

技術解説

Technical Review

自動車用パワートレイン材料の技術動向

木野伸郎*, 馬淵 豊*, 小柳貢士*, 村上 亮*

Technical Review of Materials for Automotive Power Train

Nobuo Kino, Yutaka Mabuchi, Mitsushi Oyanagi, and Ryo Murakami

Synopsis

For all of automobile makers, CO₂ reduction (Improvement of fuel efficiency) is most important to meet the regional CAFE in the short term and also to keep the global environment in the long term. Materials technology is one of the key technologies for CO₂ reduction and it could give big contribution.

In this review, various materials technologies for automotive power train are described which contribute to CO₂ reduction by friction control, high strengthening, and cost reduction.

1. 緒 言

近年、自動車メーカーの最大の課題はCO₂削減（低燃費）であり、近々に迫る各地域での燃費規制への対応と、中長期的にはCO₂排出量低減による地球環境保全に各社精力的に取り組んでいる。IPCCの第4次報告書によると、地球の平均気温の上昇を2℃に抑えるには大気中のCO₂濃度レベルを450 ppm以下に保ち、2050年度でのCO₂排出量を2000年度比で90%削減す

る必要があるとの試算を行った（Fig. 1）¹⁾。90%の削減を実現するためには、エンジン・トランスミッションの更なる効率向上に加え、ハイブリッド車（HEV）、電気自動車（EV）などの電動車両の普及が不可欠であり（Fig. 2）²⁾、どちらも材料技術の貢献度は大きい。

本稿では、自動車のCO₂削減に貢献するパワートレインの材料技術をエンジン、トランスミッション、電動パワートレイン用モーターに分けて解説する。

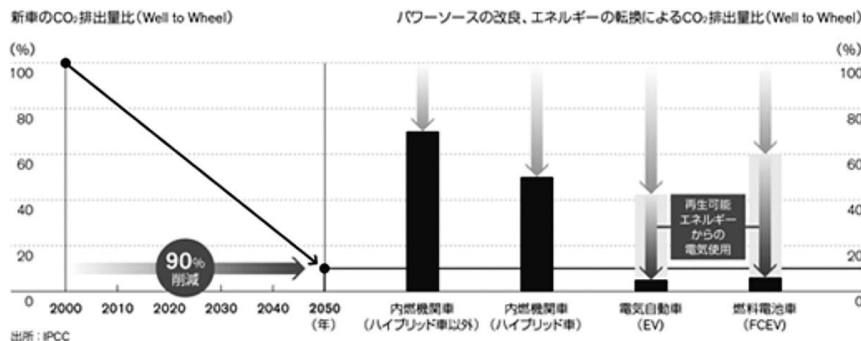


Fig. 1. Long term goal for reducing CO₂.

2014年 11月 12日受付

* 日産自動車(株)企画・先行技術開発本部 材料技術部 (Materials Engineering Dep., Advanced Engineering Div., Nissan Motor Co., Ltd.)

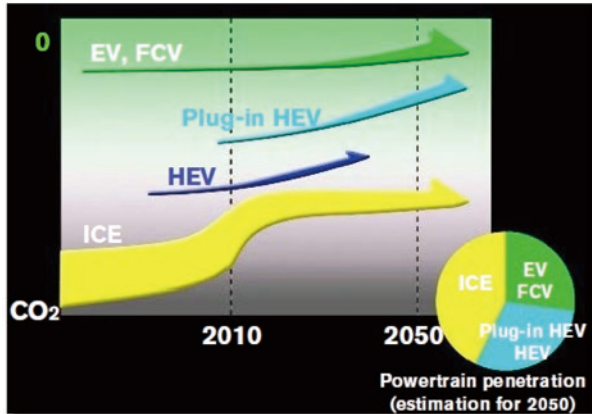


Fig. 2. Nissan's powertrain roadmap.

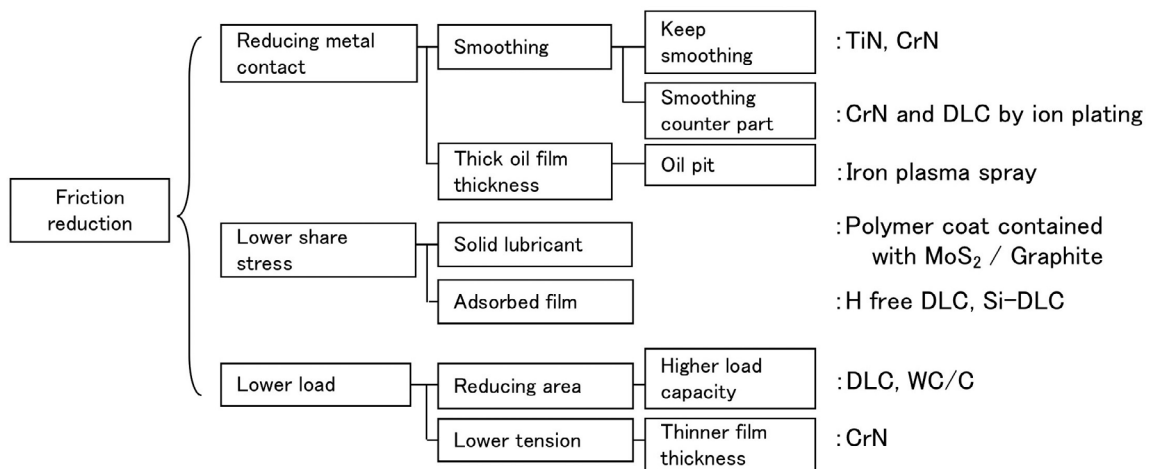


Fig. 3. Factors for friction reduction and related coatings.

2. 1 真実接触の低減

境界潤滑域から混合潤滑域におけるフリクションの発生源の大半は部品表面粗さの突起間の接触によるものであり、表面粗さを小さくすることが効果的である。また部品間の接触面圧が高い場合は、摩耗に伴う表面粗さの悪化が懸念されるため、初期の平滑さを維持する方法として平滑面への硬質表面処理が有効である。直動型の動弁系で最もフリクション分担比の高いバルブリフターとカムロブ間の面圧は最大で約 0.7 GPa と高いため、これまで浸炭処理や窒化などの母材への熱処理に加えて、平滑化後に真空蒸着処理である窒化チタン (TiN) 膜や窒化クロム (CrN, Cr₂N) 膜、最近ではダイヤモンドライクカーボン (DLC) 膜の採用が進んでいる^{3), 4)}。これらの膜の硬さは大半が 2000 HV 以上で、中には 3000 HV を越えるものもあり、従来の浸炭処理 (~ 800 HV)、窒化処理 (~ 900 HV) の硬さを大きく上回る。成膜後の表面粗さは Ra で 0.03 μm を下回る非常に平滑な面となっている。

2. エンジン材料の技術動向

ここでは、昨今成長が著しく、エンジンのフリクション低減に大きく貢献している表面処理技術に着目し、最近の開発事例について紹介する。フリクション低減に影響する因子とその対策として用いられる表面処理の事例を Fig. 3 に示す。部品間のフリクションを減らす方策としては、(1) 真実接触の低減、(2) 低せん断層の形成、(3) 入力負荷の軽減、の3つに大別される。

初期の表面粗さの維持に加え、相手材の表面粗さを摺動により平滑化することで、更なるフリクション低減をもたらす工夫も上述のバルブリフターではなされている^{3)~5)}。カソード式アーキオンプレーティングによる TiN 膜、および DLC 膜などは、その製法上の特徴として、未溶解の原料粒子が成膜時に被加工物の表面に飛来し付着後、硬いコーティングに覆われたドロップレットと呼ばれる粒子状の突起物となる。適度にこの突起を表面に残留させることで、摺動中に相手材の表面粗さが平滑化し、結果として著しいフリクション低減効果が得られる。特にカムロブなどの真円でない複雑形状を持つ部品では、加工による平滑化よりも、むしろ上述のドロップレットによるいわゆる“なじみ”による平滑化の方が効果的といえる。

現在エンジンシリンダーボアの大半はねずみ鋳鉄からなるライナー材をアルミ製のシリンダーブロックに鋳包んでいる構造である。鋳鉄自体の熱伝導率は 50 W/(m・K) とアルミ材の 100 W/(m・K) に比べ低い。鋳鉄の厚みは数 mm ある。また鋳鉄とアルミの界面も鋳造後の

凝固収縮による締め付け力のみのため、界面に微小な隙間が生じ、熱伝達の阻害要因となっている。一方、昨今の高出力エンジンや、ダウンサイジングターボなどでは燃焼室内の熱排出性を上げて、ノッキングを抑えつつ圧縮比を確保したい考えがある。シリンダーボアに铸铁ライナーのかわりに、鉄の溶射処理を施すことで、界面の密着性と肉厚の薄肉化を同時に実現でき、同部位の熱伝達・熱伝導を大幅に改善する効果が期待できる^{6)~9)}。また、溶射特有の現象として、膜内にある程度の空孔が導入され、これが表層に露出しシリンダーボア面の保油性の向上に繋がる (Fig. 4)。従来クロスハッチ状の加工目により確保していた保油性が不要となるため、結果的にボア面の平滑化が可能となり、上記の熱特性のメリットに加え、Fig. 5 のストライベック線上で示されるように、境界~混合潤滑域でのフリクション低減効果も期待できる。

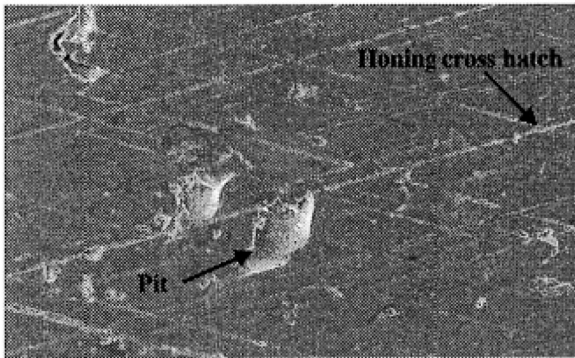


Fig. 4. SEM image of electric arc sprayed coating surface⁸⁾.

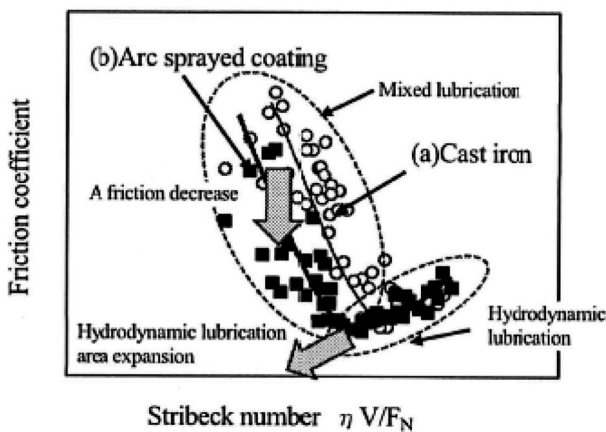


Fig. 5. Stribeck curves⁸⁾.

2. 2 低せん断層の形成

部品の表面粗さの突起間の接触に関して、突起を含む表面層全体を低せん断の材料とし、Fig. 6 中の点線

に示すように、粗さと独立にフリクションを低減する手法として固体潤滑剤の適用が挙げられる⁴⁾。特に面圧がさほど高くない場合においては、固体潤滑剤である粒子状の二硫化モリブデン (MoS_2) や黒鉛、四沸化エチレン (Polytetrafluoroethylene, PTFE) をポリアミドイミド樹脂 (Polyamidimide, PAI) に分散してコーティングした膜や、 MoS_2 の粒子を直接高速で被加工部に照射して得る膜などの、いわゆるソフトコーティングが用いられている。 MoS_2 による膜は、エンジン部品では接触面積の広いピストンのカート部分や、クランクシャフトの軸受メタルの表面層 (オーバーレイ) に適用されている^{10), 11)}。

一方で面圧の高い部品に対しては、前述のソフトコーティングでは摩耗に対する膜の耐久性が問題となるため、硬質でありながら無潤滑下では固体潤滑剤並の低い摩擦係数を示す DLC 膜をベースに、潤滑下でも同様な効果の得られる膜の開発がなされている。ここではその事例として水素を含まない DLC 膜 (水素フリー DLC 膜)、および Si を含んだ DLC 膜 (Si-DLC) を紹介する。両者が従来の表面処理と設計の考え方が大きく異なる点は、共に膜自体の単独の特性では無く、潤滑油または潤滑油に含まれる水分との組み合わせにおいて顕著なフリクション低減効果を発揮する点である。前者は潤滑油中の摩擦調整剤⁵⁾、後者は潤滑油中の水分が¹²⁾、それぞれ表面に吸着することで単分子からなる吸着膜を形成し、部品間の摩擦を大きく減らしている。Fig. 7 はエンジン潤滑油中での摩擦において、DLC 膜中の水素量を低くすること、および最適な添加剤を含む潤滑油組成とすることで、フリクションが著しく低減することを示しており、バルブリフターやピストンリングに既に採用され^{5), 13)}、DLC 膜に Si を添加した膜は、エンジン動弁系のロッカーアームに採用されている¹⁴⁾。

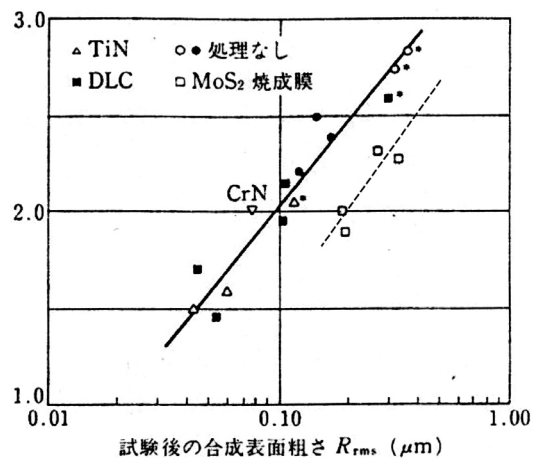


Fig. 6. Friction test results with using various kinds of coatings. * grinding cam while others are micro-finishing cam⁴⁾.

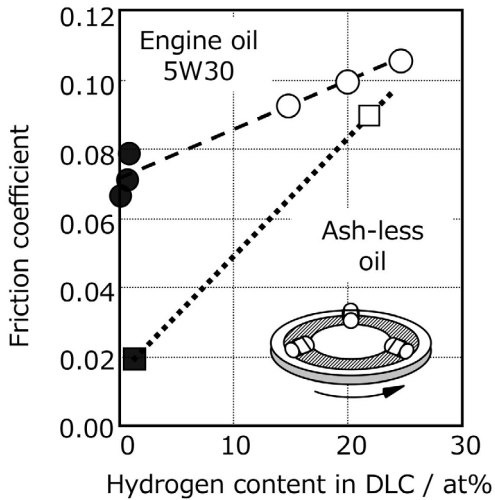


Fig. 7. Dependence of friction coefficient on H content in DLC coatings⁵⁾.

2. 3 入力負荷の軽減

摩擦力は負荷荷重と摩擦係数の積であり、摩擦係数を下げるだけでなく、負荷荷重を減らすことも重要である。ピストンピンは、コンロッドとピストンを連結するピンである。ピストンピンの長さおよびピストンの軸受

部の幅は、ピン/ピストン間の往復摺動時の焼付き発生面圧がひとつの設計要因となっている。耐焼付き性改善策としてはDLC膜の適用が挙げられ、ピストンピンやピストンの摺動部幅狭化による軽量化が有効で、入力負荷の軽減につながる。またピストンの重量からコンロッドやクランクシャフトは強度設計されているため、これら重量部品の軽量化に対しても波及的に効果を拡大することが期待でき、クランク軸周りのフリクション低減にも繋がる (Fig. 8)¹⁵⁾。

ピストンリングとシリンダーボア間のフリクション低減のため、ここ数年で従来のCrめっきや窒化処理に代わり、CrN膜の採用が進んでいる^{16), 17)}。膜厚が約100 μmのCrめっきに対し、耐磨耗性に優れたCrNの膜厚は25 μm程度と薄いため、膜厚のばらつき幅が縮小する。その結果として、ピストンリング張力の下限値を変えずに中央値のみ低く設定することができ、ピストンリング・シリンダーボア間のフリクション低減につながる。またCrN膜の摩耗量が少ないことから、リング外周面の初期の曲率が維持され、摩耗に伴う接触幅の増加を抑えられている点もフリクション低減に有効である。

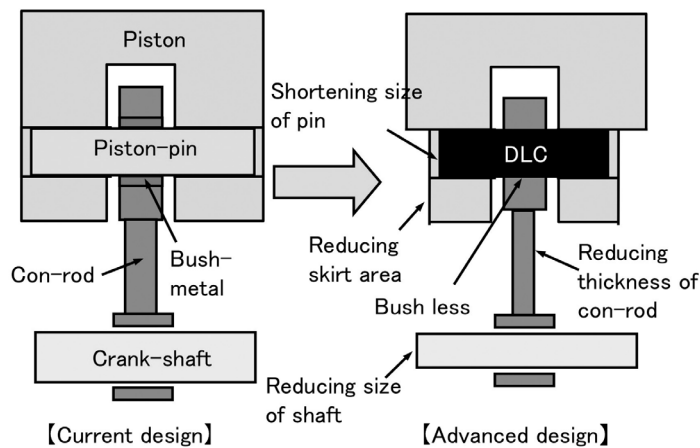


Fig. 8. Advantage of design change due to application of DLC coated piston-pin¹⁵⁾.

3. トランスミッション材料の技術動向

トランスミッションは、限られたスペースの中で、エンジンで発生した動力をできるだけロスなく車軸に伝える機能を有する。Fig. 9に、FF車用ベルトCVTの主断面を示す。ベルトCVTは無段階に変速できるため、あらゆる車速においてエンジンの最も燃費効率の高い回転数を使用して運転することができ、有段の自動変速

機(AT)に比べて燃費性能を大きく向上させることができる。ベルトCVTはその燃費性能の優位性から搭載車種が年々増加しており、現在では、排気量3.5リットルエンジンまでの適用を可能とする高トルク容量のベルトCVT¹⁸⁾や、副変速機を有し、変速比幅拡大と同時に小型化を達成したCVTユニット¹⁹⁾、更にはハイブリッド車両に対応したCVTユニットも市場に投入されている²⁰⁾。

ここでは、CVTの主要構成部品である歯車とプーリの高強度化に関する材料技術動向について紹介する。

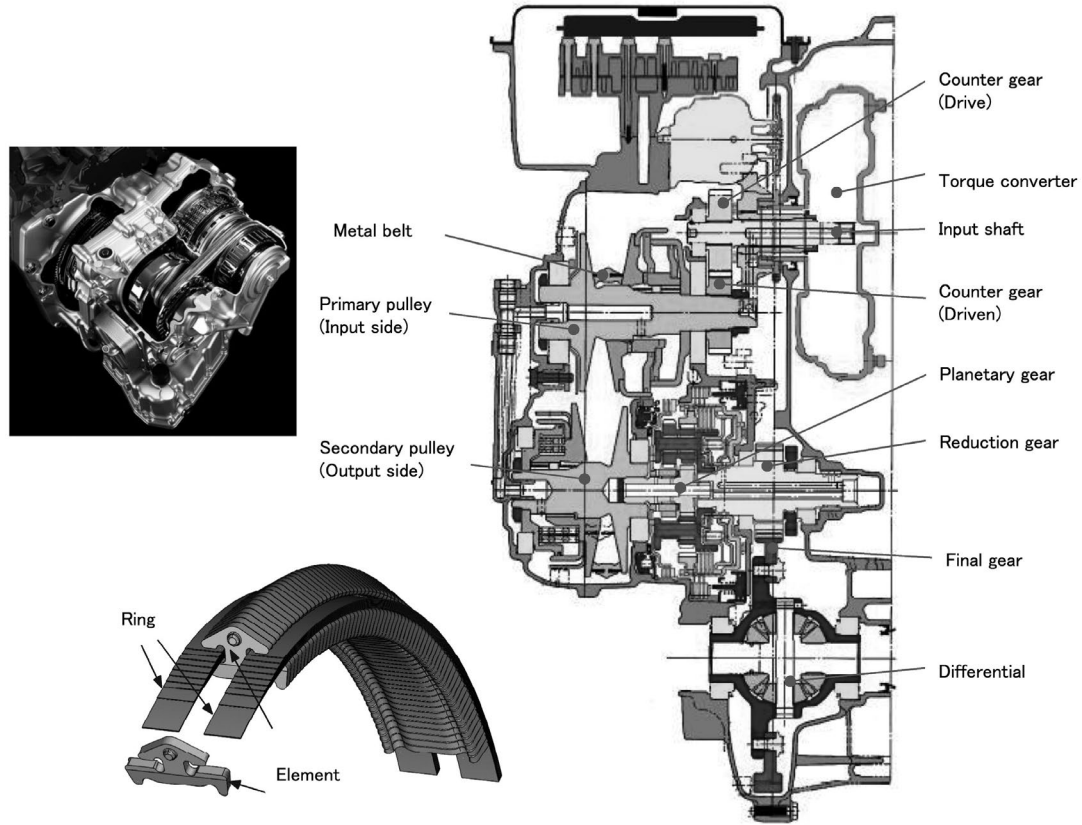


Fig. 9. Sectional view of belt CVT for front-drive cars (Jatco).

3. 1 歯車の材料技術

近年の高トルク化や小型化に対応すべく、トランスミッション内の歯車には、高い歯元疲労強度、衝撃強度、耐ピッチング強度が求められる。

歯元の疲労強度向上には、歯車表層に容易に圧縮残留応力を付与できるショットピーニング技術が一般的に用いられている。現在では、ハードショットピーニング²¹⁾に加え、さらなる圧縮応力の付与を目的とした二段ショットピーニングも採用されている²²⁾。

この他にも、ガス浸炭時に生成する表面の粒界酸化層深さが強度に悪影響を及ぼすことが知られており²³⁾、粒界酸化を皆無にできる真空浸炭の適用も有効である。

また、真空浸炭後、被処理材よりHV 50-250程度硬いショット粒を投射することにより、より高い圧縮残留応力と加工硬化を付与でき、疲労強度が飛躍的に向上するとの報告もある²⁴⁾。このように、材料、工法を組み合わせた両面からの取り組みで歯元強度は飛躍的に向上してきている。

一方、歯面の耐ピッチング性能の確保も重要な課題であり、近年では、正常な歯面潤滑の状態でも300℃程度

にまで温度が上昇する²⁵⁾ことがあるため、発熱による表面硬化層の軟化を防止するために、JIS鋼に比べてSiとCrを増量添加し、焼き戻し軟化抵抗を向上させた耐高面圧歯車用鋼²⁶⁾が実用化されている。また、合金元素による高温強度の向上に対し、浸炭窒化処理により軟化抵抗を高める取り組みや軟化抵抗性の高い材料と浸炭窒化処理との組み合わせも開発され実用化されている²⁷⁾。また、真空浸炭品にショットピーニングを施した場合、歯面の常温硬さ、圧縮残留応力の向上に加えて、300℃焼き戻し硬さも向上することにより、ピッチング強度が更に向上することが報告されている²⁸⁾。

以上述べてきたように、高強度歯車を達成するためには、鋼材と熱処理、ショットピーニングなどの工法との組合せが重要である。また、昨今のHEV、EV車両の普及に伴い、EV走行時の静粛性向上、即ちギャノイズ低減も重要な課題の一つである。ギャノイズ低減のためには、歯形の高精度化が求められ、今後は低歪鋼や焼入れ時の熱処理歪を低減するガス焼入れ²⁹⁾など、材料と工法の最適組合せを考慮することが静粛性向上にも重要となってくる。

3. 2 CVTプーリの材料技術

プーリは、歯車に比べると質量・体積ともに大きく、CVTの大容量化や軽量コンパクト化を実現するにはキーとなる部品の一つであり、特に金属ベルトのエレメントまたはチェーンとの接触面（以下、シーブ面）は、トルクを伝えるという重要な機能を有する。シーブ面は、ミクロな金属接触と微小すべりにより発生する表層微細亀裂の剥離、いわゆるピーリング摩耗の抑制が重要である。Fig. 10にユニット耐久試験後のシーブ面に発生したピーリング摩耗の一例を示す³⁰⁾。ピーリング摩耗の抑制には接触面の硬さ向上が有効であり、微粒子ピーニング処理が実用化されている³¹⁾。

また、油圧によってプーリがベルトまたはチェーンを挟み込む推力が低すぎるとスリップロスが発生し、反対

に、推力が高すぎると油圧系システムの負担が高くなりフリクションロスが発生するという課題がある。従って、耐ピーリング摩耗性を損なわずに、摩擦係数を上手く制御するため、シーブ面の微細な面性状を最適化する技術開発もなされている³²⁾。

さらに、生産性向上を目的とした、浸炭温度の高温化や真空浸炭化による浸炭時間の短縮も大きな課題である。プーリにおいても、AIN析出物による結晶粒粗大化防止策がとられているが、通常、浸炭温度が1000℃を越えるような高温浸炭を行った場合、AINが固溶し、粒成長のピン止め効果が得られなくなる。そのため、より高温安定性の高いNbやTiなどの炭窒化物を分散させた鋼材の検討や、Nb添加鋼の採用がなされている^{33), 34)}。

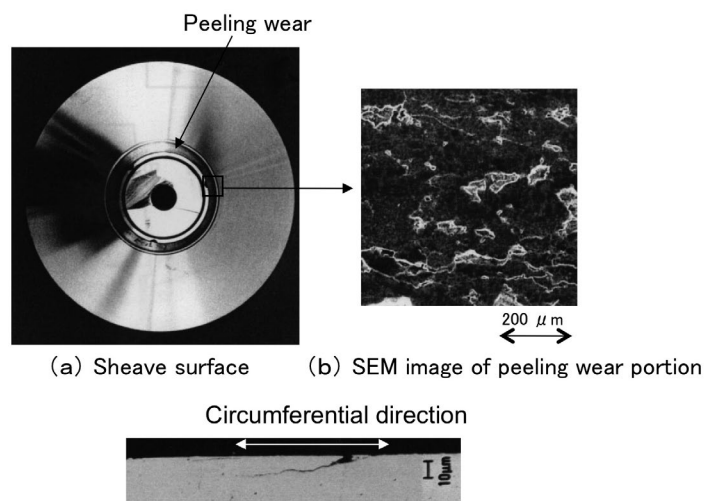


Fig. 10. Example of peeling wear of belt CVT pulley.

4. 電動パワートレイン用モータ材料の技術動向

前述のように、自動車のCO₂排出量の削減にはハイブリット車や電気自動車の普及が不可欠であり、近年は電気自動車やハイブリッド車が量販車として各自動車メーカーから販売されるに至っている。日産自動車では2010年に発売を開始した「日産リーフ」、「フーガハイブリッド」を皮切りに、これら電動車両の普及に努めており、電動パワートレインに関連する技術開発が重要な役割を担っている。

Fig. 11に日産自動車「日産リーフ」に採用している電気自動車用パワートレインシステムの構成を示す³⁵⁾。

Fig. 11ではマイナーチェンジ前後の変遷を示してお

り、マイナーチェンジ後のシステムは、パワーデリバリーモジュール (PDM)、インバータ、モータ、減速機から構成されている。従来、車両後方にあった充電器を車両前方のモータールームへ移動し、DCDCコンバータと統合してPDMとしてインバータ上部へ搭載しており、よりコンパクトで軽量のシステムを実現している。

電気自動車およびハイブリッド車の普及加速には、コスト低減と一充電当たりの航続距離延長もしくは燃費向上が求められているが、特に上述の電動パワートレインを構成する重要コンポーネントであるモータに使用される磁性材料は、コストおよびエネルギー効率に大きな影響を及ぼすため、開発が盛んに行われている。

本章では、これらの背景を踏まえて電動車両に使用される磁性材料の技術動向について紹介する。

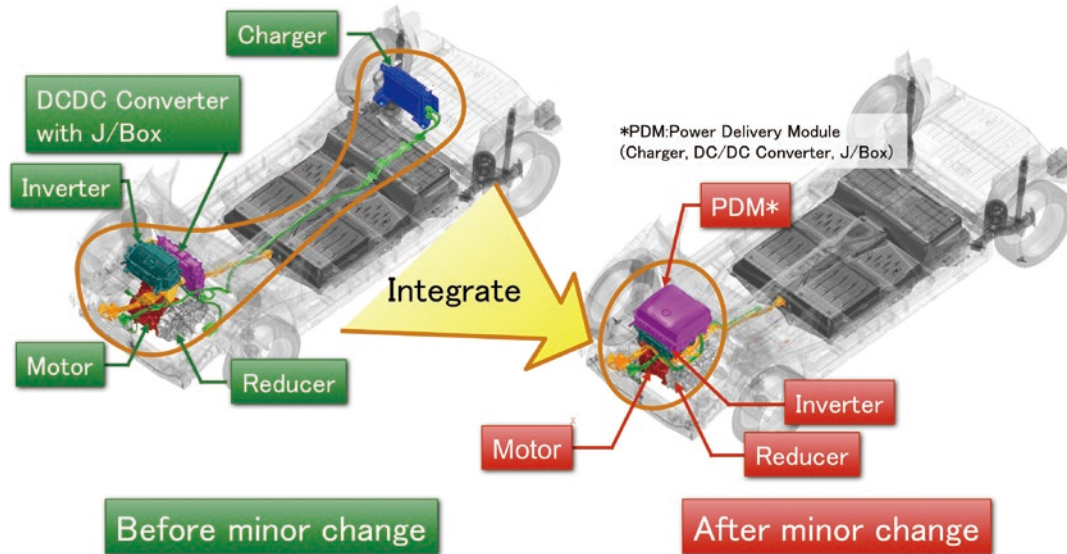


Fig. 11. Power train system for electric vehicle (Nissan Leaf) .

4. 1 永久磁石材料のDy使用量低減技術

電動パワートレインの駆動源となるモータには小型高出力で高効率であることが求められるため、埋込磁石型同期モータ（Interior Permanent Magnet Synchronous Motor：以下IPMモータ）が採用されている。Fig. 12には、IPMモータの部品構成、Fig. 13にはモータ断面の模式図を示す。ロータ部品には高性能永久磁石であるNdFeB磁石が用いられており、その材料性能がモータ性能に大きく寄与している。

自動車に用いられる電動パワートレイン用モータでは、コイル銅損、コア鉄損などに起因する熱によって磁石が高温に曝される。よってNdFeB磁石には高い耐熱性が求められるが、NdFeB化合物自体の耐熱性は決して高くないため、耐熱性を付与するためにDyを添加するのが一般的である。使用温度域によっては10 wt%近く添加されている場合もあり、さらに他の用途に比べて搭載磁石量の多い電動パワートレイン用モータでは、特にDyの使用量が多くなる傾向にある。しかしながら、Dy資源は中国南部で採掘されるイオン吸着鉱からの供給に極端に依存しており、2010年の諸島問題をきっかけに起きた価格高騰では、あらためて供給リスクが認識される事態となった。

このような背景からNdFeB磁石に添加されるDy削減技術の開発が加速され、各磁石メーカーでは磁石の性能を落とさずにDy使用量を削減できる技術として、粒界拡散技術の開発が盛んに行なわれている³⁶⁾。最近では、粒界拡散技術を電気自動車やハイブリッド車に採用

する動きも広がりを見せており、製品への採用例としては2012年11月にFig. 14に示す粒界拡散技術を用いた磁石が日産リーフに搭載され、Dy使用量の40%削減を達成している³⁷⁾。

粒界拡散技術は、磁石を板状の製品形状に加工した後に、磁石表面からDyを粒界に沿って磁石内部に拡散させる技術であり、効果的に粒界近傍にDyを濃縮することができる。従来技術では、Dyは原料合金溶製の段階で添加されるため、焼結後の製品磁石においてDyは結晶粒内に均一に分布する。しかしながら、Dyは結晶粒界近傍に存在した方が耐熱性向上の効果が大きいため、粒界拡散により結晶粒界近傍にDyが濃縮した状態を作り出すことで、従来同等の耐熱性を得るために必要な結晶粒内部のDyを削減することが可能となる。また、結晶粒内部のDyが削減できることで、磁束密度の向上という効果も得られ、モータ出力の向上にも寄与する。

一方でNdFeB磁石結晶粒の微細化もDy削減に有効な手段として検討されている。通常、NdFeB磁石は5 μm程度の平均粒径に粉碎された原料粉を焼結することで製造されるが、粉碎粒径をさらに小さくすることで焼結後の結晶粒を微細化するとDyに頼らずとも耐熱性が向上することが知られている。粉碎粒径の微細化には、粉碎方法や微細粉末の酸化抑制といった課題があり、従来工程を用いた微細化には限界があるため、ヘリウムガス循環式ジェット粉碎システムやプレス法を使わない新しい低酸素工程による焼結体作製方法などが提案されている³⁸⁾。

上記、Dy削減技術の進展もあり、現在のDy価格は落ち着きを取り戻している。しかしながら、2010年以前に

比べると Dy 価格は高値で推移しており、今後、環境対応車がさらに普及すれば全体需要が増加すると推測されるため、資源リスクが完全に払拭されたとは言い難い。環境対応車の普及を促進するためにも、さらなる Dy 削減技術の進化が期待される。

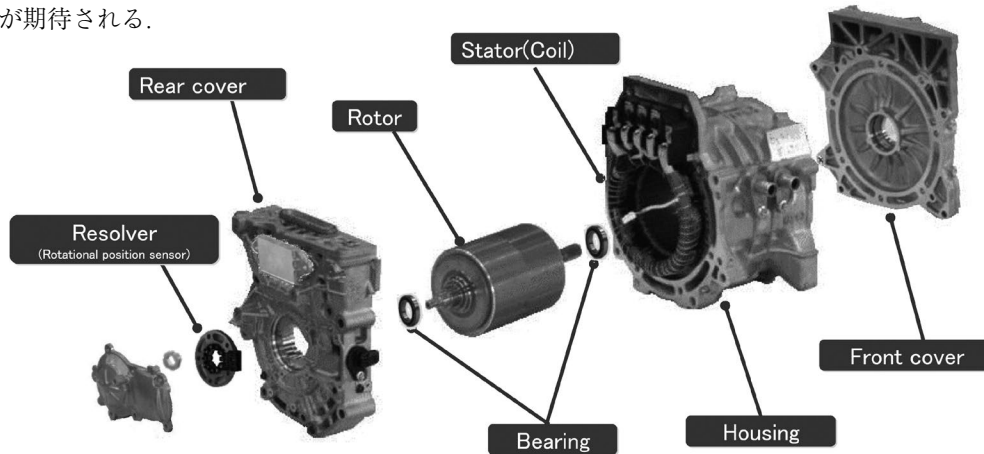


Fig. 12. Parts for IPM motor.

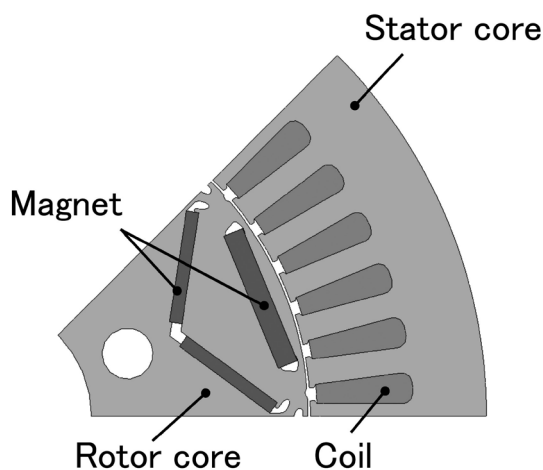


Fig. 13 Cross-section of IPM motor.

4. 2 鉄損低減によるモータの高効率化技術

モータの消費電力を低減することは、電気自動車の航続距離延長やハイブリッド車の燃費向上につながる。市街地走行モードでは、軽負荷域のモータ使用頻度が高く、走行時の電力消費を低減するには、軽負荷域のモータ損失を減らすことが重要となる。モータに使用されるもう一つの磁性材料としてロータ、ステータコアを構成する電磁鋼板が挙げられるが、電磁鋼板はモータ駆動時にステータ側のコイル巻線からの交番磁界にさらされることで発熱し、エネルギーを損失する。これを鉄損と呼び、特に軽負荷域ではモータ損失の中で大きな割合を占めるため、電磁鋼板の鉄損を低減することが求められる。

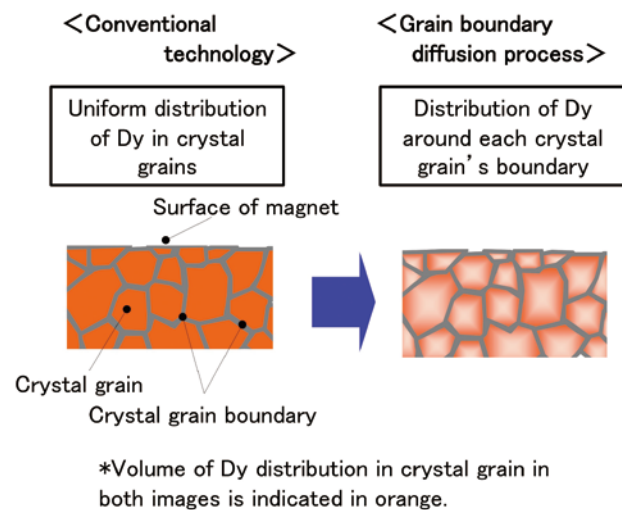


Fig. 14. Image of grain boundary diffusion process.

一般的にモータ向け無方向性電磁鋼板として各鉄鋼メーカーからは 0.5 mm、0.35 mm 厚さの製品がラインナップされている。しかしながら、電動パワートレイン用モータでは効率向上のために鉄損の中でも特に渦電流損失を低減できる薄手鋼板を採用する例が広がりを見せている。薄手鋼板を採用するには、圧延工程のコストアップ、コア部品構成時のかしめ積層が困難になることなどが課題となるが、2010年発売の日産リーフには経済性と工程成立性から 0.3 mm 厚さの電磁鋼板が選定されている³⁹⁾。

また、鋼板を薄手化するだけでなく、さらに電磁鋼板を素材の面から置き換えようとしている例としては、

Fig. 15 に示すような圧粉磁心や鉄基アモルファス材料などが挙げられる⁴⁰⁾。

圧粉磁心においてはDCDCコンバータ用車載リアクトルなどでは採用実績がある⁴¹⁾ものの、現時点では電磁鋼板と比較して磁束密度が劣ることや強度不足によりロータのような回転部品への適用が難しいという課題がある。

また、アモルファス材料も変圧器や産業用モータへの適用例はあるが、超急冷铸造による金属組織制御を行うことから数十 μ mの薄帯形状で製品が供給されるため、モータコア製造時に一般的に用いられる工法であるかしめ積層が困難であるという課題を抱えている。よって、現時点では、両者ともに量産車の電動パワートレイン用モータとして採用されるには至っていない。これら新素材を採用するためには、いっそうの素材性能の向上と素材の特徴を活かしたモータへの適用開発が必要と考えられる。

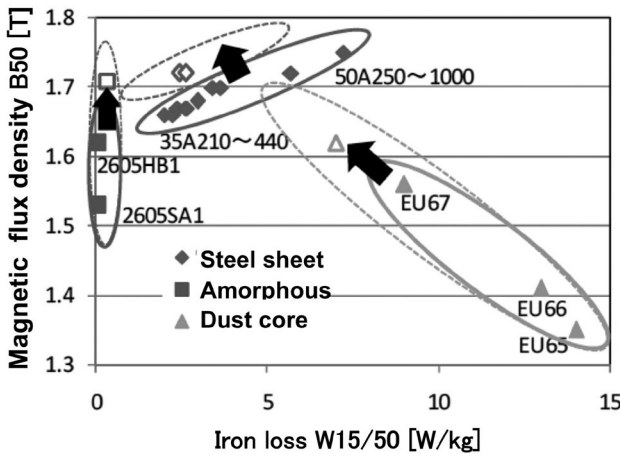


Fig. 15. Example of properties for soft magnetic materials.

5. 結 言

以上、自動車のCO₂削減に貢献するエンジン、トランスミッション、電動パワートレイン用モータの材料技術とその開発動向を紹介してきた。エンジン、トランスミッションの更なる高効率化のためには、低フリクション化や高強度化などの更なる材料技術の革新が不可欠であり、電動車両の普及には、磁性材料の更なる高性能化、低廉化技術の進展も重要である。

また、本稿では紹介しなかったが、CO₂削減には車体の軽量化も有効な手段の一つである。特に昨今のダウンサイジングターボや電動パワートレイン車両においては、従来の大排気量エンジンに比べて、燃費に対する車体重量の感度が高くなる傾向にある (Fig. 16)⁴²⁾。従って、コストを睨みながらも、ハイテンやアルミ、マグネシウム、CFRPなどの軽量材料を適材適所に使い分けるマルチマテリアル車体の開発も自動車各社で盛んに行われており、こちらもやはり材料技術がキーとなっている。

最後に、長年自動車の材料技術開発に携わってきた筆者としては、ついに『材料でクルマを革新する』時代が来たと考えている。これからは、日本のモノづくり技術を武器に、パワートレインも車体も、材料オリエンテッドでクルマの未来を切り拓いていきたい。

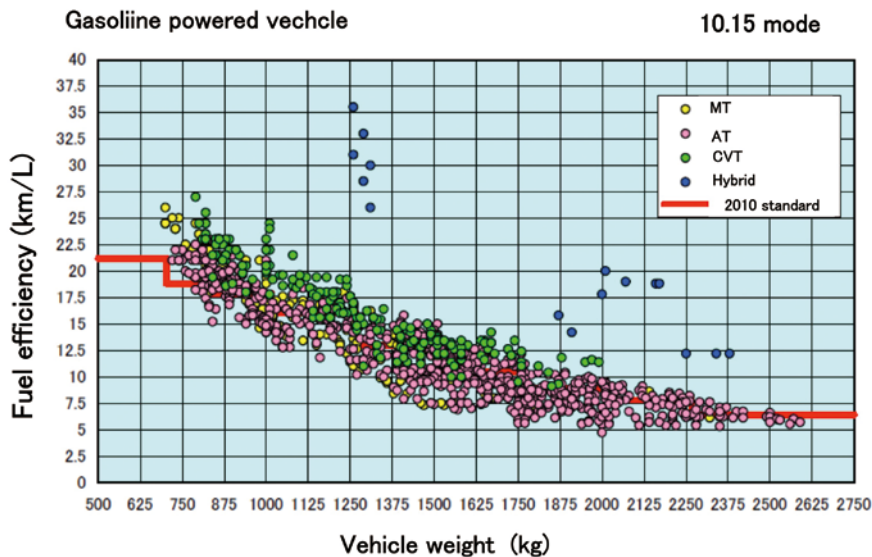


Fig. 16. Relationship between vehicle weight and fuel efficiency.

(文 献)

- 1) 日産グリーンプログラム 2010:
http://www.nissan-global.com/JP/ENVIRONMENT/GREENPROGRAM_2010/
- 2) 日産サステナビリティレポート 2010 地球環境の保全: <http://www.nissan-global.com/JP/COMPANY/CSR/ENVIRONMENT/index.html>
- 3) M. Masuda, M. Ujino, K. Shimoda, K. Nishida, I. Marumoto and Y. Moriyama: SAE Papers 970002 (1997).
- 4) 保田芳輝, 加納眞, 馬淵豊, 三宅正二郎, 齊藤喬士: トライボロジー会議 春, 予稿集, 9(1999).
- 5) Y. Mabuchi, T. Hamada, H. Izumi, Y. Yasuda, M. Kano,: SAE Papers 2007-01-1752(2007).
- 6) 池田伸, 石塚隆, 藤茂和, 日産技報: 62, 4(2008).
- 7) 塩谷英爾, 松山秀信, 池田明弘, 浜田孝浩: 溶射 46, (1), 86(2009).
- 8) 堀田滋, 稲垣英人, 宮本典孝, 児玉幸多: 自技会講演会前刷集, 20115738(2011).
- 9) 持田浩明, 村木一雄, 谷合宏之, 浜田孝浩, 中島匡哉: 自技会講演会前刷集, 20145765(2014).
- 10) Y. Kagohara, M. Niwa, A. Ono, H. Ishikawa: SAE Papers 2007-01-1570(2007).
- 11) 萩原秀美: 月間トライボロジー, 5, 12(2003).
- 12) 森広行, 中西和之, 高橋直子, 加藤直彦, 大森俊英: トライボロジスト, 54, (1), 40(2009).
- 13) 樋口毅, 馬淵豊: トライボロジー会議 春, 予稿集, 171(2007).
- 14) MotorFan illustrated, 48, 三栄書房, 61(2010).
- 15) 馬淵豊: 月刊トライボロジー, 25, (5), 22(2011).
- 16) 島野聡, 内山茂樹, 山口雅史: 自技会講演会前刷集, 20115364(2011).
- 17) 大平哲也, 田中竜司, 自技会講演会前刷集, 20115358(2011).
- 18) 植野郁夫, 安保佳寿: 日産技報, 53(2003) 75.
- 19) 中川善朗: ジヤトコテクニカルレビュー, No.11 (2012).
- 20) 小長谷文人, 大曾根竜也, 寺内政治: ジヤトコテクニカルレビュー, No. 13(2014).
- 21) 岡田義夫, 田原廣光, 松本隆, 吉田誠: 自動車技術会論文集, No. 45(1990) 72.
- 22) 荻野恵司, 藤原康之: 日本熱処理技術協会, 第4回熱処理技術セミナー(2004).
- 23) 二宮彬仁, 岡田善成, 堀本雅之, 前田修作: Honda R&D Technical Review Vol. 26 No. 1 (2014).
- 24) 石倉亮平, 狩野隆, 小林祐次, 宇治橋論: 電気製鋼 79(2008), 25.
- 25) 吉田誠, 岡田義夫, 松本隆, 渡辺陽一: 自動車技術会論文集, 27, No.4(1996) 55.
- 26) T. Nakamura, T. Hanyuda, M. Yoshida, Y. Murakami: SAE Technical Paper Series, 2001-01-0827(2001) .
- 27) 吉田誠, 永濱陸久, 田中敏行, 新明正弘, 清田祥司, 加藤直樹, 岩崎克浩, 渡辺陽一: 自動車技術会論文集, 35, No. 4(2004) 139
- 28) 石倉亮平, 井上圭介, 小林祐次, 辻俊哉: 電気製鋼 81(2010), 2.
- 29) 堀哲: 電気製鋼 84(2013) 61.
- 30) 臼木秀樹: 金属, Vol. 76(2006) No. 5.
- 31) 吉田誠, 池田篤史, 黒田正二郎, 武河史郎, 加地淳: トライボロジスト, 47, No. 12(2002) 901.
- 32) 吉田誠, 今井一貴, 征野啓, 澤田修, 山下弘: JATCO Technical Review No. 12(2013) .
- 33) 嬉野欣成, 中野修, 福田耕一, 藤原輝元, 福田康弘: TOYOTA Technical Review, 52(2002) 84.
- 34) 藤原克哉: JATCO Technical Report, 4(2003) 62.
- 35) H. Shimizu, T. Okubo, I. Hirano, S. Ishikawa and M. Abe: SAE Technical Paper(2013), 2013-01-1759.
- 36) 中村元, 廣田晃一, 美濃輪武久, 本島正勝: Journal of the Magnetics Society of Japan Vol. 31, No. 1 (2007), 6.
- 37) 日産自動車プレスリリース(2012): http://www.nissan-global.com/JP/NEWS/2012/_STORY/121120-02-j.html
- 38) 宇根康裕, 佐川真人: 日本金属学会誌 第76巻 第1号(2012), 12.
- 39) 佐藤義則, 石川茂明, 大久保孝仁, 阿部誠, 玉井克典: 日産技報 No. 69・70(2012-1), 21.
- 40) 榎本裕治: 電気学会ニュースレター Vol. 129, No. 12 (2009), 10.
- 41) 杉山昌揮, 山口登士也, 大河内智, 岸本秀史, 服部毅, 齋藤貴伸: SOKEIZAI Vol. 51 No. 12 (2010), 24.
- 42) 国土交通省ホームページより