

電動車向けモータの巻線

Magnet Wires for Driving Motors in Electric Vehicles

佐藤 淳*
Atsushi Sato

飯塚 慎一
Shinichi Iiduka

木村 康三
Kouzou Kimura

環境負荷低減に向けた自動車の電動化が急速に進んでいる。電動車用モータのベンチマークを通じてモータ設計技術の変遷と今後の開発の方向性について概括する。さらに、モータ性能の向上に寄与する平角線開発に関して当社の取組状況を報告する。モータ性能向上のために、巻線の皮膜絶縁性の向上、寸法バラツキの抑制に取り組んできた。

The electrification of vehicles has been advanced rapidly with the aim of reducing environmental impact. This paper summarizes the transition of motor design technology and its future development trends with a focus on driving motors for electric vehicles as a benchmark. We also report on the current status of our efforts towards the development of rectangular wires that contribute to the improvement of motor performance. In our efforts, we have worked to enhance the insulation performance of the film coating for magnet wires and reduce their size variation.

キーワード：電動車、モータ、巻線、エナメル線

1. 緒 言

大気汚染、資源枯渇など環境負荷低減や温暖化防止としてのCO₂排出量削減の環境問題にともなう、パリ協定採択、ZEV*¹、CAFE*²、LCA*³など、種々の規制が制定されている。中でも、運輸部門は発電所等のエネルギー転換部門、産業部門に次いで高い割合でのCO₂排出量となっており、その大半が自動車からの排出となっている。規制基準をクリアするため、ハイブリッド自動車(HEV)、プラグインハイブリッド自動車(PHEV)、電気自動車(EV)などの電動車が急速に増加してきており、今後も増加傾向が、さらに加速していくと想定される(図1)。そこで、電動車用主機モータの動向を調査した上で、それらに使用される当社巻線に関して報告する。

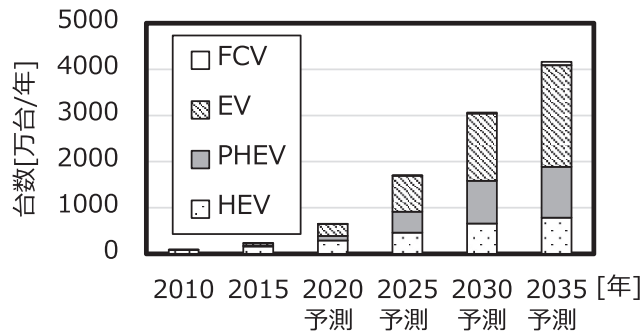


図1 電動車両台数

(出典：富士経済「2019年度版HEV、EV関連市場徹底分析調査」)

2. 電動車用主機モータの変遷

2-1 主機モータの動向

電動車普及のためには、動力性能向上、低燃費化、低コスト化が求められ、主機モータでは、高トルク化、高効率化、組み付け簡素化等の技術開発が進められている。

写真1に当社で調査した各種HEV、EVの主機モータのステータ外観を示す。各種モータ方式が採用されているが、図2に示すように、重量あたりのトルク[Nm/kg]を指標とすると、同じメーカーのモータでは、小型軽量化が進んでおり(図中、矢印で示す)、特に平角線を使用したモータで向上している傾向がみられる。

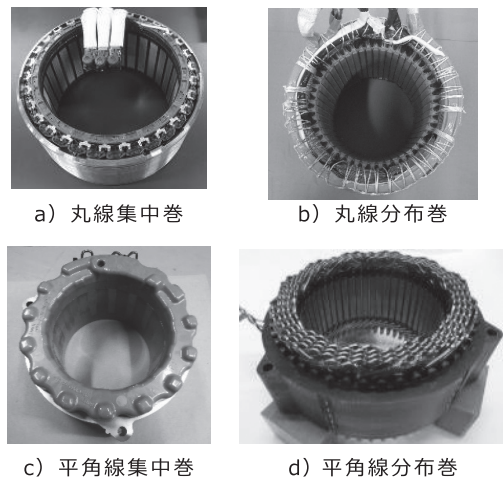


写真1 電動車用主機モータ(ステータ)

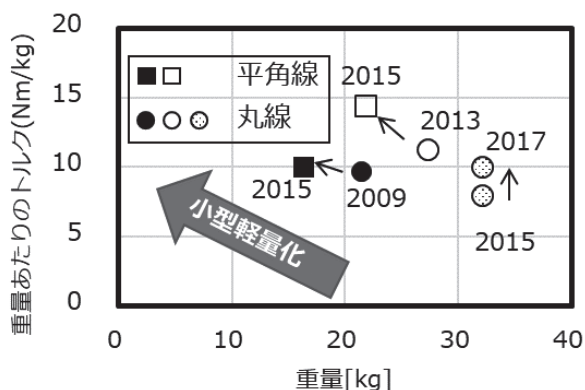


図2 電動車用主機モータのトルク密度

2-2 モータコイルの動向

主機モータのコイルに着目すると、従来は断面が丸形状の丸線を使用した分布巻方式、あるいは断面が角形状の平角線を用いた集中巻方式が主流であったが、最近では平角線分布巻方式へと進化してきている。

分布巻モータの短所であるコイルエンドの高さが、集中巻モータに比べて高くなってしまふ点については、所定のセグメントに分割された平角線を、鉄心コアに挿入後、端部を溶接して組み付けることで、コイルエンドの高さを集中巻モータと同じレベルまで低減している。また、平角線を使用することで占積率^{*4}も大幅に改善されており(図3)、小型化、銅線使用量低減による軽量化と損失(銅損)低減がなされている。

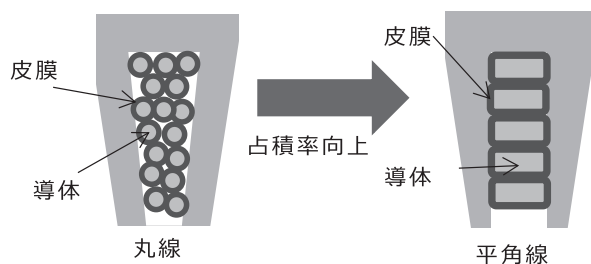


図3 モータコアの-slot断面模式図

2-3 巻線への要求項目

モータの進化に伴い、巻線には以下の項目が求められている。

- 1) 高占積率化：平角形状、皮膜厚バラツキ減、低誘電率^{*5}化・薄膜化
- 2) 高電圧化：厚膜化、低誘電率化
- 3) コイルエンド小型化：耐加工性、耐熱性、耐溶接性

4) 高速回転化：低渦電流損導体

5) 組み付け性：コア挿入性

電動車用の主機モータは、インバータ駆動が用いられ、モータ動作電圧は、当初から2倍以上に高電圧化されているモータもあり⁽¹⁾、コイルエンド部では相間電圧に対応して巻線の絶縁確保が必要になる。絶縁皮膜の厚膜化によって、従来使用されていた相間紙等の絶縁部材の削減が図られてきており、小型化、低コスト化が実現されている。当社では、平角線においても、均一な絶縁皮膜厚の分布を実現し、従来よりも高い絶縁性能を持つ誘電率の低い構造の皮膜を開発しており、耐加工劣化性においても優れた特性を持っている。

また、小型化、高出力化のため、モータの高回転化も進んでいる⁽²⁾。当初から、約3倍の高回転化が図られているモータもある。モータの高回転化には、駆動電圧の高電圧化が必要⁽³⁾となり、前述のような当社が開発している高い絶縁性能を持つ皮膜により貢献している。

3. 今後のモータ

1項で述べたように、今後電動車が急増し、その中でも急増するEVの使われ方、システム変化・多様化、低価格化に応じた技術進歩が重要になる。EVは高出力のプレミアムタイプと、低・中出力の汎用タイプに分類される傾向にある。後者のモータは動作電圧が400V以下であるのに対し、前者のモータは800Vの動作電圧が採用される例もある。今後さらに電圧を上げる場合には巻線の絶縁性向上が至上命題であり、高電圧用平角線開発に重点的に取り組むとともに、e-Axle^{*6}などのモジュール化によりモータ標準化が進み、グローバル供給への対応が必要となってきており、当社も構成部品への検討を進めている。

4. 当社のモータ巻線

前項までで述べた電動車用主機モータ性能向上の流れの中で、巻線に要求される特性改善に関して当社が進めてきた取り組みを以下に述べる。線種としては、それまでの丸線から平角線へ転換すること、高占積率化達成のために、①皮膜厚のバラツキを低減する工法開発、②同じ絶縁性能をより薄膜で実現する皮膜材料の採用、に取り組んだ。

4-1 皮膜厚分布のバラツキ改善

2項で述べたように、丸線から平角線への変更によって占積率向上が図れ、モータの小型軽量化、高性能化を実現できる。

一般的に平角線では一本当たりの導体面積を大きくすることで占積率を上げる構成が取られている。しかしながら同じ絶縁特性を持つ皮膜を採用しても、皮膜厚にバラツキがあると、絶縁保証する最小皮膜厚に対し、最大皮膜厚で巻線の外径が規定されるため占積率が低下する(図4)。ま

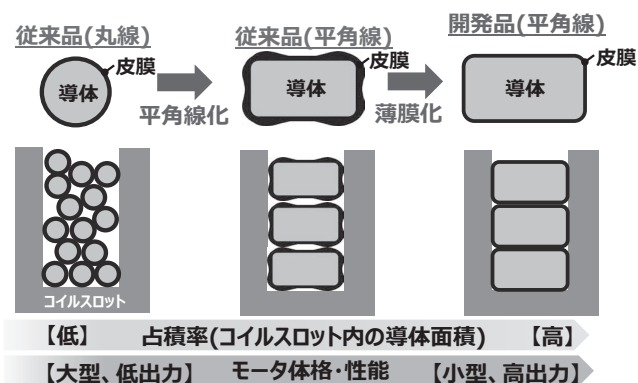


図4 スロット内占積率向上

た、皮膜材料の使用量も増えることになるため、コストアップにつながるようになる。

当社では平角線での皮膜厚のバラツキを改善し、写真2に示すように皮膜厚の均一分布を実現することができた⁽⁴⁾。

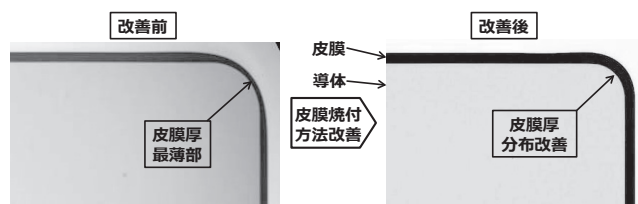


写真2 皮膜厚バラツキ改善⁽⁴⁾

4-2 薄膜化を実現する皮膜材料選定

高電圧で駆動する主機モータで使用される巻線には高耐熱性、耐加工劣化性、に加えて、部分放電を抑制できる絶縁性(高PDIV^{*7}化)が要求される。

初期の主機モータには高PDIV化を実現できる低誘電率のエステルイミドや誘電率はやや劣るが耐熱性に勝るアミドイミドが皮膜材料として採用されてきた。

さらなるモータ性能改善に向け、図5に示すように上記の皮膜材料に比べて低誘電率化と高耐熱性を含め、耐加工劣化性にも優れるポリイミドを皮膜として巻線を開発し、上市した⁽⁴⁾。

性能面で勝るポリイミドであるが、高価であることが商品化の障害のひとつであった。当社では巻線の低価格化に成功し、価格競争力のある電動車用主機モータ向け平角線を世に出すことができた。

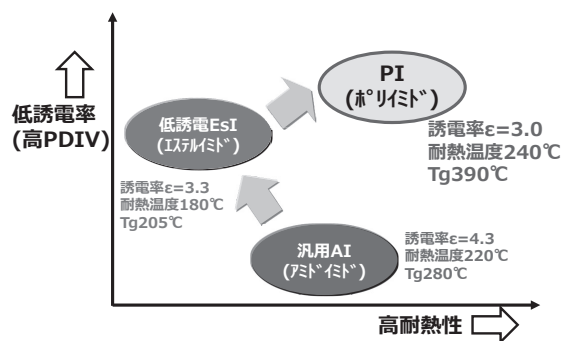


図5 巻線皮膜材料の選定

5. 平角線性能改善

主機モータの性能向上に寄与できるポリイミド皮膜を使った平角線を上市し電動車の性能向上に貢献することができたが、さらなる巻線の性能改善に取り組んでいる。

占積率向上のために、同じ絶縁性能でも薄膜化が可能な皮膜材料の開発を進めてきた。コンセプトとしてはポリイミドよりさらに誘電率の低い皮膜材料の開発である。ベースとなるポリイミドの化学構造の変性による低誘電率化に取り組んだが、ポリイミドの誘電率3.0に対して2.7まで下げることが限界であった。

材料の誘電率を下げる手法として、誘電率がほぼ1の空気を皮膜中に導入することが知られている⁽⁵⁾。皮膜の低誘電率化へのアプローチとして、巻線のポリイミド皮膜中に気泡を導入する手法に取り組んだ⁽⁶⁾。

開発中の気泡巻線(ポリイミド皮膜に気泡を導入した巻線)の気泡の導入率(気泡率)と比誘電率の関係を図6に示す。

気泡巻線は気泡同士がつながり連通孔となって粗大化する場合がある。このような連通孔が生じると誘電特性や耐加工性が低下する懸念があり、却ってモータ性能を低下させる可能性がある。

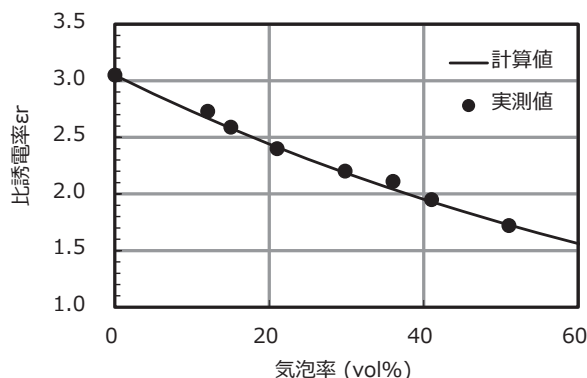


図6 気泡巻線の比誘電率⁽⁶⁾

当社は巻線の皮膜中に独立気泡を導入した気泡巻線を開発した⁽⁶⁾ (写真3)。

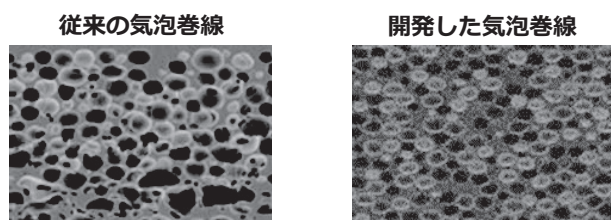


写真3 気泡巻線の皮膜断面⁽⁶⁾

開発した気泡巻線の絶縁特性を従来の製造法で作った気泡巻線と比較したところ、ほぼ同じ皮膜厚の巻線において従来の気泡巻線は4.9kVで絶縁破壊したが、開発した気泡巻線では10.8kVまで絶縁破壊電圧が向上した。皮膜中に独立した気泡を形成することで絶縁性能の向上を実現した。

PDIVについても皮膜に気泡を導入することで向上することが確認できた。2本の平角線短冊を背合わせ固定した測定用試料を使い、気泡率の違いによるPDIVを測定した。

図7に25℃で測定した結果を示す。気泡率が高くなるにつれてPDIVが向上している。気泡率30vol%では気泡率0%のポリイミド巻線に対してPDIVが200Vp向上することを確認した。

開発した気泡巻線とポリイミド巻線の特性比較を表1にまとめた。気泡率30vol%の気泡巻線では比誘電率はポリイミド巻線の3.0に比べて2.2まで低減できている。比誘電率に対応して、皮膜厚が同じ60μmの巻線のPDIVでは放電開始電圧が200Vp以上向上している。PDIV値が同じ1230Vpを得ようとすると、ポリイミド巻線では60μm必要であるが、気泡巻線では44μmと約30%の低減が可能であり、そ

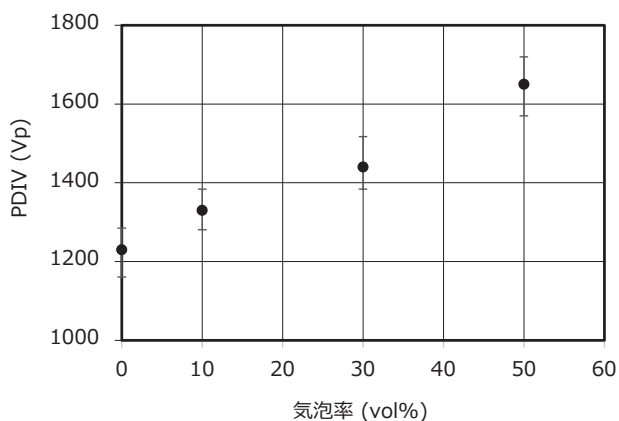


図7 気泡巻線のPDIV測定結果⁽⁶⁾

れだけモータの占積率の向上に寄与することができる。

表1 気泡巻線の特性 (ポリイミド巻線比較)

	従来品 (ポリイミド巻線)	開発品 (気泡巻線)	
	ポリイミド	ポリイミド	
絶縁皮膜材料	ポリイミド	ポリイミド	
膜厚 (μm)	60	60	44
気泡率 (vol%)	0	30	←
比誘電率	3.0	2.2	←
PDIV (Vp)	1230	1440	1230

6. 結 言

当社では電動車に使用されている主機モータのベンチマークを積上げて、モータの開発動向、使用部品の開発動向を把握し、巻線開発の指針を得てきた。その指針を基に巻線開発に取り組み、丸線から平角線への転換、平角線の性能改善を進めることで、主機モータの高性能化に貢献してきた。今後も、さらなるモータの高性能化を実現するための巻線特性改善に取り組んでいく。

用語集

※1 ZEV

Zero Emission Vehicleの略。排出ガスを一切出さない電気自動車や燃料電池車を指す。

※2 CAFE

Corporate Average Fuel Efficiency (企業別平均燃費基準)の略。自動車の燃費規制で、メーカー全体で出荷台数を加味した平均燃費で規制をかける方式。

※3 LCA

Life Cycle Assessmentの略。自動車の生産、エネルギー生成、走行、廃棄、再利用などのCO₂排出量の合計を評価する方法。

※4 占積率

モータのコアで、巻線が収まるスロットの断面積に対する巻線導体の断面積の比。これが大きいほど大きさあたりのモータの出力は大きくなる。

※5 誘電率

絶縁体に電界をかけた時に分極する強弱を示す値。誘電率が小さいと放電が起こり難く、PDIV (※7) が高くなる。

※6 e-Axle

主機モータ、インバータ、トランスミッションを一体化したモジュール。

※7 PDIV

Partial Discharge Inception Voltage (部分放電開始電圧) の略。コロナ開始電圧ともいう。

参 考 文 献

- (1) 自動車用モータの技術動向調査専門委員会 編、電気学会技術報告・自動車用モータの技術動向、第1394号、pp11-27
- (2) 伏木俊介 他、新型プリウスのハイブリッド技術、TOYOTA Technical Review、Vol.62、pp61-70
- (3) JMAGモータ設計勉強会、永久磁石同期モータ設計入門、pp224、(株)JSOL (2016年)
- (4) 菅原潤 他、「巻線開発の歴史と今後の展望」、SEIテクニカルレビュー第190号、pp99-104 (2017年1月)
- (5) 上野秀樹、岡田翔、太田慎弥、溝口晃、山内雅晃、「高周波交流電圧印加時におけるエナメル線のV-t寿命特性」、電気学会 プラズマ・放電・パルスパワー合同研究会、ED-15-079 (2015)
- (6) 太田慎弥 他、「HEV/EV用駆動モータ向け平角線の開発」、SEIテクニカルレビュー第194号、pp41-45 (2019年1月)

執 筆 者

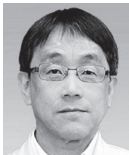
佐藤 淳* : 自動車新領域研究開発センター 主席



飯塚 慎一 : 自動車新領域研究開発センター 主幹



木村 康三 : 住友電工ウインテック(株) 技師長
博士 (学術)



*主執筆者