

環境負荷低減を目指した複合材料技術の進展

3. CFRP の LCA と省エネルギー効果[†]

高橋 淳*

Development in Composites Technology for Reduction of Environmental Load

III : Life Cycle Assessment and Energy Saving Effect of CFRP

by

Jun TAKAHASHI*

Key words : Life cycle assessment, Energy saving, CFRP

1 はじめに

輸送機器の軽量化が燃費向上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 CFRP (炭素繊維強化プラスチック) はコスト、信頼性、生産性 (製造速度、二次加工性)、リサイクル性などの観点から汎用輸送機器にはほとんど採用されていない。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。しかし、何から手を付ければよいのか、その場しのぎではなく、中長期的にも役に立つ技術開発とは何なのか。

本稿では、このような状況における意志決定のための LCA (Life Cycle Assessment) とマクロ分析の考え方を紹介し、そこから導かれる輸送機器と軽量素材の技術開発の方向性について考察する。

2 LCA とマクロ分析

LCA は資源・環境制約下での技術開発の方向性を考察するにあたっての情報を提供するツールとして有効である。例えば、図 1 は様々な自動車のライフサイクルでの消費エネルギーの割合を示しており、どのタイプの自動車においても走行時のエネルギー消費量が圧倒的に大きいこと、またその傾向は大型車ほど顕著であることなどが読みとれ、自動車単体の技術開発で考えると、材料製

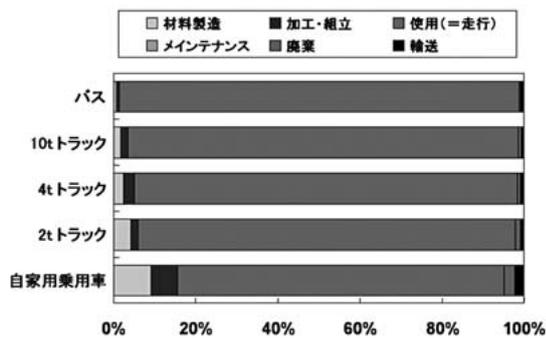


図 1 各種自動車のライフサイクル消費エネルギー

造や加工組立の省エネよりも軽量化などの燃費向上化技術の効果が高いことが理解できる。

しかし、そのような自動車単体の技術開発自体が世界全体の省エネや温暖化対策に役に立つのかについては、もう少しマクロな視点から見る必要がある。すなわち、例えば図 2 は一人あたりのエネルギー消費量を OECD 諸国と非 OECD 諸国に分けて示したものであり、まず、運輸部門がほとんど石油のみに依存していることがわかる。また、図 3 は日本の例ではあるが、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、このままでは、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、短～中期的には自動車の燃費向上が、また、中～長期的には自動車燃料の脱化石資源化が課題であることが理解できよう。

このように、図 1 と図 2 では、レベルの違う意志決定が行われることになるが、共通していることがある。それは、材料生産 (図 2 では産業部門の石炭・石油消費部分)、加工組立 (図 2 では産業部門の電気消費部分)、ユーザーによる走行 (図 2 では運輸部門) におけるエネルギー消費量や二酸化炭素排出量を個別に議論すると、それぞれ

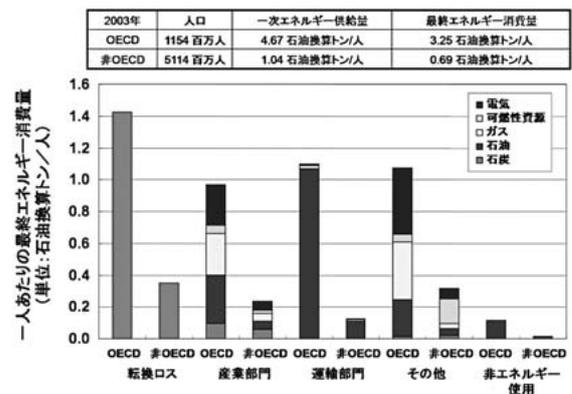


図 2 部門別・エネルギー源別に見た一人あたりのエネルギー消費量 (IEA 統計等をもとに著者ら作成)

[†] 原稿受理 平成 19 年 12 月 11 日 Received Dec. 11, 2007

©2008 The Society of Materials Science, Japan

* 正 会 員 東京大学大学院工学系研究科環境海洋工学専攻
Tokyo, Bunkyo-ku, Tokyo, 113-8656

〒113-8656 東京都文京区本郷, Dept. of Environmental and Ocean Eng., The Univ. of

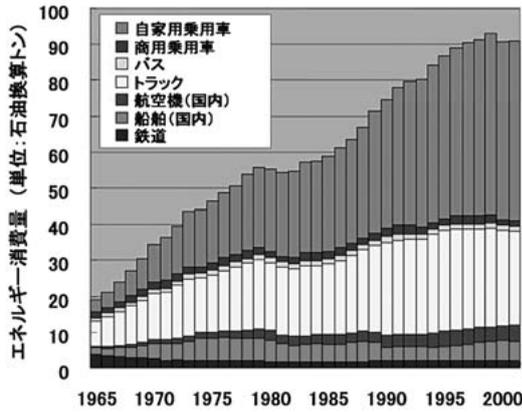


図3 日本の運輸部門での機関別エネルギー消費量の推移

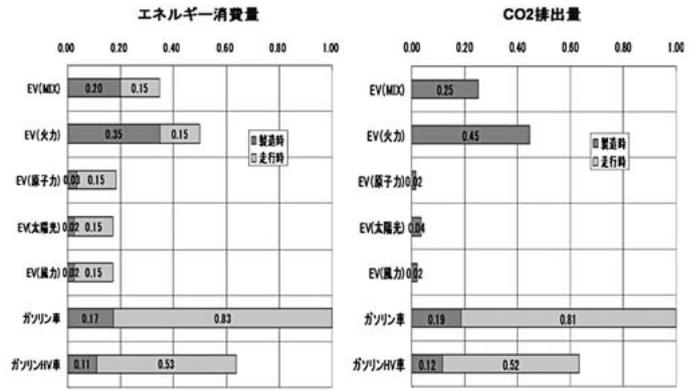


図5 電源別電気自動車 (EV) のWtW分析比較 (ガソリン車=1)

の削減努力が全体にどの程度貢献するかがわからないが、図1のLCAや図2のマクロ分析の考え方により、最も効果の大きな技術開発の方向性が定量的に議論可能となる点である。

3 究極のエコカーと軽量化

図4は内燃機関の効率向上の視点からWtW (Well to Wheel) 分析により各種推進機関の効率を比較したものであり、発電所からの電気を使う場合でも、電気自動車省エネと温暖化対策に極めて優れていることが読みとれる。なお、発電所からの電気を使うとは言うても、夜間電力を利用した充電が想定されることから、発電所を増やすことにならないことを付記しておく。

また、電気は様々な手段で得ることができ、図5に示されるように、その手段によって、さらに大きな省エネと温暖化対策効果が期待できる。

特に、地球上に降り注いでいる太陽エネルギーの総量は我々が使用している化石燃料の約1万倍あり、エネルギー密度が小さいとはいえ、太陽光パネルで一般家庭の消費電力が賄えていることを考えると、太陽エネルギーによる電気自動車の運用が現在考えられる最も現実的で環境に優しい持続可能なモビリティの実現手段ではないだろうか。

いずれにせよ、電気自動車の実用化のためには、車載用電池の性能とコストがネックとなっているが、この重くて高い車載用電池の必要量は車体軽量化率に比例して減らすことができることから、車体軽量化技術は電気自動車時代にこそ威力を発揮する技術となる。

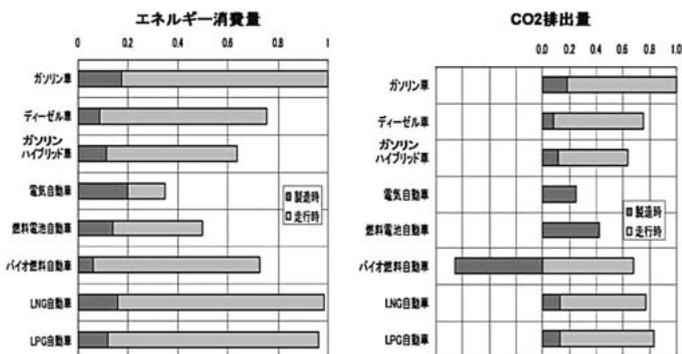


図4 各種推進機関のWtW分析比較 (ガソリン車=1)

4 CFRPによる省エネポテンシャル

内燃機関の車であっても、乗用車の軽量化はもちろん燃費向上に直結し、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あたりの消費エネルギー削減となって、これらは図3に示されたようにマクロな環境負荷低減効果大きい。本章では、日米欧で開発競争の激しい量産車用CFRP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。

4.1 軽量基礎素材の比強度・比剛性比較

図6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曲げ剛性を比較したものであり、それぞれの値が大きい方が強度部材(≒型材)・曲げ剛性部材(≒板材)を軽量化できる。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広い特性を発現し、CFRTS(熱硬化性樹脂によるCFRP)は強度部材、剛性部材共に金属材料よりも大幅な軽量化が期待できること、CFRTP(熱可塑性樹脂によるCFRP)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7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同じ曲げ剛性を発現する板材の重量を示したものであり、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

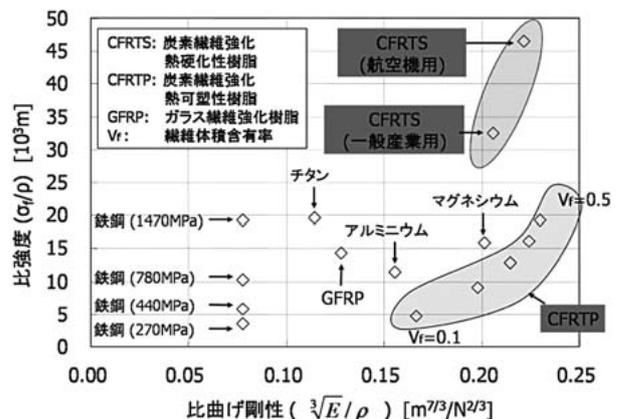


図6 各種構造材料の比強度・比曲げ剛性比較

まで軽量化できることがわかる。また、CFRPにおいては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、板厚が厚くなった(図8参照)、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。

もちろん以上で示したようなCFRTSもCFRTPも量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めざましい。図9は、この種の新素材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、超軽量量産車の実現可能性が高まってきていると考えている。

また、図9に示されるように、内燃機関による乗用車の場合、構造部分の軽量化がエンジン等の小型化には直結しないが、電気自動車では航空機に見られるような構造部分の軽量化の副次的効果が見られることになる。すなわち、電気自動車では、高価で重いバッテリーの制約から、1回のチャージでの走行可能距離が短くなるという難点が指摘されているが、構造部分の軽量化によりこれが実用的な範囲になるので、バッテリー技術の成熟を待つことなく電気自動車の社会導入が可能となる。あるいは、市内限定走行のようなコミュータスタイルの車であれば、構造部分の軽量化によりバッテリーの必要量が

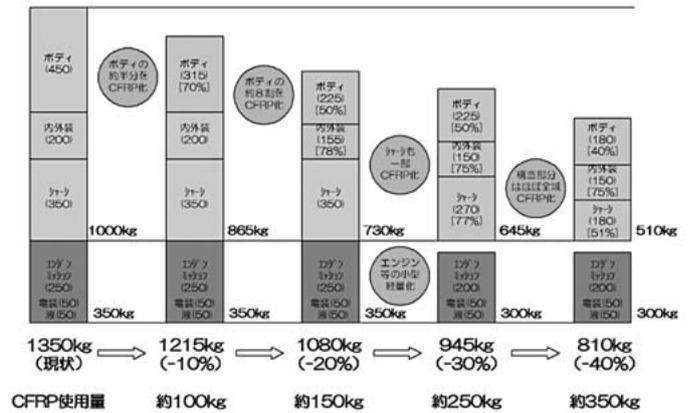


図9 自家用乗用車(内燃機関)のCFRPによる段階的軽量化の例

減るため、電気自動車の価格が低下して、やはり社会への導入時期を早めることが可能となる。

4・2 自動車のLCAで見えるリサイクルの効果

次に、運転時の燃費向上だけでなく、素材製造・加工組立・廃棄も含むライフサイクル全体で見た時の省エネ性について紹介する。

すなわち図1において、スチールベースのバス、トラック、乗用車のいずれの場合も、現段階では、軽量化等による走行時の省エネが最も効果的であることを示した。しかし、ここで考えておかなければいけないのは、先に示したような軽量化やハイブリッド技術などによる低燃費化が進み、走行段階のエネルギー消費量が半分以下になったり、さらに再生可能エネルギーによる電気自動車により走行に関連する(燃料製造時も含む)二酸化炭素排出量が極めて小さくなった時のことである。図1から容易に理解できるように、そのような状況では、素材製造と車体製造段階の省エネ・省化石資源の効果が相対的に大きくなってくる。

図10は現在のPAN系炭素繊維の原単位を用いてCFRP部品を1kg製造するために必要なエネルギーを計算したものであり、リサイクルすることで極めて省エネな素材・部品として再生できることが読みとれる。またこのことは高価な炭素繊維の再利用によりトータルで素材コスト削減が可能となることを意味しており、リサイクルCFRP部品の物性も乗用車の二次部材として適用可能なレベルにまで向上してきていることから、CFRP部品のリサイクルはゴミ問題とコスト高の問題を同時に解決しながらLCA的にも優等生となる極めて優れたソリューションであると言える。

図11は、CFRPにより30%の軽量化を行った乗用車のライフサイクルでのエネルギー消費量を計算した結果である。すなわち、炭素繊維の製造エネルギー原単位の大きさに起因して、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(この場合はLCAには出てこない低コスト化の効果のほうが大きい)、さらにはリサイクルによって省エネ効果が1.5倍に向上することなどが読みとれる。

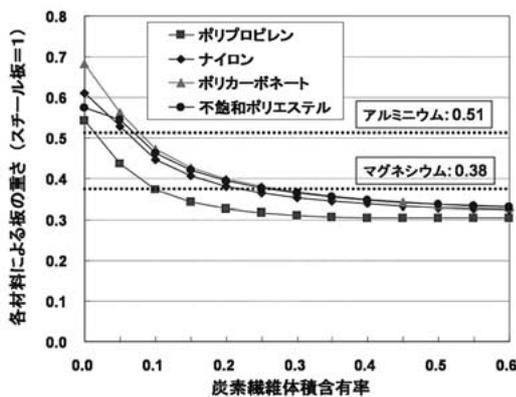


図7 CFRP 板材等の対スチール重量比に及ぼす炭素繊維含有率の影響

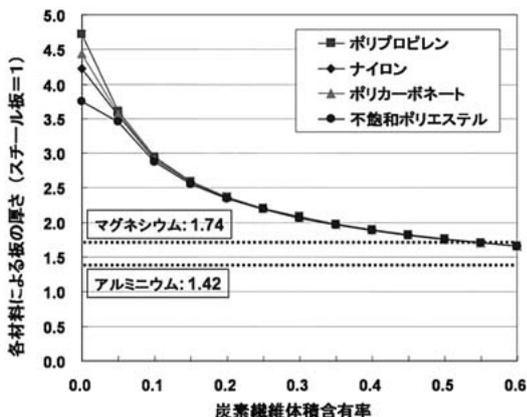


図8 CFRP 板材等の対スチール板厚比に及ぼす炭素繊維含有率の影響

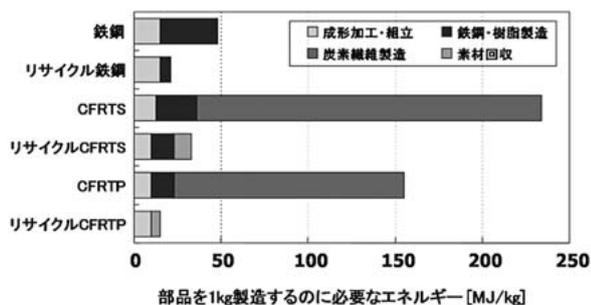


図10 リサイクル前後での鉄鋼部品とCFRP部品の製造エネルギー原単位

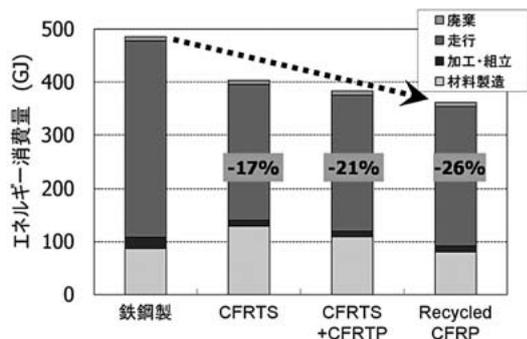


図11 乗用車のライフサイクル消費エネルギーに及ぼすCFRPリサイクルの効果 (30%軽量車の場合)

5 炭素繊維とCFRPの未来

現在、世界の乗用車の年間生産台数は5千万台(トラック・バスも含めると7千万台)であるが、中国・インド等のモータリゼーションにより、これが1億台を超えるのはほぼ確実である。一方、現在の炭素繊維の主流であるPAN系炭素繊維の世界生産量は年間数万吨であって、これでは世界で毎年生産される乗用車のうちの1%も軽くできず、抜本的な省エネ・省化石資源に寄与することはできない。

図12はCFRP関連の今後の重要技術をこのような状況からバックキャストしたものであり、次のような未来像が想像できる。

(1) まず、現在のPAN系炭素繊維と熱硬化性樹脂によるCFRPは、今後も航空・宇宙分野や陸上の最先端分野を支えると考えられるが、その高コスト・難加工性と成形速度・リサイクル性の制約から、需要量が数十万トンを超える近未来の量産車分野では熱可塑性樹脂によるCFRPの開発が不可欠となるであろう。これは、軽量性だけではなくデザインの自由度・二次加工性・耐食性・コスト・リサイクル性の観点から、乗用車で可能な部分はすべて樹脂化してきたことから容易に推論できることである。そしてその際には、熱可塑性樹脂用に表面を活性化させた炭素繊維やそれを用いた超高速二次加工技術の開発が重要となると考えられる。

(2) 次に、さらに需要量が百万トンを超えてくると、炭素繊維の原料をバイオマスに求めるのが自然であろう。この種の研究は既に胎動しており、各プリカーサーごとのブレークスルーの時期や到達物性の予測は困難ではあるが、必ず部品ごとに棲み分けてシェアを伸ばしてくると考えられる。

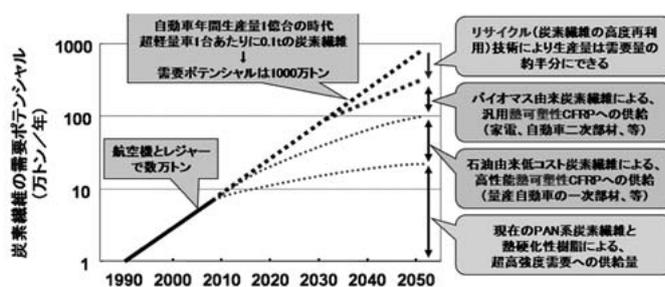


図12 炭素繊維の需要ポテンシャルからバックキャストされる重要技術

(3) また、この規模での需要となってくると、不連続繊維のCFRPも多くなり、低グレードな製品への段階的なカスケード利用も現実のものとなって、炭素繊維の高度再利用技術という意味でのリサイクル技術やそれを支える繊維強化理論の高度化が必要となるであろう。

(4) さらに、これらの素材と成形加工に関する評価・標準化を主導することも以上のようなビジョンの達成には不可欠であろう。

また、CFRPは力学特性も特異であるが、熱的・電気的にも特異な性質を持つ材料であり、例えば、1%を超える線形弾性変形能力を活用することによりソフトスキン部材とすることができ、歩行者保護に有効であったり、極めて小さい熱膨張係数を利用することで精度良い部材ができる一方で、今後、金属材料では問題なくクリアしていたことが課題となる可能性もある。未来の人類社会のために、まだまだこれから取り組むべき課題山積の魅力ある材料であると言える。

6 おわりに

LCAと言うと、基礎素材やその加工・リサイクルの原単位を集めて製品の原単位を計算し、同じ目的を達成するための異なる手段や製品を比較するツールだと思われがちであるが、本稿に示してきたように、LCAやマクロ分析の目的は「同じ目的を達成するための効果的な手段を見つけるだけでなく、より効果的な手段とするための改善方針を見出すこと」である。

なお、本稿では紙面の都合上、LCAやマクロ分析を行ったり、それを用いて改善や未来予測を行う場合の注意点などの詳細は割愛した。興味のある読者は既報^{1), 2)}を参照されたい。また、本稿における計算で使用した炭素繊維やそのリサイクルの原単位は今後改善されていく可能性が大きいことにも注意されたい。本稿では文献³⁾に記載された数値を用いているので、詳しくはこれをご覧いただきたい。

参考文献

- 1) J. Takahashi, "LCA of FRP", Reinforced Plastics, Vol.51, No.8, pp.61-64 (2005).
- 2) J. Takahashi, "Polymer Based Composite Materials for Lightening Automobile", Journal of Society of Automotive Engineers of Japan, Vol.59, No.11, pp.17-23 (2005).
- 3) The Japan Carbon Fiber Manufacturers Association, "Recycling Technology for Carbon Fiber Reinforced Plastics", Reinforced Plastics, Vol.52, No.10, pp.485-491 (2006).