

## リラクタンスネットワーク解析に基づく 永久磁石モータの熱-磁気連成解析に関する基礎的検討

### Basic Examination of Electromagnetic and Thermal Coupled Analysis for Permanent Magnet Motor based on Reluctance Network Analysis

川村 恭平<sup>†</sup>, 中村 健二

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)

K. Kawamura, K. Nakamura

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

In recent years, a thermal analysis of electric motors becomes more important following an increase of power density. Especially, it is very important for design and analysis of permanent magnet (PM) motors since characteristics of the permanent magnet are deteriorated by heat due to losses. To realize a quantitative thermal design and prevent from overheat, it is essential to establish an electromagnetic and thermal coupled analysis method for the PM motors. This paper presents a method for calculating simultaneously the eddy current loss of the permanent magnet and its temperature rise.

**Key words:** Permanent magnet (PM) motor, Reluctance Network Analysis (RNA), Electromagnetic and Thermal Coupled Analysis

#### 1. はじめに

現在, モータの解析・設計手法としては, 有限要素法 (FEM) が幅広く用いられており, 材料の磁気特性や詳細な形状・寸法に基づき, モータ単体の性能を高精度に算定することができる。しかしながら, 最近のモータはインバータなどに代表されるパワーエレクトロニクス回路によって, きめ細やかに制御されることで, 高出力・高効率な運転が実現されていることから, モータ単体のみならず駆動回路や制御系も含めた解析・設計手法の確立が必要不可欠である。また最近では, モータに対する小型高出力化の要求は益々高まっており, 例えば, 現在のハイブリッド自動車用のモータの巻線電流密度は  $20 \text{ A/mm}^2$  以上に達している。これは自然空冷では到底冷却できないほどの電流密度であり, 油冷等も想定した熱設計が欠かせない。したがって, このようなモータドライブシステムの設計には, 電気-磁気連成解析に加えて, 熱との連成も必要であり, 解析モデルが著しく大規模になる。加えて, モータの電気的な時定数は通常 ms オーダであるのに対し, 熱平衡に至るまでの時間は数分~数十分程度であるため, 熱-磁気連成解析には長大な計算時間も要求される。したがって, 簡便な連成モデルの構築と, これを用いた高速な計算が求められる。

磁気回路法は, 機器内部の複雑な磁気現象を巨視的に捉えて解析する手法であり, 機器形状を反映したシンプルな解析モデルが構築できるため, 簡便な計算で機器の動作原理を容易に把握することができる。これまで筆者らは, 磁気回路法を発展させた電気機器の解析手法として, リラクタンスネットワーク解析 (RNA: Reluctance Network

Analysis) を提案してきた<sup>1)</sup>。RNAは, 解析対象を複数の要素に分割し, これらを形状と材料の磁気特性で決まる磁気抵抗で表すことで, 解析対象全体を一つの磁気抵抗回路網として扱う手法である。FEMと比べて解析モデルが簡便で計算が速いこと, 算定精度が比較的高いこと, 電気系, 熱系, 運動系との連成解析が可能であること, 汎用の回路シミュレータをソルバとして利用できることなどの特長を有する。

先に筆者らは, モータの RNA モデルで求めた損失を入力として, 熱抵抗回路モデルを解くことで, スイッチトリラクタンス (SR) モータ<sup>2)</sup>や, 永久磁石 (PM) モータ<sup>3)</sup>の温度上昇を算定する手法を提案した。しかしながら, 磁気回路と熱回路の相互干渉を考慮しながら解析を行う完全連成手法は未だ確立できていない。そこで本稿では, PM モータを解析対象として選び, 熱-磁気完全連成モデルの構築を目的として, 基礎的な検討を行ったので報告する。

#### 2. PM モータの RNA モデル

本章では, 解析対象とした PM モータの諸元と RNA モデルの導出方法について要点を述べる。Fig. 1に, 解析対象の 3 相 6 スロット 4 極のアウトロータ型 PM モータを示す。直径は  $53.9 \text{ mm}$ , 積み厚は  $11.9 \text{ mm}$  のモータであり, 定格速度は  $9000 \text{ rpm}$  である。Table 1 に諸元を示す。

RNA モデルの導出に際しては, まず Fig. 2(a)に示すように PM モータを複数の要素に分割する。このとき, 磁束の流れが比較的単純な固定子極とヨーク部分は, 同図に示すように, 分割数を粗くする。一方, 磁束分布が複雑になることが予想される, 固定子極先端, ギャップ, 回転子は細かく分割する。

次いで、分割した各々の要素を同図(b)に示すような、2次元方向の4つの磁気抵抗で表す。これらの磁気抵抗  $R_m$  は、磁心部については、要素の断面積を  $S_m$ 、平均磁路長  $l_m$  を用いて、次式で与える。

$$R_m = \frac{l_m}{\mu_0 \mu_s S_m} \quad (1)$$

上式中の  $\mu_s$  は鉄心の比透磁率である。

一方、空間部の磁気抵抗  $R_{air}$  については、真空中の透磁率  $\mu_0$  と分割要素の寸法を用いて以下のように与える。

$$R_{air} = \frac{l_m}{\mu_0 S_m} \quad (2)$$

また、回転子磁石を表す起磁力については、永久磁石の起磁力  $f_c$  は、保磁力  $H_c$  と磁石長  $l_{pm}$  を用いて、

$$f_c = H_c l_{pm} \quad (3)$$

で表されることから、これを次式のように回転子位置角  $\theta$  の関数で与えることで、回転子の回転運動を模擬する<sup>1)</sup>。

$$f_c(\theta) = H_c l_{pm} \times \frac{2}{\pi} \arctan(b \sin p\theta) \quad (4)$$

上式中の  $b$  は、Fig. 3に示すように起磁力分布の形状を決める無次元の値である。本稿では、通常、起磁力分布は角の丸まった方形波状になることから、同図中の実線のような分布になると仮定し、 $b = 10$  とした。

Fig. 4に、上述のようにして導出したPMモータのRNAモデルの一部を示す。またFig. 5(a)に、導出したRNAモデルを用いて求めた鎖交磁束を示す。同図(b)は誘起電圧である。また比較のため、FEMによる算定結果も示す。なお、RNAモデルの要素数は588、FEMは11,130である。これらの図を見ると、両者は良好に一致しており、導出したRNAモデルの妥当性が了解される。

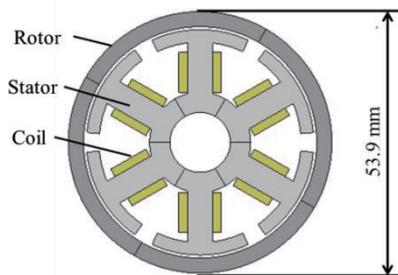
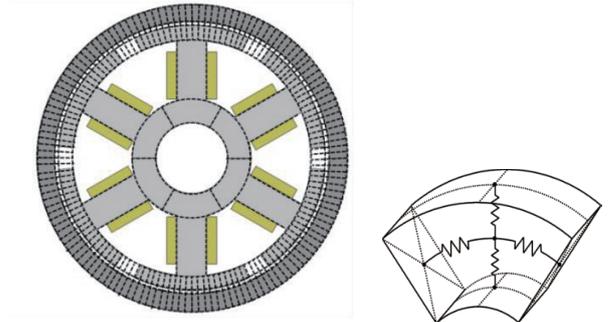


Fig. 1 Schematic diagram of outer-rotor-type PM motor.

Table 1 Specifications of the PM motor.

Number of slot	6
Number of pole	4
Stack length	11.9 mm
Number of windings/pole	48
Magnetic length	3 mm
Core material	35A300
Magnet material	Nd-Fe-B



(a) Division of the PM motor (b) Unit magnetic circuit  
Fig. 2 Division of the PM motor based on RNA.

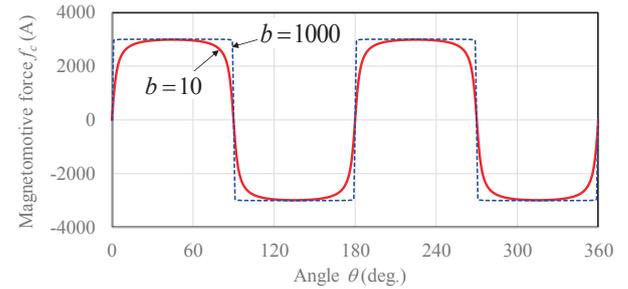


Fig. 3 Distribution of magnetomotive force of the magnet.

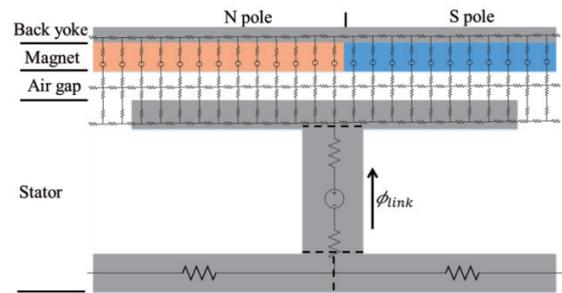
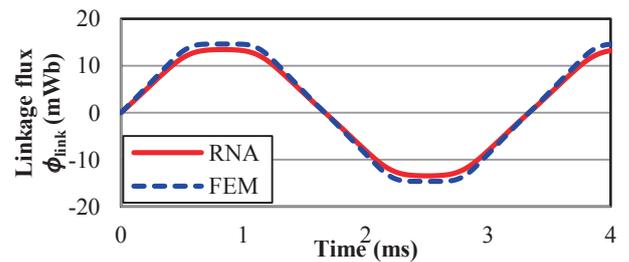
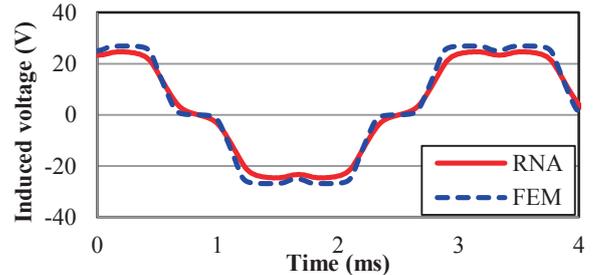


Fig. 4 A part of the RNA model of the PM motor.



(a) Linkage flux



(b) Induced voltage

Fig. 5 Comparison of RNA and FEM results.



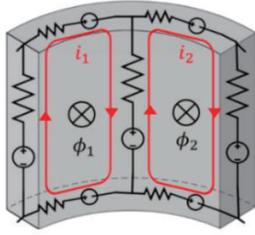


Fig. 8 Electric circuit model of the permanent magnet for calculating the eddy current loss.

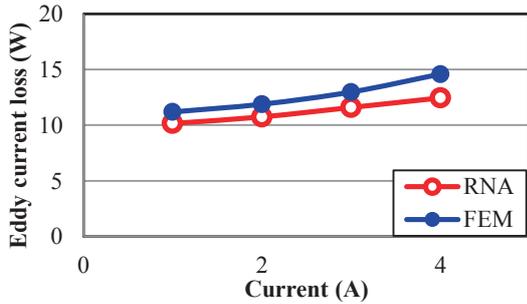


Fig. 9 Comparison of calculated eddy current losses.

### 3.3 永久磁石の熱回路解析

前項で求めた磁石渦電流損失を用いて、熱回路解析を行う。ただし、今回は簡便のため、磁石渦電流損失を熱源として、磁石のみが加熱され、小型円柱状物体からの自然熱対流であるという条件の下で計算を行った。Fig. 10に、回転子磁石の熱回路モデルを示す。図中の  $I_t$  は熱源、 $C_t$  は熱容量、 $T_o$  は外気温である。また、永久磁石の伝熱抵抗が  $R_{ti}$ 、外気への放熱抵抗が  $R_{to}$  であり、これらは熱伝導率  $\lambda$ 、熱伝達率  $h$ 、磁石表面積  $A$ 、回転子直径  $d$ 、磁石長さ  $l_{pm}$ 、磁石内部温度  $T_{io}$  を用いて、次式で表される<sup>3)</sup>。

$$R_{ti} = \frac{l_{pm}}{\lambda A} \quad (9)$$

$$R_{to} = \frac{1}{hA} \quad (10)$$

$$\text{ただし、} h = 1.32 \left( \frac{T_{to} - T_o}{d} \right)^{0.25} \quad (11)$$

Fig. 11 に示すように、Fig. 10 の熱回路モデルと Fig. 4 の RNA モデル、Fig. 8 の電気回路モデルを組み合わせ、同時並行で解析することで、永久磁石の温度が時間ステップごとに算定できる。Fig. 12 に磁石温度の算定結果の一例を示す。

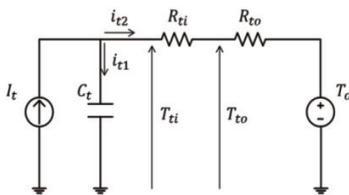


Fig. 10 Thermal circuit model of the permanent magnet.

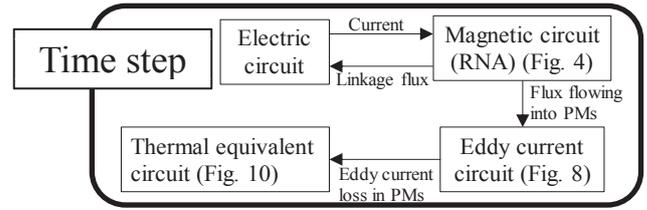


Fig. 11 Calculation flow diagram.

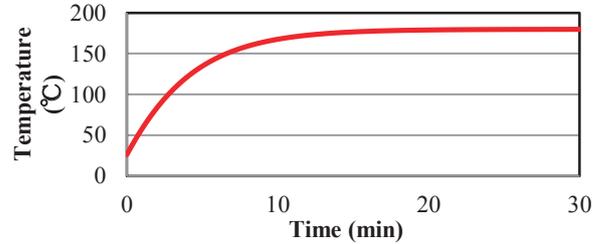


Fig. 12 Calculated temperature of the permanent magnet.

## 4. まとめ

以上本稿では、RNA に基づく熱 - 磁気完全連成解析手法の確立を目的として、PM モータを解析対象として選び、基礎的な検討を行った。

まず先行研究において大きな課題の一つであった、回転子磁石に流れる磁束の算定方法については、磁石のある1つの要素に接している2つのギャップ要素の面積比を表す三角波状の関数を新たに導入し、これとギャップ要素に流れる磁束を適切に掛け合わせることで、任意の場所の磁石磁束を後計算無しに求める手法を提案した。

本手法で求めた磁石磁束、並びにそこから求まる磁石渦電流損失について、FEM の結果と比較をしたところ、両者は良好に一致し、提案手法の妥当性を明らかにすることができた。

また、永久磁石の熱回路モデルと上述の RNA モデルの解析を同時並行で行い、電気 - 磁気 - 熱の完全連成に向けた見通しを得ることができた。

今後は、銅損および鉄損による発熱、並びに発熱による巻線の電気的特性、および磁石の磁気的特性の変化まで考慮可能な完全連成モデルの構築を目指す。また、実機との比較検証も行う予定である。

## References

- 1) O. Ichinokura, K. Tajima, H. Tanaka, and Y. Yoshida, "Jikikairoho niyuru Mota no Kaisekigijutsu", Kagakugijutsu shuppan (2016) (in Japanese).
- 2) Y. Sugai, K. Nakamura, and O. Ichinokura, *The Papers of Technical Meeting on "Magnetics" IEE Japan*, MAG-14-168 (2014) (in Japanese)
- 3) Y. Sugai, K. Nakamura, and O. Ichinokura, *The Papers of Technical Meeting on "Magnetics" IEE Japan*, MAG-15-120 (2015) (in Japanese)
- 4) Y. Yoshida, K. Nakamura, and O. Ichinokura, *J. Magn. Soc. Jpn.*, 37, 278 (2013).

2017年10月9日受理, 2018年1月20日再受理, 2018年2月14日採録