

通電下における集電材料の摩耗メカニズム

山下 主税*

Wear Mechanism of Current Collecting Material under Electric Current Flowing Condition

Chikara YAMASHITA

In this paper, the electric contact model in consideration of the film resistance such as a wear particle and an oxide film is newly proposed, and the analysis method of the electric potential distribution and the temperature distribution near the contact point is described. As a result of the analysis, several laws governing the relationship between the electric potential and temperature have been found, and a formula of temperature rising is made by using a contact boundary factor which is calculated from contact resistance and film resistance. Finally, a wear mode map which shows the transition condition between the wear modes quantitatively is newly proposed. In addition, the dominant parameters of the wear mode are identified, and the wear mechanism of current collecting materials under electric current flowing condition is clarified.

キーワード：集電材料，電位分布，温度分布，摩耗形態マップ，摩耗メカニズム

1. はじめに

現在、トロリ線やパンタグラフすり板など「集電材料」の寿命は、摩耗によって決定されている。近年、車両の高速化やパンタグラフ数の削減に伴う集電電流の増加によって、集電材料の摩耗は増大する傾向にある。そのため、保全管理や取替などのメンテナンスにかかるコストを削減するためには、摩耗対策が必須である。

従来、集電材料の著大摩耗の主要因は、架線とパンタグラフが離れる離線時に発生するアーク放電と認識されてきた。そのため、架線とパンタグラフの動力的な相互作用を改善することによる離線の抑制が、有効な摩耗対策と認識されてきた。ただし、実環境において発生する通電摩耗メカニズムは未だ解明されておらず、抜本的な摩耗低減対策が存在していないのが現状である。

鉄道総研では、これまでに通電摩耗試験装置の開発および摩耗試験の実施により、通電下では複数の摩耗形態が存在し、集電材料の摩耗率は各摩耗形態に大きく依存することを報告している¹⁾。また、測定した接触電圧から接点の最高温度を推定し、摩耗形態の遷移現象がアーク放電ではなく、主にジュール熱による材料の溶解によって発生することを報告している。

本稿では、接点の最高温度に加えて、接点近傍の電位分布および温度分布を解析することで、通電下における接点の温度上昇を定式化し、摩耗形態の遷移条件を定量的に示す「摩耗形態マップ」を提案する。また、摩耗形

態の支配パラメータを紹介し、通電下における摩耗メカニズムについて考察する。

2. 接点近傍の電位および温度分布解析

2.1 解析方法

本章では、通電接点に対する電位分布および温度分布解析手法を新たに提案する。

解析対象はトロリ線とすり板の接点であり、さらに表面の酸化膜や摩耗粒子などの介在物も解析対象とした。これは、摩耗試験や営業線では表面状態を清浄に保つことはできず、介在物を無視した解析では意味をなさないためである。

図1に示すように介在物を被膜抵抗とした円柱形状の電極モデルを作成し、中心軸上に半径 a の接点を設定した。ここで、トロリ線およびすり板の電極半径を D とする。図1のモデル円周方向の電位および温度は一様であり、計算負荷を軽減するため軸対象モデルとし、円周方向に分割した1ピースについて、図2に示す上下左右方向に格子メッシュを設定した。なお、各電極モデルの格子メッシュ数は 30×30 とした。

中心要素の求めようとする電位 φ_0 に対して、上下左右の電位を反時計回りに $\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3, \varphi_4$ とし、それぞれの要素を繋ぐ抵抗を R_1, R_2, R_3, R_4 とした。中心要素の電位 φ_0 はキルヒホッフの法則に従い、電流に関する連立方程式を解くことで、次式のように求めることができる。

$$\varphi_0 = \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} + \frac{1}{R_4} \right)^{-1} \left(\frac{\varphi_1}{R_1} + \frac{\varphi_2}{R_2} + \frac{\varphi_3}{R_3} + \frac{\varphi_4}{R_4} \right) \quad (1)$$

* 電力技術研究部 集電管理研究室

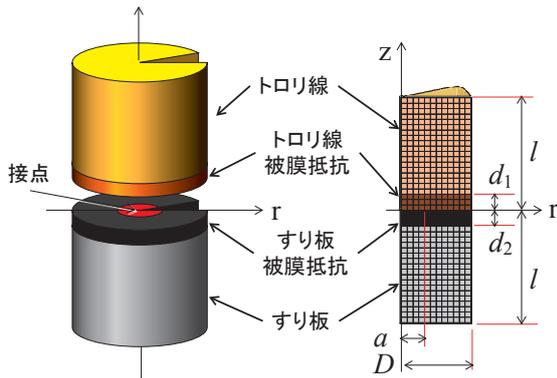


図1 解析モデル

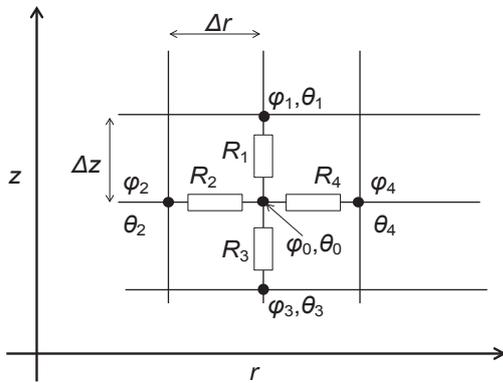


図2 電気回路要素

被膜抵抗の電気抵抗率 ρ_{d1}, ρ_{d2} は、トロリ線およびすり板の電気抵抗率 ρ_1, ρ_2 に対して次式で仮定した。

$$\rho_{d1} = f_1 \rho_1, \quad \rho_{d2} = f_2 \rho_2 \quad (2)$$

ここで、 f_1, f_2 は被膜抵抗における抵抗増分を考慮した抵抗係数である。なお、 $f_1 = f_2 = 1$ は被膜抵抗がない状態であり、抵抗係数が増加するほど接触表面に高抵抗の被膜が存在することを意味する。

次に、電極内の温度分布を解析するため、ジュール熱を与えられた時の定常熱伝導方程式に、熱伝導率と電気抵抗率の温度依存性を扱う Wiedemann-Franz の法則²⁾を適用し、新たに次式を導出した。

$$\theta_0 = \left\{ \frac{1}{4} \left(\theta_1^2 + \theta_2^2 + \theta_3^2 + \theta_4^2 + \frac{\Delta r}{2r} (\theta_4^2 - \theta_2^2) + \frac{\Phi_1^2 + \Phi_2^2 + \Phi_3^2 + \Phi_4^2}{L} \right) \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (3)$$

ここで θ は温度 [K]、 Φ は要素間の電位差 [V]、 L はローレンツ数 ($=2.4 \times 10^{-8} [(K/V)^2]$) である。なお、実際のトロリ線とすり板はしゅう動接点であるため、接点の移動時間を考慮した非定常熱伝導解析をするべきであるが、接点の移動時間に対して温度上昇は十分に短い時間で発生するため、静接点と見なすことができ、ここでは

表1 解析対象物性値

	トロリ線	すり板
種別	硬銅	鉄系焼結合金
成分	Cu (99.9%)	Fe (78.6%), Cr (16.5%), S (0.9%)
密度 (g/cm ³)	8.91	7.10
電気抵抗率 ($\mu\Omega\text{m}$)	1.77×10^{-2}	0.40
熱伝導率 (W/mK)	373.0	25.3
融点 (K)	1334	1646

定常熱伝導解析について述べる。

境界条件として、トロリ線上端面における電位を接触電圧 V_c 、すり板下端面における電位を $0V$ とし、全ての要素について式 (1) および式 (3) が成立するよう収束計算を行い、各要素における値の変化が 1×10^{-6} 未満となった時を計算終了とした。

解析精度の検証として、表1の材料の組合せに対して、電極半径 $D=300\mu\text{m}$ 、被膜厚さ $d_1=d_2=10\mu\text{m}$ 、接触電圧 $V_c=0.4V$ とし、接点半径 a と被膜抵抗係数 f_1, f_2 を変化させた条件で解析を行い、接触抵抗および最高温度について、解析値と理論値を比較した。なお、接触抵抗の理論値 R_t は式 (4)³⁾ より、接点最高温度 θ_{\max} は $\varphi-\theta$ 理論²⁾ である式 (5) より算出した。

$$R_t = R_b + R_c + R_f$$

$$R_b = \frac{(\rho_1 + \rho_2)l}{\pi D^2}$$

$$R_c = \frac{\rho_1 + \rho_2}{4a} \left\{ 1 - 1.41571 \left(\frac{a}{D} \right) + 0.06322 \left(\frac{a}{D} \right)^2 + 0.15261 \left(\frac{a}{D} \right)^3 + 0.19998 \left(\frac{a}{D} \right)^4 \right\} \quad (4)$$

$$R_f = \frac{\rho_{d1}d_1 + \rho_{d2}d_2}{\pi a^2}$$

$$\theta_{\max} = \left(\frac{V_c^2}{4L} + T_0^2 \right)^{1/2} \quad (5)$$

ここで、 R_b は電極のバルク電気抵抗 [Ω]、 l は円柱長さ [m]、 R_c は接点近傍の集中抵抗 [Ω]、 R_f は被膜抵抗 [Ω]、 V_c は接触電圧 [V]、 T_0 は両部材のバルク温度 [K] である。

接触抵抗値の比較を図3、電極内最高温度値の比較を図4に示す。いずれの比較においても理論値と解析値はほぼ一致しており、その差は接触抵抗で5.0%未満、電極内最高温度で3.0%未満であり、本章で構築した解析モデルは十分な精度を有するといえる。

この解析モデルを用いることで、異種金属接点や被膜抵抗を考慮しながら $\varphi-\theta$ 理論と整合する電位分布および温度分布解析が可能となる。

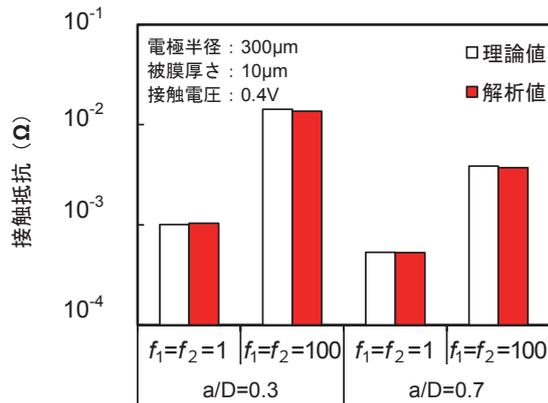


図3 接触抵抗値の比較

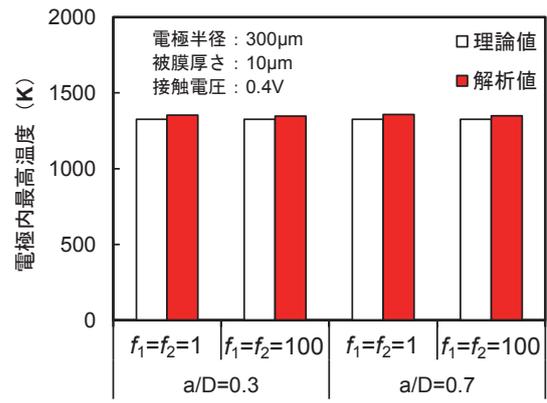


図4 電極内最高温度値の比較

2.2 解析結果

解析結果例として、表1の材料組合せに対して、接触電圧を0.45V、接点半径を100μmとし、被膜抵抗を変化させた場合の電位分布および温度分布を図5に示す。トロリ線の電気抵抗率がすり板よりも小さいため、トロリ線内の電圧降下は小さく、すり板の接点近傍における電圧降下が大部分を占めることがわかる。また、電圧降下に対応して、温度上昇もすり板側の接点近傍が最も高温となり、トロリ線とすり板では温度差が生じることがわかる。

トロリ線とすり板の電極内電位分布と温度分布の傾向が一致しているため、モデルz軸上の電位と温度の関係を用いて電極内の状態を評価でき、図5の電位と温度の関係は図6のように放物線状となる。電極内の最高温度は接触電圧の中間値となる位置、例えば接触電圧が0.45Vの場合は0.225Vとなる位置で発生する。同様の結果はHolm²⁾も報告しており、同種金属接点の電位と温度の関係は放物線状になり、接触電圧の中間箇所電極内最高温度が発生する。本節の結果より、電位と温度の放物線状の関係は、異種金属にも適用でき、電極材料の組合せに依存しないと考える。以降では、この放物線を「電位—温度放物線」と呼称する。

図6より、電位—温度放物線の形状は被膜抵抗に依存しないことがわかる。電極内最高温度は式(5)に等しいため、放物線の形状は接触電圧のみに依存すると考えられる。ただし、放物線内の接触境界位置は被膜抵抗によって変化する。図6では、すり板の最高温度が電極内最高温度であるが、接触境界が頂点から離れているため、トロリ線の最高温度はすり板よりも低くなるが、トロリ線

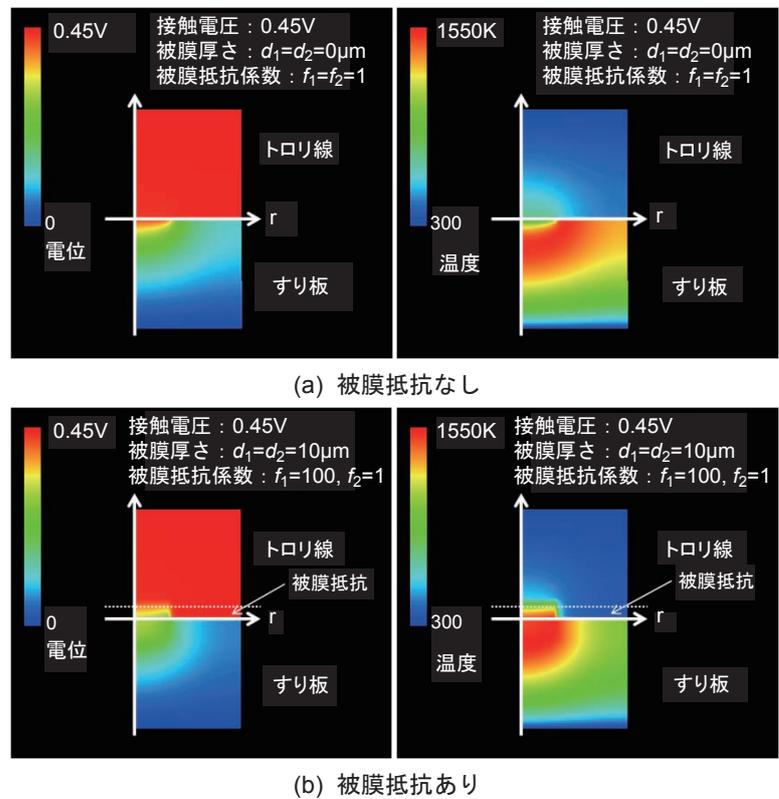


図5 電位分布および温度分布解析結果例

最高温度は被膜抵抗によって変化する。

以上より、トロリ線とすり板の電位および温度の関係を以下のように整理する。

- (1) 電極内の電位と温度の関係は放物線状（電位—温度放物線）となり、その形状は材料組合せや被膜抵抗によらず、接触電圧にのみ依存する。
- (2) 電位—温度放物線の頂点、すなわち電極内の最高温度はφ-θ理論に従い、接触電圧の中間値 $V_c/2$ で発生する。
- (3) 電位—温度放物線内の接触境界は、表面の被膜抵抗によって変化する、各電極の最高温度に影響を及ぼす。

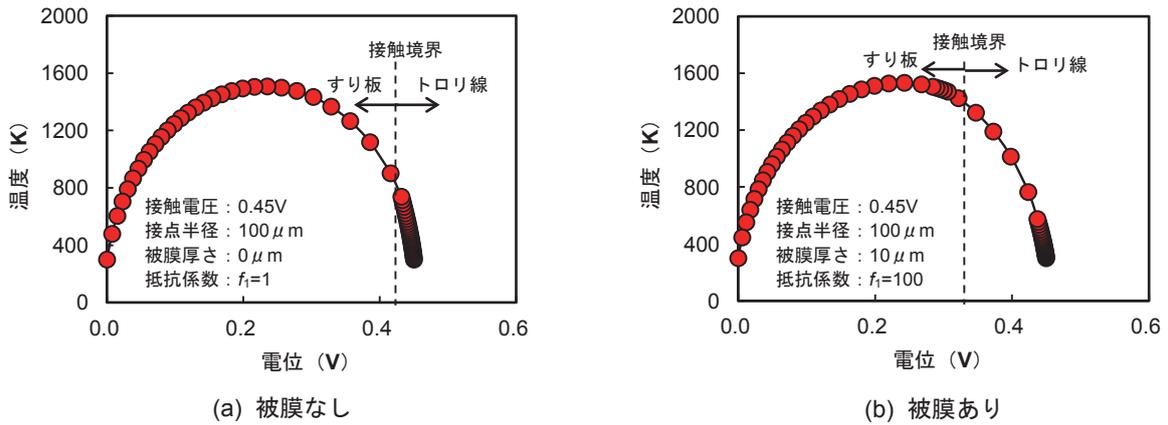


図6 電極内電位と温度の関係

3. 摩耗形態マップの作成

2章の結果をもとに、通電下における接点の温度上昇を定式化し、一般化する。

図6に示すような電位—温度放物線内の任意の電位 φ における温度 θ は、次式で表すことができる。

$$\theta = \left[\frac{V_c^2}{L} \left\{ \left(\frac{\varphi}{V_c} \right) - \left(\frac{\varphi}{V_c} \right)^2 \right\} + 300^2 \right]^{1/2} \quad (6)$$

すり板末端の電位を 0V としているため、接触境界における電位 φ_c はすり板内の電圧降下に等しくなる。この φ_c と接触電圧 V_c の比、すなわちトロリ線とすり板の接触境界における φ_c/V_c を α とし、これを「接触境界係数」と呼称する。 α は集中抵抗式と被膜抵抗式を用いて次式で表される。

$$\alpha = \frac{\varphi_c}{V_c} = \frac{\frac{\rho_2}{4a} + \frac{f_2 \rho_2 d_2}{\pi a^2}}{\frac{\rho_1 + \rho_2}{4a} + \frac{f_1 \rho_1 d_1 + f_2 \rho_2 d_2}{\pi a^2}} \quad (7)$$

材料の組合せが決定すると、材料の電気抵抗率は一意に定まるため、 α は被膜抵抗に左右されると考えてよい。接触境界における温度 θ_c は、式(7)を式(6)に代入し、式(8)のように求まる。

$$\theta_c = \left[\frac{V_c^2}{L} \{ \alpha - \alpha^2 \} + 300^2 \right]^{1/2} \quad (8)$$

トロリ線とすり板の最高温度は、接触境界が電位—温度放物線の頂点からどちらにずれるかによって以下のように決定される。

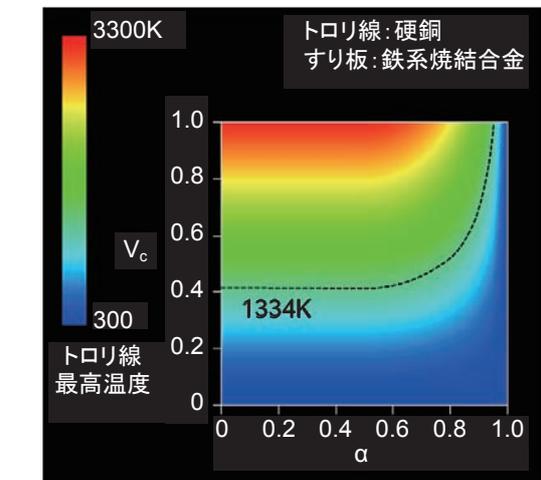
$\alpha > 0.5$ の場合（接触境界が電位—温度放物線の右側）

トロリ線最高温度・・・式(8)

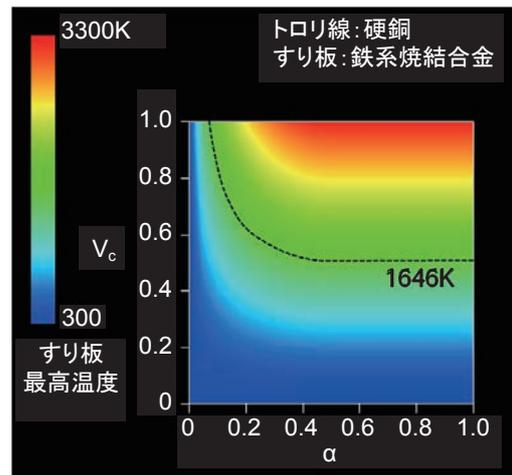
すり板最高温度・・・式(5)

$\alpha = 0.5$ の場合（接触境界が電位—温度放物線の頂点）

トロリ線最高温度＝すり板の最高温度・・・式(5)



(a) トロリ線最高温度



(b) すり板最高温度

図7 各電極の最高温度

$\alpha < 0.5$ の場合（接触境界が電位—温度放物線の左側）

トロリ線最高温度・・・式(5)

すり板最高温度・・・式(8)

このように、トロリ線とすり板の最高温度は接触境界係数 α と接触電圧 V_c によって支配される。

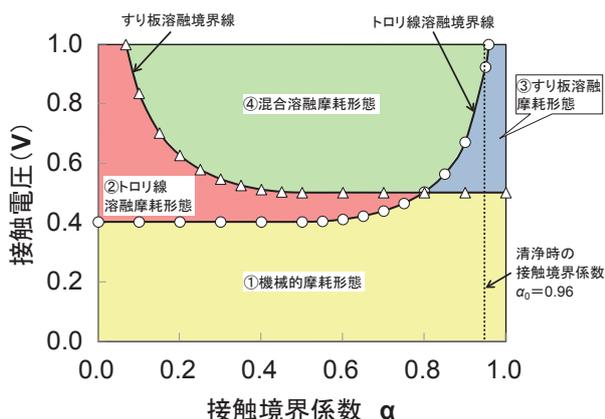


図8 摩耗形態マップ

(トロッリ線：硬銅，すり板：鉄系焼結合金)

接触境界係数 α を横軸に、接触電圧 V_c を縦軸とし、硬銅トロッリ線および鉄系焼結合金すり板の最高温度をマッピングすると、図7のようになる。なお、低速しゅう動につき摩擦熱は発生しないものとし、 $V_c=0V$ の条件におけるトロッリ線およびすり板の最高温度は室温 (=300K) としている。同図には、トロッリ線の融点 1334K およびすり板の融点 1646K を破線で示してある。

図7に基づいて、トロッリ線およびすり板の溶融条件をひとつの図にまとめたものが図8である。筆者らの以前の報告¹⁾より、材料の溶融が摩耗形態の遷移要因であることは明らかであり、図8に示すトロッリ線またはすり板の溶融条件から通電下の摩耗形態を以下の4種類に分類できる。以前の報告¹⁾で把握した各形態の摩耗傾向も合わせて記載する。

- ① トロッリ線とすり板のどちらも溶融しない領域で発生する摩耗形態を、機械的摩耗形態と呼称する。この形態では、通電時と無通電時の摩擦・摩耗特性は同等となる。図8で注目すべきは、 α が大きい条件では、接触電圧が 0.4V に達しても、トロッリ線が溶融せずに機械的摩耗形態となることである。
- ② トロッリ線のみが溶融する領域で発生する摩耗形態を、トロッリ線溶融摩耗形態と呼称する。この形態では、トロッリ線の摩耗が著しく増大する。
- ③ すり板のみが溶融する領域で発生する摩耗形態を、すり板溶融摩耗形態と呼称する。この形態では、すり板の摩耗が著しく増加する。一方で、トロッリ線の摩耗は無通電時と同等になる。
- ④ トロッリ線とすり板のどちらも溶融する領域で発生する摩耗形態を、混合溶融摩耗形態と呼称する。報告¹⁾ではこの形態を確認していないが、どちらも溶融することから、トロッリ線とすり板の摩耗は増加するものと考えられる。

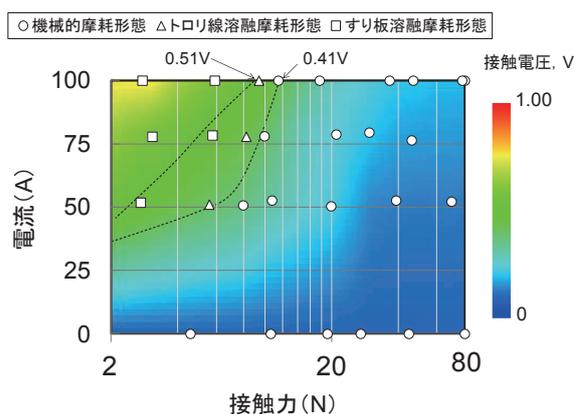


図9 接触電圧と摩耗形態の相関関係

(トロッリ線：硬銅，すり板：鉄系焼結合金)

以上より、図8は摩耗形態の遷移条件を定量的に示すものであり、これを「摩耗形態マップ」と呼称することとする。また、摩耗形態の支配パラメータを縦軸である接触電圧、横軸である接触境界係数、トロッリ線とすり板の溶融境界線を決定する融点に特定することができる。

4. ジュール熱に起因する摩耗メカニズム

図8の摩耗形態マップに基づいて、報告¹⁾の摩耗試験で確認された摩耗現象を説明し、摩耗メカニズムについて考察する。図9は報告¹⁾で得られた摩耗形態のプロット図であるが、コンターを接触電圧にしたものである。

(1) 機械的摩耗形態の発生メカニズム

図8より、接触電圧が小さく電極内の最高温度が両材料の融点に達しない条件では、接触境界係数 α がどのような値であっても、すなわち被膜抵抗の有無によらずトロッリ線およびすり板が溶融することはない。したがって、図9において接触電圧が 0.41V 未満の条件では、機械的摩耗形態になったと考える。

(2) トロッリ線溶融摩耗形態の発生メカニズム

図8において接触電圧が 0.4V 以上、かつ 0.5V 未満の条件では、被膜の存在によらずすり板が溶融することはない。一方で、トロッリ線の溶融は α によって変化する。

- (a) トロッリ線の表面に被膜抵抗が存在しない場合、硬銅トロッリ線と鉄系焼結合金すり板の組合せでは式(7)より $\alpha = \alpha_0 = 0.96$ となる。この場合は、図8より機械的摩耗形態となり、トロッリ線表面が溶融することはない。
- (b) トロッリ線の表面に被膜抵抗が存在する場合、すなわち α が小さい場合は、トロッリ線表面の温度が上

昇し、被膜を含むトロリ線が溶融する。

通電摩耗試験では、しゅう動毎に被膜抵抗や摩耗粒子の除去ができないため、その存在を無視することはできない。そのため、図9において接触電圧が0.41V以上、0.51V未満の条件では、トロリ線溶融摩耗形態になったものと考えられる。

(3) すり板溶融摩耗形態の発生メカニズム

図8より、硬銅トロリ線と鉄系焼結合金すり板の組合せでは、清浄な接触状態における α は0.96となる。そのため、 α が多少変動しても接触電圧が0.51V以上になるとすり板は溶融し、すり板の溶融特性に対する被膜抵抗の影響は小さいといえる。そのため、図9では接触電圧が0.51V以上となる条件すべてにおいて、すり板が溶融したものと考える。

すり板表面が溶融すると、すり板表面に酸化膜などの被膜抵抗が形成されるため、式(7)より α が増加して0.96以上になり、すり板のみが溶融するすり板溶融摩耗形態になることも十分考えられる。図9において、接触電圧が0.51V以上となる条件では、トロリ線が溶融しなかったと説明することができる。

以上より、既報告¹⁾において説明できなかった、すり板が溶融してもトロリ線が溶融しない現象も、本考察によって説明することができる。

5. おわりに

通電下におけるトロリ線とすり板の摩耗メカニズムを明らかにするべく、摩耗粒子や酸化膜などの被膜抵抗を考慮した通電接点モデルを作成し、通電下の電極内電位分布および温度分布を解析した。得られた結果は以下のとおりである。

- (1) 電極内の電位と温度の関係は放物線状となる（電位—温度放物線）。
- (2) 電位—温度放物線の形状は、接触電圧のみに依存し、材料の組合せや被膜抵抗に依存しない。
- (3) 電極内の最高温度は接触電圧の中間値となる電位位置で発生し、その値は $\varphi-\theta$ 理論に従う。
- (4) 電位—温度放物線のトロリ線とすり板の接触境界は、被膜抵抗によって変化する。
- (5) 電極の集中抵抗および被膜抵抗を用いた接触境界係数を新たに提案し、電位—温度放物線を定式化した。
- (6) 電極の溶融条件を定量的に示し、摩耗試験で確認された摩耗現象を説明することができる「摩耗形態マップ」を作成した。

文 献

- 1) 山下主税，菅原淳：通電下におけるトロリ線とすり板の摩耗形態，鉄道総研報告，Vol.27，No.8，pp.35-40，2013
- 2) R. Holm：Electric Contacts Theory and Applications 4th ed., pp.60-64, 1967.
- 3) P. G. Slade：Electrical Contacts Principles and Applications, CRC Press, pp. 4, 1999.