

## 実フィールドにおけるトロリ線の摩耗形態調査結果

根本 公紀\* 山下 主税 (鉄道総研)

Investigation of Contact Wire Wear Modes in Actual Site Conditions

Koki Nemoto\*, Chikara Yamashita, (Railway Technical Research Institute)

In order to clarify the wear phenomena of current collecting materials such as contact wires and contact strips in electrical railways, research has been conducted to understand the transition of wear modes. In previous studies, electrical wear modes have been classified into three types and mechanical wear modes into four types. However, these wear modes are based on laboratory tests, and it is necessary to understand the wear modes on sites in order to apply this theory to the wear phenomena on actual sites. Therefore, in this report, an analysis of a removed contact wire on an actual site and contact wire wear measurements were carried out. As a result, the wear modes confirmed in the laboratory test, such as seizure, abrasive wear, softening flow and delamination wear, contact wire melting wear, and mixed melting wear, were also observed on contact wires of actual sites.

キーワード：摩耗形態，実フィールドトロリ線，トロリ線摩耗，しゅう動条件  
(wear modes, contact wire in actual site conditions, contact wire wear, sliding condition)

### 1. はじめに

トロリ線やすり板などの集電材料の摩耗現象を解明するためには、熱による摩耗形態の遷移現象を把握することが重要である。これまでに、電気的な摩耗について、ジュール熱による接点温度上昇を測定することで、摩耗形態の遷移現象を解明している<sup>(1)</sup>。この研究では、電気的摩耗形態をトロリ線溶融摩耗，すり板溶融摩耗，混合溶融摩耗の3つの摩耗形態に切り分け、各摩耗形態の遷移条件の定量化を行っている。さらに、トロリ線溶融摩耗形態時の摩耗量の推定も行っている<sup>(2)</sup>。また、機械的な摩耗については、摩擦熱による接点温度上昇を測定することで、摩耗形態の遷移現象を解明している<sup>(3)</sup>。この研究では、機械的摩耗形態を凝着摩耗，焼付き，アブレイブ摩耗，軟化流動摩耗の4つに切り分け、それらはトロリ線とすり板の軟化により遷移することを明らかにした。さらに、有限要素法を用いて接点の温度分布などを解析することで、各摩耗形態の発現条件を定量化している<sup>(4)・(5)</sup>。

ただし、上記の理論は定置試験で確認されたものであり、これらが実フィールドにおいても適用できることを検証するためには、実フィールドで発現する摩耗形態を明らかにする必要がある。

そこで、本報告では、実フィールドで発現している摩耗形態の把握を目的として、実フィールドでのトロリ線摩耗測定および撤去トロリ線の摩耗形態分析を行ったので、以

下に報告する。

### 2. トロリ線の摩耗測定および摩耗形態分析方法

#### 〈2・1〉 対象となるトロリ線敷設箇所の選定

摩耗の測定および摩耗形態の分析を行う対象として、以下の条件を満たすトロリ線敷設箇所を選定した。

- ① 多数の摩耗形態が発現していると考えられる、走行列車の速度範囲が広いドラムであること
- ② 複数の摩耗形態の混在を防ぐため、折り返し列車や通過列車が少なく単一のランカーブであること
- ③ 定置試験で使用していたすり板材料である、鉄系焼結合金すり板を用いている区間であること

以上の条件から、新幹線の駅構内を含むトロリ線敷設箇所を選定した。なお、線種はCSトロリ線であり、架線構成はシンプル架線である。

#### 〈2・2〉 トロリ線摩耗測定方法

トロリ線の摩耗測定は、高さ摩耗測定機（電業製：DM-8901）を用いて行った。高さ摩耗測定機は、トロリ線のまわらぎ方向から透過型レーザーセンサにより残存直径を測定する装置である。走行方向の距離は、トロリ線と接して回転するローラの軸に接続されたロータリーエンコーダにより相対距離を測定するものである。本研究では、走行方向に0.02 mピッチでトロリ線の残存直径を測定した。

#### 〈2・3〉 撤去トロリ線分析方法

撤去したトロリ線約1600 mについて、まず油圧式ワイヤ

カッタで約 1 m ごとに切断し、すべての切断したトロリ線に対して、目視でのしゅう動面観察およびしゅう動面の分類を行った。

つぎに分類した各しゅう動面の典型例について、光学顕微鏡および走査型電子顕微鏡（以下 SEM）によるしゅう動面観察、エネルギー分散型 X 線分光分析装置（以下 EDS）による元素分析、マイクロビッカース硬さ試験機によるビッカース硬さ測定を行った。ビッカース硬さは、押し込み荷重 10 gf、荷重保持時間 10 s の条件で測定し、3 点の平均を求めた。これらの分析結果より、各しゅう動面に対する摩耗形態を推定した。摩耗形態推定の詳細については、3 章で述べる。

### 3. 撤去トロリ線の分析結果および摩耗形態の分類

当該トロリ線の摩耗形態および残存直径と実フィールド敷設時の通過列車速度の関係を図1に示す。ここで、列車速度は複数パンタグラフのうち速度の低い方のデータであり、減速と力行で区別している。トロリ線のしゅう動面を分析した結果、典型的な 7 つに分類し、後述の(i)~(vii)でその特徴から摩耗形態を推定した。なお、同じ位置のトロリ線しゅう動面に複数の摩耗形態が確認できる箇所もあった。しゅう動面の特徴として、各しゅう動面の光学顕微鏡像を図2、SEM 画像を図3に、ビッカース硬さ結果を図4に、成分分析結果を図5に示す。

以下に分類したしゅう動面の特徴と摩耗形態の推定結果を示す。

#### (i) しゅう動面 A (焼付き摩耗形態)

しゅう動面 A は銅色を呈しており、むしられたような摩耗痕が見られた（図 2 (a)、図3 (a)）。また図4から、軟化は確認されなかった。図 5 から鉄の成分は少なく、すり板からトロリ線への移着はほとんどなかった。これらの特徴は、以前の報告<sup>(4)</sup>で分類した摩耗形態の中で、接点温度がトロリ線の軟化点以下で発現する「焼付き摩耗形態」の特徴に一致する。

しゅう動面 A が発現する箇所は比較的低速域であり、列車速度が低下するほど摩耗が大きくなる傾向にあった。焼付き摩耗形態では、しゅう動速度が低下するほど摩擦係数

が大きくなる特徴があり、図 1 の摩耗傾向とも整合する。

#### (ii) しゅう動面 B (アブレシブ摩耗形態)

しゅう動面 B は銅色を呈しており、しゅう動面 A となめらかな線条痕部が混合したものである（図 2 (b)）。線条痕部の幅は数  $\mu\text{m}$  程度であった（図 3 (b)）。また、線条痕部の硬さは CS トロリ線の銅内部と比較して低下していた（図 4）。この線条痕部の特徴は、以前の報告<sup>(4)</sup>で分類した摩耗形態の中で、接点温度がトロリ線の軟化点のみを超過する条件で発現する「アブレシブ摩耗形態」の特徴に一致する。

しゅう動面 B が発現する箇所の摩耗はしゅう動面 A よりも小さいが、列車速度が低下するほど摩耗が増加する傾向があった。これは、しゅう動面 B にはしゅう動面 A も含まれており、摩耗は主にしゅう動面 A の焼付き摩耗によるものと考えられる。そのため、しゅう動面 A よりも高速域で発現するしゅう動面 B ではしゅう動面 A よりも摩耗が小さくなるものと考えられる。

#### (iii) しゅう動面 C (軟化流動摩耗形態)

しゅう動面 C は、黒色または銅色を呈しており、なめらかであり、亀裂や流動痕が確認された（図2 (c, d)、図3 (c, d)）。しゅう動面 C の流動痕は軟化しており、すり板の主成分である鉄が検出された（図4、図 5）。これらの特徴は、以前の報告<sup>(4)</sup>で分類した摩耗形態の中で、接点の最高温度がすり板の軟化点を超過する条件で発現する「軟化流動摩耗形態」の特徴に一致する。

しゅう動面 C が発現する箇所は比較的高速域である。図 1 減速側では低速域でも発現しているが、これは速度が速い方のパンタグラフとのしゅう動で発現したと考えられる。この摩耗形態では、他の機械的摩耗形態と比較して摩耗量は少なく、速度の依存性も少なかった。

#### (iv) しゅう動面 D (トロリ線溶融摩耗形態)

しゅう動面 D には凹部が確認でき、流動はしていない（図 2 (e)、図 3 (e)）。凹部の表面は熱影響を受け溶融した銅であり、今回測定したしゅう動面の中で最も硬度が低かった（図4、図5）。以上より、この凹部は通電接点が開離する際に発生する溶融ブリッジが、沸騰やアーク放電時に飛散した痕であると考えられる。これらの特徴は、以前の報告<sup>(1)</sup>で分類した摩耗形態の中で、接点温度がトロリ線の融点を

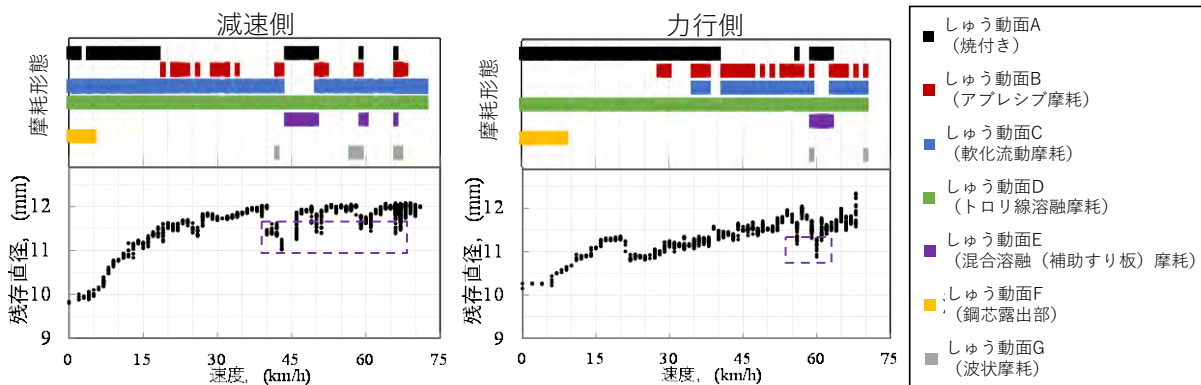


図1 摩耗形態および残存直径と通過列車速度の関係

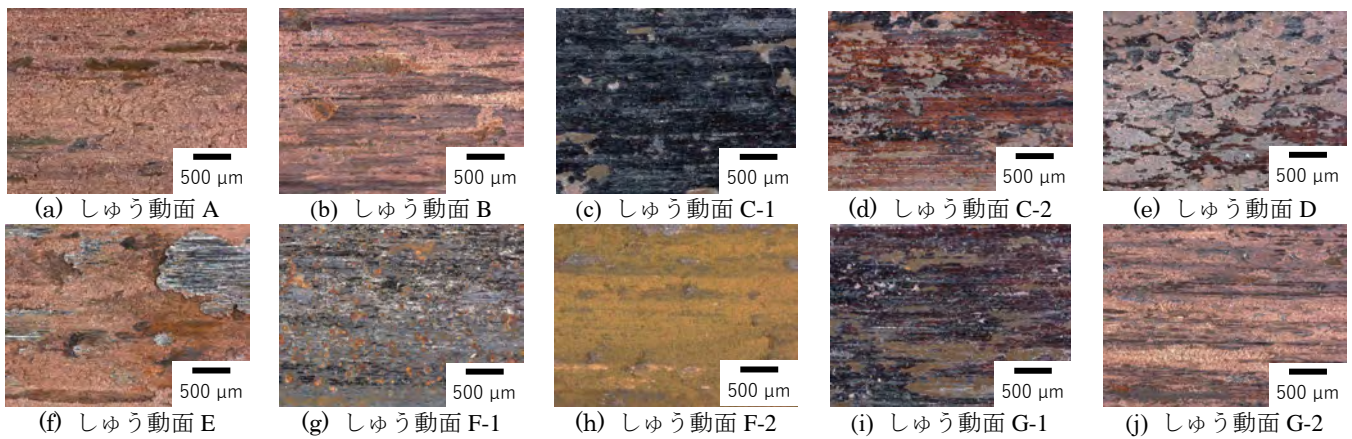


図2 しゅう動面の光学顕微鏡画像

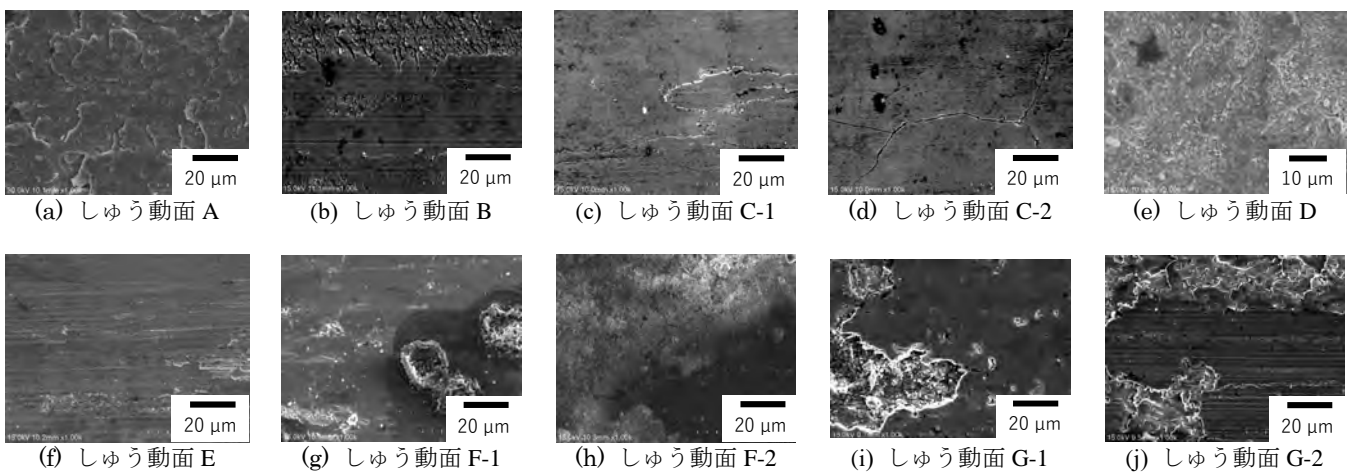


図3 しゅう動面のSEM画像

超過した条件で発現する「トリ線溶融摩耗形態」の特徴に一致する。

しゅう動面 D は全速度域で発現しており、軟化流動摩耗が発現していた高速域で顕著に確認された。これは、高速域ではパンタグラフとトリ線との接触状態が不安定となり、より多くの溶融ブリッジが発生したためと考えられる。今回調査したトリ線では、トリ線の溶融がトリ線の摩耗に及ぼす影響は明確ではなかった。

#### (v) しゅう動面 E (混合溶融摩耗形態)

しゅう動面 E は、銀色の溶融物が付着しているしゅう動面であった (図2 (f), 図3 (f))。銀色溶融物は軟化しており、アルミと銅が検出された (図4, 図5)。これらの特徴は、以前の報告<sup>(1)</sup>で分類した摩耗形態の中で、接点温度がすり板とトリ線の融点を超過する条件で発現する「混合(補助すり板)溶融摩耗形態」の特徴に一致する。なお、しゅう動面 E が発現する箇所では、しゅう動面 A の焼付きも発現していた。

しゅう動面 E はアルミ補助すり板とトリ線がしゅう動する渡り箇所付近で発現しており、同速度のしゅう動面 B, C と比較して摩耗量が大きかった。以前の報告<sup>(4)</sup>では、わたり線箇所の摩耗が増大する理由は、混合溶融摩耗形態ではトリ線が溶融しやすいことを挙げていた。しかし、今回

の調査結果では、同位置で摩耗量が多い焼付きも同時に発現しており、どちらの影響で摩耗量が増大しているのかは不明であった。

#### (vi) しゅう動面 F (鋼芯露出部)

しゅう動面 F は、CS トリ線の鋼芯が露出している鋼芯部と鋼芯が露出していない銅部にわけられる。鋼芯部はなめらかなしゅう動面であり、溶融痕のような丸い凹部が見られた (図2 (g), 図3 (g))。銅部は黄土色の粉のようなものがしゅう動面一面を覆っていた (図2 (h), 図3 (h))。この黄土色の粉は鉄が多く検出されたため (図5)、鋼芯露出部のしゅう動で発生した摩耗粉が、付着したのだけと考えられる。以前の報告<sup>(1)</sup> <sup>(4)</sup>ではすり板と鋼芯の摩擦試験は行っていないため、以前の報告の摩耗形態とは照らし合わせることは出来ない。

しゅう動面 F は最も摩耗が進行するパンタグラフ停止位置で発現していた。鋼芯が出現するまでは焼付きにより摩耗が進行したと考えられるが、鋼芯露出部は焼き付かずなめらかであった。このことから、同様のしゅう動条件であっても材料が異なると摩耗形態が変化することが推測される。この理由として、鋼芯は熱伝導率が低く同じしゅう動条件でも接点温度が高くなりやすく焼付き摩耗形態が発生しなかったことが考えられるが、今後検討が必要である。

### (vii) しゅう動面 G (波状摩耗部)

しゅう動面 G は、波状摩耗箇所であり、黒色箇所と銅色箇所に分けられる。黒色部分はしゅう動面 C と同様であり (図2 (i), 図3 (i)), 銅色部はしゅう動面 B と同様であった (図2 (j), 図3 (j))。以上より波状摩耗箇所の摩耗形態は、軟化流動摩耗形態およびアブレシブ・焼付き摩耗形態が交互に発現していると推測される。これらの摩耗形態は接点温度によって遷移するが、当該箇所は同じ速度・電流条件であるため、摩耗形態が変化した原因については、今後検討が必要である。

以上より、実フィールドで確認された摩耗形態のほとんどは、これまでの定置試験で説明されたもので説明することができることを確認した。

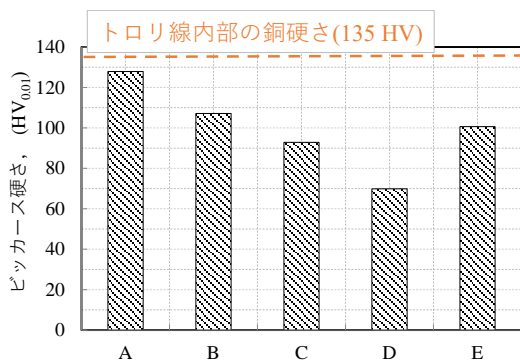


図4 ビッカース硬さ試験結果

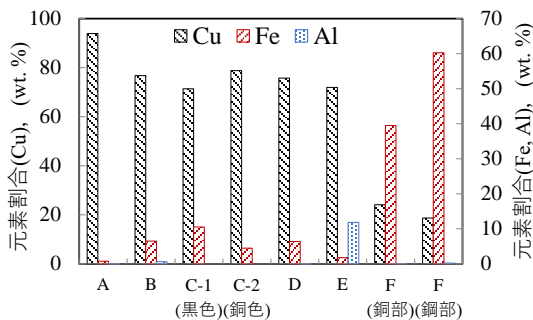


図5 元素分析結果

## 4. しゅう動条件と摩耗形態について

本章では、各摩耗形態の発現条件について、より詳細に考察する。

全体的な傾向として、低速域では焼付き摩耗、高速域では軟化流動摩耗、その中間でアブレシブ摩耗が発現する傾向にあった。以前の報告<sup>(3)</sup>では、機械的な摩耗形態は接点温度の増加に伴い焼付き、アブレシブ摩耗、軟化流動摩耗の順に遷移することを確認しており、本報告の傾向と一致している。

ただし、摩耗形態の発現する速度条件は減速側と力行側で差が確認された。焼付きの発現条件は、減速側は約 20 km/h

以下に対して、力行側は約 40 km/h 以下である。同様に、アブレシブ摩耗と軟化流動摩耗も、力行側よりも減速側の方が発生する速度条件が低い。このことは、同じしゅう動速度であっても、力行側よりも減速側の方が接点温度が高いことを示す。その理由として、減速側のすり板内部の温度は、高速走行時に加熱された状態であるのに対し、力行側のすり板内部の温度は停車などの時間で冷却された状態となっていることが推測されるが、今後検討が必要である。

電氣的摩耗形態について、トロリ線溶融摩耗は全域で発生しており、わたり線箇所において、混合溶融摩耗形態が発生しているが、集電電流の変化では、摩耗形態の変化は見られなかった。これは電氣的摩耗形態について電流量よりも、接触力変動などの機械的接触に起因して電氣的摩耗形態が遷移していること、この区間では接触力変動が少なくジュール熱による接点温度上昇が少なかったことなどが考えられる。

## 5. まとめ

本報告では、実フィールドにおける摩耗形態とその発現条件の把握を目的として、トロリ線摩耗測定および撤去トロリ線の分析を行った。以下に成果をまとめる。

- ① しゅう動面分析の結果、実フィールドの摩耗形態は大きく 7 つに分類でき、定置試験でも確認された焼付き、アブレシブ摩耗、軟化流動摩耗、トロリ線溶融摩耗および混合溶融摩耗の特徴と一致した。
- ② しゅう動速度の増加に伴い焼付き、アブレシブ摩耗、軟化流動摩耗が発現するが、いずれも力行側よりも減速側の方が発生する速度条件が低かった。

## 謝辞

本論文の執筆にあたり、東日本旅客鉄道株式会社の皆様には、トロリ線の現地調査に協力していただきました。誠にありがとうございました。

## 文 献

- (1) 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 (2013)
- (2) 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 (2022)
- (3) 根本公紀・山下主税：「集電材料の摩耗形態遷移に及ぼす摩擦熱の影響」、トライボロジスト, Vol. 67, No. 7 pp. 496 (2022)
- (4) 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 (2016)
- (5) 根本公紀・山下主税：「銅円盤と鉄系焼結合金すり板の摩擦熱に起因する接点温度上昇解析」、トライボロジー会議 2022 春 東京 予稿集, D3, pp. 178 (2022)