

# 炭素繊維強化プラスチックの リサイクル性評価

指導教官 高橋淳 助教授

東京大学大学院 環境海洋工学専攻  
安全評価工学研究室  
36257  
尾台竜也

## 発表構成



## CFRPとは

CFRP: Carbon Fiber Reinforced Plastic  
炭素繊維を強化材としたプラスチックとの複合材料

### これまでの用途

- 競技用自動車
- 航空機・宇宙開発
- スポーツ用品

高性能  
高価

### 今後

- 超軽量化量産自動車
- パソコン筐体
- ロボット駆体

量産化  
廉価

## CFRPの特徴

### ▶長所

- 軽量 重量あたりの剛性、強度に優れる
- 耐久性良 錆びないなど、経年劣化が少ない

### • 短所

- 製造時の消費エネルギー大
- リサイクル技術の未確立

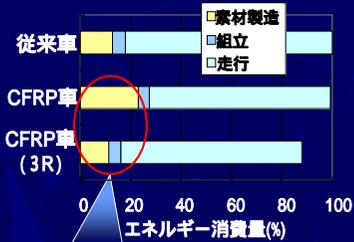
自動車への適用によって  
・鉄の代替  
・軽量化  
・部品寿命の増加  
による環境負荷低減

リサイクル技術の確立によって  
省エネ、低コスト化が可能

リサイクル技術の確立が急務

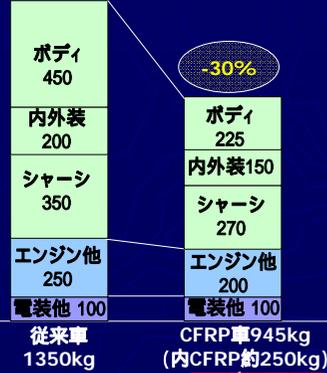
## CFRPリサイクルの必要性

- ▶ ライフサイクル全体を通しての環境負荷の低減



素材製造段階での低コスト・省エネ化

- ▶ CFRPによる鉄鋼部品の代替



自動車リサイクル法(リサイクル率95%)への対応

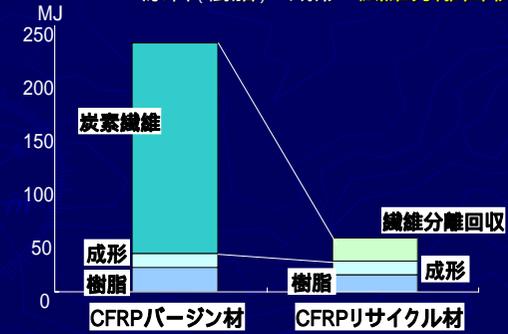
5/40

## リサイクルによる環境負荷の低減

- ▶ CFRPの製造原単位

原料(樹脂・炭素繊維)+成形

原料(樹脂)+成形+繊維分離回収



6/40

## 研究の目的

- ▶ CFRPリサイクル技術の確立を目指し  
その基礎的検討を行う

### 材料特性評価

- ▶ CF/TS(熱硬化性樹脂)破砕材の再利用
- ▶ CF/TP(熱可塑性樹脂)の開発とリサイクル性評価

### 環境負荷評価

- ▶ ライフサイクルアセスメントによる環境負荷評価
- ▶ 効果的なリサイクルのための技術開発の提言

7/40

## 材料特性評価

8/40

## 材料特性評価

- ▶ 熱硬化性樹脂製CFRP (CF/TS) のリサイクル
  - CFRP破砕材の熱硬化性樹脂 (TS) による再成形
  - CFRP破砕材の熱可塑性樹脂 (TP) による再成形
- ▶ 熱可塑性樹脂製CFRP (CF/TP) のリサイクル
  - 炭素繊維強化ポリプロピレン (CF/PP) の材料特性改善
  - CF/PPの破砕 再成形による材料特性の変化
  - CF/その他TP の材料特性確認

9/40

## CF/TSのリサイクル

現在、CFRP生産量の殆どがCF/TS

- ▶ 樹脂の特性からリサイクルが困難
- ▶ セメントの充填・強化材としての再利用の例
- ▶ 熱回収、極端なカスケードリサイクルから準水平リサイクルを目指した研究開発

### マテリアルリサイクル例

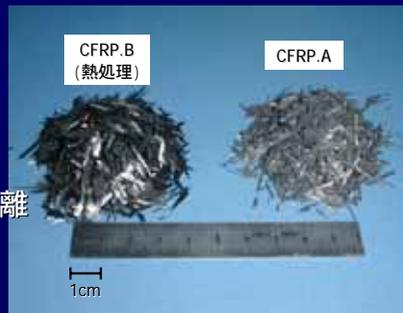
破砕後、強化材として再利用  
熱処理による樹脂分離、CF回収  
薬品処理による樹脂分解、CF回収  
超臨界水による樹脂分解、CF回収

このうち、破砕+ 熱処理の方法について検討

10/40

## CFRP破砕材

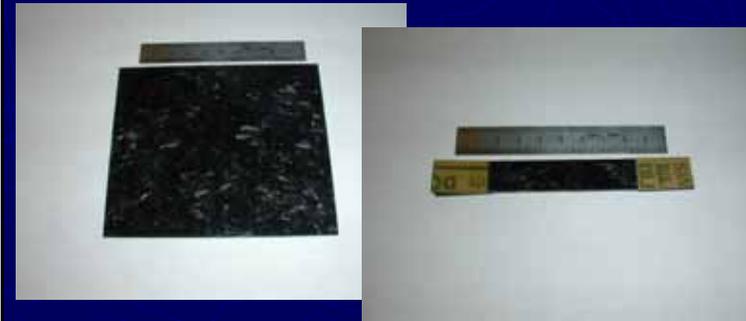
- ▶ CF/EPの破砕材  
(繊維含有率 $V_f=60\%$ )
- ▶ 繊維長  
1mm ~ 30mm程度
- ▶ 熱処理によって樹脂を分離  
(熱処理後の $V_f$ は90%)
  - ・破砕のみしたもの: CFRP.A
  - ・破砕後熱処理したもの: CFRP.B



11/40

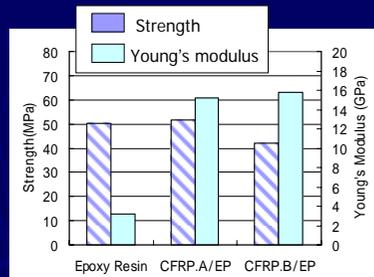
## CFRP破砕材/エポキシ

- ▶ 樹脂と破砕材を混練しプレスにより板材を成形
- ▶ 繊維体積含有率30%
- ▶ 60℃で24時間硬化後ダイヤモンドカッターで切り出し
- ▶ 引張試験で材料特性評価



12/40

## CFRP/EP 実験結果



(いずれもVf30%)

- ▶ 剛性の強化を確認
- ▶ 強度は強化されず
  - 破砕材の樹脂中での欠陥効果

**破砕材をほぐす必要有**

樹脂に対して

	Strength	Young's modulus
CFRP.A/EP	102%	480%
CFRP.B/EP	83%	498%

13/40

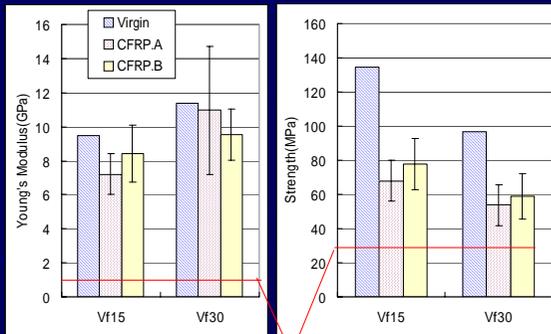
## CFRP破砕材/ポリプロピレン

- ▶ 樹脂と破砕材を混練後プレスにより板材を成形
  - 繊維含有率Vfは15% , 30%
  - 混練はスクリーによる機械混練
  - 混練温度、プレス温度は200
  - 段階加圧による真空引き無しでのボイドレス成形
- ▶ 硬化後ダイヤモンドカッターで切り出し
- ▶ 曲げ試験で材料特性評価

スクリーでの混練により破砕材の繊維を解く効果

14/40

## CFRP/PP 実験結果



PP樹脂 バージン材の説明は後述

ヤング率はバージン材と同等 ~ 25%低下

強度は50%程度に低下

15/40

## 破砕材再成形 考察

- ▶ 破砕材の再利用、再成形
  - ヤング率はバージン材と同等の値を発現
  - 強度は約50%程度に低下
    - ▶ 残留EPによる繊維-樹脂の接着阻害
    - ▶ 繊維が完全には解れないため不十分な強化効果
- ▶ 熱処理によるEP除去
  - 熱処理により強度向上
    - ▶ 樹脂除去による繊維解繊の促進

16/40

## 熱可塑性樹脂製CFRP

### ▶ 熱可塑性樹脂によるCFRP

加工性・量産性良  
リサイクル性良

CF/TSに比べ  
材料特性低

材料特性向上の必要

- ・繊維-樹脂接着性向上
- ・含浸性向上

17/40

## CF/PP材料特性

### ▶ 炭素繊維

- 短繊維: 6mmチョップ
- 薬品洗浄による解繊

回収繊維、または  
CF/TP破砕材の繊維長  
を想定

### ▶ ポリプロピレン

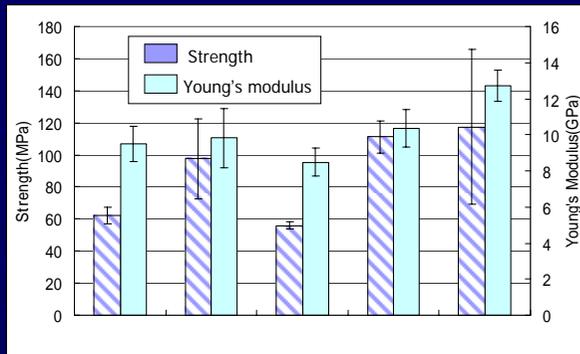
- MFR:メルトフローレート、2~30
- 無水マレイン酸添加

樹脂としてのリサイクルの  
実績豊富

混練 プレス成形  
曲げ試験による評価

18/40

## CF/PP結果



マレイン酸	×		×		
繊維洗浄	×	×			
MFR	2	2	2	2	30

Vfは  
すべて  
30%

19/40

## CF/PPリサイクル

### ▶ CF(6mmチョップ、薬品洗浄による解繊)

### ▶ PP(マレイン酸添加、MFR30)

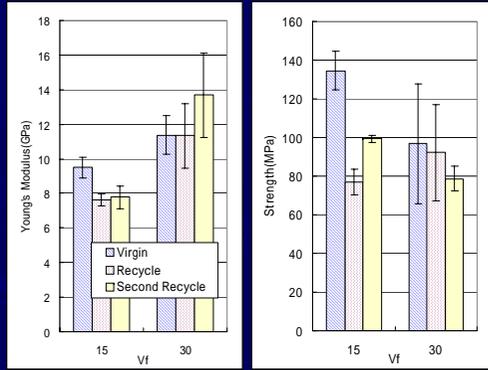
(Vf15,30%)



擬似リサイクル材の作成

20/40

## CF/PP再成形結果



ヤング率はVf30%では低下無し

強度はVf15%でやや低下したが、成形不良の可能性

21/40

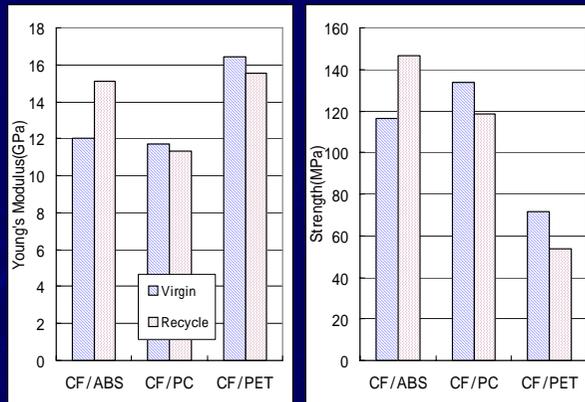
## CF/PP再成形 考察

- ▶ ヤング率は再成形による低下は殆ど見られず
- ▶ 強度はやや低下傾向
  - マレイン酸の熱履歴による劣化
  - 不純物の混入
 致命的な特性低下ではない

再成形による極端な材料特性の  
低下は起こらないことを確認

22/40

## CF/その他TP再成形結果



23/40

## 考察

- ▶ CF/ABSはリサイクルによりヤング率、強度ともに向上
  - 再混練により樹脂と繊維がより含浸、接着し特性向上
  - ★ 一回目の混練では不十分だったと考えられるため、樹脂に応じた適切な混練、成形条件の検討が必要
- ▶ CF/PCはリサイクルによる材料特性の変化は殆ど無し
- ▶ CF/PETは大きく強度低下
  - 混練成形時に加水分解により樹脂が劣化
  - 樹脂に応じて保管、成形加工時の条件管理に考慮が必要

24/40

## 材料特性評価 まとめ

### ▶ CF/TS破砕材のリサイクル

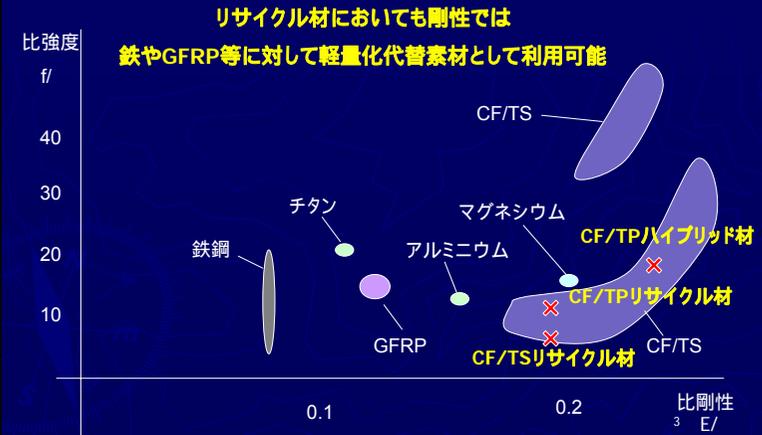
- 剛性の強化を確認  
強度面では樹脂残留度に応じて脆くなる
- 特性改善のためには  
より効率の良い樹脂除去方法の検討が必要
- リサイクル後の材料特性を考慮した用途・用法が必要

### ▶ CF/TPの再成型

- 繊維の解繊、樹脂の酸変性による  
CF/PP材料特性改善を確認
- 破砕後の再成型も材料特性の極端な低下は見られず
- 樹脂の種類によっては  
樹脂の劣化による材料特性の低下が見られる

25/40

## 比強度比剛性比較



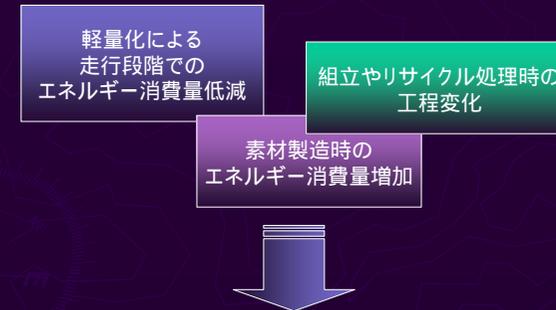
26/40

## 環境負荷評価

27/40

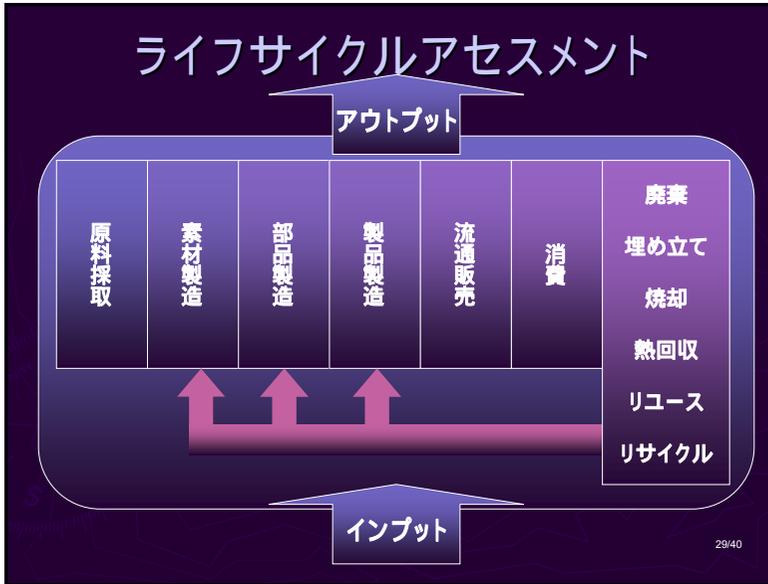
## 環境負荷評価

### ▶ 自動車へのCFRPの適用



ライフサイクルアセスメントによる評価

28/40



- ## 初期設定
- ▶ 初期設定
    - 実施目的  
自動車へのCFRP適用時及びCFRPリサイクル時の環境負荷調査
    - 評価対象  
排気量2000cc、重量1380kgのガソリン車
    - 機能単位及び基準フロー  
「排気量2000ccで91720km走行可能」なガソリン車
    - システム境界  
素材製造、部品・車体製造、使用(走行)、輸送・再生処理・廃棄
    - 環境負荷項目  
エネルギー消費量
- 30/40

## 自動車モデル

▶ 2000cc、1380kgの4ドア、セダン型ガソリン車

Unit:kg	Steel	Nonferrous metal	Others
Body	450	5	15
Chassis	210	40	40
In/Exterior	70	0	150
Engine	140	40	10
Others	80	40	90
Total	950	125	305

鉄鋼部材のCFRP化

31/40

- ## CFRP適用ケース
- ▶ CFRPの種類と適用部位の組み合わせによる場合わけ
- Case : CF/EPのみ  
高性能CFRPのみの使用
  - Case : CF/EPとCF/PPの組み合わせ  
コストパフォーマンスの良いCFRP
  - Case : CF/EPとCF/PP,CF/PPリサイクル材組み合わせ  
リサイクル性の良いCFRPの効果
- 32/40

## 材料特性比較と軽量化率

	Steel	High-tensile steel	CF/EP (Vf60%)	CF/PP (Vf30%)		
				Virgin	Recycle	Hybrid
Density	7.8	7.8	1.53	1.16	1.16	1.16
Strength (MPa)	400	1470	700	230	130	200
Specific Strength	5.2	19.2	46.7	20.2	11.4	17.6
Young's Modulus(GPa)	206	206	46	30	10.5	20
Specific Stiffness	0.077	0.077	0.218	0.273	0.193	0.239

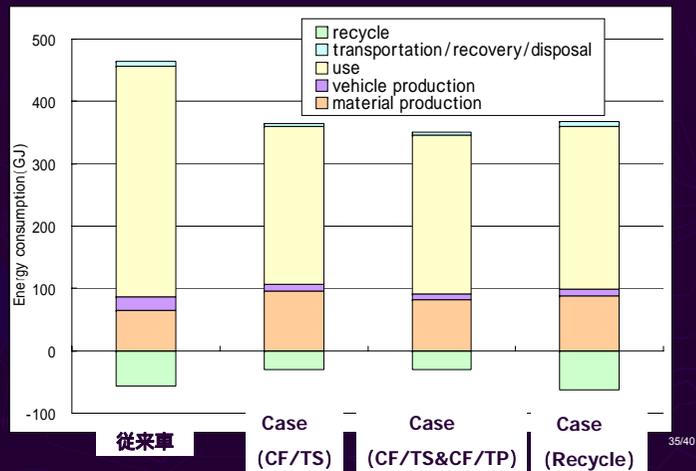
33/40

## 主な原単位

- ▶ 素材
  - 鉄: 33MJ/kg, CF: 286MJ/kg
- ▶ 組立
  - 従来車組立: 15.5MJ/kg, CFRP車組立: 12.4MJ/kg
- ▶ 走行
  - 走行距離: 10057km × 9.12年、ガソリン消費: 35MJ/kg
- ▶ 廃棄
  - 回収: 0.4MJ/kg, 再生処理: 5.5MJ/kg, 廃棄0.5MJ/kg
  - CFRP再生処理: 15MJ/kg
  - 回収された素材の製造原単位分をマイナス計上

34/40

## 結果



35/40

## 考察

- ▶ CFRP化により
  - 素材製造段階のエネルギー消費量が増大
  - 走行段階のエネルギー消費量が低下

CFRP化によりライフサイクル全体での  
エネルギー消費量低下

	Case	Case	Case
エネルギー削減率 (従来車100%)	17.6%	21.1%	24.9%



CF/TPの利用による低下  
リサイクルによる低下

36/40

## リサイクルの効果

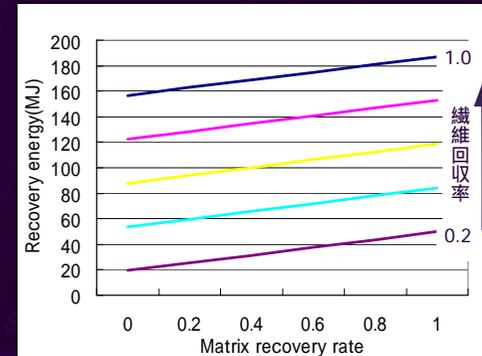
### ▶鉄のリサイクルによる回収エネルギー

	Transportation	Recovery	Disposal	Recycle	Total
Weight (kg)	1	1	0.02	0.98	-
Energy Intensity (MJ/kg)	0.4	5.5	0.3	-33	-
Energy Consumption (MJ)	0.4	5.5	0.006	-32.34	<b>-26.434</b>

37/40

## リサイクルの効果

### ▶CFRPリサイクルの場合



エネルギー回収量は  
繊維回収率に大きく依存

38/40

## 環境負荷評価 まとめ

### ▶自動車のCFRP化による環境負荷をLCAにより評価



トータルでのエネルギー消費量は削減

- ▶ CF/TPを使用することで環境負荷低減
- ▶ リサイクルによりさらにエネルギー消費量削減
  - リサイクル効果を大きくするには繊維回収率が重要

39/40

## 結論

### ▶材料特性、環境負荷両面から

CFRPのリサイクル性について評価・検討

- CF/TSのリサイクル
  - ▶ 効率よく樹脂を分離する方法の検討が必要
- CF/TPのリサイクル
  - ▶ 再成形によっても大幅な特性低下は無し
  - ▶ 樹脂によっては劣化等に注意が必要
- LCAにより、自動車CFRP化による環境負荷低減効果を確認
- CF/TPの使用による環境負荷低下を確認
- リサイクル効果は繊維回収率に大きく依存

汎用CFRPとしての  
CF/TP開発が重要

クリーンな繊維の  
効率の良い回収が  
有効かつ重要

40/40