

(論文)

純鉄系軟磁性細線を用いたアキシシャルギャップ型モータ

森田晋也*¹・松本拓也*²・笠井信吾*³

Axial-gap Motor Using Thin Wire of Soft-magnetic Pure-iron

Shinya MORITA・Takuya MATSUMOTO・Shingo KASAI

要旨

純鉄系軟磁性線材は高い磁束密度を有することから、電磁リレーやソレノイドなどの直流駆動の電磁部品の鉄心に使用されている。しかし、バルク形状では表皮効果や材料中に生じる渦電流により、モータなどの交流駆動部品に適用することが難しかった。本稿では、純鉄系軟磁性線材を細径化して渦電流損を低減することでモータへの適用を検討した。純鉄系六角細線の束線鉄心を用いた新構造のアキシシャルギャップ型モータについて試作した結果を報告する。

Abstract

Since the wires of soft-magnetic pure-iron have high magnetic flux densities, they are used for the iron cores of electromagnetic parts for DC-driven components such as electromagnetic relays and solenoids. It has been difficult, however, to apply them to AC-driven components, such as motors, due to the skin effect and eddy current caused in the material. The application to a motor has been examined by decreasing the diameter of the wire of soft-magnetic pure-iron to reduce the eddy current loss. This paper reports the results of a prototype of an axial-gap motor with a new structure using a wound-on iron core of the hexagonal thin-wire of pure iron.

検索用キーワード

軟磁性材料, 軟磁性細線, モータ, 回転機, アキシシャルギャップ型モータ

ま え が き = 昨今、地球温暖化への対応、カーボンニュートラルの実現が世界的に喫緊の課題となっている。今後、自動車業界においても、CO₂を排出しない電動車の普及が加速するとみられる。また、CASE (Connected, Autonomous, Shared, Electric) に挙げられる技術変革により、駆動モータだけでなく自動車のさまざまな構成部品が電子化・電動化されており、さまざまなニーズに対応すべく電磁部品の多様化が今後も進むと考えられる。車載補機モータには電磁鋼板の積層鉄心を用いたラジアルギャップ型モータが多用されている。いっぽう、最近ではモータの搭載スペースに対応して小型化ニーズも高まっていることから、通常のラジアルギャップ型モータとは異なる構造であるアキシシャルギャップ型モータ (AGM) の開発も盛んである。AGMは扁平形状に製作しやすいため高トルク化や小型・軽量化に有利であり、例えば車輪を直接回転駆動するインホイールタイプのモータ用途としても注目されている。本稿では、高い磁束密度と優れた加工性をもつ純鉄系軟磁性線材を使用した新たなAGMの検討内容について報告する。純鉄系軟磁性線材は電磁鋼板に比べて不純物が少ないため磁束密度が高く、とくに鉄損の影響が少ない低回転領域においてモータの高トルク化が実現できるという利点がある。しかし、バルクのまま使用すると電気抵抗が低く渦電流損

が大きくなってしまいうため、細径化することにより渦電流損の低減を図っている。このような純鉄系軟磁性細線の磁気特性例を紹介するとともに、高磁束密度である特徴を活かしてAGMの固定子鉄心に適用したときのモータ性能について報告する。

1. 純鉄系軟磁性細線を用いたモータの検討

1.1 純鉄系軟磁性細線

当社は純鉄系軟磁性材料ELCH2シリーズを製造しており、自動車部品を中心に電磁リレーやソレノイド用鉄心などに広く使用されている^{1), 2)}。ELCH2は高磁束密度、低保磁力などの優れた磁気特性を有するため、とくに直流で動作する電磁部品において小型化・軽量化、低消費電力、応答性向上などの効果が期待できる。いっぽう、モータにおいては、交流磁界によって磁性体中に発生する鉄損の低減が重要である。鉄損の一部である渦電流損は式(1)に示されるように、材料の線径の2乗に比例するため、これを低減するには細径化して使用する必要がある。

$$P_v \propto (f B_m d)^2 / \rho \dots\dots\dots (1)$$

ここに、 P_v は渦電流損、 f は周波数、 B_m は磁束密度振幅、 d は磁性体直径、 ρ は磁性体の電気抵抗率である。

一般的に、金属細線は専用のダイス (金型) を用いた

*¹ 技術開発本部 応用物理研究所 *² 技術開発本部 応用物理研究所 (現 ジャパンスーパーコンダクタテクノロジー(株) マグネット工場 技術部)
*³ 鉄鋼アルミ事業部門 線材条鋼ユニット

冷間伸線加工により製造されるが、純鉄系軟磁性材料は柔らかく冷間加工性に優れるため、占積率を高めやすい正六角形の断面形状を得ることも可能である。

線径の異なる2種類の純鉄系軟磁性細線の交流磁化曲線(周波数50 Hz)と鉄損測定値を図1および表1に示す。図表には、JIS C 2552で定める無方向性電磁鋼板35A300と50A600の磁気特性例も記載している。純鉄系軟磁性細線は対辺がそれぞれ1.24 mmと0.71 mmの正六角形形状であり、当社ELCH2を所定の線径まで冷間伸線加工した後、磁気特性向上のために還元雰囲気中で熱処理を行っている。鉄損は電磁鋼板に比べてやや高いが、不純物が少ないため飽和磁束密度が高いことが特徴であり、モータでは高い磁束密度が要求される低回転高トルク域での利用に適している。

1.2 アクシシャルギャップ型モータの設計

モータの高トルク化のためには、トルク発生部位(固定子-回転子間の空隙)ができるかぎり回転体の外側に位置する扁平形状が望ましい。図2に示すように、ラジアルギャップ型モータはトルク発生部位が固定子内側に位置するのに対して、AGMはそれを鉄心の最外部に配置することができるため高トルク化に有利である。い

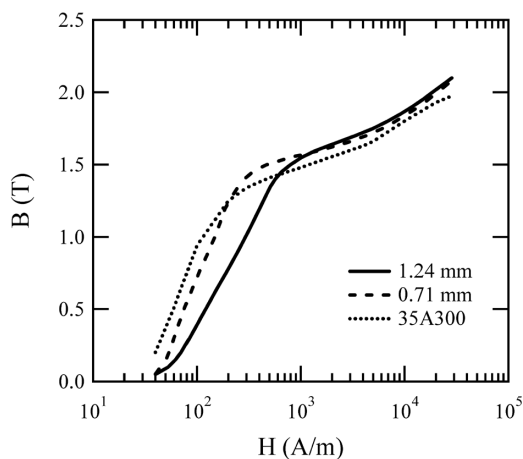


図1 純鉄系六角細線のB-H曲線例

Fig.1 B-H curves of pure iron hexagonal thin wires

っぼう、AGMには製造面での課題があり、例えば電磁鋼板をドーナツ状に巻いて積層したあと扇状に切断して固定鉄心を形成したAGMが報告されているが³⁾、歩留りが悪く曲げ加工による磁気特性低下が懸念される。細線であれば、これを束線した線材を切断するだけで鉄心として使用できる可能性がある。今回、市販の自動車補機用ラジアルギャップ型モータと同定格になるように電磁界解析を用いて、純鉄系細線を用いたAGMを設計した。設計したAGMと比較用ラジアルギャップ型モータの比較を図2に示す。AGMは2回転子1固定子の10極12スロット構成であり、回転子磁極にはネオジム磁石N42SHを使用している。回転子と固定子間のエアギャップは1 mmとしている。定格回転数は1,080 rpm、定格トルクは1.3 Nmであり、定格出力は市販モータと同程度の約150 Wとした。モータ鉄心体積は市販モータが370 cm³であるのに対して、試作AGMは296 cm³であり、20%小型化した設計にしている。ケース込みの重量も市販モータが1.68 kgであるのに対して、試作AGMは1.41 kgと15%軽量化もしている。

1.3 アクシシャルギャップ型モータの試作

試作したAGM固定子の写真を図3に示す。AGMの固定子には1歯あたり85本の対辺1.24 mmの純鉄系六角線を使用しており、束線前に磁気特性を高めるための磁気焼鈍を行っている。鉄心の中心付近の細線は直線であるが、最外部から2層目までの細線は「コ」の字型に

表1 純鉄系六角細線の磁気特性と鉄損例

Table 1 The example of magnetic properties of pure iron hexagonal thin wires

Material	Magnetic flux density (T)			Iron loss (W/kg) W _{15/50} 1.5 T / 50 Hz
	B ₂₅ 2,500 A/m	B ₅₀ 5,000 A/m	B ₁₀₀ 10,000 A/m	
Pure iron hexagonal thin wire (d=1.24 mm)	1.65	1.75	1.87	11
Pure iron hexagonal thin wire (d=0.71 mm)	1.63	1.71	1.84	5.35
35A300 (JIS)	> 1.49	> 1.60	> 1.70	<3.0
50A600 (JIS)	> 1.57	> 1.66	> 1.76	<6.0

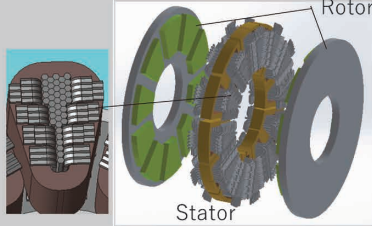
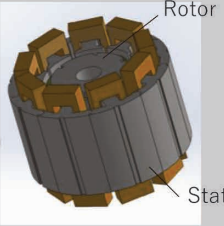
	Axial gap motor using pure iron thin wire	Radial gap motor
CAD model		
Motor type	Axial gap type (2 Rotor, 1 Stator)	Radial gap type
Poles / slots	10 poles/ 12 slots	6 poles / 9 slots
Core size	Φ 101 x 37 mm	Φ 82 x 70 mm
Core volume	296 cm ³ (-20% downsized)	370 cm ³
Weight	1.41 kg	1.68 kg

図2 試作AGMと市販ラジアルギャップモータの比較

Fig.2 Specification of the axial gap motor and a commercial radial gap motor

折り曲げ加工したものを配置している。これは固定子鉄心と回転子磁石の対向する面積を増やして固定子-回転子間の磁束量を増加させ、高トルク化するためである。また、この構造によりコイルの固定が容易になる利点もある。

1.4 モータの電磁界解析と実機評価装置

モータ設計のために、事前に市販の電磁界解析ソフト JMAG (ver.20, 株式会社 JSOL の登録商標) を用いて FEM 解析を実施した。固定子の細線鉄心は形状が複雑であり、CAD モデル化が困難かつ多大な計算負荷を要するため、簡易モデルを用いた。簡易モデルは細線鉄心を内包するように実際の鉄心より少し大きなバルク状とし、実機と素材重量を等しくするように鉄心の占積率を調整した (図 4)。

図 5 に示す三菱電機製パウダーブレーキ ZKB-5XN、トルクメータを同軸上に締結したモータ評価装置を用いて、試作したモータを評価した。MyWay 製インバータ PE-INVERTER を用いて試作モータを制御し、HIOKI 製



図 3 試作 AGM の外観
Fig.3 Photograph of the axial gap motor

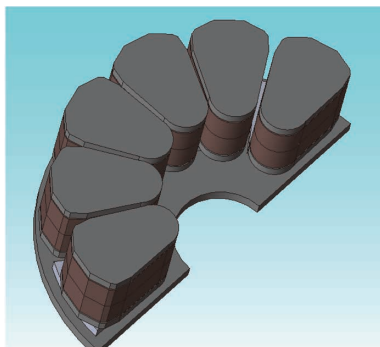


図 4 細線鉄心構造を簡略化した電磁界解析用バルクコアモデル
Fig.4 Bulk core model of the AGM for FEM simulation

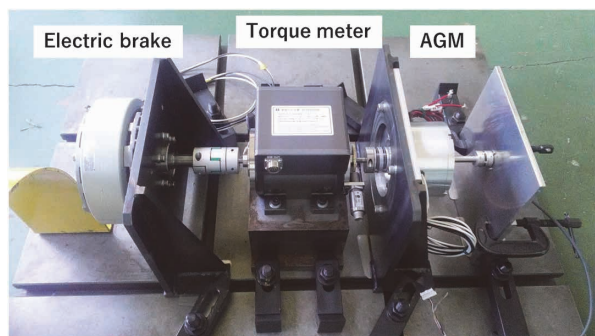


図 5 モータ評価ベンチの外観
Fig.5 Measurement system of motor property

パワーアナライザ 3390 を用いて、トルク 0.3~1.6 Nm、回転数 600~1,600 rpm の範囲で効率マップを取得した。

2. 試作モータの実機評価結果と解析結果の検証

2.1 試作モータの実機評価結果

AGM の効率マップ測定結果を図 6 に示す。動作点 A は比較モータの定格近傍 (1,000 rpm, 1.3 Nm)、動作点 B は高トルク低回転 (800 rpm, 1.5 Nm)、動作点 C は低トルク高回転 (1,600 rpm, 0.6 Nm) および動作点 D は高トルク高回転 (1,600 rpm, 1.6 Nm) の代表点として表記している。モータ効率はとくに高トルク域ほど高くなっており、測定した範囲で最大トルクかつ最高回転数の D 点において最高効率 79.8% を確認した。定格近傍 A 点における効率は 78.9% であり、比較用のラジアルギャップ型モータの効率は 81.4% であるため 2.5 ポイントほど効率は低くなっている。また、AGM の効率は電磁界解析による設計上の値より低くなっているが、モータ鉄心加工や組立影響が材料の磁気特性に影響した可能性がある。このことから、モータ製造方法の最適化や細線材料の細径化により、市販モータ並みの性能は実現できると考えられる。

効率マップ上の動作点 A~D におけるモータ出力と銅損、機械損+鉄損 (入力電力から銅損を差し引いて算出) を図 7 に示す。A~C 点はいずれも入力電力が 150 W 程度の動作点であるが、低トルク高回転の C 点に比べて、高トルク低回転側の A 点や B 点の方が効率は高い。損失

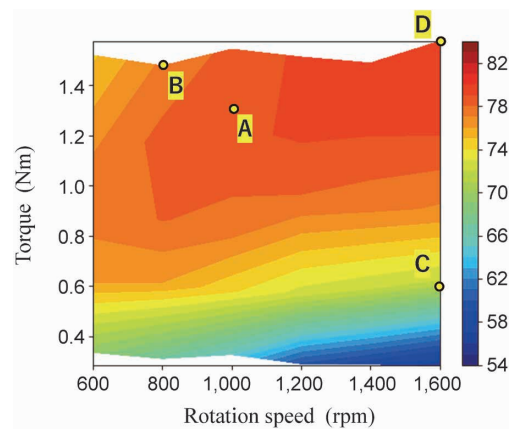


図 6 試作 AGM のモータ効率測定結果
Fig.6 Efficiency of the axial gap motor

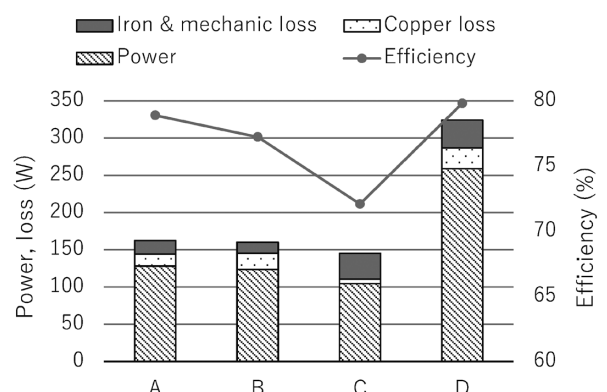


図 7 各動作点におけるモータ出力、損失
Fig.7 Motor power and loss at each operating point

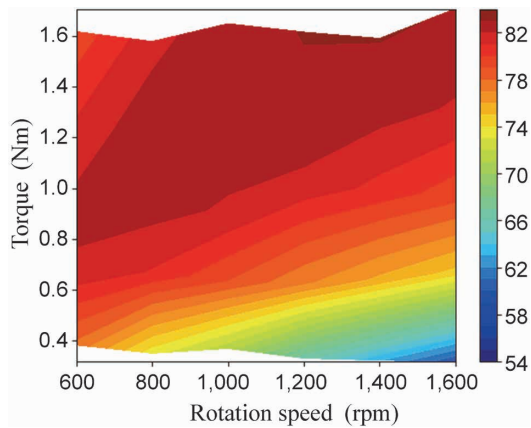


図8 効率マップ解析結果
Fig.8 Motor efficiency calculated by FEM simulation

の内訳は、C点では鉄損割合が大きいのに対して、A、B点では銅損割合がC点よりも大きい。一般に、鉄損は回転数に依存するため高回転側で増加し、銅損は電流の2乗に比例するため高トルク側で増加する。試作したAGMでは、磁束密度の高い純鉄系細線を用いることによりトルク出力に必要な電流を減らす効果があり、A～C点の比較から銅損が支配的な高トルク域でも効率が落ちにくい特徴が表れているといえる。

2.2 電磁界解析結果との比較

電磁界解析により計算したAGMのモータ効率を図8に示す。モータ効率は実機評価結果と同様に、図8よりも高回転、高トルク域ほど高くなっており、例えば最高効率点1,600 rpm、1.6 Nmで82.6%である。電磁界解析の方が実機結果よりも全領域において効率が3～10%程度高くなっている。この原因として、解析では考慮できていない機械損の影響、細線鉄心をバルク形状とした近似や曲げ加工部の鉄損増加影響などが考えられる。

1,600 rpmにおけるトルクと電流の実効値の関係を図9に示す。図9には、電磁界解析と実機評価の両方の結果を記載している。電磁界解析結果の方がわずかにトルクは高いものの誤差は10%以内であるため、細線鉄心をバルク形状に近似したモデルを用いても六角細線モータは概略設計可能であると考えられる。いっぽう、バルクモデルはとくに細線材を曲げたティース形状が大きく異なるため、形状や占積率をチューニングすることにより精度を高めた設計も可能と考えられる。

2.3 細線径の影響

試作モータでは高回転域における鉄損割合が大きいため、細線材の鉄損を低減することにより高効率化が期待できる。図1に示すとおり、試作に用いた対辺1.24 mm細線よりも0.71 mm細線の方が鉄損は低く磁気特性に優れている。そこで、2.2節の解析モデルに0.71 mm細線の磁気特性を適用した場合のモータ特性を電磁界解析し、材料特性の影響を調べた。実機評価で最高効率点であった回転速度1,600 rpm、電流実効値6.3 A（トルク1.6 Nm）におけるトルク、効率、鉄損比較を図10に示す（実験結果における鉄損は機械損を含む）。効率は1.24 mmから0.71 mmに細径化することにより6ポイント向上しており、トルクは6%向上、モータ鉄心の鉄損は58%低

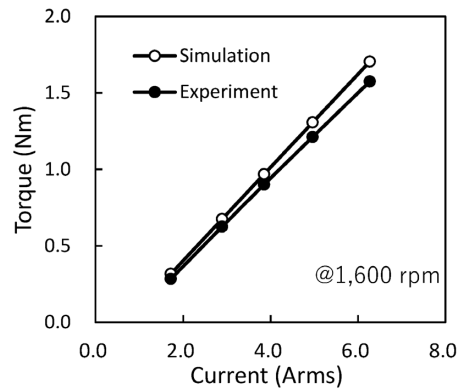


図9 1,600 rpmにおけるトルク-電流特性比較
Fig.9 Comparison of experimental and simulation data for torque-current property at 1,600 rpm

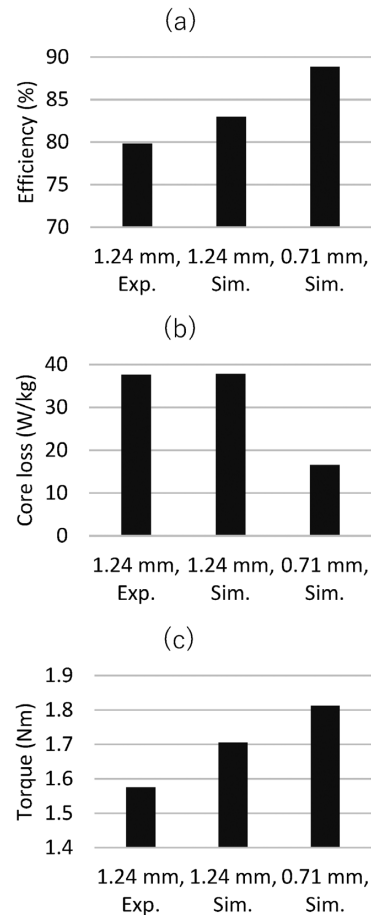


図10 試作AGMの実機評価と電磁界解析結果比較 (1,600 rpm, $I_{rms}=6.3$ A) (a) モータ効率, (b) 鉄損, (c) トルク
Fig.10 Simulation results of (a) motor efficiency, (b) iron loss and (c) torque for the axial gap motor (1,600 rpm, $I_{rms}=6.3$ A)

減している。電磁界解析から鉄心中心部の磁束密度は最大1.5 T程度であり、0.71 mm材は1.5 T以下における磁気特性が優れているため（図1）モータ性能が向上したと考えられる。純鉄は加工性に優れるため細径加工が比較的容易であり、細径化と高占積率によりモータのさらなる高トルク化、高効率化が期待できる。

むすび＝純鉄系軟磁性材料の細径化により鉄損を低減した磁性細線をアキシヤルギャップ型モータの固定子鉄心に適用することにより、小型軽量化できる可能性を示し

た。磁束密度の高い純鉄系細線を用いることによりモータの高トルク化や小型・軽量化が期待でき、例えば減速機を省略したダイレクトドライブにも適している。本稿で紹介したモータは純鉄系細線活用の一例であり、これまでにない構造や製造方法を考案することにより、電磁部品の高性能化に貢献していく。

参 考 文 献

- 1) 千葉政道ほか. R&D神戸製鋼技報. 2002, Vol.52, No.3, p.66-69.
- 2) 坂田昌之ほか. R&D神戸製鋼技報. 2015, Vol.65, No.2, p.6-11.
- 3) 松井信行. 省レアアース・脱レアアースモータ. 日刊工業新聞社, 2013.