

自動車用モータのシーズ技術

正員 渡辺 直樹 (信越化学 (株)) 正員 藤綱 雅己 ((株) デンソー)

正員 藤本 博志(東京大学) 正員 道木 慎二 (名古屋大学)

Seeds Technologies for Vehicle Motor

Naoki WATANABE, Member (Shin-Etsu Chemical Co., Ltd.), Masami FUJITSUNA, Member (DENSO CORPORATION),
Hiroshi FUJIMOTO, Member (University of Tokyo), Shinji DOKI, Member (Nagoya University)

The paper reports on seeds technology for vehicle motor. Motor as electric machine has been researched and developed in many years. R&D of specialized motor for Vehicle, has, however, not been established. In this paper, technical trends of Neodymium magnet, Magnetic material, Electrical Insulation Material as motor material and SiC power device, which impacts on power converter for motor drive are introduced. Finally, Reduction gear which is essential for electric power train and vehicle motion control by using In-wheel motor, which require reduction gear as key device, are also touched.

キーワード : Nd 磁石, 磁性材料, 絶縁紙, SiC パワーデバイス, 減速機, インホイールモータ

Keywords : Neodymium magnet, Magnetic material, Electrical Insulation Material, SiC Power Device, Reduction gear, In-wheel motor

1. はじめに

電気機器としては歴史も古く様々な研究開発が行われてきたモータであるが、自動車という製品を成立させるためには、まだまだ課題も多い。本共同研究調査委員会では、2年間の調査活動において、自動車用モータの関する技術について幅広く調査を行った。この調査活動の中で、取り上げた様々な要素技術をシーズ技術として紹介する。

具体的には、直接モータを構成する材料という視点から、Nd 磁石、磁性材料、更には今後の高トルク密度化に重要な役割を果たすであろう絶縁紙の技術動向について紹介する。次に、自動車用モータを駆動するための電力変換器に大きな影響を与えるであろうパワーデバイス、最後に、自動車用電動パワートレインを構成する際に必須となる減速機、パワートレインのレイアウトに自由度を与えるとして注目を集めるインホイールモータが自動車の運動性能に与える意味について触れる。

2. モータ材料技術

〈2・1〉 Nd 磁石

(1) Nd 磁石の市場動向

近年、Nd 磁石は日本国内で年間約 10,000 トン生産されている。日本以外での生産は、主に中国で行なわれており、その重量は日本のおよそ 1.5 倍程度といわれている⁽¹⁾。一方、Nd 磁石の用途は、HDD のボイスコイルモータ (VCM) 向

け、家電や産業用のモータ向けがそれぞれ約 30%、ついで HEV や EV の駆動・発電機や EPS などの各種補機用モータ向けが約 25%と続いている。近年の環境意識の高まりに伴って、CO₂ 排出量削減のための電力消費の低減、省エネルギーが求められており、家電や産業用、自動車向けのモータ向けの需要については、今後さらに伸びていくことが期待されている。

Nd 磁石が VCM 中心から各種モータにも使われるようになったことに伴い、Nd 磁石に要求される性能も変化してきた。従来は使用温度が室温付近であったため、磁力、すなわち残留磁束密度 (B_r) の高い材料が中心に使われていた。一方、Nd 磁石が各種モータで使われるようになると、モータを使用する周辺環境の変化 (高温になる環境での使用等)、およびモータ回転の際の渦電流による発熱で、Nd 磁石が 100°C 以上の高温に達することも多くなり、耐熱性も求められるようになった。一般的に Nd 磁石の耐熱性を決める指標は保磁力 (H_cJ) であるため、モータ向けの Nd 磁石には、高磁力 (高 B_r)・高耐熱 (高 H_cJ) の材料が求められている。すなわち、Nd 磁石には、その主成分である Nd₂Fe₁₄B 化合物の構成元素である Nd と、磁石を高温で使うためにその耐熱性を向上させる、すなわち保磁力 H_cJ を向上させる元素 Dy の 2 種類の希土類元素が主に使われている。

(2) Nd 磁石のリサイクル

近年の Nd 磁石の原料の価格高騰を受けて、リサイクルへの関心が高まり、その動向も紹介されている⁽⁶⁾。Nd 磁石に

については、工程内屑の比率が製品の 30~40%と高いため、工程内でのリサイクルは以前から行なわれてきた。工程内でのリサイクルをプロセスの観点から分類すると、湿式法と乾式法に分けられる。湿式法は、Nd や Dy を最終的に酸性溶液中のイオンの状態にして抽出する方法である。最終的に得られる希土類元素の純度が高く、不純物が少ないことから、通常の原料と同等に扱うことができる。そのため、総合的に見るとコスト面で有利であり、現在工業的に主流となっている方法である。一方の乾式法は、リサイクルした回収物を湿式法のように原料工程まで戻さず、そのまま磁石製造工程に投入する方法である。工程が短く原理的に優れた点があるが、不純物量など品質管理が厄介で、生産性が低い。

一方、廃家電や自動車などの市中スクラップからの希土類元素の回収は、スクラップ中の希土類元素含有比率の低さと、磁石だけを選別して取り出しする作業の煩雑さから、現状コスト的に見合う状況にない。ただし、日本国内での希土類元素の確保という視点から見れば、法律も含めた総合的な回収システムの構築が必要となるであろう。

(3) Nd 磁石の開発動向

Nd 磁石には前述の通り、Nd, Dy の 2 種類の希土類元素が使われている。一般的な Nd 磁石の材料設計指針は、全希土類元素 (Nd+Dy) の量は一定としていて、Nd を Dy で置換した割合に応じて、Nd 磁石の保磁力 H_{cj} 、すなわち耐熱性が向上していく。ただし、同時に Nd 磁石の主成分である $Nd_2Fe_{14}B$ 化合物が、より飽和磁化の低い $Dy_2Fe_{14}B$ 化合物に置き換わることにより、磁石の残留磁束密度 B_r は低下してしまう。従って磁石の磁力 (残留磁束密度 B_r) と耐熱性 (保磁力 H_{cj}) はトレードオフの関係にあるといえる。このような状況から、以前からモータ等で使用される耐熱性が必要な Nd 磁石の開発の方向性は、いかに残留磁束密度 B_r を下げることなく、保磁力 H_{cj} を向上させるか、言い換えれば、いかに Dy を使わずに磁石の保磁力 H_{cj} を増加させるか、というところにあった。それに昨今の希土類資源、特に Dy の価格高騰と、将来への供給不安が加わって、省 Dy 磁石の開発への期待、要求がこれまで以上に大きくなってきたと言えよう。

Dy を低減して保磁力 H_{cj} を上げるために以前からやられていた手法として、Nd 磁石の結晶粒径の微細化がある⁽⁷⁾⁽⁸⁾。Nd 磁石は主相である $Nd_2Fe_{14}B$ 化合物の微小な粒子が、粒界相と呼ばれる Nd がリッチな相により互いに結合しているような組織形態を持つ。この主相粒子のサイズが小さいほど Nd 磁石の保磁力 H_{cj} が大きくなることは、経験的に知られている。Nd 磁石は、原料から磁石原料合金溶解し、粗・微粉碎、磁場中成形、焼結・時効して製造されるが、結晶粒径を小さくするためには、微粉碎された粒子のサイズを小さくし、さらに焼結の際に、主相粒子が粒成長しないように温度や時間などの焼結条件を管理する手法が用いられる。ただし微粉碎された粒子のサイズを小さくすると、酸

化の影響も受けやすくなるため、それを抑えるような工程・管理が必要となる。また焼結時の粒成長を抑えるためには、粒界相で別の化合物をつくり、粒成長をとめるような元素 (Nb, Mo, V など) を微量添加する方法がとられる。最近ではこの粒径の微細化を追求し、平均粒径 $1.1 \mu m$ の粉碎粉を用いた Dy 添加なしの Nd 磁石で、保磁力 $H_{cj} = 1.6 MA/m$, $(BH)_{max} = 384 kJ/m^3$ の性能を達成したとの報告もある。

2005 年以降に開発され、現在実用レベルで Dy 削減技術の中心となっているのが、粒界拡散法である。この方法は、一度焼結した Nd 磁石の表面から Dy, Tb などの保磁力増大効果のある元素を供給し、磁石内部に粒界相を通して拡散して、最終的に主相粒子の表面にのみ Dy, Tb を選択配置させる方法である。Dy, Tb を供給する方法として、これらのフッ化物や酸化物などの化合物を Nd 磁石表面に塗布する方法、Dy の蒸気を直接磁石に反応させる方法などがある。この方法では、Dy, Tb が Nd 磁石の保磁力 H_{cj} 増大に関与する部分のみに選択配置されるため、効率的にこれらの元素を使用することができ、同じ保磁力 H_{cj} を持つ通常材に比べて大幅に Dy を削減できる⁽⁹⁾。さらに Dy が少ないことで、残留磁束密度 B_r も同じ耐熱性を持つ通常材に比べて大きくなる。これらの手法は磁石表面から Dy, Tb を拡散させて保磁力 H_{cj} を増大させる方法であるため、保磁力 H_{cj} は原理的に磁石表面部分ほど高くなり、内部に向かうほど小さくなるような分布を持つことになる。したがって、特に厚さが大きな磁石に対しては、保磁力増大効果が薄れてしまう。ただし、厚い磁石であっても得られた保磁力分布が、その磁石のそれぞれの部分にかかる温度や反磁界分布に適合していれば、使用上問題ない場合もある。実用にはより高精度の材料設計 (保磁力分布設計) と使用環境での磁場解析とのすりあわせが求められるが、今後このような技術の進展は十分に期待できる。

Nd 磁石内での Dy の最適配置による使用量削減は、従来から二合金と呼ばれる方法で検討されてきたが、最近ではこの手法をベースにさらに進化した H-HAL 法と呼ばれる手法も開発されている。Dy 源として主相合金よりも粉碎粒径の小さな Dy の酸化物や合金粉末を用い、主相合金粉末と混合してから磁石を製造することにより、より少ない Dy 量で保磁力 H_{cj} を増大させることができる。H-HAL 法には、粒界拡散法と異なり磁石のどの部位でも保磁力 H_{cj} が均一であるという特長がある。

〈2・2〉 磁性材料

鉄心には高い飽和磁束密度と低い鉄損が求められ、現在では一般にケイ素鋼が利用されている。モータにおける主要な損失の一つが鉄損であることから、鉄心材料の更なる低鉄損化が期待されている。しかし、一般に磁性材料では、鉄損と飽和磁束密度が相反する要素とされてきた。例えば、鉄酸化物系フェライト、コバルト基アモルファス、ニッケル-鉄などでは一桁以上透磁率を高く、つまり鉄損を下げ

ることが可能となるが、飽和磁束密度は数分の一に下がる。

そこで、材料の原子配列構造を改良することで、相反を打破する取り組みが行われてきた。アモルファス化もその一つである。アモルファス化により、高透磁率化、つまり鉄損を低く保てるが、アモルファス化を実現するために、一定の混ぜ物が必要であり、これにより飽和磁束密度が落ちてしまうという欠点があった。この考えを更にすすめたのがナノ結晶材料である。10nm程度の α -FeをPやCuなどの合金のアモルファスで取り囲む構造を持つ。これにより、飽和磁束密度はケイ素鋼とほぼ同じ、1.8T~1.9Tを確保しつつ、透磁率はケイ素鋼の一桁上の値が実現されている。実際に鉄損を比較した例でも、方向性/領域制御された $t=0.27\text{mm}$ ケイ素鋼と比べ、1.7T/50Hzの動作点で鉄損を半分程度に抑えることができると報告されている⁽¹⁰⁾。

一方で課題も残る。従来のアモルファス系の材料に比べ改善されているとはいえ、未だその脆さは加工性に大きな制約を課す。また、今現在、厚さ0.02mm、幅50mm程度のリボン材の形でしか製造できないことをからも、鉄心としての利用は容易ではない。加工性や量産性の改善はもとより、鉄心を構成するための生産技術にもブレイクスルーが期待される。例えば、文献(11)では、高速用途のモータを対象として、加工性の悪いアモルファス材を利用したモータ鉄心について検討が行われている。

〈2・3〉 絶縁紙

磁石・磁性材料や巻線の影に隠れがちであるが、今後重要な技術シーズに高熱伝導性絶縁紙がある。自動車用モータでは、高トルク密度（短時間最大トルク/重量）が特に重視される。このため、固定子の電流密度が高くなりがちであり、その結果、固定子巻線に発生する熱をいかに速やかに処理できるかが重要なカギとなる。実際、THS IIにおいては、潤滑油を直接コイルエンドに散布することで冷却を実現している。今後、希土類磁石の使用量削減を固定子の電流密度を更に上げることで実現する必要があると思われるが、一般的に樹脂が用いられるモータの絶縁紙は、固定子の構成要素の中で、圧倒的に熱伝導率が低く、固定子電流密度向上のボトルネックとなっている。

近年、熱伝導率を10倍程度に向上させ、一けた台の熱伝導率($\text{W/m}\cdot\text{K}$)を実現したPPS(polyphenylene sulfide)樹脂が登場し、従来、熱的な問題から金属が利用された分野で利用され始めている。これは、樹脂に熱伝導性の高い材料(熱伝導性フィラー)混ぜることで高熱伝導率を実現しており、更にフィラーを網の目のように結合させることで、金属並みの2けた台の熱伝導率を実現したとの報告もある。

ただし、一般に高熱伝導性フィラーは導電性の場合が多く、樹脂としての絶縁破壊電圧が大幅に低下する、フィラーを混ぜることにより、絶縁紙としての柔軟性が損なわれるなど、課題も多く、今後の改良が期待される。

3. パワーデバイス技術

〈3・1〉 HEV・EV への SiC デバイスの期待

SiCはSiに比べて優れた物性を持っている。特に破壊電界強度、熱伝導度が高いという物性の優位性から、現状のSiデバイスに比べ、2~3倍の電流密度の動作、200℃以上の高温動作が可能であり、インバータなど電力変換システムの低損失、高出力密度化が期待できる。同じチップサイズなら大容量化のため複数並列接続されている素子数を減らすことができるし、同じ定格容量の素子ならば素子サイズを1/2~1/3に小さくできるので実装スペースを小さくでき電力変換システムの小型化が図れる。またSiCでは600V以上の高電圧であってもMOSFETのようなユニポーラデバイスでSi-IGBTのようなバイポーラデバイスよりも低抵抗が実現できるため、スイッチング損失はSi-IGBTに比べて1/2~1/10に低減できる。したがって動作周波数の高周波化も容易となり、昇降圧コンバータなどに使われているような体格の大きなリアクトルやコンデンサを1/2以下に小型化でき、インホイールモータなどモータと一体化すれば、車両レイアウトの自由度が高められる。

また現在のシステムではSiパワーデバイスの動作温度の制限から、冷却系としてエンジン冷却系を共用できず、別システムの専用冷却水を用いているが、200℃を超える温度で動作可能なSiCでは、エンジン冷却系でも現状と同等以上の冷却能力を確保できるため、冷却系のエンジンとの共用化、さらには空冷化も可能になる。

また、実際の車の通常走行時(低負荷時)では、SiC-MOSFETでは順方向電流がゼロ電圧から立ち上がるため低損失な動作が可能であり、省エネルギー効果も期待できる。HV・EVではインバータシステムの小型、軽量化の効果も考慮すると燃費が約5~10%改善可能という試算もなされている⁽¹³⁾。

〈3・2〉 SiC デバイス開発の現状と課題

HEV・EV分野で期待されているSiCデバイスであるが、この用途では耐圧600~1200V、定格電流100~400Aの大容量のMOSFETとSBD(ショットキーバリアダイオード)が要求される。

近年の開発事例を見てみると、'07年にデンソーが100A級のSiC-MOSFET、SiC-SBDチップを用いたインバータモジュールによって車両用モータ駆動を発表した後、'08年に日産自動車がSiCダイオードを使用した車両用のインバータを開発し燃料電池車での走行を発表した⁽¹⁴⁾。ロームは、本田技術研究所と共同で、SiC-SBD、SiC-MOSFETを搭載した1200V・230Aクラスの次世代電気動力車向けハイパワーインバータモジュールの開発を発表した。コンバータ回路(1相)とインバータ回路(3相)を1パッケージに搭載し、小型化を実現している。パワーモジュールの性能としてスイッチング損失が従来のSiデバイスと比較して約1/4以下に低減されており、駆動周波数を上げることができるため、従来Si-IGBTを使用した場合のPWM周波数20kHzに対して、4倍

の 80kHz の高周波化も図れるとしている⁽¹⁵⁾。'09 年には三菱電機より、SiC-MOSFET (5.2mm×5.2mm) と SiC-SBD (5.2mm×5.2mm) を用いて 11kW 出力の SiC インバータの開発が発表され、従来の Si デバイスによるインバータに比べ、70%の損失低減と体格を 1/4 に小型化を達成した⁽¹⁶⁾。その後も各社で鉄道及びEV用大容量インバータの開発例が報告され SiC デバイスの特徴を生かした新しいインバータ内部構造で 60kW/L という高出力密度も実証されてきている。

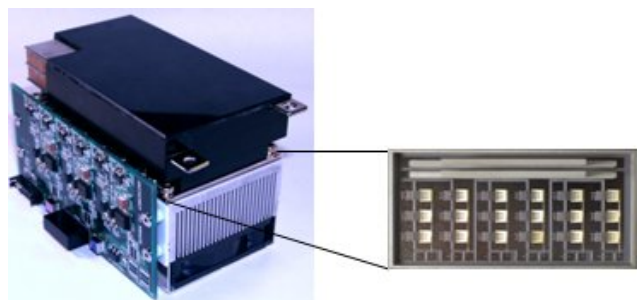


図 3.1 60kW/L SiC インバータの概観

以上のように、デバイスの初期特性としては十分な性能を達成できるレベルにある。今後の課題はデバイスの大面積化と信頼性確保の段階にある。特に自動車では負荷変動が大きく、広範囲の電流、電圧領域で使用するため、 $-40 \sim 200^{\circ}\text{C}$ 以上の全温度領域で十分なサージ耐量や、短絡耐量が確保できることを検証する必要がある。また信頼性において最も重要な MOSFET のゲート酸化膜の寿命については 30 年以上確保できるとの報告例⁽¹⁷⁾があるが、現状では Si デバイスに比べてまだ寿命が短く、結晶欠陥の影響を含めて十分な評価解析が必要である。ウエハの結晶欠陥については、らせん転移密度が 10 分の 1 以下 (転移密度: $300 \text{ 個}/\text{cm}^2$ 以下) の $\phi 4$ ウエハまで実現できている⁽¹⁸⁾が、100A 以上の電流容量のデバイスにはさらにもう 1 桁から 2 桁の転位密度低減が必要である。

実用化のために残る最後の課題はコストである。HEV・EV 用 Si-IGBT が $\phi 8$ インチのウエハで製造されてきていることを考慮すると、単純計算では、SiC でも $\phi 6$ インチ (150mm) 以上のウエハで製造しないと Si デバイスと同等以下のコストは実現できない。既に米国 CREE 社からは $\phi 150\text{mm}$ の SiC ウエハが実現可能であることは実証されており⁽¹⁹⁾、近くに実用レベルのものが供給されるであろう。

〈3・3〉 実用化への展望

SiC パワーデバイスの実用化は既に 10A 程度の小電流容量ダイオードから電源分野中心に進んでいる。また MOSFET についてもサンプル出荷が開始された。今後、ウエハの低コスト化、大口径化、高品質化が進み 50A 程度の電流容量のダイオード・MOSFET が実用化に目処が立てば、太陽光発電用パワーコンディショナ等エネルギー分野への適用が始まり、SiC パワーデバイスの市場が拡大するものと予想される。その後 100A 以上の電流容量の SiC デバイスの信頼性、歩留

りが実用レベルになり鉄道及び HEV・EV への適用も開始されることだろう。

4. パワートレイン技術

〈4・1〉 減速機

移動体である自動車においては、重量・スペースへの制約は厳しく駆動用モータもその例外ではない。小型軽量化を実現するために、回転数でパワーを稼ぎ、出力軸をギアで減速することでトルクを稼ぐ構成が利用される。このため、モータの設計においては、電気的な面から極対数や電源周波数のみならず、機械的な面から減速機において実現可能な減速比に配慮し、パワートレインとして総合的に最適な構成の実現に貢献するように、最高回転数を設定することが重要となる。特にインホイールモータにおいては、ホイール内にモータと減速機を設けることから、減速機の役割は重要となる。

減速機には、遊星歯車、サイクロイド機構、波動歯車機構など、様々な仕組みが存在し、最高回転数、減速比、効率を考慮しつつ選択することとなる。

サイクロイド減速機⁽²¹⁾は、一段で大きな減速比を取ることができる点に特徴がある。実際、モータの回転数を 15000rpm、最高速度を 150 km/h と想定すると、減速比は 10 以上あることが望ましい。ただし、サイクロイド減速機は、原理上揺動しながら回転することから、減速機を二つ用意して位相をずらす、カウンターウェイトを用いるなどの工夫が必要とされている。

文献(22)では、効率 90% 入力軸最高回転数 15000rpm を想定してインホイール駆動ユニットの開発が報告されている。この事例では、正逆効率・最高回転数の点で、サイクロイド機構、波動歯車機構を退け、カウンターギア+遊星歯車の 2 段構成で減速比 8.5 を採用している。

〈4・2〉 車両運動制御とインホイールモータ

(1) 電気自動車の運動制御

現在の内燃機関自動車は、地球温暖化、大気汚染、化石燃料の枯渇という大きな問題を抱えている。近年ではこれらの問題を解決すべく、クリーンエネルギーで駆動する電気自動車 (Electric Vehicle : EV) の研究が非常に注目されている。しかしながら電気自動車の優位点はこのような問題だけには留まらない。モータを駆動力源としている電気自動車はモータの特徴である、下記の点において大きな優位性を持つ^{(23),(24)}。

1. トルク応答性が高速かつ正確
2. 電流測定により発生トルクを正確に把握可能
3. インホイールモータを用いればタイヤ各輪に分散配置することが可能
4. 回生制動トルクが発生可能

このモータの特徴に注目し、インホイールモータ (IWM) を搭載した電気自動車を用いて EV ならではの車両運動制御の研究も行われている⁽²⁵⁾⁽²⁶⁾。

これらの車両姿勢制御の研究は、大きく並進方向、旋回方向、垂直方向の運動に分けられる。並進方向の運動では、加速時及び減速時のトラクション制御やスリップ率制御が⁽²⁷⁻²⁹⁾、旋回方向では駆動力差モーメントによるヨーレート制御や、前後輪のアクティブ操舵による横滑り角制御が行われている⁽³⁰⁻³³⁾。さらに、IWM車では垂直方向にアンチダイブ力と呼ばれる大きな力を上下両方向に発生させることが可能であり、これらを利用したピッチング運動の抑制制御やロール制御が提案されている⁽³⁴⁻³⁶⁾。

IWMはバネ下重量が大きくなるため、乗り心地が悪くなる可能性があるという欠点があるが、一般的には懸念されている。しかしながら、これらの研究成果により、垂直方向の力を制御できるというIWM車ならではの利点を用いて、この欠点を克服しつつあることが特に重要である。以下では、その成果の一例を簡単に紹介する⁽³⁴⁾。

(2) インホイールモータを用いたピッチング制御

ピッチング運動は特に制動時に大きく発生し、乗り心地に大きく影響を与えるものである。そこでモータの制駆動力を用いたピッチング運動の抑制制御法を説明する。

IWM車ではサスペンションジオメトリを考えると、図4.1に示すように上下方向に力を発生させることが可能であり、力行と回生を組み合わせれば、任意のピッチモーメントを生成することが可能になる。図4.2に示す実験車両を用いて、制動時のピッチングを抑制した結果を図4.3に示す。機械ブレーキのみの場合は、点線で示すように大きなピッチングが発生するが、これを正負のモータトルクにより実線のように抑制できている。

この考え方をさらに発展させて、ピッチ・ロール・ヨーの3次元モーメントを制御しようとする研究成果が目まはしている⁽³⁵⁾⁽³⁶⁾。

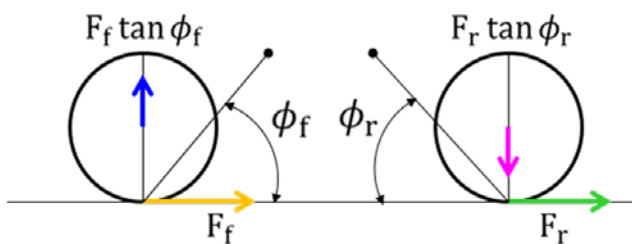


図 4.1 IWMによる上下アンチダイブ力



図 4.2 実験車両(FPEV2-Kanon)と搭載 IWM

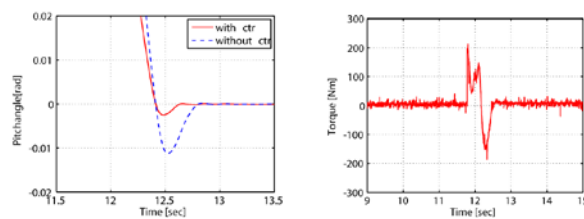


図 4.3 実験結果(左：ピッチ角，右：モータトルク)

(3) 航続距離延長制御へ向けた取り組み

一充電走行距離は電気自動車にとって大きな問題である。上記のようなアクティブ制御を行うことにより、エネルギー消費よりの増えることも懸念され、実際に詳細な検討が行われている⁽³⁷⁾。

これに対して、複数モータの制御を最適に行うことにより、航続距離を延長することが可能になるという研究も進められている⁽³⁸⁻⁴¹⁾。文献 38 では、前後輪に効率特性の異なる IWM を用いて、各モータの発生トルクの合計値がドライバーの要求するトルク値を満たす条件で、前後輪のトルク配分を最適化する方法を提案している。また、文献 39 では、旋回時に必要なヨーモーメントを左右の IWM のトルク差で生成することにより、前輪舵角を必要最小限に小さくし、コーナリング抵抗を減少させることに成功している。

IWM を用いた制御技術により安全性が向上するという事は、古くから知られていたが、緊急時のみ動くシステムでは、なかなか実用化されないというのが実情であった。今後は、本稿で紹介したような、快適性や航続距離をも改善するような、常時作動する制御技術により、その実用化が進むことが期待される。

5. まとめ

本稿では自動車用モータの開発に影響を及ぼすであろう要素技術について述べた。電気機器としては成熟の域に達している感のあるモータであるが、自動車用という製品を成立させるための制約を通してみると、まだまだ興味深い課題が数多く残っている。

文 献

- (1) 石垣尚幸:「金属」, Vol.79,pp682-687 (2009)
- (2) 上條水美:「ふえらむ」, Vol.16,No.5,pp39-45(2011)
- (3) 山本日登志:「高圧ガス」, Vol.48,No.3,pp14-17(2011)
- (4) 「工業レアメタル」, No.121,pp43-48(2011)
- (5) 森本慎一郎, 醍醐市朗, 松八重一代: 金属, Vol.81, p.117-122(2011)
- (6) 中村英次: 機能材料, Vol.31,No.7,pp.37-44(2011)
- (7) 徳永雅亮: 機能材料, Vol.31,No.7,p.7-24(2011)
- (8) 杉本諭: まぐね, Vol.6.No.2,p.81-88(2011)
- (9) 信越化学工業(株) 製品カタログ
- (10) 牧野彰宏,「NE セミナー-SELECTION 新磁性材料 第 1 回 低鉄損・高磁束密度の新軟磁性材料」,日経エレクトロニクス 2011.9.19(2011)

- (1 1) 榎本裕治他, 「アモルファス鉄心を応用したモータ高速化の検討」, 第 19 回 MAGDA コンファレンス, OS3-MA6, pp.109-114(2010)
- (1 2) 上野泰幸他: 「熱伝導率 60 倍の樹脂を開発、金属部品を安価なプラスチックに代替」, 日経エレクトロニクス 2002.12.16(2002)
- (1 3) 財団法人 新機能素子研究開発協会 平成 15 年度 NEDO 調査研究報告書 「SiC 半導体/デバイス事業化・普及戦略に係わる調査研究」平成 16 年 3 月
- (1 4) 日産自動車 2008.9.5 プレスリリース資料
- (1 5) ローム 2008.9.11 プレスリリース資料
- (1 6) 三菱電機 2009.2.18 プレスリリース資料
- (1 7) K. Fukuda et al, "Influence of processing and material defects on electrical characteristics of SiC-SBDs and SiC-MOSFETs", Proceedings of ICSCRM 2009, 11 October 2009, Nurnberg, Germany
- (1 8) 山内 他: SiC 及び関連ワイドギャップ半導体研究会 第 19 回講演会 予稿集, p.36, 2010.10.21-22
- (1 9) CREE 2010.8.30 プレスリリース資料
- (2 0) 鶴田 「SiC 半導体パワーデバイスの車載実用化の展望」, デンソーテクニカルレビュー Vol 16, 2011.12(2011)
- (2 1) 「主役を狙う伏兵技術 part3 EV のモータをインホイールに」, 日経 Automotive 2010.1(2010)
- (2 2) 村田智史, 「インホイールモータ駆動ユニットの開発」, 自動車技術会学術講演会 No.28-10, pp.5-9 (2010)
- (2 3) Y.Hori: "Future Vehicle Driven by Electricity and Control-Research on Four-Wheel-Motored: UOT Electric March II", IEEE Trans. IE, Vol.51, No. 5, 2004
- (2 4) M.Kamachi, K.Walters: "A Research of Direct Yaw-Moment Control on Slippery Road for In-Wheel Motor Vehicle", EVS-22 Yokohama, JAPAN, Oct.23-28, pp.2122-2133, 2006
- (2 5) 藤本博志, 「インホイールモータとタイヤ横力センサを用いた電気自動車の運動制御」, 計測と制御, vol.50, no. 3, pp.189-194, 2011
- (2 6) S. Murata: "Vehicle Dynamics Innovation with In-Wheel Motor", JSAE EVTeC'11, no. 20117204, 2011
- (2 7) K. Fujii, H. Fujimoto, M. Kamachi, H. Yoshida "Experimental verification of traction control for electric vehicle based on slip ratio estimation without vehicle speed detection", JSAE Review of Automotive Engineers, vol. 29, pp. 369-372, 2008
- (2 8) 鈴木 亨, 藤本博志, 「車体速度と加速度検出不要な電気自動車の減速時におけるスリップ率推定と回生ブレーキ制御」, 電気学会論文誌 D, vol. 130, no. 4, pp. 512-517, 2010
- (2 9) 吉村雅貴, 藤本博志, 「インホイールモータを搭載した電気自動車の駆動トルク制御法」, 電気学会論文誌 D, vol.131, no. 5, pp.721-728, 2011
- (3 0) 山内雄哉, 藤本博志, 「電気自動車におけるヨーモーメントオブザーバとラテラルフォースオブザーバを用いた車両姿勢制御法」, 電気学会論文誌 D, vol.130, no. 8, pp.939-944, 2010
- (3 1) 安藤直樹, 藤本博志, 「電気自動車の後輪独立制駆動力配分とアクティブ前後輪操舵を用いたヨーレート制御」, 電気学会論文誌 D, vol.131, no. 4, pp.616-623, 2011
- (3 2) K. Nam, H. Fujimoto, and Y. Hori, "Lateral Stability Control of In-wheel-motor-driven Electric Vehicles Based on Sideslip Angle Estimation Using Lateral Tire Force Sensors", IEEE Transaction on Vehicular Technology, DOI: 10.1109/TVT.2012.21916272012. (to be published)
- (3 3) K. Nam, S. Oh, H. Fujimoto, and Y. Hori, "Estimation of Sideslip and Roll Angles of Electric Vehicles Using Lateral Tire Force Sensors Through RLS and Kalman Filter Approaches", IEEE Transaction on Industrial Electronics, DOI: 10.1109/TIE.2012.2188874. (to be published)
- (3 4) H. Fujimoto and S. Sato, "Pitching Control Method Based on Quick Torque Response for Electric Vehicle", in Proc. IPEC-Sapporo, pp.801-806, 2010.
- (3 5) 赤穂大輔, 中津慎利, 勝山悦生, 高桑佳, 吉末監介, 「インホイールモータ車の車両運動制御開発」, 自動車技術会秋季大会, no. 20105533, pp.1-6, 2010
- (3 6) 勝山悦生, 「インホイールモータによる非連生 3D モーメント制御の開発」, 自動車技術会春季大会, no. 20115012, pp.1-6, 2011
- (3 7) 小林孝雄, 杉浦豪軌, 勝山悦生, 河口篤志, 平野麻衣子, 「インホイールモータによる車両運動制御時のエネルギー解析」, 自動車技術会春季大会, no. 20115762, pp.17-22, 2011
- (3 8) 藤本博志, 鈴木亨, 角谷勇人, 「電気自動車の航続距離延長制御システム」, 自動車技術会 2010 年春季学術講演会, No.20105437, pp.11-14, 2010
- (3 9) 角谷勇人, 藤本博志, 「前後輪横滑り角と左右トルク配分に基づく電気自動車の航続距離延長制御システム」, 電気学会論文誌 D, vol.131, no. 3, pp.308-314, 2012
- (4 0) 西原修, 松本大樹: 操舵と制駆動力配分により旋回する電気自動車の低消費電力化, 日本機械学会交通・物流部門大会, No.1315, 2011
- (4 1) 中嶋玲二, 吉村達矢, 狩野 芳郎, 安部正人, 「タイヤ力最適配分がタイヤ消費エネルギーに及ぼす効果」, 自動車技術会春季大会, no. 20125259, pp.23-26, 2012