

磁束を集約した磁気回路によるエアギャップが広い ロータの着磁製法

Method of Magnetizing Rotor with Wide Air Gap
Using Magnetic Circuit that Concentrates Magnetic Flux

加藤 稔 貴¹
Toshitaka KATO

根本 真 次¹
Shinji NEMOTO

平 良 斗輝生¹
Tokio TAIRA

要 旨

ABSTRACT

エアギャップが広い小径多極高回転ロータのパルス式着磁において、磁束を集約することで磁界強度を向上させる後着磁製法を開発した。ロータの外周に配置された2組の着磁コイルから発生する磁束を集約し1組の着磁コイルへ通すY字の磁気回路を作り出すことで局所に高磁界を与えられる。集約された磁束が通る1組の着磁コイルから±135°の位置にそれぞれ着磁コイルを設置した。この着磁コイルの配置によってロータの内周部を通る大きな磁気回路を形成できる。この磁気回路によって集約されなかった磁束が磁石の磁化の向きと逆向きに流れてしまうため、同様に±67.5°の位置に補助コイルを設置することで磁気回路から漏れる磁束を抑制した。本技術は、エアギャップが広いロータに対して高磁界を付与し磁石単体の目標の着磁率99.0%以上を実現した。

A post-assembly magnetization method was developed to increase magnetic field strength by concentrating magnetic flux in the pulse-type magnetization of small-diameter multipole high-speed rotors with wide air gaps. By concentrating the magnetic flux generated by two sets of magnetizing coils located on the outer periphery of the rotor, a Y-shaped magnetic circuit that passes through one set of magnetizing coils can be created that applies a high magnetic field locally. Magnetizing coils were placed at locations ±135° from the one set of magnetizing coils through which the concentrated magnetic flux passes. This magnetizing coil arrangement can form a large magnetic circuit that passes around the inner periphery of the rotor. The magnetic flux that is not concentrated by this magnetic circuit flows in the direction opposite to the magnetization of the magnet. Therefore, the similar placement of auxiliary coils at the ±67.5° locations suppressed the magnetic flux that leaked from the magnetic circuit. This technology created a high magnetic field in a rotor with a wide air gap and realized the target magnetization ratio of 99.0% or higher in single magnets.

1. まえがき

近年、地球規模の環境意識から、モビリティ走行中におけるCO₂排出削減や低燃費化の要求が高まり、各モビリティにおいて電動化普及が加速傾向である。電動化普及に向けてさまざまな種類のモビリティに搭載するためにモータの小型化や高トルクに寄与する多極化したものがある。また、小径で高出力を実現するために高回転のモータも登場している。その中でも永久磁石をロータ表面に貼り合わせたSurface Permanent Magnetic (SPM)形状、かつハルパツハ配列で設置された磁石⁽¹⁾においては高回転による遠心力を保持するため、ロータ周囲を樹脂系の材質を用いた部品で構成している⁽²⁾。そのため、ステータとロータと

のエアギャップは従来よりも8から12倍広くなっている。ロータに組み込まれた永久磁石を後着磁する製法としては着磁ヨークと呼ばれる治具を用いてパルス磁界を発生させる着磁方式が幅広く用いられている。着磁ヨークは対象のロータの磁石配置に対して着磁磁界を発生させるコイル配置を専用設計で製作する⁽³⁾。着磁ヨークとロータのエアギャップは、近いほど効率的に着磁できるため、高回転のSPMロータのようなエアギャップが大きいロータに対して着磁する場合、従来に対し大きなエネルギーを要する。印加するパルス磁界を高めるには、静電エネルギーを高めた生産条件を確立する必要がある。しかし十分な静電エネルギーを確保するために装置能力を上げると生産装置への投資が増加することや、電流値上昇による着磁コイルの発

¹ 統括機能センター

E-mail: toshitaka_kato@jp.honda

熱や電磁力によるコイル絶縁性の耐久低下、コイル変形など生産性が低下する。また、静電エネルギーを低減できるアプローチとしてはロータに組付けられた永久磁石を部分的に着磁する製法も知られてはいるが⁽⁴⁾、⁽⁵⁾、SPMで小径かつ多極ロータに対して部分的な着磁をおこなうと着磁対象に近接する磁石に対して逆方向の着磁がなされてしまう。従来の着磁手法においてはエアギャップが大きいロータに対して、静電エネルギーを維持した状態での後着磁製法を確立させることは容易ではない。従来は静電エネルギー同等以下の条件における磁界強度の向上が課題となっていた。この課題を解決するには、コイルから発生する磁界の有効な磁化成分を効率よく永久磁石に与えることが必要であり、それを達成するにはコイルの配置が最も重要となる。また、コイル配置のみで磁界強度向上ができると生産設備などに大きな影響を与えないため、新規の製品生産に対する影響を最小限にすることができる。

そこで、従来のロータ外周から磁界を与えるコイル配置では磁界強度に限界があるため、我々はロータ内部を含めた磁気経路も考慮したコイル配置に着目した。磁界の集約と反磁界経路の抑制が可能なコイル配置を検討し、着磁ヨークの製作と永久磁石の着磁率評価をおこなった。

そこで本稿は、パルス式着磁における高磁界を実現する着磁コイルの配置と部分着磁における反磁界を抑制する補助コイルの配置を組み合わせた技術を紹介する。

2. 着磁の原理と課題

2.1. 後着磁製法

後着磁とはロータの生産において磁石となる素材を着磁ヨークと呼ばれる装置を使用して磁化させる製法であり、ロータの極数と径に対して専用の着磁ヨークを設計する。異方性の磁石は製作されるときに磁界を付与することで磁化方向が決まるため、着磁コイルからの磁束が通り抜ける磁石に対する磁化方向と強さによって磁化の度合いが決定する⁽⁶⁾。

例として Fig. 1 に 8 極ロータを対象とした着磁ヨークの構成を示す。ロータ極数と着磁コイルは同数であり、コイ

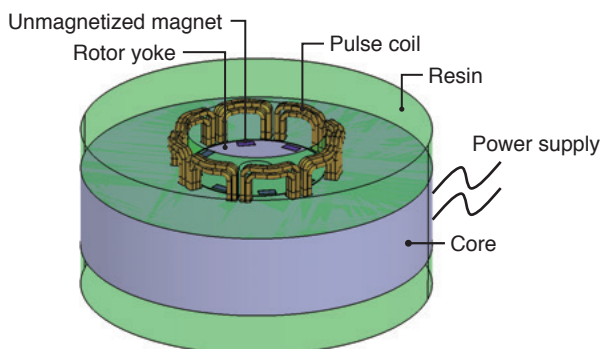


Fig. 1 Composition of magnetizing yoke

ルは動かないように樹脂で固定されている。生産性を考慮し着磁ヨークとロータとは 0.25 mm から 0.3 mm 程度のエアギャップがある。着磁の設計要素としては、着磁コイルの線径、巻数、コイル配置があり、着磁条件は静電エネルギーである電源電圧と静電容量があげられ、ロータの仕様によって適正な着磁ヨークを設計する。

2.2. 着磁の原理

着磁コイルに瞬間的に大電流を流すことでコイルから発生した磁界によって着磁をおこなう。このとき磁界 H は電流の大きさ I 磁界発生源からの距離 r としたときに式 (1) のようになる。

$$H = \frac{I}{2\pi r} \quad (1)$$

よって着磁磁界においては着磁コイルと対象の磁石が近ければ強い磁界を与えられる。

2.3. 着磁目標

今回対象とした SPM ハルバツハ配列ロータの構成と磁化方向を Fig. 2 に示す。対象は最外径 67 mm、積厚 33 mm、磁石材質は Nd-Fe-B 系焼結磁石を使用しており、目標出力を達成するために高回転を前提とした設計のため、遠心力による磁石飛散防止のための樹脂リングを装着している。

Fig. 3 に磁化特性を示す。主磁石においては磁界強度を

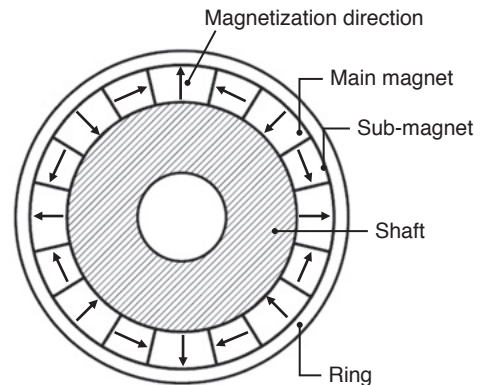


Fig. 2 Small-diameter, multipole, and high-speed rotor

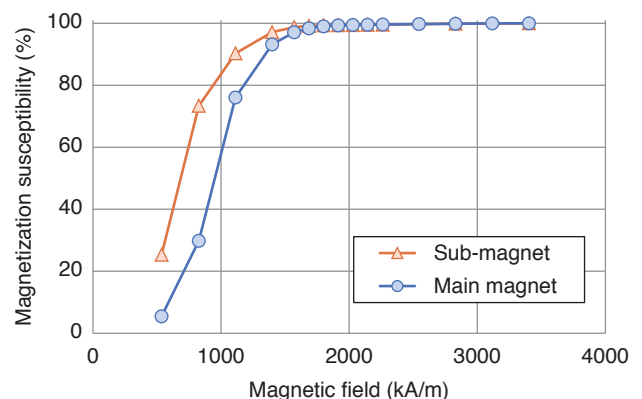


Fig. 3 Magnetization characteristics of magnets

1800 kA/m 以上、副磁石においては 1635 kA/m 以上を与えれば 99.0% 以上の着磁率を得ることができるため、それぞれ単体の磁石における磁界強度の目標値とした。

2.4. エアギャップが広い高回転ロータの着磁課題

一つ目の課題としては磁石外周部に磁石飛散防止の樹脂リングが装着していることで着磁コイルと対象磁石の距離が広がり着磁磁界が大幅に減少する。Fig. 4 に磁界発生源からの距離によって磁界強度が低下していくことがわかる。

二つ目の課題としては対象が小径になるにつれて極同士の磁気回路が狭くなり磁石内周部まで十分な着磁磁界を与えられない。これは着磁コイルの極同士の間隔が狭くなり磁気回路が小さくなるからである⁽⁷⁾。

2.5. 磁界解析による初期検討

Fig. 5 にこのロータを着磁するにあたり電磁界解析ソフトウェア JMAG で初期検討をおこなったモデルを示す。主磁石の極数と同数の着磁コイルを配置した。これは従来の後着磁製法でおこなう着磁コイルの配置である。磁界解析の条件は電流 12,000 A、コイル巻き数を 9 ターンとした。

Fig. 6 に Fig. 5 の測定位置（磁石最内周部の磁界強度）における初期検討の磁界解析の結果を示す。結果より副磁石の最内周の中心において最も磁界強度が低く、着磁に必要な目標値に達していない。

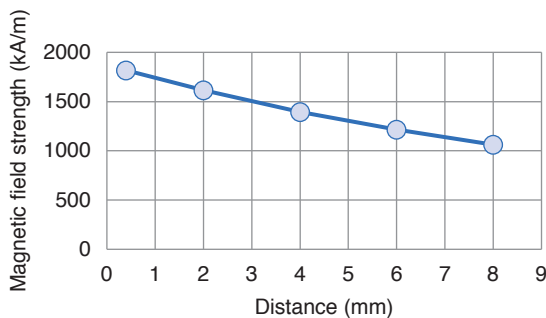


Fig. 4 Relationship between magnetic field and distance

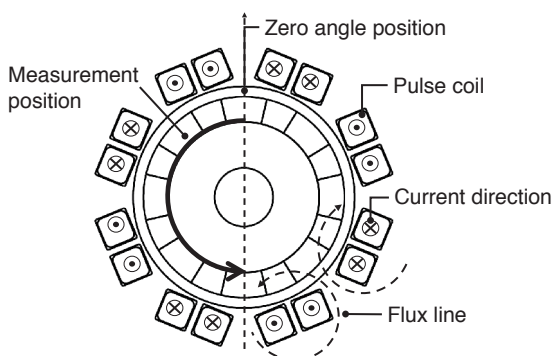


Fig. 5 Pulse coil position and measurement position

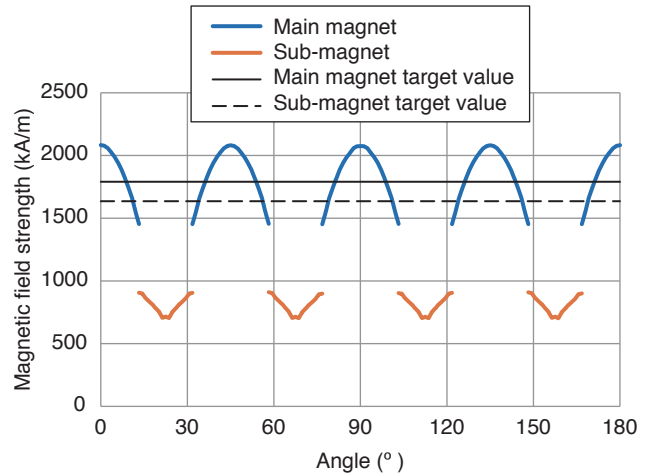


Fig. 6 Magnetic field on inner periphery of magnet

3. 磁束の集約による着磁磁界の磁気回路

3.1. ロータ内周部を通る磁気回路

着磁コイルの磁界は磁石の磁化方向に寄与する磁束の成分を効率よく与える必要がある。よって着磁コイルの線径や巻き数、配置などを検討する。Fig. 7 に着磁コイルの配置（コイル間隔）のモデルとそれを解析した磁束密度の分布をコンター図であらわす。磁界強度の強さはコイル間隔が広いほど内周側にシフトすることがわかる。Fig. 8 に主磁石と副磁石の着磁コイルの間隔の違いによる磁界強度のグラフを示す。磁界強度は磁石最内周部を測定した。グラフからもコイル間隔が広い方が狭いものに比べ、主磁石で約 1.5 倍、副磁石で約 2.5 倍程度強いことがわかる。また、ロータ磁極は N 極と S 極を交互に配置する。そのため、対応する着磁コイルの N 極着磁、S 極着磁の間隔を最大限広

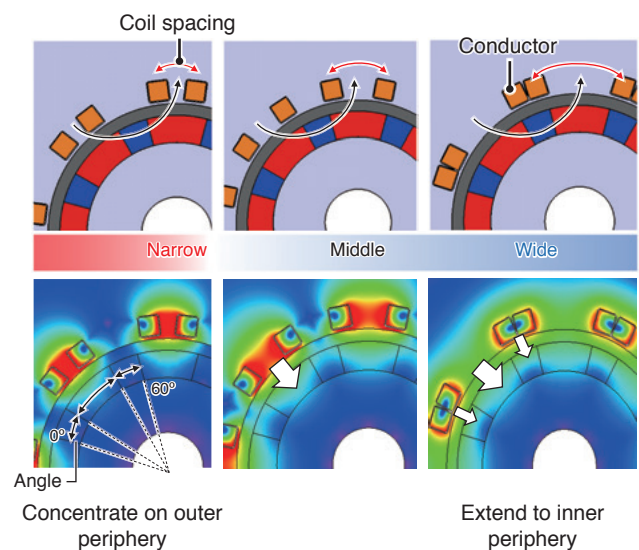


Fig. 7 Coil spacing and magnetic flux density

げること検討した。Fig. 9は隣り合う着磁コイルによる小さな磁気回路を取り除くことでB着磁コイルの位置までコイル間隔を広げた図を示す。実線はコイル間隔を広げた磁気回路の予測、破線は着磁コイルを取り除く前の磁束の流れを示す。モータは周期性をもつことから同様にC着磁コイルまでの間隔を広げることでB、C着磁コイルからの磁束が集約されるロータ内周部を通る大きな磁気回路を発生した。

3.2. 磁束を集約した磁気回路の磁界解析

Fig. 10に高磁界着磁ヨークの構成と磁気回路を示す。Aの着磁コイル位置から $\pm 135^\circ$ の位置に着磁コイルB、Cを設置した。B、Cから生じた磁束が集約されてAへ流れることでロータ内周部を通る大きな磁気回路を作る。Fig. 11に磁界解析の結果を示す(モデルの対称性より1から9の半周分の結果とする)。1と7の磁界が強まる極において主磁石の最内周部で1は290.42%、7は222.86%の磁界強度の向上がみられ、副磁石の2は296.3%、6は363.2%の向上が確認できた。解析結果より磁束の集約によって局所的に高磁界を与える磁気回路を創出できた。

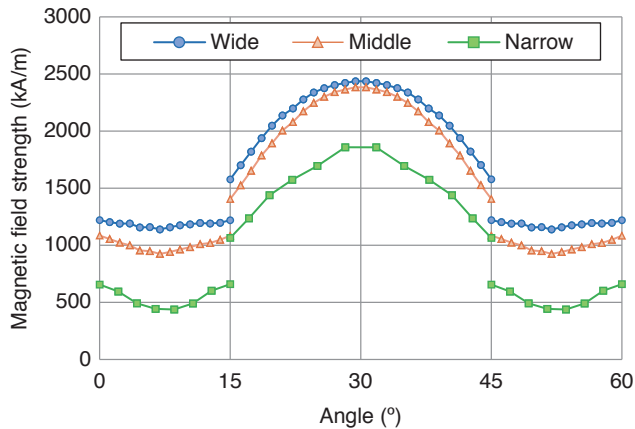


Fig. 8 Comparison of magnetic flux density of magnets

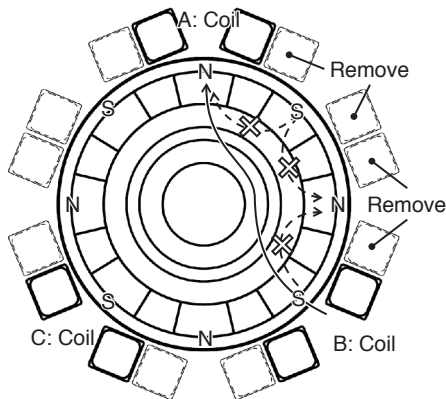


Fig. 9 Investigation of expansion of coil spacing

3.3. 磁束を集約した磁気回路の課題

ここで課題となるのが集約されていない磁束である。Fig. 11の磁界解析の結果において3と4はそれぞれマイナスの磁界強度となっている。これは本来の磁化方向とは逆向きに着磁されていることを示している。Fig. 12に集約されていない磁束の分布を示す。磁気回路がロータ内周部を通ることで途中経路において狙いの磁気回路の外に磁束が生じたと考えられる。また、シャフトより磁石の透磁率の方が大きいために磁束としては磁石を通してしまうことで反磁界が生じたことがわかる。

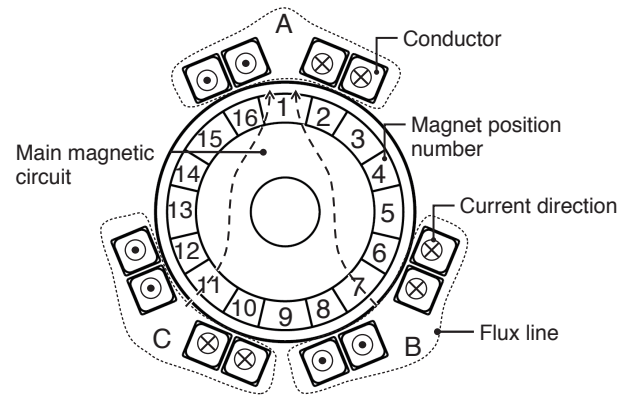


Fig. 10 Magnetic circuit

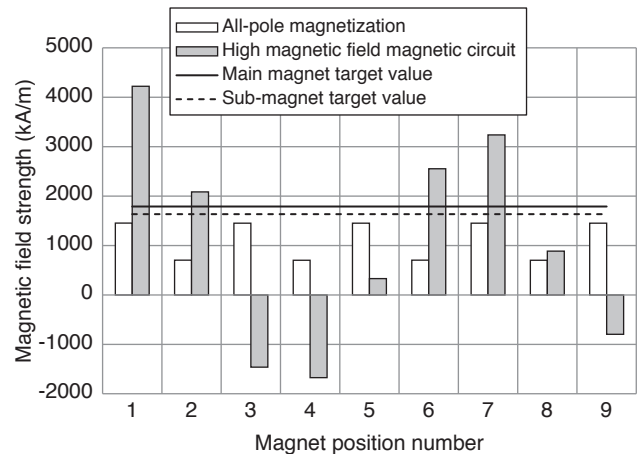


Fig. 11 Magnetic field analysis results

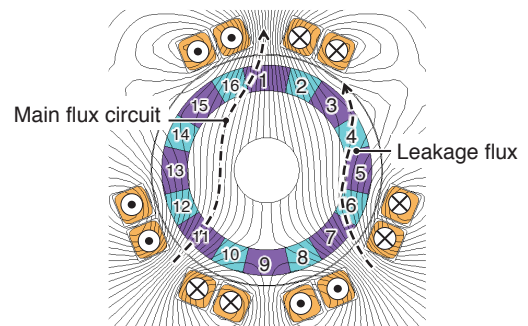


Fig. 12 Leakage flux analysis

3.4. 補助コイルを用いた漏れ磁束の抑制

磁気回路の外に生じた磁束を抑制することを狙いとして、新たに補助コイルを設置した磁気回路を考案し解析をおこなった。Fig. 13 に漏れ磁束を抑制するモデルを示す。コイルから発生する磁界は同心円状に形成される。そのため副磁石 4 の径方向の延長線上に設置することで主磁石 3, 5 と副磁石 4 に対称な磁界を与えられる角度として A から ± 67.5° の位置に補助コイル D, E をそれぞれ設置した。補助コイルから発生する磁界は主磁気回路から外れた逆向きの磁束を抑制する。また、この補助コイルの設置によって 3, 4, 5 の磁石に正しい向きの磁界を与える。Fig. 14 に補助コイルによる漏れ磁束抑制の結果を示す。補助コイルの磁界は主磁気回路を阻害するので磁界強度は下がってしまう。対策後の各磁界強度については、1 は 70.66%, 7 は 77.68%, 2 は、77.13% に低下した。磁気回路の外に漏れ出た磁束による逆磁界については、3 は 78.44%, 4 は 93.81% 向上し改善が確認できた。

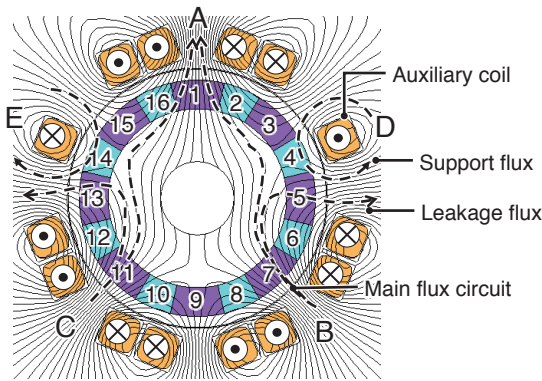


Fig. 13 Suppression of leakage flux

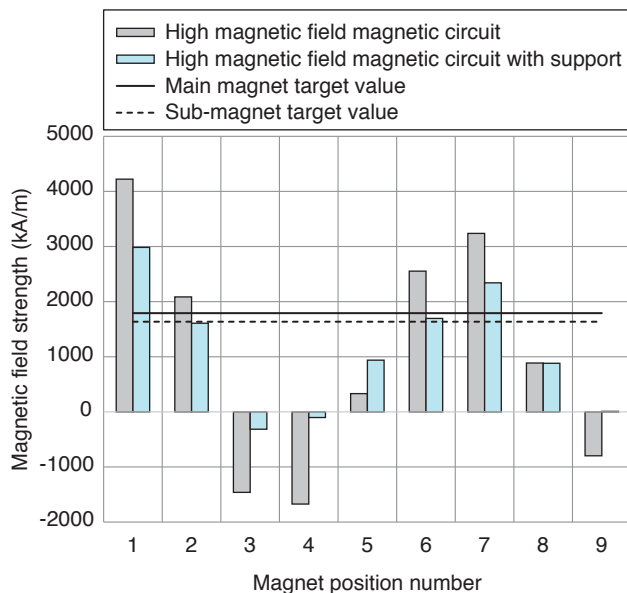


Fig. 14 Results of reverse magnetic field suppression

4. 実験結果

4.1. 高磁界着磁ヨーク

エアギャップが広いロータへの後着磁ができる高磁界磁気回路の着磁ヨークを製作した。Fig. 15 に今回開発した高磁界着磁ヨークを示す。磁束を集約する 2 組のコイルと集約した磁束を通す 1 組のコイルとが分割された構造となっており、この分割された隙間に補助コイルを設置する。また破線にて磁気回路を示している。

4.2. 磁界強度測定

着磁条件を設定するために着磁ヨークから発生する磁界強度の測定をおこなった。測定は銅線が円状に複数回巻かれたサーチコイルと呼ばれるものを用いた。測定素子は OP 電子工業株式会社製のサーチコイル (20 turns, 補正值: $T = 142.9 \times 10^{-9}$) を使用した。このサーチコイルを通る磁束によって誘起される電圧を取得する⁽⁸⁾。Fig. 16 に磁界取得の方法と測定箇所に設置した図を示す。サーチコイルは測定箇所に磁石の磁化方向と垂直にした状態で設置し磁界を取得する。式 (2) に電圧から磁界強度への演算式を示す。

$$H = T \times \int v dt \times \frac{4 \times \pi}{1000} \quad (2)$$

磁界強度: H [kA/m] 電圧: v [V]

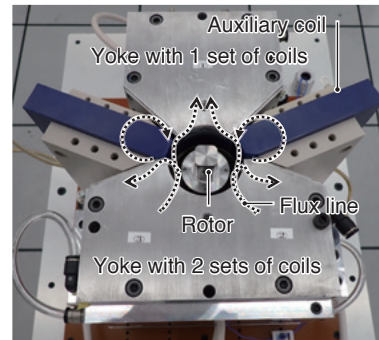


Fig. 15 High magnetic field magnetizing yoke

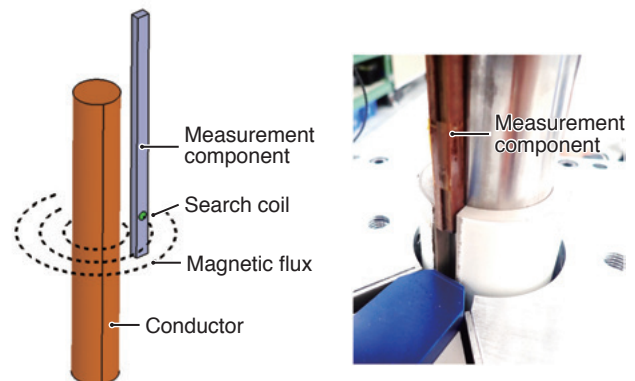


Fig. 16 Measurement method by search coil

Fig. 17 (a) にサーチコイルで取得した電圧波形を, (b) に磁界強度のグラフを示す. 取得した誘起電圧波形に対して式 (2) を用いて磁界強度を算出した. Fig. 18 に示す測定箇所 i (主磁石), ii (副磁石) において, 静電容量を 5000 μ F, 電源電圧を 1, 2, 3 kV と設定し測定をおこなった. また測定位置 ii は測定機の大きさがあることから磁石最内周部の最も磁界強度が低い箇所を取得できない. そのため CAE による磁石最内周部の磁界強度を着磁条件とする. Fig. 19 に測定結果 (測定回数 5 回の平均値) と解析結果の比較を示す. 主磁石においては実測と CAE の差が 9 kA で 13.6% に対し, 副磁石は 0.89% となっている. 主磁石の磁界強度の実測と CAE の比較としては, CAE の方が低くなっている. しかし, 磁界強度は実測において 1800 kA/m 以上を十分に達成していることから, 副磁石の磁界強度に注目する. 副磁石の磁界強度に関しては差異が 1% 以内に収まっている. このことから最も弱い最内周における磁界強度の値を精度よく予測できる. 副磁石の最内周の磁界強度は 12,700 A で 1635 kA/m 以上を得られることからこれを着磁条件とした.

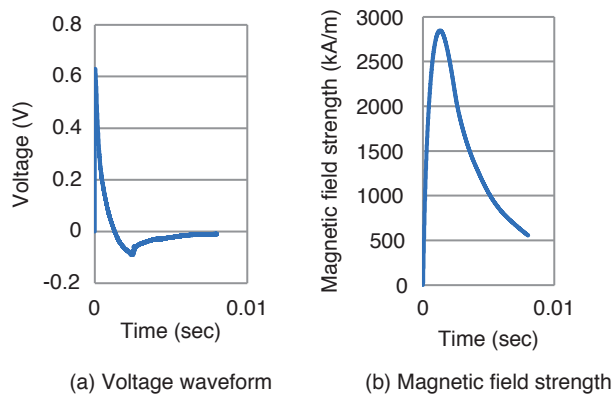


Fig. 17 Conversion of voltage to magnetic field strength

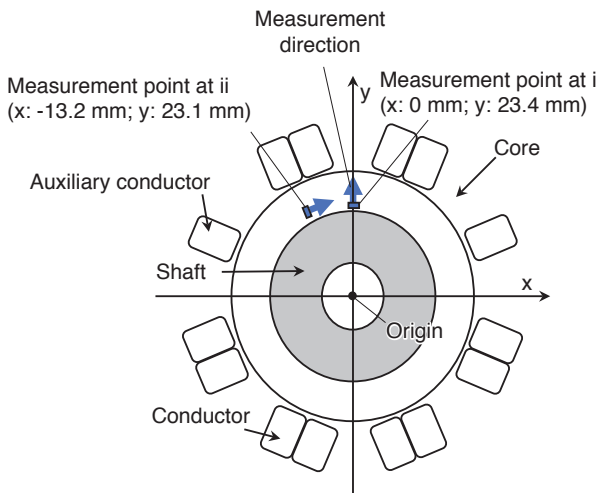


Fig. 18 Measurement points

4.3. 着磁率評価

今回対象とした磁石は, 材質: Nd-Fe-B 系焼結磁石 (信越化学工業株式会社 N44Z-SGR 相当) を使用した. 着磁した磁石の総磁束量はサーチコイルで測定した. 総磁束量は磁石が磁化された度合いを評価するために用いる. Fig. 20 に測定の方法を示す. 磁石は複数回巻かれたサーチコイルの中央にセットし磁化方向に引抜くことで磁束の変化によって誘起された電圧を積分することで測定できる. 着磁した磁石は, 空芯コイル (ϕ 100 mm $\times$ 100 mm の範囲に均一に 4376 kA/m の磁界を生じさせる装置) で飽和着磁する. 着磁率については式 (3) に示すように実験で着磁した磁石の磁化量と飽和着磁した磁化量を比較することで算出した.

$$\text{着磁率} = \frac{\text{着磁実験後磁化量}}{\text{空芯コイル着磁後磁化量}} \times 100 [\%] \quad (3)$$

磁束の集約で磁界を強められる範囲は限定的であるため, ロータの位相を 3 回転させ合計 4 回の着磁をおこなう.

Fig. 21 に位相を回転する順序と 99.0% 以上着磁できた磁石を塗り潰す. 磁界が強い箇所に順番に磁石が設置できるようにロータを回転させることで全てを着磁する.

Fig. 22 に磁石の着磁率の結果を示す. 局所的に高磁界を与える位置に磁石が設置されることで着磁率が上昇していることがわかる. すべての磁石において着磁率の目標値である 99.0% 以上を達成することができた.

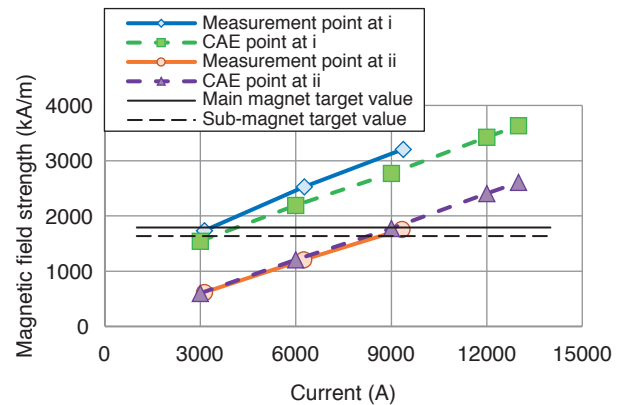


Fig. 19 Measured and analyzed magnetic field strength

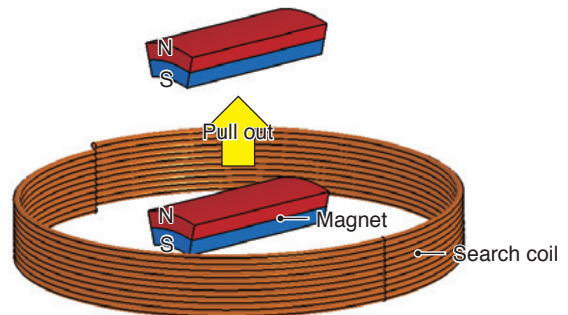


Fig. 20 Measurement of total magnetic flux

参考文献

- (1) 伊藤誠, 須藤哲也, 高橋暁史, 原崇文, 岩野龍一郎: ハルバッハ配列磁石を用いた高出力密度インホイールモータの開発, 自動車技術会 2022 年春季大会学術講演会講演予稿集, No. 74-22, No.20225324, (2022)
- (2) 水田貴裕, 伊藤一将, 栢山盛幸, 久米将実, 高島由晴: 高速・高出力モータを実現する回転機設計技術, 三菱電機技報, Vol. 93, No. 6, p. 11-14, (2019)
- (3) <https://ims-jp.com/column/02/>
- (4) 特開 2018-182118
- (5) 特開 2020-092484
- (6) 宮田浩二, 青山康明, 横山智紀, 大橋健, 近藤稔, 松岡孝一: 着磁・減磁・渦電流損を考慮した永久磁石電動機の三次元磁界解析, 電気学会論文誌 D, Vol. 123, No. 4, p. 401-408, (2003)
- (7) 幸村治洋, 北岡幹雄, 清宮照夫, 松尾良夫: 超小型モータ用 Nd-Fe-B ボンド磁石に対する新着磁システムの開発, 粉体および粉末冶金, Vol. 57, No. 1, p. 19-26, (2010)
- (8) 三浦登: 磁場中の計測技術, 計測と制御, Vol. 26, No. 6, p. 520-527, (1987)

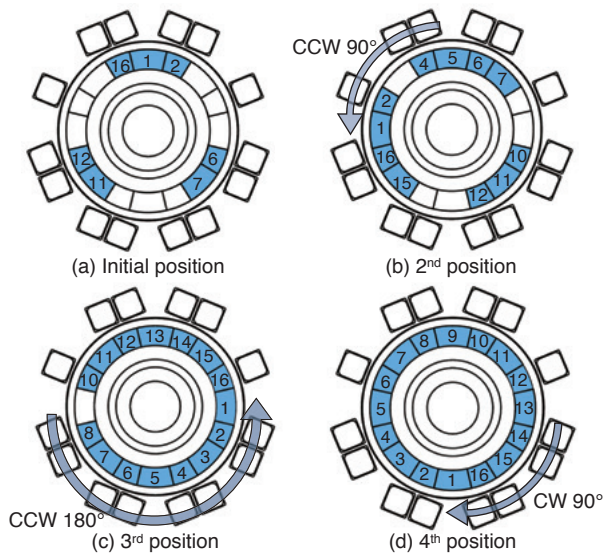


Fig. 21 Rotor phase rotation procedure

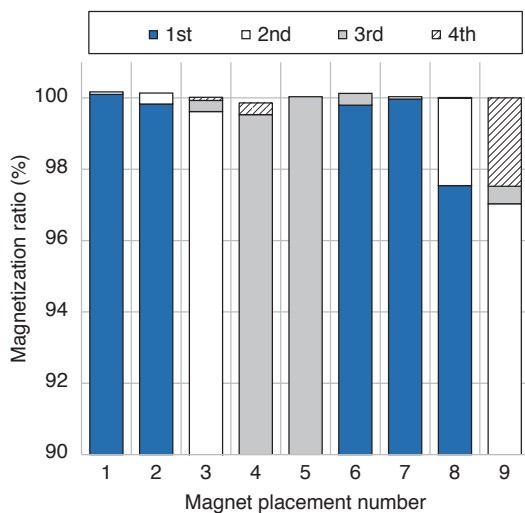


Fig. 22 Magnetization ratio measurement result of 99.0% or more

5. まとめ

エアギャップが広い小径多極高回転ロータのパルス式着磁において、磁束を集約することで磁界強度を向上させる後着磁製法を開発した。

- (1) 着磁コイルの配置を設計し磁束を集約させることで特定の箇所に高磁界を与えることができた。
- (2) 主磁気回路に集約されなかった磁束による反磁界が生じる課題への対策をおこなった。主磁気回路を構成する3組のコイルの間にそれぞれ補助コイルを設置することで反磁界を抑制することができた。
- (3) ロータの位相を3回回転させることで特定の箇所に集中する高磁界を磁石全部に与え着磁させることができた。

上記の結果、目標の着磁率 99.0% 以上を達成した。

■著者■



加藤 稔 貴



根本 真 次



平良 斗 輝 生