

## CFRPによる軽量航空コンテナの構造設計

東京大学大学院 工学系研究科  
環境海洋工学専攻 安全評価工学研究室  
56293 芦田哲郎

### 研究背景 CFRPの特徴

#### CFRP (炭素繊維強化プラスチック)の特徴

- 軽量であり、比強度・比剛性に優れる  
→ 鉄、アルミニウムなどへの代替材料
- 耐久性、耐食性に優れる  
→ メンテナンスコストの低減
- 自由な形状に成形することが可能である  
→ 工期の短縮 工数の削減

社会のニーズに応える材料として注目されている  
特に、輸送機器への適用が期待されている

### 研究背景 CFRPの課題

#### CFRPの本格的普及のためには

##### ■ コストの低減

鉄やアルミニウムよりも高価な素材。

##### ■ リサイクル性の確保

普及のためにはリサイクルの確保が必須の要件。しかし、廃棄CFRPは難リサイクルとされ大半は埋立処分されている。

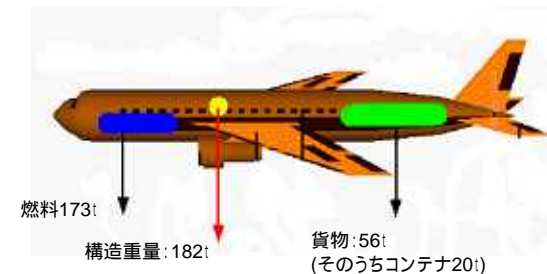
高スペックのリサイクル材を開発し、構造部材として適用する。  
生産性・コストへの波及効果も期待できる

##### ■ 信頼性の向上

一部の特殊な用途に適用範囲が限定されてきた。  
航空機、自動車の二次構造部材など...

汎用的な構造物への適用を進め、多品種展開を図り、事例を増やすことが信頼性の向上につながる

### 本研究で取り組むこと



- 航空機総重量の軽量化が積極的に追求されている
- 品質要求の高い構造重量部の削減は困難
- コンテナの軽量化により効率的に総重量軽減

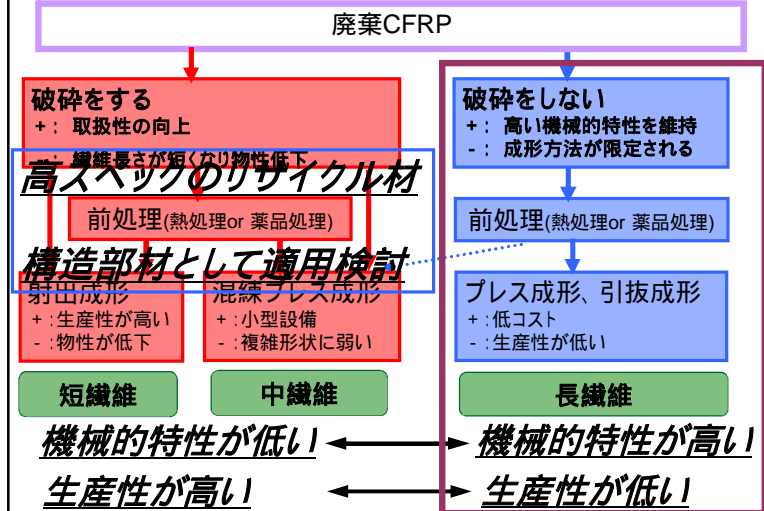
## 発表概要

1. 高スペックなCFRPリサイクル材の開発
2. 航空コンテナの構造設計
3. 航空コンテナ軽量化による効果
4. 結論

## 高スペックリサイクル材の開発

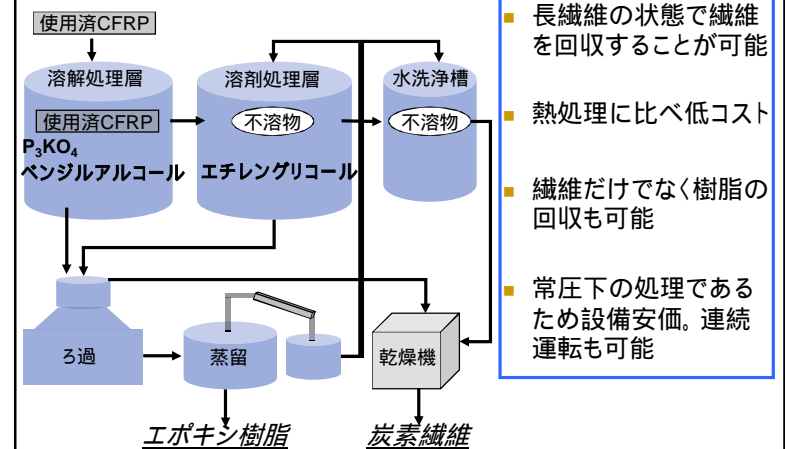
- リサイクル方法の分類
- 薬品処理法による長繊維回収
- 長繊維リサイクル材
  - 試験片作成
  - 曲げ試験による評価
  - SEMによる破断面観察
- まとめ

## リサイクル方法の分類



## 薬品処理法による繊維回収 高スペックリサイクル材の開発

### 長繊維の回収法



### 試験片の作成 高スペックリサイクル材の開発

- 繊維を30cmに切り揃える
- エポキシ樹脂の塗布
- 繊維を自作金型内に配置
- 圧力を与え樹脂を含浸
- オープンで40 16時間硬化
- 試験片の切り出し

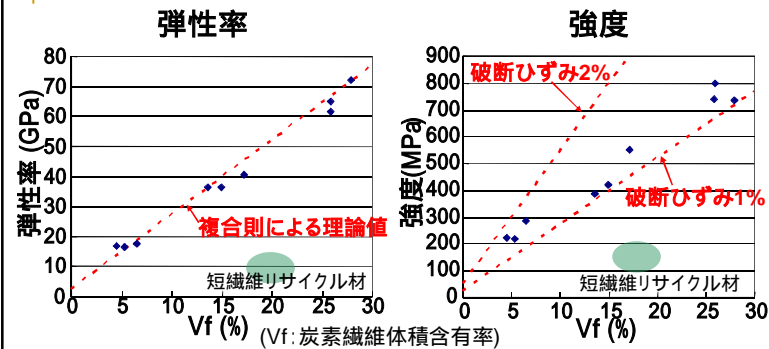


### 曲げ試験による物性評価 高スペックリサイクル材の開発



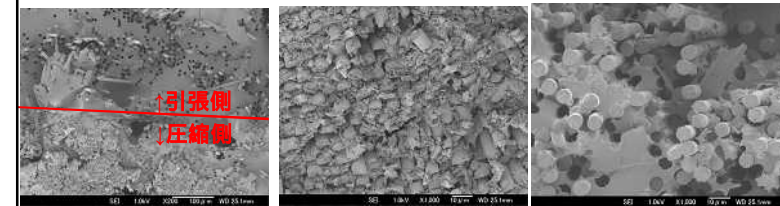
- 支持スパン: 150mm
- クロスヘッドスピード: 2mm/min

### 曲げ試験結果 高スペックリサイクル材の開発

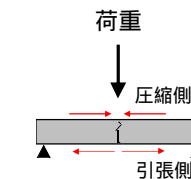


- Vfと物性値に強い相関関係 (ボイドが少ない)
- 複合則による理論値と精度よく一致 (繊維損傷が少ない)
- 短繊維リサイクル材よりも、大幅に高い物性値

### SEMによる破断面観察 高スペックリサイクル材の開発



圧縮側、引張側(×200) 圧縮側 (×1000) 引張側 (×1000)



適正な破壊モード

- 圧縮側・・・繊維の断面が潰れる
- 引張側・・・繊維の引き抜け

### 高スペックリサイクル材の開発 まとめ

- リサイクルに伴う繊維への損傷は少ないので、繊維を長い状態で回収できれば、高スペックのリサイクル材を開発できる。
- 長繊維リサイクル材は、短繊維リサイクル材よりも、高い機械的特性を持つ。 (ともに等方性材として比較)
- 本研究で開発した一方向の長繊維リサイクル材は、高い機械的特性を有する。材料に方向性を持たせ、**フレーム部等へ構造部材としての適用**が見込める。

### 航空コンテナの構造設計

- 既存コンテナ詳細解析
- 軽量化方針の策定
  - 構造様式の選定
  - フレーム断面の変更
  - フレーム構造の検討
- 板厚パラメータ解析
- リサイクル材の適用検討

### 既存コンテナ 3Dモデル化

- パネル・フレーム・ボトムの3つの部分から構成
- ジェラルミン使用より軽量化が図られているが、パネルの重量大
- ボトム部は裁荷への耐久性の観点から金属材料以外の適用不可



コンテナの外観

	材料	板厚	重量
パネル	ジェラルミン	2mm	178kg
フレーム	ジェラルミン	2mm	49kg
ボトム	積層構造	88mm	180kg



フレーム構造

**コンテナ総重量  
407kg**

ジェラルミン2mm ベニヤ板7mm 発泡材75mm ジェラルミン4mm

### コンテナ 荷重条件

- 規格NAS3610で定められた荷重を各方向に加える
- 荷重を加えた場合にコンテナが破損しないことが条件

背面	水平方向荷重	側面	水平方向荷重	天井面	鉛直方向荷重
	10.2tf		10.2tf		17.3tf

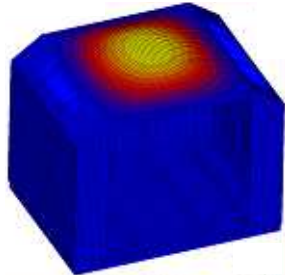


背面 水平方向荷重

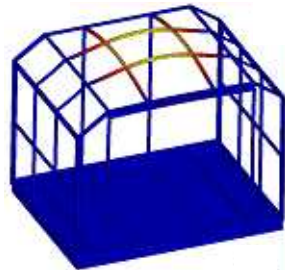


側面 水平方向荷重

### 既存コンテナ 解析結果



天井面荷重 変位分布図



天井面荷重 変位分布図

	背面方向	上面方向	側面方向
最大変位(mm)	86.5	122.1	71.1

CFRP製軽量コンテナは、この既存コンテナの変位量以下に収まることが条件となる。

### コンテナ軽量化の方針 比較

パネルとフレームのハイブリッド構造  
 パネル・フレームにCFRPを適用

フレーム構造 (スケルトン構造)  
 パネルにフィルム材、フレームにCFRP

モノコック構造  
 CFRP製モノコックパネル導入

方針	工期	コスト	技術的難易度	軽量化効果
パネル・フレームにCFRP	短	中	低	中
パネルにフィルム材、フレームにCFRP	中	小	中	大
モノコックパネル導入	長	大	高	小

構造部材として働いておらず、重量の大きいパネル部材を、低コスト・軽量のものに置き換えることが効果的

### コンテナ軽量化の方針

#### ■ パネル

構造全体の強度・剛性に大きく寄与しない

面積が大きく、パネル部の軽量化、低コスト化が重要

材料: ジェラルミン → **ポリエステル製のフィルム材**

フィルム材のみでは、せん断方向荷重に弱い

→ 斜方向フレーム導入により補強

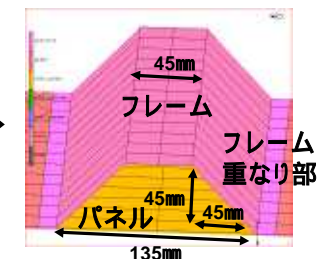
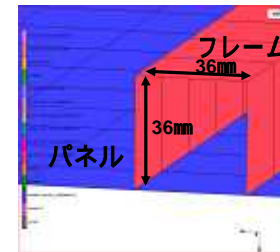
#### ■ フレーム

材料: ジェラルミン → **CF/Epoxy(Vf60)、リサイクル材**

断面形状: 中空角柱 → 台形、ハット型フレーム導入

構造 : 斜向きにフレームを追加導入

### フレーム断面形状の変更 航空コンテナの軽量化

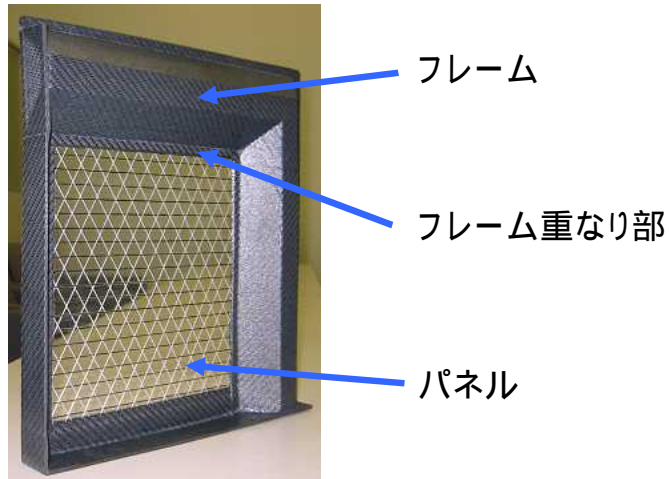


角材と板材をリベット接合

成形性よりハット構造の導入

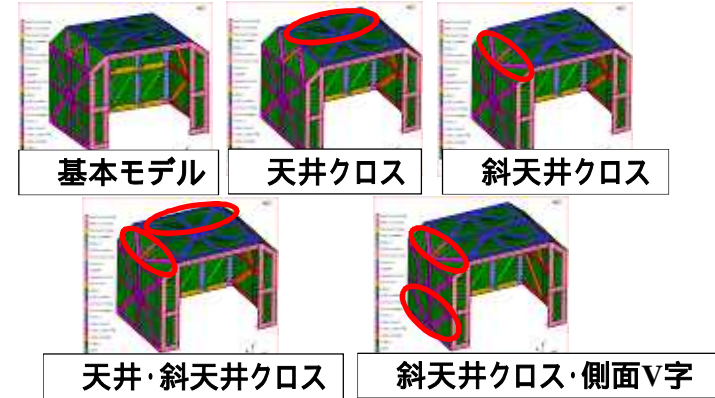
- 断面二次モーメントの増大により、曲げ剛性向上
- 台形ハット型とし、フレーム重なり部による強度増加

### フレーム部材の形状



### フレーム構造の検討 航空コンテナの軽量化

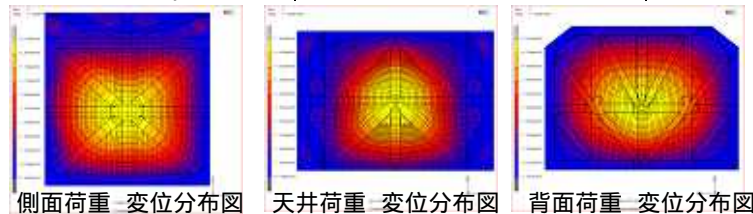
- 斜フレームの配置を以下の5モデルから検討



### フレーム構造の検討結果 航空コンテナの軽量化

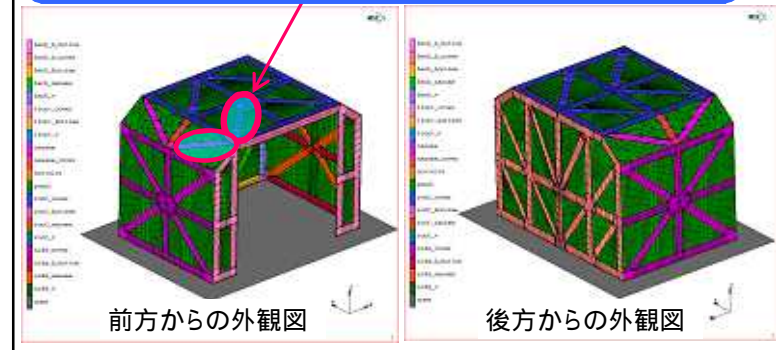
- の斜天井クロスモデルがバランス良く変位が収まる

	側面荷重	天井荷重	背面荷重
基本モデル 167.8kg	74.1	118.8	80.2
天井クロス 167.7kg	74.3 (+0.3%)	125.6 (+5.7%)	80.1 (+1.0%)
斜天井クロス 167.7kg	70.7 (-4.6%)	116.9 (-1.6%)	79.9 (-0.4%)
天井・斜天井クロス 167.9kg	74.5 (+0.5%)	133.4 (+12.3%)	80.6 (+0.5%)
斜天井クロス・側面V字 167.9kg	74.3 (+0.3%)	116.0 (-2.4%)	79.8 (-0.6%)



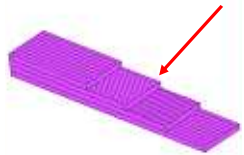
### フレーム構造の検討結果 航空コンテナの軽量化

- フレーム同士のクロス部分に集中荷重が加わる(面外方向)  
→各面の斜方向フレームは、クロス部が少なくなるほうがよい
- ドア(構造部材ではない)がある前面により大きな荷重が加わる  
→前面の上部部に斜方向フレームを直結させる



## 板厚の設定 航空コンテナの軽量化

- 変位が既存コンテナ以下に収まるよう、フレーム部板厚を設定
- フレーム部に適用するCFRPは、擬似等方材、0°方向強化積層材の二種類を比較検討



0°方向強化積層材とは一方向材を0°,60°,120°,0°に積層したもの

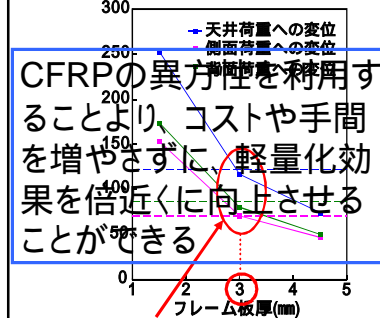
解析に代入する物性値

	弾性率(GPa)	ポアソン比	強度(MPa)
CFRP 擬似等方材(Vf60)	52.5	0.3	1.56
CFRP 一方向材(Vf60)	138	0.3	1.56
CFRP 0°方向強化積層材(Vf60)	103.5	0.3	1.56
ポリエステルフィルム	5.0	0.3	1.40

## 板厚の設定 航空コンテナの軽量化

### 擬似等方材

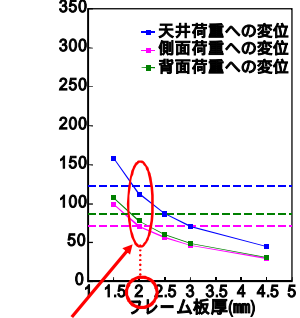
各荷重への最大変位(mm)



既存品から26%の軽量化  
227kg→167.7kg(ボトム部重量は含まず)

### 0°方向強化積層材

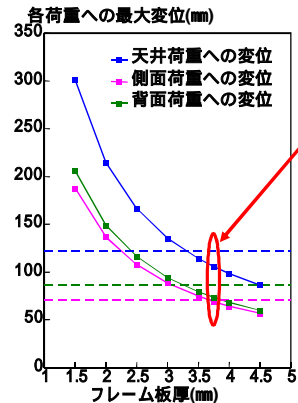
各荷重への最大変位(mm)



既存品から48%の軽量化  
227kg→119.0kg(ボトム部重量は含まず)

## リサイクル材の適用検討 航空コンテナの軽量化

- 作成した長繊維リサイクル材をフレーム部に適用検討(0°方向強化積層材)



既存品から9.6%の軽量化  
227kg→205.0kg(ボトム部重量は含まず)

リサイクル材を適用した場合でも、既存のジェラルミン製コンテナからの軽量化が実現

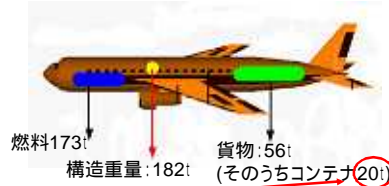
## 航空コンテナの構造設計 まとめ

- 既存コンテナにもジェラルミンが適用されており、軽量化への要望が非常に高いことが伺える
- 構造自体を見直し、CFRPを適用することで既存コンテナから大幅な軽量化が可能となる。  
CFRPの特性を活かすことより(0°方向に強化積層)既存コンテナから48%の軽量化を達成。
- リサイクル材を構造部材としてフレーム部に適用した場合も、既存コンテナからの軽量化が実現される。

## 航空コンテナの軽量化効果試算

### B747F 重量内訳

構造重量	182.7
燃料タンク重量	173.6
最大積載貨物重量	56.7
CFRP導入による軽量化	-4.95
総重量(軽量化前)	303.5



- フレーター1機当たり4.9tの軽量化を達成(B747にコンテナ46個分搭載)  
→ 航続率 0.8%向上(時間平均とし、燃料消費による重量変化の影響含む)
- 構造重量、燃料重量の占める割合が大きいが、貨物重量に対するコンテナ軽量化の影響は大きい

航続率: 単位燃料消費量当たり移動可能な距離

$$r_j = \frac{C_L^{\frac{1}{2}}}{C_D} \times \frac{1}{b_j} \times \sqrt{\frac{1}{\rho S W}}$$

r: 航続率  
bp: 燃料消費率[kg/hp·h] bj: 燃料消費率[kg/kgf·h]  
η: プロペラ効率 ρ: 空気密度 s: 主翼面積  
CL: 揚力係数 CD: 抗力係数

## 航空コンテナの軽量化効果試算

- 東京 上海のフライトの場合、年間で110klの燃料削減(年間200往復、一往復当たり燃料100kl消費)
- 航続率0.8%向上→年間で約500万円の燃料費削減(燃料価格: 61円/l 2006年8月)

CFRPコンテナ1台あたり、年間11万円の燃料コスト削減  
CFRPコンテナの初期コストを十分に回収可能

## 航空コンテナの軽量化効果試算

### リサイクル材適用の場合

- 長繊維のリサイクル材はフレッシュ材と同等の物性値を発現することが本研究での実験結果よりわかった。
- 実用段階においては、Vfをフレッシュ材と同じ60%にまで高めることは可能である



リサイクル材によっても、フレッシュ材と同等の燃料費削減効果が見込める

- リサイクル材を適用することにより、初期コスト(材料費)も大幅に削減される。



既存のジェラルミン製コンテナとも十分に競合しうる

## 結論

- 長繊維リサイクル材は高い機械的特性を有しており、構造部材として適用可能であることがわかった。
- CFRPを航空コンテナに適用する場合、構造自体を見直すことにより、既存コンテナから大幅な軽量化(-48%)が可能となる。
- CFRP製コンテナは軽量化に伴い燃料費が軽減されるので、コスト面でも既存のジェラルミン製コンテナと十分に競合しうるものである。