

# 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

早坂 高雅\* 久保田 喜雄\*\*

## Influence of Arc Discharge on Mass and Surface Condition of Current-Collecting Materials

Takamasa HAYASAKA Yoshitaka KUBOTA

Examination methods that involve a slide between contact wires and contact strips are ones that simulate the actual current-collecting phenomena arising in the railway field. However, the influence of a breaking arc on the mass and surface of contact materials cannot be clarified by these methods, because of the mass change due to the wear and arc erosion that occur during the examination by these methods. This paper tries to clarify these problems by using a breaking arc that is generated without using a wire to generate an arc discharge. The breaking arc generated in this way is similar to the arc generated in the railway field.

キーワード：アーク放電，集電系材料，アーク消耗，通過電気量

### 1. はじめに

電気鉄道は、パンタグラフのすり板をトロリ線に接触させることで、しゅう動集電を行っている。トロリ線には一般的に銅が主成分の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、炭素と銅を主成分としたカーボン系すり板に大別できる。新幹線では鉄を主成分とした金属すり板を、在来線では金属すり板、カーボン系すり板を使用している。新幹線ならびに在来線ともにトロリ線には高い電圧が課電されているため、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（以後、アーク消耗と呼ぶ）があると考えられている<sup>1)</sup>。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。この中には、接触不良の発生頻度を増減させて、アーク電流とアーク継続時間から求められる通過電気量とすり板質量の変化について実験したものもある<sup>2)</sup>。この実験方法はアーク消耗を含むしゅう動による摩耗を測定しているため、文献1)のような摩耗の定式化を行ううえで必要となるアーク消耗量が示されていない。

アーク消耗については、超高压送電系統における一線地絡故障を想定した研究がある<sup>3)</sup>。これは、離れた電極間を発弧線で短絡し、短絡電流による発弧線の熔融、蒸

発を利用してアーク放電を発生させる方法を用い、通過電気量が数千クーロン (C) の実験を行っている。これに対して、すり板とトロリ線間で生じる接触不良ともなうアーク放電は、発弧線でアーク放電を発生させる方法と異なり、通電された2つの接点が開極（以後、開離と呼ぶ）することで発生する。また発弧線の使用は銅蒸気が陽光柱に混入することで、そこでの電子密度が大きく変わる<sup>4)</sup>ことを考慮すると、アーク電流やアーク継続時間に影響を与える可能性もある。加えて直流電気鉄道における接触不良の通過電気量は最大で数百Cのオーダーである。すり板に対しては、通過電気量当たりのアーク消耗量が数Cオーダーの実験と数百Cオーダーの実験で異なる結果<sup>5)</sup>が得られており、数千Cの実験結果と数百Cの実験結果が異なる可能性もある。さらに、トロリ線に対して、アーク継続時間や電極間距離によってアーク放電前後での質量が減少する場合や増加する場合が報告されている<sup>6)</sup>。

一方、集電系材料のしゅう動集電時におけるアーク消耗のモデル化を試みた研究がある<sup>7)</sup>。このモデルは、アーク消耗がすり板側に生じることを示している。しかし、アーク消耗量は、すり板種別によって異なる場合があり、このモデルから、そのメカニズムを明らかにすることができない。

そこで、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、発弧線を用いない方法で通過電気量が最大で数百Cまでの実験を行ってきた。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<sup>8)</sup>。本論文では、

\* 電力技術研究部 電車線構造研究室

\*\* 材料技術研究部 摩擦材料研究室

特集：電力技術

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について報告する。

2. 実験条件

2.1 実験装置

図1に実験で使用した電極開閉装置と測定機器の構成を、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。本実験における通過電流量は、すり板1列当たり600A前後を通過できるように開発が進められていること<sup>9)</sup>、ならびにすり板とトロリ線の離線（機械的な離れ）時間が最大でも200msecであること<sup>10)</sup>を考慮して、最大で数百Cのオーダーとした。通過電流量の変更は、印加電圧、電流をそれぞれ50～75V、80～300Aで変えたとともに、可動ステージの開離速度を5～20mm/sで変えることで行った。加えて、一部の実験でアーク放電発生後のトロリ線表面に形成されたクレータ状の窪み（以下凹部）のアーク継続時間依存性を調べる目的で、トロリ線とすり板に対して並列にサイリスタを挿入してアーク継続時間の制御を行った。

2.2 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110mm<sup>2</sup>（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20～30mmの長さのトロリ線と約20×25×10mmのすり板に加工している。アーク放電を発生させる面は、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とすり板側が平らな面であるAの箇所とした。Bの箇所はすり板の角で、後述する高速度カメラによる撮影においてアーク放電を発生させた箇所である。

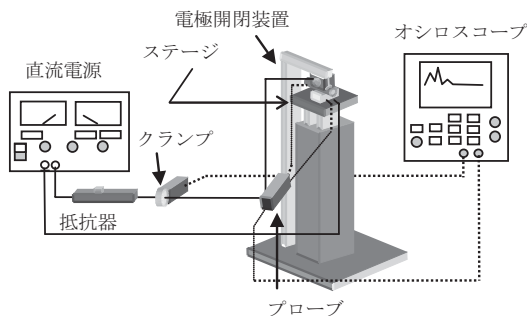


図1 電極開閉装置と測定機器

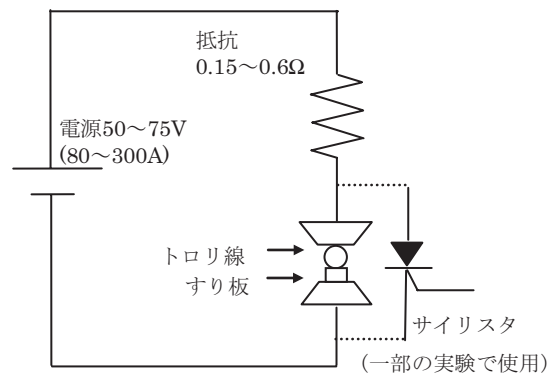


図2 回路図

表1 電極の種別と成分

極性	名称	種別	成分 (重量%)
陽極	トロリ線	GT110	Cu (99.96%)
陰極	すり板	PC78A	Cu (50%), C (50%)
		BF31	Fe (85～95%), Ni (3%)

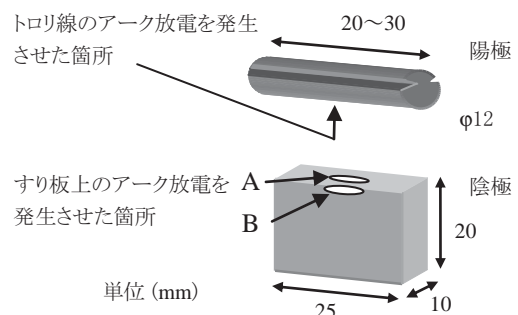


図3 電極の形状とアーク放電を発生させた箇所

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が生じる。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Aの箇所にコントロールするために、トロリ線を半径1m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。

2.3 高速度カメラ

高速度カメラによる撮影は、GT110とPC78Aの開離時アーク放電実験の際に行った。開離時アーク放電実験はトロリ線とすり板を上下対にして行っているため、アーク放電が発生している際のすり板（図3のA箇所）を観察することが難しい。そこで、高速度カメラはPC78Aから300mm程度離れた箇所に25×20mmの面が撮影できるように設置するとともに、アーク放電を図3のBの箇所が発生させて、すり板表面を観察した。撮影時の高速度カメラの設定は、1秒当たり2000フレーム、シャッタースピード1/10000秒である。

2.4 電極質量測定と表面状態の観察

一般にアーク放電が電極表面に発生すると、アーク痕としてクレータ状の窪みが形成されるとともに電極の質量変化が生じる。アーク放電後の質量変化を計測する手法には、形成されたクレータの体積に電極の密度を乗じる方法がある。しかし、カーボン系すり板は、アーク放電が発生してもクレータ状の窪みがほとんど形成されないため、この手法を用いることができない。そこで、アーク放電発生前後の電極の質量変化を測定するために、0.1mg まで計測可能な電子天秤を使用した。また、アーク放電発生後の電極の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流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) を通過電流量 $Q$  (C) の関数として表すと次式となる。

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

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

なお、本実験条件である100～150A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に1回のアーク放電によるアーク継続時間とGT110表面に形成された凹部の半径および深さを示す。凹部の半径および深さは、アーク継続時間が1msec以上になると、アーク継続時間に依存しなくなる。

図6～7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計測した値である。GT110の表面には同心円状に直径約1700 $\mu$ mと450 $\mu$ mのアーク痕が形成されている。また、PC78Aの表面には半球物質が確認でき、黒色の直径1250 $\mu$ m、茶色の直径4500 $\mu$ mのアーク痕

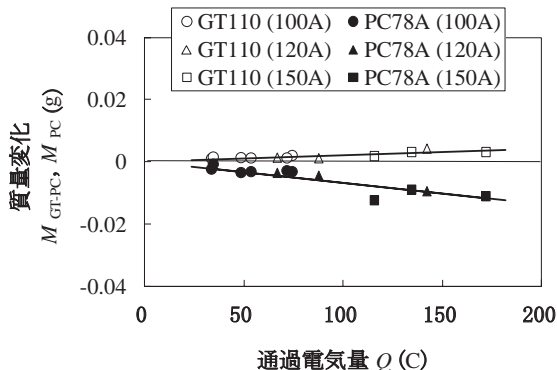
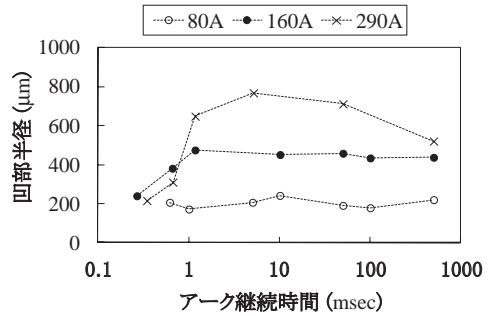


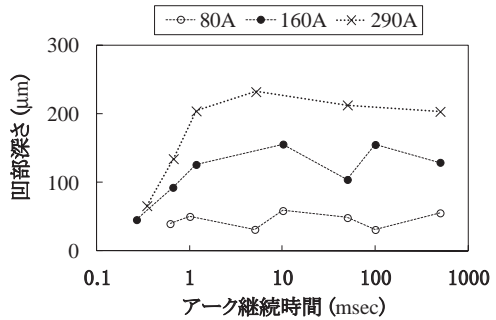
図4 GT110とPC78Aの通過電流量と質量変化の関係

も認められる。半球物質は黒色の箇所であく、その周辺で多く形成されていた。

図8 (a)～(d)に高速度カメラを用いてアーク放電終了前後のPC78Aの表面を観察した結果を示す。同図(e)にアーク放電終了後に同じ箇所をデジタルマイクロ



(a) GT110表面に形成された凹部半径



(b) GT110表面に形成された凹部深さ

図5 アーク継続時間とGT110表面の凹部の大きさの関係

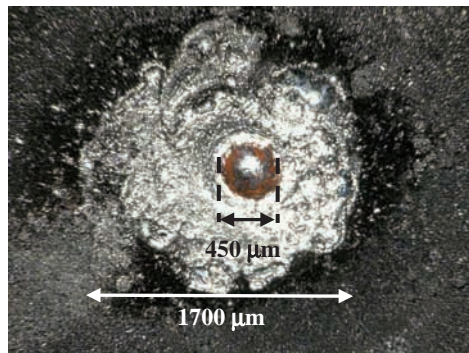


図6 アーク放電後のGT110の表面

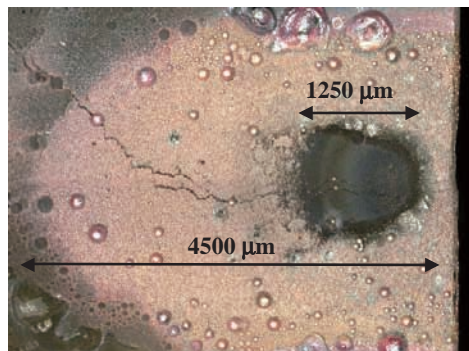


図7 アーク放電後のPC78Aの表面

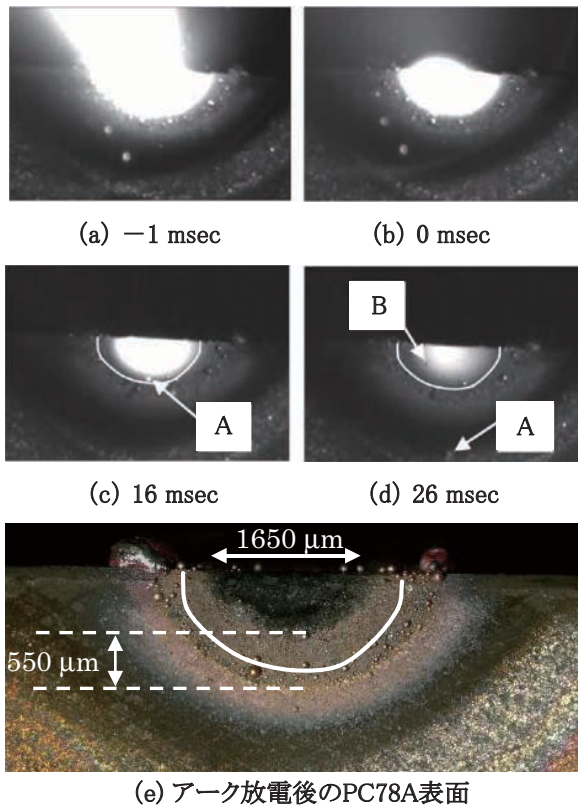


図8 アーク放電終了前後のPC78Aの表面状態

スコープで観察した結果を示す。(a)～(d)において、PC78Aに発生したアーク放電の陽光柱が完全に消えた瞬間を0 msecとしている。またこのときの平均アーク電流、通過電気量は約49 A、46 Cである。陽光柱が消える直前である(a)では、PC78Aに半円状の輝点を確認できる。また輝点の周囲に半球物質も確認できる。その後、(b)でアーク放電が終了し、(c)～(d)と時間の経過とともに(b)の輝点が小さくなる。(c)～(e)の白い実線は(b)における輝点の縁である。白い実線内では半球物質が形成されて、その後、落下するもの(図中A)や落下せずにすり板に付着するもの(図中B)が確認できる。(e)に示すように輝点の内側に黒色の箇所があり、その直径は1650 μmである。半球物質は黒色箇所にはほとんど確認できず、550 μmの範囲に多く確認できる。

### 3.2 陽極GT110, 陰極BF31

図9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。

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

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

図10～11に約170Cのアーク放電を発生させた後に各

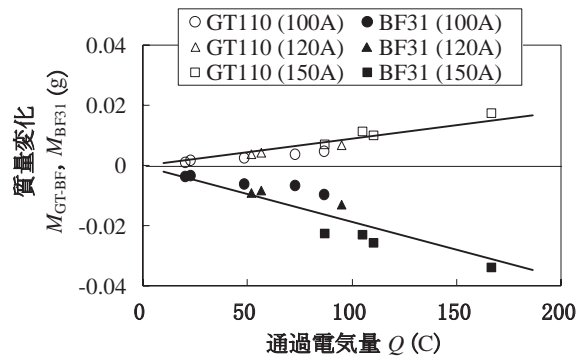


図9 GT110とBF31の通過電気量と質量変化の関係

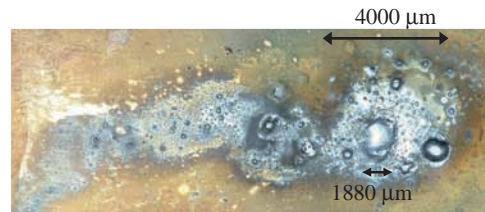


図10 アーク放電後のGT110の表面

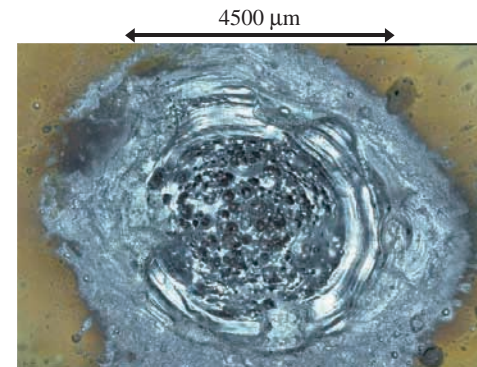


図11 アーク放電後のBF31の表面

電極の表面をデジタルデジタルマイクロス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凸状物質の大きさは、直径約1880 μm、高さ285 μmであった。また、その周囲には直径約4000 μmの円形のアーク痕が形成されている。BF31の表面には直径約4500 μmの円形で中が窪んでいるクレタ状のアーク痕が形成されている。またその深さは最大で約600 μmであった。

図12にGT110, アーク放電終了後に確認されたGT110表面の凸状物質, BF31のX線エネルギースペクトル測定結果を示す。測定にはエネルギー分散型X線分析(EDS)を用いている。また各測定結果は比較を容易にするために、GT110が0.93 eV, GT110の凸状物質とBF31が0.52eVのX線強度で規格化されている。GT110の凸状物質とBF31のスペクトルは、強度の違いがあるものの、ピーク位置が一致している。したがって、GT110の凸状物質はBF31の一部であり、アーク放電によって付着したものと考えられる。

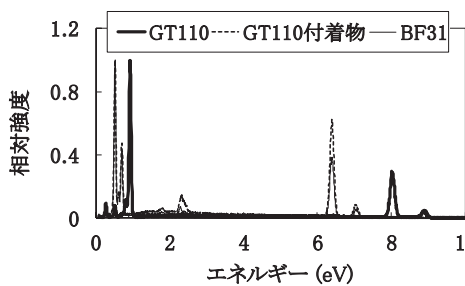


図12 GT110, BF31, GT110の付着物のX線エネルギースペクトル

#### 4. 考察

すり板とトリ線の開離時アーク放電実験の結果から、アーク放電終了後のPC78Aの表面に半球物質が観測されたこと、PC78AよりBF31の方が通過電流量当たりの質量変化量が大きいこと、陽極であるトリ線の質量が通過電流量に比例して増加するもの、アーク放電の初期（～1msec）で凹部が形成されることがわかった。

##### 4.1 PC78A表面の半球物質

アーク放電が発生している陰極近傍には、高温の陰極点が形成されると考えられている<sup>11)</sup>。これにより輝点やその周辺も高温になると考えられる。高速度カメラの映像からアーク放電終了後に時間の経過とともに輝点が小さくなり、その周辺で半球物質の形成が確認できた。この半球物質をEDSで測定した結果、銅であることがわかった。一方で、銅は陽極のGT110ならびに陰極のPC78Aの両方に含まれている。したがって、この測定結果を用いて半球物質がGT110のものであるのか、PC78Aのものであるのかを決定することができない。しかし、半球物質がGT110の材料の一部でないことは、アーク放電終了後GT110の質量が減少していなかったことから推察できる。したがって、この半球物質はアーク放電の発生により、高温となった輝点周辺でPC78Aに含まれた銅が溶出し、アーク放電終了後に凝固したものであると考えられる。

##### 4.2 PC78AとBF31の質量減少の違い

アーク放電の発生による陰極質量の減少は、陰極点が高温・高電流密度であること、高エネルギーの正イオン流が陰極点に突入すること、陰極点前面気圧と陽光柱に圧力差があることなどの影響を受けて発生する陰極からの蒸気ジェットによって生じると考えられている<sup>11)</sup>。しかし、これだけではPC78AとBF31の通過電流量当たりの質量減少量の違いを説明することができない。そこで、この質量減少量の違いが生じるメカニズムについて以下で考察する。

PC78Aで観測された黒いアーク痕は、高速度カメラとその後の表面状態の観察から、輝点の内側に形成されて

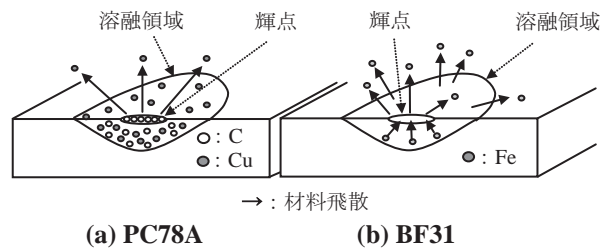


図13 アーク放電発生時の銅、炭素、鉄の動き

いる。ここにアーク放電が発生したと仮定して電流密度を計算すると約23A/mm<sup>2</sup>である。この値は文献10で示されているアークスポットと仮定された箇所で見測された電流密度とほぼ一致している。またこのアークスポットでは炭素の含有率に変化がないものの、銅の含有率の低下が生ずるとの実験結果が報告されている<sup>12) 13)</sup>。したがってPC78Aの質量減少は黒いアーク痕に含まれていた銅がPC78Aの外へ放出されることで生じると考えられる。

アーク放電が発生している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7において、4500 μmの範囲で半球物質が確認できた。これは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11においても図7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た。

図13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辺における銅、炭素、鉄の動きを模式的に示す。溶融領域は図7、図11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。(a)においてアーク放電が発生すると、PC78A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する。溶融した銅はPC78Aの溶融領域を覆う。このとき、一部が輝点からPC78Aの外へ放出されるものの、輝点に炭素が固体として残っているため、大部分が溶融領域に残る。また溶融領域の温度はアーク放電終了後の表面に半球物質が残っていたことを考えると、銅の沸点（約2600℃）までしか上昇していないと考えられる。すなわち、ここでの温度は炭素の沸点（3570℃）以下に抑えられていたと考えられる。これにより溶融領域においても炭素が固体として残る。したがって、PC78Aにおける銅の消失は輝点からの銅の蒸発が主となり、正イオンの流入による銅の飛散が輝点や溶融領域における炭素の存在でほとんど生じない。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℃まで上昇したと仮定すると、鉄の融点（約1500℃）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流入により溶融領域から飛

特集：電力技術

散すると考えられる。このように同じ通過電氣量を受けたPC78AとBF31は、同じ大きさのアーキ痕が残るものの、PC78Aの基材である炭素が銅の減少を抑制するため減少量に違いを生じる。

4.3 陽極質量の増加と凹部の形成

開離時アーキ放電実験の結果から陰極側の質量減少に対して、陽極側の質量増加が確認された。加えて、GT110とBF31の実験結果において、GT110の表面に多数の付着物も確認できた。GT110、GT110の凸状物質、BF31のX線エネルギースペクトル測定結果から、GT110の凸状物質とBF31のスペクトルが、ほぼ一致していた。したがって、アーキ放電発生後の陽極GT110の質量増加は、陰極BF31の材料の一部が付着することで生じると考えられる。一方、GT110とPC78Aを用いた、GT110表面に形成される窪みのアーキ継続時間依存性の実験結果から、アーキ放電初期（～1msec）に凹部が形成され、その大きさはアーキ継続時間が1msec以上において、アーキ継続時間に依存せず、電流値に依存した。筆者らの実験よりも電圧や電流が低く、電極材料も異なるものの、電氣接点においてもアーキ放電発生前後で陽極質量が増減する報告がある<sup>14)</sup>。これによると陰極ならびに陽極の質量変化の傾向は、アーキ長（もしくはアーキ継続時間）によって変わるとされている。このアーキ長やアーキ継続時間と質量変化の関係は、筆者らの実験結果と一致する。

凹部の形成については、今後さらに解析を進める必要があるものの、熔融金属の体積が電流の3乗に比例するという報告<sup>15)</sup>にはほぼ一致している。加えて、実際の電氣鉄道のフィールドで観測される波状摩耗について、これがアーキ放電によって形成されることを実験的に示している可能性もあり、今後さらに研究を進める予定である。

なお、陽極へ付着する陰極材料は、GT110とPC78Aの実験結果ならびにGT110とBF31の実験結果から陰極材料の質量変化量の30～45%である。

5. 結論

アーキ放電が集電系材料の消耗にどのような影響を及ぼすのかを明らかにするために、硬銅トリ線と銅ならびにカーボンが質量比で約50%の組成を持つカーボン系すり板および鉄が主成分の鉄系金属すり板を電極に用いて開離時アーキ放電実験を行った。その結果を考察することで以下のことが明らかになった。

- (1) 陽極に硬銅トリ線、陰極にカーボン系すり板を用いて開離時アーキ放電実験を行った結果、硬銅トリ線の質量は20 μg/Cで増加し、カーボン系すり板の質量は70 μg/Cで減少した。
- (2) 陽極に硬銅トリ線、陰極に鉄系金属すり板を用

いて開離時アーキ放電実験を行った結果、硬銅トリ線の質量は90 μg/Cで増加し、鉄系金属すり板の質量は200 μg/Cで減少した。

- (3) 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キ放電による銅の飛散を防ぐために生じる。
- (4) アーキ継続時間が1msec以上において、硬銅トリ線の表面に形成されたクレータ状の窪みの大きさは、アーキ継続時間に依存せず、電流の大きさに依存する。
- (5) 陽極の質量増加量は、陰極の質量減少量の30～45%である。

文献

- 1) Ragnar Holm : *Electric Contact Theory and Application Fourth edition*, p.255, Springer 1999.
- 2) 織田修：新幹線における集電系摩耗についての考察，鉄道技術研究報告，No.1323, 1986
- 3) 渋谷正豊：棒電極端面に形成された大電流交流アーキ放電による電極溶損，電学論B, Vol.113, No.4, pp.327-334, 1993
- 4) 作田忠裕，鬼頭幸生，宮地巖：銅蒸気混入による高温空気中の電子密度の増大，電学論A, Vol.98, No.4, pp.209-214, 1978
- 5) 早坂高雅：硬銅トリ線とカーボン系すり板で形成された接点における開離時アーキの諸特性と損耗量の関係，電氣学会交通・電氣鉄道研究会資料，TER-09-25, pp.51-55, 2009
- 6) 早坂高雅：アーキ継続時間と集電系材料の表面状態の関係，J-Rail2011 講演論文集，S8-1-6, pp.207-210, 2011
- 7) X. C. Ma, G. Q. He, D. H. He, C. S. Chen, and Z. F. Hu: Sliding wear behavior of copper-graphite composite material for use in maglev transportation system, *Wear*, Vol. 265, pp.1087-1092, 2008.
- 8) 早坂高雅，久保田喜雄：開離時アーキ放電が集電系材料の質量と表面状態に及ぼす影響，電学論D, 132巻，6号，pp.163-169, 2012
- 9) (財)鉄道総合技術研究所：電車線とパンタグラフ，p.7-6, 2010
- 10) (財)鉄道総合技術研究所：電車線とパンタグラフ，p.8-6, 2010
- 11) 電氣学会：放電ハンドブック 上巻，オーム社，2003
- 12) 林屋均，萬代毅，中島等，出野市郎：直流電氣鉄道における定常アーキがパンタグラフ材料に与える影響，電学論B, 127巻，6号，pp.718-724, 2007
- 13) 久保俊一：特別号 銅または銅鉛錫合金を溶浸した炭素製パンタグラフすり板のアーキ放電下の摩耗機構の研究，鉄道総研報告，No.35, p.175, 2000
- 14) Koichiro SAWA, Makoto HASEGAWA: Recent Research and New Trends of Electrical Contacts, *IEICE TRANS. ELECTRON*, Vol.E83-C, No.9, pp.1363-1376, 2000.
- 15) J. J. Langer, L. H. Germer: The Bridge Erosion of Electrical Contact Part1 *J. Appl. Phys.* vol. 19, pp. 910-928, 1948.