



特集記事・5

地球環境に貢献する鉄鋼製品

自動車用エンジン部品における鉄鋼材料開発の変遷と今後の課題

Steel Development History and Future Subjects in Automobile Engine Parts

岡田義夫
Yoshio Okada

日産自動車(株) 材料技術部
金属材料グループ 金属材料技術開発主管

1 はじめに

今日の社会において自動車は、人々の生活に必要な不可欠なものであり、時代の変遷とともに、求められるニーズはますます多様化してきている。一方、経済・社会を持続的に発展させるためには、人・社会・地球へ与えるマイナス影響を最小化することが重要であり、自動車においては環境性能や安全性能を経済・社会とバランスを取りながら向上させることが必要である。そのため、近年、環境負荷物質を低減する技術や、交通事故発生時の乗員・歩行者保護、もしくは事故を未然に防ぐ技術の開発が積極的に行われているが、これらの技術搭載に伴う車両重量増加と燃費向上の両立が大きな課題となっている。また、車の新動力という観点では燃料電池車、ハイブリット車といった代替エンジン車の研究開発が盛んに行われているが、2020年時点においてもレシプロエンジンの優位性は変わらないとする予測が多数を占める。したがって、前述の課題を解決するには、レシプロエンジンの変革が必要であり、燃費向上、車両重量低減を中心とした環境対応技術の一層の高度化が必要であると考えている。本稿では、エンジンにおける鉄鋼材料開発に関して、日産自動車の事例を中心に、軽量化、省エネルギーなど環境保全のための材料開発の変遷と今後の課題について述べたい。

加価値を生み出した。また、1990年代後半から現在に至るまでは、切削技術開発によるクランクシャフトのPbフリー化のほか、省資源の観点から合金元素の削減にも積極的に取り組み、環境対応と原価低減の両立を図ってきている。現在の材料開発の中心は、パワートレインの小型軽量化を達成するための高強度鋼開発である。歯車、コネクティング・ロッド(以下、コンロッド)、ばねといった軽量コンパクト化のキーとなる部品については、さらなる高強度鋼(新工法含む)の登場が期待される。

表1は、環境対応という切り口でこれまでの活動をまとめた。この内容に沿って、さらに詳しい内容を紹介したい。

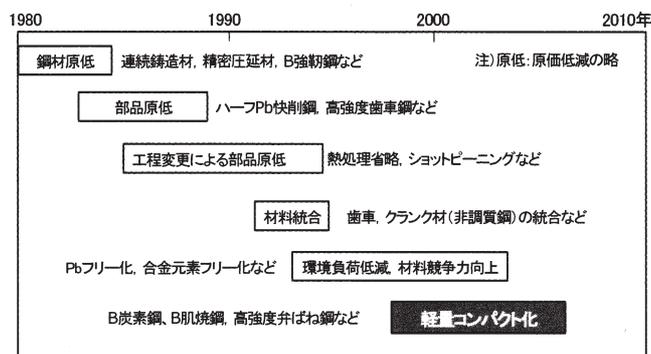


図1 日産自動車における鉄鋼材料開発の歴史

2 鉄鋼材料開発の変遷概要

日産自動車では、鍛造用鉄鋼材料の分野において、1980年以前から鋼材メーカーと共同で、原価低減、および環境対応のための材料開発を推進してきた。図1にその歴史の概要を示す¹⁾。当初は材料変更のみであったが、1980年代半ばには、熱処理省略鋼など日産自動車の製造工程を積極的に変更する開発もスタートさせ、これによって、原価低減のみならず、省エネルギー、ユニットサイズダウンなど新たな付

表1 日産自動車特殊鋼分野における環境対応への取り組み概要

項目	取り組み内容
CO ₂ 削減	①パワートレインの軽量コンパクト化 ②熱処理省略、歩留まり向上
環境負荷物質	Pb快削鋼の使用量削減
省資源	①Vフリー非調質鋼などによるV使用量削減 ②その他材料開発によるNi,Moなどの合金元素削減
リサイクル	Cu規格緩和によるスクラップ有効活用

3 CO₂削減

3.1 高強度鋼によるエンジン部品の軽量コンパクト化

地球環境を保護するためにCO₂排出量を低減するさまざまな技術開発が進められている。その中でも燃費向上は、エンジンの燃焼効率向上、各摺動部位におけるフリクション低減、およびエンジンを含めた車両全体の軽量化がキー技術である。ここでは、エンジン主運動系部品のコンロッド、動弁系部品のバルブスプリング、およびボルトの高強度化について述べてみたい。

(1) コンロッド

エンジン主運動系部品の軽量化は、単なる軽量化に留まらず慣性重量低減に繋がるため、エンジン性能向上だけでなくクランクシャフトへの負荷も低減することができる。これにより起振力が下がるため、エンジンの静粛性を向上させることが可能であり、また、クランクピンの細軸化による、クランクシャフトの軽量化も可能となる。このように、波及効果が大いことから、自動車各社はコンロッド軽量化を積極的に行っている。

コンロッドには燃焼圧力による座屈強度と慣性質量による引張圧縮入力に対する疲労強度が要求される。使用材料は主に鉄鋼材料であり、粗材工法としては熱間鍛造、粉末焼結鍛造などがある。このようなコンロッドを軽量化する手法は、多くの誌面で紹介されているが、高強度鋼化、チタン化、アルミ化など材料変更以外では図2に示すようなものがある¹⁾。

コンロッドでは、コスト問題から軽合金への材料置換は進んでいない。主流は高強度鋼+ショットピーニングであり、疲労強度を高めるために、ショットピーニングによる圧縮残留応力付与を、また、座屈強度を高めるに材料の高耐力化を行っている。高耐力化の方策として、高V非調質鋼(0.25% V)²⁾などが実用化されている。

構造面における新技術としては、コンロッド大端部を衝撃荷重により破断分離し組み立てを行うクラッキング化がある。最近のクラッキングコンロッド用鋼開発の事例を含めて

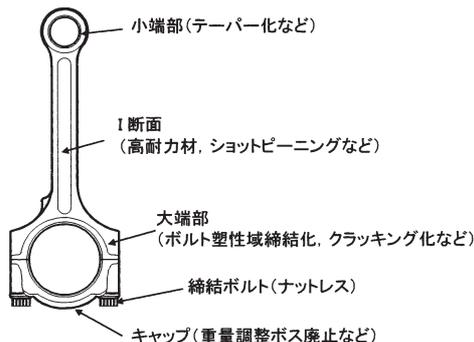


図2 コンロッド軽量化の方策例

紹介したい。

通常のコンロッド大端部は複雑形状のクランクシャフトに組み付けるために、ロッドとキャップは別々に鍛造、機械加工され、最終的に加工面で合わせてボルト締結される。一方、クラッキングコンロッドはロッドとキャップ一体で鍛造した後、破断分離させ、破断面でロッドとキャップを突き合わせて締結しており、これにより、加工工程の省略による投資削減と、位置決め用のダウエルピンの廃止、合わせ部の断面積低減による軽量化を図っている。クラッキング化するには、破断部が塑性変形しない、すなわち脆性破面となることが必要であるため、韌性の低い材料が必要となる。このため、欧州を中心に炭素量0.7%の高炭素鋼(DIN C70S6)が使用されているが、切削性が悪い、硬さが高い割に降伏点が低いなどの問題がある。日本ではこれらを改善するため、より低炭素化し切削性を改善した上で、Si、P、Vなどの強化元素を添加することにより、強度とクラッキング性を向上させた非調質鋼が開発されている³⁾。

日産自動車では、同様な目的でP添加クラッキング用鋼を開発した⁴⁾。C量は現行と同じ0.4%とし、コストの観点からVは0.1%に抑え、フェライト強化は固溶強化元素であるP添加(0.1%)、Si増量(0.2→0.6%)にて行った。これらによって現行材同等の強度、被削性を有しつつも、C70S6と同等以上のクラッキング性とすることができた。本開発鋼、およびクラッキング工法の採用により、コンロッドを軽量化しながらも、大幅な投資削減と約10%の製造原価低減を達成できた。

以上のように、コンロッド軽量化は波及効果が大いため、今後、その開発はより加速されると考えている。最軽量とされているTi合金以上の軽量化を目指して、さらなる高強度化技術開発を推進して行きたい。

(2) バルブスプリング

バルブスプリングはエンジン動弁システムに属し、その高強度鋼化はエンジン高さ低減、フリクション低減などに貢献する。材料に要求される特性は、高弾性限、高疲労強度、耐高温へたり性などである。使用される素材は、現在はばね用オイルテンパー線であり、耐へたり性を重視しSi-Cr鋼、Si-Cr-V鋼が主流となっている。これらは焼入焼戻しにより、硬さを500~600HV程度とし、ばね形状に成形した後、ショットピーニングが施されるのが一般的である。高強度化には、材料の引張強さを上げることが有効で、最近では窒化処理の適用が進んでいる⁵⁾。また、内部の硬い非金属介在物(Al₂O₃など)を起点として疲労強度が低下する場合があるため、形態制御により介在物を軟質化し強度低下を防止している。さらには、最表面の圧縮残留応力を大きく高める手法として、ショットピーニングの多段化も進んでいる。

図3に、各種材質のバルブスプリングのコストと疲労強度の関係を示した(日産自動車による推定値)。縦軸、横軸ともSi-Cr鋼の疲労強度、およびコストを1.0とした時の比率としている。ここ20年で材料は、高疲労強度へと移り変わってきている。現在、最も高い値を示す鋼は窒化前提の高強度鋼であり、その特徴は窒化時の熱による軟化を防ぐため、Si-Cr-V鋼に対してSi、Crを増量するとともに、韌性低下を抑えるため、C量低減、およびNi微量添加を実施している。これらにより約10%の引張強さ向上が得られており、今後日産自動車においては本鋼種が主流となっていくと考えられる。ただし、さらなるエンジン小型化、フリクション低減を図るため、より一層の高強度化を期待したい。

(3) ボルト

ボルトについても、その高強度化は締結部位の単なる軽量化というだけでなく、コンロッドのような運動する部品の軽量化、スペースの有効活用という観点で期待は大きい。高強度ボルトを使用する際の最も留意すべき点は、主として環境中から進入する水素による遅れ破壊である。遅れ破壊現象については未だ不明な点も多いが、近年、水素の中でも移動可能な拡散性水素と遅れ破壊との関係が明確になりつつあり、これにより高強度ボルト採用に踏み切る例が増えてきている。

従来、自動車用としては引張強さ1200 MPa級(12.9)を上限とするのが一般的であったが、前述のような理由から1300 MPa以上の強度クラスのボルト採用が始まっている。これらの高強度ボルト用鋼のベースはCr-Mo-V鋼で、概略をまとめると表2のようになる¹⁾。高強度ボルト用鋼の最大の特徴は、耐遅れ破壊性向上に有効な高温焼戻しを可能とするため、従来以上にCr、Moを増量していることにあり、特にMoは500~600℃における炭化物析出による二次硬化を狙いとしている。さらに必要強度に応じてV、Ti等が添加されるが、析出したこれらの炭化物は遅れ破壊の原因とされる拡散性水素をトラップし、その移動を抑止するため、耐遅れ

破壊性を向上すると言われている。

このような高強度ボルトは、エンジンではコンロッドボルト、シリンダヘッドボルトに、トランスミッション関係ではデフのリングギアボルトなどへの採用が始まっており、今後さらに拡大されていくものと思われる。

3.2 熱処理省略による省エネルギー

自動車では高い強度が要求される部品には鉄鋼材料が使用されるが、これらは一部を除き、熱間、温間、あるいは冷間鍛造によって成形された後、機械加工によって最終製品となる。鍛造後の粗材には、さまざまな目的で熱処理が施されてきたが、省エネルギーによる環境保全、工程省略による原価低減、および生産リードタイム短縮などの目的から、熱処理省略・簡略化に取り組んできた。現在、熱処理全体の省略率は1980年当時行っていた処理量に対する比率で表すと80%に達している(日産自動車横浜工場、および旧富士工場[現ジャトコ(株)]を合わせた数字)。そのうち、強度向上のための調質は既に約99%が省略されるまでに至っている(図4)¹⁾。

クランクシャフト、コンロッドについても、かつては調質が施されていたが現在はその省略が完了している。主な方策は、V炭窒化物を熱間鍛造後の空冷時に析出させてフェライトを強化した、フェライト・パーライト型非調質鋼によるものである。日産自動車のエンジン部品では、主として0.1% V非調質鋼を採用しているが、一部のクランクシャフトにおいては、省資源の観点からVを含まない、Vフリー非調質鋼

表2 高強度ボルト用鋼の成分範囲

C	0.35 - 0.40%
Mn	0.3 - 0.7%
P	0.010%以下
S	0.010%以下
Cr	1.0 - 1.4%
Mo	0.2 - 1.0%
その他	Ni:0.3 - 0.6%、V、Nb、Tiなど:添加

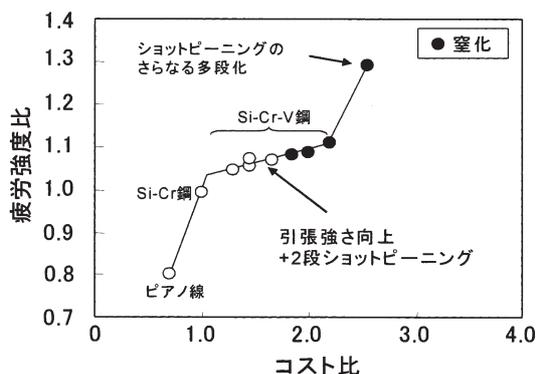


図3 バルブスプリング材のコストと疲労強度の関係

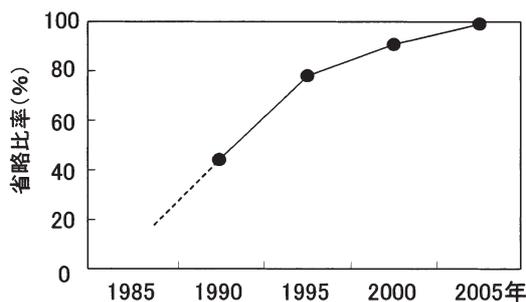


図4 調質省略状況

(非調質炭素鋼)を開発・採用している。詳細は後述したい。

4 環境負荷物質低減

前述のように、本分野において日産自動車は、環境対応と原価の両立を継続的に図ってきた。ここでは、環境負荷物質対応としてPb快削鋼、すなわちPb量削減の取り組みについて紹介する。

Pb快削鋼は、ハーフPb化することにより強度低下を生じない、すなわち、強度と被削性を両立できる快削鋼として採用拡大されてきた。しかし、環境負荷物質削減の必要性から、代替快削鋼として、硫化物形態制御型快削鋼が採用され始めている。これはコスト増が少なく、かつ新たな環境負荷物質となる可能性が無いなどの理由からである。

日産自動車においては、1990年代後半よりSを0.04～0.07%含有したS1快削鋼を、Pb快削鋼の代替材として採用の可能性を検討してきたが、部品レベルで強度低下がないことを確認できたため、現在コンロッドにおいてS1快削鋼への切り替えを進めている。一方、クランクシャフトでは一般的にCa-Pb-S系三元快削鋼が使用されることが多いが、日産自動車クランクシャフト材の大半はC量が0.4%と低く切削性が比較的良好であったため、切削条件の見直し、および切削工具の改良などにより、生産性を低下させずにPb無添加とすることができた。

図5に日産自動車横浜工場におけるPb快削鋼使用量の推移を示した¹⁾。2006年度では、さらにコンロッドでの切り替えが進み、1000トン/月以下となる見込みである。今後も継続してPb快削鋼の使用量削減を推進していく。

5 省資源

使用する鋼材の合金元素を削減することは、製造原価を下げるだけでなく、省資源という観点からも重要である。日産自動車では、非調質鋼のV量低減の取り組みとして、Vフ

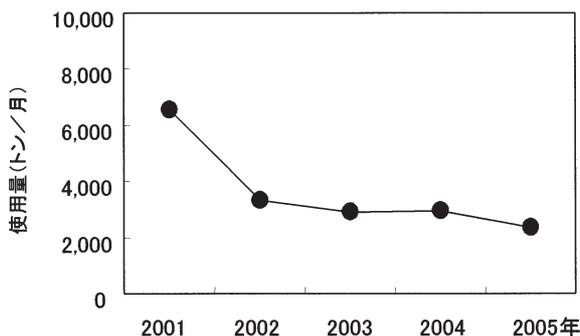


図5 Pb快削鋼使用量の推移

リーの非調質炭素鋼、およびV量を半減したハーフV非調質鋼を採用している。また、歯車などの低合金鋼において、ピッチング強度、衝撃強度に対する要求レベルの低い場合には、Ni、Moを排除してきた。また、同様にエンジン用吸排気バルブにおいても、Ni、Crを段階的に削減してきた。ここではエンジンに関連した日産自動車の事例としてハーフV非調質鋼、およびバルブ用材料の変遷について紹介したい。

5.1 ハーフV非調質鋼

コンロッドにおいては、前述のような軽量化ニーズが高いことから、炭素鋼ベースの非調質鋼は一部の用途に限られる。日産自動車では0.4% C鋼において、V添加による耐力比向上が0.05%添加までは急激に、その後は緩やかになることを見出し⁶⁾、V量を0.05%に低減したハーフV鋼を実用化した。本開発鋼によるコンロッドは、座屈強度、および各部位の疲労強度も従来の0.1%V鋼製と同等であることから、V6エンジン用で採用を開始し、材料価格を約5%低減することができた。また、日産自動車では、本開発鋼をクラッキング化していないコンロッドへ順次拡大するとともに、さらに質量の大きいクランクシャフトへも適用することで、より大きな省資源と原価低減を図って行きたいと考えている。

5.2 バルブ材料

バルブの機能は、燃焼室を開閉し、空気と燃料の混合気を流入させること、燃焼ガスを排出させること、および爆発、膨張行程では燃焼ガスをシールすることである。バルブは高温の燃焼ガスにさらされ、変形・破損しない強度と、シール機能を維持するための耐摩耗性が要求されることから材料としては耐熱材料が適用される。特に排気温度が高い場合にはNi合金が使われている。一般的なガソリンエンジンでは、排気バルブにはオーステナイト系耐熱鋼が、吸気にはマルテンサイト系耐熱鋼が使用される。日産自動車では、バルブについても積極的に合金元素の削減を行ってきた。排気用では、21%Ni-4%Cr鋼を使用していたが、現在はCr量を低減した21%Ni-2%Cr鋼が主流となっている。一方、吸気用は、約20年でJIS SUH3から、Cr量を11%→8%→5%→1%まで低減してきた。これは、要求強度に対する材料適正化によるものであり、約400℃における高温疲労強度が、1%Cr鋼においてもほとんど低下せず、要求強度を満足することを確認している。

また、高い耐摩耗性が要求されるシール面では、Co基の盛り金が実施されるのが一般的であったが、同様に材料仕様の適正化を図り、Fe基盛り金への変更を経て、現在は、ガソリンエンジンでは海外向けの一部を除いて盛り金の大半を廃止した。

6 リサイクル

スクラップの有効活用という観点でのCu規格緩和の取り組みについて紹介する。周知のことであるが、スクラップに混入したCuは、精錬操作では除去することが難しく、いわゆるトランプ元素として鋼中に蓄積され、その濃度が高くなると熱間加工性を低下させる。Cuの規格は、JISにおいても古くから0.30%以下となっているが、実際には0.5%以上になると、熱間でのCu溶出による影響が顕著になるようである。日産自動車ではスクラップ有効利用という観点から、非調質鋼におけるCuの上限を拡大し0.35%としたが、この程度では上記のような問題は起こらないことを確認している¹⁾。なお、肌焼鋼では焼入性への影響が無視できないため今後の課題とした。図6にCu規格緩和材の採用状況を示す。最終的には非調質鋼は、すべて規格緩和材としていくつもりである。

7 おわりに

自動車における種々の課題に対して、材料が果たすべき役割は一層大きくなってきている。鉄鋼材料の分野は、これまでも高品質化、低コスト化、高強度化などにより自動車の技術進歩に大きな貢献をしてきたが、21世紀を迎え自動車として解決すべき技術課題は、ますます高度化・多様化し、また、課題解決へのスピードアップも求められている。特に期待が大きい高強度化の分野では、おそらく剛性低下による小型化の限界に至るまで高強度化への挑戦は続き、その先には、さらなる難題である高剛性化が待ち受けていると考えている。この挑戦は、単に合金元素を足したり、引いたりして達成できるレベルではない。変革の時代を迎えた現在、鉄鋼材料に対しても、これまでの着実な進歩を超えた飛躍的な技術革新が望まれており、従来の発想の域を越えたイノベーションが必要になっている。そのためには、鋼材メーカーと自

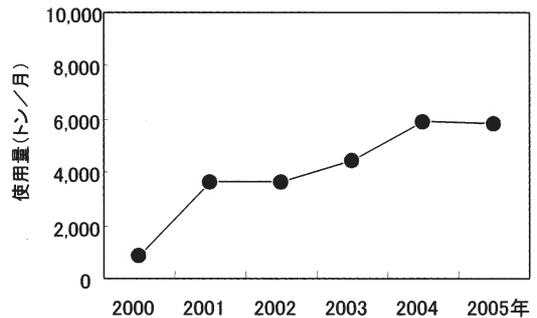


図6 Cu規格緩和材使用量の推移

動車メーカーが長期的かつ高い目標を共有化し、同じベクトルで技術開発を行っていくことが必要と考える。具体的には、我々自動車メーカーは生産技術革新が必要と考えているが、同様に鋼材メーカーには、製鋼技術、圧延技術を中心とした製造プロセスの革新を期待したい。

参考文献

- 1) 岡田義夫：第188・189回西山記念技術講座，日本鉄鋼協会編，(2006)，35.
- 2) 岩間直樹，野村一衛，森元秀，矢野正明，真部豊久：まてりあ，36(1997)6，622.
- 3) 福田晋作，衛藤洋仁：自動車技術会学術講演会前刷集，(2000)86-00，13.
- 4) 山田雄一，宮澤智則，岡田義夫，吉田純，井上幸一郎，加藤進一郎，紅林豊：自動車技術会学術講演会前刷集，(2004)81-04，18.
- 5) 吉原直，黒田武司，佐藤仁資，茨木信彦：ばね論文集，45(2000)，15.
- 6) 相原一石，山田雄一，宮澤智則，吉田純，阿南吾郎，井戸尻弘：自動車技術会学術講演会前刷集，(2005)111-05，5.

(2006年9月11日受付)