



高性能なアキシシャルギャップモータ実現に 貢献する圧粉磁心の高機能化

Enhanced Functionality of Soft Magnetic Composites for High-Performance Axial Gap Motors

齋藤 達哉*
Tatsuya Saito

榎園 勇太
Yuta Enokizono

東 大地
Daichi Azuma

伊志嶺 朝之
Tomoyuki Ishimine

上野 友之
Tomoyuki Ueno

中村 悠一
Yuichi Nakamura

奥野 麗子
Reiko Okuno

移動体の電動化や家電・産業機器の高効率化が進み、モータ需要とその高性能化ニーズが高まっている。現在一般的に用いられているラジアルギャップモータに対し、アキシシャルギャップモータは薄型で高トルクが得られるため、これらニーズを満たすものとして注目されている。当社ではこれまでに、圧粉磁心を搭載したアキシシャルギャップモータが高トルク・高効率であることを実証し、今年度よりアキシシャルコアの量産を開始した。アキシシャルギャップモータの更なる普及拡大に貢献するため、より低損失な圧粉磁心や生産性に優れる一体ツバ付コア、モータ温度上昇抑制に貢献する薄膜絶縁塗装を開発したので報告する。

The advancement of electric mobility as well as improvement in the efficiency of home appliances and industrial equipment have led to a need for higher performance motors. Axial gap motors (AGM) are attracting attention as a motor that meets the need because of their low profile and high torque compared to radial gap motors. We have demonstrated the high torque and high efficiency of AGMs with soft magnetic powder composites (SMCs) and started mass production of SMCs for AGMs. In order to contribute to the further adoption of AGMs, we have developed a low-loss SMC, pole-shoe teeth core, and thin-insulation-coated SMC.

キーワード：圧粉磁心、モータ、アキシシャルギャップ、薄型、高トルク

1. 緒 言

環境への配慮が高まる中、移動体の電動化や家電・産業機器の高効率化が広く推し進められている。モータはこれらアプリケーションの性能を左右するキーデバイスであり、その需要増加に伴い小型軽量化・高効率化の重要性がより一層高まっている。ラジアルギャップモータ（以下、ラジアルモータ）は現在一般的に用いられているモータの1つであり、制御法の開発、モータ構成部品である鉄心（コア）や銅線、磁石の性能向上により高性能化を果たしてきた。一方、ラジアルモータはそのモータ構造に起因して、薄型化によるトルク低下の弱点を抱えている。そこで注目されているのがアキシシャルギャップモータ（以下、アキシシャルモータ）であり、ラジアルモータに対し薄型で高トルクが得られる。しかし、アキシシャルモータではラジアルモータと異なり3次元形状のコアが必要となり、従来からモータに広く用いられている電磁鋼板^{*1}では製造困難であるため採用実績は限られていた。

当社では、磁気等方性と形状自由度に優れる圧粉磁心を開発し、ディーゼルエンジン用燃料噴射弁や電動車両の昇圧用リアクトル、点火コイル向け等で量産している^{(1)~(3)}。これらで長年培ってきた技術を活かしてアキシシャルモータ

用圧粉磁心の開発とモータ性能の優位性を実証し⁽⁴⁾、2020年8月からはアキシシャルモータコアを量産開始（写真1）、今後も採用拡大される見通しである。最近ではハイブリッド自動車の駆動用モータとして業界最高レベルの重量あたり出力密度を有するアキシシャルモータが量産採用された例もあり⁽⁵⁾、アキシシャルモータの採用は今後益々拡大していくと期待される。本稿では、当社圧粉磁心の特徴と最新開

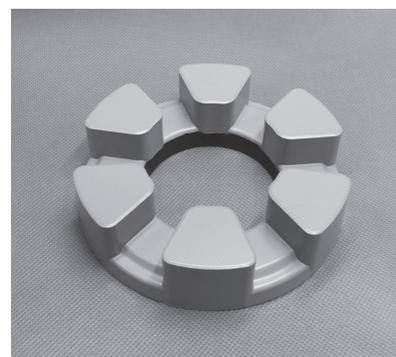


写真1 量産開始したアキシシャルモータコア

発状況、および当社圧粉磁心をアキシアルモータへ適用した場合のメリットについて報告する。

2. 圧粉磁心の概要と特徴

2-1 圧粉磁心の概要

圧粉磁心は、絶縁被覆された鉄粉を加圧成形し、加圧によって導入された歪を除去するための熱処理を施して完成する。当社では、飽和磁束密度^{*2}が高く塑性変形性に優れた純鉄や鉄系合金を用い、厚さ数十nmの絶縁被膜を破損なく高密度成形することにより、高磁束密度と優れた交流磁気特性を両立した圧粉磁心を実現している。

更に、電磁鋼板とは異なり、いずれの面においてもほぼ同様の材料組織である圧粉磁心は磁気等方性を有している。加えて、製品形状に応じた金型に粉末を充填してネットシェイプ成形^{*3}するため、アキシアルモータ等の3次元磁気回路を必要とするコアに好適である。

また、一般的に電磁鋼板の性能は積層前の単板での測定値を代表値として公開しているが、製品形状に造形する際の打抜やカシメ、溶接等に伴う応力、熱歪みにより磁気特性が悪化し、モータ性能の設計値と実測値の乖離の原因の1つとなる^{(6),(7)}。一方、圧粉磁心は設計用の磁気特性データを取得する試験片を、実際の製品と同様のプロセスを経て作るため、設計値と実測値の乖離が小さい点も特長の1つである。

2-2 圧粉磁心の材料特性

モータ用コアは、高トルクに寄与する高い磁束密度と、効率に寄与するコアでのエネルギーロス（以下、コアロス）の低さが求められる。表1に当社のモータ用圧粉磁心および電磁鋼板の直流磁化特性とコアロス特性を示す。当社圧粉磁心HB2は、電磁鋼板に対し高磁界域で高い磁束密度を有しており、コアの磁気飽和に伴うトルク低下を回避できる。これは、当社圧粉磁心が電磁鋼板に比べ高い飽和磁束密度を持つ純鉄粉を原料とし、かつ高密度に成形していることに起因する。

表1 圧粉磁心と電磁鋼板⁽⁷⁾の磁気特性

材質	磁束密度 (T)			コアロス (kW/m ³)				
	B _{2kA/m}	B _{20kA/m}	B _{50kA/m}	B _m = 1.0T		B _m = 1.7T		
				400Hz	1kHz	400Hz	1kHz	
圧粉磁心	HB2	1.02	1.76	2.04	221	696	513	1640
	HX3	0.66	1.66	1.81	146	413	311	912
電磁鋼板	0.35mm厚 (JIS 35A360)	1.45 (1.6)	1.9 (1.98)	2.00 (2.09)	227 (153)	1006 (650)	628	2760
	0.30mm厚 (日本製鉄機製 30HX1600)	-	-	-	178 (109)	734 (433)	474	1996
	0.20mm厚 (日本製鉄機製 20HX1200)	-	-	-	128 (82)	487 (304)	344	1335

* トロイダル試験片での実測値
* 括弧内数値：単板試験での値

また、一般的なモータに使用される板厚0.35mmの電磁鋼板に比べ、HB2はモータでよく使われる低い周波数域からコアロス優位性を示し、磁束密度と周波数が高くなるほどその優位性は大きくなる。加えて、更なる低ロス化を目的として開発したHX3は、板厚0.20mmの電磁鋼板に匹敵する特性が得られる。

また、圧粉磁心は高周波域でコアロスが低い材料であるため、モータをインバータ駆動した際に発生する高調波によるエネルギーロス増大の抑制が期待される。実際にインバータ駆動でコアロス特性を評価すると、図1に示すとおり、ヒステリシスループ^{*4}に重畳される高調波由来のループが小さくなり、電磁鋼板では高調波重畳に伴いコアロスが10%増大するのに対し、圧粉磁心では3%程度の増大に留まる。

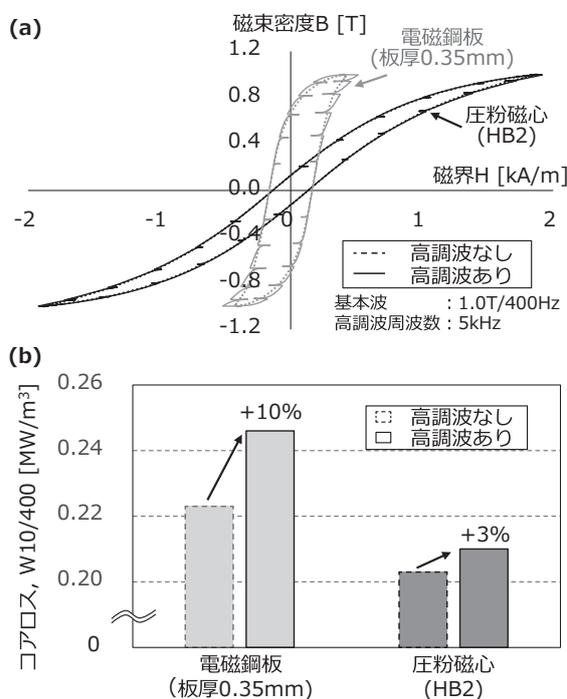


図1 高調波重畳有無による、(a)ヒステリシスループ、および(b)コアロスの差異

3. アキシアルギャップモータへの適用

3-1 アキシアルギャップモータの概要

先述のとおり、圧粉磁心は電磁鋼板に対し性能優位性を有するが、アキシアルモータのような圧粉磁心の形状自由度が活きるモータへ適用することがより好ましい。

アキシアルモータは薄型形状で高トルクが得られるモータである。構造模式図を図2に示す。従来主流のラジアルモータはステータとロータを円筒状に配した構造であるのに対し、アキシアルモータはステータとロータを回転軸方向に積層した構造である。モータが薄型化した場合、ラジ

アルモータではロータとステータの対向面積が減少するためトルクが低下するが、アキシャルモータでは対向面積が変わらないため高いトルクを維持することが可能である。

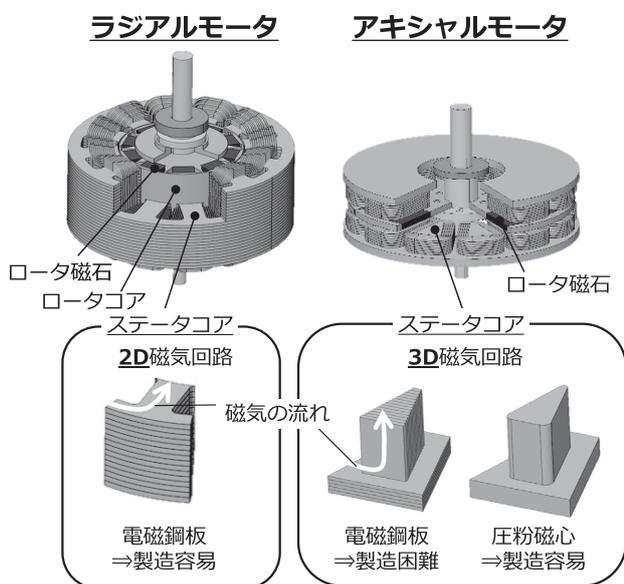


図2 各モータの構造

ラジアルモータは2次元の磁気回路で構成されるため、電磁鋼板を用いて容易にコアを造形することができるが、アキシャルモータでは3次元の磁気回路を形成するため、電磁鋼板で作る場合には幅の異なる板の積層や積層方向を変えるための鋼板接合、あるいは巻鉄心をワイヤ放電加工するなどの技術が必要となり、製造難易度が高く、コスト面も含め量産性に欠ける。これに対し、圧粉磁心は磁気等方性と高い形状自由度を持つため容易にアキシャルモータのコアを造形でき、前述の材料性能メリットに加え、アキシャルモータの実用化に貢献できると期待される。

3-2 圧粉磁心の特性とモータ高効率化

当社ではこれまでに、図2に示す部品構成で、扁平形状・同一規格のラジアルモータとアキシャルモータのモータ性能を比較評価し、ラジアルモータに対しアキシャルモータはトルク約1.6倍となり、最高効率が1%向上することを解析・実機で実証した⁽⁴⁾。本検証でアキシャルモータに用いた圧粉磁心はHB2であったが、表1にて示した、更にコアロスの低い開発材HX3を同アキシャルモータのステータコアとした場合のモータ性能評価を行った。設計諸元はステータコア形状を含め従来アキシャルと同様である(表2)。

図3に各モータの効率マップを示す。HX3を用いた場合、HB2を用いた場合に比べほぼすべての運転領域においてモータ効率が1~2%改善している。したがって、HX3が狙い通りモータ効率向上に有効であると言える。また、HX3

を搭載したアキシャルモータのトルク特性を図4に示す。HB2を用いた場合と概ね同等のトルク特性が得られた。表1に示すHB2とHX3の直流磁化特性を比較すると、HX3の透磁率^{*5}はHB2よりも低く、一般的にはトルク特性に対して不利であるが、本モータにおいては殆ど影響がないことがわかった。

表2 評価モータの設計諸元

モータ総体積	0.392 l (φ110×41.3t)	
ロータ	極数	10極
	磁石総重量	89.2g
	磁石材質	住友金属鉱山(株)製 S5B-17ME
ステータ	スロット数	12スロット
	コア材質	圧粉磁心HB2, HX3
	巻線占積率	40%
最大回転数	6000rpm	
動作温度(CAE)	80℃	

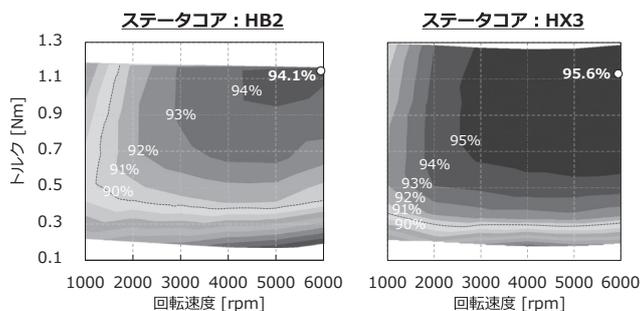


図3 開発アキシャルモータの効率マップ

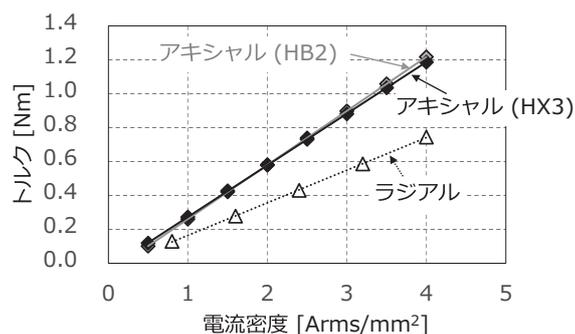


図4 開発アキシャルモータのトルク特性

このようなトルク特性結果が得られた理由として、我々が開発しているアキシャルモータの構造では、モータ全体の磁気抵抗^{*6}に対しステータコアの磁気抵抗が小さいことが挙げられる。空気の透磁率は低いため、ロータ/ステータ間のエアギャップが増えるとモータ全体の磁気抵抗は上が

る。当社アキシアルモータのエアギャップは1.0mmと、当社が比較用に製作したラジアルモータ含め、0.5mm程度で設計される一般的なラジアルモータに対して広く、かつ磁気回路中におけるエアギャップの数もラジアルモータの2倍である。したがって、モータ全体の磁気抵抗に対してエアギャップの磁気抵抗が支配的となる。今回検証に用いたアキシアルモータの磁気抵抗を算出すると(図5)、仮にステータコアの透磁率がHB2の半分の場合でも、モータ全体の磁気抵抗は1.9%の増加、トルク減少も1.9%に留まる。また、HB2と同等のコアロスでも透磁率が1/5となることで、トルク低下を抑えながら、軽負荷・高速回転域のモータ効率を1%程度改善することができるという解析結果も得られている⁽⁹⁾。本知見は、モータ用コアの透磁率は高くあるべきという従来指針に反する結果であり、アキシアルモータに限らず、モータ構成やモータ効率の改善が求められる運転領域によっては、低透磁率化や透磁率を犠牲にした低ロス化が有効であるという、材料開発の新たな選択肢を示すものである。このような開発指針をもとにHX3から更にコアロスが40%低い材料も開発し、モータ実機での評価も進めている。電磁鋼板において透磁率を変更することは容易でないが、圧粉磁心では被膜厚さや鉄粉粒径、成形密度の変更によって透磁率の変更が可能であるため、モータ設計に新たな自由度を与えることが可能な材料であるという点も圧粉磁心の特徴の一つと言える。

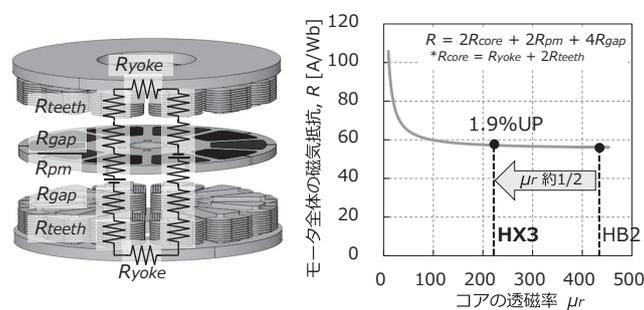


図5 開発アキシアルモータの磁気抵抗とコアの透磁率の関係

3-3 アキシアルギャップモータによる小型化

ここまで、同一体格ではラジアルモータに対しアキシアルモータは高トルクであることを示してきたが、実用を考える場合は同一性能でのモータ小型化が求められる。そこで、市販のラジアルモータに対してアキシアルモータで小型化を図った。表3にその検討事例を示す。市販のラジアルモータと径方向寸法および磁石材質を合わせ、同等トルク・効率となるように設計した試作機を製作し、58%の小型化と50%の軽量化を実証した。更に、本モータのコストを主要部品である磁石、コイル、鉄心の重量あたり単価をもとに算出した結果、小型化に伴う各部品の使用量削減も

あり、最大15%程度のコスト低減に繋がると試算された。

また、ラジアルモータの場合、同一打抜金型を用い積層枚数を変更することにより性能の異なるモータをラインナップすることがある。圧粉磁心を用いたアキシアルモータにおいても、同一金型でコアの高さを変えることが可能であるため、ラジアルモータ同様に金型コストを抑え、各種性能のモータをラインナップ拡充することが可能である(表4)。

表3 アキシアルモータ化による小型化事例

	アキシアルモータ	市販品 (ラジアルモータ)
モータ概観 *外径φ98		
重量 (コア/コイル/磁石)	0.95kg (▲44%)	1.7kg
重量 (筐体込)	1.6kg (▲50%)	3.2kg
材料コスト (ラジアルモータ対比)	85~96%	100%
トルク	0.65Nm	←
モータ効率	90.6%	90.9%

表4 同一金型でのコア高さ変更によるモータ性能のバリエーション化事例 (解析)

モータ高さ			
	24.5mm (コア: 10.1mm×2)	35.6mm (コア: 15.6mm×2)	46.7mm (コア: 21.1mm×2)
トルク定数 Nm/(Arms/mm ²)	0.062	0.114	0.178
最高効率	90.4%	92.6%	94.5%

4. 圧粉磁心の高機能化

圧粉磁心を用いたアキシアルモータにより、モータの小型・高効率化が可能であることを示してきた。その優位性を更に高めるため、材料特性の改善に加え、コア造形や周辺技術の開発も行っている。以下にその開発技術について述べる。

4-1 一体ツバ付コア成形技術

一般的に、ラジアルモータではモータのトルク向上や高効率化、音・振動抑制、信頼性向上のためにステータコアのティース端面にツバを設けることが多い。アキシアルモータにおいても同様の効果が得られるため、ツバを設ける検討も多くなされている。しかし、圧粉磁心でそのようなコアを製作する場合、加圧成形後の抜出が不可となるため、ツバ・ティース・ヨークを一体で製作することは従来は不可能と考えられており、ツバもしくはヨークを別途製作し、それぞれを接合することでツバ付コアとしていた。

しかし本製法では、複数種の金型を要するためコスト面で不利、接合部の隙間によるトルク・効率の低下、モータ性能を左右するエアギャップ量を決定する上で重要となるコア高さ方向の組立精度が悪い、などの課題を抱えていた。

我々は、従来の成形方法に捉われない、これらの課題を解決する手法を検討し、表5に示すようなツバ・ティース・ヨークを一体造形する製法を開発した。本開発製法では金型は1種類で済み、更に、コアの高さ方向の寸法精度を従来手法に比べ飛躍的に向上（寸法ばらつき1/10以下）させることが可能であることも実証しており、エアギャップ量の管理精度向上にも繋がる。各ヨーク間には接合部が生じるが、3章にて示したアキシアルモータでも同様の分割がなされており、このような分割方法がモータ性能へ影響を与えないことを解析と実機で実証済みである。本技術によりアキシアルモータの設計自由度が高まり、更なる高性能化に貢献できると考えている。

表5 開発ツバ付きアキシアルコアの特徴

	ツバなし	ツバ付き
トルク	1.39Nm	1.64Nm (△18%)
効率	88.9%	91.5% (△1.6%)
製法	従来手法	従来手法
		開発手法
コア種類	1種類	1種類
コア高さ精度	○ (通常焼結部同等)	△ (組立誤差・大)
		◎ (高精度成形が可能)

4-2 絶縁塗装技術の向上

コアに巻線を施す際には、絶縁紙や樹脂ボビンによりコア・コイル間の絶縁を確保する。従来の絶縁紙や樹脂ボビンを用いると絶縁部の総厚みが500μm以上となり、このスペース分だけコイル巻数を減らす必要があった。また、コイルはモータ内で最も高温となる部品の1つであるが、上記部品を設けることでコイルとコアの間に大きな熱抵抗が生じるためコイルの放熱性が悪く、温度上昇の観点でモータ設計に制約が生じる。そこで当社では、厚さ数十μmで高い絶縁耐圧を有する樹脂塗装をコア表面に施す技術を開発してきた⁽⁴⁾。薄膜化や生産性の改良を重ね、現在では図6に示すような、0.1kV/μm以上の薄膜・高耐圧な塗膜を実現している。また、本技術による放熱性メリットの検証結果を表6に示す。コアに絶縁紙を介して巻線したサンプルと、開発した塗装コアに直接巻線したサンプルについて、コイルに電流を印加したときの最高到達温度を比較した。開発塗装コアは、絶縁紙を用いた場合に比べ最高到達温度

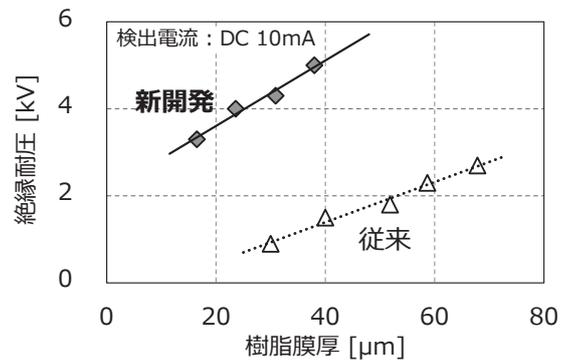


図6 開発塗装の絶縁耐圧特性

表6 塗装コアの放熱性比較

	従来	開発
コア断面模式図	絶縁紙：500μm 	絶縁塗装：～30μm
テストサンプル		
発熱状態		
最高温度	163°C	119°C

は44°C下がっており、放熱性が向上したと言える。この温度低下分だけ更に大きな電流印加が可能となり、モータの更なる小型化に繋がるだけでなく、部品点数が減ることによるモータ組立簡便化なども期待される。

5. 結 言

低炭素社会の実現に向け、当社では圧粉磁心の高性能化を果たし、それを用いたアキシアルモータが高効率であることに加え、モータ用コアの新たな開発指針を見出した。また、市販のラジアルモータに対し、同一性能で体格・重量ともに半減となるアキシアルモータを実証し、コスト低減に貢献し得ることを示した。更に、アキシアルモータの優位性を高めるため、生産性に優れたツバ付コアや薄膜・高耐圧な絶縁塗装技術を開発した。これらに加え、圧粉磁心の固定手法など周辺技術の開発や⁽¹⁰⁾、新しいタイプのアキシアルモータも開発しており⁽¹¹⁾、アキシアルモータの普及に貢献していく所存である。

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岡山大学大学院 自然科学研究科 竹本教授、綱田氏に深く感謝致します。

用語集

※1 電磁鋼板

鉄と珪素の合金からなる薄板を積層した軟磁性鉄心。一般的に板厚が薄いほどコアロス特性に優れる一方、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

機械加工等の後加工を施すことなく、金型を用いた加圧成形のみで最終製品形状を得る粉末成形方法。

※4 ヒステリシスループ

磁性体の磁束密度は磁界を印加する向きによって別のルートを辿りループを描き、この曲線のことを指す。

※5 透磁率

磁界の強さHと磁束密度Bとの間の関係を $B = \mu H$ で表した時の比例定数。透磁率が高いほど少ないコイル電流で高い磁束密度を得ることができる。

※6 磁気抵抗

磁気回路における磁束の流れにくさを表す度合い。

参考文献

- (1) 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)
- (2) 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)
- (3) 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)
- (4) 渡辺麻子 他、「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」、SEIテクニカルレビュー第192号、pp.119-125 (2018年1月)
- (5) "Ferrari selects YASA electric motor for SF90 Stradale, the company's first hybrid production series super car," U.K., YASA Limited ホームページ、<https://www.yasa.com/news/ferrari-selects-yasa-for-sf90-stradale/>
- (6) 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)
- (7) 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)

- (8) 新日鉄住金㈱、無方向性電磁鋼板カタログ、pp.25
- (9) 綱田 錬 他、「コアレス回転子形状を有するアキシアルギャップモータのためのSMC材料の開発方針の検討」、MAGDAコンファレンス講演論文集、28巻、pp.34-41 (2019年)
- (10) 榎園勇太 他、「圧縮応力下における圧粉磁心と電磁鋼板の磁気特性」、電気学会 平成31年度電気学会全国大会、G209-C1
- (11) R. Tsunata et al., "A Proposal of Ultra-Flat Axial Gap Motor Employing C-type SMC Core," IECON 2019-45th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society Lisbon, portugal, pp.847-879 (2019)

執筆者

齋藤 達哉* : アドバンストマテリアル研究所 主査
博士 (工学)



榎園 勇太 : アドバンストマテリアル研究所



東 大地 : アドバンストマテリアル研究所 主席
博士 (工学)



伊志嶺朝之 : アドバンストマテリアル研究所
グループ長



上野 友之 : アドバンストマテリアル研究所 部長
博士 (工学)



中村 悠一 : 解析技術研究センター グループ長



奥野 麗子 : 住友電工焼結合金㈱ 首席技師



*主執筆者