

集電系材料の摩耗形態と遷移条件

○ [電] 山下 主税 (鉄道総合技術研究所)

Investigation of wear mode and transition conditions of current collecting material

○ Chikara Yamashita, (Railway Technical Research Institute)

This paper presents the linear wear testing method to represent the wear mode of current collecting material, and wear behavior between copper contact wire and sintered iron contact strip. According to the friction coefficient, specific wear rate and condition of surface, the wear mode of current collecting material under the current is classified into three types. And the wear mode transits by relation between melting point of materials and the maximum temperature at contact spot estimated with waveform of contact voltage.

キーワード: トロリ線, すり板, 摩耗形態, $\phi \cdot \theta$ 理論, 接点温度, 融点

Key Words: Contact wire, contact strip, wear mode, $\phi \cdot \theta$ theory, temperature of contact, melting point

1. はじめに

電気鉄道では, トロリ線とパンタグラフすり板を接触させることで, 走行時に必要な電力を車両に供給している。車両走行に伴いトロリ線とすり板は摩擦・摩耗するが, 近年は高速化やパンタグラフ集電電流の増加などの要因により集電材料の摩耗量が増加し, 材料の摩耗低減のための対策・提案が求められている。

集電系摩耗は, これまで経験的に機械的摩耗と電気的摩耗に大別されてきた¹⁾。機械的摩耗は主として高荷重域で発生し, トロリ線とすり板の凝着摩耗に起因するとされ, 電気的摩耗は主として非接触時 (今後は離線と呼ぶ) のアークに起因するとされ, 電気的摩耗形態では大きな摩耗率となることが示唆されている⁽²⁾⁽³⁾。集電系材料の摩耗低減のためには電気的摩耗形態にならぬような条件で集電・走行する必要があるが, 実際の通電下における集電系材料の摩擦形態の区別や遷移条件について詳細に調査した例はない。筆者らは通電下における摩耗現象を把握する試験方法を検討し, 摩耗試験を実施してきた。本論文では新たに検討した摩耗試験方法, 摩擦・摩耗特性から分類される摩耗形態, また摩耗形態の遷移条件について報告する。

2. 試験条件

2.1 試験装置

摩耗形態を分類するためには, 摩耗形態の混在を防ぎ特定の摩耗現象が現れやすいよう, 一定の条件で摩耗試験を実施することが必要となる。また, 摩耗形態の遷移条件を

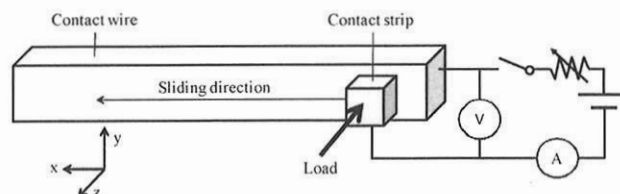


Fig.1 Linear wear test apparatus

調査するためには, 接点の状態をモニタリングする必要がある。これらの条件を基に, 本研究に必要な試験方法を検討した。具体的な検討内容を以下に示す。

- ① しゅう動中のすり板荷重変動が極力少ないこと。
- 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こと。
- ③ トロリ線とすり板間の接触電圧を精密に測定し, モニタリングできること。

検討の結果, 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て間欠しゅう動させる直動摩耗試験機を製作した。すり板の滑り速度は 3m/s 以下と低速条件に限られるが, 低速でしゅう動させることで, 荷重変動が少ない摩耗試験が実現でき, 特定の摩耗形態が現れやすくなる。実際に, 荷重 2N の条件におけるしゅう動においても, 荷重変動により離線することはほぼなかった。また, 直動型にすることで, 通電用スリップリングなどの接触抵抗を排除でき, トロリ線とすり板間の接触電圧測定精度の向上を図った。

摩耗試験に供した硬銅トロリ線と鉄系焼結すり板の物性

Table 1 Properties of specimen

Specimen	Sort	Component	Density g/mm ³	Hardness	Resistivity μΩm	Melting point K
Contact wire	GT170	Cu(99.9%)	8.91×10^{-3}	91 (Hv)	1.77×10^{-2}	1,342
Contact trip	TF-5A	Fe(78.6%), Cr(16.5%), S(0.9%)	7.10×10^{-3}	98 (HB)	0.40	1,646

Table 2 Wear test conditions

Load (N)	2~80
Sliding speed (m/s)	0.2
Voltage (V)	0, DC 100
Current (A)	0, DC100
Sliding distance (mm)	250
Sliding cycle	3,000

値を表 1 に示す。両者とも実際の鉄道で用いられている材料であるが、ここで鉄系焼結すり板を採用した理由は、成分分析による移着物の判別を容易にするためである。

トロリ線とすり板を面接触させるため、トロリ線の大弧面を切削することで平面を出し、しゅう動面の幅を 15mm 以上確保した。また、すり板材は 10mm×10mm×10mm の試験片とし、片当たりを防ぐため、全接触面に摩耗痕が確認できるまで無通電なじみ運転を実施した。

試験条件を表 2 に示す。滑り速度は河野の試験結果³⁾において、通電下の摩耗率が極大値を示す条件を選定した。これは、無通電時と通電時の摩耗特性を比較し易くするためである。

3. 試験結果

3.1 摩擦係数

無通電時および 100A 通電時における荷重と摩擦係数の関係を図 2 に示す。この図より、無通電しゅう動において摩擦係数は荷重に依存せず、約 0.7 となった。一方、通電しゅう動において摩擦係数は荷重条件によって以下に示す 3 つの傾向を確認した。

- ① 10N 超の荷重条件において、摩擦係数は荷重に依存せず、その値は無通電時と同等であった。
- ② 10N 近傍の荷重条件において、摩擦係数は 1.0 を超え、極大値を示した。
- ③ 6N 以下の荷重条件において、摩擦係数は無通電時よりも減少し、約 0.3 となった。

このことから、通電下の摩擦状態は荷重によって異なることが分かる。

3.2 比摩耗量

トロリ線の摩耗を評価するためのパラメータとして、摩耗試験前後の表面プロファイルを粗さ計によって測定し、深さ方向の摩耗面積を算出し、単位荷重・単位しゅう動回数当たりの摩耗面積を比摩耗量(mm²/N・cycle)として用いる。また、すり板は摩耗試験前後の質量差と密度より摩耗体積を算出し、単位荷重・滑り距離当たりの摩耗体積を比摩耗量(mm³/N・m)として用いる。

図 3 にトロリ線およびすり板の比摩耗量と荷重の関係を示す。これらの図より、無通電時のトロリ線比摩耗量は荷

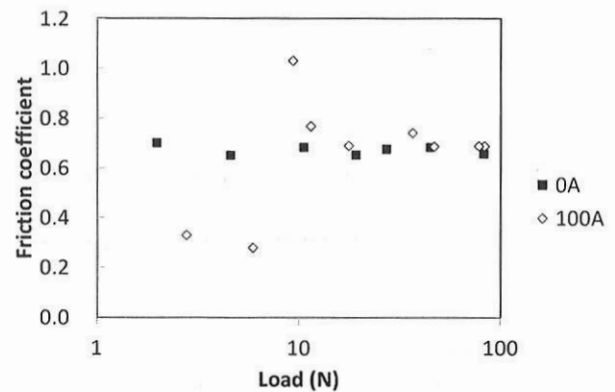
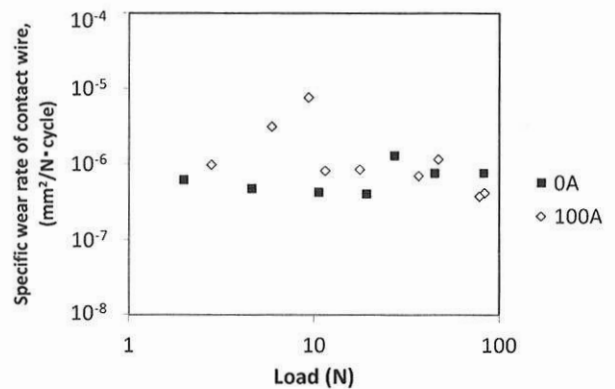
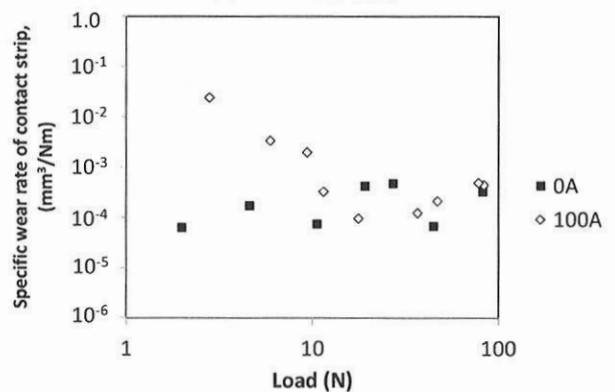


Fig.2 Relation between load and friction coefficient (sliding speed 0.2m/s,)



(a) Contact wire



(b) Contact strip

Fig. 3 Relation between specific wear rate and load (sliding speed 0.2m/s)

重に依存せず、 10^{-6} オーダーとなった。すり板比摩耗量は、ばらつきが大きいので、定性的な傾向を把握するに留まるものの、無通電時において荷重依存性は少ないと考える。すり板比摩耗量のばらつきが大きい理由は、前述したように試験前後の質量差になじみ運転分の摩耗量が加味されているためである。

100A 通電・10N 超の荷重条件では、トロリ線およびすり板の比摩耗量は無通電時と同等となった。このことから、荷重が 10N を超える場合、摩擦係数や比摩耗量に及ぼす通電電流の影響はなかった。

100A 通電・10N 近傍の荷重条件において、トロリ線比摩耗量は極大値の 10^{-5} オーダーと無通電時と比較して 1 桁大きく、すり板比摩耗量も増加傾向を示した。さらに荷重が減少すると、すり板比摩耗量は荷重の減少に伴い増加する一方で、トロリ線比摩耗量は無通電時と同等まで減少した。

これまで、集電系材料は低荷重になるほど電氣的摩耗が大きくなると考えられてきたが、トロリ線の摩耗については従来の考え方とは異なり、極大値は存在するものの、低荷重条件では摩耗が少ない結果となった。ただし、現場において常に離線する箇所(荷重条件がゼロ)ではトロリ線摩耗は少なく、離線前後の箇所(低荷重条件)で摩耗が多いという実態には則している。

4. 考察

3 章で通電下の摩擦係数や各比摩耗量は荷重によって変化することが分かった。この章では、各荷重下のトロリ線・すり板間で起こっている現象を調査・考察し、摩耗形態の分類と遷移条件の検討を行う。

図 4 に 3 種の荷重下におけるトロリ線とすり板表面の SEM 観察像を示す。図 4(a)は荷重 80N における摩耗試験後の表面であるが、両表面に溶融した形跡はなく、一般的な凝着摩耗の様相を呈しており、無通電時と同様であった。このことから、荷重 10N 超の条件ではトロリ線・すり板間接触状態に通電電流の影響はなく、摩擦係数や比摩耗量も無通電時と同様になったと考える。

図 4(b)より、荷重 10N におけるトロリ線表面は溶融していることが分かる。また、すり板表面にはロール状の摩耗粉が確認できるが、これはすり板表面に移着した銅が摩擦により脱落・凝集したものであった。つまり、この荷重条件では、通電によりトロリ線接点が溶融し、すり板に移着する形態となり、トロリ線の比摩耗量が極大値を示す。すり板表面が溶融していないのは、表 1 に示すようにすり板の融点が高いためと考える。また、トロリ線接点が溶融すると、トロリ線とすり板は溶着するため、これを引き剥がす力が摩擦力に加わることになり、図 2 では荷重 10N 近傍で 1.0 を超える大きな摩擦係数を示したと考える。

図 4(c)より、荷重 3N ではすり板表面が溶融していることがわかる。トロリ線表面に溶融物が確認できるが、これはすり板の鉄成分が溶融し移着したものであった。一方、すり板表面に銅の移着物は少なくなり、トロリ線表面は溶融していなかった。これは、間欠的にしゅう動するトロリ線よりも常にしゅう動しているすり板接点で熱の蓄積が大きく、すり板が選択的に溶融したと考えるが、そのメカニ

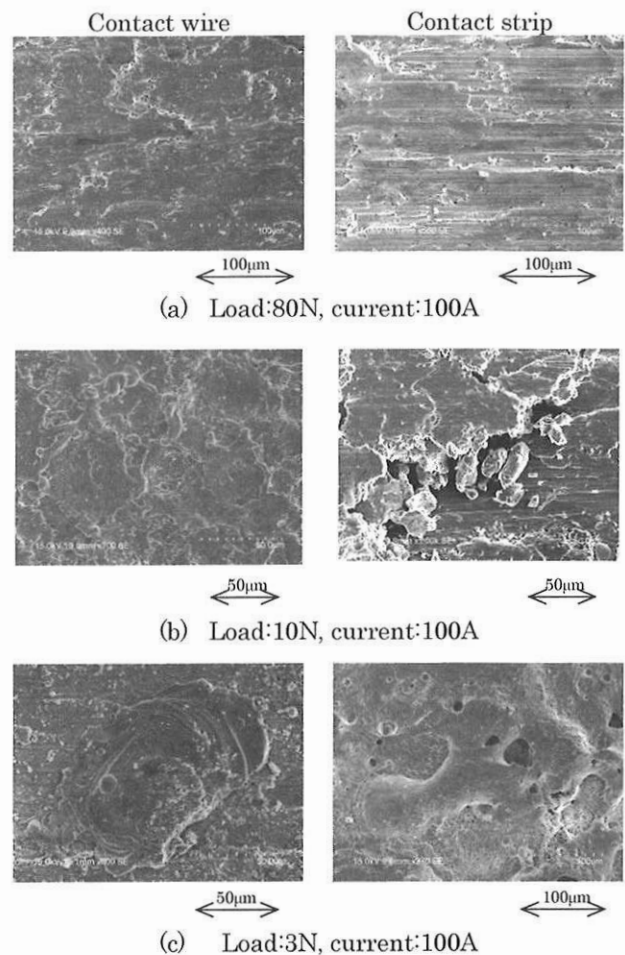


Fig. 4 SEM image of specimen

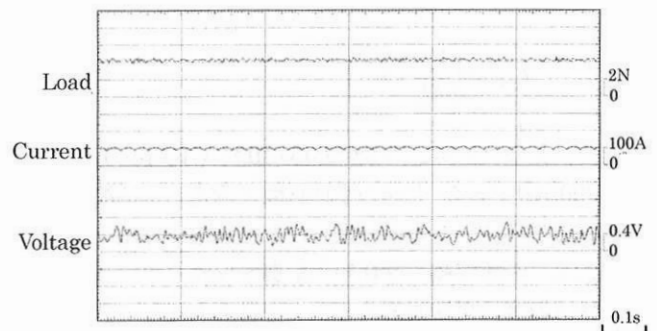


Fig.5 Waveform example of measured data (Load:10N, current:100A)

ズムについては今後検証すべき課題である。スライダーであるすり板表面が溶融しているため、図 2 では荷重 6N 以下で摩擦係数が減少したものと考える。

以上より、摩耗形態は 3 つに区別することができ、その現象は各集電材接点の溶融に関わっている、つまり遷移条件は接点温度と材料の融点に関わっていることが分かった。通電中の接点温度を直接測定することは非常に困難であるが、接触電圧 V_c を用いて接点の最高温度を推定できる理論「 $\varphi\theta$ 理論」がある⁴⁾。この理論によれば接点最高温度 T_{max} を次式で表わすことができる。

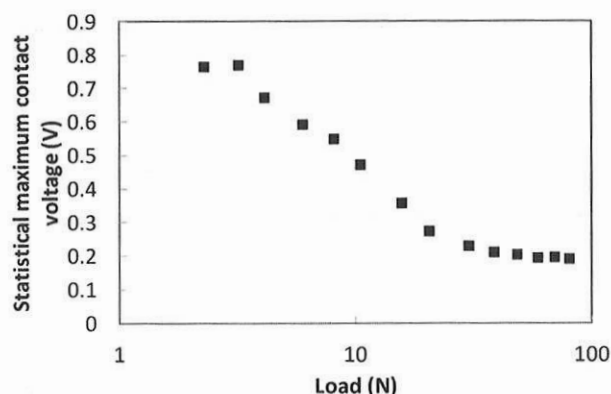


Fig.6 Relation between statistical maximum contact voltage and load (sliding speed 0.2m/s)

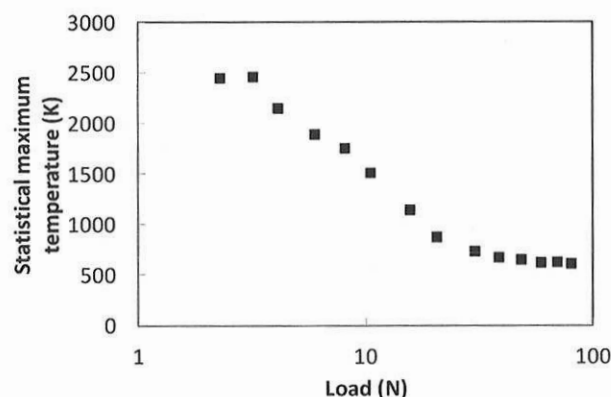


Fig.7 Relation between statistical maximum temperature at contact and load (sliding speed 0.2m/s)

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

ここで、 L はローレンツ数($=2.45 \times 10^{-8} [(V/K)^2]$)、 T_0 は室温($=300[K]$)である。今回の摩耗試験で測定した接触電圧波形を図5に示す。この図のように、接触電圧は微小に変動しており、荷重変動や摩耗粉の影響を反映していると考えられる。接点温度は電圧波形のピークで最も高くなると考え、ここでは各試番における平均接触電圧を V_{ca} 、標準偏差を σ とし、両者から統計的な最高接触電圧を $V_{ca}+3\sigma$ とした。図6に荷重と統計的最高接触電圧の関係を示す。また、(1)式を用いて推定した接点の統計的最高温度と荷重の関係を図7に示す。これらの図より、荷重 10N 近傍でトロリ線材の融点である 1,342K を超え、6N 近傍ですり板の融点である 1,646K を超えることが分かる。したがって、集電系材料の摩耗形態は、通電による接点温度が各材料の融点に達するときに遷移することがわかる。また、一般的には銅の融点に達する接触電圧は 0.414V、鉄の融点に達する接触電圧は 0.558V と言われており⁴⁾、これらの数値を用いて、通電下における硬銅トロリ線と鉄系焼結すり板の摩耗形態分類と遷移条件を以下のように示すことができる。

- (1) 無通電時の摩擦係数やトロリ線・すり板比摩耗量は、荷重に依存せず一定の値を示し、その摩耗形態は凝着

摩耗となる。

- (2) 統計的最高接触電圧が銅融点に対応する 0.414V 以下にとどまる集電しゅう動条件では、摩擦・摩耗特性に及ぼす通電の影響はなく、無通電時と同様の凝着摩耗形態となる。
- (3) 統計的最高接触電圧が銅融点に対応する 0.414V 以上、鉄融点に対応する 0.558V 以下の集電しゅう動条件では、トロリ線のみが溶融し、すり板に移着する摩耗形態となる。このとき、トロリ線の比摩耗量は極大値を示す。また、この条件下ではトロリ線とすり板が溶着すると考えられ、摩擦係数は大きな値を示す。
- (4) 統計的最高接触電圧が鉄融点に対応する 0.558V 以上となる集電しゅう動条件では、すり板が選択的に溶融し、トロリ線に移着する摩耗形態となる。この条件では、荷重の減少に伴いすり板比摩耗量は増加し、トロリ線の比摩耗量は無通電時と同等になる。また、この条件下ではスライダであるすり板表面が溶融しているため、摩擦係数は小さな値を示す。

今回は特定の摩擦条件において摩耗形態の分類を行ったが、この結果は滑り速度や電流、しゅう動インターバルなどに依存するものとする。また、高速しゅう動の場合は機械的な摩擦熱も大きくなるため、接触電圧から推定する接点温度のみでは遷移条件となりえない可能性が高い。今回確認した摩耗形態の遷移条件である接触電圧やその変動に及ぼす種々因子の影響を解明・一般化することによって、実際のトロリ線—パンタグラフすり板の摩耗現象解明や、摩耗低減指針に貢献することができると考える。

5. おわりに

集電系材料の摩耗形態とその遷移条件を解明するため、摩耗試験装置を新たに検討・製作し、摩擦・摩耗特性の評価を行った。この結果、通電下における摩耗形態を材料表面の溶融・移着によって3つに分類できた。また、接触電圧波形より推定した最高接点温度が各材料の融点に達する条件で、摩耗形態が遷移することが分かった。

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，73，1959。
- 2) 河野彰夫，大藪英雄，曾田範宗：集電用材料の摩耗に及ぼす離線アークの影響（第1報），潤滑，27，4，pp.67-71，1982。
- 3) 河野彰夫，大藪英雄，曾田範宗：集電用材料の摩耗に及ぼす離線アークの影響（第2報），潤滑，27，7，pp.55-60，1982。
- 4) 高木相：電気接点のアーク放電現象，コロナ社，pp.56-59，1995。