

軽量化に寄与する高分子系複合材料の 現状と将来*

Polymer Based Composite Materials for Lightening Automobile

高橋 淳¹⁾

Jun Takahashi

As worldwide energy saving and global warming measurement, lightening the vehicle is extremely effective. In this paper, a state-of-the-art technology and the lightening potential of automobile by carbon fiber reinforced plastics (CFRP) are shown. Moreover, an increase in the energy consumption by the motorization of the developing countries is forecast, and an introduction of the super-lightening technology at the early stage of their motorization is shown to be extremely effective in worldwide energy saving.

Key Words : Composite Material, Plastics, Weight Reduction / Carbon Fiber Reinforced Plastics, Thermoplastics, Energy Saving □

1. はじめに

輸送機器の軽量化は燃料消費量削減や温暖化対策に効果的であることは明白であるが、超軽量構造材であるFRPはコストや安全性、さらに近年ではリサイクル性などの観点から汎用輸送機器に十分に採用されているとは言いがたい。しかしながら、中国をはじめとする非OECD諸国の今後の人口増加と経済発展が、現在以上のグローバルな環境・エネルギー問題を引き起こすのはそれほど遠い将来のことではなく、適用可能な省エネ技術を総動員する必要がある。

本稿では、その中でも、運輸部門での対策の必要性と困難さを具体的に明らかにするとともに、輸送機器の超軽量化技術としてのCFRPの早期導入の重要性と技術課題などを明らかにする。

2. マクロな長期分析から

図1は1人当たりの一次エネルギー供給量ならびに部

門別最終エネルギー消費量を示したものであり、図2は世界、OECD、非OECD、ならびに主要国の人口の推移と予測である。すなわち、2000年には60億人が1人平均1toe(石油換算トン)のエネルギーを消費していたものが、無対策の場合、2050年までには90億人が1人平均3toeを消費するようになる可能性がある。これは世界中で現在の4.5倍の年間エネルギーが必要となることを意味しており、数%や数十%ではなく、数倍の効率改善が必

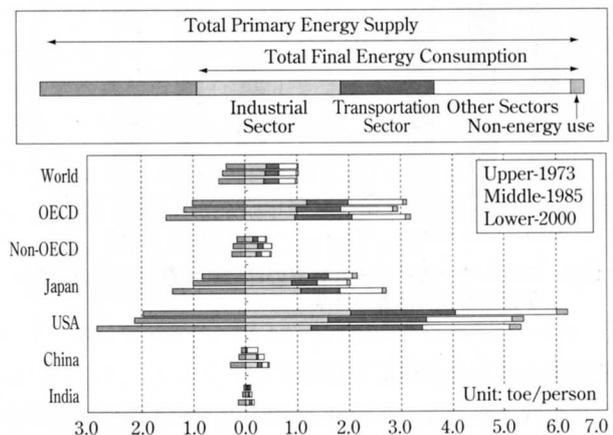


図1 1人当たりの一次エネルギー供給量ならびに部門別最終エネルギー消費量(IEA統計などをもとに筆者ら作成)

* 2005年10月6日受付

1) 東京大学大学院工学系研究科環境海洋工学専攻(113-8656 文京区本郷7-3-1)

E-mail: jun@sunshine.naoe.tu-tokyo.ac.jp

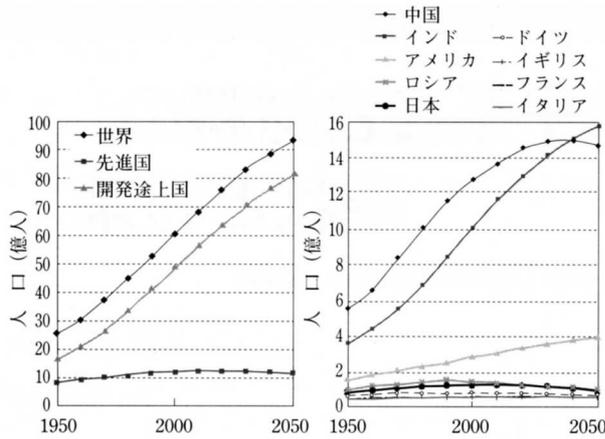


図2 世界人口の推移と予測(国連人口推計より)

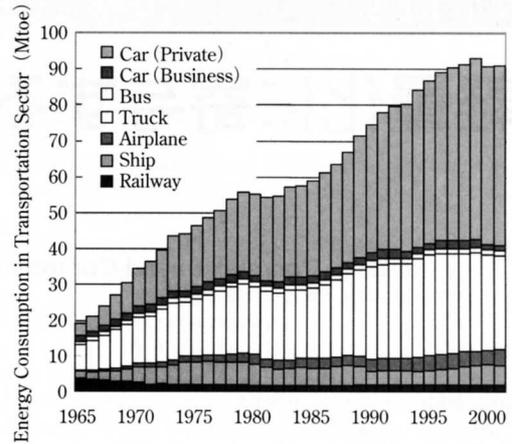


図5 日本の運輸部門での機関別エネルギー消費量の推移

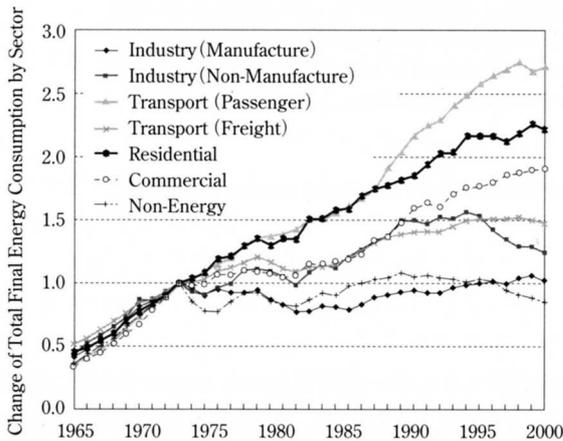


図3 日本の部門別最終エネルギー消費量の推移(1973年を1とした場合の比で表示)

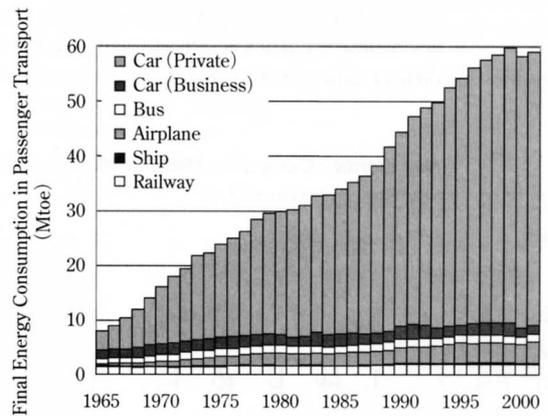


図6 日本の運輸(旅客)部門での移動手段別エネルギー消費量の推移

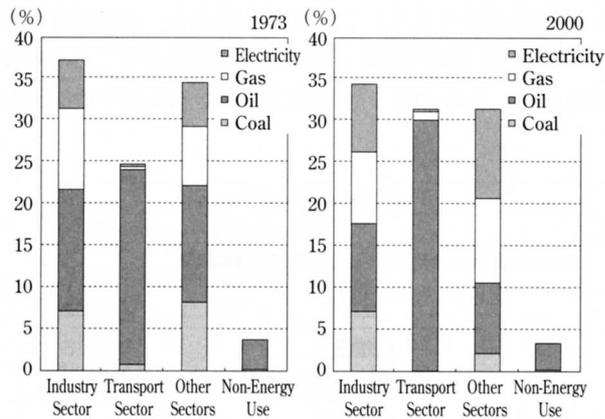


図4 エネルギー源別にみた世界の部門別消費割合(IEA統計などをもとに筆者ら作成)

要であることを意味している。

また図1からは、非 OECD 諸国の運輸部門の割合が小さいこともわかるが、図3に示される日本の例をみてもわかるように、ライフスタイルと直接関係する運輸(旅客)

部門と民生(家庭)部門のエネルギー消費量は産業部門などの省エネ努力とは別次元で今後伸びてくるものであり、技術でカバーする必要性の高い部門である。

さらに図4はエネルギー源別にみた世界の部門別消費割合であり、運輸部門はほとんど石油のみに依存していることがわかる。また、図5は日本の例であるが、運輸部門でのエネルギー消費のほとんどが自家用乗用車とトラックによることがわかる。すなわち、非 OECD 諸国のモータリゼーションにより石油はまず間違いなく供給不足になり、天然ガスも将来的には同様であって、自動車の燃費向上が緊急の課題であることが理解できよう。

3. 旅客・貨物別分析と将来予測

3.1. 旅客部門

まず図6はわが国の旅客部門の移動手段別エネルギー消費量の推移であり、自家用乗用車によるエネルギー消費の伸びが大きく、総量のほとんどを占めていることが

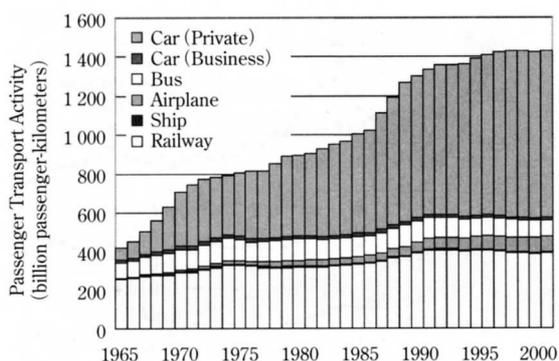


図7 日本の運輸(旅客)部門での移動手段別輸送量の推移

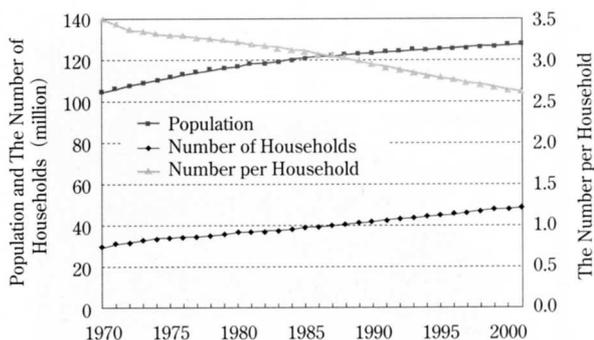


図9 日本の人口、世帯数、世帯当たりの人数の推移

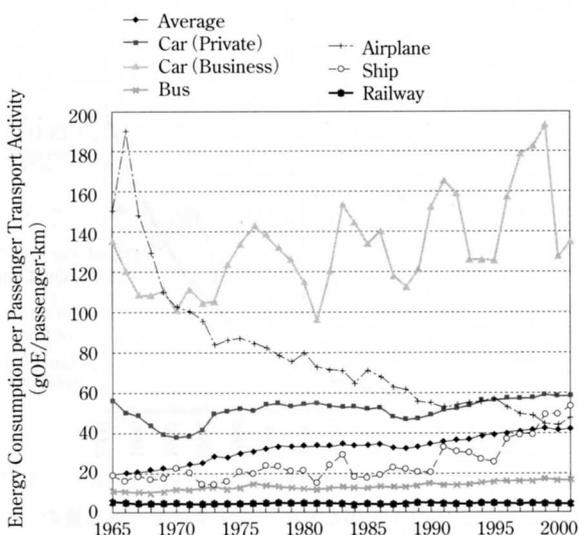


図8 日本の運輸(旅客)部門での移動手段別エネルギー消費効率の推移

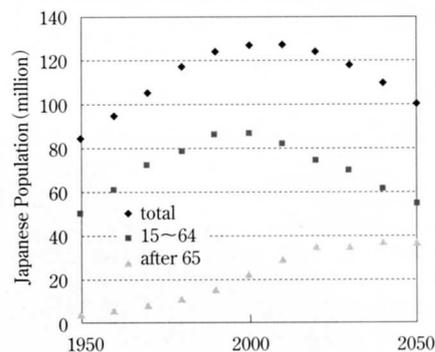


図10 年齢別人口構成の推移と予測

わかる。一方、図7はわが国の旅客部門の移動手段別輸送量の推移である。図6のデータを図7のデータで割ったものが図8であり、最近ではよく知られるようになってきた移動手段別エネルギー消費効率(旅客輸送効率=1人が1km移動するために必要なエネルギー量)である。これらの総量と原単位をみると、鉄道やバスが環境に優しい乗り物であるように思えるが、その旅客輸送効率に大きく影響する乗車率の地域差が自家用乗用車以上に大きく、またインフラ整備が周辺環境に長期的に与える影響も大きいので、画一的な乗り換えのための政策は立てにくい。

少し視点を変えてみると、図9はわが国の人口、世帯数、世帯当たりの人数の推移であり、図10は年齢別人口構成の推移と予測である。自家用乗用車の保有台数は人口当たり何台という比較がよく行われるが、ロジスティック関数的(図21参照)に増加した後に、世帯数当たり

1台強で飽和すると考えるほうが自然である(もちろんこの飽和値は都市部と農村部で異なる)。また、自家用乗用車の1台当たりの年間走行距離は高齢者の増加、特に免許保有率の高い高齢者層が増える今後の先進国において増加すると予想され、先進国は人口減少社会に順次突入するといわれているが自家用乗用車によるエネルギー消費量が増加すると考えられている所以である。

以上のような推移とその要因分析をみると、都市型・地方型それぞれにおける鉄道やバスの推進政策の根拠が理解できるが、これまでの社会実験からサービスを低下させての環境対策は困難であることがわかっている。そこで、たとえば、高齢化社会では環境負荷増加以上に事故の増加が懸念されていることから、通勤バスによる安全・安心・快適かつ低環境負荷な交通サービスなどの創出・充実が重要と考えられる。

3.2. 貨物部門

次に図11、図12、図13はわが国の貨物部門の輸送手段別にみた、エネルギー消費量、輸送量、エネルギー消費効率(貨物輸送効率=貨物1tを1km輸送するために必要なエネルギー量)の推移である。旅客部門における自家用乗用車同様、トラック輸送がエネルギー消費の大半

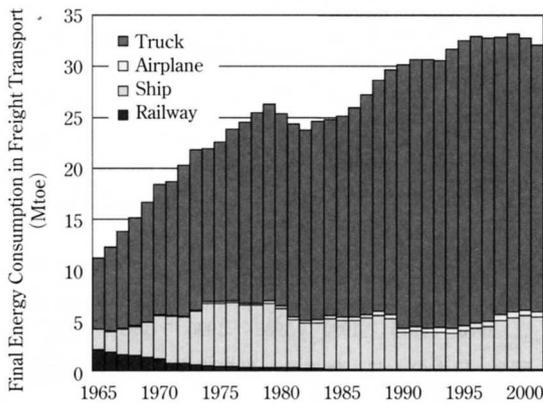


図 11 日本の運輸(貨物)部門での輸送手段別エネルギー消費量の推移

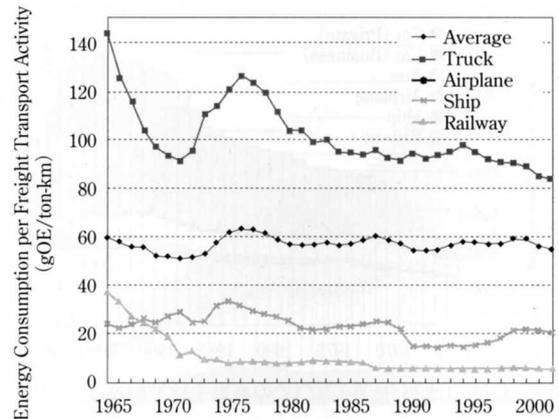


図 13 日本の運輸(貨物)部門での輸送手段別エネルギー消費効率の推移

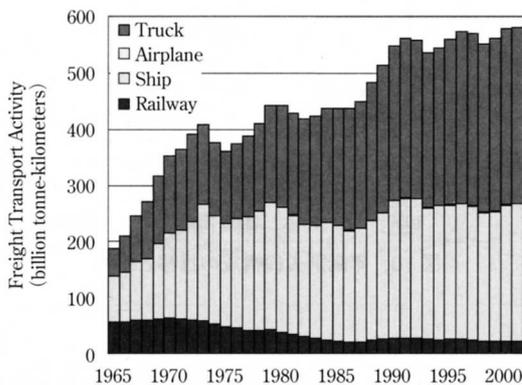


図 12 日本の運輸(貨物)部門での輸送手段別輸送量の推移

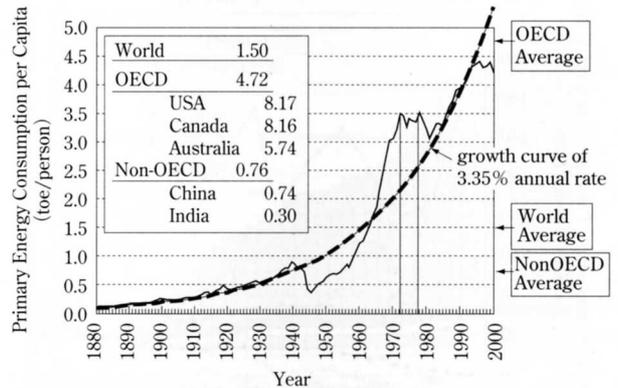


図 14 日本の1人当たりの一次エネルギー供給量の超長期推移

を占めており、その貨物輸送効率の改善や、より貨物輸送効率の良い鉄道・海運へのシフトが環境負荷低減に効果的とされている。ただし、前者はディーゼル機関の排出ガス対策に迫られて進んでおらず、後者は輸送時間帯や積み替えコストなどの点からやはり進捗は芳しくない。

しかしながら、貨物輸送における消費エネルギーの削減は、ポスト京都議定書の議論の中でクローズアップされている運輸部門のエネルギー消費量の伸びをどう抑えるかといった問題もさることながら、原油高騰というビジネススペースでのコスト削減問題として喫緊の課題であり、対策技術のポテンシャルと費用対効果を再度見直して政策を立て直す必要がある。

3.3. 長期エネルギー需要予測

以上のような要因分析を積み上げることで、輸送手段別にエネルギー需要予測を行って、総計としてのエネルギー需要予測を行うこともできるが、個々に仮定が多く、また相互に整合性がとれないことも多々あり、合意を得ることが難しい。また、今後数十年の長期のエネルギー

需要を考える場合には人口の多い途上国の1人当たりのエネルギー消費量の予測が重要となるが、図14に示される長期のデータをみてもわかるように、各国のエネルギー消費量の推移は経済・社会システムの変革に大きく左右されるため、個別の要因分析は個別の対策を数年おきに見直すことに使い、マクロな需要分析はマクロな視点から傾向を押さえるほうが合理的であると考えられる。

4. 樹脂系複合材料による軽量化ポテンシャル

前章までの議論により、共通していえることは乗り物の軽量化が環境負荷低減に寄与するということであり、特に自家用乗用車とトラックの軽量化はマクロな環境負荷低減効果が大きい(トラックの軽量化は積み荷の増加という形で、結果的に輸送トンキロ当たりの消費エネルギー削減となる⁽¹⁾)。本章では、日米欧で開発競争の激しい量産車用樹脂系複合材料について、その軽量化ポテンシャルとLCAによる分析結果を紹介する。

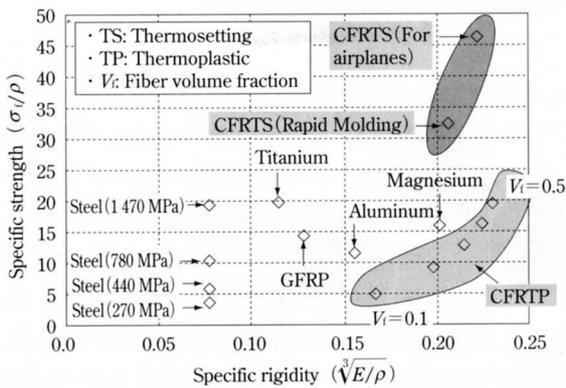


図 15 各種構造用材料の比強度・比剛性比較

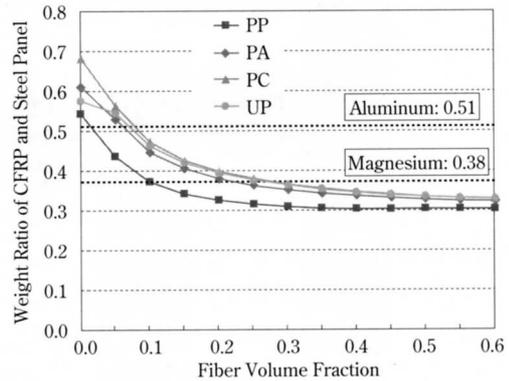


図 17 CFRP 板材の対スチール軽量化率に及ぼす炭素繊維含有率の影響

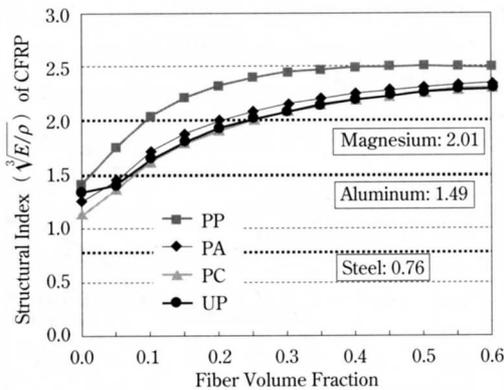


図 16 CFRP 板材の比曲げ剛性に及ぼす炭素繊維含有率の影響

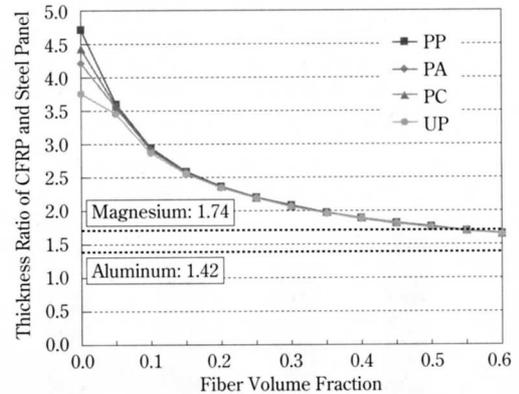


図 18 CFRP 板材の対スチール板厚比に及ぼす炭素繊維含有率の影響

4.1. 軽量基礎素材の比強度・比剛性比較

図 15 は自動車の構造部材として考えられる各種材料の比強度と比剛性を比較したものである。なお、自動車構造では曲げ剛性での比較となるので比剛性としてはヤング率の 3 乗根を密度で割った構造効率指標を用いている。同図より、金属材料は強度にバリエーションがあるものの剛性は一定であるのに対し、複合材料は繊維形態・繊維含有率・成形方法によって幅の広い特性を発現することがわかる。なお、ここでは炭素繊維強化熱硬化性樹脂 (CFRTS) として航空機や F1 カーで実績のあるものと、低コスト材として開発途上のものを例示した。また、炭素繊維強化熱可塑性樹脂 (CFRTP) は開発中のものが多いが、その大きなねらいの一つは低コストな板材の提供であって、炭素繊維の体積含有率によって力学特性以上に素材コストが大きく変動するため、目的に応じた繊維体積含有率の設定が重要となる。

図 15 から、CFRTS は強度部材、剛性部材ともに金属材料よりも大幅な軽量化が期待できることがわかり、

CFRTP は強度で競合するものの剛性部材としての軽量化ポテンシャルが大きいことがわかる。図 16 は複合材料のマトリックスとして用いられているいくつかの樹脂に関して炭素繊維の体積含有率を変化させて CFRP の比曲げ剛性を示したものであり、図 17 と図 18 はスチールを 1 とした場合と同じ曲げ剛性を発現する板材の重量と板厚を示したものである。まず、図 17 から、スチール板はアルミニウムにより約半分に、マグネシウムにより約 4 割に、CFRP により最高で約 3 割にまで軽量化できることがわかる。また、CFRP においては一般に、高価な炭素繊維の体積含有率を増やしても曲げ部材の軽量化効果はそれほど上がらないこともわかるが、逆にあまり炭素繊維の含有量が低いと、図 18 に示されるように板厚が厚くなったり、弾性変形するひずみ範囲が狭く疲労しやすくなるため、用途に応じた適量の炭素繊維の含有が必要となる。

4.2. CFRP による車体軽量化例と LCA

もちろん以上で示したような CFRTS も CFRTP も量

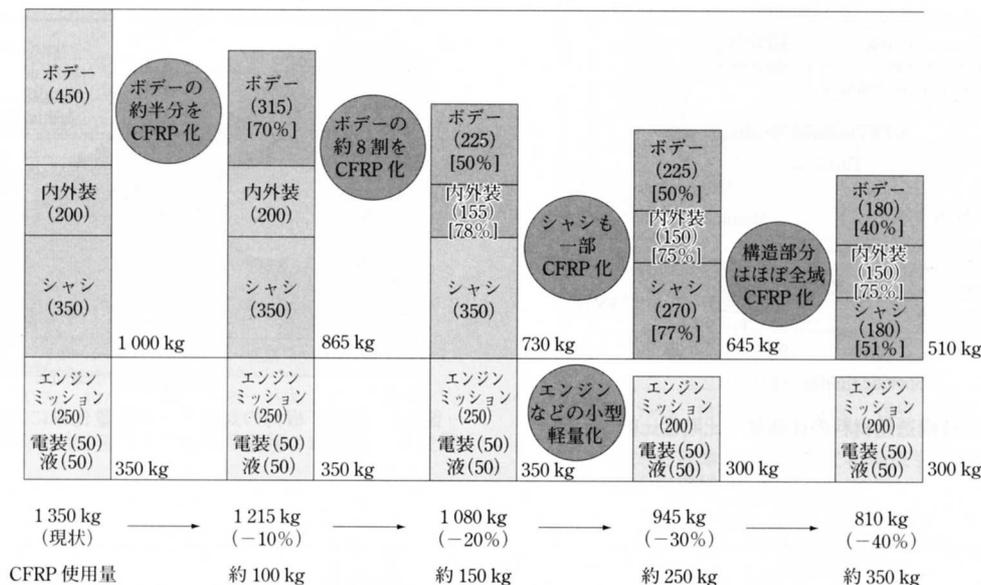


図 19 自家用乗用車の CFRP による段階的軽量化の例

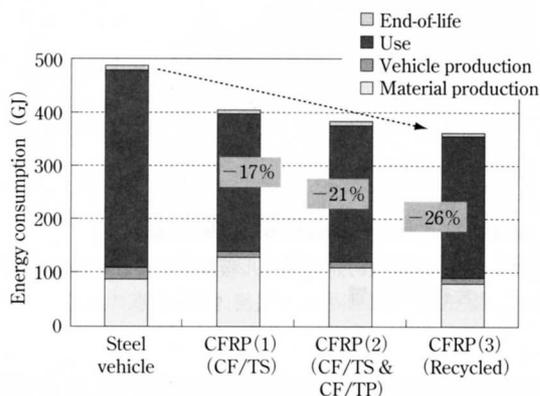


図 20 CFRP により自家用乗用車を軽量化した場合のライフサイクルエネルギー消費量の変化

産車用には開発途上であるが、開発目標値とその効果がある程度明らかとなってきたことから、ここ数年で特に熱可塑性樹脂関連技術の向上が目覚ましい。図 19 は、この種の新材料を適用した場合の段階的な車体軽量化の例であり、コスト、製造速度、リサイクル性の面からそれぞれ問題解決のための技術開発が進んでおり、超軽重量産車の実現可能性が高まってきていると考えている。

以上で CFRP による乗用車の軽量化ポテンシャルが明らかになったが、ライフサイクルでのエネルギー消費量を計算した結果を図 20 に示す⁽²⁾。すなわち、炭素繊維の製造エネルギー原単位の大きさ⁽³⁾に起因して、CFRTS だけで軽量化した場合には部材製造までのエネルギーが大きく、ライフサイクルでの省エネ効果は -17% にとどま

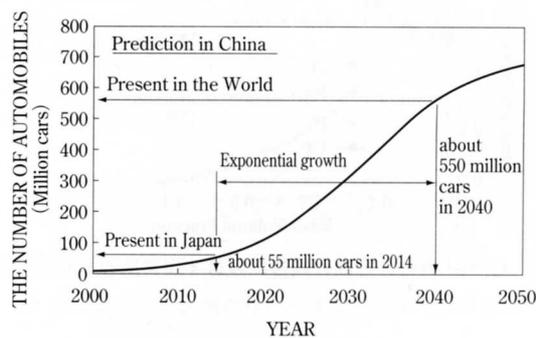


図 21 中国における自家用乗用車保有台数の予測

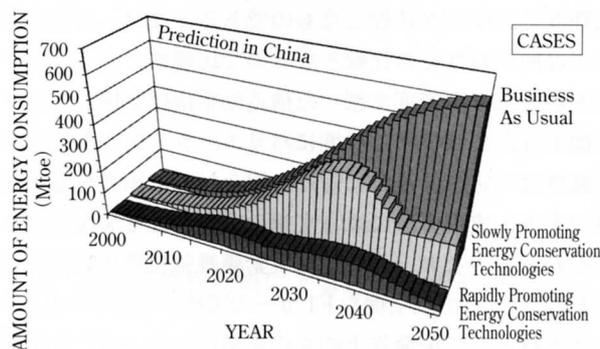


図 22 中国の自家用乗用車によるエネルギー消費量の予測と超低燃費車導入時期による省エネ効果の相違

ること、CFRTP の併用(主として板材への適用)で軽量化率を損なわずに省エネ効果を向上させられること、さらにはリサイクルによってより大きな省エネ効果が期待できることなどが読み取れる。

5. 超低燃費車導入の効果

今後の石油使用量の増加要因は主として非 OECD 諸国の自動車保有台数の増加である。本章では、21 世紀最初で過去最大のモータリゼーション国である中国を例に取り、モータリゼーションの時期的予測とそれによる燃料使用量の増加、ならびに超低燃費車の導入時期によりそれがどの程度抑制できるものかの検討結果を紹介する。

図 21 は中国の乗用車保有台数の予測結果であり、図 22 は中国の乗用車のみによるエネルギー使用量の変化である⁽⁴⁾。図 22 より、2020 年以降のエネルギー使用量の伸びが著しく、無対策の場合には 2032 年には中国国内の乗用車のみで現在の日本の総エネルギー消費量と同じ燃料を消費することとあわせて、早期の対策が積分値としてのエネルギー消費量の削減に極めて効果的であることがわかる。すなわち 2020 年頃までに安価な超低燃費車が中国市場に導入されなければ莫大な量のエネルギーが消費されるが、2020 年までに再生可能エネルギー起源の水素による燃料電池車の実現は難しいことから、温暖化対策の観点からは特に軽量化効果の高い CFRP による超軽量車の早期導入が必要不可欠であるといえる。

6. おわりに

中国をはじめとする非 OECD 諸国の今後の人口増加と経済発展を考えると、抜本的な省エネ技術と持続可能社会のためのライフスタイルモデルを先進国において構築して、できるだけ早く途上国に伝えていく必要があるといえる。

ところが、産業・民生部門ではエネルギー変換効率向

上のメリットからガス化や再生可能エネルギーの積極活用という脱石油のインセンティブがあり、これが同時に温暖化対策ともなっていくが、運輸部門においては省エネと温暖化対策が脱石油においてトレードオフとなっており、当面は市場原理に委ねられ、先進国における技術開発遅延が危惧される。

このような中で注目すべきは輸送機器の超軽量化技術であり、運輸部門におけるエネルギー源や内燃機関の選択と無関係に、即効的かつ抜本的に省エネと温暖化対策を進めることが可能となる。

参考文献

- (1) T. Suzuki, et al.: Evaluation of Effects of Lightening Trucks on Environment by LCA, Proceedings of the 3rd International Symposium on Environmentally Conscious Design and Inverse Manufacturing, p. 135 (2003)
- (2) T. Suzuki, et al.: LCA of Lightweight Vehicles by Using CFRP for Mass-produced Vehicles, Proceedings of 15th International Conference on Composite Materials (ICCM-15), (2005)
- (3) 高橋淳: FRP の LCA, 強化プラスチック, Vol. 51, No. 8, p. 61-64 (2005)
- (4) H. Zushi, et al.: Mechanical Properties of CFRP and CFRTP After Recycling, Proceedings of 15th International Conference on Composite Materials (ICCM-15), (2005)

□フェイス



高橋 淳

環境・エネルギー問題という流動的かつ深刻な制約の中で、輸送・物流システムや人工物の性能はどうあるべきかを常に考えています。いずれの研究テーマにおいても、輸送・物流システムや人工物を構成する素材の力学特性・安全性・コスト・環境負荷といった性能全般を多角的に評価し、その比較結果や将来の変化の可能性などをわかりやすく一般に提示することが重要と考えています。