国産乗用車の軽量化進捗度に関する一考察*

栗 原 雄 毅^{*1}

Progress in Reducing Domestic Passenger Car Weight

Yuki KURIHARA

The concept of specific gravity was employed in this paper as an indicator for measuring the progress achieved in reducing the weight of transportation equipments. According to this indicator, the weight of domestic passenger cars has been reduced by a value of 0.93 over the past 19 years. However, only slight weight reduction has been achieved in the past six years despite rationalizing vehicular structure through the extensive use of CAE. This indicates that the weight of vehicles constructed primarily of steel materials is approaching a natural limit. What this suggests is that it will be necessary to switch from steel to lightweight materials to substantially reduce the weight of vehicles in the years ahead.

Key Words: Automobile, Optimum Design, Structural Analysis, History of Engineering, Iron and Steel, Aluminum, Composite Material, Weight Reduction, Progress, Passenger Car

1. 序 論

地球環境問題の顕在化に起因する自動車の燃費向上および自動車にとっては永遠の課題である安全性や運動性能などの諸性能の向上をさらにはかるために、これらの前提となる軽量化が進められている。軽量化進捗状況の実態として、個々の部品を取り上げてみるといっそう軽くなっているにもかかわらず、各種部品の集合体となっている車両としてみる場合、これまで良く用いられている車両投影面積当たりの重量の指標で見ると増加現象を示している。

車両の軽量化についていえば、単一材料で構成される諸部品について、軽量化の進捗度を測定する指標はあるが、多数の異種材料で構成されている多くの部品や車両としてみた場合は適切な指標が見当たらないようである。

本報では、車両の軽量化進捗度を評価する指標について新たに提案し、これに基づき国産普通・小型乗用車の軽量化進捗度を明らかにし、将来車両の大幅な軽

量化を進める場合には、いっそう軽量材料への転換が必要であることを示唆する。

これは、車両の軽量化を将来どの時点でどのレベルまで進めるかを具体的に検討し、これに要する開発資源の数量や製造設備投資額を把握することは、自動車メーカーにとっても材料メーカーにとっても、会社経営上重要なことと考えられるからである。

2. 軽量化進捗度の評価指標

2・1 評価指標の選定 車両の軽量化の進捗度を示す評価指標として、これまで車両投影面積当たりの重量で示すことが多かった。一例として図 1⁽¹⁾に示す。これによると 1973 年の第一次石油危機とともに始まった車両の軽量化は、タイムラグを生じつつもその効果がみられるが、1982 年頃以降は漸次重量増加に転じていることが理解される。しかし実態としてはこれ以降も車両の軽量化は進められ、例えば図 2⁽²⁾のバッテリーケースに見られるように、個々の部品についていえばいっそう軽くなっているのが実態である。したがって、図 1 のように、1982 年以降重量増加に転じている要因は、例えば、パワーステアリングなどに代表される高機能化、エンジンのターボ化、吸排気弁の多弁化などに代表される高性能化などによるところが大

* 平成 5 年 12 月 7 日 日本機械学会第 2 回交通・物流部門大会において講演, 原稿受付 平成 6 年 10 月 19 日。

*¹ 正員, 日産自動車(株) (〒237 横須賀市夏島町 1)。

きいと考えられる。このような結果となるのは、図1に示されるような指標(表1の①)の適用に際しては比較する車両が等機能、等性能であることなどの前提条件が必要なことと考えられ、その前提条件を越えたものを比較しても、初期の目的が達せられないためと考えられる。

しからば、この目的を達成するために、ここではこれまでの二次元的な指標から、三次元的な指標、すなわち比重の概念(表1の②、③)を導入する。軽量化進行度評価指標案として①車両の投影面積当たりの車両重量、②純粋に物理的な意味での車両比重、③多数の車両構成材料の加重平均比重(以下車両比重と呼称)について、その長所と短所を考察すると表1のように表される。総合的に検討すると③の車両比重が、軽量化の実態を示しかつ現実的に適用可能な評価指標といえる。次に評価指標③について車両比重の式を誘導する。

2.2 車両比重式の誘導

記号

W_o : 車両全質量

$W_i(i=1\sim n)$: i 番めの車両構成材料の質量

ここに

$$W_o = \sum_{i=1}^n W_i$$

V_o : 車両構成材料の全体積

$V_i(i=1\sim n)$: i 番めの車両構成材料の体積

図1 国産自動車の車両重量推移

図2 バッテリーケースの材料と重量の変化

ここに

$$V_o = \sum_{i=1}^n V_i \dots\dots\dots (1)$$

$\phi_i(i=1\sim n)$: i 番めの車両構成材料の質量百分率 [%単位]

ρ_v : 車両比重

$\rho_i(i=1\sim n)$: i 番めの車両構成材料の比重

計算方法

$W_i = \rho_i V_i = \phi_i W_o / 100$ であるから、ゆえに

$$V_i = (\phi_i W_o) / (100 \rho_i) \dots\dots\dots (2)$$

一方 $W_o = \rho_v V_o$ であるから

$$\rho_v = W_o / V_o$$

$$= 100 / \left\{ \sum_{i=1}^n (\phi_i / \rho_i) \right\} \dots\dots\dots (3)$$

[式(1), (2)による]

したがって、

車両比重 : ρ_v は、車両重量 : W_o に左右されずに、 ϕ_i, ρ_i によって決まる。

この式によれば、自動車の性能、機能、形状が異なっても比較が可能で、設計の優劣、工法の優劣もあわせて評価することが可能である。

表1 軽量化進行度を示す指標の長所短所

Indicator	Advantages and disadvantages
① Vehicle weight per projected area	<p>Advantages Easy to calculate for comparison. Cost effectiveness to calculate this specific gravity is good.</p> <p>Disadvantages Effective only for vehicles having the same functions & performance, and similar appearance. Limited to a 2D indicator.</p>
② Vehicle specific gravity in the physical sense	<p>Advantages Value of specific gravity in a physical sense can be obtained. Applicable to vehicles having different functions, performance and appearance. Specific gravity can be calculated experimentally.</p> <p>Disadvantages The larger the cabin and trunk room, the smaller the specific gravity. Difficult to measure a vehicle. Cost effectiveness to calculate this specific gravity is bad.</p>
③ Weighted average of specific gravity of constituent materials.	<p>Advantages Easy to calculate specific gravity of each material Applicable to vehicles having different functions, performance and appearance. Weighted average of specific gravity can be calculated.</p> <p>Disadvantages Require many manhours to determine each material mix percentage and its specific gravity. Cost effectiveness to calculate this specific gravity is medium.</p>

この車両比重の考え方は、当然のことながら自動車のみならず、航空機、鉄道車両、船舶などの交通・運輸機械一般に適用される。

3. 軽量化進行度の実態

3・1 車両比重計算方法と結果 軽量化の進行度を見るため、式(3)を用いて車両比重を求める。これ

表 2 国産普通・小型乗用車の原材料推移

			Material specific gravity	1973	1977	1980	1983	1986	1989	1992	
Steel stock	Pig iron	Pig iron	7.40	3.2	3.2	2.8	2.2	1.7	1.7	2.1	
	General steel stock	Steel rod	7.86	1.2	1.0	1.0	0.9	0.9	0.8	0.8	
		Hot rolled sheet	7.86	6.9	7.1	6.9	7.6	7.1	6.3	8.5	
		Hot rolled light plate	7.86	7.5	7.2	5.9	5.7	4.7	4.8	3.6	
		Hot rolled heavy plate	7.86	0.2	0.5	0.8	0.6	0.4	0.4	0.3	
		Cold rolled sheet	7.86	38.9	37.9	33.8	29.4	26.0	22.5	15.0	
		High tensile strength steel sheet	7.86	—	0.5	1.4	4.1	7.3	6.4	3.9	
		Zinc plated steel sheet	7.86	} 1.6	3.8	5.7	5.5	5.4	10.0	14.8	
		Other surface treated steel sheet	7.86		0.6	1.5	2.3	2.8	2.9	5.4	
		Steel tube	7.86		2.3	2.2	2.3	2.3	2.7	2.4	2.0
		Other general	7.86	1.8	0.8	1.2	1.1	0.4	0.4	0.6	
	Total		—	60.4	61.6	60.5	59.5	57.7	56.9	54.9	
	Special steel stock	Carbon steel	7.86	7.9	6.8	6.1	6.0	6.1	6.0	5.8	
		Alloy steel	7.86	5.6	4.6	3.8	3.6	3.4	3.5	3.7	
		Free cutting steel	7.86	—	0.7	1.0	1.0	1.4	1.9	2.1	
		Stainless & heat resistant steel	7.86	0.4	0.9	0.9	0.9	1.0	1.0	1.4	
		Spring steel	7.86	2.2	2.0	1.5	1.5	1.5	1.4	1.3	
		Bearing steel	7.86	—	0.9	0.9	0.9	0.9	0.7	0.6	
		Other bearing steel	7.86	1.4	0.2	0.5	0.4	0.7	0.6	0.4	
	Total		—	17.5	16.1	14.7	14.3	15.0	15.1	15.3	
	Non-ferrous metals	Total		—	81.1	80.9	78	76	74.4	73.7	72.3
		Electric copper	8.96	1.0	0.9	0.8	0.9	1.0	1.3	1.0	
		Lead ingot	11.36	0.6	0.6	0.8	0.6	0.6	0.6	0.5	
		Zinc ingot	7.13	0.5	0.5	0.3	0.4	0.4	0.4	0.3	
		Aluminum ingot	2.70	2.8	2.6	3.3	3.5	3.9	4.9	6.0	
		Other non-ferrous	2.10	0.1	0.1	0.4	0.2	0.2	0.2	0.2	
		Total		—	5.0	4.7	5.6	5.6	6.1	7.4	8.0
Non-metals	Phenol resin	1.85	0.1	0.1	0.1	0.2	0.1	0.1	0.1		
	Polyurethane resin	1.20	0.5	0.5	0.8	0.9	1.2	1.0	1.1		
	Polyvinyl chloride resin	1.45	0.9	1.1	1.4	1.7	1.7	1.6	1.1		
	Polyethylene resin	0.97	0.2	0.2	0.3	0.4	0.5	0.4	0.3		
	Polypropylene resin	1.03	0.5	0.5	0.9	1.2	2.0	2.4	2.5		
	ABS resin	1.06	0.4	0.7	0.5	0.5	0.7	0.8	0.7		
	Other synthetic resins	1.53	0.3	0.4	0.7	0.6	0.4	0.3	0.4		
	(Total of general resins)	—	2.9	3.5	4.7	5.5	6.6	6.6	6.2		
	(Total of high performance resins)	1.30	—	—	—	0.2	0.7	0.9	1.1		
	[Total of synthetic resins]		—	2.9	3.5	4.7	5.7	7.3	7.5	7.3	
	Paint	1.32	2.1	1.6	1.8	1.7	1.7	1.4	1.5		
	Rubber	1.35	4.8	4.3	3.7	3.5	3.0	2.7	3.1		
	Glass	2.70	2.8	2.7	3.1	3.2	3.3	3.0	2.8		
	Fiber	1.38	—	0.7	1.2	1.3	1.4	1.2	1.2		
	Wood	0.95	—	—	0.2	0.3	0.5	0.4	0.4		
	Others	1.20	1.3	1.6	1.7	2.7	2.3	2.7	3.4		
	Total		—	13.9	14.4	16.4	18.4	19.5	18.9	19.7	
Grand total		—	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0		
Vehicle specific gravity		—	4.70	4.63	4.33	4.08	3.91	3.90	3.77		

には車両の材料構成が必要であるが、ここでは日本自動車工業会が1973年から3～4年ごとに調査した「普通・小型乗用車の原材料推移」を用いる。表2にはこれに各構成材料の比重と車両比重の計算結果を加えたものである。ここで新たに加えた車両構成材料の比重は機械工学便覧に基本的によったが、次の構成材料については、以下の仮定を用い算出した。

① 非鉄金属中の「その他非鉄金属」はマグネシウム、アンチモニー、コバルト、白金、ロジウム、錫地金、ニッケル地金などで構成されるものとし、車両への適用実態を考え、2.10とした。

② 合成樹脂中の「その他の合成樹脂」は、AS樹脂、ポリスチレン、エポキシ樹脂、メラミン樹脂、などで構成されるものとし、車両への適用実態を考え、1.53とした。

③ 非金属の「その他」は、オイルフィルタ・エアフィルタ用のろ紙、スポットウエルド用シール、ボディシール・ウインドシール等の各種シール、防振用のアスファルトシート、各種接着材、ガスケット等を使用するコルク、ステアリングホイール用の皮革、エンジン・ブレーキ・オートマチックトランスミッション・パワーステアリング等の各種油類、不凍液、ウインドウワッシャ液、グリース等で構成されるものとし、車両への適用実態を考え、1.20とした。

3・2 車両比重の減少と原因分析 図3の中段グラフに示されるように、1973年の初回の調査では車両比重は4.70であったものが、二度にわたる石油危機を契機とする軽量化の推進で、年々着実に車両比重を下げてきた。その結果1980年では、4.33となり、約8%比重が軽くなっている。身近な金属元素との対比で

いえば、その時点で既にタイヤも窓ガラスも残りのものすべてをチタニウム製と仮想した文字どおりのオールチタニウム車両より軽くなっている。その後、1986年車までどんどん軽くなり、1986年車は約3.91となり約17%(1973年比)軽くなった後、1989年は3.90とほとんど横ばい状態が続いてきたが、1992年では約3.77とわずかながら軽くなっている。この微減は軽量材料であるアルミニウム抜きには難しかったことが示される。中身をよく分析すると、1989年車に比べて軽量材料である合成樹脂材料は微かに減少(−0.2%)する中で、鉄鋼使用の減少(−1.4%)に加えて、アルミニウム使用の増大(+1.1%)が主原因となっていることが(3)の車両比重の式から明らかである。

一般に車両の軽量化技術は設計技術、材料技術および工法技術が融合した形で構成されと考えられる。前述のように車両比重が減少している技術的な根拠としては、次のような要因を上げることができる。

まず設計技術面では有限要素法などを駆使した構造解析により最適設計を行うことにより部品の小形化、薄肉化、駄肉取り、中空化、一体化および新構造化などが広範囲にわたり積極的に進められたことである。これに加え、車両重量の4%程度の軽量化がはかられる前輪駆動方式の採用が上げられる。この場合車両重量の減少は、車両の等機能等性能を前提とすると、例えばプロペラシャフト系の重量削減にみられるように、おおむね比重の高い鉄鋼材料の減少となる。その結果車両としてみた場合、相対的に鉄鋼材料の使用が減少し車両比重が小さくなる。図3⁽³⁾の下段グラフに前輪駆動車の普及と車両比重の低減との関係を示す。

材料技術面からは、工法技術の研究開発と相まって、比強度、比剛性の低い材料からより高い材料、すなわちアルミニウム、合成樹脂と高張力鋼板といったいわゆる三主要軽量材料への転換が挙げられる。表2から作成される三主要軽量材料の占有率の推移を、図3上段のグラフで分析すると、高張力鋼板は1973年から増加傾向となったが、1986年に頭打ちとなった後減少に転じ、合成樹脂材料は1989年に頭打ちとなりその後は横ばいとなっている。1989年以降も増加傾向にあるのはアルミニウムだけである。これらの現象から車両比重が1986年から1989年にわたって横ばい、1992年では微減となる要因が裏づけられる。

車両軽量化の将来を考えると、現在の車両比重は3.77で既に鉄鋼材料の半分以上となっている。今後車両の新設部品を設計するに当たり、既存部品の材料は変えないと仮定すると、比重が3.77以上の材料を使用する場合には、一般に車両比重を押しあげることに

図3 国産乗用車の車両比重の変化と原因

なる。

3・3 車両比重と部品比重との関係 一つの例として国産乗用車のバンパ表皮についていえば図4⁽⁴⁾に示すように、1970年代から1980年代にかけて鋼板からの樹脂材料へ転換が急激に進んでいる。部品比重の観点から見ると、図5に示すように急速に小さくなっている。

他の部品はこれほど急激に軽くはなっていないが、概括的にいえば、高分子基複合材料を含む樹脂化が進行している内装系、外装系部品は比重が最も低く、次いでアルミニウム化・樹脂化も一部進行しているエンジン系、パワートレイン系、サスペンション系部品の比重が低く、アルミニウム化・樹脂化が散見されるものの、大半が鉄鋼材料で構成されている車体の比重が最も高い状態となっている。それゆえ、今後の軽量化を考える場合、この逆の順番に軽量化ポテンシャルをより多く残しているといえる。

3・4 車両比重と燃料消費率との関係 図6から1973年から車両の軽量化の進行は継続しているのが

図4 国産乗用車のバンパ表皮材料の変化

図5 国産乗用車の車両比重と部品比重の変化

見られる。また国産乗用車の10モード燃料消費量(以下燃費)を同じ横軸上にプロットすると1982年がピークとなり、その後は低下の一途をたどっている。

その結果図6の両直線から、1982年までは軽量化も進行し、燃費も向上していたが、1982年以降は車両の多機能化、高性能化の進行に押され車両重量自体が増加し、純粋な燃費技術とこれに軽量化技術を加えた燃費向上技術で、燃費の低下に歯止めをかけようとしても、かけられない状況を呈している。

3・5 車両比重と航空機比重との比較 他の交通機関として軽量化が自動車より先行している航空機(一般的な航空機の例としてボーイング社の旅客機)との比較を行う。その他軽量車両としては、ホンダNSX、トヨタのAXV-IVと日産のソーラカーSUN FAVORを取り上げる。それぞれの車両材料構成百分率は図7⁽⁵⁾⁽⁶⁾および文献⁽⁷⁾による。

図8から1992年の普通・小型乗用車の車両比重は、

図6 国産乗用車の燃料消費率と車両比重

図7 乗用車の材料構成

図8 国産乗用車の車両比重と航空機比重

ボーイング社の B 747 ジャンボ旅客機比重に比べると 1 程度の大きな開きがある。乗用車の中では、アルミニウム車体を搭載し軽量化を促進した NSX でも、いまだ B 747 ジャンボ旅客機比重より高いのが実態である。ところがアルミニウム主体の材料構成となっている AXV-IV では、ボーイング社の各旅客機比重より軽くなっており、炭素繊維強化樹脂、アラミド繊維強化樹脂といった先進高分子基複合材料を主体として構成されている SUN FAVOR では、さらにいちだんと軽くなっている。

将来、車両の航空機並の大幅な軽量化をはかる場合には、軽量材料の適用が必須と考えられる。その際問題となる点は材料価格であり、アルミニウムを代表とする軽量材料は鉄鋼材料に比べ高価で、現在は使用部位が限られていることである。車両の大幅な軽量化の実践に際し、今後機能・性能と構成材料原価のバランスを取ることが、切実な課題⁽⁸⁾となっている。

4. 結 論

以上の考察から次の結論が導かれる。

(1) 国産普通・小型乗用車の車両比重は、車両比重にして、ここ 19 年間で 4.70 から 3.77 まで比率にすると約 20% 減少し、この値は鉄鋼材料比重の半分以下の値に達している。

(2) 現行の鉄鋼主体の材料構成を前提とする場

合、国産普通・小型乗用車の軽量化はほぼ限界に近ずいており、将来小幅な軽量化しか期待されない。将来大幅な軽量化を指向する場合には、構成材料はアルミニウムなどの軽量材料に転換することが必要となる。

(3) 国産普通・小型乗用車の軽量化は進行しているが、多機能化・高性能化の波に押され車両重量自体は増加が見られ、1982 年頃から燃費向上に対する軽量化の貢献はあるが、その度合は少なくなっている。

(4) 本報で言及した各種軽量車両およびジェット旅客機は、今後乗用車の軽量化技術の研究開発を進めるに当たり、その方向性を示している。

本報をまとめるにあたり、有益な助言と資料の提供をいただいた関係者に深甚なる謝意を表する。

文 献

- (1) 栗原・千葉, 自動車技術, 43-7 (1989), 51.
- (2) 斉藤・渡部, 鉄鋼界, 41-9 (1991-9), 25.
- (3) 日産自動車(株)調査部編, 自動車産業ハンドブック, (1993), 358.
- (4) 栗原, 機械の研究, 40-4 (1988-4), 351.
- (5) 伊東, アルトピア, (1990-11).
- (6) トヨタ自動車(株), 第 29 回東京モーターショー広報資料, (1991-11).
- (7) Hyatt, M. V. and Axtar, S. E., RASELM'91, (1991), 273.
- (8) Kurihara, Y., J. Minerals Metals & Mat. Soc., 46-5 (1994), 12.