

【論文の内容の要旨】

論文題目

運輸部門のエネルギー消費構造分析に基づく
材料関連省エネルギー技術の効果に関する研究

氏名 鈴木徹也

日本の石油使用量の約3分の1が自動車に関わるものであり、乗用車保有台数の増加や、車体重量の増加、物流の小口化・多頻度化などにより、自動車の環境負荷は今後も増加し続けると予測されている。世界に目を向けると、発展途上国、特に人口増加の著しい中国やインドなどの経済発展に伴い、エネルギー消費量はますます伸びている。中でもモータリゼーションによるエネルギー使用量は他部門と比べて著しく増加しており、このエネルギー消費のほぼ全てを石油に依存している。

このように増加の一途をたどる運輸部門の環境負荷に対し、先進諸国では削減への第一の課題として燃費の改善を挙げている。燃費向上の手段として車体の軽量化が最も注目を集めている。スチールからアルミニウムなどの軽金属材料への転換、さらには、先進複合材料の適用が検討されている。

本研究では、近年炭素繊維の生産能力向上と価格の大幅な低下を背景に需要が大幅に伸びていくと予想されるCFRPに注目した。現在、輸送機器の主要な構造材料として航空機やレーシングカーに用いられているCFRPは、その優れた軽量化ポテンシャルを十二分に発揮しているが、これをそのまま量産車に適用するには高コスト、遅い成型速度、難リサイクル性から困難と考えられている。そこで、まずは超高級車から徐々にCFRPを導入していき、将来的には量産車に適用するべく技術開発が行われてきている。CFRPは一般に製造原単位がとても大きいと言われているが、問題はCFRPの原単位の大きさではなく、それが製品に使用されたときにライフサイクル全体で省エネ効果があるのかどうかということである。

そこで本研究では、量産車に適切なCFRPを用いて自動車を軽量化したとき、ライフサイクル全体での環境負荷削減に効果があるのかどうかを、LCAを用いて定量的に分析することを目的とした。

まず、量産車用CFRPの開発目標値を設定した。開発初期段階のため、単純な材料置換によるマクロ的な軽量化ポテンシャルを考察した。このときCFRP適用部位を、剛性が優先される外板部材と強度が優先される構造部材に分けて考えた。CFRPの優れた比強度・比剛性から、外板部材に対してCFRPはいずれも60%を超える高い軽量化ポテンシャルを示した。その中でもCFRTPがコストや製造原単位の点からも有望であることがわかった。構造部材に対してはCFRTSの優位性が際だった。ただし、航空機用のCFRTSは力学特性に優れている反面、成型速度やコストが悪くオーバースペックなので、軽量化ポテンシャルが70%の

迅速成型用に開発している CFRTS が有望であることがわかった。また、CFRTP は Vf が 0.25 を超えた辺りから軽量化率が飽和に向かうことが分かった。板厚の制限がなければ、低い Vf は CFRTP の低コスト化と熱可塑性樹脂の含浸の悪さの点で有利であるが、Vf が低すぎると強度の点で問題が生じるので、総合的にみると Vf = 30% 辺りが妥当であることがわかった。

次に、この開発目標値をふまえた CFRP の原単位を計算した。CFRP はこれまで航空機やレーシングカーなど高スペックなものがインベントリ分析の対象であった。本研究では近年新たに調査されなおした炭素繊維のインベントリ分析を用い、リサイクルも想定した量産車に適当な力学特性の CFRP を対象とした。フレッシュ材のみの CFRP の原単位は鉄よりもはるかに大きかった。フレッシュの CFRTS 部材の原単位はとフレッシュ CFRTP 部材の原単位はそれぞれスチール部材の原単位の約 5 倍、約 3 倍であった。しかし、リサイクル材を用いるとスチール並みの原単位に大幅に低下するので、仮にリサイクルが必要でない状況であったとしても、リサイクル技術は必須であることがわかった。

続いて、これらの開発目標値を持った CFRP で従来車のスチールを代替したときの、自動車軽量化のエネルギー削減効果を LCA により分析した。このとき、リサイクル材の使用状況に応じて 3 つの軽量化シナリオを想定し LCA で比較した。CFRP を適用することで車重は 40% 前後軽くなった。フレッシュ CFRP のみ使った場合は、CFRP の原単位が大きいため素材製造段階でのエネルギー消費量は増えるが、走行段階での環境負荷低減が大きく効いて来るので結局ライフサイクルでは 32% エネルギー消費量が低下した。リサイクル材を用いた場合は車体の軽量化効果が若干鈍るが、原単位がスチール並みに劇的に下がるためライフサイクルでの環境負荷削減率は 38% にまで向上した。よって、CFRP による乗用車軽量化は、環境負荷削減においてきわめて有効な技術であることが明らかになった。このとき、部材ごとに求められる材料特性と適用すべき CFRP の性能の効率よい組み合わせと、リサイクル技術の発展がさらなる省エネ効果に結びつく。

次にトラックを大型・中型・小型の 3 サイズに分け、それぞれにおいて従来のスチール車と CFRP 軽量車の環境負荷を LCA により比較した。トラック軽量化による環境負荷削減効果はほとんどなかった。これは乗用車と違って貨物を運ぶため、車両重量が軽くなっても総車両重量になると軽量化が鈍るためと考えられる。そして、車体が小さいほど一般に走行距離は短くなる傾向にあるので、原単位の大きい CFRP による素材製造段階でのエネルギー消費量の増加が全体に及ぼす影響が大きくなっていく。よって、小型トラックでは CFRP をもちいることでほんのわずかではあるが、エネルギー消費量が増加した。

そこで、総走行距離を伸ばしてみると、CFRP 軽量化による燃費の向上がより効いてくるので、エネルギー消費量の削減率が向上した。しかし 2 倍の生涯走行距離にしてもせいぜい数% の向上にとどまった。次に、軽量化により軽くなった重量分の積載量が増える場合を考えた。積載量の増加に応じて、同じ重量の荷物を運ぶのに必要なトラック台数を減らすことで、日本の保有トラック全体の総エネルギー消費量が減ることを想定した。従来の積

載率を維持したまま軽量化した重量だけ積載量が増えると、削減率は 25% から 30% 程度となった。したがって、トラックの軽量化による環境負荷削減効果は、単に車体の軽量化だけでは効果が現れないので、総走行距離を伸ばすことはもちろん、特に積載量の増加による効率的な物流が大きく寄与することが明らかになった。

最後に、バスを大型・中型・小型・マイクロの 4 種類に分け、まず FEM 解析によりスチールを CFRP で代替したときの軽量化重量を求めた。そして、その結果をふまえてそれぞれのサイズにおけるスチールバスと CFRP バスの環境負荷を LCA により比較した。燃費の向上によりどのバスもライフサイクルでの環境負荷は減った。しかし、バスは人を乗せて走るため、トラックと同様に車体を軽くしても総車両重量では軽量化効果が鈍ってしまい、10%にも満たないエネルギー削減率であった。

そこで、コミュニティバスの普及により乗用車の稼働率を抑制することによる省エネルギー効果を分析した。コミュニティバスを 100 万台導入することにより、運輸部門の環境負荷を 10% 程度削減できることがわかった。普及台数の増加はもちろんのこと乗車率の向上も省エネ効果に大きく寄与した。これらに比べると燃費向上による省エネ効果は目立たない印象だが、人口密度が低くて高い乗車率が見込めない地域では、燃費向上技術の寄与がより大きくなっていく。よって、省エネ効果を上げるには、普及の促進や燃費を向上させる技術開発、乗車率を上げる運行システムの設定、啓蒙活動など総合的な施策が必要であると言える。

以上のように、本研究では CFRP による省エネ技術が運輸部門の環境負荷削減に大いに有効であることを明らかにした。特に運輸部門のエネルギー消費量の約 55% をも占める乗用車において、すばらしい省エネ効果が認められたことで、今後の技術開発に大きく期待できる。