

## アルミコイルを適用した SR モータに関する基礎検討

### Basic Examination of SR Motor with Aluminum Coils

朝雛 えみり <sup>a)†</sup>・中村健二 <sup>a)</sup>・柳沢恭平 <sup>b)</sup>・古屋勇太 <sup>b)</sup>

<sup>a)</sup> 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)

<sup>b)</sup> (株) アスター, 横手市柳田 12-3 (〒013-0054)

E. Asahina <sup>a)†</sup>, K. Nakamura <sup>a)</sup>, K. Yanagisawa <sup>b)</sup>, Y. Furuya <sup>b)</sup>

<sup>a)</sup> Tohoku University, Graduate School of Engineering, 6-6-11 Aoba Aramaki Aoba-ku, Sendai, Miyagi 980-8579, Japan

<sup>b)</sup> Aster Co., Ltd., 12-3 Yanagida, Yokote, Akita 013-0054, Japan

In recent years, the development of air mobility and drones has been active. For these applications, permanent magnet (PM) motors are widely used due to their high power and efficiency. However, their cooling systems are limited to a simple air-cooling type because of size and weight limitations. Since air mobility and drones require an ultra-high power density, such insufficient cooling systems may cause irreversible demagnetization in magnets. Switched reluctance (SR) motors have no permanent magnets, consisting of only iron cores and windings, they are attracting attention as a simple, robust, and inexpensive variable-speed motor. The torque density of conventional SR motors is generally lower than those of PM motors. Hence, this paper focuses on aluminum coils, which have a higher degree of freedom of shape and are lighter than conventional copper coils. The basic characteristics of the proposed SR motor were calculated by using a three-dimensional finite element method (3D-FEM). The calculation results show that the aluminum coils are superior to the conventional copper ones in terms of torque and efficiency when the winding space factor of the aluminum coils exceeds 70%. Furthermore, the power density, which is a key indicator for air mobility, was over 1 kW/kg.

**Key words:** Switched reluctance (SR) motor, Aluminum coils, Winding space factor, Air-mobility, Drone

#### 1. はじめに

昨今、脱炭素社会の実現に向けて、様々な分野で電動化が推進されている。これは航空機も例外ではなく、IATA (国際航空運送協会) は 2050 年までに、2005 年比で二酸化炭素排出量を 50%削減するという目標を掲げており、航空機の電動化は必須な状況にある<sup>1)</sup>。また、いわゆる「空の移動革命」に伴い、Fig. 1 に示すとおり、様々な機体サイズの次世代航空移動体が誕生している。特にエアモビリティ (エアモビ) の開発は、産学官連携で推進されている。このような次世代航空移動体は、機体サイズに関わらず、モータ、冷却器、バッテリー、インバータが搭載されているが、すべての構成要素には小型軽量かつ高性能であることが強く要求されている。特にモータは、システム全体に占める重量の割合が大きく、軽量化と高出力化が必須である。この要求を満たすため、モータの鉄心等に軽量化材料<sup>2)</sup>を用いることや、高速回転化<sup>3)</sup>が検討されている。また現状、ドローンなど、小型なものはダイレクトドライブである一方、電動航空機など大型機においてはギヤによる減速が主流である<sup>4)</sup>。

一般的な電気自動車主機用モータの出力密度は 1 kW/kg 程度<sup>4)</sup>であるのに対し、Fig. 1 からわかるように、ドローンでは小型なものでも 2 kW/kg 以上<sup>4)</sup>、エアモビでは 15 kW/kg 以上<sup>3)</sup>が必須である。そのため、現在は高出力密度かつ高効率な永久磁石 (PM) モータが用いられている。しかし、エアモビの冷却器は軽量化と保守性の観点から空冷方式であるため、放熱性に難があり、永久磁石の熱減磁が懸念される。これに対して、水冷技術と比べて軽量で、空冷技術より冷却性能が高い間接水冷に関する検討<sup>5)</sup>も進められ

ており、電動航空機用の 4 MW 級モータに適用された事例も報告されているが、実用化には至っていない。そこで筆者らは、永久磁石が不要なスイッチトリラクタンス (SR) モータに着目した。SR モータは鉄心と巻線のみで構成されることから、構造が単純で堅牢、熱に強く、安価で信頼性が高いというメリットをもつ。また、デメリットとされる騒音も、航空移動体の場合、プロペラ音が極めて大きいいため、問題とならない。その一方で、Fig. 1 からわかるとおり、一般的な SR モータの出力密度は 1 kW/kg 以下であるため、エアモビ等への SR モータ適用を実現するには、モータの構造、鉄心材料、コイルの最適な組み合わせを検討する必要がある。これまで筆者らは SR モータの性能向上を目指し、Fe-50%Co 合

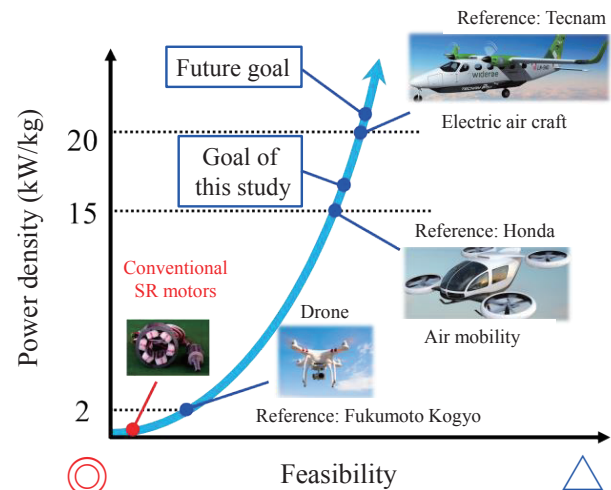


Fig. 1 Output power density required for next-generation air mobility.

責任著者：朝雛 えみり  
(e-mail: asahina.emiri.s3@dc.tohoku.ac.jp).

金による出力密度の向上や<sup>9)</sup>、アキシシャルギャップ構造によるトルクの増大<sup>7)</sup>、固定子磁極間への永久磁石挿入によるトルクおよび効率向上<sup>8)</sup>について検討を行ってきた。その一方で、トルク密度や出力密度の向上には、モータの軽量化も必須の検討項目である。

そこで本稿では、軽量かつ形状自由度が高いアルミニウム製のコイル（アルミコイル）を用いることで、SR モータの軽量化と高出力化の両立を目指すことに着目し、有限要素法（FEM）を用いて、基礎的な検討をしたので報告する。

## 2. SR モータの動作原理

Fig. 2 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氣的突極性によ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ズ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. 3 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、低電圧側に各々一つずつ持つ、両トランジスタを同時にオンすることにより、巻線に電圧が印加されて励磁電流が流れ、その後、両トランジスタをオフにすると、

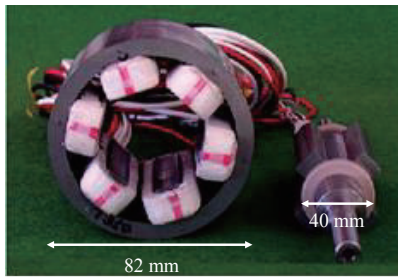


Fig. 2 Appearance of SR motor.

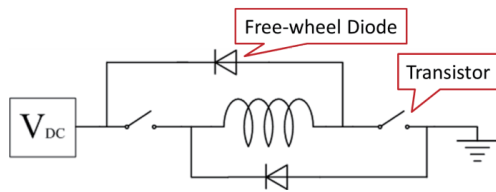


Fig. 3 Asymmetric half bridge converter (1-phase).

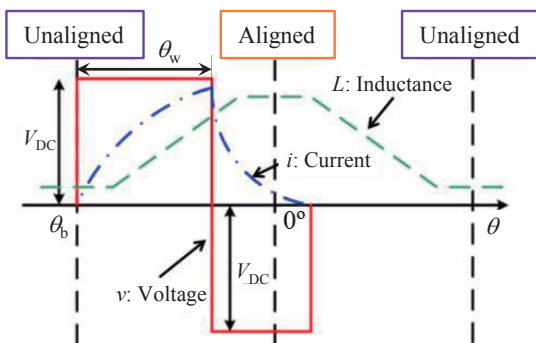


Fig. 4 Phase inductance according to rotor position angle, and exciting voltage and current waveforms.

巻線に蓄えられていた磁気エネルギーが、還流用ダイオードを通じて電源に回生される。Fig. 4 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 $L$ 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。

$$\begin{aligned} \tau_k &= \frac{\partial W_k'(i_k, \theta)}{\partial \theta} \\ &= \frac{1}{2} i_k^2 \frac{\partial L_k(\theta)}{\partial \theta} \end{aligned} \quad (1)$$

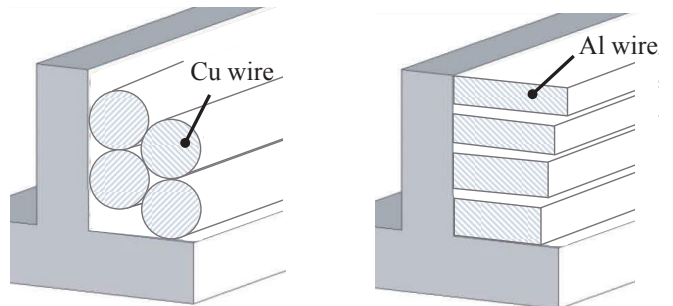
上式より、同図のインダクタンス曲線の傾きが正の領域で励磁することで、正方向のトルクが発生することが了解される。したがって、通常 SR モータを駆動するためには、回転子位置検出器が必要になる。

## 3. アルミコイルを適用した SR モータの基礎特性

Fig. 5 に、従来の一般的な銅コイルの巻線配置と、本論文で着目したアルミコイルの巻線配置を示す。アルミニウムは柔らかく、同図のように巻線の断面積を一定に保ちつつ、アスペクト比を 1 ターン毎に変えることが容易である。これによって、デッドスペースを極限まで減らし、巻線の占積率を向上させ、トルクを増大させることができる。このように、アルミコイルの適用は、軽量化とトルク増大の両方の面でメリットがあり、次世代航空移動体用モータに要求される重量出力密度の向上に有効である。しかしながら、電気伝導率が銅の約 0.6 倍であることから、銅損の増大による効率の低下が懸念される。そこで本章では、3次元有限要素法 (3D-FEM) による電磁界解析を用いて、アルミコイルを SR モータに適用した場合の特性を算定した。なお、3D-FEM には、JSOL 製の JMAG Designer Ver 20.1 を用い、アルミコイルの占積率を 50%、60%、70%、80%、90%と変化させた。

Fig. 6 に、考察に用いた SR モータの諸元を示す。本 SR モータは固定子 12 極、回転子 8 極の 3 相機であり、先行研究において電動工具用モータとした開発したものである<sup>9)</sup>。

Fig. 7 に SR モータの 3D-FEM モデルを示す。Fig. 8 は、SR モータの標準的な駆動回路である非対称ハーフブリッジコンバータ



(a) Conventional copper coil (b) Proposed aluminum coil

Fig. 5 Comparison of winding arrangements between copper and aluminum coils.

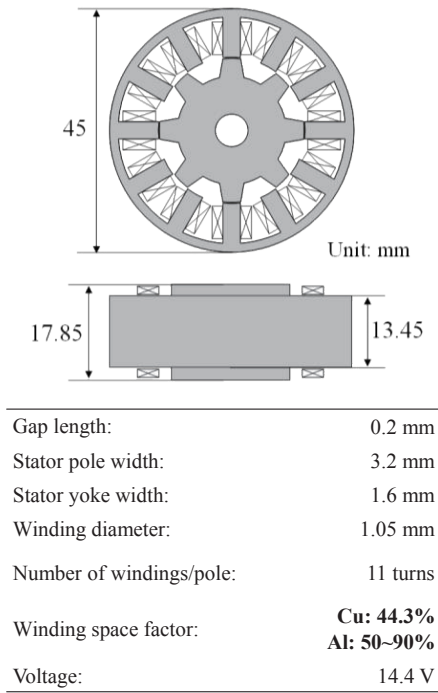


Fig. 6 Specifications of 12/8 SR motor.

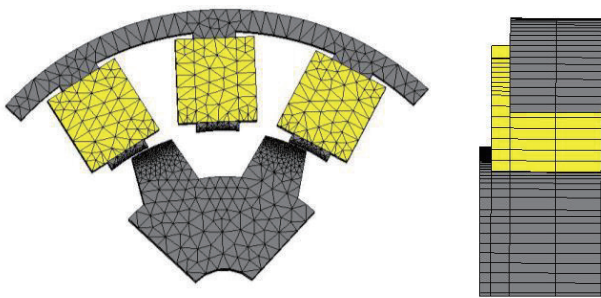


Fig. 7 3D-FEM model of SR motor.

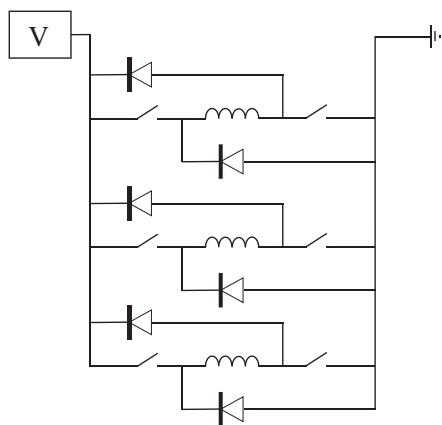


Fig. 8 Circuit model of asymmetric half bridge converter.

の回路モデルである。同図の FEM モデルと回路モデルを連成することで、一定速回転時のモータの電流、トルク、磁束密度分布などを計算することができる。

Fig. 9 および Fig. 10 に、トルク対速度特性と巻線電流密度対トルク特性を示す。Fig. 9 より、速度特性は占積率およびコイル材質に依存せずほぼ同等であることがわかる。一方、Fig. 10 を見ると、占積率の向上に伴い、同一電流密度におけるトルクが増大していることが了解される。

Fig. 11 および Fig. 12 に、銅損と鉄損の計算値を示す。Fig. 11 より、占積率 70% までは銅コイルと比べて、アルミコイルの銅損

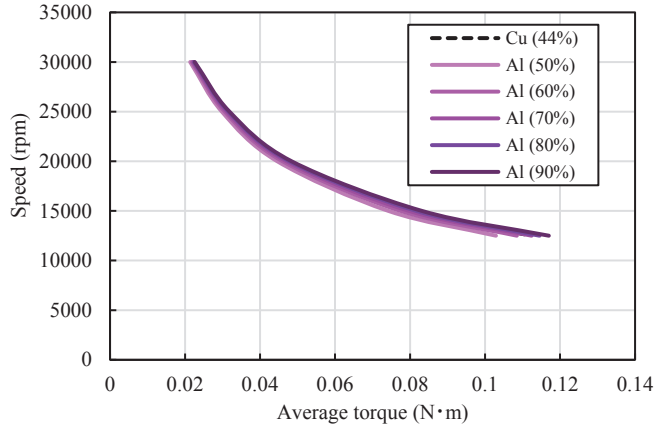


Fig. 9 Calculated torque versus speed characteristics.

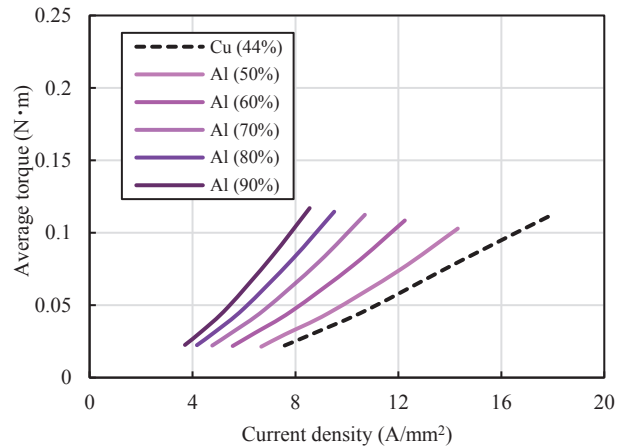


Fig. 10 Calculated current density versus torque characteristics.

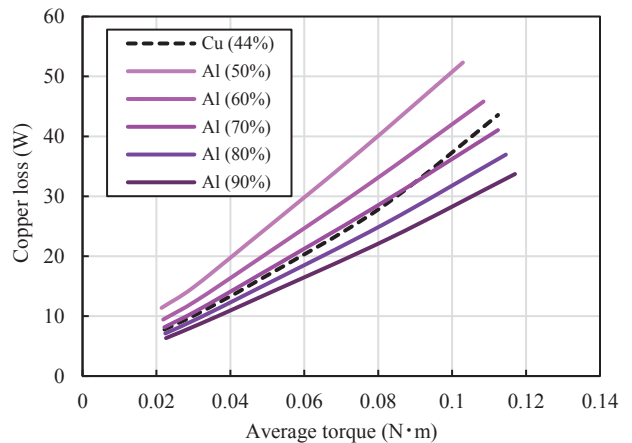


Fig. 11 Calculated copper losses.

が大きいのにに対して、占積率が70%を超えると小さくなることがわかる。これはコイル断面積の増大による抵抗減少効果が、電気伝導率の低さによる抵抗増加分を上回ったためである。つまり、アルミコイルの使用において最も懸念される銅損の増大は、占積率を70%超まで向上させることで解決できる。

次いで、Fig. 12を見ると、鉄損は占積率に依存せずほぼ同等であることがわかる。これは、Fig. 9に示したように、トルクと速度が反比例の関係であることに起因する。

Fig. 13 に効率特性を示す。ここで効率 $\eta$ は次式より求めた。

$$\eta = \frac{\omega\tau}{\omega\tau + W_c + W_i} \quad (2)$$

上式中の $\tau$ はトルク、 $\omega$ は回転角速度、 $W_c$ は銅損、 $W_i$ は鉄損である。なお、今回は解析ベースの考察であることから、機械損は無視している。この図より、先ほどの損失特性を踏まえ、占積率70%まではアルミコイルの効率は銅コイルに対して劣るものの、占積率が70%を超えると、効率においても優位性を示すことがわかる。

Fig. 14 に重量出力密度の比較を示す。この図より、アルミコイルを用いることでモータが軽量になり、かつ同一電流密度におけるトルクが増大したことから、重量出力密度が大幅に向上し、1 kW/kg を上回ったことが了解される。

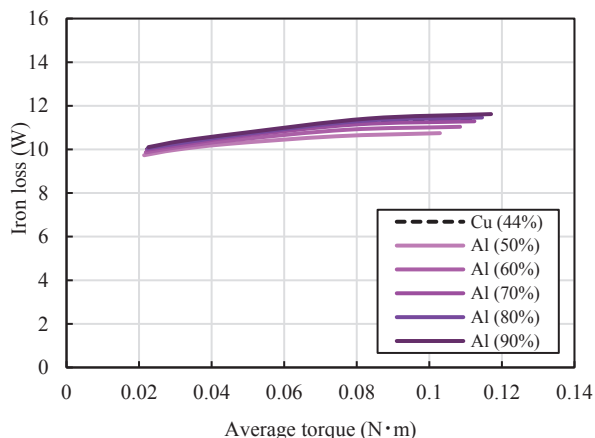


Fig. 12 Calculated iron losses.

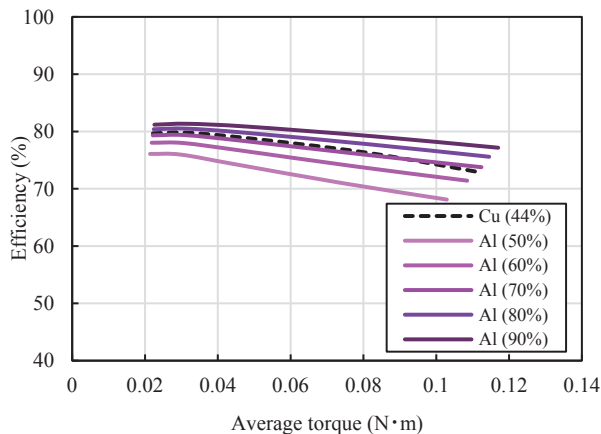


Fig. 13 Calculated efficiency.

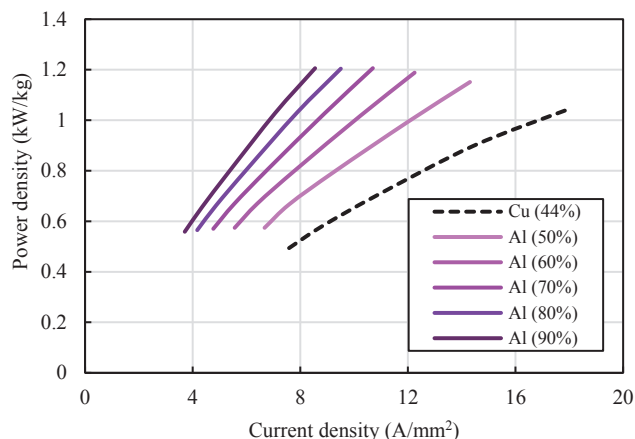


Fig. 14 Calculated power density characteristics.

#### 4. まとめ

本稿では、軽量かつ形状自由度が高いアルミコイルに着目し、SR モータの軽量化と高出力化の両立を目的として、基礎的な検討を行った。その結果、アルミコイルの占積率が70%を超えると、一般的な銅コイルよりも銅損が小さくなり、トルクおよび効率の両面で優位になることが明らかとなった。また、アルミコイルを採用したことによる巻線占積率の向上と軽量化の効果により、重量出力密度1 kW/kg 以上が達成可能であることも明らかとなった。

なお、本論文では銅損は電気抵抗に由来するもののみ考慮したが、今後はスロット間の漏れ磁束やフリンジング磁束によって発生する渦電流損についても検討する予定である。また、アルミコイルを活かしたモータ構造についても詳細な検討を行い、出力密度のさらなる向上を目指す予定である。

**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) J. Z. Bird: *IEEE Trans. Magn.*, **58**, 2,1, (2022).
- 2) J. J. Scheidler, V. M. Asnani, and T. F. Talerico: *Proc. AIAA/IEEE Electric Aircraft Technologies Symposium 2018 (EATS)*, 1 (Cincinnati, 2018).
- 3) Y. Yamada, M. Irie, and S. Nakata: *The 2022 Annual Meeting of the Institute of Electrical Engineers of Japan*, S1-9, 25 (Okayama, 2022) (in Japanese).
- 4) "Soratobu kuruma," 147 (NTS Co., Ltd, Tokyo, 2022) (in Japanese).
- 5) F. P. McCluskey, Y. Saadon, Z. Yao, and A. Camacho: *18th IEEE Intersociety Conference on Thermal and Thermomechanical Phenomena in Electronic Systems (ITherm)*, 1134 (Las Vegas, 2019).
- 6) Y. Hasegawa, K. Nakamura, O. Ichinokura: *J. Magn. Soc. Jpn.*, **33**, 135 (2009) (in Japanese).
- 7) Y. Ono, K. Nakamura, O. Ichinokura: *J. Magn. Soc. Jpn.*, **35**, 106 (2011) (in Japanese).
- 8) K. Nakamura, K. Murota, and O. Ichinokura: *J. Magn. Soc. Jpn.*, **31**, 123 (2007) (in Japanese).
- 9) K. Nakamura, Y. Kumasaka, and O. Ichinokura: *Journal of Physics: Conference Series*, **903**, 012040 (2017).

2022年11月23日受理, 2022年12月06日再受理, 2022年12月14日採録