

NANOMET[®]積層コアを適用した高速 SR モータの実機評価

Prototype Evaluation of High-Speed SR Motor Made of NANOMET[®] Laminated Core

永井歩美^{a)†}・三ツ谷和秀^{a)}・平本尚三^{b)}・中村健二^{a)}

^{a)}東北大学 大学院工学研究科, 宮城県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, 仙台市青葉区片平 2-1-1 (〒980-0812)

A. Nagai^{a)†}, K. Mitsuya^{a)}, S. Hiramoto^{b)}, and 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., 2-1-1 Katahira, Aoba-ku, Sendai, Miyagi 980-0812, Japan

A switched reluctance (SR) motor has a simple and robust structure, is low in cost, and operates maintenance-free. Therefore, the SR motor is expected to be used in various fields, especially for high-speed applications. This paper focuses on a novel soft magnetic material, called NANOMET[®], that contains nanocrystalline Fe-Si-B-P-Cu quinary alloys. It has almost the same saturation flux density as conventional non-oriented Si steel and remarkably low core loss. In this paper, a 12/8-pole SR motor made of NANOMET[®] laminated core is prototyped and compared with a conventional one made of non-oriented Si steel. As a result, the torque characteristics of both SR motors were almost the same. It was also found that the iron loss of the SR motor made of NANOMET[®] was significantly reduced, which lead to an efficiency improvement of 10% in comparison with the conventional one made of non-oriented Si steel.

Key words: NANOMET[®], Switched Reluctance (SR) Motor

1. はじめに

近年, 地球温暖化の進行抑制を目的として, 各種電気機器の省エネルギー化が進んでいる。中でも SiC や GaN などのワイドバンドギャップ半導体は, スイッチング損失の低減および動作周波数の高周波化という著しい進化を遂げている。また, 周辺技術の研究開発も盛んに進められており, 汎用的に用いられる一歩手前のところまできている¹⁾。これらの進化に伴い, モータのさらなる高速回転化の可能性が高まっており, より一層の小型・高効率化が期待されている。

現在, 高速回転用途には永久磁石 (PM) モータが多く使われている。PM モータは, 従来の直流モータや誘導モータに比べ, 高出力・高効率であるため, 様々な分野で普及してきた。しかしながら, 希土類元素 (レアアース) を用いているため, その供給不安定性や高コストであることが課題となっている。したがって, 高速回転に適し, 高出力・高効率なレアアースフリーモータの開発が期待されている^{2), 3)}。

スイッチトリラクタンス (SR) モータは, 鉄心と巻線のみで構成されるレアアースフリーモータの一種である。巻線は固定子極のみに集中巻されており, 回転子には巻線や導体バー, ブラシ, 整流子などは不要である。そのため SR モータは構造が単純で堅牢, 高速回転に適する, 安価などの特長を有しており, 様々な用途への応用が期待されている。

先に筆者らは, 電動工具への適用を目的として, 高速 SR モータのトルク密度向上について検討を行い, 既存の PM モータと同等以上のトルクを達成した⁴⁾。しかしながら一方で, 効率については, さらなる改善が必要であることが明らかとなった。

そこで本稿では, 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) に着目する。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, かつ低鉄損の特性を有する^{5), 6)}。本稿では, NANOMET[®]積層コアを適用した 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ので報告する。

2. NANOMET[®]積層コアの磁気特性

モータに使用される磁性材料としては, 無方向性ケイ素鋼板が一般的である。無方向性ケイ素鋼板は, 安価かつ高い磁束密度を有するが, 高周波領域における鉄損が大きく, 高速回転用モータへの適用の課題となっている。そこで本稿では, NANOMET[®]に着目した。NANOMET[®]はナノ結晶軟磁性合金の一種であり, 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, NANOMET[®]薄帯を積層させたコアを SR モータに適用することを検討する。Fig. 1 に, 磁気特性の測定に用いた NANOMET[®]積層コアを示す。この積層コアは, 熱処理を行った NANOMET[®]薄帯を積層し, 含浸接着によりブロックを作製した後, ワイヤカットにより成形したものである。なお, 後述の SR モータの固定子・回転子鉄心も同一の方法で製作した。なお, コアの占積率は 90% である。

Fig. 2 に, NANOMET[®]積層コアの $B-H$ 曲線を示す。本 $B-H$ 曲線は 1000 A/m までは, 直流磁化特性測定装置 (理研電子製 BHS-40) を用いて測定したが, それ以上についてはパワー不足であったことから, 別途, ファンクションジェネレータとアンプを組み合わせ, 正弦波電圧でコアを励磁した際のデータを外挿した。一方, 同図中の無方向性ケイ素鋼板 (35A300) の $B-H$ 曲線は, 材料メーカーから提供されているデータシートの値である。この図を見ると, 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 (35A300) よりもわずかに劣るが、ほぼ同等であることがわかる。

次いで、Fig. 3 に鉄損特性を示す。鉄損測定には、岩崎通信機製の *B-H* アナライザ (SY-8219) を用いた。この図を見ると、400 Hz の比較的low周波数の領域においても、NANOMET®積層コアの方が鉄損が小さいことがわかる。また、1000 Hz ではNANOMET®積層コアの鉄損は、無方向性ケイ素鋼板 (35A300) の約 1/10 であることがわかる。

3. SR モータへの適用評価

Fig. 4 に、比較検討に用いた 12/8 SR モータの諸元を示す。この SR モータは、オープンスロット構造であることを活かし、巻線径および巻線配置を最適化することで、PM モータを大幅に上回る巻線占有率を実現しており、同体格の電動工具用 PM モータとほぼ同等のトルクを達成している⁴⁾。なお、本モータの定格トルクは 0.1 N・m である。

Fig. 5 と Fig. 6 に、無方向性ケイ素鋼板 (35A300) と NANOMET®積層コアを、それぞれ 12/8 SR モータに適用し



Fig.1 NANOMET® laminated ring core.

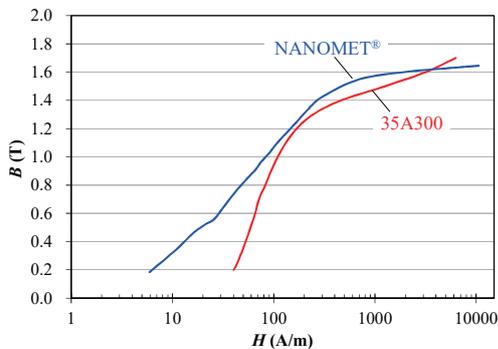


Fig.2 Comparison of *B-H* curves.

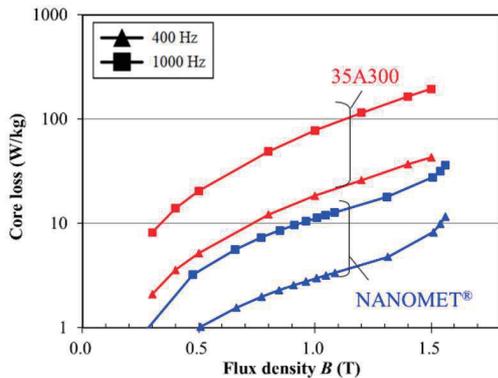


Fig.3 Comparison of core losses.

た場合のトルク対速度特性および電流密度対トルク特性を示す。ここで解析には、JSOL 製 JMAG Designer Ver. 18.1 を用いた。Fig. 5 からわかるように、両材料とも速度範囲が一致している。また、Fig. 6 においても、両材料のトルク特性がほぼ一致している。これは Fig. 2 に示した *B-H* 曲線に由来しており、ほぼ同等であったことから、トルク特性もほぼ同等になったと考えられる。

Fig. 7 に損失特性を示す。Fig. 7(a)より、両材料の銅損はほぼ同等であることがわかる。これは、Fig. 6 に示したとおり、同一トルク時の電流が等しいためである。すなわち、銅損は巻線抵抗と電流の 2 乗の積であるため、電流対トルク特性が等しければ、銅損も等しくなる。一方で鉄損については、NANOMET®積層コアは無方向性ケイ素鋼板 (35A300) の約 1/10 となり、大幅に低減されていることがわかる。

Fig. 8 に効率特性を示す。ここで、効率は次式より求めた。

$$\eta = \frac{\omega\tau}{\omega\tau + W_c + W_i} \times 100(\%) \dots\dots\dots(1)$$

上式中の τ はトルク、 ω は回転角速度、 W_c は銅損、 W_i は鉄損である。なお、解析において機械損は無視した。

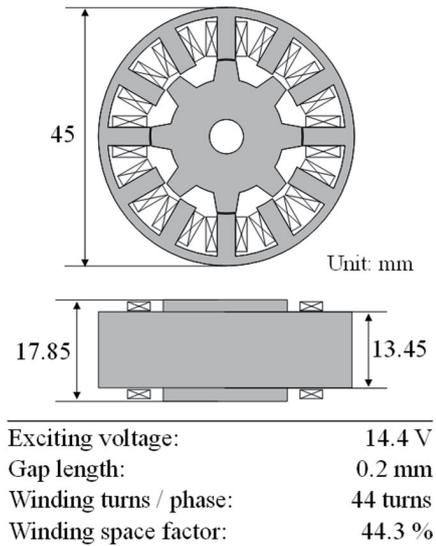


Fig.4 Specifications of 12/8-pole SR motor.

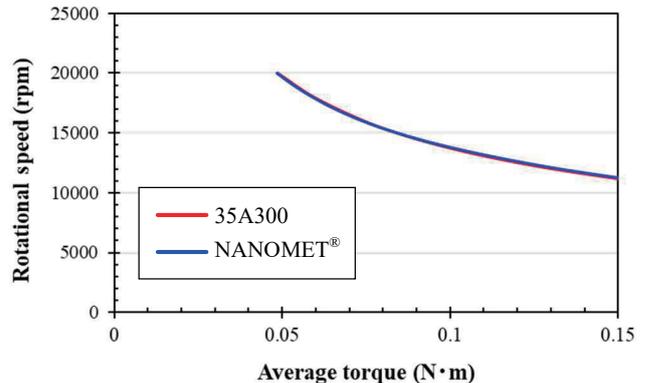


Fig.5 Calculated torque versus speed characteristics.

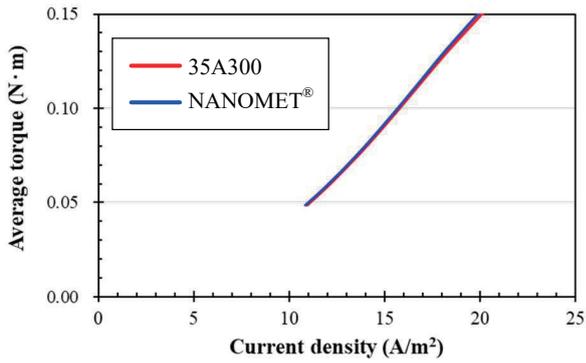
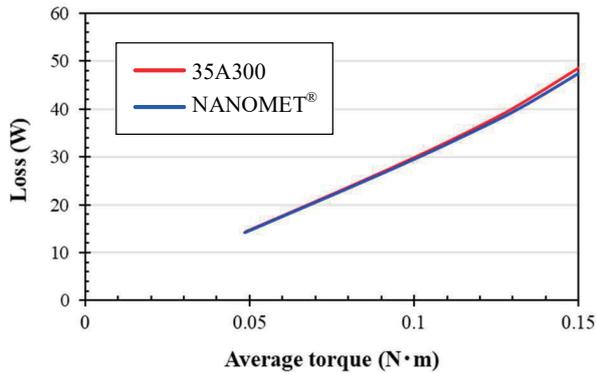
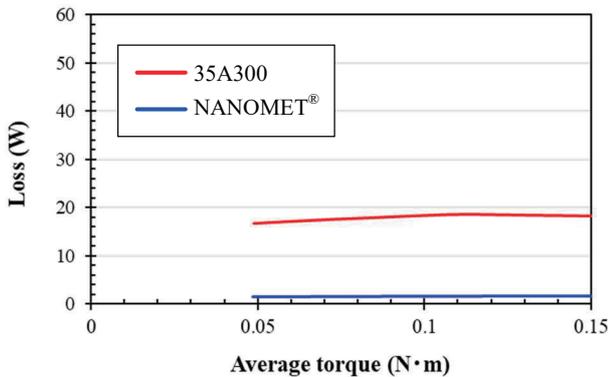


Fig.6 Calculated current density versus torque characteristics.



(a) Copper loss



(b) Iron loss

Fig.7 Calculated loss characteristics.

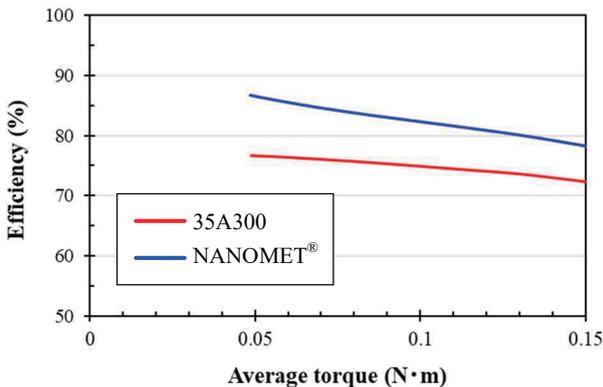


Fig.8 Calculated efficiency characteristics.

同図を見ると、NANOMET®積層コアを適用した SR モータの効率が全体的に上昇しており、特に軽負荷側では約 15% の効率改善がみられる。これは Fig. 7 に示した鉄損の低減が大きく寄与しているためである。

4. 実機検証

Fig. 9 に、NANOMET®積層コアから試作した 12/8 SR モータの固定子・回転子鉄心を示す。Fig. 10 に実験システムの構成を示す。また、Fig. 11 はその外観である。モータに取り付けられた光学式エンコーダからの位置信号に基づき、FPGA を用いて SR モータの駆動回路である非対称ハーフブリッジコンバータのスイッチングを制御する。モータ巻線の印加電圧および巻線電流の測定には、横河電機製のパワーアナライザ (WT1800) を使い、モータのトルクと回転数は、菅原研究所製のトルクメータ (TB-200MN) を用いて測定した。

Fig. 12 と Fig. 13 に、無方向性ケイ素鋼板 (35A300) と NANOMET®積層コアから試作した 12/8 SR モータのトルク



Fig.9 Stator and rotor core of prototype 12/8 SR motor made of NANOMET® laminated alloy.

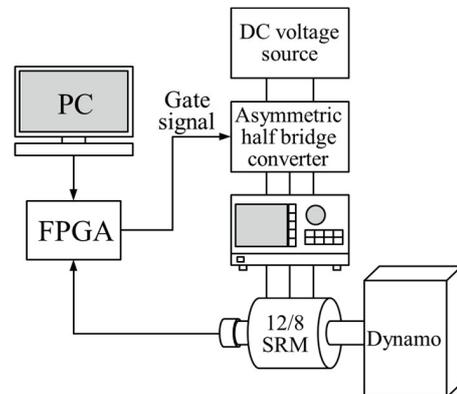


Fig.10 Configuration of experimental system.

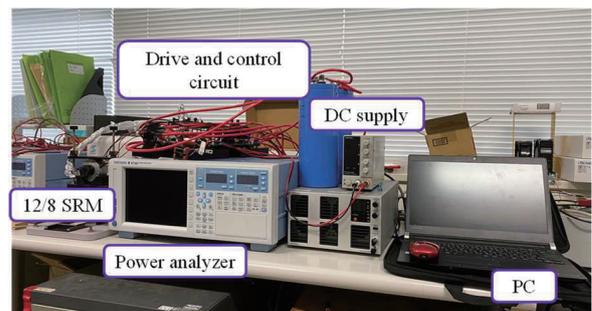


Fig.11 Appearance of experimental system.

対速度特性および電流密度対トルク特性を示す。これらの図を見ると、実機においても両者はほぼ同等の特性を有することがわかる。

次いで、Fig. 14 に損失の比較を示す。同図(a)の銅損については、両者のトルク特性がほぼ等しいことから、銅損もほぼ同等である。一方、同図(b)の鉄損と機械損の和については、NANOMET[®]積層コアを用いた SR モータの方が顕著に小さい。ここで、両モータのケースも含めた構造や仕様は等しく、ベアリングも同一であることから、両者の速度対機械損特性はほぼ等しいと考えられる。また、Fig. 12 に示すように、両者のトルク対速度特性はほぼ等しい。このことから Fig. 14(b)に示す横軸の各トルクに対する両者の機械損はほぼ等しいと言える。したがって、同図の損失差は鉄損の差と等しいと見なせる。以上より、NANOMET[®]薄帯を積層し、加工して製作したモータは、狙い通り鉄損を大幅に低減できることが明らかとなった。

Fig. 15 に効率の比較を示す。実機の効率、電気入力と機械出力から求めており、銅損、鉄損に加えて機械損なども含む。この図を見ると、実機においても NANOMET[®]積層コアの方が全般的に効率が高く、最大で約 10%の改善が認められる。

5. まとめ

以上、本稿では、NANOMET[®]積層コアを適用した 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。

まず、NANOMET[®]積層コアを適用した SR モータの特性について、3D-FEM を用いて算定したところ、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し、鉄損を大幅に低減可能であることが明らかとなった。効率も全体的に向上し、特に軽負荷側では最大 15%の効率向上が認められた。

次いで、試作試験を行ったところ、解析とほぼ同じ傾向の結果が得られ、NANOMET[®]積層コアを用いることで、鉄損が大きく低減し、効率が向上することが実証された。

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。

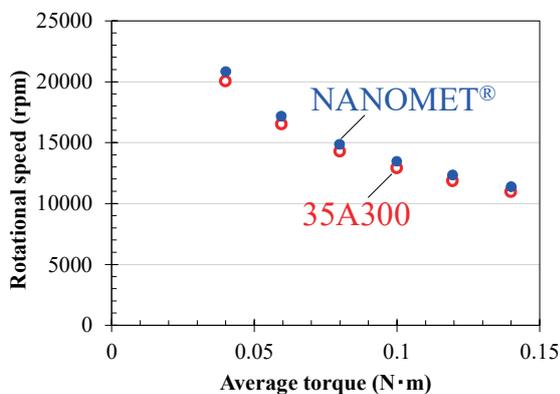


Fig.12 Torque versus speed characteristics of prototype SR motors.

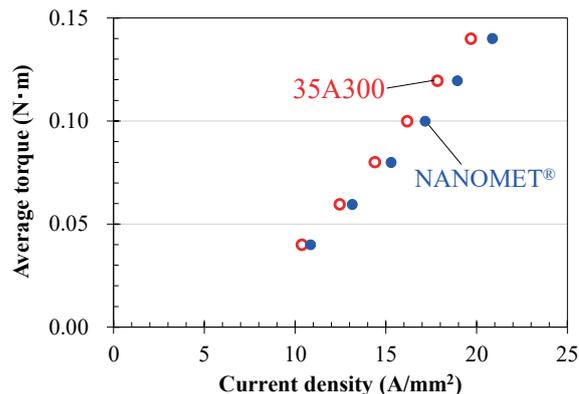
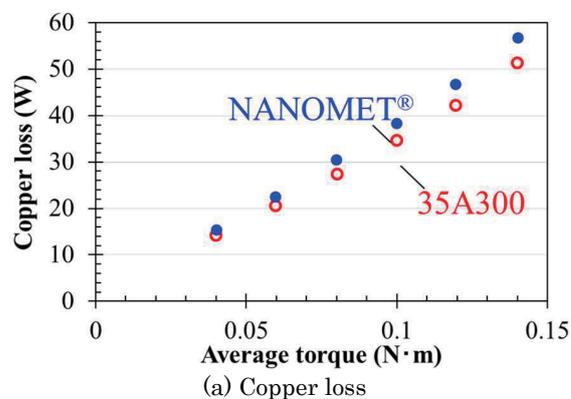
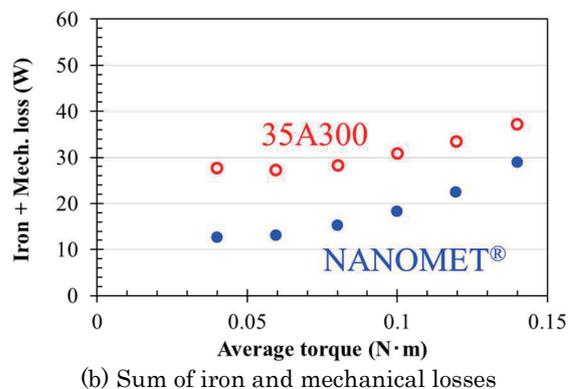


Fig.13 Current density versus torque characteristics of prototype SR motors.



(a) Copper loss



(b) Sum of iron and mechanical losses

Fig.14 Loss characteristics of prototype SR motors.

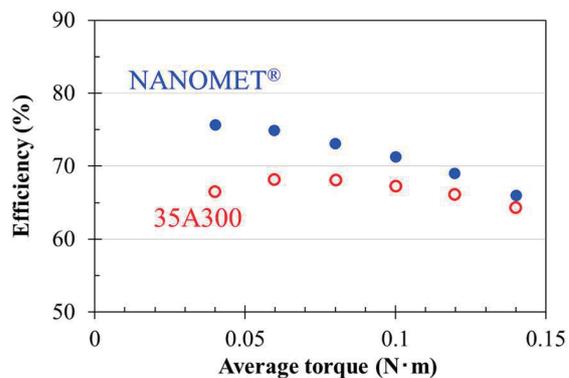


Fig.15 Efficiency of prototype SR motors.

References

- 1) M. Yamamoto: *IEEJ Journal*, **139**, 2 (2019).
- 2) K. Yamaguchi and J. Magome: *IEEJ Transactions on Electronics Information and Systems*, **135**, 761 (2015).
- 3) A. Chiba, K. Kiyota, N. Hoshi, M. Takemoto, S. Ogasawara: *IEEE Transactions on Energy Conversion*, **30**, 175 (2014).
- 4) K. Nakamura, Y. Kumasaka, and O. Ichinokura: *Journal of Physics: Conference Series*, **903**, 012040 (2017).
- 5) A. D. Setyawan, K. Takenaka, P. Sharma, M. Nishijima, N. Nishiyama, and A. Makino: *Journal of Applied Physics*, **117**, 17B715 (2015).
- 6) K. Takenaka, A. D. Setyawan, P. Sharma, N. Nishiyama, A. Makino: *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, **401**, 479 (2016).

2020年12月17日受理, 2021年01月22日再受理, 2021年02月23日採録