

アーク放電が集電系材料の質量と表面状態に及ぼす影響

電力技術研究部 電車線構造研究室

副主任研究員 早坂高雅

1. はじめに

電気鉄道において、トロリ線は成分がほぼ純銅である硬銅トロリ線が使用されており、すり板は銅や鉄を主成分とした金属すり板と、炭素を基材として銅を含浸させたカーボン系すり板が使用されている。新幹線では鉄系の金属すり板を、在来線では鉄系や銅系の金属すり板、およびカーボン系すり板を使用している。電車は、トロリ線にすり板をしゅう動させながら集電（しゅう動集電）している。しゅう動集電時にすり板とトロリ線間で接触不良が生じるとアーク放電が発生する。

しゅう動集電における材料の摩耗は、大きく分けてしゅう動による摩耗とアーク放電による消耗があると考えられている¹⁾。集電系材料においても摩耗現象を解明するため、これまでに実験室内ですり板とトロリ線をしゅう動集電させた実験が行われている。しかし、しゅう動集電の実験では、しゅう動による摩耗とアーク放電による消耗が同時に生じるため、現象が複雑化し、詳細な解析や摩耗現象の解明が難しくなるという課題があった。

筆者らはこれまでに電気鉄道で実際に使用されている材料を用いてアーク放電だけを発生させる実験を行ってきた。これにより集電系材料として一般的に用いられている材料のアーク消耗を定量的に示すとともに、すり板種別の違いにより生じるアーク消耗の違いを定性的に明らかにした。本発表では、アーク放電が発生した際の通過電気量と集電系材料の質量変化の関係や集電系材料の表面状態の観察結果²⁾について紹介する。

2. 実験

2.1 実験装置

図1に実験で使用した電極開閉装置および測定機器を、図2にその回路図を示す。この電極開閉装置は、電極としてトロリ線やすり板を上下対に固定して、一方の電極を任意の速度で上下に移動させることのできる可動ステージを備えている。通過電気量の変更は、印加電圧、通電電流をそれぞれ50～75 V、100～150 A で変えるとともに、可動ステージの開離速度を5～20 mm/s で変えることで行った。

2.2 供試電極

表1に各電極に用いた材料の種別と成分を示す。実験に用いた電極は、陽極にみぞ付き硬銅トロリ線 110 mm²(以下GT110)、陰極に在来線で一般的に使用されているカーボン系すり板の一種であるPC78A ならびに新幹線で使用されている鉄系金属すり板の一種であるBF31を使用した。PC78Aは

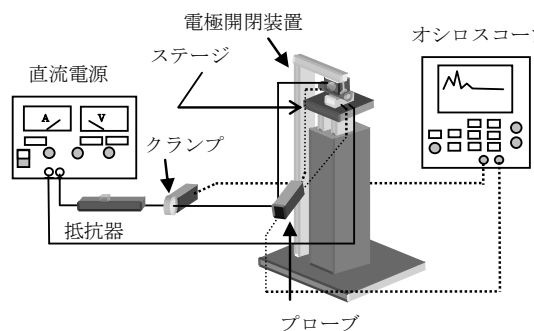


図1 電極開閉装置と測定機器

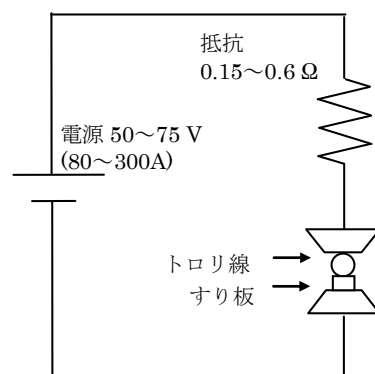


図2 回路図

焼成した炭素を基材として純銅を含浸させたすり板である。図 3 に、使用した電極の形状とアーク放電を発生させた箇所を示す。電極は長さ 20~30 mm に切断したトロリ線と、約 20×25×10 mm に加工したすり板である。アーク放電を発生させる箇所は、トロリ線側が大弧面と呼ばれる通常の使用においてすり板がしゅう動する箇所で、すり板側が 10×20 mm の平面上とした。

通電状態にあるすり板とトロリ線を開離すると、アーク放電はすり板とトロリ線の不特定の箇所で生じる。これは電極の質量変化量にばらつきが生じる要因となる。そこで、アーク放電の発生箇所を任意の箇所とするために、トロリ線を半径 1 m 前後で曲げている。トロリ線とすり板は、実験前に 200 番の紙やすりで接触面を研磨したうえで、エタノールで脱脂し、十分乾燥させた後に質量を測定してから、固定ステージにトロリ線を、可動ステージにすり板をセットした。

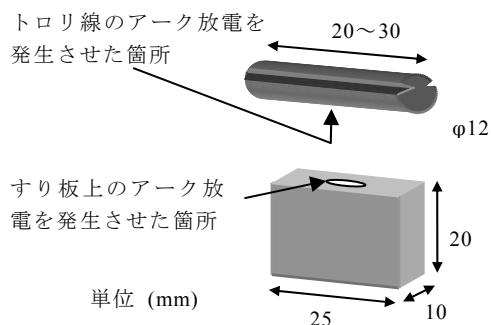


図 3 電極の形状とアーク放電を発生させた箇所

表 1 電極の種別と成分

極性	種別	成分 (重量%)
陽極	GT110	Cu (99.96%)
陰極	PC78A	Cu (50%), C (50%)
	BF31	Fe (85~95%), Ni (3%)

2. 3 質量変化の測定と表面状態の観察

質量変化の測定については、アーク放電発生後に電極表面に形成されるクレータ状の窪みの体積を測定し、それに電極の密度を乗じる方法もある。しかし、この場合、アーク放電によってクレータ状の窪み箇所やその周囲において、密度変化が生じると、正確な質量変化の値を得ることができなくなる。そこで、電極の質量変化量は、アーク放電前後の電極の質量を測定することで求め、表面状態の観察にはデジタルマイクロスコープを用いた。

3. 実験結果

3. 1 陽極GT110, 陰極PC78A

図 4 に GT110 と PC78A を電極に用いて 1 回のアーク放電を発生させた際の通過電気量と電極の質量変化量の関係を示す。なお、図中には通電電流の値も示している。この結果から、切片を 0 とした最小二乗法で陽極 GT110 の質量変化量 M_{GT-PC} (g) と陰極 PC78A の質量変化量 M_{PC} (g) を通過電気量 Q (C) の関数として表すと次式となる。

$$M_{GT-PC} = 2.0 \times 10^{-5} Q \dots \dots \dots (1)$$

$$M_{PC} = -7.0 \times 10^{-5} Q \dots \dots \dots (2)$$

なお、本実験条件である 100~150 A の通電電流の範囲において、質量変化量の電流依存性は観測されなかった。図 5~6 に、約 170 C のアーク放電を発生させた後に各電極の表面をデジタルマイクロスコープで観察した結果を示す。図中の数値は、デジタルマイクロスコープの計測機能を用いて測定した値である。GT110 の表面には同心円状に直径約 1700 μm と 450 μm のアーク痕が形成されている。また、PC78A の表面には半球状物質が確認され、黒色の直径 1250 μm、茶色の直径 4500 μm のアーク痕も認められる。半球状物質は黒色の箇所で少なく、その周辺で多く形成されていた。なお、この

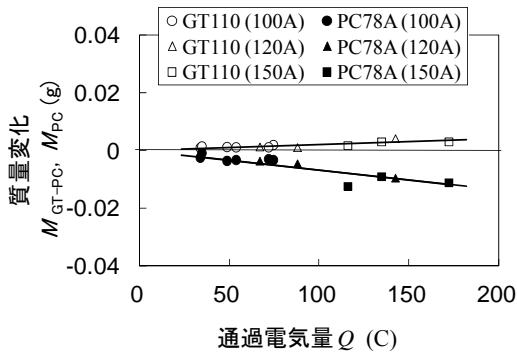


図4 GT110とPC78Aの通過電気量と質量変化の関係

半球状物質は、すり板から溶出した銅であることがわかっている。

3.2 陽極GT110, 陰極BF31

図7にGT110とBF31を電極に用いて1回のアーク放電を発生させた際の、通過電気量と電極の質量変化量の関係を示す。(1), (2)式と同様にして最小二乗法で陽極GT110の質量変化量 M_{GT-BF} (g)と陰極BF31の質量変化量 M_{BF} (g)を通過電気量 Q (C)の関数として表すと次式となる。

$$M_{GT-BF} = 0.9 \times 10^{-4} Q \quad \dots \quad (3)$$

$$M_{BF} = -2.0 \times 10^{-4} Q \quad \dots \quad (4)$$

図8~9に約170Cのアーク放電を発生させた後に各電極の表面をデジタルデジタルマイクروسコープで観察した結果を示す。GT110の表面には広い範囲にアーク痕があり、その中にいくつかの凸状の物質も確認できる。このうち最も大きなものは、直径約1880 μm 、高さ285 μm であった。BF31の表面には直径約4500 μm の円形で中が窪んでいるクレータ状のアーク痕が形成された。

4. 考察

アーク放電によるPC78AとBF31の質量減少傾向の違いや、アーク放電発生後のそれらの表面状態の違いが観測された。ここでは、この違いが生じるメカニズムについて考察する。



図8 アーク放電後のGT110の表面

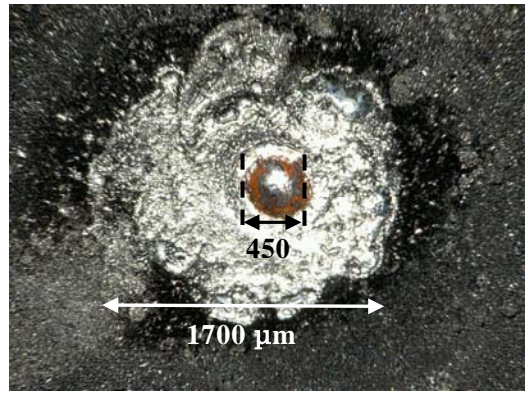


図5 アーク放電後のGT110の表面

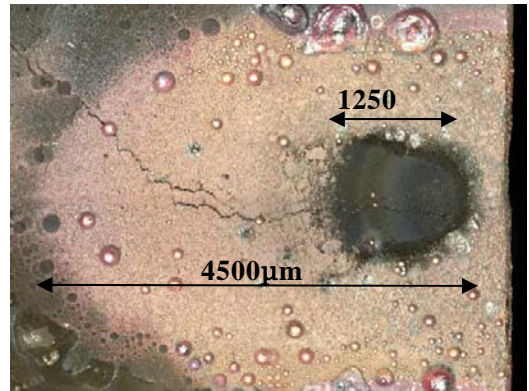


図6 アーク放電後のPC78Aの表面

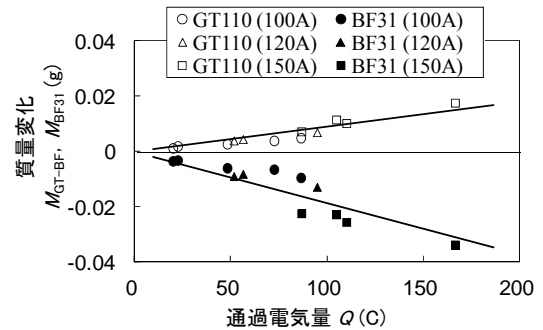


図7 GT110とBF31の通過電気量と質量変化の関係

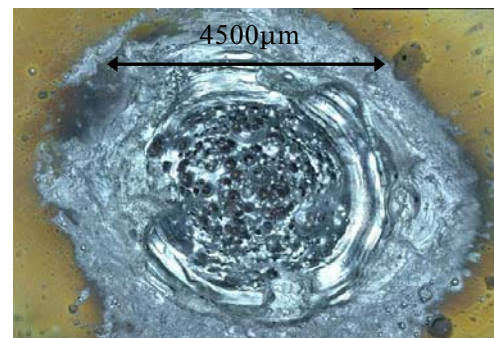


図9 アーク放電後のBF31の表面

アーク放電が発生しているすり板表面について考えると、ここでは高温の陰極点や輝点の影響に加えて陽光柱からのふく射熱の影響も受ける。したがって、温度の高い領域が広範囲に及ぶと考えられる。図 6 において、4500 μm の範囲で半球状物質が確認できた。これはこの範囲で銅が溶融したことを示しており、この範囲の温度が銅の融点以上であったことを示している。また、図 9 においても図 6 と同じ通過電流量で同じ 4500 μm の大きさのアーク痕が確認できる。

図 10 に PC78A と BF31 にアーク放電が発生している際の輝点ならびにその周囲における銅、炭素、鉄の動きを模式的に示す。溶融領域は図 6 や図 9 の 4500 μm に相当する陽光柱のふく射熱を受ける箇所と仮定する。アーク放電が発生すると、例えば図 10 (a) の輝点において PC78A に含まれる銅の蒸発が生じる。また溶融領域において PC78A に含まれる銅が輝点や陽光柱のふく射熱の影響を受けて溶融し、その溶融した銅は、溶出して PC78A の溶融領域を覆う。溶融領域の温度はアーク放電終了後の表面に半球状物質が残っていたことを考えると、高々銅の沸点(約 2600 $^{\circ}\text{C}$) までしか上昇していないと考えられる。すなわち、この領域における炭素は、昇華点(約 3400 $^{\circ}\text{C}$) 以下の温度に抑えられ、アーク放電中においても固体として形状を維持する。したがって、PC78A のアーク放電による材料消耗の要因は、輝点からの銅の蒸発が主である。一方、陰極材料の消耗要因の一つと考えられている、正イオンの衝突による材料の飛散は、溶融領域における固体の炭素が存在するため、ほとんど生じていないと考えられる。

図 10 (b) に示した BF31 の溶融領域も PC78A の溶融領域と同様に高温になり、その温度は PC78A と同じ温度である 2600 $^{\circ}\text{C}$ まで上昇したと仮定すると、鉄の融点(約 1500 $^{\circ}\text{C}$) を超える。溶融した BF31 は、その動きを阻害するものが無いため、輝点から蒸発もしくは正イオンの衝突により溶融領域から飛散すると考えられる。

このように同じ通過電流量を受けた PC78A と BF31 は、同じ大きさのアーク痕が残るものの、PC78A の基材である炭素が銅の飛散を抑えるため質量の減少量に違いが生じるものと考えられる。

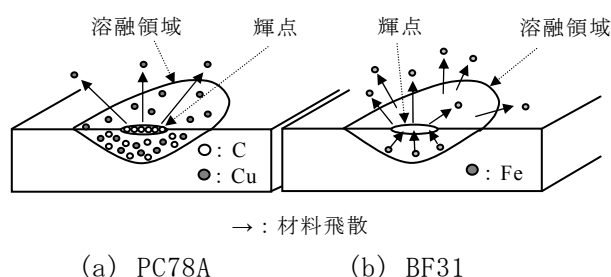


図 10 アーク放電発生時の銅、炭素、鉄の動き

5. まとめ

本報告では、アーク放電が発生した際の通過電流量と集電系材料の質量変化の関係や集電系材料の表面状態の研究について紹介した。研究結果をまとめると下記のとおりである。

- (1) 開離時アーク放電実験を陽極に硬銅トリ線、陰極にカーボン系すり板と鉄系金属すり板を用いて行い、それぞれの質量変化の実験式を求めた。
- (2) カーボン系すり板と鉄系金属すり板の質量変化の違いは、カーボン系すり板の基材である炭素がアーク放電による銅の飛散を防ぐために生じる。

文 献

- 1) Ragnar Holm : Electric Contact Theory and Application, Fourth edition p.255, Springer (1999)
- 2) 早坂高雅, 久保田喜雄 : アーク放電が集電系材料の質量と表面状態に及ぼす影響, 鉄道総研報告, Vol.26, No.6, pp.35-40 (2012)