

スマートコンポジットに関する調査

平成7年3月

一・産業技術総合開発機構
次世代金属・複合材料研究開発協会



010007523-3



「平成6年度 スマートコンポジットに関する調査」

(財)次世代金属・複合材料研究開発協会

平成7年3月 551 頁

調査目的

本調査研究は、国内外におけるスマートコンポジット（知的複合材料）スマートストラクチャ（知的構造）に関する技術動向を調査、把握するとともに、この分野の専門家で構成された委員会における検討に基づき、今後推進すべき研究開発の方向付けのための指針を得ることを目的とした。

目 次

まえがき	iii
委員名簿・調査実施責任者	iv
報告書概要	v
1. はじめに	1
2. スマートコンポジット, スマートストラクチャの概念	5
2. 1 スマートコンポジットの概念	7
2. 2 スマートストラクチャの概念	12
3. スマートコンポジット, スマートストラクチャの研究の現状と将来	21
3. 1 ハイブリッドスマートコンポジット	23
3. 2 分布型光ファイバーセンサを用いたスマートコンポジット	57
3. 3 圧電材料によるスマートコンポジット	64
3. 4 樹脂系スマートコンポジット	88
3. 5 知的構造システムインテグレーション	98
3. 6 形状記憶材料の材料特性と知的材料化	120
3. 7 セラミック構造体のスマートコンポジット化	142
3. 8 スマート構造物	159
3. 9 スマートコンポジットによる超巨大構造物実現の研究要素	182
3. 10 構造音響制御分野におけるスマート構造物	202
3. 11 スマートコンポジット, スマートストラクチャと適応設計	221
3. 12 スマート構造物の振動制御	228

4. 機能性素材の開発動向	263
4. 1 光ファイバ	265
4. 2 圧電材料	309
4. 3 超磁歪材料	318
4. 4 形状記憶合金	343
4. 5 電気粘性流体及び磁性流体の現状と可能性	351
4. 6 高分子系機能性材料	358
4. 7 無機系材料（セラミック繊維）とスマート化	368
5. 分野別ニーズの検討	391
5. 1 航空機	393
5. 2 宇宙	422
5. 3 自動車	438
5. 4 鉄道・車両	445
5. 5 建設	454
5. 6 発電プラント（火力、原子力、核融合、燃料電池）	467
5. 7 スマートマニュファクチャリング	476
6. 北米におけるスマートコンポジットの開発動向	495
7. 研究開発課題の検討	545
むすび	551

近年、スマートあるいはインテリジェント材料／構造に対する関心が種々の分野でとみに高まり、本格的な研究開発に着手する気運にある。複合材料は、材料構成及び製造プロセスの面で材料にアダプティブな機能を付与したいいわゆるスマート構造を実現するのに本来適しており、また複合材料のスマート化は、材料のプロセシングの低コスト化、信頼性向上に極めて有効であり、次世代の複合材料の発展の方向であろうと考えられる。

スマートコンポジット（知的複合材料）とは、複合材料の中に本来の強化材に加えて、センサーやアクチュエータ機能を有する素材を埋めこみ（複合・融合化）し、材料にアダプティブな機能を持たせた材料システムであり、複合材料の構造としてのパッシブな機能にセンサー、アクチュエータ及びプロセッサ機能を合せ持つ材料／構造システムである。

航空・宇宙機器をはじめ自動車、高速車両、建設分野等への複合材料の適用について、世界各国とも精力的に研究開発が推進されているが、複合材料適用による軽量化・高性能化効果の大きい航空機においても、その実用化の拡大は期待に反し遅れている。その適用拡大には、複合材料構造の製造コストの低減、材料／構造の多機能化・スマート化が不可欠となってきている。

この調査研究「スマートコンポジットに関する調査」は、このような背景のもとに計画され、新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）の委託調査として実施したものである。

この分野での豊富な経験あるいはその重要性に強い関心を持っておられる方々の御参加を得て、委員会が組織され、「スマートコンポジット」「スマートストラクチャ」に関する今後の研究開発の目指すべき方向、その重要課題についての提言を行うために、委員各位のこれまでの研究成果や産業界のニーズを多角的にレビューするとともに、4回にわたり検討会を開催し、議論を重ね、真剣かつ極めて活発な討議上でこの報告書がとりまとめられた。それぞれに多忙な本務を持ちながら、本調査研究への積極的な参加を戴いた松崎委員長をはじめ、委員各位に深甚の謝意を表したい。

またこの調査は、通商産業省機械情報産業局及び工業技術院、並びに新エネルギー・産業技術総合開発機構のご指導によって進められた。ここに厚く御礼申し上げる。

この報告書が「スマートコンポジット」、「スマートストラクチャ」がインテグレートされたものとして発展が期待される「知的構造システム」の研究開発のお役に立つことを切望する次第である。

平成7年3月

財団法人 次世代金属・複合材料研究開発協会
理事長 川合 勇

委員名簿(50音順)

委員長	松崎 雄嗣	名古屋大学 大学院 工学研究科 航空宇宙工学専攻 教授
副委員長	平野 一美	工業技術院 機械技術研究所 基礎技術部 材料物性研究室長
委員	加藤 隆造	関東特殊製鋼(株) 取締役
//	北出真太郎	石川島播磨重工業(株) 技術研究所 航空宇宙開発部
//	黒田 雅治	工業技術院 機械技術研究所 極限技術部 振動制御研究室
//	酒井 昭仁	川崎重工業(株) 岐阜技術研究所 機体技術研究部 材料研究課 部員
//	白井雄二郎	三菱重工業(株) 名古屋航空宇宙システム製作所 研究部 機体機器研究課 主任
//	杉田 稔	清水建設(株) 和泉研究室長
//	高橋 淳	工業技術院 物質工学工業技術研究所 複合材料部 複合材料構造研究室 研究官
//	武田 展雄	東京大学 先端科学技術研究センター 先端システム大部門 助教授
//	谷 順二	東北大学 流体科学研究所 構造システム制御研究部門 教授
//	谷川 栄治	富士重工業(株) 宇都宮製作所 研究部 材料研究第一課 担当課長
//	轟 章	東京工業大学 工学部 機械宇宙学科 助教授
//	中村 正俊	日産自動車(株) 宇宙航空事業部 宇宙技術部 課長
//	西村 昭	住友電気工業(株) 大阪研究所 新化学研究部 主任研究員
//	林 直義	(株)本田技術研究所 栃木研究所 エグゼクティブチーフエンジニア
//	福井 寛	(株)日立製作所 日立研究所 主管研究員
//	福田 武人	大阪市立大学 工学部 機械工学科 教授
//	古屋 泰文	東北大学 工学部 材料加工学科 助手
//	山村 武民	(株)先進材料利用ガスジェネレータ研究所 研究第4部 部長
//	吉田 均	工業技術院 物質工学工業技術研究所 複合材料部 複合材料設計研究室 主任研究官
//	若井 史博*1	工業技術院 名古屋工業技術研究所 構造プロセス部 超変形機能研究室長
//	近藤 直樹*2	工業技術院 名古屋工業技術研究所 構造プロセス部 超変形機能研究室

*1 H6.10月3日まで *2 H6.10月4日から

オプザーバ	近藤 正幸	通商産業省 工業技術院 研究開発官
//	平井 敏文	通商産業省 機械情報産業局 航空機武器課長
//	中西 宏典	通商産業省 機械情報産業局 航空機武器課 課長補佐
//	奥村 暁	新エネルギー・産業技術総合開発機構 産業技術研究開発部長
//	石原 義光	新エネルギー・産業技術総合開発機構 産業技術研究開発部 研究開発課長代理
//	田遠 伸好	新エネルギー・産業技術総合開発機構 産業技術開発部 主査
//	伊東 賢宏	新エネルギー・産業技術総合開発機構 産業技術開発部 研究開発課
//	小林 勲	(社)日本鉄鋼連盟 技術管理部 次長

調査実施責任者

東京都港区虎ノ門三丁目25番2号 (ブリヂストン虎ノ門ビル)

(財)次世代金属・複合材料研究開発協会

林 俊太	専務理事
坂本 昭	総括部長
西野 禎志	複合材料技術部長

報 告 書 概 要

スマートコンポジット／ストラクチャは機能／構造／情報を融合して、アダプティブな機能を持たせた材料／構造システムであり、最終的にはその材料／構造システムに判断・学習機能を持たすことを目指している。つまり、自己修復できる材料／構造であり、究極的には材料／構造システムの生体化である。機械／構造システムの研究開発における長期的視点からは、設計思想の変革（破壊防止→損傷許容性→損傷制御→知的化設計）およびヘルスマニタリングからヘルスケアリングへと構造健全性確保の基礎概念の変革をもたらすものと期待されている。また、先進複合材料の研究開発の大きな潮流である、高性能化→多機能化→スマート化→知能化の方向性とも一致しており、自然な研究開発の新たな展開とも考えられる。したがって、先進材料の研究開発とその実用化を促進するのみならず、航空・宇宙、新エネルギー技術開発関連分野をはじめ、自動車、高速車両、建設等広範な産業技術分野への波及が期待される。現在、このスマートコンポジット／ストラクチャの研究開発は基本的なコンセプトの提案段階から、その実現性を科学的に実証し、シーズのみならずニーズ・オリエンテッドな技術開発を積極的に展開すべき時期に来ているものと考えられる。

本報告書は次の7章より構成されている。

第1章「はじめに」では、本事前調査研究の背景、意義及び目的等について簡単に記述されている。

第2章「スマートコンポジット／ストラクチャの概念」では、スマートコンポジット／ストラクチャの必然性、研究の意味、研究開発の狙いなどについて簡単に説明しながらその概念について概説するとともに、本調査研究の対象領域や課題等を明らかにしている。

第3章「スマートコンポジット／ストラクチャの研究の現状と将来」では、国内外の研究開発の動向を踏まえてシーズ・オリエンテッドな最新研究事例を紹介するとともに、関連研究分野における開発課題等に言及している。

第4章「機能性素材の開発動向」では、スマートコンポジット／ストラクチャの構成要素としての機能性材料の開発動向と研究開発課題ならびに新規材料開発の可能性等について記述されている。

第5章「分野別ニーズの検討」では、代表的な産業分野におけるスマートコンポジット／ストラクチャのニーズ、研究開発の現状とその適用可能性、さらにはシーズ探索研究への提案がなされている。

第6章「北米におけるスマートコンポジットの開発動向」では、海外における技術開発動向調査の一環として行った、アメリカとカナダにおける関連研究開発の動向調査結果がまとめられている。

第7章「研究開発課題の検討」では、第3章から6章までの検討結果に基づき、知的構造システムの研究開発の必要性、先導／プロジェクト研究のための研究開発課題等が抽出・検討されている。その共通課題として、次の3項目に要約されている。

- (1) 母構造／センサ／アクチュエータ複合・融合化
ーコンセプトの科学的検討と開発課題の明確化ー
- (2) 母構造体とセンサ、アクチュエータ材料との複合・融合化設計及び成形技術の検討
- (3) 新規機能性材料の創製とセンサ、アクチュエータ材料の合目的改質技術
また、平成7年度における先導研究の実施計画（案）について記述されている。

Summary : The survey report on Technological Trends of Smart Composites

Smart composites / structures aim to integrate functions , structures , and information within the material. The final goal is to incorporate the functions of judgement and learning in the material to achieve self-repair — in other words , to make materials / structures similar to organic systems.

In the long run , research into smart materials / structures will bring about innovations in the framework of structural design — from failure prevention and damage tolerance to smart structure design — and change in the concept of mechanical / structural systems from health-monitoring to health-care , leading to various changes in a wide range of industries.

The stage of basic concept building and seeds finding is almost completed , so research into smart materials / structures is currently moving into stage of elucidating the viability of the research and implementing needs-oriented technical development.

This article was compiled for the "Survey of smart composites / structures" consigned by New Energy and Industrial Technology Development Organization (NEDO).

Chapter 1 outlines the background , significance and purpose of the survey.

In Chapter 2 , the concept of smart composite materials / structures and the necessity of R & D of smart materials / structures are briefly described.

In Chapter 3 , the recent research topics carried out mainly by universities and national research institutes in Japan and the technical issues to be solved in this field are described.

Chapter 4 introduces the current researches of typical candidate functional materials for sensors and actuators , and smart structures — which are important components in the research and development of smart materials / structures. And also the future trend of technical development of the materials is briefly discussed in the chapter.

In Chapter 5 , the current application research of smart materials / structures is outlined and the needs of this materials / structures system for various industrial fields are discussed.

Chapter 6 is the survey report of smart materials / structures R & D in the U.S. and Canada.

In Chapter 7 , the necessity for R & D of smart materials / structures is outlined and the content of the leading research project "R & D of Smart Structural Systems" is discussed. The R & D content of the research will include the following :

- (1) Hybridization technologies of host materials and smart functional materials.
- (2) Innovative design and forming technologies for smart structures.
- (3) Innovative smart functional materials.

第 1 章

はじめに

1. はじめに

スマートコンポジット／ストラクチャは機能／構造／情報を融合して、アダプティブな機能を持たせた材料／構造システムであり、最終的にはその材料／構造システムに判断・学習機能を持たすことを目指している。つまり、自己修復できる材料／構造であり、究極的には材料／構造システムの生体化である。機械／構造システムの研究開発における長期的視点からは、設計思想の変革（破壊防止→損傷許容性→損傷制御→知的化設計）およびヘルスマonitoringからヘルスケアリングへと構造健全性確保の基礎概念の変革をもたらすものと期待されている。また、先進複合材料の研究開発の大きな潮流である、高性能化→多機能化→スマート化→知能化の方向性とも一致しており、自然な研究開発の新たな展開とも考えられる。したがって、先進材料の研究開発とその実用化を促進するのみならず、航空・宇宙、新エネルギー技術開発関連分野をはじめ、自動車、高速車両、建設等広範な産業技術分野への波及が期待される。現在、このスマートコンポジット／ストラクチャの研究開発は基本的なコンセプトの提案段階から、その実現性を科学的に実証し、シーズのみならずニーズ・オリエンテッドな技術開発を積極的に展開すべき時期に来ているものと考えられる。

スマートストラクチャの要素技術となる知的材料は、日本が生み出した独創的コンセプト（科学技術庁、航空・電子技術審議会諮問第13号に対する答申）として海外の関心も高い。この知的材料（特性が外部刺激に対して適応変化する材料）のわが国における提唱は古く、（1978年、島村昭治、当時機械技術研究所材料工学部長）、現在のところ、材料自身にセンサ機能、アクチュエータ機能および制御機能を盛り込もうとするもので、原子・分子レベルでの微構造制御による知的材料の創製に関する基礎的研究に重点が置かれている。これに対して欧米の研究開発は、材料自身よりも材料／構造（材料：要素技術レベル、構造：システムレベル）として捉えられており、研究開発にはブラクテカルな目標設定がなされていることを特徴としている。本報告書でも記述されるとおり、わが国でも欧米型のスマート材料／構造システムの研究開発に対する関心が高まりつつある。

通産省工業技術院が進めている産業科学技術研究開発制度における先導研究として、平成7年度から開始が予定されている「知的構造システムの研究開発」では、新規機能性素材の創製を含むセンサ／アクチュエータ等の候補機能性材料の合目的改質技術、知的構造体成形・融合化技術、および知的構造システム化技術等に関する基礎的先行研究が計画されている。

本調査研究は、前述の先導研究「知的構造システムの研究開発」の事前調査研究の一環として実施したものであり、国内外の関連研究開発の動向を調査するとともに、開発成果の産業界への波及の観点から、ニーズの発掘調査を行い、今後の研究開発の指針を得ることを目的としている。

第2章

スマートコンポジット・スマートストラクチャの概念

- 2.1 スマートコンポジットの概念…………… 平野 一美 …… 7
 - 2.1.1 まえがき
 - 2.1.2 スマートコンポジットの基礎概念
 - 2.1.3 複合材料の発展過程におけるスマートコンポジットの位置付け

- 2.2 スマートストラクチャの概念と課題…………… 松崎 雄嗣 …… 8
 - 2.2.1 まえがき
 - 2.2.2 スマート構造物の必然性
 - 2.2.3 宇宙展開構造物の開発
 - 2.2.4 スマート構造物研究の意味

2. 1 スマートコンポジットの概念

2. 1. 1 まえがき

スマートコンポジット／ストラクチャの最終目標は機能／構造／情報を融合し、その材料／構造システムに判断・学習機能を持たすことを目指している。つまり、自己修復等できる材料／構造であり、究極的には材料／構造システムの生体化であり、省エネルギー、省資源（高効率化）および安全性の更なる向上を目指しており、人間・環境調和型機械／構造システムの追求でもある。

ここでは、(1)なぜスマートコンポジット／ストラクチャか？(2)スマートコンポジット／ストラクチャで何ができるか？ および(3)スマートコンポジット／ストラクチャの研究開発は何をもたらすか？を概説することにより、スマートコンポジットの基礎概念について簡単に触れることにする。

(1)なぜスマートコンポジット／ストラクチャか？

スマートコンポジット／ストラクチャの必要性、効果および応用分野等について表2. 1-1に簡単にまとめて示す。

表2. 1-1 スマートコンポジット／ストラクチャのまとめ

〈必要性〉

- 省エネルギー、省資源（高効率化）
- 安全性向上
- 人間・環境調和性

〈効果〉

- スリム化、軽量化
- 形状、剛性最適化（構造力学、流体力学的）
- ヘルスケアリングによる長寿命化、保守性向上、安全性向上

〈応用分野〉

- 航空機、高速車両、自動車等の高性能化、安全性向上
- 静かな機械、航空機、鉄道車両、自動車の実現
- 大型土木・建築構造物の寿命管理（突風、地震、酸性雨・・・）

(2) スマートコンポジット／ストラクチャで何ができるか？

(a) 構造のヘルスマニタリング

- ・ 構造信頼性・安全性の向上：材料、設計、製造、品質保証、運用、補修、リサイクル、廃棄にいたる“ゆりかごから墓場まで”構造健全性のモニタリング・保証、寿命予知によるライフサイクルコストの低減
- ・ 荷重及び使用環境データの自動集積による残存寿命予測及び設計技術の高度化
- ・ 先進複合材料等の実用化促進：インプロセス・モニタリングによる品質向上、製造コストの低減
- ・ 設計データベースの乏しい新規開発材料の信頼性向上

(b) 構造のアクティブ制御

- ・ 振動制御（疲労の低減）等構造の適応性向上による長寿命化
- ・ 荷重位置の最適化（安定性）、表面形状の制御（液体力学的流れ）、振動制御（騒音低減）等による構造・運動性能の向上、エネルギー消費の効率化

(c) 構造システムの簡素化・軽量化

- ・ 知的材料による構造制御システムのブラックボックス化抑制による操作性向上
- ・ 先進複合材料の活用、構造システムの簡素化等による軽量化

(3) スマートコンポジット／ストラクチャの研究開発は何をもたらすか？

現状では基本的コンセプトの提案とその科学的実証性の確認段階にある。その応用は航空・宇宙及び土木建築分野で先行しているが、自動車、鉄道車両、船舶、産業機械、原子力など広範囲の産業分野に発展を見せつつある。構造／機能／情報の融合、つまり生体機能の応用である本システム研究開発の究極は、地球上で最高のエネルギー効率で生命活動を維持している生体システムに近づけることであり、その実現は、究極の省エネルギーを可能にし、人、自然に優しい機械・構造システムとして今後の社会・経済の発展のみならず高齢化社会や地球環境問題の解決に向けて大きく貢献するものと考えられる。

さらに、本研究開発を通じて、i)スマートコンポジット／ストラクチャ概念の研究開発現場への普及・浸透、ii)異分野の研究者の活発な交流・連携、iii)研究層の拡大と研究交流の促進、iv)応用分野の拡大・創出、v)新理論、新材料、新装置の創出、vi)新しい研究領域の創出などの波及効果が期待される。

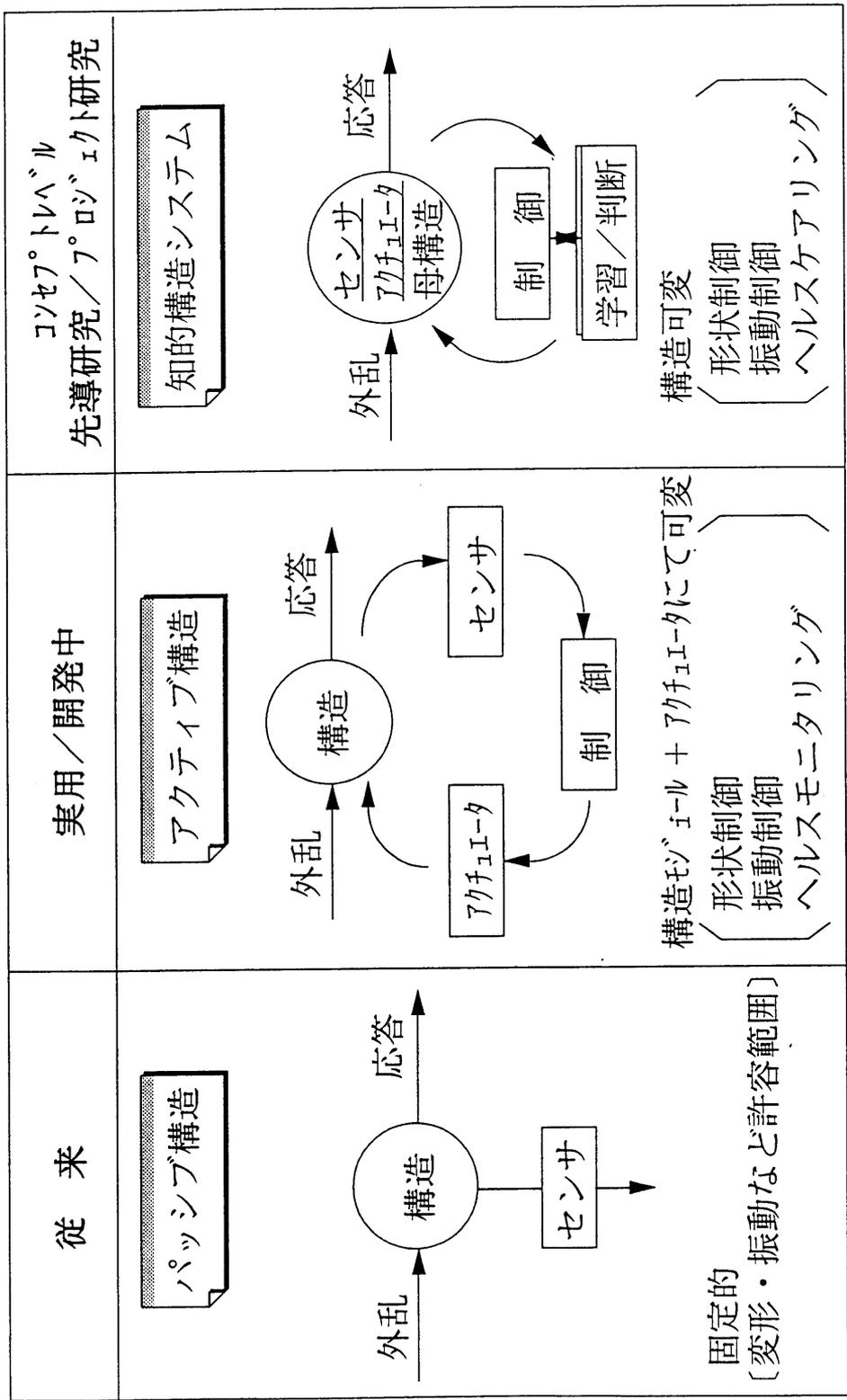


図2. 1-1 知的構造システムの基礎概念

2. 1. 2 スマートコンポジットの基礎概念

スマートコンポジットやスマートストラクチャの概念を包含した知的構造システムの基礎概念を図2. 1-1に示す。知的とはスマートの上位概念としてのインテリジェントあるいはワイズ概念を包含していると考えられる。

従来の機械／構造システムは一部センシング機能を有するものの、基本的には変形、振動などある範囲内にて許容されるパッシブ構造である。一部実用化ないし研究開発中のものとして、構造モジュールとアクチュエータにて可変構造となっているアクティブ構造がある。外付けセンサ／アクチュエータ／制御器により外乱等に対する能動的な形状制御、振動制御およびヘルスマニタリングが一部可能である。先導研究／プロジェクト研究で提案されている知的構造システムとは、母構造にセンサとアクチュエータが一体融合化されており、学習／判断機能を有する制御器により外乱等に対する能動的な形状制御、振動制御およびヘルスマニタリング／ケアができる可変構造である。将来的には学習／判断機能を有する制御器をマイクロチップ化して母構造に一体融合化させる。

スマートコンポジットの基礎概念とは一体何であるか？ ここで言うところのスマートコンポジットとは、狭義の意味ではセンサ、アクチュエータ機能を有する複合材料構造体を指しており、広義の意味ではスマートストラクチャをそのもの指すとも解釈される。現在のところ、母構造にセンサ／アクチュエータ／制御器を一体融合化した知的構造システムを実現するためにキーとなる材料／構造として、設計できる唯一の材料として開発、発展してきた複合材料システムへの期待は大きいものがあると考えられる。

2. 1. 3 複合材料の発展過程におけるスマートコンポジットの位置付け

複合材料の発展過程を図2. 1-2に示す。第1世代の軽量、高剛性、第2世代の高強度、高靱性および第3世代の多機能化追求の時代を経て、現在、第4あるいは第5世代にさしかかっているものと考えられる。そこでは、多機能化設計の究極としてのスマートあるいはインテリジェント複合材料の追求である。したがって、スマートコンポジットの研究開発は高性能化→多機能化→スマート化という大きな複合材料研究開発のトレンドとも一致しており、将来の複合材料研究開発の方向性を示している。また、後の各章で詳述されるように、スマートプロセッシングやヘルスマニタリング技術の研究開発と相まって先進複合材料そのものの研究開発とその実用化を促進させることになる。

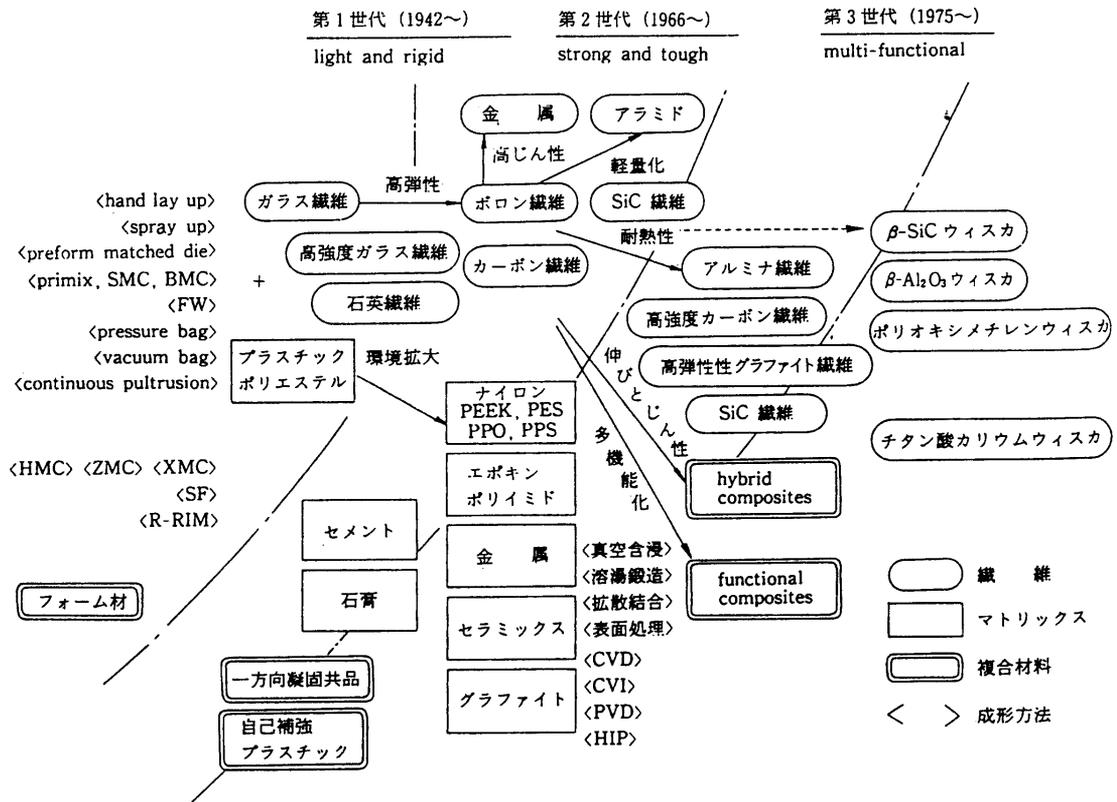


図 2. 1-2 複合材料の発展過程

2. 2 スマートストラクチャの概念と課題

2. 2. 1 まえがき

近年、世界的に注目を集めているスマート（インテリジェント、適応）構造・材料の研究・開発は日米が独立に先行して研究を始め、ヨーロッパでも現在、独英を中心にして研究が盛んになりつつある [1, 2]。日米が中心となるスマート構造物に関しては、第 1 回 Joint U.S./ Japan Conf. on Adaptive Structures が 1990 年にハワイ・マウイ島で、第 2 回 Japan/U.S. Conf. は 1991 年に名古屋で開催され、第 3 回からは国際会議となり、1994 年 12 月に第 5 回が仙台で開催された。ここ数年の当分野における主要な国際会議の開催はインテリジェント材料関係を含めると表 2. 2 - 1 の通りであり、当分野における研究、開発が国際的に極めて積極的に進められていることが分かる。

2. 2. 2 スマート構造物の必然性

通常の構造物は受動的 (passive)、固定的なものである。構造物の機能とは、外からの荷重などを支え、その荷重に対して許容される小さな変形や振動は生ずるが、規定された形状を保持するものであった。これに対し、宇宙構造物の領域ではこの様な構造物の固定的な形状概念を越えた可変構造物の考えが出て来た。それは、地上から重力に抗してロケットで打ち上げるフェーズ、ロケットから離脱するフェーズ、ミッション達成のための宇宙軌道でのフェーズにおいてそれぞれ制約が異なり、また構造物の重量、形状、強度、剛性および機能などに違った条件が要求されるためであった [3]。例えば、パラボラアンテナはロケット内部にコンパクトに収納して打ち上げられるが、軌道上では微弱で高周波の電波などに対して十分な分解精度を得るために、形状 (鏡面) 精度が高く、且つ大きな表面積が必要となる。そこで、円形のパラボラアンテナをいくつかの断面に分割して収納し、展開時には分割された断面の支持架台がアクチュエータにより伸びて、規定のパラボラ形状を自動的に組み立てる展開構造として建設されたりしている。宇宙では無重力環境と空間的な制限などがないことから、太陽発電衛星などでは長さが数 k m に達する構想まで有り、新しい自由なアイデアを導入することができる。荷重支持、形状保持以外の機能を附加した構造物に対して、容易に別の機能を追加することも思い付く。それは、例えば足場の無い宇宙での建設では、全体の構造の組立のために構造部材自身が自律的に集合、結合する機能であり、そのために簡単な構造単位を単純作業によって連続的につなげる設

表 2. 2 - 1 スマート構造物・材料の国際会議

- (1) 平成 2 元年 2 月 (筑波)
International Workshop on Intelligent Materials
- (2) 平成 2 年 1 1 月 (ハワイ州カウアイ)
First U.S.-Japan Conference on Adaptive Structures
- (3) 平成 3 年 4 月 (大磯)
First International Conference on Intelligent Materials
- (4) 平成 3 年 1 1 月 (バージニア州アレクサンドリア)
International Symposium on Active Materials & Adaptive Structures
- (5) 平成 3 年 1 1 月 (名古屋)
2nd Japan-U.S. Conference on Adaptive Structures
- (6) 平成 4 年 5 月 (英国、グラスゴー)
First European Conference on Smart Structures & Materials
- (7) 平成 4 年 1 1 月 (カリフォルニア州サンディエゴ)
3rd International Conference on Adaptive Structures
- (8) 平成 5 年 2 月 (ニューメキシコ州アルバカーキ)
1993 North American Conference on Smart Structures & Materials
- (9) 平成 5 年 1 1 月 (ドイツ、ケルン)
4th International Conference on Adaptive Structures
- (10) 平成 6 年 2 月 (フロリダ州オーランド)
1994 North American Conference on Smart Structures & Materials
- (11) 平成 6 年 4 月 (サウスカロライナ州ヒルトンヘッド)
第 1 回 AIAA/ASME's Adaptive Structures Forum
- (12) 平成 6 年 6 月 (バージニア州ウィリアムズバーグ)
2nd International Conference on Intelligent Materials
- (13) 平成 6 年 1 0 月 (英国、グラスゴー)
2nd European Conference on Smart Structures & Materials
- (14) 平成 6 年 1 2 月 (仙台)
5th International Conference on Adaptive Structures

(15) 平成7年2月 (カリフォルニア州サンディエゴ)

1995 North American Conference on Smart Structures & Materials

(16) 平成7年4月 (ルイジアナ州ニューオーリンズ)

第2回 AIAA/ASME's Adaptive Structures Forum

(17) 平成7年11月 (フロリダ州キーウエスト)

6th International Conference on Adaptive Structures

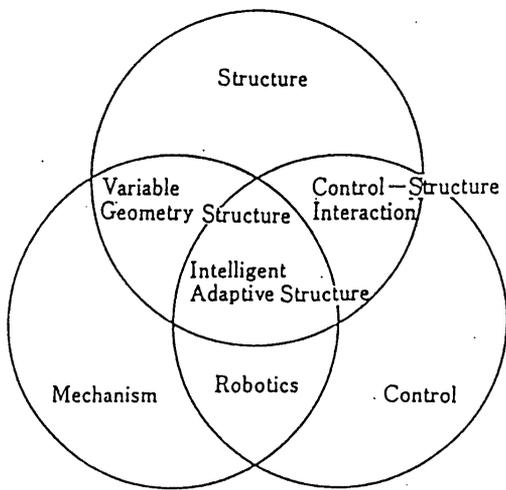


図 2.2-1 スマート・知的・適応
構造物の概念 [4]

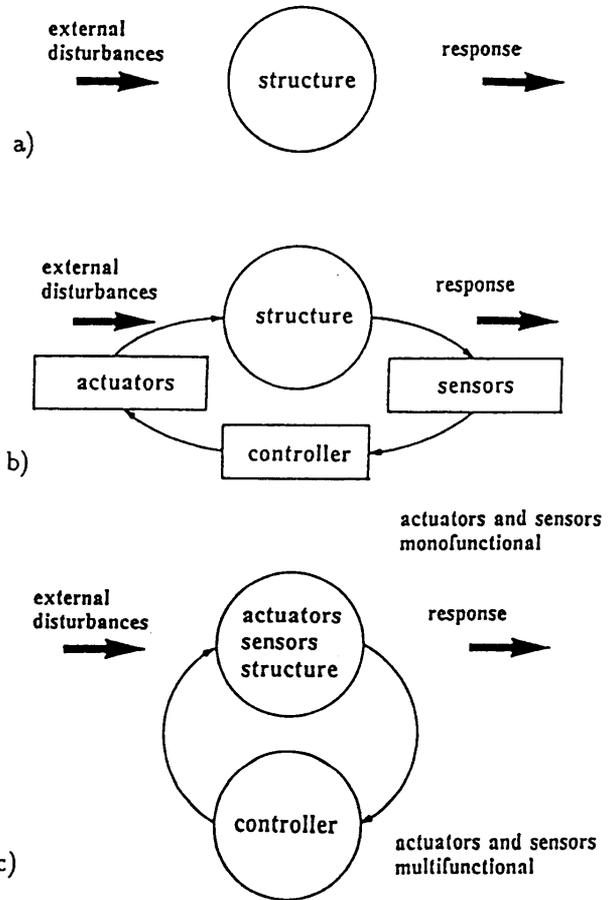


図 2.2-2 構造物の概念 [6]

a) passive, b) active, c) adaptive

計である。この様に、将来の大型宇宙建造物の設計では、展開と収納機構、形状可変などの機能だけでなく、さらに固有振動数、剛性、減衰などの構造特性の制御、上述の集合や分離などの機能も含めて、建造物としての対応力、適応性(adaptability)を高めることが期待されている [1, 2]。

複数の要求される機能へのこの様な適応能力を持つ形状可変適応建造物が、基本的なスマート(smart)、知的(intelligent) 構造である。スマート建造物については多くの概念が提案されているが、本質的には3つの基本的な構成要素、構造(structure)、機構(mechanism)、制御(control)にまたがるものとして定義される(図2.2-1 [4])。ここで、制御には計測、演算、制御作用が含まれている。機構と構造とからなるものは、単に可変形状(variable geometry) 構造に過ぎない。複雑な構造を持つ日本古来の「からくり人形」が典型的な例であるが、制御装置を持たないため、与えられた振舞いだけを繰り返す。また、機構と制御から成る場合は、例えば、単にロボットアームであり、構造力学の観点から十分に吟味、検討された構造とはなっていない。また構造と制御からなるものは機構部を通して建造物が制御力を受けるに過ぎないが、航空機技術としては能動制御技術(active control technology)とも呼ばれ、既に1970年代に大型航空機を用いた実証試験が行われており、我が国のこの分野の研究は文献 [5] に紹介してある。これに対し、適応スマート建造物では構造、機構、制御が一体として構成され、機構部分は単に制御を受けて駆動されるだけでなく、建造物の一部分として荷重を受け持ったり、要求される形状を規定するために機能している。即ち、機構部分が欠落していると可変駆動建造物でなくなるだけでなく、荷重を支える建造物としても成立しなくなる。図2.2-2にpassive, active, adaptive 構造の違いを示す [6]。荷重支持・形状保持に限らず、複数の状況に自律的に適応する機能を持つシステムをスマート構造と呼んだ。一般的には、複数の機能を自律的かつ適応的に発揮できるものがスマートシステムであり、どの様な機能であれ、材料レベルの適応力によるものはスマート(インテリジェント)材料と言える。

2.2.3 宇宙展開建造物の開発

宇宙建造物の展開による適応については、最も簡単な一次元部材である人工衛星の棒状のアンテナの場合、単純な機構のものとしては、例えば、テレスコピックに伸びるものがある。他方、複雑な機構のものとしては、横材とワイヤあるいは人字型のスペーサによって結合された3本の十分長い縦通材で構成され、収納時にはその縦通材がコイル状に押し

縮めて畳まれ、展開には収納時に貯えられた弾性ひずみエネルギーを利用するシンプレックスマストなどがある [7]。

全長約100mの宇宙ステーションの構造は、中央部の居住棟や実験棟などに、基本的なトラスモジュールが多数結合したものになっている。トラス構造では、割合簡単な単位構造要素を次々と結合していくことにより、同一パターンからなる大型の構造物を構成できる。この場合、単位となる構造要素の構造的、形態的特性を把握しておけば、容易に全体構造の特性を解析することが可能である。3次元トラス構造体として最も簡単なものは、6本のトラス部材からなる四面体であり、四面体を次々と増設することにより、一方向に、あるいは平面的にトラス構造を構築することが可能になる [8]。理想的な、太さのない稜としてのトラス部材からなる四面体の場合、特定の部材が適切に伸縮されれば、一平面上に畳み込まれるだけでなく、一本の線上に重ねることが理論的には可能となる。実際にはトラス部材は太さを持ち、また、トラス結合部分では立体的な各種の拘束があるため、現実には、平面上に畳み込むことや1本の束にまとめることは不可能である。しかし、このような機構を用いることにより、大きな空間を占有する構造物を有効に縮小させることが出来る。

2.2.4 スマート構造物研究の意味

宇宙構造物の発展の過程から必然的に生じた知的適応構造物なる概念は新しい研究の必要性を提示している [9]。形状が固定し、部材の材料特性の変化しない従来の構造物に対しては、これまでに開発された線形、時不変（時間の経過に対して変化しない）システムに有効な多くの手法が適用できる。また、どんな複雑な場合でも、オフラインで時間をかけて予め計算しておくことが出来る。これに対して時間的に変化して適応するスマート構造物やスマート材料システムでは、

1) 自律的に適応してその形状や材料特性が時々刻々と変化する場合に対しては、オンラインによる瞬時々々における システム全体の特性の同定 が早い速度で行なわれなければならない。即ち、時変システムの同定法の確立 が必要となる。

2) 変化するシステムであるため、単に動的挙動の解析に限らず、変形の挙動の制御解析とその挙動が安定であることの保障 が必要になる。即ち 時変システムの解析法と制御法の確立 が重要となる。

3) この様なシステムでは多くの場合、非線形系としての扱いが避けられなくなる。即

ち、1)と2)は非線形システムとして扱う必要がある。

4) スマート材料による構造物のスマート化には、形状記憶合金繊維による構造物の減衰力の増加や力制御、あるいは光ファイバーによる歪の計測などがその例である。例えば、形状記憶合金の特性は応力、歪に依存しており、使用している夫々の部材における位置によって応力や歪は著しく異なる。従って、適切に制御機能を発揮させるため形状記憶合金繊維を用いる場合には微視的（ミクロな）力学的考察に基づいた応力、歪の解析を精度良く行う必要がある。即ち、使用したスマート材料のレベルや材料によって生ずる影響にマッチした構造物の応力、歪解析の確立が不可欠である。いずれにせよ1)～4)の特徴を示すシステムに対しては、従来、確立されている多くの解析手法を直接利用することは出来ず、全く新しい考え方やより精度の高いのアプローチが必要となる。

5) 計測、制御の観点からは、対象物の変形やその機械的特性の変化を精度良く追従できるセンサー、また小型、軽量で精度良くコントロールできるモータなどの制御機器や、特性が比較的簡明で信頼性の高い、アクチュエータとしての機能を持つ材料の開発が重要となる。特に、宇宙では、小型で簡易な計測装置とコンピュータを用い、従って対象物の変形や運動の数式化などを必要としない解析や制御法が望ましく、また地上においても簡便に十分な精度で処理出来ればそれに過ぎるものはない。そこで、非線形的に変化、適応するシステムに対しては、生物規範的なニューラルネット理論による学習、ファジー制御理論などの応用が有効のものと考えられる。いずれにせよ、ソフトウェアおよびハードウェアの点で新しいアプローチの確立が必要となっている。

ところで、構造設計の歴史は大変長く、多くの実験的、理論的解析手法、技術、ノウハウが蓄積されている。いかなる構造物もその基本原理を無視しては成り立たない。構造物としては、例えば、応力集中、切り欠き等の特性の急激な変化は好ましくない。複合材は成形や剛性、強度設計に秀れているが、金属材と比較すると層間剝離、ポイドなどにより信頼性の点で劣るのはこの為であり、スマート材料を開発する場合にも、この様な基本原理を無視して構造物のスマート化を計ろうとすれば、手痛いしっぺ返しを受けることになろう。また、人工的に創製された各種の機能材料の特性の十分な評価はまだこれからであり、特に制御部品としての信頼性の確認も不可欠である。スマート材料を用いた構造物の実際的な設計を考えた時、構造屋達は上述の技術的問題だけでなく直観的に材料費、加工、保守、維持などを含めたコストを問題にするとと思われる。従って、一方では大胆な仮説の上に新しい展開をはかるが、夫々の分野の基本的な原理をないがしろにすることなく

進めて行く必要がある。

ところで、上述した展開構造物に関する研究は、これまで主に静的、準静的な意味での適応のための解析が行なわれている。また、軽量で大型の宇宙構造物は、必然的に剛性が低く、また真空状態では減衰も小さいため、衝撃力などが加わると低周波数の振動が生じ、なかなか減衰しない。この様な振動を急速に減衰させるための振動制御は、典型的な動的適応と呼べるが、多くの解析では構造形態やその機械的特性は変化しないとし、線形時不変システムとして扱っている。即ち、多くの場合には従来から行われている、単なる構造の動的制御に他ならず、図 2. 2 -2 で示した active (能動) 制御である。これに対し、構造物の運動によって生ずる構造動学的な影響を考察し、構造形態や特性が変化する際の制御に積極的に利用して、スマート構造物としての特性を十分に発揮させることが考えられ始めている。

参考文献

- 1) 松崎雄嗣 : インテリジェント材料, 3, 1 (1993), pp.5-12.
- 2) 松崎雄嗣, 紙田 徹 : 日本航空宇宙学会誌, 43, 495 (1995), pp. 239-244.
- 3) 松崎雄嗣 : 日本機械学会誌, 97, 910 (1994), pp.778-780.
- 4) K. Miura and M. Natori : Proceedings of 2nd Joint Japan/US Conference on Adaptive Structures (1992), pp. 3-14.
- 5) H. Matsusita and Y. Matsuzaki : Proceedings of Active Materials and Adaptive Structures (1992), pp. 577-584.
- 6) E. T. Breitbach : Proceedings of 2nd Joint Japan/US Conference on Adaptive Structures (1992), pp. 32-48.
- 7) M. Natori and K. Miura : Proceedings of 26th AIAA's Structures, Structural Dynamics and Materials Conference (1985), AIAA Paper 85-0727.
- 8) M. Natori, et al. : Proceedings of 28th AIAA's Structures, Structural Dynamics and Materials Conference (1987), AIAA Paper 87-0743, pp. 143-151.
- 9) 松崎雄嗣 : スマートコンポジットシステム講演論文集 (NIMC-RIMCOF ジョイントフォーラム) (1994), pp. 9-16.

第3章

スマートコンポジット・スマートストラクチャの研究の現状と将来

3.1	ハイブリットスマートコンポジット	福田 武人	23
3.1.1	はじめに		
3.1.2	センシング技術と光ファイバひずみセンサ		
3.1.3	アクチュエータ材料		
3.1.4	ハイブリットスマート化		
3.1.5	おわりに		
3.2	分散型光ファイバセンサを用いたコンポジット	武田 展雄	57
3.2.1	分散型光ファイバセンサを用いたスマート材料／構造の研究開発動向		
3.2.2	研究課題 — 分布型光ファイバセンサを用いた力学負荷 同定手法の提案		
3.3	圧電材料によるスマートコンポジット	谷 順二	64
3.3.1	圧電材料の性質		
3.3.2	圧電複合材料		
3.3.3	圧電センサとアクチュエータ		
3.3.4	知的圧電複合材料システム		
3.3.5	むすび		
3.4	樹脂系スマートコンポジット	吉田 均	88
3.4.1	はじめに		
3.4.2	各種の樹脂系スマートコンポジットの研究開発例		
3.4.3	まとめ		
3.5	知的構造のシステムインテグレーション	轟 章	98
3.5.1	電気ポテンシャル法による層間はく離検出知的CFRP積層構造		
3.5.2	ニューロネットによる亀裂検出知的構造材料		
3.5.3	屈曲光ファイバを用いたスマートFRP構造の基礎研究		
3.5.4	結言		
3.6	形状記憶材料の材料特性と知的材料化	古屋 泰文	120
3.6.1	はじめに		
3.6.2	知的材料としての形状記憶合金(SMA)		
3.6.3	形状記憶合金を用いた材料／構造体の能動制御		
3.6.4	工学的研究事例		
3.6.5	その他のSMA知的材料化研究		
3.6.6	金属以外の形状記憶材料(SMM)		
3.6.7	知的材料を実現させるための要素技術		
3.6.8	知的材料研究の進め方		

3.7	セラミックス構造体のスマートコンポジット化	近藤 直樹	142
3.7.1	セラミックスコンポジット		
3.7.2	要求される機能		
3.7.3	スマートコンポジット化技術		
3.7.4	問題点		
3.8	スマート構造物	松崎 雄嗣	159
3.8.1	はじめに		
3.8.2	時変システムの解析		
3.8.3	スマート宇宙構造物		
3.8.4	スマートコンポジット構造		
3.9	スマートコンポジットによる巨大構造物実現の研究要素	高橋 淳	182
3.9.1	知的複合材料と超巨大構造物		
3.9.2	革新成形技術		
3.9.3	複合材料のリサイクル性		
3.9.4	結言		
3.10	構造音響制御分野におけるスマート構造	黒田 雅治	202
3.10.1	はじめに		
3.10.2	音響パワーモードとスマートセンサ		
3.10.3	制御系構成		
3.10.4	おわりに		
3.11	スマートコンポジット、スマートストラクチャと適応設計	谷 順二	221
3.11.1	知的材料と知的構造物の発想とニーズ		
3.11.2	知的材料と知的構造物の創製と設計		
3.11.3	むすび		
3.12	スマート構造物の振動制御	黒田 雅治	228
3.12.1	はじめに		
3.12.2	集中定数系 VS 分布定数系		
3.12.3	分布定数系の振動制御の問題点		
3.12.4	現段階での2つのアプローチ		
3.12.5	分布定数系制御における今後の展開		
3.12.6	おわりに		

3. 1 ハイブリッドスマートコンポジット

3. 1. 1 はじめに

M. V. Gandhiらは、著書 "Smart Materials and Structures" の冒頭で、21世紀には新しい"スマート材料"時代が到来すると述べている¹⁾。その理由は、人類の文明は、石器時代、青銅器時代、鉄器時代というふうに、その時代に発見されたり、発明されたりし、際立って利用された材料に大いに影響を受けている。そして、プラスチックや繊維強化複合材料に代表される人類が作った現代の"合成材料"の時代は、神経系、脳そして筋肉の働きを持たせた材料、スマート材料を創製するためのいくつかの複合した新しい技術を開発するに相応しい、先駆的役割を果たしているからである。

材料/構造のスマート化とは、生物が有している自己増殖性、自己修復性、自己診断性、自己学習性、あるいは環境適合性などを、材料/構造(ホスト)に取り入れることとされている²⁾。したがって、スマートコンポジットを構築するのに必要なものは、ホストをコンポジットとして、図3. 1-1に示すように、第一に、環境を検出するセンサ(光ファイバ、圧電素子など)、第二に、変化に適応するためのアクチュエータ(圧電素子、ER流体、形状記憶合金ワイヤーなど)そして、もっとも重要な要素はこれらを制御し、最適な応答を考える第三の要素、すなわち、プロセッサ(マイクロコンピュータ)である。これらの3要素は、人間では、それぞれ五感、種々の筋肉そして脳に対応する。

本節では、まず、材料/構造のスマート化に必要なセンサとアクチュエータのための材料やデバイスの特徴や原理を簡単に述べる。つぎに、それらを組み合わせて一体化して用いたハイブリッドスマートコンポジットの概念と研究動向を記述し、著者の最近の研究結果を紹介する。また、機能性素材への要求にも言及する。

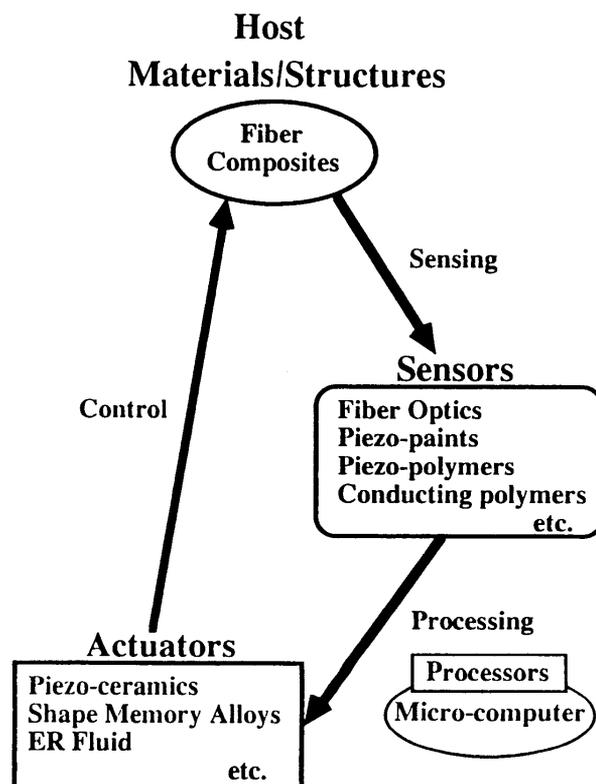


図3. 1-1 スマートコンポジットの概念図

3. 1. 2 センシング技術と光ファイバひずみセンサ

(1) センシング候補材料

表3. 1-1にひずみ測定のためのセンシング候補材料を示しある。これらのセンサは異なった特徴を持っている。¹⁾例えば、セラミックピエゾ素子やひずみゲージセンサは、局所的な変形情報を提供するが、光ファイバやSMAセンサは構造内の2つの離れた領域の間の変形場の全体あるいは平均的な大きな変形を測定できる。したがって、スマート構造を構築するときには、各候補材料の特徴を注意深く評価しなければならない。形状記憶合金、ピエゾセラミック素子についてはアクチュエータ材料のところで述べる。また、電気式ひずみゲージによるひずみ測定は、抵抗、圧電抵抗、電気容量、誘導性、圧電性や光電性現象などのいくつかの異なった原理を利用する。しかしながら、抵抗式ゲージは、小さくかつ低質量であるため最も一般的である。

以下には、スマートコンポジットのセンサとして、最も有望な光ファイバについて記述する。

(2) 光ファイバひずみセンサ

光ファイバは光通信における伝送媒体として広く用いられている。コア（心材）、クラッド、被覆材より構成されていて、石英系あるいはプラスチック系の材料で作られている。安価、軽量、ノイズに強い。センサとしての光ファイバの利用が智能化に役立つ。光ファイバセンサには、大別すると偏光型と干渉計型がある。

表3. 1-1 センシング材料候補

センサ材料 特性	干渉型 光ファイバ	TiNi 形状記憶合金	ピエゾ セラミックス	ひずみゲージ
価格	普通	低	普通	低
技術完成度	良	良	良	良
ネットワーク化	可能	可能	可能	可能
埋め込み性	優	優	優	良
線形性	良	良	良	良
応答周波数 (Hz)	1-10000	0-10000	1-20000	0-500000
ひずみ感度 (10^{-6})	0.11/fiber	0.1-1.0	0.001-0.01	2
最大ひずみ (10^{-6})	3000	5000	550	10000
最高温度 ($^{\circ}\text{C}$)	300	300	200	300

(a) 偏光型センサ

光弾性実験と同じような原理に基づいたもので、複屈折性のファイバを利用する。すなわち、光ファイバ内を伝播する光の偏光状態が外部からの刺激によって変化することを利用するもので、偏光状態がランダムにならない特殊な光ファイバ（偏波面保持光ファイバ）を用いる。測定感度は干渉型センサに比べて低いが、装置構成が比較的簡単である。

(b) 干渉計型センサ

光の干渉を利用して光ファイバの光学的特性の変化（屈折率変化など）を測定するものである。光の波長を尺度としているので極めて高感度であり、特定の位置のひずみや温度が測定できること、また、位相検波技術の適用によって高安定化が可能なことなどの優れた特徴を有している。干渉計型センサには種々なタイプがあるが、その主な光ファイバセンサを以下に簡単に述べる。

①マイケルソン干渉計型光ファイバセンサ

光ファイバの入力端より入射したコヒーレントな光波を一旦2つに分岐し、再び重ね合わせると2光波の位相分布と密接に関係した干渉パターンが得られる。ここで、一方の光路(感知アーム: sensing arm)における導波光に生じた位相変化を、他方の光路(参照アーム: reference arm)の導波光と重ね合わせて得られる周期的な干渉光の強度変化をフォトダイオード等で検出することにより、測定できるのである。

②マッハツェンダー干渉計型光ファイバセンサ

光ファイバをループさせ、参照アームをひずみ場の外へ設定し、感知アームを部材へ埋め込む。そのため、部材に埋め込まれた部分全体の積分されたひずみの情報は得られるが、局所のひずみを求めることは不可能である。また、光結合器が2つ必要であり、ノイズに対して敏感になる。

③ファブリ・ペロー干渉計型光ファイバセンサ

1本の単一モード光ファイバの中間に半透鏡を挟んだ形に構成されたもので、この半透鏡と鏡になったファイバの端面との間がセンサ部になっている。この場合には、半透鏡で反射された光と、端面からでた残りの光が重なってセンサ部の2倍光路差を生じて干渉を起こす。ひずみにより中空チューブが伸縮すると、センサ部が変化するので、干渉光も変化する。このタイプは構成部品も比較的少なく、センサ部までの光ファイバも1本で済むためコンパクトなものになる。また、現在非常に多くの研究対象となっており、F15戦闘機の翼のひずみ測定等、様々な例が報告されている。欠点としては、センサヘッドの製作の困難性があげられる。光ファイバとほぼ同径の中空チューブの穴に光ファイバをセンサ長だけ離して接着しなければならず、また、中心軸が著しくずれた場合、反射光が再び入射する時損失を生じる。

(3) その他のセンサ

光ファイバを用いたセンサにはひずみセンサ以外にも、様々なものがあるので、ここで紹介しておく。

(a) 温度センサ

光ファイバの一端にレーザパルス光を入射すると、後方散乱光が再び入射端に戻る。この光パルスを入射してから後方散乱光が戻ってくるまでの遅滞時間から、その後方散乱光の発生位置がわかる。これはOTDR法(Optical Time Domain Reflectometry)と呼ばれる。この後方散乱光にはレイリー散乱光、そしてラマン散乱光であるストークス光、アンチ・ストークス光が存在する。このラマン散乱光はレイリー散乱光の約 $1/1,000$ 、また入射光の約 10^{-8} と極めて微弱であるが、ストークス光とアンチ・ストークス光の強度比は、温度に強く依存する性質を持つ。したがって、光ファイバの各点からの後方散乱光のうちラマン散乱光の2成分を分光し、強度比を求めれば各点の温度を知ることができる。このシステムは、従来のポイント型センサに比べ長距離の測定も容易に行える。また電磁誘導の影響も受けず、防爆であるため、発電所、トンネル等幅広く適用されている。

(b) 損傷センサ

損傷センサは航空分野で特に適用が多い。これは、1988年のアロハ航空ボーイングB737型機、ユナイテッド航空B747型機、1989年のアイオワでのDC10型機の事故が機体の損傷から起こったことが影響を及ぼしている。最も簡単なシステムとしては以下のようなものが挙げられる。

図3. 1-2に示すようにFRP内に埋め込んだ光ファイバに光を入射し、他端で光ファイバを伝わる光を観察していれば、クラックや層間剥離により光ファイバが破断した瞬間を検出することができる。¹⁾この方法を航空機翼のFRP製リーディングエッジに適用した例では、化学的処理を施して切れやすくした光ファイバを埋め込み、衝撃荷重による内部クラックの発生を検出している。飛行機構造内部にこのような光ファイバを神経のように張り巡らせれば、飛行中を含めて常に構造の安全性を把握することが可能である。また、先に述べたOTDR法を用いれば、損傷の場所を把握することもでき、素早い修復も可能となる。

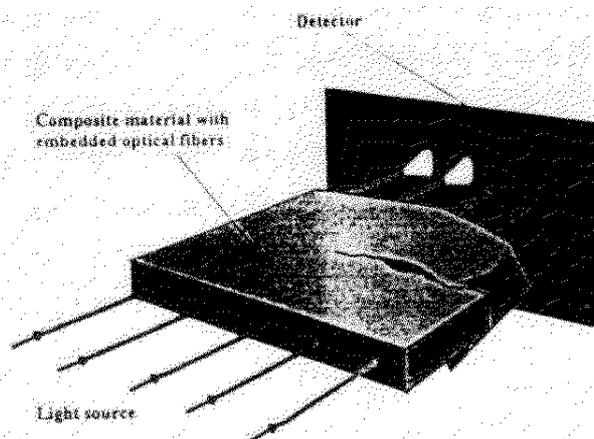


図3. 1-2 損傷センサの原理図

3. 1. 3 アクチュエータ材料

アクチュエータ材料は、スマートコンポジットのいくつかの重要な基本要素の一つである。これらのアクチュエータ材料は、構造物のグローバルな機械的性質を動的に調整するため、あるいは構造物の形状を環境に調和させて設計するために用いられる。このようなアクチュエータ材料の候補とその特徴を表3. 1-2にまとめてある。以下に、簡単にそれらを解説する。

表3. 1-2 アクチュエータ材料候補

特性 \ アクチュエータ類	電歪材料	E R 流体	磁歪材料	TiNi 形状記憶合金	ピエゾ セラミックス
価格	普通	普通	普通	低	普通
技術完成度	可	可	良	良	良
ネットワーク化	可能	可能	可能	可能	可能
埋め込み性	良	可	良	優	優
線形性	可	可	良	良	良
応答周波数 (Hz)	1-20000	0-12000	1-20000	0- 5	1-20000
最大ひずみ (10^{-6})	200	—	200	5000	200
最高温度 ($^{\circ}\text{C}$)	300	300	400	300	300

(1) 電気粘性流体 (Electro-Rheological Fluids)

流体に外部電場を加えたとき、流体の見かけの粘性が著しく増大し、電場を取り去ると元の粘性にもどる現象をER効果といい、この現象を示す流体をER流体という。一般に、ER流体は、電気絶縁性流体（分散媒）に誘電性の固体微粒子（分散相）を分散・懸濁させた微粒子分散型である。分散媒は低粘度で電気絶縁性に優れた液体を用いることができ、シリコンオイル、炭化水素系鉱油、ハロゲン化炭化水素などが知られている。分散相は電場印加により電気分極する固体粒子を用いることができ、セルロース、シリカ、ゼオライト、イオン交換樹脂が知られていたが、新規な分散相として、炭素質粉末、電気絶縁性の薄膜で被覆された金属粒子、特殊酸化チタンが表面に埋め込まれたアクリル粒子などが提案されている。電場で粘性の大きさを制御できること、粘度を変化できる範囲が広いこと、および応答性が良好なことが特徴である。動作原理は、電場をER流体に加えたときに流体中に分散された粒子が誘電分極を起し、その際電気2重層が形成されその中で分極が

生ずる。この分極された電荷の静電気力により電場方向に粒子の鎖を形成する。図3. 1-3にその模式図³⁾を示す。

(2) 形状記憶合金 (Shape Memory Alloy)

形状記憶効果(Shape Memory Effect, SME)とは、ある形状に拘束した試料をある臨界温度以上で加熱して形状記憶熱処理を行った後、急冷して低温相(マルテンサイト相)を形成させ、これにある程度の変形を加えた後に再加熱するとき、その臨界温度を越えると結晶逆変態が起こり高温安定相(オーステナイト相)となり、元の形状に回復する現象をいう。形状記憶合金は、圧電材料に比べて応答速度は遅いが、ストロークが大きいので、体積当たりの発生力が大きい、素材自体がアクチュエータとして機能するため微小化が容易である、結晶構造の変化を利用しているため、摩擦、振動、騒音などの問題がないなどの特徴を有するため、センサおよびアクチュエータとして利用できる。形状記憶合金には多くの種類が知られているが、アクチュエータとしては耐久性に優れたチタン-ニッケル合金が多く用いられる。形状は、ワイヤー、板、コイル、パイプなど多様である。その動作原理は、引張応力-ひずみ曲線(図3. 1-4)における加熱時の形状記憶効果が、複合材料はりに埋め込まれた形状記憶合金ワイヤーに電流を通し加熱させ、内部応力、剛性、強度、幾何学的形状などを目的方向に変化させる⁴⁾。

(3) 圧電セラミックス (Piezoelectric Ceramics)

力を加えひずませると電圧を発生する(圧電効果)、逆に電圧を加えるとひずみあるいは応力を発生する(逆圧電効果)性質を有する物質である(電気エネルギーと機械エネルギーの変換現象)。応答速度が速いこと、精密な制御が可能なこと、発生力が大きいなどの特徴を有するので、センサおよびアクチュエータとして利用される。量産的で低価格化が可能、電気機械結合係数が大きい、添加物の量や成分を変えることによって圧電特性を微妙に制御できる、音、圧力、温度、湿度などのセンサとして用いられるだけでなく、周波数制御デバイス、超音波機器、音響機器などにも幅広く応用されている。代表的な圧電セラミックスとしてはPZT ($\text{Pb}(\text{Zr}, \text{Ti})\text{O}_3$)が知られている。この物質は、圧電特性に優れ、材料組成により誘電率などの特性値を幅広く選択でき、製造的にも特性的にも形状に対する自由度を有している。その動作原理は、圧電材料は分極軸からなる方位を有し、分極軸に対する電界の方向により、図3. 1-5に示す変形モードが存在する。例えば、(a)のように矢印で示す分極方向に垂直な面に電極を形成して電界を印加すると、電界の極性と分極方向が一致しておれば、分極方向に伸び、逆ならば縮む⁵⁾。

(4) 磁歪材料 (Magnetostrictive Materials)

外部磁場を受けたとき大きな機械的変形をする固体である。この磁歪現象は、材料内の小さな磁区の回転による。この磁区は、材料が磁場に曝されないときは、ランダムに配向している。しかし、磁場を受けるとこれらの小さな磁区は磁場方向に向けられひずみが発

生ずる。磁場の強さが増すにつれて、より多くの磁区が方向性を持ち、磁場と平行になり最終的には飽和する。テルビウムイオン合金は、典型的な磁歪材料である。"Terfenol-D"は、Edge Technologies Inc.によって市販されている磁歪材料で、希土類ジスプロシウムを含んでいる。これは、0.002のひずみを生じ、圧電性材料より優れている。しかしながら、このクラスの機械-磁性材料は、スマート構造材料を設計する際には注意して考えねばならないいくつかの欠点がある。これらの中には、宿主構造材料内に埋め込まれた磁歪材料アクチュエータに磁場をうまく制御して与えなければならない技術的な課題がある。さらに、この材料は圧縮荷重を受けたとき非常に大きな応答をする。また、この種のアクチュエータは、圧電性材料に比べて非常に大きなパワーが必要である¹⁾。

(5) 電歪材料 (Electrostrictive Materials)

これは、磁歪材料に相似的な材料である。すなわち、外部電場を受けたとき、機械的変形をする。電歪現象は、外部電場がかけられたとき材料内の小さな電氣的領域の回転による。この電場がないとき、その領域はランダムに向いている。電場が与えられると、それと平行に電氣的領域が並ぶことが、電歪材料の変形を生む。PMNは、熱電歪効果を有し、電歪現象が周りの温度に依存する。このタイプの材料は、セラミックピエゾ素子よりヒステリシス損失が小さいが、非線形な構成関係を持ち(図3. 1-6)、実用的には限られた範囲の励振に互って見かけ上線形の関係を持たせるようバイアスを与える必要がある⁶⁾。

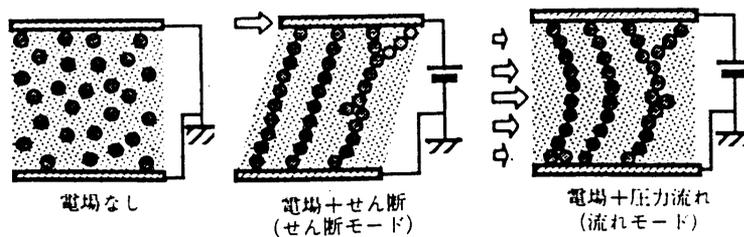


図3. 1-3 ER流体の原理模式図

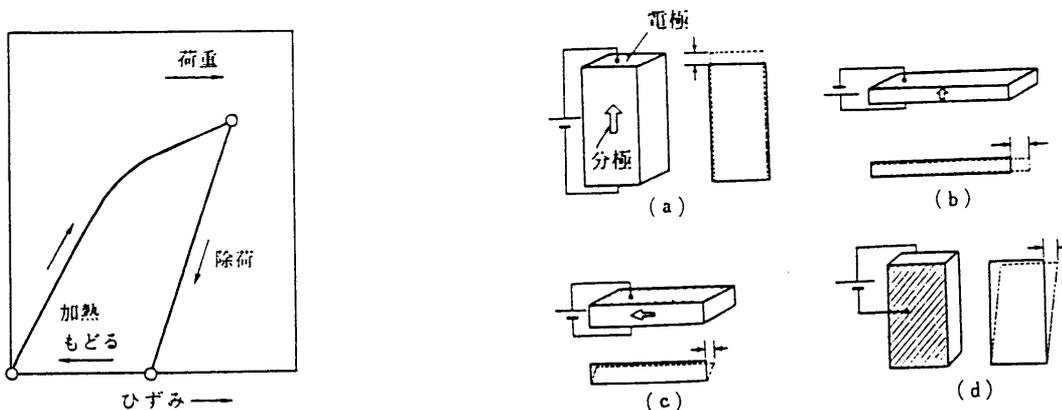


図3. 1-4 形状記憶合金の原理図

圧電素子の変形モード
 (a) 縦モード: d_{33} , (b) 横モード: d_{31} ,
 (c) 厚みすべりモード: d_{15} , (d) 面すべりモード: d_{25}

図3. 1-5 ピエゾ素子の変形モード

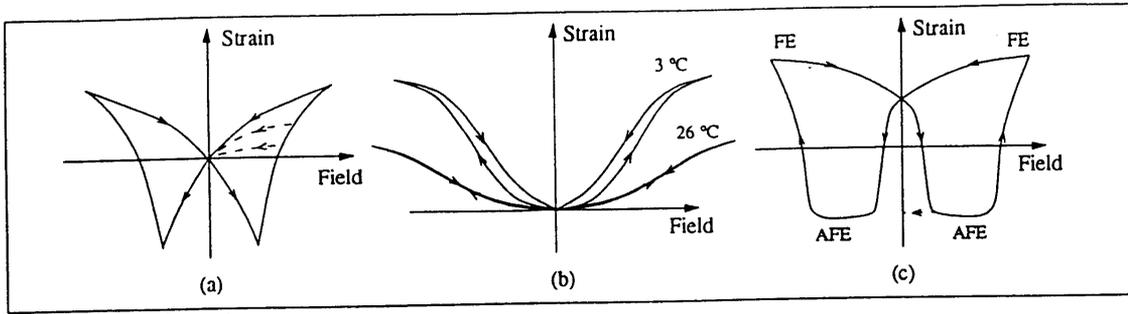


図 3. 1-6 3タイプのエレクトロセラミックスの

ひずみ-電場曲線：

(a) ピエゾ素子 (b) 電歪材料 (c) 形状記憶セラミックス

3. 1. 4 ハイブリッドスマート化

(1) はじめに

材料／構造のスマート化の共通概念は一体化と多機能化にある。これらの実現にはハイブリッドスマート化が有効と思われる。このために、Hybrid Smart MaterialやSensoriactuatorが考えられている。前者は、複数のアクチュエータ、センサあるいは材料を組み合わせた多種多様な材料／構造が考えられる。後者としては、センサあるいはアクチュエータとしてもしくは材料の双方向性を利用して稼動中にセンサ／アクチュエータ両方に同一材料を用いることができるものがある。

以下において、まず、ハイブリッドスマート化の基本的な考え方を例を挙げ説明し、つぎにアクチュエータやセンサに使用される材料やデバイスの候補を挙げる。そして、最近の研究報告から、センサ／アクチュエータとハイブリッドスマート化とをテーマにした研究動向を調べた結果を紹介する。最後に、応用例を示し、スマート化に使用される材料やデバイスの問題点を整理したい。

(2) 基本的事項

(a) ハイブリッドスマート化

たとえば、図 3. 1-7 に示すようなコンポジット構造の振動制御にセンサとして、光ファイバを用いて、アクチュエータとして piezoelectric material と ER 流体とをハイブリッドにして一体化を図る¹⁾。この結果、コンパクトでかつ広い範囲の高性能な仕様を満足させるスマートコンポジットを実現できる。このクラスのハイブリッドスマートシステムに対する典型的な実験結果を図 3. 1-8 に示す。他の例としては、変形が小さいが応答速度の速い磁性材料と応答速度が遅いが変形が大きい形状記憶合金をハイブリッドにして用いるなどが考えられている。

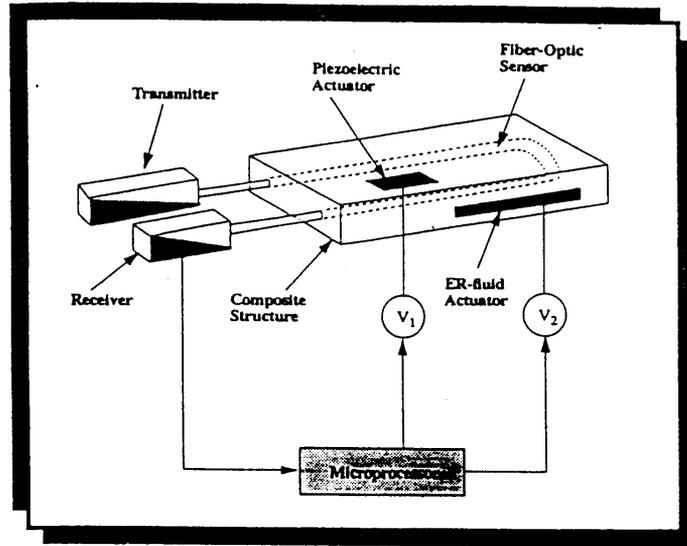


図3. 1-7 ハイブリッドスマートシステムの例

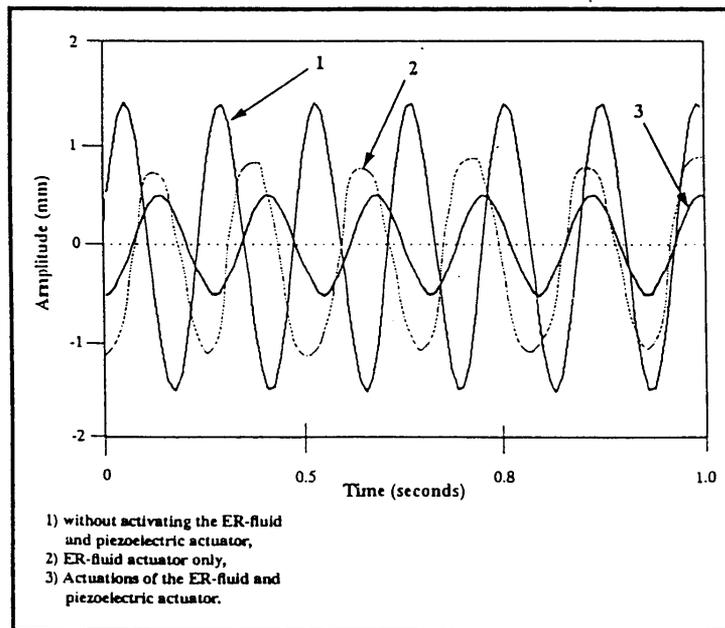


図3. 1-8 ハイブリッドスマート化効果の比較実験例

b) センサ・アクチュエータ (Sensoriactuator)

現在使用し得るアクチュエータとセンサの候補を挙げると、表3. 1-3のようなものがある。これらのいくつかの材料やデバイスは、アクチュエータあるいはセンサとして使用されるが、使用方法を工夫することによって、材料の双方向性を利用して稼動中にセンサあるいはアクチュエータとして、もしくは両方に同一材料を用いることによって、コンパクトなスマート材料やスマート構造への応用が可能になる。これはセンサ・アクチュエータ(Sensoriactuator)と呼ばれている。

表3. 1-3 各種材料のアクチュエータとセンサへの適用性

材料の種類	アクチュエータ	センサ
音響デバイス		○
キャパシティブデバイス		○
ER流体	○	
電歪材料	○	
光ファイバデバイス		○
磁歪材料	○	○
圧電材料	○	○
形状記憶合金	○	○
ひずみゲージ		○
X線デバイス		○

(3) 光ファイバセンサとアクチュエータを一体化した研究

文献番号 7 M. K. Burford, K. A. Murphy and R. O. Claus 図 3. 1-9, 3. 1-10
ホスト材料/構造: graphite/epoxy センサ材料: 光ファイバ(extrinsic Fabry-Perot interferometer) アクチュエータ材料: PZT
3つのPZT/材料構成について, 試験片に加わる電圧を種々な荷重とクランプ条件下で徐々に上下させ外部ファブリペロー干渉型光ファイバセンサによって, 縦ひずみの測定をしている.
文献番号 8 R. T. Failes and B. Glowasky 図 3. 1-11
ホスト材料/構造: glass/epoxy, glass/PEEK センサ材料: 光ファイバ アクチュエータ材料: PZT
光ファイバセンサとPZTアクチュエータを埋め込んだ熱硬化性ならびに熱可塑性複合材料について, 製造プロセス, 耐久性ならびに制御性能などを実験と数値モデルにより総合的に検討している.
文献番号 9 S. W. Case and G. P. Carman 図 3. 1-12
ホスト材料/構造: graphite/epoxy センサ材料: 光ファイバ アクチュエータ材料:
センサとアクチュエータを埋め込んだことによる複合材料の圧縮強度に及ぼす影響を, センサとアクチュエータの直径, 積層板厚さ, 積層板の剛性あるいはせん断強度をパラメータとして線形弾性モデルを用いて理論的に検討している.

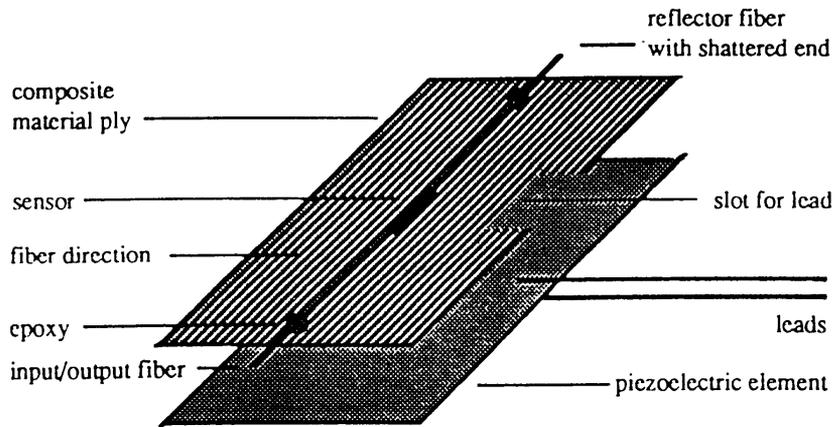


図 3. 1-9 光ファイバセンサとセラミックピエゾアクチュエータを貼り付けられたグラファイトコンポジット

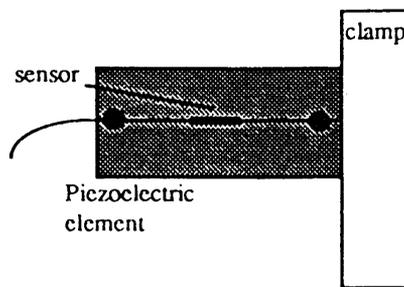


図 3. 1-10 セラミックピエゾアクチュエータを取り付けたはりの解析モデル

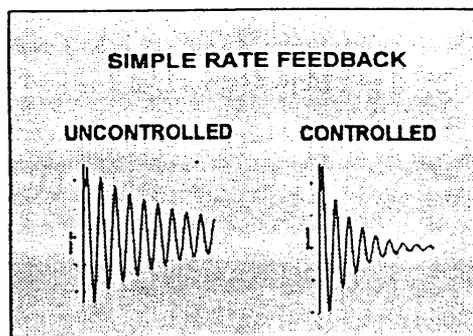


図 3. 1-11 制御した場合の自由振動応答に及ぼす効果

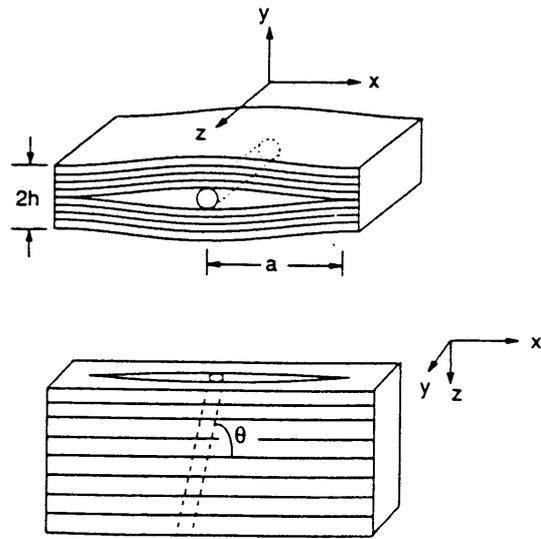


図 3. 1 - 1 2 センサとアクチュエータを埋め込んだ
コンポジットの解析領域

(4) PZTをセンサ・アクチュエータとした研究

文献番号 10	K.Chandraschara and R.Tenneti 図3. 1-13, 3. 1-14
ホスト材料/構造: graphite/epoxy センサ材料: PZT アクチュエータ材料: PZT	
piezoelectric sensor and actuator embedded in a layered composite plate for thermal vibration control using a finite element model.	
文献番号 11	W-S. Hwang, H-C. Park and W. Hwang 図3. 1-15
ホスト材料/構造: graphite/epoxy センサ材料: PZT アクチュエータ材料: PZT	
vibration control of a ceramic piezoelectric actuator and sensor embedded in a composite layered plate using FEM.	
文献番号 12	D.G.Cole and R.L.Clark 図3. 1-16
ホスト材料/構造: analog component センサ材料: PZT アクチュエータ材: PZT	
applicability of piezoelectric sensors and actuators to piezoelectric structures, standard adaptation signal processing techniques and piezoelectric devices using an adaptation algorithm.	
文献番号 13	H.T.Banks, K.Ito and Y.Wang 図3. 1-17
ホスト材料/構造: アルミニウム センサ材料: PZT アクチュエータ材料: PZT	
identification and feedback control of a ceramic piezoelectric actuator and sensor using the same computational method.	

文献番号 14	S. Akishita, Y. Mitani and H. Miyaguchi · 図 3. 1 - 1 8
ホスト材料/構造:	ステンレス矩形平板
センサ材料:	PZT
アクチュエータ材料:	PZT
セラミック piezo 素子をアクチュエータとセンサとして用いた矩形板を伝達する音響の能動制御について述べている。	

文献番号 15	J. Qiu and J. Tani 図 3. 1 - 1 9
ホスト材料/構造:	円筒シェル
センサ材料:	PZT film
アクチュエータ材料:	PZT film
円筒シェルの振動制御のために piezo フィルムセンサとアクチュエータを分布させて用い、コントローラ的设计のため $H-\infty$ と μ -シンセシスの手法を適用している。	

文献番号 16	F. P. Sun, Z. Chaudhry, C. Liang and C. A. Rogers 図 3. 1 - 2 0, 図 3. 1 - 2 1
ホスト材料/構造:	トラス
センサ材料:	PZT
アクチュエータ材料:	PZT
組み立てられたトラスのヘルスマニタリングのために信号パターンをセラミック piezo センサーアクチュエータを用いて周波数領域のインピーダンス信号処理技術により解析している。	

文献番号 17	J. V. Kouri, A. J. McCain and R. M. Borchert 図 3. 1 - 2 2
ホスト材料/構造:	アルミニウムはり
センサ材料:	PZT
アクチュエータ材料:	PZT
一組のセラミック piezo アクチュエータ/センサをアルミニウムはりに用いて自己センシング/制御を理論的ならびに実験的に検討している。	

文献番号 18 C. Y. Liao and C. K. Sung 図 3. 1 - 2 3

ホスト材料/構造: フレキシブルリンク機構

センサ材料: PZT

アクチュエータ材料: PZT

高速の柔軟リンク機構にセラミック piezo アクチュエータとセンサを組み込み, 弾性動力学応答の振動抑制について理論的ならびに実験的に検討している.

文献番号 19 K. K. Denoyer and M. K. Kwak 図 3. 1 - 2 4

ホスト材料/構造: 回転フレキシブル構造

センサ材料: PZT

アクチュエータ材料: PZT

セラミック piezo アクチュエータとセンサを貼り付けた回転フレキシブル構造の近似的動的モデルを作成し, 2 種類の制御方式で振動制御を検討している.

文献番号 20 D. A. Paige, R. C. Scott and T. A. Weisshaar 図 3. 1 - 2 5,
図 3. 1 - 2 6

ホスト材料/構造: 複合材料パネル, アルミニウムパネル

センサ材料: PZT

アクチュエータ材料: PZT

複合材料パネルのフラッタとそれを能動制御するために, PZT を用いた場合について解析的ならびに実験的検討を行っている.

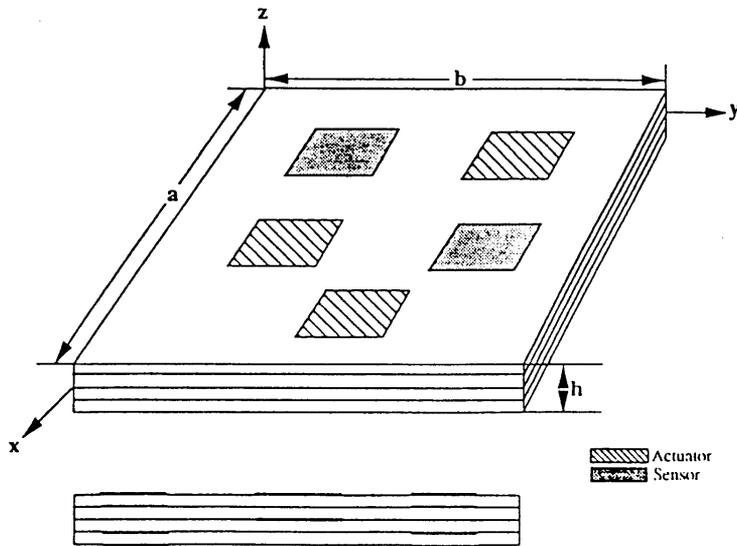


図 3. 1-13 セラミック piezo センサとアクチュエータ
とを一体化した積層板

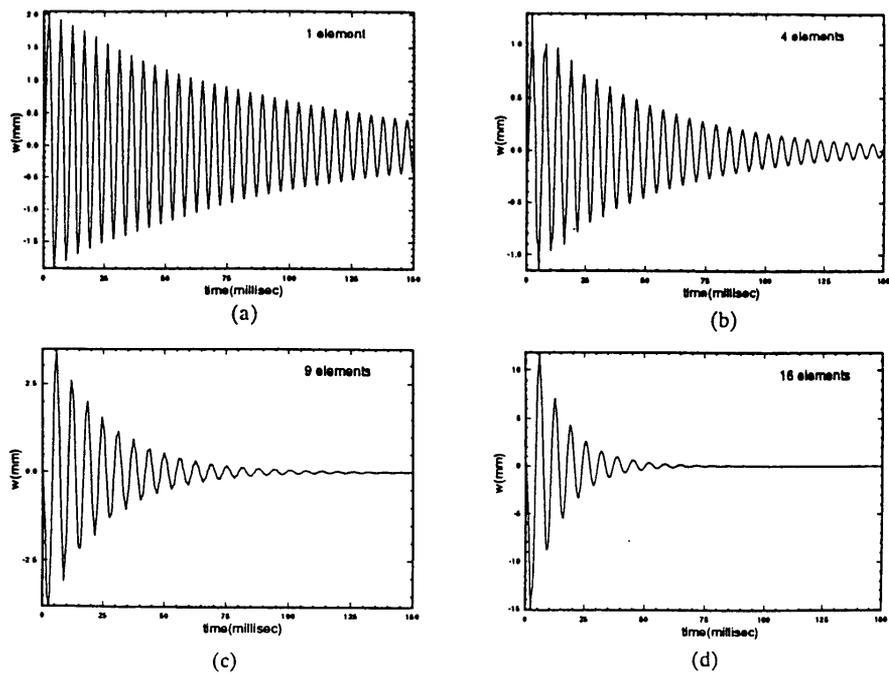


図 3. 1-14 熱的刺戟に対する応答に及ぼすセラミック
piezo アクチュエータの分布の影響

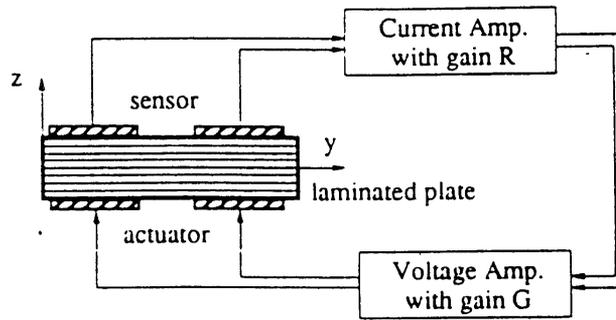


図 3. 1-15 センサ/アクチュエータから成る
フィードバックシステム

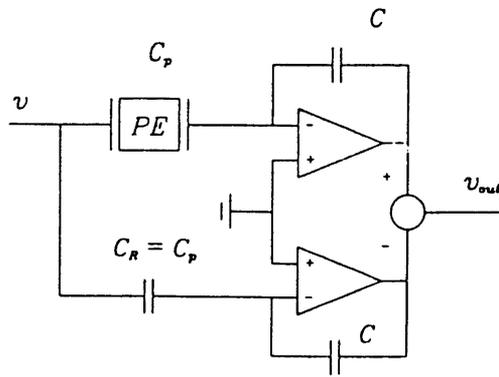


図 3. 1-16 ピエゾセンサ・アクチュエータの
アナログ補償回路

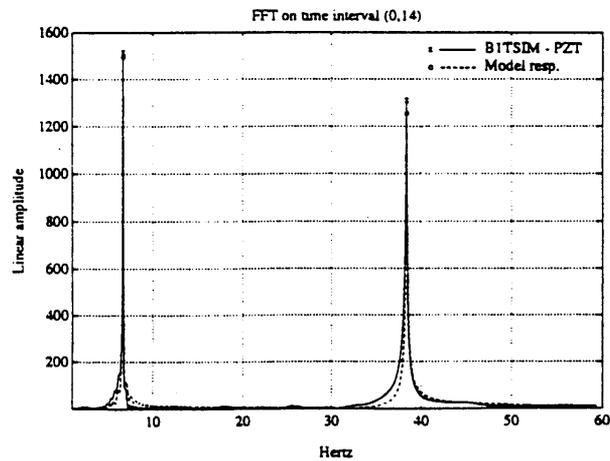


図 3. 1-17 実験データとモデル解析の周波数応答の比較

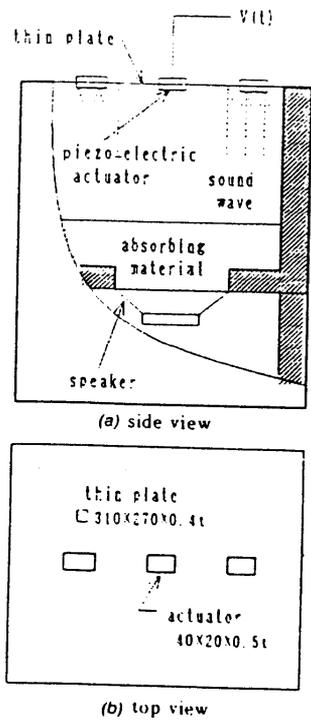


図 3. 1 - 1 8 実験装置の概観図 (a) 側面, (b) 上面

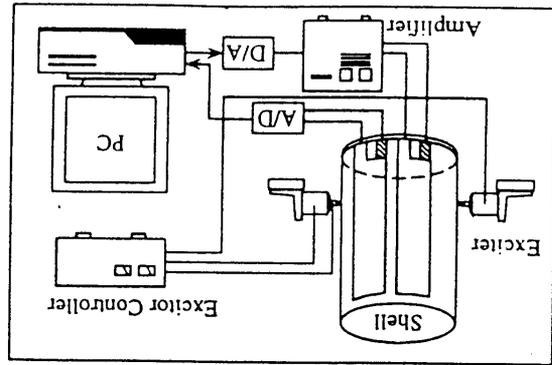


図 3. 1 - 1 9 円筒シェルの実験装置

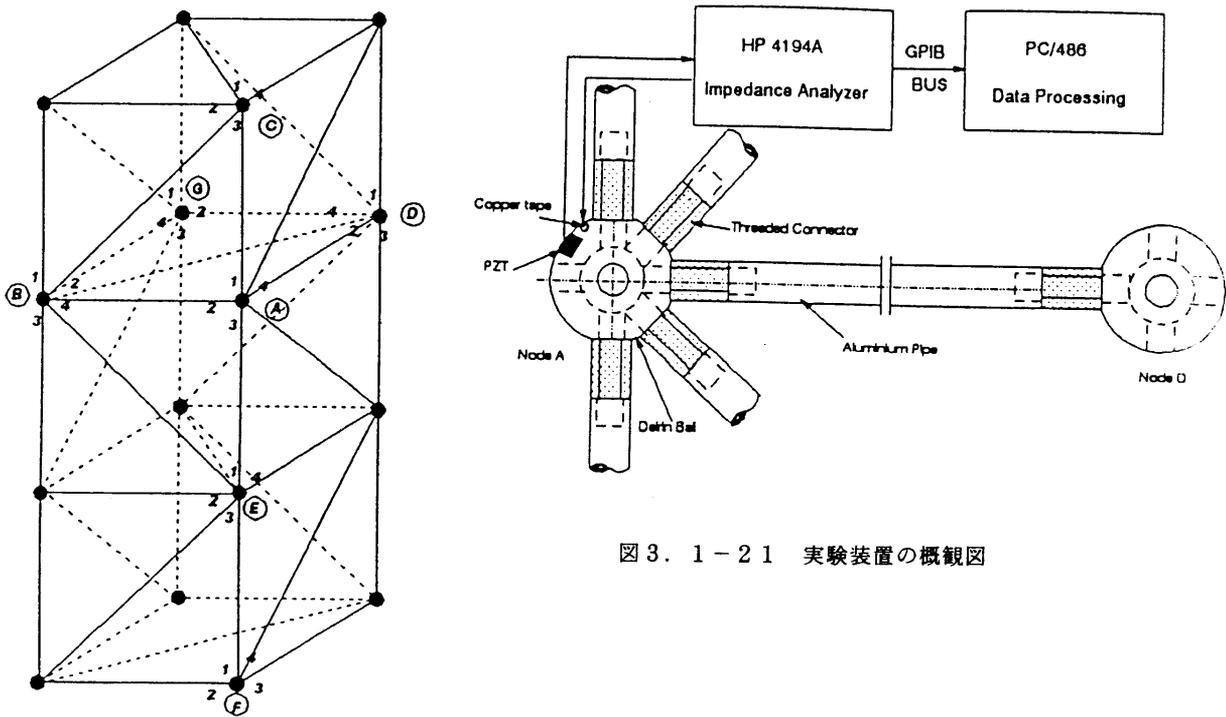


図 3. 1 - 2 0 3つの格間から成るトラス

図 3. 1 - 2 1 実験装置の概観図

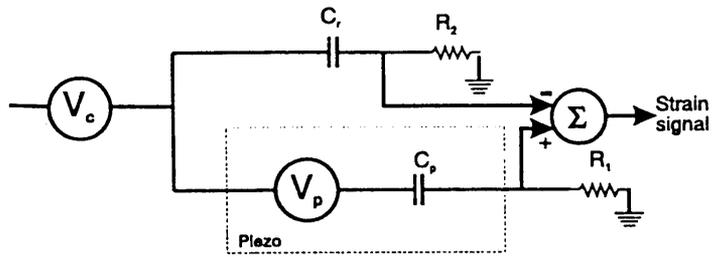


図 3. 1-22 ピエゾ素子自己センシング回路

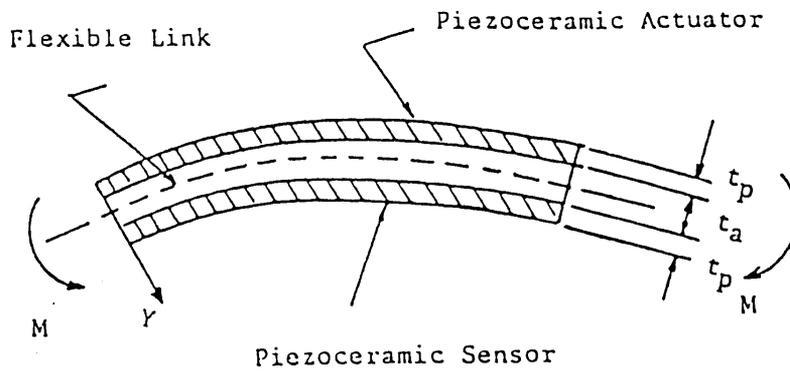


図 3. 1-23 ピエゾセンサ/アクチュエータによって
引き起こされるはりの曲げモーメント

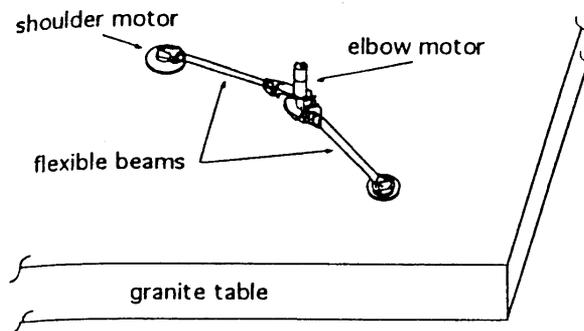


図 3. 1-24 回転フレキシブル機構

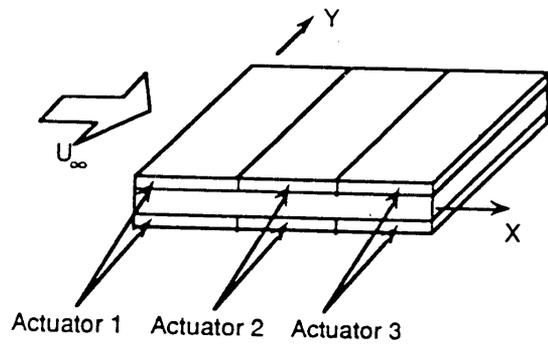


図3. 1-25 3つのアクチュエータを分布させたパネル

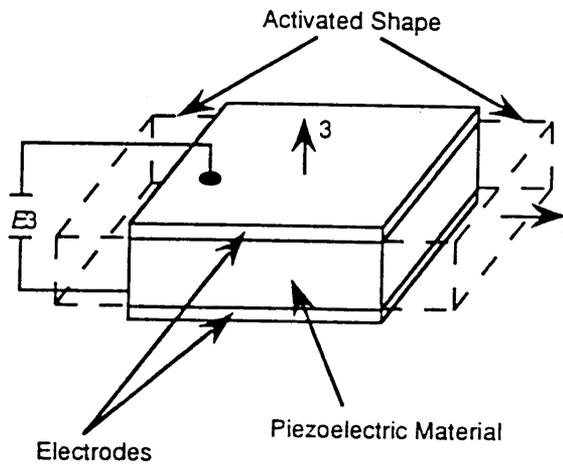


図3. 1-26 ピエゾ素子の分極の方向

(5) SMAをセンサ・アクチュエータとした研究

文献番号 21 L. McD. Schetky, C. Liang and C. A. Rogers 図 3. 1 - 2 7
ホスト材料/構造: アルミニウム平板 センサ材料: SMA アクチュエータ材料: SMA
アルミニウム平板に形状記憶合金を貼り付けて種々な周辺支持条件のもとで振動と音響制御を検討している。

文献番号 22 J. S. N. Paine and C. A. Rogers 図 3. 1 - 2 8
ホスト材料/構造: graphite/bismaleimide センサ材料: SMA(Nitinol fiber) アクチュエータ材料: SMA(Nitinol fiber)
繊維状形状記憶合金をグラファイト/ビスマールイミドへ埋め込んだ複合材料に対する低速度衝撃に対する耐衝撃性改善について述べている。

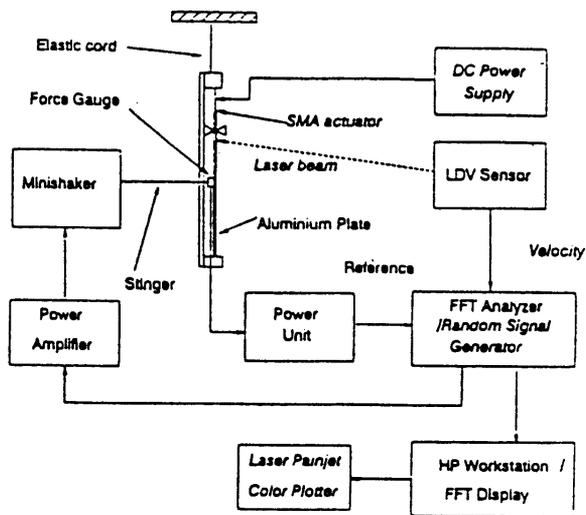


図 3. 1 - 2 7 周波数応答関数測定装置

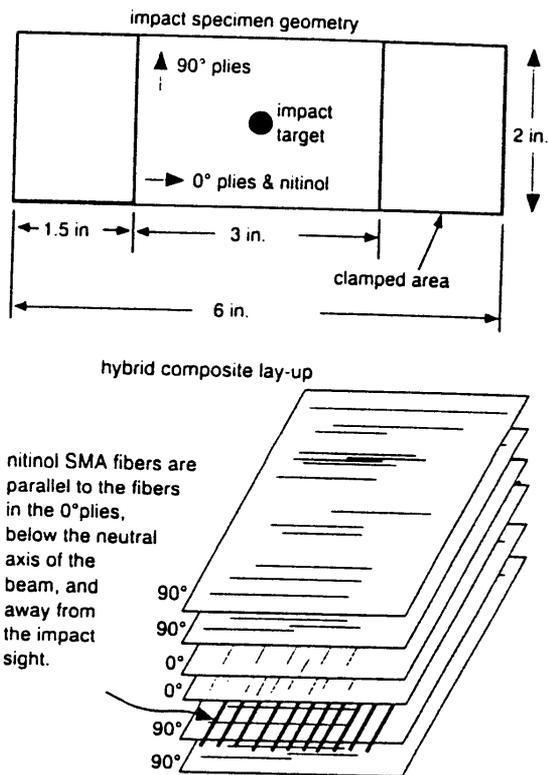


図 3. 1 - 2 8 SMAによりハイブリッドスマート化した
コンジットの積層構成と衝撃用試験片の形状・寸法

(6) ハイブリッドスマートコンポジットに関する研究

文献番号 23	R. Ikegami, D. G. Wilson, J. R. Anderson and G. J. Julien 図 3. 1 - 29
ホスト材料/構造:	aluminum
センサ材料:	SMA(Nitinol)
アクチュエータ材料:	SMA(Nitinol), PZT
形状記憶合金を低周波数の柔構造へセンサ/アクチュエータとして, 高周波数剛構造へはセンサとして, またセラミック piezo アクチュエータを併用した振動制御について述べている.	
文献番号 24	Q. Su, S. -Riba and A. Roytburd 図 3. 1 - 30
ホスト材料/構造:	
センサ材料:	
アクチュエータ材料:	SMA(Nitinol), 磁歪材料(Terfenol)
Nitinol と Terfenol をハイブリッドしてアクチュエータ材料とした場合の弾性ならびに非弾性特性について検討して, 剛性とダンピング特性に関する情報を提供している.	
文献番号 25	M. Avellaneda and G. Harshé 図 3. 1 - 31
ホスト材料/構造:	
センサ材料:	
アクチュエータ材料:	PZT, 磁歪材料
piezo 素子と磁歪材料を2層に積層した複合材料について磁性/弾性効果を検討している.	
文献番号 26	D. Damjanovic and R. E. Newnham 図 3. 1 - 32
ホスト材料/構造:	
センサ材料:	
アクチュエータ材料:	磁歪材料(Relaxor ferroelectrics), PZT
アクチュエータ材料として有望な電歪セラミックと piezo セラミック素子の特性評価を行っている.	

文献番号 27 F. Gordaninejad and A. Ray 図 3. 1 - 3 3

ホスト材料/構造: アルミニウム
センサ材料: ピエゾ加速度計
アクチュエータ材料: ER流体, viscous oil

粘性オイルとER流体を組み合わせ用いたアルミニウムはりの振動制御をリレー制御と比例制御のアルゴリズムを適用して検討している。

文献番号 28 K. D. Weiss, J. D. Carlson and D. A. Nixon 図 3. 1 - 3 4

ホスト材料/構造:
センサ材料:
アクチュエータ材料: MR流体, ER流体

極性を持つ粒子をオイルに懸濁した多相材料であるMR流体(Magneto-Rheological Fluid)とER流体(Electro-Rheological Fluid)について, 弾性と粘性の遷移領域を検討している。

文献番号 29 R. M. Barrett 図 3. 1 - 3 5

ホスト材料/構造: 低アスペクト比の空力弾性サーボ翼(PZT繊維を埋め込んだエポキシ)
センサ材料:
アクチュエータ材料: PVDF, PZT, DAP

種々な piezo素子の中で, PVDFやPZTを低アスペクト比の空力弾性サーボ翼を駆動する能動トルク板に組み込むことにより実験的ならびに理論的に翼の安定化を検討している。

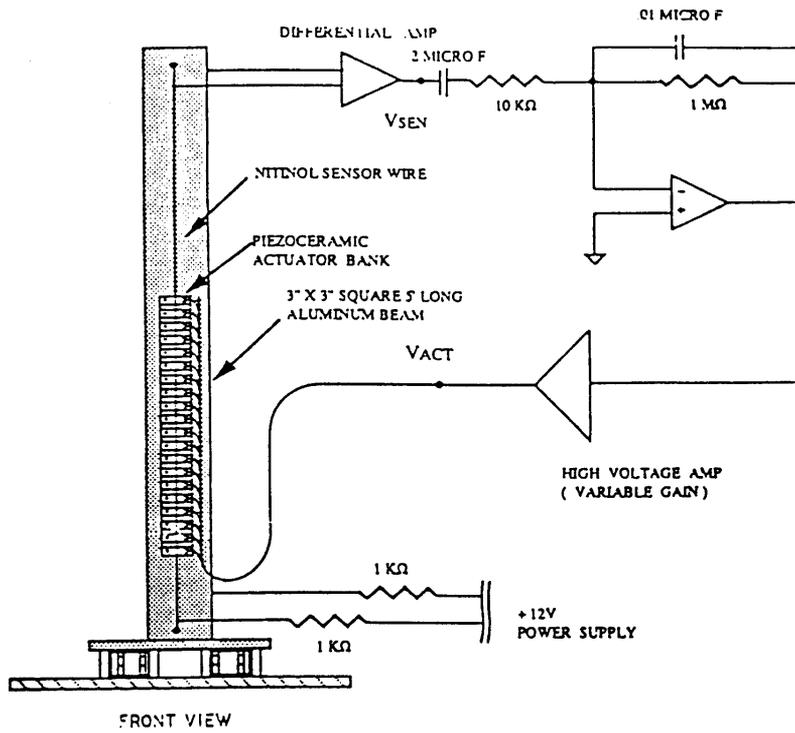


図 3. 1-29 高周波数用能動ダンピング回路

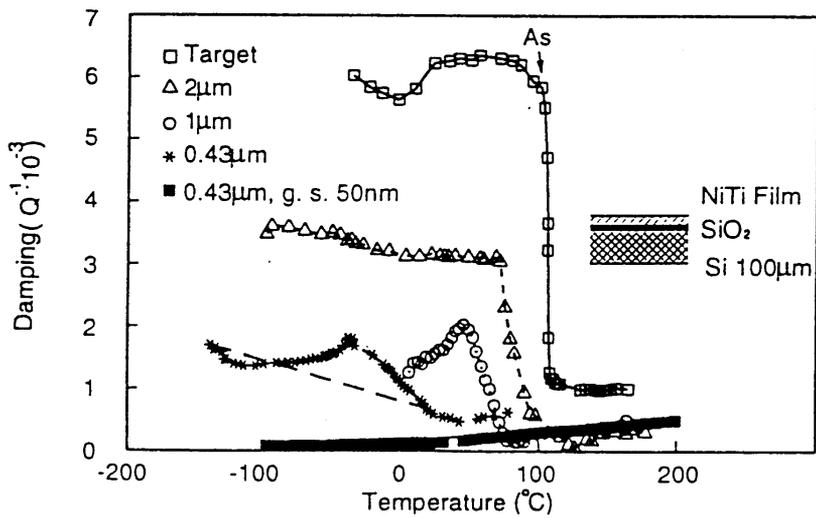


図 3. 1-30 温度を関数としたときの $\text{Ni}_{50}\text{Ti}_{50}$ フィルムの厚さを変えたときのダンピング

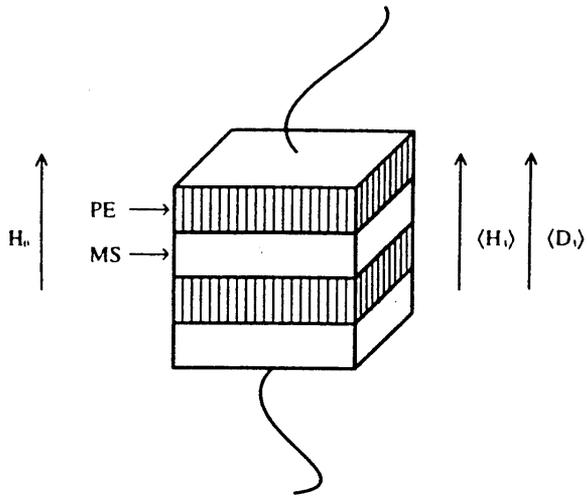


図 3. 1-31 ピエゾ素子と磁歪材料を用いた多層積層トランスデューサの概観図

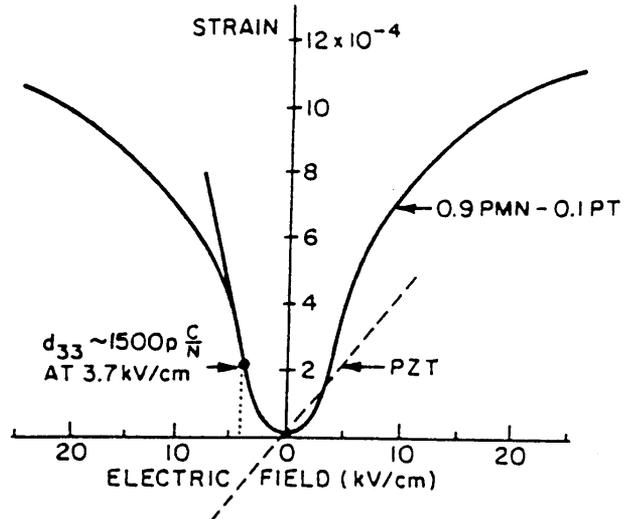


図 3. 1-32 電歪材料 (PMN-PT) と piezo 素子 (PZT) の電気機械的特性

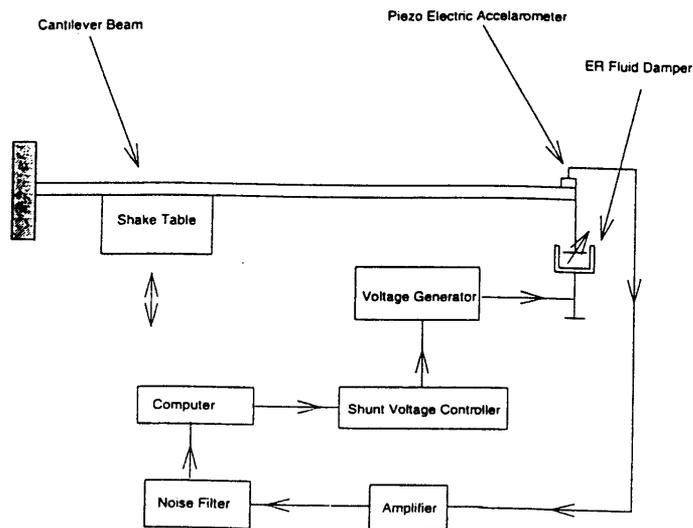


図 3. 1-33 ER 流体ダンパを取り付けたはりと実験システム

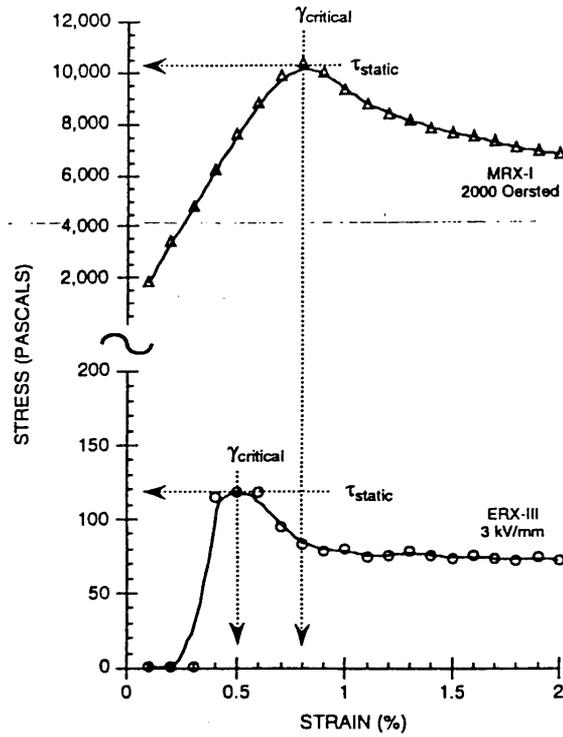


図 3. 1 - 3 4 ER 流体と MR 流体に対する応力-ひずみ線図

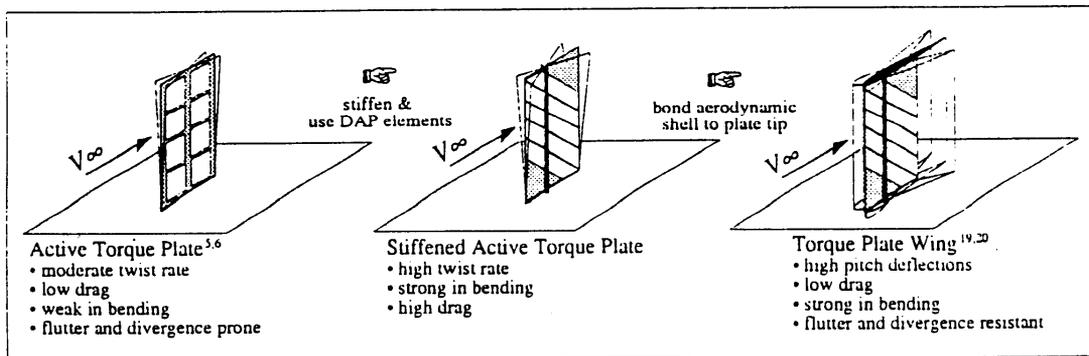


図 3. 1 - 3 5 能動空力弾性サーボ翼のデザインの考え方

(7) 著者らの最近の研究から

文献番号 30 福田他 図3. 1-36, 3. 1-37, 3. 1-38
ホスト材料/構造: カーボン/エポキシ積層複合材料 センサ材料: 圧電性塗料 アクチュエータ材料: PZT
カーボン/エポキシ積層複合材片持ちはりに piezo素子をアクチュエータとして埋め込み, はりの表面に圧電性塗料を塗布したセンサとして用い, 一体化した複合材料積層板を製作し, その振動特性を検討している.

文献番号 31 福田, 大島 図3. 1-39, 3. 1-40
ホスト材料/構造: カーボン/エポキシ積層複合材料 センサ材料: 非接触レーザ変位計 アクチュエータ材料: PZT, ER流体
カーボン/エポキシ積層複合材片持ちはりにアクチュエータとしてセラミック piezo素子と ER流体を用いた複合材料積層板を製作し, 固定端をランダム強制加振したときの, 両アクチュエータ材料の振動抑制効果を検討している.

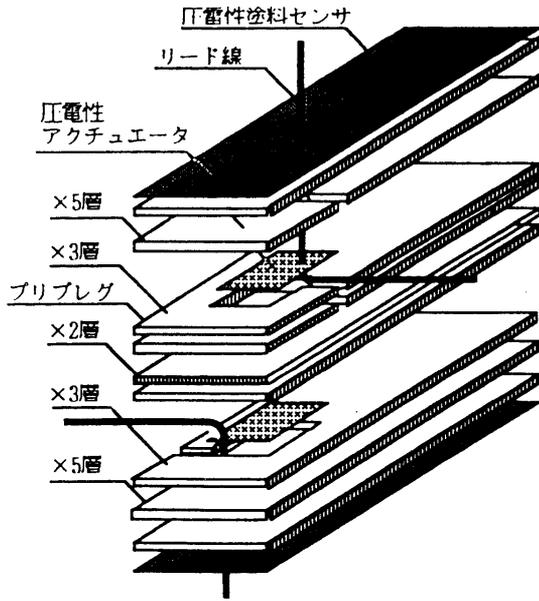


図3. 1-36 圧電性塗料をセンサ、 piezo素子をアクチュエータとした一体化したCFRPコンポジットの積層構成

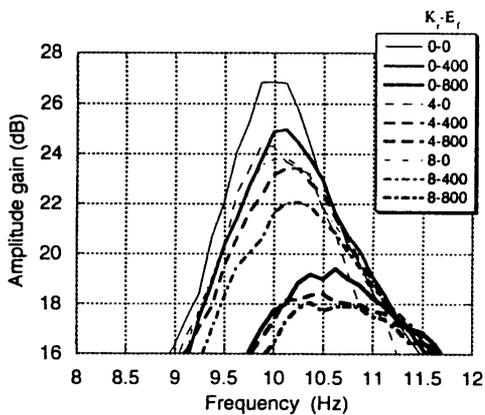


図3. 1-40 ER流体とpiezo素子の制振効果

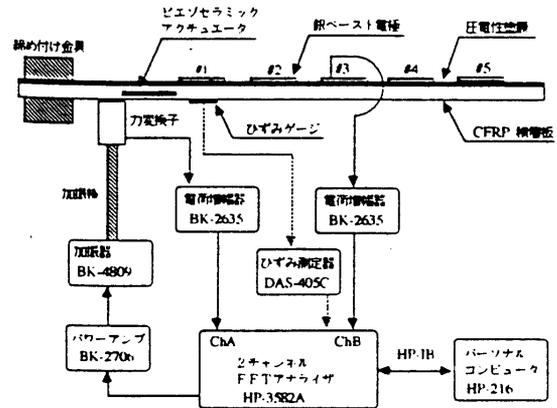


図3. 1-37 実験システム

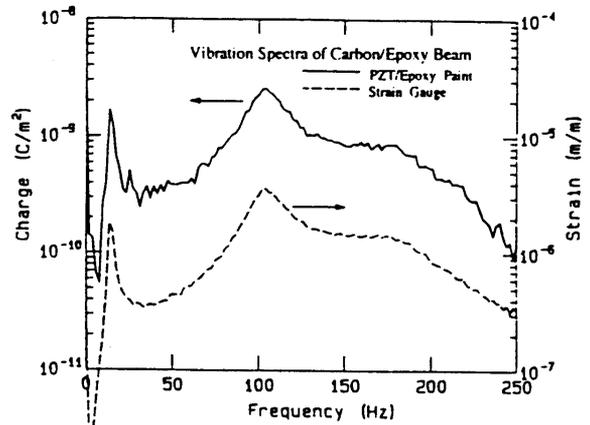


図3. 1-38 圧電性塗料とひずみゲージを用いて測定した振動スペクトルの比較

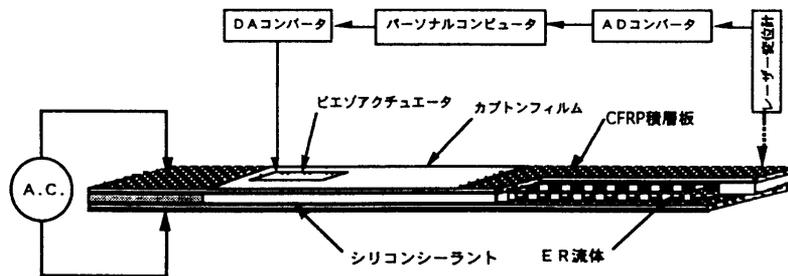


図3. 1-39 ER流体とpiezo素子を内蔵したCFRPコンポジットの概略図

3. 1. 5 おわりに

コンポジットのスマート化においてアクチュエータ材料とセンサ材料を埋め込む問題がある。この場合スマート構造の設計者は、使用するアクチュエータとセンサの成形熱処理パラメータを評価しなければならない。すなわち、複合材料のマトリックスが、熱硬化性プラスチック、熱可塑性プラスチックあるいは金属であるのかによって成形における基準パラメータはおのずから異なるからである。表3. 1-4は、代表的な先端複合材料の成形温度を表にしたもので、光ファイバ、 piezoセラミックスおよび形状記憶合金が永久に損傷を受けないで耐え得る熱環境と対比して示している¹⁾。熱硬化性複合材料は、スマート構造への応用に際して現時点で最も大きい自由度をスマート構造設計者に与える。何故なら、120°Cから180°Cの間の低硬化温度と0.3MPaと1.3MPaという低成形圧力で成形できるからである。普通に入手できるアクチュエータとセンサの大部分は、此の種の構造には容易に埋め込まれる。ただし、piezo高分子フィルムは、熱的には約80°C以下に限定されるから使用できない。また、室温で硬化するある種のエポキシ樹脂も不可である。また、Graphite/PEEKへの光ファイバの埋め込みもまた不可であるが、piezoセラミックスや形状記憶合金なら可能である。Graphite/Alへは形状記憶合金は可能である。また、一体化したスマート材料に埋め込まれたアクチュエータやセンサを作動させるためには、モノリシックなパワーアンプの開発も検討されねばならない⁶⁾。(図3. 1-41)

その他上記温度特性以外の機能性
素材に対する要求をまとめると

光ファイバ：(1) 外径が小さく、伸びの大きいファイバの開発、(2) マトリックス樹脂との接着性の向上など

piezoセラミックス：(1) 成形時に壊れることの防止、(2) 導電性のあるCFRPへの埋め込み時の絶縁性など

ER流体：(1) 分散安定性の向上、(2) 経年変化の防止、(3) 熱による劣化抑制、(4) 重量軽減などが挙げられる。

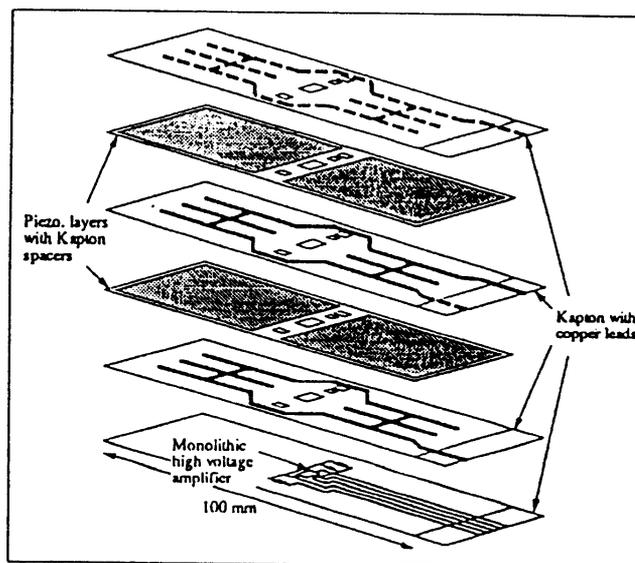


図3. 1-41 モノリシックにパワーアンプを組み込んだスマートコンポジット

表3. 1-4 先端複合材料の成形温度と各種センサ材料/
アクチュエータ材料の耐熱性との対比

成形温度・材料 複合材料	成形温度 (°C)	光ファイバ	ピエゾ セラミックス	形状記憶合金
グラファイト/エポキシ	120-180	○	○	○
グラファイト/ポリイミド	290-340	○	○	○
グラファイト/PEEK	320-430		○	○
金属マトリックス複合材料	540-1100			○

参考文献

- 1) M.V.Gandhi and B.S.Thompson: Smart Materials and Structures, CHAPMAN & HALL (1992) P.80.
- 2) スマートストラクチャー研究会, 「SMART STRUCTURES」 (1993).
- 3) 浅子, 伊藤, 機能材料, Vol.14, No.3 (1994) /24-
- 4) 連載講座「超先進構造・材料としての知的材料」, 機械の研究, Vol.44, No.9 (1992) pp.89-91.
- 5) 連載講座「超先進構造・材料としての知的材料」, 機械の研究, Vol.44, No.11 (1992) pp.84-90.
- 6) E.F.Crawley et al.: Recent Progress in Intelligent Material Systems, MATERIAUX&TECHNIQUES (1994-1995), pp.1-7.
- 7) M.K.Burford, K.A.Murphy and R.O.Claus: Experimental Characterization of Sensor and Actuator Embedded Intelligent Materials, Proc. 2nd ICIM (1994) pp.235-246.
- 8) R.T.Failes and B.Glowasky: Analytical and Experimental Studies of Smart Materials and Structures Incorporating Embedded Piezoelectric Actuators and Fiber Optic Sensors, SPIE Vol.2190 (1994), pp.165-170.
- 9) S.W. Case and G.P.Carman: Compression Strength of Composites

- Containing Embedded Sensors or Actuators, J. Intelligent Material Systems and Structures, Vol.5, No.1, January (1994), pp.4-11.
- 10) K.Chandraschara and R.Tenneti: Thermomechanical Modeling of Laminated Plates with Piezoelectric Sensors and Actuators, SPIE Vol.2190 (1994), pp.782-789.
- 11) W-S. Hwang, H-C. Park and W.Hwang: Vibration Control of a Laminated Plate with Piezoelectric Sensor/Actuator: Finite Element Formulation and Model Analysis, J.Intelligent Material Systems and Structures, Vol.4, No.3, July (1993), pp.317-329.
- 12) D.G.Cole and R.L.Clark: Adaptive Compensation of Piezoelectric Sensoriactuators, J. Intelligent Material Systems and Structures, Vol.5, September (1994), pp.665-672.
- 13) H.T.Banks, K.Ito and Y.Wang: Computational Methods for Identification and Feedback Control in Structures with Piezoceramic Actuators and Sensors, J. Intelligent Material Systems and Structures, Vol.4, No.4, October (1993), pp.469-476.
- 14) S.Akishita, Y.Mitani and H.Miyaguchi: Sound Transmission Control through Rectangular Plate by Using Piezoelectric Ceramics as Actuators and Sensors, Intelligent Material Systems and Structures, Vol.5, May (1994), pp.371-378.
- 15) J.Qiu and J.Tani: Vibration Control of a Cylindrical Shell Using Distributed Piezoelectric Sensors and Actuators, Proc. 2nd ICIM (1994), pp.1003-1014.
- 16) F.P.Sun, Z.Chaudhry, C.Liang and C.A.Rogers: Truss Structure Integrity Identification Using PZT Sensor-Actuator, Proc. 2nd ICIM (1994), pp.1210-1222.
- 17) J.V.Kouri, A.J.McCain and R.M.Borchert: The Feasibility of a Truly Collocated Piezoelectric Sensor/Actuator, SPIE Vol.2190 (1994), pp.250-261.
- 18) C.Y.Liao and C.K.Sung: Vibration Suppression of Flexible Linkage Mechanisms Using Piezoelectric Sensors and Actuators, J. Intelligent Material Systems and Structures, Vol.2, April (1991), pp.177-197.
- 19) K.K.Denoyer and M.K.Kwak: Dynamic Modeling and Vibration Suppression of a Slewing Active Structure Utilizing Piezoelectric Sensors and Actuators, SPIE Vol.1917 (1993), pp.882-894.
- 20) D.A.Paige, R.C.Scott and T.A.Weisshaar: Active Control of

Composite Panel Flutter Using Piezoelectric Materials, SPIE Vol.1917 (1993), pp.84-97.

21) L.McD.Schetky, C.Liang and C.A.Rogers: Hybrid Composite Materials Using Shape Memory Alloy Actuators to Provide Vibration and Acoustic Control, SPIE Vol.2190 (1994), pp.422-435.

22) J.S.N.Paine and C.A.Rogers: The Response of SMA Hybrid composite Materials to Low Velocity Impact, J. Intelligent Material Systems and Structures, Vol.5, July (1994), pp.530-535.

23) R.Ikegami, D.G.Wilson, J.R.Anderson and G.J.Julien: Active Vibration Control Using NiTiNOL and Piezoelectric Ceramics, J. Intelligent Material Systems and Structures, Vol.1, April, (1990), pp.189-206.

24) Q.Su, S.-Riba and A.Roytburd: Principles and Components of Hybrid Actuators, Proc. 2nd ICIM (1994), pp.1185-1193.

25) M.Avellaneda and G.Harshé: Magnetolectric Effect in Piezoelectric/Magnetostrictive Multilayer (2-2) Composites, Intelligent Material Systems and Structures, Vol.5, July (1994), pp.501-513.

26) D.Damjanovic and R.E.Newnham: Electrostrictive and Piezoelectric Materials for Actuator Application, J. Intelligent Material Systems and Structures, Vol.3, April (1992), pp.190-208.

27) F.Gordaninejad and A.Ray: Hybrid Dampers for Active Vibration Control, Proc. 2nd ICIM (1994), pp.577-588.

28) K.D.Weiss, J.D.Carlson and D.A.Nixon: Viscoelastic Properties of Magneto- and Electro-Rheological Fluids, J. Intelligent Material Systems and Structures, Vol.5 November (1994), pp.772-775.

29) R.M.Barrett: Modeling Techniques and Design Principles of a Low-aspect-ratio Active Aeroservoelastic Wing, SPIE Vol.1917 (1993), pp.107-118.

30) 福田,高田,戚,江草,岩沢: 第23回 FRPシンポジウム講演論文集 (1994) / II-10~12.

31) 福田,大島: 1995年度日本複合材料学会研究発表講演会予稿集 (1995) (印刷中).

3.2 分布型光ファイバセンサを用いたスマートコンポジット

3.2.1 分布型光ファイバセンサを用いたスマート材料・構造の研究開発動向

光ファイバセンサはスマートコンポジットを構成する有力な要素である。その概要については、たとえば文献 1-3) を参照されたい。また、本報告 3.1 節、4.1 節も参照されたい。一般に光ファイバセンサは、光ファイバ中を伝搬する光波の位相、偏波状態、偏波面、損失、あるいは散乱が外的要因によって変化することをセンサとして利用するものである¹⁾。光ファイバセンサには、大別して、マッハ・ツェンダ、マイケルソン、ファブリ・ペロー方式などの干渉計型、偏波面回転型、損失変化型、分布型、多点型などがある。

分布型光ファイバセンサは、光ファイバの長手方向における被測定量分布を測定するもので、分布型や多点型は実用上のスマート構造を考える時には最も有力なものと言えよう。分布型や多点型光ファイバセンサについては、SPIE (The International Society for Optical Engineering) でもすでにこのテーマに絞った国際会議を 3 回も開催している。1993年に開催された会議⁴⁾では、光ファイバ中に微小間隔の格子面を構成する Bragg grating sensor が注目されている。フォトリソグラフィ法を応用した簡便な Bragg grating sensor 製造法も提案されており、分布型や多点型光ファイバセンサとしての今後の発展が期待される。この研究は、米国では、United Technologies Research Center (UTRC) や Naval Research Laboratory (NRL) において、英国では University of Southampton などで行研究が活発に進められている。

分布型光ファイバセンサとしてこれまで提案されているもののうちでは、OTDR (Optical Time Domain Reflectometry) 手法を用いた分布型センサが最も研究が進んでいる。高出力・狭パルス幅のレーザを光ファイバ中に照射し、ファイバ中で生じる後方レーリ散乱やファイバ接続部、破断点でのフレネル反射などを計測する。SN比を向上させるために繰り返しパルスに対して積分処理を行うことが多い¹⁾。しかしながら、OTDR 装置は高価であること、距離分解能が光パルス幅で決まること²⁾などから、他のタイプの分布型光ファイバセンサもいくつか提案されている⁴⁾。分布型光ファイバセンサの現状と展望については文献5)にまとめられている。

保立ら⁶⁾は、レーザの直接周波数変調特性を利用して光波コヒーレンス関数を合成し、これによりリフレクトメトリー (反射光分布測定法) を実現する OCDR (Optical Coherence Domain Reflectometry by synthesis of coherence function) 法を提案している。さらに最近、光源の直接周波数変調に同期して位相変調器を駆動することで、コヒーレンス関数を形状一定のまま掃引する p-OCDR (phase-modulating OCDR) 法⁷⁾も提案している。

これらの手法は空間分解能が高くかつ可変、機械的可動部分がない、数値処理が不要、測定地点にランダムアクセスできる、などの特徴をもち、スマートコンポジット用の有力な分布型光ファイバセンサの一つである。

3.2.2 研究課題—分布型光ファイバセンサを用いた力学負荷同定手法の提案

(1) はじめに

東大先端研先端システム大部門武田研究室では、幸い、隣接研究室である光デバイス分野保立研究室（保立 和夫 教授）において、光ファイバセンサを用いた世界的にもトップレベルの計測技術を開発中であることから、同研究室の協力を得て、分布型光ファイバセンサによる計測技術とそれを適用する際の問題点解決に関する予備的研究を着実に進めてきた。本研究はその延長として提案するものである。

(2) 光波コヒーレンス関数の合成・掃引による分布型光ファイバセンサ

ここでは、東大先端研光デバイス分野保立研究室において開発中の、光波コヒーレンス関数の合成・掃引（p-OCDR法）による分布型光ファイバセンサ⁸⁾について説明する。

偏波維持光ファイバは直交する偏波モード間のモード結合を、光ファイバ断面方向の構造および応力分布を非対称にすることで各モード間に伝搬定数差を設けることで抑制し、入射時にそれぞれの偏波モード間に分配された光パワーを維持して伝搬するファイバである。しかしながら、応力あるいは温度など外的な擾乱が偏波維持光ファイバに加わると、直交する偏波モード間にわずかにモード結合が生じる。

一方リフレクトメトリーは、光回路から反射・散乱光の位置と量を同時に測定する光センサである。このリフレクトメトリーの手法を用いれば、偏波維持光ファイバ内のモード結合の位置と量を同時に測定することができ、分布型光ファイバを構成することが可能となる。

リフレクトメトリー手法を偏波維持光ファイバの偏波モード結合に適用した分布型光ファイバセンサとして、現在までに白色光源を用いる手法⁹⁾と光源の周波数を掃引する手法¹⁰⁾が提案され、実験的にその原理が確認されている。しかし、白色光源を用いる手法では機械的可動部分が必須であり、光源の周波数を掃引する手法では数値処理が必要となる。これに対し保立らが提案した半導体レーザの直接周波数変調特性を利用した光波コヒーレンス関数の合成と掃引を用いれば、機械的可動部分も数値処理も不要な分布型光ファイバセンサを構成することができる⁸⁾。また最近、本報告でも行う光ファイバセンサにかかる荷重分布を求める試み^{11,12)}もあるが、コストや機械的可動部分も数値処理も不要である点などから、本方法が有力であると筆者らは考えて

いる。

実験構成図を図3.2-1に示す。光源の半導体レーザ(LD)を出射した連続光は戻り光による半導体レーザの動作不安定を防ぐためのアイソレータを経由して音響光学変調器(AOM)に達する。AOMにおいて光波は二分されると同時に、一方の光波は80MHzの周波数シフトを受ける。周波数シフトを受けた光波は位相変調器を経由してセンサである偏波維持光ファイバ(PANDA fiber)の遅軸に入射する。また周波数シフトを受けない光波は半波長板により直行する偏波状態に変換された後、PANDA fiberの速軸に入射する。PANDA fiberを出射した光は偏波ビームスプリッタ(PBS)により速軸に相当する成分だけが取り出されて受光器(PIN-PD)に達する。受光された信号のうち中間周波数80MHzを持つ干渉成分のみがバンドパスフィルタ(BPF)により抽出され二乗検波ダイオードで時間平均されることにより干渉成分の振幅が検出される。

このとき光波コヒーレンス関数の合成および掃引の手法を用いれば、特定の遅延時間を持つ二光波による干渉信号だけを取り出すことができる。偏波維持光ファイバの長手方向に z 軸を取れば、検出される信号 P は光波コヒーレンス関数 $\gamma(z)$ とモード結合量分布 $K(z)$ の畳み込み積分で表される。

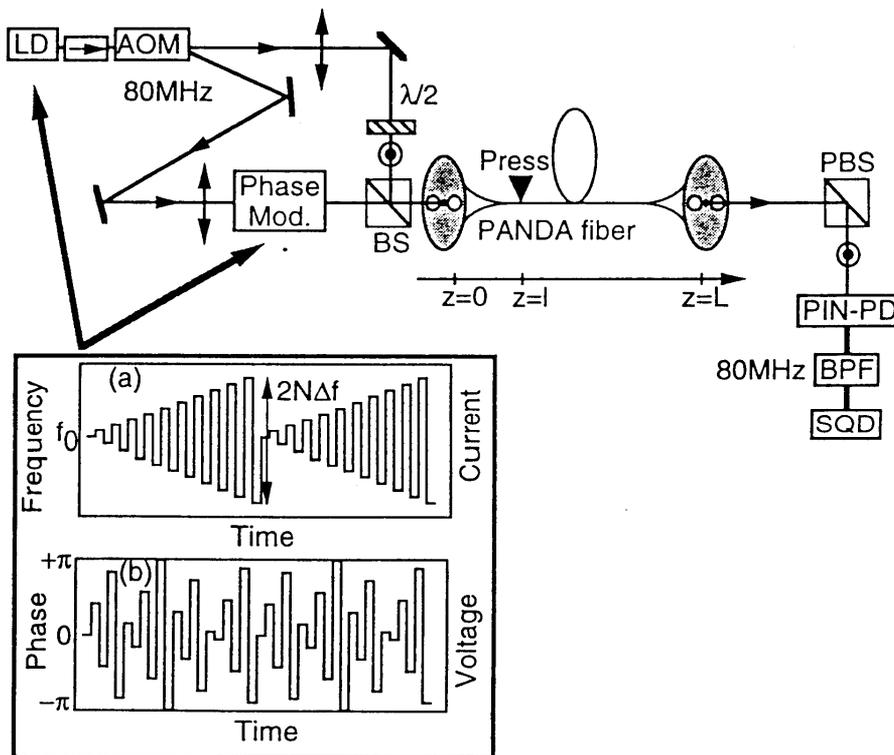


図 3.2-1. 光波コヒーレンス関数の合成・掃引による分布型光ファイバセンサの実験構成図⁸⁾

図3.2-1(a)のように半導体レーザを駆動電流により直接周波数変調しこれに同期して位相変調器を図3.2-1(b)の波形で変調すれば、光波コヒーレンス関数として図3.2-2に示すデルタ関数列形状のものが得られ、そのピーク位置は位相変調の係数 k で制御できるので結局近似的に $K(z)$ をそのまま取り出せることとなる¹³⁾。ただし複数回のモード結合はモード結合量が微小であり無視できるとした。

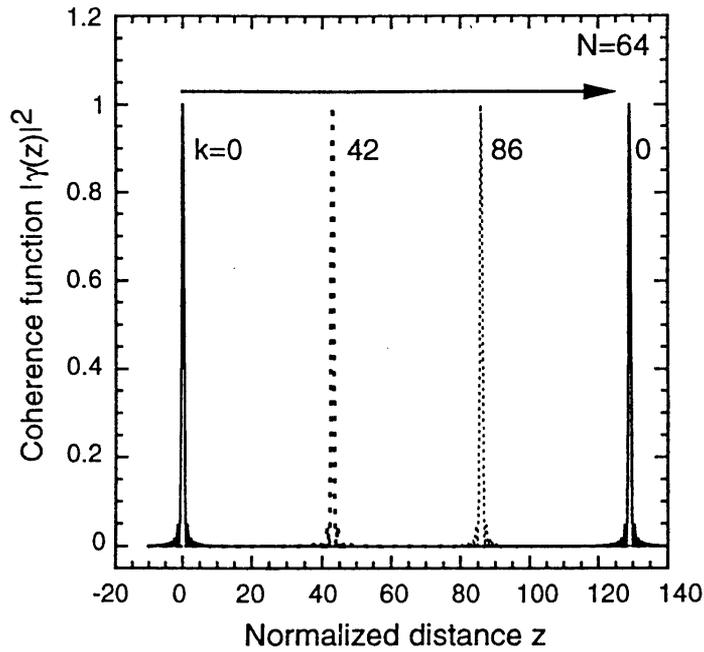


図 3.2-2. 光波コヒーレンス関数の合成と掃引⁷⁾

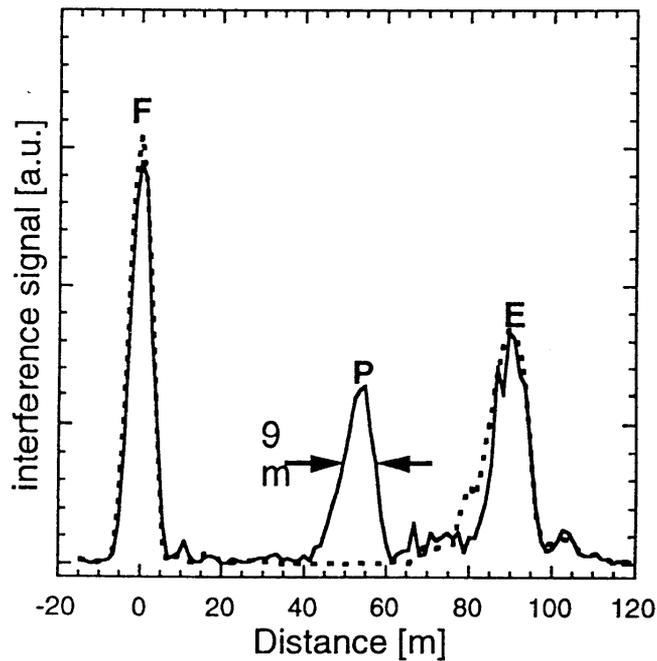


図 3.2-3. 光波コヒーレンス関数の合成・掃引による分布型光ファイバセンサを用いて得られた圧力分布⁸⁾

原理確認の基礎実験を行った結果を図3.2-3に示す。90mの偏波維持光ファイバを用意し、圧力としてファイバの一部に重りを置いた。点線が重りを置いていないときの測定値であり、実線が重りを置いたときの測定値である。ピーク F および E は光ファイバの両端での偏波ずれによる誤差に起因している。ピーク P が印加された圧力に対応する。達成された空間分解能はピークの半値半幅で定義すると9mであった。半導体レーザーの光周波数掃引幅と偏波維持光ファイバの複屈折率差により決まる理論空間分解能は6mである。

(3) 分布型光ファイバセンサを用いた力学負荷同定手法の提案

(a) 研究の目的

本研究では、複合材料板の表面近くに、連続した一本の長い偏波維持光ファイバをあらかじめ埋め込み、光ファイバの長さ方向の被測定量分布を測定する分布型センサとして用いる技術を応用して、板表面に負荷される集中力の位置と大きさを同定する新規計測システム（図3.2-4）として構築し、スマート複合材料／構造の有力な一手法として確立することを目的とする。具体的には、まず、入射レーザー光の周波数・位相変調を利用した分布型センサの計測装置を複合材料板の表面集中力測定用に構成する。また、偏波維持光ファイバを複合材料板の表面近くに埋め込む製造技術を確認する。次に、表面集中力によるセンサ出力の理論解析に基づく力の位置と大きさの予測を行い、測定結果と比較することにより、力の位置と大きさの同定誤差要因を把握する。以上の研究プロセスは、途中で互いにフィードバックし合い、本方法による力の位置と大きさの同定が実用に耐えるレベルにまで到達することを目指す。

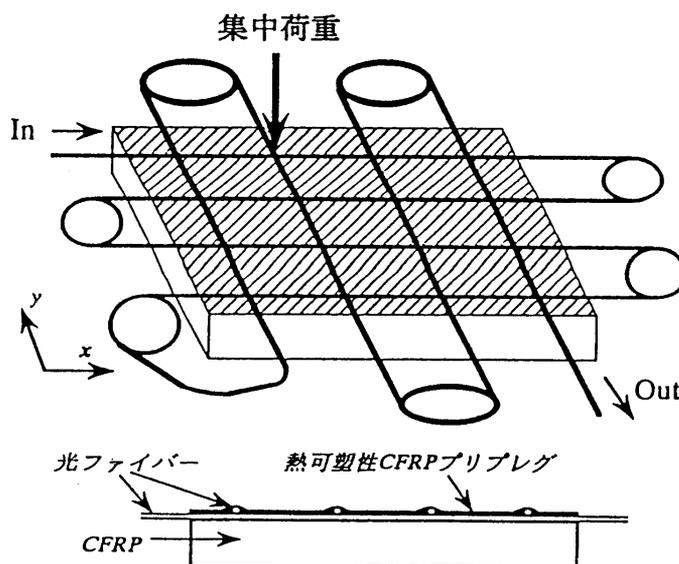


図 3.2-4. 分布型光ファイバセンサを用いた複合材料板の力学負荷同定システム

(b) 本研究の特色、独創性、予想される結果と意義

欧米の航空宇宙分野を中心に萌芽的研究が進められ、将来的にも研究が望まれる「スマート複合材料／構造」を実現化する一つの有力な手法を提案していることに本研究の最大の特色がある。偏波維持光ファイバを用いる分布型光ファイバセンサ計測技術自体は光計測分野での最先端研究テーマであるが、本研究はこの分布型光ファイバセンサを複合材料板の表面近くに埋め込み、表面集中力の位置と大きさの同定に用いる点に独創性がある。また、センサの埋め込みは薄い熱可塑性樹脂複合材料プリプレグにより表面近くで実現されるため、構造自体の耐久性に与える影響は少ないことに加え、センサ損傷時の交換も容易である。測定原理の確立は十分実現できると考えられるし、力の位置と大きさの同定も実用に耐える程度まで可能であると予想される。本研究により、「スマート複合材料／構造」を実現化する一つの有力な手法が実現されれば、複合材料／構造研究の今後の展開の方向づけに与えるインパクトは大きい。

(c) 国内外関連研究の中での本研究の位置づけ

国内においては、光ファイバセンサおよびそれによる計測技術の研究は盛んであるが、複合材料／構造を含む構造体のひずみや温度の測定に用いられているのは主としてきわめて単純な光の干渉を用いるものである。米国においては、異なるタイプの分布型光ファイバセンサを計測技術として用いようとする研究はあるが、本研究で提案する方法により得られる精度は実現困難であり、複合材料へ埋め込むことも困難であると考えられる。

参考文献

- 1) 保立 和夫：光ファイバセンサ（大越孝敬編著），第6章「光ファイバセンサII：ファイバ自体をセンサとして用いる場合」，オーム社（1986）。
- 2) 平成5年度 航空機へのインテリジェントコンポジットシステムの適用に関する調査報告書，（社）日本機械工業連合会，（財）次世代金属・複合材料研究開発協会（1994），4.2.2 節，pp. 141-154。
- 3) 北出 真太郎：非破壊検査，43，3（1994），pp. 167-172。
- 4) A. D. Kersey and J. P. Dakin, eds.: Distributed and Multiplexed Fiber Optic Sensors III, Proc. SPIE 2071 (1993)。
- 5) M. A. Marcus: 文献 4) の pp. 198-208。
- 6) K. Hotate and O. Kamatani: Electron. Lett., 25 (1989), pp. 1503-1505. など
- 7) 才田隆志, 保立和夫：電子情報通信学会技報, OPE94-2 (1994), pp. 7-12。
- 8) 才田隆志, 保立和夫：1994年電子情報通信学会秋季大会 (1994), C-238。

- 9) K. Takada, J. Noda, and Y. Sasaki: *Electron. Lett.*, 20 (1984), 119. など
- 10) K. Kurosawa, S. Hattori, and T. Yoshino, *Proc. Soc. Photo-Opt. Instrum. Eng.*, Vol. 798 (1987), 36. など
- 11) S. Huang, F. Luo and Y. Pan: *Recent Advances in Adaptive and Sensory Materials and Their Applications*, Technomic Publ. (1992), 236-241.
- 12) I. Cokgor, V. A. Handerek and A. J. Rogers: 文献 5) の pp. 221-228.
- 13) K. Hotate and T. Saida, *Proc. SPIE*, Vol. 2294 (1994), pp. 22-31. など

3.3 圧電材料によるスマートコンポジット

3.3.1 圧電材料の性質

対称中心を持たない結晶構造体に外力を加えると、分極を生じて電荷が誘起される。これを圧電効果と呼び、ガスの着火装置などに実用化されている。逆に、その結晶構造体に電圧をかけると電圧に比例した歪みが誘起される。これを逆圧電効果という。外力を加えない状態でも自発分極をもつものがあり、それを焦電体という。焦電性とは、結晶の温度を変えたときに、自発分極の温度依存性由来してその変化分に相当する電荷が現れる現象をいう。この焦電体のうちで、その自発分極が結晶を破壊しない程度の大きさの電界によって反転し得るものを強誘電体という。⁽¹⁻³⁾ 図 3.3-1 のように圧電体、焦電体、強誘電体が位置づけられる。セラミックス強誘電体の代表的なものにチタン酸バリウム (BaTiO_3) がある。これはペロブスカイト型と呼ばれる結晶構造をもち、高温の常誘電相 (無極性相) では自発分極をもたないが、キュリー温度とよばれる相転移点 T_c (約 120°C) 以下では自発分極を生じ、図 3.3-2 のように結晶構造は少し縦長の正方晶になる。自発分極と誘電率の温度依存性は図 3.3-3 のように表せる。強誘電相では圧電性を有し、常誘電相では非圧電性で電歪性を示す。なお電歪は電界の 2 乗に比例する歪みで、常誘電相で現れる。キュリー温度が高温にある物質は室温で圧電性を示し、室温以下にある物質は室温で電歪性を示す。電歪性は、キュリー一点でイオン対ポテンシャルの非調和性が大きいために、異常に大きくなる。図 3.3-4 に PLZT ($(\text{Pb},\text{La})(\text{Zr},\text{Ti})\text{O}_3$) と PMN ($\text{Pb}(\text{Mg}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})\text{O}_3$) 系セラミックスについて、電界によって誘起される電界印加方向のひずみを示す。圧電性を示す PLZT は、印加電界が小さいと電界とひずみの関係はほぼ直線的だが、印加電界が大きくなると履歴が大きくなり、ある臨界電界 (抗電界という) 以上になると左右対称的な蝶形に移行する。これは大きな電解の印加によって強誘電的な分域が極性を変え、別の分極状態に移行するためである。なお圧電材料は電界分極の前処理が必要なため時効が問題になる。一方電歪性を示す PMN は分域が存在しないか、非常に小さいため履歴がほとんどない。電歪は圧電歪みと同程度の大きさ ($\Delta l/l \sim 10^{-3}$) のものもあるが、誘電率が大きいので、高速反復的使用にはあまり適さない。しかし電歪材料は電界分極処理を必要としないため、時効がなく、高温での保持や大荷重の印加といった過酷な使用条件でも劣化しにくい。

強誘電体の歪み ε と印加電圧 \bar{E} との関係は、誘起分極 $\Delta P = \bar{\varepsilon}_0 \bar{\varepsilon} \bar{E}$ と近似し、ギブスの自由エネルギーより次式で与えられる。

$$\varepsilon = Q(P_s + \Delta P)^2 = QP_s^2 + 2Q\bar{\varepsilon}_0\bar{\varepsilon}P_s\bar{E} + Q\bar{\varepsilon}_0^2\bar{\varepsilon}^2\bar{E}^2 \quad (1)$$

ただし P_s は自発分極、 $\bar{\varepsilon}$ は比誘電率で、右辺第1項は自発歪み、第2項は電界に比例する圧電歪み、第3項は電界の2乗に比例する電歪を示す。なお Q は温度にあまり依存しない定数、 $\bar{\varepsilon}_0$ は真空中の誘電率で、 $d = 2Q\bar{\varepsilon}_0\bar{\varepsilon}P_s$ は圧電定数、 $M = Q\bar{\varepsilon}_0^2\bar{\varepsilon}^2$ は電歪定数といわれる。

強誘電体では自発的な双極子の配列が結晶内で平行で向きが同じ極性結晶であったが、双極子配列が結晶内で平行で向きが逆の反極性状態を示す反強誘電体がある。図 3.3-5 のように常誘電体は非極性体で分極 P と電圧 \bar{E} の関係は直線になり、強誘電体は極性体で分極と電圧の関係は履歴を示し、反強誘電体は反極性体である。反強誘電体では、低電界のうち電界に比例した誘起分極だけがみられるが、ある電界をこえると電界誘起強制相転移を起こし強誘電体となり、分極は E に対して履歴曲線を描く。反強誘電体の歪みは一次元二副格子モデルで説明できる。隣り合う副格子 a と b がそれぞれ副格子分極 P_a と P_b をもつ超格子を形成すると考え、格子間の相互作用を Ω で表すと図 3.3-6 のように表される。常誘電相における誘起歪みは誘起強誘電分極と次式で関係づけられる。

$$\varepsilon = \frac{Q}{4}(1 + \Omega)(P_a + P_b)^2 \quad (2)$$

相転移温度以下では自発歪みは自発反強誘電分極と次式で関係づけられる。

$$\varepsilon = \frac{Q}{4}(1 - \Omega)(P_a - P_b)^2 \quad (3)$$

$Q > 0$ であっても Ω の値に応じて、自発歪みが正にも負にもなり得る点が、強誘電体の場合と著しく異なる。 P_a と P_b が平行で向きが反対の反強誘電相の場合には Ω は歪みを大きくするように働き、 P_a と P_b が平行で向きが反対の反強誘電相の場合には Ω は歪みを小さくするように働く。反強誘電相と強誘電相の電界誘起転移に伴う図 3.3-7 のような大きな歪みのジャンプも図 3.3-6 から理解できる。なお相転移の応答速度は比較的遅く、50Hz ほどである。

セラミックの圧電材料、電歪材料、反強誘電材料がアクチュエータ材料としてよく用いられるが、もう一つ特徴あるアクチュエータとして高分子圧電材料がある。これは弾性的で軟らかく、成形加工が容易で、色々な形状や大面積が可能で、衝撃に強く、音響インピーダンスが固体と液体の中間の値になるため、水や人体とのインピーダンス整合が取り易い。代表的なものとしてポリフッ化ビニリデン (PVDF) がある。セラミックス圧電材料の PZT と高分子圧電材料の PVDF の諸特性は表 3.3-1 のようになる。圧電材料をアクチュエータとして用いる際に重要となる d 定数 (電界あたりの歪みを示す) に関しては、高分子圧電材

料がセラミックス圧電材料より1桁小さいことがわかる。一方センサとして用いる際に重要となる g 定数（単位応力あたりの電界強度を示す）に関しては、PVDFがPZTより1桁大きいことがわかる。これはPVDFの誘電率 $\bar{\epsilon}$ がPZTと比較して約2桁も小さく、それにともない静電容量が小さくなるが、逆に発生電荷当たりの電界強度または電圧が大きくなるからである。なお $g = d / \bar{\epsilon}$ の関係がある。このことからセラミックス圧電材料はアクチュエータに、高分子圧電材料はセンサに適しているといえる。

3.3.2 圧電複合材料

アクチュエータとセンサの両方を兼ね備える材料として、セラミックス圧電材料と高分子とを複合化したものがある。⁽⁴⁾ 一般に2相複合体は、複合体中の各相の連続性を0、1、2、3次元的なものに分類し、その組み合わせによって10種類の連結形態に分類される。例えば、図3.3-8に示すように、圧電セラミックスの繊維を高分子マトリックスの中に1次元的に配列した圧電複合体の接続性は1-3である。一方圧電セラミックスの微粒子を高分子マトリックスの中に分散した圧電複合体の接続は0-3である。種々の接続性を有する圧電高分子複合材料の諸特性を表3.3-2に示す。高分子圧電材料の固有の問題である低い圧電 d 定数は、圧電セラミックスと高分子の複合化によりかなり改善されることがわかる。なお高分子圧電材料の高い圧電 g 定数は、複合化によって僅かしか低下しない。結局圧電セラミックスと高分子の複合化によりバランスのとれた d 定数と g 定数とを実現することができ、アクチュエータとセンサの両機能を兼ね備えた高機能性材料を創製するための有力な方法であるといえる。

最近開発された圧電塗料は、PZT微粉末を顔料とし、エポキシ樹脂をバインダとする常温乾燥型塗料で、一種のPZTと高分子の複合化であるといえる。⁽⁵⁾ この塗料を構造材料の表面に塗布し乾燥させれば、PZT体積含有量25~53%、厚さ25~175 μm の塗膜が得られる。この表面に電極とリード線を印刷し、この電極と構造材料自身とで最高450kV/cmまでの高電界を印加すれば、圧電塗膜が得られる。図3.3-9にこの模式図を示す。塗料は大面積塗布性、表面形状適応性、可燃性、軽量性等の特長を有しており、今後の応用が期待できる。ある分極電界下で得られる圧電定数とその電界下において測定される電気伝導度との間には、極めて良い相関があり、PZT・エポキシ複合系塗膜の電気伝導度によって塗膜中に分散したPZT粒子に作用する電界の強さが決定され、さらにその電界の強さによってPZT粒子の分極挙動が決定される。したがって複合系塗膜の電気伝導度を制御することにより圧電定数を向上させることができる。構造材料に圧電塗料を塗装することにより、歪ゲージのように

歪みを検出したり、AEセンサのように材料の亀裂発生を検出したりできるようになり、構造物の安全性と信頼性を向上させることができるようになる。

高性能センサやデバイスとして有望な傾斜機能圧電平板の提案もある。⁽⁶⁾ 表面の LiTaO_3 の圧電材料に対して裏面は10倍の弾性定数、1/10の圧電定数、1/2の誘電率、2倍の密度の材料からなり、板厚方向に材料の物性値が放物線に変化する場合には弾性表面波が発生しやすく、分極軸を板厚方向にとると剪断表面波のみが発生しやすくなる。剪断表面波のモードは図 3.3-10 のようになる。これを用いると電気機械結合係数の高い、即ち電気エネルギーと機械エネルギーの変換特性のよい高性能センサやデバイスが可能となる。

3.3.3 圧電センサとアクチュエータ

圧電効果を利用して、圧電材料に加わる力に比例する電気信号を測る加速度センサ、振動センサ、圧力センサ、接触センサ、AEセンサならびに弾性表面波を利用した温度、湿度センサなど数多くの圧電センサが開発されている。⁽⁷⁾ 今後はセンサ自身に情報あるいは信号処理の機能を付与した知的なセンサの開発研究が盛んになるであろう。⁽⁸⁾ 測定条件の最適化や一次信号処理以上の機能である自己診断や修復性をもたせ、適応性をもつ生物のようなセンシングシステムも可能となるであろう。

圧電材料を用いた代表的なアクチュエータとして、圧電セラミックスを電極と共に多数積層し、図 3.3-11 のように外部電極をつけ、積層方向に大きな縦効果歪みを発生させる積層型がある。変位・力特性は、図 3.3-12 のように積層方向に負荷がかかると負荷に比例して変位は減少する。また長さ方向に伸縮する横効果歪みを利用する圧電平板を2枚貼り合わせた図 3.3-13 のような構造で、一方が伸びたとき他方が縮み、全体として屈曲するバイモルフ型がある。これはセラミックス板を接着剤で貼り合わせるだけで容易に作ることができ、力は弱いが発生変位が大きい。表 3.3-3 のような積層型とバイモルフ型の変位と電圧の関係には、図 3.3-14、15 のような履歴特性がある。更にリニアモータのように直線的に動くインチワーム型がある。これは図 3.3-16 のように、3個の管状素子からなり、位相をずらして伸縮を繰り返すことにより左右に移動させることができる。

3.3.4 知的圧電複合材料システム

圧電材料はセンサにもアクチュエータにも用いることができるため、構造材料と一体化して、自らが検知し、自らが判断し、自らが結論を出し、自らが指令し行動を起こす機能を併せ有する材料、即ち知的圧電複合材料のシステムを作ることができる。以下にその例

を示す。

(a) 知的傾斜機能材料

耐熱傾斜機能材料は、耐熱材料と強度材料を含有する割合を連続的に変化させて、耐熱性と強度の両機能の条件を満足させようとする材料で、図 3.3-17 のように模式化される。

⁽⁹⁾ 通常の複合材料には、母材と強化材の間に界面が存在し、界面がトラブルの原因となるが、傾斜機能材料は界面を持たないので機能を高めることができる。二種類の材料を最適傾斜になるように混合し、耐熱材料側が超高温、強度材料側が室温の場合にも熱応力が緩和され許容範囲に入るようにできる。しかし、熱変形を許さなければ困難である。熱応力と熱変形の両方共が許容範囲に入るように二種類の材料の混合比を傾斜させることは容易でない。また耐熱材料側が超高温で強度材料側が室温の場合に熱応力が緩和され、熱変形も小さいとしても、未使用状態で耐熱材料側と強度材料側が同じ温度条件の場合には、逆に熱応力と熱変形が大きくなり不具合が発生することになる。これを避けるには、環境や使用条件が変化しても、常に最適な状態になり適応できる材料、即ち知的材料の視点を傾斜機能材料に導入することが必要である。

図 3.3-18 のように、傾斜機能材料 (FGM) の低温の強度材料側に圧電材料 (PEM) を接着することにより知的傾斜機能材料システムが実現できる。⁽¹⁰⁾ 耐熱材料 (ZrO_2) 側が $T_1 = 1100^\circ C$ 、強度材料側 (Ti-6Al-4V) が $T_2 = 0^\circ C$ の場合に、二次元問題として解析する。

温度を T 、熱伝導率を λ とすると、熱伝導方程式は次式で与えられる。

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right) = 0. \quad (1)$$

板の上下面の熱的境界条件は次式で与えられる。

$$\begin{aligned} T &= T_1(x) & \text{on} & \quad y = -h_b, \\ T &= T_2 & \text{on} & \quad y = h_p, \\ \frac{\partial T}{\partial x} &= q & \text{on} & \quad x = 0 \quad \text{or} \quad x = l/2. \end{aligned} \quad (2)$$

有限要素を用いると次の代数方程式が得られる。

$$[G]\{T\} = \{g\}. \quad (3)$$

板の上下面の温度差が大きいと、 λ は T の関数となり、 $[G]$ も T の関数となるため、上式は非線形の式になる。

傾斜機能材料中の応力は、温度変化、外力、圧電効果により発生する。応力 σ と歪み ε の関係は次式で与えられる。

$$\{\sigma\} = [D](\{\varepsilon\} - \{\varepsilon_0\}), \quad (4)$$

ただしヤング率を E 、ポアソン比を ν とすると、

$$\{\sigma\} = \begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix}, \quad \{\varepsilon\} = \begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix},$$

$$[D] = \frac{E}{1-\nu^2} \begin{bmatrix} 1 & \nu & 0 \\ \nu & 1 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1-\nu}{2} \end{bmatrix}.$$

有限要素法を用いると次式を得る。

$$[K]\{u\} + \{f\} = 0. \quad (5)$$

ただし $[K]$ 、 $\{u\}$ 、 $\{f\}$ はそれぞれ剛性マトリックス、節点変位ベクトル、等価節点荷重である。

$$\{f\} = \int_V [N]^T \{b\} dV + \int_A [B]^T \{t\} dA + \int_V [B]^T [D] \{\varepsilon_0\} dV, \quad (6)$$

ここで $\{b\}$ は物体力の節点ベクトル、 $\{t\}$ は表面力の節点ベクトルで、 $[N]$ と $[B]$ は形状関数とその微分からなる行列式である。初期歪み ε_0 は次式で与えられる。

$$\{\varepsilon_0\} = \begin{Bmatrix} \alpha T \\ \alpha T \\ 0 \end{Bmatrix} \quad \text{in FGM}, \quad (7)$$

$$\{\varepsilon_0\} = \begin{Bmatrix} \alpha T + d_{31} E_y \\ \alpha T + d_{33} E_y \\ 0 \end{Bmatrix} \quad \text{in PEM}, \quad (8)$$

ただし圧電材料の3軸を y 軸と一致させ、 y 方向の電圧を E_y とする。

耐熱セラミックス (ZrO_2) の物性値は $0^\circ\text{C} \leq T \leq 1100^\circ\text{C}$ で次式のように T の関数として与えられる。

$$\begin{aligned} \lambda &= 1.71 + 0.21 \times 10^{-3} T + 0.116 \times 10^{-6} T^2 && \text{W/mK}, \\ E &= 132.2 - 50.3 \times 10^{-3} T - 8.1 \times 10^{-6} && \text{GPa}, \\ \alpha &= 13.31 \times 10^{-6} - 18.9 \times 10^{-9} T + 12.7 \times 10^{-12} T^2 && \text{K}^{-1}, \\ \nu &= 1/3 \\ \sigma_B &= 148.1 + 1.184 \times 10^{-3} T - 31.4 \times 10^{-6} T^2 && \text{MPa}. \end{aligned} \quad (9)$$

金属材料 $\text{Ti}-6\text{Al}-4\text{V}$ の物性値は $0^\circ\text{C} \leq T \leq 1100^\circ\text{C}$ で次式のように T の関数として与えられる。

$$\begin{aligned}
\lambda &= 1.1 \times 0.0177T && \text{W/mK,} \\
E &= 122.7 - 0.05657T && \text{GPa,} \\
\alpha &= \begin{cases} 7.43 \times 10^{-6} + 5.56 \times 10^{-9}T \\ -2.69 \times 10^{-12}T^2 \\ 11.4 \times 10^{-6} \end{cases} && \begin{matrix} (0^\circ\text{C} \leq T \leq 830^\circ\text{C}) \\ (830^\circ\text{C} \leq T \leq 1100^\circ\text{C}) \end{matrix} && \text{K}^{-1}, \quad (10) \\
\nu &= 0.2888 + 32.0 \times 10^{-6}T \\
\sigma_B &= 1252.0 - 0.8486T && \text{MPa.}
\end{aligned}$$

ただし λ 、 α と σ_B はそれぞれ熱伝導率、熱膨張係数、許容応力である。

上記の耐熱セラミックスと金属材料が理想的に混ぜられ、金属材料と空孔の体積比が次式で与えられるとする。

$$\begin{aligned}
V_m &= (1-y)^m, \\
P &= Ay(1-y)^n. \quad (11)
\end{aligned}$$

最適設計の繰り返し計算をすると、 $m=2$ 、 $n=1.5$ 、 $A=3$ が求められ、図 3.3-19 のようになる。温度分布、熱伝導率、熱膨張係数、ヤング率、ポアソン比は板厚方向に図 3.3-20～22 のように分布する解が得られている。熱変形と熱応力は図 3.3-23、24 のよになり、圧電アクチュエータに電圧を加えることにより熱応力が許容範囲にありながら熱変形を抑制できる。これは傾斜機能材料にアクチュエータ材料を加え知的化することにより、互いに矛盾する熱応力と熱変形を同時に緩和させた例である。センサ機能をアクチュエータ材料の一部に持たせ、コントロール機能を有する演算ボードを組み込めば、環境の変化により高温側の温度条件が刻々変化しても、常に最適な状態に維持できることになるであろう。

(b)知的パネル

片持薄板の両面に圧電フィルムを接着し、片面の圧電フィルムをセンサ、他の片面の圧電フィルムをアクチュエータとして用い、コントローラとして外部のパソコンを用いた例を図 3.3-25 に示す。⁽¹¹⁾この片持薄板を一樣な平行気流中に設置すると、ある流速以上で薄板はフラッタを起こし、激しく振動する。フラッタが発生してからアクチュエータを働かせても、圧電フィルムの力が弱いため、フラッタを止めることはできなかった。しかし、流速が低くてフラッタが起きない状態から制御を加えておけば、フラッタの発生を感知し、応答振幅が小さいときにアクチュエータが働き、フラッタを止めてしまうことができる。したがって、図 3.3-26 のように流速が通常のフラッタ流速を超えて高くなるまでフラッタを起こさないパネルが実現できる。なおアクチュエータが強い力を発生できれば、フラッタを起こすようになる限界流速を非常に高くすることができる。ただしこの問題ではパネルに加わる流体力を解析的に求めることが困難なため、古典制御理論のデジタル

PID制御則を用いた。

(C)知的円筒殻

圧電フィルムを2枚接着し、それで円筒殻を作製し、圧電フィルムの一部の電極を剥し、図3.3-27のようにセンサとアクチュエータとして用いる。⁽¹²⁾ 圧電フィルムは異方性であるため、円筒殻を軸方向に曲げるモーメントをアクチュエータは発生しないと見做せる。実際は、積層円筒殻であるが、等方性で均質な円筒殻と見做し、そのヤング率、ポアソン比、密度、厚さ、半径、長さをそれぞれ E 、 ν 、 ρ 、 h 、 R 、 L とし、変位の x 、 y 、 z 方向成分を U 、 V 、 W とすると、円筒殻のフリュゲ (Flügge) 型の運動方程式は次式で与えられる。

$$\left. \begin{aligned} & u_{,\xi\xi} + \nu_1(1+k)u_{,\eta\eta} + (1-\nu_1)v_{,\xi\eta} - \nu w_{,\xi} \\ & \quad + k\kappa(w_{,\xi\xi\xi} - \nu_1 w_{,\xi\eta\eta}) - \frac{1}{\kappa\Omega^2}u_{,tt} = 0 \\ & (1-\nu_1)u_{,\xi\eta} + \nu_1(1+3k)v_{,\xi\xi} + (1+\nu_1)k\kappa w_{,\xi\xi\eta} \\ & \quad + v_{,\eta\eta} - w_{,\eta} - \frac{1}{\kappa\Omega^2}v_{,tt} - \bar{M}_p \delta(\eta_1, \eta_2) H(\xi_1, \xi_2) = 0 \\ & -\nu u_{,\xi} - v_{,\eta} + k\kappa^2 \bar{\nabla}^4 w + k\kappa(u_{,\xi\xi\xi} - \nu_1 u_{,\xi\eta\eta}) \\ & \quad + (1+\nu_1)k\kappa v_{,\xi\xi\eta} + (1+k)w + 2k\kappa w_{,\eta\eta} + \frac{1}{\Omega^2}w_{,tt} \\ & \quad + \kappa\delta(\xi - \xi_c)[\delta(\eta - \eta_c) + \delta(\eta - \eta_c - \pi R/L)] \bar{P}_0 \sin pt \\ & \quad - \kappa \bar{M}_p \delta_{,\eta}(\eta_1, \eta_2) H(\xi_1, \xi_2) = 0 \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

ただし $\delta(\cdot)$ と $H(\cdot)$ をそれぞれデルタ関数とヘビサイド関数として、

$$\begin{aligned} \delta(\eta_1, \eta_2) &= \delta(\eta - \eta_1) - \delta(\eta - \eta_2) \\ H(\xi_1, \xi_2) &= H(\xi - \xi_1) - H(\xi - \xi_2) \end{aligned} \quad (13)$$

ここでコンマ後の添字はそれについての偏微分を表し、 P_0 と p は強制力の振幅と角振動数である。上式では次の無次元量を用いている。

$$\left. \begin{aligned} \xi &= \frac{x}{L}, \quad \eta = \frac{y}{L}, \quad \bar{\nabla}^2 = \frac{\partial^2}{\partial \xi^2} + \frac{\partial^2}{\partial \eta^2} \\ u &= \frac{RU}{Lh}, \quad v = \frac{RV}{Lh}, \quad w = \frac{W}{h} \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

$$k = \frac{h^2}{12R^2}, \quad \kappa = \frac{R^2}{L^2}, \quad \Omega = \frac{E}{\rho R^2(1-\nu^2)} \quad (15)$$

円筒殻の下端が固定で、上端が自由な場合の境界条件は次式で表せる。

$$w = w_{,\xi} = u = v = 0 \quad (\xi = 0). \quad (16)$$

$$\left. \begin{aligned}
S_x = 0 & : \kappa w_{,\xi\xi\xi} + (2 - \nu)\kappa w_{,\xi\eta\eta} + u_{,\xi\xi} \\
& \quad + (1 + \nu_1)v_{,\xi\eta} - \nu_1 u_{,\eta\eta} = 0 \\
M_x = 0 & : \kappa w_{,\xi\xi} + u_{,\xi} + \nu(\kappa w_{,\eta\eta} + v_{,\eta}) = 0 \\
N_x = 0 & : u_{,\xi} + \nu(v_{,\eta} - w) + \kappa k w_{,\xi\xi} = 0 \\
T_x = 0 & : u_{,\eta} + (1 + 3k)v_{,\xi} + 3\kappa k w_{,\xi\eta} = 0
\end{aligned} \right\} \quad (\xi = 1) \tag{17}$$

モード展開法で、強制振動を解く。即ち強制振動変位を自由振動モードで次式のように表す。

$$\left. \begin{aligned}
u &= \sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^m \Phi_{Uij}(\xi) q_{ij}(t) \\
v &= \sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^m \Phi_{Vij}(\xi) q_{ij}(t) \\
w &= \sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^m \Phi_{Wij}(\xi) q_{ij}(t)
\end{aligned} \right\} \tag{18}$$

ただし $\Phi_{Uij}(\xi)$ 、 $\Phi_{Vij}(\xi)$ 、 $\Phi_{Wij}(\xi)$ は (i, j) 次のモード関数で、 i と j はそれぞれ軸方向波数と周方向波数である。式(18)を式(1)に代入し、ガレルキン法を用い、減衰項を加えると次式を得る。

$$\begin{aligned}
& \omega_{lk}^2 (q_{lk} + c q_{lk}) + \ddot{q}_{lk} \\
& = \kappa \left[\bar{M}_p \int_{\xi_1}^{\xi_2} \{ \Phi_{Ulk}(\xi, \eta_2) - \Phi_{Ulk}(\xi, \eta_1) \} d\xi \right. \\
& \quad + \bar{M}_p \int_{\xi_1}^{\xi_2} \{ \Phi_{Wlk,\eta}(\xi, \eta_2) - \Phi_{Wlk,\eta}(\xi, \eta_1) \} d\xi - \\
& \quad \left. \{ \Phi_{Wlk}(\xi_e, \eta_e) + \Phi_{Wlk}(\xi_e, \eta_e + \pi R/L) \} \bar{P}_0 \sin pt \right] \\
& \quad (l = 1, \dots, m), (k = 1, \dots, n)
\end{aligned} \tag{19}$$

上式を状態方程式で表すと次式のようになる。

$$\dot{\mathbf{X}}(t) = \mathbf{A}_c \mathbf{X}(t) + \mathbf{B}_c M_p(t) \tag{20}$$

$$\mathbf{X}(t) = [q_1(t) \ \cdots \ q_n(t) \ \dot{q}_1(t) \ \cdots \ \dot{q}_n(t)]^T \tag{21}$$

$$\mathbf{A}_c = \left[\begin{array}{c|c} \mathbf{O} & \mathbf{I} \\ \hline -\Omega & -c\Omega \end{array} \right], \quad \mathbf{B}_c = \left[\begin{array}{c} \mathbf{O} \\ \Theta \end{array} \right]$$

$$[\Omega] = \begin{bmatrix} \omega_1^2 & & 0 \\ & \ddots & \\ 0 & & \omega_n^2 \end{bmatrix}$$

$$[\Theta] = k_3 \begin{bmatrix} \int_{\xi_1}^{\xi_2} \Phi_{W1}(\xi) d\xi \{ \Psi'_1(\eta_2) - \Psi'_1(\eta_1) \} \\ \vdots \\ \int_{\xi_1}^{\xi_2} \Phi_{Wn}(\xi) d\xi \{ \Psi'_n(\eta_2) - \Psi'_n(\eta_1) \} \end{bmatrix}$$

圧電センサからの出力電圧はセンサ部分の変形に依存し、センサ表面の電荷密度と歪みとの関係は次式で与えられる。

$$q^c = e_{31}S_{11} + e_{32}S_{22} + e_{33}S_{33} + e_{33}\bar{E}_3 \quad (23)$$

ただし e_{31} 、 e_{32} 、 e_{33} は圧電定数、 S_{11} 、 S_{22} 、 S_{33} は 1、2、3 方向の歪みで、 \bar{E}_3 は 3 方向の電界である。式(18)、(23)よりセンサからの出力電圧 $V(t) = Q(t)/C_t$ が次式で求められる。

$$Q(t) = \sum_{i=1}^n Q_i q_i(t) \quad (24)$$

$$Q_i = \iint_S q_i^c d\xi \eta, \quad q_i^c = \frac{h}{R} \left(\frac{\partial \Phi_{ui}}{\partial \xi} + \frac{\partial \Phi_{vi}}{\partial \eta} + \Phi_{wi} \right)$$

ただし C_t は全体の容量で、 S はセンサの面積である。 $V(t)$ を $y_c(t)$ で表すと出力方程式は次式のようになる。

$$y_c(t) = C_c X(t) \quad (25)$$

$$C_c = [Q_1/C_t \cdots Q_n/C_t \ 0 \cdots 0]$$

圧電アクチュエータに印加される電圧 V_p と発生する曲げモーメント M_p の関係は次式で表される。

$$M_p = (h - h_p) e_{31} V_p \quad (26)$$

上式はコントロール入力として式(20)で用いられる。

使用した円筒殻の形状や物性値を表 3.3-4 に、4 個の固有振動数を表 3.3-5 に示す。

制御実験では(1、4)モードが励振されるように工夫し、(1、4)と(1、6)のモードのみを考慮に入れて制御された。解析モデルと実験モデルの間には幾何学的にも材料的にも違いがあり、高次の振動モードを無視しているため、ロバスト制御を用いなければならない。そこで図 3.3-28 のような拡張制御系を考える。ここで G_{nom} は解析モデル、 Δ_G はモデル誤差、 K はコントローラ、 u_c 、 d 、 w_c 、 y_c 、 e 、 z_c はそれぞれコントロール入力、ノイズ入力、擾乱入力、センサ出力、誤差出力、擾乱出力である。また W_{del} と W_p はそれぞれモデル誤差と制御性能の重みである。実際のコントロール対象の伝達関数は次式で表される。

$$G = G_{nom}(1 + \Delta_G W_{del}) . \quad (27)$$

本問題ではH無限大制御理論によって、 d 、 w_c から e 、 z_c への伝達関数のH無限大ノルムが1以下になるようなコントローラ K を求めることができない。しかし μ シンセシスを用いるとコントローラ K が求められる。誤差と(1、4)モードの固有振動数を考慮して次式の重みを用いる。

$$W_{del}(s) = \frac{3(s + 3000)}{s + 60000} \quad (28)$$

$$W_p(s) = \frac{0.5(s + 4000)}{s + 200} \quad (29)$$

上式の重みのゲインを示すと図 3.3-29 のようになる。

ハンケル近似で次数を6に減じて、コントローラ K を求めると次式のようにになる。

$$K(s) = \frac{80.7(s + 2.05 \times 10^9)(s + 2.06 \times 10^4)}{(s + 3.44 \times 10^6)(s + 5.46 \times 10^4)} \\ \times \frac{(s + 23.3 + 287.5j)(s + 10.1 + 176.7j)}{(s + 4.85 \times 10^3)(s + 45.3)} \\ \times \frac{(s + 10.1 - 176.7j)(s + 10.1 + 176.7j)}{(s + 1.455 - 177.1j)(s + 1.455 + 177.1j)} \quad (30)$$

図 3.3-30 に最大特異値と μ 限界を示す。いずれも1以下で条件を満足していることがわかる。

実験は図 3.3-31 のような装置で行い、その結果は図 3.3-32 の(b)、(d)のようになる。これはシミュレーション結果の図 3.3-32 の(a)、(c)とほぼ一致し、強制振動の振幅が制御により1/3になることがわかる。

次に励振力が自明の場合には外乱相殺法によっても制振できることを示す。外乱相殺法とは励振される振動とは逆位相の振動をアクチュエータにより加える方法である。核磁気

共鳴装置の高性能化の妨げになっている勾配コイルドラムの電磁力による振動を抑制する。⁽¹³⁾⁽¹⁴⁾ 勾配コイルドラムを図 3.3-3 3 のように円筒殻でモデル化し、その運動方程式を状態方程式で表すと式(31)のようになる。

$$\dot{\mathbf{X}}(t) = \mathbf{A}_c \mathbf{X}(t) + \mathbf{B}_1 u_c(t) + \mathbf{B}_2 \bar{p}(t) \quad (31)$$

$$\mathbf{X}(t) = [q_1(t) \cdots q_n(t) \dot{q}_1(t) \cdots \dot{q}_n(t)]^T$$

$$\mathbf{A}_c = \left[\begin{array}{c|c} \mathbf{O} & \mathbf{I} \\ \hline -\Omega^2 & -c\Omega \end{array} \right], \quad [\Omega] = \begin{bmatrix} \omega_1 & & 0 \\ & \ddots & \\ 0 & & \omega_n \end{bmatrix} \quad (32)$$

ただし $u_c(t)$ は圧電フィルムに加える制御入力電圧、 \bar{p} はコイルの単位長さに作用する電磁力である。システムの出力方程式は次式で表される。

$$y_c(t) = C_c \mathbf{X}(t) \quad (33)$$

ただし C_c はセンサの位置に依存する。図 3.3-3 4 に実験装置を示す。

図 3.3-3 5 は(4, 7)モードの共振点で励振される強制振動の制御実験とシミュレーション結果で、破線と実線は制御なしと制御ありのセンサ出力を表す。シミュレーションでは振幅がほとんど0にまで減らされているが、実験では、高周波のノイズが残っていることがわかる。しかし本方法は十分使えることがわかる。

3.3.5 むすび

圧電材料は単体でセンサ、アクチュエータ、デバイスなどとして数多く用いられ、現代の科学技術を支えている重要な材料となっている。またセラミック・プラスチック複合圧電材料としてより高い機能を発現している。したがって、最近注目を集めている知的複合材料の構成要素として、圧電材料は不可欠なものとなっている。知的圧電複合材料はまだ研究が緒についたばかりで、センサとアクチュエータ機能を発現する圧電複合構造材料ができた段階である。今後はコントローラ・チップを組み込み、コントローラ機能をも有する完全な知的複合材料を創製する研究が行われるようになるであろう。

参考文献

- (1) 岡崎清：セラミック誘電体工学、学献社(1977).
- (2) 内野研二：圧電/電歪アクチュエータ、森北出版(1986).
- (3) 岡崎清：電子セラミックスへの招待、森北出版(1986).
- (4) 日本セラミックス協会編：セラミックスコンポジット、培風館(1989).
- (5) 江草・岩沢：インテリジェント材料、Vol.2、No.3 (1982), 22-27.
- (6) 劉桂栄・谷順二：日本機械学会論文集C編、58巻547号(1992)、504-507.
- (7) 一ノ瀬昇：圧電セラミックス新技術、オーム社(1991).
- (8) 大場良次：インテリジェント・センサ技術、オーム社(1990).
- (9) 未踏科学技術協会編：傾斜機能材料、工業調査会(1993).
- (10) J.Qiu, J.Tani and T.Takagi : Journal of Technical Physics, Vol.35, No.1-2 (1994), pp.99-107.
- (11) Y.Z.Liu, J.Tani, S.Chonan : Proceedings of 1993 JSME International Conference on Advanced Mechatronics, (1993), pp.44-46.
- (12) J.Qiu and J.Tani : Proceedings of 2nd International Conference on Intelligent Materials, (1994), pp.1003-1014.
- (13) J.Qiu, J.Tani, T.Takagi and V.Parton : Proceedings of 1993 JSME International Conference on Advanced Mechatronics, (1993), pp.38-43.
- (14) 裘進浩・谷順二・大友規矩雄：MRI装置用勾配コイルドラムのインテリジェント化、日本機械学会論文集(C編)に投稿中.

表 3.3-1 各種圧電性高分子材料の諸特性

	密度 (g/cm^3)	弾性率 (GPa)	比誘電率	d 定数 (10^{-12}C/N)	g 定数 (10^{-3}Vm/N)	最高使用温度 ($^{\circ}\text{C}$)
PVDF	1.78	3.0	13	20	174	80
PZT	7.50	83.3	1200	110	10	250

表 3.3-2 各種圧電性高分子複合材料の諸特性

	接続性	密度 (g/cm^3)	弾性率 (GPa)	比誘電率	d 定数 (10^{-12}C/N)	g 定数 (10^{-3}Vm/N)
PZT/PVDF	0-3	5.5	2.6	120	90	85
PZT/ゴム	0-3	6.2	0.08	73	52	140
PZT/エポキシ	1-3	3.0	19	400	300	75
PZT/シリコンゴム(レフ'リカ)	3-3	3.3	3	40	110	280
PZT/シリコンゴム(ラタ'-)	3-3	4.5	19	400	250	60

表 3.3-3 圧電アクチュエータの形状

名 称	寸 法 [mm]
積 層 1	11.4 × 10.8 × 18.0
積 層 2	6.0 × 6.0 × 18.0
積 層 3	6.0 × 6.0 × 9.0
バイモルフ 1	13.3 × 49.0 × 0.9
バイモルフ 2	12.0 × 40.5 × 0.7
バイモルフ 3	10.5 × 33.0 × 0.7

表 3.3-4 試験片パラメータ

長さ	L (mm)	347.5
半径	R (mm)	100
ヤング率	E (N/in ²)	2.0×10^9
内部減衰係数	c (s)	3.0×10^{-4}
密度	ρ (kg/m ³)	1.78×10^3
圧電フィルムの厚さ	h_p (mm)	0.052
殻の厚さ	h (mm)	0.130
アクチュエータの位置 (mm)	(x_1, y_1)	(10.0, 120.0)
	(x_2, y_2)	(345.0, 170.0)
センサの位置 (mm)	(x_1, y_3)	(10.0, 25.0)
	(x_2, y_4)	(345.0, 75.0)
加振点	(x_e, y_e) (mm)	(42.0, 0.0)

表 3.3-5 円筒殻の固有振動数

軸方向波数 (i)	1	1	1	1
周方向波数 (j)	3	4	5	6
理論値 (Hz)	49.20	30.48	24.60	26.6
実験値 (Hz)	55.0	33.1	25.8	27.1

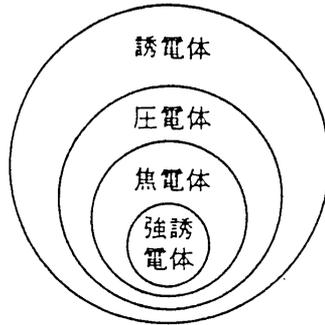


図 3.3-1 強誘電体の位置づけ

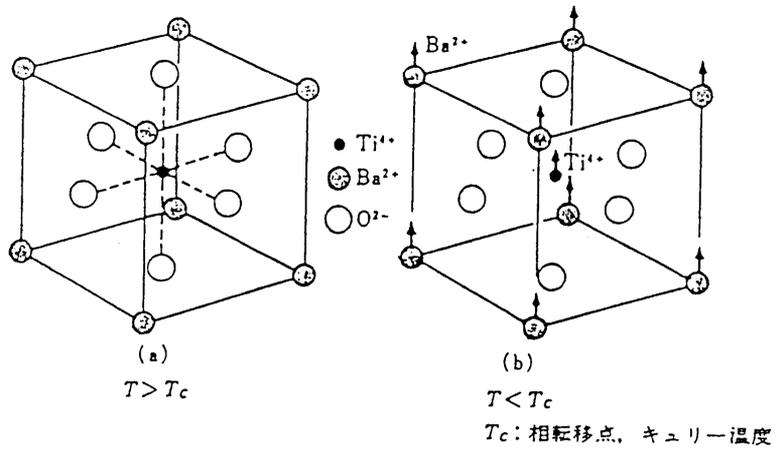


図 3.3-2 チタン酸バリウム (BaTiO_3) の結晶構造

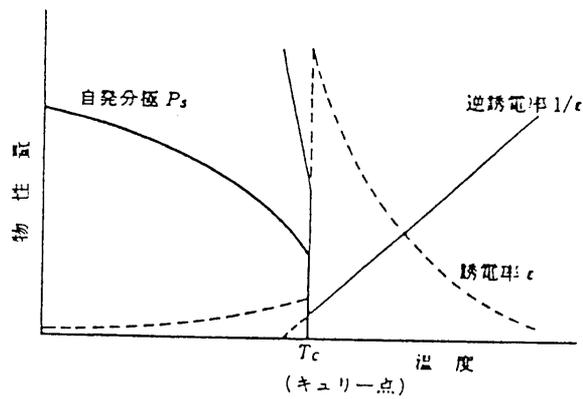


図 3.3-3 強誘電体における自発分極、誘電率の温度依存性

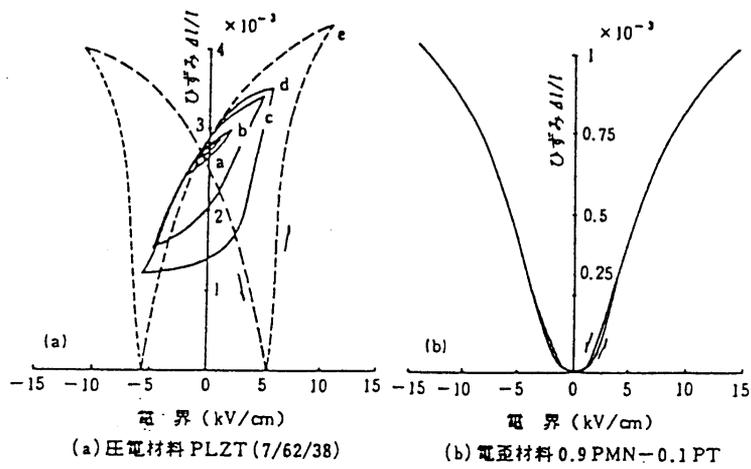


図 3.3-4 セラミックスの電界誘起歪み

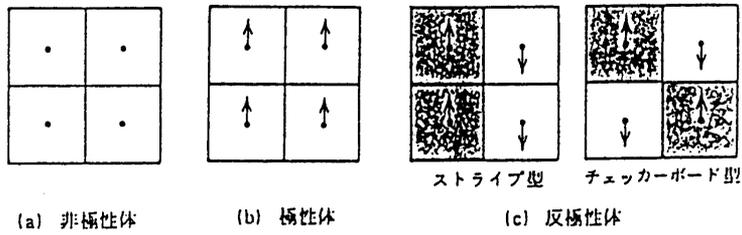


図 3.3-5a 非極性体、極性体および反極性体における自発電気双極子の配列の模式図

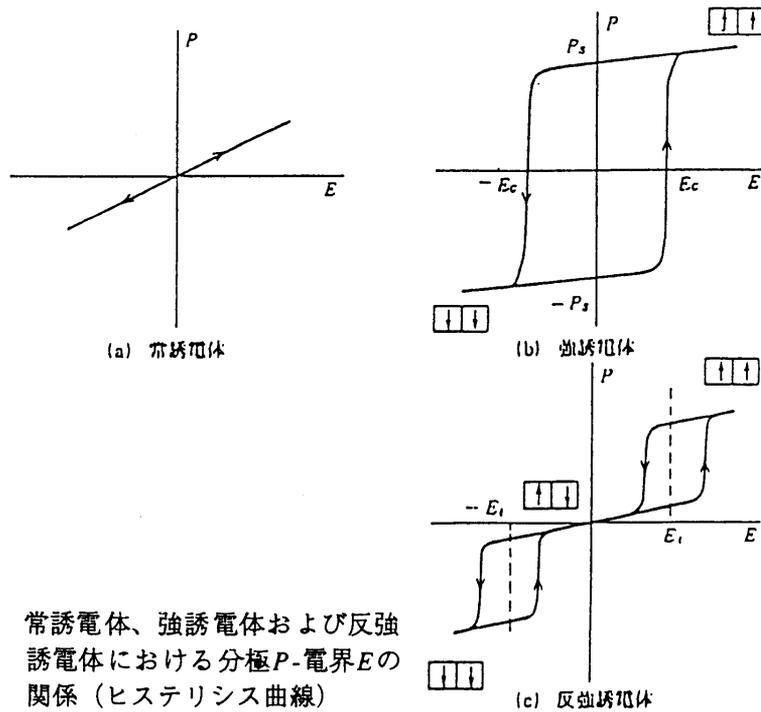


図 3.3-5b 常誘電体、強誘電体および反強誘電体における分極 P -電界 E の関係 (ヒステリシス曲線)

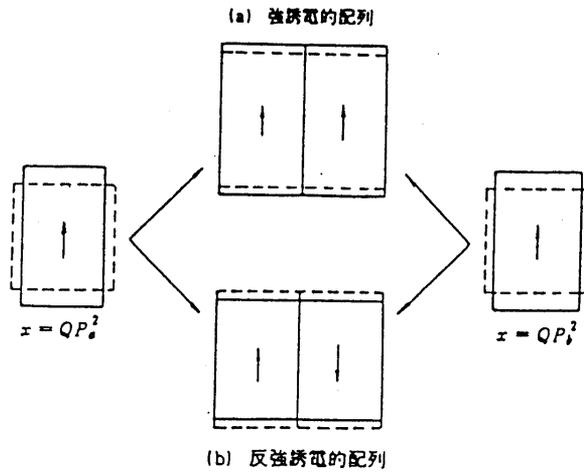


図 3.3-6 電歪効果における副格子相互作用の直感的説明図 ($\Omega > 0$ の場合)

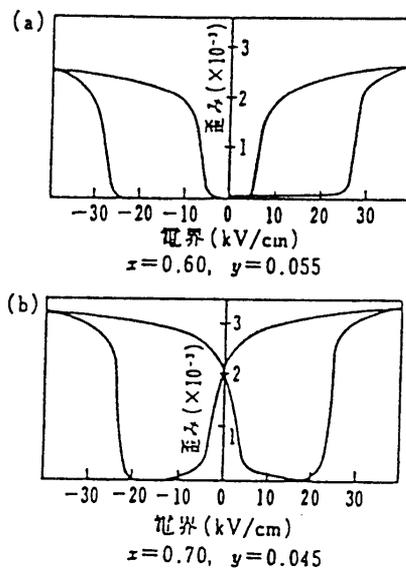


図 3.3-7 $\text{Pb}_{0.99}\text{Nb}_{0.02}((\text{Zr}_{1-x}\text{Sn}_{1-x})_{1-y}\text{Ti}_y)_{0.98}\text{O}_3$ の室温における縦方向誘歪み

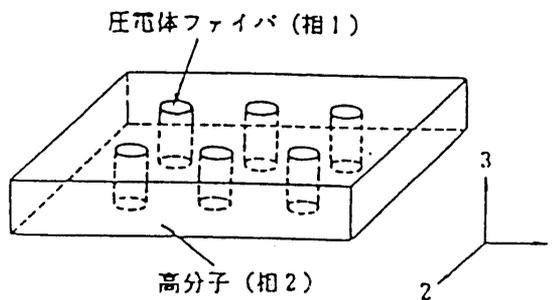


図 3.3-8 1-3 接続のセラミックス/高分子系圧電複合体の模式図

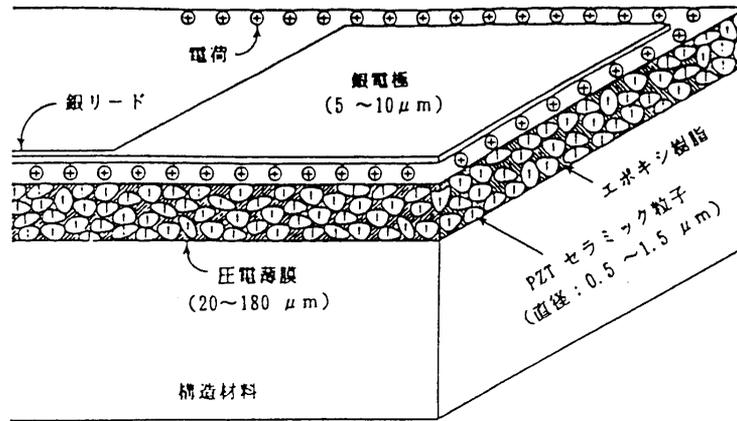


図 3.3-9 構造材料の表面に形成される圧電性薄膜の模式図

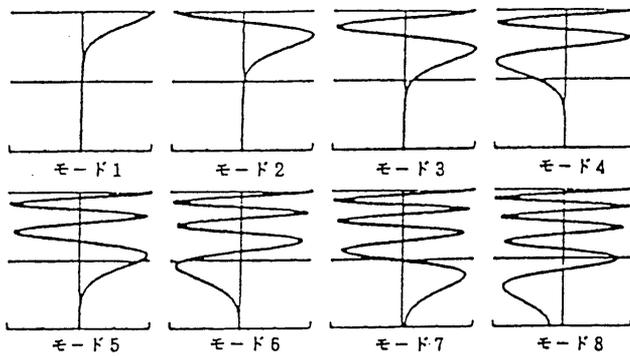


図 3.3-10 FGPM板の波動モードの変位分布
($kh=25.0$ 、上表面は電気的に短路)

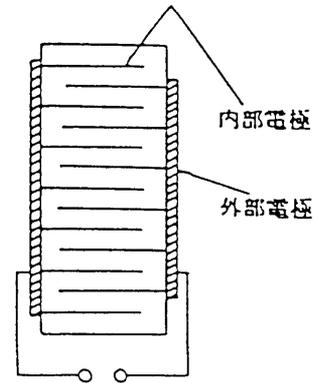


図 3.3-11 内部電極型積層素子の構造

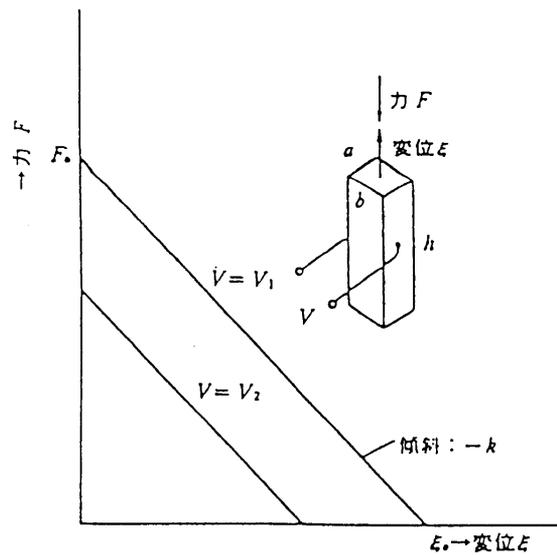


図 3.3-12 積層型圧電アクチュエータの変位と力の関係

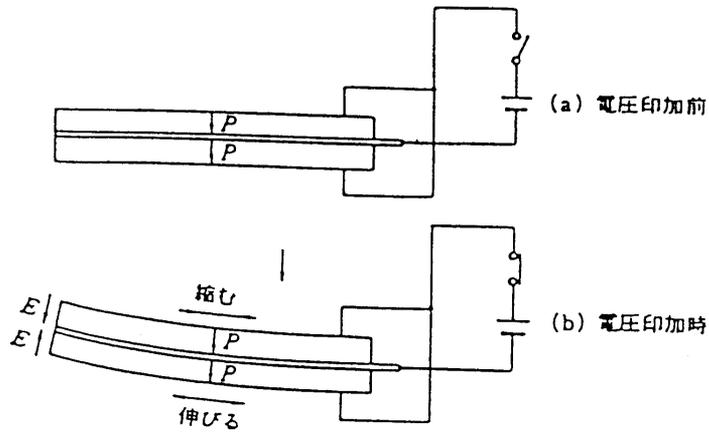


図 3.3-13 バイモルフの屈曲原理

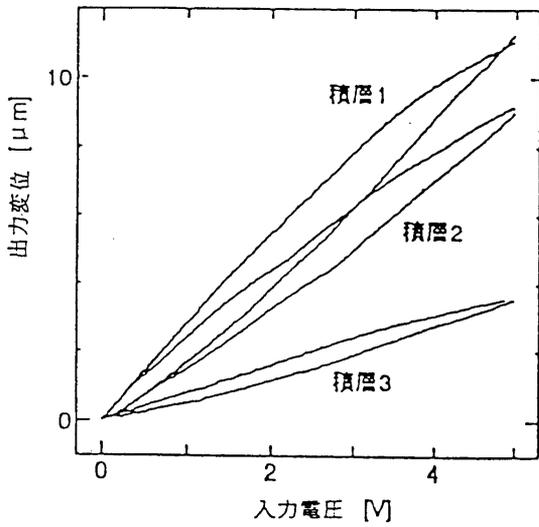


図 3.3-14 積層型圧電アクチュエータに三角波電圧を印加した場合の発生変位特性

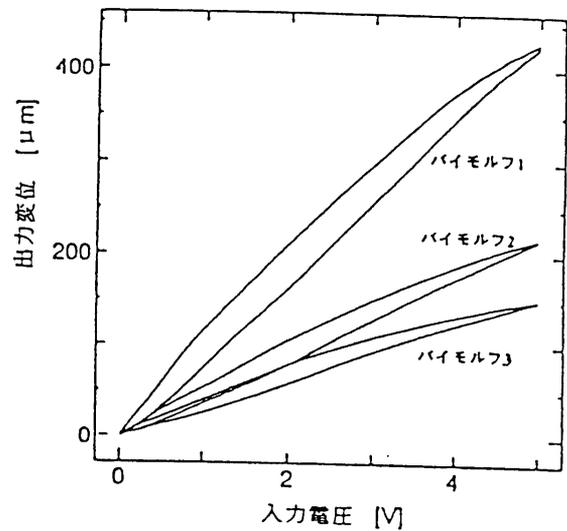


図 3.3-15 バイモルフ型圧電アクチュエータに三角波電圧を印加した場合の発生変位特性

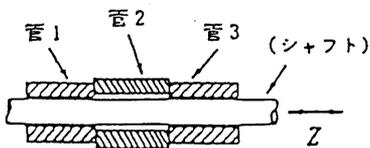


図 3.3-16 尺取り虫型

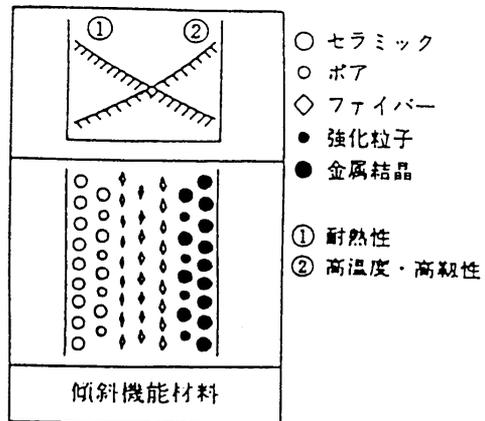


図 3.3-17 傾斜機能材料の概念図

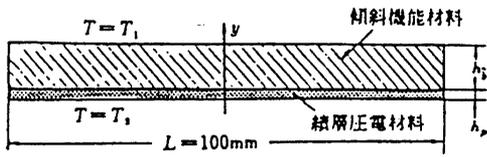


図 3.3-18 知的傾斜機能材料
 $h_b=10\text{mm}$, $h_p=2\text{mm}$

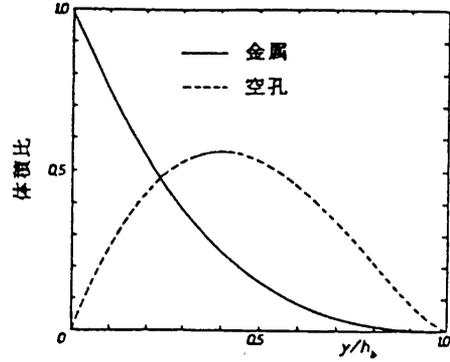


図 3.3-19 金属、セラミック、空孔の割合

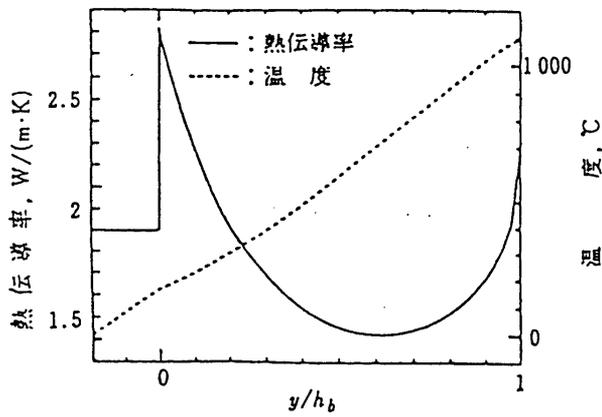


図 3.3-20 温度と熱伝導率の分布

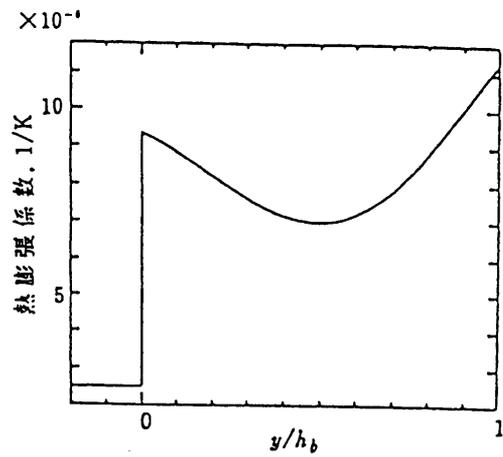


図 3.3-21 熱膨張係数の分布

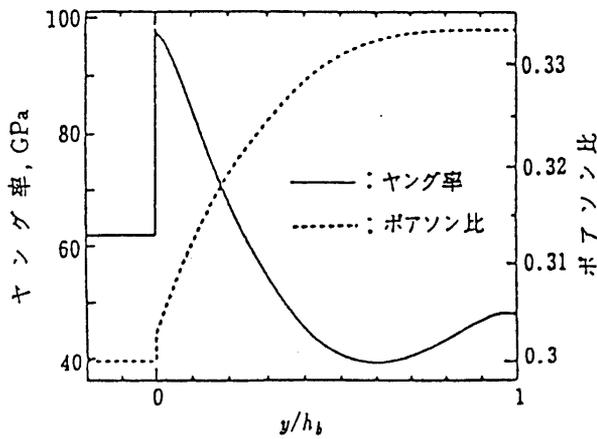


図 3.3-22 ヤング率とポアソン比の分布

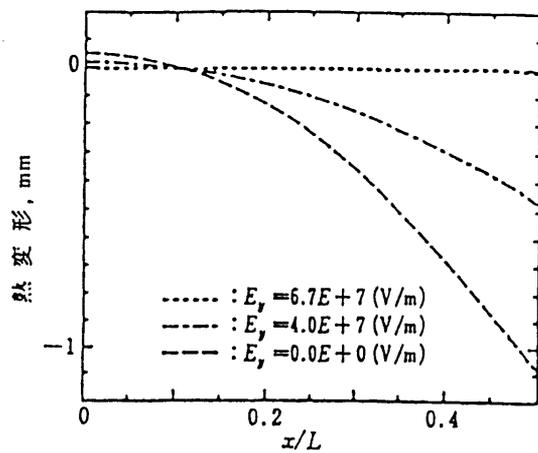


図 3.3-23 制御前後の熱変形

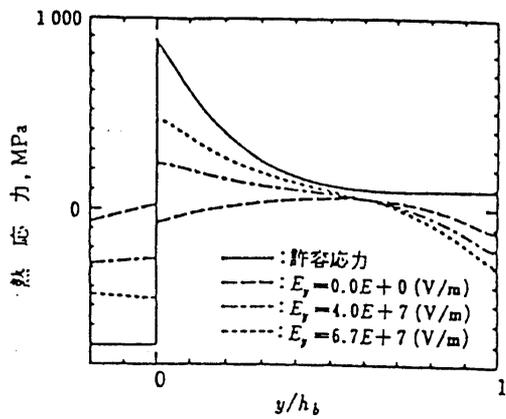


図 3.3-24 制御前後の熱応力

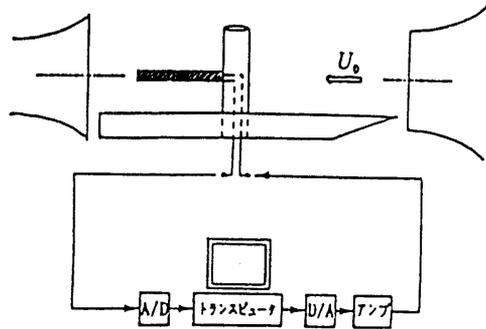


図 3.3-25 知的パネルシステム

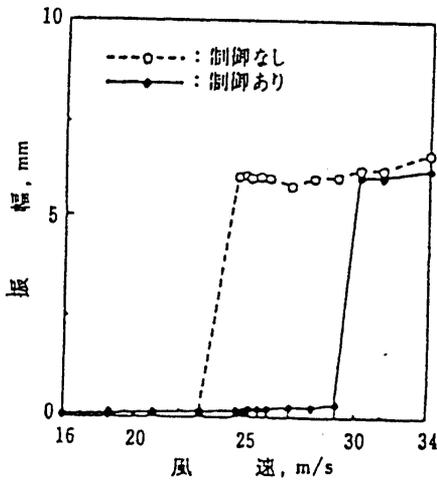


図 3.3-26 フラッタに対する制振効果

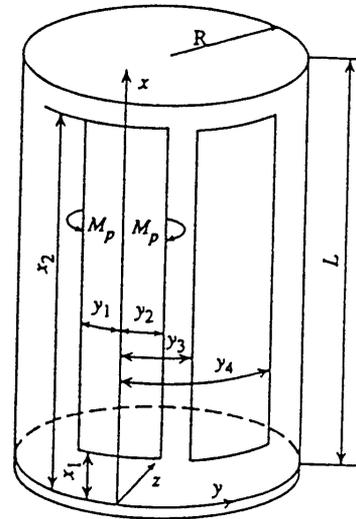


図 3.3-27 円筒殻モデル

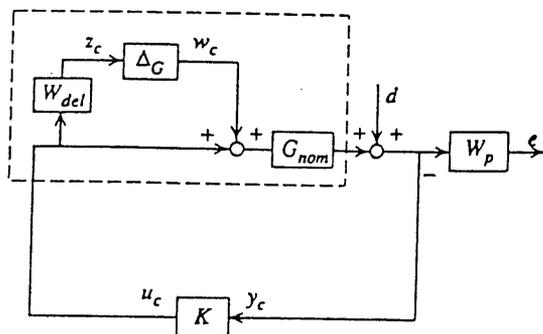


図 3.3-28 拡張制御系

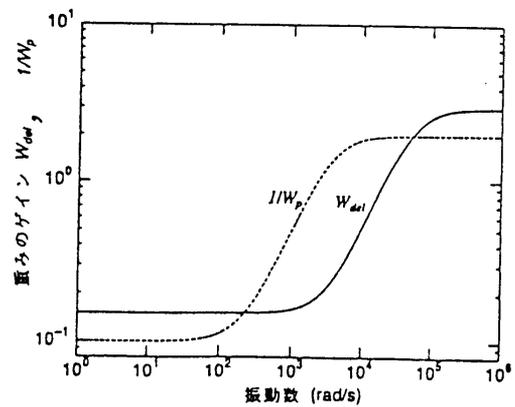


図 3.3-29 重みのゲイン

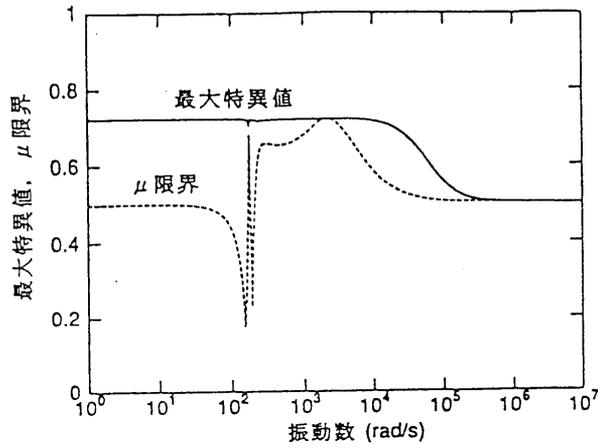


図 3.3-30 最大特異値と μ 限界

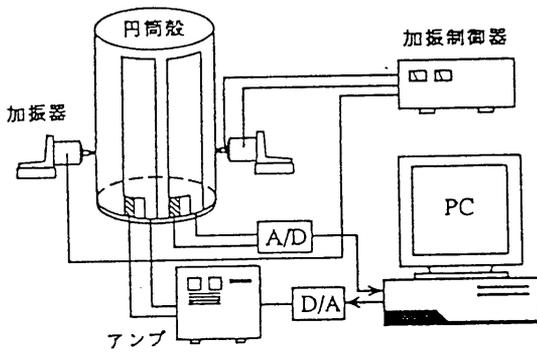
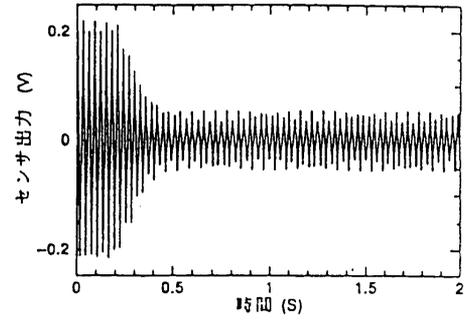
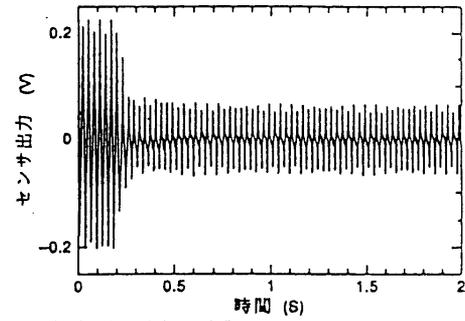


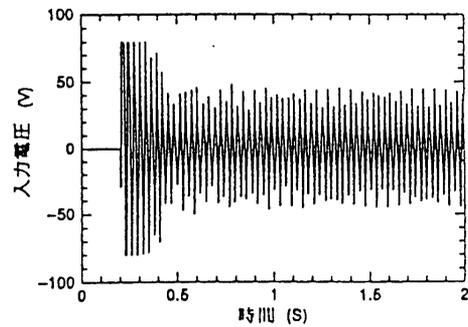
図 3.3-31 実験装置



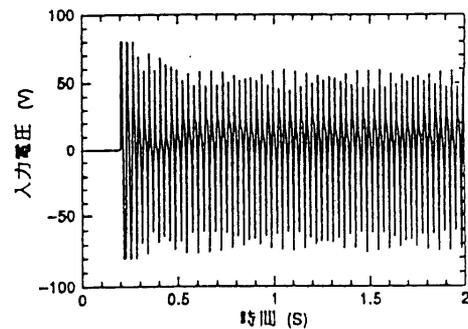
(a) 時間応答: シミュレーション



(b) 時間応答: 実験



(c) コントロール入力: シミュレーション



(d) コントロール入力: 実験

図 3.3-32 シミュレーションと実験結果

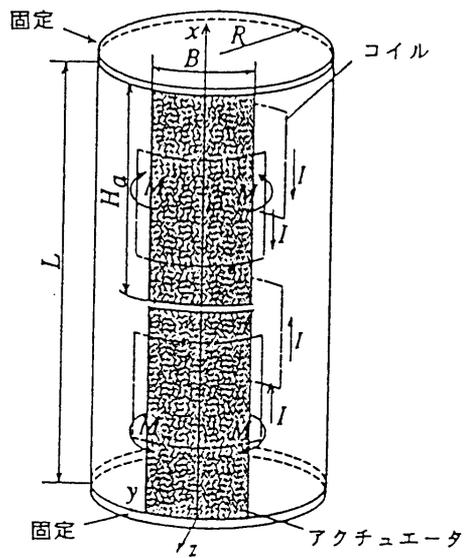
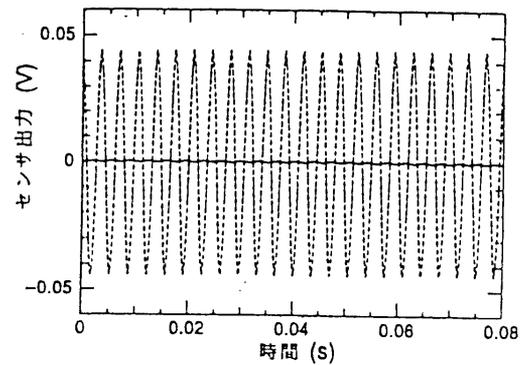
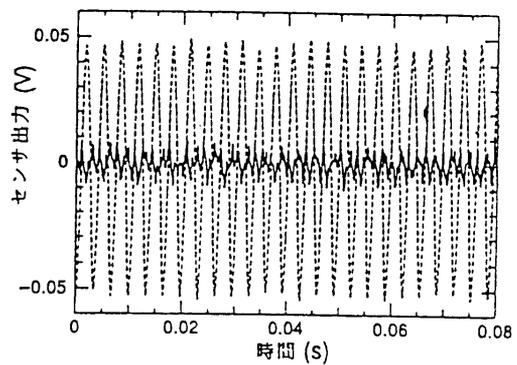


図 3.3-33 勾配コイルドラムのモデル



(a) シミュレーション結果



(b) 実験結果

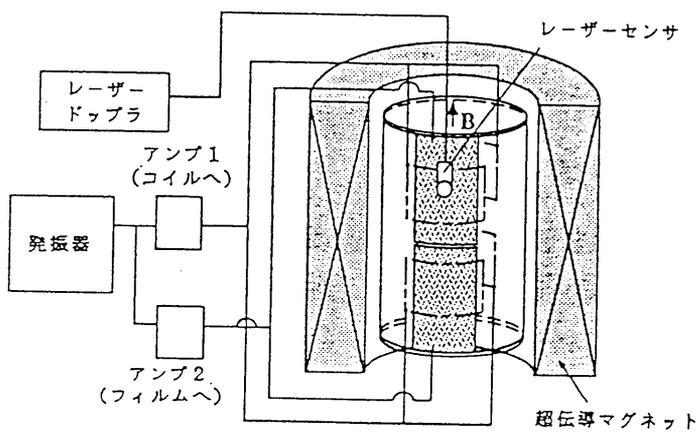


図 3.3-34 実験装置

図 3.3-35 モード (4、7) の応答

3.4 樹脂系スマートコンポジット

3.4.1 はじめに

科学技術会議第14号答申（昭和62年8月）¹⁾を反映した形で出されたところの航空・電子等技術審議会答申「環境条件に知的に応答し、機能を発現する能力を有する新物質・材料の創製に関する総合的な研究開発の推進について」（平成元年11月）²⁾によって一段と脚光をあびることになったスマート材料あるいはスマートコンポジットは上記答申に

も記されているように、材料自体にセンサ機能及びエフェクタ（アクチュエータともいう）機能を持ち、同時に内部あるいは外部に、これらが連携して機能させるためのプロセッサ機能をもつようなものとされている。その目指すところは、例えば、人工知能やニューロコンピュータの分野でソフトウェアや電子回路によって実現しようとしている知的機能の一部を材料自身の中に求めようとするものである。その応用分野としては、医療、航空・宇宙、原子力、衣料、建材及び日用品等極めて広範囲な分野が想定されている。

以上のような状況のもとで、近年、これら材料に関する研究が国内外で活発に展開され始めている。そこで本節においては、スマートコンポジットに関するこれまでの研究の中で、主に樹脂系のスマートコンポジットの研究開発動向とそれらの可能性について述べることにする。

3.4.2 各種の樹脂系スマートコンポジットの研究開発例

樹脂系スマートコンポジットは熱硬化あるいは熱可塑性の樹脂やゴム等のエラストマーを母材とし、スマート性またはインテリジェント性を発現させるための機能性素材を複合させることによって所要のスマート機能を具備させたものであり、異種素材複合型の知的複合材料をさすものとする。

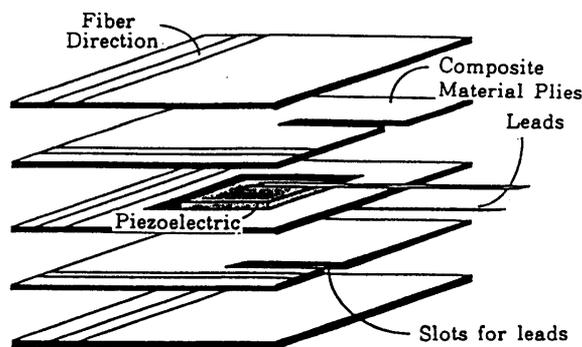


図3.4.1 GFRP(ガラス繊維とエポキシ樹脂による複合材料)積層材料に圧電セラミックスを埋め込んだスマートコンポジット

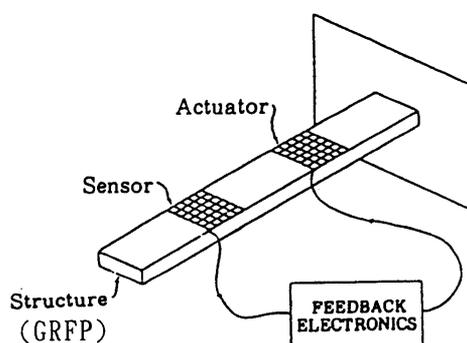


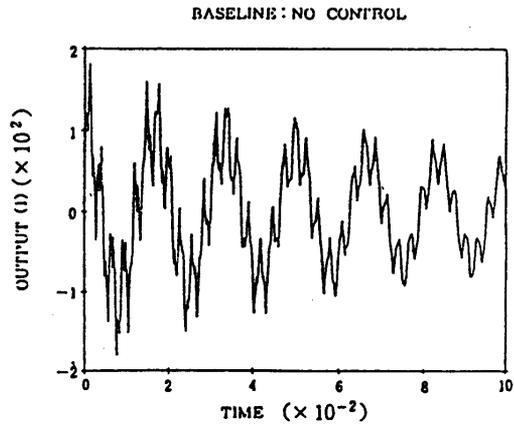
図3.4.2 圧電セラミックスのセンサとアクチュエータからなる能動制御型スマートコンポジット

樹脂系スマートコンポジットの機能性素材としては圧電セラミックス、光ファイバー、形状記憶合金及び電気粘性流体等が研究対象となっており、これらと樹脂単体あるいは繊維強化複合材料との複合による各種のスマートコンポジットが提案されている。以下これまでに報告されている調査研究³⁾等も参考にこれらの概略について述べる。

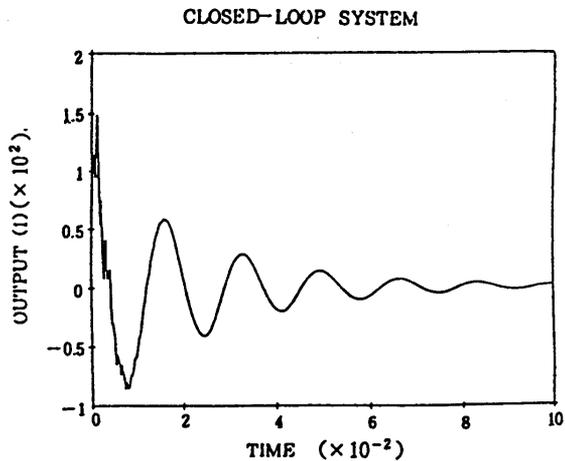
圧電セラミックスには電気を流すと振動し、振動させると電気が生ずるという圧電効果があるのでこれを樹脂系複合材料の母材中に埋め込んでアクチュエータあるいはセンサとして利用することが検討されている。これらは時間応答性や感度が良好な点から実用的なスマートコンポジットの創出のために今後益々重要性を

帯びてくるものと予想される。図3.4.3 片持ばり(図3.4.2)の先端における振動挙動
 4.1³⁾、⁴⁾ は米国マサチューセツ工科大学の Hagoodらの試作したも

ので、GFRP(ガラス繊維とエポキシ樹脂からなる積層複合材料)の中にPZT(チタン酸ジルコン酸鉛)系圧電セラミックスを埋め込んだスマートコンポジットである。これらの構造は、外部荷重、振動及びき裂の発生に伴うアコースティックエミッションに対するセンサ機能に加えて、振動制御、形状制御、あるいは音波の伝播・吸収・放出に対する制御などのアクチュエータ機能が期待できる。これらのうち、現在までによく研究されているのは、能動的制御システムである。これらの考え方を図3.4.2³⁾、⁵⁾に示す。これはジョージア州立工科大学のHanagudらが行ったもので、能動的振動制御の例である。この例において、スマートコンポジットの振動状態は圧電センサによって電圧の時間変化とし

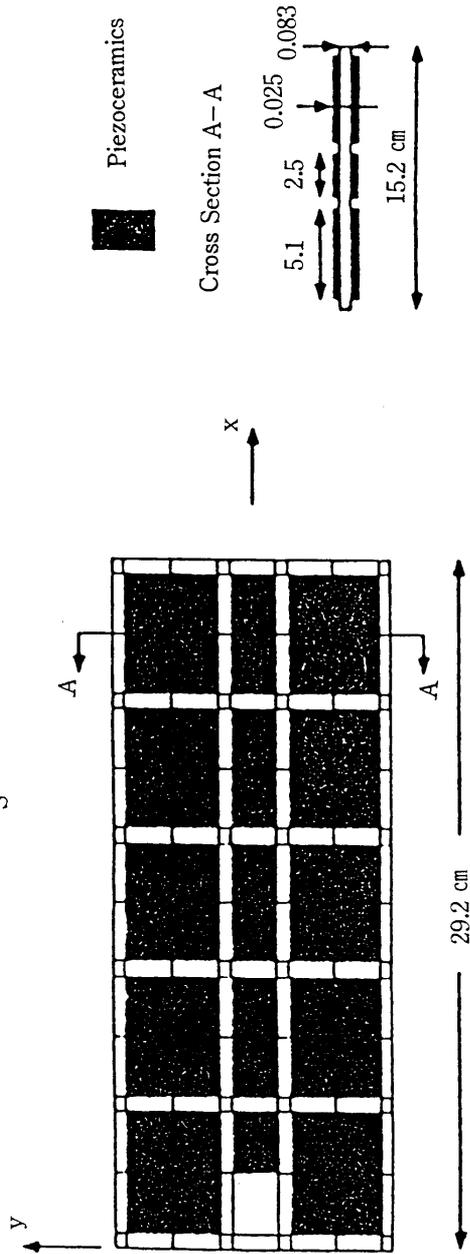


(a)フィードバック制御を行わない場合

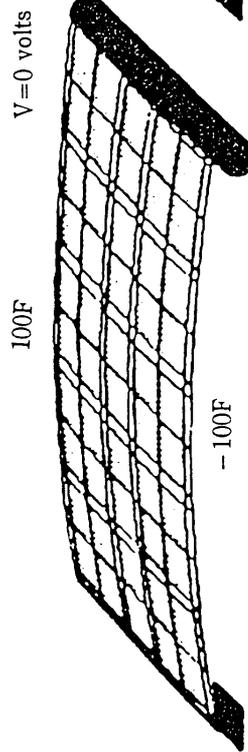


(b)フィードバック制御を行った場合

Piezoceramic-Composite Plate
Graphite Epoxy[0/ ± 45]_S



Temperature Induced Deformation



Shape Controlled Configuration

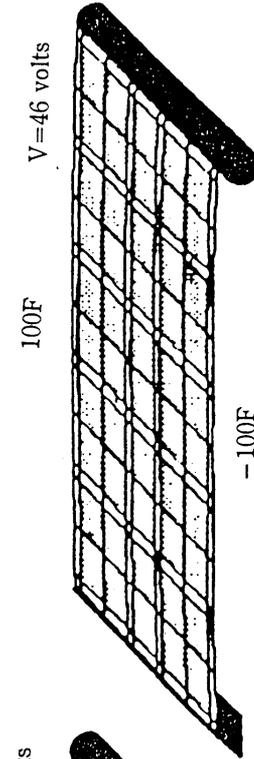


図 3.4.4 非制御及び制御された温度上昇をうける圧電セラミック貼付CRFP板の数値シミュレーション

上の図：板の初期形状

左下の図：変形を制御しない場合の板の形状

右下の図：変形を制御した場合の板の形状

て検出され、その信号はフィルタリング、位相シフト、増幅等の処理を施されたのち、圧電アクチュエータにフィードバックされる。圧電アクチュエータの中で発生する機械的エネルギーはスマートコンポジットへ伝達され、その結果、スマートコンポジットシステムの振動状態が能動的に制御される。図3.4.3は前図(図3.4.2)のシステムを用いた実験結果であり、図3.4.3(a)はフィードバック制御を行わない場合、図3.4.3(b)はフィードバック制御を行った場合の振動挙動である。能動的振動制御法としてフィードバック機構が有効に働いていることがわかる。

図3.4.4⁶⁾はCFRP(カーボン繊維強化エポキシ樹脂複合材料)積層板の上下両面にPZT系圧電セラミックスを貼着し、これをセンサ(上面)及びアクチュエータ(下面)として機能させることによって形状制御が可能であることを示したものである。左下の図のように、上下面の温度の違いで変形したパネルをアクチュエータに適当な電圧(この場合は46V)をかけることによって右下の図のようにフラットに制御できることを示している。この例は比較的小規模なモデル構造であるが、この応用として、各種のソーラーパネルの形状制御や大規模宇宙構造物の形状制御が想定されている。

圧電セラミックとともにスマートコンポジットの機能性素材として最も有望視されているものに形状記憶合金がある。形状記憶合金には、所定温度(形状回復温度)に達すると予め記憶されている元の形状に回復しようとする性質に加えて、電気抵抗が温度や歪に対して変化する性質がある。これらの性質に着目し、センサ機能とアクチュエータ機能を有するスマートコンポジットを創出しようとする試みがなされている。

図3.4.5⁷⁾はCFRP複合材料中にニッケル/チタン系の形状記憶合金(ニチノール)繊維を複合させたスマートコンポジットである。この場合、アクチュエータの活性化(低温側マルテンサイト相から高温側オーステナイト相への相変態)には合金繊維あるいは合金線に通電することによ

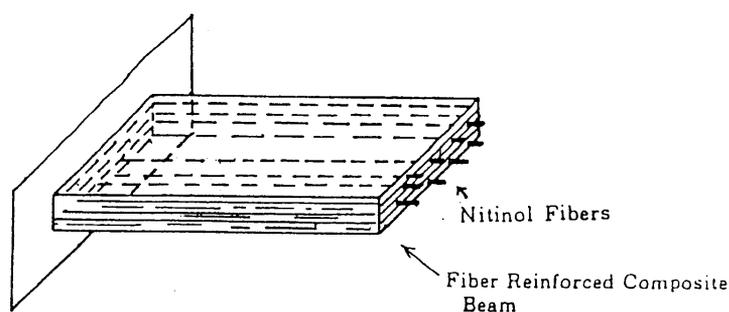


図3.4.5 埋設型形状記憶合金アクチュエータを用いたCFRPスマートコンポジット

て昇温を行う方式を用いている。その結果、スマートコンポジットの剛性、振動特性(固有振動数や振動モード)、音波の伝播特性などを能動的に調節・制御することが可能であ

ることを明らかにしている。形状記憶合金のアクチュエータ機能の発現は、低温側マルテンサイト相から高温側オーステナイト相への加熱による相変態に起因するものであるから、加熱に要する時間の分だけ時間応答性が低くなるという欠点があるが、その形状回復力は極めて大きく、約 60 kg/mm^2 もある⁸⁾ のでこの機能を有効に活用することによって他の機能性素材では達成できないようなスマートコンポジットが実現できる可能性がある。

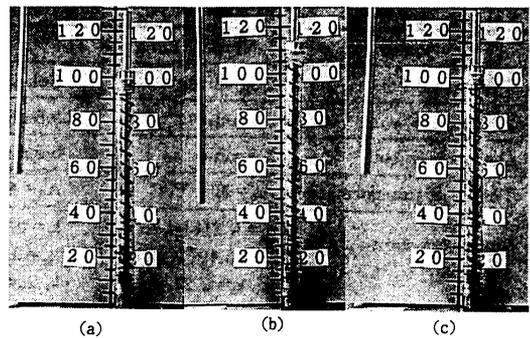


図 3.4.6 引張-圧縮応答型スマートコンポジットの温度変化にともなう長さの変化 (a)初期状態、(b)高温状態、(c)放冷後30分の状態

図 3.4.6^{10), 11)} は R T V 樹脂 (室温硬化型樹脂) と形状記憶合金線からなる温度応答性スマートコンポジット (引張-圧縮型) である。同図において (a) は初期 (マルテンサイト) 状態で、(b) が高温 (オーステナイト) 状態、(c) は放冷後 30 分における状態である。100 mm の長さであったものが、高温状態において 110 mm に伸長し、放冷後は 100 mm の初期状態に戻り、二方向性応答が発現されている様子がわかる。ここでは、より顕著な応答現象を発現させるために、高温状態において伸長するようなコイル状の形状記憶合金を用い、これを中空状に成形した R T V 樹脂のマトリックスに挿入してその両端でコイルと固定する方式をとっている。初期長さ (低温時の長さ) L_i と高温時の長さ L_n の計算値は次式で与えられる。

$$L_i = \frac{(A_m E_{m_i} + k_i L_0)L}{A_m E_{m_i} + k_i L}, \quad L_n = \frac{(A_m E_{m_n} + k_n L_0)L}{A_m E_{m_n} + k_n L} \quad (1)$$

ただし、 A_m はマトリックスの断面積、 E_{m_i} は低温時のマトリックスのヤング率、 k_i は形状記憶合金コイルの低温時のバネ定数、 L_0 は形状記憶合金コイルの初期長さ、 L はマトリックスと形状記憶合金コイルを固定するときの長さ、 E_{m_n} はマトリックスの高温時のヤング率 ($E_{m_n} \approx E_{m_i}$)、 k_n は形状記憶合金コイルの高温時のバネ定数、である。一般に低温時のバネ定数と高温時のバネ定数は大きく異なる ($k_n > k_i$) ので、形状記憶合金の相変態を伴うような温度の変化に応じて、このスマートコンポジットは L_i と L_n の間で長さが可逆的に変化することになる。

図 3.4.7¹¹⁾ は前図と同じく R T V 樹脂と形状記憶合金線からなるスマートコンポジット (曲げ応答型) である。同図において (a) は初期状態であり、(b) は高温状態であ

る。以降、放冷後1分～5分後の状態で、最後の（h）は放冷後1時間後の形状である。放冷5分後程度ではほぼ初期状態に戻って二方向性形状応答が発現されていることがわかる。ここで、スマートコンポジットの初期曲率（低温時の曲率）を κ_c 、高温時の曲率を κ_h とすると、それぞれの計算値は次式で与えられる。

$$\kappa_c = \kappa_0 + \frac{E_m I_m (\kappa - \kappa_0)}{E_a I_a + E_m I_m}, \quad \kappa_h = \kappa_0 + \frac{E_{mh} I_m (\kappa - \kappa_0)}{E_{ah} I_a + E_{mh} I_m} \quad (2)$$

ただし、 κ_0 は形状記憶合金アクチュエータ（この場合は線材）の初期曲率、 κ はマトリックスと複合するときの曲率、 E_m は低温時のマトリックスのヤング率、 E_a は低温時のアクチュエータのヤング率、 I_m はマトリックスの断面二次モーメント、 I_a はアクチュエータの断面二次モーメント、 E_{ah} は高温時のアクチュエータのヤング率である。 E_{mh} は高温時のマトリックスのヤング率である。したがって、この材料は形状記憶合金のマルテンサイトからオーステナイトへの相変態を伴うような温度変化に応じて κ_c と κ_h の範囲の可逆的な形状応答を繰り返すことになる。

現在実用化されている形状記憶合金は、一般に一方向応答性であるので、バイアスばねとの組み合わせによって二方向性応答を得ているが、バイアスばねのエネルギーの吸収及び放出の機能をマトリックスであるRTV樹脂に受けもた

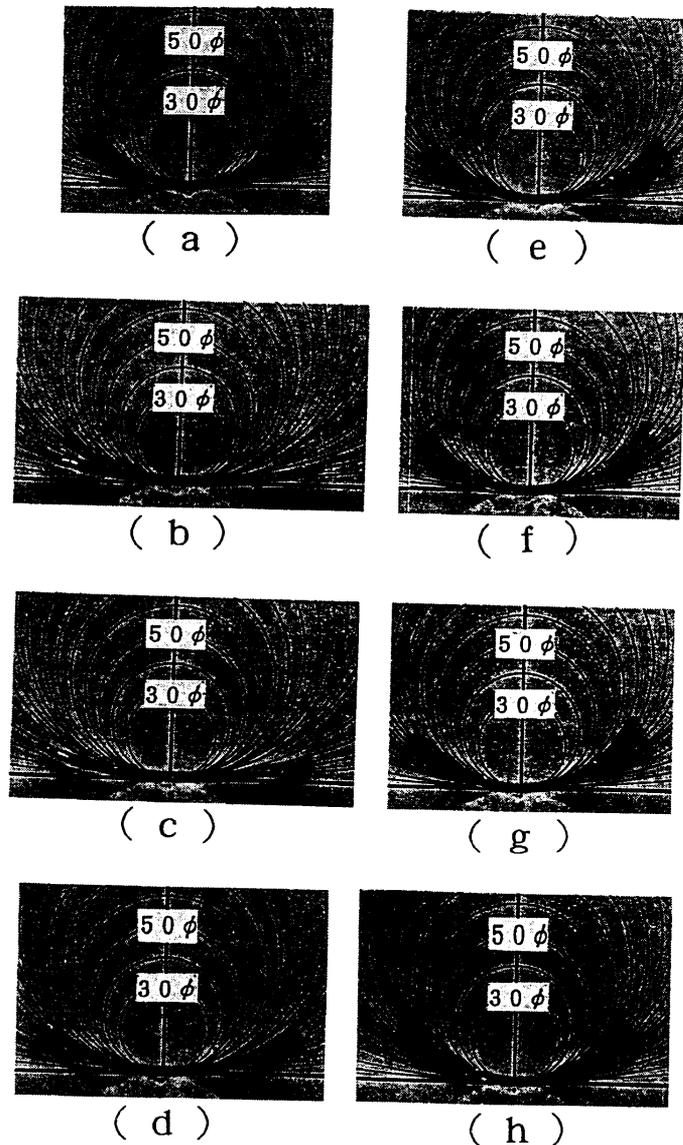


図 3.4.7 曲げ応答型スマートコンポジットの温度変化にともなう曲率の変化、(a)初期状態、(b)高温状態、(c)放冷1分後、(d)放冷2分後、(e)放冷3分後、(f)放冷4分後、(g)放冷5分後、(h)放冷1時間後

せることによって、部品の組み合わせとしてでなく、一つの材料として二方向性応答を実現しているのが本研究の特長である。

図 3.4.8¹¹⁾ は光弾性エポキシ樹脂製の引張り板試料表面に予ひずみ 1% の Ti-Ni 形状記憶合金ファイバを配置・設定して、通電加熱によって形状記憶収縮させ、

切欠き先端での応力集中を減ずることが可能であることを示したものである。通電加熱によって急激な圧縮応力が導入され、応力拡大係数 (K 値) の減少及び能動的破壊靱性の制御や疲労き裂閉鎖促進によるき裂伝播速度の低下及び長寿命化が可能であることが明らかにされている。これは、内在する形状記憶合金ファイバを生体での神経系と人工筋肉系に置き換えたものにとらえることもできるとされている。

光ファイバーを樹脂系複合材料の母材に埋め込み、センサ機能を有するスマートコンポジット構造が検討されている。センサ機能、アクチュエータ機能、プロセッサ機能のうちで光ファイバーはセンサ機能発現用として用いられる場合が多いが、光ファイバーの特長としては、小型・軽量である、可撓性がある、耐電磁雑音性にすぐれる、広い周波数帯域を有する、多重送信性を有する、電気絶縁性が良い、消費電力が少ない、等が挙げられる。さらに光ファイバーセンサには、温度、圧力、振動、音響、電場、磁場、光、放射線など、検出できる物理量の種類が極めて多いという特長がある。

光ファイバーに関して、これまでなされてきた研究としては、樹脂系の複合材料中に埋め込むことによって、内部のひずみを検出して、応力拡大係数を求めるもの¹²⁾、振動数や振動モードを求めるもの¹³⁾、マイクロメカニクスに利用するもの¹⁴⁾、さらに内部温

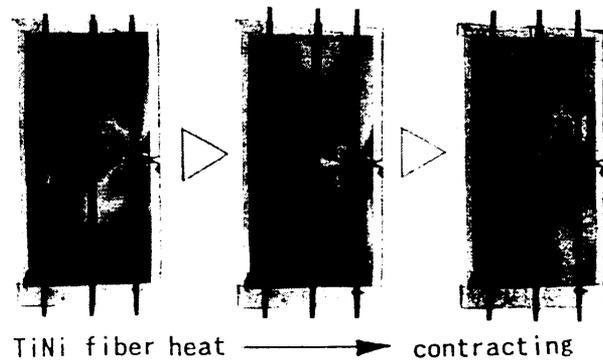


図 3.4.8 Ti-Ni 形状記憶合金の収縮によって急速に生ずるクラック先端での応力密度の減少

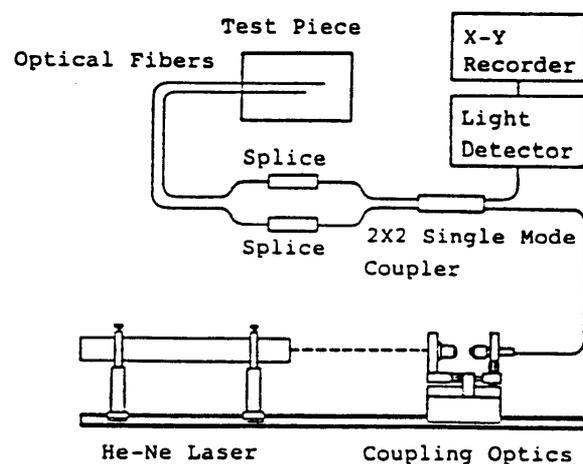
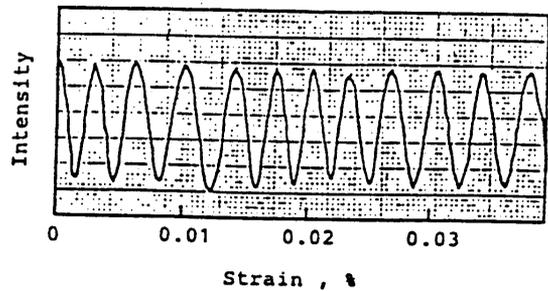


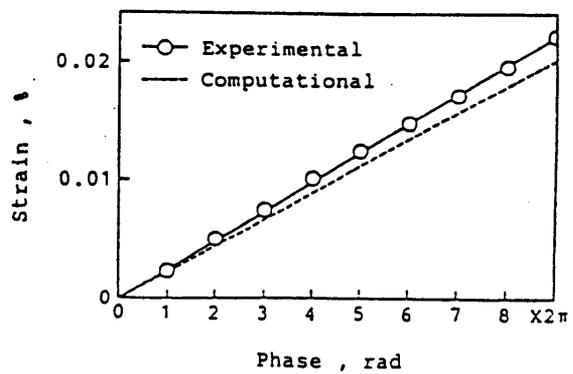
図 3.4.9 埋設型光ファイバセンサ評価装置の組立図

度やひずみを検出するもの¹⁵⁾ などがある。

図 3.4.9¹⁵⁾ は、光ファイバーを用いて内部温度や内部ひずみを測定するための装置で、He-Ne レーザからの光が、対物レンズを介してシングルモード光ファイバー（外径 250 μm、コア径 3.6 μm）に入射され、光結合器によって 1:1 に分岐される。分岐された光はセンサ部端面で反射し、再び光結合器に戻って干渉を生じ、その信号を光検出器によって検出し、X-Y レコーダによって記録するようになっている。この場合の光ファイバー埋設型テストピースとして、GFRP 及び CFRP の 2 種類の積層板が用いられた。各積層板の層間中央部には長さの異なる 2 本の光ファイバーがマイケルソン型干渉計として埋め込まれている。図 3.4.10 (a)



(a)



(b)

図 3.4.10 (a)¹⁵⁾ はテストピース表面に貼付した抵抗線歪ゲージによるひずみ値と干渉光強度の関係を示したものであり、干渉光はひずみの増加とともにほぼ一定の周期で強弱を繰り返していることがわかる。この周期から干渉光強度の位相とひずみゲージ出力の関係が求められ、その結果が図 3.4.10 (b)¹⁵⁾ に示される。

この関係から干渉光強度の位相とひずみの関係は線形となることがわかり、干渉光強度の位相の変化からひずみ量を測定できることがわかる。これらと同じ装置を用いてテストピース内部の温度を測定した例を図 3.4.11¹⁵⁾ に示す。この図からも分かるように干渉光強度の位相の変化から温度変化が求められることがわかる。なお、これらの装置を用いて

図 3.4.10 埋設型光ファイバセンサの応答 (GFRP, ゲージ長 12mm)

(a) ひずみと光強度の関係
(b) 位相とひずみの関係

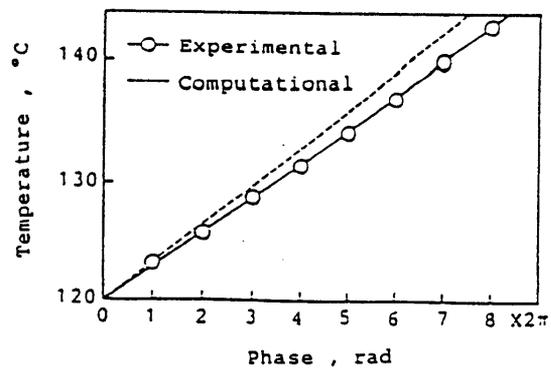


図 3.4.11 埋設型光ファイバセンサの位相と温度の関係 (GFRP, ゲージ長 10mm)

ひずみまたは温度を測定する場合は互いに影響を及ぼし合うので他の条件は一定に保っておくことが必要である。

3.4.3 まとめ

本節においては、機能性素材複合型の樹脂系スマートコンポジットについて、それらの可能性と各種の具体例について述べた。センサ機能、アクチュエータ機能、プロセッサ機能のすべてが材料内に組み込まれているような純粹にスマート材料あるいはインテリジェント材料と言えるようなものは現在のところほとんど存在しないが、今後、これらの構成素材となる各種の機能性素材の発達や例えば生体メカニズムの解明の進展によって、それらをモデルとした新しいスマートコンポジットが急速に出現してくることが期待される。

参 考 文 献

- 1) 科学技術会議：諮問第1.4号「物質・材料系科学技術に関する研究開発基本計画について」に対する答申、1987年8月.
- 2) 航空・電子等技術審議会：「環境条件に知的に応答し、機能を発現する能力を有する新物質・材料の創製に関する総合的な研究開発の推進について」（諮問第13号に対する答申）、1989年11月.
- 3) 江草 茂則、藤村 卓：インテリジェントマテリアル、シーエムシー(1991), pp.195-206.
- 4) N.W.Hagood et al.: Proc. Smart. Mater. Struct. Math. Issues, 80(1988).
- 5) S.Hanagud, et al.: Proc. Smart. Mater. Struct. Math. Issues, 69(1988)
- 6) S.K.Ha, C.Keilers & F.K.Chang : J. of Intell. Mater. Syst. and Struc., Vol. 2, Jan., (1991), pp.59-71.
- 7) C.A.Rogers : Proc. Smart. Mater. Struct. Math. Issues, 1(1988).
- 8) 本間 敏夫：日本金属学会会報、Vol.24, No.1, (1985), pp.20-25.
- 9) 吉田 均：NIMC-RIMCOF Joint Forum, 「スマートコンポジットシステム」講演論文集(1994), pp.33-41.
- 10) 吉田 均：日本ゴム協会誌、67,10(1994), pp.721-731.
- 11) 古屋 泰文：第2回インテリジェント材料シンポジウム講演要旨集(1993), pp.16-17.
- 12) N.Narendran, A.Shukla & S.V.Letcher: Experimental Mechanics, Vol.31, No.4,

(1991), pp. 360-365

- 1 3) D.W.Jensen, J.Pascual & J.M.Cory, Jr. : J. of Intell. Mater. Syst. and Str-
uc., Vol.2, April, (1991), pp.198-214.
- 1 4) J.J.Lesko, et al. : Optical Engineering, Vol.31, No.1, (1992), pp.13-22.
- 1 5) 福田 武人、逢坂 勝彦、池内 淳一、北出 真太郎 : 第 3 6 回 F R P 総合講演会講演
要旨集、(1991), pp.290-293.

3. 5 知的構造のシステムインテグレーション

知的構造（スマート構造，インテリジェント構造と同義）は従来の構造と異なり，構造や構造を形成する材料にセンサー，アクチュエーターを取り付けたり埋め込むことによって構造や材料の側からユーザーに働きかけ，またユーザー側から構造に制御を加えることができる．これによって構造上の制約を受けていた機器は，その制約を受けにくい構造にすることが可能となる．例えば金属疲労が問題となる航空機構造などでは疲労き裂を検出する知的構造によって従来の安全性確保のための運行制限などを大幅に改善することが可能である．

構造の安全性を検知する知的構造はアクチュエーターを搭載しない分だけ比較的軽量，安価であり実現性が近い．しかし，構造の安全性を検知する知的構造には，図3.5-1に示すように，破壊のメカニズムとセンサー，人工知能の3本の技術的柱がシステムインテグレーションには必要不可欠である．これに対して金属などの従来材料構造では，既に数十年間の技術的蓄積があり，疲労き裂の発生・進展による疲労破壊が破壊のメカニズムとして知られている．このため，センサーおよび人工知能部分だけの研究で容易に知的構造化可能である．これに対して，複合材料の歴史は浅く，また日々材料自身が改善されているため，破壊のメカニズムが不明である場合も多い．このような場合には破壊のメカニズムの研究が第一であるが，複合材料では複数の欠陥が次第に蓄積されていくことが既に知られており，メカニズムを考慮せず，マクロな剛性低下から損傷力学的に安全性を評価することも可能である．

このように，欠陥検出知的構造に限定した場合においても，複数のアプローチが存在し，要素技術的観点ではなく，グローバルなシステムインテグレーション的観点から見た知的構造というものも存在し得ることがわかる．以下では，CFRP積層構造の知的構造，FRP断熱支持体の知的構造，従来金属の疲労き裂検出知的構造を例にその技術的背景と展望を述べる．

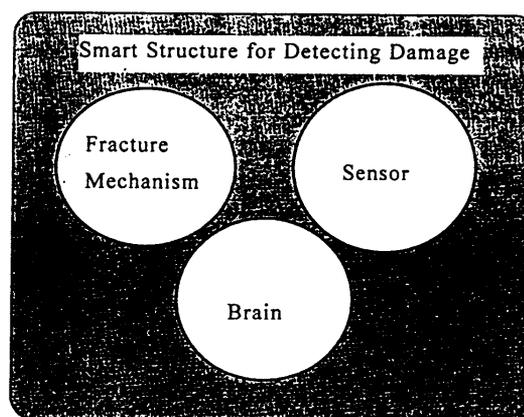


図3.5-1欠陥検出スマート構造開発に必要な研究

3. 5. 1 電気ポテンシャル法による層間はく離検出知的CFRP積層構造

(1) 緒言

炭素繊維で強化されたプラスチック積層板のCFRP積層構造物は優れた力学的特性を有するため、航空宇宙機器の一次構造物に適用されつつあるが、層間はく離抵抗が非常に小さく、点検時の工具落下などの低速度衝撃などによって容易に層間はく離が発生し、圧縮強度および圧縮剛性を著しく低下させる。特にCFRP積層板では、衝撃後の圧縮強度が著しく低いため、設計許容荷重はこの特性で決定されており、CFRPの優れた力学的特性を十分に活かした設計はなされていない。先に述べたように近年、構造物にセンサー、アクチュエータを取付けたり、埋込むことで構造物、材料のき裂発生・進展を構造物、材料自身が検知し、補修する知的構造・材料が現在注目されている。そこで、CFRP構造物の層間はく離の発生・進展を点検時、運行中もリアルタイムに検出可能な知的構造物化が現在強く望まれている。これに対して成形時に光ファイバーを埋込み、内部のマトリックス割れや層間はく離を検出する試みが現在行われている^{1)~3)}。しかしこの方法は、以下の問題点がある。

- ①既存構造物に適用が不可能である。
- ②光ファイバー埋込みによる強度低下がある。
- ③光ファイバー破断時の修理が非常に困難である。
- ④ひずみ測定で検出する場合には、点検時（無負荷時）の検出が不可能である。
- ⑤光ファイバー-マトリックス界面はく離による機能寿命が存在する。

そこで本節では、CFRP構造の外側（機体内側）の電極取付けだけで既存構造物にも適用可能であり、強度低下もなく、センサー部の修理も容易でリアルタイム検出可能な手法として電気ポテンシャル法を取り上げ、その有効性の基礎的検討を行った。

CFRPには導電性の炭素繊維と絶縁材料の樹脂が複合されており、この電気ポテンシャル法は強化繊維の炭素繊維をそのままセンサーとして用いることに他ならない。CFRP積層板の層間はく離き裂への電気ポテンシャル法の適用は、既に守谷ら⁴⁾、Chr. Fischerら⁵⁾によって実施されている。しかしこれらは、層間はく離抵抗測定試験時のはく離き裂長さを目的としており、はく離き裂を挟むように電極が取り付けられ、実機構造には適用できない。また、CFRP積層板の電氣的基礎特性は現在のところほとんど未知であり、実験的検討が不可欠である。このため、本節ではまず基礎的可能性を探る目的で、0°積層板を用いて層間はく離試験を実施し、電気ポテンシャル法によるはく離き

裂長さ検出実験を行った結果を報告する。

(2) 材料および試験片, 実験方法

0° 積層板に用いた材料はT300/Epoxy (東レP3051-25: 成形条件130℃×0.4MPa×1.5H) であり, 積層構成は $[0_g]_T$ である. 成形時に中央に長さ30mmの2つ折りテフロンフィルムを挿入し, 人工欠陥を作成した. この平板から, 長さ $L=200\text{mm}$, 幅 $B=20\text{mm}$, 厚さ $2H=約2\text{mm}$ の試験片を作成した. 実験は, この試験片を用いて, モードI層間はく離試験(図3.5-2参照)とモードII層間はく離試験(図3.5-3参照)を実施した.

モードI試験では, アルミニウム合金製ブロックタイプ治具を用いて2重片持ち梁試験(DCB試験)を実施した⁶⁾. ただし, 試験片の絶縁性を確保するため, 治具と試験片の間にGFRP積層板を挟んで試験片に接着した. 負荷途中で負荷保持し, 試験片側面から読み取り顕微鏡を用いてはく離き裂長さを測定した.

モードII試験では, 3点曲げ式の治具を用いた端部切欠き曲げ試験(ENF試験)を実施した. モードII試験では, はく離き裂前縁形状に凹凸が激しくなるため⁷⁾, はく離き裂長さの側面観察ではなく, 筆者らが既に超音波顕微鏡を用いて, 平均はく離き裂長さとの誤差が小さいことを実験的に検証している荷重-荷重点変位関係のコンプライアンスから計算した⁸⁾.

電極の取り付けは, 数種の試行錯誤の結果, 以下の方法を採用した.

- ①試験片をエメリー紙(600番程度)で研磨し, アセトンで洗浄する.
- ②洗浄部に銀ペーストを塗布する.
- ③ひずみゲージターミナルを一ヶ所の電極に二個向かい合わせるように接着する.

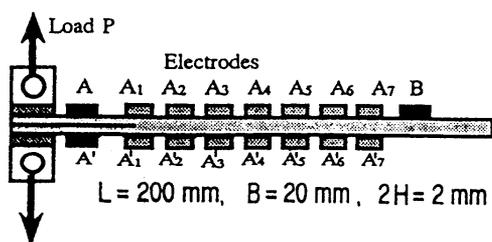


図3.5-2 モードI試験片

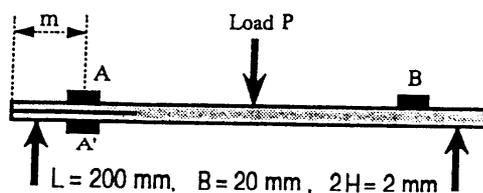


図3.5-3 モードII試験片

- ④リード線をターミナル両端にはんだ付けする。
- ⑤銀ペーストでリード線と試験片の導通を確保する。
- ⑥導電性アルミニウムテープで固定する。

電気ポテンシャル法としては、直流定電流を流し、試験片の電気抵抗変化を電圧変化に換算する従来の方法（以下ポテンシャル法と略記）と直流ブリッジ回路を用いた方法（以下ブリッジ法と略記）の2種を用いた。電極の構造断面図を図3.5-4に示す。

電極取り付け位置は、はく離き裂を挟むように取り付ける方法（図3.5-2：A-A'）と、航空機の機体内側に電極を取り付けることを想定した方法（図3.5-2：A-B）の両者を検討した。ブリッジ法では電極はこれだけだが、ポテンシャル法では、試験片内部の電気ポテンシャル分布を調査する目的で、A₁～A₇までの電極を取り付けた（図3.5-2参照）。

試験片の電気抵抗はA-A'間で約4Ω、A-B間で約2Ωであり、非常に小さいので、ブリッジを安定的に平衡させるため、試験片に直列に120Ωの高精度抵抗をつなぎ、このブリッジ回路を安定的に平衡させた。これを図3.5-5に示す。図中可変抵抗には10Ωのものを用いた。ブリッジは共和電業製シグナルコンディショナと接続し、この微小電流を流し、ブリッジ間電圧をこれを用いて高精度に増幅した。

(3) 実験結果および考察

A. モードI試験

ポテンシャル法（A-A'）のはく離き裂増分 $\Delta a / L$ - 抵抗変化 $\Delta R / R_0$ 関係実測

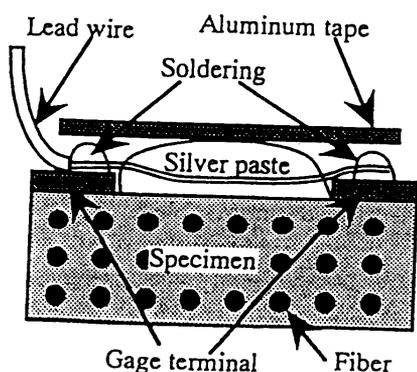


図3.5-4 電極構造

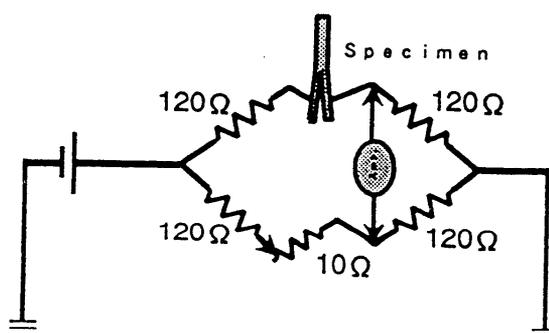


図3.5-3 ブリッジ法回路図

結果を図3.5-6に示す。図中 A_0 は電極間（A-A'間）の変化である。ポテンシャル法では、入力電流を変化させて測定したが、図は0.7Aの定電流を入力した結果である。図中縦軸は電圧計で測定した電圧からオームの法則で計算した抵抗値の初期値 R_0 で規格化した抵抗変化 $\Delta R/R_0$ であり、横軸は試験片長さ L で規格化したはく離き裂長さ増分 $\Delta a/L$ である。図から、ポテンシャル法を用いた場合、はく離き裂長さの進展に伴い、全ての電極でほぼ線形の関係の抵抗変化が生じており、はく離き裂長さが検出可能であることがわかる。しかし、測定電圧ははく離き裂進展後変化し、10分程度の後安定化する挙動を示した。この原因を調査するため試験片に熱電対を取り付け、各入力電流に対する試験片温度の時間変化を測定した。この結果を図3.5-7に示す。入力電流としては、0.1、0.5、0.7、1.0Aの4種類で試験した。その結果、0.7Aでは10分の安定時間が必要であり、また試験片温度も50℃にまで上昇することが明らかになった。

以上示したように、ポテンシャル法にはいくつかの問題点がある。これをまとめると、以下のとおりである。

- ①安定化に時間がかかる。
- ②高精度化には大電流を必要とする。
- ③消費電力が大きい。
- ④温度上昇が激しい。

これらのことから理想的には、小電流で高精度に測定可能な手法が望まれる。このため、本研究ではブリッジ法を検討した。ブリッジ法は既に図3.5.5に示したが、ホイートスト

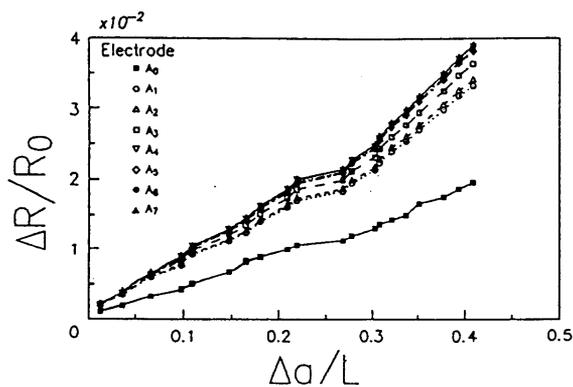


図3.5-6ポテンシャル法（A-A'）の結果

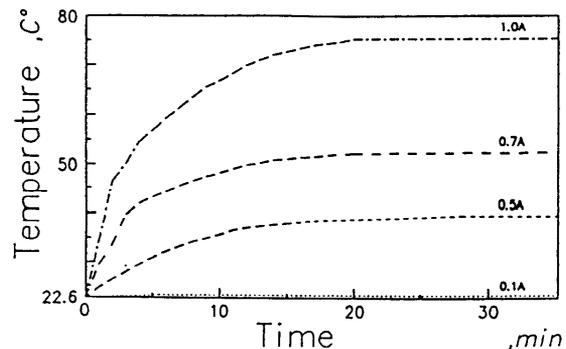


図3.5-7試験片温度変化

ブリッジに試験片を組み込むことで、上記の問題点を解決している。ブリッジ法（A-A'）のはく離き裂進展に伴う抵抗変化の実測結果を図3.5-8に示す。図中縦軸および横軸は図3.5.6と同じであり、●印と▲印は異なる試験片の結果である。図3.5.6のA₀の結果は電極間抵抗変化であり、これとブリッジ法の結果は定量的にほぼ一致している。また、異なる試験片の結果もほぼ一致しており、はく離検出法として有効であることがわかる。安定化保持時間なしの結果（図3.5-8△印）とありの結果（図3.5-8▲印）を比較すると、その差異は小さい。このことから、ブリッジ法では安定化保持時間を必要としないことがわかる。ブリッジ電圧は4 V、電流は最大でも30 mAであり、消費電力も小さく、温度上昇もない。以上から、ブリッジ法がリアルタイムはく離検出に適していることが実証された。

ブリッジ法（A-B）のはく離き裂進展に伴う抵抗変化を図3.5-9に示す。航空機構造の内側に取り付けることを想定したA-B間電極の場合、実測結果の抵抗変化はA-A'間のほぼ5分の1程度の変化であり、非常に小さい。これは、試験片全体の抵抗は約2 Ωであり、はく離き裂進展に伴い導電部断面積が減少する部分が増大することで抵抗変化が生じるためと推察される。図中●印と▲印は異なる試験片の結果であり、両者の差は無視できない。また、はく離き裂進展に伴い抵抗変化は非線形になってきている。

実験的に非線形となった原因としては、リード線接続部および電極の信頼性があげられる。A-A'間電極の場合、抵抗変化が大きく、上記の試験片の変形による接続部分の抵抗変化は無視できる程度であるが、A-B間電極の場合、抵抗変化は非常に小さく、上記

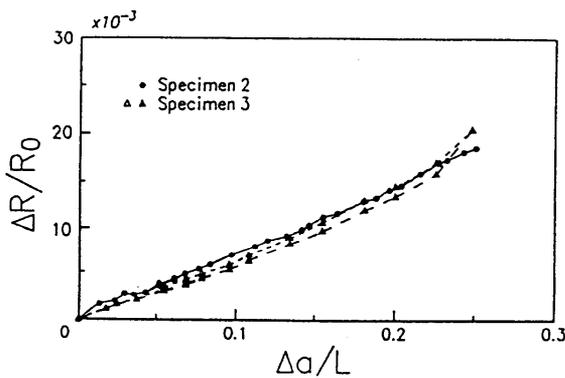


図3.5-8 ブリッジ法(A-A'モードI)

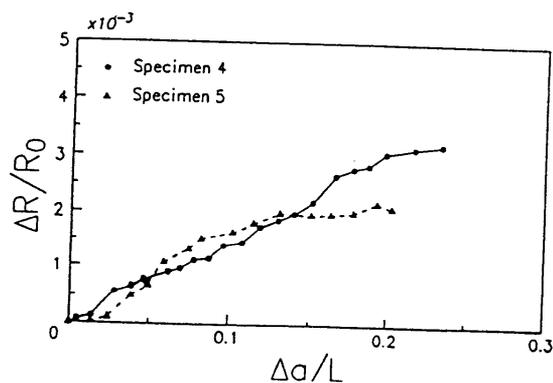


図3.5-9 ブリッジ法(A-BモードI)

の接続部分の変化が無視できない程度になっているためと考えられる。したがって、さらに高信頼性の電極作成法を今後検討する必要がある。しかし、はく離き裂進展に伴う抵抗変化は十分実測可能であり、A-B間のようにはく離き裂の上面にだけ電極を取り付けてもはく離が検出可能であり、航空機のCFRP構造物のリアルタイムはく離検出に有効であることが明らかとなった。

B. モードII試験

モードI試験において、ブリッジ法の有効性が実証されたので、モードII試験ではブリッジ法だけを検討した。モードII試験では、はく離き裂はせん断応力によって進展する。このため、はく離き裂面はモードI試験と異なり、接触したままである。

A-A'間電極の実測結果を図3.5-10に示す。図中縦軸および横軸はモードIの場合と同じである。図から、はく離き裂面が接触しているモードII試験においても、はく離き裂進展に伴い抵抗変化がほぼ線形に生じていることがわかる。また、この変化率もほぼモードIの結果と同じである。図中丸印と三角印は異なる試験片の結果であり、両者はほぼ一致している。図中黒塗り印と白抜き印は安定化保持ありの場合となしの場合の結果であり、両者に差異はない。以上のことからモードII試験においてもブリッジ法(A-A')は有効であることがわかる。

A-B間電極の実測結果を図3.5-11に示す。A-B間電極の場合でもはく離き裂進展に伴い抵抗変化は線形に増加していることがわかる。ただし、その変化率はモードIの場

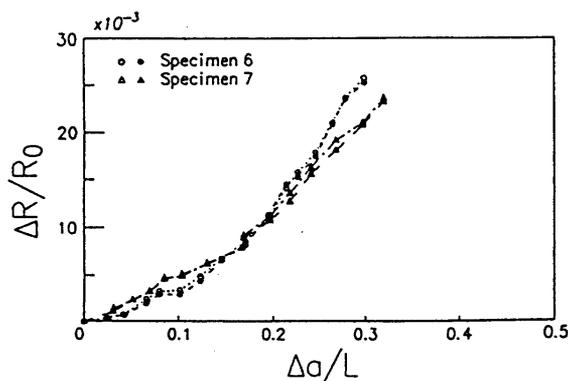


図3.5-10 ブリッジ法(A-A'モードII)

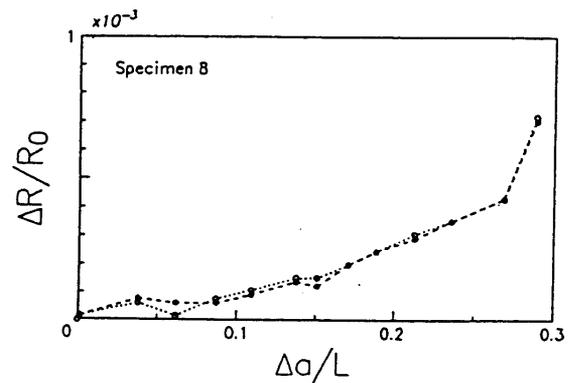


図3.5-11 ブリッジ法(A-BモードII)

合と比較して1/5程度であり、小さい。A-A'間ではモードⅠとほぼ同じ変化率が得られたのに対して、A-B間では変化率がモードⅡで小さくなってしまった。この原因は不明であり、今後詳細に検討する予定である。しかしながら、モードⅡ A-B間電極においても、はく離き裂進展を検出可能であることが実証されたと判断できる。ただし、モードⅡ試験においては、はく離が急速進展する場合 ($a/L > 0.7$ の場合) があり、このときには衝撃によって、電極抵抗が変化してしまい、はく離き裂進展を定量的に評価できなかった。A-B間のように抵抗変化が小さい場合には、電極の信頼性が最重要課題であると判断できる。

(4)まとめ

以上、CFRP 0°積層板を用いて層間はく離試験を実施し、電気ポテンシャル法（ポテンシャル法、ブリッジ法）の有効性を実験的に検証した。得られた結果と今後の課題を要約すると以下のとおりである。

(1)直流定電流を用いるポテンシャル法は、高精度測定のためには、大電流を必要とし、試験片の著しい温度上昇をまねき、電圧安定に時間がかかるため、リアルタイムはく離検出には適さない。

(2)ブリッジ法は小電流で高精度に測定可能であり、リアルタイムはく離検出に有効である。

(3)航空機構造内側に電極を取り付けるCFRP知的構造を想定した手法でも、抵抗変化は非常に小さいが、はく離をブリッジ法で検出可能である。

(4)はく離面が接触しているモードⅡ試験においてもモードⅠの結果と同様に、はく離き裂進展に伴い、抵抗変化はほぼ線形に増加した。

(5)今後の課題

本手法は日本独自の技術であり、世界に例を見ない。しかし、まだ開始されたばかりであり、数多くの問題点が残されている。今後の課題としては、以下の8点があげられる。

(1)信頼性の高い電極の作成（現在半埋込み式を検討中）

(2)成形手法による電気抵抗特性の差異の実験的検証

(3)実構造物に近い積層板での積層構成の影響

(4)衝撃などによる実際のはく離発生の検出

(5)電極位置の最適化

(6)解析的検討

(8)長期信頼性の検討

3. 5. 2ニューロネットによるき裂検出知的構造材料

(1)はじめに

1985年夏の日航ジャンボ機墜落事故に代表されるように、疲労き裂の発生・進展による航空機構造の破壊は大惨事を引き起こす⁹⁾。そこで航空宇宙機器やリニアモーターカーなどの大量輸送用機器における知的構造の第一段階としては、構造物にセンサーを取り付け、疲労や衝撃荷重によって発生した欠陥を運行時にリアルタイムに検出し、危険性を構造自身が自己診断する生物の痛覚に似たシステムを有する診断型の知的構造が注目されている^{10), 11)}。これは、既存の構造物にひずみゲージや光ファイバー、圧電塗料などのひずみセンサーを取り付けることによって容易に知的構造化可能であり、またセンサーの補修も容易に実施できるため非常に有望である。

き裂検出知的構造においては、ひずみ情報からき裂の発生・進展を判定するため、いわゆる逆問題となり、既にひずみ情報や電気ポテンシャルから逆問題としてき裂を検出する取り組みは幾つか研究されている^{12), 13)}。また、逆問題の解法としてバックプロパゲーションニューロネットモデルの有効性が報告されている^{14)~16)}。このことから、ニューロネットモデルはひずみ情報に基づくき裂判定知的構造の頭脳部分に適用可能であると容易に推察できる。しかしながら、バックプロパゲーションニューロネットモデルでは、解析対象によって学習方法や学習回数などの有効性が異なり、また実機のき裂検出知的構造を想定すると、実際の誤差を含むひずみ情報からき裂の逆解析の可能性やひずみセンサー配置の最適化など課題は数多く残されている。

以上の背景から、ここではき裂検出知的構造の頭脳部分の特性を要約して述べた後、実機を想定したバックプロパゲーションニューロネットモデル（以下BPモデルと略記）の汎化能力の検討結果を示す。

(2) BPモデルによる逆問題解析

ニューロネットは単数または複数の信号 (I_j) を入力し、その信号にニューロどうしの結合の強さを表す結合係数 W_j をかけてたしあわせ、しきい値 T を加えた信号 ($\sum W_j \cdot I_j + T$) の関数を出力 ($O = f(\sum W_j \cdot I_j + T)$) する動物の脳のニューロをモデル化した部分の層状構造からなる (図3.5-12参照)。

ニューロネットは入力層、中間層、出力層の3層以上から構成され、ニューロ数や中間

層結合係数，しきい値をうまく設定することによって，複雑な写像を構築することが可能である．このため，陽に解くことができない複雑な問題の逆問題（解答が既知で入力変数が未知の問題）を解を得る手法として有力視されている．ニューロネットの中でBPモデルとは，複数層（入力，中間，出力）からなる階層構造を有するニューラルネットに対する教師信号付き学習方法（結合係数，しきい値の修正方法）である．この手法は，出力結果が既知の入力信号に対して出力信号を計算し，その誤差とニューロ出力の入力に対する微係数から修正値を決定する方法である．このため，解空間が複雑で，極小値が数多くある場合には，容易に極小値に囚われてしまい，良好な結果がなかなか得られない．したがって，逆問題にBPモデルを適用する際には，中間層の数，層内のニューロの数，教師信号数，学習方法などを最適化する必要がある．

望月らは，一様引張平板中の円孔の中心位置と半径を平板周囲の変位とひずみ情報から求める逆問題にBPモデル（ニューロ数：入力層4，中間層8，出力層2）を適用し，その学習方法，教師信号などの影響を詳細に調査した¹³⁾．その結果，欠陥同定問題にBPモデルを適用する場合，学習回数の増大によって教師信号入力時の誤差は減少するが，未学習信号の入力時の誤差が逆に増大する過剰学習が発生し，汎化能力が低下するため，学習用の教師信号による誤差評価だけでなく，未学習信号による出力の誤差をモニタし，BPモデルの汎化能力を検討しながら学習させる必要があることが指摘されている．

(3) き裂検出知的構造の概念

ここでは既存の航空機にひずみセンサーを取り付けることを想定する．この場合，検出

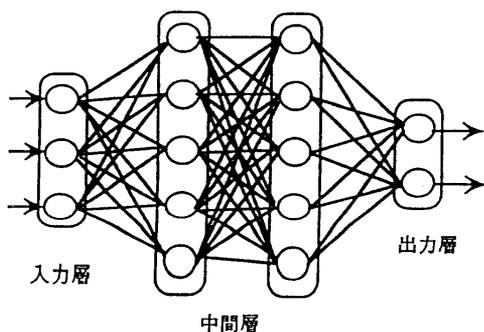


図3.5-12BPニューロネットモデル

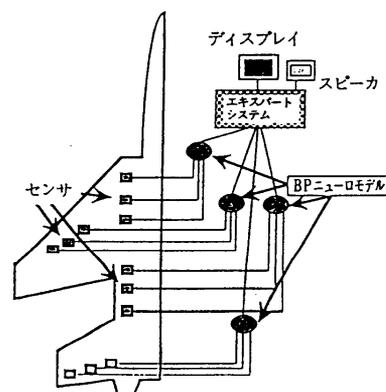


図3.5-13航空機のスマート構造システム

するき裂は、リベットやボルト締結部の応力集中部から発生・進展する疲労き裂であり、構造物の主応力方向もほぼ既知であるので、その進展方位もおおよそ明らかである。したがって、ひずみセンサーは応力集中部からの疲労き裂検出だけを考慮し、応力集中部周囲に配置すればよいことがわかる。

航空機を例にした、き裂検出知的構造の概念図を図3.5-13に示す。サルやヒトの脳では、感覚を司る感覚皮質と合理的な判断をする部分は明確に分離されており¹⁸⁾、視覚皮質では6層構造で各層の役割はそれぞれ異なることが既に明らかになっている。これと同様に、き裂検出知的構造においても、機体の各部分のき裂検出はそれぞれ異なるBPモデルで判別し、運航上の論理的な判断は各BPモデルの結果に基づいてエキスパートシステムが実施し、緊急着陸や補修などの指示を行うシステムが適当であろう。

(4) BPモデルによるき裂検出知的構造の検討¹⁶⁾

既存航空機の構造として、B747旅客機の圧力隔壁の構造を解析対象に用いた。対象構造材料はアルミニウム合金2024、板厚0.8mmであり、直径3.9mmのリベット孔が間隔18mmで並ぶ構造である⁹⁾。解析対象は前述のように航空機主翼・尾翼取付け部やエンジン取付け部など一次構造の応力集中部のき裂の詳細な検出であるが、後部圧力隔壁の寸法・荷重などの情報が容易に入手可能であるため、便宜的に上記寸法・形状を用いた。簡便化のため、構造の対称性から一部(1/4平面)だけを応力解析した。解析対象の構造・寸法を図3.5-14に示す。負荷は、運行時の機内の予圧で生じる2軸応力であるが、簡便のために一軸応力とした。以上から、構造安全上重要な損傷としてはリベット孔から発生する疲労き裂だ

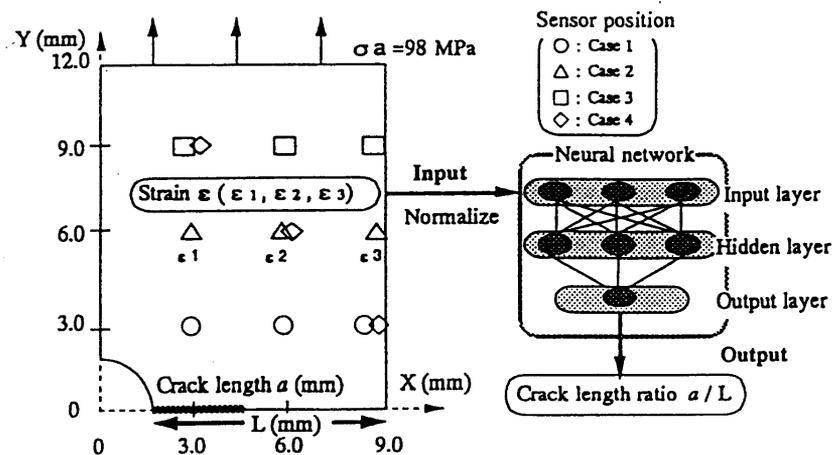


図3.5-14試験片形状，センサーIとニューロネット

けであり、これは隣接リベット孔に向かって負荷に垂直に進展することが経験的に明らかなので、推定する対象は疲労き裂長さだけとなる。

負荷は、運行時の機内予圧から $\sigma_a = 98\text{MPa}$ だが⁹⁾、実機では σ_a 近傍で変動応力が生じる。このため、負荷を未知とし、ひずみ分布形状だけでき裂長さを推定する。機体に取り付けるひずみセンサーはセンサーフェールセーフを考慮して一つのリベット孔に3箇所を標準とした。センサー位置およびこのシステムの概形を図3.5-14に示す。ひずみセンサー位置としては、き裂に近いCase1 (X軸から3mm) を丸印、やや離れたCase2 (X軸から6mm) を三角印、さらに離れたCase3 (X軸から9mm) を四角印で示した。Case1~3まではセンサーをX軸に平行に配置した。Case4の各センサー位置はCase1~3のセンサー位置と同じであり、菱形印で示す。これは円孔、欠陥を有する平板のひずみ分布形状に近い形状 (円孔縁でX軸から遠く、板端部でX軸に近い分布) に配置した。以上のひずみセンサー位置による影響を検討した結果を紹介する。

BPモデルは、3層構造とした。入力層ニューロンはひずみセンサー個数と同様の3個とし、中間層ニューロンは15, 30, 50個の3通りで検討した。ここで、出力層ニューロンは1個である。入力層ニューロンへの入力信号 $I_i = (u_1, u_2, u_3)$ は、ひずみセンサー出力 $X = (x_1, x_2, x_3)$ の絶対値 $|x_0| = \sqrt{x_1^2 + x_2^2 + x_3^2}$ で規格化 ($I_i = (x_1/|x_0|, x_2/|x_0|, x_3/|x_0|)$) した。これによって、荷重変動と関係のない、境界条件だけに依存するひずみ分布形状が得られる。また出力層の出力信号 O_o は、リガメント L で規格化されたき裂長さ ($O_o = a/L$) とした。

学習方法には、教師信号 T と出力信号 O の2乗誤差が最小になるように、最急降下法でニューロン間の結合係数、しきい値を修正した。修正方法としては、各教師信号ごとに修正する逐次修正法と全ての教師信号による2乗誤差を積算する一括修正法の2種を検討した。結合係数修正値 Δw_{ij} およびしきい値修正値 $\Delta \theta_j$ は、2乗誤差の和 E を微分して得られる値をそのまま用いる方法 (以下 Δ 法と略記)、モーメント法、修正モーメント法の3種を用いた^(3.5.17)。結合係数の刻み幅 α としきい値の刻み幅 β はそれぞれ $\alpha = 0.5$, $\beta = 0.4$ とした。また、モーメント法のモーメント値は $m = 0.7$ とした。修正モーメント法では m は繰返し数の関数であり、 $\Delta m = 2.0 \times 10^{-4}$, $m(0) = 0.5$ とした。モーメントには上限値 $m_{\max} = 0.7$ を設定し、 10^3 回の学習で上限値に達し、一定となるように設定した。

教師信号数は、 $a/L = 0.02, 0.15, 0.36, 0.57, 0.79, 0.96$ の6通りの場合と同様にほぼ均等に分割した14通りの場合、19通りの場合を検討した。

各種の条件は、一つの条件をパラメータとして他条件は固定し、汎化能力の優劣として推定誤差の大小で条件の優劣を決定した。ただし、BPモデルではパラメータ値を乱数で初期化するため、計算を10回繰り返し、その平均値で判断した。上記の手法で学習手法を決定後、実機知的構造への適用に際するニューロネットBPモデル汎化能力の問題点を検討することを目的として、ひずみセンサー位置誤差がき裂長さ推定誤差に与える影響と、片側き裂発生がき裂長さ推定誤差に与える影響を調査した。

(5) 数値解析結果¹⁷⁾

A. 学習方法の検討

ひずみセンサー位置をCase 1 (3箇所)、学習方法は一括修正法で△法を用い、教師信号数を6, 14, 19と変化させた際の推定値の2乗平均誤差の学習回数増加に伴う変化を図3.5-15に示す。図中縦軸がき裂長さ推定値の平均誤差であり、横軸は 10^3 回以上の学習の繰り返し数Nである。き裂長さ推定は、 $a/L=0.32, 0.49, 0.66, 0.83$ の4箇所を実施し、推定誤差平均を求めた(以下同様)。教師信号数6の場合(図中実線)が 3×10^3 回の学習まで最も推定誤差が低く、その後過剰学習によって推定誤差が上昇するがその値は教師信号数19の場合とほぼ同様である。教師信号数が14の場合には、過剰学習によって推定誤差が 5×10^3 回の学習まで増加している。このことから、教師信号数6で学習回数は 10^3 回程度で十分であることが判断できる。

学習方法として、一括修正法、△法を用いて教師信号数6で 10^3 回学習し、中間層ニ

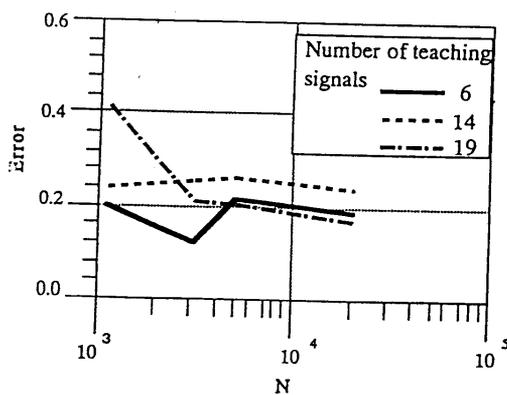


図3.5-15教師信号数の影響

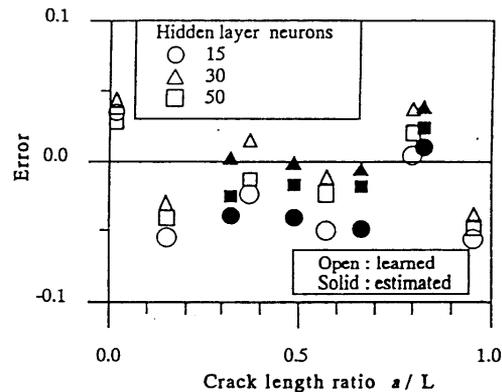


図3.5-16 中間層ニューロン数の影響

ニューロン数を15, 30, 50と増加した場合の誤差を図3.5-16に示す。図中の丸印が15個の結果, 三角印が30個の結果, 四角印が50個の結果であり, 黒塗り印は推定誤差, 白抜き印は教師信号点での誤差である。図から30個が適当であることがわかる。

Δ 法, モーメント法, 修正モーメント法の3種を用いた場合の学習回数と推定誤差との関係を図3.5-17に示す。図から数千回学習後の推定誤差は Δ 法が最も低くなり, 他の学習方法では減少がなだらかで, 学習に時間を要する。このことから, Δ 法で十分であると判断される。

推定誤差を一括修正法と逐次修正法を比較して図3.5-18に示す。丸印が一括修正法の誤差であり, 三角印が逐次修正法の誤差である。また, 白抜き記号が教師信号誤差であり黒塗り記号がき裂長さ推定誤差である。図から, き裂の短い領域で誤差の少ない一括修正法の結果が, 教師信号およびき裂長さ推定の両者の誤差が小さい。前述のように, 非線形性の強い欠陥同定問題の学習においては, 微調整可能な逐次修正法が効率的と述べられているが, この問題に関しては一括修正法が効率的であることがわかる。

以上から, 教師信号数6, 中間層ニューロン数30, 学習方法として Δ 法, 一括修正法を用いて 10^3 回の学習を実行させれば, ひずみセンサー情報からき裂長さを推定するBPニューロネットが十分作成可能であることが明らかとなった。学習方法として, 上記の結果を用いた場合の各ひずみセンサー位置による推定誤差結果を図3.5-19に示す。図からき裂面に近いCase1で最良の推定値が得られるが, センサー位置がき裂面から遠い場合で

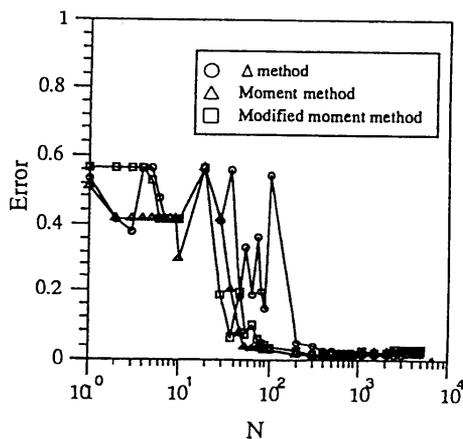


図3.5-17結合係数修正法の影響

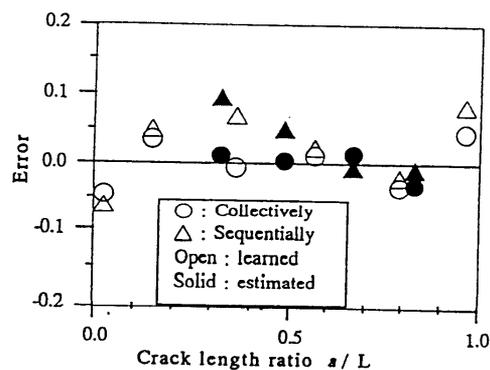


図3.5-18誤差修正法の影響

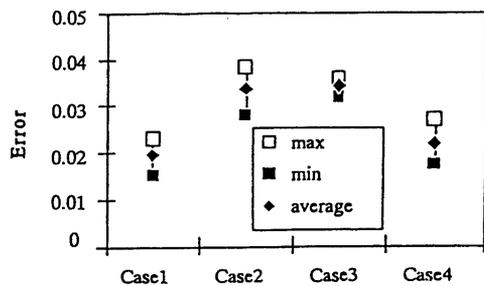


図3.5-19 センサー位置の影響

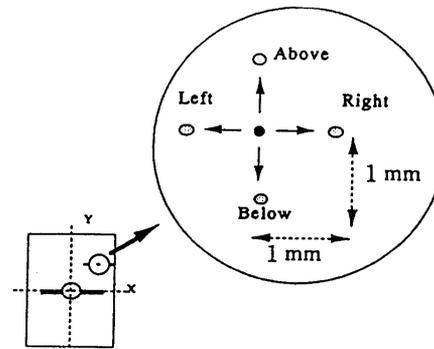


図3.5-20 センサー取り付け位置誤差

も推定誤差5%以内であり、Case4の結果はCase1よりやや劣るが大差はなく、どちらも優秀である。この結果から、ひずみセンサー位置が比較的き裂から離れた点でも十分にき裂長さを推定可能であり、またCase4はCase1に近い性能を有することがわかる。

B. 実機の知的構造を想定した検討

学習済みBPニューロネットモデルに各ひずみセンサー位置を上下左右にそれぞれ1mmずつずらした場合に入力信号を与えた際のき裂長さの推定誤差を検討した。ずらし方は図3.5-20に示すとおりである。その結果を図3.5-21(a)～(d)に示す。縦軸はずれによる推定誤差の変化(Δ Error)であり、横軸はずれの方向である。各場合で10回計算し、平均と最大・最小値を図中に示す。Case1の場合(図3.5-21(a)参照)、上下のずれよりも左右のずれの影響が大きい。Case3の場合には逆に上下のずれの影響が大きい。これに対して、Case4の場合には、全ての方向のずれに対して推定誤差の変化が小さい。

実機では、き裂進展の初期段階や初期欠陥の有無により、両側き裂でなく、円孔の片側だけにき裂が発生する場合がある。そこで、両側き裂のデータで学習後のBPニューロネットモデルを用いて、片側き裂のき裂長さ推定の汎化能力をCase4のひずみセンサーで調査した。その結果を図3.5-22に示す。図中Aが、センサとき裂がY軸に対して同じ側にある場合、Bが、センサとき裂がY軸に対して逆側にある場合の結果である。全ての場合で誤差が大きく、実用的でないことがわかる。

C. 新しいセンサー配置の検討

Case4でも、片側き裂の推定はできない。そこで、ひずみセンサーを左右両象限に配置

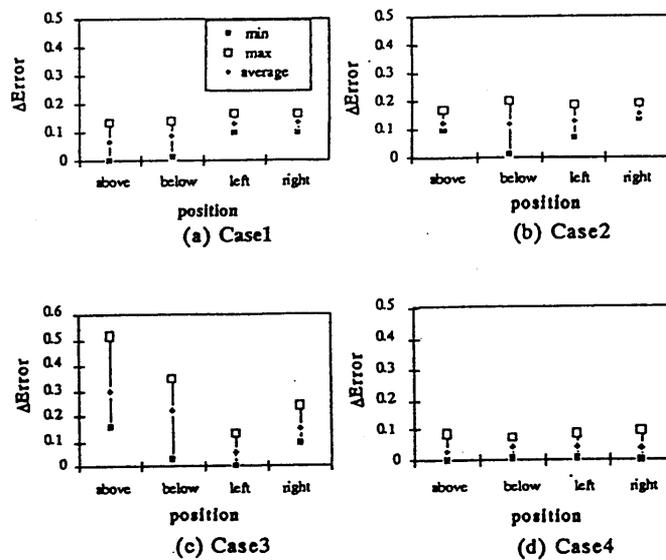


図3.5-21 センサー位置誤差による影響

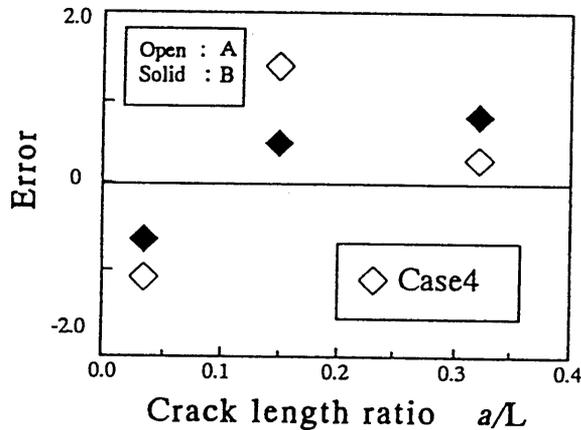


図3.5-22片側き裂の推定

し、しかも円孔からの距離とき裂面からの距離をそれぞれ異なるようにした (図3.5-23参照)。左のひずみセンサーの座標は $(-6.3, -1.8)$ 、 $(-3.5, -3.5)$ 、右のひずみセンサーの座標は $(4.2, 4.2)$ 、 $(6.9, 2.1)$ である。入力情報はこの4箇所のひずみであり、左右のき裂長さ比 (a/L) をそれぞれ別に出力するように、出力層は2個のニューロンとした。このき裂長さ推定誤差の結果を図3.5-24に示す。図の縦軸はき裂長さ推定誤差、横軸はき裂長さ比 a/L である。図中の白抜き記号が教師信号誤差であり、黒塗り記号が推定値誤差である。両側き裂の場合には、Case4のひずみセンサー2箇所の場合と近い配置であり、き裂長さ推定は十分な精度で実施できる。図からわかるように、推定誤差は $-0.05 \sim 0.02$ の程度であり、この新センサー配置によって片側き裂が検出可能といえる。

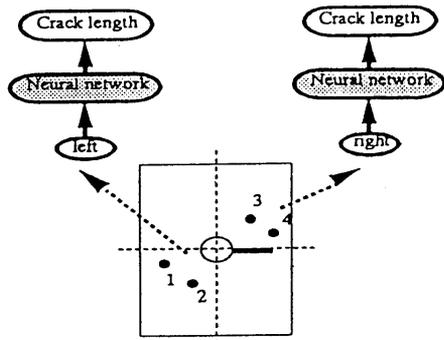


図3.5-23 片側き裂用センサー配置

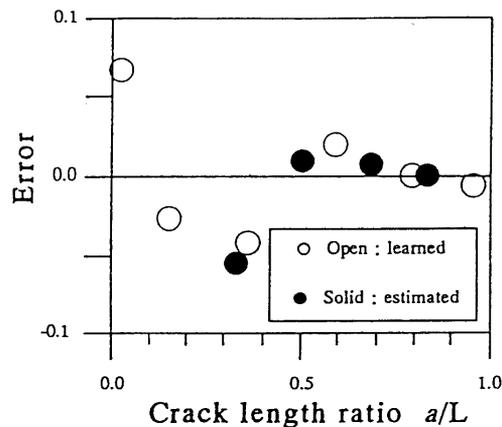


図3.5-24センサー4個配置の推定結果

(6) まとめと今後の課題

以上航空機における知的構造を想定し、知的構造におけるニューロネットの適用性を検討した結果を紹介した。BPモデルはセンサーからの情報によるき裂検出に最適なシステムであるが、学習方法や中間層ニューロ数、センサー配置などのパラメータは構造形状、センサー種類によって最適なものを選択する必要がある。このような観点からの研究は非常に少ない。

なお、ここでは本来2次構造である後部圧力隔壁の寸法を用いて、一次構造の疲労き裂の検出を検討した。圧力隔壁などの2次構造部材ではリベット孔が非常に数多く、各孔にセンサーを取り付けることは不可能である。今後はこの点を考慮した新しいシステムを検討して行く予定である。具体的には、センサーをブリッジに組む方式などが考えられる。さらに、ひずみセンサーとして圧電フィルムなどの利用も考えられ、今後の検討課題である。

3. 5. 3 屈曲光ファイバーを用いたスマートFRP構造の基礎研究

(1) 緒言

極低温下で完全密封状態にある磁気浮上列車の超伝導コイルのFRP製断熱支持体などでは、稼動中に数百Hzの負荷を受けるため、損傷評価をリアルタイムに可能な知的構造が望まれており、光ファイバーを用いたひずみ測定に基づく知的損傷評価、残存寿命評価

が必要である。

光ファイバーによるひずみ測定手法には、光干渉法、光伝播損失法など既にいくつか提案されている^{19)~23)}。しかし、これらのいずれの方法でも、光ファイバーを構造材料に埋め込む極低温下超伝導コイル断熱支持体への適用には問題点があり新測定手法が必要とされている。例えば、光干渉法では非常に強い磁場の影響で光ファイバーの偏光面の回転が生じる可能性があるため、従来よりもさらに高性能な偏光面維持ファイバーを開発するか、またはセンサー部を空間にする特殊なファイバーが必用となる。また、干渉縞を数える手法は熱応力などの初期応力の測定には不向きである。光ヘテロダイン法は有効であるが装置が複雑かつ高価になる。さらに、マイクロベンドによる光伝播損失を利用する手法では、大きな治具を必用とする。これらに対して、A. Caner Demirdogenら²⁴⁾は光ファイバーを円形に曲げて構造に接着し、曲げひずみを検出するシステムを提案している。このシステムでは、光ファイバーの曲げによる伝播損失を用いるため、磁界の影響がなく、また特別なファイバーも必用としないため、比較的安価でしかも特別な治具も必要ないために構造と一体化させることが可能である。しかしながら、曲げによる伝播損失を用いたセンサーはひずみ負荷による出力変化が極微小であり、安定性にかけるなどの欠点があり、さらに曲げた状態で構造に光ファイバーを埋め込む技術の難しさからアイデアに留まっている。そこで本研究では従来の光ファイバーを用いたひずみ測定手法と比較してA. Caner Demirdogenらの提案した屈曲型光ファイバーを用いた手法を改善した手法を提案し、その原理を考察して実験的に検討を行った。

(2) 屈曲型光ファイバーを用いた新手法

屈曲型光ファイバーを用いる手法は、光の伝播損失を利用する手法であるが、特別な治具を必要としないため、FRP構造への埋込みが可能であり、かつ測定装置、手順が簡便で大きなひずみ範囲を測定できるという利点を有する。この概念図を図3.5-25に示す。

光ファイバー中の電磁界はクラッド中に指数関数的に減少する電磁界を有する。光ファイバーが曲げられると曲率中心の外側と内側で光伝播が異なる。外側の部分で光の速度を越えられないためにエネルギーの減少が生じる。曲率半径Rのファイバーの伝播損失 2α は次式で表示される。

$$2\alpha = \frac{\sqrt{\pi\kappa^2 \exp\left[-\frac{2}{3}(\gamma^3/\beta^2)R\right]}}{e_{\nu}\gamma^{2/3}V^2\sqrt{RK_{\nu-1}(\gamma\alpha)K_{\nu+1}(\gamma\alpha)}} \quad (1)$$

A. Caner Demirdogenらは解析的にこの原理で板の曲げひずみ測定が可能であることを円

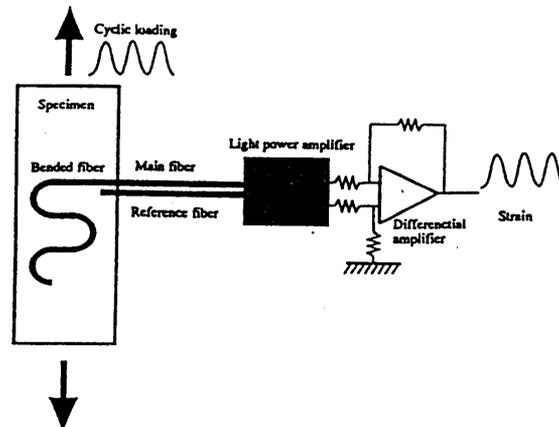


図3.5-25 屈曲型光ファイバーを用いたひずみ計測システム概念図

形に曲げた光ファイバーを例に示している。しかし、信頼できる実験データは得られていない。

(3) 屈曲型光ファイバーによる変位・ひずみ測定

A. 変位計測

使用した光ファイバーは日立電線製S I型シングルモード光ファイバーである。このファイバーでループを作成し、ループ半径を変化させて光の伝播強度を実測した。この場合、引張変位はすなわちループの減少に直結する。なお、入力光は波長1300nmである。測定結果を図3.5-26示す。図中横軸は変位、縦軸は光伝播損失であり、半径の減少によって伝播損失が大きくなっていることがわかる。この結果から、変位計としては十分実用的であることがわかる。

B. ひずみ計測

シングルモードファイバーを用いて単軸引張板状試験片に半円形光ファイバーを取り付けた場合の光伝播損失の変化を解析した結果を図3.5-27に示す。この図からわかるように、円形（半径11mm）の場合、引張につれて上下の屈曲点での屈曲増加によって光伝播損失がいったん減少後に増加する。またその変化も小さい。そこで、長軸 $2a = 120\text{ mm}$ 、短軸 100 mm の半楕円形にした場合を解析した。その結果を図3.5-28に示す。この図から、楕円形にすることによって引張時の光伝播損失が単調に減少することがわかる。またその減少の程度も半円の場合と比較して非常に大きいことがわかる。

アルミニウム合金に楕円形に屈曲させた光ファイバーを張り付け、引張試験を実施した。

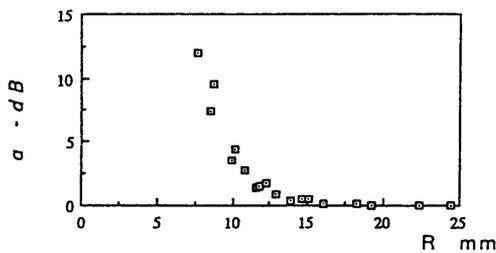


図3.5-26 SMファイバの曲伝播損失

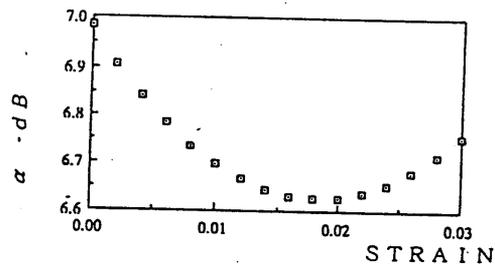


図3.5-27半円形ファイバによるひずみ計測

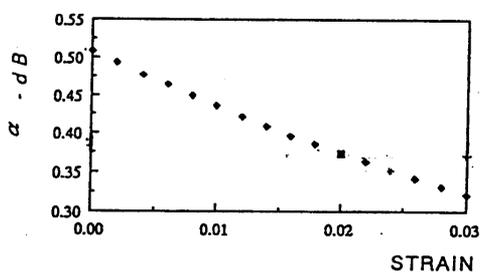


図3.5-28半楕円形ファイバによるひずみ計測

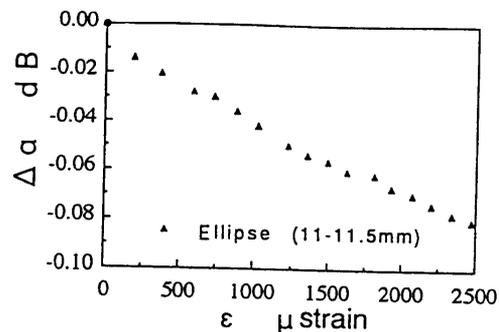


図3.5-29ひずみ計測実測例(半楕円)

その結果を図3.5-29に示す。この図から、この新手法によって構造物のひずみが測定できることがわかる。ただし、解析結果と定量的には一致していない。

3. まとめ

以上屈曲型光ファイバーを用いた新手法で安価に信頼性の高いひずみ計測システムが構築可能であることが明らかとなった。本手法は世界的に広く行われている光干渉によるひずみ計測と異なり、やはり日本独自の技術である。しかし、研究は開始されたばかりであり、技術的問題点も数多い。今後研究すべき課題は以下の通りである。

(1)最適な屈曲形状の検討

(2)解析手法の検討

- (3) さらに高い信頼性の接着方式の検討
- (4) 屈曲ファイバー埋込みの力学特性への影響評価
- (5) 反射式ファイバーなどの改善方式の検討

3. 5. 4 結 言

以上3つのケースを例に，スマート構造のシステムインテグレーションを論じた．スマート構造は，スマート化する目的に応じてセンサーや頭脳を選択する必要がある．個々の要素技術はあくまでもケースバイケースで考慮されるべき問題である．また，スマート構造でのセンサー，頭脳の部分は，損傷検出に限定した場合でも，その損傷の種類や検出すべき程度によって異なる技術となり，総合的な技術力が最も必要である．

新素材の中にはその損傷過程が複雑で構造材料としての実用化が躊躇されているものが少なくない．しかし，損傷検出のスマート化によって，剛性低下というパラメータで損傷力学的評価を可能とし，これらの新素材の適用範囲が拡大される可能性がある．

参考文献

- 1) 北出真太郎，ほか3名，FRPシンポジウム講演論文集，第21回，(1992)
- 2) B. Hofer, Composites, 18, 4, (1987) 309.
- 3) S. R. Waite and G. N. Sage, Composites, 19, 4, (1988) 288.
- 4) 守屋一政，遠藤隆，日本航空宇宙学会誌，36, 410, (1988), 37
- 5) Chr. Fischer and F. J. Arendts, Comp. Sci. and Tech., 46, (1993) 319.
- 6) 影山和郎，小林孝行，柳沢昇，菊池正紀，宮本博，日本機械学会論文集，A-53, (1987), 2386.
- 7) 轟 章，小林英男，日本機械学会論文集，A-57, (1991), 1648.
- 8) 轟 章，ほか2名，日本機械学会材料力学部門講演会講演論文集，72, 920, (1992), 373.
- 9) 小林，ほか2名，材料，36-409(1987)1077.
- 10) 福田，ほか3名，日本機械学会第69期全国大会講演論文集A，910-62(1991)442.
- 11) 薄，日本機械学会第70期通常総会講演論文集(I)，930-9(1993)108.
- 12) 本間，結城，機論，57-540A，(1991)1916.
- 13) 望月，ほか2名，機論，57-540A，(1991)1922.
- 14) 邊，木野山，日本機械学会第69期通常総会講演論文集A，920-17，(1992)125.

- 15) 吉村, ほか3名, 日本機械学会第69期通常総会講演論文集A, 920-17, (1992)131.
- 16) 轟, ほか2名, 機論, 掲載決定.
- 17) 中野 監修, 「入門と実習 ニューロコンピュータ」, 技術評論社(1988)
- 18) D. マコーレイ, 「脳ってすごい!」, 草思社 (1993).
- 19) KEXING Liu and Raymond M. Measures, J. Intell. Mater. Syst. & Struct., 3, (1992)432.
- 20) Raymond M. Measures, Comp. Eng., 3, (1993)715.
- 21) Roderick D. Turner, Tomas Valis, W. Dayle Hogg and Raymond M. Measures,
J. Intell. Mater. Syst. & Struct., 1, (1990)26.
- 22) Mario Martinelli, IEEE J. Quantum Elect., QE-18, (1982)666.
- 23) S. R. Waite, R. P. Tatam and A. Jackson, Composites, 19, (1988)435.
- 24) A. Caner Demirdogen, J. R. Houghton, Andrew K. Tay, Dale A. Wilson and
R. L. Wood, ASTM STP, 1128, (1992)55.

3. 6 形状記憶材料の材料特性と知的材料化

3. 6. 1. はじめに

21世紀の材料工学研究を機械構造用材料分野という視点に立って予測すると、我々が育って来た20世紀の大量生産・消費という工業社会の仕組みとその価値観を大幅に変えた観点からの産業基盤技術の確立、すなわち、人間社会や地球環境との調和を目指した、自然界のエネルギー開発、省資源・省エネルギー型の材料/構造システム設計などが実際に極めて重要な研究課題になって来るであろう¹⁾。そのために、交通機械(自動車、高速鉄道、宇宙航空機、深海艇)やエネルギー開発産業(火力・原子力プラント、核融合)さらには土木建築構造(超高層ビル、巨大橋梁)など知識集約型の機械構造システムに対しては、一層の高性能・高効率化や高い安全性、長寿命化技術に対するニーズが一段と高まってくる。それには、【図3. 6. 1】²⁾に示される様な、環境・状況検知(センサ)→情報処理・判断(プロセッサ)→応答・駆動(アクチュエータ)機能を組み込み、【図3. 6. 2】に示される様に、現在の材料/構造設計での受動的・対処的(破壊力学・安全率)設計を越えた自己強化や損傷修復機能などの能動・環境応答性を有する、新素材開発、複数の機能を有する材料/構造設計、非破壊評価(NDE)技術、システム制御技術、モデリングとシュミレーション法を融合させた知的(インテリジェントまたはスマート)材料/構造システム³⁾⁴⁾⁵⁾開発が必要になる。

3. 6. 2. 知的材料としての形状記憶合金(SMA)

(1) 知的要素材料の必要性

【図3. 6. 2】で示される次世代の機械構造物を実現させるためには、究極的には、常時、機械部品や構造物に加わる外力や温度などの環境の変化を検知し、かつその内部で進む構造変化や損傷劣化状態を我々に知らせることが出来たり、さらには、構造体に組み込まれたその材料自体の特性が能動的に変化して、構造物の形状変化や内部き裂・損傷なども修復可能な、いわば知能を持つようなセンサとアクチュエータを一体化させた小型のインテリジェント機能素子(Intelligent Material Element)の開発が必要になるであろう。現時点では、このような非破壊的情報発信機能があり、自らもその構成材料として能動的な特性変化への寄与が可能な複数の機能を有するセンサ素子は、材料/構造体研究者にとっても21世紀の夢の技術としてとらえられているが、そのような可能性を秘めた材料素子の一つとして、日米欧での最新の知的(インテリジェントまたはスマート)材料研究のなかから形状記憶合金(Shape Memory Alloy, SMA)が有力な候補として浮かび上がっ

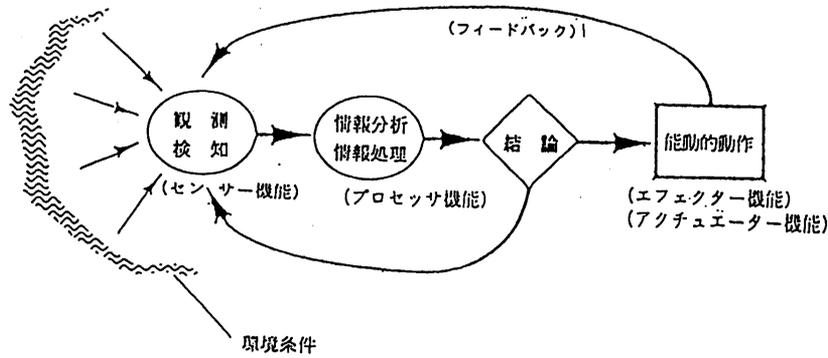


図3. 6. 1 知的（インテリジェント）の機能条件と環境に知的に応答するための流れ図²⁾

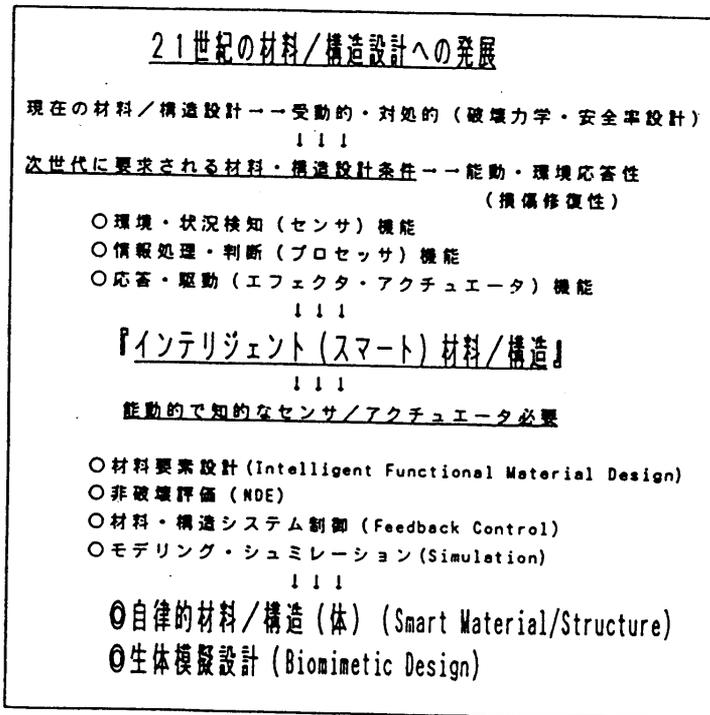


図3. 6. 2 インテリジェント（スマート）材料/構造の発展⁵⁾

表3. 6. 1

各種形状記憶合金の化学組成、変態温度、ヒステリシスおよび変態体積⁷⁾

合金	組成	M.点, K	変態温度ヒステリシス, K	結晶構造変化*	規則隣接の有無	体積変化
AgCd	44~49 原子 %Cd	83~223	~15	B 2→2 H	規則	-0.16
AuCd	46.5~50 原子 %Cd	243~373	~15	B 2→M 2 H	規則	-0.41
CuAlNi	14~145 質量 %Al 3~4.5 質量 %Ni	133~373	~35	DO ₃ →M 18 R	規則	-0.30
CuAuZn	23~28 原子 %Au 45~47 原子 %Zn	83~233	~6	ホイスラー→M 18 R	規則	-0.25
CuSn	~15 原子 %Sn	153~243		DO ₃ →2 H または 18 R	規則	
CuZn	38.5~41.5 原子 %Zn	93~263	~10	B 2→9 R または M 9 R	規則	-0.5
CuZnX (X=Si, Sn, Al, Ga)	数質量 %X	93~273	~10	B 2→9 R または M 9 R DO ₃ →18 R または M 18 R	規則	
InTi	18~23 原子 %Ti	333~373	~4	FCC→FCT	不規則	-0.2
NiAl	36~38 原子 %Al	93~373	~10	B 2→M 3 R	規則	-0.42
TiNi(Fe, Cu)	49~51 原子 %Ni	223~373	~30	B 2→B 19	規則	-0.34
FePt	~25 原子 %Pt	~143	~3	L1 ₁ →応心正方格子	規則	0.8~-0.5
FePd	~30 原子 %Pd	~143		FCC→FCT→ECT	不規則	
MnCu	5~35 原子 %Cu	23~445	~25	FCC→FCT	不規則	
FeNiTiCo	Ni: 33, Ti: 4, Co: 10	~155	~20	FCC→ECT	部分規則	+0.4~2.0

てきている³⁾⁵⁾⁶⁾。

(2) 知的 (インテリジェント) センサ/アクチュエータ機能

形状記憶効果 (Shape Memory Effect, SME) を持つ合金は、【表 3. 6. 1】に示される様に現在までに TiNi, CuAlNi, NiAl を代表とする金属間化合物系、さらに最近では鉄系の FeNiCo、ステンレスなども含めた十種類以上の様々な合金系で発見されて来ている⁷⁾。SME の多くは、【図 3. 6. 3】に示される様に、結晶学的には”熱弾性型マルテンサイト変態”と呼ばれる変態機構に起因する。また、SMA に見られる超弾性 (Superelasticity, SE) は、高温側オーステナイト相での応力誘起マルテンサイト変態により起こる⁷⁾。SMA で現れる一般的な材料機能特性をまとめて【図 3. 6. 4】に示す。特に、その温度上昇に伴う結晶相変態により 2~3 倍の剛性向上と回復応力発生が起こり、さらに、その合金自体も構造材料として大きな制振 (減衰) 性や耐摩耗性などユニークで優れた材料機能特性が備わっている⁷⁾⁸⁾。すなわち、前記の知的材料条件のうち、[1] センサ (温度、応力) と [2] アクチュエータさらには [3] 能動応答 ([1] + [2])、[4] 記憶・形態回復機能を SMA 自体はすでに内包し、その相変態や材料特性を温度のみならず外力 (応力) でもコントロール出来ることを意味していて、インテリジェントセンサ/アクチュエータとして利用可能なユニークで優れた要素材料として位置付けることが出来る。なお、実際に、知的材料/構造体を設計製作する場合は、SMA をあたかも人工的な神経 (センサ) と筋肉 (アクチュエータ) のように利用するので、材料構造体の表面もしくは内部に組み込んだ複合的構造 (コンポジット) が適している⁹⁾¹⁰⁾。その様なインテリジェント機能素子への初歩的な試みとして、電磁誘導 (うず電流) に伴う強磁性体フェライト被覆層の発熱を利用した【図 3. 6. 5】に示される電磁気応答型の TiNi 合金素子を開発し¹¹⁾、生体ガン温熱療法針や生体内人工筋肉型アクチュエータ、さらには電磁場を利用した金属、ポリマーやコンクリート系など各種複合材料製造プロセスでの母材中の混合・配列素子の方向制御などにも応用出来ることを示している⁶⁾。

3. 6. 3. 形状記憶合金 (SMA) を用いた材料/構造体の能動制御

(1) フィードバック SMA 材料特性制御

形状記憶複合材料 (SMC) を知的機能化させるために、その内部に混合、配列させた SMA ファイバーを利用した、フィードバック材料特性制御 (自己診断機能→自己調整・修復機能発現) とその流れを【図 3. 6. 6】に示す¹⁰⁾。例えば、【図 3. 6. 7】に示される様に、SMA の熱弾性的相変態 (形状記憶効果) や応力誘起相変態 (超弾性効果) に伴う材料物理情報 (電気抵抗変化、超音波音速変化、内耗 (減衰)、AE 発生) をセン

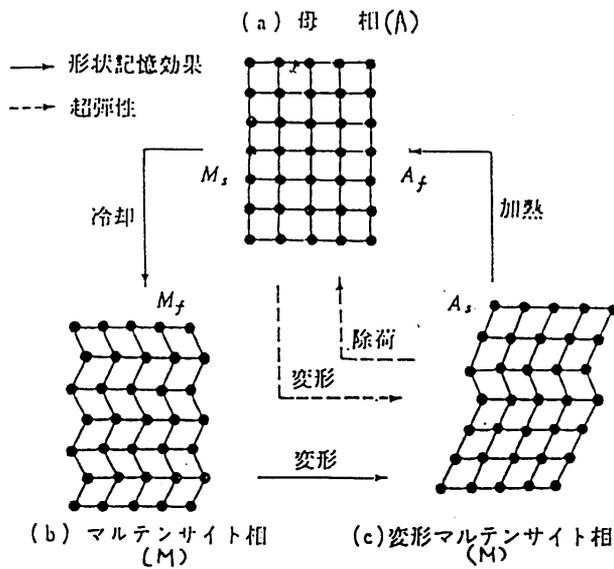


図 3. 6. 3 形状記憶効果と超弾性の結晶学的格子変態の概念図^{7) 8)}

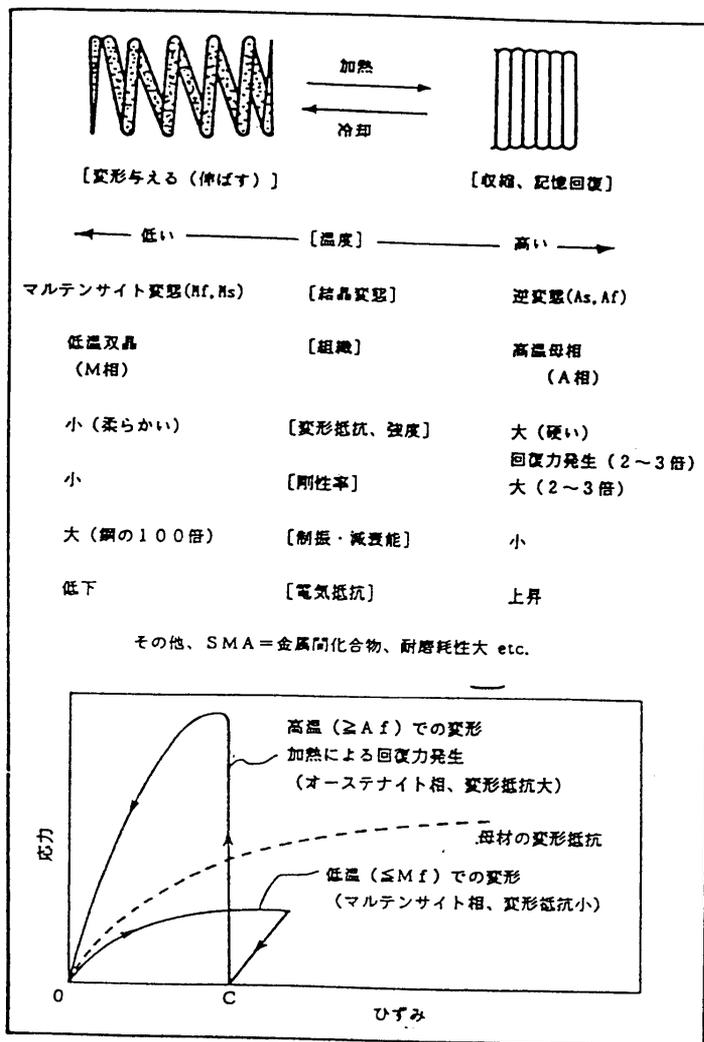


図 3. 6. 4 温度上昇に伴う形状記憶合金 (SMA) の材料機能特性変化^{5) 10)}

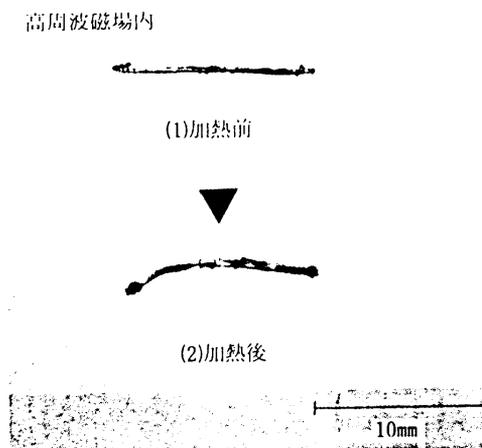


図3. 6. 5 高周波磁場に置かれたフェライト被覆TiNi
インテリジェント素子の変形¹¹⁾

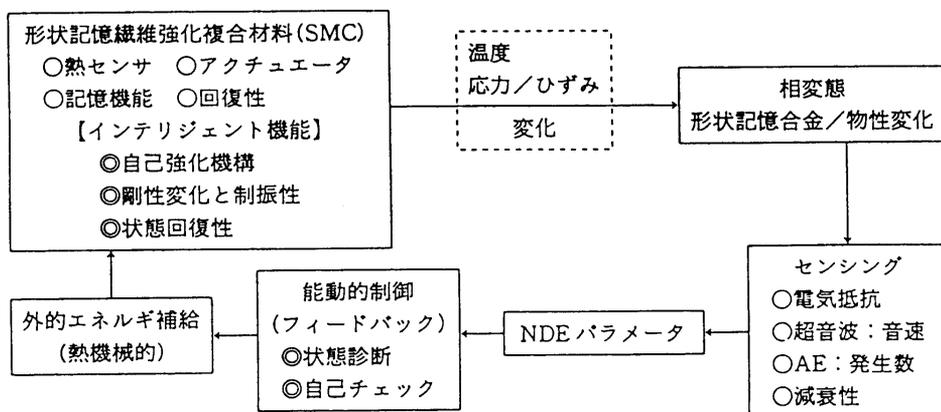


図3. 6. 6 形状記憶複合材料(SMC)でのフィードバック
材料特性制御とその流れ図¹⁰⁾

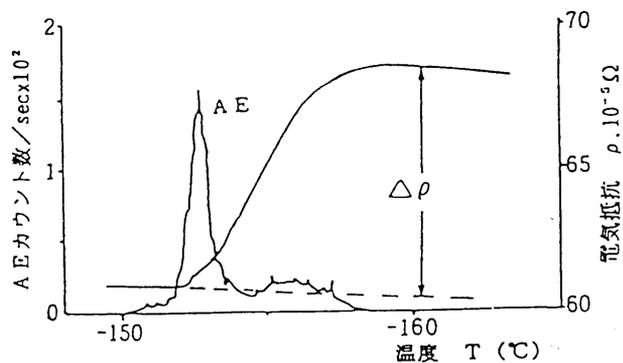


図3. 6. 7 形状記憶Cu-Zn合金の温度変化に伴う電気抵抗(ρ)と
AE発生数の変化¹²⁾

シングしながら¹²⁾、外部的環境・状況に対応してSMAファイバーに通電法などによる加温収縮もしくは応力負荷により相変態を起こさせて、その剛性を変えて、SMA複合材料部材の形状、材料強化、き裂閉鎖・強硬化さらには制振性などの機能を材料側から能動的に付与することが出来ることになる。そのための基礎的研究として、著者が試みた光弾性エポキシ樹脂製引張り板試料表面に予ひずみ1%のTiNiファイバを配置・設定して、通電加熱により形状記憶収縮させ、切欠き先端での応力集中を減じた実験例を【図3.6.8】に示す。TiNi繊維への通電加熱により急激な圧縮応力が導入され、図中に模式図として示されるように応力拡大係数(K値)の減少が確認出来た¹⁰⁾。これは、SMAファイバを生体での神経系と人工筋肉系に置き換えたものにとらえることが出来る。

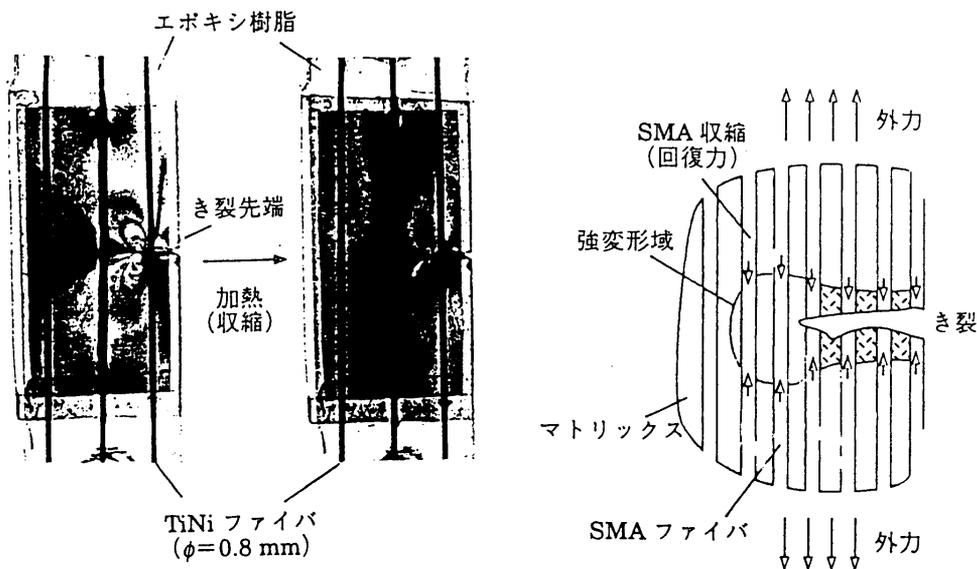
3.6.4. 工学的研究事例

これまで述べた、インテリジェントセンサ/アクチュエータとしてSMAの特性、およびそれによる材料/構造体の能動制御の考え方を基本にして、工学的な知的材料/構造システム実現への可能性を材料強度、機能性建築材料および土木工学分野などでの例を挙げて示す。

(1) 知的材料

まず、知的化を考えた金属系新材料開発については、実際に加圧鋳造法により、【図3.6.9】に示される形状記憶TiNi繊維強化/Al基複合材料がわが国で初めて開発され、“多重機能=知的材料”としての可能性が示された⁹⁾。その基本的な材料設計指針は、Alなど金属は一般的に高温で剛性と強度が低下してしまうので、これをSMAの温度上昇に伴う形状記憶収縮効果と逆の回復力強化作用(【図3.6.4】参照)により防ぎ、さらに、母材とSMAファイバの剛性率の違いにより起こる制振・減衰効果を引き出そうというものである。そのための材料加工および熱処理順序を含む材料設計概念を【図3.6.10】に模式図で示します。以上の特徴を考えると、TiNi/Al基複合材は、振動抑制と軽量化が要求される航空機や車両用材料、さらには混合TiNi繊維の耐摩耗性向上のメリットも生かした形で中温度域(100~200℃)までのエンジン用材料などとして期待できる。

次に、知的な機能性建築材料への応用の一例として、【図3.6.11】に示される直接通電加熱方式によるSMA相変態を利用した能動的振動・騒音吸収数可変複合材料板が米国で報告されている¹³⁾。また、同様にTiNi繊維強化エポキシ複合材料からなる連結棒でのSMA変態を利用したアクティブな振動制御に成功した例が報告されており¹⁴⁾、SMAの変態および高制振性を材料設計に取り入れた複合材料は、能動応答性を有する知的材料として可能性がある。



$K=0.19 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ $K=0.08 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$

図 3. 6. 8 TiNi 繊維強化/エポキシ樹脂複合材で確認された TiNi 繊維の加熱収縮に伴うき裂先端部の光弾性縞の変化と応力集中の減少およびき裂閉鎖・材料強化機構模式図^{10) 12)}

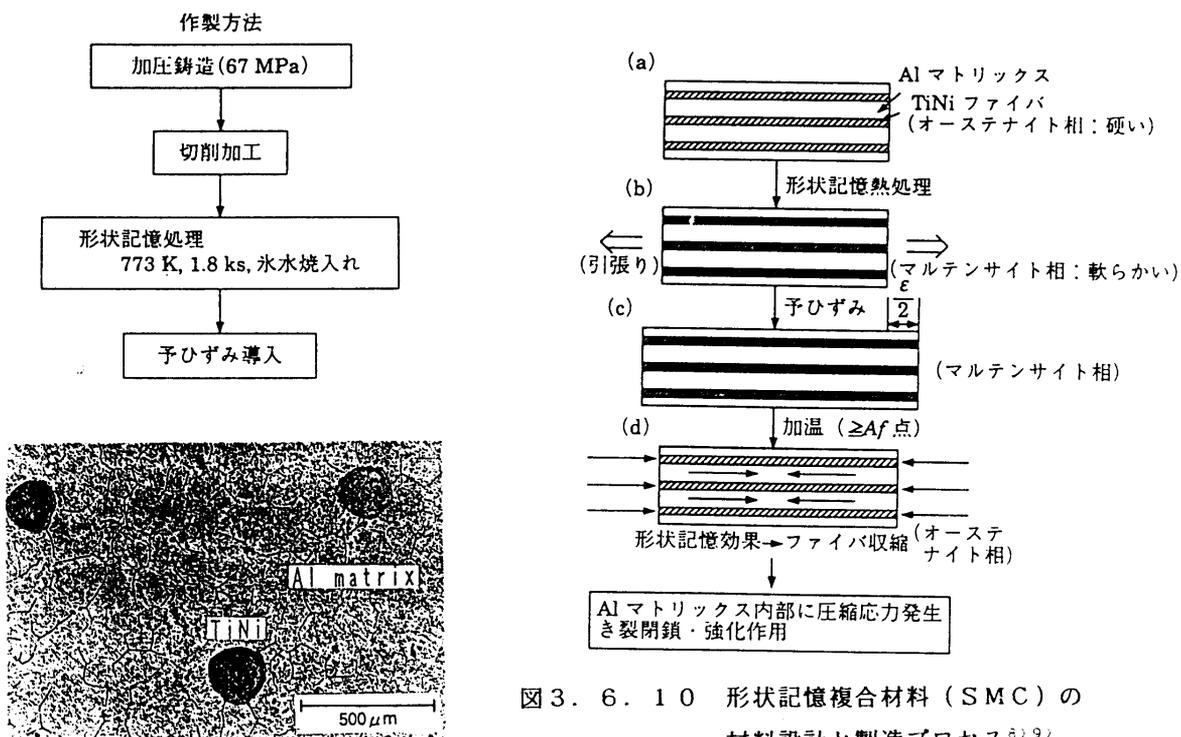


図 3. 6. 9 開発した TiNi 繊維強化 Al 基複合材料の試料作製手順と断面顕微鏡組織写真^{8) 9)}

(2) 知的材料システム・構造

また、材料力学・強度分野では、前出の【図3. 6. 8】の応用として、【図3. 6. 12】に模式図で示される様な応力集中が起こる切り欠き底部分にあらかじめ設定したSMA繊維列からなるアクチュエータに通電加熱などを与え、形状記憶収縮応力により平均応力を下げて応力集部分でのき裂発生や疲労き裂閉鎖促進によるき裂伝播速度低下・長寿命化など能動的な破壊靱性制御が可能になる¹⁰⁾¹⁵⁾。

さらに、土木工学分野でも能動的構造強化を可能とする知的材料システム設計¹⁶⁾が考えられる。その模式図と設計概念を【図3. 6. 13】に示す。例えば、橋梁、ダム、高層ビルに於いて台風や急激な増水、地震時などにより起こる異常な外力、振動負荷を受ける場合等が想定もしくは予知される場合、SMA材の端部に設置した電気抵抗測定計器やAEセンサを通して、材料/構造内部の応力状態や温度変化を検知したのち、異常時にSMAパイプ内部に温水や高温蒸気を急速に流し込むシステムを考える。SMAの剛性と強度は数倍上がり、それらを内部に組み込んだ複合コンクリート材料/構造体全体の強度と剛性、さらには母材とSMA間での剛性の違いに起因する制振性などの向上が可能となる。このようなSMA素子(センサ/アクチュエータ)を組み込んだ知的材料/構造システムでは、原子力工学分野¹⁷⁾なども含む機械構造物における、社会的に重大な損害を引き起こす突発的な破壊事故を未然に防いだり、構造物の全体破壊までへの長寿命化が期待出来ることになる。

3. 6. 5. その他のSMA知的材料化研究

(1) SMAアクチュエータの特徴を生かした実用化研究

SMA単体での応用方面の研究分野としては、【図3. 6. 14】に示されるな、SMA本来の熱機械的エネルギー変換機能を利用した感温素子やロボットアクチュエータ(駆動素子)利用が多く試みられて来ている¹⁸⁾¹⁹⁾。一般にSMAアクチュエータでは冷却時の熱放散が応答速度を律速してしまうので、【図3. 6. 15】に見られるように、ヒートシンクとしてのシリコン材料に埋め込んだりして応答速度の改善や二方向性アクチュエータ機能を付与する知的機能化に向けての要素研究が進められている²⁰⁾。なお、SMAアクチュエータの環境応答への多重機能化をめざした【図3. 6. 16】に示される光-熱-力変換アクチュエータも提案されている²¹⁾。

(2) 生体医用材料分野

患者の成長や治癒の程度により生体になじんで変形・変質できて、患者への不快感を低減させるような知的な医科歯科材料や新治療システム開発は、もっとも身近な医療に関す

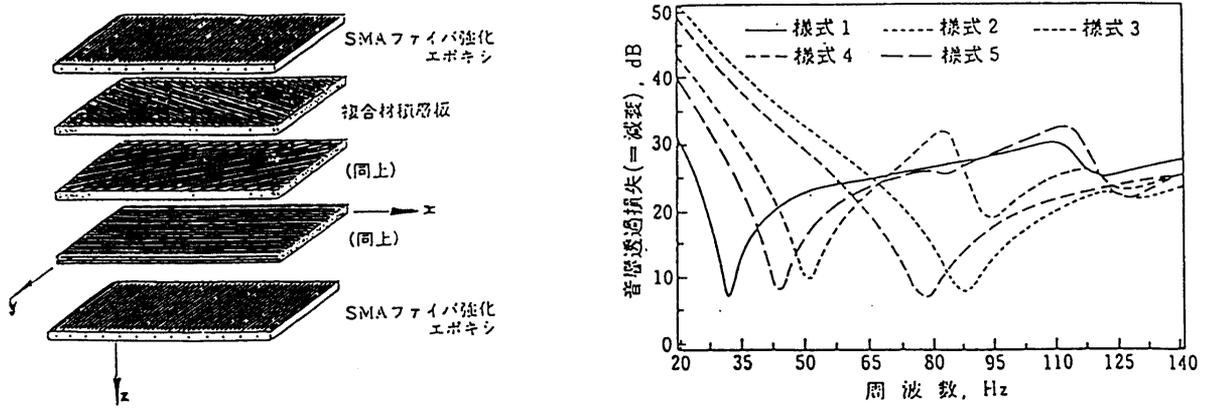


図3. 6. 1 1 SMA薄帯埋め込みエポキシ板に応力負荷アクチュエータを組み込んだ能動的波動吸収周波数可変板¹³⁾

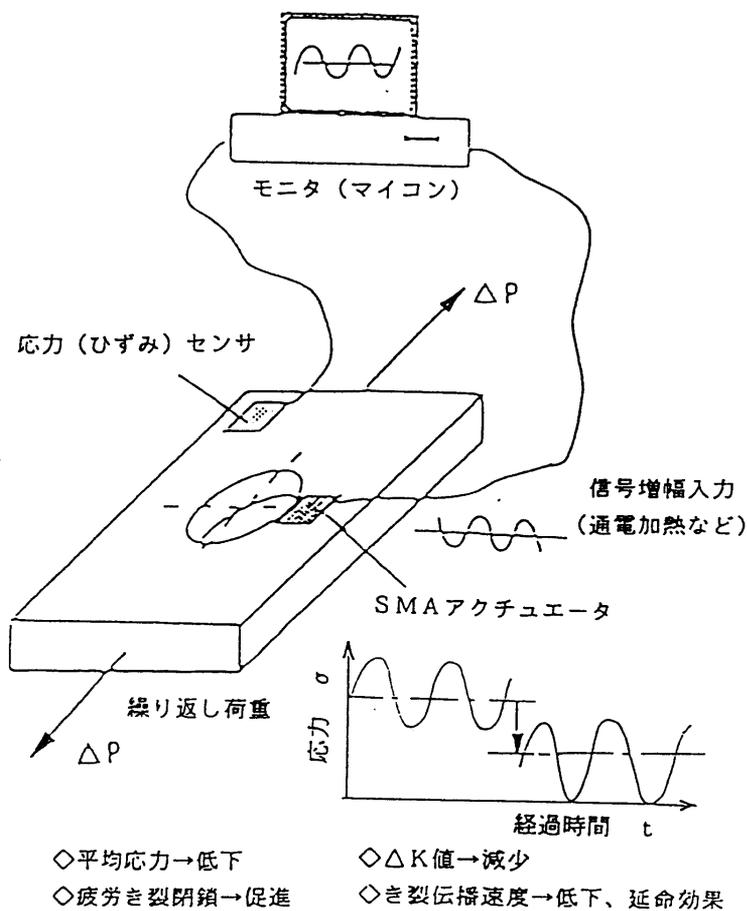


図3. 6. 1 2 SMA線列アクチュエータを用いた切欠き底応力集中部での疲労き裂伝播と寿命の能動的制御^{10) 14)}

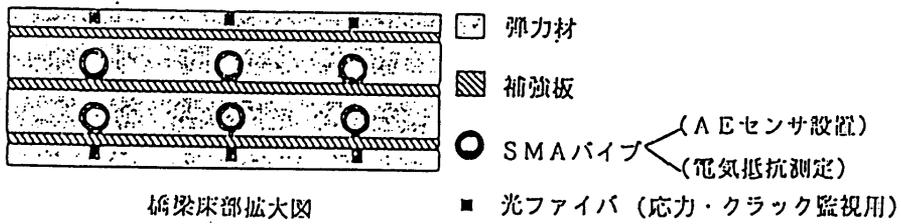
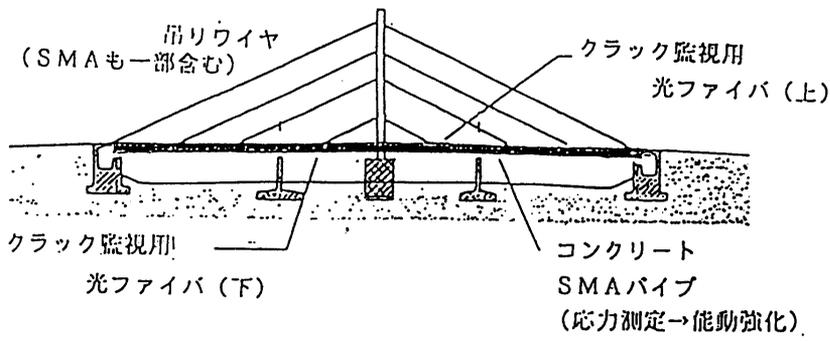


図3. 6. 13 形状記憶合金の変態現象を利用した能動的コンクリート系構造物強化と制振システム概念図^{12) 16)}

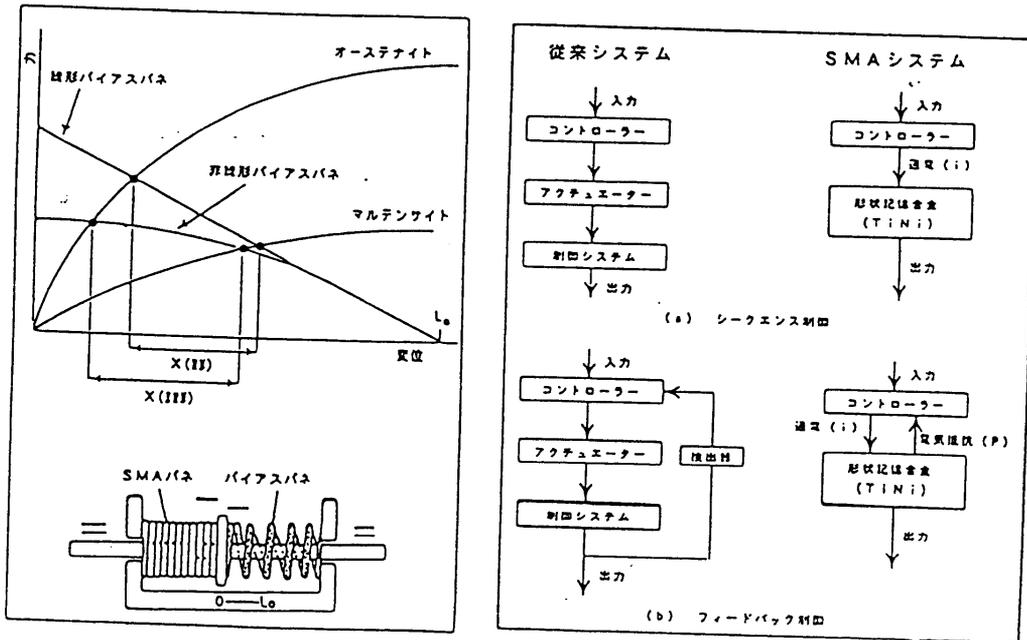


図3. 6. 14 SMAアクチュエータの作動原理と特徴^{18) 19)}

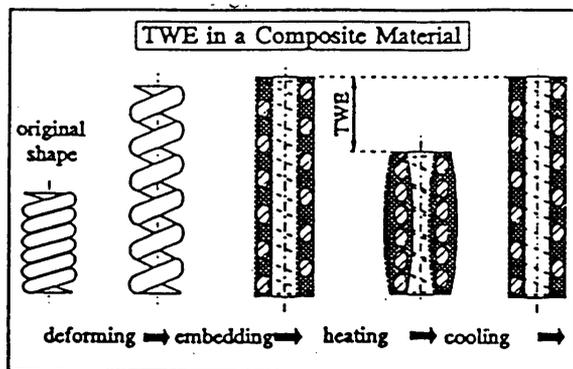


Figure 1: TWE of a composite material. The alloy has to be deformed pseudoplastically, before the silicone is vulcanized on the surface.

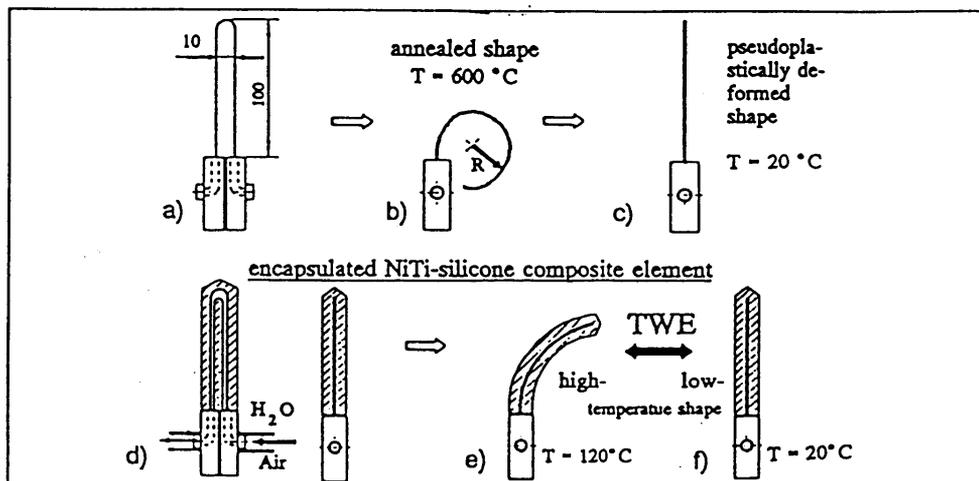


Figure 2: Preparation of finger elements using NiTi-Silicone composite materials. a) NiTi-wire fixed on an Al-base; b) annealed high temperature shape; c) pseudoplastically deformed shape; d) embedded element with cooling channels; e, f) TWE of the finger.

図 3. 6. 1 5 シリコン中に埋め込んで冷却時応答性を高め、かつ二方向性形状記憶効果発現を目指したSMAアクチュエータ²⁰⁾

光-熱-力変換アクチュエータ

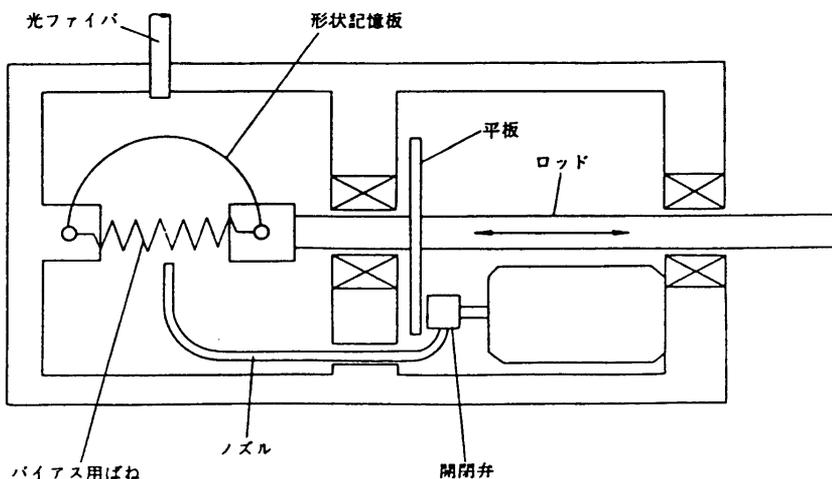


図 3. 6. 1 6 知的な光-熱-力変換アクチュエータ²¹⁾

髄内骨接合材

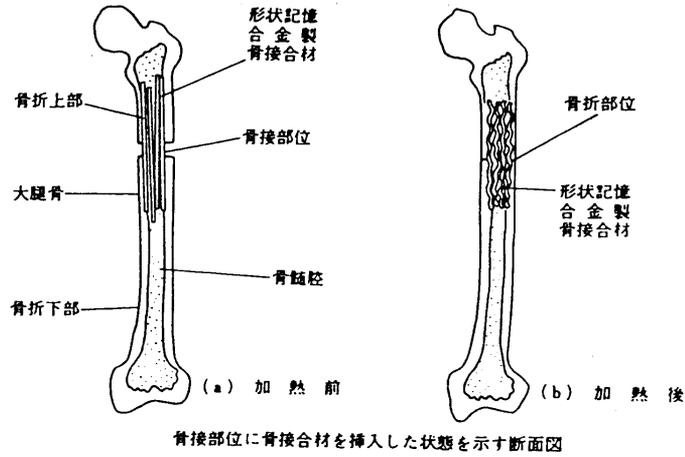


図3. 6. 17 SMAを用いた髄内骨接合材²²⁾

薬剤散布用消化管カプセル

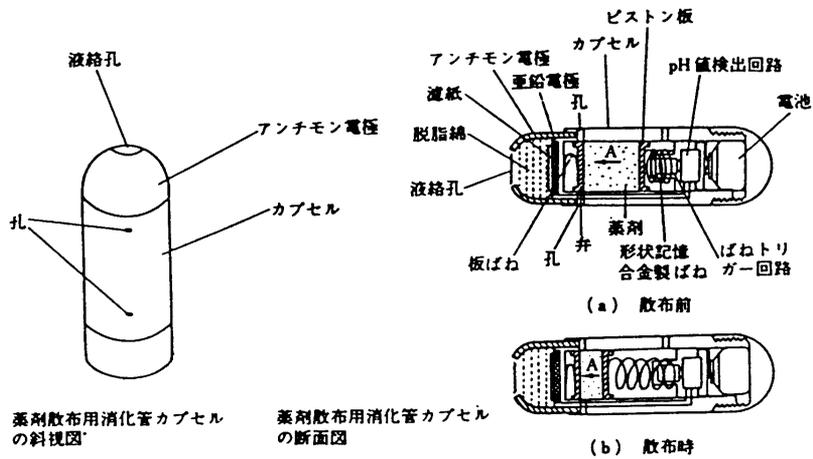


図3. 6. 18 SMAを用いた知的な薬剤送達用 (DD) カプセル²³⁾

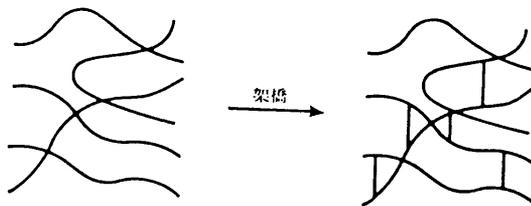


図3. 6. 19 高分子材料における架橋による網目構造の形成模式図²⁴⁾

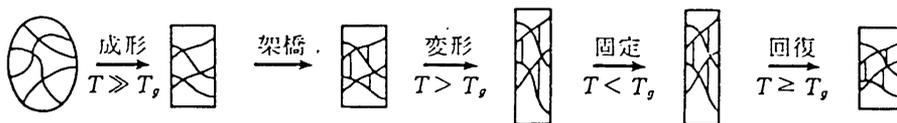


図3. 6. 20 高分子材料での形状記憶効果発現のための材料プロセス²⁴⁾

る分野であり、目に見える形で結果が我々に実感できる。それゆえに、医療の知的化の重要性は一般にも理解され易く、わが国を始めとした先進技術国では、今後、発展が期待される研究分野と予想される。それらに向けてのSMAを用いた医科歯科治療研究例としては、SMA人工歯根、人工関節固定用SMAピンや【図3.6.17】に示される髄内骨接合用SMA材など多くの事例が考案されている²²⁾。さらに、生体内の胃→腸移動時に変化する酸性(pH値)をカプセルが検知して、その内部の超小型SMAバネが伸びて消化管にカプセル内薬剤が放出される【図3.6.18】の知的な薬剤送達システム(DDS)も提案されている²³⁾。

3.6.6. 金属以外の形状記憶材料(SMM)²⁴⁾²⁵⁾

熱弾性的マルテンサイト変態を代表とする金属系SMA以外にも、形状記憶現象を示す材料が高分子やセラミックス系で見つかって来ている。その応用例はSMAに比べて少ないが、今後、金属以外の材料が使用されるにつれて徐々に発展する可能性もあるので以下に紹介する。

(1) 形状記憶高分子材料

ポリエチレン系、ウレタン系、ポリアセタール系、ポリノルボルネンの様な高分子(樹脂)材料も熱的環境変化に伴って形状記憶効果を示す。これらは高分子材料特有のガラス転移(ガラス転移温度=T_g)という相変態が関係しており、その機構には高分子鎖同士がすべりを起こさないように互いに網目構造を作るように結合させる【図3.6.19】に示される”架橋”形成が関与している。高分子に形状記憶機能を与えるプロセスを【図3.6.20】に示す²⁴⁾。室温においてある形状を有する高分子素材に化学的もしくは電子線照射による架橋形成処理を行う。その後、T_g以上に加熱し変形を与え、そのまま室温まで温度降下させると変形は保持されたままになる。これは、T_g以下では高分子鎖の運動が拘束されひずみが残留されるためである。この状態で再びT_g以上に加熱すると残留ひずみが解放されて架橋処理時の元の形状に回復する。合金と高分子材料での形状記憶現象は対症的な面が多い。後者の形状回復率は数百%にも及ぶが高温側で柔らかくなり電気的絶縁体である。そのためにSMAの様な高温自己強化は期待できない。そこで、両者の相補的な面を利用したSMAと形状記憶高分子材料との組み合わせで両方向変形を促進できることに着目した組み合わせ型SMAアクチュエータが提案されている。その他、化学的刺激や光反応による高分子系材料での形状記憶効果も現れることがわかっている²⁴⁾。高分子系単体での応用例はまだ未開と言え、電気コネクタや【図3.6.21】に示される異形パイプの結合などが試みられているに過ぎない²⁶⁾。しかし、つい最近、繊維の分子に架橋処理をして、【図3.6.22】に示されるアイロン不要の形状記憶ワイシャツ

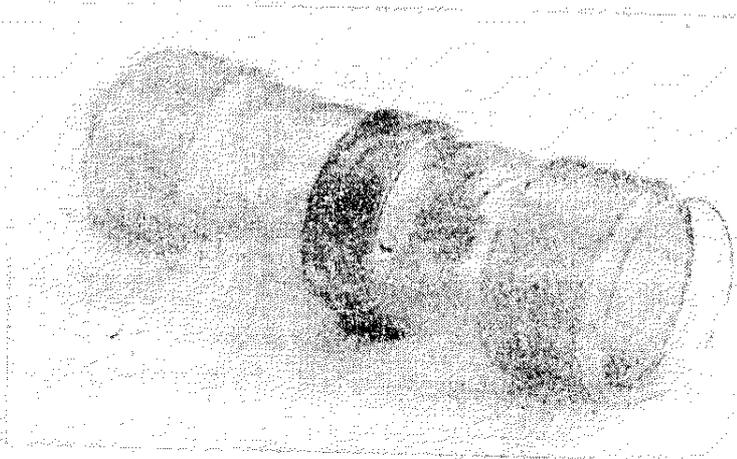


図3.6.21 電線接続と被覆を同時に行うための内管面ハンダ付き熱収縮チューブ²⁶⁾

綿繊維の分子を結合し固定

アイロン不要のワイシャツ

しわを防ぐ仕組み

しわのない状態

密な部分(結晶)	粗い部分(非結晶)
綿繊維	セルロース分子

洗うと分子の粗い部分が折り曲げられる

ホルマリンで分子と分子を結合

⑤ホルマリンで加工したシャツを、五回洗濯したもの④加工していないシャツを、五回洗濯したもの(いずれも東洋紡提供)

図3.6.22 形状記憶繊維を用いたアイロン不要のワイシャツ開発とその作用機構原理図²⁷⁾

が国内繊維メーカーから相次いで開発されて大きな市場を形成しつつある²⁷⁾。また、形状記憶毛髪なども試作されて来ている。これらは、美容・服飾産業への高分子系での形状記憶材料の代表的な用途開発成功例として大いに注目される。

(2) 形状記憶セラミックス

PZT強誘電体では、形状記憶合金に比べて回復ひずみ量は1桁以上小さいが、電氣的に駆動でき応答速度が早い利点がある²⁸⁾。また、結晶化ガラスの一種であるマイカガラスセラミックスでも変形後に高温側で形状記憶効果が発見されている²⁹⁾。これらの事実は、セラミックス系でも結晶構造変化、相変態に伴い変形量は小さいが形状記憶現象があることを示す事例であるといえることができる。形状記憶セラミックス系では、その現象自体が発見されたばかりで、その応用についてはまだほとんど提案されていないのが現状である。ガラスやセラミックスでの相変態時の物理的性質（ひずみエネルギー解放、屈折率変化など）の変化を有効に取り入れた形で、破壊靱性や光（波動）などの物質透過率を人工的に制御できる、知的機能をこれら素材に付け加える試みに研究が発展して行くことを期待したい。

3. 6. 7. 知的（インテリジェント）材料を実現させるための要素技術

これまで説明してきた各種形状記憶材料（SMM）の特性を比較したものを【表3. 6. 2】³⁰⁾に示す。このように、SMMはそれぞれ異なった特徴を有しているので、その応用には各素子で異なる形状記憶効果の発現メカニズム、回復力（ひずみ）量や応答速度、駆動エネルギー、使用可能温度とその際の材料強度などを注意深く考慮して選択する必要がある。

以下には、最も研究が進んでいる金属系の形状記憶合金（SMA）を用いたインテリジェント材料実現への課題と要素技術をまとめてみた。

(1) SMA実用化への材料学的課題

知的材料要素としてのSMAアクチュエータの利点は、出力/重量比が大きく、シンプルな機構で小型化可能やノイズレスなどの特徴があるため、特にマイクロマシン用として有望視されている。しかし、SMAの一層の実用化を促進するためには、【図3. 6. 23】に示される様な大きな回復力（ひずみ）実現、熱エネルギー変換効率向上、耐疲労劣化（記憶ボケ）抑制、早い応答性を得るための冷却時の熱放散が大きい薄膜・細線化加工技術確立など材料学的課題が残されていた¹⁹⁾。また、知的システム化への研究が進んでいる来ている、もっと高温環境下にさらされる航空宇宙機器や発電用プラント材料・構造への適用には、現在よりもさらに高温で作用したり、高い耐食性や耐放射線変質への抵抗など高度で信頼性における材料機能が要求されてくることになる。

	形状記憶合金	強誘電体	形状記憶ポリマー	形状記憶セラミックス
形状回復ひずみ%	1~10	~0.1	200~1000	1
回復応力 (MPa)	500	50	10~30	40
駆動源	熱	電界	熱	熱

表 3. 6. 2 各種形状記憶材料 (SMM) の特性比較³⁰⁾

《 アクチュエーター用SMAへの材料機能的課題 》

(I) 改善すべき問題点

- (1) 熱機械的エネルギー変換効率 大
- (2) 変形ひずみ量 大
- (3) 温度～変形ひずみヒステリシス特性 . . . 温度に敏感、安定
- (4) 繰り返し使用中機能性劣化 (記憶ボケ) . . . 小
- (5) 冷却時に熱放散の大きな材料形状 サンプル採用
→ (比表面積の大きな薄膜、リボン、ファイバーなど)

(II) 対策 ⇒ 《高性能SMA開発→合金組成、新製法》
《新材料加工法によるサンプル形状制御》

↓↓

《SMAマイクロアクチュエータ》 ⇒ 《発展が期待》

- 軽量、小型、ノイズレス・生物的駆動・応答性
- 簡略、高精度

図 3. 6. 2 3 アクチュエーター用形状記憶合金 (SMA) への材料機能的課題¹⁹⁾

(2) 高性能SMA素子

その問題解決策の一つとして、最近、アモルファス合金製造に用いられている液体急冷凝固（メルトスパン）法を採用して、もっと低速度冷却側の領域で結晶方向が非常に揃った微細柱状結晶薄帯を製造し、従来よりも飛躍的に形状記憶合金性能を高めることに成功した。【図3.6.24】に示される $Ti_{50}Ni_{40}Cu_{10}$ （添字は原子%）合金薄帯（約30ミクロン厚さ）では、形状記憶変形量および熱エネルギー変換性能が3~5倍（【図3.6.25】参照）、熱サイクル温度幅が10℃以下（ $Cu=17$ 原子%で最小6.5℃）、冷却時応答速度10~20倍、耐疲労劣化10倍以上、耐食性（アルカリ・酸・海水など）も100~10000倍という画期的（ブレイクスルー）な特性が得られることを確認しており³¹⁾、インテリジェント材料を設計する際の効果的な、薄膜、ファイバ状SMA素子としての利用が期待される。

(3) 線形応答型SMA

幅広い温度変化に対して線形（比例）的に変形できる形状記憶合金（SMA）が、比例制御感温アクチュエータ、人体になじむ生体医療用材料、SMA素子の自己収縮性を複合材設計に取り込んで熱膨張（ひずみ）制御を行ったり、変態時の剛性変化を能動的振動吸収作用に利用する知的材料設計という立場から望まれる。そのために、 $TiNi$ 系をベースとして、第3元素として Co を添加した場合やそれらに熱処理を施した場合の形状記憶ヒステリシス曲線の挙動を調べた。【図3.6.26】に一例として示される温度や応力負荷に対してほぼ線形（Linear）に応答するSMAを得る見通しがつきつつある³²⁾。

(4) 知的材料プロセス

筆者らは、電磁誘導（うず電流）に伴う強磁性体フェライト被覆層の発熱を利用した電磁気応答型のインテリジェント $TiNi$ 合金素子を開発し、生体ガン温熱療法針や生体埋め込み人工筋肉型アクチュエータ、さらには電磁場を利用した金属、ポリマーやコンクリート系など各種複合材料製造プロセスでの母材中の混合・配列素子の方向制御などにも応用出来ることを示した⁸⁾¹⁰⁾。さらに、【図3.6.27】に模式的に示される、材料電磁プロセス技術を利用して、予め小さな形状に収縮させた強磁性体被覆SMAインテリジェント複合機能素子（繊維、粒子、箔）の形状記憶拡大、その配列・分布を制御した厚肉管（パイプ）やポリマ系射出成形製品作製プロセスも提案している⁸⁾。これは、外界温度変化に伴い形状記憶繊維収縮強化、SMA傾斜分布による外面内面間での温度差に伴う熱膨張・熱応力発生軽減さらには音波・電磁波吸収、制振機能、耐摩耗性向上なども発現できる、「傾斜機能材料（FGM）にインテリジェント（知）性を付与した先進的な複合機能材料」³³⁾設計に必要な基盤技術となる。

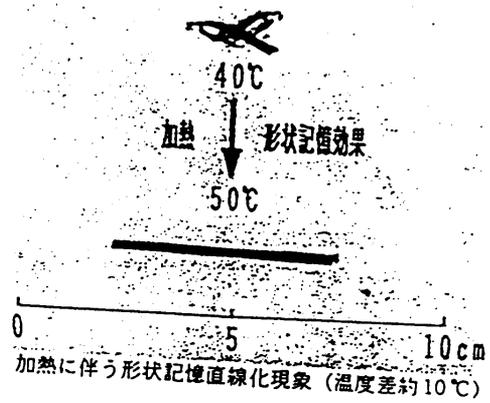
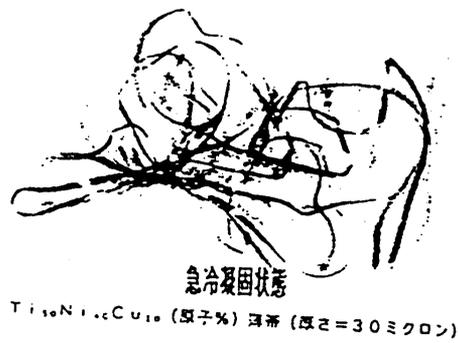


図 3. 6. 24 (a) 液体急凝固法により作製された高性能TiNiCu形状記憶合金薄膜³¹⁾

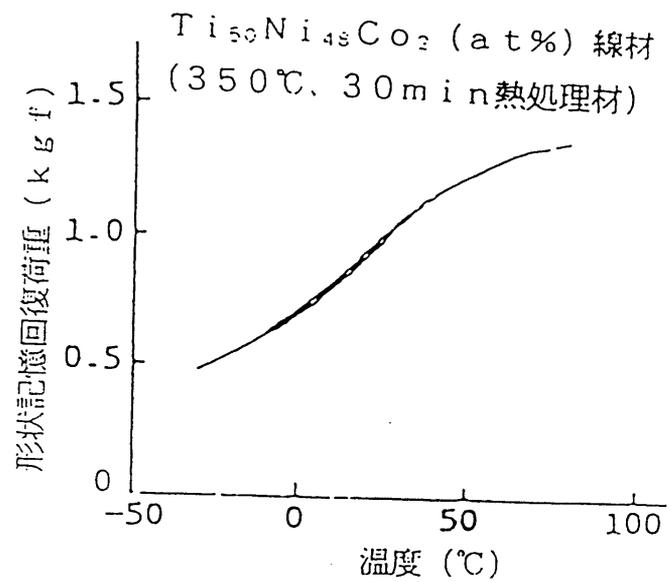
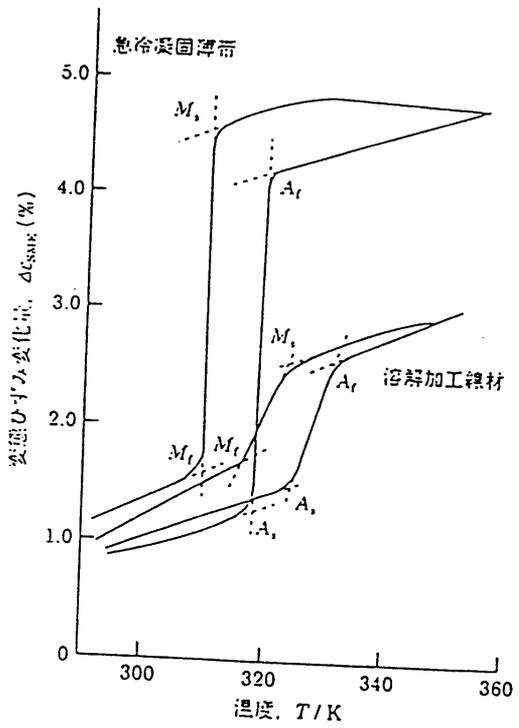


図 3. 6. 26 開発された温度線形応答型Ti50Ni48Co2 (原子%)合金線材での温度~荷重履歴曲線例³²⁾

図 3. 6. 25 液体急凝固および溶解加工法により作製されたTi50Ni40Cu10合金の変態ひずみ変化量~温度ヒステリシス曲線³¹⁾

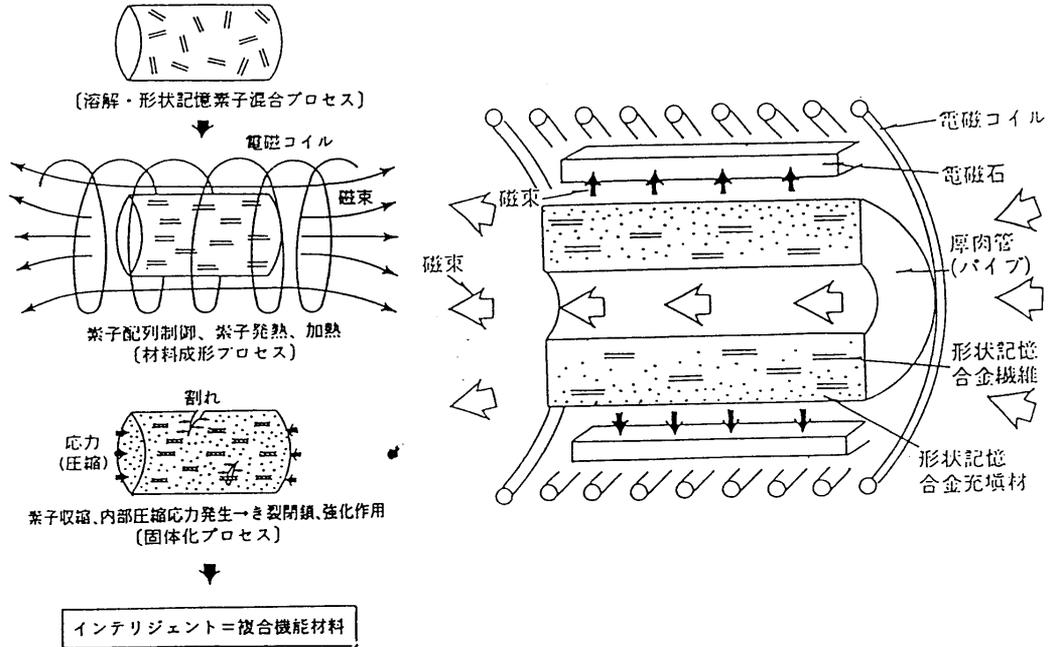


図3. 6. 27 SMA繊維、微細粒子を混練るして、長手引き抜き方向と肉厚方向圧縮応力発生・傾斜分布を目的にした、電磁力を利用した形状記憶複合機能材料製造用電磁プロセス予想図(インテリジェント マテリアルプロセス)³³⁾

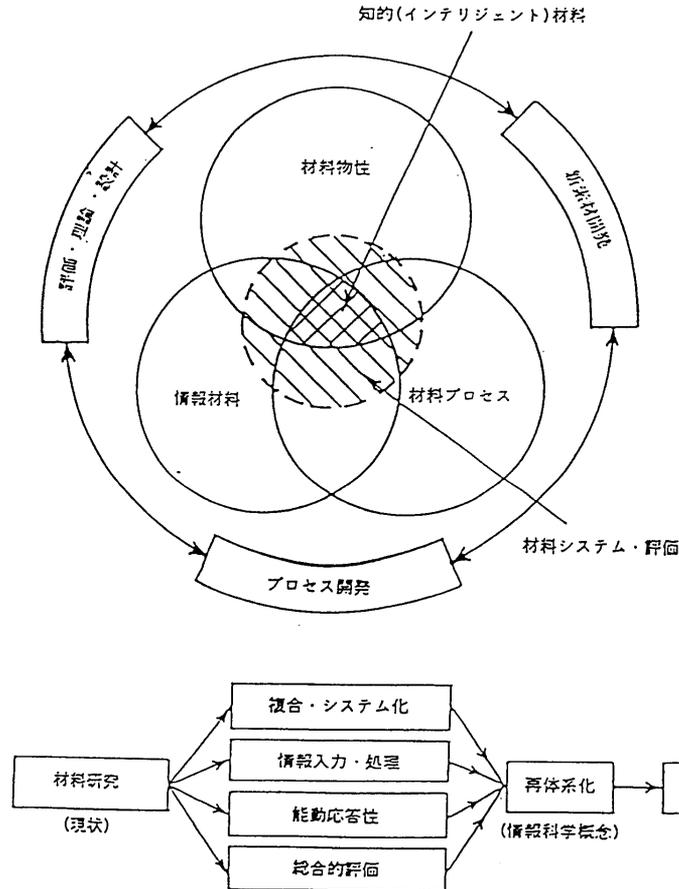


図3. 6. 28 インテリジェント材料研究・開発に必要な材料学(物性、プロセス、情報)の相互関係と研究流れ図^{33) 34)}

3. 6. 8 知的材料研究の進め方

(1) 知的材料研究開発への新体系

知的材料実現には、まず、その基本的な構成要素材料の《物理化学特性》→《その積層・複合化》→《材料内情報伝達・処理》→《材料システム制御》→《能動的応答》→《複数機能（センサ、プロセッサ、エフェクタ）発現》という材料設計が必要となる。知的材料研究・開発に必要な材料学各分野（物性、プロセス、情報）の相互関係と知的材料研究の流れ図をまとめて【図3. 6. 28】に模式図として示す³⁴⁾。従来からの材料物性、材料製造・加工プロセスに加えて、新たに材料への各種外的刺激（情報）に対する材料内反応・情報伝達処理特性、すなわち、センサ、エフェクタ（アクチュエータ）機能に対する基礎研究やそのin-site計測技術開発も含めた形の新たな”情報材料学”との重なり合いにより知的材料が実現できること、そのためには、各種機能性材料の”複合システム化”と材料の使用目的・状況・環境を踏まえた”総合的材料評価”研究の強化が必要となることがわかる。

(2) まとめ（材料新時代）

知的（インテリジェント）材料出現の重要性は、情報（環境）を組み込んだ能動応答性を有する材料設計とそのシステムの制御組み込みによる構造自律化を主体とした研究を意味していて、これまでの材料特性の高性能化を主眼に置いた材料開発への姿勢とは質的に異なっており、材料学的にも未開な研究分野（=情報材料学）を提案しているところにある³³⁾。

知的材料の基礎を形成するこのような新体系（【図3. 6. 1】、【図3. 6. 28】）に、状況・環境の変化に能動的に反応して機能を発揮する、人間社会の活動とも対応可能な新材料研究（=インテリジェント材料）の次代的発展の息吹が感じられる。その、具体的な研究推進については、材料研究者組織内に材料物性、設計・評価、製造プロセス、さらには知的材料に関連してくる周辺学問分野や材料使用環境・条件も含めた形での相互の意見交換が密に行えるフィードバック型の研究進展状況チェックシステムを作り上げて行くことも一層重要になると思われる

知的材料／構造システム のコンセプトの明確化、各分野からの研究手法（アプローチ）の討論、わが国での縦型の枠組を超えた横断・学際的（Trans-disciplinary）³⁵⁾組織連携による開発研究の推進は、材料科学工学に新たな地平を開くのみならず、次の材料革命とエンジニアリング革命の引き金・・・すなわち、21世紀の新錬金術（Alchemy）へのステップになるかも知れない。そこに、知的（インテリジェント）材料・構造システム研究の価値と産学両面にわたる新展開が期待出来る。

参考文献：

- 1) 寺田博之：日本機械学会誌、96-894 (1993)、406
- 2) 高木俊宣：インテリジェント材料、1-1 (1991)、1 または 新素材 (日本工業出版)、4-8 (1993)、51
- 3) Special Issue "Smart Materials", MRS Bulletin, XVI, No.4 (1993), 24-5 および Gandhi, M.V., and Thompson, B.S., "Smart Materials and Structures", Chapman & Hall (1992)
- 4) 江川幸一：機械の研究、44-7 (1992)、793を始めとした連載講座"超先進構造・材料としての知的材料"がある。
- 5) 古屋泰文：インテリジェント材料、3-3 (1993)、22
- 6) Proc. 1st European Conference on Smart Structures and Materials, (1993, May, Glasgow).
- 7) 特集：形状記憶合金とその応用、日本金属学会報、24 (1985)、1
- 8) 古屋泰文：機械の研究、44-9 (1992)、87および44-10 (1992)、80
- 9) Y. Furuya, A. Sasaki and M. Taya: Mater. Trans. JIM, 34-3 (1993), 224
- 10) 古屋泰文：新素材 (日本工業出版)、4-8 (1993)、63 または 日本機械学会、第70期通常総会講演会・講演論文集、No.930-9 (1993), 90
- 11) Y. Furuya, Y. Tanahashi & S. Orikasa: Proc. Int. Conf. on Intelligent Materials, Oiso (1992), 39, in press.
- 12) 古屋泰文：非破壊検査、43-3 (1994)、157
- 13) W.S. Anders & C.A. Rogers: Proc. 1st Joint US/Japan Conf. on Adapt. Struct., Hawaii (1990), 285.
- 14) A. Venkatesh, J. Hilborn, J.E. Bidaux and R. Gotthardt: Proc. 1st European Smart Structure and Materials, (Glasgow, 1992), 185.
- 15) C.A. Rogers, C. Liang and S. Li : Proc. AIAA/ASME/ASCE/AFS/ASC 32nd SPM Conf. (Baltimore, April 1991, Part II), 1190.
- 16) 古屋泰文：007特別研究委員会資料No. 007-116 (日本非破壊検査協会, 1993)、40
- 17) Y. Furuya, T. Takagi, M. Matsumoto and J. Tani: Proc. EMF Workshop (Tokai, Japan, 1993) C-1
- 18) Y. Furuya and H. Shimada: Mater. & Design, 12-1, (1991), 21.
- 19) 古屋泰文：バウンダリー、8-10 (1992)、47
- 20) K. Escher, C. Haastert, E. Hornbogen and M. Mertmann: Proc. MRS' 93 (Tokyo, Sept.),

in press.

- 2 1) 石川昇治、木梨貞男、三輪 学：形状記憶合金アイデア集（工業調査会）P.91、
（実開昭60-1973号）
- 2 2) 2 0) のP.57、（特開昭59-203550号）
- 2 3) 2 0) のP.57、（特開昭59-115164号）
- 2 4) 清水謙一、入江正浩、唯木次雄：記憶と材料（入門形状記憶材料）（共立出版）
（1896）
- 2 5) 大塚和弘：特集・新素材開発を振り返る（形状記憶合金）、金属、63-8(1993),16
- 2 6) 清水謙一、入江正浩、唯木次雄：記憶と材料（入門形状記憶材料）（共立出版）
（1896）,p.154
- 2 7) 朝日新聞（1993年11月9日、朝刊）
- 2 8) K.Uchino:MRS Int. Mtg.on Advanced Materials,(Tokyo,1989),489
- 2 9) K.E.Schurch and K.H.Ashbee:Nature,266(1977),706 および
伊藤明俊、三輪敬之、井口昇；日本金属学会誌、52-2（1988）、523
- 3 0) 田中喜久昭、戸伏壽昭、宮崎修一；形状記憶合金の機械的性質、養賢堂出版
（1993）
- 3 1) Y.Furuya,M.Matsumoto and T.Masumoto : MRS Proc.,246(1992),355および
松本實、古屋泰文、増本健；日本金属学会会報、32-7（1993）,12
- 3 2) 古屋泰文、木村久道、増本健、相場満；日本金属学会平成6年春季講演概要集、講演
番号246（1994）、86
- 3 3) 古屋泰文：KAST-REPORT、5-3（1993）、6
- 3 4) 古屋泰文：インテリジェント材料、2-3（1992）、6
- 3 5) 谷順二；日本機械学会論文集、60巻576号、C編（1994）、28

3. 7 セラミックス構造体のスマートコンポジット化

セラミックスは耐熱性、耐摩耗性、耐酸化性、耐薬品性、耐絶縁性、機械的性質など、素材によりそれぞれ優れた機能や性質を有している。この優れた特性を活用しようと、様々な研究が進められてきている。実用化のための手段の1つとして、セラミックスをベースとした複合材（コンポジット）とする方法が考えられている。

3. 7. 1 セラミックス・コンポジット

モノリシックセラミックス（単一相で構成されるセラミックス）中に粒子、ウイスカ、繊維等を分散させた複合材料は、複合化により特性が向上することが期待できる。¹⁾

粒子分散強化は、適度な強度を保ちながら靱性を向上させることを期待して行われる。粒子を分散させることにより、クラックの進行を湾曲、変更させることで、靱性が向上する。粒子分散強化において制御する点は、1) 分散状態、2) 分散位置、3) 分散粒子形態、があげられる。1) 分散状態の制御では、粒子の分散が、強度低下を招く臨界サイズよりも小さくなることが求められる。このためには、分散粒子の粒径と量を制御し、かつ、分散粒子が互いに接触しないように均一に分散させることが必要である。2) 分散位置の制御では、大別して分散粒子がマトリックス粒子の粒内に存在する場合と粒界に存在する場合とに分けられる。たとえば、ジルコニア／アルミナ複合材料は粒界にアルミナ粒子を分散させた材料である。（図3. 7-1）²⁾ 粒内分散では、アルミナ粒子中にnmサイズのSiC粒子を分散させた、あるいは、窒化ケイ素粒子中にSiC粒子を分散させたナノコンポジット（図3. 7-2）¹⁾も研究されている。分散位置は強度や靱性の向上のメカニズムや材料系によってそれぞれ最適な条件が異なる。3) 分散粒子形態の制御では、分散粒子の異方性の制御が問題となる。一般には、粒子分散強化ではアスペクト比の小さい、球状に近い粒子を分散させるが、靱性の向上という点からは、粒子形状が球状、円盤状、棒状と、異方性が高くなるほど効果的である。制御の方法としては、異方性の高い材料を原料として使用する方法と、焼結時等の熱処理により異方性の高い粒子を成長させる方法がある。

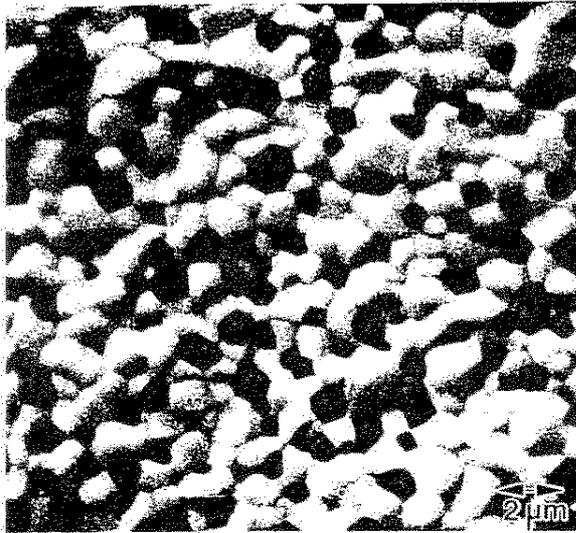


図 3. 7-1 ジルコニア-アルミナ
複合材料の組織

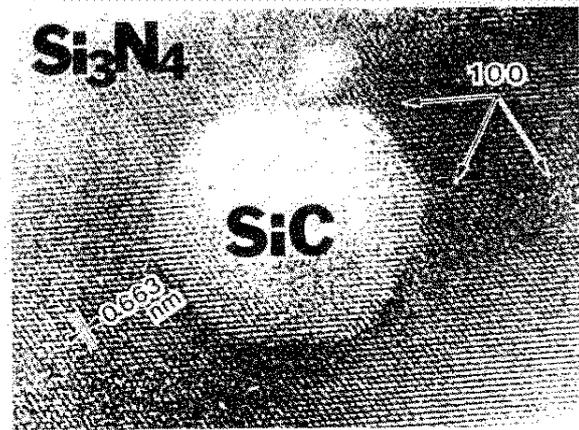


図 3. 7-2 窒化ケイ素-炭化ケイ素
ナノ複合材料の高分解能電子顕微鏡写真

ウイスカ強化セラミックスは、セラミックスマトリックス中にウイスカを分散させ、靱性の向上をめざすものである。粒子分散に比べてウイスカのアスペクト比が大きいため、より効果的な靱性の向上が期待できる。ウイスカ強化による効果は破壊靱性、常温及び高温強度、硬度などの機械的特性の向上だけでなく、高温クリープ特性、耐摩耗性、信頼性、熱伝導性、電気伝導性など、多岐にわたっている。ウイスカの配向を制御することにより、等方的性質を持つ材料から、異方性の大きい材料まで、用途に合わせた性質を持つ材料の製造が可能である。主として、ウイスカとしては、窒化ケイ素や炭化ケイ素、マトリックスとしては、ガラス、アルミナ、窒化ケイ素などが研究されているが、そのほかにも様々な組み合わせが研究されている。さらに、窒化ケイ素では、微細な窒化ケイ素マトリックス中に柱状の粗大な窒化ケイ素粒子を成長させた、いわゆる自己複合化組織を実現させ、ウイスカ強化と同様の効果をもたらす材料も研究されている。

特に靱性強化の研究が多くなされており、熱膨張率差を利用した残留応力や弾性率差を利用した荷重転移によるき裂進展開始抵抗の増大や、き裂先端でのブリッジング、プルアウトによるき裂進展抵抗の増大、マイクロクラックによる応力集中の抑制、き裂のデフレクションによる応力集中の低減などの強化機構が考えられている。(図 3. 7-3) ¹⁾

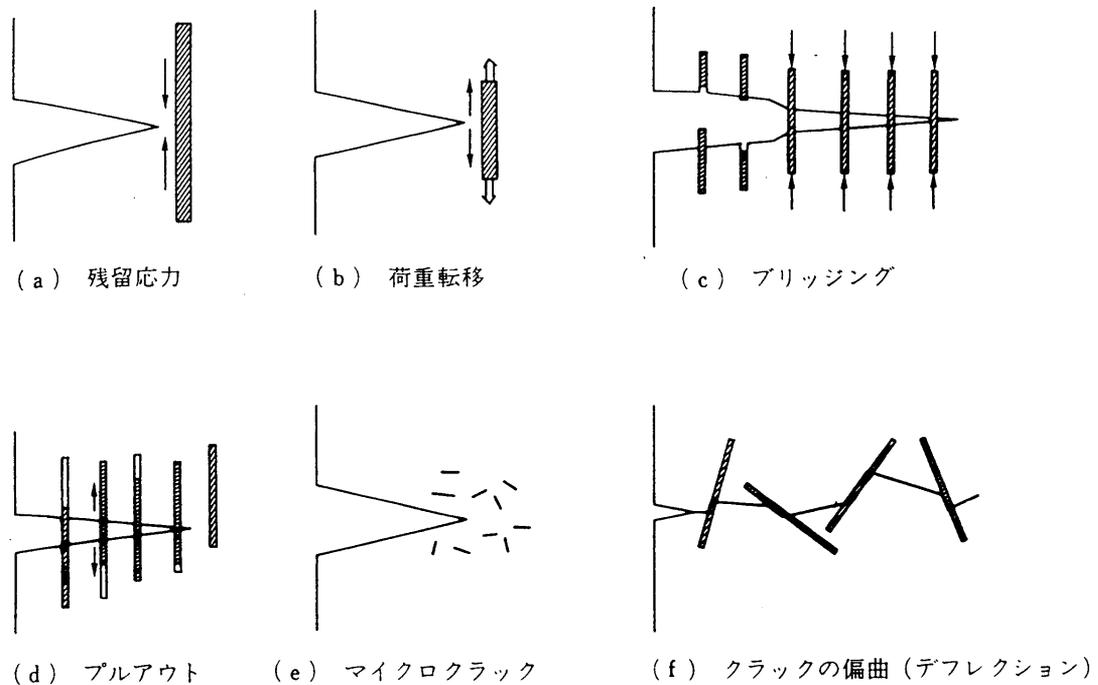


図 3. 7 - 3 ウィスカ強化セラミックス
における靱性強化機構

繊維強化材料は、繊維の配向があるための異方性があり、これをうまく制御することにより、幅の広い特性を持つ材料となりうる。繊維の編みかた、マトリックス前駆体、熱処理方法等の制御により、すぐれた特性を引き出すことが可能となる。

繊維強化型の複合材料の代表例としては、C/Cコンポジットがあげられる。

C/Cコンポジットは、炭素繊維をフィラーとし、マトリックスも炭素からなる複合材料である。軽量で高強度で耐熱性に優れ、2000℃まで強度の低下がない特徴がある。現在、その高温特性を生かして、宇宙航空材料として利用されている。たとえば、国産スペースシャトル「HOPE」の外壁材としての適用の研究が行われている。

また、プラズマを汚しにくいという特徴から、核融合炉の炉壁材として、生体親和性に優れることから医療用材料としても注目されている。

3. 7. 2 要求される機能

セラミックスの最大の欠点は、脆いということである。セラミックスの表面や内部に存在する微細な欠陥を起点としてクラックが発生、進展し、致命的な破壊を引き起こすこと

もありうる。現在、脆性改善のための様々な研究がなされているが、この脆さは結晶オーダーでの科学結合性に起因しているため、素材単体での改善には限界がある。

セラミックスは優れた性質を持っているが、実用化につながらないのはこの脆いという欠点のためである。脆くて信頼性に欠けるため、安心して使うことができないとされてきた。

そこで、セラミックスをスマートコンポジット化することにより、この欠点を補い、従来にない優れた材料とし、セラミックス構造体の利用範囲が飛躍的に広がることが期待できる。³⁻⁹⁾

注) スマートコンポジットは、以下に述べるような機能を材料自身に持つということが定義とされているが、ここでは、材料自身にそのような機能が内在されておらず、構造的あるいはシステムの的に実現しようとするスマートシステムについても区別せずに述べてある。

3. 7. 2. 1 クラック検知機能（あるいは、ヘルスマニタリング機能）

セラミックスは欠陥（クラック）に対して非常に敏感である。欠陥が許容できる大きさを越えると、そのクラックが進行し破壊に至る。セラミックスの場合、許容できる欠陥の最大サイズはおよそ数10 μm である。これは、金属の場合の数mmに比べてきわめて小さい。欠陥の原因は、それが内在する場合、原料粉体での粗大粒の存在、混合過程で微量の介在物の混入、圧粉過程での不均一圧縮、焼結過程での収縮、など原料あるいは製造過程での不具合が考えられる。また、欠陥が外部的な要因、たとえば予想外の荷重、衝撃、運用劣化等により導入されることもおこりうる。

安全性を保つには、欠陥が許容できる大きさを越えないうちに早期発見する点検が必要となるが、セラミックスの場合、欠陥の許容寸法が小さいため、欠陥検出のための技術的問題、コスト的問題等があり、定期点検を行うという手法は必ずしも有効とはいえない。

そこで、セラミックス構造体の安全性を高めるために求められるのは、より簡単に欠陥の検知ができるようにする手法の開発である。そのための1案として考えられているのが、セラミックス構造体にそれ自身の状態を常に監視し、異常が生じればそれを検知して報告するという機能を持たせることである。

スマートコンポジットとしてのセンサ機能を持たせるためには、音響センサ、オプティカルファイバセンサ、圧電センサ、電気抵抗センサ等を使う方法が提案されている。音響センサでは、構造体部品中にクラックが生じるとき発生する音を検知しようというものである。圧電センサでは、限界以上のひずみが部品に生じていないかを検知するものである。オプティカルファイバセンサや電気抵抗センサは材料中に埋め込まれたセンサの破断等を検知することにより部品全体のダメージを知ろうというものである。

3. 7. 2. 2 クラック安定化機能

先にも述べたように、セラミックスは、存在を許容できる欠陥の大きさが、金属に比べてきわめて小さい。安全性を保つためのもう1つの方法として、クラックを安定化させる機能を持たせ、存在が許容できるクラックの寸法を大きくすることが考えられる。

高靱性セラミックスでは、クラックが生じたとき、クラックの成長とともに破壊抵抗が非線形に増加するものがある。これをR曲線挙動とよぶが、これはクラックが進行した後の部分が外部応力を吸収し、クラック先端での応力集中が低下することにより生じる現象である。(図3. 7-4)⁶⁾ ガラスや単結晶のような均一なものを代表とする低靱性セラミックスでは応力緩和がないため、点線のように、破壊抵抗は亀裂長さに依存しないが、複合化することにより、亀裂長さに対して破壊抵抗が増加するような材料とすることが期待できる。

材料そのものにクラック安定化機能がそなわっている例としては、部分安定化ジルコニアがあげられる。部分安定化ジルコニアの高温安定相(正方晶、T相)は、低温でも準安定に存在するが、クラックが生じてクラック先端に応力がかかると低温安定相(単斜相、M相)へとマルテンサイト変態(転移)を起こす。この相変態により応

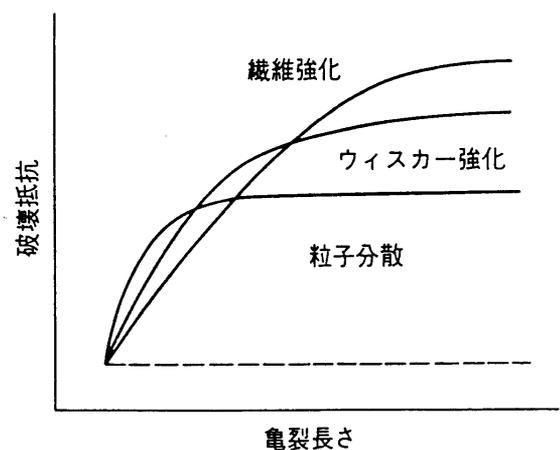


図3. 7-4 セラミックスの破壊抵抗の亀裂長さ依存性

力を吸収緩和し、クラックを安定化する。

(図 3. 7-5)⁶⁾ このばあい、クラックを検知し、結晶構造を変化させることによってクラックを安定化し破壊を防ぐ自己調整機能が備わっている、といえる。

積極的な複合化によりクラック安定化機能を実現させた例としては、ウイスカ強化複合材料のクラック先端でのブリッジングによるクラック進展抵抗の増大、があげられる。(図 3. 7-6)⁶⁾ この場合、クラックが進行した後に、ウイスカの繊維がクラック破面をつなぐようにのこり(ブリッジング)、クラックを引き留めるスプリングの役割を果たす。クラックが進展しても、ウイスカのブリッジングによる効果で、クラック先端への応力集中が緩和され、R 曲線挙動を示す。なお、この場合でも、破壊強度 σ_r は $\sigma_r = K_{IR} / Y \sqrt{c}$ (K_{IR} は破壊抵抗、 Y は定数、 c 欠陥寸法) と記述され、欠陥寸法 c が増加しても、破壊抵抗 K_{IR} も増加するため、破壊強度はあまり低下しない。このような材料では、万一、クラックが生じても、破壊抵抗を増加させてクラックの進行が妨げられ、かつ、強度も大きく減少することがないため、次回の定期点検を行うまでの安全を保障することができる。また、従来よりも大きなサイズのクラックの存在も許容できるため、点検の精度への要求も緩和される。

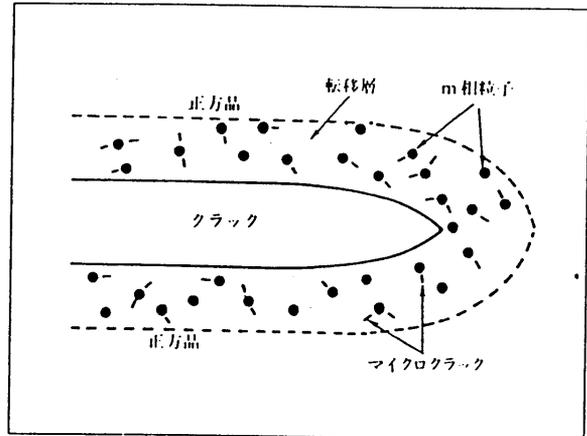


図 3. 7-5 ジルコニアの相転移によるクラックの安定化

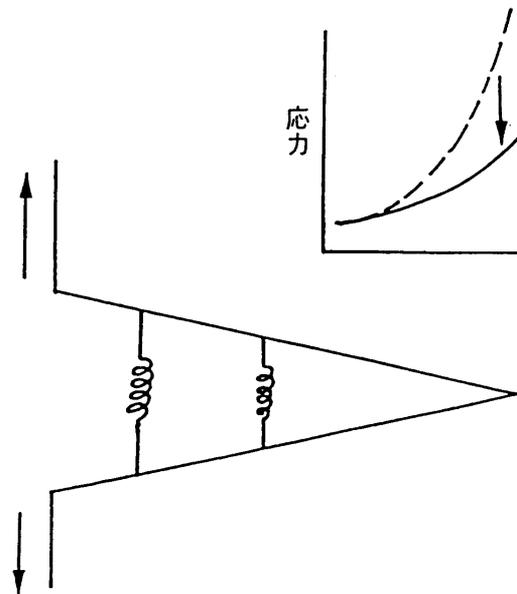


図 3. 7-6 架橋(ブリッジング)による亀裂先端の応力集中の緩和

結晶粒の配向や粒子形状を制御して、あるいは、複合材料を製造して靱性の高い材料を製造するという手法はこれまでも多数研究されてきたが、このような材料も、クラックの発生を検知して、破壊抵抗を上昇させ、クラックの進行を妨げて安定化させる機能を持つという意味で、スマートコンポジットである、といえる。

3. 7. 2. 3 自己修復機能

セラミックスの安全性を高める方法として、生成したクラックを自己修復させるという機能を、セラミックス構造体に持たせるという方法も提案されている。

セラミックス中に生成したクラック先端は一般に原子的に鋭く、化学的に活性であり、塑性変形などの応力緩和機構が働かない。しかし、クラックが生成したセラミックスは、高温で保持することによってクラック先端が丸くなり、強度が回復するということはよく知られている。これは自己修復の一種であると考えられることもできるが、クラック自体が消滅するわけではない。

現在、もっとも自己修復機能を持たせることができるのではないかと注目されている材料はジルコニアである。部分安定化ジルコニアの高温安定相（正方晶、T相）は、低温でも準安定に存在するが、クラックが生じてクラック先端に応力がかかると低温安定相（単斜相、M相）へとマルテンサイト変態を起こす。このとき変態により体積膨張が起こるため、クラック先端では圧縮応力を生じる。圧縮応力により閉じたクラックを、熱処理することによって再接合・修復することができるという報告がなされている。また、同時にM相からT相への逆変態を起こさせれば、結晶組織的にも元に戻る。（図3. 7-7）⁶⁾

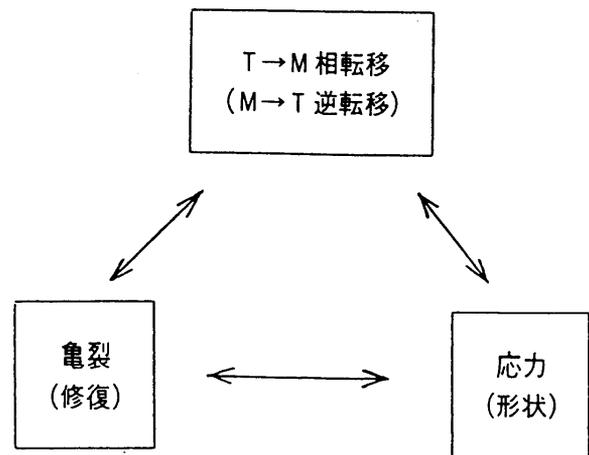


図3. 7-7 ジルコニアの相転移とそれに関連する現象

この方法では、クラックを修復するた

めには熱処理が必要であるが、適当な使用環境を選べば、自己修復させることも可能となる。提案されている概念の1つとして、ジルコニア製の摺動部品がある。この部品は、使用中にクラックが生じれば、相変態が起こってロールが膨張し、摩擦熱が生じる。この摩擦熱によってクラックを修復する。クラックが修復し、また、逆変態によって体積が収縮すれば、元の状態に戻る。(図3.7-8)⁶⁾

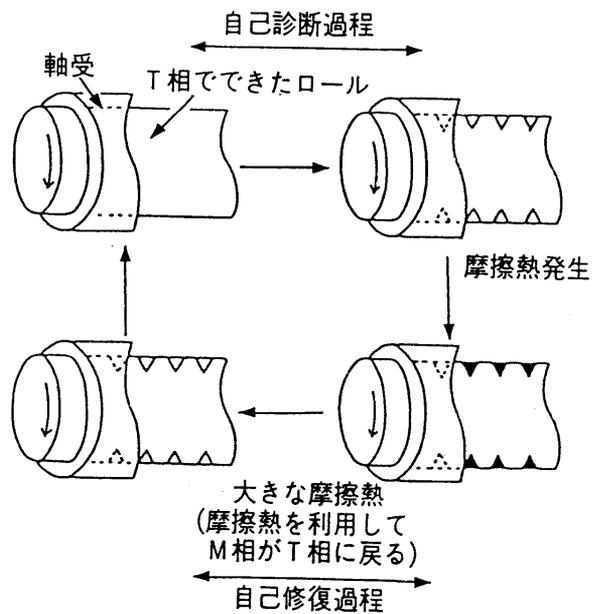


図3.7-8 ジルコニア製摺動部品の自己修復

以上のようなメカニズムを利用した自己修復機能は、相変態するという性質を持つ材料に限られてしまうため、すべての材料に適用できるわけではないが、このような機能を持たせることができれば、応力やクラックの検出をしなくても材料の信頼性を確保することができる。

3.7.3 スマートコンポジット化技術

セラミックス構造体をスマートコンポジット化するための方法としては、従来より研究され用いられてきた、セラミックス構造体の製造についての様々な手法を応用することが考えられる。特に、様々な機能をつけ加えるという性格上、複合材料を製造する技術を発展させた方法が、最も有望であると考えられる。

以下、セラミックス構造体の製造に使用できるとと思われる各要素技術について述べる。

3.7.3.1 焼結

焼結は、セラミックス構造体を製造する上で最も一般的、かつ、重要なプロセスの1つ

である。(図 3. 7-9) ¹⁰⁾

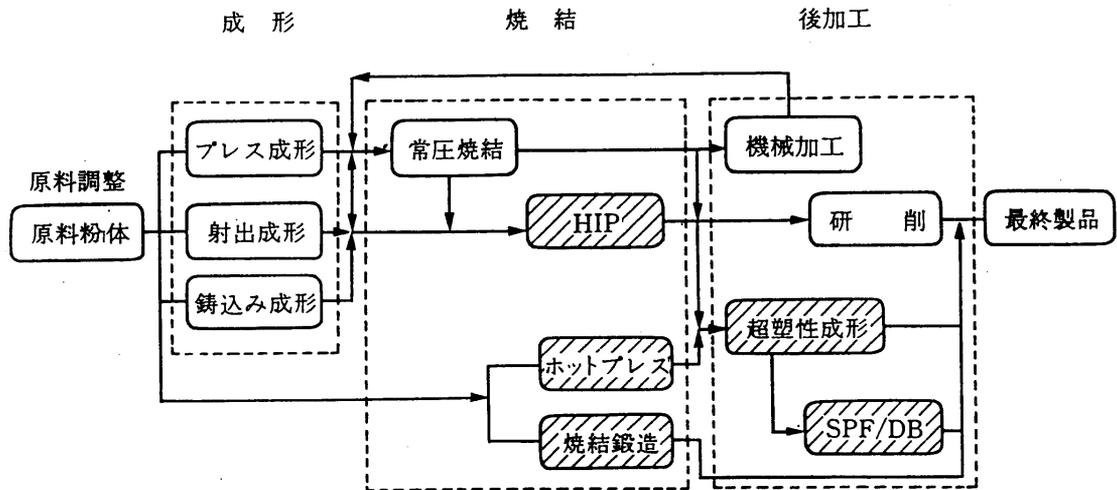


図 3. 7-9 一般的なセラミックスの製造プロセス

焼結とは、圧粉体（粉末を圧縮、成形したもの）をその溶融点以下の比較的高い温度で加熱すると、粉末粒子の接合・緻密化が進行し、強固な塊となる現象である。焼結の駆動力は粉末粒子の接合部（ネック）での表面張力と蒸気圧、空孔濃度である。焼結機構は大別して、体積拡散、表面拡散、粒界拡散、蒸発・凝集、などがあげられている。(図 3. 7-10) ¹¹⁾

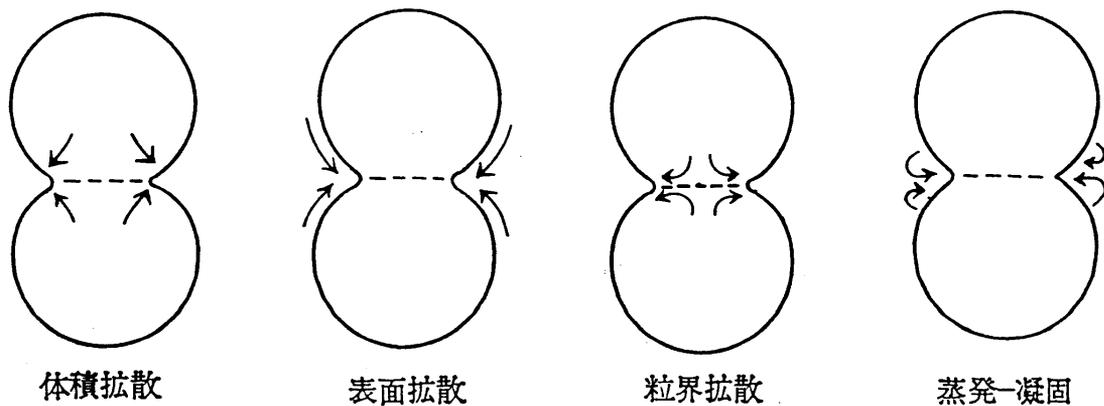


図 3. 7-10 焼結のメカニズム

焼結には、以下のような特徴がある。

- ① 製造温度は融点以下である。金属等で行われる铸造では融点以上の温度への加熱が必

要であるが、セラミックスの場合、金属に比べて融点の高い材料も多く、熔融加工が不可能である。このような場合でも、焼結法でセラミックス構造体を製造できる。

② 広範囲に複合材料が作れる。複数の原料粉体を任意に混ぜ合わせた材料を製造することができる。また、ウイスカ、ファイバ等を埋め込んだ材料の製造も行われている。

③ 多孔質体を作れる。機構が材料中に存在することは、強度の点からみればマイナスであるが、用途によっては、多孔質を利用できる。たとえば、セラミックスフィルター、触媒などへの利用があげられる。

④ 大量生産に向く。型とプレス機と焼結炉があれば製造でき、自動化もしやすい。コスト的にも安くすむ。切削加工に比べて、製造速度も速い。

セラミックスに焼結法を用いてクラック検知機能を持たせた例としては、以下のものがある。

高田らは Al_2O_3 マトリックス中に、強化繊維として Al_2O_3 ファイバ、検知材としてTiCスラリーを加えた焼結体を製造した。この焼結体の曲げ試験を行い荷重-たわみ-電気抵抗の測定を行った。その結果、材料は非線形的な破壊挙動を示した、電気抵抗は材料が全破壊に至る前に大きく変化していることがわかった。(図3. 7-11)¹²⁾ このことから、 Al_2O_3 セラミックス中に導電性材料を導入することにより破壊の検知

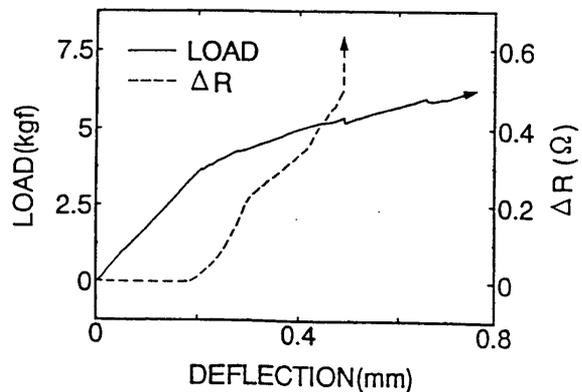


図3. 7-11 Al_2O_3 - Al_2O_3 ファイバ-TiCスラリー製破壊検知材料の荷重-たわみ-電気抵抗曲線

が可能であるとしている。彼らは、他に Al_2O_3 -40vol%TiCスラリー、金属Ti線を加えた焼結体についても試験を行い、同様の結果を得ている。

他にも、窒化ケイ素系セラミックス破壊検知材料、 CaF_2 -SiC系破壊検知材料などが同様の方法で試作が行われている。

3. 7. 3. 2 接合・接着

接合・接着により、同種、あるいは、異種材料を接合することもスマートコンポジット

製造の上で、重要な要素技術の1つである。セラミックスは化学的に安定であるため、接合・接着を行うときには高温を要することも多い。このとき熱膨張率の違いにより熱応力が発生する。セラミックスは一般に圧縮強度は曲げ強度の数倍、曲げ強度は引張強度の約2倍の強度を持つため、接合・接着時に力がかかる場合は圧縮応力がかかるようにする。また、異種材料の接合・接着時には熱膨張率の近い組み合わせを選ぶか、応力緩和層を挟み込むことをおこなう。¹³⁻¹⁴⁾

接合・接着には主に以下のような方法に分類できる。

①機械的接合法

ネジ止めや焼きばめなど機械的に接合を行う。あらゆる材料の接合に用いることができる。ほかの方法と異なり、接着層が存在しない。

②有機接着剤法

有機接着剤を用いて張り合わせる。安価で簡便であるため、使用範囲が広い。しかし、接着剤の耐熱性がセラミックスの耐熱性に比べてはるかに低いため、高熱のかかる部材の接合には向かない。また、物理的接着であるため、高い接着強度を得ることは難しい。接着剤の主流はエポキシ系である。

③無機接着剤法

無機接着剤も比較的安価であり、接着法も簡便であり比較的高温での接着が可能である。種類によっては1500°Cまで耐熱温度があるものもある。しかし、一般に高い接着力が得られにくく、また、硬化反応時に脱水が起こって接着するため、気密性のある接着は得られない。主な種類としてはケイ酸アルカリ系、リン酸塩系、シリカゾル系がある。

④低融点ガラス系

PbOを添加した低融点ガラスは、その耐熱性が高く、化学的に安定であり、電気的特性も良好であり、接着性も優れていることから、広く電子工業の分野で用いられている。接着機構は、セラミックス界面での粒界のガラス成分と低融点ガラスが化学結合するためとされている。

⑤高融点酸化物溶剤法

CaOやAl₂O₃を主成分とする高融点酸化物溶剤を用いる。接着は酸化物溶剤とセラミックス結晶が共有物をつくるか、ガラス結合を形成することによりおこる。

⑥活性金属法

Ti、Zrなどの活性金属と低融点合金をつくるNi、Cu、Agなどの金属を混ぜたソルダを、セラミックスの接合面に挟み込み、不活性ガス下または真空中で加熱圧着する。TiあるいはZrの一部がセラミックスの酸化物により酸化され、これらの反応生成物が互いの相に相互拡散し、強度の大きい気密性の高い接着が起こるとされている。

⑦溶接法

溶接法は固相溶接法と熔融溶接法に大別できる。固相溶接法では、セラミックス同士、あるいは、セラミックスの間に中間層をいれ加熱圧着して接着する。方法によっては接着層と母材の界面がわからないほどの接合も可能とされる。熔融溶接法では、レーザー、電子ビーム、放電などにより加熱熔融させ接着する。そのため、熱ひずみが発生したり、結晶粒径が変化する、気泡が発生するなどの問題点がある。

⑧メタライズ／金属ソルダー法

この方法は、2段階の工程が必要である。まず、セラミックスの表面を蒸着、イオンプレーティング法、スパッター法、CVD法、溶射法、酸化銅法、硫化銅法、高融点金属法、などでメタライズする。これを金属ソルダーにより接着する。

3. 7. 3. 3 超塑性加工

セラミックスにおける超塑性変形は、若井らにより1986年にジルコニアにおいて発見され¹⁵⁾、その後、様々なセラミックスが超塑性現象を示すことがわかってきた。

超塑性とは、多結晶材料の引張変形において局部収縮（ネッキング）を生ずることなく数100%以上の巨大な伸び値を示す現象をいう。一般に、セラミックスは粉体製造、圧粉成形、焼結、切削加工という工程で製造される。超塑性加工を用いれば、これらの工程を大幅に削減できる。すなわち、超塑性加工には、以下のような特徴がある。

①成形

シート成形、バルジ成形、押し出し、深絞り等の加工ができる。このため、様々な形状の製品を製造することができる。また、この応力は比較的低くてすむため、成形型に与える影響が少ない。温度も焼結と同じかそれ以下の温度で行える。

②焼結（緻密化）

応力をかけて成形するため、材料の緻密化がおこる。たとえば、低い温度で仮焼結を行った材料を超塑性加工することにより、ち密な材料とすることができる。強度も、内部欠

陥が消滅するため向上する。

③仕上げ

型を用いるため、成形後の寸法精度がよい。また、表面荒さも少ない。したがって、最終製品かあるいはそれにきわめて近いものを製造することができ、仕上げの切削加工や磨きが必要ない。

超塑性加工を用いれば、これらの効果を同時に得ることができる。

拡散接合時に超塑性加工を利用することもできる。（超塑性拡散接合）超塑性接合の特徴は、以下のようなものがある。

- ①接合面の鏡面研磨を行う必要がない。
- ②低温、低圧力で接合できる。
- ③短時間で接合できる。
- ④接合強度が高い。
- ⑤接合と成形を同時に行うことができる。

このように、超塑性拡散接合は拡散接合の密着過程を超塑性流動を利用してスムーズに行い、短時間で高強度の接合体を得ることができる。

超塑性拡散接合の例としては、永野らがジルコニア-アルミナの傾斜機能材料を製造したものがある。（図3.7-12）¹⁶⁾

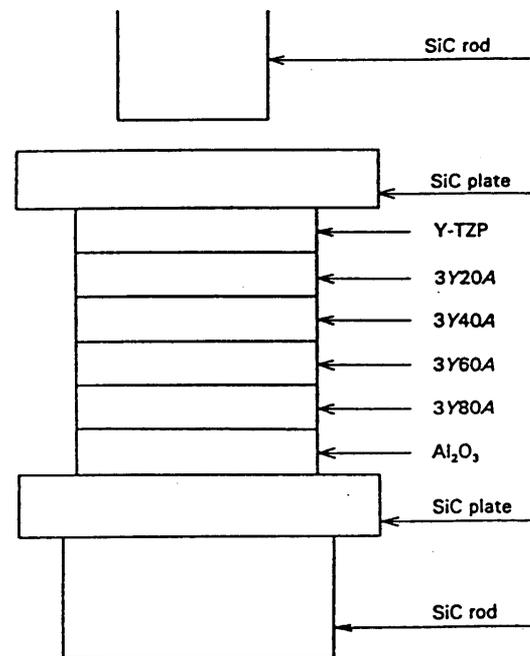


図3.7-12 ジルコニア-アルミナ傾斜機能材料の超塑性加工による製造

以上に述べたような超塑性加工、あるいは、超塑性拡散接合は、スマートコンポジットの製造においても有効である。たとえば、セラミックス積層材、傾斜機能材料、あるいは、それらの層間にファイバを挟み込んだ材料を、最終製品に近い形状で製造できることが期待される。

3.7.3.4 溶射

溶射はもともとは表面改質の1手段として用いられてきた。液体、あるいは、半熔融状態の金属やセラミックスを基材の表面に吹き付け、膜をつくるものである。溶射の特徴としては

- ①低真空下で広範囲に短時間で皮膜をつくることができる。
- ②CVDやPVDに比べて厚い膜圧を得ることができる。
- ③セラミックス等の融点の高い材料の皮膜をつくることができる。

という点あげられる。したがって、構造体などの表面に皮膜をつくり耐摩耗、耐熱、耐食などの機能を付与する方法として、簡便で有用である。また、耐熱性の高い皮膜をつくることのできるため、高温用構造体にも適用することができる。

溶射の方法としては、ガス式では 1)フレイム溶射 2)爆発溶射 3)高速ガスフレイム溶射 電気式では 1)アーク溶射 2)プラズマ溶射 3)レーザー溶射 4)線爆溶射 がある。

スマートコンポジットへの適用としては、一般的な表面改質、機能付加の手段としての他に、構造体表面にファイバ等のセンサを張り付けるという手段として用いることができる。

3. 7. 4 問題点

3. 7. 4. 1 原料の制御

セラミックスは一般に、粉末を原料として圧粉成形、焼結、切削加工という工程で製造される。このため、原料の粉末が均質でなければ、後の工程をいくら制御してもよい品質の構造体は得られない。したがって、質の良い構造体を製造するためには、まず、原料の制御を行わなければならない。

原料の制御としては、まず、結晶粒度の制御がある。特に、異常に大きい結晶粒が存在する場合、異常粒成長の核になり、応力がかかった場合の破壊の起点になりうる。そのため、粒度の分布を制御し、異常粒子を取り除いた均質な粉末を得る必要がある。

焼結助剤の分散も問題となる。焼結助剤は、特に液相焼結を行う場合など、この分散に不均一があるための異常粒成長がおこるため、均一な分散が必要となる。

ウイスカ、あるいは、粒子による複合化を行う場合、その分散も問題となる。マトリックスになる粉末中にウイスカや粒子が均一に分散していなければならないが、一般に、マ

トリックスとなる粉末とウスカや粒子は密度が異なり、また、形状も異なる。このため、ただ混ぜ合わせただけでは、均一に分散しないことが多い。このため、ウスカや粒子を均一に分散させる方法の開発が必要となる。（目的を持って不均一に分散させる場合を除く。）

3. 7. 4. 2 組織の制御

組織の制御では、焼結等の熱処理による組織の制御と、ウスカやファイバの配向による組織の制御がある。

焼結・熱処理による組織の制御では、粒成長の制御が問題となる。この場合、制御する必要があるのは、結晶粒径、結晶粒のアスペクト比、結晶粒の配向などである。これらにより、同一の材料系でも様々な性質に制御できる。一般には焼結・熱処理の温度、時間を変えることにより目的の組織を得る。焼結・熱処理を2段階で行う、結晶の核となる種結晶を粉末の段階で埋め込んでおく、などの方法も採られる。

ウスカやファイバの複合化を行う場合、その配向の制御が問題になる。ウスカの場合、ウスカの配向によっては特定の方向に特定の強度や機能を付与することも可能となるし、また、配向をなくすことによって等方的な性質を持つ材料をつくることができる。ファイバにおいても、その配置する位置と方向により、必要な強度と機能を特定の方向に持たせることができるので、その制御方法の確立が重要である。

3. 7. 4. 3 応力緩和層・コーティング

スマートコンポジットを実現するための手段の1つとして、材料内にセンサを埋め込み、複合化することが考えられている。このとき問題になるのが熱応力とセンサ劣化である。

セラミックスにおいては、製造段階で何らかの熱処理が加わることが多い。また、室温と高温間での温度変化がある使用環境では、熱サイクルが加わる。このとき問題となるのは熱応力である。母材となる材料とセンサとの熱膨張率の差が大きければ、はがれ、内部破断等の欠陥を生じる。これを防ぐには、1) 熱膨張率の近い組み合わせを選ぶか、または、2) 適当な熱応力緩和層をもうけるかの必要がある。1) では組み合わせに限りがあるため、2) の方法の方がより一般的である。

もう一つ問題になるのは反応である。センサと母材が製造時あるいは使用時に反応を起こし、結果、センサが予定の性能を発揮できない場合が起こりうる。この対策としては、センサに適当なコーティングを施し、反応を起こさせないようにすることが考えられる。

以上の応力緩和層とコーティングは、製造時、あるいは、使用時にセンサを守るために必要な処理である。これらの機能を同時に1層で達する場合もあるが、たいていの場合、多層にわたる処理を必要とする。様々なスマートコンポジットを製造するためにはこれらの技術の確立が重要である。

参考文献

- 1) セラミック先端材料－強度と微構造－ 日本セラミックス協会 平成3年 第14章
- 2) T.G.Nieh International Materials Reviews 1991 vol.36 No.4 pp151
- 3) 「スマートコンポジットシステム」フォーラム 講演論文集 平成6年
工業技術院・物質工学工業技術研究所
次世代金属・複合材料研究開発協会
- 4) 航空機へのインテリジェントコンポジットシステムの適用に関する調査報告書
平成5年 (社)日本機械工業連合会、(財)次世代金属・複合材料研究開発協会
- 5) インテリジェント材料 平成6年
(社)未踏科学技術協会、インテリジェント材料フォーラム
- 6) セラミックス 1993年6月号(インテリジェント材料特集)
日本セラミックス協会
- 7) 次世代材料インテリジェントマテリアル 柳田博明 1993年 ブルーバックス

- 8) 金属 1994年4月号(次世代構造材料特集)
- 9) セラミックス 1994年4月号 日本セラミックス協会 pp341-343
- 10) 材料 日本塑性加工学会編 1994年 コロナ社 第8章
- 11) 初級セラミックス学 曾我直弘 アグネ pp75 昭和58年
- 12) 日本セラミックス協会1994年秋期シンポジウム講演予稿集 pp659
- 13) 工業材料 第33巻13号 pp129-133
- 14) 先端材料の基礎知識 日本材料学会編 平成3年 オーム社 第2章
- 15) F. Wakai et al. Advanced Ceramic Materials, 1, 3(1986)259
- 16) 永野孝幸 日本セラミックス協会学術論文誌 100(11) 1279(1992)

3. 8 スマート構造物

3. 8. 1 はじめに

宇宙および航空分野におけるスマート構造物について述べる [1, 2]。宇宙構造物については、特に展開、伸展構造の必要性がスマート化を押し進め、静的、準静的な意味でのスマート化の研究がなされて来た。また、大型宇宙構造物は軽量で剛性が低いため、特に真空状態では振動がなかなか消滅せず、構造全体の制御などにも影響を与える。そこでこの様な運動を抑制するため固定した形態の宇宙構造物に対して、主に線形時不変システムに用いられる手法により、振動制御などが行われており、これは典型的な動的適応と言える。ここでは特に、形態などが変化する場合の構造力学的な考察をスマート化の制御に積極的に利用する宇宙構造物の研究を中心に紹介する。

形状などが変化するスマート構造物の解析に対しては、下記のことなどが要求されている。そのため、線形時不変の（時間の経過に対して変わらない）システムに有効な多くの手法が直接適用できなくなり、新しいアプローチが必要となる。即ち、

1) 自律的に適応してその形状や材料特性が時々刻々と変化する場合には、オンラインによる瞬時々々におけるシステム全体の特性の同定が早い速度で行なわれねばならない。即ち、時変システムの同定法の確立が必要となる。

2) 変化するシステムであるため、単に動的挙動の解析に限らず、変形の挙動の制御解析とその挙動が安定であることの保障が必要になる。即ち、時変システムの解析法と制御法の確立が重要となる。

3) この様なシステムでは多くの場合、非線形系としての扱いが避けられなくなる。即ち、1) と 2) は非線形システムとして扱う必要がある。

4) スマート材料による構造物のスマート化としては、形状記憶合金繊維による構造物の減衰力の増加や力制御、あるいは光ファイバによる歪の計測などがその例である。例えば、形状記憶合金の特性は応力、歪に依存しており、使用している夫々の部材における位置によって応力や歪は著しく異なる。従って、適切に制御機能を発揮させるため、形状記憶合金繊維を用いる場合には、微視的（ミクロ）な力学的考察に基づいた応力、歪の解析を精度良く行う必要がある。即ち、使用したスマート材料のレベルや材料によって生ずる影響にマッチした構造物の応力、歪解析の確立が不可欠である。いずれにせよ、1) ~ 4) の特徴を示すシステムに対しては、従来、確立されている多くの解析手法を直接利用することは出来ず、全く新しい考え方やより精度の高いアプローチが必要となる。

ところで、汎用的な意味で1)～4)の要求を満たすものを求めることは難しい。そこで、筆者のグループでは、夫々の問題に固有な構造動学的観点からの考察に基づいたスマート化の研究を行ってきた。そこで、以下にはそれらの研究について、1)時間と共に変化しているシステムの振動特性の解析及び安定性の推定、2)構造物の形態を適切に変化させて適応することにより、好ましくない衝撃力の軽減や不安定振動の抑制、3)スマート積層板のマイクロメカニクス解析および応用、などを紹介する。

3. 8. 2 時変システムの解析

時間の経過に従い、機械的特性が変化するシステムの振動特性の解析と実験、および変化している航空機の空力弾性システムの安定性の評価と安定限界の推定について述べる。

(1) 伸展する片持ち棒状アンテナの振動解析 [3]

多くの宇宙構造物では予定軌道に達してから、アンテナ、太陽電池パドルなどを伸展、展開して規定した形態を形成させる。ここでは、最も簡単な梁(棒)状のアンテナが人工衛星本体から外部へ伸展、あるいは内部へ収納する際の振動の解析と実験について記す。ところで、もしも、形状が固定して変化しなければ、どの様に複雑な構造物であっても、モード解析法、あるいは固有振動解析によって固有モード、固有振動数などを求めて振動特性を評価できる。そこで、伸展する場合にも、そのモード形状を近似的に利用した解析などが行われて来ているが、正確なものではない[4]。図3.8-1に伸展、短縮する片持梁の実験装置を示す。モータによりシャフトが回転することにより、梁の支持端が左右に移動し、3組のローラによって挟んで固定された梁の長さが増加する装置であり、初期撓みを与えて振動を誘起し、同時に梁の長さを増加あるいは短縮させ、振動応答を計測する。これに対し、図3.8-2に示す時間と共に長さが変化する要素による有限要素法を用い、Newmarkのベータ法による数値解析を行ったが、高次モードの減衰が十分でないためアルファ法を用いることによって図3.8-3に示される様に、実験(実線)と計算(点線)の振動波形が良く一致することを明かにした。支持条件を解析に十分考慮することなどにより、上述の方法は各種の構造物の解析に対して、十分有効と考えられる。

ちなみに、時間と共に長さの変化する弦の解析は、上から吊されたエレベータのモデルなどとして行なわれており、解析的に振動解が得られている。筆者のグループでも伸展する梁について解析的解を両端支持の梁の場合については求めている[5]。

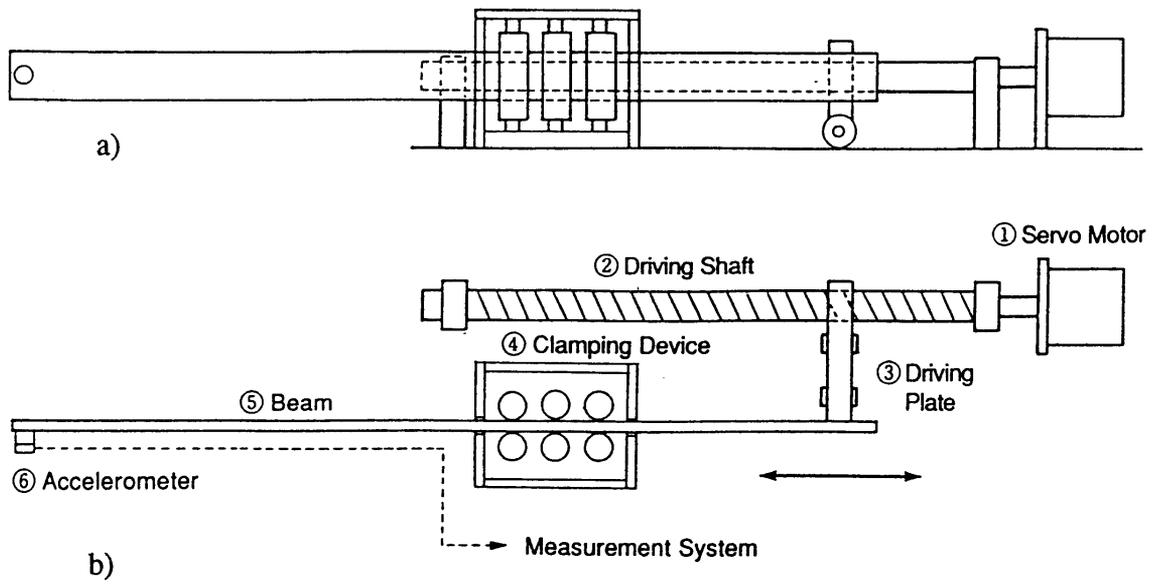


図 3. 8 - 1 伸展、短縮する片持梁の実験装置 [3]

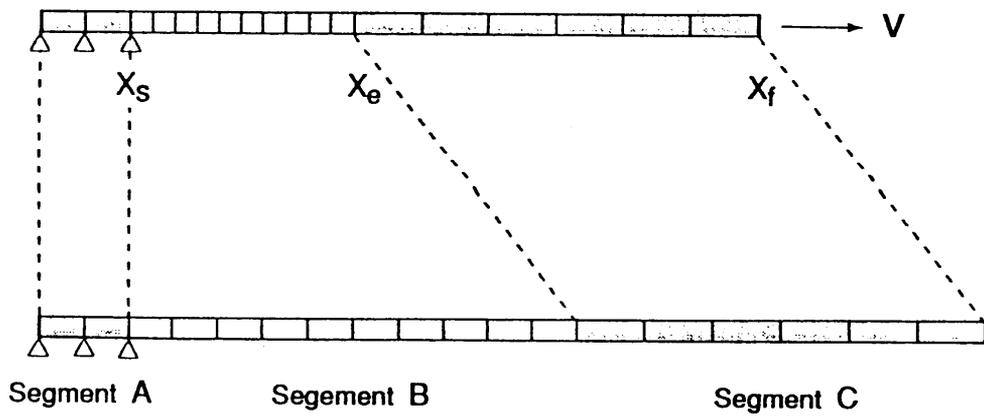


図 3. 8 - 2 可変長要素による有限要素梁モデル [3]

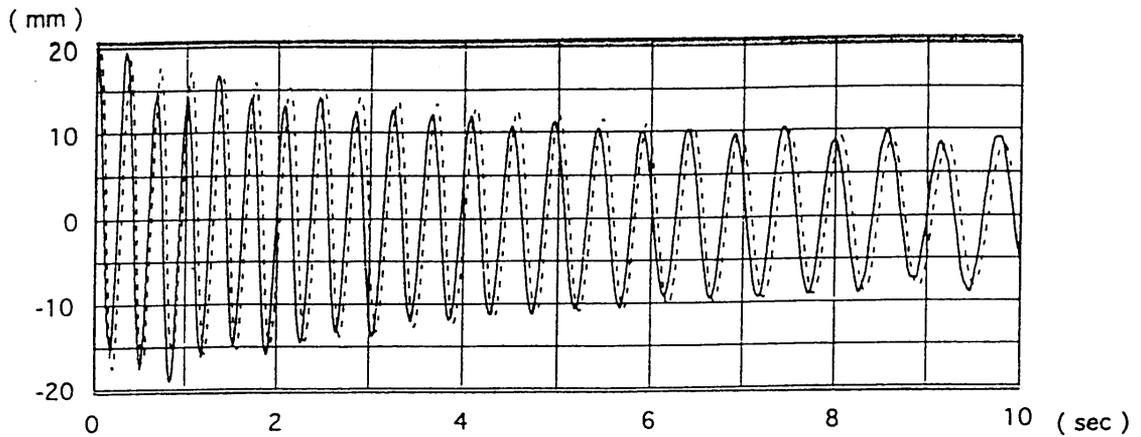


図3.8-3 伸展梁の振巾曲線の比較：実験値（実線）、計算値（点） [3]

(2) 時間と共に変化する航空機の空力弾性系のシステム同定および安定評価

航空機のスマート化の1つに能動的制御技術 (active control technology) と呼ばれるものがある。航空機では、飛行速度が一定の危険速度に達すると、突然、翼や機体は振動が増加する自励振動を生じ、バラバラに破壊される致命的なフラッタと呼ばれる空力弾性現象を発生する。従って、航空機の開発では、解析、風洞試験、および実機飛行試験などによって安全性を十分に確認することが義務付けられている。また、航空機が突風を受けて激しい衝撃力を受け、機体が破損することは良く知られているが、これも空力弾性現象の1つであり、極めて危険なものである。航空機の空力弾性では、翼や機体が空気力を受けて弾性変形をし、その弾性変形が新たな空気力を生じ、それによりさらに変形が加わるという様に、空気力と翼などの変形や振動が相互に干渉する現象である。そこで、この相互干渉を逆手に取り、何らかの影響により振動や変形が生じた時には、それに対して瞬時に対応し、補助翼やフラップが自動的に操作されて、適切に空気力を発生させ、翼の振動や変形が大きくなりえない様に抑制する技術が開発されている。航空機のスマート化の1つである能動的制御技術については実証が重要なものであるとして、風洞試験を中心とした研究を筆者らは推進して来ており [6, 7]、我が国においては航空宇宙技術研究所において成果を挙げている [8]。

ところで、上述の翼や機体の致命的な破壊を伴う危険なフラッタ発生速度を、風洞試験で実際に確認し、他方では、実機飛行試験として、フラッタの発生速度を予測しながら、

設計飛行領域の範囲の中での飛行を行い、発生しないことの保証を実際に行う。そのために、速度を一定の割合で増加しながら計測を行うことがある。この場合、航空機と大気、あるいは風洞試験模型と空気の流れは、それぞれ空力弾性システムと考えられ、しかも速度は変化しているため、時々刻々と変化するシステムになっている。地上と異なり大気中を飛行している場合には、特別な振動や加振試験装置なども無く、フラッタ飛行試験は工学の領域における安全性確認のための最も危険な試験と言える。

そこで筆者らは、大気中や風洞気流中の乱れによって機体や翼が励振される応答を計測し、定常自己回帰移動平均過程（ARMAモデル）によって表わせると仮定した解析法を提案している[9-11]。計測した応答データから赤池の方法を用いてモデルの固有係数、即ち、システムのパラメータの同定を行い、さらに推定した固有係数からシステムの各空力弾性モードの固有振動数、減衰係数を求め、またJuryの安定判別法を用いる事により安定余裕の評価を（固有振動数や減衰係数の値を用いなくて）出来ることを明らかにした。実際に風洞試験を行い、実験データから、フラッタ発生速度の予測を行い、減衰係数による方法と比較すると、一層精度良く、しかも安全な十分低い速度から推定出来ることを実証した[12, 13]。特に、気流速度を増加させている時にも短いデータを局所的に準定常なものとして扱い、この方法によってフラッタ危険速度を十分な精度で推定できることを示した[14]。さらに、速度増加の影響に対するこの局所準定常の仮定を用いる点を改めるため、モデルの固有係数の算出には、逐次推定誤差法を導入することにより推定法としての改良を行った[15]。即ち、1) ARMAモデルによる応答の表示、2) 逐次推定誤差法による固有係数の算出、そして、3) Juryの安定判別法の3ステップからなる本方法は、時間的に変化するシステムの同定、安定余裕評価、危険速度推定を、オンラインによる迅速なデータ解析により可能にしている。図3.8-4は、ある翼の模型に対する解析結果を示している。横軸に無次元速度 V （ $V=1$ でフラッタ発生）を取り、縦軸に安定余裕率と1次モードの減衰係数率を取っている。 $V=1$ 以上では、夫々、負の余裕、負の減衰となる。減衰係数率に対しては $V=0.95$ を越えると、特性が変化して減少するため、 $V=0.95$ 以下での結果がいくら正確に分かっても、その範囲からは危険の接近を予測できない。一方、安定余裕率は $V=0.8$ で、既に減少をしており、しかも特性の変化は緩やかなため、例えば、 $V=0.8\sim 0.9$ のデータがあれば、外挿することによって、 $V=1$ 附近で安定余裕率が0になることが容易に分かる。図3.8-5には、気流の乱れを考慮した数値シミュレーションに対して推定した安定余裕率を示し、2次曲線に

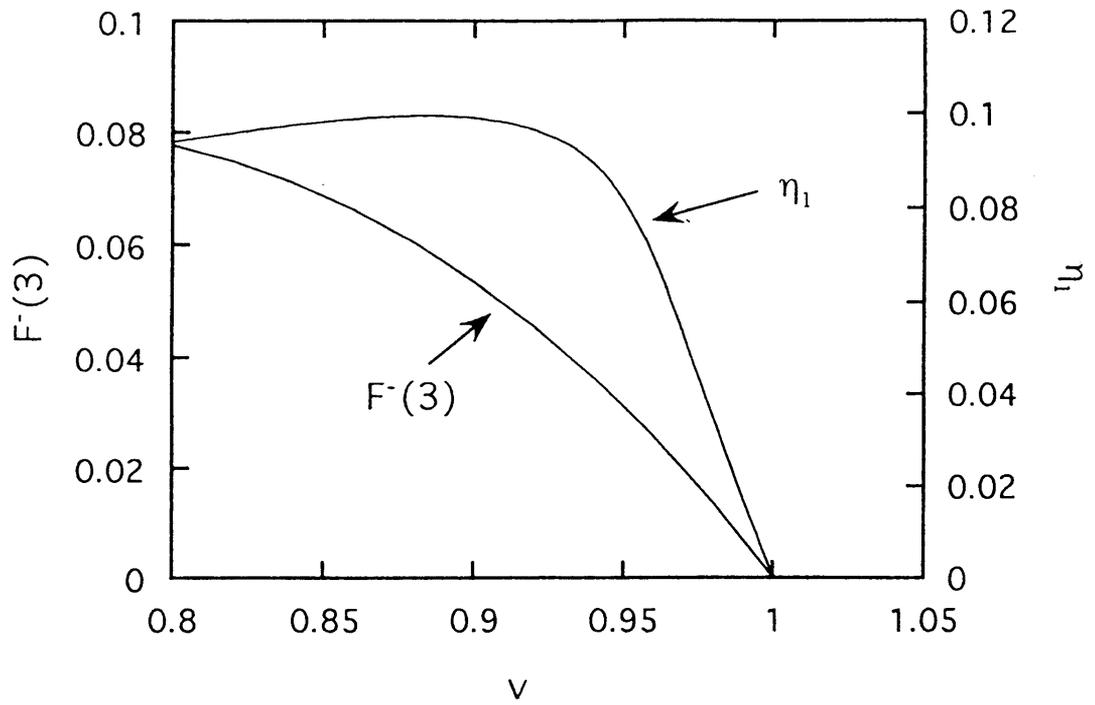


図 3. 8 - 4 減衰係数率 η_1 と安全余裕率 $F^{-}(3)$ の比較 [15]

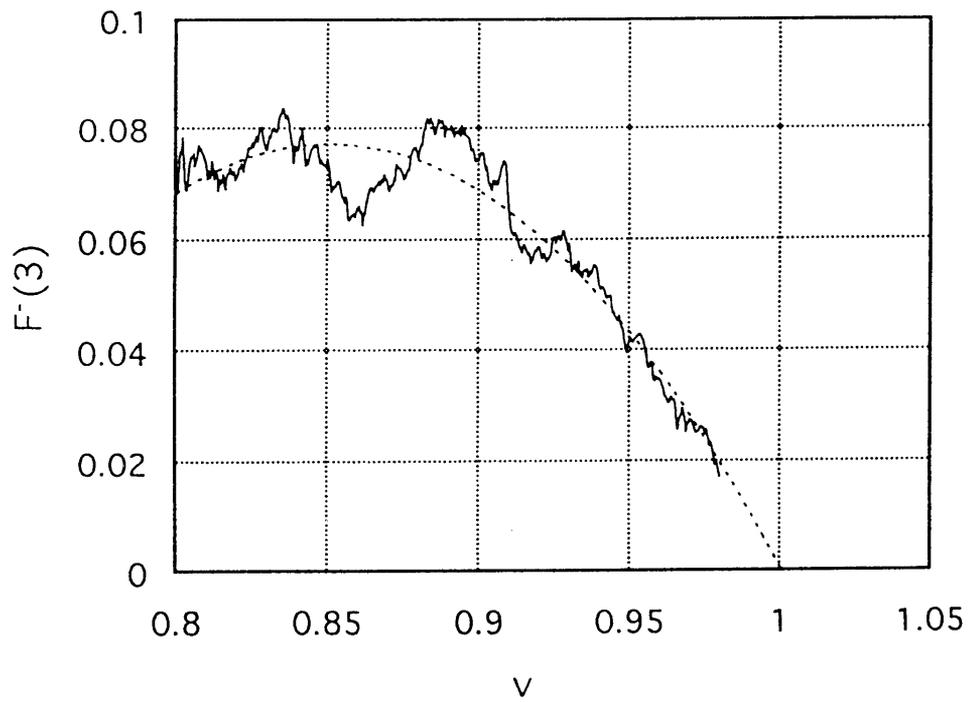


図 3. 8 - 5 安全余裕率による危険速度 ($V=1$) の推定 [15]

よる当てはめを破線で行ったものであり、 $V = 0.9 \sim 0.95$ 附近のデータから危険速度に急速に接近していることが容易に予測されるのが分かる。

本方法は、高速飛行を行う航空機の破壊を発生する、極めて複雑な空力弾性の問題を、直接対象にして開発して来たものであるが、いかなるシステムに対しても、ある程度様な外乱によってシステムが励振され、その応答が計測出来る場合には、全く同じ様に適用出来るものである。

3. 8. 3 スマート宇宙構造物

ここでは、構造物が適応的に形態を変えることが出来るという特性を利用した解析として、1) 宇宙構造物のドッキングのための追従と接近 [16-22]、2) テザー人工衛星の不安定振動の抑制の問題へのファジィ制御およびニューラルネット理論の適用例 [23, 24] を、さらに、3) 宇宙構造物の厳密な形態制御の問題への人工ポテンシャル法の応用例 [25] について述べる。

(1) 重心位置の移動を拘束したソフトドッキング

スペースステーションや宇宙フライヤなどで計画されている新材料の創製の実験などでは、長時間にわたる $10^{-5} \sim 10^{-6} g$ 程度の重力環境を想定している。地上からの補給や回収などのために、スペースシャトルの離発着が宇宙ステーションで行われる際や、宇宙フライヤーへの宇宙ビークルの接合の場合に、微小重力環境が損なわれないことが望ましい。宇宙空間で浮遊している大きな質量を持った物体（以下、本体と呼ぶ）が、ドッキング対象物（以下、対象物と呼ぶ）に動的な衝撃力を与えることなく接触して、合体することは容易ではない。相対距離を縮めて接近することは出来るが、特に数10トンの質量を持つスペースシャトルの様な場合には、微少な推力制御による減速の調節は難しく、微少な速度誤差でも、接触による運動量の変化は大きく、即ち、加わる力も無視出来ないものとなる。そこで、本体が形状可変なスマート構造物であるとするれば、対象物に接近する際、本体の質量中心が相対的に移動しない様、例えば、左右にアームを持ち、質量中心に対称な変形をしながら一方のアームが対象物に接触するならば、本体全体の質量が接近の運動に直接関与することなく結合が可能となる [16]。

図3.8-6には、左右対称に製作した、2次元トラス可変形状ドッキング構造物の模型および上下に運動出来るドッキング対象物⑨の実験装置の模式図を示す。模型と対象物

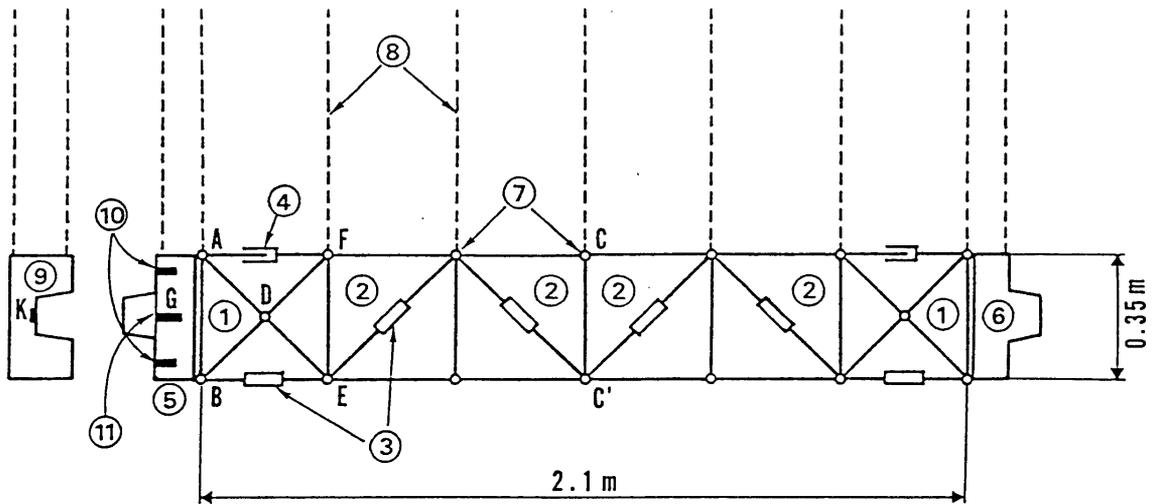


図 3. 8 - 6 2次元トラス可変形状ソフトドッキング実験模型 [16]

は宇宙での浮遊状態を模擬するためワイヤーで吊ってある、リニアアクチュエータ③を内蔵したトラス部材は伸縮できるため、中央のトラス部材（C-C'）に対して対称に、剪断変形モジュール②と曲げ変形モジュール①を変形することにより、中央トラス部材上にある重心を左右方向に移動せず、ドッキング構造を左右に伸展させることが出来る。そのため、対象物に対して、ソフトに、大きな衝撃力を発生することなくドッキング出来ることを実験的に明らかにした。図6では、ドッキング模型は完全に伸展した状態にあり、この時、実際にはドッキング機構⑤と⑨は接した状態にある。⑨の運動の追従には二種類の異なるレーザーセンサ⑩、⑪を用いている。

宇宙空間ではドッキング構造物と対象物は相対的に6自由度の運動が可能である。従って、対象物の運動に追従しながら接近し、結合する必要がある。そこで、まず垂直方向に運動しているドッキング対象物に対して、曲げ変形モジュールの追従のための変形制御に、ファジィ制御を用いたシミュレーション解析を行い、ファジィ制御法の有効なことを示した [17-19]。さらに、せん断変形モジュールを用いた、ドッキング構造物の伸展による接近をしながら、曲げ変形モジュールによる追従の制御にファジィ制御を適用して、その有効性を確認した。図3.8-7には、横軸に時間を取り、縦軸には対象物との距離

y を破線で示し、また点線で与えた対象物の運動に対する追従のズレを実線で示した。この解析では、ファジィ制御に簡単な制御則を用いたが、制御則の決定には経験と勘を必要とすることから、試行錯誤の繰り返しにより制御則を決定していた。そこで、制御則のより合理的な決定を計るために、トラス部材の伸縮に対し、ドッキング機構も含め複雑な応答をするドッキング機構の挙動を学習するために、まずニューラルネットワーク理論によってエミュレータを構成した。次に、あるターゲットの運動に対するエミュレータの入、出力データを用いて、ニューラルネットワーク理論により、3層のニューラルネットワークを用いて学習を行い、最適化された制御則の決定を行った[20]。図3.8-8では、 y が⑨の運動を、 e が追従のズレを示しており、ズレは十分小さくなっているのが分る。同じ制御則を使って、⑨の運動の振動数が1.5倍になった場合について、追従の性能について調べた結果を図3.8-9に示す。ズレ e が2倍程度に悪化していることが分かる。即ち、学習を行って習熟している対象には精度良く追従の制御を行えるが、学習していない変化に対しては性能が容易に劣化すること、即ち、ロバスト性の悪いことが示された。そこで、比較的ロバスト性の良いファジィ制御則を用い、制御則の決定には体系的な最適化のために、ニューラルネットワーク理論による学習を導入した[21, 22]。図3.8-10は、学習したターゲット運動が25秒経過後から未学習なものに変化した時にも、ロバスト性の高いファジィ制御則による追従により十分に対応出来ていることを示している。

ここでは、ソフトドッキングのための追従および近接という直接的な接触をする直前で、衝撃力の作用しない範囲における、ドッキング構造物の重心移動を避ける変形の場合について、ファジィ制御則、ニューラルネットワーク理論の誤差逆伝播法による学習による制御則の決定、およびファジィとニューラルネットワークによる制御則の決定について述べた。ファジィ制御則の決定には経験と勘を必要とするのに対し、ニューラルネットワークの学習による方法は与えられた状況に対しては体系的に制御則の決定が出来るが、ロバスト性が悪い。しかし、両方の手法の長所、即ち、ファジィ制御則のロバスト性、およびニューラルネットワークの誤差逆伝播法による制御則の最適化を利用したハイブリッドなアプローチが有効な結果を導くことを明らかにした[21]。ところで、追従と接近という比較的簡単な不安定の生じないオペレーションに対しては、ファジィ制御により直感や経験を基礎にして制御則を組むことが可能であった。次に、不安定な振動の抑制に動力的考察を導入することによって、ファジィ制御則を構成する例を述べる。

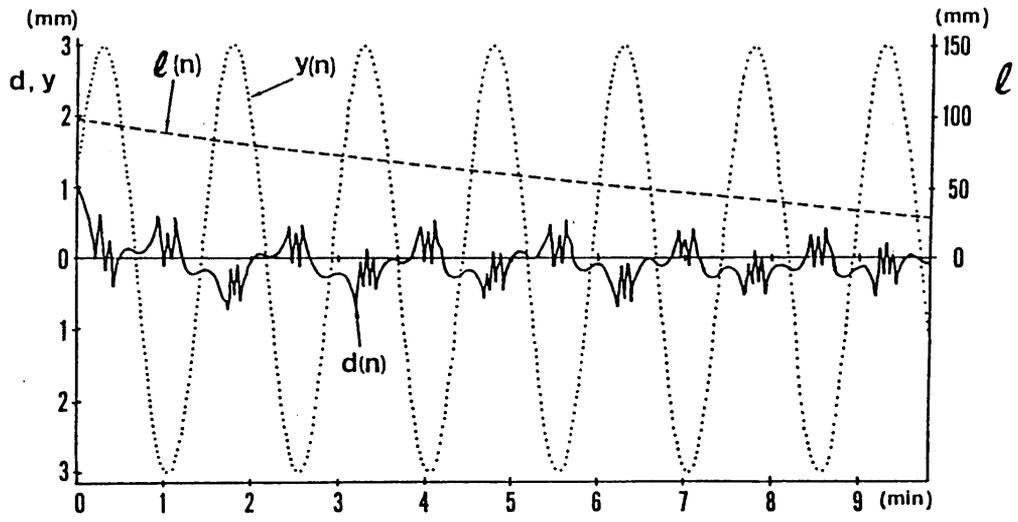


図 3. 8 - 7 ファジー制御則によるターゲットの追従と接近の計算結果 [1 8]

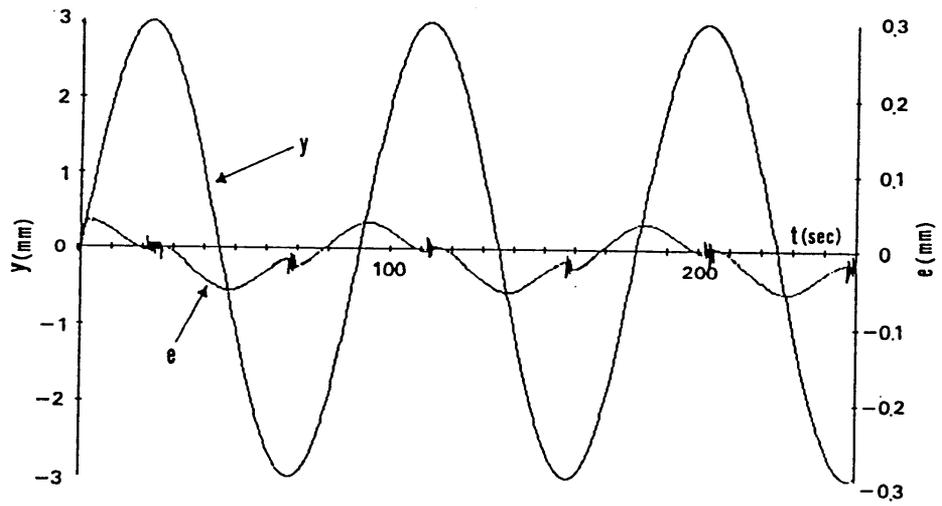


図 3. 8 - 8 ニューラルネット理論の学習による制御則を用いた計算結果 [2 0]

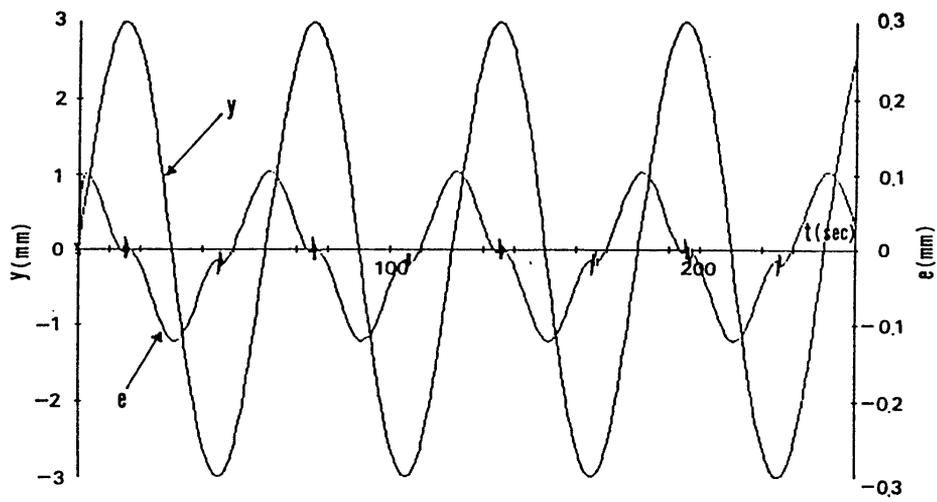
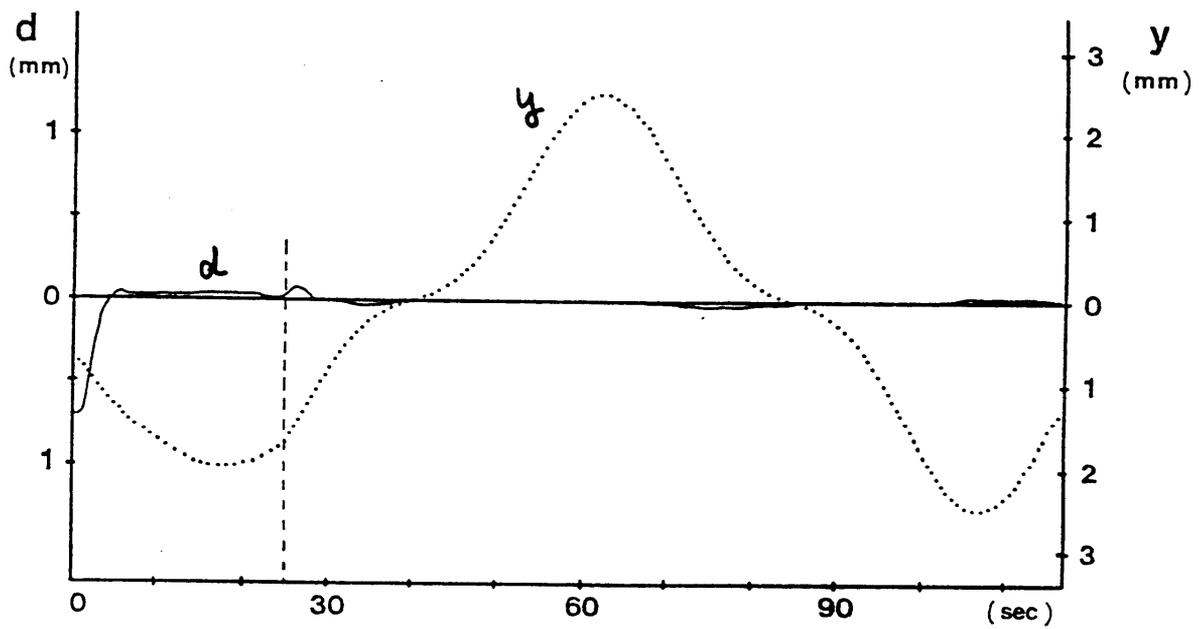


図3.8-9 学習していないターゲットの運動の追従 [20]



Tracking by Control C for Change of Motion.

図3.8-10 学習によって最適化したファジー制御則によるターゲット運動の変化に対する追従

(2) テザー長さの制御によるテザー衛星の振動制御

高度300 km付近の地球回りの円軌道を周回しているスペースシャトルから、先端に観測衛星を取り付けたワイヤーの長さ I を100 kmに伸ばすと、高度200 kmにおける高層大気の観測が可能になる(図3.8-11)。この時、人工衛星は空気抵抗のため、軌道を含む平面内で進行方向に対して前後にピッチ角 θ で、またその平面に対して垂直、即ち、左右方向にロール角 ϕ の振子振動を発生する。この振動は時間と共に発散し、特に観測終了後、ワイヤーを短縮してスペースシャトルに回収する際に激しい振動となるため、制御して抑制する必要がある。スペースシャトルが周回している時、ワイヤーの長さを変化させて衛星に速度を持たせると、上述の軌道平面に沿って、ワイヤーに垂直方向のコリオリ力が衛星に働き、復元力として作用させることができる[23]。図3.8-12には、前後方向のピッチ振動を押さえるため、角速度 Ω で回転していることから、コリオリ力を内側への復元力として衛星の作用させるために、テザーのコマンド長さ I_c を基本的には与えられた伸縮速度 dI_c/dt 、ここでは負の値、即ち、短縮して制御すれば良いことを示している。実際にはファジィ制御則はピッチ角 θ とピッチ角速度 $d\theta/dt$ の組合せによって分類して伸縮速度を規定する必要がある。

図3.8-13には、約100 kmの長さのテザーを短縮して、衛星をスペースシャトルに回収する時に、発生したピッチ振動をテザー長さを調節しながら抑制した計算結果を示した。単一の制御則を用いているため、コマンド長さが10 km以下になった附近から、テザーの短縮率が落ちているが、別の制御則を導入することにより、振動を抑制したまま6時間程度での回収が可能となる。衛星の運動を支配する方程式は非線形な複雑なものであるが、簡明なコリオリ力についての考察をファジー制御則に用いることにより、容易に前後振動を抑制することが可能である。また、左右方向のロール振動に対しても、ヨーヨーの原理による長さ変化のファジー制御則が有効なことを示した[24]。

(3) 浮遊構造物の厳密な形態制御

スマート構造物が構造の形態を変化させる場合、宇宙で浮遊した状態で行なうのと、地球上でどこかに固定された状態で行なうのとでは、力学的に挙動が本質的に異なる。浮遊している場合には、極めて複雑な難しいものになることが知られている。即ち、構造物が部分的に拘束されていれば、そこが基準になり、また位置決めも容易である。これに対し、浮遊している場合には、構造物に外力が作用すれば全体のシフトや回転が生じ、また内力

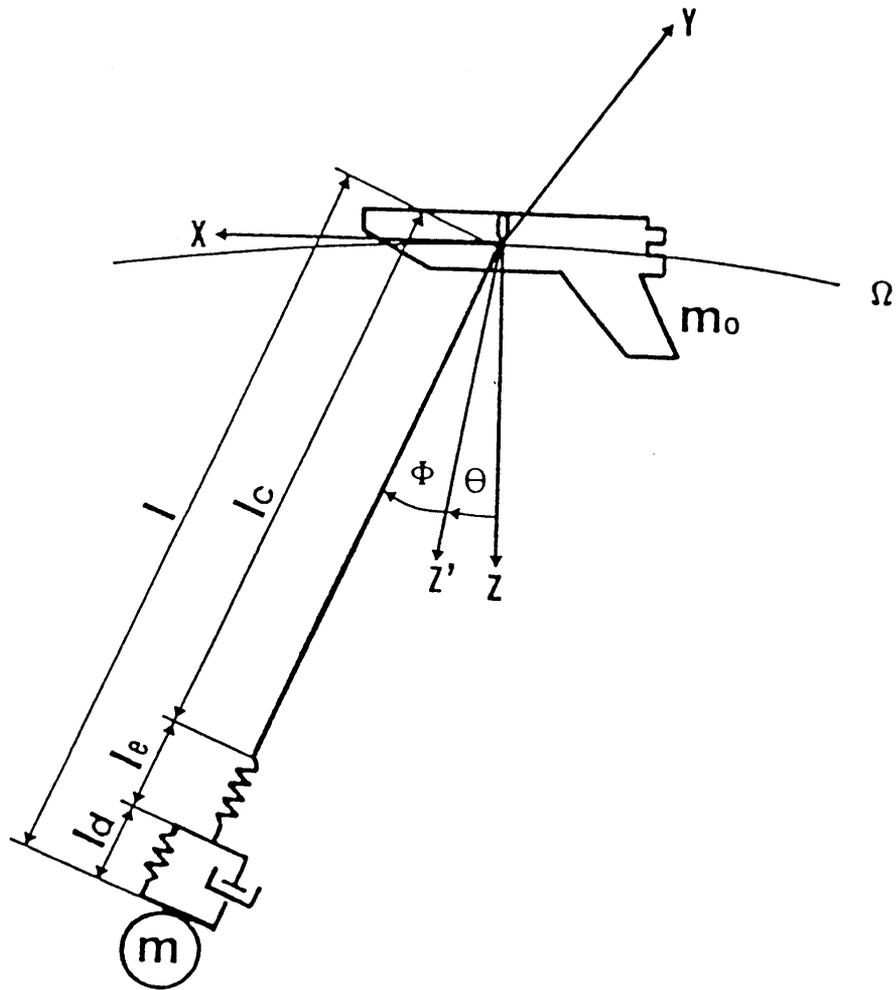


図 3. 8 - 1 1 スペースシャトルに吊されたテザー衛星 [2 4]

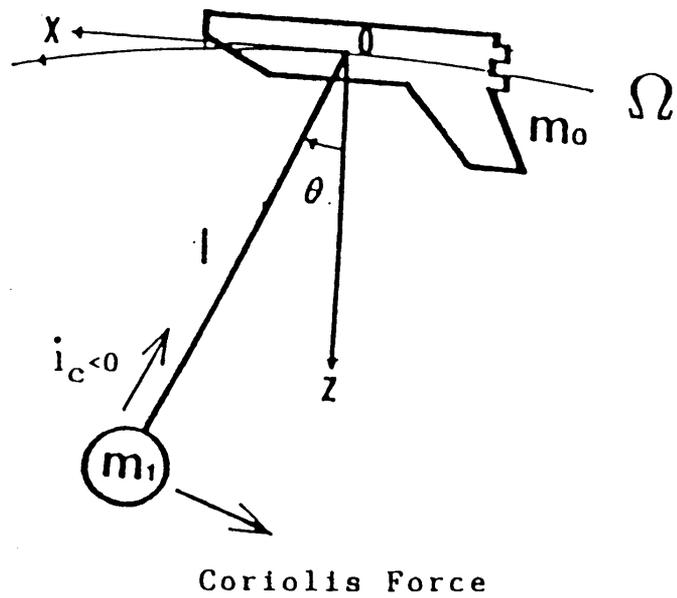
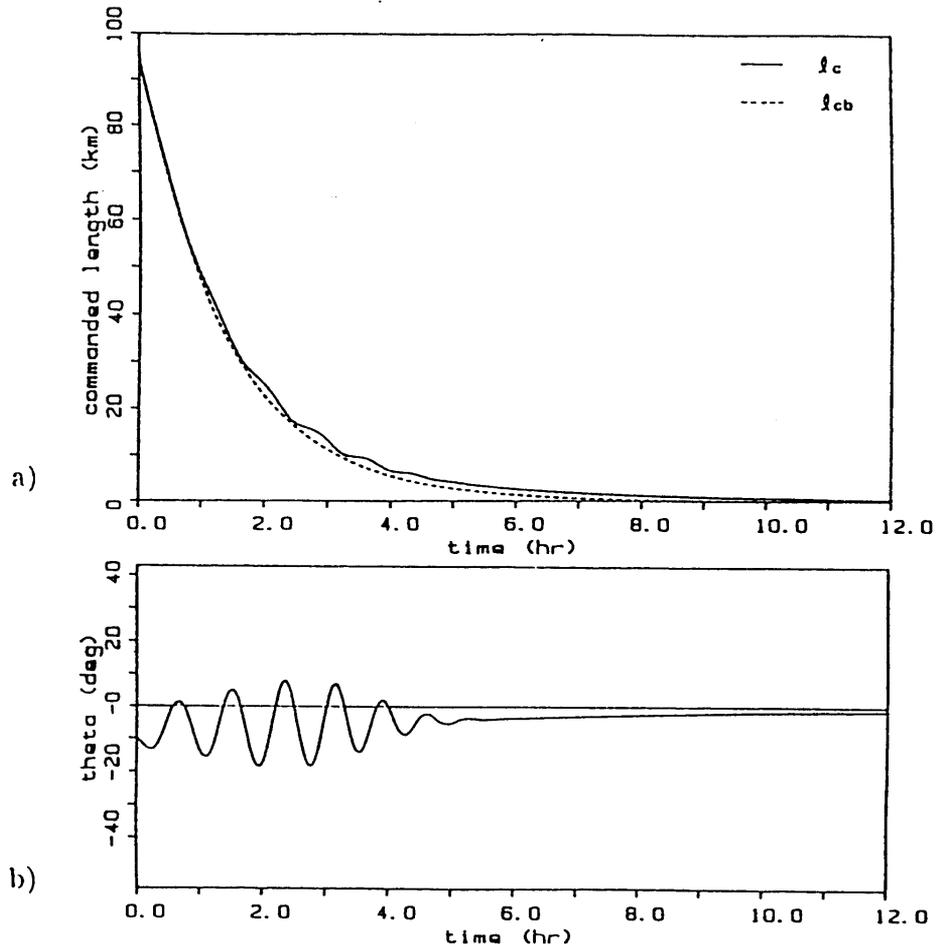


図 3. 8 - 1 2 コリオリカの利用のためのテザー長の短縮 [2 3]



a) command length, b) pitch angle.
 $t=0; \hat{\theta} = 0.02(\text{rad}), \quad \hat{\ell} = 0.0(\text{m})$
 $\dot{\theta} = 0.0(\text{rad/s}), \quad \dot{\ell} = 0.0(\text{m/s})$

図 3. 8 - 1 3 テザー衛星収納時のピッチ振動の制御 [2 3]

によって構造物の一部の形態が変化して移動すれば、全体の重心位置は不動のまま構造物全体としてシフトすることになる。このため、宇宙ロボットの挙動の制御は、地上ロボットに比較して大変難しいものになっている。即ち、固定されたロボットのハンドの位置は、各関節における相対位置で与えられるのに対し、浮遊ロボットでは、ハンドの速度と各関節速度の関係が一般化ヤコビー行列で与えられることになり、しかもこの行列の値は過去の履歴に依存するため、固定されたロボットで確立された手法を使うことが出来ない。宇宙ロボットの標準的解析手法では、この一般化ヤコビー行列の逆行列の演算が時間演算の1ステップ毎に必要となり、膨大な計算を必要とする。そこで、ロボット・ハンドの制御

のために、この逆行列の演算を必要としない人工ポテンシャル法が提案されている。しかし、この提案のままでは、ハンドは目的位置に到達は出来ても、途中の経路や姿勢を規定することが出来ない。そこで、筆者らは人工ポテンシャルに、付加項を与えることにより、ハンドを目的位置まで直線経路を取らせ、与えた姿勢で到達する制御法を提案した [25]。この制御法によれば目的地までの最短距離を取ることが出来、また、その経路上に障害物があるとすれば、それを避けた数点を選び直線経路で結んで到達することも可能となる。

また本手法は、宇宙ロボットに限らず、図3.8-6に示した様な宇宙トラス構造物にも適用出来る。図3.8-14には、宇宙ロボット本体、2本のアーム、ハンドからなるロボットシステムが、初期状態からハンドの先が与えられた点を経由して、対象物を垂直方向から捕捉する場合について、一定時間毎のロボットシステムの位置を示した。図3.8-15は、斜め部材のみが伸縮できる4組のせん断モジュールからなる、2次元スマートトラス構造物の初期状態から目的状態までの同様な移動について示している。右端のトラス部材の中央点にドッキング機構があり、最終状態では、右端トラスは平行移動をして対象物結合点に到着している。この変形では左右非対称になっているが、左右方向へは重点位置の移動は拘束され、ソフトドッキングを行なっている。

3.8.4 スマート・コンポジット構造

構造物のスマート化のために、アクチュエータとしての形状記憶合金を、パネル材として、あるいは繊維材として積層板の中に埋め込み、活用しようとする試みが行なわれている。形状記憶合金の剛性、強度や応力・歪特性は極めて複雑であり、温度に限らず応力、歪のレベルにより挙動が異なり、特に温度制御によるアクチュエータとしての利用には、特性の正確な把握や疲労寿命の点での改良が、今後極めて重要と考えられる。また、実際に有効なスマート化のためには、温度制御に関しては、加熱と、特に、急速な冷却の手段を提供することが不可欠である。迅速な加熱と冷却の保証がないと、遅い速度制御によるスマート化で十分な構造物への利用に限られることになる。

アクティブな材料としては上述の様な問題があるため、形状記憶合金を、パッシブに使うことが検討されている。即ち、形状記憶合金の、マルテンサイト相における減衰係数率が他の材料と比較して著しく大きいことから、強制振動の抑制や自励振動、特に空力弾性現象の抑止に有効と考えられる。この場合にも、前述した様に、減衰率は温度、応力・歪に依存するため、減衰特性のこれらに対する正確な情報が必須のものである。また、特に

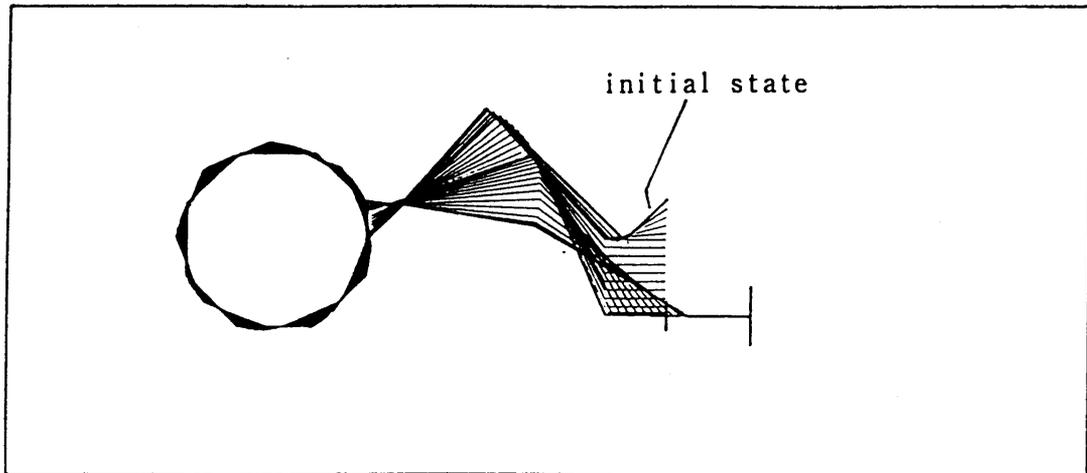


図 3. 8 - 1 4 宇宙ロボット・ハンドの直線移動 (1 点経由) [2 5]

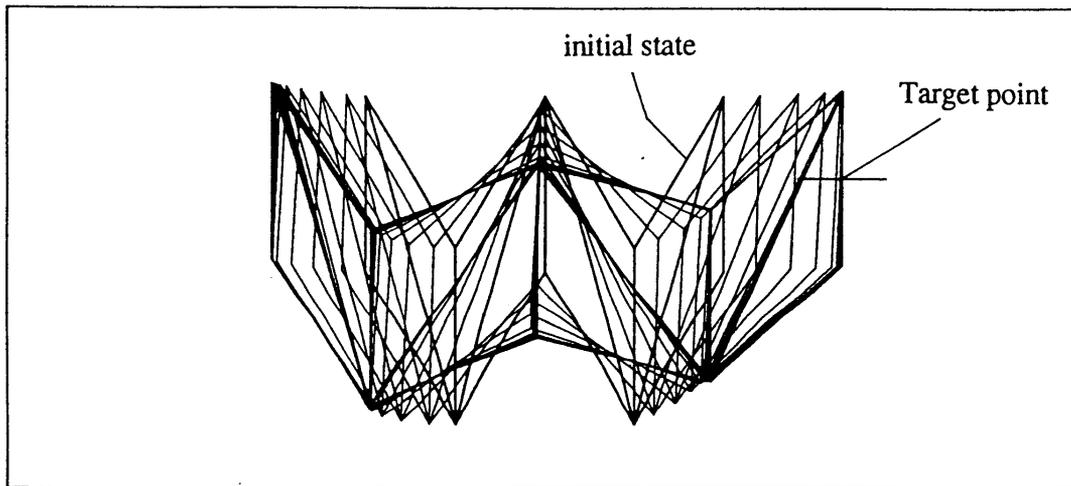


図 3. 8 - 1 5 トラス構造物の結合部材の規定された移動 [2 5]

形状記憶合金を繊維材として積層スマートコンポジット板に利用する場合には、材料としての特性が十分正確に把握されているだけでなく、スマート構造部材の中で、どのような応力・歪状態にあるかということをも十分精度良く知ることが重要である。即ち、複雑な構成を持つ、複合材という部材の中における応力・歪状態が分かって、初めて材料の特性を知ることになるからである。従って、スマートコンポジット構造物では、一層厳密な解析が要求されることになり、しかも局所的な変化も把握することが必要である。特に、オーステナイト相とマルテンサイト相の混在する遷移域で、高い減衰特性を利用する場合には重要である。

(1) 積層板の減衰係数率のマイクロメカニクス解析

ここでは、広く用いられている積層複合材板に、形状記憶合金繊維を付加することによって、材料自体の高い減衰率を利用して、平板としての減衰率を増加させる場合について、筆者らのマイクロメカニクス解析について記述する。

材料が変形をする時のエネルギーの損失率は、減衰容量比(Specific Damping Capacity)、即ち、1周期の運動をする間のエネルギー損失を、その間の最大の歪エネルギーで割ったもので与えられる。マトリックス材、強化繊維材の夫々について、垂直方向、剪断方向の材料特性と減衰容量比が既知のものとした時には、単一のマトリックスが単一の繊維材により一軸方向に強化された単層板を対象にして、6つの面内および面外の変形モードに対する減衰容量比と機械的特性に関する半実験式による複合則が提案され、単層板のこれらの特性の評価法が与えられている。そこで、形状記憶合金繊維の特性も既知のものとして、図3.8-16に示す様な複数の種類の繊維材を一軸方向に含む単層板について、単層板の減衰容量比と機械的特性の評価式の一般化を提案し、形状記憶合金(NITINOL)の含有率を変化させた時の減衰容量比への影響について調べた[26-28]。

さらに、外力に対する繊維の方向や一軸強化単層板を異なる角度で積層した時の減衰容量比への効果、また四辺単純支持積層矩形平板の場合について各振動モードに対する影響などを調べている[29, 30]。図3.8-17は、上下対称に積層し、ハッチ部分がEガラス/エポキシ、黒色部分がEガラス/NITINOL/エポキシからなる積層板の場合について、NITINOLの含有率と繊維方向が、固有振動モード1~3次の減衰容量比に与える影響を示している。ここでは、遷移域での減衰の増加の効果を利用していないが、その場合には、積層板内の応力・歪の分布を考慮した上で、再度各種の特性を評価する必要がある。

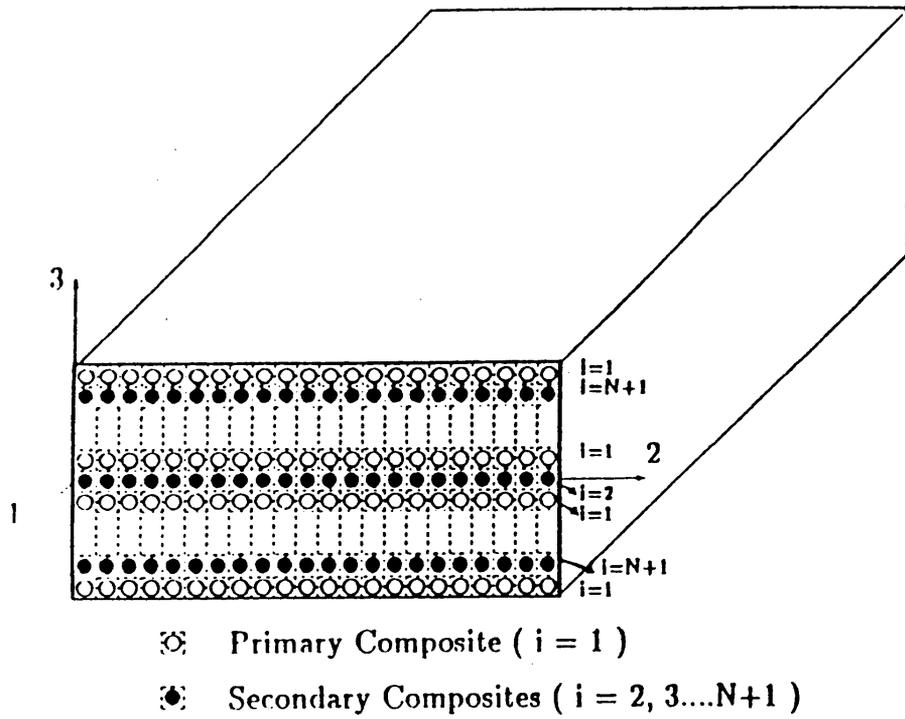


図 3. 8 - 1 6 複数種の繊維材の一軸方向強化単層板 [2 8]

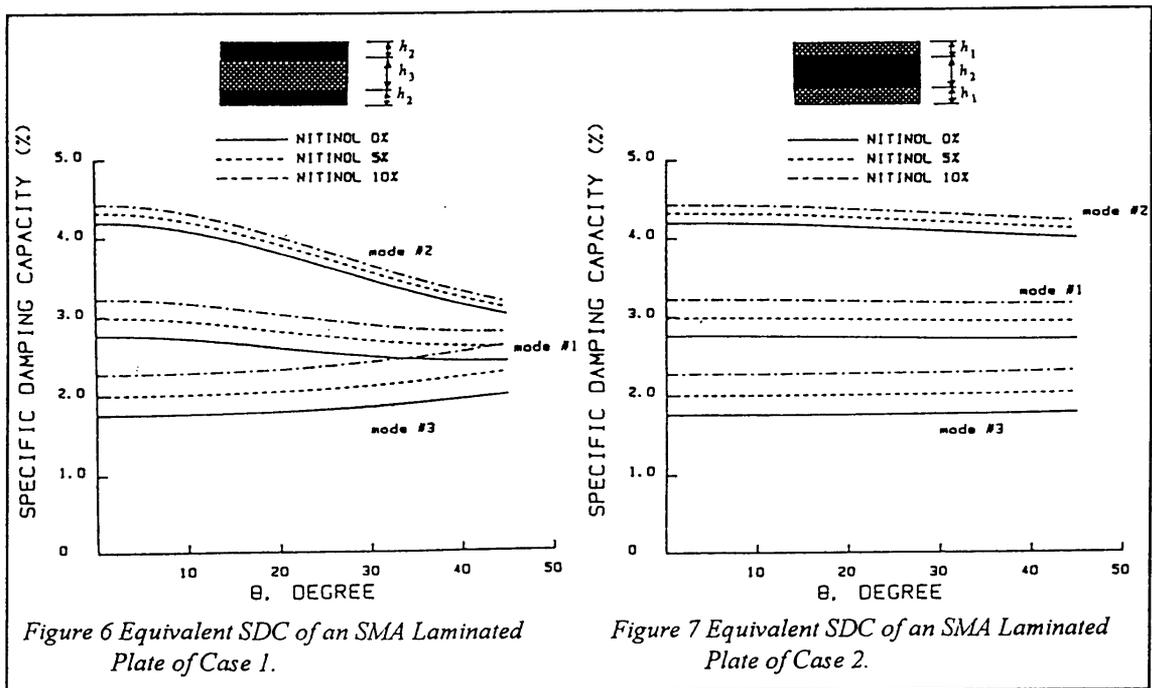


図 3. 8 - 1 7 四辺支持積層板の固有モードの減衰容量比へのニチノールの含有量と繊維方向の影響 [3 0]

る。

(2) スマート積層板によるパネルフラッタ抑止など

オーステナイト相とマルテンサイト相の混在している温度域における、形状記憶合金の高い減衰を利用することによって、周期外力を受ける構造物の振動を抑制する効果を明らかにするために、マルテンサイト相の体積含有率や材料定数を簡単な温度の表示式で与えて、減衰係数の評価式を導き、表板を形状記憶合金によって作られた浅い曲面のサンドイッチ板の振動特性を調べた [31]。図3.8-18に、解析的に用いた浅いサンドイッチ曲面板のモデルと図3.8-19には、温度が310 °Kと330 °Kの時の過度的振動の位相図を示した。310 °Kの時には振巾が有効に減少していることが分かる。

また、形状記憶合金繊維を埋め込んで、4辺で単純支持された矩形の積層カーボン・エポキシ・パネルが超音速流にさらされる場合について、オーステナイト相およびマルテンサイト相におけるパネルフラッタの危険速度への形状記憶合金繊維の体積含有率やパネルの矩形比などの影響を調べている [32]。

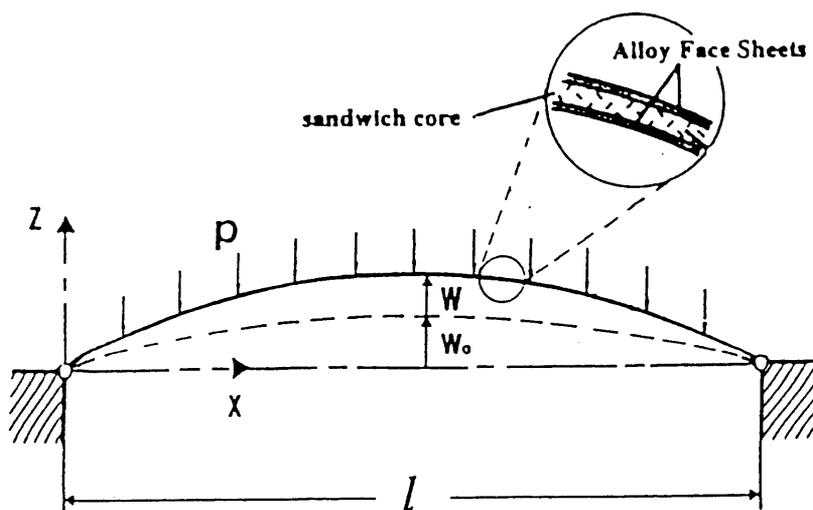


図3.8-18 形状記憶合金表板のサンドイッチ曲面板 [31]

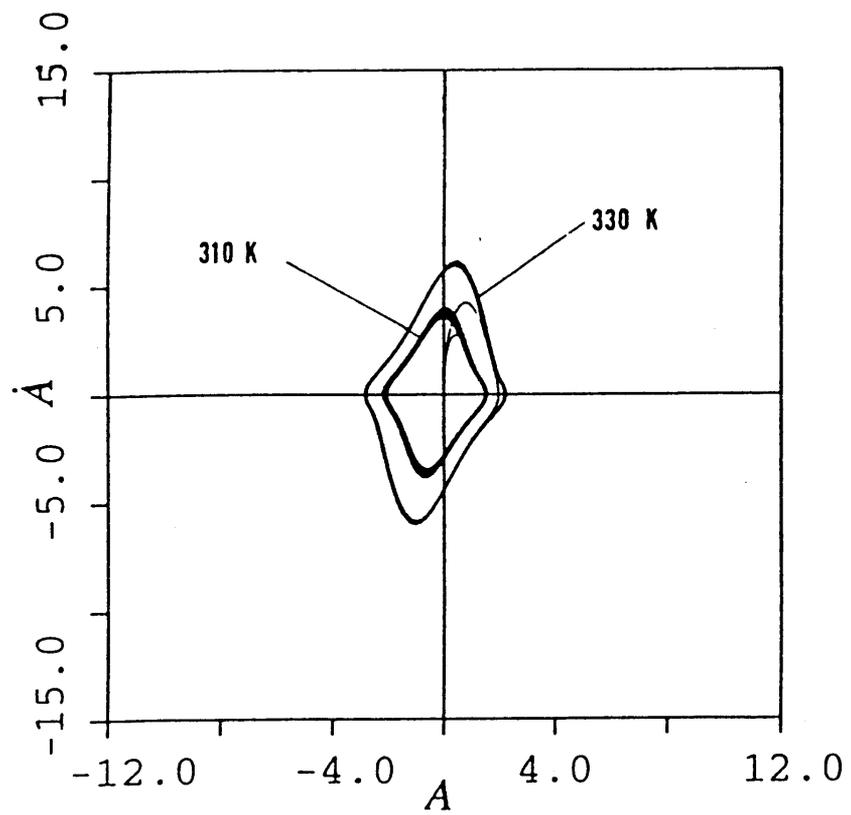


図3. 8 -19 振動への温度効果 [3 1]

参考文献

- 1) 松崎雄嗣 : インテリジェント材料, 3, 1 (1993), pp. 5-12.
- 2) 松崎雄嗣, 紙田 徹 : 日本航空宇宙学会誌, 43, 495 (1995), pp. 239-244.
- 3) Y. Matsuzaki and M. Toyama : Proceedings of Smart Structures and Materials (1994), Smart Structures and Intelligent Systems, SPIE, 2190 (1994), pp. 705-716.
- 4) Y. Matsuzaki, K. Kimura and T. Harada : Proceedings of the 16th International Symposium on Space Technology and Science (1988), pp. 643-648.
- 5) 松崎雄嗣, 外山道治 : 日本機械学会第70期全国大会講演論文集, Vol. E (1992), pp. 592-594.
- 6) Y. Matsuzaki, et al. : 28th AIAA's Structures, Structural Dynamics and Materials Conference (1987), AIAA-87-0781-CP, pp. 233-241.
- 7) Y. Matsuzaki, et al. : Journal of Aircraft, 26, 4 (1989), pp. 322-327.
- 8) H. Matsusita and Y. Matsuzaki : Proceedings of Active Materials and Adaptive Structures (1992), pp. 577-584.
- 9) Y. Matsuzaki and Y. Ando : Journal of Aircraft, 18, 10 (1981), pp. 862-868.
- 10) Y. Matsuzaki and Y. Ando : Journal of Aircraft, 21, 6 (1984), pp. 435-436.
- 11) Y. Matsuzaki and H. Torii : Journal of Sound and Vibration, 136, 2 (1990), pp. 187-199.
- 12) H. Torii and Y. Matsuzaki : International Pacific Air and Space Technology Conference and 29th Aircraft Symposium Proceedings (1991), P-246, SAE Paper 91-1999, pp. 309-314.
- 13) T. Torii and Y. Matsuzaki : Proceedings of 33rd AIAA's Structures, Structural Dynamics and Materials Conference (1992), AIAA Paper 92-2393-CP, pp. 1870-1877.
- 14) Y. Matsuzaki and Y. Ando : Proceedings of 26th AIAA's Structures, Structural Dynamics and Materials Conference (1985), AIAA-85-0691, pp. 313-320.
- 15) H. Torii and Y. Matsuzaki : 36th AIAA's Structures, Structural Dynamics and Materials Conference (1995), AIAA Paper 95-1487.
- 16) Y. Matsuzaki, et al. : Proceedings of 31st AIAA's Structures, Structural

- Dynamics and Materials Conference (1990), AIAA-90-0945-CP, pp. 1865-1869.
- 17) Y. Matsuzaki, H. Hosoda and Y. Hayakawa : Proceedings of 1st Joint U.S./ Japan Conference on Adaptive Structures (1991), pp. 792-802.
 - 18) Y. Matsuzaki and H. Hosoda : Proceedings of 32nd AIAA's Structures, Structural Dynamics and Materials Conference (1991), AIAA Paper 91-1234, pp. 1-6.
 - 19) Y. Matsuzaki and H. Hosoda : Proceedings of 2nd Joint Japan/US Conference on Adaptive Structures (1992), pp. 641-652.
 - 20) Y. Matsuzaki and S. Abe : Proceedings of 33rd AIAA's Structures, Structural Dynamics and Materials Conference (1992), AIAA Paper 92-2402, pp. 1-7.
 - 21) Y. Matsuzaki, H. Hosoda and S. Abe : Proceedings of 1st European Conference on Smart Structures and Materials (1992), pp. 293-296.
 - 22) Y. Matsuzaki and Y. Hayakawa : Proceedings of 3rd International Conference on Adaptive Structures (1992), pp. 3-12.
 - 23) Y. Matsuzaki, T. Fukushima and K. Takahashi : Proceedings of 34th AIAA's Structures, Structural Dynamics and Materials Conference (1993), AIAA Paper 93-1673, pp. 3430-3436.
 - 24) Y. Matsuzaki and S. Abe : Proceedings of 35th AIAA's Structures, Structural Dynamics and Materials Conference (1994), AIAA Paper 94-1617, pp. 2373-2383.
 - 25) Y. Matsuzaki and T. Miura : AIAA's 36th Structures, Structural Dynamics and Materials Conference (1995), AIAA Paper 95-1087.
 - 26) V. Baburaj and Y. Matsuzaki : Proceedings of 3rd International Conference on Adaptive Structures (1993), pp. 473-485.
 - 27) V. Baburaj and Y. Matsuzaki : Proceedings of 4th International Conference on Adaptive Structures (1993), pp. 87-95.
 - 28) V. Baburaj and Y. Matsuzaki : Journal of Intelligent Material Systems and Structures, 5 (1994), pp. 647-653.
 - 29) V. Baburaj and Y. Matsuzaki : Journal of Sound and Vibration, 172(3) (1994), pp. 415-419.
 - 30) V. Baburaj and Y. Matsuzaki : Proceedings of 5th International Conference on

Adaptive Structures (1995).

31) Y. Matsuzaki and D. Ishikubo : Proceedings of 3rd Asia-Pacific Workshop of Intelligent Materials (1995), pp. 34-36.

32) 松崎雄嗣, 永盛敏彦 : 第36回構造強度に関する講演会集 (1994), pp. 125-128.

3. 9 スマートコンポジットによる超巨大構造物実現の研究要素

複合材料ならではの特性（比強度・耐食性・耐久性）を活用してはじめて可能となる超巨大構造物の構想がある。本節では、まずこの構想ならびにそのスマートコンポジットないし知的材料／構造との関連を説明した後に、超巨大構造物実現のための研究要素として、革新成形技術およびリサイクル技術に関する研究の現状を紹介する。

3. 9. 1 知的複合材料と超巨大構造物

超巨大構造物に限らず、知的材料／構造の考え方を実構造物へ適用することを考えれば、例えば光ファイバや形状記憶合金の埋め込みの必要性などからもわかるとおり、これはまさしく複合材料の応用分野である。そこでここではまず、複合材料の応用としての超巨大構造物（ないし構造システム）開発という立場から、シーズ・ニーズ両面から具体的に必要となる技術等を説明する。

(1) 知的材料／構造の研究体制

知的材料／構造の研究体制には大きく分けて2つの流れがある。すなわち、知的機能性素材（Intelligent Materials）の研究開発というシーズ開拓の流れと、実用構造物への応用というニーズのもとで、現存する機能性材料の組み合わせで構造体として機能を発現しよう

表3.9-1 知的機能性材料に関する主要な国家プロジェクト

科技厅 科学技術振興調整費	(1) 新機能性材料創製のためのホスト・ゲスト反応活用技術に関する基礎的研究	1990～	層状構造・籠構造・トンネル構造などの特異構造を持つホストと種々のゲスト分子との選択的反応を活用することによって、様々な機能材料を創製する。
	(2) 原子・分子の協同作用を用いたインテリジェント材料創製のための基礎技術開発	1992～	環境条件に知的に応答し、変化の自己診断・抑制・修復・寿命予告等の機能を発現する新物質・材料を創製する。
	(3) ナノスペーススラボによる新材料創製に関する研究	1994～	原始・分子レベルでの基礎機能の解明と応用により、生体をも凌駕する超機能発現物質・材料を創製する。
通産省 産業科学技術研究開発制度	(4) 加遠型生物機能構築技術（タイムマシンバイオ）	1995～	生命が地球上に誕生してからの様々な進化の機構を分子レベルで模倣して、新規な生物機能を実験室内で効率的に創出する進化実験系を構築するための技術を開発する。
	(5) 自律応答材料	先導研究 1993～	環境の変化に自律的かつ能動的に機能を発現する生体系を人工的に模倣し、エネルギー変換効率・環境適合性にも優れた知的材料を創出する。
	(6) 分子協調材料	先導研究 1995～	生体組織で一般に認められる、有機分子同士、有機分子と金属・無機物質との結合により構築される超分子に着目し、各分子が協調して機能発現する新規な有機系材料の創製を図る。
	(7) スーパーメタル	先導研究 1995～	金属材料の開発・製造方法の高度化・統合化を図り、材料設計コンセプトの革新により、金属の限界性能の発揮並びに新機能を発現させた材料、すなわちスーパーメタルの開発を行う。
通産省、工技院 院内一般特研	(8) 知的構造システム	先導研究 1995～	様々な機械・構造システムの巨大化・知能化に資すべく、一つの構造モジュールとしてセンサ・判断・学習・アクチュエータ機能を発現する知的構造システムの研究開発を行う。
	(9) バイオミメティックデバイスに関する研究	1992～1996	生体における高度な情報の受容・変換・伝達分子機構を材料工学的に模倣する技術を確立し、分子素子よりなる新規な情報変換デバイスを構築する。
通産省、工技院 院内一般特研	(10) 有機・無機ハイブリッド材料の環境応答機能発現機構に関する研究	1995～1998	有機高分子とセラミックスのハイブリッド材料化により、環境の変化に迅速に様々な機能を発現する材料を創出する。
	(11) フェニックス複合材料の開発に関する研究	1995～1999	省エネルギー・省資源化に資すべく、製品信頼性の評価技術の高度化による構造材料の寿命延長、廃棄物再資源化をにらんだ新たな材料設計技術などを確立する。

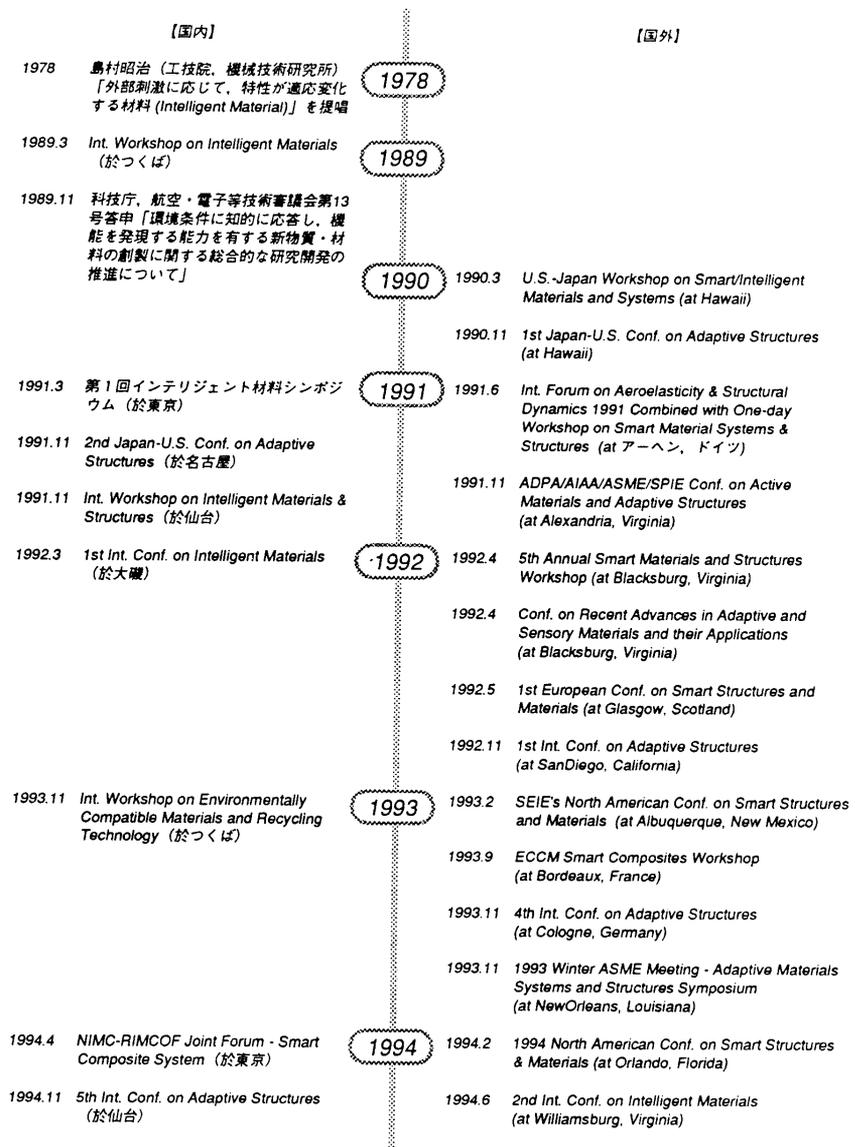
(Smart Structures) という流れである。ここで、表3.9-1は日本国内における関連する国家プロジェクトをまとめたものであるが、これらのほとんどが生体模倣・環境適合を目標としたシーズ開拓研究であり、我が国の基礎研究に偏重した研究体制が理解できよう。

ただし、最近では、欧米では我が国のインテリジェントマテリアルの研究開発に興味を持ちはじめ、逆に我が国においては欧米型のスマートストラクチャーに関心が寄せられている。表3.9-2は我が国における関連委員会等をまとめたものであるが、知的構造体に関するものがここ数年で数多く設立されていることがわかる。また、表3.9-3は関連する内外での主要な国際会議等を年表に整理したものであるが、我が国におけるインテリジェントマテリアルと欧米のス

表3.9-2 知的材料／構造に関する国内の主要な委員会・研究会

スマート流体研究会	1989～1990	次世代高分子基盤技術研究組合
インテリジェント材料フォーラム	1990～	未踏科学技術協会
知的材料研究会	1991～	日本非破壊検査協会
エレクトロロジー研究会	1991～	日本レオロジー学会
スマートストラクチャー研究会	1993～	未踏科学技術協会
航空機へのインテリジェントコンポジットシステムに関する調査委員会	1993～	日機連/RIMCOF
知的材料・構造研究会	1993～	日本機械学会
スマートコンポジットに関する調査委員会	1994～	NEDO/RIMCOF
知的構造システムに関する海外調査委員会	1994～	JETRO/RIMCOF

表3.9-3 知的材料／構造に関する国内外での主要な会議等



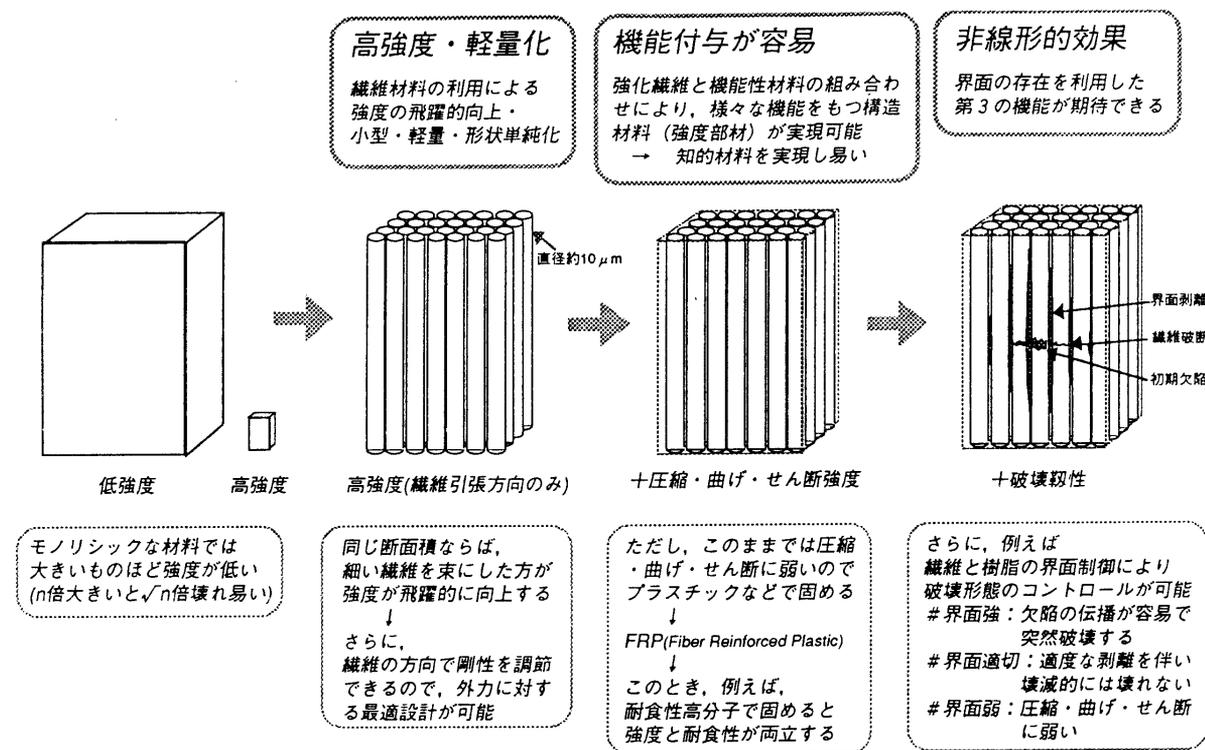


図3.9-1 複合材料の利点（機能性構造材料の観点から）

マートストラクチャーの密接な連携が今後ますます盛んになることが予想される。

本節で取り上げる知的材料／構造は、日本型の「原子分子レベルでの機能発現」よりは、欧米型の「構造体としての機能発現」に近いものをさしている。

(2) 複合材料から知的複合材料へ（シーズ先行型研究開発）

まず、図3.9-1は知的機能材料（あるいはその母体）としての複合材料の利点を模式的に示したものである。すなわち、「高強度で軽量」で

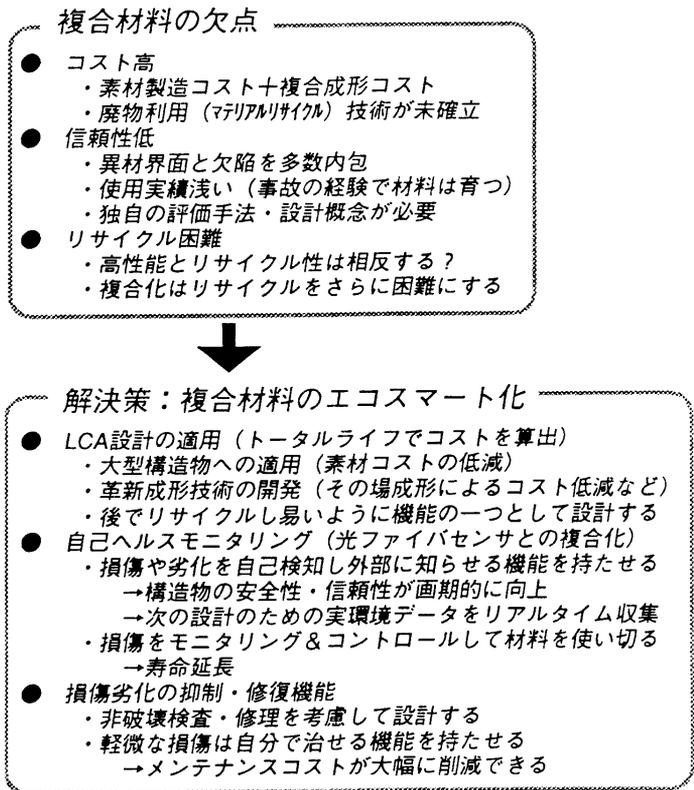


図3.9-2 複合材料の欠点と研究開発指針

あることは、これまでその自重に耐えられないことを理由に実現できなかった超高層建築が可能となることを意味しており、「機能付与が容易」であることは、光ファイバや形状記憶合金などのセンサやアクチュエータを構造に組み込むことが製造工程で容易に実現できることを示している。さらに、構造物の耐環境性を考えれば、耐食性プラスチックの利用がメンテナンスコストと構造物の寿命の面から極めて有利なものとなる。

このように高機能な複合材料ではあるが、その一般構造物への普及拡大は期待に反して遅延している。図3.9-2は、その原因と考えられる複合材料の一般的な欠点と同時に、その解決を目的とした知的複合材料化の考え方を示したものである。すなわち、複合材料は

- 原料費と大がかりな成形プロセスに起因する高コスト
- 使用実績の少なさから来る低信頼性と使いづらさ
- リサイクルの困難さ

の3点がネックとなり、前述のごとき高機能を持ちながらも、その普及拡大が伸び悩んでいると考えられる。そして、この解決方針として考えられているのが複合材料の知的複合材料化である。具体的には、図3.9-2中に示されるように、複合材料のコスト高は巨大構造物への適用・革新成形技術の確立・リサイカブル設計法の確立などで対応し、信頼性の低さは自己ヘルスマモニタリングや損傷劣化の抑制・修復機能の付与で対応することなどが考えられている。

(3) 超巨大構造物実現への要素技術（ニーズ先行型研究開発）

一方、図3.9-3～6は複合材料をはじめとする新素材を用いてはじめて実現できる超巨大構造物の構想の一例

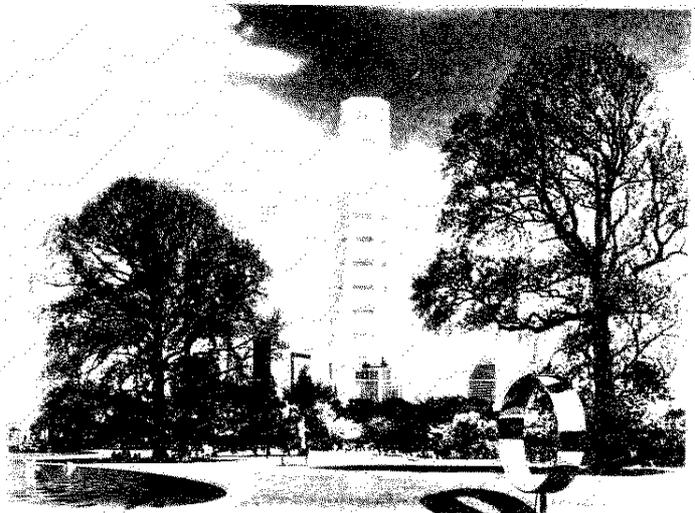


図3.9-3 超巨大構造物の構想例（超々高層建築物）¹⁾

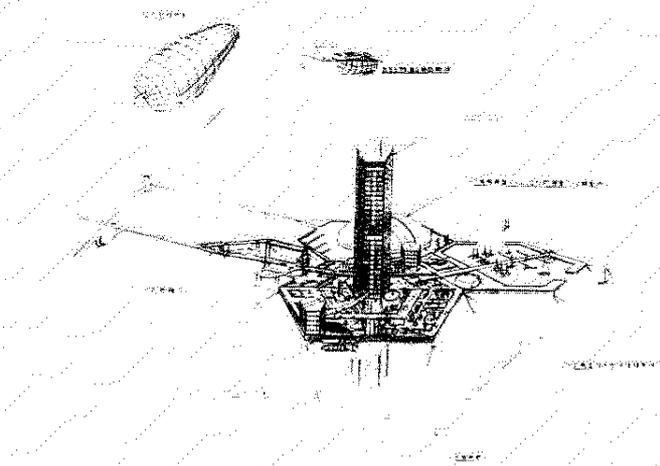


図3.9-4 超巨大構造物の構想例（海上都市）¹⁾

であり、図3.9-3は高さ1000m級の超々高層建築物、図3.9-4はフロート式人工島による海上都市の概念図¹⁾であり、図3.9-5、6は高さ2004mのピラミッド型の立体都市の構想図²⁾である。そして、図3.9-7は上記(2)とは異なる立場、すなわち、図3.9-3～6に示されるような超巨大構造物の実現に必要な要素技術というニーズ先行の立場から、材料に要求される性能を整理したものである。

ここで注目すべき点は、図3.9-2に示した複合材料の研究開発指針と図3.9-7における超巨大構造物実現のための指針が良く一致している点である。ただし、詳しくみてみれば、超巨大構造物実現の観点からは、接合技術・データ処理技術等の現実的問題点が明らかにされており、クリアすべき技術的目標もはるかに明確になっている。すなわち、複合材料をはじめとする新素材は、これまで主として(化学的)機能性材料として用いられていたが、その高機能性を真に世の中の役に立つものとして活

用するためには、構造材料としての適用に積極的にチャレンジする必要がある(あるいはそれが最も近道である)といえるであろう。さらに言えば、複合材料の解決すべき問題点として挙げられているコストの低減・信頼性の向上なども(図3.9-2参照)、鉄・アルミ・コンクリートなどのこれまでの材料がそうであったように、構造材料としての大量の使用によってはじめて実現するものであろう。

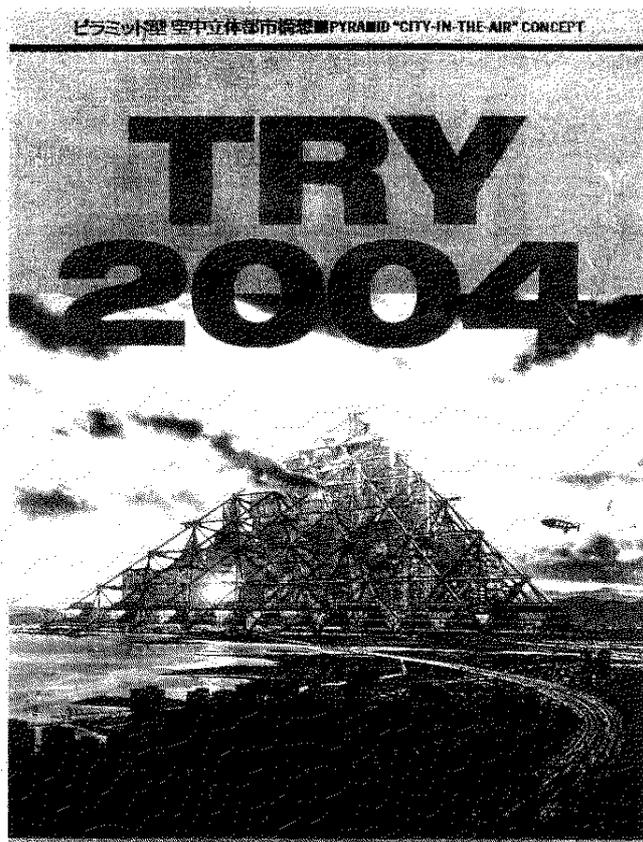


図3.9-5 超巨大構造物の構想例
(ピラミッド型立体都市)²⁾

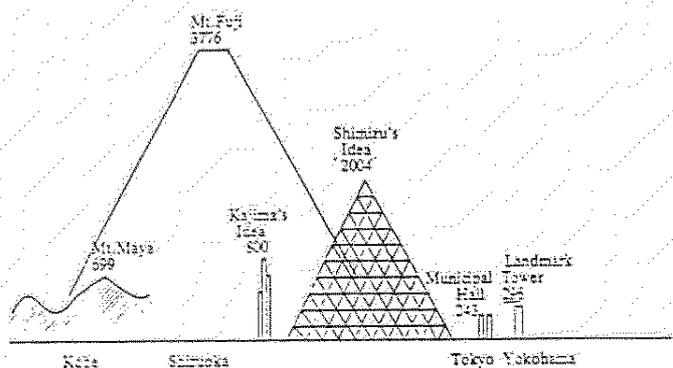


図3.9-6 超巨大構造物の大きさの比較²⁾

(4) 環境調和型知的複合材料開発の必然性

次に、図3.9-2および図3.9-7に示された個々の要素技術について少し詳しく考えてみる。まず、図3.9-7中に示される要求性能のうち、「軽量性・寸法安定性・耐環境性」に関しては、コストを度外視すれば、モノリシックな従来材料に代えて繊維強化複合材料を用いることではほぼ解決する（逆にこのことに起因する問題点もあるが、その解決案は上記（2）で既に示した通りである）。次に、「メンテナンス性」の項目を見ると、ここでの研究項目がまさに現在スマートストラクチャーとして精力的に研究開発されている

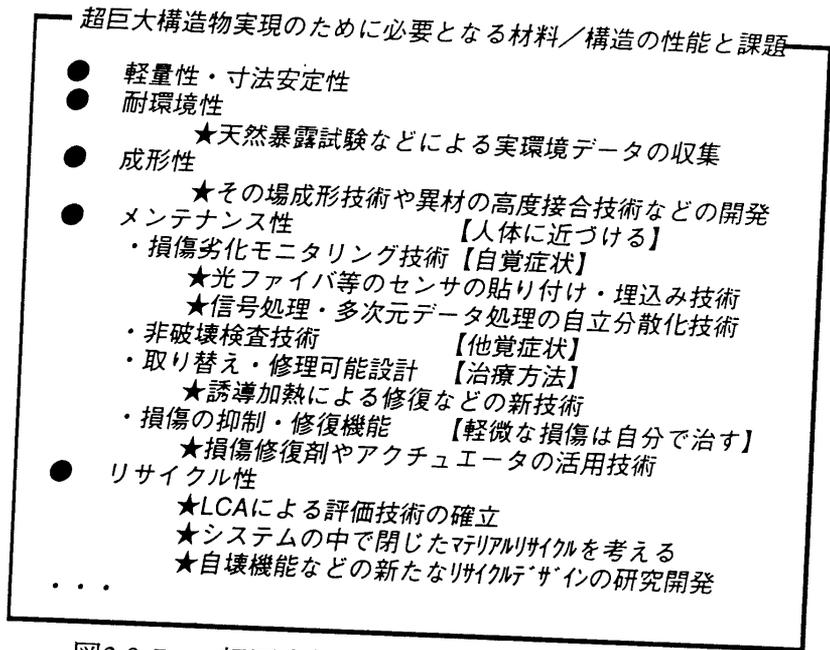


図3.9-7 超巨大構造物開発のために必要となる材料／構造の性能と課題

ものと一致していることが理解できよう（本書の本節以外の所で解説されているものはすべてこの項目に含まれていることを確認されたい）。このように見てくると、現在のスマートストラクチャーの研究開発の成果を現実の構造物に適用する段階で、「成形性」と「リサイクル性」が新たな問題点としてクローズアップされることはもはや明らかである。またこのことは、地球環境問題にからんで、省エネ・省資源・省環境負荷の観点からも今後ますます厳しく規制されて行く問題であり、見逃せない。ところが、残念ながら、現地点ではこの趣旨のもとでの研究開発は極めて少ない。そこで以下では、省エネ・省資源・省環境負荷を目標とした環境調和型知的複合材料の研究開発の考え方を示すことで問題を具体化し、次節以降では、これを実現するためのものとして図3.9-7に示した研究要素のうちの革新成形技術とリサイカブル設計に関する検討例を紹介する。なお、図3.9-7中に挙げられた項目の中で本書中に取り上げられていない耐環境性と損傷の抑制・修復機能については、それぞれ筆者による解説³⁴⁾があるので、それらを参照されたい。

まず、図3.9-8は、以上の議論を踏まえ、国家プロジェクトとしての知的構造システム（表3.9-1(8)参照）の研究開発要素とその連携などを図にまとめたものである（個々の具

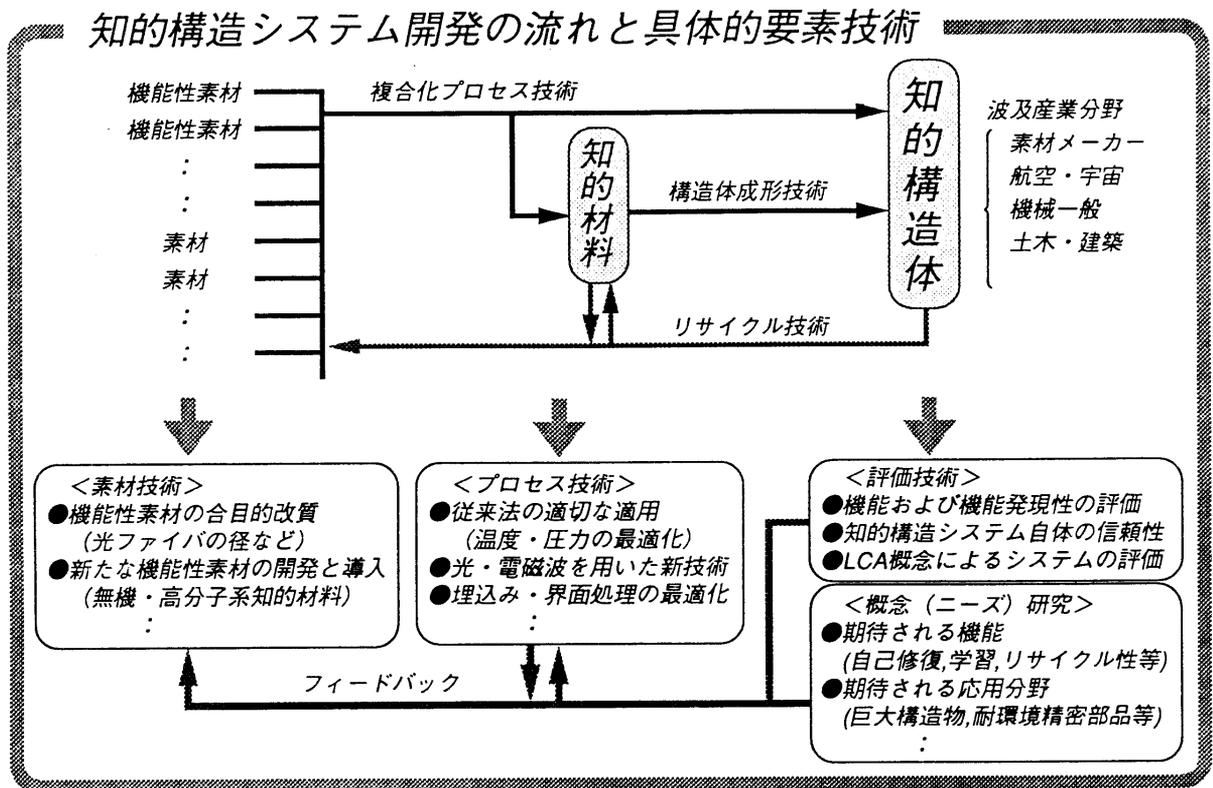


図3.9-8 知的構造システム開発の流れと要素技術

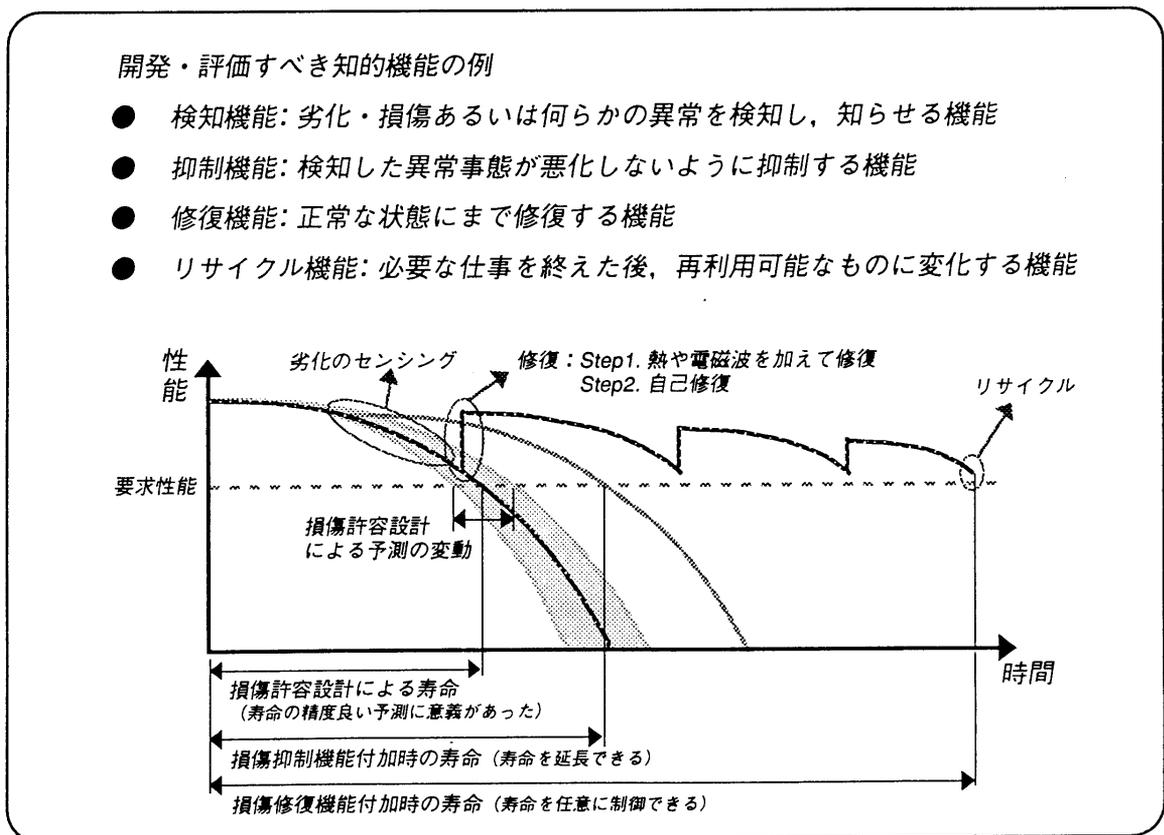


図3.9-9 損傷の抑制・修復機能の概念と寿命の関係

体的研究内容は図3.9-2および図3.9-7を参照されたい)。また、図3.9-9は、ここで考える知的構造システムにおける機能の例とその構造寿命やメンテナンス性との関連を示したものである。同図から、本システムにより構造物の「機能向上・メンテナンスコストの低減による省エネ・省コスト」と同時に「寿命延長・リサイクルによる省資源・廃棄物低減」が可能となることが理解でき、本システムがまさに今望まれている地球に優しい構造システムであることがわかるであろう。

次に、図3.9-10は、以上の要件を満たすものとして考案された環境調和型知的複合材料の概念図である⁹⁾。上側の図は、光ファイバ・炭素繊維・形状記憶合金・圧電セラミックなどを用いて損傷劣化のセンシング・外部告知・抑制・修復などを行う様子を示してお

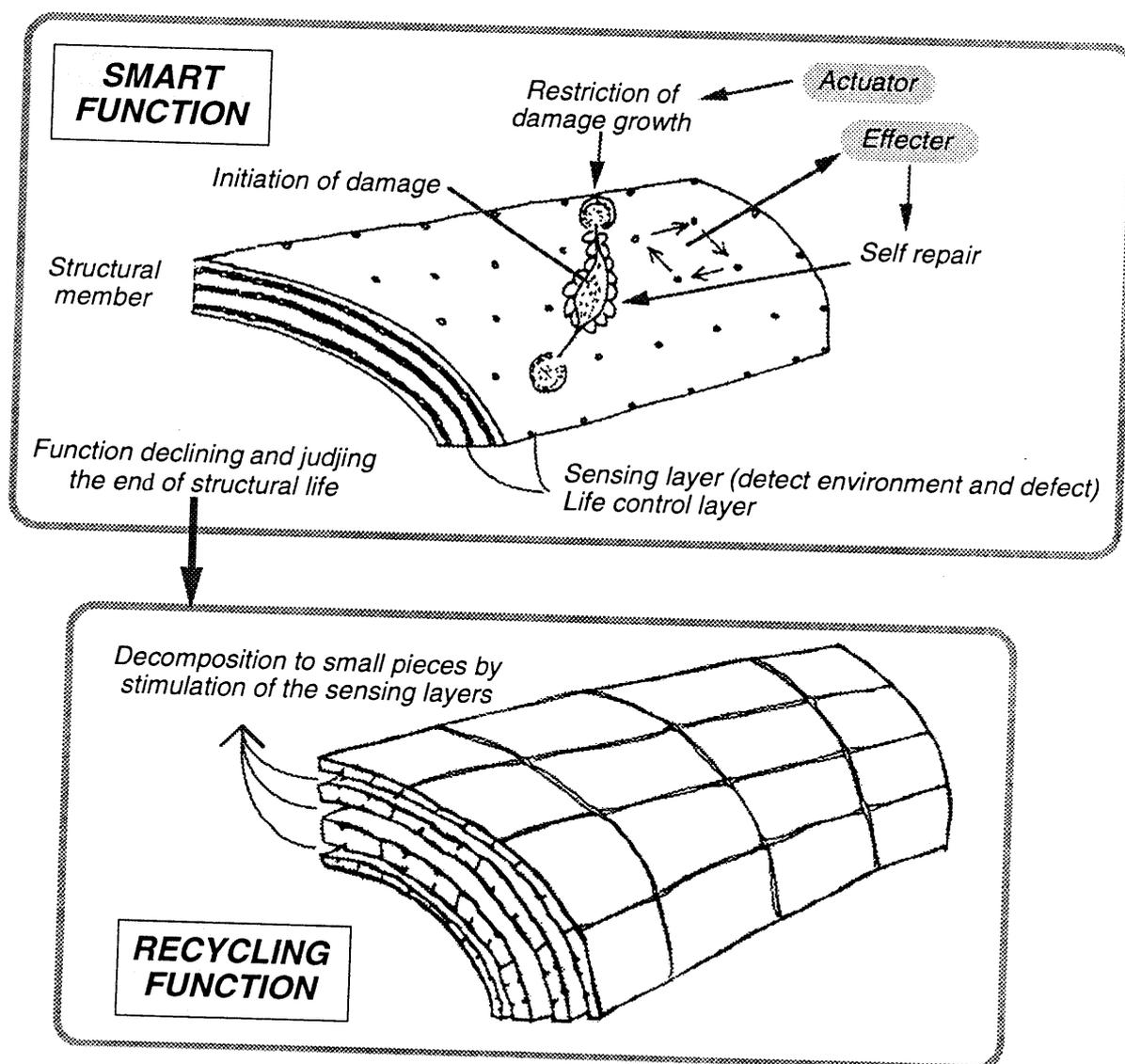


図3.9-10 環境調和型知的複合材料の概念図⁹⁾

り、これらは通常のスマートストラクチャーのもつ機能と同じものである。一方、下側の図は寿命を全うした後、小片に分解して再利用（マテリアルリサイクル）を可能とするリサイクル機能のアイデアである。ここで重要なのは、複合材料は異種混合材料であるため、鉄・アルミなどのモノリシックな材料に比べて素材に戻す形でのリサイクルが非常に困難となる点であり、これが巨大構造物に使用される際には、その廃棄・再利用までもにらんだ設計が極めて重要となることである。さらに言えば、高性能複合材料に使用される強化繊維および樹脂はそれ単体でも原料に戻す形でのリサイクルは困難であることから、溶かしたり砕いたりして使う形での再利用法の検討はこの種の複合材料ではあまり現実的ではない。このような現状を踏まえ、図3.9-10ではなるべく複合材料の形で再利用しようというマテリアルリサイクルの考えも含まれている点に注目されたい。

最後に、超巨大構造物への知的構造システムの適用を考えた場合、定期点検が大変であることは言うまでもなく、宇宙空間・海上・超高層・砂漠・被災地など、建設や修理・交換作業自体が極めて困難な場所での使用が十分に想定されるため、成形法やメンテナンス法の機能もまたこれらを想定して検討することが重要であることを付記しておく。

3. 9. 2 革新成形技術

知的複合材料ないし知的構造システムの実現においては、前述したとおり固有の成形技術の研究開発は避けて通れない。ところで、スマートマニュファクチュアリングの名の下、オートクレーブ成形時の温度と圧力のモニタリングと最適化や、光や電磁波を用いたクリーンな成形法に関する検討も行われているが、比較的良く知られている⁶⁾のでここでは割愛し、本項では、その場成形技術とスマートプリプレグの考え方を紹介する。

(1) その場成形技術

通常の大規模建築物では、鉄骨材を工場で作成し、それを船ないしトラックで輸送し、クレーンで釣り上げて組み立ててゆく。ところが、超巨大構造物の建造に際してこの方法を踏襲することが非常に大変な作業でありコストのかかるものであることは容易に想像できよう。また、ここで想定する超巨大構造物は、宇宙空間・海上・超高層・砂漠・被災地など、建設や修理・交換作業自体が極めて困難な場所での使用が十分に想定されるため、可能な限り自動化された成形法を採用することが望ましい。

ここでは、使用するその場で部材を成形して構造体を作り上げてゆく「その場成形」の技術について紹介する。この考え方は、宇宙におけるトラス構造物の成形技術に学ぶところが多い。図3.9-11は軌道上での宇宙構造物の成形の概念図であり、図3.9-12に示されるインジェクションモルダーでFRPビームを現場近くで成形し、図3.9-13に示されるように蜘蛛型のロボットがこれを組み立てるようになっている。また、ドーム状のものを作成する場合の手順も図3.9-14のように考えられており、例えば月面などでの図3.9-15のような使い方が考えられている。もちろんこれは完成された技術ではなく、また大気中・重力作用下ではさらに工夫が必要となるものと考えられるが、その場で構造体を作るアプローチとしては大変参考になる。

劔持ら³⁾は、工業技術院製品科学研究所（現、物質工学工業技術研究所、生命工学工業技術研究所）におけるロボットアーム技術をこれにインテグレートさせた成形法を提案している。

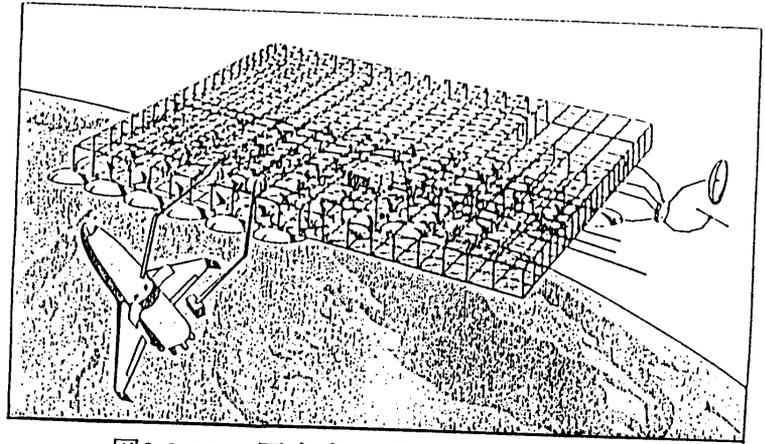


図3.9-11 巨大宇宙構造物成形の概念図

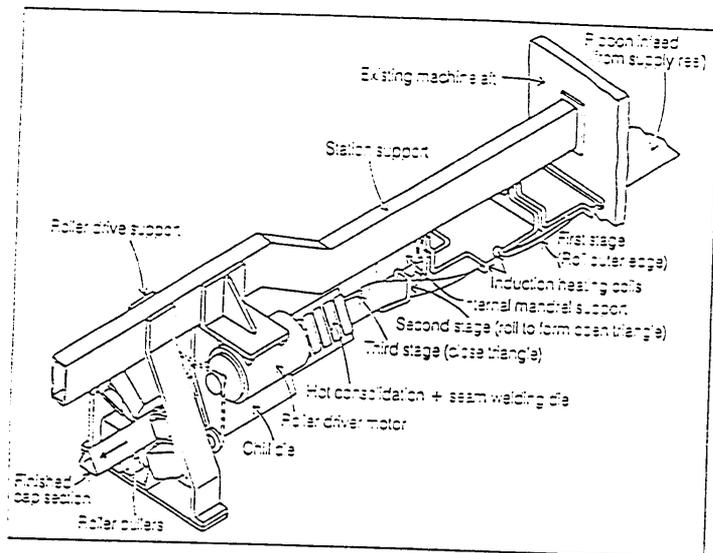


図3.9-12 宇宙構造物用ビームのインジェクションモルダー

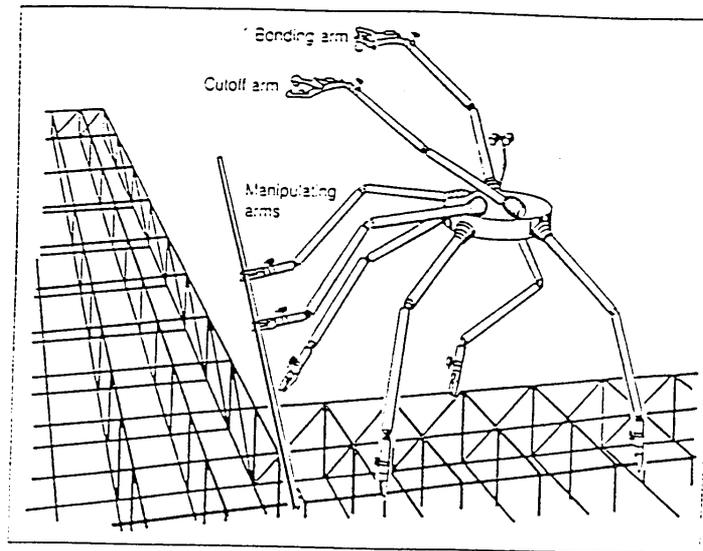


図3.9-13 蜘蛛型ロボットによる宇宙構造物のその場成形の概念図

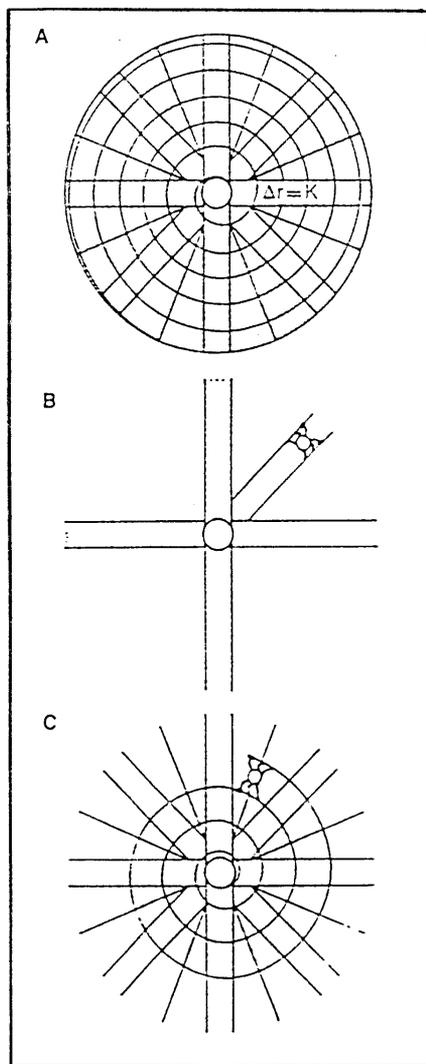


図3.9-14 蜘蛛型ロボットによるドーム状構造物の成形手順

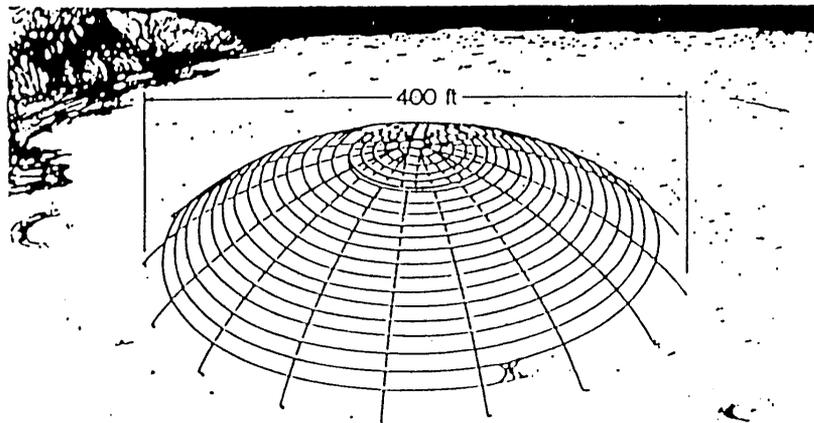


図3.9-15 ドーム状宇宙基地成形の概念図

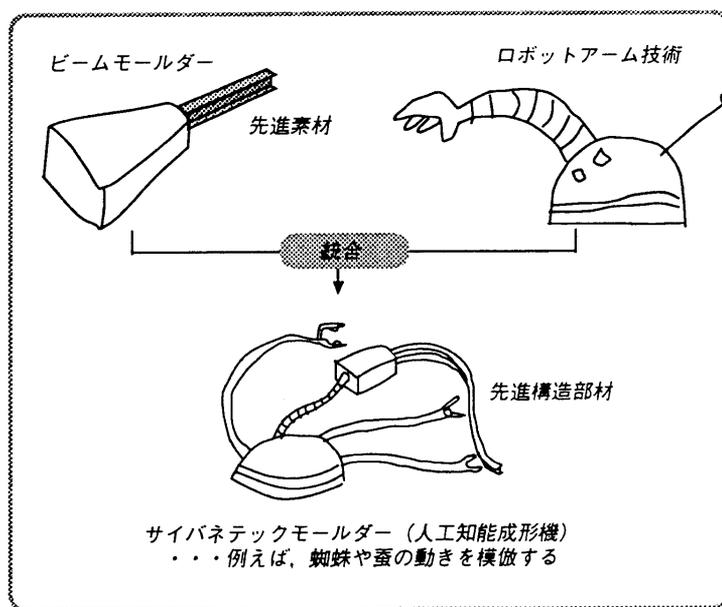


図3.9-16 その場成形用サイバネティックモルダー（人工知能成形機）の概念

すなわち、図3.9-16は射出成形機をロボットアームの先端に取り付けたサイバネティックモルダー（人工知能成形機）の概念図であり、これはロボットアームが蜘蛛や蚕の動きをまねることにより「使用する現場」で部材と同時に構造物を造り上げることを目的としたものである。参考となる生物の動きは、例えば図3.9-17に示される蚕の動きであり、この動きを図3.9-18に示されるロボットアームでシミュレーションするものである。図3.9-19,20はその応用例であり、それぞれ宇宙往還機用カタパルトおよび超巨大ドームの概念図である。

なお、多関節ロボットの性能に関する詳細は、例えば(株)コマツや(株)三菱電機の産業

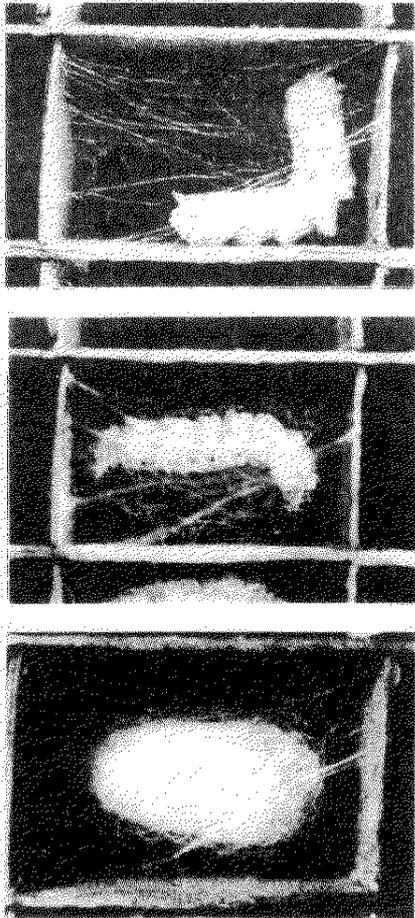


図3.9-17 蚕が繭を作る動きの例

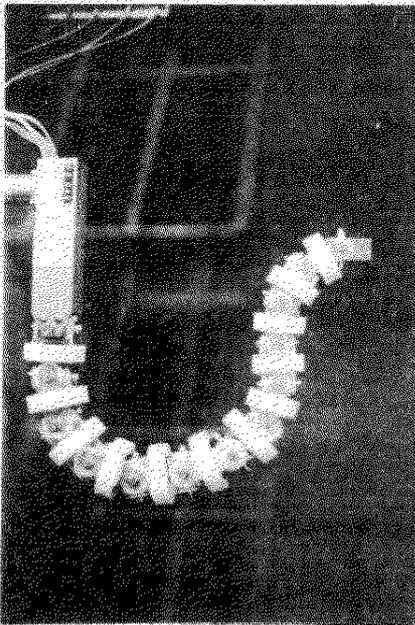


図3.9-18 ロボットアーム

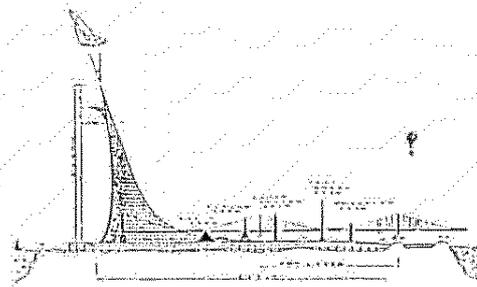
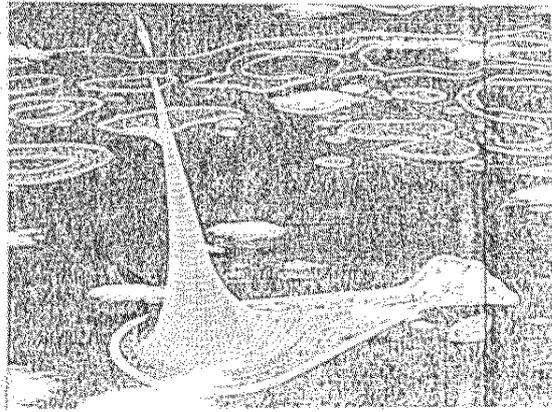


図3.9-19 その場成形技術の応用例
(宇宙往還機用カタバルト)

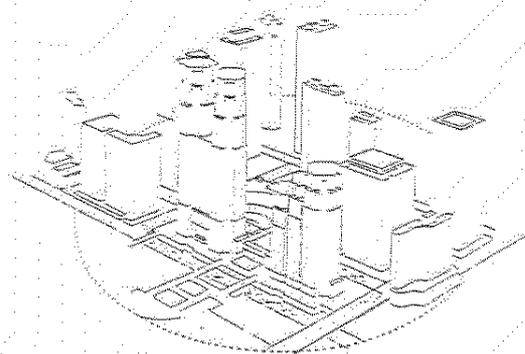
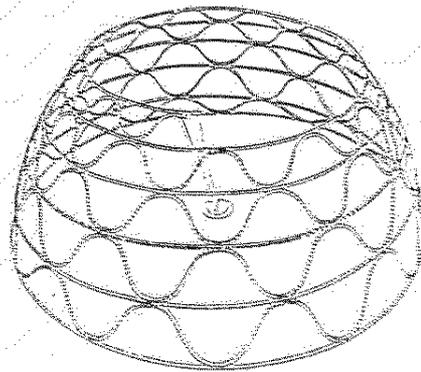


図3.9-20 その場成形技術の応用例
(超巨大ドーム)

用ロボットのカタログなどに詳しいのでここでは割愛する。また、上記の技術はまだ研究の初期段階であり、ロボットの性能以外にも様々な技術的課題を残している。例えば、早稲田大学の土屋⁹⁾は、ロボットアームの位置制御による（繊維強化でない）プラスチック製品の立体成形に関する研究を行い、材料の自重により硬化前に形が崩れる点が本技術のネックとなることを指摘しているが、上記の繊維強化プラスチックの場合にも同様に硬化速度の最適化が一つの大きな技術的ポイントとなるものと考えられる。

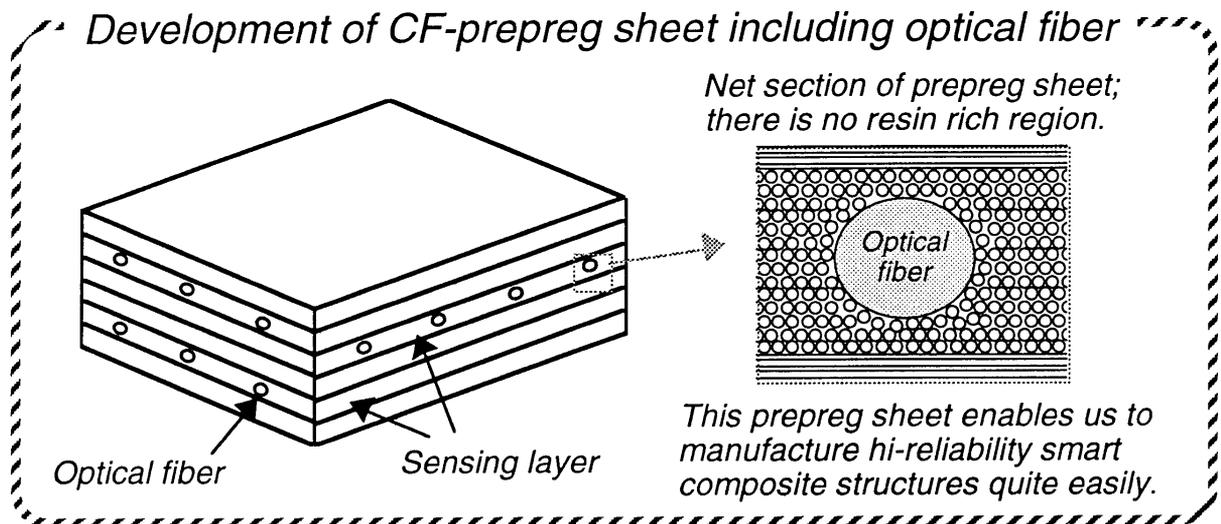


図3.9-21 スマートプリプレグの概念図

(2) スマートプリプレグ

一方、知的構造システムの成形に固有な問題として、センサ材料やアクチュエータ材料の埋め込みの問題がある。この問題の解決に資すべく考えられているものの一つが図3.9-21に示されるスマートプリプレグである。具体的には、光ファイバ等を実際にFRPに埋め込む際に、界面の接着不良や光ファイバの割れなどの問題点が生じることを想定したものであり、現に、研究段階の試験片作成にあたっては、個々の研究者がそれぞれに試行錯誤を繰り返すといった非効率的な状態が続いており、この種の技術的進展を大きく阻害している。すなわち、この試みは、予め最適な形で機能性素材が埋め込まれたスマートプリプレグを準備（できれば標準化）しておくことにより、研究開発のさらなる進展はもとより将来の超巨大構造物製作時の作業性や製品の信頼性の向上を睨んだものである。

3. 9. 3 複合材料のリサイクル性

次に、複合材料のリサイクル問題の現状を概説し、これを踏まえた構造設計の研究例を紹介する。

(1) 複合材料のリサイクル問題の現状

まず、表3.9-4はFRPの用途別原料出荷量⁹⁾であるが、既に住宅機材を中心として総量で年間45万トンを超えていることがわかる。近い将来これらがすべて廃棄されることを考えれば、これは地球環境に負荷を及ぼすに足る量である。具体的には、図3.9-22にまとめられているように、法的にもプラスチック特にFRPはリサイクル困難なものとして認識されており、その処理法の中でも、地球環境の観点から今後はケミカルリサイクルとマテリアルリサイクルを前提とした設計をせざるを得ないことが理解できよう。この種のリサイクル問題の現状と関連文献等は既に筆者による解説⁹⁾があるので、ここではその詳細は割愛する。

さて次に、このFRPのリサイクルに関する調査研究とその成果の実態を見てみることにする¹⁰⁾。表3.9-5はFRP廃棄物に関する調査研究とその概要をまとめたものである。同表に示されるとおり、これらはいずれも漁船・レジャーボートなどのFRP製の老朽船が港湾その他に放置されて大きな社会問題となったことに対し、その解体処理技術の調査と研究開

表3.9-4 FRPの用途別原料出荷量⁹⁾

単位：ton, ()は%

分野	年				
	昭和 62 年 (1987)	昭和 63 年 (1988)	平成元年 (1989)	平成 2 年 (1990)	平成 3 年 (1991)*
建設資材	30,700 (9.4)	31,100 (8.2)	35,500 (8.4)	37,900 (8.4)	36,400 (8.0)
住宅機材	129,800 (39.7)	153,700 (40.5)	181,500 (43.0)	194,400 (42.8)	193,200 (42.6)
舟艇・船舶	34,800 (10.6)	36,800 (9.7)	37,800 (8.9)	39,800 (8.8)	35,000 (7.7)
自動車・車両	12,500 (3.8)	17,000 (4.5)	21,200 (5.0)	25,000 (5.5)	26,600 (5.9)
タンク・容器	38,200 (11.7)	46,400 (12.2)	49,300 (11.7)	49,700 (10.9)	50,200 (11.1)
工業機材	48,700 (14.9)	56,400 (14.9)	52,500 (12.4)	54,400 (12.0)	55,600 (12.3)
雑貨	21,700 (6.6)	25,500 (6.7)	33,000 (7.8)	40,400 (8.9)	44,000 (9.7)
その他	10,400 (3.3)	12,300 (3.3)	11,700 (2.8)	12,500 (2.8)	12,200 (2.7)
合計	326,800 (100)	379,200 (100)	422,500 (100)	454,100 (100)	453,200 (100)

* 1991 年 (推定)

- 「再生資源の利用の促進に関する法律」(通称リサイクル法, 平成3年施行)
- FRP: 耐食性が良い反面リサイクルは困難(異種材料が混ざっているのでさらに困難)
年間生産量約47万トン(1990年)
年間廃棄量約20万トン(1990年, 推定) ...浴槽, 船艇, タンクで60%
- 処理法:
 - 埋め立て ⇒⇒⇒ 埋立地不足, 地耐力, 汚染, 海洋投棄問題
 - 焼却(サーマルリサイクル) : 熱エネルギーとして回収 ⇒⇒⇒ 酸性雨問題
 - 熱分解(ケミカルリサイクル) : 燃料や原料として回収
 - 破碎 : 埋め立て・焼却・熱分解・微粉碎の前処理
 - 微粉碎(マテリアルリサイクル) : 原料として再利用
 - 分別 : 再生品の品質確保や微粉碎の効率向上のために不可欠(一般廃棄物)
- 今後の廃棄物処理の流れ
 - (1) 廃棄物を出さない
 - (2) 廃棄物を減量する
 - (3) 廃棄物を再生品や原料としてリサイクルする
 - (4) 再生できないものはエネルギーとして回収する
 - (5) 処理できないものは埋め立てする

図3.9-22 複合材料のリサイクル問題の現状

発として行われたものである。ただし、ここでの主要な成果は、船体を小さなブロックに切断し粉体化する技術の開発であり、最近ようやく、こうして粉体化された強化繊維とマトリックス樹脂の混合物の再利用法が検討され始めた段階である。他にも、生分解性プラスチックに関する研究開発も始まってはいる(「ゴム及びプラスチック廃棄物の微生物処理技術の開発に関する研究」1993-1995)が、これらの技術だけでは前述のような巨大構造システム構想のバックボーンとなるまでには相当の距離が感じられる。

(2) 巨大構造システムに向けたリサイカブルコンポジットの研究例

そこで次に、萌芽的研究ではあるが、巨大構造物構想の足掛りとなりうるいくつかの研究例を紹介する。

まず、(株)神戸製鋼所の小松ら¹¹⁾は、CFRPの熱分解によるリサイクルを検討しており、大気中500℃の熱処理でCFRP中の樹脂分のみが分解され、CFがほぼ100%回収できることを明らかにしている。また、この回収したCFは、未使用のCFと比べて表面性状や機械的特性の面で差異のないことを示している。すなわち、この種の技術の確立により、上記(1)のような「廃棄→微粉末化→充填材としての再利用」というレベルから、CFの短繊維・長繊維から半連続繊維まで、繊維長を自由に選択できるリサイクルが可能となり、2次構造物の選択の幅が急激に広がるばかりか、第3次・第4次のリサイクルにもつなげて

表3.9-5 FRP廃棄物に関する既存調査研究の概要

主管	実施期間	報告書	事務局	調査範囲
FRP協会 (第一次)	49/9~51/6	廃棄物処理法 研究委員会報 告書 52年3月	FRP協会	<ul style="list-style-type: none"> FRP 廃棄物の実態把握と処理機械の性能調査 適正設備・作業標準のとりまとめ アンケート
FRP協会 (第二次)	59~61	廃棄物処理 専門委員会調査 研究報告書 61年6月	FRP協会	<ul style="list-style-type: none"> 上記の現状把握（排出状況、処理対策について実態調査） FRP 廃棄物に関する法的、技術的問題
運輸省	60/6~63/2	使用済み FRP 船解撤・処理体 制調査研究報告 書 一中間報告書一 61年2月	日本造船 振興財団	<ul style="list-style-type: none"> FRP 船の解撤・処理体制、解撤・処理費用の負担方法についての基礎的調査研究 アンケート 現地調査、ヒアリング
		使用済み FRP 船解撤・処理体 制調査研究報告 書 62年3月	日本造船 振興財団	<ul style="list-style-type: none"> 60年度成果に基づき下記事項の調査研究 基本方針および計画の作成 実地検証 現地調査等 FRP 船解撤・処理体制の予備的検討
		使用済み FRP 船解撤・処理の 手引き 63年3月	日本造船 振興財団	<ul style="list-style-type: none"> FRP 船の解撤・処理技術体制の確立 発生量予測 既存技術での処理の可否検討 実地検証
通産省 運輸省	60/4~64/3		四国工業試験所 運輸省船舶技術 研究所	<ul style="list-style-type: none"> FRP 製廃船の処理技術を確立するため、FRP 製廃船の砥石切断法または、ブラズマ切断法による解体技術および常温粉砕法による廃材処理技術を開発する。 制御爆破による FRP 廃船の解体方法 流動床炉による FRP 廃材の焼却技術の研究 使用済み船用材料の熱分解
通産省	63/4~68/3		四国工業試験所 民間企業救済社	<ul style="list-style-type: none"> 廃 FRP 船の自動解体技術の開発と解体した廃材の有効利用を図るため、充填材としての利用、ポリマーの分解、解重合によるモノマーとしての再生利用、無機成分のウィスカーや吸着材としての利用技術を開発する。
水産庁	60年度	FRP 漁船廃船 処理対策検討 事業報告書 61年3月	全国漁業協同 組合連合会	<ul style="list-style-type: none"> 廃船発生量の予測 漁村および漁業の実態を踏まえた処理システムのあり方の検討
	61年度	FRP 漁船廃船 処理対策検討 事業報告書 62年3月	全国漁業協同 組合連合会	<ul style="list-style-type: none"> 漁村に最も適した処理システムの策定 処理運営のための組織化の検討 廃船処理対策指針の作成 FRP 漁船魚礁化活用の検討
	62年度	FRP 漁船再利 用推進事業検討 報告書 63年3月	全国漁業協同 組合連合会	<ul style="list-style-type: none"> モデル地区を選定し FRP 漁船の実船処理（沈船魚礁および乾留法） 処理システムの具体的指針の策定

ゆけるという点で、巨大構造システムに一步近づいた技術と評価できる。

次に、日本電気(株)の田村ら¹²⁾は、リサイクルを容易としかつ強度等の使用時の性能を損なわないものとして、熱可塑性の制振インターリーフフィルムを層間に挿入したCFRPを開発している。同材料は、図3.9-23に示されるようにホットプレスによる加熱でインターリーフ層が溶解し、かつCFプリプレグの異方性により自己分解できる点に特徴があ

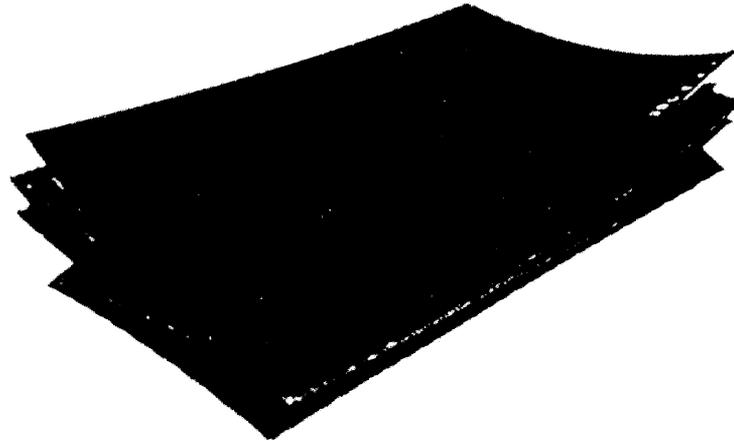


図3.9-23 加熱後自己分離した制振構造材料¹²⁾

る。田村らは、フィルターとしての再利用を目的とした微粉碎に要する電力が著しく減少することと同時に、粉碎材料の再利用が可能であることも示しているが、本稿の立場からは、本技術によりプリプレグの状態でのリサイクルが可能となる点に最も魅力を感じる。すなわち、本技術により、上記のCFレベルでの回収よりもさらに一步進めて、プリプレグレベルでの回収・再利用によるリサイクル工程の簡素化やコストの低減などが実現できる可能性があり、興味深い。いずれにせよ、図3.9-10にも見られた自壊層の導入という考え方は今後のリサイカブルストラクチャーの一つの代表的形態となるものと考えられるが、田村らはこの自壊層の導入が強度上なら問題なく、むしろ好結果となることなども示しており、大変頼もしい結果であるといえる。

さらに、工業技術院物質工学工業技術研究所の北野らは、誘導加熱を利用したCFRPの分解・再利用法の検討を行っており、ここでは誘導加熱の度合いを調節して層間剥離などをその場で修復することも同時に検討している。これらの技術の確立により修理・リサイクルがよりいっそう簡便となることはもちろん、修理・リサイクルの段階まで含めた形で構造体の運用コスト・長寿命化の議論が具体化し、また構造システムへのLCA設計の適用も可能な段階に達すると考えられることから、巨大構造システム実現に向けた着実な足掛りとなるものと期待される。特に、修復技術に関してはいくつかのアイデア⁴⁾はあるものの実用化の研究は少なく本研究の注目度は高い。

ところで、宇宙構造物がそうであるように、今後の巨大構造システムでは、可能な限り

材料系をシステム内でクローズドな形でリサイクルすることが望まれる。次の細項では、このような観点から行われている筆者らの研究を具体的データを交えて紹介したい。

(3) 複合材料の閉じたマテリアルリサイクルシステムに関する研究¹³⁻¹⁵⁾

図3.9-24は、以上で示してきた巨大構造システムに向けての複合材料の機能の一つとして検討されている閉じたマテリアルリサイクルシステムの考え方とその実現のための研究項目を示したものである。すなわちこれは、リサイクルに適した熱可塑性樹脂複合材料 (Fiber Reinforced Thermoplastics; FRTP) を対象とするもので、同図の左半分を示されるとおり、連続繊維・長繊維・短繊維・粒子分散の4段階のマテリアルリサイクル (再利用) を経て、さらに使用可能分は上位の構造材の原料として使用するという閉鎖型のリサイクルシステムを構築しようというものである。これにより、単純に考えても同一材料を4倍以上の長い期間使用することになり廃棄物の画期的な減量化が実現することはもちろん、再使用不可能な材料はシステム内でサーマルリサイクル (焼却によりエネルギーとして回収) することによりシステムの内部で材料を無駄なく使い切ることが可能となる。これは、まさしく巨大システムに望まれる資源循環システムの理想型の一つである。

さて、同図の右半分には、この閉鎖型リサイクルシステムの実現のために必要となる研

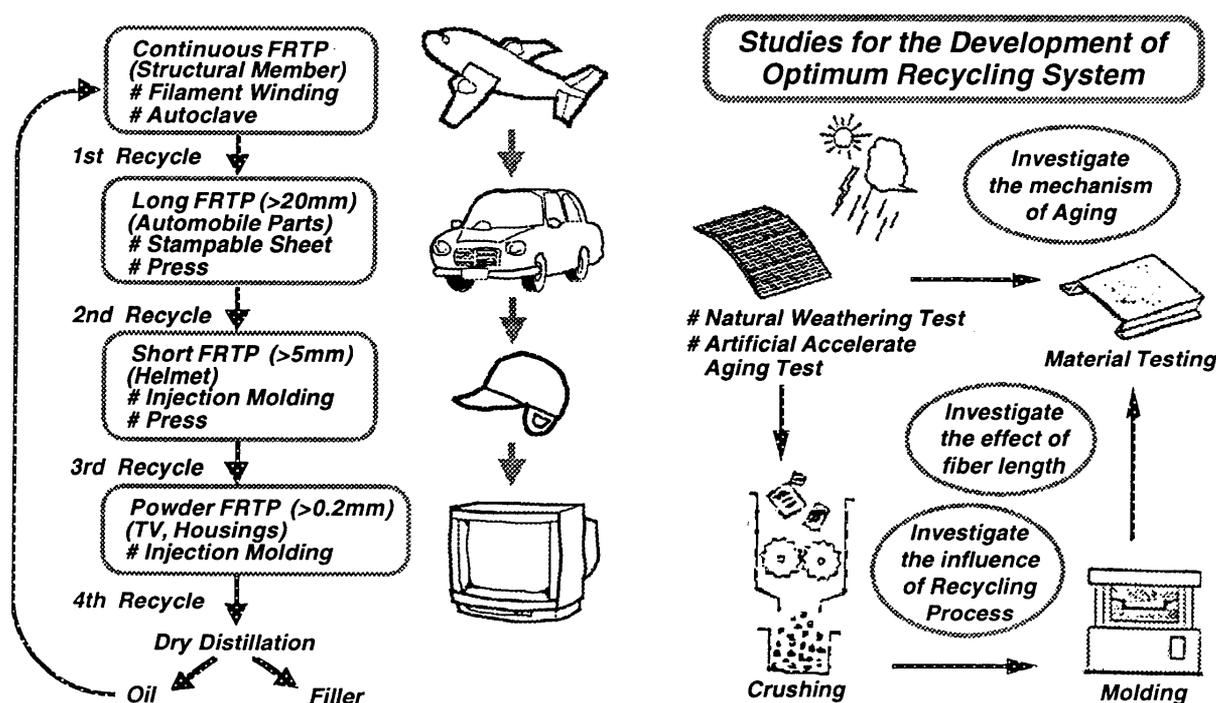


図3.9-24 熱可塑性樹脂複合材料(FRTP)の閉じたマテリアルリサイクルループの概念図と要素研究⁵⁾

究項目が記してあり、繊維の長さ、リサイクル過程での熱履歴、天然暴露等が各種性能に及ぼす影響を明らかにすることと同時に、加速劣化試験法の確立の重要性が指摘されている。これを踏まえて、剣持らは、

- 強化繊維長さがFRTPの強度および強化機構に及ぼす影響
- 破碎とホットプレス成形時の熱履歴(1~4回)がFRTPの材料特性に及ぼす影響
- 天然暴露試験データに基づく促進劣化試験法(5~20年相当)の確立

などを検討しており、現在までに次のような結果を得ている。

- (A) 繊維長が短くても静的な強度発現率は十分に高い
- (B) 熱履歴による強度劣化は少なく、むしろリサイクル材で強度の向上が見られた(図3.9-25参照)。これは、破碎・プレスの繰り返し下でも繊維の劣化がなく、逆に繊維の解離が進むことにより補強効果が高まった結果と考えられる。
- (C) マトリックス樹脂は暴露により劣化するが、FRTP(特にCFRTP)では静的・疲労いずれの強度も暴露による顕著な低下はない。
- (D) キセノンランプを用いたサンシャインウェザーメーターによる促進劣化性は繊維形態により異なるため、加速率の定量化は現地点では困難である。

また、これらの結果から、特に、破碎・インジェクションによる粒子分散強化FRPの再成形は、性能の面でも品質安定性の面でもバージン材よりも優れているという実用的価値のある知見も得られはじめています。

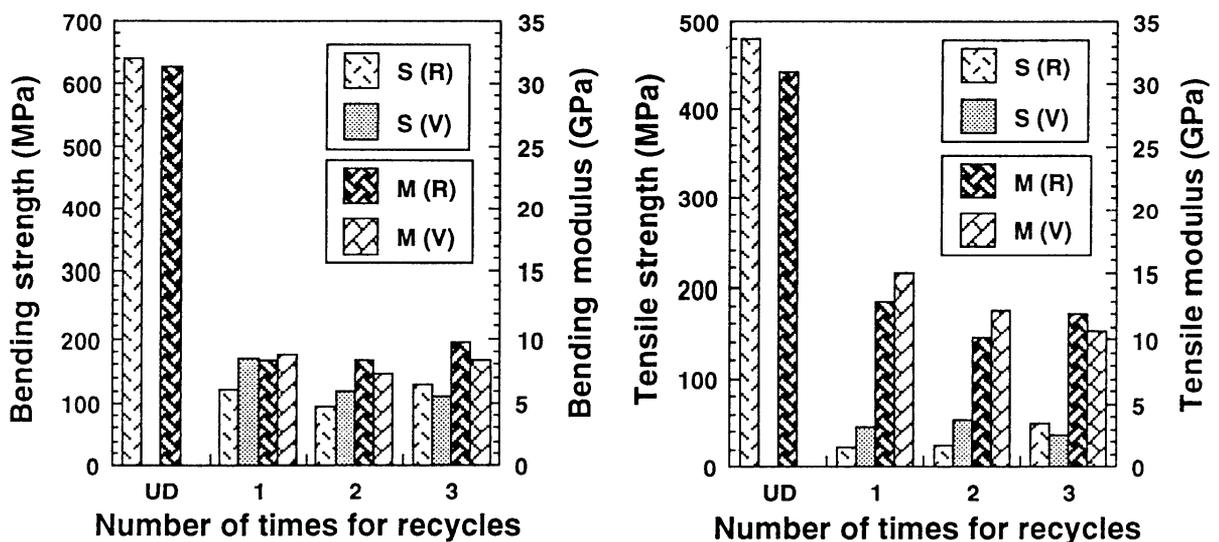


図3.9-25 強度(S)と剛性(M)に及ぼす破碎・プレスの回数の影響 (V; バージン材, R; リサイクル材)

3. 9. 4 結言

本項では、スマートコンポジットを用いてはじめて実現可能となる超巨大構造物の構想を紹介し、具体的な研究要素を解説した。そして、ここで必要とされる研究項目が、現在インテリジェント材料ないしスマートストラクチャーの名の下に行われているものを包含するものであることを示すと同時に、それらの実用化に際してもやはり問題となるであろう「成形性」と「リサイクル性」の研究がなおざりにされている現状を指摘した。次に、超巨大構造システムの実現に向けての革新成形技術と複合材料のリサイクル性という観点から、その必要性と目的を明らかにし、現在行われはじめている新たな試みのいくつかを紹介した。

全く新しいモノを創り出すためには、非常に多くの斬新な試行錯誤が不可欠である。テーマがあまりにも大きく、要部細部にわたって多くの見落としがあることと思われるが、本稿もまた試行錯誤の一つと考え、御容認いただければ幸いである。

参考文献

- 1) まちづくりと新素材，通産資料調査会(1989).
- 2) 清水建設(株)資料.
- 3) 海洋開発と新素材，通産資料調査会(1995)，4.5節.
- 4) 航空機へのインテリジェントコンポジットシステムの適用に関する調査報告書，(社)日本機械工業連合会，(財)次世代金属・複合材料研究開発協会／編(1994)，pp.121-135.
- 5) 劔持潔，高橋淳，林龍一：NIMC-RIMCOF Joint Forum「スマートコンポジットシステム」講演論文集(1994)，pp.49-56.
- 6) Peter R. Ciriscioli and George S. Springer：Smart Autoclave Cure of Composites, Technomic publishing Co., Inc. (1990).
- 7) 名取通弘：日本機械学会誌，96，900(1993)，pp.958-961.
- 8) 土屋喜一：日本ロボット学会誌，8，5(1990)，pp.84-88.
- 9) 宮入裕夫：日本複合材料学会誌，18，3(1992)，pp.106-112.
- 10) 「FRP廃棄物再資源化・処理特集」，強化プラスチック，40，8(1994).
- 11) 小松信行，牛越憲治，杉野守彦：第23回FRPシンポジウム講演論文集(1994)，pp-I-23-26.
- 12) 田村徹也，藤本淳：日本複合材料学会1994年度研究発表講演会予稿集(1994)，pp.57-58.
- 13) 劔持潔，高橋淳，林龍一：日本機械学会第71期通常総会講演会講演論文集(II)，No.940-10(1994)，pp.630-632.
- 14) 劔持潔，福田博，京野哲幸：日本機械学会第72期全国大会講演資料集(IV)，No.940-30(1994)，pp.190-196.
- 15) 劔持潔，長沢長八郎，高柳寛司，高橋淳，林龍一：日本機械学会材料力学部門講演会講演論文集(Vol.B)，No.940-37(1994)，pp.126-127.

3. 1 0 構造音響制御分野におけるスマート構造物

3. 1 0. 1 はじめに

我々の生活環境では建築材料の軽量柔軟化に伴い、固体伝搬音の問題は顕在化する方向にある。また、産業分野でも超LSI製造工程のように、音の擾乱すら嫌う環境は今後益々増えるものと予想され、静粛空間の創成は生活・産業の両面で重要な課題と言える。しかし、固体伝搬音の抑制においては、(1)多くの振動モードが重畳、相互干渉して放射音響パワーに影響する、(2)パッシブ制御の効果は高い周波数帯域に限られる、(3)アクティブ制御はアクチュエータに供給するエネルギー消費が無視できない、等の問題を抱えている。

振動放射音の抑制に関する研究は、基本的には振動放射音を付加音で制するアクティブノイズコントロール法^{(1)・(2)}と、対象構造物の振動を抑制することでその振動放射音の抑制を図る振動制御法^{(3)・(4)}の2種類に大別される。当該分野におけるこれまでの研究報告を総括すると、基本的にはある空間点（センサ点）での音圧を最小とする研究^{(3)・(4)}に尽きていると言えよう。この手法の難点は、対象としているセンサ点近傍の音圧は最小化されたとしても、それ以外の空間点における音圧抑制の保証はないばかりか、逆に音圧が増大する可能性も有り得る。

3. 1 0. 2 音響パワーモードとスマートセンサ

本節では、ある限定された空間点での音圧最小化を志向する立場は取らず、振動構造物より放射される音の全エネルギー（音響パワー）自体の最小化を可能とするような振動制御法について解説する。

まず、最も基本的構造要素である平板を対象とし、図3.10-1に示す無限大バフル内に埋め込まれた平板構造物が調和加振を受ける際に放射される音響パワーを評価関数として置き直すことから始める。平板構造物が調和加振を受ける際に放射される音響パワー P_w は次式⁽⁶⁾のように記述できる。

$$P_w = \frac{\omega \rho_0}{4\pi} \int_S \int_S v^*(x_2) \frac{\sin kr}{r} v(x_1) dx_2 dx_1 \quad (1)$$

ただし、 ω ；加振角周波数、 ρ_0 ；空気密度、 k ；波数、 $v(x)$ ；平板上の任意点 (x, y) における複素速度、 $*$ ；複素共役、 r ；平板上の任意点 x_1 と x_2 間の距離、である。また、平板

表面速度 $v(x)$ は N_m 個のモード重畳として表される。

$$v(x) = \sum_{i=1}^{N_m} v_i \psi_i(x) = \Psi^T(x) \mathbf{v} \quad (2)$$

ただし、 T : 転置、 $\Psi(x)$; n 次元モード関数ベクトル、 \mathbf{v} ; 速度モーダルベクトル、を表す。

音響放射パワー P_w は次のように書き直せる。

$$P_w = \mathbf{v}^H \mathbf{A} \mathbf{v} \quad (3)$$

ここで、 H ; エルミート、 \mathbf{A} ; 音響パワーマトリクス⁽⁷⁾を表す。

$$\mathbf{A} = \frac{\omega \rho_0}{4\pi} \int_S \int_S \psi^*(x_2) \frac{\sin kr}{r} \psi^T(x_1) dx_2 dx_1 \quad (4)$$

音響パワーマトリクスは必ず実対称マトリクスとなるので、直交変換により次のように対角化でき、最終的に音響放射パワー P_w は次のように記述できる。

$$\begin{aligned} P_w &= \mathbf{v}^H \mathbf{A} \mathbf{v} = \mathbf{v}^H \mathbf{Q} \mathbf{\Lambda} \mathbf{Q}^{-1} \mathbf{v} \\ &= \mathbf{u}^H \mathbf{\Lambda} \mathbf{u} \end{aligned} \quad (5)$$

ここで、 \mathbf{Q} ; 直交マトリクス、 $\mathbf{\Lambda}$; 音響パワーマトリクス \mathbf{A} の固有値 λ_i ($i = 1, 2, \dots$) が対角線上に並ぶ対角マトリクス、である。変換モーダルベクトル \mathbf{u} と速度モーダルベクトル \mathbf{v} の関係は次のように表すことができる。

$$\mathbf{u} = \mathbf{Q}^{-1} \mathbf{v} = \mathbf{Q}^T \mathbf{v} \quad (6)$$

したがって、平板任意点 x における速度 $v(x)$ は次式のように展開される。

$$v(x) = \Psi^T(x) \mathbf{v} = \Phi^T(x) \mathbf{u} \quad (7)$$

ただし、

$$\Phi(x) = \mathbf{Q}^T \Psi(x) \quad (8)$$

ここで、 $\Phi(x)$ は音響パワーモード関数⁽⁷⁾、 \mathbf{u} は音響パワーモード振幅ベクトルを表す。図 3.10-2 に 1 次から 3 次の音響パワーモード関数の 3 次元表示を示す。つまり、振動現象を記述する基本因子が振動モードであったのと同様に、放射効率の高い振動モードをグループ化した新たな基本因子「音響パワーモード」が導出できた。

さらに、音響放射パワー P_w はパワーマトリクス \mathbf{A} の固有値を用いて、次式のようにも記述できる。

$$P_w = \sum_{i=1}^{N_m} \lambda_i |u_i|^2 \quad (9)$$

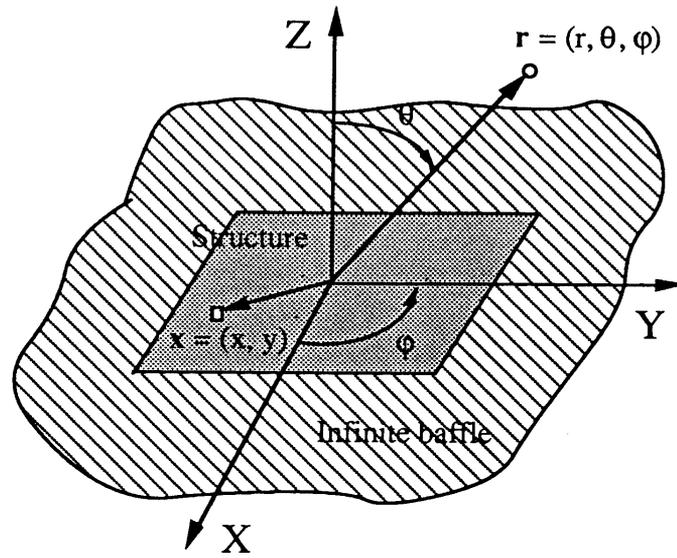


図 3.1 0-1 無限バツフル中の振動平板

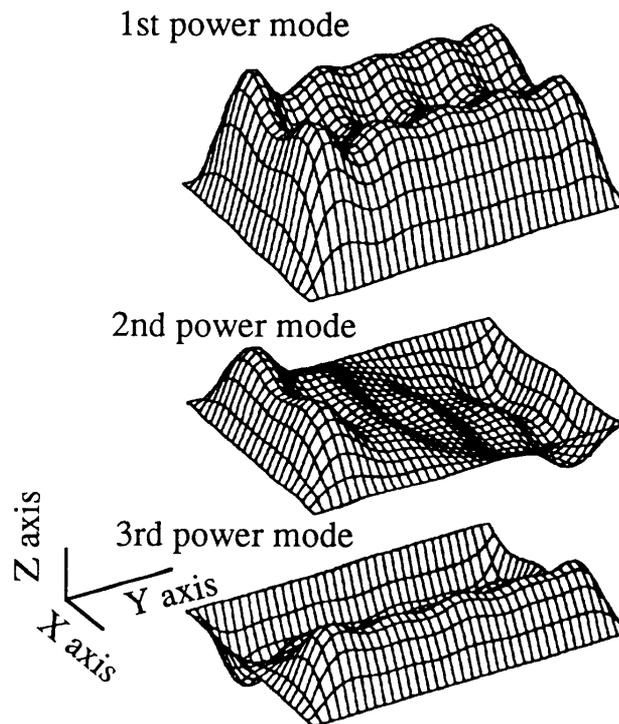


図 3.1 0-2 1次から3次の音響パワーモード関数の3次元表示

このように、音響パワーは音響パワーモード振幅の2次形式形⁽⁷⁾で記述できるので、音響パワーモードが検出でき、その出力を最小とする制御系を構築できれば、音響放射パワーの最小化に至る理論的保証となる。これに対して、振動モードを検出しその出力を最小とすることが、必ずしも音響放射パワーの最小化につながらないことに留意されたい。なお、サザンプトン大のElliottら⁽⁸⁾は筆者らと同時期に音響パワーモードと同等の概念、ラディエーションモードを提案しているが、測定法としては多数の加速度計を配列する検出方法にとどまっております、分布定数系のセンサ開発には至っていない。

3. 10. 3 制御系構成

(1) センサ — PVDFフィルム製の分布定数系センサ

つぎに、騒音抑制のためのスマートセンサ⁽⁷⁾の具現化を考えるにあたり、音響パワーモードの検出は2次元情報に基づくので、点センサ（加速度計、ギャップセンサ）を用いると膨大な数が必要になる。ここでは、音響パワーモード振幅に比例する出力が電荷として取り出せるように形状設計したPVDF（圧電材料の一種）製フィルムを振動平板に貼付することで、分布定数系センサを開発した。

近年、振動制御の分野においても、分布定数系センサが注目されつつある。その理由は、上述の騒音制御の場合と全く同様で、構造物内のあるセンサ点にのみ着目した集中定数制御は、当該センサ点での振動レベルを抑制することは可能でも、それ以外の振動場における振動レベルを抑制する保証がないからである。極端な場合、センサ点を振動の節とするように制御エネルギーが作用し、別の振動モードを惹起する可能性すら存在する。これに対して、例えばPVDFフィルム⁽⁹⁾や光ファイバ⁽¹⁰⁾のような分布定数系センサが制御センサとして利用できるならば、振動場の情報が点としてではなく、線または面として入手できるので、振動場の広い領域にわたって、振動レベル抑制が可能となる。この種の研究報告としては、IBM開発部のLeeら⁽¹¹⁾がPVDFフィルムをモードセンサに応用し、モード関数の2階微分の形状にPVDFフィルムをシェーピングすることで、モード振幅のセンシングが可能となることを明らかにしている。さらに、バージニア工科大のClarkら^{(12),(13)}、Collingsら⁽¹⁴⁾、Lefebvreら⁽¹⁵⁾がPVDFセンサを、平板や柔軟はりのモードセンサとして応用している。

今仮に、PVDFフィルムが平板構造物全面に貼付されているとすると、当該センサの出力 q は次式のように表すことができる。

$$q(t) = \int_0^a \int_0^b \Gamma(x,y) \left(e_{31} \frac{\partial^2 w(x,y)}{\partial x^2} + e_{32} \frac{\partial^2 w(x,y)}{\partial y^2} + e_{36} \frac{\partial^2 w(x,y)}{\partial x \partial y} \right) dx dy \quad (10)$$

ここで、 e_{31} 、 e_{32} 、 e_{36} ；圧電応力定数⁽⁷⁾（歪角が零となるように平板に貼付すると、 $e_{36} = 0$ ）、 Γ ；センサ形状関数、 w ；平板のたわみ、 a 、 b ； x 、 y 軸方向の辺長、を表す。この形状関数は、平板に対して鉛直方向にスマートセンサの厚さ／密度／圧電応力定数を変化させることを意味するが、これらを変化させることは現実的な方策とは言い難い。そこで、その代案として、センサの幅方向に形状関数を置換することとする。実際に使用したPVDFフィルムセンサは、厚さが25 μm のPVDFフィルムを、厚さが60nmのアルミ電極で両側を挟む形態をしており、 $e_{31} = 0.0105 \text{ C/m}^2$ 、 $e_{32} = 3.5 \times 10^{-4} \text{ C/m}^2$ である。

平板周囲が単純支持されている場合、平板のたわみ w は次式のように記述できる。

$$w(x,y) = \sum_{i=1}^{N_m} A_i \sin \frac{m_i \pi}{a} x \sin \frac{n_i \pi}{b} y \quad (11)$$

ここで、 A_i ；モード振幅、 m_i 、 n_i ；モード指数、である。

実際問題としてはセンサを平板全体に貼付することは容易ではない。そこで、分布定数系センサを実現する現実的な対応策として、短冊状のPVDFフィルムを用い、音響パワーモード振幅の検出を可能とするセンサ形状設計法を明らかにする。まず、図3.1.0-3に示すように x 軸方向にスマートセンサを帯状($y = c$ から $y = d$ の範囲)に貼付した場合の形状関数を導出する。その形状関数 Γ を次のように定義する。

$$\Gamma(x,y) = \{u(x,y-c) - u(x,y-d)\} \varphi(x) \quad (12)$$

ここで u ；2次元ステップ関数、 $\varphi(x)$ は次式で定義される。

$$\varphi(x) = \sum_{i=1}^{N_m} q_i \sin \frac{m_i \pi}{a} x \quad (13)$$

式(10)～(12)を式(9)に代入すると次式を得る。

$$q(t) = \sum_{i=1}^{N_m} q_i \left\{ e_{31} \left(\frac{b m_i^2}{a n_i} \right) + e_{32} \left(\frac{a n_i}{b} \right) \right\} \left(\cos \frac{n_i d \pi}{b} - \cos \frac{n_i c \pi}{b} \right) A_i \quad (14)$$

さらに式(13)と j 次の音響パワーモード算出式、すなわち

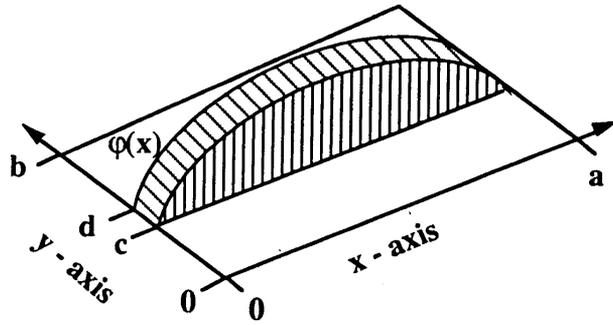


図 3.1 0-3 帯状に形状設計されたPVDFフィルム

	A	B	C	D	E	F	G	H
1st power mode	+	+	+	+	+	+	+	+
2nd power mode	+	-	+	-	+	+	-	-
3rd power mode	+	+	-	-	+	-	+	-

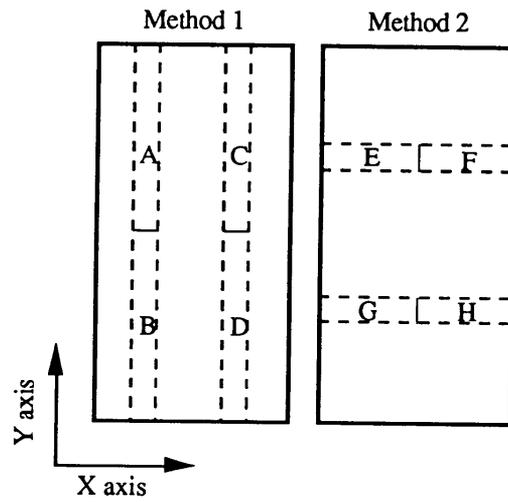


図 3.1 0-4 振動モードの対称性を利用したスマートセンサ貼付法

$$\text{j-th power mode: } \sum_{i=1}^{N_m} Q_{ij} A_i \quad (15)$$

を等置することで、形状関数における係数は、結局次式で求められる。

$$Q_i = \frac{2 Q_{ij}}{\pi \left\{ e_{31} \left(\frac{b m_i^2}{a n_i} \right) + e_{32} \left(\frac{a n_i}{b} \right) \right\} \left(\cos \frac{n_i d \pi}{b} - \cos \frac{n_i c \pi}{b} \right)} \quad (16)$$

ここで、 Q_{ij} ；直交マトリクス Q の i 行 j 列成分である。全く同様に、 y 軸方向にも帯状のスマートセンサを形状を決定できる。ここで注意すべきは、平板全面にスマートセンサを貼付した場合とは異なり、式(15)は、 x （および y ）軸方向に各々独立して表記したものである。したがって、それらの係数で決定されるセンサ形状関数は、音響パワーモード測定に関する必要条件しか満たしておらず、双方の出力のたたみ込み積分が必要になる。ここでは、たたみ込み積分法を採用する代わりに、以下に示す振動モードの対称性を利用する音響パワーモードセンシング法を提案する。

いま、200Hzまでの周波数領域を対象とすると、この周波数領域における音響パワーを抑制するには、1次から3次の音響パワーモードを抑制すればよい⁽⁷⁾ことが明らかになっている。因みに、1次から3次の音響パワーモードは、各々、奇・奇、奇・偶、偶・奇数次モードで構成される⁽⁷⁾。これら1次から3次の音響パワーモード検出法が図3.10-4に示されており、 y 軸方向（メソッド1）、または x 軸方向（メソッド2）いずれかのメソッドを選択すればよい。この際、センサ端子は、メソッド1では{A,B,C,D}、メソッド2では{E,F,G,H}の総和をスマートセンサ出力とする。例えば、1次の音響パワーモード（奇・奇数次モード）の検出方法については、図3.10-4に示すように、 y 軸方向ないしは、 x 軸方向に沿って、一对のスマートセンサを平板中心線に対して対称に貼付し、その極性(+ - で表示)を図に示すように全て等しく設定することで、奇・奇数次モードを検出することができる、のようである。図3.10-5には、平板の中心線を利用する際のスマートセンサの形状関数（設計周波数30Hz）を示している。1次および2次の音響パワーモードに関しては y 軸方向、3次の音響パワーモードに関しては、 x 軸方向に沿った形状関数が示されている。

(2) アクチュエータ — 積層型PZTを利用した曲げモーメント型アクチュエータ

ボイスコイル型の動電型加振器等せん断力を操作量とするアクチュエータでは、反力を

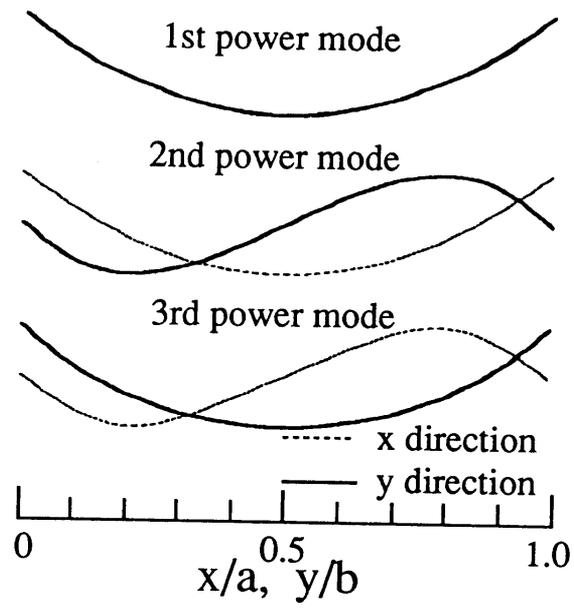


図3.10-5 1次から3次のスマートセンサ形状

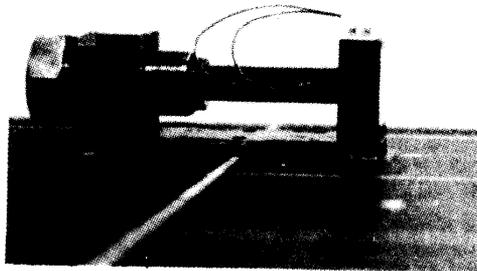


図3.10-6 曲げモーメント型アクチュエータ外観図

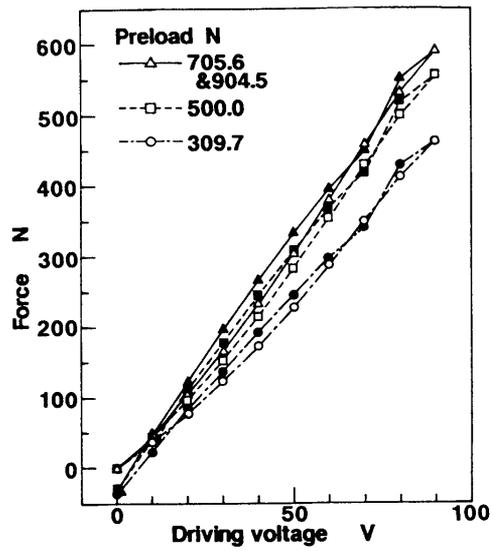


図 3.1 0-7 曲げモーメント型アクチュエータの静特性

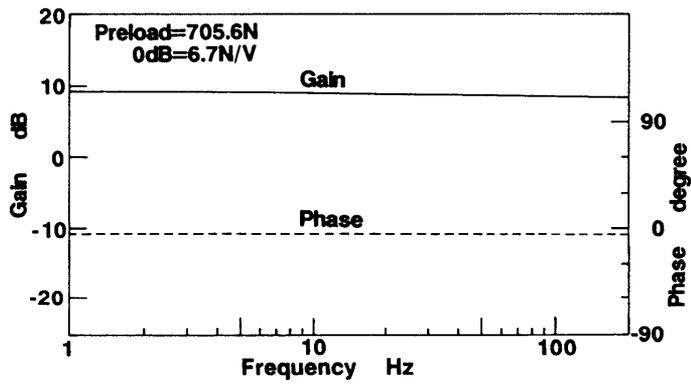


図 3.1 0-8 曲げモーメント型アクチュエータの動特性

取るための固定面を必要とする点、加振器の大きさに比較して発生できる制御力が小さいなどの難点が存在する。そこで、積層型ピエゾ・セラミック素子を利用して、平板上のみで相対力が得られ発生力も大きいという利点を有する曲げモーメント型アクチュエータを開発した。アクチュエータの外観を図3.10-6に示す。“コ”の字型の鋼製コラムの中に積層型ピエゾセラミクス素子を挟み込む構造となっており、ボルト締めによってピエゾ素子には予荷重を与えることができる仕組みとなっている。2個または3個の積層型圧電素子を直列に配置し、駆動電圧を加えることによって素子が伸張し、素子両側のコラムを加振する。その際、アクチュエータが固定された平板に対して、発生する力と素子・対象平板間の距離を乗じた大きさを持つ曲げモーメントを加えることが可能となる。積層型圧電素子1個の性能としては、無負荷の状態で100Vの電圧を入力することで10 μ mの伸び量を発生できる物を使用している。つぎに、駆動電圧と直列配置2素子が発生可能な力との関係を図3.10-7に示す。本図は圧電素子・コラム間にロード・セルを挿入して測定したもので、予荷重の与え方によって発生する力は変化する。また図3.10-7より、圧電素子特有のヒステリシスが認められる。実際に用いる際は、予荷重705Nバイアス電圧を50V加えて、正負の曲げモーメントが発生可能にしている。図3.10-8は、この条件下でのアクチュエータとしての周波数特性を示しており、200Hzまでの範囲でゲイン・位相特性ともにフラットである。

(3) 制御器 — MIMO Filtered-X LMSを始めとする多入力多出力適応制御

一旦形状設計した後はセンサ特性はほぼ一定であるが、対象とする建屋の特性は一定とは限らないので、その経時的変化に対して制御器側が適応する必要がある。最終的には、平板振動に関する情報のみに基づいて、エネルギー消費量を極力抑えたアクティブ制御系を実現するために、音響制御分野で適応制御手法として名高いfiltered-x LMSアルゴリズム⁽¹⁶⁾をDSP(C40)チップにダウンロードして、センサ出力を適応的に最小化する制御器を構築した。図3.10-9は、その構成図である。実験では、スマートセンサ出力がエラー信号として直接、適応制御コントローラに入力される。さらに同コントローラには、外乱信号が参照信号として入力され、filtered-x LMSアルゴリズムを駆動する条件が満足される。入力データはこのアルゴリズムに沿ってDSP上で高速演算処理され、その出力が制御信号としてアクチュエータを駆動し、スマートセンサ出力を最小とすることにより、

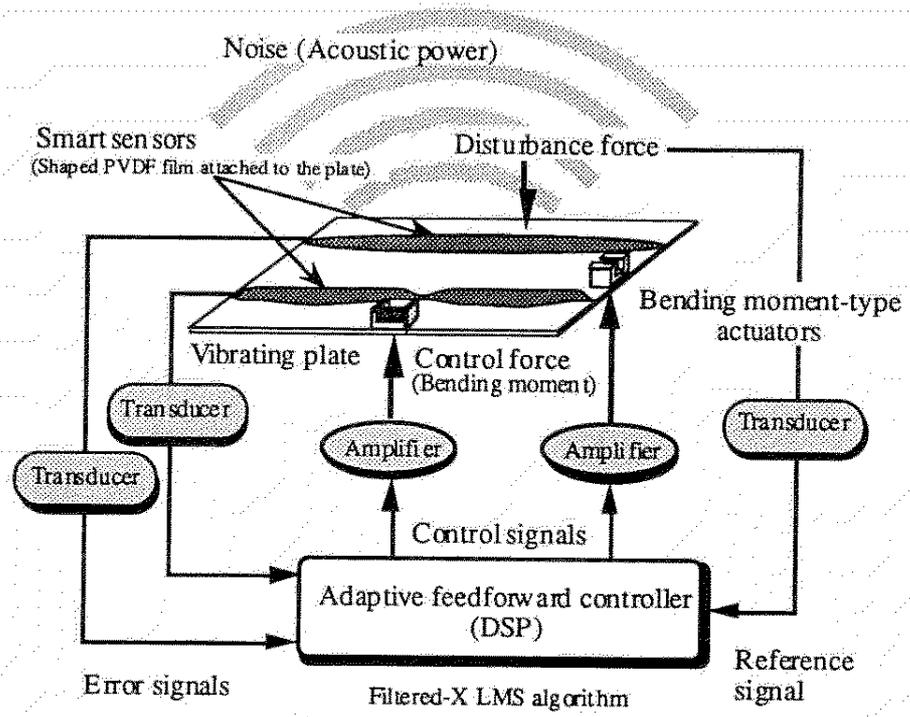


図 3.10-9 スマートセンサを用いた適応フィードフォワード制御系構成図

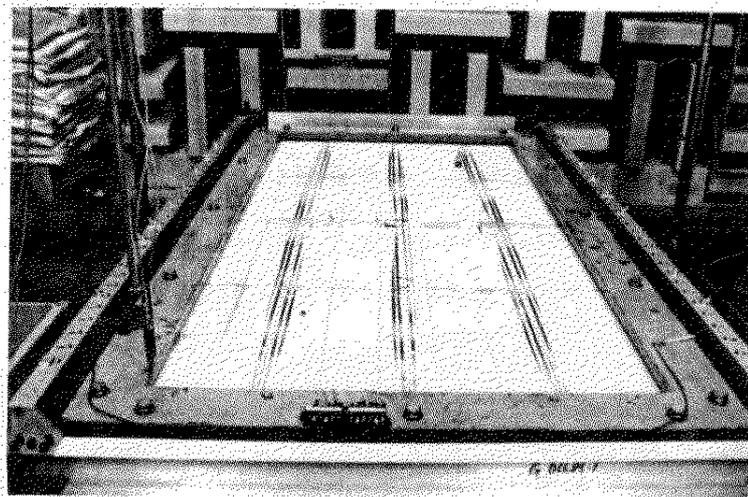


図 3.10-10 スマートセンサを貼付した実験装置外観

振動平板より放射される音響パワーの最小化を図るという構図になる。また、この際に使用した同定用デジタルフィルタは50タップで構成され、サンプリング周波数は600Hzである。

(4) 制御効果

最後に、構築したフィードフォワード型適応制御系を用いた音響放射パワーの抑制実験を行い、当該手法の有意性を立証する。スマートセンサを貼付した実験装置の外観図を図3.10-10に示している。本実験装置は半無響室に設置され、供試パネルとして使用される鉄板(幅88cm、長さ180cm、厚さ9mm)が、厚さ10cmの鉄筋コンクリート製エンクロージャの上面に単純支持されている。

まず、200Hzまでの帯域幅をもつ白色雑音で供試パネルを加振した場合の、駆動点加速度スペクトルおよび各々のスマートセンサ出力スペクトルを図3.10-11に示す。図より、200Hzまでの周波数領域には、(1,1)モードから(2,3)モードまで、都合7個の振動モードが存在しており、スマートセンサによって、それらの振動モードの内、1次、2次、3次の音響パワーモードが{(1,1)および(1,3)モード}、{(1,2)および(1,4)モード}、{(2,1)および(2,3)モード}という様に、各々の音響パワーモードの特性に応じてグループ化されてセンシングされていることが分かる。

まず、1次の音響パワーモードセンサ出力のみを誤差信号として制御実験を行った結果が図3.10-12~14に示されている。なお、この場合に用いた制御用デジタルフィルタのタップ数は50個である。図3.10-12は1次の音響パワーモード用スマートセンサ出力を示している。その際の駆動点加速度スペクトルを示したのが図3.10-13であり、対象とする振動モードのみが抑制されている点に着目されたい。音響パワーモードを抑制することで達成される音響パワースペクトルが図3.10-14である。対象としている(1,1)モード(36.5Hz)では22dB、(1,3)モード(86.6Hz)では12dBの抑制効果が得られている。

さらに、1~3次の音響パワーモード用スマートセンサを用いた3入力1出力系の制御実験を行なった。まず、図3.10-15は各々のスマートセンサ出力スペクトル結果を示している。注意してほしいのは、2次の音響パワーモード因子である(1,4)モードは抑制されずにいるが、これは(1,4)モードに近接する(2,2)モードの影響によるものである。すなわ

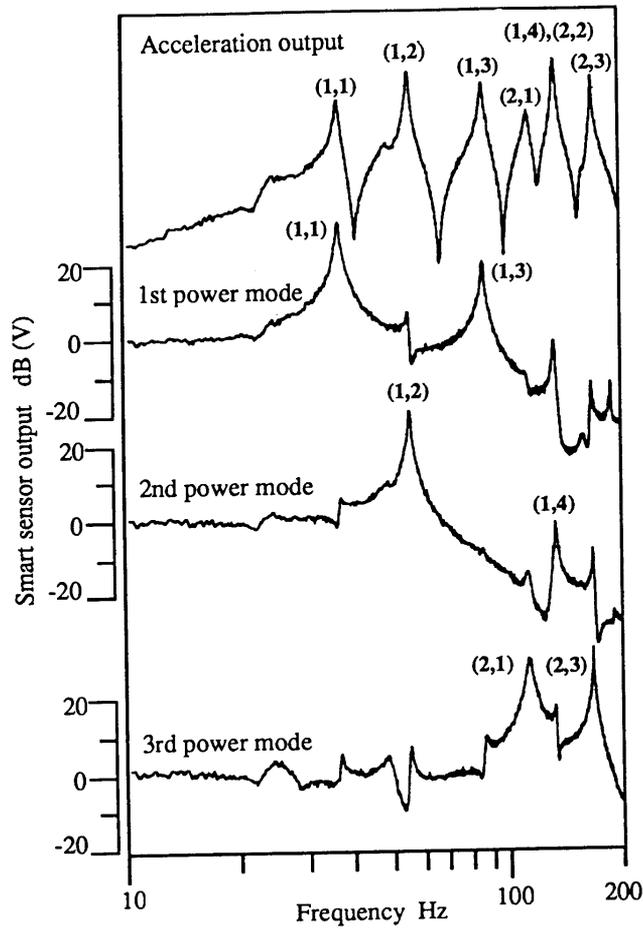


図 3.10-1.1 スマートセンサによる音響パワーモード測定結果

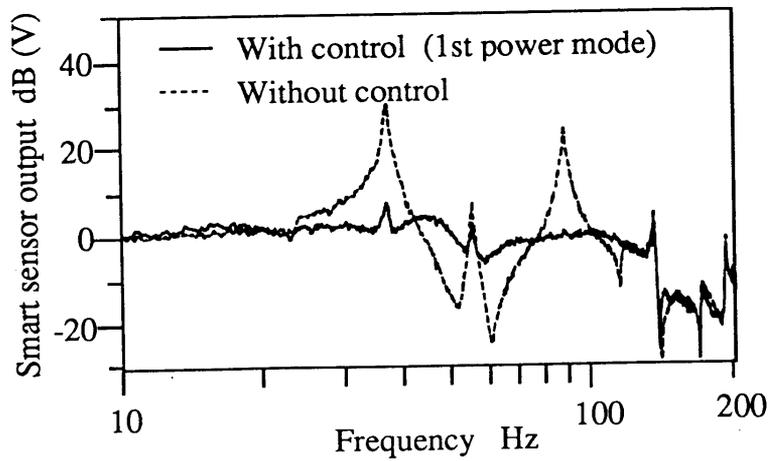


図 3.10-1.2 1次の音響パワーモード抑制効果

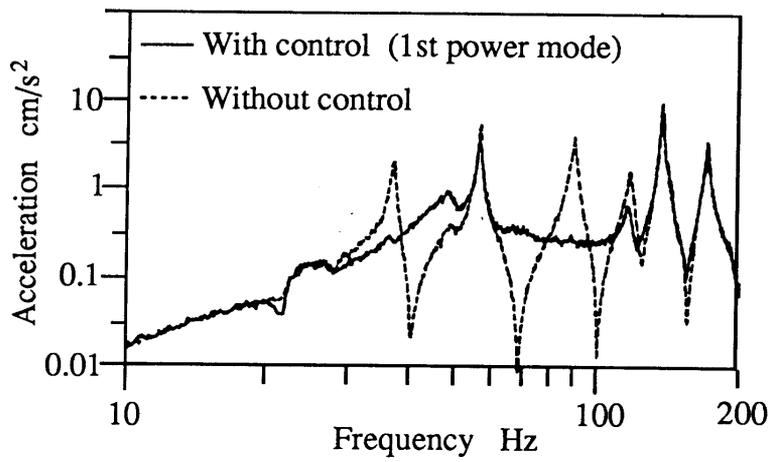


図3.10-13 駆動点加速度スペクトル（1次の音響パワーモード抑制）

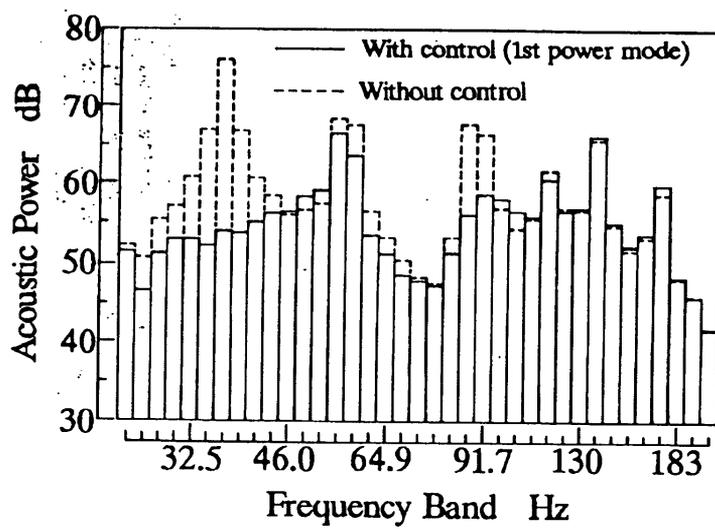


図3.10-14 音響パワースペクトル（1次の音響パワーモード抑制）

ち、(1,4)モードを抑制しようとする、逆に(2,2)モードが励振するという位置関係に、外乱作用点と制御作用点があるためである。図3.10-16は、1~3次の音響パワーモードを抑制した際の駆動点加速度スペクトルを示したもので、対象としている200Hz以下の周波数領域で、制御不能な(1,4)モードを除き、全ての振動モードが抑制されているのが分かる。この場合の音響パワー抑制効果が図3.10-17に示されており、対象とする振動モードに関連する音響成分((1,4)モードを除く)が全て抑制されている。因みに、(1,1)、(1,2)、(1,3)、(2,1)、(2,3)モードに関する音響パワー抑制効果は、各々16dB、11dB、13dB、5dB、7dBである。

3.10.4 おわりに

PVDFフィルムセンサを形状設計することにより、振動放射音パワーの構成因子である音響パワーモードの計測を可能とするスマートセンサを実現した。さらに、このセンサ出力を最小とする制御系を構築することで、音響パワーの抑制を可能とした。なお、今回は、周辺単純支持平板を対象にスマートセンサの形状設計手順を説明したが、音響パワーマトリクスが数値計算等の手段で求められるなら、その他の形状・境界条件の構造物であっても、本質的な手順は全く変わらない。

本研究は、分布定数系対応のセンサ、アクチュエータ、適応制御器が一体化した「スマート構造物」概念の構造音響制御分野における具現化である。柔軟展開構造物など大規模宇宙構造物にその源流をたどることのできるスマート構造物ではあるが、“快適な静粛環境の実現”といった我々の日常生活に密接に関連した分野に目を転じることによって、今後新たな展開が生まれるものと考えている。

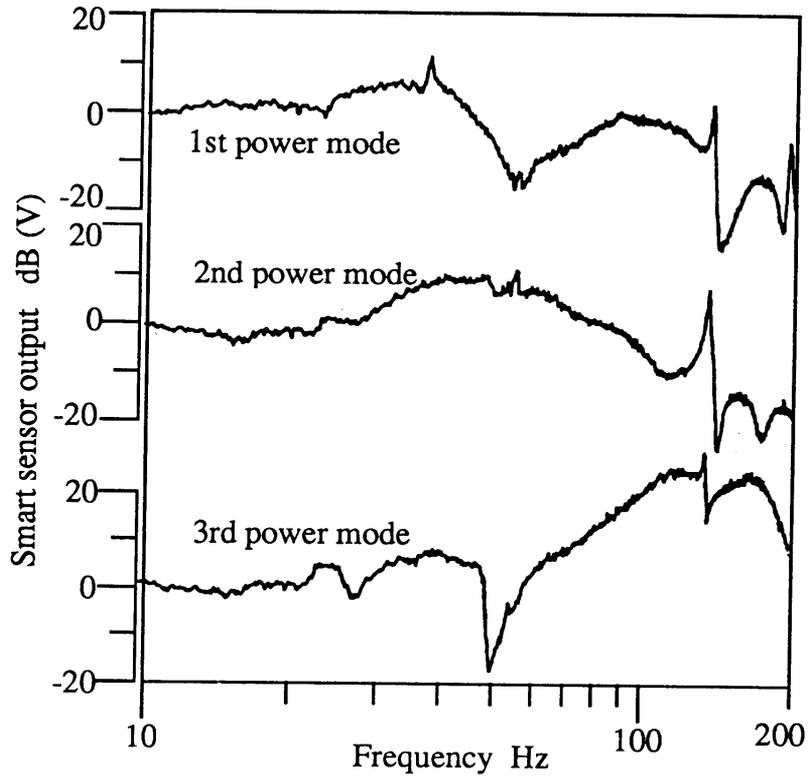


図3.10-15 1次から3次までの音響パワーモード抑制効果

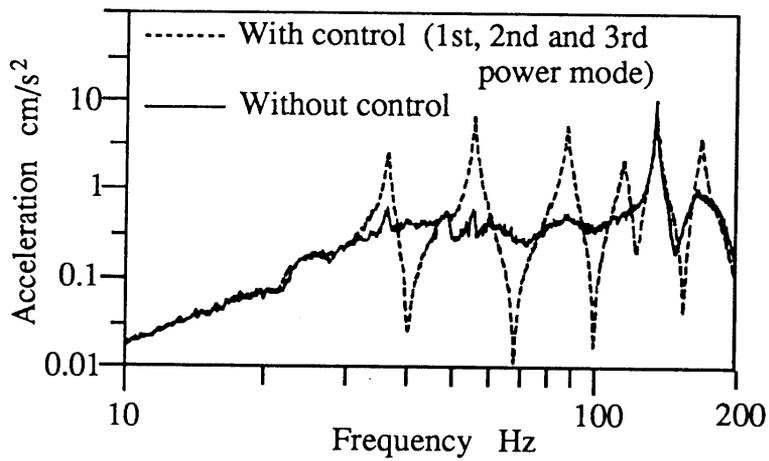


図3.10-16 駆動点加速度スペクトル（1次～3次までの音響パワーモード抑制）

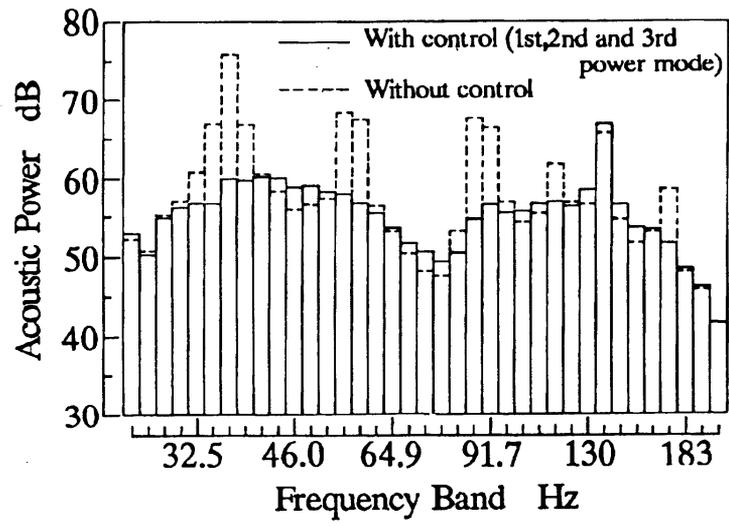


図 3.1 0-17 音響パワースペクトル (1次～3次までの音響パワーモード抑制)

文 献

- (1) Deffayet, C. and Nelson, P.A., *J. Acoust. Soc. Am.*, 84-6, (1988), p.2192.
- (2) Song, L.,ほか2名, *J. Acoust. Soc. Am.*, 89-6, (1991), p.2786.
- (3) Fuller, C.R., *J. Sound Vib.*, 136-1, (1991), p.1.
- (4) Meirovitch, L. and Thangitham, G.H., *J. Acoust. Soc. Am.*, 112, (1991), p.237.
- (5) 田中・菊島・黒田、機論、57-537, C(1991), p.94
- (6) Williams, E.G., *J. Acoust. Soc. Amer.*, 73, (1983), p.1520.
- (7) 田中ほか3名、機論、59-567, C(1993)
- (8) Elliott, S. J. and Johnson, M. E., *J. Acoust. Soc. Am.*, 94(4), (1993), pp.2194-2204.
- (9) 瀬尾、精密工学会、55-8, (1989), p.1374.
- (10) 三橋、計測と制御、24-9, (1985), p.791.
- (11) Lee, C.K. and Moon, F.C., *Tran. of ASME, J. Appl. Mech.* 57, (1990), p.434.
- (12) Clark, R.L., and Fuller, C.R., *J. Acoust. Soc. Am.*, 91 (6), (1992), p.3321.
- (13) Clark, R.L., and Fuller, C.R., *J. Intelligent Material Systems and Structures*, Vol. 4, July, (1993), p.354.
- (14) Collins, S.A.,ほか3名, *J. Guidance*, 15-2, (1992), p.396.
- (15) Lefebvre, S.,ほか2名, *J. Sound and Vib.*, 155(1), (1992), p.177.
- (16) Elliott, S.J., *IEEE, ASSP-35*, 10, (1987), p.1423.

略語表

3. 1 0 構造音響制御分野におけるスマート構造物

ANC = Active Noise Control ; 能動音響制御

PVDF = polyvinylidene fluoride ; ポリふっ化ビニリデン

PZT = lead zirconate titanate ; チタン酸ジルコン酸鉛

SISO = Single Input Single Output ; 1入力1出力

MIMO = Multiple Inputs Multiple Outputs ; 多入力多出力

Filtered-x LMS algorithm = Filtered-x Least Mean Square algorithm

; フィルタードX最小二乗平均アルゴリズム

DSP = Digital Signal Processor ; デジタル・シグナル・プロセッサ

3.1.1 スマートコンポジット、スマートストラクチャと適応設計

3.1.1.1 知的材料と知的構造物の発想とニーズ

知的材料と知的構造物の発想とニーズを歴史的に考えてみると、材料と構造物の歴史は人類の文明の歴史である。材料と構造物は文明の形態を規定し、文化とも深くかかわって来た。まず石器時代から近い将来までの材料史を見わたし、世代を区分してみると図 3.1.1-1 のようになる。⁽¹⁾

第一世代では、天然の材料の形を単に変えただけである。天然の材料は樹木、岩石、骨、貝殻などである。一万年以上もさかのぼることができる。

第二世代では、天然の材料から必要な成分のみを抽出して、さらに有用な形に成形している。縄文土器のようなやきものから始まり、紀元前 1 千年頃金属の製錬と加工が加わった。銅、鉄、軽合金など現代でも材料の主役を演じている。

第三世代では、天然に存在しない材料を人間が創製している。1910 年頃に誕生したベークライトからプラスチック、合成ゴムへと続く有機材料、更に CBN（立方晶状のほう化チタン）のような無機材料もある。プルトニウムなどの超ウラン元素もこの世代に属する。二十世紀は第三世代の幕開けの年であった。第一世代から第三世代の共通点は、材料の強さなどの特性が場所によって変わらないことである。

第四世代では、材料の特性が空間的に分布するもの、即ち複合材料が学術的に検討され、実用化された。二つ以上の素材を混ぜて固めて作ったもので、もとの素材が区別できる複合材料の思想は、縄文土器にも既に見られる古いものであるが、FRP が実用化された 1940 年以後を第四世代という。

第五世代では、外部の環境の時間的変化と共に特性が変化する材料の芽が出始めたばかりで、知的材料は 21 世紀に実用化されるであろう。

材料をその利用する際の性質、即ち機能で分類すると表 3.1.1-1 のようになる。この中で機械的機能、熱的機能、放射線機能を持つ材料を構造材料という。これらは受動的機能であり、過酷な条件下で用いられる場合が多くある。構造材料は力持ちの材料といえる。電気・磁気・光学・化学的機能を発揮する材料、材料中の電子の状態の変化、電子の動きを利用した材料を機能材料という。これらは頭のよい材料といえる。材料は最初、第一世代は構造材料のみであったが、第二世代以後、特に 20 世紀になり電気・電子の利用が始まり、また触媒性、酸化還元性などの化学的機能の利用が始まって、材料と物理学や化学が融合することにより機能材料が発展した。

この次に期待される材料は、物理学と化学それに生物学とも融合した材料である。生物は情報の集積と環境条件に対応していく情報処理機能がある。したがって物理学、化学、生物学との融合をベースとした材料は、機能と情報を融合した、情報を処理する材料、即ち第五世代の知的材料である。これは構造と機能と情報が融合した、力持ちで頭のよい材料である。これはまた、究極の省エネルギーを可能とし、生物や環境に優しい材料である。

知的材料の概念が、「環境条件に知的に応答し、機能を発現する能力を有する新物質、材料の創製に関する研究開発の推進について」（科学技術庁長官の諮問第13号）に対する答申として、科学技術庁の航空・電子等技術審議会でまとめられ、1989年11月に提出された。知的材料は物性と機能のみならず情報の概念を取り込み、複数の機能を組織的に連携させて、より高次の機能を能動的に実現しようという視点を導入した。材料中に、周辺的环境情報や材料の内部情報を検知し（センサ機能）、判断・命令し（コントロール機能）、行動を起こすメカニズム（アクチュエータ機能）が内蔵されている究極の姿が知的材料で、図3.1 1-2で表される。材料自身が劣化や破壊を診断して寿命を予告したり、自己修復したりして危険を未然に防いだり、自己分解して自然に戻ったり、自己学習してより賢くなったりできる知的材料は、安全工学のうえからも、環境問題・省資源の立場からも極めて有用である。⁽²⁾

一方構造物はその構成材料に強く依存するため、最近までその歴史は構造材料の歴史といってもよかった。従来構造物は荷重を支え、形状を保持し、強度的に安全性を確保する受動的なものとして、その形状が設計され材料が選定されていた。しかし新しく出現した知的構造物は、センサ、アクチュエータを構造部材として持ち、センサからの信号を外部コンピュータで情報処理し、その指令でアクチュエータを作動させ、適当な力を発生させて、構造物の形状や強度を変え、応答を加減する。即ち構造部材として、構造材料だけでなくセンサやアクチュエータ機能を有する機能材料も加えることになる。更に進むと、構造材料と機能材料が融合した知的材料からできた知的構造物ができることになるであろう。⁽³⁾

知的構造物の研究は、宇宙構造物の収納と展開機構、可変形状機構、振動抑制などの適応性と自律性を高めるために始められた。図3.1 1-3のような八面体からなる可変形状トラスが提案されて以来、種々の可変形状トラスが研究されている。また航空機の安全性、信頼性、エネルギー消費の高効率化のため、構造内部に超小型で軽量のセンサとアクチュエータを分散配置させて、構造の損傷をいち早く探知し、損傷拡大を押さえたりする知的化の研究が進められている。なお最近、建築、土木構造物においても、決定的崩壊以前に現れる変化を早期に発見し修復して、橋梁や建築物の破壊、ダムの決壊事故を未然に防ぐ

ため、知的化の研究が活発になって来た。

3.1 1.2 知的材料と知的構造物の創製と設計

知的材料の創製法には、表 3.1 1-2 の材料構成機能単位をどこにおくかにより、ミクロレベルからマクロレベルまで色々な方法がある。将来知的材料になりうる新しい多機能材料が原子・分子のミクロレベルから研究が始まりつつあるが、現実味のある研究はマクロレベルの複合材料の知的化である。センサとアクチュエータ機能を兼ね備えた形状記憶合金、圧電材料、超磁歪材料などやセンサ機能を有する光ファイバーを構造材料と一体化して複合化し、スマートコンポジット（知的複合材料）を創製する研究が世界的に盛んに行われている。なおコントローラとして外部のコンピュータを用いるのが現状であるが、将来チップとして複合材料中に組み込めれば完全に知的複合材料と言えるであろう。図 4 に現在の知的複合材料の概念を示す。センサ・アレイで環境変化や内部変化をセンシングし、外部のコンピュータで情報を処理し、その指令をアクチュエータ・アレイに伝えて適切に応答する。これは既存の機能性材料と構造材料を複合化することにより可能である。しかし複合化技術は従来の技術を格段に高度化する必要があり、研究課題が山積している。

一方知的構造物の創製法には、構造材料と機能材料が融合した知的材料を用いる方法、構造部材として構造材料と機能材料を別々に用いる方法、機能材料の代わりに各種の独立したセンサとアクチュエータを用いる方法がある。第一の方法は知的材料ができたときに可能となるが、第二、三の方法は現在盛んに研究されている方法で、実用化も近い。種々の可変形状トラスや大型展開アンテナの運動と振動の制御方法、センサとアクチュエータの最適配置、宇宙空間での建造問題など多くの問題が研究されつつある。

従来の複合材料や構造物を設計する方法は、材料の種類、組み合わせ、分布など受動的変数を変えて条件を満足する最適な組み合わせなどを見つけることである。しかし受動的変数をいくら変えても条件を満足する最適な組み合わせが見つからない場合がある。このような場合にセンサ、アクチュエータ、コントローラ機能、即ち能動的変数を加えて知的化すると最適設計が可能となる。図 3.1 1-5 のように、従来の設計法は評価関数と従動変数の 2 次元平面内で最適値を求める方法であり、能動的変数を加えて知的化することは 3 次元空間で最適値を求める方法で、これを適応設計と呼ぶ。⁽⁴⁾ 例えば図 3.1 1-5 の条件 A、B を従動変数の中だけでは同時に満足させることができなかつたものが、能動的変数によって条件 A、B の範囲が変化し、許容範囲の中で条件 A、B を同時に満足する範囲ができることになる。なお条件 A、B、C…としては、応力やひずみの静特性、固有振動数、

固有モードおよび周波数応答関数などの動特性、ならびに制御系の制御性能およびロバスト性、更にシステム全体の質量、コスト、信頼性、寿命、インテリジェント係数など種々のことが考えられる。このように従動変数と能動変数の中で最適設計する方法、即ち適応設計が知的材料や構造物を設計する際に必要となる。これは構造と制御の同時最適化の一般化である。この際に最も重要なことは条件と評価関数をどのように選ぶかであり、設計思想を決定することである。

3.1.1.3 むすび

過酷な環境や荷重にただ耐えるだけの丈夫で冷たく硬い受動的な材料や構造物を、生物のように環境や状況の変化に対応し、適応し、人や環境に優しい、気のきく能動的な材料や構造物に変身させる研究が始まりつつある。状況が変わっても効率的に最高の機能を発揮させる高性能化のみでなく、事故を予知し、安全を確保するため、材料や構造物を知的化する必要がある。転ばぬ先の杖を手に入れようとするのが知的材料と構造物の研究ともいえる。この究極の材料と構造物を実現するには学問分野を越え、多くの学問分野の新しい融合で、Transdisciplinary Fieldを作ることが必要である。

参考文献

- (1) 島村昭治：複合材料のはなし、産業図書（1982）。
- (2) インテリジェント材料フォーラム企画委員会：インテリジェント・マテリアル、シーエムシー（1991）。
- (3) K.Miura and B.K.Wada : Proceedings of First Joint U.S./Japan Conference on Adaptive Structures（1990）。
- (4) 谷順二：インテリジェント材料、3-1（1993）、pp.22-33.

表3.1 1-1 材料の機能

1. 機械的機能	(1) 強度 (強度, 高温強度, 低温強度, 比強度, 疲労強度, クリープ強度, クリープ破断強度) (2) 靱性 (靱性, 高温靱性, 低温靱性) (3) 硬度 (硬度, 高温硬度) (4) 弾性 (超弾性) (5) 形状記憶性 (6) 超塑性 (7) 制振性 (8) 耐摩耗性 (9) 摩擦特性 (潤滑性)
2. 化学的機能	(1) 耐食性 (2) 耐候性 (3) 分離性 (気体分離, 液体分離, イオン交換) (4) 選択透過性 (イオン, 気体, 液体選択透過性) (5) 触媒性 (6) 吸・脱着性 (7) 水素貯蔵性 (8) 吸水・吸油性 (9) 透水性 (10) 酸素遮断性 (11) イオン伝導性 (12) 酸化・還元性 (13) 電気化学特性
3. 電子・電気的機能	(1) 導電性 (温度依存性, 応力依存性) (2) 超導電性 (3) 絶縁性 (4) 半導性 (5) 圧電性 (6) 焦電性 (7) 誘電性 (8) 熱電変換性 (9) 光電変換性 (10) 耐アーク性 (11) 熱電子放射性 (12) 光電子放射性 (13) 電磁波吸収性 (14) レーザー発振性 (15) エレクトロクロミック
4. 磁氣的機能	(1) 硬・軟磁性 (2) 非磁性 (3) 透磁性 (4) 磁気バブル効果 (5) 磁性流体性 (6) ホール効果
5. 熱的機能	(1) 超耐熱性 (2) 断熱性 (3) 伝熱性 (4) 難燃性 (5) 蓄熱性 (6) 発熱性 (7) 熱膨張性 (8) 極低温性 (9) 赤外線放射性
6. 光学的機能	(1) 感光性 (2) 透光性 (3) 導光性 (4) 偏光性 (5) 光選択透過性 (6) 光選択吸収・反射性 (7) 光導電性 (8) 非線形光学性 (9) 光磁気記録性 (10) レーザー発振性 (11) 音響光学効果性 (12) フォトクロミック (13) PHB効果 (14) ルミネッセンス (螢光・燐光)
7. 生体的機能	(1) 生体適合性 (2) 抗血栓性 (3) 生体内分解性
8. 放射線機能	(1) 耐スエリング性 (2) 耐放射線クリープ性 (3) 耐放射脆化性 (4) 中性子減速 (5) 中性子吸収 (6) 放射線シンチレーション (7) 耐放射化性

「新素材便覧1990」通産資料調査会より引用

表3.11-2 知的材料を構成する機能単位の物理サイズ

機能単位の物理サイズ	機能単位の例
マクロ	圧電材料の金属やセラミックスへの塗布など 複合材料・傾斜機能材料レベルの機能単位 (炭素繊維とガラス繊維の複合材料、チタン合金とジルコニアセラミックスの傾斜機能材料など)
	ナノレベル、メソスコピックレベルの現象の利用 (超微粒子を金属表面に配属することによる歪み測定のパフォーマンス向上など)
ミクロ	分子・原子システムレベルの機能単位 (機能性分子、原子レベルでのハイブリッド構造など)

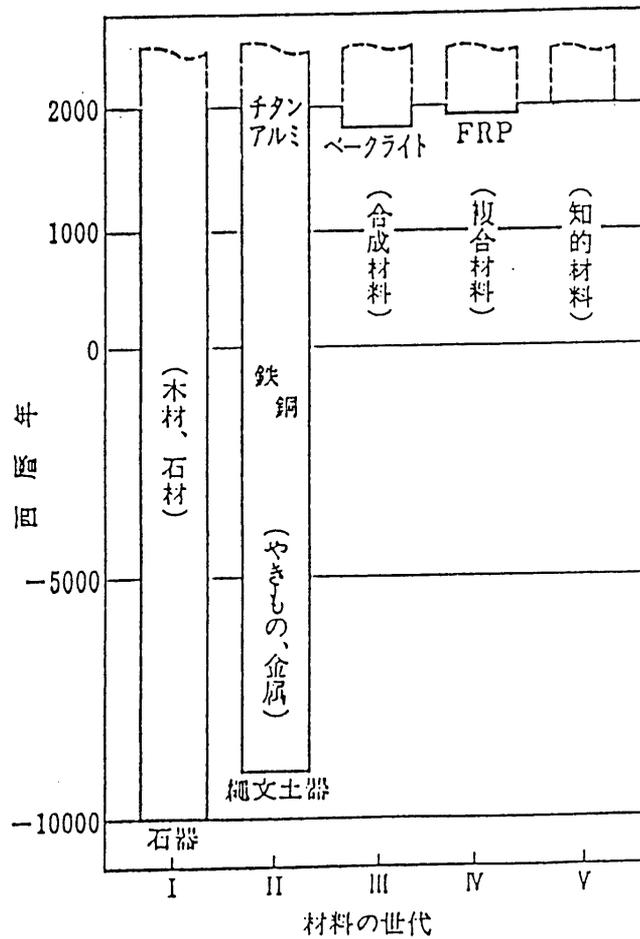


図3.11-1 材料の世代史⁽¹⁾

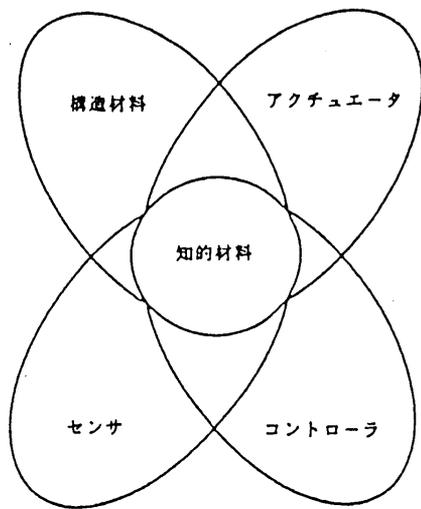


図 3.1 1-2 知的材料

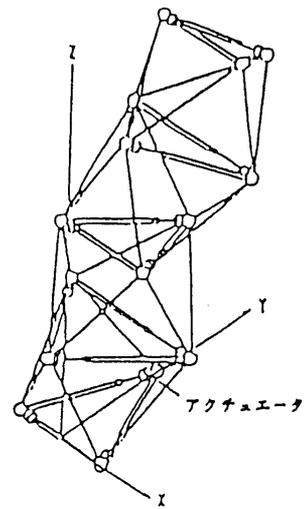


図 3.1 1-3 八面体トラス

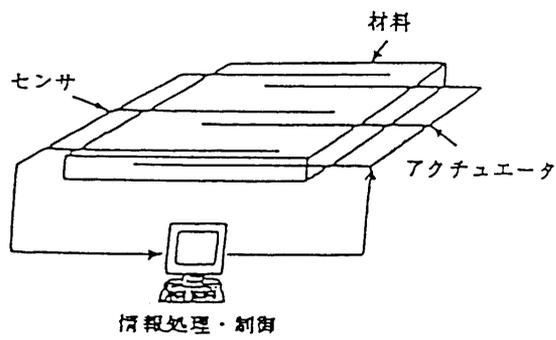


図 3.1 1-4 知的複合材料

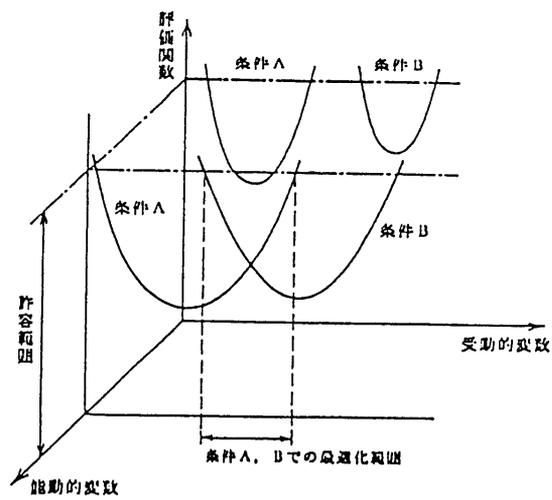


図 3.1 1-5 適応設計

3.12 スマート構造物の振動制御

3.12.1 はじめに

スマート構造物とは、（誤解を怖れずに言えば）分布的なセンサおよびアクチュエータが構造物の隅々まで張り巡らされ、それらをつなぐ配線や制御用CPU等も一体化・内蔵した構造物（図3.12-1）であり、単純な適応機能から自己組織化まで、さらには自己修復機能までも究極的には有するものと期待されている。しかし、振動制御に問題を限定すると、スマート構造物と言えどもしよせんは連続体の複合であり、現時点で指摘されている分布定数系の振動制御における問題点から無縁というわけにはいかない。そこで本節では、スマート構造物実現のために当然まずクリアせねばならない分布定数系の振動制御における問題点を概説することから始めて、現時点で提案されているアプローチおよび将来的に有望と思われる解決策について述べる。

3.12.2 集中定数系 vs 分布定数系

スマート構造物とは、剛体とみなせる構造要素と柔軟な構造要素の結合体（図3.12-2）、いわゆる「混合パラメータシステム（図3.12-3）」（集中定数と分布定数のサブシステムが結合しているシステム）である⁽¹⁾。

剛体部分（LPS:Lumped Parameter System）＝常微分方程式

↓

結合→混合パラメータシステム（MPS:Mixed Parameter System）

↑

柔軟部分（DPS:Distributed Parameter System）＝偏微分方程式

集中定数系

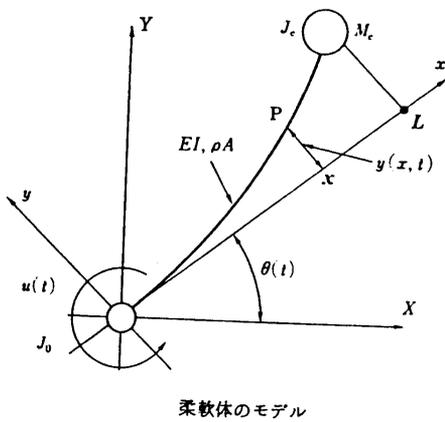
＝常微分方程式で記述

＝変数は時間のみの関数

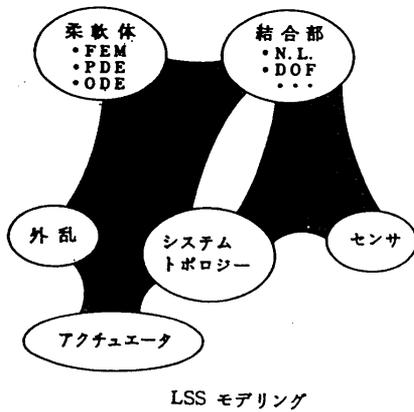
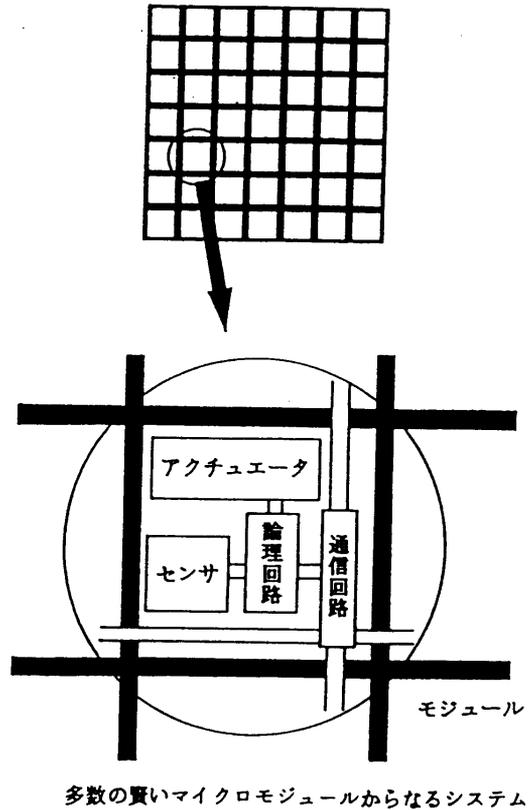
＝状態空間は有限次元ユークリッド空間

分布定数系

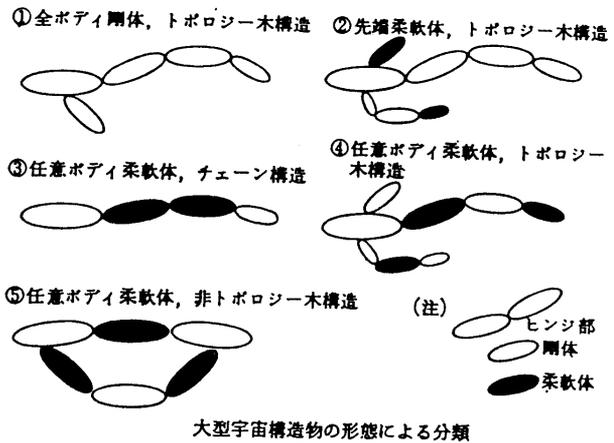
図 3.1 2-1 スマート構造物 [I] →



柔軟体のモデル



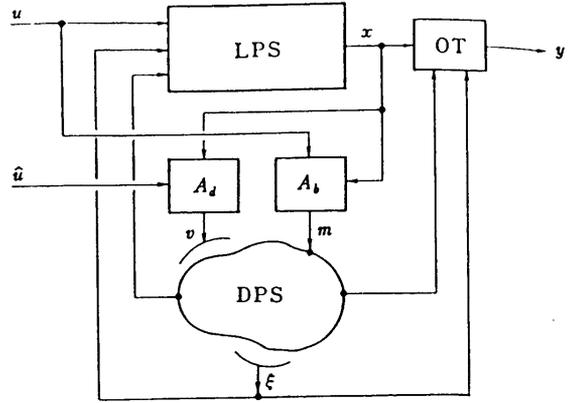
LSS モデリング



大型宇宙構造物の形態による分類

図 3.1 2-2 スマート構造物 [II]

$$\left. \begin{aligned}
 \text{LPS のサブシステム: } & \frac{dx}{dt} = Ax + b\eta(t) \\
 \text{DPS のサブシステム: } & \frac{\partial \xi(t, s)}{\partial t} + v \frac{\partial \xi(t, s)}{\partial s} = 0 \\
 \text{サブシステムの: } & \xi(t, 0) = kc x(t) \text{ (境界条件)} \\
 \text{結合条件: } & \eta(t) = \xi(t, L)
 \end{aligned} \right\}$$



MPS の構造

図 3.1 2-3 混合パラメータシステム

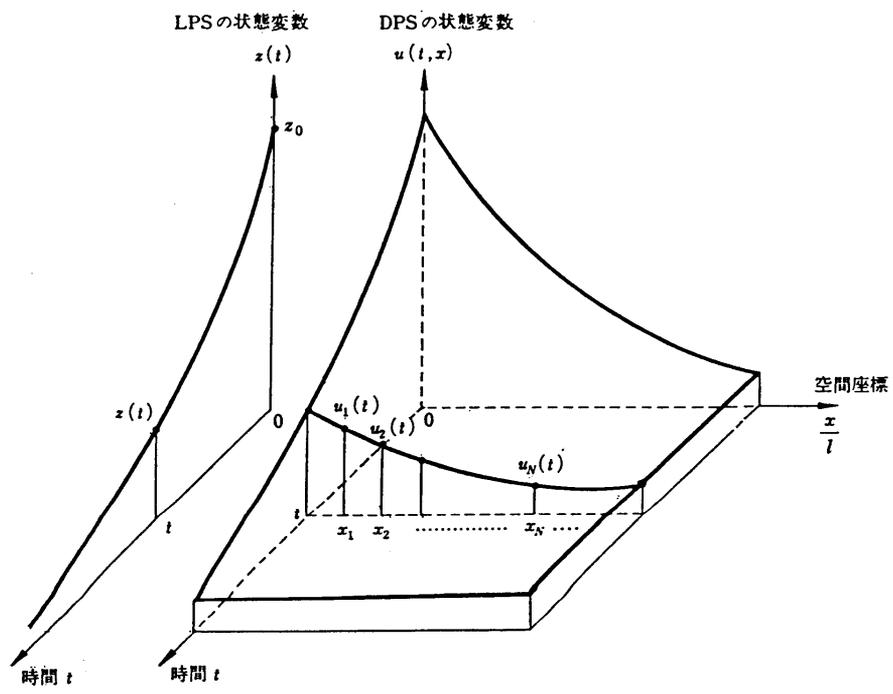


図 3.1 2-4 集中定数系と分布定数系の状態変数

= 偏微分方程式 (境界条件の与え方が難しい) で記述⁽²⁾

= 変数は時間と場所の関数 (図 3.12-4)

= 状態空間は無限次元空間⁽³⁾

(無限次元関数は有限次元のそれとは全く違った様相を呈する)

例 1 ; むだ時間を含むシステムはある種の分布定数システムと集中定数システムが結合したシステムである (集中定数システムのみでは絶対にありえない)。

例 2 ; 分布定数システムを制御する制御系は、有限次元ダイナミクスを有する制御器を付加するので、その結果分布定数系の制御対象と集中定数のコントローラの結合したシステムになる (図 3.12-5)。

例 3 ; センサ/アクチュエータのダイナミクスを考慮する場合、センサ/アクチュエータは集中定数システムであるから、例 2 と同じ状況になる。

スマート建造物の多くは軽量かつ柔軟な建造物である。特に、大規模宇宙建造物などは巨大な柔軟建造物であるため、基本的には分布定数系として取り扱わねばならず、その数式的表現の出発点は偏微分方程式となる⁽¹⁾⁽²⁾。偏微分方程式を常微分方程式に直さずに直接解く手法は、

(a) 半群理論を導入する。

(b) 関数空間における発展方程式から変分方程式へもっていく。

の 2 つに大別できる⁽³⁾。

通常は、無限次元の分布定数系を、さらに

(a) 領域分割法 (有限要素近似)

(b) モード畳重法 (モード解析)

などを用いて有限次元の集中定数系モデルに変換する⁽⁶⁾ (有限次元モデル化→図 3.12-6)。さらに制御系を設計するには、そのままでは制御理論を適用するには高次元過ぎるので、有限次元モデルを低次元モデルに直す必要がある (低次元化→図 3.12-7)。通常、変数について適当な固有関数を用いて展開し、ある有限項 N で打切って表現し、それらに関する常微分方程式に変換する⁽⁴⁾。解法としては、

(a) 数式を直接解く (手間はかかるが古典的手法が使える。ただし、次元数が大きくとれない場合、モードの切捨て誤差が発生する。)

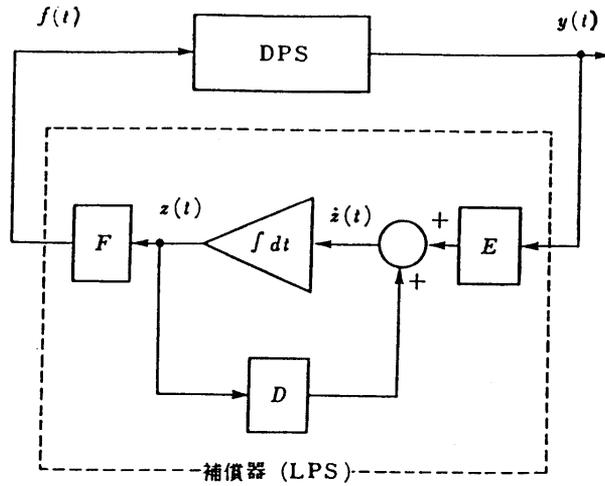


図 3.1 2-5 有限次元のコントローラによる分布定数系制御

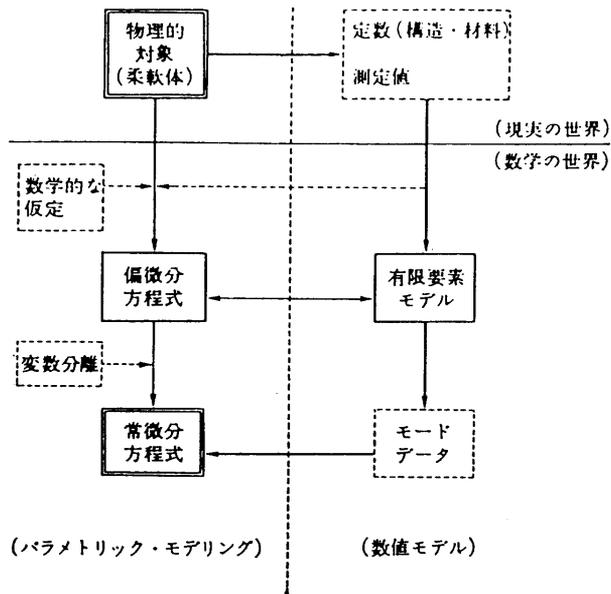


図 3.1 2-6 分布定数系の有限次元モデル化

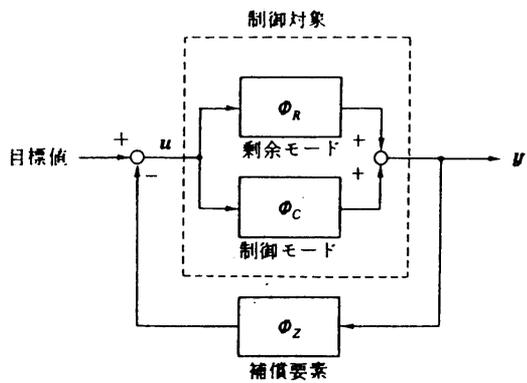


図 3.1 2-7 有限次元モデルの低次元化

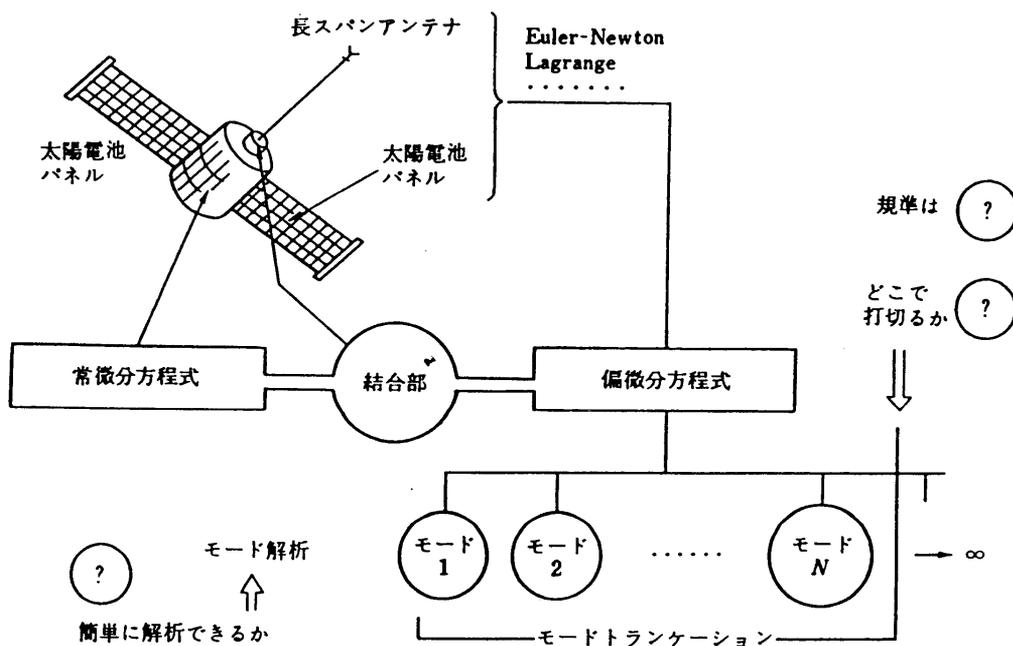


図 3.1 2-8 混合パラメータシステムのモデル化

(b) 有限要素法（数千の分割を必要とし、計算量が膨大となる。）

(c) コンピュータ・シミュレーション（数値積分を用いる。境界・初期条件やセンサ・アクチュエータ配置条件等を設定変更して繰り返しシミュレーションできる。）

が挙げられる。1つの部材だけでなく複数の要素が結合されている場合、相当手間のかかる複雑な解法になることは想像に難くないであろう（図3.12-8）。ここで注意が必要なのは、「現実の構造物に対して、常微分方程式は近似であるが、偏微分方程式は正確である」ことを意味するわけではない。偏微分方程式であろうと常微分方程式であろうと、実際の構造物の近似には違いないのである（図3.12-9）。例えば、長方形板の振動の場合であっても、簡単な偏微分方程式で記述できるのは、薄肉などの仮定を満たす場合のみであり、事実、複合材とアルミの結合材を用いると一様な連続体としての扱いはできなくなり、形状の複雑さが加わればさらに偏微分方程式での記述は困難になる。したがって、モード個数の打切りの問題は、偏微分方程式に対する忠実性で判断するのではなく、現実の構造物との整合性・妥当性の観点から議論するべきである。

したがって、どの解析手法を用いるとしても完全なモデル化は不可能であり、モデル化誤差を考慮に入れて制御系設計しなければ失敗する⁽¹⁾。

3.12.3 分布定数系の振動制御の問題点

(1) モデル化誤差

前項で述べたように、分布定数系構造物は無限個の振動モードを有するが、現実には有限個しか対応できない以上、高次の振動モードは無視するしかない。また、複雑な形状の構造物ならば、比較的低次の振動モードについても実験モード解析技術を用いても正確にその形状や振幅の推定をすることは難しい。したがって、線形構造物と見做せる加振パラメータ範囲においてすら、完全な数理モデルを得ることは不可能であり、対象システムが線形と見做せる場合にも誤差の混入は不可避である。

(2) 非線形性・時変性

現実の制御対象（構造物）の形状、センサ／アクチュエータ特性において完全な線形性は理論上でしかありえない。アンプ性能に起因する飽和特性等何らかの非線形特性を有する。構造物の形状が変化すれば、系のダイナミクスそのものが変化したり、パラメータが不

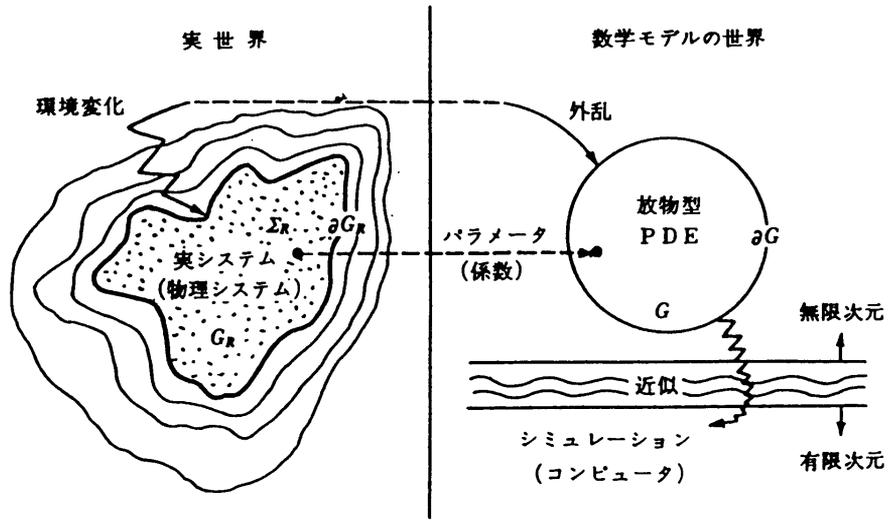
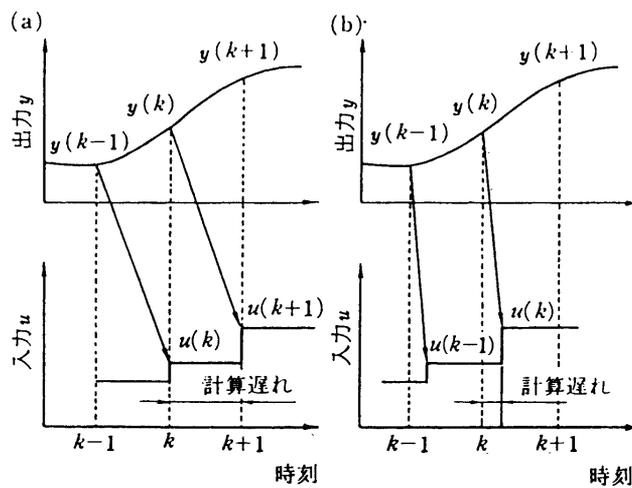


図 3.1 2-9 スマート構造物の実システムと数式モデル



(a) 1相クロックに同期する場合 (b) 2相クロックに同期する場合

図 3.1 2-10 デジタル化誤差、センサ出力・制御力の時間遅れ

規則／不連続に変化する（時変システム）ことになるため、制御問題が非常に複雑な問題になる。顕著な構造変化の例として、宇宙構造物の2つの部分がドッキングするような場合、衝撃力加振の問題も起きる。その他の不安定化要素として、デジタル化誤差、センサ出力・制御力の時間遅れ（図3.12-10）、トランスデューサ・ノイズなどに起因するセンサの観測雑音などが存在する。制御効果が劣化するのみならず、モデル化できなかった高次モードを不安定化させるスピルオーバー不安定を引き起こす。

（3）“点”センサ／アクチュエータ

再び宇宙構造物を例にとれば、構造物が（質点とは見做せずに）連続体であるため、加わる外乱も分布的な取扱いをせざるを得ない。しかし、制御対象全体に任意形状の分布入力を加えたり、分布状態の完全観測を行なうことは不可能である⁽⁶⁾。したがって、境界上での観測／制御や点観測・点制御が重要になる⁽²⁾（図3.12-11）。センサに関しては、時間的・空間的に離散化したデータしか得られないことに注意する。アクチュエータの動特性および高次モードとの干渉を考慮する必要もある。しかし、センサ／アクチュエータ系に関しては、大規模宇宙構造物では軽量化が絶対条件であるため、膨大な個数のセンサ・アクチュエータを配置することは困難であり、現実にも行なわれていない。したがって、大個数のセンサ・アクチュエータを必要とする制御理論の適用には限界がある（図3.12-12）。

有限個のセンサ→観測スピルオーバー⁽⁵⁾

有限個のアクチュエータ→制御スピルオーバー⁽⁵⁾

以上、次のように総括できる。スマート構造物は、常微分方程式だけでなく偏微分方程式によって記述される分布定数系的取り扱いを必須とし、系全体を記述するには部分要素に関する方程式を立てた後に再結合する必要がある、1つの数式で記述できるほど単純ではない。また、センサ・アクチュエータの配置にしても有限個であって、連続ではなく離散的である。したがって、必然的に分散制御であり、多変数入出力制御問題に帰着する。特にスピルオーバー問題対策が不可欠である。スマート構造物の振動制御においては、現在までの制御理論の分野では全く想像もしなかった新しい理論体系の確立が要求されているのである（図3.12-13）。

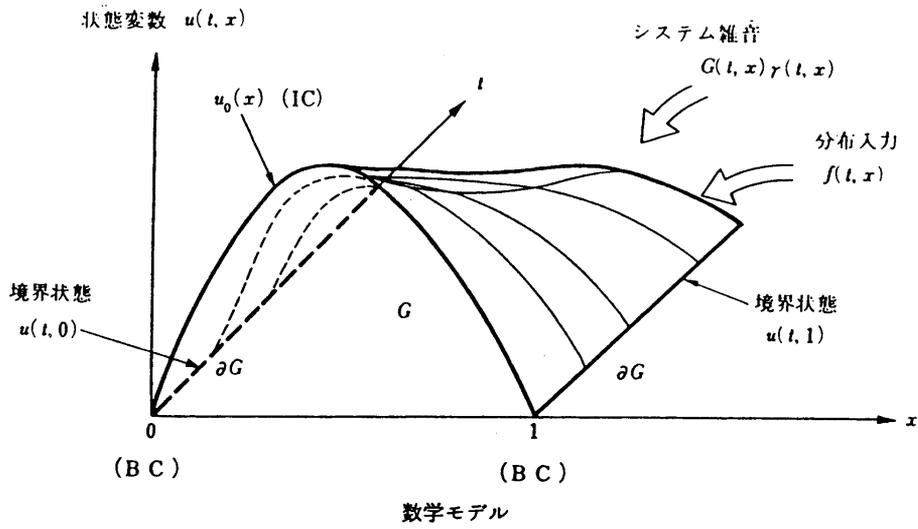


図 3.1 2-1 1 分布定数系の境界上での観測/制御

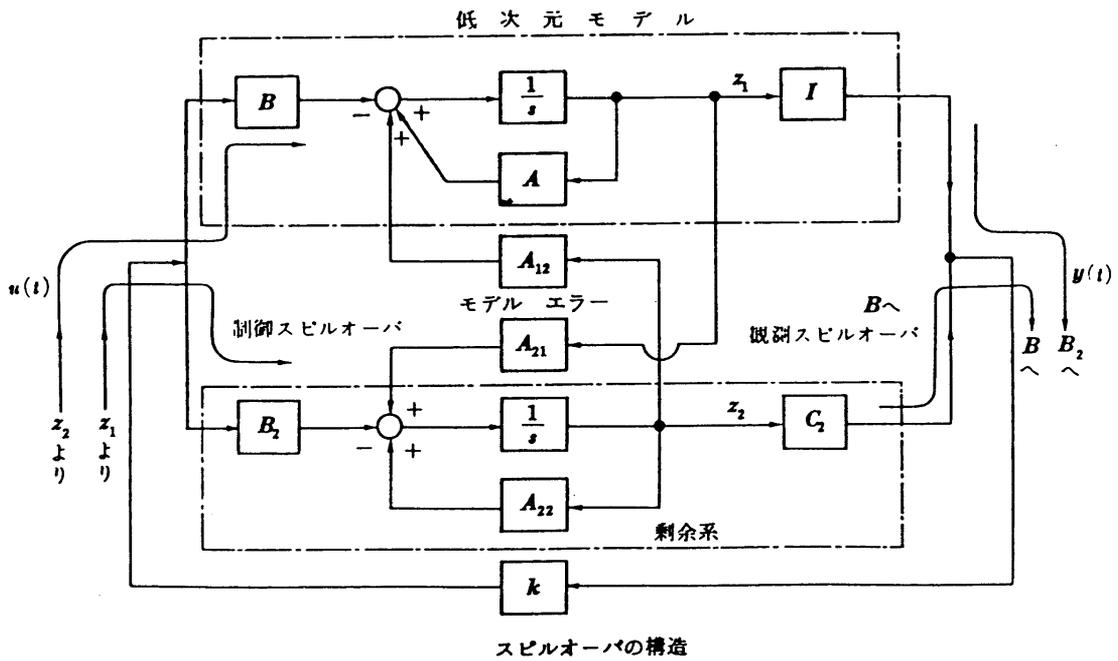


図 3.1 2-1 2 観測スピロオーバー/制御スピロオーバー

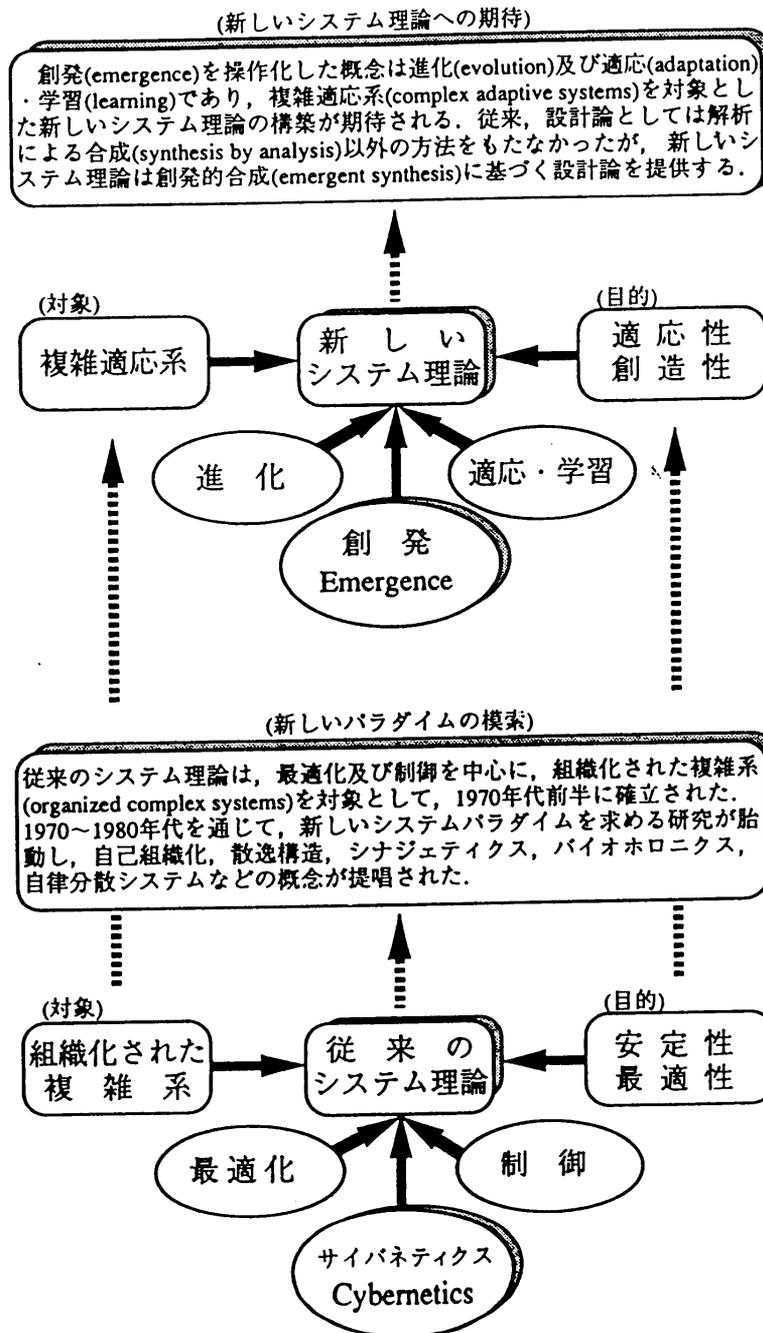


図 3.1 2-1 3 スマート構造物の振動制御における新しい理論体系の確立

3.12.4 現段階での2つのアプローチ

(1) ロバスト制御法 (H^∞ 制御、 μ 解析/設計法、LMI Theory ...)

予めシステムパラメータの誤差（無視した高次モードなどのモデル化誤差を含む）・最悪外乱等を見込んで制御系を設計する理論（図3.12-14）であり、システムの外乱から出力までの伝達関数を H^∞ ノルムで1未満にすることで、指定された誤差範囲内のパラメータ変動ならば、制御系の安定を損なわず（ロバスト安定 $\rightarrow H^\infty$ 制御（図3.12-15））、さらに制御性能をも保証する制御器を求める（ロバスト制御性能 $\rightarrow \mu$ 解析/設計法（図3.12-16））ことができる⁽⁷⁾。

しかし、 H^∞ 制御理論では、外乱から出力までの伝達関数に対する周波数重みづけ関数を制御系設計者が設定する必要があるが、制御仕様を満たす H^∞ 制御器導出に成功するためには経験を要する。さらに、仮に導出できたとしても、その H^∞ 制御器を実システムに適用すると制御性能が保守的になることが指摘されている。これは、 H^∞ 制御理論では「不確かさ」を構造化しないで最大特異値 $\bar{\sigma}$ で取り扱い、誤差を過剰に見積ることに起因している。そこで、不確かさをブロック構造化（図3.12-17）し、最大特異値ではなく構造化特異値 μ を導入し、ロバスト安定性とノミナル制御性能だけでなく、ロバスト制御性能を評価することのできる μ 解析/設計法へと発展したわけである。ただし、 μ 解析/設計法でも、最終的に制御器が求められるか否かは、D-Kイテレーションと呼ばれる一種の繰返し解法（図3.12-18）の成否に依存する。ちなみに、非線形系に対して H^∞ 制御法を用いたロバスト制御系設計法の体形化に成功した例として、スライディングモード制御を挙げることができる⁽⁸⁾。

前段落で触れたが、 H^∞ 制御や μ 解析/設計法⁽⁷⁾では最終的に所望の制御仕様を満たす制御器が得られるか否かは周波数重みづけ関数の設定の経験に頼る部分が大きく、試行錯誤の結果としてしか判明しない。したがって、現設定下で制御器が得られなかったからと言っても、異なる設定の下では制御器が得られることは充分ありうるし、より優れた制御効果を与える制御器の存在に関する疑いが常に付きまとう。その点、最新のLMI Theoryでは、与えられた制御仕様を満たす制御器が存在するか否かについても理論的に回答できるとされている。このLMI (Linear Matrix Inequality) 理論⁽⁸⁾とは、多くの制御系設計仕様（その上界値）やロバスト安定条件が、LMIを用いて定式化できる点に注目した理論で、多目的制御を凸計画問題（図3.12-19）として定式化し直して、ワー

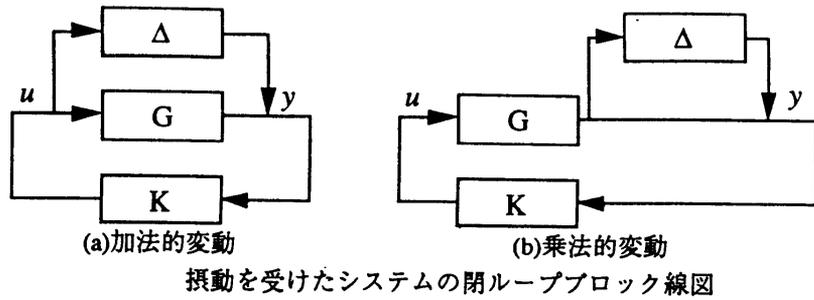


図 3.1 2-1 4 制御対象とモデル化誤差

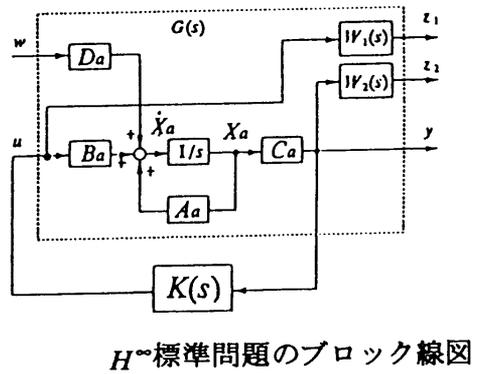
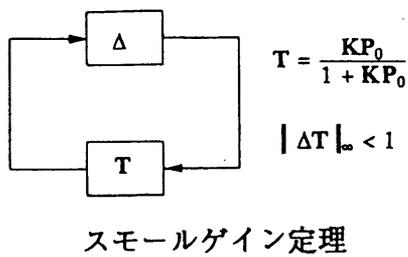
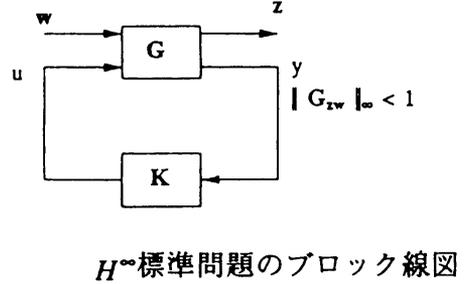
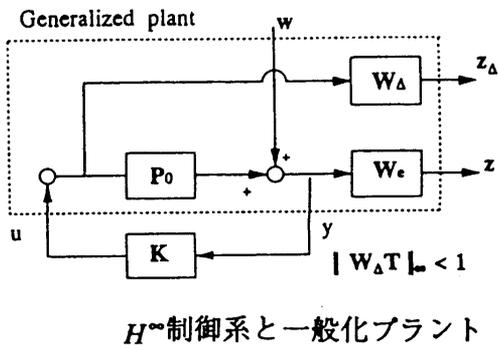
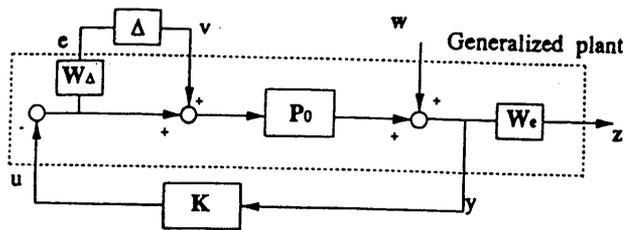
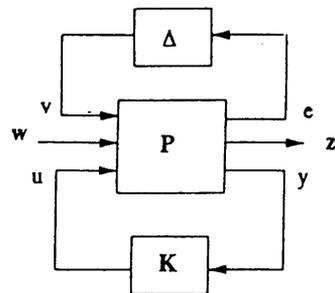


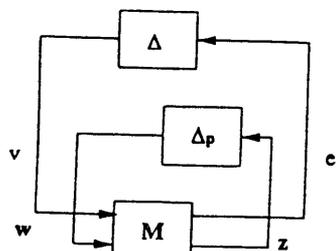
図 3.1 2-1 5 H^{∞} 制御のブロック線図



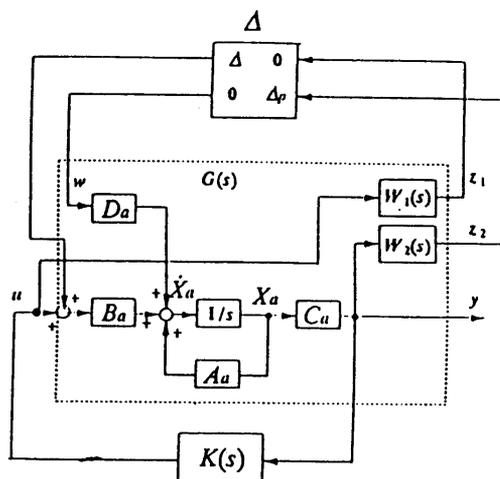
μ 制御系と一般化プラント



μ 標準問題のブロック線図

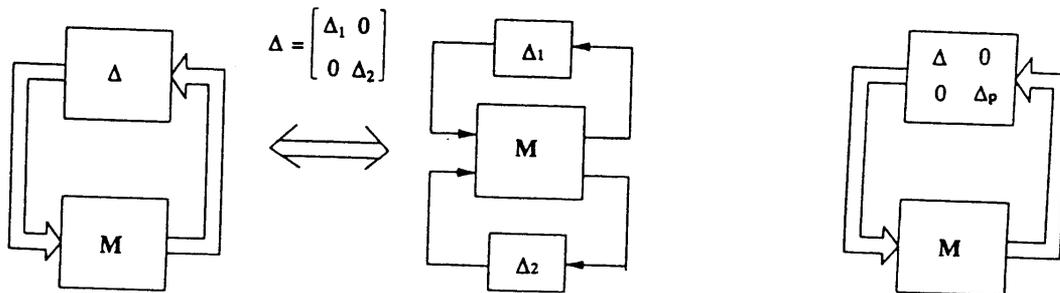


仮想的な不確かさを有する閉ループ系



μ 標準問題のブロック線図

図 3.1 2-1 6 μ 解析/設計法のブロック線図



ブロック構造の不確かさを有する閉ループ系

図 3.1 2-1 6 の 等価ブロック線図

図 3.1 2-1 7 ブロック構造化された不確かさ

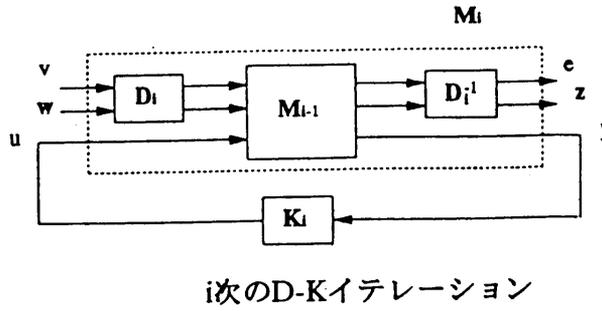


図 3.1 2-1 8 D-K イテレーション

Linear matrix inequality

LMI has form:

$$F(x) = F_0 + x_1 F_1 + \dots + x_m F_m \geq 0$$

$F_i = F_i^T$ are given; $x \in \mathbb{R}^m$ is the variable

- a set of **polynomial inequalities** in x
- a **convex** constraint on x :
 $F(x) \geq 0, F(\tilde{x}) \geq 0 \implies F\left(\frac{x+\tilde{x}}{2}\right) \geq 0$
- multiple LMIs can be combined into one

Optimization problems over LMIs:

- **Feasibility:** find x s.t. $F(x) \geq 0$, or show that none exists
- **Linear objective:** minimize $c^T x$ subject to $F(x) \geq 0$

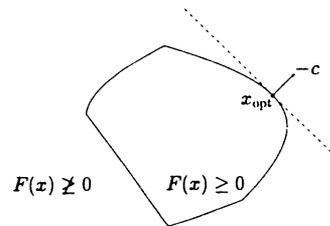
called **Positive-Definite Programming**

Definition

Positive definite program (PDP):

$$\text{minimize } c^T x \text{ subject to } F(x) \geq 0$$

- $F(x) \triangleq F_0 + x_1 F_1 + \dots + x_m F_m$
- $F_i = F_i^T \in \mathbb{R}^{n \times n}$



This is a **convex** optimization problem:

$$F(\lambda x + (1 - \lambda)y) = \lambda F(x) + (1 - \lambda)F(y) \geq 0$$

if $F(x) \geq 0, F(y) \geq 0, 0 \leq \lambda \leq 1$

図 3.1 2-1 9 LMI (Linear Matrix Inequality) 理論

クステーション等の計算処理能力をフルに利用して、数値解法によって制御器を設計するものである。利点としては、

- (a) 複数の設計仕様を満たす多目的制御系設計が可能。
 - (b) 内点法に基づく有効な数値解法が既に得られている。
 - (c) 虚軸上の零点条件が不要など、前提となる仮定を緩めることができる。
- が挙げられる。

しかし、いずれの理論に基づいても非常に高次の制御器が導出されることが多く、デジタル制御で実装する場合には多数のタップ（時間遅れ要素）数を必要とするので、実現にはトランスペュータやDSP等の高速計算処理能力に負うところが大きい。

(2) 適応制御法 (Filtered-x LMS, Neural Network ...)

制御目的達成のために制御対象にどのような制御装置を付加すればよいかについては、2つの解法、つまり設計と調整がある⁽⁹⁾。調整とは、制御現場で最も広く用いられている手法であり、与えられた制御対象に制御器を接続して、制御装置に含まれる可変パラメータを変更して制御目的に合致するまで試行錯誤を繰り返すものである。この場合、制御対象や制御目的が数式で表現されている必要はなく、操作者が担当する制御対象および制御器で達成可能な制御の質を把握していればよい。しかし、人間による調整ではPID制御に代表されるように3個程度のパラメータの調整が限度である。一方、設計とは、制御目的と制御対象を厳密に数学モデル化して制御理論に基づいて制御器を求めるものである。制御理論応用の成否は、実機と数学モデルとの間のモデル化誤差の吸収が不可欠である。モデル化誤差（の数学モデル）を考慮した制御系設計法として、前項で述べたロバスト制御理論が構築されているが、現実のモデル化誤差を吸収するにはまだ不十分である。実際には現場のエンジニアによる制御装置の調整という形でモデル化誤差を吸収しているのである⁽⁸⁾。結局、現代制御理論に基づくものでもそうでなくとも、制御理論の実際応用においては、調整作業が不可欠である⁽⁸⁾。調整を言い換えると最適値の探索であり、探索法には大きく分けて

- (a) 逐次探索（例；最急降下法）
- (b) 逆演算（例；最小2乗法）

がある。

適応制御とはこの設計と調整のギャップを埋める位置にある。つまり、適応制御とは調

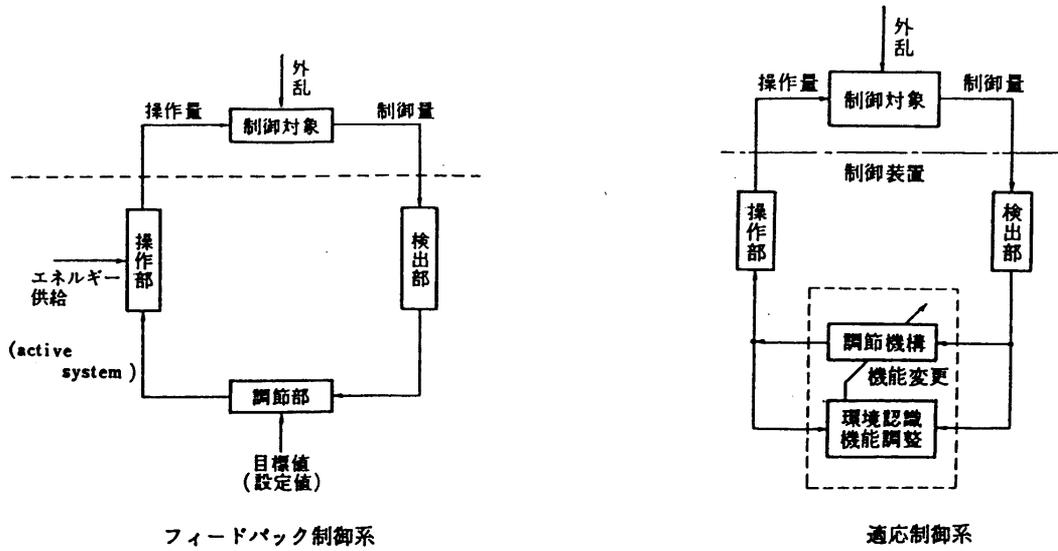
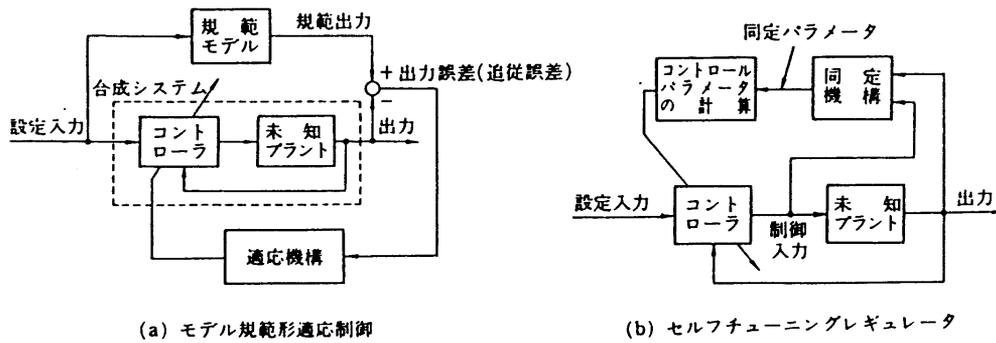


図 3.1 2-2 0 フィードバック制御と適応制御



典型的な適応制御の設計方式

図 3.1 2-2 1 MRAC と STR

整の自動化と定義できるとともに、現代制御理論などで行なわれる同定し自動設計する過程自体を自動化したものとも言える（図3.12-20）。前者の立場を直接法、後者を間接法と呼んでいる。直接法の代表がMRAC（Model Reference Adaptive Control →図3.12-21(a)）であり、間接法の代表はSTR（Self-Tuning Regulator →図3.12-21(b)）である。ただし、適応制御理論は以下のような未知プラントの理想条件

- (a) 線形で固定パラメータ
- (b) 雑音は加わらない
- (c) 次数および相対次数は既知
- (d) 高周波ゲインの符号は既知
- (e) 逆システムは安定
- (f) 制御入力の大きさに制限なし

の下で体系化されており、この理想条件は実システムに照らして非現実的な場合が多く、現在ではこれらの制限を緩和するロバスト適応制御が盛んに研究されている。外乱の有界性のみを仮定するものが狭い意味でのロバスト適応制御である。この他、FAN（ファジィ、AI、ニューラルネット）制御方式と呼ばれる学習型ファジィ制御やニューロコントロール（図3.12-22）などインテリジェント機能を取り込んだ少し異質な適応制御方式も現われてきた。

例を挙げると、最急降下法に基づくFiltered-x LMSアルゴリズムでは、誤差信号の2乗平均の和を最小化するようにデジタルFIR/IIRフィルタの重み係数を逐次更新することで実システムに追従する（図3.12-23）。ちなみに、ニューラルネットワークは、線形フィルタを2層→多層、各ユニットは1出力→多出力、信号は線形処理→シグモイド関数等の非線形処理…のように変更を加えたものであり、非線形システムに応用可能なように拡張・一般化した、いわば非線形適応フィルタと言える⁽¹⁰⁾が（図3.12-24）、1サイクル時間内の計算量はかなり増大する。システム同定用と制御器用の2つの重み可変デジタルフィルタを準備し、予め制御対象システムを同定する必要があるので、加振試験が行なえる制御対象・範囲に適用は限られる。また、適応制御ゆえ最適な制御状態が成就するには収束時間を要する。さらに、何を評価関数（制御指標）にとるかが、実際の制御における成否の決め手となる。デジタルフィルタがベースとなるため、当然、トランスピュータやDSPなどのデジタル技術が必須である。

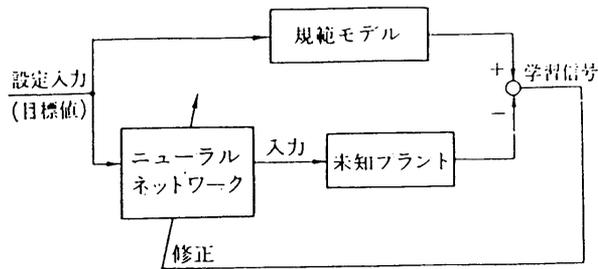
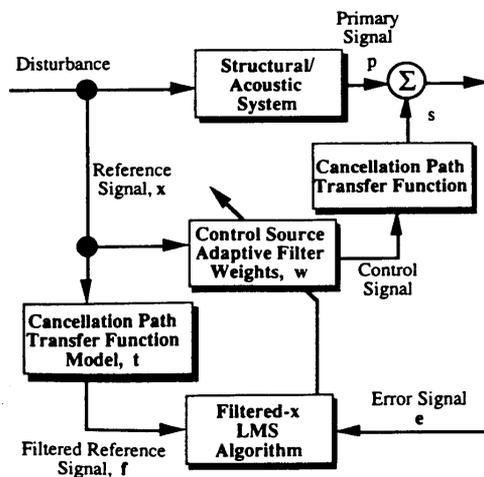


図 3.1 2-2 2 ニューラルネットワーク応用制御系



フィルタード xLMS アルゴリズム形
FIR フィルタ制御系構成図

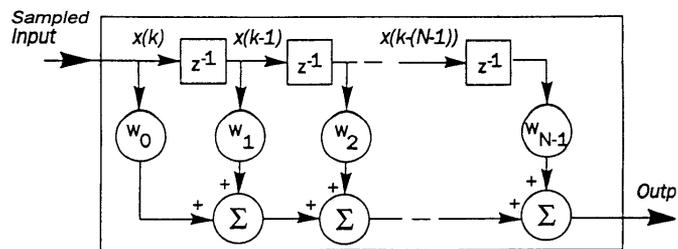


図 3.1 2-2 3 Filtered-x LMS アルゴリズムによる適応制御系

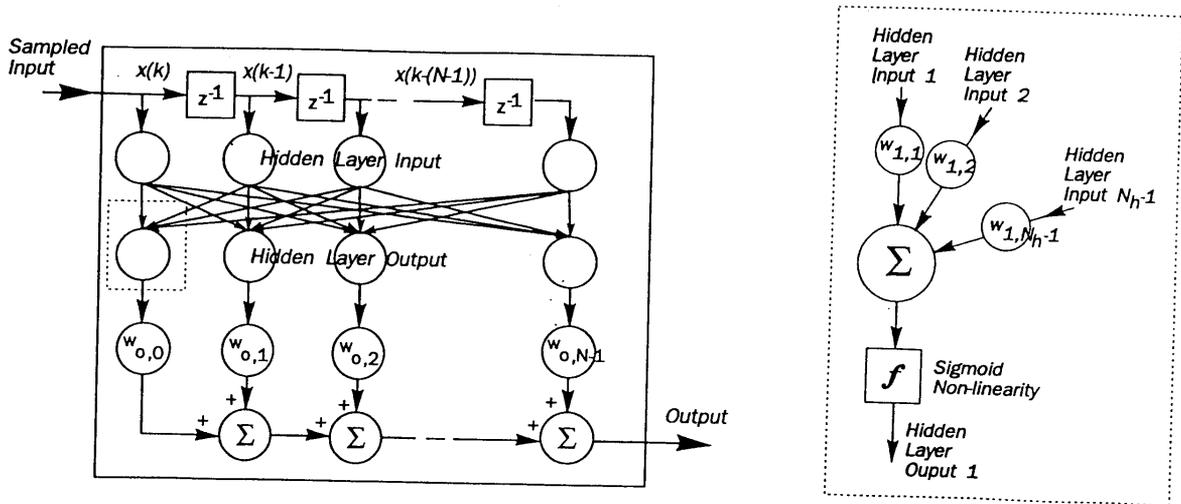


図 3.1 2-2 4 非線形適応フィルタとしてのニューラルネットワーク

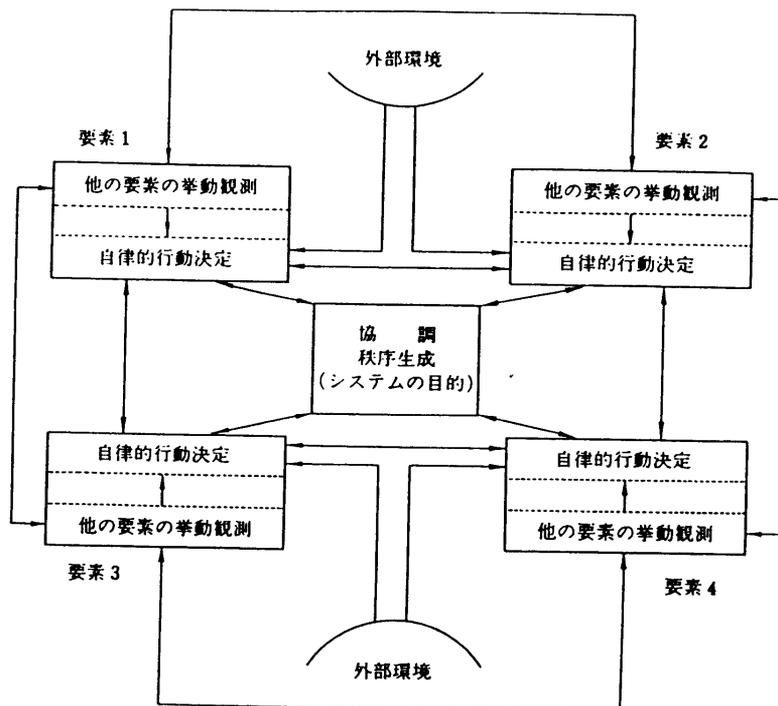


図 3.1 2-2 5 自律分散システム

3. 1 2. 5 分布定数系制御における今後の展開

(1) 分散制御・階層制御

スマート構造物は従来の工学システムとは異なり、自律分散システム(図3.12-25)としての性格を有する。自律分散システムとは、システムを構成する各要素(サブシステム)が個々に自律性を保ちつつ行動し、お互いに協調しながらシステム全体として秩序を生成する(自己組織)システムである。自律分散システムは多様性、信頼性、柔軟性、拡張性を特徴とし、多様な環境・目的に対して柔軟に対処でき、しかもシステムの一部の故障が全体の機能に与える影響を最小に押さえることが期待されている⁽¹¹⁾。

従来の工学システム

＝様々な特性を有する部品が結合関係を通じて所定の機能を生成し与えられた目的を達成する。

自律分散システム

＝自己完結的かつ均質な個が相互の干渉・協調を通じて秩序を形成し環境に適応する。

- ・個に完結性と冗長性を持たせる。
- ・個に互いの行動を認識する局所的相互作用を付与する。
- ・大局的な調整は(中枢によって一元的に行なうのではなく)「場」を設定することによって行なわれる(図3.12-26)。
- ・システム全体の目的達成につながる局所的な評価基準を与える。ただし、個がその評価基準を徹底追及(最適化)しないような抑制機能を付加する。

例えば、典型的な自律分散システムである人や動物は、多自由度・非線形なシステムを実に巧みに制御している(図3.12-27)。このような運動制御の特徴としては、

- (a) 自由度が多い
 - (b) 制御が非線形
 - (c) 要求が多様
 - (d) 様々な環境に適応
- などが挙げられる。

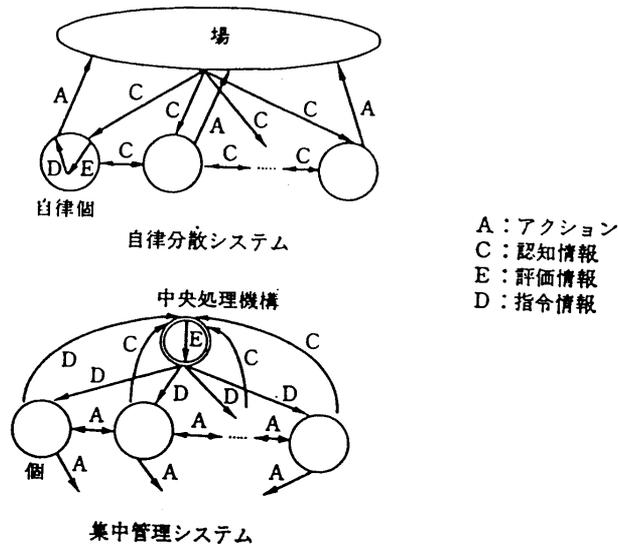


図 3.1 2-2 6 自律分散システムにおける「場」

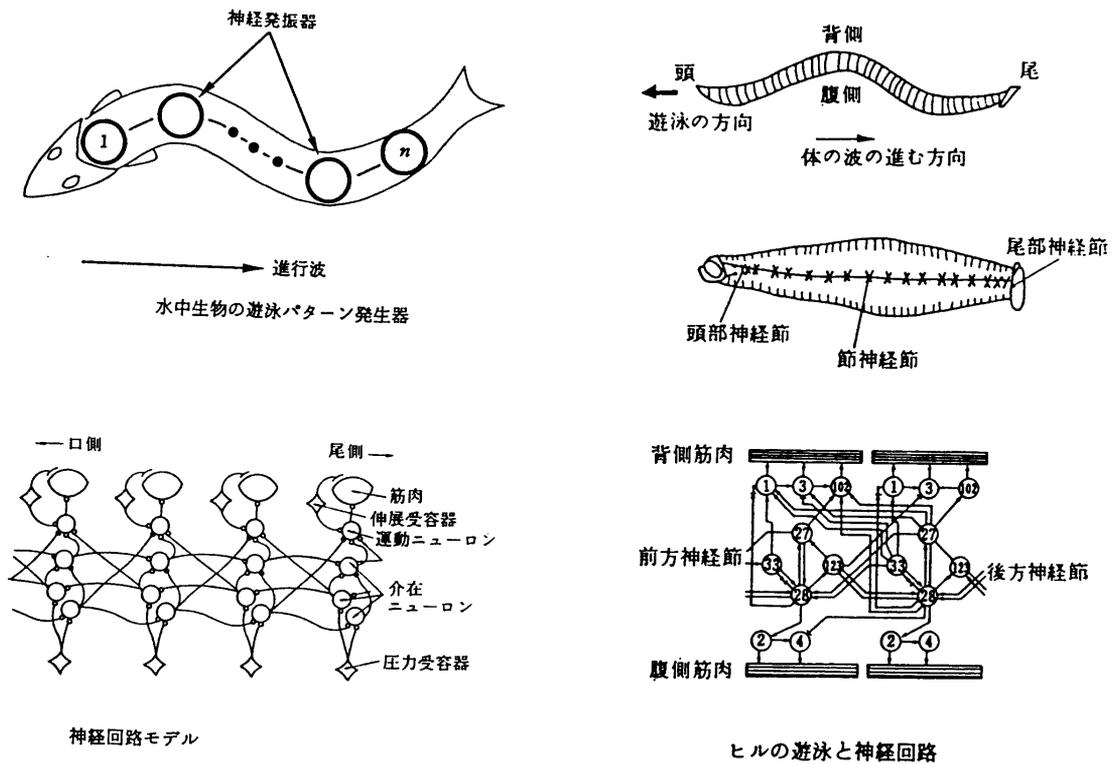


図 3.1 2-2 7 生物における自律分散制御系

従来の制御理論は古典／現代制御理論を問わずフィードバック制御法に基づいているが、このフィードバック制御とは、予測できない外乱の下で制御量を目標値に一致させることが目的であり、安定性の確保が重要課題となる。そのためには、動作点（定常値）周りでの系の線形近似モデルを用いた線形理論に基づく制御が基本となる。入出力が複数である大規模な多変数制御系であっても事情は変わらない。したがって、上記のような複雑で多様な運動制御を行ない、周辺環境に自在に適応するという問題を扱うことは不可能である。ここで求められている制御系は、線形フィードバック制御より一段レベルの高い制御である。

このような制御の実現にあたっては新しい制御概念の創出が必須で、「フィードバック制御から分散制御へ⁽¹²⁾」と銘打って、分散制御がその解答として期待されている⁽¹³⁾。この分散制御とは、システムの各点各点にセンサ・アクチュエータを配置し、その全てを中枢制御器で高性能制御するのではなく、個々の要素自身は低レベルの制御則しか備えていなくとも、各点が隣接する制御要素と状態／制御情報をやり取りしながら、全体として1つの目標を達成するように制御を実行する構成のもの（図3.12-28）であり、自律分散システムそのものである。したがって「自律」分散制御と呼ばれることもある。適応制御と似てはいるが、適応制御はあくまでも線形理論に依拠しており、フィードバック制御の域を超えるものではない。また、適応制御における「適応」と、生物などにおける構造をも変化させて内部状態を自己組織化させる、広い意味での「適応」とは意味が少し異なる。このように、設定や構造の変更まで含めた複数のフィードバック系からなるネットワークシステムの協調が自律分散システムの主眼であり、連続系の非線形力学における分岐理論または離散事象システム理論が有力な設計ツールになると思われるが、連続（分布系）と離散（集中系）の境界を明確にして使い分けることが重要である。GA(Genetic Algorithm) やAL(Artificial Life) など創発的計算手法などもこの分野に含められる。

また、階層制御（図3.12-29）は分散制御に似ている（事実、階層型（自律）分散制御とも呼ばれる）が、各階層での制御自体は低レベルのフィードバック制御から高レベルの判断まで、従来の理論に則った制御則（例えば、PID制御、現代制御理論、Fuzzy, AI, Neural Network...）の適用であるが、それら制御動作に「階層構造」を導入する点が新しい。制御理論というよりも分布定数系を意識した制御系構成手法として注目されている。G. N. Saridisらは、「自律分散システムの3つの階層⁽¹⁴⁾」として、知的制御システムを3つの階層、

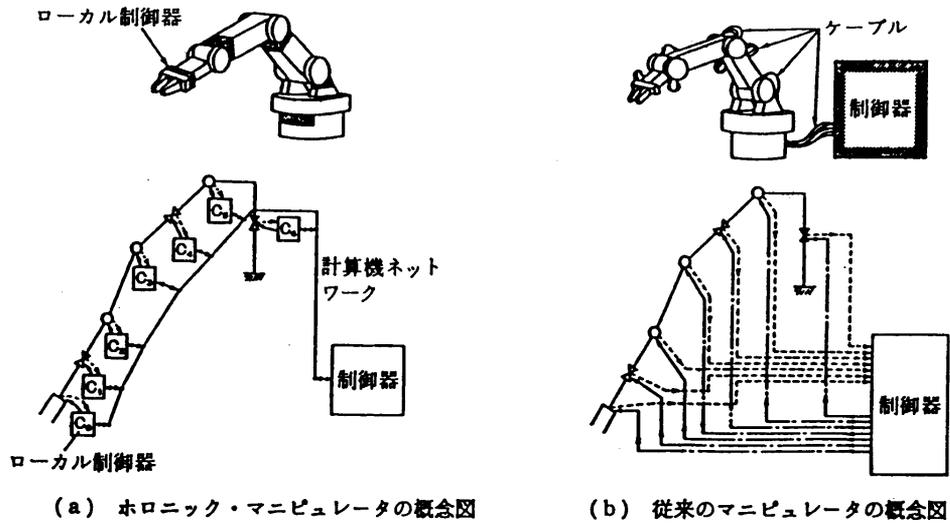


図 3.1 2-2 8 分散制御の例；マニピュレータ

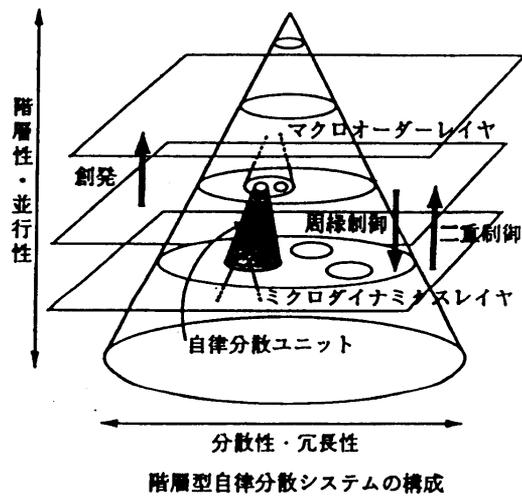


図 3.1 2-2 9 階層型（自律）分散制御

(a) Organization Level

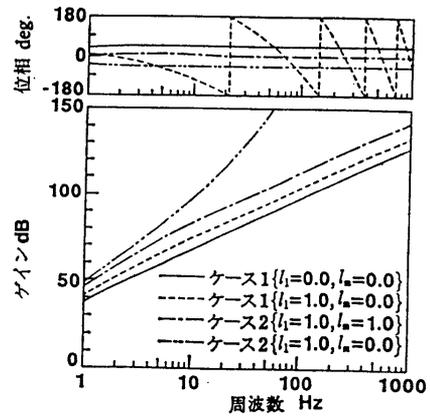
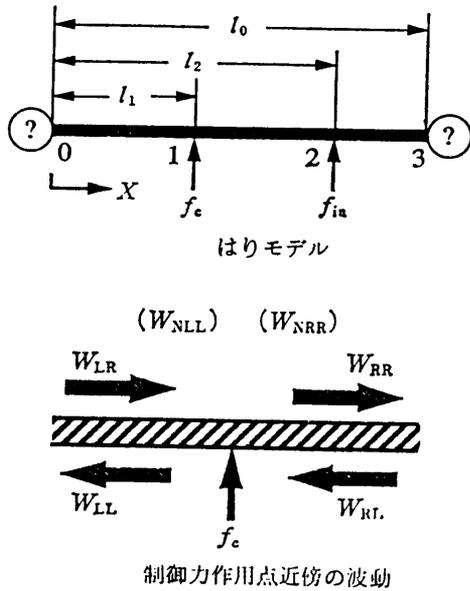
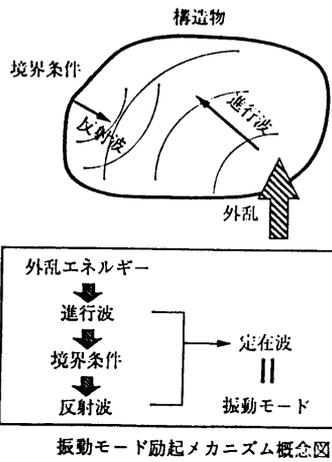
(b) Coordination Level

(c) Execution Level

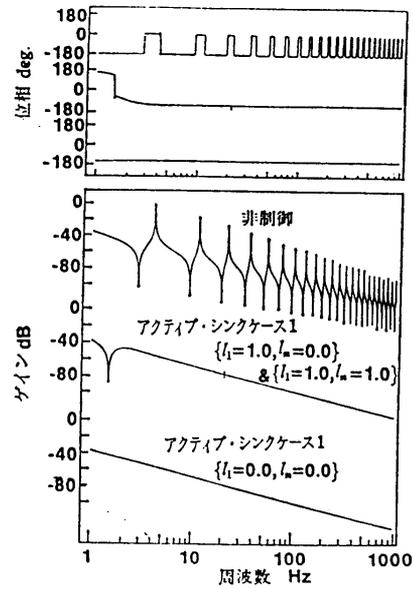
に分類し、それぞれの解析方法としてExecution Levelでは通常のフィードバック制御理論、Coordination LevelではORなどの最適化手法または離散事象システム理論、Organization LevelにはAIやニューラルネットワーク、さらにGAなどが有効ではないか、と述べている。

(2) 偏微分方程式を(連立常微分方程式系に直すことなく)直接扱える制御理論の構築
言い換えると、スマート建造物の構成要素たる分布定数系を(有限次元の)高次の集中定数系で近似するのではなく、連続体そのものとして取り扱える制御理論の構築である。具体的には、スマート建造物における分布的なセンサ・アクチュエータの実現にともなう、分布的な力や分布的なセンシングの取り扱いをどうするか等の問題に直面することになる。“(センサ)点”から“(アクチュエータ)点”への伝達関数ではなく、“面(線)”上のスカラ値(測定値)から“面(線)”上のスカラ値(制御量)への伝達関数に基づく制御系設計法の確立する必要があり、より抽象度が上がる。

建造物に励起する定在波を対象とするのではなく、その定在波を構成する進行/反射波を制御対象とする波動制御⁽¹⁵⁾はその有力候補のひとつと言える(図3.12-30)。特に、宇宙建造物などが超長大になり振動の伝搬時間が問題となる場合には、モード表現ではなく、波動としての取扱いが必要となってくる。この場合、必ず偏微分方程式が出发点となる。従来の制御理論では定在波、特に建造物固有の振動モードという定在波を制御対象とするので、可制御・可観測性の観点から、センサ点とアクチュエータ点のコロケーションの成立が制御系の安定性を保証する上で重要となるほか、アクチュエータ・センサの設置には最適な位置が存在する。したがって、どれほど巨大で複雑な建造物であっても、事前のモード解析による振動モード形状(節/腹)の抽出が必要となる。しかし、波動制御では振動情報自身が波に伴って移動するので、センサ点とアクチュエータ点間のコロケーションが成立しなくても制御系の安定性を損なわず制御効果が劣化しないなど、興味深い特色がある。ただし、波動制御法にはコーザリティの面で制御器のリアライゼーションに難点があり、現在は H_∞ 制御法などを用いて外乱周波数帯域を制限した制御器実現法が主流である。



フィードバック制御方式アクティブ・シンク成立条件



アクティブ・シンク (Case 1) を付加した場合の駆動点コンプライアンス ($l_n=2.77$)

図 3.1 2-3 0 波動制御の概念

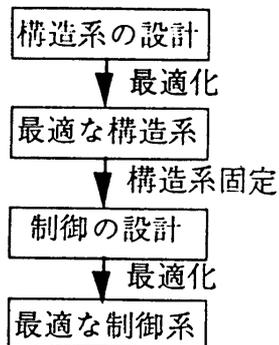


図 3.1 2-3 1 従来の構造系と制御系の設計手順

(3) 構造系と制御系の同時設計・同時最適化

動的荷重をうける、あるいは運動している構造物の設計に際しては、まず構造系の設計を行ない、構造設計だけでは所望の動特性あるいは運動が得られない場合、制御系を新たに設計して元の構造物に付加し、全体として所望のシステムを得るという方法が従来法である(図3.12-31)。しかし、構造設計単独あるいは制御系設計単独では所望の設計条件や制御性能を満足できない場合がある。

最適設計問題

与えられた設計条件を満足させる構造の中で、ある目的に最も適した構造を得るための設計パラメータを決定する問題(図3.12-32)。目的関数はスカラー値関数とは限らず、多目的最適設計問題の場合はベクトル値関数となり、ベクトル最適化問題とも呼ばれる。静的問題は数値計画法の手法を用いて解かれる。動的問題の解法としては、(a)モード解析法、(b)逐次積分法に大別される。

最適制御問題

現代制御理論における最適レギュレータ問題のように、系の制御対象の状態をある初期状態から所定の最終状態まで、与えられた評価関数を最小(あるいは最大)にする制御入力を決定する問題(図3.12-33)。

現在、構造技術者が最適に設計した構造系を所与のものとして制御技術者が制御系の設計を行なっている理由としては、構造系の周波数帯域と制御系の周波数帯域が離れていたことが挙げられる(図3.12-34(a))。しかし、大規模柔軟宇宙構造物などのように、構造系と制御系の周波数帯域が近接、あるいは柔軟ロボットアームのように重複する場合、構造系と制御系の個々のパラメータは互いに影響を与え合う(図3.12-34(b))。特に、軽量・柔軟性やコンパクト化が強く要求されるスマート構造物の設計には従来の設計法では対処しきれない⁽¹⁶⁾。したがって、構造系と制御系を連成・一体化させて統合系として設計を行なう必要がある。

構造系と制御系の同時最適化とは、従来のように、まず構造があって制御系を後づけで設計するのではなく、最初から制御系も構造強度要素の一部として位置づけ設計し最適化

<最適設計問題>
 k個の制約条件式：

$$g_j(\mathbf{b}) \geq 0 \quad ;(j=1,2,\dots,k) \quad (a)$$
 を満足する設計変数のなかで，目的関数

$$f(\mathbf{b}) \quad (b)$$
 を最小化（最大化）する設計変数

$$\mathbf{b} = \{b_1, b_2, \dots, b_n\}^T \quad (c)$$
 を見いだす問題

図 3.1 2-3 2 最適設計問題のフォーマット

<最適レギュレータ問題>
 状態方程式

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{Ax} + \mathbf{Bu} + \mathbf{Df} \quad (d)$$
 と初期条件 $\mathbf{x}(0) = \mathbf{x}_0$ に対し次の 2 次形式の評価関数：

$$J = \int_0^{t^F} \{ \mathbf{x}^T \mathbf{Q} \mathbf{x} + \mathbf{u}^T \mathbf{R} \mathbf{u} \} dt \quad (e)$$
 を最小にする \mathbf{u} を求める問題
 特に \mathbf{u} として状態フィードバック

$$\mathbf{u} = -\mathbf{Gx} \quad (f)$$
 が施されているならば，ゲインマトリクス \mathbf{G}
 を求める問題

図 3.1 2-3 3 最適レギュレータ問題のフォーマット

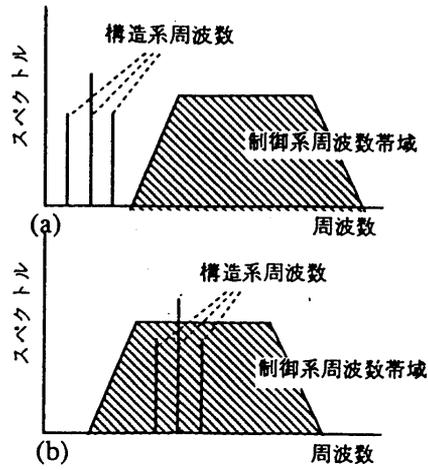


図 3.1 2-3 4 構造系と制御系の周波数帯域

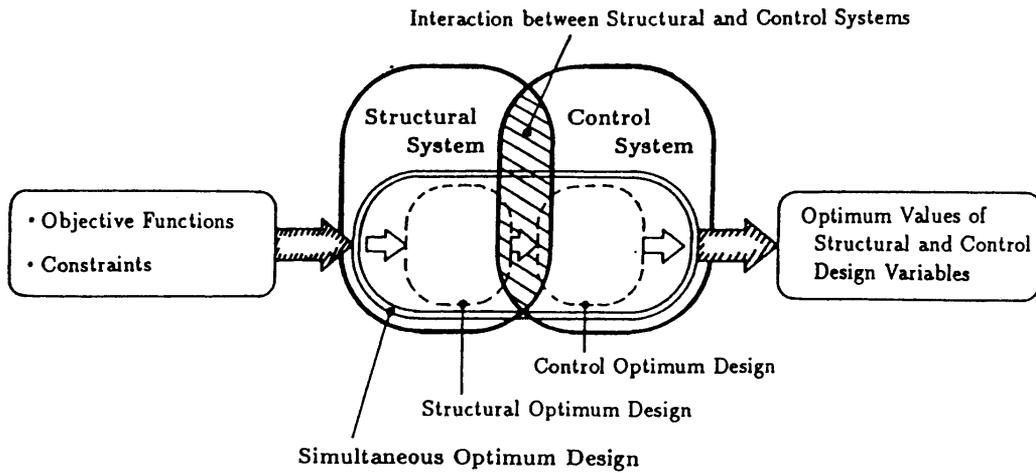


図 3.1 2-3 5 構造系と制御系の同時設計・同時最適化

も図ることを意味する（図3.12-35）。つまり、

(a) 構造系と制御系に関する設計変数を、

(b) 制約条件の下で、

(c) 同時最適化の評価（目的）関数を最小化する設計変数を求める。

ことである。同時最適化問題の解法としては、

解法I；構造系と制御系の最適化を交互に繰り返す手法。

解法II；構造系と制御系を1つの総合系として最適化する手法。

が考えられるが（図3.12-36）、現状では前者が主流である。

制約条件あるいは評価関数が設計変数の非線形関数である場合、最適化手法として非線形計画法を用いることになる。非線形計画法は降下法と直接探索法に分けられるが、両者とも設計変数が多いと最適解探索の過程で収束が困難になる。また、設計モデルの要素数を増やすと設計変数の数も増加し、大自由度の構造物への適用を困難にしている。さらに、評価関数が複数存在する多目的最適化の場合、それらの重み付き和を求めて評価関数をスカラー化することが通常行なわれるが、多峰性関数の出現など、収束性にとって好ましくない⁽¹⁷⁾。

結論的には⁽¹⁷⁾、

(a) 同時最適化の有効性が不明確。現状では同時に最適化した場合と個別に最適化した場合の違いがそれほど見られない。同時最適化する場合の方が、設計変数の数は増し、複数の制約条件の下で多変数の非線形計画問題を解くことになるわけであるから、計算量も増加し、収束性の面でも不利である。その不利を乗り越えるだけの有利な設計結果を与えなければ無意味。

(b) 構造物の有限要素モデルの要素毎の断面積などを設計変数に用いている場合、大自由度の構造物モデルの取扱いが困難。

と言われている。

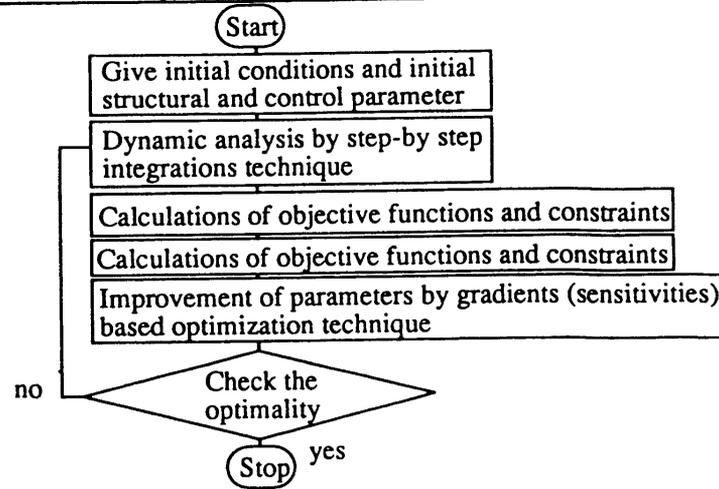
最近では、構造系と制御系の連成だけでなく、安定性・制御性能に関するロバスト性をも加味した研究が現われている。

3.12.6 おわりに

以上、スマート構造物の振動制御に関わる問題点を総括し、その解決に向けての理論的／現実的取組みについて概観した。比較的成功しているアプローチもあれば、現段階では

最適設計と最適制御の同時最適化問題

Design variables	Structural Parameters Cross Sectional Area, length, width, Thickness, Mass etc	Control Parameters Feedback gain Phase compensation Constant etc
Constraints	Side constraints of members Allowable stress Frequency Allowable displacement etc	
Objective function	Displacement of vibration Energy for control Structural weight etc	



同時最適化問題の最適化の流れ

図 3.1 2-3 6 同時設計・同時最適化の手順

壁に直面しているアプローチもあることがお分かり頂けたかと思う。いずれの（あるいは全ての？）アプローチが最終的にスマート構造物の振動／運動制御に対して有効であるか否かについて結論することは筆者の能力を超えるので差し控えたい。

従来の新素材開発は、機械構造物の強度設計や形状設計に関しては当然大きな影響を与えてきたが、機械構造物の制御に目を向けると、ダンピング材などパッシブな振動抑制に影響を及ぼすことはあっても、構造物のアクティブな振動／運動制御にまで影響を及ぼすことはなく、また先端的な制御理論が新たな材料開発を促すといった関係は成立していなかった。しかし、スマート構造物を実現する過程では、制御面での要請がセンサ／アクチュエータ用の材料開発面での目標を設定し、新素材の開発が制御法でのブレークスルーを産むといった螺旋状の上昇過程が予想される。おそらく逆もまた正しく、新素材開発が構造物の強度／形状設計部分に留まらず構造物の振動／運動制御法にまでインパクトを与え、またアドバンスな制御理論の構築が構造／機構／要素の変更に留まらず材料開発のモチベーションとなるような相互影響・発展なくしては、スマート構造物の実現はありえないと考えられる。材料系の研究者と構造物の振動／運動制御に携わる研究者の間の緊密な協力が必要な所以である。

文 献

- (1) 「特集 LSSと近未来制御」、計測と制御、Vol.26, No.10、(1987)、pp.827-908.
- (2) 「講義 集中と分布-[I]」、計測と制御、Vol.26, No.6、(1987)、pp.511-519.
- (3) 「講義 集中と分布-[II]」、計測と制御、Vol.26, No.8、(1987)、pp.697-704.
- (4) 「講義 集中と分布-[III]」、計測と制御、Vol.26, No.9、(1987)、pp.785-792.
- (5) 「講義 集中と分布-[IV]」、計測と制御、Vol.26, No.11、(1987)、pp.968-976.
- (6) 「講義 集中と分布-[V]」、計測と制御、Vol.26, No.12、(1987)、pp.1065-1073.
- (7) 日本機械学会編、「制御系設計ソフトウェア(CACSD)を用いた基礎から最先端の制御(I)」講習会資料、No.940-7、(1994).
- (8) 日本機械学会編、「制御系設計ソフトウェア(CACSD)を用いた基礎から最先端の制御II」講習会資料、No.940-78、(1994).
- (9) 「ミニ特集 適応制御の最近の動向」、計測と制御、Vol.29, No.8、(1990)、pp.695-740.
- (10) 田中ほか3名、機論、59-559, C(1993), p.700.
- (11) 「特集 自律分散システム」、計測と制御、Vol.29, No.10、(1990)、pp.877-952.
- (12) 「特集 自律分散システムの新たなる展開」、計測と制御、Vol.32, No.10、(1993)、pp.788-862.
- (13) 「特集 分散と協調」、計測と制御、Vol.26, No.1、(1987)、pp.1-83.
- (14) Wang, F. and Saridis, G. N., Automatica, 26-5(1990), pp.833-844.
- (15) 田中・菊島、機論、56-530, C(1990), p.2575.
- (16) 日本機械学会編、「動システムの設計と最適化に関する先端技術」講習会資料、No.930-3、(1993).
- (17) 「研究展望 機械構造物の構造系と制御系の同時最適設計に関する研究動向と今後の課題」、岩壺ほか2名、機論(C編)、Vol.59, No.559、(1993)、pp.631-637.

略語表

3. 1 2 スマート構造物の振動制御

LSS = Large Scale Structure ; 大規模構造物

DPS = Distributed Parameter System ; 分布定数システム

LPS = Lumped Parameter System ; 集中定数システム

MPS = Mixed Parameter System ; 混合パラメータシステム

PDE = Partial Differential Equation ; 偏微分方程式

ODE = Ordinary Differential Equation ; 常微分方程式

BC = Boundary Condition ; 境界条件

IC = Initial Condition ; 初期条件

MRAC = Model Reference Adaptive Control ; モデル規範型適応制御

STR = Self-Tuning Regulator ; 自己調整レギュレータ

FAN = Fuzzy, AI, Neural Network ; ファジィ理論・AI・(人工)神経回路網

AI = Artificial Intelligence ; 人工知能

GA = Genetic Algorithm ; 遺伝的アルゴリズム

AL = Artificial Life ; 人工生命

OR = Operation Research ; オペレーション・リサーチ

第 4 章

機能性素材の開発動向

- 4. 1 光ファイバ 西村 昭 265
 - 4. 1. 1 光ファイバの調査
 - 4. 1. 2 光ファイバセンサ
 - 4. 1. 3 まとめ

- 4. 2 圧電材料 谷 順二 309
 - 4. 2. 1 研究開発動向
 - 4. 2. 2 積層圧電アクチュエータの新しい構造
 - 4. 2. 3 積層圧電アクチュエータの変位置
 - 4. 2. 4 その他のアクチュエータ特性
 - 4. 2. 5 圧電アクチュエータの応用動向
 - 4. 2. 6 線形バイモルフ圧電アクチュエータ
 - 4. 2. 7 光歪アクチュエータ
 - 4. 2. 8 形状記憶圧電材料
 - 4. 2. 9 圧電捻りアクチュエータ
 - 4. 2. 10 むすび

- 4. 3 超磁歪材料 黒田 雅治 318
 - 4. 3. 1 研究開発動向
 - 4. 3. 2 デバイスへの応用
 - 4. 3. 3 研究開発課題
 - 4. 3. 4 新規材料開発の可能性

- 4. 4 形状記憶合金 加藤 隆造 343
 - 4. 4. 1 はじめに
 - 4. 4. 2 形状記憶効果
 - 4. 4. 3 NiTi合金の製造法
 - 4. 4. 4 変態温度と動作特性
 - 4. 4. 5 NiTi系形状記憶合金の使用法
 - 4. 4. 6 今後の開発動向

- 4. 5 電気粘性流体及び磁性流体の現状と可能性 吉田 均 351
 - 4. 5. 1 はじめに
 - 4. 5. 2 電気粘性流体
 - 4. 5. 3 磁性流体
 - 4. 5. 4 まとめ

4. 6	高分子系機能性材料	吉田 均	358
4. 6. 1	はじめに		
4. 6. 2	形状記憶高分子		
4. 6. 3	導電性高分子		
4. 6. 4	圧電性高分子及び圧電性塗料		
4. 6. 5	まとめ		
4. 7	無機系材料（セラミック繊維）とスマート化	山村 武民	368
4. 7. 1	セラミック繊維の種類		
4. 7. 2	現状の開発動向		
4. 7. 3	今後の研究課題		

4. 1 光ファイバ

スマートコンポジットにおいて、光ファイバは、状態変化の知覚と、その情報を脳（CPU）に伝達する神経の役割を司る。ここでは「光ファイバ」（以下OFと略）、および「光ファイバセンサ」（以下OFセンサと略）をキーワードに、それらの動向・問題点を調べた。

既にこれまでも同様な調査^{1) 2)}があるので、できるだけ新しい情報の収集に留意し、ここでは、94年10月、英国グラスゴーにて開催された10th International Conference on Optical Fiber Sensors を中心に調べることにした。同会議は、第1回が83年ロンドンに始まり、第11回は96年札幌で開催される予定である。今回の第10回を概観すると、

- ①国別発表 : 米45件(31%)、英45件(31%)、その他欧州38件(25%)、
日12件(5%)、その他8件(6%)、計148件
- ②機関別発表 : 民間23.3%、大学59.6%、国研等17.1%(軍関係も多い。米
Naval Research Lab. は19件)
- ③内容の傾向 : Bragg gratingに関するものが増加している。分布型は依然研究が盛んであるが、OTDRよりも干渉型、波長分離型にシフトする傾向がある。

4. 1. 1 光ファイバの調査

OFについては多くの成書があるので、ここでは、本調査の中心課題であるOFセンサの調査の前段として、OFをレビューしておく。なお、本調査全体を通して見ると、スマートコンポジットに携わる研究者が真に望むOFを得たい場合には、自作も必要であり、事実、そのような研究例もあった。

(1) 光ファイバの特長

図4. 1-1³⁾に示すように、OFは屈折率 n の異なるコアとクラッドからなり($n_{コア} > n_{クラッド}$)、情報媒体の光はコア内を全反射して進む。クラッドの外にはOFを保護するジャケットが設けられることがある。

OFの特長は以下のように整理され、通常、OFをセンサとして用いる場合には、①、②は殆ど意識しなくてもよいとされる。

- ① 広帯域性（可能性としては数十THz（=数万GHz）に及ぶ）
- ② 低損失性（最低 0.154dB/km）
- ③ 細径（ $\sim 125\mu\text{m}$ ）
- ④ 軽量（ $\sim 30\text{g/km}$ ）
- ⑤ 可とう性（最小曲率半径 2mm）
- ⑥ 機械的強度（7kg程度の引張荷重に耐える）
- ⑦ 相互干渉性（いわゆる「漏話」現象がない）
- ⑧ 無誘導性（雷、電力線の電流サージ、あるいは近隣の線路などからの電磁誘導を受けにくい（事実上まったく受けない））
- ⑨ 防爆性（絶対に火花を出さないことに由来する「本質安全性」を持つ）
- ⑩ 高い絶縁耐力（例えば20cmで10万ボルトに耐える）
- ⑪ 高い耐腐食性（化学溶媒、油、水に強い）

（2）光ファイバの種類

① シングルモード光ファイバとマルチモード光ファイバ

図4. 1 - 2³⁾に示すように、OFはコアを伝搬する光のモード数で分けられる。

シングルモードOFはコア径が小さく（ $< 10\mu\text{m}$ ）、帯域幅が広く、通信用は石英のシングルモードOFである。OFセンサ用としては、コアが細いので接続がしにくく、光源との結合効率の向上をはかることが重要である。

マルチモードOFはコア径が大きい（通常 $50\mu\text{m}$ 程度）。強度を情報媒体とするのに適する。コアのn分布にステップ形とグレーデッド形があり、グレーデッド形はn分布が軸対称な2乗形をしており、各モードの光の伝搬定数は同じになる特長がある。

② 複屈折光ファイバ

OF内にnの偏りを生じさせ、偏波間の伝搬定数を変えたOFである。n分布が軸に関して非対称な屈折率分布型と、軸に非対称な応力を発生させてnに偏りを生じさせた応力型の2種類がある。図4. 1 - 3³⁾に代表的複屈折OFの断面を示す。

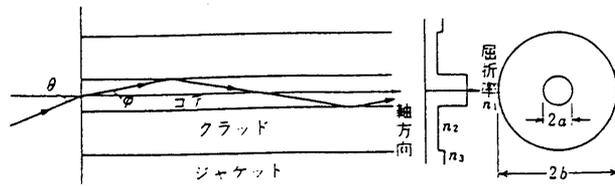


図4.1-1 光ファイバの基本構造

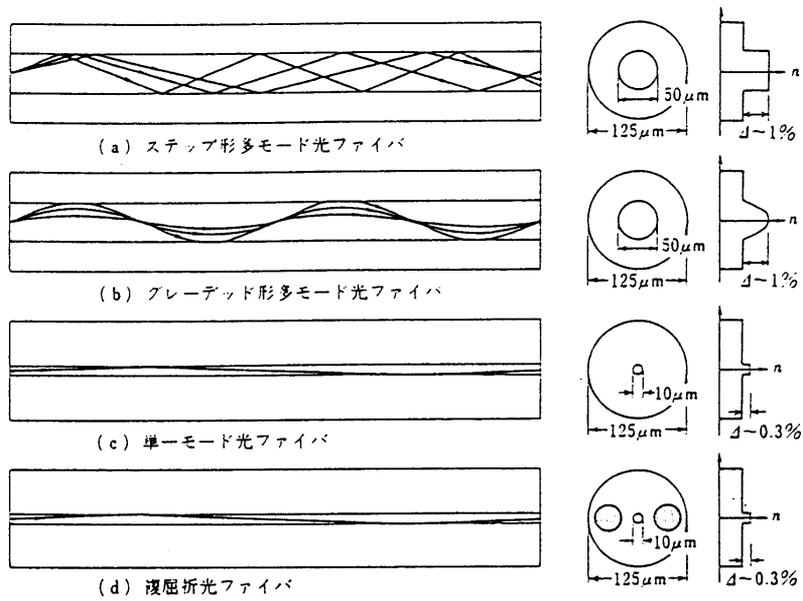
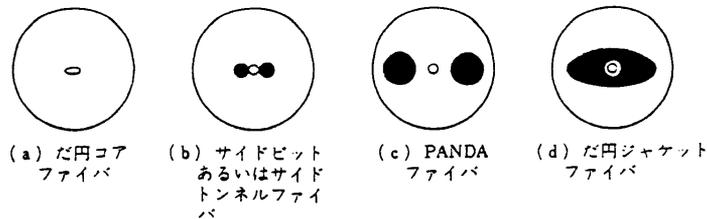


図4.1-2 光ファイバの種類



(a)は Yeh ほか⁴⁾, (b)は大越ほか⁵⁾, (c)は Hosaka ほか⁷⁾, (d)は Katsuyama ほか⁸⁾による。

図4.1-3 複屈折ファイバの種類

③光ファイバの材質

石英ファイバは、コア・クラッドが石英 (SiO_2) であり、通常、コアに Ge がドーピングされている。長距離通信用であり、損失は OF センサの中で最も小さく、 0.2dB/km ($1.3\mu\text{m}$)、 0.154dB/km ($1.55\mu\text{m}$) である。

多成分ガラスファイバは、比較的低融点 ($\sim 1400^\circ\text{C}$) であり、大口径コアが作り易い。高開口数 ($\text{NA} \sim 0.5$) が特長であり、損失は $\sim 4\text{dB/km}$ ($0.8\mu\text{m}$ 帯)、 $5\sim 10\text{dB/km}$ ($1\mu\text{m}$ 帯) である。

プラスチックファイバは、コアがポリメチルメタクリレート (PMMA)、あるいは重水素化 PMMA、クラッドがフッ素系ポリマーである。高開口数 ($\text{NA} \sim 0.5$) であるが、損失は $\sim 30\text{dB/km}$ ($0.8\mu\text{m}$ 帯) と大きく、短距離通信用に向く。

プラスチッククラッドファイバは、コアが石英、クラッドがフッ素系ポリマーである。上記プラスチックファイバ同様、短距離通信用に向く。開口数 $\text{NA} \sim 0.4$ であり、損失は $\sim 5\text{dB/km}$ ($0.8\mu\text{m}$ 帯) である。

赤外光用 OF として、フッ化物ガラス OF ($\text{ZrF}_4\text{-BaF}_2\text{-LaF}_3\text{-YF}_3\text{-AlF}_3\text{-LiF}$ コア、損失 3.8dB/km ($2.55\mu\text{m}$))、カルコゲナイドガラス OF (AsS コア、 $10.6\mu\text{m}/\text{CO}_2$ レーザ、および $5.3\mu\text{m}/\text{CO}$ レーザ)、ハロゲン化物結晶 OF (CsBr 、 TlBr コア) がある。

耐熱性 OF センサに関する研究では、サファイアのロッドを OF として用いている例がある。通信用 OF では水の遮断をはかるため、カーボンのハーメチックコートがなされるが、OF センサを FRP 等に埋め込む場合にはポリイミド (PI) など、また、セラミック等高温物に取り付ける場合には金 (Au) などが OF にコーティングされ、周囲との接着や、外乱に対する保護とされる。

以上、OF を要約したが、OF のセンサ化に関しては、種々の OF 応用素子や、また、光回路技術に関する知見が必要であり、成書を参照して頂きたい³⁾。

4. 1. 2 光ファイバセンサ

OF同様に、まずOFセンサについても概観しておく。

(1) 光ファイバセンサの種類

OFを伝送路として用いるものと、OF自身をセンサとするものがある。図4. 1-4³⁾にOFを伝送路として用いる場合のセンサの基本構成を示す。また、図4. 1-5³⁾にOF自身をセンサとする場合の主な方式分類を、また、図4. 1-6³⁾に高感度を特長とする干渉型OFセンサの構成方法を示す。

ここでの調査は、上記OFセンサをスマートコンポジットに適用した、あるいは適用しようとして検討している最近の研究例であり、以下のように分類して報告する。但し、分類は難しく、ある程度恣意的になっているかもしれない。

- ① Bragg grating利用のOFセンサ
- ② 複屈折ファイバ利用のOFセンサ
- ③ 多点型・分布型のOFセンサ
- ④ ニューラルネット利用のOFセンサ
- ⑤ 温度測定、および温度・歪み同時測定のOFセンサ
- ⑥ ダメージ検出のOFセンサ
- ⑦ 各種OFセンサ
- ⑧ OFセンサの取り付け
- ⑨ OFセンサの実使用例
- ⑩ OFセンサのビジネス状況

① Bragg grating利用のOFセンサ

Bragg grating 利用のOFセンサは、歪みにより生じた Bragg grating の回折変化を、Bragg波長のシフトとして検出するものである。最近は、Bragg gratingを利用した高感度の干渉型OFセンサの研究例が増えていると思われる。

W.W.Moreyらは、長期間高温で使用する際のBragg gratingの基本的問題点について検討

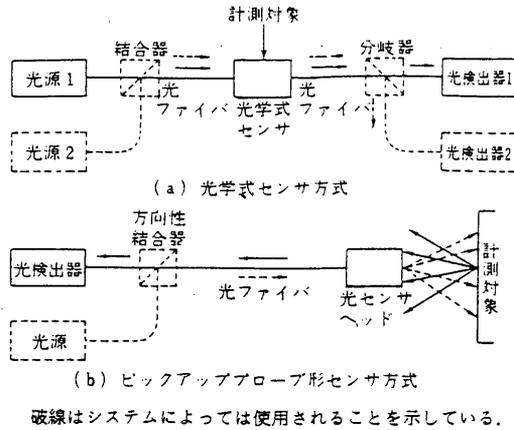


図4.1-4 光ファイバセンサの基本構造図

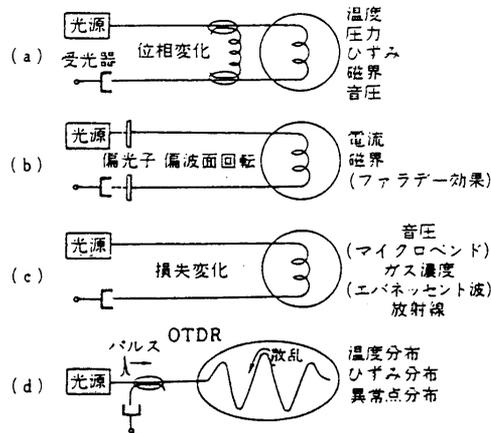


図4.1-5 光ファイバをセンサとして用いる手法の主な方式分類

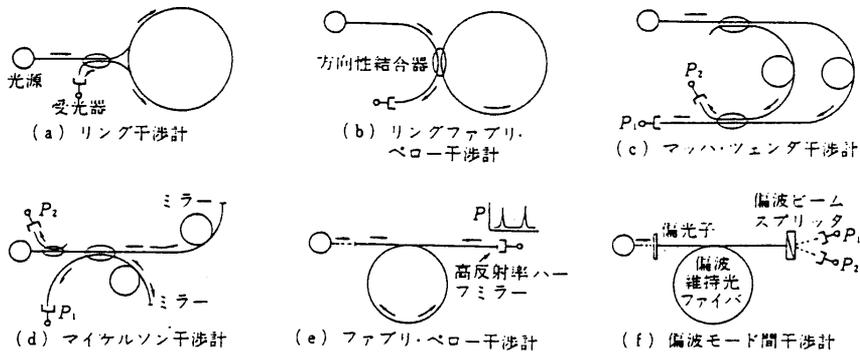


図4.1-6 主な光ファイバ干渉計の構成方法

している⁴⁾。

まず、photoinduced index Δn は、高温に曝すと初期低下があり、十分アニールしてから使うべきとしている。また、 Δn は、値としては大きい方が耐熱性があり、水素負荷した Bragg grating は650°Cでも使えるとしている(図4. 1-7)。また、ドープした Ge が拡散すると Δn がなまり、Bragg波長はシフトするが、その変化 $\Delta\lambda$ が0.01nmとなるのは、10百万年/370°C、2.8年/650°C、100時間/800°Cと推定している。応力に関しては、650°Cの雰囲気中で30kpsiかけておくと、一夜でBragg波長が変化したと報告している。結論として、350~400°Cで使うのはあまり問題はないが、650°Cで使用する場合には、応力によるクリープ、またGeの拡散が問題であるとし、 Δn の大きい($\sim 10^{-3}$) Bragg gratingを十分にアニールして使うのがよいとしている。

K. Kalli らは、Bragg gratingを1個使い、gratingの1次・2次の回折を利用して温度と歪みの同時測定を検討している⁵⁾。

実験では、主反射光の波長が1561nmのgratingに対し、789nm LDを温度でチューニングし、2次反射光の波長の光のみを入れる原理的検討を行っている(図4. 1-8)。なお、その2次反射光波長の光の反射率は0.1%であった。

歪み変化 $\Delta\varepsilon$ と温度変化 ΔT は、Bragg波長のシフト $\Delta\lambda$ と略リニアな関係($\Delta\lambda\varepsilon = K\varepsilon\Delta\varepsilon$ 、 $\Delta\lambda T = KT\Delta T$)があり、下式の係数行列(K)を予め求めておけば、 $\Delta\lambda_1$ (主反射光波長シフト)、 $\Delta\lambda_2$ (2次反射光波長シフト)より $\Delta\varepsilon$ 、 ΔT が同時に測定できる。問題は、gratingの捻りを防ぐこと、LDをチューニングして最強の反射光を得ることなどとしている。

$$\begin{bmatrix} \Delta\lambda_1 \\ \Delta\lambda_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K\varepsilon_1 & KT_1 \\ K\varepsilon_2 & KT_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta\varepsilon \\ \Delta T \end{bmatrix}$$

G. P. Brady らは、Bragg gratingを複数直列配置して各プローブとし、反射光を受けるレーザー側にも各プローブのgratingとペアを組むBragg gratingを直列配置し、信号を多重化する多点型OFセンサを検討している(図4. 1-9)⁶⁾。

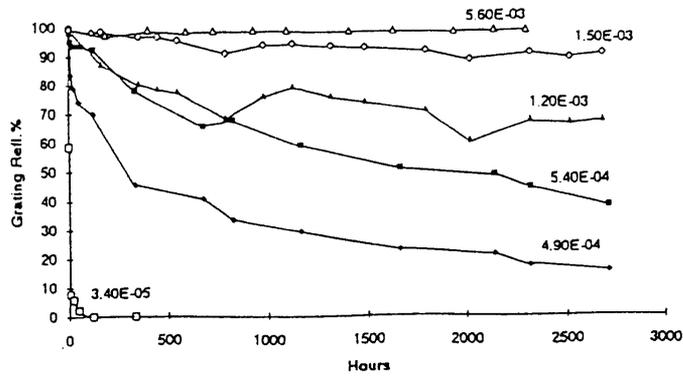


図4.1-7 Bragg gratingの反射率の変化 (650°C雰囲気
表記は Δn 初期値。値の大きい3種類は水素負荷grating)

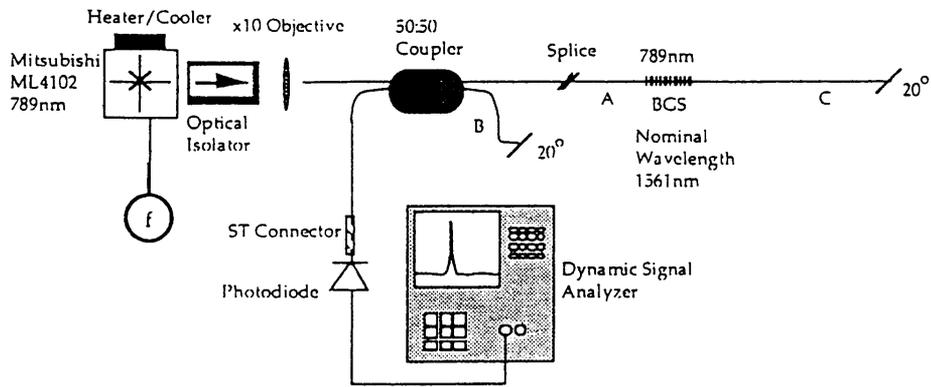


図4.1-8 実験系スキーム

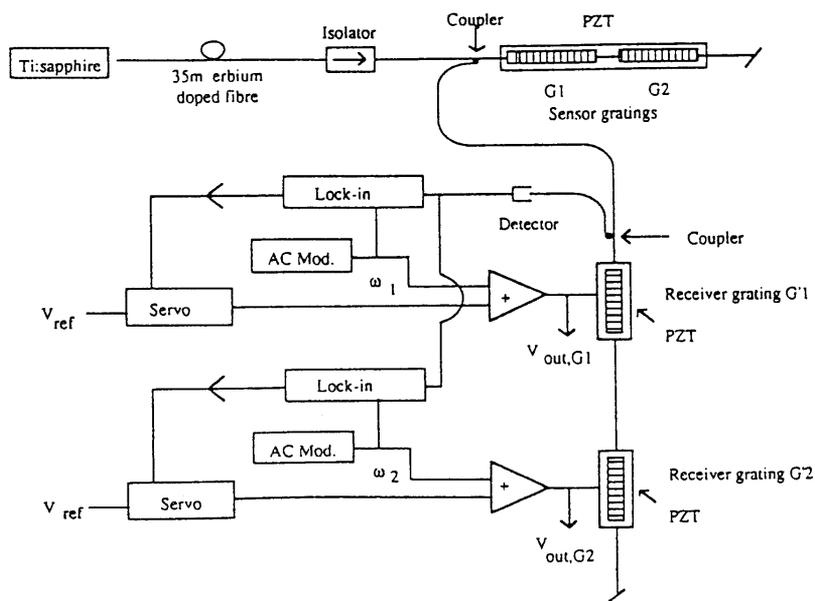


図4.1-9 実験系スキーム

各ペアには別々の波長を割り付け、P Z Tにてレシーバ側の grating に歪みをかけることにより、プローブの grating に生じた位相変化をキャンセルし、そのキャンセル量から温度、あるいは歪みを測定する。実験は二つのペアで行っており、誤差は $2.8\mu\epsilon$ 、あるいは 0.5°C であった。配置できるペアの数は、測定する歪み、あるいは温度の範囲に依存する。実験では、位相変化の代わりに波長シフトを用いると、 1.15nm の波長シフトが、Bragg gratingにかかる $1\text{m}\epsilon$ の歪みに相当したので、 $1\text{m}\epsilon$ オーダーの歪みを多点測定する場合には、バンド幅 22nm の光源を用いれば、19ペアが配置できる。また、温度によるシフトは $1.3\times 10^{-2}\text{nm}/^{\circ}\text{C}$ であったので、10ペアを配置するのであれば、 170°C の範囲が測定できることになる。

Bragg gratingセンサを、圧縮コンクリート桁のCFRP緊張材の歪みのモニタリングに使うことを検討した例があり、A.T.Alavieらは、Cファイバ/PEEKのコンポジットの緊張材に Bragg grating を貼り付け、白色光源を用いて波長シフトを検出し、コンポジットに発生する歪みを測定する検討を行っている⁷⁾。

Bragg gratingセンサの測定範囲は $250\sim 8000\mu\epsilon$ であり、それ以上の歪みには耐えなかったが、それはBragg gratingセンサ自体によるものではなく、測定系の製作上の問題によるとしている。また、 $0\sim -2000\mu\epsilon$ の繰り返し歪みを320,000回以上与えて、疲労特性を調べたところ、コンポジットのクリープに起因する中心波長の永久シフトが見られた。実際にカルガリ市の道路橋にCFRP圧縮桁を使うに際して、Bragg gratingの取り付け・コンクリート打ち込み前後のセンサ特性を調べているが、問題なかったとしている。しかしまた、OF表面のマイクロクラックの防止をはかることや、CFRP緊張材はその製造段階からモニタリングできるようにすることが望ましいとも述べている。

② 複屈折ファイバ利用のOFセンサ

複屈折OFは高感度な干渉型OFセンサが組める。

S.A.Egorovらは複屈折OFを用いて、二つの光路を設けた干渉型センサと同様な測定方法を検討している⁸⁾。

複屈折OF内の伝搬定数の異なる二つのモードを利用し、両者の光路長の差(D)の変化から温度、あるいは歪みを測定するもので、さらにDから、温度、あるいは歪みの作用

する位置をも検出するものである。実験では、入射光は二つのファイバ軸に45°傾いた直線偏光とし、出射光は同じく45°傾いたポーラライザで2モードの光をミックスして取り出している(図4. 1-10)。複屈折OFにはPANDAファイバ(ビート長6mm)、だ円コアファイバ(ビート長10mm)の2種類を検討し、micro optic grating spectrometerで信号光の干渉パターンをとっている。光源は中央波長0.85μmのLEDである。検討したDの温度係数($\Delta D/L \Delta T$)、歪み係数($\Delta D/\Delta L$)は各々、

PANDA	温度係数	$0.71 \mu\text{m}/^\circ\text{C m}$	歪み係数	$5.5 \times 10^{-3} \mu\text{m}/\mu\text{m}$
だ円コア	温度係数	$0.09 \mu\text{m}/^\circ\text{C m}$	歪み係数	$5 \times 10^{-3} \mu\text{m}/\mu\text{m}$

であった。また、だ円コアOF(150cm長)における作用点の位置とDの関係も求めている(図4. 1-11)。この測定方法は、時間・空間・波長の各分割により多重化が可能であり、2本のOFセンサを使い、その検討も行っている。

H. Giovanniniらは、複屈折OFを用いて疑似分布型歪みセンサを検討している⁹⁾。

光源には白色光源、レシーバにはgratingを用い、センサである複屈折OFから出てくる干渉光はgratingにて回折させ、フォトダイオードアレイ上に干渉パターンを結ばせる(図4. 1-12)。各複屈折OFに生じる歪みは、光路長の差、すなわち位相変化としてアレイ上に並列的に検出する。実験では、Cファイバ/エポキシのコンポジットに複屈折OFを埋め込み、偏光モードカプラで区切った三つのプローブ部として動作を確認している(図4. 1-13)。一つのレシーバで並列検出できるのが特長である。

H. Shanglianらは、複屈折OFに外力が作用するときのモードカップリングを利用して、外力の大きさと位置を検出する分布型OFセンサを検討している¹⁰⁾。

位相変調と光路長を変えられるマイケルソン干渉計をレシーバに使用しており、paperでは解析式の導出から始めている。今、X軸方向の直線偏光を複屈折OFに導波しているとき、外力F(作用長d、角度φ)が作用すると、Y軸方向の偏光パワーPyが生じる(図4. 1-14)。Pyの全パワーPoに対する比 h^2 はF、d、φの関数となり、 h^2 の測定からFの大きさがわかる。一方、外力F₁~F_nが作用するとき、干渉光は図4. 1-15に示すマイケルソン干渉計のレシーバに導入される。この干渉計では、ハーフミラーMHで

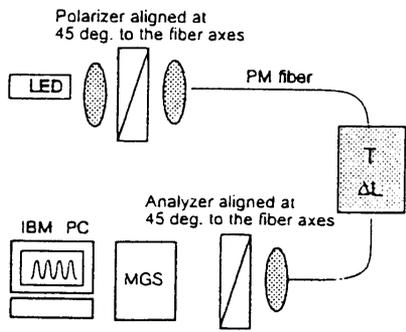


図4.1-10 実験系スキーム

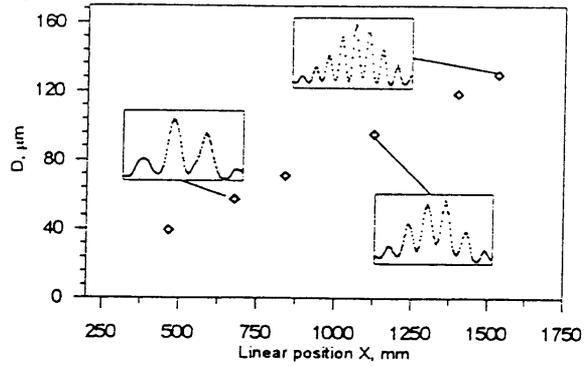
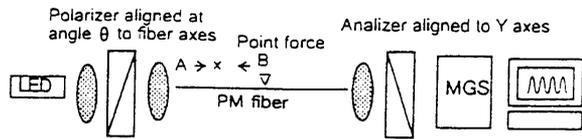


図4.1-11 力の作用点の位置とDの関係

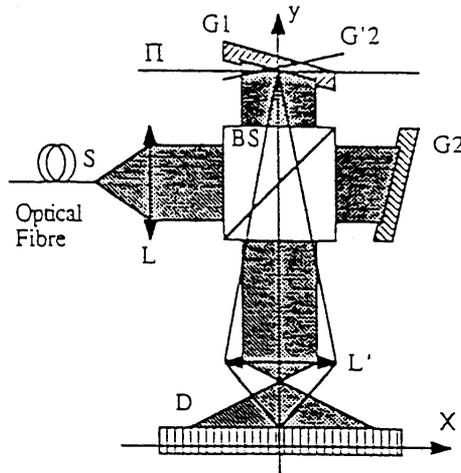
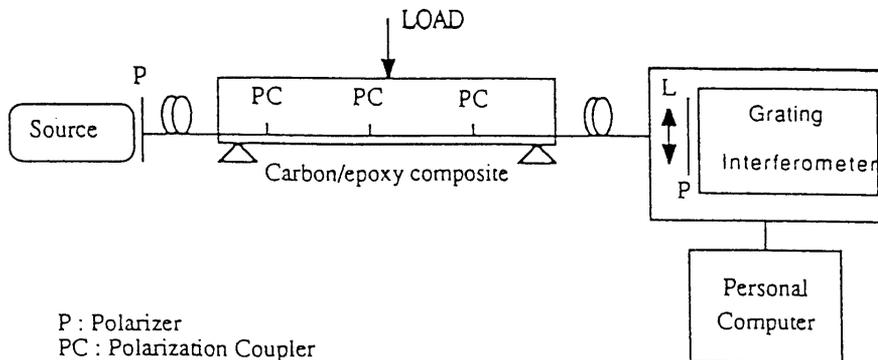


図4.1-12 回折gratingとフォトダイオードアレイを用いたレーザー



P: Polarizer
PC: Polarization Coupler

図4.1-13 実験系スキーム

分岐された一方の光は、振動 f をかけたミラー M_1 で変調して反射される。また、もう一方の光は、ミラー M_2 の位置 L を変えることにより、その光路長がスキャンされる。検出される干渉光の強さは、複屈折 OF の X 軸・Y 軸に 45° 傾いたアナライザで両モードの光が合わせられて測定される。複屈折 OF 方向の位置 Z_i に作用する外力を $F_i(Z_i)$ とすると、 Z_i は、 L をスキャンして X・Y 両モードのパワーの伝搬の遅れをキャンセルしてやれば、 Z_i が L_i に比例する関係から求まる。また、 h^2 から F_i の大きさもわかる。実験では光源に 850 nm LD、複屈折 OF に bow-tie high birefringence ファイバ (50 μ m) を用い、空間分解能 0.15 m / 50 m、力の検出限界 0.01 kg を得ている。

③ 多点型・分布型の OF センサ

このタイプの OF センサの研究は依然活発であり、この項では grating、Absolute Extrinsic Fabry-Perot Interferometer (AEFPI) を組み込んだ多点型、ブリルアン散乱・ラマン散乱を利用した改良 OTDR (Optical Time Domain Reflectometry) の研究例をピックアップする。

V. Bhatia らは、まず、外部ファブリ・ペロー干渉計 (EFPI)、キャリブレーション不要な絶対外部ファブリ・ペロー干渉計 (AEFPI) の原理を解説し、レシーバ側に設けた 1 個の EFPI プロブによってパスマッチングをとることにより、複数のプロブを多点化し、信号を多重化する測定方法を検討している¹¹⁾。

まず AEFPI について実験を行い、検出限界は、歪みでは $100 \mu \varepsilon$ 、温度では 2°C をみている (図 4. 1-16、-17)。多重化する測定系は、AEFPI 同様、白色光源を用い、複数の直列に配置する EFPI プロブは、各々キャビティギャップ d を変えておく。レシーバ側には、測定部の EFPI プロブからの干渉光信号とパスマッチングをとる 1 個の参照 EFPI プロブを設けておく (図 4. 1-18)。測定は、測定部の各 EFPI プロブの d の全範囲をスキャンすることによって強い干渉光を検出し、歪み、温度によって各 EFPI プロブに生じる変位を求めて行う。本測定系の用途としてはコンクリートの歪み測定を考えているとしている。

K. H. Wanser らは、プロブとして、周期を変えたマルチモードファイバ Bragg grating (MMFBG) と OF センサの組合せを直列配置し、レシーバ側に設けた 1 個の grating

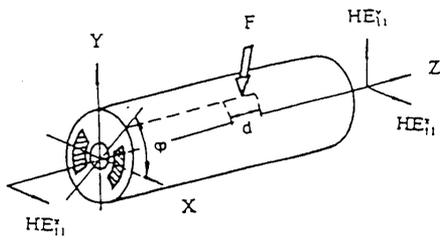


図4.1-14 外力Fが作用する複屈折ファイバ

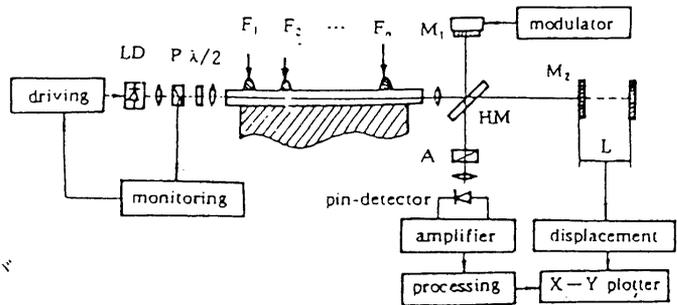


図4.1-15 マイケルソン干渉計をレーザとする実験系スキーム

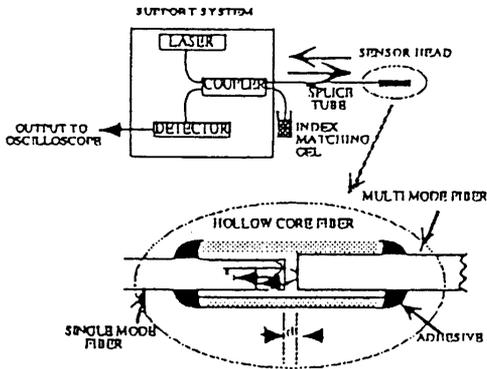


図4.1-16 EFPI系システム

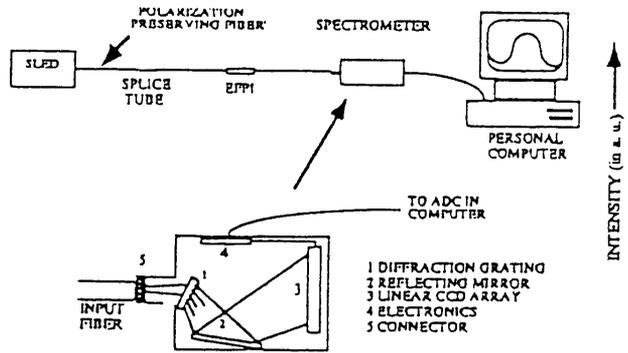


図4.1-17 AEFPI系システム

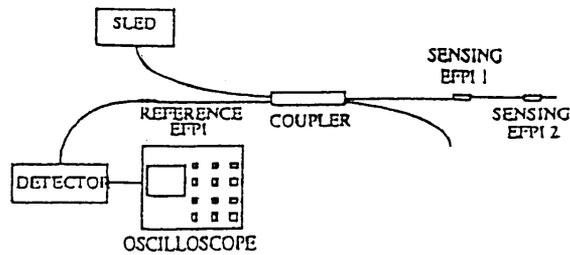


図4.1-18 2個のEFPIを多重化した実験系スキーム

により反射光の干渉を検出してOFセンサにかかる歪みを測定する多重化多点型測定を検討している¹²⁾。

ひとつの方式は、OFセンサとMMFBGのペアの間にモードスクランブラを入れて配置し、白色光源を用い、各ペアに割り付けた2波長の干渉から測定する(図4. 1-19)。もう一つの方式は、マッチングした2個のMMFBGの間にOFセンサを入れて各プローブ部とし、それらに各々割り付けた1波長の干渉から測定する(図4. 1-20)。これら測定方式の特長は、後方散乱する弱いレーザ光を利用するOTDR、および反射率の小さいシングルモードファイバ Bragg grating を利用する方式と異なり、より強い反射光の利用できることである。実験では、コア径 $50\mu\text{m}$ 、NA 0.22、 $n_{\text{core}} = 1.458$ 、 $\Delta n = 1.5 \times 10^{-3}$ 、長さ1mmのMMFBGを用いている。

ブリルアン散乱を利用した分布型OFセンサを2例挙げる。

M. Niklesらは、温度に敏感なブリルアンシフトを利用したOTDRによる温度測定を検討している¹³⁾。

実験では、 LiNbO_3 の電気光学効果を利用し、光源(YAG:Nd)からのレーザ光を周波数シフトさせ、ブリルアン散乱のポンプ光と位置検出のプローブ光として用い、それらを交互にタイミングをとってOFセンサに導波してブリルアン散乱の戻り光を検出している(図4. 1-21)。その結果、4.7kmのOFセンサを用い、空間分解能60m、ブリルアンシフトの温度係数 $1.3\text{MHz}/^\circ\text{C}$ 、誤差 0.5°C 以下を得ている。ポンプ光、プローブ光の2光源を使わなくて済むことが特長である。

K. Shimizuらは、異なったブリルアンシフトを持つOFセンサを分岐状に配置し、ブリルアン散乱光の強度変化から温度、あるいは歪みを測定することを検討している¹⁴⁾。

実験では、Erドープファイバ(EDFA)で増幅した波長 $1.55\mu\text{m}$ のパルスレーザ光を、アコースティック周波数変調して各OFセンサに導波し、ブリルアン散乱光強度を測定する(図4. 1-22)。異なったブリルアンシフトを持つOFセンサはGeドープにより調整し、そのシフトの範囲は、 $1.55\mu\text{m}$ の入射光に対して、周波数で10~11GHzとしている(表4. 1-1)。これらの周波数の差は、歪みで0.05%、温度で25Kに相当し、図4. 1-23には実験で得たOFセンサの配置と周波数の関係を示す。

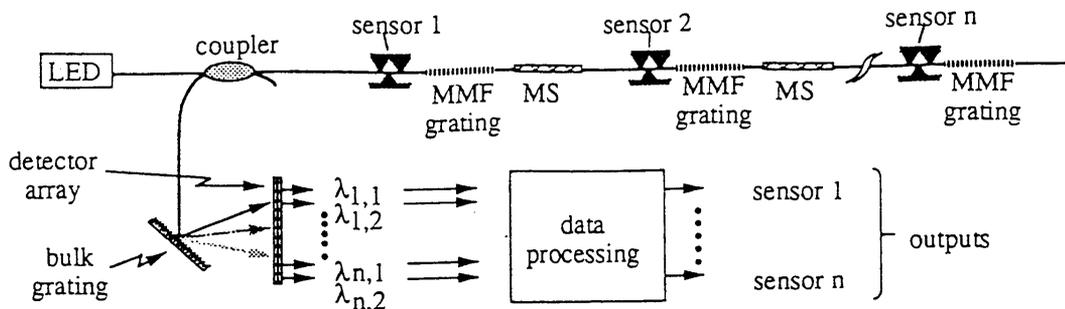


図4.1-19 実験系スキーム (OF-MMFBGペアプローブの場合)

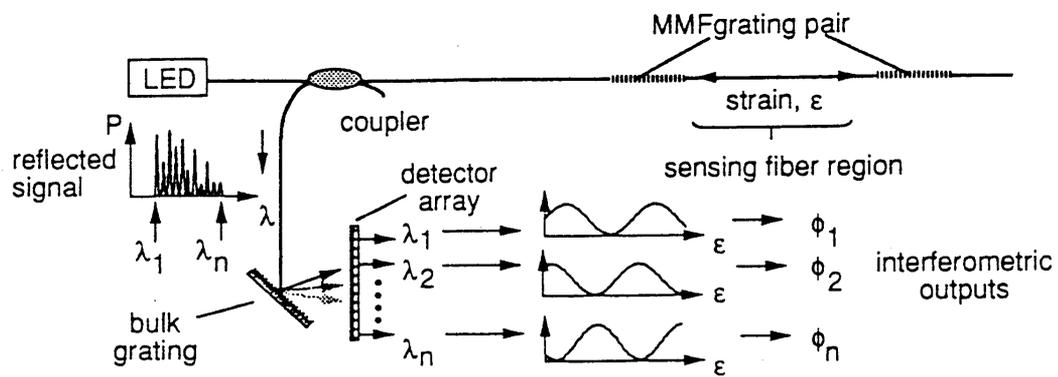


図4.1-20 実験系スキーム (MMFBG-OF-MMFBGプローブの場合)

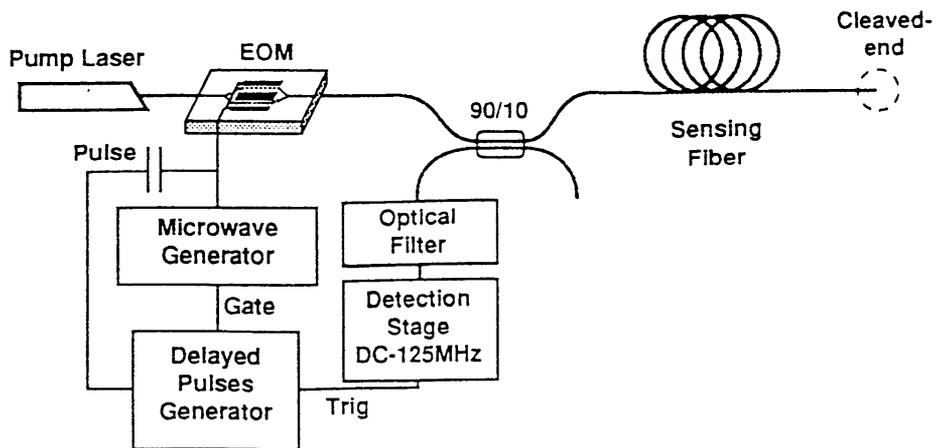


図4.1-21 実験系スキーム

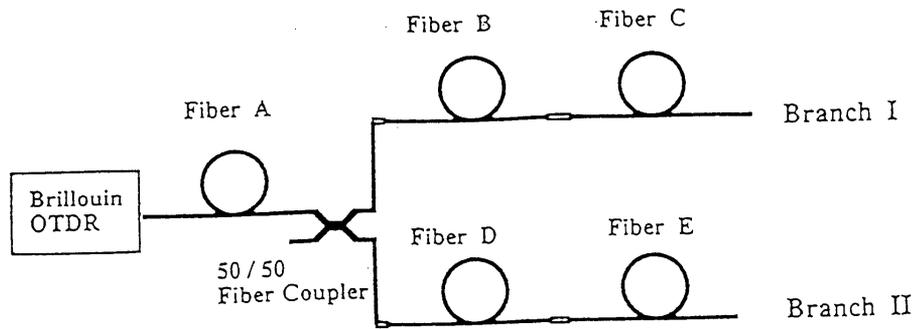


図4.1-22 実験系スキーム

表4.1-1 各光ファイバの長さとブリルアンシフト周波数

Fibers	A	B	C	D	E
	Trunk	Branch I		Branch II	
Length [km]	1.0	1.0	1.3	1.0	1.0
Brillouin Frequency Shift [GHz]	10.765	10.705	10.680	10.800	10.780

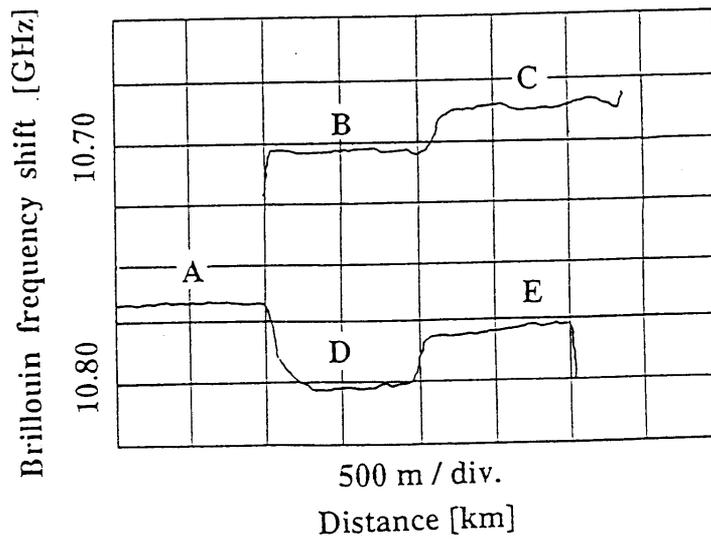


図4.1-23 分岐光ファイバネットワークの位置とブリルアンシフト周波数

T. Wakamiらは、OTDRと類似な方法で、グレーデッド形マルチモード石英OF（コア径 $50\mu\text{m}$ / クラッド径 $125\mu\text{m}$ ）に波長 $1.55\mu\text{m}$ のレーザ光を導波させ、ラマン散乱で生じるストークス光と、温度に敏感なアンチストークス光を検出し、両者の比をとることにより遠隔点の温度と位置を測定することを検討している¹⁵⁾。実験では、30 km離れた 40°C の温度を測定し、位置検出精度 6.5m 、温度検出精度 2.3°C の結果を得ている。

G. Yanivらは、OFセンサをコンポジットに埋め込んで、OTDRにより、静的、および繰り返しの歪みをモニタリングする検討を行っている¹⁶⁾。

実験は、OFセンサ（コア径 $110\mu\text{m}$ / クラッド径 $140\mu\text{m}$ / 長さ 30cm / PIコート）をEガラスファイバ/エポキシの積層体（ $5\text{cm} \times 56\text{cm}$ ）に、EガラスファイバとOFセンサの配向に留意して埋め込んで行っている。その結果、OFセンサの動作を確認すると共に、EガラスファイバとOFセンサが直交するとき、OFセンサは曲げられて損傷率が高いこと、また、OFセンサの積層体からの取り出し口が強度的に弱く、補強がいること等を問題点として挙げている。

W. C. Michieらは、吸水ポリマーをOFと組み合わせ、OTDRを利用して水、あるいはpH等の化学パラメータの測定を検討している¹⁷⁾。

実験では、吸水ポリマーを $40\mu\text{m}$ の厚さにディップコートしたGFRPのロッドの上にグレーデッド形マルチモードOF（コア径 $25\mu\text{m}$ ）を置き、ケブラーの糸をヘリカル巻きしてプローブ部としている（図4. 1-24）。測定の動作は、ヘリカル巻きしたケブラー糸の拘束により、水溶液で膨潤した吸水ポリマー層がOFを押し、OFにマイクロベントが生じて導波する光の損失が増大することを利用する。ヘリカル巻きのピッチが適当であれば、周期的なマイクロベント間で導波光と散乱光に共鳴的パワー転移が起これば、損失が大きくなり、感度が上がるとしている。水での測定では、100 mロッドの25 cmの部分で水を検出している。その検出は10秒以内に可能であり、15~30秒では完全膨潤状態の60~80%膨潤し、ほぼ完全に膨潤するには1~2時間を要した。また逆に、乾燥による回復は、数分~数時間を要したとしている。位置の特定は数分以内に10 cmの分解能があり、数km離れても検出できるとしている。吸水ポリマーの平衡膨潤度はpHで変化するので、この測定方法でpHも測定できると述べている。

④ニューラルネット利用のOFセンサ

ニューラルネットを利用する信号処理により、特別な構造力学などの知識を必要とせず、また、複雑なデータ解析も行わずに、対象を測定するOFセンサが検討されている。このニューラルネットとOFセンサを組み合わせた系は、単に特性値を測定するだけでなく、それらも取り込んだ上で対象を診断するといったことにも使える。

W. P. Spillmanらは、橋梁のヘルスマニタリングを目的として、二つの piezoelectronic 加速度計とOFモーダルセンサを取り付けたスチール製モデル梁にてダメージの診断を試みている¹⁸⁾。

ダメージのモデルとしては、モデル梁に入れた切れ目を用い、切れ目に補強板をボルト締めして、強いボルト締めはgood状態、緩いボルト締めはquestionable状態、および補強板無しをbad状態のダメージとした(図4. 1-25)。モデル梁の診断は、インパクトモードのわかったハンマーの打撃で行い、モデル梁の振動モードの空間分布を調べて行っている。振動モードはモデル梁の1~3次共振点をカバーする0~25Hzの周波数を取り、三つのOFセンサからはハンマーの加振モードに対応する応答関数(振動特性)をとっている。それらの振動特性からモデル梁のダメージを診断するのにニューラルネットを用い、paperには作製したソフトも載せている。信号処理にあたっては、各状態を数値化して表し、bad状態を「-1」、questionable状態を「0」、good状態を「+1」とおき、振動特性のデータと関係づける学習を行わせた。実験では、24セットの既知ダメージ状態と振動特性データの組み合わせを学習した後は、正解率は0.32(3OFセンサと2加速度計を使用)、0.15(2加速度計使用)であったが、44セットを学習した後は、0.58(3OFセンサと2加速度計を使用)、0.44(2加速度計)、および0.22(3OFセンサ)に向上したと報告している。

Raoらは、レーザ光のスペックルパターンの非線形応答を、ニューラルネットで処理してOFセンサにかかる外部振動の検出を検討している¹⁹⁾。

実験は、コアのみからなる太いマルチモードOF(コア径0.5mm、長さ5cm)に導波したレーザ光のスペックルパターンを、OFセンサの出射端側に設けたフォトコンダクタアレイで取り込み、ニューラルネットで信号処理している(図4. 1-26)。1.5 μ mの範囲で変位検出を学習させておくと、誤差 $\pm 0.015\mu$ m以下で変位を検出できるように

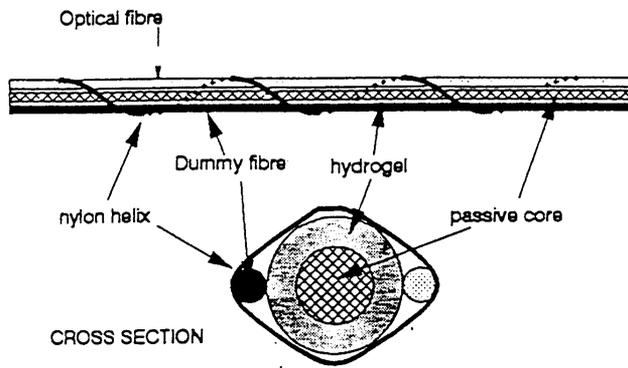


図4.1-24 OFプローブの構造

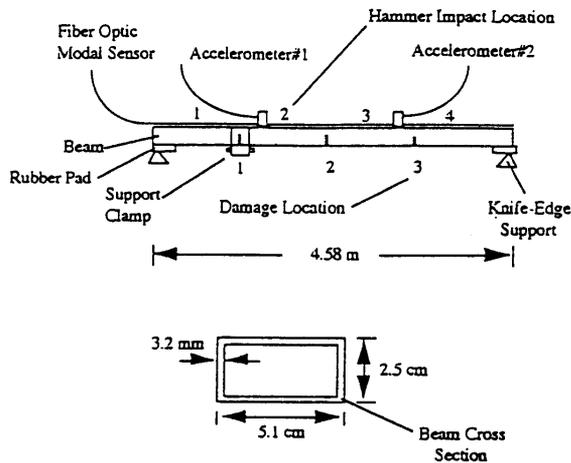


図4.1-25 実験系スキーム

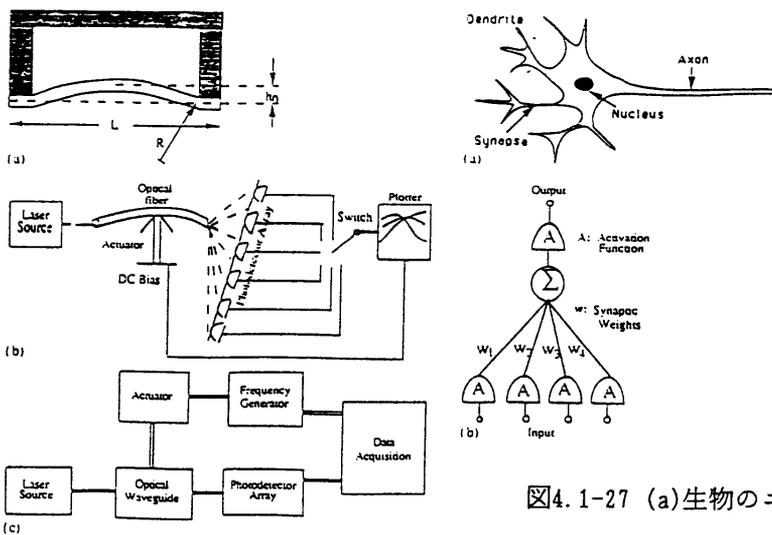


図4.1-26 (a) OFアセンブリ (b)実験系スキーム
(c)実験系ブロックダイアグラム

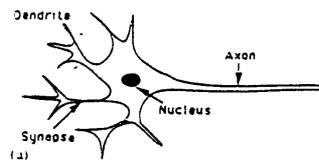


図4.1-27 (a)生物のニューロン

(b)ニューラルネットワークの構造

なり、11個のfunctional-linkと4個のニューロンを持つfunctional-link netは、1,000回以下の反復学習で収束条件が 5×10^{-6} になるトレーニングができたと述べている（図4.1-27）。結論として、このような方法を用いれば、オングストロームオーダの変位を0.1Åの分解能で検出することもできるとしている。

⑤ 温度測定、および温度・歪み同時測定のOFセンサ

E. Mauriceらは、ErドープOFをセンシング部とする蛍光を利用した高温測定を検討している²⁰⁾。すなわち、緑色の蛍光強度が温度により変化することを利用し、二つの蛍光強度の比 (${}^4S_{3/2} \rightarrow {}^4I_{15/2}$) / (${}^2H_{12/2} \rightarrow {}^4I_{15/2}$) を検出して高温を測定する。

実験では、ErをドープしたOFセンサは、コア径 $9.2 \mu\text{m}$ / Er (100 ppm) / 長さ30 cm、コア径 $6.4 \mu\text{m}$ / Er・Yb (2500 ppm) / 長さ7 mm (ポンプ光488 nm) と長さ10 mm (ポンプ光976 nm) の3種類を用いた（図4.1-28）。その結果、蛍光強度比の誤差は、3% / RT ~ 5% / 1000 Kであった。コストを下げるためにLDの利用も考えている。

V. Fericoloらも蛍光を利用した高温測定を検討している²¹⁾。

ここではLD光で励起したCr:YAG結晶から出る蛍光のdecay-time (τ) の測定から、参照光を用いずに温度を測定する。実験では、Cr:YAG結晶プローブ（径3 mm × 長さ5 mm）に2本のAuコートしたステップ形石英OF（径 $400 \mu\text{m}$ ）を突き合わせ、一方のOFには635 nm LDの励起光を、もう一方のOFには発生した蛍光を各々導波させる（図4.1-29）。蛍光強度 $V(t)$ は経時的に下式で表されるので、時定数 τ の温度 (T) 依存性から温度が測れる。

$$V(t) = A \exp(-t/\tau(T)) + B$$

-25 ~ +500°Cで検討し、 $\tau(T)$ は最小 $50 \mu\text{s}$ 、最大 6.7ms であり、誤差は最大0.11°C (300°C付近) であった。プローブは700°Cまでもつことがわかっており、シンプルな系であることが特長としている。

さらに高温を測定する研究例には以下のようなものがある。

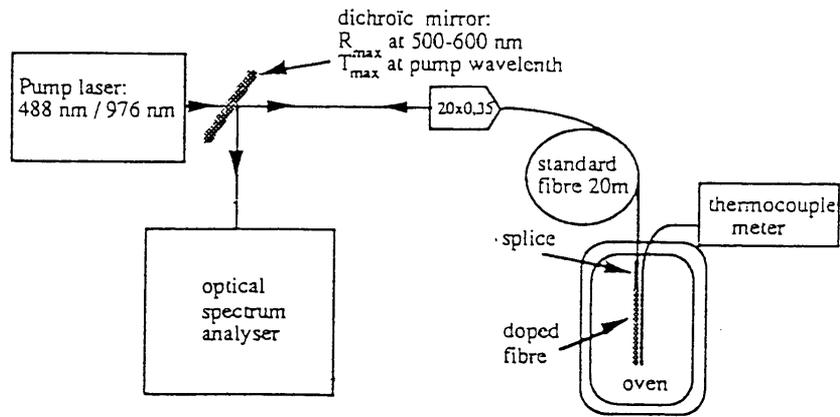


図4.1-28 実験系スキーム

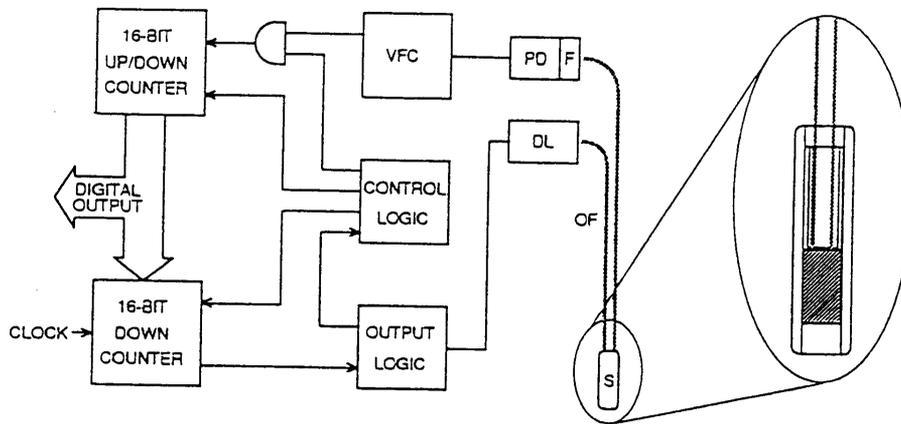


図4.1-29 実験系スキーム

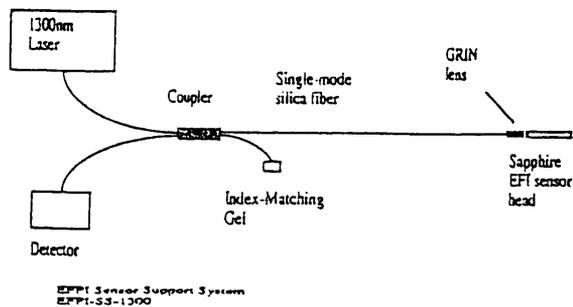


図4.1-30 実験系スキーム

R. Clausらは、E F P Iにて高温下での温度、あるいは歪みを測定するのに、これまでの石英（m. p. 1063°C）のO Fプローブに代えて、サファイア（m. p. 2048°C）のO Fプローブを検討している²²⁾。

実験では、サファイアチューブの両端からサファイアロッドを挿入し、ギャップを設けてE F P Iプローブとし、シングルモード石英O FにつないでE F P I干渉計としている。プローブをセラミック接着剤にてS i Cロッド（径 1.5 c m×長さ 20 c m）に貼り付けて評価したところ（図4. 1-30）、1760°Cまで動作することが確認された。また、S i Cに繰り返し圧縮荷重をかける疲労試験（30←→1500 L b s / 25 H z）を行ったところ、抵抗型歪みゲージは6万回/1090°Cしかもたなかったのに対し、サファイアE F P Iプローブは20万回以上/1727°Cもつことを確認した。問題点として、サファイアO Fの高価なこと、剛性の大きすぎること（→変位小）を挙げている。

温度と歪みを同時測定する研究例を2件挙げておく。

V. Gusmeroliらは、O Fの光路長変化 Δl と分散特性（dispersion characteristic: D）の変化 ΔD を、近接した2波長 λ_a 、 λ_b の各位相変化 $\Delta \phi_a$ 、 $\Delta \phi_b$ を測定することにより求め、温度Tと歪み ε を同時測定する検討を行っている²³⁾。

cを光速、LをO Fの長さ、 $\Delta \lambda / 2 = \lambda_b - \lambda_a = \lambda_a - \lambda_b$ （ $\lambda_a < \lambda_b < \lambda_a$ ）とすると、図4. 1-31より、また、 $\Delta \phi_b(T, \varepsilon)$ 、 $\Delta \phi_a(T, \varepsilon)$ より、

$$l(\lambda_b) = (\Delta \phi_b - \Delta \phi_a) \cdot \lambda_b^2 / 2 \cdot \Delta \lambda$$

$$D(\lambda_b) = (\Delta \phi_b + \Delta \phi_a) \cdot \lambda_b^2 / (\Delta \lambda)^2 \cdot c \cdot L$$

$$\begin{bmatrix} \Delta l \\ L \\ \Delta D \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{L} \frac{\delta l}{\delta T} & \frac{1}{L} \frac{\delta l}{\delta \varepsilon} \\ \frac{\delta D}{\delta T} & \frac{\delta D}{\delta \varepsilon} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta T \\ \Delta \varepsilon \end{bmatrix}$$

したがって、予め上式の係数行列を求めておけば Δl 、 ΔD より温度、歪みが同時に測定できる。実験では、 $\lambda_0 = 855 \text{ nm}$ 、 $\lambda_0 = 845 \text{ nm}$ 、 $\lambda_0 = 865 \text{ nm}$ を用い、精度 $10 \mu \varepsilon \cdot \text{m}$ 、 $1^\circ \text{C} \cdot \text{m}$ を得ている。

また、M. G. Xuらは、別々のBragg波長を持つ二つのBragg gratingを直列につなぎ、各々のBragg波長のシフトから温度（ T ）と歪み（ ε ）を同時測定することを検討している²⁴⁾。

Bragg波長シフト $\Delta \lambda_B$ と $\Delta \varepsilon$ 、 ΔT の関係（ $\Delta \lambda_B = K_\varepsilon \Delta \varepsilon + K_T \Delta T$ ）より、

$$\begin{bmatrix} \Delta \lambda_{B1} \\ \Delta \lambda_{B2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K_{\varepsilon 1} & K_{T1} \\ K_{\varepsilon 2} & K_{T2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \varepsilon \\ \Delta T \end{bmatrix}$$

したがって、前例と同様に予め係数行列（ K ）を求めておけば、 $\Delta \lambda_{B1}$ 、 $\Delta \lambda_{B2}$ より歪みと温度が同時に測定できる。実験では、Bragg波長が 1298 nm と 848 nm のgrating（ピーク反射率は70%と55%）を用い、光源には 1300 nm と 850 nm のLEDを使っている。測定範囲が $0 \sim 800 \mu \varepsilon$ 、および $10 \sim 60^\circ \text{C}$ においては、各々誤差は $10 \mu \varepsilon$ 、 5°C であった。なお、温度誤差が比較的大きいのは、 $\Delta \lambda$ を検出するスペクトルアナライザの分解能が良くなかったためとしている。

⑥ ダメージ検出のOFセンサ

この項では、少しコンポジットの疲労破壊等のダメージ検出に重きをおいたと思われる研究例をピックアップする。

G. P. Carmanらは、ポリマー系・セラミック系・金属系の各コンポジット材料について、剛性、熱膨張率の変化から疲労の状況、あるいは寿命を探る可能性について検討している²⁵⁾。

ここでは、OFセンサそのものの議論は、繰り返し歪みのモニタリング手段として、従来の箔歪みゲージに比較し、OFセンサは圧倒的な耐久性を示すというものである。データとして、箔歪みゲージは、 $5,000 \mu \varepsilon$ では10,000サイクルで、また $6,000 \mu \varepsilon$ では6,000サ

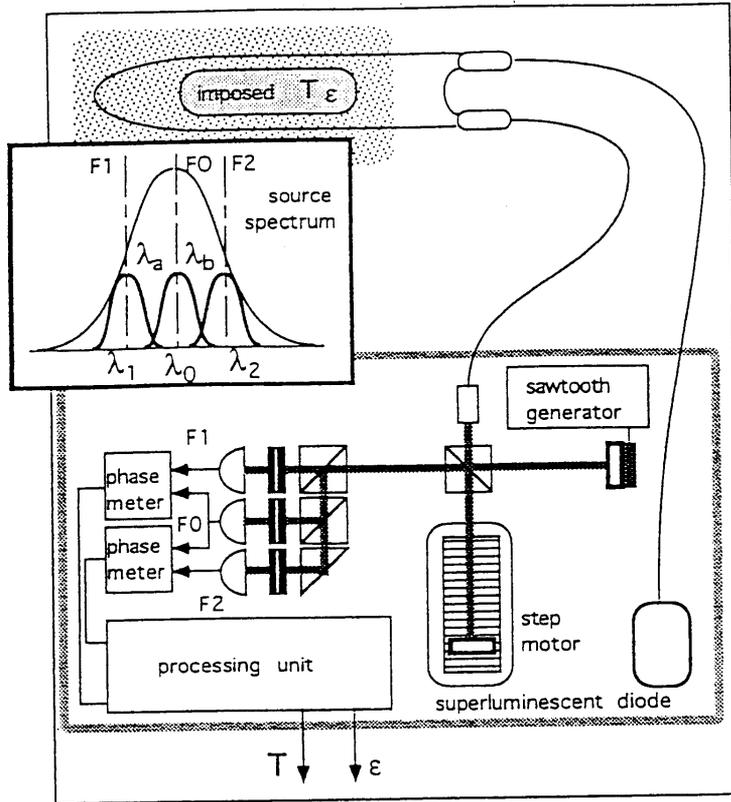


図4.1-31 実験系スキームと λ_0 、 λ_a 、 λ_b の関係

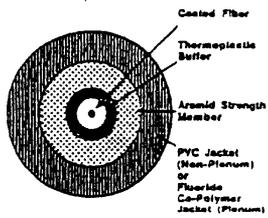


図4.1-32 OFケーブル断面

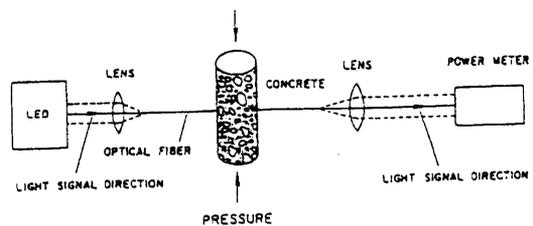


図4.1-33 圧縮実験系スキーム

イクルで破損したが、E F P I 利用の O F センサはいずれも 100 万サイクル以上もったと報告している（セラミック系コンポジット：C ファイバ / S i C への適用実験）。本論の疲労状況、寿命のモニタリングについては、ポリマー系（C ファイバ / P I、C ファイバ / エポキシ）では、マトリックスの微小クラックと相関のある熱膨張率低下が ~ 30 % と大きいこと、また、それがセラミック系では 10 % 以下、金属系（S i C ファイバ / T i 合金）では 6 % と相対的に小さかったと報告している。

A. Mendez らは、「マルチモード O F（径 100 μ m） / 熱可塑性樹脂コート / アラミド強度メンバ / P V C ジャケット」からなる O F ケーブルをコンクリートに埋め込み、導波する光の強度変化から、コンクリートに生じるダメージを検知することを検討している²⁶⁾。

実験では、まず、1 inch 径 \times 1 inch 高さの円柱ブロックで引き抜きテストを行ったところ、3.0 N で数百 μ m ほど O F ケーブルが動いた。2 \times 2 \times 12 inch 直方体ブロックの曲げテストでは、400 N でコンクリートブロックは破断したが、O F ケーブル自体は無事であった。しかしまた、急激な光強度の低下により、コンクリートブロックの破断を検知することができた。4 inch 径 \times 8 inch 高さの円柱ブロックの圧縮テストでは、O F ケーブルと圧縮荷重の方向が直交するとき、O F ケーブルは引っ張られるが曲がらないので、光の強度は破断荷重 60,000 L b s まで殆ど変化しなかった（図 4. 1 - 3 2、図 4. 1 - 3 3）。一方、O F ケーブルと圧縮荷重の方向が平行するときは、最初、O F ケーブルは撓んで光の強度が低下するが、12,000 L b s でヒビ割れが起こると、一度その低下が止まり、その後も、ヒビ割れの進行と共に光の強度は準安定と低下を繰り返した。いずれの場合もダメージ検知はできるが、O F ケーブルと平行な圧縮がかかるときには、最初、O F ケーブルが捩れて光の強度が低下することもあり、コンクリートの小損傷と区別しにくい場合のあること、O F ケーブルには耐久性を考慮した適当なコーティングがいること、また、複数の O F ケーブルの埋め込み技術のいること等が課題であるとしている。

C. Chang らは、銅（C u）をコーティングしたシングルモード O F（径 125 μ m）を C ファイバ / エポキシのコンポジットの積層間に埋め込み、マイケルソン干渉計を組んで C u 層の塑性変形による O F の位相変化から、コンポジットのダメージを検知することを検討している²⁷⁾。

実験では、単軸引張では C u の厚さが 290 μ m、337 μ m のときに残留歪みによる位相変

化を検出した。しかし衝撃を与えた場合には、衝撃エネルギーと位相変化が相関することは認められたが、繰り返し衝撃に関しては、新しいダメージによる位相変化か、既存のダメージの再配分による位相変化かはっきりしないことが問題であるとしている。

M. Hollらは、PIコーティングしたOF（径 $125\mu\text{m}$ + PI厚さ $15\mu\text{m}$ 、径 $240\mu\text{m}$ + PI厚さ $20\mu\text{m}$ ）をCファイバ/エポキシのコンポジットの積層間に埋め込んで、コンポジットのダメージの検知を検討している²⁸⁾。

実験では、静的引張では、1点を除き、OFから離れた所で破壊が発生し、OFはコンポジットに重大な影響は与えていないと考えられた。しかしまた、コンポジット強度は、OFを埋め込んでいないものより数%（OF径 $125\mu\text{m}$ ）、あるいは10数%（OF径 $240\mu\text{m}$ ）、各々低下していた。圧縮をかけたときも、OFを埋め込んでいる所では破壊が起きず、静的引張と同様、OFはコンポジットに重大な影響は与えていないと考えられた。しかしまた、詳細に観察すると、OF近傍では、CファイバがOF周囲で曲がり、マトリクス樹脂であるエポキシのリッチな部分が生じており、コンポジットの本来の一様性は損なわれていた。したがって、OFを埋め込むことによるコンポジットへの影響は、PIとエポキシの接着の疑わしいことと併せて、今後、さらに詳細な研究が必要としている。

K. A. Murphyらは、コンポジットの層間剥離部分では超音波の伝搬が阻害されることを利用し、超音波とEFPI干渉計を用いて、層間剥離の検出を検討している²⁹⁾。

実験では、 7×2 inchのCファイバ/エポキシのコンポジットを用い（図4. 1-34）、繰り返し引張を与えて層間剥離を生じさせ、その検出を検討している。超音波は、圧電素子にてコンポジットに負荷させている（図4. 1-35）。その結果、層間剥離が生ずる前は、EFPI干渉計のセンサ3付近からあてた超音波はセンサ1・2で検出したが、層間剥離が生じた後は、センサ1・2、さらにセンサ4でも超音波を検出しなかった。一方、反対側のセンサ4付近からも超音波をあてたが、同様な結果を得ており、EFPI干渉計により、層間剥離の診断の可能性が示されたとしている。

⑦各種OFセンサ

この項では各種OFセンサの研究例をピックアップする。

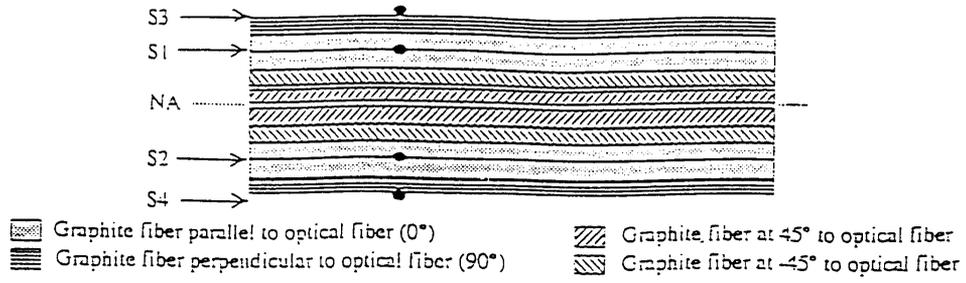


図4.1-34 センサを埋め込んだコンジット断面

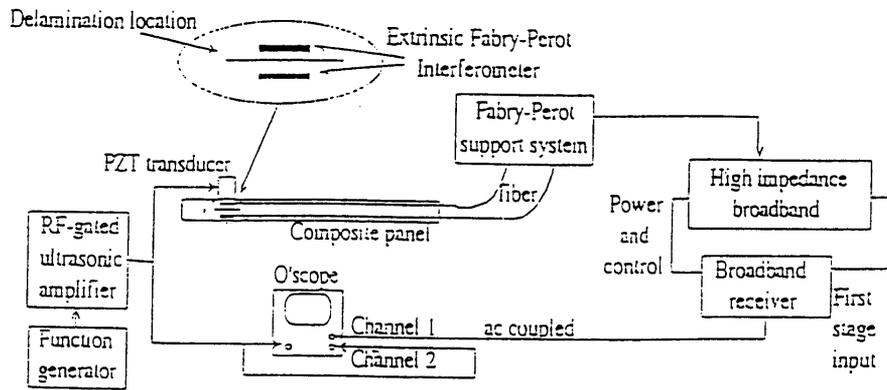


図4.1-35 実験系スキーム

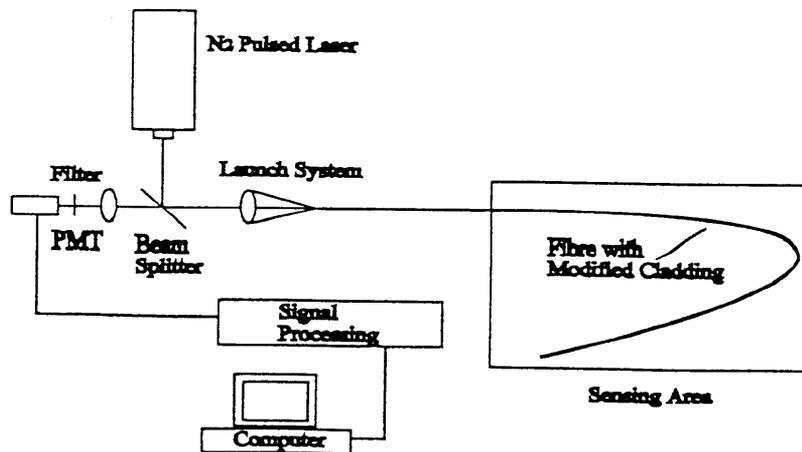


図4.1-36 実験系スキーム

P. A. Wallaceらは、プラスチッククラッドOFの一部クラッドを剥がし、ゾルゲル法により、蛍光染料を含浸した新しいセンシング部のクラッドを設け、コアを導波してきた励起光を漏らして蛍光を発生させ、逆にその蛍光をコアに導波して検出し、蛍光の発生に影響する因子であるpH等の測定を行うことを検討している(図4. 1-36)³⁰⁾。

使用したプラスチッククラッドOFは、コアが石英であり、全体径は600 μ m、励起光は窒素レーザ(377nm、nsパルス)、検出する蛍光は500-550nmである。ゾルゲル液の主成分はtetraethyl orthosilicate($\text{Si}(\text{OC}_2\text{H}_5)_4$)であり、コーティング厚さは1 μ mとしている。励起光波長と蛍光波長が異なり、参照光の不要なことが特長である。

M. Q. Fengらは、ワイヤを張ったフレームを土木構造物内に設け、構造物にかかる応力、歪み、振動をワイヤの張力変化として検出することを検討している³¹⁾。

ワイヤは光励起ソレノイドで加振し、OFセンサで共振周波数($\sim(\text{ワイヤ張力})^{1/2}$)を求めてフレームにかかる応力、歪み、振動の検出を行う(図4. 1-37)。モデル実験では、土木構造物としては十分な20Hzまで振動を測定することができた。問題は、OFセンサモジュール自体の耐久性を構造物の寿命並にすること、あるいは、そのリプレースを考えた埋め込み方法を検討することとしている。

S. R. Kiddらは変化の速い温度の測定を検討している³²⁾。

これまで、反射面のギャップが40 μ mのFabry-Perot干渉計で4KHzの温度変化を検出していた。しかし、さらに変化の速い、60KHz程度のターボマシンの中のような温度変化を測定するには、ノイズを小さくするために、Fabry-Perot干渉計のプロープのギャップを小さくする必要があり、その分、低下する感度を高めるために温度-光学係数(thermo-optic coefficient dn/dT)を大きくする必要があり、ここではシングルモードOFの先端に、 dn/dT が SiO_2 の8倍あるZnSeを、蒸着にて2.4 μ mの厚さ(=ギャップになる)に設けたプロープを持つFabry-Perot干渉計温度センサを検討している(図4. 1-38)。実験は10KHzで行い、温度の振幅15Kを検出しているが、70KHzまでは追従できるとしている。但し、ターボマシンの中で使うような場合には、ガス中の油分の付着やアブレーションからプロープ先端のZnSeを保護する工夫が要るとしている。

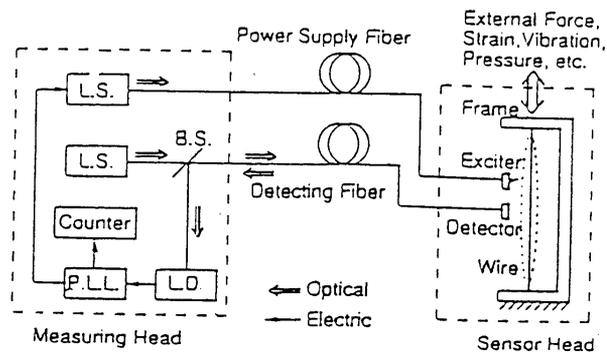


図4.1-37 実験系スキーム

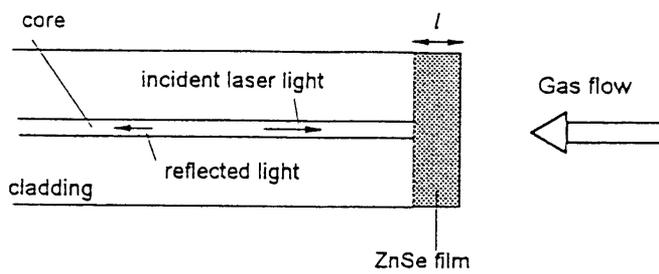


図4.1-38 ZnSeを蒸着したプローブ

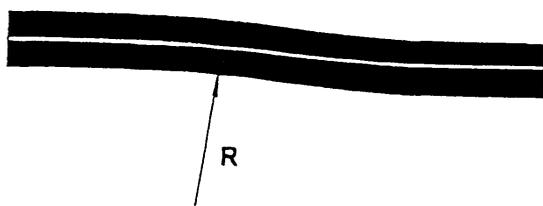


図4.1-39 S字型屈曲部のプローブ

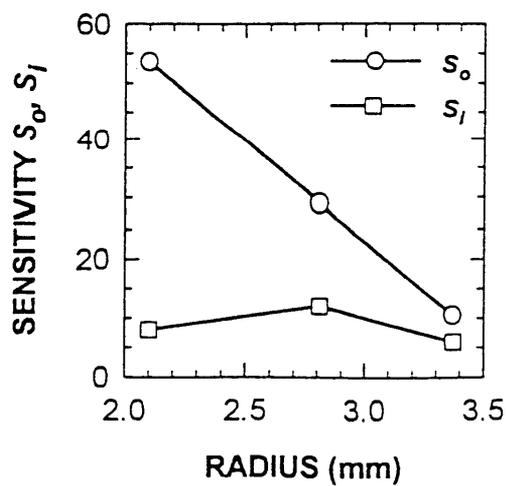


図4.1-40 感度 S_o と S_i の比較

M. Kullらは、シングルモード石英OFに永久S字型屈曲を与えてプローブ部とし、このプローブ部にかかる歪みによる透過光量の増加から、その歪みを測定することを検討している(図4. 1-39)³³⁾。

実験では、曲率半径Rを2.1・2.7・3.4mmと変えて行い、R=2.1mmのとき、歪みのかかっていない屈曲部自身の初期損失は8.2dBであり、感度は $5.9 \times 10^{-5} \mu \varepsilon^{-1}$ 、分解能は $30 \mu \varepsilon$ であった。屈曲部自身の損失を考えない感度 S_0 (=透過光量の増加 ΔI_0 /屈曲部からの全出射光量 I_0 /歪み量 ε)は、Rの小さい順に高くなるが、屈曲部自身の損失を考慮した感度 S_1 (ΔI_1 /屈曲部への全入射光量 I_1 / ε)は、あるRで最大を示し、以前、Weissらが示したプラスチックOFの結果と同様の結果を得たとしている(図4. 1-40)。

M. F. Guntherらは、白色光源を使い、参照光を用いることなく、変位を絶対測定するAbsolute Extrinsic Fabry-Perot Interferometer(AEFPI)による金属の塑性変形の検出を検討している³⁴⁾。

実験では、AEFPIのセンシング部をアルミ(Al)の供試体(厚さ1.56mm×幅2.54mm×長さ30cm)に取り付け、供試体にその弾性限界を超える荷重をかけたところ、 $1,600 \mu \varepsilon$ の残留歪みを検出した。なお、AEFPIの分解能は $10 \mu \varepsilon$ であった。今後、クリーブのような長期にわたる損傷のモニタリングにAEFPIが使えると提案している。

K. Johannessenらは、複屈折OFセンサに生じた変位を光路長の変化として検出する測定方法において、光路長変化による位相変化の信号をフリッジ化し、そのフリッジのデジタルカウントにより、複屈折OFに生じた変位を求める検討を行っている³⁵⁾。

まず、複屈折OFセンサから出る信号光を二つにスプリットし、一方を基準とする光 $S(t)$ とし、他方を $S(t)$ より位相が $1/4$ 波長ずれた $C(t)$ とする。両者を $S-C$ 座標上で時間 t に関してパラメトリックプロットすると、円になる(図4. 1-41)。 $S(t)$ 、 $C(t)$ をある閾値で切ってデジタル処理すると、光路長の変化に応じてフリッジが得られるので、そのフリッジのカウントから複屈折OFの変位が検出できる。実験では、光源に780nmシングルモードレーザ、複屈折OFにbow-tie strain induced birefringenceを用いており、光路長の変化 $60 \mu m$ が $S-C$ 座標上の円の一周に相当し、検出限界は $15 \mu m$ であった。リニアリティは複屈折OFの破断強度の90%(伸びは2%以上)まであったとしている。さらに船体のグラスファイバコンポジットに、3mのPIコー

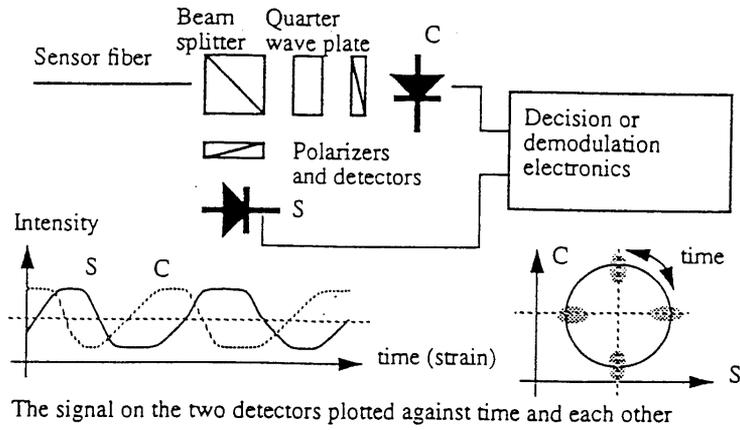


図4.1-41 実験系スキームと信号のフリッジ化

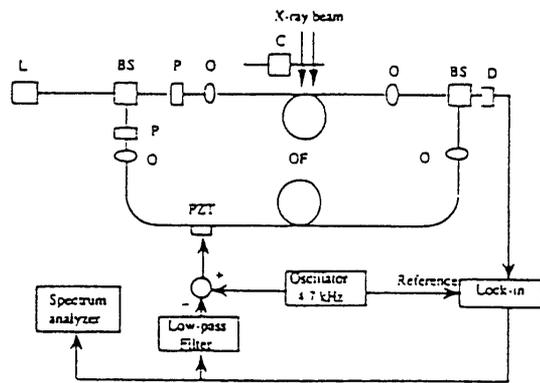


図4.1-42 実験系スキーム (X線強度測定)

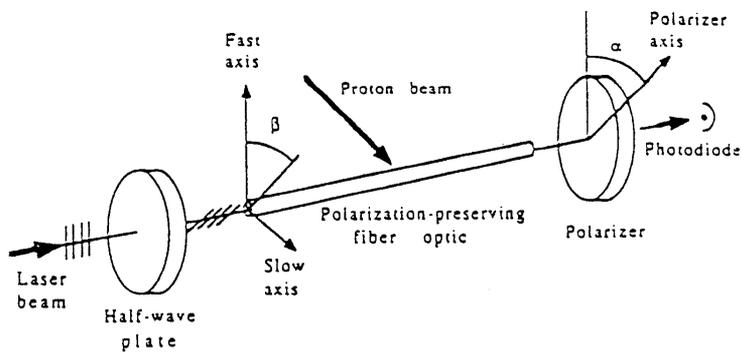


図4.1-43 プロトンビームの測定原理

ト複屈折OFセンサ（分解能 $5\mu\text{m}$ ）をエポキシで取り付けて試したところ、 1Hz 以下の動的歪みが良好に検出できたと報告している。

L. DiFioreらは、医療分野への適用を考え、診断用high flux X-ray tube（ 30keV 、平均エネルギー 16.8keV 、tube電流 $17\text{--}40\text{mA}$ ）を用いて、X線強度を、石英偏波保持ファイバ（複屈折OF）の被爆による温度上昇として測定することを検討している³⁶⁾。

センサシステムとしてはマッハ・ツェンダー干渉計を組むもので、OFセンサの温度上昇を位相変化として検出する（図4. 1-42）。また、同じシステムを用いて、熱的に定常状態にあるプロトンビームの強さの測定を検討している（図4. 1-43）。プロトンビームがOFセンサの複屈折パラメータを変化させることを利用したものであり、実験では、複屈折パラメータはプロトンビームの強さにリニアに変化している。

B. M. Roginaらは、ポリマークラッドOF（コア径 $200\mu\text{m}$ 、クラッド径 $320\mu\text{m}$ ）の放射線センサを検討している³⁷⁾。

測定原理は、放射線を浴びてOFセンサ内に生成したカラーセンターの吸収損失（の記憶）により、放射線のドーズ量を測定するものである。実験では、照射条件を、 ^{60}Co の γ 線/ 1.25MeV で最大ドーズレート 10kGy/h とし、 $0.4\text{--}1.6\mu\text{m}$ の波長範囲で吸収損失を調べたところ、 $0.6\mu\text{m}$ の吸収損失が最も大きく（図4. 1-44）、感度は $1.47 \times 10^{-1}\text{dB/cm}\cdot\text{Gy}$ であった。この吸収損失が20%回復するには2カ月要した。なお、proceedingにはクラッドのポリマーの材質は明記していない。

⑧ OFセンサの取り付け

これまで主に測定原理や測定対象を中心にOFセンサの研究例を見てきたが、スマートコンポジットにOFセンサを適用する場合、実際的问题として、OFセンサの取り付けが重要である。この項では、OFセンサの取り付けに着目して研究例をピックアップする。

D. P. Henkelは、MMC、およびCCコンポジットの表面にOFセンサを貼り付ける方法を検討している³⁸⁾。

Ti/SiCコンポジットには、プラズマ溶射（Ni-Cr-Al合金）とアルミナセメントで、石英OF（ a-SiO_2 （径 $90\mu\text{m}$ ）/F-doped SiO_2 （径 $120\mu\text{m}$ ）/Au（厚さ 15

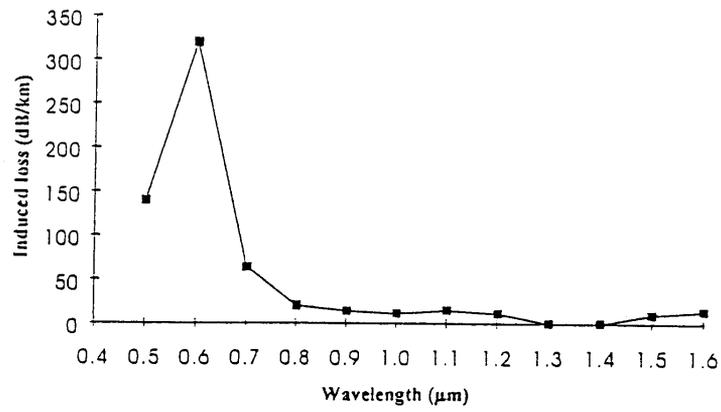


図4.1-44 波長と吸収損失

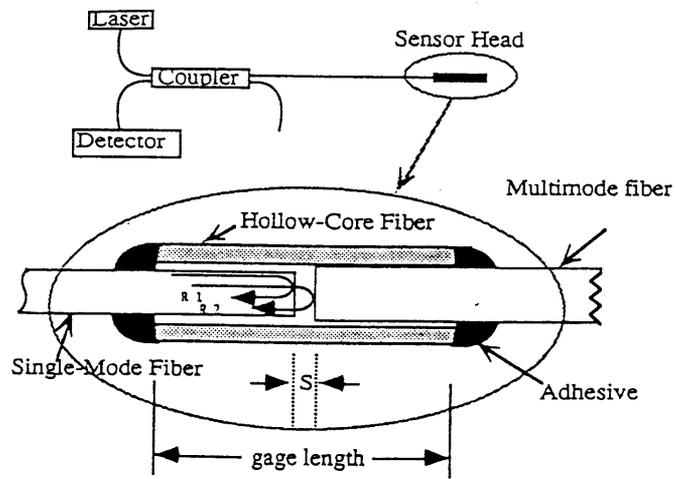


図4.1-45 EFPプローブとその取り付け方

μm) を貼り付けて評価している。その結果、プラズマ溶射の方が接着は良好であったが、溶射層の偏析を抑え、靱性を向上させて微小クラックを避けるためには、さらに合金組成を検討する必要があるとしている。一方、アルミナセメントは脆性破壊を起こしやすかったと述べている。また、Auコートは、Au粒塊間のクラックがOF表面に達しないようにすることが重要としている。SiC/Cコンポジットでは、コアのみのサファイアOFをZr添加アルミノシリケート結晶セメントで取り付けているが、同じく、セメントの脆性クラックが問題であった。セメントの強度低下は、表面が繊維状になり、内部がポラスになって起こるとしている。結論として、目下、合金のプラズマ溶射による接着が最も良さそうであるが、合金組成はなお検討が必要であり、傾斜化等の検討が要るとしている。

M. F. Guntherらは、石英OFにNi合金 (INCONEL 625、Haynes 214)、およびPdをスパッタコーティングし、 $1,000^{\circ}\text{C}$ 程度の高温域での使用について評価している³⁴⁾。

実験では、OFを線引きした直後にスパッタコーティングした場合、いずれの金属層もほぼアモルファス化していたが、事前に製造したOFにスパッタコーティングした場合には、INCONEL 625については $1\mu\text{m}$ 以上の結晶粒が見られた。Haynes 214、およびPdについては $1\mu\text{m}$ 以下の結晶粒であり、一部はアモルファス化も見られたとしている。コーティングした金属膜の接着強度の評価は、粘着テープによる剥離を行った。その結果、ヒートサイクルをかける前はいずれも剥がれなかったが、ヒートサイクルをかけた後は、一部に剥がれが見られた。結論として、OFセンサの材質の検討、使用条件に適したコーティング材の検討、および中間バッファ層を含む多層コーティングなどを考えるべきとしている。また、耐熱性、耐酸性を向上させるには酸化物のコーティングも可能性があるとしている。

同じくM. F. Guntherらは、多層セラミックアクチュエータ (MCAs) の製造プロセスにおいて、有機バインダが燃えるのに伴う内部歪みを、EFPIを用いてin situモニタリングすることを検討している⁴⁰⁾。

実験では、AuコートのシングルモードOF (コア径 $9\mu\text{m}$ / クラッド径 $125\mu\text{m}$) を用いており、EFPIプローブは、反射側ファイバにマルチモードOF (コア径 $85\mu\text{m}$ / クラッド径 $125\mu\text{m}$) を用い、シングルモードOFと共に中空ファイバに挿入してセット

している。未焼成の (green) セラミック多層体への取り付けは、1 mm 径のドリル穴に $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ セメントを用いて行っている。製造プロセスの温度は 900°C である。実験の結果、OF センサは、普通の歪みゲージの 2 桁以上の使用回数の耐久性を示し、107 回の使用に耐えた。しかも問題は、接着部分の耐久性であり、OF センサ自身の劣化ではなかったとしている。

R. Davidson らは、OF センサをコンポジット材料の nervous system と位置付け、製造から使用の全ライフを通じて、コンポジット材料の内部状況をリアルタイムにモニタリングする OF センサ技術の全般をレビューしている⁴¹⁾。

まず、OF センサの分類・問題点を解説し、OF センサの適用に関して、取り付け方、取り出し口の問題、OF センサ自身のコンポジット材料特性への影響に触れている。また、具体例として温度・歪みの同時測定についても紹介している。

S. H. Poland らも、OF をコンポジット材料に適用する上で考慮すべき OF センサの組み込み方 (integration)、耐久性、OF / マトリクス間の応力伝達に関して考察している⁴²⁾。

組み込み方では接着剤の選択や埋め込み方が問題であり、特に高度な技術である埋め込みに関しては、OF 挿入によるマトリクスへの影響を最小限にする必要があると述べている。また、OF の耐久性を向上させるためにはコーティングを行い、外傷や化学物質の損傷から OF を保護する必要があるが、しかしまた、コーティング材とマトリクスはその相性が問題であると述べている。すなわち、OF / マトリクス間の応力伝達は界面が問題であり、コーティングすれば界面の数が増えるので、コーティングは界面の接着が極めて重要となる。

OF の疲労特性は、コローション係数、あるいは n 値で表されるが、かかる応力は、静的疲労については 40 年のライフタイムで 1% クラック成長以下となる範囲内、また、動的疲労については 24 時間で 1% クラック増加以下となる範囲内であれば問題ないと思われるとしている。しかしながら、衝撃応力については、静的な許容応力の範囲をはずれており、なお詳細な今後の研究が必要としている。

OF センサで歪みを測定する場合、測定する対象の歪みは OF センサを取り付けた接着

材を介してOFセンサに伝えられるので、接着の仕方が重要である。G.M.Nauらは、片持ち梁の表面にEFPIプローブを、2種類のエポキシを用いて、4種類の接着方法で貼り付け、それらを評価している(図4. 1-45)⁴³⁾。

実験では、エポキシは硬いDevcon 5 Minute(ショア硬度D85)と、柔らかいTra-Band F1138C(ショア硬度D78)を使用している。プローブの貼り付け方は、プローブ全体をエポキシで埋め込んで梁に固定する(EE)、プローブ下部をエポキシのフィルムで梁に貼り合す(EF)、プローブ両端をエポキシのビードで梁に固定する(EB)、およびプローブを構成する中空ファイバの中を、入射光・反射光を導波するシングルモードOFが自由に動けるよう、エポキシのビードで梁に固定する(UEB)の4種類とした。比較対照するため、抵抗型歪みゲージ、および所定の曲げを与えたときの歪みの理論計算値も求めた。その結果、エポキシと梁の歪み緩和により、どの測定値も厳密には理論計算値と一致しなかったが、UEBが最も理論計算値に近い測定値を得ており、また、硬度の高いエポキシの方が、低いものより良い結果となったと報告している。

市販のOFは、コア径/クラッド径が $90\mu\text{m}/125\mu\text{m}$ (シングルモードOF)、 $50\mu\text{m}/125\mu\text{m}$ ・ $100\mu\text{m}/140\mu\text{m}$ (マルチモードOF)であるが、コンポジットに用いるCファイバの径が $10\mu\text{m}$ 程度であることを考えると、OFの径の大きさが問題になる。OFにはコーティングを施してマトリクス樹脂との馴染みを改善したりするが、M.F.Guntherらは、コンポジットに埋め込むOFの細径化を検討している⁴⁴⁾。

検討に供したOFはステップ形である。まず、クラッド径の最小化を検討し、導波するパワーの閉じこめは、コア径 $4.5\mu\text{m}$ /クラッド径 $18\mu\text{m}$ (クラッド径/コア径=4)で95%であったとしている。与えられたモードのフィールドモールド径は周波数に強く依存すると共に、モードナンバ:1に依存し、同じカットオフ周波数を持つにも拘わらず、LP21の方がLP20より多くのパワーを閉じこめている(図4. 1-46)。

実際にプリフォームの引き落としにより、最小外径 $35\mu\text{m}$ のOFを試作すると共に、フッ酸を用いたエッチングにより短尺細径OFも試作している。エッチングする場合には、作り方は容易であったが、許せる程度ではあるが、損失が大きくなったと述べている。

外径が $40\cdot 60\cdot 90\cdot 140\mu\text{m}$ のOFをサークル状にして、Cファイバ/エポキシのコンポジット(13層)の層間に挟み、その時の状態を顕微鏡レベルで観察している(図4. 1-47)。その結果、OF径が大きいほど、OF周りのマトリクス樹脂のリッチ域が大きく

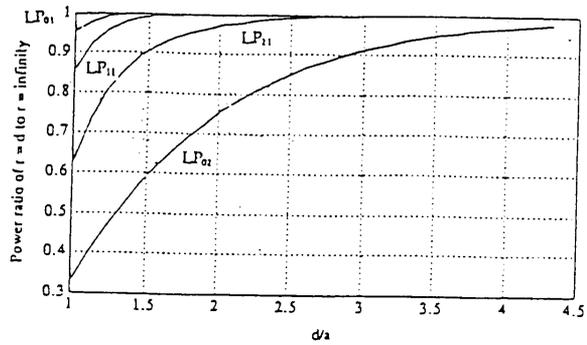


図4.1-46 クラッド径/コア径とパワーの閉じこめの関係

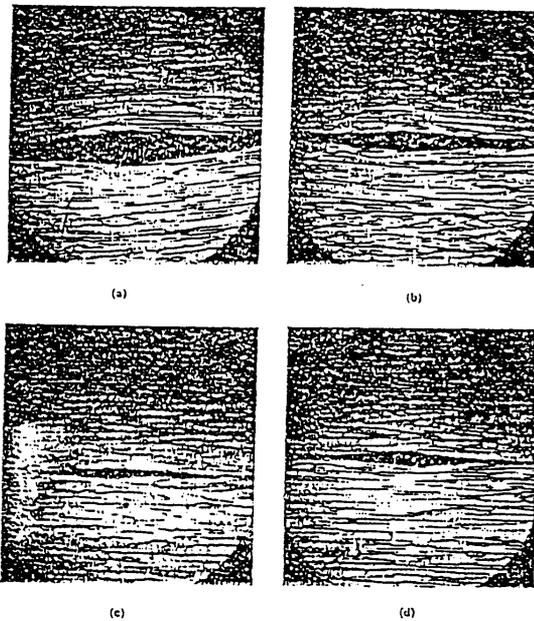


図4.1-47 OF外径を変えたときのマトリクス樹脂リッチ域の大きさ (観察)
(ファイバ径140 μ m/a 90 μ m/b 40 μ m/c 60 μ m/d)

表4.1-2 OF外径を変えたときのマトリクス樹脂リッチ域の大きさ

Fiber outer diameter (μ m)	Area of resin rich region (mm^2)
140	9.8618
90	4.2603
40	2.2893
60	3.1429

なっていた（表4. 1-2）。それらはOFとCファイバの配向にも関係があり、両者が同じ方向に向くほど樹脂リッチ域は小さくなり、平行になるときほぼ無くなった。しかし、両者が直交する場合には、OFは最も抵抗の小さいパスをとると考えられるが、これについてはさらに詳細な検討がいと述べている。

動作については、アルミの梁に細径のシングルモードOFを使ったファブリ・ペロー干渉計を取り付けて評価したところ、ほぼ理論通りのフリンジを得たので、細径化しても使えることが示せたと述べている。

A. Henrikssonらは、OFを埋め込むことによるコンポジットへの影響をできるだけ小さくするため、シングルモードOFと同じ外径（ $125\mu\text{m}$ ）を持ち、かつ、先端のとがったテーパつきEFPI干渉計プローブを検討している⁴⁶⁾。

まず、シングルモードOFと同じ外径を持ち、内径が $50\mu\text{m}$ の中空ファイバをシングルモードOFの端面に融着する。次に、中空ファイバの開いた片端からガラスロッドを挿入し、シングルモードOF端面とロッド端面との距離を $70\mu\text{m}$ とし、EFPIプローブのキャビティギャップとする。次に、中空ファイバとロッドの一体化した部分を溶融して引張ってテーパをつけ、さらにフッ酸でエッチングして形状を整えてアニールする（図4. 1-48）。実験では、さらにPIコーティングしてCファイバ/エポキシのコンポジットに埋め込んだところ、うまく埋め込めたと述べている（図4. 1-49）。結論として、FEM解析して最適形状化し、上記のような製作をすれば、EFPIプローブは、単に中空ファイバとロッドを融着したプローブでは達成できない、歪み $\sim 1\%$ にもち、航空機関係で使えるとしている。

⑨ OF センサの実使用例

この項では、OFセンサを実際に使用した例をピックアップする。

C. Meunierらは、原発の900MWターボ発電機の固定子の温度をモニタリングする、8チャンネルのプロトタイプOFセンサ（図4. 1-50）の、6カ月間の実証試験結果を報告している⁴⁶⁾。

プローブ部は偏向子で挟んだ、複屈折する CaCO_3 結晶からなり、測定は、温度変化で生じる光路長の変化による位相変化を検出して行う。精度は $\pm 0.2^\circ\text{C}$ であった。プローブ

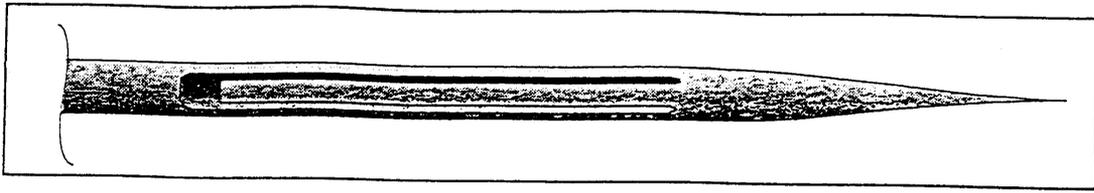


図4.1-48 改良EFPIプローブ



図4.1-49 改良EFPIプローブの埋め込み状態

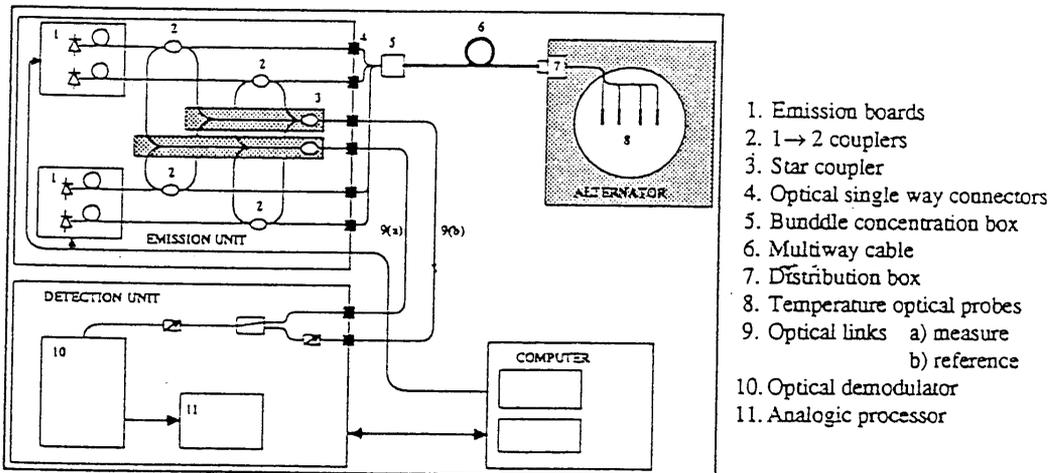


図4.1-50 実験系スキーム

Temperature
Pressure
Flow
Liquid Level
Displacement
Acceleration
Force
Turbidity
Gas
pH
Dissolved Species
Dissolved Gases
Miscellaneous

表4.1-3 市販OFの種類(用途)

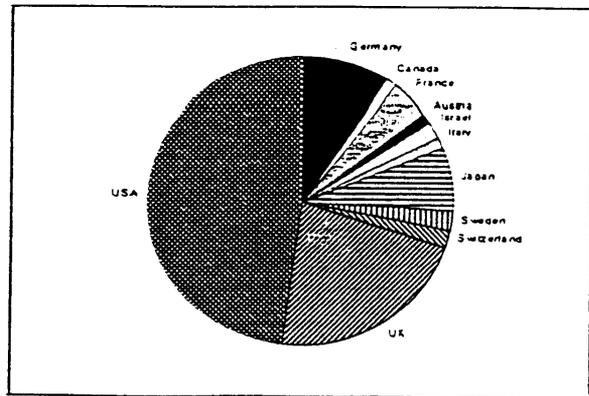


図4.1-51 国別OFセンサメーカー数比較—1994

部は、ケブラーで補強したPIコートマルチモード石英OF（コア径 100 μ m / クラッド径 140 μ m）につなぎ、波長は850nmを使っている。80mの遠隔測定で6カ月間使用したが、室温～55 $^{\circ}$ Cの測定域で問題なく動作し、さらに、4barのH₂の圧力にも耐えたと報告している。

柿沢は、スマートストラクチャーに関する概説において、80年代、旧東独のPC橋への適用例、北米初のCファイバロッドを用いたカルガリ橋（カナダ）への適用例、およびコンクリート躯体内に埋め込んで応力、歪み、温度、ヒビ割れを検出する、米国バーモント大学メディカルビルへの適用例を紹介している⁴⁷⁾。

R.M.Measureらは、カナダのカルガリ市にて、新しい橋の5本のコンクリート梁（60ft）に各4個、計20個のBragg grating OFセンサを埋め込み、反射光の周波数シフトから、梁の歪み、温度をモニタリングする検討を行っている⁴⁸⁾。

各4個のBragg gratingは、1個のLD（980nm、60mW）と各々Erドープファイバを介して結ばれており、Bragg gratingに作用する歪み、温度を、Bragg gratingの周波数シフトとして測定する。測定可能な歪みは3000 μ ϵ までであるが、梁の歪みは2500 μ ϵ 以下なので十分使えるとしている。

⑩ OFセンサのビジネス状況

10th International Conference on Optical Fiber Sensorsでは、S.D.Crosslyが、10年間の商業OFセンサをレビューしているので要約しておく⁴⁹⁾。なお、このレビューは、87年のUK Optical Sensors Collaborative Associationが行った調査等を利用している。

調査の対象とした会社は213社あり、そのうちOFメーカーは約100社ある。国別で見ると米、英が多い（図4.1-51）。光ジャイロを除くOFセンサの種類は、温度、歪みセンサが最も多く（表4.1-3）、40社が作っている。

温度センサには3タイプあり、遠隔高温型：Celect Electronics(UK)、ARi、Luxtron、分散型：York、Ericsson、Cossor、蛍光型：Nortech Fibronics、Optrand Inc.、Takaoka Electric、Rosemountの各メーカーがある。

圧力センサも3種類あり、マイクロベント型：Babcock & Wilcox、光学原理型：FST、

Optrand、Dynisco、波長変換型：Lucas Control Systemがある。

歪みセンサには、MIT Instruments (Philtex + Optech)、Computer Optical Products、Litton Polyscientific、Smiths Industries、Teledyne Ryan、Dr. Johannes Riegl GmbH、SCICOMらがある。

液面レベル計には、Fuji、Lucasがある。

ガスセンサには、Rosemountがあり、特にヘルスケア分野向けに3M/CDI、AVL Photonics、Lightsense Corporation、Biomedical Sensorsがある。

化学センサには、Pharmacia Biotek、pHセンサには、3M/CDI、Lightsense、Optical System & Sensors、Synetics Medical、Fiberchemがある。

まとめると、87年には多くが開発段階にあったが、その後の7年を通して見ると、開発中であったセンサが商品に成長しつつあるとしており、Herga、York、Photonetics、Metri Cor's、Luxtron等は好調としている。しかしまた、93年には多くがビジネスに至らず、3M/EOTやAsterなど、OFセンサを別会社に移した例もある。これから魅力的なセンサとしては、オーバーヒートセンサ／Ericsson、Surface Plasmon Resonance装置／PharmaciaBiotek、PCカード分光計／Ocean Optics、圧力センサ／FST等を挙げている。

4. 1. 3 まとめ

全体を通してみると、あらかじめOFセンサの測定原理の検討そのものは一段落しているように思われ、最近では、Bragg gratingや複屈折OFを用いた高感度な干渉計型OFセンサの検討や、一本のOFラインにプローブを多点配置し、回折gratingや干渉計をレシーバ側に組みこんで信号を多重化する測定系の研究が活発である。特に多点型・分散型測定は、実際にスマートコンポジットにOFセンサを組み込むとき、信号の処理は複雑になるが、回路の集積化・小型化の進展を考えれば、結果としてハード的に簡略化できることになり、最も期待されるどころと言えよう。その際、ここでも研究例を紹介したが、ニューラルネットによる情報処理も興味深い。すなわち、学習というステップは踏むものの、複雑な信号処理・解析を行うことなく、コンポジットにとっては重要且つ高度な診断にまで踏み込んだスマート化の行える可能性があるためである。

高度化・高感度化の一方で、コンポジットへの影響を極力少なくするOFセンサの埋め込み方、あるいは過酷な使用条件下で信頼性・耐久性が高いOFセンサの貼り付け方など、

地味ではあるが、実際のOFセンサの適用において重要なOFセンサのintegrationの研究も依然続いており、また今回の調査を踏まえると、まだまだ検討すべき課題があると思われる。具体的には、研究例でもあったように、コンポジットの宿主材料とOFのインターフェースとなる接着剤やOFのコーティング材が重要である。この辺りはたんにOF側だけを考えてもうまくいかないように思われ、宿主材料との馴染みや剛性のバランス等力学特性も考えねばならず、かなりノウハウ的知見になりそうに思われる。

センサ用OFそのものについては、確かに商業的に細径のものや種々の材質のものが品揃えされていることが望ましいが、そうなるためにはある程度、量の出ることも必要であろう。スマートコンポジットの研究開発ではそういった面も今後考えておくべきであろう。今回の調査では殆どが石英OFである。耐熱性OFとしてサファイアロッドOF、化学的パラメータ・放射線の検出にプラスチッククラッドOFがあったが、研究例としては少ない。しかし、有機コンポジットや、極端にゴムを使うようなスマートコンポジットが出てくるとすれば、大変形に追随するOFも必要かもしれない。耐熱性がクリアできるのであれば、オールプラスチックOFも使えよう。以前、シリコンゴムを使った弾性OFもあった。これらは光の透過損失は大きいですが、プローブとして、あるいは短距離伝送路として使える可能性があり、今後検討していく必要があるだろう。

いずれにせよ本調査報告書の各章、各節で引用されているように、OFセンサはスマートコンポジットにおいて重要な役割を果たす。素材と呼ぶにはその役割が大きく、必須なシステム部品と捉えた方がよい。現在、OFは、通信分野を柱とするが、スマートマテリアル、スマートストラクチャが進展し、それに必須なものとなれば、センサ分野がもう一つの柱として成長することも期待できよう。

参考文献

- 1) 日機連：平成5年度航空機へのインテリジェントコンポジットシステムの適用に関する調査報告書、日機連5先端-3 (1994)
- 2) 工技院、(財)次世代金属・複合材料研究開発協会：スマートコンポジットシステム講演論文集 (1994)
- 3) 大越孝敬編著：光ファイバセンサ、オーム社 (1993)

- 4) W.W. Morey et al. : Proc. 10th International Conference on Optical Fiber Sensors (1994), pp. 234-237.
- 5) K. Kalli et al. : ibid.
- 6) G.P. Brady et al. : ibid., pp. 510-513.
- 7) A.T. Alavie et al. : SPIE, vol. 2191 (1994), pp. 103-110.
- 8) S.A. Egorov et al. : Proc. 10th International Conference on Optical Fiber Sensors (1994), pp. 347-350.
- 9) H. Giovannini et al. : ibid., pp. 175-179.
- 1 0) H. Shanglian et al. : J. Intelligent Material Systems and Sesors, vol. 5, No. 3 (1994), pp. 427-431.
- 1 1) V. Bhatia et al. : Proc. 10th International Conference on Optical Fiber Sensors (1994), pp. 171-174.
- 1 2) K.H. Wanser et al. : ibid., pp. 265-268.
- 1 3) M. Nikles et al. : ibid., pp. 138-141.
- 1 4) K. Shimizu et al. : ibid., pp. 142-145.
- 1 5) T. Wakami et al. : ibid., pp. 134-137.
- 1 6) G. Yaniv et al. : SPIE, vol. 1918 (1993), pp. 377-387.
- 1 7) W.C. Michie et al. : Proc. 10th International Conference on Optical Fiber Sensors (1994), pp. 130-133.
- 1 8) W.B. Spillman Jr. et al. : SPIE, vol. 1918 (1993), pp. 377-387.
- 1 9) Umesh K. Rao et al. : Sensors and Actuators A. 39 (1993), pp. 37-44.
- 2 0) E. Maurice et al. : Proc. 10th International Conference on Optical Fiber Sensors (1994), pp. 219-222.
- 2 1) V. Fericola et al. : ibid., pp. 211-214.
- 2 2) R. Claus et al. : ibid., pp. 384-387.
- 2 3) V. Gusmeroli et al. : ibid., pp. 199-204.
- 2 4) M.G. Xu et al. : ibid., pp. 191-193.
- 2 5) G.P. Carman et al. : Proc. Smart Structures and Materials (1994).
- 2 6) A. Mendez et al. : SPIE, vol. 1918 (1993).
- 2 7) Chia-Chen Chang et al. : ibid., pp. 138-144.

- 2 8) M.Holl et al. : Proc. Smart Structures and Materials (1993).
- 2 9) K.A.Murphy et al. : SPIE, vol.2191 (1994).
- 3 0) P.A.Wallace et al. : Proc. 10th International Conference on Optical Fiber
Sensors (1994), pp.465-467.
- 3 1) M.Q.Feng et al. : ibid., pp.223-226.
- 3 2) S.R.Kidd et al. : ibid., pp.245-248.
- 3 3) M.Kull et al : ibid., pp.187-189.
- 3 4) M.F.Gunther et al. : SPIE, vol.2191 (1994), pp.308-313.
- 3 5) K.Johannessen et al. : Proc. 10th International Conference on Optical Fiber
Sensors (1994), pp.368-367.
- 3 6) L.DiFiore et al. : ibid., pp.580-583.
- 3 7) B.M.Rogina et al. : ibid., pp.468-470.
- 3 8) D.P.Henkel : SPIE, vol.1916 (1993), pp.97-108.
- 3 9) M.F.Gunther et al. : SPIE, vol.2191 (1994), pp.2-12.
- 4 0) M.F.Gunther et al. : Proc. 10th International Conference on Optical Fiber
Sensors (1994), pp.493-496.
- 4 1) R.Davidson et al. : Measurement 11 (1993), pp.347-360.
- 4 2) S.H.Poland et al. : SPIE, vol.1918 (1993), pp.122-130.
- 4 3) G.M.Nau et al. : ibid., pp.248-255.
- 4 4) M.F.Gunther et al. : Proc. 10th International Conference on Optical Fiber
Sensors (1994), pp.372-375.
- 4 5) A.Henriksson et al. : ibid., pp.473-476.
- 4 6) C.Meunier et al. : ibid., pp.238-244.
- 4 7) 柿沢 : 機能材料 (1994), vol.14, No.12. pp.5-15
- 4 8) R.M.Measure et al. : Conf. Proc. Laser and Electro-optics Society Annual
Meeting (IEEE) (1993), pp.137-138.
- 4 9) S.D.Crossly : Proc. 10th International Conference on Optical Fiber Sensors
(1994), pp.249-252.

4.2 圧電材料

4.2.1 研究開発動向

(1) 研究開発の歴史的背景

圧電セラミックスであるチタン酸バリウムが発見されたのは、約50年前の1940年代前半である。それ以前から圧電効果は水晶などの単結晶で知られていたが、多結晶で圧電効果の発現が確認されたのはチタン酸バリウム (BaTiO_3) が最初である。この物質は化学式が ABO_3 で表されるペルブスカイト型であり、その後、AおよびBを各種の金属元素に置換して、それぞれの用途に適した圧電セラミックスが開発された。特に1995年米国のクレバイト社が PbZrO_3 - PbTiO_3 の相境界 (MPB) 近傍の組成で BaTiO_3 の約1.5倍の圧電性の得られる、いわゆるPZTを開発し、圧電セラミックスの実用化が急速に普及した。以来、圧電セラミックスの研究はPZTへ第3成分を加えた複合ペルブスカイトが中心になり、それぞれの圧電デバイスに適した組成物が開発された。機能デバイスとしての圧電アクチュエータの応用は20年程以前から特殊な分野で検討されていたが、民生品レベルへの普及には至らなかった。

圧電アクチュエータの名前が世の中に知られ、機能デバイスとしてその性能が認識されたのは、10年前の1985年に、一体焼結タイプの積層型圧電アクチュエータがワイヤードットプリンタ用に開発されて以来である。その後、圧電アクチュエータは、精密位置制御、微小変位量駆動用に実用化の検討がなされ、様々な用途に使用されている。

(2) 圧電材料の特徴

圧電セラミックスの特徴は、圧電効果をもたらす結晶軸を外部電界により容易に揃えられることであり、圧電アクチュエータの変位量は圧電セラミックスの圧電 d_{33} 定数と印加電圧の積に比例するので、アクチュエータ用圧電セラミック材料として、一般的には圧電 d_{33} 定数の大きな材料が使用される。表4-2-1に代表的な圧電アクチュエータ用圧電材料の諸特性を示した。また、焼結温度の低い圧電材料を用いると内部電極として比較的安価な銀-パラジウム合金を使用できるので、圧電アクチュエータの低価格化のための工業的な観点から望ましい。現在この条件を満たす圧電材料として $\text{Pb}(\text{Ni} \cdot \text{Nb})\text{Ti} \cdot \text{ZrO}_3$ 系材料が実用に供されている。

第4.2-1表

材料名	N - 10	SPEM - 5D	HCE - PE24
成分系	Pb (Ni, Nb) Ti, Zr, O ₃	Pb (Ni, Nb, Zn) Ti, Zr, O ₃	Pb (Zr, Ti) -MO ₃
比誘電率	5 4 4 0	4 3 0 0	3 3 0 0
電気機械 結合係数	K ₃₁ K ₃₃	0.3 5 5 0.7 0	0.4 2 0.6 6
圧電定数	d ₃₁	- 2 9 0	- 2 9 0
×10 ⁻¹² (m/v) d ₃₃	6 3 5	6 4 0	6 6 7
機械的品質係数 Q _m	7 0	5 0	6 8
キュリー温度 (°C)	1 4 5	2 1 0	2 1 0

4.2.2 積層圧電アクチュエータの新しい構造

最近、工作機械や各種産業機器、計測機器等の高精度化に伴って、動作の信頼性が高く、しかも高速動作が可能な超精密位置決め技術の確立が強く要望されている。また、半導体製造技術を用いて、シリコンウエハー上に数百ミクロンの大きさの複雑な構造体や可動素子（マイクロマシン）を形成するマイクロマシニングの研究や、走査型プローブ顕微鏡を用いて、物体表面上の数ナノメートルオーダーの寸法測定や加工の研究が活発化している。これら超精密位置決めやマイクロマシニング等の研究開発にとって、マイクロオーダーの変位量を高精度に再現性良く得られるマイクロアクチュエータが必要である。

これらの要求を満たすアクチュエータとして、図4.2-1、2のように内部電極構造を立体的な交差指電極とすることで積層方向と直交方向に圧電縦効果で変位する積層型セラミックアクチュエータの研究が行われている。この構造では変位方向の長さの制約が少なく、内部電極用の貴金属の使用量が少なく、製造プロセスも簡略化されるので、アクチュエータの低価格化が期待できる。ここでは従来構造と立体的な交差指内部電極構造の積層セラミックアクチュエータを比較し、寸法構造、変位量、その他の諸特性について述べる。

従来のアクチュエータ構造は、積層方向に直交するセラミック断面と内部電極の面積が一致し、表面側面に露出した内部電極が一層ずつ対向電極となるように、一層置きに表面で絶縁処理され、その絶縁体の上に外部電極が形成された構造である。この構造では、積層方向と圧電縦効果の変位方向が一致し、電圧を印加すると、内部電極間のセラミック部が均一に変位するので、内部に応力の集中が無く、繰り返しの駆動で高い信頼性が得られ

ている。しかし、面状内部電極のため貴金属の使用量が多く、表面絶縁処理等の製造プロセスが複雑で、コスト的に問題があり、また内部電極とセラミックスが反応しないで機械的に密着しているだけなので引っ張り強度が弱いという問題点がある。

立体的に交差指電極を内部電極に用いた積層セラミックアクチュエータでは、積層方向に直交方向に櫛刃状内部電極が形成され、この櫛刃状内部電極は、積層方向で一層ずつ半ピッチずれて立体的交差指を構成し、かつ櫛刃状電極が積層方向で一層ずつ対向電極となるように側面で外部電極に接続した構造である。この構造では、積層方向と直交方向に圧電縦効果で変位し、変位方向の長さは交差指を形成するパターンや積層一体化する金型の大きさにのみ制約され、一体焼結で80 mm程度の長さのアクチュエータが実現されている。また、この構造では内部電極が櫛刃状なので使用量が少なく、表面上の絶縁処理工程等を省略できるので製造コストの低下が期待できる。

4.2.3 積層圧電アクチュエータの変位量

マイクロオーダーの変位量を電圧で制御可能なアクチュエータの研究開発にとって、構造と変位量の関係の計算式が必要である。

従来型の積層セラミックアクチュエータの変位量 δ_1 は、内部電極間のセラミックスの層数を N 、圧電縦歪定数を d_{33} 、印加電圧を V とすると(1)式で計算できる。

$$\delta_1 = \alpha \cdot N \cdot d_{33} \cdot V \quad (1)$$

ここで、 α は弱電界下の共振-反共振周波数の測定から計算した d_{33} の強電界における補正係数で1.5程度である。

内部電極に立体的交差指電極を用いた積層セラミックアクチュエータの変位量は基本的には(1)式を展開して計算することが出来る。但し、長さ方向の電界は実際の印加電界から θ 傾いているので変位量は(2)式のようになる。

$$\delta_2 = \alpha \cdot (2n - 1) \cdot d_{33} \cdot \cos\theta \cdot V \quad (2)$$

ここで、 n は長さ方向の櫛刃交差指電極数で、 $(2n - 1)$ は立体交差指電極間隔数である。この(2)式は変位方向の長さ寸法が40 mm以上の場合に、変位量の実測値と比較的精度良く計算値が求められるが、アクチュエータ寸法が小さくなると、アクチュエータの中で変位量を拘束する部分の体積比率が大きくなることと、 θ が大きくなり圧電横効果の影響等に起因して、実測値と計算値の差が大きくなる。この場合には形状効果と圧電横効果 ($d_{33} \cdot \sin\theta$) を考慮した(3)式を用いて変位量を計算することが出来る。

$$\delta_3 = A \cdot (2n - 1) \cdot (\alpha \cdot d_{33} \cdot \cos\theta + \beta \cdot d_{31} \cdot \sin\theta) \cdot V \quad (3)$$

ここで、Aは形状効果の補正係数で、 β は α と同じ d_{31} の強電界における補正係数と形状の補正係数の積で3.0程度である。

4.2.4 その他のアクチュエータ特性

従来構造と立体的交差指電極構造の積層セラミックアクチュエータの変位量以外の特性比較を第4-2-2表に示した。

第4.2-2表

	従来構造	立体交差指電極構造
発生力 (Kgf)	21	24
静電容量 (nF)	400	180
絶縁抵抗 (M Ω)	800	1500
ヤング率 (N/m ²)	6.1×10^{10}	6.9×10^{10}
曲げ強度 (Kgf/mm ²)	4.4	6.8

発生力の大きさは「アクチュエータに電圧を印加して発生した変位量を、変位軸方向に機械的な負荷を加えて、発生変位量をゼロに戻すのに必要な負荷の値」と定義している。その大きさFは前項の変位量 δ と、アクチュエータのヤング率 Y_{33} を用いて式(4)で計算する事が出来る。

$$F = \delta \cdot Y_{33} \cdot (S/L) \quad (4)$$

ここで、Sは断面積、Lは変位方向の長さである。ヤング率はアクチュエータの密度 ρ と音速 v から(5)式で計算することが出来、さらに音速 v はアクチュエータの長さLと共振周波数 fr を測定することで(6)式で求めることが可能である。

$$Y_{33} = \rho \cdot v^2 \quad (5)$$

$$v = 2fr \cdot L \quad (6)$$

表2中で発生力やヤング率が立体交差指電極構造のアクチュエータの方が従来構造より大きな値となっているのは、立体交差指電極構造は変位軸方向でセラミック単独の部分が存在し、それに対して、従来構造は変位軸方向にセラミック層と内部電極層の複合構造であり、内部電極の応力に対する塑性変形が影響しているものと考えられる。この構造の違いは、三点曲げ試験結果にも現れており、立体交差指電極構造のアクチュエータの方が従来構造より大きな値となっている。

また、静電容量の大きさは積層セラミックアクチュエータを高速駆動した時の電流値に影響し、静電容量が小さいと駆動電源の電流容量が小さくなるので、立体交差指電極構造のアクチュエータの方が小さな電流容量の駆動電源を用いることが可能である。

4.2.5 圧電アクチュエータの応用動向

最近の半導体メモリの高密度化は、量産レベルで16Mビット、研究開発では1Gビットに達している。それに伴い露光装置や描画装置にはサブミクロンオーダー、あるいはそれ以上の超精密位置決め精度が要求されている。また、1987年に積層セラミックアクチュエータが印字速度が110CPSのインパクトプリンタのワイヤー駆動に実用化され、以来、大幅な性能の改善がなされず、現在でも155CPSの高速印字プリンタに搭載されている。プリンタの印字速度は、更に超高速化の傾向にあり、それに対応した低価格アクチュエータが要求されている。

これらの急速な技術革新に伴う、マイクロアクチュエータに対する市場要求条件、要求特性の変化を的確に把握し、市場要求を満足する性能の積層セラミックアクチュエータの開発が今後必要である。さらにセラミック材料、アクチュエータ構造、製造プロセス等を開発することで、より高性能な積層セラミックアクチュエータを実現し、新たな用途を開拓して行く必要がある。

4.2.6 線形バイモルフ圧電アクチュエータ

ニオブ酸リチウム (LiNbO_3) の単分域結晶板をキュリー点より若干低い温度で熱処理すると、電界を印加することなく自発分極が反転した層が図4.2-3のように板厚の半分形成できる。この板の上下面に電極を付け電圧を印加すると、反転分域と未反転分域では発生する長さ方向伸縮歪の符号が逆になり、結果的に屈曲変位を生じる。このようにして接着層のない単一圧電板でバイモルフ型アクチュエータが実現できる。図4.2-4にアクチュエータの一端を固定し、そこから20mm離れた自由端の変位を測定した結果を図4.2-5に示す。かなり大きな変形に対してもヒステリシスがないことがわかる。この優れた直線性を用いることにより超精密な変位制御用アクチュエータとしての応用が期待できる。

4.2.7 光歪アクチュエータ

圧電体に近紫外光を照射すると、電子の励起が特定の方向性をもって起こり、結晶全体

に大きな電位勾配が発生する。これは強誘電体の光起電力効果に由来し、結晶構造が中心対称性をもたないことと、不純物の存在がキーポイントである。これらの結晶は圧電性も兼ね備えているので、両効果の重畳として、光の照射による歪が誘起される。図4.2-6は、外部印加電界が零、電極間開放状態で、光をステップ状に照射（ $\sim 17\text{mW/cm}^2$ ）したときの誘起歪の時間応答を示したものである。光誘起歪の大きさは、圧電定数と光起電界の積でほぼ定量的に説明できる。

光歪アクチュエータの応用が最近多く研究されているが^{(3)~(6)}、応答性の速い材料の開発が必要である。

4.2.8 形状記憶圧電材料

圧電材料の印加電界と歪には、一般にヒステリシスが存在するが、そのヒステリシスを十分に大きな角形にすると、印加電界によって歪のオンおよびオフというべき2状態が存在する。図4.2-7にPZT派生系の反強誘電体についての強誘電相への電界誘起相転移にともなう自発歪の変位を示す。相転移の際の歪変化量と比較して、反強誘電状態あるいは強誘電状態での歪の電界依存性は小さく、歪のオンとオフ状態が実現されており、デジタル的な使用が可能である。ただし、相転移の応答速度は比較的遅い。また相転移に伴う破壊現象は従来の電圧セラミックとは異なり、図4.2-8のように電極端とは無関係に起きる。破壊強度を上げて繰り返し使えるように改良することが必要である。

4.2.9 圧電捻りアクチュエータ

外周面に交差指電極を形成した圧電セラミック中空柱単体からなる圧電捻り振動子が提案されている。図4.2-9に捻りアクチュエータの構造と電極パターンを示す。交差指電極は円筒の軸方向と 45° の角度をなすようにする。上の直流電圧を印加し、印加電圧の大きさおよび極性を連続的に変化させ捻り角を測定すると図4.2-10のようにヒステリシスループを描く。なお t は円筒の肉厚、 p は電極ピッチである。

4.2.10 むすび

圧電材料の最近の進歩は著しいものがあり、性能が高くなっているが、まだまだ改良の余地があり、今後スマートコンポジットのセンサ・アクチュエータ材料として期待できる。

参考文献

- (1) 布田, 大橋, 吉田: 日本機械学会, ロボティクス・メカトロニクス講演会論文集, (1993), 446-449頁.
- (2) 中村, 清水: 第25回東北大通研シンポジウム「超音波エレクトロニクスー新しい圧電応用ー」, (1989), 35-40頁.
- (3) 内野: 圧電/電歪アクチュエータ, 森北出版, (1986), 202-204頁.
- (4) 服部, 福田, 永守: 日本ロボット学会誌, 9巻(1991), 692-699頁.
- (5) 中田, その他4名: 日本機械学会論文集, C編, 57巻(1991), 48頁.
- (6) 福田, その他4名: 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会論文集, (1992), 535-536頁.
- (7) K. Uchino, Proceedings of 2nd International Symposium on Intelligent Materials, (1994), pp.1248-1268.
- (8) 布田, 増子, 吉田: 日本機械学会第3回電磁力関連のダイナミクスシンポジウム講演論文集, (1991), 154-157頁.

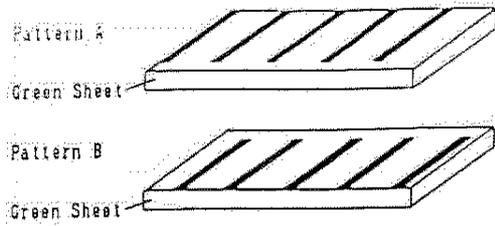


図 4.2-1 交差指電極パターン

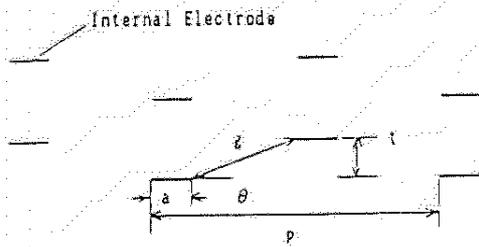


図 4.2-2 立体配置を示す断面

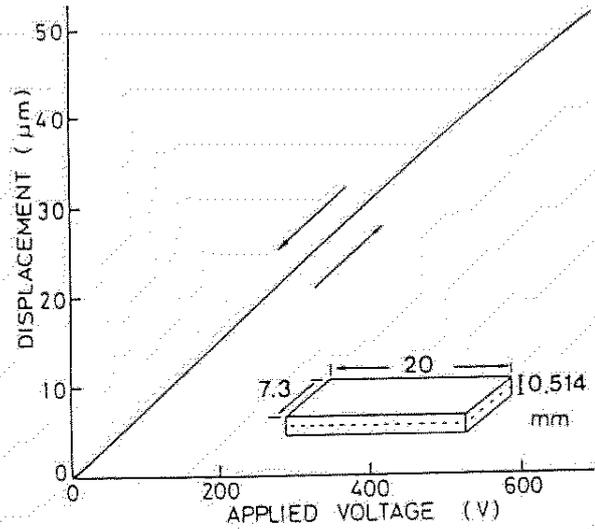


図 4.2-5 140°回転Y板を用いた屈曲型アクチュエータの変位-電圧特性

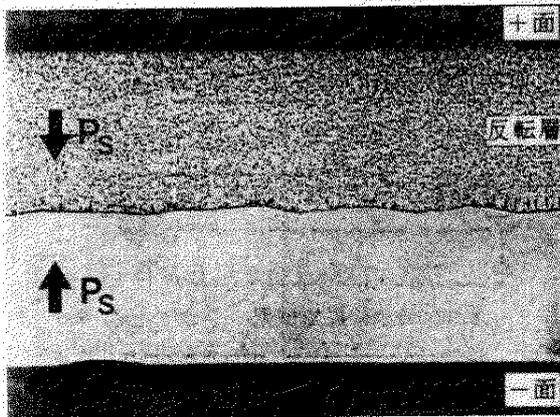


図 4.2-3 熱処理した140°回転Y板の断面 (Z' 面) における分域構造 (板厚: 0.5mm)

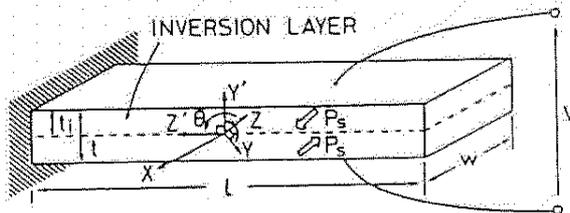


図 4.2-4 分極反転層を利用した屈曲型アクチュエータ

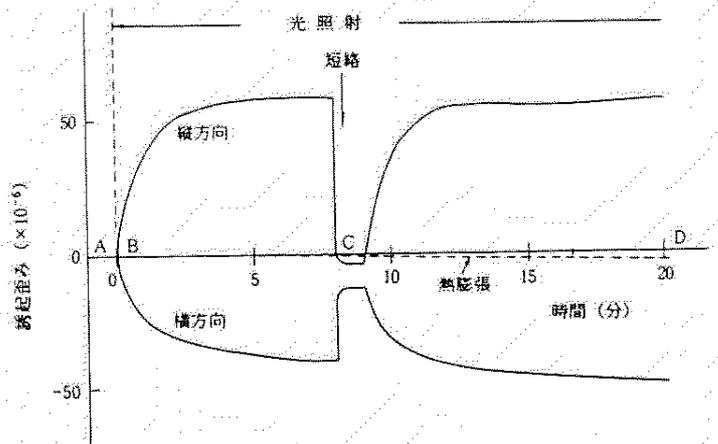
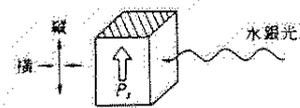


図 4.2-6 PLZT磁器における光誘起歪み効果

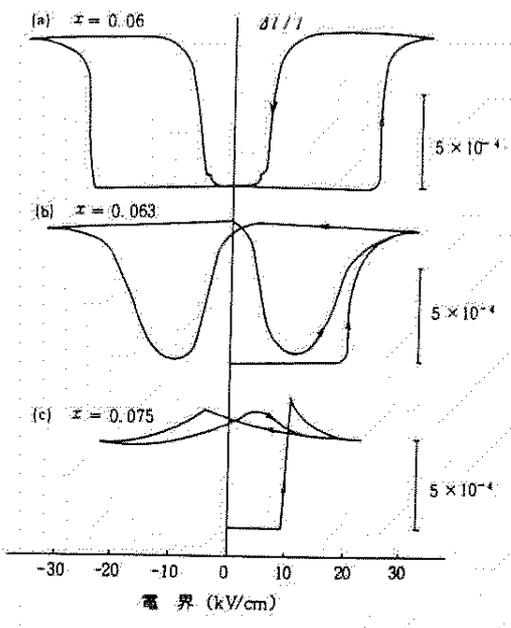


図 4.2-7 反強誘電体 $Pb_{0.99}Nb_{0.02}[(Zr_{0.6}Sn_{0.4})_{1-x}Ti_x]_{0.98}O_3$

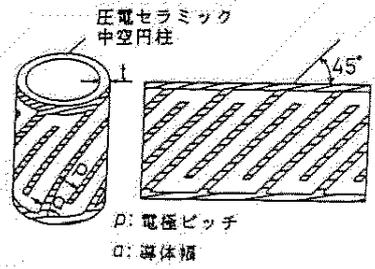
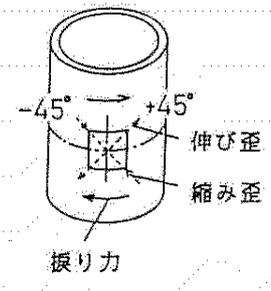


図 4.2-9 捻りアクチュエータの構造と電極パターン

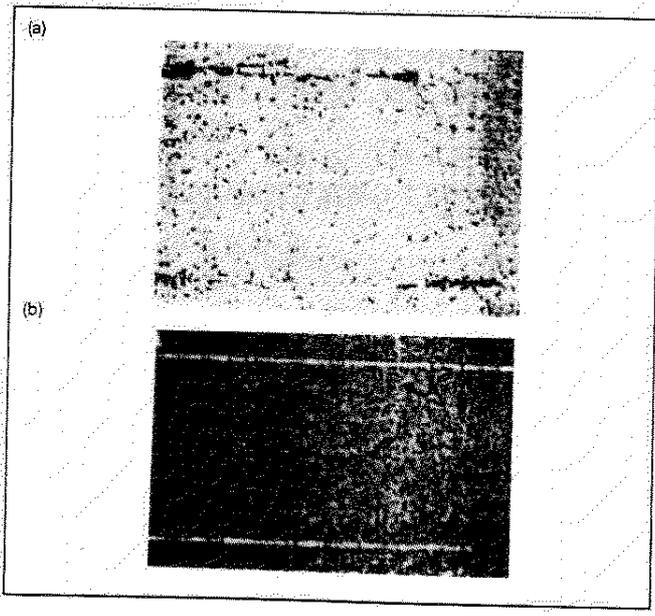


図 4.2-8 (a) PNNZTの破壊パターン
(b) 相転移PNZSTの破壊パターン

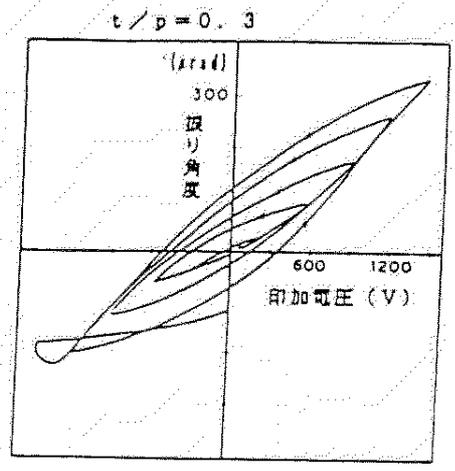


図 4.2-10 印加電圧と捻り角度

4. 3 超磁歪材料

4. 3. 1 研究開発動向^{(1) (2)}

(1) 研究開発の歴史

「磁歪」とは磁性体が外部磁場によって形状変化を起こす現象のことを言い、磁歪現象自体は古くから知られていた。以下に歴史的経緯を概観する。

1940年代に磁歪現象がようやく実用化の段階に入り、超音波に利用されるようになった。しかし、その当時使用されていた材料はニッケル、コバルトのような既存材料であり、磁歪値は 40×10^{-6} に留まった。

1950年代に入ると磁歪材料としてアルフェルFe-13%Alが開発されたが、磁歪値に大した変化はなかった。

1960年代には材料としてフェライトが取り上げられたが、やはり磁歪値に向上は見られなかった。しかし、この年代にTb, Dyなどが磁歪材料として研究され始めている点は注目すべきである。これらは極低温において巨大な磁歪値を示すことが発見されたが、極低温ゆえに実用化には至らなかった。

1970年代には希土類金属の極低温における超磁歪現象をいかにして常温まで持ってきて、実用へと繋げるかの研究が盛んになされた。

1980年代になって上記の研究が実り、超磁歪材料の開発に至った。そして、各種デバイスへの応用も行なわれ始めた。

1990年代は日本やヨーロッパを中心として応用研究、製造技術も進歩し、様々なサイズの試験片が作成できるようになり、研究対象の素材というより開発者のためのコンポーネント開発材料としての関心が高まってきた。したがって、超磁歪材料は、現在、実用デバイスの開発の段階に突入していると言える。

(2) 超磁歪材料の特徴

先にも述べたとおり、磁歪は磁性材料の基本的な特質であるが、超磁歪材料はこの効果が非常に大きいことを特徴とする。「超」磁歪とは、巨大(0.1%以上)磁歪を有する軟磁性材料のことを指し、巨大磁歪現象を保持したままどこまで軟磁性が実現可能かが材料開発上の課題とされている。特徴を箇条書きにすると次のようになる。

1) 【JOULE効果】外部より自発磁化と異なる方向から磁界を加えると、磁化はその方向に回転する。

すると歪みの均衡点が移動し、その結果寸法が変化する（図 4.3-1）。これが磁歪である。

2) 【VILLARI効果】逆に、外部から機械的圧力を加えて結晶を歪ませると磁化量が変化する（図 4.3-2）。これが逆磁歪である。

3) 【200%を越す ΔE 効果】磁歪が生じることで弾性率が変化し音速が変わる（図 4.3-3）。

4) 【VIEDEMANN効果】同時に縦横 2 方向から磁界をかけると振れる（図 4.3-4）。

5) 【逆VIEDEMANN効果】逆に、振じれば磁化が変化する（図 4.3-5）。

6) 【プレ・ストレス現象】磁歪材料を駆動素子として使用した場合、駆動前の変位方向の静的な力（プレ・ストレス）および駆動時の変位速度と負荷質量に応じた加速度応答が加わるが、この応力は磁歪材料の磁化状態と弾性に作用するため、外部磁界と磁歪量との関係が外部応力の強さに依存して異なることになる（図 4.3-6）。

（3）圧電材料との比較

超磁歪材料を圧電（電歪）材料と比較した場合の相違を簡潔に箇条書きにする。

1) 電流（磁界）駆動である【圧電材料は電圧（電界）駆動】。

2) 歪率がPZTに比較して5～10倍大きい。

3) 発生応力がPZTに比較して2～3倍大きい。

4) ヤング率がPZTに比較して約1/4である。

5) 結合係数が約0.75である。

このような比較は方々で散見される⁽³⁾（表 4.3-1）が、従来圧電材料が使用されてきた部材を単純に超磁歪材料で置き換えるだけの応用を勧めるものではないことに注意を喚起したい。超磁歪素子による圧電素子の完全な代替は不可能であるし、また超磁歪材料独自の性質に根差したデバイス応用を考えなければ、超磁歪材料応用面でのブレークスルーが得られないことは言うまでもない。

（4）国外の研究開発現状

米国では、1980年代においてアイオワ大エイムス研究所で、主に超磁歪材料の研究が行なわれてきた。これは米国海軍およびエネルギー省の援助を受けて行なわれたものであり、超磁歪材料開発のめどが立った。その後、直ちにこの技術の民間移転が行なわれ、エッジ社で工業化されて超磁歪材料の世界的供給元となった。同社では応用デバイスの開発にも取り組んでいる。

またヨーロッパでは、1980年代にウプサラ大（スウェーデン）、ルンド大（スウェーデン）で研究が行なわれ、成果はフェレグイン社（スウェーデン）へ技術移転され、同社がヨーロッパでの超磁歪材料の供給元になっている。研究開発は多くの機関で盛んに行なわれているが、ベルリン工科大、

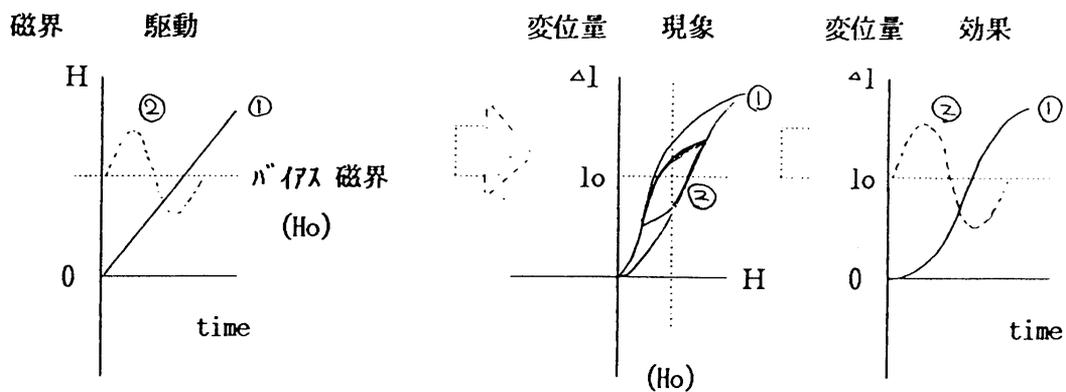


图 4.3-1 磁歪効果

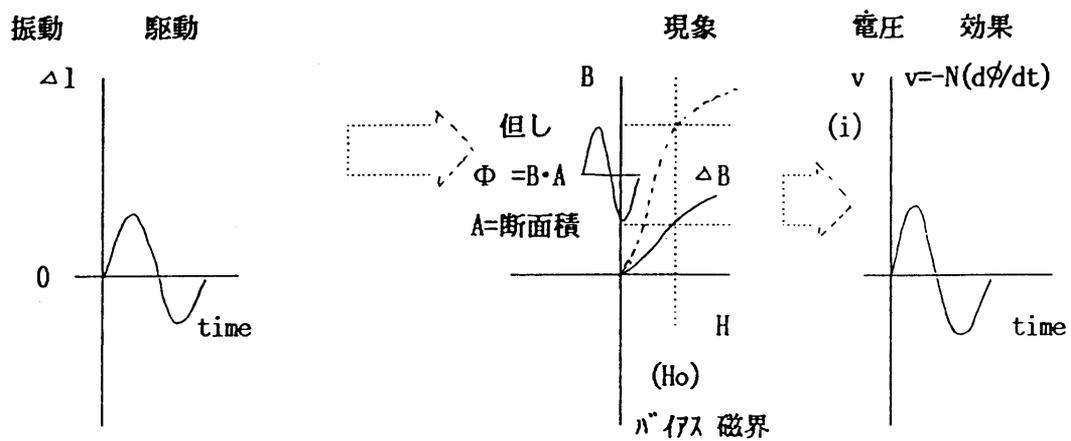


图 4.3-2 逆磁歪効果

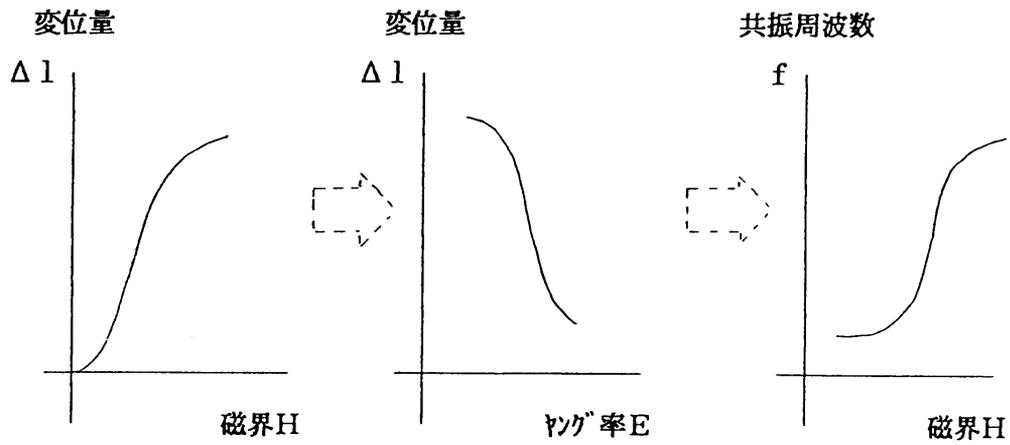


図 4.3-3 ΔE 効果

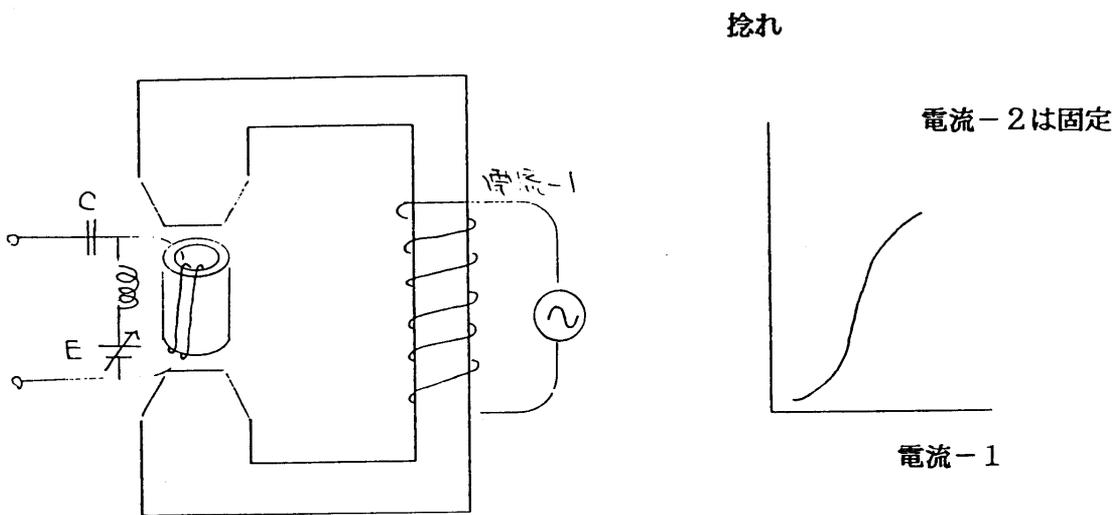


図 4.3-4 VIEDEMANN 効果

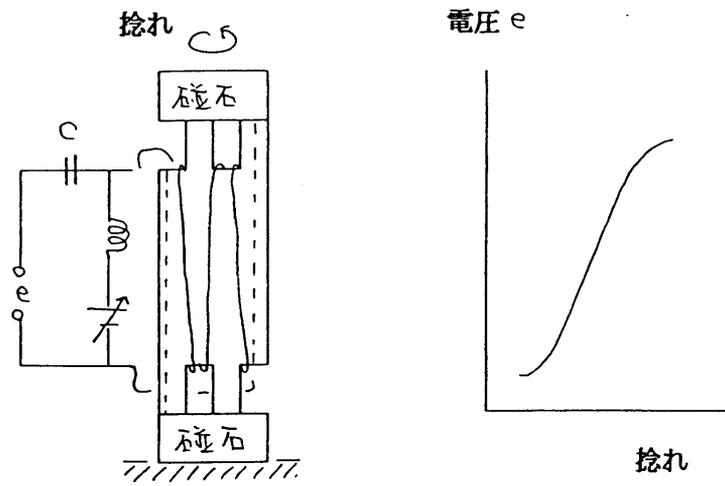


図 4.3-5 逆VIEDEMANN 効果

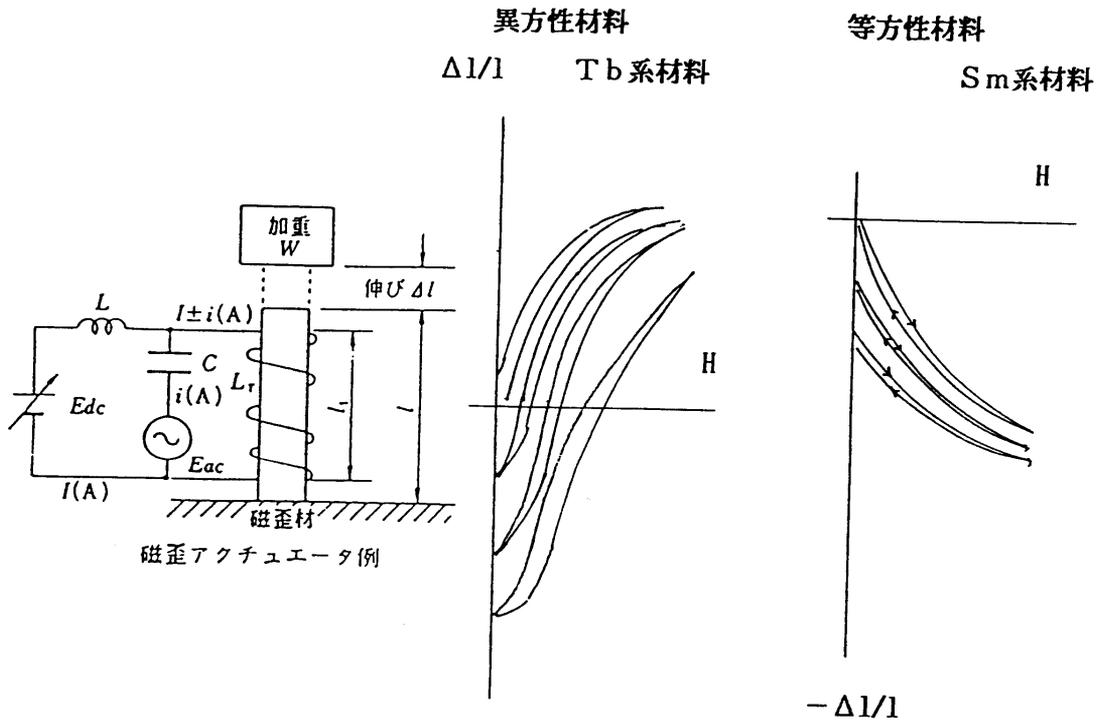


図 4.3-6 プレ・ストレス現象

ハノーバー大での研究が名高い。

(5) 国内の研究開発現状

一方、日本では、欧米と比べて時間的に遅れて研究がスタートしたものの、現在では欧米の研究開発水準に対して遜色はないと言える。基礎研究では東北大学の寄与が大きく、応用面では茨城大、明治大、豊田工大などで研究が進んでいる。2、3の日本企業で超磁歪材料の製造技術を完成しており、デバイス等応用に関しても数社が研究開発に取り組んでいる。

4. 3. 2 デバイスへの応用

(1) デバイス応用上の問題点⁽²⁾

デバイスへの応用の観点から超磁歪材料の長所をまとめ直すと以下のようになる。

- 1) 変位量が大きい。
- 2) 磁界方向に伸びる（正磁歪）、逆に縮む（負磁歪）材料がある。
- 3) キュリー温度が高い（高温での使用可）
- 4) 低電圧駆動可能
- 5) 電極が無い場合非接触で駆動できる。
- 6) 発生応力が大きい。
- 7) 等方的駆動が可能なので、任意形状で設計できる。

一方、短所をまとめると以下のようになる。

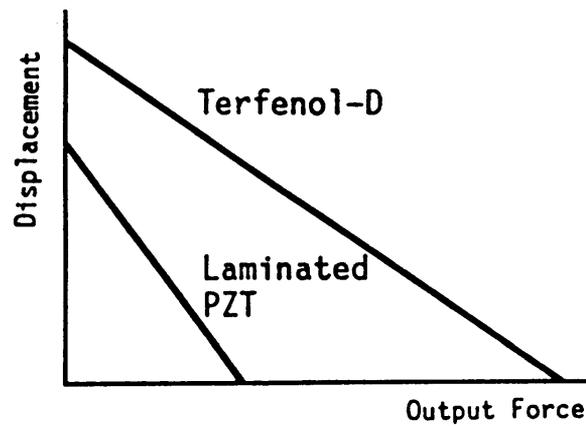
- 1) 磁場に対する歪応答が不十分。

RFe₂に代表される超磁歪材料は比透磁率 ($\mu_r = B/\mu_0 H$) が低く、磁化させるために大きな駆動（外部）磁界を必要とする。この結果、コイルは過大となり時定数が大きくなる。永久磁石等のバイアス磁場を利用したとしても、単純なコイルで十分な歪量を得るためには、大電流が必要で、ジュール熱による損失も大きくなる。実用においてコイルによる素子の加熱や応答速度の劣化は致命的である。改善策は、いかにしてコイルを小さくできるか、に尽きる。

- 2) 電気伝導度が高く、高周波数領域（100Hz以上）では渦電流損失の問題がある。
- 3) 透磁率が低いため磁束漏洩対策が必要となり、設計が磁気回路設計が難しい。
- 4) 脆性材料であり、通常の金属材料と同じ設計ではチップング等の問題がある（強度関連のデータが不足している）。
- 5) ヤング率を含む基本特性が温度、磁場強度、負荷条件に依存する（デバイス設計しにくい）。

表 4.3-1 PZTおよび磁歪素子と超磁歪材料の特性比較

項目	超磁歪材料	圧電材料(PZT)	純ニッケル
密度(10^3 kg/m^3)	9.25	7.49	9.5
ヤング率(10^{10} N/m^2)	2.5~3.5	7.5	22.5
電気抵抗率($\mu \Omega \text{ cm}$)	60	—	6.6
飽和歪量(ppm)	1500~2000	100	-40
発生応力(kgf/mm^2)	3.0	1.5	0.1
エネルギー密度(J/m^3)	14000~25000	930	30
結合係数(%)	70~75	65	30
音速(m/s)	1720	3130	4940
透磁率(emu)	4.5~9.3	—	60



積層型 P Z T と超磁歪材の特性比較

表 4.3-2 超磁歪材料の応用製品

用途分類	動力機器	アクチュエータ			振動素子		フィルター素子
		電子機器	OA.FA.HA	車載用デバイス	共振	非共振	
デバイス名称	ポンプ	VTR	プリンタヘッド	ロックセンサ	溶接機	高速モータ	遅延回路素子
	ファン	カメラ	リレー	エンジンのタペット 開閉	カッター		メニルフィルター
特性項目	位置決め	フォーカス	ロボット		ソナー	圧延展 機	可変周波数 変換器
	プッシャー	シャッター	リニアモータ	バルブ制御	レベル スイッチ	皮膜 除去	弾性波素子
	フィーダ	小型モータ	バルブ開閉	蛇輪操作			サウンデューサ
	モータ	小型 リニアモータ	光字リジッド 高速プッシャー	燃料噴射ノズル	ブザー	距離計 速度計 流量計	医療メス 粉砕機 音響 機器
磁歪 (ppm) at 1 kOe	○	○	○	○	△	○	○
磁歪率 (ppm/Oe)	○	○	○	○	○	○	○
Δ音速 (m/sec)	—	—	—	—	—	—	○
応力 (kg/cm ²)	○	○	○	○	△	○	△
機械的Q	×	×	×	×	○	×	×
残留磁歪 (Oe)	○	○	○	△	○	○	○
透磁率	△	○	○	△	○	○	△
キュリー温度 (℃)	○	—	—	○	○	○	—
抗折強度 (kg/mm ²)	○	○	○	○	○	○	—
膨張係数 (ppm/℃)	○	△	△	△	—	—	○

以下の超磁歪材料応用デバイス一覧表（表4.3-2）の中から、各種の資料において重複して取り上げられ、特に注目されていると思われる開発例をピックアップする。

（2）開発例その1；センサ

歪みゲージ⁽¹³⁾

磁歪材料の透磁率が応力によって大きく変化する性質を利用している（図4.3-7）。半導体ゲージ等に比べて3桁程度高感度にでき、ゲージと検出用コイルは非接触にできる等の利点がある。

変位センサ⁽⁴⁾

VIEDEMANN効果とVILLARI効果を利用して高精度の変位センサを構築している（図4.3-8）。導波管の中心の導体にパルス電流を流すと、周方向の磁界がパルス電流の進行に沿って進む。このとき導波管外周部に移動自由なリング磁石があると、部分的に磁界が振れてVIEDEMANN効果によって振れ波が発生する。この弾性波がストレインテープ（磁歪リボン）に伝わって、VILLARI効果により検出コイルに電圧を誘起させる。このとき、パルス電流と誘起電圧の時間差からリング磁石の位置を同定する仕組みである。

ロボットの触覚センサ⁽⁵⁾

磁歪材料に加わる圧縮力／引張り力によって磁束分布が変化する性質を用いてロードセルとして利用できる（図4.3-9）。線形性がよく、ヒステリシスも小さく、ダイナミックレンジが広く、温度特性に優れた高感度材料が開発されている。

アモルファスリボンの力センサ⁽⁶⁾

アモルファス金属の機械的性質と磁歪特性を利用した力センサが検討されている（図4.3-10）。アモルファス金属はヤング率が高く小変形でも力測定が可能な利点があり、引張りセンサ向きである。一方、超磁歪材料は負荷特性に優れ、圧縮応力測定や超高压センサとしても期待されている。

（3）開発例その2；アクチュエータ

単一ステップ型⁽¹⁾

超磁歪ロッドの軸方向に磁界を加えた時の変形を推力あるいは変位の形でそのまま利用する、オン・オフ的なアクチュエータであり、精密位置決め用等に用いられる。超磁歪材料の強大な発生応力のため、レバー機構などで変位を増幅しても推力が得られる。（図4.3-11）

連続ステップ型⁽¹⁶⁾

超磁歪ロッドに繰返し磁界を加えることによって、その変形を累積的に利用して連続的な直進あるいは回転を行なうもので、インチワーム方式をとる場合が多い。超磁歪材料は

変形量は大きくとれるものの渦電流損失のため動作周波数に制限をうける。回転型もあるが、ここではリニアアクチュエータの代表的なものを示す（図4.3-12）。

振動型アクチュエータ⁽¹⁵⁾

超磁歪ロッドに正弦波状の一定周期の磁界を加えることによって、一定周期の振動を励振共振器として用いるもの。電磁アクチュエータや圧電アクチュエータに比較して大きな出力が期待できる。やはり渦電流損失のため動作周波数に制限をうける。リニアアクチュエータ超音波モータとして用いられているものを例として示す（図4.3-13）。

(4) 開発例その3；その他

磁歪クラッチ⁽²⁾

構造がシンプルで非接触駆動を可能にした。発生応力は大きく応答速度も速い利点がある（図4.3-14）。しかし、熱膨張係数が大きく靱性も悪いことが現段階の難点とされている。

超磁歪ポンプ⁽³⁾

超磁歪材料製駆動素子、駆動用の永久磁石とコイル、および変位増幅のためのレバー機構からなる駆動部分と、ダイヤフラム方式によるポンプ室から構成される、気液両用ポンプである（図4.3-15）。連続／間欠／液滴モードに至る広範囲の流量制御が可能で低電圧駆動を特徴とする。

音響変換素子⁽¹⁴⁾

超磁歪音響変換素子は、固体／液体／気体中に音を放射できるが、機械インピーダンスが高いこともあって、固体あるいは液体中に強い音を放射するのに用いられることが多い。例としてTompilz Type変換素子を示す（図4.3-16）。

光学的制御素子⁽⁷⁾⁽⁸⁾⁽⁹⁾

スプリングタイプ磁歪アクチュエータ（STMA）を用いた適応光学素子と呼ばれる反射鏡がある。適応光学系とは、可変形状の反射鏡を用いてリアルタイムで光波面を補正するための光学系であり、レーザの位相補償や天体望遠鏡の光学像を補正するために用いられる。天体望遠鏡の光学像を補正の例（図4.3-17）では、仕様として局所的な変形量で数 μm 、精度は $\sim 0.1\ \mu\text{m}$ 、変形の時定数で数 m sec が要求される。構造はスプリング状の磁歪ロッドに導線が巻かれており、両者に電流を流すと合成磁場は磁歪ロッドに対してスパイラル状になり捩れを生じることになる（VIEDEMANN効果）。この捩れがSTMAに線形変位を与える。その結果、STMAは、従来の圧電・電磁アクチュエータでは実現できなかった、 $50 - 100\ \mu\text{m}$ の変位量で精度 $0.1\ \mu\text{m}$ 、応答時間 $1 - 10\ \text{m sec}$ を達成した。さらに、光スキャナ、光変調器や光スイッチ等への応用も研究されている。

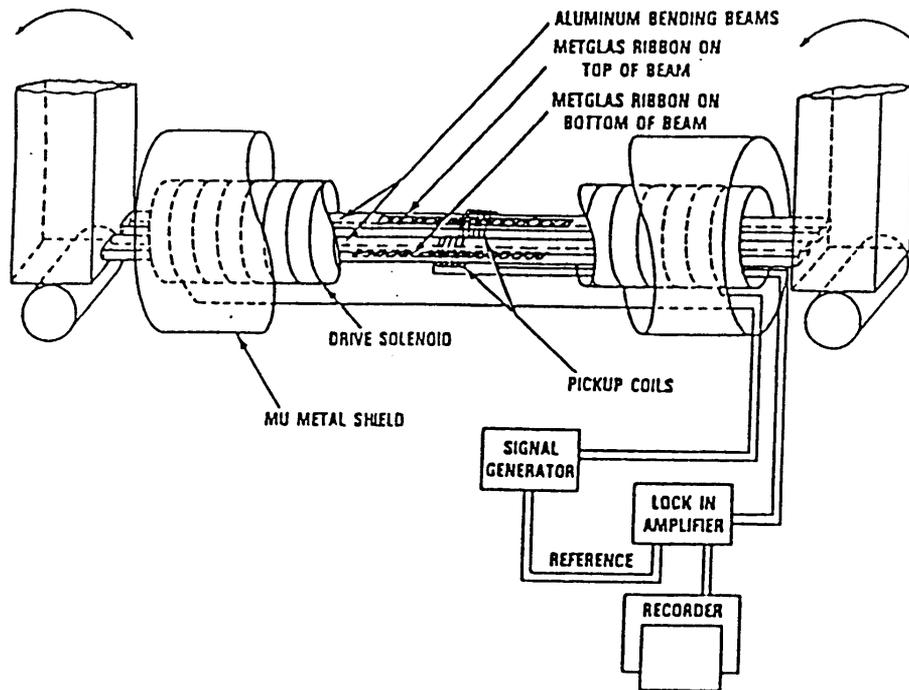


図 4.3-7 超磁歪材料を応用した歪ゲージ

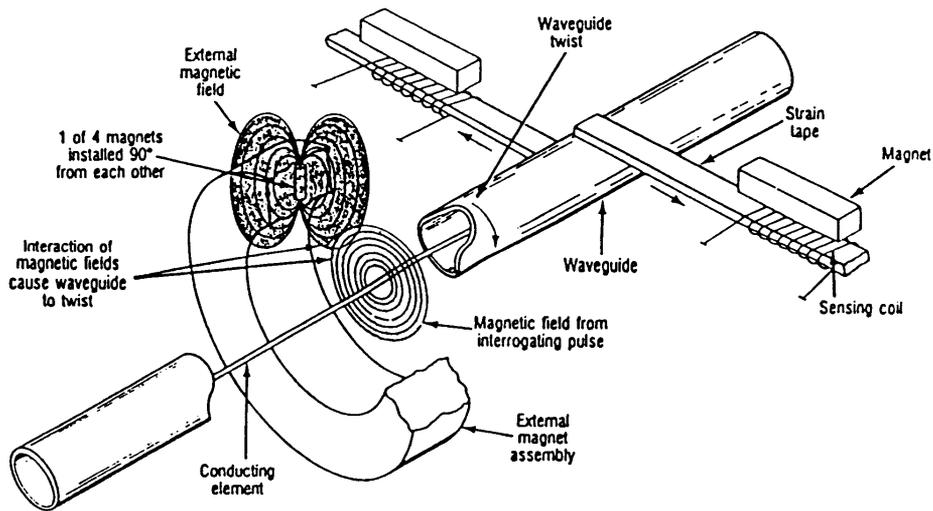


図 4.3-8 超磁歪材料を応用した変位センサ

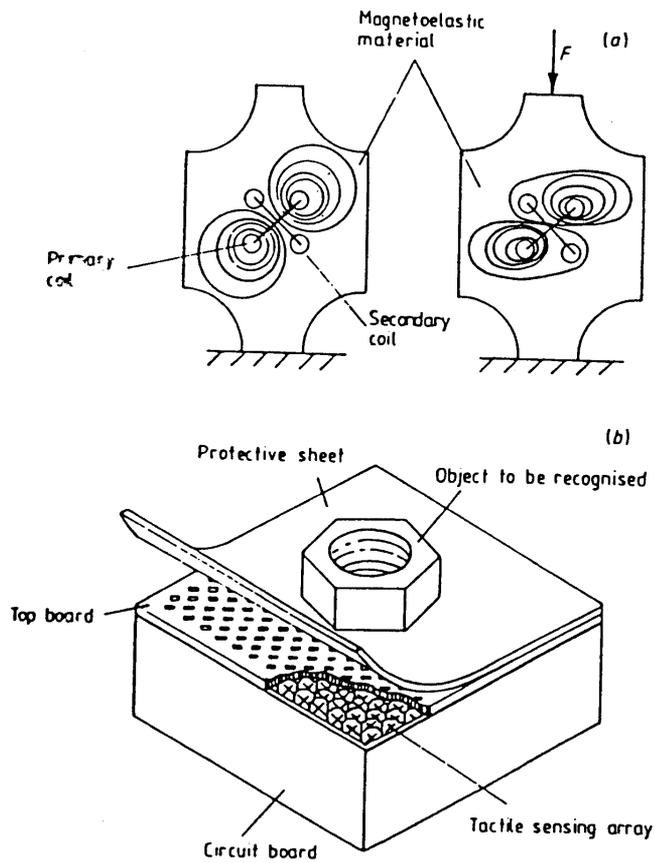


図 4.3-9 超磁歪材料を応用した触覚センサ

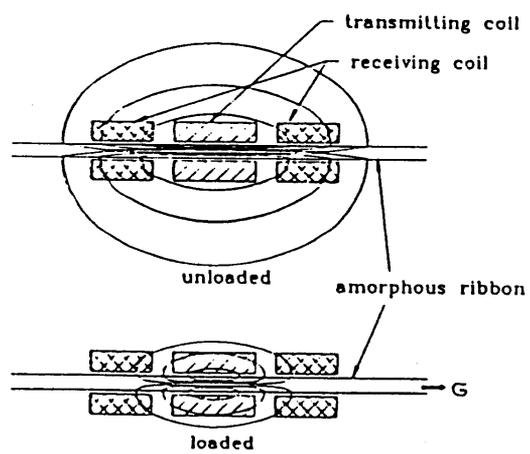
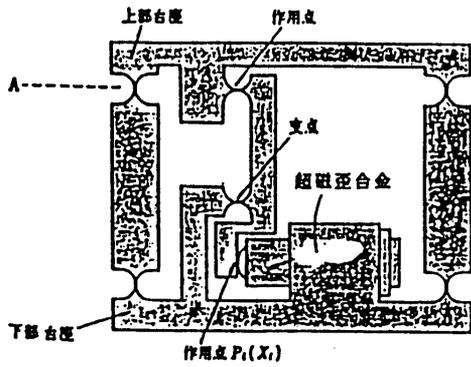
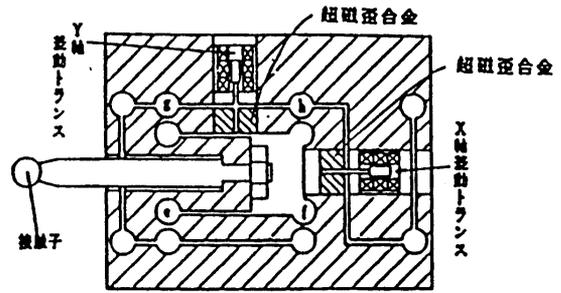


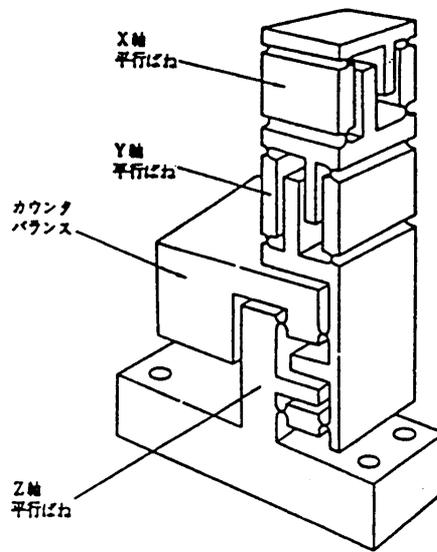
図 4.3-10 超磁歪材料を応用した力センサ



1次元メカニズム用デバイス



2次元メカニズム用デバイス



3次元メカニズム用デバイス

図 4.3-1 1 超磁歪材料を応用したレバー機構変位デバイス

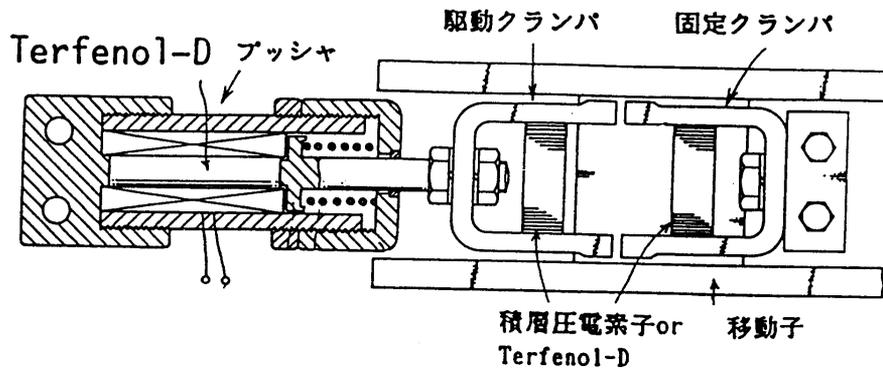
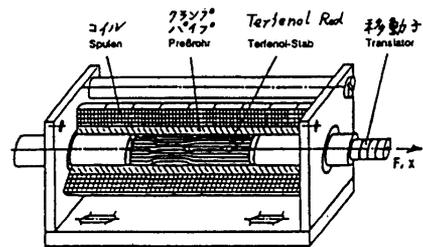
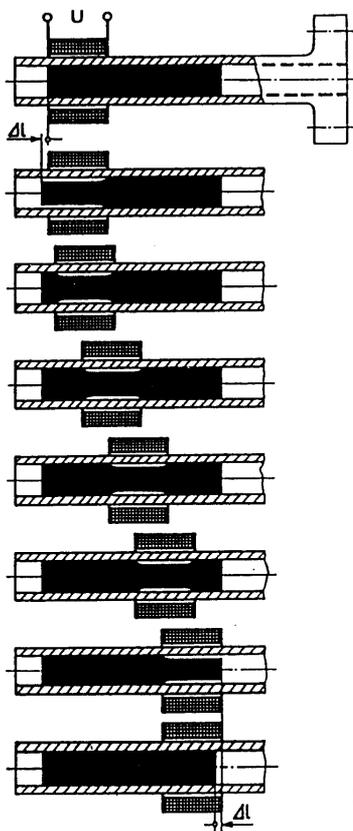


図 4.3-1 2 超磁歪材料 (Terfenol-D) を応用した
 双方向クランプ方式リニアアクチュエータ

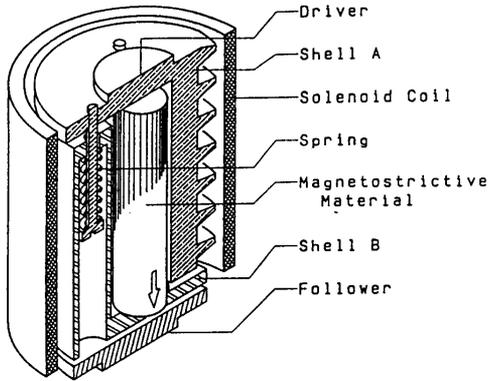


Kiewetterモータの構造

Kiewetterモータの動作原理

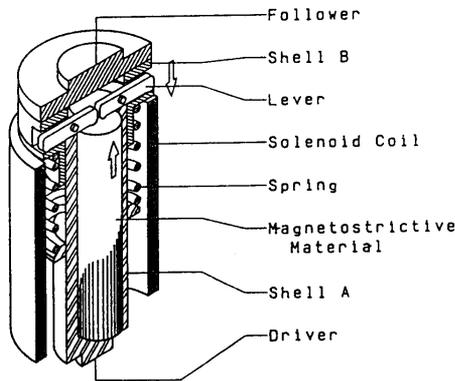
図 4.3-1 3 超磁歪材料を応用したインチワーム方式リニアモータ

伝達クラッチ



The structure of new clutch

開放クラッチ



The structure of new clutch

超磁歪クラッチ概略図

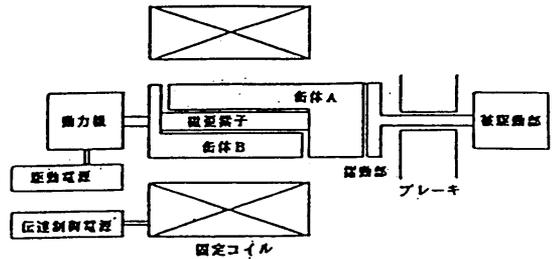


図 4.3-1 4 超磁歪伝達/解放クラッチ

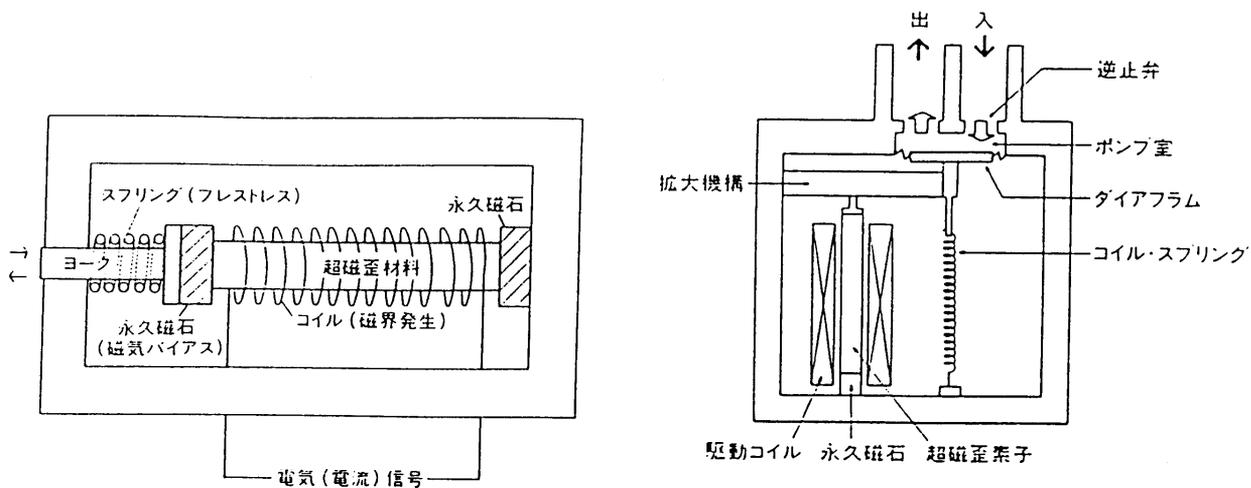


図 4.3-1 5 超磁歪ポンプ

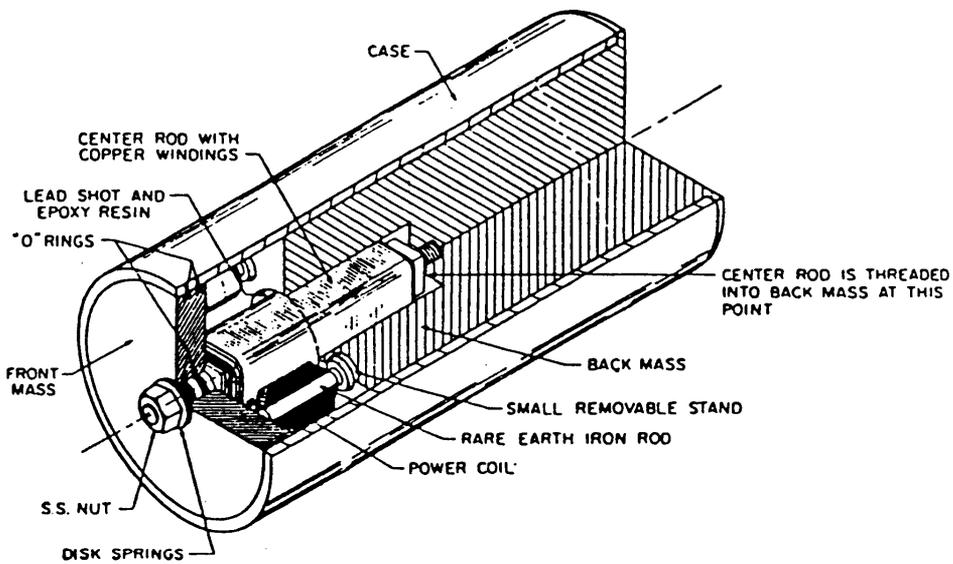
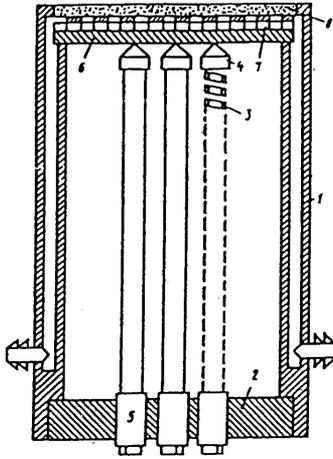
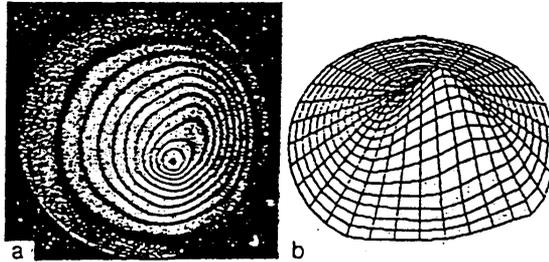


図 4.3-1 6 超磁歪材料を応用したTompilz 型音響変換器



STMAを用いた適応光学素子の構造



適応光学素子の反射鏡の形状変化

図 4.3-1 7 STMA を用いた適応光学素子

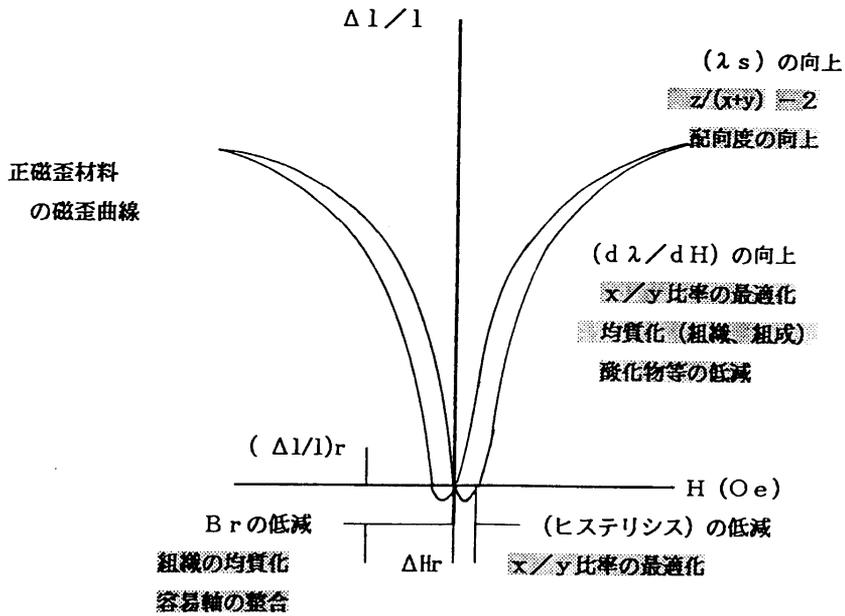


図 4.3-1 8 $Tb(x) Dy(y) Fe(z)$ と磁歪特性の関係

4. 3. 3 研究開発課題

(1) 磁歪材料自体に関する課題

材料開発の側面からは、

- 1) 磁歪 λ を大きくする。(結晶の配向度向上、主相比率の向上、etc.)
- 2) $d\lambda/dH$ を大きくする。(均質な組織、低い内部応力、etc.)
- 3) K (結晶磁気異方性) を小さくする。(精密で均質な組織、etc.)

低磁界駆動を実現するには、磁歪変位量と素材の磁化の関係、すなわち透磁率 μ を大きくすることである。一般に、透磁率 μ は飽和磁化 (M_s) に比例し、磁気異方性 (K) や磁歪 (λ)、内部応力 (σ) に反比例する。

$$\mu = c \frac{M_s}{a K_1 + b \lambda \sigma} \dots\dots\dots(a, b, c : \text{定数})$$

磁歪や磁気異方性を損なわず、透磁率 μ や飽和磁化 M_s を向上させるためには、新たな組成や結晶形の発掘、製法の開発が低磁界駆動を実現するための今後の課題である⁽²⁾ (図 4.3-18)。

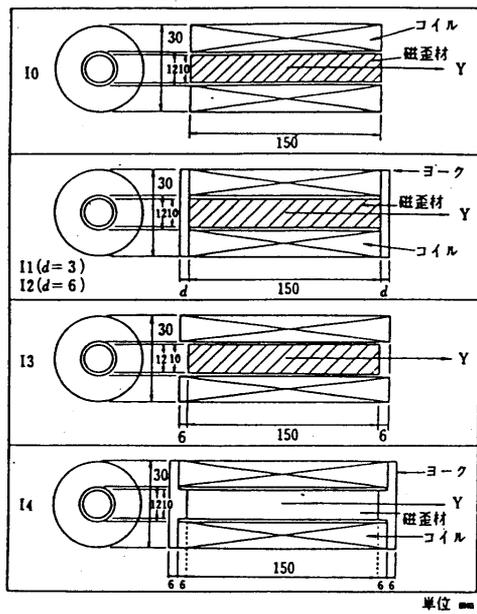
しかしながら、現実が一番問題となるのはコストである。希土類、特に多量にTbを使用しており、需要が少ないこともあいまって、現状ではかなり高価である。また、安定供給の面では、海外だけでなく国内の素材供給メーカーが増えてきたので不安は解消されたとされている。しかし、現行市販品は組成がTb-Dy-Fe合金のみである。他の希土類元素と組み合わせることによってより安価な超磁歪材料は作れないものか。また、歪量は少し小さくても電気伝導率が高く高周波領域でも使える材料であるとか、磁場方向と歪み方向が直角の材料など、全ての面で秀でていなくともそれぞれ特長を持った材料があれば、新たな応用も期待できるのではないか。品質の向上・安定とともに多様性を持った超磁歪材料の開発が待たれる⁽³⁾。

(2) 周辺技術に関する課題

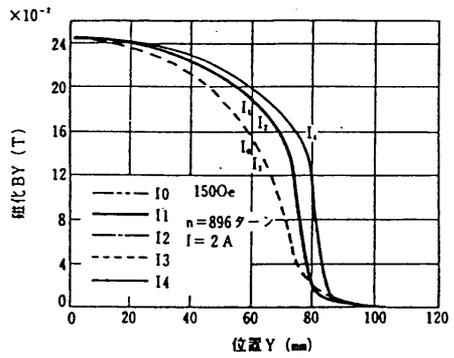
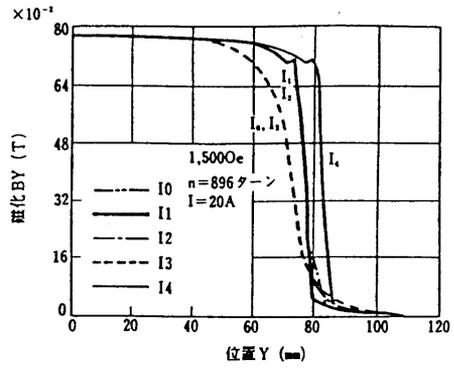
超磁歪材料を各種デバイスとして実用化する過程では、材料特性の改良以外にもそれを取り巻く技術の面で様々な課題に直面することになる。特に重要な磁気回路の側面からは、

- 1) 磁歪材料端部での漏洩磁束を小さくする。(μeの向上)
- 2) コイルの厚みを小さくする。(磁束漏洩の低減)
- 3) 素子のH/D (長さ/径) を大きくする。(反磁界の低減) (図 4.3-19)

また、変位の伝達は磁歪材料の端部で行なわれるが、端部の機械的平行や結晶方向はおおよそ調整はされているものの十分とはいえない。しかし、TbDyFe₂に代表される超磁歪材料は硬く脆い性質で



コイルによるバイアス磁界の事例



磁歪材中の磁化分布

図 4.3-1 9 超磁歪素子にバイアス磁界を与えるコイルの例

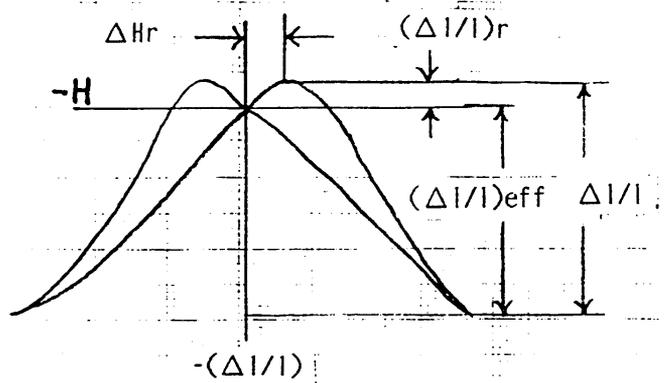


図 4.3-2 0 SmFe2の負磁歪特性

あり、また耐蝕性の低い材料でもある。このため設計時に加工処理を必要最小限に留めるのがよいとされている⁽²⁾。

(3) その他の課題

評価法を含めて材料の基本データ不足は否めない。また、材料・電気・機械の3分野にまたがる技術融合が必要である。そのためには、国内のメーカー、研究機関の協力だけでなく、国際的な各分野の交流を通して、磁場解析技術、実装技術など各種設計用データベースの作成が必要である⁽³⁾。

さらに量産品に至るには、信頼性の問題をクリアせねばならない。特に強度部材に採用する場合には問題が生じる。この点、評価に時間のかかる時間依存のパラメータ（疲労、クリープetc.）は、簡単に予測できる簡易算出式が見つかるとう用である。また、希土類磁性材料であるから、バルク材の場合発火性にも注意する必要がある。素材自身は脆性材料であり、取付け・実装に関して細心の注意を要する。実際にはセンサ、アクチュエータなどの仕様は、素子自身よりも実装技術によって決定されることが多いからである。例に挙げたように、多数のデバイスが試作される中で巧く使いこなした例も出てきているものの、長時間にわたる安定な動作にはまだ困難が付きまとう⁽³⁾。

4.3.4 新規材料開発の可能性

以上、超磁歪材料・素子に関する過去と現状、利点と問題点について述べた。最後に、今後さらなる研究開発が期待される超磁歪材料を以下に列挙する。

(1) 負磁歪材料

RFe₂結晶でRにSmを適用すると、外部磁界の方向に平行な寸法は縮み直角無方向には伸びる負磁歪材料⁽²⁾となる（図4.3-20）。RFe₂結晶は引張り強度が圧縮強度に比べて1桁小さく10kg/mm²程度であり高応力なアクチュエータには向かないが、高温下でのセンサへの応用が考えられる。

(2) バルク材から薄膜材へ

超磁歪材料には、形態で分けるとバルクと薄膜の2種類がある。用途を基本的に分類すると、

- 1) バルク材料（単結晶、柱状晶）.....メカトロニクス向き
- 2) 薄膜材料^{(10) (11) (12)}（アモルファス）.....エレクトロニクス向き

となるが、今まではバルク材の応用が中心であったのに対して、今後は薄膜材の応用がエレクトロニクス分野を中心に拡大すると予想される（図4.3-21）。

(3) マイクロマシン分野への応用

マイクロマシン⁽¹⁷⁾ (図4.3-22) に適用できるアクチュエータとしては、通常の機構に用いられる電磁モータに代わって、温度/磁界/電界等の変化によって変位を生じるタイプの素子が考えられる。既存のアクチュエータとしては、形状記憶合金、電歪材料を利用したものがある(表4.3-3)。一方、超磁歪素子応用アクチュエータ⁽¹⁸⁾ (図4.3-23) は変位量は比較的少ないが、最大の特徴は非接触で素子に変位を生じさせる点で有利といえる。しかし、駆動エネルギーが比較的大きくなることや電源や駆動コイルなども含めた寸法装置が小型・軽量とはいかない理由から、マイクロマシンレベルには超磁歪材料はアクチュエータより、薄膜化によるセンサ機能を利用するほうが合理的と考えられる⁽¹⁹⁾。

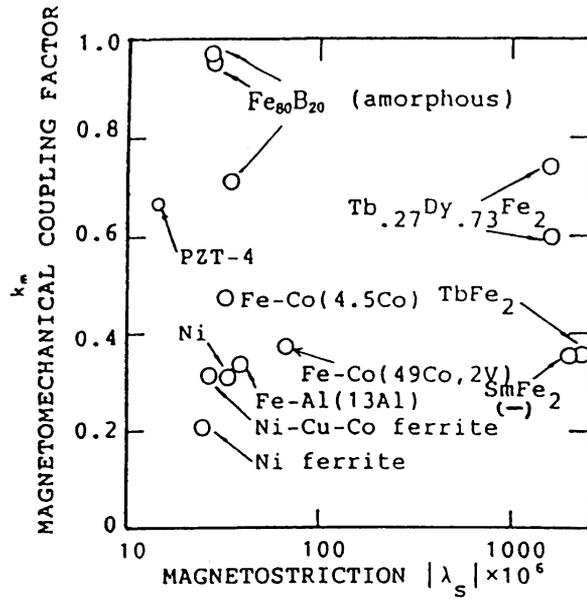


図 4.3-2 1 バルク材と薄膜材(amorphous)の磁歪特性

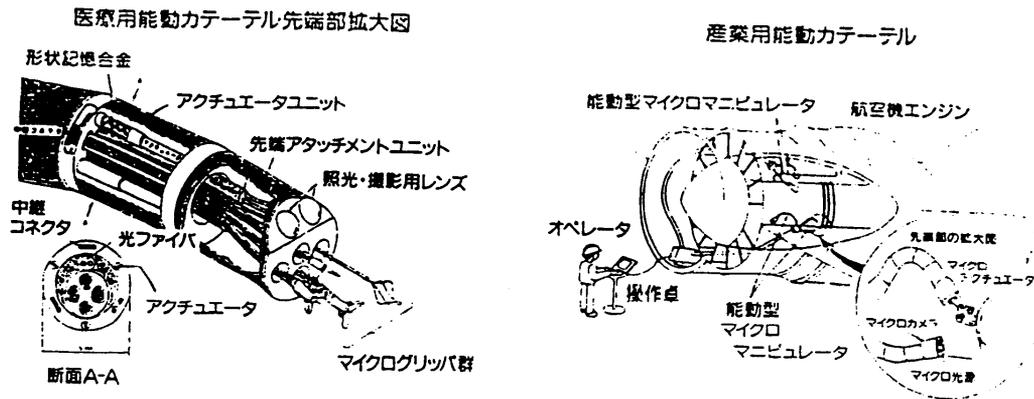
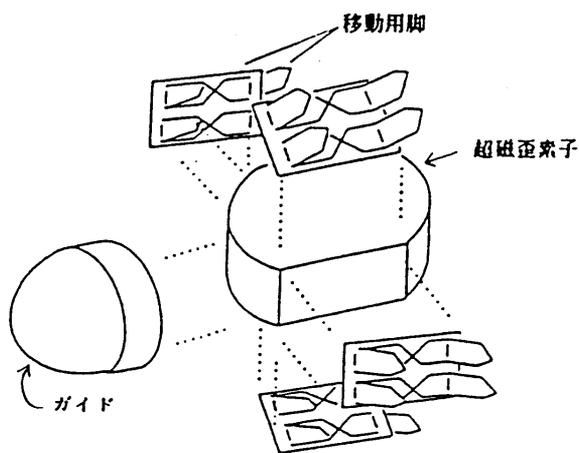


図 4.3-2 2 マイクロマシンの応用分野

表 4.3-3 マイクロアクチュエータ用の各種材料の比較

要求項目	アクチュエータ用材料		
	形状記憶合金	磁歪材料 (超磁歪)	電歪材料
変位量大きい	◎	△ (○)	△
再現性が良い	△	◎	◎
応答性が良い	×	◎	◎
駆動エネルギーが小さい	×	△	○
小型・軽量である	△	△	○
発生力大きい	◎	○	○



マイクロロボットの組立図

マイクロロボットの主要諸元

長さ	4 mm
幅	6 mm
質量	0.7 g
速度	0.5 mm/sec

図 4.3-23 超磁歪マイクロロボットの構成

文 献

- (1) 平成元年超磁歪デバイスの適用に関する調査研究、(社)日本機械工業連合会(財)先端加工機械技術振興協会(1990)
- (2) 平成2年超磁歪デバイスの適用に関する調査研究、(社)日本機械工業連合会(財)先端加工機械技術振興協会(1991)
- (3) 平成3年超磁歪デバイスの適用に関する調査研究、(社)日本機械工業連合会(財)先端加工機械技術振興協会(1992)
- (4) William Brenner: Magnetostrictive LDTs are precise, built tough, I&CS Sept., (1989), pp.45-47.
- (5) B. J. Jayawant: Tactile sensing in robotics, J. Phys. E:Sci. Instrum., Vol. 22, (1989), pp. 684-692.
- (6) J. Seekircher and B. Hoffmann: New Magnetoelastic Force Sensor Using Amorphous Alloys, Sensors and Actuators, Vol. A21-A23, (1990), pp.401-405.
- (7) V. V. Apollonov et al.: Exp. Tech. Phys., 37, (1989), p. 31.
- (8) V. I. Aksini et al.: Sens. Act., A21, (1990), p. 236.
- (9) V. V. Apollonov et al.: Sov. J. Quantum Electron, 20, (1990), p. 1403.
- (10) H. Uchida et al.: Z. Phys. Chem. N. F., 164, (1989), p. 1275.
- (11) H. Uchida et al.: J. Less-Common Metals, 172-174, (1991), p. 983.
- (12) H. Uchida et al.: J. Less-Common Metals, 172-174, (1991), p. 1018.
- (13) M. Wun-Fogle et al.: Sensors and Actuators, Vol. 12, (1987), pp. 323-332.
- (14) S. W. Meeks et al.: J. Acoust. Soc. Am., 62, (1977), p. 1158.
- (15) L. Kiesewetter: The Application of Terfenol-D in Linear Motor, Proc of 2nd Int. Conf on Giant Magnetostrictive and Amorphous Alloys for Sensors and Actuators, 7, (1988).
- (16) T. Akuta: An Application of Giant Magnetostrictive Material to High Power Actuators, Proc. of 10th Int. Workshop on Rare Earth Magnets and Their Applications, 5, (1989), pp. 359 - 368.
- (17) 例えば、(財)マイクロマシンセンター案内、(1992)
- (18) 福田ほか:管内検査ロボットの研究(第4報、超磁歪素子を用いた微小管内移動マイクロロボットの機構と制御)、日本機械学会論文集C、57-537、(1991)、pp. 1661 - 1666.
- (19) Proc. of IEEE MEMS92, IEEE catalog No. 92CH3093-2, (1992)

略語表

4. 3 超磁歪材料

PZT = lead zirconate titanate ; チタン酸ジルコン酸鉛

STMA = Spring-Type Magnetostrictive Actuator

; スプリング型磁歪アクチュエータ

4. 4 形状記憶合金

4. 4. 1 はじめに

形状記憶効果(SME)は熱弾性型マルテンサイト変態に起因する現象であることはよく知られており、そのメカニズムについてはほぼその全容が明らかになっている。この不思議な特性をもつ形状記憶合金(SMA)を工業的に応用しようという試みは近年活発に行われており、家電、自動車、医療、衣料、装飾品等の分野で着実に実用化が進んでいる。機能材料として工業的には価値のある合金であり、今後もさらに応用開発が望まれる。

SMEの特性を持つ合金は数十種類以上も発見されているが¹⁾、実用合金として注目され開発が進められているSMAにはNi-Ti系とCu-Zn系(Fe系もあるがSMEのメカニズムは異なる)に限られ、疲労寿命および機械的強度などの諸特性を考慮した場合、信頼性のあるSMAは現状ではNiTi系のみである。NiTi合金は形状記憶効果以外に超弾性・防振性・耐食耐摩耗性を兼ね備えた多機能材料でもある。そこで、ここではスマートマテリアルとしてのNiTi系SMAを中心にその諸特性、使用法、開発動向について述べる。

4. 4. 2 形状記憶効果

SMEのメカニズムに関する詳細な説明は他の文献¹⁾²⁾³⁾を参照して頂くとして、ここでは簡単に触れることとする。

一般の金属材料では図4.4-1aに示す伸び-応力線図のように弾性限を超えた応力を与えると、原子間にすべりが生じ、いわゆる塑性変形を起こしてしまい、応力を除去しても永久歪が生じ元には戻らなくなる。しかし、SMAは熱弾性型マルテンサイト変態という特殊な変態挙動を示し、 M_s 温度(冷却過程でオーステナイト相からマルテンサイト相へ変態が始まる温度)以下で変形を加えると、すべりが起こる前にマルテンサイト相(B19構造)内の双晶界面の移動により変形をまかかってしまい、見かけ上塑性変形したかのようになる。母相(オーステナイト)が安定な規則構造(B2構造)となっているために、加熱した際に起こる母相への逆変態に伴い完全に元の形状

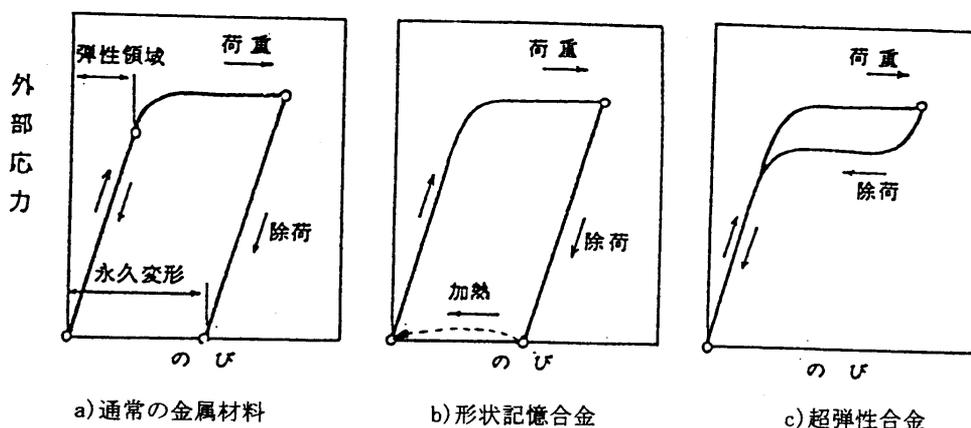


図4.4-1 形状記憶合金と一般金属材料の応力-伸び線図の比較

に戻ることになる。これを形状記憶効果(SME)と呼び、伸び-応力線図で示すと図4.4-1bのようになる。また、Af温度(加熱の際、マルテンサイト相からオーステナイト相への逆変態が終了する温度)以上の母相状態でSMAに変形を加えた場合、応力負荷によってもオーステナイト→マルテンサイトの変態が起こるために(応力誘起マルテンサイト変態)、図4.4-1cのように応力を除去するとゴムのように元の形状に戻る。これを超弾性(または擬弾性/PE)と呼び、形状記憶合金の持つもう一つの大きな特徴である。形状記憶効果・超弾性とも、材料の組成および製造法によって多少異なるがNiTi合金の場合6~8%の歪まではほぼ完全に回復可能であり、形状回復時に発生する応力値は最大600Mpaにも達する。SME、PEとも他の合金には見られないユニークな特徴ではあるが、スマートマテリアルとしては温度によって各種特性値が大きく変化するSMEを利用することが有効であろう。

4.4.3 NiTi合金の製造法

図4.4-2はNiTi合金の製造工程を示したものである。

(1) 溶解

NiTi合金は、酸素などの大気ガス成分との親和性が高いチタンを含むため、高真空もしくは不活性雰囲気中での溶解が必須となる。溶解法としては一般的には、VIM(真空高周波誘導溶解)、VAR(消耗型真空アーク溶解)、PBM(プラズマビーム溶解)などが用いられる。

NiTi合金の変態温度の調整は図4.4-3に示すようにNiとTiの比率を変えることによって可能である。Ni量が49.5at%を超えた点よりNi量の増加に伴い各変態温度は急激に低下し、その割合はNi0.1at%の変化により約12°Cとなり、わずかの組成変化により大きく変態温度は移動する。そのため、精度良く安定的に組成すなわち変態温度がコントロールされたNiTi合金鑄塊の溶解作業は特に特殊な技術と熟練を要する。

(2) 熱間加工

溶解鑄造されたNiTi鑄塊は、次に、線材の場合はピレット鍛造、板材の場合はスラブ鍛造などの熱間加工の後、さらに熱間線材圧延もしくは熱間板圧延が施される。NiTi合金の熱間加工は、2元系合金の場合49.5~51at%の範囲では比較的容易に可能である。この範囲を外れるとNiTi₂もしくはNi₃Tiなどの金属間化合物が多量に析出するため熱間加工は不可能となる。

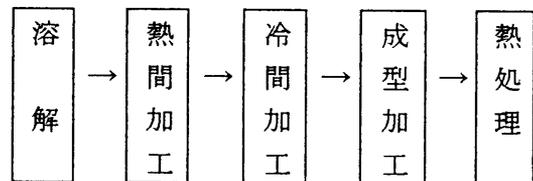


図4.4-2 NiTi合金の製造工程

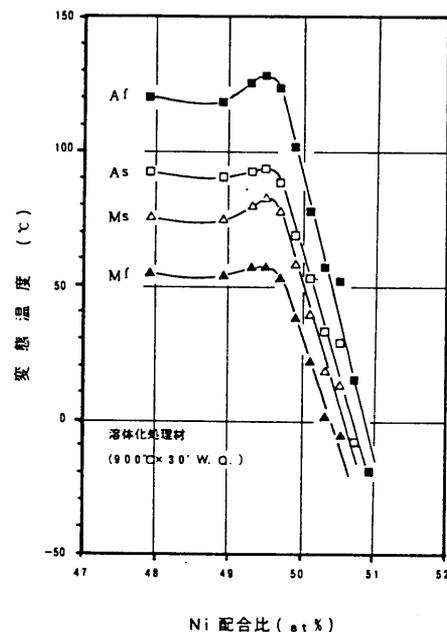


図4.4-3 NiTi合金2元系合金におけるNi含有量と変態温度の関係

(3) 冷間加工

熱間加工により得られた線材および板材は、さらに冷間加工により、より細く薄く加工される。しかし、NiTi合金は金属間化合物であり、そのため冷間加工性は他の合金に比較し、極めて悪いという欠点がある。NiTi合金は加工硬化を起こしやすく、30~40%の冷間加工を行う度に軟化焼鈍を繰り返し何度も行う必要があり、コスト上昇の大きな要因となっている。

(4) 成形加工および熱処理

冷間加工で得られた線材や板材はそれ自体ではSMEを有してはいない。NiTi合金にSMEを生じさせるには希望する形状に成形加工（例えばバネ状、直線状など）してさらに熱処理を行う必要がある。熱処理により結晶の再配列が起こり、初めて形状を記憶するようになる。熱処理条件はNiTi合金の諸特性に大きな影響を与える重要な因子であり、使用する合金組成ならびに要求仕様によって個々に熱処理条件を設定しなければならない。

4. 4. 4 変態温度と動作特性

前述のごとく、NiTi合金の変態温度は基本的にはNiとTiの比率によって決定される。さらにNiTi合金に第三、第四の元素を添加した多元NiTi合金ではこれら添加合金による影響により複雑に変態温度は変化する⁴⁾。そればかりではなく、加工および熱処理履歴によってもNiTi合金の変態温度は大きな変化を示す。特に重要な点は冷間加工による加工歪がどの程度残留しているかである。

図4.4-4は50.2at%のNiTi冷間加工線をコイルバネに加工し475℃および700℃で記憶熱処理を行った後、一定歪拘束状態で加熱処却しその際の発生応力を変化を測定したものである。同一組成の材料においても熱処理（最終的に形状を記憶させる処理）温度によってSME特性は大きく変化することがわかる。しかし、事実上は700℃処理材のような焼鈍材を使用することはまれで、これは冷熱サイクル耐久性が悪く、またヒステリシスが約30~40℃と大きくなるなどの欠点があるためである。そこで、冷熱サイクル耐久性や小ヒステリシス特性が要求される場合は、通常冷間で強加工を加え、再結晶温度(550~600℃)以下で熱処理を行い加工組織を残留させる方法によりこ

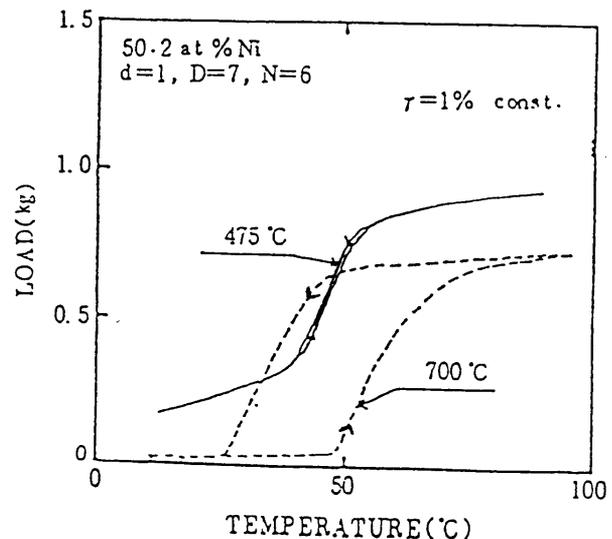


図4.4-4 NiTiコイルバネの熱処理温度と定歪温度—荷重線図における作動特性の違い

れらの問題の改善を図っている。加工転位の存在により、母相(B2構造)→M相(B19構造)の変態過程に中間変態相であるR相(菱面体構造)が出現しB2相→R相→M相という逐次2段階型変態を起こすことが明らかとなっている^{5) 6)}。R相変態は1%程度の歪まではM相を誘起せずB2→R間のみで完全な形状記憶効果を示し、1℃程度の小ヒステリシス特性および優れた冷熱サイクル耐久性を有している。図4.4-4に示した475℃処理材はこのR相変態によるSMEを利用したも

のである。現在、工業部品として応用されているNiTi-SMAコイルの大部分がこのR相変態の記憶効果を利用したものでM変態を極力抑えるような使い方をしている。但し、1%以上の歪ではM相を誘起する(応力誘起M変態)ためにヒステリシスは大きくなってしまふ。したがって冷熱サイクル耐久性や小ヒステリシス特性が要求される場合は冷間加工材に現れるB2→R変態を用い低歪低応力状態で使用し、またこれらを重要視せず、大きな回復力を利用する場合もしくは冷間加工できない形状の場合はB2→M変態を利用するなどの使い分けが必要となる。

表4.4-1 NiTi合金の変態温度と動作特性

合金系	NiTi2元系		NiTi3元系
	焼鈍材	冷間加工材	冷間加工材
変態温度	-80~80°C(Ms)	20~70°C(RMs)	-30~60°C(RMS)
ヒステリシス	30~40°C	1~5°C	1~5°C
変態形式	B2→M	B2→R	B2→R
寿命	10 ³ ~10 ⁴	10 ⁵ ~10 ⁷	10 ⁵ ~10 ⁷

NiTi2元系合金の焼鈍材では、冷却過程のM相変態開始温度Ms点は-80~80°Cと比較的大きな温度範囲を示すものの、実用上重要な冷間加工材に現れるR相変態の開始温度RMs点は20~70°Cと狭い範囲に限定される。そこで、第3元素(Fe, Cr, Co, V, Cuなど)を添加したNiTi3元系合金の開発により、NiTi2元系では不可能な-30~20°Cの低温域で作動する合金も供給可能となった。NiTi系合金の変態温度および動作特性について表4.4-1にまとめた。

4.4.5 NiTi系形状記憶合金の使用法

(1) 非可逆的使用法(1方向性素子)

非可逆的使用法とは、形状記憶合金の最も基本的な概念であり、低温相で変形させた素子を加熱し一度だけ形状回復を行うものである。物と物との接合や締めつけなど、特に人間の入り込めない場所や溶接等の接合手段が使えない場所(狭い空間、原子炉内、海中等)で効果がある。図4.4-5に非可逆的使用法の代表例である管継手の応用例を示す。このような使い方は、一度だけの使用が多く、冷熱サイクル疲労が問題とならず、また大きな回復力を利用できる。さらに、変態温度もそれほど正確さを必要としない場合が多いなどの利点がある。

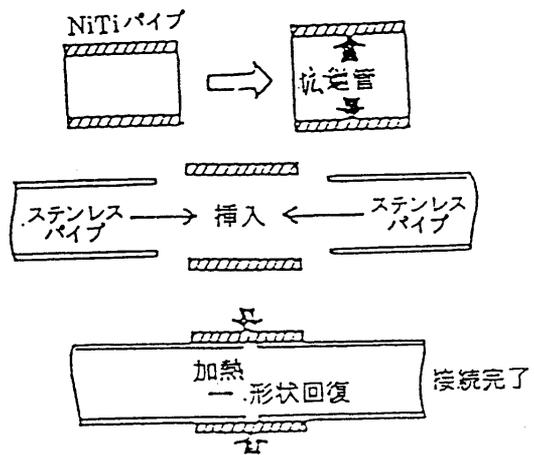


図4.4-5 管継手への応用(一方向性)

(2) 可逆的使用法(二方向性素子)

・自発可逆特性を利用する方法

SMA素子を温度の昇降につれて可逆的に作動させる二方向性素子は最も応用範囲の広い魅力的な使い方である。NiTi系形状記憶合金は銅系記憶合金にみられるような顕著な自発

可逆記憶特性を基本的に有していない。しかし、強変形や熱サイクルレニングまたは拘束状態で熱処理を行う等の処理により、部分的自発可逆記憶特性(RSME)を持つようになる⁷⁾。図4.4-6には強変形を与えてRSMEを出現させた場合の1例を示す⁷⁾。これは、完全焼鈍されたNiTi合金丸線に低温相の状態です定の引張歪を与えた後、無負荷状態で温度昇降させた際の歪の変化を見たものである。ここで、②は通常の1方向SMEを示しており、③④がRSMEに相当する。このようにNiTi合金に強変形を与えることにより2~3%のRSMEを取り出すことが可能である。ただし、RSMEはヒステリシスがおおきく、また冷却過程でのRSMEにおける回復力が加熱時の1/3以下と小さいために大きな応力下では二方向素子として利用できない等の欠点がある。したがって、前出の図4.4-5に示した管継手の場合において、取り外し可能な可逆継手といった応用が考えられている。

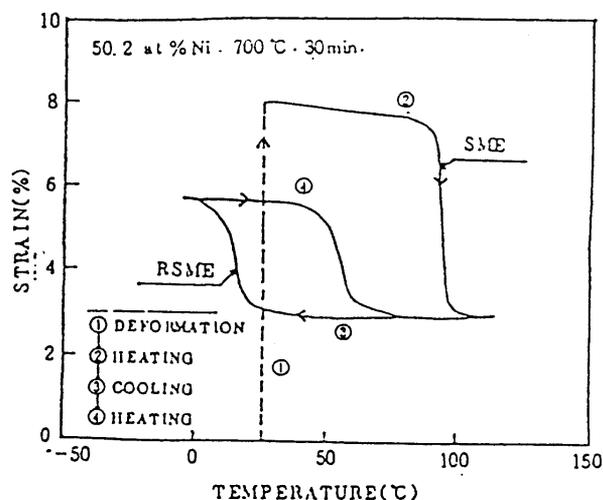


図4.4-6 NiTi合金の部分的自発可逆特性

・バイス力を利用する可逆的使用法

NiTi系形状記憶合金において、安定した二方向特性を得るためにはバイス力を併用して一方向の記憶特性を二方向動作に変える方法が一般的であり、大部分の応用例がこの方法を用いている。

つまり、図4.4-7に示すように形状記憶合金では低温相の降伏応力ならびに見かけの弾性係数が高温相に比べ低いためにバイス力(重りやバネ等)を与えることにより低温側では容易に素子に変形される。しかし、高温側では形状回復と見かけの弾性係数の増加により、バイス力に打ち勝つ力が生まれるために、温度を上げることによりおもりを持ち上げることができる。温度の昇降を繰り返すことにより、これらの動作は何度も可逆的に行われるようになる。このような可逆的動作を用いる場合は一般的には繰り返し数が多く、冷熱サイクル耐久性が要求され、疲労特性を考慮して適切な素子設計が必要となる。

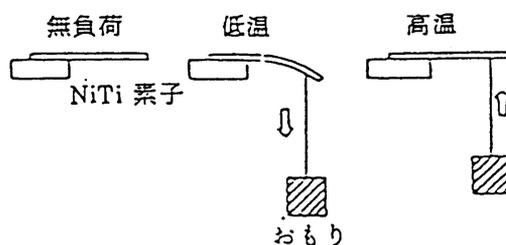


図4.4-7 バイス力を利用する可逆的使用法の原理

可逆的動作を利用した例をさらに1) 温度センサ+アクチュエータとしての利用、2)アクチュエータとしてのみの利用の2つの機能的な分類を行ってそれぞれ図4.4-8、図4.4-9に応用例を示す。図4.4-8はSMA感温バルブの応用例であり、バルブ内の流体の温度によってバルブの開閉を行うもので、温度センサ+アクチュエータの2つの機能を併用している。従来のバimetallに比較し、SMAの最も一般的なかつ有効な利用法である。図4.4-9は通電による自己発熱を利用し強制的に熱を与え、モーターやソレノイドのようなアクチュエータとしてのみ利用し、シャッターを開閉使用とする例である。SMAの利用により装置の小型計量化を計ることができる。

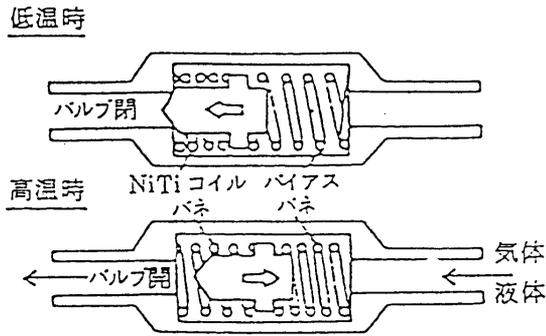


図4.4-8 感温バルブへの応用例

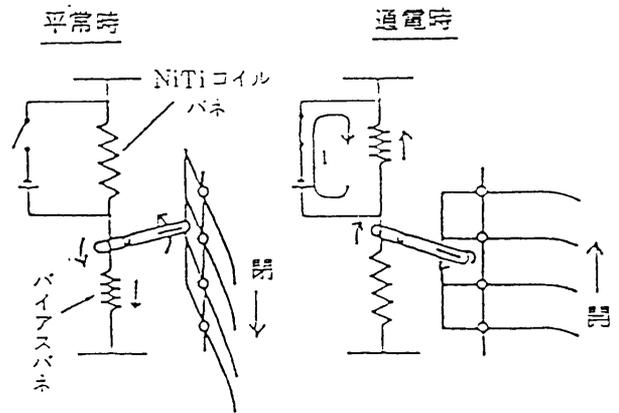


図4.4-9 通電加熱を利用した応用例

(3) 超弾性の利用

インテリジェント材料としては利用価値は少ないと考えられるが工業的価値はSME以上に注目されているのが、SMAの持つもう一方の特徴である超弾性(PE)である⁸⁾。超弾性は8%程度の歪でも完全に回復してしまうゴムのような特徴であり、図4.4-10のNiTi合金線材の伸び-応力線図に示すように、 A_f 温度以上のある温度範囲(図4.4-10では20~40℃)で特徴的な曲線を描き超弾性を示す。また変態温度を調整することにより任意の温度範囲に超弾性を出現させることが可能である。この特性を生かした応用例としては、ブラジャー用ワイヤ、歯列矯正ワイヤ、眼鏡フレームなどがあり、工業的価値は大きく、今後もさらに用途は広がると予想される。

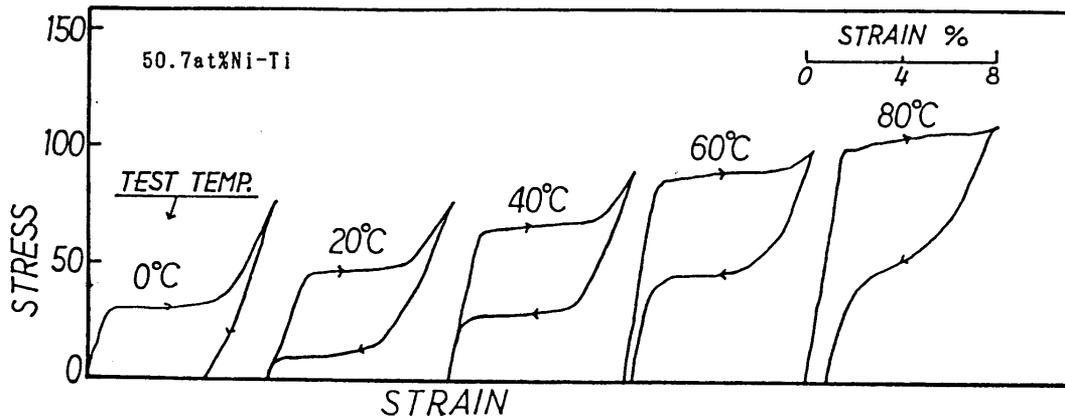


図4.4-10 NiTi合金の歪-応力線図における超弾性特性

4.4.6 今後の開発動向

(1) 特性の多様化

一口に形状記憶効果といっても、用途によって要求される特性は様々である。下記のよ

うないろいろな要求を満たすため、今まで様々な開発が行われている。今後もNiTi系合金の改善もしくは新SMAの開発により、より高機能のSMAが出現するであろう。

・温度ヒステリシスのコントロール

温度ヒステリシスをできる限り狭くすることは、前述のごとくR相変態の利用によりある程度は実現した。今後はR相の出現応力の上限を拡大することが必要であろう。

狭い温度ヒステリシスが要求される一方、逆にヒステリシスを広げる要求もある。例えば、管継手など加熱により締結力を与えた後は、冷却後も締結応力が低化せず持続するような用途である。NiTi-Nb合金などで実用化が進んでいる⁹⁾¹⁰⁾。

・比例制御型

NiTi合金組成と熱処理条件をうまく組み合わせることにより、図4.4-11の350°C~400°C熱処理材に示されるように変態温度幅を広くすることができ、ON-OFF型のデジタル的な使用のみならず、比例制御型のアナログ的な用途も可能となる。すでに水道水の流量調整弁や混合栓などに適用され、反応速度が遅い、機構が複雑で大型であるといった従来のサーモワックスの欠点を改善することができた。今後は温度範囲

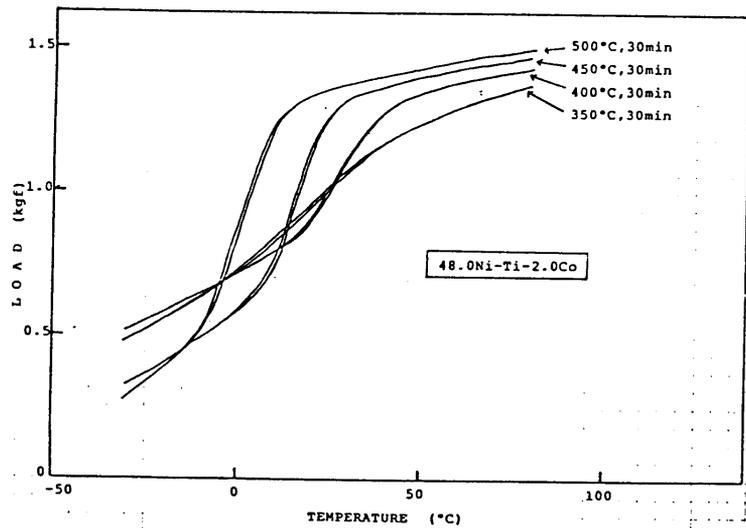


図4.4-11 NiTiコイルバネの熱処理と動作特性

の拡大、温度精度の向上などの多様化を進める必要がある。

・高温作動型SMA

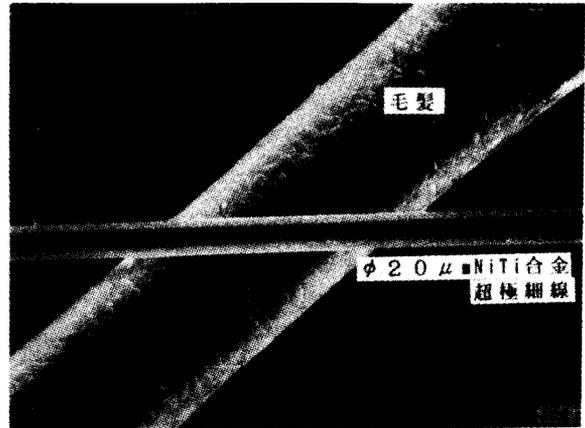
NiTi2元系合金では、前述のとおり焼鈍材のMs温度は-80~80°C、事実上重要な冷間加工材のRMs温度は20~70°Cの範囲に限定される。NiTi-X多元系合金ではRMs温度を-30°Cまで低下させることが可能である。しかし、Ms温度を80°C以上RMs温度を70°C以上に設定することは現状では成功していない。Ti-Pd系合金で高温変態温度を有するSMAの開発が進められており¹¹⁾¹²⁾、他のNiTi系合金以外の実用形状記憶合金の開発も含めて高温作動のSMAの開発が今後の大きな課題であろう。現状の変態温度を150°C程度まで上昇させることができればSMAの用途は膨大なものとなるであろう。

(2) 軽薄短小化

スマートマテリアルとしてSMAを使用する際、問題となるのは反応速度であろう。形状記憶効果は熱変化を感じて動作するものである以上、反応速度を上げるには熱伝導の速度を上げる以外にない。周囲の環境温度の変化をセンシングする場合はもちろん、通電加熱により強制的に加熱しアクチュエータとしてSMAを使用する場合においても、加熱速度については通電量である程度コントロールは可能であるが、冷却速度の向上は何らかの強制冷却を用いることが要求される¹³⁾。材料の持つ熱伝導率を大幅に変えることは困難なことであり、SMA素子の細線化、薄

膜化など軽薄短小化を図ることが反応速度改善の最も簡便な方策であろう。

線材においては、加工技術の進歩により図4.4-12に示すように髪の毛の1/4程度の直径 $\phi 20\mu\text{m}$ までのNiTi合金モノフィラメントの製造が可能となっている。板材は従来の冷間圧延法では $100\mu\text{m}$ 以下の薄膜化を図ることは困難であり、イオンスパッタリング法¹⁴⁾¹⁵⁾、急冷凝固法¹⁶⁾などの研究が活発に行われており、実用化も間近い。



(3) 疲労寿命の改善

図4.4-12 NiTi合金超極細線($\phi 20\mu\text{m}$)

機械的疲労寿命ならびに冷熱サイクル寿命が形状記憶合金の中で最も優れているNiTi系合金でさえ、1万回を越える疲労耐久性の要求される用途では、繰り返し歪は最大1%程度が限界である。この1%という値はアクチュエータとしてはやや不満の残る数値であり、種々の添加元素による改善、加工法・熱処理法の改善により、大応力下でも疲労しない形状記憶合金の開発が望まれる。

4.4.7 さいごに

NiTi合金を始めとする形状記憶合金は、わずかな温度の変化によって形状、見かけの弾性係数、応力、電気抵抗値など様々な特性値が大きく変化するという、他の材料にはないユニークな性質を有する金属材料である。まさにインテリジェントマテリアルとして大きな可能性を秘めた材料である。しかし、形状記憶合金は万能ではなく、形状記憶合金を用いインテリジェント複合材料を作製するにはまだ解決すべき問題点は多い。そのためには、材料と複合化技術のハード面の開発もさることながら、形状記憶合金の特性を正確に把握し、データベースとして使用できるようにソフト面の整備も重要であろう。インテリジェントコンポジットの開発機運が高まりつつある現在、形状記憶合金の用途の一分野として期待したい。

参考文献

- 1) 大塚, 杉本: 塑性と加工, 22, 246(1981), pp. 645-653
- 2) 舟久保 編: 形状記憶合金, 産業図書(1984)
- 3) 戸伏, 田中, 宮崎: 形状記憶合金の機械的性質, 養賢堂(1993)
- 4) たとえば本間 et al. 選研叢報, 28(1972)pp. 209
- 5) 轟, 田村: 日本金属学会誌, 50, 1(1986)pp. 1-9
- 6) 轟, 田村: 誌, 49, 6(1985)pp. 439-444
- 7) 武沢, 佐藤: 日本金属学会誌, 44, 3(1979)pp. 229-235
- 8) 宮崎, 大塚: エネルギー資源, 4, 4(1983)pp. 376-382
- 9) C. S. Zhang et al.: Scripta Metall., 24(1990)pp. 1807
- 10) S. Miyazaki et al.: Mater. Trans., JIM, 34(1993)pp. 919
- 11) D. Golberg et al.: Scripta Metall. et Metalia, 30(1994)pp. 1346
- 12) 江南 et al.: 日本金属学会秋期大会講演概要, (1985)pp. 112
- 13) 本間: 精密工学誌, 53, 5(1987)pp. 25-27
- 14) 宮崎, 大塚: 金属, 59, 8(1989)pp. 505-507
- 15) 宮崎, 石田: 金属, 63, 3(1993)pp. 9-13
- 16) 古屋 et al.: 日本金属学会報, 32, 7(1993)pp. 505-507

4.5 電気粘性流体及び磁性流体

4.5.1 はじめに

電気粘性流体、磁性流体は、ともにある所定の流体中に微粒子を分散させ、外部電場を与えることでその流体の流動挙動を制御可能とするような流体である。

他の節で扱う機能性素材がいずれも固体（固相）であるのに対し、これらの材料は流体である点に大きな特徴があり、これを活用すれば固相の機能性素材では達成できないような独自のスマートコンポジットを実現できる可能性がある。

本章の主旨は各機能性素材そのものに関する調査研究が目的であるから、これら材料の応用に関しては他の章にゆずり、電気粘性流体と磁性流体そのものに関する概要と特性について調査研究結果を報告する。

4.5.2 電気粘性流体

電圧を印加すると液体の粘度が上昇する現象は電気粘性効果として古くから知られており、19世紀後半に Duff, Quinke らによって報告されている¹⁾。これらの電気粘性効果は極性液体の粘度の上昇であり、粘度上昇も小さく、非極性液体には見られない現象であった。

1940年代に、米国人 Winslow は、誘電体粉を油に混ぜた流体に高電圧をかけると電極間の力が大きく上昇するという現象を見出し、これに電気流体(Electro-Fluid)と名づけて特許化した¹⁾。

1960～1970年代にはアメリカ、イギリス等で活発な研究が行われ、なかでも1970年代にイギリスでは国防省が大学や企業に Electro-Rheological Fluid（電気粘性流体、以下ERFと略称する。）の研究委託をしたこともあって、ERFの材料及びそれらの応用に関する多くの特許が出された。

1980年代に入って、ERFを用いると小型で構造が簡単でしかも電子制御が可能な部品が設計できるということもあって、ERFの自動車部品への応用が検討されはじめ、自動車メーカー、部品メーカー、化学メーカーなどがこぞってERFに注目するようになってきた。

この流体の特徴は、粘性の変化する範囲が非常に大きく、流体から固体まで変化するものもあり、その応答性が数ミリ秒以下と非常に速いことである。

また対象となる液体は電流を通して発熱しないことが必要であるので、利用できる液体は絶縁性液体に限定される²⁾。

(1) ERFの特性³⁾

ERFはコロイド溶液の一種で、一様流体中に微粉末を分散させたものである。

流体が電場の下で粘性を変化させる現象を一般に電気粘性効果（ER効果）というが、ER効果の詳細はいまだに明らかでない。現在はERFに電場を加えたときに流体中に分散された粒子が誘電分極を起し、粒子のクラスタを形成することで見かけの粘性が変化するものと考えられている。

ERFは従来から水分を含んでいることが必要条件とされ、事実、水分を含ませることによって大きな電気粘性効果が得られていた。従来提案されてきたERFの多くは親水性の固体微粒子を絶縁性流体中に分散させたものである。水分の存在により粒子表面に電気二重層が形成され、高電圧を印加することによって電気二重層の中で自由イオンの移動を起して分極を生じ、この分極された電荷の静電気力によって電場方向に粒子の鎖を形成すると考えられている。その模式図を図4.5.1³⁾に示す。

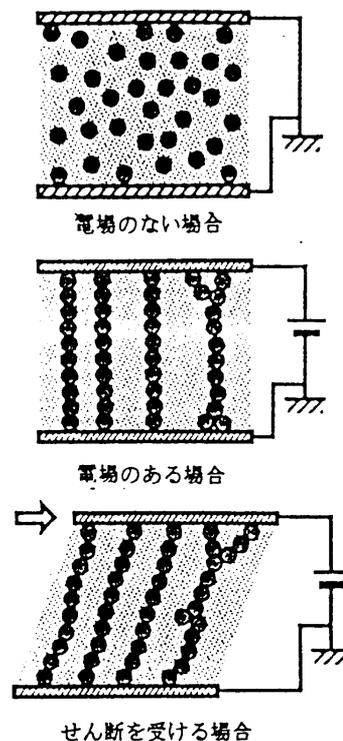


図4.5.1 電気粘性流体のメカニズム

電極間に粒子による鎖が形成されると、電極がその平行な方向に相対速度を生じたときの抵抗力となり、また電極間に圧力流れが生じたときの流れに対する抵抗力になると考えられている。加える電圧は使用目的に応じて異なるが数百V/mmから数十V/mmとされ、その時の電流値は数 μ Aから数mAで、消費電力は数ワットである。

図4.5.2³⁾はせん断速度を変化させたときの電場の強さとみかけの粘性の関係を示す。電場の強さに応じて粘性は放物線状に大きくなり、図においては100倍近い増粘効果が現れている。せん断速度が大きくなると電気粘性効果は減少していることがわかる。

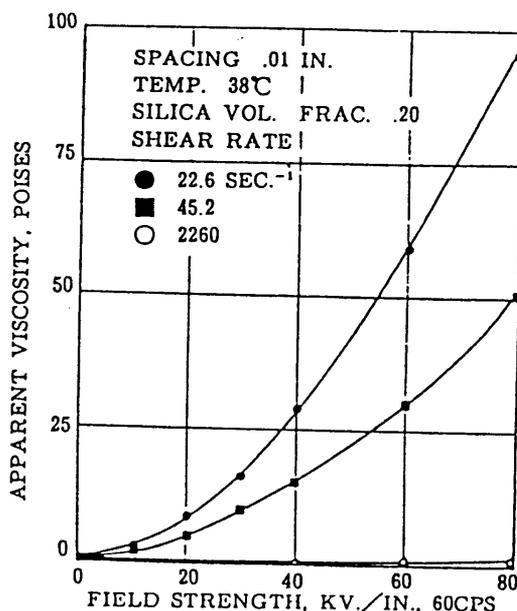


図4.5.2 ERF効果 (電場強さ、せん断速度の影響)

図4.5.3³⁾はER粒子としてシリカゲル粉末を用いた場合のその体積含有率がER効果に及ぼす影響を示す。含有率が増加するほどER効果は大きくなっていることがわかる。

ERFを実用化する場合には温度に対する安定性が重要なファクターとなるが、図4.5.4³⁾は温度とER効果の関係を示す。図からもわかるように温度が高くなるとER効果は大きくなるが、流体中に含まれる水分の為に、100℃を越えると流体の劣化が生じることが知られており、その対策として非含水系流体の開発に各方面でしのぎを削っている。

そのような状況の中で、ER粒子として従来は、シリカゲル、セルロール、澱粉等の粉末が使用されてきたが、これら含水系に代わる非含水系粒子として石野ら^{1), 4)}は炭素質粒子系のERFの開発に成功した。

図4.5.5⁴⁾はERFにおける分極メカニズムを示す模式図であり、図4.5.5(a)は従来のような含水系粒子におけるイオンの移動による分極メカニズムであり、図4.5.5(b)は石野らの開発になる炭素質粒子の分極メカニズムである。

図4.5.5(a)のように含水系の粒子は+イオンと-イオンの移動によって起きるが、イオンの移動には水分が必要であり、もし粒子中の水分が蒸発してしまうと分極が起こらずER効果も生じなくなってしまう。

そこで石野らは、「イオンではなく、正孔(ホールともいう)と電子の移動で粒子を分

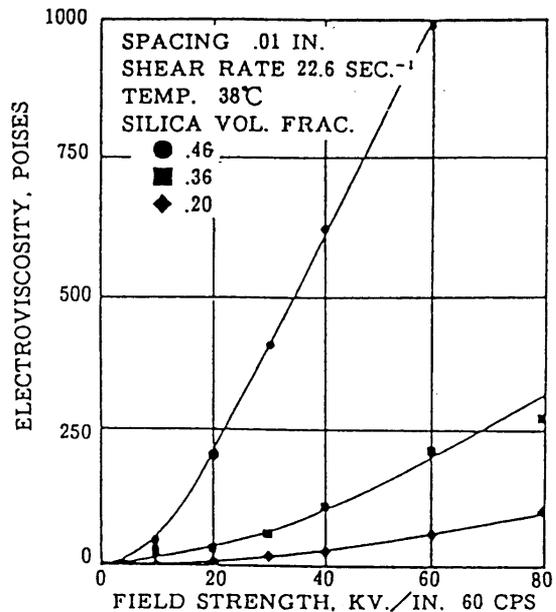


図4.5.3 ER効果に及ぼす粒子の含有率の影響

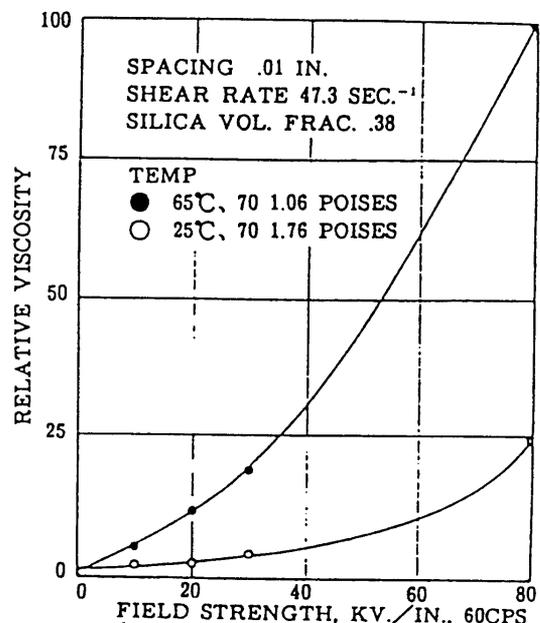


図4.5.4 ER効果に及ぼす温度の影響

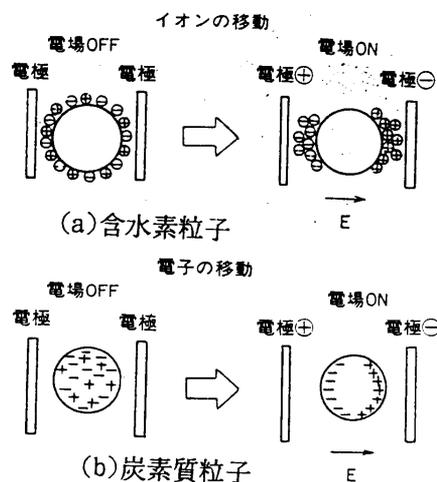
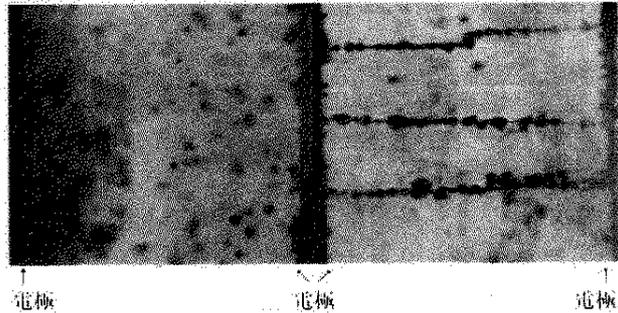


図4.5.5 ERFの分極メカニズム

極させれば水分の必要はなくなり、したがってER効果の減少もないはずである」という考えのもとに炭素質粒子を用いたERFの開発に着手したのである。



電場をかけない状態では粒子が自由に浮遊しているが(左)電場をかけると誘電分極によって粒子が鎖状に連なる(右)
図4.5.6
炭素質粒子系ERFのER効果の発現メカニズム

これは図4.5.5(b)のように正孔と電子の移動によって誘電分極し、その結果、粒子が鎖状に連な

てER効果を発現する。これらの状態を図4.5.6⁴⁾に示す。詳しい内容は明らかにされていないが、ここで用いられている炭素質粒子の組成は炭素が90%で、残りは酸素、水素、窒素で占められている。直径は数 μm 、比重は1に近い。とされている。

図4.5.7⁴⁾は、含水系粒子によるERFと炭素質粒子によるERFにおける見かけ粘度と温度との関係である。含水系粒子のERFは約80 $^{\circ}\text{C}$ 以上ではデータがとれないのに対し、炭素質粒子のERFでは-50 $^{\circ}\text{C}$ ~180 $^{\circ}\text{C}$ の範囲まで粘度測定が可能であり、しかも0 $^{\circ}\text{C}$ ~100 $^{\circ}\text{C}$ の範囲では粘度はほぼ一定であることがわかる。

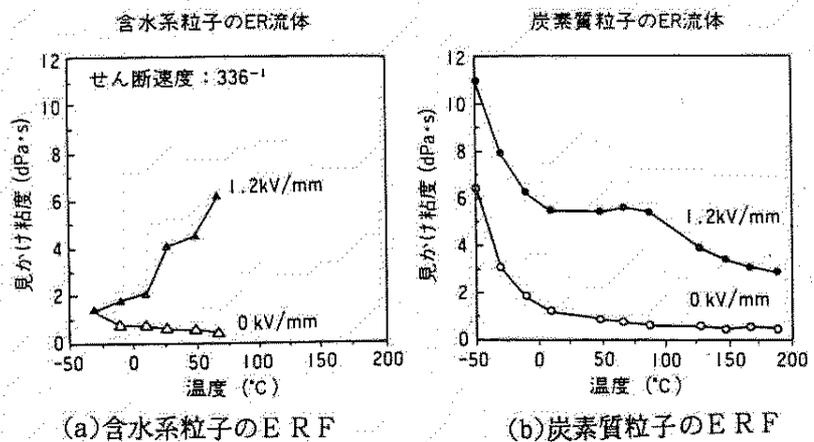


図4.5.7 ERFの見かけ粘度と温度の関係

図4.5.8⁴⁾は、炭素質粒子ERFの耐久性を示すもので、温度60 $^{\circ}\text{C}$ 、せん断速度750 s^{-1} 、電界強度2 kV/mm として電場をかけたときの炭素質粒子ERFの粘度と電流密度の変化である。800時間を経過しても粘度は約20 $\text{dPa}\cdot\text{s}$ で変化せず、電流密度も25 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ 前後で変化がない。このことから炭素質粒子ERFは耐久性と安定性にすぐれているERFであることがわかる。

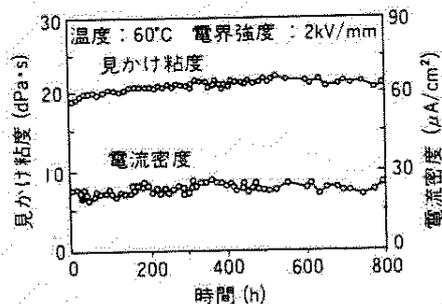


図4.5.8 粘度、電流密度の経時変化。800時間経過してもほぼ一定で安定している(せん断速度:750 s^{-1})

4.5.3 磁性流体

(1) 磁性流体の概要⁵⁾

磁性流体とは、磁性体の超微粒子を液体中に分散させて得られる流体である。超微粒子には単磁区構造のマグネタイト（微小永久磁石）あるいは鉄以外の純金属、金属化合物等の超微粒子を用いるものである。超微粒子の粒子径は10～100nm程度であり、分散系電気粘性流体の粒子径が1～100 μm (1000～100,000nm)であるのに比較するとはるかに小さいので超微粒子といわれる所以である。

また、磁性流体を構成する粒子は外部磁場の有無には無関係にそれ自体安定な永久磁石であって、固有の磁気モーメントをもっている。これに対して粒子分散系電気粘性流体用の粒子は外部電場がなければ極性を持たず中性であり、電場がかけられて初めて静電誘導によって外部電場の方向に極性が生ずる。したがって、粒子が回転しても極性の方向は変わらない。この点が磁性磁体と電気粘性流体との大きな違いであって、そのことが基本的な性質や流動現象などに大きな相違となって現れてくる。

磁性流体においては流体中の超微粒子はブラウン運動によって全くランダムな運動を行いながら浮遊しているので、比重が大きいにもかかわらず重力による沈降が妨げられている。すなわちそれほど微小な粒子であるともいえる。また磁氣的性質についてみれば、粒子自身が微小な永久磁石の状態であり、流体中でブラウン回転運動を行うことによって磁気モーメントが自由に回転している状態となるため、マクロ的にみれば超常磁性を示すことになる。

これに対して粒子分散系電気粘性流体では粒子径が大きいため一様安定に分散させることが難しく重力による沈降が生じ易い。また、静電分極による粒子の凝集は避けるべきものではなく、むしろ電気粘性流体の特徴的性質を形成する基本的機構そのものである。

(2) 磁性流体の製法⁶⁾

マグネタイト微粒子による磁性流体の製法には、(a)粉砕法、(b)水溶液吸着-有機相分散法、(c)解膠法の3つがある。(a)は、1965年に米国のS.S.Pappellによって開発された。ボールミルにマグネタイト、有機溶媒及び界面活性剤（オレイン酸ソーダ）を装入して長時間混合し、粉砕してマグネタイトの安定分散をはかる。生産性、収率、濃度ともに低い。

(b)は、日本の下飯坂によって1966年に開発された。鉄イオンを含む溶液にアルカリを添加してマグネタイトの微粒子を析出させ、これに界面活性剤（オレイン酸ソーダ）

を吸着させた後に水洗を繰り返し、さらに二層目の界面活性剤を吸着させて安定分散を得る方法である。生産性が高い。

(c) は、1972年に米国の S.E.Khafalla によって開発された。(b) と同じ方法でマグネタイトを析出させ、これを沸騰しているケロシンとオレイン酸ソーダの混合液に加えて水分を蒸発させて一気に磁性流体を得る。生産性は高い。磁性粒子を分散させる流体としては、水、ケロシン、エステル、ダイエステルなどがあり、使用目的に応じて選択される。

(3) 磁性流体の性質⁶⁾

磁性流体における磁性粒子の安定分散は、粒子間のファンデルワールス力や磁氣的引力及び粒子表面に吸着された界面活性剤の反発力に由来する。

マグネタイトは元来フェリ磁性であり磁気履歴を示すが、安定分散する程に微細化すると超常磁性となって、その磁化曲線はヒステリシスループを描かなくなる。

磁性流体を利用するには、その磁化特性を大きくするために高濃度で外部磁界の作用下で使用するのが普通であるが、外部磁界の作用を利用すれば、磁性流体の見かけ比重を大きくしたり、粘性係数を変化させることも可能である。

表4.5.1⁶⁾に磁性流体の一般的性質を示す。

表4.5.1 磁性流体の一般的性質

	W-35	HC-50	DEA-40	DES-40	NS-30	PX-10
外 観	黒色液体	黒色液体	黒色液体	黒色液体	黒色液体	黒色液体
比 重 (25°C)	1.35	1.28	1.40	1.40	1.20	1.24
粘 度 (cp, 25°C)	25	20	150	300	600	1,300
磁化(Gauss, 8 kOe)	360	420	400	400	300	100
使用温度範囲 (°C)	0~90	-20~150	-20~150	-20~150	-10~150	-10~150
沸 点 (°C, 1atm)	100	180~212	335	377		
凝 固 点 (°C, 1atm)	0	-27.5	-72.5	-62	-10	-10
引 火 点 (°C)	—	65	192	215	225 以上	240
蒸 気 圧 (mmHg)	—		0.15 (150°C)	0.5 (200°C)	7×10^{-2} (200°C)	
貯 蔵 安 定 性	良 好	良 好	良 好	良 好	良 好	良 好

4.5.4 まとめ

本節においては、電気粘性流体と磁性流体に関して、それぞれの歴史的背景、製法、特性等応用分野以外について、その調査結果を記述した。電気粘性流体と磁性流体の大きな違いは、①分散粒子の大きさが前者は後者に対して100~1000倍の大きさであること。②分散粒子の電磁氣的性質が前者は外部電場があってはじめて発生するのに対し、後

者の粒子は永久磁石であるので固有の磁気モーメントをもっていることである。

いずれの素材もかなり長い歴史を有しているが、近年のスマートコンポジットの開発熱とともに今後益々研究開発が進展するものと思われる。

参 考 文 献

- 1) 石野裕一、斎藤翼、五嶋教夫：工業材料、Vol. 41, No. 11, (1993), pp. 113-117.
- 2) 浅野和俊：電気粘性流体とその応用に関する研究分科会成果報告書、日本機械学会(1994), pp. 2-21.
- 3) 森下信：油空圧技術、(1991年11月), pp. 19-23.
- 4) 色めく日本の電気粘性流体開発、工業材料、Vol. 42, No. 3(1994), pp. 104-106.
- 5) 山根隆一郎：電気粘性流体とその応用に関する研究分科会成果報告書、日本機械学会(1994), pp. 22-30.
- 6) 小野寺正：機能材料入門（上巻）、本間基文、北田正弘編、（株）アグネ(1982), pp. 93-96.

4.6 高分子系機能性材料

4.6.1 はじめに

近年の石油化学工業の発達にともなって、スマートコンポジット用の機能性素材として使用できる可能性のある高分子系の機能性素材が各種開発されあるいは開発されつつある。

そのような状況の下で本節においては主要な高分子系機能性素材の例として、形状記憶高分子、導電性高分子、圧電性高分子及び圧電性塗料について、その概要と特性等について調査研究結果を報告する。

4.6.2 形状記憶高分子

1960年代に、NiとTiをほぼ同量含む合金がすぐれた形状記憶性を有することが知られていたが、高分子材料においてもさまざまな形で形状記憶性を有することが以前から知られていた¹⁾。

高分子材料における形状記憶性の典型的な例は、ゴム、エラストマー等は大きく変形しても力を離すと直ちに元の形にもどるといふ、ゴム弾性である。この現象は変形の回復はしても記憶にはつながらないために一般には形状記憶とは言えない。形状記憶材料とするためには分子構造をある状態に保持したり、所定の条件に達したときにそれを解除したり出来る一種の「掛け金」といふべきものが必要になるのである。具体的には、ガラス転移、融解、相変態などである。

図4.6.1¹⁾は形状記憶高分子の形状記憶、形状回復のプロセスを示したものである。粉末やペレット等の原料を加熱下に

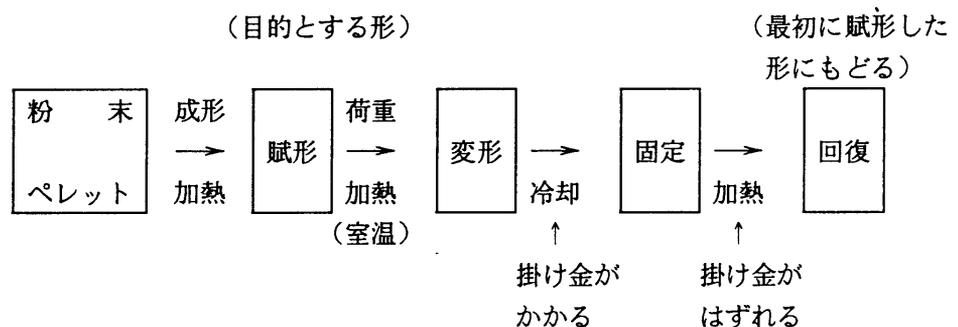


図4.6.1 形状記憶ポリマーの記憶、回復のプロセス

る形に賦形し、次いで室温又は加熱下で所定の変形を与えた状態で形状を固定する。加熱下で変形を与えた場合は冷却することによって形状を固定する(掛け金がかかる)。この後、必要なときに加熱することによって目的とする元の形の回復する。

表4.6.1¹⁾形状記憶高分子と形状と記憶合金の比較を示した。形状記憶高分子の場合、安価、形状変化率が大きい等の利点もあるが、形状回復力や繰返し性などに金属に比較す

るとかなり劣っているのでスマートコンポジットのアクチュエータとしては必ずしも適していない。

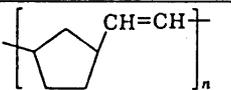
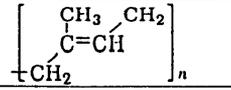
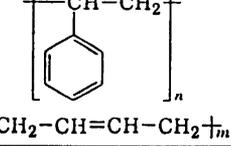
近年、形状記憶シャツとか形態安定シャツなどと呼んで、活発な商品開発が行われている衣料素材におけるいわゆる形状記憶性というものは、綿素材を構成するマイクロフィブリルのセルロース分子におけるひ結晶部分を樹脂加工またはホルマリンガスによるVP (Vapor Phase)加工で架橋²⁾することによっていわゆる「型くずれ」を防止したものであり、本稿で対象としている、いわゆる「掛け金」の作動による形状記憶や形状回復のメカニズムを有するところの形状記憶高分子とは必ずしも同じ内容をさすものではないことに注意をする必要がある。

表4.6.1 形状記憶合金と形状記憶ポリマー

	高 分 子	金 属
形状記憶のメカニズム	・高分子鎖の変形と分子配向 ・分子運動の凍結 ・ゴム弾性	・見かけの降伏現象と結晶変態
形状回復のメカニズム		・加熱による逆変態
回 復 力	小さい	大きい
回 復 量	大きい	小さい
記憶・回復の可逆性		
1 方 向 性	○	○
2 方 向 性	—	○
(可逆形状記憶効果)		トレーニングによる
力学的性質 (強さ)	低	高
電 気 的 性 質	絶縁性	導電性
通 電 加 熱	不可	可
高 周 波 誘 導 加 熱	—	可
熱的性質 (融点)	低	高
(熱伝導率)	小	大
比 重	小	大
そ の 他	易成形性 錆びない	
コ ス ト	低	高

表4.6.2¹⁾は現在開発されている形状記憶高分子である。日本ゼオン(株)が輸入販

表4.6.2 開発されている形状記憶高分子

樹脂名	分子構造	製造企業
ポリノルボルネン 〔ノーソレックス〕		日本ゼオン
トランスポリイソブレン		ク ラ レ
スチレン・ブタジエン共重合体 〔アスマー〕		旭化成工業
ポリウレタン	リニアポリウレタン ・ジイソシアネート ・ポリオール	三菱重工業
「シェイブルA」	ポリエステル系アロイ	日本ゼオン
高密度ポリエチレン	化学架橋高密度ポリエチレン —(CH ₂ -CH ₂) _n —	

売を行っている「ノーソレックス」はフランスCd Fchimie社が開発したノルボルネンポリマーであり、エチレンとシクロペンタジエンからディールス・アルダー反応によって合成される非晶質のポリマーである³⁾。ノーソレックスは粒径0.8mm以下、多孔質の白色の粉体で分子量300万以上、ガラス転移点が35℃である。この粉末状原料を150℃で所要の形に成形し、室温に戻すと半硬質の成形品が得られ、これに所定の変形を与えると一見塑性変形を生じたようにその変形された形を保っている。その後、必要に応じてこれを40℃以上の温度に保つと成形したときの形状に復元する。

この材料はガラス転移点以上の40℃以上で形状回復するが、この時には弾性率が大幅に低下して形状回復力がきわめて小さくなってしまう。このことはまた二方向記憶が不可能なことにつながり、現状では必ずしも明確な実用的効果の見いだせない原因の一つとなっている⁴⁾。

このように形状回復後の弾性率が大幅に低下してしまう現象は、形状記憶合金がマルテンサイトからオーステナイトへの相変態によって形状回復するときに弾性率が大きく増大（筆者の実験では2～10倍）するのとは対照的であり、これが高分子系形状記憶材料の持つ宿命であるとも言える。

ノーソレックスは圧縮成形品としてのみ製品化が可能であり、射出成形、押出成形、カレンダーリングなどの通常のプラスチックで使用される成形法は適用できない⁴⁾。

（株）クラレのトランスポリイソプレン(TP-301)は密度が0.96g/cm³、ガラス転移温度T_gは-68℃の結晶融解温度T_m=67℃の結晶性材料である¹⁾。

この材料はT_mを越えると容易に流動するため溶融押出しによるシート状成形が可能である。

この材料の形状記憶プロセスは、①TP-301を硫黄、パーオキサイドで加硫しながら成形する。②T_m以上で変形させる。③変形したまま室温まで冷却する。④T_m(67℃)以上に加熱すると元の形状に回復する。となる。この材料の「掛け金」は微結晶の融解である。

旭化成工業（株）のアスマーは、ポリブタジエンユニットとポリスチレンユニットが特殊な形で複合化されたスチレン系ハイブリットポリマーである⁵⁾。

これは120℃以上になると固定相（ポリスチレンユニット）、可逆相（結晶性ポリブタジエンユニット）ともに溶融状態になり、押出成形、圧縮成形、射出成形などによって所定の形状に成形できる¹⁾。

この材料の形状記憶プロセスは、①120℃以上の温度で所定の形に成形する。②ポリブタジエンのT_m(=60℃)で変形を与える。③変形させた状態で室温(40℃以下)まで冷却する。④その後、必要に応じてT_m以上に加熱すると形状を回復する。この材料の「掛け金」は結晶の融解である。

三菱重工業（株）のポリウレタン系形状記憶高分子は、ジイソシアネートとポリオールが無溶媒反応を利用して得られるポリウレタンをベースにしたものである⁶⁾。

この材料は結晶部と非晶部の2相からなり、非晶部のT_g(ガラス転移点)から結晶部の

融点までのゴム弾性を示す温度領域では非晶部は自由に運動し、結晶部は架橋点のように挙動する。この現象を利用して、材料を変形させた状態で T_g 以下に冷却すると、その形状は内部応力を残したまま固定され、その後、必要に応じて T_g 以上

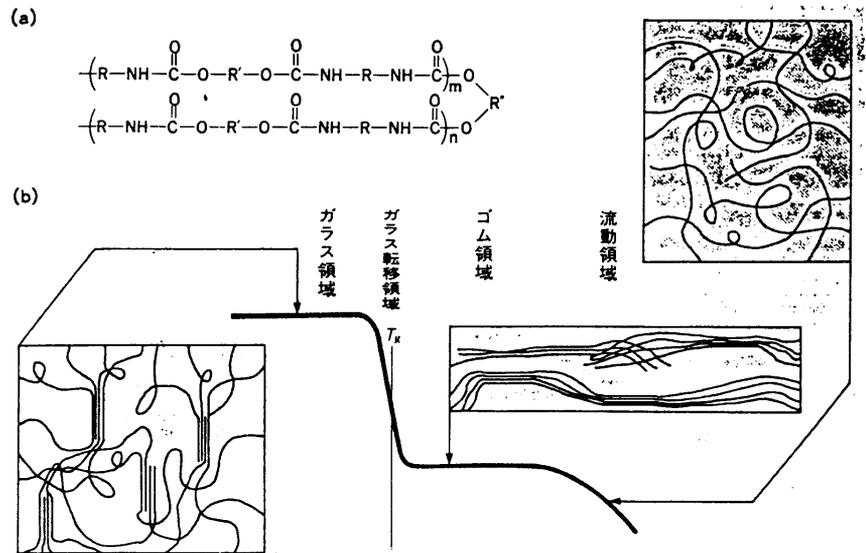


図 4.6.2 三菱重工のポリウレタン系形状記憶樹脂 (a) と形状記憶効果の仕組み (b)。結晶部と非晶部を持ち、温度を上げると分子はブラウン運動を始め やがてゴム弾性を示すようになる。 T_g は $-30 \sim 70^\circ\text{C}$ の間に制御できる

に温めると内部応力による復元力によって形状が回復する。なお、この材料はジイソシアネートとポリオール主鎖や分子量を調整することによって T_g を変化させることができ、 -30°C から $+40^\circ\text{C}$ までの範囲で形状回復温度を変化させることができるとされている。

図 4.6.2⁶⁾ にこの材料の構造と形状記憶効果の仕組みを示す。この材料の「掛け金」はガラス転移である。

4.6.3 導電性高分子^{7), 8)}

導電性高分子材料という場合は通常の意味での導電性（暗電流）をもつものが主体であるが、光の照射によって導電度が増す光導電性のものも含まれる⁷⁾。

高分子における電気伝導のメカニズムは、①イオン伝導と、②電子伝導の二つに分けられる。①は高分子固体中にイオンが混在している場合に、電界のもとでそのイオンが移動することによって電気はイオンによって運ばれる。このときのイオンをキャリアと呼ぶ。②は電子の移動による伝導で、キャリアは電子そのものであるが、その外に正孔（ホール）と呼ばれる電子が引き抜かれた状態をキャリアと考えると便利である。キャリアの濃度が高いほど高い電導度が期待できる。キャリアの移動の速さも導電性の重要なファクターである。イオン電導の場合はイオンが通り抜けていく高分子媒体の摩擦抵抗によってこれが支配される。電子伝導では（イ）ホッピング電導と（ロ）バンド電導の二つの機構が考えられている⁷⁾。

表 4.6.3⁸⁾ に代表的な導電性高分子とその骨格を示す。ポリアセチレンは導電性が高

いことで知られる共役 π 電子系高分子の代表格であり、アセチレンの重合で得られる線状高分子である。

分子の形態にはシス型とトランス型があり、電気伝導度はシス型で $10^{-9} \Omega^{-1} \text{cm}^{-1}$ 、トランス型で $10^{-5} \Omega^{-1} \text{cm}^{-1}$ である。トランス型はヨウ素や A, F のドーピングによって $10^3 \Omega^{-1} \text{cm}^{-1}$ に増加する⁷⁾。ポリアセチレンは高い導電率を示すが、空気中の酸素によって劣化するなど安定性に乏しい。ポリピロールとポリアニリンは導電率は高くないが、安定性に優れているので工業的利用では先行している⁸⁾。ポリキノリンとポリピリジンは他の導電性高分子と異なって酸化型ドーピングは受けず、還元型ドーピングだけが可能である。ポリフェニレンはポリアセチレンと同様、酸化型及び還元型のドーピングが可能で安定性が高いので興味深い導電性高分子であるが、現在、形になっているものは成形不可能な粉末であったり、分子量が低すぎたりして問題も多い⁸⁾。

π 電子線状高分子では、この他にポリパラフェニレン、ポリパラフェニレンスルフィド、ポリチエニレンなどがある。

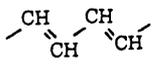
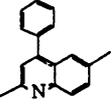
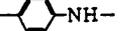
イオン性導電性高分子材料は、高分子固体中にある種のイオンを含んだものであるが、この例としてはポリプロピレンオキシドやメチルメタクリレートがある。

導電性高分子材料のもう一つの範疇に導電性高分子複合材料がある。これは導電性の微粒子や微細繊維などを絶縁体である通常の高分子に混入させて所要の導電性を得るものであるが、この種の材料は、①高分子材質と粒子材質、②粒子の形や大きさ、③混入・成形の条件、等によって非常に多様性をもっている⁷⁾。

(1) 導電性高分子複合材料における粒子含有率と導電率との関係⁷⁾

粒子含有率を増していくと、はじめは非常にわずかな導電率の増加が見られるが、ある含有率になると急激な飛躍が生じ、10桁以上の増加がみられその後再び緩やかな増加にもどる。この急激な増加はほとんど例外なくこの種の材料に見られる現象で多くの研究者の興味をひきつけている。この転移的な導電度の増加は導電粒子が高分子マトリックス中で互いに接触して導体回路をつくりはじめることに対応している。これを網目またはパー

表4.6.3 代表的な導電性高分子の骨格

ポリアセチレン	
ポリフェニレン	
ポリピロール	
ポリチオフェン	
ポリキノリン	
ポリピリジン	
ポリアニリン	

コレーションと呼ぶ。

(2) 導電性高分子複合材料における導電性発現のメカニズム⁷⁾

導電性の飛躍が生じるまでの導電率は高分子自体のそれと匹敵するほど低いものであり、そのメカニズムは高分子と同様ほとんど不純物によるイオン伝導とカンガエラレル飛躍後については、(イ) 導電粒子の網目において粒子の接触面を電子が移動する。

(ロ) 粒子と粒子の間は狭いが、多少の隙間があり、それを高分子が埋めている。しかしそれが狭いため電子が飛び越すことができる。という2つの考え方がある。後者をトンネル効果といい、電子がホッピングするよりもはるかに小さいエネルギーで移動できるメカニズムが働いている。

これら材料に関する研究例は膨大なものがあるので、ここでは筆者の同僚研究者である熊谷⁹⁾の研究について紹介するにとどめる。

図4.6.3⁹⁾は熊谷の開発した粒子充填型の導電性高分子材料の粒子(フィラー)含有量と導電性(比抵抗値で表す)との関係である。ここで用いた粒子はりん片状の雲母であるセリサイトの粉体に、Ni-P合金めっきを無電解法で皮膜したものである。これをポリウレタン系樹脂塗料に分散させて高分子複合体とし、これを厚さ2mm、150mm×75mmのプラスチック板に100 μ m程度にスプレー塗膜としたものである。平均粒子径は40 μ mであるフィラー含有量(wt%)30~50%の範囲で含有量の増加とともに急速に比抵抗値が減少して、導電性が增大していることがわかる。この材料は面状発熱体としての用途開発も進められており、図4.6.4⁹⁾にこれら面状発熱体の発熱温度と抵抗の関係を示す。

導電性高分子のもう一つの範疇として、光の照射によってキャリアーが生成し、導電性が増加する現象をもつ光導電性高分子がある⁷⁾。

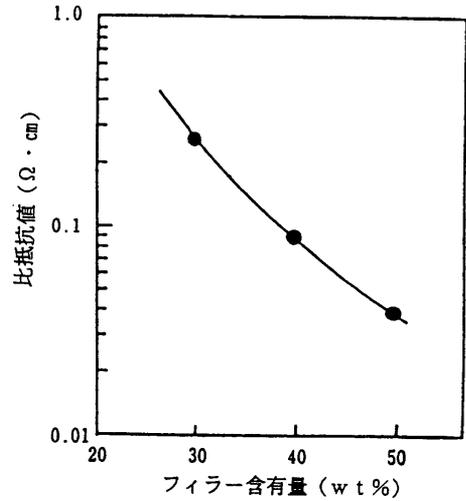


図4.6.3 粒子分散型導電性高分子の粒子含有量と比抵抗の関係

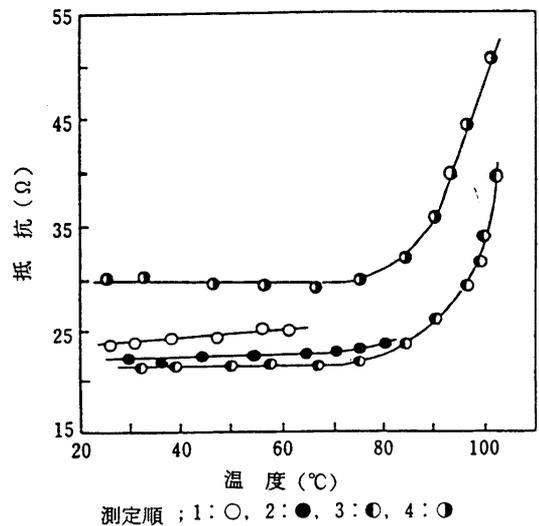


図4.6.4 粒子分散型導電性高分子面状発熱体の発熱温度と比抵抗の関係

これには現在2つのメカニズムがあるとされており、その1つは、光によって価電子帯の電子が励起され導電帯に飛び込むという直接的な機構である。もう1つは低いエネルギーの光に励起された電子が周辺の分子や不純物と関係し合ってキャリアを形成する。というものである。この材料で最も有用なものはポリビニルカルバゾール (PVC₂) である。

4.6.4 圧電性高分子及び圧電性塗料⁷⁾・¹⁰⁾

圧電性 (Piezoelectricity) とは、物質に力あるいはひずみを加えると電荷が誘起され、すなわち物質中の正と負の電荷の重心がずれて分極を生じ、逆に電位を与えると力やひずみを発生する現象である。圧電性はもともと無機材料である電気石において1880年、キュリー兄弟によって発見されたものである¹⁰⁾。

高分子材料における圧電性もかなり古くから知られており、木材などは圧電性を示すことはよく知られていたが、圧電性の強さが無機材料のそれと比べると比較にならない程小さかったために高分子を圧電性材料として使用できる可能性は乏しいと考えられていた⁷⁾。

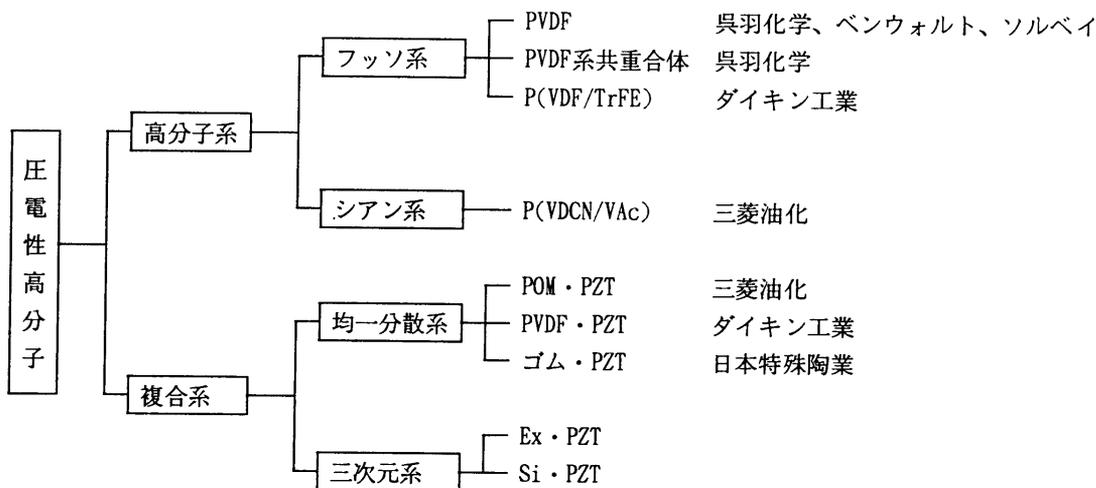
しかしながら1969年にポリフッ化ビニリデン、PVDF (—CH₂—CF₂—)_nが、他の高分子と比べて桁違いに大きな圧電性を示すことが見いだされて以来この分野の研究が活発化した⁷⁾。

圧電性高分子を大別すると生体高分子に見られる面ずり型 (せん断応力型) のものと、PVDFに代表されるエレクトレット型のものに分けられる。前者には、木材、骨、絹、合成ポリペプチドなどがあり、後者にはPVDF、PVC (ポリ塩化ビニル)、ナイロン11などがある¹⁰⁾。

後者の圧電体は面ずり型に比べて大きな圧電率を示す。これらの圧電性は強電界 (～1 MV/cm) 下での分極処理によって生じた残留分極と他の物理量のカップリングにより生じた圧電効果である。一般に高分子系圧電材料は大面積化が可能で成形性にも富んでいるため、無機系のものに比べて応用範囲も広い。熱的安定性は必ずしも良くないがビニリデンシアナイト系の共重合体では、170℃まで安定なものもある¹⁰⁾。

図4.6.5¹¹⁾に現在実用化段階にある圧電性高分子材料の分類を示す。また、表4.6.4には圧電性高分子材料の諸特性 (伸び方向の圧電性) を無機圧電材料と対比して示す。

高分子系圧電材料の圧電定数は無機圧電材料の代表であるPZTと比較してアクチュエータとして用いる際に重要な定数であるd定数 (応力と分極との関係) で1/4であるが、センサとして用いる場合の重要な定数であるg定数 (加える応力と発生する電圧との関係) では約1桁大きい。従って高分子系圧電材料は機械—電気変換材料として適していること



PVDF：ポリフッ化ビニリデン、P(VDF/TrFE)：フッ化ビニリデン・トリフルオロエチレン共重合体、
 P(VDCN/VAc)：シアン化ビニリデン・酢酸ビニル共重合体、POM：ポリアセタール、
 Ex：エポキシ樹脂、Si：シリコン樹脂、PZT：チタン酸ジルコン酸鉛。

図 4.6.5 圧電性高分子材料の分類

を示唆している。

構造物あるいは高分子材料の振動センサ用途として高分子系圧電塗料の研究も進められている。

図 4.6.6¹²⁾ は江草らの開発した圧電性塗料を構造物表面に塗布した場合の模式図である。塗料は P Z T (チタン酸ジルコン酸鉛) のセラミックス微粉末を顔料として、エポ

表 4.6.4 各種圧電材料の諸特性 (伸び方向の圧電性)

	密度 ρ (10^{-3}Kg/cm^3)	弾性率 C (10^9N/m^2)	比誘電率 ϵ_r	圧電定数		最高使用温度 ($^{\circ}\text{C}$)
				d_{31} (pC/N)	g_{31} ($10^{-3}\text{V}\cdot\text{m/N}$)	
PVDF ^{*1}	1.78	3.0	13	20	174	80
P(VDF/TrFE)						
(VDF55)	1.90	1.2	18	25	160	70
(VDF75)	1.88	2.0	10	10	110	100
P(VDCN/VAc)	1.20	4.5	4.5	6	169	160
PVDF/PZT ^{*2}	5.3~5.8	3~6	120~180	20~30	19	100
ゴム/PZT ^{*3}	5.6	0.04	55	35	72	100
POM/PZT	4.5	2.0	95	17	20	140
PZT ^{*4}	7.5	83.3	1,200	110	10	250
水晶 ^{*4}	2.65	77.2	4.5	2	50	573

^{*1} KF ピエゾフィルムカタログ、^{*2} ピエセルカタログ、^{*3} NTK ピエゾシートカタログ、^{*4} 超音波技術便覧

キシ樹脂をバインダーとしたものである。これを室温・空气中で塗布・乾燥させることによって20~180 μm厚でPZT含有率25~72%の薄膜を形成している。

図4.6.7¹²⁾はこの材料で形成した圧電薄膜の圧電定数に及ぼす膜厚の影響を示す。この図からも分かるように膜厚が薄くなると圧電定数も

低くなるので実用上の観点からは必ずしも有利ではない。しかし、最近、江草らは膜厚依存の関係を説明できたので近い将来膜厚依存性のない圧電塗料を開発できるとしている。

4.6.5 まとめ

以上、スマートコンポジットに適用可能と思われる機能性高分子材料の主なものである形状記憶高分子、導電性高分子、圧電性高分子及び圧電性塗料についてその概要、特性などについて報告した。

これら高分子材料の「機能性」は、金属や無機材料においてもともと発見、開発された「機能性」の場合が多く、これらの機能性と成形性、展延性、耐衝撃性など高分子材料の長所を合わせ持った材料を得るために開発された例が多い。そして、機能性の性能そのものは本家である非高分子材料のそれと比べるとはるかに劣るのが一般的である。そのため活用分野も日用品、衣料品、住宅・住居関連資材等の非極限環境分野をメインにして考えるのが妥当ではないかと考える。

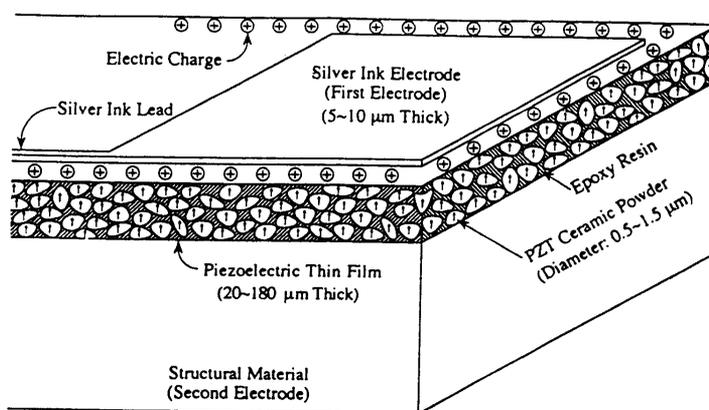


図4.6.6 構造材料の表面に形成される圧電性薄膜の模式図

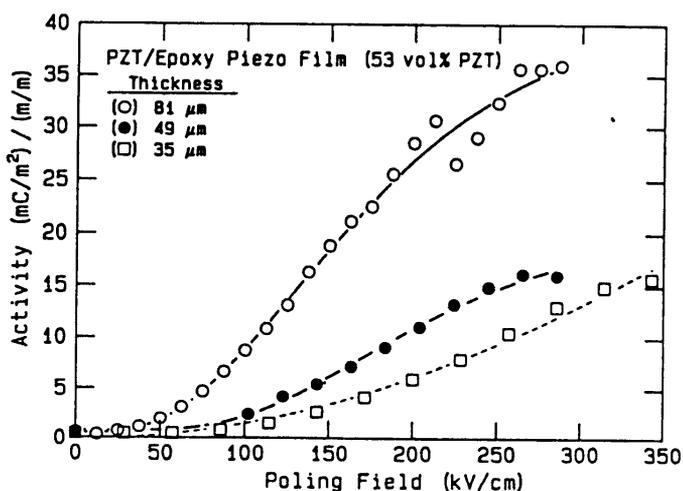


図4.6.7 圧電性塗料薄膜の圧電定数に及ぼす膜厚の影響

参考文献

1) 中山和郎：日本ゴム協会誌, Vol. 63, No. 9(1990), pp. 529-534.

- 2) 伊藤博：インテリジェント材料フォーラム、第9回ワークショップ要旨集、(社) 未踏科学技術協会(1994), pp. 5-13.
- 3) 日本ゼオン(株)：ノーソレックス技術資料、No. AM-001(1990).
- 4) 山本英輔：プラスチック、Vol. 38, No. 12(1987), pp. 107-111.
- 5) 旭化成工業(株)：技術資料「旭化成形状記憶樹脂アスマーについて」、合成ゴム技術部(1993).
- 6) 衣料裏面に形状記憶樹脂をコーティング—温度で透湿性をコントローラー、日経ニューマテリアルズ、1992年10月26日号、pp. 62-65.
- 7) 宮坂啓象：未来をひらく新素材、石川欣造、澤岡昭、田中良平、編、森北出版(1985), pp. 307-327.
- 8) 掃山亨二：機能材料、Vol. 13, No. 1(1993), pp. 32-39.
- 9) 熊谷八百三：防錆管理、Vol. 36, No. 4(1992), pp. 129-135.
- 10) 宮田清蔵、田坂茂：機能材料入門(上巻)、本間基文、北田正弘編、(株)アグネ、(1982), pp. 38-41.

4.7 無機系材料(セラミック繊維)とスマート化

スマートコンポジットの構成要素(センサ、プロセッサ、アクチュエータ、エフェクタ、複合材(母材))のうちセラミック繊維で構成可能な要素はセンサ、アクチュエータ、複合材(母材)が考えられる。本節ではセラミック繊維の機械的特性も含めて主に機能性の面から、スマートコンポジットの可能性、開発動向を報告する。

4.7.1 セラミック繊維の種類

セラミック繊維として市販あるいは開発されてきた繊維には

炭素繊維

炭化ケイ素系繊維(Si-C、Si-C-O、Si-Ti-C-O)

ボロン繊維

アルミナ系繊維

ジルコニア系繊維

窒化ケイ素系繊維(Si-N、Si-N-O)

窒化ホウ素系繊維

ガラス繊維 等

が挙げられる。代表的なセラミック繊維の力学的特性等を表4.7.1¹⁾に示す。これらの繊維のなかで、炭素繊維およびガラス繊維については、3.1節、3.2節、4.1節、5.5節等で詳細に報告されるため、本節ではそれ以外のセラミック繊維を中心に報告する。

炭素繊維の連続繊維はポリアクリルニトリル(PAN)、セルロース、レーヨン、ポリビニルアルコール、ポリアセチレン、アラミド、ポリイミド、ピッチ等を前駆体物質として製造できるが、現在はほとんどPANあるいはピッチを前駆体として製造されている²⁻¹⁰⁾。

炭化ケイ素系繊維は連続繊維と短繊維が製造されている。炭化ケイ素系連続繊維はポリカルボシラン、ポリチタノカルボシラン、ポリシラスチレン、メチルポリシラン(MPS)、ヒドリドポリシラザン(HPZ)、メチルポリジシラザン(MPDZ)等を前駆体物質とした前駆体法により製造される繊維径8~15 μm の細い繊維と、タングステン繊維あるいは炭素繊維を芯線として化学気相蒸着(CVD)により炭化ケイ素を付着させるCVD法により製造される繊維径100~140 μm の太い繊維がある¹¹⁻¹⁶⁾。このなかで、工業化され市販されている炭化ケイ素系連続繊維はポリカルボシラン、ポリチタノカルボシランから前駆体法により製造される非晶質構造のSi-C-O系繊維、Si-Ti-C-O系繊維、およびCVD法により製造される多結晶質の

表4.7.1 CMCの強化用に用いられる代表的なセラミックス系素材。

(*の記してある数値は推定値)

繊維名	原料・組成 (wt%)	N_f (本)	直径 (μm)	密度 (g/cm^3)	強度 (GPa)	K_{Ic} ($\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$)	m_f	弾性率 (GPa)	熱膨張係数 ($\times 10^{-6}/\text{K}$)	
連続繊維	炭素繊維 (高強度型) (高弾性型) (ピッチ系)	PAN系	1000	6~8	1.75	3	—	3~8	$\sim 13^{230}$	$\sim 10.6^7$
		PAN系	以上	6~8	1.80	2.2	—	3~6	*390	$\sim 13.0^{1.2}$
		メソフェーズピッチ系	—	≈ 10	2.10	2.1	—	3~8	*690	$\sim 12.0^{1.5}$
	Al ₂ O ₃ 系繊維	>99 α Al ₂ O ₃	210	20 \pm 5	3.95	1.4~2.1	≈ 6	7~13	380	8.3
		86($\alpha+\beta$)Al ₂ O ₃ , 4 SiO ₂	(短繊維)	31	3.4	1~2	—	—	250~320	8.7
		85Al ₂ O ₃ , 15SiO ₂	1000	9~17	3.2	1.8~2.6	3~5	3~12	2.1~2.5	8.8
		70Al ₂ O ₃ , 28SiO ₂ , 2 B ₂ O ₃	—	10~12	3.05	2.1~2.3	—	—	190~224	—
		Al ₂ O ₃ , 15~25ZrO ₂	—	20	4.2	2.1~2.5	—	—	385	—
	SiC系繊維	59Si, 31C, 100(PCS)	500	10~20	2.55	2.5~3.3	3~5	6~12	182~210	3.1
		48Si, 28C, 18O, 4 Ti	200n	8~10	2.3~2.5	≈ 3	—	6~12	≈ 200	3.1
		47Si, 30C, 15N, 8 O	—	10~15	2.3	1.75~2.1	—	—	175~210	—
		59Si, 10C, 28N, 3 O	—	10	2.35	2.1~2.45	—	—	140~175	—
		69Si, 30C, 1 O	—	10~15	2.6~2.7	1.1~1.4	—	—	175~210	—
		70Si, 30C, (炭素=7)(CVD)	1	143	2.55	≈ 3.92	—	—	406	~ 2.93
		59Si, 41N, 0.4C, 2 O	—	34 \pm 5	2.2	≈ 1.5	—	—	232	—
Si ₃ N ₄ 系繊維	56Si, 28N, 14C, 2 O	—	28 \pm 5	2.5	≈ 3.17	—	—	141	—	
	60Si, 39N, 0.5C, 1 O	—	1.0	2.5	2.5	—	—	300	—	
BN繊維	>99 BN (グラファイト構造)	—	7.6	2.0	≈ 1.4	—	—	82.7	$\sim 9.9^{0.1}$	
ウイスキー	SiC ウイスキー	β SiC ($l_f=50\sim 200$)	—	0.1~0.5	3.9	14*	3~6*	—	700*	3.8
		β SiC ($l_f=5\sim 200$)	—	≈ 1.5	3.18	14*	—	—	700*	3.8
		α SiC + β SiC ($l_f=10\sim 80$)	—	≈ 0.6	3.18	6.9	—	—	690	—
	Si ₃ N ₄ ウイスキー	α SiC + β SiC ($l_f=20\sim 200$)	—	1~10	3.18	1.8	2.5~4	3.5~8	550	—
		($\alpha+\beta$) Si ₃ N ₄ ($l_f=50\sim 300$)	—	0.5~2	3.18	4.8	—	—	276	2.5
		Al ₂ O ₃ ウイスキー	—	—	3.88	27.5	2.2~6	4~8	427	7.7
グラファイトウイスキー	>99C (グラファイト構造)	—	1.66	—	19.6	—	—	686	—	

N_f : 1ヤーン中の本数, K_{Ic} : モードI臨界応力拡大係数, m_f : ワイブル係数, n は1以上の整数

表4.7.2 アルミナ繊維の製法と物性。

製法	化学組成 (wt%)	直径 (μm)	密度 (g/cm^3)	引強さ (MPa)	弾性率 (GPa)	結晶構造
EFG法 (TYCO)	Al ₂ O ₃ 100	250	3.99	2400	450	α
無機塩法 (ICI)	Al ₂ O ₃ 96	3	3.3	1000	100	δ
	SiO ₂ 4					
ゾル法 (3M)	Al ₂ O ₃ 62	10~12	2.5	1500	145	γ
	SiO ₂ 24					
Nextel 312	B ₂ O ₃ 14					
スラリー法 (Du Pont) FP	Al ₂ O ₃ >99	20	3.9	1400	380	α
	MgO 0.5					
前駆ポリマー法 (住化)	Al ₂ O ₃ 85	17	3.2	1800	210	γ
	SiO ₂ 15					

SiC繊維である。炭化ケイ素系短繊維はウイスキーがほとんどであり、は主としてCVD法により製造される。

ボロン繊維はタングステン繊維や炭素繊維を芯線としてCVDでホウ素を被覆する方法により、繊維径約140 μm の太い繊維が製造され市販されている¹⁷⁾。

アルミナ系繊維は連続繊維および短繊維ともに各種の方法により製造され市販されている。アルミナ系連続繊維の製造方法と物性を表4.7.2に示す^{18,19)}。アルミナ系繊維に対してはセラミック繊維を製造するほとんどすべての方法が試みられている。EGF法はアルミナの融液から引き上げ法により単結晶繊維を製造する方法で、無機塩法はアルミニウム硝酸塩を含む紡糸液を繊維状にしたのちに焼成してアルミナ系繊維を製造する方法である²⁰⁾。前駆体法あるいはゾル・ゲル法はアルミナゾルを主成分としてシリカゾルあるいはケイ酸エステルさらに必要ならばホウ酸を加えた混合物を、アルミナ繊維の前駆体として使用する方法である²⁰⁾。スラリー法はアルミナ微粉あるいはアルミナに部分安定化ジルコニアを加えた混合物の微粉をスラリー状にし、紡糸したのち高温で焼成することによりアルミナ微粉を焼結させてアルミナ繊維を製造する方法である。アルミナ系短繊維は上記の連続繊維の各製造法によって製造され、欧州、米国、日本の各社から販売されている。

ジルコニア系繊維は短繊維がほとんどであり、連続繊維は僅かの研究機関で開発が進められている。ジルコニア系連続繊維は、ジルコニアゾルを主成分としてシリカゾルあるいはカルシウムアルコキッドを加えた混合物を前駆体とするゾル・ゲル法により製造されている²¹⁻²³⁾。ジルコニア系短繊維は、ジルコニウム塩溶液を有機繊維基材に圧入したのち乾燥、焼成して製造するものと連続繊維と同様にゾル・ゲル法により製造されるものがあり、どちらも市販されている²⁴⁾。

窒化ケイ素系繊維は、炭化ケイ素系繊維と同様に、限られた方法によってのみ製造が可能である。短繊維はCVD法により $\alpha\text{-Si}_3\text{N}_4$ 、 $\beta\text{-Si}_3\text{N}_4$ のウイスキーが製造されている。連続繊維は二つのタイプの前駆体法によって製造されており、その一つはペルヒドロポリシラザンのように分子内に窒素を持つ有機ケイ素ポリマーを前駆体とする方法であり^{25,26)}、他の一つは、これまで炭化ケイ素の前駆体として使用されてきた、ポリカルボシランのような分子内に窒素を持たない有機ケイ素ポリマーを前駆体としてポリマーのセラミックス化と同時に窒化反応させることにより窒化ケイ素に転換させる方法である²⁷⁻²⁹⁾。

窒化ホウ素系繊維は短繊維、連続繊維ともにまだ研究開発の段階であり、市販されていない。窒化ホウ素系短繊維は、酸化ホウ素繊維をアンモニアガス中、高温で処理して窒化

反応させることにより製造される³⁰⁾。窒化ホウ素系連続繊維はポリボラジンを前駆体として製造され、1800℃以上の高温で焼成することによって高強度を発現する³¹⁾。

短繊維としては、上記の繊維以外にも、チタン酸カリウム、マグネシア、酸化亜鉛、ムライト等のウイスキーが製造販売されている³²⁾。

4.7.2 現状の開発動向

4.7.1節で挙げたセラミック繊維は、一部がその電気特性あるいは電磁波特性を利用した機能材料として使用される以外は、主として複合材料の強化材として使用される場合が多い。

(1) 機械的特性および耐熱性

セラミック繊維を用いてスマートコンポジット化し、例えば航空機へ利用することを考えた場合、現状の繊維自体の機械的特性、耐熱性を改善する必要がある。そこで、まずこれらに関する開発動向について記述する。

① アルミナ系繊維^{18-20,33)}

現在使用されている多くのアルミナ系繊維は、構造から大きく二つに分けることができる。一つは約500nmの大きな α - Al_2O_3 結晶からなる結晶性繊維であり、Fiber-FPの商品名で米国Du Pont社から販売されている。他の一つは、数十nm以下の γ - Al_2O_3 、 $9\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{B}_2\text{O}_3$ 、 $3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$ 微粒子 およびアモルファス SiO_2 のいくつかの成分から構成される微結晶性繊維であり、Nextelの商品名で米国3M社から、Altexの商品名で住友化学工業(株)から販売されている。Fiber-FPは α - Al_2O_3 結晶が大きいいため引張強度が約1.4GPaと低く、高温では結晶成長により大きな強度低下を引き起こす。これを改善するため、第2相として Y_2O_3 部分安定化ジルコニアを添加し、 α - Al_2O_3 結晶の粗大化を抑える努力がなされている(商品名: PRD-166)。開発当初のNextelは非常にしなやかな繊維であったが B_2O_3 を14wt%含有していたため(商品名: Nextel 312)、アルミナ系繊維本来の耐熱性を発現できなかった。現在は B_2O_3 を2wt%まで低減化したNextel 440および480が開発され、耐熱性だけでなく引張強度も2.1GPa以上に向上した。Altexは γ - Al_2O_3 を主成分とする繊維であるが、 γ - Al_2O_3 は1000℃付近で α - Al_2O_3 に転移して強度低下の原因となる。そこでAltexには、 α - Al_2O_3 への転移を妨げるために15wt%の SiO_2 が添加されている。

② ジルコニア系繊維^{21-24,33)}

ジルコニア系繊維は、米国Union Carbide社、Zircar社によって初めて開発されたが、こ

の繊維は中空あるいは半円筒状で、繊維表面も平坦でなく強化繊維としては不十分であった。一方、品川白煉瓦(株)は前駆体法によりジルコニア系繊維の製造を試み、中実で繊維表面が平滑な繊維の開発に成功した。開発当初のジルコニア系繊維は、非安定化ジルコニアであったために1100℃付近で体積変化を伴う結晶変態により自己破壊を起こした。その後、前駆体の紡糸技術の改善により、CaO、Y₂O₃等の化合物を添加することが可能となった。その結果、高温まで自己破壊を起こさない部分安定化ジルコニア系繊維が製造できるようになり、高温構造材の強化材としての可能性が広がった。この部分安定化ジルコニア系繊維の標準特性を表4.7.3に示す²⁴⁾。

③窒化ケイ素系繊維^{25,26)}

ウィスカー以外で市販されている窒化ケイ素系繊維は、東燃(株)がペルヒドロポリシランを前駆体として製造している繊維のみである。この繊維はアモルファス構造で、図4.7.1²⁶⁾、図4.7.2²⁶⁾に示すように、1500℃以下で優れた機械的特性を示す。しかしながら、1500℃を越えると急激な結晶化により繊維強度が低下する。これを改善するため、結晶化抑制剤としてホウ素を添加した窒化ケイ素系繊維が開発された。図4.7.3²⁶⁾に示すように、6wt%以上ホウ素を含有した窒化ケイ素系繊維は、1700℃の熱処理後もアモルファス構造を保持することができる。

④炭化ケイ素系繊維¹¹⁻¹⁶⁾

市販されている炭化ケイ素系の連続繊維は、米国Textron社製のSiC/CおよびSiC/W系繊維、日本カーボン(株)製のSi-C-O系繊維(商品名:Nicalon)、宇部興産(株)製のSi-Ti-C-O系繊維(商品名:Tyranno繊維)である。SiC/CおよびSiC/W系繊維は繊維径が数十μm~百数十μmで太いため、形状の複雑な構造物の強化材として使用するうえで不利である。一方、NicalonおよびTyranno繊維は繊維径が数μm~十数μmと細いため、容易に複雑形状物を複合化することができる。しかしながら、NicalonおよびTyranno繊維はともに製造過程で取り込まれる多量の酸素を含有しており、1500℃以上の高温における急激な強度低下の原因となっている。そこで、電子線等の放射線照射法を繊維製造工程に応用することにより、酸素を取り込むことなく炭化ケイ素系繊維を製造することが可能となった³⁴⁻³⁷⁾。その結果、Nicalon(Si-C-O系繊維)は耐熱性が大きく改善され、図4.7.4に示すように、1500℃の耐熱試験後も2.5GPa以上の引張強度を維持できるようになった³⁴⁾。また、Tyranno繊維(Si-Ti-C-O系繊維)は耐熱・耐酸化性が改善され、図4.7.5に示すように、空气中、1500℃における熱間引張強度が2.0GPa以上を示す繊維が製造されるようになった³⁷⁾。

表 4. 7. 3 ジルコニア繊維の製法と物性。

項目	品種	ZrO ₂ 100% ファイバ	CaO安定化 ファイバ	Y ₂ O ₃ 安定化 ファイバ	MgO添加 ファイバ
化学成分 (%)		ZrO ₂ 99	ZrO ₂ 95 CaO 4	ZrO ₂ 92 Y ₂ O ₃ 7	ZrO ₂ 92 MgO 7
結晶系		単斜晶	正方晶	正方晶	単斜晶
外観	白色短繊維状				
繊維径	平均 5 μ				
繊維長	平均1~5mm	平均 20~30mm			
融点	約 2600°C				
真比重	5.8				
かさ密度	0.08~0.10				
熱伝導度 (Kcal/m·h·°C)		(かさ密度0.1)		(かさ密度0.4)	
	500°C	0.10	0.12		
	1000°C	0.26	0.17		
	1500°C	0.75	0.23		

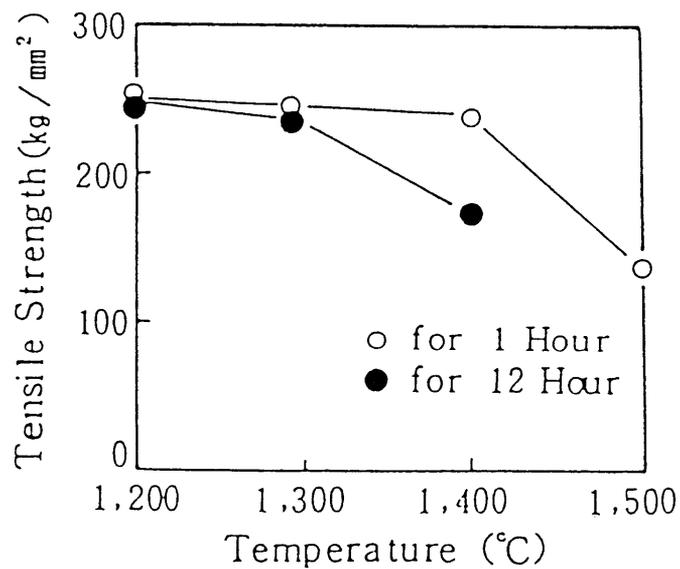


図 4. 7. 1 高純度窒化ケイ素繊維の耐熱性(窒素中)。

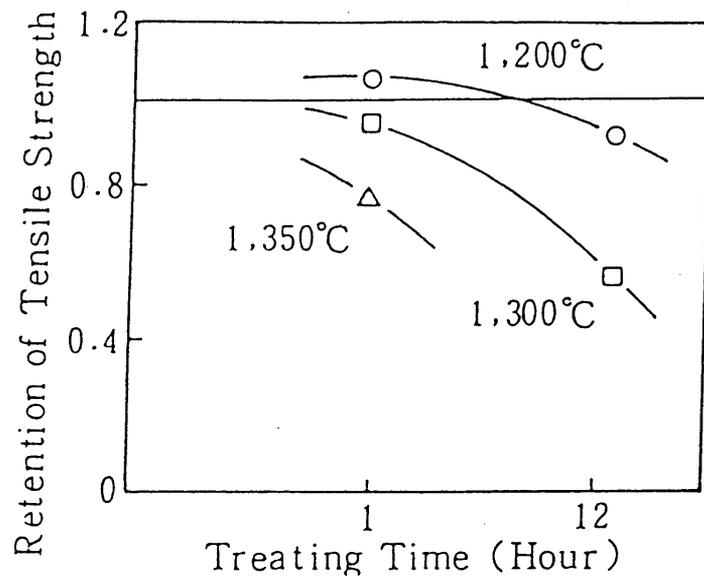


図4.7.2 高純度窒化ケイ素繊維の高温耐酸化性(静止大気中)。

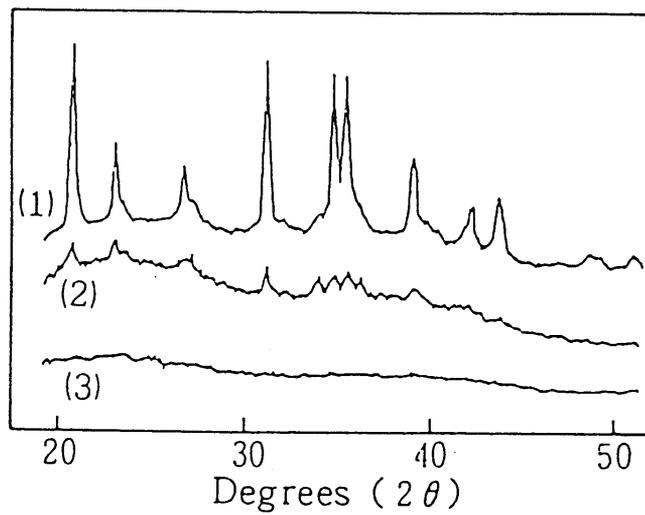


図4.7.3 ホウ素含有窒化ケイ素繊維の結晶析出とホウ素含有量の関係。

(1700°C、N₂ガス中、1時間保持)

(1)B=1.2wt% (2)B=3.8wt% (3)B=6.4wt%

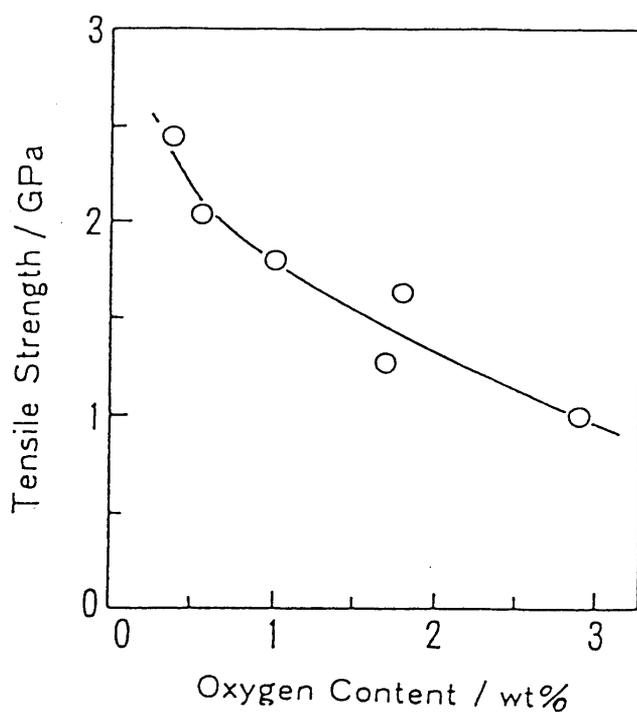


図4.7.4 Nicalonの室温引張強度(1500°C、Arガス中、1時間保持)。

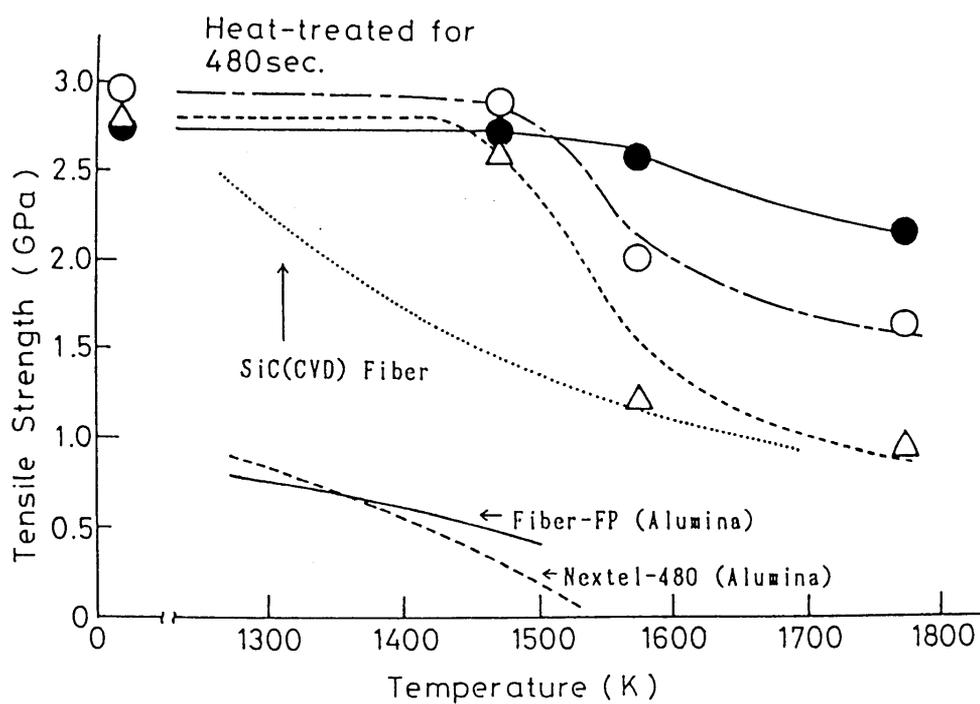


図4.7.5 空气中、1200°C(1473K)~1500°C(1773K)におけるTyranno繊維の熱間引張強度。●——酸素含有量4.7wt%、○-----酸素含有量6.7wt%
△-----酸素含有量13wt%

(2)セラミック繊維の表面構造

セラミック繊維を各種のマトリックスと複合化し、目的とする性能を発現できる複合材料を製造する場合、繊維およびマトリックスの特性はもちろんであるが、繊維/マトリックス界面の構造も重要となる。この繊維/マトリックス界面の構造に大きく影響するのが繊維表面の構造である。

①繊維表面被覆³⁸⁻⁴⁰⁾

繊維の表面構造を改質するため頻繁に試みられる手法としては表面被覆がある。繊維の表面を被覆する技術としては多くの方法が考えられるが、最も一般的に行われるのはCVD法である。ここでは、CVD法によりセラミック繊維の表面被覆が行われた代表的な例について記述する。セラミック繊維の表面を被覆する具体的な目的は、セラミック繊維自体の耐熱性、耐酸化性等の特性向上、セラミック繊維を各種のマトリックスと複合化する際の反応抑制、複合材料におけるセラミック繊維と各種のマトリックスとの力学的および熱的適合性の改善等である。

Nicalon(Si-C-O系繊維)は、炭化ケイ素系繊維であるが繊維中の酸素が引き起こす分解反応により炭化ケイ素本来の耐熱性を発現できていない。そこで、繊維中の酸素含有量を低減させる以外に、繊維表面をC+SiCの2層で被覆することにより耐熱性の改善が試みられている。図4.7.6に示すように、被覆により繊維強度は低下するが、被覆したC層あるいはC+SiC層が高温で有効な拡散バリアになって繊維の熱分解を抑える効果のあることが明らかにされている。

Nicalon、Tyranno繊維、SiC/C繊維および炭素繊維は各種金属および金属間化合物の強化材として有望視されているが、複合化の際のマトリックスとの反応により繊維特性が劣化し、十分な複合効果が得られない。そこで、この問題を解決するため繊維表面に反応バリア材を被覆することが試みられている。反応バリア材としては、CaO、Al₂O₃等の酸化物、SiC等の炭化物、Si₃N₄等の窒化物、TiB₂等のホウ化物、Hf、Ta等の高融点金属が考えられるが、CVD法により繊維被覆が試みられているのは、大部分が結晶性SiCの被覆である。破断延びの小さな結晶性SiCを、Tyranno繊維のような破断延びの大きな繊維に直接被覆した場合、繊維強度が低下することが指摘されている。これを解決するため、繊維と結晶性SiCの被覆層との間に緩衝層として炭素を被覆した、2層被覆が試みられている。

②表面に傾斜構造を持つ繊維³⁷⁾

表面構造が改質された繊維として、前記①で示した繊維表面被覆以外に、繊維表面が傾

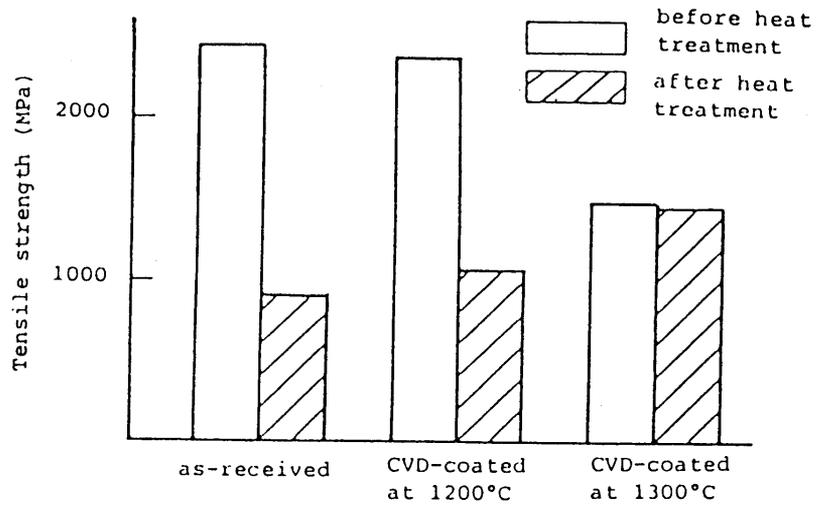


図4.7.6 Arガス中、1300°C、6時間保持後のNicalonの引張強度。

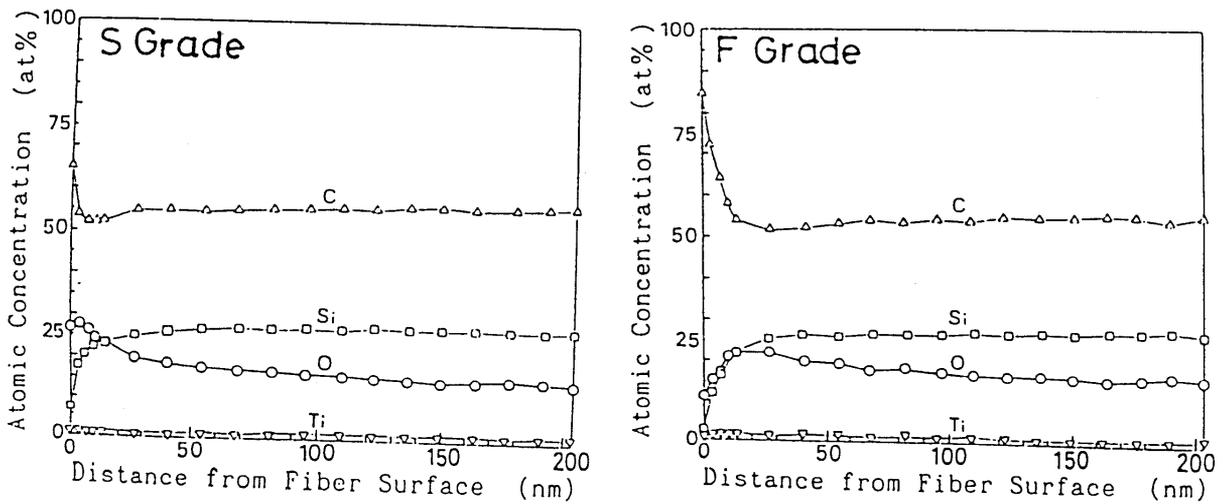


図4.7.7 Tyranno繊維のSグレードおよびFグレードの表面付近の元素分布。

斜構造になった繊維が開発されている。

Nicalon、Tyranno繊維およびSiC/C繊維はその優れた耐熱・耐酸化性からセラミックスの強化材としても有望視されている。しかしながら、表面改質が行われていない繊維をセラミックスと複合化した場合、繊維とマトリックスが一体化してほとんど複合効果を発現できない。そこで、宇部興産(株)では新規なTyranno繊維として、図4.7.7³⁷⁾および図4.7.8^{37)・41)}に示すF、TM-S5およびTM-S6を開発した。FおよびTM-S5をセラミックスと複合化した場合、繊維/マトリックス界面に炭素過剰な界面層を形成し、この界面層が緩衝層となって大きな複合効果を発現する。しかしながら、この界面層は炭素過剰であるため、酸素雰囲気中の高温で界面層が酸化され、複合材料の力学的特性を低下させる。これを解決するため、図4.7.8のTM-S6のような表面に2層傾斜構造を持つ繊維が開発された。この繊維は、表4.7.4³⁷⁾に示すように、TM-S5より優れた複合効果を発現でき、高温での耐酸化性に優れた複合材料を製造できる。

(3) センサ⁴²⁻⁴⁴⁾

セラミック繊維をセンサとして実用化した例は非常に少ないが、NicalonおよびTyranno繊維で興味ある報告がなされている。NicalonおよびTyranno繊維が迅速な熱応答性を示すことから、これらの繊維の赤外線検知用サーミスタとしての可能性が検討された。NicalonおよびTyranno繊維はともに、図4.7.9⁴³⁾および図4.7.10⁴⁴⁾に示すように、赤外光照射により迅速に応答する。また、応答速度の決定因子を調べるため、繊維本数、繊維径、繊維抵抗の異なる繊維を用い、繊維長さを変えて応答速度および感度を測定した。その結果を、図4.7.11⁴³⁾、図4.7.12⁴⁴⁾および図4.7.13⁴⁴⁾に示す。これらの結果から、NicalonおよびTyranno繊維は繊維長さを短くすることによって、熱時定数が小さくなり応答特性が改善されることが報告されている。また、これらの繊維の種類(抵抗温度係数、直径)と素子形状(繊維本数、繊維長さ)を選択することにより、熱時定数を制御できることが示され、NicalonおよびTyranno繊維はともに、赤外線検知用サーミスタとして利用できることが報告されている。Nicalonについては、実用化されつつある。

(4) アクチュエータ⁴⁵⁻⁵²⁾

繊維状アクチュエータとしての研究は、これまでバルク状の素子として使用されてきたアクチュエータ材料を繊維化し、各種の特性について評価している場合がほとんどである。ここではその一例を紹介する。代表的なアクチュエータ材料の一つにジルコン酸チタン酸鉛(PZT)がある。このPZTの繊維を製造する方法としては大きく二つに分けることができる。

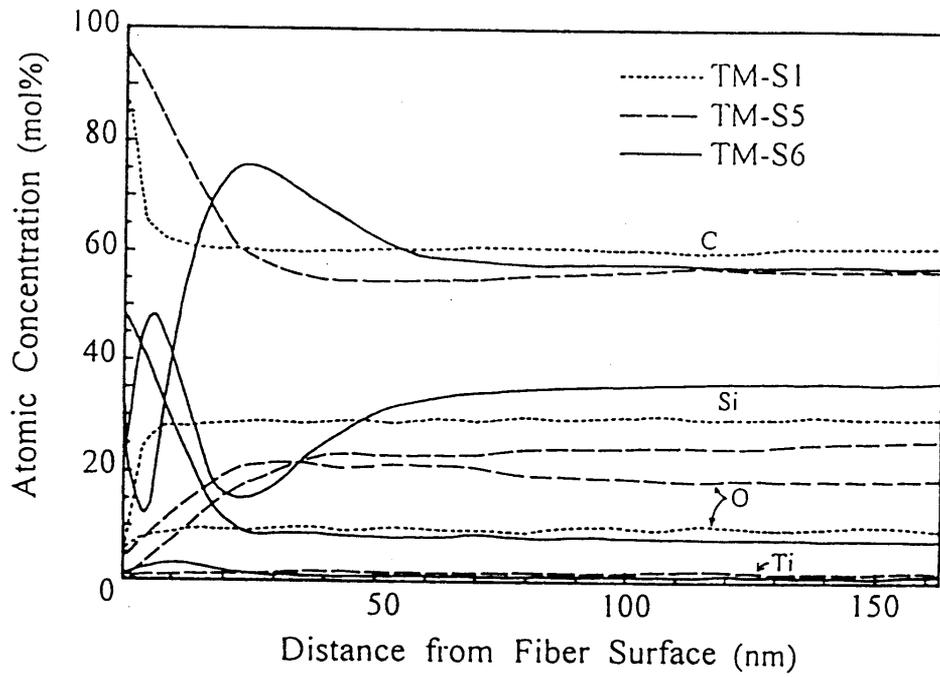


図 4. 7. 8 Tyranno繊維のTM-S1、TM-S5およびTM-S6の表面付近の元素分布。

表 4. 7. 4 PIP法により製造したTyranno繊維(TM-S1、TM-S5およびTM-S6)/SiC系セラミックス複合材料の引張強度。

	TM-S1	TM-S5	TM-S6
Tensile Strength (MPa)	77.8	299.7	350.6
Tensile Modulus (MPa)	—	76.2	75.4

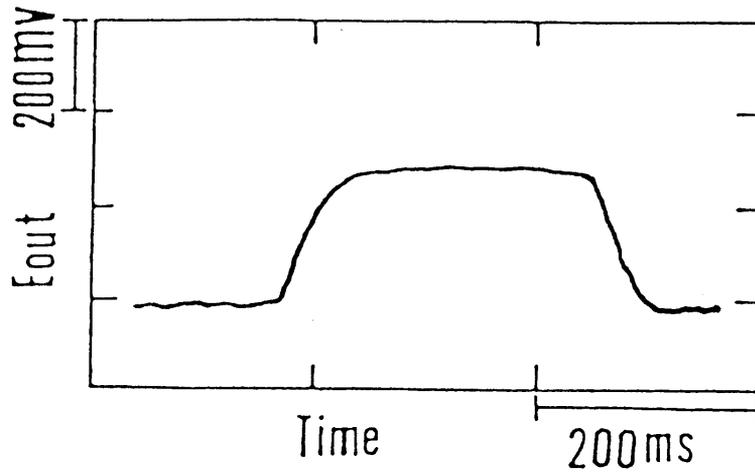


図4.7.9 Nicalonの出力電圧変化(抵抗 $370\Omega\cdot\text{cm}$ 、繊維径 $14\mu\text{m}$ 、繊維本数22、繊維長 1mm)。得られた熱時定数は 11ms 、感度は 8.5V/W 。

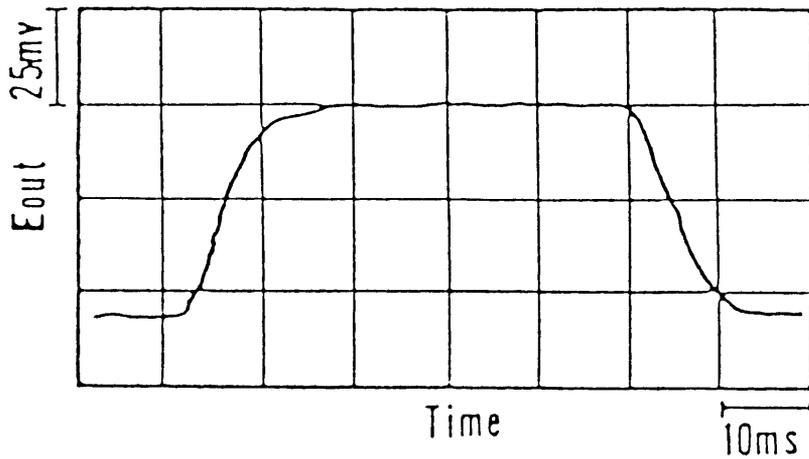


図4.7.10 Tyranno繊維の出力電圧変化(抵抗 $370\Omega\cdot\text{cm}$ 、繊維径 $8.5\mu\text{m}$ 、繊維本数10、繊維長 1mm)。得られた熱時定数は 5.3ms 、感度は 29V/W 。

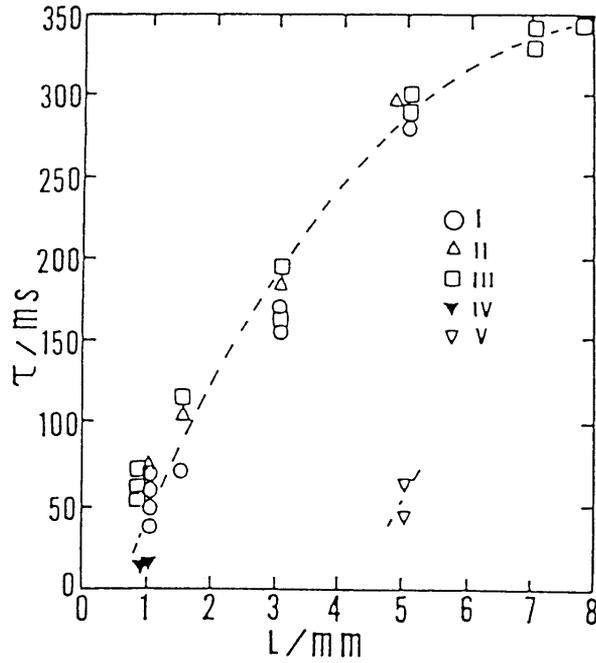


図4.7.11 Nicalonの繊維長さ(電極間距離)による熱時定数の影響。(I:抵抗 $3k\Omega \cdot cm$, 繊維径 $7\mu m$, 繊維本数1300、II:抵抗 $1.4k\Omega \cdot cm$, 繊維径 $12\mu m$, 繊維本数250、III:抵抗 $3k\Omega \cdot cm$, 繊維径 $14\mu m$, 繊維本数500、IV:抵抗 $370\Omega \cdot cm$, 繊維径 $14\mu m$, 繊維本数22、V:抵抗 $370\Omega \cdot cm$, 繊維径 $14\mu m$, 繊維本数8)

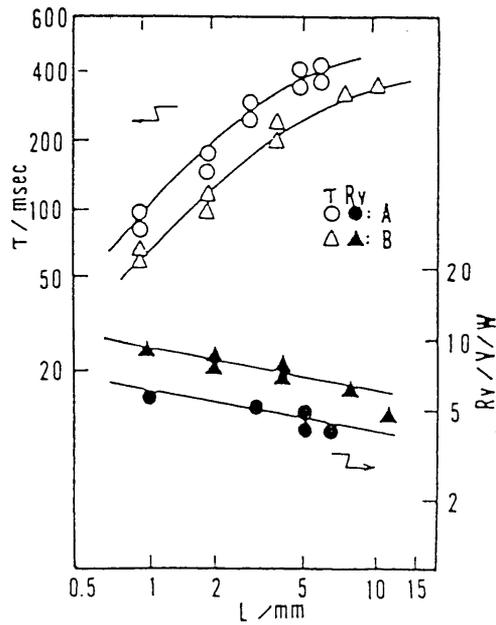


図4.7.12 Tyranno繊維の繊維長さ(電極間距離)による熱時定数および感度の影響。(A:抵抗 $480\Omega \cdot cm$, 繊維本数800、B:抵抗 $480\Omega \cdot cm$, 繊維本数400)

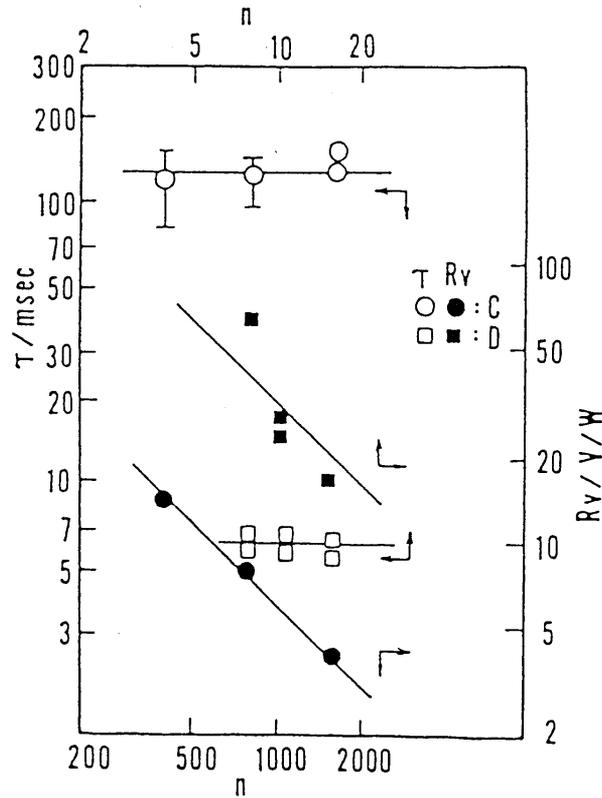


図4.7.13 Tyranno繊維の繊維本数による熱時定数および感度の影響。

(C:抵抗 $480\Omega\cdot\text{cm}$, 繊維長さ 2mm 、D:抵抗 $80\Omega\cdot\text{cm}$, 繊維長さ 1mm)

表4.7.5 ソル・ゲル法により製造されたPZT繊維およびNb-PZT繊維の誘電率。

(平均繊維径は $30\mu\text{m}$)

Ceramic	Heat Treatment Temp.[$^{\circ}\text{C}$]/Time [min.]	Dielectric Constant (% error)
PZT	750/10	670 (15)
“	1250/10	870 (10)
Nb-PZT	750/10	1250 (15)
“	1250/10	1100 (15)

その一つは、繊維状の母材にPZTの前駆体物質を含浸し、焼成することによってPZTの繊維あるいはPZTを含有する繊維を製造する方法であり⁴⁶⁾、他の一つは、粘稠なPZTの前駆体ゾルを紡糸し、室温で乾燥させた後に焼成して繊維を製造する方法である⁴⁷⁻⁴⁹⁾。高純度のPZTが得られるとともに任意の元素(例えば、Aサイトに空孔を作る元素)を添加し易い等の理由から、後者のゾル・ゲル法によりPZTの繊維が製造される場合が多い。

ゾル・ゲル法により製造された、 $\text{Pb}(\text{Zr}_{0.48}\text{Ti}_{0.52})\text{O}_3$ 繊維(以下、PZT繊維と略す)および一部がNbで置換された $\text{Pb}_{0.988}(\text{Ti}_{0.48}\text{Zr}_{0.52})_{0.976}\text{Nb}_{0.024}\text{O}_3$ 繊維(以下、Nb-PZT繊維と略す)について、分極履歴曲線、誘電率、引張強度等が調べられた⁵⁰⁻⁵²⁾。PZT繊維およびNb-PZT繊維はともに、ペロブスカイト構造から成り、前駆体繊維を空气中、 $750^\circ\text{C}\sim 1250^\circ\text{C}$ で焼成して得られる。焼成温度の異なるPZT繊維およびNb-PZT繊維の誘電率を表4.7.5に示す。PZT繊維に比べてNb-PZT繊維の誘電率が大きい。これはNbの置換によりAサイトに空孔が生じたためであり、従来のPZT素子と同様な傾向を示す。このNbの置換は、誘電特性に有効に働くだけでなく、繊維構造にも大きく影響する。PZT繊維では焼成温度を 750°C から 1250°C に上昇させることにより急激な粒成長が観察されたが、Nb-PZT繊維の場合、その粒成長は僅かであり、繊維中のNbは繊維の急激な結晶化を抑制する効果のあることが確認された。 1250°C で焼成されたNb-PZT繊維の分極履歴曲線を図4.7.14に示す。この履歴曲線は、従来のPZT素子と同様である。以上から、ゾル・ゲル法により製造されたPZT繊維およびNb-PZT繊維は、従来の圧電素子と同様な圧電性を示す可能性の高いことが示唆された。また、PZT繊維およびNb-PZT繊維の引張強度は、それぞれ約40MPaおよび約75MPaであり、力学的強化材としては不十分であると考えられる。従って、これらのPZT繊維およびNb-PZT繊維を複合材料へ応用し、圧電性だけでなく力学的強化も併せた複数の複合効果を考えた場合、力学的な強化効果を補助するための強化材が必要であると考えられる。

上で述べたように、セラミック繊維をアクチュエータとして検討された例は非常に少なく、従来のアクチュエータ材料を繊維化した例がほとんどである。今後、さらに幅広い材料についての研究が待たれる。

(5)その他^{53,54)}

Tyranno繊維には、図4.7.15⁵³⁾に示すように、比抵抗値の異なる各種のグレードがあり、これらのTyranno繊維で強化したプラスチック基複合材料(PMC)について、誘電特性および電磁波特性が調べられている。その結果を図4.7.16⁵⁴⁾および図4.7.17⁵⁴⁾に示す。比抵抗が $10^6\sim 10^3\ \Omega\cdot\text{cm}$ の繊維を用いたPMCの誘電率(ϵ' および ϵ'')はほぼ一定であるが、

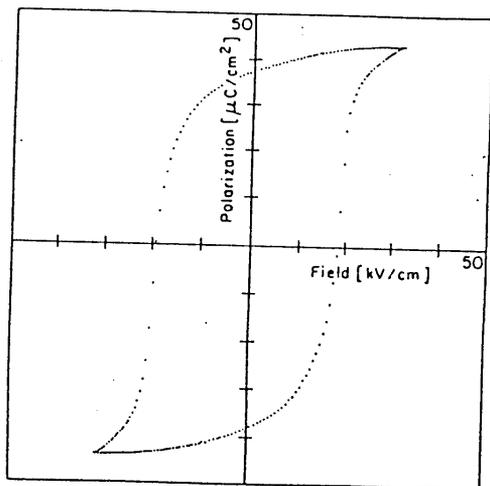


図4.7.14 ソル・ゲル法により製造されたNb-PZT繊維の分極履歴曲線。
(繊維径30 μ m)

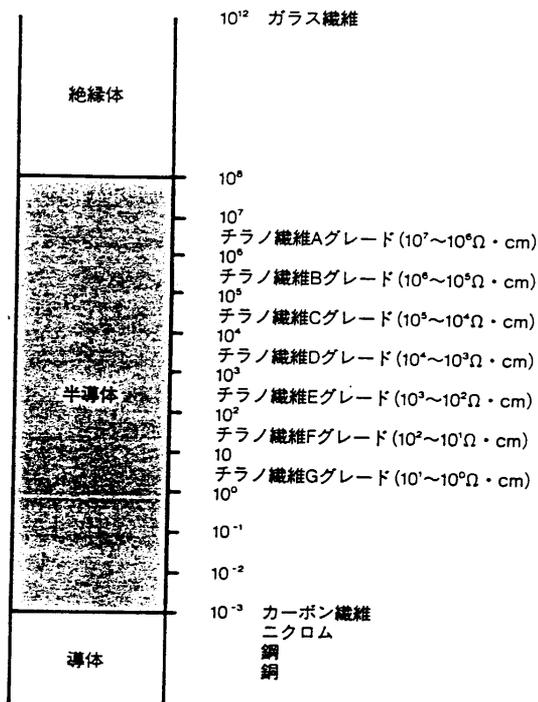


図4.7.15 Tyranno繊維の電気的特性。

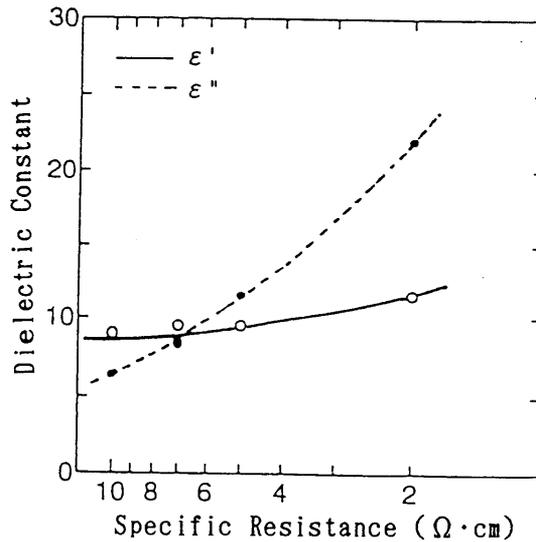
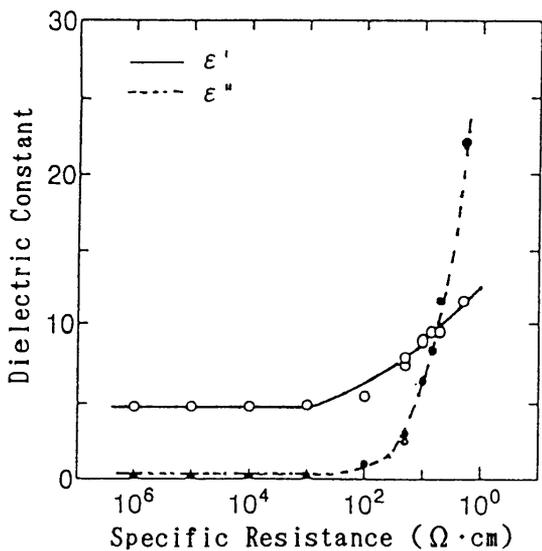


図4.7.16 Tyranno繊維の比抵抗とTyranno繊維で強化されたPMCの誘電率との関係。
PMCは0°/90°繊維強化、周波数10GHz。

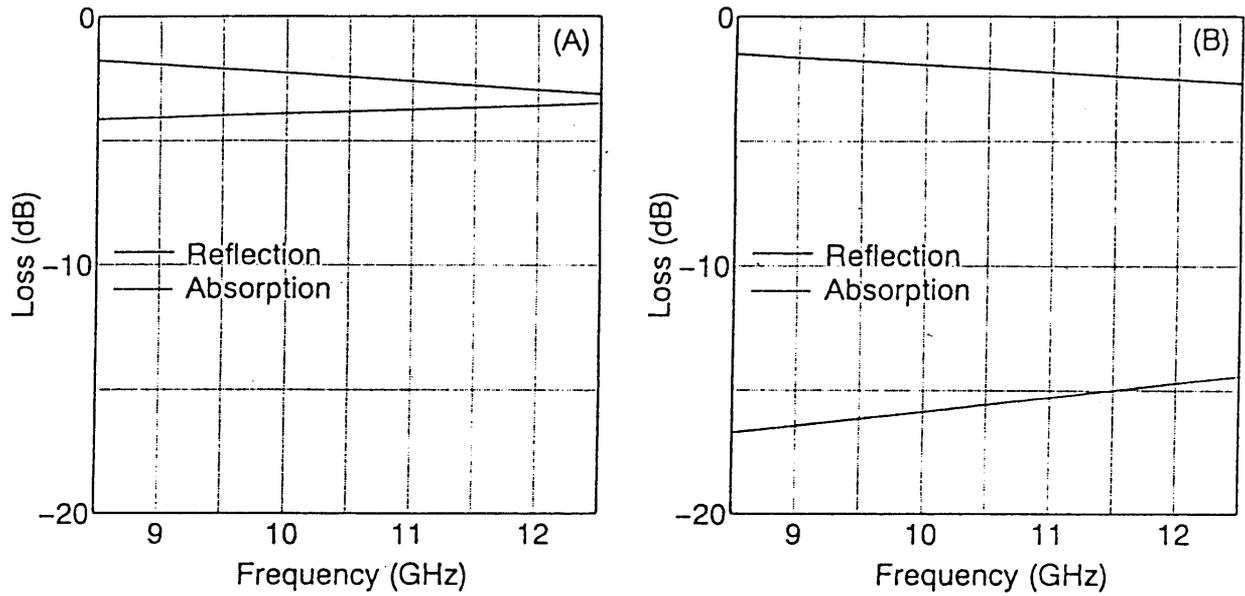


図4.7.17 Tyranno繊維強化PMCの周波数による反射および吸収損失。

A:Tyranno繊維Aグレード、B:Tyranno繊維Gグレード

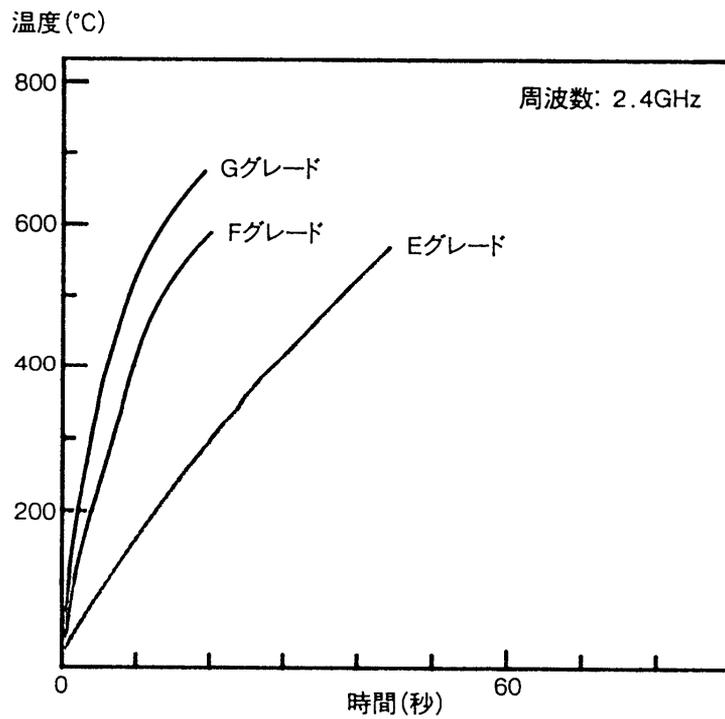


図4.7.18 誘電発熱によるTyranno繊維の温度上昇。

$10^2 \Omega \cdot \text{cm}$ より小さい比抵抗の繊維を用いた場合、 ε' と ε'' の値が逆転していることがわかる。このように比抵抗を変化させたTyranno繊維を用いることにより興味深い誘電特性を示すことが報告されている。また、比抵抗の小さなTyranno繊維を用いたPMCは電磁波を吸収する特性を示し、比抵抗の大きな繊維を用いたPMCは逆に電磁波を透過する特性を示す。さらに、これら両者をうまく積層することにより、単独で使用するよりも優れた電磁波吸収特性を発現できることが報告されている。また、比抵抗の小さなTyranno繊維は、図4.7.18⁵³⁾に示すように、高い誘電発熱特性を示すため、各種産業への幅広い用途が期待されている。

以上のように、Tyranno繊維は、複合材料への応用を考えた場合、力学的な強化だけでなく、誘電特性、電磁波特性等を組み合わせた、複数の複合効果の発現が期待できる。

4.7.3 今後の研究課題

セラミック繊維は、その大部分が複合材料の強化材として開発されており、機能性を考慮して開発された例は少ない。アルミナ系繊維、ジルコニア系繊維、窒化ケイ素繊維は非常に高い比抵抗を示すことが予想され、Tyranno繊維と同様に、力学的強化と電磁波透過の両特性を示す複合材料が開発される可能性が高い。今後は、機械的特性の他に、各種の機能性についても積極的に研究されることが期待される。また、4.7.1節に示したように、前駆体法により窒化ケイ素系繊維を製造する手法の一つとして、分子内に窒素を持たないポリマーをセラミックス化と同時に窒化反応させる方法を紹介した。この手法は、任意の元素をセラミック繊維に取り込ませるうえで興味深い方法であり、より高機能なセラミック繊維を開発するために有効となる²⁷⁻²⁹⁾。

また、耐熱複合材料の繊維/マトリックス界面の構造を考えた場合、従来のように耐熱・耐酸化性の優れた界面構造を追求するだけでなく、自己修復機能を持つ界面構造の開発が期待される(例えば、ホウ素を含有した界面層を形成させた場合、その界面層は高温、酸化雰囲気中ではマトリックスに発生した亀裂を通して酸化されるが、酸化により生成した酸化ホウ素は高温で軟化し、マトリックスの亀裂をシールすることができる)。

これまで、セラミック繊維は主として単一組成あるいは単一組織の材料のみが検討されてきたが、複数の機能を付与することを目的とした場合、希望する機能を発現するための任意の材料を組み合わせた複数の組成あるいは複数の組織からなるセラミック繊維の開発が必要となる。

(参考文献)

- 1)香川豊 他：セラミックス基複合材料，アグネ承風社 (1990) pp.27
- 2)W.Watt et al. : Appl. Polymer Sympo., No.9 (1969) pp.215
- 3)M.M.Tang et al. : Carbon, 2, (1964) pp.211
- 4)工技院, 特公昭 45-33, pp.845
- 5)C.M.Krutchen et al. : 11th Conf. on Carbon, (1973) pp.263
- 6)I.Tomizuka et al. : 炭素, No.106 (1981) pp.93
- 7)R.G.Bourdeau : 11th Conf. on Carbon, (1973) pp.265
- 8)S.Otani : Mol. Cryst. Liq. Cryst., 63, (1981) pp.249
- 9)S.Otani et al. : Bull. Chem. Sor. Japan, 45, (1972) pp.3715
- 10)L.S.Singer : Carbon, 16, (1978) pp.409
- 11)岡村清人：粉体および粉末冶金, 39, (1992) pp.441
- 12)K.Okamura : Advance Structure Inorganic Composites (7th CIMTEC-World Ceramics Congress), Elsevier Science Publishers B.V. (1991) pp.19
- 13)岡村清人：炭化珪素セラミックス, 内田老鶴圃 (1988) pp.73
- 14)岡村清人：金属, No.4 (1987) pp.27
- 15)岡村清人：日本複合材料学会誌, 11, (1985) pp.15
- 16)T.Yamamura et al. : J. Mater. Sci., 23, (1988) pp.2589
- 17)「アドバンスト・コンポジット」の新展開, (株)東レリサーチセンター, (1986) pp.40
- 18)堀切尚三：セラミックス, 19, (1984) pp.194
- 19)Tai-Il Mah : Cer. Bull., 66, (1987) pp.304
- 20)原川正司：工業材料, 37, (1989) pp.24
- 21)K.Kamiya et al. : J. Mater. Sci., 15, (1980) pp.1765
- 22)E.Leroy et al. : Ultrastructure Processing of Ceramics, Glass, and Composites, ed, by L.L.Hench and D.R.Ulrich, John Wiley & Sons (1984) pp.218
- 23)T.Yoko et al. : '87 International Symp. & Exhib. in Science and Technology of Sintering, Tokyo, Nov. 4-6, (1987) pp.542
- 24)浅見肇 他：工業材料, 36, (1988) pp.101
- 25)松尾英樹 他：日本セラミックス協会学術論文誌, 102, (1994) pp.409
- 26)川村憲明 他：JETI, 38, (1990) pp.104

- 27) M.Sato et al. : MRS Int'l. Mtg. on Adv. Mats., Vol.4, Materials Research Society, (1989) pp.197
- 28) K.Okamura et al. : Ceramic International, 13, (1987) pp.55
- 29) K.Okamura et al. : Ceram. Eng. Sci. Proc., 9, (1988) pp.909
- 30) A.E.Lindemanis : Proc. Conf. on Emergent Process Methods for High-Technology Ceramics, 1982/ Material Science Research Vol.17, Emergent Process Methods for High-Technology Ceramics, (1984) pp.111
- 31) U.S.Patent 4581468
- 32) アドバンスト・セラミックスの新展開, (株)東レリサーチセンター, (1991) pp.152
- 33) 速水諒三 : セラミックス強化複合セラミックス, (株)産業技術サービスセンター, (1991) pp.41
- 34) 今井義一 他 : 次世代基盤技術 第3回 超耐環境性先進材料シンポジウム 講演集, (1992) pp.239
- 35) 岡村清人 : 放射線化学, No.45 (1988) pp.41
- 36) 佐藤光彦 : 次世代基盤技術 第3回 超耐環境性先進材料シンポジウム 講演集, (1992) pp.249
- 37) 佐藤光彦 他 : 超高温材料国際シンポジウム '94 in 「たじみ」 講演集, (1994) pp.86
- 38) 李建興 他 : 日本セラミックス協会学術論文誌, 99, (1991) pp.1207
- 39) K.Honjo et al. : Composite Interface (Proc. 1st Int. Conf. on Composite Interfaces (ICCI-I) held May 27-30, 1986 in Cleveland, Ohio, U.S.A.), North-Holland, (1989) pp.101
- 40) 本城国明 他 : 窯業協会誌, 94, (1986) pp.182
- 41) 塩路泰広 他 : 粉体粉末冶金協会講演概要集 平成6年度秋季大会, (1994) pp.187
- 42) 武藤範雄 他 : 日本セラミックス協会学術論文誌, 97, (1989) pp.403
- 43) 武藤範雄 他 : 日本セラミックス協会学術論文誌, 97, (1989) pp.1304
- 44) N.Muto et al. : J. Am. Ceram. Soc., 73, (1990) pp.443
- 45) S.Yoshikawa et al. : Proc. IEEE, 8th International Symposium on Application of Ferroelectrics, Aug.30-Sept.2, 1992 in Greenville, S.C., (1992) pp.269
- 46) D.J. Waller et al. : J. Am. Ceram. Soc., 73, (1990) pp.3503

- 47)U.S.Patent 4921328
- 48)U.S.Patent 5072035
- 49)U.Selvaraj et al. : J. Mater. Res., (1992) pp.992
- 50)S.Yoshikawa et al. : Am. Soc. Mech. Eng. Aerosp. Div., (1993) pp.87
- 51)S.Yoshikawa et al. : Proc. 6th US-Japan Seminar on Dielectric and Piezo-
electric Ceramics, Nov.11-12, 1993 in Maui, H.I., (to be published)
- 52)S.Yoshikawa et al. : J. Intelligent Materials System and Structures,
(to be published)
- 53)チラノ繊維カタログ, 宇部興産(株)
- 54)M.Shibuya et al. : Proc. 3rd Japan International SAMPE Symposium, Dec. 7-10,
(1993) pp.491

第5章

分野別ニーズの検討

5. 1	航空機	393
5. 1. 1	機体	白井 雄二郎・酒井 昭仁 … 393
	(1) 航空機体へのスマートコンポジット適用ニーズと期待される成果	
	(2) ヘルスモニタリングシステムの研究開発状況	
	(3) 能動/適応制御の研究開発状況	
	(4) 非構造用途のスマートコンポジットの研究開発状況	
	(5) 航空機体に対するスマートコンポジットの適用・今後の課題	
5. 1. 2	ジェットエンジン	北出 真太郎 … 414
	(1) ジェットエンジンの基本構成と開発動向	
	(2) ジェットエンジンにおけるスマートコンポジットのニーズ	
5. 2	宇宙	422
5. 2. 1	宇宙関連スマート材料	谷川 栄治 … 422
5. 2. 2	宇宙分野におけるスマートストラクチャ	中村 正俊 … 432
5. 3	自動車	林 直義 … 438
5. 3. 1	応用事例	
5. 3. 2	期待される応用分野	
5. 4	鉄道・車両	白井 雄二郎・福井 寛 … 445
5. 4. 1	はじめに	
5. 4. 2	研究開発状況	
5. 4. 3	応用の可能性	
5. 4. 4	まとめ、今後の課題	
5. 5	建設	杉田 稔 … 454
5. 5. 1	資材	
5. 5. 2	光ファイバセンサ	
5. 6	発電プラント（火力、原子力、核融合、燃料電池）	福井 寛 … 467
5. 6. 1	はじめに	
5. 6. 2	研究状況	
5. 6. 3	応用の可能性（スマートコンポジットへの要望・期待）	
5. 6. 4	まとめ、今後の課題	
5. 7	スマートマニファクチャリング	酒井 昭仁・谷川 栄治 … 476
5. 7. 1	スマートマニファクチャリングに対するニーズと期待される成果	
5. 7. 2	キュアモニタリングおよびオートクレーブエキスパートシステム	
5. 7. 3	新エネルギー成形法	
5. 7. 4	スマートマニファクチャリングの課題	

5. 1 航空

5. 1. 1 機体

(1) 航空機体へのスマートコンポジット適用ニーズと期待される成果

航空機体の構造・材料は軽量化要求が厳しく、かつ高度な信頼性・安全性を要求されるため、これまでも先進材料の開発に対するニーズの抽出およびその適用研究は、他分野に先駆けて行われてきた。もちろんスマートコンポジットおよびスマートストラクチャに関しても、航空（宇宙を含め）分野において先鞭がつけられた感がある。

航空機におけるスマートコンポジットの適用ニーズを表5. 1 - 1にまとめる。最も直近のニーズは安全性・信頼性の確保のためのヘルスマニタリングである。日航ジャンボ機の御巣鷹山墜落事故や、ハワイのアロハ航空機事故等を繰り返さないために、機体構造・材料の健全性をリアルタイムで監視し、重大な事故に至る前に必要な対応をとるシステムの開発が急務であり、これをスマート化することは今後の機体複合材料化の流れとあいまって不可欠となろう。特に重要なのは、スマートコンポジットの適用は安全性と軽量化・最適化に伴う運用コスト低減を両立可能とする点である。

表5. 1 - 1 航空機におけるスマートコンポジットの適用ニーズ

種 別	内 容
健全性監視	<ul style="list-style-type: none"> ・ヘルスマニタリング ・スマートマニファクチャリング(5.7章参照)
制御 (能動/順応)	<ul style="list-style-type: none"> ・振動制御：ヘリコプタ・ローター 大型宇宙構造物 ビーム構造物 等 ・形状制御：翼型変形（一部/全部） ・音響制御 ・パネルフラッタ制御
非構造用途	<ul style="list-style-type: none"> ・コンフォーマルレーダー (スマートスキン)
その他	<ul style="list-style-type: none"> ・自己修復/学習材料 ・リサイクル材料

一方、センサで得られた情報等を元に、能動制御により高性能（もちろん安全性・信頼性の更なる向上を含む）を得るためのスマート化ニーズも高まっている。すなわち材料中にセンサだけでなくアクチュエータ、更にはプロセッサを埋め込み、振動・音響及びフラッタを抑制したり、翼型自体を変化させてその時々最適な飛行特性を得たいというニーズである。このようなものは能動／順応型スマート構造とよばれ、種々の運用状況対して常に機体を最適化することが可能になり、運用コストの低減のほか、積極的な安全性確保手段としても期待されている。

さらに単なる構造用途だけにとどまらず、ほかの付加価値を与えたいというニーズも出現しており、機体外板構造自体がレーダーアンテナとなるコンフォーマルレーダーと、これを含めたスマートスキンの概念が知られている。これによって機体外部の突起をなくすと共に、搭載機器スペースの確保や全方位レーダーの実現が期待されている。

なお、このほか生体類似機能ともいえる究極の概念として、自己修復性材料や学習材料というものも登場しているが、実現にはまだ相当の年月が必要と考えられるので、ここでは割愛する。

図 5. 1 - 1 に将来航空機におけるスマート適用構想の一例を示す。

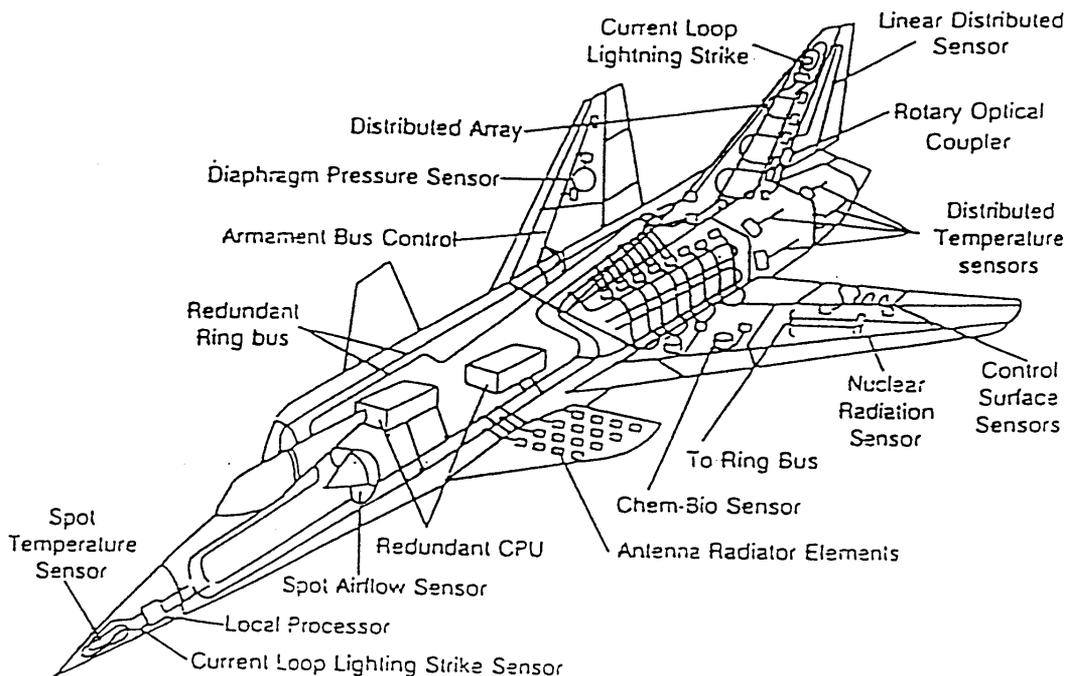


図 5. 1 - 1 将来航空機へのスマートコンポジットの適用構想例¹⁾

(2) ヘルスモニタリングシステムの研究開発状況

現代の航空機は損傷許容設計が義務づけられており、たとえ損傷が発生しても運用期間内には致命的にならないように、あるいは致命的になる前に発見できるように厳密に定量化・体系化されている。もちろんこれらは信頼できる非破壊検査技術と解析／試験による厳密な損傷評価が前提となる。ところがこのようにして保証された機体でも、予期せぬ事態によって破壊・墜落することがある。通常の検査では発見できない疲労が原因であった1988年アロハ航空事故のような事故や人為的ミスによる事故は跡を絶たない。そこで、航空機の安全性をより高める将来技術として、以下に示すようなスマートコンポジットによる新しい設計コンセプトすなわちヘルスマニタが考えられるに至った。

航空機の機体を人体のようにできれば、すなわち機体各部に神経のようにはりめぐらされたセンサで得た情報を、脳にあたる乗員や人工知能にリアルタイムで伝え、直ちに対応できるようにすれば、航空機はより安全な乗り物になるし、地上整備・検査を簡略化して稼働率を向上し、運用コストを大幅に低減できる。また、このようなセンサが製造時に取り付けられることを利用して、製造品質のチェックと不具合発生を低減が可能になる。さらに運用中の機体が過去に受けた荷重や損傷を記録することによって、その機体の寿命を決めることも可能になる。このようなヘルスマニタリングシステムは、航空機を文字どおりゆりかごから墓場まで無理・無駄なくより安全に使用できるものにする。

スマートコンポジットによるヘルスマニタリングシステムを構成する要素技術は、

①センサ技術（材料中への埋め込み技術を含む）

②信号処理による損傷評価技術

の2つに大別できる。すなわち、飛行中の機体自身が出す機械的・電氣的ノイズや雷などの外乱から、有意な損傷による信号のみを検出する技術（しかもセンサは材料と一体化されていなければならない）と、得られた信号がどの程度の損傷をあらわすのか、あるいはそれがどの程度有害なのかを評価する技術である。重要なのはこれら2つが表裏一体となって初めてシステムは機能することである。損傷の検出と評価は一緒に取り組まないとうまくいかないとして、分野の違う専門家を含めたシステムチックな研究開発を呼びかける提言もなされている²⁾。そこでここでは、検知から評価までを含むシステム研究を中心に調査結果の代表例を表5. 1 — 2にまとめる。個々のセンサ技術やスマートコンポジットとしての構成等は3章と4章に詳説されているので参照されたい。

表 5. 1 - 2 ヘルスモニタリングシステムの研究開発状況

検出対象	センサ	内容・評価方法	結果	文献
F-15の主翼 外板ひずみ	OTDR光ファイバ ループ光ファイバ	ひずみゲージ計測結果 との比較 →図5.1 -2	光ファイバとひず みゲージ計測の結 果はよく一致 →図5.1 -3	3)
平板の静的 荷重付加点	モーダル・ドメイン 型光ファイバセンサ	逆伝播トレーニングを加え たニューラルネットワークを用い 荷重付加点を推定	荷重付加点は精度 よく検出された。	4)
補強パネル 上の模擬損 傷（円孔）	40枚のひずみゲージ	一軸圧縮応力を加えた ときのひずみを検知、 有限要素解析でトレー ニングしたニューラルネットワークを 用い、損傷位置・サイ ズを推定 →図5.1 -4	損傷位置・サイ ズともほぼ正確に検 出 →図5.1 -5	5)
DHC-6主翼 前縁の着氷 および腐食	圧電型振動センサ	渦電流アクチュエータによる 加振の応答を検知し、 飛行試験における着氷 厚さと模擬腐食を検出	腐食ダメージ有無 の100%、着氷厚さ の94%を正しく応 答	6)
アルミ構造 の疲労亀裂	光ファイバ (破断のび2%以下)	表面に接着剤で張り付 けた光ファイバの破断 を検知して、亀裂発生 を検出	5 から30ミクロン幅の 発生亀裂ではファ イバ破断せず	7)
CFRP ¹ -M 供試体	圧電酸化亜鉛で被覆 した炭素繊維	外部から加振した時の 被覆繊維とその他の繊 維の間の電位を測定、 加速度センサの検出波 形と比較。 →図5.1 -6	被覆繊維で振動検 出が十分可能であ ることを立証 →図5.1 -7	8)

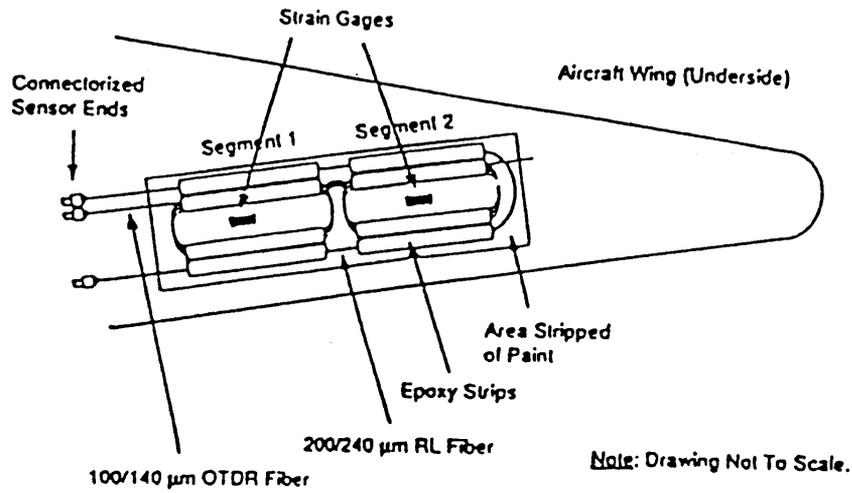


図 5. 1 - 2 F-15の主翼外板ひずみ計測におけるセンサ位置

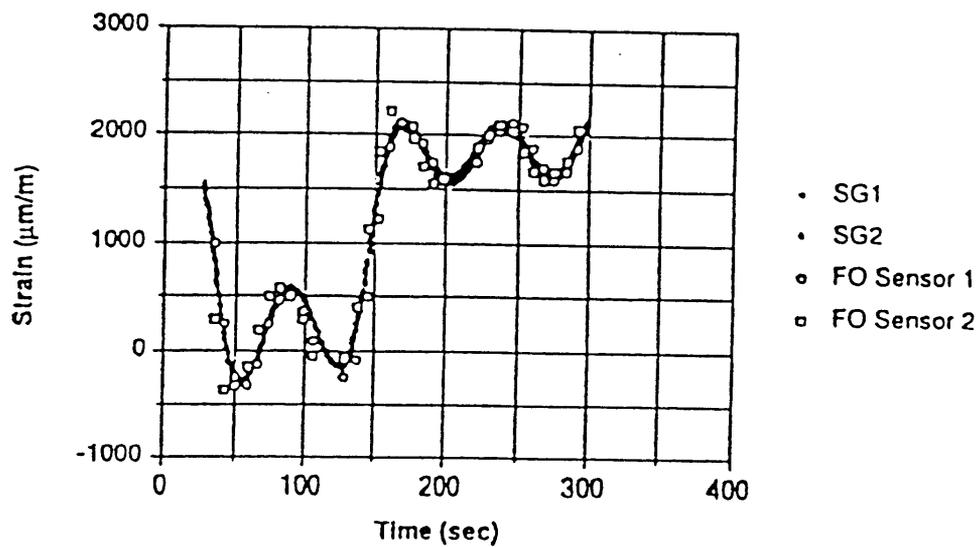


図 5. 1 - 3 OTDRセンサとひずみゲージによる検出ひずみの比較

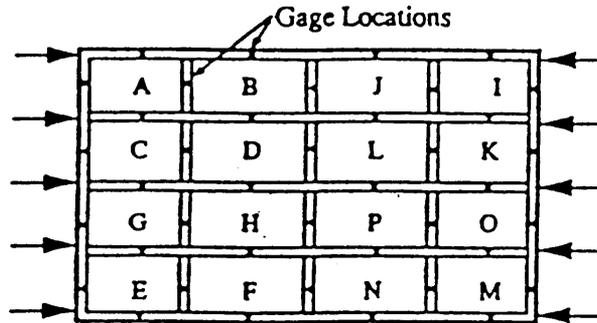


図 5. 1 - 4 ニューラルネットワークによる損傷検出供試体(スティフト・ハネ)の概要

Example Details	Radius		Location	
	Actual	Predicted	Actual	Predicted
Example 1. Training Set: R = 0.5, 1.5 and 2.5 inches in Bay A Input = 20 and 40 Gages Output = Damage Radius	1	0.5		
	2	2.2		
	1	0.6		
	2	2.4		
Example 2. Training Set: R = 0.5, 1.5 and 2.5 inches in Bays A, B, C, & D Input = 40 Gages Output = Damage Radius and Location	1	0.73	A	A
	2	2.5	A	A
	1	1.1	B	B
	2	2.0	B	B
	1	0.6	C	C
	2	1.4	C	C
	1	0.6	D	D
	2	2.4	D	D
Example 3. Training Set: R = 1.5 and 2.5 inches Inputs: 40 Gages - (i) Damage in all 16 Bays (ii) Damage in Bays in Quad 1 only Outputs: (i) Quad Location & Radius (ii) Bay Locations	2	2.04	Q-1/A	Q-1/A
	2	1.88	Q-1/B	Q-1/B
	2	2.05	Q-1/C	Q-1/C
	2	2.08	Q-1/D	Q-1/D
Example 4. Training Set: R = 0.5 and 1.5 inches at Locations a, b, c, & d in Bay A Input = 8 Gages at Locations Shown Output = Damage Radius and Location	1	1.45	a	a
	1	1.50	b	b
	1	0.65	c	c
	1	1.46	d	d

図 5. 1 - 5 ニューラルネットワークによる損傷検出試験結果

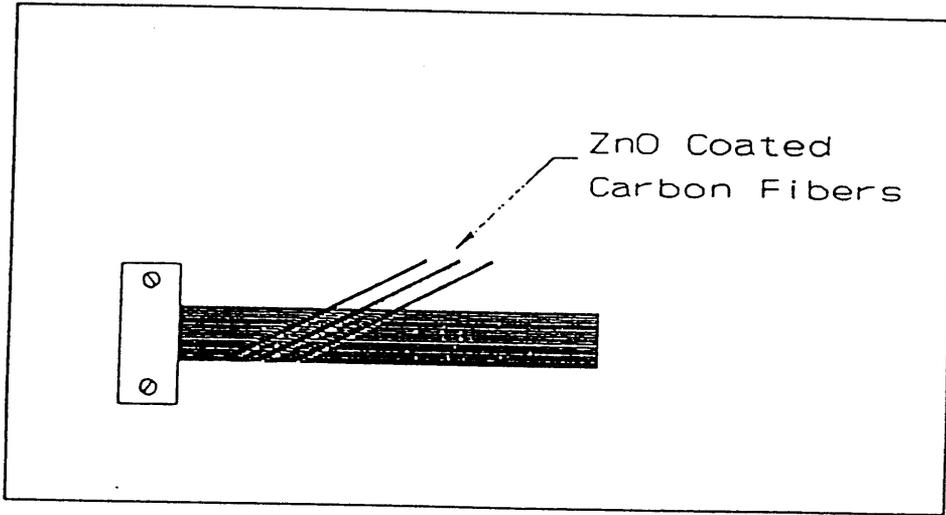


図 5. 1 - 6 酸化亜鉛被覆炭素繊維入りCFRP ϵ -4供試体の概要

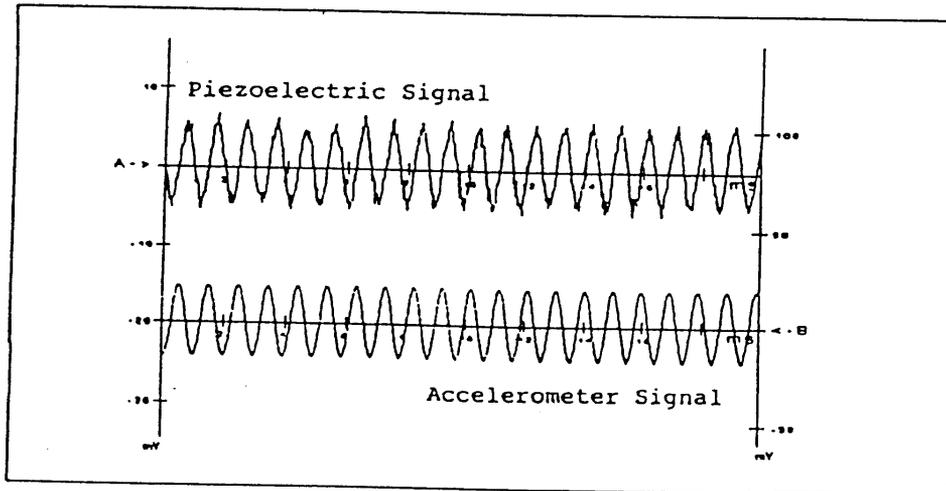


図 5. 1 - 7 酸化亜鉛被覆炭素繊維入りCFRP ϵ -4供試体の振動検出結果

(3) 能動／適応制御の研究開発状況

航空機の空力性能の向上，フラッタ抑制や荷重低減のための振動制御を目的として外部状況の変化をセンシングして，形状，剛性，ダンピングをコントロールするものを能動／適応制御として，ここでは区分する。これらの制御は，従来ACT（Active Control Technology）やミッションアダプティブウィングの概念として油圧アクチュエータを用いた方法が提案されている。この項で述べるものは，従来の油圧アクチュエータを使用した方式については考えない事とし，構造にアクチュエータ機能とセンサ機能を一体化したものをスマートコンポジットの範囲としてとらえる。スマートコンポジットのアクチュエータ機能は， piezo素子，電気粘性流体，形状記憶合金等により実現させる。

能動／適応制御の研究開発については，固定翼の翼型制御とヘリコプタのロータブレード制御の2つが主な研究対象となっている。研究開発の代表例を，表5.1-3に示す。固定翼の翼型制御は，従来の操舵面による空力制御の方式の代わりに翼型そのものを変形させて空力制御を行うものである。この翼型制御方式は，翼型全体の形状を大きく変化させるものと，微小変形で翼面上の衝撃波を制御して大きな効果を狙ったものの2種類が研究されている。翼型全体の制御の例として，C. H. Beauchampらの形状記憶合金（SMA）ワイヤを用いた可変キャンバー翼（SMAAC：Shape Memory Alloy Adjustable Camber）のコンセプトを図5.1-8(a)に示す。この例では，剛な前縁と後縁をスプリングで結合し外形をエラストマで形成したものである。形状を変化させるには一方のSMAワイヤを熱して収縮させ，他方のSMAワイヤを冷却する。図5.1-8(b)に示した模型による実験では，図5.1-8(c)に示すように同一迎角で約40%高い揚力の発生が得られている。

別の翼型制御の研究例として，F. Austinらの翼の断面形状を変えるためにリニアタイプのアクチュエータを組み込んだトラス構造のリブを用いる方法がある。この例では，図5.1-9(a)に示すようにJSTAR S翼の断面形状を変化させると抵抗係数が6%減少できる事を示している。また，リニアタイプアクチュエータとしては，磁歪型アクチュエータの適用を考えており，図5.1-9(b)に示すようなリブの変形を起こす事を目標としている。

また，T. Weisshearは図5.1-10に示すようにわずかな翼型の変化でスーパークリ

ティカルウィングの抵抗が減少する事に注目して、SMA又は piezo素子でこの翼型変化を実現可能である事を示している。

ヘリコプタのロータブレードの制御では、HHC (Higher Harmonic Control)が開発されている。HHCは、振動制御効果は充分にあるものの、スウォッシュプレートにサーボアクチュエータで加振するため過大な加振力が要求される事が実用上のネックになっている。そのため、piezo素子を利用しブレード翼断面形状を直接変化される方法が研究されている。1つの基礎研究例として、W. Smithらは薄肉断面にpiezo素子を埋め込めばトルク及びねじりを発生できる事を解析的に示した。図5.1-11はその原理であり、簡単のために4本の繊維とpiezo素子のみを示している。この例では、ロータ振動を制御可能なブレードの空気力を発生できる十分なピッチ変化が達成できるとしている。別の研究例として、I. Chopraはインテリジェントロータのコンセプトを提案している。この例では、piezo素子をセンサ、アクチュエータとして用いるものであり、piezo素子はスパーのいくつかの場所に多数埋め込まれている。アクチュエータ機能としては、曲げねじり及び伸びねじりの変形が発生できるものである。このインテリジェントロータにより、HHCに比較して大幅な能力向上が期待できるとしている。構成の1例を図5.1-12に示す。また、I. Chopraの別の研究例として、ロータブレード内部にpiezo素子又は電歪素子を使用したスタックアクチュエータ駆動の小舵面による空力制御方式が提案されている。図5.1-13に示すようにフラップロン又は前縁操舵面をロータブレードに装着し、空力荷重、抵抗を軽減する事を目的としている。

表 5. 1 - 3 能重カ／適応制御の研究開発状況

対象	研究目的	結果	アキュエータ	図番	文献
固定翼	可変キャンバ翼による揚力の制御	40%の揚力増加及びウェイクの1/3減少	形状記憶合金ワイヤ	図5.1-8	9)
	トラス構造リブによる翼の断面制御	抵抗係数の6%減少	磁歪型リニアアクチュエータ	図5.1-9	10)
	スーパーリテリカルウィングの翼型の微小変形	微小変形による抵抗の大幅な減少	形状記憶合金又はピエゾ素子	図5.1-10	11)
	薄肉断面でのねじり及びトルクの発生	ロータ振動低減に有効	ピエゾ素子	図5.1-11	12)
ヘリコプタ ロータブレード	インテリジェントロータ (曲げねじり, 伸びねじりの変形発生)	HHCよりも非定常空 気力発生能力大	ピエゾ素子	図5.1-12	13)
	小舵面による空力制御	空力制御に有効	スタックアクチュエータ (ピエゾ素子及び電歪素子)	図5.1-13	14)

(4) 非構造用途のスマートコンポジットの研究開発状況

この項では、スマートコンポジットの非構造的用途としてスマートスキンについての研究開発状況を述べる。

スマートスキンとは、機体外板にアンテナ、送信、受信処理部を集積し、機体外板のみでレーダ等を構成する構造である。スマートスキンの概念は、2000年代の航空機技術の開発を目指し1985年より研究開発された米空軍のProject Forecast IIで提唱されたものである。このスマートスキンは、電装品への要求が格段に高まるにつれて、機体内部の電装品ではこの要求に対処できず構造部材としての機体外板に電装品の機能を持たせるというものである。このスマートスキンのメリットとしては、次に示すものがある。

1. 航空機の空力形状をそのまま保ったコンフォーマルな形態
2. センサの大開口化
3. センサのワイドバンド化
4. 航空機の耐環境性内での作動が可能
5. ヘルスモニタリングが可能
6. レーダ等の即応性をサポート
7. センサやミッション用電子機器の耐故障能力増加
8. スキンパネルの冗長性確保及びメンテナンスの軽減
9. センサ、フロントエンド、シグナルプロセッサの有機的結合によるシステム能力向上
10. ミッションの有効性を高める新しい手段の提供

スマートスキンを先進航空機に適用する構想例を、図5.1-14に示す。図中には、スマートスキンだけでなく他のスマート構造についても併せて示している。この例では、先進アビオニクス、先進ECM、火器統合機能や可変キャンバ等にスマートスキンの適用が考えられている。スマートスキン機能の中で、一番身近な用途として考えられているコンフォーマルレーダの提案例を、図5.1-15と図5.1-16に示す。前の例では、表面部に積層構成のアンテナを配置し、一番内面にコントロール用の電子部品を配置した構成になっている。後の例は、ロバストハイブリッドと呼ばれるパッケージの中に高密度ICチップによる信号処理と、構造部材である複合材積層板の

層間に光ファイバセンサを格子状に配置したものである。処理を終えたデータは、光／電子バスでメインの演算処理装置へ伝送する。また、集積回路の発熱や空力加熱を冷却するために、冷却用のサーマルバスが設置されている。

このスマートスキンを構成する要素技術の内容、研究例を以下に示す。

(a) アンテナ要素技術

アンテナ要素技術として、カルスパン社はProject Forecast II で表 5.1-4 に示すようなアンテナ方式を研究している。図 5.1-17 にアンテナ構成を示す。パッチと呼ばれる導電材の要素がグランドプレートと一体化された構造になっている。各種方式のバンド幅等の比較も、表 5.1-4 に示されている。

(b) 送受信モジュール技術

スマートスキンの送受信モジュールとして使用する半導体として最も有望なものは GaAs がある。また、送受信モジュール個々の構成要素としては、オシレータ、ミキサ、パワーアンプ、フェイズシフタ、ノーノイズアンプ、スイッチがある。個々の構成要素は実用化レベルに近いものになっている。

(c) 熱制御技術

スマートスキンの熱制御の対象は、パワーアンプの発熱と超音速や極超音速に発生する空力加熱である。亜音速時は、内部要因による熱源が支配的である。そのため、複合材外板を介した空気による自然冷却方式が考えられる。また、超音速や極超音速時は、空力加熱が問題になるためクーラント等を使用するアクティブな熱制御方式が必要となる。

(d) センサ技術

スマートスキンのセンサとしては、通常光センサが考えられている。この光センサが、スマートスキンとして一体化された構造になっている。この光センサの用途としては、データバス、伸び及び歪み計測、スキンのペネトレーションモニタがある。

(5) 航空機機体に対するスマートコンポジットの適用・今後の課題

本節では、航空機機体に対するスマートコンポジットの研究開発状況について、ヘルスマモニタリング、能動／適応制御、スマートスキンの各々についてのその概要を紹介した。実機への適用という観点では、ヘルスマモニタリングが一番実用化に近いところにある。しかし、まだ様々な技術課題があるため、今のところは限定された範囲での実用化にならざるを得ない。また、能動／適応制御は基礎研究の段階であり、どのような用途が可能かスタディされている。スマートスキンは、あるべき姿が示されているが、現実的にはコンフォーマルレーダ技術を徐々にステップアップして実用化を目指している。以下、各々の技術について実用化に際しての今後の課題を述べる。

(a) ヘルスマモニタリング

・センサ

搭載電子機器からの電磁干渉対策や耐環境性（温度、湿度、振動等）技術、耐久性技術が必要となる。また、構造にセンサを埋め込むことによる強度低下を防止する技術、設計手法も課題である。

・解析評価（ソフトウェア）

リアルタイム性を確保するための処理時間の短縮方法、ユーザフレンドリーで簡単に更新できるソフトウェアのメンテナンス性、トラブルの自己診断が可能で冗長性を持たせるような信頼性の確保が必要となる。

(b) 能動／適応制御

・アクチュエータ

高出力、高応答性、高信頼性が満足できるアクチュエータ素材の開発やセンサと同様な耐環境性、耐久性技術が技術課題である。

・センサ

ヘルスマモニタリングと同様な技術課題と1つのものにセンサ／アクチュエータ機能を持たせる設計技術が必要になる。

・制御手法（ソフトウェア）

能動／適応制御を実現する制御手法の開発が必要となる。特に適応制御の場合には、非線形システムの制御手法が必須となる。

(c) 非構造的用途（スマートスキン）

- 積層化技術

機体外板に組み込み可能な薄型のアンテナ送信，受信，信号処理，ビーム制御モジュールの設計及び製造技術。

- モジュール面の応力変形検出，補正技術

温度，湿度環境によるモジュール面の剛性値の変化を検出し，モジュール面の応力変形を補正する技術。

- 耐環境性技術

半導体素子を含む脆弱な電子回路を機体外板表面での厳しい環境条件に対する耐環境性技術。

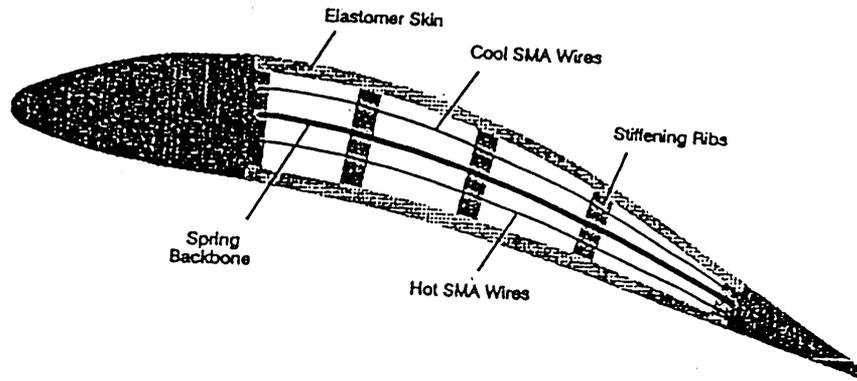


図5.1-8(a) SMAACのアクチュエータ概念

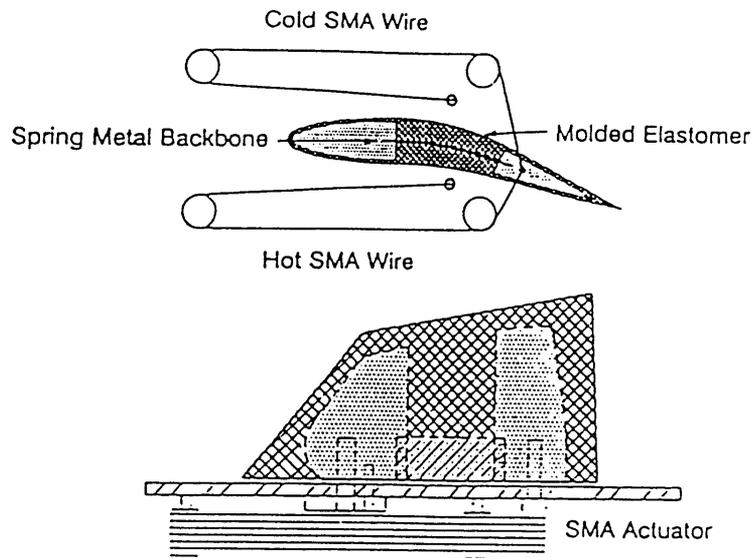


図5.1-8(b) 形状記憶合金アクチュエータ

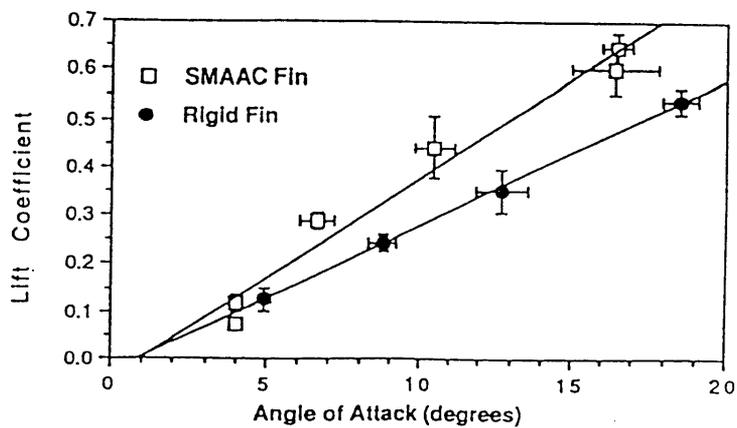


図5.1-8(c) SMAACと剛フィンとの比較

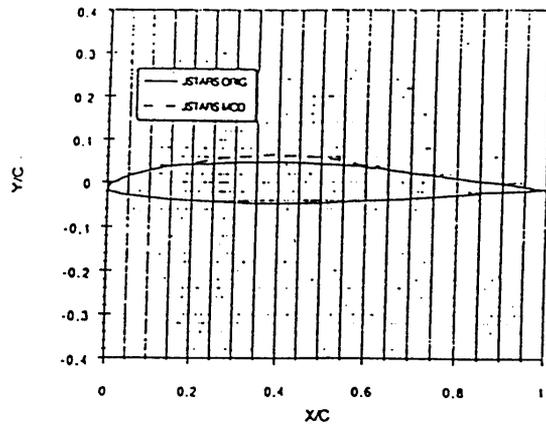
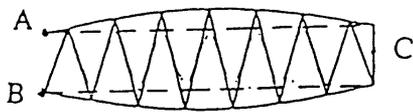
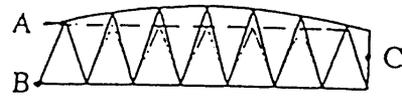


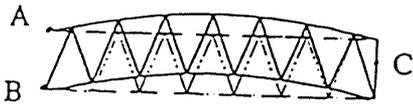
図5.1-9(a) 0.42スパンでの原型と修正された翼型の比較



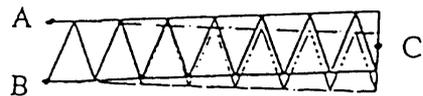
(a) Sine/Minus Sine



(b) Sine/Flat



(c) Sine/Sine



(d) Racking

図5.1-9(b) リブの変形

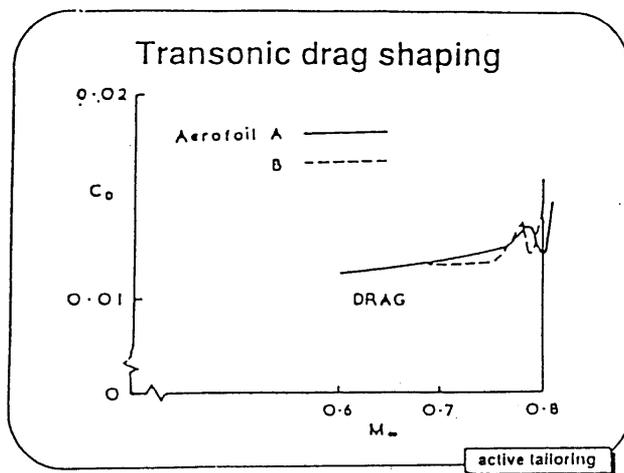


図5.1-10 遷音速時のドラックシェーピング

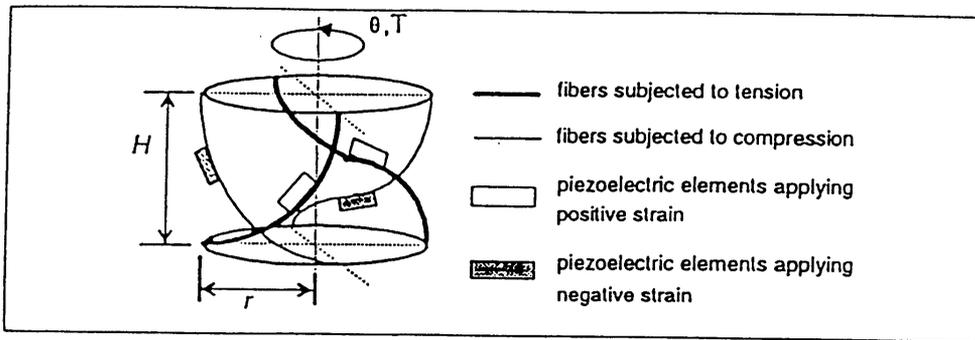


図5.1-11 ピエゾアクチュエータによるねじり変形

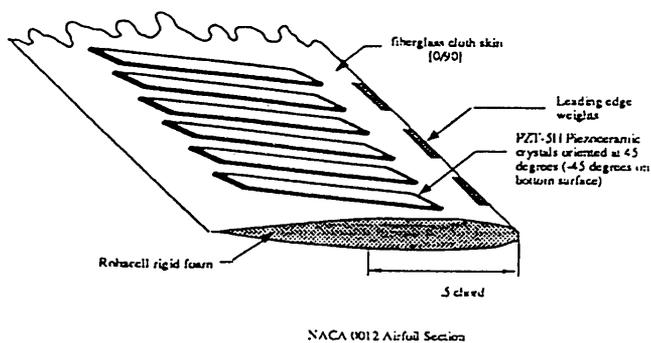
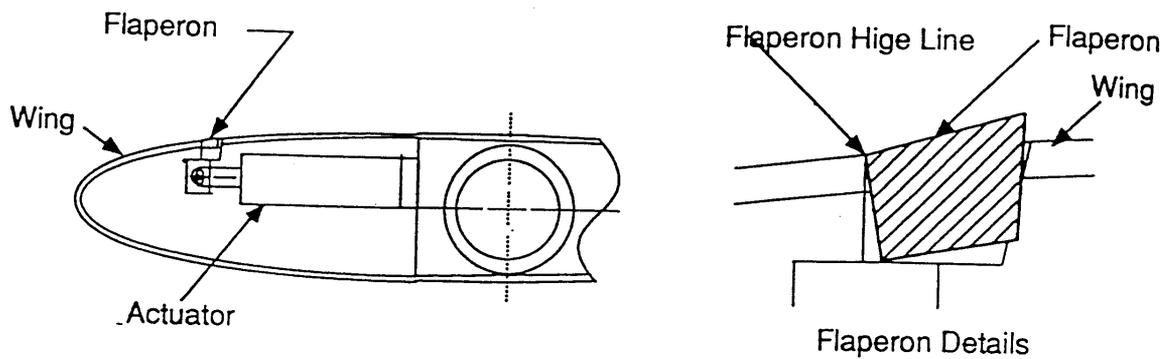
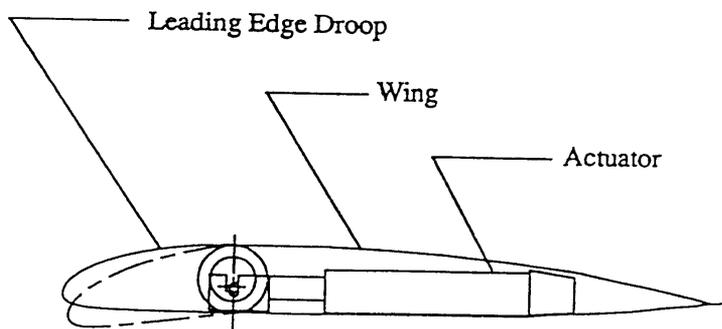


図5.1-12 ピエゾアクチュエータブレードの断面図



Schematic of wing with flaperon and actuator



Schematic of wing with leading edge droop

図5.1-13 小舵面を配した翼のスケマチック

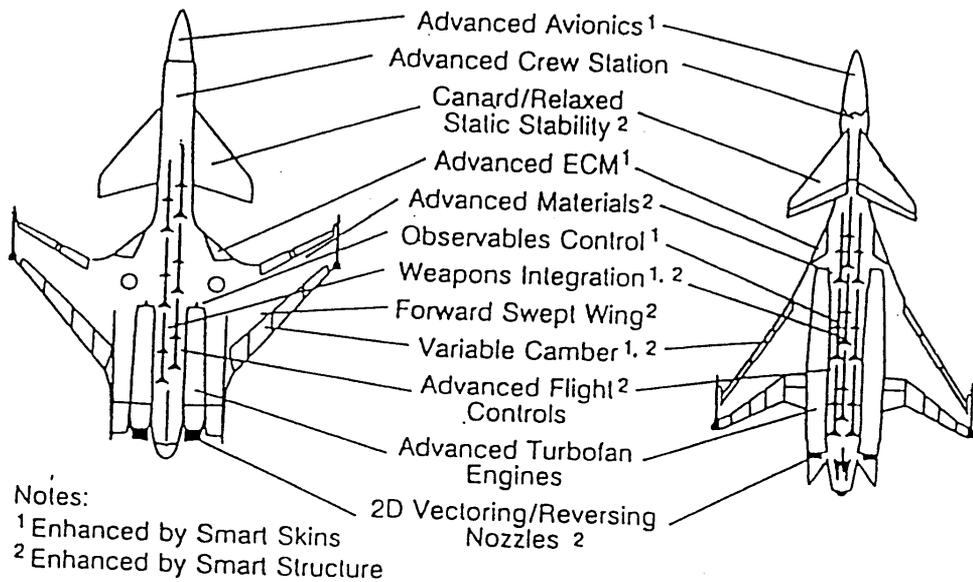


図5.1-14 先進航空機への適用¹⁵⁾

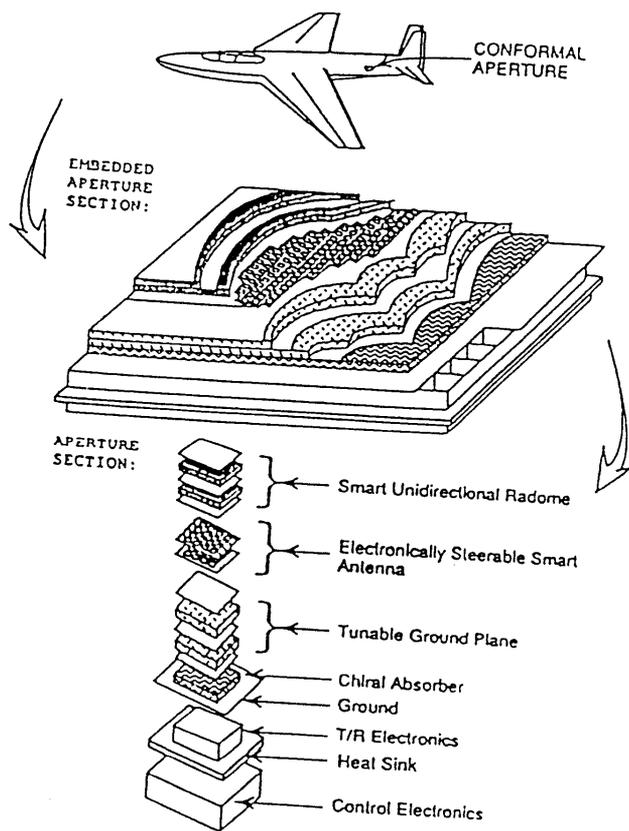


図5.1-15 コンフォーマルスマートスキンの観念¹⁶⁾

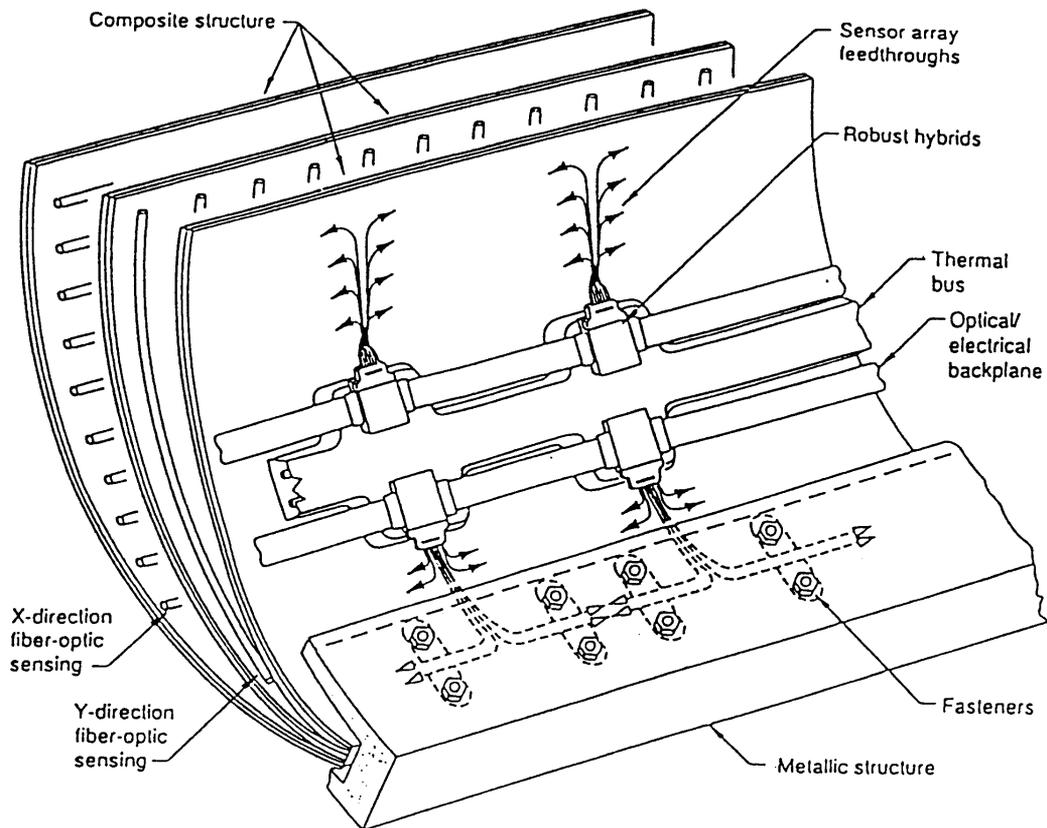


図5.1-16 スマートスキンの理想的な概念¹⁷⁾

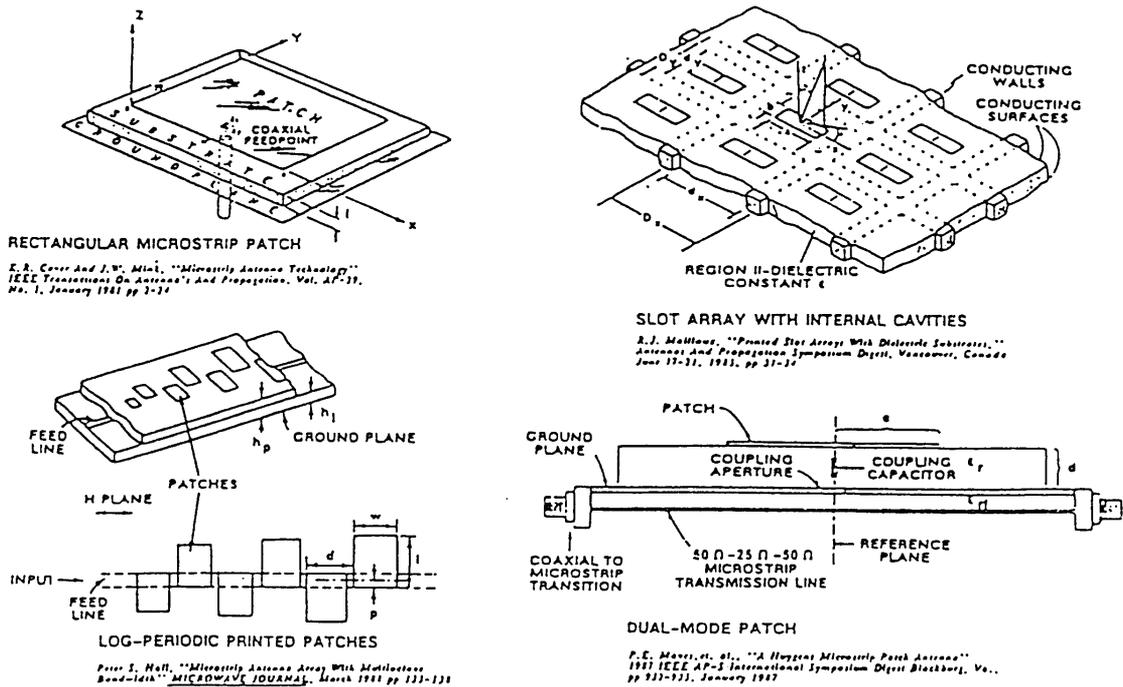


図5.1-17 スマートスキンアンテナ要素¹⁹⁾

表5.1-4 アンテナ要素の特徴²⁰⁾

Antenna Type	Bandwidth	Beamwidth (deg)	No. of Polarizations	Profile	No. of Array Angles	Risk of Embedding
Patch	5 - 10%	100	2*	Very thin	2	Low
Cavity Backed Slot	15 - 20%	150	1	Thin	2	Medium
Honeycomb	2-3 Octaves	60-120	2**	Thick	2	High
LPPP	2-3 Octaves	90	1	Very thin	1	Low
Dual Mode Patch	1 Octave	130	1	Thin	2	High

* With multiple feeds

** In cross-polarized configuration

5.1.1 参考文献

- 1) Stanley Rich, Charles Ritter : SPIE Vol.1170(1989). pp 77-89
- 2) J.M.Alper : Structural Damage Detection For Smart Structure
- 3) B. Zimmermann, R.Claus :Optical Times Domain Fiber Strain Sencer Trial on Full Scale F-15 Test Plane
- 4) A.L.Bbott :Neural Net for Surfase Estimation Using Optical Fiber Sensors
- 5) J.N.Kudva et al : ADPA/AIAA/ASME/SPIE Conf. on Active Material and Adaptive Structure Session 30
- 6) J.Gerardi et al : ADPA/AIAA/ASME/SPIE Conf. on Active Material and Adaptive Structure Session 22
- 7) K.F.Hale : 1st European Conf. on Smart Structures and Marerials (1992)
- 8) N.Shaikh : ADPA/AIAA/ASME/SPIE Conf. on Active Material and Adaptive Structure Session 22
- 9) C. H. Beauchamp et al : Proc of ADPA/AIAA/ASME/SPIE conf on Active Materials and Adaptive Structures (1991). pp. 455-460
- 10) F. Austin et al : Adaptive/conformal wing design for future aircraft, Dot(1988), pp. 387-390
- 11) T. A. Weisshear : 31st JSASS Aircraft Symposium (1993).
- 12) W. P. Smith et al : Proc ASC 7th (1992).
- 13) P. C. Chen, I. Chopra : SPIE Vol.2190 (1994). pp. 123-140
- 14) D. K. Samak, I. Chopra : SPIE Vol.2190 (1994). pp. 86-98
- 15) S. Reich, C. Ritter : SPIE 1170 (1989). pp. 77-89
- 16) V. K. Varadan, V. V. Varadan : 国際航空宇宙シンポ'92名古屋前刷集(1992)
- 17) T. Thomas : Proc. Electron. Tech. Conf. 40th(1990) pp. 131-139
- 18) J. Lochocki : SPIE 1170 (1989) pp. 19-47

5.1.2 ジェットエンジン

(1) ジェットエンジンの基本構成と開発動向

ジェットエンジンの基本構成¹⁾を図5.1-18に示す。エンジン内部に流入した大量の空気は、圧縮機によって圧縮され、燃焼室において燃料を混合して燃焼が行われる。燃焼された空気の流れはタービンに導かれて、そのエネルギーの一部は回転エネルギーに変換される。圧縮機とタービンは低圧用と高圧用に分けられており、低圧用と高圧用は独立して回転する。これは、効率良く空気を圧縮すると共に、圧縮機を流れる空気の速度を適切に保って、コンプレッサストール（圧縮機翼からの空気のはく離、圧縮機翼の破損や異常燃焼などの重大な結果を生む可能性がある）を避ける工夫である。

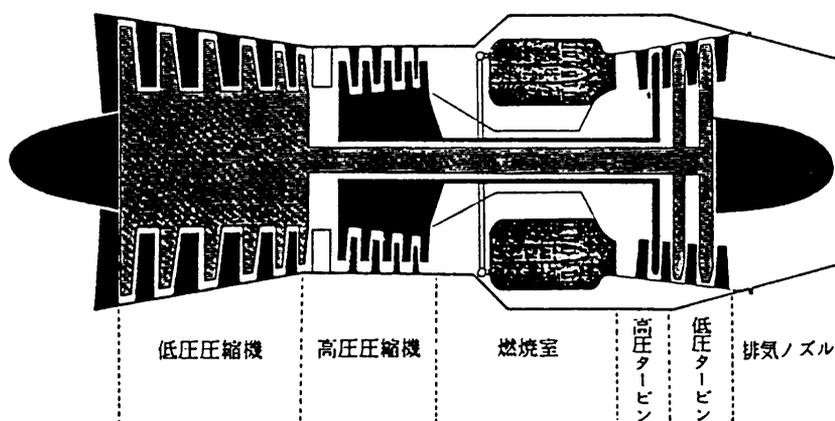


図5.1-18 ジェットエンジンの基本構成

近年の旅客機には、燃費の向上と低騒音化を図るために大型のファンを取り付けたターボファンエンジンが採用されている。例えば、1989年から運用が開始されたV2500-A1エンジン（図5.1-19）²⁾は、ファン動翼および静翼が1段、低圧圧縮機3段、高圧圧縮機10段、高圧タービン2段、低圧タービン5段で構成される2軸ターボファンエンジンで、バイパス比（ファンによりバイパスされる空気と、エンジンの内部に入る空気の比）は5.4である。

1930年代末のジェットエンジン実用化以来、この約半世紀の間にその推力は40倍以上にも達し、大きな進歩を遂げてきた。そして、近年環境保全の重要性が指摘さ

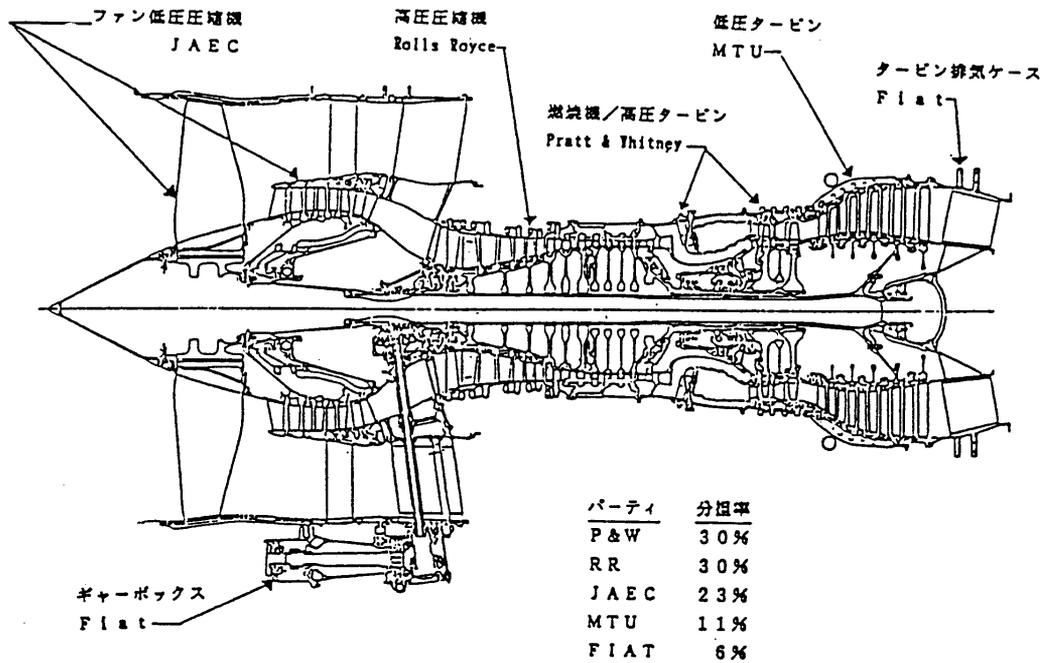


図 5.1-19 V2500 エンジン

れるに至って、ジェットエンジン（特に民間航空機用ターボファンエンジン）の最も重要な開発課題は以下に示す3項目であると言われている。

- ①低燃料消費率
- ②低排気ガス汚染（低Nox）
- ③低騒音化

これらを実現するために、高圧力比化、高温化、各種の防音対策、高バイパス比化などが行われてきた。例えば、サイクル効率向上による燃費軽減のためには、エンジン全体の圧縮比を高めることが有効であり³⁾、近年では図5.1-20に示すように高いものでは35~40にも達している。また、サイクル最高温度としてのタービン入り口温度は圧力比の増大に伴って上昇し、約1400℃に達している（図5.1-21）。

以上のようなジェットエンジンの進歩に果たした材料の役割は、少なからぬものである。ジェットエンジンの材料構成は図5.1-22に示すように、現在ではニッケル基超合金やチタン合金が多用され、今後は金属系複合材料（MMC）およびセラミック複合材料（CMC）が採用される⁴⁾と考えられている。一方、比強度および比弾性率に優れる繊維強化複合材料（FRP）も、厳しい軽量化が求められる

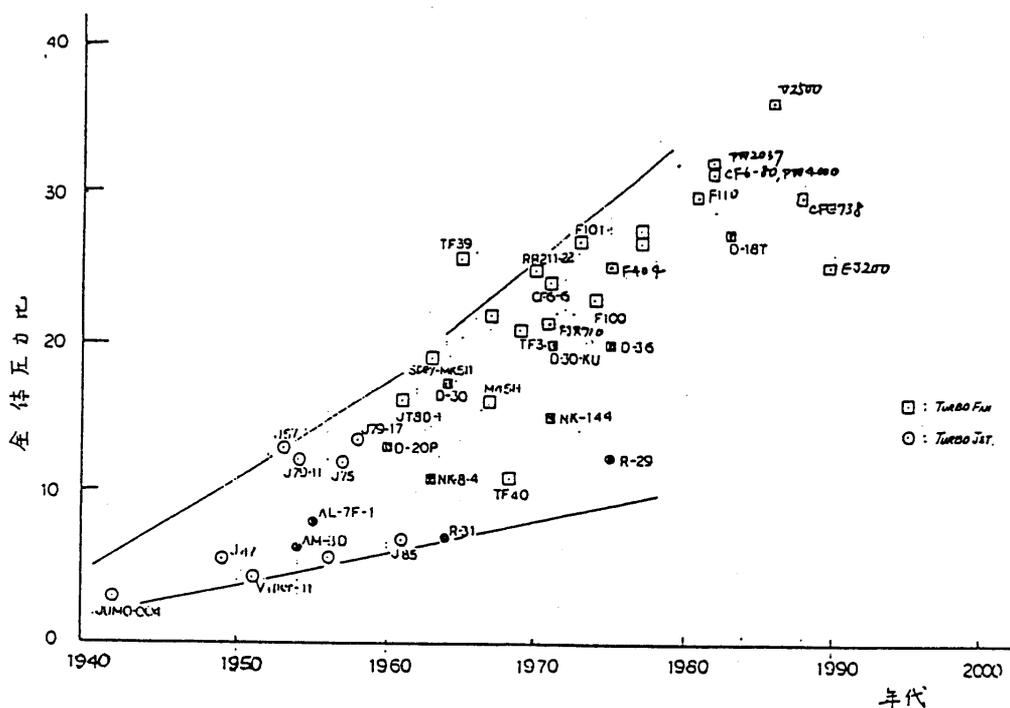


図 5.1-20 エンジン全体圧力比の変遷

ジェットエンジンにおいては重要な構成材料であり、比較的低温なエンジン前部やカウルなどへ適用されている。

ところで、先に述べた近年のジェットエンジン開発の3つのキーワード（低燃費、低Nox、低騒音）は、当然のことながら、ジェットエンジンを構成する材料のみによって実現するものではない。エンジン内の温度や圧力、エンジンの回転数などを測定して適切な燃料流量を算出し、エンジン全体を制御するコントローラの役割は極めて重要である。前出のV2500エンジンでは、Full Authority Digital Electronic Control (FADEC) と呼ばれる最先端のコンピュータ制御技術が採用され、機会油圧式ではなし得なかったきめ細かい制御が行われており、燃料供給量をはじめとする最適制御が行われてエンジン効率の向上に寄与している。

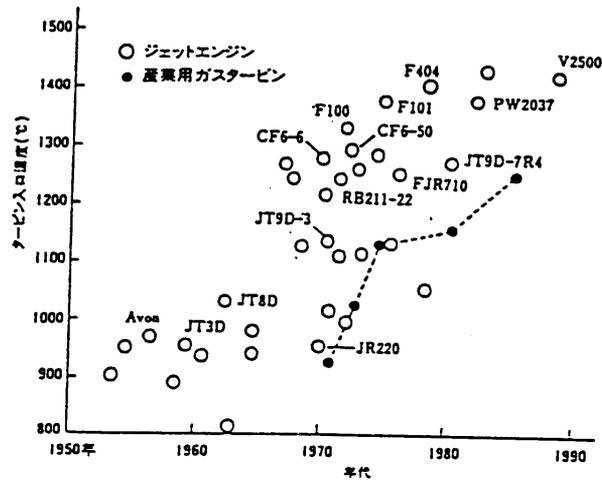


図 5. 1 - 21 タービン入口温度の変遷

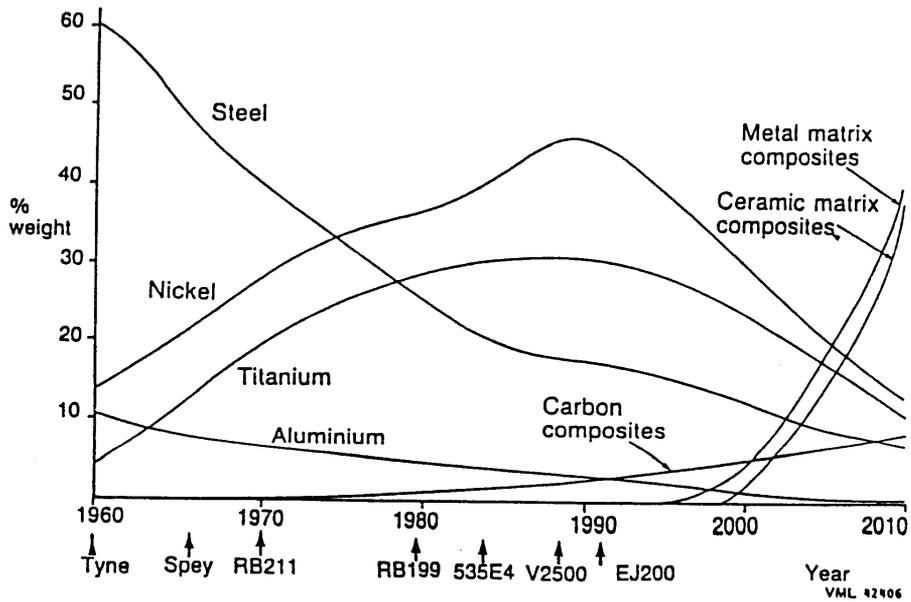


図 5. 1 - 22 ジェットエンジン材料構成の推移予測

(2) ジェットエンジンにおけるスマートコンポジットのニーズ

ジェットエンジンへの複合材料適用の動向および適用性と技術課題については、文献⁴⁾（複合材料次世代技術動向調査研究、昭和62年度）に詳しく示されている。それによると、複合材料の適用は、大幅な軽量化、小型化、さらに高性能化といった航空エンジンの今後の技術進歩に対して、極めて大きな役割を果たすと述べられている。例えば、複合材料の適用可能時期の予測は、図5.1-23に示す各種材料の耐熱温度から、図5.1-24のように主要なエンジン部品に適用可能であると考えられる。図5.1-24によると、1990年代の後半からFRPおよびFRM、2010年代頃からFRCおよびC/Cの本格的な適用が予想される。

以上のように、本格的な複合材料の適用を間近に控えて、スマートコンポジットの概念と技術をこれらの材料に取り入れることは、複合材料の適用をさらに加速し、エンジン全体の性能向上（すなわち、低燃費、低Nox、低騒音）に大きく寄与すると

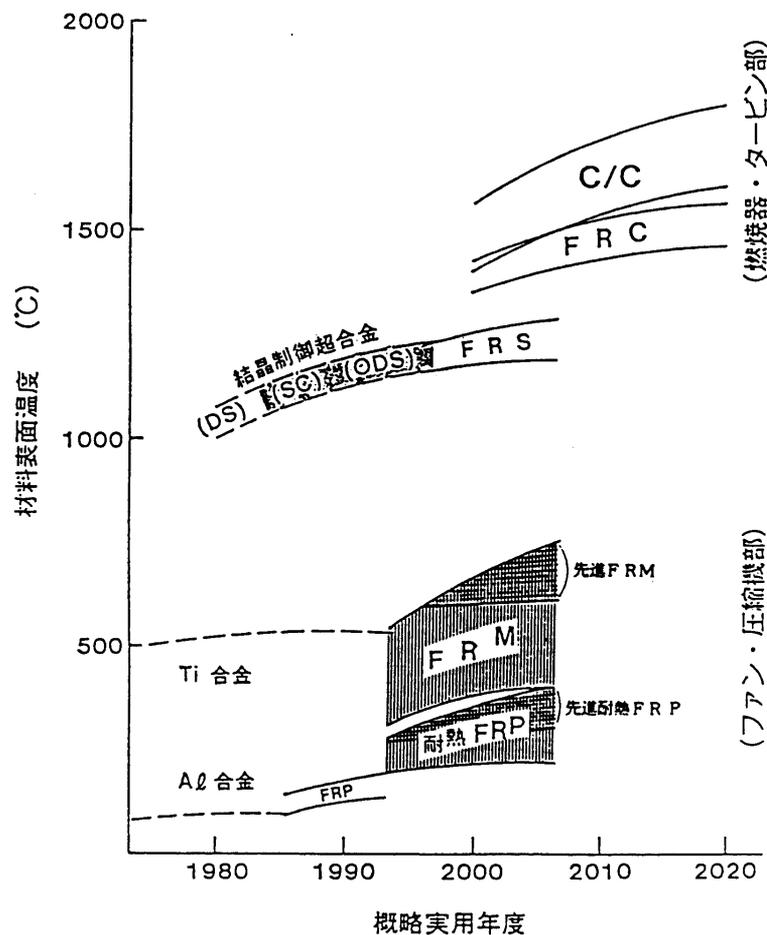


図5.1-23 航空エンジン適用可能複合材料の実用化予測

考えられる。例えば、何らかの自己診断の手法が各種の部品に適用されれば、高い信頼性が要求されるエンジン部品への新しい材料の採用がより有効なものとなるし、開発期間の短期化が可能であると考えられる。また、構造部品に分布型のアクチュエータを埋め込んで構造部品レベルでのアクティブな振動低減などを行い、エンジン全体の低騒音化を図ることや、さらには、自己修復が可能となると、多大な時間を要するメンテナンスの大幅な省力化も可能であると考えられる。近年のジェットエンジンの開発には、その高性能化に伴って多額の費用と長期にわたる開発期間

主要エンジン部品	西暦				
	1985	1990	2000	2010	2015
ファン動翼	チタニウム合金			FRP/FRM	
ファンケーシング ファンフレーム フロントフレーム	鋼, チタニウム合金		FRP		
ファンディスク	チタニウム合金			FRM	
圧縮機動静翼	鋼, チタニウム合金, ニッケル合金			FRP/FRM	
圧縮機ケーシング	チタニウム合金			FRP/FRM	
燃焼器ライナ	ニッケル合金, コバルト合金				FRC 又はC/C
燃焼器ケース	ニッケル合金				C/C
タービン・ノズル	ニッケル合金, コバルト合金				FRS, FRC, C/C
タービン・ ディスク	ニッケル合金,				C/C
タービン動翼	ニッケル合金,				C/C
エクゾー ストフレーム	ニッケル合金			FRS	
テールコーン	ニッケル合金				C/C
ナセル	アルミニウム合金		FRP		
ギアボックス	アルミニウム合金			FRM	

図 5.1-24 複合材料のエンジン適用可能予測時期

が必要となってきた。構造部品がよりスマートなものとなれば、その信頼性と性能は大幅に向上し、より環境に優しく低コストでスマートなエンジンが実現するのではないかと考えられる。

ところで、現在も進められている新しいエンジン材料の開発にスマートコンポジットの概念と技術を取り入れていくステップには、次のような2つの状況が考えられる。

①開発段階における新しいエンジン部品の評価手法としての適用

②実機に搭載され、恒久的に使用されるシステムとしての適用

例えば、ジェットエンジンのファンブレードをFRP化しようとしたときを考えてみる。枚数が多く重量も径も大きい回転体であるファンブレードへのFRPの採用は、軽量化の切り札として極めて魅力的であり、古くはロールスロイス社によって1960年代にも試みられた。しかしながら、鳥や氷、小石、砂などの異物吸い込みによる破壊および損傷（FOD：Foreign Object Damageと呼ばれる）がFRP化したときの大きな問題であり、1960年代におけるロールスロイス社の試みは失敗に終わった。その後、素材の改良とエンジントータルでの設計見直しなどを行って、GE社は最新式のエンジンGE90においてFRPファンブレードを開発し、180～270kgの軽量化を実現した。以上のようなFRP製ファンブレードの開発において、どのようなスマート化技術の適用が可能であるかの一例を以下に述べる。まず、FRPブレードの開発段階においては、耐FOD性に優れた材料の選定、その結果に基づく要素試作と要素試験レベルでの耐FOD性の評価、次に実機に搭載した状態での評価が必要となる。この開発段階においては、例えば、新しい評価技術として埋め込み光ファイバセンサや埋め込みピエゾセンサの利用が有効であると考えられる。すなわち、外観からは把握が困難なFODを新しい埋め込み型センサによってリアルタイムに検出すれば、材料評価や要素試験の幅が広がることになる。次に、同様な手法は実機に搭載されるFRPブレードにも適用可能であり、補修や交換時期がこれらの手法によって明確に決定されれば、ブレードの信頼性は大幅に向上し、またメンテナンスの省力化も実現される。

以上で述べたスマート化技術の適用例は、FRPブレードの非破壊検査手法としての一例であり、他のジェットエンジン部品においても様々な適用が考えられる。

例えば、圧縮機やタービンなどのより高温部分で用いられる金属製あるいはセラミック製などの翼においては、その耐熱性を飛躍的に向上し、またクラック発生などに対する自己診断機能を兼ね備えたスマートコーティングなるものが考えられる。また、非破壊検査手法としてだけでなく、真にスマートと呼べるものに近い適用も、例えば、高度上昇による外気の温度変化に応じた翼形状の変化などや、アクチュエータを圧縮機の翼に埋め込んでコンプレッサストールを抑制することなど様々なものが考えられる。ジェットエンジン部品は過酷な環境において極めて高い信頼性が要求され、そこに使用される材料技術は典型的な極限技術の一つとすることができる。この材料技術にスマートコンポジットの概念および技術を取り入れることは、従来技術をさらに飛躍させる新しい手法として期待される。

参考文献

- 1) 中村：空を飛ぶはなし、(社)日本航空技術協会、(1993) p. 52.
- 2) 山崎：チタニウム・ジルコニウム、34, 4 (1990), pp. 117-184.
- 3) 村島：G T S J、16, 61 (1988), pp. 7-16.
- 4) 昭和62年度複合材料次世代技術動向調査研究（下）、(社)日本機械工業連合会
(財)次世代金属・複合材料研究開発協会 (1987).

5. 2 宇宙

5. 2. 1 宇宙関連スマート材料

ここでは、宇宙関連の用途として使用が期待され、研究されているスマート構造材料の中で、特に、スマート材料に関するその現状と今後の課題等について述べる。

宇宙関連のスマート構造材料として、使用が期待され研究されている項目としては主として下記の項目がある。

- ・展開トラス、宇宙ステーション構造（振動制御）
- ・宇宙ロボット（スペースクレーン）
- ・ヘルスマニタリング（トラス構造ほか）
- ・ドッキング
- ・太陽発電衛星
- ・アンテナ、マニピュレータ等（形状制御、位置制御等）
- ・有人圧キャビン（自己修復材料）

これらに関する適用研究例は平成5年度に行われた日機連調査「宇宙システム用材料に関する技術動向調査報告書」¹⁾でもまとめられており下記のような例がある。

将来宇宙システムには、太陽発電衛星、スペースレーダー、レンズアンテナ、ソーラーセイル等があり、図5. 2-1にその一例を示すが、巨大な平面構造体を必要とするものが多い²⁾。これらの構造物の展開収納に対しては、移動したり目標に指向させたりする機能等が備われば、ペイロードからの多様で時間変化する要求に対応できるスマートな構造が必要となる。その基本例として、ローカルアクチュエータやセンサを備え、プログラムによって展開・収納、さらには任意の形状に変化することができる図5. 2-2に示すようなスペース・クレーンが提案されている³⁾。スペースクレーンのアクチュエータ機能部には図5. 2-3に示すような圧電素子を使用した構造⁴⁾や図5. 2-4に示したような電気粘性流体を使用した構造⁵⁾が考えられている。

また、ボーイング社では宇宙システムの制振構造として、NiTiNOL（ニチノール）センサ・アクチュエータを使用したActive Vibration Suppressionを研究している⁶⁾。本

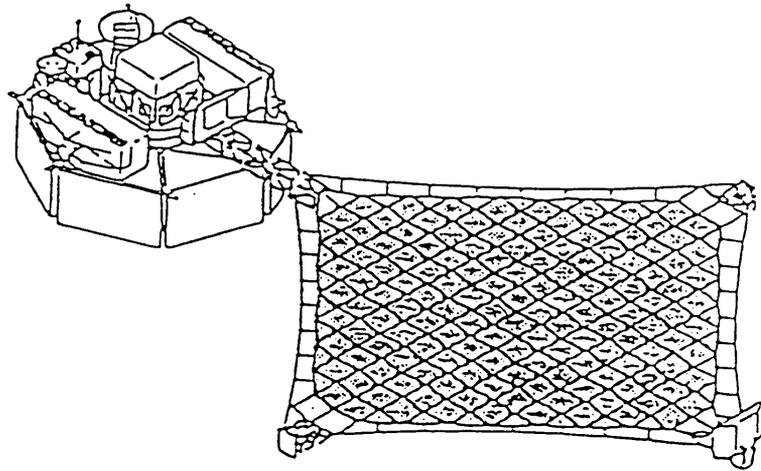


図5.2-1 スペースフライヤーと二次元展開アレー²⁾

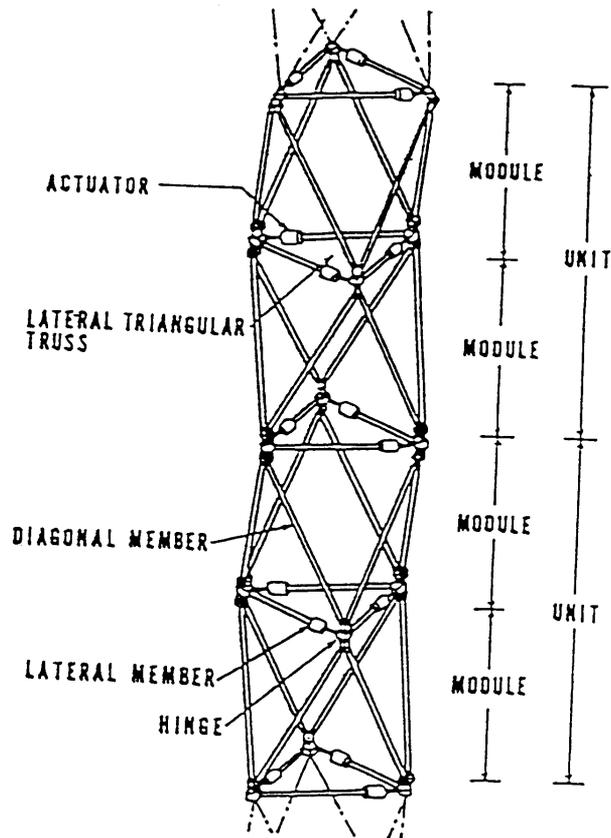
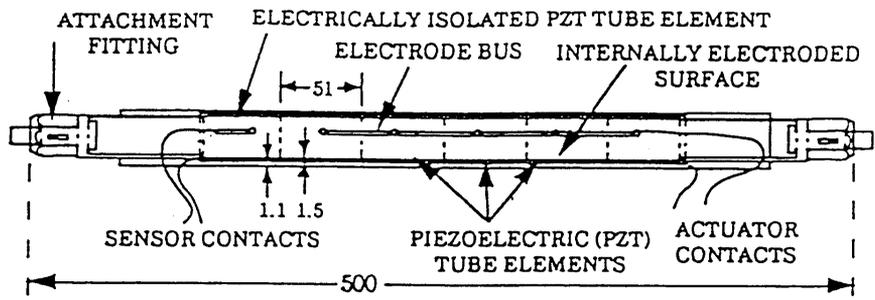


図5.2-2 VGTの概念³⁾



The MDSSC Piezoelectric strut (dimensions in mm).

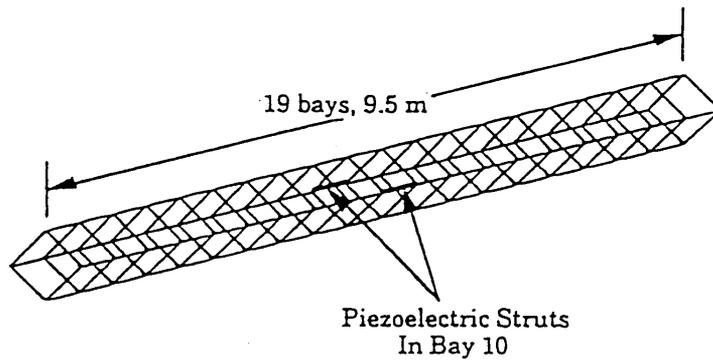


図5.2-3 圧電素子を用いたストラット構造⁴⁾

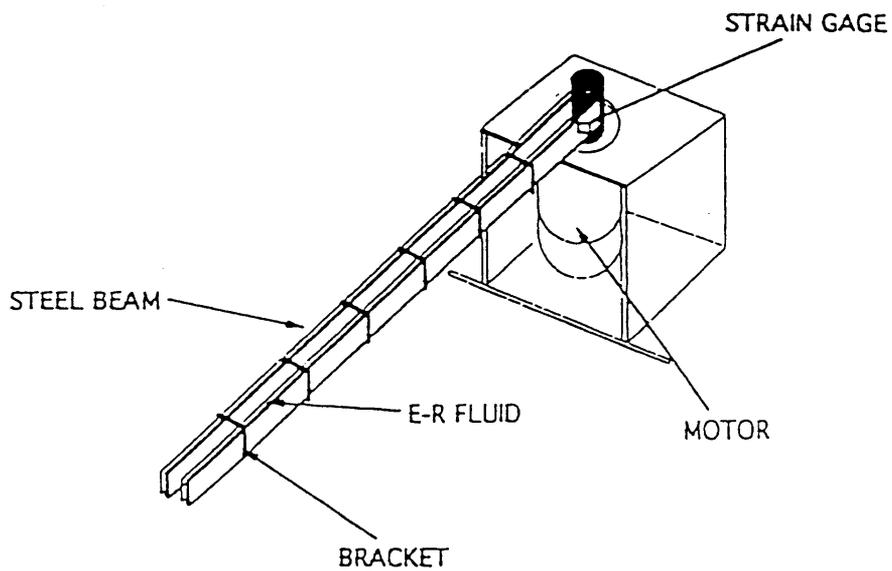


図5.2-4 電気粘性流体を用いたビーム構造⁵⁾

システムの回路及びダンピング効果を図5. 2-5、6に示す。さらに、マーチンマリエッタ社では図5. 2-7に示すような形状記憶材料を使用した宇宙大型機器への制振モデルを考案している⁷⁾。

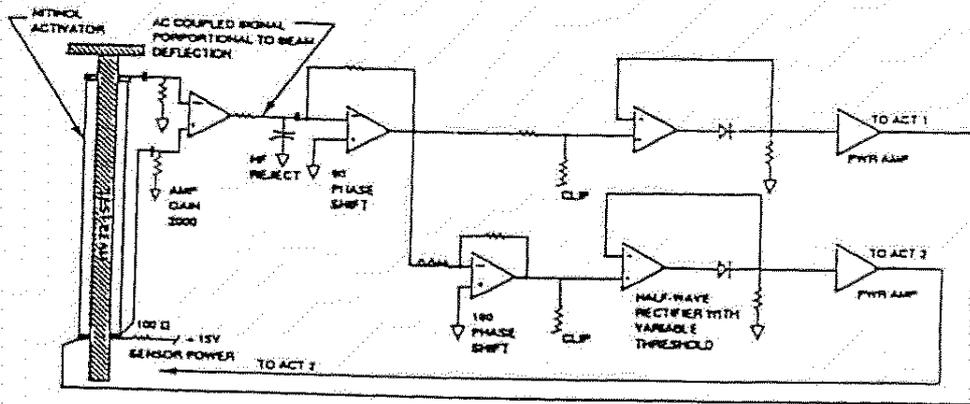


図5.2-5 アナログ制御によるニチノールを用いたアクティブダンピング回路⁶⁾

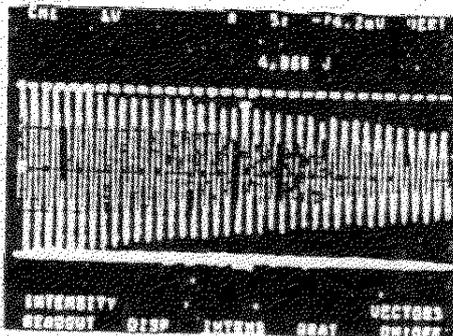


Figure 5. NiTiNOL Passive Damping System, 4 min, 10 sec

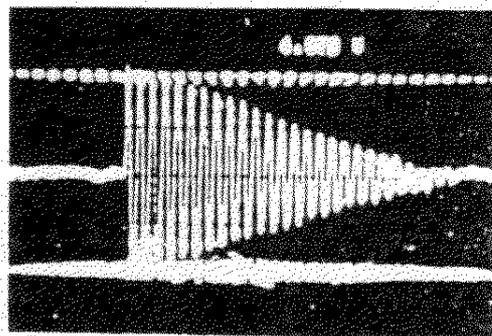
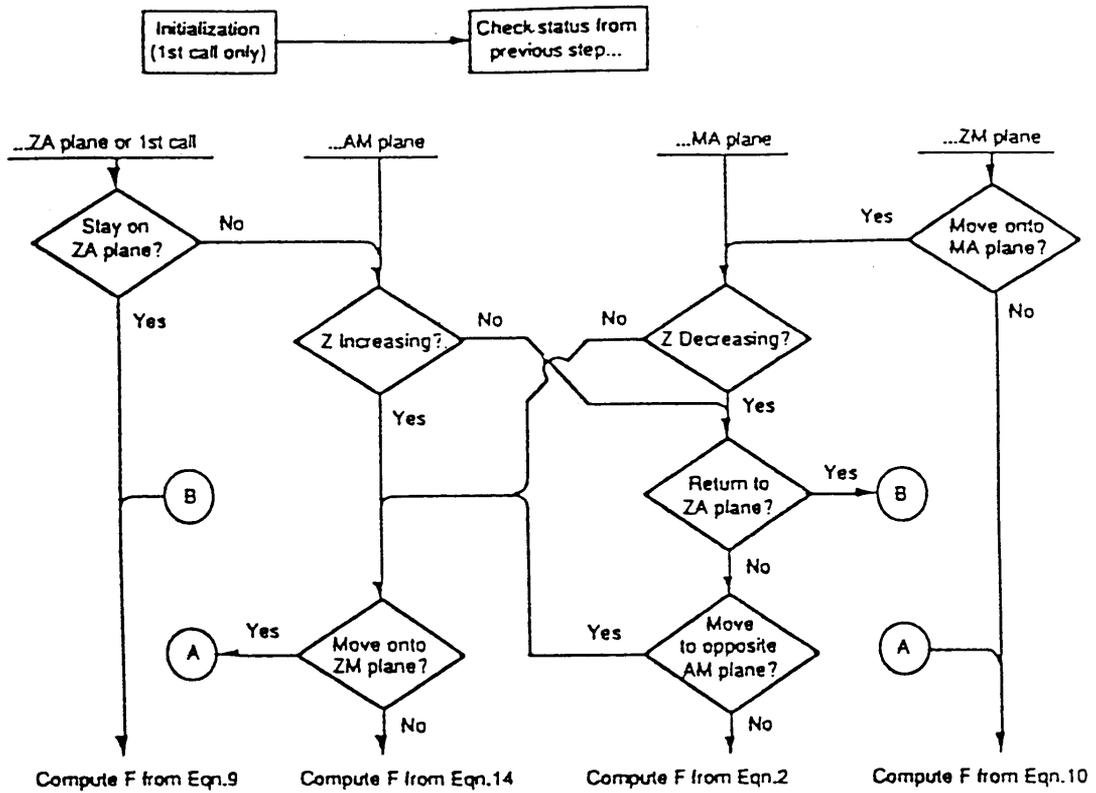
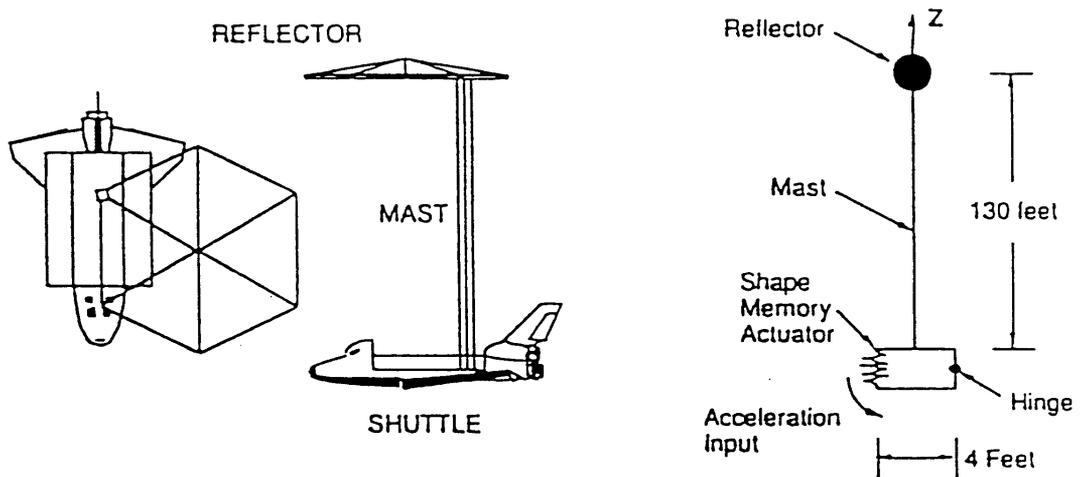


Figure 6. NiTiNOL Active Damping System, 28 sec

図5.2-6 アクティブダンピングによるダンピング効果⁶⁾



Shape memory behavior subroutine flowchart.



Mass Properties

	CG, Ft.	Wt., lbs.	$I_{xx} = I_{yy}$ sl-ft ²	I_{zz} sl-ft ²
Reflector	$\bar{Z} = 130$	400	4,969	9,938
Mast	$\bar{Z} = 65$	400	17,495	0

Mast EI = 4.00E7 lb-ft²

図5.2-7 形状記憶合金を用いた宇宙機の制振モデル⁷⁾

以上は、スマート材料を用いてスマート構造を達成しようとする研究例である。これに対し、材料そのものの自己修復性に着目して研究開発が行われている例として、C/C材料があり、これについて概説する。

米国スペースシャトルのような宇宙へ行き地上に戻ってくる機体は、大気圏への再突入の再、空力加熱により非常に高い高温にさらされる。特に機体の先端部や翼の前縁部の温度上昇は激しい。この部分には耐熱複合材料であるC/C材が用いられる。

C/C材自体は真空中での使用は問題ないものの、高温では急激な酸化を起こすため、単体では使用できない。このため、通常はC/C材の表面に耐酸化コーティングを施して、C/C材が直接酸素にさらされないよう保護を行う⁸⁾。

この耐酸化コーティングがクラックに対する自己修復機能を持ち、一種のスマート構造を形成している。その構造は、C/C材の表層部をコンバージョンによりSiCとし、耐酸化層を作る。このSiC層にはC/C材とSiCの熱膨張差によるクラックが発生する。このとき図5. 2-8に示すように、クラック先端がC/C材に到達している部分では酸化が起こり、空洞ができて強度を保持できなくなる。

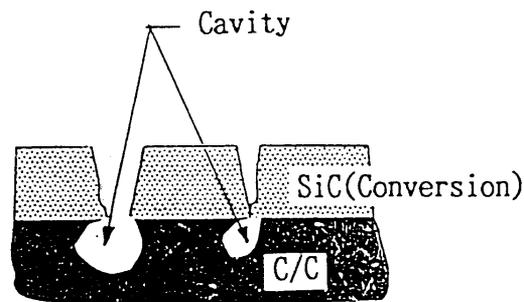


図5.2-8 クラックシール被膜が無い場合

また、コンバージョンによるSiC層は比較的ポラスなため、クラック同様酸素の侵入を受けられる可能性がある。これを防ぐために、SiC層(コンバージョン)の上に、CVD法を用いてより緻密なSiC被膜を施す。さらにそのうえにガラス被膜を施す。この結果、図5. 2-9に示すように、この2種類の被膜が、違った温度域でそれぞれ軟化し、

クラックに侵入してクラックシールとして働き、C/C材が直接酸素に触れないよう保護を行う。ガラス被膜は、700～1300℃で軟化し、クラックシールとして自己修復を行う。さらに、ガラス被膜が無くなった場合でも、内側のSiC(CVD)被膜が酸化してSiO₂を形成し、約1300℃で軟化しクラックシール機能を発揮する。これらの被膜は新しく発生するクラックに対しても侵入し、自己修復的な耐酸素バリアとなる。

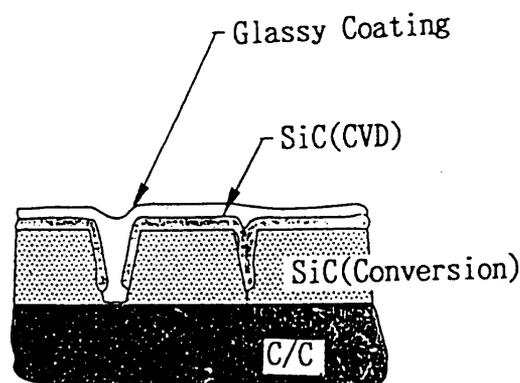


図5.2-9 クラックシール被膜がある場合

ただし、これらのコーティングはフライト毎に点検し、必要な被膜を再コーティングして、新たなフライトで発生するであろうクラックに備える必要があることから、今後は再使用性に優れたクラックシールの開発が望まれる。

以上、スマート材料に関する現状をまとめたが、C/C材料を除けば、いずれも現状のスマート材料（圧電素子、形状記憶合金、電気粘性流体等の要素材料）を用いてシステムを構築し目的を達成するというシステム研究が主流であり、スマート材料そのものの特性を上げることに注目した研究発表例は少ない。

このような中で、NASA Langley Research CenterのGarnett C. Hornerは、NASA Langley Research Centerにおける次のようなスマート材料プログラムの現状を紹介している⁹⁾のが注目される。以下にその概要をまとめるが、今後のスマート材料の研究開発の方向として参考に

なると思われる。

NASA Langley Research Centerにはスマート材料の開発と適用を推進・統合することを目的とした技術委員会がある。委員会は年に一度のワークショップ及びスマート材料の講習を行っている。いろいろな構造を次のように定義している。

- Controllable Structure : 所定の目標を達成するためにプロセッサと相互作用するセンサ、アクチュエータを備えた構造
- Active Structure : 所定の機能を達成するためのプロセッサと構造コンセプトに統合されたセンサ、アクチュエータを有する構造
- Smart Structure : 所定の機能を達成するためのプロセッサと構造材料に埋め込まれたセンサ、アクチュエータを有する構造

彼らが最も注目しているのは圧電材料であり、その圧電材料に関する研究はほぼ圧電ポリマー及び圧電セラミックスに集中している。圧電ポリマーは、宇宙環境に適し、高温安定性を有する高性能材料の開発にその目的をおいている。さらに重要なのは圧電応答性に影響を与えるプロセス変数と構造特性との関係としている。圧電セラミックスに関する研究目的は reduced and internal biased oxide wafers (RAINBOW) に集中している。RAINBOWsは100psiまでの荷重に耐えられる能力を有するセラミックアクチュエータの新しいクラスであり、荷重、サイズ、組成に応じて50milまでの変位がだせるものである。

そして、その適用に関し、圧電セラミックスは民間機の先進亜音速技術プログラムにおいて機内の騒音低減用として評価されている。また、ヘリコプタートランスミッションからの騒音を、先進トランスミッションマウントの利用をとおして低減することに狙いがおかれている。このマウントはガラス繊維とPZTのコンポジットアクチュエータを使用している。適応材料を利用した空力弾性の研究では圧電セラミックと形状記憶合金を利用した翼及びパネルフラッタを抑制する解析研究に集中している。解析研究は翼の形状をコントロールする研究、圧電アクチュエータのモデリングや圧電空力弾性の応答性を追尾する研究(PARTI)に広がっている。このPARTIの目的は圧電アクチュエータを利用した空力弾性の応答性をアクティブコントロールすることを示すことにある。アクティブコントロールは機体のフラッタースピードを増加させることができる。RAINBOWセラミックスを利用した

適用に関する研究にはポンプ、モーター、スピーカー、低温クーラーが含まれる。センサとして、圧力変換機にRAINBOWsを利用する研究も行われている。

また、これらの研究のインフラストラクチャーとして、NASA Langley Research Centerでは新しい圧電材料を開発したり、新しい材料を成形したり、それらの特性を評価することが行われている。このように、航空宇宙分野へ適用される新しいデバイスが開発され、このセンターのメインミッションとなっている。その状況は、NASA Langley Research Centerのけるスマート材料プログラムは年々成長しており、インフラストラクチャーも開発を進めている。インフラストラクチャーの現在の焦点は、圧電ポリマーとRAINBOWsの特性を明らかにする開発であるとしている。

さらに、Franco Persiani、Luca Piancastelli及びGian Marco Saggianiらによれば、宇宙構造におけるスマート材料として、最近、インテリジェント材料を用いた振動と形状のコントロールに非常に興味もたれている¹⁰⁾。圧電セラミックスと形状記憶合金のような歪アクチュエータは構造振動のアクティブコントロールや形状コントロールを達成するように幅広く選択される。これらの材料は多機能センサ、アクチュエータ等に統合されている。

このように、宇宙関連としてのスマート材料で有望な材料は、圧電材料と形状記憶合金であり、欧米ではその特性に具体的目標をおいて研究を進めようとしていることが注目される。国内の研究においてもこのような取り組みが必要であろう。

一方、複合材料を宇宙空間で使用する場合の問題点、特に無人での使用における問題点として非破壊検査の難しさがあり、複合材料は金属材料に比べて信頼性の面で劣るため大幅な適用に到っていないという現状がある。この解決手法としてスマート化を図り、欠陥を検出できるようにすれば適用が進展することが予想される。

また、ボーイング社の宇宙関連研究者によれば、宇宙における他の問題点として、衛星の輻射率の劣化が問題として上げられるとのことである。長期間の使用により表面性状が劣化し輻射率が低化すれば、構造の温度が上昇し、変形を生じるとともに最終的には寿命の減少を招くことになる。したがって、輻射率をセンシングし、その低下を感知したら自己修復できるようなスマート化ができればこれらの問題を解決することができる。これらのように、宇宙空間では他の環境と異なり、強度よりも機能上の問題解決が重要となっている。

(参考文献)

- 1)平成5年度宇宙システム用材料に関する技術動向調査報告書, (社)日本機械工業連合会
(財)次世代金属・複合材料研究開発協会(1994), pp. 272-282.
- 2)三浦公亮:「地上の構造・宇宙の構造」, 日本航空学会報, 38, 436, (1990), pp. 221-229.
- 3)M. F. Card: Streamlining for Fuel Economy, Aeronaut, Astronaut., March(1983), p. 68.
- 4)D. L. Edberg, A. S. Bicos: Proceedings of ADPA/AIAA/ASME/SPIE Conf. (1992), pp. 377-382.
- 5)G. E. Lee, F. G. Yuan: Space Exploration Science and Tech. Research ASME (1992), pp.
107-115.
- 6)D. G. Wilson et al: 出典不明
- 7)B. J. Maclean et al: Journal of Intelligent Material Sys. and Struct. 2, Jan. (1991),
pp. 72-84.
- 8)菅原憲明: 第4回超耐環境性先進材料シンポジウム講演集, (1993), pp. 63-72.
- 9)Garnett C. Horner: 第5回適応構造物国際会議, (1994), B-3-4.
- 10)F. Persiani et al: 第5回適応構造物国際会議, (1994), A-3-4.

5. 2. 2 宇宙分野におけるスマートストラクチャ

(1) ニーズ

宇宙分野でのスマートストラクチャの適用については、スペースシャトルに代表される有翼の宇宙往環機では航空機と同様のことが考えられるが、現状では主としてスペースステーション等の宇宙構造物を対象に検討されている。そこで本報では宇宙構造物の特徴、技術課題等を通し宇宙構造物のスマート化の現状について述べる。

まずこれらの宇宙構造物における基本的要求としては以下のような点が挙げられる。

(a) 宇宙構造物の大型化・軽量化

宇宙ステーション計画及び太陽発電衛星構想等の実現のためには、大型宇宙構造物のテクノロジーは不可欠なものである。一方、輸送コストが高いため極限の軽量化が要求される。

(b) 輸送時の高収納性

ロケット等の輸送手段のスペース的な制約より、コンパクトな形態での輸送が可能な高収納性が求められる。

(c) 微小重力環境の維持

宇宙ステーションでのミッションは微小重力環境下での製造・実験等も多くこの環境を維持することが求められる。

(d) 耐宇宙環境性

軌道上で長期間運用されるため、放射線、原子状酸素等の宇宙環境やアプリ、メテオロイドの衝突からの防御について考慮しなければならない。

次に上記の基本的な要求を実現する上での技術的な課題について述べる。

(a) 形態変化（適応構造）

宇宙構造物を軌道上まで運ぶロケット等の輸送系のスペース的な制約により、輸送時はコンパクトに収納でき、軌道上では大型構造物として運用できることが必要になる。このためには伸展・展開等の機能を利用して各フェーズの形態要求に適応できる構造である必要がある。

(b) 構造物の振動制御及び形状制御

宇宙構造物は無重力環境下で運用されるので外力も小さく、前述のように軽量化要求も厳しいので、軽量で大型の構造物となる。このため構造力学的には柔軟構造物となり、真空環境化であるため減衰も小さく、一度振動が生じると長時間持続する。微小重力環境がミッション上非常に重要な場合も多く、この環境を損なわないためには能動的な制振が必要になってくる。能動的な振動制御を行う場合の技術的な課題としては以下の点が挙げられる。

- ・大型宇宙構造物（LSS；Large Space Structure）は地上での展開が困難であり、できたとしても重力の影響を免れ得ないためLSSフルサイズのパラメータを部分的な試験や解析により精度良く推定する必要がある。
- ・LSSは無限次数の分布定数システムであるが、実際の制御系設計では有限の次数で打ち切ることになる。このとき打ち切られた高次モードの影響で生じるスピルオーバー不安定の問題を考慮する必要がある。

また、大型アンテナでは非常に高い鏡面精度が要求されるが、熱変形等による影響を補償するためにアンテナ鏡面の形状制御が必要になってくる。

(c) ソフトドッキング

物資の供給等のために宇宙ステーションと輸送系、或いは宇宙構造物同志のドッキングが必要な場合があるが、ドッキング時の衝撃が大きいと微小重力環境を損なうことになる。宇宙構造物では微小重力環境を利用したミッションが数多く行われることを考慮するとドッキング時の衝撃発生を極力小さくすることが必要になる。

(d) 自己修復機能

宇宙塵や人工的スペースデブリの衝突から宇宙構造物を保護するための防御シールドを設けたり、損傷を受けた場合自己修復する機能を付加することが必要になる。

(2) 研究開発状況

本項では前項で述べた宇宙構造物における技術的課題に対する研究開発状況について記す。

(a) トラス構造

前述のようにLSSは輸送上の制約により軌道上での展開或いは組み立てを前提としたものとなる。このための有効な手段の1つとして展開トラス構造が考えられる。トラス構造の一部の部材長を可変にし、展開や振動及び形状制御を行うVGT（Variable Geometry Truss）などの知的トラスが提案されている¹⁾。これは図5.2.10に示す様な正8面体のトラスを基本要素とするもので、これを複数組み合わせることで全体の構造を構築するものである。2つの基本要素が共有する3本の部材長さを可変とすることにより収納時の畳み込や形状・振動制御を行うことが可能となる。このVGTを宇宙構造物の各部に適用する構想やシミュレーション等のシステム検討が数多くなされている²⁾。代表的な適用構想を図5.2.11に示す。

また、トラス構造の一部に圧電素子、電気粘性流体等を用いて部材の剛性、長さ等を可変にし構造物全体の制振を行う実験的研究もなされている³⁾が、どちらかといえば前述のようなシステム

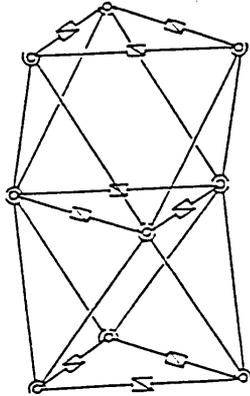
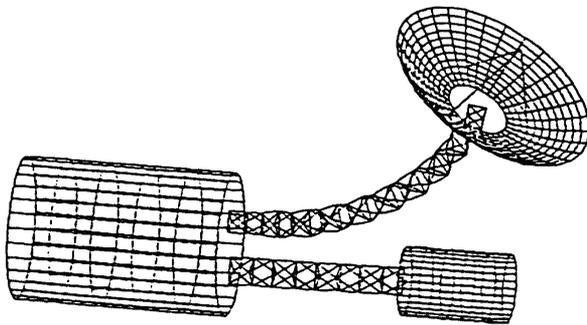
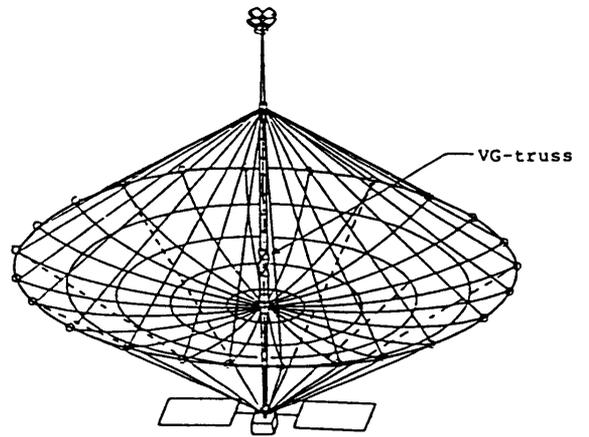


図 5.2.1 0 VGTの概念図¹⁾
 (基本要素を 2 つ結合した状態)



Application to space station.



Application to controllable structural system.

図 5.2.1 1 VGTの適用構想¹⁾

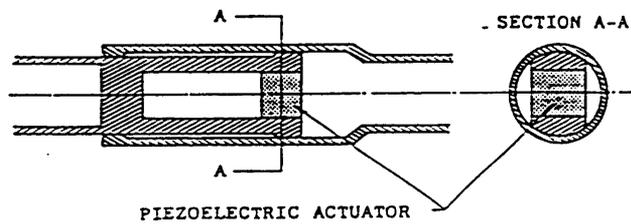


図 5.2.1 2 可変剛性部材の概念図⁵⁾

研究が多く行われているようである。圧電素子を用いた可変剛性部材の概念図を図5.2.12に示す。

宇宙構造物というマクロな観点から見れば、VGT等はスマートストラクチャであるといえるが、上記のように圧電素子や電気粘性流体等の素材を応用し、センサ、アクチュエータ、コントローラの融合という観点からのスマート化も今後の課題の一つであると思われる。

その他、展開・畳み込みに必要なメカニズムの数の低減（信頼性向上）、収納効率向上、展開形状としてパラボラ面等の実現などの観点から種々の展開トラス構造が提案されている^{4) 5)}。

(b) 振動制御及び形状制御

前述のようにLSSの制御において問題となるスピルオーバー不安定が生じない能動制御系の設計法について数多くの方法が研究され、DVFB法（Direct Velocity Feedback Control）⁶⁾、IMSC法（Independent Modal Space Control）⁷⁾、MESS法（Modal Error Sencitivity Suppression）⁸⁾など種々の設計法が提案されている。

形状制御に関する研究例としては、耐荷能力最大等目的に応じ知的トラス構造物を最適適応形態に制御する研究や⁹⁾、知的トラスを用いたスペースクレーン等のロボットアームを最適軌道制御する研究¹⁰⁾等（宇宙構造物は通常多自由度、高冗長系となるのでアームの先端位置を指定しただけでは全体の姿勢は一意的には決まらない）が行われている。シミュレーション例を図5.2.13に示す。

また、LSSの制御を行う上では構造物そのものの特性、センサ/アクチュエータの配置（系の可観測、可制御性にかかわる）等、構造系の設計と干渉するため、制御系/構造系の設計を統合してシステムとしての最適化を図るというコンセプトが注目され最適化手法に関する種々の研究が行われている。¹¹⁾

(c) ソフトドッキング

宇宙構造物とスペースシャトル、或いは宇宙構造物同志のドッキング時の衝撃を知的トラスを用い極力小さくするために、重心位置の移動が起らないよう左右対称にドッキング機構を作動させる等の制御方法の研究がなされている。¹²⁾

(d) 自己修復機能

無人大型宇宙構造物として有望視されているインフレータブル構造（宇宙膨張方式の空気膜構造）では、宇宙塵やスペースデブリの衝突による膜面損傷は重要な問題となる。この問題に対し、衝突確率の高い小径の砂粒程度のものが衝突した場合の対策として、化学変化を利用した自己修復機能に関する研究がなされている。¹³⁾ この機能の概念図を図5.2.14に示す。

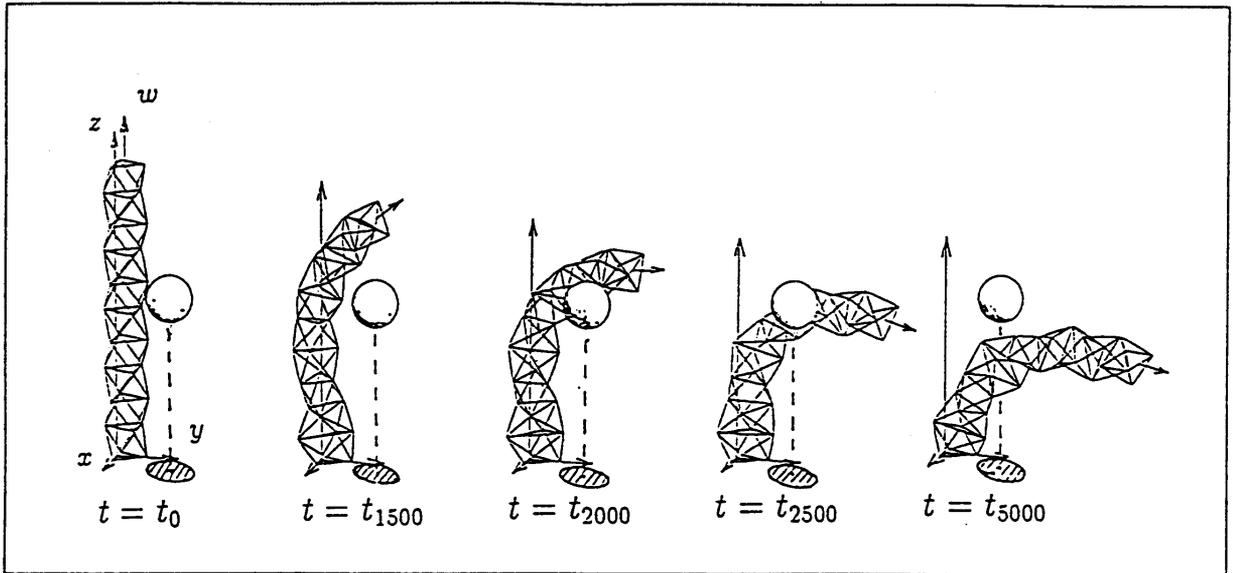


図 5.2.1.3 知的トラス構造物の制御シミュレーション例¹⁰⁾

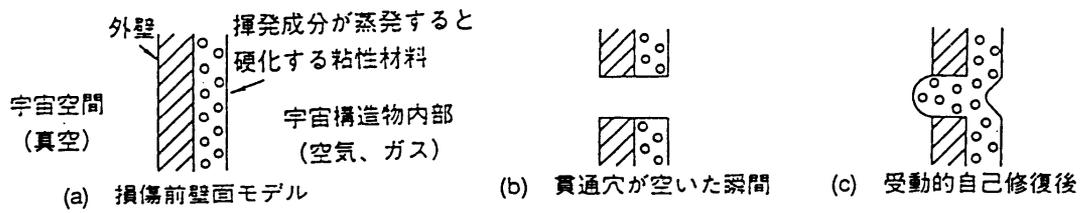


図 5.2.1.4 自己修復構造の概念図¹³⁾

参考文献

- 1) 古谷他：宇宙構造物研究会講演集（1985），pp.9-12
- 2) K. Miura et al：Acta Astronautica.Vol.12, No.7-8, pp.599-607, 1985
- 3) 小野田他：第29回宇宙科学技術連合講演会講演集（1985），pp.240-241
- 4) M. Natori et al：宇宙構造物研究会講演集（1985），pp.19-22
- 5) 小野田他：宇宙構造物シンポジウム講演集（1989），pp.13-17
- 6) Balas. M. J et al：J. Guidance and Control Vol.2, No.3, pp.252-253（1979）
- 7) Meirovich, L. et al：J. Guidance and Control Vol.6, No.4, pp.302-310（1983）
- 8) Sesac, J. R. et al：J. Astronautical Science Vol.xxxvii, No.2（1979）
- 9) 室津他：宇宙構造物研究会講演集（1988），pp.90-96
- 10) 室津他：宇宙構造物シンポジウム（1990），pp.166-172
- 11) 内田他：宇宙構造・材料シンポジウム（1994），pp.120-123
- 12) 松崎雄嗣：NIMC-RIMCOF Joint Forum スマートコンポジットシステム講演論文集（1994），
pp.9-16
- 13) 樋口健：第36回構造強度に関する講演会講演集（1994），pp.209-212

5.3 自動車

5.3.1 応用事例

インテリジェントマテリアル、スマートコンポジットの自動車分野での応用について、ここ20年間の特許について調査を行なった。この材料分野は、まだ非常に新しい分野であり、自動車への応用という条件では、該当するものはない。一般材料という形で枠を広げ抽出されたものに対して、自動車への応用の可能性について検討することとした。

抽出されたものは、7件であり、特徴的な事は、特許公開が全て平成4年以降である。件数及び年代的にも非常に新しいこれからの分野であるといえる。抽出されたものを夫々検討してみる。

①自走性インテリジェント材料¹⁾

微小センサと微小アクチュエータを自己組織的に一体化した能動的に移動を可能な材料を狙ったもので具体的事例としてリボソームを基本に微小センサとアクチュエータを付加した閉鎖小胞を構成しドラッグ・デリバリー・システムを提示している。自動車への応用は難しい。

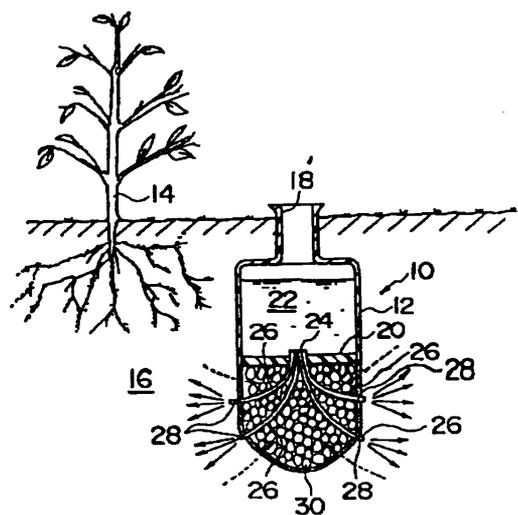
②自己診断機能を有するセラミック材料²⁾

セラミックス材料の母材に粒子が分散され外部負荷を増大すると、破断応力が発生する以前の所定の応力値になったときAE信号を発生し、外部負荷の軽減またはセラミックス部材の交換を警告する。

これは、セラミックス材料の脆性材料である特徴を生かしている。すなわち、セラミックスを応用していることから将来的なガスタービンブレード等へ適用することで軽量高効率化が狙える可能性がある。

③自動給水ポット³⁾

図1に示すような自動給水システムで、30の加硫ゴムが土中の水分量に応じて26の給水パイプの管路を制御し土壌16の水分量に応じて自動的に水分補給を行なうもので自動車へ考え方が応用出来る可能性がある。



10	自動給水ポット	22	貯留部
12	ケーシング	24	孔
14	植物	26	塩化ビニールパイプ
16	土壌	28	貫通孔
18	開口	30	加硫ゴム
20	平板		

図1

④センサバルブユニット⁴⁾

前述の自動給水ポットと同様の考え方をセンサバルブユニット(図2)としてまとめたもので自動車へは、③同様考え方が応用出来る可能性がある。

⑤導電性繊維束含有プラスチック複合材⁵⁾

導電性繊維として炭素繊維束を附加したGFRP材で炭素繊維束の電気抵抗値変化を測定することで歪又は応力状態を検知するもので炭素繊維束の破断歪より若干大きな予歪を与えることで、応力検出感度の向上及び最大応力履歴を把握出来る。これを構造物の内部へ埋設し、内部歪、内部応力を直接的に測ることが出来るとしている。図3に構成図を、又図4に歪と抵抗値変化の特性を示す。これは、自動車の構造部材のヘルスマニタリングを行なう手法として応用出来る可能性が有ると考えられる。

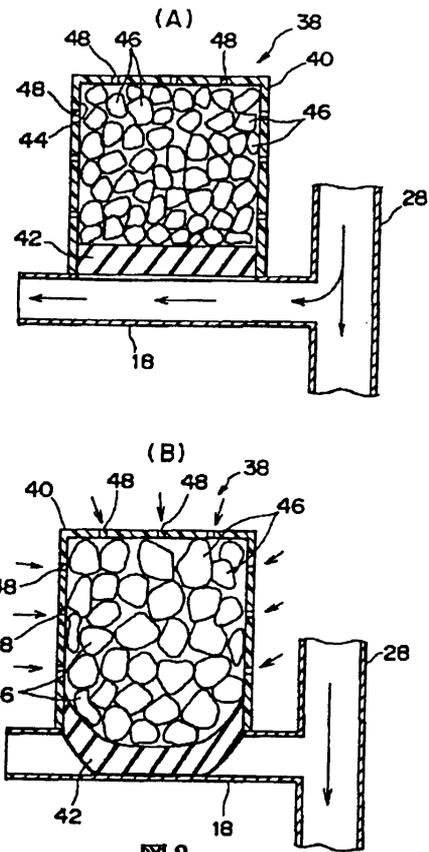


図2

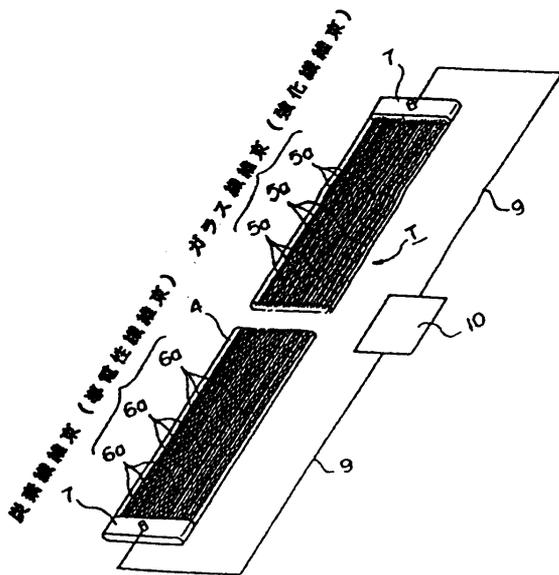


図3

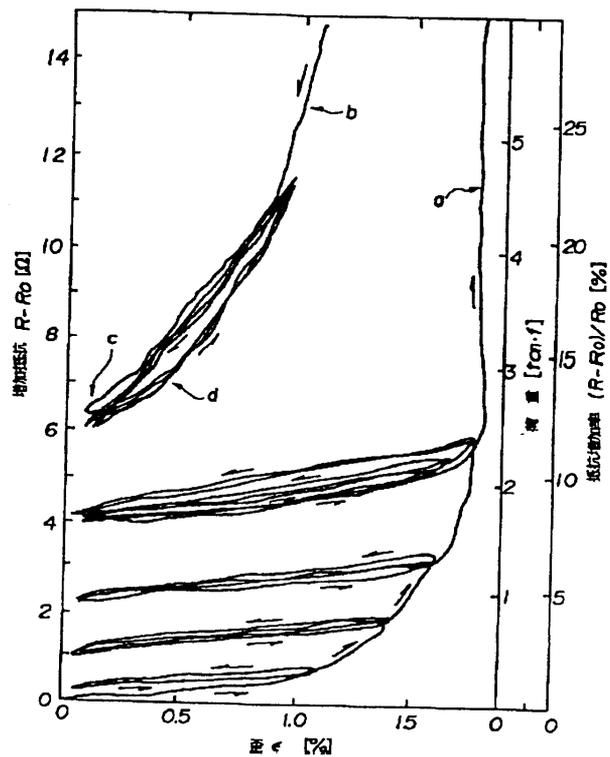


図4

⑥応力検出機能を備えたセラミックス結合部材⁶⁾

図5のようにセラミックス母材の中に力を受けると抵抗変化する又は、電荷を発生する繊維を複合した材料である。例えば、ガスタービンの静止翼、回転翼に適用して、これら翼が破損ないようにタービンの運転条件を制御する為の応力測定に使われる。自動車では、このような手法は、駆動系に内蔵したトルクメータにより限界トルクを超えないようエンジンを制御するといった技術が既に実用化されている。

⑦強度と制振性を高めた金属基複合材料⁷⁾

形状記憶合金材料素子を母材内に混合もしくは配列させた金属基複合材料で形状記憶合金材料素子の逆変態前低温側での変形応力(抵抗)が母材のそれよりも低く、逆に逆変態終了後の高温側での形状記憶回復力と変形応力(抵抗)が母材のそれよりも高い複合材料とすることで、図6に基本プロセスを表わすが、Alマトリックス内部に圧縮応力を発生させ、亀裂の閉鎖、強化作用(図7)、熱膨張コントロール、制振性の向上をさせており、温度上昇に伴う金属材料強度低下を抑制するか、内在亀裂の自己修復といった従来にない特性が提示されている。自動車への応用という面では、熱膨張コントロール及び亀裂修復といった特性を生かした継手といったことが考えられる。

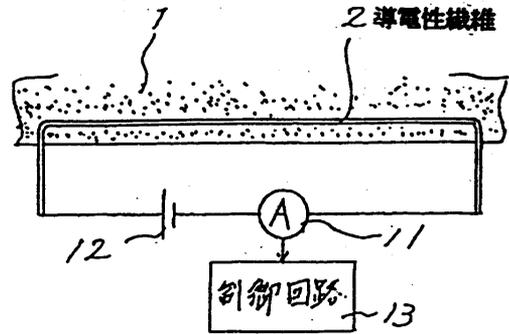


図5

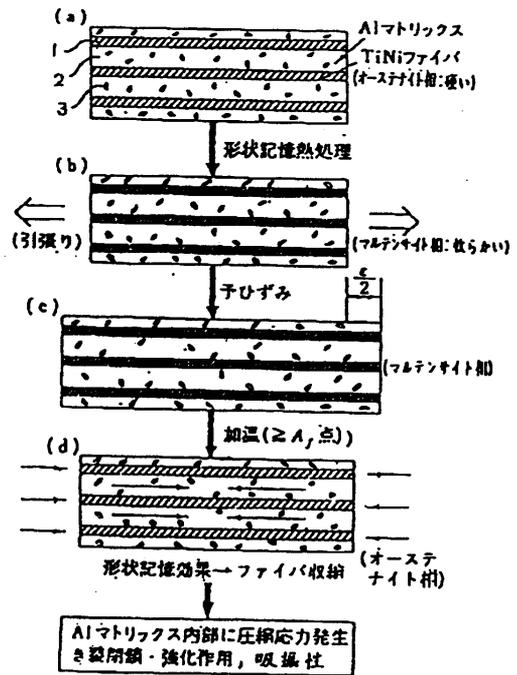


図6

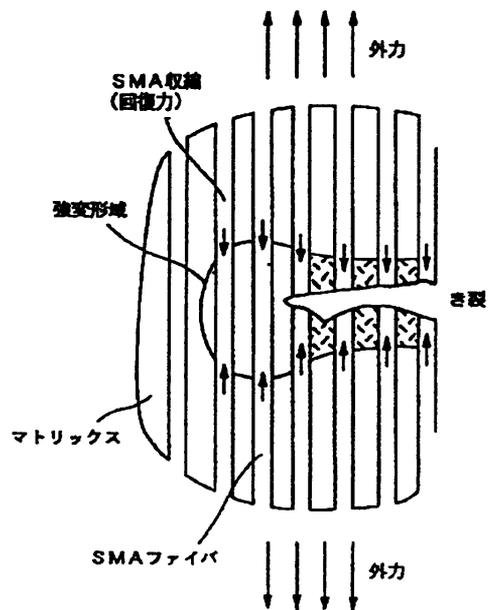


図7

以上が抽出された技術の内容であるが、自動車に直接実用化されたもの、される可能性の高いものは、なかなか見当たらない。今後どのようにシーズとニーズを結び付けてゆくかが重要である。

5.3.2. 期待される応用分野

現在、自動車における応用事例は、殆どなく、今後どのようなところに応用されてゆく可能性があるのかといった点を現在のスマートコンポジットの実態を無視して、基本概念をベースに自動車分野への応用分野について考えてみる。

応用分野の検討については、スマートコンポジットシステムを(1)構造（材料）の健全性を監視する。(2)構造を制御する。(3)構造を利用する（非構造的用途）。の3分野に分けて検討することとした。

(1)構造の健全性を監視する

この機能を活用する対象として、製造プロセスのスマート化、構造のヘルスマニタリングがあげられるが、自動車産業に応用することを検討してみる。

①製造プロセスのスマート化

自動車産業は、基本的に大量生産が基本となっていることから、開発過程で先行して量産生産技術を確立してゆく手法をとる為、航空機産業で考えられている様な応用は考えられない。むしろ開発過程での技術確立の精度及び効率向上の為のツールとして活用することが考えられる。特に今後軽量化等で適用が期待される大型樹脂部品の製造プロセスへの応用など。

他に自動車産業の大きな部分を占める組立工程は、自動化が難しく、又人口の老齢化といったことから大きな課題となってくる領域である。部品の精度向上、大掛かりな設備で対応するとしても限界があり、より効率のよい手法が望まれる。次に述べられる構造を制御する概念をロボット等の装置側へ、又組立てられる部品の組付けポイントに応用し、ラフな位置精度で組合せ、相手側に合わせて自動的にガタを詰めて組立てられるといったような手法が考えられる。

② 構造のヘルスマニタリング

自動車への本方式の応用は、結果的に構造体を使用過程での監視を行なう前提で限界設計し、軽量化効果を得ることになる。

自動車の設計では、安全率を考慮して行なうがヘルスマニタリングを前提に安全率を限界

まで下げる。すなわち約30%位高応力設計することとなるが、実質的な重量軽減は、経験的に約10%位とそれ程効果的ではない。このヘルスマニタリングの応用は、より将来的にリサイクルを促進する為に主要パーツのリユースといった事を展開する時、残存寿命が把握出来る又は、その後の使用過程での損傷評価、交換指示といった技術として活用出来ることから非常に価値の高いものとなると考えられる。

(2) 構造を制御する (能動/順応型スマート構造)

①形状を変化するもの

図8にショックアブソーバーに応用した事例を示す。⁸⁾これは、積層型圧電素子を路面の凹凸の判定のためのセンサと減衰力調整のためのアクチュエータとして使用し、走行条件に応じて減衰力をセルフコントロールするものである。同様の応用対象としては、図9に示すような液封マウントの加振入力に対応してオリフィスコントロールを行ない減衰力を最適化することが考えられる。

又、形状記憶合金をリンク又は、ルーバに用いて高温時は自動的にルーバを開き空冷効果をあげ、低温時は、ルーバを自動的に閉じるといった方式も使われている。

(図9)

②剛性、ダンピング性を変化するもの

自動車部品でダイナミックダンパー機能

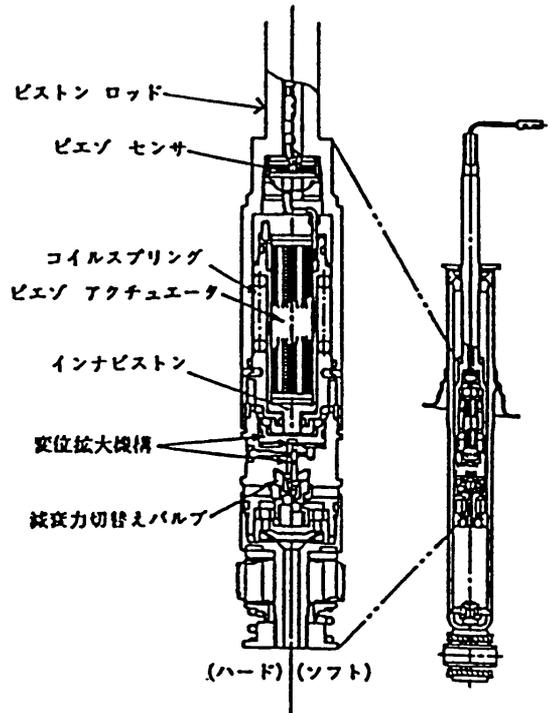


図8

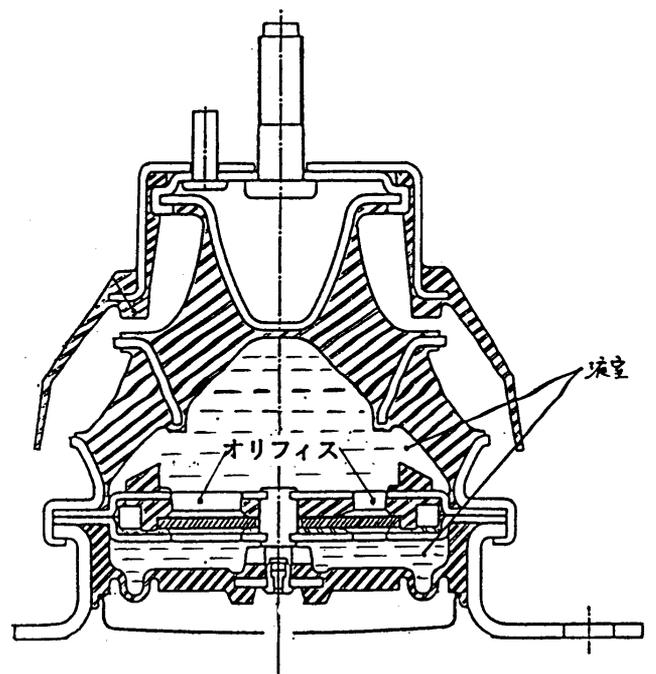


図9

を活用している部品クラクトーションナルダンパー（図10）等がある。これらは、慣性重量とゴム部のダンピング性能で特性が決まる。このダンピング性能を適応制御することで更に性能向上を図れる。（図11）又、最近時、自動車の室内騒音低減に対する要請は大変高くなってきている。それらに対応して騒音に対して位相が反転した音を発生して両者が干渉して消音するアクティブノイズサプレッションといった手法も検討されているがその原理から、効果の高い領域は狭い。

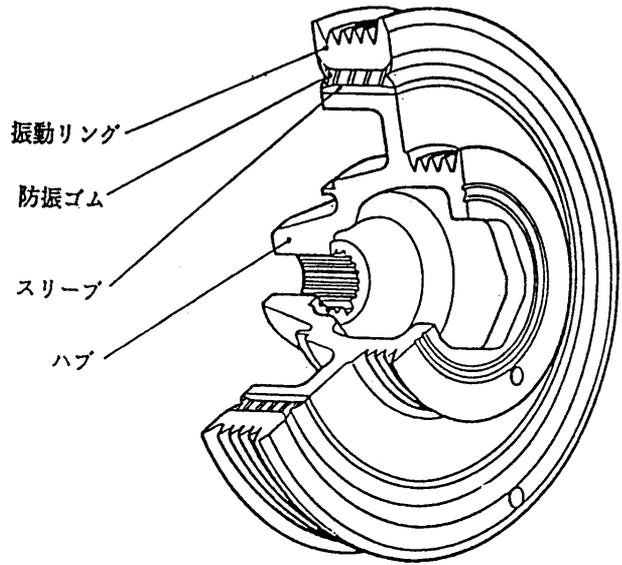


図10

室内騒音の主なものは、エンジンの振動や道路状況からの振動が足廻り部位を経由してボデーに入力されボデーが共振することで発生するが、この振動の伝達経路に積層型圧電素子を介在させ伝達されてくる振動を遮断もしくは、共振周波数をずらすことが考えられる。又、車室を構成する板材が共振して発生するいわゆるコモリ音に対しては、構成する板材にフィルム状又は、条状の圧電性高分子を応用し、共振を検知すると、剛性又はダンピング性をずらすことで共振を回避しコモリ音を低減する手法が考えられる。これは、騒音発生の発生源から

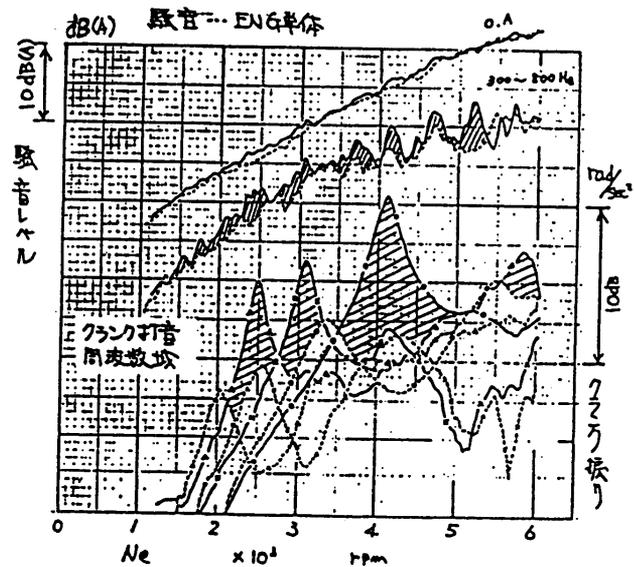


図11

ら対応する有効な方法になると考えられる。次に、エネルギーレベル的に難かしさは有るが、自動車の衝突エネルギー吸収を行なう部材に衝突エネルギーを大きさをセンシングし、そのレベルに応じて最適なエネルギー吸収を行なうよう材料特性を制御するといった手法が可能となると、現在の自動車の基本レイアウトを制約している主要な要素に新しい技術が導入されることとなり、自動車の形態が変化する可能性がある。

(3) 構造を利用する (スマートスキン)

現在航空機等で検討されているスマートスキンの概念は、今後の自動車として必要となってくる双方向通信、カーナビゲーションといったインテリジェントカー化してくる段階では、自動車に対して必要な技術となってくると考えらる。

現在の自動車は、コンピューターによる制御技術の進化により大きく改良されて来たと言っても過言でない。又、更に将来に向かって自動車の種々の制御をより精度の高い状態で行なうようになってくると考えられるが、これはコンピューターの容量の大巾増大、センサ、アクチュエターの洪水ということが予測されるが、スマートコンポジットの概念の機構が更に研究され取り入れられることでより効率の良い自動車が想定される。今後のこの分野の研究に注目してゆきたい。

参考文献

- 1) 大西通博 : 公開特許公報 平4-41420
- 2) 阪井博明他 : " 特開平4-285054
- 3) 佐久間護他 : " 特開平5-115226
- 4) " : " 特開平5-123066
- 5) 柳田博明 : " 特開平6-50830
- 6) 浅山雅弘他 : " 特開平6-287078
- 7) 古屋泰文他 : " 特開平6-264161
- 8) 佐藤宏毅他 : トヨタ技術、第39巻第2号(1990) PP117~125

5.4 鉄道・車両

5.4.1 はじめに

鉄道・車両についてのスマートコンポジットシステムの適用は、現時点では橋等の構造物に対するヘルスマモニタリングが研究されているが、車両本体についてはほとんど研究されていない状況である。ただし、車両の高速化、リニア車両の開発推進に伴い各種技術課題が出てきており、これらの課題の解決策としてスマートコンポジットシステムの適用が考えられる。

また、車両高速化に伴い、車両の軽量化を実現する事が必須となっている。そのため、軽量の航空機構造の技術を採用しようとしているものもある。

以上のような状況を踏まえて、本章では高速車両を中心にして、スマートコンポジットシステムの適用の可能性を、航空機技術との共通点も踏まえて述べる事とする。

5.4.2 研究開発状況

1980年後半に、地震の多いイタリア、アルノー川にかけられた橋の建設中および通常の運用中の応答データ取得を目的として、ヘルスマモニタリングを行った¹⁾。センサーの取り付けは、橋の架設の異なったフェーズで各々のセンサーについて実施した。使用されたセンサーおよびその用途、取付場所を以下に示す。

(1) ロードセル (16点)

荷重分布計測用に、ロードセルをコンクリートの流し込み前の基礎、ベースプレート、土台の真下に設置する。

(2) 埋め込み型歪計 (86点)

コンクリート内部の引張/圧縮応力状態計測用に設置された。設置場所は、橋脚の長さ方向およびブリッジデッキに沿った水平軸方向である。

(3) 埋め込み型温度プローブ (140点)

周囲の温度変化による歪ゲージの温度補正のために設置された。ブリッジデッキおよび橋脚の中のコンクリート壁の内部温度分布を計測する。

(4) 表面歪計（94点）

コンクリート表面上の引張／圧縮応力を計測する。計測は、埋め込み型歪計が設置された場所の表面で実施する。

(5) 2軸傾斜計（6点）

橋脚のベースおよびトップに取り付け、橋脚の回転の絶対量（垂直面に対する傾斜）と相対量（変位）を計測する。

(6) ダイナモメトリック歪みゲージセル（8点）

軸受け上の垂直荷重（通常静的）の測定を行う。

(7) 変位センサー（4点）

ブリッジデッキに取り付け、軸受け変位、結合部の変位および構造要素間の変位を計測する。

これらのヘルスマニタリングは、建設中および2年間の運用を通じて計測された。この計測されたデータは、設計へのフィードバック、設計技術の最適化に使用される。

構造物の諸元

- ・連続ツインボックス構造のコンクリートブリッジデッキ
- ・中央部スパン：210 ft
- ・最大高さ：144 ft
- ・1989年建設

5.4.3 応用の可能性

車両高速化に伴う技術課題を、JR総研では表5.4-1に示すように述べている³⁾。これらの技術課題の中でスマートコンポジットの応用の可能性があるものを以下に述べる。

(1) ヘルスモニタリング

高速走行により、列車通過時の軌道に与える狂い（軌道破壊量）は速度の2乗～4乗に比例して増加する。そのため、軌道の保守点検量増加につながる。また、同様に車両の保守点検量も増加する。これらの保守点検量を減少させるため、ヘルスマニタリングの適用が考えられる。ヘルスマニタリングの方法としては、軌道の歪、変位を直接モニタリングする方法と軌道通過時の列車の応答より軌道破壊量を推定する方法の2つが考えられる。ただし、軌道を直接モニタリングする方法は橋等の安全上問題がある特定の構造物のヘルスマニタリングに使用され、通常は後者の方法が用いられる。

また、高速車両は軽量化の要求および荷重の増大のため、クリティカルな構造設計となり、航空機と同様な車両本体のヘルスマニタリングの適用が考えられる。

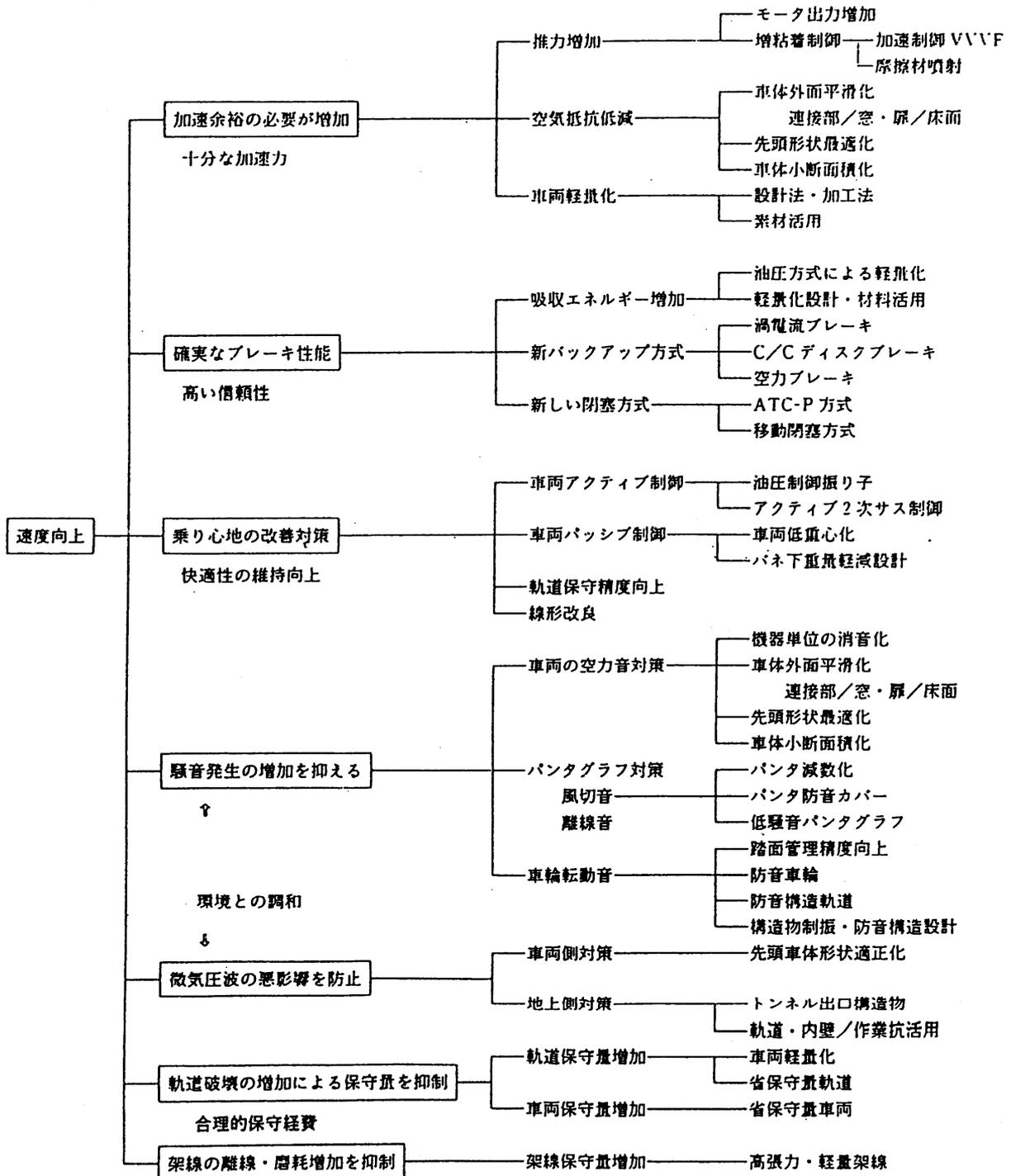
例えば、のぞみ（270Km/h）に続く次世代高速車両では高い安全性、軽量高剛性、低騒音が開発課題であるが特に軽量高剛性に関してはアルミハニカムパネルを用いた車両が期待されている。このハニカムパネルはろう付で組立てられるため、特にろう付部の高信頼性の確保が必要である。このハニカム車両の信頼性確保の一つとして光ファイバや炭素繊維を適用したヘルスマニタリングが考えられる。光ファイバや炭素繊維を図5.4-1に示すように車体の側壁に配置し、歪の増加に伴う電気抵抗の変化を電気信号として検知する。

(2) 騒音対策

鉄道車両の騒音は、レールの振動から放射される転動騒音、コンクリート高架物の振動から放射される構造物騒音、主電動機の回転を車軸に伝える歯車装置から発生するギヤ騒音および車両の各部から発生する空力騒音の4つに大別される⁴⁾。この内転動騒音と構造物騒音は、振動の減衰を付加する事により騒音レベルの低減が可能とな

表5.4-1

高速化へのアプローチ



る。減衰を付加する方法としては、 piezo素子による能動的な方法と形状記憶合金の変態擬弾性効果を利用した受動的な方法の2つが考えられる。ただし、piezo素子による能動的な方法は、レールや構造物のような長大なものに適用する事は現実的ではなく、形状記憶合金による減衰付加方法が実際の応用の可能性が高いものと考えられる。この場合は、形状記憶合金のワイヤをレールや構造物の中に、プリストレスをかけた状態でコンポジット化する。形状記憶合金のワイヤは、図5.4-2に示すように²⁾オーステナイト層からマルテンサイト層に変態する時の変態擬弾性、すなわちヒステリシスループによってエネルギーを吸収する事で減衰を付加する。

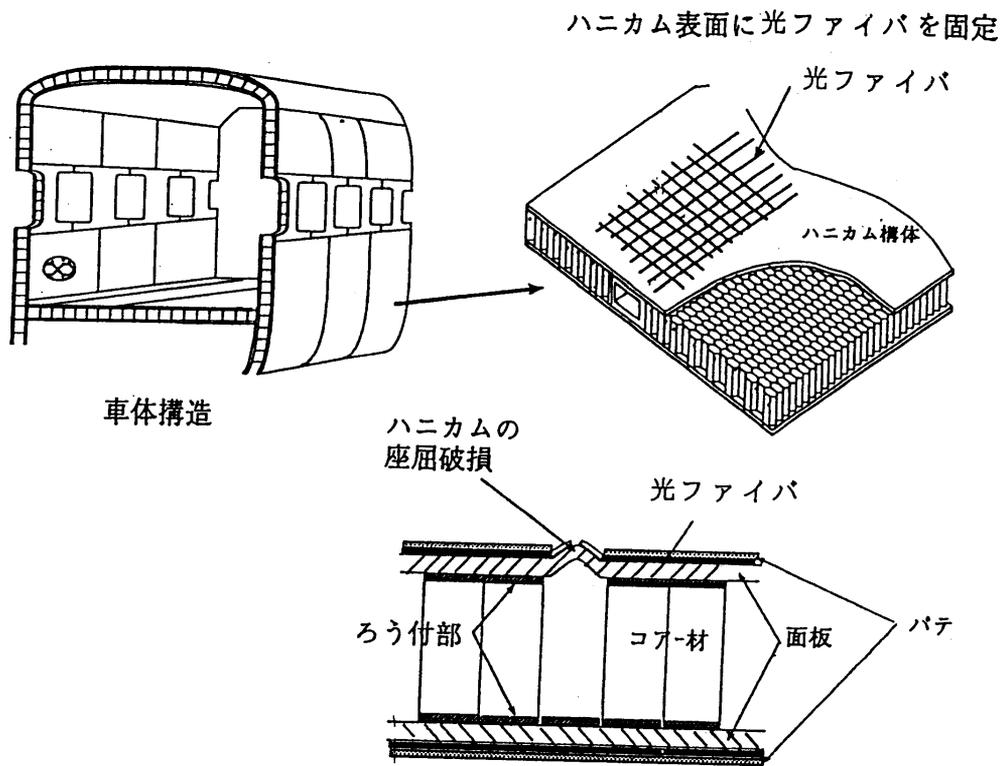


図5.4-1 光ファイバセンサを適用したハニカム車体

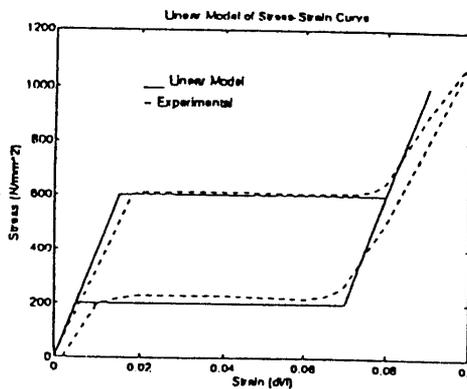


図5.4-2 NiTiワイヤの応力歪線図 (擬弾性)

(3) 乗り心地改善

車両の高速走行に比例して、同じ軌道の精度でも一般に乗り心地に影響を与える車両の振動応答のレベルは増加する。その対策として軌道の精度を向上させる事は、軌道の設置および保守点検コストの面で困難である。そのため、車両側で振動応答のレベルを下げるための対策が要求される。この乗り心地改善に対して、車両側では台車と車体間のサスペンションの減衰率を可変制御するセミアクティブ制御や、サスペンションにアクチュエータを付加して車体の変位、速度、加速度を検知して外乱と逆位相の力を与えるアクティブ制御の2つの方式が検討されている。

スマートコンポジットをセミアクティブ制御に適用する場合は、減衰率の可変制御を可能にするものとして電気粘性流体を内部に封入し、減衰率を可変に制御するセミアクティブダンパが考えられる。また、アクティブ制御に適用する場合は、スマートコンポジットとしてセンサとアクチュエータ機能の両者を持つ必要がある。この内、センサ機能は、ピエゾ素子や光ファイバを利用する事により持たせる事が可能である。アクチュエータ機能については、振動応答の制御を行うため、ピエゾ素子、電歪材料、磁歪材料の利用したアクチュエータが考えられる。ただし、アクチュエータ機能は車体の振動応答を制御するため、比較的大きな荷重が要求される。そのため、大きな荷重を発生できるアクチュエータが必要となる。

また、最後尾車両は車体境界層の剝離点が不安定になり、空力加振により左右方向の乗り心地が悪化する事が知られている。そのため、スマートコンポジットを適用した小舵面を最後尾車両に装備する事により車体境界層を制御し、乗り心地を改善する事が考えられる。

(4) 高速安定性

高速時に自分自身の固有振動に起因する自励振動現象として、航空機ではフラッタがよく知られている。鉄道車両でも、同様な固有振動に起因する自励振動現象として蛇行運動と呼ばれるものがある。この蛇行運動は、フラッタ同様高速になると急激に発散するものであり、高速運転をする事により問題が顕在化してきた。蛇行運動対策として、蛇行運動が発生する臨界速度を上げるために台車剛性やサスペンションのバネ定数、減衰率を調整している。

この高速安定性の改善にスマートコンポジットを適用する可能性としては、サスペ

ンションの減衰率を与えるヨーダンバが考えられる。ヨーダンバの場合も、減衰率を可変にするセミアクティブ方式の適用に、乗り心地改善と同様な電気粘性流体の応用可能性がある。

(5) 磁気浮上列車への適用

磁気浮上列車に使用される超電導磁石内では、各種複合材料が強い変動磁場を受けながら、極低温（液体ヘリウム温度）にさらされている。

また、磁石内の各構成部品はアルミの真空密閉容器の中にあるため、簡単に取りだして検査したり、外部から打撃等で検査できない。

リニア車両のヘルスマモニタリングにあたっては、上記の特殊な環境を考慮した電気信号に頼らない新たなセンサ（例えば光ファイバ）が必要となる。そして、センサを磁石内部にあらかじめ設置し、各部材のひずみ、温度を検知し、場合に応じて磁石内部で自己修復するスマート機能を持たせる必要がある。

図5. 4-3に光ファイバを用いた複合材のひずみ計測の一例を示す。FRP成型時に光ファイバを屈曲させてFRP繊維層の中に埋設する。ファイバは屈曲させられることで光の伝播損失が増加する。この状態で埋め込まれたファイバが、成型後FRP自身の変形で伸ばされることで伝播光量が増加する。あらかじめ、この伝播光量変化とひずみ変化の関係を測定しておくことで、構造物のひずみを知ることができる。特に強変動磁場中にある磁気浮上列車の車体、台車および磁石内部の各種複合材のひずみ計測においては、電気信号を用いないセンサが必要である。

また、図5. 4-4に示すように、FRP内部に格子状に光ファイバを張り巡らしておくことで、何らかの原因でFRPに欠陥が生じた場合に、その位置を検出できる。この方法は長い1本のファイバで複数箇所の欠陥を検出できるため、システムをシンプルに構成できる。

5.4.4 まとめ、今後の課題

本節では、鉄道車両についてスマートコンポジットの応用可能性を中心に述べた。鉄道車両については、明確にスマートコンポジットを意識した研究は少なく、そのため研究が先行している航空機の例を参考にしながら、スマートコンポジットの応用可能性を推定したものがほとんどである。この中で、ヘルスマモニタリング等に必須なセンシング機能は鉄道車両への応用の観点から一番重要度が高いと考えられる。このセンシング機能に対しては、次の課題が考えられる。

(1) 埋め込み技術

構造と一体化するための埋め込み技術およびその時の強度設計手法。

(2) 耐環境性

通常運用時の温度、湿度、衝撃等の耐環境性の対策が必要。

(3) システム技術

軌道および車両へのヘルスマモニタリングを行うセンシングとしてのシステムチェックな方法が必要。また、リアルタイムでの処理方法および過去のデータによる予知手法も考える必要がある。

次に重要な機能としては、乗り心地改善などに必要なアクチュエータ機能である。アクチュエータ機能に関して、今のところは十分な性能を発揮するアクチュエータはまだ見当たらないが、アクチュエータ機能に対しては高変位、高出力、高応答性の3つを満たす事が要求される。今後、具体的な応用を考えながら開発していくステップが必要となってくる。

参考文献

- 1) F. Cianfrone R. Medeot : SPIE VOL 2193 (1994), pp. 347-361
- 2) S. H. Poland et.al : SPIE VOL 2193 (1994), pp. 58-66
- 3) 小田和裕 : 日本航空宇宙学会誌 11 (1994), pp. 639-650
- 4) 森藤良夫 : 日本航空宇宙学会誌 2 (1995), pp. 108-113

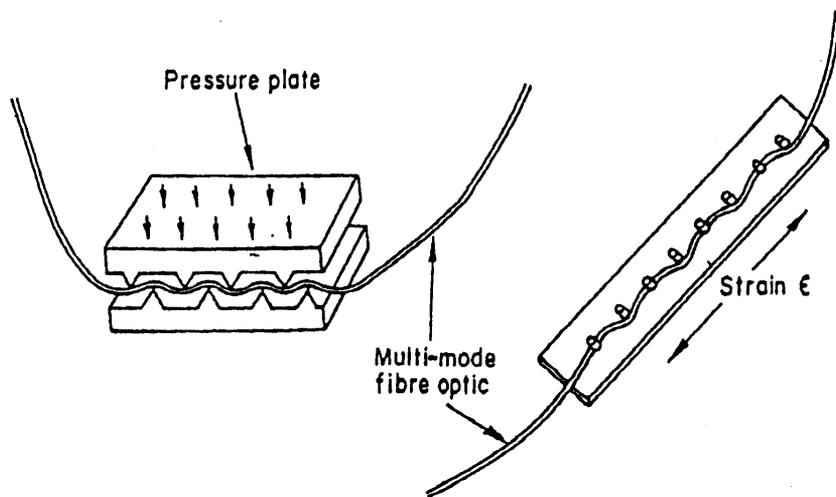


図5.4-3 歪み測定用光ファイバの埋込み例

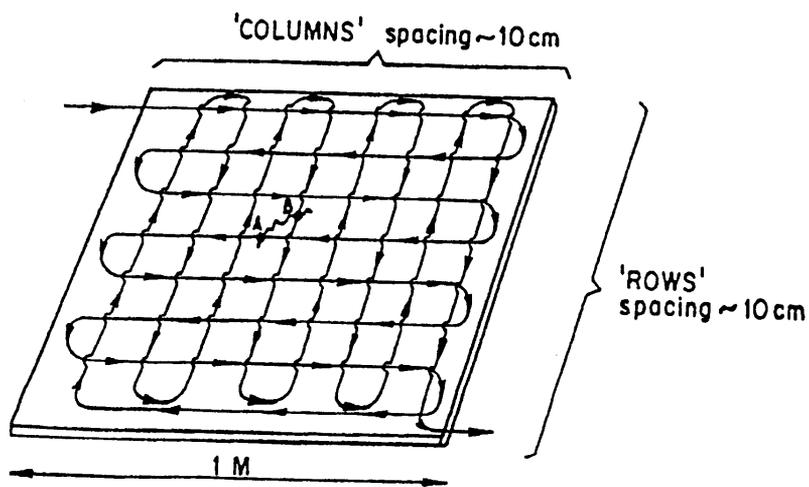


図5.4-4 複数個の欠陥を検出するための光ファイバの配置例

5. 5 建設

5. 5. 1 資材

(1) はじめに

コンクリート構造物の耐久性向上と高い機能性をもたせることを目的として開発された、高強度連続繊維である炭素繊維とガラス繊維とでハイブリッドされたコンクリート補強材が「構造材」であると同時に、優れた「賢材」の機能をもっていることを示し、それを実際にどう適用しているかについていくつかの実例を紹介する。

「インテリジェント材料」は、ほぼ「賢材」と同意語であるが、「賢材」とは知恵をもった構造材料のことであって、材料自身が「もうそろそろ壊れそうだ」とか、「補修してくれないと危険です」といった自分自身の状態を診断し、警報を発することを意味するのである。

一般に生物は、その生命を維持するために、いくつかの機能をもっている。その1つは、自分の置かれた状況を判断する「自己診断」機能がある。その判断をもとに調節する「自己調節」機能、そして、もし生物自身が傷ついたときに治す「自己修復」機能などがある。これらは、生物がもっている基本的なインテリジェントな働きである。

本稿では、筆者らが研究しているコンクリート構造物にインテリジェントな機能をもたせるための研究の概要を中心に、それをどう展開しているかについて報告したい。^{1, 3, 4)}

(2) 技術の概要

コンクリート構造物の耐久性向上を目的として、炭素繊維、アラミド繊維やガラス繊維など高強度連続繊維を用いた繊維強化プラスチック (FRP) によるコンクリート補強用鉄筋の代替材の研究・開発が活発に行なわれている。筆者らも、格子状FRP筋などを開発し、実用化のための研究・開発を進めてきている。

この新補強材の一種に、炭素繊維とガラス繊維とでハイブリッドされた補強材がある。この補強材は、炭素繊維の剛性とガラス繊維の靱性を合わせもつ鉄筋の降伏点に似た応力—歪み関係を示す (図 5. 5—1)。つまり初期の応力—歪みグラフは、剛性の高い炭素繊維の影響でヤング率の高い直線性を示し、伸び限界の小さい炭素繊維が破断すると、剛性は小さいが伸び限界の大きいガラス繊維の材料特性にのっとなってガラス繊維の限界伸びにて破断する挙動を示すのである。

このハイブリッド補強材がインテリジェント機能をもっているといえるのである。それは、炭素繊維は電気を通す性質をもっているから、炭素繊維が破断すると簡単なテスター

で電気抵抗値を計測することにより、「もうそろそろ破断する」と危険予知をすることができるからである。そこで、ハイブリッド補強筋の引張り実験やこの補強筋を用いたコンクリート板の曲げ実験によって、炭素繊維の電気抵抗の変化を調査し、それらのインテリジェンス性について検討を行なった。

(3) CFGFRP補強材の引張り特性

表5. 5-1に、ハイブリッド新補強材を構成する繊維などの材料特性を示す。表中PAN-HSCFはPAN系高強度炭素繊維を、PAN-HMCFはPAN系高弾性炭素繊維を意味する。この表に示した各繊維の限界伸び量の違いに着目してもらいたい。

表5. 5-1に示した3種類の炭素繊維（体積含有率 $V_f=0.3\sim 0.4\%$ ）を用い、ガラス繊維（ $V_f=31.6\%$ ）とのハイブリッド補強材（CFGFRP）の引張り試験片を図5. 5-2に示す。試験片の長さは700mmとし、両端に導電性接着材を用いて電気抵抗測定用端子を接着してある。引張り試験では、両端部を150mmずつチャック部を補強し、インストロン試験機にて1mm/minの速度で加力した。また同時に、CFGFRPに $1\mu A$ の一定電流を通電して電圧変化を測定することによって電気抵抗変化を測定した。なお、加力途中で何度も除荷を繰り返し、そのときの電気抵抗変化を測定した。

引張り試験による新補強材の歪みと電気抵抗増加の関係を図5. 5-3～図5. 5-5に示す。図5. 5-6に、CFGFRP試験体の炭素繊維含有率は前述と同じで、初期の電気抵抗値がそれぞれ、Pitch-HPCF（ $R_0=42\Omega$ ）、PAN-HMCF（ 38Ω ）とPAN-HSCF（ 56Ω ）の歪みと残留電気抵抗値との関係の一例を示す。

これらの実験結果および考察を整理すると次のようなことがいえる。

①歪みの増加に対して、電気抵抗は初期の間は徐々に増加するが、ある歪み以上になると電気抵抗は急激に増加する。変換点Aは炭素繊維の破断点であり、電気抵抗値が無限大を示す点である。しかし、CFGFRP補強材は強度的には最大耐力B点までは耐力を十分保持することが確認された。このことによって、構造材料の電気抵抗の変化を構造材料の破壊予知に適用することが可能であることが確認された。

②急激に電気抵抗値の変化する点Aは、炭素繊維の種類によって異なる。これは各炭素繊維ごとの破断限界伸び率によって異なるのであって、これにより、適当な破断伸び率の炭素繊維を選択することによって、破壊予知の感度を適当に調整することが可能であると言える。

③荷重の作用がなくなっても電気抵抗が残留する。これは、事前にキャリブレーション

として図5. 5-6に示すような特性を把握しておくことによって残留電気抵抗値を計測することにより、その構造材が過去に受けた最大歪み（応力）を測定することが可能となる。

（4）CFGFRP補強コンクリート曲げ特性^{2, 3)}

それでは、このCFGFRP補強材をコンクリート部材の補強筋として用いた場合も同様の挙動が得られるかの確認実験を、コンクリート床板の曲げ実験で行なった。図5. 5-7に、実験に用いた供試体の寸法および加力状況を示す。実験では、荷重と変位の関係のほか、荷重とCFGFRPの電気抵抗の関係を計測した。その結果の一例を図5. 5-8に示す。

これらの結果から、コンクリートにひびわれが発生するまでは電気抵抗値はほとんど変化していないが、ひびわれ発生後は変位に応じて電気抵抗が増加することが確認された。また、除荷すると変位は戻るが電気抵抗値は残留値を示し、先に述べたCFGFRP補強材の引張り試験の挙動と同じく、過去に受けた最大歪み（荷重）を記録していることが確認された。

電気抵抗、歪み、たわみ変形の3測定結果を比較してみると、荷重に対して電気抵抗がもっとも優れた相関関係を示している。

（5）適用例

筆者らが研究中のCFGFRPコンクリート補強材の破壊予知機能について概要を述べてきたが、最初に述べたインテリジェント機能の「自己診断」機能についてのみであり、まだ「自己調節」や「自己修復」の機能をもつところまでには至っていない。しかし、ここで紹介した「賢材」は、

①構造材料自身が破壊センサー機能をもつ、

②構造物が過去に受けた最大歪みを荷重が作用していない状況でも記憶していて、情報として取り出せる、

③計測が「電気抵抗の変化」だけと簡単であり、市販のテスターで計測が可能である。などの特徴をもつ「自己診断」機能をもっているといえよう。

既に、これらの機能を生かしてコンクリート構造物中に設置し、重要建築物の安全性確保と危険予知システムとして実用化を図っているので、以下に2例を紹介する。

①超高層ビルの床に適用した例

シンガポール市内のビジネスの中心というべきラッフルスプレースに、高さ280m、地上66階建ての超高層ビル「リパブリックプラザ」が建設中である。図5. 5-9に完成予

想パースを示す。黒川紀章氏のデザインによる、巨大なカットクリスタルを連想させる壮麗な外観をもつこの建物は、完成後にはシンガポールでもっとも高いビルの1つになる。このビルの特徴は、20階部分と44階部分の2カ所にて外側の柱の一部がしぼられている。図5. 5-10にこの建物の断面図を示す。図5. 5-10からわかるようにこの2カ所の部分にて高層階の建物の重量を外側の柱に分散させようとする狙いがある。

しかし、斜めに下がってきた柱から外側柱に力を伝える部分では、外側に押し出そうとする力の成分（「スラスト力」と呼ぶ）が水平の床、梁部分に作用する。これは、風や地震力によって建物が大きくゆすられるときに大きな力が発生する。このとき床版に大きな引張り力が発生し、ひびわれの発生が予測されるので、この床版にひびわれ発生を障害を予知すべくCFGFRPによるモニタリングを行なうこととした。図5. 5-11に20階平面図と設置したCFGFRPの位置を示す。図5. 5-12に取付けたCFGFRP材の詳細を示す。また、図5. 5-13に20階床版への据付状況を示す。この後、コンクリートを打設してコンクリート床版が完成する。これは、通常のワイヤストレーンゲージでは、長期間の計測が不可能であること、「賢材」の特徴である、構造物が過去に受けた最大歪みを作用力がない状況でも測定できることを活用しようとするものであり、工事中よりずっとモニタリングを行なうことになっている。観測はシンガポール南洋工科大学が担当してくれている。

②セキュリティに適用した例

賢材は破壊予知センサーの機能をもっていることはすでに述べたが、この機能をもっとも有意義に活用できる適用例が次に述べるセキュリティのための適用例である。金庫室や現金引き出し所などの盗難防止と警備のために実用展開した例である。清水建設(株)と東京大学柳田研究室および総合警備保障(株)で共同開発したものである。防犯、警備用に開発したものであるので、性質上詳細については紹介できないのが残念であるが、セキュリティ用構造材料として金庫室や重要建築物の構造体中にCFGFRP補強材を鉄筋と併用または代替材として用いるものである。図5. 5-14に大金庫室の構造壁体にCFGFRP補強筋を配筋したところを示す。図5. 5-15は鉄筋と併用している例でCFGFRP格子状筋「ネフマック」を配筋しているところである。CFGFRPは鉄筋と適切な配置になるように設計されており、単に、セキュリティ用破壊検知・防護ばかりでなく、構造体であるコンクリート耐力壁の補強筋としての機能を果たしているのである。

今回は紙面の都合で2件の適用例について簡単に述べたが、危険性が高く人が接近して

構造物の安全性を確認することが難しい海中構造物や地中構造物、原子力発電格納庫などの構造物の危険予知システムとして、広く建築・土木の分野でのこの賢材の活用が期待される。また、賢材は建設部分野だけにとどまらず、航空機、自動車、鉄道、船舶などの分野にも広く展開適用できるものと考えている。

なお、本文は「機能材料」1995年1月号、「建設分野における賢材の適用例」を修正加筆したものである。

文 献

- 1) 中辻照幸、杉田稔、武藤範雄、柳田博明：インテリジェント構造材料(その1)、CFGFRPの破壊予知機能、日本建築学会大会学術講演梗概集、1992.8
- 2) 武藤範雄、柳田博明、杉田稔：セメント・コンクリート論文集、No.46、pp.790～795、(1992)
- 3) 米丸啓介、関島謙蔵、杉田稔、武藤範雄、柳田博明：インテリジェント構造材料(その2)、CFGFRP筋のひびわれ検知機能、日本建築学会大会学術講演梗概集、1994.9
- 4) 杉田稔：インテリジェント・コンクリート、コンクリート工学、32(7)、1994.7
- 5) 杉田稔：機能材料、15(1)、(1995)、pp.10～16

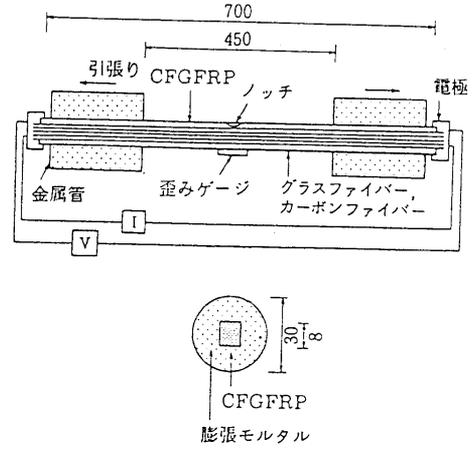
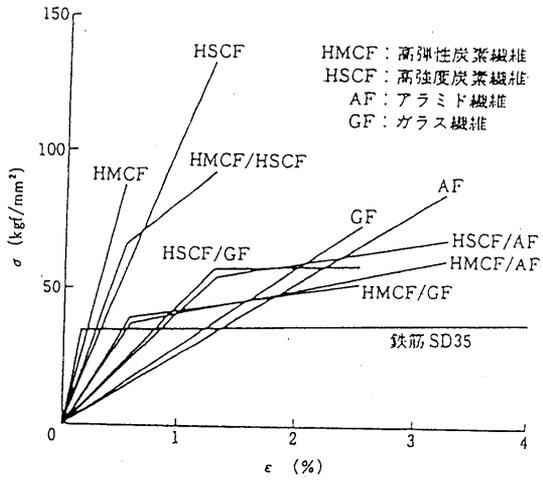


図5. 5-1 新補強材の引張り特性 (応力-歪み関係) 図5. 5-2 CFGFRP補強材試験片

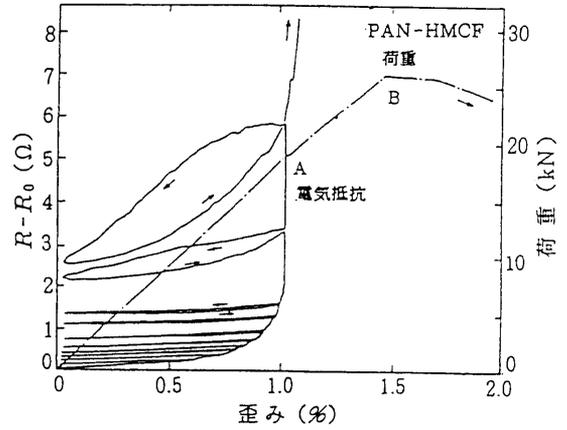
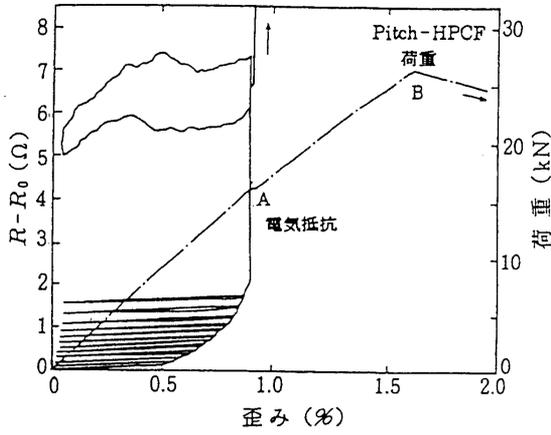


図5. 5-3 Pitch-HPCFの歪みと電気抵抗増加の関係

図5. 5-4 PAN-HMCF

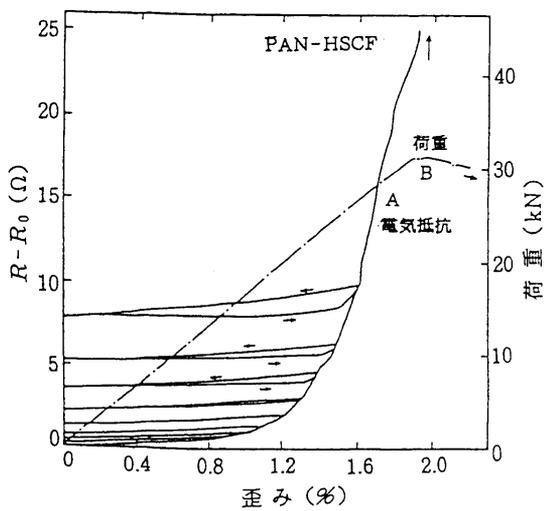


図5. 5-5 PAN-HSCFの歪みと電気抵抗増加の関係

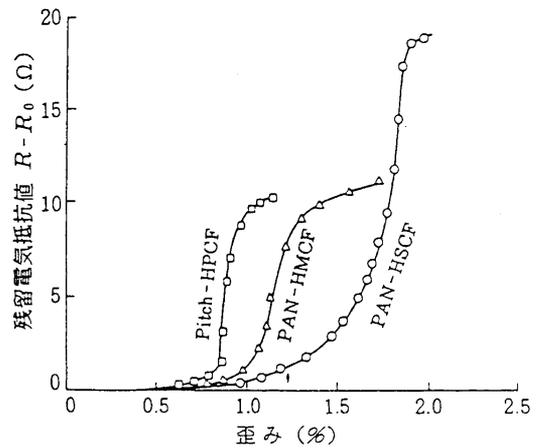


図5. 5-6 各試験体の残留電気抵抗値と歪みの関係

表 5. 5-1 CFGFRP補強材の材料特性

種類	引張り強度 (kgf/mm ²)	ヤング率 (tf/mm ²)	伸び率 (%)	直径 (μm)	繊維束 (本数/束)	電気抵抗 (μΩ/cm)
PAN-HSCF	400	24.0	1.7	7.0	6000	244
PAN-HMCF	300	35.0	1.1	6.7	6000	263
Pitch-HPCF	260	24.5	0.9	10.0	3000	148
ガラス繊維	250	7.4	4.8	16.0	4200	
ビニルエステル	8.3	0.35	5.3			

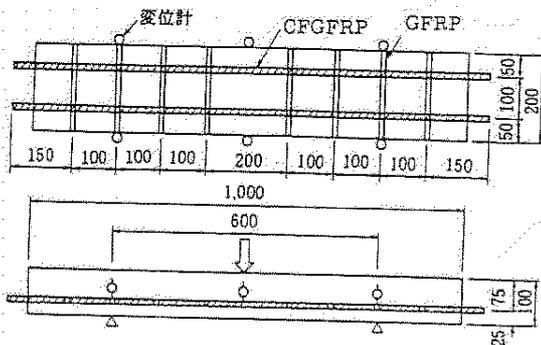


図 5. 5-7 曲げ試験体寸法と加力状況

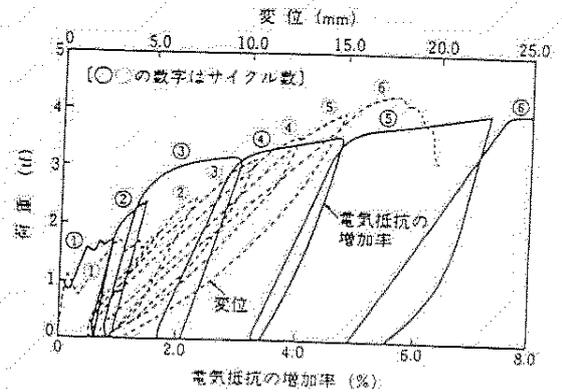


図 5. 5-8 CFGFRP補強コンクリートの曲げ実験結果

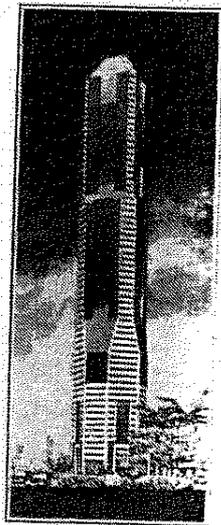


図 5. 5-9 リバブリックプラザ完成予想図

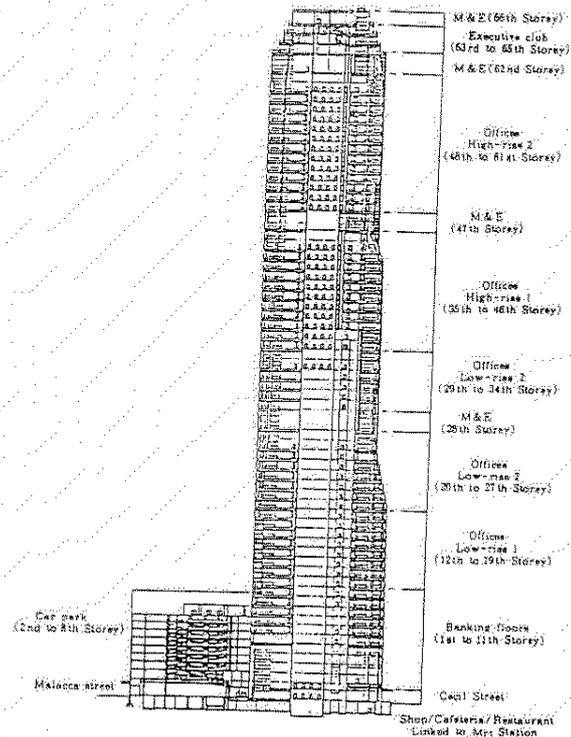


図 5. 5-10 リバブリックプラザ断面図

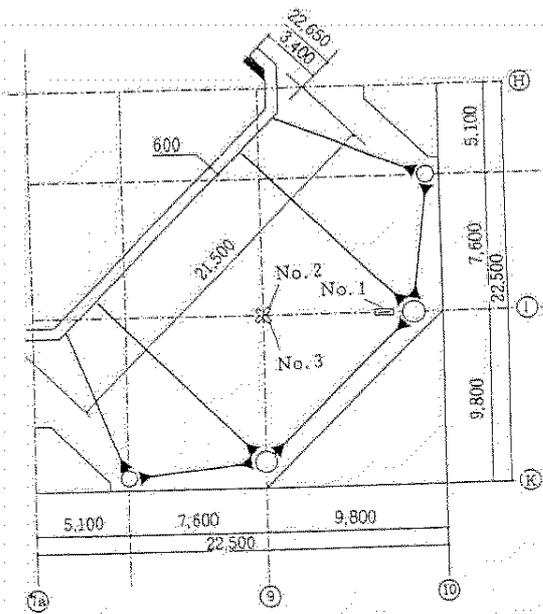


図5.5-11 20階平面図および計測位置

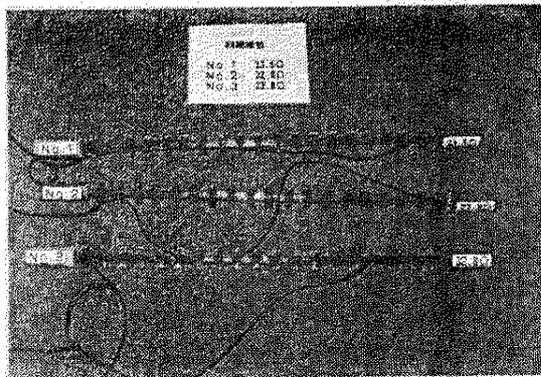


図5.5-12 CFGFRP補強筋

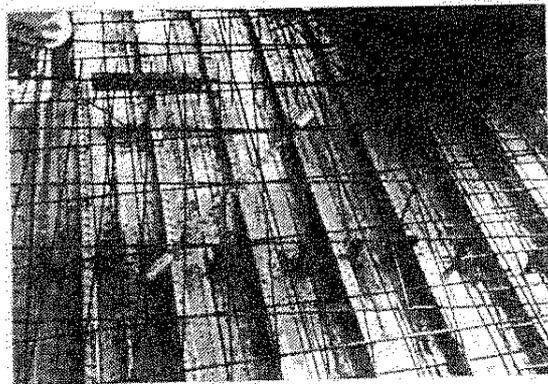


図5.5-13 配置状況

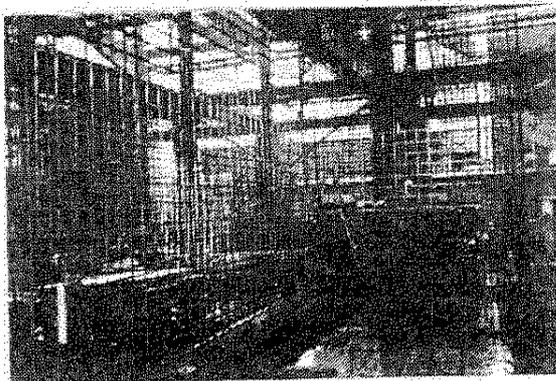


図5.5-14 ネットマック配筋状況

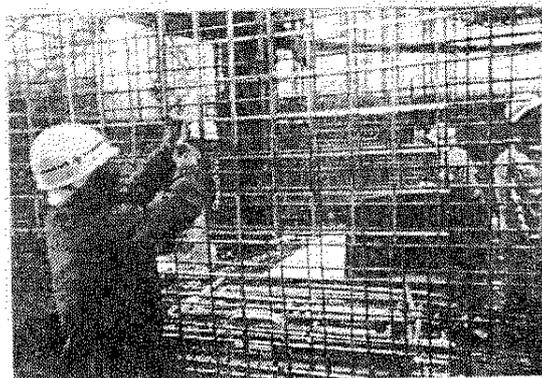


図5.5-15 ネットマック取り付け作業

5. 5. 2 光ファイバセンサ

(1) はじめに

スマートストラクチャの構成要素として光ファイバセンサが注目されて久しい。このセンサは軽量安価で、湿度や電磁気に強く、耐薬品性、耐久性に優れるなどさまざまなすげれた特徴を持つ。しかしながらいままでのセンサに比較して圧倒的に優位な点は母材に埋め込むことが可能であることと、測定原理によっては点ではなく線あるいは面の状態が把握できるいわゆる分布型のセンサを実現できる点にある。以下には建設分野に適用可能な光ファイバセンサの代表的なものについてその原理と応用事例について述べる。また、今後のニーズと課題についても言及する。

(2) 光ファイバセンサの原理

光ファイバセンサには、光ファイバそのものをセンサに用いたものとセンサそのものは基本的に従来型で光ファイバを信号や駆動エネルギーの伝達に利用したものの2種類がある。後者のものにも雑音低減などのメリットがあるが、ここではセンサそのものが光ファイバであるものに限定することとする。

光ファイバそのものがセンサになるものにはさまざまな原理に基づくものがある。光の偏向特性を利用した偏向型、干渉を利用した干渉型、散乱現象を利用した散乱型が主なものである。偏向型は光ファイバのひずみが偏向特性を変化させることを利用するものである。干渉型は基本的に2つあるいはそれ以上の光路を通った光を干渉させてその位相差から必要な物理量を検出するものである。たとえばマッハ・ツェンダー干渉計、マイケルソン干渉計、ファブリ・ペロー干渉計などさまざまなものがある。車のナビゲーションシステムに利用され、建設の分野でも利用されつつある光ファイバジャイロも干渉を利用したセンサの典型である。散乱型にはレーリー散乱、ラマン散乱、ブリリアン散乱を利用したものがある。このうちラマン散乱は温度に、ブリリアン散乱はひずみと温度に依存性がある。温度あるいはひずみの変化に応じて散乱光のスペクトル特性が変化することを利用するため、強度に依存するものよりも定量測定に向くものである。

そのほかに距離を測定する手法として重要なものにOTDR(Optical Time Domain Reflectometry)がある。これは一次元レーダと呼ばれることもあり、反射光の帰ってくる時間から距離を測定するものである。上記の散乱原理に基づくセンサは通常このOTDRの機能も併せて持つものが多い。

(3) 建設分野への適用

光ファイバセンサは「何でもセンサ」と揶揄されることもあるように、どんな物理量でも工夫すれば測定可能であるといっても過言ではない。実際、実験室レベルでは原始的なセンサから極めて高度なセンサまでさまざまなものが検討されている。しかしながら実際の建設現場に近々に適用できるセンサは限られる。ここでは、現在までに建設分野に適用されたセンサあるいは適用に近いセンサについて述べる。

- ・ 偏向を利用した振動センサ

米国のヴァーモント大学でさまざまな建設物のコンクリート構造物に埋め込まれた事例がある。大学の校舎、ダム、橋などに実験的に設置されている。ウィノウスキー川に建設されたダムのケースではタービンの振動、侵入者の検知、ダムの水圧測定、などに用いられている。このセンサはダムの無人運転を目的に設置されたものですでに稼働中で、設置されたセンサからタービンの故障を検知した事例が報告されている。ここでもちいられている振動センサは偏向を利用したものであり、対象とする光ファイバ全体の平均的な応答を評価するものであり、定量的な評価には向かない。しかしながら、定性的な評価で十分なこのダムのような場合には有効なセンサであるといえる。

- ・ファブリ・ペロー干渉計に基づくセンサ

ファブリ・ペロー干渉計の原理に基づくひずみセンサがヴァージニア工科大学で開発され、南カリフォルニア大学においてコンクリートの柱梁接合部の実験模型に埋め込まれて実験が行われている。このセンサは歪の測定精度が非常に高く、しかも繰り返し荷重に対する耐久性が高いため、疲労試験にも適用できる。このセンサはポイント型のセンサで、建設物以外にも航空機、発電所のタービン内部に設置される等の実績がある。また、開発者によれば近々にスペースシャトルに積み込まれその構造特性把握に利用される、とのことである。しかしながら、このセンサは温度の補償が必要であり、また、コンクリート打設時に対しての耐久性に対して課題がある。

- ・光ファイバジャイロ

光ファイバジャイロそのものは既に商品化され、自動車のナビゲーションシステムに利用されているが、建設分野ではシールド機械の位置検出への利用やガス管などの地中埋設管の配置測定への利用が試みられており、最近マスコミに発表された。通常の振動ジャイロに比較して駆動部分がないことにより小型軽量で精度が高く、しかも機械的衝撃に強いため、建設分野に最適である。このセンサは今後ますます利用されていくものと予想される

- ・ラマン散乱を利用した温度センサ

OTDRの機能を使って位置を検出し、ラマン後方散乱のスペクトル特性から温度を測定するものである。距離解像度は現状で1m程度、温度解像度は±1度程度である。建設分野ではダムの温度管理、空調機器の保全管理などへの適用がある。分布型のセンサとして唯一実用レベルにあるものといえる。光ファイバは通信用のものが利用できるため、きわめて安価である。

(4) ニーズと今後の課題

阪神大震災を契機にいろんな意味でのモニタリングが注目されている。それは都市レベルの被害状況把握から水道管の被害箇所検知までさまざまな面に及ぶ。いずれにしても安価で信頼性の高いセンサの実現が前提であり、光ファイバセンサはそうした利用にもっとも近い位置にいるといえよう。光ファイバセンサの特徴を十分踏まえた上で建設分野でのニーズをまとめると以下のようなものとなる。

「コンクリート内部に埋め込み可能で、分布型の情報が瞬時に得られるセンサ。情報としてはひずみ、温度、応力、変位、加速度、速度、変位、角速度などである。」

もちろん現状のセンサを置き換えることによって、耐久性、電磁環境下での利用が可能になるなどの有利さはあるが、光ファイバセンサだからこそ最大限にその特徴を活かすシステム構築が望まれる。

上記のニーズを鑑みた現状の問題点をいくつか列挙する。

- ・分布型のセンサでは距離解像度に応じた平均値を求めることになる。したがって、局所的な情報を得るのは困難である。
- ・多くの建設構造物に適用するためには分布型のセンサは一般的に高価過ぎる。計測システムのコストダウンはもちろんであるが、計測部分は高価であっても全体コストとしては安価である、といったシステム構築上の工夫が必要である。
- ・ブリルアン散乱を利用した分布型のひずみセンサが通信用の光ファイバ保守のために開発されているが、距離解像度、ひずみ解像度共に建設分野に適用するには不十分である。性能向上が望まれる。
- ・光ファイバによってひずみを計測する場合にはその被覆が問題となってファイバ自身に母材のひずみが正確に伝達されない。ひずみを光ファイバに正確に伝達できる光ファイバケーブルの開発が望まれる。
- ・干渉計型および散乱型の両者ともひずみ測定の場合には温度の補償が不可欠である。この補償を確実にを行うメカニズムが必要である。

(5) まとめ

光ファイバは通電の必要がないため、誘爆の問題がなく雷にも強い。耐久性についても十分なものがあり、建設分野での利用範囲は非常に広い。橋、ダム、道路などの老朽化に対するメンテナンスが重要な問題となっている米国では、光ファイバのような先進的なセンサを用いた構造物の健全性診断（ヘルスマニタリング）が重要な研究課題となっている。こうした問題はやや遅れて確実に日本の問題となるものである。ここに述べたような光ファイバセンサが実現されれば、より効率的な公共投資を可能とし、ひいては財政支出削減にも貢献にもつながろう。

(6) 文献

- ・ Eric Udd ed.: Fiber Optic Sensors, Wiley-Interscience Publication, John Wiley & Sons, Inc.(1990).
- ・ P. L. Fuhr, D. R. Huston: SPIE Vol. 1918, Smart Sensing, Processing and Instrumentation (1993), 412-427.
- ・ P. L. Fuhr, R. R. Huston and T. P. Ambrose: Proc. Second European Conf. on Smart Structures and Materials (1994), 148-150
- ・ S. F. Masri, M. S. Agbabian, A. M. Abdel-Ghaffar, M. Higazy, R. O. Claus and M. J. de Vries: J. of Engineering Mechanics Vol. 120, No. 8, ASCE (1994), 1696-1717.
- ・ 堀口常雄, 倉嶋利雄, 立田光廣: 電子情報通信学会 B-1 Vol. J73-B-I No. 2 (1990), 144-152
- ・ 小川勝徳他: 応用物理学会LST (1989), 3-21

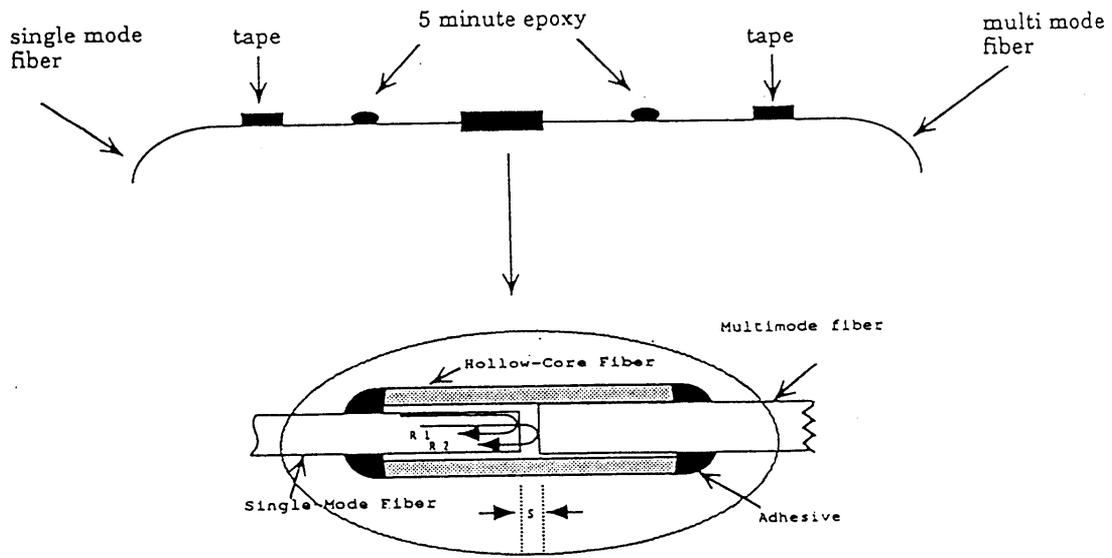


図 5. 5-16 ヴァージニア工科大学で開発されたファブリ・ペローセンサの原理

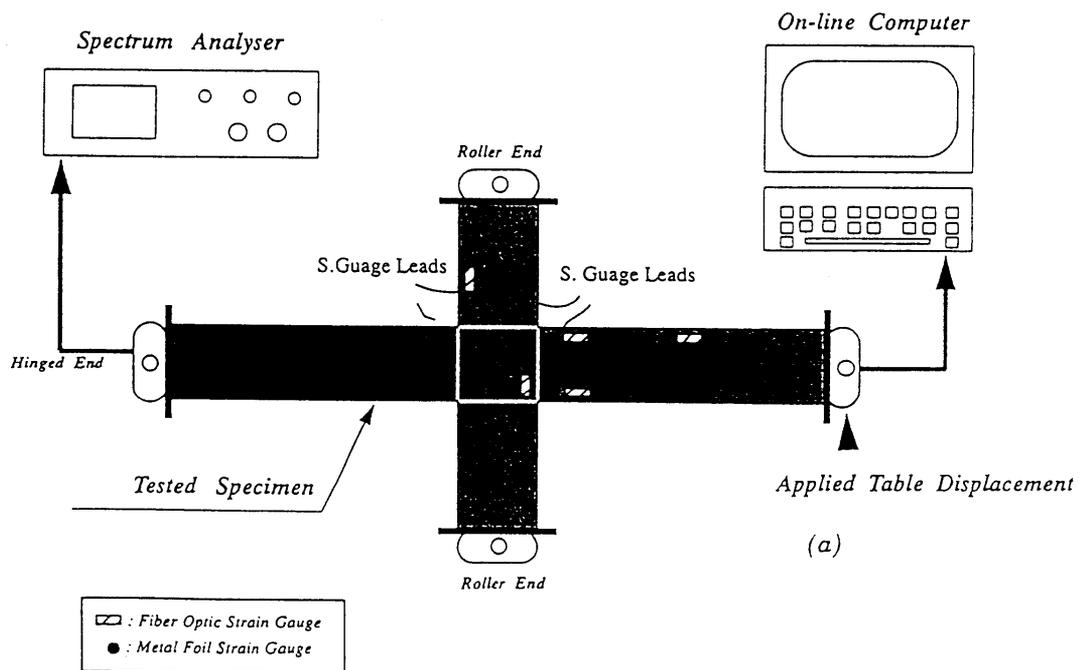


図 5. 5-17 ファブリ・ペローセンサ埋め込み試験の概要

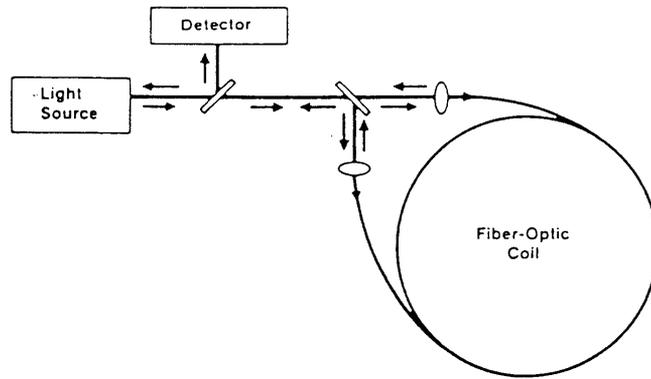


図 5. 5-18 光ファイバジャイロの原理

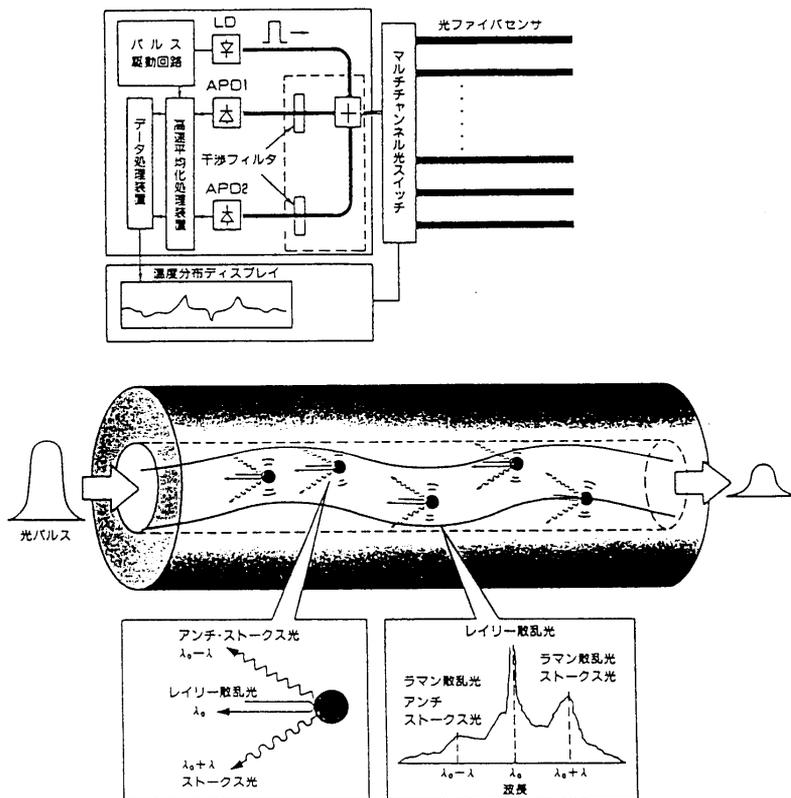


図 5. 5-19 ラマン散乱を利用した温度センサの原理

5.6 発電プラント(火力、原子力、核融合、燃料電池)

5.6.1 はじめに

発電プラントの主力は火力及び原子力発電であり、2010年には発電電力量比率が火力43%、原子力43%、水力12%、その他新エネルギー2%と予想されている。火力発電プラントではCO₂等の地球環境の問題から効率向上が求められており、運転温度が年々上昇している。このため、より高温で使用可能な耐熱材料の開発が必要である。原子力発電では、今後、運転年数が長期にわたる原子力発電プラントが増加することが見込まれ、高経年劣化対策の推進が重要である。また、原子力発電の経済性向上を目的として、ウラン燃料の燃焼度を高める傾向にあり、燃料構造部材の性能(特に耐食性)向上が求められている。放射性物質を内蔵する原子力発電プラントでは、構造部材の信頼性確保に対する要求が他の分野に比べて大きく、その観点から損傷寿命評価、予防保全技術が主要な研究課題となっている。核融合、燃料電池が将来の発電プラントとして重要視されている。核融合では第一炉壁及びダイバータ中性化板の表面を保護する耐熱性アーマ部材接合部の耐熱性向上が必要である。また、燃料電池の中で有望視されている溶融炭酸塩型燃料電池では、より苛酷な環境に耐えられる、高耐食材料の開発が必要である。

以上の通り、発電プラントの将来は材料開発が鍵であり、効率向上と信頼性の向上を目的としたスマートコンポジットの発電プラントへの適用について検討した。

5.6.2 研究状況

発電プラントへのスマートコンポジットの適用例はほとんど見当たらない。ただし、ボイラの蒸気配管の異常検知を目的に、光ファイバセンサを配管保温筒の頂部に取付け、温度測定により蒸気の漏洩箇所の検知と浸水を監視している例が報告されている¹⁾。図5.6-1に蒸気管への光ファイバセンサ取付け状況を示す。高温部での使用が可能であれば、ボイラのみならず発電プラント設備全般の温度監視システムとして広い範囲での適用が期待できる。3、4章で紹介されているスマートコンポジットの中では、光ファイバ、圧電素子、形状記憶合金等を用いたスマートコンポジットの発電プラントへの適用が期待できるので、以下、個別に検討する。

5.6.3 応用の可能性(スマートコンポジットへの要望・期待)

(1) 火力発電プラント

蒸気タービンは効率向上を目的に低圧側の動翼の長翼化が進められている。低圧タービンの最終段の動翼には、主に、翼長33.5インチの12Cr鋼が用いられているが、これを40インチにすると、効率が1.6%向上するため、Ti長翼が開発され一部で実用化されている²⁾。将来はさらに、48インチ長翼が必要となるが、引張り強さが不足する。形状記憶合金複合Ti長翼が可能であれば、運転時に遠心応力がかかった時に内部的に圧縮応力がかかるようにすることで、長翼化が可能になる。形状記憶合金複合Al合金³⁾で仕様が満足できれば、コスト的にはTi長翼より有利になる。

一方、蒸気発電プラントは経年化が進み、運転時間が10万時間を超えるものが半数以

上に達している。そのため、発電プラントの信頼性を確保しつつ、電力の安定供給を図るためには、各機器の経年劣化過程を評価し、余寿命を予測する必要がある。蒸気タービンでは⁴⁾、クリープ損傷は電気抵抗法、硬さ測定法及びレプリカによる組織観察で非破壊で検出されている。また、疲労損傷は微小亀裂をレプリカ法で検出し、損傷度を評価している。脆化に関しては、ピクリン酸で結晶粒界をエッチングし、粒界腐食溝の深さ(粗さ)を計測して評価している。いずれの場合も年一回の定期検査中に実施されるもので、約一ヶ月間のプラント停止を余儀なくされている。そのため、スマートコンポジットによる損傷モニタリングが可能となれば、定期検査周期の延長や期間の短縮が可能であり、その効果は大きい。

そこで、蒸気タービンロータへの適用の可能性について述べる。蒸気タービンロータは30~40tonと大型になるため中心孔は介在物、ボイド等の欠陥が集中するため、直径60mmの中心孔が開けられる。この中心孔には遠心力と熱応力が発生するため損傷が集中し、前述の定期検査時にマイクロ割れ等の損傷程度が検査される。この部分に光ファイバもしくはカーボンファイバ等の歪み又はクラックを検知できるセンサを取付け、材料の表面をスマートコンポジット化できれば、運転中に中心孔のどこに歪みがかかるか、あるいはマイクロクラックが発生したかをモニタリングでき、定期検査の回数の減少、又は全く不要とすることが可能になり、予防保全上大きなインパクトを与える。

ガスタービンは効率向上を目的に運転温度が年々上昇し、現在は1400℃に達している。さらに、10年後には1500℃級ガスタービンが実用化される見通しである。1500℃級ガスタービンでは、蒸気タービンとの複合化により総合効率53%以上が得られることから、火力発電プラントの主要機器として今後の発展が期待されている。1500℃級ガスタービンの成功には、より高温で使える耐熱材料の開発が必須である。主要部品である動翼には、 γ' 相と呼ばれる主に Ni_3Al からなる金属間化合物を微細に分散析出させた、析出強化型のNi基超合金が使われている。この合金の特徴は高温強度が高いことであるが、 γ' 相は高温下に長時間曝されると凝集粗大化し、合金の強度が低下する(図5.6-2)。しかし、この γ' 相の性質を使って余寿命診断が可能である⁵⁶⁾。 γ' 相の粒径は温度と時間の関数として整理できる(図5.6-3)。従って、運転時間は運転記録から既知であるので、 γ' 相の粒径を見れば運転中にその部位がどの程度の温度になっているのかがわかり、同時にその余寿命も推定できる。しかし、この方法は定期点検時のレプリカあるいは破壊検査によるマイクロ組織観察を前提としているため、蒸気タービンの現状の余寿命評価技術と同様に、プラントを一定期間停止させる必要がある。しかし、 γ' 相の粒径変化を何らかの物理量に変換でき、さらにそれをセンシングできるセンサをスマートコンポジット化して埋め込めば、in-situでの動翼の余寿命診断が可能となる。

将来、ガスタービンの運転温度が向上すると、さらに高温強度の高いNi基の単結晶超合金が使用される予定である。しかし、それでも1500℃の高温に耐えるには不十分であり、表面にはセラミックコーティングを施す必要がある。しかし、動翼の内部は空冷、コーティング外表面は1500℃と高温になるため大きな熱応力が発生する。そこで、基材の上に積層圧電材料と傾斜機能材料を用い、熱応力を低くコントロールしたスマートコンポジットの適用が期待できる⁷⁾。図5.6-4に示す材料により熱応力を制御すると、図

5.6-5に示す結果となり、高温ガスタービン用熱応力緩和型セラミックコーティングとして有望である。ただし、現在考えられているガスタービンでは、基材外面は900℃程度になるため、高温域での使用が可能な圧電素子等の開発が必要である。

高温ガスタービン動翼には、前述のとおりNi基超合金を用いているため、内部に冷却孔を設け、動翼を冷却する必要がある。このため、コンプレッサで圧縮した空気の一部を冷却空気として使用するので、効率が低下する。1300℃級ガスタービンの例では、冷却空気量を圧縮空気量の約20%程度と仮定すると、蒸気タービンとの複合発電効率は50%になる。これを10%まで低減できれば、複合発電効率は53%に向上する。さらに、セラミックス動翼が実用化され、無冷却化が可能となれば、複合発電効率は55%以上となる⁸⁾。しかし、セラミックスは脆いという問題があり、実用上大きな障害となっている。そのため、亀裂のセンシング機能を付加することにより、セラミックスの破壊を事前に予測することが有効である。従って、セラミックス動翼の実用化のために、図5.6-6に示すシステムが考えられている。すなわち、セラミックス動翼内部に導電性セラミックス繊維による導電回路を設けておく。この導電性セラミックス繊維はタービン使用温度において安定であり、良好な導電性を示すものとする。もしタービン使用中にクラックが発生した場合、張られていた繊維がクラックによって切断され、回路に通電できなくなる。これを検出することによりクラックの発生を知ることができる。さらに、束状の繊維を用いると、回路の抵抗値の連続的な変化を観察することにより、発生クラックのサイズ、成長過程等を知ることができる。また、応力状態に応じて抵抗値が変化する繊維⁹⁾を用いれば、部材が受けた応力履歴が記録でき、亀裂の発生や破壊を事前に予測することが可能となる。

(2) 原子力発電プラント

中性子、 γ 線、高温高圧水の環境に曝される炉内構造部材の信頼性向上を目的として、ステンレス鋼、高強度Ni基合金、高耐食性ジルコニウム合金の開発が進められている。信頼性確保、予防保全の観点から、これらの性能が向上した新材料についても損傷検出機能、自己修復機能を持つことが重要であり、水質調整技術、運転制御も含む原子炉全体の予防保全技術が望まれる。このためには、in-situで炉内材料の状態をモニタできるセンシング技術が必要であるが、上述した炉内環境下で機能するセンサがないのが現状である。

例えば、シュラウド、上部格子板等炉内構造物の健全性確保の観点から、

- ・ 亀裂発生検知センサ
- ・ 亀裂進展検出モニタ

に対するニーズがある。これらのセンサは構造部材中に光ファイバを格子状に埋め込むことが可能になれば、上記センサ機能を付与できる。また、ファイバ中に亀裂進展抑制剤を封入し、亀裂がファイバを切断したとき、亀裂内部に放出させることで、亀裂進展抑制(自己修復)機能も付与できる。

材料自体がセンシング機能、情報伝達機能、自己修復機能を合わせ持つことが理想であるが、現状におけるスマートコンポジットへの要望(期待)は、炉内環境下で使用可能なセンサ材料である。

原子力プラントへの具体的な適用例を以下に述べる。この例は再循環配管を対象としている。再循環配管にCo60が付着すると、配管からの放射線線量が上昇し、定期検査時に作業員被曝量が増加する。従って、Co60等の放射性核種の付着を検出し、それを抑制する手段が必要とされている。酸化チタン(TiO_2)、酸化ジルコニウム(ZrO_2)等の酸化物は、半導体電極として作用し、光あるいは放射線の照射を受けると電位が変化することが知られている。配管内部にこれらの酸化物を局所的に被覆しておくこと、配管内部に放射性Co60が付着するに従ってその電位が変化(低下)する(図5.6-7)。この電位変化をモニタすることによりCo60の付着状況がわかる。

また、図5.6-7からわかるように、上記酸化物はCo60の付着量が増加し、放射線照射量が増すと電位が低下する。これにより、Co60の付着量をモニタリングできる。さらに、ステンレス鋼の配管表面の全部あるいは部分的にこれら半導体電極材料を被覆することにより、配管材料の電位を低下させる防食作用が期待できる。この結果、Co60の配管への付着は耐食性の向上により抑制される。

さらに、電位変化の信号レベルをモニタリングし、配管内を循環する水(288℃)のpHを制御することで、Coの溶出を抑制することもできる。

(3) 核融合

21世紀中頃の実用化を目指し、現在、国際協力による核融合実験炉(International Tokamak Experimental Reactor:ITER)の開発が進められている。図5.6-8にITERの概念設計段階の本体概略図を示す。ITERでは、核融合実証炉の前段階として、実際に重水素と三重水素の燃料ガスを用い、核融合反応により、燃焼を1000秒以上持続する定常燃焼実験を目指している。そのため、核融合実験炉の炉心プラズマを囲む第一壁及び不純物排気装置であるダイバータ(図5.6-8-(11))の表面を保護する耐熱性アーマ部には、定常運転時でも、数十 MW/m^2 の熱流束負荷が100～1000秒間持続して加えられる。そのため、これら耐熱性アーマ材は多数の10～100mm角のタイル状に分割され、水冷銅基板に冶金的に接合された形で使用される。冶金的接合部の健全性をモニタするために何らかのセンサが必要であるが、現状では実用化されていない。一部、原研JT-60Uにおいて、ダイバータ部のタイルなどに熱電対が埋め込まれている例があるが、この目的はタイルに流入する熱流束の評価用である。なお、全ての接合部をモニタリングするためには、極めて多数のセンサが必要となり、この点の工夫も必要である。

(4) 燃料電池

600～700℃で作動する溶融炭酸塩型燃料電池(MCFC)は、金属とセラミックスによって構成されている。この電池において、カソード電極(NiO)が溶出し H_2 で還元され、Niとして電解質板(セラミック： $\text{LiAlO}_2+\text{Al}_2\text{O}_3$)中に析出する現象がある。このNi析出が端絡電流通路となり急激な性能低下を引き起こすため問題となっている。一方、このNi析出は電解質板に生じた亀裂部付近で多い。これは、亀裂部ほどガス(H_2)の侵入が容易であるためである。電解質板に亀裂が生じても口が開かなければNi析出を抑制できると考えられる。そこで、電解質板に予め、使用温度で面内に圧縮応力が生じるように材料を複合化することで、亀裂の開口を抑制できれば長寿命化につながる。なお、この複合材は溶融炭酸塩に対して安定なことが要求される。

5.6.4 まとめ、今後の課題

発電プラントへのスマートコンポジットの適用に関してはほとんど例が無く、本章では適用の可能性とスマートコンポジットへの要望を中心に述べた。発電プラントでは使用環境が高温、高放射能、高腐食等、材料に要求される特性が厳しいため、第一段階としてはセンサによるモニタリングの実現性が高いであろう。今後の課題としては次のことが挙げられる。

- (1) 高温化への対応。
- (2) 構造と一体化のための製造技術。
- (3) アクチュエータによる自己修復への展開
- (4) システム化への構想と要求技術抽出。

以上、実現の可能性と新しいシステムに対するインパクトが期待できれば、まずは試みて見る必要がある。

参考文献

- 1) 川神 裕志：機械の研究, 45, 10 (1993), pp. 1193-1197.
- 2) 石木 芳徳 他：日立評論, 69, 10 (1987), pp. 925-932.
- 3) 古屋 泰文：機械の研究, 44, 10 (1992), pp. 1090-1096.
- 4) 村田 肇ら：火力原子力発電, 40, 10 (1989), pp. 1170-1203.
- 5) 土井 裕之ら：CAMP-ISIJ, 5 (1992), p. 967.
- 6) 岡部 永年ら：日本ガスタービン学会誌, 22, 85 (1994), pp. 63- 68.
- 7) 谷 順三：機械の研究, 45, 9 (1993), pp. 987-991.
- 8) 青木 素直：日本ガスタービンセミナー第19回資料集 (1991), pp. 69-78.
- 9) 武藤 範雄ら：日本セラミックス協会1994年会講演予稿 (1994), pp. 661-662.
- 10) 磯尾 裕幸 他：第41回防食討論会予稿集 (1994), pp. 489-492

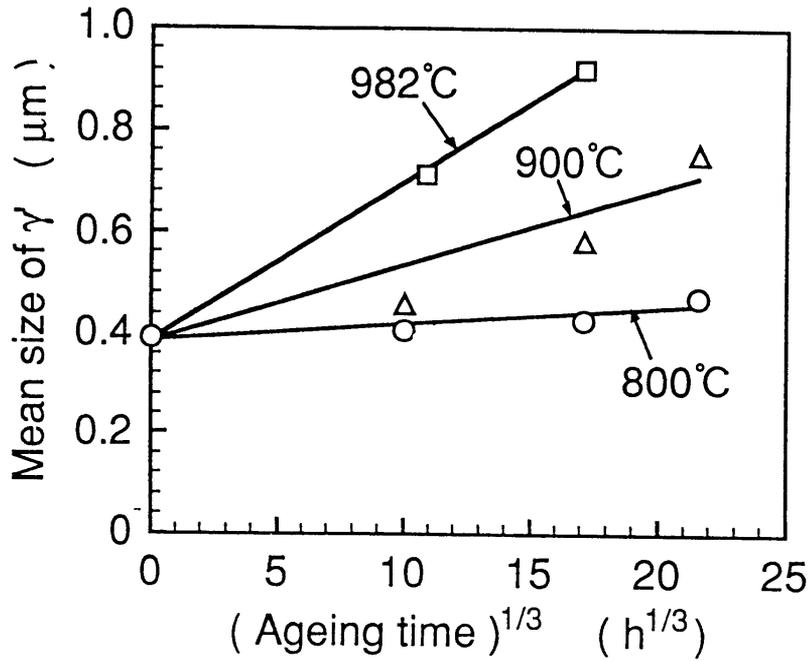
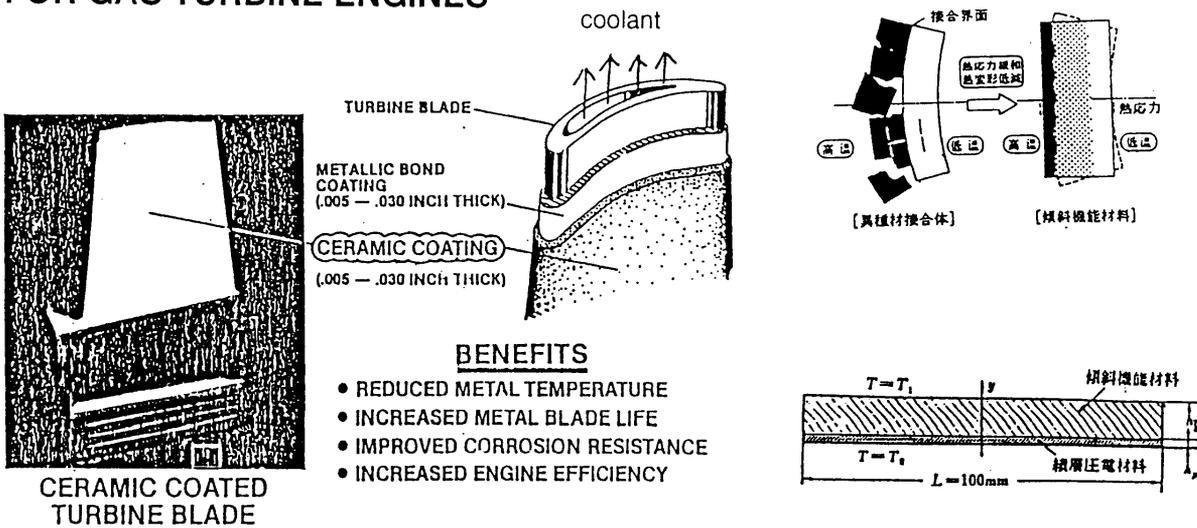


図5.6-3 γ' 相の平均粒径に及ぼす時効時間の影響⁵⁾

CERAMIC THERMAL BARRIER COATINGS FOR GAS TURBINE ENGINES



(a) 熱遮蔽セラミックコーティングの概略

図5.6-4 知的傾斜機能熱応力緩和型セラミックコーティング⁷⁾

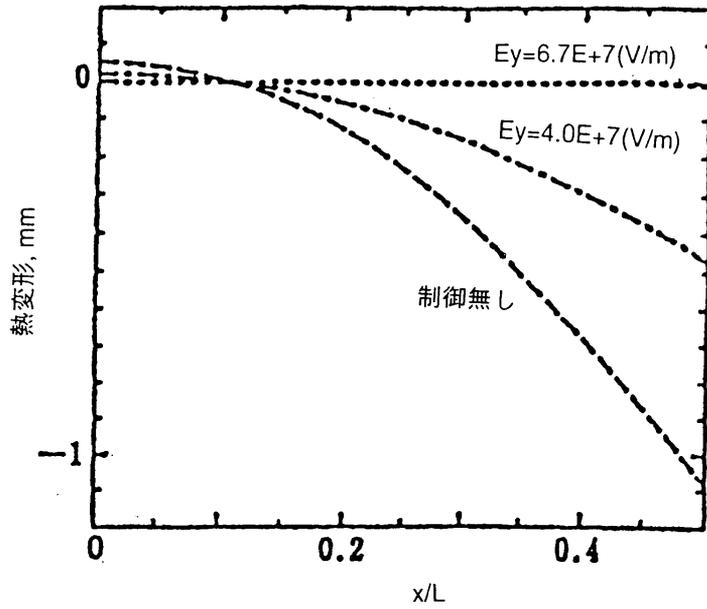
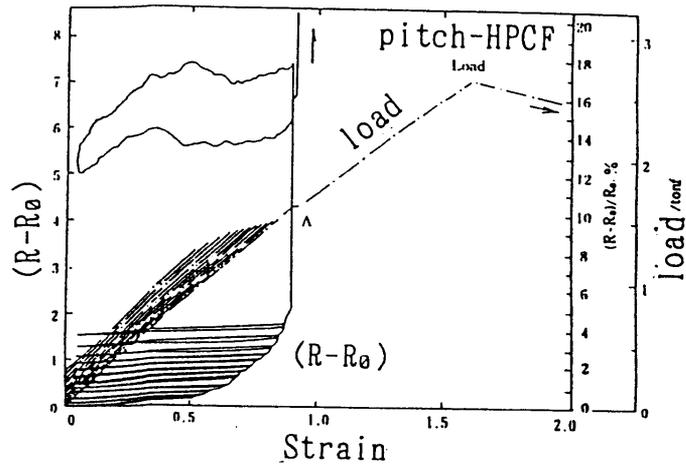
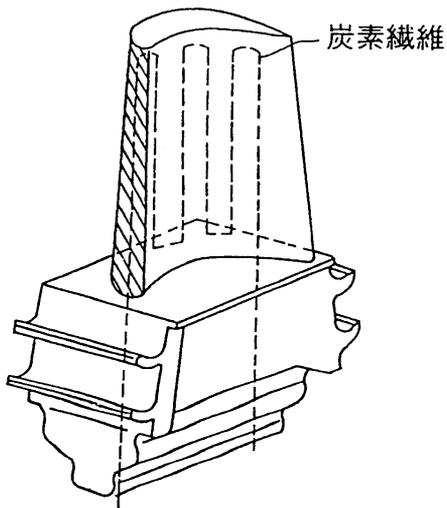


図5.6-5 圧電素子制御前後の熱変形⁷⁾



(b) 炭素繊維-ガラス繊維強化プラスチックの
応力-抵抗特性⁹⁾

(a) セラミックス動翼概念図

図5.6-6 導電性セラミックス繊維内蔵セラミックス動翼

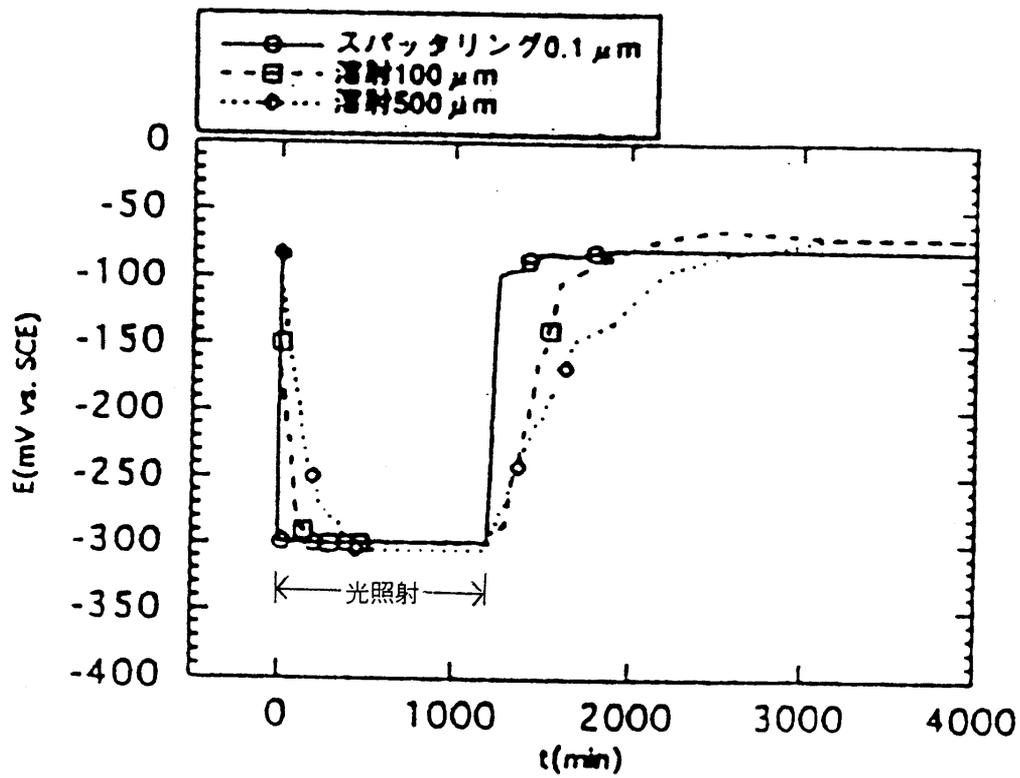


図5.6-7 TiO₂を被覆したSUS304鋼の電位変化¹⁰⁾

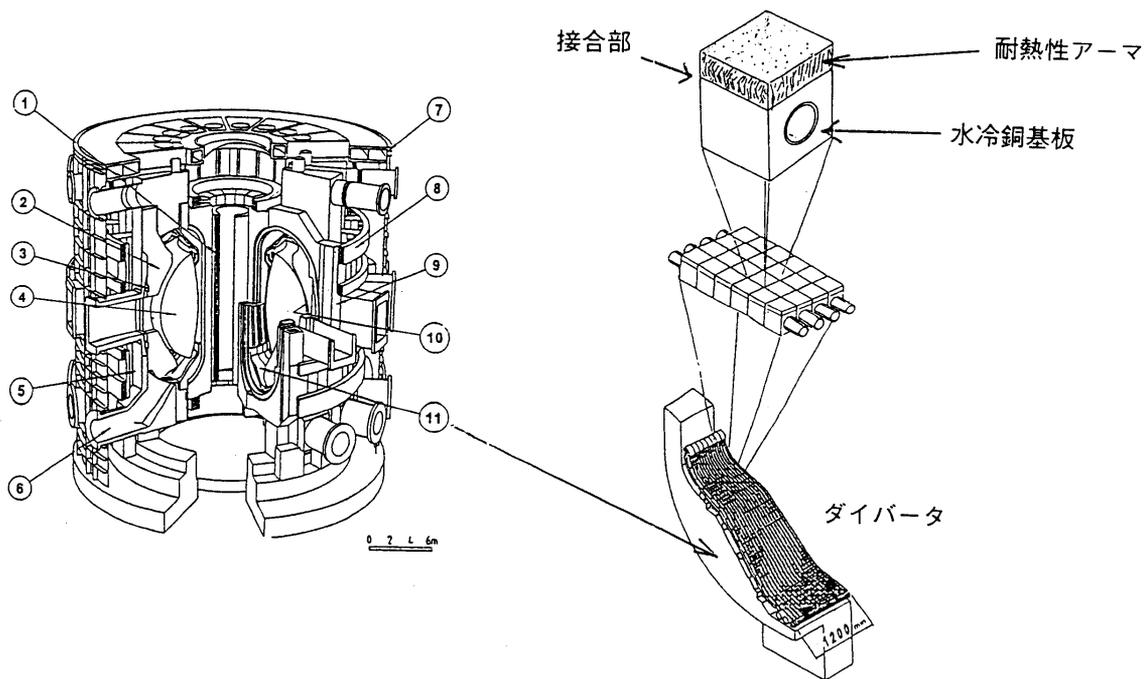


図5.6-8 ITERの本体概略図

5. 7 スマートマニファクチャリング

5. 7. 1 スマートマニファクチャリングに対するニーズと期待される成果

先進複合材料を最も多用する航空機製造の分野では、これまでその成形硬化はあらかじめ設定された製造部品ごとに一定の温度・圧力・真空のキュアサイクルで実施されており、その成形品質は部品と同時に処理される小型の工程管理試験片を試験することで保証するシステムをとってきた。これは、通常成形硬化の設備となるオートクレーブが、中を覗くことができないブラックボックスと考えられてきたことによる。このため、原材料であるプリプレグの品質ばらつきや保管履歴、さらには作業環境といった変動因子の影響による製品品質のばらつき・歩留まりの悪化はある程度避けられなかったし、もっと本質的には、複雑厚肉部品（熱容量大）とその脇に置かれた小さな工程管理試験片（熱容量小）が同じ品質であるかという点で、問題があった。

そこで、

①成形中の樹脂の状況等をリアルタイムでモニタし、得られた情報で成形条件の適正化操作をしたい （キュアモニタリング）

②適正化操作を高度に自動化したい （オートクレーブ・エキスパートシステム）

というニーズが高まり、最近の複合材料のスマート化研究は製品そのものに限定されず、製造プロセスに関するものに拡張されてきた。すなわち、スマート化のために硬化前に埋め込まれるセンサや、場合によっては成形硬化専用のスペシャルセンサを用いて上記のような製造プロセスのスマート化までやっってしまうということである。これによって、ポイド量の減少や余剰樹脂の除去による成形品質の向上・均一化とともに、成形体の初期強度（特に面外強度、たとえば層間剪断強度）の高いレベルでの保証が期待できる。

一方で、スマートマニファクチャリングを意識するしないに関わらず、従来からオートクレーブ成形法の代替をねらいに、

③成形に新しいエネルギーを使いたい。 （新エネルギー成形法）

というニーズが存在しており、その実現によって成形コスト・成形時間の低減および制御に対する追従性等をが期待されている。これらはより高い目標の達成に向かって今後スマート化に向かうことが確実と考えられ、その意味ではスマートマニファクチャリングに対するニーズの一部と考えることができる。

5. 7. 2 キュアモニタリングおよびオートクレーブエキスパートシステム

通常、キュアモニタリングに用いられるセンサには①誘電特性センサ、②超音波センサ、③光ファイバセンサ、があり、誘電特性センサと超音波センサはかなり実用化されつつある。一方光ファイバセンサはいまだ基礎研究段階にあるが、部品完成後にはそのままスマートコンポジットを構成できる^{1) 2)}ことから、実用化が期待されている。

誘電特性センサは、わが国でも次世代産業基盤研究開発制度で研究されたことがあり、樹脂の誘電率が硬化程度で変化することを利用している。図5. 7-1にその一例³⁾を示すが、供試体に張り付けた平面電極型センサで測定した静電容量Cと誘電損失係数Dで計算される

$$Y_x = k / (C + C_0) \cdot (D + D_0) \quad k, C_0, D_0 \text{ は実験定数}$$

と、実測した樹脂粘度にはよい相関があることを示している。

超音波センサによる研究例としては、超音波トランスデューサを成形治具にとりつけて樹脂の剛性変化を測定したのがあり、超音波による剛性データとDSC（示差走査熱量計）による硬化程度データがよく一致したとしている。⁴⁾

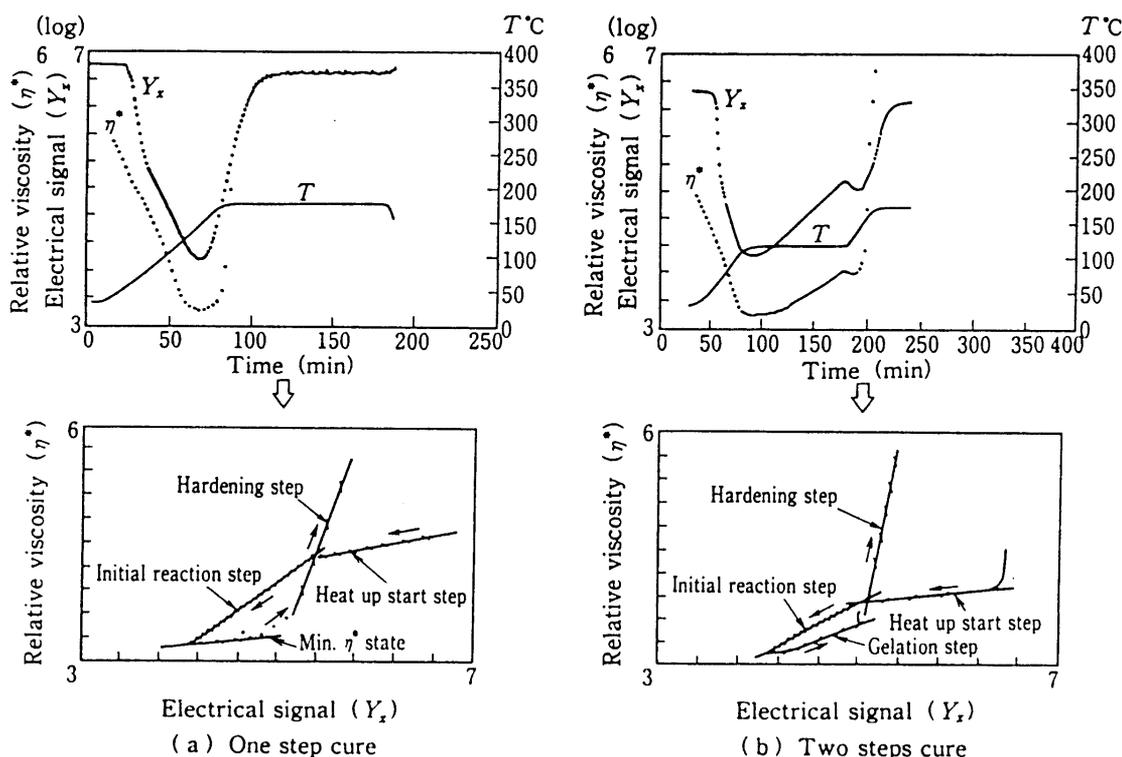


図5. 7-1 誘電特性データと樹脂粘度の相関

現在研究されている、光ファイバによるキュアモニタリングには、

- a. 赤外吸収スペクトロメータに接続して官能基量を検知し、硬化度を検出するもの^{5) 6)}
- b. レーザ反射指数が樹脂硬化にともなって変化するのを検出するもの⁷⁾
- c. 硬化に伴う、内部ひずみの変化による光ファイバの偏光度変化を検出するもの⁸⁾
- d. 硬化に伴う、一定ギャップを設けた光ファイバ間の透過率変化を検出するもの²⁾

等がある。図5. 7-2に上記a. のシステム例⁵⁾を示す。この例では感度の向上が課題であるとのことである。図5. 7-3には、d. の計測例として、硬化中のキセノン光透過度変化を示すが、樹脂流れやボイドが発生する時期には透過度が独特の挙動を示している²⁾

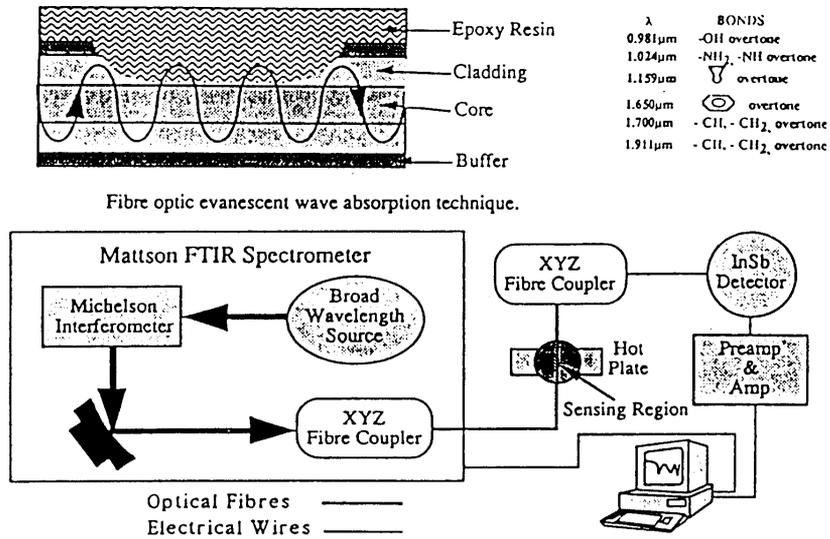


図5. 7-2 光ファイバセンサを用いた赤外吸収スペクトロメータシステム

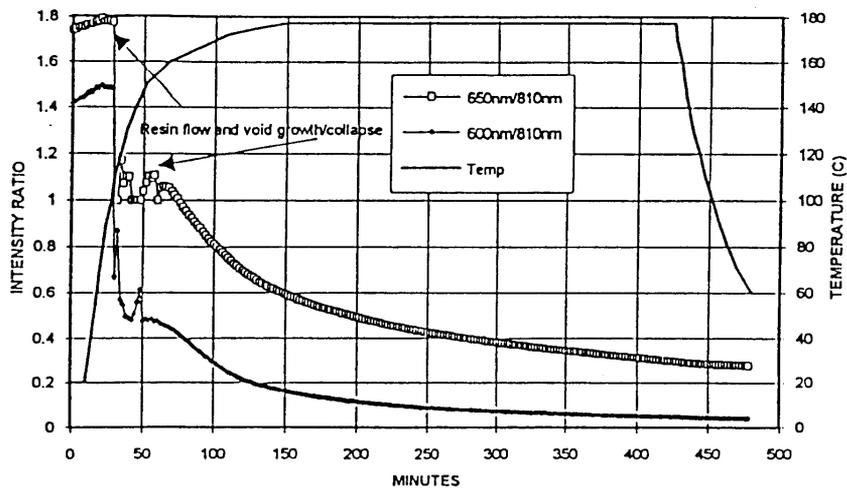


図5. 7-3 AS4/3501-1の硬化中のキセノン光透過度変化

オートクレーブ・エキスパートシステムの研究例としては米国スタンフォード大のS.F. Springerらの”SECURE”システム⁹⁾が知られている。これは、①温度・粘度等を求める熱化学モデル、②圧力・樹脂流れを求める流れのモデル、③ポイドサイズ計算モデル、④残留応力・ひずみの計算モデル、の4つのサブモデルからなる熱硬化樹脂複合材料の硬化モデルによって、硬化サイクルの最適化を行うものである。図5.7-4にこのシステムの構成を示し、図5.7-5にセンサの配置を示す。また、図5.7-6に”SECURE”システムを使用した場合の効果を示す。

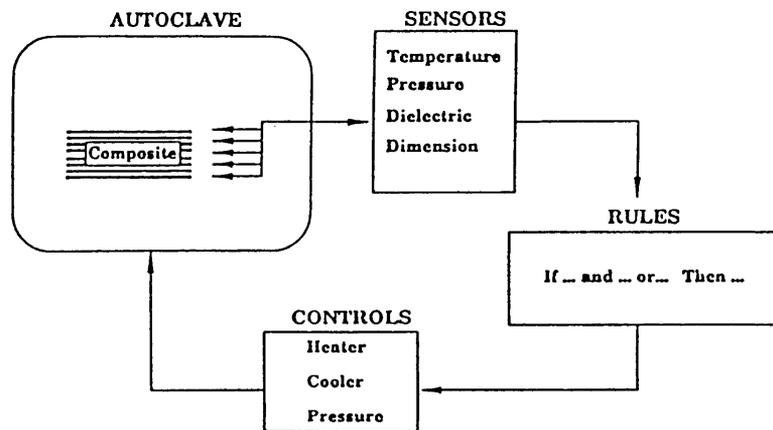


図5.7-4 SECUREシステムの構成

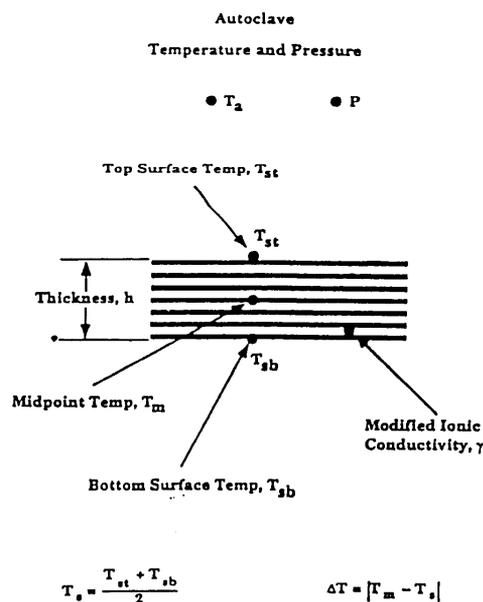
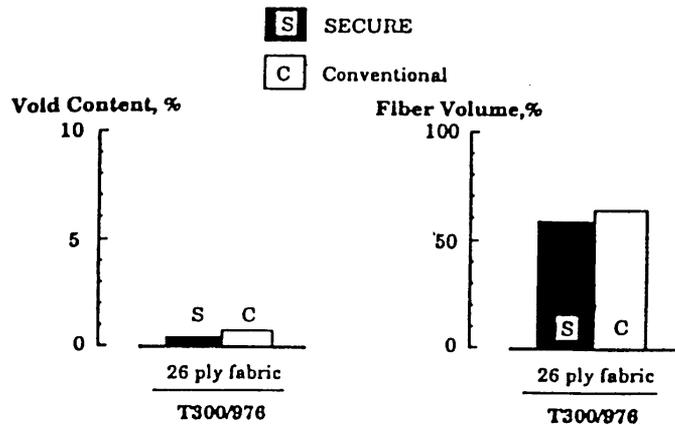
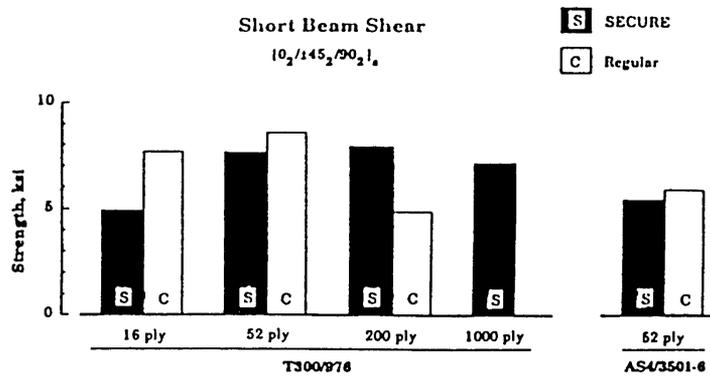


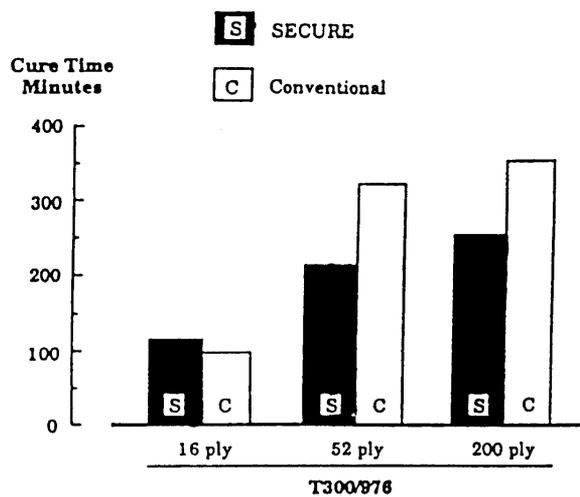
図5.7-5 SECUREシステムのセンサ配置



A. ボイド率低減とV f 適正化



B. 従来法での成形品との層間剪断強度比較



C. 硬化時間の短縮

図5. 7-6 SECUREシステムの効果

5. 7. 3 新エネルギー成形法

直接加熱以外のエネルギーを利用した成形法の中で、代表的な方法を表5. 7-1にまとめて示す。この他にもエネルギーの与え方以外の分類があり、脱オートクレーブ成形法としてのプラズマ成形法やRTM（レジン・トランスファ・モールディング）成形法等¹⁰⁾がある。

これらの新エネルギー成形法は、従来のオートクレーブ成形法に比べて、成形法そのものが新しいこともあり、成形プロセスのインテリジェント化あるいはスマート化を直接取り上げた研究例は少ない。また、これらの脱オートクレーブ成形法等は、温度や圧力のばらつきからくる局所的な樹脂流れ不足や、硬化不十分、あるいはコスト高等が問題になっていた。近年、これらの課題に対する解決策として、インテリジェントプラズマ成形、熱可塑複合材成形におけるニューラルネットワークシステム等の構想があげられている。研究はまだ始まったものばかりのものが多いが、これらの成形法を中心に以下にその研究開発状況を概説する。

表5. 7-1 代表的な新エネルギー成形法

名称	内容	特徴
マイクロウェーブ	電磁波(低周波)によって材料内部を直接発熱させる。	加熱スピードが大きく、選択加熱が可能で、制御も容易
高周波	高周波によって治具を直接発熱させる。	移動設備としてフィールド・リペアに最適
電子線 紫外線(光)	温度を上昇させることなく直接反応エネルギーを与える。	内部応力が少なく、短時間硬化が可能で、エネルギー効率が高い

● マイクロウェーブ硬化

マイクロウェーブ硬化は、加熱スピードが早く、選択加熱が可能であり、且つそのコントロールも容易であることに興味をもたれ、多くの研究が行われてきた^{11), 12), 13), 14)}。

特に、炭素繊維強化複合材料について開発した2.45GHzで稼働する可変マイクロウェーブ共鳴キャビティが、材料中に効率よくエネルギー伝達され、加熱コントロールできることに着目している。これを利用して、炭素繊維強化エポキシ複合材料のマイクロウェーブ硬化の実用性を確認している研究として注目される¹⁵⁾。内容は、交差積層させた炭素繊維強化エポキシ複合材料の硬化状況と適用したマイクロウェーブ共鳴キャビティモードによって硬化された交差積層板の曲げ特性の比較からその影響を見ている。その結果、マイクロウェーブ加熱システムは、図5.7-7に示すものを使用することにより、曲げ強度は硬化プロセス条件に強く依存するものの、容易に短時間で均一に硬化することがわかった。また、特に適切な共鳴モードの選択が効率の良い硬化プロセスに重要であり、例えばモードの注意深い選択により一方向積層及び交差積層の72プライを硬化させることができると述べている。

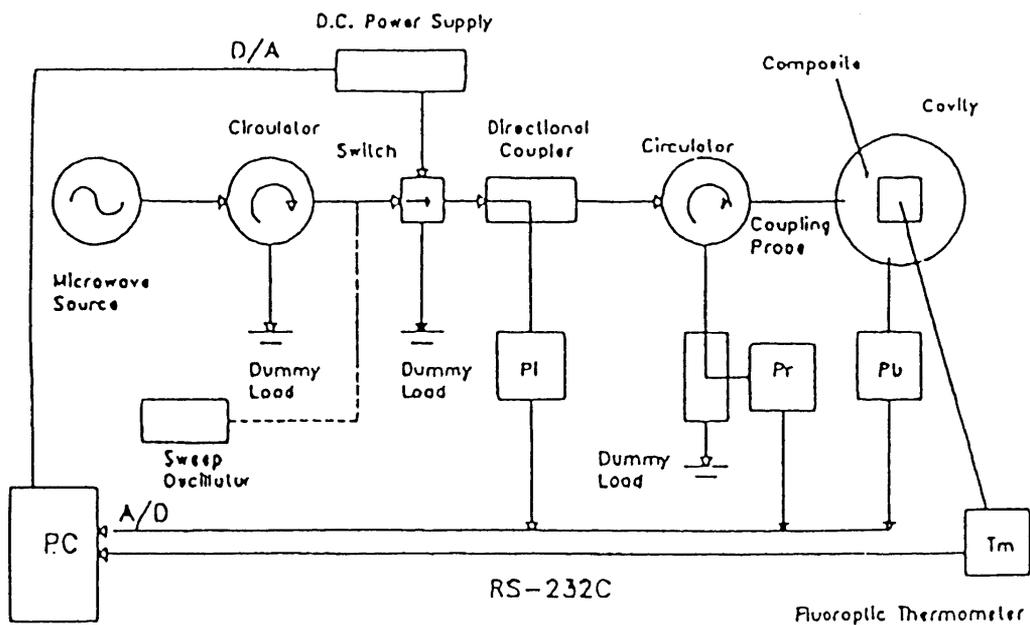
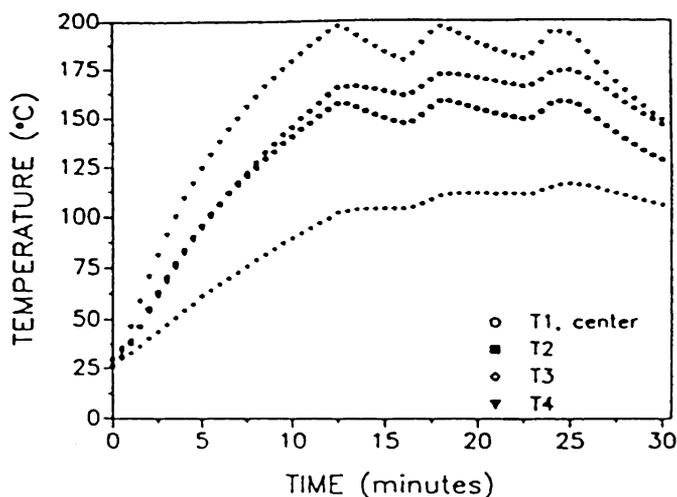


図 5.7-7¹⁵⁾ Computer-aided high power microwave processing and diagnostic circuit

他方、前述してきたマイクロウェーブ硬化の対象材料が一般的なエポキシ樹脂系複合材料であったのに対し、高温環境下で使用可能なポリイミド樹脂に関しても、L. A. FellowsとM. C. Hawleyのグループによって研究が成されている。彼らは、機体構造への適用を将来の目標として耐熱熱可塑性樹脂の一種であるL a R C - T P Iの複合材パネル硬化に対しマイクロウェーブ硬化技術を検討している。¹⁶⁾ 供試体は一方向材を24プライ積層して18cm共鳴キャビティ内でマイクロウェーブを用いて、180℃及び250℃での2ステージプロセスで硬化を行っている。なお、この2ステージプロセスの適用はL a R C - T P Iが硬化過程で水やアルコール等の縮合物を発生し、硬化後の品質に悪影響を与えることからであり、マイクロウェーブ法、熱硬化法とも180℃では真空圧を適用している。マイクロウェーブ硬化においてはキャビティ内のカップリングプローブと繊維方向を45°あるいは315°に位置させたが、当初供試体の温度ばらつきが図5.7-8のように生じた。この防止方法としてモードスイッチ手法を活用して図5.7-9の様な比較的均一な温度保持を実現した。その結果、最終的に硬化供試体から切り出したサンプルの曲げ特性比較は表5.7-2のようになりマイクロウェーブ硬化させた材料は従来の熱硬化させた材料に比較して強度、弾性率ともに優れていることが分かった。さらに、温度分布均一化の検討を行う必要があるものの、マイクロウェーブ硬化法の将来性が高いと述べている。



Temperature profile of processed 24-ply AS4/LARC-TPI composite heated at 315°C fiber orientation and cavity length of 13 cm.

図5.7-8¹⁶⁾

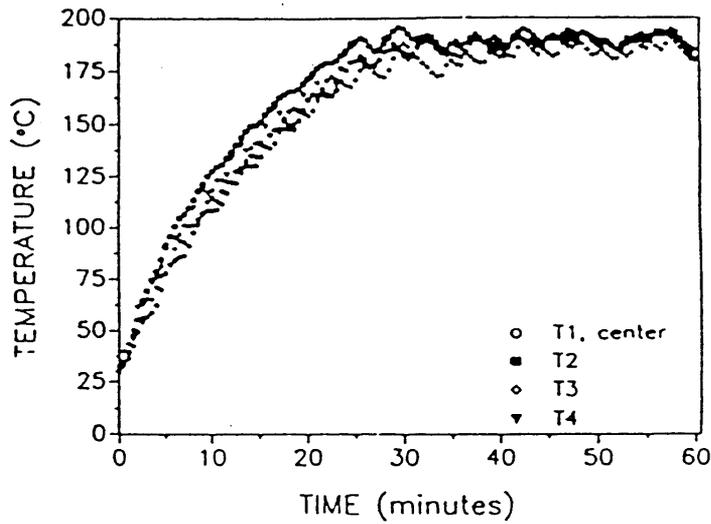


图 5. 7 - 9 ¹⁶⁾ The temperature profile of processed 24-ply AS4/LARC-TPI composite heated at 315° fiber orientation and by mode-switching techniques.

表 5. 7 - 2 ¹⁶⁾

Results of Flexural Testing of Thermal and Microwave Composites

Sample	Flexural Strength (MPa)	Flexural Modulus (GPa)
Thermal Sample	87.2 ± 8.2	17.3 ± 2.9
Thermal Sample	79.8 ± 10.6	12.1 ± 2.2
Microwave with 45° Fiber Orientation	104.4 ± 8.2	31.4 ± 5.9
Microwave with 315° Fiber Orientation	126.1 ± 8.0	27.6 ± 8.2

●電子線硬化

樹脂の電子線硬化技術の多くは、電子線照射によって発生するフリーラジカル重合反応を利用したものであり、光（UV）硬化可能な樹脂のようなもの例えばビニール系、アクリル系樹脂が電子線硬化に適していると考えられている。また、治具材料としては、アルミ、スチール製モールド及び真空バッキングフィルム（ナイロン66、ポリプロピレンフィルム）等が使用され、ほぼ従来のオートクレーブ硬化手順と同じである。

電子線硬化を従来のオートクレーブ成形法の代替として研究している研究例としては、C. B. Saundersの所属するAEC L研究所のV. J. Lopada、T. E. McDougall等の、航空機の複合材製機体構造の接着技術にこの電子線硬化を応用する例がある¹⁷⁾。彼らは通常の熱硬化による接着が内部応力の発生により所期の接合力を発揮していないのに対し、電子線硬化による接着接合は室温下で、接触圧を加えながら短時間で作業完了し、複合材の硬化同様、内部応力を発生させないことに着目して取り組んでいる。電子線硬化接着剤はLoctite社のものを使用し、且つ被着体をCFRPとして接着せん断強度を求めて性能の評価を行ったが熱硬化接合と同等であることが分かった。そして、プライマーの適用有無によっては強度のばらつきが生じることが確認され、適切な方法を設定することにより、電子線硬化技術を接着接合に適用できると結論している。

他方、米国のAspen社のT. C. WaltonとResselaer Polytechnic研究所のJ. V. Crivelloは電子線硬化法が従来のオートクレーブ成形硬化方法に比較して、より速く、安く、容易であるということと、材料においては、多くの従来の複合材料用マトリックス樹脂が宇宙環境下でも原子状酸素によって、エロージョンを容易に受けることの両方に着目して研究を実施し成果をあげている¹⁸⁾。この研究の目的は単純なエポキシ樹脂をシロキサン変性し、原子状酸素に対する耐久性の発現と電子線硬化法の適用性確保であり、宇宙環境下の種々の用途に適用できる樹脂開発である。彼らは、NASAとの契約研究の中で多種のシロキサン変性エポキシを開発し表5.7-3に示すように電子線硬化したフィルムの原子状酸素エロージョンによる重量減少を評価している。そして、このシロキサン変性エポキシ樹脂は原子状酸素による劣化の過程で表面にSiO₂の薄い膜が形成され劣化を促進させない自己修復性が開発当初の予想通り見いだされ、且つ優れた衝撃エネルギー吸収特性を示し、力学特性も良好であると報告している。特に、複合材用途への適用という面では表5.7-4に示すように300°F硬化

表 5. 7 - 3 (18)

EFFECTS OF TEGAL PLASMOD ASHER¹ OXYGEN PLASMA ON VARIOUS FILMS²
(Sample Key can be found on the following page)

MATERIAL	EXPOSURE (hours)	WEIGHT LOSS (%)
ULTEM	4	28-68
	5	21-66
	6	24-85
KAPTON	4	17-38
	5	29-51
	6	38-61
NASA POLYIMIDE-SILICONE 74-94	4	63.0
	5	50.0
	6	50.4
NASA POLYIMIDE-SILICONE 119-4	4	67.5
	5	59.5
	6	70.6
16-1 (same as IC11 resin)	4	-1.0
	5	1.2
	6	1.1
16-2 (same as IC11 resin)	4	6.8
	5	-3.1
	6	0
23a(b)	4	-1.2 (-1.7)
	5	2.1 (0)
	6	0 (0)
26a(b)	4	0 (1.8)
	5	0 (0)
	6	-4.9 (-15.6)
29a(b)	4	4.1 (4.0)
	5	-11.5 (-16.4)
	6	0 (1.7)
32a(b)	4	10.9 (3.2)
	5	3.9 (4.5)
	6	-2.0 (1.2)

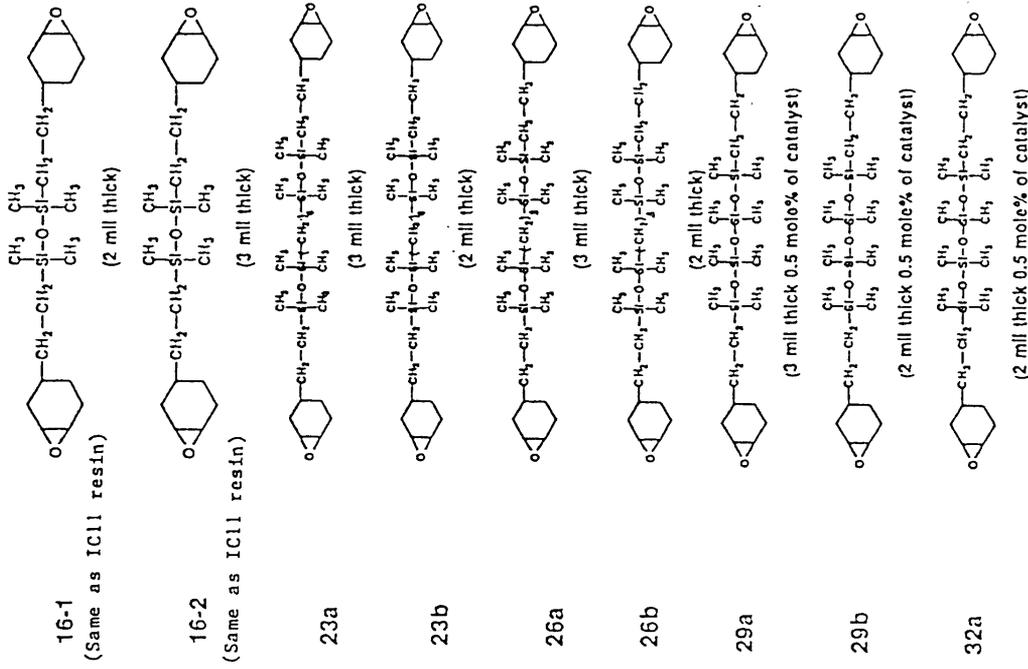
¹ Tegal Plasmod Asher, 500 mlorr, 60 sccm, 100 W rf power, 3 psi O₂.

$$\% \text{ weight loss} = \frac{W_{10} - W_{11}}{W_{10}} \times 100$$

² This work was done under NASA Research Grant Contract #NAG-1-980 (LaRC) which is still active as of 6/93.

Our I. D. #

Chemical Structure



¹ 32a and 29b appear to be the same material based on the information provided with the films.

32b = 16-2 Slightly different operating parameters.

エポキシ樹脂に比較してシロキサン変性エポキシ樹脂は耐アウトガス性、耐原子状酸素エロージョン性：耐紫外線等に優れ、且つ、電子線による急速硬化可能な材料であり、宇宙環境下に暴露される構造体の外被材料に適していると述べている。

表 5. 7 - 4 ¹⁸⁾

COMPARISON OF THE CLEANLINESS (OFFGASSING), ATOMIC OXYGEN AND UV RADIATION RESISTANCE OF A STATE-OF-THE-ART EPOXY AND THE CANDIDATE EPOXY FUNCTIONALIZED SILOXANE GRAPHITE-COMPOSITE MATRIX RESIN (IC 11-SC)

	POLYMER BINDER	COMMERCIAL NEAT 300°F CURED EPOXY RESIN	EPOXY FUNCTIONAL SILOXANE (IC 11-SC)
PROPERTY			
USEFULNESS		<ul style="list-style-type: none"> • Commercially available • Long track record • Barely meets offgassing requirements in full composite form • No atomic oxygen resistance 	<ul style="list-style-type: none"> • Low outgassing • Room temperature • No molded in stresses • Rapid E-beam processing
CLEANLINESS;OUTGASSING (ASTM E595)			
TOTAL MASS LOSS: (TML) %		1.42 ¹	0.61
COLLECTED VOLATILE CONDENSABLE MATERIAL: (CVCM) %		0.05	0.01
WATER VAPOR RECOVERED: (WVR) %		N/A	0.07
ATOMIC OXYGEN RESISTANCE OR SELF HEALING CHARACTERISTIC		No Atomic Oxygen resistance	Plasma asher, 40 hour space shuttle ² and TEM ² exposure demonstrate self healing atomic oxygen resistant characteristics
QUANTITATIVE UV RADIATION RESISTANCE SCREENING (QUV- Q Panel) (UVB-313) EXPOSURE FOR 240 HOURS		Very Poor UV resistance Darkens, breaks down	Slight Amber Color after exposure of neat resin film ³

¹ Extrapolated from graphite uni-prepreg test data @62% fiber volume (73% by wt.) .

² Complete report not available at press time from NASA LaRC.

³ This sample was: DiFunctional G1650-sc (a similar modified version of IC11-sc)

● R T M 成形

R T M 成形は従来のオートクレーブ成形等の成形法に比較してコスト低減効果が高いと言われているが、R T M の成形方法を革新的に改良した研究例として、スペクトラムテクノロジー研究所 J. E. Bradley と T. S. Wysocki によるインテリジェントプルトルージョン & R T M 成形法がある¹⁹⁾。

これは、大型で複雑なチューブ状複合材の低コスト製造方法に関する検討である。従来の R T M やプルトルージョン成形方式では、温度や圧力のばらつきからくる樹脂フロー不足や効果不十分な領域の存在があり、期待する性能や品質を確保できず、結局製造コストの低減を達成することを難しくしてきた。これに対し、提案されているのが図 5. 7-10 に示す I P R T M (Intelligent Pultrusion and Resin Transfer Molding) システムであり、装置は型を構成する個々の部分に装着されたモジュラーゾーンよりなり、図 5. 7-11 に示すプロセスコントロールシステムと連結して、成形状況のモニタリングと制御をリアルタイムで行うことができる。なお、各モジュラーゾーンにはセンサーを設置してある。そして、結果的にこのインテリジェントプロセスの付加により、スクラップ補修作業部品数の低減につながるだけでなく、表 5. 7-5 に示すようにハンドレイアップ方式等の従来方式に比較してコスト低減効果が高いことが認められる。したがって、この種のインテリジェント化を製造方法の中に取り込む方法が時代のニーズに合致した品質や性能の工場、製造量の拡大に必要であると述べている。

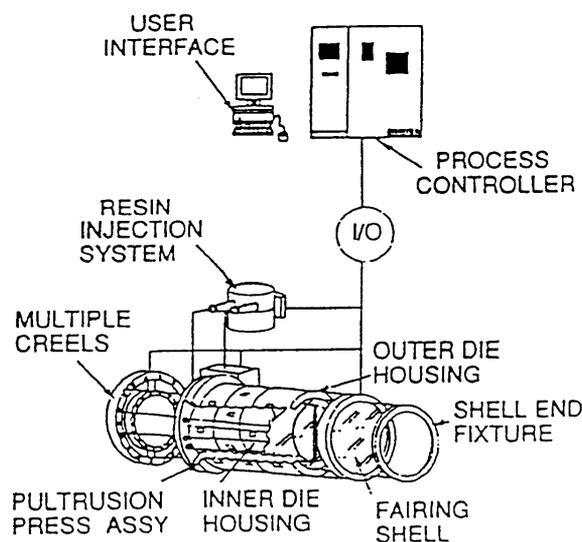


図 5. 7-10 IPRTM process layout¹⁹⁾

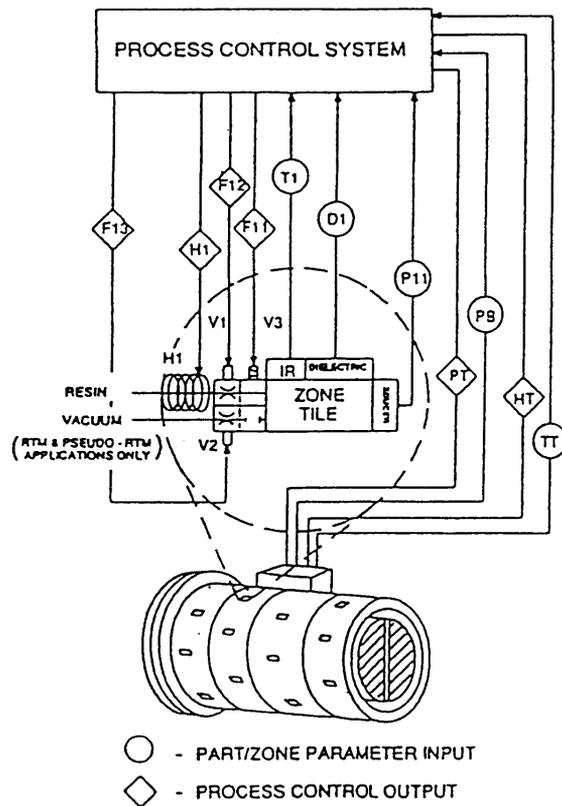


图 5.7-11 IPRTM process control diagram (typical) ¹⁹⁾

表 5.7-5 Results of economic/geometric analysis. ²³⁾

PROCESS	GEOMETRY								
	Flat Panel			Single Curvature			Compound Curvature		
	Normalized Cost			Normalized Cost			Normalized Cost		
	10 ²	10 ³	10 ⁴	10 ²	10 ³	10 ⁴	10 ²	10 ³	10 ⁴
	Units	Units	Units	Units	Units	Units	Units	Units	Units
Hand Layup	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
TP Filament Wind	0.74	0.53	0.50	0.76	0.54	0.52	x	x	x
ATL	2.33	0.82	0.69	x	x	x	x	x	x
ATL w/ Press	2.61	0.99	0.84	2.66	1.01	0.86	3.84	0.83	0.49
RTM	0.39	0.36	0.36	0.41	0.38	0.36	0.33	0.28	0.27

X-Geometrically Inadmissible.

NOTE: Relative costs shown in bold are automated process/geometry combinations which are not cost effective relative to hand layup at that part volume.

●熱可塑複合材料の成形

熱可塑複合材料は、熱硬化複合材料のように成形硬化反応を伴わないので、早くから製造コスト低減効果を見極めようとしている研究例がある^{20), 21)}。特に、最近では、製造技術の複雑な指示や動作によって複雑な機械制御加工やフィードバック機構を直接的にも間接的にもともに融合させ、正確に制御することが要求されている。そのような中でマクダネルダグラス社のD. WhiteとD. Sofgeは生物学的な神経細胞（ニューラルネットワーク）機構を参考にした図5. 7-12のシステムを考えている²²⁾。このニューラルネットワークとは人間の頭脳のようなもので、与えられた情報に対して期待された成果を生じるように学習することができ、システムの特徴としては判断能力を持ち、ノイズや非線形的外部情報等の外部環境に対応できることになる。彼らはこのシステムを図5. 7-13に示す熱可塑複合材構造の製造技術に適用することを考えており、リアルタイムニューラルコントロールシステムを作っている。構造体は治具の上で先に固化した積層上で熱可塑複合材テープがメルトしながら製造されるが、メルトの領域をIRカメラでモニタし、供給熱源の電力にフィードバックしている。ただし、現状では制御パラメーター間の非線形的関係はプロセスの動的モデルや経時変化を複雑化しており、人手による調整作業を加えることを余儀なくされている。したがって、作業中に生じるシグナルをフィルターしたり増幅するだけでなく、作業中のエラーによるプロセス遅れを減少させる方法が必要と考えられており、将来的には図5. 7-14に示す評価機能（critical）をオンラインで適用し、成形条件の最適化を図れるように配慮していると述べている。なお、現状のコントロールシステムの適用性評価のために製造スピードや温度を外部的に変化させるテストを実施し、新しい動的プロセスに対応できる変換処理を行っている。そして、結論としては、この種の複雑な製造作業を学ぶことができるニューラルネットワークシステムが、種々のノイズの存在化でもプロセスの安定性を円滑に保証できると報告している。

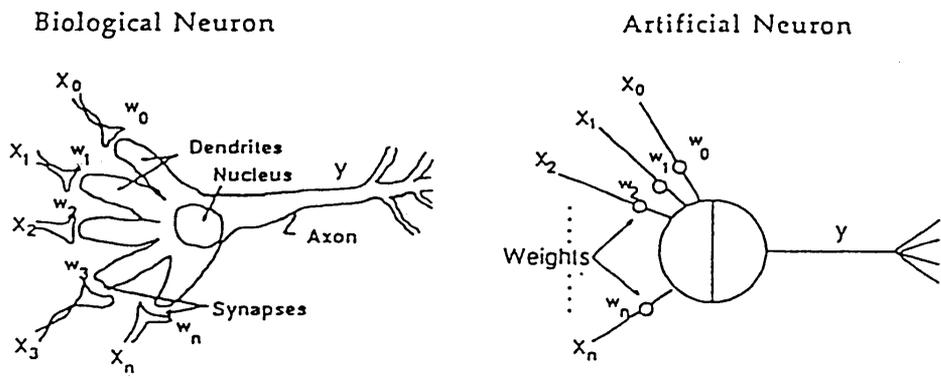


图 5.7-1.2 Functional Models of Real and Simulated Neuron Source--Derived from Neural Works: An Introduction to Neural Computing²²⁾

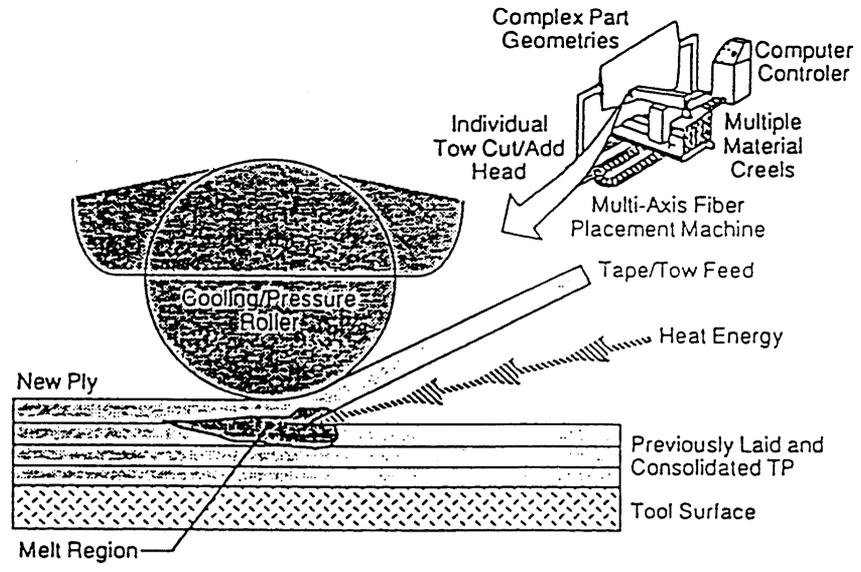


图 5.7-1.3²²⁾ Manufacturing Process for Thermoplastic Composites Structure

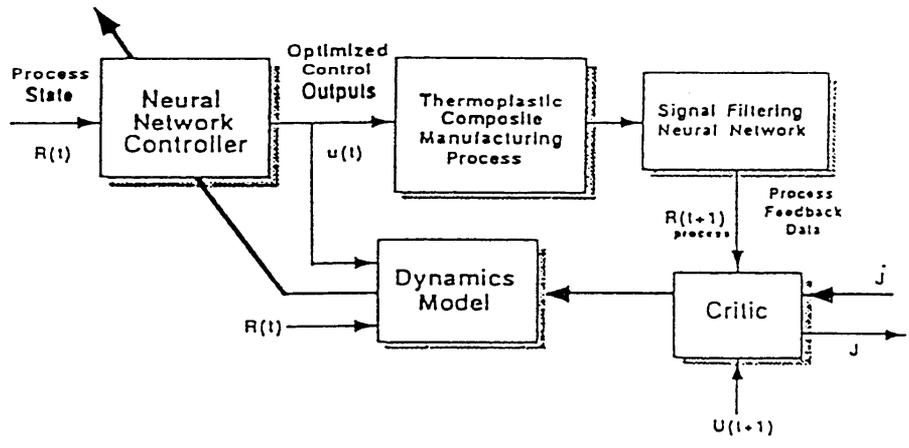


图 5.7-1.4 Adaptive Critic based Neurocontrol System for the Manufacture of Thermoplastic Composites

5. 7. 4 スマートマニファクチャリングの課題

(1) センサに対する課題

従来のスマートマニファクチャリングにおけるセンサは、専用のスペシャルセンサが用いられることが多かった。これは、そのセンサが製造完了すなわち使用開始時には不要になるということであり、埋め込まれたセンサは運用時にはじゃまになるし、張り付けられた多数のセンサを除去するには非常な手間がかかることになる。そこで、運用中のスマートセンサと共用できる一貫使用型センサが必要であるが、このタイプのものたとえば光ファイバによる製造時の赤外吸収スペクトル検知などはいまだに実用レベルには遠いようである。そこで、これらの開発がセンサに対する最大の課題になる。

(2) 制御システムに関する課題

まずセンサによってえられた測定値を、樹脂の状態を表す定量値に置き換えるツールが必要である。これは経験式で与えられることが多いが、今後は種々の材料系に適用すべく汎用化をはかる必要があると考えられ、そのための硬化挙動のモデル化が今後の課題になると考えられる。すなわち樹脂の基本物性や積層数、部品形状を入力すれば、その場合に応じた樹脂挙動の尺度を出力し、対応制御を可能にするようなためのモデルが必要になってくる。むろんモデル化には、たとえば樹脂の粘度と圧力による樹脂流れの変化などに関する基礎的な実験データや解析との比較が不可欠であり、こうしたデータの蓄積と利用可能なデータベースの構築が必要であろう。

一方、少ないセンサでと短い処理時間で全体の情報をつかみ、制御するソフトウェアの開発は、運用されるスマートコンポジットの場合と同様に重要である。

いずれにしてもこれらについては、たとえばニューラルネットワーク構築のため情報処理専門家の参画など、多様な専門分野の研究者、技術者の結集が必要となろう。

(5.7 参考文献)

- 1) Helmers Publishing Inc. : Sensor , May (1989)
- 2) B. P. Rice : Proc. 38Th SAMPE Sympo. (1993) pp 1346-1356
- 3) 次世代複合材料ハンドブック, 日本規格協会 (1990) pp 635
- 4) R. A. Kline et al : Proc. ICCM-9 (1993) pp 441-448
- 5) M. A. Dury et al : Proc. ADPA/AIAA/ASME/SPIE Conf. on Active Material and Adaptive Structure (1992) pp 805-808
- 6) E. E. Iapanes : Proc. ICCM-9 (1993) pp 457-464
- 7) B. Zimmermann et al : Proc. ADPA/AIAA/ASME/SPIE Conf. on Active Material and Adaptive Structure (1992) pp 313-316
- 8) B. Culshaw : Proc. ECCM Smart Composite Workshop (1993) pp 25-37
- 9) S. F. Springer et al : J. Comp. Mat. 25 (1991) pp 1542-1587
- 10) 平成5年度航空機へのインテリジェントコンポジットシステムの適用に関する調査報告書、(社)日本機械工業連合会 (財)次世代金属・複合材料研究開発協会, (1994), pp. 25-44
- 11) W. I. Lee & G. S. Springer; Interaction of Electromagnetic Radiation with Organic Matrix Composites, Journal of Composite Materials, 18, (1984), pp. 357-386.
- 12) W. I. Lee & G. S. Springer; Microwave Curing of Composite, Journal of Composite Materials, 18, (1984), pp. 14-18.
- 13) S. M. Singer & M. C. Hawley et al; Effects of Processing on Tensile Properties of an Epoxy/Amine Matrix : Continuous Electromagnetic and/or Thermal Curing, SAMPE Quaterly, January, (1989), pp. 14-18.
- 14) M. C. Hawley and J. D. Delong; Microwave Processing of Polymer Composite Material, Proc. 5th Annual ASM/ESD Advanced Composite Conference, September, (1989), pp. 25-28.
- 15) J. Wei, J. D. Delong & M. C. Hawley; Microwave processing of Crossply Continuous Graphite Fiber/Epoxy Composites, SAMPE Journal, 27, January/February, (1991), pp. 33-39.
- 16) L. A. Fellows & M. C. Hawley; Proceeding of 8th ICCM, July, 15-19, (1991), 12-E-1.

- 17) V. J. Lopata, Minda Chung & T. E. McDougall; Proceeding of 39th International SAMPE Symposium, April, 11-14, (1994), p. 514.
- 18) T. C. Walton & J. V. Crivello; Proceeding of 39th International SAMPE Symposium, April, 11-14, (1994), p497.
- 19) J. E. Bradley & T. S. Wysocki; Low Cost Composite Manufacturing Utilizing Intelligent Prutrusion and Resin Transfer Molding (IPRTM), SAMPE Journal, vol. 29, No. 1, January/Februar, (1993), PP. 22-25
- 20) R. C. Harper; Thermoforming of Thermoplastic Matrix Composite Part I, SAMPE jouranal, vol. 28, No. 2, March/April, (1992), pp. 9-17.
- 21) R. C. Harper; Thermoforming of Thermoplastic Matrix Composite Part II, SAMPE jouranal, vol. 28, No. 3, May/June, (1992), pp. 9-17.
- 22) D. White & D. Sofge; Neural Network Based Control for Composite Manufacturing, ASME, MD, 21, (1990), PP. 89-97.
- 23) M. F. Foley; Thecno-Economic Automated Composite Manufacturing Techniques, SAMPE Quarterly, January, (1991), pp. 61-68.

第6章

北米におけるスマートコンポジットの開発動向

6.1	調査概要	497
6.1.1	目的と意義	
6.1.2	調査結果のまとめ	
6.2	訪問機関別調査内容	497
6.2.1	ヴァージニア工科大学 Center for Intelligent Materials Systems and Structures	
6.2.2	ヴァージニア工科大学 Fiber & Electro-Optics Research Center (FEORC)	
6.2.3	National Science Foundation	
6.2.4	メリーランド大学	
6.2.5	ノースロップ・グラマン社	
6.2.6	ヴァーモント大学	
6.2.7	ボーイング社	
6.2.8	ワシントン大学	
6.2.9	トロント大学	
6.3	総括	540
6.3.1	研究開発状況、特徴	
6.3.2	応用分野について	
6.3.3	我国での研究開発についての留意点	

6 北米におけるスマートコンポジットの開発動向

6. 1 調査概要

6. 1. 1 目的と意義

北米におけるスマートコンポジット研究開発に関連する代表的な大学、国立研究機関および企業の研究所を訪問し、日本における研究開発動向を紹介しながら討論と意見の交換等を行い米国及びカナダにおける同技術分野の研究開発の動向調査を行うとともに、国際共同研究の可能性を調査することを目的とする。

6. 1. 2 調査結果のまとめ

訪問機関、面会代表者及び調査結果のまとめを表6. 1-1に示す。

6. 2 訪問機関別調査内容

6. 2. 1 ヴァージニア工科大学

Center for Intelligent Material Systems and Structures

1) 訪問先の概要

ヴァージニア工科大学 (Virginia Polytechnic Institute and State University) はワシントンD.C.の南方約250kmのヴァージニア州ウイリアムスバーグにある州最大の大学である (学生数23000人、スタッフ5000人)。訪問先の Center for Intelligent Material Systems and Structures (CIMSS ; インテリジェント材料システム/構造研究センター) は、1987年 Smart Materials and Structures Laboratory として始まり、1989年に大学付属のセンターとなったもので、ポスドクを入れて現在20人の研究グループである。(ドクターコースの学生10名、研究スタッフ5名、秘書)。

訪問した研究センターは1991年7月にキャンパス外に設置されたセンター専用の新しいビルであり、センター長である Prof.Rogers 他スタッフの方々から多くのデモンストレーションを含む詳しい研究紹介を受けた。

(2) 説明内容

Prof.Rogers による説明は、まずCIMSSの提唱するインテリジェントマテリアルシステムの定義から始まった (図6. 2-1 参照)。すなわちそれは、生体

表6. 1-1 調査結果のまとめ

訪問機関	研究分野/アイテム	プロジェクトへの要望/提案	備考
<p>ヴァージニア工科大学 インテリジェント材料システム/構造研究センター (Center for Intelligent Material Systems and Structures(CIMSS)) Prof. C. A. Rogers</p>	<p>研究協力に関する積極的姿勢と協力関係の構築を希望する</p>	<p>1) 本プロジェクトへの大変な興味を示すとともに、積極的な協力関係の構築を表明する。 2) 研究情報の電子メールでの交換の申し出であり 3) I C A S' 9 5 (6th Int. Conf. on Adaptive Structures, Nov. 13-15, 1995) 前後における日米ワークショップ開催の提案を受ける。</p>	
<p>ヴァージニア工科大学 光ファイバー/電子研究センター (Fiber & Electro-Optics Research Center (FEORC)) Prof. Claus</p>	<p>光ファイバーの創製、台目的改質技術およびそれらを用いたスマート構造化の研究開発</p>	<p>1) 本プロジェクト研究開発への興味を表明する。 2) 当研究センターの研究アイテムと共通するので研究協力/参加に強い期待を表明する。</p>	
<p>N S F (National Science Foundation) Dr. J. E. Sabadell</p>	<p>航空・宇宙、軍事および厚生関連の研究領域を除くスマート構造の研究開発、特に建築・土木分野を中心とする社会インフラ関連のスマート材料/構造の研究領域</p>	<p>1) 研究協力を積極的に進めたい。例えば、国際会議の開催、研究者の相互交流、研究情報の交換、共有など 2) 具体的な研究テーマを模索したい。 ただし、 1) 会計年度の違い 2) 参加研究機関 (N S F ; 大学中心) の違い 3) 研究対象領域の違い など今後調整すべき問題もある。</p>	

表6. 1-1 調査結果のまとめ (続き)

訪 問 機 関	研究分野/アイテム	プロジェクトへの要望/提案	備 考
<p>メリーランド大学 Prof. J. S. Sirkis</p>	<p>1) 研究協力に関する積極的姿勢と協力関係の構築を希望する。 2) 大学内の幾つもの学科が協調、協力しあいがらスマート材料/構造の研究センターの設立を目指して研究開発を積極的に進めている。特に、航空・宇宙分野におけるヘリコプターのローター・ブレードのスマート化の研究開発に特徴があり、世界的にもトップ・レベルにある。関連研究分野での日本との情報交換等も緊密に行っている模様である。 3) スマート材料の研究開発よりもむしろスマート構造のためのシステム化の研究開発に特徴とその重点がある。</p>	<p>1) 本プロジェクトへの大変な興味を示すとともに、積極的な協力関係の構築を表明する。</p>	
<p>ノースロップ・グラマン社 Dr. H. Armen</p>	<p>ノースロップ・グラマン社が興味を持っている研究テーマは以下のとおりまとめられる。 1) Adaptive Wing 2) Active Vibration Reduction 3) Machine-Tool Chatter Suppression 4) Active Constrained-Layer Damping 5) Satellite Vibration Suppression 6) Precision Pointing</p>	<p>1) 国際研究協力には非常に興味がありその機会が与えられることを希望している。引続き情報交換を続けて行きたい。 2) 研究規模は今のところ小さいが、将来大きなプロジェクトとなるようお互い協力し合いたい。 3) 小規模研究開発でも良いから、日米一緒に研究しよう。 4) 日本とはぜひ共同研究を行いたい(日本の予算で)。</p>	
<p>ヴァーモント大学 Prof. D. R. Huston</p>	<p>インフラストラクチャーへのスマート材料/構造の研究開発を積極的に進めている全米でも先駆的な大学である。航空・宇宙分野の研究開発に携わった研究者が同大学の研究開発を積極的にリードしていることに特徴を有している。Public Relations Officerの会議参加やテレビ局の取材</p>	<p>以下に示す研究協力の可能性が説明された。 1) Research/consulting contracts (many possible configurations) 2) Trading scholars and graduate</p>	

表6. 1-1 調査結果のまとめ(続き)

訪問機関	研究分野/アイテム	プロジェクトへの要望/提案	備考
ボーイング社	<p>勢等から明らかなように、ヴァーモント大学の国際研究協力に対する基本的姿勢は大変積極的である。</p> <p>1) スマート材料/構造の研究について、1987年から開始しており、宇宙構造物の制振を狙った基礎的研究が行われている。既存の光ファイバ、形状記憶合金、ピエゾを利用したビームやトラスの制振などの評価研究を終了している。現在の重点研究領域として、能動構造音響制御(A SAC)に移行している。</p> <p>2) 本格的なスマート構造の研究開発はARPA資金による翼型コントルロールなどの空力弾性制御分野である。米大と共同開発中のセンサ/アクチュエータ材料としてのピエゾの繊維化および既存繊維へのピエゾのコローティング技術のアイディアは特筆される。</p> <p>3) ボ社におけるスマート構造の実用化研究は、防衛・宇宙が先行し、HSCITなどの民間機への適用化研究は材料・構造・制御系を含む低コスト化が実現しない限り遅れようである。</p> <p>4) 構造のヘルスモニタリング技術は、一種のスマート/構造と捉え、センサの開発から機体適用システム化研究まで幅広く行われている。特に、経年機対応の腐食センサの開発には本格的に取り組んでいる。</p>	<p>students</p> <p>3) Equipment and supplies (e.g. GRIN POF)</p> <p>4) Conference(U.S.-Japan Joint Panels, SPIE, etc.)</p> <p>注) GRIN POF: GRadient INdex Polymer Optical Fiber</p>	
	<p>センサ/アクチュエータ材料の研究開発が再重要課題と認識しており、ピエゾの繊維化や光ファイバ腐食センサ開発など米国内大学と共同研究中であり、日本にさらに優れた技術があれば国際研究協力の可能性は高い。</p> <p>ただし、MITIのナショ・プロの場合、まず政府間の合意に基づく共同研究、例えばJet Propulsion Lab./NASAとMITI研究所の共同研究があり、その傘下に民間会社(ボ社含む)が参加する形態が考えられるとのコメントがあった。</p>		

表6. 1-1 調査結果のまとめ (続き)

訪 問 機 関	研究分野/アイテム	プロジェクトへの要望/提案	備 考
<p>ワシントン大学</p> <p>Prof. M. Taya</p>	<p>1) Tayaグループは、力学特性と物理特性とのカップリング効果による機能発現を狙ったスマート材料の、ShenグループはPassive dampingとActive dampingの統合による制振スマート構造の研究開発を精力的に展開している。両グループとも最終的な応用を明確にした上で、まず modelingによる理論解析から検討を開始し、実験的研究を行い、応用に結び付けようとしており、極めてオーソドックスな研究開発を行っている。</p> <p>2) 理論解析集団であるTayaグループがスマート材料の材料プロセス技術をも重視する姿勢を見ていることは注目される。</p>	<p>1) ワシントン大学の研究グループはいずれも日本のナショ・プロへの参加を強く要望した。</p> <p>2) 日米ワークショップのワシントン大学開催の具体的提案を受けた。</p>	
<p>トロント大学</p> <p>Prof. Measures</p>	<p>1) Measures教授はIntelligent Structureの分りやすい概念の提唱者でもあり、具体的な目的を持ち、将来を見通した研究開発を行おうとしている。</p> <p>2) 航空機分野の光ファイバを利用したセンシング、モニタリング技術開発に始まり、航空宇宙研究所でありながら橋梁を始めとするインフラストラクチャへ特化した同技術の適用化研究を精力的に行っている。</p> <p>3) 研究所の方針として、研究予算の重点的、傾斜配分を行い研究開発を行っており、スマート材料/構造の研究開発もそのうちの一分野である。</p>	<p>航空宇宙研究所のDirectorである、Dr. R. C. Tennysonから、共同研究したいとの積極的な申し出があった。</p>	

のもつ機能や知性を材料に持たせたものであり、これにより機器の簡素化・機能向上による省エネルギーを実現することと同時に、機器の信頼性の飛躍的な向上を目的としている。具体的には、神経系のようなセンサシステムと筋肉のようなアクチュエーターを持ち、外界の変化に対して知的に対応できる材料システムをその理想像として挙げている。また、ここでのインテリジェントマテリアルシステムの研究開発は次のような思想ないし特徴を持っている。

- 1) 学際的な研究領域であって、様々な分野からのアプローチが不可欠である（現に、当センターには8つの学科から人が集まっている）。
- 2) （これまでの物理化学的研究の優位性を指摘した上で）本研究領域における工学の重要性を強調しており、工学がイノベーションを起こすべきテーマであると述べている。
- 3) ニーズ先行型、すなわち社会のニーズを適確にとらえた研究開発が重要であるとし、実際の研究も具体的なもの（構造体）を想定した（マテリアルよりもストラクチャーよりの）実験的研究が行われている。
- 4) ニーズを把握した上で、それを実現する材料システムの設計・開発が重要であるとしており、一つの方法論として生体系のシンプルで高度な機能発現構造を見倣うことを挙げている。
- 5) SM/S(Smart Materials and Structures)はPhilosophy of DesignであってTechnologyではないとも言っている。

これらを踏まえて、具体的な研究開発目標としては、センサシステムは社会インフラ（ビル・橋・高速道路など）や経年機のダメージモニタリングへの応用、アクチュエータは機器の振動・音響・形状のコントロールによる負荷の軽減（減量・省力化に役立つ）への応用があげられており、これらは確かに後述する具体的な研究テーマとそれぞれ対応している。

Prof.Rogers による説明の後、学生の実験室を見学し、担当の学生などから個別に説明を受けた（約1時間半）。この部屋はむしろエキジビジョン専用という感じで、10テーマ程度の成果概要のパネルと装置が整然と並べられていた（Air Force がスポンサーの1件を除いてすべてArmyがらみ）。説明を受けたものを、以下に列記する。

- 1) 形状記憶合金を用いた複合材料の衝撃応答性向上（応用分野：タービンプレート、圧力容器など）
- 2) ピエゾを用いた不静定トラスのヘルスマニタリング（宇宙構造用トラス

のミニチュアモデルで実演があった)

- 3) レーザー (レーザー Doppler 干渉計) を用いて壁の振動を測定し、コンクリート補強 CFRP の層間剥離を非破壊的に検出するもの (実演があり、目視ではわからない非常に小さい剥離が検出できると自慢していた)
- 4) エディークレントによる非破壊検査 (エポキシ中のボイド率の測定を実演)
- 5) ピエゾを用いた音響装置 (車のドアをスピーカーにしたものを実演。音域によりまだトラブルが起こることがある)

(3) 所感

インテリジェント材料システムの定義・研究目的・方法論共に非常に明快で、研究紹介用に整理された部屋や入手した紹介記事などからも、非常にアピールがうまいと感じた。本研究センターの今後のアウトプットを追跡する価値は十分にあると考えられる。

CENTER FOR INTELLIGENT MATERIAL SYSTEMS AND STRUCTURES (CIMSS)

- Founded in 1987 as the Smart Materials and Structures Laboratory
- Became a University Center in 1989
Currently has 31 faculty members
2 colleges
8 academic departments



OBJECTIVES:

- The education of graduate students in the interdisciplinary sciences and engineering disciplines associated with the new area of endeavor of intelligent systems
- To provide an educational experience and opportunities for students beyond science and engineering to facilitate their entry into industry and academia upon completion of their studies at Virginia Tech
- The advancement of the fundamental concepts and philosophy of intelligent systems throughout the academic and industrial communities in Virginia, the United States, and internationally
- The creation of scholarly works, particularly of an interdisciplinary nature, and dissemination of these works



INTELLIGENT MATERIAL SYSTEMS

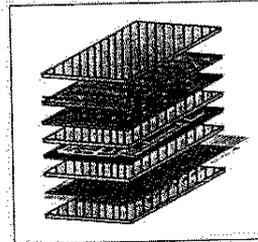
DEFINITION

Material systems with intelligence and life features integrated in the microstructure of the material system to reduce mass and energy and produce adaptive functionality.



GOALS

- reduce mass
- reduce energy needs and consumption
- increase reliability
- increase functional capabilities
- increase utility of a generic technology



WHAT WE DO

- Address integration issues related to incorporating highly distributed sensor, actuator, and control systems into applicable engineering environments
- Development of novel sensor systems for
 - civil infrastructure
 - aging aircraft
- Development of novel actuator systems for
 - vibration control
 - structural acoustic control
 - shape control (servo-tab control of helicopters)
- Development of novel material systems for
 - improved impact tolerance
 - adaptive suspensions (magnetorheological fluids)
 - reliable induced strain actuators



図 6. 2-1 Center for Intelligent Material Systems and Structuresの研究概要

HOW WE DO IT

- Investigate the true engineering constraints of implementation on real-complex structures
- Then, identify the significant research issues to address on simplified structures
- “Close-the-loop” by developing reliable “products” based upon the results of previous studies



RESEARCH & APPLICATION AREAS

RESEARCH AREAS

- Constitutive Modeling of Shape Memory Alloys, Electroactive materials, and Magnetorheological Fluids
- Electromechanics of induced-strain actuators
- System modeling of integrated intelligent material systems
- Control modeling and implementation

APPLICATION AREAS

- Structural Health Monitoring
- Aging Aircraft Monitoring
- Intelligent Manufacturing
- Adaptive Suspensions
- Noise and Vibration Control



EDUCATIONAL PROGRAMS

- Summer Undergraduate Research Internships
- Undergraduate Research Internships
- Minority Program
- Visiting Scholars Program
- Graduate Course
- Undergraduate Course
- Undergraduate Honors Course
- Graduate Student Conference
- Service



図 6. 2 - 1 (続き)

6. 2. 2 ヴァージニア工科大学

Fiber & Electro-Optics Research Center(FEORC)

(1) 訪問先の概要

FEORCはヴァージニア工科大学の電気工学科の中に1979年に設置されたもので、スタッフと学生合わせて70人（1994年秋現在）という米国最大の光ファイバー研究グループである。敷地的にも学内の研究室の他に2つの専用ビルを持っており、光ファイバーに関する最先端の研究が幅広くかつ精力的に行われている。面接者のProf.Clausは本研究所の所長であるが、研究所ならびに研究内容の説明から質問の答えまですべて一人で丁寧に対応していただいた。

FEORCの研究テーマは、材料開発から通信システムに至るまで極めて幅広く、中でも光ファイバーがらみのスマート材料／構造の研究開発には近年特に力を入れている。取り組んでいるプロジェクト研究は現在44件あり、予算総額は年間約2million\$である。なかでも、Navyからの予算（1993年からの5年ものを筆頭に全部で7テーマ）が大きく、予算全体の約半分を占めている。他は、ARPA, Air Force, Army, NASA, DoEなどの公的機関からのものと、航空・材料・電気・電力・通信・土木・建築といった民間企業からのものである。なお、特許収入は年間25,000\$程度である。

(2) 説明の内容

バスでヴァージニア工科大学の学内を見てまわり、キャンパス内の電気工学科にて会議とラボツアーが行われた。Prof.Clausによる説明は、FEORCの概要（上記概要参照）と具体的な研究内容の紹介であった（図6. 2-2参照）研究は基礎から応用まで極めて幅広く行われており、これらは材料・デバイス・センサー・通信の4分野に大別できる。その主要なものについて行われた説明を以下に列記する。

- 1) 材料（光ファイバーやセラミックアクチュエータの製造開発）：光ファイバーについては、径の小さいものや高温用にコーティングされたものを自作できるという点が強みである。例えば、高温用のコーティング材としては、ポリイミド（～500℃）、SiO₂（～1000℃）、メタル（～1400℃：厚さ10～20μmほどの膜をマグネトロンスパッタリングでコーティングできる）、Al₂O₃（～2000℃）を取り扱っており、他にも形状記憶合金フィルムやこれをコーティングした光ファイバなども作成できる。なかでも、SiO₂によるコーティングは安価であるため十分に商業化

できるしニーズもある（なにしろ歪測定マーケットは年間1/2billion \$とされている）。一方、アクチュエータ関連では、セラミックアクチュエータ（Multi-Layer Ceramic Actuators;MCAs）などの研究開発を行っている。

- 2) デバイス：当初はカプラーなどのハードウェアの技術開発が主であったが、最近では情報処理技術やネットワークシステムの設計などのシステム化技術も含んだ幅広い研究開発を行っている。
- 3) センサー（共用中の構造／材料の評価と非破壊検査）：光ファイバーセンサによる歪・温度・圧力・加速度・ケミカルな現象のモニタリング技術により、コロージョン・衝撃による損傷・疲労き裂・層間剥離・翼まわりの圧力分布・振動などの評価・監視、さらには超高温状態下での材料の評価を行う。
- 4) 通信（DSP）：光ファイバーベースのネットワーク通信システムのモデル化と解析を行う。スマート材料／構造関連で言えば、構造体が大きくなったりセンサの個数が多くなってくるとこのような技術が必要となってくる。

（3）所感

材料を自分たちで作れるという点で、他の追従を許さない強力な研究体制を感じた。また、研究の性質としては応用研究が多く、基礎研究であってもかなり実用に近い（現実の問題点からフィードバックされた基礎技術の研究開発）という印象を得た。このことから、光ファイバーがらみのスマート構造に関しては、本研究センターでの研究項目がすなわち国際レベルでの研究開発の最先端であると判断できる。今回は、残念ながらその個々については時間的な関係で詳細を知ることができなかったものの、整理された研究項目からは得るものが多かった。なぜならば、日本側の「知的構造システム」プロジェクトの要素技術として考慮すべき項目のいくつかに対して、その国際的技術レベルと問題点がここで体系的に整理されていたからであり、ここで収集した情報は今後の研究開発の指針を定めて行く上での大きな参考になるものと考えられる。



**Fiber & Electro-Optics Research Center
Bradley Department of Electrical Engineering**

Involvement in Smart Materials and Structures

1. Manufacturing of Sensors and Actuators

- optical fiber sensors and instrumentation systems
- ceramic actuators, including multi-layer ceramic actuators (MCAs)
- shape memory alloy films and coatings
- application of modeling, sensors and control to advanced composites and materials manufacturing (PMCs, MMCs, CMCs, other)

2. Evaluation and Control of Materials and Structures During Use

- optical fiber sensors for strain, T and other mapping in materials
- micro-integration of sensor/actuator elements into PMCs
- distributed pressure measurements on adaptive wing
- vibration analysis



(continued)

3. Nondestructive Evaluation of Materials and Structures

- optical fiber sensors for measurement of strain, corrosion, impact damage, fatigue cracks, delamination, others
- high temperature materials analysis (to 2000 °C)

4. Programs supported by

government (ARPA, Navy, Air Force, Army, NASA, DoE, other)
industry (aerospace, materials, electronics, power, communications,
civil structures)

図 6. 2 - 2 Fiber & Electro-Optics Research Center(FEORC)の研究概要

6. 2. 3 National Science Foundation

(1) 訪問先の概要

1950年に設立された、大統領府の直接機関であり、その設立目的は以下に要約されている：

“NSF provides support for a broad range of research and education activities in all fields of the physical, natural and social science, mathematics, and engineering.”

具体的には以下の3方針に要約される：

- (1) Strengthening the nation's overall capabilities in fundamental science and engineering
- (2) Investment in the education and advanced training of individual members of society: research grants provide support for;
 - senior scientists and engineers
 - postdoctoral researchers
 - technicians
 - graduate students
 - undergraduate and high school students, and schools, teachers and students
- (3) Addressing strategic research priorities;
 - high performance computing and communication
 - manufacturing
 - materials
 - global change, and
 - biotechnology

具体的には以下の10分野に、約2,500百万ドル20,000件以上のプロジェクトを援助している。

分野	件数	予算／百万
Biological Science	3,275	\$ 274.35
Computer and Information science and Engineering	1,542	\$ 219.37
Engineering	2,929	\$ 258.10
Geoscience	2,664	\$ 380.83
Mathematical and Physical Science	5,021	\$ 622.33

Social,Behavioral and Economic Science	1,700	\$ 85.99
Education and Human Resources	2,420	\$ 441.41
United States polar Research Program	457	\$ 108.50
Academic Research Facilities and Infrastructure	91	\$ 33.36
Experimental Prog.to stimulate Competitive Research	29	\$ 18.02

今回は、Joseph Bordogna(Asistant Director for Engineering)の部門のJ.Eleonora Sabadell (Program Director,Natural & Technological Hazards Mitigation)が主体となって対応してくれた。J.Eleonora Sabadellさんの属しているDirectorate of Engineeringは、6分野に分かれており、約45のprogramで構成されている。彼女を中心として、

“Nation's infrastructure and construction are not only at risk because of the action of natural forces such as earthquake,hurricanes,landslides,subsidence and other extreme natural phenomena,but their state is deteriorating from the effects of pollution,use beyond the original design,aging of materials,and obsolescence” の理解のもとに、“The goal is to provide society with safer,long-lived,efficient and economical civil engineering systems and facilities” の目的をもって、“Structural Control Research” を推進している。そこで、今回訪問での話の内容は、土木インフラの事が中心となった。

(2) 説明の内容

Joseph Bordogna/Asistant Director for Engineering

- NSFは大統領直属の機関であり、どの省庁にも属さない
- NSFの年間予算は\$ 3.3B
- 95~98%は大学関係へ
- receive proposals,evaluate adn fund.

一般の研究は1~3年、the center for excellenceに関しては5年援助する。

- NSFでは、military & Healthに関する研究は扱っておらず、civilian researchが主体である。

J.Eleonora Sabadell/Program Director,Natural & Technological Hazards Mitigation

- Strategy of NSF:
 - to enable nation's capacity perform better.
 - merit review:receive proposals and send them to peer review.

- geographic equity
- relevant to nation.
- Three core strategies:
 - (1) Infrastructure
 - people's knowledge & capacity
 - intellectual & physical
 - (2) Integration of interdisciplinary, education & research
 - (3) Partnership between agencies of government, universities, industries and nations

Ken P. Chong, Ph.D., P.E., Director, Structural Systems & Construction Processes

- Civil Infrastructure System (CIS) involves;
 - social, economic, environmental, legal, and political issues as well as technical ones.
- New Vision and Strategy
- Enrich the science and engineering knowledge base that can advance the understanding, assessment, and intelligent rebewal of civil infrastructure.
- Encourage the integration, transfer, and application of knowledge that will contribute to the intelligent renewal of infrastructure, and
- Integrate research with education and training to produce the next generation of engineers scientists, and others who will design, build, and use the civil infrastructure systems of the future.
- The need to develop new scientific and engineering knowledge in the following areas:
 - (1) Deterioration Science examines how materials and structures break down and wear out through research in material science, chemistry, biology, geotechnical engineering, mechanics, failure processes, and risk/reliability.
 - (2) Assessment Technology determine how durable, safe, and environmentally benign our structures and facilities are, which lead to nondestructive evaluation techniques, improved sensor technologies, smart self-correcting materials, and enhanced geographical information systems.
 - (3) Renewal Engineering extends and enhances the life of civil infrastructure systems and components which otherwise continue to deteriorate with focusing research

on new approaches in designing effective demolition, the compatibility of repair materials, recycling of appropriate resources, novel sensors that monitor wear, and so on.

(4) Institutional Effectiveness and Productivity recognizes the importance of those factors affecting the decision processes underlying the provision and management of civil infrastructure on the economic and social productivity of society.

- Smart Structure

- (1) Sensors

- (2) Actuators

- Potential Use

- (1) assessing remaining useful life

- (2) erosion and corrosion detection

- (3) fire detection

- (4) structure health monitoring

- Optical Fiber

- (1) embedding process in concrete structure

- (2) optical fiber ageing

- (3) effects of exposure to moisture and chemicals

- Smart Concrete

- (1) self-healing concrete

- (2) intrinsically smart structure

- (3) Actuators

- Knowledge Transfer:

- Research on the barriers to innovation and knowledge utilization,

- Proof-of concept experiments,

- Human resources and educational programs,

- Workshops and seminars, and

- Information services and networks.

Dr. Kishan Baheti, Program Director, Engineering Systems

- Knowledge Transfer:

- Sensor and Control

- many aspects of research

- NSF initiatives
 - Intelligent control
 - structural control
 - biosystems analysis control
 - sensor and sensor systems for power systems and other dispersed civil infrastructure systems
 - intelligent transportation system
planning experiments on Interstate-5 in San Diego

Chen-Ching Liu, Ph.D., FIEEE, Program Director, Power Systems

- Sensor and Sensor Systems for Power Systems and Other Dispersed Civil Infrastructure Systems
 - sensor for detecting remaining life
 - the health of system
 - alternatives of frequent recalibration

6. 2. 4 メリーランド大学

(1) 訪問先の概要

大学紹介資料が未入手なので詳細については不明であるが、工学部内では Aerospace engineering, Electrical Engineering, Institute for Systems Research, UMBC, Materials and Nuclear Engineering, Mechanical Engineeringが共同でスマート構造の研究を実施している。

(2) 説明の内容

1) Overview(Dr. James S. Sirkis)

メリーランド大学での研究状況 (図 6. 2-3、4 参照)

2) Rotorcraft(Dr. Chopra)

陸軍の資金を基に回転翼機に対するスマート構造の適用を研究している。振動を軽減し、ブレードの動的応力を最小化し、安定性を強化し、騒音を減少させ、取扱を容易にし、初期欠陥を検知するスマート・ロータのための基礎技術を開発している。またアクチュエータ、センサー、分布型コントローラ等のリファインを実施している。

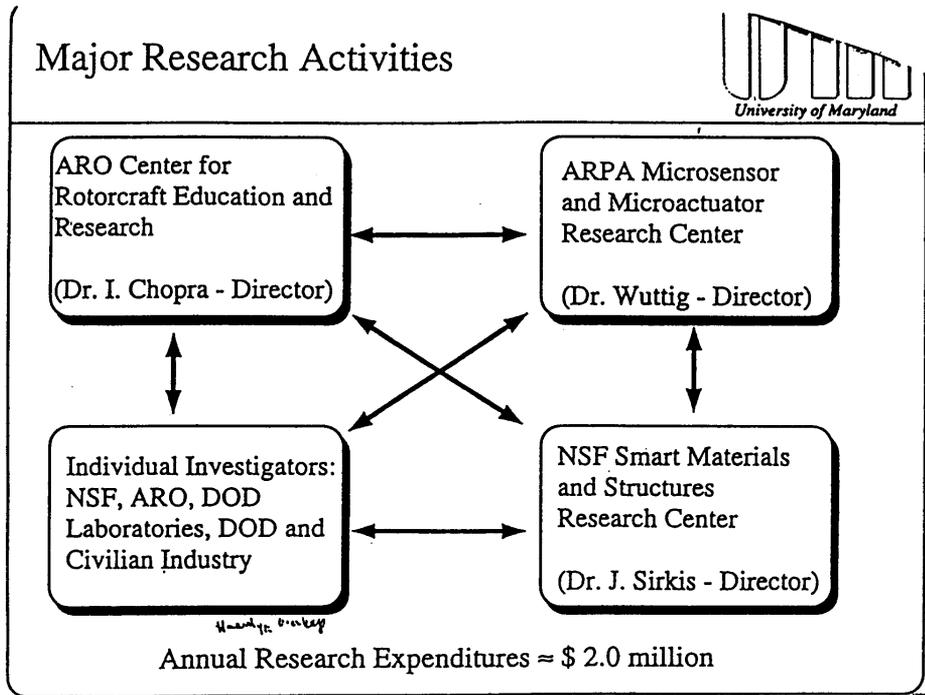


図 6. 2-3 メリーランド大学での研究概要

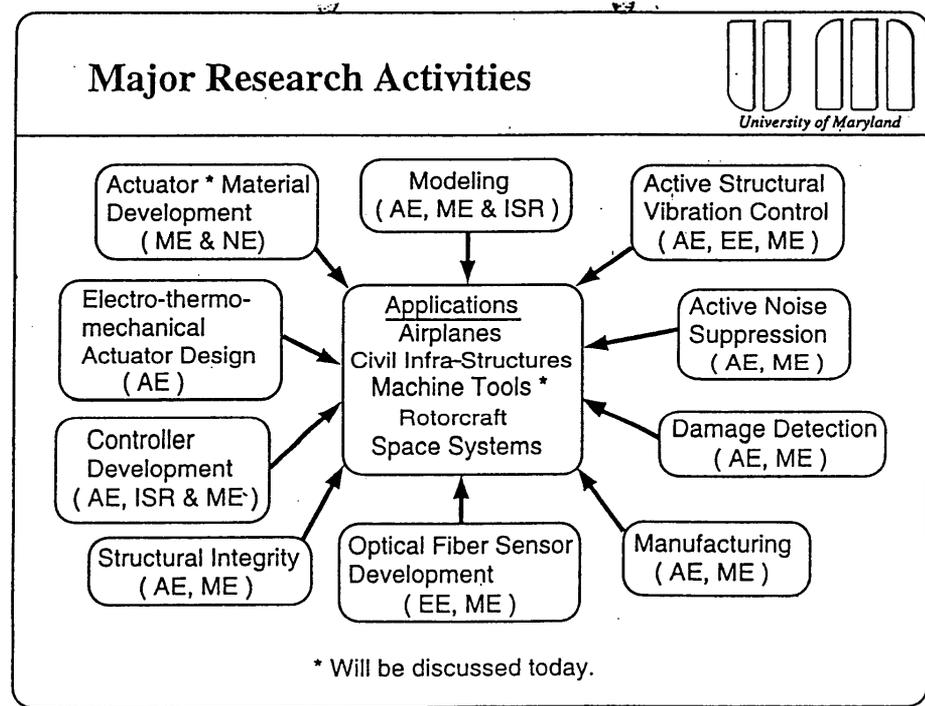


図 6. 2-4 メリーランド大学での研究活動

スマート・ロータ・ブレードの研究は真空チャンバー→ホーバー・スタンド→風洞の順に進めている。

研究の現段階での結論を述べると、

(a)後縁フラップ

目標値8度に対して現状の達成フラップ角は3度である。この概念はフル・スケール機に対しても適用の可能性はある。

(b)ブレードを捻る型

目標値2° に対して0.3° の捻り角を達成できた。この方式は部分的な振動軽減に利用できそうである。

(c)形状記憶合金アクチュエータ

静的変形を起こさせるのには利用できる。

(d)解析モデル

捻りのモデル化を改善しロータ解析コードに導入する必要がある。

(図6. 2-5、6参照)

2) Control Systems(Dr.krishnaprasad)

Intelligent Controls Research at ISRの研究概況の説明。

3) Materials(Dr.Wutting)

ハイブリット型アクチュエータについて説明。高出力、高速のアクチュエータが実現できるといっている。

4) Manufacturing(Dr.Zhang)

スタック・タイプの多層アクチュエータを用いたスマート・ツール・ポストの研究を紹介。切削加工におけるビビリ振動を抑えることに成功している。

5) Modeling(Dr.Dasgupta)

スマート構造の数学モデルの研究例の紹介。

(3) 所感

学内の協力体制も良好でよい雰囲気で行っているとの印象である。ヘリコプターのロータ・ブレードのスマート化の研究を積極的に進めており、この分野では世界のトップ・レベルにあると思われる。

Bimorph Flap Actuation System

Blade Cross Section

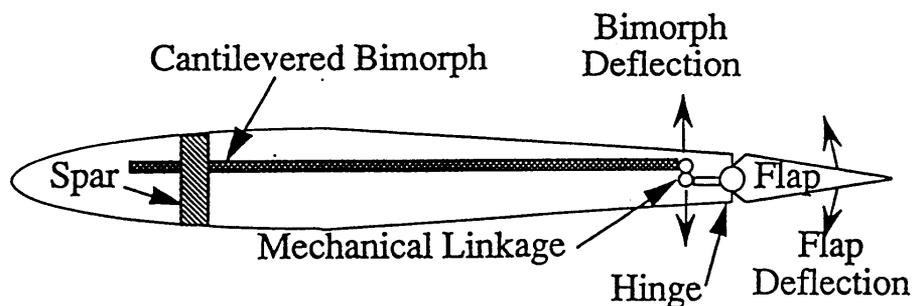


図 6. 2-5 バイモルフ型フラップ駆動装置

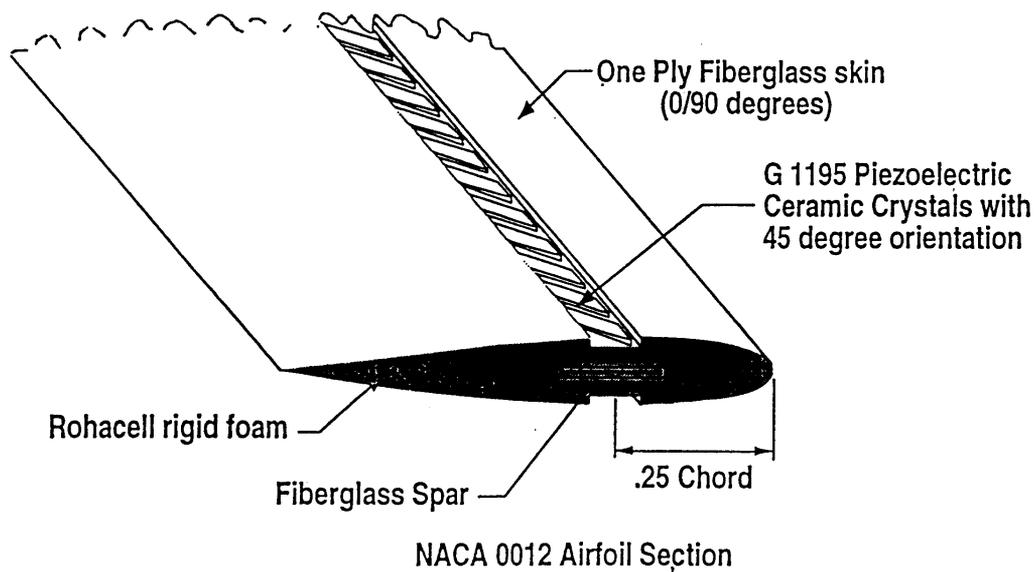


図 6. 2-6 埋め込み型

6. 2. 5 ノースロップ・グラマン社

(1) 訪問先の概要

- 1) 最近、ノースロップ社と一緒に、activityの範囲が広がった。
- 2) 会社全体の機能組織図、及び知的構造システム等の研究を行っている
- 3) R&Dセンターの陣容は、訪問したBethpageの研究所に約300人、西海岸の研究所に約300人の計600人である。Bethpageの研究所は、もともとグラマン社の研究所で、西海岸の研究所はノースロップのものであった。
- 4) R&Dセンターの研究開発予算のソースは、ARPAから30%、NAVYから20%、残り50%は外部資金。小額だが、民間との共同研究も行っている。
- 5) 研究開発の売り上げ高比率は、3~4%程度。総売上高\$ 6billionとすると、\$ 180~240millionが研究開発費。
- 6) 「Bethpageの研究所は良いところで、scientistを大切にしているので、優秀な人材が永く勤めている。よって、日本と共同研究を永く続けても大丈夫と太鼓判を押している。
- 7) スマート構造の研究は、1987年から行っている。

(2) 説明の内容

- 1) スマート材料・構造の利点及び問題点について（図6. 2-7参照）。
- 2) ノースロップ・グラマン社で現在進めているスマート材料・構造の研究開発項目（図6. 2-8）。更に、ノースロップ・グラマン社が共同研究として興味を持っている技術分野（図6. 2-9参照）の提案。
- 3) 現在研究開発を進めている項目の中から、次の五テーマにつき内容の概要説明。

(1)形状適応翼 Adaptive Wing

遷音速域での空気抵抗を減らす最適翼形状制御

(2)ヘルス・モニタリング・システム Structural Health Monitoring System

(3)振動制御 E2-C Active Vibration Reduction

電子機器によるミッションを行うターボプロップキ機の搭乗員乗心地改善、搭載品振動環境緩和、修理間隔改善を目的とした振動低減

(4)工作機械のがたつき制御 Machine-Tool Chatter Suppression

“TERFENOL” アクチュエータを用いた振動制御

(5)PZTの破壊力学 Fracture Mechanics of PZT

PZT材料中の欠陥につき、電氣的信号から、クラック進展、エネルギー

解放率、破壊靱性等をつかまえる研究

4) 構造制御研究室(Controlled-Structure Lab.) の見学

(1)衛星の動的模型(Satellite Dynamic Model)

piezoelectric crystalを使用した振動制御デモ・モデル

(2)形状適応翼(Adaptive Wing)のbread-board model

構造様式としては、トラス・リブが適用しやすいとの見解。

“TERFENOL” アクチュエータの試作品を見た。非常に重い。

(3)構造振動制御ソフトのデモ

次の三ステップで設計を行っていた。

第一ステップ(ProtoSim) Structural Dynamic Dataを取り込む。

シミュレーションができるようにする。

第二ステップ(ProtoBlock)構造振動制御アルゴリズムの作成

第三ステップ(ProtoOpt) 最適化

(3) 所感

幅広く研究しているが、feasibility studyのレベルである。BBM(Bread Board Model)を製作して、実験結果を取り込みながら研究を進めており、堅実である。研究のターゲットは、military useで、軍用航空機への適用が主である。HSCT等の民間機への具体的な適用計画は持っていない。なお、日本との共同研究には好意的であるとの印象を持った。

BENEFITS OF SMART MATERIALS & STRUCTURES

- ACCURATELY CONTROL SHAPES OF STRUCTURES SUCH AS AIRFOILS & HYDROFOILS
- VIBRATION CONTROL
- PRECISION POINTING
- PRECISION MACHINING
- SUPPRESSION OF ACOUSTIC NOISE
- HEALTH MONITORING OF STRUCTURES
- WEIGHT REDUCTION

PROBLEMS WITH SMART MATERIALS & STRUCTURES

- COST
- WEIGHT
- COMPLEXITY
- RELIABILITY
- REPAIRABILITY

図 6. 2-7 スマート材料・構造の利点及び問題点

RESEARCH & DEVELOPMENT

ADAPTIVE WING
E-2C ACTIVE VIBRATION REDUCTION
MACHINE-TOOL CHATTER SUPPRESSION
ACTIVE CONSTRAINED-LAYER DAMPING
SATELLITE VIBRATION SUPPRESSION
OPTICAL FIBER EMBEDMENT
BRAGG GRATINGS
PRECISION OPTICAL ALIGNMENT
PZT FRACTURE MECHANICS
NEURAL NETWORKS TO ASSESS DAMAGE
EMBEDDING ANTENNAS IN AIRCRAFT SKINS

図 6. 2-8 スマート材料・構造の研究開発項目

SUMMARY

AREAS OF INTEREST

- **ADAPTIVE WING**
- **ACTIVE VIBRATION REDUCTION**
- **MACHINE-TOOL CHATTER SUPPRESSION**
- **ACTIVE CONSTRAINED-LAYER DAMPING**
- **SATELLITE VIBRATION SUPPRESSION**
- **PRECISION POINTING**

**WE WELCOME THE OPPORTUNITY TO EXPLORE AREAS
FOR COLLABORATION**

図 6. 2-9 共同研究として興味を持っている技術分野

6. 2. 6 ヴァーモント大学

(1) 訪問先の概要

ヴァーモント大学はモンリオールの南約80マイルに位置するヴァーモント州バーリントンにあり、ヴァーモント州唯一の総合大学である。訪問した1月下旬頃は、例年数フィートの積雪があるとのことだが、今年は暖冬で地面全体がようやく白くなる程度の積雪であった。大学全体の学生数は、約1万人であり、そのうち8割は学部学生で、年間予算は約\$50Mである。スマート構造の研究に関しては、特にビルや橋、ダムなどの民間のインフラストラクチャのスマート化に関する研究論文を多数発表している。

(2) 説明の内容

1) Overview of the University and its Mission(Dr.Tritton)

Dr.Trittonは大学のVice Provost(Provost:教務事務官)としてだけでなく、DDS (Drug Delivery System、またの名をSmart Drug)の開発に関する研究も行っている。ヴァーモント大学では、学部間でのCollaborationがうまく機能しており、日本との共同研究の模索と、大学側では研究予算の獲得の好機として有効に活用したいとの挨拶がなされた。

2) Technology Transfer at University of Vermont(Dr.Skiff)

Technology TransferのDirectorとして、学外との共同研究、学外への研究成果の普及および産業界との交流を担当しているとの短い挨拶。

3) Smart Structures Activities at University of Vermont(Dr.Huston)

Dr.Hustonはヴァーモント大学に来る前はHighway Agencyで橋の空力設計を担当しており、元々はAerodynamicsが専門である。ヴァーモント大学におけるスマート構造関連の研究全体の紹介が以下の3項目に分けて行われた。

(a)Instrumentation Systems for Civil Structures:光ファイバセンサの適用

(Stafford Bldg, Winooski One Dam,Middlebury Railroad Bridgeの3つの適用例がある)、コンクリート構造の損傷および腐食検出(実験室レベル)、および構造のモニタリング結果の遠隔地からのアクセス手法(インターネットを利用)等の研究を行っている。

(b)Mechanical and Aerospace Systems:複合材料内部へPZTセンサを埋め込んで損傷を検出する研究等が行われているとのことだが、具体的な説明は少

なく詳細不明。

(c)Medical Systems:Smart holo vest,Surgical instrumentsなど。詳細説明無し。

会議後に行われた見学の様子も併せて考えると、(b)は基本的な実験レベルであり、まだ着手後あまり時間がたっていないような印象を受けた。(c)については説明者と我々訪問者共に、専門分野が異なるためにあまり説明が無かったとも考えられる。いずれにせよヴァーモント大学側の一番のセールスポイントは、(a)のインフラストラクチャのモニタリングに関する研究であり、コンクリート構造物を光ファイバセンサを用いて監視すること、およびその監視結果をネットワークやテレメトリを通じて遠隔地でも把握すること、の2点に研究の力点が置かれていると考えられる。次のDr.Fuhrのプレゼンテーションでは上記(a)の具体例について説明が行われた。

4) Specific Examples of Smart Structures Research(Dr.Fuhr)

Dr.Fuhrは10年前まではNASAに在籍しており、スペースシャトルの開発に関与していた。前項3)の具体例としてWinooski One Hydroelectric Damの紹介が行われた。このダムは大学から車で約10分のWinooski川にかかる出力7.5MWのダムで、3台のタービンが稼働している。“Smart Civil Structure”のケーススタディとして、振動センサや圧力センサなどの5種類の光ファイバセンサが用いられている。これらのセンサによる計測値には、ダムの近くに設置されたビデオカメラの映像と共にインターネットを通じて世界中どこからでもアクセス可能であり、遠隔地からも容易にダムの状況を把握することができる。

5) Field Trip to the Winooski One Hydroelectric Dam

前項4)のダムに実際に赴き、その状況を見学した(図6. 2-10、11及び表6. 2-1参照)。光ファイバセンサは既に色々な場所(ダム本体の内部、タービンの台座など)に組み込まれているので、接続ボックスなどしか見ることは出来なかった。ダムの水量コントロールにはRubber Dam(ゴムはブリジストン製でKevlar繊維/EPDMゴム)が用いられており、内部の圧力および水量は光ファイバセンサによって測定される。また、タービン台座の振動測定についてはNSFの予算による4年間で\$600,000のプログラムである。

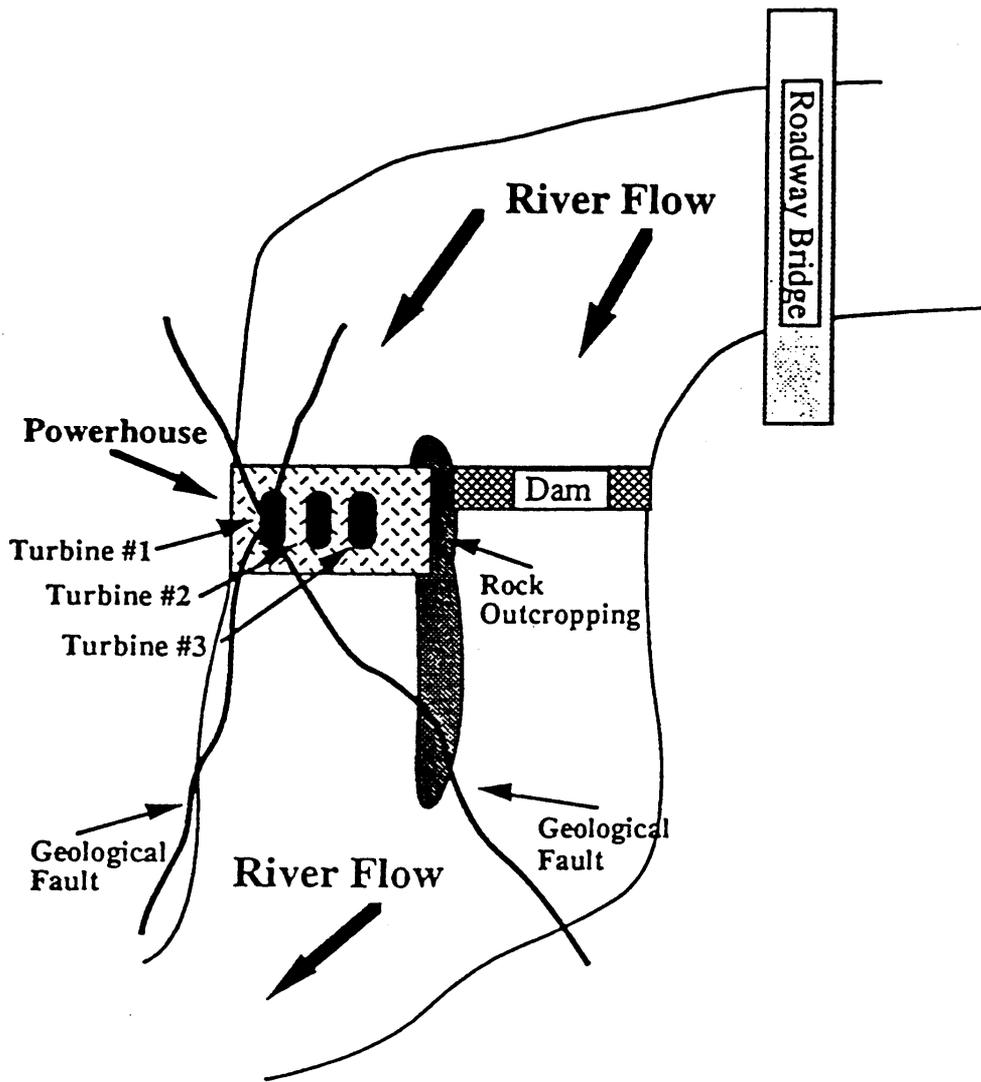


図6. 2-10 ダムの概況

表 6. 2-1 光ファイバの種類と設置状況

Types of Fiber Installed

Size, type, manufacturer

100/140 (cable) Northern Lights Cable

200/300 (fiber) Ensign-Bickford

62/125.100/140 (fiber, cable, multiconductor cable)

Siecor

4/125 (fiber) Corning

8/125 (fiber, cable) Siecor

300/700 POF (fiber) Toray, Hoechst Celanese

Fiber Optic Sensors Installed

vibrations (speckle)

(simple) continuity

pressure (polarization based, multiplexed)

vortex shedding (water flow rates, turbulence)

intrusion (coherence collision)

+ communications (sometimes simultaneous)

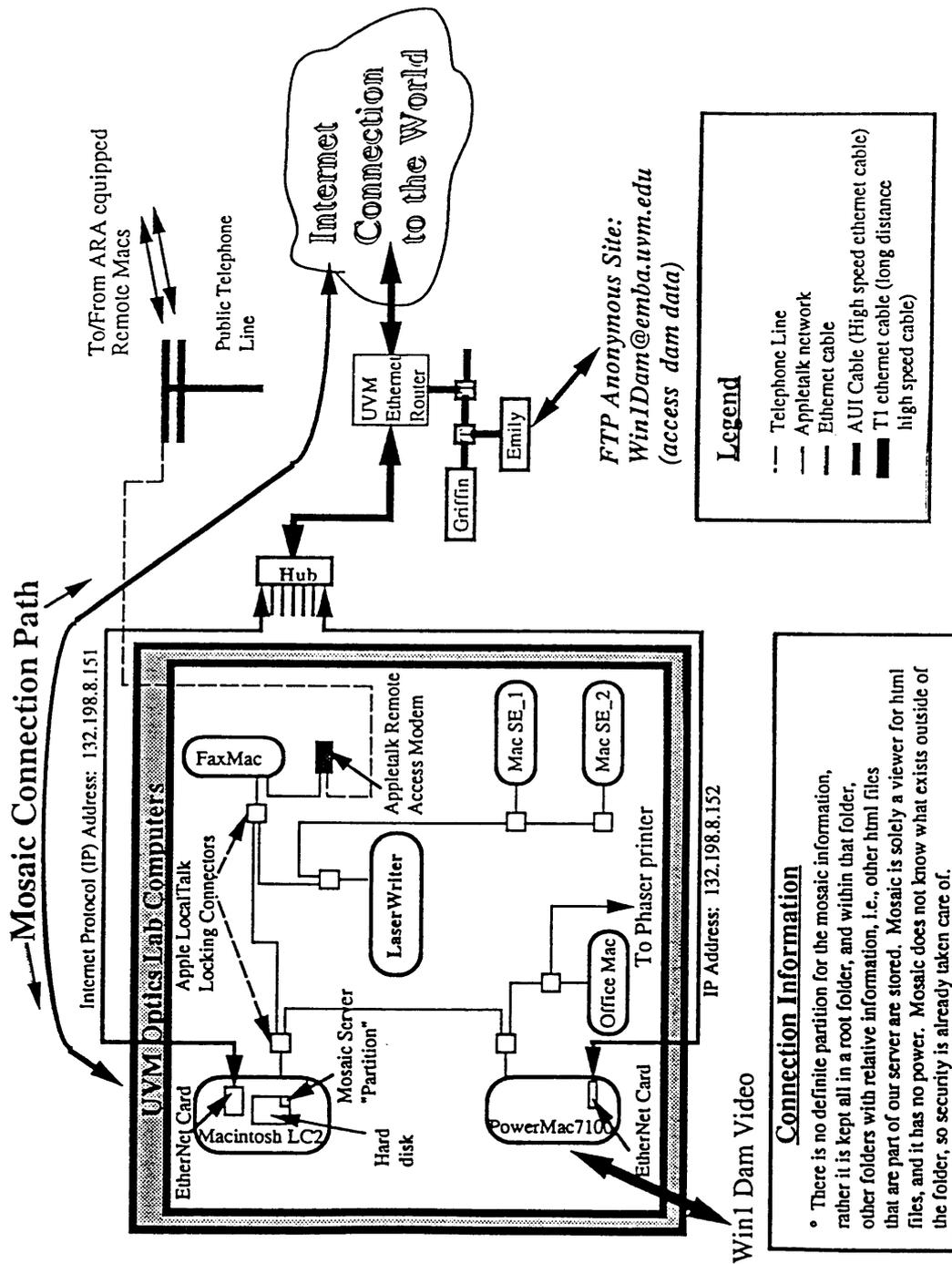


図 6. 2-1-1 データのネットワークシステムの概要

6) 実験室見学

(a) Embedded Ultrasonic Transducers in Composites

φ3~5mm程度のPZTセンサをFRPパネル（厚さ10mm程度、ガラス/エポキシ）の内部に埋め込んで、損傷検出を行う研究。

(b) Laboratory Studies of Damage and Corrosion Detection in Concrete

プラスチック光ファイバ（東レ製）を用いて、鉄筋とコンクリートとの剥がれを検出する手法の研究が行われている。その他、鉄筋の腐食センサ（検出原理は不明だが光ファイバセンサ）、鋼製ワイヤの入ったコンクリート製カヌー（スマート構造との関連は不明）を見学した。

(c) 木材骨組み構造のヘルスマモニタリング

スケールダウンモデルでの試験を準備中であるが、詳細不明。政府の予算による研究。

(3) 所感

今回の訪問先の中では、実際のコンクリート構造物に適用した研究を行っているのはヴァーモント大学が唯一の機関であった。いずれの訪問先においても、スマート構造の適用は航空宇宙分野だけでなく、インフラストラクチャの分野においても重要であるとの認識が強く、その意味ではヴァーモント大学は一步先をいっているとの感がある。

例えば、ダムの監視の研究では、構造の要所に様々な光ファイバセンサを適用しており、実際のニーズに良く対応した計測データを提供していると考えられる。また、鉄筋とコンクリートの剥がれを光ファイバで検出する手法は、非常に原始的な原理ではあるがコンクリート構造物のいわば初期破壊の一つを検出することになるので、ヘルスマモニタリング手法として有効であると考えられる。数十年の耐用が求められるコンクリート構造物に対して、スマート構造システム自身の信頼性を評価することも今後重要と考えられる。

Public Relations Officerの出席やテレビ局の取材などからも明かなように、ヴァーモント大学側の対応は大変積極的であった。

6. 2. 7 ボーイング社

(1) 訪問先の概要

ボーイング社(The Boeing Company,本社シアトル)は、民間機グループ(Boeing Commercial Airplane Group)と防衛・宇宙グループ(Boeing Defence & Space Group)からなる世界最大の航空宇宙メーカーである。

今回の訪問は、BCAG HSCT構造とりまとめ責任者のMr.Donald L.Grande (当日不在)のアレンジにより実現したもので、会議場所はHSCT開発技術者の集まっているシアトル南部レントンのボーイング#721ビルディング内であった。既に250人の専任技術者がHSCT開発研究に従事している。

但し、今回の調査対象のSmart Material/structureに対してはBDSGの中で実際の研究が行われていることから、上述の通り同グループから5人の出席を得、説明・質疑は彼らを中心に行われた。BDSG全体は15000人(シアトル地区)で約10人がSmart Structureの研究に従事している。

(2) 説明の内容

1) Smart Structureの研究状況(BDSG,Mr.Jacotより)

(a)研究実績

すでに1987年から研究を開始している。光ファイバセンサ、形状記憶合金(NiTi-nol) 適用炭素繊維/エポキシ複合材ビームのダンピング研究からスタートし、 piezo素子 埋込アルミビーム/トラス構造のダンピング研究等を経て、現在は能動構造音響制御 (Active Structural Acoustic Control)の研究を行っている(図6. 2-12参照)。

(b)応用技術

過去の研究例の代表として、piezoをセンサ/アクチュエータに使ったアクティブダンピング(能動振動制御)の実験とその電子制御系の小型化(1536in³→0.7in³)の紹介があった。

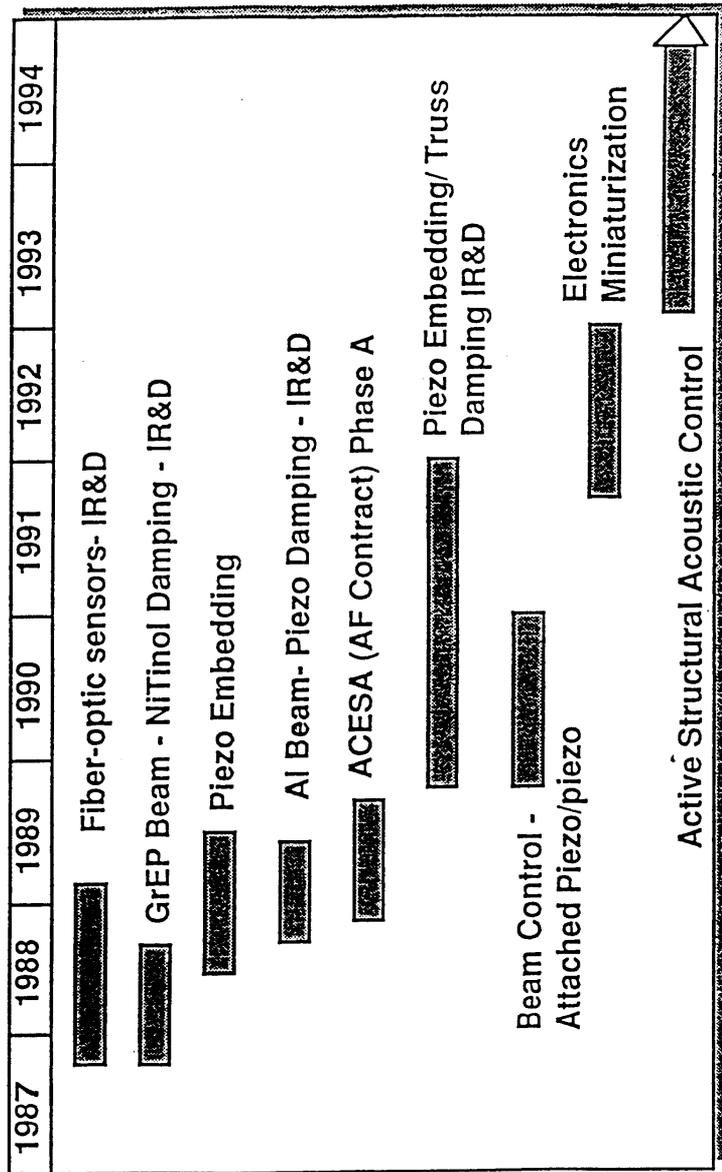
さらに現在重点をおいて実施中のパネル制御と騒音低減研究について説明あり、特に航空機内装パネルにpiezo素子を埋込み構造自身で音響制御を行うASAC手法は、スマート構造の応用として最も実現性の高いものとして注目される。

(c)空力弾性制御

ARPA研究で実施中のPhase1プログラムの紹介があった。スマート化による狙いとして、音響・振動・空力性能向上をあげ、次の4テーマに取組

Boeing
Defense &
Space Group

Smart Structures Experience



a85vckof117.5vashistLpp25

図 6. 2-1-2 ボーイング社における Smart Structure の研究状況

んでいる。

(i)スマート材料／プロセスの改良・低コスト化

- ・ 30～100 $\mu\phi$ のピエゾ繊維の押出、ゾル・ゲル法プロセス、繊維開発はペンシルバニア州立大学と共同開発。

(ii)押出ピエゾ繊維による翼トルクボックスの制御

- ・ 翼型の振り／曲げ
- ・ ロータクラフト、自由形状翼、尾翼小型化への応用

(iii)ピエゾアクチュエータ式後縁フラップ（図6. 2-13参照）

- ・ 翼型下面にピエゾ素子を配し、後縁フラップを稼働。

(iv)ピエゾセンサによるヘルスマニタリング

- ・ 金属ワイヤや炭素繊維にピエゾをコーティングしたセンサの特性評価と応用化研究

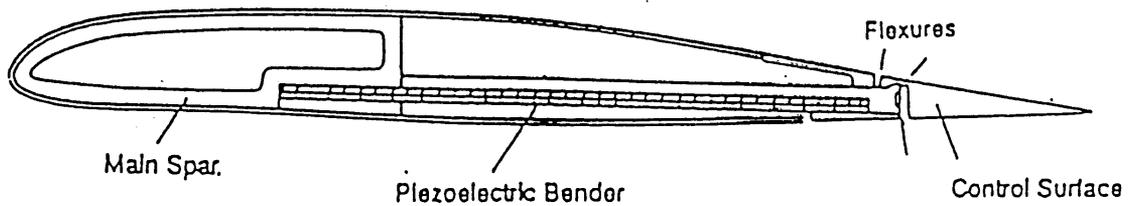


図6. 2-13 ピエゾアクチュエータ式後縁フラップ

2) Structural Health Monitoring研究状況(BDSG,Dr.Ikegamiより)

(a)経年軍用機への適用

KC135・B52の経年機の寿命延長や生存性向上と検査・保守コスト低減を狙いにスマート構造センサ／プロセッシング技術の開発と構造一体化モニタリングシステムの構築を目的として次の研究を行っている。

- (i)光ファイバ腐食センサ開発と既存センサ評価
- (ii)KC135・B52構造の問題部位へのセンサ組込み
- (iii)AE（アコースティックエミッション）と衝撃負荷の信号処理アルゴリズムの作成

(b)将来軍用機への適用構想

主翼や尾翼外板に配置したセンサ群により腐食・クラック・はくり・衝撃・温度・歪をモニタしダメージメカニズムを明らかにしようとするシステムで、データ集中管理パッケージや信号処理迄具体的に検討されている様子が伺えた（ボーイング知的所有権あり）。

(c)腐食センサの開発

1994年に実施した研究例の紹介あり。

- (i)既存のバイメタル式センサの腐食（塩水噴霧）環境での評価
- (ii)新型センサの試作と腐食環境評価

2024、7075Alクラッド光ファイバ特殊センサを開発、このセンサのAlクラッド部の腐食により光学特性が変化することを利用して、小型試験片を用いた評価試験を実施中。（図6. 2-14参照）

(d)AE欠陥モニタリングの研究

1994年に実施した研究例の紹介あり。

- (i)50KHz～2MHz広帯域AEトランスデューサの開発
- (ii)AEデータ計測システムの構築
- (iii)7075T6材クラック伝播AE信号データの収集
- (iv)複合材ビームのはくり進展AE信号データの収集

(e)まとめ

BDSG研究中の構造ヘルスマニタリングを下記にまとめる。

- (i)利点
 - ・検査／保守コスト低減
 - ・検査作業による機体損傷の低減
- (ii)光ファイバ腐食センサの有効性

Transmissivity Corrosion Sensor Development

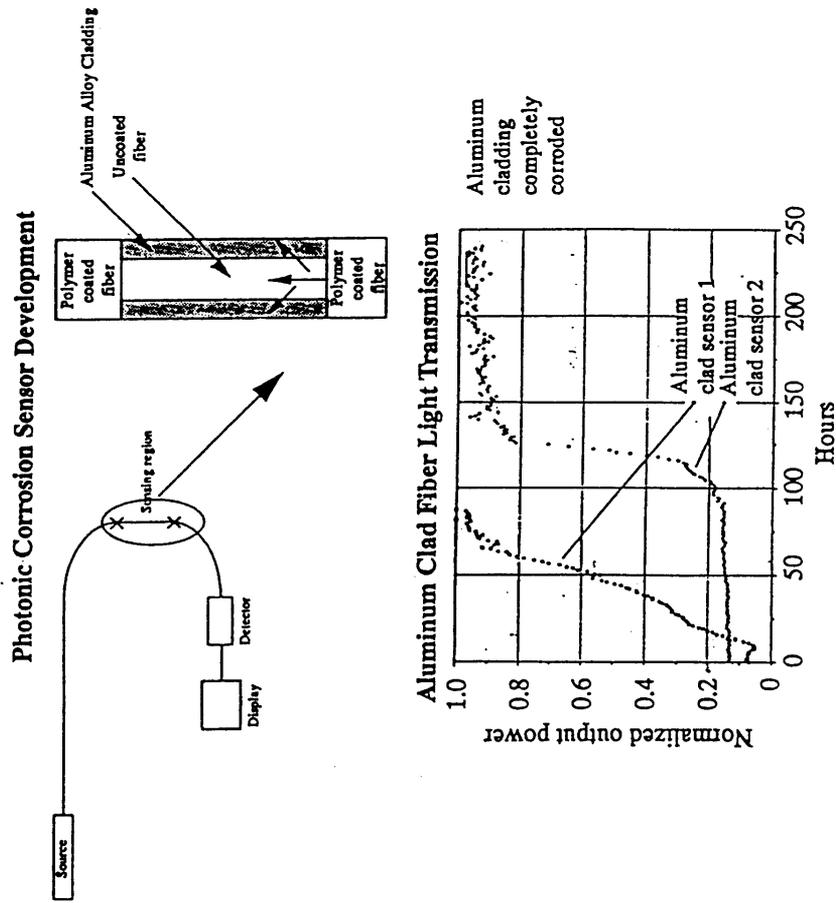


図6. 2-1-4 新型光ファイバセンサの試作と耐腐食性評価

- ・ボーイング/VIP共同開発
- (iii)腐食センサの評価
 - ・光ファイバ、バイメタル
 - ・共同研究の促進
- (iv)AEによるクラック／はくりの発生・進展検知
 - ・センサ開発・データ処理・解析の必要性

(3) 所感

世界のボーイング相手に情報交換が果たしてうまくいくか心配であったが、実際に研究中の防衛・宇宙グループからキーマンの出席を得、相互の説明と討議により予想以上の収穫があった。Mr.Grandeグループのアレンジにお礼を言いたい。

スマート材料／構造の研究については、2項の通りすでに1987年から開始しており、宇宙構造物の制振を狙った基礎的研究が行われている。既存の光ファイバ、形状記憶合金、 piezo を利用したビームやトラスの制振など一連の評価を済ませているが、実用演進に進んでないと思われる。現在研究中の重点は、 π 動構造音響制御(ASAC)に移っているが、現状のアクチュエータ材料の出力を考慮すれば、この分野が手近な対象として適当と思われる。

本格的なスマート構造化は、ARPA資金による開始している翼型コントロールなどの空力弾性制御分野であろう。大学と共同開発中のセンサ／アクチュエータ材料としての、piezoの繊維化及び既存繊維へのpiezoのコーティングのアイディアは、脆くて扱いにくく構造物へ適用し難い現piezoセラミックス素子の短所を大幅に改善し、かつ組合せにより変形能力(出力)を大きくとれる可能性もあるので、非常に興味深い。

ボーイング社におけるスマート構造の実用は、防衛・宇宙が先行し、HSCTなどの民間機へは、材料・構造・制御系を含めた低コスト化が実現しない限りかなり遅れそうである。

構造のヘルスマニタリング技術も、一種のスマート材料／構造としてとらえ、センサの開発から機体適用システム化迄研究が幅広く行われている。なかでも経年機対応の腐食センサ自身の開発にも本格的に取り組んでいるのは注目される。又、AEについても実用化を目指し精力的に開発を進めており、これらを組合わせた構造モニタリングシステム搭載のB52、KC135が実用飛行するのも間近いものと思われる。

6. 2. 8 ワシントン大学

(1) 訪問先の概要

ワシントン大学は、1861年シアトル市に設立されたアメリカ北西部最大の州立総合大学。文理学部、経営学部、法学部、工学部、建築学部、医学部、森林学部、海洋学部を含む16の学部、大学院、社会人プログラムには、約35,000名の学生が在籍し、約3,000名の教員を擁している。中でも科学技術の研究分野と大学院教育の評価が高い。

シアトル市には世界最大の航空機メーカー、ボーイング社があり、同社との交流、共同研究も盛んに行われている。

(2) 説明の内容

1) Dean J.R.Bowenによる工学部の概要紹介

工学部は、航空宇宙、バイオ、土木、コンピュータサイエンス、電気、産業技術(Industrial Engineering)、材料、機械、原子力、テクニカルコミュニケーションの10学科からなり、全米で高い評価を受けており、ワシントン大学の中で重要な地位を占めている。

7名の国立工学協会会員、Presidential Young Investigator Awardを受賞した43名の若手教官を含む約230名の教官が、約3,000名の学部・大学院生の指導に当たっている。

ワシントン大は研究機関としての評価は高く、研究助成金獲得額では、全米でジョンズホプキンス大に続いて第2位（因みに3位MIT、4位スタンフォード大）である。学内研究だけでなく、合衆国政府、州政府、民間企業との共同研究が盛んであり、研究費は官民合わせて年間約430M\$（民間から40～45M\$）、うち工学部は20～30M\$である。

2) Prof.M.Taya:ワシントン大学におけるSmart Composite Materials, Smart Structureの研究状況

(a)M.Tayaグループ(H.R.Inoue,K.Mizuuchi)は表1に示すように、主として形状記憶合金繊維を用いた複合材料と圧電材料や導電材料との複合材料“Electronic Composites”の研究を行っている。

(b)Strengthening mechanisms of TiNi shape memory fiber /Al matrix composite

表6. 2-2に示す設計コンセプトよりアルミニウムマトリックス中に圧縮応力を残し、これにより引張強度、 K_{IC} 及び高温特性を向上させよ

表 6. 2-2 Tayaグループの研究内容

Smart Composite Materials

**M. Taya, Department of Mechanical Engineering
H.R. Inoue, and K. Mizuuchi, Materials Science and Engineering
University of Washington**

1. Smart Composites

1.1. Shape Memory Alloy Fiber Composites

- a. TiNi fiber/Al alloy matrix composite
- b. TiNi fiber/epoxy matrix composite
- c. TiNi fiber/graphite fiber/epoxy matrix composite

1.2 Electronic Composites

- a. Piezoelectric composites
- b. Conductive short fiber/elastomer matrix composite
- c. Anisotropic conductive films/ adhesives for electronic packaging

2. Micromechanics Modeling

- a. Eshelby's model
- b. Generalized Eshelby's model
- c. Percolation model

3. Processing

- a. TiNi fiber MMCs
- b. TiNi fiber PMCs
- c. Piezoelectric composite
- d. Conductive elastomer composite

うとする試みであり、Prof.Tayaの説明は主としてEshelbyの式に基づく解析モデルによる本系複合材料の強化機構の解析と実験結果との比較であり、Tayaらの解析モデルが実験結果と良い一致を見ている。

(c)TiNi Fiber/Epoxy Matrix Composite

エポキシ樹脂中に予ひずみを与えたTiNi繊維を埋め込み、通電加熱により形状記憶収縮させ、亀裂先端での応力集中、K値の低減を図る。

(d)CF/Polyimide/TiNi Fiber Composite

耐熱樹脂系複合材料(CF/Polyimide)中にTiNi繊維を複合化することにより、前述の亀裂先端での応力集中の低減、強靱化に加えて、TiNi繊維の持つ大きな内耗値及びその相変態に伴う剛性変化を利用することにより、activeな制振性を付与することができる。本系材料は、Mach~2.4のHSCT用機体構造に有望であり、基礎的な研究を進めている。

(e)Electronic Composites

各種Electronic Compositesについて機能発現とそれらの材料系についての概要があり、そのうちの力学的挙動（応力、歪）と電氣的挙動（電場、電位）とのカップリング機能を発現する機能性複合材料として、

Piezoelectric Composites(PZT/polymer), Piezoresistant Composite (Ni-coated Gr/rubber)について紹介された。

(f)Ni-coated Chopped Graphite Fiber/Elastomer Matrix Composite

歪と共に伝導性が向上する力学特性と電気特性のカップリング現象を示す複合材料。本系材料のプロセッシング、Rubber Switchへの応用、電気伝導率と短繊維のVfと繊維のアスペクト比の関係、モンテカルロ法に基づくFiber Percolation Modelによるカップリング現象の解析について紹介された。

(g)Micromechanics of Piezoelectric Composites

圧電複合材料の応用：静水圧下では、圧電セラミックスの静水圧ひずみ係数(hydrostatic strain coefficient) d_h は小さく適用に限界があるが、圧電セラミックスと圧電性を有しない高分子と組み合わせた複合材料は圧電セラミックス単体よりも大きな d_h を示すので、transducerの寸法が音の波長よりかなり小さい低周波hydrophoneへの適用性に優れており、下記の応用が有望である。

- Hydrophone
- Medical Diagnostic Ttransducers
- Smart /Active Materials

圧電複合材料のマイクロメカニクス：Tayaらは機能性複合材料のマイクロ構造設計のためにEshelbyの方法(Equivalent Inclusion Method)を力学的挙動と電気的挙動のカップリング問題に拡張しているが、その骨子の圧電効果カップリングについて述べられた。

(h)複合材料の物性値推定のためのマイクロ・メカニクスモデル

Tayaらが進めてきたEshelbyの方法の複合材料の熱的及び電気的物性や力学的挙動と物理的挙動のカップリング問題への拡張及びFiber Percolation Model。

3) Prof.K.H.Inoue:形状記憶合金(SMA)及びスマート複合材料

SMAの基礎から応用までの解説、高温SMAに関する教授の最近の研究及びNiTi Fiber/Al複合材料のプロセッシングについて述べられた。

(a)SMAの結晶学、マルテンサイト変態の熱力学、形状記憶効果[one way memory及び two way memory]及びsuperelasticityとそれらの応用例の紹介など教科書的な解説が先ずなされた。

(b)Cu-Al-NiやTiNiなどの慣用のSMAは、Ms点が室温あるいはそれ以下で形状記憶効果が室温付近であるため、高温で使用し得るSMAの開発が望まれている。Prof.Inoueらの開発中の新しい高温SMAの紹介がなされた。TiPd-X合金でMsの高い材料が得られる可能性が大きく、X=V,Cr,Mn,Fe,Co,Niなどについて検討中である。本系合金で使用温度800Kまでの高温形状記憶デバイス用材料の開発の可能性が大きい。

(c)TiNi繊維を用いたスマート複合材料

TiNi Fiber/Alのconcept,buckling control,TiNi/Alの界面反応問題（界面反応層の生成によりNiTiの形状記憶効果が劣化）などについての説明がなされた。Prof.Tayaの教え子Dr.Armstrongが三菱重工、長崎研究所で製作したNiTi/Alのマイクロ組織を示し、界面反応抑制の重要であり、そのためには、プリフォーム、consolidationなどのプロセッシングの管理が要点であるとし、TiNi/Al成形用の真空ホットプレスチャンバーの説明があった。

4) Prof.S.I.Y.Shen:Smart Structures

(a) “Active(or Intelligent)Constrained Layer Damping Treatment and Their Application” と題してShenグループの研究内容を紹介、彼らの研究しているActive Constrained Layer Dampingはpassiveとactive dampingのintegration

であり、reliable,fail-safeで実際的であること、また彼らのグループは若いenergeticなチームであることなどが強調されるなど売り込みが盛んであった。

(b)現在は主として、modelingの解析的研究が行われているが、実験的研究を経て、最終的には音響制御やフラッタ制御への応用を考えている。

(3) 所感

Tayaグループは、力学特性と他の物理特性とのカップリング効果による機能発現を狙ったスマート材料、Shenグループはpassive dampingとactive dampingの統合による制振スマート構造の開発を狙って研究を精力的に展開している。両者とも最終の応用を明確にした上で、まずmodelingによる理論的検討から入り、実験的研究を経て、応用に結びつけようとしており、オーソドックスなアプローチをしていると感じた。

なお、Tayaグループがスマート材料の物作り、材料プロセス研究をも重視する姿勢を見せていることに注目したい。本分野の研究開発には、強力なリーダーと若い頭の柔らかな研究者からなる学際的な研究グループの形成が必要であることを今回の北米加調査ミッションを通じて痛感した。

6. 2. 9 トロント大学 航空宇宙研究所およびElectroPhotonics Corporation

(1) 訪問先の概要

トロント大学航空宇宙研究所(UTIAS)の組織、およびMeasures教授のUTIAS内での位置づけを以下に示す。

	Flight Mechanics	
	Fluid Dynamics	
UTIAS	Solid Mechanics	
	Spacecraft Mechanics	Applied Mass Spectroscopy
	Engineering Physics	Fusion Energy
		Fiber Optic Smart Structure
		ElectroPhotonics
		Corporation

FOSSは1988年に設立され、Measures教授のもとに約14名で構成されている。

ここでは主に光ファイバーを用いたセンシング、モニタリング技術を開発しており、これらの技術はEPCを通じて実用化される。

FOSSは

- National Sci.& Eng.Res.Council
- Ontario Laser & Lightwave Res.Center
- Ontario Certer for Mat.Res.
- Inst.for Space & Terrestrial Sci.
- Canadian Space Agency

などの機関から資金的援助を受けている。

なお、UTIASの年間予算は約6百万ドルとのこと。

(2)説明の内容

Measures教授がOHP（現段階ではOHPのハードコピーは入手できていない）でUTIASとEPCに関して説明された。

Intelligent Structuresの考え方、FOSSのアクティビティ、その展開の方向性、民生関係へのニーズと具体的応用例、メリット、Bragg Grating Laser Sensing Systemとその応用例等に関してOHP26枚で説明された。

1) Intelligent Structures

Intelligent StructuresとはStructure、Sensor System、Actuator System、Neural Network Systemが重なりあったその丁度中心に位置するものであるとの考えが示された。このような考え方もとので、FOSSではSensor Systemとして光ファイバー技術を開発している。

2) FOSSでの現在の研究活動

- (a)リーディングエッジに対するモニタリング技術の開発
- (b)歪センサーの開発
- (c)Bragg Grating Laserセンサーの開発
- (d)光ファイバー技術によるデラミネーション検出に関する検討

3) 民生面への応用例

Beddington Trail Bridge(Calgary市内)（写真6. 2-1参照）ではスチールに代えてプリストレスカーボンファイバーを筋にして橋が建設されており、光ファイバーセンサーシステムによる交通量のモニターに利用されている。

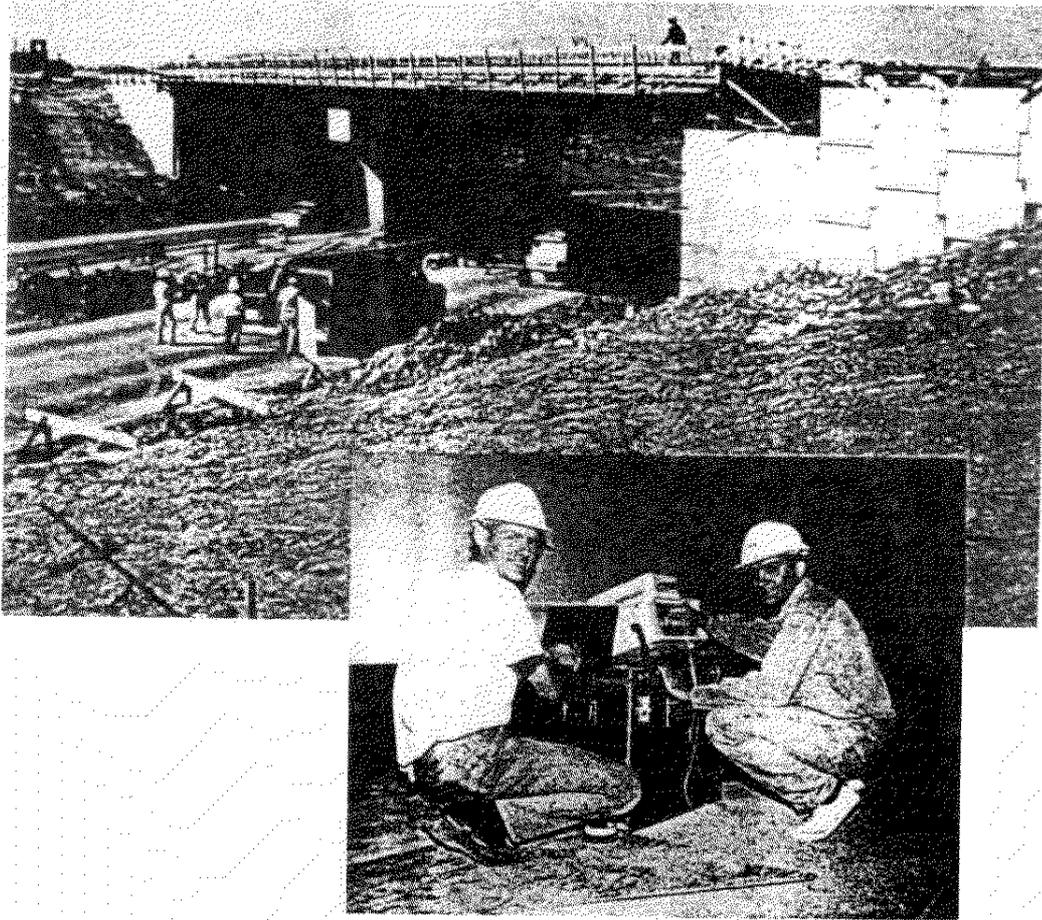


写真6. 2-1 橋への光ファイバーセンサーシステムの適用例

その他、(Sensor-Host Interaction for Single Embedded Optical Fiber)繊維強化複合材料内のデラミネーションに関して、埋め込まれた光ファイバーの先端形状とその周辺の応力勾配（引張、圧縮）の状況をシミュレーションしながら検討している。

4) ラボツアー

(a)FOSS実験室

リーディングエッジの説明。

埋め込み光ファイバーのマイクロメカニックスの説明、特に層間剥離解

析について。

(b)EPC

カルガリー市内の橋に対する光ファイバーセンサーシステム応用例の説明。

(3) 所感

訪問直後は双方ともぎこちなく堅苦しい雰囲気が始まったが、だんだんと打ち解け合い、食事をはさんでの議論ではかなりフランクな状態になり、最終的には、予定時間を20分超過して退出した。

UTIAS内での他の部署の説明、見学は無かったが、Measures教授のところでは今は光ファイバーを利用したセンシング、モニタリング技術の開発だけとの印象を持った。提唱しているIntelligent Structureへはまだ過程は長い。

6. 3 総括

6. 3. 1 研究開発状況、特徴

(1) ニーズ指向、合目的型研究の戦略的展開

大学での基礎的研究であっても最終の応用ターゲットを明確にしている。例えば、NSFではロサンゼルス大震災を契機として、本テーマに関する技術開発をCIS(Civil Infrastructure System)の研究開発の一環として位置付け、積極的に推進している。

(2) 学際的アプローチ

本テーマは、国家的重要課題として、また、学際的研究開発の必要性が強調され、次第に各地の大学に機械、材料、電気・電子、計算機科学、制御等からなる学際横断型研究センターが形成され、多数のスタッフが同一目的のもので研究が整えられている。

(3) 研究の方法論

知的構造は、本来システムインテグレーションであることから、設計概念(design concept)やphilosophyが重要であるとの認識から、コンセプト→モデリン

グ・理論的検討→実験的検証→応用技術開発といったプロセスが一般的に採られている。

知的構造の構成要素である機能材料(active material)の性能向上、合目的改質の重要性は認識されているが、この課題に本格的に取り組んでいる所は、ヴァージニア工科大学のFEORCにおける光ファイバを除き少ない。ただし、本分野でヴァージニア工科大学に対する一方の雄とされるペンシルベニア州立大学は、今回訪問しなかったが、セラミックス系のセンサ、アクチュエータ材料の開発を精力的に行っていると聞く。

(4) 研究のレベル

全般的印象としては、コンセプトの構築／モデリング、実験的検証の初期段階にとどまっており、本テーマに関する本格的な研究開発は緒についた段階といえ、本テーマが目標の一つとしている「自己修復」までの道のりはかなり遠そうである。しかし、多くのプログラムについて多くのグループの研究が進められており、技術的蓄積、ポテンシャルの点では彼我の差は大きいと言えよう。

要素技術では、セラミックセンサの研究開発はかなり進んでおり、ヴァージニア工科大学やトロント大学の光ファイバセンシングシステムのように商品化レベルに達しているものもあった。これに対して今回の訪問先でのセラミックアクチュエータ材料の研究は、余り進んでいないとの印象を受けた。課題としてはストローク不足、脆性、パワー不足などが指摘されている。

本分野で研究が進んでいると言われている軍用航空機のスマートスキン（構造とエレクトロニクスとの統合）やヘルスマニタリング等については、非公開技術？のためか見聞する機会はなかったが、大学や企業で軍の委託研究を実施していることは確かであり、実態は相当に進んだレベルに達していると思われる。航空・宇宙分野でみるように、先ず軍用目的で研究開発を進め、必要となれば軍用から民生用へすぐ転用を図るといった米国の技術開発の風土を念頭に置くべきであろう。

(5) 研究資金について

米国における現行の研究開発は、殆どが軍(Army、Air Force、Navy)、ARPA、NASAおよびNSFのいわゆる国家資金により推進されている。大学の研究センター等には企業からの資金も寄せられている所もあるが僅少である。

本技術がシステムインテグレーションであり、広い範囲の学際的研究を必要

とし、また基礎的研究レベルに留まっていることから、当分は国家資金によるシビルインフラ及び航空・宇宙分野への適用を狙った研究開発が進められていくものと思われる。

6. 3. 2 応用分野について

シビルインフラおよび航空・宇宙分野への適用が先行すると考えられている。シビルインフラへの適用は、先ずコストの問題、次に技術的未成熟、レギュレーション等の点で、まだ先の話であるというのが共通の認識のようであるが、関心度は非常に高い。民生用(civil use)の航空機への具体的な適用計画は持っていないようであるが、前述の軍用から民生用への転用として急激に技術開発が進展する可能性があると考えられる。

SST(HSCT)やHST等将来航空機への知的構造の適用メリットは、①ヘルスマニタリング - 長期間(20年)使用する間の構造部材の劣化を事前に予知し、安全性確保、騒音低減(active noise suppression) - 機内騒音を低減し、居心地改善などが考えられる。宇宙構造物に対しては、大型構造の振動制御の他に、輻射率(emissivity)劣化のモニタによる予想外の温度上昇や熱変形の防止が考えられる。

6. 3. 3 我国での研究開発についての留意点

本テーマの研究開発は、システムインテグレーションであり、その要諦は、構造システムを如何に知的・スマート化して社会ニーズに対応するかの哲学である。

今回の北米調査により、我国で研究開発を進める上で大変参考となる示唆が得られたと考えられる。以下に留意点として列挙する。

- (1) 本技術に関する技術的ニーズを体系的に調査・分類し、その実現の可能性及び技術的ブレークスルーを検討・整理することにより、我国独自のターゲットとその実現への具体的コンセプトを打ち出すべきである。
- (2) 本技術の関連する技術分野は、機械、構造、材料、電気・電子、情報、システム工学、環境工学など広範囲にわたっているので、その研究開発には学際的アプローチが必要であり、関連分野の産官学の研究者・技術者による共同研究として、国家プロジェクトにより推進すべきである。
- (3) 現行の米国における研究は、基本的には現状の要素技術をベースにモデ

リング（システム化及びその最適化）、母構造と機能材料(active material)の一体化（融合）設計及び制御技術に重点が置かれており、機能材料の改質・性能向上に対する関心は高いもののそれほど進展していないと思われる。しかし、母構造材料と機能材料の相互作用に関するマイクロメカニックスの研究など基礎的な研究も行われており、これらの成果を基に早晩、新機能材料の開発の動きが活発化する可能性は大きい。

我国は、材料開発及び製造技術には高いポテンシャルを有していることから、我国の開発する知的構造システムには今以上に高性能な材料を組み入れたものとすべきであり、機能材料の合目的改質や新材料の開発にも重点を置くことが必要である。

また、自己修復機能に興味を持つ機関もいくつかあったが、これなどは概念的には我国の方が整理されているように思われ、今後、我国が先導すべき項目の一つであろう。

第7章

研究開発課題の検討

7. 1	研究開発課題のまとめ	547
7. 2	先導研究の実施に向けて	548
7. 3	ナショナルプロジェクト研究へ向けて	548

7. 研究開発課題の検討

7. 1 研究開発課題のまとめ

スマートコンポジット／ストラクチャの概念を包含した今後の先導研究「知的構造システムの研究開発」の実施あるいはそのナショナル・プロジェクト研究を模索する観点から共通的な研究開発課題をまとめて列挙すると、表7. 1-1のとおりとなる。スマートストラクチャは適用目的により母構造／センサ／アクチュエータの構造様式は多岐にわたるので代表的な2～3例を選定し、それらについて表中の各研究開発課題について基礎的検討することが望まれる。

なお、スマートコンポジット／ストラクチャ関連の個別技術分野における研究開発課題については第6章までの各章を参考していただきたい。

表7. 1-1 先導研究「知的構造システムの研究開発」の共通課題

1. 母構造／センサ／アクチュエータ複合・融合化
 - ーコンセプトの科学的検証と開発課題の明確化ー
 - 振動制御、形状制御、ヘルスケアリングシステムの基礎的検討
 - 代表的なスマート構造モデルの試作と評価
2. 母構造体とセンサ、アクチュエータ材料との複合・融合化設計及び成形技術の検討
 - 母構造材料／センサ、アクチュエータ材料の界面制御
 - 母構造の力学的挙動に及ぼす影響
 - 機能発現に及ぼす母構造との複合化の影響
 - 複合・融合化最適設計（母構造と機能発現の両立性）
3. 新規機能性材料の創製とセンサ、アクチュエータ材料の合目的改質技術
 - 新機能材料の創製
（センサ、アクチュエータ機能と構造要素としての力学特性を具備する新材料）
 - 既存材料の性能向上
母構造体埋込み材料として性能不十分
（センサ機能、駆動力、力学特性・・・）

7. 2 先導研究の実施に向けて

7. 2. 1 研究計画とその実施体制

平成7年度から開始予定の先導研究「知的構造システムの研究開発」で計画されている研究計画とその実施体制（案）を図7. 2-1に示す。国立研究所を中心として、新機能性材料の創製・合目的改質技術、知的構造体成形技術および知的構造システム・融合化技術に関する小規模な先行研究と大学等によるシーズ探索研究による知的構造システムの基礎的検討とともに、産・学・官の学識経験者から構成される調査研究委員会において国内外の研究開発動向の精査と知的構造システムのシーズ研究とニーズの接点を模索した具体的な技術開発課題の抽出・検討が計画されている。

7. 2. 2 日米ワークショップの開催

先導研究では国際研究協力の模索とその可能性等を検討するための一環として日米ワークショップの開催が計画されている。その骨子（案）を表7. 2-1に示す。日米の第一線の研究者が最新の研究成果を持ち寄り討論と意見の交換等が予定されている。平成6年度、日本貿易振興会内設置の知的構造システムに関する調査国際協力推進委員会が国際産業技術開発推進事業の一環として行った「米国・カナダにおける知的構造システム研究開発の現状と研究協力の可能性」調査研究の第2弾として、また、具体的な国際研究協力事業としても期待されている。

7. 2. 3 国内シンポジウムの開催

平成7年度の先導研究の成果発表と知的構造システム関連分野における外国の著名な研究者を招待して特別講演会等を行う国内シンポジウム（於つくば）が、平成8年1月以降開催する方向で調整が進められている。

7. 3 ナショナルプロジェクト研究へ向けて

先導研究はフィージビリティ的先行研究であるが、平行して今後のナショナルプロジェクト研究のためにも研究開発課題の明確化による研究アプローチ策の策定とともに、プロジェクトフォーメーション等についても十分に検討することが望まれる。

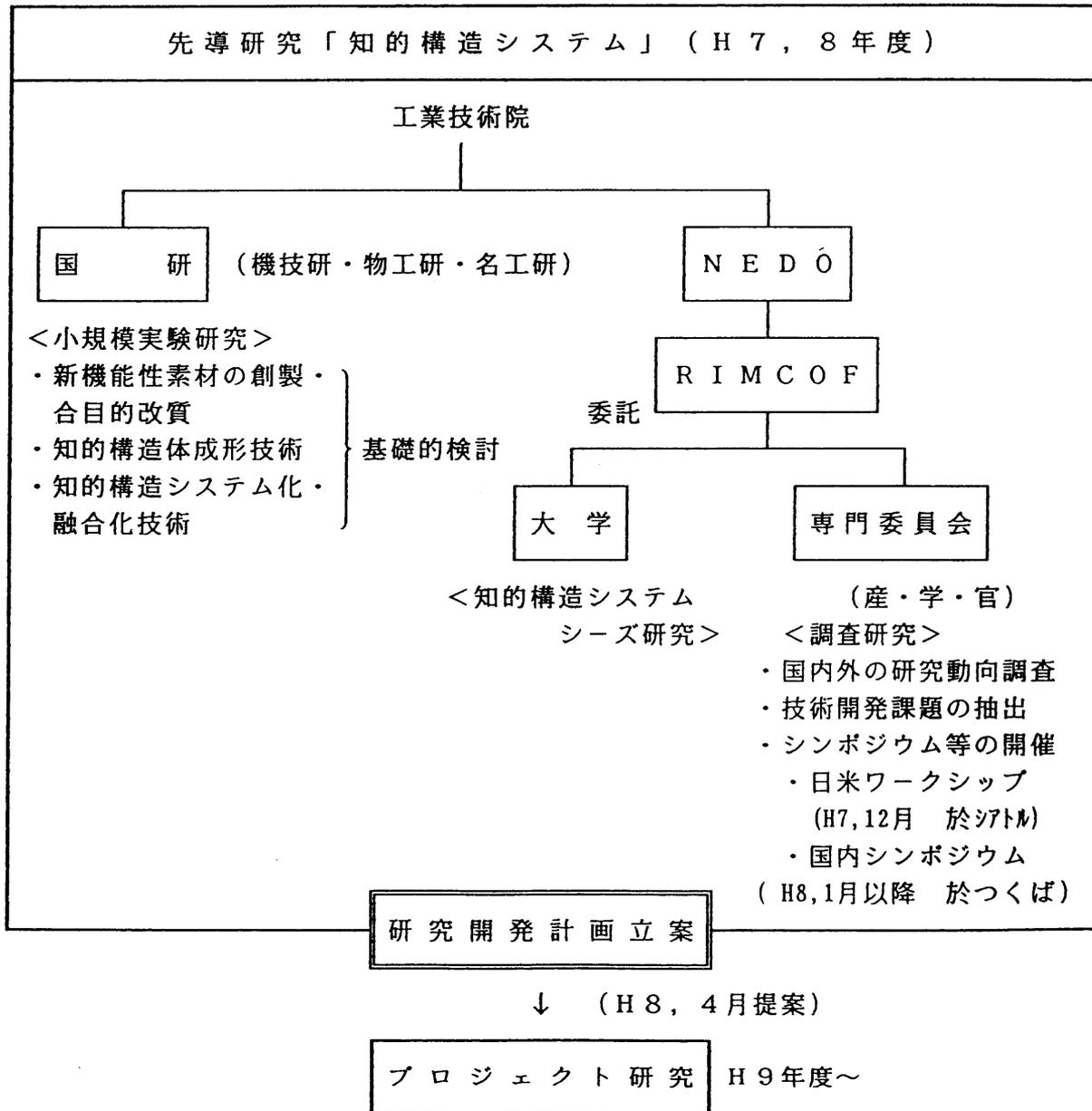


図7. 2-1 先導研究の研究計画とその実施体制(案)

表7. 2-1 日米ワークショップの開催骨子(案)

Japan/US Workshop on Smart Materials/Structures(draft)

Sponsor(Japanese side): NEDO(RIMCOF), and co-sponsor:
MITI(AIST)

Time: Dec. 4, 5 and 6

Place: University of Washington, Seattle

Organizers(Japanese side):

Prof. M. Sunakawa
Professor emeritus of the University of Tokyo
College of Industrial Technology
Nihon University

Dr. K. Hirano
Mechanical Engineering Laboratory
Agency of Industrial Science and Technology, MITI.

Dr. A. Sakamoto
R&D Institute of Metals and Composites for Future Industries

Number of Participants(Japanese side): 15 Japanese participants
(10 speakers and 5 attendees)

Publication of Papers: Proc. of Extended Abstracts(up to 3 pages),
Proc. of full papers to be published as a special issue of TMS-AIME

MITI: Ministry of International Trade and Industry
AIST: Agency of Industrial Science and Technology
NEDO: New Energy and Industrial Technology Development
Organization
RIMCOF: R&D Institute of Metals and Composites for Future
Industries

む す び

本調査研究は、新エネルギー・産業技術総合開発機構（N E D O）の委託を受け、平成7年度先導研究として予定されている「知的構造システムの研究開発」を補うために、前段階の予備的・基礎的な調査・検討及びニーズの発掘調査を実施したものである。

知的構造システムは、複合材料等構造材料を母構造として、これにセンサ材料やアクチュエータ材料更には、プロセッサ機能を複合・融合化して得られる材料／構造システムであり、広範の産業分野への応用、波及が期待されている。

本調査研究の成果が先導研究に適切にフィードバックされるためには、機械、航空宇宙、エネルギー、自動車、高速車両、建設、新素材等広範な分野における十分な理解と産官学の幅広い連携のもとに実施される必要があった。

幸いにも、松崎委員長をはじめとして、この技術分野での豊かな経験とその重要性に強い関心を持っておられる多くの方々に委員をお引き受け戴き、また、オブザーバーとして、通商産業省機械情報産業局、工業技術院、並びに新エネルギー・産業技術総合開発機構のご指導を得て、短期間で大冊の本報告書をまとめることができた。多忙な中を、委員会へのご出席と、原稿のご執筆をいただいた委員の方々、ご指導をいただいたオブザーバーの方々に深く感謝する次第である。

本報告書が、先導研究「知的構造システムの研究開発」更にはそのプロジェクト化に向けてお役に立つことを切望する次第である。

本報告書の内容を公表する際はあらかじめ
新エネルギー・産業技術総合開発機構
産業技術研究開発部の許可を受けて下さい。

電話 03-3987-9355

