

CFRP による軽量化トラックの LCA

Life Cycle Assessment of Lightened Trucks by CFRP

東京大学工学部システム創成学科
環境・エネルギーシステムコース 4 年 10783 福山哲士
指導教官：高橋 淳 助教授

1. 序 論

近年、地球温暖化問題やエネルギー問題が強く叫ばれるようになってきた。地球温暖化に最も寄与している物質は CO₂ であり、日本は全世界の約 5% をしめる年間約 3 億トン（炭素換算）の CO₂ を排出している。中でも運輸部門は産業部門について多く、我が国全体の約 20% を排出している。また、産業部門では省エネ化が進んでおり CO₂ 排出量の削減に多くを望めない中、ライフスタイルの多様化により運輸部門のエネルギー消費と CO₂ 排出量の増加が著しい。さらに運輸部門においては乗用車と貨物車の CO₂ 排出量が大半をしめており、自動車の省エネ技術を加速化させることが我が国ひいては世界全体の CO₂ 排出量削減の近道である。また、世界の石油使用量の半分は自動車による（日本の石油使用中自動車によるものは約 3 分の 1）ことから、自動車の省エネ対策の加速化が急務といえる。

乗用車・トラックのライフサイクルにおけるそれぞれの CO₂ 排出量は、走行時が全体の 84%・95% を占めており、乗用車およびトラックからの CO₂ 排出量を抑え、石油の消費を減らすためには走行時の燃料使用の効率化、すなわち燃費を向上させることが最も効果的である⁽¹⁾⁽²⁾。そして、一般に走行段階でのエネルギー消費量・CO₂ 排出量の割合が大きいトラックに軽量化を行うことが効果的であると考えられているが、トラックは荷物を運ぶ役目を担っており、積載重量のため車体自体を軽くしても全体としての効果は乗用車ほどあがらないとも考えられる。

そこで本研究では CO₂ 排出やエネルギー使用をより合理化する方向へ技術開発の努力を注ぐことが重要と考え、乗用車とトラックのどちらに軽量化を適用することが効果的であるかを LCA 的に考える。

なお、車体重量を軽くするために、本研究では、CFRP（Carbon Fiber Reinforced Plastics：炭素繊維強化プラスチック）を用いることにする。CFRP は軽量化材として優れていることのみならず、一体成形により車体製造時の組立にかかるエネルギーが少なくなるなど、CO₂ の削減、エネルギーの節約に効果的と考えられる⁽³⁾。

2. CFRP による軽量化乗用車の LCA

自動車の仕様、LCA 実施の諸設定などは「リチウム電池を対象にしたライフサイクルアセスメントの実施」（産業技術審議会、1997）⁽⁴⁾⁽⁵⁾ に従った。

2.1 素材製造段階

鉄の原単位は 33MJ/kg（エネルギー）2.6kg/kg（CO₂）とし、CFRP の原単位は 460MJ/kg（エネルギー）30kg/kg（CO₂）とする。また CFRP の原単位は将来的には約半分になると予想されるので現在と将来の両方の原単位で比較する。

車体重量 1,287kg の乗用車一台に使われる鉄を 600kg まで CFRP で代替できるとする。また、鉄 100kg あたり CFRP50kg で代替できると仮定した。このとき、CFRP 使用量 300kg の時に、車体重量で約 23% の軽量化となる。

素材製造段階に関しては、CFRP の製造原単位の大きさに起因して Fig.1（Material production 部分）に示され

るように、CFRP の導入量が増えるに伴ってエネルギー消費量、CO₂ 排出量とも増加する。

2.2 部品加工・組立段階

CFRP は一体成形により部品点数を削減でき、中でも温暖化対策を目的とした低コスト大量生産用の CFRT（炭素繊維強化熱可塑性樹脂）は加工性が良くリサイクル後の特性低下が少ないため、部品加工・組立段階のエネルギー消費量は金属材料よりも減少する。本論文ではエネルギー消費量・CO₂ 排出量は鉄 100kg 減少あたり 10% 減るものとする。

部品加工・組立段階では CFRP の導入量に伴いエネルギー消費量・CO₂ 排出量は減少している。（Fig.1）

2.3 走行段階

車体重量 1,287kg、燃費を 11km/L とし 10 万 km あたりのエネルギー消費量が 320GJ、CO₂ 排出量が 21t という乗用車の走行シミュレーションモデルを用いた。燃費は車重量に反比例するものとして計算をおこなった。

走行段階では CFRP により軽量化されるにしたがってエネルギー消費量、CO₂ 排出量ともに減少している。（Fig.1）

2.4 ライフサイクルでの比較結果

CFRP により乗用車を軽量化するとき、CFRP の製造原単位に関係なく部品加工・組立段階、走行段階のエネルギー消費量、CO₂ 排出量は減少する。しかし、原単位が 460MJ/kg のときは素材製造段階でその減少分以上のエネルギー消費増、CO₂ 排出増となってしまうので全体として環境負荷の削減にはならない。一方、原単位が 230MJ/kg のときは素材製造段階でのエネルギー消費量、CO₂ 排出量がそれほど増えないので環境負荷の低減につながる。（Fig.1）

なお、CFRT は小さなエネルギーで再加工できるため、リサイクル率向上により平均的な製造原単位が下がることが知られているが、本研究ではバージン材の原単位のみによる議論を行っているので、注意が必要である。

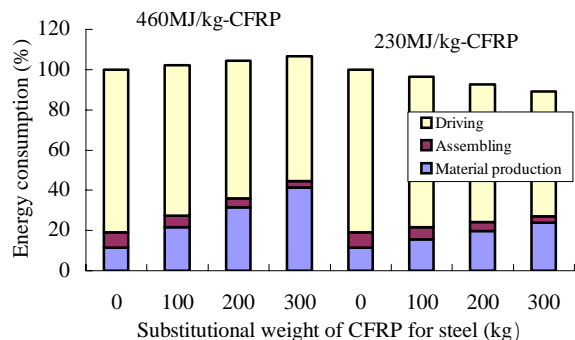


Fig.1 Change of energy consumption rate of automobile until driving

3. CFRP による軽量化トラックの LCA

トラックは大きさと用途が多岐にわたり、それぞれのメ

メーカーやユーザーが独自の前提条件をもとに LCA を行っているが、個々の前提条件は総量である統計量と矛盾することが多い。そこで本研究では、各種トラックの車体重量、最大積載量、積載率、燃費、総走行距離、耐用年数を日本全体の年間輸送トンキロ、保有台数、年間 CO₂ 排出量等の統計量⁽⁶⁾から逆算して Table 1 のように平均値として求め、以下の解析に用いた。

また、素材製造段階、部品加工・組立段階のエネルギー消費量と CO₂ 排出量は、各種トラックの素材構成重量比と乗用車の素材原単位データから推定した。

Table 1 Average data of various trucks

	Vehicle weight (t)	Maximum load (t)	Loading ratio (%)	Fuel Consumption (km/L)	Driving distance (10 ⁴ km)	Life (year)
Large	8	10	50	4	35	10
Midsized	4	4	50	6	30	10
Small	2.4	2	15	8	5	10

3.1 素材製造段階

トラックの車体重量の 60% を CFRP によって軽量化できるとする。なお、乗用車のときの LCA と同様に鉄 100kg を CFRP50kg で代替できると仮定した。

素材製造段階におけるエネルギー消費量、CO₂ 排出量は乗用車同様 CFRP の使用量の増加に伴って増える。

3.2 部品加工・組立段階

トラックにおいては車重の 10% を CFRP に代替することで部品加工・組立のエネルギーも 10% 減少するものとして計算をおこなった。

部品加工・組立段階のエネルギー消費量、CO₂ 排出量は乗用車同様 CFRP 導入量に比例して減少する。

3.3 走行段階

Table1 のデータに従い、計算をおこなった。CFRP 使用量の増加に伴い走行段階での環境負荷は小さくなるが、積載量の存在のため、乗用車のように軽量化率と燃費向上率が比例しない。さらに、平均積載率の相違により、Fig.2 に示されるように同じ軽量化率のときには小型、中型、大型の順で軽量化の効果があることがわかる。

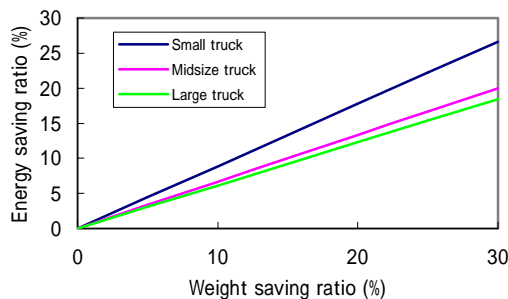


Fig.2 Change of energy consumption in driving stage

3.4 ライフサイクルでの環境負荷の比較

素材製造、部品加工・組立、走行をすべて足し合わせてライフサイクル全体での環境負荷を比較したものを Fig.3 に示す。CFRP の原単位 460MJ/kg の場合にはいずれのトラックもエネルギー消費量が増加し、原単位 230MJ/kg では中型トラック、大型トラックの順でエネルギー消費量が減少している。

まず、小型トラックが軽量化するほど環境負荷が大きくなるのは、年間走行距離が短いために素材製造時の環境負荷の割合が大きくなるためである。大型トラックと中型ト

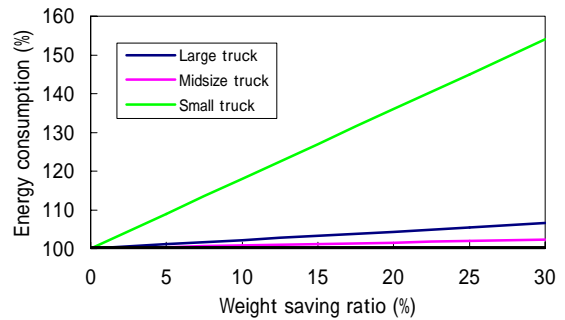
ラックの差は、大型トラックのほうが中型トラックよりも積載量が多く車体軽量化の効果が小さいからである。以上のことは CO₂ 排出量に関しても同様である。

3.5 総走行距離のみを変化させる場合

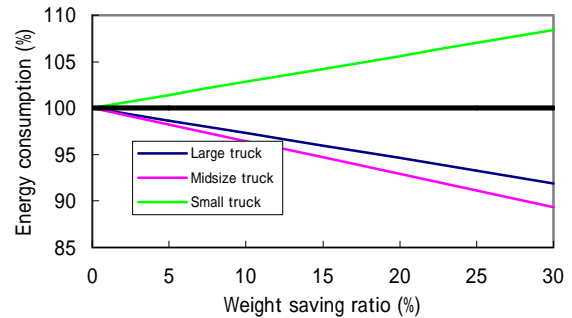
次に、年間走行距離は変化させずに使用年数を変化させた場合を考える。Fig.4 に示されるように、大・中・小それぞれのトラックに関して総走行距離を現在の平均値から増やす方向に変化させ、現行のトラックが同距離走行したときの環境負荷（基準値 100 と設定）と比較した。

すると、現在の CFRP の原単位では総走行距離を少し増やすだけで環境負荷を小さくできる可能性があるのは中型トラックのみであり、小型トラック・大型トラックは総走行距離を 50% 以上増やさなくては環境負荷を小さくできないことになり、これは現実的ではないと言える。

一方、CFRP は生産技術も確立されておらず原単位を大幅に下げることが可能である。大型トラックでは原単位 350MJ/kg-CFRP、中型トラックでは 400MJ/kg-CFRP、小型トラックでは 150MJ/kg-CFRP、程度まで下がると現在の総走行距離でも環境負荷を小さくできることがわかり、中型トラック、大型トラックに関してはその目標となる原単位は近々達成されると考えられる。



(a) 460MJ/kg-CFRP



(b) 230MJ/kg-CFRP

Fig.3 Change of energy consumption until driving

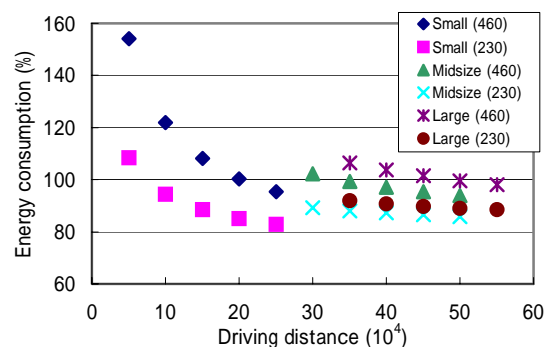


Fig.4 Change of energy consumption rate according to driving distance

3.6 積載量を変化させる場合

これまでは個々のトラックについて考えたが、次に、CFRP により軽減された車両重量分だけ積載能力が増えると考え、積載率は変わらないとして計算すると積載量の増率に反比例して必要なトラックの台数は減る。これらの要素を考慮して日本全体での環境負荷の推移をみる。

すると Fig.5 に示されるように現在の CFRP の原単位でも大型、中型トラック全体としては十分に環境負荷を小さくできることがわかる。一方、小型トラック全体に関しては現在の原単位では環境負荷は大きくなってしまいが、将来的にはすべてのトラックでのエネルギー消費量が減ることがわかる。

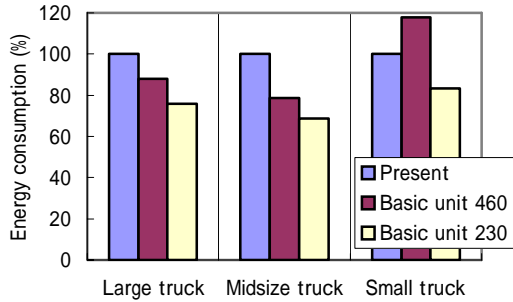
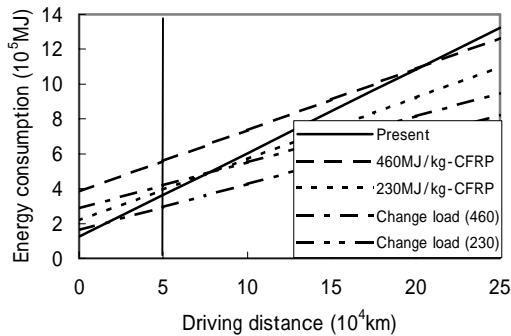


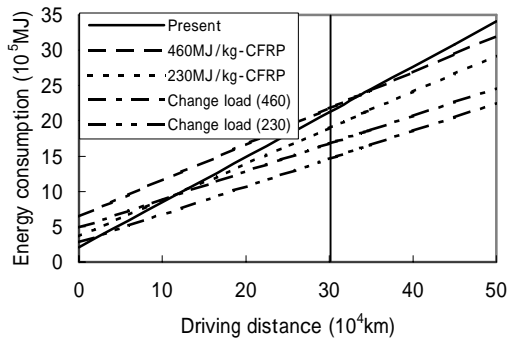
Fig.5 Percentage of energy consumption until driving

3.7 走行距離、積載可能量、自動車台数を変化

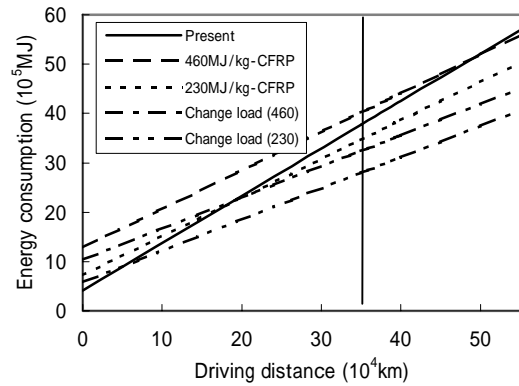
この項目では、現在のトラック、積載量の変わらない軽量化トラック、積載率は変わらず軽量化された重量分だけ積載可能量が増えるトラック、に対して、トラック一台分の荷物を運ぶのに必要なエネルギーの走行距離による変化を考察した。なお軽量化トラックについては現在の原単位と将来の原単位両方について考えている。



(a) Small truck



(b) Midsize truck



(c) Large truck

Fig.6 Relationship between energy consumption and driving distance

Fig.6 から CFRP による軽量化トラックの環境負荷が汎用のものを下回るためには、CFRP の製造原単位を下げトラック製造時の環境負荷を小さくする、CFRP 軽量化トラックの一台あたりの積載量を増やしトラックの台数そのものを減らす、長距離走ること燃費の利点を生かす、という3つのアプローチが有効であるとわかる。

中でも、現在の積載率と生涯走行距離が変わらないとした場合には、即効的には、中型トラックを軽量化するのが最も効率よく省エネならびに温暖化対策の効果を得ることができる。

4. 結論

一台の乗用車とトラックでエネルギー消費量、CO₂ 排出量を比較した場合、いずれも将来の CFRP 製造原単位ならばともかく、現在の CFRP 製造原単位では CFRP による軽量化が一台あたりの環境負荷低減には役に立たない。しかし、トラックの本来の役目は荷物を運ぶことであり、軽量化した重量分の積載能力を増やすことに注目すれば、現在の原単位でも大型・中型トラックでは CFRP を用いた軽量化が総量としての環境負荷を小さくするため、温暖化対策やグローバルな省エネ対策として有効であると結論できる。

また本論文により、CFRP の製造原単位を下げること、一台の総走行距離を増やす(すなわち車両寿命をのばす)こと、軽量化しただけ積載量を増やす(すなわち車両台数を減らす)ことの3点が、より環境負荷を小さくするために有効であることとその車種別の効果が具体的に明らかになった。

参考文献

- (1) 河西純一, 山戸昌子, LCA の自動車業界での取り組み, 自動車技術, 第 56 巻, 第 7 号, 2002
- (2) H. Nagasu, Life Cycle Inventory Analysis for a Truck, Proceedings of the Forth International Conference on Eco-Balance, Oct.31-Nov.2, 2000
- (3) 社団法人プラスチック協会, だれでも使える FRP-FRP 入門, 2002
- (4) 産業技術審議会, リチウム電池を対象にしたライフサイクルアセスメントの実施, 1997
- (5) 足立芳寛, エントロピーアセスメント入門, オーム社, 1998
- (6) 平成 13 年度国土交通省資料, 平成 13 年度自動車輸送統計について