

トロリ線の連続許容交流アーク電流値の導出手法

早坂 高雅* 和田 祥吾**

Evaluation Method for Allowable Continuous AC Arc Current of Contact Wire

Takamasa HAYASAKA Shogo WADA

The possibility of contact wire breakage due to AC arc discharge in electric railways has been qualitatively inferred based on the conditions of contact wire breakage in positive and negative DC arc discharge. However, railway operators need the precise threshold of the allowable continuous AC arc current with no possibility of contact wire breakage, because some breakage accidents occur at AC insulated overlap sections. In this study, the time until contact wire breakage against the arc current was experimentally measured. Then, heat conduction analysis was conducted to find the efficiency of heat transfer from AC arc discharge to the contact wire. Finally, an evaluation method for allowable continuous AC arc current with no possibility of contact wire breakage was proposed.

キーワード：電気鉄道，交流アーク，トロリ線，断線，熱伝導解析

1. はじめに

トロリ線とパンタグラフすり板間に発生したアークによりトロリ線が断線する事故がたびたび発生している。アークの発生原因は、主にトロリ線とすり板の不完全接触である。例えば、2本の電車線を並行に設けて電源の切り替えを行うエアセクション区間にパンタグラフが停止したとき、両トロリ線に高低差があると、高い位置のトロリ線とすり板が不完全接触を起こし、アークが発生することがある。他にも、留置した車両のパンタグラフに冠雪し、雪の重みでパンタグラフが降下することや、トロリ線表面に生じた着氷霜部分にすり板が乗り上げるによりアークが発生することがある。

エアセクションでのトロリ線断線対策としてエアセクション区間に標識などを設け、同区間で電車列車が停車しないように運転取扱いを定めるソフト対策が実施されている。また、ハード対策として、アークの発生原因となるエアセクションの両電車線の電位差が発生しないように、並行する2本の電車線を列車通過時に短絡させる対策¹⁾や、トロリ線にアルミニウム型材を取り付け、アークによる入熱を放熱するとともに、引張強度も分担する対策²⁾、複合架線構造にすることにより引張強度を分担する³⁾、または架線構造の変化によりアークを消弧し断線を防ぐ対策⁴⁾などが検討あるいは実用化されている。

アークによるトロリ線の断線事故は、負荷電流が大きい直流電化区間で多く発生しているため、直流アークに

よるトロリ線の断線特性について複数の研究が報告されている⁵⁾⁶⁾⁷⁾。特に文献7)では、直流アークの電力がトロリ線の温度上昇に寄与する割合が、数100Aのアーク電流でアーク長が短い範囲において、トロリ線が陽極のときに概ね60%、陰極のときに40%であることが報告されている。

交流電気鉄道はき電圧が高く負荷電流が小さいため、アークによるトロリ線断線リスクは低いと考えられてきた。しかしながら、交流電気鉄道においてもトロリ線とすり板間で生じたアークによるトロリ線断線事故の例がある⁸⁾。

交流電気鉄道で発生するアークに関しては、これまで走行時の交流アークがトロリ線の摩耗に与える影響⁹⁾¹⁰⁾についての研究が報告されているが、交流の連続アークがトロリ線を断線させる条件を実験などで定量的に評価した研究報告は見当たらない。

筆者らは、これまでにトロリ線とすり板間に発生したアークがトロリ線に与える影響について研究を進めてきた。本論文では、交流アークによるトロリ線断線実験の結果について述べ、交流アーク電流値とトロリ線断線時間の関係および交流アークによる電力がトロリ線の温度上昇に寄与する割合を明らかにする。これを基に、交流アークが連続して発生してもトロリ線が断線に至らない電流値（以下、連続許容交流アーク電流値と記す）を導出手法を提案する¹¹⁾。

2. 交流アークによるトロリ線断線実験

交流アークによるトロリ線への入熱量やアーク電圧などのパラメータならびに、熱軟化によってトロリ線が断

* 電力技術研究部 電車線構造研究室

** 電力技術研究部 電車線構造研究室（現 西日本旅客鉄道株式会社）

線に至る温度を明らかにするため、交流アークによるトリ線断線実験を実施した。この結果を基に、アークによる電力がトリ線の温度上昇に寄与する割合を次章で導出する。

2.1 実験装置と供試体

図1に、実験回路を示す。電源は交流安定化電源（菊水電子製、PCR18000WE2R）を使用し、トリ線とすり板で形成される接触部に直列に可変抵抗 R を接続した。図に示す通り、トリ線とすり板をそれぞれ電源に接続し、互いに接触させて閉回路を構成した。トリ線は、すずが0.3%、インジウムが0.08~0.09%含有された、すず・インジウム入り硬銅トリ線 GT-SNN170 を使用し、張力調整装置により19.6kNで引張した。すり板は、銅の含有率が約50%の銅含浸カーボンすり板 PC78A を使用し、あらかじめ設定した速度で鉛直方向に昇降可能なアクチュエータのステージ上に設置した。

測定項目は、トリ線とすり板の電極間電圧 V (V)、回路電流 I (A)、トリ線張力 F (kN)、室温 T_R (°C) および後述するトリ線温度 T (°C) である。

図2に、供試体のトリ線とすり板の接触方法および温度測定位置を示す。すり板は、トリ線に対し約10°傾けて設置した。これは、トリ線軸方向の温度分布を調べるためにアークの発生箇所を固定し、加えて、アークがすり板上を移動することによるトリ線への熱入力の分散を防止するためである。アークによるトリ線の断線現象において、トリ線の温度上昇は局所的で

あり、アーク発生点から数100mm離れた場所はほとんど温度上昇しない¹²⁾ため、供試体トリ線には全長1500mmの短尺品を用いた。温度測定は、トリ線の金具把持面（以下、トリ線の金具把持面を小弧面、すり板がしゅう動する面を大弧面と記す）に小孔（φ0.9mm、深さ1.5mm）を設け、熱電対を挿入して実施した。トリ線軸方向に対してアーク発生点を0mmとし、図2に示すように前後100mmの位置までの範囲で温度測定を行った。なお、小孔を設けることによるトリ線の破壊荷重の低下は、新線の破壊荷重73.5kNに対し、計算値で0.6kN程度（低下率が0.8%程度）である。また、筆者らの予備試験においても破壊荷重の低下率は計算値と同様に約0.8%と小さかったため、本論文では小孔を設けたことによるトリ線破壊荷重への影響は考慮しないこととした。

2.2 実験方法

実験前に、トリ線とすり板の接触部を120番のサンドペーパーで磨き、アセトンで脱脂した。その後、トリ線とすり板を接触させた状態で60Hzの交流電流を通電した。通電後、直ちにアクチュエータによりすり板を降下させ、交流アークを発生させた。本実験では、アークがトリ線上を移動することなく、トリ線の一点に固定することを目的に、トリ線とすり板の電極間距離をアークが継続する範囲で可能な限り小さくした。

すり板降下後の電極間距離が小さい場合には、金属短絡によりアークが消滅する可能性が高く、大きい場合には、磁気吹の影響によりアークが不安定になり自己消弧する可能性が高くなる。また、100A程度の小電流アークの場合、すり板の降下速度が速いとアークが安定しないため自己消弧しやすく、100Aを超える大電流アークの場合には、すり板の降下速度が遅いと電極の溶融による金属短絡によりアークが消滅する可能性がある。そこで本実験では、アーク電流に応じてすり板降下速度と降下後の電極間距離を調整し、0.1~1mm/sの降下速度で1~2mm降下することでアークを発生させ、その後、金属短絡を防ぐため0.1~0.2mm/sで1mm降下した。なお、最終的な電極間距離は最大3mmとした。また、実験は無風で日射が当たらない温度約15°Cの室内で実施した。

2.3 測定波形

図3に、実効値で電源電圧95V、回路電流255Aを通電時にすり板を降下し、交流アークを発生させた時の測定波形の例を示す。通電開始後、 $t=1s$ で、すり板をトリ線と接触した状態から速度1mm/sで電極間距離が1mmとなるように降下を開始させると、電極間電圧 V が上昇し、トリ線とすり板間でアークが発生した。回

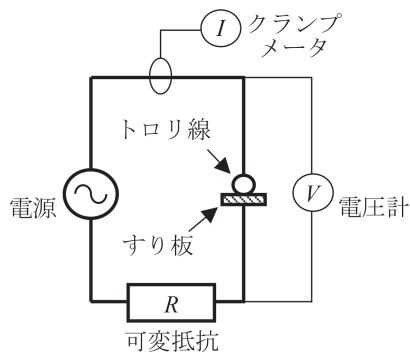


図1 実験回路

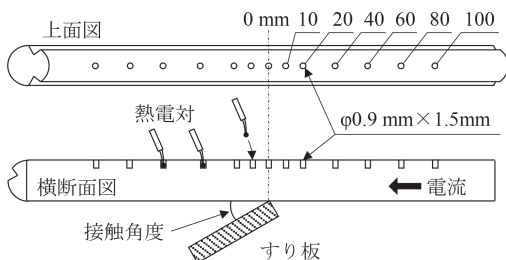


図2 トリ線とすり板の接触方法および温度測定位置

路電流 I は、電極間電圧 V の上昇に伴い 200A 程度まで減少した。また、アークが発生すると、トロリ線小弧面の温度が上昇した。その後、 $t=4.7s$ においてすり板降下速度 0.1m/s で電極間距離が 2mm になるまで降下を再び開始させた。 $t=18.3s$ でトロリ線が断線し、張力 F が急峻に減少するとともに、アークが消弧した。ここで、トロリ線断線時間を、電極間電圧 V が最低アーク電圧電圧 9V¹³⁾ を超えた時刻から、トロリ線が断線し、張力 F が 50% 以下になった時刻までの間とし、トロリ線断線時間における回路電流 I の実効値の平均をアーク電流、電極間電圧 V の実効値の平均をアーク電圧とした。

なお、図 3 には電極間距離 1mm 当たりの電圧降下である電位傾度を 3V/mm¹³⁾、点弧時のアーク電圧を実験値の 19.26V として計算したアーク電圧（以下、計算電圧と記す）を併せて示した。

2.4 アーク電流とトロリ線断線時間の関係

図 4 に、実験で得られたアーク電流とトロリ線断線時間の関係を示す。なお、本データはそれぞれ 1 回の実験により得られたものである。トロリ線断線時間は、アーク電流が大きいほど短くなり、250A 程度以上で飽和する傾向がある。200A 以下では、アーク電流が小さい領域でトロリ線断線時間が急激に増加する傾向があり、アーク電流が 78A では、トロリ線が断線するまでに 100s 以上要している。これは、アークによるトロリ線への入熱と、トロリ線内部への伝熱およびトロリ線表面からの放熱との差が小さくなり、温度上昇が鈍化するためであると考えられる。

2.5 アーク電圧とアーク電流の関係

図 3 に示すように、接点开離直後のアーク電圧の変化量は、文献 13 と同様に 3V/mm 程度であったが、トロリ線の温度が高くなるとアーク電圧は計算電圧より低い値を示した。これは、アークによるトロリ線およびすり板表面の溶融に伴う体積膨張や、トロリ線大弧面の局所的な温度上昇による変形により、電極間距離が小さくなるのが影響していると考えられる。図 5 に、アーク電流とアーク電圧との関係を示す。先述の理由により、厳密には実験での電極間距離はアクチュエータで降下させた距離よりも小さいことが考えられるが、GT-SNN170 と PC78A の距離が 3mm 程度までのごく小さい空隙に発生する交流アークでは、平均アーク電圧は概ね 20V 程度となることがわかった。

2.6 断線時のトロリ線小弧面温度

図 6 に、断線時のトロリ線小弧面の 0mm 位置の温度を示す。なお、この温度は、アーク発生点直上の小弧面で測定したため、アークのわずかな移動による入熱の分

散はあるものの、概ね小弧面の最大温度であると考えられる。断線時のトロリ線小弧面中央部の温度は、多少ばらつきはあるものの、最も低い温度で約 500℃、高い温度で約 550℃、平均が約 530℃であった。

このことから、GT-SNN170 の新線トロリ線を 19.6kN で引張した場合、アークによりトロリ線小弧面の最大温度が概ね 530℃に達した時点で断線するということが明らかになった。

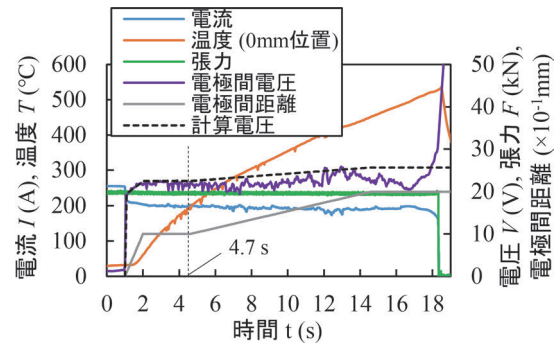


図 3 測定波形例

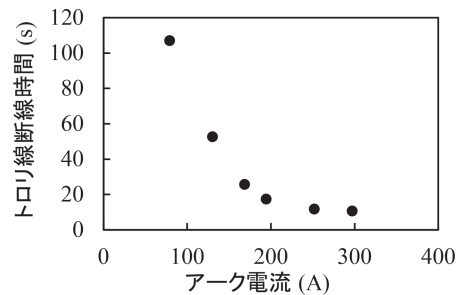


図 4 アーク電流とトロリ線断線時間の関係

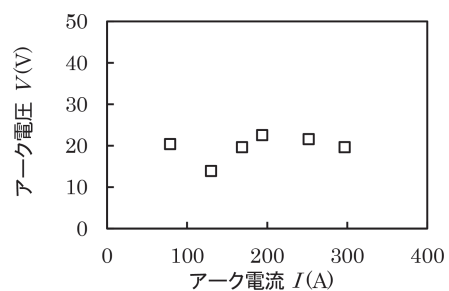


図 5 アーク電流とアーク電圧との関係

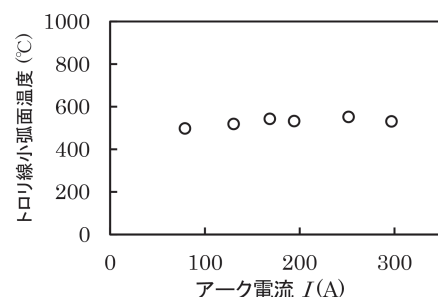


図 6 断線時のトロリ線小弧面 (0mm 位置) の温度

3. 熱伝導解析によるアーク効率の同定

実験では、設備上の制約から大電流アークを発生させることが難しく、また、トロリ線が断線に至らないような小電流アークは、陰極点の移動現象¹⁴⁾によりトロリ線とすり板間に長時間安定して発生させることが難しい。そこで、熱伝導解析により、実験で得られたトロリ線の温度上昇傾向から交流アークによる電力がトロリ線の温度上昇に寄与する割合（以下、アーク効率と記す）を同定し、定置試験で実施できない電流条件でのトロリ線の断線特性を明らかにした。

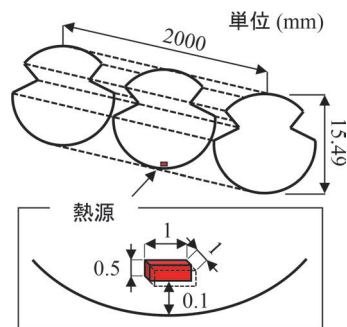


図7 トロリ線の熱伝導解析モデル

3.1 解析モデル

アークによるトロリ線の温度上昇について、熱伝導解析の商用ソフト Femtet (ムラタソフトウェア) を使用して三次元有限要素法により熱伝導解析を実施した。図7にトロリ線の熱伝導解析モデルを示す。解析モデルの外形はGT-SNN170トロリ線と同様とし、全長を2000mmとした。アークの電極は、トロリ線の最下部に位置するとし、トロリ線大弧面の最下部より0.35mm内部の位置に熱源を与えてアークによる入熱を模擬した。また、100~300A程度の直流アークによりトロリ線表面に生じる溶融痕が直径1mm程度¹⁵⁾であることから、トロリ線上に発生する交流アークの直径も同程度と考え、熱源の大きさを、幅1mm×長さ1mm×厚さ0.5mmとした。熱源の総発熱量 Q (W) は、式(1)で与えた。

$$Q = I \times V \times \eta \quad (1)$$

ここで、 I (A) はアーク電流、 V (V) はアーク電圧、 η はアーク効率である。

表1に、解析に用いたパラメータを示す。トロリ線表面の放射率は、実験で用いた新線トロリ線を放射温度計により実測した値とした。トロリ線の熱放散 W (W/m²/°C^{1.25}) は自然対流によるものとし、単位表面積あたりの値を式(2)で計算した。

$$W = h \times (\theta - \theta_a) \quad 1.25 \quad (2)$$

ここで、 h は自然対流係数、 θ は対象物表面温度 (°C)、 θ_a は環境温度 (°C) である。なお、自然対流係数は解析ソフトの自動計算により算出した。また、本解析において日射による影響は考慮していない。アーク柱からの熱放射は、アーク柱で生じる熱エネルギーの7~14%程度¹⁶⁾であり、トロリ線の温度上昇に与える影響はごくわずかと考えられるため、これをアーク効率 η に含めた。

表1 シミュレーションパラメータ

トロリ線	長さ	放射率	密度
GT-SNN170	2 m	0.2	$8.96 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$
比熱、熱伝導率 ¹¹⁾		環境温度	放熱形態
0.37~0.46 J/g/K 300~340 W/m/K		15°C	自然対流

3.2 アーク効率の同定

解析では、式(1)に対して実験で得られたアーク電流 I およびアーク電圧 V を代入し、図2で示した各測定点での温度上昇の傾向が実験値と一致するように Q の値を変えてアーク効率 η を同定した。なお、解析モデルの温度評価箇所は、実験と同じく、トロリ線小弧面から深さ方向に1mmの位置とした。

図8にアーク電流194.5A、アーク電圧22.6V、アーク効率を0.33とした時の解析結果の例を示す。なお、アークが発生した時刻を0sとしている。解析ではアーク電圧を一定としているのに対し、実験ではアーク電圧に揺らぎがあるため、実験値と解析値でわずかな乖離が生じているが、トロリ線の温度上昇の傾向は概ね一致している。図9に、上記条件における、トロリ線断線時の軸方向の温度分布を示す。アーク発生点近傍は、アークがトロリ線表面をわずかに移動することによる入熱の分散のために、実験値と解析値にわずかな乖離が生じているが、両者は良い一致を示した。

図10に、アーク電流およびアーク電圧に対するアーク効率の関係を示す。同定したアーク効率は平均で0.37程度であり、電極材料は異なるもののトロリ線を陽極とした直流のアーク効率⁷⁾よりも低い値であった。一般に、陽極の温度は電子の衝突による加熱のため、陰極よりも高くなる傾向がある¹⁷⁾。このため、トロリ線が常に陽極である直流アークと比較し、極性が交番する交流アークのほうがトロリ線へのアーク効率が低くなったものと考えられる。アーク電圧が他より低い13.9Vの試番において、アーク効率は0.46と大きい値を示した。陽極と

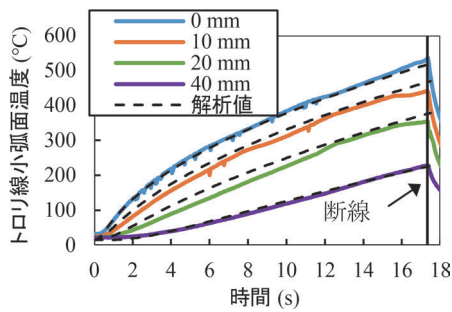


図8 解析結果例

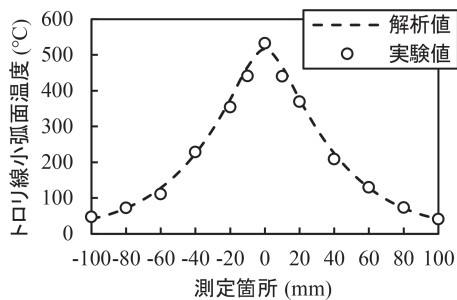


図9 トロリ線断線時の軸方向の温度分布

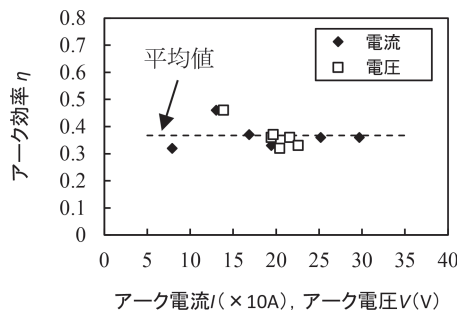


図10 アーク電流およびアーク電圧に対するアーク効率の関係

陰極での電圧降下は電極材料に依存するもので、アーク電流やアークの長さにはほぼ無関係に一定¹⁸⁾であるため、アーク電圧の増減は、アーク柱での電圧降下の増減である。しかし、アーク柱で生じる電力は、そのほとんどが対流損¹⁶⁾として消費されることから、トロリ線の温度上昇に大きく寄与しないと考えられる。

このことから、アーク電圧が低い試番では、アークによる全電圧降下のうち、アーク柱での電圧降下の割合が低いため、アーク効率が高くなったものと考えられる。

3.3 実験結果との比較

構築した解析モデルの妥当性を確認するため、解析で得られたアーク電流に対するトロリ線断線時間および電力量の関係を実験結果と比較した。解析条件は、表1と同様とし、熱源の総発熱量 Q は実験結果を基にアーク電圧 V を20V、アーク効率 η を0.37として解析を行っ

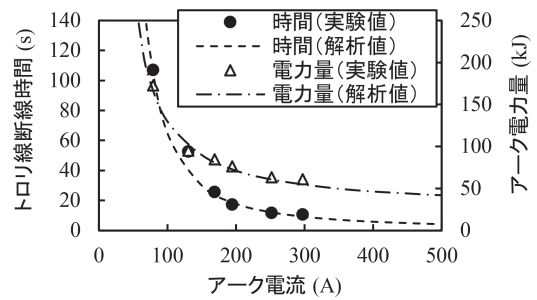


図11 アーク電流に対するトロリ線断線時間および電力量の関係

た。なお、アーク発生点におけるトロリ線小弧面温度が 530°C を超えた時点で断線するとし、その時までの経過時間を断線時間とした。また、電力量は、アーク電流、アーク電圧および上記断線時間の積で求めた。図11に、アーク電流に対するトロリ線断線時間および電力量の比較結果を示す。解析結果は、電力量およびトロリ線断線時間ともに実験と良い一致を示しており、解析の妥当性を確認できた。本解析モデルを用いることで、実験が難しい低電流アークや大電流アークがトロリ線の断線に与える影響を明らかにすることができると思われる。

4. 連続許容交流アーク電流値の導出

2.4節で述べたように、低電流アークではトロリ線の温度上昇が鈍化し、低い温度で飽和することが考えられる。この飽和温度がトロリ線の断線温度より低い場合、アークが連続して発生しても断線に至らないと考えることができる。そこで、解析モデルを用い、数mm程度の微小な空隙に交流アークが連続して発生してもトロリ線が断線する温度まで至らない連続許容交流アーク電流値を導出する手法を検討した。以下に、導出手順を示す。

1. 断線時のトロリ線小弧面最大温度 T_{max} ($^{\circ}\text{C}$)を実験により決定する。
2. T_{max} 未満で熱飽和する最大電力 Q_{max} (W)を定常熱伝導解析で導出する。
3. 式(1)、および図10の結果より、連続許容交流アーク電流値 I_{max} (A)を式(3)で求める。

$$I_{\text{max}} = \frac{Q_{\text{max}}}{0.37 \times 20} \quad (3)$$

図12に、表1の条件で T_{max} を 530°C とした時の連続許容交流アーク電流値を示す。なお、このときの Q_{max} は、約266Wである。図中のプロットは、式(1)に対して実験で得られたアーク電圧 V およびアーク効率 η を代入して求めた電流値であり、破線はアーク電圧 V を20V、アーク効率 η を0.37として式(3)で求めた電流値

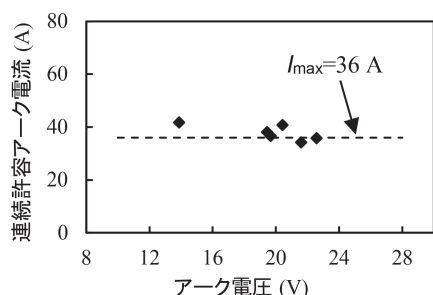


図 12 表 1 の条件下における連続アーク許容電流値

である。530℃でトロリ線が断線すると仮定すると、式(3)より連続許容交流アーク電流は約 36A となる。トロリ線とすり板間の空隙が本実験で設定した 3mm よりも大きくなり、アークが長くなると、アーク電圧が 20V を超えて大きくなることが考えられる。ただし、3.2 節で述べたように、アーク柱で生じる熱はトロリ線の温度上昇に大きく寄与しないと推測されるため、アーク電圧が 20V を超えて大きくなった場合でも、連続許容交流アーク電流値はアーク電圧が 20V の時と同等程度であると考えられる。

5. まとめ

19.6kN で引張したすず・インジウム入り硬銅トロリ線 GT-SNN170 と銅含浸カーボンすり板 PC78A 間に 3mm 以下の空隙を設け、300A 以下の交流アークでトロリ線を断線させる実験を行った。その結果、これらの条件で数 mm 程度の微小な空隙に発生した交流アークについて、アーク電流値とトロリ線が断線するまでの時間の関係を明らかにした。また、交流アークによるトロリ線温度上昇を模擬可能な熱伝導解析モデルを構築し、交流アークの電力がトロリ線の温度上昇に寄与する割合を同定した。以下にこれをまとめる。

- (1) 19.6kN で引張した GT-SNN170 トロリ線と PC78A すり板との間の 3mm 程度の微小な空隙に発生する交流アークについて、アーク電流値とトロリ線断線時間の関係を実験により明らかにした。
- (2) GT-SNN170 と PC78A の電極間距離が 3mm 程度の交流アークにおいて、アーク電圧 V は概ね 20V 程度である。
- (3) GT-SNN170 断線時の小弧面の最大温度は、アーク電流値にほとんど依存せず、概ね 530℃である。
- (4) 交流アークによるトロリ線温度上昇を模擬可能な熱伝導解析モデルを構築し、本論文の実験条件下において、GT-SNN170 と PC78A の間に発生する交流アークの電力がトロリ線の温度上昇に寄与する割合 η を同定した結果、約 37%であった。
- (5) 本論文の解析条件下において、19.6kN で引張した

GT-SNN170 トロリ線の連続許容交流アーク電流値を試算したところ約 36A であった。

文献

- 1) 近藤真吾, 延原隆良, 清水政利: エアセクション箇所の溶断防止対策, 第 15 回鉄道技術・政策連合シンポジウム (J-Rail2008), No.029-S2, pp.155-156, 2008
- 2) 西健太郎: TC 型エアセクションの開発, 鉄道と電気技術, Vol.19, No.8, pp.37-40, 2008
- 3) 鈴木昌実: セクション箇所添線補強によるトロリ線断線対策, 鉄道と電気技術, Vol.21, No.6, pp.27-30, 2010
- 4) 伊東和彦, 早坂高雅, 宮崎修造, 川原敬治: エアセクションにおけるトロリ線断線対策の検討, 電気学会論文誌 D, Vol.138, No.2, pp.105-112, 2018
- 5) 三浦梓, 諸永聖和: トロリ線溶断試験, 電気鉄道, Vol.27, No.6, pp.6-9, 1973
- 6) 林屋均, 阿部泰久, 萬代毅, 濱田貴弘, 中島等, 根岸英雄: 架線-パンタグラフ間アークによるトロリ線断線の基礎特性, 電気学会論文誌 D, Vol.127, No.9, pp.927-934, 2007
- 7) 林屋均: 架線-パンタグラフ間アーク現象, 日本鉄道電気技術協会, pp.109-110, 2007
- 8) 鉄道の輸送トラブルに関する対策のあり方検討会: <https://www.mlit.go.jp/common/001247223.pdf> (参照日 2020 年 2 月 17 日)
- 9) G. Bucca, A. Collina, A. Collina, and E. Tanzi: "Experimental Analysis of the Electrical Arc on the Wear Rate of Contact Strip and Contact Wire in a.c. System," Advances in Italian Mechanism Science, pp.449-456, 2017.
- 10) T. Ding, G.X. Chen, X. Wang, M.H. Zhu, W.H. Zhang, and W.X. Zhou, "Friction and wear behavior of pure carbon strip sliding against copper contact wire under AC passage at high speed" Tribology International, Vol. 44, No. 4, pp. 437-444, 2011.
- 11) 和田祥吾, 早坂高雅: 交流アークによるトロリ線の連続許容アーク電流値の導出手法, 電気学会論文誌 D, Vol.140, No.11, pp.834-840, 2020
- 12) 林屋均, 萬代毅, 中島等: トロリ線アーク断線時の線条温度測定, 平成 18 年電気学会全国大会, Vol.1, No.96, pp.116-117, 2006
- 13) 林屋均, 山口紀男, 山本浩志, 植松正次, 松村周, 早坂高雅: 直流気中アーク放電におけるアーク長とアーク電圧の関係について, 平成 24 年電気学会産業応用部門大会, Vol.5, No.17, pp.209-210, 2012
- 14) 安藤弘平, 長谷川光雄: 溶接アーク現象, 産報, pp.92-93, 1973
- 15) 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
- 16) 安藤弘平, 長谷川光雄: 溶接アーク現象, 産報, pp.53-55, 1973
- 17) Angel, A.v.: 電離気体 (山本賢三奥田, 孝美訳), コロナ社, pp.254-256, 1968
- 18) 鈴木春義: 最新溶接ハンドブック, 山海堂, pp.26-27, 1973