

© 1983 ISIJ

自動車省エネルギー化のための材料



新 美 格*

Materials for Energy Saving of Automobile

Itaru NIMI

1. 緒 言

近年自動車の普及にともない、その消費するエネルギーが量的にもとくに制約のある石油を主とするものであるため省エネルギーの配慮なくしては自動車は成り立たなくなつてきている。そして自動車材料も省エネルギーの立場から見なおさなければならなくなつており、また新材料もこの観点からの開発が望まれている。そこでまず自動車のエネルギー事情を述べ、自動車のエネルギー消費を低減する方策の中で、とくに材料が関与する事項についてそのニーズとその対応策を述べることにする。

2. 自動車のエネルギーとその背景

2.1 自動車のエネルギー

自動車の輸送エネルギーは全国総エネルギー消費の14.1%¹⁾で欧米先進国に比して低い、それにしても消費量は大きい。ただし、これは実際使用時の輸送用のエネルギーの消費で、資源から原材料にするエネルギー、いわゆる材料エネルギーと加工して自動車にする製造エネルギーは含まれていない。そこで自動車一生のエネルギーすなわち材料エネルギー、製造エネルギーおよび使用エネルギー(走行エネルギー)の総和について見ると、図1のようになる。この図から分かるように生涯エネルギーの80%以上は、ガソリンなどの石油燃料が大部分を占める走行エネルギーであることが分かる。ただし10数%は材料および製造のエネルギーであることも、これからのエネルギー対策には十分考慮しなければならぬことである。さらに、全石油消費に占める自動車の石油消費量の割合は欧米諸国と比べて小さいとは言え15.7%で、全消費量にたいしてその比重は高い。しかもこれを1978年のそれと²⁾比べると各国ともその比率は増加しているのである。

2.2 最近の石油情勢

自動車の石油消費シェアは以上の通りであるが、一方石油消費はオイルショック以降増加したものの、1980年以降大幅に減少しており³⁾、それを反映して石油生産も減少している⁴⁾。そして景気が落ちこむ一方省エネ

ギーが進んでいる。さらに石油代替エネルギーへの転換は進み石油依存はしだいに低下することが予想されている⁵⁾⁶⁾。

2.3 自動車の台当たり石油消費量

図2⁷⁾は自動車1台当たりの石油消費量を示し、1980年に消費された石油は日本車は台当たり1tで、欧米諸国に比べると少ない。燃費規制を明確にしているのは米国で図3に示すような数値で、これを満たさない場合罰金が課せられることになっている。また我が国でも表1の⁸⁾ような目標値が示されており、これまで図4⁹⁾のような経過をたどつて燃費向上がはかられている。

3. 自動車の燃費低減方策

自動車燃費低減には、自動車の構造、装置の改善、自動車の運転、使用方法の改善、交通環境(道路)の改善、あるいは輸送構造の改善などの方策が考えられる。ここではとくに材料に関係のある自動車の構造、装置の改善を中心に述べることにする。

3.1 車輛重量の軽減

構造、装置の改善のうち、効果が全体の49%と見られるこの方策は、もつとも燃費低減に効果がある。重量軽減は、主として(1)車輛の小型化、FF化(2)軽量材料(3)その他部品数、大きさの減少、軽量化がある。

3.1.1 小型化、FF化

車輛の小型化はとくに従来大型車生産に主力をおいた

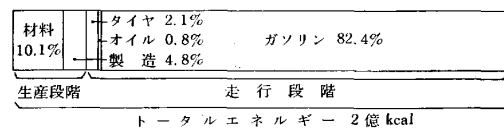


図1 自動車の生涯エネルギー消費(1979年)

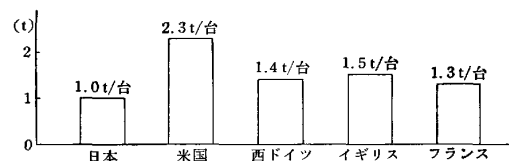


図2 自動車1台当たりの石油消費量(1980)

昭和57年10月29日受付(Received Oct. 29, 1982)(依頼解説)

* 豊田工業大学 工博 (Toyota Technological Institute, 2-12-1 Hisakata Tempaku-ku Nagoya 468)

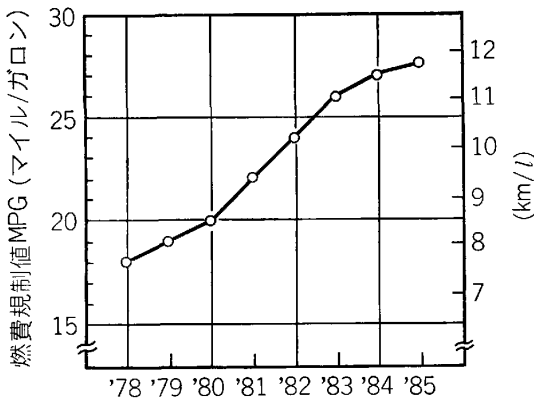


図 3 米国の自動車燃費規制値

表 1 日本の燃費目標値

事項 区分	車両重量 (kgf)	目標値 (km/l)	昭和53年度平均 燃料消費率 (km/l)	対 53 年度 向上率(%)
A	577.5 kg 以下	19.8	18.6	6.5
B	577.5 kg 以上 827.5 kg 以下	16.0	14.4	11.1
C	827.5 kg 以上 1 265.5 kg 以下	12.5	11.1	12.6
D	1 265.5 kg 以上 2 015.5 kg 以下	8.5	7.6	11.8
総合平均		12.8	11.4	12.3

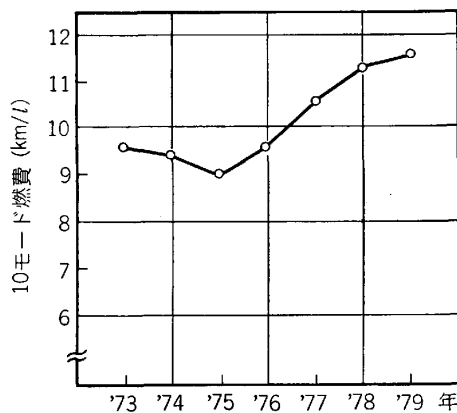


図 4 年度別 10 モード燃費推移

米国車にその傾向が著しい。図 5¹⁰⁾に車輛重量と燃費の関係を示す。軽量の小型車ほど重量軽減の効果が大きい。前輪駆動車(FF車)はエンジン、トランスミッション、ディファレンシャルなどがすべてエンジンルーム内にまとめられるため、トランスアクスルなどの重量が軽くなるし、また後部車体構造の自由度が大きくなり、小型車の割には室内スペースを広く確保できる利点があるため、今後増加する傾向がある(図 6¹¹⁾)。この FF 方式では前輪が駆動しながら方向変換をすることになるので、エンジンの回転トルクがスムーズに前輪に働くよう等速ジョイントを必要とするが、これには精度の高い加工技術を必要とするため、その材料、加工、熱処理などに研究の余地がある。

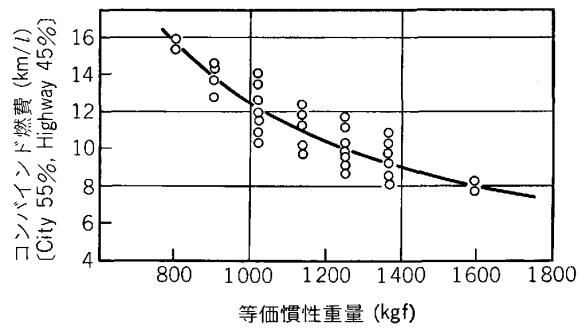


図 5 車両重量と燃費

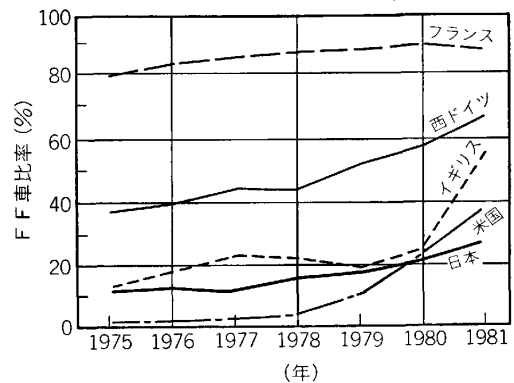


図 6 乗用車の販売台数に占める FF 車比率の推移

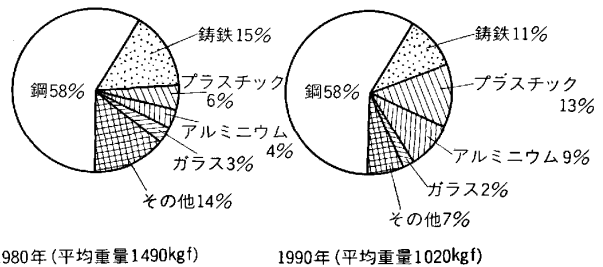


図 7 自動車の材料構成の予測

3.1.2 軽量材料の使用

従来、自動車の燃費改善のためにもっとも効果的な方法の一つとして軽量材料の使用推進がはかられて来た。軽量材料としては図 7¹²⁾に示すようにプラスチック、アルミニウムの著増が予想される。鉄系材料はその密度が大であることから減少する傾向にあると考えられている。しかし比較的成本が低く扱いやすいこともあり、铸铁材料が減少傾向にあることについては意見が一致するが、鋼材料が増減いずれに向かうか不明である。これは、高強度鋼板の使用量いかににかかっていると見られる。高強度鋼板はその加工方法のむずかしさや設計のむずかしさからして、決して展開は容易ではないが、原価的に安価であり、また従来扱いたなれた工程を主体に展開できるので、この数年急激に使用量のシェアを伸ばしてきている(図 8)。高強度鋼板の鋼種別使用量の一例を表 2 に示す。またプレス・溶接工程を完了し、ボディ

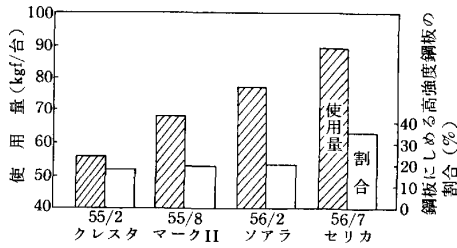


図 8 乗用車の高強度鋼板採用状況

表 2 高強度鋼板採用状況 (セリカリフトバックの例)

ボデー部品		鋼種 kgf/mm ²	重量 kgf
ボデー外板	フード, ドア	35	18.6
ボデー内板	フロントサイドメンバ リヤフロアサイドメンバ他	38~50	33.2
バンパ関係	バンパリインホース アーム他	45~60	22.7
シート関係	フロントシートクッションフレーム リクライニングアジャスタ他	35~45	4.9
排気管関係	エキゾーストパイプサポートブラケット	45	0.1
計			79.5

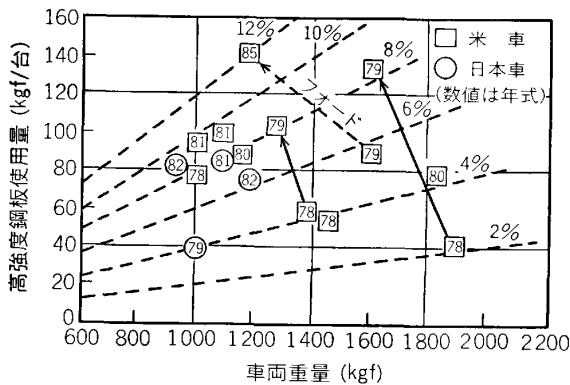


図 9 高強度鋼板の使用量

の塗装工程で最高 170°C の熱履歴を経る間に時効硬化するペークハードニング鋼板なども興味ある材料といえる。図 9 は高強度鋼板の一般的使用量を示したものである。図 10, 11 はそれぞれプラスチック, アルミニウムの使用量を示したものである。

3.1.3 部品の軽量化

部品の軽量化では、まずシリンダ・ブロックをあげるべきであろう。これは従来の鋳鉄品を薄肉にする方向のくふうである。シリンダ・ブロックの軽量化としては、アルミニウムに鉄系材料のスリーブをインサートする方法が従来とられているが、これはコスト高である。一方過共晶ケイ素アルミニウム合金鋳物で、スリーブなしのブロックが一部使用されているが現在のところごく一部に限られており、当面鋳鉄ブロックの薄肉化が効果を生んでいる。図 12¹³⁾ に薄肉, コンパクト化による重量軽

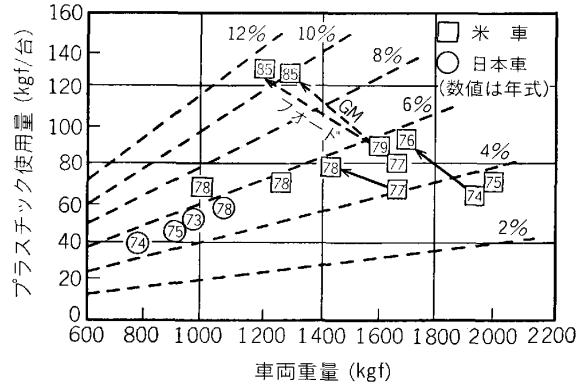
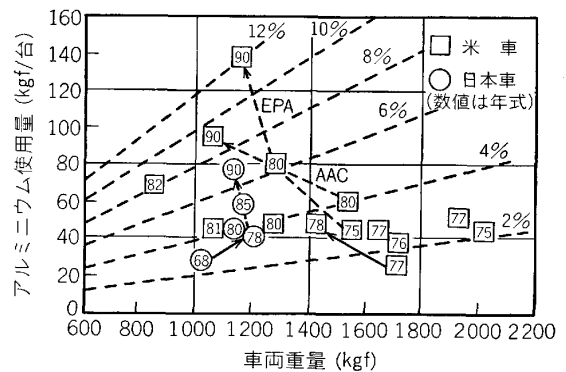


図 10 プラスチックの使用量



EPA=U.S.Environmental Protection Agency
AAC=Arther Anderson Co.

図 11 アルミニウムの使用量

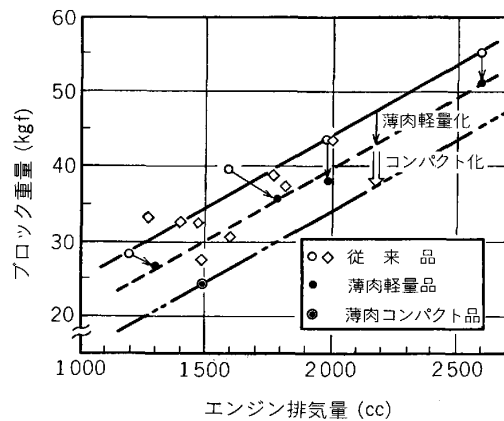


図 12 エンジン排気量に対するブロック重量

減傾向を示す。この効果は精密な鋳造技術と、エンジン設計の集約により達成されるものである。クランクシャフトは小型になれば鋼より鋳鉄に変更可能であり、さらに中空化により一層軽くすることができる (図 13)。また従来は鋳鉄チルのカムシャフトも鉄パイプ、焼結合金カム接合による軸の中中空化による軽量化をはかつた例がある (図 14)。従来鋼鍛造品のエンジンピストンのコネクティングロッドも鉄系の焼結鍛造により、寸法精度向上により重量選別工程の排除をかねて軽量化が可能にな

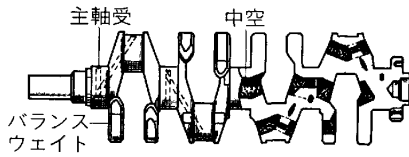


図13 中空クランクシャフト



図14 焼結接合カムシャフト

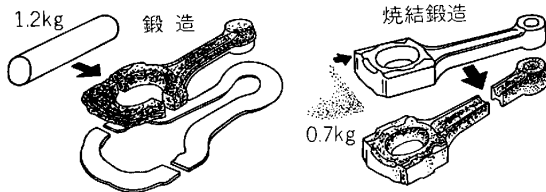


図15 焼結鍛造コンロッド

っている (図 15)。またバネ鋼のリーフスプリングを FRP 材に変えて軽量化をはかった例がある。このような例は数多くあるが、いずれもまず信頼性の確保と、次いでコスト問題の解決が必要である。そしてこれは材料と加工技術の両面にわたって、より一層の開発により推進されるものである。それには新しい材料の開発に関連して、従来の加工技術の見直しと、さらにその複合化技術の開発、展開が必要であろう。

3.2 走行抵抗の低減

車輻重量も走行抵抗の主要な因子であるが、この他にころがり抵抗、空気抵抗の低減および動力伝達系の改善がある。これらは燃費低減効果の 30% を占めると考えられる。

タイヤのころがり抵抗^{14)~18)}の低減のためにはラジアルタイヤへの切り替えがあり、材質上タイヤコードの開発がある。またゴム材質としても反発係数の大きいものが望まれる。高弾性材料の開発により、タイヤの薄肉化がはかられ、タイヤ自身の軽量化ができる。また軽量化ができ、ヒステリシス損失が少なく、燃費低減に効果のあるプラスチック射出成形タイヤの開発も可能性がある。

3.3 エンジンの熱効率改善

3.3.1 混合気の希薄化、給気の高速度

大気汚染にたいする対策として、車の排ガス浄化を行うが、とくに NOx 低減のため排ガスの一部を燃焼室へ還流する EGR 装置を採用する場合や、HC、CO 低減のために希薄混合気方式をとった場合、安定した着火燃焼を行わせて燃費を改善しなければならない。燃焼安定化のためには副室やバルブ数増加、点火プラグ数の増加などの新しい方式がとられている。これら部品の材質はより耐熱性の高いものが必要とされる。副室には 18-8

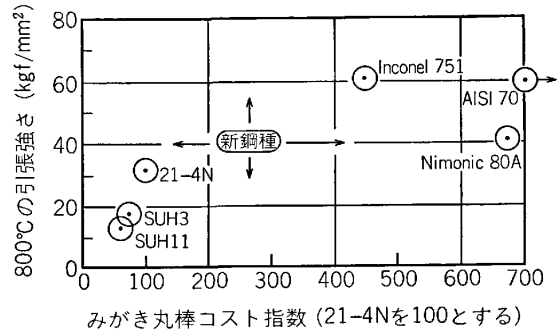


図16 バルブ鋼の現状と期待

系のステンレス鋼から超合金に至る各種材料が使われる。またプラグには白金チップを溶接したものもある。

3.3.2 高圧縮比、空燃費、点火時期制御の向上

高圧縮比化により、温度は上昇するため、排気バルブは従来の 21-4N 系鋼より高温強度が高く、超合金よりは安価な材料が必要となりつつある (図 16)。また空燃費、点火時期制御の精度を向上するため排気中の酸素量を連続計測する酸素センサーは今や重要なセラミック材料の新分野として普及されるに至った。このセラミックスは $ZrO_2-Y_2O_3$ 系が主であるが、作動温度として 900°C を考える必要があり、耐久性とコストの点でさらに材料の開発に期待したいものである¹⁹⁾²⁰⁾。またノッキング対策のため、とくにセラミックノックセンサーなどの利用も考えられており、その他各種センサー用セラミックス材の開発が望まれる²¹⁾²²⁾。ディーゼルエンジンのピストンのように熱負荷が大きく、ピストンリングの溝摩擦発生といった現象に対応して、アルミニウム合金ピストンの一部にセラミックファイバーを含有する合金を鋳ぐるんだものが使用され始めた²³⁾。

3.3.3 摩擦損失の減少

ピストンリングの薄肉化、クランクシャフトのジャーナルの小径化などによる、各部品の負荷増大にたいする材質的配慮が必要となつている。また低摩擦化、低粘度化の方向の低燃費潤滑油も排ガス用触媒に毒作用のないものが開発されている²⁴⁾。

3.3.4 ターボチャージャの展開

ターボ過給によつてエンジンに多量の空気を送り込むことにより、出力を上げ、相対的にエンジンの小型化をはかることができる。またこれをマッチングさせれば燃費の改善、排気公害対策にも効果が大きい。塔載車輛数も多く、低価格、高品質が要求される。とくに材質上はその作動温度が 900°C をこえることもあつて、タービン翼車、ケーシング、遮熱板などの耐熱性が要求される。また負荷変動にたいする熱応力、熱疲労、高温腐食などについても要求は厳しい。タービン翼車の材料は 713C などのニッケル基超耐熱合金である。タービンケーシングは、ディーゼルエンジンではダクタイル鋳鉄

が、また温度の高いガソリンエンジンでは高シリコンダクタイル鋳鉄またはニレジストダクタイル鋳鉄が使われる²⁵⁾²⁶⁾。将来セラミックスが使用されることも期待されるが、この場合脆い材料としての設計法、現在問題となっている物性のばらつきの少ない材料の開発など、技術面の進歩と同時にコストや加工面でのくふうが必要である。機構の変更に伴い材料物性への要求はさらに多様化するものと思われる。

3.3.5 排気浄化触媒の品質・コストの改善

排気規制対策には、触媒の使用は不可欠となつている。触媒には貴金属の白金、パラジウム、ロジウムが使用され、また担体には高強度遷移アルミナが使用される。モノリス担体にはコーディライト ($2\text{MgO} \cdot 2\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{SiO}_2$) が耐熱性の良いこと、熱膨脹係数が小さい点で使用されている。貴金属は資源的な事情もあり、また潤滑油中の極圧添加剤のリン化合物は触媒および酸素センサーに毒作用があり問題である²⁷⁾。貴金属以外の安価な触媒の開発が望まれる。

3.3.6 エンジン部品の断熱化

排気浄化の反応促進のために排ガスの温度低下を防ぐ目的で、排気経路の断熱保温にセラミックスを金属に鋳ぐるむ方法が時によりとられている²⁸⁾。また本来ディーゼルエンジンはガソリンエンジンに比べ、熱効率が大きく、低燃費、長寿命のため近年小型乗用車にも広く使用されるようになった。時代の要求はさらに熱効率向上となり、燃焼室を中心としたセラミック断熱のエンジンへの期待が高まっている^{29)~31)}。現在これに使用する材料は、窒化ケイ素、炭化ケイ素などで、とくに窒化ケイ素は熱膨脹係数が小さいこと、高温強度が高く、熱伝導度が低くて耐熱衝撃性が良い点から多く検討されている。ただし現在のところ品質保証上の問題があり、今後材料強度のばらつきの減少、非破壊検査技術の確立が望まれる。

3.3.7 将来のエンジン

自動車の原動機の今後の推移は、オートエンジンが主たる地位を保ちながら、またディーゼルエンジンの漸増に加えて成層吸気が、さらにガスタービンと電気が少量ながら一般に使用されることになるものと思われる。この他にランキンエンジン、スターリングエンジンなどがあり、またディーゼルエンジンのターボコンパウンドエンジンのようなコンパウンドエンジン、ハイブリッドエンジンや排気量可変エンジンのような機能をさらに付加したエンジンもある。この中でガスタービンエンジンはもつとも広く検討されているものである。これは燃料の選択が比較的容易であることから期待したいが、小型化にあたり効率の低下があるので、燃焼温度を高くする必要があり、最近では $1,300^\circ\text{C}$ の温度が問題となつている。この温度ではセラミックス以外には材料的に見込みは薄くなる。窒化ケイ素、炭化ケイ素などが対象材

料となつているが、セラミックスがこのような部品に使用されるためにはまだ高温強度、熱衝撃性に信頼性が低く、またコストも高すぎる。これらの欠点の改善のため原材料およびその成形加工法の改善開発が強く望まれる。またガスタービンの高温材料とは別に高速回転用のベアリングなど、特別の部品の材料が必要となり、その加工技術の開発も併せて、実用化には多くの検討が必要である。電気自動車はコストの面でも走行性能の面でも現状では内燃レシプロエンジンより不利であるが、限定された用途では十分にその実用性を発揮することができる³²⁾。これには軽量、高効率、長寿命の電池の開発が望まれる。ランキンエンジンは、低速トルクが大きく、低負荷時に燃料消費の増加も少ないので、発進停止の多い都市内走行のような場合はとくによく、高温高圧化して熱効率の改良をはかれば有望である。これには作動流体の蒸気発生機、エキスパンダー、フィードポンプなどに適当な高温材料の開発が必要である³³⁾。

3.4 動力伝達系の燃費改善—無段変速機 (CVT)³⁴⁾³⁵⁾

エンジンの熱効率のできるだけ高い条件で運転できるようにするには、変速機の段数を増し無段変速にすればよい。これは加速だけでなく定常走行においても有効である。これには大別してベルト式とトラクションドライブ式とがある。ベルト式では、ベルト材はゴムよりも金属の方がその引張強度が大きいので大トルク伝達にも適当である。金属製ベルトはチェーン式にくらべてピッチ円径も小さくでき小型化には都合がよい、Van Doorne³⁶⁾ のものは 0.2mm 厚のマルエージング鋼帯を $10\sim 14$ 枚重ねたものを使用している。トラクションドライブ式はいわば摩擦駆動というべきもので、本来潤滑機能を期待している油を介して動力伝達が行われる。これは加圧によつて油が固化する温度 (転位温度) が上昇する現象が、高圧下でごく短時間で発生し、圧力が低くなると再び液体になることを利用したもので、このときの油のせん断抵抗の大きさには油の粘度による影響は少ない。このような油剤の開発もまた興味ある問題である。

3.5 代替燃料

石油の資源事情と排気エミッションの対策から、石油の代替燃料が検討されている。原料は植物、石炭、オイルシエル、オイルサンド、天然ガスなどで、これからえられるエタノール、メタノールおよびメタノールとイソブチレンとの反応で合成される MTBE (メチルターシャリーブチルエーテル) などは液体燃料として現在ガソリンに混合して使用されている国もある。このうち、トウモロコシからえられるエタノールを 10% ガソリンに混合したものが米国では GASOHOL として販売されている。この他合成ガスからえられるガソリン合成燃料の気体燃料として水素燃料がある³⁷⁾。これらの燃料に切り替えた場合の装置材料に及ぼす影響はまだ十分に把握されていないが、メタノール燃料³⁸⁾、エタノール混合ガソ

リン³⁸⁾、メタノール混合ガソリン⁴⁰⁾などは金属材料に錆、プラスチックに強度低下、重量変化、ゴム材料に膨潤による体積増加と強度低下が起こることがみとめられている。例えばメタノールの場合、燃料タンクのターンシートが溶解し、キャブレタジェットのとまりなどを起こし、またアルミニウムの腐食、銅の錆、亜鉛めつき層の腐食やエポキシ系接着剤の硬化、ナイロンの変形、フッ素ゴムの膨潤が起こる。これらは材料の選択、材質の改善が必要であることを知らしめる。水素燃料は MH すなわちメタルハイドライドとして車輛に搭載するものと、LH₂ すなわち液体水素として搭載するものの二方式がある。MH としては現在低温型と高温型とがあり、低温型の FeTiHx が有望とされている。数 mm の粒塊とし、多数のパイプに詰め、パイプのすきまに冷水または温水や排気を通して熱交換して水素の出し入れを行うものである。高温型は Mg₂NiHx で 573K 程度の高温で水素の出し入れを行う。これらの低温、高温両型の MH の組み合わせで、車室内の冷暖房が有効にできる。MH そのもののコスト低減と耐久性向上が問題である。LH₂ では低コスト、高断熱性タンクの開発が望まれる⁴¹⁾。

3.6 エレクトロニクス化による燃費低減

エンジンの熱効率改善の項で一部述べたように、各種センサーとマイコンの応用による肌目細かい計測制御が可能となり、車輛のエレクトロニクス部品搭載は車輛価格に大きく影響するようになってきている。これは点火、燃料、スピード、エンジンのコントロール、安全快適性などの広範囲の領域に展開するものと見られる。そして(1)電子技術の適用をより拡大し省燃費をはかる。(2)外部情報の直接取り込みにより能率的運行をはかる。(3)この電子技術を通してこれまで自動車分野では用いられなかつた新しい技術シードが活用されるようになる⁴²⁾。この方面の材料のシードは急速に拡大し、今のところ予想もつかないほど数多くの分野からえられるものである。

4. 材料エネルギーと製造エネルギー

以上自動車の走行時のエネルギーの節約に関連する事項を述べた。次に自動車の材料・製造エネルギーについて

表 3 日本の自動車工業における主要資材消費割合 (昭和 55 年)

品名	消費割合 (%)
アルミ	80
ゴアルミ	70
バ冷	60
ベ延	60
板アガ	37
延アガ	33
板熱	32
特殊	28
鋼	25
ブ	8
ラ	8
ス	
チ	
ック	

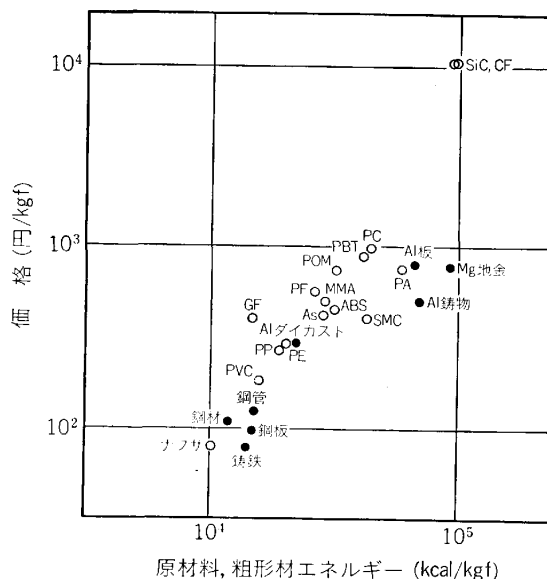


図17 原材料、粗形材 (製造) エネルギーと価格 (例)

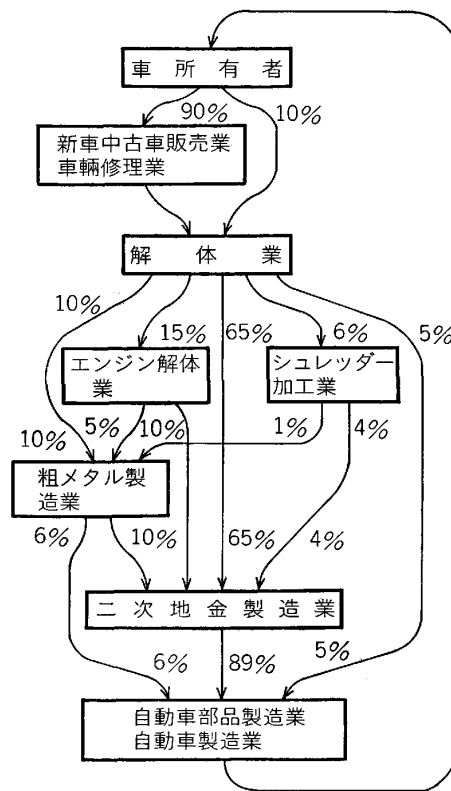


図18 廃車アルミニウムの再生経路

表 4 原材料の再生エネルギー

	鉄	プラスチック	アルミニウム	マグネシウム
原材料エネルギー (kcal/kgf)	4504	25020	51263	63940
再生エネルギー (kcal/kgf)	1658	—	1543	1593

て述べる。自動車工業で消費する材料をみると、表 3⁴³⁾ に示すように主要材料は我国産業の全消費量にたいしてかなりのシェアを占めている。当然材料エネルギーも、またその加工エネルギーも大きい。各種材料の材料エネルギーと価格との関係例を図 17 に示すが、このように材料エネルギーの大きいものほど価格も高く、エネルギーの低い材料を使用することが有利であることはいうまでもない。ところで、材料問題ではリサイクリングがある。非金属材料と金属材料の相異点はリサイクリングの難易の差である。金属材料はたとえばプラスチックやセラミックスと異なり再生が容易である。廃車のリサイクリングの例として、アルミニウムの場合を図 18⁴⁴⁾ に示す。このような金属材料は表 4⁴⁵⁾ に示すように、鉱石から還元するよりは一般に少ないエネルギーで再生ができるから、再生地金を主原材料とした部品製造を心掛けるべきである。現に自動車用アルミニウム鋳物はほとんど新塊を使用せず、再生地金のみで製造するようになった。

5. 自動車運行環境の省エネルギー施策

自動車そのものの省エネルギー方策とは別に、環境の改善がある。(1) 経済的な運転管理対策、これは経済的な走行性能に適合した運転をすることや、乗車効率、積車効率をあげることなどである。(2) 道路事情の改善、これは路面構造の改善やネットワークの最適化などである。(3) 輸送構造の改善、これには大量輸送機関の利用促進や新交通システムの推進などがある。いずれも自動車の省エネルギー上看過し難い問題で、このような変更改善により、車輛の構造、諸元が変わり、したがって構成材料もまた変わることも考えられるが、現在のところそれまでには至っていない。

6. 結 言

自動車をとりまくエネルギー事情を述べ、自動車の省エネルギーに関連する材料問題について述べた。記述にあたって、材料問題がきわめて広範囲にわたっていることが知られるよう配慮したため、かえつてまとまりのないものになった。このような広域性は自動車が省資源省エネルギーだけでなく、むしろこの足を引くような無公害、安全そして性能商品性向上といった諸特性を持ち、これに関連する材料および材料技術が数多くあり、これらの総和から省エネルギーの途が開かれねばならないことも一つの理由である。これらのニーズに適した新しい材料が発見され、低コストの加工技術が開発されて、より合理的な材料の使用が推進されることを期待したい。

おわりに本稿作成にあたり、数多くの資料を提供して頂いたトヨタ自動車株式会社の技術者の諸氏に感謝の意を表したい。

文 献

- 1) Energy Balances of OECD Countries (1980)
- 2) Energy Balances of OECD Countries (1978)
- 3) B. P 統計
- 4) Petroleum Interigence Weekly より集計
- 5) Exxon World Energy Outlook, 1980, Nov.
- 6) 総合エネルギー調査会, 需要部会, 1982, 4月
- 7) 自工会, B. P 統計
- 8) 通産省資料
- 9) 自工会試算, 加重平均
- 10) EPA 公表データ
- 11) 各国自工会資料
- 12) Arthur Anderson Co.
- 13) 葉袋親昭, 野村隆二, 内海 清, 原賀哲男: トヨタ技術, 28(1978)3, p. 202
- 14) 高橋道悦, 平井 勝, 岡本和雄: 自動車技術, 35(1981)3, p. 274
- 15) 上野一海: 自動車技術, 34(1980)10, p. 1059
- 16) 酒井秀男: 自動車技術, 35(1981)4, p. 419
- 17) J. E. MORGAN: SAE Paper 810133
- 18) 宮里昭男: 機械振興 (1982)6, p. 51
- 19) 内田 清, 大久保禄治, 河合満雄: トヨタ技術, 28(1978)1, p. 99
- 20) 神谷英夫, 大塚康弘, 松本伸一: トヨタ技術, 29(1979)3, p. 245
- 21) 豊田利一, 井上憲太: エレクトロニクス・セラミックス (1978) 秋, p. 9
- 22) 柴田良昌, 坂野久夫: 内燃機関, 21(1982)264, 7月, p. 57
- 23) トヨタ自動車ニュース (1982) 7月
- 24) 増永邦彦, 吉岡達夫: トヨタ技術, 29(1980)4, p. 475
- 25) 秋田 宏, 岡崎洋一郎: 自動車技術, 35(1981)3, p. 265
- 26) P. I. FONTAINE: SAE Paper 800016
- 27) F. CARACCILO: SAE Paper 790941
- 28) 小松康彦, 杉本繁利, 北川久善: トヨタ技術, 29(1980)4, p. 425
- 29) R. KAMO, W. BRZYK: SAE Paper 810070
- 30) 吉光利男, 外山浩介, 佐藤文秀, 山口寛昌: 内燃機関, 20(1981)249, 5月, p. 34
- 31) 中原義毅: 自動車技術, 36(1982)2, p. 114
- 32) 高橋祥夫: 自動車技術, 34(1980)4, p. 295
- 33) 海上次郎: 自動車技術, 34(1980)4, p. 367
- 34) 矢田恒二: 機械の研究, 34(1982)4, p. 457
- 35) 矢田恒二: 機械の研究, 34(1982)5, p. 577
- 36) D. SCOTT: Automobile Engineering, 88(1981)2, p. 136
- 37) 木村元雄, 土本皓二: 自動車技術, 34(1980)4, p. 375
- 38) Dept. of Energy(U. S. A.) Report, HCP/M2923-01, 1979.
- 39) D. J. BOLOGNA: SAE Paper 780920
- 40) 石渡正治, 金 栄吉, 杉本隆義: 自動車技術, 36(1982)4, p. 410
- 41) 古浜庄一: 自動車技術, 34(1980)4, p. 310
- 42) 林 洋: 機械振興 (1982) 6通, p. 28
- 43) 通産省他関係業界資料
- 44) 豊田通商資料
- 45) A. F. BAUER: Die Casting Engineers (1974) July-Aug. など