

2703 パンタグラフすり板の局部摩耗に関する基礎的検討

正 [機] ○久保田 喜雄

正 [電] 早坂 高雅 (鉄道総合技術研究所)

Basic study on localized wear of a pantograph slider

Railway Technical Research Institute, 2-8-38 Hikari-cho, Kokubunji-shi, Tokyo, 185-8540 JAPAN

Localized wear of a pantograph slider may lead to break of a pantograph and eventually cause a breaking of an overhead wire. Therefore, it is strongly required to take measures for preventing the localized wear. However, the cause of the localized wear is yet to be identified and effective measures have not been taken yet. In this study, we reviewed the prior incidents of the localized wear and conducted basic examination on requirements for progression of the localized wear by experiment and calculation.

Keywords : pantograph slider, localized wear, abnormal wear, groove wear

1. はじめに

パンタグラフすり板(以下すり板)を使用中に、摩耗がある部位で特に速く進行することがある。この、一般に段付き摩耗や溝摩耗と呼ばれるすり板の局部摩耗現象は、パンタグラフの溶断やそれにとまなう架線の切断事故につながることもあり、解決が望まれている。しかし、局部摩耗の発生や進展のメカニズムはいまだ明らかになっておらず、効果的な対応策は立てられていないのが現状である。トロリ線に設置したセンサによってすり板局部摩耗を検知する方法の検討も行われている¹⁾が、根本的な解決のためには、局部摩耗の発生・進展過程を明らかにする必要がある。そこで、本研究では局部摩耗現象の機構解明を目的として、局部摩耗の発生原因について過去の事例をもとに考察するとともに、初期局部摩耗の進展条件について実験と計算による基礎的な検討を行った。

2. すり板局部摩耗の発生原因と特徴

局部摩耗の発生原因のうち、明らかになっているものは以下の3つに分類できる。

- (1) 架線への着氷霜
- (2) 架線やパンタグラフの性能低下
- (3) 特性の異なるすり板材の混用

(1)は、トロリ線のしゅう動面に着氷霜が生じた箇所をパンタグラフが通過する際に離線し、アークが生じることですり板が急激に摩耗するものである。この場合の特徴として、すり板の局部摩耗発生が冬季に集中すること、舟体側面に離線アークによる損傷が見られることが挙げられる。対策としては、離線アークに対する耐性が高いすり板材の使用や、霜取り用パンタグラフによる着氷霜の除去などがおこなわれている。

(2)は、架線・パンタグラフ系の性能が低下し、離線が発生することですり板が急激に摩耗するものである。例えば、トンネル内の架線高さが低いところでパンタグラフの押上力が低下することで離線が増加し、すり板局部摩耗が発生する²⁾ことや、トロリ線に波状摩耗が生じることですり板局部摩耗発生が増加する^{3), 4)}ことが報告されている。このような場合、離線はすり板上の決まった

箇所が生じることから、同一線区を走行するいずれの車両においてもすり板の同一箇所付近に局部摩耗が生じるという特徴が見られる。

(3)は、主すり板と補助すり板の境界部で局部摩耗が発生するものである。これは、主すり板と補助すり板とで電気抵抗率および摩耗特性が大きく異なることが原因である。したがって、主すり板と補助すり板の材料を同一にすることが有効な対策となる⁵⁾。

以上、明らかになっている局部摩耗発生原因について述べたが、発生原因が明らかでない局部摩耗も依然として発生している。そのような発生原因不明のすり板局部摩耗の特徴として、パンタグラフあたりの集電電流量が比較的大きく、カーボン系すり板を使用している車両で発生しやすい傾向にあること、一度局部摩耗が生じると2日~5日程度で摩耗限度まで達することが挙げられる。なお、現在では、問題となるような局部摩耗が発生するすり板はカーボン系すり板がほとんどであるが、過去には銅系焼結合金すり板でも発生事例^{3), 4)}が報告されており、必ずしもカーボン系すり板でのみ局部摩耗が生じるというわけではない。

3. すり板局部摩耗の進展過程

通常問題なく使用されているすり板であっても、その表面は平坦ではなく、ある程度の凹凸が生じている。つまり、前章で述べたような、さまざまな原因によってすり板表面には凹凸(初期の局部摩耗)が形成されたとしても、何らかの条件を満たさない限り局部摩耗が進展することはない。したがって、局部摩耗の進展過程は「初期凹凸の発生」と「凹凸の進展」にわけて考えることが、対策を講ずる上で重要となる。本研究では、はじめに、局部摩耗の進展条件について計算による検討を行ったのち、初期局部摩耗の発生について実験による再現を試みた。

3.1 局部摩耗が進展する条件

すり板の局部摩耗箇所は、健全部と比べ数十倍から数百倍以上摩耗している。すり板の摩耗率がこれほど大きく増加する原因としては、離線アークの繰り返し発生が

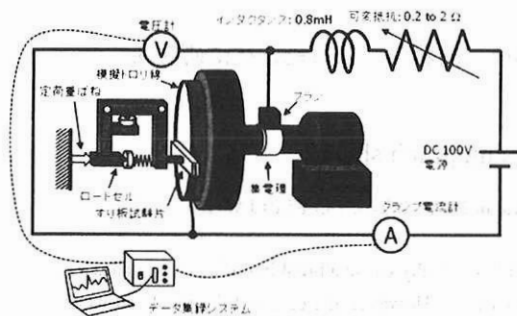


Fig.1 Scheme of the test apparatus

考えられる。そこで、離線アークが生じた場合とそうでない場合とですり板の摩耗がどの程度変わるのかを実験により調べた。

3.1.1 実験方法

実験には、鉄道総研所有の高速用集電材摩耗試験機 (Fig.1

) を用いた。すり板材はカーボン系すり板 PC78A を用い、以下の条件で通電摩耗試験を行った。しゅう動速度：100 km/h、押付力：59 N、通電電流：DC100～500 A (極性はトロリ線側が陽極)、しゅう動距離：25 km。すり板の比摩耗量は試験前後の重量差から算出した摩耗体積を平均押付力としゅう動距離で除することにより求めた。接触電圧が 10 V を超えた場合にアーク離線と判定し、アーク離線の評価量としてアーク電流 I とアーク時間 Δt の積の総和で定義される累積アーク電気量 Q を用いた。

$$Q = \sum_{i=1}^N (I_i \times \Delta t)$$

3.1.2 結果

摩耗試験結果を Fig.2 に示す。Fig.2 からわかるようにアークが発生すると、アークが発生しない場合と比べてすり板の摩耗は数倍から数十倍に増加する。以上のことから、すり板の局部摩耗が急速に進展する条件として、同一箇所を繰り返し離線アークが生じることが考えられる。次節では、繰り返し離線が発生するような摩耗形状について考察する。

3.2 局部摩耗の進展開始形状

ここでは集電系を Fig.3 のモデルに近似して考察する。Fig.3 のようにトロリ線がすり板の局部摩耗部に向かって落ち込んでいく場合、摩耗部の形状とトロリ線/すり板間の相対速度によっては、すり板とトロリ線が接触を保てずに離線する。このときの形状を以下で求める。Fig.3



Fig.2 Effect of arc discharge on wear of carbon based contact

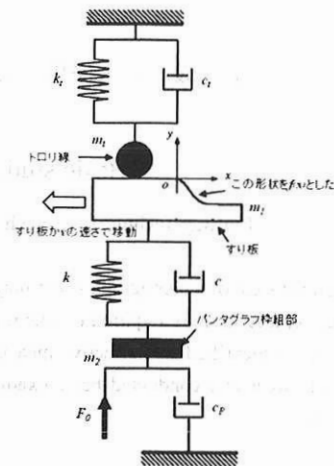


Fig.3 Dynamic model of current collecting system

で、トロリ線の変位を y_1 、すり板の変位を y_2 、パンタグラフ枠組の変位を y_3 とし、トロリ線のばね定数を k_1 、パンタグラフ復元ばねのばね定数を k 、トロリ線の減衰係数を c_1 、パンタグラフの復元ばねと主ばねの減衰係数をそれぞれ c_1 、 c_2 とするとトロリ線とパンタグラフの運動方程式は次のようになる。

$$m_1 \ddot{y}_1 = N - k_T y_T - c_1 \dot{y}_1 \quad (1)$$

$$m_1 \ddot{y}_1 = -N - k(y_1 - y_2) - c_1(\dot{y}_1 - \dot{y}_2) \quad (2)$$

$$m_2 \ddot{y}_2 = k(y_1 - y_2) + c_1(\dot{y}_1 - \dot{y}_2) - c_2 \dot{y}_2 + F_0 \quad (3)$$

ここで N はトロリ線とすり板間の垂直方向の接触力、 F_0 は押上力である。接触を保てなくなる限界では接触力が 0 となるので、 $N=0$ とし、式(1)をつぎの初期条件

$$N_0 - k_T y_T(0) = 0, \dot{y}_1(0) = 0$$

のもとで解くと

$$y_1 = \frac{N_0}{k_T} e^{-\xi_1 \omega_{t1} t} (\cos \omega_{t1} t + \frac{\xi_1 \omega_{t1}}{\omega_{t1}} \sin \omega_{t1} t) \quad (4)$$

となる。

$$\text{ただし } \omega_t = \sqrt{k_T/m_T}, \xi_t = \frac{c_1}{2\sqrt{k_T m_T}}, \omega_{td} = \omega_t \sqrt{1 - \xi_t^2}$$

であり、 N_0 は静押上力である。

式(2)、(3)について今回対象としているパンタグラフ (PS16) は主ばねにダンパがついていないので $c_p=0$ とし y_3 について解くと

$$y_3 = \frac{m_2}{M} \Delta y_0 e^{-\xi_p \omega_{pd} t} (\cos \omega_{pd} t + \frac{\xi_p \omega_{pd}}{\omega_{pd}} \sin \omega_{pd} t) + \frac{F_0}{2M} t^2 \quad (5)$$

となる。ただし、 $M = m_1 + m_2$ 、 $\Delta y_0 = \frac{N_0 + m_1 g}{k_1}$

$$\omega_p = \sqrt{\frac{kM}{m_1 m_2}}, \xi_p = \frac{c \sqrt{M/k m_1 m_2}}{2}, \omega_{pd} = \omega_p \sqrt{1 - \xi_p^2}, g \text{ は重力加速度}$$

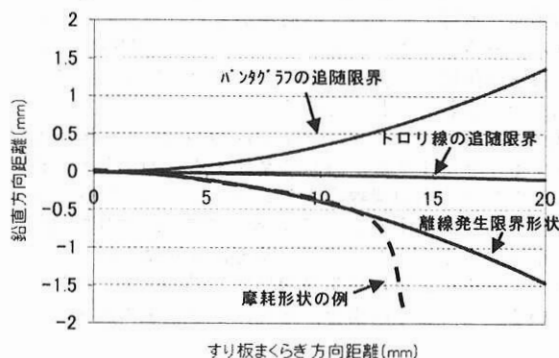


Fig.4 Local wear progression-onset geometry of contact slider

速度である。

すり板とトロリ線が接触を保てなくなる限界のすり板の摩耗形状 $f(x)$ は、すり板とトロリ線の追従限界の和で表され、 $f(x) = y_1 + y_2$ である。すり板とトロリ線の左右方向の相対移動速度を v とすると、 $x = vt$ であり、これを上式に代入することで摩耗形状 $f(x)$ を求めることができる。Table 1 に示した条件のもと、離線が発生する限界の形状を算出した結果の一例を Fig. 4 に示す。たとえば、すり板の摩耗形状が Fig. 4 中に点線で示したように離線発生の限界形状を超えると、そこで離線し、摩耗が進行する。計算結果から言えることは、局部摩耗が進展するかどうかは段の高さや溝の深さの寸法ではなく、形状によって決まるということである。すなわち、小さな段であっても、傾きの変化が急であれば局部摩耗は進展するといえる。

Table 1 Parameter used in geometry calculation

	記号	値	単位
トロリ線のばね定数	k_t	2000	N/m
トロリ線の減衰係数	c_t	10	Ns/m
トロリ線の等価質量	m_t	65	kg
舟体の質量	m_f	10.5	kg
復元ばねのばね定数	k_f	25700	N/m
復元ばねの減衰係数	c_f	10	Ns/m
枠組の質量	m_2	9.4	kg
主ばねの減衰係数	c_p	0	Ns/m
静押上力	F_0	59	N
トロリ線の左右移動速度	v	2	m/s

3.3 トロリ線の拘束による局部摩耗の進展

すり板の局部摩耗が進行すると、やがて大きな溝や段が形成され、その箇所にはトロリ線が拘束されてすり板の同一箇所をしゅう動しつづけるようになる。トロリ線がすり板の同一箇所をしゅう動し続けると、同一アーク量に対するすり板の摩耗量は2倍、摩耗高さは80倍になるという報告⁹⁾がなされており、トロリ線の拘束が始まることで局部摩耗はいっそう急速に進行する。このトロリ線の拘束について、すり板とトロリ線を Fig. 5 のようにモデル化し考察した。Fig. 5 のようにトロリ線を根元が自由に回転するばねに円柱がついたものと考え、これがすり板によって N の力で押し上げられているとする。この状態でトロリ線がすり板摩耗部と接触した場合を考える。トロリ線がすり板によって x 方向に距離 X 引張られた場合、トロリ線との間に働く力の x 方向成分は $-k_t X$ (k_t : トロリ線のばね定数) である。 y 方向成分を N とし、トロリ線とすり板の接点で働く力を、接線方向と接線に垂直な方向に分解すると Fig. 5 下図のようになる。トロリ線を接線方向に乗り上げる向きに働く力 F_t は次式で表される。

$$F_t = k_t X \cos\theta - N \sin\theta - \mu(k_t X \sin\theta + N \cos\theta) \quad (6)$$

ここで、 θ は接線と水平面が成す角度、 μ はトロリ線とすり板の間の摩擦係数である。

$F_t < 0$ の間、トロリ線はすり板に拘束されるため

$$k_t X > \left(\frac{\tan\theta + \mu}{1 - \mu \tan\theta} \right) N \quad (7)$$

となるまでトロリ線はすり板の摩耗部に拘束されることになる。前節と同様に $X = vt$ とすると、トロリ線がすり板の斜面に拘束される時間 T は

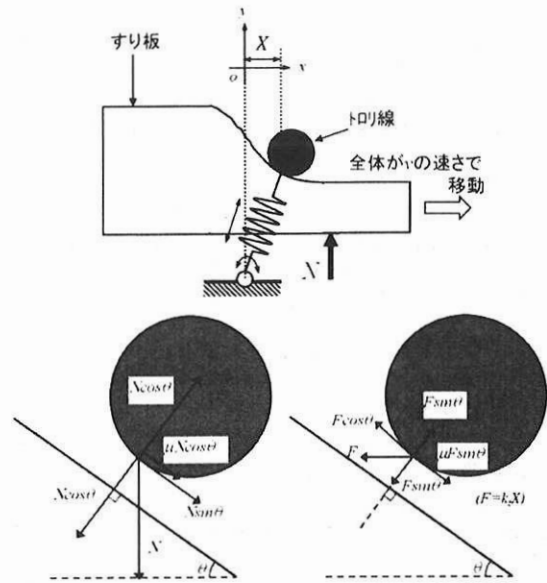


Fig. 5 Mechanical model of slider and overhead wire

$$T = \left(\frac{\tan\theta + \mu}{1 - \mu \tan\theta} \right) \frac{N}{k_t v} \quad (8)$$

と表わされる。この結果から、トロリ線がすり板表面の凹凸に拘束される時間は、すり板とトロリ線の接触部の傾き、すり板/トロリ線間の摩擦係数、トロリ線のばね定数などによって決まることがわかる。その条件を満たしている間、トロリ線はすり板の同一箇所をしゅう動し続けることで、局部摩耗が進展すると考えられる。また、トロリ線のばね定数は、径間中央でもっとも低く、支持点付近で最大となる。したがって、トロリ線がすり板摩耗部に拘束される時間は径間中央で最大となり、支持点付近で最小となる。なお、今回、簡単のためすり板は並進運動のみを考えたが、実際にはすり板は左右の微動ばねで支持されており、すり板の傾きはトロリ線との接触点の位置や押付力によって変化する。今後はこうしたパンタグラフやトロリ線の動きも考慮に入れたモデルを、実験による検証を踏まえながら構築していく必要があると考える。

4. 初期局部摩耗の発生

本章では、初期の局部摩耗がいかにして形成されるかについて実験により検討した結果について述べる。

これまでに考えられてきた初期局部摩耗の発生原因は大離線である。これは、大離線によってカーボン系すり板表面にアーク損傷が生じ、アーク損傷部は含浸金属が抜け、強度が低下しているため選択的に摩耗が進行し、初期局部摩耗が形成されるという考えである。この仮説を検証するため、電極開閉装置を用いてアーク損傷箇所をすり板試験片上に作成し、その試験片を用いて摩耗試験を行った。

4.1 実験方法

アーク放電は、トロリ線とすり板を接触させた状態で通電し、その後一方の電極を任意の速度で上下に移動させることで発生させた。すり板試験片はアーク放電を発生させた後にしゅう動試験を実施するために、25×60 mmの大きさの摩耗試験片を用いた。アーク放電は合計4回行った。その際、すり板表面のアーク痕が実際と同様

にしゅう動方向と平行になるよう、放電を一系列に発生させた。4回の放電で発生したアーク電気量は合計913 Cである。以上の方法で製作したすり板試験片について、高速用集電材摩耗試験機を用いて摩耗試験を実施した。しゅう動速度は100 km/h、通電電流はDC500 Aとした。本試験機ではすり板と架線の間の相対変位を、すり板押付装置を左右に移動させることで模擬している。今回の試験では、左右動の幅を45 mm、左右動速度を2 mm/sとした。試験時間は180 秒とし、試験中に模擬トロリ線はすり板試験片上を4往復する。試験前後にすり板の表面形状を測定し、摩耗試験後にアーク損傷箇所の形状がどのように変化するかを調べた。表面形状の測定は、レーザー変位計を用いてすり板表面を走査することで行った。

4.2 結果と考察

Fig.6に試験前後のすり板表面の写真を示す。Fig.7に試験前後のすり板表面形状の測定結果を示す。なお、表面形状の測定箇所はFig.6中に点線で示した。Fig.7からわかるように、すり板試験片のアーク損傷部が選択的に摩耗することはなかった。この理由として、はじめにアーク損傷部の耐摩耗性が低下すると仮定したが、これは掘り起こし摩耗（アブレシブ摩耗）が生じる場合にのみ正しく、今回のようにトロリ線表面の粗さが小さい（Raで1～10 μm ）条件ではアブレシブ摩耗ではなく凝着摩耗が主たる摩耗の機構であるため、アーク損傷箇所とその他の箇所での摩耗に差が生じなかったと考えられる。また、一般に凝着摩耗は同種の金属同士だと大きくなり、互いに固溶しにくい銅と炭素などの組み合わせでは小さくなる。アーク損傷部は銅が抜け、炭素のみになっていることから銅と銅の接触でなく、炭素と銅の接触になるため、凝着摩耗は大きくならないことも、アーク損傷部に選択的な摩耗進行が生じなかった理由の一つとして考えられる。したがって、今回の試験条件ではアーク損傷部がすり板局部摩耗の起点となることはなかったが、トロリ線のしゅう面が荒損して、アブレシブ摩耗が生じやすく、かつ、すり板表面にアーク損傷が存在する場合、そこを起点に局部摩耗が発生する可能性はある。

5. 結論

局部摩耗現象の機構解明を目的として、局部摩耗を発生と進展に分けて考察を行った。その結果、以下のことがわかった。

- (1) すり板表面形状が集電系の追従限界を超えるような形状となった場合に、局部摩耗が急速に進展すると仮定し、追従限界を超える臨界形状を算出した。その結果、局部摩耗が進展するかどうかは段の高さや溝の深さではなく、形状によって決まることがわかった。
- (2) トロリ線がすり板上の凹凸に拘束される場合に局部摩耗が進展すると仮定し、そのときの条件を算出した。その結果、トロリ線がすり板表面の凹凸に拘束される条件は、すり板とトロリ線の接触部の傾き、すり板/トロリ線間の摩擦係数、トロリ線のばね定数などによって決まることがわかった。
- (3) 大離線によってすり板上に生じたアーク損傷部で選択的に摩耗が進行することで初期局部摩耗が形成されるという仮説を検証するため、カーボン系すり板表面にアーク損傷をつけ、摩耗試験を実施した。その結果、本実験条件ではアーク損傷部が選択的に摩耗することはなかった。

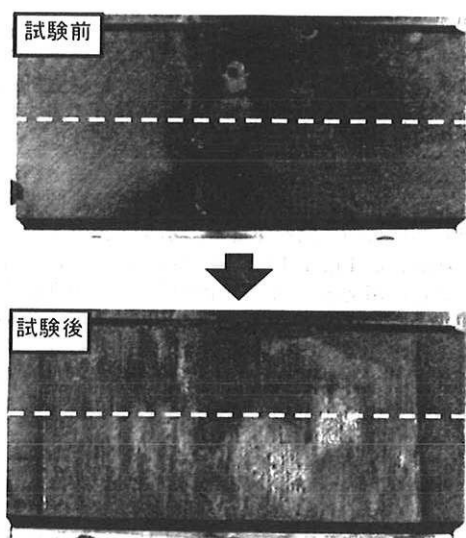


Fig.6 Worn surface of contact strip

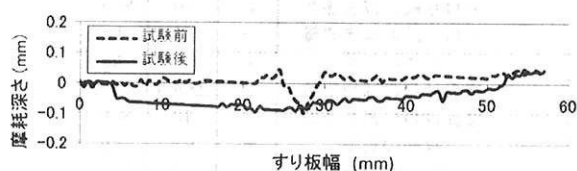


Fig.7 Profile of contact strip

参考文献

- 1) 白田、池田：トロリ線の振動測定によるすり板段付摩耗の検出、鉄道総研報告、Vol.25, No.4, pp.35-40、2011
- 2) LIU Guo-liang : Analysis of pantograph carbon contact strip abnormal wear on Guangzhou Metro Line 2 train, Electric Locomotives & Mass Transit Vehicles, No.2, 2008
- 3) 佐藤、尾野崎、天海：日光線におけるビデオ撮影によるパンタグラフのスリ板溶損・段付摩耗防止対策について、車両と機械、Vol.2, No.4, 1988
- 4) 佐藤、尾野崎：日光線におけるビデオ撮影によるパンタグラフスリ板溶損、段付摩耗防止対策について、電気車の科学、Vol.41, No.7, 1988
- 5) 大熊、森本、小林、橋本、真野、土屋、久保：主すり板、補助すり板境界部分での段付摩耗対策、J-RAIL, pp.113-114, 2004
- 6) 小比田、長沢：トロリ線偏位の有無がすり板摩耗に与える影響、電気学会全国大会、1994