

ϕ - θ 理論を用いた集電材料の離線箇所における 溶融体積推定手法

山下 主税* 根本 公紀* 小原 拓也*

Estimation Method of Melting Volume of Current Collecting Materials at Contact Loss Point by using ϕ - θ Theory

Chikara YAMASHITA Koki NEMOTO Takuya OHARA

In order to control electric wear of current collecting materials such as contact wire and contact strip in electric railways, it is necessary to understand the relationship between current and melting volume at a contact loss point. In this paper, we propose a method for estimating melting volume of contact wire whose film resistance is taken into account, based on the ϕ - θ theory. To verify the proposed method, we carried out wear tests under two current conditions to measure melting depth, melting radius, and melting volume. The wear test results showed that experimental values of melting volume of the contact wire were in the range where contact boundary factor α was estimated from 0.90 to 0.94.

キーワード：トロリ線，溶融ブリッジ，電位—温度放物線，正規化電位，被膜抵抗

1. はじめに

電気鉄道では，電車線とパンタグラフを用いて電力を車両に供給しており，その集電材料であるトロリ線とすり板は接触力やしゅう動速度，通電電流によって摩耗する。過去の現地調査では，トロリ線とすり板の離線箇所において通電電流による摩耗が著大になることが報告されている¹⁾。離線箇所ではトロリ線の摩耗が局所的に進行することもあり，摩耗管理や取替などのメンテナンス上の課題である。また，集電材料の局所的な摩耗を抑制するため，摩耗の観点から集電電流の許容値などの設定が求められている。

パンタグラフの集電電流許容値については，岩瀬²⁾がトロリ線線条の温度上昇に基づいて検討しているが，摩耗に基づいていないという課題を述べている。通電電流による摩耗については，河野ら^{3) 4)}や織田⁵⁾が通電摩耗実験を行っており，離線時のアーク放電によって摩耗率が増加することを報告している。ただし，離線時と接触時の摩耗が混在しており，離線時の局所的摩耗量については未解明である。アーク放電による摩耗については，早坂ら⁶⁾が実験を行っており，アーク放電発生直前でトロリ線とすり板に溶融ブリッジが形成され，アーク放電発生時に溶融部分が飛散することで摩耗すると報告している。溶融ブリッジの形成については，笹本⁷⁾や窪野ら⁸⁾が理論的考察を行っている。ただし，酸化膜などの皮膜抵抗がない理想的状態におけるものであり，トロリ線やすり板のような屋外でしゅう動する接点については，皮膜抵抗も考慮する必要があると考える。

筆者らはこれまで，通電摩耗試験により集電材料のジュール熱による摩耗形態を分類し，トロリ線の著大摩耗の主要因が溶融ブリッジであると考察している⁹⁾。また，ジュール熱に起因する接点温度上昇を解析し，接点近傍の電位と温度の関係が放物線状になることを明らかにするとともに，皮膜抵抗を考慮したトロリ線とすり板の溶融条件を定式化し，ジュール熱に起因する摩耗形態のマッピングを行っている¹⁰⁾。

本稿では，通電しゅう動実験において溶融体積を測定可能なトロリ線を対象とし，離線箇所における溶融体積の推定手法を提案する。また，硬銅トロリ線と鉄系焼結合金すり板の組合せで実施した通電しゅう動試験結果と推定結果の比較によって提案手法を検証する。

2. 溶融体積の推定手法

これまでの研究¹⁰⁾で，図1に示す2つの電極からなる接点に電流 I [A] を通電し，接触電圧 V_c [V] になったときの x 軸上の温度 θ [K] と電位 ϕ [V] の関係は，図2に示す放物線になり，これを電位—温度放物線と呼称している。本章では，この電位—温度放物線を用いて接点内の温度勾配から溶融範囲を推定し，溶融体積を推定する手法を提案する。なお，本章で使用する記号をまとめたものを，表1に示す。

図2の横軸は電位を接触電圧で正規化したものであり，同放物線は次式で表される¹⁰⁾。

$$\theta = \sqrt{\frac{V_c^2}{L} \left\{ \left(\frac{\phi}{V_c} \right) - \left(\frac{\phi}{V_c} \right)^2 \right\}} + 300^2 \quad (1)$$

* 電力技術研究部 集電管理研究室

表 1 溶融体積推定に用いるパラメーター一覧

I	電流	[A]	R_{m1}	トロリ線溶融範囲の抵抗	[Ω]
V_c	接触電圧	[V]	R_{m2}	すり板溶融範囲の抵抗	[Ω]
ϕ	電位	[V]	R	接触抵抗	[Ω]
ϕ_c	接触境界の電位	[V]	L	ローレンツ数	[V^2/K^2]
α	接触境界における正規化電位		λ_1	トロリ線熱伝導率	[$W/(m \cdot K)$]
β_1	トロリ線溶融正規化電位		λ_2	すり板熱伝導率	[$W/(m \cdot K)$]
β_2	すり板溶融正規化電位		a	接点半径	[m]
θ	温度	[K]	d_1	トロリ線被膜厚さ	[m]
T_b	沸点	[K]	d_2	すり板被膜厚さ	[m]
T_{m1}	トロリ線融点	[K]	h_1	トロリ線溶融深さ	[m]
T_{m2}	すり板融点	[K]	h_2	すり板溶融深さ	[m]
ρ_1	トロリ線電気抵抗率	[$\Omega \cdot m$]	r_1	トロリ線溶融半径	[m]
ρ_2	すり板電気抵抗率	[$\Omega \cdot m$]	r_2	すり板溶融半径	[m]
ρ_{d1}	トロリ線被膜電気抵抗率	[$\Omega \cdot m$]	V_1	トロリ線溶融体積	[m^3]
ρ_{d2}	すり板被膜電気抵抗率	[$\Omega \cdot m$]	V_2	すり板溶融体積	[m^3]

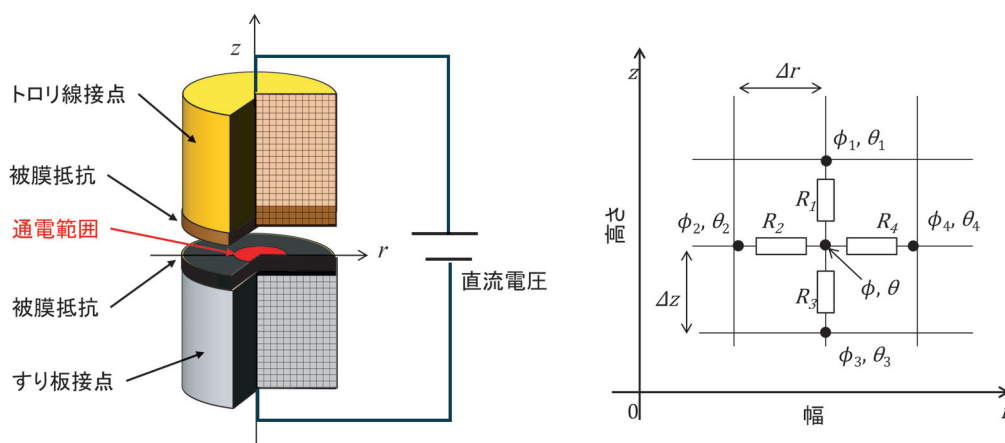


図 1 トロリ線とすり板の接点温度解析モデル¹⁰⁾

ここで、 L はローレンツ数 ($=2.4 \times 10^{-8}$ [V^2/K^2]) である。図 2 において、トロリ線とすり板の接触境界を示す正規化電位 α は、全接触抵抗に占めるすり板側の抵抗の割合に等しく、次式で表される¹⁰⁾。

$$\alpha = \frac{\phi_c}{V_c} = \frac{\frac{\rho_2 + \rho_{d2}d_2}{4a} + \frac{\rho_{d1}d_1}{\pi a^2}}{\frac{\rho_1 + \rho_2 + \rho_{d1}d_1 + \rho_{d2}d_2}{4a} + \frac{\rho_{d2}d_2}{\pi a^2}} \quad (2)$$

ここで、 ϕ_c は接触境界における電位 [V]、 ρ_1 、 ρ_2 は電気抵抗率 [$\Omega \cdot m$]、 ρ_{d1} 、 ρ_{d2} は皮膜の電気抵抗率 [$\Omega \cdot m$]、 d_1 、 d_2 は皮膜厚さ [m] である。なお、各定数の添え字である 1 はトロリ線、2 はすり板を示すものとする。 a は溶融開始時の接点半径 [m] とし、文献 11 より次式で表される。

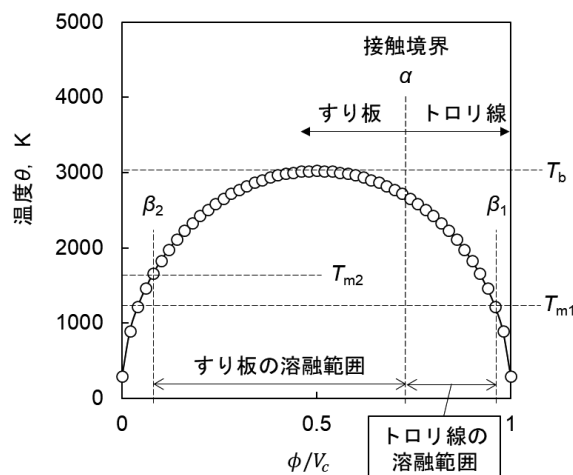


図 2 電位—温度放物線¹⁰⁾

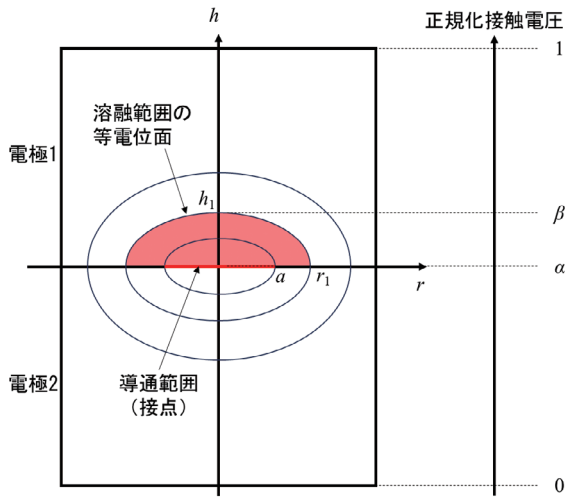


図3 接触境界近傍の集中抵抗

$$a = \frac{\sqrt{LI}(\lambda_1 + \lambda_2)}{8\lambda_1\lambda_2} \quad (3)$$

ここで、 I は電流 [A]、 λ_1 、 λ_2 はトロリ線およびすり板の熱伝導率 [W/(m・K)] である。

アーク放電の発生、すなわち接点の沸騰で溶融ブリッジが飛散する時、電位—温度放物線の最高温度は材料の沸点と一致する。そこで、アーク放電時の接触電圧は ϕ - θ 理論¹²⁾より求めることができる。

$$V_c = \sqrt{4L(T_b^2 - 300^2)} \quad (4)$$

ここで、 T_b は最高温度が発生する電極の沸点 [K] である。電位—温度放物線がトロリ線やすり板の融点を超える正規化電位を β_1 、 β_2 とすれば、 α と β の範囲が各電極の溶融範囲と考えることができる。なお、 β_1 、 β_2 は式(1)にトロリ線やすり板の融点 T_{m1} 、 T_{m2} [K]を代入することで求めることができる。

$$\beta_1 = \frac{1}{2} + \frac{1}{2V_c} \sqrt{V_c^2 - 4(T_{m1}^2 - 300^2)L} \quad (5)$$

$$\beta_2 = \frac{1}{2} - \frac{1}{2V_c} \sqrt{V_c^2 - 4(T_{m2}^2 - 300^2)L} \quad (6)$$

次に、接触境界から溶融範囲までの距離である溶融深さを求める。図3のように溶融範囲が等電位面に沿う場合を仮定する。 α から β_1 、 β_2 までの電気抵抗 R_{m1} 、 R_{m2} [Ω]は、Holm¹²⁾の報告より次式で表される。

$$R_{m1} = \frac{\rho_1}{2\pi a} \arctan \frac{h_1}{a} \quad (7)$$

$$R_{m2} = \frac{\rho_2}{2\pi a} \arctan \frac{h_2}{a} \quad (8)$$

ここで、 h_1 、 h_2 は接触境界からの溶融深さ [m] である。電極内では電流 I が不変であるため、 α から β_1 、 β_2 までの正規化電位は、式(7)、式(8)を全体の抵抗接触抵抗 R [Ω]で除したもので表すことができる。そこで、 β_1 、 β_2 を以下の式で表し、 h_1 、 h_2 の式に変換することで溶融深さを求めることができる。

$$\beta_1 = \alpha + \frac{R_{m1}}{R} = \alpha + \frac{2}{\pi}(1 - \alpha) \arctan \frac{h_1}{a}$$

$$h_1 = a \tan \frac{\pi}{2} \left(\frac{\beta_1 - \alpha}{1 - \alpha} \right) \quad (9)$$

$$\beta_2 = \alpha - \frac{R_{m2}}{R} = \alpha - \frac{2\alpha}{\pi} \arctan \frac{h_2}{a}$$

$$h_2 = a \tan \frac{\pi}{2} \left(\frac{\alpha - \beta_2}{\alpha} \right) \quad (10)$$

接点半径と溶融半径は異なり、電極内部の等温面が回転楕円体であることから、溶融半径 r_1 、 r_2 [m]は次式で表される。

$$r_1 = \sqrt{a^2 + h_1^2} \quad (11)$$

$$r_2 = \sqrt{a^2 + h_2^2} \quad (12)$$

以上より、1つの接点に電流が流れた場合の、トロリ線およびすり板の溶融範囲を半楕円球体とみなし、その体積 V_1 、 V_2 [m³]を次式で求めることができる。

$$V_1 = \frac{2\pi}{3} r_1^2 h_1 \quad (13)$$

$$V_2 = \frac{2\pi}{3} r_2^2 h_2 \quad (14)$$

式(9)～式(12)に示す通り、溶融半径 r [m]や溶融深さ h [m]は接点半径 a [m]の関数であり、接点半径は式(3)より電流 I [A]の関数となっている。したがって、式(13)、式(14)の溶融体積 V [m³]は電流 I [A]の3乗に比例する関数となっている。

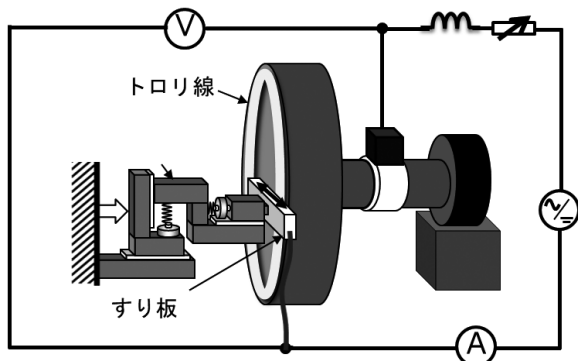


図4 高速集電材摩耗試験機概要

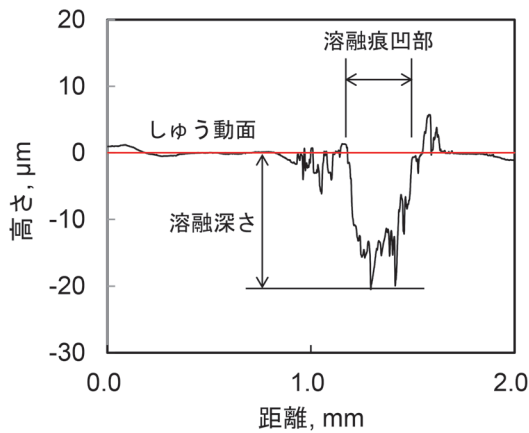


図5 溶融痕近傍のプロファイル例

表2 試験片特性

	トロリ線	すり板
材料	硬銅	鉄系焼結合金
融点, K	1,334	1,646
沸点, K ¹¹⁾	2,853	3,027
電気抵抗率, Ωm	1.77×10^{-8}	0.40×10^{-6}
熱伝導率, W/mK	373	25.3

表3 試験条件

すり板接触力, N	約 50
しゅう動速度, km/h	5
通電電流, A	100, 200
しゅう動時間, s	~60

3. 実験による検証

3.1 実験装置と実験条件

本稿で提案した手法は、トロリ線とすり板が離線する際、すなわちトロリ線とすり板の接点同士が開離する際の溶融体積を求めるものである。この手法の検証に用いる装置は、図4に示す高速集電材摩耗試験機とした。本装置は実物トロリ線を回転円盤に設置し、すり板を押し付けて通電しゅう動させるものである。ここで、回転円

盤内のトロリ線設置直径は2mであり、円周は約6.3mである。溶融体積の推定手法は定常状態で用いられる ϕ - θ 理論を活用しているため、検証試験はできるだけ低速でしゅう動させることが求められる。本装置は過去の摩耗試験に用いた直動摩耗試験機⁹⁾よりも接触力の変動が大きく、低速でしゅう動させても離線によるアーク放電が頻発するため、推定手法の検証試験として適当と考えた。また、本装置は直動摩耗試験機よりも通電電流を大きく設定可能であり、本研究の目的である許容電流値の策定に資する大電流条件における結果が得られる。

表2に試験に供する硬銅トロリ線および鉄系焼結合金すり板試験片の物性値を示す。なお、沸点については両者の母材である銅と鉄の沸点¹¹⁾を記載した。また、表3に試験条件を示す。すり板の片当たりを防ぐため300km/hでなじみ試験を行った後、トロリ線表面の移着物を除去するためトロリ線表面を切削してから本試験を行った。接触力はパンタグラフ押付力に近い50N、しゅう動速度は試験機で設定可能な最も低い速度である5km/h、通電電流は100Aと200Aとした。ここで、通電電流が100A以下では、溶融痕が小さくなり、試験片の取外しが困難な高速摩耗試験機では溶融痕の測定が困難と判断し、100A以上の条件とした。発生した溶融痕を保存し測定するため、試験開始後にアーク放電が数回確認できた時点で試験を終了し、すり板の接触力を除荷した。トロリ線の溶融痕は概ね保存できたが、すり板は同じ箇所できゅう動を続けたため、溶融痕は保存できなかった。そこで、トロリ線の溶融痕について深さや半径を測定した。

試験後のトロリ線しゅう動面を確認し、各溶融痕について粗さ計(ミットヨ製 SJ-310 (0.75mNタイプ))を用いて測定距離5mmのプロファイルを数回測定した。しゅう動面のプロファイル拡大例を図5に示す。溶融痕と考えられる箇所周辺のしゅう動面を基準値とし、溶融痕凹部の最大深さを測定した。溶融痕は電極内の等温面に沿って回転楕円体状となると考えられるため、数回測定した内の最大値を溶融深さとした。また、溶融痕を光学顕微鏡(キーエンス製 VHX-100 175倍レンズ)で撮影し、溶融半径を計測した。光学顕微鏡の溶融痕写真例を図6に示す。溶融痕の周囲に飛散した溶融物やしゅう動痕によって完全な円形でない場合もあるが、ここでは明確な凹部外周の3点に円をフィッティングさせることで半径を算出した。測定した溶融半径と溶融深さを式(13)に代入することで、実験におけるトロリ線の溶融体積を算出した。

3.2 実験結果

図7に通電電流に対する溶融深さの推定値と実測値の比較を示す。鉄系焼結合金すり板を使用する新幹線の

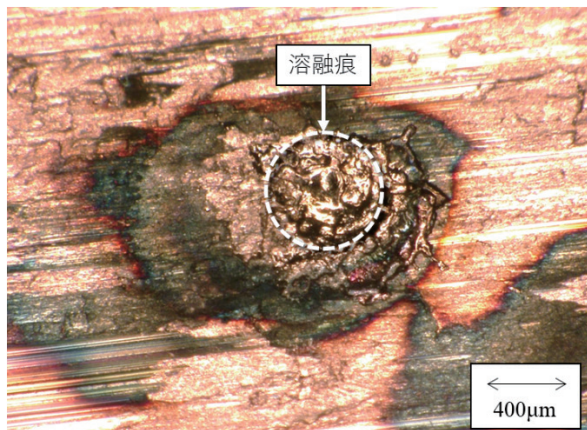


図6 溶融痕近傍の光学顕微鏡画像例

集電電流は300A程度であるため、推定値は電流300Aまで算出した。なお、推定に用いた式(4)の沸点 T_b は、すり板の沸点を使用した。これは、硬銅と鉄系焼結合金の組合せの場合、すり板の電気抵抗率がトリ線よりも大きく、図2に示した電位-温度放物線における接触境界の正規化電位 α が0.5以上になり、最高温度がすり板側となるためである。

図7において、 α の値が減少するほど溶融深さの推定値は増加する傾向にあり、実測値は α が0.90から0.94の推定範囲に点在した。ここで、式(2)と表2より、接触表面に被膜が形成されていない場合、すなわち被膜抵抗を考慮しない場合、硬銅トリ線と鉄系焼結合金すり板の組合せでは α が0.96となる。材料の電気抵抗率が小さくなることは考えにくいので、 α が0.96より小さくなることは、式(2)の分母が大きくなること、すなわちトリ線の皮膜抵抗が増加した状態を示す。なお、 α が0.96の場合、推定溶融深さは負の値となる。これは、図2の電位-温度放物線において、トリ線の融点 T_{m1} に相当する電位 β_1 よりも α が大きくなり、トリ線接点の温度が融点以下となるためであり、離線時も溶融しないことを意味する。

図8に通電電流に対する溶融半径の推定値と実測値の比較を示す。溶融半径に及ぼす α の影響は溶融深さほどではないが、 α の値が減少するほど溶融半径の推定値は増加する傾向にあった。実測値は推定した範囲から外れるものもあるが、電流の増加に対する溶融半径の増加傾向や値のオーダーは概ね整合したと考える。なお、図7では溶融深さの実測値は α が0.90から0.94までの推定値に点在したが、図8では溶融半径の実測値は α が0.84以下と、推定値よりも大きい場合があった。これは、実験においてトリ線の溶融部分の全てが飛散するとは限らないためと考えられ、早坂ら⁶⁾は離線時に溶融部分の1/5~1/10が飛散するという報告をしている。式(11)~式(14)から溶融半径も溶融深さの関数と考えると、

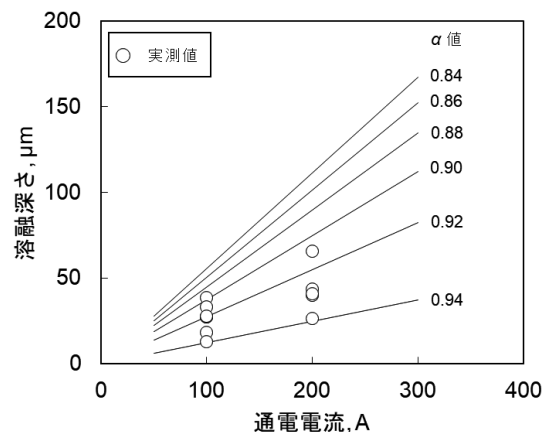


図7 溶融深さの推定値と実測値の比較

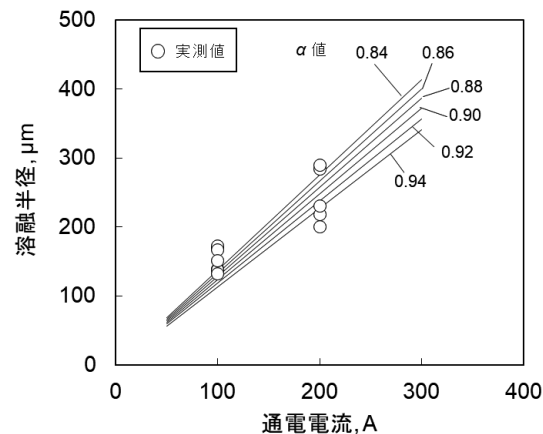


図8 溶融半径の推定値と実測値の比較

大まかに溶融体積は溶融深さの3乗に比例すると考えられ、その場合は実際の溶融深さの1/2~1/5が凹部深さとなると考えられる。図7において真の溶融深さが実測値の約2倍とすれば α が0.84以下となる場合もあり、図8の傾向に近づくと考える。

図9に通電電流に対する溶融体積の推定値と実測値の比較を示す。2章で述べた通り、通電電流と推定溶融体積の関係は直線的にはならず、溶融体積は通電電流の3乗に比例する。また、 α の値が減少するほど溶融体積の推定値は増加する傾向にあり、実測値は α が0.84から0.94までの推定値の範囲に点在した。ただし、前述した通り、実験において溶融した部分が全て飛散したとは限らず、実際の溶融体積は実測値よりも大きいことは充分に考えられる。そのため、トリ線の摩耗を考慮する場合は、残存する溶融部分が軟化しているなどを考慮する必要があると考える。

今回の実験では、しゅう動中の皮膜抵抗を測定することはできなかったため、 α の妥当性を検証することはできなかった。ただし、トリ線表面を切削した直後の実験であるため、トリ線表面に大きな皮膜抵抗が存在し

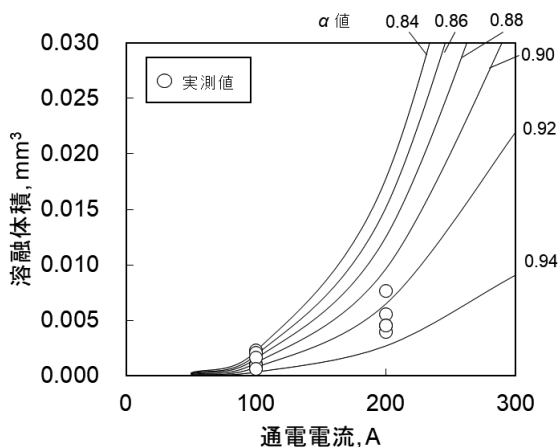


図9 溶融体積の推定値と実測値の比較

たとは考えにくく、 α が被膜を考慮しない0.96に近い値であったことは実情に整合するものと考えられる。

集電材料の離線時における溶融体積を定式化し、同じオーダーで推定できる可能性を示したことは有益である。一方で、本稿で提案した溶融体積の推定手法は ϕ - θ 理論を用いているため、低速しゅう動の準定常状態においてのみ成立するものである。そのため、高速で走行する電気鉄道における溶融体積を推定するためには、非定常状態における温度上昇を一般化する必要があると考える。今後、しゅう動速度によらず、集電材料のジュール熱に対する溶融体積を推定することで、走行条件に対する摩耗の予測や、集電電流に応じた離線率の許容値など、保全に関わる根拠の検討に活用できると考えられる。また、パンタグラフの電流許容値などの設計に関わる検討にも活用できると考えられる。

4. おわりに

集電材料であるトリ線やすり板の離線箇所における溶融体積を推定するべく、接点近傍の電位と温度の関係に着目し、皮膜抵抗を考慮した溶融体積推定式を提案した。また、通電しゅう動試験機を用いて、通電電流に応じた溶融体積を測定し、推定手法の精度検証を行った。以下に主な成果を述べる。

- (1) 接点近傍の定式化された電位—温度放物線より、材料の融点に達する電位と接触境界を示す電位で囲まれた範囲を溶融範囲とし、接点が沸騰する際の溶融深さおよび半径を推定することで、溶融体積を推定する手法を提案した。
- (2) 推定上、溶融深さや溶融半径は通電電流に比例し、溶融体積は通電電流の3乗に比例する。また、電位—温度放物線の接触境界を示す正規化電位 α が

減少するほど、トリ線の溶融体積は増加する。

- (3) 通電しゅう動試験の結果、トリ線の溶融体積実測値は α が0.84から0.94で推定した範囲に点在していた。実験では溶融した体積が全て飛散したとは限らず、実際の溶融体積は実測値よりも大きいと考えられるが、電流に対する増加傾向やオーダーは概ね整合した。

(本稿は文献¹³⁾をもとに内容を加筆・修正したものである。)

文献

- 1) 岩瀬勝：パンタグラフ集電と摩耗（I），鉄道技術研究報告，No.53，1959
- 2) 岩瀬勝：架線の容量とパンタグラフの集電容量，鉄道技術研究資料，Vol.14，No.1，pp.283-287，1957
- 3) 河野彰夫，大藪英雄，曾田範宗：集電用材料の摩耗に及ぼす離線アークの影響（第1報）—荷重を変化させた場合—，潤滑，Vol.27，No.4，pp.283-287，1982
- 4) 河野彰夫，大藪英雄，曾田範宗：集電用材料の摩耗に及ぼす離線アークの影響（第2報）—速度を変化させた場合—，潤滑，Vol.27，No.7，pp.527-532，1982
- 5) 織田修：新幹線における集電系の摩耗についての考察，鉄道技術研究報告，No.1323，1986
- 6) Hayasaka, T., Akagi, Y., "Influence of Arc Discharge on the Surface of a Contact Wire," IEEJ Transactions on Industry Applications, Vol.135, No.4, pp.327-334, 2015.
- 7) 笹本猛：コンタクト開離時のブリッジ転移の理論解析，電子通信学会論文誌C，Vol.J58-C，No.3，pp.101-108，1975
- 8) 窪野隆能，鈴木純司：ブリッジの寸法と転移量に関する理論的考察，電子通信学会論文誌C，Vol.J63-C，No.10，pp.667-674，1980
- 9) 山下主税，足立幸志：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，Vol.58，No.7，pp.496-203，2013
- 10) 山下主税，足立幸志：集電材料の摩耗形態マップ，トライボロジスト，Vol.62，No.2，pp.129-136，2017
- 11) 高木相：電気接点のアーク放電現象，コロナ社，pp.56-67，1995
- 12) Holm, R., "Electric Contacts: Theory and Applications, 4th ed.," Springer, pp.64-68, 2000.
- 13) 山下主税，根本公紀，小原拓也：電気鉄道における集電材料の通電による溶融体積の推定手法，トライボロジスト，Vol.67，No.5，pp.366-372，2022