# 圧粉磁心を適用した電動工具用 SR モータに関する検討

# High-Speed SR Motor Made of Soft Magnetic Composite for Electric Power Tools

永井歩美<sup>†</sup>・中村健二 ・佐藤重典・牧野彰宏 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)

A. Nagai †, K. Nakamura , S. Sato , and A. Makino

Tohoku University, Graduate School of Engineering, 6-6-11 Aoba Aramaki Aoba-ku, Sendai, Miyagi 980-8579, Japan

A switched reluctance (SR) motor has a simple and robust structure, is low in cost, and operates without the need for maintenance. The motor is expected to be put to use in various fields, especially for high-speed applications such as electric power tools. This paper focuses on a new kind of soft magnetic composite (SMC) that is superior in terms of high-frequency characteristics than conventional non-oriented Si steel. The basic characteristics of a 12/8-pole SR motor made of the new SMC were calculated by using the finite element method (FEM) and compared with a previous prototyped 12/8-pole SR motor made of non-oriented Si steel. The usefulness of the proposed SR motor is proved in the high-speed region.

Key words: switched reluctance (SR) motor, soft magnetic composite (SMC), electric power tools

#### 1. はじめに

建設現場や日常生活において広く用いられている電動工具には、従来、交流整流子モータが使われてきた。しかし、このモータはブラシと整流子の機械的接触に起因する保守性の低さや効率の低さなどの欠点がある。また近年では、電動工具に対しても小型軽量、並びに高効率の要求が高まっていることもあり、出力密度が高く高効率な永久磁石(PM)モータの利用が広まっている。しかしながら、PMモータには希土類元素(レアアース)が用いられており、供給不安や価格高騰のリスクがある。したがって、保守性が良好で高出力・高効率なレアアースフリーモータの開発が期待される。

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である。巻線は固定子極のみに集中巻され、回転子には巻線や導体バー、ブラシや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、保守性が良好、安価などの特長を有し 1)・4)、電動工具などの高速回転用途に適する。

先に筆者らは、電動工具への適応を目的とした SR モータのトルク密度向上について検討を行った. 3 次元有限要素法 (3D-FEM) を用いて、現状の電動工具に使用されている PM モータと同体格の SR モータについて構造検討を行い、同等以上のトルク特性を達成した 5. しかし、本 SR モータの効率は PM モータよりもやや低いことから、さらなる性能の改善が必要不可欠である.

そこで本稿では、低周波から高周波までの広い範囲で、一般的な無方向性ケイ素鋼板よりも鉄損の小さい、新規の圧粉磁心を用いて、SR モータのさらなる高効率化を図ったので報告する.

### 2. SRモータの動作原理と先行試作機の課題

## 2.1 SR モータの動作原理

Fig. 1 に、SR モータの外観を示す。SR モータは鉄心と巻線の

みで構成され、固定子と回転子の磁気的突極性に由来するリラクタンストルクによって駆動される。また、固定子はオープンスロット構造であり、PM モータで一般的なセミクローズドスロット構造と比較して、巻線占積率を高めることができる。

Fig. 2 に、SR モータの駆動回路として一般的な非対称ハーフブリッジコンバータの 1 相分の回路を示す。この回路はトランジスタと還流用のダイオードを高圧側、低電圧側に 1 つずつ有する。両トランジスタを同時にオンすることにより、固定子巻線に電圧が印加されて励磁電流が流れる。その後、両トランジスタをオフにすると、固定子巻線に蓄えられた磁気エネルギーが、還流用ダイオードを通って電源に回生される。

Fig. 3 に、回転子位置角 $\theta$ に対する、ある相のインダクタンスの変化と励磁電圧・電流波形の概略を示す。同図に示すように、固定子極と回転子極が完全に対向したときにインダクタンスは最大となり、最も遠ざかったときに最小になる。ここで、ある相で生じるトルク $\tau$ は磁気特性を線形と仮定すると、次式で与えられる。

$$\tau = \frac{1}{2}i^2 \frac{\partial L(\theta)}{\partial \theta} \quad .... \tag{1}$$



Fig. 1 Appearance of SR motor.

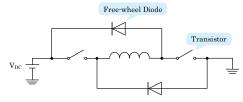
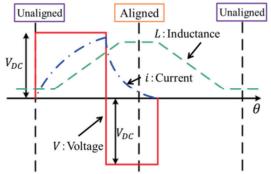


Fig. 2 Asymmetric half bridge converter of one phase.



**Fig. 3** Phase inductance according to rotor position angle, and exciting voltage and current waveforms.

したがって、Fig.3に示すように、インダクタンス曲線の傾きが正の領域で励磁することで、正方向のトルクが発生することがわかる。そのため、一般にSRモータを駆動するためには、回転子位置検出器が必要になる。また同図のとおり、SRモータは矩形波電圧で駆動されるため、高調波鉄損の割合が大きく、高速化するとその影響が顕著に現れることが予想される。

#### 2.2 先行試作機の基本特性と課題

Fig. 4 に、ある電動工具に実際に使用されている PM モータの諸元を示す。3 相、6 スロット、4 極の集中巻の埋込磁石モータであり、鉄心材料は厚さ 0.35 mm の無方向性ケイ素鋼板、磁石材質はネオジム焼結磁石である。また、Fig. 5 に先行研究で試作された12/8 SR モータの諸元を示す5. SR モータはオープンスロット構造であることから、この特徴を生かし、巻線の線径と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積率を実機で実現している。

Fig. 6 と Fig. 7 に、両モータのトルクおよび効率特性を示す. 計算には、汎用の 3D-FEM プログラム (JSOL 製 JMAG Designer Ver. 14.1) が用いられた。 Fig. 6 を見ると、 SR モータは PM モータとほぼ同等のトルクを有していることがわかる。 これは巻線占積率の高さに由来する。 また、実機特性は設計通りであることがわかる。

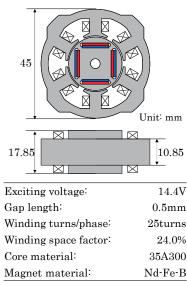


Fig. 4 PM motor used in present electric power tools.

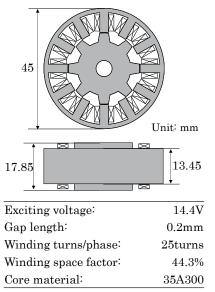


Fig. 5 Specifications of prototype 12/8 SR motor.

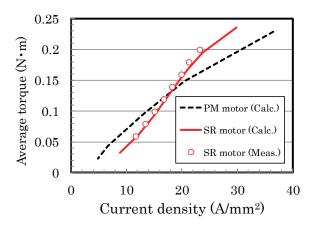


Fig. 6 Comparison of winding current density versus torque characteristics.

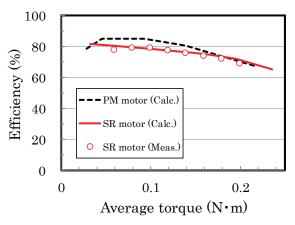


Fig. 7 Comparison of efficiency characteristics.

一方、Fig. 7 より PM モータは広い運転領域で効率が 80%を超えているのに対して、SR モータはほとんどの領域において 80%を下回っている. したがって、実用化を目指すためには、効率のさらなる改善が必要である.

#### 3. 圧粉磁心の磁気特性と SR モータへの適用評価

#### 3.1 圧粉磁心の磁気特性

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、安価であることや飽和磁束密度が高いといったメリットがあるが、高周波鉄損が大きいといったデメリットがある。これに対して、圧粉磁心は磁性紛の間に絶縁性の高い樹脂が入るため、渦電流の経路を短くすることができ、高周波鉄損が小さいというメリットがある。しかしながら、樹脂の耐熱性の問題から焼鈍が不適のため、低周波時の鉄損は逆に無方向性ケイ素鋼板よりも大きい。一般に圧粉磁心が無方向性ケイ素鋼板よりも鉄損で優位になるのは、周波数が数 kHz 以上である。そのため、一般的な駆動周波数が数 100 Hz 程度であるモータの場合、圧粉磁心を使用するメリットはあまり大きくない。

このような問題に対して、本稿では低周波領域においても鉄損が小さい、新規の圧粉磁心の適用可能性について評価する. Fig. 8 および Fig. 9 に、今回の比較に用いた磁性材料の B-H 曲線および周波数に対する鉄損を示す. 比較対象には、一般的な無方向性ケイ素鋼板として 35A300 を用いた. また同図中に、市販の圧粉磁心 (Conv. SMC) の特性も併記した.

Fig. 8 より、磁束密度は圧粉磁心よりも無方向性ケイ素鋼板 (35A300) の方が高い、本稿での検討に用いた新規の圧粉磁心 (New SMC) は、B-H 曲線の立ち上がりに関しては、市販の圧粉磁心 (Conv. SMC) よりも優れるが、飽和磁束密度はやや劣る.

次いで、Fig. 9 を見ると、周波数が 1 kHz 以下の領域で比較をしているため、市販の圧粉磁心 (Conv. SMC) の鉄損が最も大きいことがわかる。これに対して、新規の圧粉磁心 (New SMC) は低周波領域においても無方向性ケイ素鋼板 (35A300) より鉄損が小さいことが了解される。

#### 3.2 SR モータへの適用評価

Fig. 10 と Fig. 11 に、無方向性ケイ素鋼板(35A300)と新規の圧粉磁心(New SMC)を、それぞれ 12/8 SR モータに適用し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。ここでの解析には、JSOL 製 JMAG Designer Ver. 17.1 を用いており、SR モータの鉄心材料以外の諸元は、Fig. 5 に示したものと同一である。

Fig. 10 からわかるように、両材料とも速度範囲が一致している. Fig. 11 より、新規の圧粉磁心を適用した SR モータのトルクは、無方向性ケイ素鋼板を適用した場合よりも劣っていることがわかる. これは Fig. 8 に示した飽和磁束密度の低さに起因している. また、負荷の増大とともにその差が大きくなっていることから、新規の圧粉磁心を適用する場合には、より低負荷側での動作が望ましいと言える.

Fig. 12 に効率特性を示す。この図を見ると、低負荷側において新規の圧粉磁心の効率が約 5%向上していることがわかる。Fig. 13 は損失の内訳である。銅損  $W_c$ に関しては、トルク特性が良好な無方向性ケイ素鋼板の方が小さいが、鉄損  $W_i$ に関しては新規の圧粉磁心の方が小さい。これが低負荷側で効率が向上した要因である。したがって、新規の圧粉磁心を適応した SR モータは、高速低負荷領域で動作

させた方がより優位性が高まると予想される.

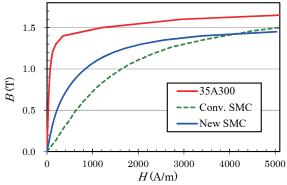


Fig. 8 B-H curves of core material.

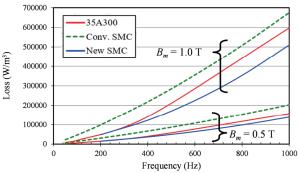


Fig. 9 Core loss characteristics.

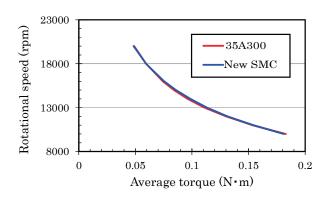


Fig. 10 Comparison of torque versus speed characteristics.

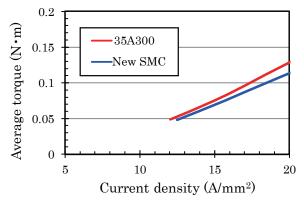


Fig. 11 Comparison of winding current density versus torque characteristics.

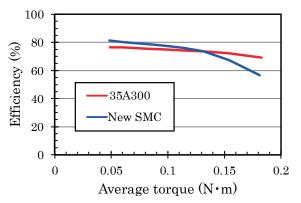


Fig. 12 Comparison of torque versus efficiency characteristics.

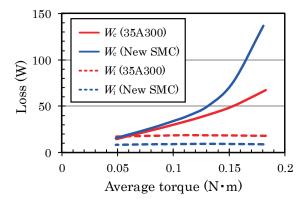


Fig. 13 Comparison of copper and iron losses.

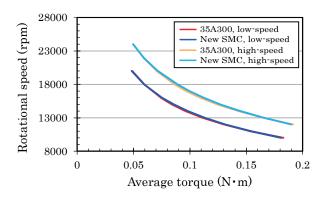


Fig. 14 Comparison of torque versus speed characteristics.

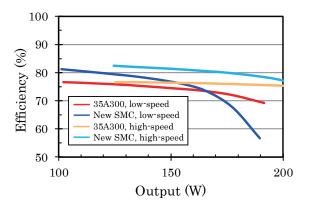


Fig. 15 Comparison of mechanical output versus efficiency.

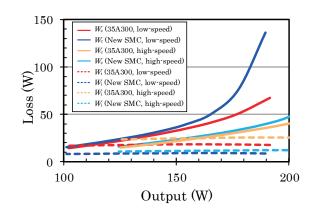


Fig. 16 Comparison of loss characteristics.

そこで以下では、無方向性ケイ素鋼板および新規の圧粉 磁心を適用した両モータについて、電源電圧を 1.2 倍に高めて、高速化させた場合の特性について比較検討を行う. なお、SRモータの形状・寸法、巻線仕様等に変更は無い.

Fig. 14 に、高速化前と高速化後のトルク対回転速度特性を示す。 巻線仕様が同一で電源電圧を 1.2 倍に上げているので、同一トルクに対する速度が単純に約 1.2 倍に増加していることがわかる.

Fig. 15 は、機械出力に対する効率の比較である.この図を見ると、両材料ともに高速化により、効率が改善されたことがわかる.ただし、効率の改善の大きさを比べると、無方向性ケイ素鋼板の方が圧粉磁心よりも小さい.この理由は、Fig. 16 の損失内訳を見るとわかるように、銅損は圧粉磁心とほぼ同程度まで改善されたにも関わらず、鉄損が高周波化によって増大したためである.これに対して、新規の圧粉磁心は、低周波から高周波までの広い範囲で、無方向性ケイ素鋼板よりも鉄損が小さいことから、高周波化に伴う鉄損の増加がほとんどなく、その結果、効率が大幅に改善されたことがわかる.

#### 4. まとめ

以上,本稿では,電動工具用 SR モータのさらなる高効率化を目的として,低周波から高周波までの広い範囲で,無方向性ケイ素鋼板よりも鉄損の小さい,新規の圧粉磁心の適用可能性について評価を行った.

まず,先行研究で試作した 12/8 SR モータに対して,新規の圧粉磁心を適用した場合の諸特性について,3D-FEMを用いて算定したところ,トルクは従来の無方向性ケイ素鋼板を用いた SR モータの方が優れるが,鉄損は小さく,その結果,低負荷時の効率では5%程度向上することが明らかとなった.

次いで、上述の結果から、新規の圧粉磁心を適用した SR モータは、高速低負荷領域で動作させた方が優位性が高まると予想し、高速化した場合の特性についても比較検討を行った。その結果、同一出力において効率が大幅に改善された。これは高速化により銅損が大幅に低減されたことと、

鉄損の増大が抑制されたことに起因する.

本稿では、同一形状、同一寸法の条件下で比較を行ったが、今後は圧粉磁心の形状自由度の高さを活かした形状の 最適化について検討を行うとともに、試作試験を行う予定である.

**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

- 1) R. C. Becerra, M. Ehsani, and T. J. E. Miller, *IEEE Trans. Power Electron.*, **8**, 257 (1993).
- N. Matsui, A. Chiba, and Y. Takeda, J. IEEJ. D, 114, 824 (1994) (in Japanese).
- 3) N. Matsui and Y. Takeda, *J. IEEJ. D*, **118**, 685 (1998) (in Japanese).
- 4) S. S. Ramamurthy and J. C. Balda, *IEEE Trans. Ind. Applicat.*, **37**, 1256 (2001).
- K. Nakamura, Y. Kumasaka, and O. Ichinokura, *Journal of Physics: Conference Series*, 903, 012040 (2017).

#### 2019年10月30日受理, 2019年12月09日採録