NANOMET®積層コアを適用したインセット型 PM モータの実機評価

Prototype Evaluation of Inset PM Motor made of NANOMET® Laminated Core

于 越^{a)†}・平本尚三^{b)}・中村健二^{a)} ^{a)}東北大学 大学院工学研究科,仙台市青葉区荒巻字青葉 6-6-11 (〒980-8579) ^{b)}東北マグネットインスティテュート,宮城県名取市増田北谷 11 (〒981-1224)

Y. Yu^{a)†}, S. Hiramoto^b, K. Nakamura^{a)}

^{a)} Tohoku University, Graduate School of Engineering, 6-6-11 Aoba Aramaki Aoba-ku, Sendai, Miyagi 980-8579, Japan ^{b)} Tohoku Magnet Institute Co., Ltd. 11 Kitaya, Masuda, Natori, Miyagi 981-1224, Japan

Non-oriented silicon steel, which is commonly used as motor cores, is less expensive and has high flux density, while large iron loss under high-frequency region is a problem for high-speed applications. In contrast, NANOMET[®], one of the nanocrystalline soft magnetic alloys, is expected to be a next-generation motor core material since it has high flux density as almost the same as the conventional non-oriented silicon steel and lower iron loss. In a previous paper, prototype tests of a switched reluctance (SR) motor made of NANOMET[®] laminated core were conducted, and it was clear that the iron loss is significantly reduced and the efficiency is improved. This paper presents the prototype tests results of an inset permanent magnet (InPM) motor made of NANOMET[®] laminated core.

Key words: Inset permanent magnet (InPM) motor, Nanocrystalline soft magnetic alloy, NANOMET®

1. はじめに

エネルギー危機や地球温暖化対策の一環として,産業,運輸, 民生など,様々な分野で電動化が推進されており,モータの需要 は拡大を続けている.最近では、日本の総発電電力の50~60%が モータで消費されている現状から,モータの高性能化,高効率化 に対する要求は益々高まっている.このような背景の下,種々の モータの中でも、小型高出力で高効率な永久磁石 (PM) モータが 注目されており、電気自動車や家電製品などの幅広い分野で利用 が拡大している.

今後, PM モータのさらなる小型高出力化,高効率化を考えた際に、キーポイントになるのは高速回転化であると考えられる. モータの出力はトルクと回転数の積で決まるが、トルクは体格に比例するため、小型化には逆行する.したがって、回転数向上による高出力化が望まれるが、一方で損失という観点で見ると、特に鉄損はモータの高速回転化に伴い、速度の1~2乗で増大するため、高周波で低鉄損な材料を採用するなどの対策が必須である.

そこで筆者らは、ナノ結晶軟磁性合金の一つである NANOMET[®](株式会社東北マグネットインスティテュートおよ び株式会社トーキンの登録商標)に着目している.ナノ結晶軟磁 性合金は、液体急冷法により作製された非晶質合金を結晶化させ、 結晶粒を 10~20 nm 程度まで微細化することで、結晶磁気異方性 を見かけ上小さくし、優れた磁気特性を実現している.その中で も、NANOMET[®]は一般的な無方向性ケイ素鋼板とほぼ同等の高 い磁束密度を有し、かつ低鉄損であることから、次世代のモータ 鉄心材料として期待されている^{1,2}.

先に筆者らは、NANOMET[®]積層コアを適用したスイッチトリ ラクタンス (SR) モータの特性について、有限要素法 (FEM) を 用いて算定するとともに、実機の試作試験を行った³. その結果、 一般的な無方向性ケイ素鋼板とほぼ同等のトルク特性を有し、鉄 損を大幅に低減可能であることが明らかとなった.また、実機の 効率は最大で10%向上した.

そこで本稿では、新たにNANOMET®積層コアを PM モータに 適用することを試みた.具体的には、先行研究で開発したインセ ット型 PM モータを検討対象とし、解析と実験の両面から評価し たので報告する.

2. NANOMET®積層コアの磁気特性

NANOMET®はナノ結晶軟磁性合金の一つであり,主な構成元 素は Fe, Si, B, P, Cu である. NANOMET®は, Fe の含有量 が他のナノ結晶軟磁性合金よりも高いため,磁束密度が高くかつ 低損失である.本稿では,熱処理後のNANOMET®薄帯を積層し, 含浸接着により積層コアを作製した.また,これをワイヤ放電加 工機を用いて,任意に形状に切り出すことで,所望のモータ鉄心 を得ることができる.なお,積層コアの占積率は約90%である. Fig. 1(a)に,NANOMET®積層コアのB-H曲線の実測値を示す.



Fig. 1 Comparison of *B*-*H* curves and core loss curves.

責任著者:于越 (mail: yu.yue.r1@dc.tohoku.ac.jp)

Transaction of the Magnetics Society of Japan (Special Issues) Vol.6, No.1, 2022

同図(b)は鉄損曲線の実測値である.これらの実測値は先行研究で 測定したものである³⁾.一方,同図中の無方向性ケイ素鋼板 (35A300)の*B-H*曲線と鉄損曲線は、材料メーカから提供されて いるデータシートの値である.同図(a)を見ると、例えば5000 A/m における NANOMET[®]積層コアの磁束密度 *B*50 は、無方向性ケイ 素鋼板よりもわずかに劣るが、ほぼ同等であることがわかる.ま た同図(b)を見ると、すべての領域でNANOMET[®]積層コアの方が 鉄損が小さいことがわかる.

3. インセット型 PM モータへの適用

3.1 インセット型 PM モータの構成

Fig. 2(a)に、先行研究で開発したインセット型PMモータの形状 と寸法を示す⁴⁾. 3相4極6スロット集中巻のPMモータであり、 固定子よりも回転子の軸長の方が長い、いわゆるオーバーハング 構造を有している. 定格出力は約260 W, 定格回転数は12600 rpm, 定格トルクは200 mN·m である.回転子磁石は、高速回転でも高 効率を実現するため、電気抵抗率が極めて高く、磁石渦電流損が ほぼ発生しない、ネオジムボンド磁石を採用している.また、ト ルク増大のため、極異方性着磁されている.同図(b)に示すように、 極異方性着磁では、磁化が磁極中心に集中するように着磁される ことから、空隙磁束分布が正弦波に近くなり、トルクに寄与する 基本波成分の振幅が大きくなる.

本稿では、このインセット型 PM モータの固定子鉄心を、従来の無方向性ケイ素鋼板(35A300)から NANOMET®積層コアに 置き換えた際の特性について、解析と実験の両面から評価する. なお、本 PM モータの場合、回転子鉄心内の磁束はほぼ一定で変 化しないため、無方向性ケイ素鋼板(35A300)のままとした.



(b) Magnetization direction of polar anisotropic bonded magnets Fig. 2 Prototype inset PM motor made in Ref. 4).

3.2 3次元有限要素法による検討結果

本節では、3 次元有限要素法 (3D-FEM) を用いて、先行研究 で開発したインセット型 PM モータに、NANOMET[®]積層コアを 適用した場合の特性を算定する. なお、3D-FEM には、(株)JSOL の JMAG Designer Ver18.1 を用いた.

Fig. 3に、インセット型 PM モータの 3D-FEM モデルを示す. 電磁界の対称性から、同図に示すように 1/4 モデルで解析を行った. 要素数は約 15 万である.

Fig. 4 に、3D-FEM で求めた磁束密度コンターを示す. 同図(a) が固定子鉄心が無方向性ケイ素鋼板(35A300)の場合であり、同図(b)が NANOMET®積層コアの場合である. この図を見ると、磁 束密度分布に材料による差異はほぼ無いことがわかる.

Fig.5に、電流密度対トルク特性の計算結果の比較を示す.この ときの回転数は12600 rpm である.また、後計算で求めた鉄損に 起因するロストルクを引いている.この図を見ると、材料による 特性の差異はほとんど無く、NANOMET®積層コアは従来の無方 向性ケイ素鋼板とほぼ同等のトルク特性を有することがわかる. これはFig.1(a)に示したとおり、両材料の*B-H*曲線がほぼ同等で あることに由来する.



Fig. 3 3D-FEM model of inset PM motor.



Fig. 4 Contour diagrams of flux density of inset PM motor made of 35A300 and NANOMET[®].



Fig. 5 Calculated current density vs. torque characteristics.

次いで, 効率を比較する. ここで, 3D-FEM における効率ηは, 次式から求めた.

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{out} + W_c + W_i} \times 100(\%) \tag{1}$$

$$P_{out} = \omega I$$
 (2)
(1)式中の P_{out} は機械出力であり、(2)式のとおり、モータの回転角
注意。 しずわしょれ アの時からまたスール いた知識でも、ためます

速度ωと平均トルクTの積から求まる. Weは銅損であり、巻線電 流の実効値の2乗と巻線抵抗の積から求まる. 最後に, 鉄損 Wiは 3D-FEM で求めた各要素の磁束密度波形からスタインメッツの実 験式に基づき鉄損を求め、これら各要素の鉄損の総和をモータ全 体の鉄損として求めた. なお, 3D-FEM では機械損は無視してい る.









Fig. 7 Calculated copper and iron losses.

Fig. 6 に、効率の計算結果の比較を示す. この図を見ると、 NANOMET®積層コアを適用することで、インセット型 PM モー タの効率が全運転領域で向上したことがわかる. 最高効率の計算 値は約4%上昇した.

Fig. 7 には、銅損と鉄損の計算結果の比較を示す. 同図(a)の銅 損を見ると、両者はほぼ一致していることがわかる. これは、Fig. 5に示したとおり、トルク特性がほぼ等しいためである.一方、同 図(b)を見ると、NANOMET®積層コアを用いることで、無方向性 ケイ素鋼板(35A300)に対して約1/5と、大幅に鉄損が低減され ていることがわかる.

3.3 実機評価結果

前節の3D-FEMの結果の妥当性を確認するため、実機評価を行 った. Fig. 8 に試作機の外観を示す. NANOMET®などの板厚が 極めて薄い材料は、応力による特性の劣化が大きい可能性が有る ことから、同図に示すように、固定子鉄心を前後からケースで挟 む構造を採用し、さらにトルクレンチを用いて、ボルトの締め付 けトルクを管理することで、過度な応力が鉄心に加わらないよう に工夫した.

Fig.9に実験システム構成図を示す. Fig. 10 は実験システムの 外観である.3相 PWM インバータによるセンサレス電流ベクト ル制御により、実機を一定速度(12600 rpm)で駆動し、ヒステ リシスブレーキで任意の負荷を印加する. その時のモータの巻線



Fig. 8 Appearance of the prototype inset PM motors.



Fig. 9 Configuration of the experimental system.



Fig. 10 Appearance of the experimental system.

電流や電気入力などをパワーアナライザで測定し、各種特性を求めた.なお、直流電源電圧は48Vである.

Fig. 11 に、電流密度対トルク特性の実験結果の比較を示す. この図を見ると、実機においても両材料による特性の差はほとんど無く、NANOMET®積層コアと無方向性ケイ素鋼板はほぼ同等のトルク特性を有することがわかる.

Fig. 12に、効率の実験結果の比較を示す、実験における効率は、 電気入力 Pm と機械出力 Pout から次式を用いて求めた.

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} \times 100\,(\%) \tag{3}$$

この図を見ると、NANOMET®積層コアを適用したインセット型 PM モータの効率は、全運転領域で向上したことがわかる.実機の最高効率は95.1%であり、無方向性ケイ素鋼板に対して約4% 向上した.

Fig. 13 には、損失の実験結果の比較を示す、銅損 Weは巻線電流の実測値の2 乗と巻線抵抗の積から求めた.一方、実験では鉄損 Wie と機械損 Wim を分離することは容易では無いため、次式に示すように、電気入力 Pm から機械出力 Pout と銅損 We を引くことで、両者の和の形で求めて比較した.

$$W_i + W_m = P_{in} - P_{out} - W_c \tag{4}$$

まず同図(a)の銅損を見ると、両者はほぼ一致していることがわかる. 一方、同図(b)を見ると、NANOMET®積層コアを用いることで、無方向性ケイ素鋼板(35A300)に対して大幅に損失が低減したことがわかる. すなわち、NANOMET®積層コアを適用したインセット型 PM モータの効率が大幅に向上したのは、鉄損 Wi と機械損 W_m の和が大きく低減したためであると結論付けることができる.





Fig. 11 Measured current density vs. torque characteristics.





Fig. 13 Measured loss characteristics.

4. まとめ

以上、本稿ではNANOMET®積層コアを適用したインセット型 PMモータの特性について、解析と実験の両面から評価を行った.

その結果,NANOMET[®]積層コアを適用したインセット型 PM モータは,従来の無方向性ケイ素鋼板を用いたモータとほぼ同等 のトルク特性を有し,鉄損を大幅に低減可能であることが明らか になった.また,効率は全運転領域で向上した.実機の最高効率 は95.1%であり,従来の無方向性ケイ素鋼板に対して約4%向上し た.

今後は、中容量~大容量機~の適用・評価を行う予定である.

謝辞 本研究の一部は東北大学人工知能エレクトロニクス 卓越大学院プログラムの支援を得て行われたものである.

References

- A. D. Setyawan, K. Takenaka, P. Sharma, M. Nishijima, N. Nishiyama, and A. Makino: *J. Appl. Phys.*, **117**, 17B715 (2015).
- K. Takenaka, A. D. Setyawan, P. Sharma, N. Nishiyama, A. Makino: J. Magn. Magn. Mat.,401, 479 (2016).
- A. Nagai, K. Mitsuya, S. Hiramoto, and K. Nakamura: T. Magn. Soc. Jpn. (Special Issues), 5, 22 (2021) (in Japanese).
- Y. Uchiyama, K. Nakamura, O. Ichinokura, H. Goto, H.J. Guo: *T. Magn. Soc. Jpn. (Special Issues)*, 4, 67 (2020) (in Japanese).

2021年9月24日受理, 2021年11月02日採録