

環境対策技術としての複合材料の 開発と評価

指導教官 高橋 淳 助教授

東京大学
大学院工学系研究科
環境海洋工学専攻

圖子 博昭

研究概要

本研究では、**新しい手法に基づく**中国のモーターゼーションの**予測**を背景に、2020年頃からの急激な石油消費による環境負荷増大を危惧し、これを抑えるための対策技術として**軽量化技術**にターゲットをしばり

積み上げ法により得られた軽量化率「40%」の乗用車普及が、省エネに寄与することを確認し

大物成形性、軽量性、コスト、リサイクルビリティなどを考慮し、これを満足する複合材料の開発を行った

提案する炭素繊維強化ポリプロピレン(CFRPP)は、これまで界面接着/含浸などの問題から複合化のメリットがないとされてきたが、成形法の手法によりこの問題を解決し、これまででない優れた性能を有する軽量複合材料の開発に成功した

また一方で、CFRPPの**3R**性についても検討し、3Rに有利な材料であり、環境適合型であることを確認した

以上の検討を経て、CFRPPは、**車体軽量化に極めて有効な材料**であり、また、**環境適合性に優れる**と結論付けられた

発表構成

【第1章, 第2章】

エネルギー消費構造
運輸部門の石油依存

【第3章】

モーターゼーション
新手法による予測

【第4章】

材料の検討
金属材料とFRP

【第7章】

軽量化による
省エネ効果の試算

材料の検討

段階的軽量化の検討

必要な技術開発の整理

【第5章】

炭素繊維一方向強化
ポリプロピレンの
開発と評価

【第6章】

不連続炭素繊維強化
ポリプロピレンの
開発と評価

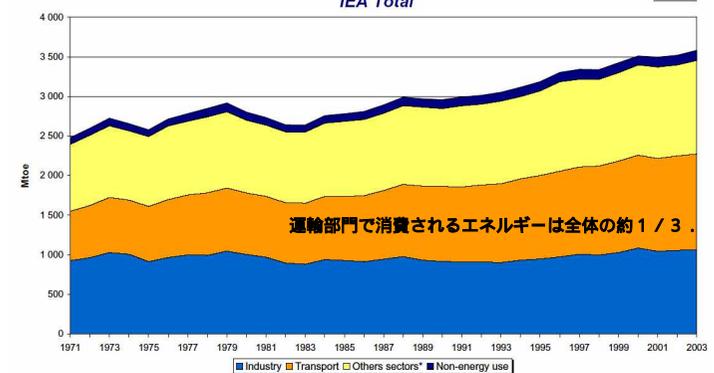
およびその再利用法

【第8章】

本研究の結論

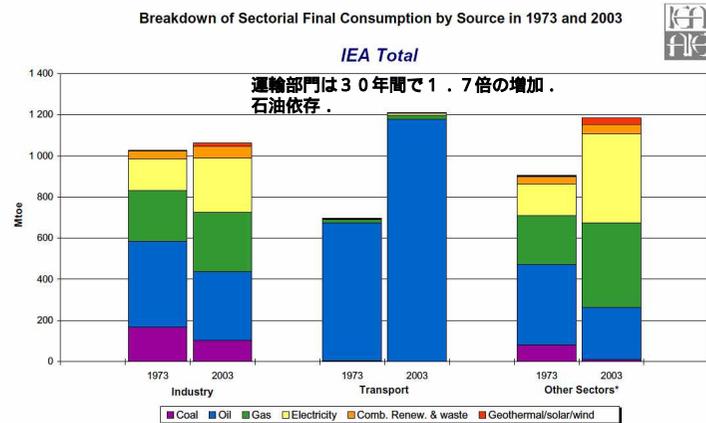
部門別エネルギー消費構造

Evolution of Final Consumption by Sector from 1971 to 2003



* Includes residential, commercial and public services, agriculture and non-specified.

部門別エネルギー源別消費構造



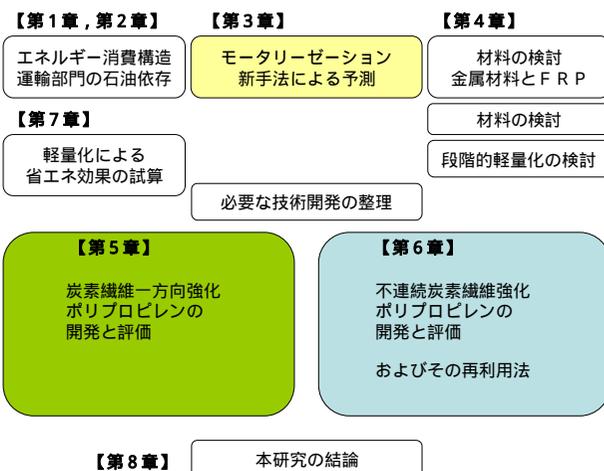
5

研究背景まとめ

- 運輸部門は世界のエネルギー消費量のうちの約3分の1を消費
- 運輸部門は石油依存度が高い
- 運輸部門の石油依存からの脱却は当分困難
- 運輸部門における省エネ努力が必要
- BRICsの成長で石油はかなり早い段階で不足
- 経済指標から、BRICsのうちで一番はやく発展を遂げるのは中国

6

発表構成



7

本手法 (Logistics) による予測の特長

	予測の特徴	予測 範囲	途上国 の影響	乗用車保有台数 (世界:億台)		
				2020	2030	2040
IEA	世界のエネルギーバランスの成長に基づく予測	世界	x	7.5	9.0	11.1
JARI	経済社会シナリオに基づく予測	地域 世界				
Logistics	統計量に基づいた予測 ひとつの関数形で簡便に 予測	地域 世界		7.5	10.7	17.2

世界の乗用車保有台数： 5.3億台(2002)

8

運輸の対策要素技術

9

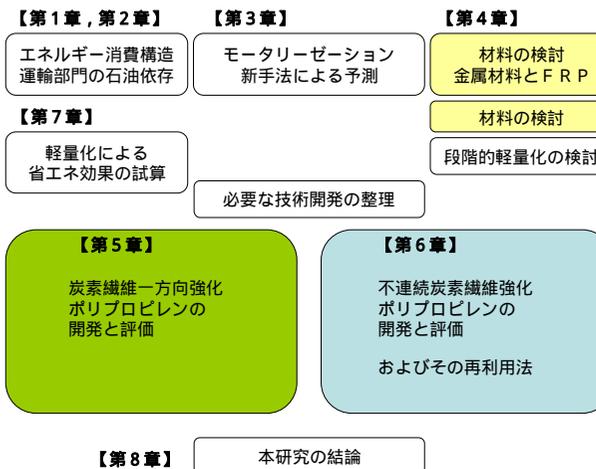
- 乗用車保有台数は, 2040年には3倍 (主に, 中国とインドの影響)
- 最初で最大の爆発的増加は, 中国によりもたらされるであろう
- 即効的な対策技術を早期に波及

現状 将来

燃費改善	ガソリンエンジン	ハイブリッドEV, FCV
軽量化	軽量金属素材	軽量FRP素材
交通システム		ITSの整備

発表構成

10

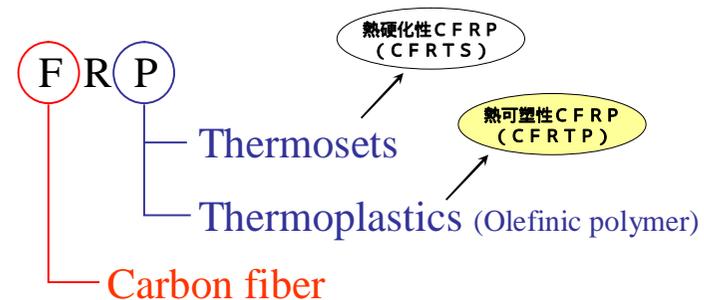


11

Material	STRUCTURAL INDEX for				Integration	Member	Panel/Sheet
	Young's Modulus	Specific Gravity	Specific Tensile Strength	Specific Young's Modulus			
	E GPa	ρ -	σ/ρ MPa	E/ρ GPa			
Steel	210	7.8	62 (480/7.8)	27	59	76	
Ti alloy	108	4.5	213 (960/4.5)	24	73	106	
Al alloy	75	2.8	168 (470/2.8)	27	98	151	
Mg alloy	42	1.7	118 (200/1.7)	25	121	204	
Glass	73	2.4	50 (120/2.4)	30	113	175	
Concrete	15	2.5	2 (4/2.5)	6	49	99	
GFRP SMC V160%	12	2.0	50 (100/2.0)	6	55	114	
CFRTS RTM V160%	46	1.6	438 (700/1.6)	29	134	224	
LC-CFRTP V130%	23	1.2	167 (200/1.2)	19	126	236	
Wood	14	0.5	200 (100/0.5)	28	236	482	

軽量素材としてCFRPが挙げられる

12



- 1.8 g/cm³ of density lightweight
- 4,900 MPa of ultimate tensile strength high strength
- 230 GPa of Young's modulus high stiffness

熱硬化性CFRPと熱可塑性CFRP

13

	CFRTS	CFRTP
マトリックス	熱硬化性樹脂 (加熱で硬化)	熱可塑性樹脂 (加熱で軟化)
技術	成熟	未熟
連続繊維強化の成形法	確立	未確立
不連続繊維強化の成形法	確立	確立
再成形	困難	溶融再成形

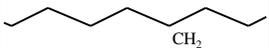
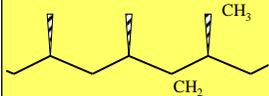
オレフィン系プラスチックの特長

14

- 材料コストが安い → 安価なCFRPの創製
- 成形温度が低い → 省エネ成形
- 比重が小さい → 材料軽量化
- 再成形や再溶融、修理が容易 → 3R

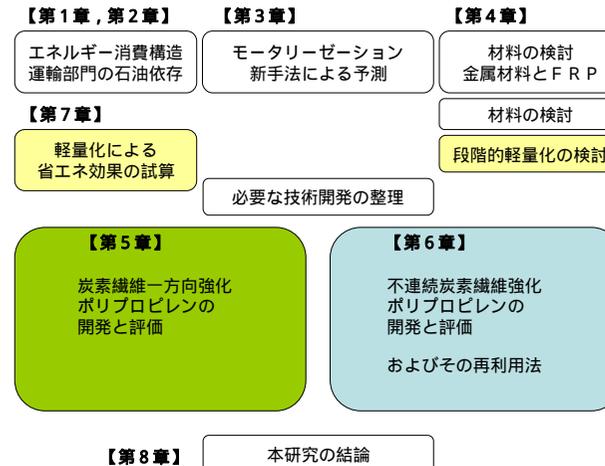
ポリエチレンとポリプロピレンの比較

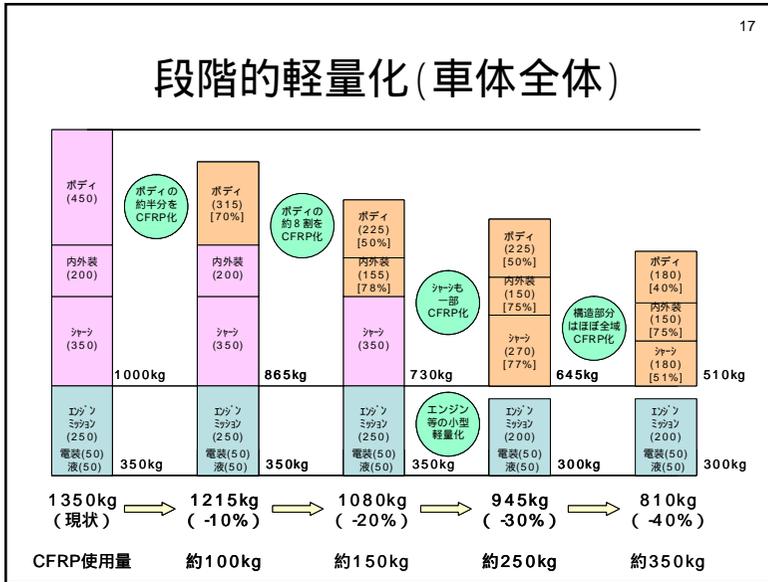
15

Crystalline Polymers	poly-ethylene (HDPE)	poly-propylene (isotactic)
Structure		
Density (g/cm ³)	0.941 – 0.970	0.850 – 0.943
Crystallinity (%)	65 – 85	60 – 70
Weather proof	×	
Deflection temp. under load ()	60 – 83 (at 0.45 MPa)	118 (at 0.45 MPa)
Application	<ul style="list-style-type: none"> films 50% bottles, containers 15% pipes 6% 	<ul style="list-style-type: none"> automobile, appliance 60% film 20% fiber and yarn 6%

発表構成

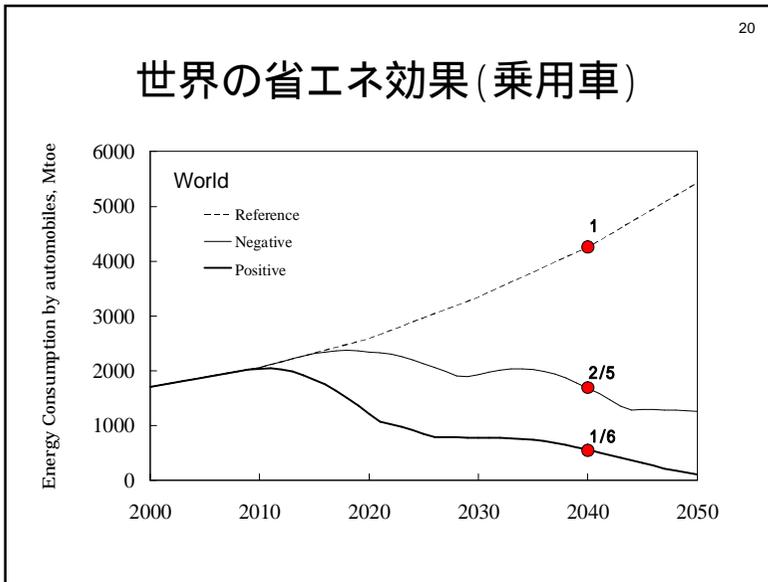
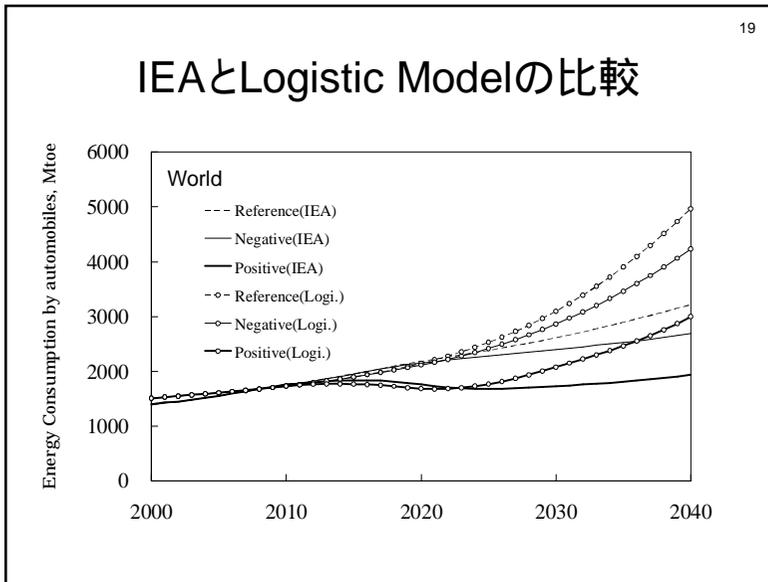
16





試算条件

		Introduction begging year of ULA	Ratio of ULA occupied to newly possessed automobiles	Lightening rate of ULA	Maximum lightening rate of ULA
Positive	OECD	2010	10% first +10% / year	10% first +10% / year	40%
	Non-OECD	2015	5% first +5% / year	10% first +10% / year	40%
Negative	OECD	2015	5% first +5% / year	5% first +5% / year	20%
	Non-OECD	2025	5% first +5% / year	5% first +5% / year	20%



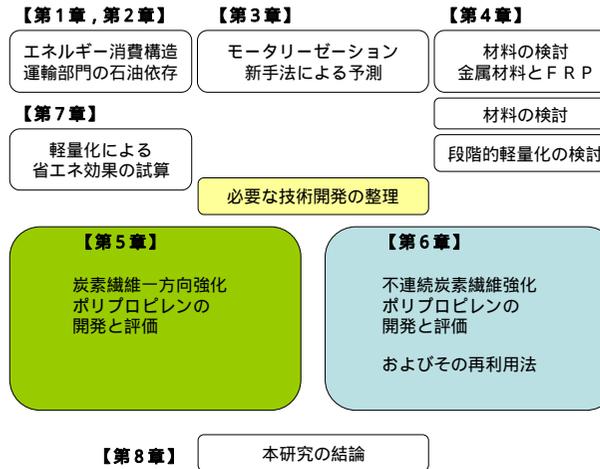
軽量化による省エネ効果まとめ

21

- 中国の乗用車普及を考慮した本モデルは、IEAが公表しているエネルギー消費予測値よりも**累計で約20,000Mtoe**大きくなることを示した
- 世界の乗用車による省エネは、無対策の場合に比べ消費を**約6分の1**に抑える効果がある
- 軽量化は**即効的**であり、他の省エネ技術と協調できるため、他の省エネ技術が確立される前に導入してゆくべき
- 中国の急速な成長に反映される2020年からの急激なエネルギー消費を抑えながら発展するために、軽量化はできるところから段階的に行うべき

発表構成

22



材料要求性能

23

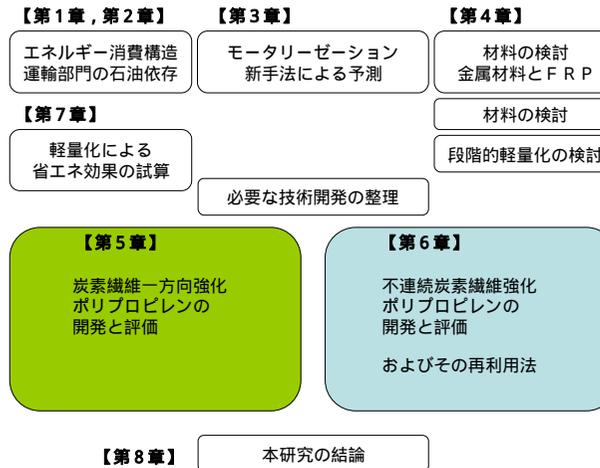
- 軽量
- 再利用可能
- 安価な材料コスト
- 迅速な成形速度

	CFRTS	CFRTP
軽量化		
3R	x	?
普及	x	
量産		?

炭素繊維強化ポリプロピレンの開発と基本的力学特性評価および再利用評価

発表構成

24



炭素繊維一方向強化ポリプロピレンの
開発と評価

炭素繊維強化ポリプロピレン(CFRPP)

- CF/PEEK, CF/PAなど様々な炭素繊維強化熱可塑性プラスチックは実用化されているが, 高コストやリサイクル性の面から乗用車向けのものはない
- また, 実用化されている材料は, 不連続繊維強化のことが多い
- 炭素繊維とPPの組合せは, 界面接着および含浸が悪い

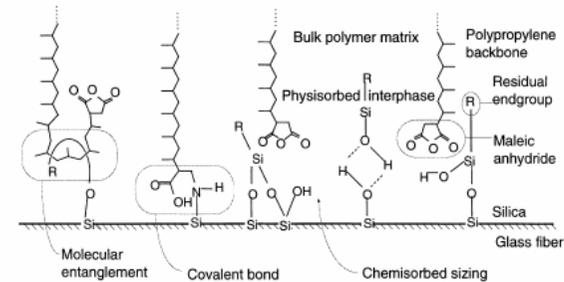
成形法の改善による解決

解決法

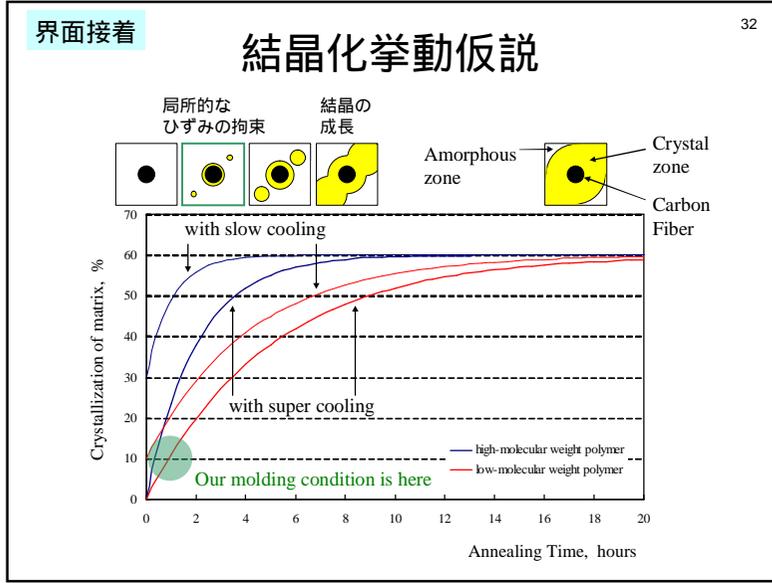
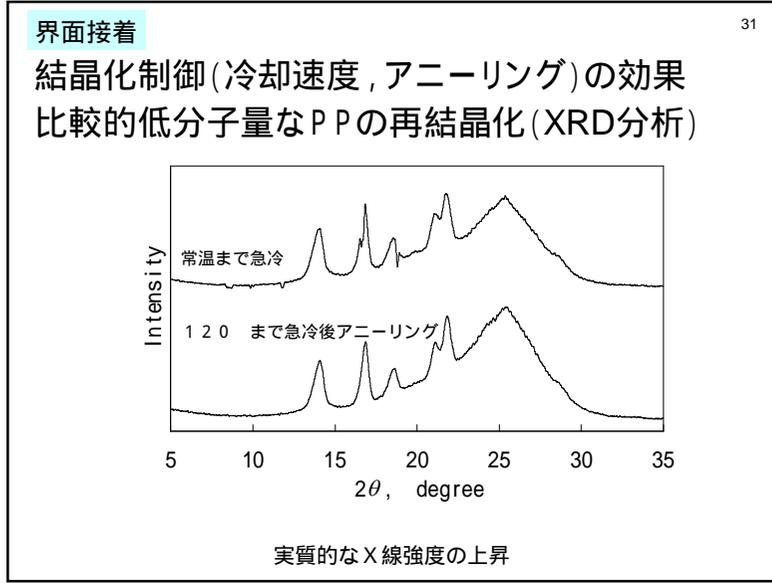
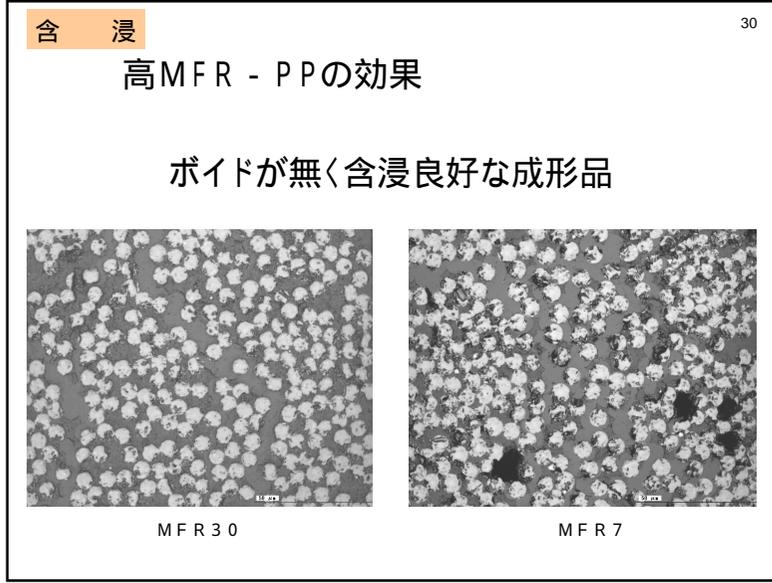
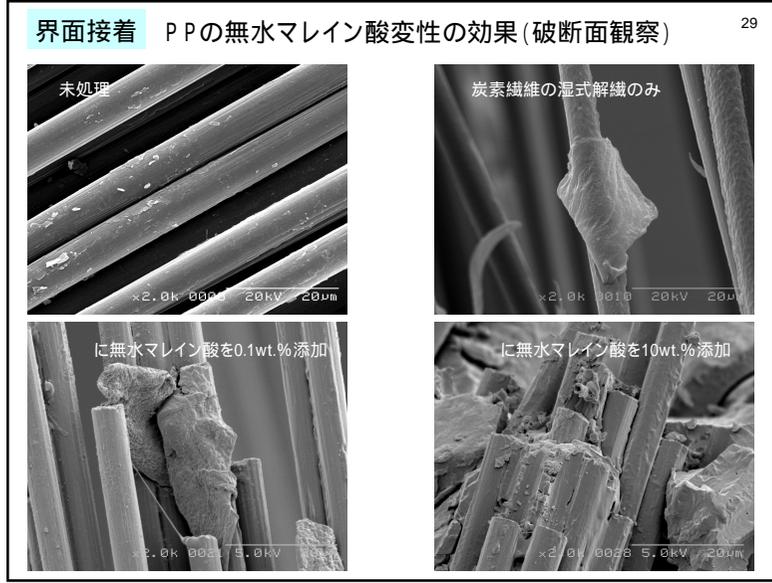
界面接着	含浸
PPの無水マレイン酸による変性	低分子量(高流動性)PPの使用
PPの再結晶化(結晶化度の向上)	炭素繊維の湿式解繊
	成形温度

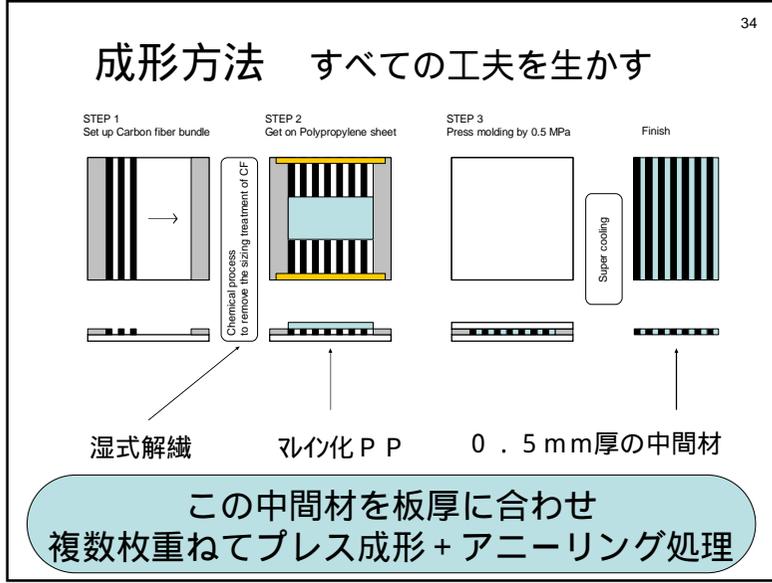
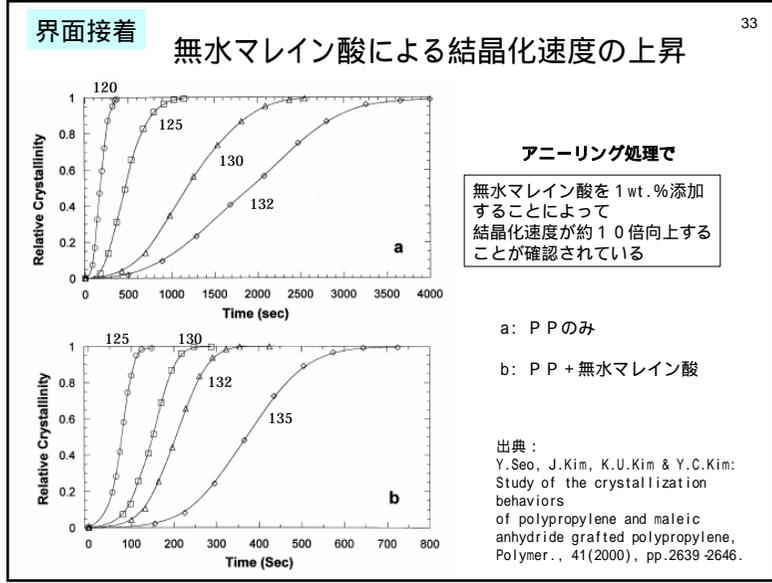
ポイド・成形不良 薄いCFRPPシートの積層

界面接着 PPの無水マレイン酸による変性



出典: E.K.Gamstedt et al.: Composites Science and Technology., 59(1999), pp.759-768.





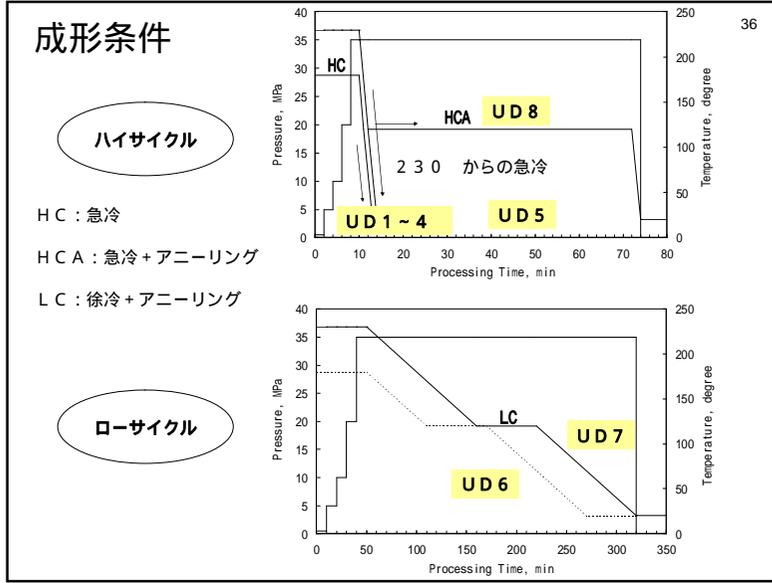
試験片作製条件

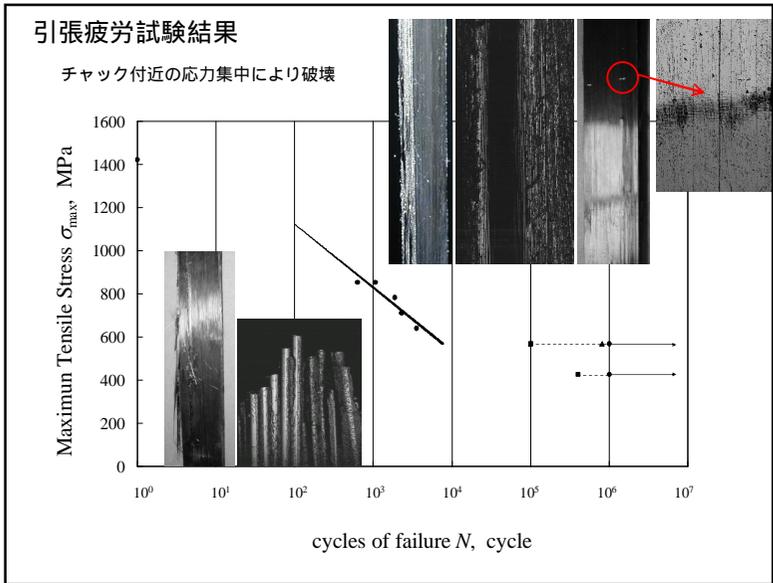
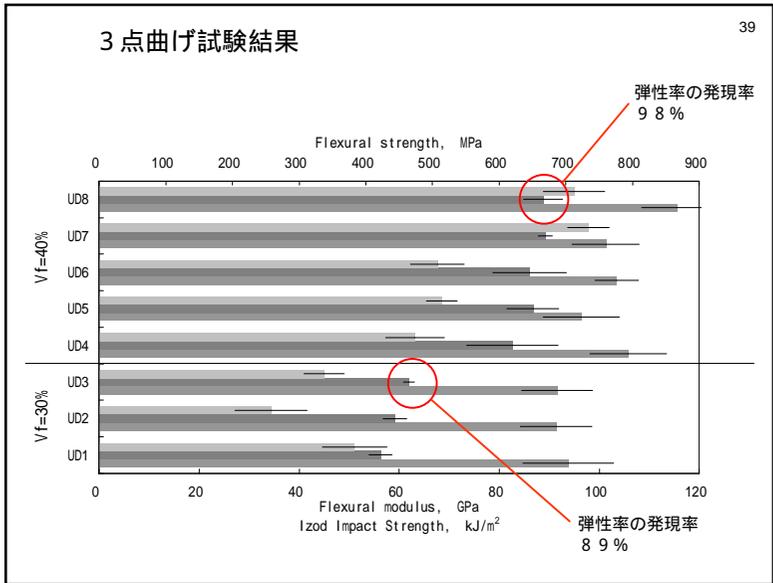
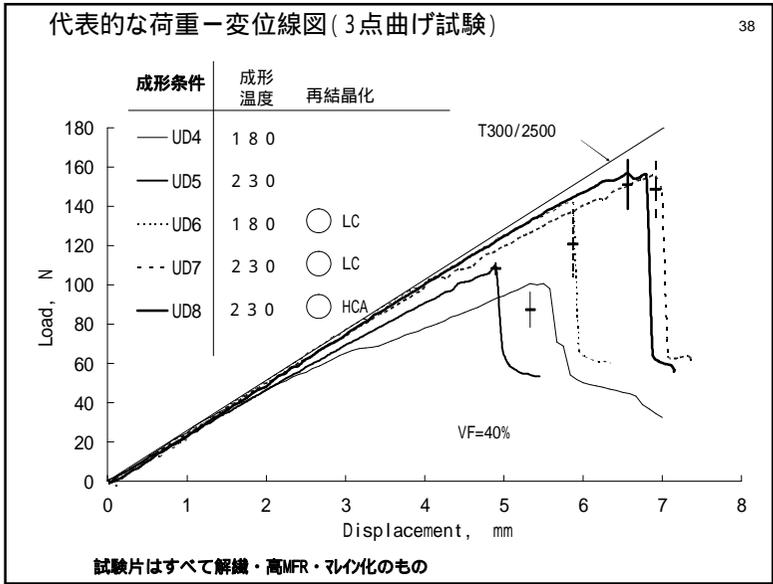
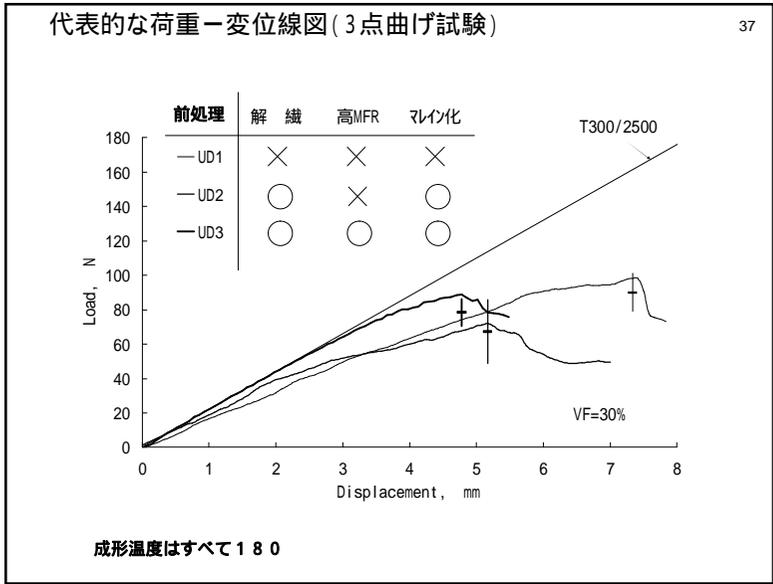
35

S/N	Fiber modification*	Polypropylene	MFR (g/10min)	V _f	Temp. ()	Process type
UD1	None	PP1	2	0.30	180	HC
UD2	C/W	PP1	2	0.30	180	HC
UD3	C/W	PP2	30	0.30	180	HC
UD4	C/W	PP2	30	0.40	180	HC
UD5	C/W	PP2	30	0.40	230	HC
UD6	C/W	PP2	30	0.40	180	LC
UD7	C/W	PP2	30	0.40	230	LC
UD8	C/W	PP2	30	0.40	230	HCA

* C/W means chemical washed to fibrillate of carbon fiber bundle.

	解繊	高MFR	珪化	成形温度	再結晶化処理
UD1	×	×	×	180	なし
UD2		×		180	なし
UD3				180	なし
UD4				180	なし
UD5				230	なし
UD6				180	徐冷 アーリング 徐冷
UD7				230	徐冷 アーリング 徐冷
UD8				230	急冷 アーリング 急冷

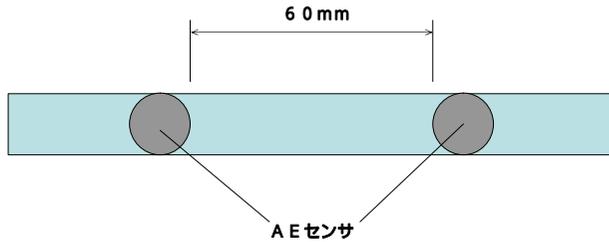




初期破壊の計測 (AE)

41

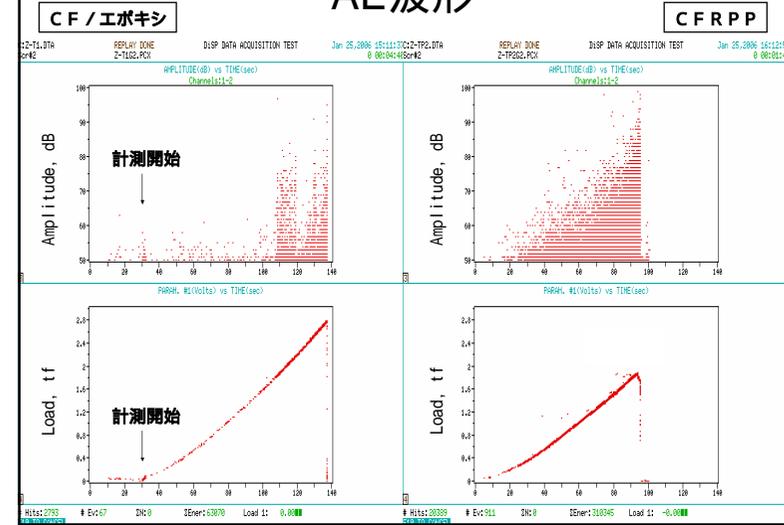
- 従来のエポキシ系CFRPと今回開発した材料 (UD8) の引張試験を行い, 破壊様相の違いをAEセンサを用いて調べた



同時に, 中央部に伸び計を付けることでひずみを測定した

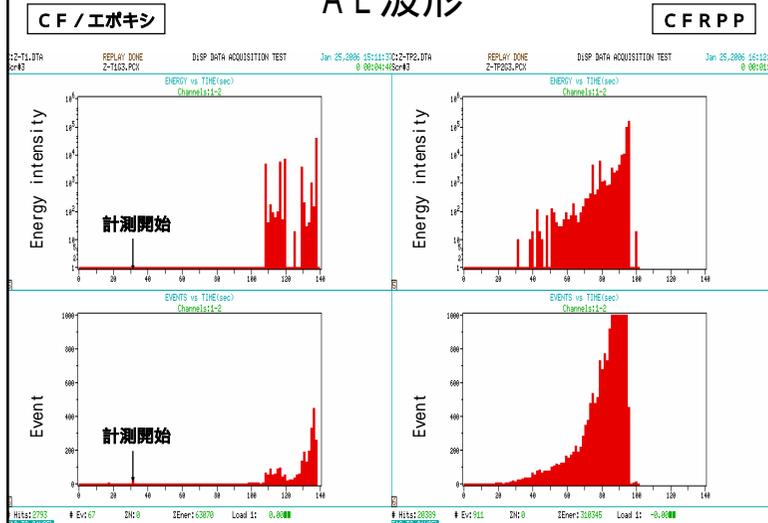
AE波形

42



AE波形

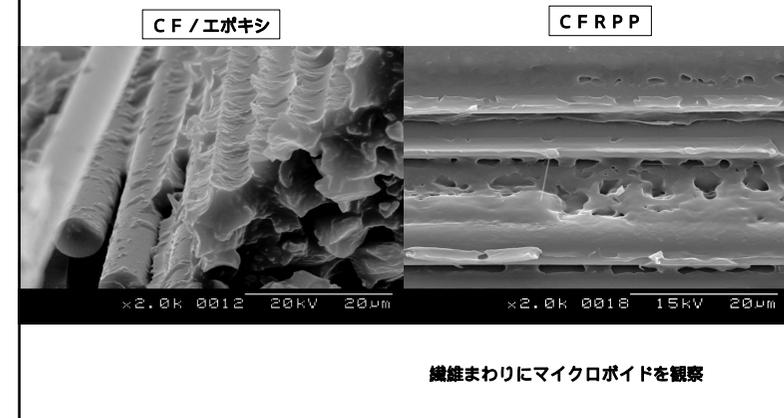
43



CFRPPの初期破壊の原因は何か

44

SEMによる破断面観察 (シアリング)



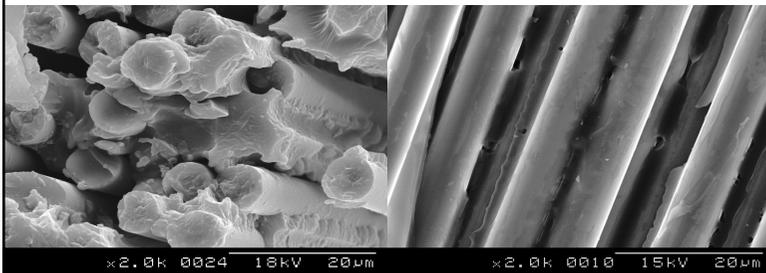
CFRPPの初期破壊の原因は何か

45

SEMによる破断面観察

CF/エポキシ

CFRPP



繊維まわりにマイクロポイドを観察
荷重方向に走るき裂のようなものを発見

CFRPPの破壊

46

	CF/エポキシ	CFRPP
破断荷重	27 259 N	18 349 N
破断ひずみ	1.96%	1.50%
AE波形	ひずみ量1.25%から発生	ひずみ量0.25%から発生
マクロ観察	分断(テンション・シア)	ほうき状 未含浸・不整あり
SEM観察	ポイドなし 含浸良好	繊維周囲マイクロポイド

初期破壊には、繊維まわりのマイクロポイドが関与しているものと思われる、この除去により、CFRPPの品質は向上する

まとめ

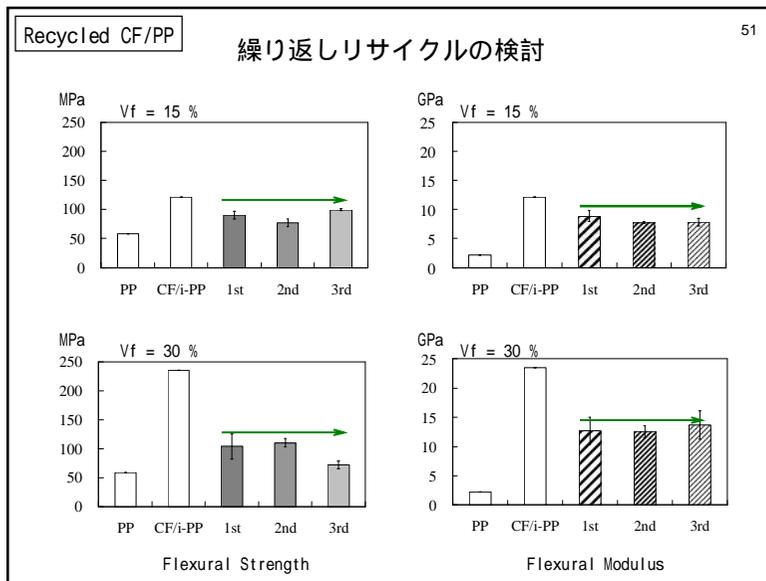
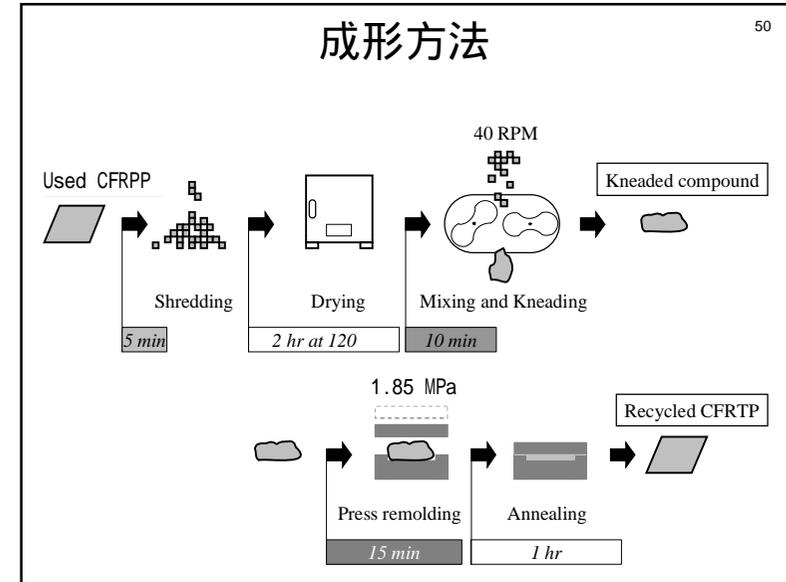
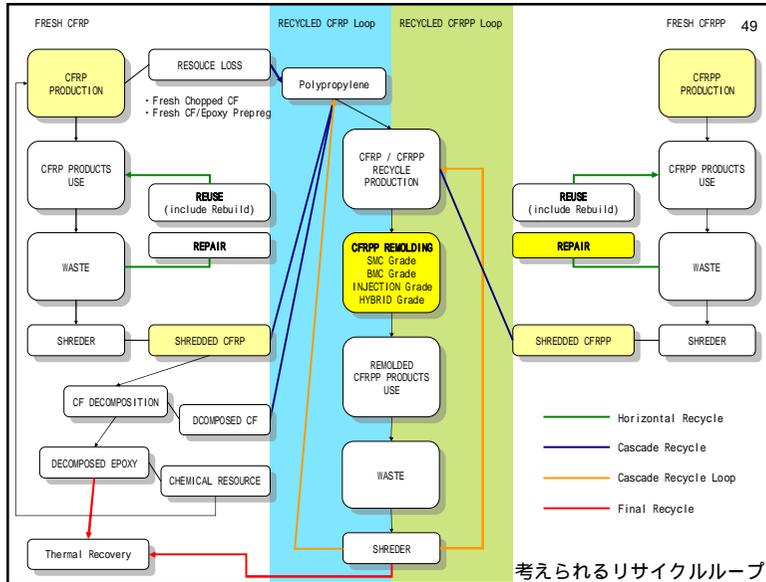
47

- 界面接着と含浸の技術的な問題解決を、マトリクス、繊維、中間基材、成形法の工夫を通じて試みた
- 提案した成形法で、一方向強化CFRPPの力学特性を画期的に改善した
- 曲げ強度で700MPa、曲げ弾性率で90GPaを達成した
- しかしながら、ひずみ量が小さく、強度が低い
- この原因は、材料内部で発生する初期破壊に原因があるのではと考え、AE計測試験および破断面観察を実施した
- AE計測より、従来CFRPPにくらべ、かなり早い段階で破壊が起こり、小さな破壊を繰り返しながら最終破断に至ることが定性的に分った
- SEM観察より、この初期破壊は、マトリクス内の細かなき裂進展と考えられ、繊維まわりのマイクロポイドから誘引される可能性がある
- このように構造部材として利用するには強度や品質にやや問題が残るが、パネル材としては十分利用可能である

不連続炭素繊維強化ポリプロピレンの
開発と評価

およびその再利用法

48

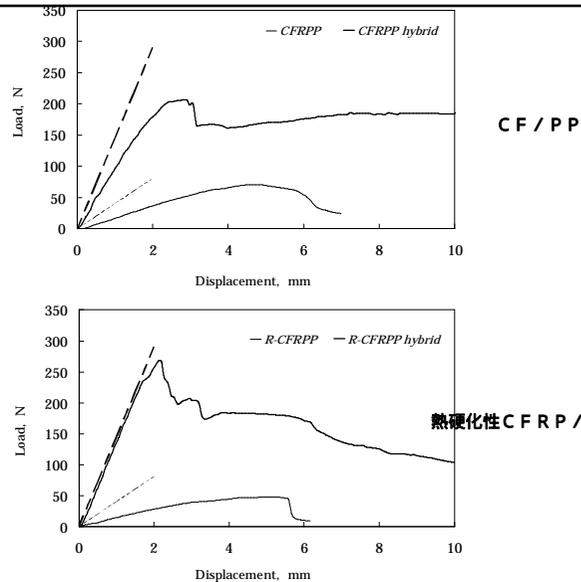
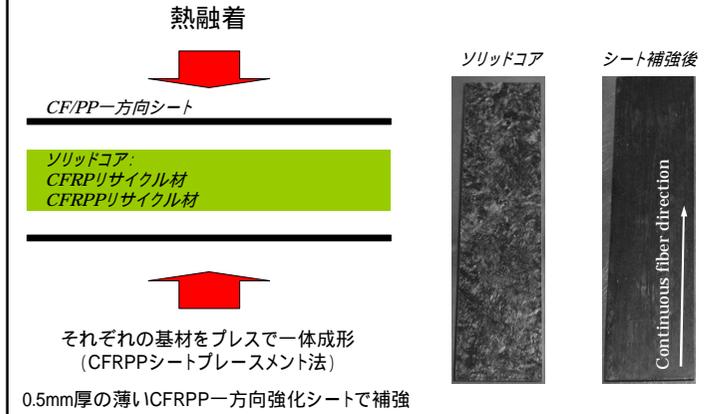


- ### まとめ
- 不連続繊維強化としても先に示した成形法の工夫で、力学特性を改善可能である
 - リサイクル材のPPには、本手法に従うならば、MFR 60 やそれ以上の樹脂が望ましい
 - 低Vfの場合は、複合材料理論から期待される力学特性と同等の性能を発現した
 - しかしながら、高Vfの場合は、およそ50%程度しか発現しなかった
 - このことから、CFRPPは、樹脂を足しながらVfを下げつつ再利用するリサイクル形態に向いている

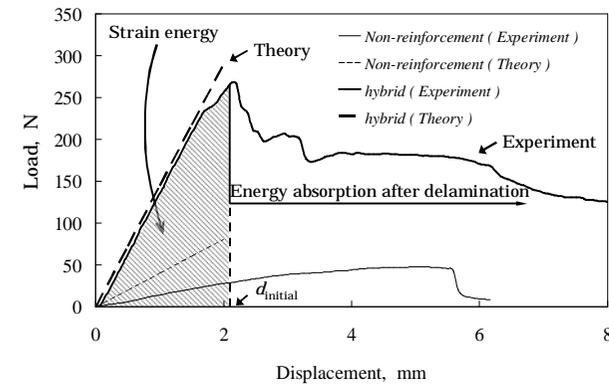
ハイブリッド補強&リペア

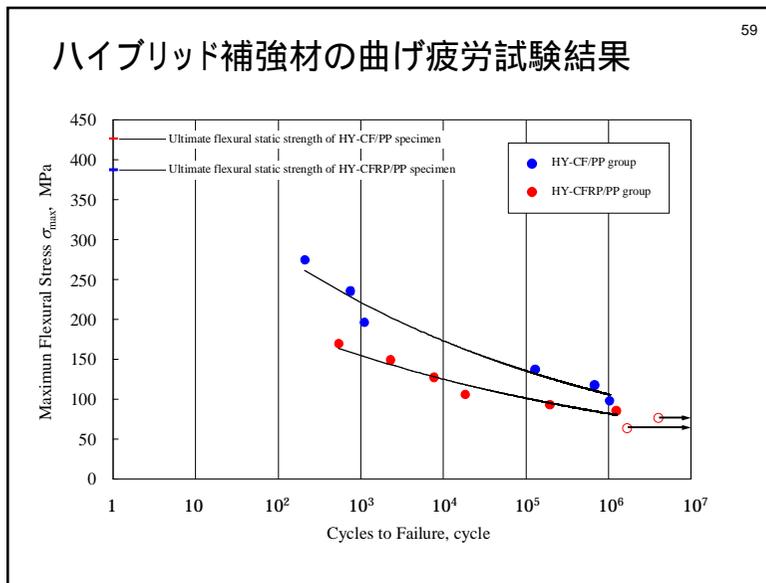
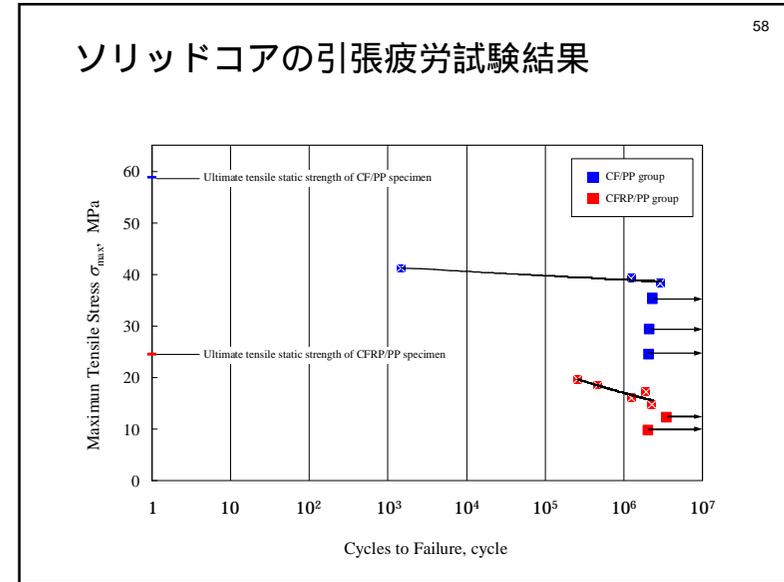
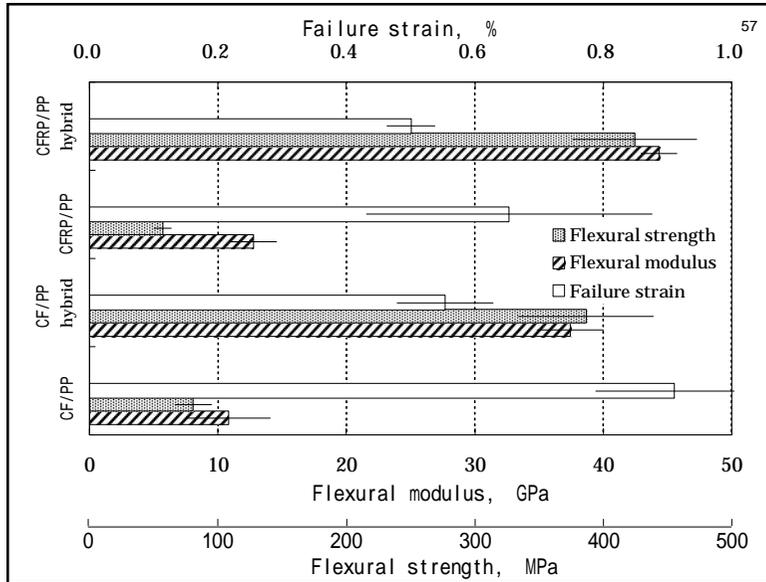
リサイクルCFRPPの曲げ強度、曲げ剛性は、複合則の約半分と低いため、リサイクルCFRPPをソリッドコアとし、薄いCFRPPシートを表面に配したハイブリッド補強材について提案する。
 また、本手法は、リサイクル材を損傷により力学特性が著しく低下したCFRPPと見立てれば、パッチ補修(リペア)としても用いられると考えられる。

プレス成形による補強方法

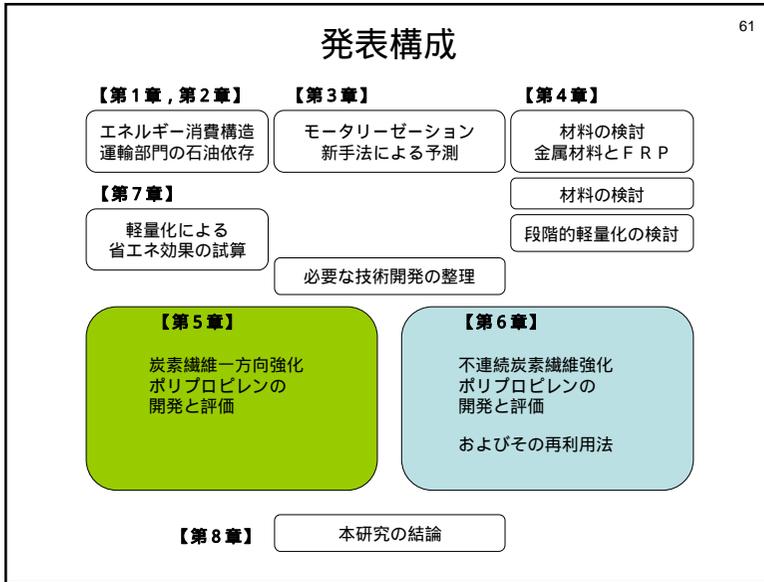


ひずみエネルギーの蓄積と破壊エネルギーの吸収





- 60
- ### ハイブリッド補強・リペアまとめ
- CFRPPシートをリサイクル材にサンドイッチすることで、画期的に性能を改善した
 - 曲げ強度 **400 MPa** , 曲げ弾性率 **45 GPa** を発現し, 強度, 弾性率ともに **約4倍** に向上した
 - 同時に, 破壊エネルギーもスキンのはく離やソリッドコアのき裂進展で吸収され, エネルギー吸収に優れる材料である
 - 本手法は, 接着剤を要さない熱融着のみの成形で, 現実的な3次元面への適用(貼付)も可能である
 - 本手法は損傷を受け, リサイクル材程度の低物性になったCFRPPの**リペア**に対しても有効である



本研究の結論

- 炭素繊維とポリプロピレンの界面接着および含浸を改善する、**新しい成形法を提案**し、高性能なCFRPPの開発に成功した
- 本材料を自動車に適用すれば、40%軽量化が実現し、さらに他の対策技術との相乗効果で、将来の乗用車によるエネルギー消費を無対策の1/6に抑えることができる
- フレッシュな一方向強化材は、強度発現に課題が残ったが、パネル材には適用可能なだけの剛性を有する
- 世界初の連続繊維CFRPP大型成形物の作製に一步近づいた

本研究の結論

- リサイクル材は、現在の自動車用GF RTP成形品(射出/SMC)と同等の力学特性を発現したため、GF RTP適用部位への代替は可能である
- リサイクル材は、一方向材成形時につくる中間基材を熱融着で表面に貼り付けるだけで、性能が画期的に改善し、エネルギー吸収が問題となるドアのインナービームなどに適用可能である
- 本技術の効果は即効的であり、エネルギー消費の激増が危惧される未来において極めて有効である
- 量産に際し、成形速度の向上、接合、安定した品質の確保が今後の主な課題として残った

各章と業績との対応

	国内学会	国際学会	学術 雑誌 (日)	学術 雑誌 (英)	論文 番号
第2章	3 (1)				[12] [13] [14]
第3章	2 (1)	2 (2)		1 (1)	[1] [3] [6] [16] [19]
第4章	3 (0)	2 (0)			[4] [5] [15] [17] [25]
第5章	1 (1)	1 (1)	1 (1)		[2] [9] [20]
第6章	4 (1)	4 (2)			[7] [8] [10] [11] [21] [22] [23] [24]
第7章	3 (2)	1 (1)		1 (1)	[1] [3] [13] [16] [19]
第8章					
補遺A		1 (1)			[2]
補遺B	1 (1)				[18]

括弧内数字は筆頭論文件数を示す