

CFRP コンテナによる貨物輸送の省エネルギー効果

Improvement of Container Cargo Transportation by CFRP Container

環境海洋工学専攻
指導教官

円谷晃司(46284)
高橋淳

1. 緒言

近年、世界のエネルギー消費は増加傾向であり今後も需要増加が続くと考えられている(Fig.1)。エネルギー消費を部門別にみると、運輸部門の増加率が近年もっとも大きいものとなっており、さらに枯渇性資源である石油資源に依存している(Fig.2)ため、消費エネルギー・温室効果ガス削減の観点から省エネルギー技術の導入は重要な位置づけとされる。中でも輸送機器の軽量化は省エネルギーに役立つばかりでなく、普及ポテンシャルの大きさから有望な技術であると考えられる。

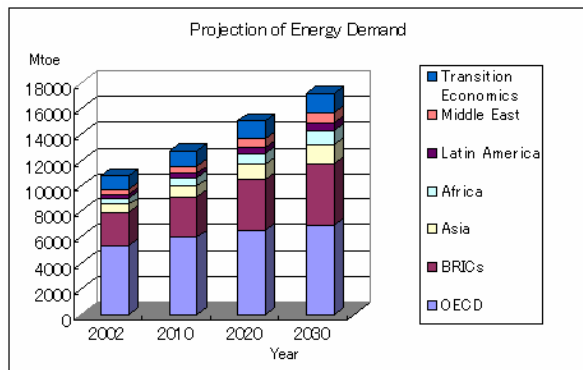


Fig.1 世界のエネルギー需要予測

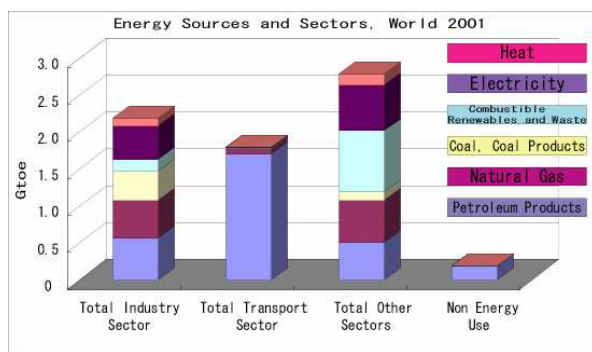


Fig.2 部門別エネルギー消費構造

本研究では運輸部門の中でも貨物輸送に焦点をあて、陸海空で用いられる各種コンテナを、軽量・高強度な CFRP で製造するために FEM 構造解析を行い、その設計指針を示し CFRP 製コンテナの提案を行った。また CFRP 製コンテナ導入による輸送消費エネルギー削減効果を試算した。

2. コンテナ貨物輸送

コンテナ貨物の一般的な形態は以下に示すものであるが(Fig.3)、輸送機関によって貨物輸送消費エネルギー原単位は異なる(Fig.4)。

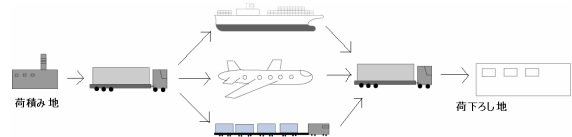


Fig.3 コンテナ貨物輸送概念図

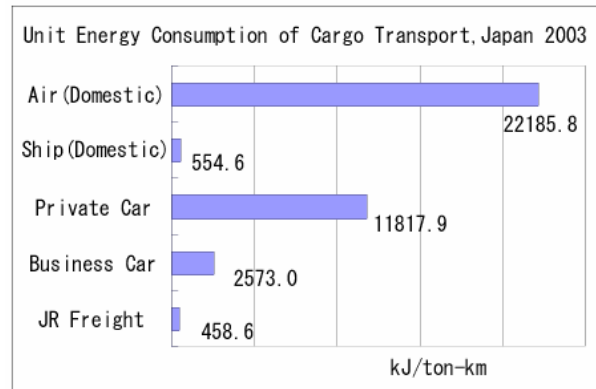


Fig.4 貨物輸送エネルギー消費原単位

よりエネルギー効率のよい輸送機関での貨物輸送が望ましいが、輸送に用いられるコンテナは輸送機関によりその規格が異なる(Fig.5)ためモーダルシフトの阻害要因となっている。共通規格のコンテナの存在が望ましいが、その前段階として大型コンテナに小型コンテナを積んでの輸送など部分的共有化を進めることでモーダルシフトの推進となると予想される。その際にコンテナ素材が軽量であること、強度基準の統一といったことが重要となるが、軽量高強度な材料でコンテナを製造することでその問題は解決でき、さらに輸送機器の軽量化は燃費の向上につながるため、軽量コンテナの導入自体が省エネルギーにつながる。

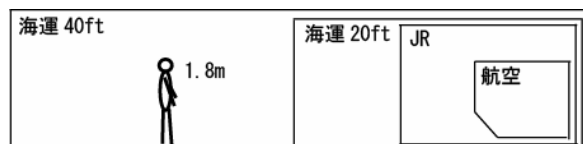


Fig.5 輸送機関別コンテナサイズ

日本では運輸部門のエネルギー消費の4割弱を貨物輸送が占める。貨物輸送のエネルギー消費原単位で比較すると、空運及び陸運は、鉄道や海運に比べ値が大きく効率の改善が必要である。さらに海上コンテナ輸送（陸送部分も含む）(Fig.6)、航空コンテナ輸送(Fig.7)は近年の増加が著しく今後も世界中で増加していくと考えられる。そこで本研究では航空貨物用コンテナ(以下航空コンテナ)および海上貨物用コンテナ(以下海上コンテナ)を例にとりCFRP製軽量コンテナ設計及び軽量化効果試算の結果を紹介する。

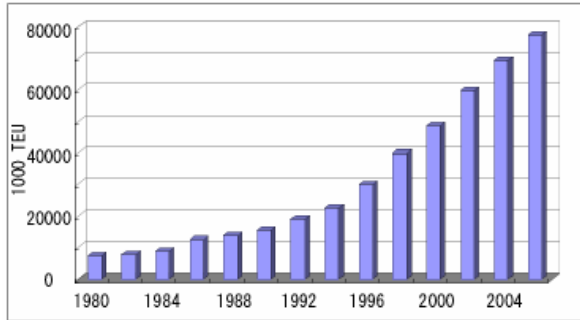


Fig.6 世界のコンテナ船腹量推移

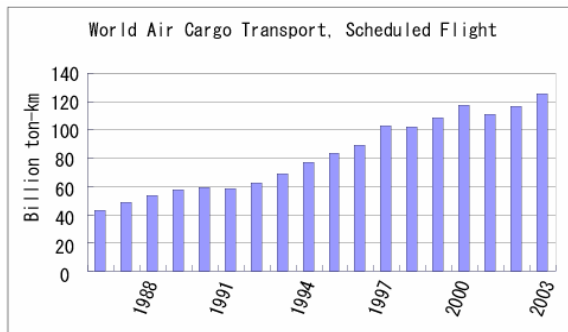


Fig.7 世界の航空貨物輸送推移

ここで各輸送機関別のコンテナ貨物輸送量(重量ベース)を比較すると、その大部分が海上コンテナによる輸送であることが分かる(Fig.8)。鉄道コンテナ輸送には海上コンテナの鉄道輸送が含まれるため、鉄道コンテナのみの輸送量割合は低下すると考えられる。

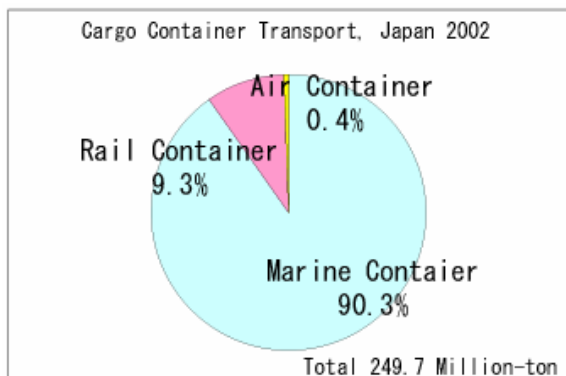


Fig.8 輸送機関別コンテナ貨物重量割合

3. コンテナ規格と現状

世界共通に運用される海上コンテナや航空コンテナのサイズや強度基準は国際標準化機構(ISO)等により定められているものの、材料の選定に関しては大きな制約がない。

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、LD-3と呼ばれる規格のものが標準的であり、国内航空会社合計では、保有数約2万5000個と、航空通常コンテナ全体の8割を占めている。一般的にアルミ製となっている。

海上コンテナは、輸送品目により使い分けられ、冷凍コンテナ等いくつかの種類があるが、2003年度では世界で1,750万個が流通しているとされる。もっとも一般的なものが雑貨用のドライコンテナであり、長さが20フィートのものが全体の35%、40フィートのものが48%を占める状況となっている。スチール製のものが多く使用されている。

4. 航空コンテナ

4.1 航空コンテナ軽量化例

LD-3コンテナはフレーム・パネル・パレットという3部材に大別される(Fig.9)。強度基準では積み込みに対する想定荷重において破損しないことが前提となり、パレット部に強度をもたせること、およびコンテナ重心の位置が重要となる。アルミ製コンテナ自重は130[kg]程度となっている。本解析ではフレーム・パネルともにアルミ板材を基本構造と考え、板材の曲げ剛性を等しくするようなCFRP板材の板厚を各構造部材に対し設定し、その板厚を100%から90%、80%、といったように変化させることで軽量化をおこなった。

アルミ製コンテナモデル132.2[kg]に対し、構造部材をCF/Epoxy-VF60の擬似等方性材料で置き換えることで、自重89.2[kg]まで減らすことができた。CF/PC-VF40での置き換えでは100.5[kg]となった。ISOで規定される荷重に対して、アルミモデルと同等の変形量(Fig.10)となることを基準としたため、ヤング率の高いCF/Epoxy-VF60が軽量化により効果的であった。軽量化試算には以下の材料特性を考慮した(Table 1)。

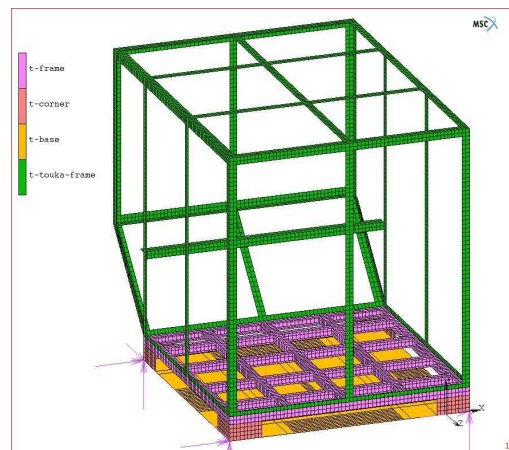


Fig.9 Frame and Pallet of LD-3 container

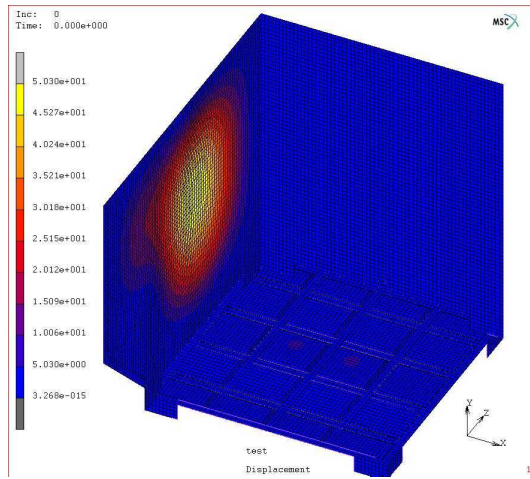


Fig.10 ISO 規定荷重に対するコンテナ変形例

ヤング率の高いCFRPを用いることや、構造自体が剛性を持つような形状、サンドイッチパネルなどを検討することで更なる軽量化が可能だと考えられる。

Table 1 Material Properties for Estimation

材料	ヤング率 [GPa]	引張強度 [MPa]	密度 [g/cc]
Steel	210	280	7.8
Aluminum	70	270	2.7
CF/Epoxy-VF60	52.5	525	1.56
CF/PC-VF40	30.5	360	1.44

*VFとは繊維の体積含有率である

4.2 航空コンテナの軽量化効果試算

航空機の内部は大きく Lower Deck と Main Deck に大別される。旅客機の場合 Main Deck には乗客が搭乗し、Lower Deck には手荷物や貨物が LD-3 に積載され運びこまれる。貨物専用機の場合は Main Deck にもコンテナが設置されるが LD-3 とは異なるコンテナ規格となる。

2003 年度における世界定期航空会社の平均座席利用率は約 70%であり重量利用率は約 60%である。これに基づき旅客機(A330-300)・貨物専用機(B747-400F)の2機種についてコンテナ軽量化による重量軽減効果を試算した(Table 2)。離陸時のジェット燃料積載は 80%としている。Weight Reduction は機体総重量に対する重量削減率を表す。B747-440Freighter の Main Deck に積載される大型コンテナは LD-3 二個分として計算している。

ここで輸送トンキロあたりの燃料消費原単位を考えた場合、重量削減率が省エネルギー化率と等しくなる。2003 年度の日本における航空旅客輸送の消費エネルギーは $3,401 \times 10^{10}$ [kcal]であり、航

空貨物輸送では同 547×10^{10} [kcal]であった。これに対し旅客輸送の省エネルギーを 3.5%、貨物機を 5.3%とすると合計で 148×10^{10} [kcal] の省エネルギーとなり全体で 3.7%の省エネルギー効果である。これは年間で 1,693 万リットルのジェット燃料削減であり、41,389t-CO₂ の排出抑制である。

Table 2 Aircraft Spec and Weight Reduction

Aircraft		A330-300	B747-400F
Overall Length[m]		63.6	70.7
Seat		295 ~ 335	-
Maximum Structural Load [kg]		44,836	123,970
Maximum Fuel Capacity[L]		97,170	203,000
Maximum Takeoff Weight[kg]		230,000	396,900
Container	LD-3	32	32
	Other Size	-	30
Passengers		210	-
Weight of Passengers[kg]		12,600	-
Load[kg]		26,901	74,382
CFRP Containers [kg]		-1,375	-3,956
Weight Reduction		-3.50%	-5.30%

5 . 海上コンテナ

5.1 海上コンテナ軽量化例

最も流通量の多い 40 フィートドライコンテナの軽量化例を示す。スチール製コンテナ自重は約 4000[kg]でありコンテナ最大総重量は 30,480[kg]と規定されている。フレーム・梁・パネルの3部材でのモデル構成とした(Fig.11)。フレーム・梁は中空の四角柱とし、パネルはコルゲートとしている。スチールモデルは 3,932[kg]となっている。本解析ではフレーム・パネルともにスチール製板材を基本構造と考え、板材の曲げ剛性を等しくするようなCFRP板材の板厚を各構造部材に対し設定し、その板厚を 90%、80%といったように変化させることで軽量化をおこなった。

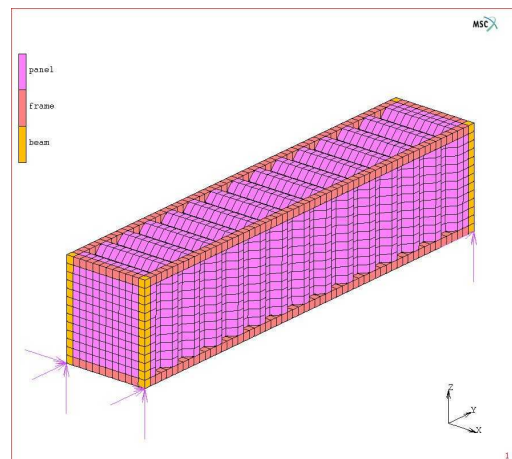


Fig.11 40ft 海上コンテナモデル

ISO で規定される荷重試験では、コンテナ重ね積み前提とする試験荷重において最も変位量が多いため、この試験荷重におけるスチールモデルの変位量を基準として軽量化を行った。

FEM 解析の結果、外部荷重に対して CFRP 製コンテナでは長手方向のフレーム変形が大きくなってしまい全体としてコンテナ底面の変形量が大きくなる(Fig.12)。

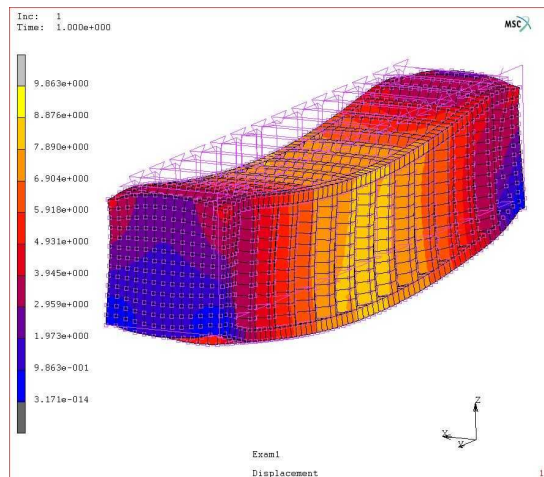


Fig.12 CF/Epoxy-VF60 変形量を 100 倍に拡大

板厚変更に対するコンテナ底面変形量及びコンテナ重量変化は以下である(Fig.13)(Fig.14)。材料特性は Table 1 を用いた。CF/PC-VF40 ではスチールモデルと同等の変形量にするのに対し基準板厚の 3 倍が必要になり、結果コンテナ重量は増加した。CF/Epoxy-VF60 については大きな軽量化ができると考えられた。

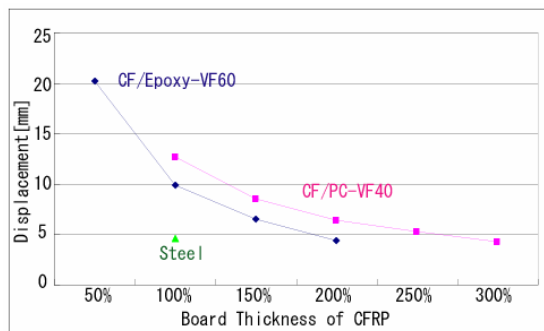


Fig.13 部材板厚と変位量の関係

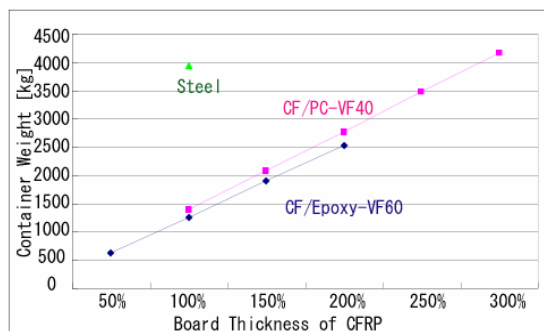


Fig.14 部材板厚とコンテナ重量

ここで積重ね試験に対して長手方向のフレーム剛性を高めるために、上下左右 4 本の同フレームの上下面に同材料による一方向材(UD 材)を積層し、曲げ剛性を高めることとした。一方向材の板厚を変化させ基準となる変位を満たす板厚を検討した(Fig.15)。UD 材の材料特性は Table 3 に示したものである。

Table 3 UD 材の材料特性

ヤング率	E11	138[GPa]
	E22	9.2[GPa]
	E33	9.2[GPa]
ポアソン比	v11	0.3
	v22	0.5
	v33	0.02

また長手方向の剛性を高める方法として同フレームを縦長の長方形構造とすることを検討した。初期設定である中空 200[mm]から縦方向のみ 300[mm]、400[mm]と変化させ、荷重に対する変形量と重量の関係を調べた(Fig.16)。

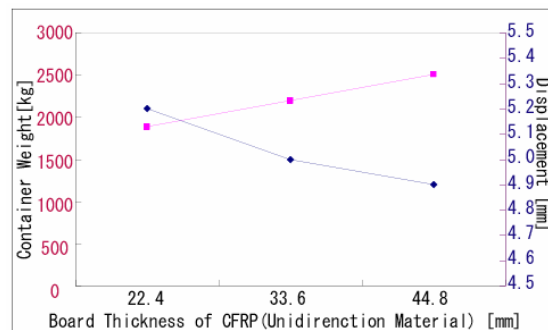


Fig.15 UD 材板厚とコンテナ重量の関係

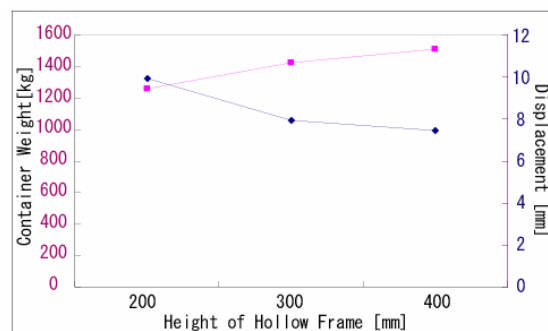


Fig.16 長手方向フレーム高さでコンテナ重量

以上の結果を踏まえ長手方向のフレーム高さで UD 材板厚をパラメータとしたところフレーム高さ 300[mm]、UD 材板厚 22.4[mm]においてコンテナ重量 2,006[kg]となり、重量削減率が 49%となった。

5.2 海上コンテナの軽量化効果試算

海上コンテナの陸上輸送部分での省エネルギー効果を試算した。自動車輸送においては、車両重量と転がり摩擦には相関があり、コンテナ軽量化に伴う車両総重量の低減により燃費が向上する。

平成 15 年度の港湾統計では日本における海上コンテナ流動は以下のようになっている (Table 4)。

Table 4 日本におけるコンテナ流動

	輸出・移出	輸入・移入
外航	6,755,166[TEU]	7,000,767[TEU]
	87,319,964[ton]	117,210,285[ton]
内航	1,352,671[TEU]	1,440,221[TEU]
	10,528,060[ton]	10,429,930[ton]

これらコンテナの港湾からの輸送手段を見ると大部分がトレーラ輸送となっている (Fig.17)。

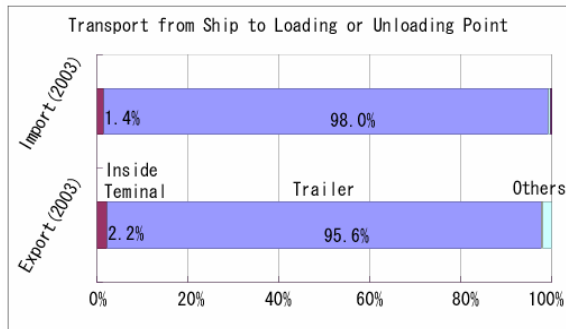


Fig.17 海上コンテナ輸送手段

港湾からのコンテナトレーラ平均輸送距離としては輸出コンテナで 105.5[km]、輸入コンテナで 104.6[km]という報告がなされている。

またコンテナトレーラの車両総重量と燃費には比例関係があり (Fig.18)、コンテナ軽量化により走行時の燃料消費が減少する。

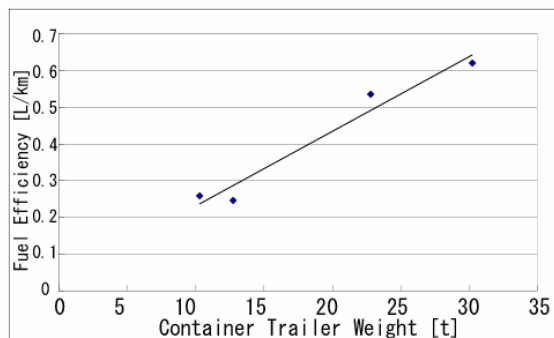


Fig.18 Trailer Weight and Fuel Efficiency

コンテナトレーラ総重量と燃費の算出には以下の関係式(1)を用いた。

$$Y = 0.0202X + 0.0288 \quad \dots (1)$$

ここに Y:実燃費[L/km]、X:車重[kg]である

40 フィートコンテナトレーラーの場合、最大積載重量 30,480kg に対し、トラクターヘッド 6,400kg、トレーラシャーシ 4,200kg といった仕様のものが利用される。40ft・20ft コンテナの流通個数比および 40ft・20ft の積載効率を一定とするような輸送貨物の重量振り分けを行い Table 4 から以下のようなコンテナ国内流動であると推定した (Table 5)。

Table 5 コンテナ規格別貨物流動量

	40ft コンテナ(個)	Ton/個	20ft コンテナ(個)	Ton/個	積載効率
輸出	1,958,998	21	2,837,169	16.8	70%
輸入	2,030,222	27	2,940,322	21.6	79%
移出	392,274	12.3	568,121	9.8	41%
移入	417,664	11.6	604,892	8.1	34%

20ft コンテナの CFRP 化により 40ft と同様に 49%の重量削減が可能とし、通常 2,300[kg]であるスチール製 20ft コンテナが 1,173[kg]となるとし、CFRP 製コンテナの導入効果を試算した。貨物輸送後の空コンテナ返送までをコンテナ輸送としたところ、従来年間 122.0 万キロリットルの軽油が消費されているところ、CFRP 製海上コンテナを導入することで 114.3 万キロリットル程度の燃料総消費になると試算された。これにより約 6.3%の燃料節約となり年間 7.7 万キロリットル、194,111t-CO₂ の排出削減となる。

6. 結論

現在用いられている各種コンテナの軽量化は、軽量コンテナの運用段階の燃費向上において効果があった。航空輸送で 3.7%、海上コンテナ陸上輸送で 6.3%の省エネルギーが可能と試算された。コンテナ貨物輸送は年々増加傾向にあるため、燃料節約効果も暫定的な値である。今後 CFRP コンテナのリサイクル性・製造段階のエネルギー消費を考えた LCA 分析により、より高精度な試算が可能となる。また、構造が比較的単純であることから導入容易性は高いと考えている。世界共通な規格のため普及に関しても世界規模でポテンシャルを考えることができる。鉄道コンテナに関する検討にはコンテナ流動の詳細な統計資料の整備が必要である。

コンテナ構造に関しては、部材置き換えにより軽量化をはかる場合にはヤング率の高い材料を選択することが重要であった。また構造部材の CFRP 化では、CFRP の高強度性という特性が活かされず剛性が設計基準となったが、想定する材料に合った最適形状を設定することでより軽量のコンテナが実現できると考えられる。本研究では触れていないが共有コンテナのコンセプトや折りたたみ可能コンテナの提案などは今後の課題である。