EV モータ構造を模擬した回転二重円筒への熱回路網モデルの適用可能性 Applicability of the thermal network to the rotating coaxial cylinders simulating an EV motor geometry

○学 駒ヶ嶺 将孝 (筑波大院) 正 平野 寛 (筑波大院/*明電)
正 金子 暁子 (筑波大) 正 阿部 豊 (筑波大)

Masataka KOMAGAMINE, Satoru HIRANO, Akiko KANEKO, Yutaka ABE

University of Tsukuba, 1-1-1, Tennoudai, Tsukuba, Ibaraki, 305-8573, Japan

*Meidensha Corporation, 825, Nakadate, Chuo-shi, Yamanashi, 409-3894, Japan

Electric Vehicle (EV) motors have the problem on heat removal. Arranging thermal-hydraulic characteristics in the motor is required. However, heat transfer characteristics in an EV motor is not clarified. The aim of the present study is to develop a means of predicting the temperature in the coaxial cylinders. In the present study, thermal network is introduced. With experimental apparatus simulating an EV motor, temperature at every part is measured. We build the thermal network in the experimental apparatus. We estimate the thermal resistance between every part., and evaluate applicability of the thermal network for coaxial cylinders.

Key Words: EV motor, Heat transfer behavior, Thermal network, Thermal resistance

1. 諸言

電気自動車 (=Electric Vehicle 以下 EV) の技術面で、効率の良い放熱に適するモータ形状を設計することが課題である。EV モータは高速回転するロータと固定されたステータからなる回転二重円筒となっている。この2つの円筒の隙間は非常に狭い。この特徴を有した回転二重円筒における伝熱特性の解明は非常に重要である。

諸見里ら⁽¹⁾は、EVモータを模擬した回転二重円筒間内の流動可視化実験を行った。 $Re = 140-1784$ において、隙間とロータ端部の境界部分を通過するような粒子が観測され、 Re 数が増加するにつれ境界部分を通過する回数は増加することを示している。平野ら⁽²⁾はEVモータ内のロータステータ間の狭い領域における熱流動解析を行った。しかし、モータ内部全体における伝熱特性は明らかにされていない。

そこで、本研究では、EVモータ構造を模擬した同軸回転二重円筒間内の温度を短時間で予測する手法を開発することを目的とする。実験装置における熱回路網モデルを構築する。局所温度計測および熱流動解析から得られる熱抵抗率を熱回路網モデルに適用することによって、各構成部品の温度を予測する。

本論文では、回転するロータに埋め込まれたヒータにより熱を加え、実験装置内各位置での温度を計測する。実験装置の簡易な熱回路網において、実測温度分布と熱回路網モデルから計算される温度分布を比較することにより、熱回路網モデルのEVモータへの適用可能性を評価する。

2. 実験装置と実験条件

図1に実験装置の概略図を示す。実験装置はモータ、インバータ、軸、ロータ、ステータ、ヒータ、スリップリング、電圧調整器、温度データロガーから構成される。ステータの直径 $2r_o$ は $2r_o = 220$ mm, ロータの直径 $2r_i$ は $2r_i = 218$ mm であり、半径方向の隙間 d が $d = 1$ mm と非常に狭い。ステータの長さは100 mm, ロータの長さは40 mmである。ロータにはヒータが円状に埋め込まれてあり、電圧調整器からスリップリングを介しヒータに電流を流し発熱させる。ロータおよび軸にはそれぞれ熱電対が設置されており、スリップリングを介して温度を計測する。インバータ周波数を変化させ、ロータの回転数を調整する。ロータは二重管であり、外管と内管の間にヒータが挟み込まれている。ロータ、軸に各1点熱電対を取り付けている。ロータの左端

Fig.1 Experimental apparatus.

を基点とし、スリップリングに向かう軸方向を正とする。ステータおよびフレームにおいて、基点から軸方向に 20, 68, 72, 76 mm の位置に熱電対を取り付けている。熱電対は直接データロガーにつながれている。実験条件としてヒータ入力を 130 W とし、角速度 Ω rad/s を変化させ、

$$Re = \frac{\rho(r_i\Omega)(r_o - r_i)}{\mu} \quad (1)$$

で表される式から、回転数を Re 数に変換する。 ρ は空気密度 [kg/m^3], μ は空気粘度 [$\text{Pa} \cdot \text{s}$] である。 $Re = 0, 389, 785, 1190, 1590, 2010$ の各 Re 数の条件下で、温度が定常になるまでの 4.5 h 間、各点の温度を計測した。

3. 熱回路網

3.1 回転二重円筒における熱回路網

図2に本実験装置に対応する熱回路網のモデルを示す。部品接点 ij を想定した時、 ij 間の電気回路における電位差を温度差 ΔT °C, 電流を移動熱量 Q_{ij} W, 抵抗値を熱抵抗率 R_{ij} °C/W に対応させている。ここで、回路則を表記すると、

$$\sum_j Q_{ij} = 0 \quad (2)$$

$$R_{ij} = \frac{1}{Q_{ij}} (T_i - T_j) \quad (3)$$

であり、これより図2の熱回路網の行列表記は(4)式となる。

$$\begin{bmatrix} \frac{1}{R_{ra}} & -\frac{1}{R_{ra}} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{1}{R_{ra}} & -\frac{1}{R_{ra}} - \frac{1}{R_{as}} & \frac{1}{R_{as}} & \frac{1}{R_{of}} & 0 \\ 0 & \frac{1}{R_{as}} & -\frac{1}{R_{as}} - \frac{1}{R_{sf}} & \frac{1}{R_{sf}} & 0 \\ 0 & \frac{1}{R_{of}} & \frac{1}{R_{sf}} & -\frac{1}{R_{of}} - \frac{1}{R_{fe}} & \frac{1}{R_{fe}} \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{R_{fe}} & 1 \end{bmatrix} \begin{pmatrix} T_r \\ T_a \\ T_s \\ T_f \\ T_e \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} Q_r \\ 0 \\ -Q_s \\ 0 \\ T_e \end{pmatrix} \quad (4)$$

ここで、 Q_h はヒータ入力 [W]、 Q_s はステータ入力 [W] である。 T_r 、 T_a 、 T_s 、 T_f 、 T_e はロータ、内気、ステータ、フレーム、外気の温度[°C]である。 Q_{ra} 、 Q_{as} 、 Q_{af} 、 Q_{sf} 、 Q_{fe} はロータから内気、内気からステータ、内気からフレーム、ステータからフレーム、フレームから外気への移動熱量 [W] である。 R_{ra} 、 R_{as} 、 R_{af} 、 R_{sf} 、 R_{se} 、 R_{fe} はローター内気間、内気-ステータ間、内気-フレーム間、ステータ-フレーム間、フレーム-外気間の熱抵抗率[°C/W]である。

3.2 各熱抵抗率の算出

(4)式において、局所温度計測や熱流動解析から各熱抵抗率を算出する。まず、固体-固体の接触であるステータ-フレーム間の熱抵抗率 R_{sf} の計測を行う。図 1 の実験装置からステータとフレームを取り出し、接合する。ステータにヒータを巻き、2 節の実験と同様に基点を設定し、z 方向の各位置に熱電対を取り付けた。ヒータを発熱させ、各点における温度を計測した。

$$R_{sf} = \frac{L}{Ak_{Stator}} + R_g \quad (5)$$

より、ステータ、フレーム間の熱抵抗率 R_{sf} を求める。 k_{Stator} はステータの熱伝導率[W/(m・K)]であり、 L はステータ-フレーム間の距離 ($L = 0.08$ m) である。 A は伝熱面積[m²] である。 R_g は接触熱抵抗[°C/W]である。(5)式より、 $R_{sf} = 0.935$ °C/W が得られた。次に、内気-ステータ間の熱抵抗率 R_{as} を求める。図 3 に隙間における平野らの熱流動解析結果⁽²⁾を示す。横軸が次式で表されるテイラー数 Ta である。

$$Ta = \frac{\Omega^2 \rho^2 r_i d^3}{\mu^2} \quad (6)$$

縦軸がヌッセルト数 Nu をプラントル数 Pr の 3 分の 1 乗で除したものである。 $Ta > 10^4$ の範囲で、隙間部の熱通過は橋ら⁽³⁾が提唱する実験式 $Nu = 0.092(Ta \cdot Pr)^{1/3}$ に近似することがわかる。各 Ta 数での Nu 数を橋らの実験式で見積もり、

$$R_{as} = \frac{\frac{d}{2}}{k_{air} Nu A} \quad (7)$$

に代入し、 R_{as} を算出する。また、ローター内気間の熱抵抗率 R_{ra} は $R_{ra} = R_{as}$ とする。さらに、フレーム-外気間の熱抵抗率 R_{fe} は垂直平板での自然対流熱伝達率の見積りである LeFevre の式⁽⁴⁾を用いて Nu 数を算出し、この Nu 数を用いて R_{fe} を計算し、 $R_{fe} = 0.300$ °C/W を得た。

4. 各熱抵抗率の熱回路モデルへの適用

得られた熱抵抗率を熱回路モデルに適用し温度を算出する。この温度分布と実測温度分布を比較することで、熱回路モデルによる温度予測の適用可能性を検討する。内気-フレーム間の熱抵抗率 R_{af} をパラメータとして変化させる。各熱抵抗率および外気温 T_e を(4)式に適用し、ヒータ、ステータ、フレームの温度を計算した。図 4 に結果を示す。横軸は Re 数、縦軸は温度である。 Re 数の増加につれて、ヒータ、内気、ステータ、フレームの温度が減少していることが分かる。これは、回転数の増加が装置内の熱の拡散に寄与していると考えられる。また、高い Re 数ほど、実験と計算の温度差が小さくなることが分かる。これは、 Re 数が大きくなると、橋らの実験式における Ta 数の適用範囲に収まるからだと考えられる。そして、 R_{af} が大きくなるほど温度差は大きくなり、 R_{af} の温度計算への影響が示された。以上より、熱回路モデルにより温度を予測できることが示された。

Fig.2 Thermal network.

Fig.3 Distribution of mean Nu according to Ta .

Fig.4 Comparison between the measured temperature and the temperature obtained by calculation of the thermal network with changing R_{af} .

5. 結言

EV モータ構造を模擬した回転二重円筒の装置を製作し、温度計測実験を行った。また、実験装置における熱回路モデルを構築した。実測温度分布と熱抵抗率を熱回路モデルに適用させて得られる温度分布を比較した。これにより、熱抵抗率がロータ、ステータ、フレームの温度に及ぼす影響を評価できることを示した。

参考文献

- (1) 諸見里ら, 日本機械学会 関東支部第18期総会講演会論文集 1913, (2012.3), pp.87-88.
- (2) 平野ら, 熱工学コンファレンス講演論文集 No. 12-62 (2012.11) .pp.461-462.
- (3) Tachibana F., Fukui S., Bulletin of JSME, 7 (1964), pp.385-391.
- (4) 日本機械学会, 伝熱工学, (2005), pp.87-90.