解 説

自動車用エンジン部品の最近の軽量化
材料技術について

吹沢一徳*, 松原敏彦*

Recent Materials for Weight Reduction of Gasoline
Engines

Kazunori Fukizawa and Toshihiko Matsubara

Synopsis

Weight reduction is a key technology in order to improve fuel economy and driving performance of automobiles.

Recently, requests for the automobile has been diversified, which are upper-class oriented taste, improvement of safety, noise attenuation and earth environmental problem etc.

These requests cause increase of weight of the automobile. Accordingly, the material technology to reduce weight becomes more and more important.

Furthermore, due to tightening CAFE regulation in the US and the Clean Air Act in California in 1990, it is forced to speed up the development of weight reduction technology.

In this paper, recent materials for weight reduction of gasoline engines are described.

1. は じ め に

自動車にとって軽量化は燃費の向上や動力性能向上のための基本技術である。これまで自動車各社はもちろんのこと、素材メーカーや加工メーカーとの緊密な連携のもとに軽量化のための研究開発が着実に展開されている。

しかし、自動車に対する要求は近年、より多様

化している。例えば自動車の高級化、安全性向上、騒音低減そして地球環境問題の急激な高まりなどが挙げられる。そして、このような動きの多くは自動車の重量増につながる技術を必要とする。そのため、ここ数年の自動車の燃費は図1に示すように重量増の分だけ低下しているのが実情であり¹⁾、軽量化要求は一層高まっている。

また、最近のアメリカにおけるブライアン法案を始めとするCAFE（企業平均燃費）規制強化の動きや、1990年にはカリフォルニア州でこれまでにない厳しい内容の大気浄化法が可決されるなど

1991年11月4日受付

*㈱本田技術研究所

図1 日本における乗用車の燃費の変化

表1 カリフォルニア州大気浄化法（1990年）

1) 低公害車の段階的導入の義務化

NMOG規制値 Model year	0.39	0.25	0.125 (TLEV)	0.075 (LEV)	0.040 (ULEV)	0 (ZEV)	FLEET Ave. NMOG規制
1994	10%	80%	10%				0.250
1998		48%		48%	2%	2%	0.157
2001				90%	5%	5%	0.070
2003				75%	15%	10%	0.062

※FLEET Ave. NMOG規制値（従来のHC規制に変わるノンメタン有機ガス規制）

2) 新カテゴリー別の排ガス規制値

カテゴリー	NMOG (g/mile)	NOx (g/mile)	CO (g/mile)	HCHO (g/mile)
TLEV	0.125	0.4	3.4	0.015
LEV	0.075	0.2	3.4	0.015
ULEV	0.040	0.2	1.7	0.008

の状況から、軽量化技術開発に火がついたといっても過言ではない状況になっている。カリフォルニア州、大気浄化法の詳細を表1に示す。

ここでは、エネルギー節減の観点から軽量化の必要性を考え、そして当社におけるエンジン部品の最近の軽量化材料技術について述べてみたい。

2. エネルギー節減と軽量化

エネルギー節減を考える場合、原材料の製造に要するエネルギーから自動車の製造エネルギー、そして走行エネルギー、つまり自動車を動かすに必要な燃料エネルギーを加えた生涯エネルギー全

体の節減を考慮することが必要である。図2に示すように、生涯エネルギーの構成割合から見ると走行エネルギーの比率が高く²⁾、エネルギー節減を図る上では優れた省燃費車を作ることがポイントの1つであるといえる。この省燃費車を実現する重要技術の1つが軽量化である。

図3に自動車の10モード走行時のエネルギー損失の比率を示した³⁾。この図から走行抵抗、加速抵抗、エンジンの摩擦損失が大きな因子であることがわかる。

したがって、燃費向上のためには自動車全体の軽量化により走行及び加速抵抗の低減を図ること

図2 自動車の製造及び走行に要するエネルギー

図4 車両重量と10モード燃費

図3 10モード走行時の損失比率

と合わせ、エンジンの摩擦損失の低減を図ることが重要となる。

具体的な軽量化効果の例として、図4に当社における代表的な自動車の車重と燃費との相関を示した。この図から、ほぼ10%の重量軽減が7～8%の燃費向上をもたらす軽量化の効果が大きいことがわかる。

3. 最近のエンジン部品の軽量化材料技術について

エンジンの主要部品である動弁系、クランク系などの部品の軽量化は、摩擦損失低減効果の他に高回転化や高出力化によりエンジン性能の向上を図る上でも重要な技術である。そのため従来から各社で、これら部品の軽量化技術開発が精力的に行われている。当社においても同様に、材料や設

計そして製法を基本にこれらの最適化を図る開発が進められている。以下に当社における最近のエンジン部品の軽量化材料技術について、実用化した部品例から一部を紹介したい。

3.1 動弁系部品

(1) アルミニウム製バルブスプリングリテーナー（以下アルミリテーナー）

バルブスプリングリテーナーは従来、浸炭鋼で作られており、その重量は15～20g程度の小部品である。しかし、リテーナーはバルブと一緒に動作し、これらの部品の重量がエンジンの回転限界に大きな影響を与えるため軽量化がそのままエンジンの高性能化につながる。エンジンの種類にもより異なるが、たとえば1gの軽量化は約50回転のエンジン高回転化に相当する。また、エンジン回転を同一にすれば、バルブ駆動のためのバルブスプリングのバネ荷重を低減でき摩擦損失低減に寄与する。そのため当社では、この素材をAl-Si-Fe系急冷凝固粉末とした軽量のアルミリテーナーを開発した⁴⁾。

この急冷凝固粉末材料は従来の溶製法では大量添加できなかった合金元素を均一かつ微細に添加できるという特質を有し、今後の軽量構造部材として注目されている。リテーナーをアルミ化した場合、強度と共に耐摩耗性の確保が重要であり、開発したアルミリテーナー材ではこの耐摩耗性確保のために上述の特質を活かし Al_2O_3 、 ZrO_2 、 SiO_2 のセラミックス粉末を添加している。図5は粉末添加量および粉末平均粒径と摩耗量との相関を示したものである⁴⁾。この図からセラミックス

粉末の添加量が多く、粒径が大きくなるほど摩耗量が少なくなることがわかる。

反対に、このことは相手材であるバルブスプリングの摩耗が増大することになる。そこで、両者のバランスを考慮し、添加するセラミックス粉末は添加量が3質量%で平均粒径は約 $5\mu\text{m}$ を目標とした。この技術によりスチール製に比べて約40%の軽量化を実現した。写真1は開発したアルミリテーナーを示す。

(2) バルブ

バルブの軽量化はリテーナーの項で述べたのと同様の効果がある。この軽量化に当たってはバル

図5 アルミリテーナーのセラミックス粒子の添加量および粒径と摩耗量の関係

写真1 アルミ焼結押し出し材製バルブスプリングリテーナー

ブの細軸化を行っている。細軸化にともなう強度低下分に対しては高特性材の適用により対策し、バルブコッター溝部については、応力集中を避けるための形状の最適化によって補うなどの対策を行っている。さらに、インレットバルブは従来SUH 11M材を用いた一体構造であるのに対し、傘部にはSUH 35を、軸部にはSUH 11Mを用いて摩擦溶接結合構造としたのが特徴である。

エキゾーストバルブにおいては傘部用にNCF系の新耐食耐熱合金を開発適用し、軸部にはSKH 51材を用いている。傘部用の新材料は従来使用していたSUH 751材を基本に、Cr, Nb, Fe量の見直しとMo, Wの添加を行っている。図6に開発材の熱間強度をSUH 751との比較で示したが、800℃で約30%の強度向上が図られている。また、疲労強度においても、同じく800℃でSUH 751に比べ32%の強度向上が確認されている。これらによりインレット及びエキゾーストバルブ共に、軸径が $\phi 6.6$ から $\phi 5.5$ に細軸化され、20%の軽量化を達成している。

(3) バルブスプリング

バルブスプリングには近年、エンジンの4バルブ化にともない小型でかつ疲労耐久性を上げることが求められている。このニーズに対して疲労強度を20%向上させ、さらにエンジン回転数を500回転以上向上できるバルブスプリングを開発した。

図6 バルブ材の熱間強度

これは、製鋼メーカーにおける溶製技術の進歩による介在物の低減、ショットピーニング条件の最適化、さらにC量の増加と熱処理条件の最適化により達成されたものである。図7は非金属介在物の大きさと疲労寿命の関係を示したものである。介在物を小さくすることにより、疲労寿命が長くなることがわかる。開発材においては、この介在物の微細化と共に介在物量の低減をも実現し、疲労耐久性を向上させた。さらに、スプリング断面形状の上でも図8に示すごとく従来の真円から異形とすることで等応力化を図り、軽量化と小型化を達成している。これらによる軽量化量は材料技術と合わせて約15%である。

図7 パルプスプリング材における非金属介在物と回転曲げ疲労寿命の関係

異形断面形状

従来品断面形状

図8 パルプスプリング断面形状

(4) カム駆動用ブリー

材料はFe-1.0C-1.5Cuを基本とした焼結合金である。軽量化を図るためにアロイデザインにより23%の強度向上を達成するとともに、薄肉化設計との連携により15%の軽量化を実現した。実用化した製品例を写真2に示す。いっぽう焼結技術上は高圧成形が問題となったため、新たに低圧力で高密度化成形が可能な成形条件そして方案を取り入れ、これら製法上の技術改良を行い問題を解決した。

3.2 クランク系部品

(1) コネクティングロッド (以下コンロッド)

エンジンの性能向上のために、往復部重量を減少して摩擦損失や起振力を低減しようという狙いの材料開発は極めて重要である。コンロッドについては、当社においても種々の材料が開発され量産適用されている。

最近の例では、チタンコンロッドの適用が挙げられる。写真3にスポーツカーNSXに適用されたチタンコンロッドを示す。従来より四輪車としては、レース用エンジンで使用されていたが、量産車での適用は初めての例である。チタンは鍛造性及び切削性に問題がありコストがかなり高いことが量産車への適用を阻害していた。

今回、これらの技術的課題を快削チタン合金材の開発、そして鍛造技術の改善などによりコスト/軽量化のバランスの優れた技術として確立し量産車に適用されている^{5),6)}。重量はスチール比で30%の軽量化が図られている。しかしながら、今後一層の適用拡大を図る上では、さらなるコスト低減

写真2 鉄焼結合金製カム駆動ブリー

写真3 快削チタン合金製コネクティングロッド

が必要であり、これが今後の課題である。

(2) クランクシャフト

従来はS48Cの炭素鋼をクランクシャフトに使用していたが、近年の高出力化に対応するために高強度のクランクシャフト用鋼として非調質合金鋼を開発し、軟窒化処理との組み合わせにより量産適用している。この材料は従来のS48C材に対して疲労強度が高く、エンジンサイズが同一の

ままで出力向上が図れ、軽量化に寄与している。

図9はS48Cと非調質合金鋼の疲労テストにおける破損確率と負荷応力の関係を示したものであるが、破損確率10%のポイントで約15%の強度向上が得られている。また、クランクシャフトにおいては被削性が生産性に大きく影響を与えるため、従来よりCa, Pb, Sを添加した三元快削鋼を使用しているが、非調質合金鋼の適用に当たっても当初よりこれら三元の快削成分を添加し、生産性を犠牲にすることなく高強度のクランクシャフトとして量産適用している。

3.3 シリンダーブロック系、他

(1) 繊維強化アルミニウム合金製シリンダーブロック

シリンダーブロックの材質やその構造によってエンジンの重量そしてコンパクト性が大きく影響を受ける。現在当社のエンジンブロックは全量、アルミニウム合金製である。従来のシリンダーブロックは鋳鉄製のシリンダースリーブを挿入したタイプであったが、一層の軽量化を図るために、ピストン摺動部であるシリンダースリーブが繊維強化アルミニウム合金からなるアルミニウム合金

図9 高強度クランクシャフト用非調質合金鋼の疲労強度

製ブロックを開発し量産適用した。強化繊維は写真4に示したようにアルミナと炭素繊維からなるハイブリッド仕様である⁷⁾。

製法は当社で独自に開発したNDCと呼んでいるアルミニウム用高圧鋳造であり、シリンダーブロック鋳造時に繊維強化アルミニウム合金製シリンダースリーブを同時に成形している。これによりシリンダースリーブ間寸法の減少によるコンパクト化とシリンダースリーブ自体の軽量化が可能となり、従来のアルミニウムシリンダーブロックより約20%の軽量化が達成されている。

(2) マグネシウムヘッドカバー

当社では、マグネシウムは2輪車での適用以来、軽量材として使用されているが、材料としての性能や生産技術的に解決すべき課題が多く大量使用するに至っていない。しかし最近の技術改良には、めざましいものがあり各社で積極的に使用し始めている。図10はマグネシウム合金の耐食性と不純物成分であるFe, Ni, Cuとの相関を示したものである。これらの不純物を低減させた合金(AZ 91D)では、これまで一般的に使用されているマグネシウム合金(AZ 91B)より耐食性が大幅に改善されアルミダイカスト合金(ADC 12)並の耐食性が確保されている。このようにAZ 91D材は特別の表面処理を必要とせず、ダイカストのまま使用できるようになっている。

当社での最も新しいマグネシウム部品はスポーツカー NSX に適用したマグネシウムヘッドカバーである。製法はダイカスト法で、アルミニウム製に対して約32%の軽量化を達成している。この外観を写真5に示す。

写真4 繊維強化アルミニウム合金製シリンダースリーブのマイクロ組織

(3) エキゾーストマニフォールド (以下エキマニ)

エキマニは、高温での耐久性が必要なことや、触媒での排気ガス浄化性能を良くするために、断熱性能が要求されエンジン部品の中でも重い部品の1つである。そのため、軽量で上述の性能を合わせ持つエキマニが必要とされていた。写真6に示したものは、この要求に応えるために開発されたエキマニである。耐熱性向上を狙って、これまで使用していたダクタイル鋳鉄からステンレス鋼に置換した上に薄肉化を図り、断熱性確保のためにはポート部分を2重構造にした軽量の新設計エキマニである。

これにより、従来の鋳鉄製エキマニに比べ約40%の軽量化とエキマニ内部温度で約40度の断熱性能向上を達成している。

図10 マグネシウム合金の耐食性 塩水噴霧試験 (JIS Z 2371) による

写真5 マグネシウム合金製ヘッドカバー

写真6 ステンレスパイプ溶接製エキゾーストマニフォルド

4. 特殊鋼への期待

以上、当社における最近の自動車用エンジン部品の軽量化材料技術について各種材料技術を取り混ぜて述べてきた。これらの例からもわかるように、軽量化を目的とした各種材料が適材適所に開発され使用されている。その中でも特殊鋼を含む鉄系材料の役割は今後も大変重要である。

当社における1500ccのエンジンの材料の構成割合は図11に示したとおりであるが、その内の44%が特殊鋼を含む鉄系材料である。そして、これらは、負荷も大きく他の軽量材料では代替できない部品に使用されている。例えば、カムシャフト、バルブ、バルブスプリングなどの動弁系部品、そしてクランクシャフトやコンロッドなどのクランク系部品、エキマニで代表される排気系部品などである。これらの例からもわかるように、特殊鋼を含む鉄系材料はエンジンの性能を左右する部品に多く使用されており、現状の鉄系材料の構成割合は今後も変化する余地は少ないと考えられる。そして、今後の軽量化ニーズに対応するためには各部品の高強度化とコンパクト設計が必要となり、特殊鋼には材料としてのさらなる高強度化が期待される。しかし、一層の高強度化が期待される反面、高強度化は被削性の低下などによって部品の生産性を阻害する要因ともなる。したがって今後は、改めて高強度かつ被削性の良い特殊鋼の開発を期待したい。

他方、現在使用されている実績ある特殊鋼をそ

プラスチック

(5%)

図11 エンジンの使用材料構成 (1500cc エンジンの例)

のまま活用し高強度化と生産性を得る手法として、ショットピーニング加工やロール加工を後加工として採用する方法や、あるいは新しい熱処理技術などを併用してゆく方法も考えられる。ショットピーニングはバルブスプリングやミッションギヤに既に適用され⁸⁾、ロール加工はクランクシャフトで実用化されている⁹⁾が、今後さらに重要な位置を占めると思われる。

このように、今後は特殊鋼自体の改良と共に切削技術や熱処理技術、後加工としての塑性強化技術など、特殊鋼を取り巻く周辺技術を含めた総合的な取り組みが重要となろう。

5. ま と め

以上、当社における最近の軽量化材料技術を紹介した。今後、環境問題への対応は一層重要度を増し、消費するエネルギーの低減のため自動車の省燃費化要求はますます高まり、軽量化のための技術開発が精力的に取り組まれると考えられる。エンジンについて見ると当然のことながら、材料置換による軽量化もあるが、上述のごとく主要部品を構成する特殊鋼に対しては、生産性を考慮にいたった高性能化が今後期待される。さらに軽量化を図る上では部品コストを抑えながら軽量化を達成するということが大変重要なことである。コスト/軽量化のバランスの取れた技術を完成させるためには各構成部品に対して、材料や設計そして

製造技術の最適化が必要であり、これらの技術の地道な取り組みが一層重要となるであろう。

(文 献)

- 1) 環境白書：平成2年版
- 2) The Institute of Energy Economics ; Japan (1989)
- 3) 金原淑郎, 杉浦章充：自動車技術, 32(1978) 5, 379
- 4) 椎名治男, 村極良一, 星 雅巳, 有村光典, 北条信明：自動車技術, 44 (1990) 6, 80
- 5) Atsuyoshi Kimura, Sadayuki Nakamura, Sachihiro Isokawa, Toshihiko Matubara, Kenji Kimura and Yasunori Sato : SAE Technical Paper Series, 910425 (1991)
- 6) 上原 繁：自動車技術, 45 (1991) 6, 104
- 7) Tadayosi Hayasi, Hideki Ushio and Masuo Ebihara : SAE Technical Paper Series, 890557 (1989)
- 8) 五十嶺優, 浅野謙一, 猪原秀夫：自動車技術, 43 (1989) 6, 93
- 9) 島本敏郎, 山口俊弘, 鈴木義秋, 近江竜司：自動車技術, 44 (1990) 6, 95