自動車の軽量化と材料

新 美 格*

1. 緒 言

1973年のオイルショック以来、世界のエネルギー事情を大きく左右する石油の量的限界が改めて注目され、これに伴い石油の用途として大きい部分を占める自動車の燃料消費の問題が大きくとりあげられるに至った。これは図1†に示すように国によりその消費割合は異なり、我が国の自動車向けは他国のそれに比べて低目であるにしても、13%という大きな割合であるからである。しかも図2†に示すように、我が国の1次エネルギーにたいす

図1 石油消費割合(1978年)。

図2 1次エネルギー構成比(1978年)。

る石油の依存度は他国に比べて高いので一層問題となる。したがって自動車用燃料消費量の低減は、とくに我が国においては将来のエネルギー対策上の大きな課題となっている。

2. 燃費低減方策と車両の軽量化

以上のような状況から、自動車業界では燃費向上対策として表1に示すような各種の方法を進めてきている。軽量化と共に各種の対策が施され、結果的にはそれらの総合により燃費低減が進められるのであるが、軽量化は他の対策項目に比べて進め易く、また効果も大きいので燃費低減の代名詞のようにになっている。図3††は車両質量と燃費の関係の一例である。この図から車両質量が800, 1000, 1200, 1400 kgのそれぞれにたいし、各10%軽量の車両にした場合の燃費向上率、およびその傾向で車両質量を1 kg 軽減した場合の燃費向上を算出すると表2のようになる。この表に示される数値は国内生産車の資料からえた平均値的なものから算出したのであるから、概念的なものであることに留意して頂きたい。

車両の総質量低減の効果は以上の通りであるが、車両の構造の中で、回転、往復運動をする部分のエネルギー消費の問題が別にある。たとえば、一時停車時のエンジン空転によるエネルギー消費等の問題である。そこで部品個々に軽量化効果が異なる。ごく大ざっぱに見れば、回転部分の軽量化は回転しない部分のそれに比べて2倍程度の効果がある。しかし回転部分の質量は車両質量の13%程度であり、また機能的要素の高い部品であるから軽量化が比較的困難である。また1部品1構造を軽量化すれば、関係する部品を軽量化することができ、1次2次と波及的に軽くすることができる^{(1)~(3)}。エンジン系と駆動系、車両質量とシャシー系、ボデー系と車両質量に高い相関があるが、さらに2次3次の波及効果の例を示すと、ボデーの軽量化をはかれば、車両質量が軽く

* 豊田工業大学教授
How to Manage Automotive Materials for Light Weight Cars; Itaru Niimi (Faculty of Eng., Toyota Technological Institute, Nagoya)
1981年4月28日受理

† ENERGY BLANCES OF OECD COUNTRIES (1978)

†† 昭和53年排気公害対策国産車

表 1 燃費向上対策.

図 3 53 年度排気対策車の車両質量と 10 モード燃費 ($10^6 \text{ m}^3/\text{m}^3=1 \text{ km/L}$).

表 2 図 3 より算出した各質量車両の軽量化による燃費改善.

車両質量 (kg)	10% 軽量化による燃費向上率 (%)	1 kg 軽量化による燃費改善量 ($10^{-9} \text{ m}^3/\text{m}^3 \cdot \text{kg}$)	1 kg 軽量化による 1 km 当りのガソリン節約量 ($10^{-9} \text{ m}^3/\text{m}^3 \cdot \text{kg}$)
800	10.96	20.0	0.0845
1000	11.11	13.0	0.0855
1200	11.22	9.2	0.0858
1400	11.31	6.8	0.0863

なり, それに従いエンジンおよびシャシー系が軽量化され, エンジン, シャシー系が軽くなれば, 駆動系の軽量化を促し, 結局エンジン, シャシー, 駆動系全体が軽くなり車両質量が軽くなる. 車両質量が軽くなれば, この 2 次的軽減質量をもとに, 再びエンジン, シャシー, 駆動系の軽量化が続き, 3 次の車両質量の軽減がえられる. これらの各コンポーネントの質量に関する回帰式が得られれば, ループ演算ができるわけである.

3. 燃費と車両の消費全エネルギー

これまで述べたことは, すべて車両の燃費についてであった. しかし自動車の社会的効用という観点からエネルギー消費として見ると, いわゆる自動車一生のエネルギー消費, あるいは消費全エネルギーを考えなければならない. これは資源から材料をつくり, これを加工して部品をつくり, 組立て, 自動車が生れるまでのエネルギーに, 使用され走行して廃車になるまでの消費エネルギーを加えたものである. 一例を図 4 に示す. 走行エネルギーは, タイヤやエンジンオイルのような交換によって消費されるものはその残存エネルギーを差し引いた正味の消費エネルギーである. 全エネルギー中燃料消費が圧倒的に大きいことは明らかであるが, 材料, 製造エネルギーもまた決して無視できないものである.

図 4 自動車の消費する全エネルギー ($1 \times 10^8 \text{ m} = 10 \text{ 万 km}$).

4. 軽量化の得失と進め方

軽量化の利点は、燃料経済性の向上や自動車製造上材料、加工エネルギーの節約につながることから省資源対策になることであろう。一方損失も考えられる。たとえば車両衝突時の安全性や加速走行時の振動騒音、走行安定性などの乗心地に影響する特性は低下する傾向がある。また低価格材料を使用するだけではすまされないような軽量化を計ると、コストアップになる。したがってこれらの欠点をカバーするよう配慮しなければならない。

次に軽量化の方法であるが、表 1 にも一部示したように、先ず第 1 は設計の見直しである。大型車をサイズダウンするとか、構造部品の余肉をとるとかによるものである。第 2 は生産技術からの工夫である。たとえば、工程の変更改善による部品の精度向上や一体化などである。これらの方法は材料の節約という意味でコストダウンにつながり、省資源、省エネルギーになる要素が多い。第 3 は軽量化に効果のある材料、いわゆる軽量材料を使用する方法である。この方法は必ずしもコストダウンとはならず、往々にしてコストアップとなるが、第 1、2 の方法を十分に採用した上で一層有効な方法として採用することになる。

5. 車両の材料構成率

軽量材料を云々する前に、まず自動車の材料構成が現在どのようなものかを知っておく必要がある。図 5 は 1978 年のある国産車と 1978 年のある米国車⁽⁴⁾の例で、材料構成は車によって余り差がない。図中のアルミニウ

図 5 車両材料構成 (質量)。

図 6 アルミニウムの使用量。

図 7 プラスチックの使用量。

ムとプラスチックがいわゆる軽量材料であるが、何れも数%の質量割合である。さらに図 6⁽¹⁾、図 7⁽¹⁾に各車のアルミニウム、プラスチックの使用量を示した。特種の車両を除き各車大差ない。これらの図が示すように、軽量材料の使用量は少なく、一方比重の大きい鉄鋼が車両全体の 75% に達するということである。この構成の今後の動向について米国 EPA のデータを図 8⁽⁶⁾に示す。アルミニウム、プラスチックは増加し、鉄鋼は減少するが、1990 年を見てもそれほど大きくは変化しない。これは筆者も同意見である。理由は材料コストと物性値のバランスによるもので、軽量材に置きかえる場合単に密度の比がそのまま部品の質量比にならないため部品原価の上昇をきたす場合が多いことが大きい。

6. 材料転換による軽量化

軽量材料への転換効果例を表 3、表 4⁽⁶⁾に示す。使用の方法でその効果は著しく差があることが分かる。またコストも増減することが分かる。以下代表的な軽量材料について述べる。

図8 乗用車の材料構成(質量割合) 予測.

表3 材料転換による軽量化(日本車の例).

材 料 転 換	軽 減 率 (%)
鋳 鉄 → Al ダイカスト	36~60
〃 → Al 鋳 物	34~55
鋼 板 → Al 板	40~56
鋼板溶接構造 → FRTP	23~60
〃 → SMC	19~32
〃 → FRP	12~75

FRTP: 繊維強化熱可塑性プラスチック(ここではガラス繊維)

SMC: ガラス繊維強化熱硬化性プラスチックのシート状成形材料

FRP: 繊維強化熱硬化性プラスチック(ここではガラス繊維)

表4 材料変換による軽量化とコストアップ(米車の例).

材 料	軽減率 (%)	コ ス ト 比
[展伸材]		
普通鋼板	0	1
耐デント鋼板	10~20	0.8~1
高張力鋼板	15~30	0.9~1.1
超高張力鋼板	40~50	2~3
アルミニウム	50~60	2~3
[鋳物]		
ねすみ鋳鉄	0	1
Alダイカスト	50~60	0.9~1.2
Al低圧鋳造	50~60	1.5~1.9
Znダイカスト	10~40	0.7~1.1
Mgダイカスト	75	0.9
[樹脂]		
普通鋼板	0	1
FRP(方向性無)	50	1.25
SMC	35~50	1.15
CFRP(方向性無)	60~70	1.5~4
STX(ホットスタンプ)	35	1.5

CFRP: 炭素繊維強化熱硬化性プラスチック

STX: ガラスマット強化熱可塑性プラスチックのシート状成形材料

(1) 高張力鋼板

図5に示したように、普通鋼板の使用量は車両質量の約半分にもなり、その軽量化の効果は大きい。高張力鋼板は板厚減少により軽量化効果が現われるが、表4に示すように、耐デント性、衝撃特性の向上のためにも使用

されてきている。しかし、一般的に下記事項にたいする配慮が必要である。

- プレス成型時の割れ、しわ、歪、型のかじりや磨耗
- 成品の形状、精度不良
- 溶接部位の強度低下
- 低耐久限度比
- 肉薄による剛性低下
- 単価アップ

現在これらの欠点をカバーするため各種の材料が研究されており、引張強さ 400~600 MPa 級のものが使用されている。

(2) アルミニウム

図5,6に示すように、アルミニウムは車両質量の数%を占めるが、部品は殆どが鋳物またはダイカストで展伸材は我が国では余り使われない。この理由はコストが高いためであるが、また鋼板に比べて物性上不利な点があるからである。たとえば、

- 鋼板に比べてプレス成形性が悪い。
- 接合が難しい。
- 塗装が難しく、また電食の問題もあって鋼板との併用には特別な工夫が必要である。

などがあげられる。何れにせよ鋳鉄や鋼に比べて高価であるから、材料原単位の低減、再生材の利用、さらに政策上廃車処理システム、廃材再生供給体制の整備等についても考える必要があろう。

(3) プラスチック

プラスチック材は密度が鉄材の 1/4~1/8、アルミニウム材の 1/1.5~1/3 と小さいので軽量材料としては効果が大きい。しかも一体成形による組立コストの低減、生産性の高さなどの有利さをもち他材料と比べて特徴をもっている。従来も急激に使われてきている材料である。しかしこれまでの適用部品は機械的強度や温度などの使用環境条件がそれほど厳しくない分野のものが多く、これからは機械部品や外板部品など使用環境条件の厳しい分野への適用が考えられるので、そのため金属材

料のかなりの分野で競合できる材料が開発されつつある。複合材料の分野での発展がさらになされるであろう。

(4) その他の材料

マグネシウム、炭素、ニューセラミックなどの材料も自動車用材料として検討されているが、未だ大量使用できるような状況にはなっていない。

7. 軽量材料の適用による全エネルギー節約効果への歩みより

以上述べてきた軽量材料の適用に関する留意点は、主として製造原価とのバランスであった。実際、3項で述べたように、単に燃費のみを考えず、全エネルギーを基準として考えた方がエネルギー施策上は望ましい。図4に示したように、材料および製造のエネルギーの総和は全エネルギーの15%を占めており、資源エネルギー的には無視できないものである。ところで、図4の材料、製造エネルギーは、ある自動車メーカーにおいて、ある期間の消費された材料と加工のエネルギー量を、その期間の生産台数で除した、台当りの平均消費量で算出し、走行距離は最高寿命を考慮して、走行エネルギーを算出したのである。実際に車両全エネルギーを考えると、さらに条件を入れ、車両が逐年老朽化することによる年平均走行距離の低下とある年に生産された車両台数が逐年何らかの理由で廃車されて行くための実績車両残存率を要素にとり入れた方がよい。図9†は1971~1972年の資料からえた例である。これによると車両寿命は最大12年で、50%の車両が約6年で廃車となり、月平均走行距離も図のように逐年低下する。

いま材料、製造エネルギー総和を概念的に材料別に仮定して表5を例示する。なお表中廃車くずは残存エネルギーを有しているものとして示した。

そこで、図9のような車両の使用状況での、転換材料

図9 車令と車両残存率、走行距離の関係。

† 1971年度運輸省自動車局資料等

表5 材料エネルギー。

材 料	粗形材 kg 当りエネルギー (MJ/kg)
鋼 板	89.956
鋳 鉄 板	58.994
ア ル ミ 板	276.144
ア ル ミ 鋳 物	291.206
アルミダイカスト	92.466
プラスチック	179.912
〔廃車くず〕	
鉄 く ず	16.736
ア ル ミ く ず	100.416
廃プラスチック (油化)	12.552
ガ ソ リ ン	$42.89 \times 10^9 \text{ J/m}^3$

による車両台当りエネルギーの得失は次式で表わすことができる。

$$E_{Ti} = \sum_i E_{Fi} - E_M + E_{Si} \dots \quad (1)$$

E_{Ti} は i 年経過後の全エネルギーの得失

$\sum_i E_{Fi}$ は i 年後の燃費低減によるガソリンエネルギー低減量

E_M は材料代替による材料・製造エネルギーの過剰投入量

E_{Si} は廃車くずの残存エネルギー量

いまある材料転換を想定して全エネルギーが経年どのように変化するかを見てみる。仮に、軽量化によるガソリン節約量が $0.05 \times 10^{-9} \text{ m}^3/\text{m} \cdot \text{kg}$ ($0.00005 \text{ L}/\text{km} \cdot \text{kg}$) の車両について簡単に鋼板 8 kg、鋳鉄 8 kg 相当の部品をアルミニウム 4 kg (内ダイカスト 1.5 kg、鋳物 1.5 kg、展伸材 1 kg) とプラスチック 4 kg でおきかえたとする。表5から E_M はアルミニウムと樹脂の材料エネルギーと鋼板+鋳鉄の材料エネルギーの差で、

$$E_M = 380 \text{ MJ (90750 kcal)}$$

また E_{Fi} は i 年後の車両の年間走行距離に、軽量化 8

図10 軽量材料の適用によるエネルギー節約効果。
($1 \text{ GJ} \approx 2.4 \times 10^5 \text{ kcal}$)

kg による走行 1 km 当りのガソリン節約量を乗じ、これに車両残存率を乗じて一台当りに換算する。

$$E_{Fi} = (\text{車両残存率}) \times (i \text{ 年後の月平均走行距離} \times 12 \text{ 月}) \\ \times 0.05 \times 10^{-9} \text{ m}^3/\text{m} \cdot \text{kg} \times 8 \text{ kg} \times 42.89 \times 10^9 \text{ J/m}^3$$

さらに E_{Si} は廃車台数を率として 1 台当りに換算した (1-車両残存率) に材料置換による残存エネルギー差を乗じて、

$$E_{Si} = (1 - \text{車両残存率}) \times (100.4 \text{ MJ/kg} \times 4 \text{ kg} + 12.55 \text{ MJ/kg} \times 4 \text{ kg} - 16.74 \text{ MJ/kg} \times 16 \text{ kg})$$

これらの数値を式 (1) に代入して得られた結果を図 10 に示す。図で分かるように、使用開始後 1 年までは材料転換による材料、製造エネルギーの増加が燃費低減の効果を押えるが、その後は燃費低減の効果が現われることになる。

以上の例は、あくまでもある条件を想定しての結果であるから、一般的な考え方としてうけとめねばならないが、個々のケースについて、このような計算予測をすることにより軽量化の正しい進め方ができるのである。

8. 結 言

以上石油事情の特に我が国における重要性から自動車の軽量化は資源エネルギー節約上誠に重要な問題となっ

てきているが、これは単に車両を軽くすればよいと言うものではなく、また軽くすることによって燃料消費量を低減すればよいと言うものでもない。軽量化のための材料転換もこのような観点から進めなければならない。材料・製造のエネルギーに加えて、使用エネルギー、さらにはリサイクリングまで考えた全エネルギー消費を如何に最少にすることができるかを常に考えて進めることが重要である。これはしかし何も自動車に限ったものではないが、とくに石油を多量消費する製品として重要となっていることを再度述べて本稿を終りたい。

文 献

- (1) L. Artinian and S. L. Terry : The Total Cost of Weight, SAE 325 D, (1961).
- (2) D. G. Adams : High Strength Materials and Vehicle Weight Reduction Analysis, SAE 750221, (1975).
- (3) F. E. Kennedy and F. J. Hooven : An Analysis of Automobile Weight and Its Reduction by Aluminum Substitution, SAE 77085, (1977).
- (4) Ward's-Automotive Reports., (1977-10-3).
- (5) Impact of Material Substitution in Automobile Manufacture on Resource Recovery, EPA-600/5-76-007a (1976-7)
- (6) Chrysler : American Metal Market-Metal Working News Edition (1979-2-26)

◆学協会だより (2)◆

First International Conference on Current Solutions to Hydrogen Problems in Steels

時 : 1982 年 11 月

所 : Washington. D. C.

共催 : Technical Divisions of American Society for Metals (ASM)

ASM'S Washington, D. C. Chapter

アブストラクト : 1981 年 9 月 1 日 (1,000 語 (英語))

照会先 : Dr. G. M. Pressouyre, Creusot-Loire Research Centre, 71208 Le Creusot, France.

4th International Conference on Mechanical Behaviour of Materials

時 : 1983 年 8 月 15 日 ~ 19 日

所 : The Royal Institute of Technology, Stockholm, Sweden

主催 : The Royal Institute of Technology

アブストラクト : 1982 年 9 月 15 日

照会先 : Conference Secretariat ICM-4

Dr. N. G. Ohlson

Royal Institute of Technology, Materials

Research Center,

S-100 44 Stockholm,

Sweden