

異種金属接触における内部温度勾配が接点温度に及ぼす影響

Influence of Internal Temperature Gradient on Contact Temperature in Dissimilar metal contacts

鉄道総研（正）*山下 主税 （正）根本 公紀

Chikara Yamashita*, Koki Nemoto*

*Railway Technical Research Institute

1. はじめに

電気鉄道では、電車線とパンタグラフとのしゅう動を介して車両に電力を供給しており、そのしゅう動部材であるトロリ線とすり板を総称して集電材料と呼んでいる。一般にトロリ線は銅および銅合金、すり板は銅系焼結合金や鉄系焼結合金、カーボン系の材料が使用されている。特に日本の新幹線区間のすり板は、鉄系焼結合金が使用されている。集電材料の寿命は主に摩耗によって決定されるため、鉄道の安全・安定輸送やメンテナンスコストの削減を実現するためには、集電材料の摩耗を抑制することが必要である。摩耗を抑制する施策の提示や新しい集電材料の開発を効率的に行うためには、まずは摩耗の予測手法を確立することが重要である。

筆者らは、集電材料の摩耗メカニズム解明のために、摩耗形態の分類とその遷移条件に着目し、これまでにジュール熱および摩擦熱に起因する摩耗形態の遷移現象について、接点温度上昇に伴う材料の溶融および軟化が大きな要因であることを明らかにしている¹⁾²⁾。しゅう動接点の接点温度は、接触電圧や熱起電力を測定することで推定することができるが、実フィールドにおいてはこれらのパラメータを取得することは困難であるため、しゅう動条件から接点温度を予測する必要がある。筆者らは、異種金属材料であるトロリ線とすり板の接点について、ジュール熱および摩擦熱のそれぞれに起因する接点温度上昇の解析手法を提案している³⁾⁵⁾。しかしながら、これらの手法は両接点と同じ初期温度であることが前提となっており、実フィールドにおいて常にしゅう動しているすり板接点の初期内部温度がトロリ線よりも高いことは考慮していない。そのため、すり板の初期内部温度が接点に及ぼす影響を把握する必要がある。

Lim ら⁶⁾は、ピンオンディスク試験における摩擦熱による接点温度上昇を表す式を提案している。具体的には、接点温度を閃光温度とバルク温度の和により表し、それぞれの寄与を示す式を導出している。ただし、ここではピンとディスクの接点は同種金属であり、且つピンの温度は平衡状態としている。また、見かけの接触面の表面温度をバルク温度とし、ピンとディスクで等しいとしている。森本ら⁷⁾や久保田ら⁸⁾は、すり板の摩耗低減に資するため、トロリ線とすり板の摩耗試験結果に基づきすり板の解析モデルを作成し、すり板内部温度を解析している。ただし、トロリ線とすり板の接点温度については詳細に検討されていない。伝熱工学分野では見かけの接触では粗さなどの接触熱抵抗を考慮する必要があり、それぞれの見かけの接触面の表面温度は必ずしも等しくはならないとしている⁹⁾。初期温度が異なる半無限物体が接触する場合の表面温度について定式化されているが、初期温度は一樣とされ、すり板のように内部温度に勾配があるときの表面温度などは扱われていない。

そこで本研究では、異種金属であるすり板とトロリ線について、両者の温度差や内部温度勾配がある場合の非定常熱伝導解析を行い、これらが表面温度、すなわち接点温度に及ぼす影響を検討した。また、接点温度に影響を及ぼす内部温度の範囲についても検討し、材料特性を含めて定量化した。

2. 解析方法と解析結果

2.1 初期内部温度が一樣の場合

本研究では、トロリ線とすり板の内部温度を任意に設定し、接触面や接点内部の温度勾配について解析する。なお、摩擦熱やジュール熱は考慮しないものとする。解析するモデルは Fig. 1 のように 2 次元の非定常熱伝導解析モデルとした。解析ソフトは FEMTET の熱伝導過渡解析を使用し、接点のサイズとして、モデルの幅を前報²⁾⁵⁾で報告した真実接触点直径である 128 μm (64 μm の 2 倍)、モデル長さは 500 μm 、接触面のメッシュサイズは 0.2 μm とした。材料特性を Table 1 に示す。ここでは、すり板材料として鉄系焼結合金を、トロリ線材料として硬銅を採用した。

解析例として、すり板の初期内部温度 $T_{1,i}$ を 100 $^{\circ}\text{C}$ 、トロリ線の初期内部温度 $T_{2,i}$ を 25 $^{\circ}\text{C}$ としたときの非定常解析結果を Fig. 2 に示す。過渡解析の解析時間は 0s, 4.6 $\times 10^{-4}$ s, 4.6 $\times 10^{-5}$ s, 9.2 $\times 10^{-6}$ s, 4.6 $\times 10^{-6}$ s, 2.3 $\times 10^{-6}$ s, 1.5 $\times 10^{-6}$ s であり、それぞれ接触時点と速度 1km/h, 10km/h, 50km/h, 100km/h, 200km/h, 300km/h における接点の接触時間に相当する。内部温度が一樣の場合、接触面温度 T_s は Fig. 3 のように時間によらず常に一定になり、半無限物体の接触を扱う伝熱工学では次式で表している⁹⁾。

$$T_s = \frac{\sqrt{\rho_1 c_1 \lambda_1 T_{1,i}} + \sqrt{\rho_2 c_2 \lambda_2 T_{2,i}}}{\sqrt{\rho_1 c_1 \lambda_1} + \sqrt{\rho_2 c_2 \lambda_2}} \quad (1)$$

ここで、 ρ は密度[kg/m³]、 c は比熱[J/kgK]、 λ は熱伝導率[W/msK]である。添字の 1 はすり板を、2 はトロリ線を示している。

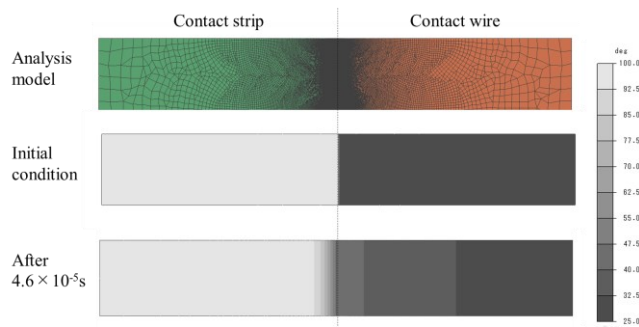


Fig. 1 Analysis model and example

Table 1 Material properties

	Contact strip	Contact wire
Material	Iron-based sintered alloy	Hard-drawn copper
Density, kg/m ³	6910	8910
Thermal conductivity, W/(m · K)	20	373
Specific heat, J/(kg · K)	496	381

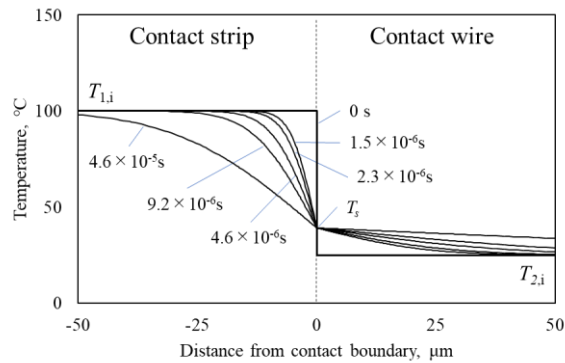


Fig. 2 Analysis result

Initial condition (contact strip: 100°C, contact wire: 25°C)

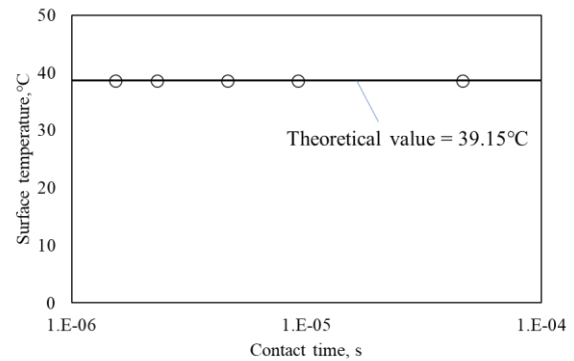


Fig. 3 Relationship between contact time and surface temperature

2.2 初期内部温度に勾配がある場合

Figure 4 に初期内部温度に勾配がある例として、すり板の内部温度に勾配を与えた場合の初期条件を示す。ここではすり板内部温度の勾配は一定とした。この条件について 2.1 節で示した接点の接触時間に対する解析結果を Fig. 4 に示す。また、接触時間に対する接触面温度を Fig. 5 に示す。これらの図より、内部温度に勾配がある場合、接触面温度が時間によって変化しており、式(1)の理論式を単純には適用できないことがわかる。

そこで、内部温度に勾配がある場合は、ある範囲 d の平均温度を一律な $T_{1,i}$ とすることで、式(1)を活用できると仮定した。 $T_{1,i}$ は式(1)を用いて次式で求めることができる。

$$T_{1,i} = \frac{T_s(\sqrt{\rho_1 c_1 \lambda_1} + \sqrt{\rho_2 c_2 \lambda_2}) - \sqrt{\rho_2 c_2 \lambda_2} T_{2,i}}{\sqrt{\rho_1 c_1 \lambda_1}} \quad (2)$$

Figure 4 におけるすり板内部温度の傾きを a 、切片を b とし、一律な内部温度 $T_{1,i}$ の面積 A と等価な台形面積となる勾配範囲を求めることで、接触面温度に影響を及ぼす範囲 d を求めた。

$$A = dT_{1,i} = \frac{(ad + b + b)d}{2}$$

$$d = \frac{2(T_{1,i} - b)}{a} \quad (3)$$

本研究では、 d を内部温度影響範囲と呼称する。Figure 5 および式(2), (3)より、接触時間に対する内部温度影響範囲を Fig. 6 に示す。

本節の仮定について妥当性の検証として、所定の解析時間に対して①勾配がある初期温度条件と、②内部温度影響範囲を考慮した一律な初期温度条件で、同じ接触面温度となるかを確認する。解析時間を 4.6×10^{-5} s とすると、Fig. 6 より内部温度影響範囲は $37 \mu\text{m}$ となる。Figure 4 と同じ初期温度勾配に対する接触面から $37 \mu\text{m}$ 範囲の平均値は 263°C となる(Fig. 7)。2 種類の条件に対して解析時間 4.6×10^{-5} s 後の解析結果を Fig. 8 に示す。この図より、すり板内部の温度分布は異なるものの、接触面温度およびトリ線線の温度勾配は一致しており、本研究の仮定は妥当であると考えられる。

以上より、接点の接触時間の増加に伴い内部温度が接触面温度、すなわち接点温度に影響を及ぼす範囲は増加する。また、内部温度に勾配がある場合でも、影響範囲の平均温度を用いることで式(1)より接触面温度を算出することができることを示した。

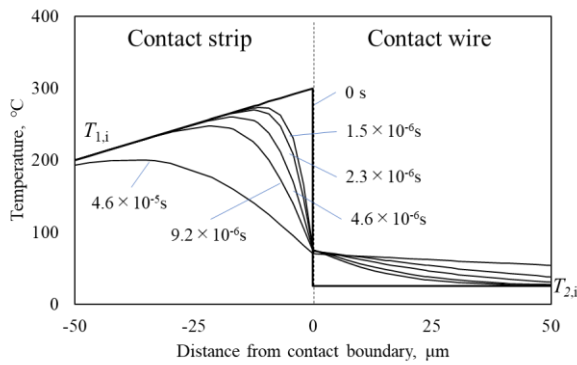


Fig. 4 Analysis result
Initial condition (contact strip: 25-300°C, contact wire: 25°C)

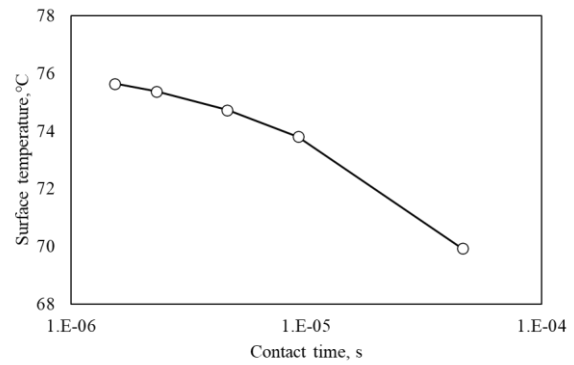


Fig. 5 Relationship between contact time and surface temperature

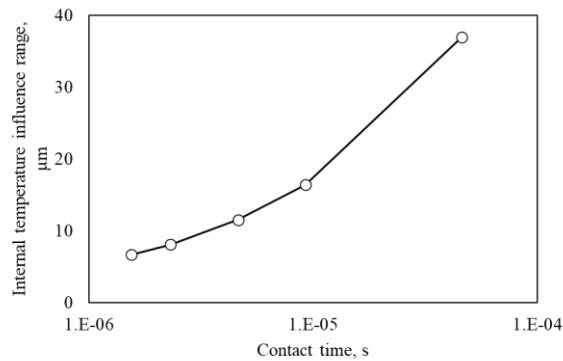


Fig. 6 Relationship between contact time and internal temperature influence range

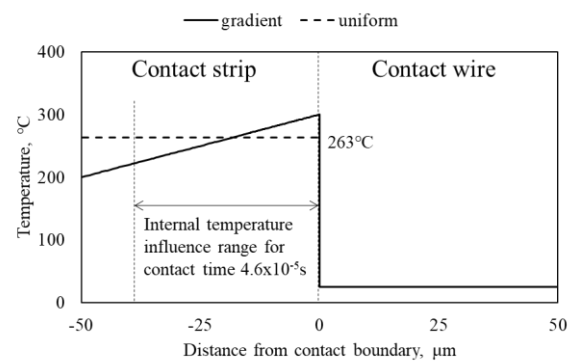


Fig. 7 Initial temperature conditions for validation

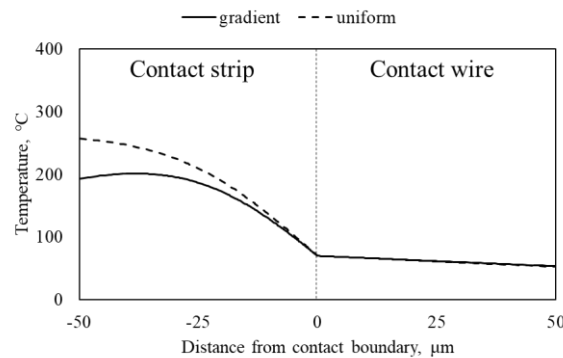


Fig. 8 Temperature distribution after 4.6×10^{-5} s

3. 接点の接触時間と内部温度影響範囲の関係

本章では、前章で示した内部温度影響範囲と接点の接触時間の関係について一般化するため、温度勾配や材料組合せを変化させて解析を実施した。

Figure 9 にすり板内部温度勾配の傾きや切片が異なる 3 種類の初期温度条件を示す。これらの条件に対する接触面温度の解析結果を Fig. 10 に示す。また、2.2 節の手法で求めたそれぞれの内部温度影響範囲を Fig. 11 に示す。これらの図より、異なる内部温度の勾配に対して接触面温度も異なるが、内部温度影響範囲は同一であることがわかる。これはバルク温度の影響範囲は温度に依存せず、他に支配要因があることを示唆するものである。

次に、初期内部温度の勾配を Fig. 12 で同一とし、材料組合せが異なる場合の解析を実施した。Table 2 に材料組み合わせを、Table 3 にアルミニウムの材料特性を示す。各材料組合せに対する接触面温度の解析結果を Fig. 13 に示す。この図より、材料の組み合わせが異なることで、同じバルク温度勾配でも接触面温度が異なることがわかる。この傾向は式(1)で説明可能であり、温度が高いすり板の比熱 c_1 や熱伝導率 λ_1 が大きいほど分子が大きくなり、接触面温度 T_s は増加する。一方で、温度が低いトリ線線の比熱 c_2 や熱伝導率 λ_2 が小さいほど分母が小さくなり、接触面温度 T_s は増加するものである。

また、2.2 節の手法で求めたそれぞれの内部温度影響範囲を Fig. 14 に示す。この図より、解析結果はすり板の材料とした鉄系焼結合金、硬銅、アルミニウムで 1 つの線となった。このことより、内部温度影響範囲はトリ線線の材料によらず、すり板の材料に支配されているといえる。ここで、実際に使用されている鉄系焼結合金では、バルク温度の影

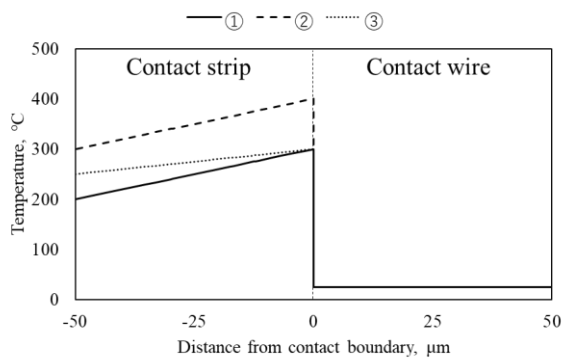


Fig. 9 Initial temperature conditions with three type gradients

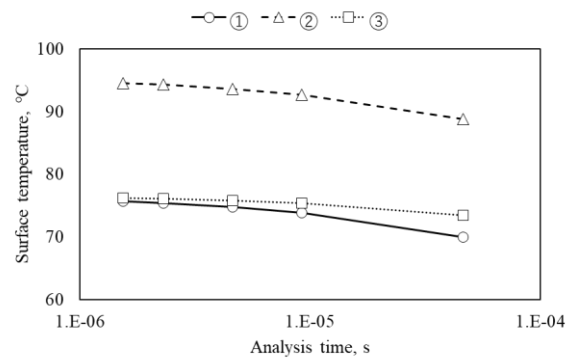


Fig. 10 Relationship between analysis time and surface temperature

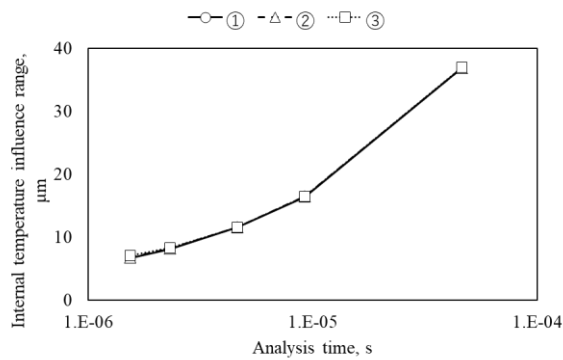


Fig. 11 Relationship between analysis time and internal temperature influence range

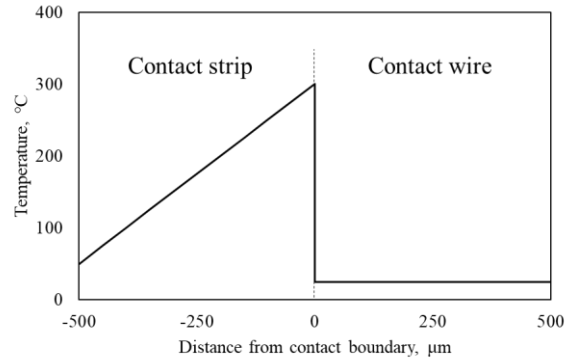


Fig. 12 Initial temperature conditions for long model

Table 2 Material combinations		
No.	Contact strip	Contact wire
1	Iron-based sintered alloy	Hard-drawn copper
2	Hard-drawn copper	Iron-based sintered alloy
3	Aluminum	Hard-drawn copper
4	Hard-drawn copper	Aluminum

Table 3 Material properties of Aluminum	
Density, kg/m ³	2700
Thermal conductivity, W/(m · K)	237
Specific heat, J/(kg · K)	900

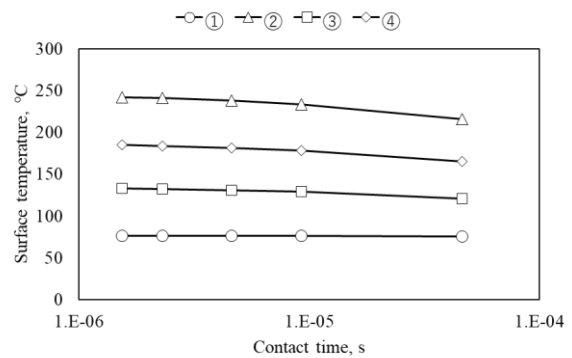


Fig. 13 Relationship between analysis time and surface temperature

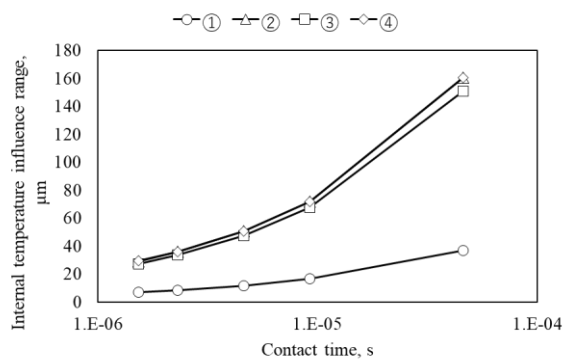


Fig. 14 Relationship between contact time and internal temperature influence range

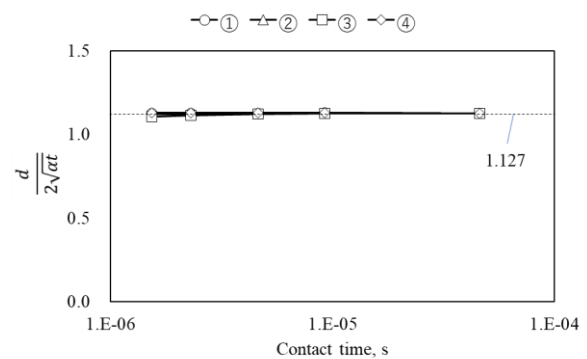


Fig. 15 Relationship between contact time and dimensionless internal temperature influence range

響範囲は 50μm 以内であり、接触面直下の範囲しか接触面温度に影響を及ぼさないことがわかる。従来の定置実験では接触面から数 mm 離れた箇所の温度を熱電対などで測定しているが、内部温度から接触面温度を算出するためには表面近傍までの温度勾配を求める必要があることがわかった。

内部温度影響範囲はすり板の材料特性にのみ依存するため、伝熱工学で扱う半無限物体に熱流束が入力されるケース⁹⁾と同様とみなした。温度の時間変化が物体全体に及ばない場合、半無限物体の取り扱いができ、物体内の温度 θ の空間および時間の変化は次式で表される。

$$\theta = \frac{T - T_{\infty}}{T_0 - T_{\infty}} = 1 - \operatorname{erf}\left(\frac{x}{2\sqrt{at}}\right) \quad (4)$$

ここで、 T_0 は初期温度[°C]、 T_{∞} は定常状態の温度[°C]、 $\operatorname{erf}(x,t)$ は誤差関数、 x は物体の表面からの距離[m]、 α は熱拡散率($=\lambda/cp$)[m²/s]、 t は時間[s]である。式中 $x/(2\sqrt{at})$ の x にFig. 14で求めた d を代入することで無次元化した内部温度影響範囲とし、接触時間との関係はFig. 15のように時間によらずほぼ一定となり、次式で表すことができた。

$$\frac{d}{2\sqrt{at}} = 1.127 \quad (5)$$

$$\therefore d = 2.254\sqrt{at} \quad (6)$$

式(5)の値 1.127 については解析によって求められたものであり、物理的な根拠については今後の課題であるが、すり板材料と接点の接触時間、すなわち接点半径としゅう動速度がわかれば、この式から内部温度影響範囲を求めることができ、工業的に有意義であると考ええる。

今後はしゅう動速度や電流、トロリ線のジグザグ偏位などに起因するすり板の内部温度勾配を解析し、摩擦熱やジュール熱に加えて、すり板内部温度に起因する接点温度上昇を加味することで、実フィールドの接点温度を推定することに取り組む予定である。また、推定した接点温度から摩擦形態の予測や摩耗率の予測に展開できれば、摩耗を抑制する設備の敷設条件や集電材料の開発などが発展するものと考ええる。

4. おわりに

本研究では、電気鉄道の集電材料であるすり板とトロリ線という異種金属接点について、非定常熱伝導解析を用いて両者の温度差や内部温度勾配が接触表面温度、すなわち接点温度に及ぼす影響を考察した。その結果を以下に示す。

- (1) 接点の内部温度が一樣な場合は、接触時間によらず接点温度は一定となるが、内部温度に勾配がある場合は、時間とともに接点温度が変化する。本研究では接触時間に応じた内部温度影響範囲を仮定することで、当該範囲の平均温度を用いて伝熱工学の理論式より接点温度を算出する手法を提案した。
- (2) 内部温度影響範囲は接点内の温度勾配に依存せず、接触時間と材料特性に依存することを明らかにした。また、接触時間と熱拡散率を用いた無次元化内部温度範囲は接触時間によらず一定となることを示した。

文献

- 1) 山下・足立：集電材料の摩耗形態および遷移条件に及ぼす通電電流の影響，トライボロジスト，58，7(2013)496-503.
- 2) 根本・山下：集電材料の摩耗形態遷移に及ぼす摩擦熱の影響，トライボロジスト，67，7(2022)496-506.
- 3) 山下・足立：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，トライボロジスト，59，5(2014)302-309.
- 4) 山下・足立：集電材料の摩耗形態マップ，トライボロジスト，62，2(2017)129-136.
- 5) 根本・山下：銅円盤と鉄系焼結合金すり板の摩擦熱に起因する接点温度上昇解析，トライボロジー会議 2022 春 東京予稿，D3.
- 6) S.C.Lim, M.F.Ashby: Wear Mechanism Maps, Acta Metallurgica, 35, 1 (1987) 1-24.
- 7) 久保田・森本：通電しゅう動時のパンタグラフすり板内部温度測定および解析結果，第25回鉄道技術連合シンポジウム講演論文集 (2018)，1312.
- 8) 森本・久保田：パンタグラフすり板の摩耗に及ぼすトロリ線左右移動速度の影響，第26回鉄道技術連合シンポジウム講演論文集，S7-3-2 (2019) 554-557.
- 9) 日本機械学会：伝熱工学，丸善出版 (2020) 23-43.