

S8-4-7 パンタグラフの移動とトロリ線のアーク断線について

Relation between the pantograph movement and the breaking of the trolley caused by arc

[電] ○林屋 均 (JR 東日本) [電] 萬代 毅 (三和テッキ)
[電] 日渡 貴広 (三和テッキ) [電] 中島 等 (JR 東日本)

Hitoshi HAYASHIYA, R&D center of JR East Group, 2-0 Nisshin, Saitama-shi, Saitama

Tsuyoshi MANDAI, Sanwa Tekki Corporation

Takahiro HIWATASHI, Sanwa Tekki Corporation

Hitoshi NAKAJIMA, R&D center of JR East Group

The particular characteristics of the arc between the trolley and the moving pantograph are described in this paper. Firstly, the possibility of the trolley braking in the low speed movement of the pantograph is experimentally confirmed. Secondary, the influence of the current feeding direction on the arc behavior is tested. The reason of the difference is also discussed based on the magnetic force calculation by FEM. Lastly, the distributed arc anode spot traces on the trolley is mentioned.

Key Word : arc, breaking of contact wire, electromagnetic force

1. はじめに

筆者らはこれまでに、架線-パンタグラフ間に発生したアークによりトロリ線が断線する事象について、実験的な検討を中心に研究を進めてきた。アークによるトロリ線の断線事象は大別すると、降雪時に電留線などに長時間滞留した列車のパンタグラフすり板上に積雪し、この重みでパンタグラフが離線、アークが発生して断線に至る場合と、エアセクション(以下 AS)箇所列車が緊急停止してしまった際に、パンタグラフとすり板の接触が不完全な箇所が発生し、これによりアーク断線もしくは抵抗発熱による断線がもたらされる場合に大別できる。いずれの場合も、基本的には列車が停止している状況を想定すればよく、これまでに様々な実験を行ってきた^{(1)~(4)}。本シンポジウム予稿では、これらの文献に含まれない、パンタグラフが移動している場合に見られるアーク現象の幾つかについて紹介する。

2. パンタグラフの移動とトロリ線の断線について

2.1. 試験内容

トロリ線断線条件については、トロリ線が GT-Sn-110mm²、すり板がメタライズドカーボンすり板の場合、100A では 20 秒程度、200A では 7 秒程度、400A では 2.5 秒程度という結果を得ている。トロリ線の断線は、アークの熱がトロリ線に伝搬し、トロリ線が軟化すると張力により引っ張られて引きちぎれるという手順を踏む。このため、列車の走行とともにアークが移動する場合は、トロリ線上の一箇所が加熱されないために、トロリ線は断線しないと考えられるが、非常にパンタグラフの走行が遅い場合は、やはり局所的に加熱されて断線する可能性があると考えられる。そこで、パンタグラフをゆっくり走行させた場合に、トロリ線の断線の可否を確認し

た。

2.2. 試験方法

図 1 に示したパンタグラフ移動装置を用い、図中、A で記したトロリ線にのみ電流を供給する。パンタグラフは走行するに従い A 線から B 線へと接触を移行させ、やがて A 線からは離線するが、本実験では電流は A 線のみから供給されるため、強制的にアークが発生される状況となっている。また、本節の実験では、電流の供給はトロリ線の左右から並列回路により行った。

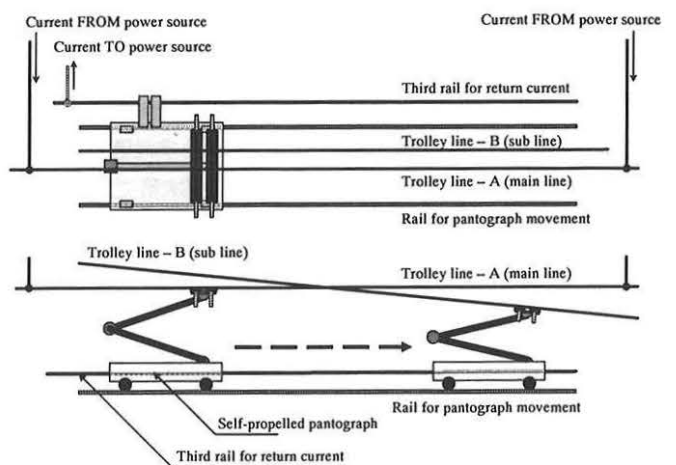


図 1 試験装置

2.3. 試験結果

電流値 400A, 533A, 666A、パンタグラフ走行速度 30mm/s, 60mm/s, 100mm/s のそれぞれの場合についての、アーク試験結果を表 1 にまとめる。表中、断線した場合の時間は、パンタグラフの走行の過程

で、アークが発生してから断線に至るまでの時間である。

400A の場合、本試験装置で試験可能な最低速度(30mm/s = 0.108km/h)においてもトリ線が断線することはなかった。一方、533A と 666A の場合、最低速度の 30mm/s の場合のみトリ線は断線した。パンタグラフが停止した状態での断線試験において、400A での断線時間が 2.5s 程度であることと比べると断線までの所要時間はやや長くなる。パンタグラフとともにアークが移動することで、局所的な加熱は回避されるものの、30mm/s 程度の極めて低速な領域では、トリ線が断線する可能性があることが確認された。

表1 パンタグラフの移動とトリ線の断線の関係

	400A	533A	666A
30mm/s	× 断線せず	○ 6.2s で断線	○ 4.9s で断線
60mm/s	×	×	×
100mm/s	×	×	×

3. 給電方向と移動アークの消弧特性について

3.1. 試験内容

文献(5)には、エアセクション箇所においてトリ線を引き上げた側に第一ブランチを設けることで、磁気吹き消し機能が付与されるとの記述がある。このことについては、変電所からパンタグラフ位置までのマクロな電気回路によりアークに作用される電磁力と、パンタグラフ位置におけるトリ線やパンタグラフすり板の微妙な傾きの違いによるミクロな電気回路によりもたらされる電磁力の、いずれかの貢献が大きいかが判然としないため、その効果が確かなものであるかどうか想像しにくい。そこで、実際に図1に示した試験装置において、電流を A 線の始点側から供給した場合と、終点側から供給した場合で、アークの安定性について確認する試験を行った。

3.2. 試験方法

電流値 400A、パンタグラフ走行速度 1200mm/s (4.32km/h) においてパンタグラフを走行させ、アーク発生状況を比較した。電流値と併せて、トリ線およびパンタグラフの電圧を分圧器で計測し、それらの差としてアーク電圧を算出した。なお、実設備の AS では負荷電流に応じて発生するトリ線間の電位差次第でアーク発生の有無が決まるが、本試験では 2 章同様に A 線のみ電流を供給しているため、離線すれば確実にアークが発生する。

3.3. 試験結果

電流供給方向の違いにより、アークの様子は明らかに異なる結果を得た。即ち、パンタグラフの走行方向後方から給電した場合に比べ、前方から給電した場合には激しいアーク音とともにアークの挙動が不安定となる結果となった。電流値 400A の場合には自己消弧することはなかったが、別途行った電流値 200A、パンタグラフ走行速度 30mm/s の試験では、パンタグラフ走行過程で不安定になったアークが自己消弧する傾向も見られた。

図2に400A、1200mm/s の場合の、給電方向の違いによるアーク

電圧の時間変化の比較の一例を示す。"Follow"が走行方向後方から、"Against"が前方から給電した場合である。アーク電圧はアーク長に従って線形に変化するため、アーク電圧の変化はアークの挙動を反映していると考えられる。

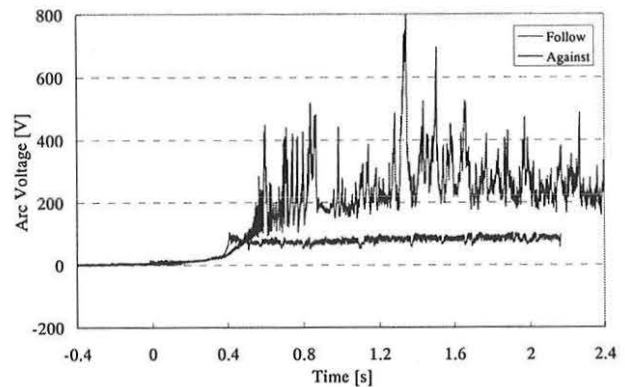


図2 給電方向の違いによるアーク電圧変化の比較

図2において、離線を開始し 10V 程度の最小アーク電圧が見られ始めた時間を $t = 0s$ としている。パンタグラフの移動とともに離線の度合いは大きくなるためアーク電圧は徐々に高まるが、走行方向前方から給電した場合の方が3倍程度のアーク電圧が見られ、かつ、アーク電圧の変動が大きいことが確認できる。これは、アークに作用する電磁力の違いによるものであると推察され、これにより不安定になったアークは過渡的に大きなアーク電圧をもたらす、自己消弧しやすくなる。例えば図2の例では、 $t = 1.3s$ 過ぎにアーク電圧 789V を記録している。

4. 移動アークがもたらすトリ線上のアーク痕について

4.1. 試験内容

一連のパンタグラフ移動時のアーク試験において、アークが通過して行ったトリ線上にはアーク痕が残されるが、多くの場合、ほぼ等間隔に並んだ斑点状の特徴的なアーク痕が見られる。このことは、電力中央研究所のグループの研究事例の中でも「尺取走行」として紹介されており、また、現場で工事を担当する電気さんらの間では、このようなトリ線上の斑点状のアーク痕は「タラバガニ」と呼ばれて経験的に知られていたようである。

本章では、走行アーク試験結果を詳細に分析すると、このような斑点状のアーク痕が形成される過程が顕著にアーク電圧に現れていることが確認できたため、その結果について紹介する。

4.2. 試験方法

3 章と同様のアレンジで、パンタグラフ移動時のアーク試験を行った。ただし、本章で示す試験では、パンタグラフ走速度およびアーク電流値は 3 章同様に 1200mm/s、400A であるが、電流の供給はパンタグラフの前方・後方の双方から並列に供給した。

4.3. 試験結果

パンタグラフを走行させアークを発生させた場合のアーク電圧

の時間変化の様子を図3に示す。また、その一部を拡大した図を図4に示す。

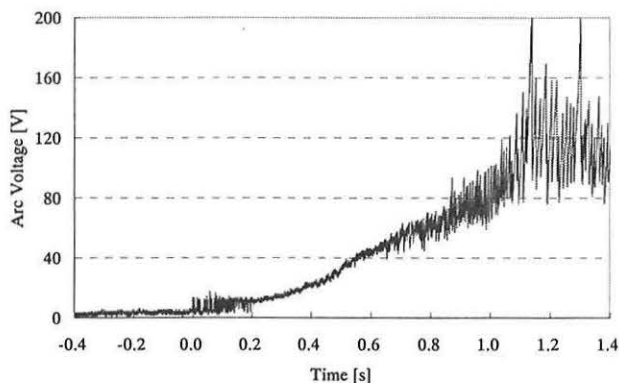


図3 前後双方から給電した場合の走行アーク電圧の時間変化

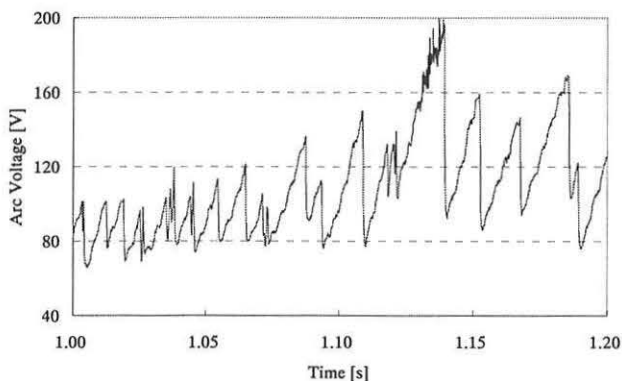


図4 図3の一部を拡大した図

アークが発生し、まだ空隙が短い状態でのアークである $t=0 \sim 0.6s$ 程度までは、アーク電圧は短時間の変動無く、パンタグラフの移動に伴ってアークが長くなるにつれて徐々に高まっていく。しかし、 $t=0.6s$ を過ぎたあたりからアークは短時間での変動を始める。この部分を拡大した図4を見ると、アーク電圧はこのように鋸歯状の変動を見せており、アーク電圧が連続的に高まった後に不連続に低下する、即ち、アークが徐々に長くなった後に一気に短くなる、という現象を平均10数msごとに繰り返している。パンタグラフの走行速度が1200mm/sであることから、10～20mmごとにアーク長が急変していることになるが、このことは、トロリ線に残されたアーク痕が同様な間隔で見られていることと一致した結果である。トロリ線に残されたアーク痕の写真を図5に示す。

アークの陽極点は銅電極であるトロリ線上に強く固着されることはないものの、短時間、ある点にとどまり、パンタグラフが移動していくにつれてアークは引き伸ばされるが、ある程度長くなると、陰極点近くのトロリ線上に陽極点が容易に跳躍し、アーク長が短くなる。この繰り返しで図3.4のようなアーク電圧の変化が見られ、図5のようなアーク痕がトロリ線に残されていると推察できる。なお、陰極点については、今回の一連の試験ではメタライズドカーボンすり板を使用したため、融点の高いカーボン材料を含んでおり、これにより陰極点はすり板上に強く固着して、パンタグラフが動い

ていくにつれて一緒に移動していく。

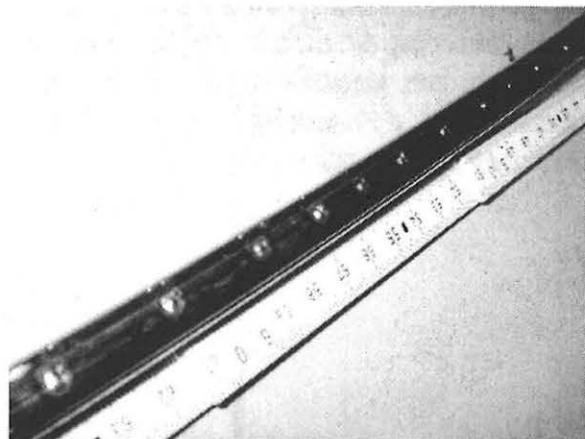


図5 移動アークによるトロリ線上のアーク痕の写真

5. アークに作用する局所的な電磁力について

5.1. 概要

3章に示したように、アークの挙動は給電方向により大きく異なる。本章では、架線～パンタグラフ間アークを模擬した簡単な電流モデルを用い、アーク形状によりどの程度の電磁力がアークに作用するかを概算し、アークの挙動を考察する。

5.2. 解析モデル

電磁界シミュレーションは、三次元有限要素法により行い、トロリ線～アーク～パンタグラフすり板を流れる電流経路のみを模擬し、これによりアークが存在すると考えられる部位において電流に作用する電磁力を算出した。電磁力の計算は、電流と磁束密度の外積により求めた。

解析モデルを図6に示す。トロリ線の一方から流入した電流が、アークを経由してすり板に流入する部分を対称境界条件により1/2モデルで表した。電流経路は断面を10mm×10mmの正方形とし、トロリ線からアークに電流が流入する鋭角の部分を、ヘアピン状の電流経路として与えた。アークが引き伸ばされた状態を図のようにオフセット量として与え、オフセットのない状態がトロリ線から直下にアークが伸び、さらに水平方向にすり板中を電流が導通する状態である。オフセットが60mmの場合の電流経路の様子を図7に示す。

5.3. 解析結果

オフセット量を-20mm～100mmで与えた場合の、図6中※で示した電流断面におけるy方向電磁力(アークを引き伸ばす方向に作用する電磁力)を算出した結果を図8に示す。また、オフセットが60mmの場合の対称面におけるオフセット部の等磁束密度線図を図9に示す。

図9に示すように、ヘアピン状の電流経路の内側で磁束密度が高まり、これより磁気圧を受けてアークは外側に引き伸ばされる方向の力を受ける。その電磁力は、僅かなオフセットでもとたんに大きくなり、オフセットがない場合の倍程度の電磁力となる。逆に、オ

フセット量が負の場合は、ほとんど電磁力は作用しない。現実には、アークが斜め方向に引き伸ばされることでさらにアーク端部は鋭角に電流が歪曲して流れることになり、より大きな電磁力が作用するものと思われる。また、電流経路の形状・断面積によっても影響を受けられるが、モデル化が困難であるため、ここではこのような簡単なモデルにより、電磁力を評価した。

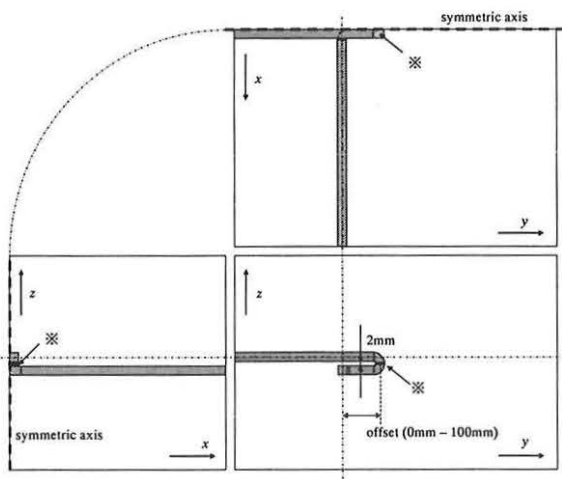


図6 解析モデル

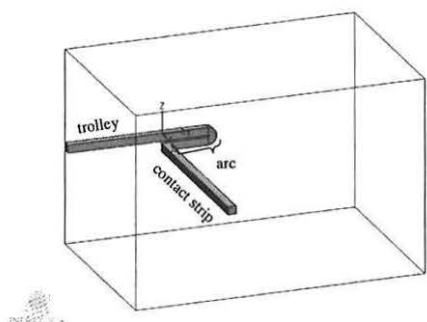


図7 電流経路の様子(offset = 60mm)

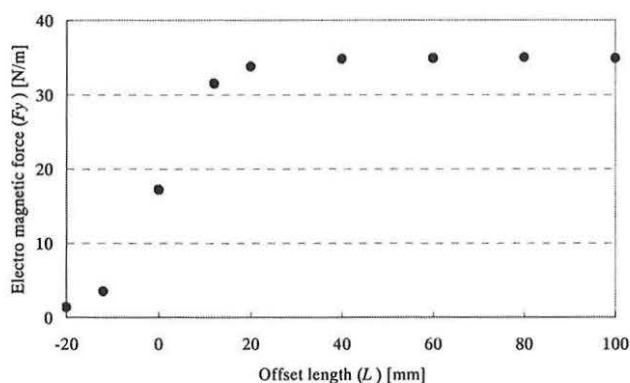


図8 オフセット量と電磁力の関係

以上の解析結果からも、3章において終点側から給電した場合は、パンタグラフの移動とともにトロリ線とアークの境界面では瞬間的にオフセットが与えられたような鋭角な電流分布となるため、大

きな電磁力がアークに作用し、これによりアークが引き伸ばされ不安定になり易いと考えられる。一方、始点側から給電した場合には、このような電磁力は作用しないため、比較的安定してアークが点弧しやすいものと思われる。

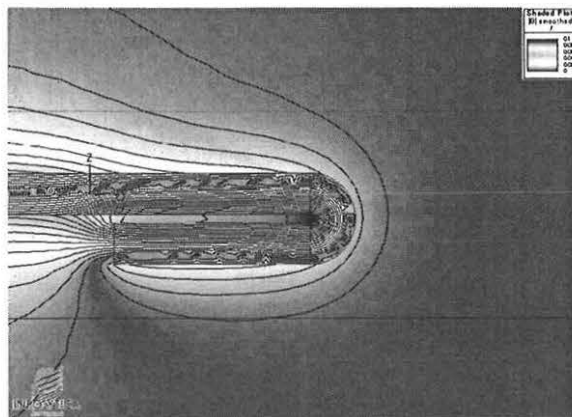


図9 等磁束密度線図 (offset = 60mm)

6. まとめ

本資料では、架線-パンタグラフアーク試験のうち、パンタグラフを移動させた場合に見られる特徴的な現象についてまとめた。主な内容は以下の通りである。

- ✓ 列車が動いていても、速度が非常に低速(30mm/s)で電流値が500A以上の場合、トロリ線が断線する場合がある。
- ✓ 電流経路により、アークの挙動・消弧特性が顕著に異なり、この事はアークに作用する電磁力の違いにより説明できる。
- ✓ 移動アークにより、正極性アークによりトロリ線上には離散的なアーク痕が残ることがある。

参考文献

- (1) 林屋, 阿部, 萬代, 林, 根岸:「降雪時のトロリ線アーク溶断可能性の検証試験」, 電気学会 交通・電気鉄道研究会資料, TER-04-57, pp.19-24 (2004)
- (2) 林屋, 阿部, 中島, 出野, 萬代, 林:「直流電気鉄道における架線-パンタグラフ間アークによるトロリ線断線現象の極性効果」, 平成17年電気学会全国大会 (2005)
- (3) 林屋, 阿部, 萬代, 中島, 出野:「トロリ線アーク溶断試験～すり板上の痕跡が物語るもの」, 電気学会 交通・電気鉄道研究会資料, TER-05-17, pp.19-24 (2005)
- (4) 林屋, 萬代, 日渡, 中島:「架線-パンタグラフ間の直流アーク電圧について」, 電気学会 交通・電気鉄道研究会資料, TER-05-58 (2005)
- (5) 電鉄直流回路研究委員会編:「直流き電回路の保護法式に関する研究」, 鉄道電化協会 (1974)
- (6) 大野他:「電磁駆動力を受けて平行平板電極の端面間を走行するアークの速度特性」, 電学論 B, Vol.120, No.11 (2000)