

集電材料の摩擦熱による接点温度の測定および解析結果

○ [電] 山下 主税 根本 公紀

[電] 小原 拓也 長坂 整 (鉄道総合技術研究所)

Measurement and analysis results of contact temperature due to frictional heat of current collecting materials

○Chikara Yamashita, Koki Nemoto, Takuya Ohara,
Sei Nagasaka (Railway Technical Research Institute)

Understanding the contact temperature between the current collecting materials such as the contact wire of overhead contact line and the contact strip of pantograph is very important for clarifying the wear phenomenon. However there are few reports of measuring the contact temperature that rises due to frictional heat. In this paper, we perform a non-current wear test on a combination of a copper plate and an iron-based sintered alloy contact strip, and report the results of measuring the contact temperature using thermoelectromotive force. In addition, we report the results of analyzing the contact temperature distribution due to frictional heat by two-dimensional heat conduction analysis.

キーワード：集電材料，接点温度，摩擦熱，熱起電力，熱伝導解析，摩耗形態

Key Words: Current collecting material, contact temperature, frictional heat, thermoelectromotive force, heat conduction analysis, wear mode

1. はじめに

電気鉄道における集電材料であるトロリ線とすり板の摩耗現象を解明するため、従来から接触界面に発生する熱に着目して整理された研究報告がある¹⁾²⁾。

過去、筆者らはジュール熱に着目し、トロリ線とすり板間の接触電圧を測定することで接点温度をモニタリングし、さらに接点近傍の温度分布について2次元熱伝導解析を行うことで、摩耗形態が遷移する条件を定量化した³⁾。このように、摩耗試験時の接点温度をモニタリングし、解析によって接点近傍の温度分布を把握することは、摩耗メカニズムを解明する上で有益であると考えられる。

本稿では摩擦熱に着目し、接点温度をモニタリング可能な試験機の開発と、無通電摩耗試験における接点温度の測定結果について報告する。また、2次元非定常熱伝導解析によって摩擦熱による接点温度上昇を解析した結果を報告する。

2. 摩耗試験

2.1 摩耗試験機

摩擦熱による接点温度上昇をモニタリングすることを目的とし、新たに回転摩耗試験機を開発した(図1)。銅円盤を模擬トロリ線とし、回転する模擬トロリ線にリニアモータですり板試験片を押し当てる構成である。

接点温度 θ_c は、異種金属間のゼーベック効果⁴⁾を応用し、

模擬トロリ線とすり板間の熱起電力 V を測定することで次式より求める。

$$\theta_c = \frac{V}{Z} + \theta_0 \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 Z はゼーベック係数($\mu\text{V/K}$)、 θ_0 は電位測定点温度($^{\circ}\text{C}$)である。 θ_0 を室温近くに保つ必要があるため、模擬トロリ線やすり板の電位測定点を発熱源である摩擦部から離してある。また、模擬トロリ線に接続している回転軸やすり板の末端にはひだをつけ、表面積を増やすことで放熱しやすい構造とした。さらに送風を行うことで測定点の冷却を図っている。

模擬トロリ線とすり板について、電位測定点までは同種金属とし、他の金属と接する箇所はベークライト等で絶縁することで、余分な熱起電力を発生させないよう設計した。

2.2 試験片および摩耗試験条件

ゼーベック効果を応用するため、模擬トロリ線とすり板は異種金属でなければならず、模擬トロリ線材をタフピッチ銅、すり板材を新幹線でも使用されている鉄系焼結合金とした。試験片の材料特性を表1に示す。試験条件として、すり板の接触面は $10\text{mm}\times 10\text{mm}$ 、接触力は 60N 、しゅう動速度は $5\sim 100\text{km/h}$ とした。

模擬トロリ線やすり板のバルク温度が上昇すると、接点温度だけでは説明できない摩耗形態が表れる可能性があるため、電位測定点温度で常温から 10°C 以上上昇しないよう、試験時間は $1\sim 3$ 分とした。

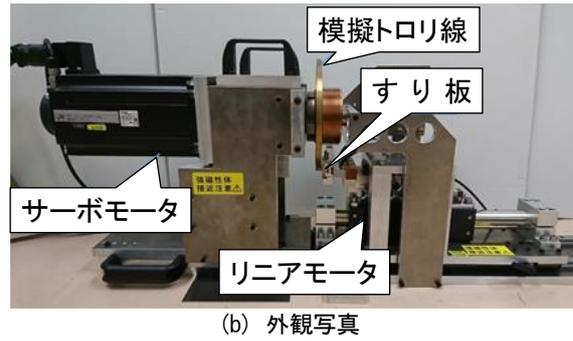
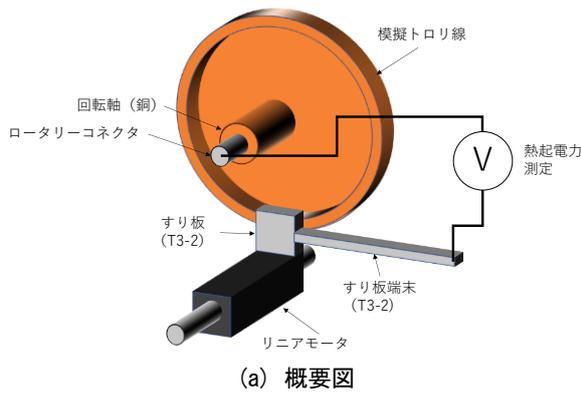


図1 回転摩擦試験機

表1 試験片の材料特性⁵⁾

試験片	模擬トリリ線	すり板
種類	タフピッチ銅	T3-2
主な成分	Cu 99.90 wt.%	素地: Fe, 硬質成分: Cr, 潤滑成分: MoS ₂ , Bi, BN
密度	8.94×10 ⁻³ g/mm ³	7.0×10 ⁻³ g/mm ³
硬さ	90~105 HV	100 HB
軟化点	180 °C	400 °C
ゼーバック係数	9.6 μV/K	

2.3 摩擦試験結果

摩擦試験結果として、各速度において測定した平均摩擦係数、平均熱起電力を図2および図3に示す。また、式(1)より求めた平均接点温度も図3に併記する。

摩擦係数は速度 5~20km/h の条件で 0.2~0.4 であり、30km/h 以上で増加する傾向にあった。一方で、熱起電力および接点温度の平均値は速度の増加に伴い増加する傾向にあった。同じ速度でも摩擦係数が異なれば摩擦熱が異なるため、接点温度を摩擦熱 (摩擦力×速度) で整理した結果、良い相関を示した (図4)。

測定した熱起電力および算出した接点温度の妥当性を示すものとして、試験終了後に観察した典型的な2種類の模擬トリリ線しゅう動面を図5および図6に示す。速度 20km/h 以下の試験では、模擬トリリ線のしゅう動面は図5のように荒れ、激しい凝着による摩擦と考える。一方で、速度 30km/h 以上の模擬トリリ線しゅう動面は図6のように滑らかな線条痕となり、すり板表面に銅が多量に移着していた。しゅう動面観察結果から、すり板表面の微小突起によるアブレシブ摩擦と考える。

アブレシブ摩擦は、硬い突起が軟らかい材料を掘り起こす摩擦形態であり、図3から速度 30km/h 以上で接点温度が銅の軟化点約 180°Cを超えているものもあり、模擬トリリ線の接点軟化によってアブレシブ摩擦形態に遷移したと説明することができる。

以上より、熱起電力および接点温度の算出は概ね妥当と考える。

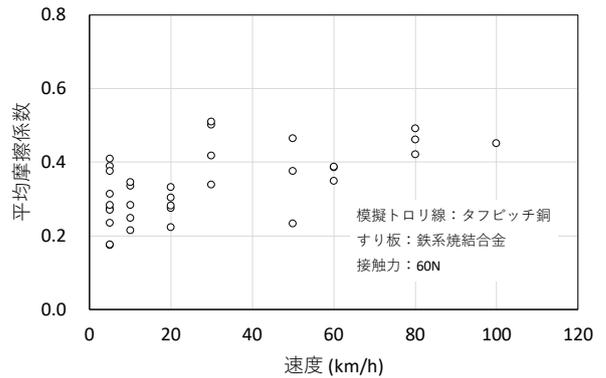


図2 速度と摩擦係数の関係

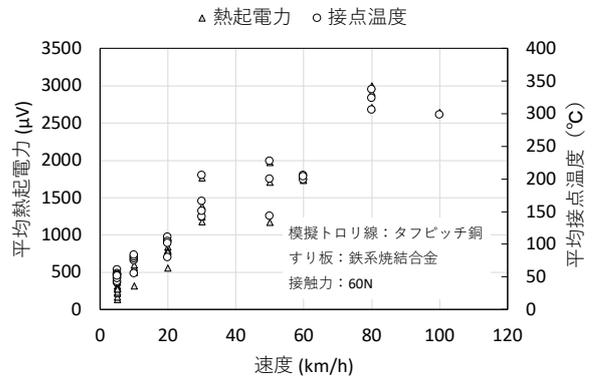


図3 速度と熱起電力の関係

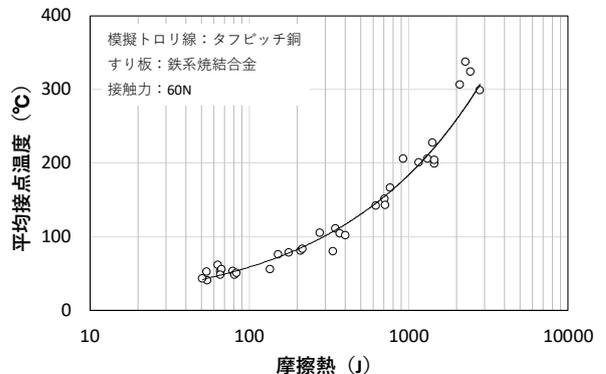
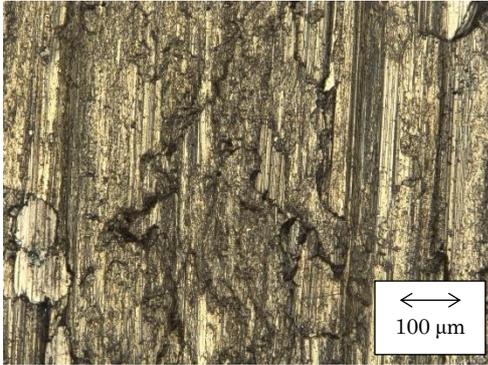


図4 摩擦熱と接点温度の関係



(a) しゅう動面外観

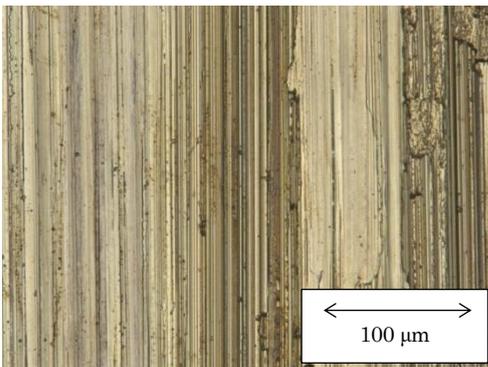


(b) しゅう動面拡大

図5 模擬トロリ線しゅう動面観察結果 (速度 20km/h)



(a) しゅう動面外観



(b) しゅう動面拡大

図6 模擬トロリ線しゅう動面観察結果 (速度 30km/h)

3. 2次元非定常熱伝導解析

摩擦熱による集電材料の接点温度推定については、過去にいくつか報告がある⁹⁾。ただし、異種金属接触を考慮していないなど、課題もあった。

そこで、本稿ではジュール熱による接点温度解析³⁾でも使用した円柱モデルを使用して、摩擦熱による非定常熱伝導解析を行うこととした。

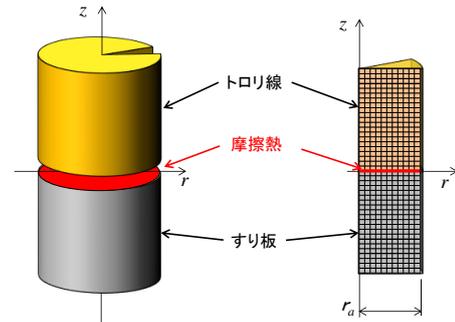


図7 熱伝導解析モデル

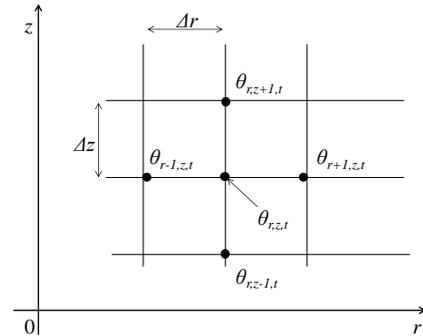


図8 熱伝導解析要素の温度

図7のようにトロリ線とすり板の接点を円柱とし、接触面に熱流束として摩擦熱を入力する。円柱はr方向、z方向および円周方向に分割し、図8の各要素について非定常熱伝導解析を行った。任意の要素における温度 $\theta_{r,z,t}$ について、 Δt 秒後の温度 $\theta_{r,z,t+1}$ は次の差分方程式で求められる。

$$\theta_{r,z,t+1} = \frac{\lambda \Delta t}{c\rho} \left[\frac{\theta_{r+1,z,t} - 2\theta_{r,z,t} + \theta_{r-1,z,t}}{\Delta r^2} + \frac{1}{r} \frac{\theta_{r+1,z,t} - \theta_{r-1,z,t}}{2\Delta r} + \frac{\theta_{r,z+1,t} - 2\theta_{r,z,t} + \theta_{r,z-1,t}}{\Delta z^2} \right] + \theta_{r,z,t} \dots\dots (2)$$

ここで、 λ は熱伝導率(J/(s・m・K))、 c は比熱(J/(kg・K))、 ρ は密度(kg/m³)である。また、トロリ線とすり板の接触面では摩擦熱 $Q_{f,r}$ の項を各要素に加えた。

$$Q_{f,r} = \eta \frac{\mu F_r v}{N} \dots\dots (3)$$

$$F_r = \frac{1.5F}{\pi r_a^3} \sqrt{r_a^2 - r^2}$$

$$N = \left(\frac{r_0}{r_a}\right)^2 \left(\frac{F}{A_n H_0}\right) \left(1 - \frac{F}{A_n H_0}\right) + 1$$

ここで、 μ は摩擦係数、 F_r は接触面内の接触力分布(N)、 v は速度(m/s)、 N は真実接触点数 η 、 F はすり板の接触力(N)、 r_a は真実接触半径(m)、 r_0 は見かけの接触半径(m)、 A_n は見かけの接触面積(m²)、 H_0 は硬さ(MPa)である。また、摩擦エネルギーのすべてが熱になるとは限らないため、熱効率係数として η を乗じて熱流束としている。

本解析では、速度に応じた接触時間 t を算出している。

$$t = \frac{2r_a}{v} \dots\dots (4)$$

開始時における全要素の温度を 25°C とし、各要素に対して非定常熱伝導解析を $t/\Delta t$ の回数実施することで t 秒後の温度分布を求めた。

図 9 に接点近傍の温度分布解析例を示す。しゅう動条件は押付荷重 60N、速度 100km/h である。トロリ線の上端とすり板の上端はバルク温度を考慮せず 25°C で固定しているため、円柱のサイズは接触時間に対して熱が十分に広がることを念頭に設定している。接触面近傍の要素サイズは、温度分布解析精度に関係するため、要素サイズを 0.1 μm ~ 10 μm まで変化させたときの z 軸上の温度分布と最高温度を比較した。比較結果を図 10 と図 11 に示す。これらの図より、要素サイズ 1 μm 以下の温度分布および最高温度はほぼ同等となっており、解析時間を早めるため以降の要素サイズは 1 μm とした。

2 章で実施した試験条件に基づき、2 次元熱伝導解析から求めた推定温度と実験値の比較を図 12 に示す。この図より、熱変換効率を 50% とした場合の推定値と実験値はほぼ一致することを確認した。これにより、熱起電力が測定できない試験機においても、接触力と摩擦力を測定し、銅が移着する条件が判明すれば、解析によって接点温度を求められると考える。

4. おわりに

集電材料の摩擦熱に起因する接点の温度上昇を把握するため、新たに回転摩擦試験機を開発し、熱起電力の測定によって接点温度をモニタリングできることを確認した。また、異種金属接触および真実接触点数などを考慮した非定常熱伝導解析によって接点温度を推定する手法を構築した。

参 考 文 献

- 1) H. Nagasawa, K. Kato: Wear mechanism of copper alloy wire sliding against iron-base strip under electric current, wear, Vol. 216, pp. 179-183, 1998.
- 2) G. Bucca, A. Collina: A procedure for the wear prediction of collector strip and contact wire in pantograph-catenary system, wear, Vol. 266, pp. 46-59, 2009.
- 3) 山下主税, 足立幸志: 介在物を考慮した温度分布解析による集電系材料の通電摩耗機構の解明, Vol. 59, No. 5, pp. 302-309, 2013.
- 4) 平田哲夫, 田中誠, 熊野寛之, 羽田善昭: 図解エネルギー工学, pp. 173-174, 森北出版, 2011.
- 5) 久保田喜雄, 土屋広志, 久保俊一: 新しい固体潤滑剤を用いた新幹線すり板の開発, J-RAIL, 2010.
- 6) 織田修, 藤井保和: しゅう動速度がトロリ線の摩耗に及ぼす影響についての若干の実験結果と考察, 潤滑, Vol. 29, No. 1, pp. 66-71, 1984.
- 7) S.C. Lim, M.F. Ashby, Wear-mechanism maps, Acta Metallurgica, Vol. 35, pp. 1-24, 1987.

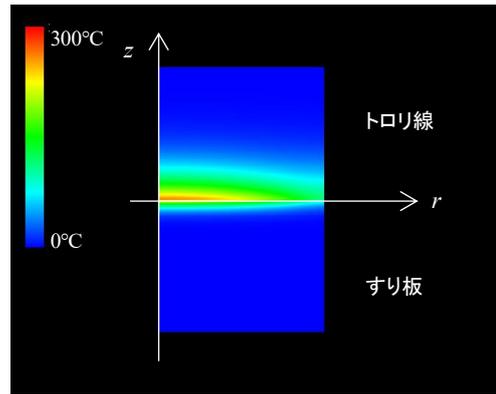


図 9 解析結果例 (接触力: 60N, 摩擦係数: 0.3, 速度: 100km/h)

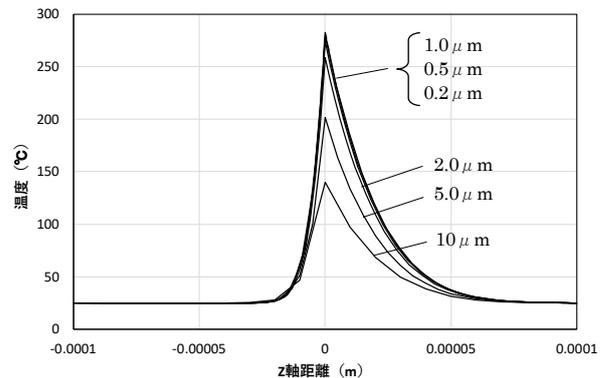


図 10 要素サイズ毎の z 軸温度分布比較

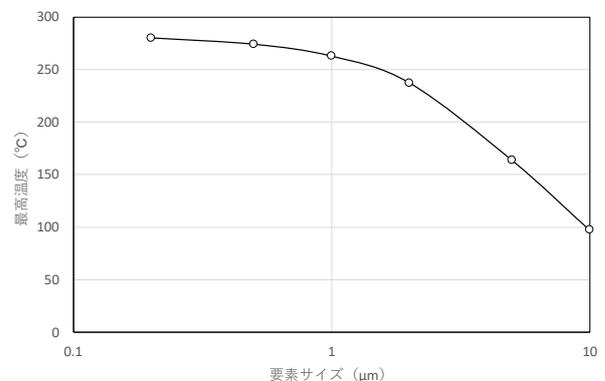


図 11 要素サイズと最高温度の関係

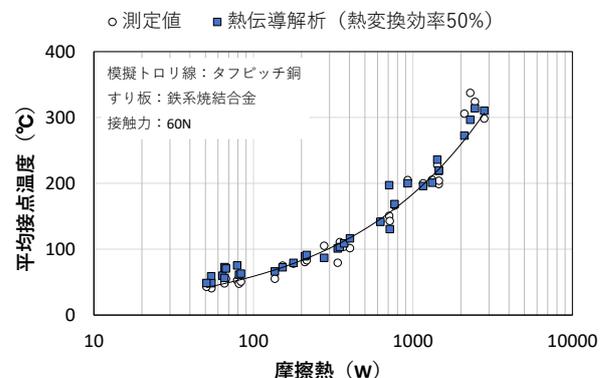


図 12 接点温度の実験値と解析値の比較