スイッチトリラクタンスモータの温度解析に関する検討

学生員 稲村 慎吾* 正員 沢 孝一郎*

A Study on Temperature Analysis of Switched Reluctance Motor

Shingo Inamura*, Student Member, Koichiro Sawa*, Member

This paper describes the temperature analysis of a Switched Reluctance Motor (SRM) taking into account the temperature rise in the inside air. The temperature of motor will be known to be important for motor design, because the rated values such as voltage, current, and output considerably depend on it. Moreover the temperature rise affects the magnetic characteristics of material e.g. permanent magnet, electrical steel sheets. In this paper, we introduced the equation of temperature rise in the inside air which includes the heat convection to the iron and the outside air for analysis. Finite Element Method (FEM) was combined with it and solved simultaneously by iterative method. In comparison with measured value, it is clear that the model of the temperature rise is effective for highly accurate analysis. Furthermore, the distribution of temperature in SRM is obtained, which makes it possible to estimate the local heat generation.

キーワード：スイッチトリラクタンスモータ (SRM), 有限要素法 (FEM), 温度解析, 自然対流, 強制対流

Keywords: Switched Reluctance Motor, Finite Element Method, Free Convection, Forced Convection

1. はじめに

近年、回転機の設計に際し、数値解析技術である有限要素法 (Finite Element Method: FEM) は、大きな役割を担っている。特に、研究開発において電磁界解析による最適設計が盛んにおこなわれ、その性能は飛躍的に進歩した⁽¹⁾⁽²⁾。

スイッチトリラクタンスモータ (Switched Reluctance Motor: SRM) は、その高効率性や簡単な構造のため、脚光をあびており、実用化へ向けて研究が盛んにおこなわれている^{(3)~(6)}。その設計に際して、これまでの回転機と同様に、FEM 解析は有効な手段の一つであり、トルクや振動などの解析がおこなわれてきた。加えて、高効率性は現在の省エネルギー時代にともない最優先課題となるが、それを評価するため損失に関する研究が不可欠となりつつある^{(7)~(9)}。それは、鉄損や銅損の推定を可能にすることを目標とし、また、その応用技術として、損失にともない発生する熱問題についても期待できる。特に、大型の回転機に関しては、高温になりやすく通風冷却による放熱問題が大きいと、熱対策が必要である。一方、小形機に関しても、出力密度が高く、温度上昇が各種絶縁に影響を与えたり、永久磁石などの磁気特性が熱により変化したりするため正

確な評価が必要とされると考えられる。さらに、材質開発においても、熱解析に対する要求が高まりつつある⁽¹⁰⁾。これまで、温度解析に関しては、熱の伝導特性から三次元解析が必要で、FEM ではなく、熱等価回路法が多く適用されている⁽¹¹⁾。しかし、計算機技術の進歩にともない三次元解析も実用化に近づき、解析結果より諸現象の局所的な評価が容易になってきただけでなく、連成問題にて損失解析データやメッシュ分割等を簡単に共用して解析できるという点からも、FEM は温度解析にとっても重要な解析手法であり、その応用例も挙げられる⁽¹²⁾⁽¹³⁾。

そこで、本論文では、FEM を用い、比較的小形の SRM の温度特性に着目し解析をおこなった。発熱源を鉄損・銅損とし、磁界解析から求めた分布を用いて計算した⁽¹⁴⁾。モータの温度解析では、ロータの回転による強制対流熱伝達を考慮しなければならないが、SRM は突極構造のため、モータ内部の空気部分が大きく、接触面積が広いので、温度上昇に対して影響は大きくなり、空気部分の小さいモータの解析と比較するとその影響度は大きく異なる⁽¹³⁾。さらに、実際の SRM 内部の空気の温度は、ファン等の冷却がおこなわれていない場合、完全に除熱できなく、それによる温度上昇が解析において重要な要素となると考えられる。そこで、このようなモータ内部の空気の温度上昇を考慮にいったモデルを提案した。それは、モータ内部の空気の温度上昇の式を FEM 解析とは別に定義し、それを反復法で連立して解くものである。そして、解析結果と実験結果の比

* 慶應義塾大学理工学部システムデザイン工学科
〒223-8522 横浜市港北区日吉 3-14-1
Department of System Design Engineering, Keio University
3-14-1, Hiyoshi, Kouhoku-ku, Yokohama 223-8522

較, 検討をおこない, これにより, 温度上昇モデルの有効性が示され, また, 複雑な構造を持つ SRM の局所的な温度分布を求めることができた。

2. 解析手法

〈2・1〉 支配方程式 本論文で用いる非定常熱伝導問題の支配方程式を, 以下に示す⁽¹⁵⁾。

$$\kappa \nabla^2 T + \dot{Q} - \rho c \frac{\partial T}{\partial t} = 0 \dots \dots \dots (1)$$

c , ρ , κ , $\dot{Q}$ は, それぞれ比熱, 密度, 熱伝導率, 単位時間に単位体積あたりに供給される発熱量である。境界条件は, 外気との熱伝達がある場合は, (2) 式による Newton の冷却法則によって表わされ, 温度が規定されている場合は固定境界が適用される。したがって, (2) 式を用いることで空気の流れによる熱移動の境界条件が表されるため, 流体解析は考慮されない。この式は, 固体表面と流体 (ここでは空気) との間の熱交換を表しており, 温度差に比例する。

$$q = -\kappa \frac{\partial T}{\partial n} = h(T - T_b) \dots \dots \dots (2)$$

ここで, q , h , T_b はそれぞれ, 熱流束, 熱伝達率, 空気の温度となる。

〈2・2〉 モータ内部の空気の温度上昇 (1)(2) 式を解くために, 境界条件として空気の温度 T_b は既知として与えなければならない。しかしながら, モータ駆動時における内部の空気の温度は, モータ自身の発熱にともない上昇する。これにより, モータ内気温は温度上昇により外気温とは異なる。ただし, モータ内気温はロータによる攪拌により, 一定であると考えられ, 温度上昇さえ考慮できれば (1)(2) 式を解くことができる。ここで, このモータ内部の空気の温度上昇をモデル化するために, 空気の温度 T_b を外気温 T_{oa} (既知) と内気温 T_{ia} (未知数) と 2 種類に分けて, (3) 式の空気の温度上昇の式を導入し, これを連立して解く。すなわち, 解析対象である鉄部のみならず, モータ内部の空気の温度も未知数となる。

$$\int_{S_{i-ia}} h_{i-ia} (T_i - T_{ia}) ds + \int_{S_{oa-ia}} h_{oa-ia} (T_{oa} - T_{ia}) ds = \int_V \rho c \frac{\partial T_{ia}}{\partial t} dv \dots \dots \dots (3)$$

これは, 内部の空気の熱収支を示した式であり, 図 1 に示めされる。(3) 式の左辺は, 熱伝達境界面 S で, モータ温度 T_i から内気温 T_{ia} への熱伝達, 外気温 T_{oa} から内気温 T_{ia} への熱放出, すなわち通気孔を通した熱放出を示している, そして右辺は温度上昇を示しており。ここでモータ内気の温度上昇が考慮されている。また, 境界面 S の添字の $\{i-ia\}$ は鉄 (iron) から内気 (inside air) への熱伝達, $\{i-oa\}$ は, 鉄 (iron) から外気 (outside air) への熱伝達, 最後に $\{oa-ia\}$ は通気孔による外気から (outside air) から内気 (inside air) への熱伝達を示している。

ここで, 実際の通気孔での熱移動は対流による移動とな

図 1 モータ内部の空気の熱伝達

Fig. 1. Heat transfer to inside air of SRM.

図 2 フローチャート

Fig. 2. Flowchart.

るが, 熱流束は外部, 内部間の温度差に比例すると仮定し熱伝達の形式でモデル化をおこなった。

〈2・3〉 解析手順 本節では解析手順について述べる。(1)(2) 式を FEM 用いて解くため, Galerkin 法により以下のように離散化した⁽¹⁶⁾。

$$[k]\{T\} + [c]\left\{\frac{\partial T}{\partial t}\right\} = \{f\} \dots \dots \dots (4)$$

(3) は以下のように式変形され, 温度上昇を評価する。なお, $[N]$ は試験関数である。

$$\int_{S_{i-ia}} h_{i-ia} [N] ds \{T_i - T_{ia}\} + \int_{S_{oa-ia}} h_{oa-ia} [N] ds \{T_{oa} - T_{ia}\} = \int_V \rho c [N] dv \left\{\frac{\partial T_{ia}}{\partial t}\right\} \dots \dots \dots (5)$$

そして, 時間差分は Crank-Nicolson 法を用いて解析をおこなう。

これより, 次ステップのモータ温度 $\{T_{i(t+\Delta t)}\}$ と内気温 $T_{ia(t+\Delta t)}$ は (4) 式と (5) 式を連立させてそれぞれ求めることになるが, 対称マトリクスでなくなるため, 本論文ではこれらを, 反復計算により解いた。最後に, 計算過程を図 2 に示す。

〈2・4〉 メッシュ分割 モータ内部の空気メッシュは、磁界解析等の連成を考慮にいて分割されているが、温度解析については先に述べたように、その温度分布は一定として解析するため、実質上解析対象とはならない。しかしながら、磁界解析のメッシュを直接適用するほうが連成解析に便利であるためメッシュの再構成をせずに、そのままの分割で、内部の空気部分の各パラメータ熱伝導率 κ 、比熱 c 、密度 d を全て0として計算をおこなった。これにより、実質上内部空気は解析対象から除外されたことになる。マトリクス計算に関しては、上述した内部空気部分での節点番号に対応する行の成分はすべて0となるため、不定方程式となり直接法では解けない。しかし、反復法である ICCG 法では、その不定になるべき節点での解はそのまま初期値を返し解が得られるため、ここにそれぞれの気温(内気温)を代入することにより、そのままの分割を用いて計算することが可能となる。

3. 各定数について

本章では熱伝達、熱伝導に関する各定数について検討する。

〈3・1〉 熱伝達率(自然対流) モータと外気との熱伝達 $\{i-oa\}$ は自然対流となる。その値を一般式から求めた。自然対流の熱伝達率は、一般的に Nusselt 数 (Nu) と呼ばれる無次元数から導出され、また、これは、同様に無次元数である Grashof 数 (Gr) と Prandtl 数 (Pr) の変数となる。熱伝達率は垂直、水平平面、円筒面等の面の向きによって異なるが、本論文では代表値として、球体の場合について考え熱伝達率を導出した。この際の、Nusselt 数は (6) 式から求められる⁽¹⁷⁾。

$$Nu = 2 + 0.43(GrPr)^{1/4} \dots\dots\dots (6)$$

Grashof 数は伝熱面と空気との温度差 ΔT に比例する。実際、SRM では定常状態で、温度差 $\Delta T = 20 \sim 30K$ 程度になる場合があるが、平均値 $\Delta T = 10K$ として計算すると $h = 7.9W/m^2K$ が得られる。しかし、平均 ΔT は駆動条件に若干影響されるため、本論文では、概算値としてモータと外気との熱伝達率 $h_{i-oa} = 8.0$ を固定値として与えて解析した。

〈3・2〉 熱伝達率(強制対流) ロータの回転による空気の対流により、モータ内部空気とモータの熱伝達 $\{i-ia\}$ は強制対流伝達となる。まず、ロータの回転による対流の効果について検討する。ここで、SRM ヨーク部の外側の頭の定常状態の温度を測定した。そして、図3にSRM駆動時における温度-損失特性を示す。損失は鉄損と銅損との和として計算し、機械損は $3,000min^{-1}$ でも $2.0W$ 程度であり鉄損と比較しても小さいため考慮しない。実験は回転速度 $1,500, 3,000min^{-1}$ の条件でおこない、負荷を変えて測定した。

結果、定常温度は回転速度に対して変化し、高速では、低速と比較して温度が低くなり、同じ損失で約23%の温度下降が見られた。このため、ロータの回転による冷却効果の

図3 温度-損失特性

Fig. 3. Characteristics of temperature and loss.

表1 熱伝達率

Table 1. Heat transfer coefficient in SRM.

Rotational Velocity[min^{-1}]	Stream Velocity[m/s]	$h[W/m^2K]$
2000	4.2	30
3000	6.3	40

特性が得られ、特に本論文で用いるような小形のモータについては、外部のファンによる強制的な冷却がなされないため、その効果は大きい。このように、冷却効果をモデル化するために、モータとその内部の空気との熱伝達率 h_{i-ia} を決定することは重要である。

強制対流下での、熱伝達率はその固体の形状及び、向き等に大きく依存しており、突極構造で形状が複雑なSRM解析において、その導出は大きな問題である。しかしながら、空気の流れを考慮し流体解析をおこなう場合、ロータが回転している状態を考慮し、なおかつ三次元解析が必要とされ、計算コストが大きくなってしまいます。そこで本論文では、これに関して代表的な値を用いた。この際、モータ内部の熱伝達面の平均直径を考慮し、5cmの円柱の強制対流下での実験結果から得られたデータを参考にした⁽¹⁷⁾⁽¹⁸⁾。流速は、ロータ突極先端の回転速度と等しいと仮定して計算した。その結果を表1に示す。以上より、これらを h_{i-ia} として与える。

〈3・3〉 平均熱伝導率 熱伝導率 $\{\kappa_1, \kappa_2, \dots\}$ と厚さ $\{\delta_1, \delta_2, \dots\}$ の異なる平板を重ね合わせた場合の、厚さ δ の熱伝導率 κ は (7) 式で表される。

$$\frac{\delta}{\kappa} = \frac{\delta_1}{\kappa_1} + \frac{\delta_2}{\kappa_2} \dots \frac{\delta_n}{\kappa_n} \dots\dots\dots (7)$$

この κ を平均熱伝導率と呼ぶ。一般的に巻線の絶縁や、積層による絶縁皮膜等の熱伝導率は金属のそれと比較して2~3桁小さい。特に、FEMによるSRM等の回転機の温度解析では、それらの考慮が必要となるが、実際のメッシュ分割で、それをモデル化することは、三次元解析では困難である。これより、この平均熱伝導率の導入は不可欠であると考えられる。また、この値の導入により、熱伝導特性の異方性を取り扱うことができ、FEM解析により、これを容易に組み込むことが可能となる。

4. 解 析

解析モデルは、極数 6 : 4 の三相機の試作モータであり、低電圧で駆動し、電源電圧 10 V、出力 200 W 程度の比較的小形である⁽¹⁴⁾。モデルは、主にモータ本体（ロータ・ステータ部）、コイル部、シャフト部で構成されており、その他にベアリング等を固定させるフレーム部と、モータ全体を固定する固定板もメッシュ分割した。実際にはこれら全体を水平に固定するための土台が存在するが、後述する境界条件により考慮しない。

〈4・1〉 解析諸元 分割図を図 4 に、また FEM 解析での解析諸元を表 2 に示す。

〈4・2〉 材料と各物性値 材料は、SRM 本体がケイ素鋼板で、それをはさむフレーム部分がアルミニウム、そして、シャフトを鉄、コイルを銅として解析をおこなった。材料物性値はカタログ値を用いた。

平均熱伝導率は巻線と積層鋼板に与えられ、それぞれ絶縁皮膜を 1×10^{-3} 、 2×10^{-5} m として計算し 0.3、6.5 W/mK とした。この値は、電流方向に対する垂直方向と、鋼板面

図 4 試作 SRM のメッシュ分割図

Fig. 4. Mesh distribution of prototype SRM.

表 2 解析諸元

Table 2. Analysis conditions.

Analytical Method	3D FEM
Material	Linear
Type of Element	1st order Tetrahedral
Number of Elements	579504
Number of Nodes	105167
Time by a Step	1 min
Outside Air Temperature	24°C

表 3 材料物性値

Table 3. Parameters of SRM.

	Thermal Conductivity [W/mK]	Specific Heat [J/kgK]	Density [kg/m ³]
Air	2.2×10^{-2}	1.0×10^3	1.1×10^0
Silicon Steel	3.1×10^1	4.6×10^2	7.7×10^3
Copper	4.0×10^2	3.8×10^2	8.9×10^3
Iron	8.3×10^1	4.4×10^2	7.9×10^3
Aluminium	2.3×10^2	9.0×10^2	2.7×10^3

に対する垂直方向に課せられ異方性を示す。また、ステータとロータの熱伝導は、ベアリングを介しておこなわれており、その接触面積の小さいことを考慮にいて、その空隙部では、ほぼ空気と等しいとして計算した。これにより、ロータとステータとの接触による熱伝導はほとんどないと考えてよい。

〈4・3〉 境界条件 ここで境界条件についてまとめる。図 5 に示すように、モータおよびフレーム、固定板と外気に接する境界 1 は、自然対流での熱伝達率を用い、一般式の結果から一様に 8.0 W/mK とした。内気に接する境界 2 に関しては強制対流での熱伝達率を導入して、ステータ、ロータ各部において同一の値を用い、その値は表 1 より決定した。なお、解析境界条件は、先に述べたように、(2) 式のモータと外気、内気との熱伝達だけではなく、モータの下部の土台と接続されている箇所では、土台の熱容量が大きく温度変化しないと仮定した。これによりここでは Dirichlet 型の境界条件として外気温 T_{∞} を設定した。なお、本論文では解析対象が高温にならない等の理由で熱放射を考慮せず、ステータとロータのギャップ間での直接的な熱伝導は行われないとした。

〈4・4〉 損失分布 損失分布は、二次元 FEM 解析結果から求めた。図 6 に、駆動条件が 10 V 定電圧シングルパ

図 5 境界条件

Fig. 5. Boundary conditions.

図 6 鉄損分布

Fig. 6. Distribution of iron loss in SRM.

表 4 鉄損と銅損

Table 4. Iron loss and copper loss.

Rotational Velocity [min ⁻¹]	2000		3000	
	Measured	Calculated	Measured	Calculated
Iron Loss[W]	30.2	32.6	33.2	32.6
Copper Loss[W]	19.6	17.8	8.8	8.5

ルス駆動であるときの鉄損分布を示す⁽¹⁴⁾。また、損失に関して解析結果と測定結果との比較を表 4 に示す。

5. 解析結果

温度上昇を図 7、温度分布を図 8、9 に示す。通気孔での熱伝達 { $oa-ia$ } は、モータの内部と外部の空気圧の差による空気の移動により生じ、内部の空気圧は、ロータの回転によって生じるため、その伝達能力は等回転速度では一定であるとする。一方、定常状態において (5) 式は以下のようになる。

$$S_{oa-ia}h_{oa-ia}(T_{oa} - T_{ia}) = \sum S_{i-ia}h_{i-ia}(T_i - T_{ia}) \quad \dots\dots\dots (8)$$

本論文では、定常状態でのモータ鉄心部と内部空気の測定温度を代表点として用いて、 $S_{oa-ia}h_{oa-ia}/\sum S_{i-ia}h_{i-ia} = -(T_i - T_{ia})/(T_{oa} - T_{ia}) = 0.3$ とした。また、収束判定は $|(T_{in}^{n+1} - T_{in}^n)/T_{in}^n| < \varepsilon$ で、判定は $\varepsilon = 1.0 \times 10^{-8}$ とした。

温度上昇は、各所での測定値と比較して、時定数の誤差がかなり生じているが、一方、定常状態での温度特性は最大でも 2.6°C と誤差が小さく予測できた。これより、モータ内気の温度上昇をモデル化して、SRM 温度解析をおこなったが、解析結果より、それを考慮して解析することが可能であることを示した。そして、本体からフレームそして固定板への熱の分布が得られ、ロータ部においてステータ部より全体的に温度が高く、また、図 9 の断面図より巻線の温度上昇が SRM 全体で最も高いことを示した。

6. 考 察

最初に、モータ内部の温度上昇が解析におよぼす影響について検討する。これを考慮せずに内気温度を外気と同じにして計算した場合、図 7 の測定点 1 における定常温度は 2,000 min⁻¹ で 38.5°C (測定値 47.7°C)、3,000 min⁻¹ で 34.5°C (同 40.9°C) と誤差が大きくなり、過度の冷却効果が示された。この結果より、空気温度上昇を考慮した解析の必要性が検証され、それをモデル化した解析の有効性が確認された。

自然対流の熱伝達率は、 $\Delta T=10K$ を用いて導出され、 $h=8.0 W/m^2K$ と固定値として与えられ、解析をおこなったが、 $\Delta T=30K$ では $h=9.5 W/m^2K$ が得られ、伝熱面の温度に依存しており、解析での誤差の原因になると考えられる。ここで、この影響について簡単に評価する。実際の SRM モデルで、伝熱面全体が $\Delta T=30K$ あると仮定すると、 $h=8.0 W/m^2K$ の場合と $h=9.5 W/m^2K$ の場合での熱

図 7 温度上昇 (プロット: 実測, 線: 解析値, 上 2,000 min⁻¹, 下 3,000 min⁻¹)

Fig. 7. Temperature rise (Plot: Measured, Line: Calculated, Above: 2,000 min⁻¹, Below: 3,000 min⁻¹).

伝達量の差は 5.8W となる。実際はこれより小さいが、この誤差が、解析結果に若干影響を及ぼす可能性があると考えられ、より詳細な解析では、これを考慮に入れなければならない。

ロータの回転による熱伝達率に関して検討する。本論文では、ロータ突極先端の速度と風速が等しいという仮定でおこなってきたが、ここでは、その強制対流の代表値での解析の妥当性を示す。ステータとロータの間の熱伝導はベアリングのみで、おこなわれており、大変小さいと考えられる。したがって、ロータの温度はステータの温度に直接は依存せず、内部の空気の温度とその熱伝達により決定される。また、図 7 では、定常温度に関しては内部空気の温度は解析値と測定値とではほぼ一致しているため、ロータの温度により熱伝達率が評価できる。しかし、実際上、測定では停止直後にモータを開けて調べることができないため、シャフト部分の温度を測定した。結果、シャフト部の温度が測定値と解析値とではほぼ一致していることが分かる (表 5)。以上より、本論文で設定した強制対流での熱伝達率の値は妥当であると考えられる。

次にロータ部での温度について検討した。図 7、表 5 より、ロータの温度がステータの温度より高いことが予想さ

図 8 温度分布 (全体図)

Fig. 8. Temperature distribution (overview).

図 9 温度分布 (断面図)

Fig. 9. Temperature distribution (cross section).

表 5 シャフト部の温度

Table 5. Temperature at shaft.

Rotational Velocity[min^{-1}]	2000	3000
Measured [$^{\circ}\text{C}$]	49.0	43.5
Calculated [$^{\circ}\text{C}$]	49.9	44.1

れるが、ロータの温度は直接は測定できないため、以下の現象からその特性を調べた。モータ駆動終了時において、内気温度は図 7 と異なり図 10 のように、約 1 分くらいの間に急激な温度上昇がみられた。この原因について考察する。駆動終了時において、ロータ内部の空気はロータの回転停止により、移動が少なくなり、外部へ熱が放出されにくくなるため結果として上昇する。その温度は、平衡状態になるまで上昇すると考えられる。実験結果の表 6 より、空気の高温度がステータ部分の測定値と同程度かそ

図 10 SRM 駆動停止後の内部空気温度上昇

Fig. 10. Inside air temperature rise after operation.

表 6 SRM 駆動停止後の内気とステータ、ロータの温度

Table 6. Temperature of air, stator and rotor after rotation.

Rotational Velocity[min^{-1}]	2000	3000
Inside Air (Measured) [$^{\circ}\text{C}$]	50.7	39.9
Stator(Measured) [$^{\circ}\text{C}$]	47.7	40.9
Rotor(Calculated) [$^{\circ}\text{C}$]	53.3	47.8

れ以上であることが示され、内部に高い熱源があることを示唆しており、それがロータであること表しているといえる。解析結果についても同様に図 8 から、ロータ部分が高温になっていることが表わされ、解析結果の妥当性が示された。

この解析での反復計算については、図 2 より $|(T_{in}^{n+1} - T_{in}^n)/T_{in}^n| < \varepsilon$ で収束判定を $\varepsilon = 1.0 \times 10^{-8}$ として計算したところ 1 ステップ 1 min で計算した場合、1 ステップあたり 10 回以下で収束し、発散することはなかった。

図 7 より、ヨークと内気の定常温度に関して解析値と実験値がほぼ一致していることから考えても定常状態での温度解析においてはこのような手法で十分であるといえる。しかしながら、解析結果は、実験値と比較して時定数がかなり異なり、解析値の方が早い。この原因として、初期において内部の空気の温度の上昇が大きく推定されていることが挙げられる。図 7 より、内部空気温度の解析値と測定値との間に最大 $2,000 \text{ min}^{-1}$ で 5.0°C 、 $3,000 \text{ min}^{-1}$ で 3.3°C の誤差がみられる。この差によって推定されるモータの熱伝達による冷却効果は、 $2,000 \text{ min}^{-1}$ で 10.1 W 、 $3,000 \text{ min}^{-1}$ で 8.9 W となる、この値は、表 4 での鉄損・銅損から比較しても無視できず、その冷却効果によりモータの温度上昇が抑えられる。以上より、内部の空気温度の誤差が解析に大きく影響していることがわかった。その温度の誤差の原因として、通気孔における放熱能力を固定したことが考えられる。通気孔での空気の流れはロータの回転の効果だけでなく、温度上昇にも影響され、特にその上昇率の大きい駆動開始直後にその影響は大きくなる。そのため、通気孔

の放熱能力は一定とはならないと考えられるが、今後の検討課題である。

7. まとめ

本論文では、SRM 駆動時の温度上昇を FEM を用いて解析をおこなった。FEM 解析では、鉄損・銅損の発熱の分布データを直接利用することが可能であり、また、積層鋼板等の熱伝導特性の異方性をモデル化することが容易である。解析モデル SRM は比較的小さくファン等による通気をしないタイプであり、モータ内部の空気の温度上昇を考慮することが必要で、これをモデル化した。解析は、モータ内部の空気の熱のやりとりを考慮にいたした式を定式化して、熱伝導方程式と連立して解くものである。

解析により温度分布や非定常状態での結果が得られ測定値と比較した結果、温度分布は定常状態において、比較的高い精度の解析結果が得られた。これにより、ステータ、ロータ部の熱の移動を予測することが可能となり、モータ内ではロータのほうが温度が高いことを示した。また、巻線をはじめとした局所的な加熱の箇所を、検知することができた。一方、モータ内部の空気の温度上昇をモデル化した本解析の有効性は確認されたが、非定常状態において時定数に違いがみられた。その問題点として、モータ内部の空気の温度の誤差が挙げられ、それが時定数に大きな誤差を生じさせていることがわかった。結果、この点については、モデリング、特に通風孔での、より詳細な冷却モデルの必要性が考えられ、これは今後の課題である。

(平成 14 年 4 月 30 日受付, 平成 14 年 12 月 2 日再受付)

文 献

- (1) Nakata, Takahashi: "Finite Element Method for Electrical Engineering 2nd Edition", Morikita (1982)
中田・高橋: 電気工学の有限要素法 第 2 版, 森北出版 (1982)
- (2) IEEJ: "Technical Report No.663" (1998)
- (3) T.J.E. Miller: "Electronic Control of Switched Reluctance Machines", Butterworth-Heinemann (2001)
- (4) T.J.E. Miller: "Brushless Permanent-Magnet and Reluctance Motor Drives", CLARENDON PRESS OXFORD (1989)
- (5) N. Matsui and Y. Takeda: "Reluctance Motors - State-of-the-art-", T. IEEJ, Vol.118-D, No.6 (1998-6)
- (6) N. Okabe, M. Sanada, S. Morimoto, Y. Takeda, N. Matsui, and H. Yamai: "Evaluation of noise reduction for interior airgap SRM", IEEJ Workshop, RM00-34
- (7) H. Yoshino, K. Baba, and H. Kawaguchi: "Making the Switched Reluctance Motor Highly Effective", IEEJ Workshop, RM98-153

- (8) T. Aizawa, K. Nishihama, and K. Sawa: "Core materials and efficiency of Switched Reluctance Motor", IEEJ Workshop, RM98-152
- (9) W. Nakamura, T. Yanada, T. Watanabe, and O. Ichinokura: "Experimental Considerations on core materials of switched reluctance motor", IEEJ Workshop, MAG00-101
- (10) C. Kaido, T. Wakisaka, T. Muneta, and K. Takeda: "The functions of electrical steel sheets in rotating machines and the new approaches", IEEJ Workshop, RM96-84
- (11) K. Hattori, K. Ide, K. Kobayashi, I. Miyashita, H. Okabe, A. Semba, and T. Watanabe: "Development of a Highly Efficient Air-Cooled Turbine Generator with Inner Coolers", IEEJ Workshop, RM01-156
- (12) Y. Kawase and K. Suwa: "3-D Finite Element Heat Analysis of Motors Taking into Account Eddy Currents Caused by Dynamic Field", IEEJ Workshop, RM96-105
- (13) Y. Lee, H. Lee, and S. Hahn: "Temperature Analysis of Induction Motor with Distributed Heat Sources by Finite Element Method", IEEE T. Magn., Vol.33, No.2, pp.1718-1721 (1997-2)
- (14) S. Inamura, H. Shibayama, and K. Sawa: "A Study on Simple Method of Iron Loss in Switched Reluctance Motor", T. IEEJ, Vol.122-D, No.10 (2002-10)
- (15) J.P. Holman: Heat Transfer, McGraw Hill Book Company (1986)
- (16) L.J. Segerlind: Applied Finite Element Analysis, Translated by T. Kawai, Maruzen (1978) (in Japanese)
L.J. Segerlind, 川井忠彦訳: 応用有限要素解析, 丸善 (1978)
- (17) I. Tanishita: Heat Transfer Engineering, Shokabo (1986) (in Japanese)
谷下・市松: 伝熱工学, 裳華房 (1986)
- (18) F.M. White: Heat Transfer, Addison-Wesley Publishing Company (1984)

稲村 慎吾 (学生員) 1973 年 4 月 10 日生まれ, 97 年慶應義塾大学理工学部電気工学科卒業, 99 年同大学理工学研究科修士課程修了, 現在, 同大学理工学研究科博士課程在籍。有限要素法を用いた SRM 鉄損解析に関する研究に従事。

沢 孝一郎 (正員) 1941 年 12 月 11 日生まれ, 1964 年慶應義塾大学工学部電気工学科卒業。1969 年同大学大学院工学研究科博士課程単位取得修了。工学博士。現在, 慶應義塾大学理工学部システムデザイン工学科教授。研究分野は, 小形モータ (DC モータの整流, スイッチトリラクタン্সモータの特性解析他), 電気接点の接触信頼性, 磁界解析 (FEM, BEM) ならびに高温超電導応用に関心をもって

いる。電気学会, 電子情報通信学会, IEEE 等会員。