

自動車はモータで走る時代へ

2005年東京モーターショーでは、燃料電池車や電気自動車、ハイブリッド車など多数の低公害車が出品された。いずれの車も高性能な駆動モータを搭載し、モータで走る自動車の可能性を示した。環境負荷低減が大きな課題となるなか、自動車におけるモータの役割は重要度を増している。モータの特性を生かす新しい車体設計や制御技術も開発が進行している。最新の駆動モータの開発動向と性能向上を支える材料技術を紹介する。

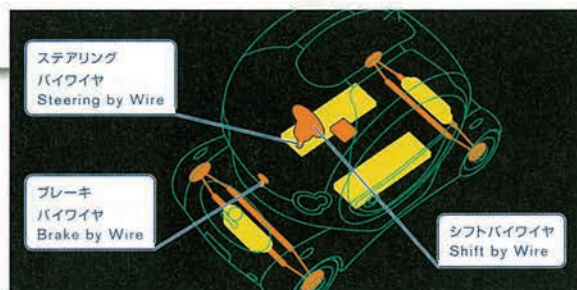
2005年東京モーターショーでは、モータの高い制御性を生かしたコンセプトカーが登場した。写真は日産・電気自動車「Pivo」の事前プレス発表の様子。ワイヤ化によりキャビンと台車は機械的に分離し、キャビンが前後に回転できるようになっている。(写真提供:AP/WWP)

新しい自動車の心臓部

CO₂排出量削減、燃費向上をめざして、低公害車の開発、実用化が進んでいる。1997年に我が国で世界初の量産型ハイブリッド車を実用化されたのを契機に、ハイブリッド車の車種拡大が進行している。最近では小型低価格車にハイブリッドシステムが搭載されることが発表されるなど、いよいよ本格的な普及が期待されている。また2002年には世界初となる燃料電池車の市場導入が開始されている。さらに高性能なリチウムイオン電池の開発もあり、電気自動車の可能性も注目されてきた。

ハイブリッド車*1や電気自動車*2、燃料電池車*3では、モータが走行の動力源として重要な役割を果たす。すでに重量比の出力はガソリンエンジンに見劣りしないレベルに高まっており、またエンジンに比べトルク応答が非常に速く、制御性に優れるという利点を持つ。このような駆動用主機モータの他に自動車にはワイバモータやパワーウィンドモータなど、多数の小型モータが使用されているが、本稿では次世代低公害車の中核技術となる駆動用主機モータ(以降、駆動モータと記す)を取り上げる。

駆動モータの性能は車の走行性能や燃費に影響を与えるため、高性能化が積極的に進められている。特に車の発進時に対応



した高トルク化、最高車速に対応した高速回転化、燃費改善を図る高効率化が図られている。さらに限られたスペースに設置されるためいっそうの小型軽量化も求められている。

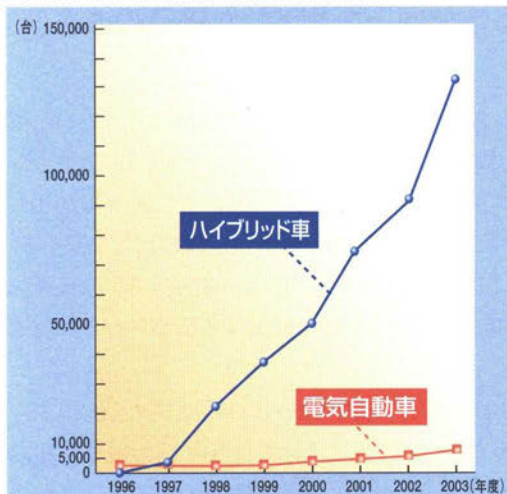
駆動モータには様々な種類があるが、ハイブリッド車や電気自動車、燃料電池車等には誘導モータ(Induction Motor, IMモータ)や永久磁石界磁式同期モータ(Permanent Magnet, PMモータ)が有望とされている。特にPMモータは少ない電流で誘導モータと同程度のトルクを発生できるため効率に優れ、ハイブリッド車を中心に採用されている。PMモータは、磁石をロータ(回転子)の表面に取り付けた表面磁石形(Surface Permanent Magnet, SPM)とロータ内部に磁石を埋め込んだ埋込磁石形

*1 ハイブリッド車:ガソリンエンジンやディーゼルエンジン等の動力と、電気や圧力等の動力を組み合わせて効率的に走行する。

*2 電気自動車:蓄電池に蓄えた電気でモータを回転させて走行する。走行中は排出ガスが出ない。また騒音、振動も少ない。

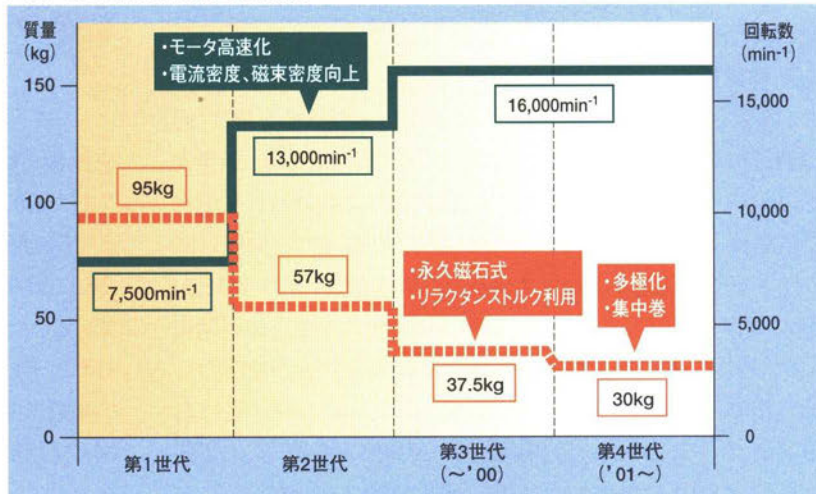
*3 燃料電池車:電気自動車に発電装置として燃料電池を搭載したもの。燃料として水素を搭載した場合、走行時には水しか排出しない。

■ハイブリッド車、電気自動車の普及台数



(社)日本自動車工業会資料より作成

■モータの小型化、高速化の推移

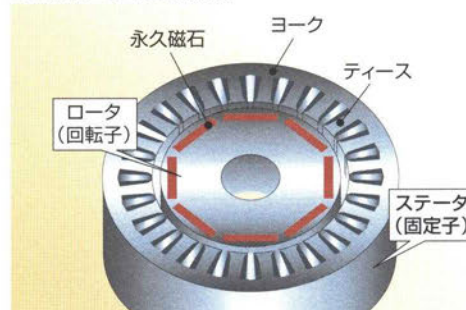


「自動車用モータ技術」(日刊工業新聞社発行)より作成

(Interior Permanent Magnet, IPM)に分類される。IPMモータは、磁石形状や磁束の通路の工夫によって大きなリラクタンストルク^{*4}を活用することができ、高出力、高効率なモータをつくることができる。例えば最近のハイブリッド車では、IPMモータで永久磁石に現在最も磁気特性の高いネオジム(Nd-Fe-B)磁石を採用した例が多い。

*4 リラクタンストルク:自己インダクタンス^{*5}の位置による磁気エネルギー変化によって生じる回転力。
 *5 自己インダクタンス:巻線が自己の磁束変化を受けて電磁誘導作用により起電力を発生させること。

■PMモータの断面略図



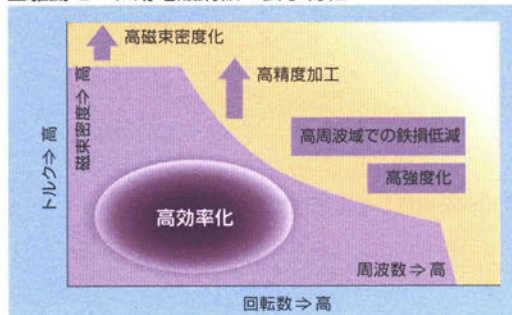
モータの性能を左右する電磁鋼板

駆動モータの高性能化に寄与するキーマテリアルの一つが電磁鋼板である。モータは主にロータ(回転子)とステータ(固定子)で構成されるが、このロータとステータの鉄心に電磁鋼板が使用されている(PMモータの断面略図参照)。

電磁鋼板には方向性電磁鋼板と無方向性電磁鋼板があるが、モータの鉄心には一般的に無方向性電磁鋼板が使用されている。これは鉄の結晶方位のうち、最も磁化しやすい稜線(100)を鋼板面に平均的に配し、さまざまな方向に磁化しやすくしたもので、回転により磁界の向きが常に変化するモータの鉄心に適している。

駆動モータに用いられる電磁鋼板への主な要求特性は、高い磁束密度と低い鉄損である。高い磁束密度は、自動車の発進時に必要となる高トルク化に寄与する。一方、鉄は磁化した際にエネルギーを消費(発熱)する性質があり、このエネルギーの損失が鉄損であるが、鉄損はモータの効率を下げる要因となっている(その他、モータの損失には巻線でジュール熱として発生する銅損、機械的な摩擦熱などの機械損等がある)。特に最近ではモータの高速回転による出力向上が進められているが、高速回転に伴

■駆動モータ用電磁鋼板の要求特性



新日本製鐵(株)資料より

い高周波域での低鉄損が課題となっている。

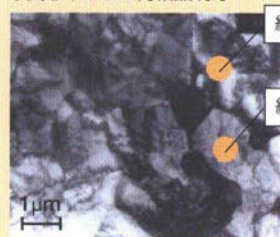
鉄損は、ヒステリシス損と渦電流損の2種類からなる。渦電流損の低減は、ケイ素、アルミニウム等を添加し固有抵抗を上げたり、板厚を低減する等が有効であるが、同時に磁束密度も低下させてしまうため、低鉄損と高磁束密度の両立は難しい。そのため合金成分の最適化に加えて、結晶方位制御等によりヒステリシス損を低減しながら磁束密度の向上が図られている。

無方向性電磁鋼板の製造工程は、製鋼、熱間圧延、冷間圧延後に焼鈍し一次再結晶、結晶粒成長を図る。無方向性電磁鋼板

の結晶方位制御は、二次再結晶まで行う方向性電磁鋼板に比べ短い製造工程の中で行わなければならない。焼鈍後の結晶粒には、結晶粒界近くから再結晶したものと、結晶粒内から再結晶したものが分布している。結晶粒界近くから再結晶した結晶方位は、磁気特性に劣る〈111〉方向を向いている。そこで冷間圧延でできた結晶粒内の変形帯(歪蓄積部)から再結晶する磁気特性に優れた結晶粒を優先的に制御することが重要となる。また冷間圧延時の圧下率や焼鈍温度によっても焼鈍後の結晶方位が変わってくる。さらに製鋼段階でC、S、N等の不純物元素を低減する高純度鋼化も磁気特性向上に寄与する。最先端の製鋼、製造技術が駆使され、低鉄損で高磁束密度を持つ電磁鋼板が開発されている。例えば、最高級グレード並の低い鉄損値で高い磁束密度を達成した電磁鋼板は、2003年に発売されたトヨタ「新型プリウス」の駆動モータに採用され、燃費向上に貢献している。

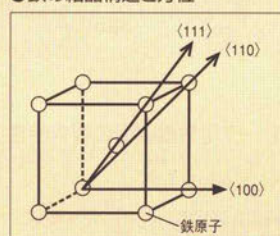
■結晶方位制御

●変形帯からの再結晶萌芽



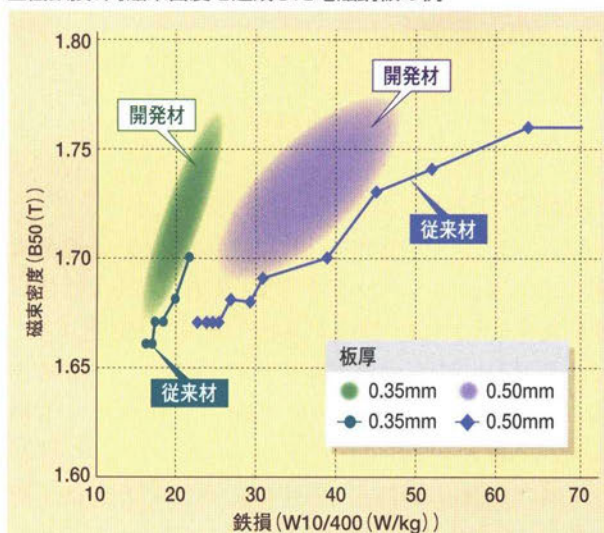
鉄は〈100〉の方位が最も磁化しやすい。結晶粒界近くから再結晶した結晶方位は、磁気特性に劣る〈111〉方向を向いている。そこで結晶粒内の変形帯(歪蓄積部)から再結晶する磁気特性に優れた結晶粒を優先的に制御することが重要となる。

●鉄の結晶構造と方位



写真提供:新日本製鐵(株)

■低鉄損、高磁束密度を達成した電磁鋼板の例



新日本製鐵(株)資料より

さらなる性能向上をめざした鉄心の改良

ロータ、ステータの鉄心は、プレスで鉄心形状に打ち抜いた電磁鋼板を積層、固着して組み立てられる。この製造工程中、プレスをはじめとして溶接やかしめ、圧入や焼ばめ等、種々の加工により電磁鋼板には歪や応力があり、残留歪は鉄損増加に繋がる。これには例えば歪取り焼鈍を行うことで鉄損が低減することがわかっている。また結晶粒を細粒化し歪を低減する結晶粒径制御等も行われている。

最近では電磁鋼板の打ち抜き方法の改善等も進められている。例えば鉄心を幾つかのパーツに分けて打ち抜き、最終的に組み合わせる分割型が開発されている。分割型はパーツごとに巻線を巻いてから組み合わせることができ、巻線占積率の向上が図れる等の利点がある。

分割型を採用し、ステータのティース部位(ステータの凸部、ここに巻線が巻かれる)の打ち抜く方向を最適化した例もある。ティースは磁束が集中するため、ティースの磁気特性を改善すればモータ全体の性能向上に寄与すると考えられており、ティースの寸法や形状を変えるなど、現在盛んに研究が行われている部位である。

例えばホンダ「シビック ハイブリッド」の駆動モータでは、ステータ

■トヨタ「新型プリウス」の駆動モータの概要

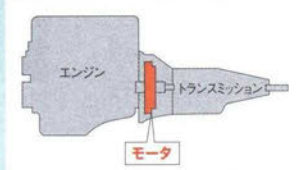
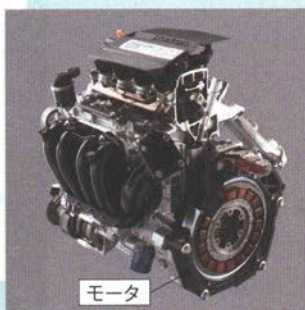
1997年に世界初の量産ハイブリッド車として登場したトヨタ「プリウス」は、2003年に可変電圧システムを採用し、モータ・発電機の電源電圧を従来比2倍の500Vに高圧化している。これにより少ない電流でモータへの大電力供給が可能となっている。モータはPMモータで、出力は従来の33kWから50kWに向上している。また制動時にモータを発電機として作動させ、運動エネルギーを電気エネルギーに変換しバッテリーに回収する回生ブレーキシステムを導入している。



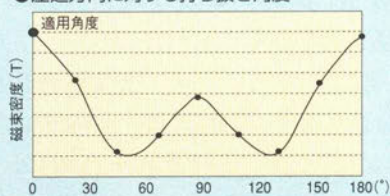
■ホンダ「シビック ハイブリッド」の駆動モータの概要



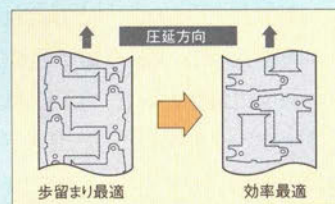
同車のハイブリッドシステムは小型化を図るため、駆動モータはエンジンとトランスミッションの間、わずか60mmのなかに収められている。そのため従来車に対し、最小の変更でハイブリッドシステムを積むことができる。駆動モータのロータ内周部は、エンジントルク及びモータトルクをミッションに伝達する機能を有するため高強度なダクタイル鋳鉄を用い、磁気回路を形成する外周部には電磁鋼板を用いている。また、ステータも様々な改良が行われており、磁気特性向上のために電磁鋼板の打ち抜き最適化が図られている。



●圧延方向に対する打ち抜き角度



ティースの打ち抜き角度を圧延方向に合わせて磁束密度が高くなることがわかっている。



ティースの方向（モータの径方向）と電磁鋼板の圧延方向を合わせて打ち抜くことで磁気特性を向上させている

タのティースに流れる磁束を優先して打ち抜き、磁気特性を向上させている。一般に、無方向性電磁鋼板は方向による特性差がないものとして歩留まり優先で打ち抜きを行うが、実際には若干の方向による特性差がある。そこでステータ各部の磁束の量、方向を詳細に解析し、最適な打ち抜き方法が検討された。その結果、ティースの方向（モータの径方向）と電磁鋼板の圧延方向を合わせて打ち抜くことで磁気特性を改善し、効率向上を実現している。

設計自由度を高めるモータの可能性

高性能な駆動モータを動力にすることで、自動車はどのように変わるのだろうか。

エンジンに比べ駆動モータの特長は、トルク応答が非常に速い点にあり、高い制御性を持つ。またモータは分散配置してもコストがそれほど高くないので、4輪独立駆動が可能となる。このようなモータの特性を生かした新しい技術の開発が進められている。

例えばインホイールモータは、駆動モータをタイヤホイールの内に配置したものである。動力の伝達効率が極めて高く、応答性の良い4輪独立駆動が実現する。ドライブシャフトやデフレンシャルギアなど、従来駆動系部品が占めていた空間の有効利用が図れ、車体設計の自由度が向上する。さらにパイワイヤ技術を用いれば車体設計自由度はいっそう広がる。パイワイヤは機械的作動を電気信号（信号線（ワイヤ））に置き換えることである。パイワイヤ化を図ることでステアリングやブレーキなどの操作装置を自由に配置

できるほか、精密な制御が可能となり運転制御が向上するなど利点が多い。

2005年の東京モーターショーに出品されたコンセプトカーでは、新技術を導入して新しい車体設計や運転制御等が提案されていた。

例えば、日産・電気自動車「Pivo」は、キャビンが180度回転し前後の向きが変えられる。これはパイワイヤ化ならではの機構で、ステアリングやブレーキなどをパイワイヤ化することで、キャビンと

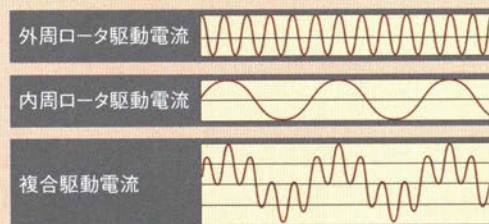
■日産「Pivo」の駆動モータの概要

大幅なモータ性能の向上が難しくなるなか、「スーパーモーター」は新たな構成による小型化、高効率化を試みた例。一つのステータを二つのロータが共有する構成で、複合電流制御により2ロータを独立制御している。二つのロータの鉄心は0.35mm厚、ステータはより効率の高い0.27mm厚の電磁鋼板を使用している。



●複合電流波形

複合電流を流すことで、2ロータ独立制御を可能にしている



台車を機械的に分離し、キャビンの回転を実現している。またこの車は「スーパーモーター」という特殊なモーターが搭載されたことでも話題を集めた。これは1個のモーターで左右2軸の動力を取り出すことができ、しかも左右独立制御が可能となっている。通常、4輪独立制御には4個のモーターが必要になるが、このモーターを搭載することで2個のモーターで済み、大幅な小型化に貢献している。

同モーターの構造は、ステータの内周と外周にそれぞれロータが配置され、一つのステータを二つのロータが共有する構成となっている。通常、ステータのヨークと呼ばれる部位(3ページのPMモーターの断面略図参照)は磁力線が通る道としての働きしかしておらず、しかも磁力線の変化により鉄損が生じる。このヨーク部分に二つ目のロータを配置し、小型化、効率化が図れないかと考案されたのが同モーターである。一つのステータで二つのロータをそれぞれ独立して駆動させるため、新たに複合電流制御技術が開発された。また複数のロータを単一のステータで駆動するには、ロータ間のトルク干渉が問題となるが、同モーターは磁石の配置を工夫することで各ロータの磁石極対数を変え、ロータ間のトルクを非干渉になるように設計している。2ロータ、ステータともに鉄心には電磁鋼板を使用している。これまでもこのようなモーターは提案されていたが、2ロータ独立制御は世界初の試みとなっている。

● 材料の最適化により高性能化を実現

大学においても駆動モーターの特性を生かした自動車の開発が進行している。例えば、慶應義塾大学電気自動車研究室の「Eliica」は、新しい電気自動車の開発、普及を目的とし、産学協同プロジェクトのもとに開発が進められているものである。同車の最高時速は370kmに達し、モーター出力は640kW(850馬力)に及ぶ。これまで電気自動車というと「スピードが遅い」、「パワーが足りない」等の評価が多かったが、F1カー並みの走行性能に話題が集まっている。

同車の最大の特徴はインホイールモーターを搭載した8輪車8輪駆動である。8輪車は4輪車に比べ乗り心地や走行安定性の向上に貢献するという。タイヤホイールの中には、モーターや減速ギヤ、ブレーキ等が組み込まれ、動力の伝達損失の低減や居住空間の拡大などを図っている。インホイールモーターの採用により従来駆動系部品が占めていた床下空間にリチウムイオン電池等の主要部品を収納している。

搭載された駆動モーターは、ネオジウム磁石を採用したSPMモーターである。特にこの車は最高時速370kmに達し、走行抵抗に打ち勝つ高トルクが必要となるため、駆動モーターの発熱量低減が課題



開発が進む電気自動車「Eliica」。停止から時速100kmまでの加速時間は4.1秒、時速160kmまでは7.0秒となっている(記録挑戦車の場合)。(写真提供:慶應義塾大学)



8輪すべてに搭載されたインホイールモーターは、損失を抑え高出力化を実現し、高速走行に対応している。(写真提供:(株)明電舎)

となった。銅損や鉄損などを低減するため、絶縁効果の高い材料を巻線間に用いたり、高効率な電磁鋼板を鉄心に採用したり、ロータ表面の磁石を押さえる磁石押さえの材料を従来のアルミニウムから導電率の低いステンレス鋼に変更するなど、最適な材料の選定により損失を抑え、高出力化を図っている。

次世代を担う自動車はどの方式になるかは未知数であるが、どの方式の車にもモーターが必要となる。現在、モーターの性能は極めて高いレベルにまで達し、大幅な向上が難しくなるなか、さらなる性能向上を目指し材料の最適化が積極的に検討されている。いよいよハイブリッド車が本格的な普及に乗り出すなか、次の新しい自動車の登場に向けて、求められる高性能なモーターの実現に材料が果たす役割は大きい。

- 取材協力 トヨタ自動車(株)、本田技研工業(株)、日産自動車(株)、慶應義塾大学、(株)明電舎、新日本製鐵(株)
- 取材・文 杉山 香里