

摩擦熱に起因するトロリ線とすり板の機械的摩耗形態の分類

山下 主税* 根本 公紀*

Classification of Mechanical Wear Modes of Contact Wire and Contact Strip caused by Frictional Heat

Chikara YAMASHITA Koki NEMOTO

In order to reduce the wear of the contact wire of OHL and the contact strip of a pantograph, it is necessary to clarify the wear mechanism, especially the mechanical wear mechanism that has not been clarified. In this study, a rotary wear tester which can measure the contact temperature caused by frictional heat is newly developed and wear tests were carried out. According to test results, wear modes were classified into four types on the basis of the friction coefficient and the wear condition of test specimens. In addition, it is clarified that the softening of material is an important factor for the transition phenomena of the wear mode.

キーワード：熱起電力，接点温度，摩擦熱，軟化，摩耗形態，摩耗形態遷移条件

1. はじめに

電気鉄道における集電材料である電車線のトロリ線やパンタグラフのすり板などの寿命は、摩耗が最大の支配要因となっている。摩耗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の抑制が必須であるが、摩耗対策の策定には摩耗メカニズムが解明されていないことが課題となっている。

従来、トロリ線とすり板の摩耗は電氣的摩耗と機械的摩耗の2つに大別され、電氣的摩耗の主要因はアーク放電による損耗、機械的摩耗の主要因は接点の凝着と考えられてきた。筆者らは、集電材料の摩耗メカニズムを解明するため、摩耗形態の遷移現象を詳細に調査し、電氣的摩耗については、アーク放電の直前に発生する溶融ブリッジが主要因であることを明らかにし、材料の電気抵抗率の組合せによって摩耗形態が複数存在することを報告している¹⁾²⁾。

一方、機械的摩耗については、未だそのメカニズムは未解明である。そこで本研究では、摩擦熱に着目して接点温度を測定可能な試験機を開発した。また、無通電摩耗試験の結果から機械的摩耗形態を分類し、各摩耗形態の遷移条件を明らかにした。本報告は、これらの結果について述べるものである。

2. 摩耗試験機の開発と実験条件

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。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（図1）。開

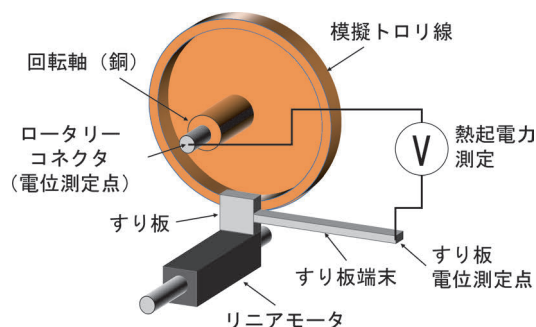


図1 回転摩耗試験機概念図

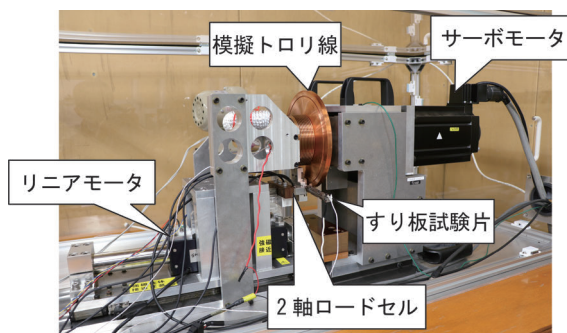


図2 摩耗試験機外観

発した摩耗試験機の外観写真を図2に示す。リニアモータとすり板試験片の間に2軸ロードセルを設置し、すり板の接触力と摩擦力を測定している。

接点温度 θ_c は、異種金属間のゼーベック効果³⁾を応用し、模擬トロリ線とすり板間の熱起電力 $V[V]$ を測定することで式(1)より求める。

$$\theta_c = \frac{V}{S} + \theta_0 \quad (1)$$

ここで、 S は相対ゼーベック係数 $[\mu V/K]$ 、 θ_0 は電位測定点における温度 $[^{\circ}C]$ である。接点温度の測定精度

* 電力技術研究部 集電管理研究室

表 1 試験片の材料特性

試験片	模擬トロリ線	すり板
種類	タフピッチ銅 (C1100) H 銅	鉄系焼結合金
主な成分	Cu 99.90 wt. %	素地: Fe 硬質成分: Cr, 潤滑成分: MoS ₂ , Bi, BN
硬さ	97 HV	100 HB
軟化点	約 200°C	約 400°C
ゼーベック 係数	4.0 μ V/K	13.6 μ V/K

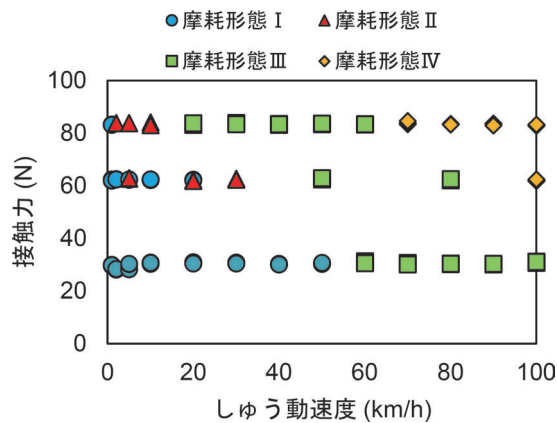


図 3 接触力としゅう動速度に応じた摩耗形態

を維持するためには、 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端末にはひだをつけ、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。

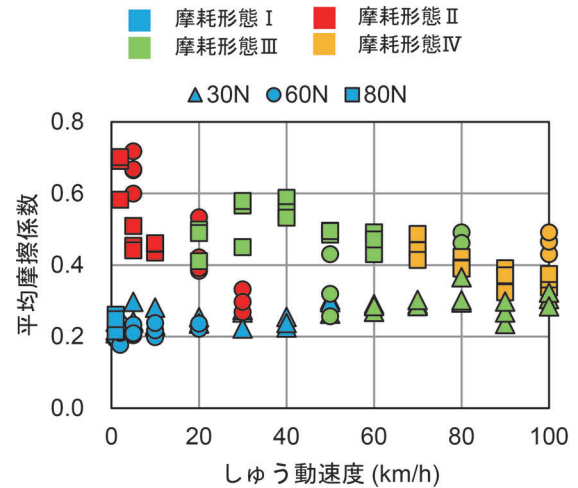
ゼーベック効果を活用するためには、模擬トロリ線とすり板は異種金属でなければならず、模擬トロリ線材をタフピッチ銅、すり板材を新幹線でも使用されている鉄系焼結合金とした。試験片の材料特性を表 1 に示す。試験条件として、すり板の接触面は 10mm×10mm、接触力は 30N、60N、80N の 3 種類とし、しゅう動速度は 2～100km/h とした。

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、試験時間は長くとも 1 分とした。

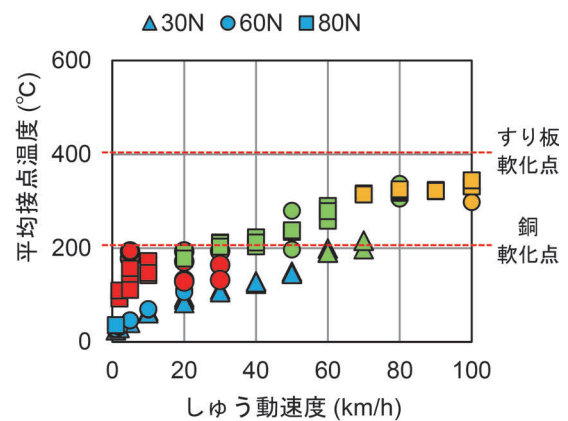
3. 摩耗試験結果および摩耗形態の考察

図 3 に摩耗試験を行った各試番の接触力としゅう動速度条件を示す。同図には後述する 4 種類の摩耗形態を区別してある。

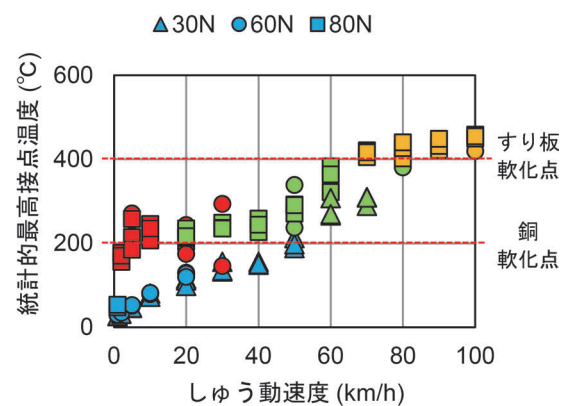
各接触力について、しゅう動速度と平均摩擦係数の関係、しゅう動速度と平均接点温度の関係、およびしゅう



(a) しゅう動速度と平均摩擦係数の関係



(b) しゅう動速度と平均接点温度



(c) しゅう動速度と統計的最低接点温度

図 4 摩耗試験結果

動速度と統計的最低接点温度の関係を図 4 に示す。ここで、平均接点温度は測定した熱起電力の平均値から式 (1) を用いて算出し、統計的最低接点温度は熱起電力の標準偏差 σ を用いて、平均値 + 3σ の値から算出した。図 4 の (b) および (c) には、銅およびすり板の軟化点を赤

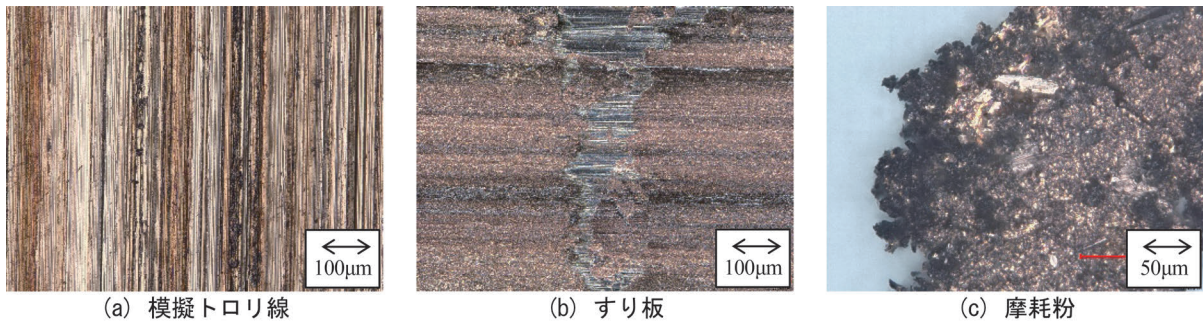


図5 光学顕微鏡観察結果（摩耗形態Ⅰ，接触力：60N，しゅう動速度 10km/h）

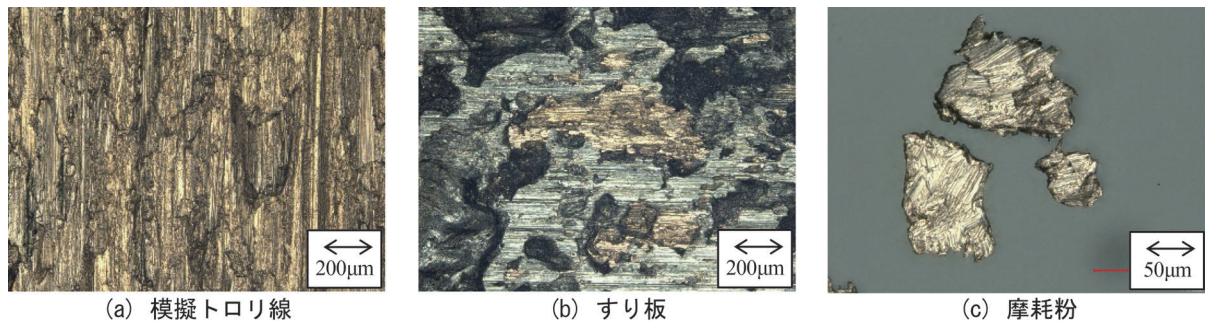


図6 光学顕微鏡観察結果（摩耗形態Ⅱ，接触力：60N，しゅう動速度 5km/h）

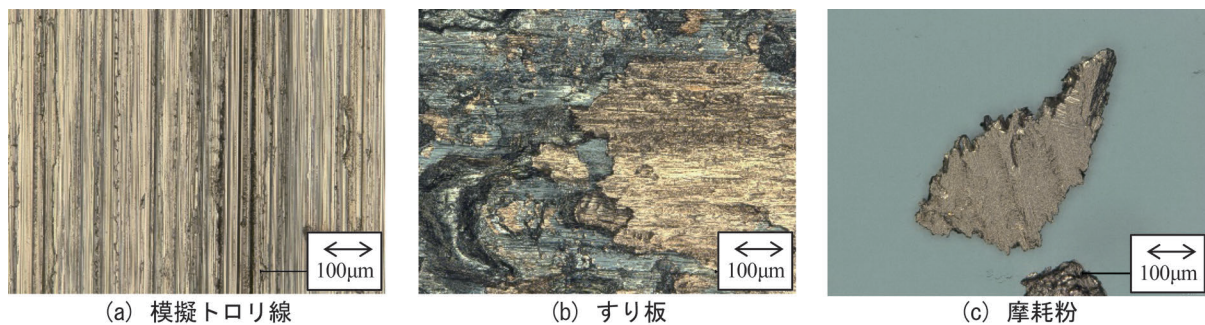


図7 光学顕微鏡観察結果（摩耗形態Ⅲ，接触力：60N，しゅう動速度 50km/h）

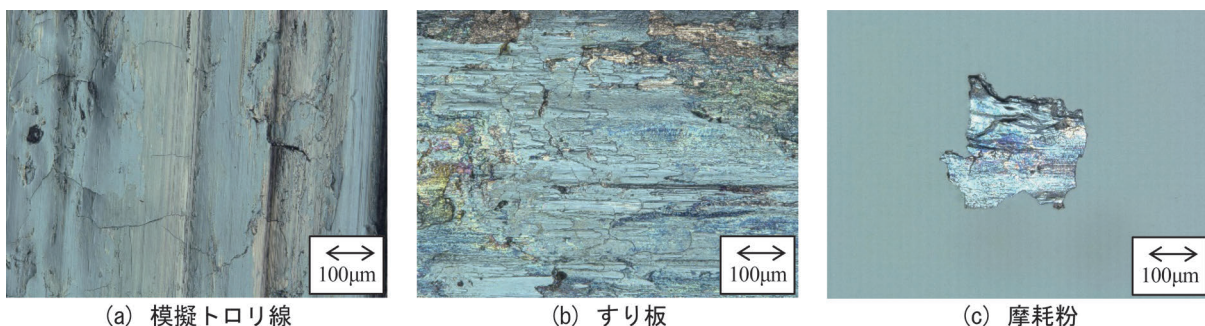


図8 光学顕微鏡観察結果（摩耗形態Ⅳ，接触力：80N，しゅう動速度 100km/h）

線で記載している。さらに、観察した摩耗面や摩耗粉の写真から、特徴的なものを図5～図8に示す。これらの図において、模擬トロリ線のしゅう動方向は下から上、すり板のしゅう動方向は左から右である。

これらの平均摩擦係数、接点温度、および摩耗面と摩耗粉の観察結果より、今回の試験条件範囲における摩耗形態を以下の4つに分類することができた。なお、図4において、各データを摩耗形態別に色分けしてある。

(1) 摩耗形態Ⅰ

この形態は、接触力 30N でしゅう動速度 1～50km/h の条件、接触力 60N でしゅう動速度 1～20km/h の条件、接触力 80N でしゅう動速度 1km/h の条件で確認した。なお、この形態における平均接点温度および統計的最高接点温度はいずれも 200℃ 以下であり、模擬トロリ線もすり板も軟化しない条件で発生していた。

この形態の特徴として、図4(a)に示すとおり平均

摩擦係数がしゅう動速度に依存せず0.2～0.3となる。一般に、滑り摩擦におけるクーロンの法則⁴⁾では、動摩擦係数はしゅう動速度に依存しないとされており、本形態の特徴と一致する。

この形態における摩耗面および摩耗粉の典型例を図5に示す。模擬トリ線表面は滑らかで線条痕が確認でき、すり板表面には数 μm オーダーの銅摩耗粉が堆積していた。なお、これらの堆積物は表面を拭うなどで容易に除去可能であった。観察した摩耗粒子は、すり板などに堆積した摩耗粉が凝集して脱落したものであった。

以上の特徴より、摩耗形態Ⅰは凝着摩耗⁴⁾に該当すると考えられる。

(2) 摩耗形態Ⅱ

この形態は、接触力60Nでしゅう動速度5～30km/hの条件、接触80Nでしゅう動速度2～10km/hの条件で確認した。接触力60Nでは、摩耗形態Ⅰと摩耗形態Ⅱが同じ条件で発生する場合があった。この形態における平均接点温度は200℃以下であり、統計的最高接点温度はしゅう動速度にかかわらず約200℃であり、模擬トリ線が瞬間的に軟化するがすり板は軟化しない条件で発生していた。

この形態の特徴として、図4(a)に示すとおり平均摩擦係数が摩耗形態Ⅰと比較して大きく、しゅう動速度の増加に伴い摩擦係数が減少する傾向を示した。また、この形態では接触力および摩擦力の変動が激しく、スティックスリップが発生していた。

この形態における摩耗面および摩耗粉の典型例を図6に示す。模擬トリ線表面には数百 μm オーダーの凹凸が確認できる。すり板表面には数百 μm オーダーの銅塊が移着しており、拭っても除去できなかった。摩耗粉は数百 μm オーダーの銅塊であった。

一般に、金属面が焼付くと摩耗面は荒れ、スティックスリップが発生する⁵⁾とされており、本形態の特徴と一致する。接点のしゅう動面が焼付くなど非常に強い固着が発生した場合、接触境界ではなく比較的軟らかい銅接点の内部で破壊・せん断が発生するが、材料の軟化で接点が破壊・せん断しやすくなることは十分に考えられる。摩耗形態Ⅱにおける接点温度波形は、図9に示すとおり接点温度が銅の軟化点である約200℃に達したところで急激に下がっており、上述したように銅の軟化点まで温度が上昇し、接点が破壊・せん断したものと考えられる。

接点の温度上昇は摩擦熱(=摩擦力×しゅう動速度)に起因するため、しゅう動速度が増加するほど200℃まで上昇するための摩擦力は小さくなる。このことが図4(a)においてしゅう動速度の増加に伴い摩擦係数が減少しているメカニズムと考えられる。

(3) 摩耗形態Ⅲ

この形態は接触力30Nでしゅう動速度60～100km/h

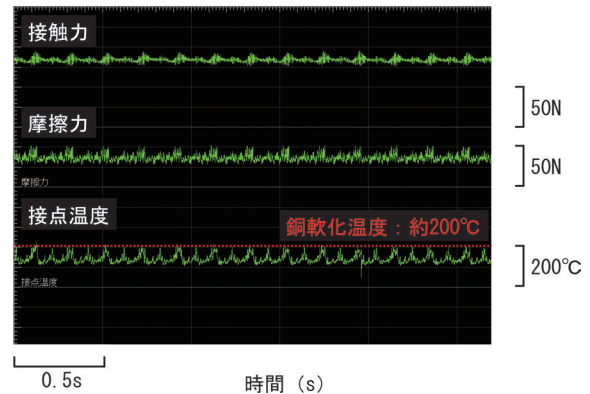


図9 摩耗形態Ⅱの測定波形（接触力：80N、しゅう動速度：10km/h）

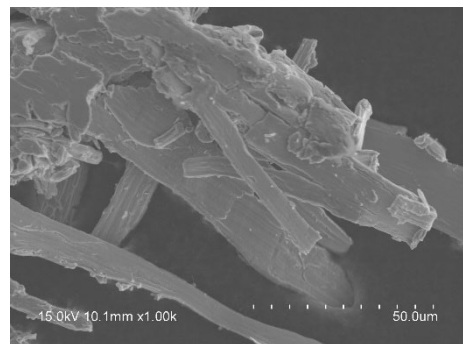


図10 摩耗形態Ⅲにおける摩耗粉 SEM 像

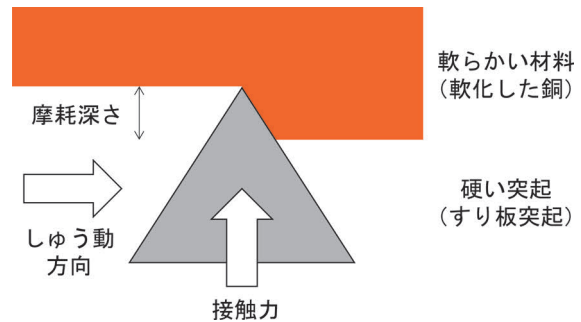


図11 アブレシブ摩耗モデル

の条件、接触力60Nでしゅう動速度50～80km/hの条件、接触80Nでしゅう動速度20～60km/hの条件で確認した。なお、この形態における平均接点温度は200℃以上、統計的最高接点温度は400℃以下であり、模擬トリ線は平均的に軟化するが、すり板は軟化しない条件で発生していた。

この形態の特徴として、図4(a)に示すとおりしゅう動速度の増加に伴い平均摩擦係数が増加する傾向を示した。

この形態における摩耗面および摩耗粉の典型例を図7に示す。模擬トリ線表面は滑らかで、線条痕が確認できる。すり板表面には、大小さまざまな銅が移着してお

り、拭っても除去できなかった。摩耗粉は、数百 μm オーダーの銅であるが、図 10 に示すようないくつかの細長い銅片が凝集したものであった。

以上の特徴から、摩耗形態Ⅲのメカニズムを考察する。接点同士の接触について、凝着や固着であれば、接点温度が銅の軟化点に達したところで破壊・せん断が発生して接触が終了する。一方、この形態では平均の接点温度が 200°C 以上であり、銅接点が軟化しても接触が継続し摩擦熱が接点に蓄積されているため、凝着や固着とは異なるメカニズムであると考えられる。また、模擬トリ線のみが軟化していること、模擬トリ線表面が線条痕であり、摩耗粉に細長い銅片が確認できることを鑑みると、摩耗形態Ⅲは図 11 に示すように軟らかい材料を硬い突起が削るアブレシブ摩耗⁶⁾に該当すると考えられる。

アブレシブ摩耗では、すり板突起が模擬トリ線に食い込んだ面積が大きいほど、摩擦係数が大きくなる⁷⁾。しゅう動速度が増加するほど接点温度が増加し、銅の硬さが低下するため、すり板突起の食い込み面積が増加し、摩擦係数が増加することは十分に考えられる。このことが、図 4 (a) においてしゅう動速度の増加に伴い摩擦係数が増加しているメカニズムと考えられる。

(4) 摩耗形態Ⅳ

この形態は接触力 60N でしゅう動速度 100km/h の条件、接触 80N のしゅう動速度 $70\sim 100\text{km/h}$ の条件で確認した。なお、この形態における平均接点温度は 200°C 以上、統計的最高接点温度は 400°C 以上であり、模擬トリ線とすり板が軟化する条件で発生していた。

この形態の特徴として、図 4 (a) に示すとおりしゅう動速度の増加に伴い平均摩擦係数が減少する傾向を示した。

この形態における摩耗面および摩耗粉の典型例を図 8 に示す。模擬トリ線は滑らかであり、鉄が移着していた。また、模擬トリ線表面には多数のき裂を確認でき、き裂内の表面が波打つような変形や大きくはく離した痕も確認できた。すり板表面には流動した痕を確認できた。摩耗粉は波打つように変形した剥片であり、表面に鉄が移着した銅剥片であった。

以上の特徴から、摩耗形態Ⅳのメカニズムを考察する。本摩耗形態ではすり板も軟化するため、アブレシブ摩耗とならず、接点が流動することで模擬トリ線表面への鉄の移着や、すり板表面への銅の移着など相互移着が生じる。また、模擬トリ線表面は凝着や切削による摩耗は減少するが、摩擦力によるせん断力が蓄積される。このせん断力の蓄積によって表面下にき裂が発生し、図 12 に示すデラミネーション⁸⁾もしくははく離摩耗⁹⁾が発生したものと考えられる。摩耗形態Ⅳでは、すり板接点が軟化することで流動し、接点同士の接触は終了すると考えられる。摩耗形態Ⅱと同様に、しゅう動速度によ

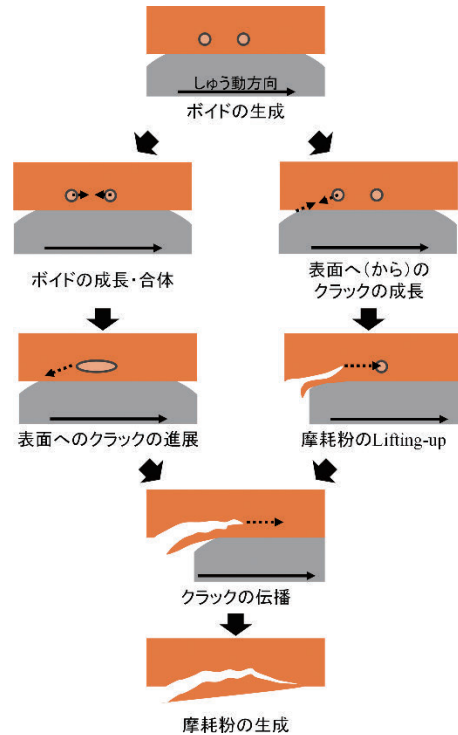


図 12 デラミネーション摩耗モデル

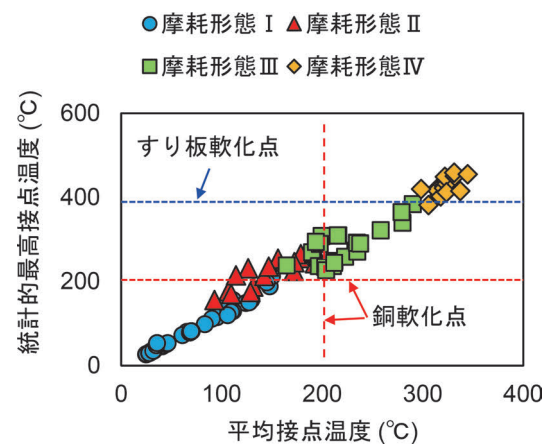


図 13 接点温度に応じた摩耗形態

らずすり板軟化点約 400°C に達する摩擦熱 (= 摩擦力 $\times$ しゅう動速度) が必要だとすれば、しゅう動速度が増加するほど必要な摩擦力は小さくなる。このことが、図 4 (a) においてしゅう動速度の増加に伴い摩擦係数が減少しているメカニズムと考えられる。

従来は、しゅう動条件によらず機械的摩耗形態のメカニズムはもっぱら凝着摩耗であるとされてきた。一方、本研究ではしゅう動条件によって摩耗形態が 4 種類存在することがわかり、凝着摩耗はそのうちの一つに過ぎなかった。実フィールドにおいてトリ線の摩耗率や摩耗面の状態が異なることは、摩耗形態が異なっている可能性を示唆するものであり、本研究の知見は実効的な摩

耗低減対策を検討する上で有用と考える。

過去の研究のように、図3のように摩耗形態と接触力やしゅう動速度を関連付けようとしても、各摩耗形態が発現する条件に法則性を見出すことはできず、定性的な説明しかできない。また、摩耗試験機は実フィールドの設備とは異なるため、接触力やしゅう動速度などの試験条件をそのまま実フィールドに当てはめることはできないと考える。

一方、本研究では接点温度を測定することで、摩耗形態の発現条件を図13のようにまとめることができた。同図は接点温度に応じた摩耗形態であり、摩耗形態の発現には材料の軟化が重要な因子であることがわかる。温度上昇による材料の軟化現象は、材料毎に固有の現象であるため、設備が異なっても適用できる普遍的な法則性を示唆するものである。今後の展開として、実フィールドのしゅう動および通電条件から、接点温度を推定することで、定置試験で確認した摩耗現象と関連づけを試みる予定である。なお、摩擦熱から接点温度を推定する数値解析モデルについては、別途開発している¹⁰⁾が、本報告では割愛した。

本章における各摩耗形態の考察では、摩耗形態Ⅲと摩耗形態Ⅳは接点温度の上昇による模擬トリ線とすり板の軟化に起因しており、図13からも明確である。一方、摩耗形態Ⅰと摩耗形態Ⅱについては、いずれも軟化しない条件で発現しており、さらには同じ接触力およびしゅう動速度条件で発生することもある、このことから、単にしゅう動条件や接点温度の整理では摩耗形態Ⅰと摩耗形態Ⅱの遷移メカニズムまでは解明できず、今後の課題と考える。また、本研究はすり板のバルク温度の影響を排除して、接点温度の上昇に着目したが、実フィールドではすり板がしゅう動し続けることでバルク温度が上昇するため、今後はバルク温度の影響も考慮する必要があると考える。

4. まとめ

集電材料であるトリ線およびパンタグラフすり板の摩耗抑制対策などメンテナンスコストの低減に資するため、未解明であった機械的摩耗のメカニズム解明に取り組んだ。本研究では、新たに開発した回転摩耗試験機を用いて摩耗試験を実施し、模擬トリ線およびすり板の摩擦係数や摩耗面から摩耗形態を分類した。また、摩耗試験中に接点の温度を測定し、各摩耗形態の遷移条件を

検討した。主な成果を以下に示す。

- (1) 模擬トリ線とすり板間の熱起電力を測定することで、しゅう動中の接点温度を測定可能な回転摩耗試験機を開発した。
- (2) 摩耗試験の結果、銅と鉄系焼結合金すり板の組合せにおいては、機械的摩耗には以下の4種類の形態が存在し、各摩耗形態のメカニズムについて考察した。
 摩耗形態Ⅰ：凝着摩耗
 摩耗形態Ⅱ：焼付き摩耗
 摩耗形態Ⅲ：アプレシブ摩耗
 摩耗形態Ⅳ：軟化・流動・デラミネーション
- (3) 平均接点温度と統計的最高接点温度で4種類の摩耗形態を分類した結果、平均接点温度が銅の軟化点に達しなければ摩耗形態Ⅰもしくは摩耗形態Ⅱ、平均接点温度が銅の軟化点を超え、かつ統計的最高接点温度がすり板の軟化点未満であると摩耗形態Ⅲ、統計的最高接点温度がすり板の軟化点を超えると摩耗形態Ⅳとなることを明らかにした。

文 献

- 1) 山下主税，菅原淳：通電条件下におけるト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) 山下主税：通電下における集電材料の摩耗メカニズム，鉄道総研報告，Vol.31，No.2，pp.35-40，2017
- 3) 平田哲夫，田中誠，熊野寛之，羽田善昭：図解エネルギー工学，森北出版，pp.173-174，2011
- 4) 佐々木信也：数値解析と表面分析によるトライボロジーの解明と制御，テクノシステム，pp.47-56，2018
- 5) 笹田直：摩耗，養賢堂，(2008)
- 6) 水本宗男，宇佐美賢一：摩耗はなぜ起こるのか，ターボ機械，Vol.24，No.5，pp.267-273，1996
- 7) J. Goddard, H. Wilman, "A theory of friction and wear during the abrasion of metals," Wear, Vol.5, No.2, pp.114-135, 1962.
- 8) N.P. Suh, "The delamination theory of wear," Wear, Vol. 25, pp.111-124, 1973.
- 9) M.F. Ashby, S.C. Lim, "Wear-mechanism Maps," Acta metal, Vol.35, No.1, pp.1-24, 1987.
- 10) 山下主税，根本公紀：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，第27回鉄道技術・政策連合シンポジウム，S7-2-4，2020