

複合架線によるエアセクション箇所のトリ線断線対策の提案

近藤 優一* 和田 祥吾* 早坂 高雅* 伊東 和彦**

Compound Catenary Preventing Break of Contact Wire at Insulated Overlap

Yuichi KONDO Shogo WADA Takamasa HAYASAKA Kazuhiko ITO

When a train comes to a standstill at an insulated overlap, breaking of contact wire may occur due to the arc generated between the pantograph and the contact wire. Therefore, we have developed a compound catenary to prevent the breaking of contact wires at the insulated overlap when a train is stopping. The proposed compound catenary has a function of extinguishing arc when the heat by the arc softens the contact wire. This paper describes the evaluation results of the current collection performance of the proposed compound catenary. In addition, it describes a monitoring method of the strain of additional wires to detect generation of the arc.

キーワード：エアセクション、断線、複合架線、アーク、集電性能、ひずみ

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）箇所に電車が停車することにより、トリ線断線事故が発生することがある。このようなトリ線断線の多くがAS箇所で停止したパンタグラフのすり板とトリ線との間に発生したアークが原因とされている。

図1にAS箇所に停止したパンタグラフのすり板とトリ線の位置関係を示す。ASは、電車線の電源系統を電車線間に設けた離隔によって区分するものであり、パンタグラフが高速で通過できるように、A線（車両進入側のトリ線）およびB線（車両進出側のトリ線）がパンタグラフの移行箇所で互いに引き上がる構成となっている。そのため、図1に示すように、片側のトリ線が引き上がり始める（I）あるいは（III）の位置にパンタグラフが停止すると、引き上がり始めたトリ線とすり板の間で不完全な接触状態となる。このような状態で電流が流れると、すり板とトリ線との間に生じたわずかな間隙にアーク放電が発生する。このアークによってトリ線の温度が上昇し、軟化によりトリ線の強度が低下して破断に至る。

これまでにもアークによるトリ線断線を防止する様々なハード対策が検討されてきたが、コストあるいはメンテナンス性の課題から広く普及していない。そこで、本稿では、低コストかつ保守性に優れたAS箇所のトリ線断線対策として開発した「AS複合架線」について報告する^{1) 2)}。

AS複合架線は、発生したアークを消弧する機能を有しているが、アークの発生を検知することができない

* 電力技術研究部 電車線構造研究室
** 電力技術研究部 き電研究室（現 西日本旅客鉄道株式会社）

め、AS複合架線を構成した箇所に車両が停車するたびに、電力係員は現地にてトリ線のしゅう動面を確認する必要がある。このような現地確認作業の削減を目的に、AS複合架線の保護線のひずみからアークの発生を検知する方法について検討した結果を併せて報告する。

2. AS複合架線の構造と特徴

既設のASに施工可能で、導入コストが低く、これまでと同等の保守性を有するというコンセプトのもとAS複合架線を開発した。図2にAS複合架線の概略を示す。AS複合架線は、シンプル架線のトリ線上部50mm程度の位置に、コンパウンド架線で使用実績がある銅より線H100（以下、保護線）を無張力で添架し、トリ線に

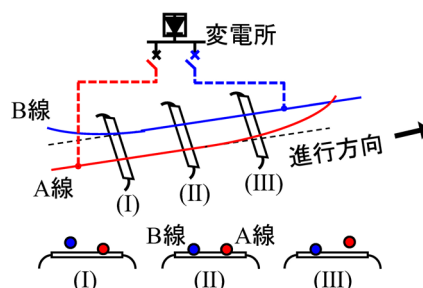


図1 AS箇所に停止したパンタグラフのすり板とトリ線の位置関係

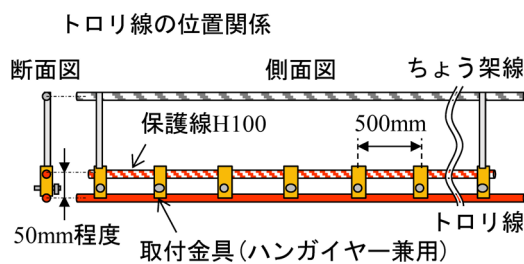


図2 AS複合架線概略²⁾

対して取付金具（以下、金具）により 500mm 間隔で固定しただけの簡単な構造である。トロリ線と保護線の間隔および金具間隔は、後述する試験結果により決定した。

AS 複合架線は AS 全体に設ける必要は無く、トロリ線とすり板が不完全な接触状態となる恐れがある箇所のみ構成すれば良い。

2.1 トロリ線と保護線の間隔

トロリ線とすり板の間で発生したアーク放電が AS 複合架線の保護線に転移すると、保護線が断線に至る可能性がある。そのため、アーク放電が保護線に転移しないようにトロリ線と保護線の距離を確保する必要がある。そこで、AS で発生する最大の電位差および電流をシミュレーションにより算出したうえで、開離アーク実験を行い、最大アーク長を導出した。

まず、汎用電気回路シミュレータ（Powersim 製 PSIM）を用いて直流区間の AS で発生する最大の電位差および電流を計算した。その結果、電車負荷が厳しい条件において、A 線と B 線との電位差は約 100V、すり板で両方のトロリ線を短絡した時の短絡電流は約 1000A であることがわかった¹⁾。

次に、発生し得る最大アーク長を明らかにするために、トロリ線とすり板を電極に用いた開離アーク試験をおこなった。試験では、直流電流を通电した状態で電極を開離してアーク放電が発生させ、アーク放電が消弧する直前のアーク長を画像解析ソフト（Photoron 製 TE-MA2D）により算出した。図 3 に試験で得られた電流と電圧およびアーク長の関係を示す。また、図中には、先述した AS における最大電位差 100V、最大電流 1000A となる条件を破線で示している。この破線を境に、左下の領域が AS で発生するアーク長の条件であり、この破線に接する 50mm が最大アーク長となる。ただし、アーク放電は電極間を直線的に短絡するのではなく、電磁力により屈曲を生じて短絡するため、両線の間隔は 50mm より短くても保護線に転移しないと考えられる。これにより、本稿の検討で用いる AS 複合架線におけるトロリ線と保護線の間隔を 40mm とし、これ以降も同様とする。

2.2 AS 複合架線のアーク消弧機能と金具間隔

2.2.1 アーク消弧試験概要

AS 複合架線のアーク消弧機能の検証および金具間隔の決定のため、アーク消弧試験を実施した。図 4 に試験概要を示す。各架線のトロリ線には GT-SNN110、ちょう架線には St90 を使用し、すり板にはカーボン系すり板 PC78A を使用した。図 4 に示すように AS 複合架線とシンプル架線をすり板で短絡した状態で直流電源装置により通电した。すり板を鉛直方向に昇降可能なアクチュエータ上に設置し、通电中にすり板を降下させるこ

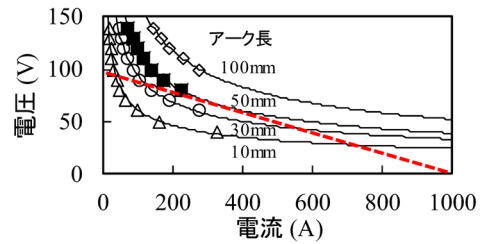


図 3 電流・電圧・アーク長の関係¹⁾

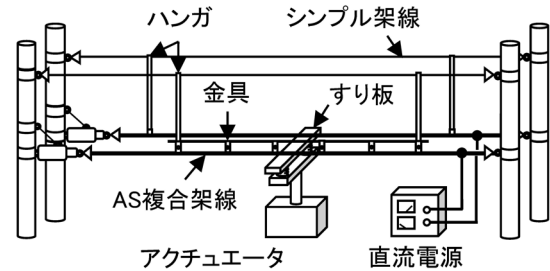


図 4 アーク消弧試験概要²⁾



図 5 アーク消弧試験状況

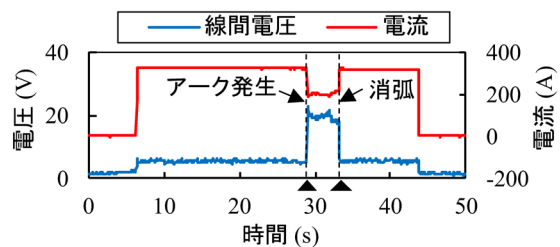


図 6 試験時の電流および電圧波形例²⁾

とで電位差 20～24V、電流 170～200A のアーク放電が発生させた。なお、すり板降下後もシンプル架線はすり板と接触し続けるように AS 複合架線より低く構成した。すり板の降下速度は 1mm/s 程度とし、AS 複合架線のトロリ線とすり板の離隔が 4mm のときに降下を停止し、アーク放電を維持させた。また、試験条件は金具間隔を 500mm、750mm、1000mm の 3 条件、すり板の線路方向の位置を金具間中央、金具直下、ハンガ直下の 3 条件として試験をおこなった。

2.2.2 金具間隔の検討

図 5 にアーク消弧試験の状況を、図 6 に試験時における電流および電圧の測定波形の一例を示す。測定開始後 6s で約 300A の通电を行い、29s ですり板の降下を開始すると線間電圧が 20V 程度に上昇し、トロリ線とすり板間でアーク放電が発生した。このとき、線間電圧は上昇し、電流は 200A 程度まで減少している。その後、34s でアーク放電が消弧し、線間電圧が低下した。

図7にAS複合架線のアーク消弧機能のメカニズムを示す。AS複合架線のトロリ線とすり板との間にアークが発生すると、トロリ線は局所的に温度が上昇して軟化する。このとき、温度上昇と張力によってトロリ線に伸びが生じるが、保護線が張力を受け持つとともに金具に回転モーメントが加わりトロリ線が降下する。これにより、トロリ線とすり板との間隙が解消され、トロリ線はすり板に接触し、アークが消弧する。

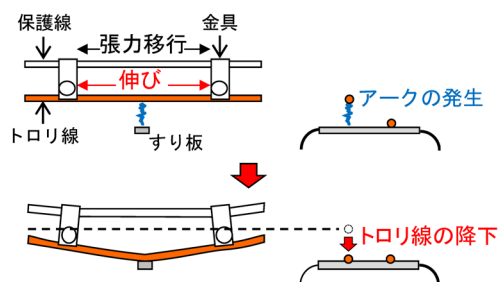


図7 AS複合架線のアーク消弧機能

表1にアーク消弧試験の結果を示す。ただし、金具間隔1000mmかつすり板の位置をハンガ直下とした試番は、アーク放電を安定して継続させることができなかった。上記の試番を除いたすべての条件において、アーク発生後にAS複合架線のトロリ線が降下し、表1に示すようにアークが消弧することを確認した。

表1 アーク消弧までの時間

金具間隔 (mm)	すり板位置		
	金具間中央	金具直下	ハンガ直下
500	4.3s	9.5s	14.2s
750	5.6s	12.6s	20.6s
1000	6.9s	22.8s	

金具間隔と比較すると、金具間隔が長くなるとアーク放電を消弧するために要する時間が長くなる傾向があることがわかった。保護線は無張力で添架するため、金具間隔が長くなるほど自重による保護線のたわみが大きくなる。トロリ線の温度上昇により、張力が保護線に移行すると、最初に保護線の張力によってたわみが低減され、それ以降にトロリ線の降下が始まるため、金具間隔が長いほどアーク放電を消弧するまでの時間が長くなると考えられる。なお、すり板の線路平行方向の位置の違いで比較すると、すり板が金具間中央に位置する場合に比べて、金具直下やハンガ直下に位置する場合の方がアーク放電を消弧するまでに要する時間が長くなる傾向があることがわかった。これは、アークによる入熱を金具で放熱することと、金具を取り付けている箇所のトロリ線には伸びが生じず、金具間のトロリ線まで熱が伝わるのに時間を要することが理由として考えられる。



図8 アーク消弧後のトロリ線外観例

以上のことから、AS複合架線の金具間隔は、同条件において、アーク放電を最も早く消弧することができる500mmとした。

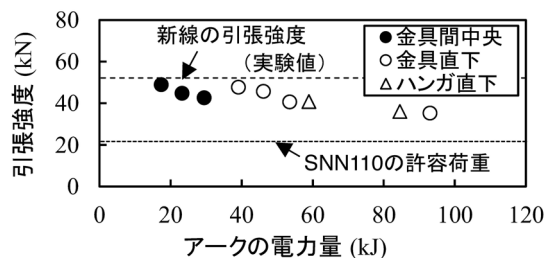


図9 アークによる電力量と引張強度の関係

2.2.3 試験後のトロリ線外観と引張強度

図8にアーク放電を消弧したトロリ線の外観例を示す。図8より、トロリ線のしゅう動面にアーク放電による溶融が局所的に生じていることがわかる。このようなアーク消弧後のトロリ線は熱による影響により、引張強度が低下している可能性がある。そこで、前述の試験で得られたアーク消弧後のトロリ線に対し、引張強度を測定した。図9にアークの電力量とトロリ線の引張強度の関係を示す。なお、図中には新品のGT-SNN110トロリ線の引張強度測定結果と、同トロリ線の許容荷重（メーカー公称の引張強度を安全率2.2で除した値）を示している。また、アークの電力量は、アーク発生時の電流および両線間の電圧、アーク継続時間の積とした。図9より、アークの電力量の大きさがトロリ線の引張強度に影響することがわかる。

引張強度測定の結果、アーク消弧後のトロリ線は、新線に比べて引張強度が低下しているが、許容荷重21.8kNに対し、十分な引張強度を有していることがわかった。ただし、このようなトロリ線は新線に比べて引張強度が低下しているため、トロリ線を張り替える際にはトロリ線に過張力が加わらないように実施することが望ましい。

3. AS複合架線の集電性能と摩耗状況の確認²⁾

既設のASに対してAS複合架線を架設すると、質量の増加による集電性能の悪化および局部摩耗の促進が懸念される。そこで、鉄道総研の集電試験装置にAS複合架線を構成し、集電性能を確認した。また、営業線にAS複合架線を架設し、集電性能の確認および架設1か月後の摩耗状況を確認した。

3.1 集電試験装置における集電性能確認試験

部分的に質量が増加するAS複合架線では、局部摩耗が促進される可能性がある。ASのようなオーバーラッ

ブの交差部におけるトロリ線摩耗を低減する方法として、B線の静高さをA線よりも高くする構成（以下、段差付き構成という）が提案されている³⁾。これを参考に、架線構成として、段差を設けない構成および30mmの段差付き構成の2条件で集電試験装置による走行試験を実施した。図10に集電試験装置に構成したAS複合架線の概略を示す。AS複合架線の構成範囲は両線ともに20m程度とし、AS複合架線のオーバーラップ区間は12.5mとした。A線のAS複合架線の途中からオーバーラップ区間を経てB線のAS複合架線にパンタグラフが移行し、その後、再度A線に移行するように架線を構成した。なお、試験には一般的な在来線用パンタグラフを使用した。

ASのようなオーバーラップ区間の離線を評価する際には最大離線時間が重要となる。図11に集電試験装置における最大離線時間の測定結果を示す。走行速度80km/hで大きな値を示しているが、これは集電試験装置の走行路不整による振動がパンタグラフと共振したためと考えられる。シンプル架線のASではほとんど離線は発生しないのに対し、AS複合架線では走行速度の上昇に伴い最大離線時間が大きくなる傾向があった。ただし、走行速度80km/hの結果を除けば、AS複合架線の離線時間は最大でも40ms程度であり、近年の新型車両の停電補償時間である60ms以下であることから集電性能に問題ないことがわかる。

3.2 営業線における集電性能および摩耗状況

シミュレーションにより架線構成を決定したうえで、営業線にAS複合架線を1か月間架設し、複数パンタグラフが通過することによる集電性能への影響と、トロリ線の摩耗状況を調査した。

シミュレーションには架線・パンタグラフ系運動シミュレーションソフト「架線道」⁴⁾を使用した。対象路線はASの通過速度が90km/h程度の営業線を選定した。架線構造はトロリ線がGT-M-SN170(9.8kN)、ちょう架線がSt135(19.6kN)のシンプル架線であり、パンタグラフの押上力は59Nである。AS複合架線の構成区間は径間中央から前後15mとした。

3.2.1 シミュレーションによるAS複合架線構造の検討

集電試験装置における試験結果より、速度90km/hの場合は段差付き構成を用いることで離線時間の低減効果が見られた。そこで、シミュレーションでの架線構成はASの交差部に20mmおよび30mmの2種類の段差を設けた場合と、段差を設けない場合の3通りで検討した。また、ハンガ間隔が集電性能に与える影響を確認するため、ハンガ間隔が5mと3.5mの場合を検討した。さらに、片側の架線のみAS複合架線を構成した時の集電性能についても検討した。これは、AS複合架線を構成する際、作業時間が十分確保できず、1回の夜間作業でA線および

B線を同時に施工できない場合を想定したものである。

パンタグラフはJR西日本の283系（パンタ種別：WPS28，パンタ数：2，パンタ間隔：40m），287系（パンタ種別：WPS28C，パンタ数：2，パンタ間隔：60m）を想定して最大離線時間を評価した。なお、参考として走行速度は90km/h以外に110km/h，130km/hの場合も評価した。

図12にAS複合架線における交差部の段差の違いによる最大離線時間のシミュレーション結果を示す。最大離線時間は走行速度に伴い大きくなる傾向があるが、速度110km/hまでは目安値の60msを超えないことがわかった。また、速度90km/h程度では段差を設けることで最大離線時間を低減できる可能性があることがわかった。

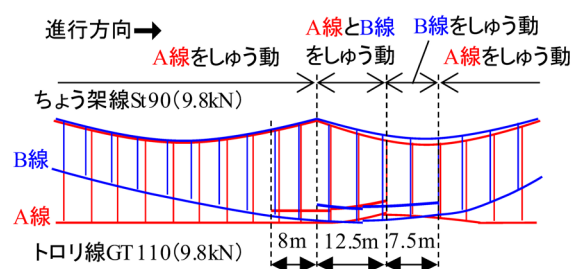


図10 集電試験装置に構成したAS複合架線

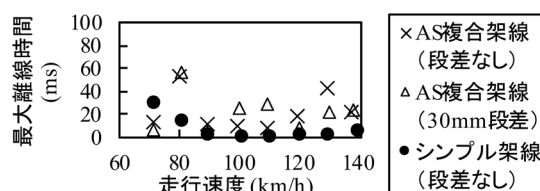


図11 最大離線時間測定結果（集電試験装置）²⁾

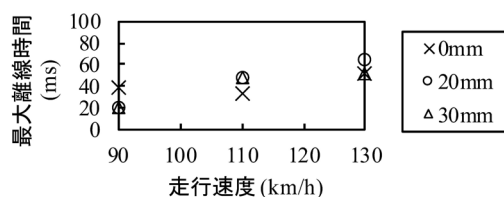


図12 AS交差部の段差と最大離線時間²⁾

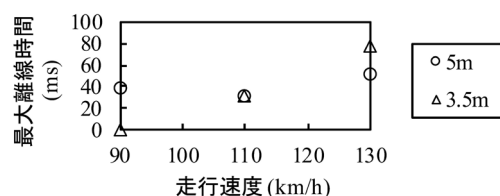


図13 ハンガ間隔と最大離線時間²⁾

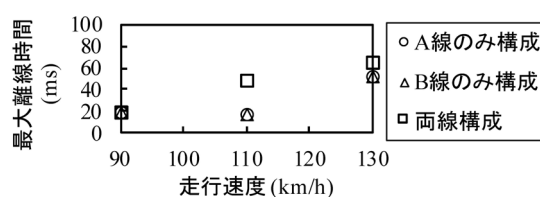


図14 AS複合架線の構成状況と最大離線時間²⁾

図 13 にハンガ間隔を 5m および 3.5m としたときのシミュレーション結果を示す。なお、架線構成は 20mm の段差付き構成とした。最大離線時間は 110km/h 以上の走行速度では、ハンガ間隔を短くすることによる優位性は見られなかったが、90km/h 程度の走行速度では、ハンガ間隔を 3.5m にすることにより最大離線時間を低減できる可能性があることがわかった。

図 14 に A 線および B 線のうち、いずれか片線のみ AS 複合架線を適用した場合のシミュレーション結果を示す。なお、架線構成は 20mm の段差付き構成とした。片線のみ AS 複合架線で構成した場合の最大離線時間は、両線に AS 複合架線を構成した場合よりも短くなることがわかった。

3.2.2 フィールド試験による集電性能および摩耗状況

図 15 に営業線に架設した AS 複合架線概略図を示す。前項の結果と営業線の AS 通過速度 90km/h を考慮し、AS 複合架線は、20mm の段差付き構成とし、ハンガ間隔は 3.5m とした。この AS 複合架線における集電性能および摩耗状況について評価した。

AS 複合架線の集電性能として、離線時間は紫外線検出式地上離線測定装置⁵⁾、トロリ線押上量は支持点のトロリ線に設置したポテンショメータ、トロリ線ひずみはトロリ線小弧面に貼り付けたひずみゲージによりそれぞれ測定した。

図 16 に最大離線時間の測定結果を示す。今回の試験では、AS 複合架線の架設を 1 日目に B 線、2 日目に A 線に対して実施したため、AS 複合架線を構成する前（シンプル架線）と B 線のみ AS 複合架線を構成した場合の測定結果も併せて示す。図 16 より、最大離線時間は走行速度が速くなるに伴い増加する傾向があるものの、両線に AS 複合架線を構成した場合で最大 30.5ms であり、目安値である 60ms 以下であった。また、B 線のみ AS 複合架線を構成した時の最大離線時間は、両線に構成した場合に対して同等以下であることを確認した。

図 17 に支持点におけるトロリ線押上量の測定結果を、図 18 にトロリ線ひずみの測定結果を示す。なお、トロリ線ひずみは、各線 3 箇所での測定位置における最大値を示す。図 17 より、トロリ線押上量は、A 線および B 線ともに目安値とされる 70mm 以内であり、AS 複合架線を構成したことによる異常なトロリ線の押上がりは見られなかった。また、図 18 より、トロリ線ひずみは、概ね $300 \sim 400 \times 10^{-6}$ であり、すべてのトロリ線ひずみは目安値 500×10^{-6} 以内であった。

AS 複合架線の摩耗への影響を確認するため、AS 複合架線の架設前と架設 1 か月後のトロリ線残存直径を測定した。測定は、トロリ線側面にレーザーを当てることによって残存直径を測定するハンディ型トロリ線摩耗測定器（電業製デジタルメータ）を用いた。

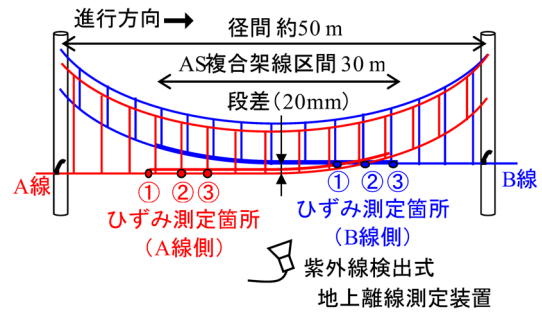


図 15 営業線における AS 複合架線概略図

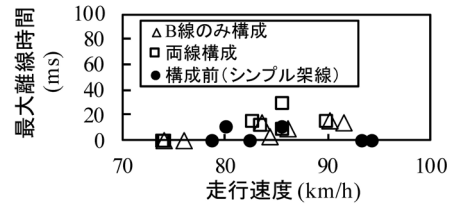


図 16 最大離線時間測定結果（営業線）²⁾

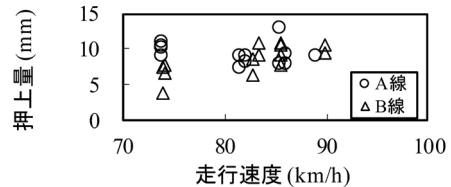


図 17 トロリ線押上量測定結果（営業線）²⁾

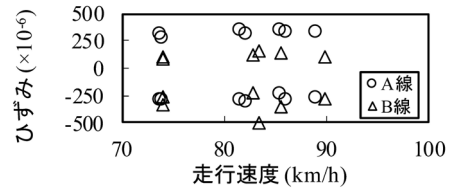


図 18 トロリ線ひずみ測定結果（営業線）²⁾

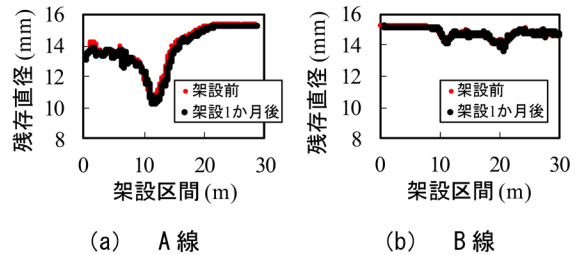


図 19 架設 1 か月後のトロリ線摩耗（営業線）²⁾

図 19 に残存直径測定結果を示す。なお、試験区間の年間通過パンタグラフ数は約 9 万である。図 19 より、A 線および B 線ともに急速な摩耗の進行は発生していないことが確認できる。

以上のことから、AS 複合架線の集電性能に問題ないことを確認した。また、AS 複合架線により急激な局部摩耗が発生しないことを確認した。

4. AS 複合架線におけるアーク検知と運用方法

これまでの検討により、AS 複合架線は AS における

トロッコ線断線に対して有効であり、集電性能等にも問題がないことが示された。

AS 複合架線の現状の運用方法としては、乗務員は AS 箇所にて車両が停止したことを指令に報告し、報告を受けた指令は電力係員に対し AS 複合架線のトロッコ線の溶融痕の有無を確認するよう指示するといった方法が考えられる。しかしながら、AS 箇所にて車両が停車したとしても必ずしもアークが発生するとは限らないため、このような運用方法では電力係員による現地確認回数が必要以上に多くなると考えられる。そこで、電力係員による現地確認回数の削減を目的に、AS 箇所における車両停車に伴うアークを自動的に検知する方法について検討した。

図 7 に示したように、アーク発生時にはトロッコ線の張力が保護線に移行するため、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アークを検知する方法について検討する。

アーク発生時と平常時（アークが発生していない時）の AS 複合架線の保護線のひずみを比較する。図 20 に保護線のひずみ測定概要図を示す。図 20 に示すように AS 複合架線のトロッコ線とすり板を接触させ、直流電源により通電した状態ですり板を降下させることによりアーク発生時の保護線のひずみ変化量を測定した。なお、トロッコ線の初期張力は 9.8kN とした。

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 21 に示す。図 21 より、アーク発生時には保護線のひずみが 1 秒間に $2.0 \sim 10 \times 10^{-6}/s$ 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 $0.5 \times 10^{-6}/s$ 程度の変化量であった。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を検知することが可能であると考えられる。例えば、1 秒間の保護線のひずみ変化量の閾値として $1.0 \sim 1.5 \times 10^{-6}/s$ を設定し、それを超過したらアークが発生したと判断する。ただし、これを適用する場合には、通常のパンタグラフの走行時に発生する離線アークを誤検知する可能性があるため、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。

5. まとめ

エアセクション（AS）箇所にて電車が停車したことにより発生するアークによるトロッコ線断線対策として低コストかつ保守性に優れた AS 複合架線を開発した。また、AS におけるアークの発生を検知する手法を提案した。

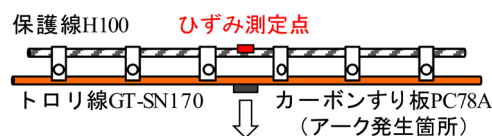


図 20 保護線のひずみ測定概要

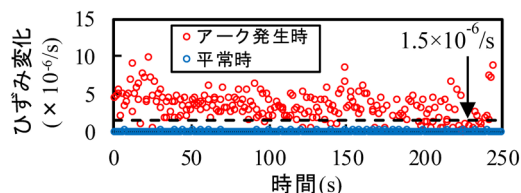


図 21 アーク発生時と平常時における保護線のひずみ変化量の絶対値（1秒あたり）

- (1) 低コストで保守性に優れた AS 箇所のトロッコ線断線防止対策として AS 複合架線を開発した。AS 複合架線はトロッコ線の上方に無張力の保護線を金具で取り付けるだけの簡単な構造でありながら、アークを消弧する機能を有している。
- (2) AS 複合架線を営業線に 1 か月間架設し、パンタグラフの離線時間が目安値以下であること、架設 1 か月後のトロッコ線に異常な摩耗が生じないことを確認した。
- (3) AS 複合架線の保護線のひずみから AS 箇所に停車した車両におけるアークの発生を検知する手法を提案した。

謝 辞

営業線における試験実施にあたり、ご協力をいただいた西日本旅客鉄道株式会社の関係者にお礼申し上げます。

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ッコ線断線対策の検討, 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ッコ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) 清水政利: 新幹線オーバーラップ構成の最適化, 鉄道総研報告, Vol.9, No.9, 1995
- 4) 真鍋克士: 「架線道」で集電系の弱点を再現する, RRR, Vol.55, No.3, 1998
- 5) 臼田隆之, 池田充: 紫外線検出式の地上離線測定装置の開発, 鉄道総研報告, Vol.23, No.2, pp.17-20, 2009