

通電条件下におけるトロリ線とすり板の摩耗形態

山下 主税* 菅原 淳*

Wear Modes of Contact Wire and Contact Strip under Electric Current Condition

Chikara YAMASHITA Atsushi SUGAHARA

It is necessary to understand actual phenomena generated at the electric contacts between contact wire and contact strip to suggest the measures for reducing wear. For our study on classification of the wear modes and the transition conditions between hard-drawn copper contact wire and iron-based sintered alloy contact strip, a linear wear testing method has been newly introduced. As a result, we found that the contact temperature which was estimated from contact voltage depended on electric current and load, and then friction and wear properties of the current collectors under electric current condition could be classified into three types by the maximum contact temperature.

キーワード：トロリ線，すり板，直動型摩耗試験機，摩耗形態， $\phi - \theta$ 理論，接点温度，融点

1. はじめに

電気鉄道では、変電所から送られる電力は電車線を介して車両に供給される。電力の授受は集電材料であるトロリ線とパンタグラフのすり板を接触させて行うため、当然ながら接触しゅう動による摩耗が発生し、両部材ともに一定期間を経過すると取替が必要となる。近年は車両の高速化や集電電流の増大などの要因により、集電材料の摩耗も増大する傾向にあり、集電材料のメンテナンスコストを低減するための摩耗対策が求められている。

従来の研究では、トロリ線とすり板の通電下における摩耗形態は、経験的に機械的摩耗と電気的摩耗に大別され、特に電気的摩耗は離線アークに起因し、著大な摩耗を引き起こすと報告されている¹⁾。しかしながら、同報告の現地測定結果において、常にアークが発生する箇所ではトロリ線の摩耗が非常に小さいという報告があることから、電気的摩耗のメカニズムは未だ明確ではないといえる。

トロリ線やすり板の根本的な摩耗対策を提案するためには、通電下の摩耗メカニズムを解明する必要があり、そのためにはまず、摩耗形態の明確な区別とその遷移条件を明らかにする必要があると考える。そこで、摩耗メカニズム解明を主眼とした摩耗試験機を新たに開発し、同試験機による試験結果に基づき、通電下における集電材料の摩耗形態の分類およびそれら摩耗形態の遷移条件を考察したので報告する。

2. 試験方法

2.1 試験装置

従来、集電系材料の摩耗特性調査のため、ピン・オン・ディスクなどの小型回転型摩耗試験機から大型の回転摩耗試験機まで様々な試験機が製作されてきたが、これら摩耗試験機の主な目的は試作開発した集電材料の摩耗特性評価であり、特に大型のものは営業列車と同程度の高速走行を模擬することを主眼としていた。しかしながら、摩擦間隔や荷重変動について実機の条件と異なり、実際の摩耗現象が再現されていないと指摘もあった²⁾。一方で、本試験の目的は摩耗メカニズムの解明であり、摩耗試験時のパラメータを厳密にコントロールすることが重要となる。そこで、こうした試験を行う上で必要な検討事項を以下に示す。

- (1) 実機で発生するすり板荷重に依存した摩耗形態を区別するためには、荷重変動による摩耗形態の混在を抑えることが求められるため、しゅう動中のすり板荷重変動を抑制する。
- (2) 実機に近いトロリ線への熱影響を再現するため、パンタグラフの通過間隔を考慮したしゅう動インターバルを設定する。
- (3) 通電摩耗の本質を理解するためには、通電発熱のみに着目することが重要と考え、従来のような高速すべり試験による摩擦熱の影響を抑制できる低しゅう動速度における摩耗試験とする。
- (4) 接触面の状態や接点の温度を高精度で推定するため、トロリ線とすり板間の接触電圧を精緻に測定する。

* 電力技術研究部 集電管理研究室

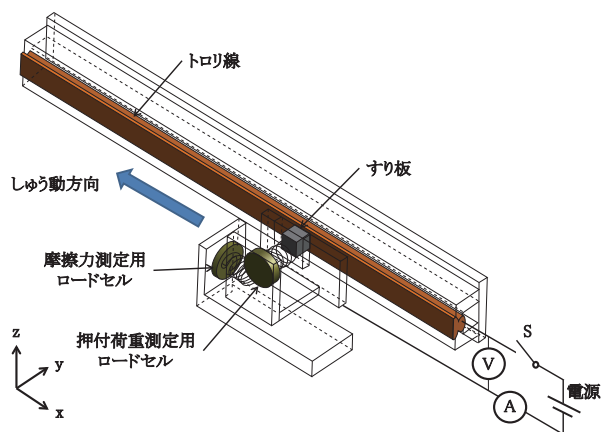


図1 直動型摩耗試験機

--- 摩耗試験前 --- 摩耗試験後

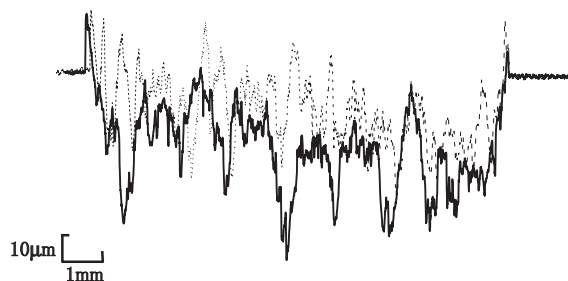


図2 トロリ線表面プロファイル

表1 試験条件

トロリ線材	硬銅
すり板材	鉄系焼結合金
押付荷重 (N)	2 ~ 80
すべり速度 (m/s)	0.2
電圧 (V)	DC100
電流 (A)	0, 50, 80, 100
摩擦距離 (mm)	250
摩擦インターバル (s)	約 5.0
しゅう動回数 (cycle)	3,000

表2 試験片物性値

	トロリ線	すり板
成分	Cu (99.9%)	Fe (78.6%), Cr (16.5%), S (0.9%)
密度 (g/mm ³)	8.91	7.10
電気抵抗率 (μΩm)	1.77 × 10 ⁻²	0.40
熱伝導率 (W/mK)	373.0	25.3
比熱 (J/kgK)	381	485
融点 (K)	1,334	1,646

以上の要件を実現するため、図1に示すようにトロリ線材を直線的に配置し、すり板を間欠しゅう動させる直動型摩耗試験機を開発した。すり板のy方向(押付方向)駆動はボールねじ式、x方向(しゅう動方向)の駆動は電磁式のリニアアクチュエータを用い、すり板をばねによってトロリ線に押し付けることで荷重を負荷する。押付荷重や摩擦力はすり板のy方向とx方向にばねを介してロードセルを設置することで測定する。また、すり板の移動を往路で接触、復路で非接触とすることで摩擦方

向を一方とし、所定の荷重が負荷されている間のみ通電するように開閉器Sを操作する。従来の回転型摩耗試験機では通電機構としてスリップリングなどを必要としたが、直動型摩耗試験機ではそれらが不要であるため、接触電圧を精緻に測定することが可能である。

2.2 試験条件

試験条件を表1に示す。本試験で使用するトロリ線材は一般的に使用されている硬銅、すり板材は新幹線などで使用されている鉄系焼結合金を採用した。実使用されているすり板材は各種あるが、ここで鉄系焼結合金を選択した理由は、成分分析による判別を容易にするためである。それぞれの物性値を表2に示す。すべり速度は摩擦熱を抑制し、かつ低荷重条件において離線が生じにくい条件を選定した。電流は無通電から100Aまで4段階の条件を設定した。また、営業線において1列車に複数パンタグラフが装備されている場合を想定し、トロリ線の定点を通過するパンタグラフのインターバルを模擬するため、摩擦インターバルを約5秒とした。

すり板の幅をトロリ線のしゅう動面幅よりも小さくすることで、トロリ線の表面には摩耗しない面が残る。この面を基準面とし、粗さ計を用いて図2のようにトロリ線の表面プロファイルを測定することで深さ方向の摩耗面積を算出できる。なお、トロリ線表面プロファイルを走査する方向は図1のz方向である。このプロファイル測定を5か所で行い、それらの平均摩耗面積Aを用いてトロリ線摩耗率 W_{st} (mm²/N・cycle) を次式で算出した。

$$W_{st} = \frac{A}{P \cdot N} \quad (1)$$

ここで、Pは荷重(N)、Nはしゅう動回数(cycle)である。すり板比摩耗量 W_{ss} (mm³/N・m) は試験前後の質量差より次式で算出した。

$$W_{ss} = \frac{\Delta m}{\rho \cdot P \cdot L} \quad (2)$$

ここで、 Δm は摩耗試験前後のすり板質量差 (g)、 ρ は密度 (g/mm^3)、 L は総しゅう動距離 (m) である。

3. 摩耗試験結果

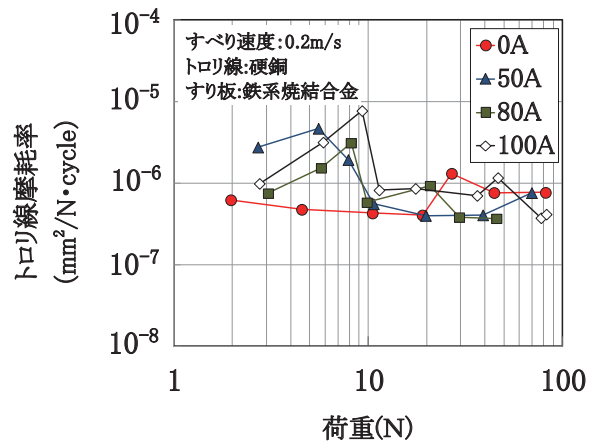
無通電および3段階の電流を通電した場合のトロリ線摩耗率、すり板比摩耗量および摩擦係数と荷重の関係を図3に示す。これらの図より、無通電しゅう動では摩擦と摩耗特性は荷重に依存せず、ほぼ一定の値を保つことがわかる。この無通電条件における摩耗表面および摩耗粒子の典型的な走査電子顕微鏡 (SEM) 写真を図4に示す。なお、成分分析は硬銅トロリ線の主成分であるCu、鉄系焼結合金すり板の主成分であるFeについて実施した。図4 (a), (b) より、トロリ線およびすり板表面にはすべり方向にせん断された痕が確認でき、双方の移着も少なかった。また図4 (c) より、摩耗粒子は主にCuの剥片であり、凝着摩耗等によりトロリ線表面から剥がれたものとする。この形態を従来の分類どおり機械的摩耗と呼称する。

一方、通電した場合の摩擦・摩耗特性より、通電下の摩耗形態は以下の3つに分類できる。

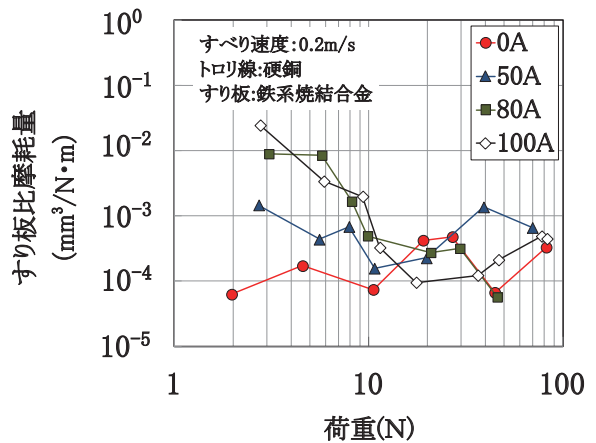
- (1) 図3 (a), (b), (c) より、通電かつ10N以上の荷重条件における摩擦・摩耗特性は無通電時と同等である。トロリ線とすり板の摩耗表面および摩耗粒子も図4と同様であり、通電下であってもトロリ線やすり板に溶融痕は確認できず、通電電流の影響は観察されなかったため、機械的摩耗形態とする。
- (2) 図3 (a) より、通電かつ荷重6~10Nの条件においてトロリ線摩耗率が無通電時の摩耗率よりも1桁大きい値を示し、極大値となる。このトロリ線摩耗率が極大となる荷重は、電流の増加に伴い増加する傾向を示し、図3 (c) では同荷重条件において、摩擦係数が無通電時より増加することがわかる。

このトロリ線摩耗率と摩擦係数が増加する条件における典型的な摩耗表面および摩耗粒子のSEM写真を図5に示す。図5 (a) よりトロリ線表面では主成分であるCuが溶融し、図5 (b) より、すり板表面に溶融したCuが移着していることがわかる。一方ですり板表面にはFeの溶融痕は観察されなかった。また図5 (b), (c) より、すり板に移着したCuの端からロール状の摩耗粒子が脱落していることがわかる。明らかに機械的摩耗形態とは違う様相を示し、トロリ線のみが溶融していることから、この形態をトロリ線溶融摩耗形態と呼称する。

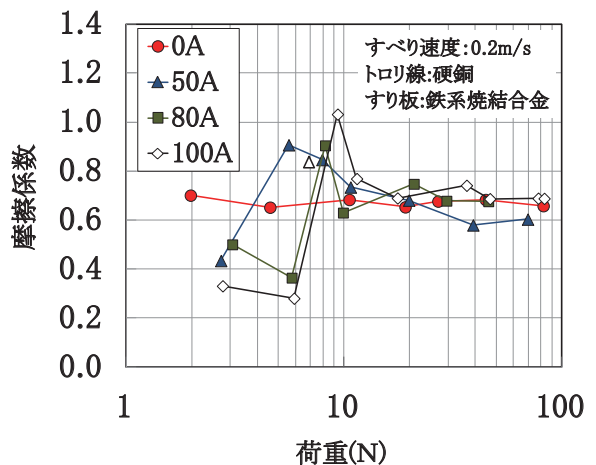
- (3) 図3 (b) より、通電かつ6N以下の荷重条件では、荷重の減少に伴いすり板比摩耗量が著しく増加し、無通電時よりも1~2桁大きい値となる。また図3 (c) では、同荷重条件において摩擦係数が無通電



(a) トロリ線摩耗率



(b) すり板比摩耗量



(c) 摩擦係数

図3 摩耗試験結果

時より減少することがわかる。一方、図3 (a) より通電かつ6N以下の荷重条件では、荷重の減少に伴いトロリ線摩耗率の増分は減少し、通電電流80A以上かつ荷重3N近傍の条件では無通電時と同等に

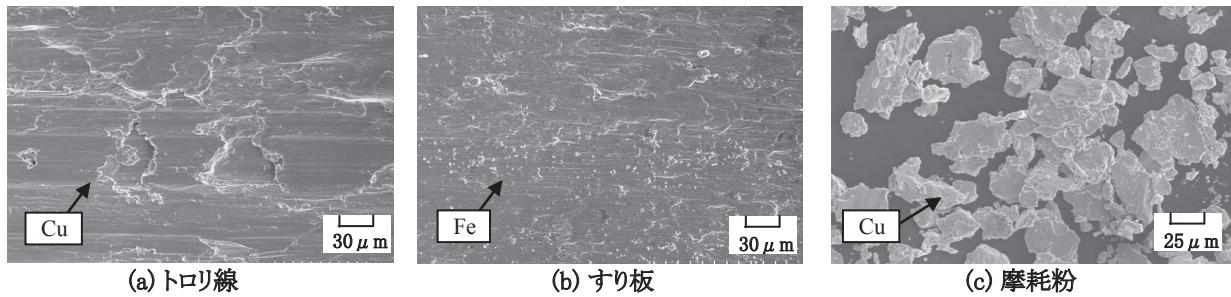


図4 摩耗面および摩耗粉のSEM像（荷重：27 N，すべり速度：0.2 m/s，電流：0 A）

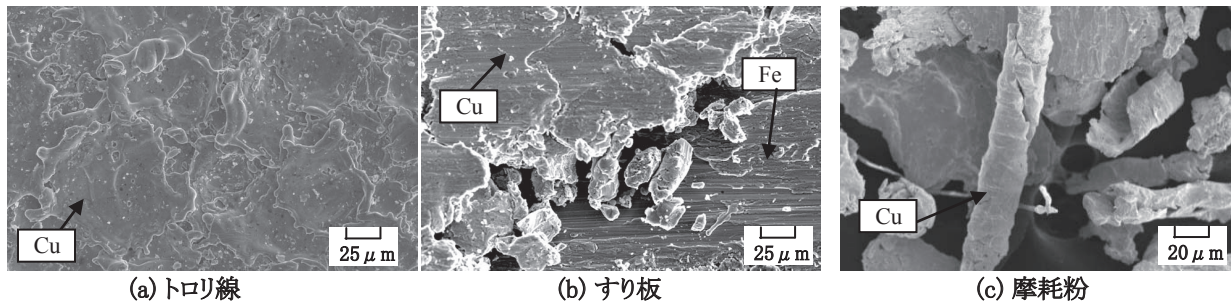


図5 摩耗面および摩耗粉のSEM像（荷重：9.3 N，すべり速度：0.2 m/s，電流：100 A）

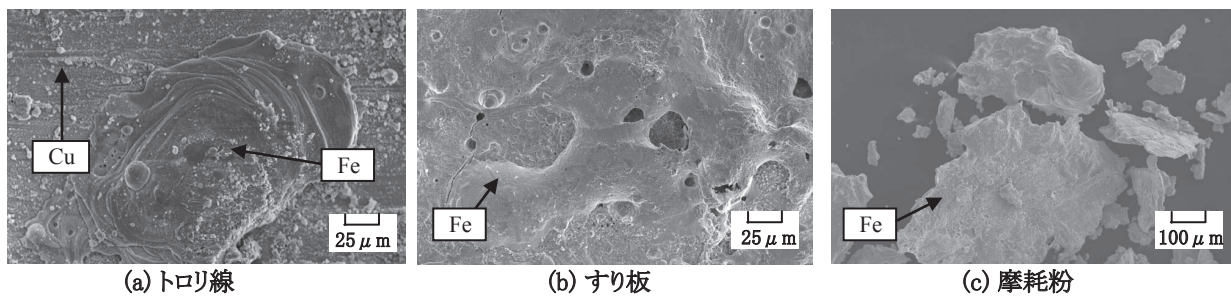


図6 摩耗面および摩耗粉のSEM写真（荷重：2.7 N，すべり速度：0.2 m/s，電流：100 A）

なる。なお、この条件では微量であるがアークの発生も確認した。

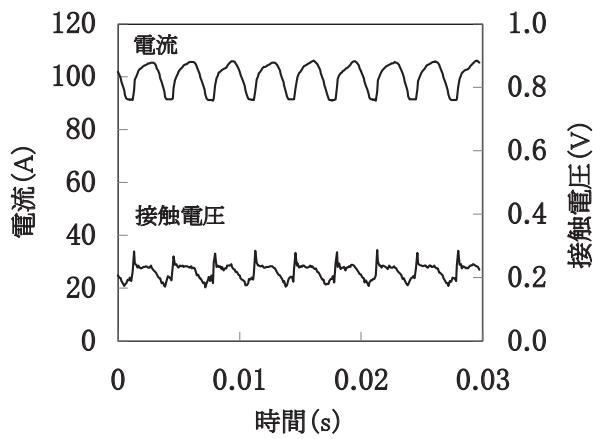
このすり板比摩耗量が増加し、摩擦係数が減少する条件における典型的な摩耗表面および摩耗粒子のSEM写真を図6に示す。図6(a),(b)より、すり板表面において主成分であるFeが溶融し、トロリ線表面にFeが移着していることがわかった。なお、トロリ線溶融摩耗形態と異なり、トロリ線表面にCuの溶融痕は確認できなかった。また、図6(c)より、摩耗粒子の主成分はFeであり、非常に大きな剥片であった。ここでは、すり板のみが溶融していることから、この形態をすり板溶融摩耗形態と呼称する。

従来は経験的に機械的摩耗と電氣的摩耗に分類されていたものが、本試験によって電氣的摩耗形態をトロリ線溶融摩耗形態およびすり板溶融摩耗形態という2つに分類することができた。これまで、アークが発生すると

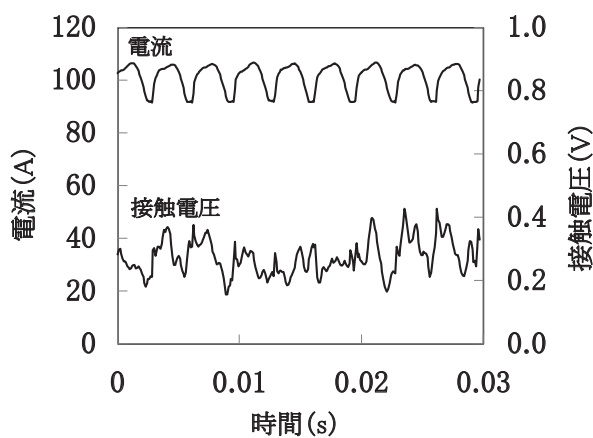
トロリ線の摩耗は増加すると考えられてきたが、本試験によりアークが発生するような条件ではすり板のみが溶融し、トロリ線の摩耗は非常に小さくなることがわかった。これらの試験結果は、従来の報告「常にアークにさらされている箇所の摩耗は非常に小さいという事実」¹⁾に合致すると考える。次章では、これら摩耗形態の遷移条件について考察する。

4. 摩耗形態遷移条件

図4～6より、各摩耗形態の特徴はトロリ線およびすり板表面溶融の有無であり、摩耗形態の遷移現象には接点の溶融が関わっていると考えられる。微小な接点の温度を直接測定することは困難であるが、R. Holm³⁾によって電氣的発熱による温度上昇値を推定する理論「 ϕ - θ 理論」が提案されている。この理論より、接触電圧 V_c を用いて接点の最高温度 T_{max} を次式で推定できる。



(a) 静止時



(b) しゅう動時(0.2m/s)

図7 接触電圧波形

$$T_{\max} = \left(\frac{V_c^2}{4L} + T_0^2 \right)^{1/2} \quad (3)$$

ここで、 L はローレンツ数 ($=2.4 \times 10^{-8}$)、 T_0 は両部材のバルク温度(室温)である。今回開発した直動型摩耗試験機は、前述したとおりトロリ線とすり板間の接触電圧を精緻に測定することができ、また低速しゅう動とすることで摩擦熱の影響を小さくしているため、(3)式によって接点の最高温度値を求めることができる。

図7に100Aの通電下において、すり板の静止状態および速度0.2m/sで接触しゅう動させた状態における電流と接触電圧の測定波形を示す。図7(a)より、静止時における電流および電圧波形は交流から直流に整流されたリップル波形であり、他のノイズはほとんど観察されない。一方で図7(b)においてしゅう動中の接触電圧波形は、しゅう動中の微小な荷重変動や接点数変動を反映した値が測定されている。通電時の電氣的発熱やそれに伴う接点温度上昇は非常に速い現象であり、接触電圧の平均値よりも最大値で評価するべきと考え、「接触電圧の平均値+3 σ (σ :標準偏差)」を統計的最大接触電圧として(3)式の最高接点温度推定に用いる V_c パラメー

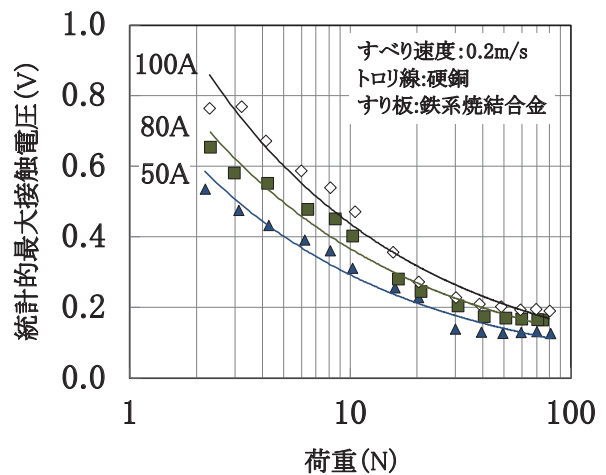


図8 各電流における荷重と接触電圧の関係

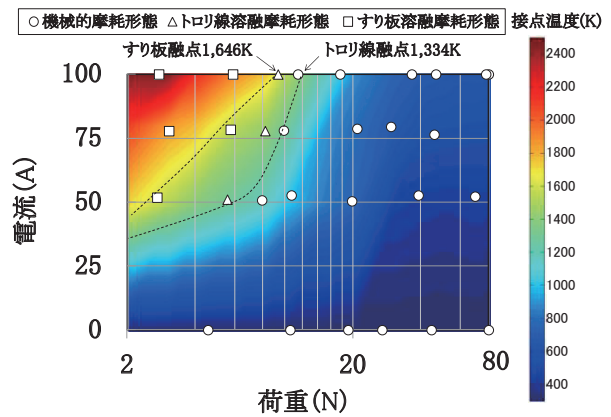


図9 摩耗形態と最高接点温度の相関関係

タとした。

3段階の電流を通電した場合の荷重と統計的最大接触電圧の関係を図8に示す。この図より、荷重の減少および通電電流の増加に伴い統計的最大接触電圧が増加することがわかる。図8で得られたデータと(3)式を用いて、荷重と電流で整理した接点最高温度のコンター図および、摩耗試験結果で得られた3つの摩耗形態の分類プロットを図9に示す。ここで、摩擦熱の影響は無視でき得るとし、0Aにおける接点温度は300Kと仮定した。また、同図にはトロリ線融点1,334Kとすり板融点1,646Kを示してある。この図より、機械的摩耗形態からトロリ線溶融摩耗形態に移る条件は、接点温度がトロリ線の融点1,334Kに達する条件にほぼ一致し、トロリ線接点の溶融によって摩耗形態が遷移すると考えられる。通電下の機械的摩耗形態では、トロリ線の融点に至らなくとも温度上昇はしているはずであり、1,000K程度であれば材料の軟化も十分発生しているはずであるが、摩耗形態遷移に対して材料軟化の影響は観察されず、図3で示した摩耗・摩耗特性に対しても軟化の影響は観察されなかった。また、トロリ線溶融摩耗形態からすり板溶融

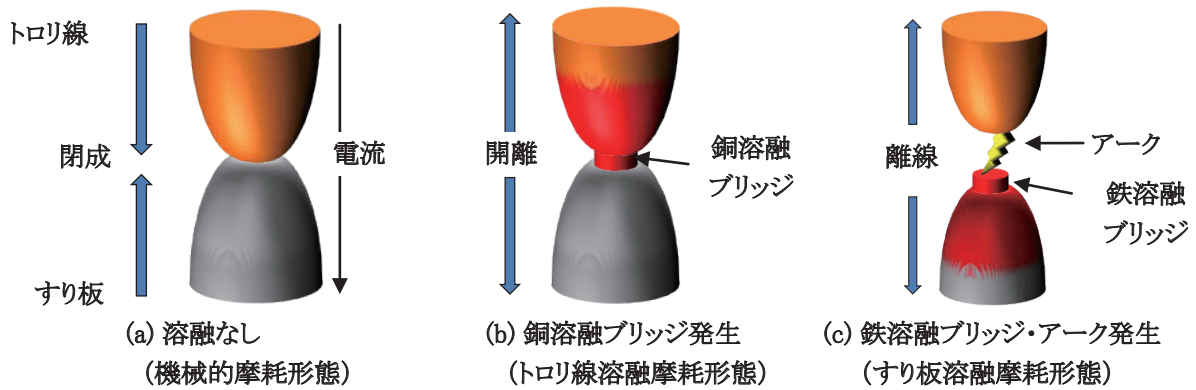


図 10 接点におけるアーク発生過程

摩耗形態に遷移する条件は、接点温度がすり板の融点 1,646K に達する条件にはほぼ一致し、すり板接点の溶融によって摩耗形態が遷移すると考えられる。

以上のことから、トロリ線が最も摩耗するトロリ線溶融摩耗は、トロリ線のみが溶融する接点温度条件で発生し、アークを含めすり板の融点以上となる温度条件では、すり板溶融摩耗形態となると考えられる。通常の接触通電からアーク発生までの過程および摩耗形態は図 10 のモデルを用いて以下のように説明できる。

- (1) 十分に荷重を負荷した接触では接触抵抗が小さく接触電圧が小さいため、通電による温度上昇の影響が無視でき、無通電時と同様の機械的摩耗形態となる(図 10 (a))。
- (2) 荷重の低減に伴い接点が開離すると、接触抵抗の増加に伴い接触電圧が増加するため、融点の低いトロリ線が先に溶融し、図 10 (b) のように溶融ブリッジが発生する。このときトロリ線溶融摩耗形態となり、トロリ線の摩耗は増大する。
- (3) さらに荷重が低減すると、接点温度はすり板の融点に達し、図 10 (c) のように鉄の溶融ブリッジやアークが発生する。このときすり板溶融摩耗形態となり、すり板の摩耗は増大する。なお、本試験結果ではこの条件において銅の溶融は観察されなかった。

実際の営業線では図 10 (a), (b), (c) の過程が連続的に発生していると考えられるため、アーク発生時も銅溶融があり、離線アークが多発する箇所でもトロリ線摩耗が大きい場合があっても矛盾しない。ただし、常にアークが発生する箇所では今回の試験のようにすり板溶融摩耗のみが発生すると考えられるため、トロリ線の摩耗が小さくなると推測できる。

5. 結論

通電下におけるトロリ線とすり板の摩耗現象を明らか

にすべく新たに導入した直動型摩耗試験機により、通電下における摩耗形態が接点温度と部材の融点から以下の3つに分類されることを明らかにした。

- (1) 接点温度が硬銅トロリ線および鉄系焼結合金すり板の融点未満である場合、機械的摩耗形態となり、通電時と無通電時の摩擦・摩耗特性は同等となり、摩擦係数や摩耗率は荷重や電流に依存しない。
- (2) 接点温度が硬銅トロリ線の融点以上、鉄系焼結合金すり板の融点未満である場合、トロリ線溶融摩耗形態となり、通電時の摩擦係数とトロリ線摩耗率は著しく増加する。
- (3) 接点温度が鉄系焼結合金すり板の融点以上である場合、すり板溶融摩耗形態となり、通電時のすり板比摩耗量は著しく増加する。一方、通電時の摩擦係数は減少し、トロリ線摩耗率は無通電時と同等になる。

6. 今後の課題と展望

今回の摩耗試験結果より、すり板溶融摩耗形態において融点が 1,646K であるすり板が溶融し、融点が 1,334K であるトロリ線が溶融しないという現象を確認した。すり板溶融摩耗形態ではトロリ線の摩耗が非常に小さく、このメカニズムを解明することによって、実際のトロリ線—パンタグラフすり板の摩耗低減指針や材料開発指針が提案できると考える。

文献

- 1) 岩瀬勝:パンタグラフ集電と摩耗(Ⅲ), 鉄道技術研究報告, No.217, 1961
- 2) 岩瀬勝:集電技術ア・ラ・カルト, 研友社, p.21, 1998
- 3) 高木相:電気接点のアーク放電現象, コロナ社, p.56, 1995