



圧粉磁心による薄型・高トルクなアキシアルギャップモータの実現

Thin and High-Torque Axial Gap Motor Using Soft Magnetic Powder Cores

渡辺 麻子*
Asako Watanabe

齋藤 達哉
Tatsuya Saito

上野 友之
Tomoyuki Ueno

鶴田 聖
Hijiri Tsuruta

中村 悠一
Yuichi Nakamura

ハイブリッド車や電気自動車などの電動車両の普及や家電・エレクトロニクスの省エネ化により電磁部品の需要が高まっている。中でも最大の市場であるモータでは、現在は磁心に電磁鋼板を用いたラジアルギャップモータが主流であるが、近年車載用途をはじめ小型（薄型）・高出力化のニーズが増大しており、これらを両立可能なアキシアルギャップモータに注目が集まっている。しかし、重要な構成部品のひとつである磁心の三次元造形が困難なため、市場での広がりは極めて限定的であった。圧粉磁心は絶縁被覆された軟磁性粉末を加圧成形により造形した材料であり、磁氣的等方性と高い形状自由度が特長である。当社では圧粉磁心をアキシアルギャップモータに適用することで性能と生産性に優れた薄型モータを実現し、ラジアルギャップモータ対比で高トルク化・高効率化を実証した。

Axial gap motors have been attracting attention as demand increases for thinner motors with a higher output. However, radial motors using laminated steel sheets remain dominant in the market, and the use of axial gap motors is still limited due to the difficulty in producing three-dimensional magnetic cores with laminated steel sheets. We have built an axial gap motor using soft magnetic powder cores that feature magnetic isotropy and high design flexibility. The motor offers high torque and cost efficiency compared with a conventional radial motor of the same size.

キーワード：圧粉磁心、モータ、アキシアルギャップ、薄型、高トルク

1. 緒言

近年、自動車の電動化や家電製品の高性能化、工場のオートメーション化が急速に進行しており、これらの駆動部品の根幹をなすモータの重要性が一層高まっている。特に車載用途では電動車両の普及に加え、ガソリンエンジン車においてもアイドリングストップ時の冷却能力確保のため水冷ポンプや空冷ファンを電動化する等、モータ搭載数は増加の一途を辿る。同時に、車両の部品数増加による搭載スペース制約の課題が発生しており、有効な対応策のひとつとしてモータの薄型化が挙げられる。しかし、現在最も一般的なラジアルギャップモータ（ラジアルと称す）は薄型化によるトルクの低下が避けられないため、代わって注目を集めているのがアキシアルギャップモータ（アキシアルと称す）である。本モータは薄型化と高トルク化を両立可能な点が最大の特長である。主なモータの構成部品は、軟磁性磁心と磁石、銅線とベアリング等であり、アキシアルの軟磁性磁心には三次元形状が求められる。このため、従来から一般的にモータに用いられている電磁鋼板^{*1}では製造が非常に難しく、市場での採用実績は極めて限られていた。この状況に対し、筆者らは磁氣的等方性と形状自由度に優れた圧粉磁心を搭載したアキシアルがラジアルに比べ薄型モータの高トルク化と高効率化に有効であることを実証した。本報では圧粉磁心の特長と上記モータの性能評価、および新材料や新技術への取り組みについて記載する。

2. 圧粉磁心の概要

圧粉磁心とは、表面に極めて薄い絶縁膜を被覆した軟磁性粉末を加圧成形した材料である。軟磁性粉末には飽和磁束密度^{*2}が高く、かつ加圧時の塑性変形性に優れた純鉄または鉄系合金が使用される。個々に絶縁された上記粉末を高密度に成形することにより、高磁束密度と高電気抵抗を両立する優れた軟磁気特性が得られる。圧粉磁心の特長を電磁鋼板との比較で表1に示す。薄板を複数枚積層する電磁鋼板とは異なり、粉末からなる圧粉磁心は磁氣的等方性を有しているため、磁路の形成方向に制約がない。加えて、様々な形状に応じた金型に粉末充填してネットシェイプ成形^{*3}するため、高い形状自由度を有する。このため、アキシアル等の三次元形状の磁心に好適である。また、一般的に電磁鋼板は積層前の単板で測定された磁気特性がJIS規格で定められているが、モータ用の磁心に造形する際の打ち抜きプレスやダボカシメ、溶接等の応力、熱歪みにより磁気特性が劣化し、モータ性能の設計値と実測値に乖離が大きいことが知られている^{(1),(2)}。一方で、圧粉磁心は完成品と同様に加圧成形された試験片を用いて磁気特性データを取得するため、モータ性能の設計値と実測値の乖離が少ない点も特長のひとつである。更に、高い電気抵抗を持つ圧粉磁心は高周波特性に優れるためディーゼルエンジン用燃料噴射弁や電動車両の昇圧リアクトル等の高周波駆動用途での量産適用が進んでいるが^{(3)~(5)}、モータ用途でもイン

表1 圧粉磁心の特長

	圧粉磁心	電磁鋼板 (汎用磁心材)
模式図	<p>個々の金属軟磁性粒子を絶縁被覆し、加圧成形</p> <p>どの方向も発熱小</p> <p>絶縁被膜 Fe, Fe-Si, etc (10~500μm)</p>	<p>絶縁コートされた板を積層</p> <p>板面内と磁界が直交 ⇒ 発熱大</p> <p>絶縁層 Fe-Si板 (0.05~1.0mm)</p>
磁氣的等方性	○	×
形状自由度	○	△
製品形状での性能	○	×~△
高周波特性	○	△

パルサー駆動時に発生する高周波ノイズによるエネルギーロスの抑制が期待できる。

3. アクシシャルギャップモータへの適用

3-1 アクシシャルギャップモータの概要

アクシシャルは薄型形状で高トルクを特長とするモータである。構造模式図を図1に示す。従来主流のラジアルは固定子と回転子を円筒状に配した構造であるのに対し、アクシシャルは回転軸の垂直方向に円板状の固定子と回転子を重ねて配した構造になっている。モータが薄型化した場合、ラジアル構造では固定子と回転子の対向面積が減少しトルクが低下するが、アクシシャル構造では対向面積が変わらないため高トルクの維持が可能である。

次に、モータ固定子の軟磁性磁心について説明する。ラジアルの磁路は二次元であるため、電磁鋼板で容易に磁心の造形ができる。一方、回転子を2個の固定子で挟んだダブルステータ型のアクシシャル(図1左)は三次元磁路を形成する必要があり、電磁鋼板で本磁心を造形しようとするとは異なる板幅での積層や積層方向を変えての接合を伴うた

め、作製が非常に困難である。これに対し、圧粉磁心は磁氣的等方性と高い形状自由度を持つため容易に本磁心を作製でき、性能のみならず高い生産性が期待できる。

3-2 モータ用圧粉磁心の材料特性

モータ用の圧粉磁心には、トルクに影響する磁束密度と、効率向上に影響する磁心で発生するエネルギーロス(以下、コアロス)の低さが要求される。本項では当社の圧粉磁心 FMCM シリーズのうち、高磁束密度とモータ駆動領域での低コアロス特性を両立するHB2の磁気特性について記載す

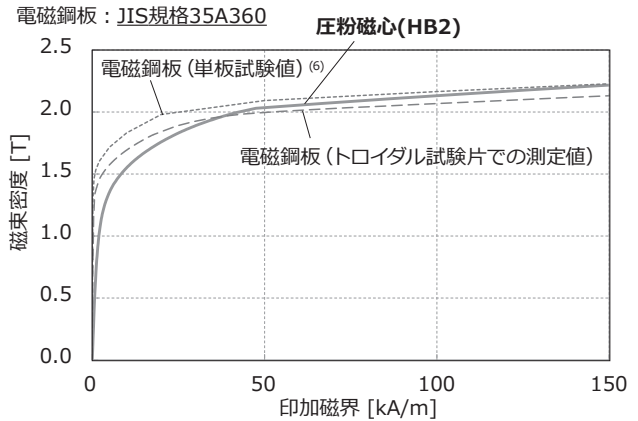


図2 モータ用圧粉磁心の直流磁化曲線

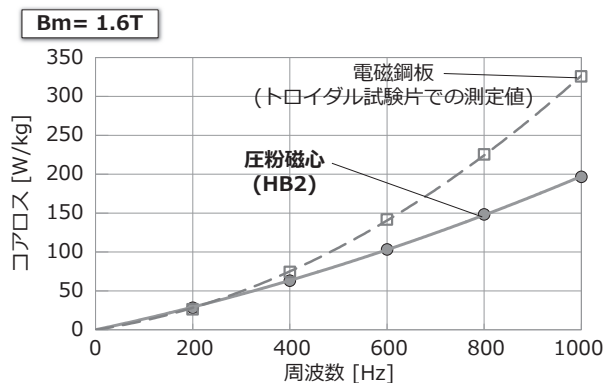
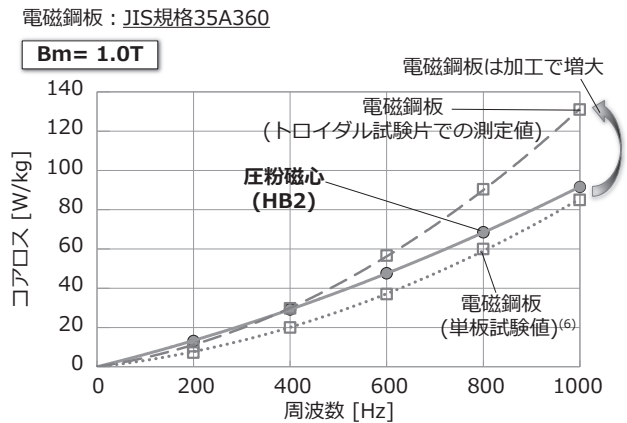


図3 モータ用圧粉磁心のコアロス特性

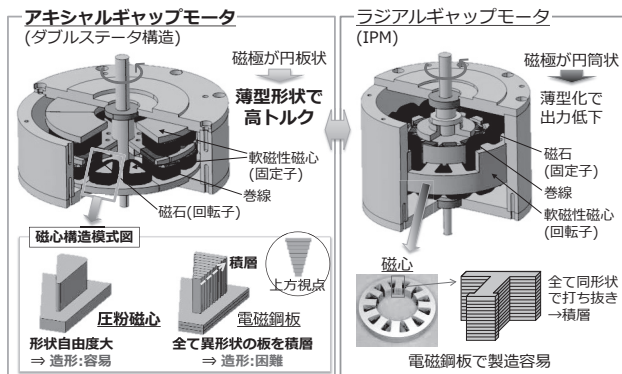


図1 各モータの構造

る。HB2の直流磁化曲線を図2に示す。HB2は高磁界領域で電磁鋼板に比べ高い磁束密度を持つため、磁気飽和による性能低下を回避可能である。次に、コアロス特性を図3に示す。一般的なモータに使用される板厚0.35mmの電磁鋼板 (JIS規格35A360) をトロイダル形状に加工・積層した試験片の実測値と比較すると、HB2は高周波領域および高磁束領域で優れた特性を示しており、例えば $B_m = 1.6\text{T}/1\text{kHz}$ では電磁鋼板に対してコアロスを40%低減できる。

なお、上記HB2を含む当社の圧粉磁心はJMAG-Designerに材料データを登録しており、 $-30^{\circ}\text{C} \sim 150^{\circ}\text{C}$ までの幅広い温度特性データが搭載されているため、モータをはじめとした電磁気部品の設計・解析に活用されている。

3-3 アキシャルギャップモータの設計と評価

(1) アキシャルギャップモータの電磁気解析・設計

前項で記載したモータ用低コアロス圧粉磁心HB2を用いたアキシャルの実機性能について、電磁鋼板磁心を用いたラジアルとの比較を行った。両モータとも永久磁石式とし、アキシャルはダブルステータ構造で磁石を非磁性の支持部材に嵌め込んだコアレス固定子を採用、ラジアルはインナーロータ型のIPMモータとした。本項で検討に用いたモータの設計前提条件は以下の通りである。

- ①モータ占有体積：0.392L
- ②磁石重量：89.2g
- ③巻線の占積率：40%
- ④極数/スロット数：10極/12スロット

上記モータ占有体積は、モータの外径と厚みの積である。また、ラジアルの厚みは巻線の上下端面 (コイルエンド) 間の距離とする。また、圧粉磁心以外の材料として、電磁鋼板はJIS規格35A360、ネオジウム (Nd) 焼結磁石^{*4}は日立金属(株)製NMX-37SH ($B_r = 1.14\text{T}$ 、 80°C でのデータ)、Ndボンド磁石^{*5}は愛知製鋼(株)製S5B-17ME ($B_r = 0.81\text{T}$ 、 80°C でのデータ)を使用した。

はじめに、軟磁性磁心に圧粉磁心、回転子にそれぞれNd焼結磁石とNdボンド磁石を使用した2種のアキシャルと、電磁鋼板とNd焼結磁石を使用したラジアルの電磁界解析を行った。各モータとも扁平率0.376 (外径110mm、厚み41.3mm) の薄型形状で設計した。解析条件は駆動温度 80°C 、回転数6000rpm、電流密度 $4\text{Arms}/\text{mm}^2$ とした。瞬時トルク波形の解析結果を図4に示す。圧粉磁心とNd焼結磁石を使用したアキシャルではラジアル比でトルクが約2倍、磁力の低いNdボンド磁石を使用した場合でも約1.5倍であり、アキシャル構造の適用により薄型のモータで大幅なトルク向上が確認された。次に、各モータの損失および効率の解析結果を図5に示す。Nd焼結磁石を使用したアキシャルでは、回転子での損失が非常に大きくなっている。これは回転子にコアレス構造を採用しているため、固定子の磁束が磁石を通過し、電気抵抗の低いNd焼結磁石の内部で電磁誘導による渦電流損失が発生するためである。一方、高電気抵抗なNdボンド磁石を使用したアキシャルでは、回転子で

の損失が小さく、ラジアルとほぼ同等の損失、かつ高出力 (トルク) であることから効率はラジアルを上回っている。上記の結果から、圧粉磁心とNdボンド磁石を使用したアキシャルが薄型形状での高トルクと高効率の両立に最も好適である。本モータとラジアルの扁平率とトルクとの関係を図6に示す。解析では、モータ体積は一定とし、アスペクト比を変更して設計した。ラジアル構造では薄型化に伴いト

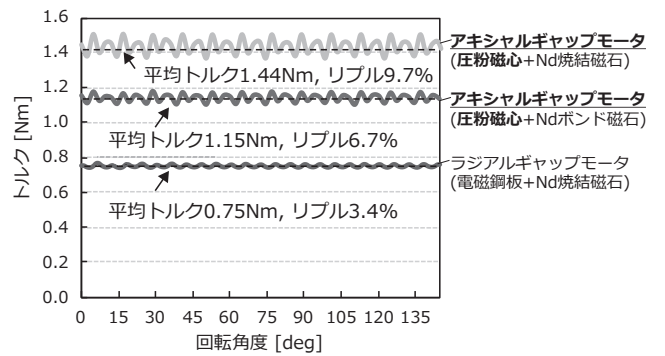


図4 各モータの瞬時トルク波形解析結果

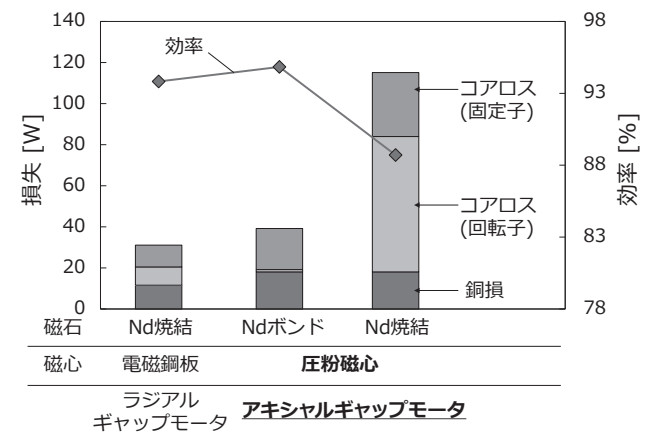


図5 各モータの損失および効率解析結果

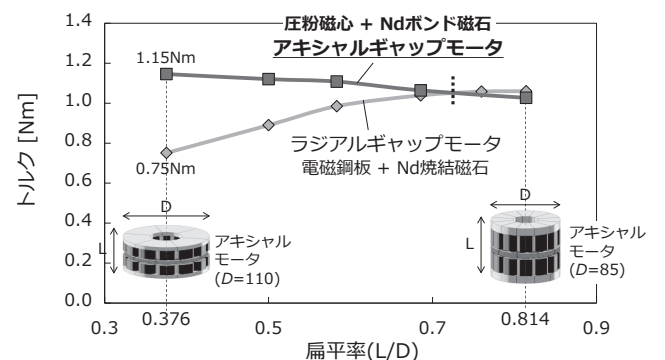


図6 各モータのトルクと扁平率

トルクが約3割低下するのに対し、アキシシャル構造では低い扁平率でも高トルクを維持しており、扁平率0.75で両者のトルクが逆転する。この結果から、アキシシャルは薄型形状であるほど高トルク化のメリットが大きいことがわかる。

(2) アキシシャルギャップモータの実機評価

次に、各モータを実際に作製して実機にて性能評価を行った。図7に各試作モータを示す。モータ形状は解析と同様に扁平率0.376 (外径110mm、厚み41.3mm) の薄型形状とし、アキシシャルには当社の圧粉磁心HB2とNdボンド磁石を、ラジアルには電磁鋼板JIS規格35A360とNd焼結磁石を使用した。図8に、金型を用いて造形した本開発モータ用圧粉磁心を示す。ティースとバックヨークからなる本件のような多段形状でも、ネットシェイプ成形で容易に造形することができる。本試作では、将来的に駆動モータ等の非常に大型で高出力のモータを造形する際に重要となるセグメント方式の造形試作を兼ねたため、6分割した形状にて成形を行った。当然のことながら、本形状を一体形状で造形することは十分可能である。表2に各モータの実機性能の評価結果

表2 各モータの実機評価結果

		アキシシャルギャップモータ	ラジアルギャップモータ
モータ外形		φ110×41.3 (扁平率0.376, 薄型)	← (同一扁平率)
磁心		圧粉磁心 (HB2)	電磁鋼板 (35A360)
磁石		Ndボンド (S5B-17ME)	Nd焼結 (NMX-37SH)
トルク*1	解析	1.23 (Nm)	0.81 (Nm)
	実測	1.18 (Nm)	0.74 (Nm)
効率	最高	解析	93.8%
		実測*2	94.1%
	低負荷*3	解析	87.3%
		実測*2	87.3%

*1 測定条件：1000rpm, 4Arms/mm² *2 機械損はダミーロータを用いて分離
*3 測定条件：1000rpm, 0.3Nm

を示す。アキシシャルはラジアルと比較して、磁力の低いNdボンド磁石を使用したにも関わらず、実機の測定結果で約1.6倍の高トルクを示した。更に、圧粉磁心が有利となる高回転・高負荷領域に加え、低負荷領域も含めた全運転領域でアキシシャルの効率がラジアルを上回っており、最高効率が1%向上した。以上の結果から、モータ実機を用いた測定でも、圧粉磁心を用いたアキシシャルの薄型形状での高トルク化・高効率化を確認し、優れたモータ性能を実証した。

なお、本項は国立大学法人北海道大学 大学院情報科学研究科 竹本准教授との共同研究成果である。

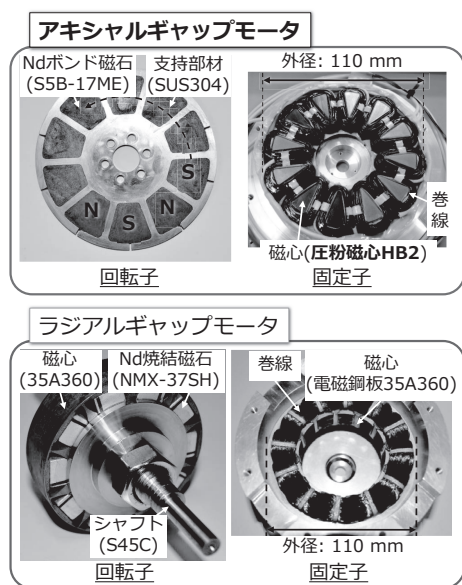


図7 作製した各モータ

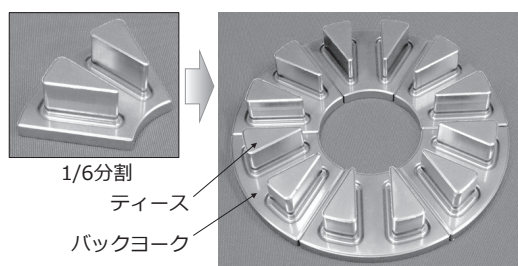


図8 アキシシャルギャップモータ用圧粉磁心

4. 新たな材料・技術への取り組み

4-1 圧粉磁心の低コアロス化と高強度化

アキシシャルの更なる高性能化には圧粉磁心の材料特性向上が欠かせない要素であるが、そのひとつとして一層の低コアロス化が挙げられる。図9に新開発材であるHX3のコアロス特性を示す。HX3は、金属粉末の材料組成制御と、高電気抵抗と薄膜・均一を両立する当社独自の絶縁被覆技術により、前項で用いたHB2より低コアロスを実現した。一般的な板厚である0.35mmの電磁鋼板に限らず、板厚0.30mmや0.20mmの薄板鋼板と比べても遜色ない特性となっており、モータ高効率化への貢献が期待できる。

また、他の高性能化の指標として高強度化がある。図10に当社の圧粉磁心HB1を用いた上記検討結果を示す。圧粉磁心の表面平滑化による破壊起点の低減や内部の空孔組織制御で亀裂進展を抑制し、三点曲げ強度で1.6倍、引張強度で約3倍と、大幅に高強度化した。強度改善により圧粉磁心の形状自由度を更に高めることができ、例えば電磁鋼板では打ち抜きが非常に困難な厚さ0.8mmの極薄肉形状でも、図11に示すとおり圧粉磁心では造形が可能である。

0.35mm鋼板: JIS規格35A360,
 0.30mm鋼板: 新日鉄住金(株)製30HX1600,
 0.20mm鋼板: 新日鉄住金(株)製20HTH1200

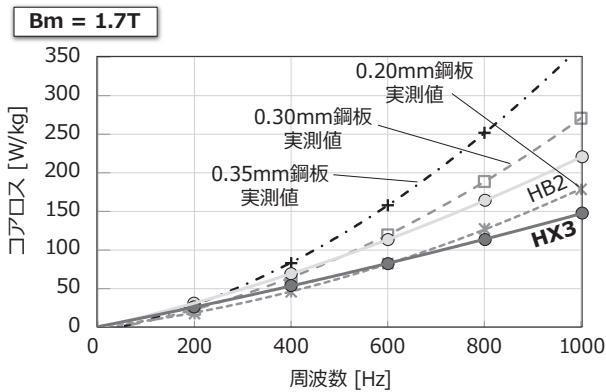
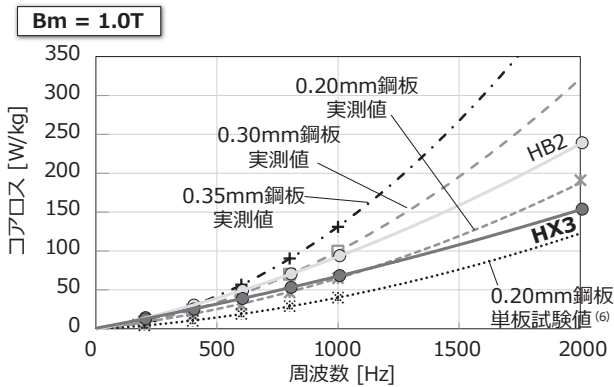


図9 モータ用圧粉磁心の低コアロス化^{*6}

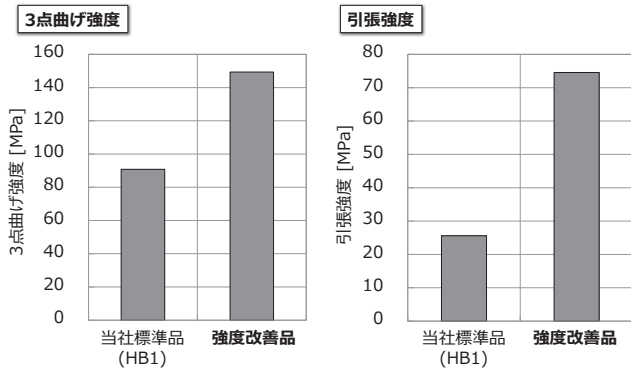


図10 モータ用圧粉磁心の高強度化

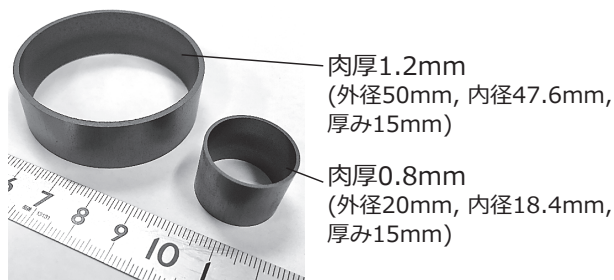


図11 圧粉磁心薄肉形状品

4-2 絶縁塗装技術

モータの軟磁性磁心に巻線を施す際には、絶縁紙や絶縁性樹脂を使用して磁心と巻線の間の絶縁を確保する。しかし、上記部品は数百 μm の厚みを有するため、巻線の占積率低下やコイルと磁心の距離が大きくなることでモータ出力は減少する。さらに、コイルと磁心の密着性も低くなるためコイルから磁心への放熱性が悪く、電流上限値が制限され、モータ出力向上の足かせとなっている。この課題解決に有効な方策が磁心表面への絶縁塗装である。絶縁塗装したモータ用磁心および塗装品エッジ部の断面写真を図12に示す。塗装の膜厚は約 $50\mu\text{m}$ で絶縁耐圧は最大2500Vである。この薄膜かつ高耐圧塗装技術により、絶縁部品レス化と巻線占積率向上による更なるモータの高出力化が実現できる。

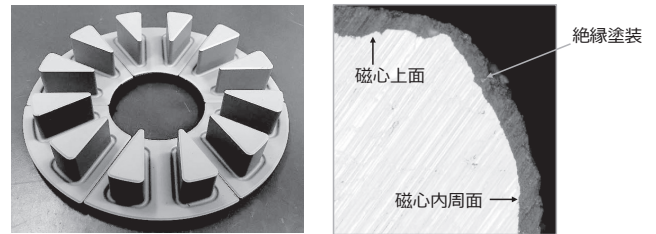


図12 絶縁塗装品の外観と断面組織

4-3 モータの電磁気解析・設計

本項では、圧粉磁心の製造販売を行う当社におけるアキシシャルの電磁気解析・設計技術を行う目的について記す。一般的にモータの電磁気設計の結果得られたアキシシャルの磁心形状は、三次元磁路という形状の複雑性から造形面の考慮がなされていない場合が多く、生産性に課題がある場合が多い。従ってアキシシャル用磁心において、生産性とモータ実機性能を両立する設計技術が必要である。ここで、生産性考慮と、モータ実機性能への影響評価(電磁気解析)の機能が会社間や組織間で別れていると、磁心形状の最適化には双方での協議、調整が生じるため時間のロスが非常に多くなる。そこで、当社研究単独で電磁気解析技術を構築することで、時間ロスなくアキシシャル磁心形状の最適化が可能となる。更に、当社ではモータ仕様(要求トルク、回転数、サイズ等)を元に、独自に電磁気解析・設計を行い、仕様に即したアキシシャルを提案する取り組みも行っている。図13に当社で解析・設計したモータ実機性能の例を示す。上記の取り組みを通じて、圧粉磁心を用いたアキシシャルによる薄型化や高トルク化といったメリットを迅速に幅広く世間に提供することが可能である。

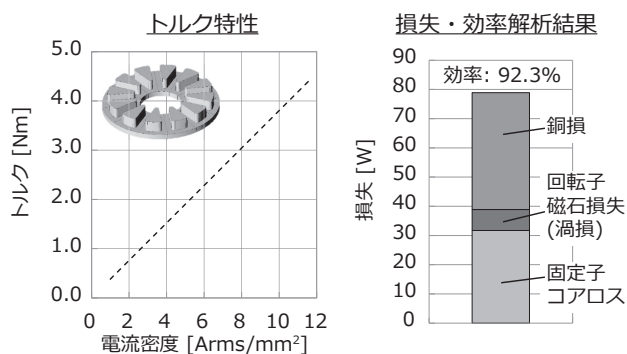


図13 当社設計アキシシャルギャップモータの性能解析結果

5. 結 言

本開発では圧粉磁心を用いたアキシシャルギャップモータの性能を解析し、薄型形状で実機を作製して評価を行った。以下に総括する。

1. 圧粉磁心は、①磁氣的等方性、②形状自由度、③製品形状での性能、④高周波特性に優れる。
2. 電磁気解析の結果、圧粉磁心とNd ボンド磁石を搭載したアキシシャルは、高トルクと高効率の両立が可能である。
3. 扁平率が低く薄型であるほど、アキシシャルによる高トルク化の効果が高い。
4. モータ実機評価の結果、電磁鋼板とNd 焼結磁石を使用したラジアルと比較して、アキシシャルは1.6倍の高トルクと全運転領域での高効率を達成した。
5. 当社ではモータ仕様に基づいて電磁気解析・設計提案を行っており、アキシシャルの普及を推進している。また、上記解析用データはJMAG-Designerに登録されている。
6. 圧粉磁心の要素技術として、低ロス材や造形技術（肉厚0.8mmリング等）、絶縁塗装等の開発を推進しており、更なるモータの高性能化に貢献する。

6. 謝 辞

モータの電磁気解析、実機評価について多くのご指導、ご協力を頂いた国立大学法人北海道大学 大学院情報科学研究科 竹本准教授に深く感謝致します。

用語集

※1 電磁鋼板

鉄とケイ素の合金からなる薄板を積層した軟磁性磁心。薄板の厚みを板厚と呼び、一般的に板厚が薄いほどコアロス特性に優れるが、生産性は低下するため高価になる。

※2 飽和磁束密度

磁性材に生じ得る最大の磁束密度（単位面積当りの磁束量）。高いほど磁心の小型化が可能。

※3 ネットシェイプ成形

最終完成品の複雑形状を機械加工等の後加工を施すことなく実現する粉末成形技術。

※4 Nd焼結磁石

Nd磁石粉末を高温度処理でほぼ真密度まで緻密化した磁石。磁力は非常に強いが、形状の制約が多く加工が必須であり高価。また、金属のバルク体のため電気抵抗は低い。

※5 Ndボンド磁石

Nd磁石粉末と樹脂を混練し射出成形または加圧成形した磁石。密度が低いため磁力は焼結磁石に劣るが形状自由度に優れ、樹脂の絶縁効果により電気抵抗が高い。

参 考 文 献

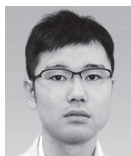
- (1) 藪本政男 他、「ハイブリッド／電気自動車の駆動モータ用電磁鋼板」、新日鉄技報第378号、pp.51-54 (2003年)
- (2) 脇坂岳頭 他、「ハイブリッド／電気自動車駆動モータ用電磁鋼板の最近の動向」、新日鉄技報第393号、pp.116-120 (2012年)
- (3) 島田良幸 他、「高性能圧粉磁心材料の開発」、粉体および粉末冶金、第53巻、第8号、pp.686-695 (2006年8月)
- (4) 五十嵐直人 他、「車載用リアクトルの小型化を可能にした純鉄系圧粉コア」、SEIテクニカルレビュー第186号、pp.92-97 (2015年1月)
- (5) 上野友之 他、「磁気特性に優れる圧粉磁心の開発経緯と実用化事例および今後の展開」、SEIテクニカルレビュー第188号、pp.4-9 (2016年1月)
- (6) 新日鉄住金株、無方向性電磁鋼板カタログ、pp.25

執筆者

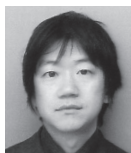
渡辺 麻子* : 人事部 主査
(旧所属 アドバンストマテリアル研究所)



齋藤 達哉 : アドバンストマテリアル研究所
博士 (工学)



上野 友之 : アドバンストマテリアル研究所
グループ長
博士 (工学)



鶴田 聖 : 住友電工焼結合金㈱



中村 悠一 : 解析技術研究センター 主席



*主執筆者