

# コミュータバスへの複合材料の適用に関する研究

## The Application of Composite Materials to Commuter Buses

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 修士二年 36260 菅満春  
指導教官 高橋淳助教授 吉成仁志客員教授

### 1. 緒言

日本のエネルギー消費の中では、運輸部門の消費エネルギーの増加が著しく、その中でも自動車の占める割合は 87%と高い値を示している<sup>1)</sup>。今後、マイカー世代の高齢化に伴う高齢者の免許保有率の上昇を中心とした年間総走行距離増加の影響を加味すると、さらにこの値は増加すると考えられる。

運輸部門のエネルギー消費の低減には、比剛性、比強度の高い CFRP (炭素繊維強化プラスチック) を乗用車の車体に適用し、軽量化による燃費向上を図ることが有効であると期待されている<sup>2)</sup>。しかし、CFRP は生産速度が遅い、コストが高い、製造時のエネルギー原単位が大きいなどの理由から導入が遅れているのが現状である。

そこで本研究では、まずコミュータバスに CFRP を適用することを検討した。バスは多種少量生産であることから、設計の自由度が高く設備投資が少ない CFRP が適している。また、バスは走行距離が長く、ゴーアンドストップが多いため、燃費向上の効果が非常に大きくあられ、コストや環境負荷においてもメリットが期待できる。

コミュータバスとは地域循環型の運行形態をとるバスで、利便性が高く特に高齢者の足となることができる。そういったことから、すでにコミュータバスは全国に普及しており、今後さらに拡大していくことが期待されている。

本研究ではコミュータバスに CFRP を適用する効果と課題を検討し、CFRP ならではの魅力的なデザインのバスを提案することを目的とする。

### 2. 研究の構成

本研究は以下のように構成する。

部品代替による CFRP の適用

現行の構造のバスについて、CFRP の適用が最も有効なサイズを検討する。また、その最適な設計を検討する。

衝突安全性の検討

CFRP 製バスの衝突安全性に関して、実験およびシミュレーションの両面から検討する。

複合材料を活かしたバスの提案

現行のバスを形状や構造から見直し、複合材料をより有効に活用できる魅力的なデザインのバスを提案する。

### 3. 評価方法

CFRP の適用によるバスの構造部材の軽量化効果は FEM 解析から、それに伴う環境負荷低減効果は LCA から試算する。

**3.1 軽量化効果** バスの構造部材に CFRP を適用した際の軽量化効果を試算する。バスの車体は、乗り心地、操作性、耐久性を確保するため、バス全体の曲げ剛性、ねじり剛性、強度を評価基準として設計されている。CFRP 製バスがこの基準を確保するための最小重量を FEM 解析から求める。なお、ソルバには MARC を用いた。

解析に用いた材料の物性値を Table1 に示す。CFRP としてはエポキシ樹脂と PAN 系炭素繊維の組み合わせとし、繊維体積含有率 60%を想定した。なお、許容応力については Steel は降伏応力を、CFRP は強度を採用した。

Table 1 Material properties of Steel and CFRP

	Steel	CFRP
Density (g/cc)	7.8	1.58
Young's modulus (GPa)	206	54
Critical stress (MPa)	225	500

**3.1.1 曲げ剛性評価** ホイールベース中央部付近に荷重  $W$  を負荷する曲げ試験に対応するように、FEM 解析を行う。ホイールベース間距離を  $L$ 、タイヤから荷重点までの距離を  $b$  とし、解析の結果得られた、ホイールベース間での最大たわみ量を  $\delta$ 、タイヤから最大たわみ発生点までの距離を  $x$  とする。それらの値から、式(1)のような車体サイズに依存しない曲げ剛性の評価基準を求める<sup>3)</sup>。

$$\frac{EI}{E^3} = \frac{Wbx}{6L^4\delta}(L^2 - b^2 - x^2) \quad (1)$$

**3.1.2 ねじり剛性評価** 右前輪中心部に下向き荷重  $W$  を負荷するねじり試験に対応するように、FEM 解析を行う。タイヤ間距離を  $R$  と設定し、解析の結果得られた荷重点でのたわみ量を  $\delta$  とする。それらの値を式(2)に代入してねじり剛性の評価基準をを求める。

$$\frac{GJ}{E^3} = \frac{WR^2}{\delta^2} \quad (2)$$

**3.1.3 強度評価** 床面に車両総重量分の荷重を負荷した際に生じる相当応力を評価する。基準値は材料の許容応力に対して、4.5 の安全率を確保するものとする。

3.1.4 評価基準 評価基準は、バスメーカーから提供されたデータそのままである Steel 製大型バスの値から、曲げ剛性で 233.2、ねじり剛性で 115.3 に設定した。

3.2 環境負荷低減効果 ライフサイクルにおける環境負荷低減効果を LCA によって評価する。

3.2.1 分析条件 各バスに関して乗車率 30%、使用年数 15 年、走行可能距離 430,000km とし、それを満たすバス 1 台を基準フローとする<sup>4)</sup>。システム境界は、素材の発掘から部品および車両本体の製造・走行までとし、環境負荷項目にはエネルギー消費量を用いた。

CFRP の製造原単位には 232MJ/kg、鉄鋼の製造原単位には 33MJ/kg を用いた。その他の素材については、乗用車の素材原単位データを用いた。燃費の評価には鉄鋼製大型バス(9,980kg)の燃費を 2.34km/L とし、車両重量との関係から各車両の燃費を求めた。

#### 4. サイズの検討

4.1 対象 バスは一般的に大型、中型、小型、マイクロバスというようにサイズで分類される。それぞれのサイズのバスに CFRP を適用した際の効果を試算し、どのサイズに適用するのが最も効果的かを検討した。使用したモデルは Fig.1 に示す。大型バスのモデルはバスメーカーから提供されたもので、中型、小型、マイクロバスについては、現在販売されている代表的な車両を参考に独自に作成した。軽量化の対象は構造部材のみとし、形状は変化させ

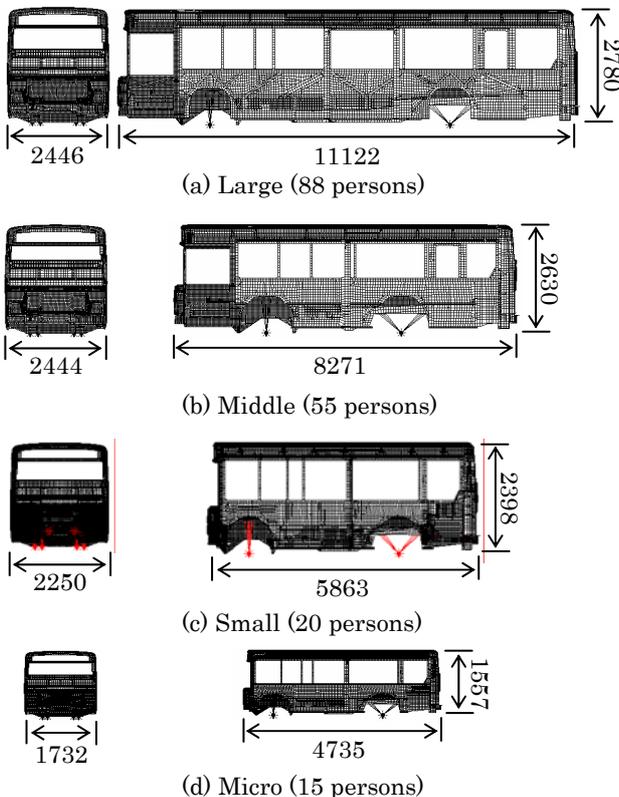


Fig.1 Models of buses for FEM

ず、板厚も Steel 製バスの状態から一律に変化させるものとした。

4.2 結果 各モデルに CFRP を適用した際のバスの車両重量を比較した結果を Table.2 に示す。軽量化率が最も高いのは小型バスであった。Steel 製バスの場合、大型バス、中型バスでは強度基準で設計されているが、小型バス、マイクロバスでは剛性基準で設計されている。中でも特に小型バスにおいては強度に大きな余裕があり、非常に効率が悪い構造である。一方で CFRP は特に比強度に優れるため、すべて剛性基準で設計される。以上のような剛性、強度の関係から、Steel 製では効率の悪い小型バスにおいて CFRP を適用した際の軽量化効果が最も大きく現れたと考えられる。

Table.2 Weight of steel and CFRP buses and respective weight reduction rate

Size	Material	Structural member (kg)	Total(kg)	Weight reduction rate(%)
Large	Steel	2719	9980	
	CFRP	1760	9021	9.6
Middle	Steel	1459	6371	
	CFRP	599	5511	13.5
Small	Steel	1072	2700	
	CFRP	493	2121	21.4
Micro	Steel	609	1630	
	CFRP	306	1327	18.6

以上の結果を用いて各サイズのバスの LCA を行った結果、軽量化効果と同様に小型バス、次いでマイクロバスが環境負荷低減効果が大きい結果となった。

#### 5. 最適化

4 章の結果から最も効果の高い小型バスについて、さらに詳細に検討を進める。検討内容は 材料選択、各部品の最適化、ボディの軽量化に伴う副次的効果である。

5.1 材料選択 CFRP を自動車に適用するにあたって問題となるのが、コストの高さと製造エネルギー原単位の高さである。しかし、CFRP のマテリアルリサイクルによってそれらの問題が大きく改善できる。これまでの検討で想定してきた CFRP はマトリックスとしてエポキシを用いたバージン材である。ここでは廃棄 CFRP と熱可塑性樹脂であるポリカーボネートの組み合わせによるリサイクル材<sup>5)</sup>を使用することも含めて検討を進めていく。リサイクル材の材料特性は密度 1.38g/cc、ヤング率 15GPa に設定した。

リサイクル材の原単位は以下のようにした。ポリカーボネート樹脂の原単位は 78.8MJ/kg で、炭素繊維については廃棄 CFRP から回収するため 0 とした。炭素繊維の体積含有率を 30%とし、成形にはプレス成形を用いる。以上の工程を合計すると、

リサイクル材 1 kg 作るのに必要なエネルギーは 58.1MJ となった。

リサイクル材は強度が低いため、適用箇所はパネル部材のみとした。

**5.2 各部品の最適化** 4章の解析では、各部品の板厚を Steel 製大型バスの値から一律に同じ倍率で変化させていた。この最適化では、剛性や強度への感度が大きい部材は厚くし、感度が小さい部材は薄くすることですべての部材の無駄を無くすることができる。ねじり剛性と強度には大きなアドバンテージがあるので、最適化は曲げ剛性に関して行った。ただし、パネル部材は張り剛性（局所的な曲げ剛性）を確保するよう Steel の 2.4 倍以上に設定した。また、フレーム部材については強度等のバランスが大きく崩れるのを防ぐため、Steel の 1 倍以上とした。

最適化の基準は次の通りに設定した。まず、各部材の厚みを 0.1mm 増やした時の剛性向上量を FEM 解析から求めた。また、その時の CFRP の重量増から、素材製造段階および、走行段階のエネルギー消費の増加量が求まる。それらを用いて、「感度=剛性向上量/エネルギー消費増加量」と定義する。車体重量ではなくエネルギー消費量で最適化したのは、原単位の低いリサイクル材の効果も考慮するためである。この最適化においては、すべての部材の感度が同じになる板厚が最適解である。ただし、最低板厚が設定されているため、すべての感度を同じにすることはできなかった。感度の高い部品を Fig.2 に示す。

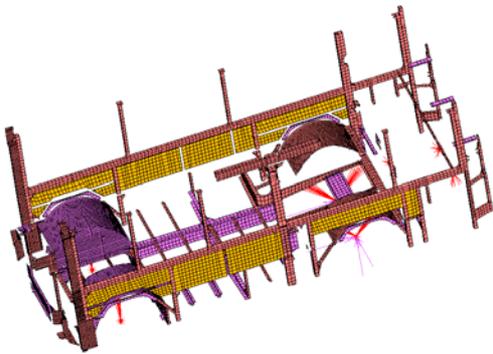


Fig.2 Sensitive members for flexural rigidity

**5.3 副次的効果** CFRP を適用することで構造部材が軽量化されれば、副次的に軽量化される部分があるはずである。

部品重量のデータで入手できたのはトラック（4t および 2t）のデータのみであったが、駆動系部品などは、トラックとバスで共通の部品が使われていることも多いため、これらのデータから推定した。車両総重量が異なる車両であっても、各部品の車両総重量に占める割合にそれほど大きな違いはない。したがって、これらの部品重量は車両総重量に対して線形であると仮定した。なお、Steel 製小型バスの車両重量および車両総重量は参考にした小型バスの諸元表から 3,800kg とした。

- 軽量化後の各部品の重量は次のように推定した。
- 構造部材：FEM 解析より
- エンジン、トランスミッション、ブレーキ、ステアリング、サスペンション：トラックデータより
- 機装品、電装品、液類：軽量化なし

**5.4 結果** 最適化前は 21.4%だった軽量化率が最適化によって 28.3%まで上がった。また、LCA の結果、軽量化に加えリサイクル材を用いたことによって、環境負荷低減効果は 15.2%から 22.7%にまで向上した。これが部品代替による環境負荷低減効果のポテンシャルであると考えられる。

## 6. 衝突安全性

国内の法規においては、バスの衝突安全性を規定しているものはない。しかしながら、バスメーカー各社は前面衝突時の乗務員の安全確保を設計の指標している。Steel 製の車両の衝突安全性に関しては、自動車や鉄道など様々な分野において実験および解析が行われている。しかしながら、CFRP 製の車両に関してその衝突をシミュレーションすることは非常に困難であるとされている<sup>6)</sup>。そこで、本章では以下の手順にて簡易的に CFRP 製バスの衝突安全性の評価を行う。

CFRP 部材（角パイプ）の実験および FEM 解析によるエネルギー吸収特性のシミュレーションを反映した実車解析

**6.1 角パイプの実験および解析** Fig.3 に示すような角パイプの三点曲げ試験を行う。寸法は図内に示してあるとおりで、クロスヘッドスピードは 5mm/min とした。荷重と荷重点変位を記録したものを Fig.4 に示す。最大荷重を示した後、荷重は急激に低下し、Steel などの延性材料と比較すると吸収エネルギーは小さい。

続いて、FEM 解析によってこの結果をシミュレーションできる手法を検討した。解析ではシェル要

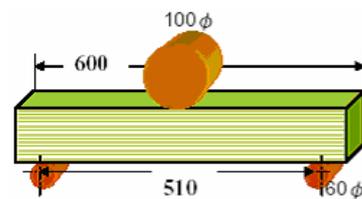


Fig.3 Three point bending test

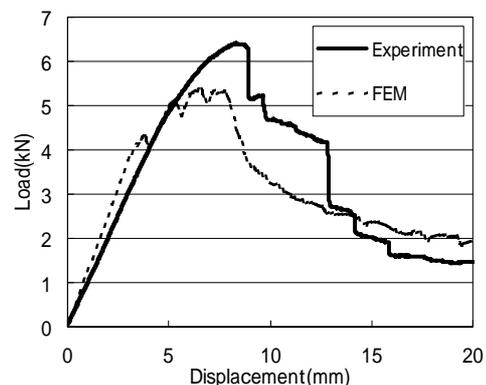


Fig.4 Load-displacement curve of experiment and FEM

素を用いてモデリングし、材料特性は等方性とした。材料特性については試験片の試験結果から得られた値を使用した。ここで問題となってくるのは損傷発生後の挙動である。これが最高荷重およびその後の吸収エネルギーに大きく影響してくるからである。しかしながら、CFRP の損傷はミクロ的に非常に複雑な挙動を示すため、それらをモデリングすることは困難である。本研究ではマクロ的にその挙動を再現するため、要素が限界応力値に達すると、破壊が進展している間はその応力を保持し、ひずみが 5% に達した時点で破断したと判定し、要素を消去する手法を用いた。Fig.4 のようにマクロ的には実験結果と良い対応を示している。よって、この手法を実車解析に適用する。

**6.2 実車解析** 自動車の衝突解析においては動的な問題として扱う必要があるため、陽解法を適用している LS-DYNA をソルバとして用いた。

Steel の降伏後の応力ひずみ関係および速度依存性は、自動車の解析に使用されているものを適用した。CFRP は応力ひずみ関係に速度依存性がないとし、6.1 の結果をそのまま用いた。解析条件は、前面フルラップ衝突試験を想定し、前面に設定した剛体壁へ 55km/h で衝突させた。初期状態でのエネルギーを統一するために、自重もふくめた全体重量が 3t になるように質点を付与して調整した。したがって、初期状態での運動エネルギーは Steel 製バスおよび CFRP 製バスともに約 350kJ である。

Fig.5 に変形量が最大になった時点での変形図を示す。Steel 製バスでは「曲がる」ような変形をしてエネルギーを吸収しているのに対し、CFRP 製バスにおいてはむしろ「折れる」ような変形が大部分で生じているのが見られる。一般的な箱型バスに関しては、乗務員席が車両の前方ギリギリに設置されているため、乗務員の生存空間を確保することが最優先されるべきである。そこで、乗務員室への進入量で評価した。その結果は Steel 製バスで 433.8mm、CFRP 製バスで 538.0mm となっており、1.24 倍の進入量であった。以上のような結果から、CFRP で軽量化した車体においては衝突安全性に課題が残る結果となった。ただし、CFRP 製バスは軽量化されていることや、軸方向圧縮を受ける部材はより大きなエネルギー吸収能力があることから、この解析は安全側に設定した結果であるといえる。

## 7. 導入効果

ここでは、通勤バス普及効果に影響を及ぼす因子について検討する。通勤バスの普及効果について、鈴木ら<sup>7)</sup>は既往の研究において以下のような試算を行っている。

基準となる条件として、乗車率 30%、乗車定員 30 人、年間走行距離 33,000km、燃費 6.06km/L のバスを想定する。一方で、乗用車は国土交通省の統計によると、平均乗車人数 1.3 人、実燃費が 8.69km/L である。通勤バスが新しく普及す

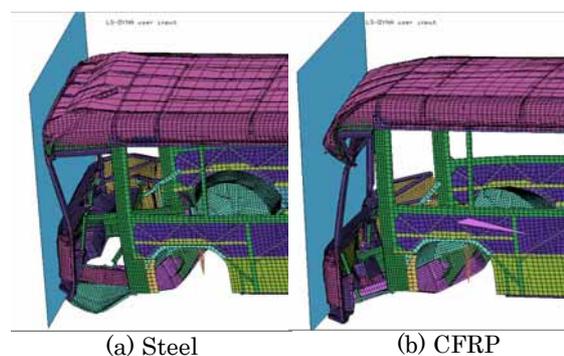


Fig.5 Deformation of crash simulation

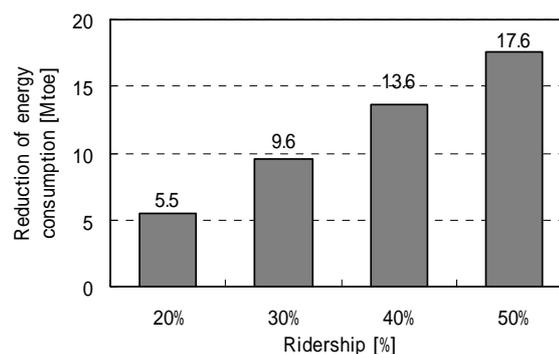


Fig.6 Effect on ridership for reduction of energy consumption

るといことは、同量の輸送量を乗用車よりも原単位の小さいバスに移行できるということであり、1台あたり年間約 800GJ のエネルギー消費量を削減することに相当する。

この計算結果をもとに、通勤バスの新規普及台数を 50 万台とした場合の、乗車率の影響を試算した結果を Fig.6 に示す。運輸部門における年間エネルギー消費量 91Mtoe (toe: 石油換算トン) と比べても、乗車率がエネルギー消費量削減効果に大きな影響があることがわかる。

以上の結果から、通勤バスは乗車率を高め、より多くの乗用車による旅客輸送を吸収することが重要であることがわかる。

## 8. JUN-KAN バス

通勤バスの利用者を増やすには、車両という視点から考えると「利便性が高く、魅力的なバス」でなければならない。ここでは新しいデザインのバス (JUN-KAN バス) を提案する。

### 8.1 デザインコンセプト

バスの形状はボンネットバスとする。6 章の結果から、CFRP は衝突安全性に課題が残るが、ボンネットバスにすることで車体前方に衝撃吸収部材を取り付けることができる。また、今後のバリアフリー社会に対応するためにも、超低床、ノンステップ、フルフラット床のバスが望まれる。後部床下にあった動力、駆動系の部品をすべて前部に配置できるのはボンネットバスしかありえない。

構造はモノコック構造とする。現行のバスはすべてスケルトン構造である。CFRP はもともとモノコック構造に適した材料で、部材をより有効に使える。

モノコック構造およびフルフラットの床を超軽量で実現するには、材料としてサンドイッチ材が有効である。

客室にゆとりをもたせるため、定員 20 人に対して室内長 4,400mm、室内幅 1,920mm、室内高 2,200mm 以上を確保する。開放感のあるデザインにするため、天井にも続くような大きな窓を付ける。軽くて透明性の高いポリカーボネートによるはめ込み窓として剛性を確保する。

CFRP の重要なメリットである、「一体成形が可能」「設計の自由度が高い」といった点を最大限に活用することで、部品点数の削減による設備投資の低減、組立工数の削減によるコストの低減などである。また、多様なニーズに柔軟に対応する。

フルフラット床を実現するためには、後部の車輪が邪魔になる。そこで、両サイドに向かい合わせてベンチ型の座席を配置し、その下にタイヤを収める。

超低床であることを活かし、バックニーリングによって床を完全に地面に付けるようにして、車椅子の乗降性を良くする。よってドアはサイドとバックの 2 つとする。

以上のようなニーズを満足するように設計したのが Fig.7 のバスである。サンドイッチ材として CFRP/アルミハニカムコア/CFRP の構成を想定した。FEM 解析の結果、基準を満たすにはフロアで 2mm/70mm/2mm、その他で 1mm/30mm/1mm の

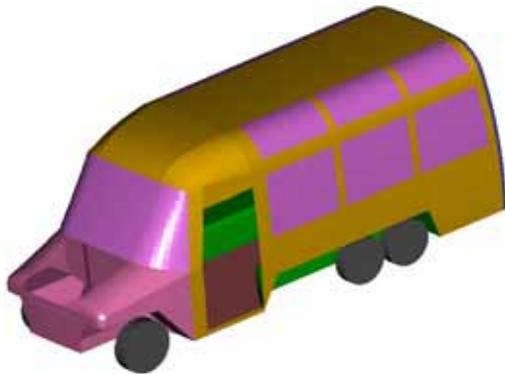


Fig.7 The model appearance of JUN-KAN bus

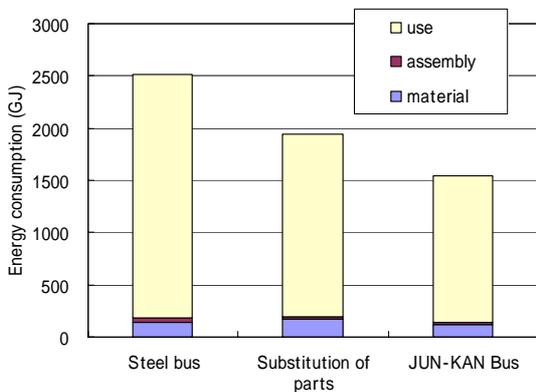


Fig.8 Life Cycle energy consumption of small buses

板厚が必要となった。その結果、構造部材はわずか 221.2kg となり、79.4%の軽量化となった。さらに、床面および側面がフラットなパネルのため内装板などが不要で、座席がフロアと一体成形になっているため、簡易的なシートを取り付けるだけで済むことなどから、艤装品の大幅な軽量化も期待できる。それらを考慮して推定した車両重量はわずか 1,499kg (軽量化率 44.5%) となり、環境負荷低減率も 38.5%と大幅に向上する。部品代替による CFRP の適用に比べて、大きな効果が得られた (Fig.8)。また、これだけ軽量化が進めば、電気自動車や、インホイールモーターなどへの展開も期待でき、さらなる軽量化、環境負荷低減につながる。

一体成形により部品点数は、フロア、ボディ、バックパネル、フロントモジュール、サイドドア、バックドアのわずか 6 点で構成されている。Steel 製バスの部品が 1,900 点にもおよぶのと比較すると、組立コストは大幅に削減される。

## 9 . 結言

本研究では CFRP のバスへの適用に関して様々な方向から検討した。その結果、以下のような知見を得た。

- CFRP の適用は小型バスが効果的である。
- 部品代替で 22.7%の環境負荷低減効果がある。
- 軽量化後の衝突安全性は劣る。
- 導入効果をあげるには乗車率の高さが重要である。

以上の結果および課題をふまえて、モノコック構造ボンネットバスである JUN-KAN バスを提案した。社会のあらゆるニーズを満足させ、大幅な軽量化と、組立コストの低減につながる可能性を示した。CFRP を車両に適用するには、単なる部品代替ではなく、より材料を有効に活用できる構造の見直しが重要である。

## 参考文献

- 1) 環境白書,環境省,2003
- 2) H. Zushi, S. Sawada, T. Suzuki, T. Origuchi and J. Takahashi, Proceedings of the 3rd International Symposium on Environmentally Conscious Design and Inverse Manufacturing, (2003-12), pp. 473-476
- 3) 式田昌弘,自動車の強度,山海堂, 1989
- 4) EDMC/エネルギー・経済統計要覧,(財)省エネルギーセンター,2003
- 5) 尾台,圖子,大澤,鷺沢,高橋, 第 29 回複合材料シンポジウム講演論文集, 2004, pp.197-198
- 6) 例えば, Hang E.,Fort O.,and Tramecon A.,SAE Technical Paper Series, SAE, 910152, 1991, pp.245
- 7) T. Suzuki, H. Zushi, S. Nakatsuka, J. Takahashi and J. Kasai, Proceedings of The 6th International Conference on EcoBalance, 2004, pp.579-582