

平成 17 年度 博士論文

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

東京大学大学院 工学系研究科 環境海洋工学専攻

鈴木 徹也

要旨

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。そして、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 (Carbon Fiber Reinforced Plastics : 炭素繊維強化プラスチック) 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ルギー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、量産車に適した性能の 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 (Life Cycle Assessment : ライフサイクルアセスメント) 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。自動車はきわめて多くの部品から構成されるが、本研究では分析の簡素化のため、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の大きく 2 つに分けて考えた。複合則により理論的な対スチール軽量化率を算出すると、CFRP の比強度・比剛性が優れているために、外板部材に対して CFRP はいずれも 60%を超える高い軽量化率を示した。その中でも CFRTS (熱硬化性 CFRP) 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であるため、対スチール軽量化率が 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 (繊維体積含有率) が 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 で従来車のスチールを代替して軽量化したときに、環境的にメリットがあるのかどうかを LCA により検討した。初めに、LCA を行う上で不可欠である CFRP の製造原単位を計算した。CFRP の主要な原料である炭素繊維の原単位のインベントリデータは、近年ようやく整備され始めたばかりである。さらに、CFRP についても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しかインベントリ分析の対象ではなかった。そこで本研究では、近年新たに再調査した炭素繊維のインベントリ分析を用いて、リサイクルも想定した量産車に適当な力学特性の CFRP の製造原単位を検討した。フレッシュの CFRTPS 部材の原単位とフレッシュの 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 倍とかなり大きな値であった。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、これらの原単位を用いて、乗用車の LCA を行った。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比較した。CFRP を適用することで車両重量は 40%前後軽くなった。フレッシュ CFRP のみを使った場合は、CFRP の原単位が大きいこと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 31%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 35%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、さらに省エネルギー効果を向上させる。

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省エネルギー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積載量を含む車両総重量では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来る。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、かえってエネルギー消費量が増加した。

そこで、総走行距離を 2 倍に伸ばしてみると、CFRP 軽量化による燃費の向上がさらに効いてくるのでライフサイクルでのエネルギー消費量の削減率が向上したが、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エネルギー消費量は減少した。しかしながら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車両総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、運輸部門のエネルギー消費量を 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ルギー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ルギー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くる。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 による自動車の軽量化技術が運輸部門の省エネルギー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ルギー効果が認められたことで、今後の技術開発が大いに期待される。

目次

| | |
|-----------------------------------|----|
| 要旨 | i |
| 目次 | iv |
| 図表一覧 | ix |
| | |
| 第1章 序論 | 1 |
| 1.1 本研究の背景 | 1 |
| 1.2 本研究の目的 | 2 |
| 1.3 本論文の構成 | 3 |
| | |
| 第2章 エネルギー需給分析 | 5 |
| 2.1 緒言 | 5 |
| 2.2 世界のエネルギー需給 | 5 |
| 2.2.1 エネルギー需給の現状 | 5 |
| 2.2.2 人口推移予測 | 8 |
| 2.2.2.1 2050 年までの人口推移予測 | 8 |
| 2.2.2.2 2300 年までの人口推移予測 | 9 |
| 2.2.3 エネルギー消費量推移予測 | 10 |
| 2.2.3.1 IEA によるエネルギー消費推移予測 | 10 |
| 2.2.3.2 IPCC によるエネルギー消費推移予測 | 12 |
| 2.3 日本のエネルギー需給 | 14 |
| 2.4 運輸部門における省エネ・温暖化対策 | 16 |
| 2.4.1 環境負荷の現状 | 16 |
| 2.4.2 要因分析 | 17 |
| 2.4.2.1 旅客部門 | 17 |
| 2.4.2.2 貨物部門 | 22 |
| 2.4.3 排出量予測と対策の概要 | 23 |
| 2.5 結言 | 26 |
| | |
| 第3章 軽量化による燃費向上と軽量化素材 | 28 |
| 3.1 緒言 | 28 |
| 3.2 自動車のライフサイクルにおける環境負荷 | 28 |
| 3.3 燃費規制 | 29 |
| 3.4 燃費向上の手段 | 32 |

| | | |
|---------|--------------------------------|----|
| 3.5 | 車両重量と燃費の関係..... | 35 |
| 3.6 | 軽量化素材の比較..... | 39 |
| 3.6.1 | CFRP..... | 39 |
| 3.6.2 | 高張力鋼..... | 40 |
| 3.6.3 | アルミニウム..... | 43 |
| 3.6.4 | マグネシウム..... | 44 |
| 3.6.5 | チタン..... | 46 |
| 3.6.6 | GFRP | 46 |
| 3.7 | CFRP の基礎的知識..... | 46 |
| 3.7.1 | CFRP の長所と短所..... | 47 |
| 3.7.2 | 炭素繊維..... | 47 |
| 3.7.2.1 | PAN 系炭素繊維 | 47 |
| 3.7.2.2 | ピッチ系炭素繊維 | 48 |
| 3.7.3 | 樹脂 | 49 |
| 3.7.3.1 | 熱硬化性樹脂..... | 49 |
| 3.7.3.2 | 熱可塑性樹脂..... | 49 |
| 3.8 | CFRP の需要動向..... | 50 |
| 3.9 | 乗用車への CFRP 適用の現状..... | 52 |
| 3.10 | 結言..... | 54 |
| 第4章 | 量産車用 CFRP の開発目標..... | 55 |
| 4.1 | 緒言..... | 55 |
| 4.2 | 各種基礎素材の軽量化ポテンシャル..... | 56 |
| 4.3 | パネル材の軽量化と板厚に及ぼす密度と弾性率の関係 | 62 |
| 4.4 | 炭素繊維体積含有率の目標値..... | 67 |
| 4.5 | 結言..... | 69 |
| 第5章 | 構造部材の製造原単位 | 70 |
| 5.1 | 緒言..... | 70 |
| 5.2 | 環境負荷定量分析に関する既往研究成果..... | 70 |
| 5.2.1 | ライフサイクルアセスメント（LCA）の概要..... | 70 |
| 5.2.2 | LCA 研究の歩み..... | 72 |
| 5.2.3 | LCA の構成..... | 73 |
| 5.3 | 量産車用基礎素材およびそれによる部材の原単位 | 77 |
| 5.3.1 | スチール..... | 77 |
| 5.3.2 | アルミニウム..... | 79 |

| | | |
|---------|--------------------------------------|-----|
| 5.3.3 | GFRP | 81 |
| 5.4 | 量産車用 CFRP の原単位予測 | 82 |
| 5.4.1 | CFRP 製部品の原単位の目標値 | 82 |
| 5.4.2 | フレッシュ材のみの CFRP 製部品の製造原単位予測 | 82 |
| 5.4.2.1 | CF の製造原単位 | 82 |
| 5.4.2.2 | マトリックス樹脂の製造原単位 | 84 |
| 5.4.2.3 | プリプレグ製造の省略による原単位低下 | 85 |
| 5.4.2.4 | 成形の原単位 | 86 |
| 5.4.2.5 | 外板部材用 CFRP の原単位 | 89 |
| 5.4.2.6 | 構造部材用 CFRP の原単位 | 89 |
| 5.4.2.7 | 加工組立時の原単位 | 90 |
| 5.4.3 | 3R 後の CFRP の原単位予測 | 90 |
| 5.4.3.1 | 自動車リサイクルの現状 | 90 |
| 5.4.3.2 | 自動車リサイクルの達成目標 | 91 |
| 5.4.3.3 | CFRP のリサイクル方法 | 92 |
| 5.4.3.4 | リサイクルによる原単位の低下 | 93 |
| 5.4.3.5 | 3R のシナリオ | 94 |
| 5.4.3.6 | 量産車用 CFRP の原単位見積もり | 95 |
| 5.5 | 結言 | 97 |
| 第6章 | 乗用車の軽量化 | 98 |
| 6.1 | 緒言 | 98 |
| 6.2 | 自動車 LCA のあゆみ | 98 |
| 6.3 | LCA の実施 | 100 |
| 6.3.1 | 目的及び調査範囲の設定 | 100 |
| 6.3.2 | 素材製造段階 | 102 |
| 6.3.3 | 部品・車体製造段階 | 109 |
| 6.3.4 | 走行段階 | 115 |
| 6.3.5 | リサイクル・廃棄段階 | 115 |
| 6.3.6 | ライフサイクル | 118 |
| 6.3.7 | CFRP の軽量化率と CFRP 車のエネルギー削減率の関係 | 120 |
| 6.4 | 軽量乗用車導入による省エネルギー効果 | 123 |
| 6.5 | 結言 | 125 |
| 第7章 | トラックの軽量化 | 126 |
| 7.1 | 緒言 | 126 |

| | | |
|---------|----------------------------|-----|
| 7.2 | トラックの分類..... | 126 |
| 7.3 | LCA の実施..... | 128 |
| 7.3.1 | 目的及び調査範囲の設定..... | 128 |
| 7.3.2 | 素材製造段階..... | 129 |
| 7.3.3 | 部品・車体製造段階..... | 137 |
| 7.3.4 | 走行段階..... | 138 |
| 7.3.5 | ライフサイクル..... | 139 |
| 7.4 | 軽量トラック導入による省エネルギー効果..... | 140 |
| 7.4.1 | 総走行距離を変化させた場合..... | 140 |
| 7.4.1.1 | 大型トラック..... | 140 |
| 7.4.1.2 | 中型トラック..... | 141 |
| 7.4.1.3 | 小型トラック..... | 142 |
| 7.4.2 | 積載率を変化させた場合..... | 143 |
| 7.4.2.1 | 大型トラック..... | 144 |
| 7.4.2.2 | 中型トラック..... | 147 |
| 7.4.2.3 | 小型トラック..... | 150 |
| 7.5 | 結言..... | 152 |
| 第8章 | バスの軽量化..... | 154 |
| 8.1 | 緒言..... | 154 |
| 8.2 | コミュニティバスとは..... | 154 |
| 8.3 | コミュニティバスの普及状況..... | 158 |
| 8.4 | CFRP の適用の可能性..... | 161 |
| 8.5 | 車体サイズの検討..... | 165 |
| 8.5.1 | 評価方法..... | 166 |
| 8.5.1.1 | 曲げ剛性評価..... | 169 |
| 8.5.1.2 | ねじり剛性評価..... | 171 |
| 8.5.1.3 | 強度評価..... | 172 |
| 8.5.2 | FEM 解析結果..... | 173 |
| 8.6 | LCA の実施..... | 176 |
| 8.6.1 | 目的及び調査範囲の設定..... | 176 |
| 8.6.2 | 素材製造段階..... | 176 |
| 8.6.3 | 部品・車体製造段階..... | 178 |
| 8.6.4 | 走行段階..... | 178 |
| 8.6.5 | ライフサイクル..... | 180 |
| 8.7 | コミュニティバス導入による省エネルギー効果..... | 182 |

| | |
|----------------------|-----|
| 8.8 結言 | 184 |
| 第9章 結論 | 185 |
| 9.1 本研究で得られた知見 | 185 |
| 9.2 今後の課題 | 187 |
| 参考文献 | 189 |
| 発表論文 | 197 |
| 謝辞 | 199 |

図表一覧

第2章

| | | |
|----------|--|----|
| 図 2.2.1 | OECD 諸国と非 OECD 諸国の一次エネルギー消費量の推移 | 5 |
| 図 2.2.2 | 世界の 1 人あたりの一次エネルギー供給量と部門別最終エネルギー消費量 | 6 |
| 図 2.2.3 | 世界の人口予測（中位推計） | 7 |
| 図 2.2.4 | 世界の部門別最終エネルギー消費割合 | 8 |
| 図 2.2.5 | 2300 年までの世界人口推移予測 | 9 |
| 図 2.2.6 | IEA による地域別世界の一次エネルギー需要予測 | 11 |
| 図 2.2.7 | IEA による部門別に見たエネルギー源構成予測 | 12 |
| 図 2.2.8 | IPCC の 4 つの標準シナリオによる一次エネルギー需要予測 | 14 |
| 図 2.3.1 | 部門別最終エネルギー消費量の推移 | 15 |
| 図 2.3.2 | 部門別最終エネルギー消費量の推移 | 15 |
| 図 2.4.1 | 輸送機関別最終エネルギー消費量の推移 | 16 |
| 図 2.4.2 | 旅客輸送量の推移 | 17 |
| 図 2.4.3 | 自家用乗用車の総走行距離の推移 | 18 |
| 図 2.4.4 | 世帯数と世帯当たり保有台数の推移 | 18 |
| 図 2.4.5 | 乗用車世帯保有率の推移 | 19 |
| 図 2.4.6 | 乗用車の重量別保有台数と平均車体重量の推移（軽自動車を除く） | 20 |
| 図 2.4.7 | 理論燃費と実走行燃費の推移 | 21 |
| 図 2.4.8 | 輸送手段別の総貨物輸送量の推移 | 22 |
| 図 2.4.9 | 普通トラックと小型トラックの積載効率の推移 | 23 |
| 図 2.4.10 | 運輸部門の CO ₂ 排出実績と目標 | 24 |
| 表 2.4.1 | 県別世帯当たり保有台数 | 19 |
| 表 2.4.2 | 貨物輸送量の輸送機関別構成費の推移 | 23 |
| 表 2.4.3 | 運輸部門における省エネルギー量と CO ₂ 削減量の目標値 | 25 |

第3章

| | | |
|---------|-------------------------------|----|
| 図 3.2.1 | 各種自動車のライフサイクルエネルギー消費量割合 | 28 |
| 図 3.2.2 | 自動車走行時における二酸化炭素排出低減化技術 | 29 |
| 図 3.4.1 | 車両のエネルギー消費割合（10 モード走行時） | 33 |
| 図 3.5.1 | 10・15 モードの概要 | 37 |

| | | |
|---------|-----------------------------|----|
| 図 3.5.2 | 乗用車の車両重量と理論燃費の関係 | 38 |
| 図 3.5.3 | e 燃費のアンケート調査に基づく実燃費と車両重量の関係 | 38 |
| 図 3.6.1 | 各種基礎素材の比強度と比剛性 | 40 |
| 図 3.6.2 | 高張力鋼板の使用例 | 42 |
| 図 3.6.3 | ULSAB カーのボディ構造 | 42 |
| 図 3.6.4 | アルミニウムボディ | 43 |
| 図 3.7.1 | PAN 系炭素繊維の製造プロセス | 48 |
| 図 3.7.2 | 世界の PAN 系炭素繊維市場シェア（東レ推定） | 48 |
| 図 3.8.1 | 世界の炭素繊維市場の変遷 | 50 |
| 図 3.9.1 | PAN 系炭素繊維の世界の需要量と価格の推移 | 54 |
| 表 3.3.1 | 主要国の運輸政策 | 30 |
| 表 3.3.2 | 燃費向上の目標基準値 | 30 |
| 表 3.3.3 | 燃費向上の目標基準値（重量別） | 31 |
| 表 3.4.1 | 自動車の燃費低減方策 | 34 |
| 表 3.6.1 | マグネシウムに代替可能な自動車部品 | 45 |
| 表 3.8.1 | 炭素繊維の主要産業用途 | 51 |
| 表 3.9.1 | 乗用車における CFRP の適用例 | 53 |

第 4 章

| | | |
|---------|---------------------------------------|----|
| 図 4.2.1 | 外板部材と構造部材の軽量化ポテンシャル | 58 |
| 図 4.2.2 | 外板部材と構造部材の低コスト化ポテンシャル | 60 |
| 図 4.3.1 | 炭素繊維の体積含有率と CFRP の密度の関係 | 63 |
| 図 4.3.2 | 炭素繊維の体積含有率と CFRP の弾性率の関係 | 63 |
| 図 4.3.3 | 炭素繊維の体積含有率と CFRP パネルの構造指標の関係 | 65 |
| 図 4.3.4 | 炭素繊維の体積含有率と CFRP パネルの対スチール重量比の関係 | 66 |
| 図 4.3.5 | 炭素繊維の体積含有率と CFRP パネルの対スチール板厚比の関係 | 66 |
| 図 4.4.1 | 炭素繊維の体積含有率と構造用 CFRP パネルに要求される弾性歪範囲の関係 | 67 |
| 図 4.4.2 | 炭素繊維の体積含有率と構造用 CFRP パネルに要求される強度の関係 | 68 |
| 表 4.1.1 | 乗用車の部位別重量 | 55 |
| 表 4.2.1 | 各材料の物性 | 57 |
| 表 4.2.2 | 外板部材と構造部材の軽量化ポテンシャル | 59 |
| 表 4.2.3 | 各種 CFRP の部品コスト | 60 |
| 表 4.2.4 | 外板部材と構造部材の低コスト化ポテンシャル | 61 |

| | |
|---------------------------|----|
| 表 4.3.1 対象とした基礎素材の物性..... | 62 |
|---------------------------|----|

第 5 章

| | |
|--|----|
| 図 5.2.1 ライフサイクルと環境負荷の概念図..... | 71 |
| 図 5.2.2 LCA の枠組み..... | 74 |
| 図 5.3.1 鉄鋼製品のライフサイクルフロー..... | 77 |
| 図 5.3.2 輸入アルミニウム新地金のシステム境界..... | 79 |
| 図 5.3.3 アルミニウム圧延製品の製造フローとサブシステム（板製品の例）..... | 81 |
| 図 5.4.1 CFRP の製造フロー..... | 82 |
| 図 5.4.2 CF プリプレグの製造フロー..... | 83 |
| 図 5.4.3 乗用車のリサイクルフロー..... | 90 |
| 図 5.4.4 CFRP 車ガラスのリユース・リサイクルフロー..... | 94 |
| 図 5.4.5 ハイブリッド材..... | 96 |
| 図 5.5.1 スチールと各種 CFRP 部材の製造原単位の比較..... | 97 |
| 表 5.2.1 ISO14040s の規格化の状況..... | 73 |
| 表 5.3.1 小型・普通自動車の鉄鋼材に関する投入素材構成と製造インベントリ..... | 78 |
| 表 5.3.2 アルミニウム新地金の原単位..... | 80 |
| 表 5.3.3 アルミニウムの圧延および押出加工の原単位..... | 81 |
| 表 5.3.4 GFRP の原単位..... | 81 |
| 表 5.4.1 スチールと PAN 系炭素繊維の原単位..... | 84 |
| 表 5.4.2 各種マトリックス樹脂の原単位..... | 84 |
| 表 5.4.3 プリプレグ製造の原単位の内訳..... | 85 |
| 表 5.4.4 オートクレーブ法の概要..... | 86 |
| 表 5.4.5 プリフォームマッチドダイ法の概要..... | 87 |
| 表 5.4.6 RTM 法の概要..... | 88 |
| 表 5.4.7 各種成型原単位..... | 88 |
| 表 5.4.8 ボディ用 CFRP の製造原単位..... | 89 |
| 表 5.4.9 シャーシ用 CFRP の製造原単位..... | 89 |
| 表 5.4.10 リサイクル目標の比較..... | 91 |
| 表 5.5.1 スチールと各種 CFRP の部材製造原単位の比較..... | 97 |

第 6 章

| | |
|-----------------------------|-----|
| 図 6.3.1 乗用車のライフサイクルフロー..... | 101 |
|-----------------------------|-----|

| | | |
|----------|---|-----|
| 図 6.3.2 | 車両重量とエンジン重量の関係..... | 106 |
| 図 6.3.3 | 各乗用車のライフサイクルでのエネルギー消費量..... | 119 |
| 図 6.3.4 | スチール車と CFRP 車のライフサイクルエネルギー消費量の比較 (CFRP の製造原単位が変化した場合) | 120 |
| 図 6.3.5 | スチール車と CFRP 車のライフサイクルエネルギー消費量の比較 (CFRP の対スチール軽量化率が変化した場合) | 121 |
| 図 6.3.6 | CFRP の対スチール軽量化率と CFRP 車のエネルギー削減率の関係 | 122 |
| 表 6.2.1 | 国内自動車業界の LCA 研究・活動の推移..... | 99 |
| 表 6.3.1 | 対象車の主な仕様・諸元..... | 101 |
| 表 6.3.2 | 乗用車の構成材料別使用量, 投入量, エネルギー消費量..... | 103 |
| 表 6.3.3 | 乗用車の部位別重量..... | 105 |
| 表 6.3.4 | 対象とした CFRP の種類..... | 105 |
| 表 6.3.5 | 各シナリオにおける CFRP の使い方 | 105 |
| 表 6.3.6 | 軽量化後の乗用車の部位別重量 (シナリオ 1) | 107 |
| 表 6.3.7 | 軽量化後の乗用車の部位別重量 (シナリオ 2) | 107 |
| 表 6.3.8 | 軽量化後の乗用車の部位別重量 (シナリオ 3) | 108 |
| 表 6.3.9 | 軽量化後のエネルギー消費量の変化..... | 109 |
| 表 6.3.10 | 自工会 13 社合計のエネルギー・素材資源使用量..... | 110 |
| 表 6.3.11 | 対象車の内製分での各種エネルギー資源の使用量..... | 111 |
| 表 6.3.12 | 対象車の内製分でのエネルギー消費量..... | 111 |
| 表 6.3.13 | 各業界における部品・車体製造段階のエネルギー消費量..... | 113 |
| 表 6.3.14 | 部品・車体製造段階におけるエネルギー消費量..... | 114 |
| 表 6.3.15 | 部品・車体製造段階におけるエネルギー消費量..... | 114 |
| 表 6.3.16 | 走行段階でのエネルギー消費量..... | 115 |
| 表 6.3.17 | 従来車の廃棄・リサイクル段階におけるエネルギー消費量..... | 116 |
| 表 6.3.18 | 解体および破碎・選別処理における物質収支..... | 117 |
| 表 6.3.19 | リサイクル・廃棄段階におけるエネルギー消費量..... | 118 |
| 表 6.3.20 | 各乗用車のライフサイクルでのエネルギー消費量..... | 119 |
| 表 6.4.1 | CFRP 軽量車導入による省エネルギー量の推移 | 124 |

第 7 章

| | | |
|---------|--------------------------|-----|
| 図 7.2.1 | トラックの車両重量と積載重量の関係..... | 128 |
| 図 7.3.1 | トラックの車両重量とエンジン重量の関係..... | 134 |
| 図 7.3.2 | トラックの車両総重量と燃費の関係..... | 138 |

| | | |
|----------|----------------------------------|-----|
| 図 7.3.3 | トラックのライフサイクルにおけるエネルギー消費量 | 140 |
| 図 7.4.1 | 総走行距離を変化させた場合のエネルギー消費量の変化 | 143 |
| 図 7.4.2 | 積載率の向上による車両台数の減少 | 143 |
| 図 7.4.3 | 大型トラックの総エネルギー消費量の比較（ケース 1） | 144 |
| 図 7.4.4 | 大型トラックの総エネルギー消費量の比較（ケース 2） | 145 |
| 図 7.4.5 | 大型トラックの総エネルギー消費量の比較（ケース 3） | 146 |
| 図 7.4.6 | 中型トラックの総エネルギー消費量の比較（ケース 1） | 147 |
| 図 7.4.7 | 中型トラックの総エネルギー消費量の比較（ケース 2） | 148 |
| 図 7.4.8 | 中型トラックの総エネルギー消費量の比較（ケース 3） | 149 |
| 図 7.4.9 | 小型トラックの総エネルギー消費量の比較（ケース 1） | 150 |
| 図 7.4.10 | 小型トラックの総エネルギー消費量の比較（ケース 2） | 151 |
| 図 7.4.11 | 小型トラックの総エネルギー消費量の比較（ケース 3） | 152 |
| | | |
| 表 7.2.1 | トラックの分類（道路運送車両の保安基準による分類） | 127 |
| 表 7.2.2 | トラックの分類（トラックメーカーによる分類） | 127 |
| 表 7.2.3 | 検討対象とした各トラックのエネルギー消費量分析に用いるデータ | 127 |
| 表 7.3.1 | 2t トラックの素材別重量およびエネルギー消費量 | 130 |
| 表 7.3.2 | 乗用車，2t トラック，4t トラックの部位別重量 | 131 |
| 表 7.3.3 | 2t トラックの部位別素材別重量 | 132 |
| 表 7.3.4 | 軽量化前の大型トラックの部位別重量 | 133 |
| 表 7.3.5 | 軽量化後の大型トラックの部位別重量 | 134 |
| 表 7.3.6 | 軽量化前の中型トラックの部位別重量 | 135 |
| 表 7.3.7 | 軽量化後の中型トラックの部位別重量 | 135 |
| 表 7.3.8 | 軽量化前の小型トラックの部位別重量 | 136 |
| 表 7.3.9 | 軽量化後の小型トラックの部位別重量 | 136 |
| 表 7.3.10 | CFRP トラックの素材製造段階におけるエネルギー消費量 | 137 |
| 表 7.3.11 | トラックの部品・車体製造段階におけるエネルギー消費量 | 137 |
| 表 7.3.12 | トラックの走行段階におけるエネルギー消費量 | 139 |
| 表 7.3.13 | トラックのライフサイクルにおけるエネルギー消費量 | 139 |
| 表 7.4.1 | 総走行距離を変化させた場合の大型トラックのエネルギー消費量の変化 | 141 |
| 表 7.4.2 | 総走行距離を変化させた場合の中型トラックのエネルギー消費量の変化 | 141 |
| 表 7.4.3 | 総走行距離を変化させた場合の小型トラックのエネルギー消費量の変化 | 142 |
| 表 7.4.4 | 大型トラックの総エネルギー消費量の比較（ケース 1） | 144 |
| 表 7.4.5 | 大型トラックの総エネルギー消費量の比較（ケース 2） | 145 |
| 表 7.4.6 | 大型トラックの総エネルギー消費量の比較（ケース 3） | 146 |
| 表 7.4.7 | 中型トラックの総エネルギー消費量の比較（ケース 1） | 147 |

| | | |
|----------|----------------------------|-----|
| 表 7.4.8 | 中型トラックの総エネルギー消費量の比較（ケース 2） | 148 |
| 表 7.4.9 | 中型トラックの総エネルギー消費量の比較（ケース 3） | 149 |
| 表 7.4.10 | 小型トラックの総エネルギー消費量の比較（ケース 1） | 150 |
| 表 7.4.11 | 小型トラックの総エネルギー消費量の比較（ケース 2） | 151 |
| 表 7.4.12 | 小型トラックの総エネルギー消費量の比較（ケース 3） | 152 |

第 8 章

| | | |
|---------|------------------------------|-----|
| 図 8.2.1 | 武蔵野市のコミュニティバス（ムーバス） | 156 |
| 図 8.2.2 | 旅客部門の輸送機関別エネルギー原単位（2003 年度） | 156 |
| 図 8.2.3 | 原付以上運転者（第一当事者）の年齢層別交通事故件数の推移 | 157 |
| 図 8.4.1 | CITY（Kutsenits 社） | 163 |
| 図 8.4.2 | ポンチョ（日野自動車） | 163 |
| 図 8.4.3 | リエッセ（日野自動車） | 164 |
| 図 8.4.4 | レトロバスの例 | 164 |
| 図 8.4.5 | 個性的なデザインのバスの例（1） | 164 |
| 図 8.4.6 | 個性的なデザインのバスの例（2） | 165 |
| 図 8.5.1 | 各バスの FEM モデル | 167 |
| 図 8.5.2 | 曲げ剛性の解析 | 169 |
| 図 8.5.3 | 曲げ剛性の分析におけるパラメーター | 169 |
| 図 8.5.4 | ねじり剛性の解析 | 171 |
| 図 8.5.5 | ねじり剛性分析に用いるパラメーター | 171 |
| 図 8.5.6 | 強度の解析 | 172 |
| 図 8.5.7 | 強度解析における相当応力分布図 | 174 |
| 図 8.6.1 | 自動車の車両総重量と燃費の関係 | 180 |
| 図 8.6.2 | トラックのライフサイクルにおけるエネルギー消費量 | 181 |
| 図 8.7.1 | コミュニティバス普及による省エネルギー効果 | 183 |
| 図 8.7.2 | 燃費の向上による省エネルギー効果 | 183 |
| 図 8.7.3 | 乗車率の向上による省エネルギー効果 | 184 |
| 表 8.3.1 | コミュニティバスの導入状況 | 158 |
| 表 8.4.1 | GFRP のバスへの適用 | 165 |
| 表 8.5.1 | 検討対象としたバスのサイズ | 166 |
| 表 8.5.2 | スチールと CFRP の材料特性 | 168 |
| 表 8.5.3 | スチール製大型バスの剛性解析結果 | 173 |
| 表 8.5.4 | 各 CFRP バスの軽量化率 | 175 |

| | | |
|---------|-----------------------------------|-----|
| 表 8.6.1 | スチールバスの素材製造段階におけるエネルギー消費量..... | 177 |
| 表 8.6.2 | CFRP バスの素材製造段階におけるエネルギー消費量..... | 177 |
| 表 8.6.3 | スチールバスの部品・車体製造段階におけるエネルギー消費量..... | 178 |
| 表 8.6.4 | バスの部品・車体製造段階におけるエネルギー消費量..... | 178 |
| 表 8.6.5 | バスの走行段階でのエネルギー消費量..... | 179 |
| 表 8.6.6 | トラックのライフサイクルにおけるエネルギー消費量..... | 181 |

第 1 章 序論

1.1 本研究の背景

運輸とは「旅客および貨物を、主として鉄道・自動車・船舶・航空機によって運び送ること」であり[1]，社会の基盤となるものの 1 つである．運輸は旅客輸送と貨物輸送に大別できる．旅客輸送においては，人間の生活圏の拡大に伴う日常移動量の増加と，ライフスタイルの変化による余暇の増加や輸送手段の快適性の追求により，また貨物輸送においては，社会構造の変化による生産の集中と拡大により，両輸送部門の移動量，輸送量とも増加傾向にある．

現代の主要な交通手段としては，人力的な徒歩，自転車などに加え，自動車，鉄道，船舶，航空といった動力装置による手段が挙げられる．これらのうち，鉄道，船舶，航空は基本的に公共交通機関である．駅，港湾，空港間の輸送となるために，他の手段とは結節点での乗り換えや積み替えを必要とする．これに対し，自動車，特に乗用車は「個別交通機関」としての性格を有している．これは各個人が自分の目的に応じて個々の交通活動を行うことを意味しており，このためには各自が乗用車を所有し自分で運転することが理想である[2]．自動車は短距離から長距離まで任意の 2 点間を自由に移動できる唯一の交通手段のため，着実に需要は増大し今後もその傾向は続くと考えられる．

現代の人間活動を環境影響の面から考える場合，産業・民生・運輸の 3 つの部門に分けて各部門の特徴をとらえることが多い．環境負荷の指標としてエネルギー消費量に注目すると，日本における 1973 年度から 2003 年度の部門別最終エネルギー消費量割合の推移は，産業部門が 63%から 47%に低下しているのに対し，民生部門は 18%から 27%，運輸部門は 16%から 24%に増加している．また，運輸部門の CO₂ 排出量のうち化石燃料起源のものは 96%であり，産業部門の 63%，民生部門の 38%に比べてその高さは際だっている．このように，2 度にわたるオイルショック以後，コスト意識が高く各種規制に縛られている産業部門ではエネルギーの削減が積極的に進められてきている．一方運輸部門では省エネルギー化や化石燃料からの脱却が進まず，依然としてその動力のほとんどを石油に頼っている．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，エネルギー起源 CO₂ 排出量でみると，自動車からの排出は全体の約 5 分の 1 である．

世界で消費されるエネルギーの大半は，石油，天然ガス，石炭などの化石燃料を由来としている．産業革命以後膨大な量のエネルギーを消費してきた結果，近い将来に化石燃料が枯渇するのではないかと危惧されている．今のペースで消費が続けば石油が約 41 年，天然ガスが約 63 年，石炭が約 212 年で枯渇すると予測されている[3]．その上，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。例えば中国は自動車生産台数では2010年頃には日本を抜いて世界第2位の生産国となり、自動車保有台数では2020年頃に1~1.5億台、2030年には3億台を保有する世界第1位の自動車保有国まで急成長すると予測されている[4]。自動車によるエネルギー使用量の増加は大規模なCO₂排出から地球温暖化につながるため、これをいかに抑制するかが先進諸国の最大の共通課題となっており、今後は途上国でも厳しい規制が求められる。

1.2 本研究の目的

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。特に、日本とヨーロッパでは燃費規制によりCO₂排出削減目標を示し、低燃費車導入促進のために税制優遇などの政策を導入している。燃費向上の手段には、エンジン・駆動系の高効率化、走行抵抗の低減、車体の軽量化が挙げられるが、最も注目されているのは車体の軽量化である。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。2002年4月の総合科学技術会議でも経済産業省から国際競争力強化の重要課題として、省エネルギーで安全性の高い次世代自動車を実現するための、軽量かつ強度に優れた革新的な素材の開発が取り上げられている[5]。

先進複合材料の中でも繊維強化プラスチック（FRP：Fiber Reinforced Plastics）は、1970年代の2度のオイルショック以後、航空機メーカーと自動車メーカーが燃費向上のために軽量化率の高い材料として研究開発に力を入れてきたが、自動車用途にはコスト的に見合わず、その後は航空機用途として発展してきた。また1990年代に入って、石油への依存からの脱却と地球温暖化対策の両面から自動車軽量素材（ハイテン鋼、アルミニウム、マグネシウム、FRP）の検討が再燃した。例えば米国でのPNGV（Partnership for a New Generation of Vehicles, 1993~2001）ではCFRP（炭素繊維強化プラスチック）により2011年までに47%軽量車を製造するという目標が掲げられた。また国際鉄鋼連盟ではULSAB-AVC（Ultra Light Steel Auto Body - Advanced Vehicle Concept）が立ち上げられ、超高張力鋼で30%軽量車実現が目標に掲げられた。しかしながら、量産車にこれらの軽量化素材を大量に使用するには物性、コスト、成形速度、リサイクル性などの面から解決すべき問題が多い。自動車の樹脂化率は向上してきたが、燃費向上のために積極的に利用されたというよりは、安全設備や快適設備の付加のための重量増を押さえるあるいは相殺するために、自動車の基本機能以外の付加的部品用として採用されてきた。そして結果的に安全性や快適性は樹脂化により大幅に向上したものの、適用量が小さいため燃費向上への寄与はそれほど大きくなかったと言える。

しかしながら、欧米を中心として燃費向上を目的とした自動車の樹脂化技術は急速に進んでおり、超高級車では既にボディーなどが半分以下の重量になったことを謳って市場に

投入され始めている。このことから考えると、コスト、安全性、成形速度、リサイクル性などが解決されれば、量産車が先進複合材料により大幅に軽量化されて燃費が向上し、エネルギー消費量の削減に大きく貢献する可能性がある。

そこで本研究の目的を、近年の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 を用いて自動車を軽量化したときの省エネルギー効果を評価し今後の開発目標を示すこと、とした。このとき用いた CFRP は、航空機やレーシングカー、超高級車に用いるような高スペックで高コストのものではなく、量産車に適した力学特性のものを想定した。それでも一般に CFRP は製造時に多くのエネルギーを消費すると言われているが、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ルギー効果があるのかどうかということである。そのため本研究では、LCA（ライフサイクルアセスメント）を用いてライフサイクル全体での省エネルギー効果を定量的に求めた。

これまで乗用車の LCA はいくつも行われてきたが、高価な CFRP を量産車に大量に用いることは想定されなかったので、CFRP 車が LCA の対象になることはなかった。また、CFRP を用いた製品の LCA を行うにあたって、CFRP の製造原単位データは必要不可欠である。しかしながら、CFRP の原単位に関してこれまで議論されたことはあるものの、それは航空機用の高スペックの CFRP であった。そもそも主要材料である炭素繊維のインベントリデータを把握するのが非常に困難であったので、十分な信頼性があるとは言い難かった。そこで、本研究では近年再計算された炭素繊維の原単位を用いて、量産車用の CFRP の原単位をリサイクルすることまで想定して検討した。そしてその原単位を用いて乗用車だけでなく、これまで LCA がほとんど行われてこなかったトラック、バスについても CFRP で軽量化したときの省エネルギー効果を評価した。

このように、次世代の自動車軽量化材料として期待される CFRP に注目し、その省エネルギー効果を初めて定量的に検討し開発の方向性を示したことは、大変意義のあることと考える。

1.3 本論文の構成

本論文は、9つの章より構成される。

まず本章では、本研究の序論として、研究の背景、目的を説明する。

第2章では、序論で触れたエネルギー需給分析について、さらに詳しく述べる。特に、本研究で扱う日本の運輸部門に焦点を絞り、環境負荷の現状とその要因分析、さらに排出量予測と今後の対策について論じる。

第3章では、運輸部門の環境負荷を削減する上で、最も効果が期待されている燃費向上について述べる。燃費向上が良い理由とその手段として車両の軽量化が適していることを示したあと、軽量化材料としていくつかの素材を比較検討し、CFRP が特に優れていること

を結論づける。

第4章では、量産車に適した物性を持つCFRPの開発目標を示す。まず、自動車の部材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の2つに大きく分け、軽量化と低コスト化の観点からどのようなCFRPが適当かを検討する。次に、CFRTP（熱可塑性CFRP）について複合則から最適な炭素繊維体積含有率の理論値を算出する。

第5章では、環境負荷を定量的に分析する手法の1つであり、本研究でも用いるLCAの概要を説明した後、LCAを行う上で重要な材料の製造原単位について詳述する。まず、これまで一般的に用いられてきたスチールの原単位について解説する。次に、軽量化材料であるCFRPの原単位を、フレッシュ材のみを用いた場合と、3R（リデュース、リユース、リサイクル）を行った場合に分けて検討する。その中で、自動車のリサイクルの現状についても解説する。

第6章以降では、第5章の原単位を用いてLCAを行うことで、輸送機器をCFRPによって軽量化した場合に、どれだけ省エネルギー効果があるのかを評価する。

第6章では、従来のスチール乗用車と3タイプのCFRP軽量乗用車の環境負荷を、LCAで比較する。

第7章では、CFRPによるトラックの軽量化効果を評価する。まず、トラックを大型・中型・小型の3サイズに分類して、それぞれについて従来車とCFRP車の環境負荷を比較する。次に、総走行距離と積載量の変化が省エネルギー効果にどのような影響を及ぼすか分析する。

第8章では、CFRPによるバスの軽量化効果を評価する。まず、バスを大型・中型・小型・マイクロの4サイズに分類して、それぞれについてどれだけCFRPで軽量化できるかをFEM（有限要素法）で解析する。そして、その結果をふまえて従来車とCFRP車の環境負荷を比較する。次に、バスの中でも特に普及の促進が進められているコミュニティバスに注目し、運用形態が省エネルギー効果にどのような影響を及ぼすか分析する。

最後に第9章において、本研究で得られた知見をまとめ、今後の課題や発展性についても言及する。

第2章 エネルギー需給分析

2.1 緒言

前章では、エネルギー需給分析に簡単に触れ、運輸部門のエネルギー消費量を抑える技術を早急に開発する必要があると述べた。本章では、このエネルギー需給分析について詳述する。

まず世界全体におけるエネルギー需給の現状と今後の予測と、日本全体のエネルギー需給について述べる。次に日本の運輸部門に焦点を当てて、環境負荷の現状とその要因を分析する。最後に運輸部門の排出量予測とその対策について解説し、自動車の燃費改善が環境負荷削減の切り札として期待されていることを述べる。

2.2 世界のエネルギー需給^[1]

2.2.1 エネルギー需給の現状

現在世界中で大量のエネルギーが消費されており、今後もさらに増加することが予想される。図 2.2.1 は OECD 諸国と非 OECD 諸国の一次エネルギー消費量の推移を示したものであり、年々増加しているのがわかる。また地域別に見ると、世界中で消費されているエネルギーの約 6 割を、人口が 2 割程度でしかない OECD 諸国で消費しているのが現状である。

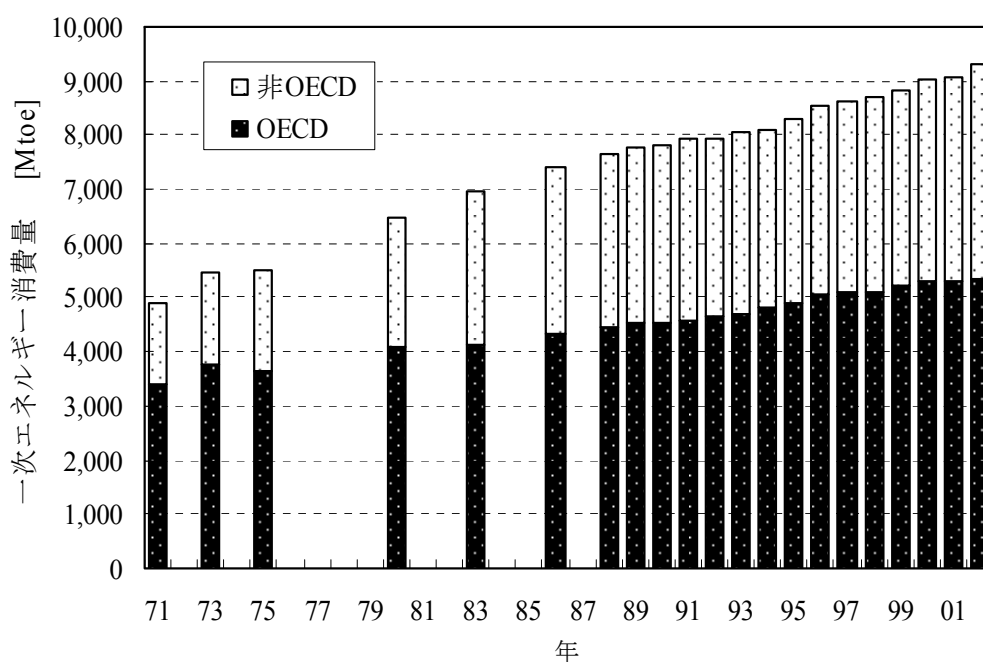
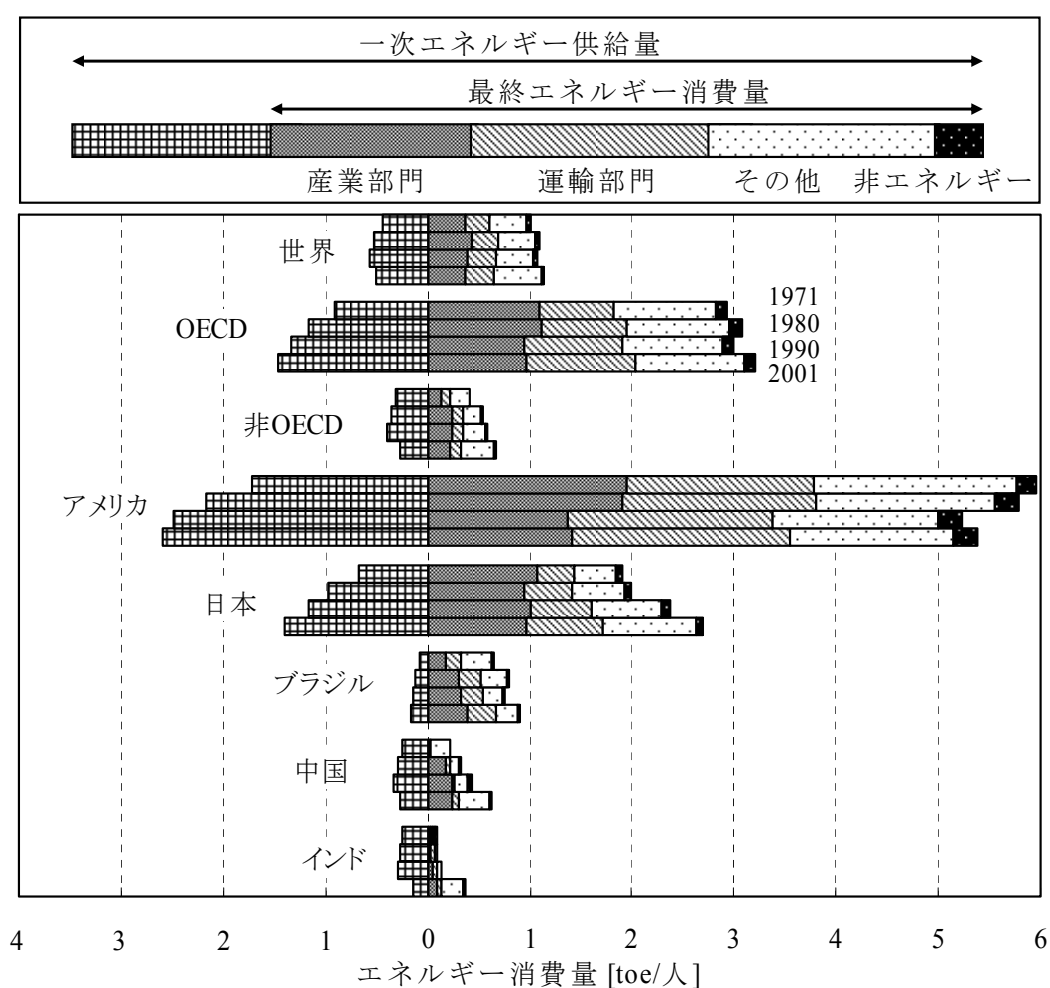


図 2.2.1 OECD 諸国と非 OECD 諸国の一次エネルギー消費量の推移^[2]

図 2.2.2 に地域別の 1 人当たりの一次エネルギー供給量および最終エネルギー消費量を示す。0 のラインより右側は最終エネルギー消費量を産業・運輸・その他・非エネルギーの各部門別に示し、左側は発電時などに生じるロスを表す。つまり全体では一次エネルギー消費量を示すことになる。非 OECD 諸国は、まだ 1 人当たりのエネルギー消費量が OECD 諸国に比べて少ない。2001 年における 1 人当たりの一次エネルギー供給量は、OECD 諸国が 4.72 (toe/人)、非 OECD 諸国が 0.76 (toe/人) である。ここで、toe (ton of oil equivalent) は石油換算トンのことで、1toe は 10^7 kcal (41,900MJ) である。



(注) IEA 資料より作成。

図 2.2.2 世界の 1 人あたりの一次エネルギー供給量と部門別最終エネルギー消費量

非 OECD 諸国における 1971 年から 2001 年までの最終エネルギー消費量の伸びは 31% である。一方中国、インドにおけるそれはそれぞれ 92%、57% であり、非 OECD 諸国の平均を大きく上回っている。仮に現在の中国の国民 1 人当たりのエネルギー消費量が OECD 諸国並みの 4.72 (toe/人) になったとすると、中国の総エネルギー消費量は 6,019Mtoe となる。これは、現在の世界の一次エネルギー消費量 9,043Mtoe の約 3 分の 2 に相当する値である。加えて、中国をはじめ非 OECD 諸国は大幅な人口増加が予想されている (図 2.2.3)。2050 年には、世界人口は 2000 年の約 1.5 倍になると予想されている。その中で、OECD 諸国、非 OECD 諸国ともに現在の OECD 諸国の水準でエネルギー消費を続けることは不可能である。

また図 2.2.2 から非 OECD 諸国の運輸部門の割合が小さいことがわかる。しかしながら次節で示す日本の例からもわかるように、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の次元で今後増加していくものであり、対策の必要性が高い部門である。

2000 年の時点で、世界の一次エネルギー消費における石油依存度は OECD 諸国平均で 40.8%、非 OECD 諸国平均で 34.9% である。さらに、図 2.2.4 はエネルギー源別にみた世界の部門別エネルギー消費割合であり、運輸部門はほとんど石油に依存していることがわかる。今後中国、インドをはじめとする発展途上国での急激なモータリゼーションにより石油は供給不足となり、石油の代わりとして注目されている天然ガスも同様に不足していくと考えられる。

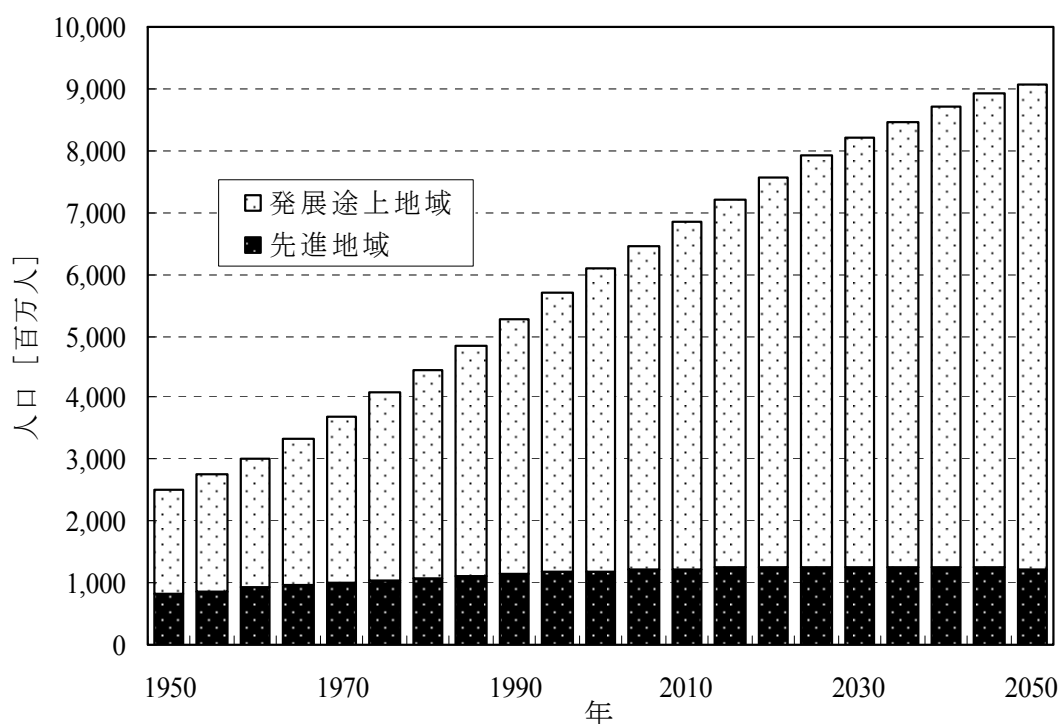


図 2.2.3 世界の人口予測 (中位推計) [3]

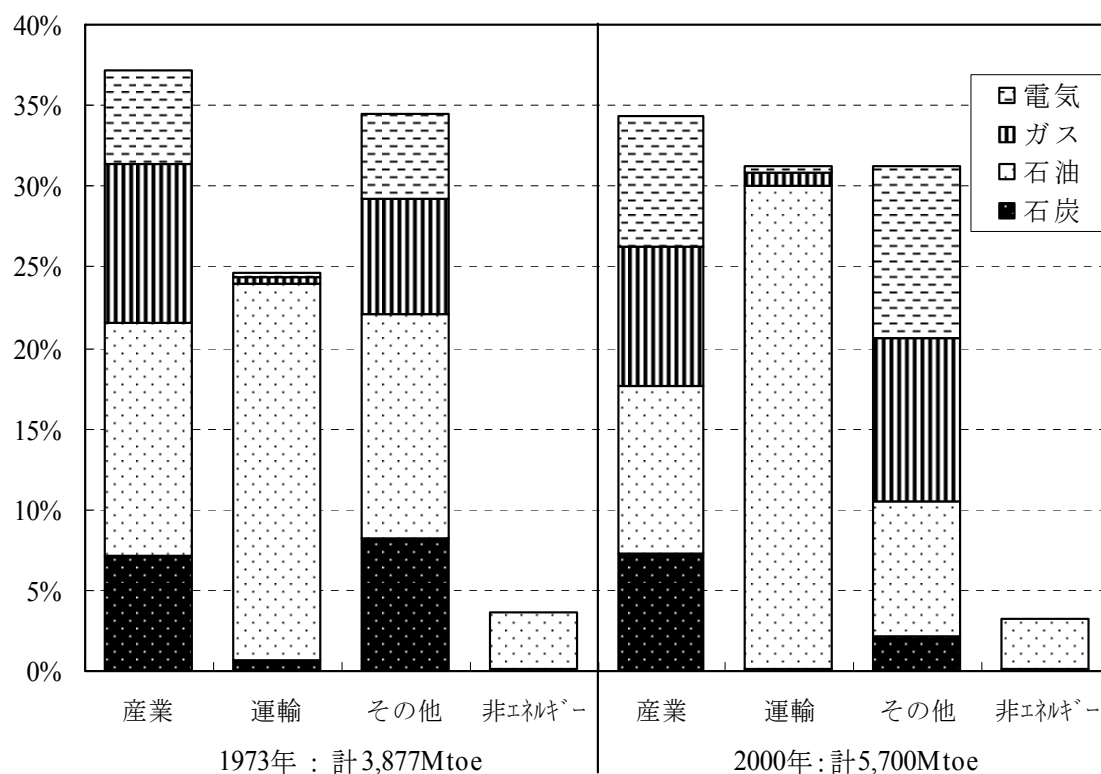


図 2.2.4 世界の部門別最終エネルギー消費割合 (文献[4]より作成)

2.2.2 人口推移予測

2.2.2.1 2050 年までの人口推移予測

2050 年までの世界人口の推移は前項で触れたが、2002 年に国連の人口部会により図 2.2.3 のように予測されている。2002 年における国連人口部会の予測は、それまでの予測に比べて 2 点大きく変わっている。1 点目は出生率の見通しを下方修正したこと、2 点目は HIV の感染が人口の変化にもたらす影響をそれまでより大きく見積もったことである。この変化によりそれまでの予測に比べて 2050 年時点における人口は減少している。以下に予測の要点をまとめる。

- ・ 出生率は低下するものの、今後 50 年間の間に人口は現在の 63 億人から 90 億人にまで増加する (中位推計)。また、現在の人口増加率を維持した場合 2050 年の世界人口は 128 億人、出生率を中位推計の半分と仮定した下位推計では 74 億人である。
- ・ 世界人口の増加分は現在年間約 7700 万人だが、その半分はインド・中国・バングラデシュ・パキスタン・ナイジェリア・アメリカ合衆国の 6 カ国によるものである。
- ・ 先進国では今後 50 年間に人口はほとんど変化しない。中には減少することが予測されている国もある。日本は 14%、イタリアは 22%、東欧や旧ソビエト連邦の国々には 30～50%の減少が予測されている。
- ・ 一方、途上国では着実に人口が増加し、現在の 49 億人から 77 億人にまで達する。

- 全体的に出生率は低下するが、2050年時点において人口を維持するためのレベルである出生率2.1を上回る国は依然として多い。
- 平均余命は現在の65歳から74歳に上昇する。しかし、先進国・発展途上国・後発発展途上国ごとの平均余命の差はそれほど縮まらない。特に後発発展途上国においてはHIVの影響が大きい。
- 60歳以上の高齢者は現在約6億人だが、2050年にはその3倍を超える19億人まで上昇する。世界人口に占める割合では、現在8%だが2050年には20%近くまで上昇する。

2.2.2.2 2300年までの人口推移予測

2300年までの世界人口の推移は、2003年に国連の人口部会により図2.2.5のように予測されている。予測の前提を以下の通りである。

- 全てのシナリオについて同じ平均寿命の伸びを仮定。
- 国ごとの予測をする際、移民はゼロと仮定。
- 中位推計では2050年以降、出生率が人口補充水準（人口の増減が見込まれない水準）である2.1を下回り、その後2.1に達するものとする。高位・低位では、中位推計において人口補充水準を維持する期間にそれぞれ2.35、1.85の出生率を維持するものとする。
- 国連人口部会は2002年に2050年までの人口予測を行った。各位の推計は2002年度の高位・中位・低位推計の2050年の予測値からスタートするものとする。

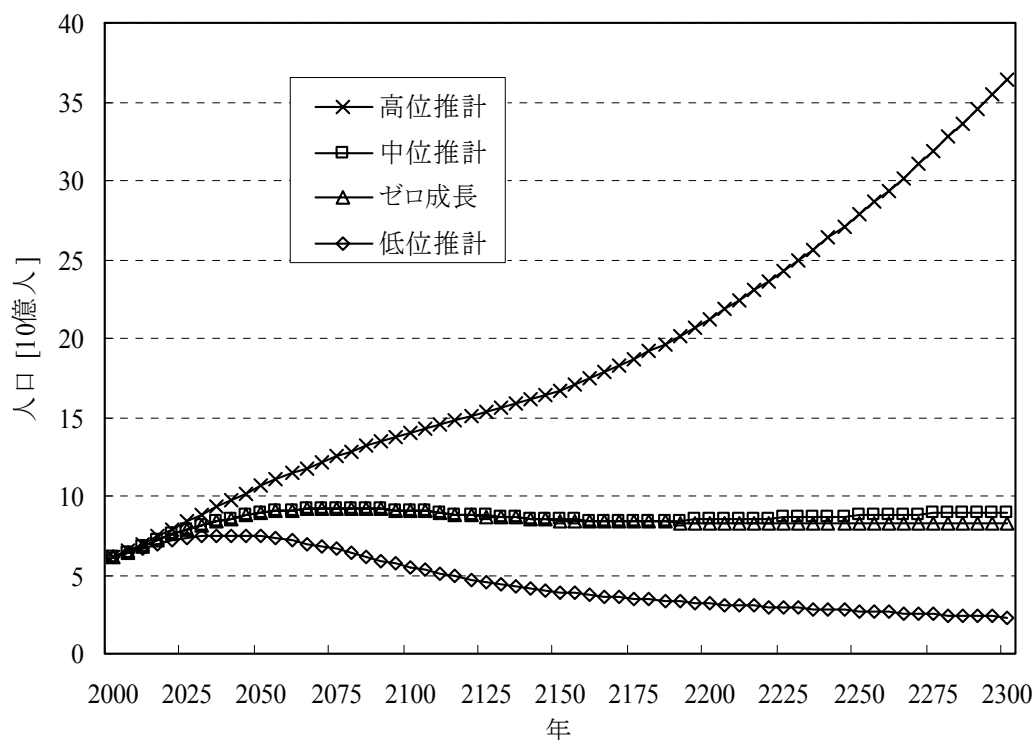


図 2.2.5 2300年までの世界人口推移予測[5]

以下に予測の要点をまとめる。

(1) 中位推計

2075 年に人口の極大値である 93 億人に達し、その後は出生率の低下により 2175 年には 83 億人にまで下がる。その後、出生率が 2.1 を維持すると、平均寿命が延びたことのみによって 2300 年に 90 億人に達する。出生率が 2.1 を若干下回り、寿命の延びによる人口増加の効果と相殺することにより、2175 年から 2300 年までの世界人口が 83 億人で一定であるゼロ成長シナリオもある。

(2) 高位推計と低位推計

高位推計では 2175 年以降の出生率を 2.35、低位推計ではそれを 1.85 としている。世界人口は出生率に対して非常に敏感で、高位推計では 2300 年に 364 億人、低位推計では 24 億人になる。

(3) 成長維持推計

1995 年から 2000 年までの成長率を維持したまま 2300 年を迎えると、世界人口は 134 兆人になる。

(4) 人口分布の変化（中位推計の例）

2000 年現在アフリカの人口は全体の 13%であるが、2300 年には 23%に達する。一方アジアは 61%から 55%に、ヨーロッパは 12%から 7%に減少すると予測される。

(5) 寿命の延び

寿命の延びは際限なく続くとして推定を行っている。2300 年の日本人の寿命は男性 104 歳、女性 108 歳となる。

(6) 人口構成の変化

低位推計と中位推計では人口構成の大幅な変化が見込まれており、世界的な高齢化が起こる。また、どの推計においても 2300 年には労働可能人口に対する扶養人口の割合が 1 を超える。80 歳以上の人口割合は現在の 1.1%から 17%までに上昇する。

2.2.3 エネルギー消費量推移予測

今世紀前半のエネルギー消費量の推移について様々な機関が予測を行っている。そのうちの代表的なものとして IEA と IPCC の予測の要点をまとめる。

2.2.3.1 IEA によるエネルギー消費推移予測

2000 年から 2030 年の世界の経済成長率を年平均 3.0%(OECD2.0%, 市場経済移行国 3.1%, 発展途上国 4.1%)との前提をおく。すると、世界の一次エネルギー供給は 2000 年の 9,180Mtoe から年平均 1.7%で増加し、2030 年には 15,270Mtoe (2000 年比で 66%増)に達すると予測されている。

この見通しを地域別に見ると、今後の世界の一次エネルギー供給増加分のうち 6 割以上は発展途上地域で発生する（図 2.2.6）。また、その中でも特にアジア地域のエネルギー需要

の増大が予測されている。先進地域における 2000 年から 2030 年の年平均増加率が 1.0%にとどまるのに対し、アジアを中心とする発展途上地域では 2.9%とほぼ 3 倍の増加率が予測されている。その結果、世界の一次エネルギー供給に占める先進地域のシェアは 2000 年の 58%から 2030 年には 47%に低下し、逆に発展途上地域のシェアは 30%から 43%に増大すると見られている。

次に、この見通しをエネルギー源別に見ると、現在世界のエネルギーの太宗を占める石油は発展途上地域での堅調な需要増加などに支えられ、一次エネルギー供給全体と同程度の伸び率（1.6%）が予測されている。主力エネルギー源の中で最大の伸びを示すのは天然ガスで、発電用、産業用などを中心に今後 30 年間で平均 2.4%増加すると見られている。一方、石炭、原子力は一次エネルギー供給全体の伸びより低めの需要増加が想定され、特に原子力は欧米先進地域での新規開発が停滞していくと予測されていることから、2030 年までの年平均増加率はわずか 0.1%にとどまる。その結果、各エネルギーの 2030 年におけるシェアは、石油はほぼ現状並みの 38%、天然ガスは 28%にまでシェアを大きく増大させ、逆に石炭、原子力はそれぞれ 24%、5%まで低下する。依然として、石油、石炭、天然ガスなどの化石燃料がエネルギーの太宗（約 8 割）を占めると予測されている。なお、再生可能エネルギーは今後高い増加率が予測されるものの 2030 年でもそのシェアは 4%にとどまると見られる。

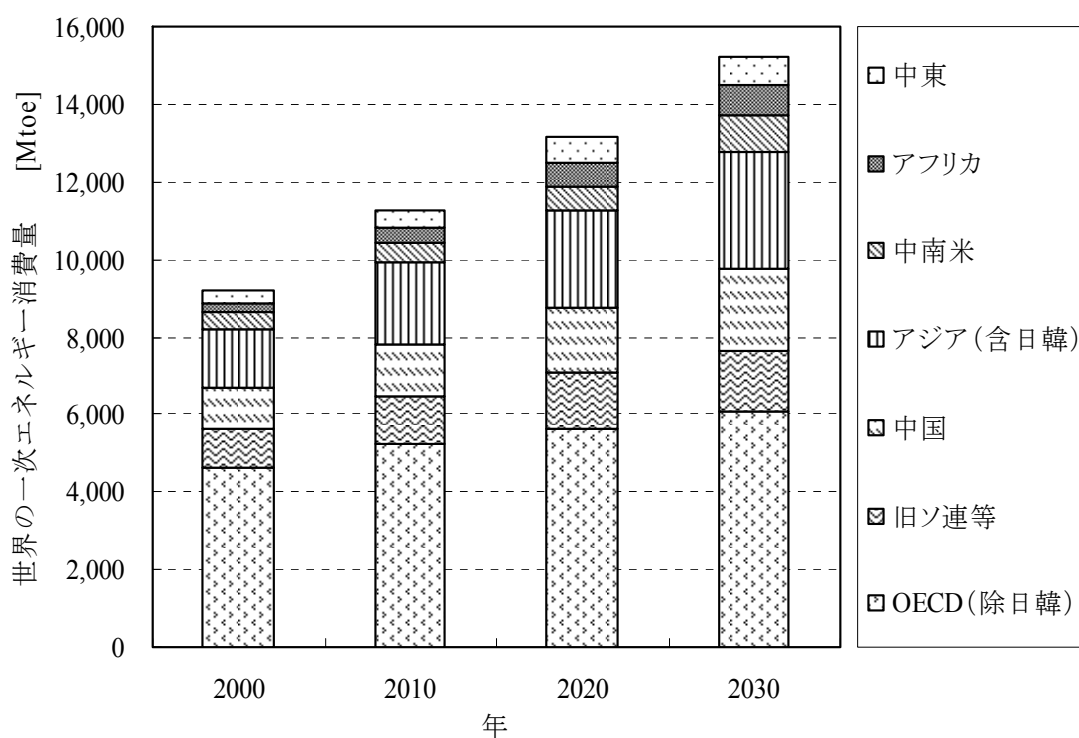


図 2.2.6 IEA による地域別世界の一次エネルギー需要予測[6][7]

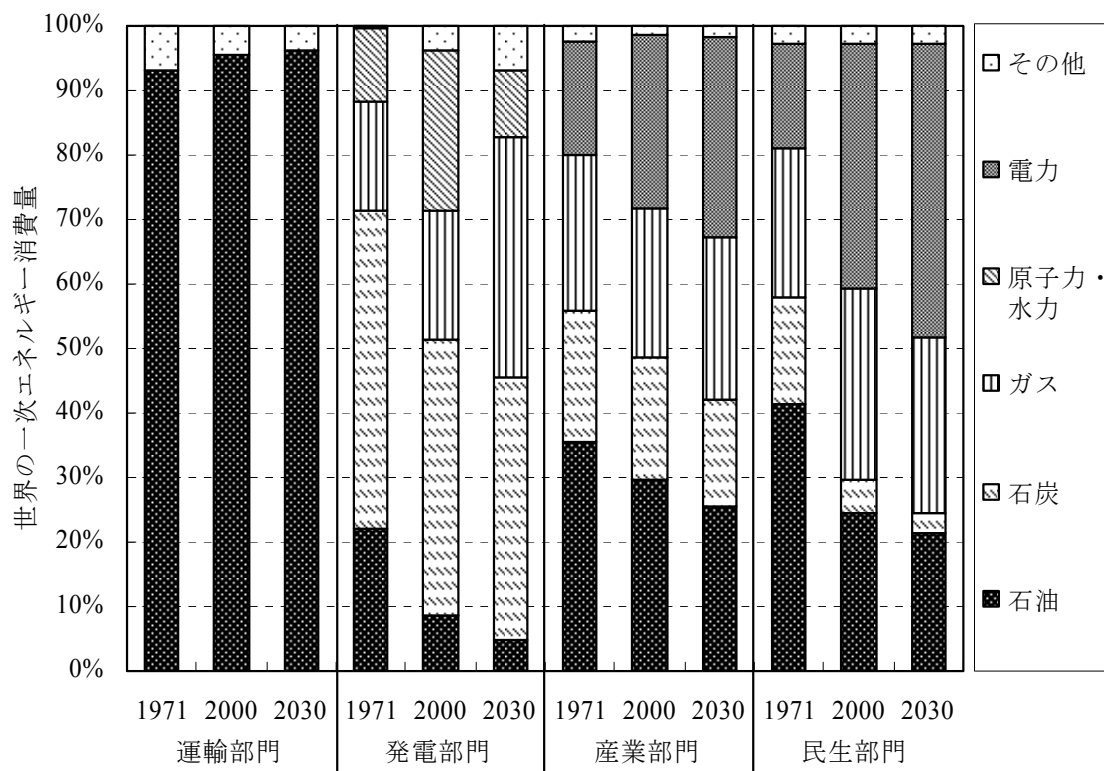


図 2.2.7 IEA による部門別に見たエネルギー源構成予測[6][7]

この見通しについて図 2.2.7 のように部門別にエネルギー源を見た場合、交通部門においては、依然として、石油が 9 割以上のシェアを持つと予測されている。発電部門においては、石油の割合は現状から半減の 4%程度にまで落ち込む一方で天然ガスの割合が大幅に増加し、31%に達すると予測されている。また、産業部門、民生部門では電力のシェアが増大すると予測されている。

2.2.3.2 IPCC によるエネルギー消費推移予測[8][9][10]

2000 年 3 月 15 日深夜、ネパールのカトマンズで開かれた気候変動に関する政府間パネル (Intergovernmental Panel on Climate Change : IPCC) 第 3 作業部会第 5 回会合において、IPCC の新しい排出シナリオが承認された。IPCC ではシナリオの作成に当たり、(1) 対策をとらない場合の気候変動の影響を評価するため、(2) 対策を行った場合の気候変動の影響を評価するため、(3) 異なる地域、部門、時間軸の中で、温室効果ガスの排出を抑制する可能性と費用を分析するため、(4) 国家間における削減可能量を取り決めるため、の各入力情報を挙げている。地球温暖化がどの程度進むかは、自然の不確実な挙動を別にすれば、われわれ人間社会がどのような方向に発展するかによって大きく左右される。つまり、将来の社会の描き方により、エネルギー利用や土地利用変化の予想が大きく変わり、温室効果ガスや硫黄酸化物などの排出シナリオが大きく変化する。その結果、温暖化の予測に大き

な差が生まれ温暖化対策にも大きな違いが出てしまう。

4 つの叙事的シナリオ（「ストーリー・ライン」と呼ばれる）は、いずれも地球温暖化の軽減のための政策を含んでいない。4 つの異なった発展方向を示し、今よりも一般的に豊かな将来世界を描いたものである。これら 4 つのシナリオは全て、一般に今日よりも豊かな将来の世界を描写したものである。これらのシナリオは、単純に「A1」、「A2」、「B1」、「B2」という記号で簡単に呼ばれる。以下に、各シナリオの概要を説明する。

（1）A1 シナリオ

低人口成長のもとでの高度経済成長シナリオ。高い技術開発が続く。世界の地域間の壁は縮小し、地域間の社会構造、1 人あたり所得とも、次第にある方向に収束に向かう。なお、世界エネルギー会議（WEC）の排出シナリオと同様、エネルギーにおける技術変化の方向性により、A1B（バランスの取れたエネルギー消費）、A1F1（化石燃料依存型）、A1T（高効率エネルギー技術主導型）という 3 つの分類がある。

（2）A2 シナリオ

地域主義の高いシナリオ。各地域はブロック化し、独自の伝統的文化の枠組みをあまり崩さない。また、自由貿易に基づく経済的効率性に高い価値をおかない。この結果、人口は最も増大し約 150 億人に達する。エネルギーも地域内の資源に依存する割合が高く、技術進歩も相対的に低い。このため、アジアなど石炭の豊富な地域では石炭依存度が低下せず、温暖化ガス排出も高水準となる。

（3）B1 シナリオ

低い人口成長、高度経済成長は A1 シナリオと同様であるが、低資源消費、クリーンエネルギーの開発および利用など、持続可能性に重きをおく形で技術選択が行われる。このため、経済水準自体は A1 シナリオよりも下がる。地域主義より、地球主義の価値観が主導であり、結果として温暖化ガス排出量は 2100 年で 1990 年水準を下回る。温暖化対策をことさら取らなくとも社会全体として環境を重視するため、温暖化対策の追加的費用は小さくなる。ただし、そのような社会の実現には現状からは大きな旋回が必要である。

（4）B2 シナリオ

比較的地域主義が強く、その範囲で経済・社会・環境の持続可能性が追求される。このため、世界は多様性を残す。ただし、環境保全も意識されているため、A2 シナリオほど極端な姿ではない。人口は国連の中位推計に従う。やや保守的であるが中庸なシナリオと言える。

数の多いシナリオを扱いやすくするため、各ストーリーライン（A1、A2、B1、B2）についてこの特徴を最もよく反映したものを代表的ケースとして選び出し、「標識シナリオ」と決められた。標識シナリオは他のシナリオに比べて、現実性が高いわけでも低いわけでもなく、あくまで各ストーリーラインを例証していると SRES（Special Report on Emission Scenarios）作成チームが考えたシナリオである。その 4 つのシナリオ（A1B-AIM、A2-ASF、B1-IMAGE、B2-MASSEGE）が示す 2050 年までの一次エネルギー供給量を図 2.2.8 に示す。

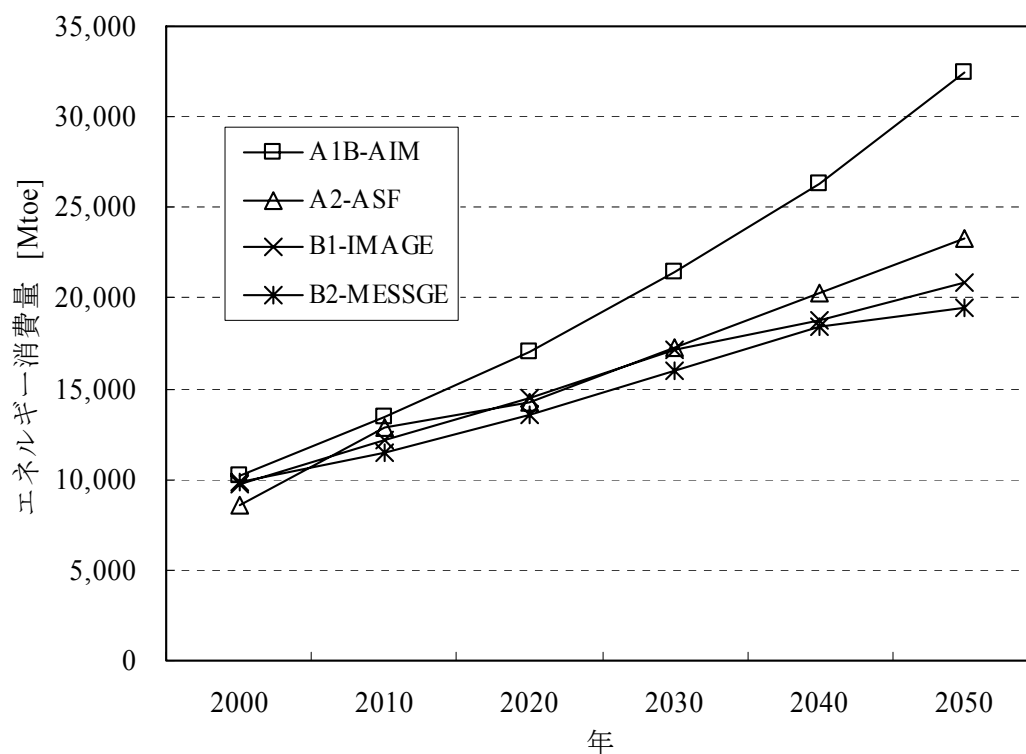


図 2.2.8 IPCC の 4 つの標準シナリオによる一次エネルギー需要予測[6]

2.3 日本のエネルギー需給

図 2.3.1, 図 2.3.2 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. 図 2.3.2 では, 1973 年を 100 として示している. 産業部門が最大のエネルギー消費部門であるが, 各種規制や企業努力などにより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, ライフスタイルと直結し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.

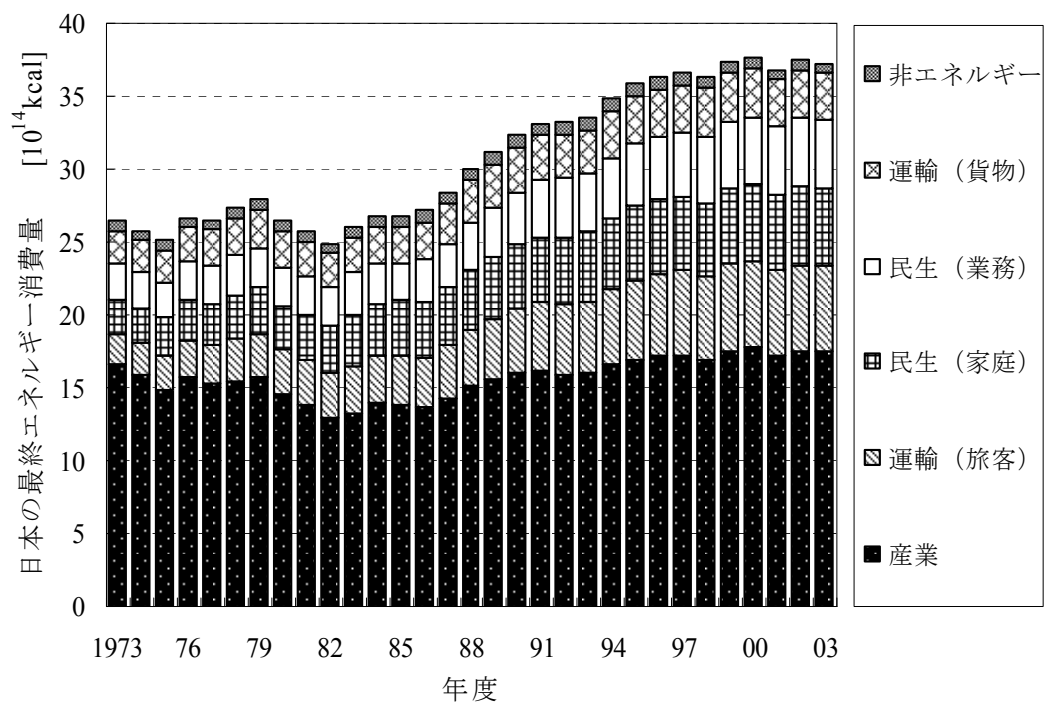
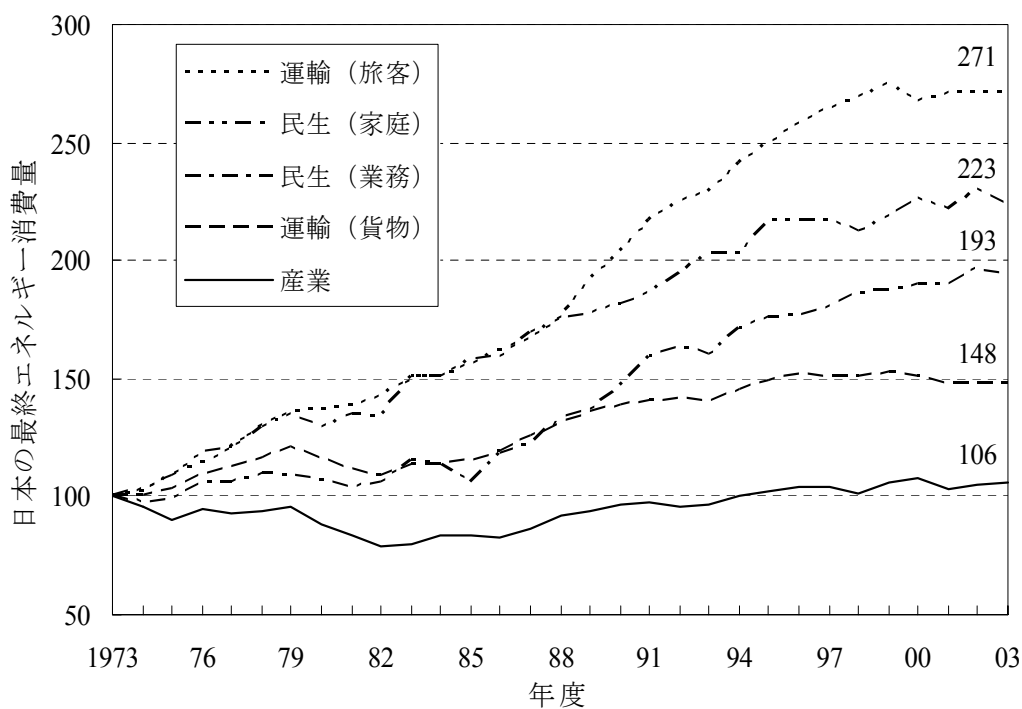


図 2.3.1 部門別最終エネルギー消費量の推移[2]



(注) 1973 年を 100 としている。

図 2.3.2 部門別最終エネルギー消費量の推移[2]

2.4 運輸部門における省エネ・温暖化防止対策

2.4.1 環境負荷の現状

日本における最終エネルギー消費量に占める運輸部門の割合は約 24%であり，そのうち約 87%が自動車での消費である．特に乗用車は運輸部門全体の約 55%である．2003 年度の運輸部門のエネルギー消費量は 1990 年度に比べ 22.1%増となっている．ただ，地球温暖化対策推進大綱の対策が実施され始めた 1997 年以降はほぼ横ばい傾向にあり（0.7%増），排出抑制の効果が見て取れる．輸送機関別エネルギー消費量の推移を図 2.4.1 に示す．

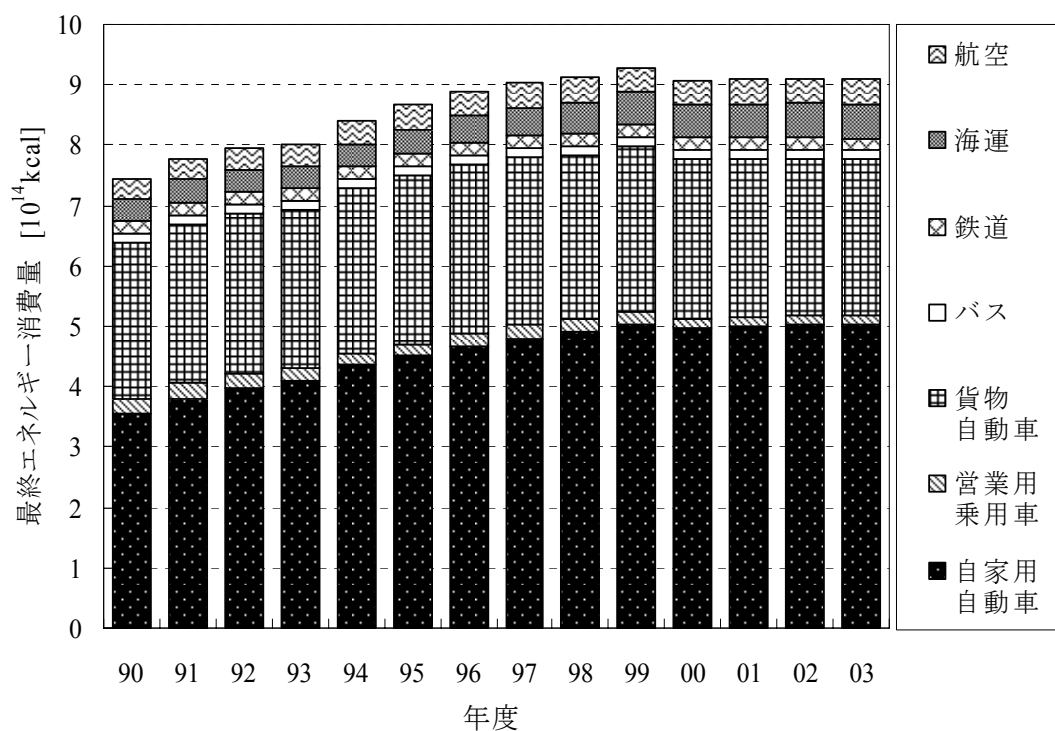


図 2.4.1 輸送機関別最終エネルギー消費量の推移[2]

2.4.2 要因分析

2.4.2.1 旅客部門

(1) 輸送量が増加

図 2.4.2 は旅客輸送量の推移である。2003 年度の旅客輸送量は、90 年度比で 9.9%増加した。なかでも「自家用乗用車」と「旅客航空」は 90 年度比で、それぞれ 17.7%増、61.4%増となっている。特に地方においては、公共交通機関の衰退が進み、自家用乗用車へのシフトが進み、ますます自動車中心のライフスタイルとなっている。

(2) 世帯当たり乗用車保有台数の増加

日本のモータリゼーションはすでに 1970 年代に浸透し、自動車は贅沢品ではなく日常的な道具である。一般に生活必需的な道具は、ある程度まで普及すればそれ以降は頭打ちになるが、自動車の場合はその傾向にはない。現在も保有台数や走行距離は増加を続け、車依存社会の傾向をますます強めている。特に大都市圏以外の地域では、地域内の日常的な交通は自家用乗用車によって担われており、生活の足として欠くことのできない存在となっている。また、高齢化により、今まで乗用車を運転しなかった世代がどんどん運転するようになると予想されるため、今後も保有台数や走行距離は増加していくと考えられる。

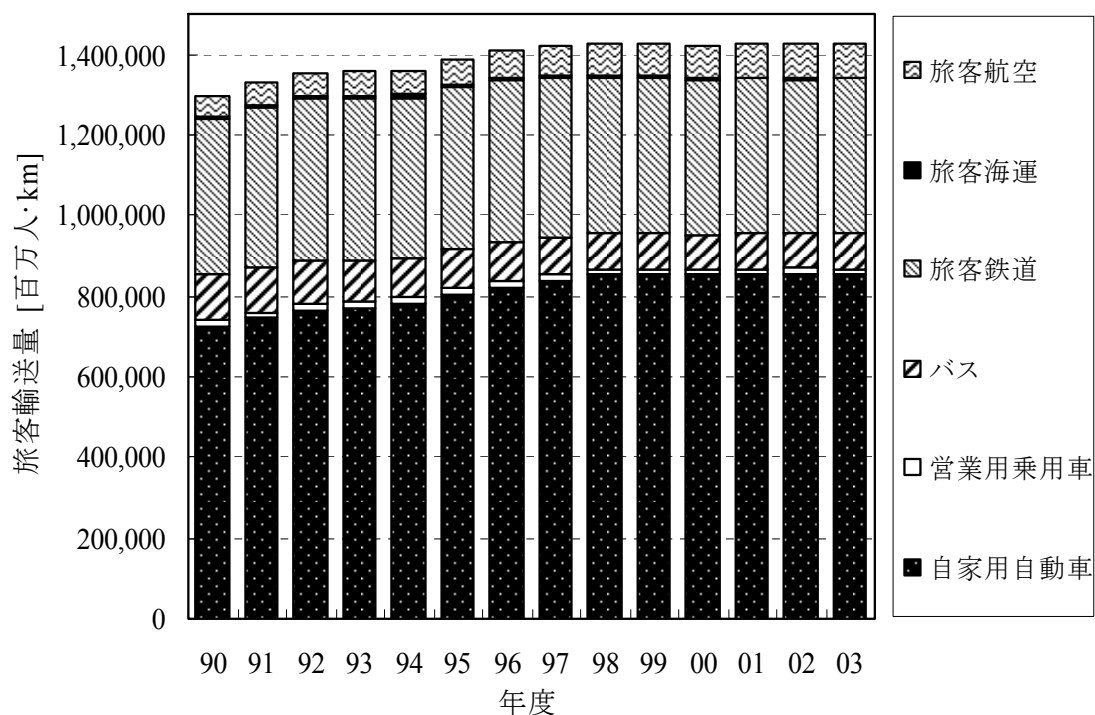


図 2.4.2 旅客輸送量の推移[2]

1 世帯当たりの保有台数は一貫して上昇していて、2003 年度の 1 世帯当たり乗用車保有台数は、1.09 台/世帯であり、90 年度比で 31.3%増である。あわせて、複数保有率も伸びている。1 世帯当たり保有台数は、地方圏で大きく大都市圏で小さい。特に東京にあっては伸び率がマイナスに転じるなど地域間で相当の格差がある。

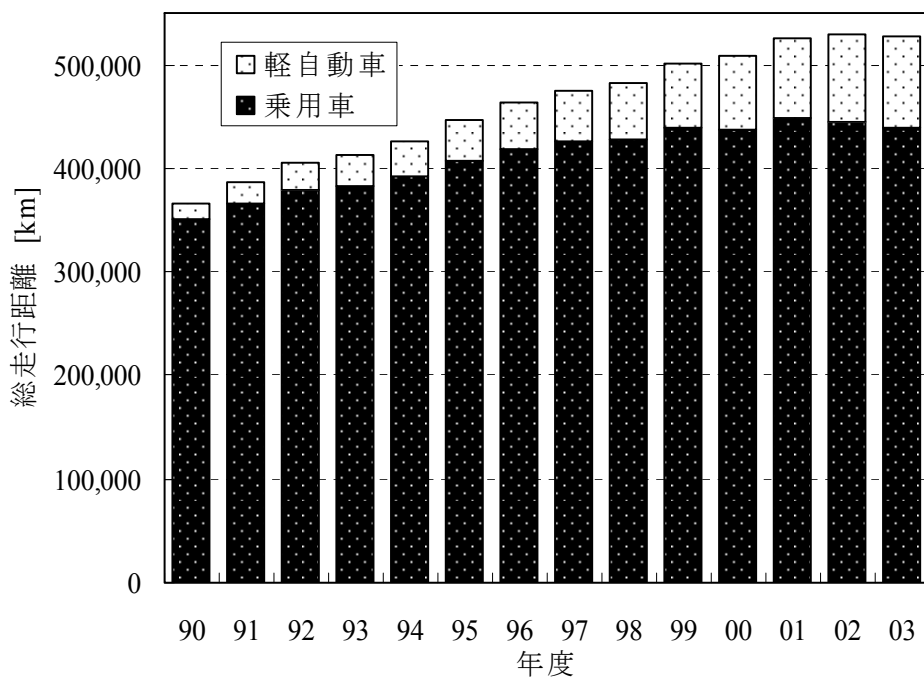


図 2.4.3 自家用乗用車の総走行距離の推移[2]

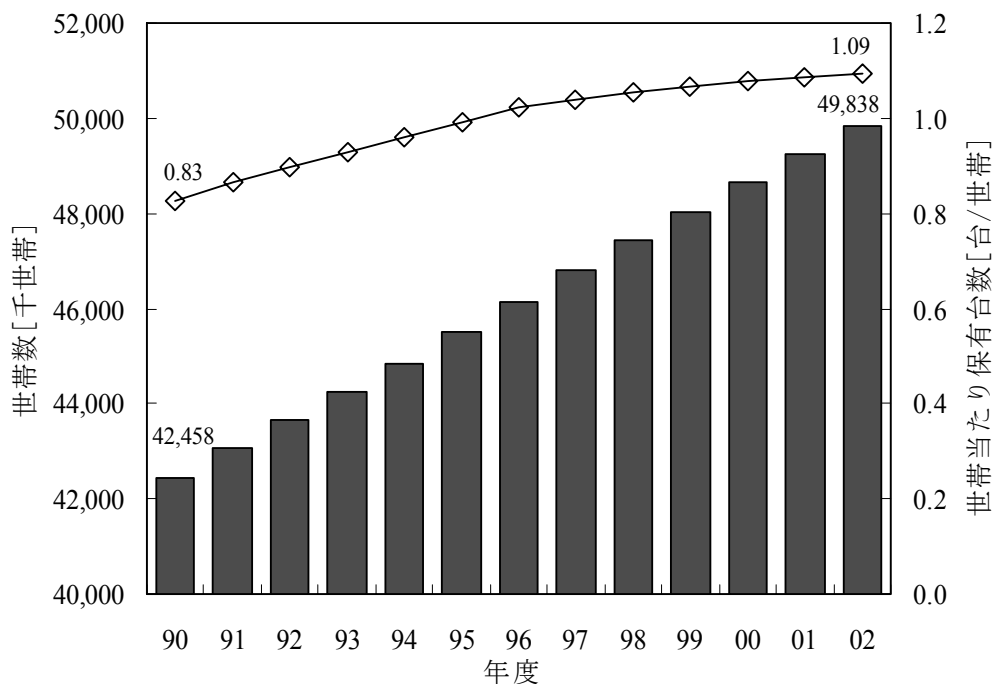


図 2.4.4 世帯数と世帯当たり保有台数の推移[2][11]

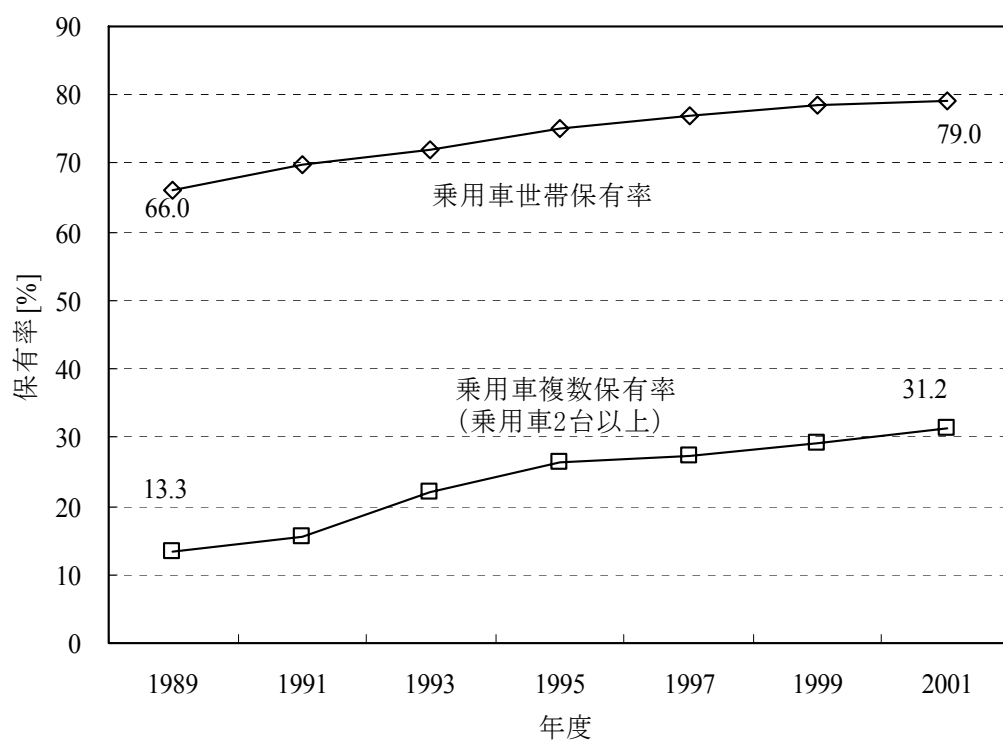


図 2.4.5 乗用車世帯保有率の推移[12]

表 2.4.1 県別世帯当たり保有台数[11]

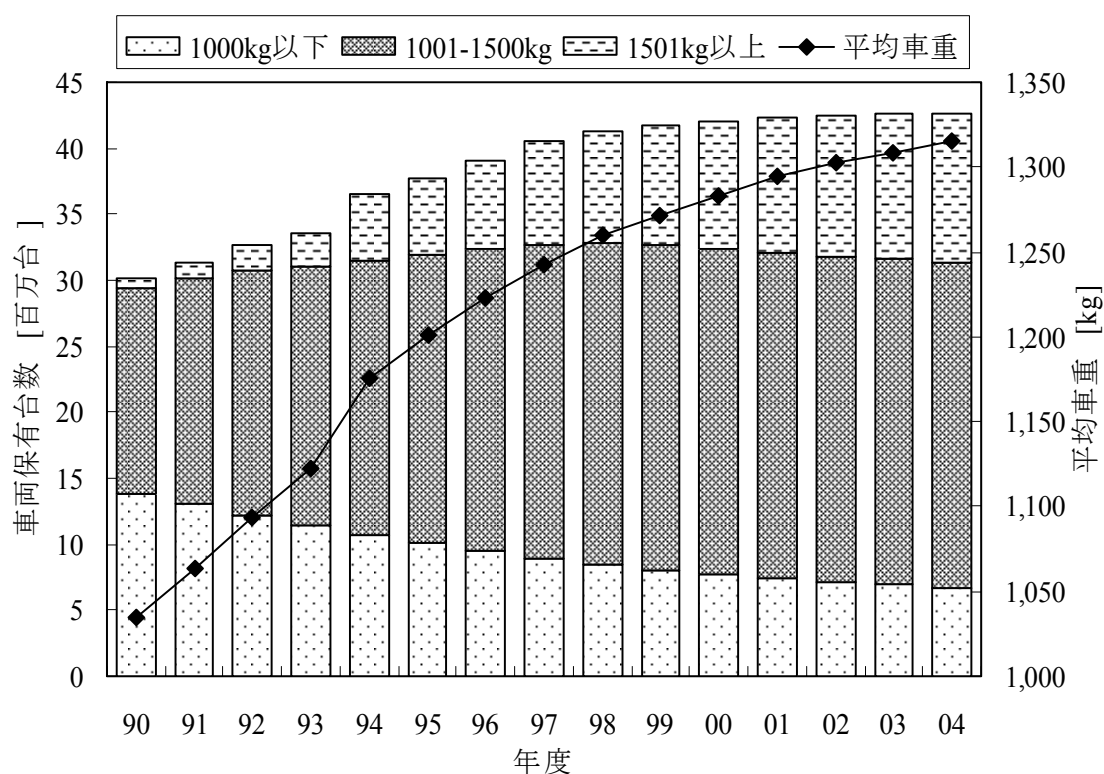
| 県名 | 1993 | | 2003 | | 伸び率 [%] |
|-----|------|-------|------|-------|------------|
| | 順位 | 台数/世帯 | 順位 | 台数/世帯 | |
| 福井 | 6 | 1.265 | 1 | 1.715 | 35.6 |
| 富山 | 5 | 1.275 | 2 | 1.708 | 34.0 |
| 群馬 | 1 | 1.365 | 3 | 1.676 | 22.8 |
| 岐阜 | 2 | 1.325 | 4 | 1.664 | 25.6 |
| 栃木 | 3 | 1.313 | 5 | 1.614 | 22.9 |
| 兵庫 | 39 | 0.799 | 43 | 0.963 | 20.5 |
| 京都 | 40 | 0.788 | 44 | 0.909 | 15.4 |
| 神奈川 | 41 | 0.777 | 45 | 0.827 | 6.4 |
| 大阪 | 46 | 0.664 | 46 | 0.731 | 10.1 |
| 東京 | 47 | 0.566 | 47 | 0.550 | -2.8 |

(3) 乗用車の平均車体重量の増加

2004 年度の普通・小型乗用車（軽自動車を除く）の重量別登録台数をみると、「1001～1500kg」が 1990 年度の約 1.6 倍、「1500kg 以上」が約 14.6 倍に増加した結果、04 年度の平均車体重量は 90 年度の約 1.3 倍に増加した。普通・小型乗用車の保有台数は、04 年度で 4,278 万台となっており、90 年度比で約 1.3 倍に増加した。

1989 年に行われた自動車関連税制の変更において、普通車に関する取得時の税の軽減（物品税の廃止）、保有時の税の軽減（自動車税の軽減）により普通乗用車と小型乗用車との税率格差が著しく縮まったことが、消費者の嗜好の変化とともに乗用車の大型化を促進した要因と考えられる。

また、軽自動車の保有台数は 90 年から 04 年にかけて、271 万台から 1,348 万台と約 5 倍に増加している。これは、軽自動車が各家庭で 2 台目の車として保有され、買い物など日常的な用途での移動手段としての利用が増えているからである。



(注) 平均車体重量は出典の「その他」を除いたものの区分の中間値に保有台数を乗じ加重平均により算出

図 2.4.6 乗用車の重量別保有台数と平均車体重量の推移（軽自動車を除く）[13]

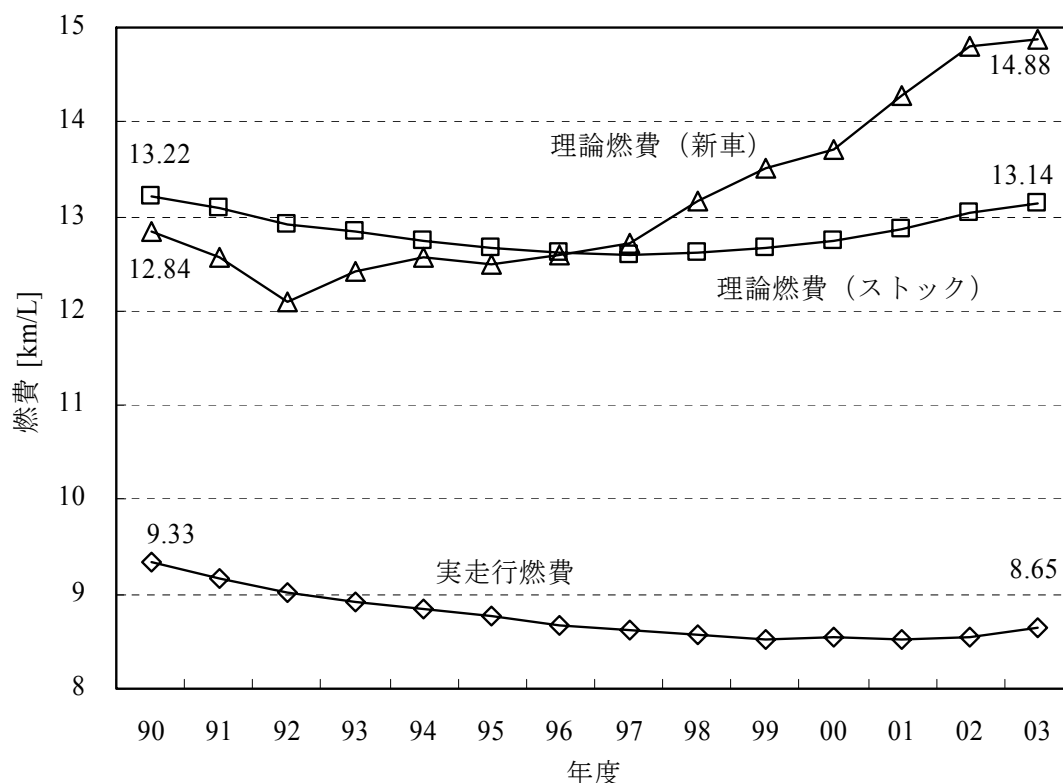
(4) 理論燃費と実走行燃費の乖離

省エネ法の改正（1998 年 6 月）による自動車燃費目標の強化により、現時点で最も効率の良い製品を基準とするトップランナー方式を導入して、目標値の設定が行われた。

図 2.4.7 は理論燃費と実走行燃費の推移である。理論燃費とは自動車の設計上の燃費で、道路運送車両法に規定する 10・15 モード法（詳細は 3.5 節）による運行条件で測定された燃費であり、実走行燃費とは気象、道路、車両、運転、整備等の状況等を考慮した場合の燃費である。

90 年から 95 年までは新車の理論燃費が悪化していたが、それ以降は著しく改善している。前述の車両の大型化によって、ストックベースの理論燃費が悪化していると考えられるが、98 年度以降はストックベースの理論燃費も改善に向かっている。平均車齢（6.58 年[11]）を考慮すると、新車の理論燃費の改善が 2～3 年遅れてストックベースの理論燃費に反映されると考えられる。

一方、実走行燃費は、渋滞等の道路状況の変化や運転状況、積載状況などの実走行条件の変化により、ストックベースの理論燃費とはかなり乖離している。ようやく 2002 年から改善の兆しが出てきた。



（注）実走行燃費は乗用車の総走行距離を燃料の総量で除して算出

図 2.4.7 理論燃費と実走行燃費の推移[2][14]

2.4.2.2 貨物部門

(1) エネルギー多消費型の輸送形態にシフト

図 2.4.8 は輸送手段別の総貨物輸送量の推移である。2003 年度の総貨物輸送量は 90 年度比で 3.1%増加しているだけで、近年横ばい傾向である。「貨物自動車」、「貨物航空」は 90 年度比でそれぞれ 17.4%、28.5%増加した。90 年から 2003 年の輸送機関ごとの構成比をみると(表 2.4.2), エネルギー消費原単位が相対的に大きい「貨物自動車」が 90 年度比で 6.9%増加している。

(2) 物流の小口化・多頻度化が進展

企業の在庫圧縮のため、また消費者の利便性の向上のため、物流はますます小口化・多頻度化する傾向にある。さらに、IT の活用により通信販売や細かい時刻指定の宅配が増えることで、ますますその傾向が進むと考えられる。図 2.4.9 に普通トラックと小型トラックの積載効率の推移を示す。小型トラックはわずか 10%ほどの積載効率である。また、全体的に年々積載効率が悪くなってきているのがわかる。

一方で、共同配送やモーダルシフトなど、環境に配慮した物流を志向する「グリーン物流」の動きが一部の先駆的企業や消費者の間で進められている。また、空荷で走行する貨物車を削減するため、IT を用いて求車情報や求荷情報をやりとりする「求荷求車情報システム」など、積載効率の向上への動きも進んでいる。

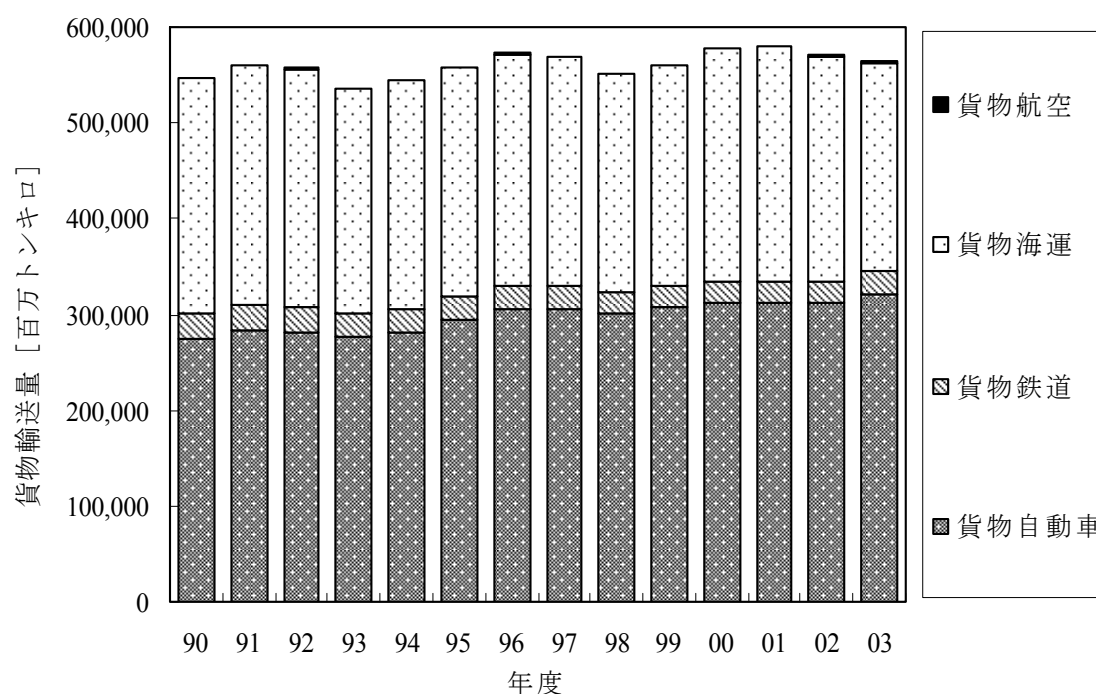
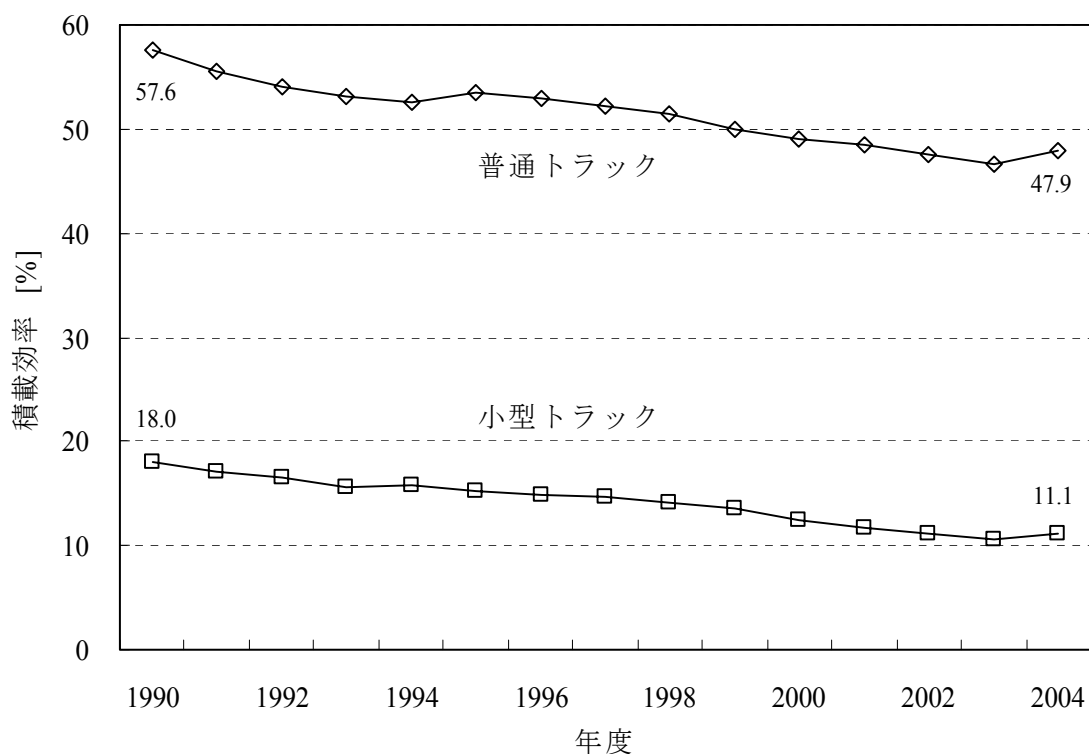


図 2.4.8 輸送手段別の総貨物輸送量の推移[2]

表 2.4.2 貨物輸送量の輸送機関別構成費の推移[2]

| | 1990 | 2003 | 増減 |
|-------|-------|-------|-------|
| 貨物自動車 | 50.2% | 57.1% | 6.9% |
| 貨物航空 | 0.2% | 0.2% | 0.0% |
| 貨物鉄道 | 5.0% | 4.0% | -0.9% |
| 貨物海運 | 44.7% | 38.7% | -6.0% |



(注) 積載効率は、輸送トンキロを能力トンキロで除して求めた

図 2.4.9 普通トラックと小型トラックの積載効率の推移[14]

2.4.3 排出量予測と対策の概要

1997 年 12 月に気候変動枠組条約第 3 回締約国会議 (COP3) において京都議定書が採択され、日本の温室効果ガスの削減目標が、2008 年から 2012 年の平均で 1990 年比 6%減と定められた。これを受けて政府は地球温暖化対策推進本部を設置し、1998 年に「地球温暖化対策推進大綱」を公表した (2002 年に新大綱を公表)。大綱の中で、各部門における温室効果ガス排出削減の目標を設定したが、エネルギー消費量の増加が著しい運輸部門については、エネルギー消費量を 1995 年の水準に抑えること、すなわち 2010 年時点において 4,530 万 t-CO₂ の削減を目標として設定した (図 2.4.10)。この状態では 1990 年に対して 17%増と依然として増えてしまうが、日本全体として産業部門での減少分と相殺する計算となる。

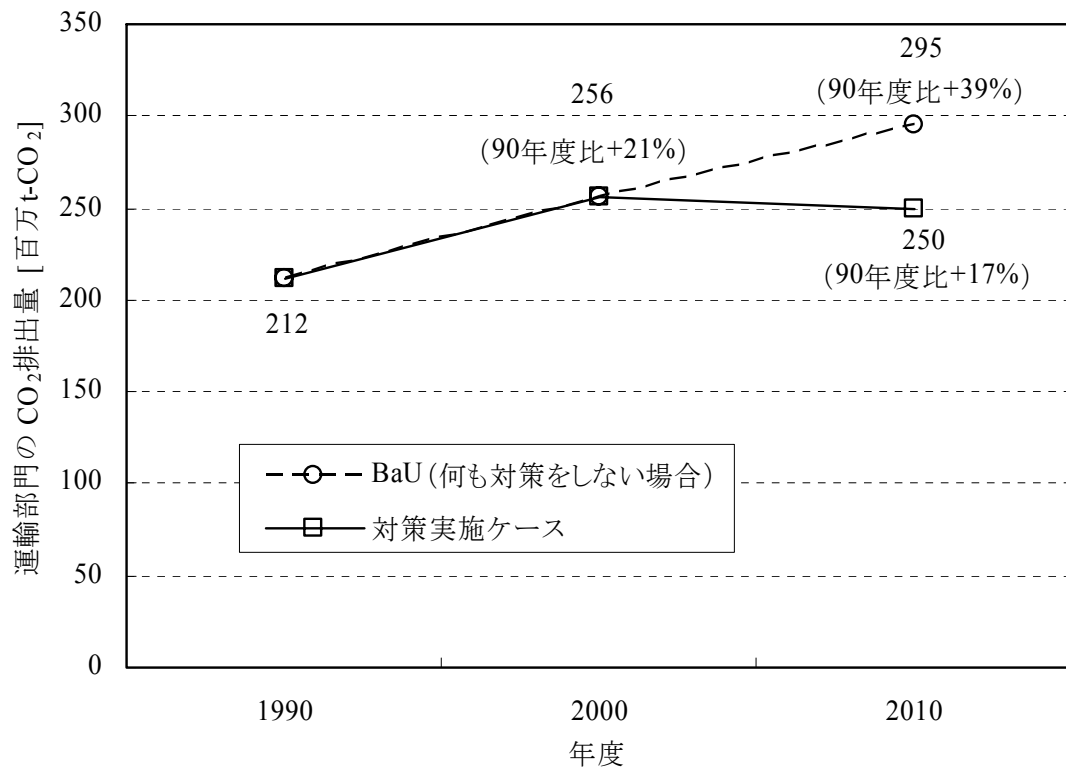


図 2.4.10 運輸部門の CO₂ 排出実績と目標[15]

運輸部門におけるエネルギー消費量の増加は、その大部分が自動車による石油製品（ガソリン、軽油）の燃焼によるものとして、その対策を大きく 3 つに分けている。

- ・ 自動車を中心としたエネルギー消費効率の向上および低公害車の技術開発・普及促進（単体対策）
- ・ 物流効率化および公共交通機関の利用促進（モーダルシフト対策）
- ・ 交通対策の推進（交通流体策）

表 2.4.3 はこれらの施策と CO₂ 排出量の削減量を示したものである。

「単体対策」の削減量は運輸部門の削減量のうち約 49%を占めており、同部門において最大の削減量が見込まれている分野である。特に自動車の燃費改善に大きな効果が期待されている。また、以前はエネルギーの使用の合理化に関する法律（省エネ法）に基づき自動車の燃費向上が進められてきたが、1997 年 3 月の法改正により、この燃費向上のための目標として、その車種の中での最高水準を求めるという、いわゆるトップランナー方式が導入された。ガソリン乗用車の新車については、2010 年度までに 1995 年比で 22.8%の燃費改善を目指すとしている。一方、鉄道、航空機、船舶についても省エネ技術の導入を進め、鉄道、航空機についてはエネルギー消費原単位の 7%の改善、船舶については同 3%の改善を目指すとしている。

表 2.4.3 運輸部門における省エネルギー量と CO₂ 削減量の目標値[16]

| 対策 | | 省エネ量 [万 kL] | CO ₂ 削減量 [万 t-CO ₂] |
|----------------------------|------------------------|----------------|---|
| 単体対策 (49%) | 自動車の燃費改善 | 540 | 1,390 |
| | トップランナー基準適合車の加速的導入 | 100 | 260 |
| | クリーンエネルギー自動車の普及 | 80 | 220 |
| | バス・トラックのアイドリングストップ | 40 | 110 |
| | 大型トラックの走行速度の抑制 | 30 | 80 |
| | 鉄道・航空のエネルギー効率向上 | 50 | 150 |
| 交通流対策 (20%) | 自動車交通需要調整 | 20 | 70 |
| | 高度道路交通システム（ITS）の推進 | 140 | 370 |
| | 路上工事の縮減 | 10 | 40 |
| | 交通安全施設の整備（信号機の高度化等） | 20 | 70 |
| | テレワーク等情報通信を活用した交通代替の推進 | 130 | 340 |
| モーダル シフト 対策 (31%) | 内航・鉄道貨物輸送の推進 | 50 | 150 |
| | 海運へのモーダルシフトの推進や輸送効率の向上 | 100 | 260 |
| | 鉄道の利便性の向上 | 10 | 30 |
| | トラック輸送の効率化 | 110 | 290 |
| | 国際貨物の陸上輸送距離の削減 | 70 | 180 |
| | 公共交通機関の利用促進 | 200 | 520 |
| 合計 | | 1,700 | 4,530 |

「モーダルシフト対策」については、貨物輸送における CO₂ 排出量を削減するために、自動車単体対策に加えて、物流の効率化を進めエネルギー消費効率の向上を図る必要性があること、さらに単位輸送量当たりの CO₂ 排出量が自動車よりも少ない公共交通機関の利用促進を図ることが必要であるとしている。

このうち特に物流の効率化が大いに期待されている。その概要については、複合一貫輸送に対応した内貿ターミナルの拠点整備、鉄道貨物輸送量の増強、鉄道貨物ターミナル・港湾等のアクセス道路の整備などを進め、中長距離の地域間幹線輸送においてトラック輸送から、よりエネルギー効率の良い鉄道、海運への誘導を推進し、内航海運の輸送分担率を 44%、鉄道コンテナの輸送分担率を 3.6%に向上させることを目標にした内航・鉄道貨物輸送の促進を挙げている。そして、国際海上コンテナターミナルを拠点的に整備し、国際貨物の陸上輸送距離の削減を挙げている。さらに、市街地における共同集配および幹線輸送における共同運行を推進し、ITS（Intelligent Transport Systems：高度道路交通システム）を活用した輸送効率の向上、物流拠点の整備などによるトラック輸送の効率化を挙げている。

る。

そして、公共交通機関の利用促進としては、大都市圏における鉄道新線の整備、地方中核都市における新交通システム、モノレール、LRT (Light Rail Transit) 等の軌道系交通機関の整備、バス交通などとの有機的な連携の確保といったハード面の整備を挙げている。これに加えて、IC カードの導入、乗り継ぎの改善などのサービス・利便性向上を通じた公共交通機関の利用促進を挙げている。また、駅前広場などの公共交通機関の結節点の整備を進めたり、バス専用・優先レーンの設定、バス優先信号制御による公共車両優先システム (Public Transportation Priority Systems) などの整備を挙げている。

「交通流体策」としては、自動車利用者の交通行動の変更を促し、都市または地域レベルの交通の円滑化を図る「交通需要マネジメント (TDM: Transportation Demand Management) 施策」の推進をその 1 つとして挙げている。これは、例えば通勤において、相乗りすることで 1 台当たりの乗車人員を増やして輸送効率を上げたり、オフピーク通勤やフレックスタイム制の導入により、朝夕の混雑を緩和し交通需要の平準化を図ることである。

技術的な対応としては、最先端の情報通信技術を活用し渋滞の削減や効率的な道路交通の確保などを図る、高度道路交通システム (ITS: Intelligent Transport System) の推進を挙げている。具体例として、リアルタイムな道路交通情報をナビゲーション・システムに提供し、ドライバーに最適な行動の選択を可能にする道路交通情報通信システム (VICS: Vehicle Information and Communication System)、料金所で停止することなく自動的に料金の支払いを可能とするノンストップ自動料金収受システム (ETC: Electronic Toll Collection System)、交通管制センターを高度化して交通量に応じた信号制御を行い、渋滞の緩和など円滑な交通の確保を図るなどがある。また、適正な駐車規制の実施、路上工事の縮減、信号機の高度化による交通の円滑化がある。

そして、国民に対する啓発活動としては、短距離自動車利用者の徒歩・自転車への誘導、エコドライブの推進などがある。このうちエコドライブとしては、駐停車時のアイドリングストップ、急発進・空ぶかしの抑制、タイヤの空気圧の適正化などがある。

また、情報通信を活用した在宅勤務やサテライトオフィス勤務など、場所にとらわれない働き方であるテレワークおよびテレビ会議システムの普及を推進することによる、交通代替の推進が期待されている[17]。

2.5 結言

乗用車保有台数の増加や平均車体重量の増加、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を続けていく。世界に目を向けると、中国、インドを筆頭に途上国でのモータリゼーションが急速に進み、ますます石油への依存が強くなっていくので、早急な対策が必要である。運輸部門の環境負荷削減対策の中でも、燃費向上に寄せられる期待は特に大きい。しかしながら、トップランナー基準方式の導入により、近年燃費

が向上した乗用車が数多く導入されてきているものの、ストックベースではようやく燃費向上の兆しが見えてきた程度である。より一層の燃費抑制対策が求められる。

第3章 自動車軽量化による燃費向上と軽量化素材

3.1 緒言

第2章で述べたように、自動車、特に乗用車はますます普及している。従来の高性能化、高出力化、長寿命化などに加え、環境問題に対する技術開発が強く求められてきている。自動車に関わる環境問題としては、

- ・ 燃費向上や代替燃料による地球温暖化対策
- ・ 代替燃料やリサイクル性の向上による天然資源保護および廃棄物処理対策
- ・ 排出ガスのクリーン化による大気汚染・酸性雨への対策

などが挙げられる。

本研究ではこのうち燃費向上に注目しており、本章では燃費向上の手段である車体の軽量化について述べる。次に、軽量化に用いる軽量素材を比較して CFRP の優位性を明らかにする。最後に、これまで航空機やロケット、レーシングカーなどに用いられてきた高スペックの CFRP ではなく、量産車に適当な CFRP の開発目標について詳述する。

3.2 自動車のライフサイクルにおける環境負荷

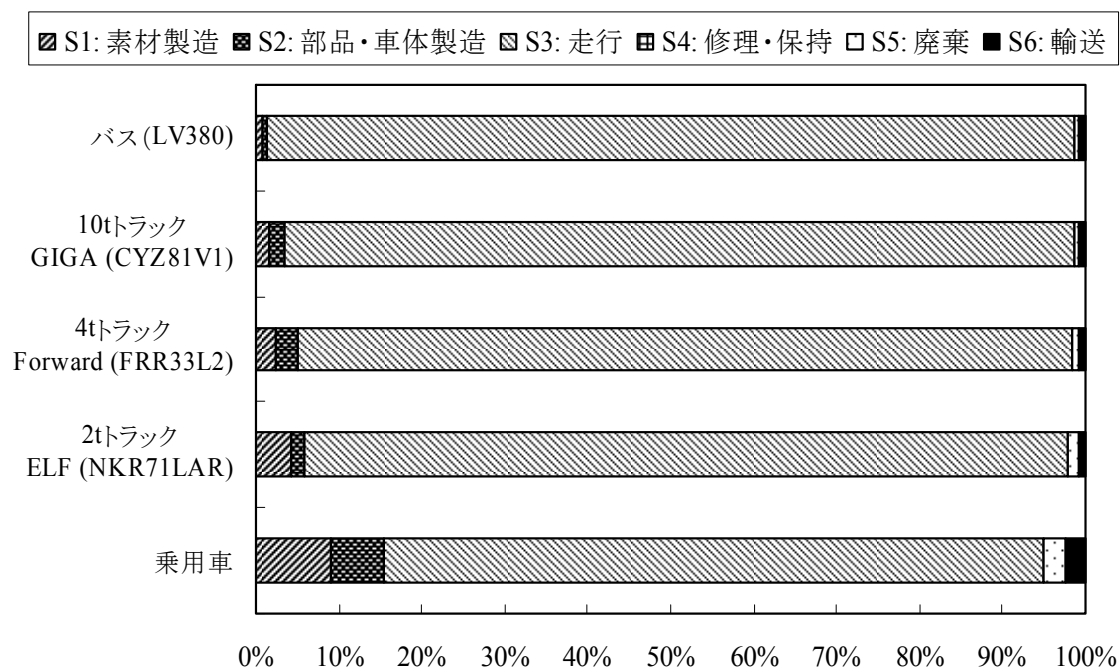


図 3.2.1 各種自動車のライフサイクルエネルギー消費量割合[1]

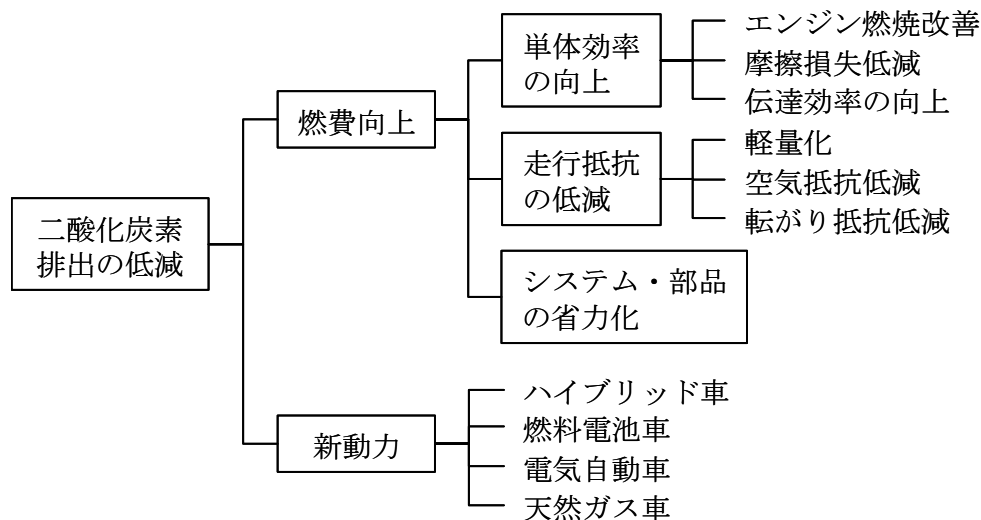


図 3.2.2 自動車走行時における二酸化炭素排出低減化技術

図 3.2.1 に示すように、自動車のライフサイクルにおけるエネルギー消費量において、走行（使用）段階での環境負荷がほとんどを占める。乗用車では約 80%である。乗用車よりも生涯走行距離の長いトラック（一般に積載量が大いほど長距離）、バスでは、トラックが 90%を超え、バスでは 97%にもなる。よって、自動車の環境負荷を削減するには、走行時での環境負荷を減らすことが最も効率の良い対策である。

対策技術は大きく分けて燃費向上技術と新動力技術に分けられる（図 3.2.2）。燃費向上技術については 3.4 節で詳述する。新動力技術についてはハイブリッド車、燃料電池車、電気自動車、天然ガス車、が研究開発中または一部実用化している。

3.3 燃費規制

1997 年に開催された気候変動枠組条約第 3 回締約国会議（COP3）において、先進国の国別温室効果ガス排出削減目標が合意された。日本に対しては二酸化炭素について、2008 年から 2012 年の 5 年間に 1990 年比 6%の削減が決定された。国全体での CO₂ 排出量削減が目標通りに進んでいる国も存在するが、全ての先進国の運輸部門 CO₂ 排出量は増加し続けており、今後もその傾向は続く可能性は大きい。このため先進諸国では、運輸政策の第一の課題として燃費規制を挙げている（表 3.3.1）。

日本では改正省エネルギー法により、表 3.3.2 のようにガソリン乗用車の燃費は 2010 年に 1995 年比 22.8%の改善目標が決まり、表 3.3.3 のように車両重量ごとの目標値が定められた。ディーゼル乗用車は 2005 年に 1995 年比 14.9%、ディーゼル貨物車は 2005 年比 6.5%の燃費改善目標が定められた。また、グリーン税を導入して低燃費車の普及を進めている。

表 3.3.1 主要国の運輸政策[2]

| | 自動車単体・ 燃料対策 | 交通流体策 | TDM・経済対策 | 2000 年比の 削減量 |
|--------|--------------------------------|---|--------------------|-----------------|
| 米 | グリーン自動車開発 大型車効率化 CAFE 規制 | 代替交通機関利用促進 物流効率化，相乗り促進 新交通 | 都心再開発 スマートグロース | 2.30% |
| 英 | 燃費改善 (グリーン税制を 含む) | 鉄道サービス改善 (旅・貨) 地域公共交通改善 | 燃料税重課 | 16-10% |
| 仏 | 燃費改善 車検厳格化 代替燃料 | インターモーダル輸送促進 トラック速度制限 公共交通計画，誘発交通削減 | 燃料税重課 炭素税導入 | 28% |
| 独 | 燃費改善 燃料品質改善 (低硫黄化) | アウトバーン課金 インターモーダルシステム | 自動車税のグリーン化 啓蒙活動 | 14-18% |
| 日 本 | 燃費改善 低燃費車普及 (グリーン税) | 自動車利用需要抑制 モーダルシフト (貨・旅) 物流効率化 | テレワーク 鉄道，航空の効率化 | 18% |

表 3.3.2 燃費向上の目標基準値[3]

| | | 1995 年度 実績値 [km/L] | 2005 年度 推定値 [km/L] | 2010 年度 推定値 [km/L] | 向上 率 [%] |
|--------|------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|----------------|
| ガソリン車 | 乗用車 | 12.3 | - | 15.1 | 22.8 |
| | 貨物車 (車両総重量 2.5t 以下) | 14.4 | - | 16.3 | 13.2 |
| | 全体 | 12.6 | - | 15.3 | 21.4 |
| ディーゼル車 | 乗用車 | 10.1 | 11.6 | - | 14.9 |
| | 貨物車 (車両総重量 2.5t 以下) | 13.8 | 14.7 | - | 6.5 |
| | 全体 | 10.7 | 12.1 | - | 13.1 |

表 3.3.3 燃費向上の目標基準値（重量別）[3]

【ガソリン乗用自動車】

| 区分 車重 [kg] | -702 | 703 -827 | 828 -1015 | 1016 -1265 | 1266 -1515 | 1516 -1765 | 1766 -2015 | 2016 -2265 | 2266- |
|---------------|------|-------------|--------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|-------|
| 目標値 [km/L] | 21.2 | 18.8 | 17.9 | 16 | 13 | 10.5 | 8.9 | 7.8 | 6.4 |

【車両総重量 2.5t 以下のガソリン貨物自動車】

| 区分車重 [kg] | 軽貨物 | | | | | 軽量貨物 | | 中量貨物 | | | |
|------------------|-----------|------|-----------|------|-------|-------|-------|-----------|------|-------|-------|
| | -702 | | 703-827 | | 828 | 1016 | 1266- | -1265 | | 1266 | 1516- |
| | 乗用車 派生 | その他 | 乗用車 派生 | その他 | -1015 | -1265 | | 乗用車 派生 | その他 | -1515 | |
| AT 目標値 [km/L] | 18.9 | 16.2 | 16.5 | 15.5 | 14.9 | 14.9 | 13.8 | 12.5 | 11.2 | 10.3 | |
| MT 目標値 [km/L] | 20.2 | 17 | 18 | 16.7 | 15.5 | 17.8 | 15.7 | 14.5 | 12.3 | 10.7 | 9.3 |

【ディーゼル乗用自動車】

| 区分 車量 [kg] | -1015 | 1016 -1265 | 1266 -1515 | 1516 -1765 | 1766 -2015 | 2016 -2265 | 2266- |
|---------------|-------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|-------|
| 目標値 [km/L] | 18.9 | 16.2 | 13.2 | 11.9 | 10.8 | 9.8 | 8.7 |

【車両総重量 2.5t 以下のディーゼル貨物自動車】

| 区分車量[kg] | 軽量 貨物 | 中量貨物 | | | | |
|---------------|----------|-----------|------|-------|-------|-------|
| | | -1265 | | 1266 | 1516 | 1766- |
| | | 乗用車 派生 | その他 | -1515 | -1765 | |
| AT 目標値 [km/L] | 15.1 | 14.5 | 12.6 | 12.3 | 10.8 | 9.9 |
| MT 目標値 [km/L] | 17.7 | 17.4 | 14.6 | 14.1 | 12.5 | |

（注）軽貨物：軽貨物自動車

軽量貨物：車両総重量 1.7t 以下の貨物自動車

中量貨物：車両総重量 1.7t を超え 2.5t 未満の貨物自動車

アメリカでは、オイルショックを受けて 1975 年に成立したエネルギー政策保護法における、最大限可能な水準を設定するというルールに基づき、CAFE (Corporate Average Fuel Economy : 企業別平均燃費規制) が実施された。同法は個別車種ごとの規制ではなく、年度ごとのメーカー別全車販売数の平均燃費を対象とした燃費規制である。アメリカでの年間販売車の燃費の平均が、乗用車、小型トラック (現在では 8500 ポンドまで) の車種別に決められたある一定の値に達しなかった場合に、その不足分の 0.1mile/gal 当たり 5 ドルと年間販売台数を乗じた金額の罰金が科せられることになっている。乗用車の燃費規制値は 1978 年に 18.0mile/gal (7.56km/L) であったが、その後何度か変更があり、1990 年からは 27.5mile/gal (11.7km/L) が続いている[2][4]。

ヨーロッパでは、欧州自動車工業会が 2008 年までに 140g-CO₂/km 削減を目標としており、欧州委員会はさらに 2015 年前後に 120g-CO₂/km とし、最終目標を 90g-CO₂/km としている。このため、ディーゼル化を戦略的手段として推進しており、2002 年には欧州域内新車販売の約 40%を占めるまでにシェアを拡大している[2]。

燃費規制はこれまで先進諸国のみで検討されてきたが、今後は途上国で自動車保有台数が急増するため、途上国においても厳しい規制が必要となってくる。例えば中国の自動車生産台数は 2010 年頃には日本を抜いて世界第 2 位の生産国となり、自動車保有台数では 2020 年頃に 1~1.5 億台、2030 年には 3 億台を保有する世界第 1 位の保有国に成長すると予測されている。早急に燃費規制を行わないとエネルギー安全保障に多大な影響を及ぼすため、中国は日米欧などの燃費規制を検討している。これを契機としてインドをはじめアジア諸国さらには南米などで燃費規制導入が拡大していくと思われる[2]。

3.4 燃費向上の手段[5]

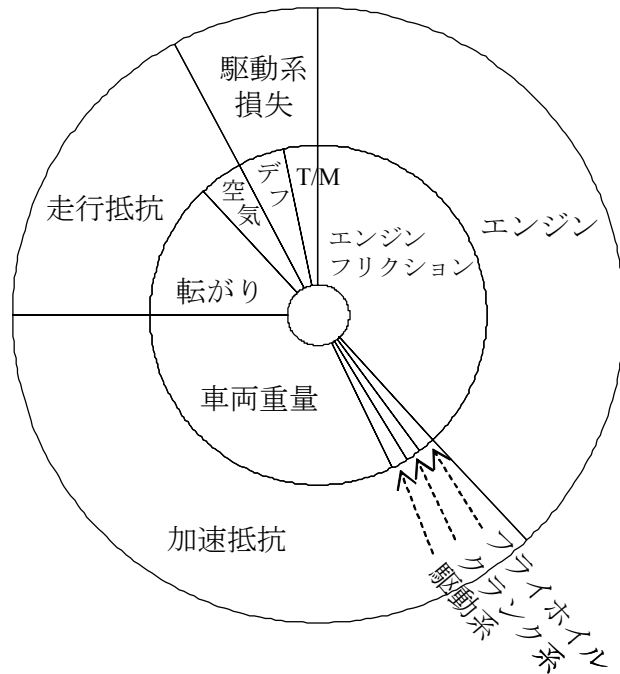
自動車における燃料消費の過程は、

- (1) 燃料に蓄えられた化学エネルギーを熱エネルギーに変換する効率 (完全燃焼)
- (2) 取り出した熱エネルギーが機械エネルギーに変換される理論出力 (指圧出力)
- (3) 理論出力がクランク軸出力に変換される際の損失 (摩擦損失)
- (4) クランク軸出力をタイヤへ伝える際の損失 (駆動系損失)
- (5) 等速巡行時に消費されるエネルギー (走行抵抗)
- (6) 加速時に消費されるエネルギー (加速抵抗)

からなる。よって、燃料技術は (1), (2) の機械エネルギー取り出し効率向上と、(3) ~ (6) の機械エネルギーの消費抑制技術に大別される。

図 3.4.1 はエミッション測定時に用いられる 10 モード走行時のエネルギー消費量の割合の測定例である。エネルギー消費は、エンジンの摩擦損失 : 4 割、加速抵抗 : 3 割、走行抵抗 : 2 割、駆動系損失 : 1 割に大別される。燃費向上にはエンジンの摩擦損失の低減が最も重要である。次いで、加速抵抗であるが、その 9 割が車両の慣性重量分である。本章 6 節

で詳説するが、車両の軽量化は燃費の向上に大きく効いてくる。走行抵抗はその 8 割が転がり抵抗であり、タイヤ技術の効果が大きい。表 3.4.1 に自動車の燃費低減方策をまとめる。本研究では、車体の軽量化に着目する。



(注) T/M はトランスミッション，デフはデファレンシャルの略である。

図 3.4.1 車両のエネルギー消費割合（10 モード走行時）

表 3.4.1 自動車の燃費低減方策[6]

| | | |
|------------|----------------------|--------------------------|
| エンジン 本体 | 新型エンジン | 希薄燃焼ガソリンエンジン |
| | | 筒内直接噴射ガソリンエンジン |
| | | ミラーサイクルエンジン |
| | | 可変圧縮比 |
| | | エンジンとモーターのハイブリッド化 |
| | エンジン制御の 最適化 | 空燃費精度の向上（電子制御 MPI） |
| | | 点火時期制御精度の向上（電子点火システム） |
| | | 減速時燃料カット |
| | | アイドリングストップ装置 |
| | 低フリクション化 | ポンピングロスの低減（マルチバブル化） |
| | | ポンピングロスの低減（可変バルブタイミング機構） |
| | | ポンピングロスの低減（気筒数自動可変機構） |
| | | 運動部の軽量化（アルミニウムコンロッド等） |
| 駆動系 | トランス ミッションの 改善 | シフトポイントの最適化（電子制御 AT） |
| | | シフトポイントの最適化（シフト指示システム） |
| | | 伝達効率の改善（電子制御式ロックアップ機構） |
| | | AT 多段化（3 段→4 段→5 段変速） |
| | | 無段変速機構（CVT） |
| 車両本体 | 補機類の高効率化 | パワーステアリングの高効率化 |
| | 車両重量の低減 | 車両の軽量化（樹脂ボディ，アルミボディ等） |
| | 空気抵抗の低減 | スポイラ |
| | | フラッシュ・サーフェス化 |
| | 転がり抵抗の低減 | 低燃費タイヤ |

3.5 車両重量と燃費の関係

燃料消費量 $E[\text{g/h}]$ は、次式で表される。

$$E = 10^3 e P \quad (3.1)$$

ここで、 e : エンジン燃費率 $[\text{g/kW}\cdot\text{h}]$, P : 出力 $[\text{W}]$.

エンジンの可動部などの軽量化や熱効率向上, 摩擦損失低減などはエンジン燃費率 e の向上に寄与する. 駆動装置の出力 $P[\text{W}]$ は、次のように表される。

$$P = nT = \frac{nr}{U\eta} F \quad (3.2)$$

ここで、 n : エンジン回転数 $[\text{rad/s}]$, T : 駆動装置の軸周りのトルク $[\text{N}\cdot\text{m}]$, r : タイヤ有効半径 $[\text{m}]$, U : 総減速比, η : 伝達効率, F : 走行抵抗 $[\text{N}]$

走行抵抗とは、自動車の走行を妨げる方向に作用する力の総称である。走行抵抗は発生原因により次の4つに分けられる。

- ① 転がり抵抗：タイヤつき車輪が転がる時の抵抗。
- ② 空気抵抗：自動車の走行を妨げる向きに作用する空気力による抵抗。
- ③ 勾配抵抗：自動車が斜面を登るとき、登坂を妨げる斜面に平行な力の成分。
- ④ 加速抵抗：自動車を加速するとき、車体総重量の直進運動とエンジンおよび伝達装置の回転運動をそれぞれ加速するための慣性抵抗の合計。

水平な路面を一定速度で走行する場合は、①と②が走行抵抗として作用し、登り坂では③が加わり、加速走行の場合は④が加わる。

転がり抵抗、空気抵抗、勾配抵抗、加速抵抗をそれぞれ R_r , R_a , R_g , R_α とすると、全走行抵抗 $F[\text{N}]$ は次のように表すことができる。

$$\begin{aligned} F &= R_r + R_a + R_g + R_\alpha \\ &= \mu W g + \frac{1}{2} C_d \rho g A v^2 + \frac{W g i}{100} + (W + W_r) \frac{\alpha}{g} \end{aligned} \quad (3.3)$$

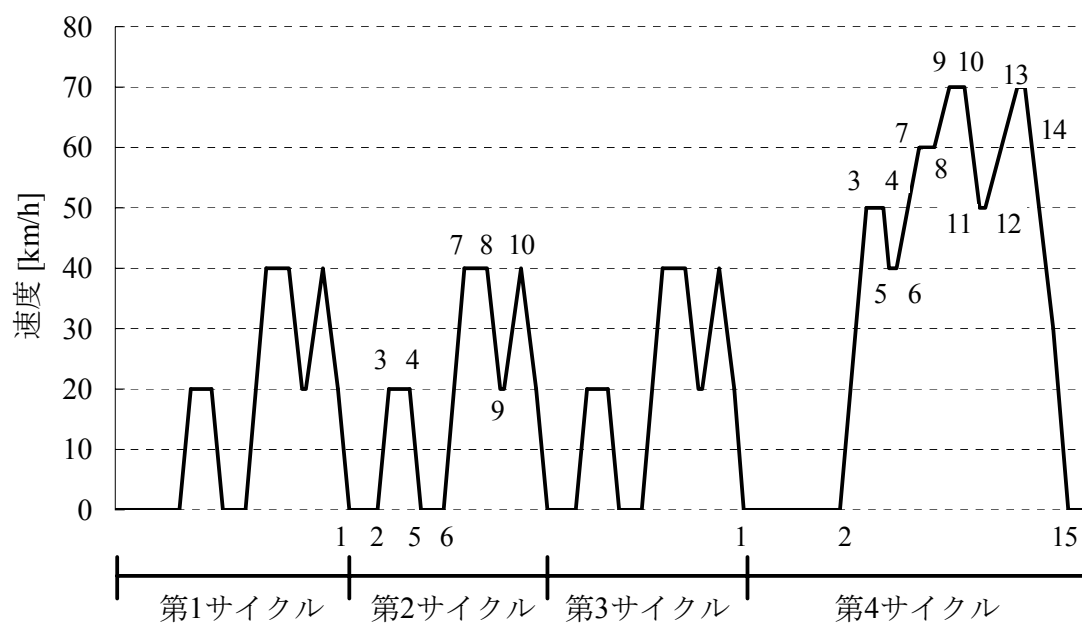
ここで、 μ : 転がり抵抗係数, W : 車両総重量 $[\text{kg}]$, g : 重力加速度 $[\text{m/s}^2]$, C_d : 空気抵抗係数, ρ : 空気密度 $[\text{kg}\cdot\text{s}^2/\text{m}^4]$, A : 車体の前面投影面積 $[\text{m}^2]$, v : 速度 $[\text{m/s}]$, i : 勾配 $[\%]$, W_r : 回転部相当重量 $[\text{kg}]$, α : 加速度 $[\text{m/s}^2]$ である。

車重 W は、第2項の空気抵抗を除いて、第1項の転がり抵抗、第3項の勾配抵抗、第4項の加速抵抗に効いてくる。つまり、軽量化が燃費改善にもたらす効果が非常に大きいことがわかる。また、空力抵抗の低減は特に高速走行時の燃費向上に貢献する[7]。

一般に車重と燃費は比例関係にあると言われる。車重と燃費の情報は各種メーカーのカタログや国土交通省の Web サイトにある自動車燃費一覧より容易に入手することができる。これらの燃費は 10・15 モード理論燃費である。10・15 モード法とは、日本の都市交通の走行実態を反映した 10 モードを 3 サイクルと 15 モード 1 サイクル、計 4 サイクルに沿って、シャシダイナモメーター上で自動車を走らせ、排出ガスを測定する。図 3.5.1 に詳細を示す。

また、561 台の乗用車の車重と理論燃費の関係をプロットしたものを図 3.5.2 に示す。確かに車重と燃費は比例関係にあると言える。なお、日本では自動車の燃費の単位として[km/L]が用いられており本研究でも基本的にこの単位を用いる。しかしながら燃費を自動車のエネルギー消費の単位と捉える場合は、これの逆数である[L/km]が示す、単位走行量当たりの燃料消費量の方が直感的に分かりやすい。そこで燃費をグラフに表す場合はヨーロッパで採用されている[L/100km]を燃費の単位として用いた。

第 2 章で述べたように理論燃費と実走行燃費には大きな乖離があるので、自動車の環境負荷を計算するには理論燃費からの補正が必要である。アンケート調査を通じて実燃費を統計解析によって把握を試みた例はこれまでにいくつかあったが（例えば文献[8]）、使用実態や使用地によって異なる実燃費を限られたサンプル数で統計的に解析するのは困難であった。そこで工藤らは[9][10]、ユーザーの自己申告に基づく給油情報を集めて実走行燃費データを集計した「e 燃費」という Web サイトを通じて、全国から 1,147,826 件の給油データ（延べ 37,933 ユーザー、1,798 型式）を集めて統計解析し、理論燃費と実走行燃費の違いおよび実燃費の地域性を明らかにしている。車重と実燃費の関係を図 3.5.3 に示す。この車重と実燃費（GV-DI：ガソリン直噴エンジン搭載ガソリン乗用車）の関係を、第 6 章で詳述する乗用車の軽量化効果の試算に用いる。



| 第1サイクル～第3サイクル | | |
|---------------|-----------|---------------------|
| 番号 | 速度 [km/h] | 時間 [秒] |
| 1 | アイドリング | 1回目：44 2, 3回目：20 |
| 2 | 加速：0→20 | 7 |
| 3 | 定速：20 | 15 |
| 4 | 減速：20→0 | 7 |
| 5 | アイドリング | 16 |
| 6 | 加速：0→40 | 14 |
| 7 | 定速：40 | 15 |
| 8 | 減速：40→20 | 10 |
| 9 | 定速：20 | 2 |
| | 加速：20→40 | 12 |
| 10 | 減速：40→20 | 10 |
| | 減速：20→0 | 7 |

| 第4サイクル | | |
|--------|-----------|--------|
| 番号 | 速度 [km/h] | 時間 [秒] |
| 1 | アイドリング | 65 |
| 2 | 加速：0→50 | 18 |
| 3 | 定速：50 | 12 |
| 4 | 減速：50→40 | 4 |
| 5 | 定速：40 | 4 |
| 6 | 加速：40→60 | 16 |
| 7 | 定速：60 | 10 |
| 8 | 加速：60→70 | 11 |
| 9 | 定速：70 | 10 |
| 10 | 減速：70→50 | 10 |
| 11 | 定速：50 | 4 |
| 12 | 加速：50→70 | 22 |
| 13 | 定速：70 | 5 |
| 14 | 減速：70→30 | 20 |
| | 減速：30→0 | 10 |
| 15 | アイドリング | 10 |

最高速度：70km/h，平均速度：22.7km/h，走行距離：4.16km，走行時間：600 秒

図 3.5.1 10・15 モードの概要

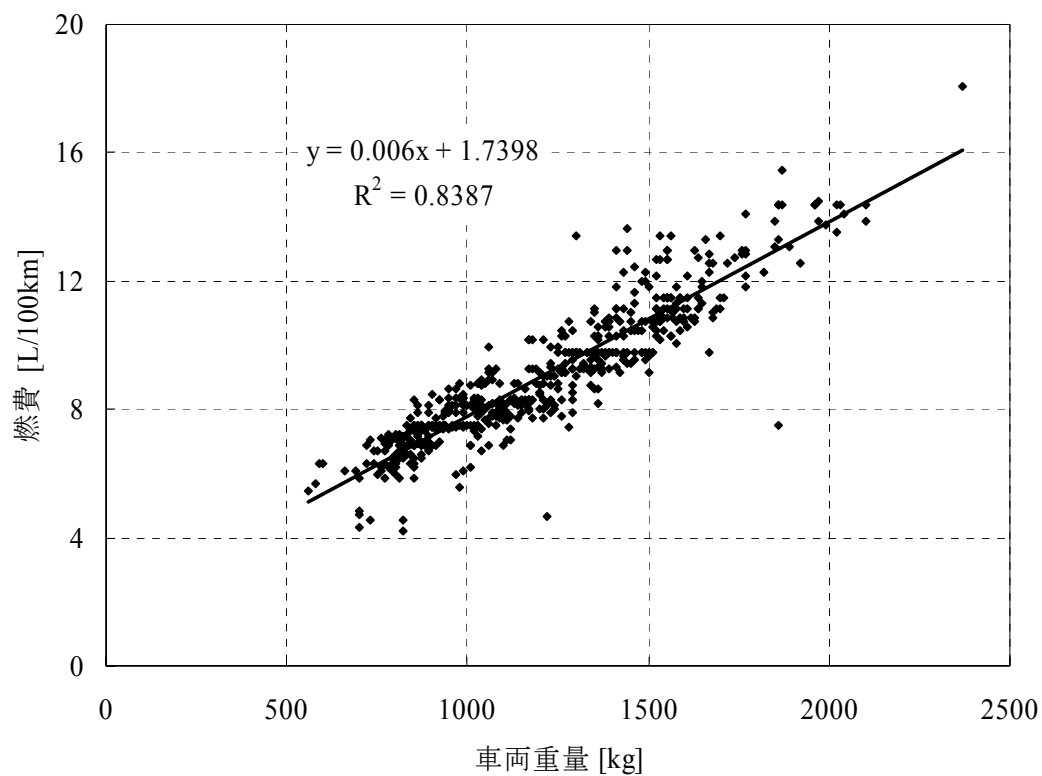


図 3.5.2 乗用車の車両重量と理論燃費の関係

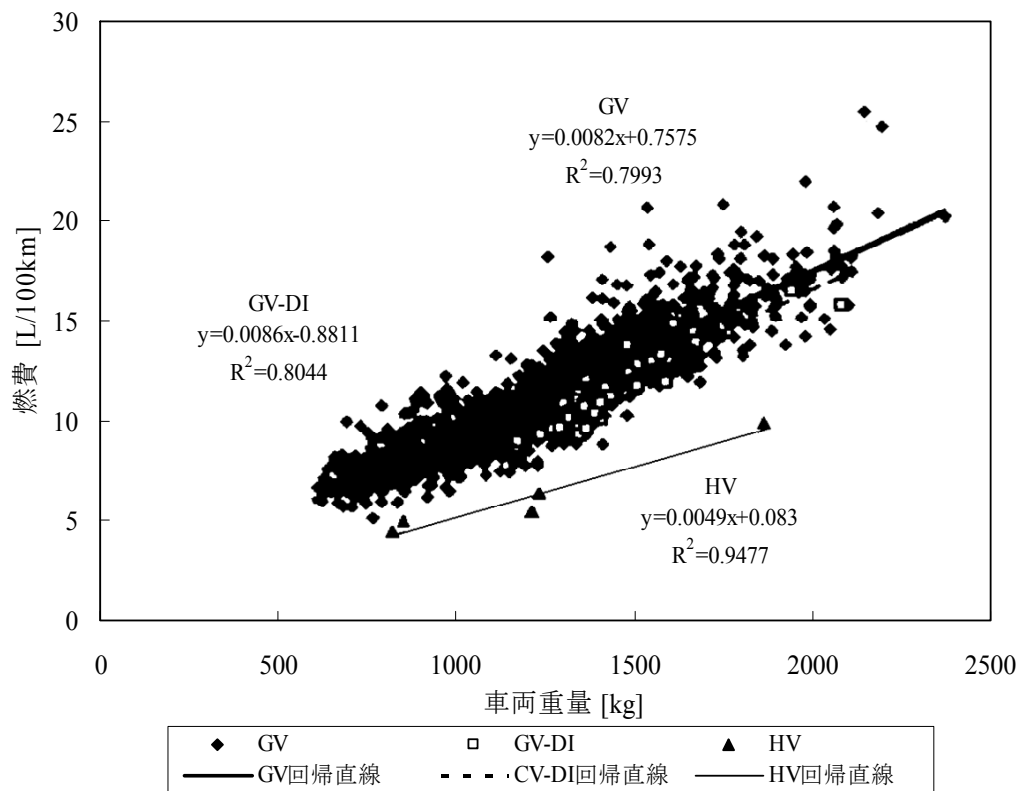


図 3.5.3 e 燃費のアンケート調査に基づく実燃費と車両重量の関係[10]

3.6 軽量化素材の比較

車体軽量化材料としてこれまで超高張力鋼（ハイテン）、アルミニウムなどの金属系材料、GFRP（ガラス繊維強化プラスチック）、CFRP（炭素繊維強化プラスチック）といった複合材料が注目され、すでに超高張力鋼やアルミニウムが適用された実績は多数ある。

金属材料はヤング率を変えることはできないが、成分調整や結晶粒の微細化などにより強度は幅広く選択できるようになってきた。ただし金属材料は融点が高いため鋳物での一体成型よりは、薄板をプレスなどで塑性加工して溶接することで構造物とする加工法が主流である。よって、リサイクルにより不純物が混ざるとプレス時に割れたり疲労寿命が短くなるなど構造欠陥が多発するため、一般にリサイクル材が使用できないので低コスト化は頭打ちとなっている。

一方、FRP は繊維の種類（GF、高強度 CF、高弾性 CF など）、繊維の形態（一方向、織物、長繊維、短繊維など）、繊維含有率、マトリックス樹脂の種類などによって、部材が要求する様々な力学的特性・耐熱性・耐食性・コストなどのニーズに応えることができる。例えば、熱硬化性樹脂は比強度が大きいのでより強度が求められるシャーシに、車体の多くはパネル材であるが、そこには剛性が要求される熱可塑性樹脂を、車体ほど高い力学的特性を必要としない内外装品には、繊維含有率を下げた熱可塑性樹脂を用いるなど部材の要求に応じた材料の選択ができる。また、熱可塑性樹脂は衝撃吸収能力が高いので金属材料のような凹みの損傷形態はあまり想定されていないが、損傷したとしても 200~300℃で溶融するため修理が容易であり、製品の長寿命化に寄与すると考えられる。さらに機能の老朽化や大損傷などのため修理しない場合でも、幅広い力学特性を同一の材料系でカバーしているため、溶融・混練といった小さいエネルギーで同等もしくは一つ下のグレードの製品に再生することが容易である。

3.6.1 CFRP

図 3.6.1 は自動車の構造部材として考えられる各種基礎素材の比強度と比剛性（強度・剛性を密度で除したもの）を示したものである。CFRP のうち熱硬化性のものを CFRTS、熱可塑性のものを CFRTTP と表している。また、 V_f とは繊維体積含有率のことである。詳細は 4.2 節で述べるが、CFRP は他の材料に比べ比剛性、比強度ともに非常に優れていることが見てわかる。なお、自動車構造ではパネル材の曲げ剛性での比較となるのでヤング率の 3 乗根を密度で割った構造効率指標を用いている。この場合ヤング率の差が鈍感になるので、密度の小さい CFRP はパネル材として使用することでより軽量化効果が高いものとなる。このようなことから、車体の軽量化ポテンシャルは CFRP が最も高いことがわかる。本研究では、軽量化材料として CFRP を用いる。CFRP の説明は次節で行う。

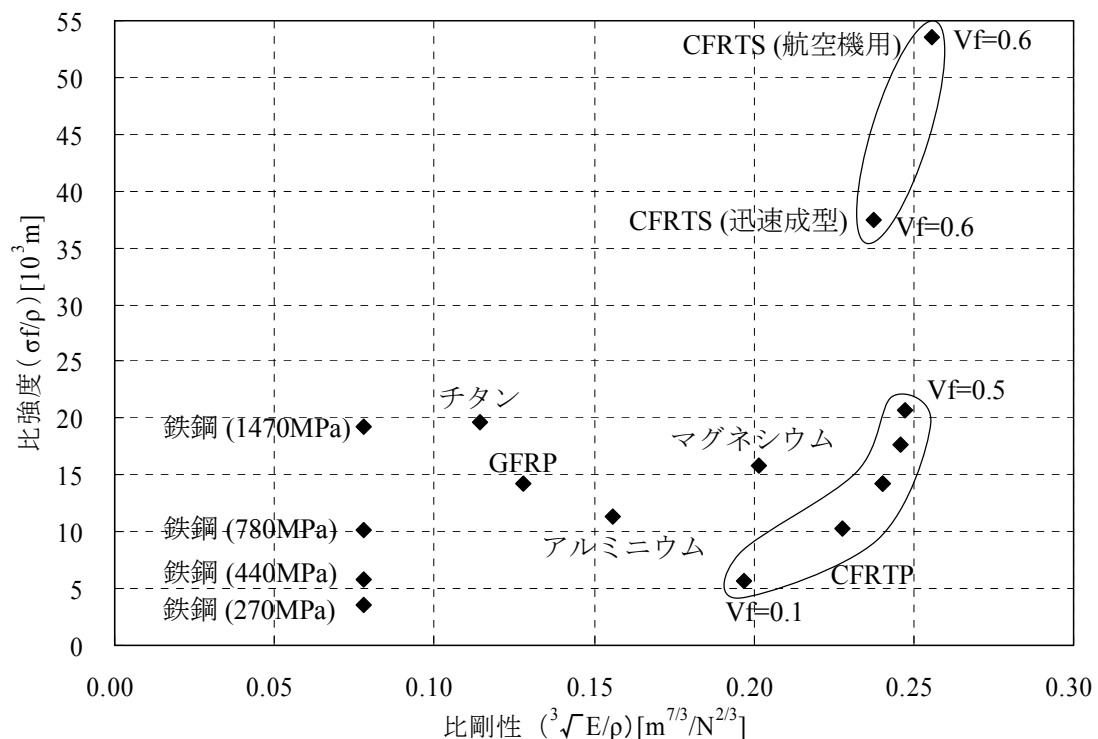


図 3.6.1 各種基礎素材の比強度と比剛性

3.6.2 高張力鋼

鉄は比重 7.8, 融点約 1,535°Cで, 地球上の金属としてはアルミニウムに次いで多い. 弾性率は206GPaである. 鉄は活性が高いため自然界では純粋な鉄として存在することはなく, 酸化鉄の形で鉄鉱石として存在する. 銑鉄は溶鉱炉 (高炉) で鉄鉱石から取り出したものである. 銑鉄は鑄鉄の原料にも利用されるが, 大部分は鋼 (スチール) を作るのに用いられる. 銑鉄中に 3~4%含まれる炭素を減少させるために, 転炉中で酸素を吹き込み, 炭素と不純物を酸化燃焼させて取り除く. さらに転炉中で合金元素を投入して成分調整を行う.

鉄といえば普通は鉄鋼のことを指すが, 細かくは鉄と鋼に分類される. 鉄は不純物をほとんど含まない純鉄と, 炭素を多量に含む鑄鉄に分けられる. 一方, 鋼は炭素鋼 (普通鋼) と炭素鋼に合金元素を添加した合金鋼 (特殊鋼) に分類される. 炭素鋼とは鉄に約 0.02%~2.1%の炭素のほかケイ素, マンガン, リン, 硫黄を含む合金で鉄鋼材料のベースとなる材料である. 0.25%以下の炭素鋼を軟鋼という. 特殊鋼は, 炭素鋼にクロムやニッケルなどいろいろな元素を加えたもので, 耐食性や耐熱性など特殊な性質を示す. 特殊鋼は, ステンレス, 工具鋼, ばね鋼, 軸受鋼, 耐熱鋼, 快削鋼など様々な種類がある.

自動車には約 7 割の重量の鉄鋼が使われている. 次に, 軽量化の観点からボディ鋼板について説明する.

自動車用鋼板には熱間圧延鋼板，冷間圧延鋼板，表面処理鋼板，ステンレス鋼板がある。

熱間圧延鋼板は主に 1.6mm 以上の比較的厚い強度部材に使用される。冷間圧延鋼板は表面の美しさと優れた加工性により車体の大部分に用いられる。冷間圧延とは素材を加熱することなく常温のままで圧延加工することで，非常に大きな力が必要となる。この加工を行うとき，素材とローラーの間に滑りが生じ素材表面がこすられるので，表面が美しく仕上がる。

表面処理鋼板としては，ボディ用に亜鉛系めっき鋼板，有機複合めっき鋼板，排気系用にアルミニウムめっき鋼板がある。このうち一般的には亜鉛めっき鋼板が中心である。防錆に対して亜鉛は非常に大きな働きをする。例えば，VW ルポ（2001 年）のボディには亜鉛めっき鋼板が使用されており，12 年間の錆穴保証がある。

ステンレス鋼は，11～25%程度のクロムを含有するスチールである。排気ガス系に使用される耐熱ステンレス鋼板とマフラーに使用される耐食ステンレス鋼板がある。

これまでは 440MPa 級の鋼板を中心に使用してきたが，軽量化効果を拡大するために 590，780MPa 級へとより高強度の鋼板の使用が増えてきている。この高張力鋼板とは厚板で引張強さ 490MPa 以上，薄板では 390MPa 以上のスチールの総称であり，「ハイテン」と呼ばれる。現在ではボディ鋼板重量の 25～35%を占めている。高張力鋼板の開発のもとになったスチールは炭素鋼で，これに対する加工熱処理や合金元素の添加などにより性能の向上が図られた。

高張力鋼板は引張強さと降伏強さが大きいので，疲労強度（繰り返し入力に対する耐久性），大変形強度（衝撃などの大入力に対する変形），耐デント性（外板パネルを手で押さえた状態で発生する局所的な凹みに対する抵抗）を重視する部材には有効である。一方，剛性によって板厚が決まる部材に適用しても軽量化は期待できない。部材の剛性は材料の強さではなく材料の弾性率と板厚などによって決まるからである。高張力鋼板の採用が有効な部品例は，耐久性や変形強度が要求されるフレーム，ピラー，メンバー類，耐デント性が要求されるフロントフード，トランクリッドなどの外板パネルである。図 3.6.2 に高張力鋼板の採用例を示す[11]。

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）では，スチールボディであっても最先端の技術を駆使することで，機能・安全性はそのままにコストアップなしで軽量化できることを示した。具体的には 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]。図 3.6.3 に ULSAB カーのボディ構造を示す。構成部材のほぼ 100%にハイテンが使用されており，そのうち約 80%が AHSS である。AHSS は，Dual Phase 鋼あるいは TRIP 鋼などの組織制御されたハイテンで，従来の C-Mn 系の析出強化系ハイテンと比べて，成形性と衝撃エネルギー吸収特性に優れている。AHSS を使用することにより，スタイリング，パッケージングと安全性を考慮しながらの軽量化設計ができた。

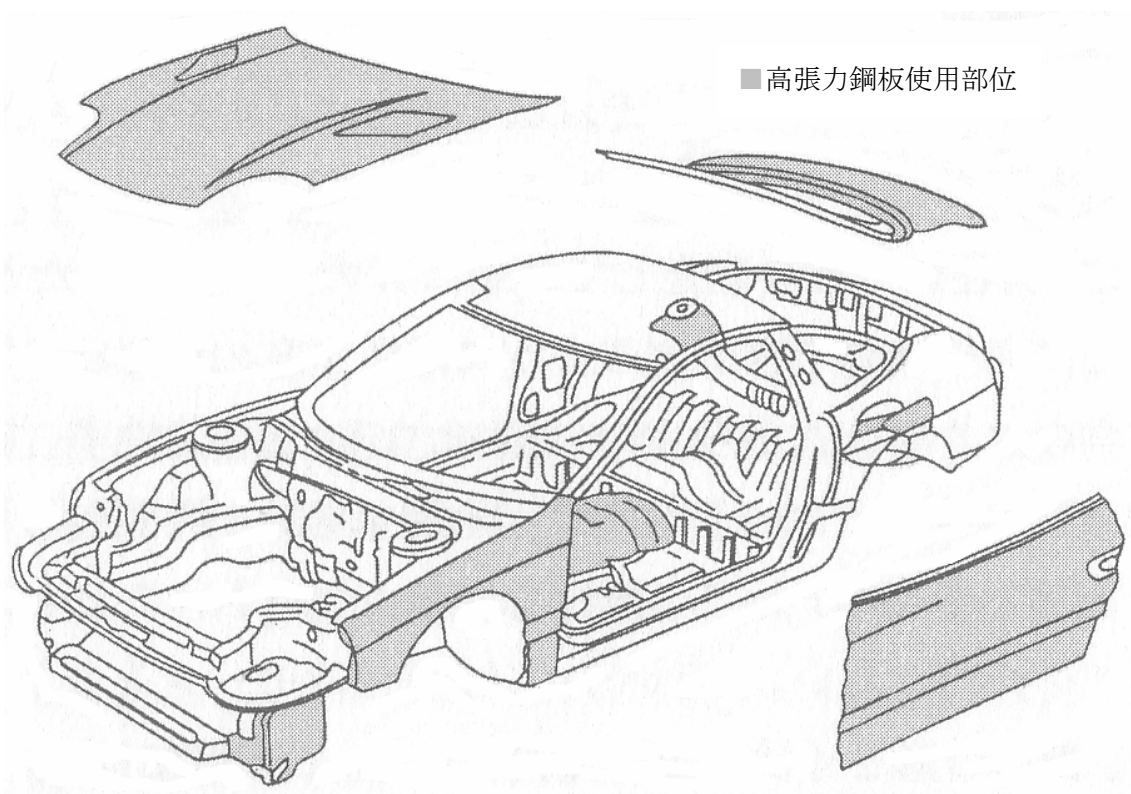


図 3.6.2 高張力鋼板の使用例

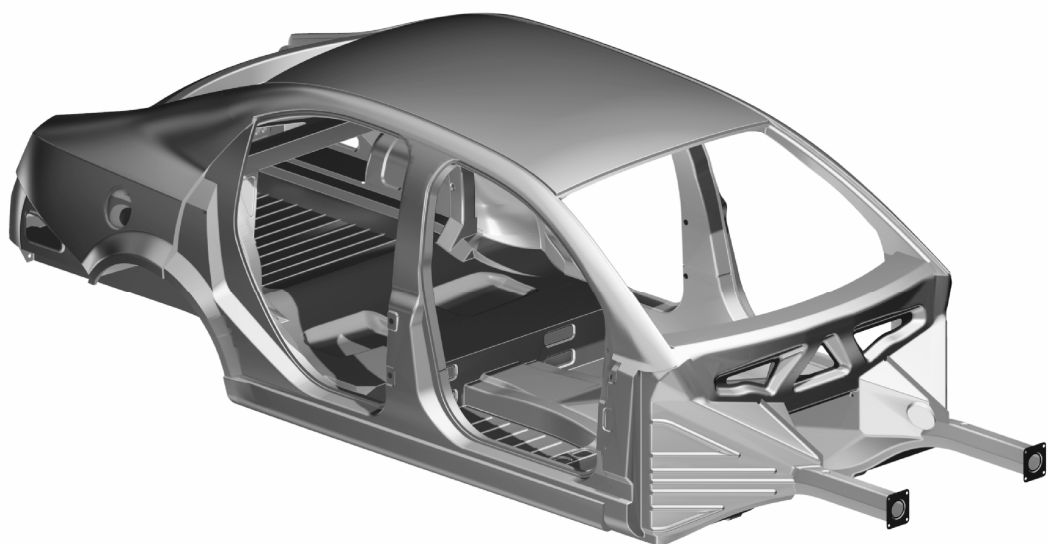


図 3.6.3 ULSAB カーのボディ構造

このように、他の材料に比べて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。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。

3.6.3 アルミニウム

アルミニウムは、地球上で最も存在量が多い金属元素である。比重は 2.7 であり、実用金属としてはマグネシウム (1.74)、ベリリウム (1.85) について軽い。融点は 660°C 。弾性率は約 70GPa である。アルミニウムは軽量であると同時に、耐食性が良い、熱および電気の伝導性が良い、加工性・接合性・成形性が良い、光や熱の反射率が高いといった特徴がある[11]。

アルミニウムは純アルミ、展伸用アルミ（加工用アルミ、高力アルミ）、鋳造用アルミ（普通鋳造用アルミ、ダイカスト用アルミ）に分類される。板材ではフードを中心に、押出し、鋳鍛造材はシャーシ、そのほかの骨格部材に用いられる。オールアルミ車 Audi A2 では、スペースフレーム構造が採用され、アルミの板、押出し、鋳造材が効果的に用いられ、部品点数の削減が図られているほか、量産化に合わせて各種技術が採用され注目されている[13]。図 3.6.4 にアルミニウムボディの例を示す。アルミは比強度の点では鉄よりも優れているが、比剛性の点ではあまり変わらない。フレッシュのアルミは製造時にかなりの電力を消費するので、原単位は鉄に比べてかなり大きい。しかしながらリサイクル材の製造の場合、原単位はかなり下がるので、軽量化にはリサイクル材を使う必要がある。

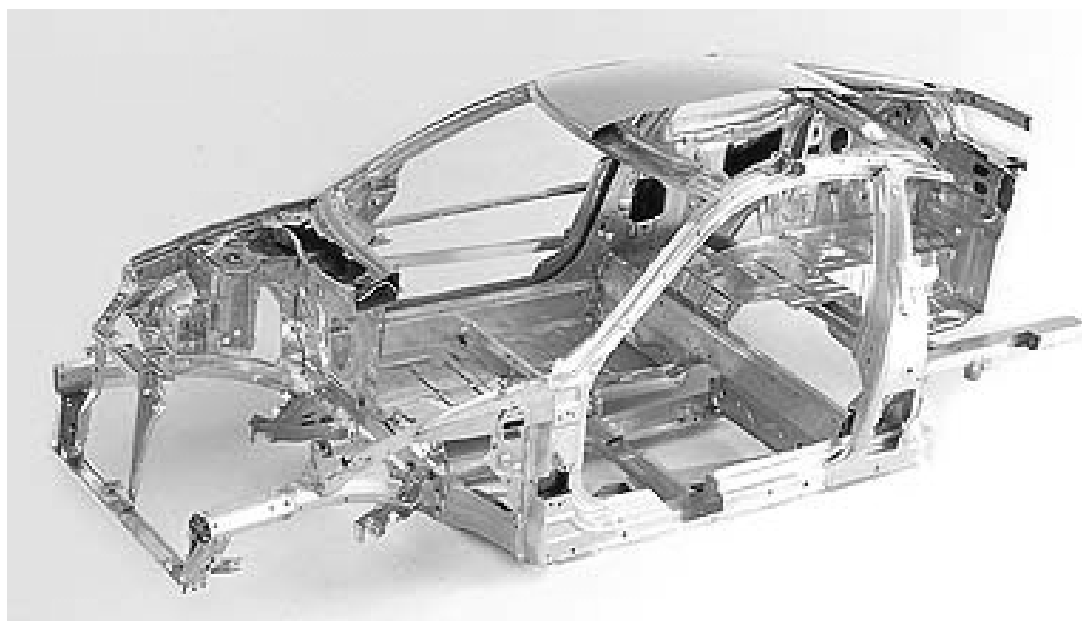


図 3.6.4 アルミニウムボディ

従来車に用いられているアルミは全重量の約 7%であり[14]、ほとんどがリサイクル可能な鑄造材である。一方、アルミ軽量車の車体などに用いる大部分は押出し材であり、鑄造材と違ってリサイクル材を用いるのは困難である。自動車部材として使用されているアルミ合金は、品種、使用形態（板、押出し、鑄造材）が様々である。例えば板材では Al-Mn-Mg の 3000 系、Al-Mg の 5000 系、Al-Mg-Si の 6000 系合金が、押出し材では主として 6000 系合金が、鑄造材では高 Si の 4000 系合金が使用されている[15]。そのため、アルミを本格的に乗用車に適用するには、車体の解体及びアルミ合金の選別を確実に進めリサイクルシステムを構築する必要がある。

3.6.4 マグネシウム[16][17]

マグネシウムは鉄やアルミより比重が小さく実用金属材料中では最も軽く、比強度、比剛性も鉄やアルミに劣らないため、自動車の部品材料として注目を集めている。国内自動車メーカーがエンジン部品への採用を進め、海外メーカーはボディにも使い始めている。コストや製造の難しさ、製造時に発火しやすいといった問題もあるが、次世代の基幹素材として期待されている。

マグネシウムは銀白色の金属である。比重が 1.74 なので、軽さはアルミの 3 分の 2、鉄の 4.5 分の 1 と実用金属中最も軽く、さらに比強度が高い。弾性率は約 64.5GPa である。融点は 649℃でアルミとほぼ同じ。マグネは様々な鉱物や海水に含まれ、その資源は無尽蔵であると言える。アルミと比べて高い製造コストを下げる如果能够できれば、マグネシウムの需要は伸びていくと予想される。ただし構造用材料として用いられるのはマグネシウム合金であり、主に鑄造合金として使用される[11]。

米国自動車工業界のいわゆるビッグスリー（Ford, GM, Chrysler）が協力して自動車へのマグネシウム合金の採用を推進し、大型のインストルメントパネルを一体ものとしてマグネシウム合金ダイカストで作製したり、筐体、ブラケット、シンダーヘッドなどへ積極的に導入している。また、ドイツのメーカーでは、筐体類のほかに新しい応用としてドア内部構造へのマグネシウム合金の採用を始めている。日本でも、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シウム化することにより軽量化・振動低減することが進んでいる。表 3.6.1 はフォルクスワーゲン車のマグネシウム化の資料である。現在のマグネシウム化部品と将来マグネシウム化の可能性がある部品の重量を示している。マグネシウムはいろいろな部分に使われているが、車両全体ではごくわずかである。将来的には増えるの見積もられているが、メインの軽量化材とまではいかない。

マグネシウム化を推進するには、コスト上昇を抑えるために十分な強度と信頼性が実現できる低コストの鑄造技術（たとえば、高強度薄肉ダイキャスト、チクソキャスティング（半熔融状態で薄肉化）など）が重要な課題となる。また、マグネシウム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[18].

表 3.6.1 マグネシウムに代替可能な自動車部品[18]

| 部品名 | VW, Audi での マグネ化部品 | 5 年以内での マグネ化の 可能性 | 5 年以上での マグネ化の 可能性 | 10 年以上での マグネ化の 可能性 |
|-----------------------|--------------------------|-------------------------|-------------------------|--------------------------|
| 1. 駆動部品系 | | | | |
| トランスミッション・ハウジング | ○ | ○ | | |
| インテークマニホールド | ○ | | | |
| シリンダーヘッド・カバー | ○ | | | |
| サポート | | ○ | | |
| オイルポンプ・ハウジング | | ○ | | |
| クランクケース | | | ○ | |
| 重量小計 [kg] | 18 | 6～11 | 14～20 | |
| 2. 内装部品系 | | | | |
| ハンドル芯 | ○ | | | |
| ペダルブラケット | ○ | | | |
| ハンドルコラム部品 | ○ | | | |
| 前後シート部品 | | ○ | | |
| その他部品 | ○ | ○ | ○ | |
| 重量小計 [kg] | 4 | 8～12 | 2～4 | 0 |
| 3. ボディ部品系 | | | | |
| トランクリッド部品 | ○ | | | |
| ドア（インナー）鋳物 | | ○ | | |
| インストルメントパネル・クロスバー・ヒーム | ○ | | | |
| Mg 板用途（内装／外装） | | | ○ | ○ |
| Mg 押出用途 | | | ○ | ○ |
| 重量小計 [kg] | 3 | 20～34 | 8～12 | 15～20 |
| 4. シャーシ部品系 | | | | |
| エンジンクレート／サブフレーム | | | ○ | |
| 車輪 | | | | ○ |
| サスペンションアーム（フロント，リア） | | | | ○ |
| 重量小計 [kg] | 0 | 0 | 4～6 | 30～34 |
| 合計 [kg] | 25 | 34～57 | 28～42 | 45～54 |
| 累積合計 [kg] | 25 | →59～82 | →87～124 | →132～178 |

3.6.5 チタン[11]

チタンとその合金は、軽くて強くて錆びないという利点を生かし、航空・宇宙・海洋・軍事などの分野で不可欠の材料として多用されてきた。自動車分野でもレーシングカーには30年以上も前から普通に使用されてきた。コストを重視しない分野では一般的な軽量化材料であった。しかしながら、スチールのように大量生産は難しく、異種金属材料との接合が困難であり、加工性が悪く価格が高い。さらにチタン合金は、耐摩耗性、耐焼付き性が劣るため高価な表面処理が不可欠であり、また耐熱性が不十分である。よってチタン系材料の適用範囲は限定されているのが現状である。

チタンは比重 4.51 で銀灰色の金属である。チタンの比重は鉄の約 60%であるが、アルミニウムやマグネシウムに比べると重い。しかし融点は 1,600℃、弾性率は約 116GPa でアルミやマグネに比べて高い。また、チタンは非常に酸化しやすい金属で、表面に強固な不動態膜である酸化チタンを形成する。よって、ほとんどの環境で使用可能となるほど実用金属中最高に近い耐食性を有する。

純チタンの場合、主にその優れた耐食性を生かした分野への適用が多い。海水で腐食しないので、船舶部品や海岸付近の建築構造物の屋根材への適用などである。また、一般装飾品、眼鏡、腕時計、ゴルフなどのレジャー用品にも数多く使用されている。チタン合金は比強度が極めて高いため、軍事用の宇宙・航空機分野から適用が始まった。元素の成分と割合により結晶構造が異なり、 α 型、 $(\alpha + \beta)$ 型、 β 型の3種類に分けられる。

自動車部品としては、バルブ、マフラー、コンロッドなどに用いられる。

3.6.6 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。CFRP と同様に比重が小さく金属よりも比強度・比剛性が大きいので、GFRP による車体の軽量化も検討されてきた。しかし、GFRP よりも CFRP の力学特性の方がはるかに優れ、CFRP が航空機やレーシングカーなどの分野で多くの実績を挙げてきている。さらに、3.9 節で述べるように CFRP の主要原料である炭素繊維の価格が近年低下してきたことにより、FRP による車体軽量化といった場合、現在では CFRP による軽量化を意味するのが一般的である。また、ガラス繊維は安全上と用途上の理由でリサイクルが困難とされており、この点でも量産車ボディへの適用は難しいと考えられる。

3.7 CFRP の基礎的知識[19]

FRP とは Fiber Reinforced Plastics の略で、つまり繊維で強化したプラスチックである。プラスチックだけでは脆すぎるか柔らかすぎるため強くてしっかりしたものを作れないし、繊維だけでは鉄鋼より強度があっても形ある構造物はできない。両者を組み合わせてはじめて使い物になる。繊維として炭素繊維 (Carbon Fiber) を用いた FRP を CFRP という。

3.7.1 CFRP の長所と短所

CFRP の長所は，以下のようなものが挙げられる．

- ・ 構造材料として使用可能なプラスチック系材料
- ・ 軽くて強く，局部的に強化することが可能
- ・ 線膨張係数が非常に小さく，寸法安定性が高い
- ・ 優れた電気絶縁性または導電性
- ・ 高断熱性または良熱伝導性
- ・ 錆びにくく腐りにくい
- ・ 低投資でさまざまな形が作れて経済的

逆に短所については以下のようなものが挙げられる．

- ・ 表面が傷つきやすく，傷が破壊の起点となりうる
- ・ 燃えやすい
- ・ 強さに弱い方向がある
- ・ 機械的，物理的な接合設計が難しい
- ・ 製造時間が長い
- ・ リサイクルが難しい

このうち特に接合性の問題が製品化の障壁になることが多く，構造設計の難しさが最大の技術的課題である．

3.7.2 炭素繊維

現在広汎に使用されている炭素繊維はその原料により，ポリアクリロニトリル（PAN）系炭素繊維とピッチ系炭素繊維の 2 種類に分けられる．また，ピッチ系については，さらに原料や製造方法によって高強度タイプと高剛性タイプに分かれ，用途に応じて選択することになる．

3.7.2.1 PAN 系炭素繊維

PAN 系炭素繊維は特殊なポリアクリロニトリルから紡糸，延伸，乾燥させて，得られた繊維を酸化雰囲気中，200～300℃で不融化处理が行われる．続いて不活性化条件下において 1,000～2,000℃で熱処理が行われ，炭素繊維が形成される．高弾性タイプの繊維を得るには，2,000℃～3,000℃条件で黒鉛化处理がなされる．引き続き最終使用条件に適合させるための重要な工程として繊維表面処理・サイジングを経て，広汎に使用できる製品となる（図 3.7.1）．

PAN 系炭素繊維の世界市場における日本のシェアは 3 社合わせて約 70%にも達する（図 3.7.2）．

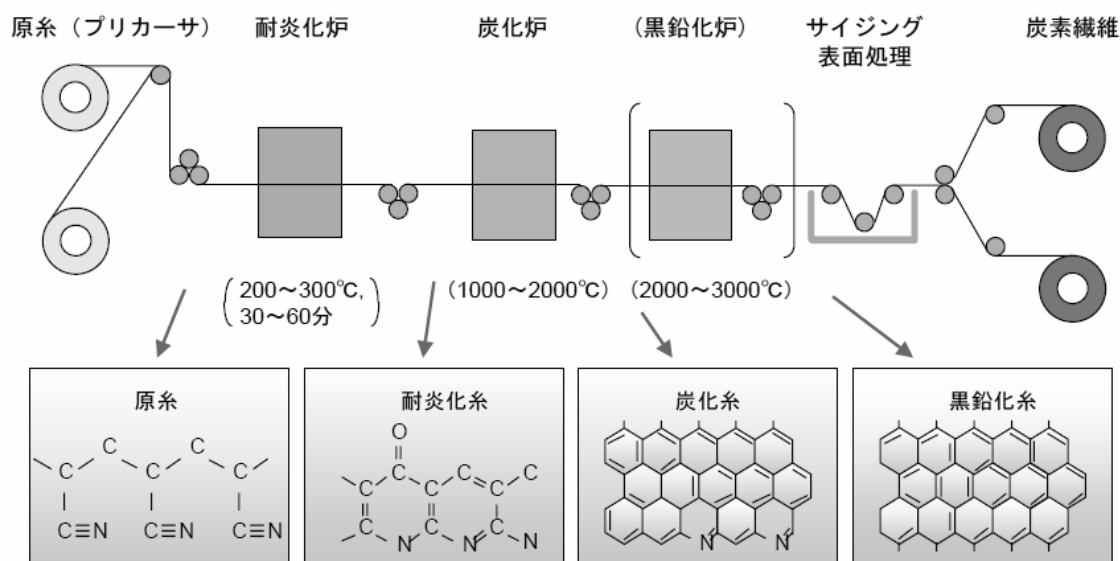


図 3.7.1 PAN 系炭素繊維の製造プロセス[20]

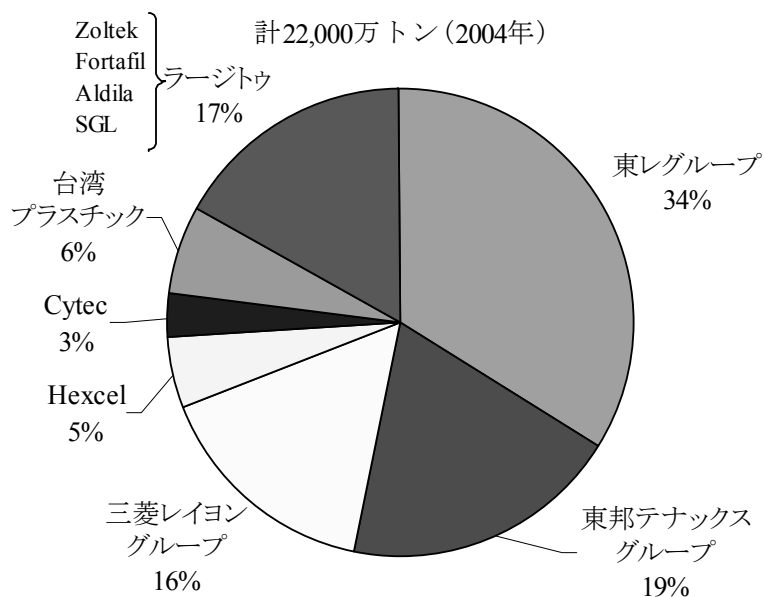


図 3.7.2 世界の PAN 系炭素繊維市場シェア（東レ推定）[20]

3.7.2.2 ピッチ系炭素繊維

ピッチ系炭素繊維の原料として、光学的等方性ピッチ並びに異方性ピッチ（メゾフェーズ、ピッチ）が使用される。この原料は紡糸可能な状態まで処理され、次にこれを繊維化するが、その方法は①通常紡糸方法にて連続状繊維とする場合と、②遠心紡糸、過流法、メルトブルー法などの方法で不連続状の繊維を得る場合の 2 通りある。次に、得られた繊維の機械的性質を発現させるために、まず繊維の不融化処理が行われる。この処理は 200

～350℃の酸化雰囲気中で実施され、さらに不活性雰囲気下 1,000～1,500℃にて炭素化处理が行われる。ここで結晶の成長が行われる。さらに高弾性タイプの場合は、不活性雰囲気にて 2,000～3,000℃で再度熱処理される。

その後、樹脂などと複合化して使用する場合は、PAN 系炭素繊維と同様に表面处理・サイジングが施され製品となる。メゾフェールピッチから得られる繊維はその機械的性質に優れていることから複合材料として使用され、光学的等方性ピッチの繊維は短繊維も含め、機械的性質以外の機能を発揮する分野で使用されている。

3.7.3 樹脂

樹脂には熱硬化性樹脂と熱可塑性樹脂がある。

3.7.3.1 熱硬化性樹脂

熱硬化性樹脂とは、プリポリマーという重合度の小さな粉末または液体状の物質に硬化剤を加えたものを加熱すると、分子間に三次元的な橋かけ結合を形成して硬くなる、立体的な網目構造を持った高分子物質のことである。一度硬化すると溶媒にも溶けにくく、加熱しても可塑性が現れないので、熱可塑性樹脂よりも一般的に耐熱性や耐薬品性が優れている。その反面、加工性は熱可塑性樹脂よりも劣る。CFRP に使用される熱硬化性樹脂としては、不飽和ポリエステル樹脂 (UP)、ビニルエステル樹脂 (VE)、エポキシ樹脂 (EP)、フェノール樹脂 (PF)、ジアリルフタレート樹脂 (DAP)、ポリウレタン (PU)、シリコン樹脂などが挙げられる。

3.7.3.2 熱可塑性樹脂

熱可塑性樹脂とは、固体状の鎖状高分子物質からできており、加熱すると外力によって変形・流動する性質（可塑性）がある。この性質を利用して簡単に製品に加工することができる。熱硬化性樹脂よりも加工がしやすい反面、製品を加熱すると可塑性が再び現れて製品の形が崩れるなど、形状保持に関する性能で劣るという欠点がある。

熱可塑性樹脂の種類は非常に多いが大別すると、

- ・ 汎用樹脂
 - 塩化ビニル (PVC)、ポリエチレン (PE)、ポリプロピレン (PP)、アクリロニトリルブタジエンスチレン (ABS) など
- ・ エンジニアリング樹脂 (エンブラ)
 - ナイロン-6、ナイロン-66、ポリブチレンテレフタレート (PBT)、ポリエチレンテレフタレート (PET)、ポリアセタール樹脂 (POM)、ポリカーボネイト (PC) など
- ・ スーパーエンブラ (超エンブラ)
 - ポリエーテルエーテルケトン (PEEK)、ポリエーテルスルホン (PES)、ポリフェ

ニレンサルファイド (PPS), ポリスルフォン (PSu), ポリエーテルイミド (PEI)
など

・ 超超エンブラ

➤ ポリイミド (PI), ポリアミドイミド (PAI) など

3.8 CFRP の需要動向

図 3.8.1 に世界の炭素繊維市場の変遷を示す。

航空機用途は軍用ジェット機への利用から始まり，1980 年代に燃費向上のため大型民間旅客機に使用され，二次構造，一次構造へと適用が進んだ。戦闘機 F22 は構造重量の 25%，民間旅客機エアバス A321 は 15%，ボーイング B777 は 10% の CFRP を使用していると言われている[21]。複合材料が使用された理由は，材料が軽いというだけでなく，航空機部品に特有の面板－多桁構造を一体成型したインテグラル化によって軽量化と部品点数の激減による加工コストダウンが達成されたことにある。今後の需要拡大については，軍用ジェットの場合，冷戦構造の終結により軍事予算が削減され炭素繊維の需要は大きく落ち込んだ。今後多くは望めず横ばいと予測されている。一方，民間機では二次構造から一次構造への利用が進んできている。世界全体の航空旅客数の 2020 年頃までの年平均伸び率は 5% 程度という予測が一般的であり[22]，これに応じて需要の拡大が期待される。また，特に米国では小型の一般飛行機への炭素繊維の利用が進められており，この用途も着実に需要を伸ばすものと思われる。

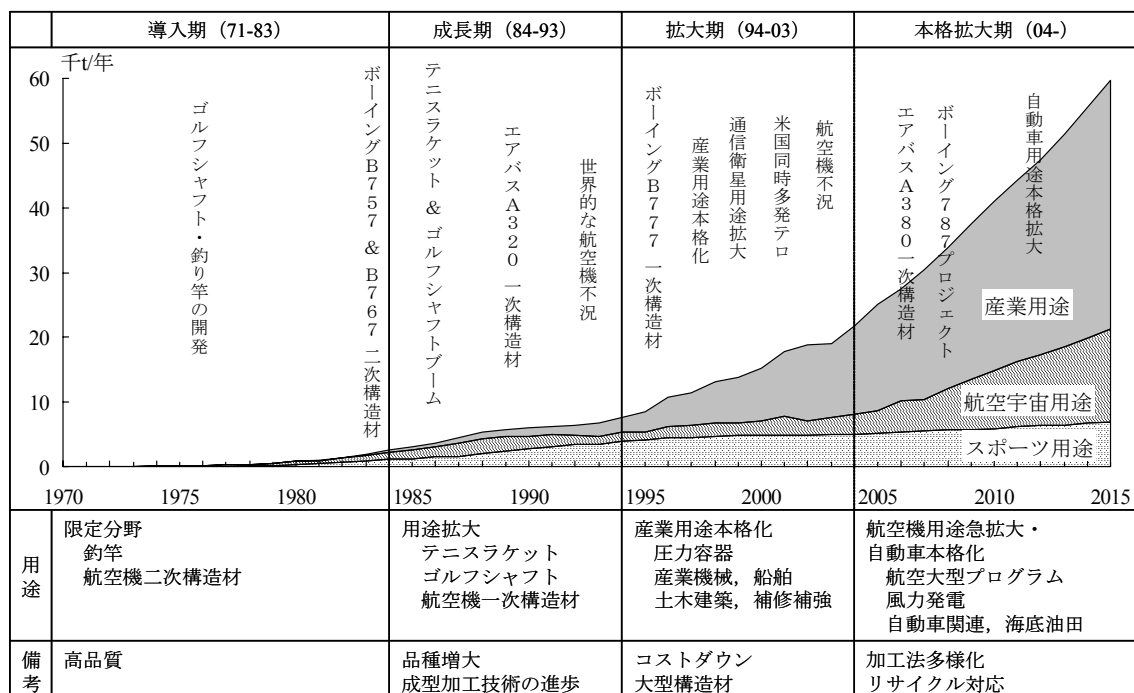


図 3.8.1 世界の炭素繊維市場の変遷[20]

宇宙用途では、特に通信衛星用途に定着している。今後はロケットやスペースシャトルにもさらなる適用が期待されている。

スポーツ用途ではゴルフクラブが 70%を占めており、年間約 2,400t がゴルフシャフトに消費されている。そして、釣竿、テニス・バドミントンのラケットがこれに次いでいる。また、F1 級レーシングカー、アメリカズカップ級競走用ヨットには不可欠な軽量・高性能構造材料となっている。これらは総じてすでに飽和状態にあり、今後も特に大きな伸びは期待できない[23]。

一般産業用途への利用は、1990 年代前半以降、炭素繊維の価格低落の結果として拡大検討が進んでいった。その結果いくつかの用途で本格的に使われてきた。主な用途を表 3.8.1 に示す。今後も産業用途でも利用拡大が期待されている。

表 3.8.1 炭素繊維の主要産業用途[23]

| 分野 | 内容 |
|----------------|-----------------------------|
| 土木・建築 | 耐震補強（橋脚、床板、建築物） |
| | 軽量建材（立体トラス構造、グルーラム） |
| | 筋材（ロッド、グリッド） |
| | シールド工法用立杭土留め壁補強剤 |
| | CFRC（ケーブル） |
| エネルギー関連 | 風力発電用翼 |
| | フライホイールバッテリー用ローター |
| | 電池電極（燃料電池、NaS） |
| 圧力容器 | CNG タンク |
| | 水素タンク |
| | 一般タンク |
| 輸送機器 海洋石油掘削 | 車両（トラックリアボディウイング、ドライブシャフト他） |
| | 船艇（船体、コンテナ） |
| | 掘削用機器（パイプ、チューブ） |
| 電子・電気機器 | 携帯機器筐体、半導体トレイ（CFRTP 使用分野） |
| 一般産業機械 | ロール（印刷機、製紙、フィルム製造用他） |
| | 化学装置（タンク、バルブ他） |
| | 医療機器（補装具、車椅子、X 線機器） |
| | 繊維機械（シャトル） |
| | ロボット（アーム） |

3.9 乗用車への CFRP 適用の現状

これまで述べたように CFRP は非常に優れた軽量化素材である。近年では乗用車への適用も進められている。表 3.9.1 に現在販売されている乗用車の CFRP の適用事例を示す。CFRP の乗用車への適用は進んでいるように見えるが、これらに共通して言えることは、「高級車またはスポーツカーである」ことと、「部品の代替にとどまっている」ということである。量産車に一次構造材として適用され広く普及した例はまだ無い。CFRP の優れた性能を十分生かす生産加工技術が発達していないからである。現状では、大量生産される部品は比較的シンプルな形状であり、より複雑な部品に対してはそれらのプロセスを適用できない。そして、複雑な形状を有する部品は非常に限られた数しか生産できない。それらの原因となっている CFRP の課題は以下のようなものがある[24]。

(1) 生産速度が遅い

CFRP 車ボディは年間 2 千台までの乗用車には使用されているが、年間数万台を生産できるシステムができて初めてブレークスルーを達成したこととなる。これに対し、例えば Mercedes-Benz の代表的な生産量は 3 万台 (SL)、10 万台 (S クラス)、25 万台以上 (C、E クラス) である。これを達成するための生産時間は金型当たり 3~5 分である。そのためには、現在スーパーカー生産に支配的である、樹脂の含浸・硬化などの過程に非常に多くの時間を要する手作業（ハンドレイアップ、オートクレーブなど）から、完全自動生産システムに移行する必要がある。このとき単に生産量の増加だけでなく、従来車並みの品質レベルとその定常性が重要となる。

(2) コストが高い

CFRP が高コストなのは炭素繊維 (CF) の価格が高いからだという見方は多い。CF の価格は、その需要量が伸びてきたため近年下がってきているが依然として高価である (図 3.9.1)。しかし、このコストのさらなる急激な低減を望むのは現実的ではなく、むしろ CFRP の生産コストに目を向けるべきであろう。その目標として例えば、高度の生産自動化、プロセスチェーンでの中間製品数とコストの削減、スケールメリットのあるプロセスの開発、廃棄物とスクラップの削減などが挙げられる。

(3) リサイクルが困難である

通産省の「使用済み自動車リサイクル・イニシアチブ」によれば[25]、2015 年には自動車用材料のリサイクル率を 95%まで引き上げるという目標を掲げており、自動車メーカー各社もこの流れに追従しているため、現在自動車におけるリサイクル性は安全性や燃費などと同レベルの重要項目であると言える。しかしながら、現在 CFRP はおもに熱硬化性樹脂を使用しており、その性質からリサイクルが非常に困難である。また、そもそも市場規模がせいぜい年間 2 万 t の生産量であるためリサイクルの必要がなかった。そのためシュレッダーダストとして廃棄されているものがほとんどである。

表 3.9.1 乗用車における CFRP の適用例[26]

| メーカー | 自動車名 | 適用箇所 |
|-------------------|--|---------------------------------------|
| ゼネラルモーターズ | シボレーコルベット Z06 コンパチブル (2004 年モデル) | フード |
| Berg | ポルシェの車種 フェラーリの車種 ほか多数 | ウイング ボンネット ミラー スポイラー バンパー |
| ポルシェ | カレラ GT | シャーシ ボディパネル |
| モスラー・オートモティヴ | Photon | ボディパネル ダッシュボード シート |
| メルセデス・ベンツ | メルセデス・ベンツ SLR マ クラーレン | モノコックの一部 ボディパネルの一部 |
| C-WEST | 多数 | エアロパーツ |
| ONEandONLY | BMWZ3 E36 クーペ | ボンネット |
| スバル | レガシイ | ドアミラー |
| Winsports | ホンダ，スバル，三菱，ト ヨタ，日産，マツダ各車 | ボンネット |
| 三菱自動車 | ランサーエボリューション | リアスポイラー |
| マツダ | RX-8 | プロペラシャフト |
| 日産 | フェアレディ Z | プロペラシャフト |
| キャデラック | XLR | フード |
| MG Sport & Racing | XPower SV | ボディ |
| ダイハツ | UFE- II | ボディ |
| フォルクスワーゲン | パサート | フロントエンド |

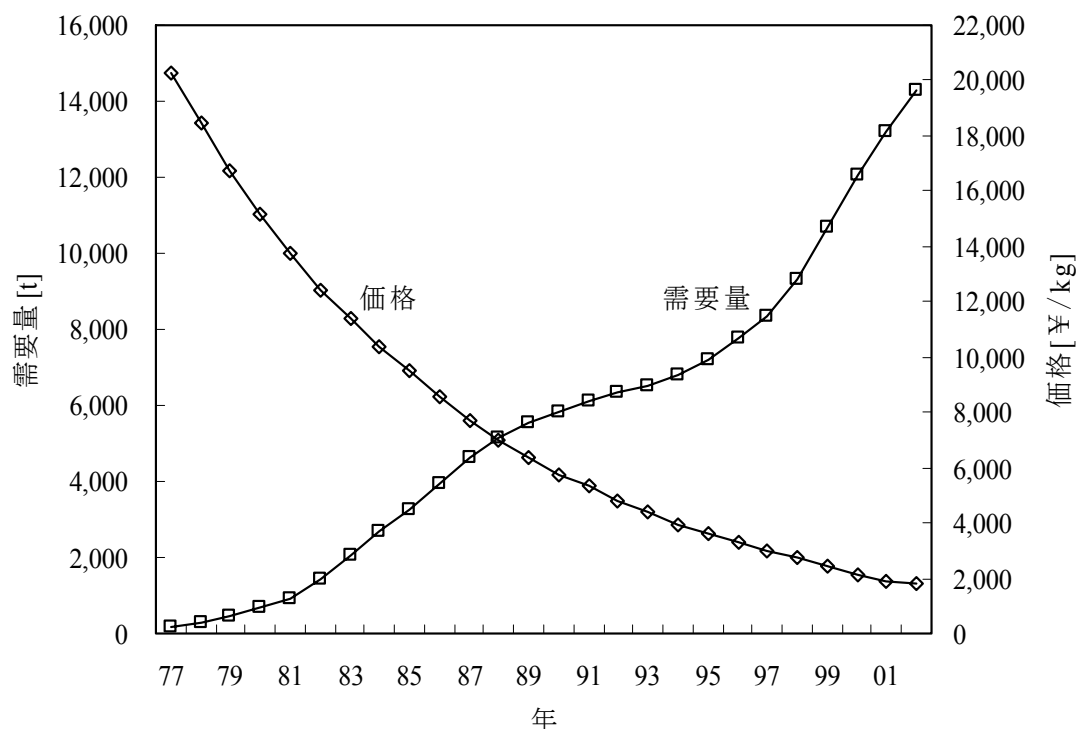


図 3.9.1 PAN 系炭素繊維の世界の需要量と価格の推移[27]

このような理由のため CFRP の乗用車への適用はなかなか進まないのが現状である。これらの課題をクリアすべく、数多くの研究開発が進められており、数多くの成果が報告されている（例えば[28][29][30]）。特に自動車用 CFRP としては SMC や RTM に関連するものが中心で、高サイクル成形やコストの削減が期待されている。これらの技術的な革新が量産車への適用には不可欠である。

3.10 結言

本章では、自動車の環境負荷削減において効率的な方策である車体軽量化による燃費向上と、そのための軽量化素材について述べた。自動車の環境負荷を抑えるには、走行時での対策が最も効率的である。車体の軽量化はその有効な対策の 1 つであり、軽量化素材として様々な金属材料や複合材料が研究されている。このうち最も軽量化効果があるのは CFRP である。ただし、量産車に適用するには成型、リサイクル、コストなど問題が多く、現状では材料開発レベルである。次章以降では、量産車へ適用する CFRP の材料開発目標値と省エネルギー効果について述べていく。

第4章 量産車用 CFRP の開発目標

4.1 緒言

本研究ではスチールの代わりに CFRP を用いることにより軽量化を考えた. このとき構造解析により部材ごとに必要な力学的特性を算出したり, CFRP と金属の適切な接合などを考慮に入れる必要がある. しかしながら量産車用 CFRP の材料開発および量産車への応用技術の開発は始まったばかりであり, 詳細な軽量化率の検討は困難であるため, 本研究ではその第一段階として, 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えた. ここでいう軽量化ポテンシャルとは, 理論的に導かれる最大限軽量化したときの重量を, スチールを 1 としたときに対して表した比である.

表 4.1.1 は平均的な乗用車の部位別重量を示したものである[1]. ボディ, 内外装品, シャーシ合わせて約 71%の重量を占め, そのほとんどがスチールであり, これらを CFRP で代替した. 一口にボディと言っても, 多種多様な部品から構成され, 求められる力学特性も異なる. その他の部位についても同様である. しかしながら, 本研究では 5.4.3 項で述べるリサイクルシナリオも考慮に入れながら解析を単純化するために, 次のようにフレッシュ CFRP を 2 種類に分類した.

表 4.1.1 乗用車の部位別重量[1]

| 部位または部品 | 合計重量 | | 鉄鋼 [kg] | 非鉄金属 [kg] | その他 [kg] |
|----------------|---------|--------|------------|--------------|-------------|
| | [kg] | [%] | | | |
| ボディ | 475.04 | 34.42 | 453.43 | 6.60 | 15.02 |
| 内外装品系 | 223.49 | 16.19 | 66.63 | 0.00 | 156.87 |
| シャーシ | 278.49 | 20.18 | 209.68 | 32.88 | 35.94 |
| エンジン系 | 194.39 | 14.09 | 142.14 | 40.38 | 11.89 |
| 駆動・操舵系 | 48.62 | 3.52 | 43.27 | 2.52 | 2.85 |
| 電装品系 | 117.69 | 8.53 | 31.26 | 38.35 | 48.08 |
| 液, その他 | 42.26 | 3.06 | 12.41 | 0.00 | 29.85 |
| 対象車の重量 [kg] | 1380.00 | 100.00 | 958.82 | 120.72 | 300.49 |
| 対象車の材料構成 [wt%] | 100.0 | - | 69.5 | 8.7 | 21.8 |

まず、ボディとシャーシは自動車の部材の中で特に強い強度と剛性が求められる。このうちボディは路面からの突き上げだけではなく、コーナリングや加減速により変形しようとする力にさらされる。しなやかに安定した走行を保証するには、このとき原型を保つような強いボディでなければならない。つまりボディは単に強度が大きいだけでは自動車部材として不十分で、むしろ剛性が重視される。よって本研究ではボディは剛性設計、シャーシは強度設計とした。内外装品系は強度設計とした。

繊維含有率や樹脂によって CFRP の物性が大きく変わることは前章で述べた。本章では剛性設計の外板部材と強度設計の構造部材それぞれにおいてどのような CFRP を使うのが適当なのか、またその軽量化ポテンシャルはどの程度なのかをマクロ的に求めた。

4.2 各種基礎素材の軽量化ポテンシャル

車体軽量化用に研究が進められている金属基礎素材と CFRP の比強度と比剛性を示した図 3.6.1 を再掲する。なお、自動車構造ではパネル材の曲げ剛性での比較となるので弾性率の 3 乗根を密度で割った構造効率指標を用いている。

近年スチールの高強度化が考えられているものの、比剛性は変わらないため適用可能部材が限定される。一方、CFRP は繊維体積含有率 (Vf) を変化させることで広い力学特性を発現できることが図からもわかる。

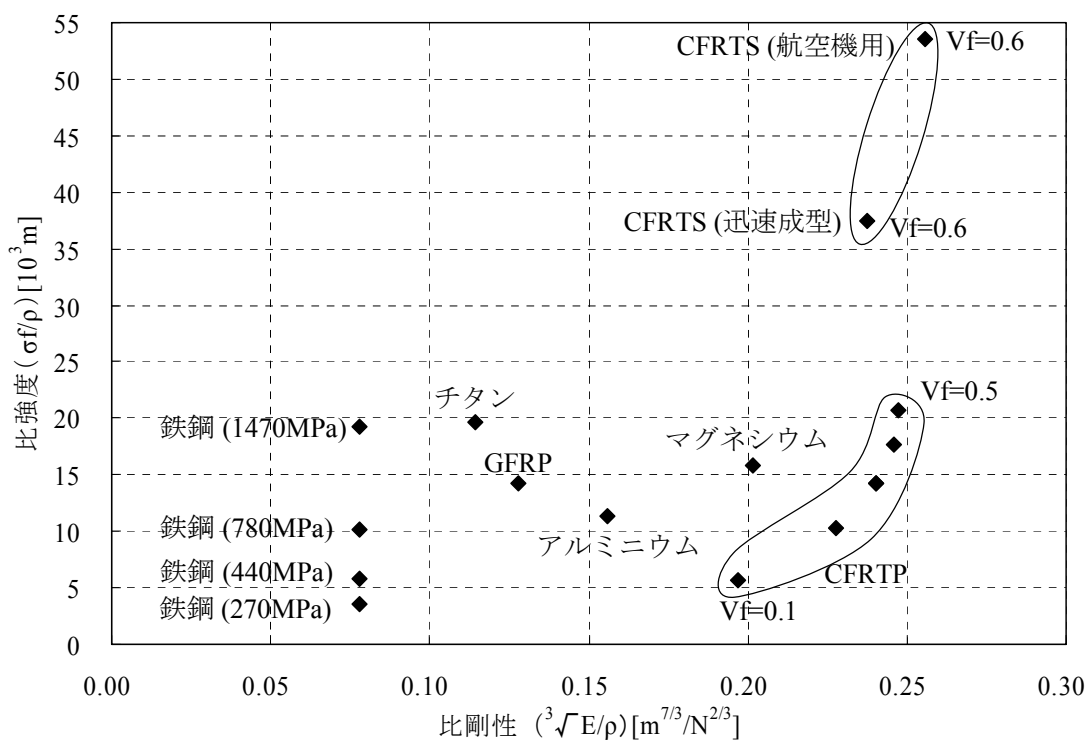


図 3.6.1 各種基礎素材の比強度と比剛性

図中の CFRP は 4 つのグレードに分かれている。航空機用 CFRTS は、現在航空機や F1 車に用いられる極めて高性能な熱硬化性 CFRP である。迅速成型 CFRTS は、これよりもいくらか性能は落ちるものの、迅速成型を目標として開発中の連続繊維の熱硬化性 CFRP であり、まずは高級車への適用の拡大を検討している。さらに量産車に CFRP を普及させるには、コストとリサイクル性などの点で熱可塑性 CFRP の実用性が求められる。熱可塑性 CFRP は連続繊維 CFRTTP と非連続繊維 CFRTTP に大きく分かれる。しっかりとした強度・剛性が求められる部材に連続繊維 CFRTTP を用い、性能が落ちてきたら粉砕・溶融して非連続繊維 CFRTTP とし、グレードの低い部材に利用することを想定している。繊維は全て量産車対応として東レが想定している PAN 系 T700 クラスとした。熱硬化性樹脂、熱可塑性樹脂として、それぞれエポキシ (EP) とポリプロピレン (PP) を想定した。

表 4.2.1 各材料の物性

| | 強度 [MPa] | 強度 発現率 | 剛性 [GPa] | 剛性 発現率 | 比重 [g/cm ³] | 比強度 [10 ³ m] | 比剛性 [m ^{7/3} /N ^{2/3}] |
|----------------------|-------------|-----------|-------------|-----------|----------------------------|----------------------------|--|
| 一般構造用圧延鋼板 | 270 | - | 210 | - | 7.80 | 3.53 | 0.078 |
| 一般構造用圧延鋼板 | 440 | - | 210 | - | 7.80 | 5.75 | 0.078 |
| 熱延高張力鋼板 | 780 | - | 210 | - | 7.80 | 10.20 | 0.078 |
| 熱延超高張力鋼板 | 1470 | - | 210 | - | 7.80 | 19.22 | 0.078 |
| アルミニウム合金 | 300 | - | 70 | - | 2.70 | 11.33 | 0.156 |
| チタン合金 | 850 | - | 120 | - | 4.40 | 19.70 | 0.114 |
| マグネシウム | 280 | - | 45 | - | 1.80 | 15.86 | 0.201 |
| GFRP | 308 | - | 21 | - | 2.20 | 14.28 | 0.128 |
| CFRTS (航空機用, Vf=0.6) | 820 | 1.0 | 60 | 1.0 | 1.56 | 53.60 | 0.256 |
| CFRTS (迅速成型, Vf=0.6) | 574 | 0.7 | 48 | 0.8 | 1.56 | 37.52 | 0.238 |
| CFRTTP (Vf=0.5) | 273 | 0.4 | 35 | 0.7 | 1.35 | 20.62 | 0.247 |
| CFRTTP (Vf=0.4) | 219 | 0.4 | 28 | 0.7 | 1.26 | 17.72 | 0.246 |
| CFRTTP (Vf=0.3) | 164 | 0.4 | 21 | 0.7 | 1.17 | 14.29 | 0.240 |
| CFRTTP (Vf=0.2) | 109 | 0.4 | 14 | 0.7 | 1.08 | 10.29 | 0.228 |
| CFRTTP (Vf=0.1) | 55 | 0.4 | 7 | 0.7 | 0.99 | 5.66 | 0.197 |
| 炭素繊維 | - | - | - | - | 1.80 | - | - |
| エポキシ | - | - | - | - | 1.20 | - | - |
| ポリプロピレン | - | - | - | - | 0.90 | - | - |

(注) アルミニウム合金は高強度 6000 系, チタン合金は Ti-5Al-2.5Sn, GFRP は炭素繊維 66% の SMC.

表 4.2.1 は各材料の強度・強度発現率・剛性・剛性発現率・比重・比強度・比剛性を示したものである。ここで、金属、GFRP、CFRP（航空機用）については、各種カタログや業界へのヒアリングなどから平均的な値を用いている。その他の CFRP の強度・剛性発現率については、現在材料実験が進められている最中なので仮定のものである。これらはむしろ金属や既存の CFRP などの材料との比較や軽量化の目標値から、逆に発現率目標値が決まる性質のものである。ただ、一般的に剛性発現率は強度発現率より高めであり、前者の方が後者よりもばらつきが小さいと予想されるので、前者の方を大きめに設定した。

図 4.2.1 と表 4.2.2 は、各材料の外板部材（剛性ベース）と構造部材（強度ベース）の軽量化ポテンシャルである。基準であるスチール（780MPa）の比剛性・比強度に対する比の逆数であり、数値が小さいほど部材を軽くできる。

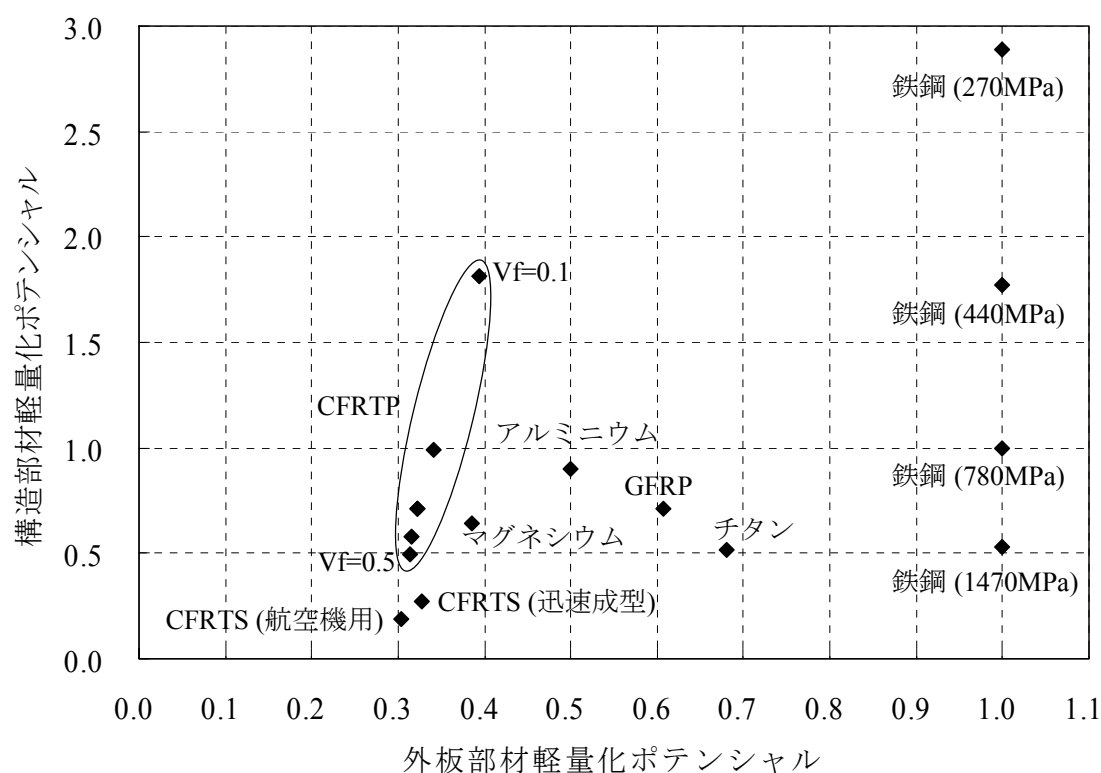


図 4.2.1 外板部材と構造部材の軽量化ポテンシャル

表 4.2.2 外板部材と構造部材の軽量化ポテンシャル

| | 比強度 [10 ³ m] | 比剛性 [m ^{7/3} /N ^{2/3}] | 軽量化ポテンシャル | |
|----------------------|----------------------------|--|-----------|-------|
| | | | 強度ベース | 剛性ベース |
| 一般構造用圧延鋼板 (270MPa) | 3.53 | 0.078 | 2.89 | 1.00 |
| 一般構造用圧延鋼板 (440MPa) | 5.75 | 0.078 | 1.77 | 1.00 |
| 熱延高張力鋼板 (780MPa) | 10.20 | 0.078 | 1.00 | 1.00 |
| 熱延超高張力鋼板 (1470MPa) | 19.22 | 0.078 | 0.53 | 1.00 |
| アルミニウム合金 | 11.33 | 0.156 | 0.90 | 0.50 |
| チタン合金 | 19.70 | 0.114 | 0.52 | 0.68 |
| マグネシウム | 15.86 | 0.201 | 0.64 | 0.39 |
| GFRP | 14.28 | 0.128 | 0.71 | 0.61 |
| CFRTS (航空機用, Vf=0.6) | 53.60 | 0.256 | 0.19 | 0.30 |
| CFRTS (迅速成型, Vf=0.6) | 37.52 | 0.238 | 0.27 | 0.33 |
| CFRTP (Vf=0.5) | 20.62 | 0.247 | 0.49 | 0.31 |
| CFRTP (Vf=0.4) | 17.72 | 0.246 | 0.58 | 0.32 |
| CFRTP (Vf=0.3) | 14.29 | 0.240 | 0.71 | 0.32 |
| CFRTP (Vf=0.2) | 10.29 | 0.228 | 0.99 | 0.34 |
| CFRTP (Vf=0.1) | 5.66 | 0.197 | 1.80 | 0.39 |

表 4.2.3 は各種 CFRP の部品コストである。炭素繊維は一律 1400 円/kg とした。熱硬化性樹脂はエポキシ (EP)、熱可塑性樹脂はポリプロピレン (PP) を想定した。繊維含有率、成型・加工における仮定から部品コストを算出した。

金属材料の部品コストはヒアリングにより得た平均的な値とした。780MPa 以上のハイテン (高張力鋼) については将来的に従来鋼と同等になると仮定した。

これらのコストを用いて求めた各素材の外板部材 (剛性ベース) と構造部材 (強度ベース) の低コスト化ポテンシャルを、図 4.2.2 と表 4.2.4 に示す。低コスト化ポテンシャルは、基準となるスチール (780MPa) のコストに対する各材料のコストの比に、それぞれの比強度もしくは比剛性を乗じたものである。数値が小さいほど部品を安くできる。

表 4.2.3 各種 CFRP の部品コスト

| | 繊維 | | 樹脂 | | | 成型 | | 繊維重量 含有率 | コスト [円/kg] |
|----------------------|-----|-------|----|-----|-------|---------|-------|-------------|---------------|
| | 密度 | コスト | 種類 | 密度 | コスト | 種類 | コスト | | |
| CFRTS (航空機用, Vf=0.6) | 1.8 | 1,400 | EP | 1.2 | 2,000 | オートクレーブ | 1,000 | 0.69 | 2,585 |
| CFRTS (迅速成型, Vf=0.6) | 1.8 | 1,400 | EP | 1.2 | 1,000 | RTM など | 500 | 0.69 | 1,777 |
| CFRTP (Vf=0.5) | 1.8 | 1,400 | PP | 0.9 | 200 | プレス成型など | 200 | 0.67 | 1,200 |
| CFRTP (Vf=0.4) | 1.8 | 1,400 | PP | 0.9 | 200 | プレス成型など | 200 | 0.57 | 1,086 |
| CFRTP (Vf=0.3) | 1.8 | 1,400 | PP | 0.9 | 200 | 射出成型など | 200 | 0.46 | 954 |
| CFRTP (Vf=0.2) | 1.8 | 1,400 | PP | 0.9 | 200 | 射出成型など | 200 | 0.33 | 800 |
| CFRTP (Vf=0.1) | 1.8 | 1,400 | PP | 0.9 | 200 | 射出成型など | 200 | 0.18 | 618 |

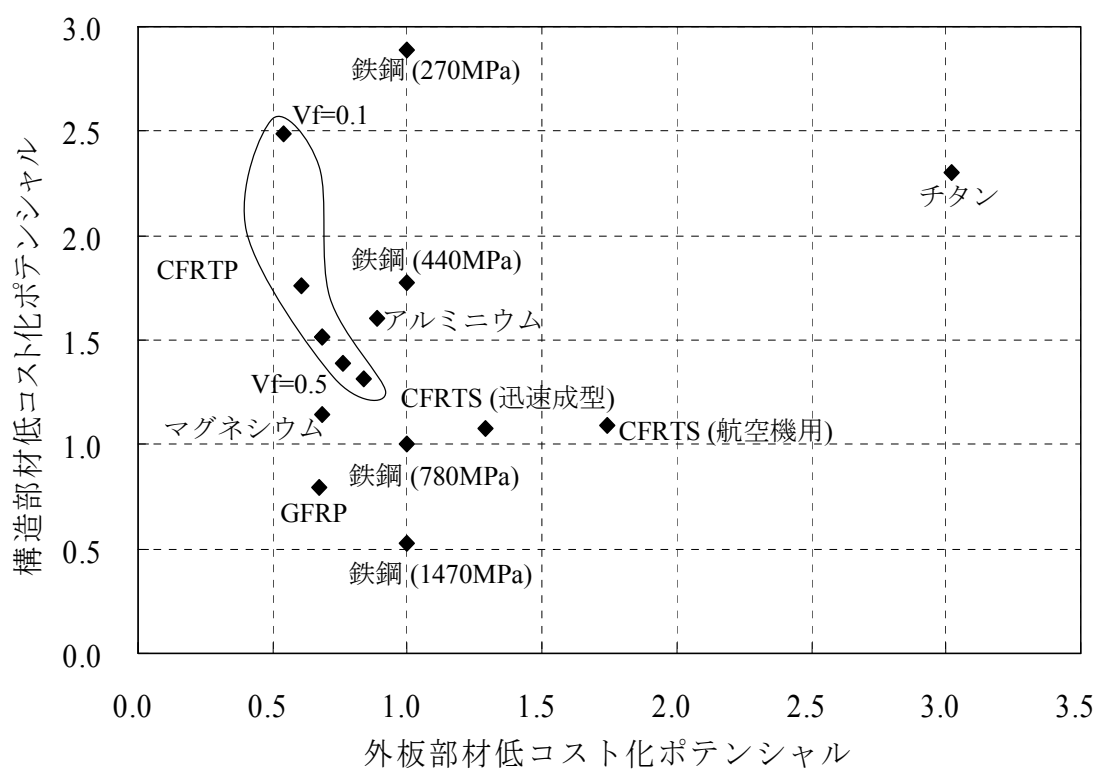


図 4.2.2 外板部材と構造部材の低コスト化ポテンシャル

表 4.2.4 外板部材と構造部材の低コスト化ポテンシャル

| | コスト [円/kg] | 低コスト化ポテンシャル | |
|----------------------|---------------|-------------|-------|
| | | 強度ベース | 剛性ベース |
| 一般構造用圧延鋼板 (270MPa) | 450 | 2.89 | 1.00 |
| 一般構造用圧延鋼板 (440MPa) | 450 | 1.77 | 1.00 |
| 熱延高張力鋼板 (780MPa) | 450 | 1.00 | 1.00 |
| 熱延超高張力鋼板 (1470MPa) | 450 | 0.53 | 1.00 |
| アルミニウム合金 | 800 | 1.60 | 0.89 |
| チタン合金 | 2,000 | 2.30 | 3.02 |
| マグネシウム | 800 | 1.14 | 0.69 |
| GFRP | 500 | 0.79 | 0.68 |
| CFRTS (航空機用, Vf=0.6) | 2,585 | 1.09 | 1.74 |
| CFRTS (迅速成型, Vf=0.6) | 1,777 | 1.07 | 1.29 |
| CFRTP (Vf=0.5) | 1,200 | 1.32 | 0.84 |
| CFRTP (Vf=0.4) | 1,086 | 1.39 | 0.76 |
| CFRTP (Vf=0.3) | 954 | 1.51 | 0.68 |
| CFRTP (Vf=0.2) | 800 | 1.76 | 0.61 |
| CFRTP (Vf=0.1) | 618 | 2.47 | 0.54 |

以上で求めた軽量化ポテンシャルと低コスト化ポテンシャルを用いて、各材料の軽量材としての適用性を検討した。

まず外板部材適用性を検討する。図 4.2.1 より、スチール比 0.4 以下の軽量化ポテンシャルを持つのは CFRTS、CFRTP、マグネシウムである。アルミニウムが 0.5、GFRP が 0.6、チタンが 0.7 と続く。また図 4.2.2 より、コストの点ではアルミニウム、マグネシウム、CFRTP、GFRP が有望である。製造原単位の点では GFRP と（リサイクルを前提とした）CFRTP が有望である（CFRP の原単位については第 5 章で詳述する）。以上より、性能的には CFRTS、CFRTP（Vf が大きいほどよい）、マグネシウム、アルミニウム、GFRP の順で有望と考えられるが、コストや製造原単位を加味して総合的に見た場合、CFRTP が有望である。CFRTP は Vf が小さいほど、すなわち炭素繊維の使用量が少ないほどコストや製造原単位の点で良いが、その分増加する板厚を考慮に入れる必要がある。Vf の検討については次節で述べる。

次に構造部材適用性について検討する。構造部材と外板部材の大きな違いは、強度が重視されることと、金属材料ではリサイクル材が適用可能となる点である。図 4.2.1 より CFRTS および Vf の大きい CFRTP の軽量化率が、外板部材の場合と同様に大きいことがわかる。航空機用 CFRTS の軽量化ポテンシャルは 0.2、迅速成型 CFRTS は 0.3、CFRTP（Vf=0.5）は 0.5、CFRTP（Vf=0.4）、マグネシウムは 0.6、CFRTP（Vf=0.3）は 0.7 である。コストの面では GFRP の優位性が際だっているが、軽量化が目的であれば総合的に見て CFRTS が最

も有望である。CFRTP の強度発現率が向上・安定化し CFRTS のポテンシャルに近づけば、CFRTP もまた有望な材料である。

4.3 パネル材の軽量化と板厚に及ぼす密度と弾性率の関係[2]

前節で述べたように、CFRTP は繊維含有率が小さいほどコストや製造原単位の点で良いが、その分増加する板厚を考慮に入れなければならないので、どれくらいの Vf が適当なのかを検討する必要がある

図 4.3.1 と図 4.3.2 は表 4.3.1 から計算される CFRP の密度と弾性率(繊維配向は面内等方)に及ぼす炭素繊維体積含有率 (Vf) の関係である。弾性率に関しては実験値との一致が示されている。

表 4.3.1 対象とした基礎素材の物性

| 材料 | 密度 [g/cm ³] | 弾性率 [GPa] |
|----------------|----------------------------|--------------|
| スチール | 7.8 | 210 |
| アルミニウム | 2.8 | 73 |
| マグネシウム | 1.7 | 40 |
| 炭素繊維 (CF) | 1.8 | 230 |
| ポリプロピレン (PP) | 0.9 | 2 |
| ポリカーボネート (PC) | 1.2 | 2.4 |
| 不飽和ポリエステル (UP) | 1.2 | 4 |

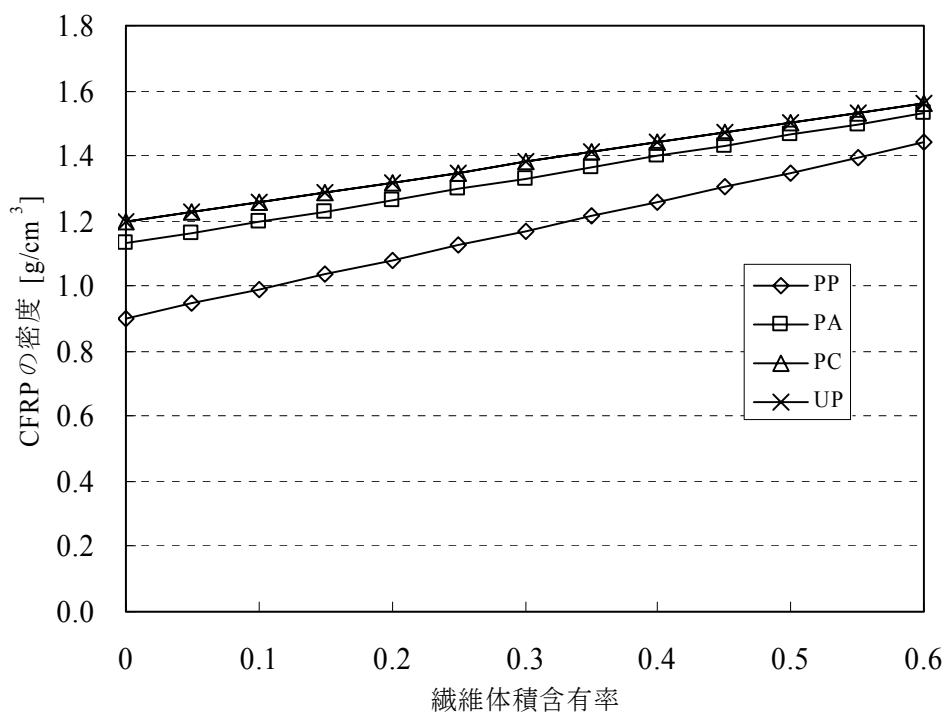
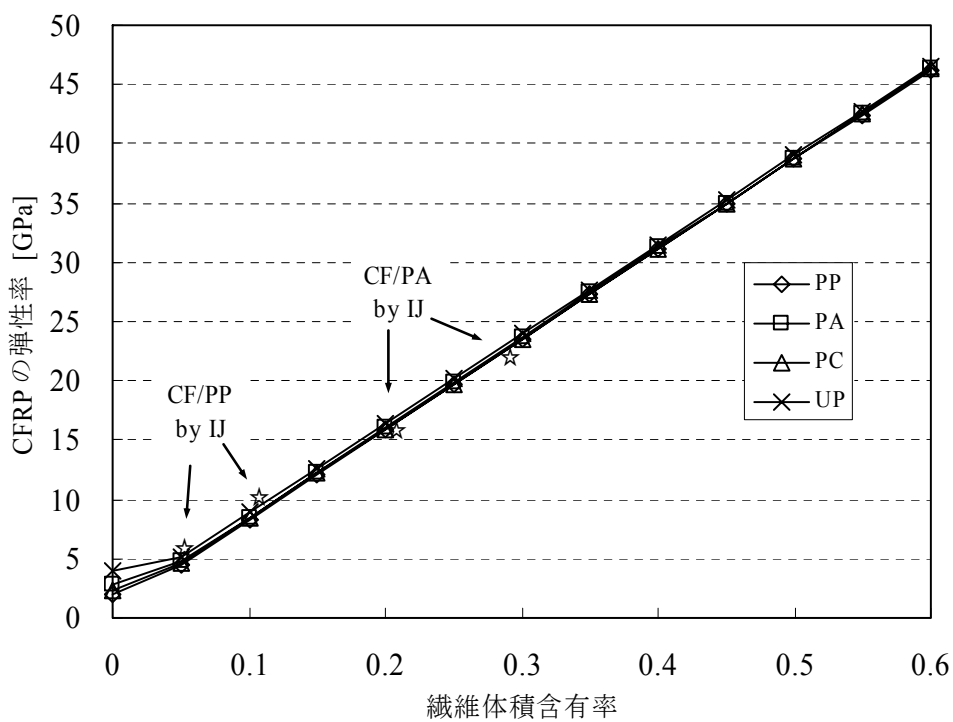


図 4.3.1 炭素繊維の体積含有率と CFRP の密度の関係



(注) 図中にナイロン 66 とポリプロピレンの射出グレードの実験値をプロット

図 4.3.2 炭素繊維の体積含有率と CFRP の弾性率の関係

これらをもとに、パネル材の軽量化と板厚に及ぼす密度と弾性率の関係を求める。
板厚 t 、深さ B 、長さ L のパネル材の板厚方向の変形 δ は曲げ荷重に対して

$$\delta = \frac{\alpha ML^2}{EI} \quad (\alpha \text{ はパネル材形状と負荷様式により定まる定数}) \quad (4.1)$$

集中荷重に対して

$$\delta = \frac{\beta PL^3}{EI} \quad (\beta \text{ はパネル材形状と負荷様式により定まる定数}) \quad (4.2)$$

であるから、パネル材の板厚方向の変形は E (弾性率) ではなく EI で決まる。ここで EI は曲げ剛性と呼ばれ、 I は断面二次モーメント ($Bt^3=12$) である。

パネル材の重量は

$$W = \rho LBt \quad (\rho \text{ は密度}) \quad (4.3)$$

であるから、スチール (下付 s) に対する複合材 (下付 c) の重量比は

$$\frac{W_c}{W_s} = \frac{\rho_c LBt_c}{\rho_s LBt_s} \quad (4.4)$$

となる。スチールパネルと複合材パネルの EI が同じとき

$$\frac{E_c I_c}{E_s I_s} = \frac{E_c t_c^3}{E_s t_s^3} = 1 \quad (4.5)$$

であるから、次式を得る。

$$\frac{W_c}{W_s} = \frac{\rho_c t_c}{\rho_s t_s} = \frac{\frac{\rho_c}{\sqrt[3]{E_c}}}{\frac{\rho_s}{\sqrt[3]{E_s}}} \quad (4.6)$$

ここで $\sqrt[3]{E/\rho}$ は構造効率 (パネル材の軽量化指標) であり、これが大きいほど同じ性能を維持しながらパネルを軽くすることができる。すなわち、図 4.3.3 のように鋼板 ($E=210\text{GPa}$, $\rho=7.8\text{g/cm}^3$) では 0.76, アルミ ($E=73\text{GPa}$, $\rho=2.8\text{g/cm}^3$) では 1.49 なのでアルミ板は鋼板を約半分に軽くすることができる。また、CFRP は繊維体積含有率により 1.4~2.5 となり、スチール比で 50~70%の軽量化が可能となる (図 4.3.4)。

一方このとき、パネル材の板厚比 t_c/t_s は

$$\frac{E_c I_c}{E_s I_s} = \frac{E_c t_c^3}{E_s t_s^3} = 1 \quad (4.7)$$

から

$$\frac{t_c}{t_s} = \frac{\sqrt[3]{E_s}}{\sqrt[3]{E_c}} \quad (4.8)$$

というように E の比のみで決まることがわかる。鉄板の $\sqrt[3]{E}$ は 5.94 で、アルミは 4.18 なので、アルミパネルは鉄板の 1.42 倍の板厚となる（図 4.3.5）。CFRPP の $\sqrt[3]{E}$ は 1.26～3.59 なので、板厚はスチール比 1.65～4.71 倍の範囲で厚くなる。

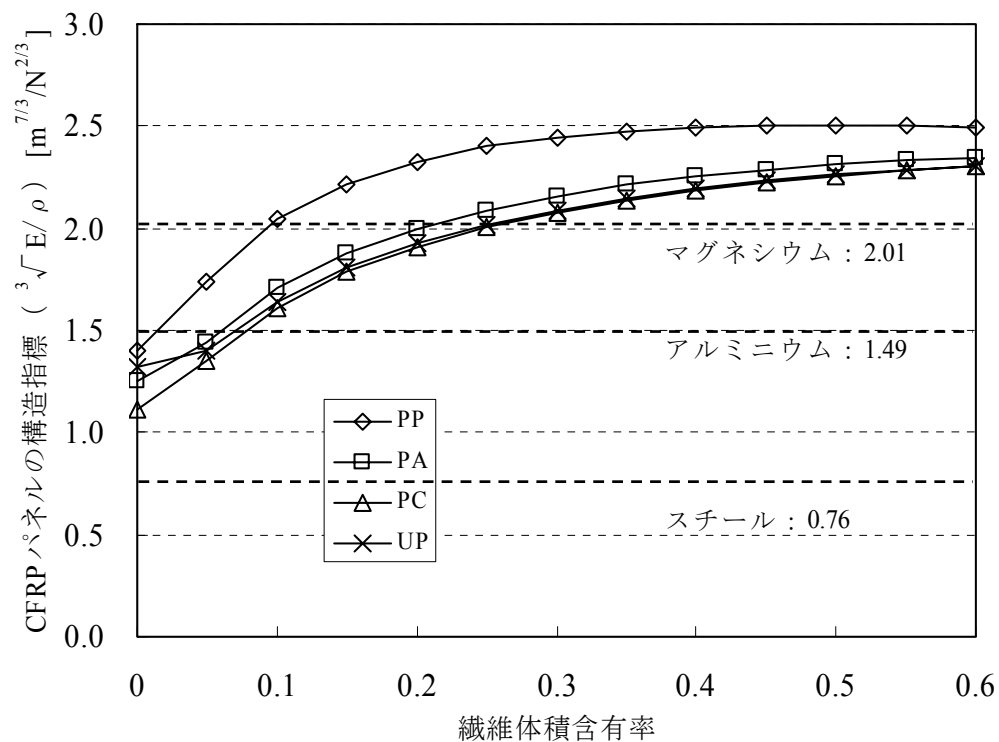


図 4.3.3 炭素繊維の体積含有率と CFRP パネルの構造指標の関係

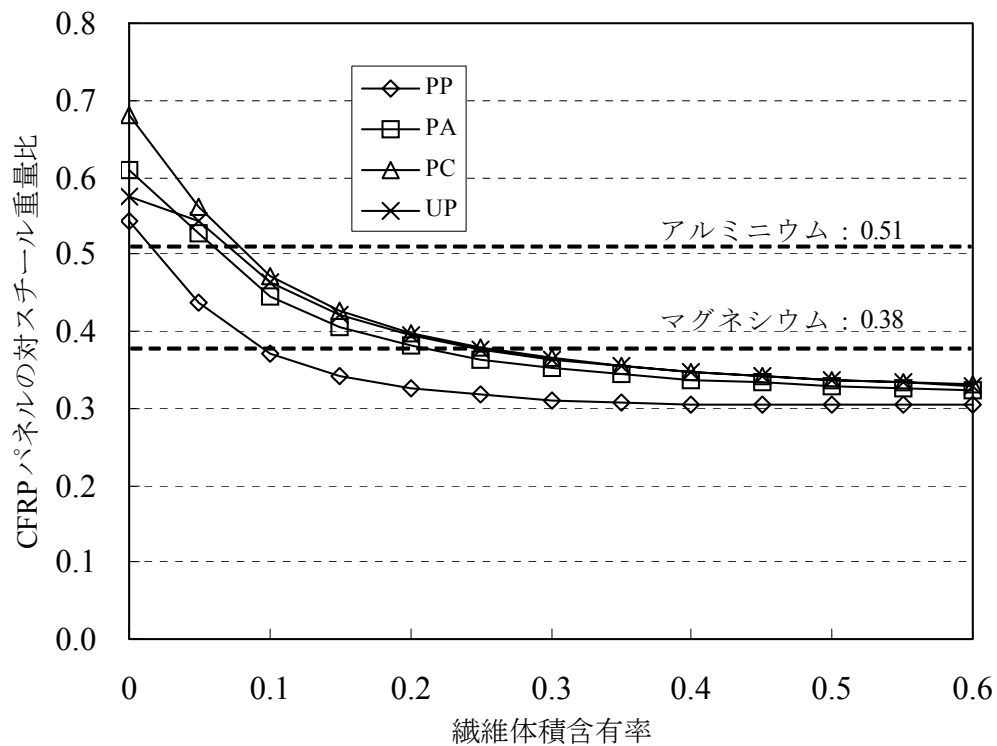


図 4.3.4 炭素繊維の体積含有率と CFRP パネルの対スチール重量比の関係

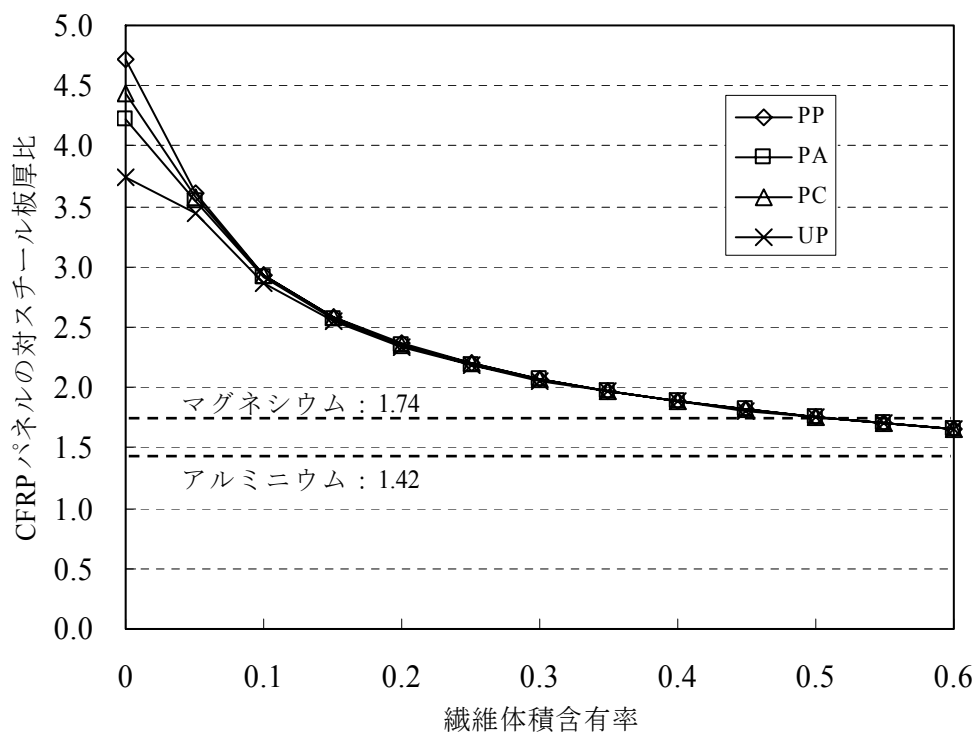


図 4.3.5 炭素繊維の体積含有率と CFRP パネルの対スチール板厚比の関係

4.4 炭素繊維体積含有率の目標値[2]

前節で述べた曲げ剛性の観点から計算した V_f による軽量化率と板厚の変化から次のことが言える。

- ・ $V_f=0.25$ を超えたあたりから軽量化率はほとんど向上しない。
- ・ 低い V_f は低コスト化の視点と含浸性の悪い TP の成型性で有利である。
- ・ また、板厚や強度面の制約が無ければ、 $V_f=0$ の近くでも鋼板を半分以上軽くできる。

なお、いずれにせよ板厚は必ず鋼板よりは厚くなるが、一定厚さの鋼板をプレス加工するのとは違い、インジェクションにせよスタンピングにせよ板厚の分布を気にしない CFRTP では、厚さの分布を最適化することでさらなる軽量化をはかることが可能となる。

ところで、強度に関しては、パネル材全面に面内方向の強度を期待するとは思えないため、本来ならば接合部等のみを補強することで足りると思われるが、汎用性と信頼性を考えた上での材料設計のために、次に、目安の概算であるが強度面の制約から必要となる V_f を考える。すなわち、鉄鋼において応力で 420MPa、歪で 0.2% の範囲で線形弾性であることを求めるのは疲労対策と考え、それと同等の条件を満たす CFRP の強度と歪の条件を求めたものが図 4.4.1、図 4.4.2 である。

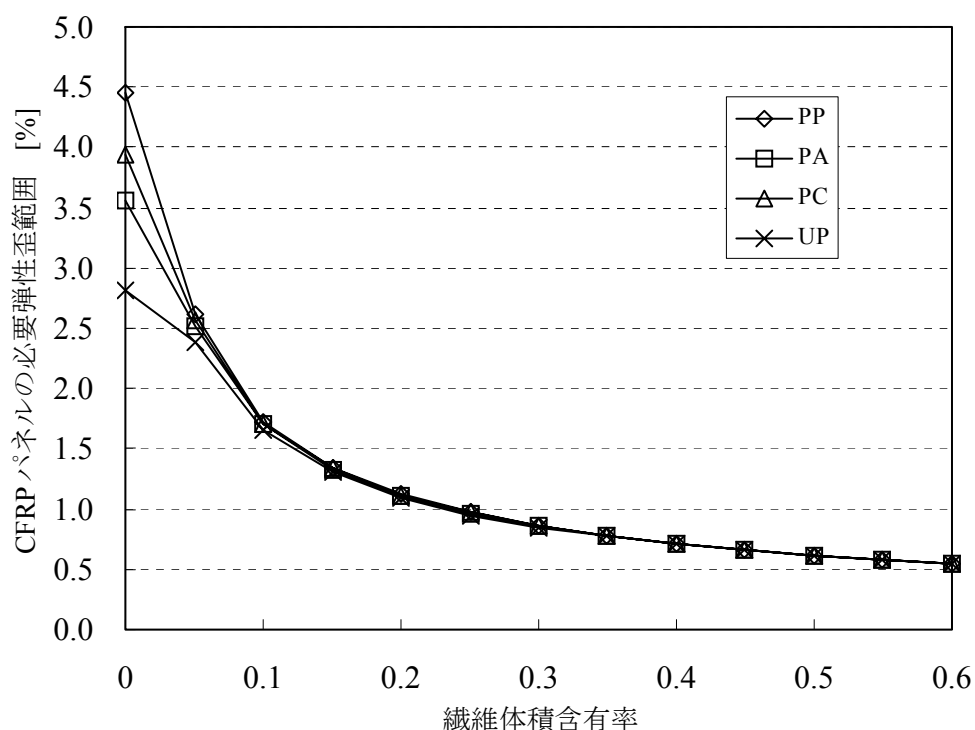


図 4.4.1 炭素繊維の体積含有率と構造用 CFRP パネルに要求される弾性歪範囲の関係

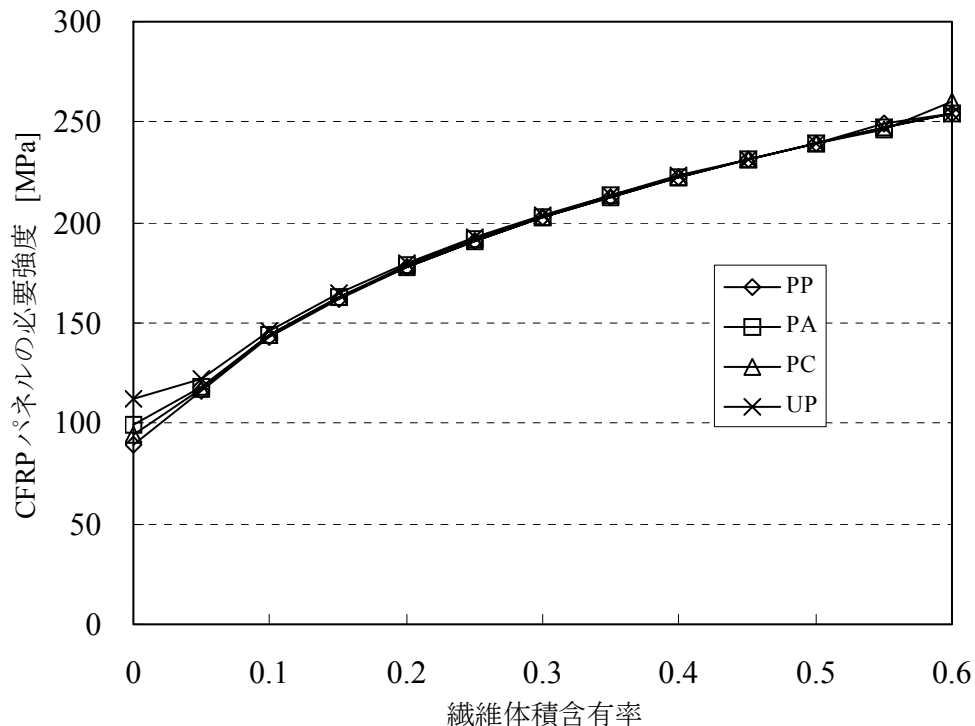


図 4.4.2 炭素繊維の体積含有率と構造用 CFRP パネルに要求される強度の関係

ところが、これまでの実験から、 $V_f=0\sim0.3$ では歪 1%以下から非線形性を示すので、今後も特に樹脂リッチな V_f が小さい所では線形弾性挙動をする歪範囲を 1%以上とすることは困難と考えられる。よって、以上のことを総合的に勘案し、繊維が切断されることを前提とするリサイクル CFRP においては、 $V_f=0.2\sim0.3$ 、弾性率 15~20GPa、線形弾性歪範囲約 1%（強度 150~200MPa）程度の目標値の設定が妥当と考えられ、このとき対スチール軽量化率 60~70%、板厚 2.0~2.5 倍となる。

次にマトリックス樹脂による相違を検討する。図 4.3.2 から、CFRP の弾性率は CF の弾性率が支配的であることがわかるが、図 4.3.1 のように PP による CFRP が軽いことから、パネル材の構造指標（図 4.3.3）すなわち軽量化（図 4.3.4）において PP が有利となることがわかる。また、CFRP パネルのスチールパネルとの重量比（図 4.3.4）を見ると、どの樹脂も鋼板を半分から 3 分の 1 の重量で代替できるポテンシャルを持っていることがわかるが、いずれにせよ図 4.3.4 だけを見ると、鋼板の軽量化の視点からは高い V_f は必要ないと言える。なお、CFRP パネルの鋼板との板厚比（図 4.3.5）、ならびに疲労破壊を防ぐために必要となる線形弾性歪範囲（図 4.4.1）と線形弾性強度（図 4.4.2）は弾性率の比のみで決まるので、樹脂による差は出ていない。また、この 3 つの指標のうち図 4.4.1 と図 4.4.2 は V_f をある程度大きくしなければならないことを示唆しているが、特に、要求される線形歪範囲（図 4.4.1）から、いずれの樹脂においても $V_f<0.2$ では構造材としての耐久性に問題が生じると

考えられる。

以上のことを総合的に勘案し、次のような目標値の設定が妥当と考える。

- ・ 連続繊維， $V_f \sim 0.3$ ，弾性率 25GPa，線形弾性歪範囲 1%：軽量化率 70%，板厚 2 倍
- ・ 不連続繊維， $V_f \sim 0.2$ ，弾性率 15GPa，線形弾性歪範囲 1%：軽量化率 60%，板厚 2.5 倍

4.5 結言

本章では、量産車用各種基礎素材の力学特性を比較し、CFRP の高い軽量化ポテンシャルを示した。剛性が優先される外板部材には、軽量化率が 60%を超える CFRTP が適していた。その中でも特に 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。強度が優先される構造部材には、 $V_f = 0.6$ の CFRTS の優位性が際だっていた。そのうち航空機用 CFRTS は確かに力学特性が優れているものの、量産車に用いるにはオーバースペックで成型速度やコストが悪いので、軽量化率が 70%の迅速成型用に開発している CFRTS が有望である。

また、CFRTP は V_f 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 V_f 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。しかし、 V_f 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 $V_f = 0.3$ 程度が妥当であることがわかった。

第5章 構造部材の製造原単位

5.1 緒言

第3章、第4章で、燃費向上の手段として CFRP の軽量化が大いに期待できることが明らかとなった。しかしながら、CFRP は一般にスチールなどの従来の素材と比べて製造に要するエネルギーが大きいと言われている。そこで、本研究ではライフサイクルアセスメント（LCA）と呼ばれる環境負荷の定量的評価手法を用いて、CFRP の導入がライフサイクル全体で環境に良いのかどうかを評価する。

LCA において、工程ごとの各資源消費量や各排出量の概略値は、物質または作業当たりの資源消費量や排出量を示す原単位に、物質質量や作業量を乗ずることにより求める。よって、LCA の計算結果は用いる原単位に大きく影響されるので、LCA を行うにあたって信頼性の高い原単位を用いることは非常に重要である。

よって、CFRP を用いた自動車の LCA を行うには、まず CFRP の原単位を用意しなければならない。このとき、CFRP の主要原料である炭素繊維の原単位データの構築は、きわめて重要な第1段階である。しかしながら、現状の炭素繊維の生産規模は小さく、CFRP の原材料の種類や製造方法、製品の種類が多岐にわたることなどの理由から、これまで炭素繊維や CFRP が LCA の対象にされることは少なかった。しかしながら、生産規模が小さいとはいえ、日本の CFRP の生産量はアメリカに次いで第2位であり、炭素繊維の生産は世界の大半のシェアを占め第1位である。原材料の製造、複合材料の成形加工、最終製品の運用などにおいて、世界市場をリードしているが、炭素繊維の原単位データ構築においても日本の果たすべき役割は大きいと考える。

そこで本研究では、近年新たに計算された炭素繊維のインベントリデータを用いて、量産車用の CFRP の原単位をリサイクルシナリオも考慮に入れて初めて検討した。これにより、第6章以降で行われる CFRP の原単位自動車の LCA が可能となった。本章では、まず LCA について解説したあと、各種基礎素材のうちスチール、アルミ、GFRP、CFRP の原単位について述べる。特に、本研究で注目している CFRP とその重要素材である炭素繊維について詳述する。

5.2 環境負荷定量分析に関する既往研究成果

5.2.1 ライフサイクルアセスメント（LCA）の概要

ある製品やサービスのライフサイクル全般にわたる環境負荷を定量的に評価する手法の代表的なものが、LCA（ライフサイクルアセスメント：Life Cycle Assessment）である。ISO14040 では[1]、「LCA は、製品の原材料の採取から製造、使用及び処分に至る生涯（す

なわち、ゆりかごから墓場まで)を通しての環境側面及び潜在的影響を調査するものである」と規定している。そしてそれは、

- ① 製品システムに関連する入力及び出力のインベントリをまとめること
- ② これらの入力及び出力に付随する潜在的環境影響を評価すること
- ③ インベントリ分析段階及び影響評価段階の結果を調査の目的に応じて解釈することから構成されている。

本来、ある環境対策が本当に環境にとって望ましいかどうかは、製品のライフサイクルを通して評価する必要がある。使用時の環境負荷が低減していたとしても、製造時や廃棄時に環境負荷を増大させている可能性もある。このような誤った判断を防ぐためには、LCAは効果的な手法である。LCAから得られる知見は本研究においても極めて有用であるため、本研究でもLCAを用いて考えていく。

図 5.2.1 にライフサイクルと環境負荷の概念図を示す。

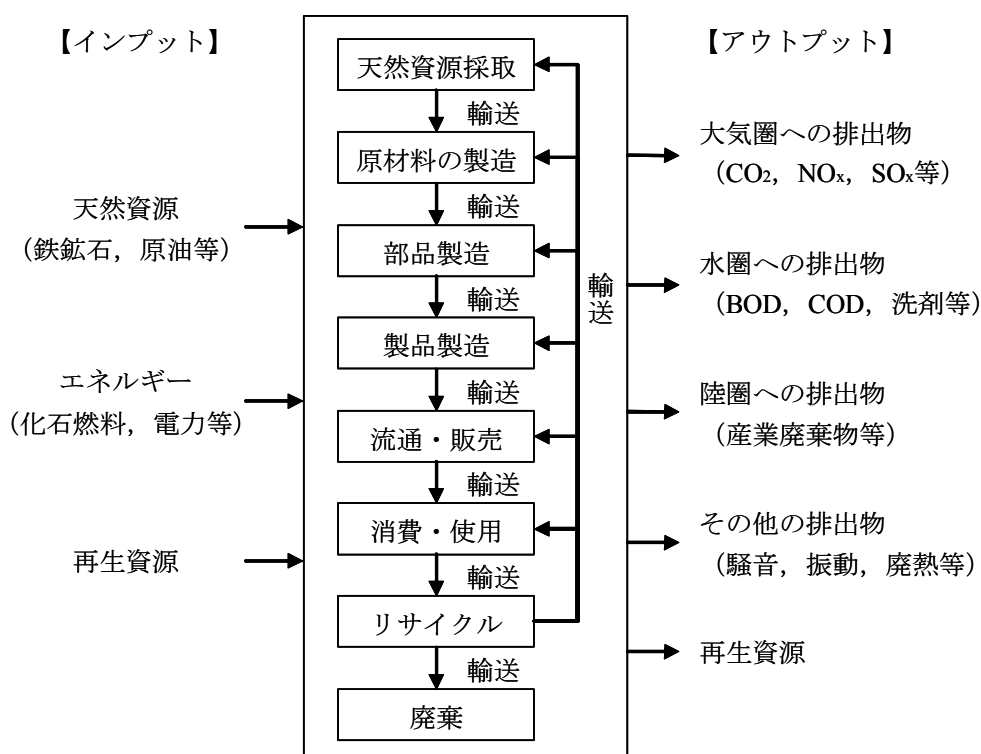


図 5.2.1 ライフサイクルと環境負荷の概念図

5.2.2 LCA 研究の歩み[2][3][4]

コカコーラ社の委託によりミッドウェスト研究所のフランクリン博士らが、1969 年に使い捨て容器とリターナルビンの環境負荷を比較分析した。これが LCA 研究の始まりとされている。その後 1973 年のオイルショックや消費者団体の影響を受けて、エネルギー消費を中心とした環境影響評価が行われ、米国環境保護庁（EPA）により REPA（Resource and Environmental Profile Analysis）としてまとめられた。ところが公害の深刻化とともに、企業の関心がエネルギーよりも汚染物質の対策に向けられたため、LCA への関心はやや下火となった。しかし 1979 年に化学製品や技術が環境に及ぼす負荷について研究する国際的な学会として SETAC（Society of Environmental Toxicology and Chemistry）が設立され、今日の LCA 研究の基盤ができあがった。製品アセスメント、ライフサイクルアナリシスやライフサイクルエネルギーなどの概念生成を経て、1980 年代には化学物質のリスク分析を中心として製品アセスメント研究が活発化した。1990 年には、製品の LCA の開発と実施の促進を目的に SETAC 財団が設立され、同年この SETAC 財団らによりアメリカのバーモント州で LCA シンポジウムが開催された。このシンポジウムを機に LCA という名称も定着するようになった。

ヨーロッパでも、アメリカと同様に 1970 年代初めから LCA の研究が続けられてきた。例えば、1972 年にイギリスで飲料容器の生産に使われるエネルギーの評価が行われた。1980 年代半ば以降には、LCA の理論的な研究が多く研究者により活発に進められるようになった。1985 年に「液体食品容器に関する指令」が出され、容器によるエネルギー消費を監視することが義務づけられた。ヨーロッパで活発に LCA 研究が行われた背景には、こうした法制度も存在している。また、1991 年にはオランダのライデン大学環境科学センターから LCA のマニュアルが発行された。

日本では、1981 年に（社）化学経済研究所が当時の通産省の委託を受けて、新素材のエネルギー消費量を分析したのははじまりとされている。この研究では新素材としてプラスチックとファインセラミックが選ばれ、それらの生涯を通しての消費エネルギーが従来の素材と比較された[5]。その後いったん下火となったが、1991 年に（社）プラスチック処理促進協会が包装材の LCA を実施し研究が再開された。このとき、エネルギー消費量だけでなく、用水消費量、大気汚染物質（ NO_x 、 SO_x 、ばいじんなど）、水質汚濁物質（BOD、COD など）、固形廃棄物の各排出量も評価の対象となった。また製品処理の際の回収エネルギーも考慮された[6]。1992 年には、LCA の普及と手法の標準化を検討するため、飲料、食品、化粧品、洗剤の各メーカーと流通業者などが日本 LCA 協会を発足させた。また、日本生活協同組合連合会も、消費者が包装容器などの環境負荷を客観的に判断できるよう、「商品のエコロジカル・ガイドライン」の策定を目的にケーススタディを行った。さらに、同年環境庁（現在の環境省）が「環境への負荷の評価に関する予備的検討」を実施し、日本における LCA 研究が本格化した。1993 年 11 月に公布された環境基本法にも LCA を促す条文が盛り込まれ、当時の通産省、科学技術庁、環境庁など関係省庁も現状調査を進めると

ともに手法の開発に着手した。また 1993 年には、ISO（International Organization for Standardization：国際標準化機構）が環境管理システム規格の検討に着目し、その一部として LCA の規格が ISO14040s として検討されることになり、2000 年までに一連の規格が発効し、2003 年に JIS 化が完了している（表 5.2.1）。1994 年 10 月には日本でエコバランス国際会議が開催され、同 12 月閣議決定の「環境基本計画」では LCA 研究の推進が位置づけられた。1995 年には通商産業省（現在の経済産業省）の主導で LCA 研究フォーラムが設立され、1998 年度から 5 カ年計画で通商産業省の「製品等ライフサイクル環境影響評価技術開発（LCA プロジェクト）」が実施された。

5.2.3 LCA の構成

ISO14040 では[1]、LCA は図 5.2.2 に示されるように、

- ① 目的および調査範囲の設定
- ② インベントリ分析（製品ライフサイクルの個々の段階における原料・エネルギーのインプットと排出物のアウトプットを分析）
- ③ 影響評価（インベントリ分析の結果を環境負荷として定量的・総合的な評価）
- ④ （結果の）解釈

から構成されるとしている。①、②、④のみを行う場合は、ライフサイクルインベントリ分析（LCI 分析：Life Cycle Inventory Analysis）と呼び、LCA とは区別される。さらに、LCA の付帯事項として「報告」と「クリティカルレビュー」が規定されている。

表 5.2.1 ISO14040s の規格化の状況[3]

| ISO 規格番号 | ISO の状況 | JIS の状況 |
|-------------------------------|---------------|----------------------------|
| 14040（原則及び枠組み） | 1997 年 6 月発行 | JISQ14040 1997 年 11 月発行 |
| 14041（目的及び調査範囲の設定並びにインベントリ分析） | 1998 年 10 月発行 | JISQ14041 1997 年 11 月発行 |
| 14042（ライフサイクル影響評価） | 2000 年 3 月発行 | JISQ14042 2003 年 3 月発行 |
| 14043（ライフサイクル解釈） | 2000 年 3 月発行 | JISQ14043 2003 年 3 月発行 |

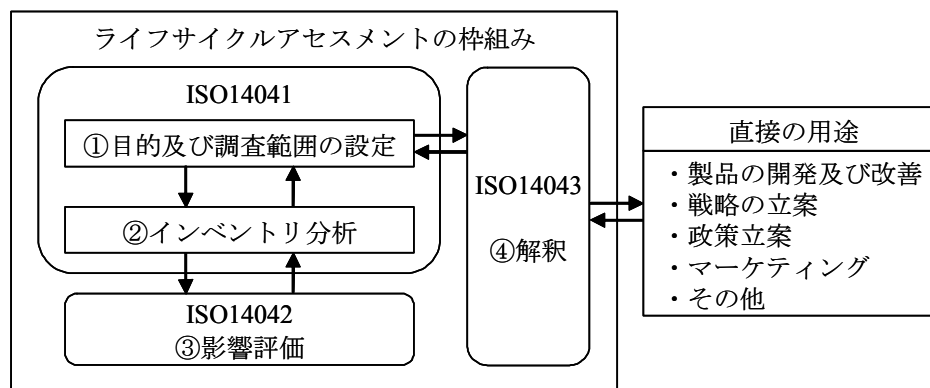


図 5.2.2 LCA の枠組み

目的と範囲を設定するのは、LCA の目的が、例えば製品間の環境負荷の大きさを比較するのか、それともある製品の環境負荷の低減を意図するのかによって手法も収集するデータも異なってくるからである。目的設定の次に必要な条件は、範囲をどこまでにするかという点である。範囲の設定では、資源採掘・素材生産・部品製造・製品製造・販売・輸送・使用・廃棄・リサイクルの各ライフサイクルステージの中で、どのステージをどの程度の深さで研究するかという両面から考慮する。LCA ではよく「ゆりかごから墓場まで」という言い方がされるように、最も広く最も深く範囲を設定することが理想的だが、限定された範囲の LCA であってもそれが LCA 的な考え方に沿うものであれば、十分に有効とされている。

製品や技術の LCA 研究で最も基本となるのが対象プロセス（製品）のインベントリである。インベントリとは、そこに投入（インプット）される資源やエネルギーと、生産または排出（アウトプット）される製品・排出物のデータを、環境負荷項目ごとに整理した入出力明細表である。インベントリ分析は、LCA 手法の基本となる最も重要な過程で、信頼できるデータをいかに収集してデータベースを構築するかが課題となる。

手法には「積み上げ法」と「産業連関法」の 2 つがある[2]。「積み上げ法」では、最初に製品を構成材料別に分解して重量を求め、単位重量当たりのエネルギー消費量や汚染物質排出量（原単位）を乗じて製造段階での環境負荷とする。さらに使用段階や廃棄段階など他の段階においても同様に算出し、最終的に環境負荷項目ごとに負荷量を合計する。積み上げ法は具体的なプロセスを検討しているので、インベントリデータの作成根拠を明確にでき、製品の改善などが容易に検討できる。しかしながら、調査できるプロセスには限界があり、全てのプロセスを網羅できないため、

- ・ どこまで検討範囲を広げれば、信頼性のある LCA 結果が得られるかが不明
- ・ 研究機関や業界によって異なる手法・データを使用しており、信頼性のある共通データベースの作成が不可欠
- ・ 海外での素材採掘・輸送などの環境負荷の取り扱いが問題となる

といった点が問題となる。

一方「産業連関法」は、分類された産業や商品ごとに、1年間の投入量と産出量との関連を金額ベースで表現している産業連関表を用いて、ある製品に関する投入量を無限遠方まで考慮して計算する方法である。産業連関表を利用して、ある製品の直接・間接のインベントリデータを理論的に算出することができるため、

- ・ 評価対象範囲の拡大が図れる
- ・ データの客観性が保たれる
- ・ 再現性が高い
- ・ 整合性の高い評価が行える

といった利点がある。しかしながら、

- ・ せいぜい 500 程度の部門にしか分類されていないので、全ての製品を分析するには不十分で、評価はあくまでも部門の平均財についてであり、個々の製品の分析への使用には問題がある
- ・ 製造プロセスが不明なため結果を元にしたプロセス分析を行えない
- ・ 新技術やリサイクルなどのような産業として実績のないものは分析できない

といった問題点がある。

このように「積み上げ法」と「産業連関法」は性格が相反しており、どちらが良いとは一概に言えない。よって、比較的大きな分類で商品や産業の評価を行うときは「産業連関法」、個々の製品を評価するときは「積み上げ法」というように補完的に利用するのが実際的である。

LCA の範囲は設定する際、考慮される事項としては以下が挙げられる[1]。

- ・ 製品システム、又は比較調査の場合は複数の製品システム、がもつ機能
- ・ 機能単位
- ・ 調査対象の製品システム
- ・ 製品システム境界
- ・ 配分の手順
- ・ 影響評価の手法、及び引き続いて実施される解釈の方法
- ・ 必要とされるデータ
- ・ 前提条件
- ・ 限界
- ・ 初期のデータ品質要件
- ・ 実施される場合には、クリティカルレビューの種類
- ・ 調査に要求される報告書の種類及び書式

調査範囲は十分適切に設定されることが望ましいとされている。これらに関する ISO14040 の基本的な考え方は以下のとおりである。

(1) 機能単位

製品システムが提供する機能を示す定量的尺度である。ある一つの製品を対象に環境面への影響をライフサイクルステージ間で比較するような場合はそれほど重要ではない。しかし、異なったシステムを比較評価する場合、その比較が共通の基準に基づいていることを保証することが不可欠である。

(2) システム境界

製造・使用・廃棄といったプロセスがどのような範囲まで LCA 調査に含まれるのかを画定する境界線である。システム境界を決定する要因としては、調査の目的・用途、前提条件、カットオフ基準・データ及び費用の節約、結果の伝達先などが挙げられる。入出力の選定、データの集約の程度、製品システムのモデル化は、調査の目的に合致していなければならない。

(3) データ品質要件

調査に必要なデータの特性を決定する。LCA 調査の目的及び調査範囲に合致しなければならない。データ品質要件は、次の事項を含むことが望ましい。

- ・ 時間に関する有効範囲
- ・ 地理的な有効範囲
- ・ 技術の有効範囲
- ・ データの精度、完全性及び代表性
- ・ LCA 全体を通して使用されている方法の整合性及び再現性
- ・ データ源及びその代表性
- ・ 情報の不確実性

(4) ライフサイクル影響評価

ライフサイクルインベントリ分析の結果を使って、潜在的な環境影響の重要性を評価することを目的とする。作業には以下のようなものがある。

- ・ インベントリデータをそれぞれの影響領域に割り振ること（分類化）
- ・ それぞれの影響領域内でインベントリデータをモデル化すること（特性化）
- ・ 非常に特種な場合で、かつ、意味のあるときに限り、可能な場合は特性化の結果を統合すること（重み付け）

(5) ライフサイクル解釈

結論及び提言を導き出すために、設定された目的及び調査範囲と整合性をもって、インベントリ分析及び影響評価から得られた知見を統合する LCA の構成段階である。

(6) クリティカルレビュー

次の事項を保証する必要がある。

- ・ LCA を実施するために用いた方法が、ISO14040s に合致している
- ・ LCA を実施するために用いた方法が、科学的及び技術的に妥当である
- ・ 使用したデータが、調査の目的に照らして適切、かつ、合理的である
- ・ 解釈は、明らかになった限界及び調査の目的を反映している

- ・ 調査報告は、透明性及び整合性がある

5.3 量産車用基礎素材およびそれによる部材の原単位

5.3.1 スチール[7]

自動車のライフサイクルからみた鉄鋼製品のライフサイクルフローの概略を図 5.3.1 に示す。鉄鋼製品は、高炉（溶鉱炉）による製品と電炉（電気炉）による製品とに分かれ、その生産重量比はおよそ 7 : 3 である。高炉による製造は、海外の鉄鉱石や原料炭の採掘から始まり、外航輸送、高炉での製鉄（銑鉄の製造）、転炉での製鋼（粗鋼の製造）、圧延加工などを経て、製品である最終鋼材の出荷までを含む。一方、電炉による製造では、市中の鉄鋼スクラップを主な原料にして製鉄を行い、製鉄工程を含まない。

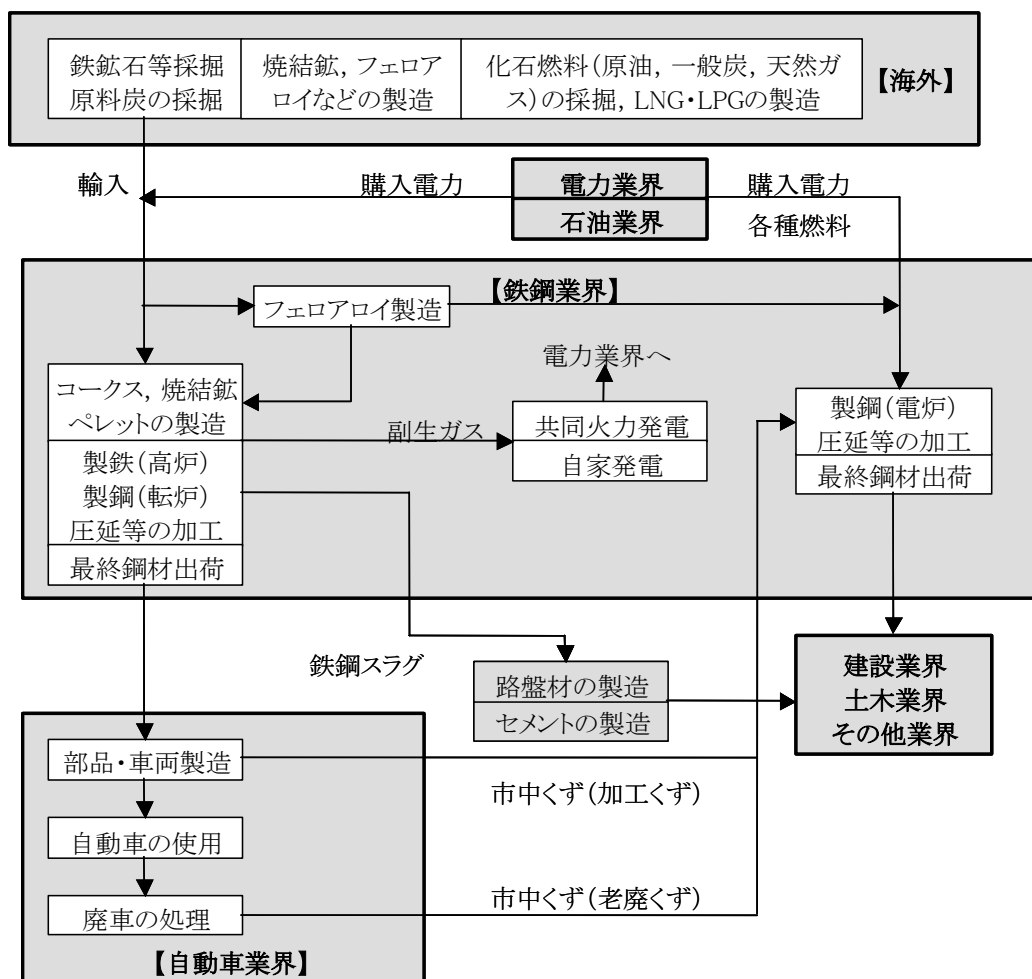


図 5.3.1 鉄鋼製品のライフサイクルフロー[7]

表 5.3.1 小型・普通自動車の鉄鋼材に関する投入素材構成と製造インベントリ[7]

| 分類 | | 投入重量比 [%] | エネルギー [MJ/kg] |
|-------|-------------|--------------|--------------------|
| - | 銑鉄 | 1.8 | 24.8 |
| 普通鋼 | 条鋼（形鋼，棒鋼など） | 0.8 | 高炉 30.5 電炉 11.6 |
| | 熱延鋼板（厚・中・薄） | 12.0 | 30.5 |
| | 冷延鋼板 | 13.3 | 33.7 |
| | 高張力鋼板 | 3.8 | 33.7 |
| | 表面処理鋼板 | 19.0 | 36.1 |
| | 鋼管 | 2.0 | 34.5 |
| | その他 | 1.2 | - |
| | 計 | 52.1 | - |
| 特殊鋼 | 炭素鋼・合金鋼（条鋼） | 10.1 | 高炉 37.2 電炉 14.6 |
| | 快削鋼 | 2.1 | 高炉 37.2 電炉 14.6 |
| | ステンレス鋼・耐熱鋼 | 1.5 | 高炉 52.4 電炉 35.3 |
| | ばね鋼・軸受鋼 | 2.0 | 高炉 43.6 電炉 23.9 |
| | その他(焼結など) | 1.2 | - |
| | 計 | 16.9 | - |
| 鉄鋼材合計 | | 70.8 | 33.3 |

（注）投入重量比は 1997 年のもの。上流から鉄鋼製品の出荷までを含む。

部品・車両製造に使われる鉄鋼製品の多くは高炉による鋼材である。自動車関連工場から排出される鉄くずは，電炉を通して再び鋼材となり，他産業（土木・建築業界など）に流通する。使用済み自動車からの鉄くずも電炉メーカーでリサイクルされる。よって，自動車用の鉄鋼の原単位は一般用途用に比べてある程度大きい値となる。

表 5.3.1 に小型・普通自動車の鉄鋼材に関する投入素材構成と製造インベントリを示す。鉄のエネルギー消費量と CO₂ 排出量の原単位は，33MJ/kg となった。なお，高張力鋼，快削鋼，ばね鋼・軸受鋼の製造インベントリ得られていないが，現段階では，高張力鋼板には冷延鋼板，快削鋼には炭素鋼・合金鋼，ばね鋼・軸受鋼には，炭素鋼・合金鋼またはステンレス熱延鋼板を適用するのが妥当と思われる。本研究では，ばね鋼・軸受鋼には，炭素

鋼・合金鋼とステンレス熱延鋼板の平均を適用した。また、高炉と電炉の生産重量比は7:3とした。

次に、これを加工して組み立てるのに必要なエネルギー消費量は16.4MJ/kgである[8]（詳細は第6章で述べる）。よって、スチール製部材の原単位は50MJ/kgとなる。

5.3.2 アルミニウム

まず、アルミニウム地金について述べる[9]。2000年度に日本に輸入された新地金の平均的なものを対象に、ボーキサイト等の原料採取から日本（東京港）に輸入されるまでをシステム境界（図5.3.2）としてインベントリ分析を行うと表5.3.2のように、140.9MJ/kgとなる。比較のため他の主なデータも一緒に示す。海外のデータがより大きい値であるのは、電解精錬後の溶湯（地金を溶かしたもの）を直接、精錬、成分調整を行い圧延インゴットとしており、そのデータも含んでいるからである。

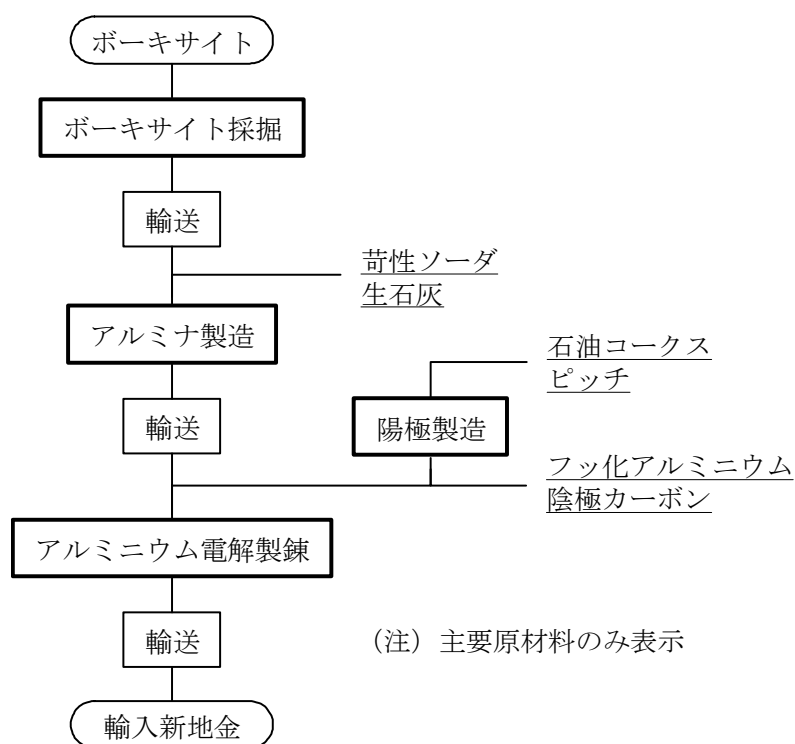


図 5.3.2 輸入アルミニウム新地金のシステム境界[9]

表 5.3.2 アルミニウム新地金の原単位[9]

| | | アルミ協会[9] (2000) | 化経研[10] (1993) | EAA[11] (1996) | AA[12] (1998) | IAI[13] (2000) |
|-------|----------------|--------------------|-------------------|-------------------|------------------|-------------------|
| 資源 | ボーキサイト [kg/kg] | 5.169 | 4.16 | 3.675 | 5.09 | 5.87 |
| エネルギー | 電力 [kWh/kg] | 15.2 | 16.67 | 15.736 | 106.0MJ | 16.47 |
| | 燃料 [MJ/kg] | 56.0 | 40.22 | 65.036 | 80.27 | 69.39 |
| | 計[MJ/kg] | 140.9 | 135.37 | 171.74 | 186.26 | 193.70 |
| 備考 | | ※1 | ※2 | ※3 | ※4 | ※5 |

※1：電力消費は電解精錬のみ。発電時の環境負荷を考慮せず。水力 69.6，原子力 0.3，石炭 24.8，ガス火力 5.3%。

※2：副原料は苛性ソーダのみ(電極材は考慮せず)。電力は IPAI 統計による自由世界平均。

※3：発電時の環境負荷を考慮せず。水力 50.8，原子力 15，石炭 25.6，石油 2.2，天然ガス 6.4%。

※4：鋳造を含む。

※5：電力平均 7.33MJ/kWh。鋳造を含む。

次に、地金を圧延材や押出材に加工するときのエネルギー消費量について述べる[14]。日本のアルミニウム関連大手 7 社が生産している、板製品 1 種および押出製品 3 種（管材，棒材，型材）について、材料（品種）別には区分せずに、全製品を対象とした。図 5.3.3 に圧延製品の製造フローを示す。このうち二重四角で囲ったサブシステムの部分をインベントリ分析の対象とした。結果を表 5.3.3 に示す。

以上より、ボーキサイト採掘から積み上げたアルミニウム製品のインベントリは、160～170MJ/kg 程度となる。ただし、これは製品の原料を新地金 100%とした場合である。原料はこのほかにも再生地金やスクラップ、添加金属・合金がある。再生（二次）地金の製造原単位は 5.54MJ/kg[14]と一次地金に比べて圧倒的に小さい。これがアルミニウムのリサイクルが地球にやさしいと言われる理由である。しかし、乗用車の部材は優れた力学特性を要求するため、基本的に一次アルミを用いる。リサイクル材は鋳造アルミ部材にいくらか用いる程度である。ここでは新地金を 100%用いたアルミを乗用車に適用するとした。

次にアルミ製品を自動車部材に加工するときの原単位について述べる。自動車製造におけるスチールとアルミの加工エネルギーの比は、1：1.5 と見積もった[15]。前項で述べたように、スチール車における部品・車体製造原単位は 16.4MJ/kg である[8]ので、アルミ車の部品・車体製造原単位は 24.6MJ/kg となる。よって、アルミ部材（板材）の原単位は 187MJ/kg となった。ただし、これは製品の用途を限定しておらず平均的なものなので、高い力学特性を要求する自動車の用途だけに絞ったときは、この値よりも大きな値になると思われる。

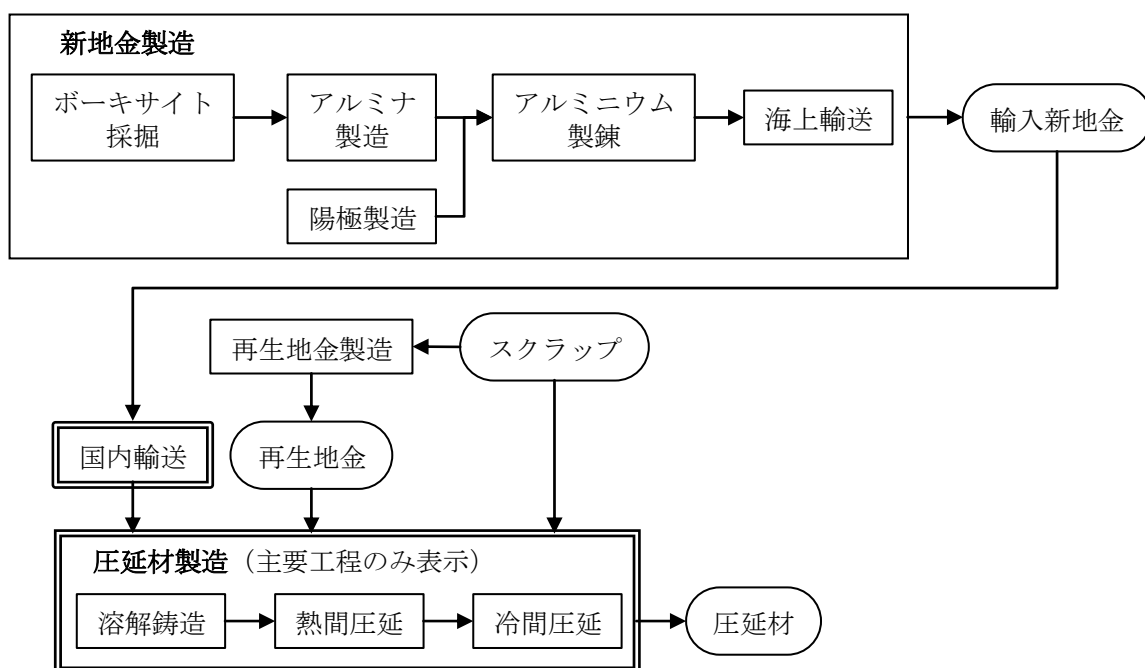


図 5.3.3 アルミニウム圧延製品の製造フローとサブシステム（板製品の例） [14]

表 5.3.3 アルミニウムの圧延および押出加工の原単位[14]

| | 圧延品 | 押出材 | | |
|------------------|------|------|------|------|
| | 板材 | 管材 | 棒材 | 形材 |
| エネルギー原単位 [MJ/kg] | 21.8 | 27.3 | 25.9 | 23.5 |

5.3.3 GFRP

自動車部材用の GFRP として、繊維含有率 70wt%で強度が 300MPa 程度の高強度 SMC (HMC) を想定した。表 5.3.4 のように原単位は 30.9MJ/kg となった。GFRP 車の部品・車体製造に関する原単位データは不明だが、素材製造の段階ですでに最終形状に近い形になっていることなどを考慮して、仮にスチール車よりも 20%低減するとしたら、13.1MJ/kg である。よってこの場合、部材の原単位は 44MJ/kg となった。

表 5.3.4 GFRP の原単位[16]

| | 含有率 [wt%] | エネルギー [MJ/kg] | エネルギー [MJ/kg-GFRP] |
|----------------|--------------|------------------|-----------------------|
| ガラス繊維（合糸ロービング） | 70% | 30.1 | 21.0 |
| フェノール樹脂 | 22% | 29.0 | 6.4 |
| その他 | 7% | - | - |
| SMC 法 | - | 3.5 | 3.5 |
| 計 | - | - | 30.9 |

5.4 量産車用 CFRP の原単位予測

5.4.1 CFRP 製部品の原単位の目標値

CFRPにより車体を軽量化することで燃費が向上するため、燃料使用量が抑えられ維持費も下がる。しかしながら、量産車として市場に普及させるには、イニシャルコストが重要であり、走行時以外のコストを従来車並みにすることが求められている。基礎素材のコストとエネルギー消費量は、一般に比例関係にあることから、量産車へ新素材を適用するには、従来のスチール並みの製造原単位にする必要がある。

スチール製部材の製造原単位は前節で述べたように 50MJ/kg である。これより、CFRP 製部品の原単位は、50MJ/kg 程度を目標にすればよいことになる。

5.4.2 フレッシュ材のみの CFRP 製部品の製造原単位予測

5.4.2.1 CF の製造原単位

CFRP は図 5.4.1 のように、炭素繊維 (CF) とマトリックス樹脂から成型用中間材 (プリプレグ) を経て製造される。CFRP の原単位が非常に大きい原因の一つは、材料である CF の製造原単位が大きいことである。炭素繊維とプリプレグの製造フローを図 5.4.2 に示す。PAN 系 CF の原単位は、メーカー3社の平均値であり、データ収集に関しての前提は以下の通りとした[17]。

(1) 品種

日本の PAN 系炭素繊維全生産量の 80～85%は、弾性率 230～250GPa の高強度繊維であり、フィラメント数が 6k、12k のものが中心である。今後の方向は低コストを指向した 24k 以上の太い糸とされるため、本調査では 6k、12k、24k の生産を対象とした。

(2) 生産量

1200t/年の生産設備で生産された場合を想定した。

(3) プリカーサの製造

PAN 重合および PAN 繊維紡糸設備の一連の能力は大きく、通常数系列の焼成設備に PAN 繊維を供給している。また、溶媒の回収は併設されている衣料用 PAN (アクリル) 繊維と共用している。本調査では、重合、紡糸および回収の能力は焼成の能力に対応するとした。

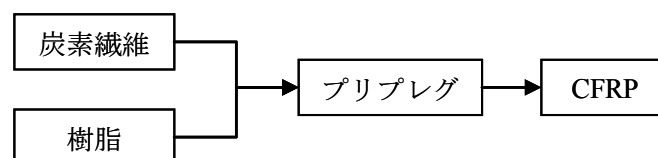


図 5.4.1 CFRP の製造フロー

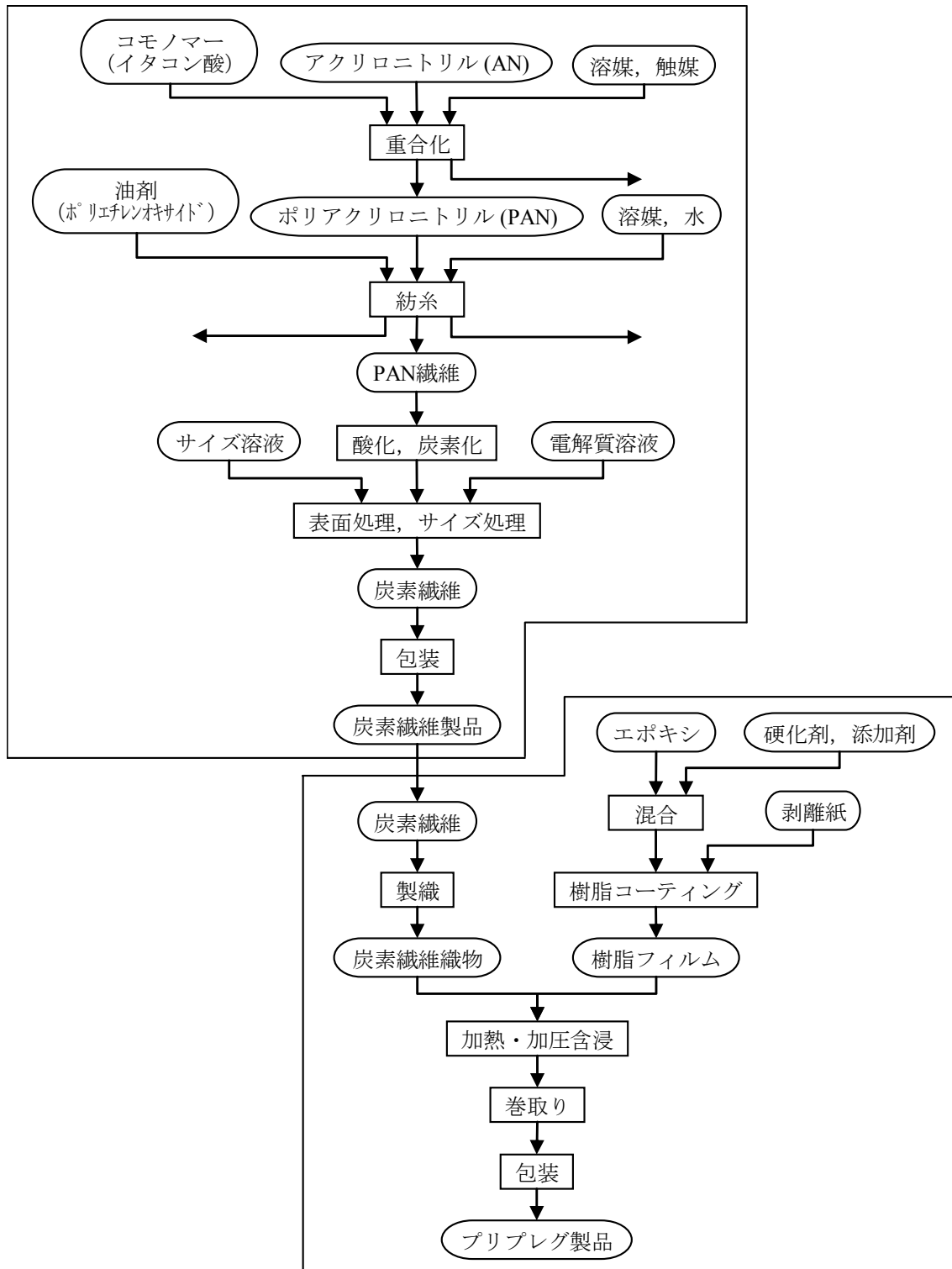


図 5.4.2 CF プリプレグの製造フロー

表5.4.1に、1999年に計算されたPAN系炭素繊維（CF）の原単位[17]と、2004年に再計算されたもの[18]を示す。原材料製造に要する環境負荷よりも、製品を製造するのに要する環境負荷の方が非常に大きい。製品製造時の環境負荷は再計算時に約半分に減っているが、依然大きな値であり、今後も小さくなると考えられる。というのも、現在のCF製造ラインでは様々なタイプ・品質のCFを製造するため稼働率が低く、また生産規模が小さいために実際の製造以外の部分での非効率な工程が多い。また、CFRPは金属材料に比べて歴史が浅く、技術開発の余地は大いに残されている。よって、量産車用に用途が限定され生産が合理化されたCFRPが大量生産されれば、原単位はさらに減少すると考えられる。しかしながら、将来的な原単位を予測するのは非常に困難であるため、本研究では2004年に新たに計算された値を用いた。

5.4.2.2 マトリックス樹脂の製造原単位

表5.4.2のように、マトリックス樹脂のうちエポキシは比較的エネルギー原単位が大きく、他の樹脂と代替することで原単位を下げるができる。しかしながら、樹脂の選択は複合材料の性能に大きく影響を及ぼす。比強度・比剛性や耐久性の点では、熱硬化性樹脂が優れているし、コストや3Rの点では、熱可塑性樹脂が優れている。樹脂に関しては、製造原単位の大小よりも、部材が要求する力学特性の方が重要である。

表 5.4.1 スチールと PAN 系炭素繊維の原単位

| | スチール [MJ/kg] | 炭素繊維 [MJ/kg] | |
|-------|-----------------|--------------|--------|
| | | 1999 年 | 2004 年 |
| 原材料製造 | - | 42 | 39 |
| 加工組立 | - | 436 | 247 |
| 合計 | 33 | 478 | 286 |

表 5.4.2 各種マトリックス樹脂の原単位[17]

| | エネルギー消費量 [MJ/kg] |
|-----------|---------------------|
| エポキシ | 76.0 |
| 不飽和ポリエステル | 62.8 |
| フェノール | 32.9 |
| 軟質ポリウレタン | 67.3 |
| 高密度ポリエチレン | 20.3 |
| ポリプロピレン | 24.4 |

5.4.2.3 プリプレグ製造の省略による原単位低下

プリプレグとは、強化材にマトリックス樹脂を含浸させて流動性や粘着性を最適化し、取り扱い性を良くした成形材料である。プリプレグを使用する理由は、材料設計段階で繊維含有量と方向性をあらかじめ正確に設定し、仕様通りに成形品の性能を発現できる点にある。プリプレグは一般的にCFRPの成形に使用される。量産を前提にCF製造からCFRP部品成形までの製造ラインを構築することを考えると、このプリプレグ製造・保管に関しての環境負荷は大幅に削減されることが期待できる。

乾式法によりプリプレグを製造するには、まず剥離紙に樹脂をコーティングして樹脂フィルムを作り、次に強化繊維と樹脂フィルムを合わせて加熱・加圧して樹脂を強化繊維に含浸する。そして剥離紙とともに巻き取る。剥離紙は吸湿・脱湿によって伸縮し、プリプレグのしわや隙間の原因になるので、製造場所の温度・湿度を一定に保つ必要がある。プリプレグの樹脂は半硬化状態であり、プリプレグ製品の経時に伴う変質を防止するため、保冷保管が必要となる。また、塵埃や異物が付着すると積層品の層間強さを低下させる恐れがあるので、製造場所の清浄管理も必要である。

表5.4.3は乾式法によるCF一方向配列プリプレグの製造工程におけるエネルギー消費量の内訳である。プリプレグ製造工程の環境負荷は、大部分が雰囲気管理と原料および製品の保管によるものであることがわかる。量産の場合にはこの工程を仲介する必要がなくなり、環境負荷はほぼゼロとなる。また、成形法の関係でプリプレグの形を経由する必要がある場合でも、雰囲気管理や保管の工程が必要ないため、10分の1程度になると考えられる。本研究ではプリプレグの工程を省略してCFRPを製造することを想定した。

表 5.4.3 プリプレグ製造の原単位の内訳[17]

| 製造工程 | エネルギー消費量 [MJ/kg] |
|--------------|---------------------|
| 樹脂混合 | 0.1 |
| 樹脂コーティング | 1.4 |
| 樹脂含浸 | 2.1 |
| プリプレグ巻取 | 0.2 |
| 作業場の雰囲気管理 | 20.8 |
| 冷凍庫保管（原料） | 11.5 |
| 冷凍庫保管（プリプレグ） | 3.4 |
| 剥離紙製造 | 0.5 |
| 合計 | 40.0 |

5.4.2.4 成型の原単位

FRPはさまざまな方法で成型され、航空機用のCFRPはオートクレーブ法が用いられる。オートクレーブ法は、プリプレグを成型型内に積層し、積層品全体をフィルムで被覆して減圧脱気しながら、オートクレーブ（加圧釜）内で加圧、加熱、冷却して成型する方法である（表5.4.4）。樹脂が熱硬化性樹脂の場合は、加熱により樹脂が完全硬化し、熱可塑性樹脂の場合は、加熱により溶融して融着し、複合化される。この方法は、ACM（先進複合材料：Advanced Composite Materials）関連の高機能、高性能が要求される部材の成形に適しているが、成形に時間や設備費がかさむ[19]。大量のエネルギーを必要とし、大量の物質を排出するので、エネルギー原単位は600MJ/kgを超える[20]。

表 5.4.4 オートクレーブ法の概要

| | |
|------|---|
| 原理 | 開放型に、余剰樹脂、空気、ガスなどの通り道となるブリーザーを置き、その上に離型フィルム、必要に応じて二次接着時に剥ぎ取るピールプライ置く。この上にプリプレグを必要枚数層間に空気が残らないように積層する。再度離型フィルムをこの上にかぶせ、余剰樹脂を吸収するブリーダーを必要数積層し、外層のブリーザーを重ね、バッグをかぶせ、周辺を気密にし、真空吸引を行い、バッグを整形して、オートクレーブで加熱・加圧して成型する。 |
| 長所 | <ul style="list-style-type: none"> ・ 優れた信頼性、再現性 ・ 優れた機械的性能、電気的性能 ・ 滑らかな積層面 ・ インサート接着が可能 ・ 優れたサンドイッチ構造の密着性 |
| 短所 | <ul style="list-style-type: none"> ・ 成型速度が遅い ・ 設備金額が大きい ・ 高度に熟練した技能が必要 ・ 強化材の選択の幅が小さい ・ オートクレーブの大きさに限界がある |
| 設計制限 | <ul style="list-style-type: none"> ・ プリプレグに限定される ・ 開口部の同時成型が困難 ・ コーナー凸 R の半径は 20mm 以上 ・ 肉厚は 30mm 以下 |
| 装置・型 | <ul style="list-style-type: none"> ・ オートクレーブ、レイアップ装置、低温保管庫など ・ 型構造：開放型、周辺機密シール ・ 型材質：FRTP、板金、構造用炭素鋼、など ・ バッグ材質：各種フィルム |

そこで、量産車用CFRPの成形法として考えられているのは、プリフォームマッチドダイ法（表5.4.5）やRTM法（表5.4.6）である。表5.4.7のようにこれらの方法では工程エネルギーは10～13MJ/kgとなっている。さらに、SMC法や射出成形法をCFRPの成形に利用することも検討されていて、量産化によって数MJ/kgまで工程エネルギーが下がる可能性がある。

表 5.4.5 プリフォームマッチドダイ法の概要

| | |
|------|--|
| 原理 | <ul style="list-style-type: none"> 精密な金型(マッチドメタルダイ:MMD)を用いる圧縮成型. 加熱(90～100℃), 加圧(0.5～4MPa), 硬化(45～300 秒). 加熱した型にプリフォームをセットし, この上にコンパウンド(ポリエステル樹脂, 着色剤, 触媒, 充填剤, 離型剤を混合したもの)を供給し型閉め. プレスで加圧する. 強化材の予備成型(プリフォーム) <ul style="list-style-type: none"> ロービングを 25～100mm (50mm が一般)に切断し, プリフォームスクリーンの上に均一分散させ吸引し, バインダーをかけ, 加熱硬化. 付着量 3～7%. 熱可塑性樹脂の二次バインダーのマット形態強化材を, 加熱(150～250℃)→しぼり賦型→型内冷却 ニットファブリックによるダイレクトシェービング |
| 長所 | <ul style="list-style-type: none"> 優れた信頼性, 再現性 圧縮成型法の中で大型の成型ができる 省力化が可能 |
| 短所 | <ul style="list-style-type: none"> プリフォーム設備の投資が必要 表面平滑性が SMC, BMC に劣る マット FRP 以上の性能が困難 |
| 設計制限 | <ul style="list-style-type: none"> インサートができない コーナー凸 R の半径は 3mm 以上 肉厚は 10mm 以下 最低肉厚は 2.0mm 以上 |
| 装置・型 | <ul style="list-style-type: none"> プリフォーマー, プレス, 金型温度調節器, 金型, 樹脂調合装置, 金型搬送装置 型構造: 密閉型, セミポジティブ, 加熱 型材質: 構造用炭素鋼, 鍛鋼, 鋳鋼, 鋳鉄 |

表 5.4.6 RTM 法の概要

| | |
|------|---|
| 原理 | <ul style="list-style-type: none"> ・ 簡易密閉型を用いる樹脂圧入法. 硬化は常温・無圧で行う. 硬化時間は 2 分～30 分. 必要に応じて, ゲルコート後型にプリフォームなどをセットし型を閉め, 雄雌の型を相互にクランプする. 適切な位置に配置した孔から樹脂を圧入する. ・ 強化材の予備成型(プリフォーム)はプリフォームマッチドダイ法と同じ. |
| 長所 | <ul style="list-style-type: none"> ・ 優れた信頼性, 再現性 ・ 幅広い生産が行える優れた経済性 ・ 展開面積 15m² 程度のものまで成型可能 ・ 美しいゲルコート表面が成型可能 ・ インサート, サンドイッチ, ハット型スチフナの一体成型が可能 |
| 短所 | <ul style="list-style-type: none"> ・ 大物の場合, 型数が多くなる ・ トリミングが必要 ・ 型が重く, 移動および荷役設備が必要 ・ FRP 型はメンテナンスが必要 |
| 設計制限 | <ul style="list-style-type: none"> ・ 縦面の肉厚の変化は避ける ・ コーナー凸 R の半径は 5mm 以上 ・ 肉厚は 15mm 以下 ・ 最低肉厚は 2.5mm 以上 ・ 成型方向の抜き勾配は 3 度以上 |
| 装置・型 | <ul style="list-style-type: none"> ・ プリフォーマー, 型, 樹脂調合装置, 型閉機, 樹脂注入器, バインダー調合装置, 型搬送装置, 空気圧縮機 ・ 型構造: 密閉型, ソフトピンチオフ ・ 型材質: FRT, ニッケル電鍍など |

表 5.4.7 各種成型原単位

| 成型法 | エネルギー消費量 [MJ/kg] |
|---------------|---------------------|
| ハンドレイアップ | 19.2 |
| スプレイアップ | 14.9 |
| RTM | 12.8 |
| VARI | 10.2 |
| コールドプレス | 11.8 |
| プリフォームマッチドダイ | 10.1 |
| SMC | 3.5 |
| フィラメントワインディング | 2.7 |
| プルトリュージョン | 3.1 |

5.4.2.5 外板部材用 CFRP の原単位

剛性が重視される外板部材（ボディ）では，第4章より熱可塑性 CFRP（CFRTP）が最適である．性能を重視すると繊維体積含有率が大きいほど良く，コストや環境負荷を重視すると繊維体積含有率が小さいほど良い．ただし，繊維体積含有率が小さいと板厚の増加に注意しなければならない，また比強度が悪くなるので，繊維体積含有率は 30～50%が適当だと考えられることは前に述べた．本研究では繊維体積含有率を 30%，マトリックス樹脂をポリプロピレン，成型法をプリフォームマッチドダイ法とした．CF と PP の原単位はそれぞれ 286MJ/kg, 24MJ/kg である．CF と PP の密度はそれぞれ 1.8g/cm^3 , 0.9g/cm^3 であるので CF と PP の重量比は 0.462 : 0.538 である．よって CF と PP のエネルギー消費量はそれぞれ 132MJ, 13MJ となった．成型の原単位は 10MJ/kg である．以上より 155MJ/kg-CFRP となった（表 5.4.8）．

5.4.2.6 構造部材用 CFRP の原単位

強度が重視される構造部材（シャーシ）では，第4章より繊維体積含有率の高いCFRP，特に熱硬化性CFRP（CFRTS）が高い軽量化ポテンシャルをもつ．樹脂は繊維体積含有率が60%で熱硬化性のエポキシ（EP）で，成型法をRTM法とした．CFとEPの原単位はそれぞれ 286MJ/kg, 76MJ/kgである，EPの密度は 1.2g/cm^3 なので，CFとEPの重量比は0.692 : 0.308である．よってCFとEPのエネルギー消費量はそれぞれ198MJ, 23MJとなった．成型の原単位は13MJ/kgである．以上より 234MJ/kg-CFRPとなった（表5.4.9）．

表 5.4.8 ボディ用 CFRP の製造原単位

| | 原単位 [MJ/kg] | 重量 [kg] | エネルギー消費量 [MJ/kg-CFRP] |
|---------------|----------------|------------|--------------------------|
| CF | 286 | 0.462 | 132 |
| PP | 24 | 0.538 | 13 |
| プリフォームマッチドダイ法 | 10 | 1 | 10 |
| CFRTP | 155 | 1 | 155 |

表 5.4.9 シャーシ用 CFRP の製造原単位

| | 原単位 [MJ/kg] | 重量 [kg] | エネルギー消費量 [MJ/kg-CFRP] |
|-------|----------------|------------|--------------------------|
| CF | 286 | 0.692 | 198 |
| EP | 76 | 0.308 | 23 |
| RTM 法 | 13 | 1 | 13 |
| CFRTS | 234 | 1 | 234 |

5.4.2.7 加工組立時の原単位

成形されたCFRPは、すでに最終形状に近い形になっているので、加工・組立に要するエネルギーは非常に小さいと見積もられる。なお、CFRPを用いると、一体成形により部品点数を大幅に少なくすることができるので、コストや製造速度の面での利点も期待されている。

5.4.3 3R 後の CFRP の原単位予測

5.4.3.1 自動車リサイクルの現状

自動車は図 5.4.3 のように様々なリサイクルが行われており、現在の自動車のリサイクル率は 75%～85%と見積もられている[21]。5 千万台を超える乗用車の登録台数のうち、毎年新車登録されるのとはほぼ同数の 500 万台が ELV（使用済み自動車：End-of-Life Vehicle）として廃棄処分される。これらの車両は、中古車業者約 70%，自動車販売店約 25%，個人ユーザー約 5%の割合で廃車市場に持ち込まれ、解体事業者によって主要な金属部品や市場価値のある部品が取り外される。そして、シュレッダーにかけるのに不都合なタイヤ、バッテリーを除き、フロン抜きやエアバッグ展開をされた ELV がシュレッダー会社を持ち込まれる。シュレッダー工程で粉砕され分別作業を経て採集された材料は低質材料としてリサイクルされる。シュレッダー処理で処理しきれない最終廃棄物が「シュレッダーダスト」として埋立て処理され、その割合は 15～25%に及ぶ。よって約 75%はリサイクルされるが、新車への再利用はほとんどないのが現状である[22]。

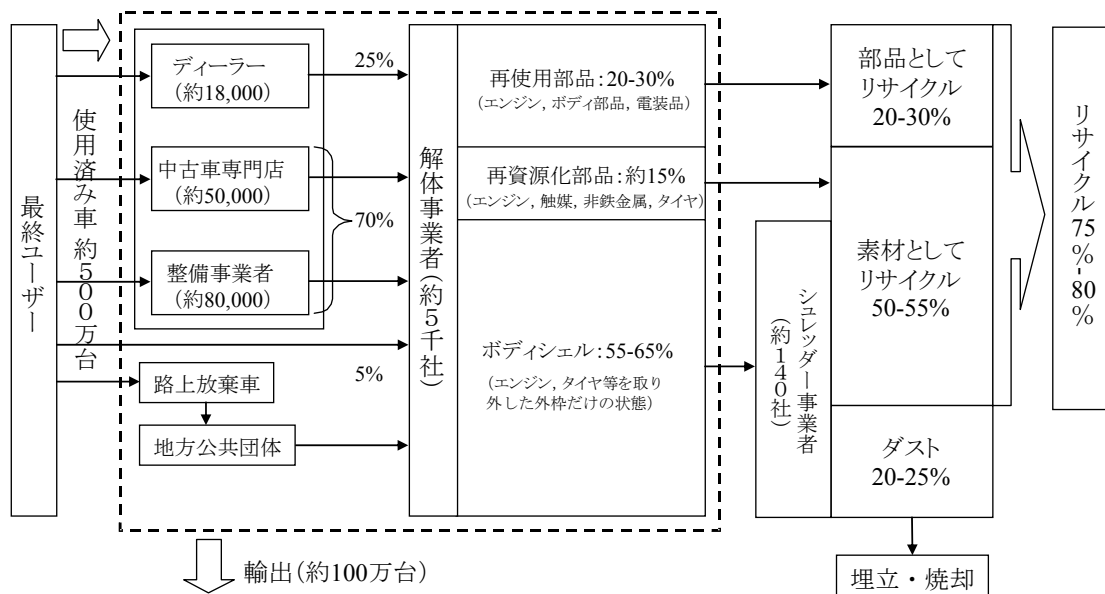


図 5.4.3 乗用車のリサイクルフロー[21]

金属に関しては、回収された自動車の鉄鋼の 95%以上がリサイクルされており、例えば 1,190kg の乗用車に使用されている鉄鋼の 98%がリサイクルされるとすれば、810kg がリサイクルされていることになる[23]。アルミや鉛も 90%以上リサイクルされている。金属は温度変化、疲労、粗大化などによって、廃棄時にはたいてい変化してしまっており、解体時に取り外された部品の中で、中古品またはリビルト品として国内に流通するものは少ない。解体された車両はシュレッダー業者と呼ばれる鉄スクラップ加工処理業者へと引き渡される。ほとんどの解体業者が解体業とシュレッダー業をあわせてやっており、種類別に選別された後、電炉メーカーを中心とする鉄鋼メーカーへと納入される。電炉業とは、鉄鉱石を還元して鉄鋼を生産する高炉に対し、鉄スクラップを原料にこれを溶かして鋼材を生産する鉄鋼業のことである。粗鋼生産に占める電炉鋼の生産比率は 1996 年には 33.3%に上昇している[24]。このように車重の約 70%を占める鉄鋼はリサイクルシステムが確立しており、鉄鋼業において自動車の重要性は大きい。

5.4.3.2 自動車リサイクルの達成目標[22]

1990 年代になって、ヨーロッパから循環型社会の構築と環境問題への関心の高まりにより、自動車のリサイクル問題が提起され始めた。当初は「リサイクル率の達成を 2000 年に 85%以上、リサイクル可能率が 2000 年に 90%以上、2015 年にリサイクル率達成を 95%以上」とし、今後の循環型社会に向けた技術開発や自動車の設計変更の必要性を日本に伝えてきた。その後ヨーロッパでは、これよりいくらか後退したリサイクル目標が、2000 年 5 月に EU 指令 (EU Directive) として提示された。使用済み自動車の最終保有者からの無償引き取りの保証、目標リサイクル率の設定、有害物質の使用の規制、モニタリングを主な内容としている。

日本では 1997 年 5 月に当時の通産省が、「使用済み自動車のリサイクル・イニシアティブ」という業界で自主的にリサイクル率の向上を狙ったガイドラインを提示し、自動車製造業者をはじめとする関係者に具体的対応を求めた。それを受けて日本自動車工業会 (JAMA) では、従来から取り組んで来た環境問題への対応に加えて、1998 年 1 月に「自主行動計画」を策定し今後取り組むべき方策と具体的な数値目標を設定した (表 5.4.10)。

表 5.4.10 リサイクル目標の比較[22]

| 年 | リサイクル・イニシアティブ (通産省, 1997.5) | | EU 指令 (2000.5) |
|------|-----------------------------|-------------|--------------------|
| | 埋立処分率 | 使用済み車リサイクル率 | 使用済み車リサイクル率 |
| 2002 | 1996 年の 3/5 以下 | 85%以上 | - |
| 2006 | - | - | 85%以上 (熱回収: 5%以下) |
| 2015 | 1996 年の 1/5 以下 | 95%以上 | 95%以上 (熱回収: 10%以下) |

2015 年のリサイクル率（95%，EU ではこのうち 10%が熱回収可）を考えると，例えば 1,287kg の車で許されるゴミは 64kg，熱回収は 129kg である．よって，量産車の超軽量化を目的とする場合の CFRP は 3R（リデュース：Reduce，リユース：Reuse，リサイクル：Recycle）を前提とした原単位で議論する必要がある[49a]．

また，理想的なリサイクルは「クローズドリサイクル」である．つまり，品質の低下をほとんど伴わずに同じ製品に再生できるリサイクルである．これは需要と供給のバランスがとれるため，コストや環境負荷の点で有利である．しかしながら現在の自動車リサイクルでは，品質の低下を伴い別の製品に再生される「カスケードリサイクル」がほとんどである．例えば，車のスクラップ鉄は建築用にリサイクルされる場合が多い．建設市場が冷え込むと鉄スクラップの需用も落ち込み価格が下落する．結果としてリサイクルがうまく回らないという問題が生じる．カスケードリサイクルになってしまう主な理由は，異物の混入によりリサイクル鉄の品質が低下し品質要求の高い車の鋼板などにはリサイクルが困難だからである．

循環型車社会を形成するためには，クローズドリサイクルの割合を増やしていかなければならない．そのための技術開発として以下の 4 つが挙げられる[25][26][27]．

- ・ 解体しやすい車両構造の開発
- ・ 解体設備の開発
- ・ 規格の統一化
- ・ リサイクル性に優れる熱可塑性樹脂（ポリプロピレン系）への統一

徹底的に解体しリユース率を高めて異物を取り除き，シュレッダーダストの発生を抑えることがクローズドリサイクルへの近道である．これらの技術開発を達成することにより，現行の車はもとより CFRP 車のリサイクル率 95%の達成が可能になる．

5.4.3.3 CFRP のリサイクル方法

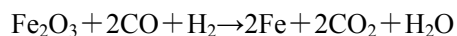
CFRP は複合材料であるため，リサイクルは鉄ほど簡単ではない．現在，CFRP の使用量は CF 換算で年間 1 万 5 千 t に過ぎず，リサイクルは事実上何も行われていないに等しい．しかし，CFRP の高い製造コストやエネルギー原単位は，CFRP の高価格につながるうえに製造時の環境負荷も大きい．CFRP を自動車に本格的に用いると使用量は大幅に増加するので，リサイクルシステムの確立は重要になってくる．将来的に量産車で主に使用しようとしているのは熱可塑性 CFRP（CFRTP）であり，熱硬化性 CFRP よりも比較的にリサイクルが容易であると考えられる．しかしいずれにしろリサイクル技術の開発は重要である．

リサイクルの手段としては，(1) ケミカルリサイクル，(2) リユース，(3) マテリアルリサイクル，(4) サーマルリサイクルなどがあるが，現実的なのはマテリアルリサイクル，サーマルリサイクルといわれている．

(1) ケミカルリサイクル

高炉製鋼での還元材，炭素繊維と樹脂を熱分解して化学原料として再利用などが考えら

れる．仮に FRP を鉄の還元剤に使うとすれば，プラスチックを燃やすことと同じになる．プラスチックを高温（約 1,200℃）で熱すると，CO と H₂ が発生し，これを用いると，



という道筋の反応が起こって，鉄が還元される．化学式から見ると，微粉炭を使う時より CO₂ の排出量が 3 分の 2 になる．鉄鋼と CFRP を同じ場所で製造するならば，コストは低く抑えられる．また，廃プラスチックを熱分解して油をとり，それを燃料として使う場合は，コストは A 重油を使う場合より少し高いといわれるが，廃プラスチックをつかうと，石油と違って NO_x，SO_x が出ない．

(2) リユース

CFRP は劣化，疲労が起こらないため，耐用年数が長いとされている．よって廃棄部品そのものを再利用するリユースが可能である．すでにポリプロピレンバンパでは行われているが，それ以外の部品ではそれほど技術は進展しておらず，実現化への課題は大きい．リサイクルを促進させるためには，部品を材料としてとらえ，車両から取り外しやすい構造にし，取り外した部品の集荷システムを作ることが必要である．これを実行するには，材料開発，構造解析，成形材料技術開発など広範囲にわたる技術が必要となる[24]．リユースはほとんど環境負荷を出さないで，実現すると究極のリサイクル法となる．自動車に搭載すると思われる熱可塑性樹脂を用いた CFRP ならば，これ以上リユースができなくなったとしても，燃やして燃料にしたりマテリアルリサイクルをすることも容易である．

(3) マテリアルリサイクル

マテリアルリサイクルとは，洗浄した廃 CFRP を破砕機などで破砕し，プラスチック原材料として樹脂再生する方法である．マテリアルリサイクルでの消費エネルギーは約 50MJ/kg といわれる．CFRP の製造には大量のエネルギーを要するので，マテリアルリサイクルは適している．

(4) サーマルリサイクル

サーマルリサイクルとは焼却して熱を回収することである．一般のプラスチックの発熱量は約 30.4MJ/kg，自動車のシュレッダーダストの発熱量は 19～20MJ/kg であるが，CFRP の発熱量はそれより高い 33.5MJ/kg である．加熱が不十分であれば異臭が発生するし，さらに，熱により炭素繊維強化プラスチックが炉内に飛散してショートをおこして焼却炉を壊してしまうため，完全な燃焼が必要になる．また CFRP を製造する際に出る副産物も，同様に燃やすことができる．

5.4.3.4 リサイクルによる原単位の低下

前項では，量産車への適用を前提とした，フレッシュ材のみの CFRP のインベントリ分析を行ったが，依然として製造時の環境負荷はスチールよりもかなり大きい．よって，コストと環境負荷の点で製品の競争力を高めるには，3R（リデュース，リユース，リサイクル）が必要不可欠である．しかし，CFRP の 3R は，CFRP 廃棄物自体の量が少なく必要がなかつ

ため、これまでほとんど行われてこなかった。よって、3Rの形態を最適なものにするために、インベントリ分析を用いて、必要となる技術やその開発目標を設定する必要がある。

5.4.3.5 3Rのシナリオ

図5.4.4にCFRP製自動車ガラのリユース・リサイクルフローの予測を示す。現在CFRPの3Rは、大きく次の2つのシナリオに分けられて技術開発が進められている。

1つ目は、現状の炭素繊維強化熱硬化性樹脂（CFRTS）の技術を生かしていくものである。CFRTSは極めて高性能で耐久性が良い。量産車の寿命を規定すると言われる錆についても非常に優位である。しかしながら、強固な高分子架橋を切断しなければ炭素繊維を取り出せず、再成形時にはフレッシュ樹脂の追加供給が欠かせない。よって、プラットフォームなど力学特性が要求されて、かつリユースにより長く使える可能性のある部品にCFRTSを使用し、使用後は繊維を分離し熱可塑性樹脂で固めてカスケードリサイクルを行う。ここで必要となる技術は、CFRTSを再利用するときの品質保証・ヘルスマモニタリングや、再成形品の品質に応じてCFRTSから効率よく炭素繊維を取り出す技術である。

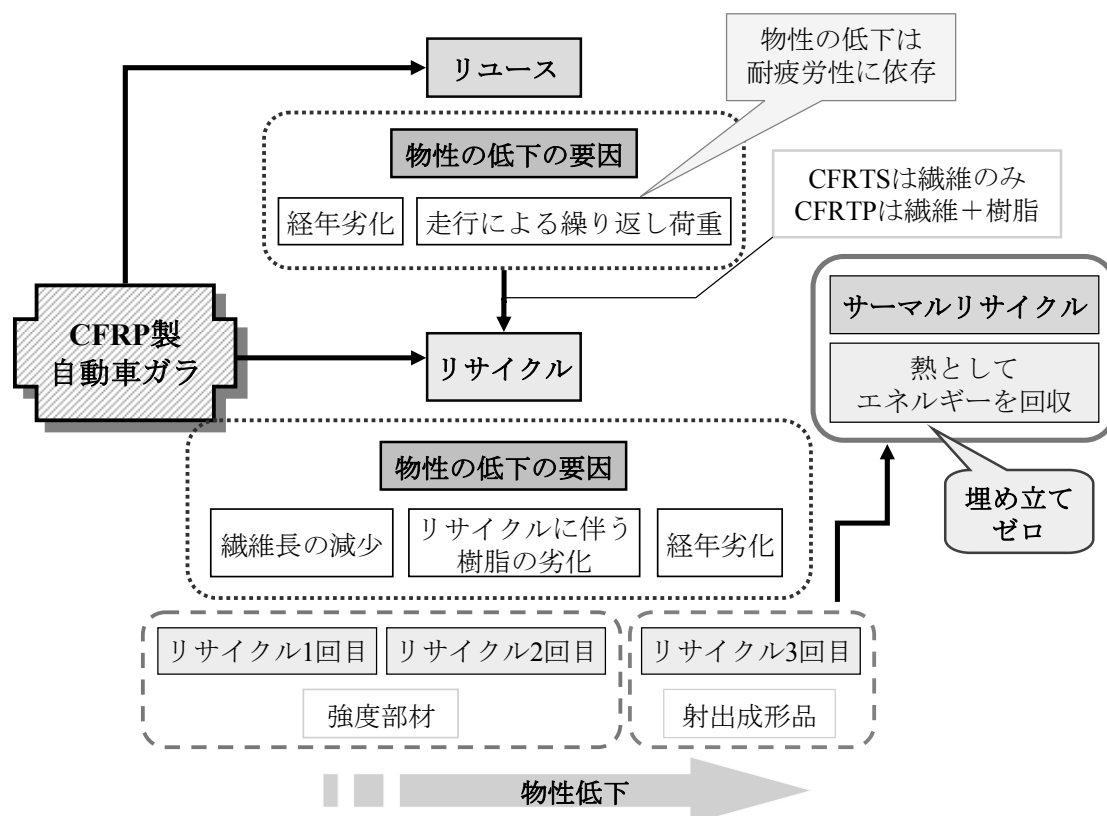


図 5.4.4 CFRP 車ガラのリユース・リサイクルフロー

2つ目は、CFRTSよりも理想的な炭素繊維強化熱可塑性樹脂（CFRTP）の実用化である。熱可塑性樹脂は、低コストであり、熱による加工・修理が可能であり、ほとんど樹脂を足さずに再成形により別の部品に形を変えることができる。しかしながら、現状では、CFと熱可塑性樹脂の接着は極めて悪く、十分な性能が発現できるような界面制御の研究が進められている。また、再成形時に繊維長が短くなっていくので、部材によってはフレッシュの炭素繊維を足してリサイクルする必要がある。

これらのリサイクルを何度も繰り返すと、当然性能は悪くなってくる。そこでリサイクルされたCFRTPの両面に長繊維の複合材シートを貼り付けて補強し、サンドイッチ材として活用する技術も研究されている。

5.4.3.6 量産車用 CFRP の原単位見積もり

CFRPのリサイクルの研究は近年取り組まれ始めたので、十分なデータを得るのはなかなか難しい。既存のフレッシュCFRPの技術、樹脂会社へのヒアリング、スチール車の場合のデータなど限られた情報から見積もるしかなく、比較的多くの仮定が含まれることは現状では致し方ない。しかしながら、このリサイクルCFRPに関するデータをスチールの場合と比較することで、逆に技術開発の目標値が定まるとも言える。

(1) 熱硬化性 CFRP のリユース

前項で述べたとおり、シャーシ用のCFRPは高性能、高寿命で、原単位が非常に大きい。ため、リユースが前提となる。リユースに必要な工程は、せいぜい輸送や洗浄であり、これらに必要なエネルギー消費量は、一般に材料製造や成形に要するものよりもきわめて少ない。よって、リユースされた熱硬化性CFRPの原単位はほぼゼロとなる。

(2) 熱硬化性 CFRP のリサイクル

リユース後の CFRTS から CF を分離回収し、熱可塑性樹脂を追加して剛性部材用 CFRP にカスケードリサイクルを行う。つまりリサイクル後は CFRTP となる。CF と PP の重量比、成型法ともフレッシュ CFRTP と同じとする、CF はリサイクル段階でエネルギーを消費するため、製造時でのエネルギー消費量は 0 となる。繊維体積含有率を 30% のとき CF と PP の重量比は 0.462 : 0.538 である。PP の原単位は 24MJ/kg なので、PP の追加に伴うエネルギー消費量は 13MJ となる。プリフォームマッチドダイ法の成型原単位は 10MJ/kg である。CF の分離回収に関するエネルギー消費量は、熱回収に関する文献[28]と樹脂会社へのヒアリングから、10MJ/kg と見積もった。合計すると 33MJ/kg となった。

回収方法については、熱回収のほかにも、溶媒により常圧溶解して回収する方法も研究されている[29]。

(3) 熱可塑性 CFRP のリサイクル

フレッシュの樹脂を追加せず、そのまま熔融して再成型を行う。成型はプリフォームマッチドダイ法で、原単位は10MJ/kgとなる。CFRTPの回収に関するエネルギー消費量は、CFRTSリサイクルの場合より工程が減るので、半分の5MJ/kgとした。よって合計すると

15MJ/kgとなった。

(4) ハイブリッド材

熱硬化性 CFRP をリサイクルした CF/PP を加重条件の厳しい箇所に適用するために、圖子ら[30]はリサイクル CF/PP をコアマテリアルとして、その両面にフレッシュ CF を用いた一方向 CF/PP シートを熱圧着して補強した CFRP ハイブリッド材を研究している(図 5.4.5)。中間材とシートの厚さがそれぞれ 2mm, 0.2mm (×2 枚) で、Vf がそれぞれ 30%, 40%のものについて実験解析を進めている。

この材料の原単位を求める。CF と PP の密度がそれぞれ 1.8g/cm^3 , 0.9g/cm^3 なので、中間材とシートの密度はそれぞれ 1.17g/cm^3 , 1.26g/cm^3 となる。中間材とシートの厚さより、体積比は 5:1 となる。仮にハイブリッド材が 600cm^3 とすると、中間材とシートの体積はそれぞれ 500cm^3 , 100cm^3 となり、重量はそれぞれ 585g, 126g で合計 711g となる。中間材の製造エネルギーは、原単位が (3) より 33MJ/kg なので、 19.3MJ となる。一方、シートの製造エネルギーは次のようになった。Vf が 40%なので CF と PP の体積はそれぞれ 40cm^3 , 60cm^3 であり、重量はそれぞれ 72g, 54g である。CF と PP の製造原単位がそれぞれ 286MJ/kg , 24MJ/kg であるので、製造エネルギーはそれぞれ 20.6MJ , 1.3MJ で、合計 21.9MJ となる。よって、711g のハイブリッド材の製造エネルギーは 41.2MJ となる。この値を 1kg あたりに換算すると、ハイブリッド材の原料に関する原単位は 57.9MJ/kg となった。次にシートと中間材を加熱・加圧する成型工程のエネルギー消費量を求めた。これについては、実際のデータを得ることは困難なので、ホットプレス法である SMC 法の成型原単位である 3.5MJ/kg を代用した。SMC 法では、蒸気加熱と 500t プレスにエネルギーのほとんどを消費する。以上より、ハイブリッド材の製造原単位は、 61MJ/kg となった。中間材の厚さがシートに対してもっと厚くなるとすると、この原単位は減少する。

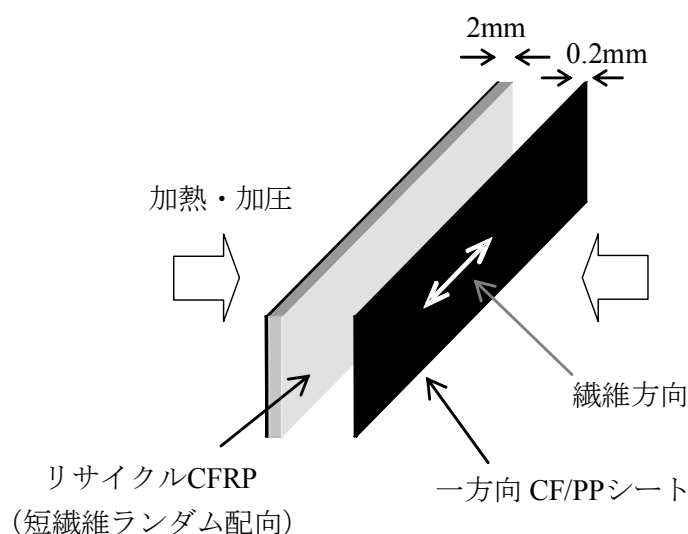


図 5.4.5 ハイブリッド材[30]

5.5 結言

図5.5.1、表5.5.1にスチールと各種CFRPの原単位の比較を示す。量産車用CFRPの製造原単位を鉄鋼部品並みに引き下げるには、生産の合理化や、迅速成形、3Rといった技術を効果的に組み合わせる必要がある。特に、フレッシュ材の製造原単位が大きいCFRPにとって、3Rは原単位を下げる効果が大きく、今後の技術開発が必須である。

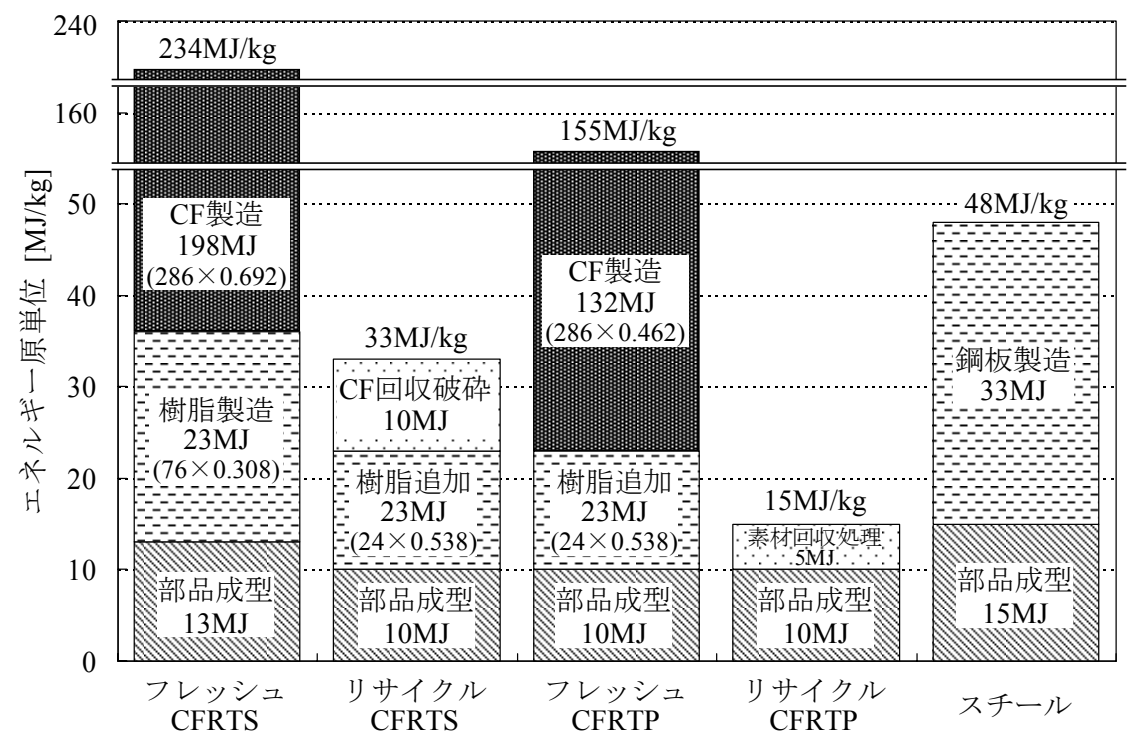


図 5.5.1 スチールと各種 CFRP の部材製造原単位の比較

表 5.5.1 スチールと各種 CFRP 部材の製造原単位の比較

| | スチール | フレッシュ CFRTS | リサイクル CFRTS | フレッシュ CF RTP | リサイクル CF RTP |
|-----------|------|----------------|----------------|-----------------|-----------------|
| 鉄または樹脂の製造 | 33 | 23 | 13 | 13 | - |
| CF の製造 | - | 198 | - | 132 | - |
| 加工・組立 | 15 | 13 | 10 | 10 | 10 |
| 素材回収 | - | - | 10 | - | 5 |
| 合計 | 48 | 234 | 33 | 155 | 15 |

第 6 章 乗用車の軽量化

6.1 緒言

本章では、CFRP で乗用車を軽量化したときに、どの程度の省エネルギー効果が見込めるのかを LCA を用いて検討する。CFRP の種類によって 3 つの軽量化シナリオを想定し、従来のスチール車とエネルギー消費量を比較した。ケーススタディの前に次節において、自動車 LCA のあゆみについて簡単に述べる。

6.2 自動車 LCA のあゆみ^{[1][2]}

海外では 1990 年頃から積み上げ法による自動車 LCA が始まり、日本では少し遅れて 1992 年、1993 年に森口・近藤らが^{[3][4]}、積み上げ法および産業連関法（1985 年版）を用いて自動車の LC-CO₂ 分析を行った。続いて 1990 年版産業連関分析では、乗用車と貨物車、乗合車などに区分し、輸入材由来の CO₂ 排出も含めた拡張が行われた^[5]。CO₂ だけでなく、走行時の CH₄、N₂O、フロン（CFC-12、HFC-134a）の排出、およびガソリン製造に関わる原油採掘時の CH₄ 排出を考慮した温室効果ガスのライフサイクル影響評価が行われた。

このほかにも電気自動車（EV）を対象にしたものも含め数十件の自動車 LCA が報告されている。例えば、石谷らは^[6]、産業連関分析法を拡張したプロセス連関モデルを用いてアルミ化の影響を検討している。吉岡らは^[7]、自動車関連の分類を細分化し、産業連関表を環境問題分析用に拡張した環境分析用産業連関表の 1985 年版と 1990 年版を作成した。電気自動車関連では、近藤らは^[8]、EV 専用に設計された IZA 車（NiCd 電池）を対象に 10 万 km 走行時のライフサイクル CO₂ 排出量を求め、現行ガソリン車（GV）の場合と比較した。工業技術院での研究では^[9]、リチウム電池搭載の EV とガソリン車について、ライフサイクルでのエネルギー消費量および CO₂ 排出量を積み上げ法により算出・比較した。

自動車 LCA の自動車業界への浸透は日本自動車工業会（JAMA）から始まり、1990 年代後半以降、各自動車メーカーへの展開や部品メーカーの協力により少しずつ広がってきた。これらの経緯を表 6.2.1 に示す。LCA の国際規格化が検討され始めた 1993 年の翌年、JAMA に ISO14000WG3（現在は LCA 分科会）が設置され、LCA 手法の標準化や共通データベースの構築などを行い始めた。第 1 期プロジェクトでは、2000cc の一般的な乗用車を対象として統計データなどを用いてマクロ的に捉えた LC-CO₂ 分析を行った。第 2 期プロジェクトでは、8 社が実際に生産している 1500cc の乗用車 1 台を取り上げ、各部品素材別の製造プロセスにまで詳細に調査した。また部品を生産している工場から実際のデータを収集して本格的に LCA を行った。第 3 期プロジェクトでは貨物車や二輪車の LCA および乗用車を含めた外部クリティカルレビューを実施した^[10]。この JAMA プロジェクトの成果をもとに、

現在では各メーカーが独自のやり方で様々な車種の乗用車の LCA を実施している。

表 6.2.1 国内自動車業界の LCA 研究・活動の推移[1]

| 年度 ・区分 | 日本自動車工業会 (JAMA) | 自動車メーカー | 自動車部品 メーカーなど | 日本自動車 研究所 (JARI) |
|-----------|---|--|---|--|
| 1994 | L C I の 導 入 | ●第 1 期乗用車 LCA プロジェクト 対象:1992 年 2000cc 乗用車(仮 想) 項目:エネルギー, CO ₂ 方法:ライフサイクルは 6 段階に区分 各段階を各社分担で調査. 素材 製造は NIRE-LCA Ver.1 を利用. | | |
| 1995 | | | | |
| 1996 | | | | |
| 1997 | L C I の 基 礎 固 め | ●第 2 期乗用車 LCA プロジェクト [16] 対象:1997 年 1500cc 乗用車(実 車) 項目:エネルギー, CO ₂ 方法:部品・材料構成・内装工 場を各社分担で調査. 素材・加 工原単位, TEAM Ver.3 を採用. | LCA 社内検討会発足 (2 社) ガソリン (GV)/ハイブ リッド (HV) 乗用車のエ ネルギー・CO ₂ 分析 | バックグラウンドデー タの調査・算出. NIRE-LCA Ver.2, SimaPro Ver.4 , TEAM Ver.2 の導 |
| 1998 | | | 日本ゴム工業会に よるタイヤの LC-CO ₂ 分析[17] | 入. 使用済み自動 車の予備的な LCA. |
| 1999 | L C I の 開 発 段 階 へ | ●第 3 期乗用車 LCA プロジェクト ●トラック/二輪車 LCA プロジェクト 対象:乗用車は 2 期と同じ. 4t 積中型トラック, 400cc 二輪車. 項目・方法:第 2 期と同じ 影響評価:EI99 の試行 外部 LCA 専門家のレビュー, 乗用車 LCA を LCA 国家プロ ジェクトに提供[18]. | GV/HV, GV/EV の LCI (CO ₂ , NO _x , SO _x , 他) | JAMA プロジェクトに 参加. バックグラウン ドデータの調査・算 出. 使用済み自動 車の LCA, シェレグ ーターテスト処理の LCA. CaBi Ver.3 の導入. 影響評価 の予備調査. |
| 2000 | | | 日本自動車部品工 業会が LCA 分科会 を設 置 し , | |
| 2001 | | | トラック用プロパシヤフの LCI. 1 ボックスの GV/HV の LCI GV/HV の LC-CO ₂ 分析. LCA 検討チーム発足 (2 社) | |
| 2002 | | | ディーゼル車 (DV) の LCA. 新型乗用車 LCA 情報開 示. | |
| 2003 ～ | 実 践 へ | 環境総合評価システムの 構想. LCA システム構築 の構想. | | 消費者・業界・行 政に向けた環境 総合評価. |

今後の課題としては、インベントリデータベースの整備・信頼性評価とわかりやすい総合評価手法の開発に集約される。インベントリ分析に必要なデータはフォアグラウンドデータとバックグラウンドデータに分けられる。前者は自動車本体の製造・使用・廃棄に関わる重要なデータであり、自ら収集するのが原則である。一方、後者は周辺産業に関わる製造や廃棄のデータである。例えば走行用燃料の製造データ、自動車の主要構成素材である各種鉄鋼の製造データ、工場での購入電力データなどである。これらは現在多くの文献やデータベースにより提供されているが、データのばらつきや情報の不完全性といった問題から検証なしで簡単に使えるという状況には至っていない。また、複数の影響領域を扱う場合は環境影響の総合的な評価手法は意思決定のために重要である。総合評価は多軸評価（非統合化）と単一指標評価（統合化）に二分される。前者は各影響領域の影響度を個別に評価するもので、通常レーダーチャートを用いて評価を行うが、トレードオフの扱いが難しい。一方後者は、各影響領域の影響度を重み付けして棒グラフで比較できるので意思決定がしやすい。しかしながら重み付けには主観が入ってしまうため合意形成は難しい。そのため様々な統合化手法が提案されているが、各手法の結果の差異は避けられず、自動車に適した手法の開発が強く求められる。

6.3 LCA の実施

6.3.1 目的及び調査範囲の設定

(1) 実施目的

従来のスチール車と CFRP 軽量車のライフサイクルを通したを定量的に評価することで、CFRP による車体の軽量化について環境面における優位性の検討を目的とする。このとき CFRP の軽量化に関して、用いる CFRP のタイプに応じて 3 つのシナリオを設定し、リサイクル材の環境面における優位性の検討も目的とする。

(2) 評価対象製品

自動車メーカーが行う LCA は主に自社製品が対象であるが、本研究では車社会全体を対象としているので、対象車は一般的、平均的なものになる。評価対象製品は CFRP で軽量化した平均的な乗用車で、比較対象製品は従来のスチール製の平均的な乗用車である。

新車販売状況および自動車諸元表などから、対象車の仕様を最も生産台数の多い 4 ドア・セダンタイプ・ガソリンエンジン・FF（フロントエンジン・フロントドライブ）、AT（オートマチックトランスミッション）とし、車両重量、排気量を算出した。表 6.3.1 に対象車の主な仕様・諸元を示す。

表 6.3.1 対象車の主な仕様・諸元

| 項目 | 仕様 |
|-----------|----------|
| 車重 [kg] | 1,380 |
| 排気量 [cc] | 2,000 |
| 燃料の種類 | ガソリン |
| ボディタイプ | 4 ドア・セダン |
| 駆動方式 | FF |
| トランスミッション | AT |

(3) 機能単位及び基準フロー

機能単位は一般乗用車の平均的な生涯走行距離とした。2004 年の自家用乗用車の総走行距離は 413,855,060 千 km[19]で車両数は 42,505 千台[19]。よって1年間の1台当たりの走行距離は 9,737.6km。2004 年の乗用車の平均使用年数は 10.00 年なので[20]，生涯走行距離は 97,376km となる。基準フローはこの機能単位を満たすスチール製または CFRP 製の乗用車である。

(4) システム境界

素材製造，部品・車体製造，走行，リサイクル・廃棄の 4 段階。ただし，他産業へのリサイクルは全て対象外とした。図 6.3.1 に乗用車のライフサイクルフローを示す。

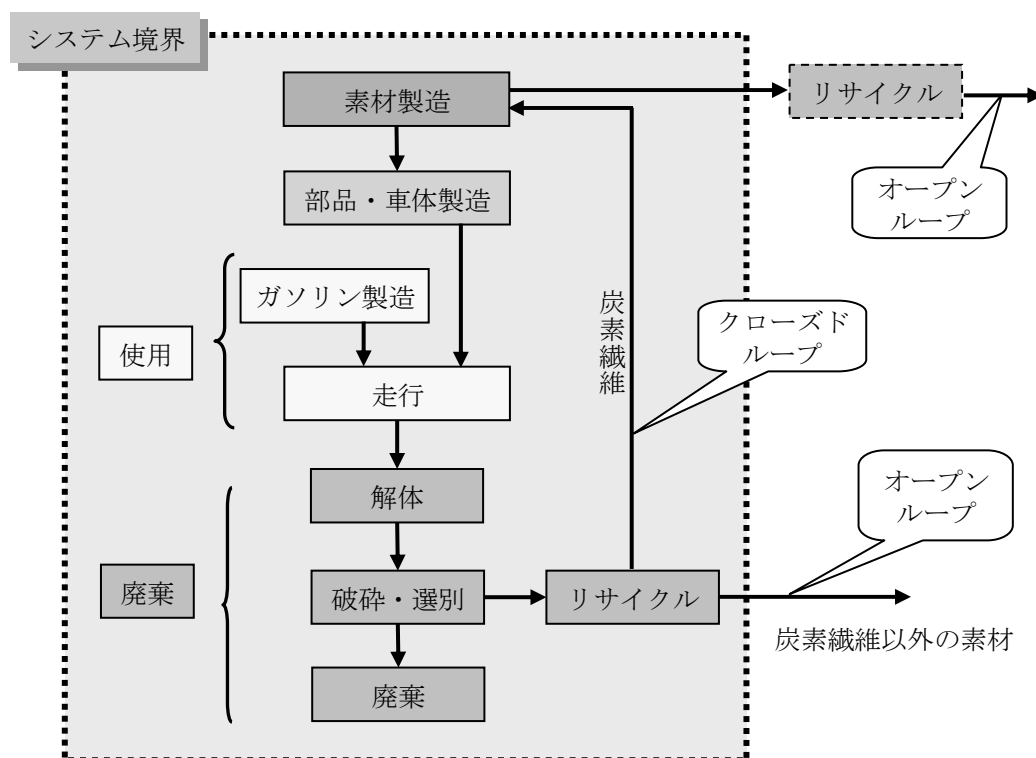


図 6.3.1 乗用車のライフサイクルフロー

(5) 項目

LCI 分析は、理論上どのようなでも計算することができる。例えば、公表されている原単位データで対象とされているの種類は、エネルギー、GHG (Green House Gas : 温室効果ガス)、SO_x, NO_x, BOD (Biochemical Oxygen Demand : 生物化学的酸素要求量)、COD (Chemical Oxygen Demand : 化学的酸素要求量)、SS, N, NH₄, P, Cl, SO₄ などがある。しかし、LCI 分析を行うには整備された正確な原単位のデータベースが必要である。

CFRP の主原料である CF の原単位が、エネルギー消費量、CO₂, SO_x, NO_x について近年再計算されたことはすでに述べたが、SO_x, NO_x については他の 2 つよりも情報収集が難しくさらに厳密な検討が必要と考えている。また、エネルギー消費量と CO₂ 排出量の傾向は、一般に似ているため、本研究では、エネルギー消費量のみを対象とした。

6.3.2 素材製造段階

表 6.3.2 に、乗用車の構成材料別使用量、投入量、エネルギー消費量を示す[21]。文献[21]では 1992 年の平均的乗用車を対象にしており、車両重量が 1,190kg であった。本研究では 1,380kg の車重としているので、元のデータを 1.16 倍 ($=1380/1190$) して合計が 1,380kg になるようにした。

自動車材料を生産するときスクラップが大量に出るため、加工工程（鋳造、鍛造、機械加工、樹脂成形など）の歩留まりは無視できない。しかし、歩留まりは加工方法によって大きく異なり公表された情報も少ないため、文献[21]を参照した。加工歩留まり推定の考え方を以下に示す。

鋳鉄の原料は銑鉄（高炉鉄）10%、鋼くず 60%、返り材（鋳鉄スクラップ）30%と推定した。すなわち鋳造の歩留まりは 70%である[22][23][24]。鋳造品の機械加工の歩留まりは 70%と推定した[23][24]。以上よりシリンダーブロックなどの鋳造部品の材料歩留まりを 49% ($=70\% \times 70\%$) とした。鋼板プレス歩留まりは 60%~70%と言われており[25][26]、ここでは 65%とした。その他普通鋼（鋼管、棒鋼など）については複雑な形状の加工はしないと考え、材料歩留まりを 80%と仮定した。

鍛造歩留まりについては、クランクシャフトやコンロッドでは約 70%と言われている[25][27]。また鍛造品の機械加工歩留まりは 70%と推定した[25]。これより鍛造部品の材料歩留まりを 49% ($=70\% \times 70\%$) とした。

ステンレス鋼・耐熱鋼、バネ鋼、軸受鋼の材料歩留まりは 80%と仮定した。

焼結品については焼結歩留まり 100%、機械加工歩留まり 90%と仮定し[25]、材料歩留まり 90% ($=100\% \times 90\%$) とした。

表 6.3.2 乗用車の構成材料別使用量，投入量，エネルギー消費量[21]

| 素材 | 使用量 | | 投入量 | | エネルギー 原単位 | エネルギー 消費量 | 出典 |
|----------------|------------|-----------|-------------|------------|--------------|--------------|------|
| | 重量 [kg] | 比率 [%] | 歩留まり [%] | 重量 [kg] | [MJ/kg] | [MJ] | |
| 高炉銑鉄 | 14.84 | 1.1% | 49.0% | 30.29 | 24.8 | 751 | [21] |
| 鋼板（端材） | 89.04 | 6.5% | 49.0% | (181.73) | (0.0) | (0) | [21] |
| 熱延鋼板（厚・中・薄板） | 171.80 | 12.4% | 65.0% | 264.31 | 30.5 | 8,061 | [21] |
| 冷延薄板（薄板） | 153.32 | 11.1% | 65.0% | 235.88 | 33.7 | 7,949 | [21] |
| 高張力鋼板（薄板） | 54.32 | 3.9% | 65.0% | 83.57 | 33.7 | 2,816 | [21] |
| 表面処理鋼板（薄板） | 259.25 | 18.8% | 65.0% | 398.85 | 36.1 | 14,399 | [21] |
| その他（鋼管，棒鋼など） | 21.74 | 1.6% | 80.0% | 27.18 | 24.8 | 675 | [21] |
| 炭素鋼，合金鋼，快削鋼 | 139.09 | 10.1% | 49.0% | 283.86 | 30.4 | 8,629 | [21] |
| ステンレス鋼・耐熱鋼 | 21.13 | 1.5% | 80.0% | 26.42 | 47.3 | 1,249 | [21] |
| ばね鋼・軸受鋼 | 25.36 | 1.8% | 80.0% | 31.71 | 37.7 | 1,195 | [21] |
| その他（焼結など） | 8.91 | 0.6% | 90.0% | 9.89 | - | - | - |
| アルミ地金 | 84.23 | 6.1% | 64.0% | 131.6 | 140.9 | 18,542 | [30] |
| 電気銅 | 20.39 | 1.5% | 90.0% | 22.6 | 14.0 | 317 | [31] |
| 鉛地金 | 8.71 | 0.6% | 90.0% | 9.7 | 25.2 | 244 | [32] |
| 亜鉛地金 | 7.40 | 0.5% | 65.0% | 11.4 | 60.0 | 684 | [32] |
| PUR | 18.38 | 1.3% | 95.0% | 19.35 | 67.3 | 1,303 | [33] |
| PVC | 19.67 | 1.4% | 95.0% | 20.70 | 66.0 | 1,366 | [34] |
| PE | 10.04 | 0.7% | 95.0% | 10.58 | 20.3 | 214 | [33] |
| ABS | 8.59 | 0.6% | 95.0% | 9.05 | 99.7 | 902 | [34] |
| PP，その他の汎用樹脂 | 51.98 | 3.8% | 95.0% | 54.71 | 24.4 | 1,335 | [33] |
| PA，その他の高機能樹脂 | 9.03 | 0.7% | 95.0% | 9.50 | - | - | - |
| 塗料，接着剤 | 19.11 | 1.4% | 37.5% | 50.97 | - | - | - |
| ゴム類（含カーボンブラック） | 55.12 | 4.0% | 70.0% | 78.73 | 107.0 | 8,427 | [32] |
| ガラス類 | 42.55 | 3.1% | 70.0% | 60.79 | 12.1 | 738 | [35] |
| 繊維類 | 33.78 | 2.4% | 95.0% | 35.57 | 16.1 | 574 | [36] |
| オイル類 | 15.88 | 1.2% | 100.0% | 15.88 | 7.1 | 113 | [37] |
| 水系液類 | 15.52 | 1.1% | 100.0% | 15.52 | - | - | - |
| 代替フロン HFC-134a | 0.81 | 0.1% | 100.0% | 0.81 | - | - | - |
| 合計 | 1380.0 | 100.0% | 70.8% | 1949.4 | - | 80,484 | - |

（注）鋼板（端材）の原単位を無視しているのは，熱延鋼板，冷延鋼板，高張力鋼板の端材を工場内でリサイクルして原料とするためである。

アルミ鋳造にはトランスミッションケースなどのダイカスト製品が半分ほど含まれており、鋳鉄の鋳造よりも歩留まりは高いと考え 80%とした。また、アルミ鋳造品の機械加工歩留まりは 80%とした[23]。これよりアルミ鋳造部品の材料歩留まりを 64% ($=80\% \times 80\%$) とした。

その他非鉄金属の材料歩留まりは 90%と仮定した。ただし、亜鉛についてはほとんどが亜鉛メッキ鋼板のメッキ分と考え、鋼板プレスと同じ 65%とした。

樹脂製品については、材料歩留まりを 95%と推定した[23][28]。

塗装については、電着および静電塗装によるボディ塗装を対象とし、塗着効率 75%、溶剤含有率 50%と推定した[23][28][29]。よって塗料の材料歩留まりは 37.5% ($=75\% \times 50\%$) とした。なお、接着剤についても同様とした。

ゴムおよびガラス製品の材料歩留まりは 70%、繊維類の材料歩留まりは樹脂製品と同じとした。また液類については、充填時の漏れ率を 0%とし歩留まりを 100%とした。

以上より乗用車の材料全体の歩留まりは 71%となった。つまり投入材料の 7 割が製品となり、残り 3 割がスクラップとして排出される。工場排出のスクラップは品質が安定しており多くがリサイクルされるが、大部分は自動車以外の産業に用いられる。

次にエネルギー原単位についてだが、それぞれの材料に対応する原単位を文献や既存のデータベースから収集して計算に用いた。その他や原単位の収集が困難な材料については無視した。これらは全体の 3.9%であった。また鋳鉄である鋼板（端材）は、熱延鋼板、冷延鋼板、高張力鋼板の端材を工場内でリサイクルして原料とするため、原単位を無視した。

各材料の投入量に原単位を乗じて各材料のエネルギー消費量を求めた。最後にこれらの値を合計すると、従来のスチール製乗用車の素材製造段階におけるエネルギー消費量は、80,484MJ となる。

次に CFRP 車の製造段階におけるエネルギー消費量を求める。まず乗用車の部位別重量データ（文献[21]より作成）（表 6.3.3）から、どの部分がどれだけ軽量化できるかを検討した。ボディ、シャーシ、内外装品系について、スチールを CFRP に置き換えて軽量化することを想定した。用いる CFRP の種類は、CF/EP(Fresh)、CF/PP(Fresh)、CF/PP(Recycle)、CF/PP(Hybrid) の 4 種類とした。CF/PP(Recycle)は CF/EP(Fresh)をリサイクルしたもので、CF/PP(Hybrid)は CF/PP(Recycle)の両面に CF/PP(Fresh)を接着したものである。これらの CFRP のエネルギー原単位、消費量、繊維体積含有率、軽量化率、樹脂のタイプについては、第 4 章、第 5 章で詳述したのでここでは表 6.3.4 にまとめて示すだけにとどめる。ただし、リサイクル材とハイブリッド材の軽量化率については、フレッシュ材よりも見積もりが困難であるため、フレッシュ材の軽量化率をもとに目標値として仮定したものである。

これらの CFRP の組み合わせ方によって、以下のように 3 つの軽量化シナリオを想定した（表 6.3.5）。

- (1) 全て CF/EP(Fresh)を用いる。
- (2) シャーシは強度に優れた CF/EP(Fresh)を用い、ボディ、内外装品は CF/PP(Fresh)を用

いる。

- (3) シャーシは強度に優れた CF/EP(Fresh)を用い、ボディはリサイクル材を補強した CF/PP(Hybrid)、内外装品は CF/PP(Recycle)を用いる。

表 6.3.3 乗用車の部位別重量（文献[21]より作成）

| 部位または部品 | 合計重量 | | 鉄鋼 [kg] | 非鉄 金属 [kg] | その他 [kg] |
|---------|---------|--------|------------|------------------|-------------|
| | [kg] | [%] | | | |
| ボディ | 475.04 | 34.42 | 453.43 | 6.60 | 15.02 |
| 内外装品系 | 223.49 | 16.19 | 66.63 | 0.00 | 156.87 |
| シャーシ | 278.49 | 20.18 | 209.68 | 32.88 | 35.94 |
| エンジン系 | 194.39 | 14.09 | 142.14 | 40.38 | 11.89 |
| 駆動・操舵系 | 48.62 | 3.52 | 43.27 | 2.52 | 2.85 |
| 電装品系 | 117.69 | 8.53 | 31.26 | 38.35 | 48.08 |
| 液, その他 | 42.26 | 3.06 | 12.41 | 0.00 | 29.85 |
| 合計 | 1380.00 | 100.00 | 958.82 | 120.72 | 300.49 |
| 合計 [%] | 100.0 | - | 69.5 | 8.7 | 21.8 |

表 6.3.4 対象とした CFRP の種類

| | エネルギー 原単位 [MJ/kg] | 繊維体積 含有率 [%] | 軽量化率 [%] | 樹脂の タイプ |
|-----------------|-------------------------|--------------------|-------------|------------|
| スチール | 33 | - | - | - |
| CF/EP (Fresh) | 286 | 60 | 70 | 熱硬化 |
| CF/PP (Fresh) | 155 | 30 | 65 | 熱可塑 |
| CF/PP (Recycle) | 33 | 30 | 50 | 熱可塑 |
| CF/PP (Hybrid) | 61 | シート：40 中間材：30 | 60 | 熱可塑 |

表 6.3.5 各シナリオにおける CFRP の使い方

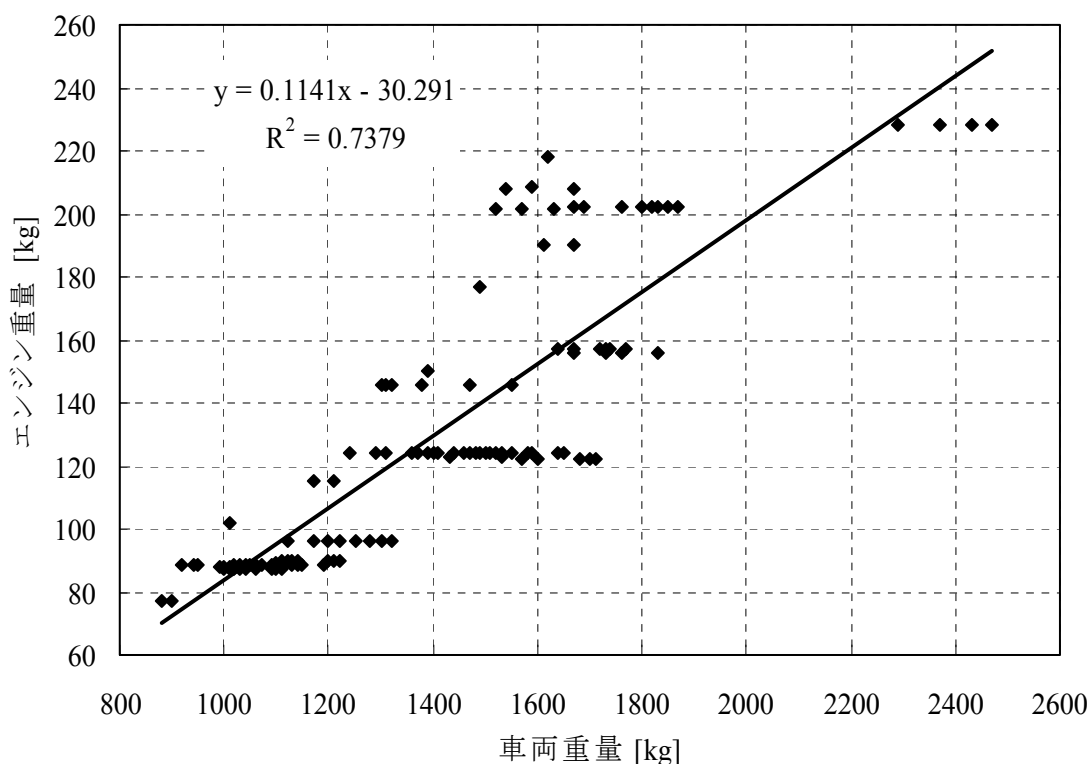
| | 従来車 | CFRP 車 | | |
|------|------|--------|---------------|-----------------|
| | | シナリオ 1 | シナリオ 2 | シナリオ 3 |
| ボディ | スチール | CF/EP | CF/PP (Fresh) | CF/PP (Hybrid) |
| シャーシ | スチール | CF/EP | CF/EP | CF/EP |
| 内外装品 | スチール | CF/EP | CF/PP (Fresh) | CF/PP (Recycle) |

シナリオ 1 では、高性能の CF/EP(Fresh)を使用するので軽量化率は高いが、フレッシュ材の原単位が大きいのでエネルギー消費量が多い。シナリオ 2 では、ボディに CF/EP のかわりに CF/EP よりも安価で製造エネルギーの小さい CF/PP(Fresh)を用いる。シナリオ 3 では、物性の落ちたリサイクル材を用いるので軽量化率はシナリオ 1 より鈍るが、リサイクル材の原単位が小さいのでエネルギー消費量はより小さくなる。軽量化率はシナリオ 1, 2, 3 の順に大きい。乗用車においてリサイクル問題は避けることができないし、リサイクル材の方が製造エネルギーが小さいので、将来的にはシナリオ 3 で CFRP の導入を図るべく開発が進められている。

また車重が軽いほどエンジンは小型化できる（図 6.3.2）。従来車のエンジン系の重量は約 194kg で、そのうちエンジン本体は 130kg と推測した。軽量化により 800kg 前後にまで車重が小さくなるので、エンジンは 70kg、エンジン系全体では約 117kg になるとした。つまりエンジン系の軽量化率は 40%である。

駆動・操舵系、電装品系、液類、その他については軽量化しないとした。

これらをふまえて軽量化したとき、各シナリオにおける乗用車の部位別重量は以下のようになった。



(注) トヨタのカatalogと文献[38]から作成

図 6.3.2 車両重量とエンジン重量の関係

表 6.3.6 軽量化後の乗用車の部位別重量（シナリオ 1）

| 部位 | 合計 [kg] | 鉄鋼 [kg] | 非鉄 金属 [kg] | その他 [kg] | CF/EP (Fresh) [kg] | CF/PP (Fresh) [kg] | CF/PP (Hybrid) [kg] | CF/PP (Recycle) [kg] |
|----------|------------|------------|------------------|-------------|--------------------------|--------------------------|---------------------------|----------------------------|
| ボディ | 157.6 | 0 | 6.6 | 15.0 | 136.0 | 0 | 0 | 0 |
| 内外装品系 | 176.9 | 0 | 0.0 | 156.9 | 20.0 | 0 | 0 | 0 |
| シャーシ | 131.7 | 0 | 32.9 | 35.9 | 62.9 | 0 | 0 | 0 |
| エンジン系 | 116.6 | 85.3 | 24.2 | 7.1 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 駆動・操舵系 | 48.6 | 43.27 | 2.52 | 2.85 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 電装品系 | 117.7 | 31.3 | 38.4 | 48.1 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 液, その他 | 42.3 | 12.4 | 0.0 | 29.8 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 重量 [kg] | 791.5 | 172.2 | 104.6 | 295.7 | 218.9 | 0 | 0 | 0 |
| 軽量化率 [%] | 42.6 | - | - | - | - | - | - | - |

表 6.3.7 軽量化後の乗用車の部位別重量（シナリオ 2）

| 部位 | 合計 [kg] | 鉄鋼 [kg] | 非鉄 金属 [kg] | その他 [kg] | CF/EP (Fresh) [kg] | CF/PP (Fresh) [kg] | CF/PP (Hybrid) [kg] | CF/PP (Recycle) [kg] |
|----------|------------|------------|------------------|-------------|--------------------------|--------------------------|---------------------------|----------------------------|
| ボディ | 180.3 | 0 | 6.6 | 15.0 | 0 | 158.7 | 0 | 0 |
| 内外装品系 | 180.2 | 0 | 0.0 | 156.9 | 0 | 23.3 | 0 | 0 |
| シャーシ | 131.7 | 0 | 32.9 | 35.9 | 62.9 | 0 | 0 | 0 |
| エンジン系 | 116.6 | 85.3 | 24.2 | 7.1 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 駆動・操舵系 | 48.6 | 43.27 | 2.52 | 2.85 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 電装品系 | 117.7 | 31.3 | 38.4 | 48.1 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 液, その他 | 42.3 | 12.4 | 0.0 | 29.8 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 重量 [kg] | 817.5 | 172.2 | 104.6 | 295.7 | 62.9 | 182.0 | 0 | 0 |
| 軽量化率 [%] | 40.8 | - | - | - | - | - | - | - |

表 6.3.8 軽量化後の乗用車の部位別重量（シナリオ 3）

| 部位 | 合計 [kg] | 鉄鋼 [kg] | 非鉄 金属 [kg] | その他 [kg] | CF/EP (Fresh) [kg] | CF/PP (Fresh) [kg] | CF/PP (Hybrid) [kg] | CF/PP (Recycle) [kg] |
|----------|------------|------------|------------------|-------------|--------------------------|--------------------------|---------------------------|----------------------------|
| ボディ | 203.0 | 0 | 6.6 | 15.0 | 0 | 0 | 181.4 | 0 |
| 内外装品系 | 190.2 | 0 | 0.0 | 156.9 | 0 | 0 | 0 | 33.3 |
| シャーシ | 131.7 | 0 | 32.9 | 35.9 | 62.9 | 0 | 0 | 0 |
| エンジン系 | 116.6 | 85.3 | 24.2 | 7.1 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 駆動・操舵系 | 48.6 | 43.27 | 2.52 | 2.85 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 電装品系 | 117.7 | 31.3 | 38.4 | 48.1 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 液, その他 | 42.3 | 12.4 | 0.0 | 29.8 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 重量 [kg] | 850.1 | 172.2 | 104.6 | 295.7 | 62.9 | 0.0 | 181.4 | 33.3 |
| 軽量化率 [%] | 38.4 | - | - | - | - | - | - | - |

これらの結果から、スチールを CFRP で置き換えたときエネルギー消費量がどれだけ変化するかを求めた。シナリオ 1 について説明する。CFRP を用いることでスチールの使用量は 730kg 減った。また、エンジン小型化によりスチールの使用量は 57kg 減った。スチールの平均歩留まりは表 6.3.2 より 60.9%なので、投入量が合わせて 1,292kg 減ることになる。原単位は表 5.3.1 より 33MJ/kg なので、エネルギー消費量は 43,024MJ 減った。さらに、エンジンの小型化で非鉄金属の使用量も減る。この非鉄金属はほとんどがアルミニウムであるので、アルミニウムが 16kg 減るとした。アルミの歩留まりは表 6.3.2 より 64%であるので、投入量が 25kg 減ることになる。原単位は表 6.3.2 より 140.9MJ/kg であるので、エネルギー消費量が 3,562MJ 減った。その他は無視した。よって、スチールの減少分と合わせて、46,586MJ 減少した。

一方、代わりに用いた CF/EP の使用量は 219kg であった。CFRP の歩留まりは一般的に 60%と言われているので、投入量は 365kg となった。原単位は 234MJ/kg なのでエネルギー消費量は 85,371MJ 増えた。

よって、スチール、アルミ、CFRP の増減を合計すると、全体では 38,785MJ の増加となった。従来のスチール車の場合、素材製造段階のエネルギー消費量は 80,484MJ であるので、シナリオ 1 での CFRP 車の素材製造段階でのエネルギー消費量は 119,269MJ/kg となった。シナリオ 2、シナリオ 3 についても同様に計算した。結果を表 6.3.9 に示す。

表 6.3.9 軽量化後のエネルギー消費量の変化

| | | シナリオ 1 | シナリオ 2 | シナリオ 3 |
|----------------|----------|---------|---------|---------|
| スチール | 使用量 | -787 | -787 | -787 |
| | 投入量 | -1,292 | -1,292 | -1,292 |
| | エネルギー消費量 | -43,024 | -43,024 | -43,024 |
| アルミ | 使用量 | -16 | -16 | -16 |
| | 投入量 | -25 | -25 | -25 |
| | エネルギー消費量 | -3,562 | -3,562 | -3,562 |
| CF/EP | 使用量 | 219 | 63 | 63 |
| | 投入量 | 365 | 105 | 105 |
| | エネルギー消費量 | 85,371 | 24,531 | 24,531 |
| CF/PP(Fresh) | 使用量 | 0 | 182 | 0 |
| | 投入量 | 0 | 303 | 0 |
| | エネルギー消費量 | 0 | 47,017 | 0 |
| CF/PP(Hybrid) | 使用量 | 0 | 0 | 181 |
| | 投入量 | 0 | 0 | 302 |
| | エネルギー消費量 | 0 | 0 | 7,256 |
| CF/PP(Recycle) | 使用量 | 0 | 0 | 33 |
| | 投入量 | 0 | 0 | 56 |
| | エネルギー消費量 | 0 | 0 | 1,998 |
| 増減の合計 | エネルギー消費量 | 38,785 | 24,961 | -12,801 |
| 素材製造時のエネルギー消費量 | | 119,269 | 105,445 | 67,683 |

(注) 使用量, 投入量の単位は kg, エネルギー消費量の単位は MJ.

6.3.3 部品・車体製造段階

本研究においては、個々の部品および自動車組立の工程で投入されるエネルギーに関するデータを収集することはできなかった。そこで、自動車工業会（自工会）の統計データおよびその他の公的統計資料を用いて、今回対象としている平均的乗用車の部品製造・車体製造におけるエネルギー消費量を推算した[39]。

まず、内製分を求める。自工会工場環境委員会がまとめた、自工会 13 社合計の素材およびエネルギー投入リスト（1991 年実績）を表 6.3.10 に示す。これには自動車工場が年間に使用するエネルギー資源の種類と量および投入される全ての原材料の種類と量が、自動車メーカー各社の合計数値として示されている。

このうち対象車に寄与する部分の抽出は、この総素材投入量を対象車の重量である 1,380kg ベースに比例換算することで求めた。エネルギー資源投入量も素材投入量に比例するとし

た．表 6.3.11 に対象車の各種エネルギー資源の使用量を示す．

表 6.3.11 のデータを基に、各エネルギー資源の原単位を用いてエネルギー消費量を求めたものが表 6.3.12 である．これより対象車の製造に関して自動車メーカーが消費するエネルギーは 9,372MJ となった．

表 6.3.10 自工会 13 社合計のエネルギー・素材資源使用量[39]

| | プレス | 溶接 | 塗装 | 樹脂成形 | 車両組立 | 鋳造 | 鍛造 | 熱処理 | 機械加工 | 動力源他 | 製造段階合計 |
|-------------------------|--------|-----|--------|-------|-------|--------|-------|-------|-------|--------|---------|
| 電気 [百万kWh] | 314 | 652 | 1,431 | 350 | 356 | 1,961 | 429 | 389 | 1,957 | 2,994 | 10,833 |
| 灯油 [千kl] | | 1 | 10 | | | 17 | 13 | 19 | | 85 | 145 |
| 軽油 [千kl] | | | | | 11 | | | | 1 | 33 | 45 |
| A重油 [千kl] | | | 1 | | | 17 | 3 | 4 | | 243 | 268 |
| C重油 [千kl] | | | | | | 5 | 2 | | | 155 | 162 |
| ガソリン [千kl] | | | | | 59 | | | | | 59 | 118 |
| LPG [千t] | 1 | 1 | 55 | 6 | 1 | 46 | 3 | 30 | 2 | 18 | 163 |
| 都市ガス [千m ³] | 1,100 | 462 | 86,153 | 1,869 | 683 | 23,716 | 5,055 | 4,586 | 1,251 | 66,830 | 191,705 |
| コークス [千t] | | | | | | 118 | | | | | 118 |
| 石炭 [千t] | | | | | | | | | | 201 | 201 |
| 鋳鉄鑄物製品 [千t] | | | | | | 3,095 | | | | | 3,095 |
| 普通鋼鋼材 [千t] | 11,136 | | | | | | | | | | 11,136 |
| 特殊鋼鋼材 [千t] | | | | | | | 3,387 | | | | 3,387 |
| アルミ [千t] | | | | | | 1,064 | | | | | 1,064 |
| 銅 [千t] | | | | | 185 | | | | | | 185 |
| 鉛 [千t] | | | | | 116 | | | | | | 116 |
| 他非鉄金属 [千t] | | | | | 94 | | | | | | 94 |
| 合成樹脂 [千t] | | | | 1,295 | | | | | | | 1,295 |
| 塗料 [千t] | | | 308 | | | | | | | | 308 |
| ゴム [千t] | | | | | 657 | | | | | | 657 |
| ガラス [千t] | | | | | 525 | | | | | | 525 |
| その他 [千t] | | | | | 997 | | | | | | 997 |
| 投入素材合計 [千t] | 11,136 | 0 | 308 | 1,295 | 2,574 | 4,159 | 3,387 | 0 | 0 | 0 | 22,859 |

表 6.3.11 対象車の内製分での各種エネルギー資源の使用量[39]

| | プレス | 溶接 | 塗装 | 樹脂成形 | 車両組立 | 鋳造 | 鍛造 | 熱処理 | 機械加工 | 動力源他 | 製造段階合計 |
|------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|---------|--------|--------|---------|---------|--------|
| 電気 [kWh] | 18,956 | 39,362 | 86,389 | 21,129 | 21,492 | 118,386 | 25,898 | 23,484 | 118,144 | 180,748 | 653,99 |
| 灯油 [l] | | 0.061 | 0.604 | | | 1.026 | 0.785 | 1.147 | | 5.131 | 8.754 |
| 軽油 [l] | | | | | 0.664 | | | | 0.061 | 1.992 | 2.717 |
| A重油 [l] | | | 0.061 | | | 1.026 | 0.181 | 0.241 | | 14.67 | 16.18 |
| C重油 [l] | | | | | | 0.302 | 0.121 | | | 9.357 | 9.78 |
| ガソリン [l] | | | | | 3.562 | | | | | 3.562 | 7.124 |
| LPG [kg] | 0.061 | 0.061 | 3.321 | 0.362 | 0.061 | 2.777 | 0.181 | 1.811 | 0.121 | 1.087 | 9.843 |
| 都市ガス [m ³] | 0.066 | 0.028 | 5.201 | 0.113 | 0.041 | 1.432 | 0.305 | 0.277 | 0.076 | 4.035 | 11.575 |
| コークス [kg] | | | | | | 7.124 | | | | | 7.124 |
| 石炭 [千t] | | | | | | | | | | 12.134 | 12.134 |

表 6.3.12 対象車の内製分でのエネルギー消費量[39]

| | プレス | 溶接 | 塗装 | 樹脂成形 | 車両組立 | 鋳造 | 鍛造 | 熱処理 | 機械加工 | 動力源他 | 製造段階合計 | エネルギー原単位 |
|------|-----|-----|-------|------|------|-------|-----|-----|-------|-------|--------|-------------------------|
| 電気 | 179 | 371 | 814 | 199 | 202 | 1,115 | 244 | 221 | 1,113 | 1,703 | 6,161 | 9.42 MJ/kWh |
| 灯油 | | 2 | 22 | | | 38 | 29 | 43 | | 191 | 326 | 37.26 MJ/l |
| 軽油 | | | | | 26 | | | | 2 | 77 | 105 | 38.52 MJ/l |
| A重油 | | | 2 | | | 40 | 7 | 9 | | 571 | 630 | 38.94 MJ/l |
| C重油 | | | | | | 12 | 5 | | | 384 | 401 | 41.03 MJ/l |
| ガソリン | | | | | 125 | | | | | 125 | 251 | 35.17 MJ/l |
| LPG | 3 | 3 | 167 | 18 | 3 | 140 | 9 | 91 | 6 | 55 | 494 | 50.24 MJ/kg |
| 都市ガス | 3 | 1 | 213 | 5 | 2 | 59 | 13 | 11 | 3 | 166 | 475 | 41.03 MJ/m ³ |
| コークス | | | | | | 215 | | | | | 215 | 30.14 MJ/kg |
| 石炭 | | | | | | | | | | 315 | 315 | 25.96 MJ/kg |
| 合計 | 184 | 377 | 1,219 | 222 | 358 | 1,619 | 307 | 376 | 1,124 | 3,586 | 9,372 | |

(注) エネルギー原単位データは文献[40]による。ただし、炭化水素油、石油系炭化水素ガス、廃タイヤの原単位は文献[41]による。

次に外製分を求める。上記の値は内製分（自動車メーカー自体が寄与する部分）に相当するものであり、さらに外製分も考慮する必要がある。すなわち自動車部品として自動車メーカーに納入される部品の製造に関わる部分であり、関連自動車部品メーカーおよびタイヤ、ガラス、バッテリーなどの専門メーカーが挙げられる。これらの領域からのデータの収集は非常に困難であるので、公的統計データを用いて推算した。

「平成 13 年度石油等消費構造統計表」[41]の産業分類の中から「自動車・同付属品製造業」、「自動車タイヤ・チューブ製造業」、「蓄電池製造業」、「板ガラス加工業」に着目し、それぞれのエネルギー消費量を同様に求めた（表 6.3.13）。これらのエネルギー消費量と内製分のエネルギー消費量の比から、外製分を含めたトータルの 1 台当たりのエネルギー消費量を推定した。「自動車・同付属品製造業」、「自動車タイヤ・チューブ製造業」、「蓄電池製造業」については自動車産業に 100%寄与するとし、「板ガラス加工業」については 40%とした。すると、トータルの値は内製分の値 9,372MJ を 2.418 倍したものとなる。すなわち 22,658MJ が得られた。

なお、各産業分類の自動車産業への寄与率であるが、「自動車・同付属品製造業」、「自動車タイヤ・チューブ製造業」、「蓄電池製造業」についてはデータがなかったため今回は 100%とした。板ガラスは用途別にみると建築用に約 5 割、自動車用等の安全ガラス用に約 4 割、鏡、家具、ショーケース用などの一般産業用に約 1 割であるので[42]、自動車産業への寄与率を 40%とした。したがって、これらの計算は精度が高いとは言えないが、数万点に及ぶ自動車部品の詳細なデータベースを構築しない限り仕方のないことである。

表 6.3.13 各業界における部品・車体製造段階のエネルギー消費量

| | 自工会データ | | 石油等消費構造統計データ | | | | | | | | | | 発熱量 |
|-----------------|-----------|-----------------|--------------|-----------------|-----------|----------------|---------|----------------|---------|---------------|--------|--------|-----|
| | 使用量 | エネルギー | 自動車・同付属品製造業 | | タイヤ | | バッテリー | | ガラス | | | | |
| | | | 使用量 | エネルギー | 使用量 | エネルギー | 使用量 | エネルギー | 使用量 | エネルギー | | | |
| 揮発油 [kl] | 49,651 | 1,718,321,808 | 81,988 | 2,837,440,704 | 818 | 28,309,344 | 169 | 5,848,752 | 78 | 2,699,424 | 34,608 | kl/l | |
| 灯油 [kl] | 110,368 | 4,051,167,808 | 222,369 | 8,162,276,514 | 13,336 | 489,511,216 | 715 | 26,244,790 | 6,821 | 250,371,626 | 36,706 | kl/l | |
| 軽油 [kl] | 33,101 | 1,264,756,109 | 45,240 | 1,728,575,160 | 127 | 4,852,543 | 43 | 1,642,987 | 245 | 9,361,205 | 38,209 | kl/l | |
| A重油 [kl] | 263,376 | 10,300,371,984 | 648,846 | 25,375,718,214 | | | 32,944 | 1,288,406,896 | 3,937 | 153,972,133 | 39,109 | kl/l | |
| B重油 [kl] | 83 | 3,353,781 | 4,036 | 163,082,652 | 0 | | 0 | 0 | 90 | 3,636,630 | 40,407 | kl/l | |
| C重油 [kl] | 134,977 | 5,629,755,693 | 38,595 | 1,609,758,855 | | | 0 | 0 | 0 | 0 | 41,709 | kl/l | |
| 炭化水素油 [kl] | 0 | 0 | 3,267 | 134,022,141 | 0 | | 0 | 0 | 0 | 0 | 41,023 | kl/l | |
| LPG [t] | 144,020 | 7,230,956,160 | 356,546 | 17,901,461,568 | 13,674 | 686,544,192 | 15,681 | 787,311,648 | 6,189 | 310,737,312 | 50,208 | kl/kg | |
| 石油系炭化水素ガス [千m³] | 0 | 0 | 92 | 3,620,016 | 0 | | 0 | 0 | 0 | 0 | 39,348 | kl/m³ | |
| 石油コークス [t] | 0 | 0 | 1,010 | 35,961,050 | 0 | | 0 | 0 | 0 | 0 | 35,605 | kl/kg | |
| 石炭 [t] | 255,092 | 6,786,212,476 | 279,379 | 7,432,319,537 | 35,538 | 945,417,414 | 0 | 0 | 0 | 0 | 26,603 | kl/kg | |
| 石炭コークス [t] | 100,242 | 3,017,985,894 | 164,652 | 4,957,177,764 | 0 | | 0 | 0 | 0 | 0 | 30,107 | kl/kg | |
| コークス炉ガス [千m³] | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | | 0 | 0 | 0 | 0 | 22,613 | kl/m³ | |
| 電気炉ガス [千m³] | 0 | 0 | 3 | 25,233 | 0 | | 0 | 0 | 0 | 0 | 8,411 | kl/m³ | |
| 天然ガス [千m³] | 0 | 0 | 190 | 7,795,700 | 0 | | 0 | 0 | 0 | 0 | 41,030 | kl/m³ | |
| LNG [t] | 0 | 0 | 27,256 | 1,483,489,568 | 0 | | 0 | 0 | 0 | 0 | 54,428 | kl/kg | |
| 都市ガス [千m³] | 286,545 | 11,778,718,770 | 736,824 | 30,287,887,344 | 35,394 | 1,454,905,764 | 19,573 | 804,567,738 | 12,191 | 501,123,246 | 41,106 | kl/m³ | |
| 廃タイヤ [t] | 0 | 0 | 176 | 3,683,680 | 24,605 | 514,982,650 | 0 | 0 | 0 | 0 | 20,930 | kl/kg | |
| 電力 [千kWh] | 9,758,410 | 87,835,448,410 | 22,326,906 | 200,964,480,906 | 1,962,085 | 17,660,727,085 | 888,561 | 7,997,937,561 | 349,790 | 3,148,459,790 | 9,001 | kl/kWh | |
| 合計 | | 139,617,048,893 | | 303,088,776,606 | | 21,785,250,208 | | 10,911,960,372 | | 4,380,361,366 | | | |

(注) 使用量の単位は kg, エネルギー消費量の単位は MJ.

次に CFRP 車の場合を考える。CFRP の特徴として、一般に素材を製造した段階ですでに製品の最終形状に近い形になるため、加工・組立工程が金属の場合よりも少なくてすむ。このとき一体成型ができて部品点数も減少するため、金属に比べて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、MBB ハンブルクが設計し、MBB スタダで製作される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、軽量化率は 20% になったと報告されている[43]。Ford Excursion 2000 年モデルの例では、ダッチドアを複合材料でつくすることで、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[44]。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。しかしながら CFRP 車の部品・車体製造エネルギーに関するデータを収集するのは現時点では不可能である。よって本研究では、求めた軽量化後の重量に応じて従来車のエネルギー消費量を単純に比例換算した。結果を表 6.3.15 に示す。

表 6.3.14 部品・車体製造段階におけるエネルギー消費量

| | | 自動車 産業 寄与率 [%] | 業界全体の エネルギー消費 [百万 MJ] | 自動車 産業での エネルギー消費 [百万 MJ] | 自動車 工業会を 1 とした ときの割合 | 対象モデル車 のエネルギー消費 [MJ] |
|----------------------|--------------------|-------------------------|-----------------------------|-----------------------------------|-------------------------------|----------------------------|
| 自動車工業会 | | 100 | 139,617 | 139,617 | 1 | 9,372 |
| 石油等 消費構造統計 データ | 自動車・ 同部品製造業 | 100 | 303,089 | 303,089 | 2.171 | 20,345 |
| | 自動車タイヤ・ チューブ製造業 | 100 | 21,785 | 21,785 | 0.156 | 1,462 |
| | 蓄電池製造業 | 100 | 10,912 | 10,912 | 0.078 | 732 |
| | 板ガラス加工 | 40 | 4,380 | 1,752 | 0.013 | 118 |
| | 合計 | - | 340,166 | 337,538 | 2.418 | 22,658 |

表 6.3.15 部品・車体製造段階におけるエネルギー消費量

| | 従来車 | CFRP 車 | | |
|---------------|--------|--------|--------|--------|
| | | シナリオ 1 | シナリオ 2 | シナリオ 3 |
| 車重 [kg] | 1,380 | 791.5 | 817.5 | 850.1 |
| エネルギー消費量 [MJ] | 22,658 | 12,996 | 13,422 | 13,958 |

6.3.4 走行段階

走行段階のエネルギー消費量は、ガソリン消費をベースに求めた。しかし、ライフサイクル全体のエネルギー消費量において走行段階の割合が非常に大きいので、ガソリンの製造に関するエネルギー消費量も計算し、両者の合計を走行段階のエネルギー消費量とした。

まず、走行時に消費するエネルギーを求める。生涯走行距離は 6.3.1 項で述べたように、97,376km とした。車重と実燃費の関係は、図 3.5.3 より次式とした。

$$y = 0.0086x - 0.8811 \quad (6.1)$$

ここで、 x ：車重[kg]， y ：実燃費[L/100km]， $R^2=0.804$ である。

よって、1,380kg の従来車の燃費は 9.10km/L。生涯に消費するガソリンは 10,699L。ガソリンの発熱原単位が 34.61MJ/L であるので[40]，走行時に消費するエネルギーは 370,279MJ となる。

次に、ガソリンの製造に要するエネルギーを求める。ガソリン 1kg の製造に要するエネルギーは 6,757kJ である[45]。ガソリンの密度は 0.75kg/L なので、1L あたり 5,067kJ となる。上述の 10,699L のガソリンを製造するのに要するエネルギーは 54,210MJ となった。

以上より、従来車の走行段階で消費するエネルギーは、424,489MJ となった。CFRP 車の走行段階でのエネルギー消費量についても同様に計算した。結果を表 6.3.16 に示す。

6.3.5 リサイクル・廃棄段階

従来車のリサイクル・廃棄段階のエネルギー消費量は、自動車解体・リサイクル業者の公表データより 5.9MJ/kg と算出した。表 6.3.17 に内訳を示す[46]。従来車におけるリサイクル処理時の回収率は、表 6.3.18 より鉄 98%，非鉄金属 95%，その他 36%とした[21]。大部分がリサイクルされるものの、そのほとんどが自動車以外の産業で使われるため、リサイクル時のエネルギー回収はゼロとした。

表 6.3.16 走行段階でのエネルギー消費量

| | 従来車 | CFRP 車 | | |
|-------------------|---------|---------|---------|---------|
| | | シナリオ 1 | シナリオ 2 | シナリオ 3 |
| 車重 [kg] | 1,380 | 791.5 | 817.5 | 850.1 |
| 燃費 [L/100km] | 10.9869 | 5.9258 | 6.1494 | 6.4298 |
| 燃費 [km/L] | 9.10 | 16.88 | 16.26 | 15.55 |
| 生涯消費ガソリン [L] | 10,699 | 5,770 | 5,988 | 6,261 |
| 走行時のエネルギー消費量 [MJ] | 370,279 | 199,710 | 207,246 | 216,695 |
| ガソリン製造エネルギー [MJ] | 54,210 | 29,238 | 30,341 | 31,725 |
| 合計エネルギー消費量 [MJ] | 424,489 | 228,948 | 237,587 | 248,419 |

CFRP 車については、輸送・廃棄における原単位は従来車と同じにした。CFRP のリサイクル処理の原単位は、熱処理時の消費電力や文献[47]から 15MJ/kg と推定した。リサイクルは熱処理としたため、樹脂は回収せず繊維のみの回収とした。炭素繊維の回収率は 100%とし、樹脂は全て焼却されたとした。回収した繊維は CFRP のリサイクル材やハイブリッド材に用いられ、その分のエネルギー回収は対象車に配分した。余った分は他産業に回るためシステムの対象外とした。なお、CFRP の回収方法として、化学的な処理により炭素繊維とマトリックス樹脂を同時に回収する方法も検討されている。その場合、化学薬品などを用いるため処理原単位は大きくなる可能性があるが、現時点では具体的なデータを得ることができなかったため、本研究では考慮の対象外とした。

表 6.3.17 従来車の廃棄・リサイクル段階におけるエネルギー消費量[46]

| | エネルギー消費量 [MJ/kg] |
|-------|---------------------|
| 処理・再生 | 5.555 |
| 輸送 | 0.390 |
| 廃棄 | 0.003 |
| 計 | 5.948 |

(注) 処理・再生ステージは、処理・再生で使用する素材の素材製造と、廃棄物を処理・再生する処理より構成される。廃棄処理には、フロン破壊処理や焼却処理、埋立処理を含む。

表 6.3.18 解体および破碎・選別処理における物質収支[21]

| 区分 | 材料 | 解体 | 破碎・選別 | 小計 | 備考 |
|----------------------|--------------|--------|--------|---------|----------------------------------|
| 回収物（リサイクル・焼却・無害化处理へ） | 鉄鋼 | 322.24 | 617.49 | 939.71 | 鉄鋼回収率＝ 98% ， 選別時の回収率は 97%と仮定 |
| | アルミ | 73.22 | 6.61 | 79.24 | アルミ回収率＝ 95% ， 選別時の回収率は 60%と仮定 |
| | 銅 | 0.65 | 11.84 | 12.49 | 銅回収率＝ 61% ， 選別時の回収率は 60%と仮定 |
| | 鉛（バッテリーなど） | 8.19 | 0.00 | 8.19 | 鉛鋼回収率＝ 94% ， 選別時の回収率は 0% |
| | 亜鉛（銅板メッキ） | 0.00 | 6.29 | 6.29 | 亜鉛回収率＝ 85% ， 選別時の回収率は銅板と同じ |
| | 樹脂（バッテリーケース） | 2.09 | 0.00 | 2.09 | 樹脂回収率＝ 2% ， リサイクルへ |
| | ゴム（タイヤ） | 20.64 | 0.00 | 20.64 | ゴム回収率＝ 47% ， リサイクルへ |
| | 繊維・カーボンブラック | 14.87 | 0.00 | 14.87 | リサイクルへ |
| | バッテリー液 | 4.17 | 0.00 | 4.17 | 回収率 100%とおいた。回収後，無害化处理へ |
| | ウォッシュ液 | 2.90 | 0.00 | 2.90 | 回収率 100%とおいた。回収後，焼却へ |
| | ラジエータ液 | 4.22 | 0.00 | 4.22 | 回収率 50%とおいた。回収後，焼却へ |
| | オイル | 7.05 | 0.00 | 7.05 | 回収率 50%とおいた。回収後，エネルギー回収へ |
| | HFC-134a | 0.20 | 0.00 | 0.20 | 回収率 24%とおいた。回収後，無害化处理（破壊）へ |
| | 小計 | 460.41 | 642.22 | 1102.63 | |
| 未回収物（放出・焼却・埋め立てへ） | 鉄鋼 | 0.00 | 19.10 | 19.10 | 自動車シュレッダーダスト（ASR）として，管理型最終処分場へ |
| | アルミ | 0.00 | 4.41 | 4.41 | 〃 |
| | 銅 | 0.00 | 7.90 | 7.90 | 〃 |
| | 鉛（添加剤など） | 0.00 | 0.52 | 0.52 | 〃 |
| | 亜鉛 | 0.00 | 1.11 | 1.11 | 〃 |
| | 樹脂 | 7.91 | 107.71 | 115.62 | 部品処理からのダストや ASR として，管理型最終処分場へ |
| | ゴム | 4.64 | 18.28 | 22.91 | 〃 |
| | ガラス類 | 0.88 | 41.67 | 42.55 | 〃 |
| | 繊維，塗料など | 0.00 | 49.60 | 49.60 | 〃 |
| | ラジエータ液 | 4.22 | 0.00 | 4.22 | 部品処理時に排出され焼却へ，ASR には含まれない |
| | オイル | 7.78 | 1.04 | 8.83 | 解体分は同上，ASR 分はショックアブソーバーなどからのオイル |
| | HFC-134a | 0.61 | 0.00 | 0.61 | 解体時に大気圏へ放出 |
| | 小計 | 26.05 | 251.32 | 277.37 | ASR の比率＝ 18.2% （分母は廃車重量 1,380kg） |
| 合計 | | 486.47 | 893.53 | 1380.00 | |

リサイクル・廃棄段階でのエネルギー消費量の算出結果を表 6.3.19 に示す。

表 6.3.19 リサイクル・廃棄段階におけるエネルギー消費量

| | | スチール車 | | CFRP 車 | | | | | | 原単位 [MJ/kg] | 廃棄率 |
|-------|------|------------|---------------|------------|---------------|------------|---------------|------------|---------------|----------------|-----|
| | | | | シナリオ 1 | | シナリオ 2 | | シナリオ 3 | | | |
| | | 重量 [kg] | エネルギー [MJ] | 重量 [kg] | エネルギー [MJ] | 重量 [kg] | エネルギー [MJ] | 重量 [kg] | エネルギー [MJ] | | |
| 処理・再生 | 鉄 | 959 | 5,321 | 172 | 956 | 172 | 956 | 172 | 956 | 5.55 | - |
| | 非鉄 | 121 | 670 | 105 | 581 | 105 | 581 | 105 | 581 | 5.55 | - |
| | その他 | 300 | 1,668 | 296 | 1,641 | 296 | 1,641 | 296 | 1,641 | 5.55 | - |
| | CFRP | 0 | 0 | 219 | 3,284 | 245 | 3,674 | 278 | 4,164 | 15 | - |
| 輸送 | 鉄 | 959 | 374 | 172 | 67 | 172 | 67 | 172 | 67 | 0.39 | - |
| | 非鉄 | 121 | 47 | 105 | 41 | 105 | 41 | 105 | 41 | 0.39 | - |
| | その他 | 300 | 117 | 296 | 115 | 296 | 115 | 296 | 115 | 0.39 | - |
| | CFRP | 0 | 0 | 219 | 85 | 245 | 96 | 278 | 108 | 0.39 | - |
| 廃棄 | 鉄 | 19 | 0 | 3 | 0 | 3 | 0 | 3 | 0 | 0.003 | 2% |
| | 非鉄 | 6 | 0 | 5 | 0 | 5 | 0 | 5 | 0 | 0.003 | 5% |
| | その他 | 192 | 1 | 189 | 1 | 189 | 1 | 189 | 1 | 0.003 | 64% |
| | CFRP | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0.003 | 0% |
| 合計 | | - | 8,198 | - | 6,770 | - | 7,170 | - | 7,674 | - | - |

6.3.6 ライフサイクル

図 6.3.3 と表 6.3.20 に従来車と CFRP 車の各ケースにおけるライフサイクルでのエネルギー消費量の比較を示す。従来車と CFRP 車を比べると、素材製造段階では CFRP の原単位が鉄鋼のそれよりもかなり大きいため、CFRP 車の方がエネルギー消費量は大きくなる。しかし、軽量化による走行段階でのエネルギー消費量の減少が大きく効いてくるため、全体では CFRP 化によりエネルギー消費量は減少した。また軽量化シナリオによる変化をみると、(1) から順にエネルギー消費量が、それぞれ 31.3%、32.1%、34.9%減少した。つまり、製造原単位の小さいリサイクル材の使用量が増えることで製造時のエネルギー消費量が減少し、全体のエネルギー消費量の削減に大きく寄与したわけである。

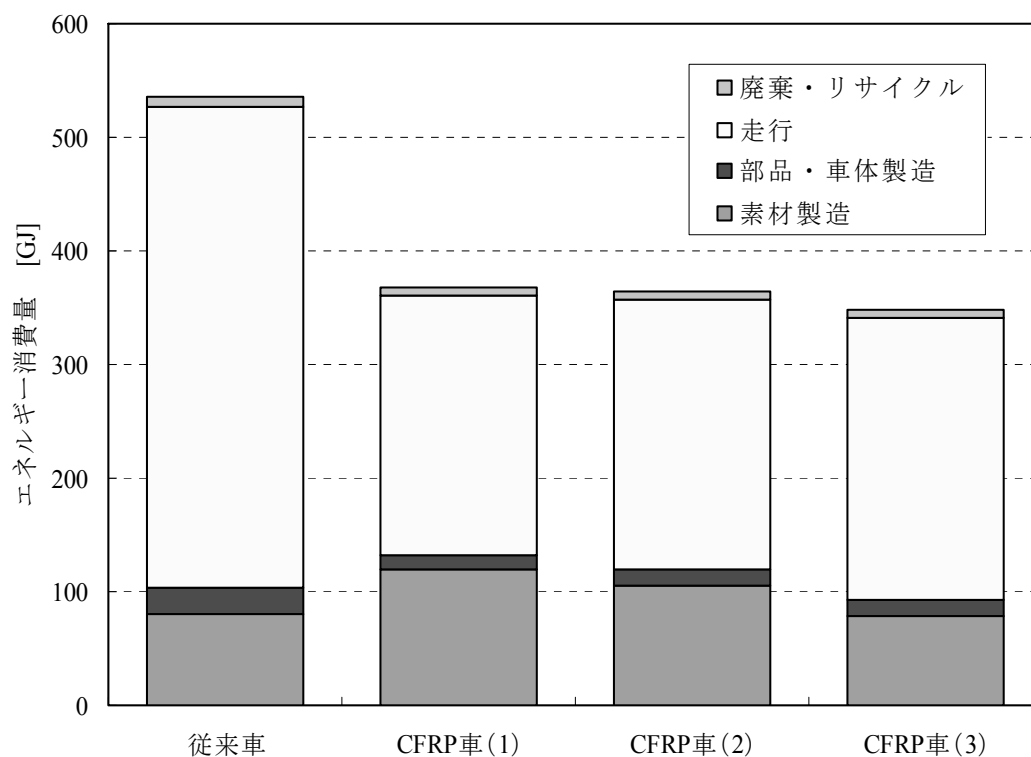


図 6.3.3 各乗用車のライフサイクルでのエネルギー消費量

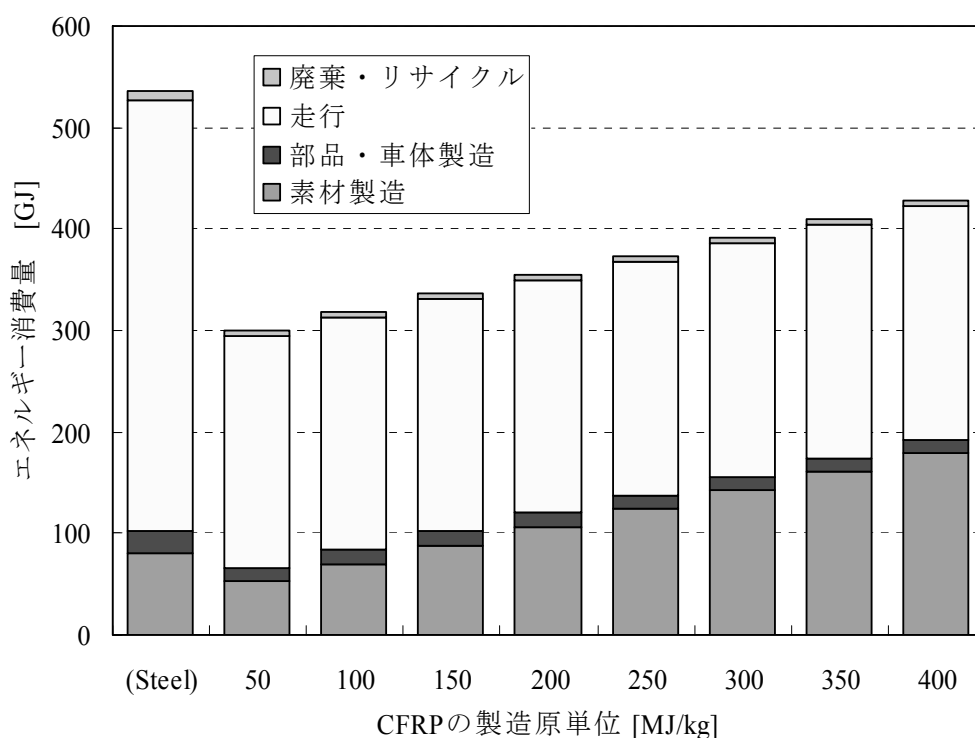
表 6.3.20 各乗用車のライフサイクルでのエネルギー消費量

| | スチール車 | CFRP 車 | | |
|----------|---------|---------|---------|---------|
| | | シナリオ 1 | シナリオ 2 | シナリオ 3 |
| 素材製造 | 80,484 | 119,269 | 105,445 | 78,702 |
| 部品・車体製造 | 22,658 | 12,996 | 13,422 | 13,958 |
| 走行 | 424,489 | 228,948 | 237,587 | 248,419 |
| 廃棄・リサイクル | 8,198 | 6,770 | 7,170 | 7,674 |
| 合計 [MJ] | 535,829 | 367,982 | 363,625 | 348,752 |
| 削減率 [%] | - | 31.3 | 32.1 | 34.9 |

6.3.7 CFRP の軽量化率と CFRP 車のエネルギー削減率の関係

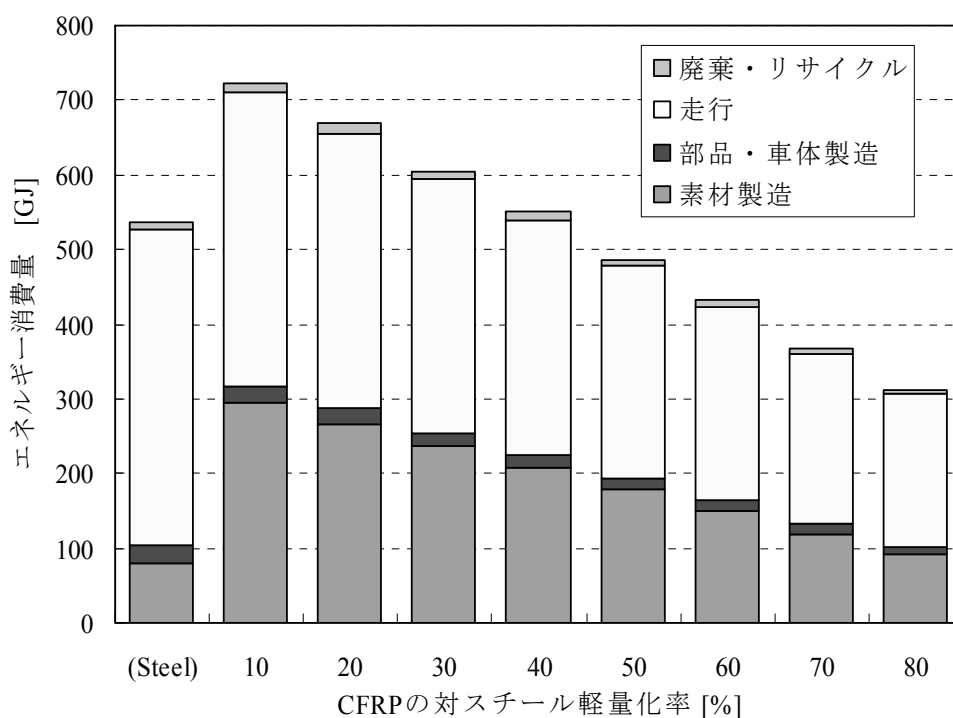
CFRP の製造原単位が変化した場合における、スチール車と CFRP 車のライフサイクルエネルギー消費量の比較を図 6.3.4 に示す。シナリオ 1 の場合を考え、軽量化率を 70% に固定した。CFRP の原単位が大きいほど、ライフサイクルエネルギー消費量は増加した。軽量化率が 70% の場合、CFRP の原単位が 700MJ/kg を超えると CFRP 適用による省エネ効果はなくなった。

CFRP の対スチール軽量化率が変化した場合における、スチール車と CFRP 車のライフサイクルエネルギー消費量の比較を図 6.3.5 に示す。シナリオ 1 の場合を考え、CFRP の製造原単位を 234MJ/kg に固定した。CFRP の軽量化率が高いほど、ライフサイクルエネルギー消費量は減少した。原単位が 234MJ/kg の場合、軽量化率が 43% を下回ると CFRP 適用による省エネルギー効果はなくなった。



(注) 軽量化率を 70% に固定。

図 6.3.4 スチール車と CFRP 車のライフサイクルエネルギー消費量の比較 (CFRP の製造原単位が変化した場合)



(注) CFRP の製造原単位を 234MJ/kg に固定.

図 6.3.5 スチール車と CFRP 車のライフサイクルエネルギー消費量の比較 (CFRP の対スチール軽量化率が変化した場合)

CFRP の製造原単位が変化した場合における、CFRP の対スチール軽量化率と乗用車のライフサイクルエネルギー消費量の削減率の関係を図 6.3.4 に示す. 軽量化率は 30% から 80%, 原単位は 50MJ/kg から 400MJ/kg とした. 図中の◆■●は, 6.3.2 項で設定したシナリオ 1, 2, 3 における場合をプロットしたものである. シナリオ 2, 3 については軽量化率が異なる CFRP を複数使っているため, その平均値となっている. 原単位も平均値として示している.

本研究では CFRP の原単位の平均値を 100~250MJ/kg 程度とした. シナリオ 1 では全て CF/EP(Fresh)を用いた場合を想定し, 原単位が 234MJ/kg, 軽量化率が 70%で, エネルギー削減率が 31%となったことはすでに述べた. このとき軽量化率が 60%ならばエネルギー削減率は 20%となった. 50%のときは 9%までエネルギー削減率が下がってしまい, CFRP を用いるメリットがかなり少なくなった. よって, 熱硬化性樹脂のみを用いるときは, まず軽量化率 60%程度を目標にし, 徐々に 70%に近付いていけば良いのではないかとと思われる.

一方、リサイクル材・ハイブリッド材も一緒に用いたシナリオ 3 の場合は、原単位の平均値が 97MJ/kg で、軽量化率の平均値が 62%である。このとき平均軽量化率が 45%しか達成できなかったとしても、エネルギー削減率は 20%程度となった。

また、将来炭素繊維の製造原単位が半分に低下するとした場合、CF/EP(Fresh)とCF/PP(Fresh)の原単位はそれぞれ 135MJ/kg, 89MJ/kg となるので、シナリオ 1 とシナリオ 2 の平均原単位はそれぞれ 135MJ/kg, 101MJ/kg となる。つまりシナリオ 1 のエネルギー削減率は 31%から 38%, シナリオ 2 のそれは 32%から 37%に増加した

このように、原単位の低下からでも CFRP の軽量化率の向上からでも、エネルギー削減率を大きく向上できることがわかった。この 2 つを効果的に組み合わせることにより、エネルギー削減率の目標を適切に設定することができる。

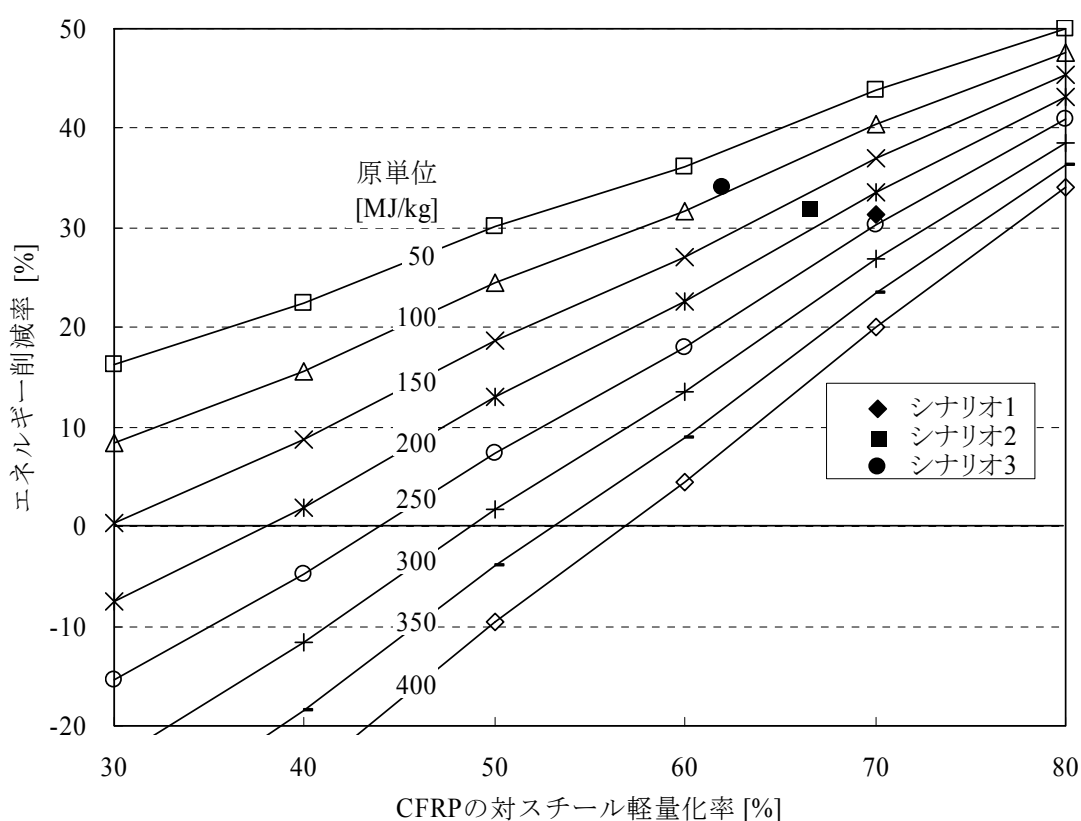


図 6.3.6 CFRP の対スチール軽量化率と CFRP 車のエネルギー削減率の関係

6.4 軽量乗用車導入による省エネルギー効果

本節では CFRP 軽量車の導入シナリオを設定し、そのときの省エネルギー効果を分析した。

前節の解析では、シナリオ 1 から 3 において車重は 40%前後軽くなり、燃費向上率は迅速成型 CFRTS のみ用いたシナリオ 1 の場合は 85.5%，リサイクル材も用いたシナリオ 3 の場合は 70.9%を示した。将来的には量産車用リサイクル材を開発し積極的に導入していくので、以下の解析において燃費向上率を 70%とした。

国内の自動車の保有台数は 2005 年 9 月末では 7,905 万台で、そのうち乗用車が 5,693 万台であった[48]。毎年保有台数の 1 割が更新される。ここでは乗用車の台数を 5,500 万台、うち 550 万台ずつ毎年更新されるとした。導入台数は、更新台数の 2%の 11 万台ずつが毎年比例的に増加するとした。つまり初年度は 11 万台 CFRP 車が導入され、2 年目は 22 万台、3 年目は 33 万台といった具合である。年間 11 万台ずつ増やすということは、1 ラインの年間生産量が 5 万台程度の超高級車あるいはスポーツカーに対して、日本全体で毎年 2 ラインずつ CFRP 軽量化技術を適用したラインを増やしていくようなペースである。この場合、全車両が入れ替わるまで 50 年かかり消極的なペースであるが、量産車に CFRP をメインの素材として使用していくにはまだまだ技術開発の余地があるので、今回は控えめに予測を立てた。なお、ある年の累積台数は年初から年末まで線形に増加するとし、その年の省エネルギーに寄与する台数は、年初と年末の台数の平均値とした。

現在の乗用車の平均実燃費は図 2.4.7 より 8.65km/L である。この燃費が 70%向上すると 14.7km/L となる。このとき年間 1 台あたりの燃料節減量は、

$$(1 \text{ 万 km/年} \cdot \text{台} \div 8.65 \text{ km/L}) - (1 \text{ 万 km/年} \cdot \text{台} \div 14.7 \text{ km/L}) = 476 \text{ L/年} \cdot \text{台}$$

ガソリンの発熱原単位は 34.61MJ/L であるので[40]、年間 1 台あたり 16,474MJ の省エネとなる。この値を原油換算すると 425L となった。

結果を表 6.4.1 に示す。運輸部門におけるエネルギー消費量の削減見積もりとして、自動車の燃費改善により原油換算で 540 万 kL の省エネルギーができると見積もられている。これは 2010 年での達成が目標であるが、このシナリオでは間に合わない。約 15 年後に目標が達成されると見積もられた。

表 6.4.1 CFRP 軽量車導入による省エネルギー量の推移

| 技術導入開始 からの年数 [年] | 導入 台数 [万台] | 廃棄 台数 [万台] | 累積 台数 [万台] | その年の省エネに 寄与する台数 [万台] | 省エネ量 [万 kL] |
|------------------------|------------------|------------------|------------------|----------------------------|----------------|
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 1 | 11 | 0 | 11 | 6 | 3 |
| 2 | 22 | 0 | 33 | 22 | 10 |
| 3 | 33 | 0 | 66 | 50 | 24 |
| 4 | 44 | 0 | 110 | 88 | 42 |
| 5 | 55 | 0 | 165 | 138 | 65 |
| 6 | 66 | 0 | 231 | 198 | 94 |
| 7 | 77 | 0 | 308 | 270 | 128 |
| 8 | 88 | 0 | 396 | 352 | 168 |
| 9 | 99 | 0 | 495 | 446 | 212 |
| 10 | 110 | 0 | 605 | 550 | 262 |
| 11 | 121 | 0 | 726 | 666 | 317 |
| 12 | 132 | 0 | 858 | 792 | 377 |
| 13 | 143 | 0 | 1,001 | 930 | 442 |
| 14 | 154 | 0 | 1,155 | 1,078 | 513 |
| 15 | 165 | 0 | 1,320 | 1,238 | 589 |
| 16 | 176 | 0 | 1,496 | 1,408 | 670 |
| 17 | 187 | 0 | 1,683 | 1,590 | 757 |
| 18 | 198 | 0 | 1,881 | 1,782 | 848 |
| 19 | 209 | 0 | 2,090 | 1,986 | 945 |
| 20 | 220 | 0 | 2,310 | 2,200 | 1,047 |

6.5 結言

本章では、CFRP 軽量乗用車の省エネルギー効果を検討した。量産車用 CFRP の開発において、迅速成型の CFRTS からリサイクル CFRTTP へ進めていきたいので、用いる CFRP 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 の原単位が大きい材料製造段階でのエネルギー消費量は増えるが、走行段階での減少が大きく効いて来るので結局ライフサイクルでは 31% 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削減率は 35% にまで向上した。よって、部材ごとに求められる材料特性と、適用すべき CFRP の性能を効果的に組み合わせることが重要である。

第7章 トラックの軽量化

7.1 緒言

本章では、CFRP を用いてトラックを軽量化したときの省エネルギー効果を検討する。トラックは乗用車と違って貨物を運ぶため、車体を軽くしても車両総重量がそれほど変わらず、燃費向上による効果が鈍る可能性が考えられる。そこで、トラックを大型・中型・小型の3サイズに分類し、従来のスチールトラックと CFRP 軽量化トラックのライフサイクルエネルギー消費量をそれぞれのサイズごとに LCA を用いて比較した。次に、総走行距離と積載量の変化が省エネルギー効果にどのような影響を及ぼすかを分析した。

7.2 トラックの分類

貨物自動車、いわゆるトラックは次のように分類される。表 7.2.1 は「道路運送車両の保安基準」による分類である。大型トラックと中型トラックは車両総重量により分けられ、中型トラックと小型トラックは積載量により分けられる。またトラック業界では、トラックメーカーの分類に従い、標準積載量によって 4t 以上の普通トラックと 4t 未満の小型トラックに分けられ、普通トラックはさらに中型と大型に区分することがある。小型トラックと普通トラックの違いを最大積載量 2t とする場合もある（表 7.2.2）。

本研究でも多種多様なトラックのエネルギー消費量を分析するにあたり、表 7.2.3 のように大型・中型・小型に分類する。車両重量は、トラックのカタログ、重量別保有台数、トラックメーカーへのヒアリングにより表のように設定した。

図 7.2.1 は 4 社 164 車種の車両重量と積載重量の関係をプロットしたものである。両者には相関がみられるので、最大積載量はこれを参考に市場の実勢も加味して設定した。積載率は、図 2.4.9 の統計値より設定した。統計では大型トラックと中型トラックを分けずに、普通トラックとして一緒に扱っており、積載率は 50%であった。一般に大型なトラックほど長距離を走るのにより効率的に荷物を積載すると思われるが、詳細な積載率のデータを得ることができなかったので、本研究では一律 50%とした。生涯走行距離は、トラックメーカーの資料および市場実勢から設定した。使用年数は自動車検査登録協会の資料[1]より設定した。

表 7.2.1 トラックの分類（道路運送車両の保安基準による分類）[2]

| 名称 | 全長×全幅×全高 | 定義 | 免許 |
|--------|---------------------|--|----|
| 大型トラック | 12m×2.5m×3.8m 以内 | 最大積載量 5t 以上または車両総重量 8t 以上 | 大型 |
| 中型トラック | | 車両総重量 8t 未満かつ最大積載量 2t 超 5t 未満 | 普通 |
| 小型トラック | 4.7m×1.7m×2m 以内 | 最大積載量 2～3t 以下かつ総排気量 2000cc 以下 (ただしディーゼル車, 天然ガス車は排気量無制限) | |

表 7.2.2 トラックの分類（トラックメーカーによる分類）[2]

| 名称 | | 標準積載量による分類 | | 通称 | 免許 |
|--------|----|------------------|-------------|---------------------|----|
| 普通トラック | 大型 | 5t 以上 | 5t 以上 | 10t 車, 20t 車, 25t 車 | 大型 |
| | 中型 | 4t 以上 5t 未満 | 2t 以上 5t 未満 | 4t 車 | 普通 |
| 小型トラック | | 2～3 t 程度 (4t 未満) | 2t 未満 | 2t 車 | |

表 7.2.3 検討対象とした各トラックのエネルギー消費量分析に用いるデータ

| | 車両重量 [t] | 最大積載量 [t] | 積載率 [%] | 車両総重量 [kg] | 生涯走行距離 [万 km] | 使用年数 [年] |
|----|-------------|--------------|------------|---------------|------------------|-------------|
| 大型 | 8 | 10 | 50 | 13 | 120 | 13 |
| 中型 | 4 | 4 | 50 | 6 | 40 | 11 |
| 小型 | 2.4 | 2 | 10 | 2.6 | 25 | 11 |

(注) 車両総重量は積載率が, 大型, 中型, 小型それぞれ 50%, 50%, 10%の場合.

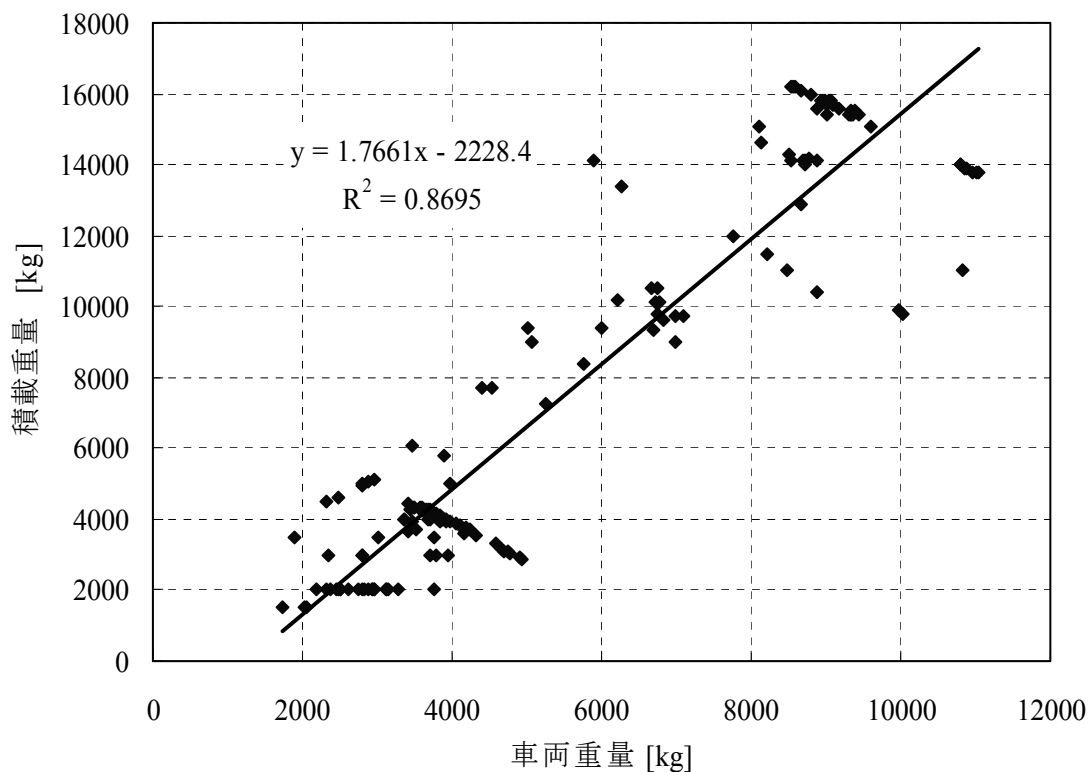


図 7.2.1 トラックの車両重量と積載重量の関係

7.3 LCA の実施

7.3.1 目的及び調査範囲の設定

(1) 実施目的

大型・中型・小型それぞれにおいて、従来のスチールトラックと CFRP 軽量トラックのライフサイクルを通した環境負荷を定量的に評価することで、CFRP による車体の軽量化について環境面における優位性の検討を目的とする。

(2) 評価対象製品

評価対象製品は、表 7.2.3 に示すような平均的な大型・中型・小型トラックを CFRP で軽量化したトラックで、比較対象製品は従来のスチール製の大型・中型・小型トラックである。

(3) 機能単位及び基準フロー

機能単位は表 7.2.3 に示すように、大型トラックの場合は積載率 50%で 13 年使用、中型トラックの場合は積載率 50%で 13 年使用、小型トラックの場合は積載率 10%で 11 年使用とした。基準フローはこの機能単位を満たすスチール製または CFRP 製の各サイズのトラックである。

(4) システム境界

素材製造，部品・車体製造，走行の3段階とした。

(5) 環境負荷項目

エネルギー消費量のみを対象とした。

7.3.2 素材製造段階

表 7.3.1 は 2t トラックの素材別重量およびエネルギー消費量である。表 7.2.3 で分類した平均的な 2t トラックではなく、実際に製造されているある車種の 2t トラックの車両重量である。歩留まりとエネルギー原単位の値は前章の乗用車の場合を参考にした。エネルギー消費量は 103,427MJ となった。車両重量が 2,038kg であるので、製造原単位は 50.7MJ/kg となった。ちなみに乗用車の製造原単位は表 6.3.2 より 58.3MJ/kg である。トラックの方が原単位が小さい理由は、原単位が他の素材と比べて小さいスチールが、乗用車の場合全素材の 71%を占めるのに対し、トラックの場合は 79%と多いからである。

表 7.3.2 は 1500cc 乗用車，2t トラック，4t トラックの部位別重量である。ただし，表 7.2.3 で分離した平均的なトラックとは異なり，実際に製造されているある車種のトラックの車重である。乗用車とトラックを比べた場合，乗用車の艤装品の高い割合やトラックのトランスミッションの高い割合が目立つが，全体的に傾向は似ている。4t トラックと 2t トラックを比べた場合は，より似た傾向がみてとれる。

よって，大型・中型・小型各トラックの製造エネルギーについては，先に求めたトラックの製造原単位 50.75MJ/kg にそれぞれの車両重量を乗じたものとした。大型・中型・小型それぞれで 121,800MJ/kg，203,000MJ/kg，406,000MJ/kg となった。

表 7.3.1 2tトラックの素材別重量およびエネルギー消費量

| 素材 | 使用量 | | 投入量 | | エネルギー 原単位 [MJ/kg] | エネルギー 消費量 [MJ] | 出典 |
|----------|------------|-----------|-------------|------------|-------------------------|----------------------|-----|
| | 重量 [kg] | 比率 [%] | 歩留まり [%] | 重量 [kg] | | | |
| 鋳鉄 | 160.61 | 7.88 | 49.0% | 327.78 | 24.8 | 8,129 | [3] |
| 棒鋼 | 15.88 | 0.78 | 80.0% | 19.86 | 24.8 | 493 | [3] |
| 熱延鋼板（中板） | 169.23 | 8.30 | 65.0% | 260.35 | 30.5 | 7,941 | [3] |
| 熱延鋼板（薄板） | 138.71 | 6.81 | 65.0% | 213.41 | 30.5 | 6,509 | [3] |
| 冷延薄板 | 49.26 | 2.42 | 65.0% | 75.78 | 33.7 | 2,554 | [3] |
| 熱延鋼板（厚板） | 155.14 | 7.61 | 65.0% | 238.68 | 30.5 | 7,280 | [3] |
| 表面処理鋼板 | 38.15 | 1.87 | 65.0% | 58.69 | 36.1 | 2,119 | [3] |
| 高張力鋼板 | 260.93 | 12.80 | 65.0% | 401.42 | 33.7 | 13,528 | [3] |
| めっき鋼板 | 187.37 | 9.19 | 65.0% | 288.25 | 36.1 | 10,406 | [3] |
| 合金鋼 | 138.82 | 6.81 | 49.0% | 283.30 | 30.4 | 8,612 | [3] |
| 炭素鋼 | 124.01 | 6.08 | 49.0% | 253.09 | 30.4 | 7,694 | [3] |
| ステンレス鋼 | 0.86 | 0.04 | 80.0% | 1.08 | 47.3 | 51 | [3] |
| ばね鋼 | 152.52 | 7.48 | 80.0% | 190.66 | 37.7 | 7,186 | [3] |
| 軸受鋼 | 14.57 | 0.71 | 80.0% | 18.21 | 37.7 | 686 | [3] |
| 快削鋼 | 0.10 | 0.01 | 49.0% | 0.21 | 30.4 | 6 | [3] |
| 特殊鋼一般 | 6.31 | 0.31 | - | - | - | - | - |
| 普通鋼一般 | 2.04 | 0.10 | - | - | - | - | - |
| 一次アルミニウム | 9.12 | 0.45 | 64.0% | 14.25 | 140.9 | 2,008 | [4] |
| 二次アルミニウム | 73.30 | 3.60 | 64.0% | 114.52 | 5.5 | 630 | [4] |
| 銅 | 12.79 | 0.63 | 90.0% | 14.22 | 14.0 | 199 | [5] |
| 鉛 | 18.49 | 0.91 | 90.0% | 20.54 | 25.2 | 518 | [6] |
| その他 | 3.21 | 0.16 | - | - | - | - | - |
| 天然ゴム | 2.96 | 0.15 | 70.0% | 4.23 | 107.0 | 452 | [6] |
| 合成ゴム | 85.38 | 4.19 | 70.0% | 121.96 | 107.0 | 13,050 | [6] |
| EPDM | 0.30 | 0.01 | - | - | - | - | - |
| ABS 樹脂 | 0.10 | 0.00 | 95.0% | 0.11 | 99.7 | 11 | [7] |
| ポリプロピレン | 52.25 | 2.56 | 95.0% | 55.00 | 24.4 | 1,342 | [8] |
| ポリエチレン | 0.07 | 0.00 | 95.0% | 0.07 | 20.3 | 1 | [8] |
| 塩化ポリビニール | 17.70 | 0.87 | 95.0% | 18.63 | 66.0 | 1,230 | [7] |
| 発泡ポリウレタン | 1.20 | 0.06 | 95.0% | 1.26 | 67.3 | 85 | [8] |
| ポリアミド一般 | 4.66 | 0.23 | - | - | - | - | - |

| 素材 | 使用量 | | 投入量 | | エネルギー 原単位 [MJ/kg] | エネルギー 消費量 [MJ] | 出典 |
|------------|------------|-----------|-------------|------------|-------------------------|----------------------|------|
| | 重量 [kg] | 比率 [%] | 歩留まり [%] | 重量 [kg] | | | |
| 熱可塑性ポリエステル | 1.41 | 0.07 | 95.0% | 1.48 | 20.3 | 30 | [8] |
| 熱可塑性樹脂一般 | 0.06 | 0.00 | - | - | - | - | - |
| 熱硬化性樹脂一般 | 0.04 | 0.00 | - | - | - | - | - |
| 綿 | 0.72 | 0.04 | - | - | - | - | - |
| 木材 | 91.75 | 4.50 | 80.0% | 114.69 | 1.66 | 190 | [9] |
| ガラス | 28.19 | 1.38 | 70.0% | 40.27 | 12.1 | 487 | [10] |
| 液類 | 13.35 | 0.65 | - | - | - | - | - |
| 合計 | 2038.30 | 99.67 | - | - | - | 103,427 | - |

(注) 素材別重量データはいすゞより提供。

表 7.3.2 乗用車，2tトラック，4tトラックの部位別重量

| 部位 | 1500cc 乗用車 | | 4t トラック | | 2t トラック | |
|---------------------|------------|-------|---------|-------|---------|-------|
| | [kg] | [%] | [kg] | [%] | [kg] | [%] |
| エンジン | 159.2 | 14.8 | 578.3 | 16.1 | 337.7 | 16.6 |
| トランスミッション | 64.3 | 6.0 | 421.9 | 11.7 | 372.5 | 18.3 |
| フレーム | - | - | 625.1 | 17.4 | 438.0 | 21.5 |
| ステアリング，ブレーキ，サスペンション | 204.5 | 19.0 | 598.6 | 16.6 | 280.7 | 13.8 |
| 艀装品 | 185.4 | 17.2 | 191.1 | 5.3 | 119.9 | 5.9 |
| キャブ | - | - | 264.5 | 7.3 | 157.9 | 7.8 |
| ボディ | 356.3 | 33.0 | 643.2 | 17.9 | 273.6 | 13.4 |
| 電装品 | 50.5 | 4.7 | 138.0 | 3.8 | 44.7 | 2.2 |
| 液類（ガソリン含む） | 59.1 | 5.5 | 140.1 | 3.9 | 13.4 | 0.7 |
| 合計 | 1079.3 | 100.0 | 3600.7 | 100.0 | 2038.3 | 100.0 |

(注) データはいすゞより提供。

表 7.3.3 2tトラックの部位別素材別重量

| 部位 | 合計 | | 鉄鋼 | 非鉄金属 | その他 |
|-----------------------|--------|-------|--------|-------|-------|
| | [kg] | [%] | [kg] | [kg] | [kg] |
| エンジン | 337.7 | 16.6 | 251.6 | 72.2 | 13.9 |
| トランスミッション | 372.5 | 18.3 | 352.2 | 19.9 | 0.4 |
| フレーム | 438.0 | 21.6 | 433.9 | 0.0 | 4.1 |
| ステアリング, ブレーキ, サスペンション | 280.6 | 13.8 | 202.6 | 0.0 | 78.1 |
| 艀装品 | 114.5 | 5.6 | 43.0 | 1.5 | 70.0 |
| キャブ | 157.9 | 7.8 | 144.6 | 1.8 | 11.5 |
| ボディ | 273.6 | 13.5 | 179.5 | 0.3 | 93.8 |
| 電装品, 液類 | 56.8 | 2.8 | 7.2 | 21.2 | 28.4 |
| 合計 | 2031.6 | 100.0 | 1614.5 | 116.9 | 300.1 |

(注) データはいすゞより提供。

次に CFRP によりトラックがどれくらい軽量化できるか考える。表 7.3.3 は 2t トラックについて計量化可能な部材の重量を示したものである。材料代替で軽量化できる部位として、フレーム、ステアリング・ブレーキ・サスペンション、キャブ、ボディを想定した。この軽量化によりサイズダウンなどで二次的に軽量化できる部位としてエンジン、トランスミッションを想定した。その他の艀装品、電装品、液類については軽量化なしとした。なお、表の合計車重が 2031.6kg で先の合計値 2038.3kg と誤差があるが、おそらく艀装品の部位において入力ミスがあったと思われるが、わずかな差なので無視した。

用いる CFRP は、繊維体積含有率 (Vf) が 60% で、樹脂が熱硬化性のエポキシ (EP)、疑似等方性、成型法は RTM 法とした。前章で行った CFRP 乗用車の分析のように、部材ごとにいくつかの種類の CFRP を用いて分析するのが理想的だが、トラックは乗用車と違って形状や車重などがあまりに多種多様なため、本研究では分析の第 1 段階として、迅速成型の熱硬化 CFRP を一律に用いた場合を想定した。軽量化率は乗用車の場合よりも控えめに見積もって 50% とした。CFRP の原単位は、乗用車のときと同様の計算により 234MJ/kg とした。

(1) 大型トラックの軽量化

表 7.3.4 は従来の大型トラックの部位別重量である。先に述べたように、フレーム、ステアリング・ブレーキ・サスペンション、キャブ、ボディのうちスチール部分を CFRP で代替して軽量化した。軽量化率は 50% なので、スチール 100kg あたり CFRP50kg に代替される。また、この軽量化に伴うサイズダウンによって、エンジンとトランスミッションが軽量化されるとした。図 7.3.1 は、53 車種のトラックの車両重量とそれに搭載されているエンジン重量の関係をプロットしたものである。表のエンジンの重量はエンジン系全体を含んでいると思われるので、そのうちエンジン本体を約 930kg と推定した。軽量化により約 700kg にサイズダウンするとした。エンジン系全体では 20% の軽量化率とした。また、トランス

ミッションは10%の軽量化とした。軽量化後の部位別重量を表7.3.5に示す。

CFRPを用いることでスチールの使用量は3,782kg減る。また、エンジンとトランスミッションの小型化によりスチールの使用量はそれぞれ198kg, 139kg減る。スチールの平均歩留まりは表7.3.1より60.9%なので、投入量が合わせて6,764kg減ることになる。原単位は表5.3.1より33MJ/kgなので、エネルギー消費量は225,237MJ減る。

次にエンジンとトランスミッションの小型化による非鉄金属の増減を考える。それぞれ使用量は57kg, 8kg減る。トランスミッションの非鉄金属は、原単位がものすごく小さい二次アルミが全てを占めるので、使用量も少ないことから無視した。エンジンの非鉄金属の構成は、一次アルミ, 二次アルミ, 銅がそれぞれ9%, 74%, 16%を占める。トランスミッションの場合と同じように二次アルミと銅については無視した。一次アルミについては使用量がかかなり少ないものの、原単位が極めて大きいので算出の対象とした。一次アルミの使用量は5kgで、投入量が8kgなので、エネルギー消費量は1,123MJ減る。

一方、代わりに用いたCFRPの使用量は1,891kgである。CFRPの歩留まりは一般的に60%と言われているので、投入量は3,152kgとなる。原単位は234MJ/kgなのでエネルギー消費量は737,529MJ増える。よって、スチール, アルミ, CFRPの増減を合計すると、全体では511,169MJの増加となる。軽量化前の大型トラックの素材製造段階のエネルギー消費量は406,000MJであるので、軽量化後は917,169MJとなる。なお、車重の軽量化率は28.8%である。

表 7.3.4 軽量化前の大型トラックの部位別重量

| 部位 | 合計 | 鉄鋼 | 非鉄金属 | その他 |
|-----------------------|--------|--------|-------|--------|
| エンジン | 1329.9 | 990.9 | 284.1 | 54.9 |
| トランスミッション | 1466.8 | 1386.9 | 78.2 | 1.7 |
| フレーム | 1724.6 | 1708.4 | 0.0 | 16.1 |
| ステアリング, ブレーキ, サスペンション | 1105.1 | 797.6 | 0.1 | 307.4 |
| 艀装品 | 450.8 | 169.2 | 6.1 | 275.5 |
| キャブ | 621.7 | 569.4 | 7.0 | 45.4 |
| ボディ | 1077.4 | 706.9 | 1.3 | 369.2 |
| 電装品, 液類 | 223.7 | 28.4 | 83.6 | 111.7 |
| 合計 [kg] | 8000.0 | 6357.7 | 460.4 | 1181.9 |

表 7.3.5 軽量化後の大型トラックの部位別重量

| 部位 | 合計 | 鉄鋼 | 非鉄金属 | その他 | CFRP | 備考 |
|-----------------------------------|--------|--------|-------|--------|--------|--------------|
| エンジン | 1063.9 | 792.7 | 227.3 | 43.9 | 0.0 | 20%サイズダウン |
| トランスミッション | 1320.1 | 1248.2 | 70.3 | 1.6 | 0.0 | 10%サイズダウン |
| フレーム | 870.4 | 0.0 | 0.0 | 16.1 | 854.2 | 鉄 100→CFRP50 |
| ステアリング ^a 、ブレーキ、サスペンション | 706.3 | 0.0 | 0.1 | 307.4 | 398.8 | 鉄 100→CFRP50 |
| 艀装品 | 450.8 | 169.2 | 6.1 | 275.5 | 0.0 | 軽量化なし |
| キャブ | 337.1 | 0.0 | 7.0 | 45.4 | 284.7 | 鉄 100→CFRP50 |
| ボディ | 724.0 | 0.0 | 1.3 | 369.2 | 353.4 | 鉄 100→CFRP50 |
| 電装品、液類 | 223.7 | 28.4 | 83.6 | 111.7 | 0.0 | 軽量化なし |
| 合計 [kg] | 5696.2 | 2238.5 | 395.7 | 1170.8 | 1891.2 | - |

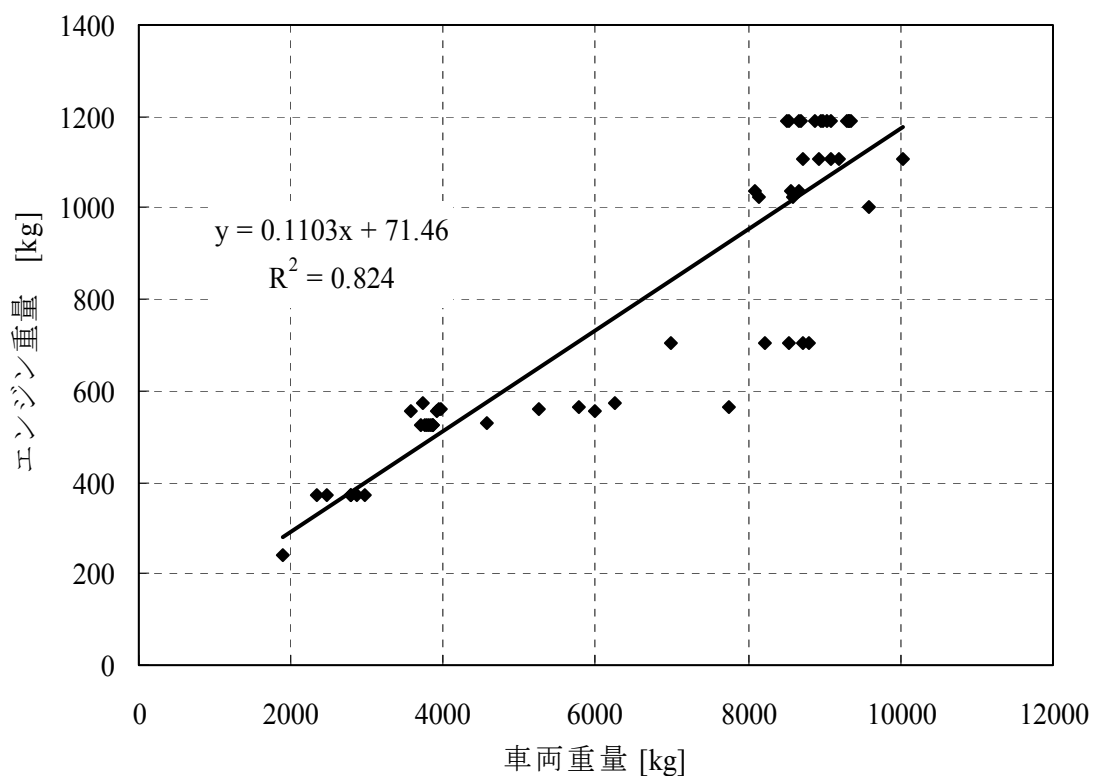


図 7.3.1 トラックの車両重量とエンジン重量の関係

(2) 中型トラック

表 7.3.6 に軽量化前の部位別重量を示す．軽量化後の部位別重量は，大型トラックの場合と同様の考え方で表 7.3.7 のようになった．エネルギー消費量も同様に求めて，458,611MJ/kg となった．車重の軽量化率は 28.8%である．

表 7.3.6 軽量化前の中型トラックの部位別重量

| 部位 | 合計 | 鉄鋼 | 非鉄金属 | その他 |
|---------------------|--------|--------|-------|-------|
| エンジン | 664.9 | 495.4 | 142.1 | 27.4 |
| トランスミッション | 733.4 | 693.5 | 39.1 | 0.9 |
| フレーム | 862.3 | 854.2 | 0.0 | 8.1 |
| ステアリング，ブレーキ，サスペンション | 552.5 | 398.8 | 0.1 | 153.7 |
| 艀装品 | 225.4 | 84.6 | 3.0 | 137.7 |
| キャブ | 310.9 | 284.7 | 3.5 | 22.7 |
| ボディ | 538.7 | 353.4 | 0.7 | 184.6 |
| 電装品，液類 | 111.8 | 14.2 | 41.8 | 55.9 |
| 合計 [kg] | 4000.0 | 3178.9 | 230.2 | 591.0 |

表 7.3.7 軽量化後の中型トラックの部位別重量

| 部位 | 合計 | 鉄鋼 | 非鉄金属 | その他 | CFRP | 備考 |
|---------------------|--------|--------|-------|-------|-------|--------------|
| エンジン | 532.0 | 396.4 | 113.6 | 22.0 | 0.0 | 20%サイズダウン |
| トランスミッション | 660.1 | 624.1 | 35.2 | 0.8 | 0.0 | 10%サイズダウン |
| フレーム | 435.2 | 0.0 | 0.0 | 8.1 | 427.1 | 鉄 100→CFRP50 |
| ステアリング，ブレーキ，サスペンション | 353.1 | 0.0 | 0.1 | 153.7 | 199.4 | 鉄 100→CFRP50 |
| 艀装品 | 225.4 | 84.6 | 3.0 | 137.7 | 0.0 | 軽量化なし |
| キャブ | 168.5 | 0.0 | 3.5 | 22.7 | 142.3 | 鉄 100→CFRP50 |
| ボディ | 362.0 | 0.0 | 0.7 | 184.6 | 176.7 | 鉄 100→CFRP50 |
| 電装品，液類 | 111.8 | 14.2 | 41.8 | 55.9 | 0.0 | 軽量化なし |
| 合計 [kg] | 2848.1 | 1119.3 | 197.9 | 585.4 | 945.6 | - |

(3) 小型トラック

表 7.3.8 に軽量化前の部位別重量を示す．軽量化後の部位別重量は，大型トラックの場合と同様の考え方で表 7.3.9 のようになった．エネルギー消費量も同様に求めて，275,137MJ/kg となった．車重の軽量化率は 28.8%である．

以上の結果をまとめて表 7.3.10 に示す．

表 7.3.8 軽量化前の小型トラックの部位別重量

| 部位 | 合計 | 鉄鋼 | 非鉄金属 | その他 |
|---------------------|--------|--------|-------|-------|
| エンジン | 399.0 | 297.3 | 85.2 | 16.5 |
| トランスミッション | 440.0 | 416.1 | 23.4 | 0.5 |
| フレーム | 517.4 | 512.5 | 0.0 | 4.8 |
| ステアリング，ブレーキ，サスペンション | 331.5 | 239.3 | 0.0 | 92.2 |
| 艀装品 | 135.2 | 50.8 | 1.8 | 82.6 |
| キャブ | 186.5 | 170.8 | 2.1 | 13.6 |
| ボディ | 323.2 | 212.1 | 0.4 | 110.8 |
| 電装品，液類 | 67.1 | 8.5 | 25.1 | 33.5 |
| 合計 [kg] | 2400.0 | 1907.3 | 138.1 | 354.6 |

表 7.3.9 軽量化後の小型トラックの部位別重量

| 部位 | 合計 | 鉄鋼 | 非鉄金属 | その他 | CFRP | 備考 |
|---------------------|--------|-------|-------|-------|-------|--------------|
| エンジン | 319.2 | 237.8 | 68.2 | 13.2 | 0.0 | 20%サイズダウン |
| トランスミッション | 396.0 | 374.5 | 21.1 | 0.5 | 0.0 | 10%サイズダウン |
| フレーム | 261.1 | 0.0 | 0.0 | 4.8 | 256.3 | 鉄 100→CFRP50 |
| ステアリング，ブレーキ，サスペンション | 211.9 | 0.0 | 0.0 | 92.2 | 119.6 | 鉄 100→CFRP50 |
| 艀装品 | 135.2 | 50.8 | 1.8 | 82.6 | 0.0 | 軽量化なし |
| キャブ | 101.1 | 0.0 | 2.1 | 13.6 | 85.4 | 鉄 100→CFRP50 |
| ボディ | 217.2 | 0.0 | 0.4 | 110.8 | 106.0 | 鉄 100→CFRP50 |
| 電装品，液類 | 67.1 | 8.5 | 25.1 | 33.5 | 0.0 | 軽量化なし |
| 合計 [kg] | 1708.9 | 671.6 | 118.7 | 351.2 | 567.3 | - |

表 7.3.10 CFRP トラックの素材製造段階におけるエネルギー消費量

| | | 大型 | 中型 | 小型 |
|----------------|----------|----------|----------|---------|
| スチール | 使用量 | -4,119 | -2,059 | -1,236 |
| | 投入量 | -6,764 | -3,382 | -2,029 |
| | エネルギー消費量 | -225,237 | -112,608 | -67,573 |
| アルミ | 使用量 | -5.1 | -2.6 | -1.5 |
| | 投入量 | -8.0 | -4.0 | -2.4 |
| | エネルギー消費量 | -1,123 | -566 | -337 |
| CFRP | 使用量 | 1,891 | 946 | 567 |
| | 投入量 | 3,152 | 1,576 | 946 |
| | エネルギー消費量 | 737,529 | 368,784 | 221,247 |
| 増減の合計 | エネルギー消費量 | 511,169 | 255,611 | 153,337 |
| 素材製造時のエネルギー消費量 | | 917,169 | 458,611 | 275,137 |

(注) 使用量, 投入量の単位は kg, エネルギー消費量の単位は MJ.

7.3.3 部品・車体製造段階

第 6 章で求めた自動車の部品・車体製造の原単位は 16.4MJ/kg であった. よって, 各トラックの部品・車体製造段階でのエネルギー消費量は表 7.3.11 のようになった.

次に, CFRP 軽量トラックの場合であるが, 第 6 章でも述べたように, CFRP の特徴として, 一般に素材を製造した段階ですでに製品の最終形状に近い形になるため, 加工・組立工程が金属の場合よりも少なくてすむ. このとき一体成型ができて部品点数も減少するため, 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. しかしながら CFRP 車の部品・車体製造エネルギーに関するデータを収集するのは現時点では不可能である. よって本研究では, 求めた軽量化後の重量に応じて従来車のエネルギー消費量を単純に比例換算した. 結果を表 7.3.11 に示す.

表 7.3.11 トラックの部品・車体製造段階におけるエネルギー消費量

| | スチールトラック | | | CFRP トラック | | |
|---------------|----------|--------|--------|-----------|--------|--------|
| | 大型 | 中型 | 小型 | 大型 | 中型 | 小型 |
| 車重 [kg] | 8,000 | 4,000 | 2,400 | 5,696 | 2,848 | 1,709 |
| エネルギー消費量 [MJ] | 131,200 | 65,600 | 39,360 | 93,418 | 46,709 | 28,026 |

7.3.4 走行段階

走行段階のエネルギー消費量は，走行時に消費するエネルギーと，軽油の製造に要するエネルギーを合計して求めた．

まず，走行時に消費するエネルギーは，軽油の発熱原単位，走行距離，燃費から求められる．軽油の発熱原単位は 38.5MJ/L である[11]．生涯走行距離は表 7.2.3 のとおりである．図 7.3.2 は車両総重量と燃費の関係をプロットしたものである[12][13]．これは（社）全日本トラック協会が 9 ブロック協会ごとに 2 県（2 事業者）計 18 事業者を選定し，「省エネ運転モデル走行調査」の実施を計画したときのデータおよび，国土交通省国土技術政策総合研究所がコンテナトレーラーの燃料消費量測定実験をしたときのデータである．後者については，速度が 30km/h から 40km/h のときの平均燃費とした．データ数は少ないものの，トラックの場合も乗用車と同様に車重と燃費が直線関係にあると言える．トラックメーカーへのヒアリングともおおむね一致する相関である．関係式はこうになった．

$$y = 0.00083x + 13.17148 \quad (7.1)$$

ここで， x ：車重[kg]， y ：実燃費[L/100km]， $R^2=0.831$ である

次に，軽油の製造に要するエネルギーは，軽油の製造原単位，走行距離，燃費から求められる．軽油の製造原単位は 41.9MJ/L である[11]．

結果を表 7.3.12 に示す．

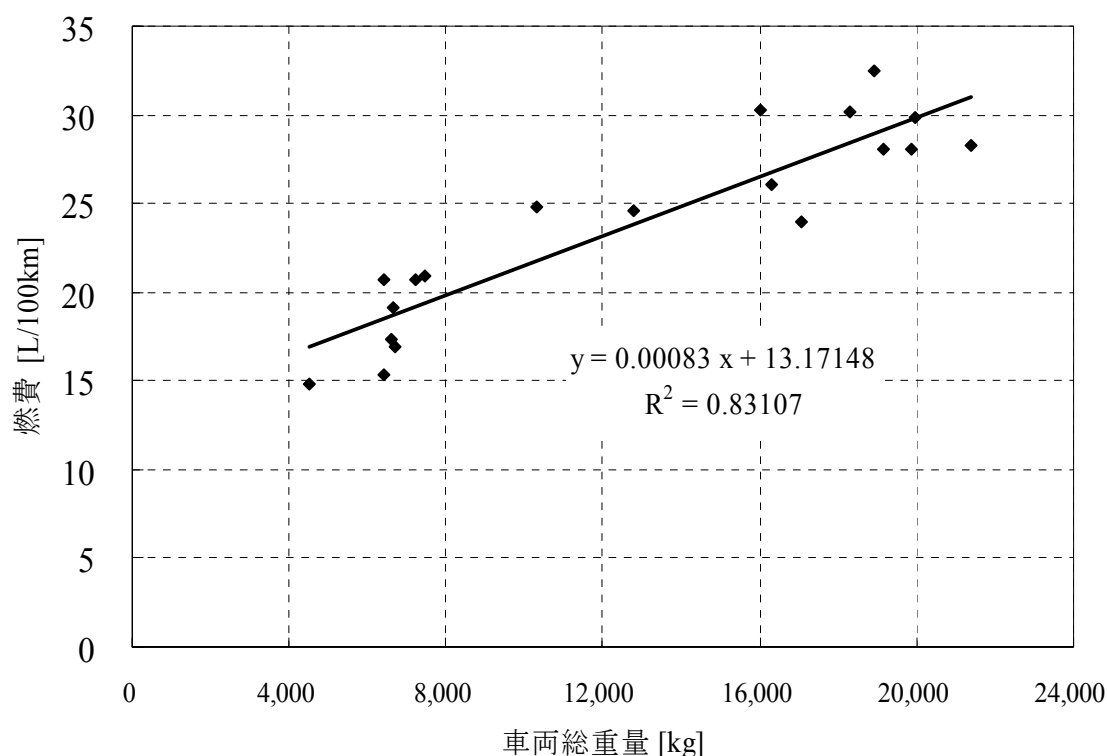


図 7.3.2 トラックの車両総重量と燃費の関係[12][13]

表 7.3.12 トラックの走行段階におけるエネルギー消費量

| | 大型 | | 中型 | | 小型 | |
|-------------------|------------|------------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| | スチール | CFRP | スチール | CFRP | スチール | CFRP |
| 車重 [kg] | 8,000 | 5,696 | 4,000 | 2,848 | 2,400 | 1,709 |
| 積載量 [kg] | 5,000 | | 2,000 | | 200 | |
| 車両総重量 [kg] | 13,000 | 10,696 | 6,000 | 4,848 | 2,600 | 1,909 |
| 燃費 [L/100km] | 24.0 | 22.0 | 18.2 | 17.2 | 15.3 | 14.8 |
| 燃費 [km/L] | 4.17 | 4.54 | 5.51 | 5.82 | 6.52 | 6.78 |
| 総走行距離 [km] | 1,200,000 | | 400,000 | | 250,000 | |
| 総軽油消費量 [L] | 287,538 | 264,592 | 72,606 | 68,782 | 38,324 | 36,890 |
| 走行時のエネルギー消費量 [MJ] | 11,070,204 | 10,186,789 | 2,795,328 | 2,648,092 | 1,475,462 | 1,420,252 |
| 軽油製造エネルギー [MJ] | 12,047,832 | 11,086,401 | 3,042,188 | 2,881,950 | 1,605,763 | 1,545,677 |
| 合計エネルギー消費量 [MJ] | 23,118,036 | 21,273,190 | 5,837,516 | 5,530,042 | 3,081,225 | 2,965,929 |

7.3.5 ライフサイクル

図 7.3.3 と表 7.3.13 に、スチールトラックと CFRP 軽量トラックの各サイズにおける、ライフサイクルでのエネルギー消費量の比較を示す。乗用車と比べ総走行距離がかなり長い
ため、走行段階でのエネルギー消費量が全体のほとんどを占めた。また、乗用車と違って
トラックは貨物を運ぶため、車重が 28.8%軽くなっても総車両重量にはあまり軽量化が効か
なかった。大型、中型、小型トラックのエネルギー消費量の削減率は、それぞれ 5.8%、1.2%、
-0.8%となった。サイズが小さいほどエネルギー消費量の削減は鈍くなり、小型トラックで
は製造原単位の大きい CFRP の使用により、かえってエネルギー消費量が若干ではあるが増
えた。

表 7.3.13 トラックのライフサイクルにおけるエネルギー消費量

| | 大型 | | 中型 | | 小型 | |
|---------|------------|------------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| | スチール | CFRP | スチール | CFRP | スチール | CFRP |
| 素材製造 | 406,000 | 917,169 | 203,000 | 458,611 | 121,800 | 275,137 |
| 部品・車体製造 | 131,200 | 93,418 | 65,600 | 46,709 | 39,360 | 28,026 |
| 走行 | 23,118,036 | 21,273,190 | 5,837,516 | 5,530,042 | 3,081,225 | 2,965,929 |
| 合計 [MJ] | 23,655,236 | 22,283,777 | 6,106,116 | 6,035,361 | 3,242,385 | 3,269,092 |
| 削減率 [%] | - | 5.8 | - | 1.2 | - | -0.8 |

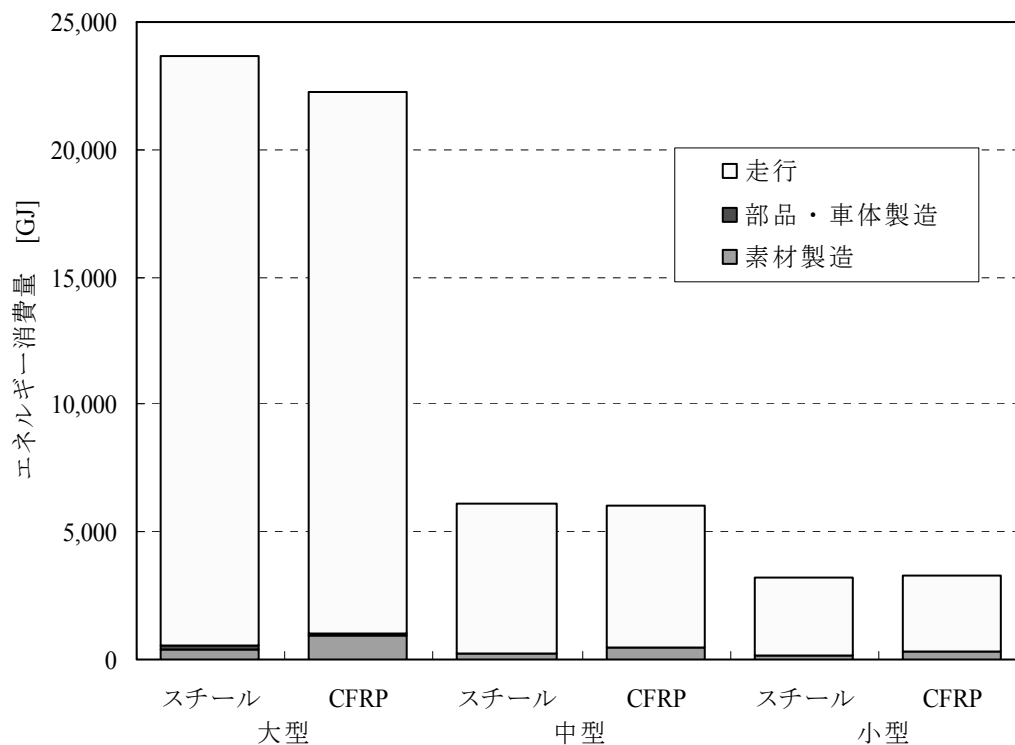


図 7.3.3 トラックのライフサイクルにおけるエネルギー消費量

7.4 軽量トラック導入による省エネルギー効果

前節では、CFRP でトラックを軽くしても、ライフサイクルでのエネルギー消費量の削減にはほとんど影響がないことがわかった。そこで本節では、総走行距離や積載率を変化させることで、エネルギー消費量の削減をどれだけ向上できるか分析した。

7.4.1 総走行距離を変化させた場合

年間走行距離は固定したまま使用年数を変化させた場合の、従来のスチールトラックと CFRP 軽量化トラックのエネルギー消費量の変化を比較した。それぞれのトラックに関して総走行距離を現在の平均値から 2 倍まで変化させた。スチールトラックのエネルギー消費量を基準にして、CFRP トラックが同距離走行したときのそれと比較した。

7.4.1.1 大型トラック

大型トラックについては、総走行距離を 120 万 km から 240 万 km まで変化させた。表 7.4.1 に削減率の変化を示す。削減率は約 1.1%しか変化しなかった。

表 7.4.1 総走行距離を変化させた場合の大型トラックのエネルギー消費量の変化

| | 総走行 距離 [万 km] | エネルギー消費量 | | | | | |
|-------|---------------------|------------|------------|------------|------------|----------------------|------------|
| | | 素材 [MJ] | 組立 [MJ] | 走行 [MJ] | 計 [MJ] | 従来車を 100 と したときの値 | 削減率 [%] |
| 従来車 | 120 | 406,000 | 131,200 | 23,118,036 | 23,655,236 | 100.0 | - |
| | 144 | 406,000 | 131,200 | 27,741,643 | 28,278,843 | 100.0 | - |
| | 168 | 406,000 | 131,200 | 32,365,250 | 32,902,450 | 100.0 | - |
| | 192 | 406,000 | 131,200 | 36,988,857 | 37,526,057 | 100.0 | - |
| | 216 | 406,000 | 131,200 | 41,614,465 | 42,151,665 | 100.0 | - |
| | 240 | 406,000 | 131,200 | 46,236,072 | 46,773,272 | 100.0 | - |
| CFRP車 | 120 | 917,169 | 93,418 | 21,273,190 | 22,283,777 | 94.2 | 5.8 |
| | 144 | 917,169 | 93,418 | 25,527,828 | 26,538,415 | 93.8 | 6.2 |
| | 168 | 917,169 | 93,418 | 29,782,466 | 30,793,053 | 93.6 | 6.4 |
| | 192 | 917,169 | 93,418 | 34,037,104 | 35,047,691 | 93.4 | 6.6 |
| | 216 | 917,169 | 93,418 | 38,291,742 | 39,302,329 | 93.2 | 6.8 |
| | 240 | 917,169 | 93,418 | 42,546,379 | 43,556,966 | 93.1 | 6.9 |

7.4.1.2 中型トラック

表 7.4.2 総走行距離を変化させた場合の中型トラックのエネルギー消費量の変化

| | 総走行 距離 [万 km] | エネルギー消費量 | | | | | |
|-------|---------------------|------------|------------|------------|------------|----------------------|------------|
| | | 素材 [MJ] | 組立 [MJ] | 走行 [MJ] | 計 [MJ] | 従来車を 100 と したときの値 | 削減率 [%] |
| 従来車 | 40 | 203,000 | 65,600 | 5,837,516 | 6,106,116 | 100.0 | - |
| | 48 | 203,000 | 65,600 | 7,005,019 | 7,273,619 | 100.0 | - |
| | 56 | 203,000 | 65,600 | 8,172,522 | 8,441,122 | 100.0 | - |
| | 64 | 203,000 | 65,600 | 9,340,026 | 9,608,626 | 100.0 | - |
| | 72 | 203,000 | 65,600 | 10,507,529 | 10,776,129 | 100.0 | - |
| | 80 | 203,000 | 65,600 | 11,675,032 | 11,943,632 | 100.0 | - |
| CFRP車 | 40 | 458,611 | 46,709 | 5,530,042 | 6,035,362 | 98.8 | 1.2 |
| | 48 | 458,611 | 46,709 | 6,636,050 | 7,141,370 | 98.2 | 1.8 |
| | 56 | 458,611 | 46,709 | 7,742,058 | 8,247,378 | 97.7 | 2.3 |
| | 64 | 458,611 | 46,709 | 8,848,067 | 9,353,387 | 97.3 | 2.7 |
| | 72 | 458,611 | 46,709 | 9,954,075 | 10,459,395 | 97.1 | 2.9 |
| | 80 | 458,611 | 46,709 | 11,060,083 | 11,565,403 | 96.8 | 3.2 |

中型トラックについては、総走行距離を 40 万 km から 80 万 km まで変化させた。表 7.4.2 に削減率の変化を示す。削減率は約 2.0%向上した。

7.4.1.3 小型トラック

小型トラックについては、総走行距離を 25 万 km から 50 万 km まで変化させた。表 7.4.3 に削減率の変化を示す。25 万 km では軽量化効果はマイナスになったが、総走行距離を伸ばすと軽量化効果が得られた。削減率は約 2.2%向上した。

以上の結果を図 7.4.1 にまとめる。

表 7.4.3 総走行距離を変化させた場合の小型トラックのエネルギー消費量の変化

| | 総走行 距離 [万 km] | エネルギー消費量 | | | | | |
|-------|---------------------|------------|------------|------------|-----------|----------------------|------------|
| | | 素材 [MJ] | 組立 [MJ] | 走行 [MJ] | 計 [MJ] | 従来車を 100 と したときの値 | 削減率 [%] |
| 従来車 | 25 | 121,800 | 39,360 | 3,081,225 | 3,242,385 | 100.0 | - |
| | 30 | 121,800 | 39,360 | 3,697,471 | 3,858,631 | 100.0 | - |
| | 35 | 121,800 | 39,360 | 4,313,716 | 4,474,876 | 100.0 | - |
| | 40 | 121,800 | 39,360 | 4,929,961 | 5,091,121 | 100.0 | - |
| | 45 | 121,800 | 39,360 | 5,546,206 | 5,707,366 | 100.0 | - |
| | 50 | 121,800 | 39,360 | 6,162,451 | 6,323,611 | 100.0 | - |
| CFRP車 | 25 | 275,137 | 28,026 | 2,965,929 | 3,269,092 | 100.8 | -0.8 |
| | 30 | 275,137 | 28,026 | 3,559,115 | 3,862,278 | 100.1 | -0.1 |
| | 35 | 275,137 | 28,026 | 4,152,301 | 4,455,464 | 99.6 | 0.4 |
| | 40 | 275,137 | 28,026 | 4,745,487 | 5,048,650 | 99.2 | 0.8 |
| | 45 | 275,137 | 28,026 | 5,338,673 | 5,641,836 | 98.9 | 1.1 |
| | 50 | 275,137 | 28,026 | 5,931,859 | 6,235,022 | 98.6 | 1.4 |

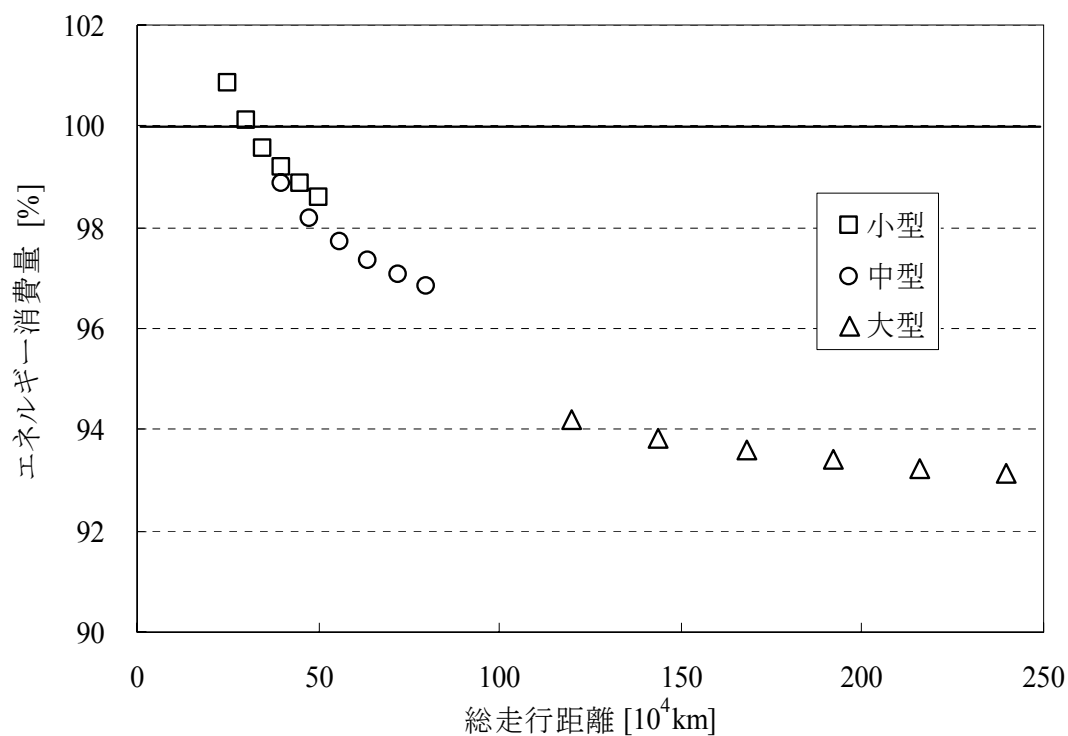


図 7.4.1 総走行距離を変化させた場合のエネルギー消費量の変化

7.4.2 積載率を変化させた場合

日本の保有トラック全体の総エネルギー消費量を考えた。このとき、日本全体での大型・中型・小型各トラックの総輸送トンキロ数を一定として 1 台あたりの積載量の増加に伴い車両の保有台数が減少するものとした（図 7.4.2）。各ケースを以下のように設定した。

- (1) 軽量化後の積載量が変わらない
- (2) 軽量化した重量と同じだけ積載量が増える
- (3) 軽量化した重量に現状の積載率をかけた分だけ積載量が増える

2004 年のトラックの保有台数は、普通トラックが 247 万台、小型トラックは 467 万台である[14]。普通トラックのうち大型トラックと中型トラックの割合を市場の実勢から大まかに 4 : 6 とすると、それぞれ 99 万台、148 万台となる。

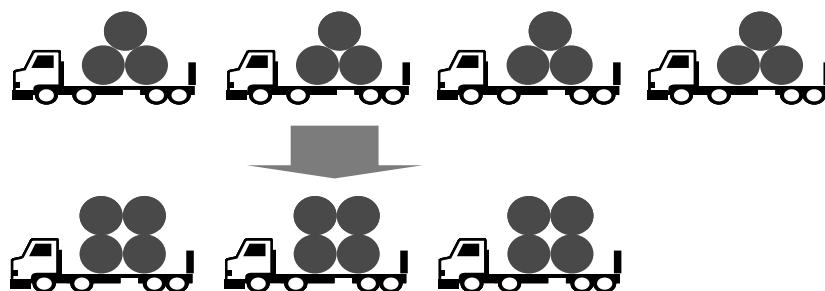


図 7.4.2 積載率の向上による車両台数の減少

7.4.2.1 大型トラック

スチールトラックの総エネルギー消費量は、1 台あたりのエネルギー消費量に台数（99 万台）をかけたものである。CFRP により軽量化される重量は 2,304kg で、これと同じ重量だけ積載能力が増えるとした。

（1）軽量化後の積載量が変化しない場合

積載量に変化がないので CFRP 軽量車も 99 万台となった。図 7.4.3 および表 7.4.4 に結果を示す。総エネルギー消費量は 5.8%減少した。

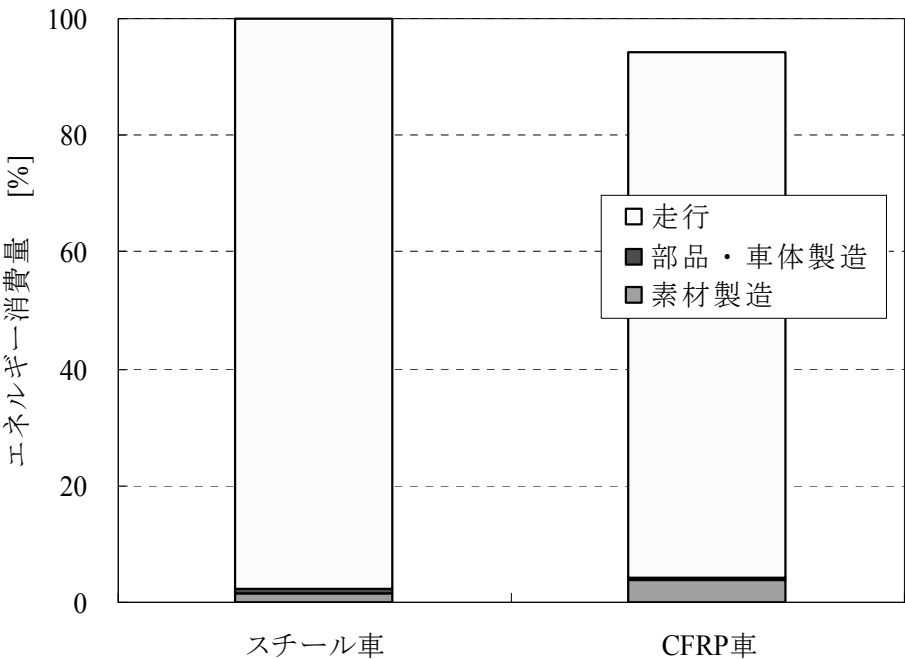


図 7.4.3 大型トラックの総エネルギー消費量の比較（ケース 1）

表 7.4.4 大型トラックの総エネルギー消費量の比較（ケース 1）

| | 素材 | 組立 | 走行 | 計 [%] |
|--------|-----|-----|------|-------|
| スチール車 | 1.7 | 0.6 | 97.7 | 100.0 |
| CFRP 車 | 3.9 | 0.4 | 89.9 | 94.2 |

(2) 軽量化した重量と同じだけ積載量が増える場合

CFRP車の積載量は5,000kgから2,304kg増えて7,304kgになった。台数は、99万台×5,000kg÷7,304kg=68万台になった。図7.4.4および表7.4.5に結果を示す。総エネルギー消費量は29.9%減少した。

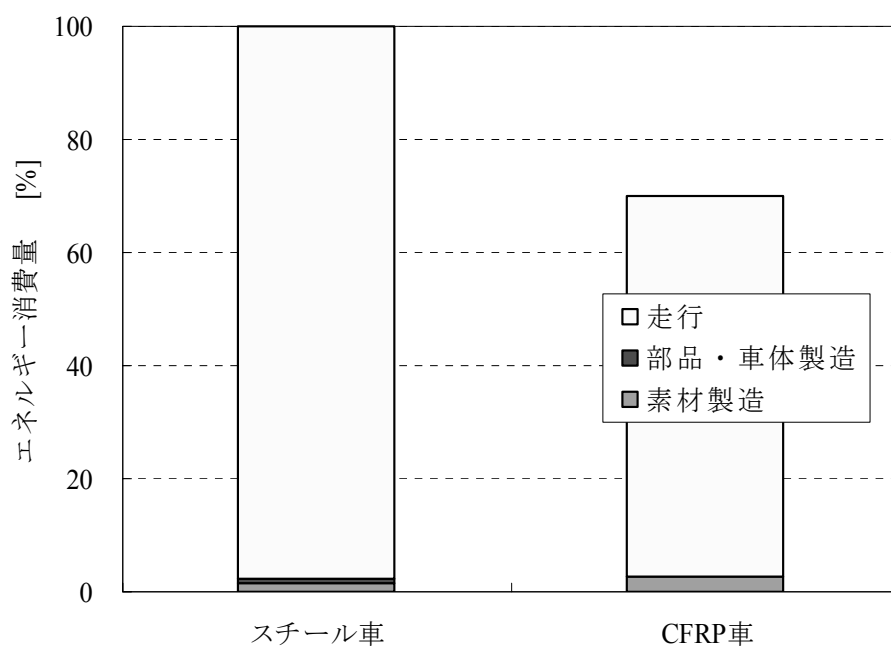


図 7.4.4 大型トラックの総エネルギー消費量の比較（ケース 2）

表 7.4.5 大型トラックの総エネルギー消費量の比較（ケース 2）

| | 素材 | 組立 | 走行 | 計 [%] |
|--------|-----|-----|------|-------|
| スチール車 | 1.7 | 0.6 | 97.7 | 100.0 |
| CFRP 車 | 2.7 | 0.3 | 67.1 | 70.1 |

(3) 軽量化した重量に現状の積載率をかけた分だけ積載量が増える場合

CFRP 車の積載量は 5,000kg から 2,304kg の 50%, つまり 1,152kg 増えて 6,152kg になった。
台数は、 $99 \text{ 万台} \times 5,000\text{kg} \div 6,152\text{kg} = 80 \text{ 万台}$ になった。図 7.4.5 および表 7.4.6 に結果を示す。総エネルギー消費量は 20.7%減少した。

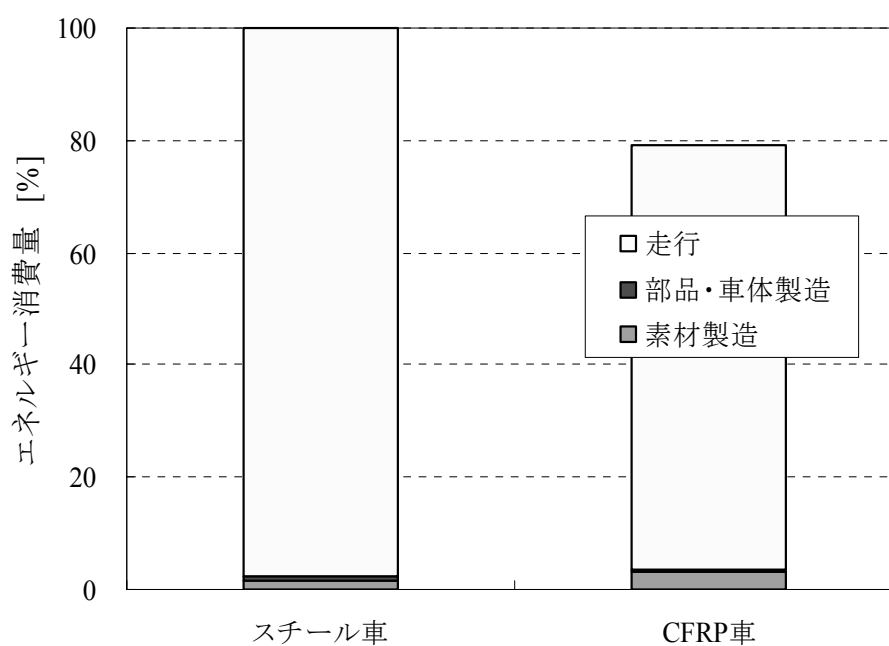


図 7.4.5 大型トラックの総エネルギー消費量の比較（ケース 3）

表 7.4.6 大型トラックの総エネルギー消費量の比較（ケース 3）

| | 素材 | 組立 | 走行 | 計 [%] |
|--------|-----|-----|------|-------|
| スチール車 | 1.7 | 0.6 | 97.7 | 100.0 |
| CFRP 車 | 3.1 | 0.3 | 75.8 | 79.3 |

7.4.2.2 中型トラック

スチールトラックの総エネルギー消費量は、1 台あたりのエネルギー消費量に台数（148 万台）をかけたものである。CFRP により軽量化される重量は 1,152kg で、これと同じ重量だけ積載能力が増えるとした。

(1) 軽量化後の積載量が変わらない場合

積載量に変化がないので CFRP 軽量車も 148 万台となった。図 7.4.6 および表 7.4.7 に結果を示す。総エネルギー消費量は 1.2%減少した。

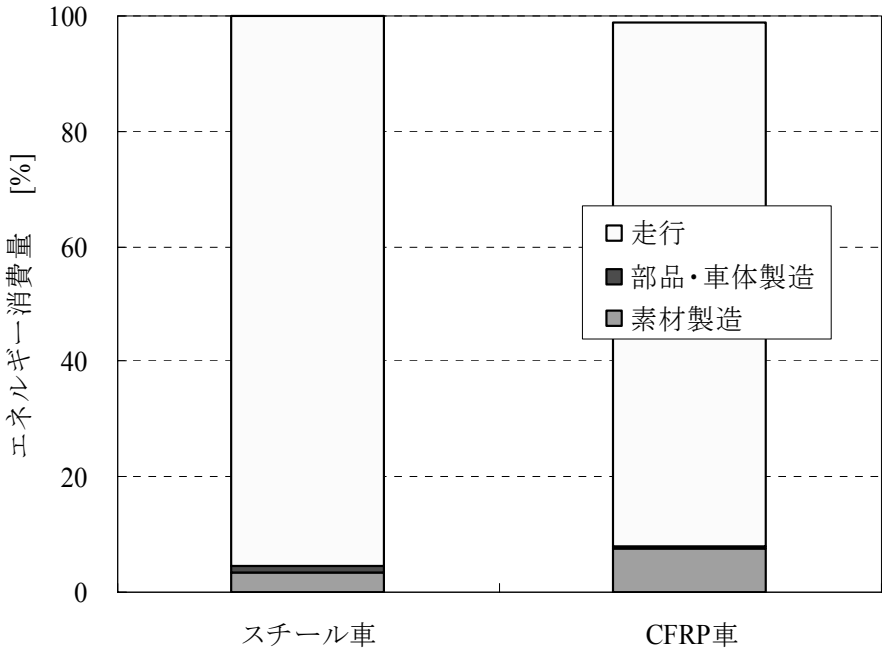


図 7.4.6 中型トラックの総エネルギー消費量の比較（ケース 1）

表 7.4.7 中型トラックの総エネルギー消費量の比較（ケース 1）

| | 素材 | 組立 | 走行 | 計 [%] |
|--------|-----|-----|------|-------|
| スチール車 | 3.3 | 1.1 | 95.6 | 100.0 |
| CFRP 車 | 7.5 | 0.8 | 90.6 | 98.8 |

(2) 軽量化した重量と同じだけ積載量が増える場合

CFRP 車の積載量は 2,000kg から 1,152kg 増えて 3,152kg になった。台数は、148 万台×2,000kg÷3,152kg=94 万台になった。図 7.4.7 および表 7.4.8 に結果を示す。総エネルギー消費量は 34.0%減少した。

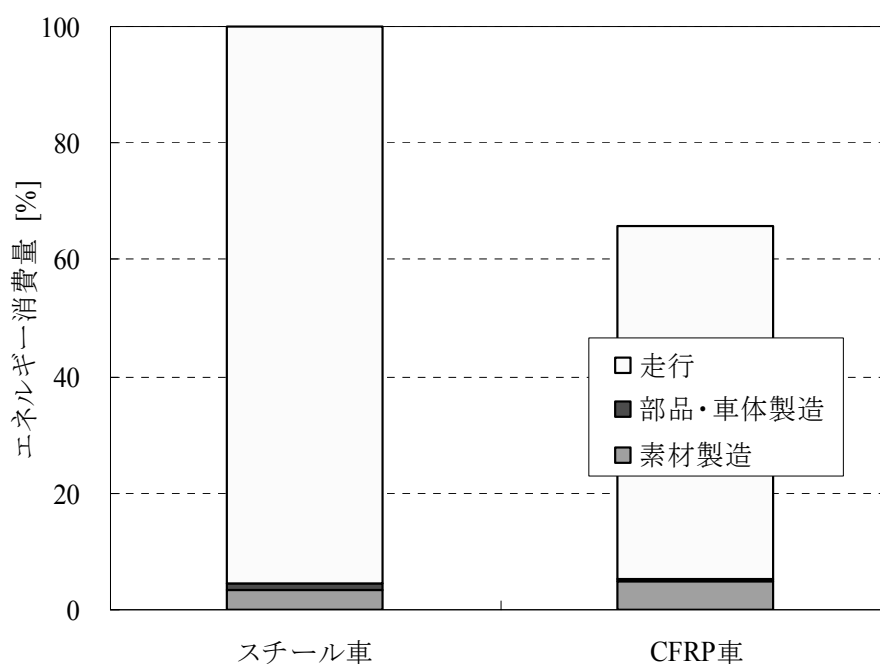


図 7.4.7 中型トラックの総エネルギー消費量の比較 (ケース 2)

表 7.4.8 中型トラックの総エネルギー消費量の比較 (ケース 2)

| | 素材 | 組立 | 走行 | 計 [%] |
|--------|-----|-----|------|-------|
| スチール車 | 3.3 | 1.1 | 95.6 | 100.0 |
| CFRP 車 | 4.8 | 0.5 | 60.7 | 66.0 |

(3) 軽量化した重量に現状の積載率をかけた分だけ積載量が増える場合

CFRP 車の積載量は 2,000kg から 1,152kg の 50%, つまり 576kg 増えて 2,576kg になった。
台数は、 $148 \text{ 万台} \times 2,000\text{kg} \div 2,576\text{kg} = 115 \text{ 万台}$ になった。図 7.4.8 および表 7.4.9 に結果を示す。総エネルギー消費量は 21.2%減少した。

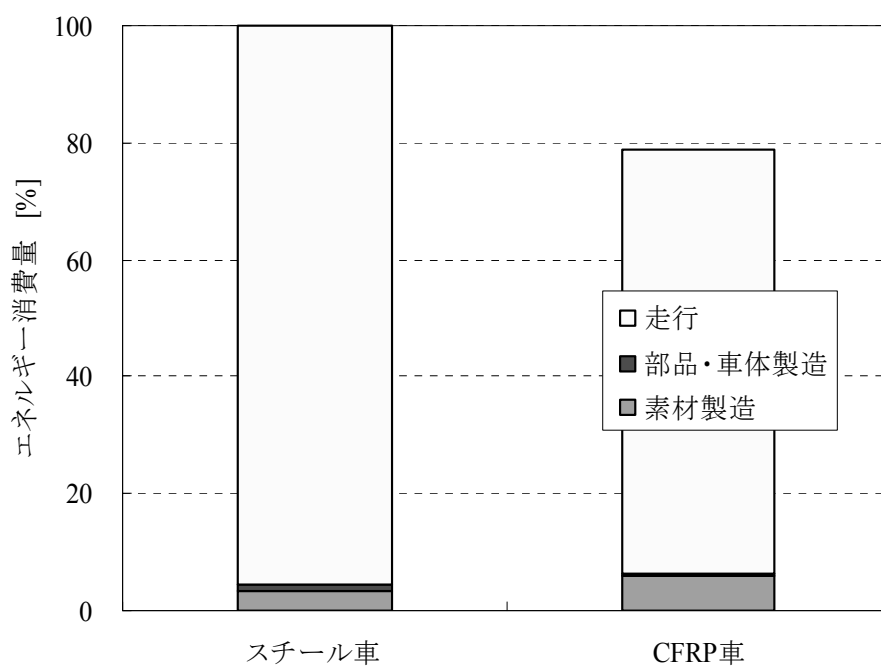


図 7.4.8 中型トラックの総エネルギー消費量の比較 (ケース 3)

表 7.4.9 中型トラックの総エネルギー消費量の比較 (ケース 3)

| | 素材 | 組立 | 走行 | 計 [%] |
|--------|-----|-----|------|-------|
| スチール車 | 3.3 | 1.1 | 95.6 | 100.0 |
| CFRP 車 | 5.8 | 0.6 | 72.3 | 78.8 |

7.4.2.3 小型トラック

スチールトラックの総エネルギー消費量は、1 台あたりのエネルギー消費量に台数（467 万台）をかけたものである。CFRP により軽量化される重量は 691kg で、これと同じ重量だけ積載能力が増えるとした。

(1) 軽量化後の積載量が変化しない場合

積載量に変化がないので CFRP 軽量車も 467 万台となった。図 7.4.9 および表 7.4.10 に結果を示す。総エネルギー消費量は 0.8%増加した。

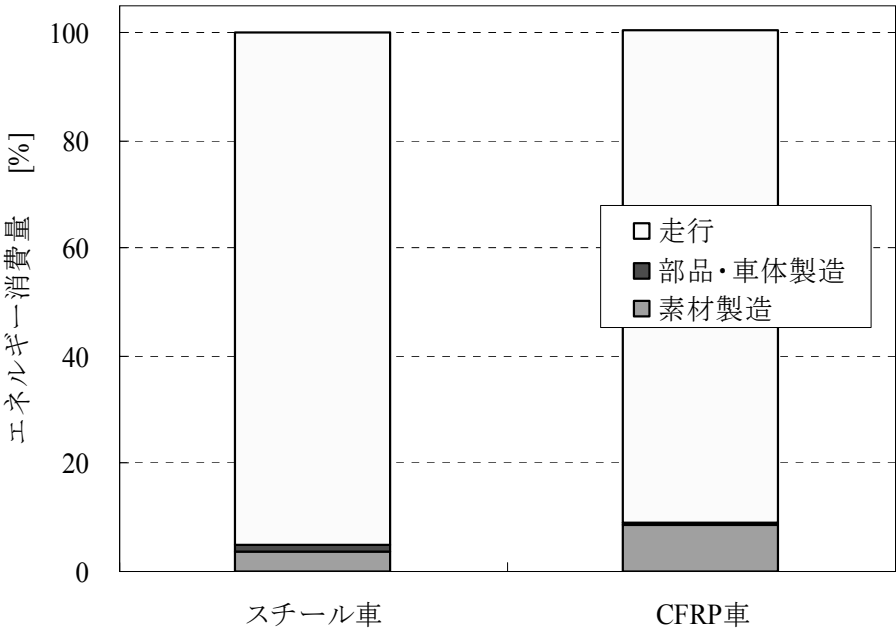


図 7.4.9 小型トラックの総エネルギー消費量の比較（ケース 1）

表 7.4.10 小型トラックの総エネルギー消費量の比較（ケース 1）

| | 素材 | 組立 | 走行 | 計 [%] |
|--------|-----|-----|------|-------|
| スチール車 | 3.8 | 1.2 | 95.0 | 100.0 |
| CFRP 車 | 8.5 | 0.8 | 91.5 | 100.8 |

(2) 軽量化した重量と同じだけ積載量が増える場合

CFRP 車の積載量は 200kg から 691kg 増えて 891kg になった。台数は、 $467 \text{ 万台} \times 200\text{kg} \div 891\text{kg} = 105 \text{ 万台}$ になった。図 7.4.10 および表 7.4.11 に結果を示す。総エネルギー消費量は 76.5%減少した。

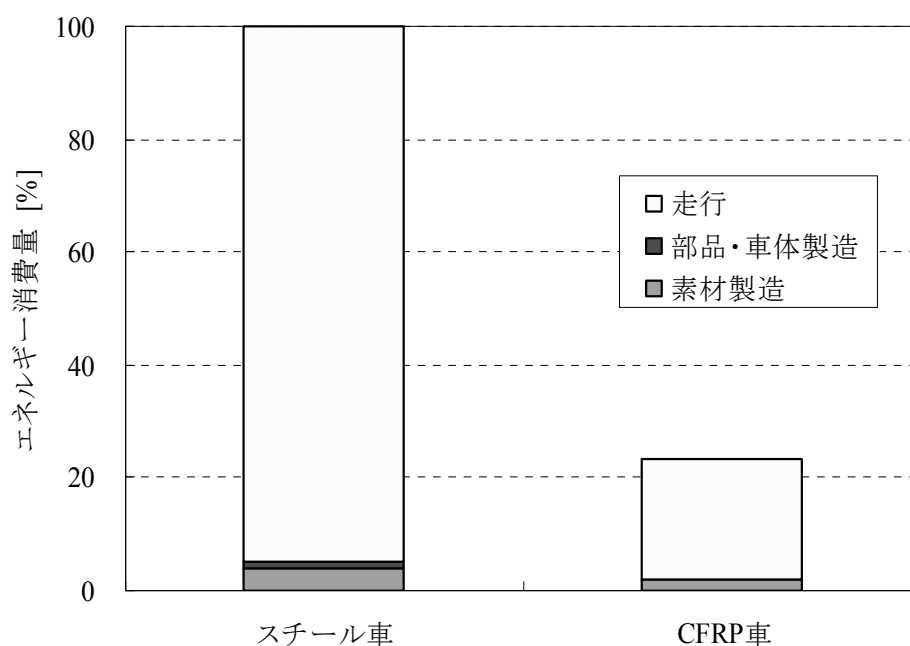


図 7.4.10 小型トラックの総エネルギー消費量の比較（ケース 2）

表 7.4.11 小型トラックの総エネルギー消費量の比較（ケース 2）

| | 素材 | 組立 | 走行 | 計 [%] |
|--------|-----|-----|------|-------|
| スチール車 | 3.8 | 1.2 | 95.0 | 100.0 |
| CFRP 車 | 1.9 | 0.2 | 21.4 | 23.5 |

(3) 軽量化した重量に現状の積載率をかけた分だけ積載量が増える場合

CFRP 車の積載量は 200kg から 691kg の 10%, つまり 69kg 増えて 269kg になった。台数は, $467 \text{ 万台} \times 200\text{kg} \div 269\text{kg} = 347 \text{ 万台}$ になった。図 7.4.11 および表 7.4.12 に結果を示す。総エネルギー消費量は 24.8%減少した。

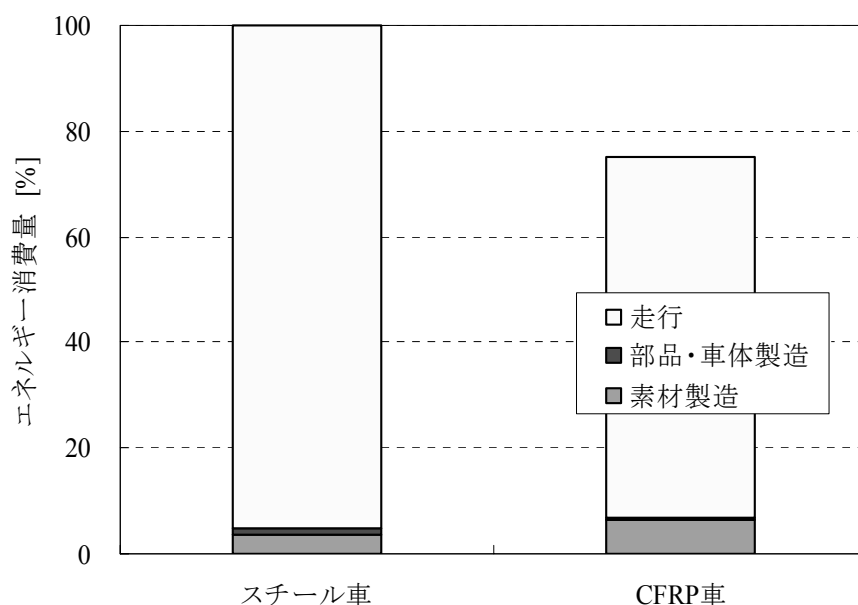


図 7.4.11 小型トラックの総エネルギー消費量の比較 (ケース 3)

表 7.4.12 小型トラックの総エネルギー消費量の比較 (ケース 3)

| | 素材 | 組立 | 走行 | 計 [%] |
|--------|-----|-----|------|-------|
| スチール車 | 3.8 | 1.2 | 95.0 | 100.0 |
| CFRP 車 | 6.3 | 0.6 | 68.2 | 75.2 |

7.5 結言

CFRP を用いたトラック軽量化による省エネルギー効果はほとんどなかった。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である。また、サイズが小さくなるほどライフサイクルに占める走行段階でのエネルギー消費量の割合が減少するので、大きな原単位の 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てしまった。

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全体の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。軽量化した分と同量の積載量が増えるとすると、大型・中型トラックでは約 30%、小型トラックでは約 76%総エネルギー消費量が減った。小型トラックの削減量がかなり大きいのは、もともと積載率が 10%と低いためである。このように軽量化した部分の全てが貨物で置き換えられるというのは現実には考えにくいので、軽量化により積載能力が増えるが積載率は従来のものである場合を想定すると、削減率は 25%から 30%程度となった。

以上をまとめると、トラックの軽量化による省エネルギー効果は、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、特に積載量の増加が大きく寄与することが明らかになった。

第8章 バスの軽量化

8.1 緒言

第2章で述べたように、運輸部門におけるエネルギー消費量の増加は、乗用車の個人利用の増加によるところが大きい。また、都市部では乗用車の集中により渋滞が引き起こされ、都市の機能が低下している。近年は高齢者ドライバーも増加していて、高齢者の運転による事故の増加も社会問題となってきた。

脱乗用車化にはバスが効果的である。大型バスなら乗用車70台分を1台で運べ、車両専有面積も排ガスも大幅に抑えることができる。地域のニーズに合ったコミュニティバスが導入されれば、買い物などのちょっとした用事にわざわざ乗用車を使うこともなくなる。また、特に高齢者の多い地方では、乗用車を使わなくても気軽に移動できる交通体系を作ること、福祉や地域活性化の面でも大いに重要である。これには、道路さえあればフレキシブルに対応できるバスが最適である。

バスはゴーストストップが多く、都市部では低速走行も多い。また、バスのライフサイクルにおけるエネルギー消費量は、図3.2.1のように走行時が全体の97%を占めている。よって、バスのエネルギー消費量を抑えるには燃費の向上が最も効果的である。

そこで本章では、まずバスのサイズを4種類に分け、CFRPによりどれだけ軽量化できるかをFEM（有限要素法）により解析した。そして、その結果を用いてこれまでの乗用車、トラックと同様に軽量車の省エネルギー効果をLCAにより調査した。

最後に、コミュニティバスを導入して乗用車の稼働率を抑えることで、運輸部門のエネルギー消費量の削減効果がどのようになるかを分析した。

8.2 コミュニティバスとは

コミュニティバスとは、既存のバスサービスだけではカバーしきれないニーズに対応するため、市区町村等の自治体が運行する路線バスである。地元のバス会社に実際の運行を委託するなどし、必要に応じ経済的な支援を行うのが一般的である。そのサービス内容は必ずしもこれまでの乗合バスの考え方によらず、利用者の利便性を最大限考慮し、かつ多様化する需要に対応する新たなバスシステムである。同時に、福祉サービス、環境に与える影響の軽減を視野に入れたバスシステムである。

法的にはコミュニティバスに関する明確な定義はないが、国土交通省によれば「中心市街地と周辺住宅地等を小型バス等による循環系統で運行し、運行ダイヤ、運賃、停留所間隔等の設定が主に通勤・通学以外の日中のバス利用の促進を図る内容のバス運行システム[1]」、あるいは「地方自治体がまちづくりなど住民福祉の向上を図るため交通空白地域・不便地域の解消、高齢者等の外出促進、公共施設の利用促進を通じた『まち』の活性化等を

目的として、自らが主体的に運行を確保するバスのこと[2]』とされている。交通ジャーナリストの鈴木文彦氏は、以下のようにコミュニティバスを定義している[3]。

- ・ 市町村が計画し、運行主体となるかあるいは運行支援を行う。
- ・ 需要規模は小さく、既存の交通機関でサービスできなかった領域をカバーする。
- ・ 地域住民の生活に根ざした移動ニーズに対応することを輸送の目的とする。
- ・ ごくローカルな地域性を反映した運行形態やシステムをとる。このため必ずしも既存の路線バスの考え方にはよらずに多様な選択肢をもつ。
- ・ 沿線住民を主体に不特定多数の利用を前提とした乗合輸送を基本とする。
- ・ 採算性は（必要だが）第一義ではなく、なんらかの財政支援または補助を背景とした社会的サービスと位置付ける。

自治体主導の地域バスが一般路線バスと一線を画した形で最初に登場したのは、1980 年の東京都武蔵村山市の市内循環バスであった。同市は鉄道交通が市内にないことから、市民の足を確保すべく市主導のミニバス路線を開設したもので、市が車両を購入して、運行は立川バスに委託した乗合バスであった。その後、利用動向などからルートやダイヤなどを変更したが、現在も継続している。1986 年には東京都日野市が同様の形態で京王電鉄に委託したミニバス路線を開設した。2 本の鉄道が平行して市域を貫通し、間に川をはさむ同市は、市内での移動が非常に不便であったので、それをカバーしようとしたのである。これも団地の造成などでルートが一部変わったが、現在も運行されている。このあたりが現在に続くコミュニティバスの始まりといえる。その後、1990 年代に入って比較的「福祉バス」的要素の強い無料バスが出現するが、一方で路線バスの空白を埋めるという考え方の元に、自治体が路線バス型の輸送をミニバスで行うという形がひとつの流れを作り始めた。

コミュニティバスの一番の目的は市民のニーズにこたえることである。このニーズをしっかりと把握し、満たしていくことを最大の目的とし、誰のため、どんな目的で運行するのかというコンセプトをしっかりと検討し、その上でそれぞれの地域の細かな事情を反映した計画が進められる。

今後日本の高齢化人口はますます増えるので、それに伴い高齢ドライバーによる自動車交通も増加する。そこで今後対策が必要とされる問題として、高齢ドライバーの増加による事故増加や、それまで電車などで通勤をしていた人が、退職後日中に買い物や観光・レジャーなどの私的な目的で乗用車を使用することによるエネルギー消費量の増加などが危惧されている。

図 8.2.2 に旅客部門における輸送機関別のエネルギー原単位を示す[4]。バスは乗用車に比べて、原単位が 4 分の 1 と非常に小さいことから、バス利用の促進は運輸部門の消費エネルギーの効率的な削減につながる。



図 8.2.1. 武蔵野市のコミュニティバス（ムーバス） [5]

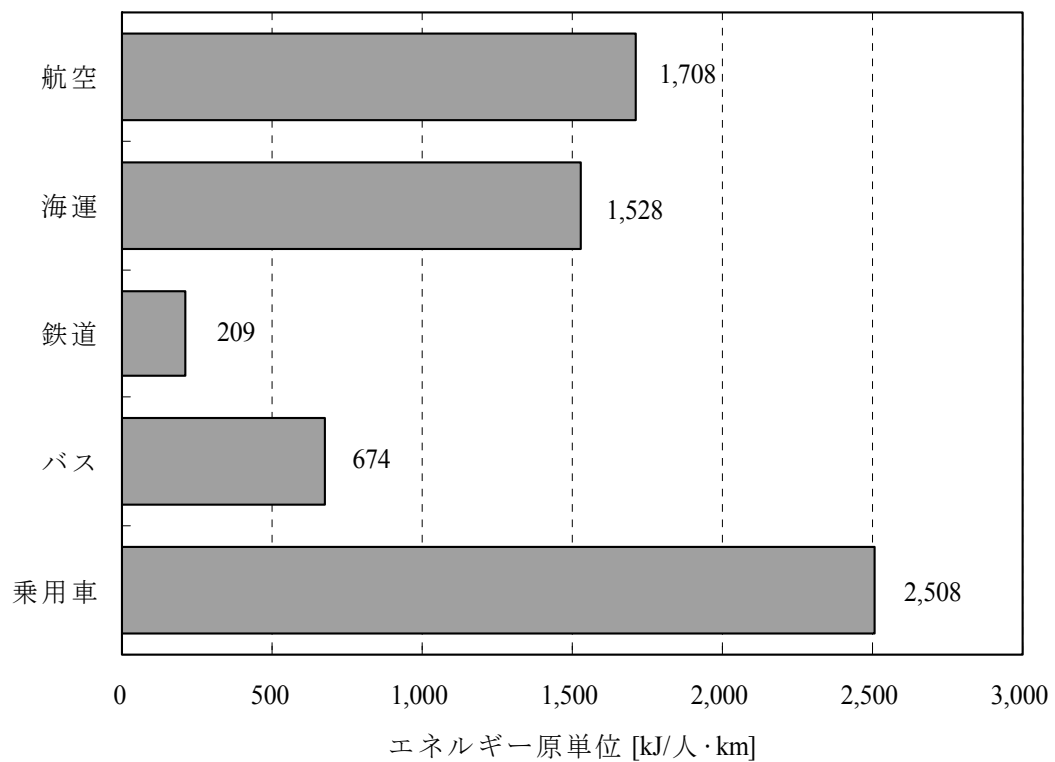


図 8.2.2 旅客部門の輸送機関別エネルギー原単位（2003 年度） [4]

図 8.2.3 は、各年 12 月末における原付以上運転者（第一当事者）の年齢層別交通事故件数の推移である[6].「交通事故」とは、道路交通法第 2 条第 1 項第 1 号に規定する道路における車両等及び列車の交通による人の死傷又は物の損壊のことである.「第一当事者」とは、交通事故に関係した人のうち違反（過失）が最も重い人、違反（過失）が同程度の場合は被害が最も軽い人のことである.交通事故において歩行者が第一当事者になる割合は非常に低い（1%以下）ので、このグラフは第一当事者となる運転者の割合の年齢層別分布と読むことができる.一般には 16～24 歳の若者の速度超過や無謀運転などによる重大事故が多いという認識があるが、近年減少を続けている.逆に 65 歳以上の高齢者の第一当事者割合が大きく増えている.16～24 歳の年齢層で最も多くの割合を占める過失は速度超過であるが、65 歳以上の年齢層では運転操作不適が最も多い過失である.高齢者になると運動能力の低下などによりとっさの判断が出来なくなることがその原因として考えられる.

コミュニティバスの利用により高齢者の自動車交通を吸収することが、これらの問題の対策の一つとなると考えられる.

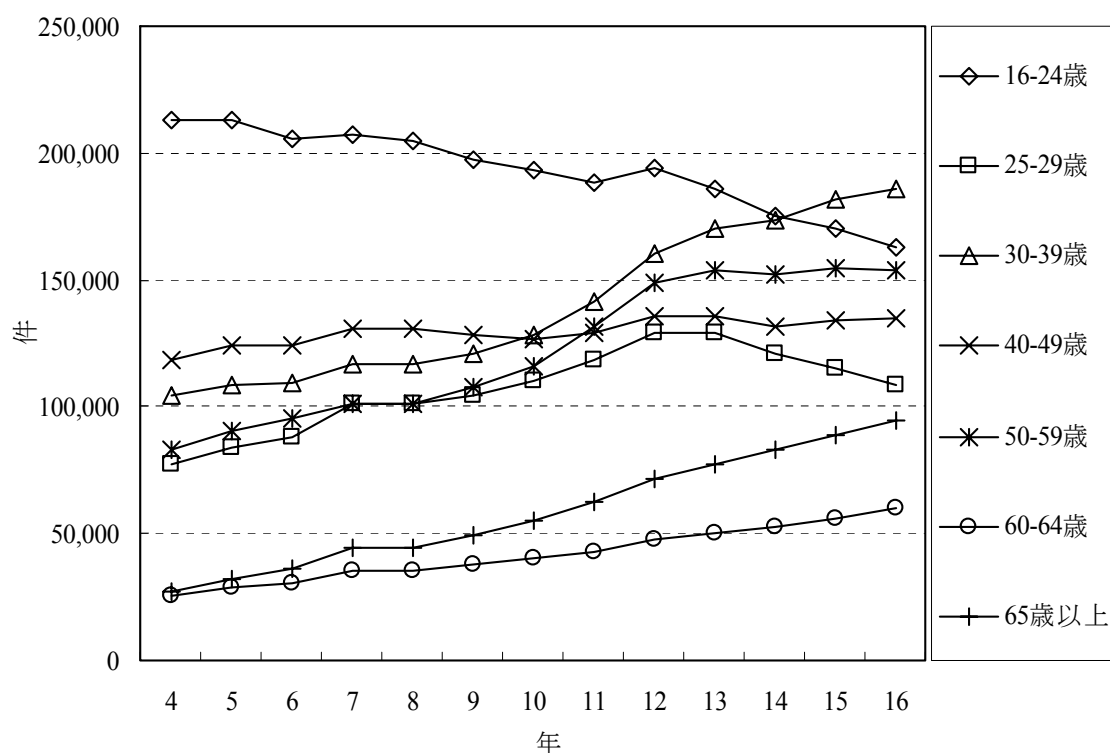


図 8.2.3 原付以上運転者（第一当事者）の年齢層別交通事故件数の推移

8.3 コミュニティバスの普及状況

現在運行しているコミュニティバスの例を表 8.3.1 に示す。これらは一部に過ぎず、すでに多くの地域に普及している。また、2002 年 2 月に「乗合バスの需給調整規制廃止」、いわゆる規制緩和を受けてバス事業への参入・撤退が容易になったことが追い風になり、さらに普及は進んでいる。実際、現在 20 の都道府県においてコミュニティバスへの補助金が設定されている[7]。民間のバス事業者が採算面から参入できないため交通不便地域となっているエリアを行政主導でカバーするという発想からすれば、今後も、交通の利便性の悪い地方都市を中心にコミュニティバスの需要は高まっていくと思われる。

表 8.3.1 コミュニティバスの導入状況

| 名称 | 市町村名 | 運行 開始日 | 線路 長 [km] | 運行 回数 | 運行 時間帯 | バス 停数 | 運賃 [円] | 所要 時間 [分] |
|---------------|------------|-----------|--------------|----------|------------|----------|-------------------|--------------|
| Z バス | 岩手県 水沢市 | | 19.4 | 4 | 7:40-16:30 | 26 | 100-200 (小人半額) | 45 |
| なの花バス | 岩手県 一関市 | | 33.1 | 2.5 | 7:00-18:20 | 43 | 100-970 (小人半額) | 67 |
| さわやか号 | 岩手県 矢巾町 | | 35.2 | 1.5 | 9:00-16:40 | 42 | 200 (小人半額) | 70 |
| i (アイ) バス | 宮城県 岩沼市 | 11.4.1 | 15.8 | 12 | 6:30-19:00 | 30 | 200 (小人半額) | 30-40 |
| 市内循環バス | 新潟県 三条市 | 10.12.1 | 15.9 | 6 | 7:00-18:50 | 45 | 150-180 (小人半額) | 50 |
| るんるんバス | 山形県 酒田市 | 10.10.28 | 19 | 7 | 8:00-18:00 | 44 | 100 | 60 |
| 八幡町福祉 乗合バス | 山形県 八幡市 | 11.7.2 | 18.5 | 4 | 8:00-16:00 | 17 | 200 (小人半額) | 50 |
| 三川町福祉 乗合バス | 山形県 三川町 | 12.3.1 | 45 | 4 | 8:30-16:00 | 35 | 100 | 120 |
| 市民バス | 山形県 東根市 | 11.12.4 | 9.6 | 6 | 6:40-18:26 | 17 | 100 | 16 |
| 高島町内 周遊バス | 山形県 高島町 | 11.7.1 | 22 | 6 | 6:50-18:35 | 19 | 200 | 25 |
| 町内循環バス | 長野県 丸子町 | 12.1.12 | 27.2 | 2 | 8:45-16:40 | 37 | 200 (小人半額) | |

| 名称 | 市町村名 | 運行 開始日 | 線路 長 [km] | 運行 回数 | 運行 時間帯 | バス 停数 | 運賃 [円] | 所要 時間 [分] |
|-----------------|-------------|-----------|--------------|----------|------------|----------|-------------------|--------------|
| あんず号 | 長野県 更埴市 | 11.10.1 | 20.8 | 9 | 7:05-19:15 | 32 | 200 (小人半額) | 60 |
| 塩尻市地域 振興バス | 長野県 塩尻市 | 11.7.12 | 17.1 | 6 | 8:30-18:00 | 29 | 100 | 45 |
| 大町市 コミュニティバス | 長野県 大町市 | 11.12.1 | 21.9 | 4 | 8:30-16:54 | 26 | 200 (小人半額) | 90 |
| かりんちゃん バス | 長野県 諏訪市 | 11.9.1 | 23.1 | 13 | 6:55-20:12 | 43 | 150-200 (小人半額) | 54 |
| イーナちゃん バス | 長野県 伊那市 | 10.4.1 | 8.3 | 21 | 7:50-18:20 | 25 | 150 | 27 |
| みやバス | 栃木県 宇都宮市 | 12.4.1 | 11.8 | 19 | 7:40-19:30 | 35 | 大人 210 | 40 |
| ムーバス | 東京都 武蔵野市 | 7.11.26 | 4.2 | 45 | 8:00-19:00 | 17 | 100 | 25 |
| 東急トランセ | 東京都 渋谷区 | 10.7.28 | 3.4 | 69 | 8:00-20:00 | 14 | 150 (小人半額) | |
| みたか シティバス | 東京都 三鷹市 | 10.11.3 | 7.3 | 10 | 7:30-18:00 | 26 | 210 (小人半額) | 30 |
| タマリバー バス | 東京都 世田谷区 | 10.10.1 | 4.4 | 55 | 6:30-21:30 | 16 | 210 (小人半額) | 21 |
| | 東京都 府中市 | 6.4.4 | 11.2 | 10 | 8:08-17:09 | 33 | 170-380 | 46 |
| | 東京都 多摩市 | 9.11.1 | 13 | 13 | 7:00-19:00 | 38 | 170-350 | 48 |
| | 神奈川県 鎌倉市 | 12.3.16 | 4.7 | 18 | 6:50-21:30 | 14 | 170-230 | 10 |
| ふらっと バス | 石川県 金沢市 | 11.3.28 | 4.6 | 39 | 8:30-18:00 | 17 | 100 | 25 |
| はぎ号 | 福井県 敦賀市 | 10.10.1 | 17.5 | 12 | 7:45-18:45 | 41 | 100 | 45-50 |
| すまいる | 福井県 福井市 | 11.8.1 | 6.5 | 23 | 7:40-19:01 | 22 | 100 | 30 |

| 名称 | 市町村名 | 運行 開始日 | 線路 長 [km] | 運行 回数 | 運行 時間帯 | バス 停数 | 運賃 [円] | 所要 時間 [分] |
|--------------|-------------------|-----------|--------------|----------|----------------------|----------|-------------------------|--------------|
| ほずみバス | 岐阜県 穂積町 | 11.10.1 | 27.3 | 18 | 6:40-18:50 | 40 | 100 | 35 |
| 関市循環 バス | 岐阜県 関市 | 11.5.1 | 34.9 | 12 | 8:00-17:43 | 51 | 200-300 | 35 |
| ブルーハー号 | 岐阜県 瑞浪市 | 11.10.1 | 11 | 3 | 9:55-14:20 | 16 | 100 | 30 |
| N バス | 愛知県 長久手町 | 10.7.1 | 15 | 7 | 7:50-16:54 | 19 | 100 | 35 |
| いきいき号 | 愛知県 高浜市 | 10.4.1 | 20 | 10 | 8:00-17:13 | 20 | 100 | 43 |
| こまき巡回 バス | 愛知県 小牧市 | 10.4.1 | 12.9 | 28 | (月水金日) 9:15-16:24 | 15 | 大人 200 小人 100 | 39 |
| | 愛知県 三好町 | 11.10.1 | 15.2 | 8 | 8:15-16:57 | 31 | 100 | 42 |
| 足助町営バス | 愛知県 足助町 | 11.10.1 | 15.1 | 11 | 7:07-18:53 | 18 | 150-620 | 37 |
| ひまわりバス | 愛知県 豊明市 | 11.11.2 | 11.7 | 25 | 9:15-17:46 | 33 | 100 | 39 |
| 東郷町 巡回バス | 愛知県 東郷町 | 12.4.3 | 14.8 | 24 | 7:45-17:15 | 28 | 100 | 40 |
| 高島町内 循環バス | 滋賀県 高島郡 高島町 | 12.5.1 | 11.2 | 3 | 7:35-16:20 | 32 | 170-400 | 38 |
| | 岡山県 真備町 | 11.11.1 | 25.8 | 8 | 8:20-17:05 | 24 | 100 | 60 |
| | 岡山県 井原市 | 11.1.11 | 5.2 | 10 | 6:55-19:15 | 15 | 100 | 17 |
| シーバス | 岡山県 玉野市 | 11.8.1 | 45.3 | 4 | 8:27-17:49 | 55 | 200 (小人半額) | 112 |
| ごんごバス | 岡山県 津山市 | 11.10.1 | 14.5 | 11 | 8:00-18:44 | 36 | 200(小人半額) 1 日フリー 500 | 44 |
| | 山口県 美祢市 | 11.10.1 | 10.8 | 6 | 8:05-17:40 | 17 | 200 (小人半額) | 20 |

| 名称 | 市町村名 | 運行 開始日 | 線路 長 [km] | 運行 回数 | 運行 時間帯 | バス 停数 | 運賃 [円] | 所要 時間 [分] |
|--------|------------|-----------|--------------|----------|-------------|----------|----------------------|--------------|
| まほろば号 | 福岡県 太宰府 | 10.4.1 | 19 | 12 | 9:21-22:44 | 30 | 180-200 (小人半額) | 66 |
| らんらん | 長崎市 | 12.2.1 | 11.2 | 10.5 | 10:00-20:00 | 21 | 150-170 1 日パス 300 | 33 |
| ひためぐり号 | 大分県 日田市 | 12.3.15 | 10.2 | 17 | 9:00-22:16 | 20 | 140-300 フリーパス 500 | 12-25 |

8.4 CFRP の適用の可能性

前述のように、コミュニティバスは多くの地域に普及しており、今後もさらなる需要が見込まれている。そうなればバスの走行距離は大幅に増大し、今まではそれほど大きくなかったバスのエネルギー消費量も無視できなくなってくる。だからこそ今後新規にコミュニティバスを導入するには、よりエネルギー消費量の小さい効率の良いバスを普及させていくことが必要とされる。

すでに述べたように自動車の省エネルギーには CFRP の適用によって車体の軽量化を図り、燃費を向上させることが有効である。しかしながら、乗用車への適用にはデメリットも大きく、普及が困難なのが現状である。では、バスの場合はどうであろうか。乗用車においてクリアすべき課題は以下の通りであった。

- ・ コストが高い。
- ・ 生産速度が遅い。
- ・ 原単位が大きい。
- ・ リサイクルが困難である。

一方、CFRP を自動車に適用する際の利点として、以下のようなことが考えられる。

- ・ 軽量化ポテンシャルが高い。
- ・ 一体成形による部品点数の削減が可能である。
- ・ 設計の自由度が大きい。
- ・ 腐食に強い。

そして、バスが乗用車とちがって CFRP の適用に有利な要因は以下の通りである。

- ・ 生涯のエネルギー消費量に占める走行段階の割合が大きい（生涯走行距離が長い、ゴーストストップが多く燃費が悪い）。
- ・ 多種類少量生産である。

先に図 3.2.1 に示したように、バスのライフサイクルエネルギー消費量に占める走行段階の割合は、生涯走行距離が長いことから約 97%である。また、ゴーストストップが多く燃費が悪いなどの理由もあり、乗用車よりも燃費向上によるエネルギー消費量の削減効果が大き

いと期待できる。よって、CFRP の原単位の大きさからくる素材製造段階でのエネルギー消費量の増加を十分に上回る可能性が高い。このことは、コストに置き換えれば車両価格と燃料費の関係にもあてはまり、十分にメリットがあると考えられる。

また、バスは大型観光バスから自家用の小型バスにいたるまで大きさ、用途ともに非常に種類が多い。さらにバス会社や路線によって運行の形態がまちまちであり、特に乗降口の数や位置、シートの配置などは各車が長年行ってきた方式を変更することが困難で、1 台から数台ずつの受注生産で生産せざるを得ない。こういったことからバスの価格は非常に高く、逆に価格を抑えるにはデザインや機能が限定されてしまい、満足度の高い車両は得られない。しかしながら、このような生産形態であれば大量生産が必要とされないの、生産速度の遅い CFRP でも十分に対応が可能である。また、CFRP は一体成型による部品点数の削減が可能であることから、必要な型の数なども少なく済む。つまり、デザインの変更に対する設備投資が少ないということであり、発注者の要望に沿った柔軟な設計変更も低コストで実現できるというメリットがある。

設計自由度の高さを活かすことも大きなメリットとなる。前述のように、コミュニティバスは多くの地域に普及しているが、その一方で、乗車率が非常に低く、存続が困難あるいはすでに撤退してしまった地域もある。たとえ採算性を重視しないとはいえ、あまりにも大きな赤字を出すようでは運行の主体である市町村の財政を圧迫することになりかねないからである。また、乗用車の利用を抑制するというメリットを活かすためには、数多くの人に乘ってもらわなければ効果は現れない。そういったことから、コミュニティバスは乗車率が非常に重要となってくる。乗車率を決定付ける要因は様々だが、車両という視点から見ると現行のバスにはまだまだ課題が多い。

乗車率アップのために車両に求められる要件として、鈴木文彦氏はその著書の中で「機能、利便性、乗り心地、きれい、かっこいい、かわいい」などを挙げている[8]。

機能、利便性、乗り心地に関して言えば、近年では低床化、ノンステップ化が重要となっている。そのことは 2000 年 11 月に「高齢者、身体障害者等の公共交通を利用した移動円滑化促進法」（通称「交通バリアフリー法」）が施行されたことからわかる。これまでも大型および中型のノンステップバスの開発は進められているが、タイヤ周りに大きなデッドスペースができてしまうという欠点がある。また、リアのエンジンおよび駆動系の集中しているところでは低床化が不可能であり、ノンステップ化した前半部との間に段差が生じてしまうことから、かえって室内での転倒等の危険が増し、乗り心地が悪いものになっている。また、現在では 1,500 万円から 2,500 万円クラスのバスの場合、500 万円程度の価格の上乗せになってしまうのも問題である。そんな中、クセニッツ社の「CITY」（図 8.4.1）、オムニノーバ社の「マルチライダー」の 2 台が開発された（オムニノーバ社はすでに倒産）。この 2 台は小型バスをボンネット型にして、駆動方式を FF（フロントエンジン、フロントアクスル）にすることでエンジンと駆動系を前のボンネット内に納めてしまい、客室の完全ノンステップ・フルフラットを実現した車両であることから大きな注目を

集めた。ただし、海外の車両は価格が高い、メンテナンスやサービスが悪いなどの問題から国内ではそれほど普及はしなかった。これを追うようにして日野自動車でも国内初の完全ノンステップ・フルフラットのバスである「ポンチョ」(図 8.4.2)を発売したが、依然としてシャーシはブジョー製で、輸入に頼っている。価格は約 1,600 万円で、現在コミュニティバスの車両として最も人気を集めている日野自動車の「リエッセ」(図 8.4.3)の約 800 万円に比べると 2 倍となっており、依然として高価である。

外観も非常に重要な要因である。レトロな雰囲気を持つバス(図 8.4.4)や、ボンネットバスはそのデザイン性から人気が高い。また、特徴的なデザインを持ったオリジナルバス(図 8.4.5, 図 8.4.6)も人気がある。しかしながらここでもやはり価格がネックとなっている。

以上のように、現行のバスでは車両に対する要求を十分に満足していることは言いがたい。だからこそ、CFRP の設計自由度の高さを最大限に生かすことで、こういった要件もクリアできる可能性がある。



図 8.4.1 CITY (Kutsenits 社) [9]



図 8.4.2 ポンチョ (日野自動車) [10]



図 8.4.3 リエッセ（日野自動車）[11]



図 8.4.4 レトロバスの例[12]

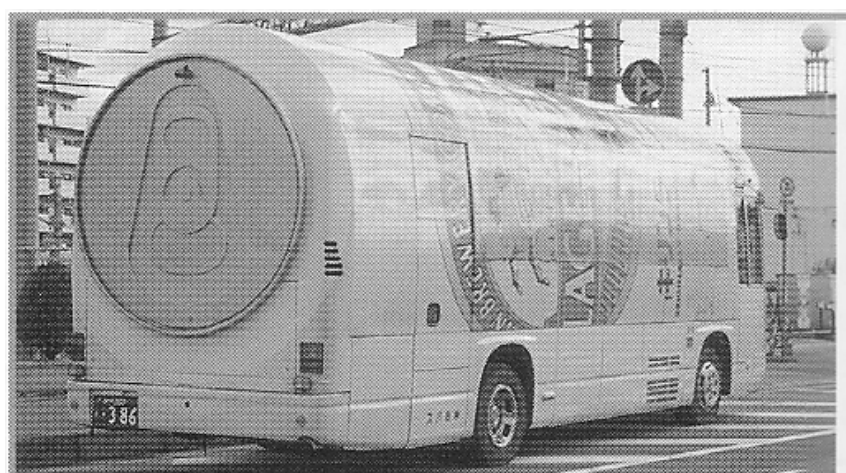


図 8.4.5 個性的なデザインのバスの例（1）[12]



図 8.4.6 個性的なデザインのバスの例 (2) [12]

表 8.4.1 GFRP のバスへの適用

| メーカー | 適用箇所 |
|---------------------|---------------------------|
| UK | パネル (ステンレスのフレーム) |
| Gillig | ルーフ, ボディパネル, ドア (アルミフレーム) |
| MCI | ボディパネル (アルミフレーム) |
| Winnebago | ブラケット (アルミフレーム) |
| Matilda Motor Homes | ボディパネル (アルミフレーム) |

以上のようにバスへの CFRP の適用可能性を検討してきた。そこで、現在の普及状況を調べた。その結果を表 8.4.1 示す。国内でバスに CFRP を導入しているところは見当たらない。また、海外で海外でもそのほとんどは GFRP であり、構造部材であるフレームは従来どおり金属で構成し、化粧板の代わりに使用している程度である。このように、CFRP のバスへの適用はその可能性にも関わらずほとんど進んでいないのが現状である。

8.5 車体サイズの検討[13]

バスには様々なサイズがある。「道路運送車両法」では、乗車定員 11 名以上の自動車をバスと定義している。つまり乗車定員 11 名のバスが最小ということになる。実際は、乗車定員 15 名のバンタイプの車両が一般的に普及しているバスの中では最小である。また、「道路交通法」では、特別な許可なしに一般道路を走行できる車両は長さ 12m、幅 2.5m、高さ 3.8m、車両総重量 25t 以下と定められている。よって、これが最大のバスということになる。その範囲における車両の分類については特に法規で決まっているわけではないが、以下のように分類するのが一般的とされている[12]

- ・ 大型バス：車両長さが 9m 以上または乗車定員 50 名以上
- ・ 中型バス：車両長さが 7m～9m または乗車定員 30～49 名
- ・ 小型バス：車両長さが 7m 以下または乗車定員 29 名以下
- ・ マイクロバス：乗車定員 15 名程度

本節では、各サイズのバスを CFRP で軽量化したときの省エネルギー効果を求め、その効果が大きく現れるサイズを検討する。

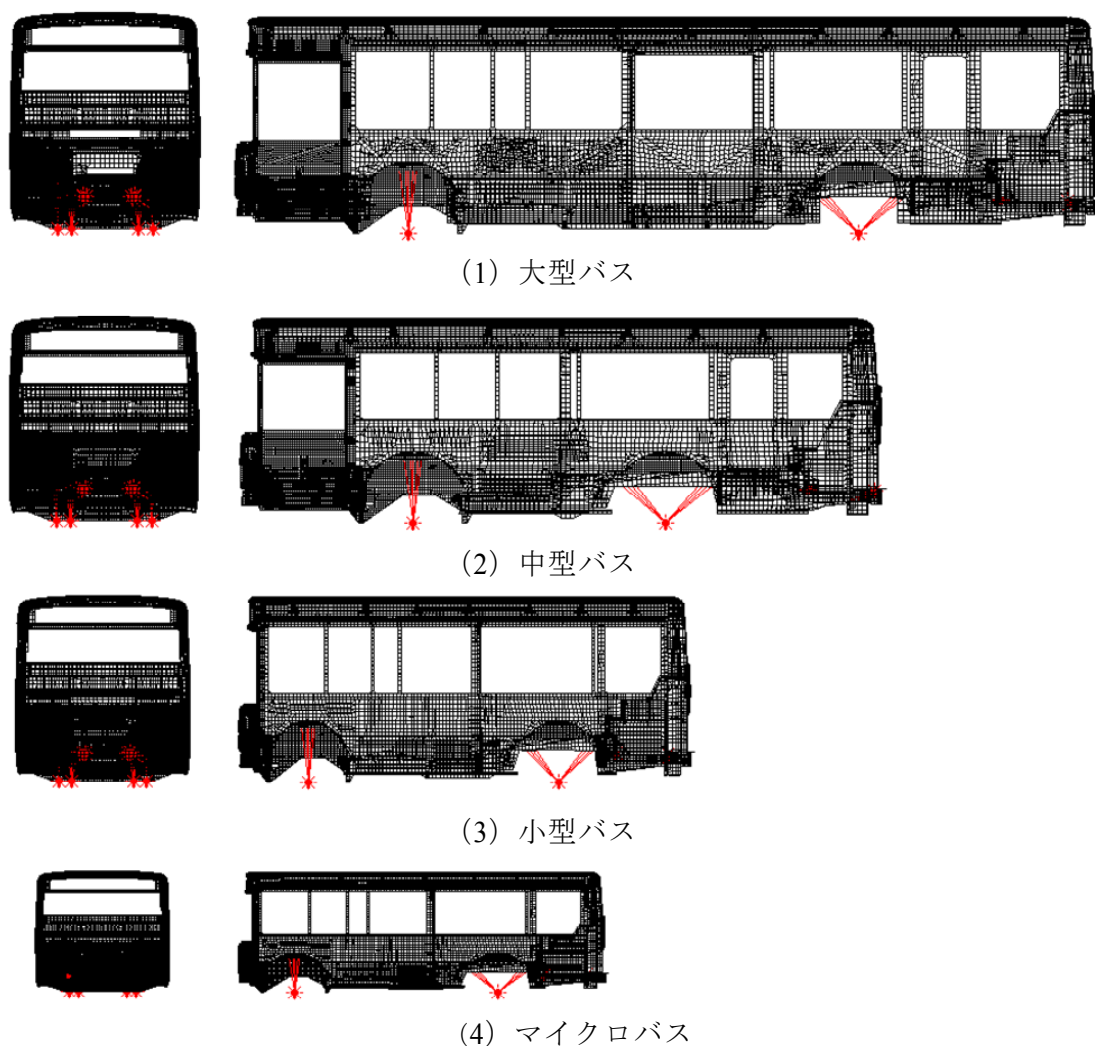
8.5.1 評価方法

従来のバスの車体は主にスチールでできており、これを CFRP で代替して軽量化することを考えた。バスを設計する際に重視されているのは、走行安定性、乗り心地、耐久性であり、その評価指標として一般に車体の曲げ剛性、ねじり剛性、強度が用いられている。そこで、本研究では FEM 解析によってこれらの 3 項目を評価した。そして、その結果から CFRP 製バスが基準値をクリアするのに必要な車体重量を算出し軽量化効果を求めた。

本研究では、表 8.5.1 のようにサイズを分類した。大型バスの FEM 解析モデルはバスメーカーから提供されたもので（図 8.5.1）、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（図 8.5.1）。モデルは構造部材であるボディおよびシャーシのみからなり、それを構成するフレーム部材とパネル部材がモデリングされている。

表 8.5.1 検討対象としたバスのサイズ

| | 大型 | 中型 | 小型 | マイクロ |
|--------------|--------|-------|-------|-------|
| 全長 [mm] | 11,186 | 8,336 | 5,872 | 4,774 |
| 全幅 [mm] | 2,445 | 2,441 | 2,250 | 1,730 |
| 全高 [mm] | 2,780 | 2,630 | 2,398 | 1,557 |
| ホイールベース [mm] | 5,800 | 3,250 | 3,217 | 2,615 |
| 乗車定員 [人] | 88 | 55 | 20 | 15 |



(注) 各バスの縮尺は一定である。

図 8.5.1 各バスの FEM モデル

以下の条件のもとで解析を行った。本研究では車体サイズの違いによる傾向を調べることが目的であるため、比較的簡単に解析できるように条件を設定した。

- ・ モデリングされている部材すべてをスチールから CFRP に代替する。
- ・ 形状の変更をしない。
- ・ 板厚の変更によって剛性、強度を調整する。ただし倍率のみを調整し、部材間の板厚比は初期設定値から変更しない。
- ・ 曲げ剛性、ねじり剛性、強度のすべてが基準値を満たすための最小板厚を求め、その時の重量から軽量化効果を試算する。

大型バスのモデルはバスメーカーから提供されており、実際に運行しているバスのデータである。中型バス、小型バス、マイクロバスに関しては、現在市販されているバスの諸

元表を参考に、大型バスのモデルをまねて独自に作成したものである。よって、スチール製大型バスのモデルの信頼性がいちばん高いので、その結果を基準値として各バスの軽量化を分析した。なお、本研究において静的な解析についてはソルバに MARC、プリポストに MENTAT を用いた。解析において、スチールと CFRP の材料特性を表 8.5.2 のようにした。

CFRP は繊維体積含有率 (Vf) を 60%、マトリックス樹脂をエポキシとした。解析では等方性材料として扱うため、CFRP は擬似等方積層材としての特性を以下のような考え方で求めた[14]。積層板全体としてのヤング率 E 、ポアソン比 γ は式 (8.1) の擬似等方の式より求めることができる。

$$E = \frac{E_L + E_T - 2E_L\gamma_{LT} + 4G_{LT}(1 - \gamma_{LT}\gamma_{TL})}{3(E_L + E_T) + 2E_L\gamma_{LT} + 4G_{LT}(1 - \gamma_{LT}\gamma_{TL})} \times \frac{E_L + E_T + 2E_L\gamma_{LT}}{1 - \gamma_{LT}\gamma_{TL}} \quad (8.1)$$

ここで、 E_L ：繊維軸方向のヤング率、 E_T ：横方向のヤング率、 G_{LT} ：剪断弾性率、 γ_{LT} ：繊維軸方向に引っ張ったときの横方向の縮みの割合を表すポアソン比、である。

炭素繊維/エポキシの一方向材 (Vf=60%) の物性値は、次のようになる。

$$E_L = 140\text{GPa}, E_T = 10\text{GPa}, G_L = 5\text{GPa}, \gamma_{LT} = 0.32$$

これらの値を式 (8.1) に代入して以下の値を得た。

$$E = 54\text{GPa}, \gamma = 0.31$$

よって、擬似等方性の CFRP のヤング率は 54GPa、ポアソン比は 0.31 となった。また、密度に関してはエポキシが 1.25 g/cm^3 、PAN 系炭素繊維 1.8 g/cm^3 なので[15]、Vf=60%より CFRP の密度は 1.58 g/cm^3 となる。

強度に関しては次のような考えから求められる。PAN 系炭素繊維の破断ひずみが 1.1%、エポキシの破断ひずみが 2.0%であることより、PAN 系炭素繊維が先に破断すると考えられる。よって、PAN 系炭素繊維の破断ひずみの 1.1%が複合材料の破断ひずみと考え、複合材料のヤング率 54GPa に PAN 系炭素繊維の破断ひずみ 1.1%を乗じることで強度を計算した。つまり 595MPa となった。

表 8.5.2 スチールと CFRP の材料特性

| | 強度 [MPa] | 弾性率 [GPa] | ポアソン比 | 密度 [g/cc] |
|------|-------------|--------------|-------|--------------|
| スチール | 250 | 206 | 0.3 | 7.8 |
| CFRP | 595 | 54 | 0.31 | 1.58 |

8.5.1.1 曲げ剛性評価

実際の曲げ試験に対応するように，FEM 解析を行った．具体的には図 8.5.2 に示すような方法で車体の曲げ剛性を評価した．後輪のタイヤ中心部の変位を完全固定し，また，前輪のタイヤ中心部の車幅方向および高さ方向の変位を固定した．荷重はホイールベースの中間付近に分布させて負荷した．用いたパラメーターは次のとおりである（図 8.5.3）． δ ：最大たわみ（mm）， W ：荷重（N）， x ：たわみが最大となる位置（mm）， y ：たわみ（mm）， a ：前の拘束点から荷重点までの距離（mm）， b ：後ろの拘束点から荷重点までの距離（mm）， L ：ホイールベース（mm）， C ：積分定数， EI ：曲げ剛性（N・mm²）．

このような条件で負荷した際の車体の曲げ剛性は以下のようにして求められる[16]．
曲げモーメントの式は

$$\begin{cases} 0 \leq x \leq a : EI \frac{d^2 y}{dx^2} = -\frac{Wba}{L} \\ a \leq x \leq L : EI \frac{d^2 y}{dx^2} = -\frac{Wa(L-x)}{L} = -\frac{Wba}{L} + W(x-a) \end{cases} \quad (8.2)$$

となり，これを積分すると

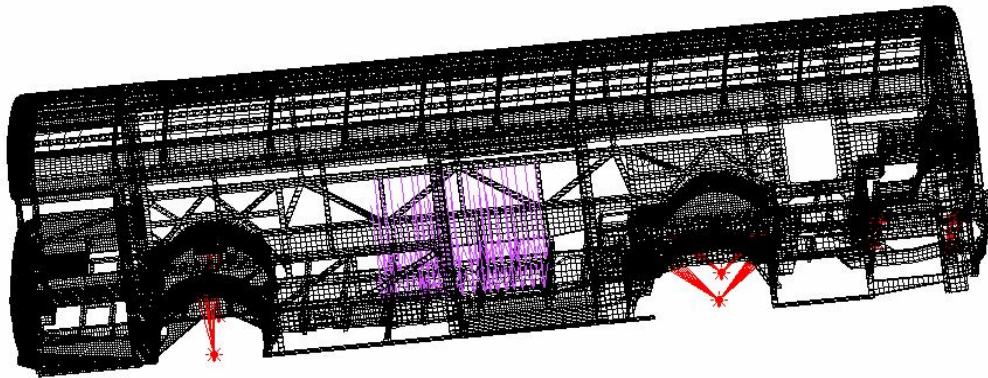


図 8.5.2 曲げ剛性の解析

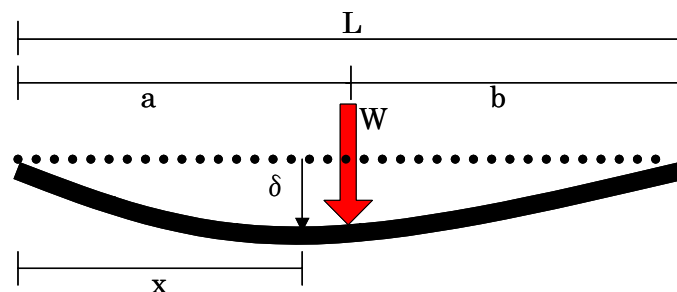


図 8.5.3 曲げ剛性の分析におけるパラメーター

$$\begin{cases} 0 \leq x \leq a : EI \frac{dy}{dx} = -\frac{Wbx^2}{2L} + C_1 \\ a \leq x \leq L : EI \frac{dy}{dx} = -\frac{Wbx^2}{2L} + \frac{W(x-a)^2}{2} + C_2 \end{cases} \quad (8.3)$$

$x = a$ において、滑らかに連続していないといけないので、

$$-\frac{Wba^2}{2L} + C_1 = -\frac{Wba^2}{2L} + C_2 \quad (8.4)$$

$C_1 = C_2$ となる．以降、 $C_1 = C_2 = C$ とする．さらに積分すると

$$\begin{cases} 0 \leq x \leq a : EIy = -\frac{Wbx^3}{6L} + Cx + C_3 \\ a \leq x \leq L : EIy = -\frac{Wbx^3}{6L} + \frac{W(x-a)^3}{6} + Cx + C_4 \end{cases} \quad (8.5)$$

$x = a$ において、同様に滑らかに連続していないといけないので、

$$-\frac{Wba^3}{6L} + Ca + C_3 = -\frac{Wba^3}{6L} + Ca + C_4 \quad (8.6)$$

$C_3 = C_4$ となる．また、 $x = 0$ のときに $y = 0$ でなければならないので、 $C_3 = C_4 = 0$ となる． $x = L$ のときも $y = 0$ であるから

$$0 = -\frac{WbL^2}{6} + \frac{W(L-a)^3}{6} + CL \quad (8.7)$$

$L - a = b$ を代入して整理すると

$$C = \frac{W\{bL^2 - (L-a)^3\}}{6L} = \frac{Wb(L^2 - b^2)}{6L} \quad (8.8)$$

よってたわみは

$$\begin{cases} 0 \leq x \leq a : \delta = y = \frac{1}{EI} \left\{ -\frac{Wbx^3}{6L} + \frac{Wb(L^2 - b^2)x}{6L} \right\} = \frac{Wbx}{6EIL} (L^2 - b^2 - x^2) \\ a \leq x \leq L : \delta = y = \frac{1}{EI} \left\{ -\frac{Wbx^3}{6L} + \frac{W(x-a)^3}{6} + \frac{Wb(L^2 - b^2)x}{6L} \right\} \\ = \frac{Wbx}{6EIL} (L^2 - b^2 - x^2) + \frac{W(x-a)^3}{6EI} \end{cases} \quad (8.9)$$

FEM 解析を $0 \leq x \leq a$ の範囲で行うとすると、曲げ剛性は

$$EI = \frac{Wbx}{6L\delta} (L^2 - b^2 - x^2) \quad (8.10)$$

となる．

ただし、必要とされる曲げ剛性は車体サイズによって異なり、単純に曲げ剛性で比較することはできない．そこで、車体サイズに依存しない曲げ剛性の評価基準として、 EI を L^3 で

除した値を用いた[17].

$$\frac{EI}{L^3} = \frac{Wbx}{6L^4\delta}(L^2 - b^2 - x^2) \quad (8.11)$$

8.5.1.2 ねじり剛性評価

ねじり剛性の評価は次のように行った．図 8.5.4 のように，後輪の車輪中央の変位を完全拘束し，左前輪の車輪中央部の幅方向および高さ方向の変位を拘束，右前輪の車輪中央部に荷重を作用させた．このような条件で，解析をした場合のねじり剛性の定義は以下の式で表される．用いたパラメーターは次のとおりである（図 8.5.5）． M ：ねじりモーメント（N・mm）， θ ：ねじり角（rad）， Φ ：ねじり率， W ：荷重（N）， R ：前輪の荷重点と支持点間の距離（mm）， L ：ホイールベース（mm）， σ ：たわみ（mm）， GJ ：ねじり剛性（N・mm²）．

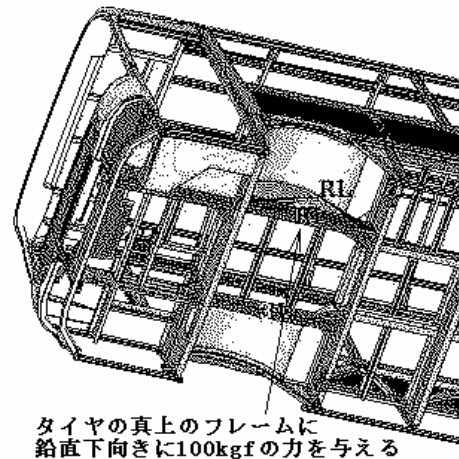


図 8.5.4 ねじり剛性の解析

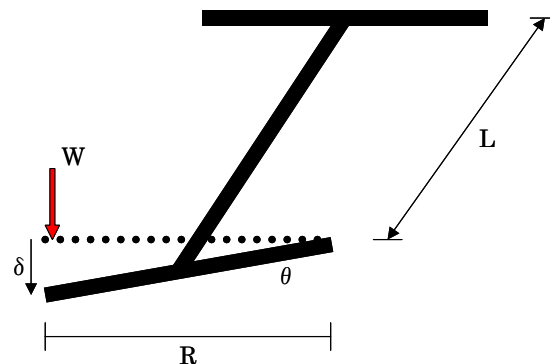


図 8.5.5 ねじり剛性分析に用いるパラメーター

$$GJ = \frac{M}{\Phi} \quad (8.12)$$

この式に

$$\begin{cases} M = WR \\ \Phi = \frac{\theta}{L} = \frac{\sin \theta}{L} = \frac{\delta}{LR} \end{cases} \quad (8.13)$$

を代入すると

$$GJ = WR \frac{LR}{\delta} = \frac{WR^2 L}{\delta} \quad (8.14)$$

曲げ剛性と同様に、車体サイズに依存しない評価のために以下のような指標とした。

$$\frac{GJ}{L^3} = \frac{WR^2}{\delta L^2} \quad (8.15)$$

8.5.1.3 強度評価

強度評価は、バスの車両総重量（平均体重 55kg として乗車定員分の人数が乗車した場合の重量）をバスの床面に分布荷重として負荷して、その際に生じる相当応力の分布によって評価した（図 8.5.6）。設計基準としては 2.5G 状態（走行時に車両総重量の 2.5 倍の負荷が発生することを想定）において、材料の許容応力に対しての安全率が 1.8 を確保する必要がある。

スチールは、ほとんどの部材の降伏応力が 225MPa であるので、スチール製バスの相当応力が $\frac{225}{2.5 \times 1.8} = 50.1\text{MPa}$ を下回るように設計しなければならない。CFRP については、

595MPa の強度を想定しているので、CFRP 製バスの相当応力が $\frac{595}{2.5 \times 1.8} = 132\text{MPa}$ を下回る

ように設計する必要がある。

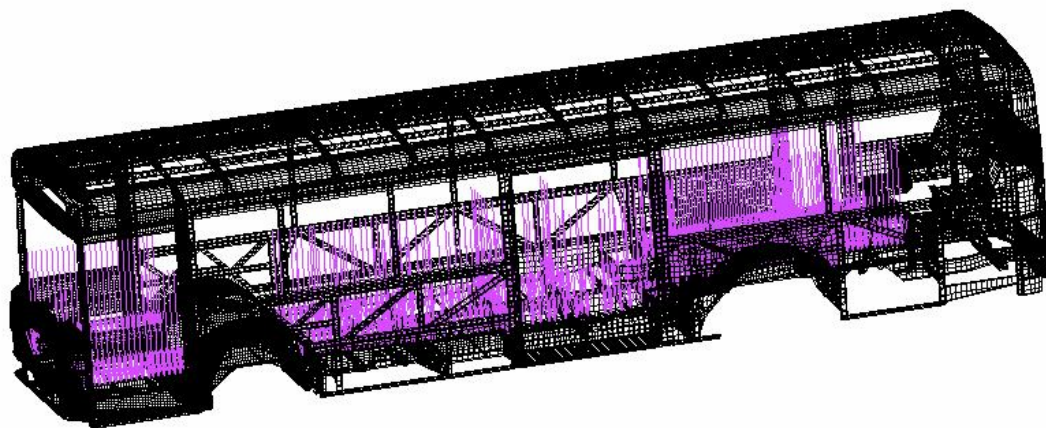


図 8.5.6 強度の解析

8.5.2 FEM 解析結果

まず基準となるスチール製大型バスの解析結果を示す．曲げ剛性とねじり剛性の解析に用いたパラメーターおよび結果は表 8.5.3 のようになった．この結果より，他のバスの曲げ剛性値とねじり剛性値は，基準値である曲げ剛性値 233.2，ねじり剛性値 115.3 を下回らないようにする．

次に，強度解析の結果を図 8.5.7 に示す．図 8.5.7 は，車両総重量分の荷重を負荷させた際に発生する相当応力の値を示しており，単位は MPa である．ホイールベース中間付近やエンジン周りなどの要素のつなぎ目などで異常に高い値が発生しているところもあったが，それ以外の部分についてはすべて基準値である 50.1MPa の範囲内であった．

表 8.5.3 スチール製大型バスの剛性解析結果

| | 曲げ剛性解析 | | ねじり剛性解析 | |
|----|---------------------------|----------|---------------------------|----------|
| 条件 | L [mm] | 5,800 | R [mm] | 1,229 |
| | a [mm] | 2,900 | L [mm] | 5,800 |
| | b [mm] | 2,900 | W [N] | 980 |
| | W [N] | 58,800 | - | - |
| 結果 | x [mm] | 2,367 | δ [mm] | 0.382 |
| | δ [mm] | 5 | GJ [N・mm ²] | 2.25E+13 |
| | EI [N・mm ²] | 4.55E+13 | GJ/L^3 [N/mm] | 115.3 |
| | EI/L^3 [N/mm] | 233.2 | - | - |

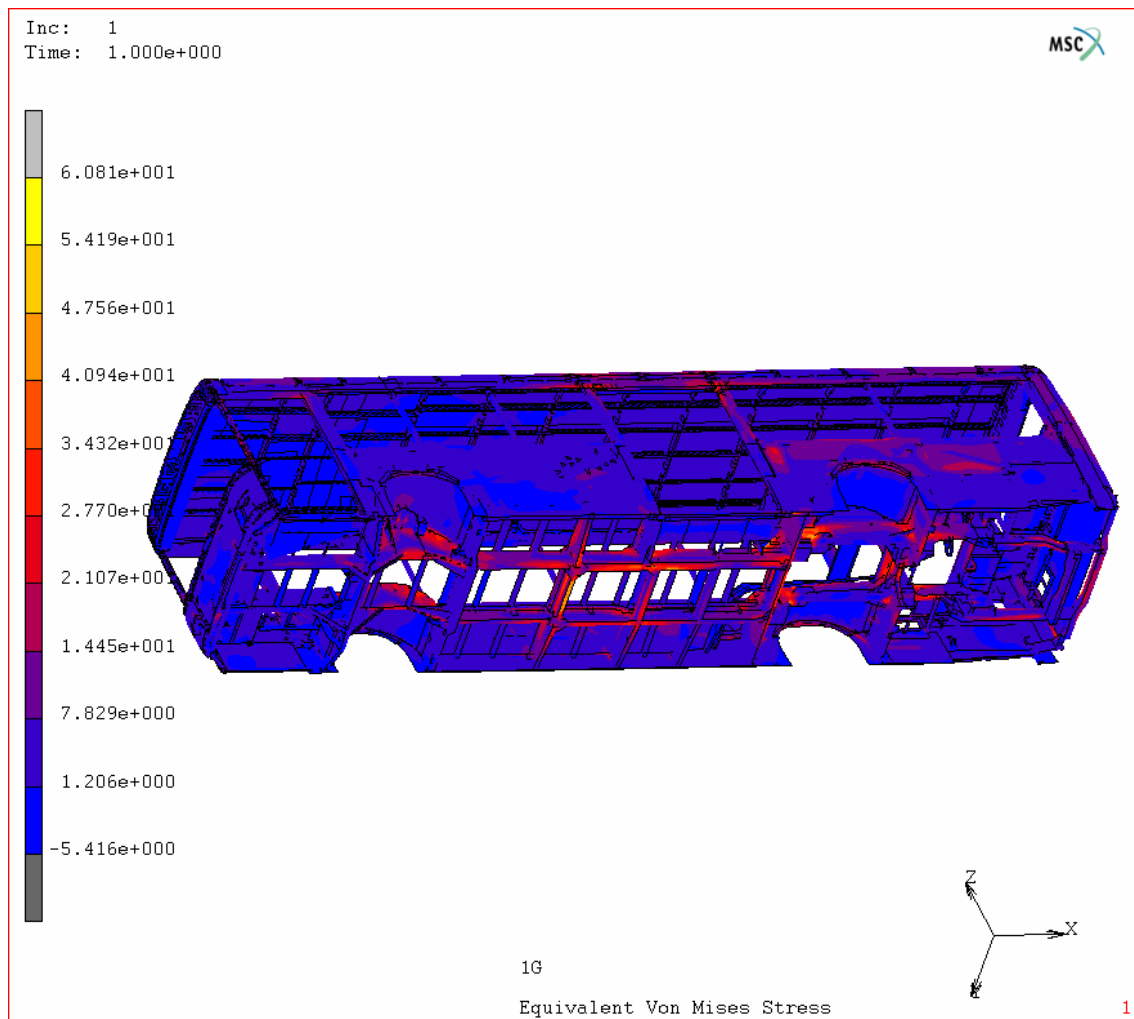


図 8.5.7 強度解析における相当応力分布図

以上のような解析を CFRP 製バスおよびその他のサイズのバスについて行った。CFRP 製バスについては、板厚の倍率と剛性の関係を近似的に求めるために 1, 2, 3, 3.5 倍の 4 種類を解析した。この近似曲線をもとに、基準値を満たすのに必要な板厚が求まる。強度解析については、CFRP は許容応力が高いうえに必要な板厚はスチールよりも大きいので、全てのサイズのバスにおいて基準値をはるかにクリアしていた。これらの 3 つの基準すべてを満たすような最小の板厚を求め、それを最適重量とした。

スチール製のバスについては、まずは大型と同じ板厚で解析した。ただし、バスは小さくなるにつれて車両総重量が小さくなるため、強度に余裕ができる。また、剛性についても基準よりも高い値が出ているため、板厚を 0.8 倍にした場合を解析した。ただし、厚みが 0.8mm 以下のスチール部材は製造上不可能なので、0.8mm の厚みの部材については 0.8mm をそのまま用いた。これらの結果から、スチール製バスについても最適な重量を求めた。

すべての解析結果をまとめたものを表 8.5.4 に示す。軽量化効果に関しては小型バスが最も高く、マイクロバスも次いで高い結果となった。このような結果となったのは、次のようなことが考えられる。スチール製バスにおいて、構造部材が車両全体に占める割合は大型が 27%、中型が 23%、小型が 40%、マイクロバスが 37%となっている。軽量化の対象となった構造部材だけの軽量化率で見ると、中型バス、小型バス、マイクロバスではそれほど差がないことから、この割合がそのまま全体の軽量化効果に現れたと考えられる。このように、小さいバスの方が構造部材の占める割合が大きくなるのは、FEM 解析における最小板厚の判定基準からも読み取れる。スチール製大型バスおよびスチール製中型バスは強度が基準となって設計されているが、スチール製小型バスとスチール製マイクロバスは曲げ剛性が基準となっている。つまり、車両総重量によって設定されている強度基準において、大型と中型は強度の限界まで板厚を薄くできている。しかし、小型とマイクロバスは曲げ剛性が不足するために車両総重量に対して板厚に無駄が出ていることになる。一方で CFRP はすべての条件において剛性で板厚が判定されているため、形状による差はない。よって、スチール製小型バスとスチール製マイクロバスで生じる無駄を CFRP が抑えたことによって大きな軽量化効果を得られたと考えられる。

表 8.5.4 各 CFRP バスの軽量化率

| | | 構造部材 重量 [kg] | 車両 重量 [kg] | 軽量化 率 [%] | 必要 板厚 比 | 曲げ 剛性 | ねじり 剛性 | 強度 | 判定基準 |
|------|------|--------------------|------------------|-----------------|---------------|----------|-----------|----|-------|
| 大型 | スチール | 2,719 | 9,980 | - | 1 | 233.2 | 115.3 | 最大 | (全て) |
| | CFRP | 1,760 | 9,021 | 9.6 | 3.2 | 264.2 | 115.3 | 余裕 | ねじり剛性 |
| 中型 | スチール | 1,459 | 6,371 | - | 0.87 | 357.1 | 419.9 | 最大 | 強度 |
| | CFRP | 599 | 5,511 | 13.5 | 1.76 | 233.2 | 242.4 | 余裕 | 曲げ剛性 |
| 小型 | スチール | 1,072 | 2,700 | - | 0.76 | 233.2 | 365.9 | 余裕 | 曲げ剛性 |
| | CFRP | 493 | 2,121 | 21.4 | 1.82 | 233.2 | 260.3 | 余裕 | 曲げ剛性 |
| マイクロ | スチール | 609 | 1,630 | - | 0.8 | 233.2 | 356.9 | 余裕 | 曲げ剛性 |
| | CFRP | 306 | 1,327 | 18.6 | 2.03 | 233.2 | 324.2 | 余裕 | 曲げ剛性 |

8.6 LCA の実施

8.6.1 目的及び調査範囲の設定

(1) 実施目的

大型・中型・小型・マイクロバスそれぞれにおいて、従来のスチールバスと CFRP 軽量バスのライフサイクルを通した環境負荷を定量的に評価することで、CFRP による車体の軽量化について環境面における優位性の検討を目的とする。また、サイズによる軽量化率の変化の検討も目的とする。

(2) 評価対象製品

評価対象製品は、表 8.5.1 に示すような大型・中型・小型・マイクロバスを CFRP で軽量化したバスで、比較対象製品は従来のスチール製の各バスである。

(3) 機能単位及び基準フロー

バスには様々な運行形態があり、それによって走行距離も変わってくる。本研究では、大型・中型バスについては比較的広範な地域をカバーする路線バス、小型・マイクロバスについては比較的狭い地域をカバーするコミュニティバスの運行形態を想定した。前者の年間走行距離は、都営バスの 1 日 1 台あたりの走行距離 107km をもとに 39,000km とした[18] 後者の年間走行距離は、全国のコミュニティバスの運行状況（路線長、運行回数、車両数）から 31,000km と推定した。バスの平均使用年数は 15 年間なので[19], それぞれ 585,000km, 465,000km となった。よって、大型・中型バスの機能単位は、乗車率 30% で 585,000km を走行すること、小型・マイクロバスの機能単位は、乗車率 30% で 465,000km 走行することとした。基準フローはこの機能単位を満たすスチール製または CFRP 製の各サイズのバスである。

(4) システム境界

素材製造、部品・車体製造、走行の 3 段階とした。

(5) 環境負荷項目

エネルギー消費量のみを対象とした。

8.6.2 素材製造段階

バスメーカーからの資料によれば、バスの車体の素材別重量は大別すると、鉄が 76.8%、非鉄金属が 13.0%、金属以外が 10.2% となっている。乗用車とトラックにおける鉄の割合はそれぞれ 70%、79% である。本研究では、バスの部位別素材別構成重量の詳細なデータを得ることができなかったため、鉄の使用量の傾向が似ているトラックのデータを参考にした。第 7 章で述べたように、トラックの素材製造原単位は 50.7MJ/kg である。よって、従来のスチール製バスの素材製造段階におけるエネルギー消費量は、表 8.6.1 のようになった。

次に CFRP 製バスの場合を考える。CFRP の種類、構造部材の重量、CFRP の代替量など解析に必要な情報は、前節で述べたとおりである。CFRP バスの素材製造段階におけるエネル

ギー消費量は，CFRPトラックの場合と同様に行った．つまり，構造部材においてスチールをCFRPで代替することで生じたエネルギー消費量の増減を，スチール製バスの値にそれぞれ加えて算出した．結果を表8.6.2に示す．

表 8.6.1 スチールバスの素材製造段階におけるエネルギー消費量

| | 重量 [kg] | エネルギー消費量 [MJ/kg] |
|------|---------|---------------------|
| 大型 | 9,980 | 506,485 |
| 中型 | 6,371 | 323,328 |
| 小型 | 2,700 | 137,025 |
| マイクロ | 1,630 | 82,723 |

表 8.6.2 CFRP バスの素材製造段階におけるエネルギー消費量

| | | 大型 | 中型 | 小型 | マイクロ |
|----------------|----------|-----------|---------|---------|---------|
| スチール | 使用量 | -2,719 | -1,459 | -1,072 | -609 |
| | 投入量 | -4,465 | -2,396 | -1,760 | -1,000 |
| | エネルギー消費量 | -148,674 | -79,778 | -58,617 | -33,300 |
| CFRP | 使用量 | 1,760 | 599 | 493 | 306 |
| | 投入量 | 2,933 | 998 | 822 | 510 |
| | エネルギー消費量 | 686,400 | 233,610 | 192,270 | 119,340 |
| 増減の合計 | エネルギー消費量 | 537,726 | 153,832 | 133,653 | 86,040 |
| 素材製造時のエネルギー消費量 | | 1,044,211 | 477,160 | 270,678 | 168,763 |

(注) 使用量，投入量の単位は kg，エネルギー消費量の単位は MJ.

8.6.3 車体製造段階

第6章で求めた自動車の部品・車体製造の原単位は16.4MJ/kgであった。よって、各スチール製バスの部品・車体製造段階でのエネルギー消費量は表8.6.3のようになった。

次にCFRP車の場合を考える。第6章でも述べたように、CFRPの特徴として、一般に素材を製造した段階ですでに製品の最終形状に近い形になるため、加工・組立工程が金属の場合よりも少なくすむ。このとき一体成型ができて部品点数も減少するため、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。しかしながらCFRP車の部品・車体製造エネルギーに関するデータを収集するのは現時点では不可能であるの。よって本研究では、求めた軽量化後の重量に応じて従来車のエネルギー消費量を単純に比例換算した。結果を表8.6.4に示す。

8.6.4 走行段階

走行段階のエネルギー消費量は、走行時に消費するエネルギーと、軽油の製造に要するエネルギーを合計して求めた。

まず、走行時に消費するエネルギーは、軽油の発熱原単位、走行距離、燃費から求められる。軽油の発熱原単位は38.5MJ/Lである[20]。走行距離は先に述べたように675,000kmである。

表 8.6.3 スチールバスの部品・車体製造段階におけるエネルギー消費量

| | 重量 [kg] | エネルギー消費量 [MJ] |
|------|---------|---------------|
| 大型 | 9,980 | 163,672 |
| 中型 | 6,371 | 104,484 |
| 小型 | 2,700 | 44,280 |
| マイクロ | 1,630 | 26,732 |

表 8.6.4 バスの部品・車体製造段階におけるエネルギー消費量

| | スチールバス | | | | CFRP バス | | | |
|---------------|---------|---------|--------|--------|---------|--------|--------|--------|
| | 大型 | 中型 | 小型 | マイクロ | 大型 | 中型 | 小型 | マイクロ |
| 車重 [kg] | 9,980 | 6,371 | 2,700 | 1,630 | 9,021 | 5,511 | 2,121 | 1,327 |
| エネルギー消費量 [MJ] | 163,672 | 104,484 | 44,280 | 26,732 | 147,944 | 90,380 | 34,784 | 21,763 |

バスの車両総重量と燃費の関係については、今回詳細な情報を集めることはできなかった。走行距離と燃料消費量から燃費を算出していたデータがいくつかあったが、車重がわからなかったため採用しなかった。このうち都営バスの資料には、車重が推定できるデータがあった。都営バスの 2003 年の平均燃費は 2.35km/L (=42.6L/100km) で、保有車両の平均定員が 71.8 人であった[18]。各メーカーのバス諸元表をみると、定員が 72 人程度のバスの車両重量は 9,500kg から 10,000kg 程度である。平均定員と交通局へのヒアリングで得た乗車率 18%と、一般に 55kg と定義される 1 人あたりの重量から、人員重量が約 700kg と算出された。よって、車両総重量は 10,500kg と推定した。そして、車重と燃費の関係式はこれらの値を通る直線としたので、次に傾きを考える。路線バスはゴーストップが多く一般に乗用車よりも燃費に悪い運転を余儀なくされるので、2,500kg までは乗用車の燃費と車重の関係式よりも上に来るように傾きを設定した。これより車重と実燃費の関係は、次式とした。

$$y = 0.003x + 12.457 \quad (8.15)$$

ここで、 x ：車重[kg]， y ：実燃費[L/100km]である。

図 8.6.1 にバスの重量と燃費の関係を示す。比較のため乗用車とトラックの回帰式も一緒に示す。

次に、軽油の製造に要するエネルギーは、軽油の製造原単位、走行距離、燃費から求められる。軽油の製造原単位は 41.9MJ/L である[20]。

結果を表 8.6.5 に示す。

表 8.6.5 バスの走行段階でのエネルギー消費量

| | 大型 | | 中型 | | 小型 | | マイクロ | |
|-------------------|------------|------------|------------|------------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| | スチール | CFRP | スチール | CFRP | スチール | CFRP | スチール | CFRP |
| 車重 [kg] | 9,980 | 9,021 | 6,371 | 5,511 | 2,700 | 2,121 | 1,630 | 1,327 |
| 車両総重量 [kg] | 11,432 | 10,473 | 7,279 | 6,419 | 3,030 | 2,451 | 1,878 | 1,575 |
| 燃費 [L/100km] | 43.9 | 40.5 | 29.0 | 25.9 | 13.7 | 11.6 | 9.5 | 8.4 |
| 燃費 [km/L] | 2.28 | 2.47 | 3.45 | 3.87 | 7.32 | 8.64 | 10.51 | 11.88 |
| 総走行距離 [km] | 585,000 | | 585,000 | | 465,000 | | 465,000 | |
| 総軽油消費量 [L] | 273,505 | 256,675 | 200,611 | 185,518 | 100,194 | 92,117 | 84,116 | 79,889 |
| 走行時のエネルギー消費量 [MJ] | 10,529,944 | 9,881,972 | 7,723,528 | 7,142,448 | 3,857,452 | 3,546,485 | 3,238,473 | 3,075,739 |
| 軽油製造エネルギー消費量 [MJ] | 11,459,862 | 10,754,666 | 8,405,606 | 7,773,209 | 4,198,110 | 3,859,681 | 3,524,468 | 3,347,363 |
| 合計エネルギー消費量 [MJ] | 21,989,806 | 20,636,638 | 16,129,134 | 14,915,657 | 8,055,561 | 7,406,167 | 6,762,940 | 6,423,102 |

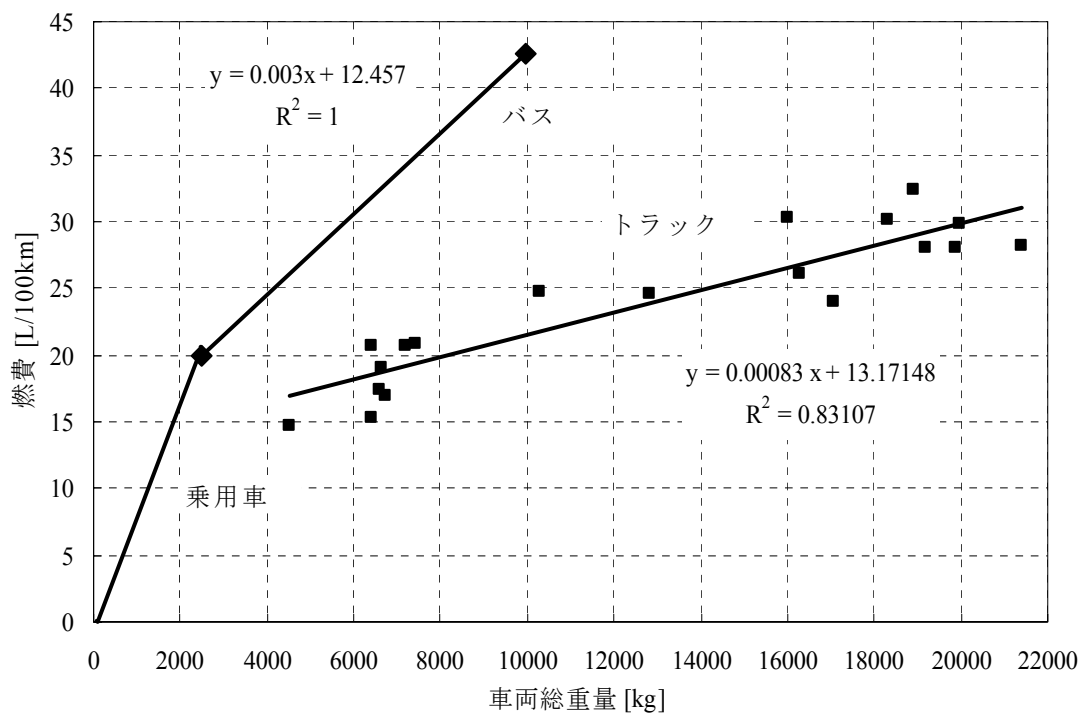


図 8.6.1 自動車の車両総重量と燃費の関係

8.6.5 ライフサイクル

軽量化により燃費が向上した結果、CFRP バスの環境負荷は従来のスチールバスより減少した。結果を図 8.6.2 および表 8.6.6 に示す。大型バスはもともと軽量化率が 4 つの中でいちばん悪かったので、エネルギー削減率もそれほど良くない。一方、マイクロバスの軽量化率は良かったにもかかわらずエネルギー削減率が悪く算出されたが、いずれにせよこれらの削減率の差は数%程度であり、削減率もトラックほどではないが乗用車と比べ格段に低い。これは、バスの車体を軽量化しても人を乗せて走るために、トラックの場合と同じように車両総重量での軽量化効果が鈍るためである。

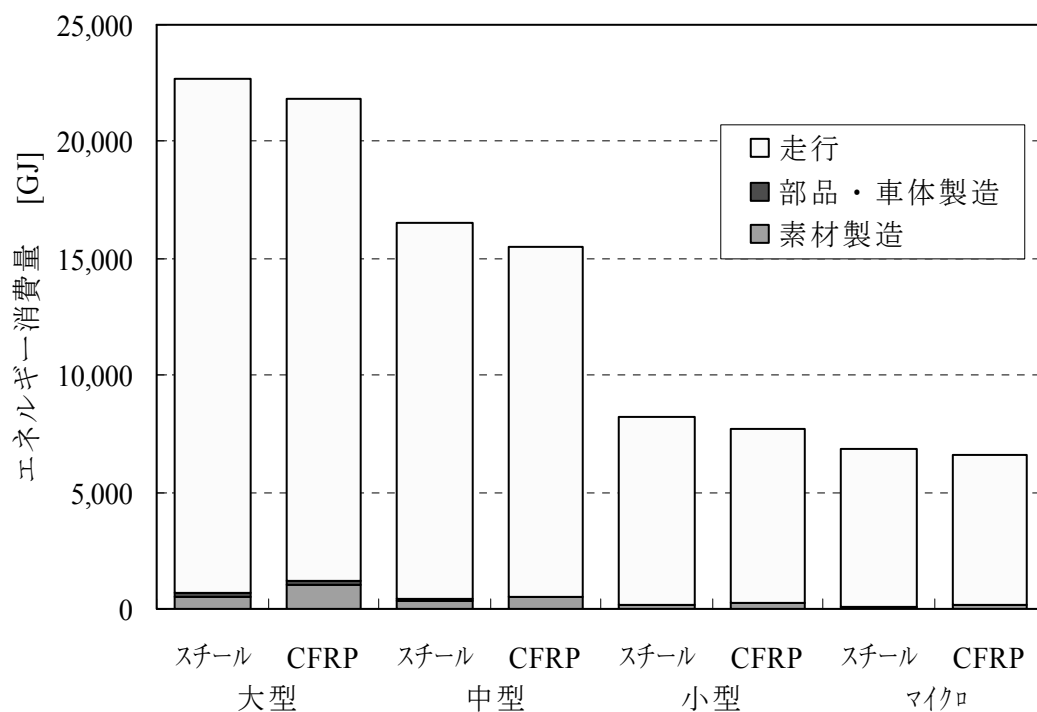


図 8.6.2 トラックのライフサイクルにおけるエネルギー消費量

表 8.6.6 トラックのライフサイクルにおけるエネルギー消費量

| | 大型 | | 中型 | | 小型 | | マイクロ | |
|---------|------------|------------|------------|------------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| | スチール | CFRP | スチール | CFRP | スチール | CFRP | スチール | CFRP |
| 素材製造 | 506,485 | 1,044,211 | 323,328 | 477,160 | 137,025 | 270,678 | 82,723 | 168,763 |
| 部品・車体製造 | 163,672 | 147,944 | 104,484 | 90,380 | 44,280 | 34,784 | 26,732 | 21,763 |
| 走行 | 21,989,806 | 20,636,638 | 16,129,134 | 14,915,657 | 8,055,561 | 7,406,167 | 6,762,940 | 6,423,102 |
| 合計 [MJ] | 22,659,963 | 21,828,793 | 16,556,947 | 15,483,198 | 8,236,866 | 7,711,629 | 6,872,395 | 6,613,627 |
| 削減率 [%] | - | 3.7 | - | 6.5 | - | 6.4 | - | 3.8 |

8.7 コミュニティバス導入による省エネルギー効果

前節の解析では、単に車体を軽量化しただけでは思ったほど省エネルギー効果が出ないことがわかった。そこで、軽量化バスをどのように普及させていけば省エネルギー効果が上がるのかを本節では検討する。普及するバスとして CFRP 軽量コミュニティバスを想定した。本章の緒言でも述べたように、コミュニティバスは地域住民のニーズに柔軟に対応して運行することができる。普及が進めばますます増大する乗用車の利用を吸収することができるかと期待されている。分析するコミュニティバスは、先に FEM および LCA を行った小型 CFRP バスとした。

まず、バス 1 台が 1 年間に削減できるエネルギー消費量を求めた。コミュニティバスの輸送量は乗車率を 30%とすると、 $3.1 \text{ 万 km} \times 6 \text{ 人} = 18.3 \text{ 万人} \cdot \text{km}$ である。車両総重量は $2,451 \text{ kg} (=2,121 \text{ kg} + 55 \text{ kg} \times 6 \text{ 人})$ なので燃費は、 5.05 km/L となった。よって軽油消費量は、 $3.1 \text{ 万 km} \div 5.05 \text{ km/L} = 6,139 \text{ L}$ となった。軽油の発熱量は 38.5 MJ/L なので[20]、 236 GJ に相当する。この交通量を全て乗用車が発生させたとすると、乗用車の平均乗車人数は旧建設省の「道路交通センサス」により 1.3 人、国土交通省の資料により実燃費は 8.69 km/L であるので、乗用車のガソリン消費量は、 $18.3 \text{ 万 km} \div 1.3 \text{ 人} \div 8.69 \text{ km/L} = 16,199 \text{ L}$ となる。ガソリンの発熱量は 35.2 MJ/L なので[21]、 570 GJ となった。よって、バス 1 台が 1 年間に削減するエネルギーは 334 GJ となった。普及台数による省エネルギー効果の変化を図 8.7.1 に示す。

2002 年の日本の最終エネルギー消費量は $156 \times 10^8 \text{ GJ}$ で、そのうち運輸部門が $38 \times 10^8 \text{ GJ}$ 、乗用車に限定すれば $22 \times 10^8 \text{ GJ}$ である。コミュニティバスを 100 万台導入すれば、運輸部門で消費されているエネルギーの 8.8%、乗用車が消費するエネルギーの 15%を削減することになる。

次に、普及台数を 50 万台に固定して、燃費及び乗車率を変化させた場合の省エネルギー効果を考える。図 8.7.2 は乗車率を 30%に固定したときの、燃費と省エネルギー効果の関係である。 4.64 km/L はスチール製小型バスの燃費である。燃費が向上すると省エネルギー効果も向上した。また、図 8.7.3 は燃費を 5.05 km/L に固定したときの、乗車率と省エネルギー効果の関係である。乗車率が増加すると省エネルギー効果も向上する。両者を比べると、燃費よりも乗車率の向上がとても効果的である。しかし、人口密度が低く、高い乗車率が見込めない地域では、燃費の向上によるエネルギー削減が支配的にならざるを得ない。よって都市部では乗車率の向上、地方では燃費の向上を中心として省エネルギーを進めることが効果的である。

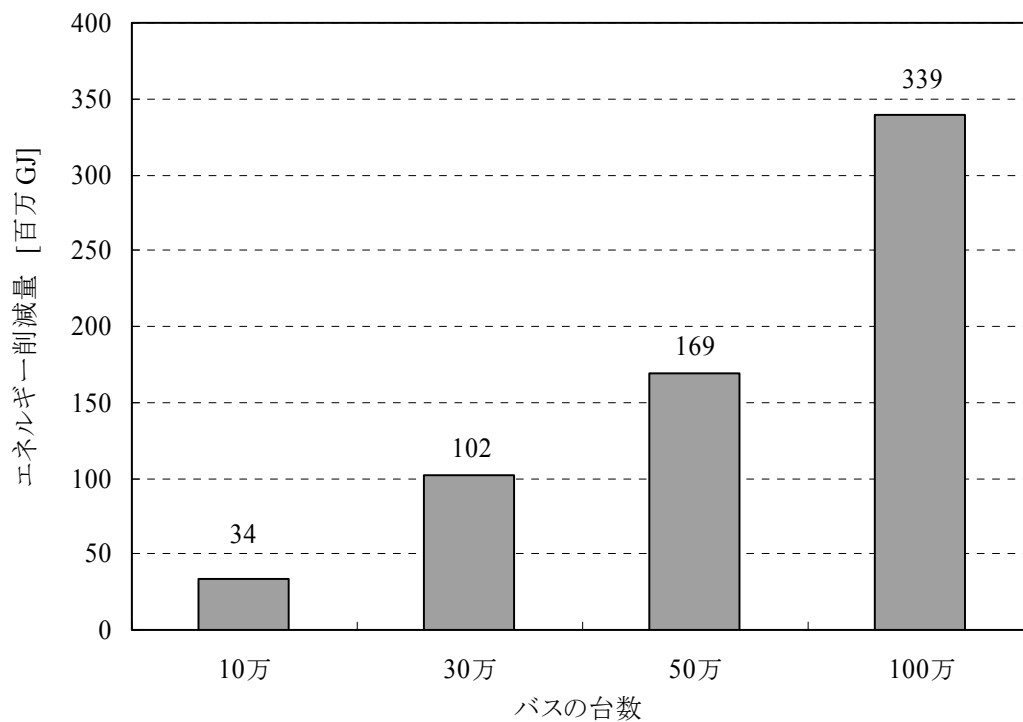
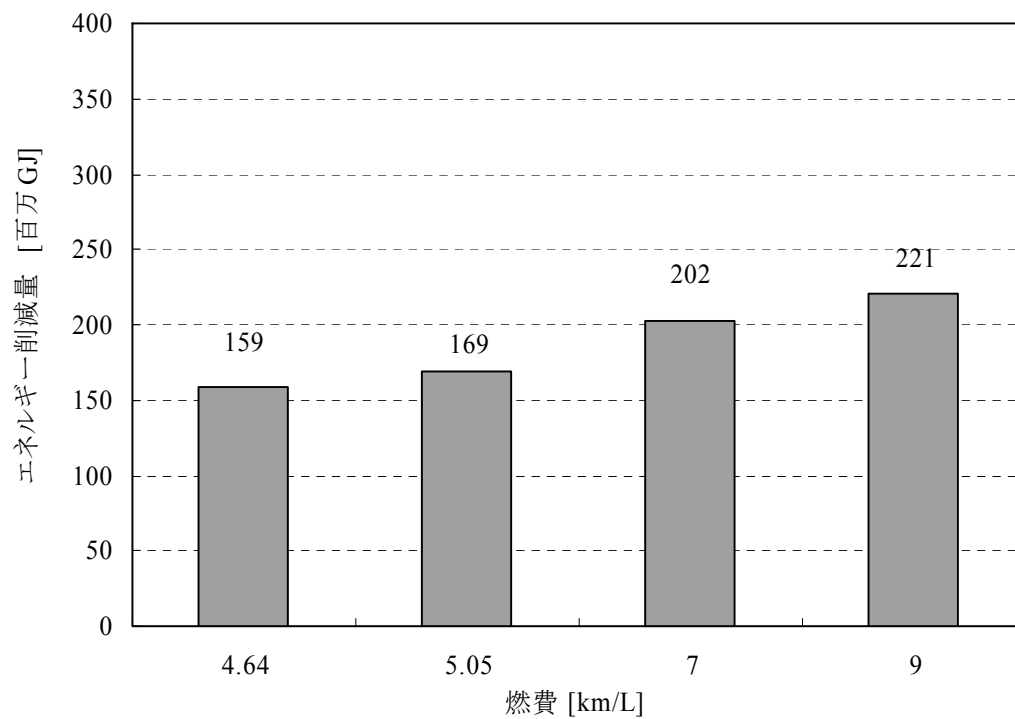
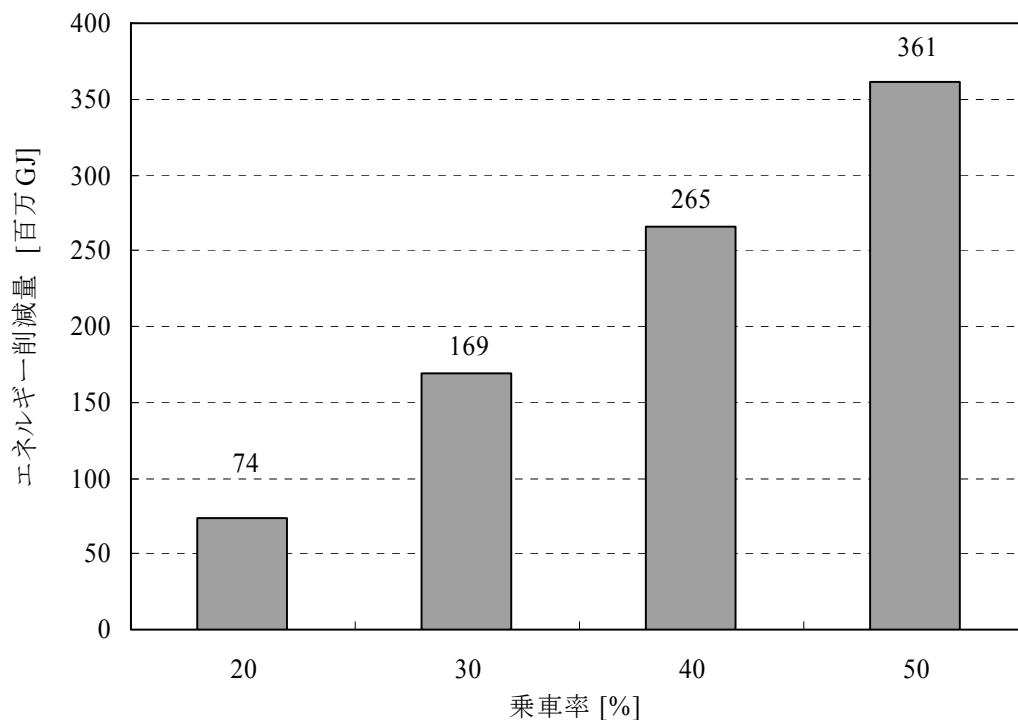


図 8.7.1 コミュニティバス普及による省エネルギー効果



(注) 普及台数を 50 万台，乗車率を 30%に固定.

図 8.7.2 燃費の向上による省エネルギー効果



(注) 普及台数を 50 万台、燃費を CFRP 小型バスの 5.05km/L に固定。

図 8.7.3 乗車率の向上による省エネルギー効果

8.8 結言

バスを大型・中型・小型・マイクロの 4 種類に分け、スチールを CFRP で代替することによりどれだけ車重が減るかを FEM で解析した。本研究の条件では小型バスの軽量化効果がいちばん大きく、次にマイクロバスであった。その結果をふまえてスチールバスと CFRP バスの環境負荷をそれぞれのサイズのバスにおいて、LCA により評価した。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、車体を軽くしても車両総重量では軽量化効果が鈍ってしまい、1 割にも満たないエネルギー削減率であった。

次に、コミュニティバスの導入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、運輸部門のエネルギー消費量を 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、乗車率の向上も省エネルギー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ルギー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、省エネルギー効果を上げるには、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。

第9章 結論

9.1 本研究で得られた知見

本研究では、自動車の燃費向上のための軽量化素材として近年注目されてきている CFRP に焦点をあてて、運輸部門の省エネルギーに対する CFRP のポテンシャルの高さを明らかにすることを目的とした。本研究で得られた知見を以下に要約する。

第2章では、運輸部門における省エネルギーの必要性和緊急性について理解するために、日本と世界における現状と今後の動向を整理した。日本ではすでに乗用車は生活必需品として普及しているものの、人々がますます快適なライフスタイルを望んでしまうため、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ることがわかった。また、世界では中国、インドを筆頭にまさにモータリゼーションが急速に浸透し始めており、ますます石油への依存が強くなっていく。このような理由から、燃費の抑制は世界的に最重要な課題の1つと認識されていることが把握できた。

第3章では、燃費向上に大きく寄与する車体の軽量化素材を比較した。比強度と比剛性に優れ、樹脂の種類と繊維含有率により力学特性を柔軟に変えることができる CFRP が、最も軽量化効果が高いことがわかった。ただし現在航空機やレーシングカーなどに用いられるのが一般的な CFRP を量産車に適用するには、成型速度、リサイクル、コストなどの課題も多いことが明らかになった。

第4章では、量産車用 CFRP 開発の第1段階として、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開発目標を提案した。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。外板部材に対し、CFRP はいずれも 60%を超える高い軽量化率を示した。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、軽量化率が 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 を超えた辺りからそれ以上高価な炭素繊維を増やしても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。しかしながら、Vf が低すぎると板厚が厚くなるし、弾性変形の歪み範囲が狭く疲労しやすくなり強度の点で問題が生じるので、用途に応じた適量の炭素繊維の含有が必要となる。総合的にみると Vf=0.3 辺りが妥当であることがわかった。

第5章では、第6章以降の CFRP 軽量自動車の LCA に必要な素材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。本研究では第 4 章で明らかになった開発目標をふまえて、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。量産車用 CFRP の製造原単位をスチール部品並みに引き下げるには、生産の合理化や、迅速成形、3R といった技術を効果的に組み合わせる必要があることがわかった。特にフレッシュ材の製造原単位が大きい CFRP にとって、原単位を下げる効果が大きい 3R 技術の開発が必須であることを明らかにした。

第 6 章では、CFRP 軽量乗用車の省エネルギー効果を検討した。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、走行段階での省エネルギーが大きく効いて来るので結局ライフサイクルでは 31%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エネルギー削減率は 35%にまで向上した。よって、CFRP による乗用車軽量がエネルギー削減において、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が重要となる。

第 7 章では、トラックを大型・中型・小型の 3 サイズに分けて、それぞれ従来のスチール車と CFRP 軽量車の環境負荷を LCA で比較した。トラック軽量化による省エネルギー効果はほとんどなかった。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車両総重量になると軽量化が鈍るためと考えられる。サイズ別にみても、車体が小さくなって軽くなるほど走行距離が減り、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来るので、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全体の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省エネルギー効果は、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、特に積載量の増加が大きく寄与することが明らかになった。

第 8 章では、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のスチールバスと CFRP バスの環境負荷を LCA で比較した。燃費の向上によりどのバスもライフサイクルでのエネルギー消費量は減った。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車両総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。

次に、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、運輸部門のエネルギー消費量を 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ルギー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ルギー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くる。よって、省エネルギー効果を上げるには、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 による省エネルギー技術が運輸部門のエネルギー削減に大いに有効であることを明らかにした。省エネルギーのための新素材の開発においては、まず現在われわれの活動がどれだけエネルギーを消費しているのかを知ることが第一歩であり、そしてどのような対策によってどれだけの削減が可能かを把握して技術開発を行うことが重要である。本研究はその意味において大いに有効な知見が得られたと言える。

9.2 今後の課題

大きく分けて 2 点の課題を挙げる。

1 点目は、CFRP の軽量化ポテンシャルをはじめとする材料開発目標のさらなる厳密な見積もりである。本研究では、開発初期段階の見積もりとして、輸送機器に用いられる代表的な物性の CFRP を基本の材料とし、その比強度、比剛性などをもとに軽量化効果を議論した。このとき外板部材と構造部材の 2 つに大きく分けただけであった。また、使用方法もスチールとの単純な材料代替を想定するにとどまり、部材ごとに要求する力学特性や金属接合条件など強度・剛性に影響を与える問題の議論を省略した。今後は、材料代替にしても現実に即した条件を増やして構造解析を行うことが求められる。将来的に理想的なのは、CFRP の特性を生かしたスチールとは設計のコンセプトが違うモデルの開発とその解析である。

また、今回は既存の研究を参考に樹脂の種類と成型法を決めたが、この妥当性の証明も必要である。

2 点目は、LCA の信頼性の向上である。車体の部位別材料別のデータは、乗用車の場合はこれまで乗用車の LCA がいくつも行われてきており比較的入手しやすい。一方、トラックやバスの場合はあまりに文献調査レベルで情報を集めるのはきわめて難しいのが現状である。かりに情報を入手できて、対象のトラックやバスの LCA が計算できたとしても、それを一般のトラックやバスに拡張した場合、バスの種類が千差万別なため平均的な車体として扱うことに疑問が生じる恐れがある。

また、正確な部位別材料別データがあっても、原単位データベースの信頼度が低くなると、当然結果の信頼性も低くなる。ごくわずかな使用量しかない材料であれば問題がない

が、CFRP 車を扱う以上 CFRP、特に炭素繊維の正確なインベントリデータベースの確立は必須である。しかしながら、炭素繊維はこれから量産化技術が発達する素材であり、今後も原単位がある水準まで下がっていくと考えられる。よって、定期的なインベントリデータの収集が必要である。また、量産化を考える以上、炭素繊維のリサイクル技術の開発は必要不可欠である。リサイクル技術はようやく実験室レベルから工場レベルでの実験が行われ始めたところであり、工場レベルでのインベントリデータの収集はまだ非常に困難である。今後の取り組みに期待したい。

最後に走行形態について述べる。自動車の環境負荷は走行時に大部分が生じるので、走行形態は LCA 結果に大きな影響を及ぼす。いちばん重要なのは燃費である。乗用車のカタログ値から車両重量と 10・15 モード燃費を収集することは簡単だが、理論燃費と実燃費の乖離が問題となる。近年は実燃費をアンケートで集めて統計的に分析することも行われている。より実態に即した推計モデルの構築が重要である。一方、トラックやバスといった重量車の場合、推計モデルがいろいろ検討されているものの、車両重量から燃費を推定するデータを収集するのはきわめて困難である。さらに、トラックの場合は積載重量、バスの場合は人員重量というパラメーターが増える。現状に即した走行形態の把握が必要である。また、車両形態も走行形態も乗用車に比べてバリエーションが豊富すぎるので、現状の実態をより適切に映し出す車両の分類、諸元、走行形態の設定が重要である。

参考文献

第1章

- [1] 新村出編, 「広辞苑」, 岩波書店 (1998)
- [2] 赤木新介, 「新交通機関論－社会的要請とテクノロジー－」, コロナ社 (1995.11)
- [3] 佐藤友香, 小林茂樹, 「化石燃料の現状と石油の将来」, 豊田中央研究所R&Dレビュー, 第32巻第2号 (1997.6)
- [4] 湊清之, 「自動車のエネルギー・環境問題」, 自動車技術, 第59巻第2号 (2005) pp.4-9
- [5] 地球温暖化防止新技術プログラム (NEDO) 「自動車軽量化炭素繊維強化複合材料の研究開発」 H15年度成果報告書 (2004)

第2章

- [1] 中塚史紀, 「運輸部門におけるエネルギー消費構造の分析と対策」, 2004年度東京大学修士論文 (2005)
- [2] (財) 日本エネルギー経済研究所計量分析部編, 「エネルギー・経済統計要覧」, 省エネルギーセンター (2005)
- [3] “World Population Prospects”, UN
- [4] “Key World Energy Statistics”, IEA
- [5] “World Population in 2300”, United Nations department of economic and social affairs population division (2004)
- [6] “World energy outlook 2003”, IEA (2003)
- [7] “World energy outlook 2004”, IEA (2004)
- [8] “Climate Change 2001: Synthesis Report Summary for Policymakers”, IPCC (2001)
- [9] 「4つの社会・経済シナリオについて－温室効果ガス排出量削減シナリオ策定調査報告書－」, 環境省地球環境局 (2001.6)
- [10] 増井利彦・森田恒幸, 「IPCC特別報告書－排出量シナリオ－」, 地球環境研究センター, 第11巻第3号 (2000.6)
- [11] 自動車検査登録協力会, 「わが国の自動車保有動向」
- [12] 日刊自動車新聞社編, 「自動車産業ハンドブック」
- [13] 自動車検査登録協力会, 「諸分類別自動車保有車両数」
- [14] 国土交通省, 「自動車輸送統計年報」
- [15] 日本自動車工業会, 「自動車業界でのCO₂削減への取り組み」 (2003)
- [16] 地球温暖化対策推進本部, 「地球温暖化対策推進大綱」 (2002)

[17] 高田邦道, 「CO₂と交通ーTDM戦略からのアプローチ」, 交通新聞社 (2000.3)

第3章

- [1] J. Kasai, “Experiences and Thoughts About Life Cycle Assessment in the Automotive Industry in Japan”, The International Journal of Life Cycle Assessment, Vol. 5, No. 5 (2000) pp.313-316
- [2] 湊清之, 「自動車のエネルギー・環境問題」, 自動車技術, 第59巻第2号 (2005) pp.4-9
- [3] 「総合エネルギー調査会省エネルギー基準部会 自動車判断基準小委員会・運輸技術審議会 自動車部会燃費基準小委員会最終とりまとめ」, (1998.12.17)
- [4] 松本廉平, 「自動車の環境対応技術入門」, グランプリ出版 (2002.9)
- [5] 神鋼リサーチ株式会社, 「新材料の適用による自動車軽量化技術の調査 調査報告書 (平成12年度)」 (2001)
- [6] 藤岡健彦, 鎌田実編, 「自動車プロジェクト開発工学ー環境, ITS, 運動性能, 物流ー」, 技報堂出版 (2001.5)
- [7] 「自動車技術ハンドブック (1) 基礎・理論編」 (社) 自動車技術会(1992.6)
- [8] 佐川直人, 坂口隆洋, 「低燃費車の普及の可能性と自家用乗用車の燃料消費の動向」, 第16回エネルギーシステム・経済・環境コンファレンス (2000)
- [9] Yuki Kudoh, et al., “Current status of actual fuel-consumptions of petrol-fuelled passenger vehicles in Japan”, Applied Energy 79 (2004) pp.291-308
- [10] 工藤祐揮, 松橋啓介, 森口祐一, 近藤美則, 小林伸治, 「ガソリン乗用車の実燃費マクロ推計式の構築」, 土木学会論文集No. 793/IV-68 (2005.7) pp.41-48
- [11] 高行男, 「アルミVS鉄ボディー自動車用材料の秘密ー」, 山海堂 (2002.9)
- [12] UltraLight Steel Auto Body – Advanced vehicle Concept
- [13] 稲葉隆, 「次世代の自動車パネル用アルミニウム板材料」, R&D神戸製鋼技報, 第52巻第3号 (2002) pp.79
- [14] 「アルミ化技術講習会資料」, 日本アルミニウム協会 (2000.11)
- [15] (社) 日本アルミニウム協会<<http://www.aluminum.or.jp/>>
- [16] L.Gains, et al., “Potential Automotive Uses of Wrought Magnesium Alloys”, Automotive Technology Development (1996)
- [17] 諸住正太郎, 「マグネシウム読本」, カロス出版 (1997)
- [18] 小原久, 「マグネシウム合金の市場動向」, 工業材料, 第50巻第8号 (2002)
- [19] (社) 強化プラスチック協会, 「だれでも使えるFRPーFRP入門ー」 (2002)
- [20] 「東レの複合材料事業について」, 第7回東レIRセミナー (2005.6.6)
- [21] A. Yahata, H. Kikukawa, “R&D Program of Innovative Structural Technology”, Proceedongs of the 7th Japan International SAMPE Symposium, (2001.11.13) pp.137-140
- [22] (財) 日本航空機開発協会, 「平成16年度版民間航空機関連データ集」 (2005.3)

- [23] 多田尚, 「PAN系炭素繊維の現状と将来」, 炭素繊維協会, 第14回複合材料セミナー予稿集 (2001.3.2) pp.1-8
- [24] 「Plastics Info World」, 国際プラスチック情報ビューロー, 第6巻第6号 (2004)
- [25] 経済産業省, 「使用済み自動車の再資源化に関する法律の概要」
- [26] 菅満春, 「コンピュータバスへの複合材料の適用に関する研究」, 2004年度東京大学修士論文 (2005)
- [27] 菅健司, 炭素繊維協会第16回複合材料セミナー (2003.3.4)
- [28] W. Krause, F. Henning, S. Troster, O. Geiger and P. Eyerer, “FT-D-A Process Technology for Large Scale Production of Fiber Reinforced Thermoplastic Components”, Journal of Thermoplastic Composite Materials, Vol. 16, (2003), pp.289-302
- [29] D. Kanawade, P. K. Mallick, “Thermoplastic Matrix Composites for Structural Automotive Applications”, SME Technical Paper, No. EM03-293 (2003)
- [30] 塚本貴史, 「成形材料SMC」, 強化プラスチック, 第50巻第12号 (2004) pp.498-504

第4章

- [1] 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 (4) —ライフサイクルにおける車両構成材料の物質フロー」, 自動車研究, 第23巻第10号 (2001) pp.46-53
- [2] 地球温暖化防止新技術プログラム (NEDO) 「自動車軽量化炭素繊維強化複合材料の研究開発」 H15年度成果報告書 (2004)

第5章

- [1] 石谷久, 赤井誠, 「ライフサイクルアセスメント—原則及び枠組み—」, 産業環境管理協会 (1999)
- [2] 石川雅紀, 赤井誠, 「企業のためのLCAガイドブック」, 日刊工業新聞社 (2001)
- [3] 鈴木武, 「ユニットロードを対象とする港湾整備に伴うエネルギー消費量とCO₂排出量の推計体系の基礎的整理」, 国土交通省国土技術政策総合研究所 (2004)
- [4] 森本一史, 「自動車におけるライフサイクルアセスメントの現状」, トヨタ中央研究所R&Dレビュー, 第30巻第2号 (1995.6)
- [5] 「新素材導入に伴う省エネルギー効果の分析について」, 化学経済研究所 (1981)
- [6] 「廃プラスチックの処理・再資源化に関する環境影響評価」, プラスチック処理促進協会 (1992)
- [7] 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)
- [8] 「自動車のライフサイクルアセスメントに関する研究」, 日本自動車工業会 (1996)

(非公開)

- [9] (社) 日本アルミニウム協会, 「アルミニウム新地金および展伸材用再生地金のLCIデータの概要」 (2005.3.23)
- [10] 化学経済研究所, 「基礎素材のエネルギー解析調査報告書」 (1993)
- [11] European Aluminium Association, “Ecological Profile Report for the European Aluminium Industry” (1996)
- [12] The Aluminum Association, “Life Cycle Inventory Report for the North American Aluminum Industry” (1998)
- [13] International Aluminium Institute, “Aluminium Applications and Society, Life Cycle Inventory of the Worldwide Aluminium Industry with regard to Energy Consumption and Emissions of Greenhouse Gases - Paper 1 Automotive -” (2000)
- [14] (社) 日本アルミニウム協会, 「アルミニウム圧延品のLCIデータの概要」 (2003.1.30)
- [15] Tadayoshi Hayashi, et al., “Reduction of Life Cycle CO2 Emissions – The Example of Honda Insight”, Society of Automotive Engineers”, Proceedings of the 2001 Environmental Sustainability Conference and Exhibition (2001) pp.17-23
- [16] (社) 強化プラスチック協会, 「だれでも使えるFRP－FRP入門－」 (2002)
- [17] 複合材料のインベントリデータ構築に関する調査報告書, 日本航空宇宙工業会 (1999.7)
- [18] 地球温暖化防止新技術プログラム (NEDO) 「自動車軽量化炭素繊維強化複合材料の研究開発」 H15年度成果報告書 (2004)
- [19] 小野昌孝, 小川弘正, 「複合材料のおはなし」, 日本規格協会 (1998)
- [20] Nagai, et al., “Inventory analysis in production and recycling process of advanced composite materials”, information paper (2001)
- [21] 産業構造審議会 廃棄物・リサイクル部会 自動車リサイクル小委員会, 参考資料 (2001.9.25)
- [22] 梶原拓治, 「自動車リサイクル」, 工業調査会 (2001)
- [23] 船崎敦, 種田克, 「自動車LCAのためのインベントリ作成の考え方 (4) ーライフサイクルにおける車両構成材料の物質フローー」, 自動車研究第23巻第10号, 日本自動車研究所 (2001)
- [24] 外川健一, 「自動車産業の静脈部」, 大明堂 (1998)
- [25] 沼尻到, 「使用済み自動車リサイクルの現状」, 自動車研究, 第21巻第12号 (1999) pp.9-15
- [26] 飯田修司, 「自動車シュレッダーダストリサイクル技術開発」, 自動車研究, 第21巻第12号 (1999) pp.34-40
- [27] 小原靖三, 「自動車リサイクルシステムの将来と要素技術」, 自動車技術, 第56巻第5号 (2002) pp.4-10
- [28] Edward Lester, et al., “Microwave heating as a means for carbon fibre recovery from polymer

composites: a technical feasibility study”, Materials Research Bulletin 39 (2004) pp.1549-1556
[29] 唯岡英介ら, 「常圧溶解法によるFRPリサイクル技術」, CON-EX2005 (2005.9)

第6章

- [1] 船崎敦, 「自動車ライフサイクルアセスメント (LCA) の課題と展望」, 自動車研究, 第26巻第11号 (2004.11) pp.595-601
- [2] 大滝俊武, 「自動車LCAの動向」, 日本エネルギー学会誌第77巻第10号 (1998) pp.956-961
- [3] 近藤美則, 森口裕一, 清水浩, 石谷久, 「素材生産に伴う二酸化炭素の排出源単位と自動車生産過程への適用」, エネルギー・資源学会第8回エネルギーシステム・経済コンファレンス講演論文集 (1992) pp.309-314
- [4] 森口裕一, 近藤美則, 清水浩, 石谷久, エネルギー経済, 第19巻4月号 (1993) pp.36
- [5] 森口裕一, 近藤美則, 清水浩, 「自動車による温室効果ガス排出のライフサイクル分析」, 環境衛生工学研究, 第19巻第3号 (1995) pp.309-314
- [6] 吉岡理文, 石谷久, 松橋隆治, 第15回エネルギー・資源学会研究発表会論文集 (1996) pp.49
- [7] 吉岡完治, 管幹雄, ECOINDUSTRY第1巻第3号 (1996) pp.20
- [8] 近藤美則, 森口祐一, 清水浩, 「電気自動車IZAとガソリン車とのライフサイクルCO₂量の分析」, エネルギー資源, 第17巻第5号 (1996)
- [9] 「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」, 産業技術審議会エネルギー・環境技術開発部会 電力等輸送・貯蔵技術分科会 (1997)
- [10] 河西純一, 山戸昌子, 「LCAの自動車業界での取り組みー日本自動車工業会LCA分科会8年間の歩みと今後の展望ー」自動車技術, 第56巻第7号 (2002) pp.64-69
- [11] 渡辺芳紀, 「部品工業会のLCA」, 自動車技術, 第56巻第7号 (2002) pp.70-75
- [12] 山戸昌子, 「ハイブリッドミニバンのLCA事例紹介」, 自動車技術, 第56巻第7号 (2002) pp.76-69
- [13] 五ノ井均, 安藤健吾, 市原和美, 御領親幸, 「製造部門でのLCAの取り組み」, 自動車技術, 第56巻第7号 (2002) pp.53-56
- [14] Tadayoshi Hayashi, et al., “Reduction of Life Cycle CO₂ Emissions – The Example of Honda Insight”, SAE Paper 2001-01-3722 (2001)
- [15] 高橋秀, 「『Honda LCAシステム』によるLCA実施事例の紹介」, LCA日本フォーラムニュース, 第31巻 (2003) pp.3-7
- [16] J. Kasai, “Experiences and Thoughts About Life Cycle Assessment in the Automotive Industry in Japan”, The International Journal of Life Cycle Assessment, Vol. 5, No. 5 (2000) pp.313-316
- [17] 日本ゴム工業会LCA分科会, 「タイヤのLCA研究」, 第3回エコバランス国際会議講演集 (1998) pp.391-394

- [18] 「平成14年度NEDO委託 製品等ライフサイクル環境影響評価技術開発成果報告書」，産業環境管理協会（2002）
- [19] 国土交通省，「自動車輸送統計調査」
- [20] 自動車検査登録協力会，「平均使用年数推移」
- [21] 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（4）ーライフサイクルにおける車両構成材料の物質フロー」，自動車研究第23巻第10号，日本自動車研究所（2001.10） pp.46-53
- [22] 「自動車と鋼材（改訂版）」，鋼材倶楽部（1992）
- [23] 赤穂義明，田畑洋，「自動車製造工程におけるリサイクル」，自動車技術，第36巻第8号（1982） pp.869-877
- [24] 日本鋳物協会編，「鋳物便覧（改訂4版）」，丸善（1993）
- [25] 「自動車ハンドブック生産・品質・整備編」，自動車技術会（1991）
- [26] 定村一洋，「レーザー溶接薄板のプレス成形」，塑性と加工，第34巻第391号（1993） pp.917-924
- [27] 「自動車の製造法」，自動車工学全書19，山海堂（1980）
- [28] 自動車技術会編，「自動車技術シリーズ9（自動車の生産技術）」，朝倉書店（1997）
- [29] 「自動車塗料の技術」，シーエムシー（1989）
- [30] 「アルミニウム新地金および展伸材用再生地金のLCIデータの概要」，日本アルミニウム協会（2005.3.23）
- [31] 「環境負担性評価システム構築のための基礎調査研究」，（社）未踏科学技術協会（1995）
- [32] LCAソフトGabi4のデータベース（出典不明）
- [33] 「複合材料のインベントリデータ構築に関する調査報告書」，日本航空宇宙工業会（1999）
- [34] LCAソフトGabi4のデータベース（出典：Association of Plastics Manufacturers in Europe）
- [35] LCAソフトGabi4のデータベース（出典：Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft）
- [36] 「1990年度産業連関表に基づくデータベース」，日本建築学会，「建物のLCA指針（案）」（1999）
- [37] 「産業連関表による環境負荷原単位データブック」，地球環境センター（2002）
- [38] 国産エンジンデータブック編集委員会編，「国産エンジンデータブック」，山海堂
- [39] 「自動車のライフサイクルアセスメントに関する研究」，日本自動車工業会（1996）（非公開）
- [40] （財）日本エネルギー経済研究所計量分析部編，「エネルギー・経済統計要覧」，省エネルギーセンター（2005）
- [41] 経済産業省経済産業政策局調査統計部編，「平成13年度石油等消費構造統計」，経済産業統計協会（2001）
- [42] 通商産業大臣官房調査統計部編，「我が国産業の現状1998年版」，通商産業調査会（1998）

- [43] C. David Warren, “Carbon Fiber in Future Vehicles”, SAMPE Journal Vol.37 No.2 (2001)
- [44] 「CMCテクニカルライブラリー 炭素応用技術」, シーエムシー, pp.182
- [45] 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 (1) —石油系燃料モデルと燃料油製造インベントリ—」, 自動車研究, 第21巻第12号 (1999) pp.58-65
- [46] 西日本オートリサイクル株式会社, JEMAI公開資料
- [47] Edward Lester, et. al., “Microwave heating as a means for carbon fiber recovery from polymer composites: a technical feasibility study”, Materials Research Bulletin 39 (2004) pp.1549-1556
- [48] 自動車検査登録協力会, 「自動車保有台数」

第7章

- [1] (財) 自動車検査登録協力会, 「車種別の平均使用年数推移」
- [2] 「トラック豆知識① (分類と積載量など)」
<<http://www9.plala.or.jp/hiyotrio/newpage019.htm>>
- [3] 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
- [4] 「アルミニウム新地金および展伸材用再生地金のLCIデータの概要」, 日本アルミニウム協会, 2005.3.23
- [5] 「環境負担性評価システム構築のための基礎調査研究」, 社団法人未踏科学技術協会, 1995
- [6] LCAソフトGabi4のデータベース (出典不明)
- [7] LCAソフトGabi4のデータベース (出典: Association of Plastics Manufacturers in Europe)
- [8] 「複合材料のインベントリデータ構築に関する調査報告書」, 日本航空宇宙工業会, 1999
- [9] 「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」, 産業技術審議会 エネルギー・環境技術開発部会 電力等輸送・貯蔵技術分科会 (1997)
- [10] LCAソフトGabi4のデータベース (出典: Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft)
- [11] (社) 強化プラスチック協会, 「だれでも使えるFRP—FRP入門—」 (2002)
- [12] (社) 全日本トラック協会, 「省エネ運転マニュアル—省エネ運転モデル走行調査結果から—」
- [13] 村野昭人, 鈴木武, 「コンテナトレーラーの燃料消費特性の把握」, 国土技術政策総合研究所資料 (2003.12)
- [14] 国土交通省, 「自動車輸送統計年報」

第8章

- [1] 自動車事故対策費補助（都市交通の安全・円滑化に資するバス利用促進等総合対策事業の部）に関する運用方針
- [2] 国土交通省近畿運輸局，「コミュニティバスの導入ガイド」（2004.3）
- [3] 鈴木文彦，「路線バスの現在・未来PART2」，グランプリ出版（2001）
- [4] （財）日本エネルギー経済研究所計量分析部編，「エネルギー・経済統計要覧」，省エネルギーセンター（2005）
- [5] 東京都内の市民バス<http://kitouin.web.infoseek.co.jp/cityBUStokyo/tokyo_c_bus.html>
- [6] 警察庁交通局，「平成16年中の交通事故の発生状況」（2005.2.24）
- [7] 鈴木文彦，「路線バスの現在・未来」，グランプリ出版（2001）
- [8] 鈴木文彦，「多様化するバス車両」，グランプリ出版（2004）
- [9] Kutsenits Japan<<http://www.kutsenits.jp/>>
- [10] 渋谷区ホームページ<http://www.city.shibuya.tokyo.jp/shibuya/com_bus/index.html>
- [11] 日野自動車ホームページ，<<http://www.hino.co.jp/j/index.html>>
- [12] GP企画センター編，「バスーその魅力と車両構造」，グランプリ出版（1996）
- [13] 菅満春，「通勤バスへの複合材料の適用に関する研究」，2004年度東京大学修士論文（2005）
- [14] 福田博，邊吾一，「複合材料の力学序説古今書院」（1989）
- [15] D.ハル，T.W.クライン，「複合材料入門」，培風館（1984）
- [16] 高橋幸伯，町田進，「基礎材料力学」，培風館（1988）
- [17] 式田昌弘，金山幸雄，「自動車の強度」，山海堂（1989）
- [18] 東京都総務局，「都営交通の営業設備及び運輸成績」
- [19] （財）自動車検査登録協力会，「車種別の平均使用年数推移」
- [20] （社）強化プラスチック協会，「だれでも使えるFRP－FRP入門－」（2002）
- [21] （財）日本エネルギー経済研究所計量分析部編，「エネルギー・経済統計要覧」，省エネルギーセンター（2005）

発表論文

<国際会議>

1. J. Takahashi, H. Zushi, T. Suzuki, H. Nagai, K. Kageyama and H. Yoshinari, “Life Cycle Assessment of Ultra Lightweight Vehicles Using CFRP”, Proceedings of The Fifth International Conference on EcoBalance (2002.12) pp.259-262
2. T. Suzuki, T. Fukuyama, H. Zushi, T. Origuchi and J. Takahashi, “Evaluation of Effects of Lightening Trucks on Environment by LCA”, Proceedings of the 3rd International Symposium on Environmentally Conscious Design and Inverse Manufacturing (2003.12) pp. 344-347
3. **(Poster Award on EcoDesign2003)** H. Zushi, S. Sawada, T. Suzuki, T. Origuchi and J. Takahashi, “Effect of Lightened Automobiles on the Environmental Problem due to Asian Motorization”, Proceedings of the 3rd International Symposium on Environmentally Conscious Design and Inverse Manufacturing (2003.12) pp. 473-476
4. T. Suzuki, H. Zushi, S. Nakatsuka, J. Takahashi and J. Kasai, “Effects on Reduction of Environmental Loads from Transport Sector by Low-Environmental-Loads Commuter Buses”, Proceedings of The 6th International Conference on EcoBalance (2004.10) pp.579-582
5. T. Suzuki, T. Odai, R. Hukui, J. Takahashi, “LCA of Passenger Vehicles Lightened by Recyclable Carbon Fiber Reinforced Plastics”, International Conference on LCA 2005 (2005.4) (Not published)
6. T. Suzuki, J. Takahashi, “LCA of Lightweight Vehicles by Using CFRP for Mass-produced Vehicles”, 15th International Conference on Composite Materials (2005.6) (CD-ROM)
7. T. Suzuki, M. Kan, M. Yamamoto, K. Uzawa, J. Takahashi, J. Kasai “Structural Analysis and LCA of Lightened Buses by Carbon Fiber Reinforced Plastics”, 3rd International Conference on Materials for Advanced Technologies (2005.7) pp.634-639 (Vol. 2)
8. T. Suzuki, J. Takahashi, “Prediction of Energy Intensity of Carbon Fiber Reinforced Plastics for Mass-produced Passenger Cars”, 9th Japan International SAMPE Symposium & Exhibition (2005.12) (CD-ROM)

<その他>

1. 鈴木徹也, 手柴富美, 圖子博昭, 高橋淳, 影山和郎, 吉成仁志, 「CFRP 軽量車の LCA」, 日本機械学会 2002 年度年次大会講演論文集Ⅱ (2002.9) pp.281-282.

2. 圖子博昭, 澤田真一, 鈴木徹也, 折口壮志, 高橋淳, 「CFRP による軽量化乗用車の長期的環境エネルギー問題対策効果」, 日本複合材料学会 2003 年度研究発表講演会予稿集 (2003.5) pp.81-82
3. 鈴木徹也, 福山哲士, 圖子博昭, 折口壮志, 高橋淳, 「CFRP による軽量化トラックの LCA」, 日本複合材料学会 2003 年度研究発表講演会予稿集 (2003.5) pp.83-84
4. 尾台竜也, 鈴木徹也, 高橋淳, 「ライフサイクルインベントリ分析による量産車用 CFRP の原単位予測」, 第 48 回 FRP CON-EX 2003 講演要旨集 (2003.10) pp.66-68
5. 鈴木徹也, 高橋淳, 河西純一, 「CFRP による軽量化バスの LCA」, 第 48 回 FRP CON-EX 2003 講演要旨集 (2003.10) pp.72-73
6. 山本道隆, 田上友之, 菅満春, 鈴木徹也, 鵜沢潔, 高橋淳, 河西純一, 「CFRP を用いた低環境負荷通勤バス提案」, 第 29 回複合材料シンポジウム講演論文集 (2004.10) pp.71-72
7. 鈴木徹也, 菅満春, 高橋淳, 「量産車用 CFRP による軽量化乗用車の LCA」, 第 29 回複合材料シンポジウム講演論文集 (2004.10) pp.195-196
8. 中塚史紀, 鈴木徹也, 高橋淳, 「CFRP による車両重量軽量化の環境負荷低減効果」, 第 29 回複合材料シンポジウム講演論文集 (2004.10) pp.201-202
9. 円谷晃司, 鵜沢潔, 鈴木徹也, 山本道隆, 高橋淳, 「コンテナ軽量化による貨物輸送の環境負荷低減効果」, 第 30 回複合材料シンポジウム講演論文集 (2005.10) pp.225-226

謝辞

この論文をまとめるにあたり、まず何よりも先に、指導教官である東京大学大学院工学系研究科環境海洋工学専攻の高橋淳助教授に、深く感謝を申し上げます。著者は学部4年の時に現在所属している安全評価工学研究室に配属され、そのまま大学院修士課程に進学しましたが、それ以来5年間にわたり熱心にご指導をいただきました。先生は非常にご多忙にもかかわらず、研究に行き詰まるたびに丁寧にアドバイスをしていただき、適切な方向へと導いて下さいました。もともと漠然と環境問題に興味はあったものの、軽量新素材による運輸部門の省エネルギーという点に注目して本論文を仕上げるまでに至ったのは、先生の下で研究していたからにはありません。また、様々な国際学会、国内学会で発表の機会を与えて下さり貴重な経験ができたことにも感謝しております。

本論文の審査委員となっていただいた他の4人の先生方、環境海洋工学専攻の湯原哲夫教授、影山和郎教授、鈴木英之教授、村山英晶講師には、本論文をまとめるにあたり各種のご指摘やご意見をいただきました。感謝申し上げます。

当研究室の森田明保技官には、パソコンやネットワーク関連のことで大変お世話になりました。お忙しいときも著者の初歩的な質問に嫌な顔をせずいつも丁寧にアドバイスして下さいました。おかげさまで研究を円滑に進めることができました。ありがとうございます。

今回同時に博士論文を提出した圖子博昭さんとは、ともに助け合いながら頑張ってきました。著者が新素材の環境評価を担当していたのに対し、圖子さんは新素材の実際の開発を担当していたので、お互い情報を交換しながら研究を進めてきました。今年の夏に国際会議のため南アフリカとシンガポールに2週間にわたって一緒に滞在しましたが、そのときのいろいろな出来事も良い思い出となりました。また、同じ研究室の方々とはこの5年間を通して、新素材の材料開発による運輸部門の省エネルギーに関する研究に取り組んできました。長岡悟君（現：東レ（株））、菅満春君（現：本田技研工業（株））、中塚史紀君（現：（株）三菱総合研究所）、尾台竜也君（現：新日鉄ソリューションズ（株））ほかいろいろいますが、本論文には彼らとの共同研究の成果も多く盛り込まれており大変参考になりました。ありがとうございます。

いすゞ自動車（株）の河西純一様（現：（独）物質・材料研究機構）には、バスの軽量化を研究する際、大変有用なデータや情報を数多く提供していただきました。お礼を申し上げます。その他学会等でも声をかけていただきアドバイスをいただくこともありました。ありがとうございました。

著者は学部時代を含めると、本専攻に7年の長きにわたり籍を置きました。その間、教務の宮川さんをはじめ数多くの教職員の方々にお世話いただきました。この場を借りてお礼を申し上げます。

最後に，博士課程を終えるまで長い間経済的に面倒をみてもらい，その他いろいろ気遣ってくれた両親，家族に感謝の気持ちを伝えます．

2005.12.16

鈴木徹也