

エアセクション用複合架線におけるアークの発生とトロリ線断線予兆の検知手法

○ [電] 近藤 優一 [電] 和田 祥吾 (鉄道総合技術研究所)

Method for Detection of Generation of Arc in Compound Catenary for Preventing Break of Contact Wires at Insulated Overlap and Sign of Break of Contact Wire by Arc

○Yuichi Kondo, Shogo Wada, (Railway Technical Research Institute)

When a train comes to a standstill at an insulated overlap, break of contact wire may occur due to an arc generated between a pantograph and the contact wire. Therefore, we have developed an “AS compound catenary” to prevent breaking of contact wires at the insulated overlap when a train is stopping. However, there is the problem not to detect whether an arc occur in an AS compound catenary. In this paper, we propose method for detection of generation of an arc by monitoring strain of additional wire in an AS compound catenary. In other cases, contact wire may break by the arc because a pantograph is folded away by snow cover on it. In this paper, we also propose method for detection of sign of break of contact wire by the arc to prevent this break.

キーワード：エアセクション，断線，複合架線，アーク，ひずみ

Key Words：Insulated overlap, break of contact wire, compound catenary, arc, strain

1. はじめに

直流電気鉄道において、エアセクション（以下、AS）に電車が停車した際に、パンタグラフすり板（以下、すり板）とトロリ線との間に発生したアークが原因でトロリ線が断線することがある。このような AS 箇所におけるトロリ線断線を防ぐために、伊東らはエアセクション用複合架線（以下、AS 複合架線）を開発した¹⁾²⁾。

AS 複合架線を適用した箇所に停車した車両のすり板とトロリ線との間にアークが発生すると、トロリ線の張力が保護線に移行するとともにトロリ線が降下し、アークを消弧させる特徴がある。しかし、アークが消弧した場合においてもトロリ線は、少なからず熱による影響を受けているため、後続電車の徐行運転や早急なトロリ線張替を実施する必要がある。そのため、AS 複合架線を適用した箇所に車両が停車した際に発生するアークを検知する手法が求められている。

一方、車両基地や駅等に留置されている車両のパンタグラフが冠雪によって降下し、すり板とトロリ線との間に発生したアークによってトロリ線が断線する場合もある。その対策として、アークによるトロリ線の断線予兆が検知できれば、き電停止などの措置をとることでトロリ線断線を防ぐ方法が考えられる。ただし、一般的な架線ではアークが発生してから数秒～20 秒程度の短い時間でトロリ線が断線する³⁾ため、検知してからき電停止などの措置をとる

ための時間を確保するのが困難である。そこで、AS 複合架線のように、車両留置箇所のトロリ線上方に保護線を取り付けた架線（以下、複合架線）に変更すれば、トロリ線の断線までの時間を確保することが可能になると考えられる。

本論文では、AS 箇所に AS 複合架線を適用した場合において、発生したアークを検知する手法、ならびに車両留置箇所に複合架線を適用した場合において、き電停止などの措置によりトロリ線断線を回避するためにアークによるトロリ線の断線予兆を検知する手法について検討した結果について述べる。

2. AS 複合架線の概要と特徴

図 1 に AS 複合架線の概略を示す。AS 複合架線は AS 箇所のトロリ線上方に保護線を取り付けた構造であり、停車した車両のすり板とトロリ線との間にアークが発生すると

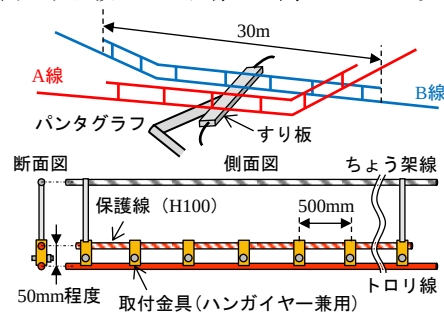


図 1 AS 複合架線概略

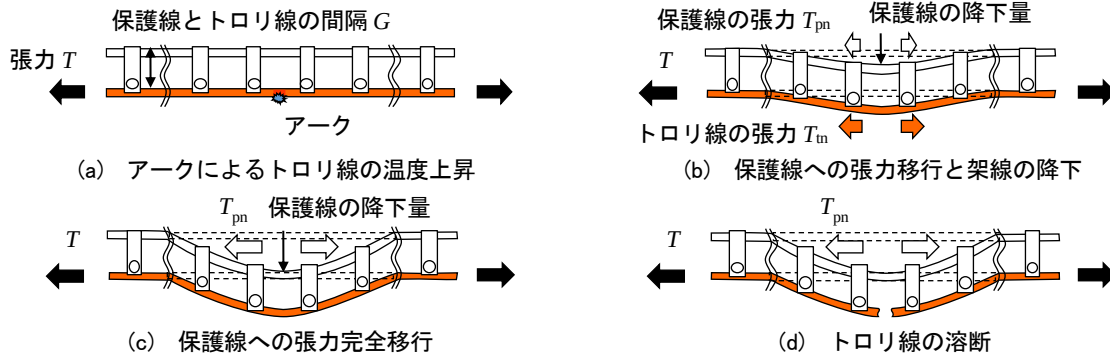


図2 アーク発生後の複合架線の挙動概略

アークを消弧させる特徴がある。

AS 複合架線のトリ線とすり板との間にアークが発生すると、トリ線は局所的に温度が上昇し軟化する。このとき、温度上昇と張力によってトリ線に伸びが生じるが、保護線が張力を受け持つことでトリ線が降下する。ここで、トリ線とすり板の間隙が数十 mm 以下であれば、この間隙が解消されアークが消弧する。

以上に述べたように、アーク発生時にはトリ線の張力を保護線が受け持つため、アーク発生箇所直上の保護線のひずみは増加する。この現象を利用して、AS 箇所のアーク検知手法ならびに車両留置箇所のトリ線断線予兆検知手法について検討することとした。

3. アーク発生時の複合架線の挙動に関する理論検討

ここでは、アーク発生後の複合架線の挙動について、理論検討を行う。

図2に複合架線において大きな間隙を伴うアークが発生したときにトリ線が断線に至るまでの過程を模式的に示す。トリ線に張力を印加させた状態で取付金具を用いて保護線を取り付けるため、図2(a)に示すように、アークが発生するまでは、トリ線に張力 T が印加されており、保護線には張力が印加されていない。アークが発生すると、トリ線の温度上昇に伴ってトリ線に伸びが生じるが、取付金具を介して保護線と剛に接続されているため、図2(b)に示すようにトリ線の張力が保護線に移行する。

図3に示すように各取付金具に関する力のつり合いを考える。まず、図3(a)に示すように端部の取付金具から数えてアーク発生箇所手前の取付金具を n 番目とすれば、 i 番目 ($i=1, \dots, n$) の取付金具に関する力のつり合いより、トリ線の張力を T_{ti} 、保護線の張力を T_{pi} とすると次式(1)が成り立つ。なお、ここでは簡単のため、張力は水平方向の力として考える。

$$T_{ti} + T_{pi} = T_{t(i+1)} + T_{p(i+1)} \quad (i = 1, \dots, n-1) \dots\dots (1)$$

また、図3(b)に示すように端部の取付金具では、保護線は自由端であるため、力のつり合いより次式(2)が成り立つ。したがって、式(1)、(2)より次式(3)が成り立つ。

$$T = T_{t1} + T_{p1} \dots\dots\dots (2)$$

$$T = T_{ti} + T_{pi} \quad (i = 1, \dots, n) \dots\dots\dots (3)$$

アーク発生箇所付近で考えれば、トリ線の伸びに伴っ

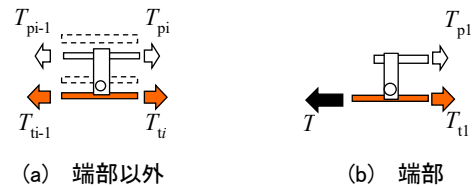


図3 取付金具周辺の力のつり合い

てトリ線の張力 T_{tn} が減少するため、保護線の張力 T_{pn} は増加する。さらにトリ線が伸び続けると、図2(c)に示すようにトリ線の張力 T_{tn} が 0 となり、保護線の張力 T_{pn} が T となる。このとき、保護線の張力 T_{pn} はアーク発生開始時から単調増加しており、曲げによるたわみ角が小さいと考えられるため、張力 T と保護線の張力 T_{pn} の作用線が一致する。すなわち、アーク発生箇所付近の保護線の降下量は、保護線とトリ線の間隔 G に等しくなる。その後は、図3(d)に示すようにアークによるトリ線の温度上昇によりトリ線だけにたわみが生じ、最終的に溶断する。したがって、トリ線断線直前におけるトリ線の降下量は、保護線の降下量と温度上昇に伴う伸びに起因したたわみの和となることが予想される。

以上の理論検討に基づき、トリ線断線直前の保護線のひずみを推定する。保護線のヤング率を E_p 、保護線の断面積を A_p とすればトリ線断線直前の保護線のひずみ ε_{pn} は、式(3)より以下の通りに求められる。

$$\varepsilon_{pn} = T / E_p A_p \dots\dots\dots (4)$$

4. アークによるトリ線断線試験と検知手法の提案

4.1 試験概要

複合架線におけるアーク検知ならびにアークによるトリ線断線予兆検知を実現する手法について検討するために、屋内においてアークによるトリ線断線試験を実施し、トリ線が断線に至るまでの保護線のひずみを測定した。

図4にアークによるトリ線断線試験の概要図を示す。図4(a)に示すように 4m のトリ線に張力を印加したうえで、取付金具を用いて保護線を取り付けた。なお、保護線とトリ線の間隔は 40mm とし、取付金具同士の間隔は 500mm とした。試験は、トリ線とすり板を接触させ、直流電源により加圧した状態ですり板を降下させることによ

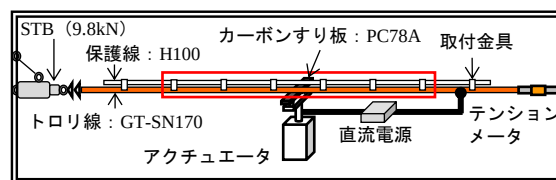
り連続的あるいは間欠的にアークを発生させ、トロリ線が断線するまでの張力 T をテンションメータで、各取付金具間の中央の保護線のひずみ①～⑤を保護線上面に張り付けたひずみゲージで測定した。

図5にアーク電流と試験終了時間の関係を示す。ここで、トロリ線が断線に至る前にアークが消弧してしまい、完全に断線させることができない場合もあったため、トロリ線が完全に断線した場合を「溶断」、溶断には至らなかったものの、溶損が著しい状態を「溶損」として示している。また、試験終了時間とは、溶断の場合ではトロリ線が断線した時間、溶損の場合ではアークが完全に消弧した時間とする。図5より、一般的な架線のトロリ線断線時間は数秒～20秒程度であるのに対し³⁾、今回の試験終了時間はすべて150秒以上であり、複合架線のトロリ線の断線抑制効果が確認できる。一般的な架線では、アーク電流が大きいほどトロリ線断線までの時間は短くなるが³⁾、今回の試験ではその傾向はあまり見られなかった。これは、複合架線ではトロリ線が降下するため、連続的にアークを発生させることが困難であり、間欠的なアークの発生に伴って温度も間欠的に上昇したためであると考えられる。なお、トロリ線の降下量は、すべての場合において保護線とトロリ線の間隔の40mm以上であった。

4.2 AS箇所におけるアーク検知

保護線のひずみからアークの発生を検知する手法について検討する。なお、これ以降に記載するひずみの番号は図4に対応している。

図6にアーク発生時と平常時（アークが発生していない時）における保護線のひずみの推移の一例を示す。アーク発生時についてはひずみ①～⑤の中でトロリ線断線時に最大の値を示したものの推移を示す。平常時についてはひずみ①～⑤のすべてを示し、熱電対で測定した保護線の温度も併せて示す。図6(a)の時間軸は秒単位であり、アークが発生すると保護線のひずみが急激に上昇していることがわかる。一方、図6(b)の平常時の保護線のひずみは温度と同様にゆるやかに変化していることがわかる。なお、各ひずみの値と保護線の温度は時間に対して線形で変化するとみなして温度変化に対する各ひずみの傾きを算出すると $21 \sim 25 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ であった。ここで、アーク発生時と平常時のそれぞれの場合において、1秒当たりの保護線のひずみ変化量の絶対値を図7に示す。図7より、アーク発生時には保護線のひずみが1秒間に $1 \sim 10 \times 10^{-6}/\text{s}$ 程度変化しているのに対し、平常時にはほとんど変化していないことがわかる。今回、平常時の測定では最大で $0.5 \times 10^{-6}/\text{s}$ 程度の变化量であった。このように、アーク発生時と平常時では、1秒当たりの保護線のひずみ変化量に大きな差異があるため、保護線のひずみ変化量からアークの発生を検知することが可能であると考えられる。ただし、保護線のひずみ変化量からアークの発生を検知する場合には、通常のパンタグラフの走行時や昇降時に発生する離線アークを誤検知する可能



(a) 全体図



(b) 拡大図 ((a)中の赤枠内)

図4 トロリ線断線試験概要図

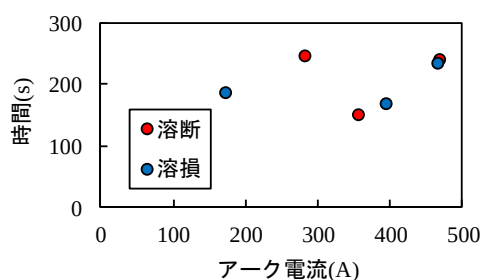
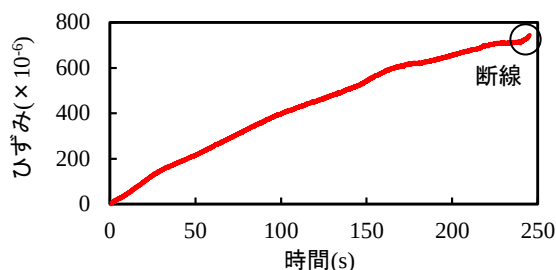
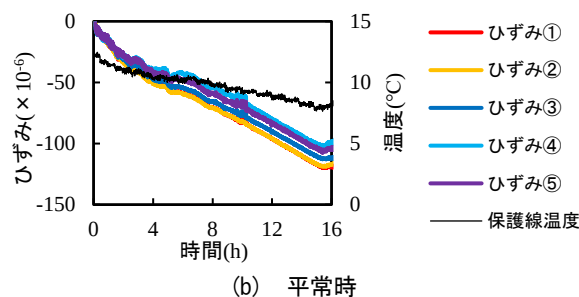


図5 アーク電流と試験終了時間の関係



(a) アーク発生時



(b) 平常時

図6 アーク発生時と平常時における保護線のひずみ

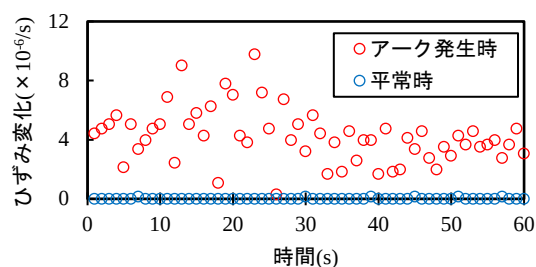


図7 アーク発生時と平常時における1秒当たりの保護線のひずみ変化量の絶対値 (1分間抜粋)

性があるため、閾値を超過した回数が数回（対象区間を走行する列車の1編成当たりのパンタグラフ数）以内であれば、パンタグラフ走行時の離線アークと判断することで誤検知を防ぐ方法が考えられる⁴⁾。

4.3 車両留置箇所におけるトロリ線の断線予兆検知

図5に示したように、複合架線のトロリ線断線時間は150秒以上であり、一般的な架線の断線時間に比べて長くすることができるため、この間にアークによるトロリ線の断線予兆が検知できれば、き電停止などの措置を施すことでトロリ線断線を回避することができると考えられる。

トロリ線断線試験終了直前における保護線のひずみの測定値と式(4)で求めた推定値を比較する。各試番において、ひずみ①～⑤の中で最大となった測定値と、式(4)で求めた保護線のひずみの推定値を表1に示し、これらの関係を図8に示す。保護線のひずみの最大値はひずみ①あるいはひずみ②で 700×10^{-6} 程度となり、推定値と概ね一致した。

トロリ線が断線する直前の保護線のひずみは式(4)から推測できることが確認されたが、式(4)からもわかるように、この値は張力と保護線の線種により決定する。そのため、保護線のひずみからトロリ線断線予兆を検知する場合には、トロリ線の標準張力とその変動を考慮して閾値を設定し、保護線のひずみがこの閾値を超過したらトロリ線が断線する恐れがあると判断する。

トロリ線断線予兆の検知が断線防止に有効であるためには検知に要する時間からトロリ線が断線するまでの時間（余裕時間）が重要である。そこで、提案手法を今回の試験に適用した場合の検知に要する時間と余裕時間を表2にまとめる。表2より、余裕時間はすべて50秒以上であり、き電停止などの措置をとるのに十分余裕のある時間が確保できることが確認できる。

5. まとめ

複合架線を架設した条件下において、エアセクションで発生したアークを検知する手法と、車両留置箇所におけるトロリ線の断線予兆を検知する手法について検討した。主な結果は以下のとおりである。

- (1) 1秒当たりの保護線のひずみ変化量をアーク発生時と平常時と比較すると、これらに大きな差異があることから、保護線のひずみ変化量からエアセクションに発生したアークを検知する手法を提案した。
- (2) 車両基地や駅等に留置されている車両のパンタグラフが冠雪によって降下する場合のトロリ線断線をき電停止などによって回避するために、複合架線を車両留置箇所に架設し、トロリ線断線までの時間を延ばしたうえで、保護線のひずみからトロリ線断線の予兆を検知する手法を提案した。

表1 トロリ線断線直前の保護線のひずみの最大値

トロリ線の状態	試番	推定値	測定値		
		保護線のひずみ ($\times 10^{-6}$)	保護線のひずみ ($\times 10^{-6}$)	測定箇所	張力 T (kN) (参考)
溶損	1	721	699	②	8.56
	2	709	627	①	8.41
	3	719	680	①	8.53
溶断	1	717	765	①	8.51
	2	674	706	②	8.00
	3	732	750	①	8.69

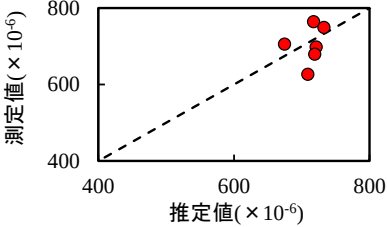


図8 トロリ線断線直前の保護線のひずみの推定値と測定値の関係

表2 トロリ線断線予兆検知に要する時間と余裕時間

トロリ線の状態	試番	検知に要する時間(s)	余裕時間(s)
溶損	1	178	56
	2	88	80
	3	74	111
溶断	1	85	161
	2	131	109
	3	72	79

- (3) 車両留置箇所におけるトロリ線断線予兆の検知手法を今回の試験に適用した結果、検知してからトロリ線断線までの余裕時間は50秒以上であり、き電停止などの措置をとるのに十分余裕のある時間が確保できることを確認した。

参 考 文 献

1) 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

2) 伊東和彦, 和田祥吾, 早坂高雅, 宮口浩一, 川原敬治, 前田佳伸: エアセクションにおけるトロリ線断線対策用複合架線の開発, 電気学会論文誌 D, Vol.140, No.6, pp.424-432, 2020

3) 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 (産業応用部門誌), 電気学会, Vol.127, No.9, pp.927-934, 2007

4) 近藤優一, 和田祥吾, 早坂高雅, 伊東和彦: 複合架線によるエアセクション箇所のトロリ線断線対策の提案, 鉄道総研報告, 鉄道総合技術研究所, Vol.34, No.9, pp.29-34, 2020