

CFRP による軽量化乗用車の LCA

Life Cycle Assessment of Lightened Automobiles by CFRP

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 16284 鈴木徹也
指導教官：高橋淳助教授，吉成仁志助教授

1. 序論

1.1 環境問題への自動車の寄与度 今日までの急速な産業活動の進展により，必要な資源やエネルギーが増大したため，人類は物質的に豊かな生活を獲得したものの，その一方で資源枯渇や環境破壊の問題を引き起こした．とりわけ，日本の石油使用量の約 3 分の 1，CO₂ 排出量の約 2 割を占めている，自動車交通に係るエネルギー・温暖化問題は，我々の日常生活にとって非常に重要な問題となっている．

図 1 は，日本の最終エネルギー消費量の推移を部門別に示したものである．産業部門が最大のエネルギー消費部門であるが，消費量はほぼ横ばいである．一方，運輸部門，民生部門においては，利便性と快適性を求める国民のライフスタイルの変化に伴い，大幅に増加している．特に旅客部門は 1973 年の約 2.7 倍と大幅な伸びである．よって，対策の費用対効果を考えると，排出削減コストの高い産業部門にこれ以上の削減を強いるよりも，増加率の高い運輸部門，民生部門で積極的に削減することが重要である．

図 2 は，運輸部門における輸送機関別のエネルギー消費量の推移を示したものである．航空機，船舶，鉄道といった大型の輸送機関の影響は少なく，圧倒的に数の多い自動車の影響が大部分を占めている．特に自家用車のエネルギー消費量の増加が全体の増加に大きく効いている．今後の途上国での自動車普及を考えれば，CO₂ 排出の急増は免れないため，その前に対策を世界的に講じておく必要がある．

単に乗用車の環境負荷は大きいといっても，乗用車のライフサイクルは，原料採掘から廃棄まで様々な段階からなっている．図 3 のように走行時での CO₂ 排出量が 81% と圧倒的に多い(ただし，燃費 11km/L，生涯走行距離 10 万 km)⁽¹⁾．よって，乗用車の環境負荷を低減させるには，燃費を良くして，走行時のエネルギー消費を減らすことが最も効果的である．

燃費を向上させるには，エンジンの効率改善，走行抵抗の低減，軽量化，動力伝達効率の向上などが考えられるが，本研究では，向上効果の大きい量産車の軽量化に着目した．もちろん技術的に簡単というわけではないが，いったん軽量化材料を開発して量産車に適用すれば，いっきに運輸部門の負荷が削減できるからである．

1.2 軽量化に用いる材料 軽量化に最適と思われる素材は，CFRP (炭素繊維強化プラスチック：Carbon Fiber Reinforced Plastic) である．CFRP は繊維形態と樹脂の組み合わせにより様々な特性を示し，比剛性で鋼板の 0.86~3 倍，比強度で鋼板の 1.6~25 倍という幅を持っているため，適材適所の設計が可能となる．鉄鋼業界の目標である 590MPa クラスの高張力鋼板(比強度 7.8)と比べても，CFRP は比強度で 4~14 倍の性能を持ち，アルミニウムや超高張力鋼と比べても，やはり比強度で 1.6~5.7 倍の性能を持つため，軽量化効果は極めて高い．また，高弾性タイプや高強度タイプの炭素繊維を部品によって使い分けることによ

り，より軽量化が可能となる．さらに，CFRP の特徴である疲労強度の大きさ(極端にいうと引張方向には疲労破壊しない)と，大きな衝撃吸収能力を活用することにより，より安全な車体を作ることが可能となる．CFRP は航空機用材料やスポーツ用具などにすでに用いられている．

1.3 本研究の目的 このように，自動車が環境に与える負荷は，ますます増大している．しかし，マイカーから

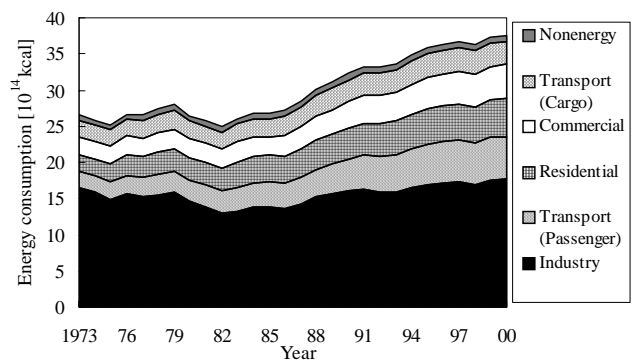


Fig. 1 Transition of departmental last energy consumption

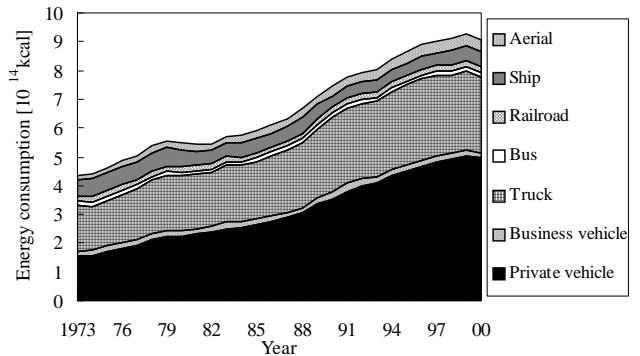


Fig. 2 Transition of departmental energy consumption about transportation

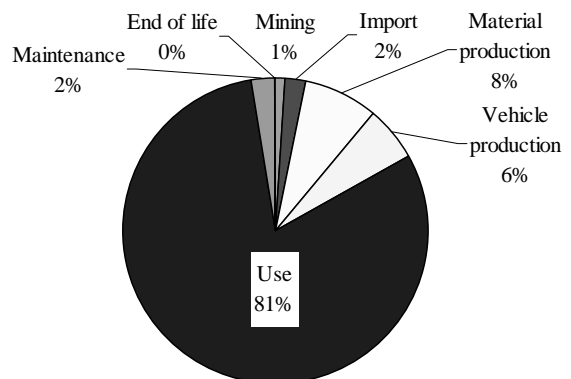


Fig. 3 CO₂ emission during life cycle of vehicles

物流用車両まで、自動車が社会の隅々まで普及している現状を考えると、もはや自動車なしの生活は難しい。そのため、環境負荷がより小さい自動車の開発が必要となる。

CFRP を自動車に用いて燃費を向上させることで、今までどおりの自動車の利便性と、省エネルギー、CO₂ 削減、廃棄物削減などの環境保護の両方を達成することができないかを、LCA を用いて定量的に明らかにすることが本研究の目的である。

2. パージン材のみを用いた場合の LCA

2.1 LCA の初期設定

実施目的

CFRP により乗用車を軽量化したとき、従来車よりどれだけ環境負荷が低減するかを調査する。

評価対象製品

排気量 2000cc、車重 1286.5kg のガソリン車。

機能単位及び基準フロー

機能単位を「排気量 2000cc で 10 万 km 走行可能」とし、それを満たすガソリン乗用車 1 台を基準フローとする。

システム境界

素材製造、部品・車体の製造、走行の 3 段階を対象とした。ただし、素材製造には原料の採掘・輸送を含む。

環境負荷項目

エネルギー消費量及び CO₂ 排出量。

2.2 素材製造段階 表 1 に鉄鋼と CFRP の製造原単位を示す。CFRP は鉄と比べると製造方法や製造量などに技術開発の余地や未確定要素が大きいので、製造原単位の数値そのものがまだ未確定の段階にある。炭素繊維の原単位は、将来的に理論上約半分にまでなる可能性がある。また、現在用いられている CFRP は高性能すぎるので、もっと繊維含有量を減らしたものが量産車に適用され、さらに CFRP の原単位は下がってくる。よって本研究では、CFRP に関してエネルギー原単位は 460MJ/kg、230MJ/kg、CO₂ 原単位は 30kg/kg-CO₂、15kg/kg-CO₂ の 2 通りを用いる。

鉄鋼を CFRP で代替でき、なおかつ車両を効率よく軽量化できる部位は、屋根、ボンネットなどの板材と呼ばれるもの、ドア、フロアなどの内外装、シャーシなどである。フォードの軽量化実験車（1979 年公開）では、鉄鋼部材の重量は 578kg から 269kg と約 50% 削減され、全体では約 30% の軽量化を達成している⁽⁴⁾。

そこで、一台の自動車に使われている鉄を 600kg まで CFRP で代替するとして、製造に要するエネルギーと CO₂ 排出量がどのように変化するかを計算する。ここで、鉄がどれだけ CFRP で代替できるかが問題となる。部品によって変わってくるが、本研究では、鉄 100kg が CFRP60kg で代替される（代替率 0.6）と仮定した。なお、鉄 600kg を CFRP360kg で代替した場合、約 20% の軽量化になる。

従来車の素材製造段階における、CO₂ 排出量は、59574MJ、2989kg-CO₂ である⁽¹⁾。CFRP の代替に伴うエネルギー消費量の変化は図 4 のようになる。CFRP の製造原単位が鉄よりもはるかに大きいので、CFRP 代替量に比例して増加する。このことは CO₂ 排出量についてもいえる。

Table 1 Comparison of basic units

	Energy (MJ/kg)	CO ₂ (kg-CO ₂ /kg)
Steel ⁽²⁾	33	2.6
CFRP ⁽³⁾	230 ~ 460	15 ~ 30

2.3 部品・車体製造段階 一般に、CFRP を利用して部品の加工・組立を行うと、金属に比べて環境負荷やコストが有利になると言われている。エアバス A320 の例では、CFRP 製の垂直尾翼安定板は、縦横にストリングのついた一体構造の大型表面板 2 桁を桁材と組み合わせており、CFRP 化によって部品点数が金属製の 10 分の 1 に、重量軽減率は 20% になったと報告されている⁽⁵⁾。Ford Excursion 2000 年モデルの例では、ダッチドアを複合材料でつくことで、20% の軽量化と 30% のコスト削減が達成できたと報告されている⁽⁶⁾。また、金属では通常 3 回行われる塗装の必要性も、錆びない CFRP では減少する可能性がある。本研究では、鉄 100kg 減少あたりエネルギー消費量と CO₂ 排出量が 10% 減少すると仮定した。

従来車の部品・車体製造段階におけるエネルギー消費量、CO₂ 排出量は、29530MJ、1517kg-CO₂ である⁽¹⁾。CFRP 代替に伴うエネルギー消費量の変化は図 4 のようになる。CFRP の代替に伴い鉄が減少するので、それに比例して減少する。このことは CO₂ 排出量についてもいえる。

2.4 走行段階 燃費が 10・15 モードで 0.091L/km（11km/L）である、従来車の走行段階におけるエネルギー消費量、CO₂ 排出量は、319721MJ、21442kg-CO₂ である⁽¹⁾。CFRP 代替に伴うエネルギー消費量の変化は図 4 のようになる。図 5 のように車重と燃費が比例関係にあることより⁽⁷⁾、CFRP の代替に伴い車重が軽くなり燃費が良くなるので、それに比例して減少する。このことは CO₂ 排出量についてもいえる。

2.5 素材製造段階から走行段階まで 素材製造段階から走行段階までの、エネルギー消費量と CO₂ 排出量の割合が、CFRP 代替量に対しどのように変化するかを、従来車の場合（CFRP を用いない場合）を 100 として図 4 に示す。原単位が 460MJ/kg の場合、CFRP 代替に伴いエネルギー消費量が

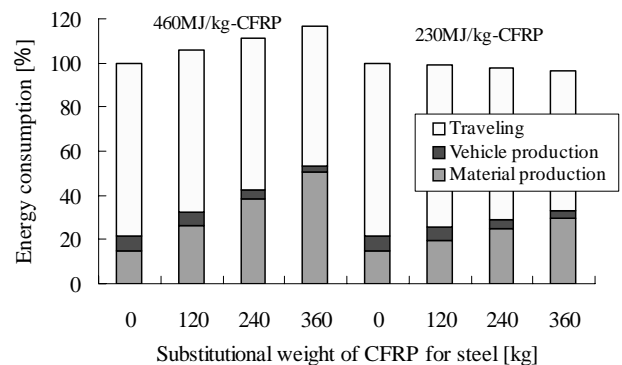


Fig.4 Change of energy consumption until traveling stage

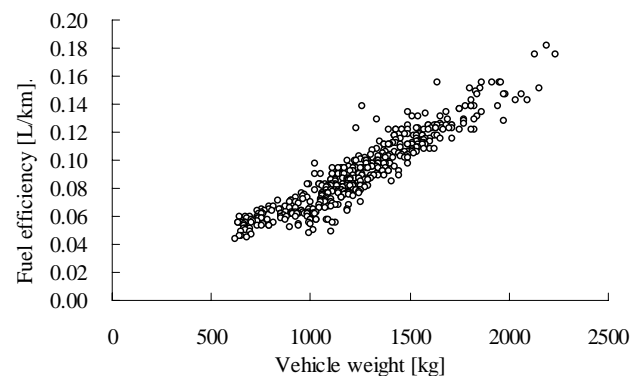


Fig.5 Relation between vehicle weight and fuel efficiency

ギー消費量は、部品・車体製造段階と走行段階で減少するが、それ以上に素材製造段階で増加するので、全体では増加する。一方、原単位が 230MJ/kg の場合、部品・車体製造段階と走行段階の減少で、素材製造段階の増加を吸収でき、全体ではわずかに減少する。このことは、CO₂ 排出量についてもいえる。

3. 環境負荷低減のための技術開発と目標値

2 章では、我が国の現行乗用車と同じ走行条件下で、鉄鋼を CFRP に代替するという前提で計算を行ったが、CFRP 自体の製造原単位を低下させる以外にも、抜本的に環境負荷低減の方策が考えられる。以下、本章では、CFRP の 3R 技術開発、素材代替率向上、生涯走行距離向上のそれぞれについて、具体的な効果と技術開発目標を論じる。

3.1 3R 後の CFRP の目標原単位 日本と EU の自動車リサイクル率に関するガイドラインでは、2015 年の目標を 95% (EU ではこのうち 10% が熱回収可) としている⁽⁸⁾。例えば 1286.5kg の車で許される廃棄物は 64kg、熱回収は 129kg である。現在の自動車リサイクル率は 80% 前後であり、そのうち鉄鋼は 95% 以上がリサイクルされている。

一方 CFRP は複合材料であるのでリサイクルが難しく、今はまだ使用量が少ないので、リサイクルは事実上何も行われていないに等しい。しかし、CFRP を量産車へ適用すると使用量が大幅に増えるため、単純に埋立て処理はできない。よって、CFRP の 3R (リデュース、リユース、リサイクル) を行いバージン材の使用を控えることにより、製造原単位を大幅に低下させる必要がある。本研究では、リユース、マテリアルリサイクル及びサーマルリサイクル(熱回収)を行った場合を考える。

3R 後の CFRP の各種原単位 L_{3R} は次式のように表せる。表 2 に各記号の意味を示す。

$$L_{3R} = \eta_v \cdot L_v + \eta_w \cdot L_w + \eta_t \cdot L_t + \eta_r \cdot L_r + \eta_u \cdot L_u \quad (1)$$

ここで、重量比 (η) 間には次の関係がある。

$$\begin{aligned} \eta_v &= \eta_w + \eta_t \\ \eta_w + \eta_t + \eta_r + \eta_u &= 1 \end{aligned}$$

このとき、

$$\begin{aligned} \eta_w &= 0.05 \\ \eta_t &= 0.1 \\ \eta_v &= 0.15 \\ \eta_r &= 0.85 - \eta_u \\ L_w &\cong 0 \\ L_t &= -30\text{MJ/kg}, 3\text{kg} - \text{CO}_2/\text{kg} \\ L_u &\cong 0 \end{aligned}$$

として計算すると、エネルギー消費量に関するマテリアルリサイクル原単位の目標値は、次式のようになる。

$$L_r = \frac{L_{3R} - 0.15L_v + 3}{0.85 - \eta_u} \quad (2)$$

また、 L_c を従来製品 (鉄) の原単位、 η_c を素材代替率 (重量比) とすると、素材製造までのエネルギー消費量と同じにする条件が次式のように書ける。

$$L_{3R} = \frac{L_c}{\eta_c} \quad (3)$$

ここで、

$$\begin{aligned} L_v &= 230 \sim 460\text{MJ/kg} \\ L_c &= 33\text{MJ/kg} \\ \eta_c &= 0.6 \\ \eta_u &= 0 \sim 0.8 \end{aligned}$$

として、リユース率とマテリアルリサイクル原単位の目標値との関係をグラフにすると図 6 のようになる。すなわち、この条件下では、現在の原単位 $L_v=460\text{MJ/kg}$ だと式(2)において L_r が負になってしまい、式(3)の目標達成は不可能である。しかし、 L_v が理論値の 230 のときには、 $\eta_u=0.26$ なら $L_r=40$ となり、逆に $L_r=28$ なら $\eta_u=0$ (すなわちリユース不要) となる。現実的には L_r は 20~80、 η_u は 0~0.3 程度であると考えられるので、まずは、 L_v 300、 L_r 40 程度を目標にするのがよいと考えられる。

リサイクル CFRP の製造原単位を 50MJ/kg、3kg-CO₂/kg として、走行段階までの各段階のエネルギー消費量と CO₂ 排出量の割合が、CFRP 代替量に対しどのように変化するかを、従来車を 100 として図 7 に示す。エネルギー消費量は素材製造段階でもわずかに減少し、走行段階での減少が全体の減少に大きく効いているのがわかる。このことは CO₂ 排出量についてもいえる。

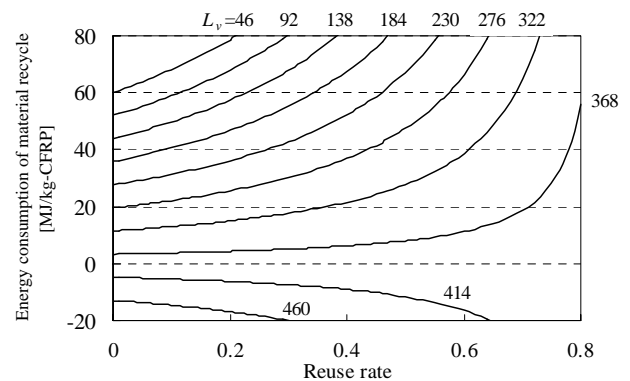


Fig.6 Target value of CFRP's 3R technologies ($\eta_c=0.6$)

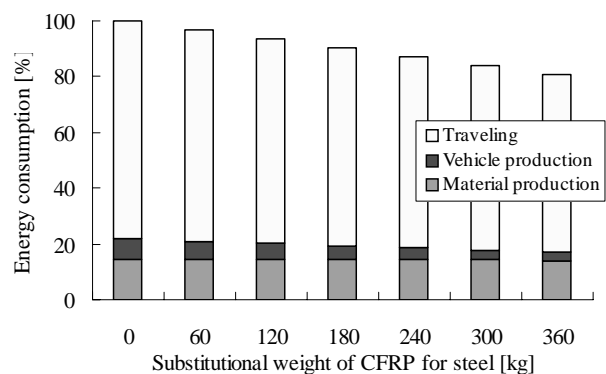


Fig.7 Change of energy consumption until traveling stage (in case of recycled material)

Table 2 Meanings of symbols in eq.(1)

	Ratios (wt%)	Basic units
Virgin material	η_v	L_v
Waste	η_w	L_w
Thermal recovery	η_t	L_t
Recycle material	η_r	L_r
Reuse	η_u	L_u

3.2 素材代替率向上の効果 ところで $L_v=300$ $L_r=40$ を実現しても、式(2)より $\eta_u=0.525$ となりこれは非現実的である。ところが、ここで $\eta_c=0.4$ にするとグラフは図8のようになる。すなわち、

$L_v=300$ のとき、 $L_r=48$ でも $\eta_u=0$ となるし、逆に $L_r=40$ のときには $L_v=343$ でも $\eta_u=0$ となる。この L_v 、 L_r の組み合わせはそれほど困難な目標値ではない。このように、素材代替率の向上は目標値に大きく効くものであり、3R 技術開発と併せて鋭意取り組むべきであると言える。図9は素材代替率と 3R 技術開発目標値の関係を示したものである。

以上に示されるように、素材製造までのエネルギー消費量を従来材料と同じにすることは、 L_v 、 L_r 、 η_u 、 η_c の個々の技術開発単独では達成困難であるが、これらを合わせるにより、現実的な技術開発目標の範囲内で可能となる。

3.3 生涯走行距離向上の効果 以上の計算に共通する前提は、生涯走行距離 10 万 km という条件であるが、これは我が国の現状（年間平均走行距離 1 万 km、車体平均寿命 10 年）であって、世界的には非常に小さな値である（EU の生涯走行距離は約 17 万 km、米国は約 20 万 km）。LCA の走行段階でのエネルギー消費量は生涯走行距離に比例するので、生涯走行距離が大きいと、LCA における素材製造部分の寄与分が小さくなる。すなわち、国際レベルで考えれば、3.2 節までに示してきたよりも車体軽量化によるライフサイクル環境負荷低減効果は高くなる。

我が国は一人あたり乗用車保有台数が 0.41 台（1 世帯あたり 1.1 台）とほぼ飽和し、総人口、免許取得者人口ともに今後の増加があまりないことから、乗用車の保有台数自体は増加しないと考えられるが、高齢化社会に伴って年間走行距離と生涯走行距離が欧米並みに増加すると予想される。このことは、乗用車の燃費が現在のままであれば、乗用車保有台数が変化せずに、乗用車によるエネルギー消費量と CO₂ 排出量が増加することを意味する。すなわち、車体軽量化の意義はますます大きくなり、その効果は 3.2 節までに示してきたよりも大きくなる。

4. 他の軽量化材料

ここまで CFRP による軽量化についてみてきたが、CFRP 以外の材料を用いた軽量化技術の開発も進められている。この章では他の軽量化材料が持つポテンシャルについて LCA もからめて述べる。

4.1 アルミニウム 車体のように強度が優先される設計では、アルミ 1kg は鉄 1.66kg ~ 1.87kg に代替する。シャーシのように剛性が優先される設計では、鉄 2kg に代替する⁽⁹⁾。本研究では鉄 100kg あたりアルミ 60kg の割合で代

替されると仮定する。鉄は 600kg まで代替されるとして、この時の車重の軽減率は約 20% となる。また、部品加工・組立時の負荷は、鉄とアルミの加工エネルギーの比(1:1.5)を用いて、鉄 100kg 減少あたり 10% 増加と仮定した⁽¹⁰⁾。アルミの原単位は 205MJ/kg、11kg-CO₂/kg とした。エネルギー消費量に関する走行段階までの LCA 結果を図10に示す。アルミの代替に伴いわずかに増加するのがわかる。また、CO₂ 排出量はほとんど変化しない。

このように、アルミのバージン材は原単位が非常に大きいので、軽量化に用いてもメリットはない。しかし、アルミのリサイクル材の原単位は 43MJ/kg、2.2kg-CO₂/kg であり、バージン材に比べて大幅に小さいので、アルミによる軽量化にはリサイクル材を用いる必要がある。従来車に用いられているアルミは全重量の約 7% であり⁽¹¹⁾、ほとんどがリサイクル可能な鋳造材である。一方、アルミ軽量車の車体などに用いる大部分は押し出し材であり、鋳造材と違ってリサイクル材を用いるのは困難である。よって原単位がそれほど下がらず、軽量化のメリットが乏しくなる。

4.2 超高張力鋼 安価な軽量化材料の代表的な例として高張力鋼板がある。440MPa 級を中心に使われてきたが、軽量化効果を拡大するため、590、780MPa 級へとより高強度の鋼板の使用が増えてきている。IISI（国際鉄鋼協会）が中心となって推進したスチール製超軽量車プロジェクト（ULSUB-AVC; UltraLight Steel Auto Body - Advanced Vehicle Concept）の報告では、1000MPa 以上の高性能の高強度鋼材を多用することにより、1500CC クラスのガソリン車で、19%の軽量化と 22.5km/L の燃費が達成された⁽¹²⁾。

このように、もともと製造原単位の小さい鉄鋼の、軽量化に対するポテンシャルは大きいものがあるが、これを量産車に適用するには、高強度化で悪化する加工性を改善する組織強化型ハイテン材の開発と、迅速加工成形方法の開発を併せて行う必要がある。

4.3 マグネシウム マグネシウムは鉄やアルミより比重が小さく、鉄やアルミに劣らない比強度、比剛性を持つ材料である。エアバッグ装着の普及に伴うステアリング部の重量増加を、ホイール芯金をマグネ化することにより軽量化・振動低減することなどが進められている。しかし、マグネの使用量は全車重の 1% にも満たない。

マグネ化を推進するには、コスト上昇を抑えるために十分な強度と信頼性の実現できる低コストの鋳造技術（たとえば、高強度薄肉ダイキャスト、チクソキャスト（半溶融状態で薄肉化）など）が重要な課題となる。また、マグネ合金はその結晶構造により塑性変形能が乏しいので、薄肉部品の塑性加工技術を確立するとともに製品強度特性

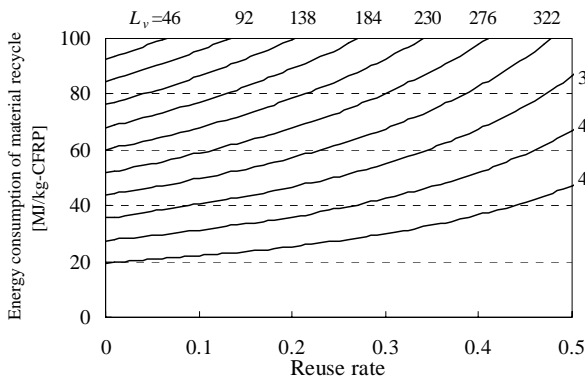


Fig.8 Target value of CFRP's 3R technologies($\eta_c=0.4$)

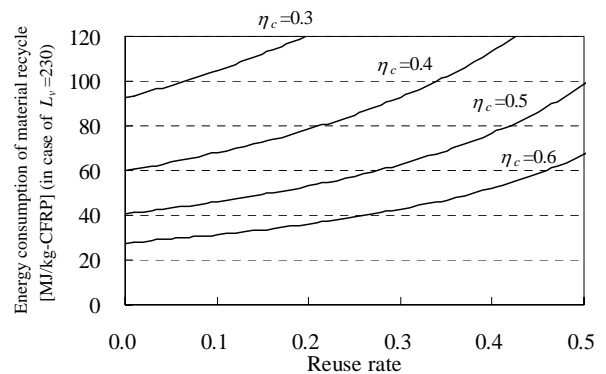


Fig.9 Relationship between target L_r and η_u under different η_c (in case of $L_v=230$ MJ/kg)

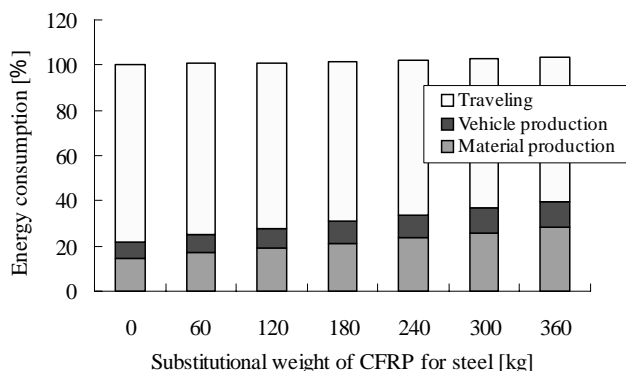


Fig.10 Change of energy consumption until traveling stage (in case of aluminium)

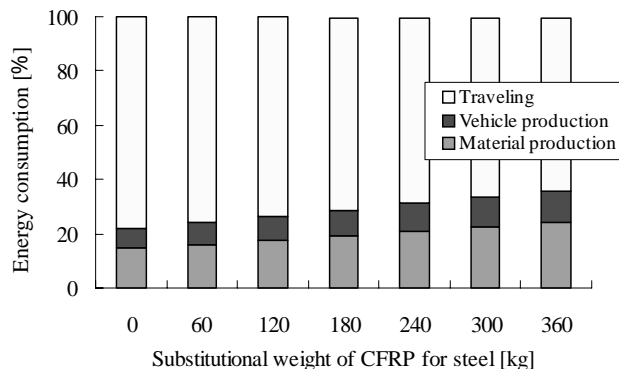


Fig.11 Change of energy consumption until traveling stage (in case of magnesium)

Table 3 Basic unit of GFRP

	Energy (kg/kg)	CO ₂ (kg-CO ₂ /kg)
GF (direct roving)	29.913	2.059
Unsaturated polyester	62.794	5.001
Pull-trusion	3.06	0.144
GFRP (GF: 70%)	42.8	3.09

を向上させる必要がある。低コストで高信頼性の溶接・接合技術も十分には確立されていないので、それらの技術開発も重要なポイントである⁽¹³⁾。

仮に 4.1 節のアルミと同じ条件で軽量化乗用車に用いた場合の LCA 結果を図 11 に示す。製造原単位は 165MJ/kg, 18kg-CO₂/kg である。エネルギー消費量はほとんど変化せず、CO₂ 排出量はマグネの代替に伴いわずかに増加する。そのため、製造原単位が 45MJ/kg, 2.0kg-CO₂/kg であるマグネのリサイクル材を用いて、マグネの原単位を下げなければならない。しかし、生産されるマグネは鋳造用が大部分であるが、本格的な車体の軽量化に用いるのは鍛造材であり、これはリサイクル材を用いるのが困難である。これでは原単位が下がらず、軽量化のメリットはなくなる。

4.4 GFRP GFRP はガラス繊維を強化材とした強化プラスチック複合材料である。比重が小さく金属よりも比強度が大きい。また、これまでみてきた CFRP やアルミ、マグネと比べ製造原単位はかなり小さい。ダイレクトローピングのガラス繊維と不飽和ポリエステルを、繊維含有量 70% としてブルトルージョン法で成型すると、原単位は表 3 のように 42MJ/kg, 3.1kg-CO₂/kg となる⁽¹⁴⁾。これは鉄鋼とそれほど変わらないので、軽量化による燃費の向上で削減した環境負荷が、製造時の環境負荷で相殺されることはない。しかし、GFRP は鉄鋼などよりも比剛性が劣るので、構造上の理由から量産車の車体に用いるのは困難である。

5. 結論

輸送機器の環境負荷の大部分は走行段階で生じるので、車体軽量化による燃費の向上が最も効果的である。そこで、輸送機器の中でもエネルギー消費と CO₂ 排出量の大半を占める自動車の CFRP による軽量化を考えたが、バージンの CFRP は製造原単位が大きく、規格大量生産や技術革新により原単位が将来理論値まで下がっても、ライフサイクルでの軽量化の効果はあまり上がらないことが示された。

しかしながら、2015 年のリサイクル率 95% を考えると、CFRP のリサイクルを考えずに行う計算は無意味である。また本稿で示されたように、3R により CFRP の事実上の製

造原単位は大幅に下がるものであり、このことはコストについても言えるから、自動車リサイクル率のことを考えなくても、CFRP の 3R 技術の開発は極めて重要と言える。

また、ここでは自動車用 CFRP の未成熟さを考え、100kg の鉄鋼を 60kg の CFRP で代替するとしたが、鉄をより少ない CFRP で置き換えることができたり、自動車の生涯走行距離が伸びれば、軽量化による環境負荷低減効果はより大きくなるので、やはり、CFRP 軽量自動車の開発は、将来的に大きなポテンシャルを持つ環境対策技術と言える。

参考文献

- (1) 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
- (2) 船崎敦、種田克典、「自動車 LCA のためのインベントリ作成の考え方(3) - 鉄鋼製品の製造 - 」, 自動車研究, 第 23 巻, 第 2 号, 日本自動車研究所, 2001
- (3) Nagai, et. al, Inventory analysis in production and recycling process of advanced composite materials, information paper, 2001
- (4) 高久明・多田尚、「複合材料をつくる」, 高分子加工 One Point, 共立出版, 1995
- (5) 「炭素応用技術」, CMC テクニカルライブラリー, CMC, 1988
- (6) C. David Warren, Carbon Fiber in Future Vehicles, SAMPE Journal, Vol.37, No.2, March/April 2001
- (7) 交通分析情報センター
(http://member.nifty.ne.jp/railway_ecology/top/top.html)
- (8) 梶原拓治、「自動車リサイクル」工業調査会, 2001
- (9) F. Stodolsky, et al., Life-Cycle Energy Savings Potential from Aluminum-Intensive Vehicles, 1995 Total Life Cycle Conference & Exposition
- (10) 林ほか、「自動車の CO₂ 削減(ホンダインサイトの事例)」, 機械学会講演論文集, No.641, 2002.9
- (11) アルミ化技術講習会資料, 日本アルミニウム協会, 2000.11
- (12) IISI, et al., UltraLight Steel Auto Body - Advanced vehicle Concept
- (13) 小原久, 「マグネシウム合金の市場動向」, 工業材料, Vol.50, No.8, 2002
- (14) 社団法人強化プラスチック協会「だれでも使える FRP - FRP 入門 - 」, 2002