

圧粉コアを用いた小型モビリティ用モーターの開発 Development of a Motor for Small Mobility with using Soft Magnetic Compound Cores

小林 孝幸 杉村 拓実 水谷 浩幸 栗田 洋敬

本稿は、公益社団法人 日本自動車技術会 2021年日本自動車技術会 秋季大会 学術講演会予稿集に掲載された論文を同会の許可を得て転載したものです。本論文の著作権は公益社団法人 日本自動車技術会に属し、無断複製・転載を禁じます。

要旨

小型電動車両には薄型で高トルクなモーターが要求される。本開発では圧粉コア(SMC)を用い、その磁氣的・機械的特性を考慮したアキシシャルギャップモーターの開発をおこなった。ステータのティースとバックヨークを別体構造とし、ティースとバックヨークのクリアランスを調整することで最適な磁気回路を実現し、薄型高トルク化を実現した。また、トルクを維持しつつ磁石とコアの形状および位置関係の最適化をおこないコギングトルクの最小化を図った。

Abstract

An axial gap motor for a small mobility using soft magnetic compound (SMC) cores was designed and prototyped considering its magnetic and mechanical properties. Teeth and a back yoke for a stator were separated and an optimum magnetic circuit was realized by controlling the clearance between the teeth and the back yoke. The performance of the prototyped motor was satisfied with the designed torque and rotational speed. Then, for the minimization of a cogging torque, the size and location of magnets of the rotor were optimized, consequently the cogging torque was minimized keeping a motor torque.

1 まえがき

カーボンニュートラルに向けた社会的要請の高まりを受けて、近年低速小型モビリティ(図1)への注目度が高まりを見せている。これらは屋外での使用とともに屋内での使用も想定されることから、動力として電動(モーター駆動)が多く採用されている。これら小型電動モビリティには高トルク密度、高効率、低騒音等の特性が要求され、これら要求特性に応じてモーターの形式やそこに使用される材料が適宜選定されている。

モーターを構成する主要材料にコアを形成する軟磁性材料がある。軟磁性材料には従来広く用いられている電磁鋼板の他にアモルファス薄帯や軟磁性粉末材料があり、図2に示すように使用される周波数、要求される磁束密度に応じて使い分けがなされている。

この中で軟磁性粉末材料は電磁鋼板とアモルファス薄帯の中間的性質を有しており、高周波特性および等方的磁気特性を活かし、従来より主として車載用リアクトルコア^{[1][2]}やDC-DCコンバータのチョークコイル用のコア^[3]等に適用されている。

また粉末材料を型内で成形固化することによる成形自由度を活かし、駆動用モーターへの適用も検討されており、ラジアルギャップ、アキシシャルギャップ、クローティース等の様々な形状で提案がなされている^{[4][5][6][7]}。しかしながら現状は圧粉コアが広く駆動用モーターに使用される状況には至っておらず、

主機用モーターへの適用は一部高性能四輪車への適用^{[8][9]}に留まっており限定的である。



図1 小型低速モビリティ

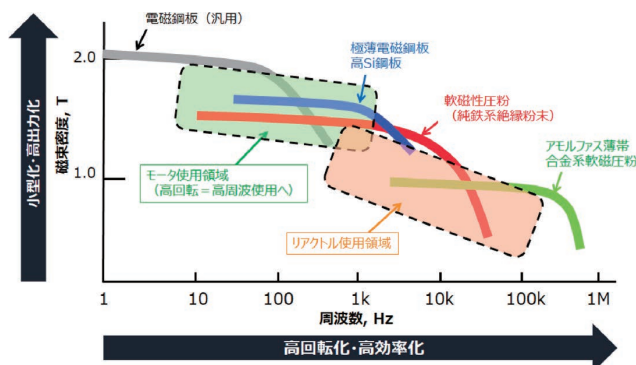


図2 各種軟磁性材料の磁気特性

圧粉コアは粉末の圧縮固化成形および熱処理条件によって磁気特性、強度特性が大きく異なる。そのため駆動用モーターとして成立させるためには、これら成形加工および熱処理条件が磁気特性および強度特性に及ぼす影響を把握し、モーター設計に反映させる必要がある。また特徴の一つである3次元的な磁束の流れを踏まえ、磁束の還流等が生じない磁路設計を行う必要がある。

本稿では適用対象として JIS T9208:2016 の規格を満たした小型低速モビリティ^[10] を選択し、必要な動力特性を確保しつつ、快適性等の商品要求に対応するため、モーターの基本構造および最適磁気回路の検討を行った。

2 粉末および粉末成形品の特性

2-1. 軟磁性粉末

材料は Höganäs 社製純鉄系軟磁性粉末である Somalloy 700 3P^[11] を用いた。粉末は99.99% (4N) の純鉄を水アトマイズすることで製作され、噴霧した液滴が表面張力によって真球状になる前に凝固させることで図3に示すような表面に凹凸を有する粉末を得ている。この凹凸が圧縮成形時に噛み合うことで一定レベルの成形体強度を得ることができる。

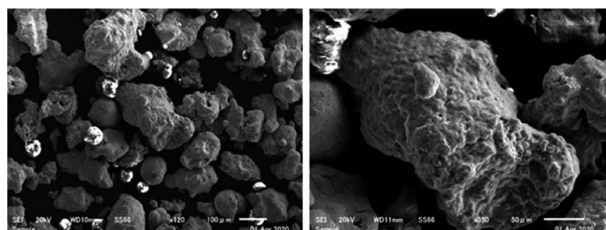


図3 軟磁性粉末の外観

2-2. 圧粉コアの磁気特性および機械的性質

圧粉コアを構成する軟磁性粉末は、粉末表面にリン酸系絶縁被膜が施され、粉末同士が絶縁された状態となっている。このため3次元的に磁束を流すことができ、かつ渦電流の発生を各粉末粒子内に抑えることで鉄損の抑制が可能となる。

リング状試験片を用いて行った交流磁気特性測定結果を図4に示す。成形体密度を7.30、7.40、7.59g/cm³と変化させ、所定の熱処理を施したリング状試験片を用い、外部磁場に対する磁束密度の変化を、交流 BH アナライザーを用いて計測した。計測時には電磁鋼板 (35A440) も併せて計測し比較対象とした。圧粉コアの磁束密度は、成形体密度の増加とともに増加した。透磁率については密度7.40および7.59g/cm³の試験片ではほぼ同じ値であるが、7.30g/cm³の試験片では小さな値を示

した。電磁鋼板に対しては磁束密度、透磁率共に小さな値を示した。圧粉コアの磁束密度が成形体密度の増加とともに増加することはよく知られており、Somalloy 500を用いた評価では成形体密度の増加に伴い磁束密度が直線的に増加することが報告^[12] されている。本研究の結果においても圧粉コアの磁束密度は成形体密度の増加とともに増加しているが、増加率については成形体密度7.40から7.59g/cm³の磁束密度増分は、成形体密度7.30から7.40g/cm³の磁束密度増分よりも小さく、その増加傾向は直線的ではなく、異なる傾向を示した。これは粉末粒子上の絶縁被膜厚さ、成形および熱処理条件等の違いに起因するものと思われる。

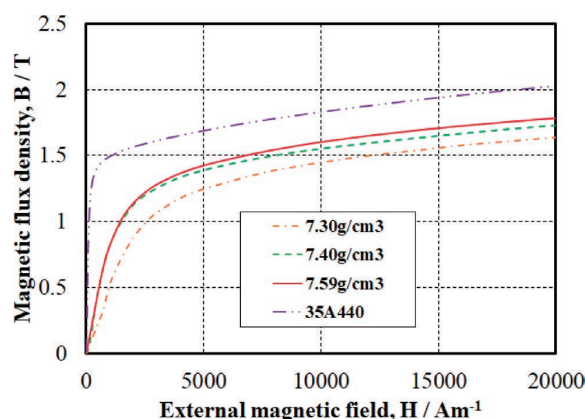


図4 圧粉コア及び電磁鋼板 (35A440) の外部磁場と磁束密度の関係。透磁率 $\mu = B/H$

次に圧粉コアの強度評価として密度7.59g/cm³とし、所定の熱処理を施した10×10×55mm の試験片を用いて4点曲げ試験を実施した。図5に代表的な応力歪み線図を示す。破壊の形態は圧粉粒子境界に沿って主亀裂が進展する脆性破壊であり。破面観察から塑性変形の痕跡は認められなかった。30本の評価を行った結果、曲げ強度は100±10MPaであった。4点曲げ強度のワイブルプロットを図6に示す。粒界強度が曲げ強度と直接的な相関があるものと思われる。

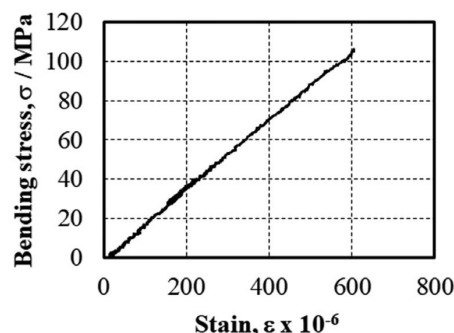


図5 圧粉コアの4点曲げ応力歪み線図

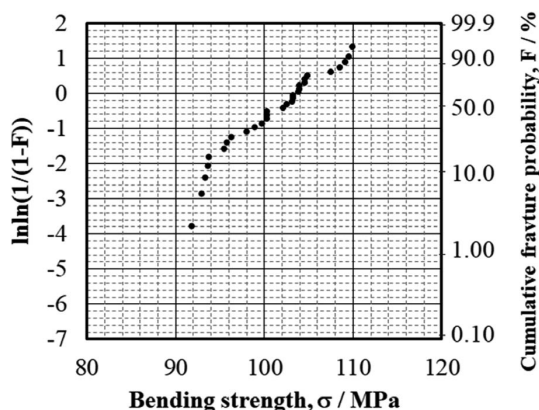


図6 4点曲げ強度のワイブルプロット

3 圧粉コアを用いたモーターの基本構造

3-1. モーター構造の検討

モーター構造としては小型モビリティに多く用いられているアキシシャルギャップ型とすることとした。従来アキシシャルギャップ型のコアは電磁鋼板を打ち抜き、積層しているため、巻線部分は直方体形状にせざるを得ず、図7(a)に示すようにコイルの占積率を上げられないという課題があった。ここに圧粉コアを適用することで巻線部分を略三角柱形状とし図7(b)に示すようにコイルの占積率を向上させ、モーターとしてのトルク密度向上が可能となる。

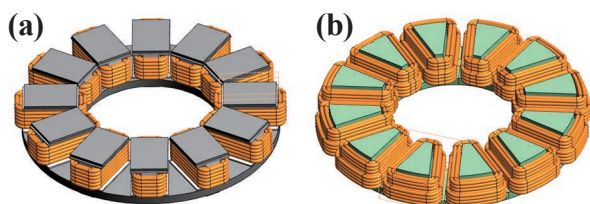


図7 アキシシャルギャップ型モーターのステータコア構造
(a) 電磁鋼板コア、(b) 圧粉コア

コアとバックヨークは当初4分割一体構造(図8(a))を検討したが、圧粉成形時に肉厚差の大きなコア根元部分に粒子同士が接合できていない微小亀裂(図8(b))が生じた。そのため図9に示すようにコアとバックヨークを別体構造とし、コアは圧粉により成形、バックヨークは電磁鋼板の積層構造とし、圧粉コアを電磁鋼板バックヨークに嵌めこむ構造とした。

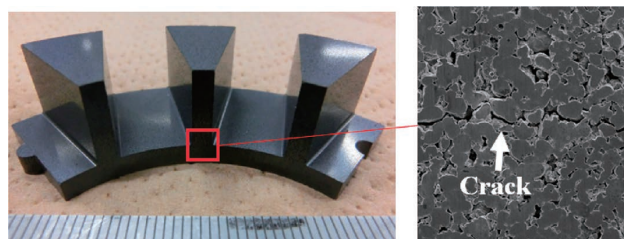


図8 圧粉コアの4分割ステータコア
(a) コア外観 (b) ティース根元部の微小き裂

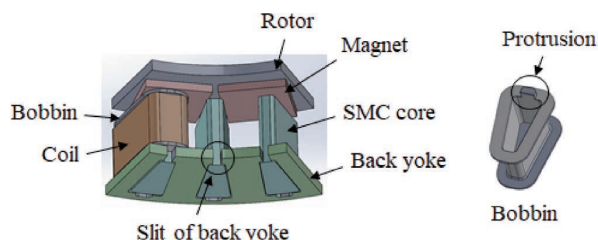


図9 ステータ及びローターの基本構造
ステータは圧粉コア、バックヨーク、ボビン及びコイルより成り、圧粉コアとバックヨークは別体として、ステータに設けた勘合孔に圧粉コアを挿入する構造

3-2. 磁気回路の検討

次いで別体構造詳細検討として、バックヨーク形状詳細について述べる。バックヨーク内周側には切り欠きを設けた。内周側切り欠き有無によるバックヨークに発生するジュール損失の違いを電磁界解析(JSOL 製 JMAG-Designer)により計算した結果(V相、q軸状態)を図10に示す。内周側切り欠きが無い場合、コアの周囲に磁束の還流が生じ、渦電流が発生することでバックヨークに約17Wのジュール損失が発生している。一方、内周側に切り欠きを設けた仕様ではジュール損失は約7Wに抑えられており、内周側切り欠き構造が効率向上に寄与していることが確認された。

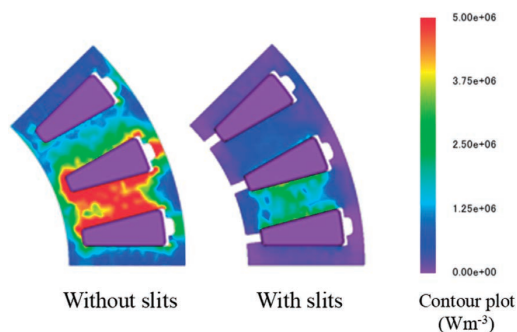


図10 バックヨーク勘合部の内周側切り欠き有無によるジュール損失比較(V相q軸状態)

次いでバックヨークとティースのクリアランスがモーター性能に及ぼす影響について述べる。バックヨークに設けられた圧

粉コア嵌め込み部形状には内周側切り欠きとともに、外周側にもクリアランスを設けている。これは圧粉コアをバックヨークに嵌め込む際の作業性を確保するためであるが、この構造により圧粉コアの径方向位置によってバックヨークと圧粉コア斜辺のサイドクリアランスが変化する(図11(a))。また圧粉コアの配置パターンとして片側の斜辺がバックヨークと接触している場合(Case A)と両側の斜辺に均等なサイドクリアランスを有する場合(Case B)を想定し、圧粉コアの径方向位置を変化させた時のモータートルクを電磁界解析により計算した。結果を図11(b)に示す。Case A、Case Bいずれの場合も径方向位置が内径側に向かうにつれてトルクは増大し、圧粉コアがバックヨーク内周側切り欠きに接する径方向位置0の点で最大となった。また Case A および B を比較すると、圧粉コアの片側がバックヨークに接している Case A の方が発生トルクは大きくなった。これは圧粉コアが内径側に位置するに従い斜辺部分のクリアランスが減少し、隣り合う磁極間の磁束が増大しているためであると考えられた。そこで圧粉コアに装着するボビン(図9参照)外周部に突起を設け、圧粉コアを内径側に押し付けることで斜辺部分のクリアランス最小化を図った。

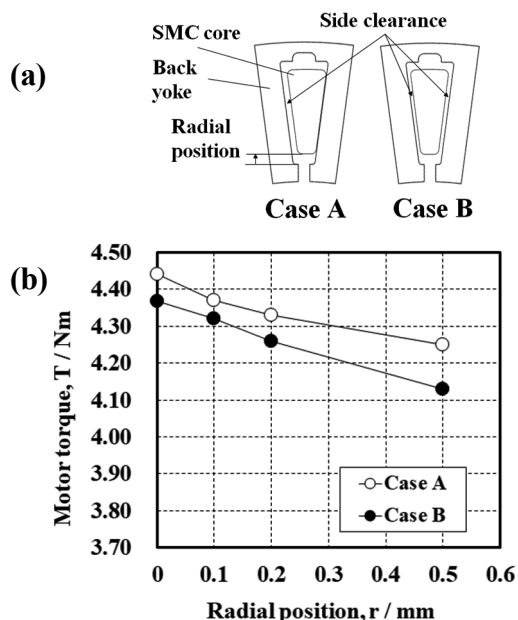


図11 モータートルクに及ぼす圧粉コア径方向位置の影響
(a) バックヨークと圧粉コア斜辺のサイドクリアランス CASE.A、CASE.B
(b) 圧粉コアの径方向位置とモータートルクの関係

4 モーター性能の最適化

4-1. モーター諸元と基本性能

上述の検討に基づいて決定したモーターの基本諸元を表1

に示す。モーター特性は22Apeak 時の最大トルク4.35Nm、無負荷回転数1,250rpmとして設計を行った。モーター構造はアキシャル形式16極24スロットのSPMモーターとし、外径146mm、厚さ23.8mmとした。ステータを構成するティースには前述の通り圧粉コアを用い、組み合わせるバックヨークは汎用電磁鋼板積層構造とした。コイルは線径1.3mmの銅線を18ターン巻き付けて構成することとした。この基本諸元に基づき設計したモーターについて電磁界解析を実施し、トルク4.4Nm、無負荷回転数1,300rpmとなることを確認した。

上記諸元に基づきモーターの試作および性能測定を行った。モーターおよび構成部品であるローター、ステータを図12に示す。図13にモーター性能測定に用いたベンチの構成を示す。供試モーターには直流電源からインバーターを介してU、V、Wの3相の電流が供給される。供試モーターの回転数はPLC (Programmable logic controller)につながれた誘導機により制御され、供試モーターのトルクは出力軸に取り付けられたトルクメータにより計測した。効率とは所定回転数における供試モーターの最大出力をインバーターより投入される電力で除して求めた。得られた性能測定結果と電磁界解析によるシミュレーション結果を併せて図14に示す。

表1 開発モーターの基本仕様

Slot number	24
Pole number	16
Coil	ϕ 1.3 x 18turns
Magnet	50 MGOe
Motor size	OD ϕ 192 x t23.8
Voltage	36V
Max. current	22A

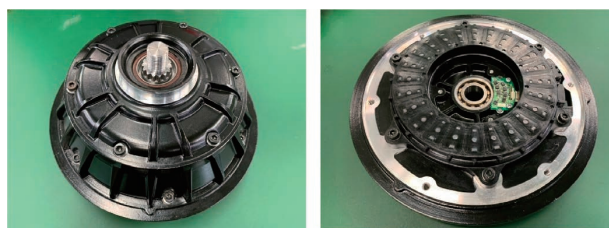


図12 左図:モーターの外観 右図:ステータ外観

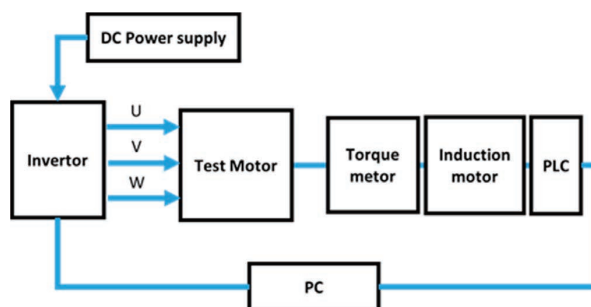


図13 モーター駆動性能計測用のベンチ構成

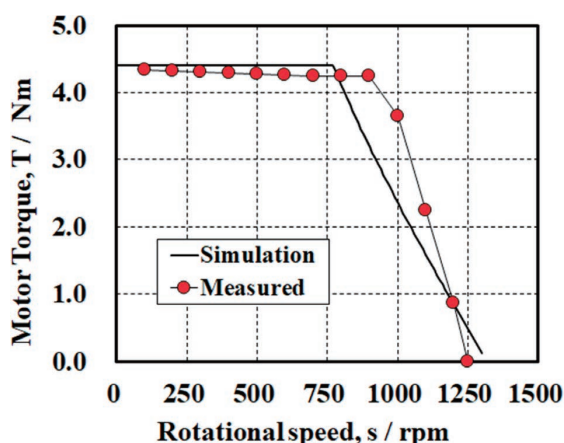


図14 モーター性能測定結果と電磁界解析結果

実測の結果、モーター回転数の増加に伴い、トルクは緩やかに低下し、900rpmを超えると急速に低下し、1,250rpmでトルクはゼロとなった。シミュレーション結果と比較すると、実測トルクは低い値となっており、トルク低下が始まる回転数は高い値となっていた。この理由としてシミュレーションで考慮していない鉄損、機械損の影響が考えられる。またシミュレーションでは750rpmでトルク低下が始まるのに対し実測では900rpmでトルク低下が始まっている理由としては、シミュレーションと実測で、1) 発生誘起電圧が異なったこと、2) 巻線抵抗分の電圧降下量が異なったこと等が考えられる。誘起電圧に影響を及ぼす因子としてはマグネットと圧粉コア間の距離であるエアギャップ量があるが、モーター組み立て時にギャップ量を実測、調整しているため、発生誘起電圧が大きく異なることは考え難い。一方、巻線抵抗については、実際の試作品巻線抵抗は電磁界解析で設定した巻線抵抗値より小さかった可能性がある。電磁界解析時の巻線抵抗の設定は、巻線時の巻太りなどを考慮して設定している。今回試作時には占積率向上のため巻太り抑制の施策を講じており、これにより電圧降下が抑制され、計算時よりトルク低下開始点が高回転側にずれたものと思われる。

4-2. コギングトルクの低減

モーターの品質要求の一つにコギングトルクの低減がある。コギングトルクは永久磁石磁界による磁気エネルギーがローター回転角度とともに変化することで生じる脈動トルクであり、ラジアルモーターにおいてはコギングトルク低減の取り組みがなされ、ステータスロット数と磁石極数の組み合わせ、着磁パターン(スキュー)の最適化、鉄心への溝形状等の付与等種々の方策が提案されている^{[13][14][15][16]}。一方アキシアルギャップモーターにおいてはティースおよび磁石の輪郭線を互いに非平行状態とする試み^[17]や、ティースに対する磁石の寸法およ

び位置を変化させてコギングトルクを抑制する試み^[18]がなされている。

本論では図15に示す略台形の断面形状を有する圧粉コアと正方形断面を有する磁石の組み合わせにおいて、磁石幅と径方向位置をパラメータとしコギングトルクを最小化できる位置関係を電磁界解析により探索した。図16に計算結果を示す。いずれの径方向位置においても磁石幅の増加に伴いコギングトルクは減少し、最小値に達した後に増加に転ずる挙動を示した。また磁石外径位置の増加に伴いコギングトルクの増減を示す線は磁石幅が大きい側に移動した。

磁石外径位置63.5mmの場合の最小コギングトルク値近傍のコギングトルク波形(計算値)を図17に示す。磁石幅の増加に伴いコギングトルク波形の振幅は減少し、17.1mmで最小となった後再び増加に転じた。

図16中の各々の磁石外径位置におけるコギングトルク最小値を示す磁石幅でのモータートルクの電磁界解析による解析結果を図18に示す。磁石外径位置の増加に伴い、モータートルクは漸増する傾向を示し、63mm付近ではほぼ一定値となった。

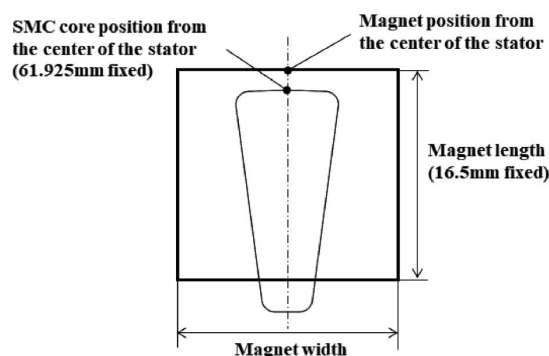


図15 圧粉コアと磁石の位置関係。磁石の径方向位置と磁石幅設計パラメータとし、圧粉コアと磁石長は固定

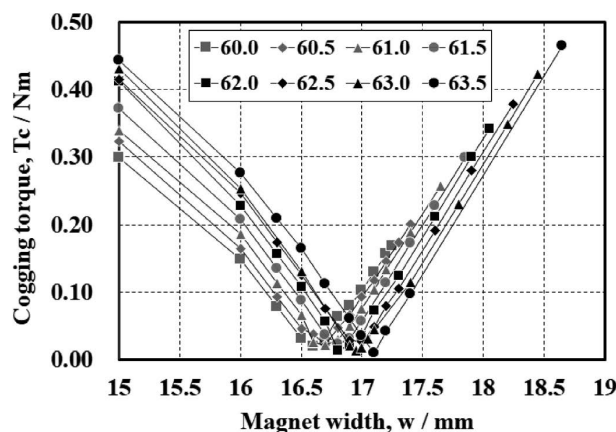


図16 コギングトルクに及ぼす各径方向磁石位置における磁石幅の影響(磁石位置:60.0mmから63.5mm)

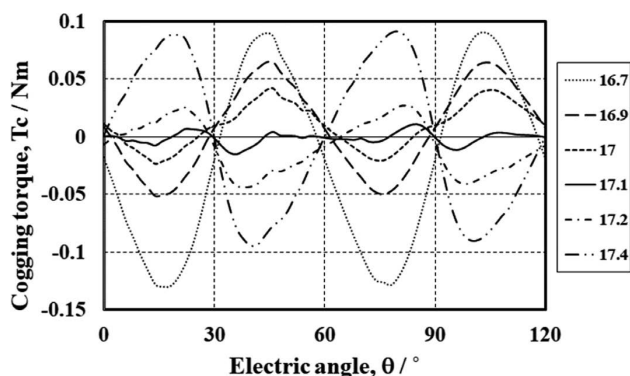


図17 コギングトルク波形に及ぼす磁石幅の影響
(径方向磁石位置:63.5mm)

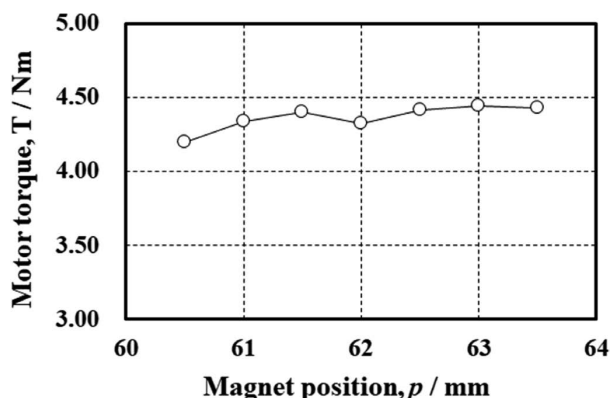


図18 モータートルクと磁石位置の関係

アキシシャルモーターのコギングトルクは円周方向磁石ピッチに対する円周方向磁石長さの比および円周方向のティースピッチに対するスロット幅の比により変化する。またアキシシャルモーターのローター位置 α におけるコギングトルク T_{cog} は以下のよう表される。

$$T_{cog}(\alpha) = \sum_{i=1}^N T_{cog,i}(\alpha) \quad (1)$$

ここで N は半径方向の分割数であり、コギングトルクは半径方向の各々の位置におけるコギングトルクの重ね合わせにより決まる^[18]。今回の検討で得られたコギングトルク最小値を示す条件においては $T_{cog,i}$ の最小化あるいは各半径方向位置 i における $T_{cog,i}$ の相互作用(互いにトルクを相殺)が起こっているものと思われるが詳細検討は今後の課題である。

これらの結果より磁石外径位置と磁石幅を最適化することによりモータートルクを減少させることなくコギングトルクを大幅に低減可能であることが分かった。モータートルクとコギングトルクを最適化できる磁石の配置、寸法として磁石外径位置63mm、磁石幅17.1mmを選択し試作評価を実施、実機でモータートルク約4.3Nm、コギングトルク約0.05Nmの結果を得た。

コギングトルクの実測値と解析値のずれは磁石寸法および貼り付け位置精度が影響しているものと思われる、この精度向上は今後の課題である。

5 まとめ

純鉄系軟磁性粉末の圧縮成形および熱処理条件が圧縮成形体の磁気特性および強度特性に及ぼす影響を検討した上で、圧粉コアとバックヨーク別体構造アキシシャルギャップ型モーターの設計仕様を検討し、ジュール損失を抑え高トルク密度を得られるモーター諸元を決定した。またコギングトルクの最小化を図るべく磁石配置および寸法の最適化を行い、モータートルクは維持しつつ、コギングトルクを最小化することができる磁石配置および寸法を見出した。

本開発モーターは小型低速モビリティに搭載し、市場実証に供した。

参考文献

- [1] 五十嵐直人, 魚住真人, 小菅敏行, 佐藤淳, 草別和嗣, 山口浩司: 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, 186(2015)p. 92.
- [2] 石原千生, 小川哲矢, 中山紀行: 粉末冶金法を用いたリアクトルおよびモータ向け圧粉磁心, 日立化成テクニカルレポート, 62(2019)p. 15.
- [3] 徳岡輝和, 前田徹, 伊志嶺朝之: 圧粉軟磁性材料の開発, 素形材, 52, 8(2011)p. 11.
- [4] 渡辺麻子, 齋藤達哉, 上野友之, 鶴田聖, 中村悠一: 圧粉磁心による薄型・高トルクなアキシシャルギャップモーターの実現, SEI テクニカルレビュー, 192(2018)p. 119.
- [5] 榎本祐治, 伊藤元哉, 正木良三, 山崎克之, 浅香一夫, 石原千生, 大岩昭二: 圧粉磁心の磁気特性比較及びモータ特性の評価, 電気学会論文誌 D, 125, 1(2005)p. 106.
- [6] 田島伸, 服部毅, 堀田昇次, 近藤幹夫, 岡島博司, 東山潔, 岸本秀史: 金型潤滑温感成形法により作製した高密度圧粉磁心(HDMC)の特性, 粉末および粉末冶金, 50, 7(2003)p. 577.
- [7] Ryosuke Akaki, Kazuhiko Matsunami, Tatsuji Mori: Variable Magnetic Flux PM-Motor with Automatically Flux Weakening Technique, EVD31 & EV Tec 2018, Kobe, Japan(2018)20189225.
- [8] <https://www.forbes.com/sites/michaeltaylor/2020/06/25/ferrari-sf90-stradale-driven-and-its-astonishing/?sh=1bfafbb83649>
- [9] <https://www.koenigsegg.com/car/regera/>

- [10] https://global.yamaha-motor.com/jp/news/2021/0421/neemo.html#_ga=2.154086200.1662357184.1626053064-1378429845.1591225588
- [11] https://www.hoganas.com/globalassets/download-media/sharepoint/brochures-and-datasheets---all-documents/somaloy_somaloy-3p-material-data_2273hog.pdf
- [12] 田島伸, 服部毅, 堀田昇次, 近藤幹夫, 岡島博司, 東山潔, 岸本秀史: 金型潤滑温感成形法により作製した高密度圧粉磁心 (HDMC) の特性, 粉末および粉末冶金, 50, 7 (2003) p. 577.
- [13] 大西和夫: 永久磁石ブラシレスモータのコギングトルク低減, 電気学会論文誌 D, 122, 4 (2002) p. 338.
- [14] 後藤誠, 小林一二: 直流モータのコギングトルクの解明と新しい低減方法, 電気学会論文誌 B, 103, 11 (1983) p. 711.
- [15] 藪見崇生: 着磁の最適化による EPS 用永久磁石モータのコギングトルク低減: 電気製鋼, 76, 3 (2005) p. 171.
- [16] 榎本裕治, 北村正司, 酒井俊彦, 大原光一郎: 分割コアモータのコギングトルク要因分析, 電気学会論文誌 D, 124, 1 (2004) p. 85.
- [17] 豊田中央研究所: アキシアル型永久磁石モータ, 特許第 4645130 号, 2011-03-09.
- [18] Linyuan Xiao, et al.: Cogging Torque Analysis and Minimization of Axial Flux PM Machines With Combined Rectangle-Shaped Magnet, IEEE Transactions on Industry Applications, 53, 2 (2017) p. 1018.

■ 著者



小林 孝幸
Takayuki Kobayashi
技術・研究本部
研究開発統括部
基盤技術研究部



杉村 拓実
Takumi Sugimura
技術・研究本部
研究開発統括部
基盤技術研究部



水谷 浩幸
Hiroyuki Mizutani
ランドモビリティ事業本部
SPV 事業部
JW ビジネス部



栗田 洋敬
Hirotaka Kurita
技術・研究本部
研究開発統括部
基盤技術研究部