

通電下におけるトロリ線とすり板の摩耗形態とその遷移条件

電力技術研究部 集電管理研究室

副主任研究員 山下主税

1. はじめに

集電系材料であるトロリ線やパンタグラフすり板(以後「すり板」)の摩耗を低減するためには、電車線とパンタグラフのダイナミクス改善のみならず、摩耗そのもののメカニズムを解明する必要がある。すなわち、トロリ線とすり板の接触部で起こる現象を調査し、摩耗形態の分類やその遷移条件を解明しなければならない。集電系材料の摩耗形態はこれまで、経験的に機械的摩耗と電氣的摩耗に分類されてきた。機械的摩耗は主として高荷重条件で発生し、トロリ線とすり板の凝着摩耗に起因するとされ、電氣的摩耗は主としてトロリ線とすり板の離線の際に発生するアーク損耗に起因するとされてきた。しかしながら、常にアークが発生している箇所ではトロリ線摩耗が小さいという報告¹⁾もあり、電氣的摩耗の詳細については不明点が多い。また、従来の研究で通電時の摩耗形態を明確に分類した例はなく、その遷移条件について研究した例もない。そこで本研究では、トロリ線とすり板間の摩耗現象を精緻に把握するための手法および試験装置を検討・開発し、電流や接触荷重を変化させながら摩耗試験を実施した。ここでは、特に接触荷重と電流によって遷移する硬銅トロリ線と鉄系焼結合金すり板の摩耗形態について報告する。

2. 直動型摩耗試験機の開発

これまでも通電下の摩耗に関する研究が実施されてきたが、高速走行時の条件再現を目的とした回転摩耗試験ではすり板押付荷重変動が大きく、種々の摩耗形態が混在した結果となるため、摩耗形態の観察や分類は困難であった。また、トロリ線のしゅう動インターバルが非常に短く、トロリ線に与える熱影響が大きいため、実際と異なる摩耗現象となる可能性があった。そこで、トロリ線とすり板の摩耗現象把握という目的を達成するための試験方法を以下のように検討した。

- ① トロリ線とすり板のしゅう動中の押付荷重変動を小さくし、特定の摩耗形態を観察する。
- ② しゅう動インターバルを設けることで、トロリ線に熱影響を与えすぎない。
- ③ 通電時のトロリ線—すり板間の接触状態を表す接触電圧の精緻な測定を行う。
- ④ 摩耗試験毎にトロリ線とすり板試験片を保管し、精密な観察・分析に供する。

これらの項目を検討した結果、図1に示すようにトロリ線材を直線的に配置し、すり板をスライダーとした直動型摩耗試験機を開発した。試験機の仕様を表1に示す。

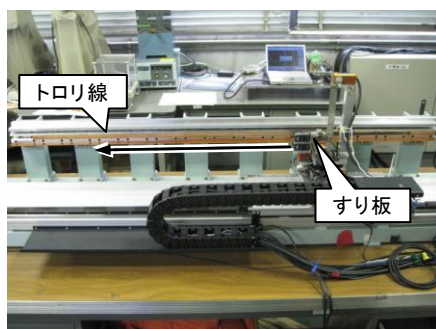


図1 直動型摩耗試験機

表1 直動型摩耗試験機仕様

駆動方式	リニアアクチュエータによる直線駆動
トロリ線材	実トロリ線各種 (GT-170、GT-Sn170)、その他
すり板材	実すり板各種 (TF5A、BC、PC78A など)、その他
押付荷重	0~100N
しゅう動速度	0~3m/s
印加電圧	直流 0~100V
通電電流	直流 0~100A

3. 最高接点温度の推定

本試験では、一般に使用されている硬銅トロリ線と鉄系焼結合金すり板を用いた。それらの物性値を表2に示す。図2に前述した摩耗試験機において、静止時としゅう動時に測定した接触電圧波形を示す。図2(a)の静止時の接触電圧波形は整流時の脈流成分であり、測定系に及ぼすノイズの影響は少ないと考える。一方、図2(b)において、しゅう動時の接触電圧は変動しており、しゅう動中の微小な荷重変動などを反映したものと考える。ここでは、電圧波形の頂点で電氣的発熱が最大になると考え、接触電圧変動の標準偏差 σ を算出して平均値+3 σ を統計的的最大接触電圧とみなした。通電しゅう動させた場合の押付荷重と統計的的最大接触電圧の関係を図3に示す。図4のような電気接点の開離モデルを考えた時、接触電圧 V_c から接触面近傍の最高温度を推定できる理論「 ϕ - θ 理論」²⁾があり、接点の最高温度 T_{max} は次の式で与えられる。

$$T_{max} = \left(\frac{V_c^2}{4L} + T_0^2 \right)^{1/2} \leq 3200 \cdot V_c \quad (3.1)$$

ここで、 L はローレンツ数($=2.4 \times 10^{-8}$)、 T_0 は両電極のバルク温度(室温)である。図3の右縦軸には、(3.1)式より推定した最高接点温度を併記してある。この図より、トロリ線とすり板の融点異なるため、電流と荷重の条件によって推定接点温度が①両部材の融点未満、②トロリ線の融点以上かつすり板の融点未満、③両部材の融点以上、の3つの場合がある。以降では、これら推定接点温度と材料の融点の関係を考慮して、集電材料の摩擦形態およびその遷移条件について述べる。

表2 試験片の成分および物性値

試験片	種別	成分	密度 g/mm ³	硬さ	抵抗率 $\mu\Omega\text{m}$	融点 K
トロリ線	GT170	Cu(99.9%)	8.91×10^{-3}	91 (Hv)	1.77×10^{-2}	1,342
すり板	TF5A	Fe(78.6%)、Cr(16.5%)、S(0.9%)	7.10×10^{-3}	98 (HB)	0.40	1,646

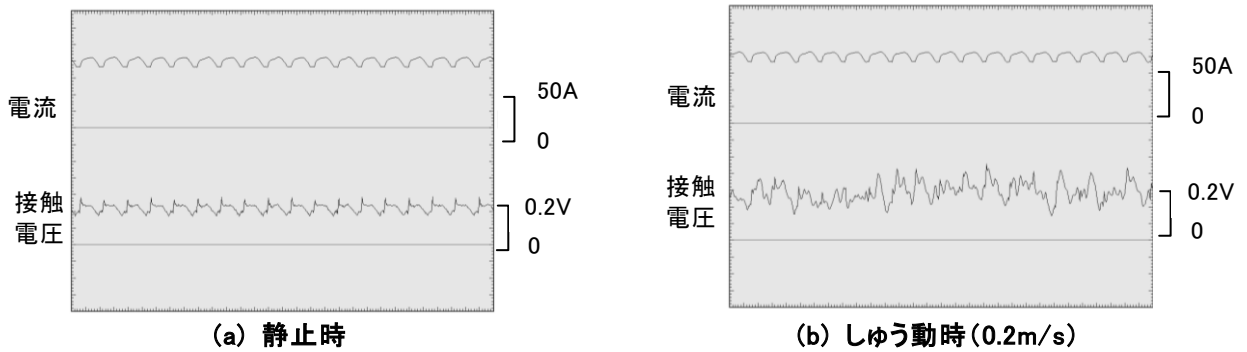


図2 接触電圧波形(100A 通電)

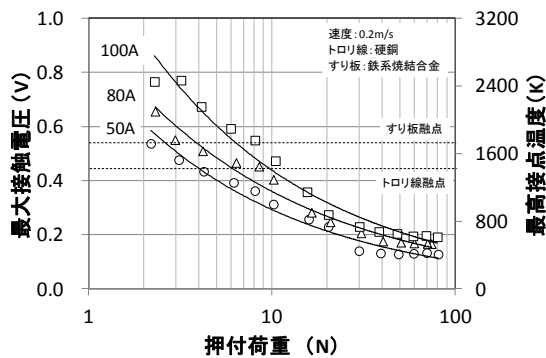


図3 各通電電流における荷重と統計的的最大接触電圧および最高接点温度の関係

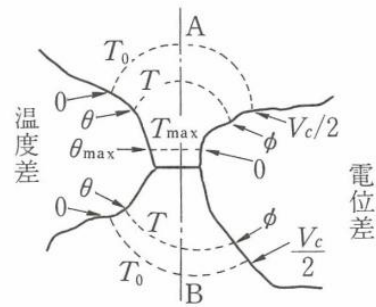


図4 接点における電位 ϕ と温度差 θ の関係²⁾

4. 摩耗試験結果と考察

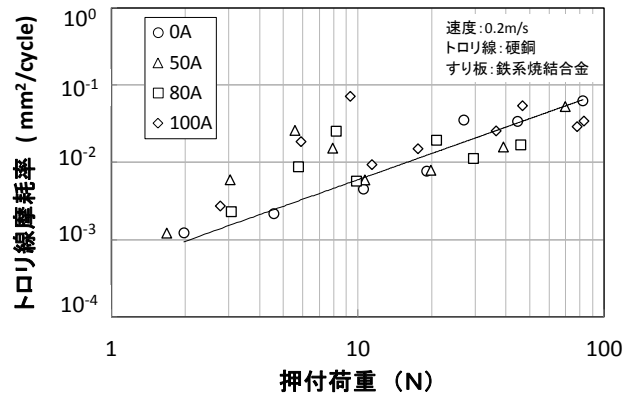
無通電および電流 50A、80A、100A を通電した場合のトロリ線摩耗率、すり板摩耗率および摩擦係数と荷重の関係を図 5 に示す。図 5(a)、(b)より、無通電しゅう動において摩耗率は荷重に比例し、図 5(c)より摩擦係数は荷重に依存せず一定の値を保つことがわかる。この無通電条件において、トロリ線およびすり板表面には滑り方向にせん断された痕が確認でき、双方の移着も少なく、摩耗形態としては凝着摩耗などの機械的摩耗であった。

一方、通電した場合は図 3 の最高接点温度と材料融点の関係から、摩擦・摩耗特性を以下の 3 つに分類することができた。

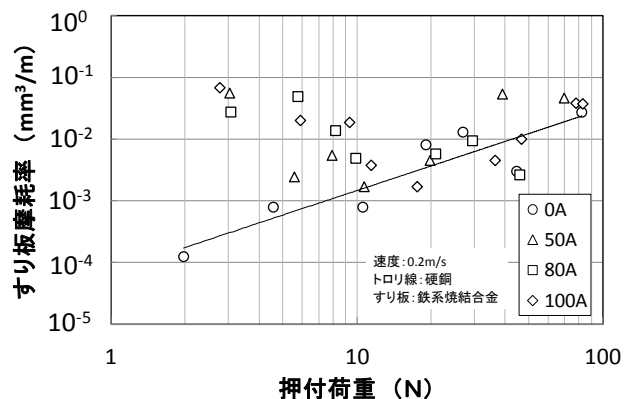
(1) 図 5(a)(b)(c)より、10N 以上の荷重条件では、通電時の摩擦・摩耗特性は無通電時と同等であった。図 3 において、この荷重条件で推定した最高接点温度は、いずれの通電電流でもトロリ線やすり板の融点に達しておらず、接点の熔融が起こらないため、摩耗形態も無通電時と同様になったと考える。トロリ線とすり板表面にも熔融痕は確認できず、機械的摩耗形態であった。

(2) 図 5(a)より、通電した場合の荷重 10N 近傍において、トロリ線摩耗率の極大値が存在し、無通電時よりも 1 桁大きい値を示した。極大摩耗となる条件は、図 3 において最高接点温度がトロリ線の融点以上、すり板の融点未満である荷重条件とほぼ一致し、トロリ線表面のみが熔融する条件であることがわかった。この条件におけるトロリ線とすり板表面の典型的な走査型電子顕微鏡（以後「SEM」）写真を図 6 に示す。この図より、トロリ線表面が熔融し、すり板に移着していることがわかった。

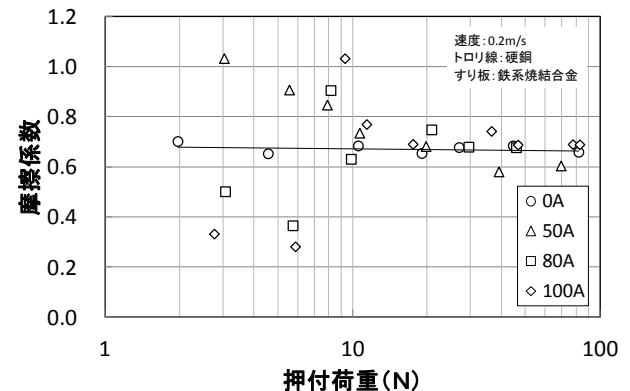
通電下の接点が熔融すると、金属熔融橋絡（以降、熔融ブリッジ）が発生する。トロリ線は間欠的にしゅう動されるため、摩擦熱や電気発熱も間欠的となる。そのため、熔融ブリッジが冷却され再凝固し、すり板と溶着する可能性がある。図 5(c)における通電下の荷重 10N 近傍では、この溶着部を引き剥がす力が摩擦力に加わり、摩擦係数が増加したと考える。



(a) トロリ線摩耗率

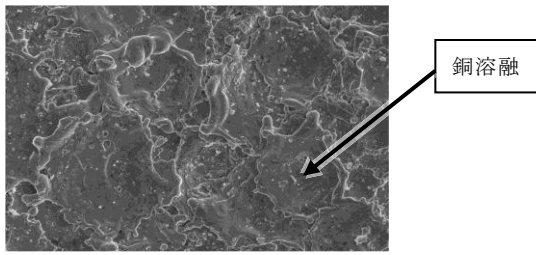


(b) すり板摩耗率

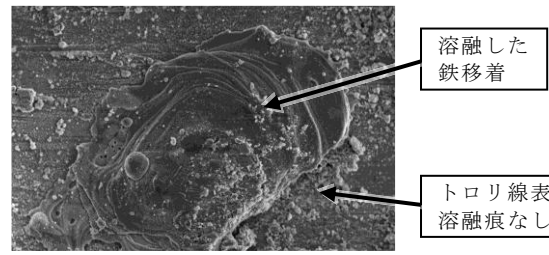


(c) 摩擦係数

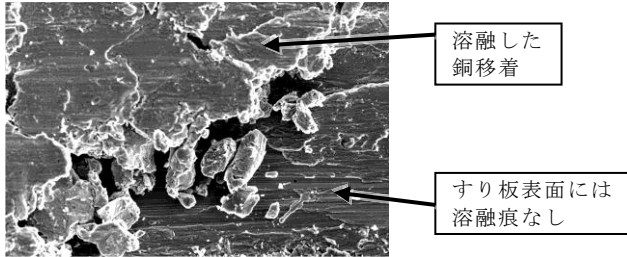
図 5 各通電電流における荷重と摩擦・摩耗特性の関係



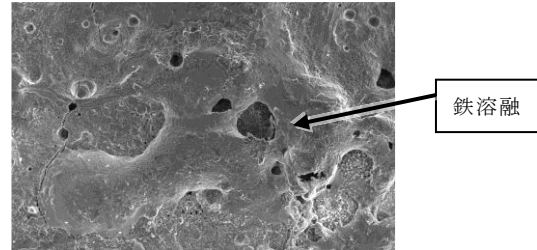
トロリ線



トロリ線



すり板



すり板

図 5(c) 摩耗表面 写真
荷重: 速度: 電流:

図 6 摩耗表面 写真
荷重: 速度: 電流:

(3) 図 5(c)において、通電電流が 80A 以上の場合、6N 以下の荷重条件（すなわち図 3 において最高接点温度がすり板の融点に達する条件）で摩擦係数の減少が認められた。これは、常にしゅう動しているすり板表面が熔融することで、一種の潤滑作用が働いたと考える。この条件における典型的な SEM 写真(図 7)でもすり板表面が熔融し、トロリ線に移着していた。すり板の摩耗量は熔融した体積と考えると、荷重の現象に伴い接点温度は上昇するため、摩耗率も増加すると考える。一方、当該条件ではアークも発生しており、推定した接点温度はトロリ線の融点以上に達しているはずであるが、図 7(a)ではトロリ線の熔融は確認できず、摩耗率は無通電時と同等になった。このメカニズムは明らかでなく、今後検証試験などの実施により解明する必要がある。

5. おわりに

集電材料である硬銅トロリ線と鉄系焼結すり板の摩耗形態およびその遷移条件を把握するため、摩耗試験装置を新たに検討・製作し、摩耗試験を実施した。この結果、通電下における摩耗形態を以下の 3 つに分類することができた。

- (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、通電時と無通電時の摩擦・摩耗特性は同等となり、摩耗率は荷重に比例し、摩擦係数は一定となった。
- (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、通電時の摩擦係数とトロリ線摩耗率は無通電時と比較して著しく増加した。
- (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、摩擦係数は減少しすり板摩耗率は無通電時と比較して著しく増加した。一方、トロリ線の摩耗率は無通電時と同等になった。

6. 参考文献

- 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) 高木相：電気接点のアーク放電現象，コロナ社，pp56-58，1995