

鉄道一般
車両
施設
電気
運転・輸送
防災
環境
人間科学
浮上式鉄道

# 架線・パンタグラフの 摩耗メカニズムを解明する

架線・パンタグラフなどの集電システムの主要な保全作業として、トロリー線やパンタグラフすり板の摩耗管理があります。また、集電システムの構成や材料開発においては、摩耗を抑える観点も重要です。そのため、なぜ摩耗が増大するかを知ることは、集電システムの保全や設計上、非常に重要です。ここでは、一般的な摩耗形態と、その要因について解析した後、摩耗実験や数値解析の結果や、近年明らかとなった摩耗メカニズムについて紹介します。



山下 主税  
Chikara Yamashita  
電力技術研究部  
集電管理研究室  
主任研究員  
【専門分野】トライボロジー、金属疲労

## はじめに

電車や電気機関車などの電気車は、走行に必要な電力を架線のトロリー線とパンタグラフすり板を接触しゅう動させることで取り入れています。ここで、電力の授受を「集電」、トロリー線とすり板を「集電材料」と呼んでいます。1編成あたりの集電電流は、直流電化区間では数千アンペアに及ぶため、集電材料は大電流を通電しながらしゅう動する、電気鉄道特有の過酷な環境にさらされています。

集電材料は、主に通電しゅう動による摩耗によって寿命を迎えます。たとえば、トロリー線には一定の張力が負荷されているため、摩耗による断面積の減少とともに、引張応力が増加し

ます。この引張応力がトロリー線材料の引張強度を超えると、破断する恐れがあるため、安全率(☞参照)を考慮した摩耗限度が設定されています。

現場における保全作業として、トロリー線の摩耗を検測し、摩耗限度を超えないよう取り替え計画を立てています。とくに、新幹線ではトロリー線の部分的な補修を行わないため、1箇所でも摩耗が進行すると、他の箇所が摩耗していなくとも、1区間全てのトロリー線(1区間は約1500m)を取り替える必要があり、多大なコストが発生します。

以上により、集電材料の保全にかかるコストを低減するためには、摩耗を低減するための対策や、システムの設計が必須となります。

## ☞ 安全率

設計の上で許容される応力と、材料が持つ引張強度など破断限界を示す応力との比で表されます。

安全率=引張強度/許容応力

電気設備の技術基準の解釈第66条<sup>1)</sup>により、トロリー線などの硬銅線や耐熱銅合金線の場合、安全率は2.2以上とされています。

## 摩耗の要因を知るには

集電材料の摩耗対策を考えるには、摩耗を促進させる要因を特定することが重要です。摩耗の要因は、「摩耗形態」によって全く異なり、各形態は摩耗面を観察することで容易に判別できます。そのため、保全現場で実施されている摩耗量、トロリー線の高さ・偏位計測

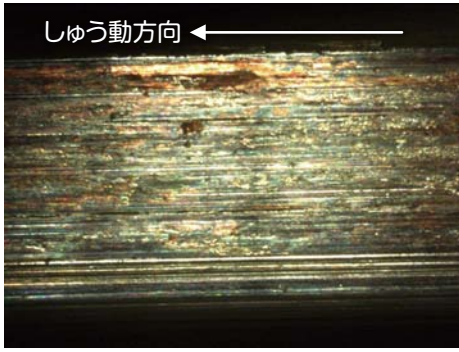


図1 トロリー線の摩耗面(機械的摩耗形態)

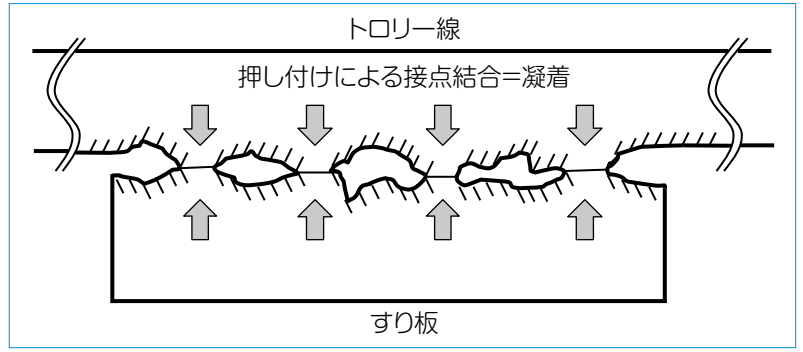


図2 トロリー線とすり板の接点模式図

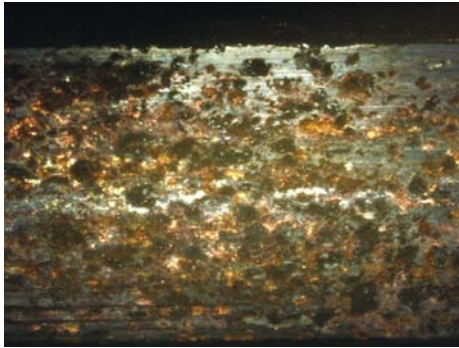


図3 トロリー線の摩耗面(電氣的摩耗形態)

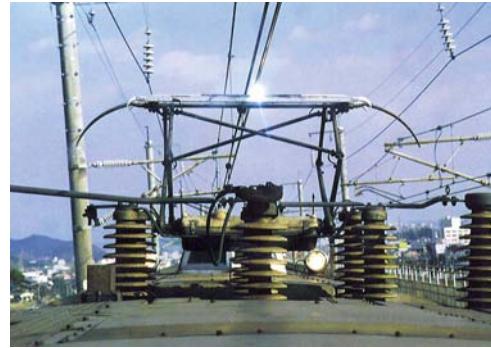


図4 トロリー線とパンタグラフ間の離線アーク放電

に加えて、摩耗面の観察を行うことは有効と考えられます。

### 機械的摩耗形態

摩耗面を観察することで判別できる形態は、「機械的摩耗形態」と「電氣的摩耗形態」の大きく2つです。

機械的摩耗形態の摩耗面は、図1のように比較的平滑であり、しゅう動方向に線状痕が観察できます。機械的摩耗形態の要因は、トロリー線とすり板の接触による接点同士の機械的な結合である凝着とされています(図2)。パンタグラフが動く際、この凝着部が引き剥がされ、失った体積が摩耗量となります。そのため、凝着を抑制することが機械的摩耗の対策となります。

機械的摩耗の対策例として、以下の3つを紹介します。

- ①凝着部の面積はパンタグラフの接触力に比例します。そのため、架線の高さや硬点(☞参照)を適正化し、パンタグラフの過大な接触力を抑制することで、機械的摩耗

を低減できます。

- ②凝着部による摩耗体積は、材料強度が増加するほど小さくなります。そのため、トロリー線やすり板を高強度化することで、機械的摩耗を低減できます。
- ③トロリー線への塗油や、パンタグラフの固形潤滑材併用、カーボン系すり板の適用など、接点同士を滑りやすくすることで、機械的摩耗を低減できます。

### 電氣的摩耗形態

電氣的摩耗形態の摩耗面は平滑ではなく、図3のようにクレーター状の凹部が多数観察できます。この形態は、主にトロリー線とパンタグラフが「離線」する箇所が発生し、集電する電流が大きいくほど摩耗量は増加します。とくに、集電電流が大きい直流区間では、機械的摩耗に比べて電氣的摩耗が増加しやすく、離線箇所の摩耗が局部的に進行する傾向があります。

電氣的摩耗形態の要因は、離線時に

発生する「アーク放電」(図4)と考えられており、その対策例として、以下の3つを紹介します。

- ①架線の高さや硬点の適正化によって、パンタグラフの接触力変動を抑制でき、離線を低減できます。
- ②パンタグラフの軽量化など、トロリー線への追随特性を向上させることで、離線を低減できます。
- ③複数のパンタグラフが搭載されている編成では、パンタグラフ間を高圧母線で接続することで、離線したパンタグラフに流れる電流を

#### ☞ 硬点

ダブルイヤーなどのトロリー線接続部や、コネクターなどの重量金具が設置されている箇所を指します。

硬点では、トロリー線の特性が局所的に変化するため、パンタグラフが通過する際に、衝撃的な接触力や離線が発生します。

現場の検測車では、パンタグラフの上下加速度を測定することで、硬点を把握しています。

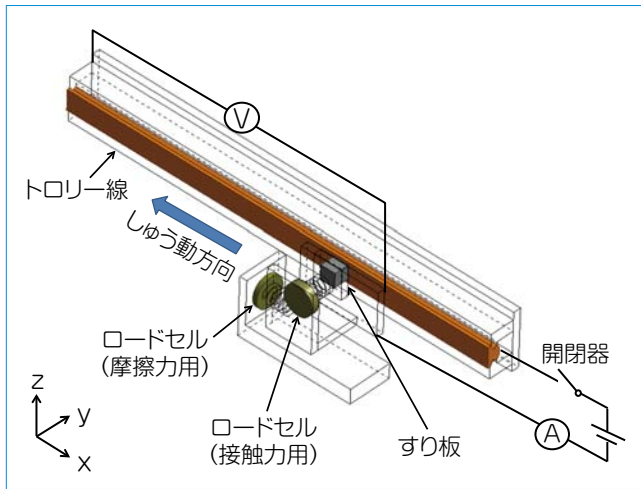


図5 開発した摩耗試験機の概要

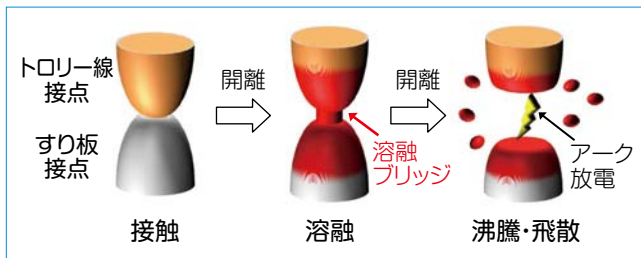


図7 電気接点の開離過程

低減でき、離線箇所の電氣的摩耗を低減できます。

これまでの電氣的摩耗の対策は、離線現象に着目し、架線・パンタグラフ間の動特性向上に関するものが主でした。近年は、さらに抜本的な摩耗対策を提案するため、摩耗メカニズムの解明に取り組んでいます。

### 摩耗形態の細分化

摩耗の要因は摩耗形態に密接に関係するため、摩耗形態を詳細に調査することで、摩耗メカニズムの解明が進むと考えました。

そこで、接触力変動を極力抑えた摩耗試験機(図5)を新たに開発し、摩耗形態が遷移する条件を調査しています<sup>2)</sup>。硬銅トロリー線と鉄系焼結合金すり板の組み合わせにおける試験の結果、これまで「機械的摩耗形態」と「電氣的摩耗形態」の2つと考えられてきた摩耗形態を、さらに細分化できることがわかりました(図6)。

図6では、摩耗率や摩耗面の観察結果から、①トロリー線もすり板も溶融しない「機械的摩耗形態」、②トロリー線のみが溶融する「トロリー線溶融摩耗形態」、③すり板のみが溶融する「すり板溶融摩耗形態」の3つに分類しました。とくに、トロリー線の摩耗率が著しく増大するトロリー線溶融摩耗形態は、アーク放電が発生する接触力範囲より大きな接触力で発生しています。一方で、従来摩耗が増大すると考えられてきたアーク放電発生条件では、トロリー線の摩耗率は非常に小さくなるということがわかりました。

アーク放電以外の接点現象として、図7に示す「溶融ブリッジ」があります。電気接点が離れる過程(開離過程)では、接触している面積の減少にとともに接点間の接触抵抗が増加します。このとき、通電による発熱であるジュール熱も増加するため、接点の温度は急激に上昇します。アーク放電は接点の沸騰で発生しますが、金属であ

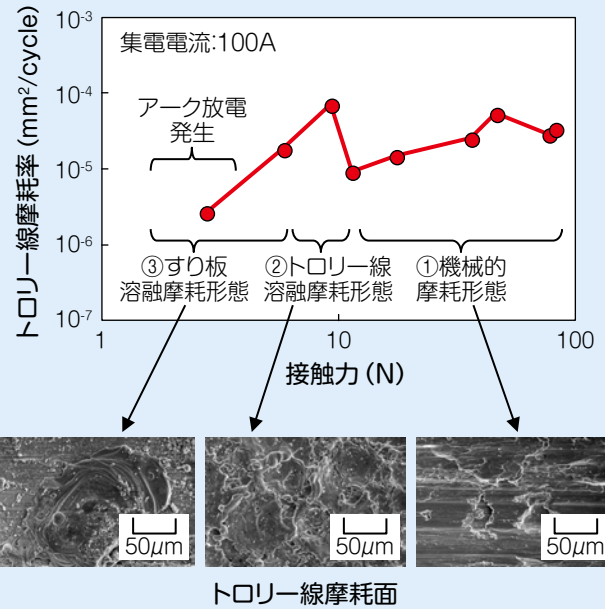


図6 摩耗試験結果およびトロリー線摩耗面観察結果

れば沸騰する前に溶融する段階が存在します。これが溶融ブリッジです。

摩耗試験の結果より、通電下の摩耗形態は、アーク放電ではなく主に溶融ブリッジによって変化すると考えられます。そこで、摩耗のメカニズムを解明するため、溶融ブリッジの発生条件を解析しました。

### 通電による摩耗のメカニズム

溶融ブリッジは、接点の溶融によって発生します。集電材料のように、トロリー線とすり板の材料が異なる場合、材料の融点やジュール熱による温度上昇も異なるため、それぞれの溶融ブリッジの発生条件も異なります。

図8に示す解析モデルを用いて、接点近傍の温度分布を解析しています<sup>3)</sup>。このモデルは、トロリー線やすり板の接触境界に存在する酸化膜や摩耗粒子などを、「被膜抵抗」として考慮しています。

硬銅トロリー線と鉄系焼結合金すり板の接点に電流を流した場合の、温度分布の解析例を図9に示します。(a)は接触表面が全く汚れていない清浄な状態であり、銅よりも鉄の電気抵抗が

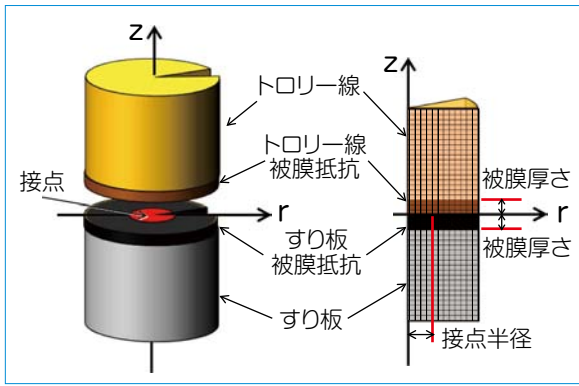


図8 接点の温度分布解析モデル

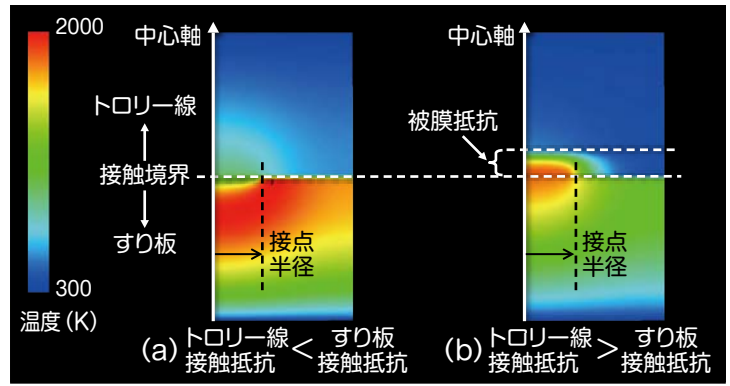


図9 温度分布解析結果例

大きいため、ジュール熱は主にすり板接点で発生します。結果として、「トロリー線温度<すり板温度」となります。一方、(b)のようにトロリー線表面に被膜抵抗が存在し、トロリー線の接触抵抗(被膜抵抗含む)がすり板よりも大きくなる場合、トロリー線でジュール熱が発生し、「トロリー線温度>すり板温度」となります。どちらも全体の最高温度は、接点全体の電圧降下である「接触電圧」に依存し、0.6Vの場合は約1950Kとなります。ただし、接点全体の最高温度は同じでも、トロリー線とすり板の「接触抵抗のバランス」が変化することで、温度分布が変化することがわかりました。

トロリー線とすり板の接触抵抗バランスを表すパラメーターとして、全接触抵抗に対するすり板の接触抵抗の比を横軸、接触電圧を縦軸とし、各条件でトロリー線とすり板の温度を求め、それぞれの融点に達する条件、つまり溶融ブリッジが発生する条件を図10のようにマップ化しました。溶融ブリッジが発生する条件で摩耗形態が変化することから、同図を「摩耗形態マップ」と呼ぶことにしました。

接触電圧1.0V以上では、ほとんどの金属が沸騰し、アーク放電が発生します。一方で、トロリー線の摩耗が最も増大するトロリー線溶融摩耗形態(図10②)は接触電圧0.4Vで発生し

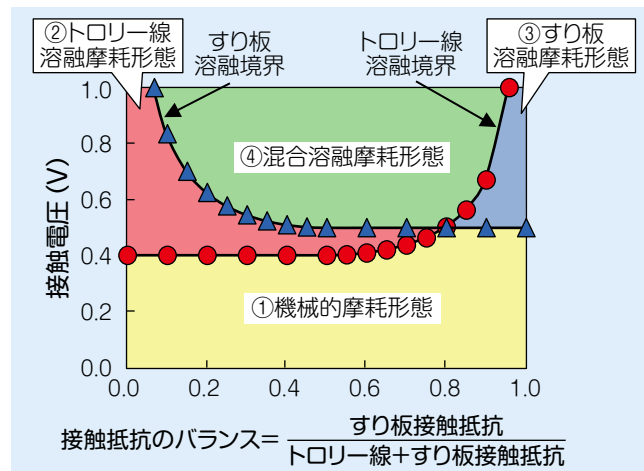


図10 摩耗形態マップ  
(硬銅トロリー線と鉄系焼結合金すり板の組み合わせ)

ており、接触電圧1.0V以下の接点温度上昇が摩耗に大きな影響を及ぼすことがわかります。とくに、すり板表面の高抵抗被膜形成などですり板の接触抵抗が増加し、接触抵抗バランスが1.0に近くなると、すり板が溶融してもトロリー線は溶融せず、トロリー線の摩耗は増加しないすり板溶融摩耗形態(図10③)になります。これが、図6のアーク放電が発生する領域でトロリー線摩耗が小さくなるメカニズムと考えられます。

以上のように、電気的な摩耗形態は材料の融点や接触抵抗のバランスによって支配されるため、これらを調節することによって、これまで提案されていなかった「摩耗形態自体を制御する」という抜本的な摩耗対策も可能となります。

## おわりに

架線・パンタグラフの摩耗要因は複雑ですが、そのメカニズムを解明することで、調節すべきパラメーターが見えてくると考えます。集電材料の抜本的な摩耗対策を提案するため、今後もさらなる研究・開発を進めていきます。RRR

## 文献

- 1) 経済産業省：電気設備の技術基準の解釈, [http://www.meti.go.jp/policy/safety\\_security/industrial\\_safety/sangyo/electric/files/dengikaishaku.pdf](http://www.meti.go.jp/policy/safety_security/industrial_safety/sangyo/electric/files/dengikaishaku.pdf)
- 2) 清水政利, 山下主税：トロリー線の摩耗対策, RRR, Vol.69, No.12, pp.20-23, 2012
- 3) 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