

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 修士2年 56293 芦田哲郎
指導教員 高橋 淳 助教授

1. 序言

人々の生活様式や社会の情勢と、使用される材料の間には密接な関係がある。環境・エネルギー問題の顕在化を背景として、構造物に用いる材料に対する社会のニーズも変容している。近年、運輸部門におけるエネルギー消費量が急激に増大しており、その深刻化が懸念されている。運輸部門はエネルギー源として石油への依存度が非常に高く、また途上国のモータリゼーションの進展や世界的な貿易量の拡大により消費エネルギー量も今後さらに加速的に増大すると考えられている。

そのような中で、比強度・比剛性に優れた軽量な材料である CFRP(炭素繊維強化プラスチック)は、耐久性や耐食性にも優れており、社会のニーズと非常によく合致した材料として今後の本格的な普及が期待されている。CFRP を移動体へと適用することにより、運輸部門のエネルギー消費量の大幅な削減や、メンテナンスのコスト低減、安全性の向上などが実現すると考えられている。

CFRP の適用範囲はこれまで航空機などの一部の特殊な用途に限定されてきたが、エネルギー問題の深刻化につれて、今後は一般の構造物への適用など汎用的な用途への展開を検討する必要があると考えられる。したがって、本研究では、軽量化により大きな省エネルギー効果が見込める移動体であり、パネルとフレームの組み合わせからなる汎用的な構造物である航空コンテナの構造設計を行うこととした。また、高価な材料である CFRP はリサイクル材として有効に活用していくことが将来的には望ましいので、高い物性値を有する CFRP リサイクル材を開発し、航空コンテナへの適用の可能性を検討することとした。

2. 薬品処理法による CFRP リサイクル

2.1 CFRP のリサイクルについて

現在生産されている CFRP の多くは、エポキシ樹脂やフェノール樹脂など、熱硬化性樹脂の CFRP となっている。樹脂の特性から CFRP のリサイクルは困難であり、廃棄 CFRP はセメントの原燃材として再利用される場合が多い。だが CFRP の材料費や製造エネルギーを軽減するためには、また本格的に構造部材として普及し生産量が増大した場合にも対応するためには、そのリサイクル処理法により早急な確立が非常に重要となる。

2.2 薬品処理法による CF の回収

図 1 に CFRP リサイクル方法を分類したものを示す。本研究では、高い物性値を有するリサイクル材の開発を目

指すので、破碎を行わず長繊維の状態での CF を回収することとした。また、樹脂を取り除く処理法に関しては、常圧下での作業のため設備が安価で連続運転も可能である薬品処理法に注目した。薬品処理法とは、具体的に述べると、薬品として溶媒にベンジルアルコール、触媒にリン酸三カリウムを使用し、これらと廃棄 CFRP を混ぜ 190 に加熱し、樹脂を溶解し CF を回収する方法のことである¹⁾。図 2 に薬品処理法の作業工程の概念図を示す。

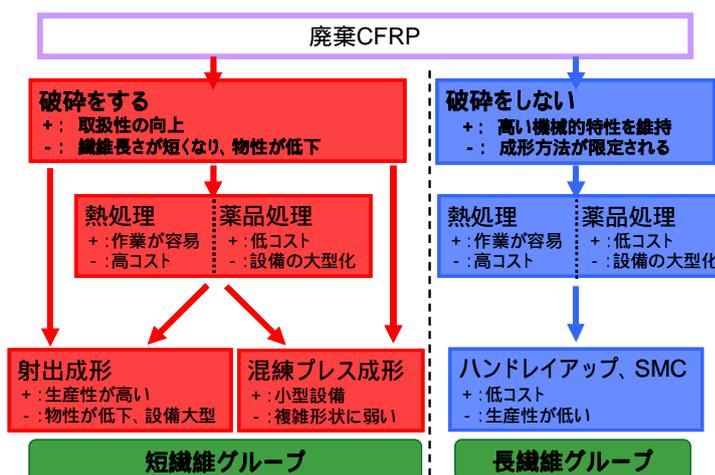


図 1 リサイクル法の分類

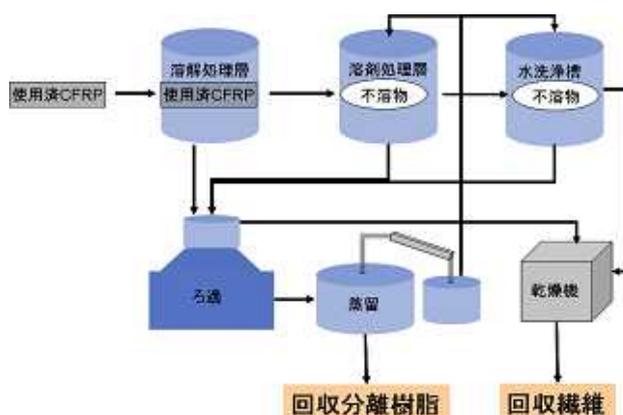


図 2 薬品処理法の作業工程概念図

2.3 リサイクル方向 CFRP 試験片の作成

薬品処理法によるリサイクル CFRP の物性値を評価するため、目標 Vf(炭素繊維体積含有率)を 5%、15%、30% とし試験片を作成した。まず、薬品処理法により回収されたリサイクル CF(図 3)をアセトンにて十分に洗浄し、CF に付着したサイジング剤などを除去した。またアセトン洗浄は、絡み合った長繊維 CF をほどこ成形の際の作業性を向上させることにもつながった。その後、CF を 30 cm 程度に切りそろえ(図 4)、ヘラでエポキシ樹脂(gougeon

brothers 製 west system 105)を塗布し(図 5)、CF が一方向になるよう両側から張力を与えつつ金型内に配置した(図 6)。なお、含浸を行う際に使用した金型はアルミニウム製 C 型チャンネル材と離型効果に優れたポリプロピレン製の直方体より自作したものである(図 7,8)。万力により金型に圧力を加えた状態で、40℃で16時間乾燥させ、エポキシ樹脂の含浸作業を完了させ試験板を作成した。この試験板をダイヤモンドカッターにより試験片として切り出し、以下の試験に用いた。



図 3 アセトン洗浄前 CF 図 4 アセトン洗浄後 CF



図 5 エポキシ塗布 図 6 金型内に CF 配置



図 7 金型外観 図 8 金型断面

2.4 リサイクル CFRP の物性評価

静的三点曲げ試験を行い、リサイクル長繊維 CFRP の物性を評価した。試験結果を図 9 に示す。また、図 10、11 は SEM(JEOL/JSM-7000F)により破断面を観察したものである。なお、三点曲げ試験では、試験片サイズを $170 \times 18 \times 4$ mm、試験速度 2 mm/min、支持スパン 150 mm とした。

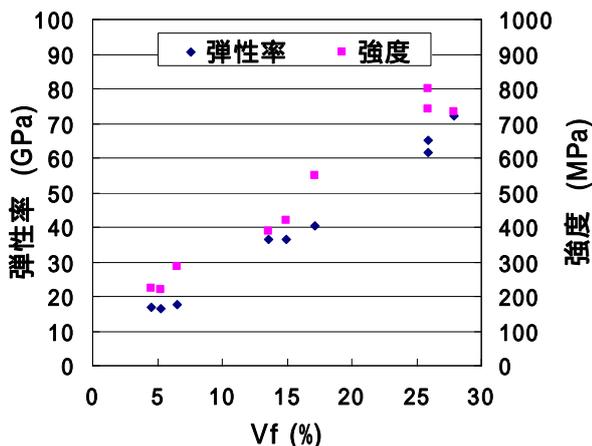


図 9 リサイクル CFRP の物性値

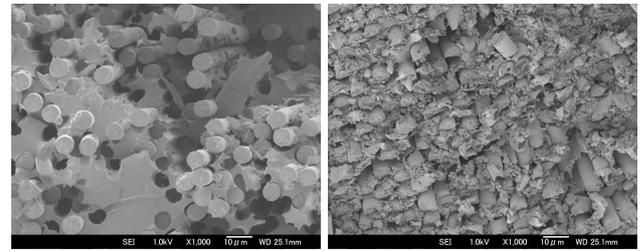


図 10 破断面(引張側)

図 11 破断面(圧縮側)

(倍率 1000 倍)

2.5 考察

薬品処理によるリサイクル CFRP は、CF を長繊維で回収できるため、その弾性率および強度も非常に高い値となった(短繊維リサイクル CFRTP の物性値は、 V_f や樹脂による弾性率 10~20GPa、強度 200MPa 程度である²⁾)。また、その値は複合則により V_f から理論的に導かれる値とも精度よく合致していた。繊維長が十分に長かったため、連続繊維とほぼ同等の機械的特性を発現させられたためであると考えられる。破断面観察からも、曲げ試験による破壊モードが適正なもの(引張側では繊維の引き抜けが起こり圧縮側では繊維の断面が潰れる)であったことがわかった。

短繊維リサイクル材では一方向に成形することは困難だが、長繊維リサイクル材であれば一方向に成形することが可能である。したがって、リサイクル材に方向性を持たせ、それを構造物(輸送体)のフレーム部等に適用することにより、構造物の重量をより効率的に軽減できると考えられる。

3 CFRP 製航空コンテナの構造設計

3.1 航空コンテナの特徴

本研究では、CFRP の適用を検討する汎用構造物として、航空コンテナを取り上げることとした。その理由は、以下の三点である。

乗用車などと比べて、品質や部材の生産スピードへの要求が低いこと。世界分業化による物流量の増大や原油価格の高騰などから、運輸部門における省エネ化・効率化の必要性が特に高いこと。コンテナはパネルとフレームから成る部品数の少ない単純な箱型構造物であり、CFRP 部材の汎用的な適用の糸口として適切な構造物であること。

3.2 ターゲットコンテナの設定

航空コンテナには冷凍用なども含め十種類以上の規格があるが³⁾、貨物量の増大・大型化などを背景として、近年特に流通量が増大しているのは $2400 \times 3000 \times 2400$ (mm) の AMA コンテナと呼ばれる大型の種類のものである。一方で、コンテナを運ぶ航空プレーターも B767 という新機種へのモデルチェンジが進んでおり、それに合わせて AMA コンテナを改造する必要性にも迫られている。そこで、本研究において CFRP の適用を目指すターゲットコ

ンテナは、AMA コンテナとした。

3.3 既存コンテナの解析

既存の AMA コンテナを 3D データ化したものを図 12 に示す。コンテナは、パネル・フレーム・ボトムの 3 部分から構成されている。パネルは板厚 2 mm のアルミニウム、フレームは 36 mm 角板厚 2 mm のアルミニウム製中空パイプ、ボトムはアルミニウム 2 mm ・ベニヤ板 7 mm ・発泡材 75 mm ・アルミニウム 4 mm の積層構造となっており、全体の中でもパネル部分の重量が大きくなっている。

航空コンテナの規格である NAS3610 で定められた荷重(表 1)を与えた場合の変位量を FEM 解析より算出した。その結果を表 2、図 13 に示す。なお、FEM 解析はソルバとして MSC.Marc を用い、解析に代入した物性値は表 3 に示す。

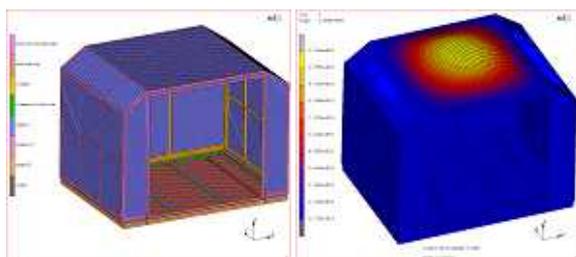


図 12 既存コンテナ外観 図 13 天井荷重への変位

表 1 NAS3610 で定められた荷重条件³⁾

荷重方向	鉛直上方向 (天井方向)	水平方向 (側面方向)	水平方向 (背面方向)
荷重(kgf)	17320	10206	10206

表 2 既存コンテナの変位

	天井荷重	側面荷重	背面荷重
最大変位(mm)	122.1	71.1	86.5

表 3 解析に代入した物性値

	弾性率 (GPa)	ポアソン比	密度 (g/cc)
アルミニウム	70	0.3	2.7
ベニヤ板	0.8	0.3	1.5
発泡剤	0.015	0.3	0.1

3.4 コンテナ軽量化の方針

コンテナの軽量化の方針として、フレーム構造を維持し部材置換えフレーム配置変更による軽量化と、フレームを排しパネルモノコック構造の導入による軽量化の 2 つが考えられるが、本研究ではコストや工期の点でより効率的である前者の方法による軽量化を検討することとした。なお、ボトム部に関しては、載荷やフォークリフト突き刺しに対する耐久性などの点から、金属材料以外の適用が困難であるとされる。そのため、本研究ではパネル部、フレーム部の軽量化を検討することとした。

3.4.1 パネル部

パネル部材は構造全体の強度・剛性に大きく寄与してい

る部材ではなく、また面積が大きいため、このパネル部分の軽量化および低コスト化が重要となる。そこで、パネル部分には、低コストかつ軽量のポリエステル製のフィルム材を導入することとした。

3.4.2 フレーム部

構造部材となるフレーム部には CFRP(Epoxy Vf60)への適用を検討した。

まず、フレーム部の断面形状を変更し、断面二次モーメントを増やすことより部材の曲げ剛性を向上させた。また、形状も正方形からハット型台形形へと変更した。

次に、パネル部に薄いフィルムを導入したので面内せん断方向の荷重をフレームが負担する必要があるため、新たに斜方向のフレームを配置することとした。斜フレームの配置法は以下の 5 つのモデルを比較検討し(図 14)、最適なものを求めた。

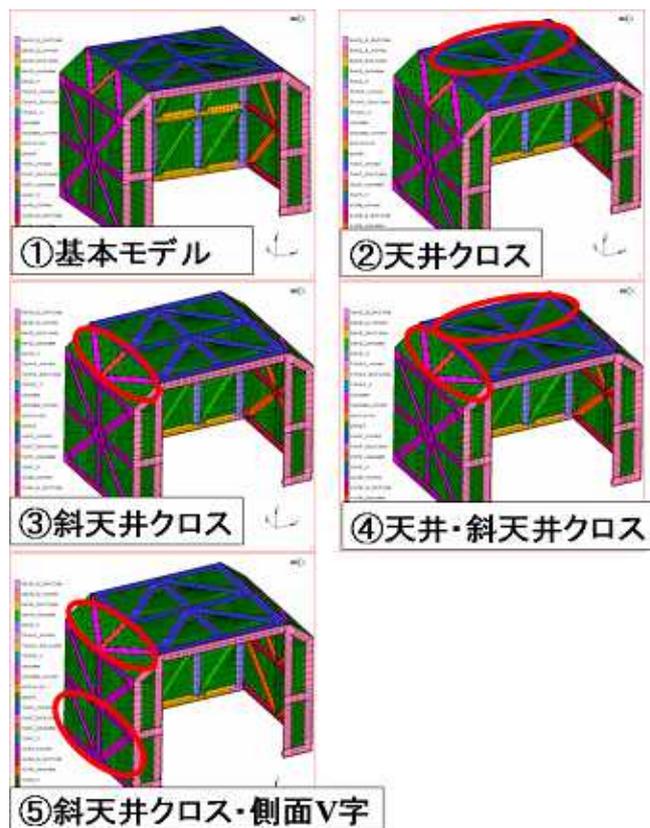


図 14 斜フレーム配置比較モデル

フレーム配置の比較検討結果は表 4 のようになり、の斜天井クロスモデルが、各方向の荷重に対して、最もバランス良く変位量が収まることわかった。これは、天井面のフレームが交差しておらず応力集中が起こりにくくなったためであると考えられる。また、構造部材ではないドアがあり大きな荷重がかかると想定される前面上角部と直結してフレームが配置されていることも、コンテナ全体の剛性向上に寄与したものと考えられる。なお、解析に当たり代入した物性値を表 5 に示す。斜フレーム配置比較を行った際には、フレームは等方性材料とした。

表 4 斜フレーム配置比較結果 (値は最大変位(mm)を示す)

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

表 5 解析に代入した物性値

	弾性率 (GPa)	ポアソン比	密度 (g/cc)
CFRP 等方材(Vf60)	52.5	0.3	1.56
CFRP 一方向材(Vf60)	138.0	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

注) 0° 方向強化積層材 CFRP は、上表の一方向材 CFRP を 0° 60° 120° 0° に積層したものとする(図 15)。

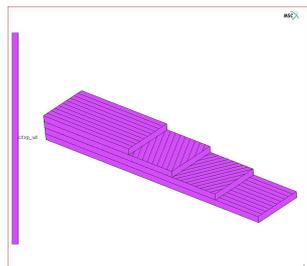


図 15 0度方向強化積層材の概念図

3.5 CFRP 製航空コンテナの重量算出

フレーム部の板厚を設定し CFRP 製航空コンテナの重量を算出した。フレーム部の板厚設定は、強度基準からではなく剛性基準により求めた。つまり NAS3610 により定められた荷重を与えた場合にその変位が既存のアルミニウム製航空コンテナの変位以下に収まるように板厚を定めた。また、板厚の設定にあたっては、フレームを等方材とする場合と 0° 方向強化積層材とする場合によりその値が異なるため両者を比較した。なお、パネル部は構造部材として働かず、パネル部のコストおよび重量を極力低減するため、板厚は 1 mm とした。フレーム部の板厚を変化させた場合の変位量の推移を図 16、図 17 に示す。解析の結果から、フレームを等方材としたとき板厚 3.0 mm が、0°

方向強化積層材としたとき板厚 2.0 mm が最適であるとわかった。それらの場合のコンテナの重量を表 6 に示す。フレームを 0° 方向強化積層材とした場合の方がコンテナの軽量化率が高く、このときパネル部とフレーム部の重量は従来のコンテナから 47.5%の軽量化されることがわかった。また、ボトム部を含めると 26.5%の軽量化となった。

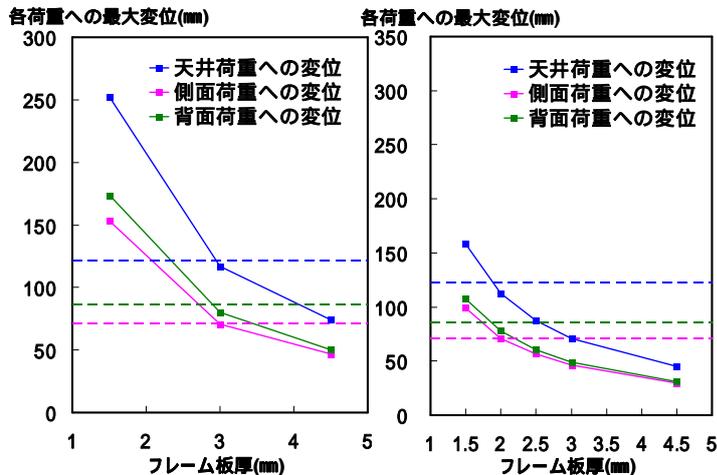


図 16 板厚と変位の関係 (等方材)

図 17 板厚と変位の関係 (0° 方向強化積層材)

表 6 軽量コンテナの重量 (単位はkg)

	パネル	フレーム	ボトム	合計
既存コンテナ	177.8	48.7	180.0	406.5
軽量コンテナ (等方材)	20.5	147.3	180.0	347.8
軽量コンテナ (0° 方向強化積層材)	20.5	98.5	180.0	299.0

3.6 リサイクル材の適用検討

薬品処理法による長繊維リサイクル CFRP のフレームへの適用を検討した。これまでの構造解析の結果より、フレームに CFRP を適用する場合、フレームは等方性材ではなく 0° 方向強化積層材とした方が大幅に軽量化率が高いことがわかった。したがって、リサイクル CFRP 製フレームは 0° 方向強化積層材とした。解析に代入するリサイクル CFRP の物性値は、本研究で行った実験より得られた値を用いることとし(表 7)、その解析結果を図 18 表 8 に示す。解析より板厚 3.75 mm のときに、各荷重に対する変位量が既存のコンテナの変位以下に収まることわかった。このときコンテナの重量はパネル部とフレーム部をあわせて 204.7 kg となり、従来のコンテナから 9.6%の軽量化となった。またボトム部を含めると、コンテナの総重量は、406.5 kg から 384.7 kg となり 5.4%の軽量化となった。

ここで、軽量化率が CFRP のフレッシュ材による軽量化率よりも低くなっているのは、リサイクル材では Vf が 30%でありフレッシュ材(60%)の半分となったためである。

だが、従来は難リサイクルとされていた CFRP 廃棄物を用いて作成した安価な部材が、構造部材として適用可能であり、さらに高価なジェラルミンを用いた場合よりも軽量となることは注目に値することであるといえる。

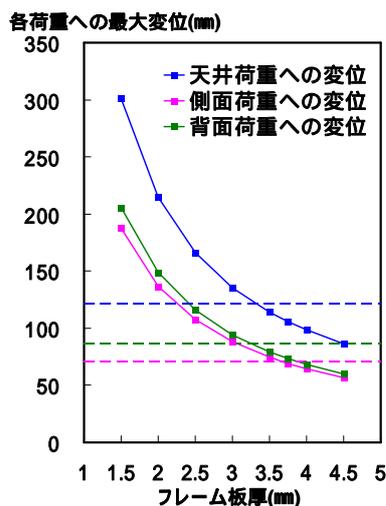


図 18 板厚と変位の関係(リサイクル材)

表 7 リサイクル CFRP の物性値

	弾性率 (GPa)	ポアソン比	密度 (g/cc)
Vf 30%(一方向材)	73.6	0.3	1.34
Vf30% (0° 方向強化積層材)	55.2	0.3	1.34

表 8 リサイクル CFRP 製コンテナの重量(単位はkg)

	パネル	フレーム	ボトム	合計
既存コンテナ	177.8	48.7	180.0	406.5
軽量コンテナ (リサイクル材)	20.5	184.2	180.0	384.7

4 CFRP 製航空コンテナの軽量化効果

コンテナ軽量化による消費ジェット燃料削減効果を試算し、CFRP 製コンテナが従来のものと価格面でも競合しうるかを検討した。なお、検討にあたっては、今後便数がさらに増大すると考えられる東京上海間を航行する B747F 機を具体例として取り上げた。

表 9 に航空機の重量内訳を示す。B747F には大型コンテナ 46 個分搭載可能であり³⁾、CFRP 適用によりコンテナ一台あたり 107.5 kg 軽量化されるので、航空機の総重量は 4950 kg 軽量化される。航空機の航続率は重量の平方根に反比例するので⁴⁾、これにより B747F の航続率は 0.8% 上昇し、年間 80kl のジェット燃料削減となる(B747-400F は東京・上海間を週 4 回往復、年間ジェット燃料消費量は約 10000kl⁵⁾)。

原油価格の高騰に伴い、昨今のジェット燃料価格はおよそ 60 円/l で推移しているため、80kl のジェット燃料消費量の削減によって、年間で 500 万円程度の燃料費が軽減

される。コンテナ一台あたり 10 万円程度の燃料費軽減要因となるので、CFRP 製軽量コンテナは、材料費や生産費は既存のジェラルミン製より高いが、使用段階で大幅な燃料費軽減効果が期待でき、既存の航空コンテナと価格面でも十分に競合しうるものであるといえる。

表 9 B747F の重量内訳⁶⁾

構造重量(t)	182.7-
燃料タンク重量(t)	173.6
最大積載貨物重量(t)	56.7
CFRP 導入による軽量化(t)	-4.95
軽量化前総重量(t)	303.5
軽量化後総重量(t)	298.6

(貨物積載率: 60% 燃料充填量 50%と設定)

5 結言

本研究では、CFRP の普及促進を目的とし、CFRP 製軽量航空コンテナの構造設計を行った。単なる部材置換ではなく、フレームの配置や断面形状を変更し、CFRP の特徴が最大限に発揮されるような航空コンテナの構造を検討した結果、CFRP 製コンテナは従来のジェラルミン製コンテナから 47.5%(107.5 kg)軽量化された。また、本研究で開発した長繊維の CFRP リサイクル材を 0° 方向に強化しフレーム部材として適用した場合も、9.6%の軽量化が実現された。CFRP の適用により重量が 47.5%軽量化されると、コンテナ一台につき年間 2kl のジェット燃料消費削減、10 万円程度の燃料費軽減となると試算され、CFRP 製航空コンテナは価格面においても従来のコンテナと十分に競合しうるものであると考えられる。

また、本研究では軽量化の要望が特に高まっている航空コンテナに焦点を当てたが、本研究で行った構造設計を通じて得られた知見は、航空コンテナに限定されるものではなく、回転ドアや海上コンテナなどのパネルとフレームからなる単純構造物への CFRP 適用検討をする際にも大いに活かせるものであると考えられる。

参考文献

- 1) K.Shibata, K.Maekawa, M.kitajima, Composite Recycling Using Depolymerizing Thermosets Under Ordinary Pressure, Proceedings of Ninth Japan International SAMPE symposium pp38-43, 2005
- 2) 園子博昭 環境対策技術としての複合材料の開発と評価 東京大学博士論文 2006
- 3) (社)日本航空宇宙工業会, 航空貨物取り扱いハンドブック, 航空総合研究所,2002
- 4) 飯野明, 航空力学の基本, 秀和システム, 2005
- 5) 中国国際航空 HP: <http://www.airchina.com.cn/>
- 6) 日本航空 HP: <http://www.jal.co.jp/aircraft/>