

接点开離時のアーク長およびその挙動解明のための基礎検討

以倉 慶子* 早坂 高雅* 岩尾 徹**

Basic Study on Length and Dynamic Behavior of Breaking Arc between Contact Wire and Contact Strips

Kyoko IKURA Takamasa HAYASAKA Toru IWAO

A long arc occurring between contact wire and contact strips could lead to have an impact on safeness of overhead contact line. Therefore, authors conducted experiments on breaking arc between contact wire and contact strips travelling in the longitudinal direction to investigate arc length characteristics with 3-dimensional image measurement. Furthermore, authors also developed numerical simulation method of 3-dimensional electromagnetic thermal fluid to analyze dynamic behavior of the arc. This paper shows the experimental and calculated results with some discussion.

キーワード：集電，トロリ線，すり板，アーク，3次元計測，離隔距離

1. はじめに

開離時アーク現象の無しゅう動実験による計測や解析¹⁾から、アーク放電が発生する瞬間の熔融ブリッジの形成²⁾、熔融ブリッジの飛散とそれに伴うアークの形成³⁾、アークによるトロリ線やすり板の溶損⁴⁾などが、材料の違いに加えて、電流値やアーク継続時間に依存することが明らかとなっている。また、電気鉄道を対象とした開離時アーク現象のしゅう動実験による計測から、近年使用されているトロリ線材料およびすり板材料におけるアークの性質・挙動が報告⁵⁾されている。一方で、電圧はアーク長を増大させることが知られている。例えば遮断器では、増大したアーク長に対応して消弧させるためにアークシュート内でアークを急速に拡散させている⁶⁾。

電気鉄道の架線・パンタグラフ間におけるアーク現象を解明するためには、アーク長を精度良く評価することが重要である。そのため、電気鉄道を対象としたしゅう動接点のアーク現象に関するアーク長やアーク挙動について3次元計測による評価が必要である。そこで、筆者らは、しゅう動アーク現象を取り扱うことのできる実験装置ならびにアーク挙動の精緻な解析のための3次元計測手法を確立し、低電圧ではあるものの、アーク電圧とアーク長の関係を明らかにするとともにアークの挙動を解明する研究を進めてきた。

本報告では、しゅう動アーク実験装置、アーク長および挙動の3次元計測手法、および実験結果について述べる。さらに、アークの挙動を3次元的に解析するシミュレーションプログラムを開発し、実験結果との比較を行った結果についても述べる。

* 電力技術研究部 電車線構造研究室

** 東京都市大学

2. しゅう動アーク実験

2.1 実験装置

接点开離時のアーク長および挙動を解明するために、トロリ線・すり板間にアーク放電を発生させることができる、しゅう動アーク実験装置を製作した。図1に実験回路を示す。電源は直流電源とし、接点と電源との間に抵抗を挿入している。図2に実験装置を示す。接点は、陽極側をトロリ線、陰極側をすり板とした。また、実験装置はパンタグラフの動きを想定し、陰極を上下に移動させることに加え、水平方向に移動させることでしゅう動アーク現象を生じさせる。

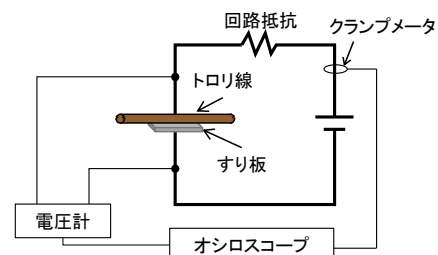


図1 実験回路

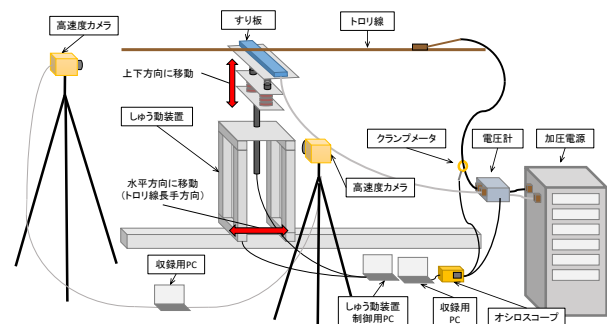


図2 しゅう動アーク実験装置

表1 電極の種類と成分

極性	名称	種別	成分 (重量%)
陽極	トロリ線	GT-M-Sn170	Cu (99.7%) Sn (0.3%)
陰極	すり板	PC78A	Cu (50%) C (50%)

2.2 印加電圧・電流・接点速度

実験では、印加電圧を 60V ~ 100V とし、抵抗値を 0.33Ω ~ 0.8Ω に変えることで電流値を 75A ~ 120A の間で変化させた。

本実験で想定しているパンタグラフの標準作用高さが 1230mm、折りたたみ高さが 110mm、パンタグラフ降下時間が 4 ~ 6 秒であることから、折りたたみ速度は 187 ~ 279mm/s となる。しかし、パンタグラフの降下速度は一定ではなく、降下開始直後は遅い。そのため、実験時のすり板の上下移動速度(開離速度)を 200mm/s とし、水平移動速度は 0 ~ 1000mm/s (0 ~ 3.6km/h) とした。なお、本実験装置の最大水平移動速度は、2000mm/s (7.2km/h) であるものの、実験時の安全を考慮して、実験時の水平移動速度を上記のとおり決定した。

2.3 接点材料

表1に実験で用いた接点材料を示す。接点材料は電気鉄道で一般的に用いられている硬銅トロリ線 GT-M-Sn170 と在来線で用いられているカーボン系すり板 PC78A を使用した。

2.4 高速度カメラによるアークの3次元計測

アーク長の測定やその挙動の計測は、これまで電圧変化や高速度カメラ1台での解析が進められてきた。しかし、アークは磁界の影響を受けて屈曲し、アーク長やその挙動が刻々と変化する。したがって、アーク長や挙動の精緻な計測をするためには、アークを3次的に捉える必要がある。そこで、本実験では、高速度カメラ2台を用いて、アークの3次元計測を行った。

図2に示すように、高速度カメラを実験装置の正面(トロリ線の長手方向が撮影できる面)と側面(正面に対して直角の面)に配置した。なお、正面に配置した高速度カメラは、実験装置のアーク発生点から 2600mm 程度離れた箇所に、側面に配置した高速度カメラは、実験装置のアーク発生点から 1100mm 程度離れた箇所に設置した。また、高速度カメラの撮影時の設定は、正面に配置した高速度カメラが、1秒当たり 4000 フレーム、シャッタースピード 1/17000 秒、側面に配置した高速度カメラが、1秒当たり 4000 フレーム、シャッタースピード 1/4000 秒である。

図3に3次元計測におけるアークとカメラの関係図を、

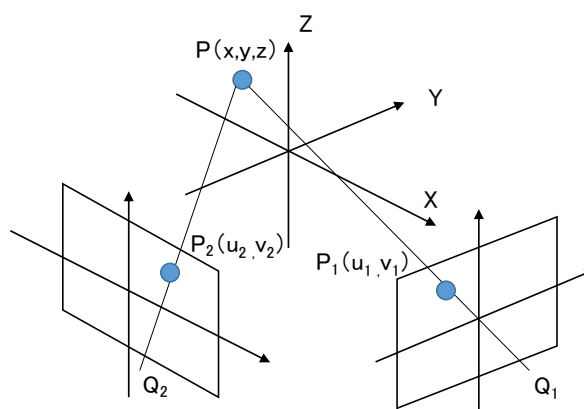
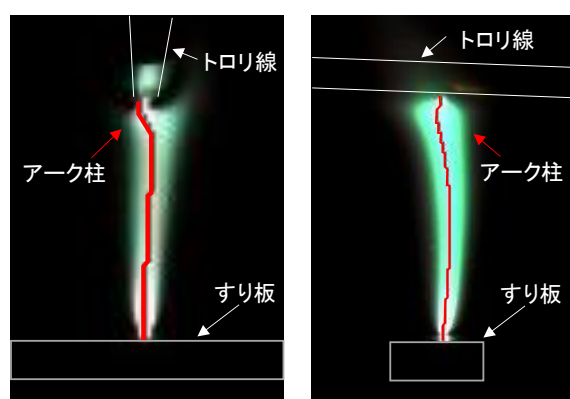
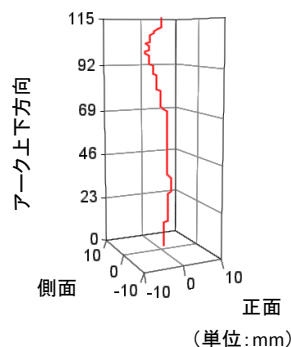


図3 3次元計測におけるアークとカメラの関係図



側面 正面

(a) 撮影画像



(b) 3次元座標におけるアーク

図4 3次元計測によるアーク長の算出例

図4に3次元計測によるアーク長の算出例を示す。算出方法は、ステレオカメラ計測と同様に三角測量の原理を応用した手法を用いて、アークの位置を決定する。また、アークが消弧する直前のアークの輝度中心点を結んだ線をアークの長さとして、2つのカメラから3次的にアーク長を算出した。

3. 実験結果

3.1 無しゅう動開離アーク

図5~図6に無しゅう動開離アークの実験結果を示す。

図5は回路抵抗を0.8Ω固定としたときの電圧とアーク長の関係をプロットしたもので、図6は電圧を80V固定としたときのアーク電流とアーク長の関係をプロットしたものである。図5からアーク電圧に応じてアーク長が増加していることがわかる。また、図6からアーク電流の増加に応じてアーク長がわずかに増加していることがわかる。

そこで、電圧と電流のどちらがアーク長に対して支配的要因であるかを調べるため、電流をパラメータとしてアーク電圧とアーク長の関係をプロットしたものを図7に示す。アーク長は、電流値が75～120Aの領域で大きく変化せず、主にアーク電圧に依存することがわかる。

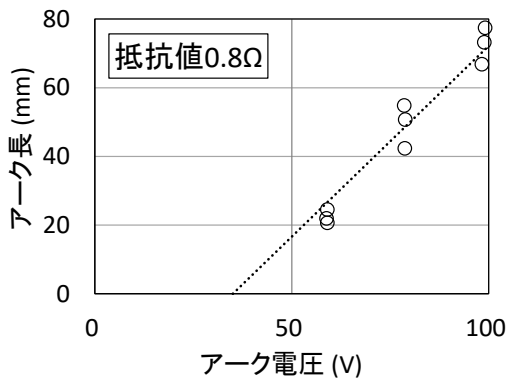


図5 アーク電圧とアーク長の関係

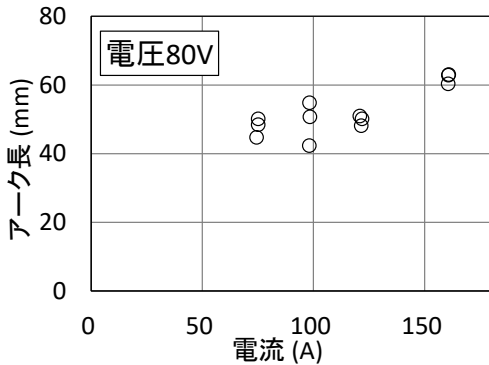


図6 アーク電流とアーク長の関係

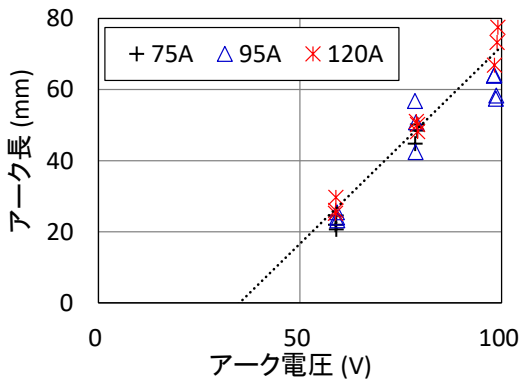


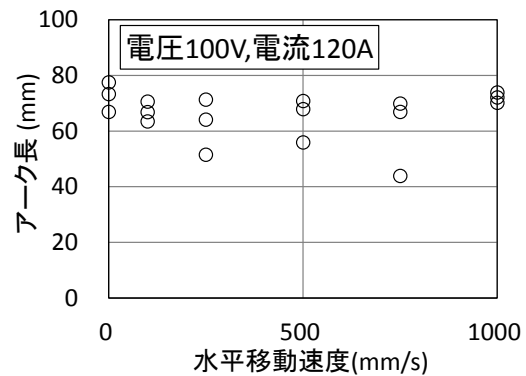
図7 電流変化時のアーク長とアーク電圧の関係

3.2 しゅう動開離アーク

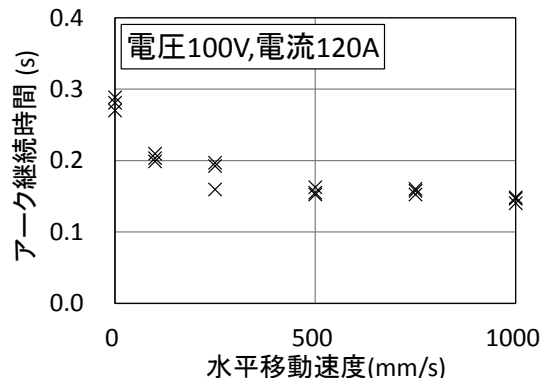
図8にしゅう動開離アークの実験結果を示す。図8(a)からアーク電圧100V、電流120Aのときのアーク長はすり板の水平移動速度によらず、約72mmであることがわかる。これは無しゅう動開離アーク実験結果(図7)とほぼ一致している。一方、図8(b)からアーク電圧100V、電流120Aのときのアーク継続時間はすり板の水平移動速度に応じて短くなる傾向がある。

電圧100V、電流120A、すり板の水平方向の移動速度を1000mm/sとしたとき、実験装置に対して正面に配置した高速度カメラで撮影されたアークの挙動を図9に示し、図10にこのときのアーク消弧後の陽極(トリ線)側のアーク痕を示す。図9に示すように、トリ線上の陽極点はすり板の水平移動に伴って移動していることがわかる。すり板は水平移動(紙面に対して右方向へ移動)に加えて、降下しているため、アーク消弧直前のすり板の位置は、すり板初期位置に対して紙面右下方となる。図9(e)は、アーク消弧直前のものであり、この時のトリ線上の陽極点はすり板の後方に位置していることがわかる。また、図10に示すようにトリ線上には連続したアーク痕と離散的なアーク痕が確認された。

図10のアーク痕が確認された測定時のアーク電圧の時間変化を図11に示す。矢印で示した箇所アーク電圧の減少が確認できる。トリ線上の陽極点がすり板の



(a) すり板水平移動速度とアーク長の関係



(b) すり板水平移動速度とアーク継続時間の関係

図8 しゅう動開離アークの実験結果

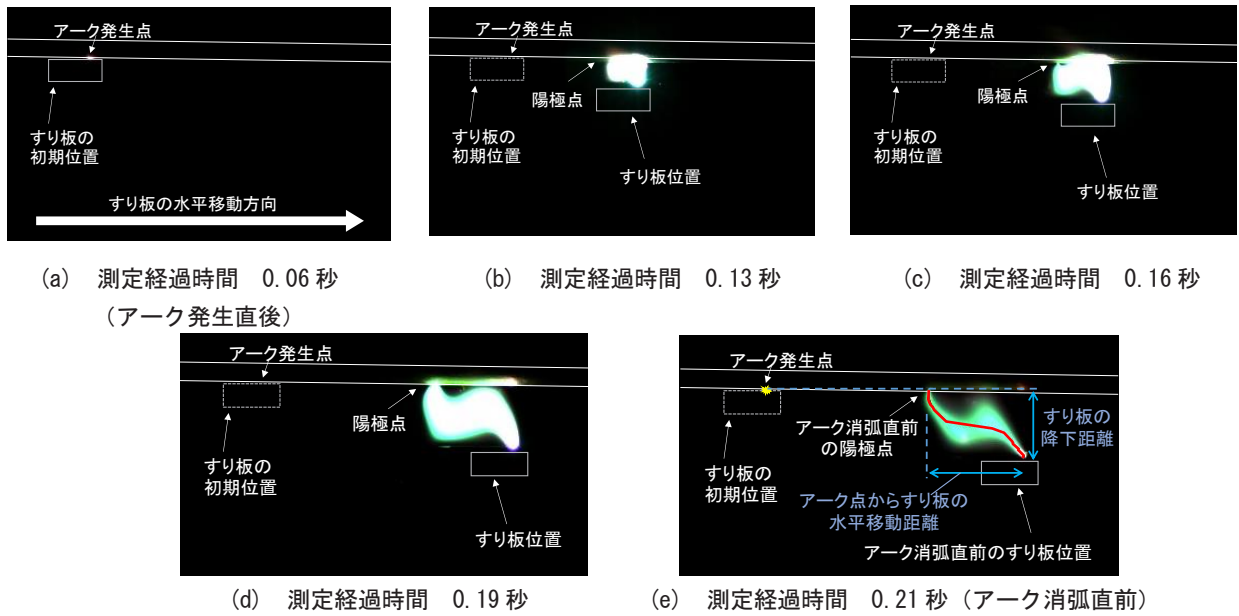


図9 アーク挙動の撮影画像（電圧 100V，電流 120A，すり板水平移動速度 1000mm/s）

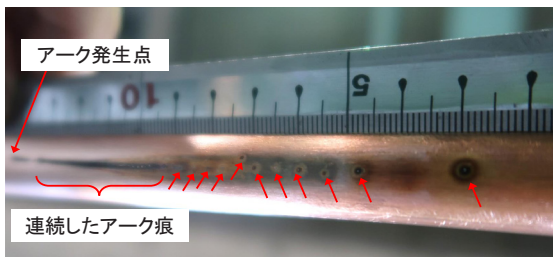


図10 トロリ線上のアーク痕

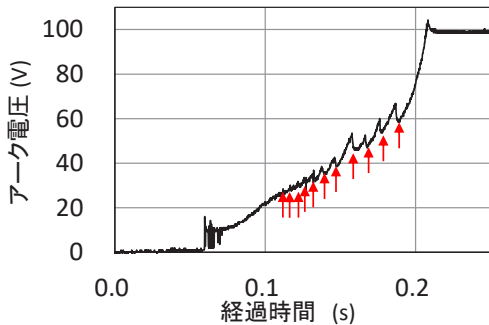


図11 アーク電圧の時間変化

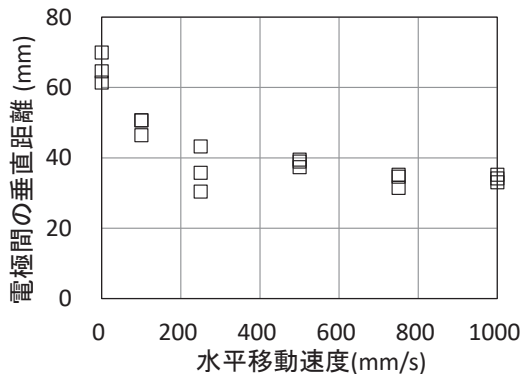


図12 すり板水平移動速度とアーク消弧時の電極間垂直距離の関係

水平移動に伴ってその移動方向へ移動すると、元の陽極点・すり板間に生じるアーク長よりも、新しい陽極点・すり板間に生じるアーク長が短くなる。アーク電圧の減少は、陽極点の移動によりアーク長が短くなったために生じたものであり、経過時間 0.1s を過ぎた後から始まっている。また、アーク電圧の変動とトロリ線上の離散的なアーク痕の数は、おおよそ一致していた。

図8の各データ（電圧 100V，電流 120A の時，すり板の水平方向の移動速度を 0，100，250，500，750，1000mm/s に変化させ計測したデータ）について、アーク消弧時のトロリ線・すり板間（電極間）の垂直距離を整理したものを図12に示す。水平移動速度がゼロの場合、電極間の垂直距離は最大で 70mm 程度であり 3 次元測定結果である 72mm とほぼ同程度であった。一方、水平移動速度の増加に伴い、アーク消弧時の電極間の垂直距離は減少し、1000mm/s のときに約 30mm であった。このように、アーク柱が消弧する条件は、電極間の最短垂直距離ではなく、3 次元的なアーク柱の長さ依存することが確認できる。

4. 3次元電磁熱流体シミュレーション

4.1 シミュレーションの概要

トロリ線・すり板間に発生するアークの3次元的な挙動の解析を行うため、陽極をトロリ線、陰極をすり板としたときの電極間に生じるアークについて、電流密度、磁界、圧力、速度、電位、温度分布を計算するシミュレーションプログラムの開発を実施した。このシミュレーションでは、空気を非圧縮性流体として扱って電磁力および熱収支を考慮し、3次元空間において時刻歴

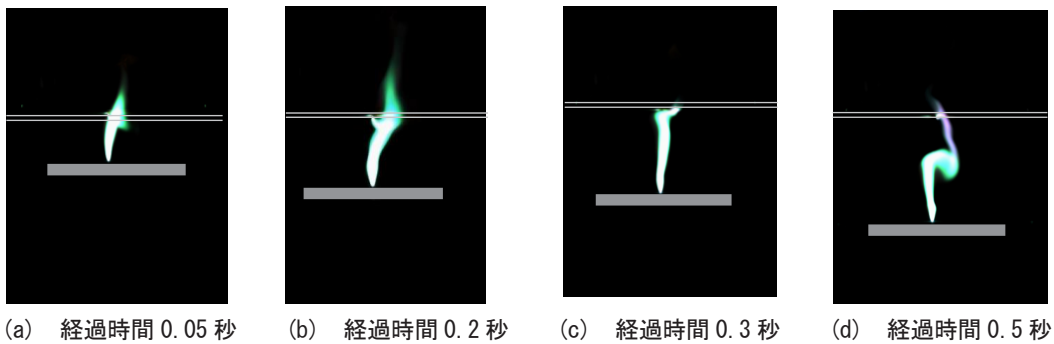


図 13 トロリ線とすり板間のアーク挙動（無しゆう動，電圧 1500V，電流 60A）

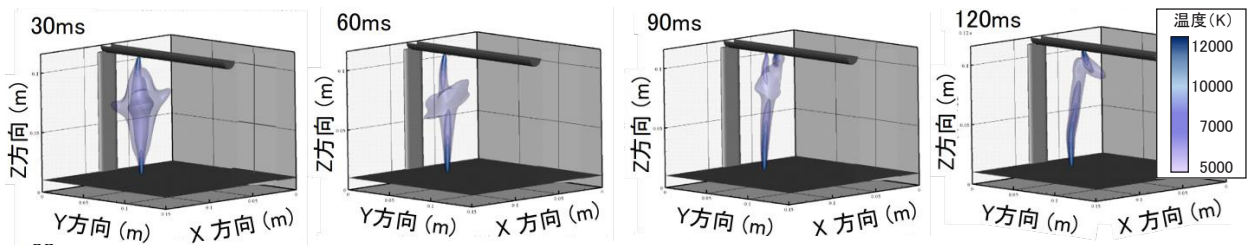


図 14 3次元電磁熱流体シミュレーションで得られたアーク挙動（温度分布）

で逐次積分して求める。計算領域は、直交座標系の X、Y 方向を 150mm、Z 方向を 116mm の直方体とし、 $z = 0 \sim 10 \text{ mm}$ の範囲はすり板を模擬した銅陰極、 $z = 116 \text{ mm}$ かつ $x = 75 \text{ mm} \pm 3 \text{ mm}$ はトロリ線を模擬した銅陽極とした。初期条件は、計算領域の $x = 75 \text{ mm}$ かつ $y = 40 \text{ mm}$ において陽極点から陰極点へ 100A のアーク電流が流れていると仮定した。3次元電磁熱流体シミュレーションから得られた温度分布により、電極間に生じるアーク挙動を解析した。

4.2 シミュレーションの妥当性検証

3次元電磁熱流体シミュレーション解析から得られた温度分布を実験結果と比較することにより、シミュレーションの妥当性検証を行った。

図 13 に、電圧 1500V、電流 60A でトロリ線とすり板を接触させた状態からすり板を下方へ引き下げた実験により得られたアーク挙動を示す。図 14 に、3次元電磁熱流体シミュレーションにより得られたアーク挙動を示す。図 13(a) と図 14(30ms) では、アークにより加熱されたプラズマが電離し、陽極および陰極から噴出したプラズマジェットとの衝突により、図の中心付近でアーク柱が径方向に広がる様子が確認できる。図 13(b) と図 14(60ms) では広がった箇所がトロリ線方向へ上昇する様子が、図 13(c) と図 14(90ms) では陽極点の移動が発生している様子が、それぞれ確認できた。この陽極点移動する現象はリストライクと呼ばれ、径方向に広がった部分の高温ガスが浮力によりトロリ線近傍まで運ばれることで陽極に二つ目の陽極点形成され、最初の陽極点が

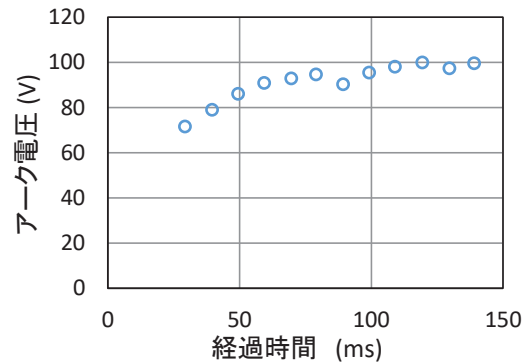


図 15 3次元電磁熱流体シミュレーションで得られた経過時間に対するアーク電圧

消滅することにより発生する。さらに、図 13(d) と図 14(120ms) では、陽極点の移動後に陽極付近のアーク柱がトロリ線電流の磁界の方向へゆるる様子が確認された。以上のように、シミュレーションにより算出されたアーク挙動は、実験により観察されているアーク挙動をよく再現していることがわかった。

4.3 陽極点の移動によるアーク電圧の変化

解析で得られた経過時間に対するアーク電圧の変化を図 15 に示す。時間の経過に伴い、アーク電圧が増加するが、経過時間が 80～90ms のとき陽極点移動し、アーク電圧が低下している。図 11 でも陽極点離散的に移動し、このタイミングでアーク電圧が低下している。シミュレーションによるアーク電圧の変化は 3 章の計測結果と同様の傾向を示すことを確認した。

特集：電力技術

5. 考察

無しゅう動アーク実験では、電圧 100V における最大アーク長は電流値に大きく依存せず、約 72mm であった。これは、しゅう動時の電圧 100V の最大アーク長とほぼ一致している。したがって、しゅう動速度 1000mm/s までの範囲では、風の影響などを考えないとすると、アーク長はしゅう動の有無によらずほぼ一定の値と考えられる。

一方、しゅう動時にはアーク電圧がわずかに減少する瞬間があることやトロリ線上に離散的なアーク痕が観測されることがわかった。加えて、今回のしゅう動アーク実験において、すり板移動時には陽極点がすり板よりも後方に位置することも明らかとなった。これらから、電極間の垂直距離がある一定の長さ以上になると、陽極点の移動は連続的な動きから離散的な動きに変わると考えられる。

図 9(d) は図 11 の経過時間 0.19s の撮影画像であり、このときトロリ線上の陽極点はアーク消弧直前の陽極点と同じである。図 9(d) の電極間の垂直距離は 32mm、電極間の水平距離は 38mm、3 次元計測によるアーク長は 59mm である。図 9(e) より、アーク消弧直前の電極間の垂直距離は 36mm、電極間の水平距離は 58mm、3 次元計測によるアーク長は 70mm である。経過時間 0.19s から 0.21s までの間はトロリ線上の陽極点の移動はなかったことから、すり板の降下と水平移動により、経過時間とともにアーク長はさらに大きくなる。そのため、すり板が水平移動する場合は、無しゅう動時と比べてトロリ線・すり板間の垂直距離がより小さな条件においてもアークが消弧することが確認された。これは、4.2 節で述べた、陽極点が離散的に移動するリストライク現象と密接に関係しているものと思われる。すなわち、リストライク現象の発生のタイミングについて検討を進めることにより、アークを消弧させるための離隔距離についても検討することができると考えられる。

6. まとめ

接点の開離時アーク現象について、電気鉄道を対象としたしゅう動接点のしゅう動アーク現象を取り扱うことのできる実験装置ならびにアーク挙動の精緻な測定が可

能な 3 次元計測手法を確立し、100V 前後ではあるもののアーク電圧とアーク長の関係やアークの挙動の計測を進めた。また、アーク挙動を 3 次元的に解析するシミュレーションを開発し、アーク挙動を再現できることを確認した。本報告の結果をまとめると以下となる。

- (1) 3 次元アーク長はアーク電圧に応じて増加し、電流値には大きく依存しないことを確認した。
- (2) すり板をしゅう動および降下させてアークを発生させると、陽極点はすり板の後方に発生することがわかった。また、トロリ線上には連続的なアーク痕と離散的なアーク痕が形成されることがわかり、わずかながらアーク電圧が減少する回数と離散的なアーク痕の数はほぼ一致することがわかった。
- (3) しゅう動時には、アーク消弧時の電極間の垂直距離がすり板の水平移動速度の増加に伴い減少することがわかった。したがって、すり板を水平移動させることで、無しゅう動での開離アークよりも短い電極間の垂直距離でアークを消弧させられる可能性がある。

なお、3 次元電磁熱流体シミュレーションは、鉄道総合技術研究所と東京都市大学との共同研究によるものである。

文献

- 1) 高木相編著：電気接点のアーク放電現象，コロナ社，1995
- 2) 森正美，河野彰夫：通電開離面に形成する溶融ブリッジの材質特性，電気学会論文誌 D，Vol.125，No. 5，pp.432-437，2005
- 3) 早坂高雅，赤木泰文：開離時アーク放電がトロリ線表面に及ぼす影響，電気学会論文誌 D，Vol.135，No. 4，pp.327-334，2015
- 4) 早坂高雅，久保田喜雄：開離時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，電気学会論文誌 D，Vol.132，No. 2，pp.163-169，2012
- 5) 林屋均：架線 - パンタグラフ間アーク現象，社団法人日本鉄道電気技術協会，pp.71-99，2007
- 6) 電気学会放電ハンドブック出版委員会編：放電ハンドブック上巻，p.212，1998