G0610205

熱回路網行列による EV 用モータの伝熱特性評価手法の構築 *

(EV 用モータにおける熱回路網法に基づくオブジェクト指向型の温度解析手法について)

平野 寛^{*1}, 小笠原 仁^{*1}, 江尻 光良^{*2}, 湯浅 朋久^{*3}, 金子 暁子^{*4}, 阿部 豊^{*4}**Estimation of heat transfer property among parts on EV motor using thermal network method
(Development of Object-oriented methodology for temperature distribution within EV motor)**Satoru HIRANO^{*1}, Hitoshi OGASAWARA^{*1}, Mitsuyoshi EJIRI^{*2}, Tomohisa YUASA^{*3}, Akiko KANEKO^{*4} and Yutaka ABE^{*4}^{*1} Meidensha corporation. Research Section 2, Powertronics Research Department,
System Technology Research Laboratories, Research and Development Group
825, Nakadate, Chuo-shi, Yamanashi 409-3894, Japan^{*2} Meidensha corporation. Analytic Simulation and Advanced Control Center,
System Technology Research Laboratories, Research and Development Group
Research and Development center, 2-8-1, Osaki, Shinagawa-ku, Tokyo, 141-8565, Japan^{*3,*4} Tsukuba Univ. Dept. of Mechanical Engineering 1-1-1, Tennodai, Ibaraki, 305-0006, Japan

The aim of this study is to develop the Object-oriented method for deducing temperature on apparatus, understanding how to relate flow with heat transfer characteristics of coaxial cylinders which simulates an Electric Vehicle (EV) motor geometry. There are two experimental apparatuses, for flow visualization and for temperature measurement. In addition, numerical simulation of flow and heat transfer inside model of an EV motor is achieved. Heat transfer on gap and rotor-end part are good agreement with experimental result of which $Nu=0.21(TaPr)^{1/4}$ and $Nu=1.26Re^{0.385}$, respectively. Moreover, thermal network model in the experimental apparatus is achieved in order to estimate heat transfer characteristics among every part. It is shown that under the detailed physical perspective, complex thermal relation can be reduced into linear relation among elements.

Key Words : EV motor, Taylor-Couette flow, Object-oriented method, Thermal network model, Heat transfer**1. 緒 言****1.1 はじめに**

近年の電気自動車 (以下, EV) に搭載する駆動用のモータ (以下, EV モータ) において, 小型化, 高出力化の要求から発熱密度が増大する傾向が見られる. モータが過熱することで回転磁界を生むコイルの絶縁皮膜が溶融してショートを起こしたり, 永久磁石が搭載されている場合, 不可逆減磁が生じてトルクが失われたりする故障モードが起り得る. このような不具合を起こさないためには, モータの設計段階であらかじめ伝熱システムを把握しておくことが必須である. しかしながら, 流動構造と伝熱の関係について検討は乏しく, 例えばロータ回転数と除熱能力との相関について定量評価が十分ではないのが現状である. 更に, 除熱特性を調べる為にモータ全体を数値解析にかける方法では, Taylor 渦等に代表される速度勾配が大きく局所性の高い現象を同時に扱わなくてはならないため, 計算機資源の制約から正確な見積もりは困難で現実的ではない. 本研究では, 図 1 に表すようにモータ各部品の温度特性を個別に検討・モジュール化して熱回路網行列を構築して, オブジェクト指向型の効率の良い温度解析手法を提案する. ここでのオブジェクト指向とは, 図 2 に示すように温度を取得する要素間が

* 原稿受付 2014 年 6 月 30 日

^{*1} 正員, 株式会社明電舎 研究開発本部 システム技術研究所 パワトロ研究部 技術第二課 (〒 409-3894 山梨県中央市中橋 825)^{*2} 株式会社明電舎 研究開発本部 システム技術研究所 解析・制御センター (〒 141-8565 東京都品川区大崎 2-8-1)^{*3} 学生員, 筑波大学大学院 システム情報工学研究科 構造エネルギー工学専攻 (〒 305-0006 茨城県つくば市天王台 1-1-1)^{*4} 正員, 筑波大学

Email: hirano-sat@mb.meidensha.co.jp

Fig. 1 Motor model of which structure is divided into some parts for Object-oriented formulation.

Fig. 2 Thermal network model of an EV motor geometry, consisting 5 nodes(objects) of which thermal resistances should be known for calculation.

熱抵抗率 $R_{i,j}$ で接合されると仮定した場合、要素の温度 T_i が $R_{i,j}$ を連立させることで一意的に決まることを指す。オブジェクト指向型の温度推定により、特定の要素間の熱伝達率が変動した場合に該当部分の $R_{i,j}$ のみ変化させることで温度予測が可能となるため、有限要素解析 (FEM) 等と比較して一定の精度で簡便な計算が期待出来る。

1.2 研究の背景

モータ各要素間の熱抵抗率 $R_{i,j}$ を求める為、固体間の熱伝導、及び間隙部分では空気等の流体における熱伝達を考慮する必要がある。モータには軸に動力を伝えるため回転するロータと、回転磁界を作るステータが組み込まれており、両者の間には径に比較して非常に狭いギャップを持つ回転二重円筒が実現される。ここで過去の知見に注目すると、回転二重円筒間の流れ場では図3に示すような流動遷移が報告されている⁽¹⁾。(a)はロータの回転数が比較的小さい場合で Couette 流と呼ばれ、回転方向と軸方向について一定の流れとなる。一方、ロータ回転数が上昇してレイノルズ数 Re がある値 Re_c に達すると (b) に示すようなドーナツ状の流れ場が実現され、Taylor 渦と呼ばれる流動様式に発達する⁽²⁾。但し

$$Re = \frac{r_i \omega d}{\nu} \quad (1)$$

であり、 r_i はロータ半径 [m]、 d はロータとステータのギャップ [m]、 ν は作動流体の動粘性率 [m^2/s] を表す。更にロータの回転数が上昇すると (c) に示すような揺動を伴った流れ場となり、ロータ回転数がこれ以上になると円筒間の流れ場は時間的にも空間的にも乱れ、発達した乱流に遷移する。

Fig. 3 Schematic drawing of (a) Couette flow, (b) Taylor vortex flow, (c) Wavy vortex flow.

Taylor 渦に起因する伝熱特性に関する考察として、Becker はヒータで熱したロータと温度を一定においたステータ間を通過する熱量を実験的に捉えており、ロータの回転に伴って熱流束が増大することが示されている⁽³⁾。この際、 Re が Re_c を超えたところで熱伝達率の急激な上昇が確認されているため、Taylor 渦が伝熱に影響を与える可能性が示唆された。更に同様の実験装置において、橋は作動流体を異なる種類で試したところ⁽⁴⁾、いずれの流体においても Re が Re_c を超えたところで熱伝達率の上昇が確認されており、Taylor 渦に起因する伝熱特性の変化は流体の種類によらず普遍的な性質であると考えられる⁽⁵⁾。

2. 熱回路網法による温度評価

本研究では熱回路網計算の実験的検証の為、モータ構造を模擬したモータモデルを作成して除熱特性を調べた。図 4(a)に実験装置、(b)にその概略図を示す。実験装置は、モータ、インバータ、軸、ロータ、ステータ、ヒータ、フレーム、スリップリング、スライダック、温度データロガー（温度分解能 0.1 [°C]、時間分解能 0.1 [s]）から構成される。ステータの直径は 0.22[m]、ロータの直径は 0.218 [m] であり、ステータとロータの半径方向における隙間が 0.001 [m] と非常に狭い。ステータの長さは 0.1 [m]、ロータの長さは 0.04 [m] である。図 4 では撮影のためステータが外部に露出しているが、実験時には断熱材で巻かれてステータから外気への放熱を防いだ。更に、フレームのモータ側にも断熱材を貼り、外気への放熱は反対側からのみ行われるように設定した。ロータにはヒータ（ニクロム線：抵抗値 46.1 [Ω]）が埋め込まれており、スライダックからスリップリングを介してヒータに電流を流し発熱させる。

Fig. 4 Apparatus for taking thermal property. (a)Snapshot where thermal insulations will be equipped except right-side on the frame. (b)Schematic drawing of the structure.

熱回路モデル図 2 を図 4 に適用することで、各部位に出入りする熱量はエネルギー保存の関係より、

$$\begin{aligned} Q_{i,j} &= C_{i,j}(T_i - T_j) , \\ \sum_{i,j=\text{total flux}} Q_{i,j} &= Q_i \end{aligned} \quad (2)$$

と書ける。但し、 $Q_{i,j}$ は部品 i から部品 j に流れる熱量 [W]、 T_i は部品 i の温度、 Q_i は部品 i に生じる発熱量、及び、 $C_{i,j}$ は部品 i と部品 j 間の熱コンダクタンスを表し、熱抵抗率 $R_{i,j}$ を導入すると $C_{i,j} = 1/R_{i,j}$ と書ける。したがって理論上、 T_i について $R_{i,j}$ の関数として式 (2) を解くことで各要素での温度が求められる。

図 2 の伝熱モデルにおいて各要素の温度は式 (2) より

$$\begin{pmatrix} T_r \\ T_{st} \\ T_{sh} \\ T_f \\ T_e \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{1}{R_{r,st}} + \frac{1}{R_{r,f}} + \frac{1}{R_{r,sh}} & -\frac{1}{R_{r,st}} & -\frac{1}{R_{r,sh}} & -\frac{1}{R_{r,f}} & 0 \\ -\frac{1}{R_{r,st}} & \frac{1}{R_{r,st}} + \frac{1}{R_{st,f}} & 0 & -\frac{1}{R_{st,f}} & 0 \\ -\frac{1}{R_{r,sh}} & 0 & \frac{1}{R_{r,sh}} + \frac{1}{R_{sh,f}} & -\frac{1}{R_{sh,f}} & 0 \\ -\frac{1}{R_{r,f}} & -\frac{1}{R_{st,f}} & -\frac{1}{R_{sh,f}} & \frac{1}{R_{r,f}} + \frac{1}{R_{st,f}} + \frac{1}{R_{sh,f}} + \frac{1}{R_{f,e}} - \frac{1}{R_{f,e}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}^{-1} \begin{pmatrix} Q_r \\ Q_s \\ 0 \\ 0 \\ T_e \end{pmatrix} \quad (3)$$

と記述できる。式 (3) 右辺の正方行列は熱回路網行列と呼ばれ、各 $R_{i,j}$ と発熱量を知っておくことで、出力が明確な場合に部品上の温度が一意的に定まることになる。

過去に行われた回転二重円筒管内の伝熱実験等により、ギャップ領域では式(4)が成り立つことが分かっている。ここで、回転二重円筒間での Nu は、楠等が伝熱実験によって求めており⁽⁴⁾、 Ta が 10^8 未満では

$$Nu = 0.21(TaPr)^{\frac{1}{4}} \quad (4)$$

の関係を得ている。但し、 Pr は作動流体のプラントル数、 Ta は流速や空間形状等の環境を反映したテイラー数を表し

$$Ta = Re^2 \frac{d}{r_i} \quad (5)$$

と定義される。したがって、ギャップ領域の熱抵抗率 $R_{r,st}$ は、フーリエの熱伝導の法則 $Q = -\lambda \vec{\nabla} T$ と式 (2) との比較から

$$R_{r,st} = \frac{d}{0.21(TaPr)^{\frac{1}{4}}\lambda S} \quad (6)$$

と表せる。但し、 Re が Taylor 渦を生じる以前の小さな値においては特別な流れ場が生じていないことが分かっているため、 Re が 500 未満では $Nu=1$ に置き換える。

同様に、ロータとフレーム間の熱抵抗率 $R_{r,f}$ を求めるため、過去に泉⁽⁶⁾によって行われた回転円盤による詳細な伝熱実験データがあるので参考にする。泉の実験では円柱状の空間の一方の端面に加熱した本研究とほぼ同スケールである直径 $\phi=200\text{mm}$ の回転円盤を配置して、空洞を隔てて静止した反対側の端面間の温度差を測定することで両面間のヌセルト数 Nu を求めた。空気を媒質とした実験によると、 $Nu=1.26Re^{0.385}$ を得ている。したがって今回の実験に適用することで $R_{r,f}$ は

$$R_{r,f} = \frac{L_m}{1.26Re^{0.385}\lambda S} \quad (\because Re = 4r_i^2\omega/\nu) \quad (7)$$

と表せる。但し、 L_m はロータ端部の軸長を表す。

ステータとフレーム間の熱抵抗率 $R_{st,f}$ については、 R_g をギャップの熱抵抗率と定義すると、ステータの軸と垂直な断面積を $S_s [\text{m}^2]$ 、 $\lambda_s=44 [\text{W/m K}]$ を部品 (S45C 等) の熱伝導率として

$$R_{st,f} = \frac{L/2}{\lambda_s S_s} + R_g \quad (8)$$

と表せる。ここで、係数 $1/2$ はステータの片側に熱が伝播することを意味している。 R_g は接続部品表面のうねりや粗さ等の複雑な要因で決まるが、現状では明確な推定手段が無いため実験から求めることとする。図 5 (a) に示すように、本実験装置のステータと片方のフレームを取り出し、ステータの端面を加熱して伝熱実験を行った。図 5 (b) の実験結果により、 T_i と T_o の差分から $R_g = 0.61$ が得られる。同様に、 $R_{sh,f}$ はシャフトからフレー

Fig. 5 Estimation of R_g according to temperature gradient through the stator. (a)Retrieving point of temperature, (b)Temperature difference on the interface.

Fig. 6 Comparison experimental data with the calculation where $R_{r,st} = d/(Nu\lambda S)$, $R_{r,f} = L_m/(1.26\lambda S Re^{0.385})$, $R_{f,e} = \delta/(Nu_e\lambda S)$, $R_{st,f}=0.93$, $R_{sh,f}=0.6$, $R_{r,sh}=0.66$, $Q_r=130$ and $Q_s=0$ according to Eq (3) .

ムにかけての熱抵抗率であり、シャフトの半径が $0.021 [\text{m}]$ 、 $L_m=0.03 [\text{m}]$ として $R_{sh,f} = 0.6$ を得る。

$R_{r,sh}$ はロータからシャフトへの熱伝導に起因する熱抵抗率で、シャフト半径を r_{sh} とおけば以下のように書ける。

$$R_{r,sh} = \frac{\ln(r_i/r_{sh})}{2\pi L_m \lambda_s} \quad (9)$$

最後に、 $R_{f,e}$ はフレームから外気にかけての熱抵抗率であり、垂直平板における自然対流熱伝達の伝熱実験から得られた値を基に導出を行う。フレームから外気への放熱を Nu_e で表すと、境界層理論に基づけば以下の Churchill-Chu の式⁽⁷⁾

$$Nu_e = \left[0.825 + \frac{0.387Ra^{\frac{1}{4}}}{\left\{ 1 + (0.492/Pr)^{\frac{9}{16}} \right\}^{\frac{8}{27}}} \right]^2 \quad (10)$$

によって見積もることができる。但し、 Ra はレイリー数であり、 $\beta=3 \times 10^{-3} [1/K]$ を空気の体膨張率、 $L_h=0.258 [m]$ をフレームの高さとすれば、グラスホフ数 Gr は

$$Gr = \frac{g\beta\Delta TL_h^3}{\nu^2} \quad (11)$$

と定義されるので $Ra=GrPr$ と書ける。尚、 ΔT はフレームと外気間における温度差で $\Delta T=20$ を仮定した。したがって $R_{f,e}$ はフレームから外気に対する温度境界層厚み δ を見積もることにより式 (6) と同様にして次のように表せる。

$$R_{f,e} = \frac{\delta}{Nu_e \lambda S} \quad (\because \delta = 3.936 L_h Gr^{-\frac{1}{4}} Pr^{\frac{1}{4}} (0.952 + Pr)^{\frac{1}{4}}) \quad (12)$$

以上から得られた熱抵抗率を用いて式 (3) に基づき温度を計算した結果を、実験と比較して図 6 に示した。

図 6 により、式 (3) による温度計算では低 Re から高 Re にかけて装置の温度を精度良く再現できていることが分かる。特に、ロータとステータの温度が Re が上昇するにつれて急激に減少する様子が実測と合うことから、解析値は Taylor 渦に起因する伝熱特性の変化を良く捉えていると考えられる。ここで、 Re が 500 以下においてギャップ領域では $Nu=1$ であるにも関わらず温度が変化するのは、ロータからフレーム間の熱抵抗率 $R_{r,f}$ が Re に依存しているためである。一方、ロータやステータとは対照的に、フレームの温度はロータの回転には全く依存していない。これは外気にはフレームからのみ放熱するため、フレームと外気間では熱量が等しければ温度差は常に一定に保たれるからである。

3. 結 言

EV モータの伝熱構造を表す熱回路網モデルを作成して、各要素間の熱抵抗率をモジュール化することによるオブジェクト指向型の熱回路網計算を提案した。更に、伝熱実験によりモータを模擬した部品各所の温度を計測して、ロータの回転を取り入れた熱回路網行列による結果との比較を行った。ギャップ領域では Re は $Re_c=500$ 以上で Taylor 渦が生じるため、 Re が 500 以上の場合において、 Nu はギャップ領域では橋、ロータ端部では泉が提案した式を用いて評価した。その結果、ロータ回転速度の広い範囲で高い精度での熱回路網による計算を実現できた。

文 献

- (1) Hirano, S., Moromizato, Y., Abe, Y. and Kaneko, A., "Visual observation of flow in rotating coaxial cylinders with narrow gap simulating an EV motor", *Japan Society of Mechanical Engineers*, Vol.79 (2013), No.806, pp.1951-1962.
- (2) Taylor, G. I., "Stability of a viscous liquid contained between two rotating cylinders", *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A, Containing Papers of a Mathematical or Physical Character*, Vol.223 (1923), pp.289-343.
- (3) Becker, K. M. and Kaye, J., "Measurements of diabatic flow in an annulus with an inner rotating cylinder", *Journal of Heat Transfer*, Vol.84 (1962), pp.97-105.
- (4) Tachibana, F. Fukui, S., "Convective Heat Transfer of the Rotational and Axial Flow between Two Concentric Cylinders", *Japan Society of Mechanical Engineers*, Vol.7 (1964), No.26.
- (5) Fénot, M., Bertin, Y., Dorignac, E. and Lalizel, G., "A review of heat transfer between concentric rotating cylinders with or without axial flow", *International Journal of Thermal Sciences*, Vol.50 (2011), pp.1138-1155.
- (6) 泉 亮太郎, "回転円盤よりの熱伝達について (第一, 第二報)", *日本機械学会論文集*, Vol.20, No.100 (1953), pp.791-796.
- (7) James, R. W., "Fundamentals of Momentum, Heat and Mass transfer", *John Wiley and Sons* 2007.