

平成11年度 新規産業創出型産業科学技術研究開発  
新エネルギー・産業技術総合開発機構委託

# 成果報告書

「知的材料・構造システムの研究開発」  
(エネルギー使用合理化技術開発)

平成12年3月

NEDOBIS  
T98045

財団法人  
次世代金属・複合材料研究開発協会

NEDO 図書・資料室



010015392-3

# 「知的材料・構造システムの研究開発」

(エネルギー使用合理化技術開発)

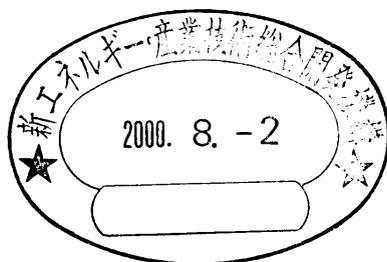
財団法人 次世代金属・複合材料研究開発協会

平成12年3月

(表紙共 176 頁)

## 研究目的

大型化、複雑化が新機械・構造システムの省資源、省エネルギー化を実現するためには、材料の高性能化や構造の軽量化、長寿命化を図る必要がある。そこで、複合材料および複合材料構造物に、繊維あるいは箔状にしたセンサ材料・アクチュエータ素子を一体化し、情報処理・制御を行うことにより、リアルタイムで材料・構造の損傷探知や健全性診断等の機能や騒音・振動制御等の機能を付与した材料・構造システムの基礎技術の開発を行う。



## まえがき

この報告書は、大学連携型産業科学技術研究開発制度に基づき、新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）より(財)次世代金属・複合材料研究開発協会（RIMCOF）が受託した「知的材料・構造システムの研究開発」（エネルギー使用合理化技術開発）について、5ヵ年計画の2年度である平成11年度の成果をとりまとめたものである。

RIMCOFは、昭和56年8月に設立され、以来一貫して先進的金属と複合材料の研究開発を推進してきた。第1期は昭和56年度から昭和63年度の8年間で、通産省工業技術院の次世代産業基盤技術研究開発制度の下に、「高性能結晶制御合金」及び「複合材料」プロジェクトを実施した。第2期は平成元年度から平成8年度の8年間で、第1期と同様次世代プロジェクトとして、「超耐環境先進材料」プロジェクトを実施した。現在は、平成9年度から始まる第3期に当る。平成9年度に開始した「スーパーメタル」プロジェクト（開発期間5年）、平成10年度に開始した本プロジェクト、「超低損失柱上トランス」プロジェクト（開発期間4年）及び「輸送用先進複合材料」プロジェクト（開発期間5年）の計4件の多彩な大型プロジェクトを擁するマルチプロジェクト体制で進めている。

本「知的材料・構造システムの研究開発」プロジェクトの2年度は、4つの集中研における要素技術研究が本格的に進められ、成果も着々と得られつつある。それぞれ4つのサブテーマに関して、第1はヘルスマニタリング技術を東京大学で、光ファイバ、AEセンサ等を利用する技術開発を行い、中でもクラット径52 $\mu$ の細径光ファイバ開発成功は各方面から注目されており、第2は、スマートマニファクチャリング技術開発を大阪市立大学で行い、開発に成功した多機能センサの改良とプロセス制御への応用技術等に大きい進展をみせた。第3のアクティブ・アダプティブ構造技術については名古屋大学で、基本となる振動・騒音制御設計プログラムが確立でき、第4の東北大学でのアクチュエータ材料・素子の開発について、特にセラミックアクチュエータ用セラミックスのマイクロ波焼結技術の成功と、磁性記憶合金の急冷凝固法の技術確証等の成果をあげた。これらの成果とともに、その利用技術、シミュレーション特性評価も着実に進んでいる。さらに工業技術院の機械技術研究所、名古屋工業技術研究所及び物質工学工業技術研究所においては産業基盤技術の立場から、アクティブ・アダプティブ、アクチュエータ、スマートマニファクチャリング等の集中研での研究を支援する重要な研究成果をあげていただいている。また、集中研における研究への補完的研究として、東京都立科学技術大学、米国ワシントン大学に再委託を行っており、振動・騒音、アクチュエータ材料においても着目すべき結果が出されている。

これらの要素研究の成果を踏まえて、本年度からは要素技術を統合してのデモンストレータ試験の基本計画及び設計を企業メンバーを中心にスタートし、まとめることができた。そして、要素研究の進展とデモンストレーションへの成果への重点的統合に向けて、プロジェクトの中間にあたる平成12年度以後のプロジェクト進捗強化のため、NEDO推進委員会での体制の見直しが行われるなど、本年度は当プロジェクトとしてまさに正念場の年であった。

また、第1年度と2年度にかけての研究開発成果発表と討論と関係者の交流を目的に、吉海正憲通商産業省大臣官房審議官及び光川寛NEDO理事を始めとするご来賓の下に、第1回シンポジウムを開催し、200名を越える盛況裏に終えることができたことも付記しておきたい。

## 巻 頭 言

プロジェクトリーダー

産業技術融合領域研究所

岸 輝雄

産業科学技術研究開発制度の大学連携プロジェクトとしてスタートとした「知的材料・構造システム」プロジェクトの平成11年度の研究成果をここに取りまとめる。大学連携という新しい試みの中で、大学での集中研究を主たる研の名の下に遂行することによる初期故障のようないくつかの課題を克服し、4つのグループの研究が順調にスタートし、成果を挙げるに至ったのは喜ばしい限りである。本プロジェクトでまず重要な課題は埋め込まれた光ファイバー、または圧電セラミックスの繊維、箔などを含んだ複合材料を安定的に製造する技術の確立にある。ファイバー、繊維等を導入するこの技術が確立しない限りにおいては、プロジェクトはスタートしえない。大阪大学を中心にしたスマートマニユファクチャリングのグループではRTM(Resin Transfer Molding)法を用いて、これらの課題に挑戦し、目的の成果が得られる状況になったと言える。埋め込み材の強度、特に種々の環境下の疲労特性が今後の課題と言えよう。次の課題は東京大学を中心にしたこのような成形法が作製した構造物での損傷のモニタリングにある。既に初年度に細径の光ファイバーの製造に成功し、FBG(Fiber Bragg Grating)を形成し本年は一定の変形および、ダメージに対する検出感度への挑戦が始まっている。このような非破壊的な位置の評定に加えて、変形又はダメージの大きさ等を定量的に評価することが今後望まれよう。光ファイバーに加えて、AE法を用いて発生しつつある欠陥の検出にもかなりの可能性が示された。もう1つの課題は生じた変形および欠陥等の修復制御過程にある。東北大グループを中心にアクチュエータ材料の開発が進められているが、アクチュエータ材料としては圧電セラミックスと形状記憶合金に焦点が当てられている。圧電セラミックスはひずみ応答に問題を残しており、また衝撃荷重に対する弱点も指摘されている。形状記憶合金は周波数特性が低く、その疲労特性への改善の余地も残している。このような現状の中で感温型、磁性記憶合金、そして圧電セラミックスの形態付与に関する研究が進められ、アクチュエータ素子としての構造物への適応の基盤が示されたと言える。

いずれにせよ、アクチュエータ・材料の開発はスマートの Key テクノロジーと言えよう。最後に本プロジェクトの目標となる減衰、騒音の低減そして欠陥の修復を目的としたアクティブアダプティブの取り扱いが重要となる。名古屋大グループの仕事となるが、本プロジェクトをスマートと名付ける以上、最終的にはこの機能の発現、そしてそのためのシステム化が欠くことのできない課題となる。振動、騒音に関する基礎的な取り扱いが平成 11 年度にとり行われている。

これらの 4 つの要素技術が各々確立したとしても現実には、それを組み合わせシステムとして構築し、制御機能を働かせることがスマート構造物の最終目標となる。そのためには目的とする構造物に近い形状の構造物を作製し、要素技術を盛り込むと共に、制御機能を働かすことが必要になる。要するにデモンストレーターとなるべく構造物の作製が必要となるが、本年度の NEDO における研究推進委員会の見直しによりデモンストレーターとしては航空機胴体に主眼を置き、一部それに関連する小型のデモンストレーターを追求することが確認された。本プロジェクトとしては平成 11 年度に基本設計を行い、1.5m の内径を持つ円筒状の 3m 長さの胴体および隔壁に各種のモニタリングおよびアクチュエータ機能を有する機能部材を配置する方針が固まりつつある。平成 12 年度中に詳細設計を行い、13 年度に作製、14 年度に評価試験を遂行するという道筋が立てられている。またこれを支えるべく小型のモデルとしてモニタリング、アクチュエータ機能を内蔵したスマートパッチまたはスマートボードを作製することも検討段階に入っている。

要素研究は 3~4 年間で全て終了し、工技院の 3 研究所の力をも結集し、デモンストレーターの作製に今後とも全力を挙げ、それに役立つ要素技術に集中した開発を進めることが確認されている。このようなデモンストレーターを作製することにより、マニユファクチャリング、モニタリング、アクチュエータ材料開発、そしてアクティブ、アダプティブの性能を評価するとともにそれらの関連を明確にし、実用化の実証試験としての位置づけを探ることを目的としている。個々の要素技術にはかなりの発展が見られているが、インテグレートしたシステムへの道は未だ厳しいものがあると言わざるを得ないが、それゆえにチャレンジングなテーマとして今後の発展を期して行きたい。関係各位のご協力と益々のご援助を期待する次第である。

目 次

まえがき

巻 頭 言

概 要

(平成 11 年度研究開発実施状況)

1. 研究実施状況	
1.1 研究期間	1
1.2 研究項目と実施状況	1
1.3 研究開発の実施場所	1
1.4 研究組織	2
1.5 研究担当者氏名	2
2. 研究目標と成果	7

本 文  
(研究内容)

I. スマートマニファクチャリング技術の開発	
1. 研究開発の成果と達成状況	1
1.1 研究開発の成果	1
1.1.1 要約	1
1.1.2 本文	3
1.2 達成状況	22
1.3 結論	23
2. 研究発表・講演、論文、文献、特許等の状況	25
II. アクチュエータ材料・素子の開発	
1. 研究開発の成果と達成状況	27
1.1 研究開発の成果	27
1.1.1 要約	27
1.1.2 本文	29
1.2 達成状況	71
1.3 結論	72
2. 研究発表・講演、論文、文献、特許等の状況	73

Ⅲ.	デモンストレータ試験	
1.	研究開発の成果と達成状況	76
1.1	研究開発の成果	76
1.1.1	要約	76
1.1.2	本文	78
1.2	達成状況	104
1.3	結論	104
2.	研究発表・講演、論文、文献、特許等の状況	104
Ⅳ.	総合調査研究	
1.	要約	115
2.	本文	118
Ⅴ.	共通基盤技術の形成	155

### 国立研究所

- I. 工業技術院 物質工学工業技術研究所
- II. 工業技術院 名古屋工業技術研究所

# 概 要

(平成 11 年度研究開発実施状況)

## 1. 研究実施状況

### 1.1 研究期間

平成11年4月1日から

平成12年3月31日まで

### 1.2 研究項目と実施状況

#### (1) スマートマニファクチャリング技術の開発

大型化、複雑化が進む機械・構造システムの省資源、省エネルギー化を実現するスマートマニファクチャリング技術を開発するため、複合材料オートクレーブの成形過程の光ファイバによるセンシング技術、本研究で開発した多機能センサのRTM成形への適用技術、RTM成形過程中の樹脂流動解析、熱可塑性FRPプレス成形過程の樹脂挙動、これらの成形過程と材質との関係の検討を行った。

#### (2) アクチュエータ材料・素子の開発

省エネルギーのため、前年度に基本技術として成功した効果の著しいマイクロ波焼結によるセラミックスアクチュエータ材料製造技術の精密化とアクチュエータ材料品質および試作アクチュエータによる特性確認を行った。一方、機械・構造システム省資源・省エネルギー化を前年度実現させた急冷凝固法を適用した温度依存型形状記憶合金リボンのアクチュエータ特性の評価および高分解能高温引張り・組織観察手法の開発、放電焼結プラズマ技術の利用の検討も行った。

#### (3) デモンストレータ試験

本年度から、航空機胴体構造モデル、ジェットエンジン静翼モデル、柔構造宇宙構造体を対象として、PL、担当企業、集中研SLと基本設計、具体的技術項目評価技術等の基礎的検討を行った。

#### (4) 総合調査研究

本年度より、定常的な研究把握強化を目的に技術委員会、幹事会、デモンストレータ部会に加えて集中研での技術検討会に参画し、また全ての研究メンバーの成果発表と討論および対外アピールのためシンポジウムを開催し、総合調査研究の幅と内容の拡大充実をはかった。

### 1.3 研究開発の実施場所

大阪市立大学工学部 福田研究室

東北大学流体科学研究所

ワシントン大学

財団法人 次世代金属・複合材料  
研究開発協会 (RIMCOF)

三菱重工業株式会社

名古屋航空宇宙システム製作所

川崎重工業株式会社 岐阜技術研究所

株式会社東芝 研究開発センター

石川島播磨重工業株式会社 技術研究所

大阪府大阪市住吉区杉本町3丁目3番138号

宮城県仙台市青葉区片平2丁目1番1号

Department of Mechanical

Engineering Box 352600 Seattle,

WASHINGTON 98195-2600 U.S.A

東京都港区虎ノ門3丁目25番2号

愛知県名古屋市港区大江町10

岐阜県各務原市川崎1番地

神奈川県川崎市幸区小向東芝町1番地

神奈川県横浜市磯子区新中原町1番地

#### 1.4 研究組織

取りまとめ機関	研究項目	研究機関
(財)次世代金属・複合材料研究開発協会	(1)スマートマニファクチャリング技術の開発	大阪市立大学 三菱重工業(株) 石川島播磨重工業(株)
	(2)アクチュエータ材料・素子の開発	東北大学 (株)富士セラミックス 関東特殊製鋼(株) (株)トーキン
	(3)デモンストレータ試験	三菱重工業(株) 川崎重工業(株) 富士重工業(株) 石川島播磨重工業(株) (株)東芝 (財)RIMCOF
	(4)総合調査研究	(財)RIMCOF

#### 1.5 研究担当者氏名

##### (1)スマートマニファクチャリング技術の開発

大学/会社名	氏名	所属・役職	備考
大阪市立大学	福田 武人	工学部 教授	(共)
大阪市立大学	元木 信弥	工学部 教授	(共)
大阪市立大学	逢坂 勝彦	工学部 助教授	(共)
大阪市立大学	山崎 友裕	工学部 助教授	(共)
大阪市立大学	大島 信生	工学部 助手	(共)
大阪市立大学	高坂 達郎	工学部 助手	(共)
大阪市立大学	古屋 泰文	工学部 助手	(共)
(財)次世代金属・複合材料研究開発協会	山口 泰弘	研究員	三菱重工業(株) (従)
(財)次世代金属・複合材料研究開発協会	神野 昌明	研究員	三菱重工業(株) (従)
(財)次世代金属・複合材料研究開発協会	酒井 茂	研究員	三菱重工業(株) (従)
(財)次世代金属・複合材料研究開発協会	盛田 英夫	研究員	石川島播磨重工業(株)
(財)次世代金属・複合材料研究開発協会	柳沢 健一	研究員	石川島播磨重工業(株)
(財)次世代金属・複合材料研究開発協会	北出 真太郎	研究員	石川島播磨重工業(株)
(財)次世代金属・複合材料研究開発協会	奥村 郁夫	研究員	石川島播磨重工業(株)
(財)次世代金属・複合材料研究開発協会	山岸 謙二郎	研究員	石川島播磨重工業(株)

## (2) アクチュエータ材料・素子の開発

大学/会社名	氏名	所属・役職	備考
東北大学	谷 順二	流体科学研究所 教授	(共)
東北大学	渡邊 龍三	工学研究科 教授	(共)
東北大学	中村 僖良	工学研究科 教授	(共)
東北大学	高木 敏行	流体科学研究所 教授	(共)
東北大学	裘 進浩	流体科学研究所 講師	(共)
東北大学	松本 實	素材工学研究所 講師	(共)
東北大学	古屋 泰文	流体科学研究所 非常勤講師	(共)
(財)次世代金属・複合材料研究開発協会	加藤 和昭	研究員	(株)富士セラミックス
(財)次世代金属・複合材料研究開発協会	高橋 弘文	研究員	(株)富士セラミックス
(財)次世代金属・複合材料研究開発協会	相場 満	研究員	関東特殊製鋼(株)
(財)次世代金属・複合材料研究開発協会	喜瀬 純男	研究員	関東特殊製鋼(株)
(財)次世代金属・複合材料研究開発協会	山内 清	研究員	(株)トーキン
(財)次世代金属・複合材料研究開発協会	武田 進	研究員	(株)トーキン

## (3) デモンストレータ試験

大学/会社名	氏名	所属・役職	備考
東京大学	岸 輝雄	先端科学技術研究センター 教授	(共)
東京大学	榎 学	先端科学技術研究センター 教授	(共)
東京大学	張 炳國	先端科学技術研究センター 外国人客員研究員	(共)
(財)次世代金属・複合材料研究開発協会	佐藤 純一	研究員	
(財)次世代金属・複合材料研究開発協会	坂本 昭	研究員	
(財)次世代金属・複合材料研究開発協会	宮崎 崇夫	研究員	
(財)次世代金属・複合材料研究開発協会	野田 稔	研究員	
(財)次世代金属・複合材料研究開発協会	具 滋滯	研究員	
(財)次世代金属・複合材料研究開発協会	中島 未知	研究員	
(財)次世代金属・複合材料研究開発協会	高木 淳二	研究員	富士重工業(株) (従)
(財)次世代金属・複合材料研究開発協会	安藤 則雄	研究員	富士重工業(株) (従)
(財)次世代金属・複合材料研究開発協会	滝沢 尚哉	研究員	富士重工業(株) (従)

(財)次世代金属・複合材料研究開発協会	真杉 京一	研究員	富士重工業(株) (従)
(財)次世代金属・複合材料研究開発協会	荻巢 敏充	研究員	富士重工業(株) (従)
(財)次世代金属・複合材料研究開発協会	野村 正人	研究員	富士重工業(株) (従)
(財)次世代金属・複合材料研究開発協会	三田 富雄	研究員	川崎重工業(株) (従)
(財)次世代金属・複合材料研究開発協会	筒井 寛明	研究員	川崎重工業(株) (従)
(財)次世代金属・複合材料研究開発協会	川又 昭夫	研究員	川崎重工業(株) (従)
(財)次世代金属・複合材料研究開発協会	白井 雄二郎	研究員	三菱重工業(株) (従)
(財)次世代金属・複合材料研究開発協会	長井 謙広	研究員	三菱重工業(株) (従)
(財)次世代金属・複合材料研究開発協会	富部 敏広	研究員	三菱重工業(株) (従)
(財)次世代金属・複合材料研究開発協会	鎗 孝志	研究員	三菱重工業(株) (従)
(財)次世代金属・複合材料研究開発協会	盛田 英夫	研究員	石川島播磨重工業(株) (従)
(財)次世代金属・複合材料研究開発協会	北出 真太郎	研究員	石川島播磨重工業(株) (従)
(財)次世代金属・複合材料研究開発協会	柳沢 健一	研究員	石川島播磨重工業(株) (従)
(財)次世代金属・複合材料研究開発協会	奥村 郁夫	研究員	石川島播磨重工業(株) (従)
(財)次世代金属・複合材料研究開発協会	山岸 謙二郎	研究員	石川島播磨重工業(株) (従)
(財)次世代金属・複合材料研究開発協会	内田 憲男	研究員	(株)東芝 (従)
(財)次世代金属・複合材料研究開発協会	林 卓郎	研究員	(株)東芝 (従)
(財)次世代金属・複合材料研究開発協会	長安 克芳	研究員	(株)東芝 (従)
(財)次世代金属・複合材料研究開発協会	高橋 博	研究員	(株)東芝 (従)

## (4) 総合調査研究

大学／会社名	氏名	所属・役職	備考
(財)次世代金属・複合材料研究開発協会	佐藤 純一	知的材料・構造システム研究開発センター長	
(財)次世代金属・複合材料研究開発協会	坂本 昭	知的材料・構造システム研究開発センター長 代行	
(財)次世代金属・複合材料研究開発協会	宮崎 崇夫	知的材料・構造システム研究開発センター 技術部長	
(財)次世代金属・複合材料研究開発協会	野田 稔	知的材料・構造システム研究開発センター 部長	
(財)次世代金属・複合材料研究開発協会	具 滋滯	研究員	
(財)次世代金属・複合材料研究開発協会	中島 未知	研究員	

## (5) 再委託研究

大学／会社名	氏名	所属・役職	備考
ワシントン大学	田谷 稔	機械工学科 教授	
ワシントン大学	井上 漢龍	材料工学科 研究教授	
ワシントン大学	玉川 浩久	機械工学科 ポストドクター	
ワシントン大学	森 勉	機械工学科 客員研究員	
ワシントン大学	スザンナ・ポポビッチ	院生	

## 1.5.2 技術委員会

### (1) 知的材料・構造システム材料技術委員会

委員長	岸 輝雄	PL	東京大学 先端科学技術研究センター 教授
委員	武田 展雄	SL	東京大学 大学院 工学系研究科航空宇宙工学専攻 教授 兼 大学院 新領域創成科学研究科先端エネルギー工学専攻 教授
(50音順)	谷 順二	SL	東北大学 流体科学研究所 所長・教授
	福田 武人	SL	大阪市立大学 工学部知的材料工学科 教授
	松崎 雄嗣	SL	名古屋大学 大学院 工学研究科航空宇宙工学専攻 教授
	相場 満		関東特殊製鋼(株) 研究開発部 主任研究員
	卜部 啓		工業技術院 物質工学工業技術研究所 複合材料部構造機能グループ 主任研究員
	川神 裕史		日立電線(株) オプトシステム研究所 第三部 部長
	尾崎 毅志		三菱電機(株) 先端技術総合研究所 金属・セラミックス技術部 主席研究員
	加藤 和昭		富士セラミックス(株) 開発部 部長
	上村 康二		アエロスパシアル マトラ 駐日事務所 所長補佐
	菊島 義弘		工業技術院 機械技術研究所 極限技術部振動制御研究室 主任研究官
	北野 彰彦		東レ(株) 愛媛工場 複合材料研究所 トレカ研究室 主任研究員
	三田 富雄		川崎重工業(株) 岐阜技術研究所 機体技術研究部構造研究グループ グループ長
	嶋本 吉春		(株)東芝 宇宙開発事業部 宇宙事業推進部 担当企画課長
	関谷 忠		工業技術院 名古屋工業技術研究所 セラミックス基礎部電子セラミックス研究室 主任研究官
	高木 淳二		富士重工業(株) 航空宇宙事業本部 宇都宮製作所 第一技術部 主管
	田中 信雄		東京都立科学技術大学 生産情報システム工学科 教授
	田谷 稔		ワシントン大学 機械工学科 兼 材料工学科 教授 (米国)
	服部 敏雄		(株)日立製作所 機械研究所 主管研究員
	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
	松原 秀彰		(財)ファインセラミックスセンター 試験研究所 主管主席研究員
	三田 彰		清水建設(株) 技術研究所 主任研究員
	村上 由利子		ダイムラー・クライスラー日本(株) 技術リサーチ 課長代理
	盛田 英夫		石川島播磨重工業(株) 基盤技術研究所 材料研究部 課長
	山内 清		(株)トーキン 電子材料事業本部商品開発部 技術部長
事務局	溝上 芳史		(財)次世代金属・複合材料研究開発協会 専務理事
	佐藤 純一		(財)次世代金属・複合材料研究開発協会 知的材料・構造システム研究開発センター長
	坂本 昭		(財)次世代金属・複合材料研究開発協会 知的材料・構造システム研究開発センター長 代行
	宮崎 崇夫		(財)次世代金属・複合材料研究開発協会 知的材料・構造システム研究開発センター 技術部長
	野田 稔		(財)次世代金属・複合材料研究開発協会 知的材料・構造システム研究開発センター 部長

アドバイザー

通商産業省 工業技術院 産業科学技術研究開発課  
通商産業省 機械情報産業局 航空機武器宇宙産業課  
新エネルギー・産業技術総合開発機構 基盤技術研究開発室

## 2. 研究目標と成果

### (1) スマートマニュファクチャリング技術の開発

母構造とセンサ、アクチュエータ等の一体化技術の確立では、オートクレーブ成形過程における積層板の内部歪み測定に使用する光ファイバセンサに関し、複合材積層板への埋込みによる測定値への影響などを計測し適用可能範囲を明らかにした。さらに、炭素繊維複合材構造への板状素子埋込みによる圧縮強度および層間せん断強度への影響を把握した。

知的成形プロセス技術の開発では、各種プリフォーム・樹脂系のための諸条件を明らかにして知的RTM成形用多機能センサの高精度化を行うとともに、複合材料の生涯モニタリングセンサにつなげるため、予備的な超音波発信・受信実験を行って良好な結果を得た。

さらに、オートクレーブ硬化過程での温度・硬化度分布およびRTM成形での樹脂流動に関するシミュレーション・モデルを構築し、シミュレーションを実施し、反応熱による温度上昇・流動フロントの進行等に関し、計測結果とよい一致をみた。また、RTM樹脂注入条件の最適化を試行し、センシングデータに基づくプロセス制御の必要性を明らかにした。

熱硬化性FRPのRTM成形では、樹脂含浸特性に及ぼすプリフォーム（繊維織物）の繊維含新率や繊維配向の影響を把握した。さらに、熱可塑性FRPのプレス成形では、熱硬化性樹脂用の誘電率式硬化センサによって、熱可塑性樹脂の熔融粘度が測定可能であることが判明した。

### (2) アクチュエータ材料・素子の開発

セラミックスアクチュエータ開発のうち、マイクロ波焼結ではアクチュエータ特性の確証のため、電気機械結合係数、誘電率は同一温度上での従来焼結に比較して良好な特性を示した。試作アクチュエータをつくり、従来焼結のアクチュエータと振動特性を比較した結果、約30%の特性向上が得られた。さらに、屈折変位するFGM素子の内部応力不連続を少なくするための最適組合せ構造を求めるためFEM解析を実施した。応力分布の解析結果から最適の素子組合せ結果を得た。

また、急凝固法で作成した温度依存型形状記憶合金リボンの力学特性を評価中である。変態による形状変化のヒステリシスがシャープになり、従来材より高速応答が可能となる知見を得ている。一方、高性能形状記憶合金の開発では、「高温引張りステージ付レーザ顕微鏡システム」を開発し、形状記憶合金の力学的引張り特性および温度履歴等を広い温度範囲（室温～1000℃以上）で計測、かつ高分解能での組織変化観察を可能にした。

### (3) デモンストレータ試験

航空機胴体構造モデルについては、実機構造のシミュレーション機能およびデモンストレーション効果を考慮して機体のサイジングを行うとともに、所要費用とのトレードオフを実施し、最適サイズとして、直径：1.5m、長さ：3m規模を選定した。主要構造・材料は、外板パネルおよびスティフナは炭素繊維複合材料、ロンジロンおよびフレームは費用削減のためアルミ合金を選定した。胴体与圧装置・負荷装置等を含む試験設備ならびに各デモンストレーション・テーマの試験順序・評価方法等に関する基礎検討を行った。

ジェットエンジン静翼モデルについては、光ファイバセンサによる成形モニタ基礎試験を

実施し、温度変化に伴う光強度の変化状況を把握した。

宇宙構造体については、柔構造部に対する振動・形状制御の基礎検討として、 piezoceramic フィルムをセンサとして振動試験を実施し、所要のセンシング機能を確認した。

また東京大学先端科学技術研究センター岸研究室と共同研究により、スマート複合材料の欠陥、損傷および損傷回復の AE、超音波、X線等を用いて総合技術評価の研究を開始した。

#### (4) 総合調査

集中研における技術検討会に参画し、研究開発状況の把握および実行上の課題調整を行うとともに、技術委員会および幹事会を通じてプロジェクト全体の総合的方向付けおよび認識レベルの共有を図った。また、海外の関連分野の研究開発の現状把握にも重視し、国際学会、参加大学、企業訪問によって情報収集と研究者・技術者との交流を通じて最新の情報を得た。さらに新アクチュエータ材料の国内集中研における研究への補完的研究開発として、圧電セラミックス・形状記憶合金・ポリマーゲルの3分野を国外大学へ委託し、所期の結果を得た。

なお平成11年12月7日、8日には、第1回知的材料・構造シンポジウムを開催し、研究成果の発表と討論、対外アピールを行い、200名を越す参加を得て、活発な意見交換と交流が実現できた。

# 本 文

〔研究内容〕

## 1.スマートマニュファクチャリング技術の開発

### 1.1 研究開発の成果

#### 1.1.1 要約

##### (1)和文

昨年度はRTM成形用フローフロント・硬化状態検出多機能センサを新たに開発したが、本年度は、オートクレーブ成形用にマトリックス樹脂の硬化状態を圧電セラミックスのインピーダンス変化をモニタリングすることにより検出できるセンシング方法を新しく開発した。この成果は、圧電セラミックスをアクチュエータとして使用する場合、硬化状態を検出するセンサを使用する必要がなくなり、センサ埋め込みによる悪影響の回避およびコストダウンを実現するものである。

次に、センシング技術については、成形方法毎に述べる。

##### (a)オートクレーブ成形

光ファイバセンサを使った成形過程における内部ひずみモニタリングについては、強化繊維方向と任意の方向に光ファイバセンサを埋め込んだ場合のひずみモニタリングについて検討した。その結果、積層板の任意方向の内部ひずみ測定の可能性と問題点を明らかにした。また、前年度の結果より、光ファイバセンサを積層板に埋め込んだ場合、センシング部への成形圧力等によりひずみ測定値に影響があることが明らかになったため、本年度は光ファイバセンサへのせん断および圧縮荷重の影響を定量的に検討した。その結果、成形圧力程度(0.5MPa)の負荷ではひずみ測定への影響がほとんど無視できることがわかった。さらに、マトリックス樹脂単体の硬化過程における比体積変化から、FRP積層板の比体積変化を計算し、内部ひずみ測定結果と比較検討した。その結果、光ファイバセンサによりマトリックス樹脂の硬化収縮が検出可能であることがわかった。

##### (b)RTM成形

成形過程におけるフローフロントおよび樹脂圧力を測定した結果、樹脂圧力がフローフロントから線形に分布することわかった。また、樹脂の浸透係数を求め、繊維含有率との関係などを求めた。さらに、フローフロント多機能センサによりレーストラッキング(樹脂が金型の端部を優先的に流れる現象)も検出可能であることも明らかにした。

##### (c)熱可塑FRPのプレス成形

成形過程において、樹脂の粘度が誘電率センサを使用することによりモニタリングできるのか検討した結果、その実現可能性が明らかになった。

次に、モデリング技術について検討した結果を述べる。まず、オートクレーブ成形についてプリプレグの硬化反応速度式および熱化学モデルを用いて、成形中のプリフォーム温

度の予測を行った。そして、RTM 成形における樹脂の金型内流動シミュレーションを行った。その結果、いずれも実験結果とシミュレーション結果が比較的良好一致し、本研究のモデルが成形過程の温度、流動シミュレーションに適用可能であることがわかった。

センサおよびアクチュエータの一体化技術については、 piezo素子を埋め込んだ CFRP 積層板について、圧縮強度およびせん断強度を測定し、素子埋め込みによる強度への影響について検討した。その結果、埋め込みによる強度への影響はほとんどみられないことが明らかになった。

以上述べたように、本年度は昨年度の成果に基き、さらにセンシング技術の精度向上、基礎的データの蓄積、モデルの開発を行い、最適成形条件の決定およびスマート複合材料への一体化技術の確立を実現するための成果が得られた。これらの成果は、製品の均質化、最適な成形条件による成形歩留まりの向上、信頼性の向上等により、省エネルギー、省資源に大いに貢献することが期待される。

## (2) 英文

In FY 1998, the multi-functional sensor, which can detect the flow-front position and the cure status of the resin in the RTM forming process, has been developed. In FY 1999, the new sensing method for autoclave molding process has been developed. This method uses the embedded piezoelectric ceramics and monitors the change of the mechanical impedance, which indicates the cure status of the resin. By using this method, the multi-functional materials with piezoelectric ceramics do not need another sensor for the cure monitoring, because the embedded piezoelectric ceramics can be used as a sensor in the forming process. Therefore, the method reduces the total cost, and the formed products eliminate the embedding effects of the cure-monitoring sensor, which is used only in the forming process.

The sensing technologies developed in this financial year are described in terms of the molding processes.

### (a) Autoclave molding

The monitoring technique of the internal strain of FRP laminates by the optical fiber sensors, which embedded to the off-axis direction, has been investigated in the autoclave molding. The results show that the capability and the difficulty of the strain monitoring. The results in the last financial year show that the molding pressures affect the precision of strain monitored in the autoclave molding. Then, the effects of transverse and compressive load on the strain outputs have been investigated. From the results, it is found that the effect

of the load equivalent to the molding pressure (about 0.5Mpa) on the strain outputs can be negligible.

The change of specific volume of the matrix resin of FRP in the curing process was measured and that of FRP laminates was calculated. The calculated values were compared with the experimental results and it is found that the embedded optical fiber sensor can measure the curing shrink of the FRP laminates.

#### (b) RTM molding

From the measurement results of flow-front position in the RTM molding process, it is found that the pressure is proportional to the position. The relation between the permeability and the volume fraction was also investigated. Furthermore, it is found that the multi-functional dielectric sensor can detect the lace-tracking, which is the phenomena that the resin impregnates faster along the edge of die.

#### (c) Hot press molding of thermoplastic FRP

From the investigation in this financial year, it is found that the viscosity of the matrix resin can be measured by dielectric sensors.

The modeling technologies developed in this financial year are described as follows. The theoretical modeling of curing process has been conducted. The temperature distribution of FRP laminates in the curing process was predicted by the equation of cure reaction rate and the thermochemical model. Then, the resin transfer simulation in the die was conducted. The both simulated results agree well with experimental results and it is found that the models are useful for prediction of the temperature distribution and the flow-front position.

Regarding to the integration technology of sensor and actuator with composites, the compressive and transverse strength of CFRP laminates with embedded piezoelectric elements were measured. The results show that the effect of embedded piezoelectric elements on the strength can be negligible.

### 1.1.2 本文

#### 1.1.2.1 スマート・マニュファクチャリング・グループ全体

##### (1) 研究開発の目的

大型化、複雑化が進む機械・構造システムの省資源、省エネルギー化を実現するためには、複合材料/構造物にセンサ、アクチュエータを一体化して、そのスマート化を行うこと

が有効であると考えられる。複合材料/構造物のスマート化により、材料や構造の信頼性および安定性を向上させ、部材厚の低減、維持管理に要する作業量・頻度の軽減等が可能となり、材料や構造物の軽量化、長寿命化が実現される。

そこで、本研究開発は複合材料/構造物のスマート化を実現する上での基本技術となる、スマートマニュファクチャリング技術を開発することを目的とするものである。

## (2)全体計画

### (2-1)グループ全体

#### (a)知的成形プロセス技術：センシング技術の確立

平成 10 年度に明らかにした各種のセンサの限界、長所などに基づき、その特徴に対応したセンシング技術を開発し、目的とする複合材料の内部状態のセンシング技術を確立する。

#### (b)知的成形プロセス技術：モデリング技術の開発

平成 10 年度に引き続き、オートクレーブ、精密プレスおよび RTM 成形において、成形シミュレーションを行うための基礎データを得るため、マトリックス樹脂の基礎物性を測定する。そして、成形実験において誘電率センサなどを用いて成形過程における樹脂の流動、硬化特性を把握する。この結果をもとに成形過程における複合材料のモデリングを行う。

#### (c)知的成形プロセス技術：統合化プロセスシステムの開発

オートクレーブ、精密プレスおよび RTM 成形それぞれについて、複合材料に埋め込まれたセンサからの信号に基づき成形機を制御する成形システムのプロトタイプを作成する。

#### (d)一体化技術：材料健全性評価

各種センサを埋め込んだ複合材料を試作し、センサの埋め込み状態を詳しく検討する。また、センサを埋め込んだことによる力学的特性への影響を調べる。そして、これらの結果を用いて、センサの最適な埋め込み位置、方法等を求める。

### (2-2)知的成形プロセスの工業技術基盤の開発

平成 11 年度は、オートクレーブ成形、RTM 成形の硬化過程や樹脂流動のセンシングシステムを検討し、成形シミュレーションのモデリングを検討する。又、複合材料母構造へセンサ、アクチュエーター一体化技術の検討を行う。具体的には

#### (1) 知的成形プロセス技術の開発

##### (a) センシング技術の確立

- ・ 熱硬化性樹脂（タフエポキシ樹脂系、耐熱樹脂系材料）を対象に、既存のセンサを用い

てオートクレーブ成形での樹脂硬化過程と、RTM成形での樹脂硬化過程と樹脂流動をモニタリングする上での問題点、改善点などを検討する。

(b) モデリング技術の開発

・ オートクレーブ成形におけるプリフォーム中の温度／硬化度分布、及びRTM成形における繊維プリフォーム中の樹脂流動の基礎データを取得し、解析モデルを検討する。

(2) 母構造とセンサ、アクチュエータ等の一体化技術の確立

(a) 健全性の評価と確保技術

・ 成形中に埋め込んだセンサ、アクチュエータに破壊、機能低下を起こさない成形条件の評価、及び、硬化途中の応力状態、硬化後の局所的な熱残留応力の検討評価を行う。

(2-3) 知的FRPプレス成形技術の工業技術基盤の開発

FRP成形過程のモニタリング技術を開発し、その情報を用いた知的成形プロセス技術を開発する。2年目にあたる本年度は、主に単純形状FRPの成形過程を対象として。以下の研究を行う。

① 熱可塑FRPのプレス成形

・ 単純形状のFRPについて、プレス成形中の溶融、固化プロセスのセンサによるモニタリングを試みる。

・ 樹脂の物性データ計測方法を検討するとともに、成形状態予測のための物性データを取得する。

② 熱硬化FRPのRTM成形

・ 単純形状のFRPについて、樹脂含浸過程のセンサによるモニタを試みる。

・ 種々の繊維織物について、樹脂の含浸特性を求める。

(3) 11年度研究成果のまとめ

(a) オートクレーブ成形

本年度は、マトリックス樹脂の硬化状態を圧電セラミックスのインピーダンス変化をモニタリングすることにより検出できるセンシング方法を新しく開発した。

光ファイバセンサを使った成形過程における内部ひずみモニタリングについては、強化繊維方向と任意の方向に光ファイバセンサを埋め込んだ場合のひずみモニタリングについて検討した。その結果、積層板の任意方向の内部ひずみ測定の可能性と問題点を明らかにした。また、光ファイバセンサへの成形過程で受けるせん断および圧縮荷重の影響を定量的に検討した。その結果、成形圧力程度(0.5MPa)の負荷ではひずみ測定への影響がほとんど

ど無視できることがわかった。さらに、光ファイバセンサによりマトリックス樹脂の硬化収縮の検出が可能であることがわかった。

#### (b)RTM 成形

成形過程におけるフローフロントおよび樹脂圧力を測定した結果、樹脂圧力がフローフロントから線形に分布することわかった。また、樹脂の浸透係数を求め、繊維含有率との関係などを求めた。さらに、フローフロント多機能センサによりレーストラッキング(樹脂が金型の端部を優先的に流れる現象)も検出可能であることも明らかにした。

#### (c)熱可塑 FRP のプレス成形

成形過程において、樹脂の粘度が誘電率センサを使用することによりモニタリングできるのか検討した結果、その実現可能性が明らかになった。

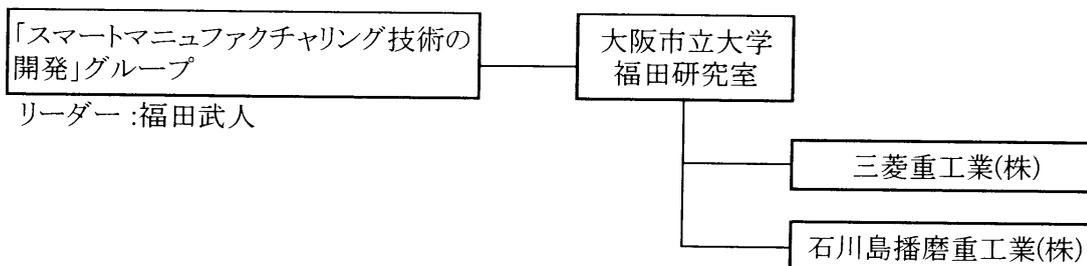
次に、モデリング技術について検討した結果を述べる。まず、オートクレーブ成形について成形中のプリフォーム温度の予測を行った。そして、RTM 成形における樹脂の金型内流動シミュレーションを行った。その結果、いずれも実験結果とシミュレーション結果が比較的良好に一致し、本研究のモデルが成形過程の温度、流動シミュレーションに適用可能であることがわかった。

センサおよびアクチュエータの一体化技術については、 piezo素子を埋め込んだ CFRP 積層板について、素子埋め込みによる圧縮強度およびせん断強度への影響を調べた結果、その影響がほとんどみられないことが明らかになった。

以上述べたように、本年度は昨年度の成果に基き、さらにセンシング技術の精度向上、基礎的データの蓄積、モデルの開発を行い、最適成形条件の決定およびスマート複合材料への一体化技術の確立を実現するための成果が得られた。これらの成果は、製品の均質化、最適な成形条件による成形歩留まりの向上、信頼性の向上等により、省エネルギー、省資源に大いに貢献することが期待される。

### (4) 研究実施体制、研究者リスト

#### (4-1)研究実施体制



#### (4-2)研究者リスト

会社名	氏名	所属・役職
大阪市立大学	福田武人	工学部 教授
	元木信弥	工学部 教授
	逢坂勝彦	工学部 助教授
	山崎友裕	工学部 助教授
	大島信生	工学部 助手
	高坂達郎	工学部 助手
三菱重工（株）	山口泰弘	名古屋航空宇宙システム製作所 研究部 主管
	神野昌明	名古屋航空宇宙システム製作所 研究部 化学研究課 主任
	酒井茂	名古屋航空宇宙システム製作所 研究部 化学研究課 主任
石川島播磨重工	盛田英夫	技術開発本部 基盤技術研究所 材料研究部 課長
	北出真太郎	技術開発本部 基盤技術研究所 材料研究部 課長代理
	柳沢健一	技術開発本部 基盤技術研究所 材料研究部 課員
	奥村郁夫	技術開発本部 基盤技術研究所 材料研究部 課員
	山岸謙二郎	技術開発本部 基盤技術研究所 材料研究部 課員

#### 1.1.2.2 知的成形プロセス技術：センシング技術の確立

##### (a)成形過程における内部状態センシング用センサ

本年度は以下の各内部状態のセンシング用に平成 10 年度と同様に以下のセンサを使用した。

##### i)マトリックス樹脂の硬化状態検出センサ

オートクレーブ成形：誘電率センサ

RTM 成形：フローフロント・硬化状態検出多機能センサ

##### ii)内部ひずみ測定センサ

オートクレーブ成形：EFPI 光ファイバひずみセンサ

##### iii)フローフロント検出センサ

RTM 成形：フローフロント・硬化状態検出多機能センサ

なお、本年度はマトリックス樹脂の硬化状態検出センサとしてアクチュエータとしてもよく使用される圧電セラミックスを使用することを新たに検討した。

一方向強化 GFRP 積層板のオートクレーブ成形において、中央の層間に圧電セラミックスを埋め込み、そのインピーダンス変化を測定した。オートクレーブ成形における誘電率センサによる対数イオン粘度および圧電セラミックスによるインピーダンス変化を測定した結果を図 1.1 および図 1.2 にそれぞれ示す。図より、インピーダンス変化は対数イオン粘度とほぼ同様の変化を示しており、圧電セラミックスによっても、オートクレーブ成形に

における FRP 積層板のマトリックス樹脂硬化状態を検出できることがわかった。

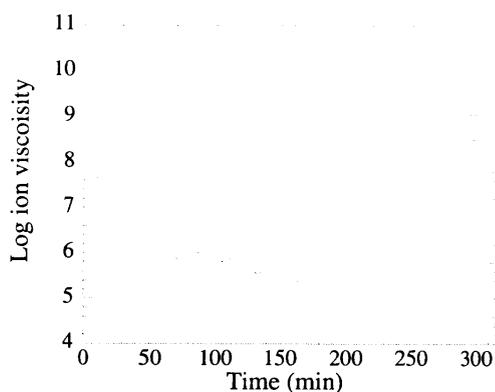


図 1.1 対数イオン粘度の時間変化

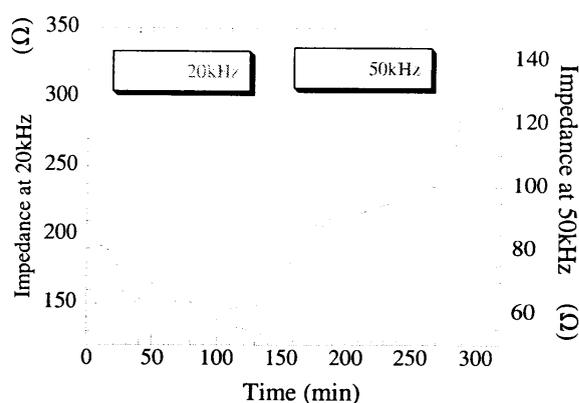


図 1.2 オートクレーブ成形における FRP 積層板のインピーダンス特性

## (b)成形過程における内部状態センシング

### i)オートクレーブ成形

#### ① Off-axis 方向の内部ひずみ測定

平成 10 年度においては、EFPI 光ファイバセンサを FRP 積層板の強化繊維と平行および直交する方向に埋め込み、オートクレーブ成形過程における積層板の内部ひずみ測定を行った。そして、その測定可能性について明らかにした。本年度は、強化繊維と任意の角度を有する方向(Off-axis 方向)に光ファイバセンサを埋め込んだ場合の、内部ひずみ測定可能性について検討した。一方向強化 GFRP 積層板について、強化繊維に対して  $0^\circ$ 、 $30^\circ$ 、 $60^\circ$ 、 $90^\circ$  の 4 方向および  $0^\circ$ 、 $45^\circ$ 、 $90^\circ$  の 3 方向に光ファイバセンサを埋め込んで、成形過程における内部ひずみ測定実験を行った。 $0^\circ$ 、 $45^\circ$ 、 $90^\circ$  の 3 方向に光ファイバセンサを埋め込んで測定した結果を図 1.3 に示す。図からわかるように成形過程最後に冷却過程において、温度低下に対応して、光ファイバセンサにより圧縮ひずみが測定されていることがわかる。また、センサの埋め込み角度が大きくなるほど大きな圧縮ひずみが測定されており、光ファイバセンサを Off-axis 方向に埋め込んだ場合も、内部ひずみが測定できる可能性が示された。

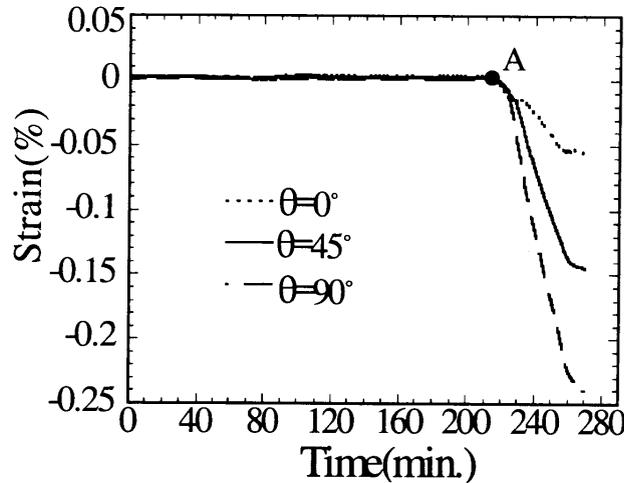


図 1.3 EFPI 光ファイバひずみセンサによる内部ひずみ測定結果

②マトリックス樹脂の硬化収縮に起因するひずみ検出

H10 年度に、カーボン繊維(CF)/タフエポキシ系樹脂プリプレグ積層板及び CF/ビスマレイミド系樹脂プリプレグ積層板(いずれも平板)に EFPI 光ファイバセンサを埋め込み、オートクレーブ硬化過程での内部ひずみを測定したところ、温度一定での硬化中にわずかに圧縮ひずみがかかる傾向を見出した。本年度は、このひずみが樹脂の硬化収縮によるものであることを確認するため、タフエポキシ系樹脂単体について硬化過程での比体積を測定し、比体積を温度と硬化度の関数として表す式を導出した。この結果に基づき、硬化過程の比体積変化とひずみ測定値を比較したものを図 1.4 に示す。

未硬化の状態では温度上昇とともに比体積が増大するが、樹脂が繊維及びセンサの隙間を流動できる間は、内部ひずみはあまり生じないものと考えられる。硬化が始まると硬化収縮によって比体積は減少するが、硬化度が約 60%に達すると硬化収縮は止まり、その後降温に伴う熱収縮によりさらに比体積が減少する。ひずみの測定値は、比体積の硬化収縮による減少が止まって一定の値になるとほぼ同時に、圧縮ひずみの増大が止まって一定の値になっており、EFPI 光ファイバセンサにより成形過程の樹脂の硬化収縮に起因する内部ひずみがセンシングできることを確認した。

同じ樹脂系(タフエポキシ系及ビスマレイミド系)について、図 1.5 に示すような平板にリブの付いた構造を模擬した供試体に EFPI 光ファイバセンサを埋め込み、同様に硬化過程での内部ひずみを測定した。結果を図 1.6 及び図 1.7 に示す。(タフエポキシ系については比体積変化も示す) タフエポキシ系では硬化度が約 60%に達すると温度一定の間はひずみの変動はなくなるが、一方ビスマレイミド系では硬化度がほぼ 100%に達するまで徐々に圧縮ひずみが増加していく。これらの傾向は平板の結果と同じである。

タフエポキシ系ではリブを模擬した部位と平板部との境界に設置したセンサの測定値が、硬化収縮が止まる直前に引張側に戻っており、このような非対称な形状の部位では平板等の単純形状とは異なる内部ひずみを生じることがわかった。胴体構造などの実製品の成形モニタリングでは、こうした点を考慮してセンサ設置位置を決める必要がある。

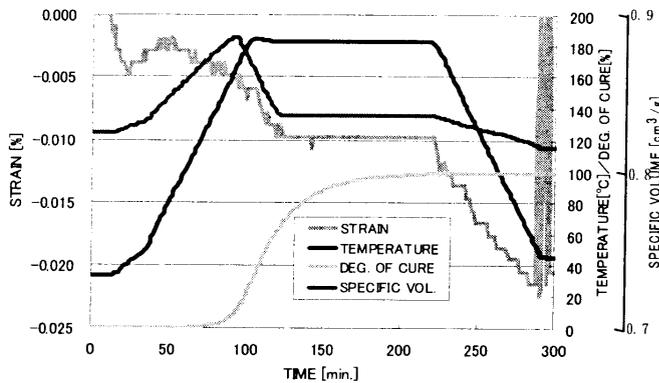


図 1.4 内部ひずみ測定値と樹脂比体積変化の比較(タフエポキシ系樹脂、平板)

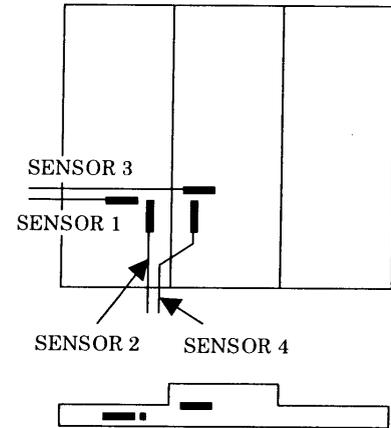


図 1.5 オートクレーブ成形供試体形状

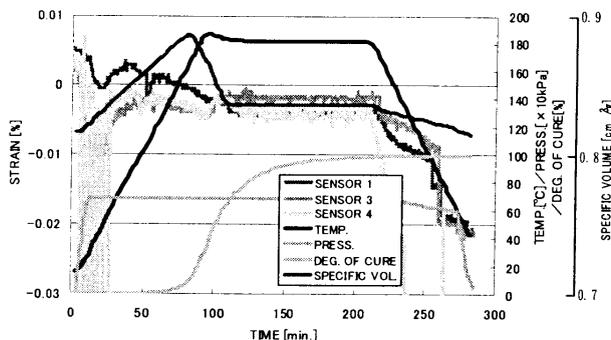


図 1.6 タフエポキシ系模擬構造積層板硬化過程の内部ひずみ

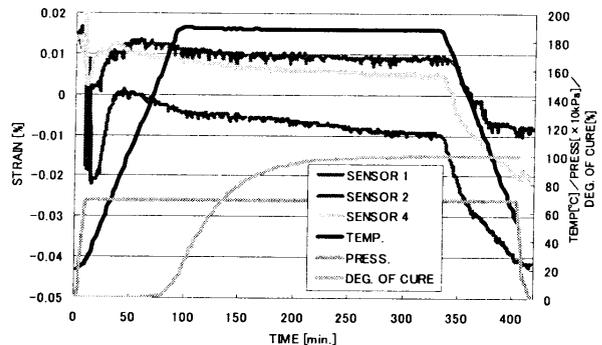


図 1.7 ビスマレイミド系模擬構造積層板硬化過程の内部ひずみ

### ③光ファイバセンサへの成形圧力によるひずみ測定への影響

EFPI 光ファイバひずみセンサを FRP 積層板に埋め込んでオートクレーブ成形過程における内部を測定する場合、成形圧力等によりセンサの光軸ずれが発生してひずみ測定に影響を与えることが考えられた。そこで、本年度は光ファイバセンサのセンシング部に直接せん断荷重を加える方法を考案し、せん断負荷によるひずみ測定への影響を定量的に検討した。また、圧縮負荷の影響についても検討した。図 1.8 にせん断負荷試験の結果を示す。

図の横軸は、せん断負荷試験において光ファイバセンサのセンシング部に加わる圧力(垂直応力)を示している。この結果より圧力により発生するせん断負荷に対する光ファイバセンサのひずみ出力への影響が定量的に明らかになった。また、通常のオートクレーブ成形において使用される圧力(約 0.5MPa)程度では、センサのひずみ出力にほとんど影響がないことがわかった。

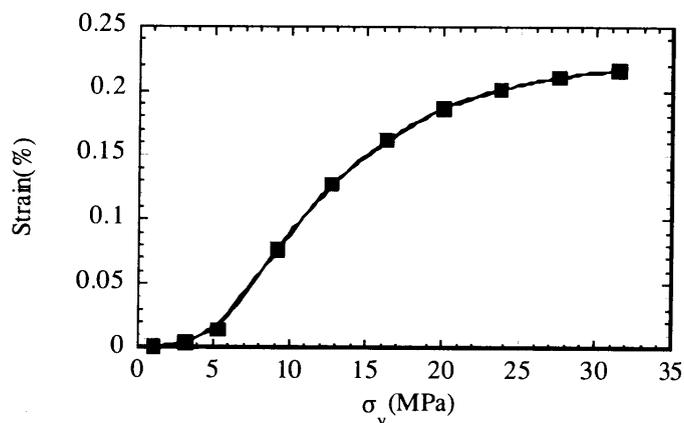


図 1.8 EFPI 光ファイバセンサに加わる圧力(垂直応力)とひずみ出力の関係

## ii)RTM 成形

### ① フローフロントのモニタリング(レーストラッキングの検出)

大阪市立大学にて開発され、エポキシ系樹脂での動作が確認されている RTM 流動フロントモニタ用櫛型誘電センサ 1)を用いて、ビスマレイミド系樹脂による RTM 成形のモニタリングを試みた。プリフォームは 200mm×200mm の平板で、図 1.9 に示す型を用い、5本の誘電センサによるモニタリングを実施し、ビスマレイミド系樹脂についても流動フロントの検出が可能なことを確認した。

RTM 成形においては、樹脂が型の端部を優先的に流れる現象(レーストラッキング)に注意する必要がある。図 1.9 の型で実際に生じたレーストラッキングの例を図 1.10 に示す。樹脂が注入口を中心に半円形に広がる一方で、型の端部を流れて排出口に達し、これ以上の樹脂含浸を妨げている。

このケースにおける誘電センサの出力(損失係数)を図 1.11 に示す。最初は中央部のセンサ(SENSOR3)が先行するが、途中でその両脇のセンサ(SENSOR2 及び SENSOR4)の出力が中央部のセンサよりも大きくなっている。これは排出口に達した樹脂が SENSOR2 及び SENSOR4 と接触し、これらのセンサが樹脂と接する面積が増大したためである。

即ち、このセンサを用いた流動フロントのモニタリングにより、レーストラッキングの

発生を知ることにも可能である。

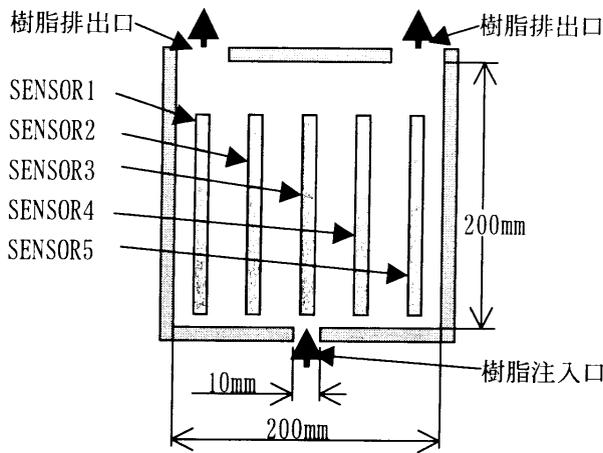


図 1.9 RTM 成形用型形状及びセンサ位置

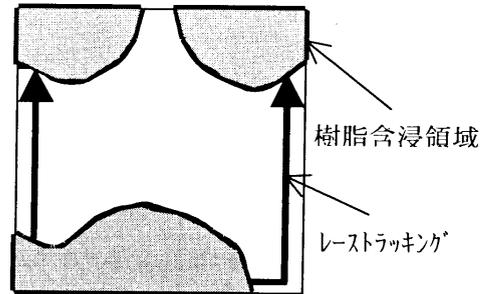


図 1.10 レストラッキング発生時の流動フロント形状

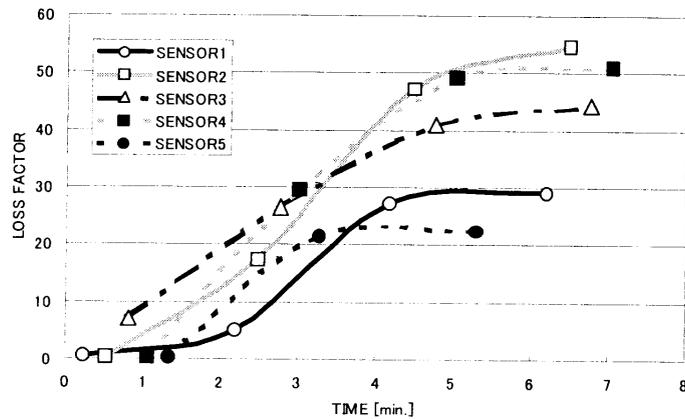


図 1.11 レストラッキング発生時のセンサ出力

## ② 成形過程における樹脂圧力分布

RTM(Resin Transfer Molding)法は、金型内に製品形状のプリフォーム（強化繊維の織物）をセットしておき、セットされたプリフォームへ熱硬化性樹脂を注入してプリフォームに含浸させ、その後に樹脂を硬化させる FRP の成形方法である。この RTM 法によって成形を行う際に、未含浸部分（ドライスポット）などの欠陥が生じないためには、製品の形状や素材の種類などに応じて樹脂への加圧力などの条件を制御することが必要である。その方法の一つとして、下に示すような、Darcy の式を用いた数値解析法がある。（含浸方向が 1 次元の場合）

$$u = -k / \eta \cdot (dP/dL)$$

ここで  $u$  は液体の含浸速度、 $dP/dL$  は含浸方向の圧力勾配、 $k$  は浸透係数(Permeability)と呼ばれる、そのプリフォームへの液体の含浸しやすさを表す定数である。この Darcy の式を用いる際には、プリフォームの種類によって異なる浸透係数を、あらかじめ求めておく必要がある。浸透係数を求めるための手法の一つとして、樹脂の 1 次元 (含浸方向) の圧力分布測定を行った。樹脂の圧力分布から上式の  $dP/dL$  が求められる。

試験に用いた機材の構成を図 1.12 に示す。あらかじめプリフォーム (ガラス繊維織物・平織・目付  $104\text{g}/\text{cm}^2$ ) をセットした金型に、窒素ガスの圧力 ( $98\text{kPa}$ ) によってシリコンオイルを注入・含浸させた。試験を容易にするため、樹脂の代わりとしてシリコンオイルを用いた。金型には  $50\text{mm}$  間隔で圧力センサを 10 個埋め込み、含浸中の圧力分布を測定した。金型上面にはアクリル樹脂板をはめ込み、目視によって含浸の進行を観測できるようにした。

厚さ  $2\text{mm}$  に対して 20 枚のガラス繊維織物を入れた場合に、得られた圧力分布の例を図 1.13 に示す。図中の時間(sec)は、含浸の開始からの経過時間である。含浸中の樹脂の圧力分布は、含浸方向に対してほぼ線形を保っていることがわかった。

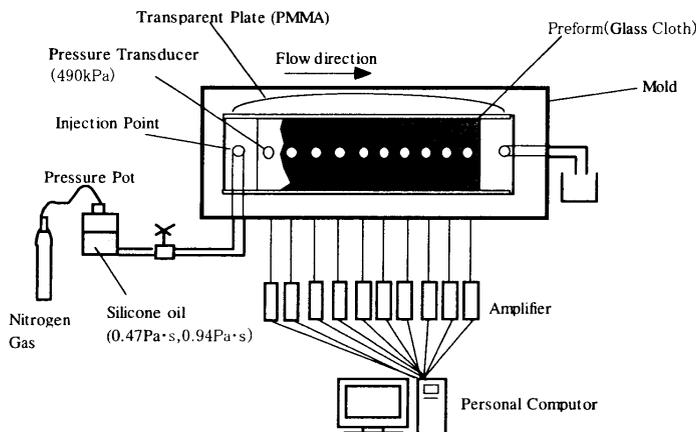


図 1.12 ガラス繊維織物へのシリコンオイル含浸圧力分布測定・機材の構成

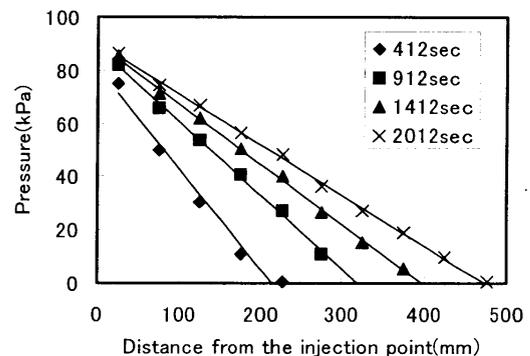


図 1.13 ガラス繊維織物へのシリコンオイル含浸圧力分布測定・機材の構成

### ③ プリフォームへの樹脂含浸特性

#### ③.1 ガラス繊維プリフォームへの樹脂含浸特性

センシングされた樹脂 (シリコンオイル) 含浸過程における圧力分布から、プリフォームへの浸透係数を計算することができる。本試験では、同じ深さの金型に対して、セットするガラス繊維織物の配向角度や枚数を変化させることによって、樹脂含浸方向や繊維含有率が変化した場合の影響についても調べた。図 1.14 に配向角度  $0^\circ$  (織物の縦糸方向と

含浸方向が同じ)と 90°(織物縦糸方向が含浸方向に対して 90°)の場合について、繊維含有率と浸透係数との関係を示す。浸透係数が繊維含有率の増加に従って急激に減少していくことがわかった。また、本試験に用いたガラス繊維織物では、0°と 90°方向とでは浸透係数に大きな差が見られた。

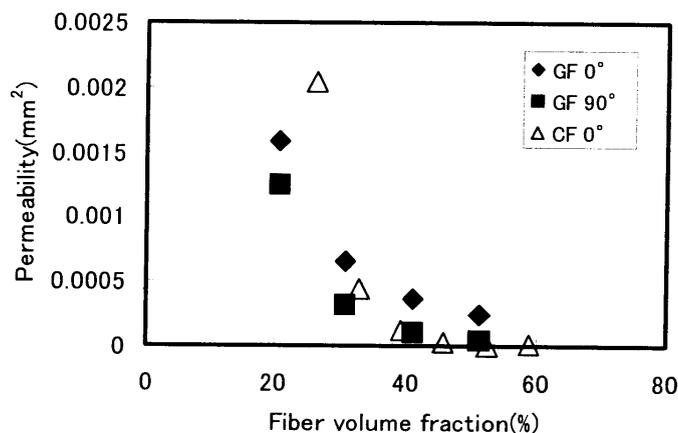


図 1.14 浸透係数測定結果

### ③.2 炭素繊維プリフォームへの含浸特性

ガラス繊維プリフォーム同様、炭素繊維プリフォームへの浸透係数の測定も行った。試験は同様に金型内部に積層する炭素繊維織物の枚数を変化させ、浸透係数の繊維体積含有率に対する依存性を調べた。CFRPの実用に際しては、より高強度・高剛性への要求が高まっていることから、これは繊維体積含有率を高める方向となる。したがってここでは配向角度 0°(織物の縦糸方向と含浸方向が同じ)のみについて、繊維体積含有率を約 60%まで増加させたプリフォームに関して実験を行った。ここでの試験は型にアクリル板でなくガラス板を用い、樹脂を減圧した金型に注入した後、加熱・硬化させて成形品を得た。試験結果から得られた繊維体積含有率 ( $V_f$ ) と浸透係数 (Permeability) との関係を図 1.14 のガラス繊維織物の場合に重ねて示す。(図中 CF) ガラス繊維同様、 $V_f$ の増加に伴って浸透係数が急激に低下するという挙動を示した。その減少の度合いはガラス繊維と比

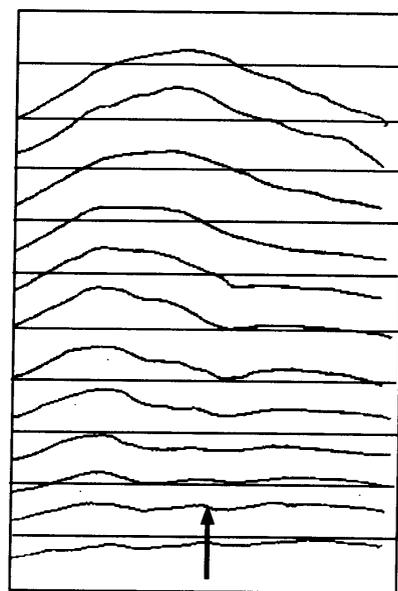


図 1.15 炭素繊維織物への樹脂含浸フローフロント形状の変化

較して大きくなっており、単に繊維体積含有率というだけでなく、プリフォームの材質（ガラス/カーボン、織り方等）なども含めた内部状態に依存するものと考えられる。繊維体積含有率が40~50%程度の場合、含浸していく先端部分（フローフロント）の形状はほぼ含浸方向に垂直であるのに対し、 $V_f$ =約60%においては図1.15に示すようにフローフロントが大きいうねりという挙動を示した。ここでは1次元の比較的平易な試験であるため、成形品において含浸不良などはマクロには観察されなかったが、より複雑形状になっていく場合、フローフロントのうねり（局地的な浸透係数の差違）が樹脂の回り込み、すなわち含浸不良などを生じさせる可能性が示唆され、よりミクロな挙動の把握等、詳細な検討を要する。

### iii)精密プレス成形

#### ① 成形過程における誘電率測定

熱可塑性FRPは耐衝撃性に優れているため、鳥吸い込みによる衝撃を受ける可能性がある、ジェットエンジン静翼部品への適用が検討されている。従来、熱可塑性FRPの成形中に金型内部の熔融樹脂粘度を知るには、あらかじめ測定しておいた温度-粘度関係と、実測または熱解析によって得られた金型内部温度から粘度を推定するしかなかった。しかし、金型内部の樹脂粘度は温度のみならず型内部の流動や圧力の影響を受けて変化している可能性があるため、直接モニタすることが望ましい。そこで本年度の研究では、熱可塑性FRPの成形過程をスマート化するため、従来は熱硬化性樹脂・熱硬化性FRPの成形モニタ用として熱硬化性樹脂の粘度測定に用いられてきた誘電率式センサを、熱可塑性FRPへ適用する可能性について検討した。

金型埋め込み式の誘電率センサを用いて測定した、ガラス繊維/ポリプロピレン樹脂の熱可塑性FRP平板成形中の誘電損失係数（Loss Factor・複素誘電率の虚数成分）変化を図1.16に示す。誘電係数は、0.1~10Hzの交流電場に対する応答から測定した。金型の加熱・冷却速度はともに1℃/min、プレスによる加圧力は0.22MPaの一定である。Loss Factorは温度とともに上昇・降下している。比較用として取得した、同じガラス繊維/ポリプロピレン樹脂の熔融粘度変化を図1.17に示す。熔融粘度は145℃付近で大きな変化を示している。ポリプロピレン樹脂の融解・固化によって粘度が変化する温度よりも、樹脂の分子運動が活発化して誘電係数が変化する温度が低いため、と推測されるが、樹脂の種類や測定条件によってもその関係は異なると考えられ、今後も種々の条件・樹脂についてデータを取得していく必要がある。

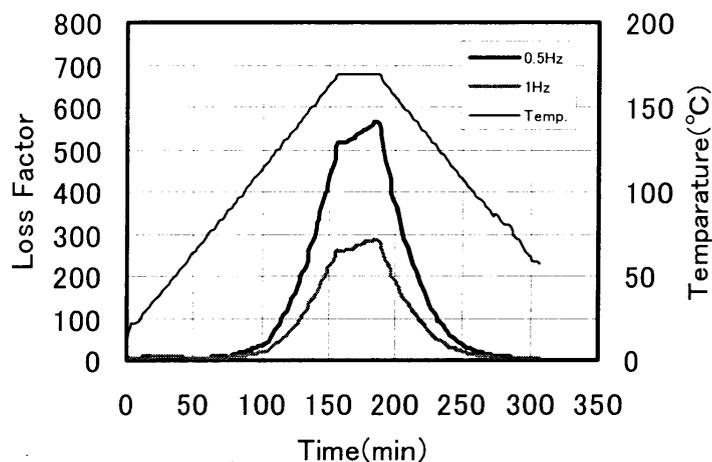


図 1.16 ガラス繊維／ポリプロピレン樹脂 FRP プレス成形中の誘電損失変化

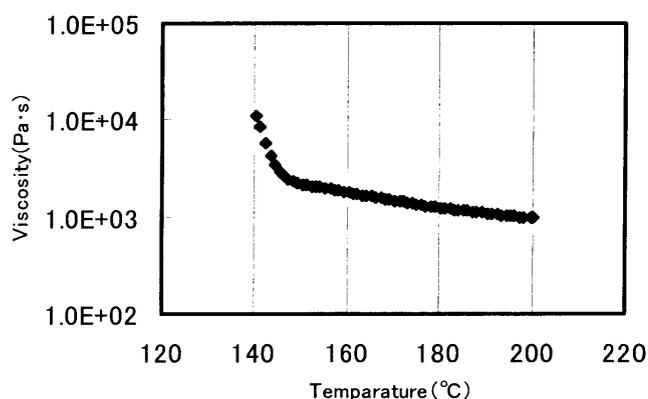


図 1.17 ガラス繊維／ポリプロピレン樹脂 FRP プレス成形中の誘電損失変化

## ② 熱可塑性樹脂の P<sub>v</sub>T 特性

熱可塑性 FRP のプレス成形では、冷却段階（樹脂の固化段階）での樹脂の収縮に合わせてプレス加圧を行うことが、表面のヒケや内部のボイドのような欠陥の無い FRP 製品を得るために必要な条件である。この樹脂の固化に伴う収縮は温度域や圧力状態によって異なるため、マトリックス樹脂の圧力 (P)・比容積 (v)・温度 (T) の関係をあらかじめ把握しておかなければならない。平成 10 年度に導入した P<sub>v</sub>T 測定装置を用いて得られたデータの例（ポリプロピレン樹脂）を図 1.18 に示す。測定方法は高温で溶融させた樹脂を徐々に冷却しながら、各温度で数種の圧力に対する体積を測定していく方法(等温法)である。

溶融状態から樹脂の温度を下げていった場合、固化に伴って 130℃～140℃付近で樹脂が急激に収縮し、圧力が大きいほど急激に収縮する温度域が高温側にずれていくことがわかる。

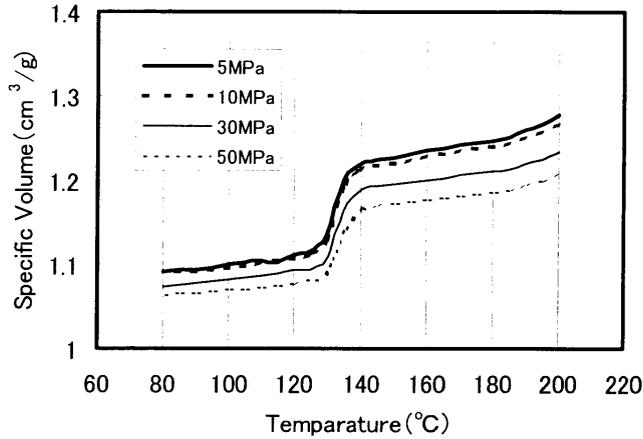


図 1.18 ポリプロピレン樹脂の PvT（圧力・比体積・温度）関係測定結果

### 1.1.2.3 知的成形プロセス技術：モデリング技術の確立

#### (a) オートクレーブ成形

プリプレグの硬化反応速度式 (H10 年度に導出) と、Springer ら 2) の熱化学モデルを用い、図 1.19 に示すような熱収支を考慮することにより、成形中のプリフォーム温度を予測することができる。

タフエポキシ系、88 層の厚板成形について、図 1.20 に示すように板厚方向の 1 次元にモデル化し、上記のモデルに基くプリフォーム温度の予測を行った。その結果、オートクレーブ雰囲気と表面との伝熱係数を適切に設定することにより、プリフォーム温度の予測値は昇温完了時点にみられた大きな過昇温を再現し、実

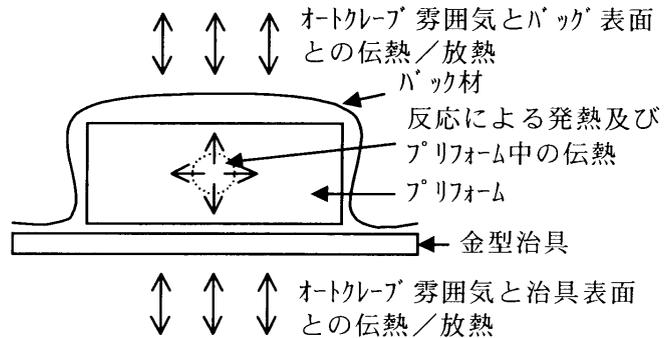


図 1.19 オートクレーブ硬化時の熱の出入り

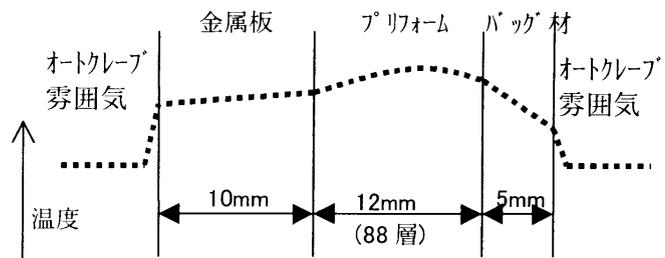


図 1.20 対象系の構成

測値とよく一致することを確認した。(図 1.21)

成形中の硬化度分布及び温度分布のモニタリング結果を基にその後の硬化過程(温度、硬化度及び内部応力の分布等)を予測し、最適な成形条件(温度、圧力等)を設定してオートクレープの制御にフィードバックさせる知的成形制御手順の構築が今後の課題である。

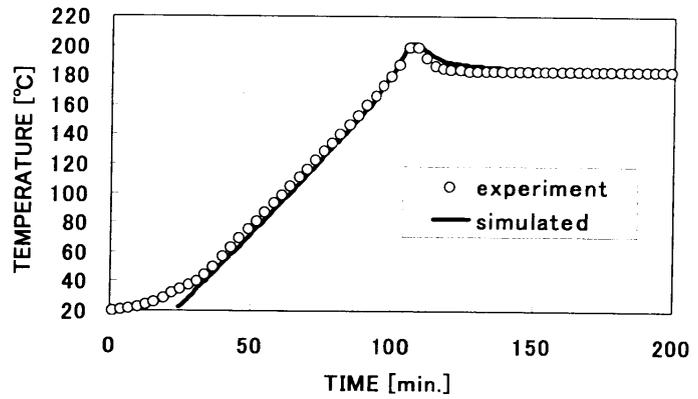


図 1.21 プリフォーム温度の実験値と予測値の比較

## (b)RTM 成形

### i) 樹脂流動シミュレーション

RTM 成形の樹脂注入過程における流動フロントの予測手法としては、多孔質媒体中の流速と圧力損失の関係を記述する Darcy 則に基くモデルにより、CVFEM 法 (Control Volume 有限要素法) に基くアルゴリズム 3) が広く使われている。そこで 2 次元系での流動フロントを CVFEM 法によりシミュレートするプログラムを作成し、実験結果との比較を行った。

大阪市立大学にて実施した流動フロントモニタリング実験結果 4) との比較を図 1.22 に示す。シミュレーション結果は実験結果とよく一致する。また、図 1.10 に示したレーストラッキング発生時の流動フロント形状を、シミュレーションにより予測した流動フロントの推移と比較したものを図 1.23 に示す。レーストラッキングによる影響部を除けば、注入

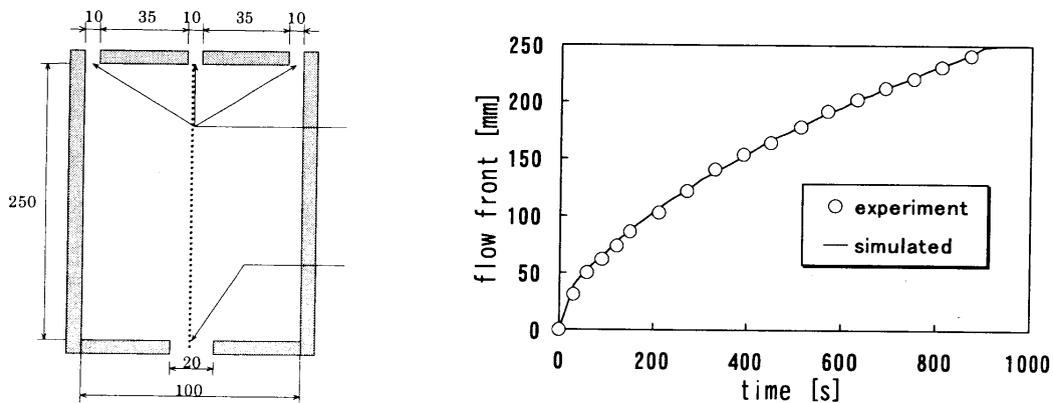


図 1.22 流動フロント位置—実験値と予測値の比較 [左図の型における中心線(破線)上での位置]

口付近の流動フロント形状は予測結果とほぼ一致する。

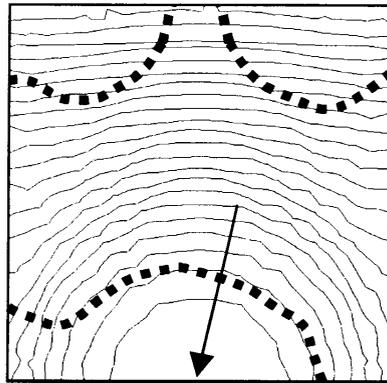


図 1.23 レーストラッキング発生時の流動フロント形状 (破線) と予測された流動フロントの推移(実践)の比較

次に、長方形の金型に金型の長手方向に対して  $30^\circ$  方向に傾けてガラス繊維の織物を積層したプリフォームについて、樹脂流動シミュレーションを行った。多機能センサを金型の長手方向に 3 本並べてフローフロントを検出した実験結果をセンサとともに図 1.24 に、シミュレーションを行った結果を図 1.25 に示す。図からわかるように、シミュレーションが実験結果をよく現していることがわかる。

以上の結果より、ここで作成した CVFEM 法のプログラムにより、2次元系の流動フロントの予測が可能になったことがわかった。

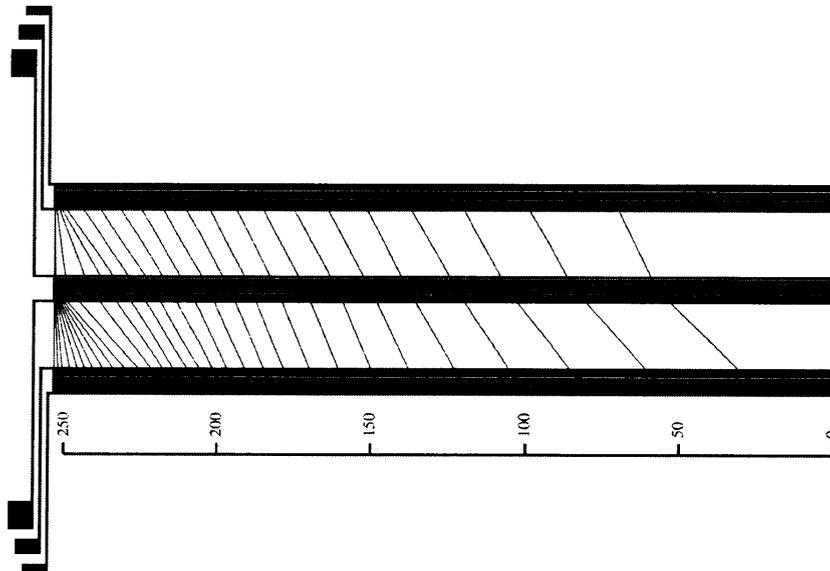


図 1.24 多機能センサと  $30^\circ$  傾いたガラス繊維織物プリフォームにおける樹脂流動実験結果

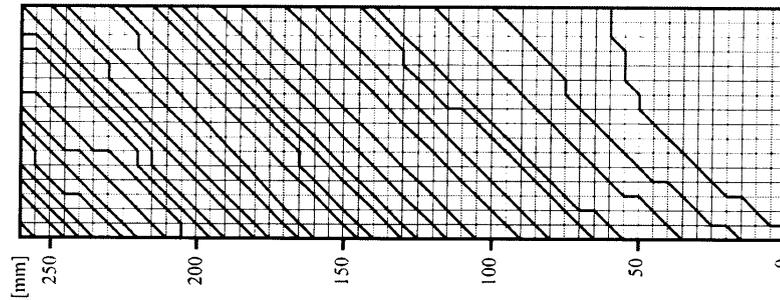


図 1.25 30° 傾いたガラス繊維織物プリフォームにおける樹脂流動シミュレーション結果

ii) 樹脂注入条件最適化の試行

R T Mの知的成形プロセスとして、流動フロントをモニタリング結果を基に樹脂注入口圧力を最適化するシステムが考えられる。特に注入口が複数ある場合、個々の注入口圧力の最適制御は、含浸時間短縮と含浸不良防止を両立させる上で重要と考えられる。

例として図 1.26 に示すような型を考える。2つの注入口から同じ圧力で注入し続けた場合のシミュレーションでは、図 1.27(a)に示すように排出口から少し左側にずれた位置が最後に含浸される、即ちこの位置にドライスポットが生じやすいことがわかる。通常このような場合、排出口の位置をずらすことでそうした含浸不良を避けるものであるが、光ファイバセンサ等を埋込んだプリフォームの場合、センサの設置位置や型の外への取出し方法によっては排出口の位置が制約を受けることも考えられる。

そこで排出口の位置が動かせない場合、樹脂が他の部位を全て含浸して最後に排出口から出るように注入条件を制御する必要がある。図 1.26 の型の場合、初めは2つの注入口から同じ圧力で注入し、途中で右側の注入口を閉鎖して左側からのみ注入するという制御が考えられる。図 1.27 (b)はプリフォーム全体の40%の領域が含浸された時点で右側の注入口を閉鎖した場合のシミュレーション結果であり、樹脂が最後に排出口の位置から出ている、即ちドライスポットの発生を防止できることがわかる。

このような制御を行うためには注入条件変更のタイミングを正確に知る必要があり、センサによる流動フロントのモニタリングが不可欠である。

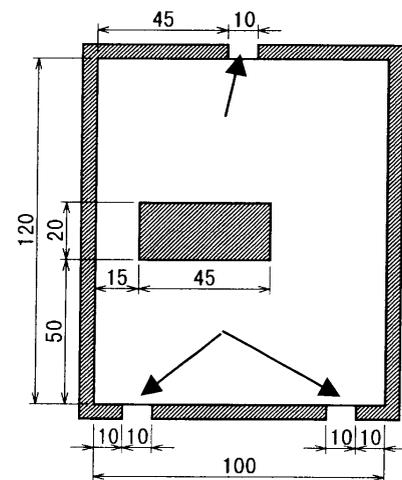
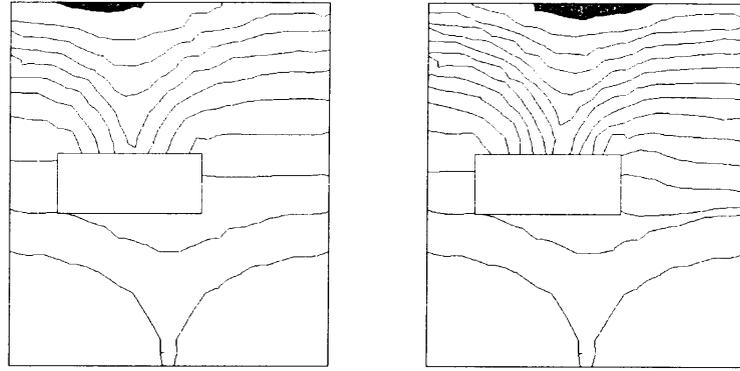


図 1.26 注入条件最適化対象系



(a)左右の注入口から同圧力で注入し続ける場合

(b)左右の注入口から同圧力で注入、全体の40%が含浸された時点で注入口を閉じる

図 1.27 シミュレーションにより予測された流動フロント  
(影の部分は最後に含浸される部位)

#### 1.1.2.4 一体化技術：材料健全性評価

##### (a) アクチュエータ埋め込みCFRPの健全性

piezo素子(富士セラミックス製、C-6材、幅5mm、厚さ0.1mm及び0.2mm)を、8層/9層間又は16層/17層間に埋め込んでオートクレーブ成形したCFRP平板(一方向材プリプレグ32層を擬似等方積層)の埋込部周辺の圧縮強度及び層間せん断強度を評価した結果、埋め込んでいないものとの有意な差は見られなかった。(表 1.1)

表 1.1 アクチュエータ素子を埋め込んだCF/タフエポキシ樹脂系積層板の強度評価結果

	ピエゾ素子サイズ	埋込位置	圧縮強度 [N/mm <sup>2</sup> ]	層間せん断強度 [N/mm <sup>2</sup> ]
1	埋込なし	-	659	75.5
2	5×0.1 mm	8層/9層間	694	76.9
3	5×0.2 mm	8層/9層間	661	74.7
4	5×0.1 mm	16層/17層間	649	77.1

#### [参考文献]

- 1) S. MOTOGI, T. ITOH, T. FUKUDA; "Multi-Functional Sensor Properties and 2-dim Flow Detection for RTM, Proc. 6th Japan International SAMPE Symposium, pp.1033
- 2) P. R. CIRISCIOLI, G. S. SPRINGER; "Smart Autoclave Cure of Composites", Technomic Publishing Co.,Inc. (1990)

3) Y. F. CHEN, K. A. STELSON and V. R. VOLLER; "Prediction of Filling Time and Vent

Locations for Resin Transfer Molds", Journal of Composite Materials, vol.31, pp.1141 (1997)

4) 元木,伊東,逢坂,大島,福田,山岸,盛田,神野,山口; 「RTM 成形法における多機能センサーの開発」、日本複合材料学会学術講演会 (1999)

## 1.2 達成状況

### 1) 知的成形プロセス技術：センシング技術の確立

まず、センシング技術として、本年度はオートクレーブ成形用にマトリックス樹脂の硬化状態を圧電セラミックスにより検出できるセンシング方法を新しく開発した。

モニタリング技術としては、オートクレーブ成形における光ファイバセンサを使った内部ひずみの測定において、平成 10 年度の強化繊維方向および直交方向のひずみ測定に加えて、強化繊維方向と任意の方向の内部ひずみモニタリングについて検討した。その結果、積層板の任意方向の内部ひずみ測定の可能性と問題点を明らかにした。また、光ファイバセンサのセンシング部への成形圧力等によりひずみ測定値への影響を明らかにするため、センサへのせん断および圧縮荷重の影響を定量的に検討した。さらに、マトリックス樹脂単体の硬化過程における比体積変化から、FRP 積層板の比体積変化を計算し、内部ひずみ測定結果と比較検討した。これらの結果より、光ファイバセンサによる内部ひずみ測定の精度を検証することができた。

RTM 成形については、成形過程における樹脂圧力、樹脂の浸透係数、繊維含有率との関係などを求めた。さらに、フローフロント多機能センサによりレーストラッキング(樹脂が金型の端部を優先的に流れる現象)も検出可能であることも明らかにした。

熱可塑 FRP のプレス成形については、成形過程において、樹脂の粘度が誘電率センサを使用することによりモニタリングできるのか検討した結果、その実現可能性を明らかにした。

### 2) 知的成形プロセス技術：モデリング技術の確立

オートクレーブ成形についてプリプレグの硬化反応速度式および熱化学モデルを用いて、成形中のプリフォーム温度の予測を行った。そして、RTM 成形における樹脂の金型内流動シミュレーションを行った。その結果、いずれも実験結果とシミュレーション結果が比較的良好に一致し、本研究のモデルが成形過程の温度、流動シミュレーションに適用可能であることがわかった。

### 3) 知的成形プロセス技術：統合化プロセスシステムの開発

オートクレーブ成形において、複合材料の内部に埋め込まれたセンサからの信号を受取り、決定された最適の成形条件を制御用コンピュータに送り、成形機をコントロールするプログラムのプロトタイプを作成した。

### 4) 一体化技術：材料健全性評価

ピエゾ素子を埋め込んだ CFRP 積層板について、圧縮強度およびせん断強度を測定し、素子埋め込みによる強度への影響について検討した。その結果、埋め込みによる強度への影響はほとんどみられないことが明らかになった。

以上述べたように、本年度は昨年度の成果に基き、さらにセンシング技術の精度向上、基礎的データの蓄積、モデルの開発を行い、最適成形条件の決定およびスマート複合材料への一体化技術の確立を実現するための成果が得られた。これらの成果は、製品の均質化、最適な成形条件による成形歩留まりの向上、信頼性の向上等により、省エネルギー、省資源に大いに貢献することが期待される。

## 1.3 結論

### 1) 知的成形プロセス技術

成形過程におけるマトリックス樹脂の硬化状態、プリフォームの内部ひずみ、RTM 成形におけるフローフロント等のモニタリング技術については、昨年度の成果に基き、その検出精度の向上について検討した。そして、光ファイバセンサに及ぼす成形圧力の影響、多機能センサによるレーストラッキングの検出可能性を明らかにし、RTM 成形における樹脂内圧力分布、浸透係数などの基礎的データを得た。また、オートクレーブ成形におけるプリフォーム内温度分布、RTM 成形における流動シミュレーションを行い、最適成形条件決定のためのモデル構築を進めている。

### 2) 一体化技術

昨年度の光ファイバセンサについての一体化技術の検討に引続き、本年度はアクチュエータである圧電素子の埋め込みによる圧縮、層間せん断強度への影響を調べた。その結果、埋め込みによる影響はほぼ無視できることがわかった。

以上の成果により、知的成形プロセス技術については、高精度の成形品内部状態のモニタリング、モデリング等の見通しをつけることができた。一体化技術については、センサ、アクチュエータの静的強度への影響等についてはある程度データを得ることができた。しかし、センサ等の埋め込みによる長期信頼性への影響については、今後データ取得が必要であり、静的強度への影響についてもより詳細な検討が不可欠である。

以上、本年度得られた成果は、製品の均質化、最適な成形条件による成形歩留まりの向上、信頼性の向上等により、省エネルギー、省資源に大いに貢献することが期待される。

## 2. 研究発表・講演、文献、特許等の状況

### 2.1 研究発表・講演

発表題目	発表者	発表先	発表期日
1) Strain Monitoring in Curing of Composites Using EFPI Sensors	K.Osaka and T.Fukuda	The 44th International SAMPE Symposium and Exhibition	1999.5.27
2) Development of Multi-Functional Sensor in Resin Transfer Molding	S. Motogi, T. Itoh, T. Fukuda, K. Yamagishi, S.Kitade and H. Morita	The 12th International Conference on Composite Materials	1999.7.7
3) Detection of Transverse Cracks in Composite Laminates by Embedded Plastic Optical Fibers	N.Takeda, T.Kosaka and T.Ichihama	The 12th International Conference on Composite Materials	1999.7.6
4) Study of Vibration Modal Estimation for Composite Beam with PZT Thin Film Sensor System	N.Oshima, T.Fukuda and S.Motogi	The 12th International Conference on Composite Materials	1999.7.6
5) In Situ Strain Measuring and Cure Monitoring of Composite Materials in Autoclave Molding	T.Fukuda and K.Osaka	The 2nd International Workshop on Structural Health Monitoring	1999.9.9
6) Multi-Functional Sensor Properties and 2-Dim Flow Detection for RTM	S.Motogi, T.Itoh and T.Fukuda	The 6th Japan International SAMPE Symposium	1999.10.29
7) Autoclave Cure Monitoring of CFRP Laminates by Embedded Sensors Comparing with Cure Prediction by Kinetics	Y.Yamaguchi, M.Yoshida, M.Jinno, S.Sakai K.Osaka and T.Fukuda	The 6th Japan International SAMPE Symposium	1999.10.29
8) RTMの樹脂含浸過程における圧力分布の測定	山岸、奥村、柳沢、北出、盛田、逢坂、元木、大島、福田	日本複合材料学会第24回複合材料シンポジウム	1999.11.18
9) RTM法による2次元樹脂浸透流れの誘電センサによる測定とシミュレーション	伊藤、元木、福田、山口、神野	日本複合材料学会第24回複合材料シンポジウム	1999.11.18
10) RTMにおいて異なるプリフォームに対する樹脂含浸挙動	奥村、山岸、柳沢、北出、盛田、逢坂、元木、大島、福田	日本複合材料学会第24回複合材料シンポジウム	1999.11.18
11) 圧電セラミックスによる樹脂の硬化モニタリング	大島、青木、元木、福田	日本複合材料学会第24回複合材料シンポジウム	1999.11.19

12)熱可塑性FRPの成形過程における誘電特性の検討	山岸、北出、盛田、逢坂、元木、福田	日本複合材料学会第24回複合材料シンポジウム	1999.11.19
13)タフエポキシ系及びビスマレイミド系CFRP硬化過程のモニタリング	山口、吉田、神野、酒井、逢坂、福田	日本複合材料学会第24回複合材料シンポジウム	1999.11.19
14)オートクレーブ成形におけるEFPI光ファイバセンサによるFRP積層板の内部ひずみの測定(Off-axis方向の測定)	逢坂、高坂、結城、福田	日本複合材料学会第24回複合材料シンポジウム	1999.11.19
15)EFPI光ファイバセンサによるFRP積層板の内部ひずみ測定に及ぼす成形圧力の影響	逢坂、高坂、結城、福田	日本複合材料学会第24回複合材料シンポジウム	1999.11.19
16)複合材料中に埋め込まれた光ファイバの光学特性について	高坂、逢坂、福田	日本複合材料学会第24回複合材料シンポジウム	1999.11.19
17)光ファイバひずみセンサによるFRP積層板の内部ひずみ測定におけるセンサ埋め込み方法の検討	逢坂、高坂、福田、結城	日本機械学会関西支部第257講演会	1999.11.6
18)光ファイバひずみセンサによるFRP積層板の内部ひずみ測定に及ぼすセンサ埋め込み状況の影響	逢坂、高坂、福田、結城	溶接学会溶接構造シンポジウム'99	1999.12.3
19)圧電セラミクスによる複合材料の硬化モニタリング	大島、青木、梅本、元木、福田	日本材料学会第29回FRPシンポジウム	2000.3.16
20)スマートRTM成形のための離散樹脂フロントセンサーの開発	元木、伊藤、中出、福田	日本材料学会第29回FRPシンポジウム	2000.3.16
21)RTM成形先進複合材料の生涯モニタリングセンサーの開発”	元木、福田	日本機械学会材料力学部門合同シンポジウム	2000.3.30

## 2.2 文献

該当なし

## 2.3 特許等

該当なし

## 2.4 その他の公表

該当なし

## II. アクチュエータ材料・素子開発（特別会計）

### 1. 研究開発の成果と達成状況

#### 1.1 研究開発の成果

##### 1.1.1 要約

###### (1) 和文

###### (a) セラミックスアクチュエータ

###### (a-1) 傾斜機能圧電アクチュエータに関する研究

本研究では屈曲型圧電アクチュエータの欠点である応力の不連続による耐久性の問題を傾斜機能化によって解決し、高性能な屈曲型圧電アクチュエータを作製することを目的としている。高誘電材料と圧電材料の組み合わせにより作製したアクチュエータが屈曲変位を発生していることが確認できた。また、解析によって電圧印加時の応力の不連続が小さく、発生力の高い構造が明らかになった。

###### (a-2) PNN-PZT系セラミックスの高性能化の研究

本研究ではPNN-PZT系材料で諸特性について調べ、アクチュエータ材料としての最適な組成を検討し、更に新合成プロセスとしてマイクロ波焼結法を採用し、圧電セラミックスの製作プロセスを改良および性能を向上することを目的としている。鉛過剰添加法を用いて、PNN-PZT組成の40組成についてP-Eヒステリシス、キュリー温度、歪特性等の圧電、電歪特性の確認を行い、各特性の状態図を作製した。製造方法の開発として、28GHzのマイクロ波焼結により焼結ムラの無い、大型で良質な焼結体が得られた。

###### (b) 形状記憶合金型アクチュエータ

###### (b-1) 感温型形状記憶合金アクチュエータ

本研究では、感温型形状記憶合金（Thermal SMA, 以下、T SMA）の機械的特性を大幅に向上させるとともに、高温で作動できる新たなSMAの開発を目的とする。改良を加えた電磁浮遊溶解ノズルレス急冷凝固装置を用いてもより長く薄い形状記憶合金の作成条件を調TiNi、TiNiCu系合金で従来よりも大幅な高機能・高性能の感熱型SMAアクチュエータ材を開発の目処がついた。また、高温型(NiAlMnFe、RuTa系など)新SMAへの研究開発も進め、繰り返しマイクロ引張り試験機（ステージ）付きのレーザ顕微鏡システムを設計・開発し、実用上重要なSMAアクチュエータの繰り返し熱疲労特性・劣化度の評価法を検討した。

###### (b-2) 磁性記憶合金アクチュエータ

本研究は平成10年度より研究を開始し、磁気特性、機械特性、形状記憶特性の相互評価を研究の柱にして、バルク材、薄膜の組成制御技術の確立を目指している。これまでの成果として、合金組成の詳細な制御による結晶変態温度の制御、圧縮試験による形状回復現象の

発現が可能となっている。その結果、磁性形状記憶合金の磁気特性、機械特性、形状記憶特性が合金の成分と均質化処理（熱処理）との間に強い相関を持つことを明らかにしている。

研究２年度である本年度は実用化に向けて当面の問題となっている材料の脆性を研究の中心課題として合金の特性制御技術の開発を行った。

(2) 英文

(a) Ceramic actuators

(a-1) Development of functionally graded piezoelectric ceramic actuators

This research aims to develop high performance bending piezoelectric actuators by fabrication of functionally graded materials, designed for minimizing of stress discontinuous and improving endurance. The bending displacement was verified in fabricated actuators which were graded with high dielectric and piezoelectric materials. The structure of functionally graded materials was determined by stress analysis in actuators at electric field.

(a-2) Development of high performance piezoelectric ceramic actuators

The purposes of this research are to determine the most suitable composition in the PNN-PZT system and to improve performance of piezoelectric ceramics by using new fabrication process like microwave sintering. The piezoelectric properties diagrams, which includes P-E hysteresis, Cure temperature, piezoelectric properties and electro-strictive of 40 different PNN-PZT composition, were completed. The sintered samples with uniformity and large scale were obtained by 28GHz microwave sintering.

(b) Improvement of shape memory alloy actuator elements

(b-1) Improvement of thermoelastic shape memory alloy actuator elements

Material characteristics of thermoelastic shape memory alloys (TSMAs) have to be improved at least up to two times higher level so that those can be applied to smart material/structure systems in engineering view point. For this purpose, it will become a very important key that we can develop a new, novel material processing technique and then, we get an optimum control of metallurgical microstructures for more high performance SMA. In this work, electro-magnetically controlled nozzleless melt-spinning method was originally designed and its equipment was fabricated. This method is characterized by combining the control of the flow down of the metal melts after levitation with rapid solidification by rotating roll. It was confirmed by SEM/EBSP crystalline analyzing technique that the produced, rapid-solidified intermetallic TiNi shape memory alloy thin plate showed very strong crystal

anisotropy, higher shape memory effect, higher ductility and stronger corrosion resistance than those of the conventionally processed melt-worked samples having its same origin. Moreover, the originally designed, laser microscope having cyclic tensile micro stage have been developed to investigation of thermal hysteresis and fatigue degradation test of various kinds of thermal SMAs whose phase transformation temperature from 20°C to 1400°C.

#### (b-2) Improvement of ferromagnetic shape memory alloy actuator elements

The research of the shape memory alloy series on the Ni-Mn-Ga alloys have shown the importance of the two features for actuating in a magnetic field. The first are the system of the structural transformations between martensite and austenite phase by an applied stress and temperatures. The second are the transition temperatures of the ferromagnetic ( $T_c$ ) and the structural one with the change of the direction of magnetic anisotropy. To realize the magnetic shape memory effect by an external magnetic field, we studied these features of the Ni-Mn-Ga alloys in the fiscal year of 1998. The findings of this investigation was the way of sample preparation on the Ni-Mn-Ga alloys delieved from the measurement of various physical properties.

#### 1.1.2 本文

##### 1.1.2.1 アクチュエータ材料・素子開発グループ全体

##### (1) 研究開発の目的

##### (a) セラミックスアクチュエータ

##### (a-1) 傾斜機能圧電アクチュエータに関する研究

屈曲型圧電アクチュエータの欠点である応力の不連続による耐久性の問題を傾斜機能化によって解決し、傾斜構造でドーム型形状とした屈曲型圧電アクチュエータ素子の発生力を2倍以上に向上させることを目的としている。

##### (a-2) PNN-PZT系セラミックスの高性能化の研究

高性能化圧電または電歪材料を用い積層型アクチュエータ素子の発生力を2倍以上に向上させることを目的として、PNN-PZT系材料で諸特性について調べ、アクチュエータ材料としての最適な組成を検討し、更に新合成プロセスとしてマイクロ波焼結法を採用し、圧電セラミックスの製作プロセスを改良および性能を向上する。

##### (b)形状記憶合金型アクチュエータ

##### (b-1) 感温型形状記憶材料の開発

T SMAアクチュエータへの材料科学的課題改善を実現させるために、新しい材料製造・加工プロセス技術を導入し、その金属結晶組織形態を最適制御し、プロジェクト後半での目的であるデモンストレータに適用できる高機能・高性能の感熱型SMAアクチュエータ材を開

発・提供することを最終目的としている。

(b-2) 磁性形状記憶合金材料の開発

形状記憶効果を1 T以下の磁場で発現する。

(2) 全体計画

(a) セラミックスアクチュエータ

(a-1) 傾斜機能圧電アクチュエータに関する研究

円盤型FGMアクチュエータにおける片側支持の拘束条件での変位測定を行い、屈曲変位の発生を測定する。また、各材料の材料定数を測定した後に、汎用数値解析ソフトANSYSを用い、最適構造の選定を行う。

(a-2) PNN-PZT系セラミックスの高性能化の研究

鉛過剰添加法を用いて、PNN-PZT組成の40組成について特性確認を行う。更にP-Eヒステリシス、キュリー温度、歪特性等の圧電、電歪特性の確認を行い、各特性の状態図を作製する。また、製造方法の開発として、28GHzのマイクロ波焼結技術の確立と従来焼結に無い微細構造組織への影響、更に圧電特性の向上について調べる。

(b) 形状記憶合金型アクチュエータ

(b-1) 感温型形状記憶材料の開発

平成11年度研究では、昨年度(平成10年度)までに導入した革新的な材料製造プロセス技術として、“電磁浮遊溶解ノズルレス急冷凝固法”装置について改良を加え、ミクロ的な金属組織を制御して、従来よりも2倍以上の高機能・高性能の感熱型SMAアクチュエータ材を開発を目指す。そして、その理由も金属組織学的に考察を行う。さらに、現状の室温レベル(TiNi, TiNiCu, TiNiPd系など)でから600~1000℃を超える高温型(NiAlMnFe, RuTa系など)SMAの研究開発を試み、それらの幅広い温度範囲での形状記憶特性把握のために、繰り返しマイクロ引張り試験機(ステージ)付きのレーザ顕微鏡システムを設計・開発する。また、実用上重要なSMAアクチュエータの繰り返し熱疲労特性・劣化度の評価法にも検討を加えることを目標とする。

(b-2) 磁性形状記憶合金材料の開発

①合金組成制御技術開発

②薄膜製造技術開発

③合金組成と特性の関係研究(磁場・熱・機械的特性及び形状記憶効果の定量化)

④磁気特性・材料特性改善技術研究

(3) 11年度研究成果まとめ

(a) セラミックスアクチュエータ

(a-1) 傾斜機能圧電アクチュエータに関する研究

本年度は円盤型FGMアクチュエータにおける片側支持の拘束条件での変位測定を行い、

屈曲変位を発生することを確認した。また、各材料の材料定数を測定した後に、汎用数値解析ソフトANSYSを用い、最適構造の選定を行い、解析によって電圧印加時の応力の不連続が小さく、発生力の高い構造が明らかになった。

#### (a-2) PNN-PZT系セラミックスの高性能化の研究

本年度はPNN-PZT系材料で諸特性について調べ、アクチュエータ材料としての最適な組成を検討し、更に新合成プロセスとしてマイクロ波焼結法を採用し、圧電セラミックスの製作プロセス条件および諸特性について調べ以下の結果を得た。鉛過剰添加法を用いて、PNN-PZT組成の40組成について特性確認を行った。更にP-Eヒステリシス、キュリー温度、歪特性等の圧電、電歪特性の確認を行い、各特性の状態図を作製した。その結果、3kV/mmの電圧下で最大0.28%の電界誘起歪を発生する組成を確認することができた。製造方法の開発として、28GHzのマイクロ波焼結により焼結ムラの無い、大型で良質な焼結体を得ることを確認した。28GHzのマイクロ波焼結技術の確立と従来焼結に無い微細構造組織への影響、更に圧電特性の向上を確認できた。

#### (b) 形状記憶合金型アクチュエータ

##### (b-1) 感温型形状記憶合金アクチュエータ

本年度は昨年度に導入した革新的な材料製造プロセス技術として、“電磁浮遊溶解ノズルレス急凝固法”装置について原料素材を浮遊溶解するための円錐形一次電磁コイルの直下に円筒形の溶湯滴下絞込み用2次コイルを設置し、改良を加え、ミクロ的な金属組織を制御して、もっと長く薄い形状記憶合金の作成条件を調べた。そして、TiNi、TiNiCu系合金で従来よりも大幅な高機能・高性能の感熱型SMAアクチュエータ材を開発の目処がついた。その理由も金属組織学的にSEM/EBSP結晶組織解析から考察した。また、現状の室温レベル(TiNi,TiNiCu,TiNiPd系など)でから400~1000℃を超える高温型(NiAlMnFe,RuTa系など)新SMAへの研究開発も進め、さらに、幅広い温度範囲での形状記憶特性把握のために、繰り返しマイクロ引張り試験機(ステージ)付きのレーザ顕微鏡システムを設計・開発する。また、実用上重要なSMAアクチュエータの繰り返し熱疲労特性・劣化度の評価法にも検討を加えた。

##### (b-2) 磁性形状記憶合金材料の開発

本年度は実用化に向けて当面の問題となっている材料の脆性を研究の中心課題として合金の特性制御技術の開発を行った。

具体的な成果は以下の通りである。

①Ni-Mn-Ga系合金にCoとFeの2種類の遷移金属元素を添加し合金組成の制御技術を確立し、材料特性を向上した。

②スパッタリング法による薄膜の組成制御技術、熱処理条件を検討し、熱弾性型形状記憶効果を発現する薄膜作製条件を得た。

③Ni-Mn-Ga 系合金の結晶変態温度と磁気転移温度の磁場依存性を定量化する事によって、磁場誘起構造相転移制御の指針を得た。

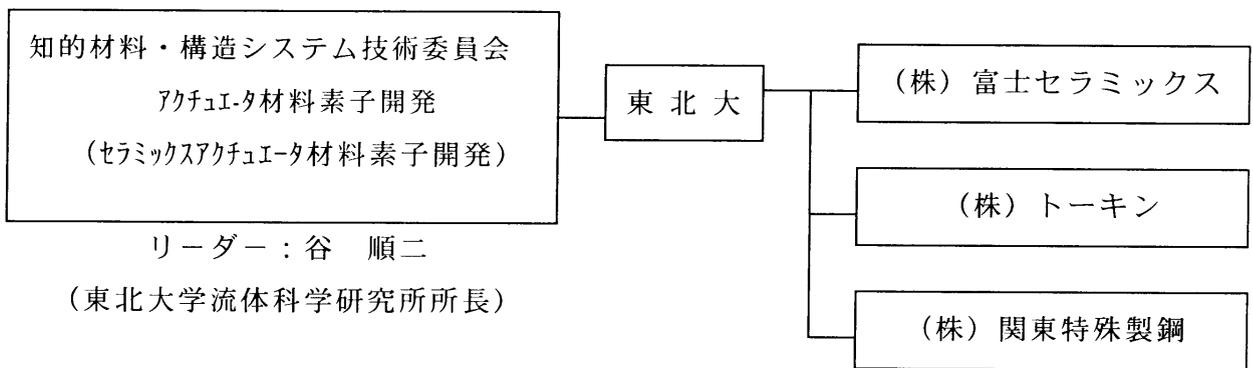
④バルク材料の「脆性」を克服する1つの方向性として放電プラズマ焼結法を用いた加工プロセスによって材料強度を改善し、熱弾性型形状記憶効果の発現を確認した。

以上によって、バルク材の磁氣的、機械的特性が元素の添加及び加工プロセスによって向上する事を実証した。加えて、脆性を改善した合金薄膜を作製する技術を開発し、薄膜における形状記憶効果制御の指針を得た。

(4) 研究実施体制、研究者リスト

(a) 研究実施体制

(a-1) 研究開発体制



(a-2) 研究管理体制

① 研究開発責任者

谷 順二 東北大学流体科学研究所 教授

② 究体運営規定

別紙1-1～3に定める。

③ 経理担当者

宍戸 広司 東北大学流体科学研究所 経理掛長

(b) 研究者リスト

会社名	氏名	所属・役職	備考
東北大学	谷 順二	流体科学研究所・教授	
東北大学	渡邊 龍三	工学研究科・教授	
東北大学	中村 僖良	工学研究科・教授	
東北大学	裘 進浩	流体科学研究所・講師	
東北大学	高木 敏行	流体科学研究所・教授	
東北大学	松本 實	素材工学研究所・講師	
東北大学	古屋 泰文	工学研究科・助教授	
(株)富士セラミックス	高橋 弘文	開発部 係長	
(株)富士セラミックス	加藤 和昭	開発部 部長	
関東特殊製鋼株式会社	相場 満	研究開発部・主任研究員	
関東特殊製鋼株式会社	喜瀬 純男	研究開発部・研究員	

(株)トーキン	山内 清	電子材料事業本部	部長	
(株)トーキン	武田 進	電子材料事業本部	部長	

### 1.1.2.2 セラミックスアクチュエータの開発

#### (1) 傾斜機能圧電アクチュエータに関する研究

##### (a) 緒言

電界印加時の圧電ひずみを利用したアクチュエータには、電界に垂直な方向のひずみを利用した単純型アクチュエータ、電界と垂直方向のひずみを利用した屈曲型アクチュエータがある。本研究で扱う屈曲型アクチュエータにおいては、現在までバイモルフ型、ユニモルフ型アクチュエータが応用されてきた。しかし、シムとしての金属と圧電材料を接着剤で貼り合わせた構造であるため、接着面での応力の不連続による割れなどが生じる問題があり、信頼性の要求される機器に応用するには問題がある。

そこで、本研究では上に述べたような屈曲型圧電アクチュエータの欠点である応力の不連続による耐久性の問題を傾斜機能化によって解決し、高性能な屈曲型圧電アクチュエータを作製することを目的としている。

今後の応用への展開を念頭に置き、今年度はまず、円盤型FGMアクチュエータにおける片側支持の拘束条件での変位測定を行い、屈曲変位を発生することを確認した。また、各材料の材料定数を測定した後に、汎用数値解析ソフトANSYSを用い、最適構造の選定を行った。

##### (b) 円盤型FGMアクチュエータの作製

本研究で作製、数値計算を行ったアクチュエータの材料には図2.1に示したPNN-PZT系の圧電材料を用いた。現在までの研究で、圧電定数が大きく誘電定数の小さい材料と圧電定数が小さく誘電定数の大きい材料で焼結特性のよく似た材料を選ぶことにより、屈曲変位を得ることが可能であることがわかっている。材料Aは圧電特性が高く、誘電率が低い、材料Bは圧電性がほぼ無く、誘電率が高い。今回、作製と変位測定を行ったアクチュエータの構造は図2.2に示したように材料AからBに5層に傾斜させたものと材料AとBを2層に積層した2種類で、どちらも形状は円盤型である。

##### (c) 実験方法

A～Eの目的の材料を得るために出発原料として構成原子の酸化物PbO, ZrO<sub>2</sub>, TiO<sub>2</sub>, NiO, Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub>(高純度化学、純度99.9%)を所定の組成になるように秤量し、ボールミルによって湿式混合した。その後、蓋付きの坩堝に混合粉末をいれ、電気炉を用いて950℃、4h、昇温、冷却速度100℃/hで仮焼成を行った。その後、湿式ボールミルを6時間行い、微粉化した。この粉末を十分乾燥させた後、バインダとして10wt%ポリビニルアルコール溶液を仮焼粉の

8.5wt%分だけ十分混合し、50メッシュ(300 $\mu$ m)の篩に通し、材料A~Eを得た。A~Eの材料をステンレス製の型の中に積層し厚さ方向に1t/cm<sup>2</sup>で一軸加圧して円盤状に成型した。

これらの試験片をアルミナのさやに入れ、電気炉で焼成を行った(図2.3)。まず昇温速度20 $^{\circ}$ C/hで室温から800 $^{\circ}$ Cまで昇温し、5時間で脱バインダを行った後、室温まで自然冷却し、さやに蓋をした。600 $^{\circ}$ Cまで100 $^{\circ}$ C/hで昇温した後、1200 $^{\circ}$ Cまでは50 $^{\circ}$ C/hで昇温して、本焼成は2時間で行った。600 $^{\circ}$ Cまで20 $^{\circ}$ C/hで冷却し、その後、室温まで自然冷却した。出来上がった試験片の密度はアルキメデス法で測定した。試験片の両面を研磨した後、スパッタにより両面に金電極をつけた。

変位測定は円盤型のアクチュエータの片側を固定し、先端を測定点として、レーザーセンサ(キーエンス社製、分解能0.01 $\mu$ m)を用いて行った。振幅 $\pm$ 500V、周波数0.2Hzの三角波を印加し、アクチュエータを駆動させた。

#### (d) 測定結果と考察

焼成後の試験片の直径、厚み、密度の測定結果を表2.1に示す。密度は8g/cm<sup>3</sup>程度であった。2層型と、5層型の変位測定結果をそれぞれ図2.4(a)と(b)に示す。それぞれ得られた最大変位は9 $\mu$ m、12 $\mu$ mである。d<sub>33</sub>効果のみによる変位しか得られていないとすると、この試験片の厚さが約1.9mmであることから、得られる厚み方向の変位は最大でも厚さの0.1%程度の1.9 $\mu$ m程のはずである。しかし、今回の結果より、作製したアクチュエータが高誘電材料と圧電材料の組み合わせからの屈曲変位を発生していることが確認できた。

#### (e) 数値解析

上に述べたように傾斜機能化したアクチュエータは屈曲による変位を発生していることが明らかになった。このことを数値解析によって確認することが必要である。また、作製したアクチュエータは円盤型で大きさもそれほど大きくないため、実用性には乏しい。したがって今後、より大型で実用性のある矩形のアクチュエータを作製する必要がある。そこで、ある特定のサイズが与えられた場合により大きな変位、発生力を得るための最適な構造を検討することが数値解析の目的である。

まず、数値解析を行うためにA~Eの各材料の諸定数を測定した。各材料の密度はアルキメデス法を用いて測定し、比誘電率、電気機械結合定数、弾性コンプライアンス、ポアッソン比、圧電定数の測定はEMASが定める共振反共振法により、インピーダンスアナライザ(HP4194A)を用いて行った。圧電性がほとんど無い材料の弾性コンプライアンス、ポアッソン比の測定はインピーダンスアナライザによる測定が困難であるため、(株)東芝タンガロイ製の弾性率内耗測定装置UMS-Lを用いた。

数値解析にはすべて以下の圧電基本式を用いた。

$$S = s^E T + dE \quad (1)$$

$$D = \varepsilon^T E + dT \quad (2)$$

$\varepsilon^T$  : 応力一定の誘電率       $S, T$  : ひずみおよび応力       $D, E$  : 電気変位および電界  
 $s^E$  : 電界一定の弾性コンプライアンス       $d$  : 圧電定数

#### (e-1)変位、発生力発生最適構造

図 2.5 に示したような材料 A と B を組み合わせた FGM アクチュエータのモデルについて解析した。片側固定の境界条件を与え、式(1)、(2)、(3)、(4)を連立させて解くと、発生変位と発生力の式は(5)、(6)のようになる。発生力は先端の変位を完全拘束状態としたときのものである。実際に作製を検討しているアクチュエータのサイズ  $57.5 \times 25 \times 1\text{mm}$  を代入し、アクチュエータの厚みに占める材料 A の厚みの割合を  $\alpha$  として、 $\alpha$  に対する変位  $u$  と発生力  $F$  の関係を図 2.6 に示した。 $\alpha$  が 0.5 付近において変位および発生力は最大値になることが明らかになった。つまり大変位、高発生力の FGM アクチュエータを作製するには、圧電材料と高誘電材料の厚みの比は同じ程度である必要があるといえる。

$$T(x) = w \int T dy \quad (3)$$

$$M(x) = w \int T y dy \quad (4)$$

$T(x), M(x)$  :  $x$  にある断面に関する全応力およびモーメント

$$u = \frac{3 d_A l^2 S_A S_B V (1-\alpha) \alpha \varepsilon_B}{t^2 (S_A^2 (1-\alpha)^4 + S_B^2 \alpha^4 - 2 S_A S_B \alpha (\alpha^3 - 2\alpha^2 + 3\alpha - 2)) (\varepsilon_A - \alpha \varepsilon_A + \alpha \varepsilon_B)} \quad (5)$$

$$F = \frac{-3 d_A t w V (1-\alpha) \alpha \varepsilon_B}{4 l (S_A (1-\alpha) + S_B \alpha) (\varepsilon_A - \alpha \varepsilon_A + \alpha \varepsilon_B)} \quad (6)$$

#### (e-2) ANSYSによる解析

ANSYSによる有限要素解析を行った結果について述べる。モデルのアクチュエータのサイズは実際に作製を検討している  $57.5 \times 25 \times 1\text{mm}$  である。前述した解析のモデルと同様に片側固定の境界条件を与えた。材料 A と B を用いた 2 層型アクチュエータと材料 A、B、C、D を用いた 4 層型アクチュエータの 4 種類の構造について解析を行った。構造については表 2.2 と図 2.7 に示した。

4 種類の構造について 500V 印加時の先端の発生変位、 $x, y$  軸方向の応力の分布状態および発生力について比較した。破壊に最も影響すると考えられる応力の分布状態は図 2.8 に示した。 $x$  軸、 $y$  軸どちらの方向もほとんど同じ傾向を示す。界面における応力の不連続は Type 1 が最も大きく、Type 2 が最も小さい。これより今回の解析結果からは Type 2 が最も応力を緩和する構造であるといえる。図 2.9 より発生変位、発生力共に Type 2 が最も大きい。アクチュ

エータの発生変位を0にするのに必要な先端への荷重を発生力とした。

(f) 今後の方針

解析によって電圧印加時の応力の不連続が小さく、発生力の高い構造が明らかになった。したがって、最適構造のFGMアクチュエータを作製するには各層を最適な厚みに制御する必要があり、作製プロセスとしては粉末をプレスする方法よりも、押し出し法かドクターブレード法の方が適しているといえる。今後はそのいずれかの方法を用いて最適構造のFGMアクチュエータを作製し、変位および発生力の測定を行い、計算値と実測値の比較をする。また、耐久性についても繰り返し試験等のテストを行う。

さらにアクチュエータの周波数応答の測定も行い、計算値との比較をする予定である。

また、PNN - PZT系の40組成の材料の特性を調査したところ、N0.25という組成の特性がFGMに適している(誘電率が今回のAよりも低く比較的発生変位も大きい)ことが明らかになったので、この組成を組み込んだFGMアクチュエータについても作製を行ってみる予定である。

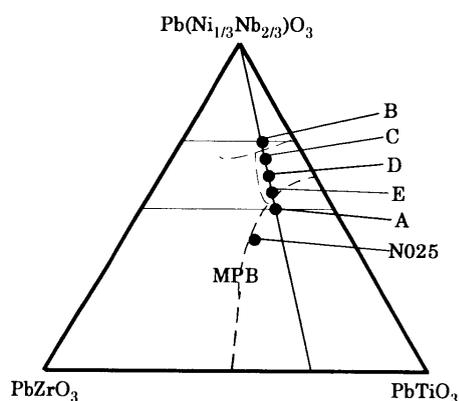


図 2.1 PNN-PZT系状態図

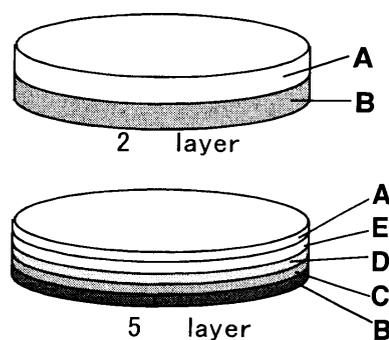
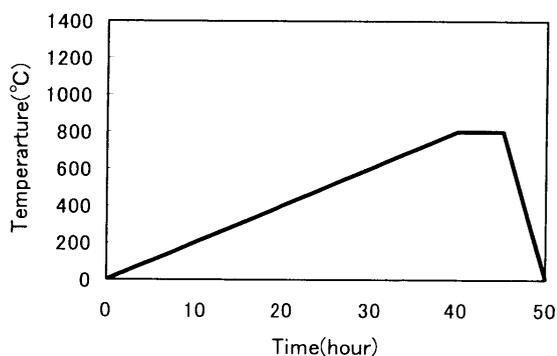
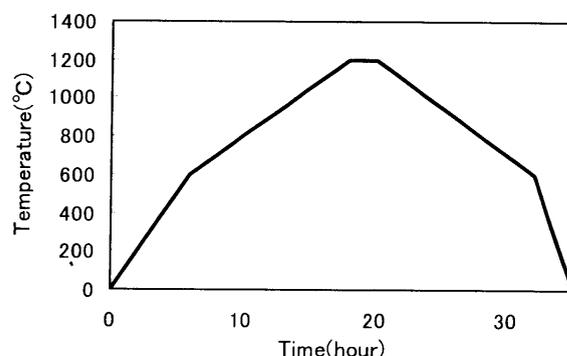


図 2.2 FGMアクチュエータ



(a)脱バインダー



(b)焼結

図 2.3 焼結スケジュール

表 2.1 アクチュエータの寸法

Actuator	Density(g/cm <sup>3</sup> )	Diameter(mm)	Thickness(mm)
2 layer	7.96	17.8	0.95
5 layer	7.97	17.6	0.95

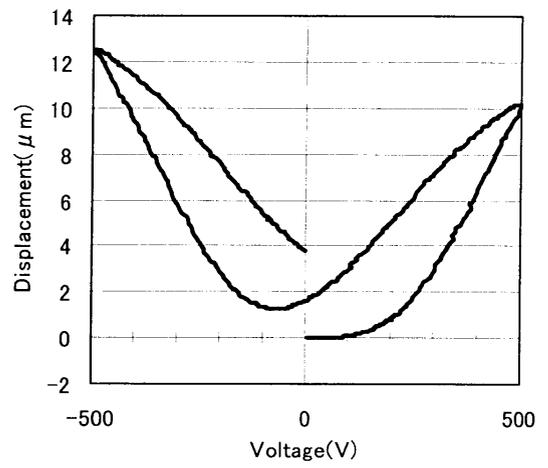
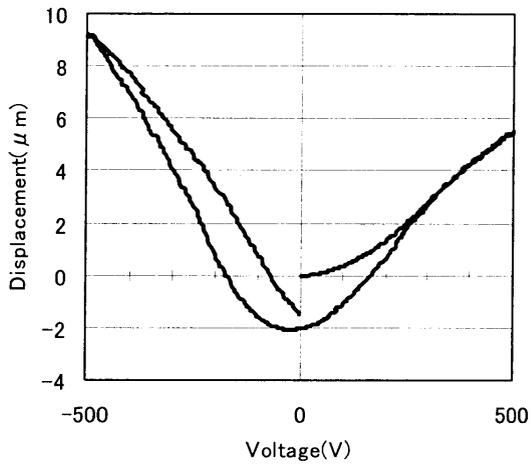


図 2.4 変位

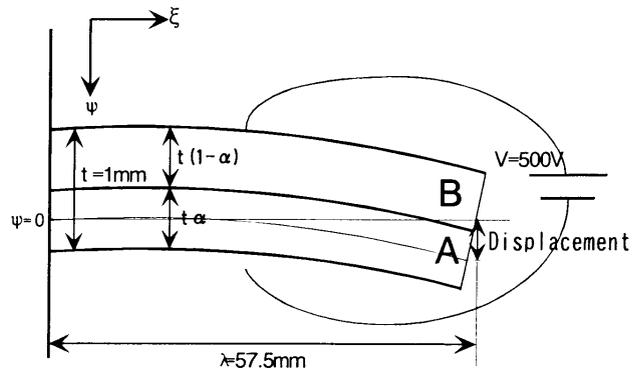
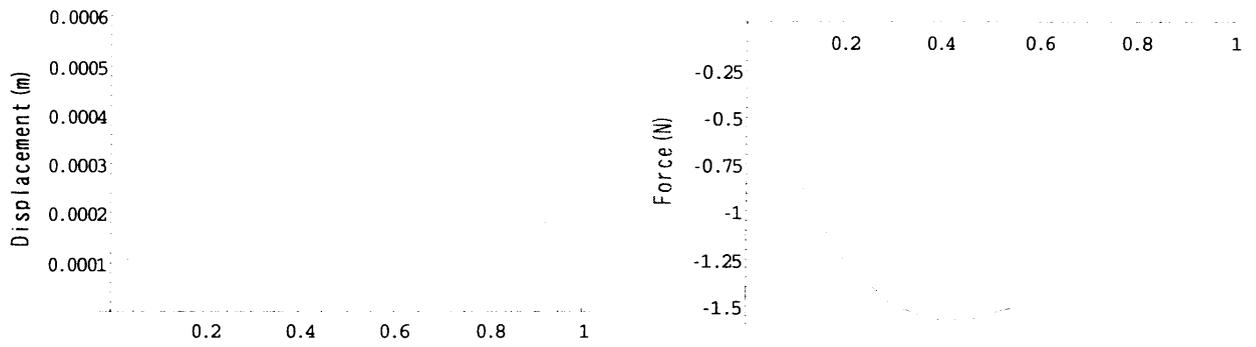


図 2.5 解析モデル



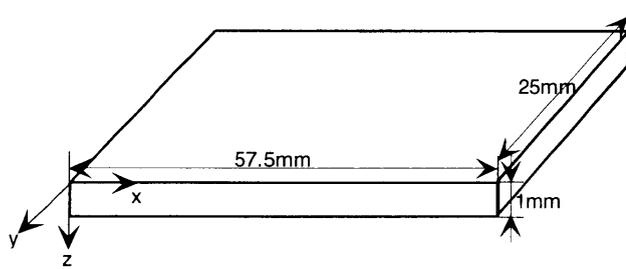
(a) 変位

(b) 発生量

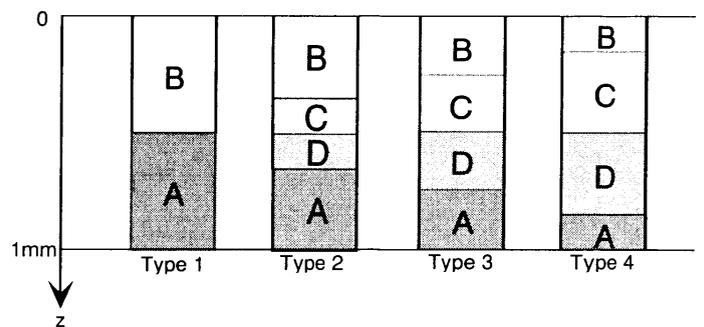
図 2.6 解析結果

表 2.2 アクチュエータの構造

Structure	Thickness of A(mm)	Thickness of D(mm)	Thickness of C(mm)	Thickness of B(mm)
Type 1	0.5			0.5
Type 2	0.35	0.15	0.15	0.35
Type 3	0.25	0.25	0.25	0.25
Type 4	0.15	0.35	0.35	0.15

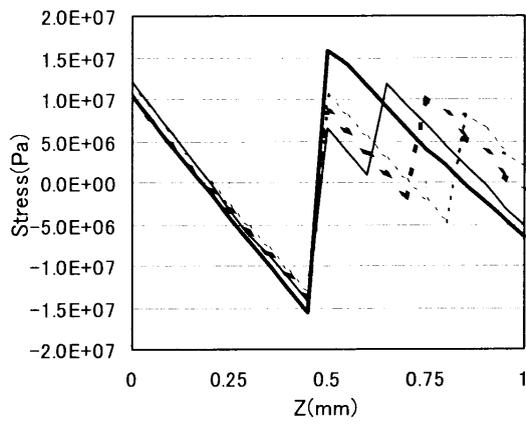


(a) FEM分析モデル

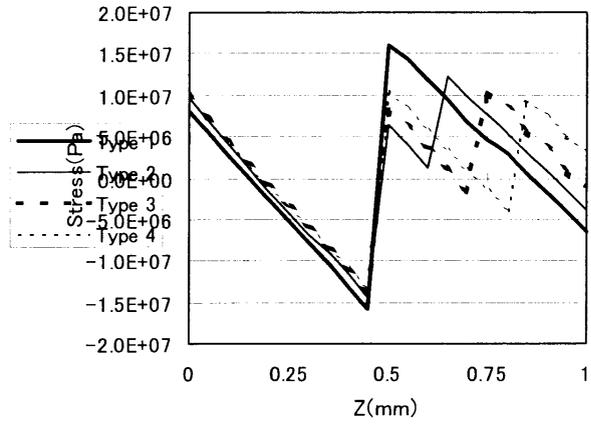


(b) z方向の構造

図 2.7 FEM分析モデルの構造



(a) x方向の応力



(b) y方向の応力

図 2.8 応力分布

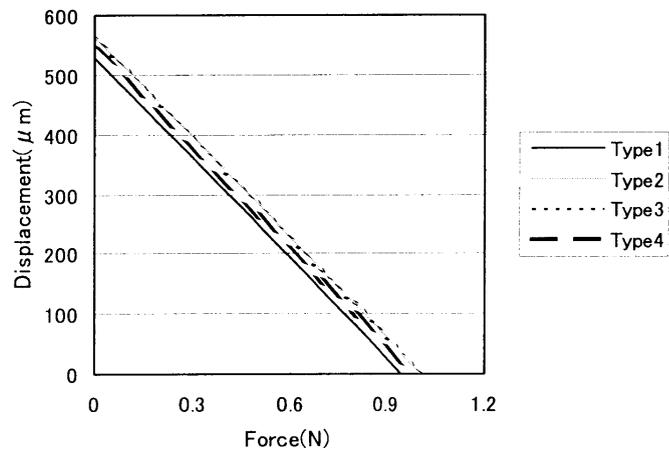


図 2.9 変位と発生力

## (2) PNN-PZT系セラミックスの高性能化の研究

### (a) はじめに

我々は名古屋工業技術研究所の考案した新合成プロセス法(鉛過剰添加法)を用いた<sup>1)</sup>。

$\text{Pb}(\text{Ni}_{1/3}\text{Nb}_{1/3})\text{O}_3\text{-PbZrO}_3\text{-PbTiO}_3$ (以後PNN-PZTとする)組成で、一般的な製法と比較し、パイロクロア相のない単一相を得ることを確認している。本年度は鉛過剰添加法を用いて、PNN-PZT組成の40組成について特性確認を行った。更にP-Eヒステリシス、キュリー温度、歪特性等の圧電、電歪特性の確認を行い、各特性の状態図を作製した<sup>2)</sup>。

その結果、3kV/mmの電圧下で最大0.28%の電界誘起歪を発生する組成を確認することができた。また、製造方法の開発として、28GHzのマイクロ波焼結により焼結ムラの無い、大型で良質な焼結体を得ることを確認した。

本報告では(株)富士セラミックス製のPZT系材料(C-82材)を用いて、28GHzのマイクロ波焼結技術の確立と従来焼結に無い微細構造組織への影響、更に圧電特性の向上を確認できたので報告する。

### (b) 実験方法

#### (b-1) 鉛過剰添加法を用いたPNN-PZT系セラミックス材料の諸特性

出発原料として $\text{PbO}$ 、 $\text{ZrO}_2$ 、 $\text{TiO}_2$ 、 $\text{NiO}$ 、 $\text{Nb}_2\text{O}_5$ を所定の組成になるように秤量し、 $\text{PbO}$ を1.5~2モル量過剰に添加した。湿式混合、仮焼き終了後に過剰鉛を酢酸溶出させ、ろ過して得たPNN-PZT系粉末を200MPaの圧力で直径15~25mm、厚さ1.5mmに成型し、 $\text{PbO}$ 雰囲気中で1230℃・2時間の焼結を行った。焼結した試料を直径12~20mm、厚さ1mmに加工し、表面に銀ペーストを塗布して700℃で焼き付け、室温のシリコンオイル中で2kV/mmの電圧を15分間印加し、分極したものを評価用試料とした。

作製した試料を用いて強誘電体物性評価システムラジアントRT-6000HVSでP-Eヒステリシスの測定を行い、圧電、電歪特性は共振反共振法を用いてインピーダンスアナライザーHP-4194Aで測定した。変位特性は直径17mm、厚さ1mmの試料にスパッタ法により、金電極をつけ、光ファイバー変位計(フォトニクス製:分解能0.005 $\mu\text{m}$ )により縦方向の変位を最大印加電圧3kV/mm、測定速度0.5ms、室温で測定した。

#### (b-2) マイクロ波焼結したPZT系セラミックスの諸特性

マイクロ波焼結装置は28GHzの富士電波工業製ジャイラトロン3を利用した。試料は富士セラミックス製PZT系材料(C-82材)を用いてマイクロ波による圧電諸特性の確認を行った。その後、更にアクチュエータ特性を調査した。圧電特性等の調査のために、各粉末にバインダーを入れ直径17~25mm、厚さ1.8mm、更にアクチュエータ特性調査のために長さ80mm、幅35mm、厚さ2mmに成型した。マイクロ波焼結を行う前に電気炉で700℃・5時間の脱脂を行った。焼結は従来焼結と比較するために、共に大気中で行った。マイクロ波焼結、従来焼結の焼結プロファイルを図(1.1.2.2).10に示した。マイクロ波焼結は昇温速度1800℃/時間、最高

温度で15分間保持し、その後自然冷却させた。従来焼結は100℃/時間、最高温度で2時間保持し昇温速度と同じ割合で冷却させた。焼結した試料をXRD、SEM観察等により微細構造解析を行い、直径15～20mm、厚さ1mm、長さ45mm、幅25mm、厚さ0.5mmに加工し、表面に銀ペーストを塗布して700℃で焼き付け170℃のシリコンオイル中で1.8kV/mmの電圧を30分間印加して分極を行った。24時間経過した試料を共振反共振法によりインピーダンスアナライザ HP-4194Aを用いて測定し、圧電特性を確認した。

更にアクチュエータ特性を調査するために、長さ150mm、幅25mm、厚さ2mmのアルミニウムビームに貼り固有振動55Hzで振動させ、図2.11のような測定ブロックにより振動測定を行い従来焼結した試料と比較検討した。

### (c) 実験結果及び考察

#### (c-1) 鉛過剰添加法を用いたPNN-PZT系セラミックス材料の諸特性

鉛過剰添加法を用いたPNN-PZT系セラミックス材料のP-Eヒステリシスを図2.12に示した。各組成で特徴ある強誘電性を示し、 $\text{Pb}(\text{Ni}_{1/3}\text{Nb}_{1/3})\text{O}_3$ を増加することにより電歪材料に近づくことを確認した。各組成における変位特性の電圧依存性を図2.13に示し、図2.14に代表組成の変位特性の電圧依存性を示した。図に示したように電歪型、電歪と圧電の中間型、圧電型の3タイプの変位特性を確認することができた。

$\text{Pb}((\text{Ni}_{1/3}\text{Nb}_{1/3})_{0.4}\text{Zr}_{0.25}\text{Ti}_{0.35})\text{O}_3$ 組成は電歪圧電中間型であり、変位量は印加電圧3kV/mmで最大0.28%の歪を確認することができた。更に各組成のキュリー温度の変化を図2.15に示した。 $\text{Pb}(\text{Ni}_{1/3}\text{Nb}_{1/3})\text{O}_3$ 、及び $\text{PbTiO}_3$ の増加でキュリー温度は低下することが確認できた。

#### (c-2) マイクロ波焼結したPZT系セラミックスの諸特性

マイクロ波焼結した富士セラミックス製PZT系材料(C-82材)の圧電諸特性、微細構造組織、アクチュエータ特性を調査した。表1に各条件でマイクロ波焼結したC-82材の圧電諸特性を示した。図2.16にはマイクロ波焼結と従来焼結の代表的なSEM写真を示した。図2.17、図2.18、図2.19に焼結温度変化による密度、粒径、結合係数 $K_p$ 、比誘電率 $\epsilon_r$ 、抗折強度の依存性を従来焼結と比較して示した。1200℃以上では測定した全ての特性で従来焼結した試料よりも著しく高い特性を得ることができた。特に1250℃の焼結では密度は理論密度の98%に達し、抗折強度も従来焼結に比べ高い値を示した。マイクロ波焼結した試料の焼結温度による粒子径の依存性が、従来焼結に比べ小さい。しかしながら、粒子径と密度との相互関係は現在のところ明らかになっていない。また、1280℃で比誘電率は最大値を示し、電気機械結合係数 $K_p$ は70%に達した。マイクロ波焼結は1200℃以下で焼結した試料の特性は従来焼結を下回り十分な焼結体を得ることができなかつた。焼結条件の違いで微細構造組織と電気機械結合係数の値は大きく変化することからも今後更に最適条件を決定する必要があると考えられる。

最も特性の良かった最高温度1250℃の焼結条件を利用して、長さ80mm、幅35mm、厚さ

2mmの大型試料の焼結を行いアクチュエータ素子を作製し、振動測定を行った。図2.20に示したように、マイクロ波焼結した試料は、従来焼結した試料に比べ大きな出力特性を得ることができた。

(d) まとめ

鉛過剰添加法を用いたPNN-PZT系材料の状態図を作製することで、各組成での特性を明らかにすることができた。特に $\text{Pb}((\text{Ni}_{1/3}\text{Nb}_{1/3})_{0.4}\text{Zr}_{0.25}\text{Ti}_{0.35})\text{O}_3$ 組成に於いては、3kV/mmの電圧で最大0.28%の歪を確認することができた。今後はこの状態図をもとに電歪型、電歪圧電中間型、圧電型の組成を利用し、デモンストレータに応用できるアクチュエータ素子の作製を目標にする。

また、鉛化合物であるPZT系材料(C-82材)にマイクロ波焼結プロセスを取り入れることで、従来焼結に比べ高い特性が得られることを確認できた。しかし、1200℃以下の焼結温度では十分な焼結は不可能であった。今後はその物性の原因を追求すると共に、更にマイクロ波焼結条件の検討を行い、より高性能なアクチュエータを開発することを目標にする。

参考文献

- 1) K.Kusmoto, T.Sekiya, Processing and Piezoelectric Properties of  $\text{Pb}(\text{Ni}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})\text{O}_3$ - $\text{PbTiO}_3$ - $\text{PbZrO}_3$  Solid Solutions from PbO-excess Compositions: the 9th US-Japan Seminar on Dielectric and Piezoelectric Ceramics, pp.127-130, 1999.
- 2) 高橋弘文, 加藤和昭, 裘進浩, 谷順二: “第1回 知的材料・構造システム” シンポジウム講演集, pp.43-46, 1999.12, 東京.

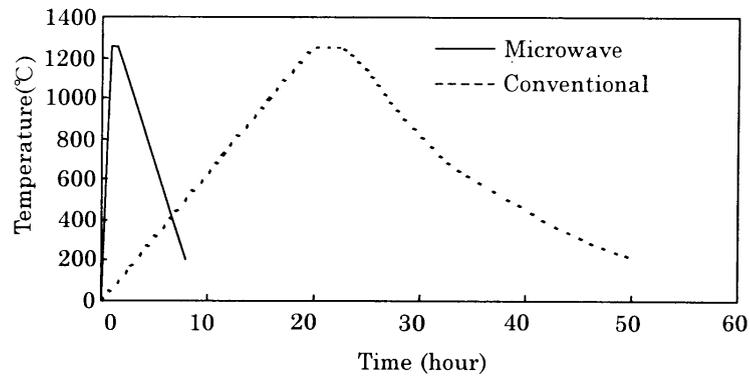


図 2.10 マイクロ波焼結と従来焼結の焼結プロファイル

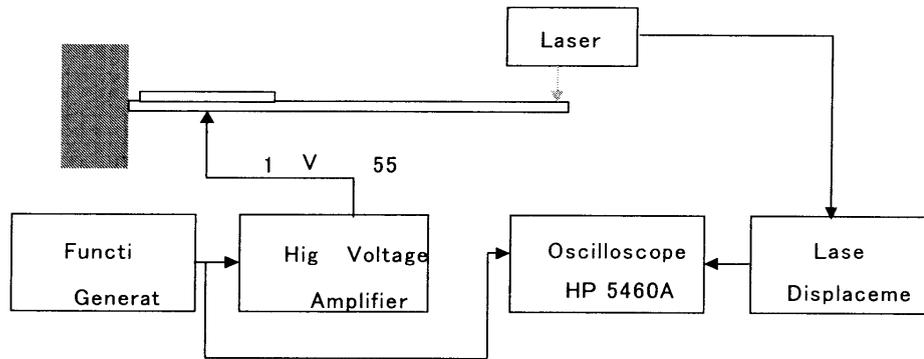


図 2.11 振動測定ブロック図

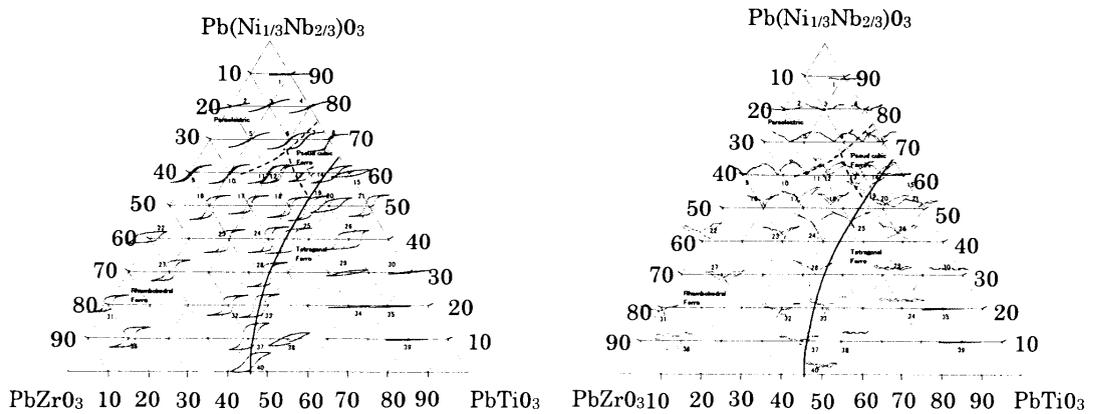


図 2.12 PNN-PZT系セラミックス室温時のP-Eヒステリシス曲線

図2.13 PNN-PZT系セラミックスの3kV/mm印加時の電界誘起歪

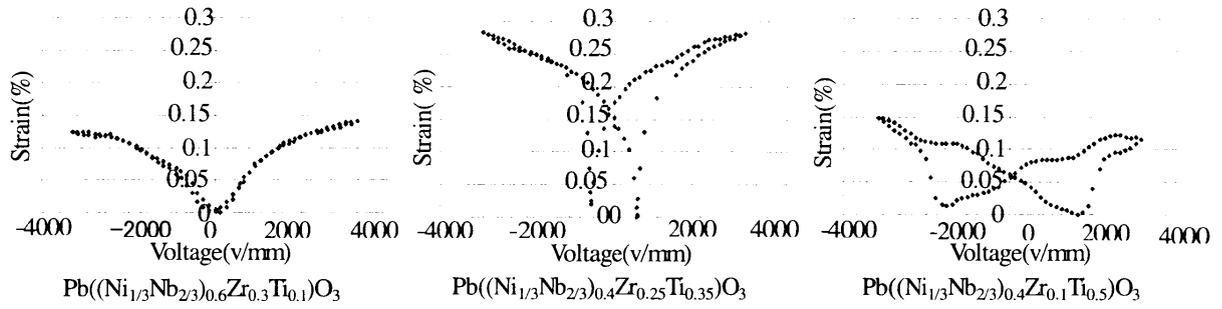
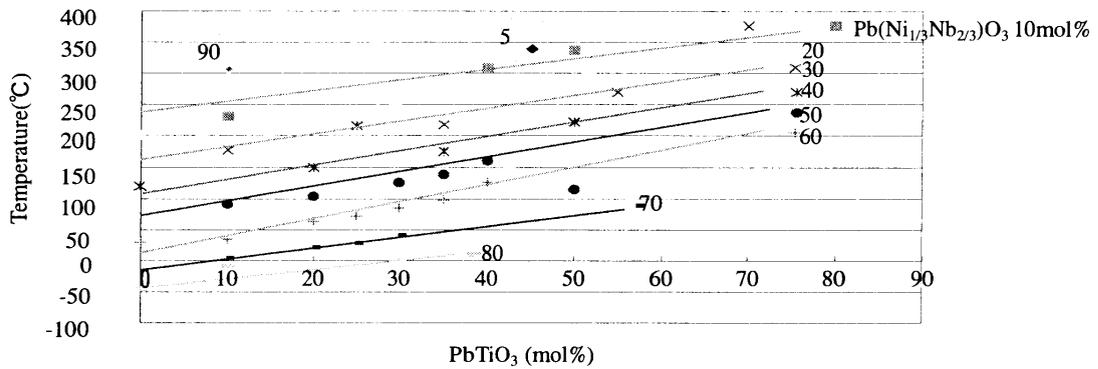


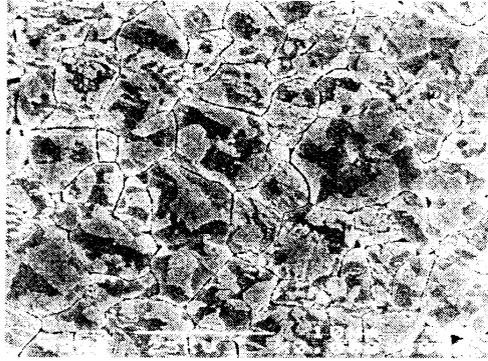
図 2.14 代表組成の電界誘起歪



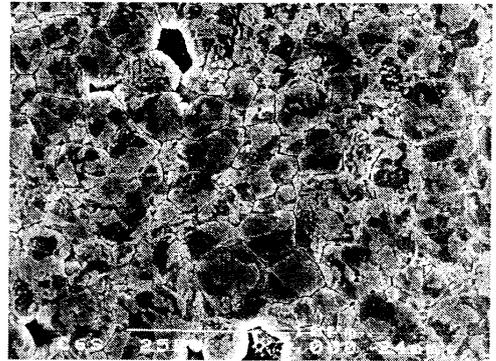
図(1.1.2.2).15 PNN-PZT系セラミックスのキュリー温度

表 2.3 PZT系材料(C82)の圧電諸特性

Sintering	Coupling	Dielectric constant	Density	Bending strength	Grain size
°C-min-°C/min	kp(%)	$\epsilon_r$	g/cm <sup>3</sup>	MPa	$\mu m$
1150-15-30 air	45.55	1900	7.00	8.8	0.5
1280-15-30 air	70.5	3300	7.58	11.5	1.5
1320-15-30 air	69.0	3200	7.55	10.8	1.6
1280-120-1.5 air	64.8	2750	7.48	10.6	1.5



a) マイクロ波焼結



b) 従来焼結

図 2.16 PZT系材料(C82)のSEM写真

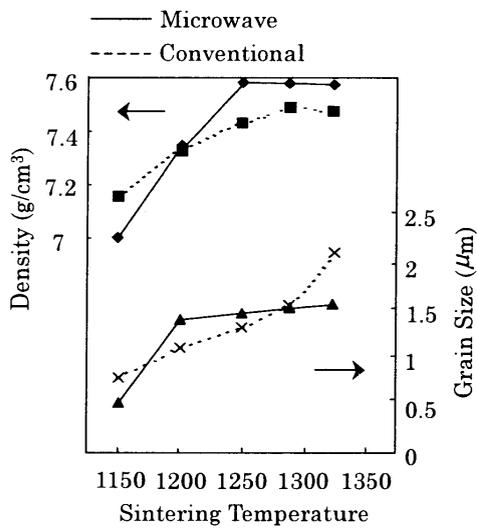


図 2.17 密度、粒径の焼結温度依存性

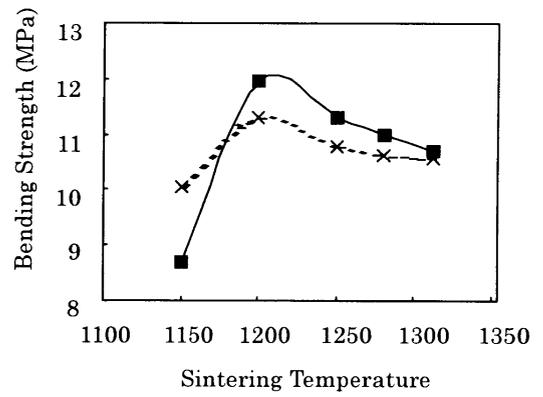


図 2.18 抗折強度の焼結温度依存性

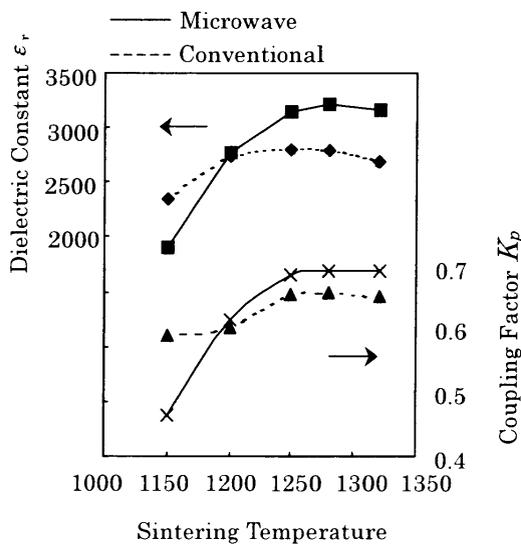


図 2.19 電気機械結合係数 $K_p$ 、比誘電率 $\epsilon_r$ の焼結温度依存性

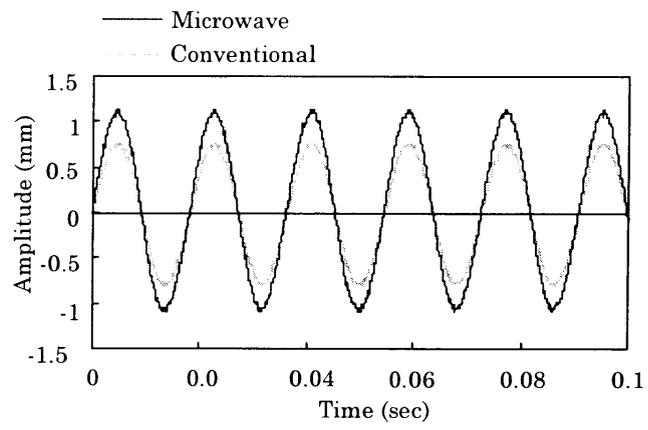


図 2.20 PZT系材料(C82)アクチュエータの振動測定

### 1.1.2.3 形状記憶合金系アクチュエータの開発

#### (1) 感温型形状記憶合金アクチュエータ

##### (a)はじめに

形状記憶合金（SMA）<sup>1)</sup>は温度や応力センサとアクチュエータの二つの機能を併せ持つが、本研究では、感温型形状記憶合金（Thermal SMA, 以下、TSMA）の機械的特性を大幅に向上させるとともに、高温での相変態温度を有する新たなSMAの開発も視野に入れている。開発目標項目は以下が挙げられる。

①感温型形状記憶合金（TSMA）の変態歪み量および耐久性（機械的疲労、冷熱繰り返し疲労）を2倍以上に向上させる。

②1000℃以上の相変態温度を有するTSMAを創製する。

③TSMAの製造コストを1/2以下に低減する細線化・薄膜化技術を確立する。

この目標に向けて、我々が現状から取れるべき対策としては、①材料微視組織制御による高性能新素材開発、②革新的な材料製造プロセス採用による機能性素材の迅速、省エネ、量産化、低コスト化実現、さらに、③素材の性能を出来るだけ低下させない合目的な材料複合バルク化加工技術の考案などが鍵となろう。

本分担テーマ（期間5年：平成10年度～14年度）では、以上のTSMAアクチュエータへの材料学的課題改善を実現するために、新しい材料製造・加工プロセス技術を導入する。そして、その金属結晶組織形態を最適制御し、プロジェクト後半での目標であるデモンストレータに適用出来る高機能・高性能の感熱型SMAアクチュエータ材を開発・提供することを最終目的としている。

本年度(平成11年度、2年目)研究では、そのために、昨年度(平成10年度)までに導入した革新的な材料製造プロセス技術として、“電磁浮遊溶解ノズルレス急冷凝固法”装置について改良を加え、ミクロ的な金属組織を制御して、従来よりも2倍以上の高機能・高性能の感熱型SMAアクチュエータ材を開発を目指した。そして、その理由も金属組織学的に考察を行った。さらに、現状の室温レベル（TiNi, TiNiCu, TiNiPd系など）でから600～1000℃を超える高温型(NiAlMnFe, RuTa系など)SMAの研究開発を試み、それらの幅広い温度範囲での形状記憶特性把握のために、繰り返しマイクロ引張り試験機（ステージ）付きのレーザー顕微鏡システムを設計・開発した。また、実用上重要なSMAアクチュエータの繰り返し熱疲労特性・劣化度の評価法にも検討を加えることを目標とした。

##### (b)実験方法と結果

###### (b-1)新溶解凝固プロセス技術（電磁浮遊溶解ノズルレス急冷凝固法）の開発

新材料製造プロセス技術となる『電磁浮遊溶解ノズルレス急冷凝固法』（図2.21の装置(一式)の改良を行った。昨年度2)までの電磁誘導加熱・溶解用の円錐型一次コイル直下に、溶湯滴下流絞り込み用円筒型2次電磁コイル（図2.22）を設置した。この両者(上下コイル)への通電量、原料素材供給量と溶湯滴下量との平衡状態維持による長い滴下流発生条件の把

握、回転急冷双ロール間隔と回転速度（急冷速度）などとの相互関係をいろいろ調整しながら、従来からの石英（セラミックス系）ノズル噴出し方式では不可能であった活性・高融点型のSMA（TiNiPd,NiAlMn系など）薄板（幅10mm、長さ30cm、板厚0.04~0.1mm）の作成のメドがつきつつある。引き続き均質で長い試料作製条件を探索して、デモンストレータに使用できるTSMA素材の製造条件を把握して行きたい。

#### (b-2) 急冷凝固法による材料組織制御・高性能化

代表的なチタン・ニッケル（TiNi）系の形状記憶合金（SMA）を対象にして、溶湯急冷凝固条件（急冷ロール回転速度）を変えながらSMAの金属組織制御を行い、SMAアクチュエータ素子とその特性の高性能化を目指した。非結晶質（アモルファス）形成条件よりも少し手前の急冷用ロール回転速度が遅い冷却条件（3600rpm、冷却速度=104~105℃/秒）で、板厚方向に結晶方位の揃った急冷凝固プロセス特有の数μm以内の粒径からなる微細柱状結晶組織が形成されることを再確認した。また、熱弾性型相変態時に双結晶（ドメイン）が拡大・移動する際に障害となる結晶界面の構造は変態特性に大きな影響を与えるので、走査型電子顕微鏡-電子線後方散乱パターン(SEM-EBSP)による結晶方位および粒界性格分布<sup>3)</sup>を調べた。従来の溶解後加工材料との特性比較を試みた結果、大きな結晶異方性（集合組織）と低エネルギー粒界の存在頻度の高い急冷特有な金属組織形成が確認された。昨年度<sup>4)</sup>はTi50-Ni50at%合金系で形状記憶効果の高性能化（大変形、シャープな感温性）とともに著しい耐食性向上の可能性も明らかにしたが、本年度はさらに機械的性質や狭い温度ヒステリシスが得られる3元系Ti50-Ni-Cu(0~30at%)の急冷材料の作製を試みた。従来の溶解加工プロセスでは、粒界脆化などによりCu=8at%以上の組成では圧延・線引き材料は不可能であったが、本プロジェクト提案の“電磁浮遊ノズルレス急冷凝固法”では、Cu=30at%まで薄板材料が作成できることが分かった。これは通常が多結晶材料に比べ、結晶粒の微細化とともに粒界構造そのものの性質が変わり、急冷効果と非接触溶解により純度が高く、かつ、原料素材内での不純物元素の偏析が大幅に抑制されて破壊・腐食に対する強い抵抗を示す原因になっていることが考察される。Ti50-Ni-Cu(0~30at%)の急冷材料での示差熱分析（DSC）結果を図2.23、図2.24に示す。Cu=10~15at%組成で変態温度幅（ $\Delta T=A_f-M_f$ ）は最小値を示し、この付近の組成合金でシャープな応答性を有する高速アクチュエータの実現可能なことが明らかになった。以上、活性で金属間化合物として硬く脆い性質であった従来のTiNi系形状合金の延性・強度などが、急冷凝固法で大幅な特性向上効果<sup>5)</sup>が期待されることが分かった。この結果は、知的材料・構造システムへの形状記憶合金アクチュエータの高速化、繰り返し・長期間使用にとって有益な研究成果と考える。

#### (b-3) 形状記憶効果の評価・耐久性試験の検討

デモンストレータなど実機にTSMAを適用する場合に重要なファクターとなる、形状記憶効果の耐久性やその際の特性変化を評価するために、新たに、室温~1000℃以上でのTSMA(変態温度マップ：図2.25参照)の特性評価を目標とした、独自に設計の繰り返しマイク

ロ引張り試験機（ステージ）付きのレーザ顕微鏡システム(図2.26)を開発試作した。6) この装置は、現状のSMA(TiNi,TiNiPd系など)での室温～200℃のレベルから、いまだ、形状回復力特性もほとんど明らかになっていない300～1000℃を超える高温型(NiAlMn,RuTa系など)SMAへの幅広い温度範囲でのTSMA特性把握を目指したものである。図2.27には、Ni59-Al11-Mn30at%開発合金でのDSCによる変態温度(M、A相)の確認データを示す。現在までに、TiNiPd系合金で200℃までの確認中の形状回復ひずみ～温度ヒステリシス曲線例(図2.28)、500℃高温下でのNiAlMn合金表面での相変態に伴う双結晶移動などの組織変化を直接的に確認できた。これにより、開発したレーザ顕微鏡システムで各種のTSMAの高性能化原因や高温下での形状記憶メカニズムが直接観察下で実時間データで議論できることが予想される。また、従来の100℃以下でのTiNi系合金ワイヤーへの繰り返し通電加熱疲労試験機(図2.29)を作製し、相変態量と通電加熱によるクリープ伸び量という二つの劣化因子に分離する定量的特性劣化(記憶ボケ)パラメータ(図2.30)による評価法を提案した。来年度は、急冷材と従来の溶解加工材との特性・劣化進展度合いの比較を進めて行く予定でいる。

謝辞：本研究遂行に当たりましては、渡邊忠雄教授（東北大・工）および岡村寛志博士（東北大・流体研）のご協力をいただきましたことを感謝致します。

参考文献：

- 1)特集“形状記憶合金とその応用”，日本金属学会会報，24,1(1985)
- 2)Y.Furuya,N.W.Hagood,H.M.Kimura,T.Watanabe and J.Tani:Proc. 9<sup>th</sup> Inter.Conf. Adaptive Structure and Technology,(edited by N.Hagood and M.Allata (Oct.14-16,Boston,Masachusetts (1998) ,pp.271-280.
- 3)T.Watanabe:Res Mechnica,11,47-53(1984)
- 4)Y.Furuya and J.Tani: Proc. of Inter. Symp. SMM-99(Kanazawa,Japan, June, 1999,) pp.145-151
- 5)Y.Furuya: Proc.of SPIE'99(Bangalore,India)pp.38-45
- 6)古屋泰文、山浦真一、谷順二：日本金属学会2000年春期大会講演概要集・講演番号#716(横浜)pp.167

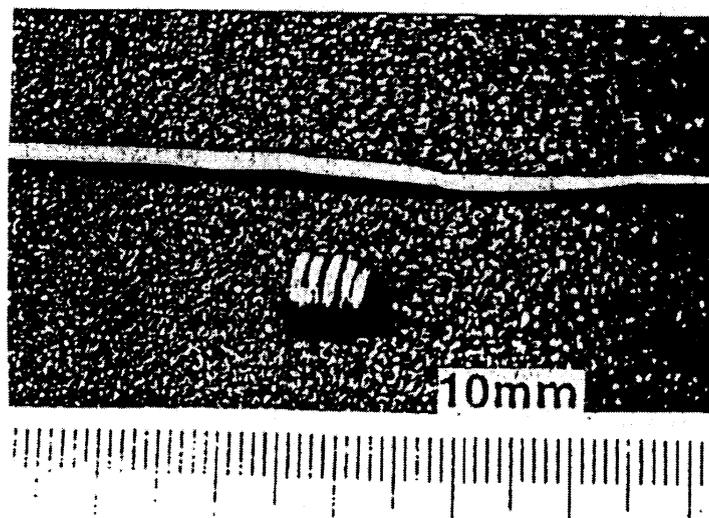
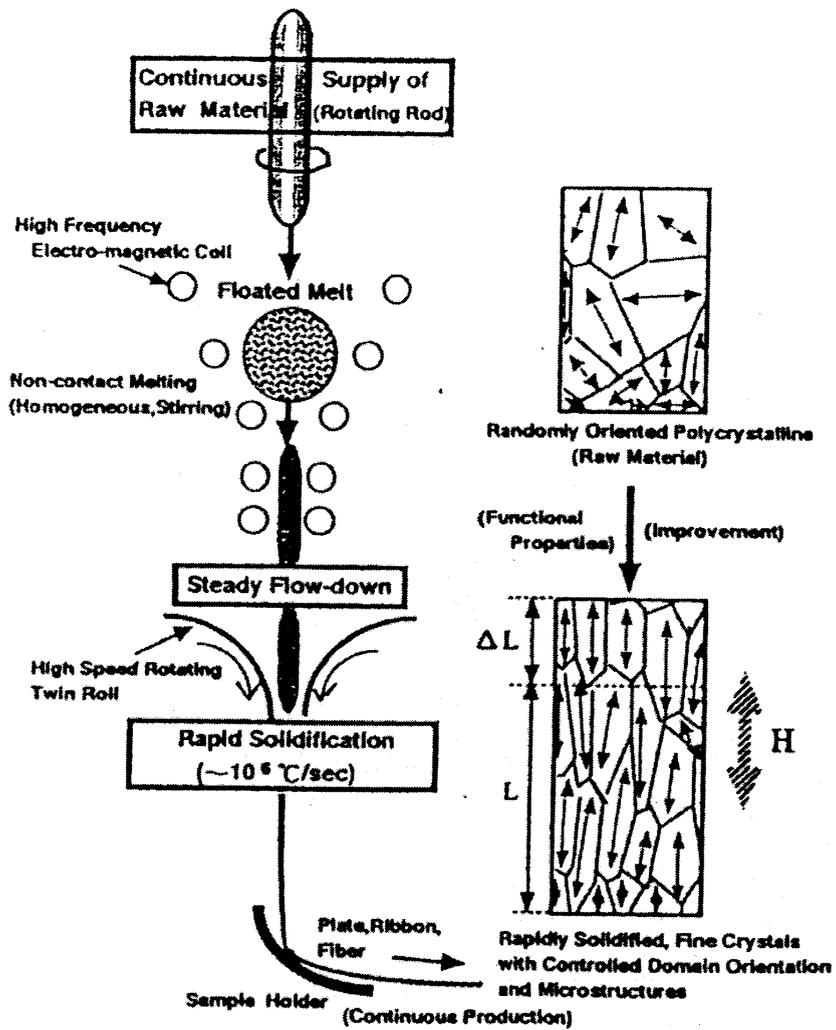


図2.21 新材料製造プロセス技術“電磁浮遊ノズルレス急冷凝固法”概念図と作製した急冷薄帯

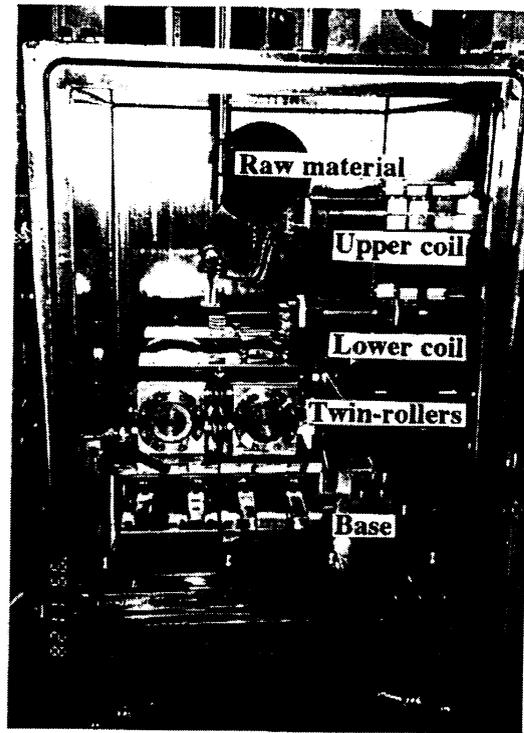


図2.22 溶湯滴下流絞込み制御用2次コイルを組み込んだ改良型装置（真空容器内部）

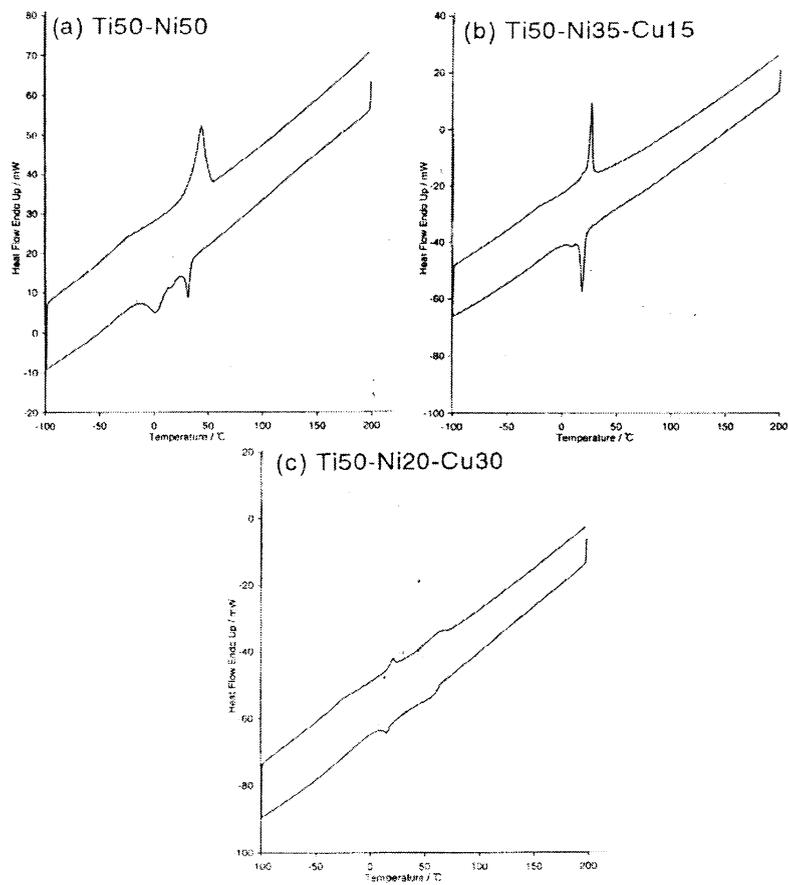


図2.23 Ti(50at%)-Ni-Cu(0-30at%)急冷凝固薄帯でのDSC変態温度測定結果

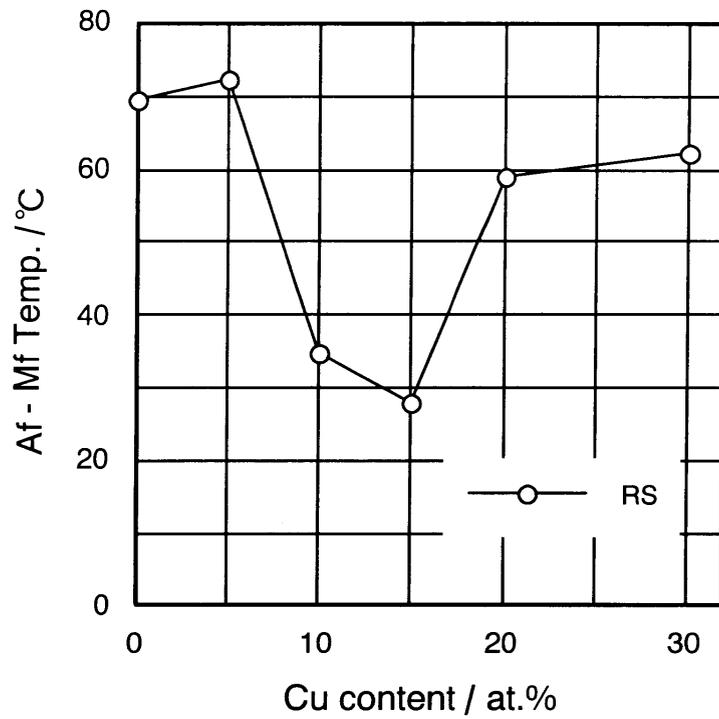


図2.24 TiNiCu系合金でのCu添加量と変態温度幅 ( $\Delta T = A_f - M_f$ ) の関係

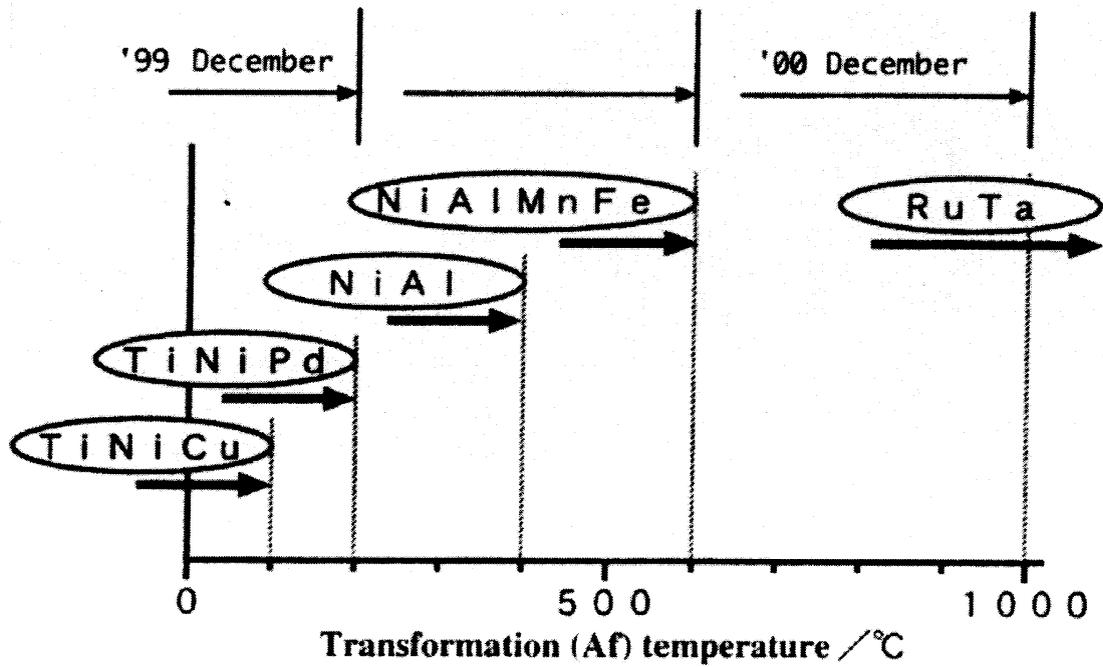


図2.25 各種感熱型形状記憶合金 (T SMA) での逆変態 (形状回復) 温度マップ

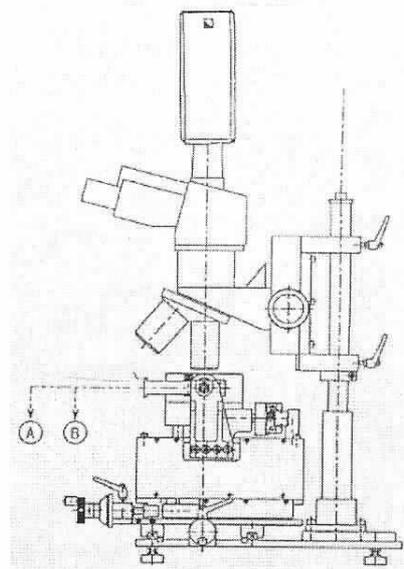
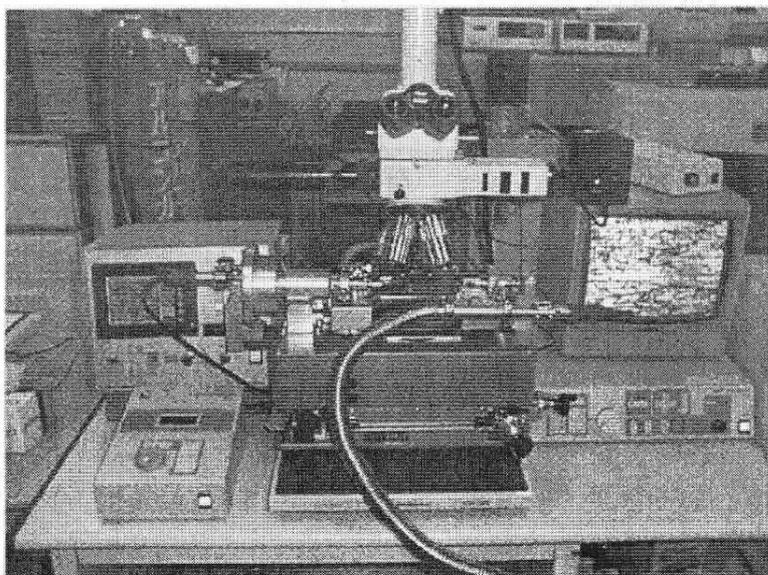


図2.26 開発した高温引張りステージ付きレーザー顕微鏡システム

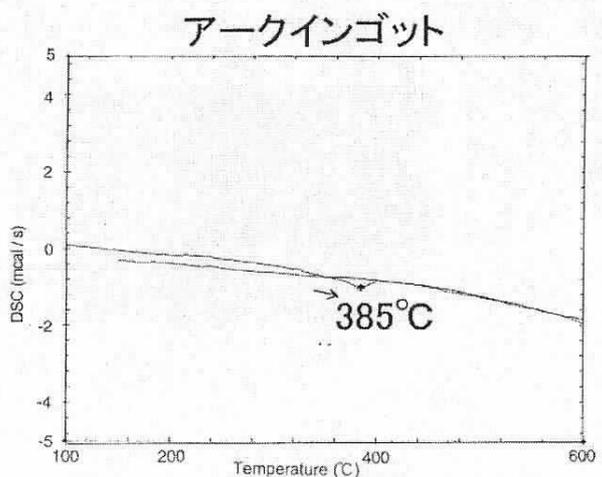
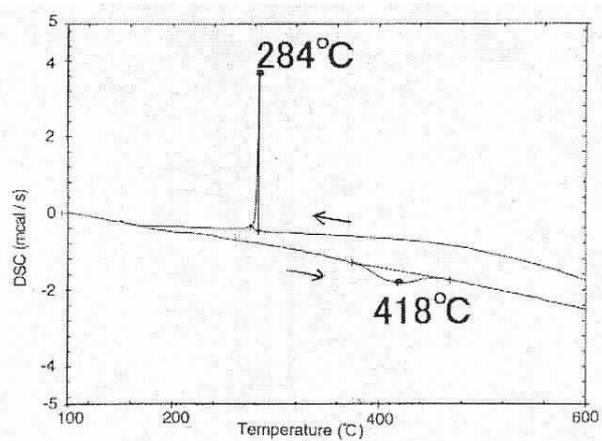


図2.27 開発したNi60-Al19-Mn16-Fe5at%系合金での高温形状記憶相変態現象のDSCによる確認

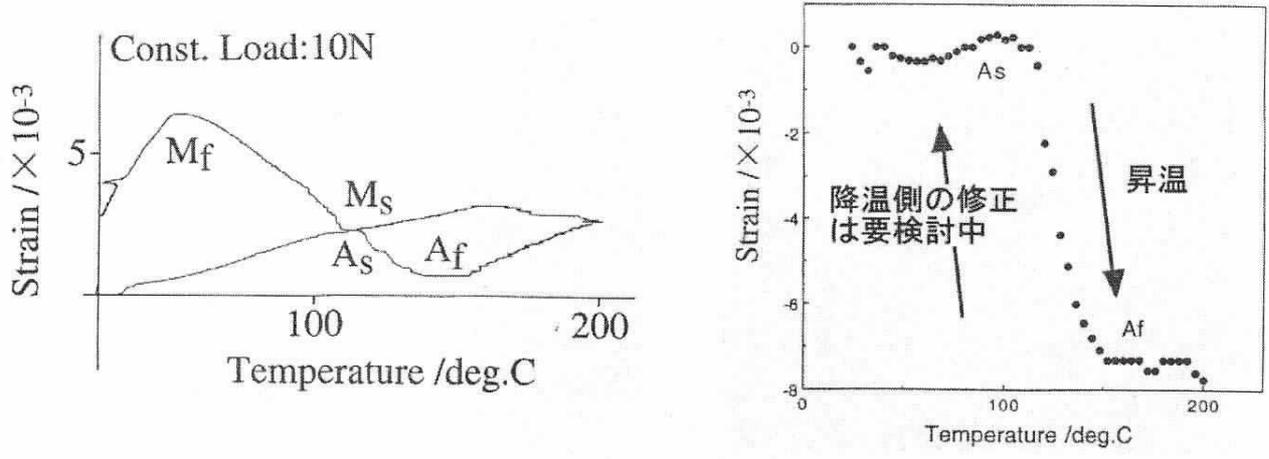


図2.28 レーザ顕微鏡による感熱型形状記憶TiNiPd系合金の相変態に伴う引張りステージ熱膨張込みの場合の歪変化測定と補正後の変態温度曲線例（初歩的段階、要再検討）

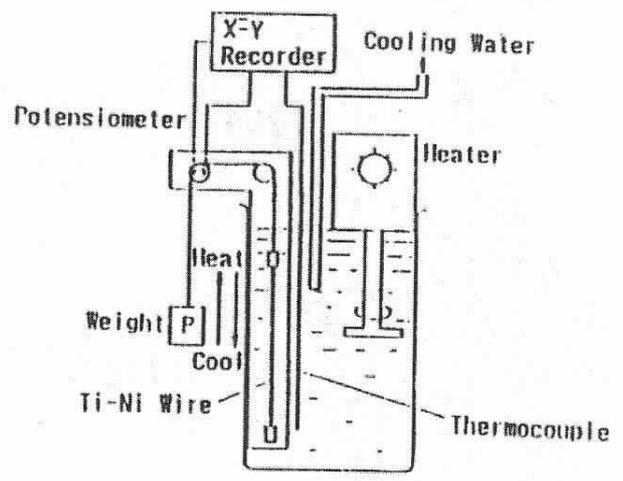


図2.29 試作した感温型形状記憶合金の繰り返し熱疲労特性評価試験機

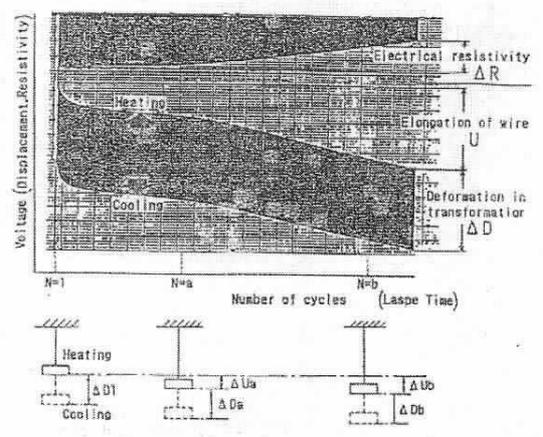


図2.30 TiNi線材（直径=0.4mm）の熱サイクルによる特性変化挙動（評価パラメータ：繰り返し変態量（ $\Delta D$ ）、クリープ伸び量（ $U$ ）、電気抵抗変化（ $\Delta R$ ））

## (2) 磁性形状記憶合金材料の開発

### (a) Ni-Mn-Ga 系磁性形状記憶合金の合金作成技術の確立

#### (a-1) 添加元素による組成制御技術開発

Ni-Mn-Ga系磁性形状記憶合金に Co および Fe の遷移金属元素を添加した合金をアーク溶解炉により溶解混合することによって均質に溶解する方法を確立し、規則度を向上する熱処理条件を確立した。

このことから均一な合金作成が可能になった。

#### (a-2) 材料特性制御技術開発

本年度後半は添加元素による材料評価の他に熱処理、加工技術について新しい方法を試み以下の成果を得ている。

Ni-Mn-Ga 系合金を微細粉末に加工し放電プラズマ焼結 (Spark Plasma Sintering, SPS) 技術を用いて成形することによって、従来のアーク溶解により得られた合金に対して約4倍のヤング率を示すことを見出した。

マルテンサイト変態温度より十分高い温度領域で、規則-不規則転移を生じる温度領域を示差走査熱量測定 (Differential Scanning Calorimetry, DSC) によって見出した。500度から900度の温度範囲のDSC 測定の結果を図2.31、繰り返し加熱冷却プロセスによる DSC 測定の結果を図2.32に示す。図2.32では2回目の加熱過程では650度付近の幅広のピークが消失していることがはっきりと見て取れる。これは不純物相が加熱によって減少し、規則度が向上することを定性的に示している。また、770度付近の規則-不規則転移は材料を脆くすることから、転移を避ける熱処理を行うことによって材料の均一化及び規則度を更に向上する事が可能になった。

これによって脆性を改善した合金作製が可能になった。

#### (b) 薄膜作成技術の確立

高周波マグネットスパッタリング装置を用いて薄膜を作製し、薄膜の化学組成が高周波電力の変化によって制御できることを明らかにした。

また、合金薄膜の組織がスパッタリングした状態では柱状組織を持つ結晶質となっているが、熱処理を施すことにより柱状組織の間隔が広がることを確認すると同時に熱処理が薄膜の組成に影響を及ぼさないことを明らかにした。この処理を施すことによって、材料の脆性が著しく向上し熱弾性型マルテンサイト変態に起因する形状回復が実現することを確認した。図2.33に形状回復角の温度変化を示す。ここではほぼ直角に曲げた合金薄膜を加熱した時の、膜の折れ曲がり角を測定しており、曲がり角 0度で形状が完全に回復している事を示している。

これによって熱による形状回復を起こす薄膜の作製が可能になった。

#### (c) 合金の組成と特性の関係研究

熱処理により磁気特性に大きな違いが生じることが予備実験で示されていることから、外力（熱や磁場など）を加えることによる磁区と機能特性の変化について定量的な評価を行った。図2.34は磁場を印可してマルテンサイト相-オーステナイト相変態を顕微鏡観察し、双晶模様が消失する温度を印可磁場に対してプロットしたものである。図2.35は低磁場磁化測定によって求めた磁気転移点を印可磁場に対してプロットしたものである。ここでは非化学量論組成の合金について磁気相変態点、構造相変態点の双方が磁場を印加することによって変化する事を見出した。特に非常に弱い磁場を印可した場合に限り磁気転移点が下がることを確認した。

この変態温度と磁気転移温度の磁場依存性を定量化する事によって、磁場誘起構造相転移制御の指針を得た。

#### (d) 磁気特性・材料特性向上

##### (d-1) 材料の機械的特性評価

機械的特性の評価では放電プラズマ焼結法で加工された試験片について圧縮試験を実施し熱弾性型の形状記憶効果の確認を行った。この材料では2方向形状記憶効果が確認されており、図2.36にその試験結果を示す。

##### (d-2) 材料の熱機械的特性評価

動弾性率測定装置を用いてプラズマ焼結法で加工した試験片について縦波音速、横波音速、ヤング率等の物理的特性の温度依存性を測定し、マルテンサイト変態に伴う物理的特性の温度変化を示す結果を得ている。ここではアーク溶解した試験片の約4倍のヤング率を示し、材料の持つ脆さに改善傾向が見られている。この材料について組織の研磨表面の光学顕微鏡観察を行い結晶粒の再結晶化が起きていないことを確認し、結晶粒径を小さくして焼結する事によって材料強度が向上することが明らかになった。

これにより形状回復現象制御と材料強度特性の指針を得た。

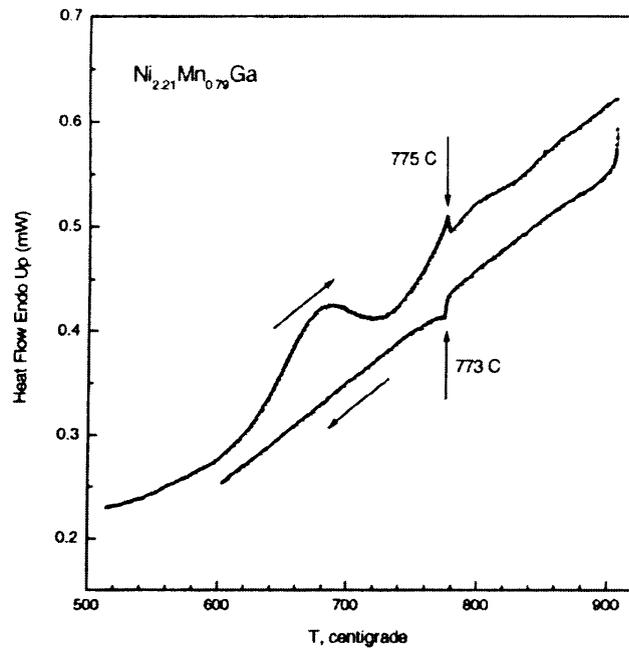


図2.31  $\text{Ni}_{2.21}\text{Mn}_{0.79}\text{Ga}$  による DSC 曲線。

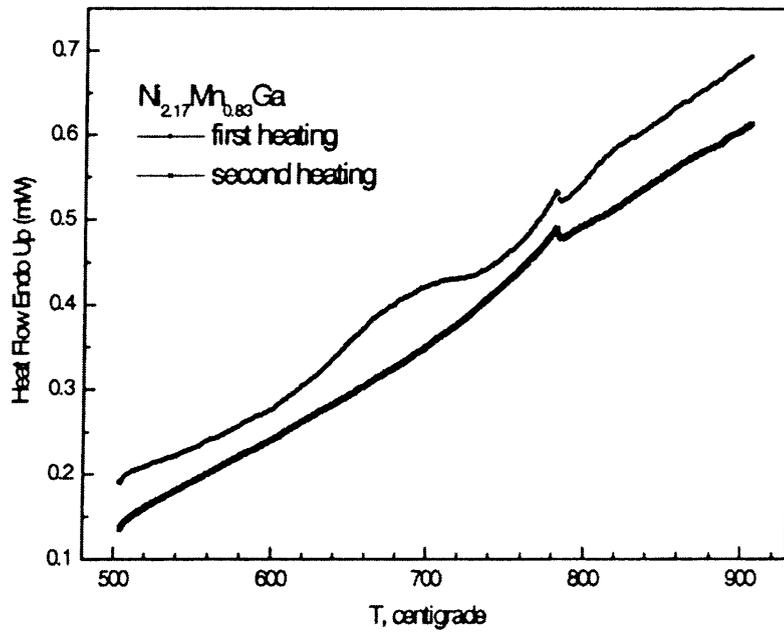


図2.32  $\text{Ni}_{2.17}\text{Mn}_{0.83}\text{Ga}$  による繰り返しDSC 加熱曲線。

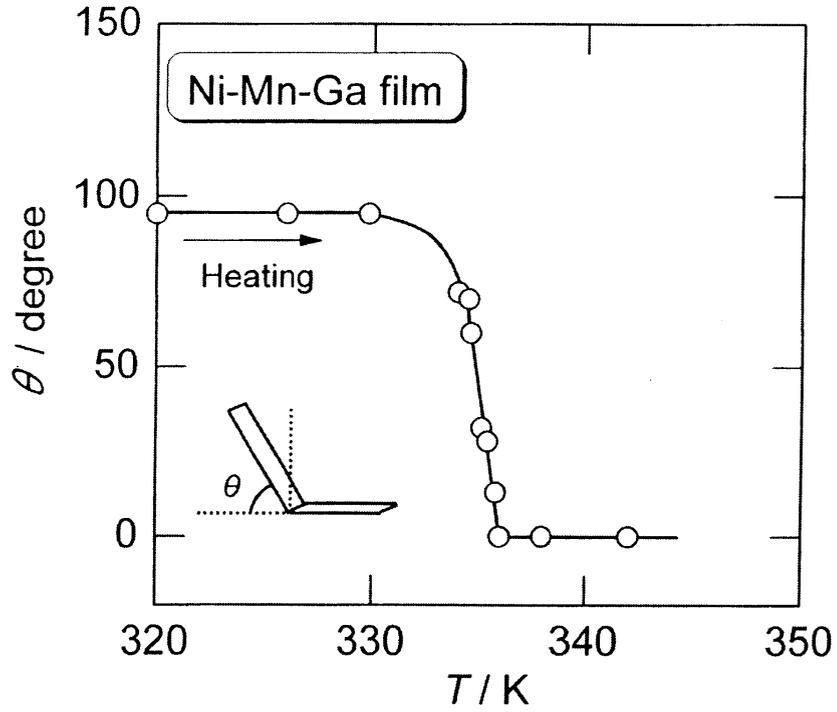


図2.33 Ni-MnGa 薄膜の形状回復角の温度変化。

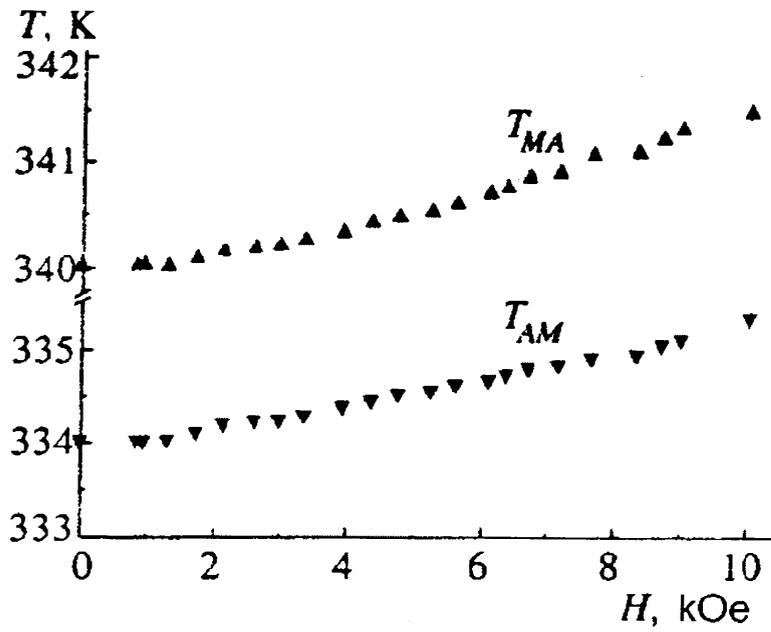


図2.34  $\text{Ni}_{2.19}\text{Mn}_{0.81}\text{Ga}$  におけるマルテンサイト変態と逆変態温度の外部磁場に対する変化。

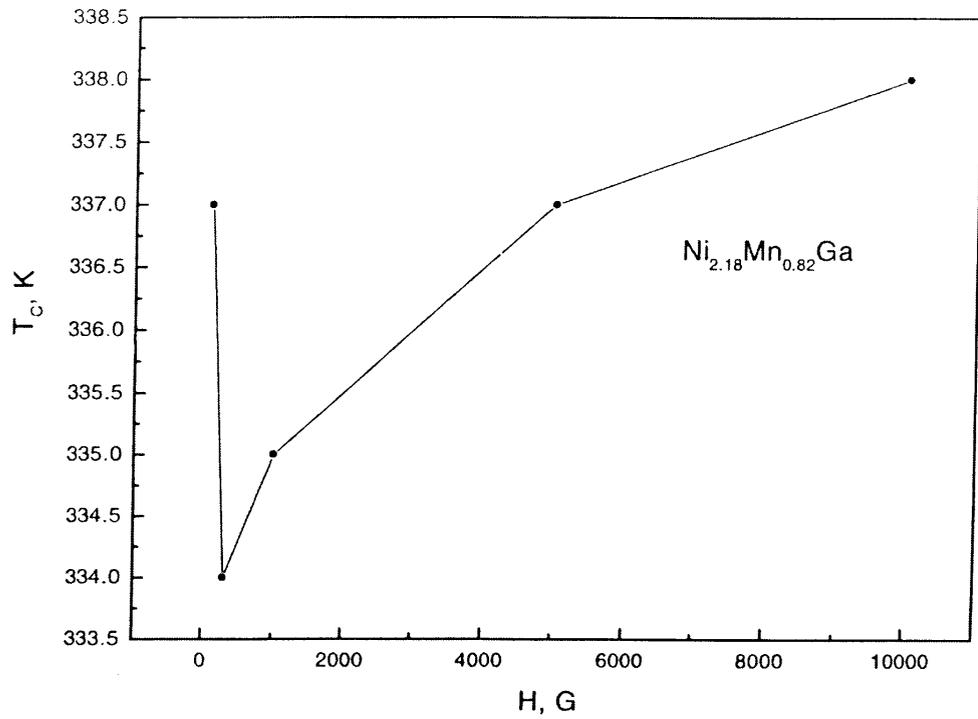


図2.35  $\text{Ni}_{2.18}\text{Mn}_{0.82}\text{Ga}$  における磁気転移温度の外部磁場に対する変化。

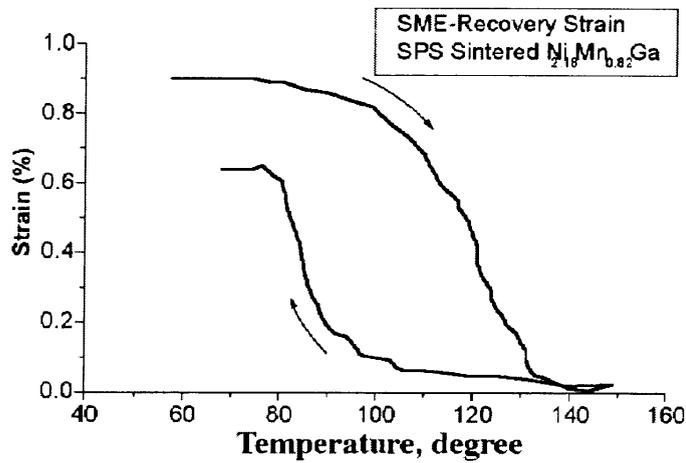


図2.36  $\text{Ni}_{2.18}\text{Mn}_{0.82}\text{Ga}$  における圧縮試験結果。

#### 1.1.2.4 新アクチュエータ材料の開発

##### 〔1〕強磁性形状記憶合金を用いたアクチュエータの開発

優れた形状記憶特性を持つ強磁性体材料を開発し、磁場の印加によってマルテンサイト変態の発生を制御することによって、従来の加熱・冷却による制御に比較して、より応答速度の高い形状記憶合金をアクチュエータの駆動素子として利用することが、本研究の目的である。

現在、優れた形状記憶特性と機械的強度を持ち、実用レベルにある形状記憶合金は、常磁性体、もしくは反強磁性体であり、磁化の大きさは極めて小さい。コンパクトな電磁石あるいは永久磁石によって作動が可能であることは、アクチュエータとして広範な応用を期待するためには不可欠な特性である。従って、ワシントン大学インテリジェント材料・システムセンターは、磁化の大きい強磁性体合金の中で、優れた形状記憶効果と機械的強度を持つ合金の探索を行った。

現在までの国内外の研究機関の研究動向・資料を調査した結果、マルテンサイト変態が報告されている強磁性体材料は、

(A) 鉄、ニッケル、コバルトのいずれかを主とする合金、

(B) Heusler 合金と呼ばれる金属間化合物、

のいずれかである。このうち、形状記憶効果の発現が報告されている合金は、以下の数種類に限定される。

(1) 鉄-ニッケル-コバルト-チタニウム合金 (Fe-Ni-Co-Ti), 分類 (A)

(2) ニッケル-マンガン-ガリウム合金 (Ni-Mn-Ga), 分類 (B)

(3) 鉄-パラジウム合金 (Fe-Pd), 分類 (A)

このうち、(1) Fe-Ni-Co-Ti 合金については、Fe-31%Ni-10%Co-3%Ti および Fe-33%Ni-12%Co-4%Ti の2種類の合金を作製し、マルテンサイト変態挙動を調査した。光学顕微鏡による組織観察、および電気抵抗測定の結果、マルテンサイト変態温度  $M_s$  は、前者が  $-150^{\circ}\text{C}$ 、後者が  $-180^{\circ}\text{C}$  付近であった。また、液体窒素を用いた変形では形状記憶効果が観察されたものの、室温では効果は現れなかった。通常の外気温度でのアクチュエータの使用を想定した場合、この動作温度は実用的でない。現在、合金組成を変えることによって変態温度を高温にする試みが継続中であるが、現状では室温に変態温度を持つ合金は得られていない。

(2) Ni-Mn-Ga 合金については、本年度までに、当センターにより基本的特性は調査済みである。この材料は、きわめて硬く、脆い材料であり、衝撃荷重により容易に粉砕する。形状記憶効果も、圧縮変形によってのみ観察されているのが現状である。この合金は、現在日本を中心に多くの研究機関が基礎的研究を行っているものの、脆性が改善されない限り実用には適さないと判断した。

(3) Fe-Pd 合金においては、曲げ変形で形状記憶効果が発見されている。アーク溶解炉により、Fe-30.0at.%, 30.5at.%, および31.0at.%Pd 合金を作製した。変態温度は、それぞれ 22℃、3℃、-24℃である。従来、この合金の変態は、連続的でマルテンサイト的ではないことが、しばしば指摘されていた。今回、我々は、示差走査熱量計により変態熱量の検出に成功し、変態潜熱を伴う典型的な一次の結晶構造変態（マルテンサイト変態）であることを明らかにした。

図 2.37 に Fe-30.0at.%Pd 合金の引っ張り試験による応力ひずみ曲線を示す。1.25%のひずみが除荷により弾性的に回復した。このとき、試料表面には、引っ張り荷重の付加・除去に伴って、マルテンサイトの生成・消滅が観察された。従って、この弾性変形は、応力誘起マルテンサイト変態による超弾性を含む弾性変形である。

図 2.38 に、この弾性変形におけるヤング率を変形温度の関数として示す。マルテンサイト変態温度(22℃)以上ではヤング率が比較的大きく(120GPa 程度)、変態温度およびそれ以下において 40GPa 程まで小さくなることからわかる。すなわち、相変態が起こると、弾性係数が軟化する材料であることがわかる。また、塑性変形が始まる弾性限は、室温でおよそ 560MPa であり、破断伸びは 20%程度に至ることから、強度が高く、延性に富む鋼の特長を持つ形状記憶合金であるといえる。

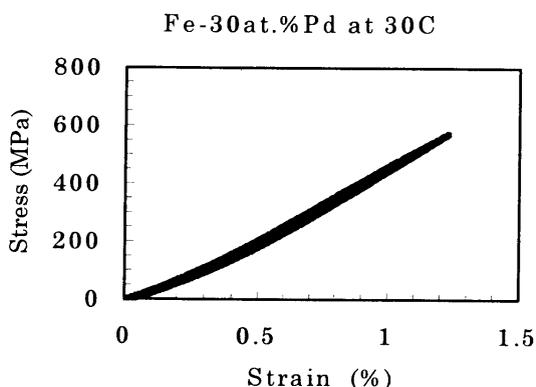


図 2.37 Stress strain curve of Fe-Pd.

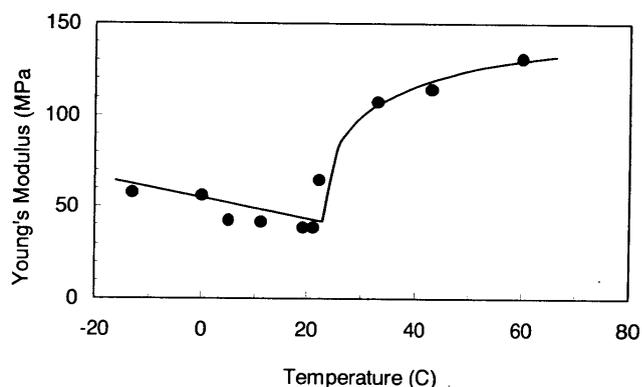
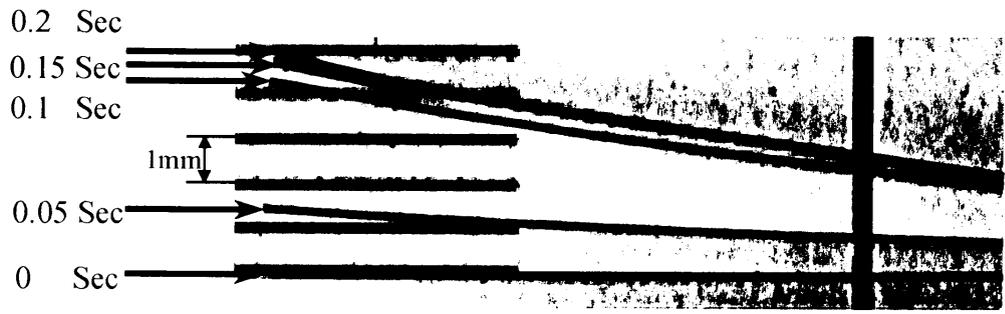
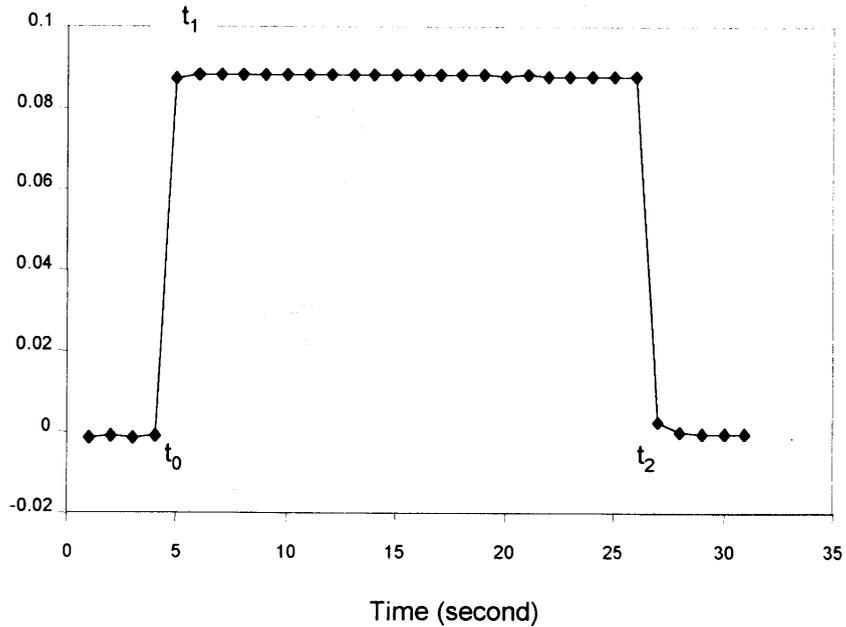
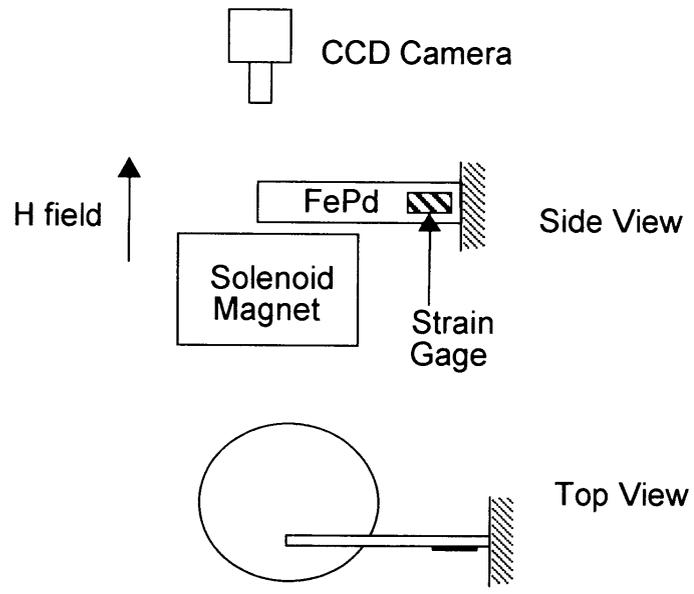
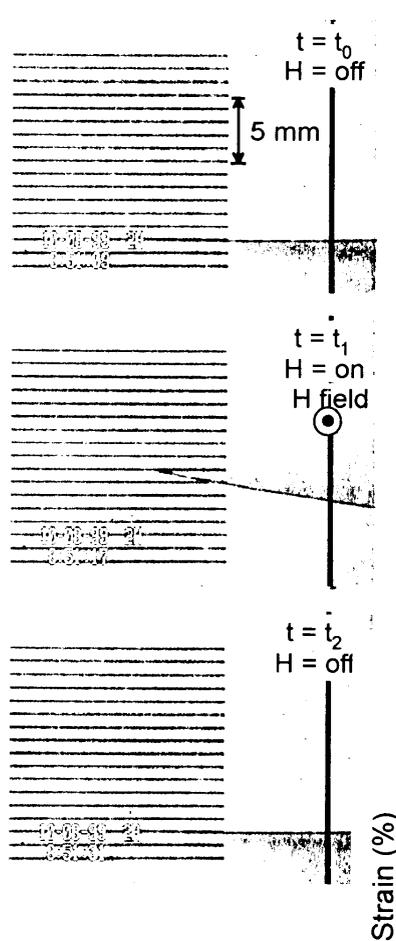


図 2.38 Young's Modulus vs. temperature

アクチュエータへの応用を考慮して、磁場下での自発的形狀変化について検討した。図 3 に、一般的なリレーに用いられているソレノイドコイルを用いた、Fe-Pd 合金板の変形を示す。Fe-Pd 板の幅方向は、電磁石の面に垂直に置かれ、磁場の方向と平行になっている。磁場の付加により、磁場の勾配方向に板が曲がっている。同じ寸法の純鉄の板で同様な実験を行っても、3分の1程度に小さいたわみしか得られない。Fe-Pd 合金のたわみが大きいのは、マルテンサイト変態による弾性定数の軟化が起るためである。

磁場による曲げ変形について、磁場への応答速度を調べるため、曲げひずみをひずみゲ

ージで測定し、その時間変化を求めた。電磁石への電流の入力の 0.2 秒後に曲げ変形が完了しており、アクチュエータとして実用上十分早い応答速度であるといえる。



2.39 Bending motion of a Fe-Pd alloy plate and its response to applied magnetic field.

## [2] 圧電セラミックス傾斜板アクチュエータ

### (a) 解析モデルの開発

クラシックの積層板モデル(classical lamination theory, CLT) は interlaminar shear stress (ISS) が計算できない欠点があるので、ISS が解析解として求められるような二次元積層板モデル (図 2.40) を開発して、これを傾斜機能圧電板に応用して変形、応力場等の解析解を得た。

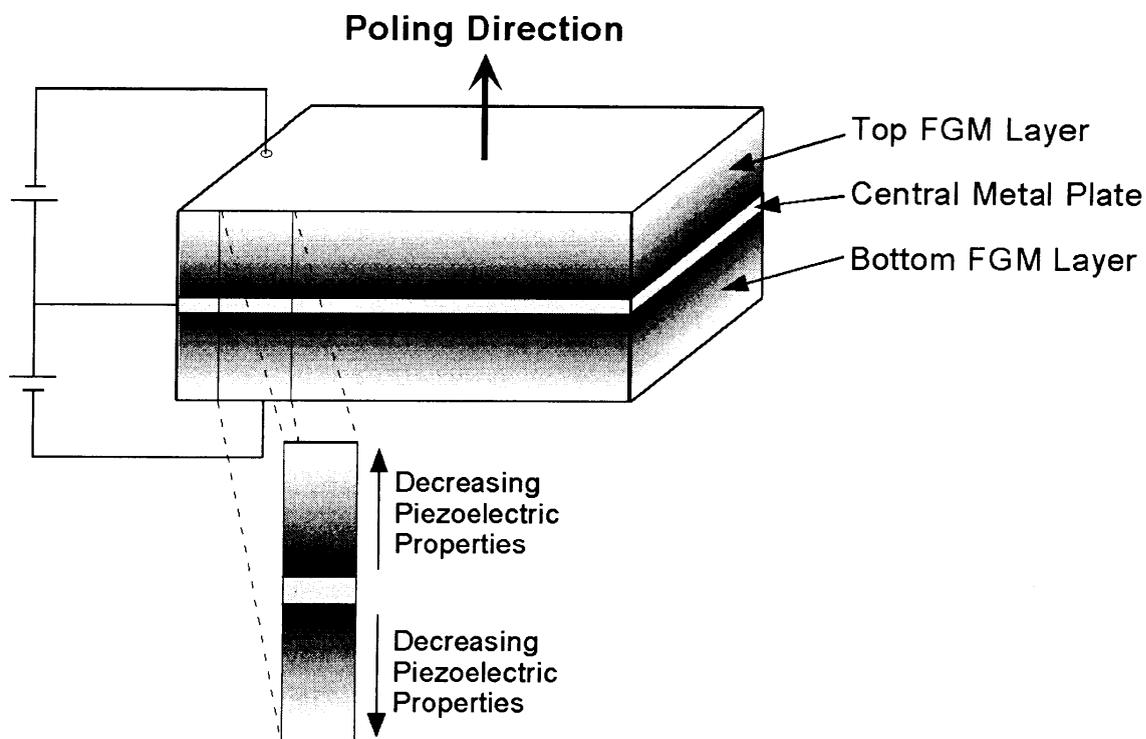


図 2.40 Schematic of FGM bimorph type actuator

この解析解を 3D-FEM モデルの数値解と比較して良好な一致を見た。また、CLT で得られた面内応力と面内変形を上記の解析解、そして 3D-FEM 解との比較を行い、CLT の精度を確認した。表 2.4 にこの解析に用いた input data を、また表 2.5 に FEM の数値解析と弾性論に基づく二次元積層板モデルの弾性解、そして CLT の解の結果を示す。表 2.5 によれば、FGM bimorph が standard bimorph に比べて 2 倍以上の大きい変形が得られ、しかし内部応力が約 1/2 ぐらいに止まっていることがわかり、FGM bimorph の有効性が証明された。また Interlaminar shear stress と normal stress の自由端辺での分布は、この二次元積層板 (2D elasticity) モデルできちんと求められ、その結果を図 2.41 に示す。FEM モデルによる数値解の一例を standard と FGM bimorph 板の両方について、図 2.42 に示す。これに依れば、standard bimorph の中央の応力集中は FGM を用いることにより、

中央部に出る最大値の値が減少しているのがわかる。

表 2.4 PZT-7A and gold electro-elastic properties

	$C_{11}$ (GPa)	$C_{12}$ (GPa)	$C_{13}$ (GPa)	$C_{33}$ (GPa)	$C_{44}$ (GPa)	$e_{31}$ (C/m <sup>2</sup> )	$e_{33}$ (C/m <sup>2</sup> )	$e_{15}$ (C/m <sup>2</sup> )
PZT	148	76.2	74.2	131	25.5	-2.1	9.5	9.2
Au	101.43	41.63	41.63	101.43	29.9	0	0	0

表 2.5 A comparison of ANSYS FEM results with the analytical values based on the Elasticity and CLT solutions.

	Method of solution	$\sigma_x$ Max (MPa)	$\tau_{xz}$ Max (MPa)	Out-of-plane disp. At mid plane of 50mm long plate(mm)
Standard Bimorph	2D-elasticity	30.4	14.1	0.4
	CLT	30	---	0.39
	FEM	30.8	13.8	0.5
FGM Bimorph	2D-elasticity	16.23	3.01	1.1
	CLT	16.4	---	1.04
	FEM	17.4	3.06	1.38

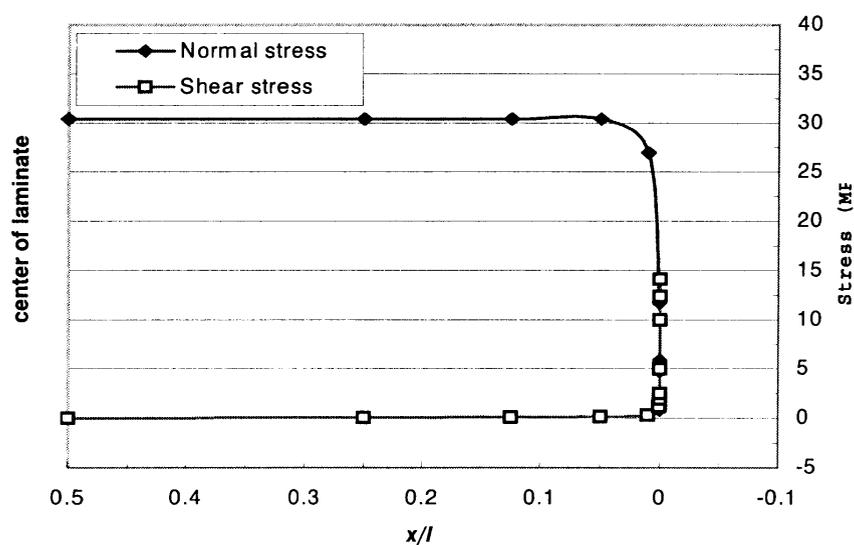


図 2.41 longitudinal and shear stresses of a standard bimorph at the mid-plane at  $l/h = 200$  by 2D-elasticity theory

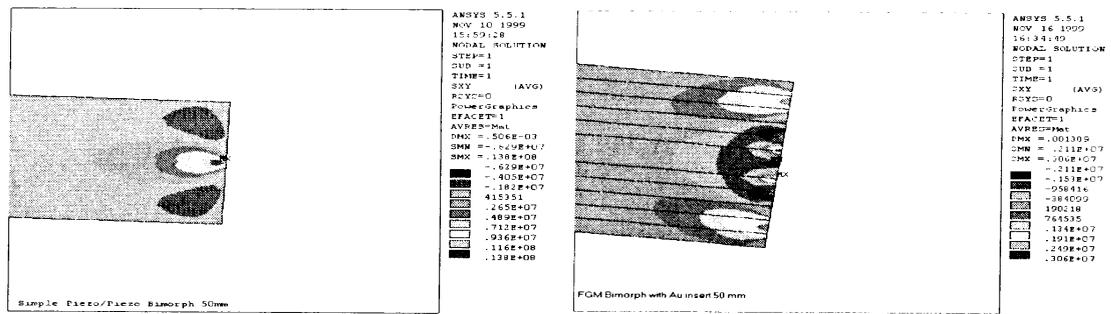


図 2.42 shear stresses of the laminate using FEM at  $l/h = 200$   
 (a) standard bimorph, (b) FGM bimorph

(b) 傾斜圧電板のプロセス

名工試の関谷研究室から得られた圧電/焦電セラミックス粒子をポリマーに混ぜて各 FGM 層をテープキャストで作製すべく準備中。

[3] 電気応答性ポリマーゲルの研究概要

昨年度、以下に示す項目に重点を置きポリマーゲルの研究を行った。

3.1、ゲルの種類の選択

- a. より良い機械特性を持つハイドロゲル
- b. 高電場印加時においても溶媒の分解を伴わないゲル

3.2、柔軟な電極の開発

3.3、Nafion 系駆動素子の駆動性能の向上

(a) PAN ゲルシート開発

PAN (ポリアクリロニトリル) ゲルは、従来よく研究されてきたアクリルアミド系のゲルに比べて、機械強度に優れるゲルとして知られている。繊維状の PAN ゲルを用いた伸長・収縮の一軸性変形についてはかなり以前よりよく研究されている。そこで我々はシート状のゲルについて着目した。そして、シート状ゲルを作成する簡便な方法およびゲルの強度と応答特性を決定する作成最終段階の最適化点を見つける事が出来た。PAN ゲルシートは酸性/塩基性の溶液交換では一軸性の変形を示すのに対し、電場印加においては曲げ変形を示した。PAN ゲルシートの電場印加による変形の結果を図 7 に示す。また、引っ張り試験の結果を図 2.43 に示す。

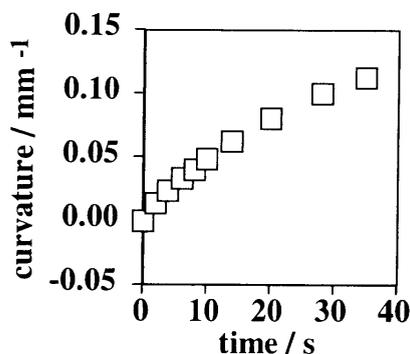


図 2.43 電場による PAN ゲルの曲げ変形

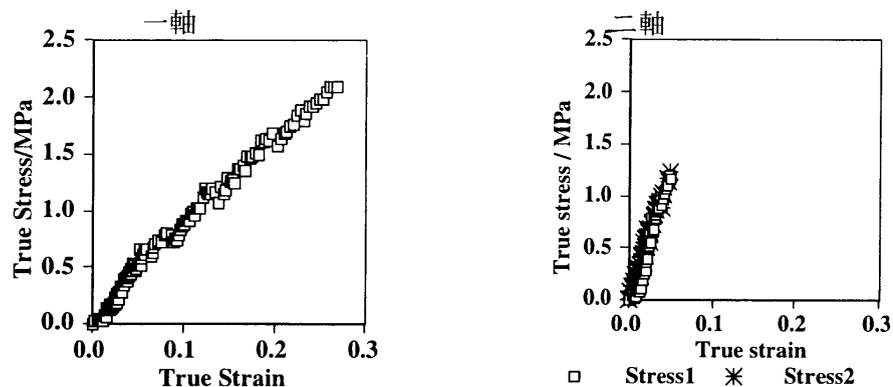


図 2.44 シート状PANゲルの引っ張り試験結果

[b] ハイドロゲルの電場応答性の確認

ハイドロゲルの大きな欠点は電場による駆動の際、印加できる電圧に限界があるということである。水を溶媒として用いたゲルは1.25ボルトまでは溶媒の分解なしに使う事が出来る。しかしながらより高い電圧が使えれば、より大きくより速い変形をさせる事が出来る。それこそが我々がPVA（ポリビニルアルコール）系ゲルと言う、もう一つのゲル系を選んだ理由である。PVAゲルの溶媒としては、数千ボルトの電圧印加においても安定な溶媒として知られているDMSOを用いた。より良い応答—より大きな歪、より速い応答—を得るための鍵となる特性はゲルの柔らかさである。ゲルの柔らかさにはゲルの架橋度が直接に効いてくる。図 2.45 に架橋度が大きいゲルと小さいゲルとの比較を示す。

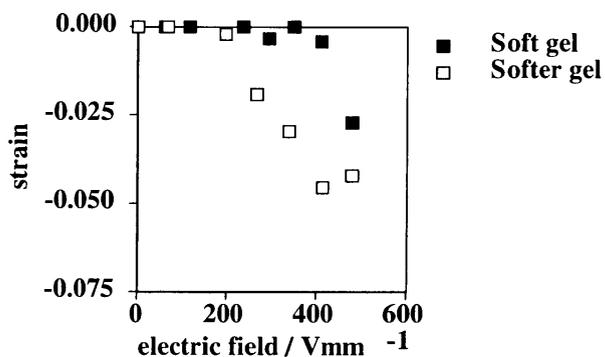


図 2.45 柔らかさが異なるゲルの電場による一軸変形の比較

ゲルの変形はポリマー網目間の溶媒の移動により左右されるので、我々はゲルを多孔質化する方法を見つける事により、応答歪の改善をする事が出来た。また多孔質化の第二の利点としては、ゲルの架橋度を大きくすることが出来るため、ゲルの取り扱いが容易になっ

た事がある。孔径が小さく高密度のものと孔径は大きい均一性が低いものの、二種類の多孔質ゲルについて研究を行った。孔径が大きいゲルの不均質構造は異なる径の孔がゲル中に不均一に分布している事によるものである。孔径の小さいゲルのほうが高いデータの再現性を示した。図 2.46 にこれら二種類の多孔質ゲルの写真を示す。

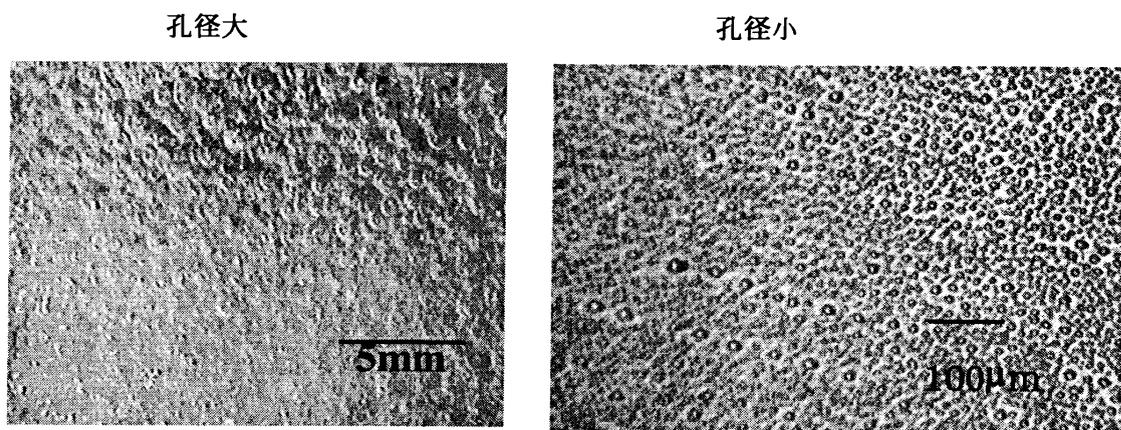


図 2.47 多孔質PVAゲル

電場応答による一軸歪は、ゲルの柔らかさ及び多孔度に大きく依存する。調査した全ての種類のゲルを比較したものを図 2.47 に示す。

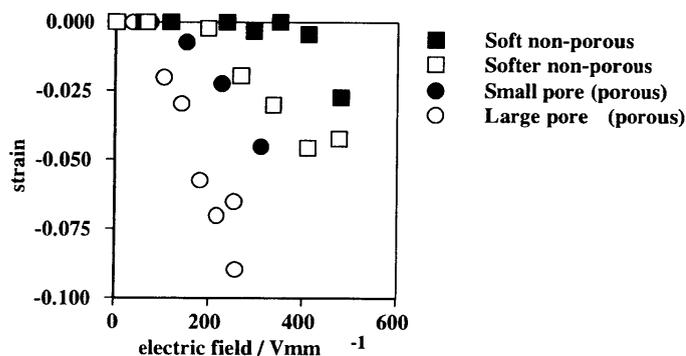


図 2.47 多孔質及び非多孔質PVAゲルの電場による歪

3.2、ポリマーゲルを電場による駆動素子として用いる際にはその表面に電極を取りつける必要がある。均一な変形のために電極とゲルは化学的に結合している事が望ましい。この目的のための電極は、ゲルと共に変形するのに十分な柔軟性と、高分子鎖との親和性があり、なおかつ溶媒との接触により変化(膨潤等)を起さない性質を持つべきである。我々は二種類の電極を開発した。

- a) セルロースベース—銀めっきしたセルロースのマット。PVAゲル表面への接着性は良好だがDMSOで膨潤する。一軸変形での使用に適する。
- b) Fusing Web ベース—銀粉または金箔を二枚の fusing web で挟んだもの。高い柔軟性を持つ。一軸及び曲げの両変形に適する。

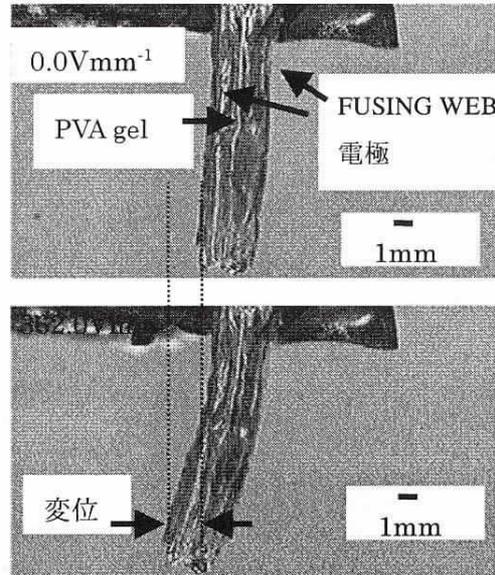


図 2.48 Fusing web 電極を用いての電場による PVAゲルの駆動

#### [d]Nafion 系駆動素子の性能向上

近年、パーフルオロスルホン酸膜（デュボン社製 Nafion®）を用いた電場応答性駆動素子について多くの研究がなされている。これらの研究では Nafion 表面に白金電極を接合しアルカリ金属イオンを膜中に含ませたものが用いられ、比較的低電場（10 ボルト以下）で大変形を起す事が報告されている。しかしながら、この素子は水を含むハイドロゲルであり、前述のように1.25 ボルト以上の電場では水の電気分解が起きてしまうため、実際の応用においてはそれ以下の電場で用いる必要がある。そこで1 ボルト以下での大変形を目指すべく、素子の改良を試みた。Nafion を用いた素子の駆動は、電場による膜中のイオンの移動により引き起こされると考えられている。白金—アルカリ金属イオン系の素子では移動できるイオンの数は最初から膜中に含まれているイオンの数だけである。そこで電極として白金と銅を用いた、電極から可動イオンが供給される素子について検討を行った。図 2.49 に白金—リチウムイオン系素子と白金—銅電極系素子を1 ボルトの電圧で駆動した結果を示す。図 2.50 にこれらの最大変形時の写真を示す。

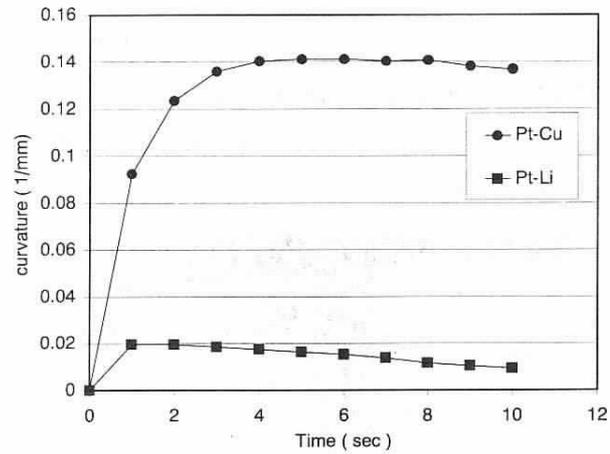


図.2.49 1 ボルト電場印加時の Nafion の変形

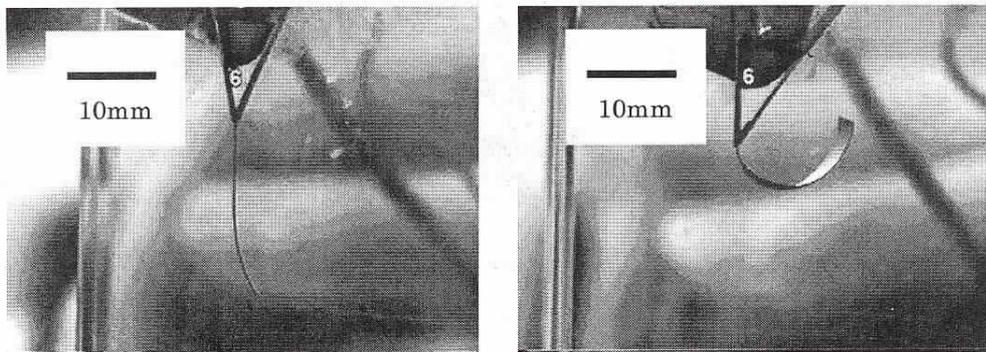


図 2.50 最大変形状態 左：白金ーリチウムイオン系 右：白金ー銅電極系

電気分解による気体の発生を伴わない低電場での大変形が達成できた事により、表面に乾燥防止のコーティングをする事が可能となり、大気中で長時間利用可能な素子の作成が可能となった。

## 1.2 達成状況

下記の今年度基本目標を達成することができた。

### 1.2.1 セラミックスアクチュエータ

#### (1) 傾斜機能圧電アクチュエータに関する研究

作製したアクチュエータが高誘電材料と圧電材料の組み合わせからの屈曲変位を発生していることが確認できた。また、解析によって電圧印加時の応力の不連続が小さく、発生力の高い構造が明らかにした。

#### (2) PNN-PZT系セラミックスの高性能化の研究

鉛過剰添加法を用いて、PNN-PZT組成の40組成について特性を確認した。P-Eヒステリシス、キュリー温度、歪特性等の圧電、電歪特性の確認を行い、各特性の状態図を作製した。その結果、3kV/mmの電圧下で最大0.28%の電界誘起歪を発生する組成を確認することができた。製造方法の開発として、28GHzのマイクロ波焼結により焼結ムラの無い、大型で良質な焼結体を得ることを確認した。28GHzのマイクロ波焼結技術の確立と従来焼結に無い微細構造組織への影響、更に圧電特性の向上を確認できた。

### 1.2.2 形状記憶合金型アクチュエータ

#### (1) 感温型形状記憶合金アクチュエータ

昨年度までに導入した革新的な材料製造プロセス技術として、“電磁浮遊溶解ノズルレス急冷凝固法”装置について原料素材を浮遊溶解するための円錐形一次電磁コイルの直下に円筒形の溶湯滴下絞込み用2次コイルを設置し、改良を加え、ミクロ的な金属組織を制御して、もっと長く薄い形状記憶合金の作成条件を調べた。そして、TiNi、TiNiCu系合金で従来よりも大幅な高機能・高性能の感熱型SMAアクチュエータ材を開発の目処がついた。その理由も金属組織学的にSEM/EBSP結晶組織解析から考察した。また、現状の室温レベル(TiNi,TiNiCu,TiNiPd系など)でから400~1000℃を超える高温型(NiAlMnFe,RuTa系など)新SMAへの研究開発も進め、さらに、幅広い温度範囲での形状記憶特性把握のために、繰り返しマイクロ引張り試験機(ステージ)付きのレーザ顕微鏡システムを設計・開発した。また、実用上重要なSMAアクチュエータの繰り返し熱疲労特性・劣化度の評価法にも検討を加えた。

#### (2) 磁性形状記憶合金材料の開発

##### (a) Ni-Mn-Ga系磁性形状記憶合金の合金作成技術の確立

非化学量論組成の合金に第4元素を添加した均一な合金作製が可能であることを確認した。

##### (b) 薄膜作成技術の確立

スパッタリング法によって熱弾性型の形状回復現象を起こすNi-Mn-Ga薄膜の作製が可能になった。

##### (c) 合金の組成と特性の関係研究

変態温度と磁気転移温度の印可磁場依存性を示した。

(d) 磁気特性・材料特性向上

加熱による2方向形状記憶効果を確認し、材料を放電プラズマ法によって加工することによって材料強度が向上することが明らかになった。

1.2.3 新アクチュエータ材料の研究開発

(1) 強磁性形状記憶合金アクチュエータの開発

Fe-Ni-Co-Ti系, Ni-Mn-Ga系、Fe-Pd系合金のついて検討し、Fe-Pd系においてアクチュエータとしての応答速度特性に良好なものが得られた。

(2) 圧電セラミックス傾斜板アクチュエータの開発

2次元積層板評価モデルを開発し、応力場解析を行い従来法との比較を行っている。

(3) 電気応答性ポリマーゲルアクチュエータ素子材料の開発

PANゲルシートおよびハイドロゲルの電場下での機械特性と物質安定性の試験、ハイドロゲルの電場応答性の測定、ポリマーゲル素子用の柔軟性電極の開発、Nafion系駆動素子の特性向上研究を行い可能性が確認された。

1.3 結論

平成11年度に下記の研究成果が得られた。

(1) セラミックスアクチュエータ

(a) 傾斜機能圧電アクチュエータに関する研究

円盤型FGMアクチュエータにおいて、屈曲変位を発生することを確認した。

解析によって電圧印加時の応力の不連続が小さく、発生力の高い構造を明らかにした。

(b) PNN-PZT系セラミックスの高性能化の研究

鉛過剰添加法を用いてPNN-PZT系の40組成を作製し、P-Eヒステリシス、キュリー温度、歪特性等の圧電、電歪特性を測定し、各特性の状態図を作製した。その結果、3kV/mmの電圧下で最大0.28%の電界誘起歪を発生する組成を確認することができた。

28GHzのマイクロ波焼結技術を確立し、焼結ムラの無い、大型で良質な焼結体を作製できた。また、従来焼結に無い微細構造組織への影響、更に圧電特性の向上を確認した。

(2) 形状記憶合金型アクチュエータ

(a) 感温型形状記憶合金アクチュエータ

TiNi、TiNiCu系合金で従来よりも大幅な高機能・高性能の感熱型SMAアクチュエータ材開発の目処がついた。

また、幅広い温度範囲での形状記憶特性把握のために、繰り返しマイクロ引張り試験機(ステージ)付きのレーザ顕微鏡システムを設計・開発した。

実用上重要なSMAアクチュエータの繰り返し熱疲労特性・劣化度の評価法にも検討を加えた。

(b) 磁性記憶合金アクチュエータ

Ni<sub>2</sub>MnGa のバルク材脆性の改善に関する技術を開発した。

また、薄膜の脆性を大幅に改善する熱処理条件を見だし、熱弾性型の形状回復現象を起こす薄膜合金作成技術を確立した。

(4) 新アクチュエータ材料の開発

(a) 強磁性形状記憶合金アクチュエータの開発

目下のところ Fe-Pd 系については応答速度で有望な結果が得られている。

(b) 圧電セラミックス傾斜版アクチュエータの開発

性能評価のために 2 次元積層板モデルを開発し、変形、応力場の解析解を得た。

(c) 電気応答性ポリマーゲルアクチュエータ素子材料の開発

PAN ゲルシート、ハイドロゲルの電場下での機械特性、物質安定性、ハイドロゲルの電場応答性などの基本データの測定、ポリマーゲル素子用柔軟性電極および Nafion 系駆動素子の開発に着手することが出来た。

2. 研究発表・講演、特許等の状況

2.1 研究発表・講演

1)高橋弘文、加藤和昭、裘 進浩、谷 順二：“マイクロ波焼結を利用した高性PZTアクチュエータの作製”，第47回応用物理学関係連合講演会，2000.3，東京。

2)H.Takahashi, K.Kazuaki, J.Qiu, J.Tani: “Fabrication of high performance PZT actuator using microwave sintering process”, The 7<sup>th</sup> SPIE Conference, 5-9 March 2000, Newport, Beach California.

3)Magnetic properties of ferromagnetic shape memory alloy Ni<sub>2+x</sub>Mn<sub>1-x</sub>Ga (x=0-0.19). Matsumoto, M., Wang, Z., Vasilev, A. N., Takagi, T., Tani, J., Tanahashi, Y. and Fujino, T. International Symposium on Non-Linear Electromagnetic Systems, (1999.5) .

4)Martensitic and magnetic transitions in Ni-Mn-Ga with Co and Fe addition. Khovailo, V. V. Proceeding of international Seminar on Shape memory Alloys and Related Technology (SMART-99), (1999.8), pp.30-33 .

5)Phase transition of the Ferromagnetic Shape Memory Alloy Ni<sub>2</sub>MnGa intermetallics and its magnetic-field-induced behavior. Miki, H. Proceeding of international Seminar on Shape memory Alloys and Related Technology (SMART-99), (1999.8), 26-29 頁 .

6)Ni<sub>2</sub>MnGa の変態温度におよぼす磁場効果。

松本 實，馬衍偉，淡路 智，渡邊和雄，高木敏行，谷 順二，藤野威男  
日本金属学会春季大会講演概要，(1999.3)，361 頁 .

7)Ni<sub>2+x</sub>Mn<sub>1-x</sub>Ga(x=0~0.2)の磁性。

松本 實, A.N.Vasil' ev, 鹿又 武, 高木敏行, 谷 順二, 藤野威男

日本金属学会春季大会講演概要, (1999.3), 362 頁 .

8) Compression test of Ni<sub>2</sub>MnGa made by spark plasma sintering.

Wang,Z., Matsumoto,M., Abe,T., Oikawa,K., Takagi,T., Qiu,J. and Tani,J.

日本金属学会春季大会講演概要, (1999.3), 383 頁 .

9) 強磁性形状記憶合金 Ni<sub>2+x</sub>Mn<sub>1-x</sub>Ga(x=0~0.20)の磁気特性

松本 實, 高木敏行, A.N.Vasil' ev, 谷 順二, 藤野威男

第 8 回 MAGDA コンファレンス講演論文集, (1999.4), 171-174 頁 .

10) 強磁性形状記憶合金 Ni<sub>2</sub>MnGa の磁場特性

松本 實, 三木寛之, 高木敏行, 羅 雲, 谷 順二, 馬衍偉, 淡路 智, 渡邊和雄, 藤野威男

日本機械学会 1999 年度年次大会講演論文集 (I) , 第 99 卷, 1 号 (1999.7), 365-366 頁 .

11) 強磁性形状記憶合金 Ni<sub>2</sub>MnGa の機械特性

三木寛之, 高木敏行, 松本 實, 谷 順二, 山内 清, 阿部利彦, 中村博一, Khovailo,V.

第 11 回「電磁力関連のダイナミックス」シンポジウム, (1999.10), 326-327 頁 .

12) Ni<sub>2</sub>MnGa の相変態における Fe と Co 添加の影響

Khovailo,V., 三木 寛之, 中村 博一, 松本 實, 高木 敏行, 谷 順二

日本金属学会秋季大会講演概要, (1999.11), 381 頁 .

13) MECHANICAL PROPERTIES OF FERROMAGNETIC SHAPE MEMORY ALLOY  
Ni<sub>2</sub>MnGa

Miki,H., Takagi,T., Matsumoto,M., Tani,J., Yamauchi,K., Abe,T., Nakamura,K.,  
Khovailo,V. and Yun,L.

第 11 回日本 MRS 学術シンポジウム要旨集, (1999.12), 212 頁 .

## 2.2 文献

1) Phase Transformation of Ni<sub>2+x</sub>Mn<sub>1-x</sub>Ga(x=0~0.19). Matsumoto,M., Kanomata,T.,  
Ebisuya,M., Kaneko,T., Takagi,T., Tani,J. and Fujino,T.

Proceedings of the International Conference on Solid-Solid Phase Trans-  
formations'99(JIMIC-3), (1999), pp.1124-1127 .

2) Properties of Ni<sub>2</sub>MnGa Shape Memory Alloy Prepared by Spark Plasma Sintering.

Wang,Z., Matsumoto, M., Abe,T., Oikawa,K., Qiu,J., Takagi,T. and Tani,J.

Materials Science Forum, Vol.327, (2000), pp.489-492 .

3) Fabrication and Characterization of Sputtered Ni<sub>2</sub>MnGa Films.

Suzuki,M. Ohtsuka,M. Suzuki,T. Matsumoto,M. and Miki,H.

Materials Transactions, JIM, Vol.40, No.10 (1999), pp.1174-1177 .

- 4)Effect of Grinding Stress on the Phase Transformation of  $Ni_{2+x}Mn_{1-x}Ga$  Powder.  
Wang, Z., Matsumoto,M., Abe,T., Oikawa,K., Qiu,J., Takagi,T. and Tani,J.  
Materials Transactions,JIM, Vol.40, No.4 (1999), pp.290-293 .
- 5)Phase Transformation of  $Ni_2MnGa$  Made by the Spark Plasma Sintering Method.  
Wang,Z., Matsumoto,M., Abe,T., Oikawa,K., Qiu,J., Takagi,T., and Tani,J.  
Materials Transactions,JIM, Vol.40, No.5 (1999), pp.389-391 .
- 6)Phase transformation of Heusler type  $Ni_{2+x}Mn_{1-x}Ga$  ( $x=0-0.19$ ).  
Matsumoto,M., Takagi,T., Tani,J., Kanomata,T., Muramatsu,N. and Vasilev,A.  
Materials Science & Engineering A , Vol.273, (1999), pp.326-328 .
- 7)Compressive Properties of  $Ni_2MnGa$  Produced by Spark Plasma Sintering.  
Wang, Z., Matsumoto, M., Abe, T., Oikawa, K., Takagi, T. and Tani, J.  
Materials Transactions, JIM, Vol.40, No.9 (1999), pp.863-866 .
- 8)Phase Transitions in Intermetallic Compounds Ni-Mn-Ga with Shape Memory Effect.  
Dikshtein,I., Koledov,V., Shavrov,V., Tulaikova,A., Cherechukin,A., Buchelnikov,V.,  
Khovailo,V., Matsumoto,M., Takagi,T. and Tani,J.  
IEEE TRANSACTIONS ON MAGNETICS, Vol.35, No.5 (1999.9), pp.3811-3813 .

### 2.3 特許等

該当なし

### 2.4 その他の公表（プレス発表等）

形状記憶合金  $Ni_2MnGa$  磁気エネルギーで変態する多機能型素材として注目  
レアメタルニュース（アルム出版社），No. 1975 (1999.12.16), pp.1 .

### Ⅲ. デモンストレータ試験

#### 1. 研究開発の成果と達成状況

##### 1.1 研究開発の成果

###### 1.1.1 要約

「知的材料・構造システムの研究開発」プログラムにおいて下記の研究項目を実施中である。

- ①ヘルスマニタリング技術の開発
- ②スマートマニファクチャリング構造技術の開発
- ③アクティブアダプティブ構造技術の開発
- ④アクチュエータ材料・素子の開発

「デモンストレータ試験」研究（以下、本研究）は、これらの研究開発成果を統合した実構造物要素を試作し、各研究開発項目の目標達成度を検証するとともに、知的構造システム技術の共通的基本技術を確立する、ことを目的とする。

本研究の平成 11 年度実施内容は、

- 1) 航空機胴体構造
- 2) ジェットエンジン用ファン静翼
- 3) 宇宙用アンテナ構造

に関するシステム構想・設計を行い、以後の研究進展のベースを明確にすること、とした。

- 1) 航空機胴体構造では、6 項目のデモンストレーション・テーマを選定するとともに、デモンストレータのサイジングおよび費用予測、構造様式、負荷方法、試験装置、評価技術に関する基本構想を設定した。
- 2) ジェットエンジン用ファン静翼では、熱可塑 FRP のプレス成形に対する知的成形技術の適用手法を検討し、誘電率センサおよび光ファイバセンサの埋め込みや引出し法を検討後、平板の試作および成形試験を実施した。
- 3) 宇宙用アンテナ構造では、柔構造部に対する振動制御および準静的形状制御の基礎検討として、アンテナ模擬構造物の概念設計、適用アクチュエータ（圧電セラミックスフィルムおよび積層型圧電素子）の検討、準静的変形に対する高分子圧電フィルムの適用検討、を実施した。

平成 11 年度後半に、「知的材料・構造システムの研究開発」プログラムの実施体制見直し結果を反映し、本研究の実施内容は、平成 12 年度以降、“航空機胴体構造”一本に絞ることになった。各デモンストレーション・テーマの実施内容に関する改善は今後も継続される。

さらに、東京大学先端科学技術研究センターの岸研究室との共同研究で、スマート材料の材料内の欠陥、損傷および損傷回復の挙動検出・探知を、既存実用技術の AE, X 線、超音波と本プロジェクトの光センサ法を含めて総合評価を基礎的に行うことにし、研究を開始した。

平成 12 年度以降のデモンストレータ試験は、供試体および架構設計・試験法・制御則設計等の

詳細検討、供試体および架構の製作、試験装置の調達・組立、等を経て、平成 14 年度に試験を終了する予定である。

## Summary

### FY1999 Research Summary of the Demonstrator Testing

The following items are under research and development as the NEDO's "Smart Materials and Structural System" program.

- ①Structural Health Monitoring Technology
- ②Smart Manufacturing Technology
- ③Active Adaptive Structural System Technology
- ④Actuator Materials and Elements

Purposes of the Demonstrator Testing are composed of the followings.

- 1.Verification of target achievement in each research and development item by producing actual structure components experimentally which integrate the above items
- 2.Establishment of common basic technology in smart materials and structures

FY1999 is the phase of system concept and design. In this phase we planed to clarify the basic concept of the Demonstrator Testing in order to proceed these research and development themes smoothly after next year.

In FY1999, the Demonstrator Testing activities in were composed of the following three(3) sub-items.

- 1)Aircraft fuselage structure;
  - selection of six(6) demonstration themes
  - sizing of the demonstrator
  - conceptual fuselage structure
  - testing apparatus and testing evaluation methods
- 2)Static vane for a fan of a jet engine;
  - application of smart manufacturing technology to the press formation of thermoplastic FRP
  - embedding of dielectric constant sensors and optical fiber sensors
  - producing a FRP flat plate experimentally
- 3)Satellite antenna structure
  - conceptual design of the antenna structure demonstrator – vibration control and quasi-static configuration control for a flexible structure
  - applied actuators(piezoelectric ceramics film and stacked piezoelectric element)

In addition to the above industrial stand point, research work for fundamental estimation on behaviors of defects and damages, and recovery mechanisms of damages has started under the contract research with Professor Teruo Kish, The University of Tokyo, with applying AE, X-ray Supersonic and optical methods.

After FY2000, the Demonstrator Testing is going to be focused on the aircraft fuselage structure. Efforts at improving demonstration contents will be continued in order to enrich the Demonstrator Testing. The Demonstrator Testing will finish on FY2002.

## 1.1.2 本文

### 1.1.2.1 デモンストレータ試験全体

#### (1)研究開発の目的

1.1.1 「要約」で先述したように、デモンストレータ試験は「知的材料・構造システムの研究開発」で実施中の i)ヘルスマニタリング技術の開発、ii)スマートマニファクチャリング技術の開発、iii)アクティブアダプティブ構造技術の開発、iv)アクチュエータ材料・素子の開発、の4研究項目の研究開発成果を統合した実構造物要素を試作し、各研究項目の目標達成度を検証するとともに、知的構造システム技術の共通の基盤技術を確立する、ことを目的とする。

#### (2)全体計画

デモンストレータ試験は、i)航空機胴体構造、ii)ジェットエンジン用ファン静翼、iii)宇宙用アンテナ構造、の3項目から成り、平成11年度から始まった。何れの項目も平成11年度は、初年度であり、システムの構想・概念設計を行い、何を・何時までに・どのように作り上げていくかを明らかにし、以後の研究推進の基礎を固めることを主眼とした。年度後半に実施体制の見直しがあり、この結果を反映して、平成12年度以降のデモンストレータ試験は“航空機胴体構造”に絞られることになった。

平成12年度以降の計画は、下記日程を骨子とする。

- ①平成12年度：基本設計－供試体設計、部分構造試験、制御則設計
- ②平成13年度：詳細設計および一部供試体製作－供試体設計、試験計画立案、治具設計および製作、供試体製作（振動・騒音制御用）
- ③平成14年度：供試体製作および試験－供試体製作（損傷検知/損傷進展制御）、試験実施、成果報告

#### (3)平成11年度成果のまとめ

航空機胴体構造のデモンストレータ試験に関しては、デモンストレーション・テーマの取捨選択を行い6テーマを選定するとともに、供試体のサイズを取得データの技術的意義、製作費・試験実施費用、利用可能施設のスペース等の観点から直径1.5m、長さ3m級に設定した。さらに、試験日程短縮のため、供試体は2体製作し、一体は損傷検知および損傷進展抑

制の諸テーマ、他の一体は振動・騒音レベルの低減、を各々分担することにした。

供試体の構造様式は複合材外板およびストリングを主体とするセミモノコック構造として、概念設計を行い、構造部材諸元を設定した。併せて、デモンストレーション・テーマ毎の試験位置も設定した。

試験装置の概念設計を行い、試験架構の概要図作成およびディスプレイ装置の仕様コンセプトを明確にした。試験での所要計測機器および計測システム構成、損傷検査の手法・頻度・所要時間等の検査手順、負荷形態・順序・頻度等の試験実施手順のコンセプトも設定した。

ジェットエンジン用ファン静翼および宇宙用アンテナ構造に関しては、「要約」を参照。

### 1.1.2.2 航空機胴体

#### (1) 供試体基本設計

これまでの要素技術の成果に基づき、デモンストレーションするのにふさわしい各研究開発の成果技術の抽出を行った。各テーマにおける要求条件を考慮して供試体の基本的構造の設計を行い、供試体概念図を作成した。

#### (a) デモンストレーションすべき技術の選定

表 1.1.2.2(1)-1 にデモンストレーション・テーマ一覧を示す。デモンストレーション・テーマの選定に際しては、試験目的のデモ効果、アピール性、達成見通し等を考慮し選定した。テーマの特徴から供試体は2体製作する方向で検討しており、1体は「機内振動・騒音レベル低減技術の研究開発」に使用し、もう1体で下表の残り全テーマを実施する予定である。前者の供試体に関しては、次年度以降検討を開始する予定であり、ここでは、後者の供試体に関して検討を実施した。

表 3-1 デモンストレーション・テーマ一覧

	大分類	個別テーマ	提案概要
1	衝撃リアルタイム探知	複合材料埋め込み光ファイバ・センサによる衝撃損傷検知	複合材構造の中に埋め込んだ細形光ファイバ・センサにより、衝撃の発生時期・場所・大きさを特定する。
2	同上	統合化 AE センサネットワークによる実用衝撃負荷の同定	AE センサにより衝撃損傷の発生時期・場所・大きさを特定する。位置探査精度は 1cm 未満を目標とする。
3	構造損傷探知	分布型 BOTDR センサ広域歪分布測定	光ファイバ・センサにより、広範囲の歪分布を計測し、複合材構造のクラック、大変形等の損傷検知を行なう。
4	同上	炭素繊維の導電性を利用したセンサ(スマートパッチ)の開発	スマートパッチに使用するファイバのコーティング、表面処理を変更し、負荷歪の最大値を検出する。
5	損傷進展抑制	形状記憶合金線・箔を用いた損傷進展抑制	複合材に埋め込んだ形状記憶合金により、発生したデラミネーションの進展を遅らせる。モードⅡが主対象。
6	振動・騒音レベル低減	機内振動・騒音軽減技術の研究開発	胴体構造にアクティブ・アダプティブ構造を適用し、騒音レベルを 3dB 以上軽減する(別供試体で実施)。

AE ; アコースティック・エミッション

(b) 供試体構造及び負荷荷重計画

供試体構造の設定に際しては、

- ・航空機胴体を模擬していること。
- ・上記テーマのデモンストレーションが行なえること。

を考慮した。供試体構造及び想定負荷荷重を図 3-1 に示す。供試体の大きさは 1.5mφ×3m 規模とする。

構造様式としては、外板及びストリंगाが複合材料、フレームはアルミ製とした。前後の隔壁はスチール製とし、一方の隔壁にはデモンストレーションを行なうための区画を設けた。この区画に関しては取り外し可能とし、複数のデモンストレーション・テーマを実施できる様にした。荷重は与圧負荷 (0.75 気圧) + 曲げ荷重 (35ton) とした。この荷重条件は、「分布型 BOTDR センサ広域歪分布測定」のデモンストレーション・テーマにおいて、最大と最小の歪の差が 3000 $\mu$  必要なこと、「形状記憶合金線・箔を用いた損傷進展抑制」において最大歪は 5000 $\mu$  以上必要なことを考慮し設定した。

曲げ荷重負荷に際しては、過度のせん断力負荷をさけるために、荷重ポイントを供試体端部から 800mm 延長した。

(c) 次にこの供試体におけるデモンストレーション・テーマの適用部位を図 3-2 に示す。適用部位の設定に際しては、前述の「分布型 BOTDR センサ広域歪分布測定」「形状記憶合金線・箔を用いた損傷進展抑制」の要求事項に基づき、「複合材料埋め込み光ファイバ・センサによる衝撃損傷検知」のデモンストレーション・テーマに於いては衝撃を負荷するため上面が望ましいことを考慮した。

以上の検討結果より、設計した供試体の概要を図 3-3 に示す。ここで、供試体は製造性及び各種センサの配線取り出しを考慮し円周方向に 4 分割とし、端部を重ねて結合している。長手方向に於いては、500mm ピッチでフレームを配し、中央部の 4bay を標定部としている。前後の部分は治具からの荷重を伝えるために最大 7mm に板厚を増やしている。

外板の板厚は下面側で 1.5mm とし要求歪 5000 $\mu$  を発生するように設計した。上面は、この荷重による座屈を防止するため 4mm の板厚とした。同様の理由により、上面と下面でストリंगा・ピッチ、ストリंगा面積を変化させた。

以上の供試体の強度計算結果を図 3-4 に示し、供試体図を図 3-5 に示す。

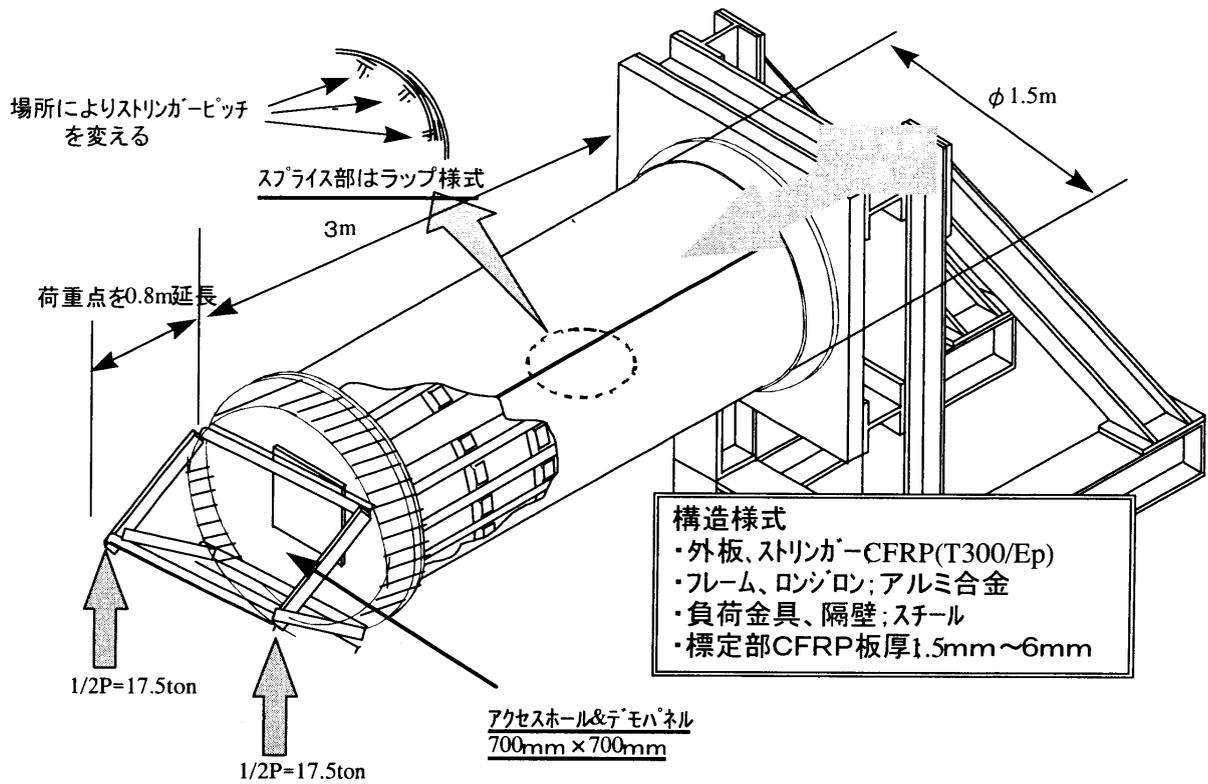


図 3-1 供試体構造及び荷重負荷計画

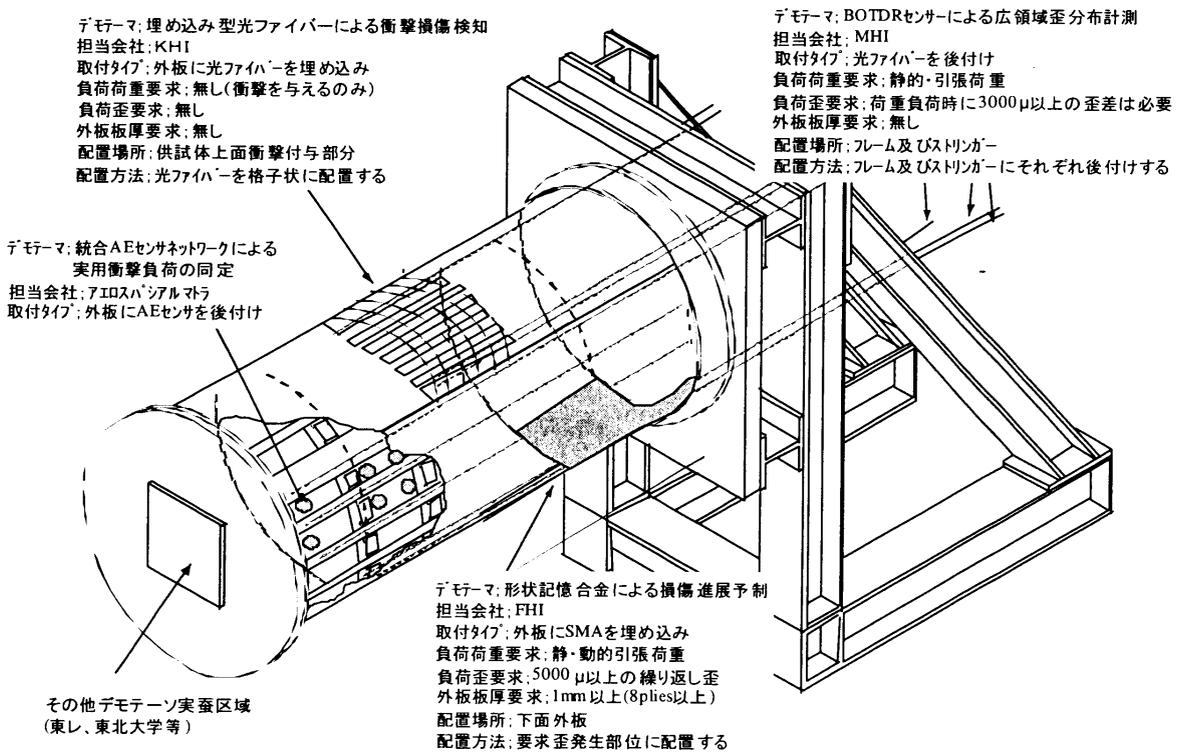


図 3-2 デモンストレーション・テーマの適用部位

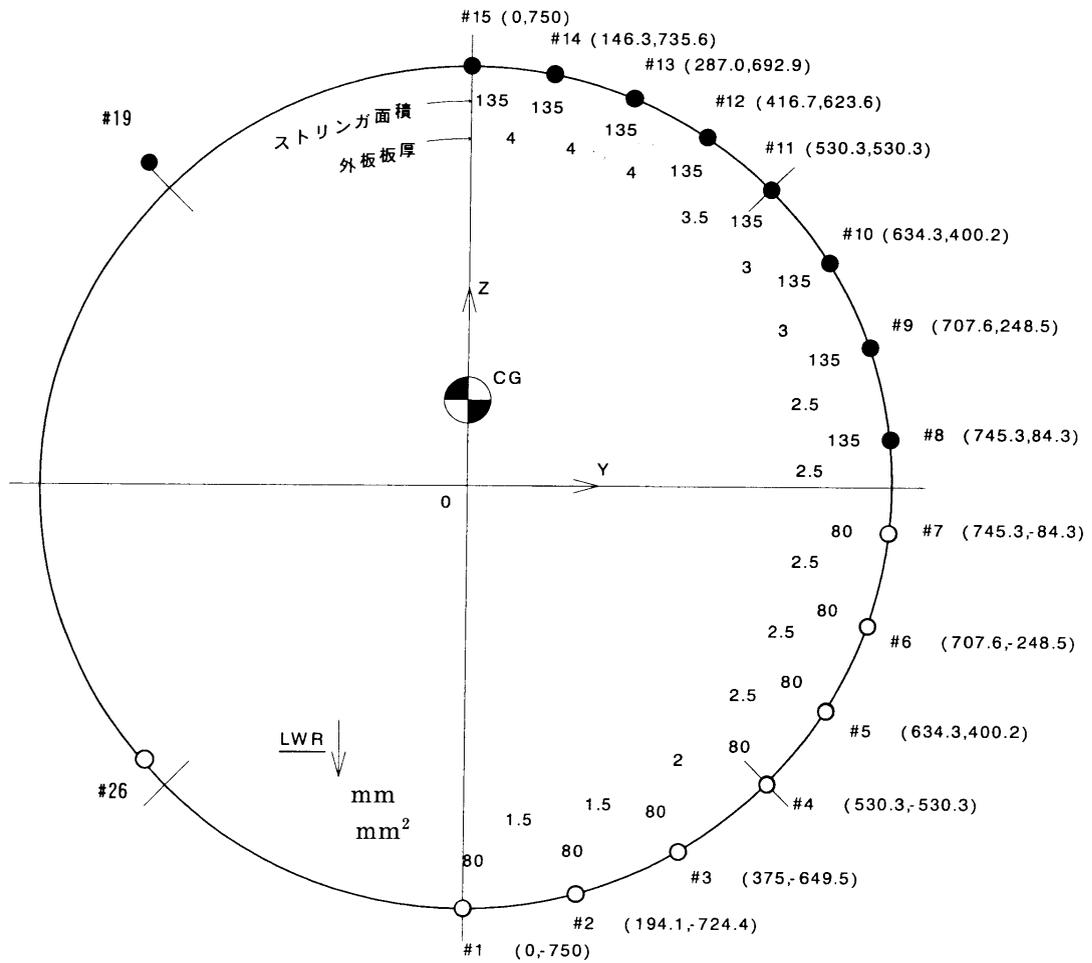
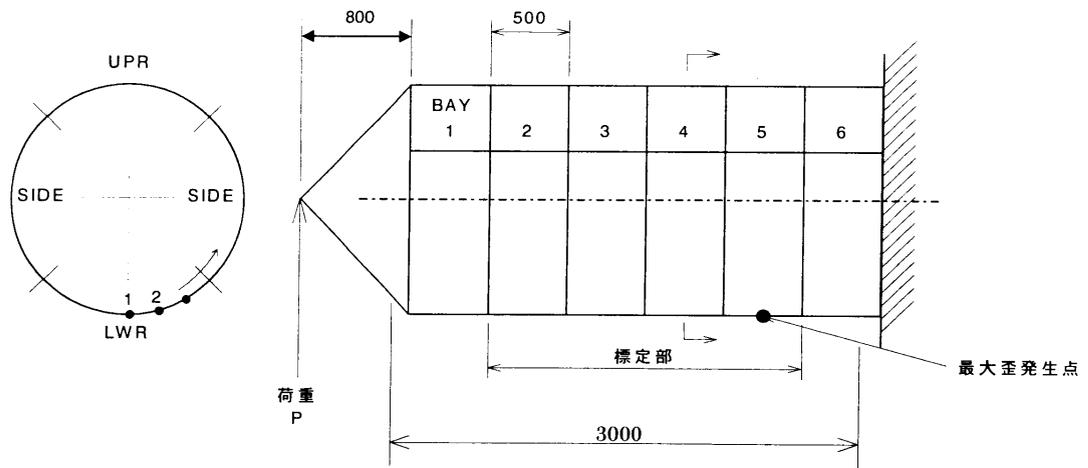


図 3-3 ストリガ-配置及び板厚分布

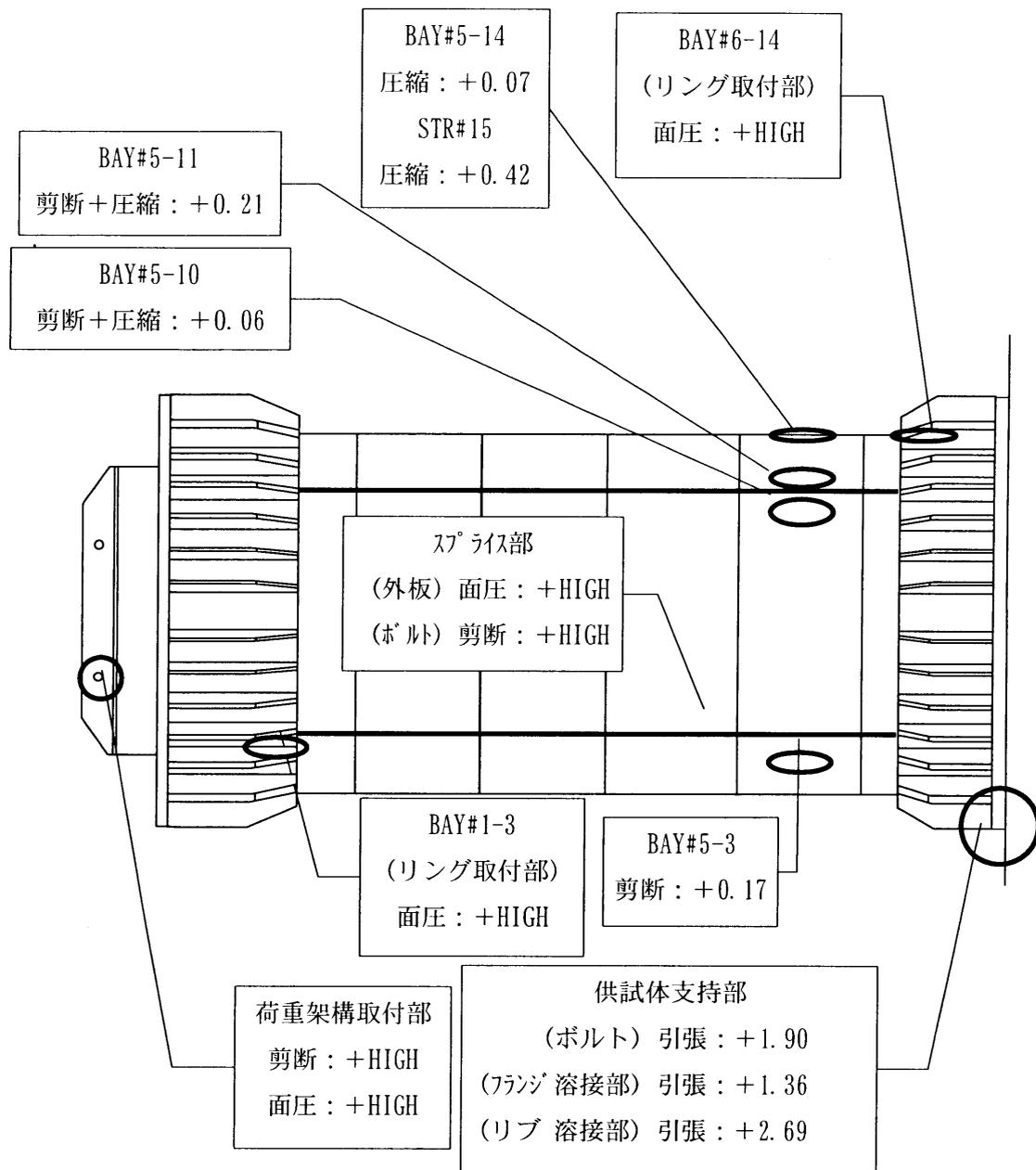


図 3-4 強度計算結果 M.S 一覧

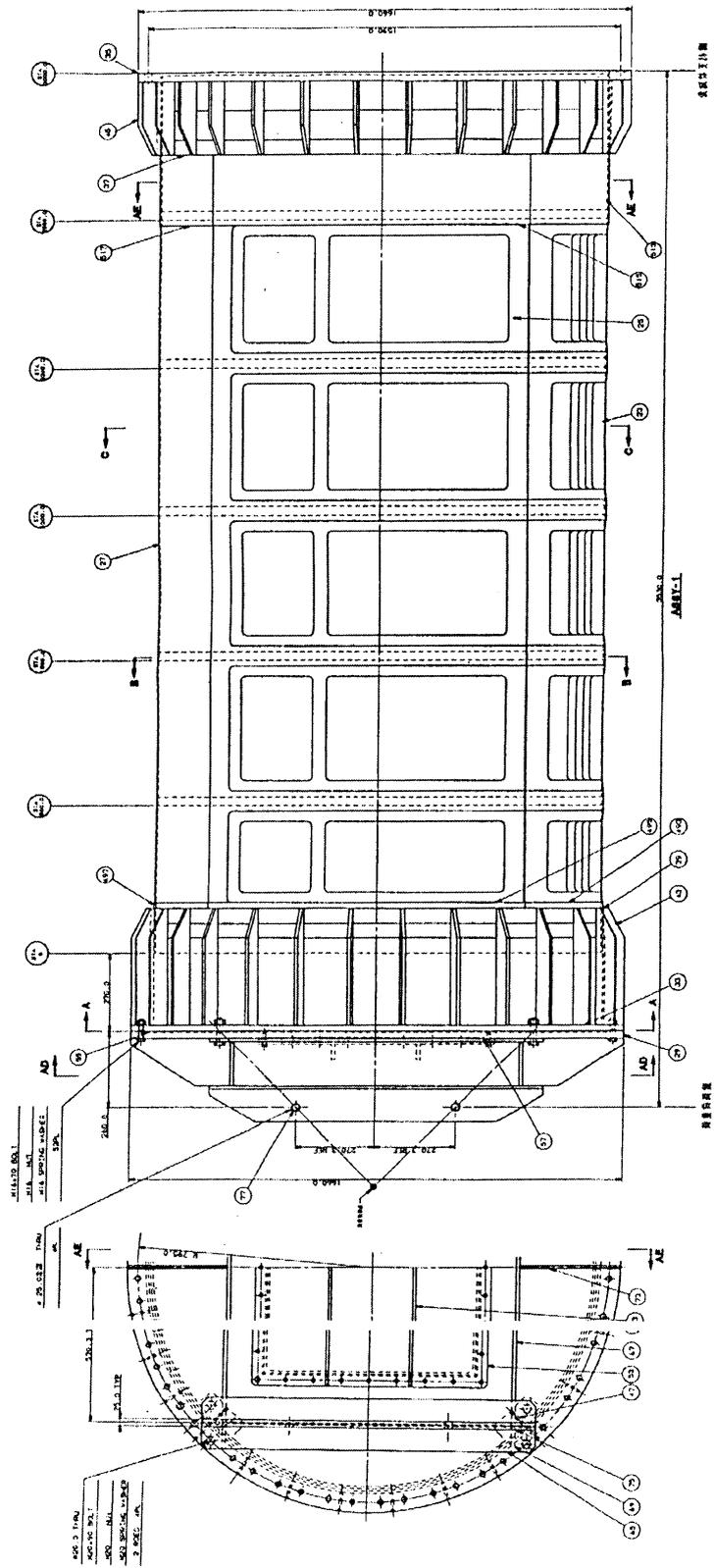


图 3-5 供試体图

(2) 試験装置概要図の作成

(a) 要求条件等

(ア) 試験内容 (検証技術テーマ)

(1) 複合材料埋め込み光ファイバーセンサーによる衝撃損傷探知 (KH I)

【注】衝撃損傷は上方より衝突物を落下させる。また、圧縮荷重を負荷する。

(2) 統合AEセンサーネットワークによる実用衝撃負荷の同定 (エアロパシアル・マトラ)

(3) 分布型BOTDRセンサーによる広域歪分布計測 (MH I)

(4) スマートパッチの開発 (東レ)

(5) 形状記憶合金線・箔を用いた損傷進展制御 (FH I)

【注】引張荷重を負荷する。

(6) 突発破壊防止形状記憶繊維強化型スマートコンポジット (東北大学)

【注】光弾性皮膜法による試験を含む。

(イ) 寸度条件

(1) 供試体外形寸度:

直径 (1,500mm) x 長さ (3,000mm)

(2) 平板パネル供試体外形寸度:

500mm x 500mm

(3) 供試体両端の支持リング厚:

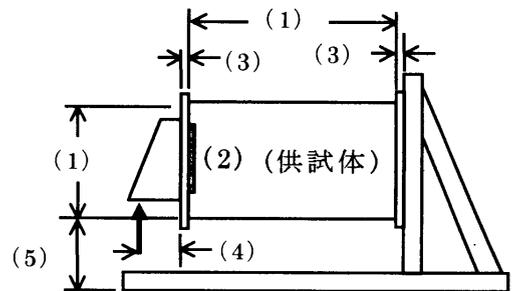
300mm (両方で)

(4) 荷重負荷点:

供試体端部から 500mm 離れた位置

(5) 供試体下面の地上高:

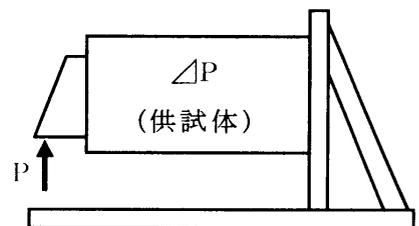
最低 1,200mm (点検・作業性から)



(ウ) 試験実施条件

(1) 剪断力 :  $P = 36 \text{ ton}$

(2) 与圧荷重:  $\Delta P = 0.75 \text{ kgf/cm}^2$



(b) 作成図面等

(a)項要求条件等にもとづいて試験（負荷）装置、試験（架構）装置、作業・点検台、点検扉、防護壁、油圧負荷装置、与圧負荷装置、試験装置のレイアウト、安全性、強度等を検討し試験装置概要図を作成した。作成した図面の一覧表を以下に示す。

表 3-2 デモンストレータ試験装置概要図面一覧

No	概要図名称	内容概略
1	デモンストレータ試験装置 総組立 3 面図	
2	正面図	総組立 3 面図から正面図のみを拡大したもの
3	側面図	総組立 3 面図から側面図のみを拡大したもの
4	上面図	総組立 3 面図から上面図のみを拡大したもの
5	(側面図の) V I E W A - A	剪断力負荷装置の概要
6	(側面図の) V I E W B - B	供試体支持面板構造の概要
7	(上面図の) V I E W C - C	バランスウェイトの懸吊概要他
8	(V I E W A - A の) V I E W D - D	ジャッキ取り付け時の仮支持部材の概要
9	(V I E W A - A の) D E T A I L E	負荷用治具の概要
10	(V I E W A - A の) D E T A I L G	横方向変位拘束要領の概要
11	(V I E W B - B の) D E T A I L H	点検扉の取付け要領
12	- 1 取付金具	負荷用ジャッキを取付ける面板上の金具の詳細
13	- 2 点検扉	点検扉構造の詳細
14	ウレタン積載状態および点検扉取出し要領	
15	試験装置レイアウト図	試験場必要スペースの概要

デモンストレータ試験装置 総組立 3 面図を次ページに示す。

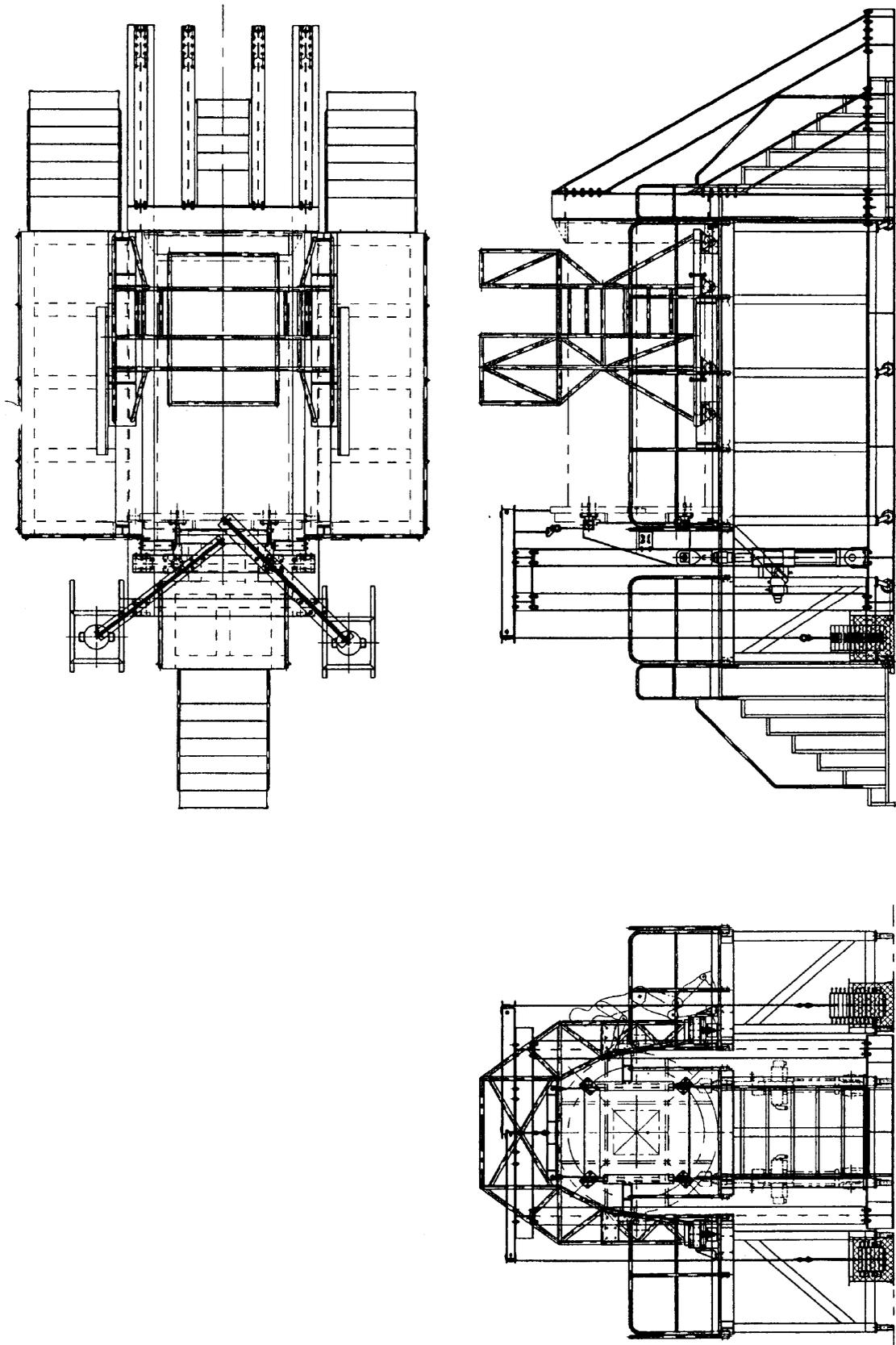


図 3-6 デモンストレーター試験装置 総組立3面図

### (3) デモ用ディスプレイ装置

ここでは、各技術テーマの中で計測される歪計測データ、およびそれ以外の共有データとして計測される以下の計測対象データのディスプレイ装置について検討する。

- 各技術テーマの中で計測される分・動歪データ (20CH) : 損傷進展制御 (FHI)
- 共有計測分
  - ・静歪データ (約 300 CH)
  - ・動歪データ (約 20 CH)
  - ・変位データ (約 20 CH)

以上より、歪計測データ数量の合計は次のようになる。

- ・静歪データ (約 300 CH) ・動歪データ (約 40 CH) ・変位データ (約 20 CH)

#### (a) 静歪モニター用ディスプレイ装置

##### (ア) 必要器材

- ・歪ゲージ (複合材用 : 5 m リード線付)
- ・歪ゲージ端子集合板 (新規設計・製作品)
- ・スキャナ (50 CH×6 台 = 300 CH)
- ・データロガー (500 CH 用)
- ・GP-1B / RS-232C コンバータ (歪計測用インターフェイスボード) および接続ケーブル
- ・モニター画面制御ソフトウェア
- ・パソコン (CPU : 500 MHz 以上)
- ・ディスプレイ
- ・プリンター (カラー出力できるものが望ましい)

##### (イ) モニター項目

モニター用ディスプレイは、「モニター画面制御ソフトウェア」を搭載することにより、画面上の表示ボタンで以下の状況のモニターができるようになる。

- ①各ゲージによる歪の生データおよび応力換算値を表示する。
- ②①の任意のゲージ番号を選択したら、グラフが表示される。
- ③①の任意のゲージ番号を選択したら、貼付位置 (図 : 座標) 表示される。
- ④最大歪 (引張 / 圧縮応力) ゲージ (モニター対象) を自動表示する。
- ⑤④の材料の許容値に対する余裕値を表示する。
- ⑥主応力分布図を表示する。
- ⑦剪断応力分布図を表示する。

#### (b) 動歪モニター用ディスプレイ装置

##### (ア) 必要器材

- ・歪ゲージ (複合材用 : 5 m リード線付)

- ・歪ゲージ用ナンバリングタグ
- ・歪ゲージ端子集合板（静歪ゲージ用を共用する）
- ・ブリッジBOX（8 CH×5台 = 40 CH）
- ・動歪測定器（40 CH：8 CH用ラック×5個）
- ・動歪測定器ラック収納ケース（新規製作品）
- ・A-D変換器（ADC型：48 CH）
- ・パソコン（CPU：500 MHz以上）
- ・モニター画面制御ソフトウェア
- ・ディスプレイ（20インチ画面以上のものが望ましい）
- ・プリンター（静歪ゲージ用を共用する）

（イ）モニター項目

モニター用ディスプレイは、「モニター画面制御ソフトウェア」を搭載することにより、画面上の表示ボタンで以下の状況のモニターができるようにする。

- ①繰返し荷重の波形を表示する。
- ②任意歪ゲージの出力波形を表示する。
- ③負荷回数およびスピード（Hz）を表示する。
- ④①の最大／最小値を表示する。
- ⑤②の最大／最小値を表示する。

（c）変位モニター用ディスプレイ装置

（ア）必要器材

- ・ポテンショメータ（ワイヤ式変位変換器：0～100 mm用）
- ・スキャナ（50 CH×1台：静歪計測用と同一品）
- ・モニター画面制御ソフトウェア
- ・ディスプレイ（静歪計測用を共用する）
- ・プリンター（静歪計測用を共用する）

（イ）モニター項目

モニター用ディスプレイは、「モニター画面制御ソフトウェア」を搭載することにより、静歪計測モニター用のディスプレイ上で選択ボタンにより表示されるようにする。

- ①各ポテンショメータの出力（変位）を表示する
- ②①の任意のポテンショメータ番号を選択したら、変位およびグラフが表示される
- ③①の任意のゲージ番号を選択したら、計測位置（図：座標）表示される
- ④最大変位ポテンショメータ（モニター対象）を自動表示する
- ⑤変位分布図を表示する

#### (4) 評価法検討

航空機胴体デモンストレータ試験において評価法に対する検討を行った結果を以下にまとめる。

##### (a) 技術検証テーマ

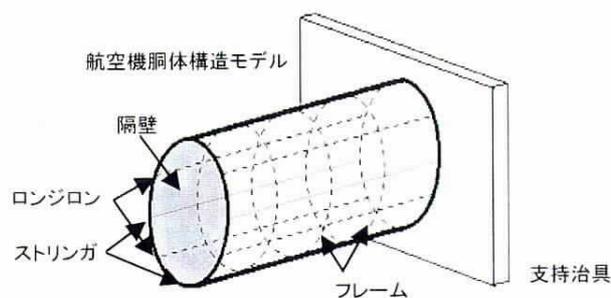
航空機胴体デモンストレータ試験で評価する技術テーマを、技術的内容から3つの大きなカテゴリ、すなわち「衝撃リアルタイム検知」、「構造損傷探知」および「損傷進展制御」に分類した。さらに供試体設計/製作に与えるスケジュール的インパクト、試験負荷方法設定に対する技術的問題等を考慮し6つの個別テーマを設定し評価法の検討を行った。表 3.3 に、設定した6つの個別テーマの提案内容を一覧として示す。これら6つのテーマはいずれも航空機胴体デモンストレータ試験で評価することが確定的であり、また現時点から検討を重ねて行かないとH14年度のデモンストレータ試験に間に合わないテーマでもある。デモンストレータ試験では他にいくつかの技術テーマの提案がなされているが、その採否についてはまだ討議がなされている段階である。しかしながら、それらは後付型のセンサ/アクチュエータであったり取り替え可能な隔壁部を使用して評価できること等から、本項で検討した検証部位、計測、検査、試験の各項目に対し大きな影響を及ぼさないと考え、最終決定がなされてから新たに検討を加えることで十分対応が可能と判断した。

##### (b) 個別技術テーマ検証部位

図 3.7 に航空機胴体構造供試体における各個別テーマ毎の技術検証部位(案)を示す。No.①～⑥は表 3.3 に記した個別テーマに該当する(以下同様)。①及び②については衝撃を与える装置の設置条件から、③については構造全体をヘルスマニタリングする目的から、また⑤については試験評価時に必要となるひずみ量の要求より、それぞれ検証部位を設定した。⑥に関しては破壊の危険

表 3.3 航空機胴体デモンストレータ試験検証技術テーマ

No.	大分類	個別テーマ	担当	提案概要/目的	センサ/アクチュエータ	取付形態
①	衝撃リアルタイム検知	複合材料埋め込み光ファイバセンサによる衝撃損傷探知	KHI (日立電線)	複合材構造の中に埋め込んだ細径光ファイバをセンサにより、衝撃損傷の発生時期・場所・大きさを特定する。	光ファイバセンサ (細径:50μm)	埋め込み
②		統合化AEセンサネットワークによる実用衝撃負荷の同定	Aerospatiale	アコースティックエミッション・センサにより、衝撃の発生時期・場所・大きさを特定する。位置探査精度は1cm未満を目標とする。	AEセンサ	外付け
③	構造損傷探知	分布型BOTDRセンサ広域歪分布測定	MHI	光ファイバ・センサにより、広範囲の歪み分布を計測し、複合材構造のクラック、大変形等の損傷検知を行う。	光ファイバセンサ (通信用直径1mm程度)	外付け (一部埋め込み)
④		スマートパッチの開発	東レ	スマートパッチに使用するファイバのコーティング、表面処理を変更し、負荷歪みの最大値を検出する。	スマートパッチ (導電CFと高伸度GFのハイブリッド)	外付け
⑤	損傷進展制御	形状記憶合金線・箔を用いた損傷進展制御	FHI	複合材構造に埋め込んだ形状記憶合金(SMA)により、一旦発生したデラミネーションの進展を遅らせる。モードIIが対象。	SAM箔状センサ/ アクチュエータ	埋め込み
⑥		突発破壊防止形状記憶繊維強化型スマートコンジット	東北大学 (古屋教授)	構造埋め込みSMAで亀裂進展を抑える。本プロジェクトでの開発SMAを使用する。	SAM7アクチュエータ	外付け



No.	航空機胴体適用部位(案)	No.	航空機胴体適用部位(案)	No.	航空機胴体適用部位(案)
①	 胴体上面	③	 ロンジロン、ストリンガ、フレーム	⑤	 胴体下面
②	 胴体側面	④	 隔壁および胴体側面	⑥	 隔壁

図 3.7 航空機胴体デモンストレータ試験個別技術テーマ検証部位

性が伴うため構造的に与圧以外の強度を負担しない隔壁部とした。④は特に大きな発生ひずみを必要としないこととセンサが外付けであることから、残ったエリアを割りあてた。本案にて航空機胴体供試体のすべての部位を各技術テーマで評価することが可能となった。

#### (c) 計測

各個別テーマにおいては、評価する対象、手法、部位等がそれぞれ異なるため、各テーマ毎に独自の計測を実施する必要がある。表 3.4 に6つの個別テーマ毎にまとめた計測内容の概要を示す。計測時の負荷状態や計測時間が各テーマで異なるため、負荷や計測の順序や速度等をよく検討し個々の評価テーマの成立性を十分考慮しておく必要がある。また、すべてのテーマの計測システムを合わせると、占有スペースや必要電力等の規模が大きくなるため、試験場所、設備、計測室のレイアウト、装置の共有化等の計画が重要となる。電気式ゲージによるひずみ値の計測や供試体の変位計測など共通する計測項目については、試験全体として効率化が図れるよう検討することが必要である。

#### (d) 検査

表 3.5 に検査に関する要求事項を各個別技術テーマ毎に示す。検査手法としては超音波探傷と目視が主である。超音波探傷装置は個別テーマ①、②、③及び④の検査で共通化することにより効率化が図れる。X線探傷検査は現場で使用するには安全上の注意が必要である。また個別テーマ毎に検査する領域や検査の質、それに伴う検査時間が異なるため、検査の時期や頻度に関して事前に綿密な計画を立てておく必要がある。さらに個別テーマ④では試験後に供試体を切り出しての精検が必要で

あるが、その実現可能性と他の代替検査法の有無について今後検討を行う必要がある。

(e) 試験・評価

試験における負荷方法、負荷順序、検査時期等の計画は、計測と同様にすべての評価が可能となるよう十分な検討を加えて立案する必要がある。図 3.8 に試験の流れに対する現状での計画案を示す。試験の順序は、まず個別テーマ①及び②についてキャリブレーションを兼ねた低レベルでの衝撃

表 3.4 航空機デモンストレータ試験計測内容一覧

No.	計測対象	負荷状態	計測時間	計測期間	計測器概要
①	・光損失 ・ひずみ	・面外方向の衝撃負荷(動的) ・常時(繰り返し与圧負荷を含む)	・0.1~1秒	・動的負荷中およびその前後常時 ・静的負荷中 ・繰り返し荷重負荷中	・光源、光マルチメータ、データ解析装置、FBGセンサシステム、データ解析装置 ・占有スペース:デスクトップPC4台程度 ・電源:AC100V
②	・アコースティックエミッション(損傷:クラック、デラミ等)	・面外方向の衝撃負荷(動的) ・常時(繰り返し与圧負荷を含む)	・リアルタイム	・動的負荷中およびその前後常時 ・静的負荷中 ・繰り返し荷重負荷中	・AE計測装置、PC ・占有スペース:1500mm×1000mm(最低) ・電源:AC110V/220V
③	・ひずみ分布	・主として静的負荷 ・繰り返し荷重負荷時にも計測	・10-30分/データ	・静的負荷時 ・繰り返し荷重負荷時	・BOTDR計測器、FBG計測器、PC2台、専用電源 ・占有スペース:500×1500×500mm ・電源:AC100V
④	・ひずみ	・静的	・5分	・静的負荷時:除荷後	・占有スペース:1000×3000mm ・電源:100V
⑤	・損傷(トランスバースクラック及びデラミ)	・繰り返し荷重負荷、損傷確認は、静的で可。	・5分~10分を想定	・定サイクル毎(ex.100サイクル)に測定、負荷状態は静的、繰り返し荷重ともに可	・A/D変換可能な動ひずみ計:(20ch) ・安定化電源:1台、P/C:2台 ・ひずみゲージ用ブリッジBOX:20個 ・超音波装置(各社と共用):1台 ・X線計測装置:1台
⑥	・ひずみ変化(歪ゲージor圧電センサ) ・切欠き先端部応力集中度合い	・内圧による準静的増加(+荷重が主体(ただし、時に低周波動的繰り返し加圧サイクル荷重も想定)	・1~2分	・準静的負荷中ずっと連続的観察	・電気抵抗歪計システム(占有面積:300mm×300mm) ・圧電AEセンサシステム(:500mm×500mm) ・SMAへの直接通電加熱用電源(:500mm×500mm)(商用電流、100V,20A) ・光弾性応力解析システム一式(:1000mm×1000mm)(白色光源用電源(100V,10A)) ・PCシステム2台(:1000mm×1000mm) ・画像拡大スクリーン(:1000mm×1000mm)

表 3.5 航空機胴体デモンストレータ試験検査内容一覧

No.	検査手法	検査の時期/頻度	検査に要する時間	供試体特別処置
1	・超音波探傷(Cスキャン) ・目視	・動的負荷後 ・計測対象の異常発生後	・約5~15分(目視)	・供試体の切り出し
2	・超音波探傷(Cスキャン) ・目視	・衝撃荷重負荷後 ・静的荷重負荷後 ・繰り返し荷重負荷途中	・15分	・特になし
3	・超音波探傷(Cスキャン) ・目視	・静的負荷除荷後 ・繰り返し荷重負荷途中	・30~60分(センサ設置長さに依存)	・特になし
4	・断面観察	・除荷後	・1週間	・切り出し必要 ・持ち帰り必要
5	・超音波探傷(Cスキャン) ・X線探傷	・定サイクル(ex.100サイクル)毎の定期検査要	・約10分程度	・特になし。
6	・電気抵抗歪ゲージ(及びAE圧電センサを併用も検討)	・準静的加圧負荷中の数(5~6)段階	・約2~3分	・隔壁板(SMAコンポジット、Max. 1mx1m、厚さ6mm)なので取り外し可能。

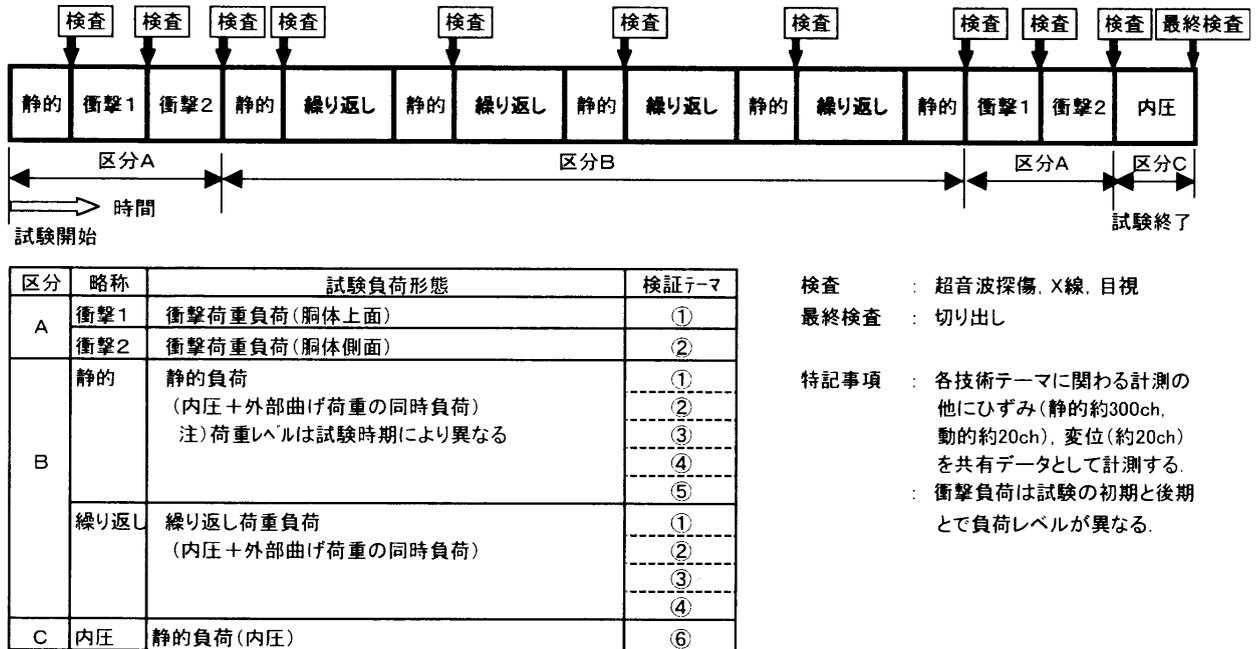


図 3.8 航空機胴体デモンストレータ試験の流れ (案)

荷重負荷を与える。その後、個別テーマ①～④で評価するための繰り返し負荷（内圧と外部曲げ荷重の同時負荷）を与える。次に高レベルの衝撃荷重を負荷し①，②の評価に供した後，最後は個別テーマ⑥を評価する。静的な負荷は，衝撃荷重及び繰り返し負荷の前後にストレインサーベイを兼ねて実施する。またその間に計10回の各計測領域を中心とした目視，超音波探傷，およびX線による検査を行う。さらに試験終了後には供試体の切り出しを含んだ最終精検を行う。

(f) 今後の課題

以上の検討結果は現状で明らかな条件をもとに設定したものであり，今後供試体，負荷方法，各計測方法等の詳細が明確になるに従い調整や変更が必要になる。H12年度での「デモンストレータ試験評価法検討作業」において実施すべき検討課題を以下に示す。

- (ア) 試験
  - ・試験形態の詳細決定（負荷方法，荷重値等）
  - ・試験手順の確立（順序，時間配分等）
- (イ) 計測／検査
  - ・計測装置／設備の詳細計画（含む試験レイアウト）
  - ・検査手法／手順の確立
  - ・各評価テーマ共通計測内容（ひずみ，変位等）の詳細決定
- (ウ) その他
  - ・他の評価テーマの盛り込み
  - ・費用の詳細見積

H12年度には，これらの課題を考慮しつつ，今年度検討した内容をベースに航空機胴体デモンストレータ試験における評価法の詳細計画を立案する。

### 1.1.2.3 宇宙用柔軟構造物

#### (1) 目的・目標

宇宙用柔軟構造物の分布系センサ・アクチュエータによる振動制御・準静的形状制御を目標とする。これを実現して評価するために、図 3.9 に示すような構造物の製作を検討している。この構造物では、梁（リブ）を用いた骨組み構造を支持構造とし、そこにメッシュを張って形成した面要素でアンテナ反射面を模擬した面を構成する。骨組み構造上に、センサ、アクチュエータを配置し、面の形状を、外乱の有無によらず最適に維持できる事をデモンストレーションする。このための概念設計と、アクチュエータの基礎実験を行なった。

#### (2) アクチュエータの検討

6本のリブ(梁)とアンテナ材であるメッシュからなる宇宙用アンテナ模擬構造物の概念設計をほぼ完了した。アクチュエータとして、(1)圧電セラミックスフィルム、(2)積層形圧電素子を検討し、圧電セラミックスフィルムを用いることが可能ながわかった。

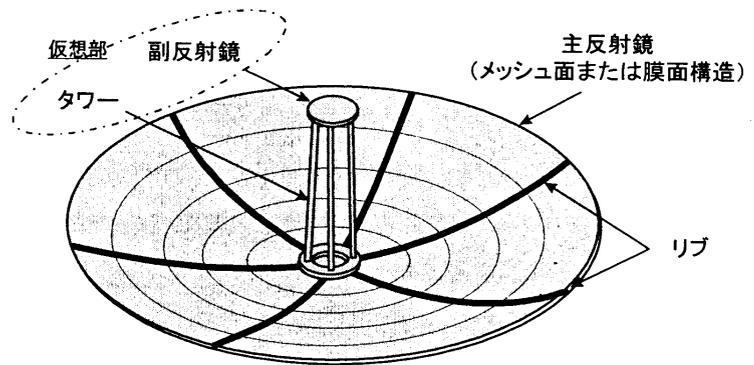


図 3.9 宇宙用柔軟構造物の概念図

#### (3) アクチュエータの構成

piezoceramic film actuators are attached to the ribs in the case of the structure shown in Fig. 3.10. The piezoceramic film is about 140mm long, so it is attached to the 1m rib in several pieces. However, it is difficult to give the ribs a curvature, which is a problem.

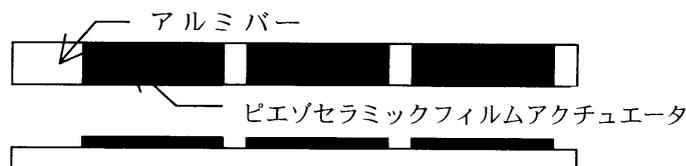


図 3.10. アクチュエータの構成

#### (4) アクチュエータによる変形量の計算と実験

厚さ 2 mm のアルミ梁の表面全体に厚さ 0.3mm の圧電セラミックス C-82 材 (富士セラ

ミックス製)を接着し、電圧をかけた場合の梁変形の理論解析を行ない、長さ1mの場合に先端で10mm、長さ50cmで3mm程度たわむことが分かった。これを踏まえ、圧電セラミックスフィルムを貼り付けた長さ約50cmおよび1mの梁を製作し、実験によって

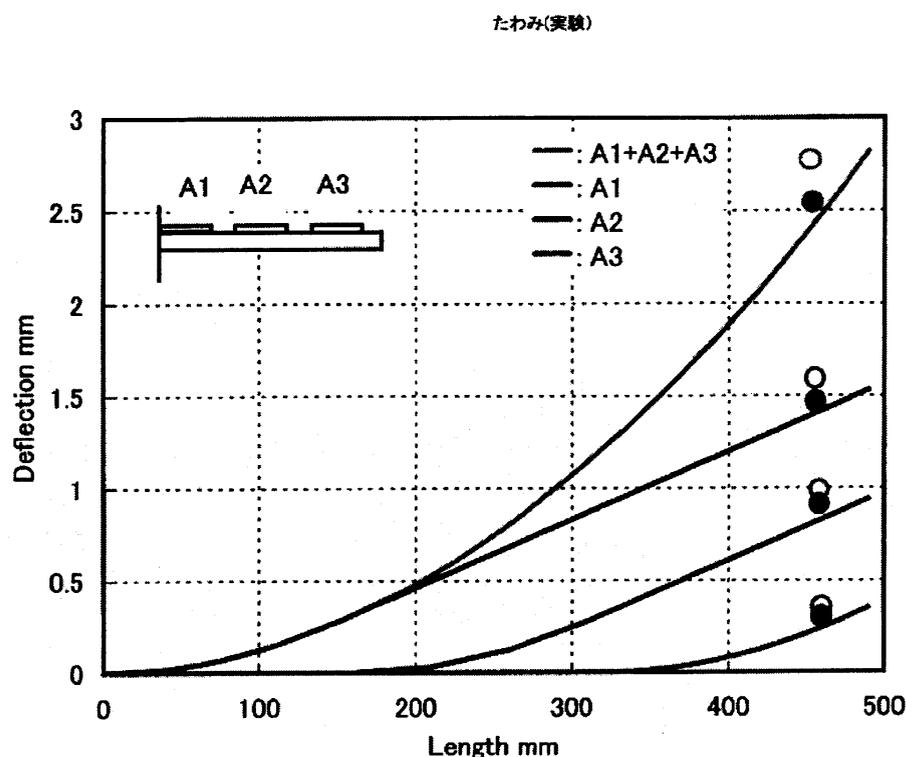


図 3.11 セラミックスシートによるアルミ梁のたわみ ( $t_1=0.3\text{mm}$ ,  $t_2=2\text{mm}$ ,  $V=105\text{V}$ )

検証した。計算および実験結果を図 3.11 に示す。図中の曲線は計算結果で、丸印は実験結果である。

#### (5) リブの自重による変形量

リブの自重による変形量、および、アクチュエータによる変形量の観点から、検討した。上記の梁(長さ1m、厚さ2mm)は地上実験の場合、重力で約140mm変形することが理論計算で明らかになり、このときセラミックスに生じる応力は耐力に対して無視できないことが分かった。アクチュエータによる変形量は所望の変形量が得られるが、自重による変形量が大きいため、実験を行なう場合、摩擦の少ない自重補償装置が必要である。

そこで、釣金具装置を用いた重力補償機構の実験装置を製作した。この実験装置の写真を図 3.12 に、構成説明図を図 3.13 に示す。

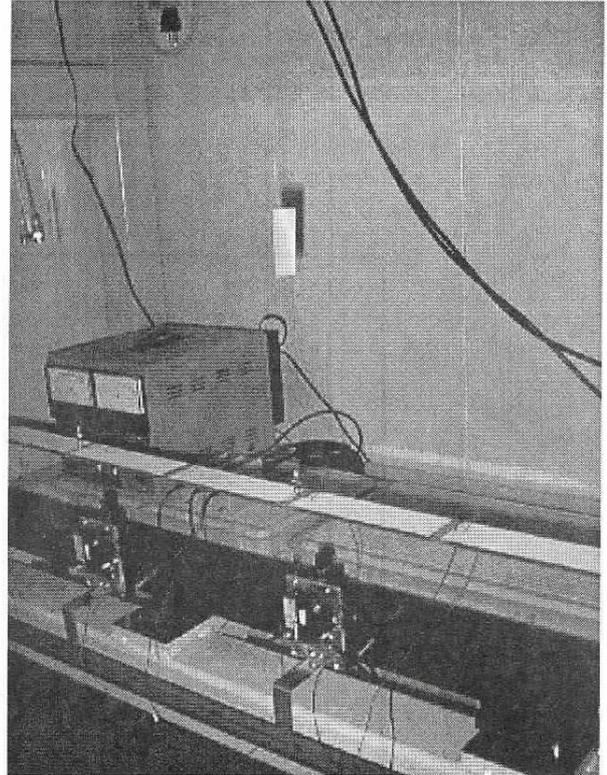
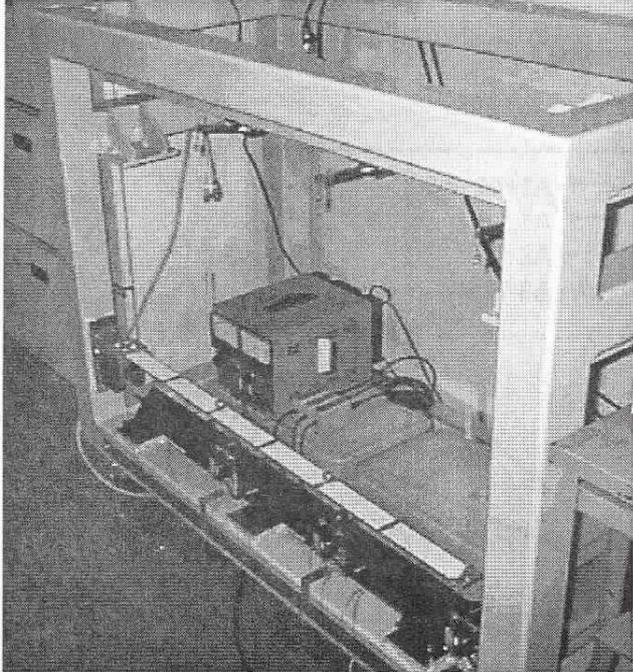


図 3.12. 自重補償装置写真

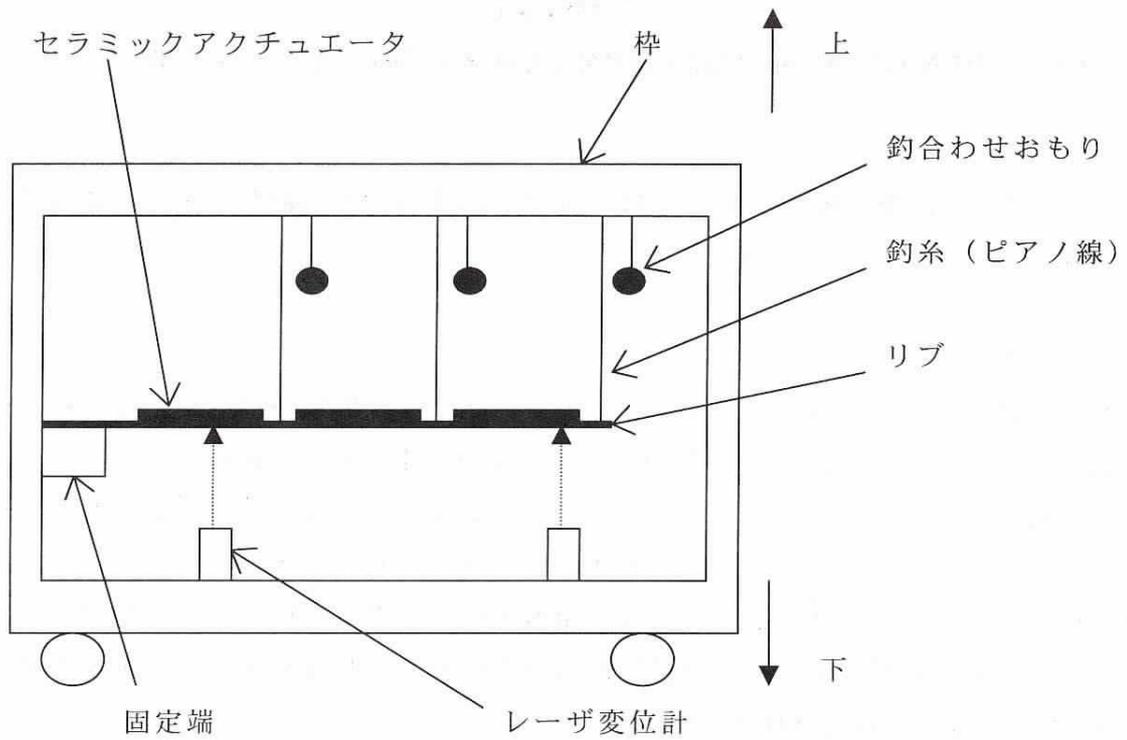


図 3.13 自重補償装置構成説明図

(6) 積層アクチュエータを使う場合の構成

また、バックアップとして、積層 piezo アクチュエータをリブに取り付ける場合も検討した。積層 piezo アクチュエータは曲げによって破壊する恐れがあるので、アクチュエータ端面とリブとの取り付けはフレキシブルに動ける必要があり、ヒンジ構造とした図 3.14 の構造を検討した。

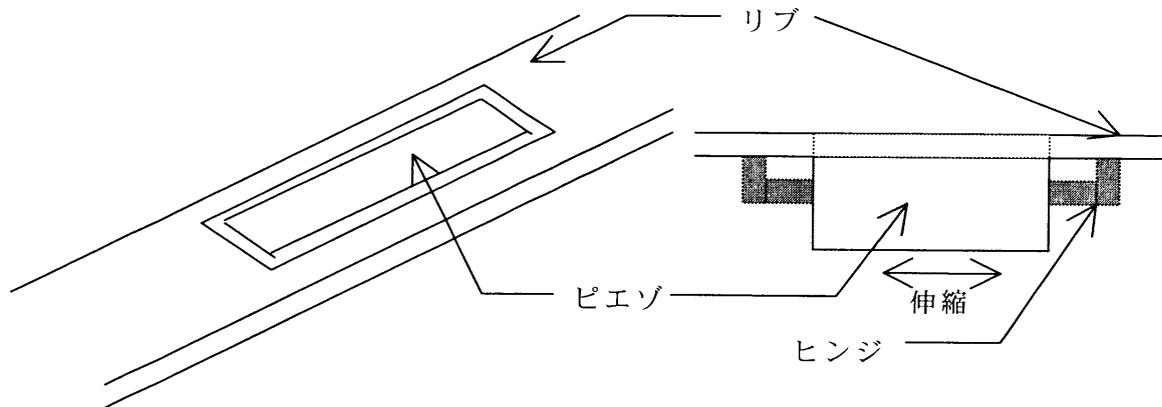


図 3.14 積層 piezo アクチュエータを使う場合の構造

(7) PVDF センサによる準静的な変形測定の検討

センサとして、高分子圧電フィルム (PVDF) についての検討と簡単な実験を行ない、アンプ構造を工夫することによって、準静的な変形に対しても出力が得られることが明らかになった。ただし、ゼロ点のドリフトがあった。これに対してどう対処するかは今後の課題である。

(8) まとめ

宇宙用柔構造物の分布系センサ・アクチュエータによる振動制御・準静的形状制御を目標とし、この構造の概念設計と、アクチュエータの基礎実験を行なった。

## 1. 1. 2. 4 ジェットエンジン用ファン静翼モデル

### (1) 概要

FRP製品の開発において、形状精度や内部無欠陥状態などの初期欠陥はその成形段階での金型構造、および温度・圧力などの成形条件が及ぼす影響の結果として生じるが、設計・製造要求を満たす成形条件は試行錯誤で検討されているのが現状である。しかしながら、金型構造や成形装置のムダのない最適化、製品開発期間の短縮、それによる低コスト化、成形品の高性能化とその成形条件把握技術の継承が求められており、そのためには基礎的な挙動と実プロセスでの挙動を把握し、詳細なデータに基づく成形条件の系統的な決定手法（スマートマニファクチャリング）の確立が必要不可欠である。本研究では、スマートマニファクチャリング技術のデモンストレータ試験として熱可塑FRPプレス成形を取り上げ、ジェットエンジン静翼に関する研究を行った。

### (2) スマートマニファクチャリングのためのモニタリングデータの検討

熱可塑FRPのプレス成形手順の概略を図3.15に示す。PEEKなどの熱可塑FRPプリプレグを所定の形状に切断し、金型内にセットする。そして、金型をホットプレスに設置して加熱・加圧・冷却し、プリプレグが溶融一体化した製品が完成する。

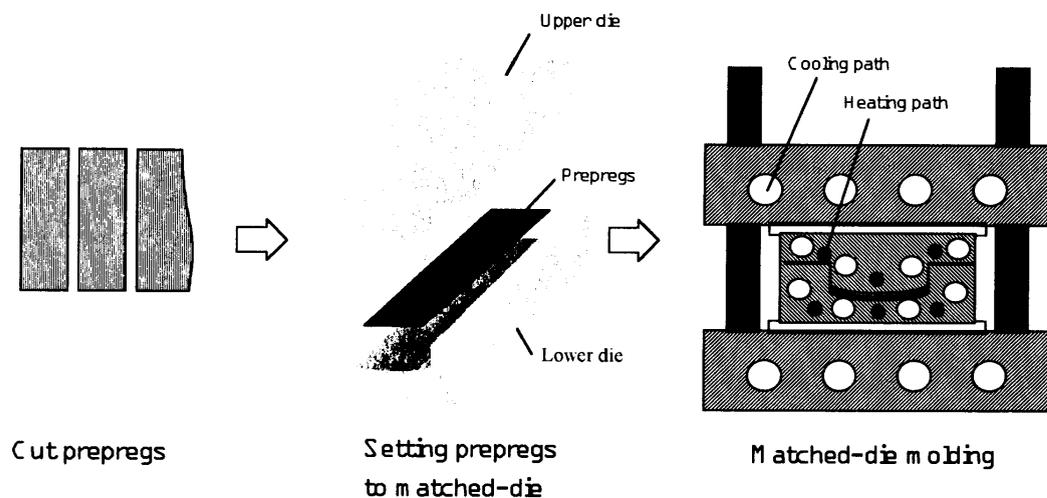


図 3.15 熱可塑FRPのプレス成形手順

製品の形状精度や品質を決定する主な成形パラメータは温度と圧力であり、一連の成形プロセスにおいて、金型内部のプリプレグは図3.16の様に変化していると考えられる。すなわち、金型温度の上昇とともにプリプレグどうしは接触しはじめ、樹脂の溶融、一体化、固化が連続して行われる。樹脂の体積増加・減少、粘度変化、流れ、および樹脂流れによる繊維の移動などの変化も常に生じており、これらの変化を予測して適切にコントロールすることがスマートマニファクチャリング技術である。特に、静翼のように三次元曲面で板厚分布がある製品形状の場合は、製品の場所によって温度・圧力も異なり、粘度や体積などの樹脂物性にも分布が生じている。さらに、重ね合わせる層によ

ってプリプレグを様々な形状に切断されているので、樹脂流れやそれによる繊維の移動、硬化収縮の影響なども金型内の場所によって異なり、単純に一箇所の温度や圧力だけではコントロールし切れない複雑さを本質的に有している。

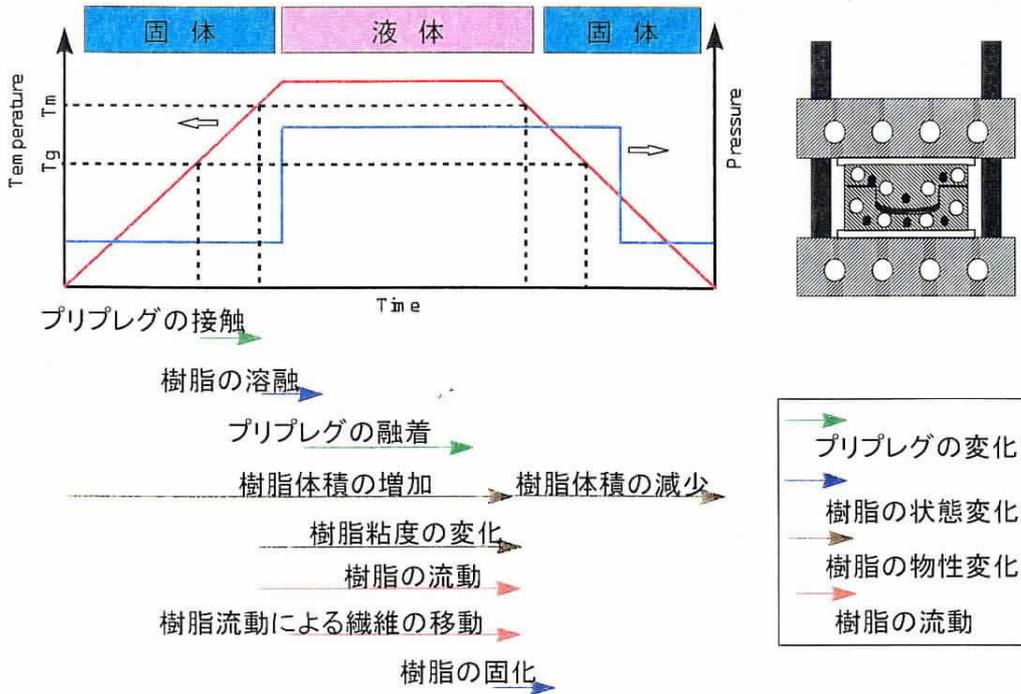


図 3.16 熱可塑 FRP プレス成形のプロセスチャート

スマートマニュファクチャリング Gr の研究では、熱可塑 FRP プレス成形の研究として誘電率センサと光ファイバセンサの金型内モニタリング手法としての有効性が示されたので、本研究でも両センサを採用し、圧力-比容積-温度 (p-v-t) データと併せて図 1.1.2.4-2 に示した金型内部変化を把握して制御することをターゲットとする。金型内モニタリングデータの成形制御への適用イメージを図 3.17 に示す。成形パラメータである温度変化から p-v-t チャートを用いて比容積変化を求めることができる。p-v-t チャートだけでなく、誘電率センサと光ファイバセンサによるモニタリングデータを用いることで、複雑な金型内部の変化の状態を把握することができ、適切な成形条件コントロールが可能になると考えられる。

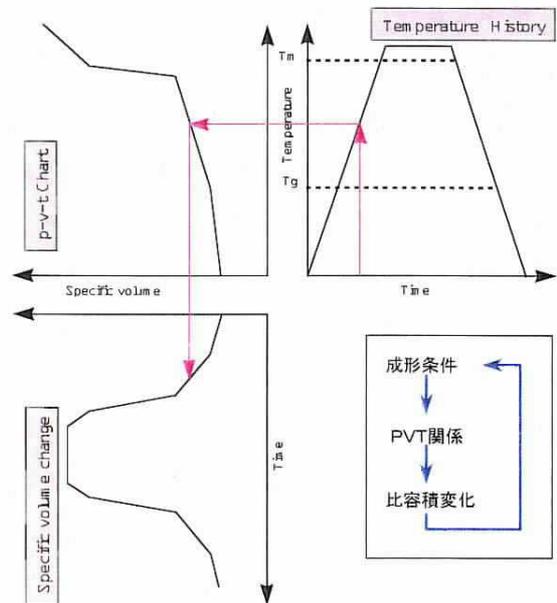


図 3.17 p-v-t チャートを用いたプレス成形制御

### (3) 静翼への知的成形適用手法の検討

既に述べたように、ジェットエンジン静翼は三次元曲面で板厚分布のある形状であり、加えてエンジン性能への要求の高まりからも高い形状精度が要求される、条件だしが極めて困難な FRP 成形品である。また、鳥吸い込み等による衝撃損傷の抑制・把握も FRP 製翼の実現には大きな課題である。これらのニーズを踏まえて、モニタリングデータに基づく知的成形とセンサを用いた衝撃損傷検技術を検討した。

図 3.18 に検討結果を示す。まず、プレス成形のスマートマニュファクチャリングとしては、樹脂物性値とモニタリングデータを用いて温度や圧力などのインプロセス制御を行うことが目標である。翼は軸方向に長いので、中央部と両端の L/E (リーディングエッジ) および T/E (トレーディングエッジ) 部に誘電率センサを配することとする。板厚が一番厚い中央部とあわせて長手方向両端を測定することで翼全体の状態が把握でき、誘電率センサの金型への埋め込みもさほど困難ではないと考えられる。一方、光ファイバセンサについてはプリプレグの層間に挟み込めることが特徴であり、成形途中の樹脂溶融を板厚が一番厚い位置で翼長手方向の両端と中央でモニタすることにする。成形時には樹脂の溶融をモニタした光ファイバセンサは、衝撃損傷モニタセンサとしてヘルスマニタリングに使用する。また、翼表面から光ファイバを引き出すことは空力的にも適切ではないので、L/E および T/E と垂直な端面から引き出すこととする。

### (4) モニタリングセンサ埋め込み試験

前項で述べた誘電率センサと光ファイバセンサを実際の静翼成形に適用するために、センサの埋め込みや引出しを検討し、平板のプレス成形金型を用いた試作と成形試験を行った。

実験装置の構成を図 3.19 に示す。誘電率センサは、測定部が金型内表面に露出してプリプレグと接触するように下側の金型に外側から埋め込んで固定し、ケーブルは金型下面に削り込んだ溝部を通してプレス装置外部まで引き出した。光ファイバセンサは、プリプレグ間に挿入した端面からの反射光強度を観察することで樹脂の溶融状態をモニタする構成となっている。すなわち、光源からのレーザー光は 2×2 光ファイバカップラを通してプリプレグ内に挿入した光ファイバに導かれ、端面からの反射光はカップラの入力側別端での強度により観察する。金型からの光ファイバの引き出し方法は真ちゅう製の円筒形アダプタを製作して金型内側から挿入する構造にした。スマートマニュファクチャリング Gr の一体化成形技術において今後検討される光ファイバコネクタの構造を、真ちゅうアダプタの構造に反映することで、実用的な光ファイバ取り出し口とすることができると考えられる。

誘電率センサと光ファイバセンサを取り付けてプリプレグを置いた状態の金型を図 3.20 に示す。図では GF/PP プリプレグを用いている。光ファイバを引き出す真ちゅう製アダプタは、光ファイバの高さがプリプレグの板厚中央と一致しており、成形圧を負荷しても引き出し部で光ファイバが切断されない構造とした。成形試験の結果、センサ埋め込み部からの樹脂流出等はなく、本手法が実際の金型へも適用できることが明らかとなった。

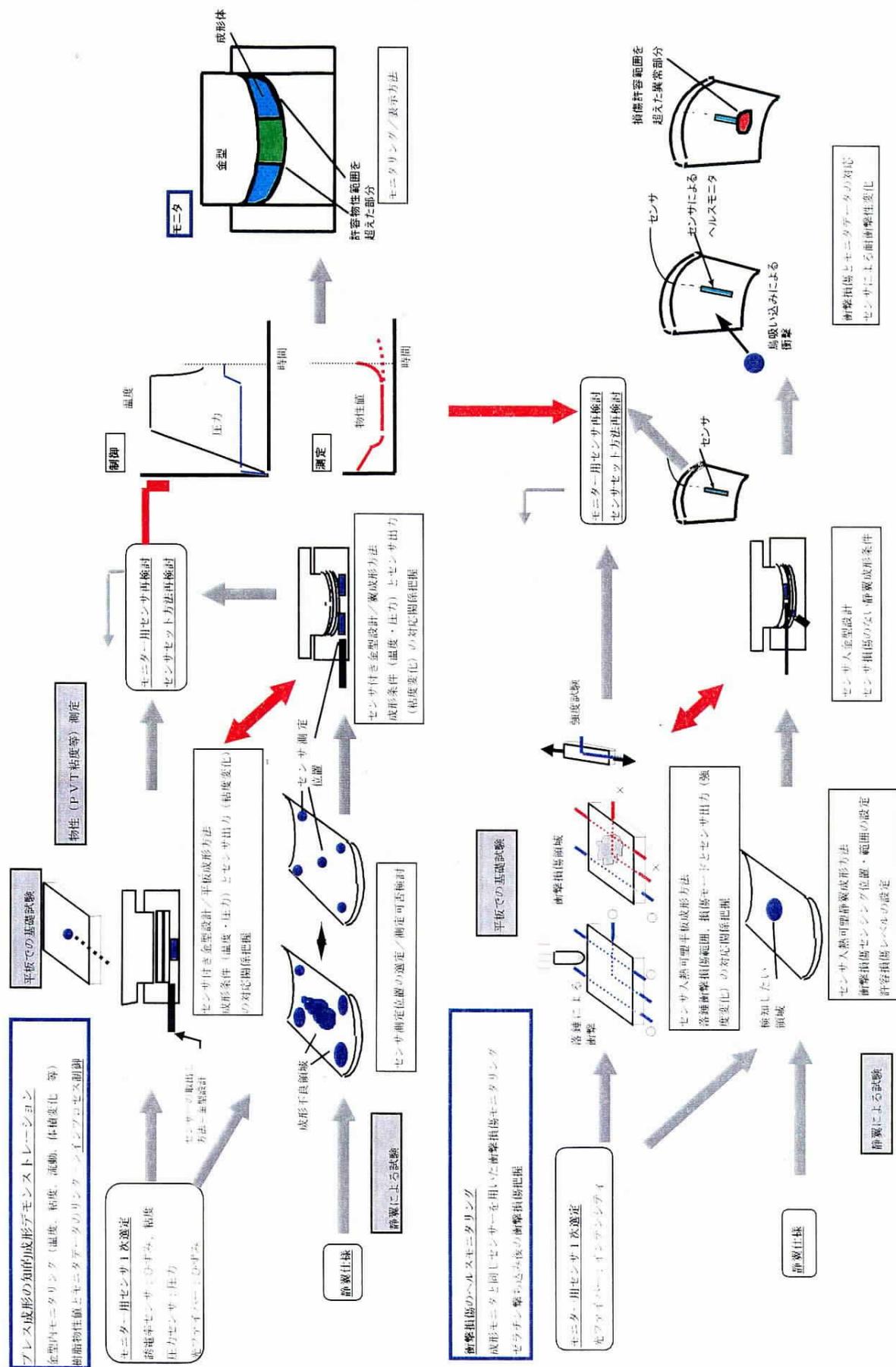


図 3.18 スマートマニファクチャリング技術とヘルスマニタリング技術の静翼への適用の検討

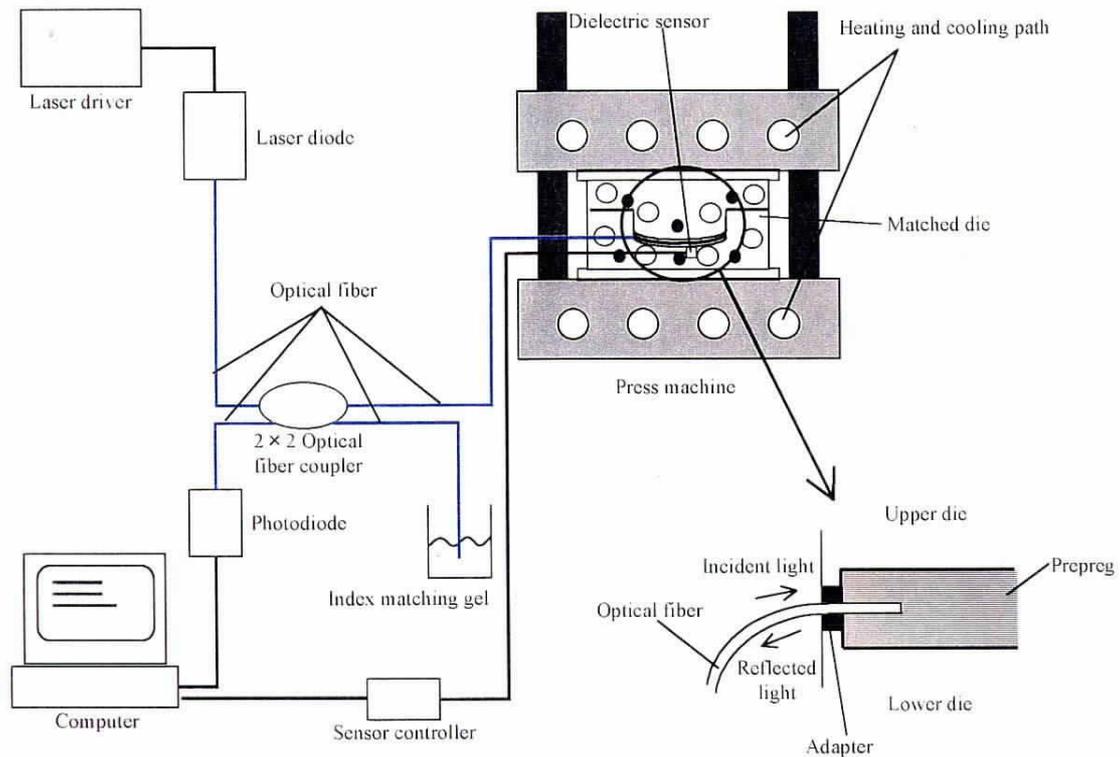


図 3.19 モニタリングセンサ埋め込み試験の装置構成

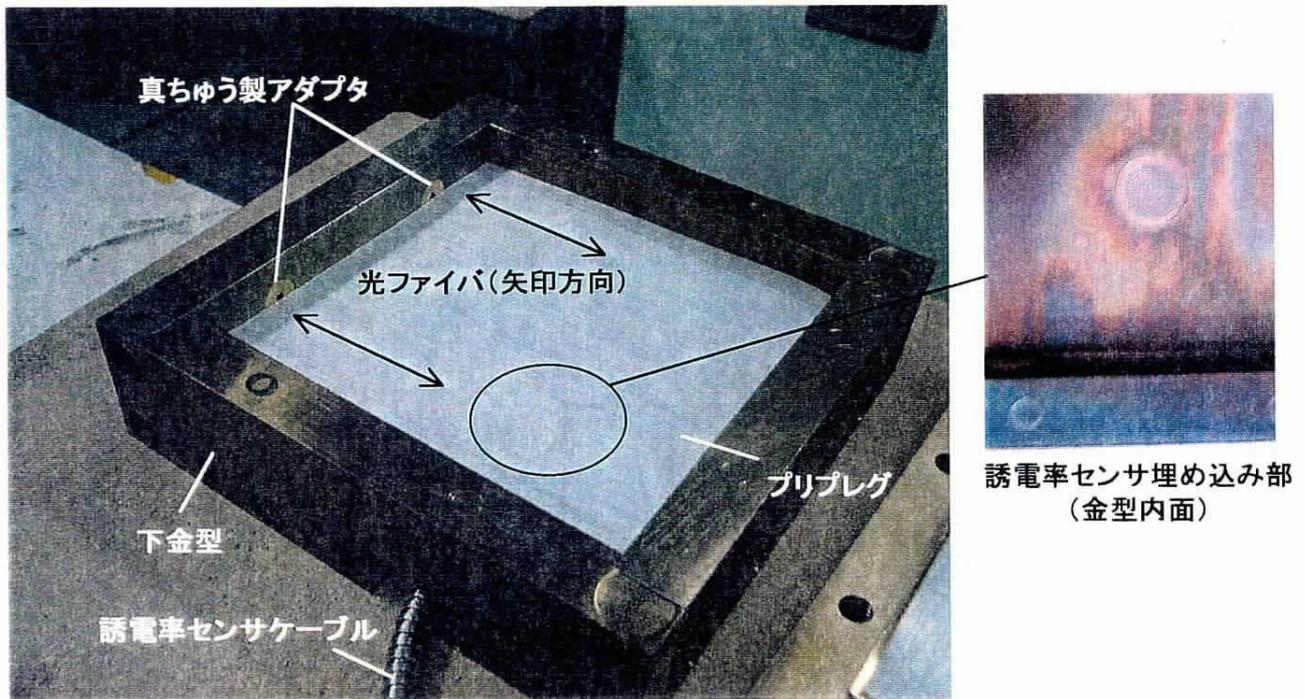


図 3.20 金型へのモニタリングセンサの設置状況

#### (5) まとめ

デモンストレーション試験として、スマートマニュファクチャリングおよびヘルスマニタリングのジェットエンジンファン静翼への適用を検討した。まず、熱可塑 FRP プレス成形において、一連の成形プロセス中の金型内部変化をプロセスチャートの形で整理した。その結果から、誘電率センサと光ファイバセンサを金型内部モニタセンサとして採用し、別途測定する p-v-t チャートと併せて成形パラメータをコントロールすることが適切と判断した。次に、モデルとする静翼形状について、両センサの埋め込み位置、およびスマートマニュファクチャリングとヘルスマニタリング技術としての利用方法を検討した。誘電率センサは下金型の内面に 5 箇所、光ファイバセンサはプリプレグの層間に 3 箇所埋め込むことと定めた。最後に温度と圧力がかかる金型にセンサを埋め込む手法を具体的に明らかにするため、誘電率センサと光ファイバセンサが埋め込み可能な平板金型構造を検討して成形試験を行った。光ファイバの破断やセンサ引き込み部からの樹脂流出等はなく、本埋め込み方法が静翼金型に適用可能なことが成形試験の結果わかった。以上により、静翼のプレス成形および衝撃損傷モニタリングのデモンストレーション準備が整った。スマートマニュファクチャリング Gr で実施される、モニタリングセンサの高度化とシミュレーション技術と併せて、市場ニーズに適合した FRP 製ファン静翼の知的成形および高性能化が可能と考えられる。

## 1.2 達成状況

本年度の契約に基づく研究開発実施内容は、i) 航空機胴体構造、ii) ジェットエンジン用ファン静翼、iii) 宇宙用アンテナ構造、とも今年度目標を達成している。すなわち、

- i) 航空機胴体構造では、デモンストレーション・テーマを選定するとともに、適用胴体構造サイジングおよび費用予測、構造様式、適用センサおよび形状記憶合金適用の可能性を明らかにした。これらの検討結果を踏まえ、供試体の概念図を作成し、主要構造部材の諸元を設定した。あわせ、デモンストレータの計測・負荷要件を検討し、試験装置の概要図を作成した。また、デモンストレーション用ディスプレイ装置の仕様概要を設定した。  
デモンストレータ試験評価技術では、デモンストレーション・テーマの検証部位を明確にするるとともに、負荷手順、モニタ方法、非破壊検査手法の概要を設定した。
- ii) ジェットエンジン用ファン静翼では、静翼モデル形状、埋め込み光ファイバセンサの位置検討を行うとともに、平板での先行試作および成形試験を行った。
- iii) 宇宙用アンテナ構造では、アンテナ模擬構造物の概念設計、適用分布センサおよびアクチュエータのモデル構造による振動試験ならびにシミュレーションを実施した。
- iv) デモンストレータ試験総合技術評価については、東京大学先端科学技術センタ岸研究室と共同研究を行い、CFRP に光ファイバや TiNi 系形状記憶材料を埋めこんだスマート複合材料系について、AE,超音波および X 線等による材料内の欠陥、損傷および損傷回復現象の測定、評価を行った。

## 1.3 結論

本年度は3つの構造テーマに関してデモンストレータ試験を追求し、それぞれ所期の目標を達した。

次年度以降においては、「知的材料・構造システムの研究開発」体制の見なおしに伴い、i)の研究開発アイテムに的を絞ることになった。最終年度(平成14年度)に、胴体直径1.5m・長さ3m規模の供試体での試験実施を目指し、研究開発を進める。供試体は2体製作し、一体で損傷検知および損傷進展抑制を、他の一体で振動・騒音制御の各テーマをデモンストレーションする予定である。

## 2. 研究発表・講演、文献、特許等の状況

### 2.1 研究発表・講演

(1) K.Nagayasu, N.Uchida, T.Hayashi, H.Takahasi, "Vibration distribution reconstruction and control of a thin plate by using distributed PVDF sensors affixed to the plate", SPIF's 7<sup>th</sup> International Symposium on Smart Structures and Materials, Newport Beach, CA, March 5-9, 2000

(2) クザホ、張炳國、遠山暢之、岸輝雄：“AE位置評定 SMAワイヤ・光ファイバCFRP

の損傷領域評価 “、日本金属学会 2000 年春季（第 126 回）大会、Mar.30,2000

## 2.2 文献

- (1)張 炳國、ク ザホ、遠山暢之、岸輝雄：TiNi 強化 CFRP 複合材料の製造とその特性、日本金属学会（投稿中）

## 2.3 特許等

該当無し

## 2.4 その他の公表（プレス発表等）

該当なし

### 1.1.2.5 デモンストレータ試験総合技術評価

共同研究：東京大学先端科学技術研究センター

#### (1) AE 位置標定による SMA ワイヤ・光ファイバ埋め込み CFRP の損傷領域評価

##### (a) 緒言

一般に CFRP をスマート化するため、SMA ワイヤや光ファイバを母材の中に埋め込むことが多い。しかし、この埋め込んだ材料が母材を力学的に劣化させてはいけない。そこで、本研究では、ラム波を用いる異方性位置標定法を利用して、SMA ワイヤや光ファイバを埋め込んだ CFRP の損傷領域を評価することにより、劣化するかどうかを調べた。

##### (b) ラム波の音速

本研究で用いた試験片の厚さは薄い(約 1.5mm)ため、AE 信号が弾性波として伝播する際にラム波が発生する。ラム波は縦波に比べて速度が速く、振幅が低いため AE 信号の到達時刻を決めるのに悪影響を及ぼす。そのため、従来は波形解析(例えば、フーリエ変換或いはウェーブレット変換)によりラム波を除去し、縦波の音速で位置標定を行ったが、本研究ではラム波の音速の実験式を求め、それを利用して位置標定を試みた。図 3.21 にラム波の音速を測定した方法を示す。直径 5mm のシャープペンシルを図のように折って発生した弾性波は、ラム波を先頭にして 10cm の距離を持つ 2 つの AE センサに順番で到達する。この際の到達時間をセンサ間の距離で割ることにより音速を求めた。測定した音速を図 3.22 に示す。4 種類の試験片の音速は同一であったので同じ実験式を利用した。

$$V_{\theta} = \left( \frac{1 + \cos 4\theta}{2} - \frac{1 - \cos 8\theta}{10} \right) (V_0 - V_{45}) + V_{45}, \quad 0 \leq \theta \leq 2\pi \quad (1)$$

ここで、 $V_{\theta}$  は任意方向の音速、 $V_0$  は  $0^{\circ}$  方向の音速、 $V_{45}$  は  $45^{\circ}$  方向の音速である。

##### (c) 実験方法

試験片は CFRP のプリプレグをクロスプライで積層し、 $180^{\circ}\text{C}$  の温度と  $0.3\text{MPa}$  の圧力で 2 時間保持して作製した。試験片の種類は 4 種類で、①CFRP 単体、②SMA ワイヤを埋め込んだもの、③光ファイバを埋め込んだもの、そして④SMA ワイヤと

光ファイバを埋め込んだものである。各ワイヤやファイバは 5mm ごとに埋め込み、特に 4 番目の試験片は SMA ワイヤと光ファイバを交互に埋め込んだ。図 3.23 に積層方法を、図 3.24 に CT 試験片の寸法を示す。各試験片に対してコンパクトテンション試験を行いながらアコースティック・エミッション(AE)信号も同時に検出した。試験中に発生した損傷領域は式(1)と二次元異方性位置標定法を用いて評価した。

#### (d) 結果と考察

図 3.25 に各試験片の位置標定結果を示す。CFRP に SMA ワイヤや光ファイバを埋込んでも、破壊に直接的に影響を及ぼす大きい振幅を持つ AE 信号が、埋め込んだものの周辺に集中的に発生したり、埋め込んだ材料の最大荷重が CFRP 単体より低くなったりはしなかった。さらに最大荷重も落ちることはなかった。このことより、SMA ワイヤや光ファイバは CFRP の損傷の発生に悪影響を及ぼさないことが明らかになった。

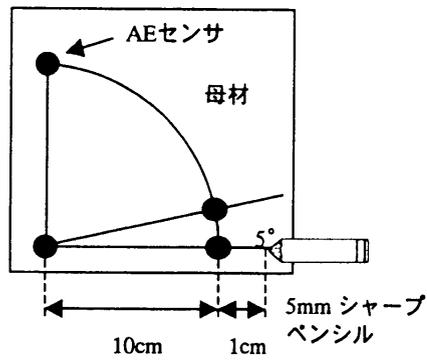


図 3.21. 音速測定

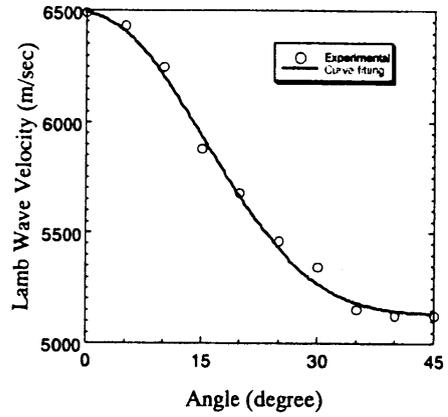


図 3.22. ラム波の音速

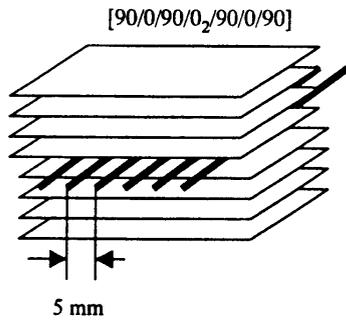


図 3.23. 試験片の積層

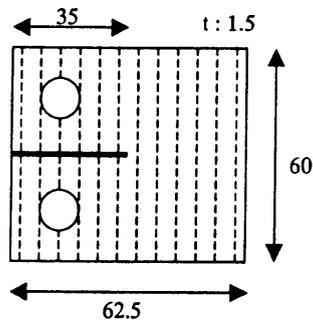


図 3.24. CT 試験片の寸法及び埋め込み方 (単位: mm)

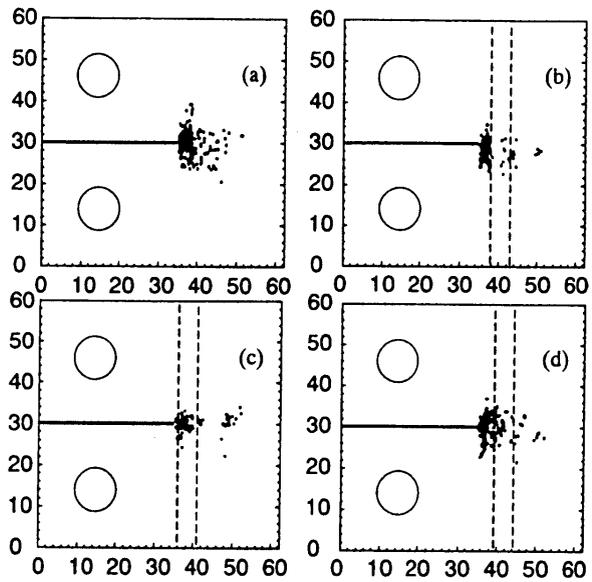


図 3.25. 位置標定結果からの損傷領域 (単位: mm)

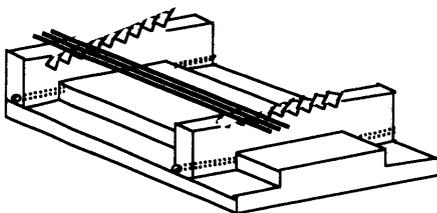
## (2) TiNi 強化 CFRP 複合材料の製造とその特性

### (a) 緒言

知的複合材料の製造の際、形状記憶合金の特性をうまく発揮させるにはマトリックスの中で形状記憶合金を埋め込んで複合化させるプロセッシングが最も大切である。そこで、本研究では、このような問題を解決するため、ホットプレスにより複合材料の製造と共に TiNi 系 SMA のワイヤを CFRP に埋め込むために、特殊の治具を工夫し作製し、CFRP プリプレグに TiNi ワイヤを埋め込む方法に関して述べる。そして、埋め込まれた TiNi ワイヤが複合材料の引張り強度と破壊特性に及ぼす影響の解明を行った。

### (b) 実験方法

CFRP に埋め込んで TiNi ワイヤを含む一方向積層板を成形するには、TiNi ワイヤを CFRP プリプレグ上に高密度かつ均一に並べなければならない。このことのため、本研究では、図 3.26 のような SMA ワイヤ埋め込み用金属製の特殊治具を工夫、作製し利用した。CFRP 積層板の成形には太さ 0.4mm の TiNi 形状記憶合金ワイヤ(大同特殊鋼製)と厚さ 0.2mm の CFRP プリプレグ(Hexcel Co.)を用い、CFRP プリプレグ



3.26.ワイヤー埋め込み用治具

8枚が積層された中心部に強化材としてTiNi形状記憶合金ワイヤを1mm間隔に埋め込まれるように成形した。そして、CFRP専用のホットプレスで150~180℃、0.03~0.3MPa、2時間の条件で積層されたTiNi/CFRP成形体を加熱・加圧することによりTiNi/CFRP複合材料を製造した。破壊挙動を

分析するため、試験片の表面の中央部にAEセンサを付着し、引張試験を行った。

### (c) 結果及び考察

複合材料の作製の際、プロセッシングを制御することが大切である。それで、これを解明するため、製造温度及び圧力を変え、複合材料の微細構造に及ぼす影響を調べた。積層されたTiNi/CFRP成形体をホットプレスで加熱・加圧する際、加熱温度の影響を分析するために、加圧圧力を0.3MPaで一定に維持しながらそれぞれ150℃と180℃で加熱して複合材料を製造した。研磨面をSEMによって観察した結果から、

気孔はほとんど存在しなかった。さらに、微細組織に及ぼす加圧の影響を分析するために、温度を 180℃ で一定に維持しながら、0.03MPa と 0.3MPa でそれぞれ加圧し、複合材料を製造し、SEM に微細組織の観察を行った。図 3.27 より、加圧力が低い 0.03MPa で作製した複合材料は埋め込まれた TiNi ワイヤ周辺の CFRP マトリックスに平均 100 $\mu$ m の気孔が多く存在していることが観察された。これに比べて図 3.28 に示すように加圧力が高い 0.3MPa で作製した複合材料の場合、気孔はほとんど存在しなかった。マトリックス中の気孔の存在は引張り強度、破壊に大きな影響を及ぼすと思われる。このことから、ホットプレスにより、TiNi/CFRP 複合材料を作製する際、大きな気孔が存在しない緻密化された複合材料を得るには、加圧力が大きな影響を及ぼすことが分かった。本研究のような複合材料では界面の状態が大切である。図 3.29 は 180℃、0.3MPa の条件で作られた複合材料での TiNi ワイヤと CFRP マトリックスの界面状態を SEM によって観察した微細組織である。図 3.29 において、左側は TiNi ワイヤであり、右側が CFRP である。界面で約 1.2 $\mu$ m の幅のき裂の発生が観察された。このようなき裂発生は製造段階で成形体を加熱した後、冷却段階で TiNi ワイヤと CFRP マトリックスの熱膨張係数の差に起因する。図 3.30 は 180℃、0.3MPa の条件で作られた複合材料に存在する小さい気孔を SEM によって観察した結果である。このような気孔はプロセシング段階での CFRP プリプレグを積層する際、CFRP プリプレグ層間で入ってしまった空気が熱を加えた時に、CFRP プリプレグのエポキシ樹脂が固まる間、外部へ抜けられない内にエポキシ樹脂が固まってしまうためであると考えられる。本研究で引張強度を測定した結果、TiNi ワイヤを挿入していない CFRP 単体の平均引張強度は 1.3GPa、TiNi/CFRP 複合材料については 1.2GPa であった。引張り試験の際、測定時間による AE 振幅の発生パターンと荷重曲線を測定した結果、200 秒付近から多量の AE 発生が始まる。これは荷重の増加につれ、繊維破断が生じることに起因すると考えられる。図 3.31、3.32 は引張り試験後、破断された試験片の破断面を SEM によって観察した微細組織である。エポキシ樹脂に埋め込まれた炭素繊維が引張り方向に対して垂直に破断されたことが分かる。

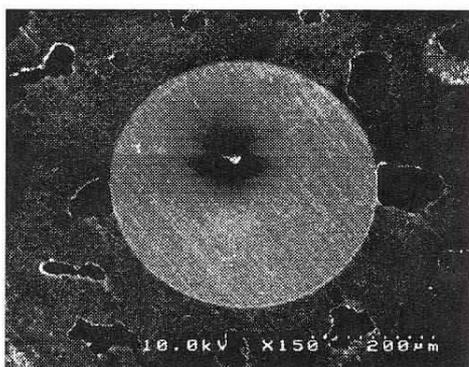


図 3.27. 加圧 0.03MPa で作った複合材料

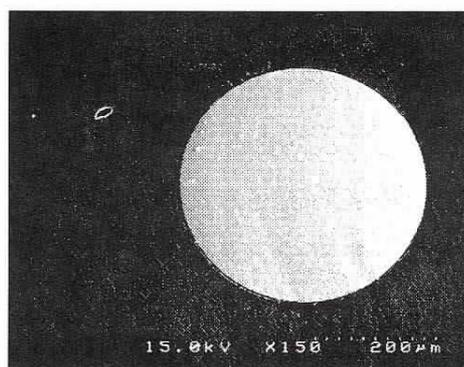


図 3.28 加圧 0.3MPa で作った複合材料

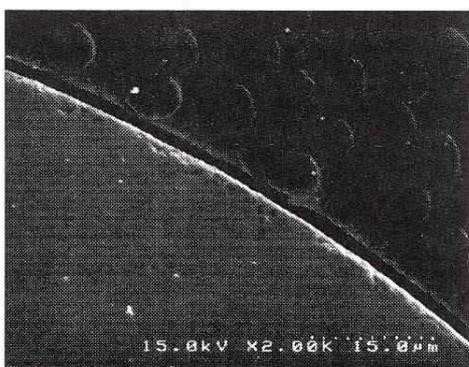


図 3.29.SMA とマトリックス界面でき裂の発生

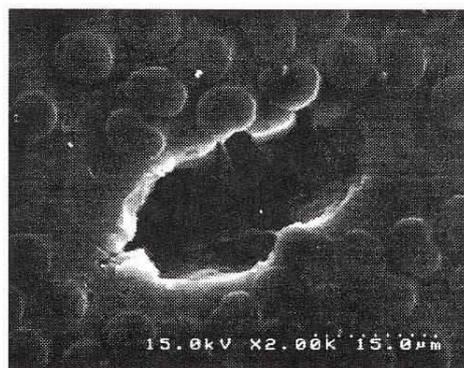


図 3.30.マトリックス内に存在する気孔

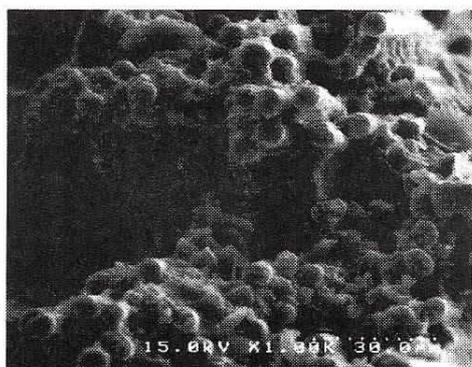


図 3.31 繊維の破断面

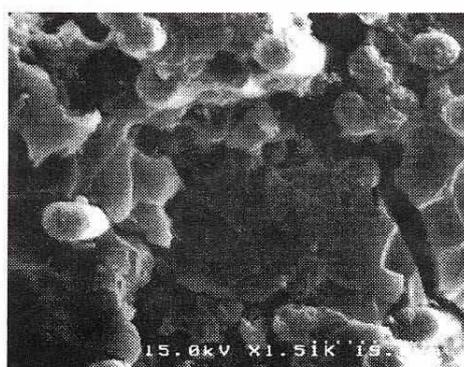


図 3.32 マトリックスの樹脂の破断

### (3)自己修復機能を有する炭素繊維強化プラスチックの開発

#### (a) 緒言

近年、き裂の発生や進展を検知するヘルスマニタリング機能、さらに必要に応じてき裂の進展を抑制したり、補修を行う自己修復機能を兼ね備えた知的材料・構造システムの開発が世界的に注目されている。自己修復機能に関しては、予歪を付加した形状記憶合金線を金属やプラスチック等の母材に埋め込み、加熱により発生する回復力を利用して、き裂の発生を抑制したり、発生したき裂を閉鎖するき裂制御型の知的複合材料の開発が試みられている。しかし、一旦き裂が発生すると、き裂は閉鎖されるものの依然として残存したままとなることが指摘される。一方、エポキシ樹脂等の補修材が内包されたカプセルを母材に埋め込み、き裂が発生した際にき裂自身が、あるいは加熱によりカプセルより補修材を放出させ、き裂を充填するき裂補修型の知的複合材料の開発も同じく試みられている。これに関しても、き裂は補修されるものの、一回の補修しかできないことと、対象となるき裂がある程度大きくなると対処できないといったことが指摘されている。従って、両者の機能を兼ね備えた、き裂の発生・進展を抑制し、き裂の発生時にはき裂を閉鎖しつつ、複数回補修を行える知的複合材料の開発手法が望まれる。

本研究では、自己損傷機能を有する繊維強化プラスチックの開発に向けた開発手法の検討を行った。さらにアクチュエータ評価を行うために、TiNi 形状記憶合金の回復力の測定を行った。

#### (b) 開発手法

CFRP の引張り負荷に対する破壊機構はトランスバースクラックの発生から始まり、層間剥離、繊維破断、そして最終破壊へと進行していく。すなわち、初期損傷であるトランスバースクラックの発生の抑制、さらに例え発生したとしても、適切な補修を行うことができれば、破壊の進行を抑制することができる。この観点から対象をトランスバースクラックに絞り、自己修復機能を付与する手法について検討を行った。

図 3.33 に概念図を示すが、き裂制御用アクチュエータとしては回復力、応答性、埋め込みやすさの点から TiNi 形状記憶合金繊維を候補材料とした。さらにき裂補修用アクチュエータとしては熱融着が可能で、繰り返し使用が可能な点から熱可塑性樹脂を候補材料とした。ここで予歪付与 TiNi 合金繊維は、通電加熱により任意に発

生する圧縮応力を利用したき裂の制御、き裂発生部近傍の熱可塑性樹脂を熔融させる発熱体、さらに約 50%の破断歪をもつ高歪材料であることから、母材の最終破壊後の分断を防ぐ等の役割をもたせる。

重要な課題は熱可塑性樹脂の選定および最適埋め込み形態・配置の確立である。通電加熱により適切に熔融し、トランスバースクラックを補修すると同時に、熔融・固化によってポアや層間剥離の原因とならないような最適設計を今後の研究を通して確立していく必要がある。

### (c) TiNi 合金繊維の回復力測定

供試材は大同特殊鋼製の直径 0.4mm の TiNi 合金繊維で組成は Ti:55.2 mass%、Ni:44.8 mass%であり、最大回復歪は約 5%である。試験に先立ち逆変態終了温度  $A_f$  である 335K 以上に加熱し、すべてオーステナイト相とした。試験片のチャック間距離は 250mm であり、変位はクロスヘッドの移動量で測定した。引張り試験機によって、負荷・除荷を行い、所定の残留歪で拘束した後、加熱・冷却を行い、その際に発生する回復力の測定を行った。図 3.34 に TiNi 合金繊維を各予歪量で拘束し、加熱・冷却した際の回復力の変化を示す。回復力-温度曲線はヒステリシスループを描き、回復力は加熱過程における逆変態の開始と同時に急激に増加し、同様に冷却過程におけるマルテンサイト変態の開始と同時に急激に減少した。予歪量の増加に従って最大回復力は増加したが、その際に必要な温度も増加した。このことから、き裂制御用アクチュエータとしては予歪量はより大きく、加熱温度はより高い方が高出力が得られる。しかし、CFRP のマトリックスであるエポキシ樹脂のガラス転移温度  $T_g$  が 445K であることから、熱変質を避けるためには加熱温度は低い方が好ましい。従って、比較的低温で高出力を得るためには、TiNiCo 等の TiNi に比較して変態温度の低い形状記憶合金繊維を代用することが考えられる。

さらに 283~453K の温度範囲で加熱・冷却を繰り返す熱サイクル試験を行い、その際の最大回復力を測定した。初期の 5 サイクル目までで約 83%にまで低下したが、それ以降の変化は小さく、20 サイクル目で約 77%の回復力を示した。これは母相とマルテンサイト相との界面での応力集中により転位が蓄積されることで、変態の可逆性が一部損なわれることによる。従って、一定の出力を得るためには 20 回程度の熱サイクルを施してから母材に埋め込めばよいことがわかった。

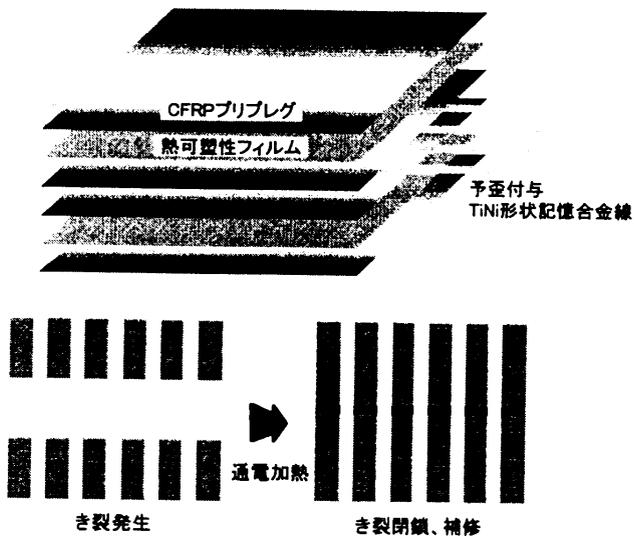


図 3.33. 開発手法の概念図

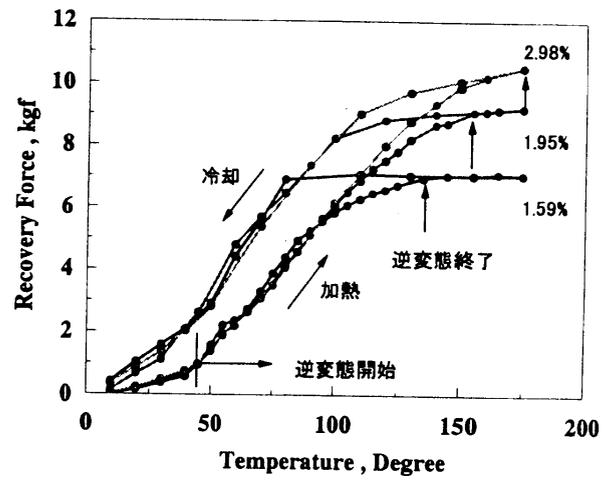


図 3.34. TiNi 合金繊維の回復力

### Ⅲ. 総合調査研究

#### 1. 要約

総合調査研究は、プロジェクトの4集中研の研究開発におけるそれぞれの独自性を尊重しつつ活性化をはかりながら、諸成果を全体として統合した方向に収斂させることを狙いとする。まず基本として、初年度にも増してプロジェクトリーダーとサブリーダーの意思疎通と連携を密にするため、幹事会において研究の進め方の認識と研究成果および関連する内外の重要技術情報の共有をはかった。これに加え本年度から集中研個別の技術検討会にも参加し、研究現場での研究者との直接接触により進捗情報把握と討論を実施し、全体の研究開発の方向付けに役立てると共に、研究担当者一人一人のプロジェクト全体に関する理解の浸透をはかった。

さらに本年度から、これら要素技術の研究成果を統合して知的材料・構造システム全体としての機能を実証することを目指して実構造物要素を製作し、デモンストレーション試験を実施するための基本計画と概念設計を行った。これに当っては試験担当予定の企業メンバー、サブリーダー、若干のプロジェクトメンバー外学識経験者からなるデモンストレータ部会を設け、これに加えてテーマ別の専門的検討を分科会で行った。これと併せて4大学における集中研での要素研究と企業での実機試験の有機的な連携をはかるため、現地での意見交換を積極的に進めた。

また、平成11年12月7日、8日に東京霞ヶ関の東海大学校友会館において第1回「知的材料・構造システム」シンポジウムを開催し、成果発表と討論および関係者間の交流を行い、プロジェクト研究発表29件に加え、プロジェクトリーダー岸輝雄 東京大学教授による統括講演、N.W.Hagood MITI教授による特別講演もいただき、200名を越す盛況を得ることができた。

以上のような定常的な統合調整をとともに、プロジェクト全体の進め方に関する共通認識の確認と意思決定のため、大学、企業からのメンバーと通商産業省、工業技術院、NEDOからもオブザーバ参加を得て技術委員会を開催した。これには機械技術研究所、物質工学工業技術研究所、名古屋工業技術研究所の3国立研究所も正式メンバーとして参加し、本プロジェクト研究推進における重要な役割が認識された。

また、プロジェクトにおける自らの研究を内外の研究との関係で比較検討するとともに、新技術情報の把握のため内外の技術調査を行うとともに、集中研での研究を補完するテーマについては特定の大学に昨年度に引き続き再委託した。

– Summary –

### Comprehensive Investigation and Research

The comprehensive investigation and research aims to integrate and manage research and development of the project toward the originally designated object as a whole, in respecting and activating the respective related university research centers.

In principle, more importance has been put was than last year to the promotion of common understanding of the final target of the project by making cooperation tighter and denser among the four subleaders, with holding the subleader committee to check and review of the respective research and development to have in common the scientific and technological information of not only the project but also others research inside and outside the country. In addition to the subleader committee, we have started from this year the research center technical meeting and participated there in order to grasp the progress of research and development by contacting directly researchers on site and discussing with them to understand the general direction of the advancement of project by the respective researchers.

Furthermore, demonstrator test program has started in order to confirm and verify the expected performance of the smart materials and structural systems on the actual scale by integrating the results of fundamental research and developments in the four research centers. This year, the concept of fundamental plan and the related basic design concepts have been investigated. To pursue it, the demonstrator committee has been started, of which members are from companies expected to practice the tests, subleaders and other specialists outside the project. Additionally, smaller special technical committees has been also held corresponding to the respective technical problems.

In the investigation, direct discussions on site at the research centers have been considered to be important particularly in order to establish an effective and organic cooperation between companies and universities.

It has to be mentioned here, too, that the 1<sup>st</sup> Smart Materials Symposium was held on December 7<sup>th</sup> and 8<sup>th</sup> of December at Tokai University Koyu-kaikan at Kasumigaseki of Tokyo to make presentation and discussion by researchers and to give an opportunity for them to communicate each other and also with all the related people even from the administrative department. There have been totally 29 presentations in addition to the general lecture by the project leader Teruo Kishi, Professor of the University of Tokyo and the special invited lecture by Professor N.W.Hagood, Massachusetts Institute of Technology. Over 200 people in all has participated.

Finally, in order to manage the project as a whole, the general technical committee has been held with participation as observer members from MITI, AIST and NEDO, where the general direction of management has been proposed and accepted and the fundamental policies have been decided.

It should be also referred to it that governmental research institutes such as National Mechanical Engineering Laboratory, National Institute of Materials and Chemical Research, and National Research Institute of Nagoya have much contributed to the project and their results of this year have been estimated to be important.

In addition, investigation on the information of research and development of the related fields inside and outside the country have been promoted and complementary researches on the special themes have been entrusted to other university laboratories.

## 2. 本文

### (1) 目的

本年度の総合調査研究は次の項目について実施し、プロジェクト全体の進捗に関して各 SL 担当の要素研究間の連携・協力と、本年度から基本設計でスタートしたデモンストレーション試験への要素研究成果および国研の研究成果の円滑な統合化をはかり、併せてシンポジウム、海外調査等を通じ情報共有・情報収集を協力で推進することを目的とした。

- (a) 技術委員会、幹事会によるプロジェクトの研究成果の把握、統合および技術情報交流を通じた研究開発の進捗と方針の共通認識の形成
- (b) デモンストレータ試験の基本方針および基本設計の推進・調査
- (c) 研究再委託による補完的研究の推進・管理
- (d) 国立研究所との交流の推進
- (e) シンポジウム開催による研究発表・討論による研究者間の技術交流、プロジェクト関係者および内外への成果キャンペーン
- (f) 国内外における研究開発情報収集

### (2) 全体計画

本プロジェクトの統合調査の全体計画は、以下の通り実施することとした。

表\*\*\* 参照

### (3) 成果報告

#### (3-1) 技術委員会

##### (a) 要素技術

平成 12 年 3 月 14 日に RIMCOF において開催し、まず平成 11 年度成果の報告が集中研各 SL により行われ、PL 以下委員間で活発な意見交換が行われた。続いて産業基盤技術の立場から本プロジェクトに強力で貢献している 3 国研から、物質工学工業技術研究所より高周波電磁波スマート成形モニタリング、名古屋工業技術研究所よりセラミックスアクチュエータ素子、機械技術研究所より構造振動制御について研究報告がなされた。また再委託については、都立科学技術大学からパワーモードセンサとクラスタアクチュエータを用いた振動音響制御、ワシントン大学からはデモンストレータ用としてカーゴドアへの SMA アクチュエータの適用について報告がなされた。

全体として岸プロジェクトリーダーからは次のような総括コメントがあった。

- ① 平成 11 年度は各グループとも軌道にのってきた。
- ② 平成 11 年度の集中研での要素技術は、平成 12 年度で目処をつけ、平成 13 年度にまとめる方向でいきたい。

(b) 平成 12 年度実行予算

RIMCOF からの予算案説明に関し、意見・疑義はなく、「平成 12 年度実行予算（案）」が全会一致で了承された。

(c) デモンストレータ試験

RIMCOF よりデモンストレーション部会、分科会及び担当企業と SL との個別打合せに基づいてまとめ、幹事会の検討・了承を経て試験計画案を説明し原案どおり承認された。

①胴体実構造モデルを製作して実施する。供試体は(イ)～(ホ) 1 体、(ハ) 1 体の合計 2 体とする。

- イ) 複合材料埋め込み光ファイバセンサによる衝撃損傷通知
- ロ) 統合化 AE センサネットワークによる実用衝撃負荷の同定
- ハ) 分布型 BOTDR センサ広領域歪み分布測定
- ニ) 炭素繊維の導電性を利用したセンサ（スマートパッチ）
- ホ) SMA 箔を用いた損傷制御型複合材料システムの開発
- ハ) 振動・機内騒音軽減技術の研究開発

②下記テーマは「より先進的な胴体構造要素実験」として、平成 13 年度概算要求に間に合うよう内容を検討し調整を行う。

- イ) 突発破壊防止上記憶繊維強化型スマートコンポジット
- ロ) スマートボード
- ハ) 知的 RTM 成形スティフナ付パネル
- ニ) SMA Airborne Door Actuator
- ホ) 円筒殻の振動と騒音放射の抑制によるアクチュエータの評価
- ハ) 国立研究所のテーマ

(3-2) 幹事会

5 月 18 日と 10 月 29 日に開催し、4 SL グループにおける要素研究の研究進捗成果報告と討論を行った。また、本年度からデモンストレータ試験がテーマに加わるので、これに向けての要素研究の集約についても重点をおいて検討を行った。

(3-3) 集中研検討会

当初の計画どおり、下記のとおり集中研で技術検討会を行い、具体的なある結果に基づき活発な意見交換支援を行った。とくに本年度からデモンストレータ試験の計画の検討が始まったことから、スマートマニュファクチャリンググループでは、いかにデモ対象の製造に当該要素技術の貢献を見るようにするか、アクチュエータ材料・素子については具体的な導入技術対象の絞込みについて、各研究者と自らの担当テーマについて真剣な論議を行った。

表 4.1 総合調査研究の全体計画

担当	年 月	平成11年 4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月	平成12年 1月	2月	3月
1) プロジェクト研究推進調整 (1) 全体 (2) 要素研究 (3) デモンストレータ試験													
			▲ 幹事会					▲ 幹事会		▲ シンポジウム			▲ 技術委員会
			▲ 部会				▲ 部会	△ 分科会				△ 分科会	
2) 集中研検討会 (1) スマートマニュファクチャリング (2) アクチュエータ材料・素子 (3) 情報調査 (4) 再委託研究 ワシントン大学													
								▲		▲		▲	
							▲					▲	

### (3-7) 調 査

#### (a) 日本複合材料学会創立 25 周年第 24 回複合材料シンポジウム

平成 12 年 11 月 18 日（木）、19 日（金）の 2 日間に亘り、本プロジェクトのスマートマニュファクチャリング技術開発のサブリーダーである大阪市立大学福田教授が会長を務める日本複合材料学会創立 25 周年記念の同シンポジウムが開催され、特別講師として本プロジェクトリーダーの岸輝雄東京大学教授の知的材料・構造システムの発展に関する特別講演以下スマートマニュファクチャリング技術について 4 件と、知的材料・構造技術関係、合計 12 件のうちプロジェクト関係の成果が大きな割合を占め、同学会で重要な位置を占めてきたことが窺われた。

#### (b) 海外技術調査

本プロジェクトは宇宙航空への応用を主要ターゲットにしている故、他分野にもましてその成果は国内に止まってはならず世界的にみて先端的レベルにあることが要求される。本プロジェクトでは広く国際的なシンポジウム、学会への参加、有力企業および大学訪問による技術者・研究者との交流を推進し、技術情報の入手と世界レベルの認識の確保・維持に努めることにしている。とくに先端的な産業技術については、単なる企業間関係では技術情報が得にくいのが、大学連携による中立性と基礎への指向の中では、比較的容易になる。表 4.2 に今年度の海外調査を総括的に要約し、詳細報告と併せて理解に供することにした。

表 4.2 海外調査研究活動一覧

(注) HM:ヘルスメタリング、SM:スマートマニファクチャリング、AA:アクティブ・アダプティブ、AC:アクチュエータ、DM:デモンストレーション

実施者	年月日	分野	実施先	国名	狙い	報告 No
1. 逢坂 勝彦 (大阪市立大学)	1999. 5. 24 ～5. 29	SM	第 44 回 SAMPE 国際会議	米国	先端複合材料成果技術研究 開発調査	FRE-12-1
2. 影山和郎 (東京大学)	1999. 5. 23 ～6. 4	DM, AC, AA, HM	第 44 回 SAMPE 国際会議	米国	センサ・アクチュエータ構造モデリング等 技術調査・討論	FRE-12-2
		DM, AC	ニューメキシコ大 人工筋肉研究所	米国	人工筋肉、イオン高分子センサ・ア クチュエータへの応用、形状記憶 効果メカニズム研究情報調査	
		DM, AC, AA	メーランド大学 スマート材料・構造 研究センタ 微小スマートシステム研 究センタ	米国	損傷検出への磁歪の応用、 形状記憶高分子、クレーンのアク ティブ制御等の研究開発情報 調査	
		DM, AC	ペンシルバニア州立 大学 電子・音響材料・ 素子工学センタ	米国	カーボンナノチューブ、多機能高分 子等に関する研究調査	
		DM, AC, AA	MIT アクティブ材料・構 造学	米国	圧電超音波回転モータ、分布型 アクチュエータ、アクティブ音響制御等 の研究開発調査	
3. 元木信彦 大島信雄 高坂達郎 (大阪市立大学)	1999. 7. 4 ～7. 11	SM	第 12 回国際複合 材料会議	フランス	知的成形技術、光ファイバセンサ 応用等に関する情報入手と 自らのスマートマニファクチャリング 研 究発表と討論	FRE-12-3
4. 関谷 忠 (名工研)	1999. 7. 12 ～7. 16	AC	第 9 回ヨーロッパ 強誘電体会議	チェコ	PNN-PT 系電歪セラミックスの研 究発表と強誘電体研究情報 調査	FRE-12-4
5. 岸 輝雄 榎 学 中島未知 (東京大学)	1999. 8. 26 ～8. 29	DM, HM	ボーイング社	米国	ボーイング社における知的材 料・構造システム技術の研究開 発調査	FRE-12-5
		DM, HM	スタンフォード社	米国	構造体内の荷重応力・損傷 の逆問題に関する研究情報 調査	
6. 岸 輝雄 遠山暢之 中島未知 (東京大学) 古屋泰文 (弘前大学) 平野一美 (機技研) 津田 浩 (物工研)	1999. 9. 21 ～9. 28	DM, AC	MIT	米国	デモンストレーション見学、アクチュエータ 材料・素子研究情報入手	FRE-12-6
		DM, AC	ACX 社	米国	アクチュエータ開発調査、デモンスト レーション見学	
		DM, AC	ペンシルバニア州立 大学 材料研究所	米国	アクチュエータ材料、エネルギー変換材 料、センサ/アクチュエータシステムの研究 開発等情報調査	

関谷 忠 (名工研) 宮崎崇夫 (RIMCOF)		DM, AC	マサチューセッツ工科大学	米国	デモンストレーション見学、形状記憶合金の研究開発情報調査	
7. 張 炳國 具 サホ (東京大学)	2000. 2. 26 ～3. 10	DM, AC, HM	バージニア工科大学 知的材料システム・ 構造センタ	米国	構造制御設計、形状記憶合金複合材料、分散制御用	FRE-12-7
		DM, HM	スタンフォード大学	米国	ヘルモニタリング研究開発情報調査	
		DM, AC	第7回 SPIE 国際 会議	米国	スマート材料・構造システム分野の研究開発動向、商品展示会 見学	
8. 山口泰弘 (三菱重工業)	2000. 3. 4 ～3. 11	DM, AC HM, AA	第7回 SPIE 国際 会議	米国	知的材料・構造システムの海外 研究動向・レベルの調査	FRE-12-8

## 調査報告

## 1. 調査目的

海外での国際学会における研究成果発表および「スマートマニュファクチャリング技術の開発」に関する海外情報収集を行う。

## 2. 調査員

大阪市立大学工学部 知的材料工学科 助教授 逢坂勝彦

## 3. 調査期間

平成 11 年 5 月 24 日 (月) ~ 平成 11 年 5 月 29 日 (土)

## 4. 調査場所とスケジュール

5 月 24 日 (月) 関西国際空港より出発  
5 月 24 日 (月) ~ 5 月 28 日 (金) USA、ロングビーチ  
5 月 29 日 (土) 関西国際空港に到着

## 5. 調査報告内容

アメリカ合衆国、カリフォルニア州、ロングビーチで 5 月 23 日 (日) ~ 5 月 27 日 (木) に開催された、**44th International SAMPE Symposium and Exhibition** に出席し、1 件の論文発表を行った。また、スマート材料・構造に関する最新の情報収集及び出席した研究者との技術情報交換を行った。

この会議は、先端複合材料の製造からアプリケーションまで、幅広い主題を扱った国際会議である。今回の会議でも、先端複合材料の成形法について多くの報告がされていた。特に、**Filament Winding** 成形について 2 つのセッション、**Electron Beam** 成形および成形品についても、2 つのセッションが設けられていた。本プロジェクトのスマートマニュファクチャリング技術では、こられの成形法については検討していないが、本研究を進める上で有用な情報を得ることができた。また、スマート材料のワークショップが開かれ、報告者は“**Strain Monitoring in Curing of Composites Using EFPI Sensor**”と題して研究報告を行い、出席者と質疑応答を通して、研究を進める上で有益な示唆を得ることができた。特に、このワークショップで行われた光ファイバの軸と直交する方向のひずみ測定が可能な新しいひずみ測定法は、今後の研究を進める上で参考になった。

## 6. まとめ

5 月 23 日 (日) ~ 5 月 27 日 (木) にアメリカ合衆国、カリフォルニア州、ロングビーチにて開催された **44th International SAMPE Symposium and Exhibition** に出席し、1 件の論文発表とスマートマニュファクチャリング技術の開発に関する情報収集を行った。本調査で得られた知見は今後の研究活動に大いに役立つものと期待される。

## 出張報告書

東京大学大学院工学系研究科  
教授 影山 和郎

目 的：米国の主要研究機関における知的材料・構造システムの研究開発動向調査および  
デモンストレータ拠点の視察

期 間：平成11年5月23日（日）～6月 4日（金）

出張先：ロングビーチカリフォルニアコンベンションセンター（SAMPE'99）、  
ニューメキシコ大学、メリーランド大学、ペンシルバニア州立大学、MIT

旅程表：

	月/日（曜）	地 名	現地 時間	交通機関 便名	予 定
1	5月26日（水）	東京 成田発 ロサンジェルス着 => ロングビーチ	16:35 10:20	UA-890	SAMPE'99 出席  ロングビーチ（泊）
2	5月27日（木）	ロングビーチ			SAMPE'99 出席 ロングビーチ（泊）
3	5月28日（金）	ロングビーチ=> ロサンジェルス発 アルバカーキ着	15:11 19:39	HP-2208	アルバカーキ（泊）
4	5月29日（土）	アルバカーキ発 ワシントン着	14:37 22:07	UA-1118	ニューメキシコ大学訪問  ワシントン（泊）
5	5月30日（日）	ワシントン			ワシントン（泊）
6	5月31日（月）	ワシントン ワシントン発 ステートカレッジ着	18:40 19:40	UA-7418	メリーランド大学訪問  ステートカレッジ（泊）
7	6月01日（火）	ステートカレッジ			ペンシルバニア州立大学 訪問 ステートカレッジ（泊）
8	6月02日（水）	ステートカレッジ発 ワシントン着 ワシントン発 ボストン着	08:20 09:15 10:30 11:57	UA-7417 UA-308	MIT 訪問  ボストン（泊）
9	6月03日（木）	ボストン発	09:00	UA-837	機中（泊）
10	6月04日（金）	東京 成田着		18:50	

訪問先会議の要点：

- 5月26日 成田発 カリフォルニア州ロサンジェルス着  
ロングビーチに移動
- 5月26日～27日 ロングビーチカリフォルニアコンベンションセンター（カリフォルニア州、ロングビーチ）にて開催中の SAMPE'99 に参加。先進複合材料の成形技術、設計技術および材料開発の最新の動向調査。材料メーカー側からの知的材料構造の研究の取り組みについても意見交換した。  
27日の 11:00～12:00 および 15:00～17:00 の時間帯に、A Special Workshop on Smart Materials, Materials Systems and Structures を開催して、MEMS、バイオニックセンサー・アクチュエータ、知的材料構造の新展開、光ファイバセンサによる構造モニタリング等の最先端の技術動向について討議した。
- 5月28日 ロングビーチからニューメキシコ州アルバカーキに移動
- 5月29日 午前中、ニューメキシコ大学 Artificial Muscle Research Institute を訪問し、主として M. Shahinpoor 教授より以下の説明を受け、情報交換をした。  
(1) Nafion および Ionic charged Teflon を用いた人工筋肉  
(2) Ionic polymer のセンサーおよびアクチュエータへの応用  
(3) 形状記憶効果のメカニズム
- 5月31日 なお、翌30日は日曜日のため特段の調査活動は行わなかった。  
午前10:00よりメリーランド大学 Smart Materials and Structures Research Center および新しく設置された Small Smart System Research Center を訪問し、J. Sirkis 教授はじめセンターのメンバー（7名）より以下の説明を受け、情報交換した。  
(1) 磁歪を利用した複合材料の損傷検出  
(2) CMOS イメージセンサを用いた FBG 多点計測  
(3) ヘリコプターの振動及び音響制御  
(4) クレーンのアクティブ制御  
(5) 形状記憶高分子の高効率化  
(6) マイクロホットプレート化学センサ (MEMS)
- 6月01日 午前9:40よりペンシルバニア州立大学 Center for the Engineering of Electronic and Acoustic Materials and Devices を訪問し、V. K. Varadan 教授より以下の説明を受け、情報交換した。  
(1) カーボンナノチューブ SPM(Scanning Probe Microscope)  
(2) 分子レベルナノテクノロジーの応用  
(3) 多機能高分子  
V. K. Varadan 教授の研究室を辞した後、ICAT(International Center for Actuators and Transducers)の内野教授の研究室を訪問し、セラミックアクチュエータの技術開発の動向と米国における産学共同について説明を受け、情報交換した。
- 6月02日 午後2:00より、MIT Active Materials and Structures Laboratory を訪問した。所長の N. W. Hagood 教授は不在であったが、以下の項目について、担当する研究者から説明を受け、情報交換した。

- (1) 圧電超音波回転モーターの開発
- (2) 線状アクチュエータ埋め込み複合材料（分布型アクチュエータの開発）
- (3) アクティブ音響制御（航空機胴体、消音魚雷、ヘリコプターローターブレードへの適用など）

米国での知的材料構造の研究は、センサー、アクチュエータに関する革新的・基礎的な研究と、現状の技術で手に入るセンサー・アクチュエータ技術を改良し、工学的インパクトの高い応用技術を考える研究の2つの方向性があるように思われた。デモンストレータ部会の視点は、明らかに後者に近く、その意味で、メリーランド大学とMITでの実用性重視の研究開発の方向性と具体的成果は大変参考になると思われる。

以上

## 調査報告

## 1. 調査目的

「スマートマニファクチャリング技術の開発」に関する研究成果の発表および海外情報調査を行う。

## 2. 調査員

大阪市立大学工学部知的材料工学科 教授 元木信弥  
 助教 大島信雄  
 助教 高坂浩一

## 3. 調査期間

平成 11 年 7 月 4 日 (日) ~ 7 月 11 日 (日)

## 4. 調査場所とスケジュール

7 月 4 日 (日)	関西空港より出発
7 月 4 日 (日) ~ 7 月 10 日 (土)	フランス国 パリ市、 Hotel de L'esperance
7 月 10 日 (土)	CDG 空港より帰国
7 月 11 日 (日)	関西空港到着

## 5. 調査報告内容

フランス、パリ市で開催された第 12 回国際複合材料会議 (International Conference on Composite Materials : ICCM-12) に出席し、'Development of Multi-functional Sensor for Smart RTM Processing' と題するプロジェクト研究の成果発表を行った。また、他研究者の発表の内、本プロジェクトに関連の深い講演を聴講し、情報を収集した。

この ICCM は 2 年に 1 回開催されている、複合材料の分野ではもっとも大規模な国際会議であり、各国から複合材料に関する最先端の研究、情報が集まる。

報告者が、上記の研究発表を行ったところ、多くの研究者に興味を持っていただき互いにこの後も情報を交換できるような知り合いができ、またカナダの研究グループから、われわれの技術を是非使いたいとの申し出も受けた。具体的な方法を現在検討中である。他には知的成形技術、光ファイバセンサ応用、数学的モデリング、ピエゾの応用、損傷力学などに関する発表を聴講した。知的材料・構造システムプロジェクトに関係の深い多くの最新研究成果、あるいは問題点などを知ることができ、大きな収穫であった。

## 6. まとめ

7 月 4 日 (日) ~ 7 月 11 日 (日) フランス、パリ市 で開催された ICCM-12 : International Conference on Composite Materials に出席し、成果発表および情報収集を行った。この結果、今回の調査は今後の研究と応用開発に役立つものと考えられる。

## 第9回ヨーロッパ強誘電体会議 (9th European Meeting on Ferroelectricity, EMF-9) に参加して

名古屋工業技術研究所 関谷 忠

1999年7月12～16日、チェコのプラハにおいて標記会議があり、NEDOのご厚意により出席させていただいた。本会議出席の主目的は、名工研でこれまで行ってきたPNN-PT系電歪セラミックスの開発に関する研究の総まとめとして、「Processing and High Electrostriction of Relaxor Ferroelectric PNN-PT Perovskite Ceramics」と題した口頭発表を行うことと、会議に提出したサブミット論文を国際誌 *Ferroelectricity* に掲載してもらうためであった。また、会議中各国の出席者とセラミックアクチュエータ分野における世界の研究開発動向に関する情報交換を行うことも一つの重要な目的であった。チェコからの帰路、パリに立ち寄り国立高等工芸学校 (Concervatoire National des Arts et Metiers, CNAM) を訪問し、フランスにおけるスマート構造に関する情報交換のスケジュールも入れておいた。

EMFは、国際強誘電体会議 (International Meeting on Ferroelectricity, IMF) 並んで強誘電体、圧電体、焦電体、非線形材料等の分野で歴史のある会議であり、ヨーロッパに限らず出席者は全世界に及ぶ。EMFとIMFはどちらも4年毎に開催され、それぞれの間に来るので、2年毎にどちらかの会議に出席できる機会が巡ってくる。

EMF-9では、強誘電体の非線形現象、強誘電体のスペクトロスコーピー、有機強誘電体、ドメイン構造とスイッチング現象、メモリー用強誘電体薄膜、リラクサ型強誘電体、アクチュエータ材料、非鉛系アクチュエータ材料等、実に多岐に渡る分野の研究発表があったが、どちらかといえば実用よりも理論的な色彩が強い会議との印象を受けた。ヨーロッパ人の理論好きを反映しているのであろうか。筆者が最も興味をもった分野は、アクチュエータ材料で、これの大きなセッションが設けられていたが、相変わらず多くの人がPZT系の研究を行っていること、その次にPMN系電歪材料が来ること、筆者のようにPNN系電歪セラミックス材料を扱っている人は皆無であり、そのオリジナリティは極めて高いこと等がわかった。また、非鉛系アクチュエータ材料では、まず非鉛系ペロブスカイトでリラクサ挙動を示す組成を探し、さらにその中からアクチュエータ機能を示すものを探すと言った手順の研究がいくつかあったが、微小変位しか示さなかったり、駆動する温度が低くかったり等で実用できる非鉛系アクチュエータ材料にはほど遠いものであると感じた。会期中、何人かの若い研究者、また世界的にも名前が知られているヨーロッパの先生たちと議論することができた。こうした機会が今後の国際共同研究へと発展する可能性があり、これも会議に出席した大きな意義の一つであった。提出した論文が、全く修正されることなく掲載可の裁定がくだされたのも嬉しいことであった。

パリのCNAMでは、金属材料およびコンポジット材料の非破壊検査法の研究をしているグループを訪問したが、あいにく夏休み期間中ということもあり、大学内はひっそりとしていた。この研究室は、企業との共同研究のため公表できない内容のものが多くこのことで、深くつっこんだ議論はできなかったが、フランス流に斬新な研究を行っているとの印象を受けた。今後、スマート構造システムに関する様々な分野で日仏技術交流ができればと切に願っている。

## 海外調査報告

## 1. 調査目的

「デモンストレータ試験総合技術評価」に関する米国内研究状況の情報収集

## 2. 調査員

東京大学先端科学技術研究センター・教授 岸 輝雄  
東京大学先端科学技術研究センター・助教授 榎 学  
東京大学先端科学技術研究センター・協力研究員 中島未知

## 3. 調査期間

平成 11 年 8 月 26 日(木)～29 日(日)

## 4. 調査場所とスケジュール

8 月 26 日(木) 成田空港より出発  
8 月 26 日(木) アメリカ合衆国、ロスアンゼルス、ボーイング社  
8 月 27 日(金) スタンフォード大学  
8 月 28 日(土) サンフランシスコ空港より帰国  
8 月 29 日(日) 成田空港到着

## 5. 調査報告内容

## 5.1. Boeing 社

1999 年 8 月 26 日にロサンゼルス郊外にある Boeing 社を訪問し、昨年の日光でのシンポジウムにも参加していた Larson 氏に会い、Boeing 社におけるスマート材料・構造に関する研究の現状についての調査を行った。以下にそのときの会議における相手側の参加者を示す。

Mr. C. R. Larson: Resusable Space System, The Boeing Company

Dr. R. R. Neurgaonkar: Rockwell Science Center

Dr. G. Hartnett: Space Systems Division, Boeing North American, Inc.

Dr. D. L. Edberg: Structure Technology/Phantom Works

Dr. Q. Huang: Space Systems Division, Boeing North American, Inc.

まず Neurgaonkar 氏が、Rockwell Science Center における圧電素子の開発について説明を行った。Boeing が Rockwell の一部を買収したため、現在は Charles 氏ら別の組織に属しているが、以前は一緒に研究開発を行っており、今でも共同で研究を行っているとのことであった。Neurgaonkar 氏は圧電素子の開発の専門家であり、圧電素子を用いたアクチュエータの航空機への応用例を多数紹介した。また彼らが開発

した PMNT 単結晶は最大 1%もの変位を駆動することが可能であり、世界的に見てもトップレベルの圧電素子であるとのことであった。

次に岸教授が日本における”知的材料・構造システム”プロジェクトの概要を説明した。さらに、アコースティック・エミッション(Acoustic Emission, AE)を用いた材料の非破壊評価、特に AE 波形の逆問題解析について説明し、微視割れの大きさと割れモードにより微視割れを分類できることを示し、この AE 法の知的材料・構造システムへの応用の期待を述べた。

次に、Hartnett 氏がスペースシャトルのモーダル解析による欠陥検査システム(Shuttle Modal Inspection System, SMIS)の説明を行った。これは、スペースシャトルの再利用により機体に発生する損傷を、従来の非破壊評価手法によらずに比較的簡単に評価しようとするものである。すなわち、損傷が予想される tail や body flap などに対して、打ち上げ以前のモーダル特性を記録しておき、6~8 回の打ち上げ後に同じ部分のモーダル特性を調べ、以前のものと比較することにより、損傷の発生を検出する方法であり、10%以上の周波数変化があるものを異常とみなすものである。この方法による結果と他の方法による損傷評価の結果との比較を進めているとのことである。

さらに、Edberg 氏が彼らが開発している構造物のヘルスマニタリング(Structural Health Monitoring, SHM)のシステムについて述べた。これは、加速度や温度などの使用監視データから機体の部分に発生する加重やひずみを予測するシステム(Intelligent Load Monitoring, ILM)と、PZT 変換子やき裂センサーなどを用いて損傷診断するシステム(Active Damage Interrogation, ADI)からなり、さらにそれらのデータから損傷を予知(Damage Prognostics)し、メンテナンスの計画を図るものである。個々のデータの取り扱い、ニューラルネットワークやエキスパート/ファジー論理システムなどの人工知能的手法を用いることにより実現する。これらのシステムの有効性は、F/A-18 の機体、DC-XA (Delta Clipper-Experimental Advanced) 再利用ロケットの複合材料製の液体水素タンク、MD 探査ヘリコプターなどで試験を行い、確認されている。ADI システムにおいては PZT センサーのアレイを用いることにより、センサー間の伝達関数を測定することにより損傷を評価している。また、スマート材料・構造の有用性を示すための形状記憶合金(SMA)を用いた、知的航空機・船舶推進システムデモンストレーション(Smart Aircraft and Marine Propulsion System Demonstration, SAMPSON)プログラムについても説明があった。これは F-15 の inlet duct などを知的化する試みである。

最後に、Huang 氏から AE や AU(Acousto-Ultrasonic)を用いた損傷評価について紹介があった。X-34 の機体、DC-XA やスペースシャトルの液体水素タンクなどは複合材料でできているために、損傷が発生した場合は Kaiser 効果により AE 信号が発生するため、損傷を AE を用いて評価することが可能である。50 個程度の AE センサーを取り付けて実際のフライトの際のデータの採取を行って有効性を調べている。

これらの計測に用いる装置は、市販のものをベースにしながら Boeing で改良したものである。また、地震の際の被害から建物を守るための”知的建築物”の提案を行っており、この場合も AE の利用を考えていることも紹介があった。

以上 Boeing における知的材料・構造の研究状況を紹介してもらい、まずかなり研究が進んでおり、実際に適用する場所についてもよく考慮しているとの印象を受けた。特にヘルスマonitoringの部分は、知的材料ではないが知的構造として実際の応用がすぐにでも可能な段階にまで研究が進んでいるようにも思われた。また、アクチュエータにおいては、デモンストレータの重要性を改めて認識した。本プロジェクトにおいても、要素技術の単なる改良や高機能化にとどまらず、実機においても適用可能な統合的なシステムの構築が重要であり、その方向での適切な目標の設定がなによりも必要であるとの印象を受けた。

## 5.2. Stanford 大学

1999 年 8 月 27 日にサンフランシスコ郊外にある Stanford 大学工学部航空宇宙学科の Fu-Kuo Chang 教授を訪問した。同教授は、PZT センサーを構造物内に埋め込むことによりヘルスマonitoringを行う技術に関しての研究を進めている。1999 年 9 月 8 日～10 日に行われる第 2 回構造物ヘルスマonitoringのワークショップのオーガナイザーでもある。

まず実験室の見学を行い、彼らのシステムのデモンストレーションを見た。彼らは"Smart Layer"と称して、非常に薄い PZT 素子を適当な間隔で配置し、素子からの電気信号を取れるように銅箔で配線し、さらにそれらを樹脂ではさんだヘルスマonitoringのためのシートを開発している。その"Smart Layer"を実際に使用されている Al 合金ではさんだ構造体における実験を見せてもらった。彼らのシステムを用いると、構造体の表面をインパクトハンマーで叩くことにより衝撃力を発生させた場合、その衝撃が生じた位置と衝撃力の時間関数を実験室レベルでは非常に高い精度で評価可能であった。このシステムにおいては逆解析を行うプログラムが最も重要であることを Chang 教授は強調していた。

また、同じ"Smart Layer"を FRP の中にはさんだ構造体も作製していた。その場合は、繊維強化型複合材料における音速の異方性が問題となるが、それを考慮したプログラムを現在作成しており、異方性がある場合においても衝撃や損傷の位置を求めることができるようになってきていることを紹介してくれた。損傷を求める場合には、Acousto-Ultrasonic の手法を用いて、一つの PZT から弾性波を発生させて他の PZT により検出し、損傷の位置を求めるものである。

見学の後で、Chang 教授の教授室で質疑応答を行った。Al 合金に彼らの"Smart Layer"を組み込んだ場合、強度それ自体は Al 合金と比べて遜色のないものが得られているとのことであった。"Smart Layer"の大きさは現在 36 インチ四方のものが作製できているとのことであった。また使用限界温度は PZT 素子と樹脂を用いていることから

200℃で程度ある。また実際の応用においては疲労き裂進展が問題となるが、まだ彼らは疲労特性については計っておらず、これは今後の課題だと思われる。

また最後に一般的なスマート材料・構造の研究動向について尋ねたところ、Chang教授自身の研究は"Smart"ではなくて、"Health Monitoring"であるとのことであった。なぜなら"Smart"であるためには、"Actuation"を行う必要であり、大きな変位を生じさせるためには、非常に高い電圧が必要であり、それはエネルギー的に現実的ではないとの意見であった。少し時間がかかるが"Health Monitoring"で成果を出してから、"Smart"の研究に移っても遅くないという意見であり、それにはもう少し時間がかかるだろうとの見解であった。また、この分野における研究を振興して行くためには、デモンストレータを作製し、大いにアピールして行くことが是非とも必要であることを強調していた。本プロジェクトにおいてもデモンストレータに向けた適切な目標・計画の重要性を改めて認識した。

## 海外調査報告

## 1. 調査目的

「デモンストレータ試験総合技術評価」に関する米国内研究状況の情報収集

## 2. 調査員

東京大学先端科学技術研究センター	・教授	岸 輝雄
弘前大学理工学部	・教授	古屋泰文
機械技術研究所	・室長	平野一美
物質工学工業技術研究所	・主任研究官	津田 浩
名古屋工業技術研究所	・主任研究官	関谷 忠
東京大学先端科学技術研究センター	・協力研究員	遠山暢之
東京大学先端科学技術研究センター	・協力研究員	中島未知
(財)次世代金属・複合材料研究開発協会	・技術部長	宮崎崇夫

## 3. 調査期間

平成 11 年 9 月 21 日(火)～28 日(火)

## 4. 調査場所とスケジュール

9 月 21 日(火)	成田空港より出発
9 月 22 日(水)	アメリカ合衆国、ボストン、マサチューセッツ工科大学
9 月 22 日(水)	ボストン、Active Control Experts, Inc. (ACX)
9 月 23 日(木)	ペンシルバニア、ペンシルバニア州立大学 第 2 回 US-Japan Collaboration Meeting
9 月 24 日(金)	ワシントン、メリーランド大学
9 月 25 日(土)	ダレス空港より帰国
9 月 26 日(日)	成田空港到着

## 5. 調査報告内容

## 5.1. MIT

平成 11 年 9 月 21 日にボストンにある MIT の Nesbitt W. Hagood 教授の研究室である Active Materials & Structures Laboratory(ASML)を訪問した。学部生を含めて 40 人程度の研究者で構成されている同研究室は、電気-機械システムの制御技術に関する研究を行っており、特に圧電セラミックスを用いたアクチュエータの開発に力を入れていた。まず詳細な研究内容について紹介があり、アクチュエータ材料の開発およびデバイスの開発、さらにアプリケーションに渡る非常に幅広い研究を行ってい

るとの説明があった。アクチュエータ材料開発では材料の更なる高性能化の実現を目指し、PZN-PT 単結晶、強磁性形状記憶セラミックスの新プロセス技術の開発、さらに作製した材料についての評価およびモデリングを行っていた。特に圧電セラミックスについてはデバイスに用いるための細線化プロセスを精力的に行っていた。それらの材料を用いて開発したデバイスとしては小型モーター(piezoelectric rotary ultrasonic motor)、構造物を可変させるアクチュエータ(bender actuators, stack actuators)、Active Fiber Composites (AFCs)、メゾスケール油圧システムとして圧電マイクロポンプを挙げていた。モーターの実用化としてはオートフォーカスレンズや X-Y ステージの駆動部等以外に、今後自動車産業、ロボット産業や MEMS 等への適用目指しているとのことであった。AFCs の実用化としては AFCs のパネルを構造物表面に貼り付けることによって、飛行機、ヘリコプター、自動車、エレベーター等の内因的音響制御、潜水艦や魚雷、変圧器等の外因的音響制御を行おうという試みがあるとの説明を受けた。

次に研究室を訪問し、実験設備の見学や彼らの作製したデバイスのデモンストレーションを見学した。PMN 単結晶ファイバの製造プロセスの in-situ モニタリング装置、ヘリコプターの回転翼、AFCs の作製装置等を見学した。また当研究室で作製した直径 8cm のプロトタイプのもーターを見せてもらい、指で力一杯押さえつけても回転を止めることができないほど、高いトルクを発生するといったデモンストレーションを行ってもらった。さらに航空機機体の振動の検知および制御を行うための長さ 1.6m のアルミニウム製模擬機体の紹介があった。この模擬機体のアルミニウムパネルは AFCs パネルへの取り替えが可能となるように設計されており、AFCs パネルの最適設計や騒音制御アルゴリズムに関する研究が行われているとのことであった。さらにヘリコプターの回転翼の振動と大騒音を制御するための約 2m 径の回転翼の実機設備を備えていた。これはボーイングの協力によって設計したもので、Labview 計測システムに接続されており、48 チャンネルの入力が可能で、AFCs や X-frame アクチュエータの埋め込みにより回転翼を湾曲させ、その際の推力、発生トルクや縦揺れモーメントの計測を行っていた。さらに各回転翼のひずみや圧力を in-situ で計測したり、アクチュエータに電力供給するシステムを兼ね備えていた。

以上、MIT における知的材料・構造システムの研究状況を紹介してもらい、基礎的な研究開発はもとより、実際に適用する場所や環境についてもよく考慮を行っており、常に実用化を見据えた研究を行っていると印象を受けた。特にモーターや AFCs デバイスを用いた振動・音響制御については実用化レベルにあるように見受けられた。Hagood 教授は知的材料・構造システムのデモンストレーターの重要性を強調していたが、米国においてもまだ始まったばかりとのことであった。従って、今後日本においても要素技術の単なる改良や高機能化にとどまらず、実機においても適用可能な統合的なシステムの構築が重要であり、デモンストレーターの重要性を

実感した。

### 5.2. Active Control Experts, Inc. (ACX)

平成 11 年 9 月 21 日に MIT の近くに位置するスマート材料・構造を実用化、商品化しているベンチャー企業である ACX を訪れた。この ACX は 1992 年に MIT 航空工学科の博士号を習得したばかりの Kenneth B. Lazarus 氏が同大学教授であった Edward Crawley 氏とともに興した会社であり、現在は 5 人の研究者達による研究開発が行われている。1993 年に圧電セラミックスを用いた QuickPack アクチュエータというシート状のアクチュエータを開発・商品化し、次々とスポーツ関連分野に進出していった。実際の商品およびデモンストレーションを見学させてもらい、スマートスキー、スマートスノーボード、スマート水上スキーが紹介され、通常の板の表面に QuickPack アクチュエータを貼り付けて、制振を可能にした比較的単純なものであったが、非常に大きな効果が得られるとの説明があった。それらの他に野球のバットやマウンテンバイク等へも適用しているとのことであった。また圧電セラミックスのバイモルフアクチュエータや音響制御のデモンストレーションを見学した。さらにスポーツ分野だけでなく、航空機分野の制振機能や油圧バルブへのアクチュエータ適用を進めているとのことであった。

以上 ACX の見学を行い、ACX が開発した QuickPack アクチュエータのように非常にコンパクトなシート状デバイスは容易に構造物の表面に貼り付けることが可能であるため、制振が要求される幅広い分野において、容易に実用化される優位性があることを感じた。今後スマート関連の商品化が加速的に進み、世界経済においても大きな位置を占める産業になることを確信すると同時に、日本においても企業化につながる研究開発を進め、ベンチャー企業育成の助成を行う必要性を感じた。

### 5.3. The Pennsylvania State University

平成 11 年 9 月 23 日にペンステート大学の Materials Research Laboratory (MRL) を MIT の Hagood 教授と共に訪問し、内野教授の案内で研究室(ICAT)見学を行った。MRL は 1962 年に学際的な材料開発を目的として設立され、物理学、材料科学、セラミックス学、電子材料学、電子工学、数学、機械学、農学、そしてコンピューター科学といった非常に多岐に亘る研究者によって構成されており、現在大学院生を含めて 150~200 人程度の研究者が従事しているとのことであった。ペンステート大学の年間予算が約 4 億ドルの内、約 1 千万ドルが MRL の年間予算であり、100 以上のスポンサーによる支援を受けているとの説明があった。内野教授の研究室である ICAT は 1992 年にアクチュエータ材料、エネルギー変換材料の開発(圧電セラミックス、電ひずみ材料)およびそれらの固相アクチュエータを用いたマイクロポジショナー、小型モーターや制振装置の設計・作製を目的として設立された。当研究室で現在行ってい

る研究内容は大きく分けて、以下の5分野である。

- 1) 圧電/電ひずみセラミックス、圧電/電ひずみポリマー、形状記憶合金、形状記憶セラミックスおよびそれらで構成される複合材料の開発
- 2) ハイブリッドセンサ/アクチュエータシステム、多層アクチュエータ、薄膜の作製プロセスの開発
- 3) アクチュエータ材料、エネルギー変換材料の基盤技術開発として、応力/ひずみ測定技術、駆動/制御技術、知的材料システム、圧電センサ等の研究開発
- 4) 光学制御システム、精密機械、適応的振動制御、医用電子機械などのへの実用化
- 5) 超音波モーターの開発

実際に研究室見学を行い、強誘電/圧電セラミックス成形のための焼結炉、ボールミル等の設備が多数存在しており、材料プロセスにも精力を注いでいるとの印象を受けた。また強誘電セラミックスにおけるドメインの移動を動的に観察することのできる高分解能 CCD 顕微鏡、温度や負荷応力が可変である極微小変位測定装置、超音波モーター設計のための高電圧インピーダンスモニタリング装置などを見学した。また各 MRL 共通装置には専門オペレーターが従事しており、使用研究室が使用料を支払うシステムを採用していた。ICAT で開発した小型モーターの試作品を紹介してもらったが、それを医用分野に適用して、胃癌の除去等に利用したいとのことであった。

以上 MRL の見学を行い、MIT の研究室と同様に新規材料開発のためのプロセス技術および評価といった基礎的研究に加えて、実用化に向けたデモンストレーションにも精力を注いでいるとの印象を強く持った。さらに行動を共にした Hagood 教授は非常に好奇心旺盛で活動的な人物であり、各実験設備や試作品に実際に触れ、詳細に観察し、多くの質問を行っていた。特に創造力と学際的な知識が要求される知的材料・構造分野における研究者にとって参考になる人物であると実感した。

#### 5.4. University of Maryland

平成 11 年 9 月 24 日にワシントン郊外にあるメリーランド大学を訪れ、航空工学科の Inderjit Chopra 教授、機械工学科の James S. Sirkis 助教授、材料・原子力工学科の Wuttig 教授の研究室の見学を行った。

Chopra 教授の Alfred Gessow Rotorcraft Center (AGRC) は Army Research Office によって 1982 年に設立された研究センターであり、ヘリコプターの知的回転翼の研究を行っている。回転翼システムのデモンストレーションを行ってもらい、回転翼に埋め込んだ PZT アクチュエータによってフラップが可動するといったものであった。さらに可動機能を備えるだけでなく、騒音・振動を抑制するシステム開発も同時に行っていた。実験設備の見学も行ったが、非常に大規模な設備を数多く有しており、

直径約 3m の真空スピンチャンバー、回転翼の安定性試験を行うベアリングレス回転装置、知的回転翼の回転装置等があり、実機レベルによる試験及び評価を行っていた。NASA や陸軍・海軍さらにボーイングなどからの資金援助および共同研究による技術支援を後ろ盾に、実用化を目指した研究開発を行っているという印象を強く受けた。

Sirkis 助教授は不在であったが、Shipping Chen 助教授の案内で Smart Materials and Structures Research Center (SMSRC) の見学を行った。SMSRC は 1992 年に設立され、現在 6 人の教職員と 30 人の大学院生で構成され、光ファイバセンサの開発および光ファイバセンサを用いたヘルスマニタリングや振動検知等を行っている。CFRP 中に光ファイバセンサを埋め込む作業過程で光ファイバは傷つきやすいものの、成形後の光ファイバ/母構造界面の影響は特に問題ではなく、むしろ成形中の樹脂漏れが一番の問題であると説明を受けた。光ファイバセンサを適用する分野としては、スペースシャトルにおける液体水素のリーク検出、120 個のブラッグ格子ファイバセンサシステムによる船舶のヘルスマニタリング、さらに戦車の砲の角度制御システム等があると説明された。またブラッグ格子書き込み装置や長さ 1.2m の模擬大砲に取り付けたプロトタイプの光ファイバ視準器等を見学した。

Wuttig 教授の研究室では TiNi 系、Cu 系、Fe 系感温型形状記憶合金および Ni-Mn-Ga 系強磁性型形状記憶合金の開発・評価を行っている。実験室において開発した形状記憶合金の薄帯やファイバのサンプルを見せてもらい、またプロセス装置や減衰特性評価装置などの見学をした。見学したメリーランド大学の他の研究室と比較すると実用化のためのデバイス化やデモンストレーションに関する研究というよりも、むしろ材料プロセスおよび評価といったいわゆる材料屋らしい研究を行っているという印象を受けた。

以上メリーランド大学における知的材料・構造の研究状況を紹介してもらい、見学した他の大学に比較して歴史が長い分、かなり研究が進んでおり、既に実機レベルでの研究が始まっていることを実感した。また日本の大学連携型産業科学技術研究開発プロジェクトで行っている航空・宇宙関連分野への適用を目指した知的材料・構造システムの研究開発の先導的研究を行っており、日本の研究・技術レベルの向上のためには今後米国との共同研究あるいは人材交流が不可欠であると痛感した。さらに、航空・軍事産業に乏しい日本において米国と同様の研究を行うことに若干の疑問を感じ、日本独自の知的材料・構造システムへのアプローチ発案の必要性を感じた。

## 海外調査報告

### 1. 調査目的

「デモンストレータ試験総合技術評価」に関する米国内研究状況の情報収集および第7回「知的構造・材料」国際会議における技術情報の交換

### 2. 調査員

東京大学先端科学技術研究センター・外国人客員研究員 張 炳國

東京大学先端科学技術研究センター・外国人協力研究員 ク ザホ

### 3. 調査期間

平成12年2月26日(土)～3月10日(金)

### 4. 調査場所とスケジュール

2月26日(土)	成田空港より出発
2月28日(月)	アメリカ合衆国、ボストン、マサチューセッツ工科大学
2月29日(火)	バージニア、バージニア工科大学の知的材料システム・構造センター
3月1日(水)	ペンシルバニア、ペンシルバニア州立大学
3月3日(金)	サンフランシスコ、スタンフォード大学
3月3日(金)～9日(木)	ニューポートビーチ、マリオットホテル 第7回「知的構造・材料」国際会議
3月9日(土)	ロスアンジェルス空港より帰国
3月10日(日)	成田空港到着

### 5. 調査報告内容

#### 5.1. バージニア工科大学・知的材料システム・構造センター

2月29日に訪問したバージニア大学の知的材料システム・構造センターは、政府と産業界の支援で、構造的な制御デザイン・作製のより効果的な方法の開発、多様な幾何学的トラスの動力学の開発、形状記憶合金複合材料の開発、分散制御のための圧電アクチュエータの開発、そしてオンラインヘルスマモニタリングのための定性

的非破壊評価等を開発している規模の大きい研究センターである。人員構成は教授が7人、博士課程の学生が11人、修士課程の学生が5人、研究員が3人である。主な研究テーマは、①インピーダンスベースモデリング、②アクティブ材料の電子-力学モデリング、③商用化した誘導変位アクチュエータのデータベース化、④誘導変位アクチュエータデザインの電力とエネルギー問題、⑤高感度誘導変位アクチュエータの開発、⑥大振幅の回転誘導変位アクチュエータ、⑦ヘリコプターブレイドのアクティブ振動制御、⑧定性的なリアルタイムヘルスマonitoring、⑨レーザドップラー非破壊評価、⑩複合材料の非破壊評価のための粒子標識化、⑪損傷に強い SMA ハイブリッド複合材料の開発、⑫磁気粘性流体、そして⑬流体の測定のためのピエゾ粘度計の開発などである。

上述したテーマはかなり様々な知識が要求されるため、機械工学科、航空工学科、電気電子工学科、物理学科等が協力して研究を行っている。勿論、総てのテーマについて精力的に研究が行われているが、その中でも、スマートパッチ(薄い PZT センサ)を用い、そのインピーダンスを利用してヘルスマonitoringを行ったり、振動を制御するのがメインになっている。応用分野は、鉄骨構造物、自動車、人工衛星のアンテナ、航空機、タイヤ、地下鉄などの損傷評価および振動制御である。

Inman 教授は、これから 2、3 年でアンテナ分野は大量生産が可能となり、5 年後には自動車と航空機分野でも可能となり、10 年後にはヘルスマonitoringとアクチュエーティングを含めた総合システムが完成されると予想していた。

## 5.2. スタンフォード大学・航空宇宙工学科 構造・複合材料研究室

Fu-Kuo Chang 教授は、従来は複合材料の破壊力学について研究を行っていたが、最近ではスマート材料・構造システムで最も重要なヘルスマonitoringに集中して研究を行っている。応用分野としては、スペースシャトル、人工衛星、飛行機、戦闘機、橋などを狙っている。

同教授は今までのヘルスマonitoring手法は Top-down であり、その手法を用いて信頼性を高めるためにはさらに費用がかかると述べた。代わりに、Bottom-up の概念でアプローチすると信頼性を高めても、それにかかる費用はあまり変わらないと述べた。同教授のいう Top-down とは、Maintenance on Demand を効率よくするために、構造物を作製する時から Built-in Sensor Network を構成して、ヘルスマonitoringを行う、つまり In-service Structure である。

同教授は自分の最近の研究をまとめて、ニューポートビーチで開かれるシンポジウムで「Structural Health Monitoring : Demands and Challenges」という題目の Keynote Address を行う予定だったため、訪問の当日には研究室でそのリハーサルを見学することが出来た。発表の時、ボーイング機に使われている CFRP に対して、ヘルスマニタリングシステムを適用した例を示した。母材は 1,000×1,000×5 mm 程度の板状であり、多数のパッチタイプの PZT センサが接着されているシートおよび電気回路が埋め込まれていた。ハンマーを利用して板に衝撃を与えると、PZT センサからの信号には変化が起き、その変化を計測装置で検知し、リアルタイムで解析(位置標定)され、結果がすぐにモニターに映し出された。

同教授の発表した結果には、弾性率の異方性問題および位置標定の精度問題などまだ改善しなければならない点もあったが、センサから解析装置および解析プログラムまでのシステム化を行ったことは、高い評価に値するものと思われる。

最後に、同教授はヘルスマニタリング研究で最も重要なのは、信頼性と費用とエネルギー節減であることを強調した。

### 5.3. 第7回「知的構造・材料」国際会議

3月5日から9日までアメリカの Newport Beach の Marriott Hotel で SPIE's が開催された。今回のシンポジウムの特徴は一般の研究者からの口頭発表とポスターセッションによる論文発表を含めて、スペシャルイベントとして Technology Overviews 講演と共に、実用化されたスマート関係の商品と装置に関連した企業からの展示会があった。最新のスマート研究動向と実用化のための技術的な面を紹介したスペシャルイベントとして Technology Overviews 講演は3月5日に開かれた。このセッションは Sensors, Smart Structures, Actuators, Power Systems, Controls, Damping & Isolation, MEMS, Directions and Trends の8分野に分け、各分野の専門家による45分間の特別招待講演があった。展示会に参加した企業はほとんどスマート研究を行っている研究者たちが創業したベンチャー企業であり、各企業の重要な研究内容は今回の口頭発表で発表された。特に、韓国から約40人の研究者が参加したことから、韓国でもスマート研究に関して強い関心を持っており、本格的に始まる段階と考えられる。ヨーロッパの中では特にドイツからの参加者が多く、活発な研究が行われている印象を受けた。Ferroelectrics 分野ではほぼすべてをドイツ人研究者が占めていた。また、ヨーロッパの場合、研究は各国間の協力の形でヨーロッパ各国の研究機関が集まり、

国際プロジェクトして行われている。例えば、BRITE、EUCAM、COSTIC、ESPRIPなどが挙げられる。研究発表は、スマート材料とストラクチャーを構成している要素技術別に、9分野で約620件の論文発表が行われた。具体的には、Mathematics and Control in Smart Structure 分野では79件、Smart Structures and Integrated Systems 分野では108件、Sensor 分野では68件、Actuator and Devices 分野では49件、Smart Systems for Bridges、Structures and Highways 分野では53件、Damping 分野では63件、Smart Electronics and MEMS 分野では47件、Industrial and Commercial Application 分野では49件、Active Materials 分野では103件であった。発表された研究者たちの専門分野も幅広く材料分野から物理関係、特に電子、機械、航空分野の研究者が多かった。アメリカのスマート関連の研究はほぼ軍事的な応用を目指して行われている。例えば、Undersea Warfare Center の J. Powers 氏による研究は PMN-PT セラミックスを利用し、センサとして海軍の潜水艦のソナー開発である。特に、航空分野の研究では、ヘリコプターを対象物として、翼やトランスミッション振動とノイズの制御、ヘルスマニタリング、形状制御に関して研究発表が行われた。SMA に関する研究は形状記憶変態やダンピング、新しい SMA の物理的な特性やモデリングに関して研究発表が行われた。全体的に研究分野が幅広く、基礎特性の解析などの学問的な研究も多かったように見受けられた。今回発表された研究内容はプロシーディングとして今年7月に出版される予定なので、各々の研究に関して詳細はこのプロシーディングが参考となる。Rhombus Consultants Group Inc. の M. Regelbrugge 氏の講演ではスマート研究の実用化は2020年頃だと言う展望である。コメントからこ今後のスマート研究実用化を実現にはより長い時間と努力が必要だという印象を受けた。

## 海外調査報告

## 1. 調査目的

国際スマート構造・材料シンポジウムに出席し、「知的材料・構造システム」に関する海外最新研究開発動向を把握する。

## 2. 調査員

三菱重工業（株）名古屋航空宇宙システム製作所  
研究部 主管 山口泰弘

## 3. 調査期間

平成12年3月4日（土）～3月11日（土）

## 4. 調査場所とスケジュール

3月 4日（土）	名古屋空港より出発
3月 5日（日）～3月9日（木）	Newport Beach Marriott (Calif.USA) 第7回 SPIE International Sympo.
3月10日（金）	ロサンゼルス空港より帰国
3月11日（土）	名古屋空港到着

## 5. 調査報告内容

## (1) シンポ概要

## ①発表

約600ペーパーを9テーマに分類し9会場で同時進行で口頭発表。初日には、要素技術を含む全体オーバビュー、ならびに各日の朝一番に基調講演が実施された。3/8（水）には、東大武田教授（知プロサブリーダー）から、「日本の大学連携プログラムにおけるヘルスマンタリングの最新動向」の基調講演が多数の聴講者のもと盛況に行われた。

又、約30件のポスターセッションとして、3/6、7の一般講演の後、飲物付の和やかな雰囲気で行われ、参加者も多く有効であった。我々のシンポでも、この方式の採用を提案したい。

## ②参加者

正確な発表は後日になると思われるが、最終日に事務局から得た情報では、約850名の登録者数で昨年より約100名増えており、ペーパー数の増大とあわせ、各国で年々関心が高まっている様子が伺えた。参加国では、地元米国から多数の出席者があるのは当然として韓国勢の増大が目立っていた。日本からは、知プロジェクト関係者も含め約30名程度。

## ③展示会

3月7日、8日の2日間限定で24社が展示、米国中心のベンチャー企業的な会社が多い。各社とも小さなブースではあったが、センサ/アクチュエータのデバイス及びパッケージ、システム化製品ならびにシステム制御を含むコンサルタント事業の売込みなど熱心であった。大学のアイデアを商品化するなど新技術が事業（利益）創出のレベルに迄育っており、米国政策の一環であるベンチャー育成と投資対象として注目されるレベルに到達している様子が伺えた。

我々の研究成果活用の方向付けの参考にしたい。

9テーマのタイトルと展示会出展者リストをP. 4 に示す

## (2) 全体動向

①欧米では、基礎研究レベルから応用・実用化段階へ着実に進展中

- ・金属構造を対象とした Health Monitoring, Active 構造技術では、すでにモデル供試体から実機による実験レベル迄到達
- ・複合材構造では、センサ/アクチュエータの外付けタイプが先行、埋込タイプは未だ基礎研究レベル

②ベースとなる「センサ・アクチュエータ材料」の性能向上とともに、繊維化など実構造に適用しやすいパッケージ化が量産・商業レベルに迄成長、充実。

③特に米国では、DARPA がほとんどの大型研究のスポンサとなるなど軍需用途先導で大学/国研/企業の研究が進められており、当面の用途も無人機 (UAV)、戦闘機、ミサイル、魚雷、軍事衛星が先行。

## (3) 個別分野

航空宇宙分野への応用を中心に聴講、特に興味ある発表については発表者に挨拶とディスカッションを行ない、理解を深めた。一部の発表者からは、メールやレターで帰国後にホームページの全文など詳細情報を得ることなどができ、本国際会議に参加することは情報入手、研究者との面識作りの上で極めて有益であった。以下P. 5 に応用研究例のまとめを、P. 6 ~ 9 に発表内容の一例を示す。P. 8 は、従来より面識のあった Chang 教授の許可を得て撮影したデモシステムで、聴衆の注目を浴びていた。彼の Piezo センサハックは外付けにより簡単にモニタリングできるデバイスである。P. 9 の発表は、Boeing 社 Dr. Ikegami によるもので論文賞を受賞、実機搭載型の Crack Monitoring System として実用面で注目を集めた。彼とは、1995年1月 JETRO 調査ミッションで Boeing 訪問時に面識があったので、彼等の取組についても聴取できた。当面は、軍用経年機のヘルスマニタリングに注力しており、スポンサーは米空軍の模様。

又、調査員の得意分野であるマニファクチャリング技術分野については、本シンポと平行開催の「NDE シンポ」の中での発表が多く直接聴講できなかったが、アブストラクト集と展示会から得た一例をP. 10 に示す。いずれも、光ファイバセンサ・誘電センサ・超音波センサにより硬化中の樹脂硬化度・樹脂流動をモニタしながら高品質な複合材料構造を成形する技術で、我々の取組みと同じ方向にある。センサシステムも完成しつつあり参考にしたい。

## (4) センサ/アクチュエータ デバイスのパッケージ化

展示会での入手情報・資料及び講演発表の中で印象を受けた製品例を下表に、カタログの一例をP. 11 に示す。すでに光ファイバセンサシステムは商品化されたものが多い。又、ヒエゾセンサ/アクチュエータもパッケージとして商品化されつつあり、実構造に簡単に適用できるシステムとして完成されつつある。素子の性能向上とともに、このようなパッケージ化はスマート構造の実用化を推進する上で不可欠である。

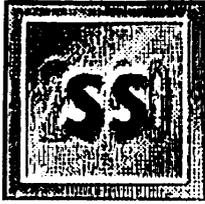
名 称	会社/大学	内 容
Quick-Pack	ACX	PIEZO BIMORPH 型アクチュエータ
Patch-Actuator Smartpanels	MSI	射出成形 PIEZO・CERAMICS
Active Fiber Composites	CCC/MIT	PIEZO-Fiber Composite Pak
S-HMS	Stanford Univ.	PIEZO センサ/Kapton film
Fiber Optic Sensor kits	Blue Road Res.	光ファイバ (FBG) 歪センサシステム
AFSS	Luna	光ファイバ (EFPI) 歪センサシステム
Pressure Belt	Endevco	翼圧力分布計測システム

Name	Activity
AMT(Belgium)	Development, manufacturing and sales of shape memory alloys
FEMCOS(Germany)	FE codes for piezoelectrical elements
FRAS(Germany)	Active vibration damping
SMARTECH(Switzerland)	Fibre optic sensors, structural monitoring, engineering, instrumentation project management, advanced data analysis
Smart Fibers(UK)	Bragg grating fibre optic sensors for operational loads monitoring

## 6. まとめ・所感

以上の調査報告のとおり、欧米のレベルは基礎研究段階から応用・実用化研究段階にあり、一部では実機による実証実験のレベルにある。一方、我国では、知的プロジェクトを中心とする基礎研究段階で格差は大きい。今回の調査結果を反映し今後の取組の中で下記を強力に推進していきたい。

- ①欧米にない日本独自アイデアの研究強化と加速、例えば「細径（40 μm）光ファイバセンサ埋込による複合材構造の知的成形とヘルスマニタリング」や「BOTDR 分布型光ファイバ歪センシングシステム」など。
- ②欧米ではすでに商品化も一般化しつつある「センサ・アクチュエータデバイス」のパッケージ・システム化。
- ③H13～14fy 予定の「デモンストレータ試験」の実証技術項目と具体的内容についての、対外アピール・先進性と確実実証を考慮した、さらなり精査・計画立案。



## Smart Structures 2000 Conferences

- 3984 – Mathematics and Control in Smart Structures
- 3985 – Smart Structures and Integrated Systems
- 3986 – Sensory Phenomena and Measurement Instrumentation for Smart Structures and Materials
- 3987 – Electroactive Polymer Actuators and Devices (EAPAD)
- 3988 – Smart Systems for Bridges, Structures, and Highways
- 3989 – Damping and Isolation
- 3990 – Smart Electronics and MEMS
- 3991 – Industrial and Commercial Applications of Smart Structures Technologies
- 3992 – Active Materials: Behavior and Mechanics

### Exhibitor Index

Active Control eXperts, Inc.-ACX .....	100
Blue Road Research .....	201
Business Communications Co. ....	112
CSA Engineering, Inc. ....	118
Dunegan Engineering Consultants .....	504
Dynamic Structures and Materials, LLC .....	403
Endevco .....	110
Hysitron Inc. ....	105
Kluwer Academic Publishers .....	302
Luna Innovations, Inc. ....	121
Magsoft Corp. ....	502
Materials Systems, Inc. ....	303
Micron Optics, Inc. ....	113
MicroStrain, Inc. ....	106
Mide' Technology Corp. ....	402
Photonics Spectra, Laurin Publishing Co., Inc. ....	404
Polytec PI, Inc. ....	115
QMI Inc. ....	301
ROCTEST Ltd. ....	114
Rohrer GmbH Mess- & Systemtechnik .....	102
Smartec SA. ....	203
Thermal Wave Imaging, Inc. ....	107
TREK, Inc. ....	104
Varian Imaging Products .....	123

航空宇宙分野への応用	Active/Adaptive Structure	
① 回転翼		
Blade Trail Edge Flap Tip Trim	<ul style="list-style-type: none"> <li>•PIEZO, SMA Actuator</li> <li>•Spin→Hoover Test→風試→Flight Testへ</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>•MD-900</li> <li>•Bell-412</li> <li>•Eurocopter</li> </ul>
Wing Active Flow Control Flipperron	<ul style="list-style-type: none"> <li>•PVDF Diaphragm</li> <li>•PVDF Bender</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>•V-22</li> </ul>
Gear Box Strut	<ul style="list-style-type: none"> <li>•PIEZO Actuatorによる制振</li> </ul>	—

航空宇宙分野への応用	Active/Adaptive Structure	
③ 宇宙		
衛星 Release Device	<ul style="list-style-type: none"> <li>•SMA利用 Low-Shock式</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>•Falcon</li> <li>•JAW(Lockheed)</li> </ul>
太陽電池展開ヒンジ	<ul style="list-style-type: none"> <li>•SMA Hinge</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>•Flexible Solar Array</li> </ul>
衛星のActive制振、 位置高精度制御	<ul style="list-style-type: none"> <li>•PIEZO利用</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>•ASTREX</li> <li>•ACESA</li> <li>•STRV-2</li> <li>•SPICE</li> </ul>
衛星の小型化(低コスト化) 光学構造物の大型化	制御機構のスマート化要求大	

航空宇宙分野への応用	Active/Adaptive Structure	
② 航空機		
双尾翼 Buffet対策	<ul style="list-style-type: none"> <li>•PIEZO Actuator</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>•F-18</li> <li>•Typhoon</li> </ul>
主翼 フラッタ減衰	<ul style="list-style-type: none"> <li>•PIEZO Actuator フラッタ速度10%向上</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>•F-16</li> </ul>
胴体 音響振動制御	<ul style="list-style-type: none"> <li>•PIEZO Actuator -8db</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>•F-15 underbelly panel</li> </ul>
フラップ 形状制御	<ul style="list-style-type: none"> <li>•Belt Rib(PIEZO)による Active制御</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>•A340/DLR</li> </ul>

航空宇宙分野への応用	Health Monitoring	
破壊モニタ	<ul style="list-style-type: none"> <li>•AE(PIEZO)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>•F-16,FS479バルクヘッド (疲労試験中モニタ)</li> <li>•X33/DCXA液水タンク (光ファイバ併用)</li> </ul>
衝撃モニタ	<ul style="list-style-type: none"> <li>•PIEZOセンサ</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>•B737尾翼モデル (スタンフオード大)</li> </ul>
歪モニタ	<ul style="list-style-type: none"> <li>•光ファイバ (FPI/FBG/Brightant)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>•F-18</li> <li>•Typhoon</li> <li>•(アメリカズカップ)</li> </ul>
経年機対策/メンテナンス削減のためニーズ大		

# Neural Net Based Controller for Flutter Suppression Using ASTROS\* with Smart Structures

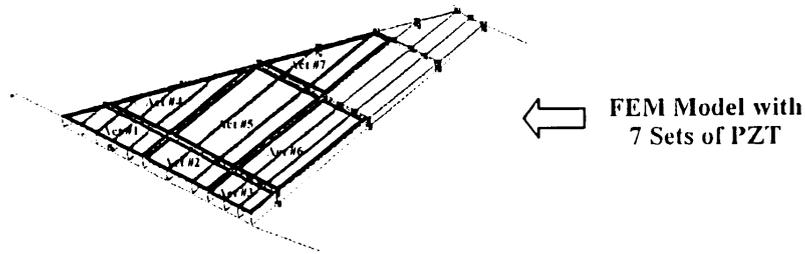
C. Nam<sup>a</sup>, P.C. Chen<sup>a</sup>, D.D. Liu<sup>b</sup>, J. Kim<sup>b</sup>

<sup>a</sup> ZONA Technology Inc., 7430 E. Stetson Dr., Suite 205, Scottsdale, AZ 85251-3540

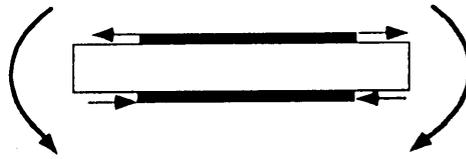
<sup>b</sup> Dept. of Mechanical and Aerospace Eng., Arizona State University, Tempe, AZ 85287-6106

## Modeled F-16 Wing with 7 Sets of PZT Actuators

*Objective: 10 % increase in flutter speed by active means using PZT actuators*



PZTs on Wing:  
Pure Bending  
Actuation

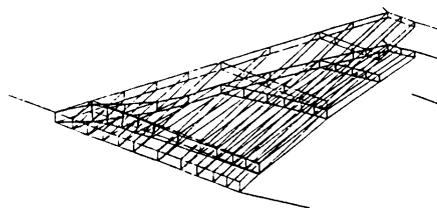
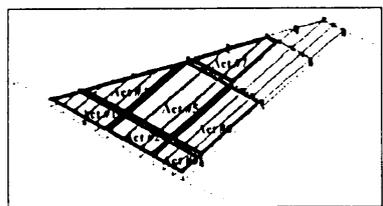


ASTROS 2001.10.200001-000000

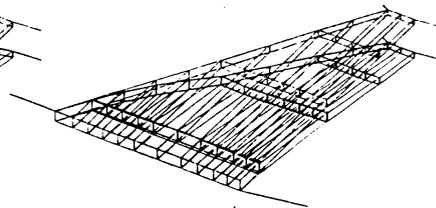
ZONA TECHNOLOGY

## Control Mode Shapes due to PZT Actuation

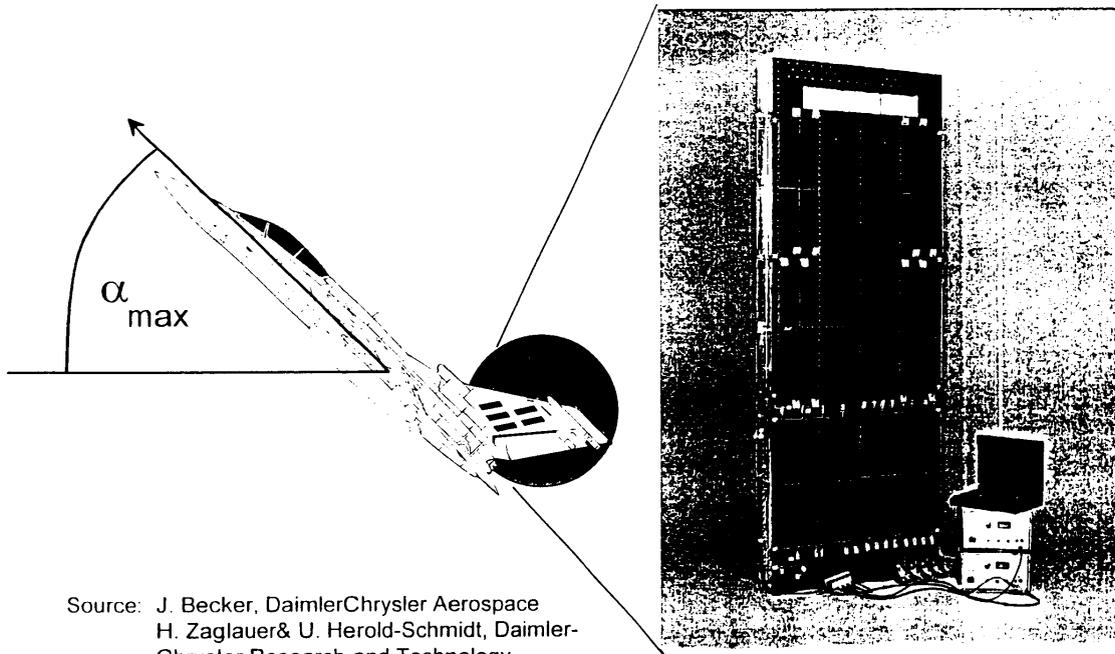
*Applied Voltage = 200 Volts*



Actuator No 1

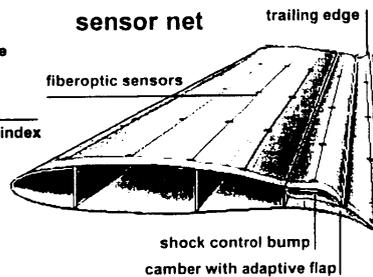
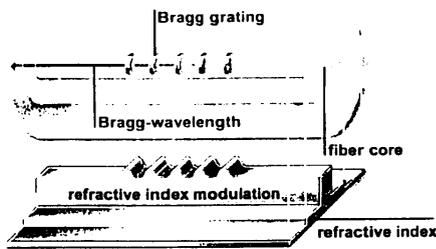


Actuator No 2



Source: J. Becker, DaimlerChrysler Aerospace  
H. Zaglauer & U. Herold-Schmidt, Daimler-Chrysler Research and Technology

**Fiber-optic Bragg grating**



**Features:**

- *small size, light weight.*
- *compact, robust*
- *immunity to EMI*
- *lead insensitive*
- *self calibration*
- *multiplexing (!)*
- *smart structure compatible*
- *low cost potential*

**Applications:  
continuous monitoring of**

- *internal strain*
  - *load*
  - *vibration state*
  - *temperature*
  - *structural integrity*
- in**
- *adaptive systems (e.g. adaptive wing)*
  - *structure diagnosis*
  - *health monitoring*
  - *impact detection*

Source: M. Trutzel, DaimlerChrysler Research & Technology



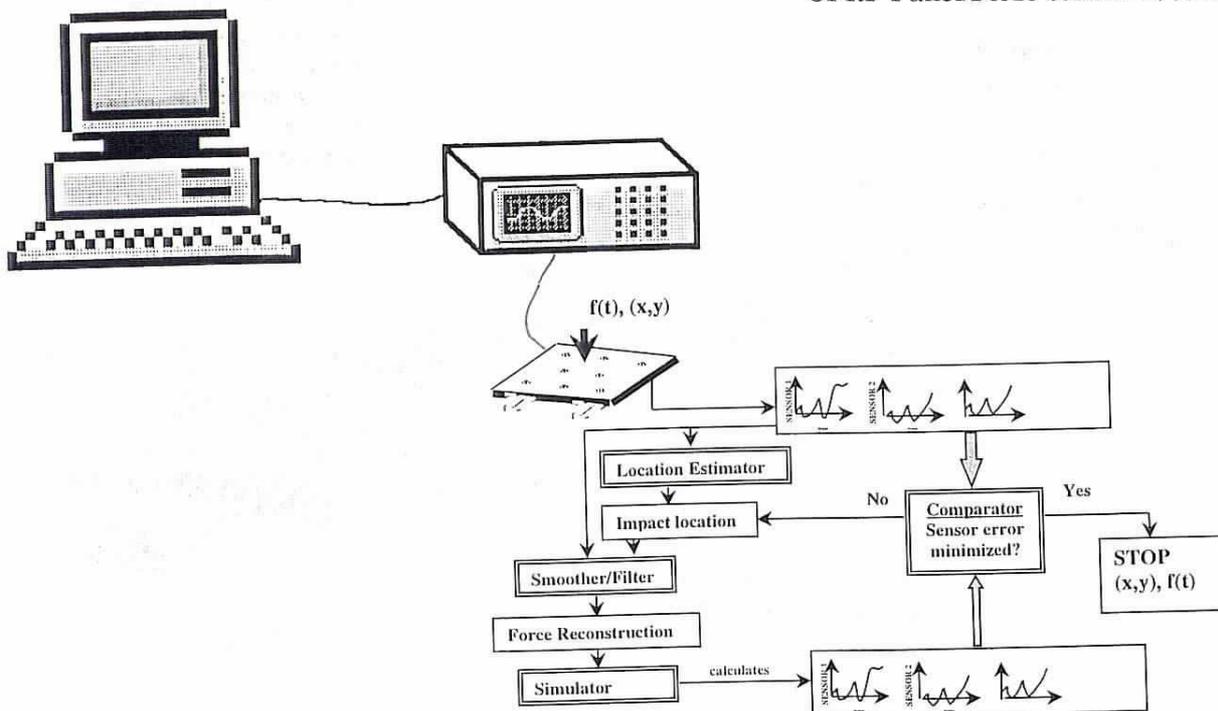
Keynote Address ..... 9:20 am

Structural health monitoring: demands and challenges, F. Chang, Stanford Univ. .... [3990-17]

講演会場に持ち込んだ衝撃モニタリングシステムのデモ  
Stanford Univ. Fu-Ko-Chang 教授



CFRP Panel/Piezo sensor 外付けタイプ



# Crack Growth Detection and Monitoring using Broadband Acoustic Emission Techniques

Eric Haugse, Tamara Leeks, Roy Ikegami and Pat Johnson  
Boeing Phantom Works

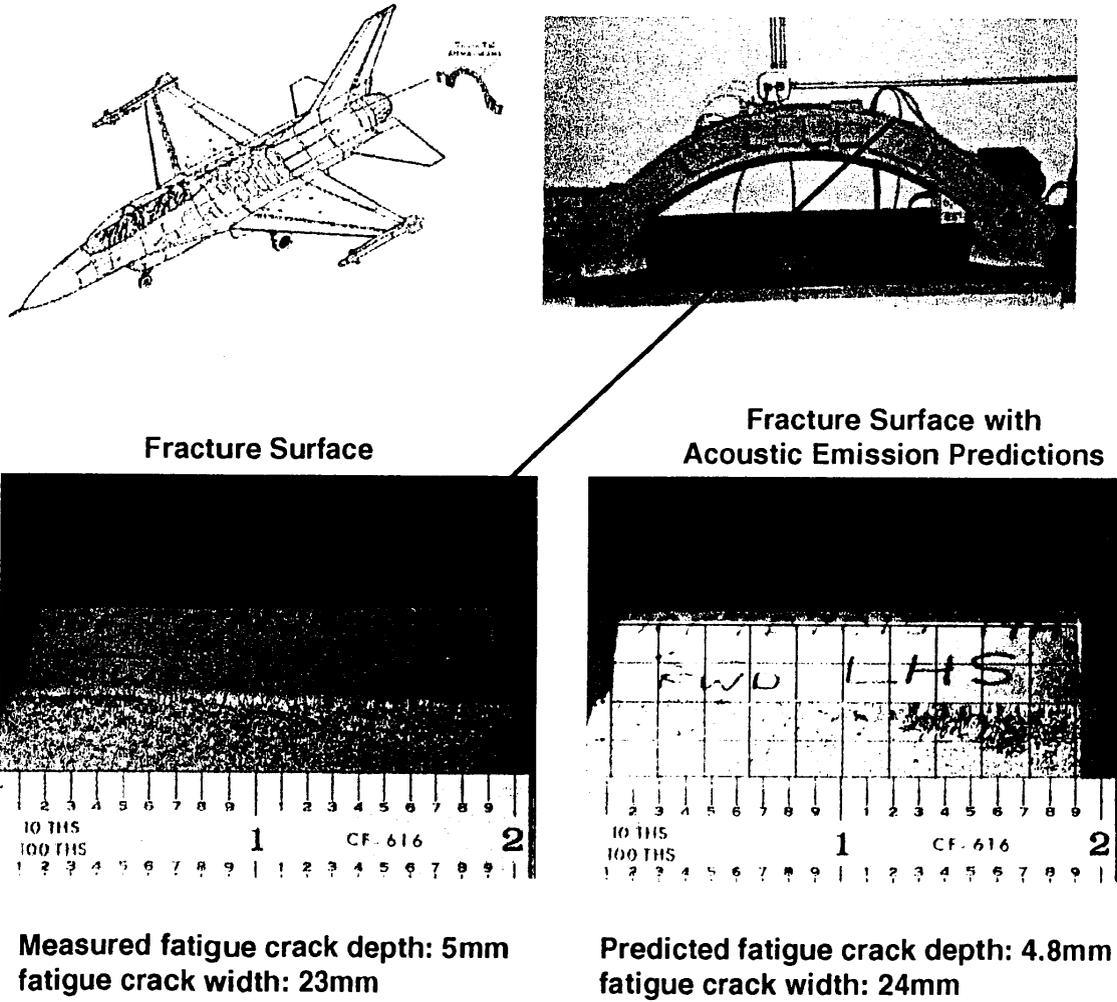


Figure 2.3. Illustration of F-16 bulkhead test results

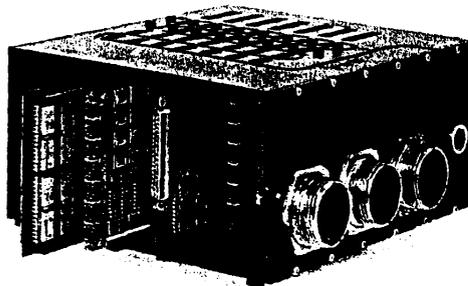


Figure 3.1. Summary of CMS Preliminary Design Results

3993-26

### Cure Monitoring of Composite Laminates Used in the Manufacturing of Snowboards

Noel V. Pelczarski, Dryver R. Huston (University of Vermont, Burlington, VT 05405)

A comparative study was performed on the use of embedded sensors for monitoring the cure reaction of thin laminate composites manufactured in a heated press. This study points to the application of a cure monitoring system for the manufacturing of snowboards. Snowboards consist of several layers that are laminated together. Two very important layers consist of fiber-reinforced epoxy-matrix composites. The use of epoxy requires a cure cycle to complete the manufacturing process. These composite layers are considered as thin laminate composites because the thickness is approximately one millimeter each. The two composite layers bond the other layers together and control the longitudinal flex and torsional stiffness of a snowboard. The embedded sensor methods incorporate electrical capacitance measurement, and ultrasonic wave transmission. The two methods measure changes in specific features of the epoxy matrix during the cure reaction. A change in capacitance results from the restriction of ionic mobility and dipolar motion in the curing epoxy and can be correlated to the end-of-cure. A waveguide system was developed for the ultrasonic method which, in turn, measures the transmission of waves from the waveguide to the hardening epoxy which is correlated to a change in stiffness of the epoxy as it cures.

3993-27

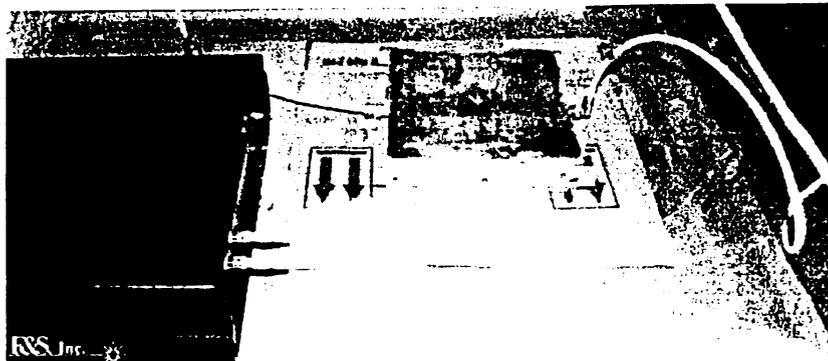
### Long Period Gratings as Flow Sensors for Liquid Composite Molding

Sylvia R. M. Kueh, Richard, S. Parnas, Joy P. Dunkers, Suresh, G. Advani, Paige, S. Furrows, Mark E. Jones, Timothy A. Bailey (Department of Mechanical Engineering, University of Delaware, Newark, DE 19716-3140) (RSP, JPD Polymers Division, NIST, 100 Bureau Drive, Gaithersburg, MD 20899-8543) (PSF,MEJ,TAB F&S/Luna Innovations, P.O. Box 11704, Blacksburg, VA 24062-1704)

One of the most important issues in liquid composite molding (LCM) is the complete saturation of the preform by the resin to eliminate voids or dry spots in the structure which could later adversely affect the structural integrity of the part. While there have been efforts in developing reliable mold filling simulations for LCM, very few successful flow sensing systems exist for detecting actual resin arrival during mold filling. In this study, the feasibility of using optical fibers with long period gratings (LPG) as sensors for monitoring flow in the LCM process was investigated. An advantage of using LPGs is that they are more robust and less susceptible to background noise than simple bare fibers. Furthermore, the location of resin arrival can be easily identified as the signals from each LPG uniquely correspond to predetermined wavelengths along the source spectrum. The LPGs are sensitive to changes in the refractive index and register a strong signal change when covered with resin. In this study, the LPG sensors were placed in the middle of a preform stack inside a mold and the sensor response after the mold was properly closed, and when the resin covered a particular LPG was monitored. An assortment of preforms, which included random mats and unidirectional fabrics, with a series of fiber volume fractions were used to determine their effects on the sensor response.

## Composite Process Monitoring

Luna Innovations has developed two types of novel composite process monitoring devices based on LPG fiber optic sensor technology. The first device is a novel optical fiber sensor for use with an FT-IR spectroscopic instrument which addresses the need for an on-line spectroscopic-based composite cure monitor. This device is useful in process monitoring because it combines remote sensing with the ability to obtain a direct measurement of the chemical state of the resin. The second device is an LPG-based fiber optic flow front sensor and a visualization tool to monitor real time resin flow during LCM processes. The LPG-based flow sensor is an embeddable process monitoring tool that is unique in that numerous sensors can be multiplexed on a single optical fiber so that there is only a single ingress/egress point. The actual sensors can be placed in critical flow locations to guarantee appropriate resin flow. To visually monitor the flow front, Luna Innovations developed a visualization tool to map the flow using LabVIEW, a graphical programming language. Following composite manufacture, the sensors remain in the part and can be used for structural health monitoring throughout the service life of the part. The figure below is a photograph of an RTM test performed using the LPG resin flow front sensors. Potential market areas include the following: aerospace, sporting goods, heavy industry, automotive, infrastructure, oil and gas, and government and academic laboratories.



QuickPacks(r): QP40W



[BACK](#)
[HOME](#)
[SITE MAP](#)
[CONTACT US](#)

**QuickPack® Actuator**

Cat. No. QP40W



**Model QP40W Specifications**

- Application type: strain actuator only
- Device size (in): 4.00 x 1.50 x 0.03
- Device weight (oz): 0.51
- Active elements: 2 stacks of 2 piezos
- Piezo wafer size (in): 1.81 x 1.31 x 0.010
- Device capacitance: (µF): 0.40
- Full scale voltage range (V): 7200

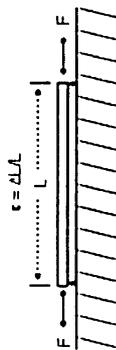
**Functional Diagram**



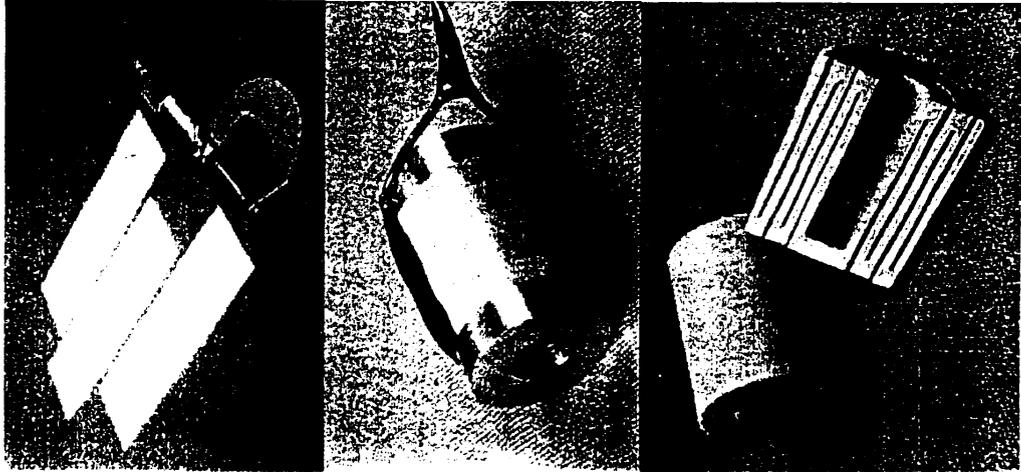
*Device poled with positive voltage applied to pins 2 and 3.*

**Bonded Configuration**

Full scale strain, extension (µε): 7280



**High Authority Piezoelectric Actuators**



**Patch Actuators**

Multilayer 150 mm by 50 mm with up to 5 times the displacement per volt of conventional patches.

2-2 composites with the unidirectional actuation of fibre-composites without strain loss in the glue line.

**Multilayer Stacks**

Cofired multilayers with up to 7 kN blocked force and 15 µm free displacement. 27 mm stack length made from 5 segments each with 21 layers each 250 µm thick.

**Complex Injection Molded Shapes**

Telescoping tubes.  
Tube arrays.  
Serpentines.

## V. 共通基盤技術の形成

共通基盤技術の形成に資する技術は以下のとおり。

### ② 新たな特性データ取得・整備

- ・マイクロ波焼結機能性セラミックスの特性データ取得：

P 4 0 の 2 7 行 ～ P 4 1 の 9 行

P 4 1 の 2 0 行 ～ P 4 2 の 3 行

### ③ 試験・評価手法、ツールの提供

- ・樹脂成形過程フローフロント・硬化状態検出多機能センサの開発：

P 1 1 の 6 行 ～ P 4 1 の 1 行

# 国立研究所

I. 工業技術院 物質工学工業技術研究所

II. 工業技術院 名古屋工業技術研究所

## 成型プロセスモニタリング技術の評価

物質工学工業技術研究所 複合材料部  
劔持潔、高橋淳、卜部啓、津田浩

### 1. はじめに

複合材料・構造体のスマートマニュファクチャリング技術の確立には、成形中の樹脂の硬化・含浸状況を検出する技術の開発が重要である。本研究は、電気物性を使う成形モニタリングにおいて、従来法とは異なり、波長が材料・構造体の寸法と同程度となる高周波信号（数百 MHz 以上）を用いることにより、材料・構造体中に形成した電磁波伝送線路の特性変化を利用して硬化状況のみならずその分布や不連続性を検出・評価する手法の開発を目的としている。前年度には、2種類の線路内で樹脂を硬化させた際の電磁波反射率の周波数特性から、硬化状況と樹脂の分布状態の検出が可能であることを示した。今年度は、樹脂の硬化に伴う複素誘電率変化の評価と、周波数特性データの理論的な裏付けを行うことを目的に、伝送線路からの反射の周波数特性について理論解析を行った。次に、不連続性や分布に関する情報をより直接的かつ明確に得る目的で、鋭い立ち上がりのステップ信号入力を用いた時間領域での反射特性測定(TDR; Time Domain Reflectometry [1])による樹脂硬化状況と樹脂含浸状態の検出について検討した。

また、光ファイバセンサは、成形中の応力・ひずみを検知するとともに、成形後の構造の健全性モニタにも利用できるものとして有力である。その構造体との一体化には、ファイバ表面の被覆が重要な意味を持つと考えられる。前年度までに、光ファイバの表面被覆を剥ぐことで検出性能が向上する一方で、取り扱いの困難さやセンサとしての信号再現性及び強度的信頼性の低さが問題となることや、それに対し、光ファイバの表面被覆を剥がずに使用する一方法としてループ型の光ファイバによる方法が有効であることを明らかにした。今年度は、光ファイバのセンサとしての信頼性評価とともに一体化した際の構造部材としての可能性についても検討するために、光ファイバの表面被覆と破断荷重の関係、及び再コーティングの影響について評価した。

### 2. 研究内容及び成果

#### (a) 電磁波伝送特性の解析

図1のように特性の異なる電磁波伝送線路が縦続接続されている場合、Line 1 と Line 2 の境界における反射率  $R_{12}$  は、

$$R_{12} = \frac{Z_{2i} - Z_1}{Z_{2i} + Z_1} \quad (1)$$

となる[2]。ここで

$$Z_{2i} = Z_2 \frac{Z_1 + Z_2 \tanh(\gamma_2 d_2)}{Z_2 + Z_1 \tanh(\gamma_2 d_2)} \quad (2) , \quad Z_2 = \frac{Z_{20}}{\sqrt{\epsilon}} \quad (3) , \quad \gamma_2 = \frac{j2\pi f \sqrt{\epsilon}}{c} \quad (4)$$

であり、 $f$ は電磁波の周波数、 $c$ は空気中の光速、 $j$ は虚数単位である。これらの式から、任意の複素比誘電率 $\epsilon$ の樹脂を線路内に入れたときの反射特性を求めることができる。図1では1つの線路だけが終端と入力ケーブルの間に挟まった形態であるが、線路間の物質（樹脂あるいは空気等）の物性が場所によって異なっている場合のように特性の異なる複数の線路が縦続接続されている時にも、式(2)を順次適用することにより入力端から見たインピーダンスを求め、式(1)により反射特性を計算できる。今回は、前年度測定したいろいろな硬化段階の樹脂で線路を満たした時の反射特性の測定結果をもとに、これらの式により硬化進展に伴う $\epsilon$ の変化を評価した。その際、式(1)が $\epsilon$ を未知数とした場合複素超越方程式であるため、逐次近似により $\epsilon$ を決定した。その結果、硬化剤混合直後(未硬化)、反応温度ピーク付近、硬化後に対応する $\epsilon$ の値として、各々 $4.4-j0.8$ 、 $3.1-j0.2$ 、 $2.7-j0.06$ を得た。すなわち、硬化の進展に伴って高周波帯域での誘電率と誘電損失が、ともに低下することが分かった。

次に、線路が未硬化の樹脂で部分的に充填されている場合の周波数特性について、3種類の異なる特性の線路（空気／樹脂／空気）を縦続接続したものとして、上述の式により計算を行った。その結果を、前年度に得た測定結果とともに図2に示す。計算結果は測定結果と良好に一致しており、反射特性が線路に沿った部分の物性分布を反映していることが理論的に裏付けられた。

#### (b) 時間領域反射特性測定(TDR)

図3に装置構成を示す。線路としては前年度の周波数領域での実験で使用したものと同様の、径2mmの導体とアルミケース（底面35×25cm）で構成したマイクロストリップライン（導体とケース底板の間隔5mm）を使用し、ここにエポキシ樹脂Epikote 828にジエチレントリアミンを当量混合したものを流し込み、室温でゆるやかに硬化させた。そして、入力側のコネクタを、時間領域反射特性測定機能の付いた高速デジタルオシロスコープ（Agilent Technologies 54750+54754）に接続した。また終端側のコネクタには50Ωの負荷を接続した。オシロスコープは立ち上がり78ps、高さ200mVのステップ電圧を発生し、基準点での電圧の時間変化を検出・表示する。線路に不連続点があるとそこで式(1)（ただし $Z_2 \neq Z_0$ ）に従い反射が生じるので不連続点までの往復伝搬時間以後の電圧にはその反射電圧が加わる。不連続点が複数ある場合はそれぞれの反射が順次加わるとともに、途中の線路の損失の影響も受ける。したがって電圧の時間変化は、不連続点までの伝搬時間、不連続点前後での線路特性、及び線路の損失の影響を受け、線路間の物質（樹脂）の物性分布を反映したものとなる。

図4に、線路全体に樹脂を入れて硬化させた場合の電圧応答の、硬化進展に伴う変化を示す。樹脂を入れる前の応答において a は線路の入射端での反射に、b は終端での反射に、各々対応する。これに未硬化の樹脂を注入すると、入力端での反射に起因する電圧応答が低下するとともに、立ち上がりと下降の間の時間が延びた。これは樹脂の誘電率が空気より大きいため式(3)及び式(1)（ $Z_2 \neq Z_0$ ）に従って境界での反射が減少するとともに、伝搬速度が低下したことによる。そして硬化の進展に伴い、この間隔が縮むとともに電圧応答が上昇した。また、立ち上がり部のオーバーシュート後の電圧低下の時定数

が、硬化進展とともに短くなった。これらの変化はいずれも、硬化進展に伴う誘電率及び誘電損失の低下を反映したものである。図5は終端側から未硬化の樹脂を順次充填したときの応答の変化を示す。電圧の立ち上がりから下降までの時間(5cm filledの場合について図中に表示)が樹脂未充填部分(空気層)の長さ(往復分)に対応する。図6には中間に空気層が残っている場合の応答を示す。空気層が電圧応答の局部的ピークとなって検出されている。図7は、硬化状況の異なる樹脂が存在する場合のもので、硬化進展度の違いが境界の位置情報も含め明確に検出されている。

以上のように、時間領域での反射特性測定から、硬化状況とともに、不連続点の位置や分布に関するより直接的かつ明確な情報を得られることが明らかとなった。今後は強化繊維、特に導電性のある炭素繊維が存在する場合の影響と、炭素繊維の伝送線路としての利用等について検討を進めていく。

### (c) 光ファイバの表面被覆と強度特性

被験体として、通信用の直径 250 $\mu\text{m}$  のものと、その被覆を剥いだ直径 125 $\mu\text{m}$  のもの、及び被覆を剥いだ後にシアノアクリル系接着剤により再コーティングしたものをを用いた。被覆付きの光ファイバについては、図8(a)のように塩化ビニル製円筒形治具(直径 70mm)を万能試験機のクロスヘッド部に掛け、この治具に光ファイバを取り付けて、ゲージ長 100mm で引張試験を行った。被覆を除去したファイバ及び再コーティングしたものについては、図8(b)のような治具により試験を行った。引張速度はいずれも 5mm/min とした。被覆の除去方法として、ファイバストリッパによる物理的な方法とジクロロメタンで化学的に被覆を膨潤させる方法とを試みたが、除去法は破断荷重に有意な影響を及ぼさなかった。なお、以下の引張強度の値は、被覆の有無及び再コーティングした場合の相互比較のため、応力単位(Pa)ではなく荷重単位(N)で表記している。

引張試験の結果、被覆のある光ファイバは、引張強度 54N (ヤング率 20GPa、破断強度 1.1GPa、破断ひずみ 5.5%) を示し、ばらつきは非常に小さかった。次に、被覆を除去した光ファイバの引張強度を、除去部分の長さを横軸にして図9に示す。除去長さが 10mm 以上ではほぼ一定(約 12N)の強度を示した。このことから、ファイバ自体は極めて高強度であり、その強度特性が周囲の被覆によって維持されていることが分かった。図10には、被覆除去長さを 10mm とし、これを再コーティングしたものの引張強度を示す。このように、被覆の除去により低下した強度は、再コーティングにより、40N 前後まで回復することが分かった。

今後は、被覆とファイバ/樹脂界面のすべりとの関係の評価、及び構造体への埋め込み時のセンサの耐久性・信頼性評価を行うとともに、その改善方策を検討していく。

## 3. まとめ

電磁波伝送線路による成形モニタリングに関し、前年度得られた反射率の周波数特性について理論解析を行った。これにより、樹脂の硬化に伴う高周波域での誘電率及び誘電損失の変化を定量的に評価した。また、樹脂が部分的に充填されている場合の周波数特性の解析結果は、前年度の測定結果と良好に一致し、反射特性が線路に沿った部分の物性分布を反映していることの理論的裏付けを得た。次に、時間領域での反射特性測定により、不連続性や分布に関するより明確な情報を得ることが可能

となった。更に、光ファイバの表面被覆と強度の関係、及び再被覆の影響について評価し、ファイバの強度が周囲の被覆によって維持されていること、被覆を除去したものを再コーティングすることにより強度が回復することが明らかとなった。

#### 参考文献

1. D. J. Dascher, Hewlett Packard Journal, 47, 83-96(1996)
2. 橋本修「電波吸収体入門」20-23 (1997) 森北出版

#### 研究発表

##### 論文

- (1) H. Tsuda, J. Takahashi, K. Urabe, T. Ikeguchi, "Damage monitoring of carbon fiber-reinforced plastics with Michelson Interferometric fiber-optic sensors", Journal of Materials Science, 34 (1999) 4163-4172
- (2) K. Urabe, J. Takahashi, H. Tsuda, K. Kemmochi, "Cure monitoring of matrix resin with high-frequency electromagnetic wave propagation line", Proceedings of the 6th Japan International SAMPE Symposium (1999) 1029-1032
- (3) K. Kemmochi, H. Tsuda, H. Nagai, K. Urabe, J. Takahashi, "Environmentally conscious smart composites by bionic design", Proceedings of the 6th Japan International SAMPE Symposium (1999) 1059-1064
- (4) H. Tsuda, S. Takeda, J. Takahashi, K. Urabe, "Response of Michelson interferometric fiber-optic sensors to impact loading", Journal of Materials Science Letters, 19 (2000) 1-2
- (5) K. Urabe, J. Takahashi, H. Tsuda, K. Kemmochi, "Cure monitoring of matrix resin with high-frequency electromagnetic wave transmission line", Journal of Reinforced Plastics and Composites (*in press*)

##### 口頭

- (1) K. Urabe, J. Takahashi, H. Tsuda, K. Kemmochi, "Cure monitoring of matrix resin with high-frequency electromagnetic wave propagation line", 6th Japan International SAMPE Symposium (1999.10, 東京)
- (2) K. Kemmochi, H. Tsuda, H. Nagai, K. Urabe, J. Takahashi, "Environmentally conscious smart composites by bionic design", 6th Japan International SAMPE Symposium (1999.10, 東京)
- (3) 武田真一, 津田浩, 高橋淳, 剣持潔, 福田博, "光干渉計型光ファイバセンサによるCFRPの衝撃損傷モニタリング", 第24回複合材料シンポジウム (1999.11, 大阪)
- (4) 卜部啓, 高橋淳, 津田浩, 剣持潔, "高周波電磁波伝送線路による樹脂硬化モニタ", 「知的材料・構造システム」第1回シンポジウム (1999.12, 東京)
- (5) H. Tsuda, S. Takeda, K. Urabe, J. Takahashi, "Impact damage detection of FRP using Michelson interferometric Fiber-Optic sensors", 3<sup>rd</sup> Joint Canada-Japan Workshop on Composites (2000.3, 京都)
- (6) 卜部啓, 高橋淳, 津田浩, 剣持潔, "高周波電磁波伝送線路の反射特性による樹脂含浸状態検出", 第29回FRPシンポジウム (2000.3, 草津)

## II 工業技術院名古屋工業技術研究所

### セラミックアクチュエータのスマート化技術の研究開発

名古屋工業技術研究所 関谷 忠

#### 1. はじめに

知的材料・構造システムにおいてセラミックアクチュエータが形状制御や騒音・振動制御を行うための素子として期待されている。現在市販されているセラミックアクチュエータのほとんどはペロブスカイト構造を有する PZT 系の圧電セラミックスであるが、これを本システムに利用しようとした場合、機械的強度および電界誘起歪みが十分ではない、電界誘起歪みのヒステリシスが大きすぎるといった問題があるため、その改善が求められている。また、コンポジット化しやすい形としてシート化や繊維化等の形状付与技術の開発も必要である。本研究は、知的材料・構造システムに適用できる性能および形状を有するセラミックアクチュエータの開発を目的として、「高性能セラミックアクチュエータ材料の開発」および「セラミックスアクチュエータの形状付与技術の開発」という二つの研究課題を取り上げている。「高性能セラミックアクチュエータ材料の開発」では、高性能アクチュエータ特性を示すペロブスカイト組成の探索を目的に、鉛-ニオブ系リラクサ型ペロブスカイトおよびその固溶体の合成法を検討し、その誘電特性および電気機械特性を評価した。また、「セラミックスアクチュエータの形状付与技術の開発」では、圧電性 PZT 単結晶粒子を一層に敷き詰めそれを高分子バインダで結合したフレキシブルアクチュエータシートの製造法について検討した。以下に平成 11 年度の研究成果の概略を述べる。

#### 2. 高性能セラミックアクチュエータ材料の開発

名工研では、従来その合成が非常に困難であるといわれていた PMN-PT 系および PNN-PT 系リラクサ型ペロブスカイトの合成について鋭意検討した結果、酸化鉛過剰組成法という新プロセスを用いることによってその合成に成功し、そのセラミックスが MPB 組成付近で高変位で低ヒステリシス特性といった優れた電歪性を示すことを見だし、新しいアクチュエータ材料としての道を開いた。この技術は、さらに他の鉛-ニオブ系リラクサ型ペロブスカイトの合成においても有効のはずであり、合成されたものの中から優れたアクチュエータ機能を有する材料が出現する可能性がある。そこで、本年度はこの技術の有効性について種々の鉛-ニオブ系リラクサ型ペロブスカイト組成に対してサーベイすることとした。

#### 2. 1 酸化鉛過剰組成法による各種リラクサ型ペロブスカイトの合成

酸化鉛過剰組成法とは、ペロブスカイト組成に対してさらに過剰の PbO を添加した混合物を高温で加熱し、それを酢酸溶液で処理することによって、過剰分の PbO を溶解除去し、ペロブスカイト相を分離するというもので、鉛基ペロブスカイトの合成に有効である。このプロセスを用いて、 $Pb(B',B'')O_3$  型ペロブスカイトにおける B'イオンと B''イオンの組み合わせを種々変えた場合のペロブスカイト相の生成について検討した。表 1 にその成否を○×で示す。これらは PbO:ペロブスカイト組成が 2:3 の混合物を 900 ~ 1000 °C で 3 時間加熱した後、酢酸溶液で処理した結果である。この結果は、これまで固相反応法で生成させることが困難であったペロブスカイト化合物でも酸化鉛過剰組成法を用いること

表 1. 酸化鉛過剰組成法による各種リラクサ型ペロブスカイト生成の成否

Pb(Mg <sub>1/3</sub> Nb <sub>2/3</sub> )O <sub>3</sub>	○	Pb(Sc <sub>1/2</sub> Nb <sub>1/2</sub> )O <sub>3</sub>	○	Pb(Fe <sub>1/2</sub> Nb <sub>1/2</sub> )O <sub>3</sub>	○
Pb(Mg <sub>1/3</sub> Ta <sub>2/3</sub> )O <sub>3</sub>	○	Pb(Sc <sub>1/2</sub> Ta <sub>1/2</sub> )O <sub>3</sub>	○	Pb(Fe <sub>1/2</sub> Ta <sub>1/2</sub> )O <sub>3</sub>	○
Pb(Mg <sub>1/2</sub> W <sub>1/2</sub> )O <sub>3</sub>	○	Pb(Sc <sub>2/3</sub> W <sub>1/3</sub> )O <sub>3</sub>	×	Pb(Sc <sub>2/3</sub> W <sub>1/3</sub> )O <sub>3</sub>	○
Pb(Ni <sub>1/3</sub> Nb <sub>2/3</sub> )O <sub>3</sub>	○	Pb(Cd <sub>1/3</sub> Nb <sub>2/3</sub> )O <sub>3</sub>	○	Pb(Co <sub>1/3</sub> Nb <sub>2/3</sub> )O <sub>3</sub>	○
Pb(Ni <sub>1/3</sub> Ta <sub>2/3</sub> )O <sub>3</sub>	×	Pb(Cd <sub>1/3</sub> Ta <sub>2/3</sub> )O <sub>3</sub>	×	Pb(Co <sub>1/3</sub> Ta <sub>2/3</sub> )O <sub>3</sub>	○
Pb(Ni <sub>1/2</sub> W <sub>1/2</sub> )O <sub>3</sub>	×	Pb(Cd <sub>1/2</sub> W <sub>1/2</sub> )O <sub>3</sub>	○	Pb(Co <sub>1/2</sub> W <sub>1/2</sub> )O <sub>3</sub>	○
Pb(Zn <sub>1/3</sub> Nb <sub>2/3</sub> )O <sub>3</sub>	×	Pb(Mn <sub>1/3</sub> Nb <sub>2/3</sub> )O <sub>3</sub>	○	Pb(Cu <sub>1/3</sub> Nb <sub>2/3</sub> )O <sub>3</sub>	×
Pb(Zn <sub>1/3</sub> Ta <sub>2/3</sub> )O <sub>3</sub>	×	Pb(Mn <sub>1/3</sub> Ta <sub>2/3</sub> )O <sub>3</sub>	○	Pb(Cu <sub>1/3</sub> Ta <sub>2/3</sub> )O <sub>3</sub>	×
Pb(Zn <sub>1/2</sub> W <sub>1/2</sub> )O <sub>3</sub>	○	Pb(Mn <sub>1/2</sub> W <sub>1/2</sub> )O <sub>3</sub>	×	Pb(Cu <sub>1/2</sub> W <sub>1/2</sub> )O <sub>3</sub>	×

によって合成が可能になるものが確実に増えていることを示している。今後、これらの化合物をベースにしてさらに新しいセラミックアクチュエータ材料の開発へと展開できるものと期待される。

## 2. 2 PNN-PSN 系リラクサ型ペロブスカイト固溶体の合成と特性

そこで、新しいアクチュエータ材料の展開を図る目的で、すでに酸化鉛過剰組成法で合成に成功し、優れた電歪材料の原料となりうることが明らかとなっている Pb(Ni<sub>1/3</sub>Nb<sub>2/3</sub>)O<sub>3</sub> (PNN)と新たに合成に成功した Pb(Sc<sub>1/2</sub>Nb<sub>1/2</sub>)O<sub>3</sub> (PSN)とを組み合わせた固溶体を合成を試み、その誘電特性を評価した。合成条件は、同様に PbO:ペロブスカイト組成が 2:3 の混合物を 950 °C で 3 時間加熱した後、酢酸溶液で処理するというものであり、結果としてパイロクロア相を生成させずにペロブスカイト相のみを合成することができた。図 1 に、得られたペロブスカイトの組成と格子定数の関係を示す。格子定数は PSN の量の増加とともに

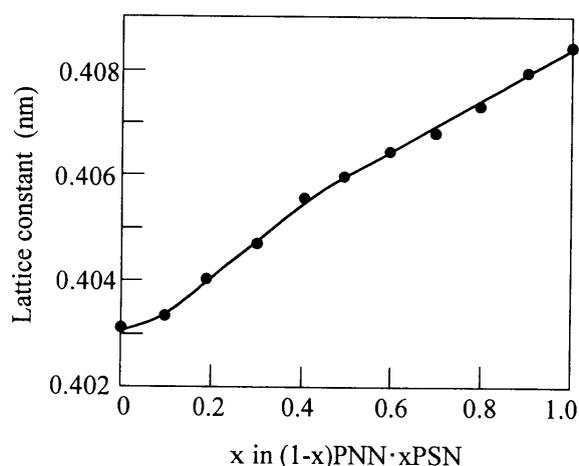


図 1. PNN-PSN 系ペロブスカイトの格子定数

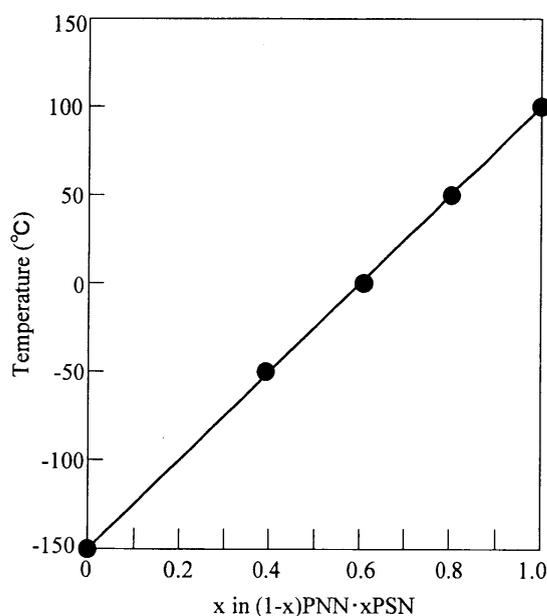


図 2. PNN-PSN 系セラミックスのキュリー温度

にほぼ直線的に増加し、PNN-PSN は全率固溶の関係にあることがわかる。また、得られたペロブスカイトからセラミックスを作製し、その誘電と温度との関係を調べた。図2に示すように、キュリー点は組成に対してほとんど直線的であった。キュリー点における誘電率は、PNN では 3000 程度と微弱であったが、PNN の量とともに次第に増加し、PSN では約 35000 と 10 倍以上の値を示した。また、リラクサ挙動は PSN の量の増加とともに弱まる傾向を示し、2PNN・8PSN 付近で消失した。

電気機械特性としては、4PNN・6PSN および 2PNN・8PSN がいずれも歪み率 0.15%程度の弱い圧電性を示すことが認められた。このように、Morphotropic phase boundary (MPB) 組成とは無関係の領域においても何らかの圧電性が得られることは、これをベースとしてさらに優れたアクチュエータ機能を示す材料が見いだされる可能性があることを示唆するものである。PNN-PSN 系をベースとして MPB 組成を得るためには、PNN-PSN 系の結晶構造(菱面体)とは異なる結晶構造を有するペロブスカイト、例えば PbTiO<sub>3</sub> (PT、正方晶)、を固溶させることが望ましい。6PNN・4PSN ~ 4PNN・6PSN 付近の組成の試料が室温以下の相転移温度をもち、誘電率が 10000 ~ 15000 であることから、これに PT を固溶させることによって相転移温度を室温付近に調整された新しいアクチュエータ材料が見いだされる可能性があり、現在さらなる検討を行っているところである。

### 3. セラミックスアクチュエータの形状付与技術の開発ーフレキシブルアクチュエータシートの開発ー

PZT 系ペロブスカイトはもともと単結晶化しにくい物質である。比較的簡単な結晶育成法としてフラックス法があるが、これを PZT に応用してもせいぜい 100 μm 前後の大きさのキューブ型の結晶粒子が得られるだけである。大きな単結晶が不可能であれば、この結晶粒子を方位をそろえて一層に並べ、それを高分子バイндаで結合したコンポジットによる単結晶的な利用ができないかという考えが生ずる。いわゆる 1-3 型フレキシブルアクチュエータシートである。そこで、このシートの製造法について検討した。PZT 結晶粒子としては、Pb(Zr<sub>0.52</sub>Ti<sub>0.48</sub>)O<sub>3</sub> 組成の大きさが 80 μm 前後ものを酸化鉛フラックス法により合成した。得られた結晶粒子とポリエステル溶液を混練した後、テフロン板の間にサンドイッチし、ハンドプレスを用いてプレスしながら硬化させ結果、結晶粒子一つ一つがシートの表裏を貫通してた 1-3 型ものが得られた。表2に、PZT 粉末とシートの X 線回折図における回折強度を比較して示す。シートでは 100 面に対して強く配向していることがわかる。両者の回折強度から、シートにおける PZT 結晶粒子の配向度  $f_{h00}$  を計算した結果、0.9 に達していることがわかった。おそらく、プレスの際の剪断応力が高配向をもたらしたものと思われる。しかし、この方法ではシートへの結晶の充填率が 40%程度にしかならず、さらに効率的なアクチュエータシートとするためにはいかにして充填率を高めるかが今後の課題である。

表2. PZT 粉末とコンポジットの X 線回折強度の比較

hkl	I/I <sub>0</sub>	
	PZT 粉末	コンポジット
100	32	77
110	100	6
111	22	0.3
200	32	100
210	10	0.3
211	30	0.5
220	10	0.3

#### 4. 研究発表・講演、文献、特許等の状況

##### 4. 1 研究発表・講演

- ① Processing and High Electrostriction of Relaxor Ferroelectric PNN-PT Perovskite Ceramics, **T. Sekiya** and K. Kusumoto, 9th European Meeting on Ferroelectricity, July 13, 1999, Prague, Czech.
- ② Study on MPB Phase Diagrams and Electromechanical Properties in the Relaxor Ferroelectric Perovskite Ceramic System, **T. Sekiya**, 2nd US-Japan Collaboration Meeting on Smart Materials, Sept. 23, 1999, Penn. State, USA.
- ③ 知的材料・構造システムにおけるセラミックアクチュエータの役割とその研究開発動向、関谷 忠、日本材料学会東海支部イブニングセミナー招待講演、1999年12月8日、名古屋
- ④ スマート構造システムにおけるセラミックアクチュエータとその研究開発動向、関谷 忠、日本セラミックス協会東海支部講演会招待講演、2000年2月23日、名古屋

##### 4. 2 文献

- ① Preparation and Electrostrictive Properties of  $\text{Pb}(\text{Ni}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})\text{O}_3\text{-PbTiO}_3$  Solid Solutions, K. Kusumoto and **T. Sekiya**, "Electroceramics in Japan", CSJ Series of Ceram. Soc. Jpn, Vol. 5, pp. 45-48, 1999, Trans.Tech. Pub. Switzerland.
- ② Processing and Piezoelectric Properties of  $\text{Pb}(\text{Ni}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})\text{O}_3\text{-PbTiO}_3\text{-PbZrO}_3$  Solid Solutions from PbO-excess Compositions, K. Kusumoto and **T. Sekiya**, Proc. 9th US-Jpn Seminar on Dielectric and Piezoelectric Ceramics, pp. 127-130, 1999.
- ③ 電歪セラミックス研究の新展開—圧電材料並の歪みを示す電歪セラミックス材料の開発、楠本慶二、関谷 忠、超音波 TECHNO, 11, 37-39 (1999).
- ④ Processing and Properties of Relaxor Ferroelectric PNN-PT Perovskite Ceramics, K. Kusumoto and **T. Sekiya**, Ferroelectrics, 1999, in press.

##### 4. 3 特許等

(取得)

- ① 圧電セラミックス用原料粉体の製造方法、関谷 忠、楠本慶二、特許第 3041411 号.
- ② 高性能圧電セラミックスおよびその製造方法、楠本慶二、関谷 忠、特許第 3044304 号.

(出願)

- ① 高性能電歪セラミックス、楠本慶二、関谷 忠、1999年、米国特許出願中.
- ② 高性能圧電セラミックスとその製造方法、楠本慶二、関谷 忠、特願平 11-87811.

##### 4. 4 その他の公表

- ① 高性能電歪セラミックスを開発、工業技術、Vol.40(8), 53(1999).

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基盤技術  
研究開発室の許可をうけて下さい。

電話 03 - 3987 - 9389 (直通)