集電系材料を用いて形成された開離時アーク放電における

通過電気量と接点の質量変化の関係

早坂 高雅* ((財)鉄道総合技術研究所)

Relation between Electric Charge and Electrodes Mass Change of Current Collecting Materials

Takamasa HAYASAKA* (Railway Technical Research Institute)

The wearing mode of the current collecting materials has two types, electrical and mechanical wearing. There are many experiments, which deal with these modes together. Although these demonstrate the relationship between the amount of arc discharge and material wearing, these results make our consideration complex. This paper shows the wearing mechanism using only the breaking arc that is made by the electrodes of the current collecting materials.

キーワード:損耗量,電気量,開離時アーク,硬銅トロリ線,カーボン系すり板,鉄系すり板 (Keywords, wear amounts, electric charge, breaking arc, copper contact wires, carbon contact strips, iron contact strips)

1. はじめに

集電系材料の摩耗には、一般にアーク放電の発生による 摩耗を表す電気的摩耗としゅう動による摩耗を表す機械的 摩耗があるとされており、パンタグラフの押上力を上昇さ せることでアーク放電の発生(電気的摩耗)を減らして、 すり板の摩耗を低減する試みもなされている¹⁰。またトロリ 線とすり板のしゅう動試験も多く実施されており、アーク 放電をともなうしゅう動による集電系材料の摩耗にも多く の知見を与えている^{2,30}。一方で、しゅう動とアーク放電を 同時に扱うことは、電気的摩耗と機械的摩耗を同時に扱う ことを意味し、実験値にばらつきが発生するだけでなく、 実験結果の考察も複雑にしてしまう。したがって、集電系 材料の摩耗を考察するうえでは、しゅう動による摩耗とア ーク放電による損耗を切り離して考える必要があるものの、 アーク放電発生時の集電系材料の損耗に着目した報告は少 ない。

そこで本報告では、アーク放電が集電系材料の損耗にど のような影響を及ぼすのかについて、硬銅トロリ線110mm² とカーボン系すり板のうち銅ならびにカーボンが約50%の 組成を持つPC78Aおよび鉄が主成分のBF31を電極に用い て開離時アーク放電を発生させ、その時のアーク電流、ア ーク継続時間およびアーク放電発生前後の集電系材料の質 量を測定するとともに、アーク放電発生後の電極の表面を 顕微鏡で観察することで、アーク放電発生時の通過電気量 と集電系材料の損耗量の関係やアーク放電発生後の集電系 材料の表面状態について明らかにした。

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 および直流電源を,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す ることができ,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。本実験では電 極が閉じているときに電流を流し,その電極を離すことで 開離時アーク放電を発生させている。

〈2・2〉供試電極 実験に用いた電極は、陽極にみぞ付き硬銅トロリ線 110mm²(以下 GT110)、陰極に在来線で頻繁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すり板の一種である BF31 を使用した。各電極の組成を表 1 に示す。これら電極は試験開始前までに 20~30 mm の長さのトロリ線片と約 10×20 mm のすり板片に切断した。また試験直前に 200 番の紙やすりで表面を磨いたうえで、その面をエタノールで拭き取り、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片を、可動ステージにすり板片をセットした。



図1 電極開閉装置および測定機器

Fig. 1 Electrodes switching device and measuring apparatus



図2 回路図 Fig. 2 Circuit diagram

表 1	供試電極の種類と組成	
200 1	LALL AND THE THE AS C MELIA	

Table 1. Sorts and	l compositions of sampl	е
--------------------	-------------------------	---

極性	材料	組成 (wt%)
陽極	GT110	Cu (99.96%)
陰極	PC78A	Cu (50%), C (50%)
	BF31	Fe (85~95%), Ni (3%)

3. 実験結果

(3・1) 陽極 GT110, 陰極 PC78A 図3に GT110と PC78A を電極に用いてアーク放電を発生させた際の通過電気量と 電極の質量変化の関係を示す。図中の実線および数式はそ れぞれ GT110の質量変化量ならびに PC78A の質量変化量 の y 切片を 0 とした場合の近似曲線および近似式である。 この試験結果から GT110の質量は, アーク放電の発生によ って 30 µ g/C で増加すること, PC78A の質量は 90 µ g/C で 減少することがわかる。

図4~5に約60Cのアーク放電を発生させた後に各電極の 表面を顕微鏡で100倍に拡大した結果を示す。GT110の表 面には同心円状に直径約1900µmと600µmのアーク痕が 形成されている。また, PC78Aの表面には黒色の直径約 1600 µmの円形のアーク痕とその中にわずかながらに茶色の直径約 600 µmの円形のアーク痕が形成されている。多くの茶色の小さな粒や亀裂も形成されているものの,窪みなどは確認できなかった。

陽極 GT110, 陰極 BF31 (3.2) 図6にGT110とBF31 を電極に用いてアーク放電を発生させた際の通過電気量と 電極の質量変化の関係を示す。図中の実線および数式は, 図 3 と同様にそれぞれ GT110 の質量変化量ならびに BF31 の質量変化量の近似曲線および近似式である。この試験結 果から GT110 の質量は、アーク放電の発生によって 200 μ g/C で増加すること, BF31 の質量は 500 µ g/C で減少する ことがわかる。図7~8に約60Cのアーク放電を発生させた 後に各電極の表面を顕微鏡で100倍に拡大した結果を示す。 GT110の表面には蛇行したアーク痕があり、いくつかの凸 状の物質も確認できる。これらのうち最も大きな凸状の物 質は,直径約1880µm,高さ285µmであった。また,そ の周囲には直径約4000µm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 でいるクレー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600μmであった。



図3 電極に GT110 と PC78A を用いてアーク放電を 発生させた際の通過電気量と電極の質量変化の関係 Fig. 3 Relation of electric charge and wear amounts at electrodes using GT110 and PC78A.



図 4 アーク放電発生後の GT110 の表面(×100) Fig. 4 Surfaces of GT110 enlarged in 100 times after arc discharges



図5 アーク放電発生後の PC78A の表面(×100) Fig. 5 Surfaces of PC78A enlarged in 100 times after arc discharges



図 6 電極に GT110 と BF31 を用いてアーク放電を発生 させた際の通過電気量と電極の質量変化の関係 Fig. 6 Relation of electric charge and wear amounts at electrodes using GT110 and BF31.



(a) 正面 (a) Top view



(b) Side view

図7 アーク放電発生後の GT110 の表面(×100) Fig. 7 Surfaces of GT110 enlarged in 100 times after arc discharges

 $4500\,\mu$ m





(b) 側面 (b) Side view

図8 アーク放電発生後のBF31の表面(×100) Fig. 8 Surfaces of BF31 enlarged in 100 times after arc discharges

4. 考察

 $\langle 4 \cdot 1 \rangle$ 陽極 GT110, 陰極 PC78A 陽極に GT110, 陰 極に PC78A を使用してアーク放電を発生させた場合のそ れぞれの電極の質量変化は、GT110 が 30μg/C の増加, PC78A が 90 µ g/C の減少であった。銅のアークによる損耗 量は, 90 µ g/C であるとの報告がある 4。 PC78A の組成は, 銅と炭素であるものの, カーボン系すり板にアーク放電が 発生するとその表面付近の銅が消失するとの報告が ある 5,6)。このことから PC78A のアーク放電発生による質 量減少が銅の減少に起因するものと考えると、 筆者らの実 験で得られた値と文献 4 で示されている値が一致する。一 方で,GT110のアーク放電発生後の質量は増加していた。 アーク放電発生後のGT110の表面には、図4に示すような アーク痕が形成されていたものの, そこに明確な凹凸を確 認することができかなった

(4.2) 陽極 GT110, 陰極 BF31 陽極に GT110, 陰極 に BF31 を使用してアーク放電を発生させた場合のそれぞ れの電極の質量変化は、GT110 が 200 µg/C の増加、BF31 が 500 µg/C の減少であった。図 7~8 に示したようにアー ク放電発生後のGT110の表面には、凸状の物質がいくつか 付着しており,最も大きなもので直径約1880µmであった。 またアーク放電発生後の BF31 の表面にはクレータ状のア ーク痕が形成されており、その直径は約 4500 µm, 深さは 最大で 600µm であった。このアーク痕が円錐形であると 仮定すると、鉄の密度 7874kg/m3を用いて、その円錐形の 質量は 25mg と算出することができる。ここで示したアー ク痕は約 60C のアーク放電を発生させたときのものである から,その損耗量は500µg/C×60Cから30mgであると算 出でき、BF31の表面に残されたクレータ状のアーク痕のほ

とんどがアークにより損耗していると推察できる。また, アーク放電発生後のGT110の表面には凸状の物質が形成さ れており,最も大きなもので直径約1880µm,高さ285µ mであった。それがBF31から放出された物質,すなわち BF31の主成分である鉄で,その形状が円錐形であると仮定 すると,その質量は2mgと算出できる。一方で,この時の トロリ線の質量は12mgの増加であった。GT110の表面に は,その他の凸状の物質が多数付着していることから,そ れらの質量も想定すると、2mgは比較的妥当な値であると 考えられ、トロリ線の表面に付着しているものはBF31の 主成分の鉄であると推定できる。

〈4・3〉 アークによる陽極の増加 筆者の実験結果から、開離時アーク放電によって陰極側の PC78A や BF31 の 減少と陽極側の GT110 の増加が確認された。GT110 と PC78A の実験結果では、アーク放電発生後の GT110 の表 面に明確な凹凸が見られなく、GT110 の質量増加の理由が 見出せなかったものの、GT110 と BF31 の実験結果から、

アーク放電発生後の GT110 の表面に多数の凹凸が確認で き,それは BF31 の成分である鉄であると考えられる。し たがって,アーク放電発生後の GT110 の質量増加は,陰極 材料 (PC78A や BF31)の付着(転移)によるものと考え られる。

本実験よりも電圧や電流が低いものの,電気接点におい てもアーク放電が発生した際の電極材料の損耗や転移につ いての報告がある^{7,8)}。特に文献 7 では,この現象について PSD(Particle Sputtering and Deposition)モデルを構築し て説明している。このモデルでは,アーク長(もしくは電 極の開離距離)によって電極材料の損耗もしくは転移に違 いが生じるとされている。筆者らの実験でのアーク長は約 20~30mmであり,PSDモデルや一連の報告⁸⁾における比 較的アーク長の長い場合に観測される陽極の質量増加と一 致する。

架線・パンタグラフ系において発生する離線時のすり板 とトロリ線の開離距離が不明であるものの,鉄道のフィー ルドでは経験的にアークでトロリ線が減る箇所や減らない 箇所があるとされている。これまでどちらが正しいのかに ついての議論はなされてこなかったものの,筆者の実験結 果や文献7,8から,トロリ線とパンタグラフが離線する際 にその開離距離が1mmオーダー,もしくはそれ以上になる 場所ではトロリ線が減らない可能性があり,アーク放電が 発生している箇所で必ずトロリ線が減るとは一概に言えな いことが示された。ただし,ここでの実験はトロリ線の断 線を想定したものではないことに留意されたい。

5. まとめ

本報告では、アーク放電が集電系材料の損耗にどのよう な影響を及ぼすのかを明らかにするために、硬銅トロリ線 110mm² とカーボン系すり板のうち銅ならびにカーボンが 約50%の組成を持つPC78Aおよび鉄が主成分のBF31を電 極に用いて開離時アーク放電を発生させた。これにより以 下のことがわかった。

(1) GT110 と PC78A を用いてアーク放電を発生させたところ,GT110 は 30 µ g/C で増加し,PC78A は 90 µ g/C で 減少した。

(2) アーク放電発生後の GT110 および PC78A の表面には アーク痕が形成されていたものの,そこに明確な凹凸は確 認できなかった。

(3) GT110とBF31を用いてアーク放電を発生させたところ,GT110は200µg/Cで増加し,BF31は500µg/Cで減少した。

(4) アーク放電発生後の GT110 および BF31 の表面にはア ーク痕ならびに凹凸が形成されており, BF31 の凹部の体積 から質量を算出したところ,アーク放電発生後の BF31 の 質量減少量とほぼ一致したことから, BF31 の凹部の多くが アーク放電によって損耗したと推察できる。

(5) 陽極である GT110 のアーク放電発生後の質量増加は、 陰極材料の転移であると考えられる。この結果は、本実験 におけるアーク長が約 20~30mm であることを考慮する と、PSD(Particle Sputtering and Deposition)モデルにおけ る陽極が増加する場合と一致する。

(6)本実験結果における陽極が損耗しない事象は、鉄道の フィールドで経験的に言われているアーク放電が発生して いてもトロリ線が減らない現象に似ていると考えられる。

文 献

- (1) 久保吏,中村悦章,近間大志,石井順:「最適なパンタ押上力の検証」, 平成 16 年鉄道技術連合シンポジウム (J·Rail'04), S8·2·1, pp.111·112 (2004)
- (2) 久保俊一:「カーボン系パンタグラフすり板の摩耗特性」,電子情報 通信学会技術研究報告. EMD, 機構デバイス Vol.99, No.360, pp.7-12 (1999)
- (3) 河野彰夫,大藪英雄, 曾田範宗:「集電用材量の摩耗に及ぼす離線ア ークの影響(第1報)一荷重を変化させた場合一」, 潤滑, Vol.27, No.4, pp.283·287 (1982)
- (4) 窪野隆能:「定常真空アーク放電におけるアーク足の半径と陰極材料 の蒸発速度」,電学論 A, Vol.97, No.8, pp.41·48 (1977)
- (5) 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ダラフ すり板のアーク放電下の摩耗機構の研究」,鉄道総研報告,35号, pp.175, pp.187 (2000)
- (6) 林屋均, 嵩代毅, 中島等, 出野市郎:「直流電気鉄道における定常ア ーク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)
- (7) 陳専科, 沢孝一郎:「材料転移と接触抵抗のアーク継続時間への依存 性に関する研究」, 信学論(C・II), Vol.J79・C・II, No.7, pp.349-357 (1996)
- (8) Koichiro SAWA, Makoto HASEGAWA : 「Recent Research and New Trends of Electrical Contcts」, IEICE TRANS. ELECTRON, Vol.E83⁻C, No.9 pp1363⁻1376 (2000)