

PHC トロリ線を用いた新幹線用シンプル架線の開発

原田 智* 清水 政利*
池田 国夫** 佐藤 純一**
小谷野 昭一*** 近成 健二***

Development of Simple Catenary Equipment used PHC Contact Wire for Shinkansen

Satoshi HARADA Masatoshi SHIMIZU
Kunio IKEDA Junichi SATOH
Shouichi KOYANO Kenji CHIKANARI

With due consideration on life cycle energy of a contact wire, we have developed the PHC simple catenary equipment as a new overhead contact line system for high speed train operations. We installed the PHC simple catenary equipment on the main line of Tohoku-Shinkansen to evaluate the current collection performance. This paper presents these evaluation results.

キーワード：集電、高速鉄道、シンプル架線、PHC トロリ線、ダンパハンガ

1. はじめに

整備新幹線用の架線方式として、低コストで高速性に優れたCSシンプル架線が開発され、北陸新幹線（高崎～長野）¹⁾をはじめ、東北新幹線（盛岡～八戸）、九州新幹線（新八代～鹿児島中央）に採用されている。CSシンプル架線は東北新幹線における性能確認試験により、現在の新幹線における営業最高速度である300km/hまで対応可能な性能を有していることが確認されている²⁾。しかし近年、更なる高速度での営業運転の気運が高まっており、300km/hを超える速度に対応する電車線路設備が必要となることが予想される。

また、地球温暖化やリサイクル等の資源循環型社会構築への社会的関心が高まり、鉄道においても環境保全や環境負荷軽減への配慮が求められており、トロリ線の摩擦低減による張替周期の延伸や、リサイクル性に優れた銅合金トロリ線の採用などが必要になってきている。

このため、架線系に関する調査、シミュレーションによる性能予測、研究所内における走行試験等の基礎的検討を行い、PHCトロリ線を採用した新たなシンプル系架線（PHCシンプル架線）を選定した。今回、開発の最終段階として、PHCシンプル架線を新幹線の営業線に実際に架設し、特性調査を実施したので報告する。

2. PHC シンプル架線の概要

2.1 架線構成

図1にPHCシンプル架線の概要を示す。トロリ線には、CSトロリ線（銅覆鋼トロリ線）と同等の機械的強度、すず入りトロリ線と同等以上の導電率を有するPHCトロリ線（析出強化型銅合金トロリ線：Precipitation-Hardened Copper alloy contact wire）を採用している。PHCトロリ線は無酸素銅にCr, Zrを添加した銅合金で耐摩耗性に優れており、CSトロリ線と比較してライフサイクル中の環境負荷が低い³⁾。PHCトロリ線の断面積は110mm²、張力は19.6kNとして波動伝搬速度の向上を図っている。表1に主なトロリ線の諸元を示す。また、シミュレーションや過去の高速走行試験の結果から現在の整備新幹線の車両条件（2個パンタグラフ、間隔約50m）を考慮すると、シンプル系架線では300km/h超で後続パンタグラフが受ける架線振動を抑制する対策を施す必要がある。そこでPHCシンプル架線では、径間周期のパンタグラフ振動およびトロリ線の残留振動等を抑制するため、支持点前後にダンパハンガを採用した構成とした⁴⁾。

2.2 ダンパハンガの仕様

表2にダンパハンガの主な仕様を示す。ダンパハンガはコイルばねによるばね機構とユニット内の摩擦力を利用した減衰機構で構成されている。営業線では、無荷重時のストロークが73mmおよび84mmである2種類のダンパハンガを実際に架設した。

* 電力技術研究部（電車線構造）
** 東日本旅客鉄道株式会社
*** 鉄道建設・運輸施設整備支援機構

特集：電力技術

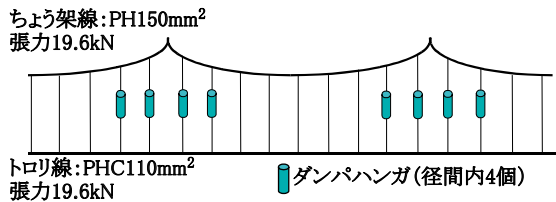


図1 PHC シンプル架線の構成

表1 各種トロリ線の主な諸元（新線時）

線種	質量 (kg/m)	導電率 ^{*1} (%)	引張荷重 ^{*1} (kN)	波動伝搬速度 ^{*2} (km/h)	摩耗限度 ^{*2} (mm)
GT110mm ²	0.988	97.5	38.2	—	—
GT-Sn110mm ²	0.982	70	40.2	—	—
CS110mm ²	0.935	60	65.1	521	8.34 ^{*3}
PHC110mm ² (架設試験品)	0.989	80.6	64.0	506	8.20 ^{*4}

*1 PHC110mm²は実測値，その他は仕様等の最小値
*2 張力19.6kN時トロリ線のみ，*3 安全率2.5，*4 安全率2.2

表2 ダンパハンガの主な仕様

	タイプ1	タイプ2
ばね定数	1500 N/m	
ダンパ定数	50 Ns/m (等価的設計値)	
標準荷重 (50N) 付加時の動作長		

3. PHC シンプル架線の架設状況

3.1 PHC シンプル架線の静高さ

営業線に架設したPHCシンプル架線の概要を表3に示す。本架線を東北新幹線下り線の1ドラム約1300mに約4年間、試験的に架設した⁵⁾。その際、1ドラムを3区間に分け、一般ハンガのみを架設した区間、およびタイプ1、タイプ2のダンパハンガをそれぞれ架設した区間を設け(図2)、集電特性を比較した。

PHCシンプル架線の現地架設後、トロリ線高さ・摩耗測定器⁶⁾を用い、トロリ線の静高さを測定した。図2に測定結果を示す。トロリ線静高さの変動は1径間内ではほぼ±20mm以内の範囲であり、PHCシンプル架線を架設したドラムの高さ構成は良好である。

3.2 検測車による測定

PHCシンプル架線の列車走行時における状態を確認するため、検測車によるデータ収集を行った。図3にPHCシンプル架線を架設したドラム付近の測定結果を示す。PHCシンプル架線のドラムではトロリ線偏位が100～150mm程度であり、パンタ点高さの標準偏差が12.7mmとなっていた。このパンタ点高さの標準偏差は、隣接したドラムの標準偏差21.7mm、27.3mmと比較して小さく、PHCシンプル架線を架設したドラムは他のドラムと比較して架設精度が高いといえる。

表3 PHC シンプル架線の架設概要

架設箇所	東北新幹線下り線
距離	約1300m
径間長	37～48m
架高	1500mm
ハンガ間隔	標準5m
偏位	100mm (1径間半サイクル)

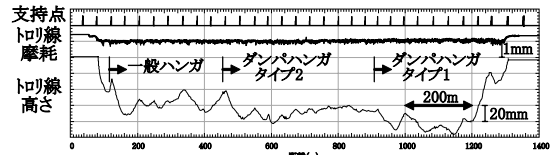


図2 PHC シンプル架線のトロリ線静高さ測定結果

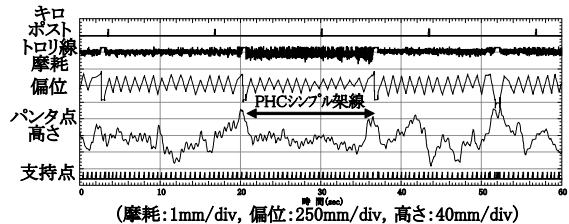


図3 検測車によるパンタ点高さ測定結果

4. PHC トロリ線の摩耗推移

営業線に架設したPHCシンプル架線におけるPHCトロリ線の摩耗推移を評価するため、摩耗測定を約4年間継続的に実施した。測定はトロリ線高さ・摩耗測定器を用い、トロリ線の残存直径をレーザで検出することにより行った。残存直径の測定値から架設したPHCシンプル架線のドラム全体の直径摩耗率、および面積摩耗率を求めた結果を図4、図5に示す。比較のため、以前同じ箇所に架設したCSトロリ線の摩耗率も併せて示す。

図4および図5より、架設約4年後のPHCトロリ線の直径摩耗率は0.021mm/万パンタ、面積摩耗率は0.054mm²/万パンタであることがわかる。これらの値は、同じ箇所で架設試験を実施したCSトロリ線の摩耗率と比較して小さく、それぞれ81%、70%程度となっている。また、図2のトロリ線摩耗波形に顕著な局部摩耗は見られないことから、架設したPHCトロリ線の摩耗状態は良好であるといえる。

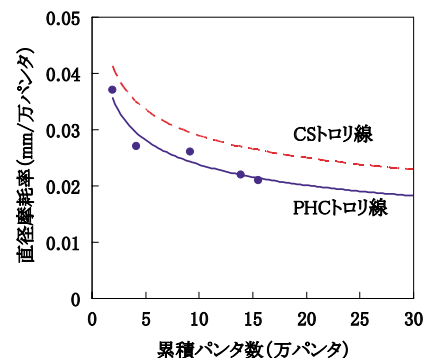


図4 PHC トロリ線の平均摩耗率推移（直径摩耗率）

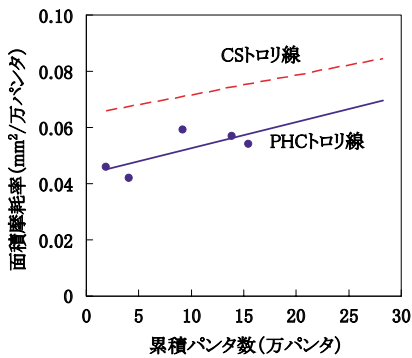


図5 PHCトロリ線の平均摩耗率推移（面積摩耗率）

5. コネクティングハンガイヤーの開発

トロリ線の高さ構成，または曲線引金具やコネクタ金具などの架線金具の荷重によってはトロリ線に局部摩耗が発生し，トロリ線の張り替え周期が短くなることがある。このような局部摩耗は，トロリ線高さの調整や架線金具の軽量化により抑制することができる。しかし，シンプル架線ではちょう架線とトロリ線を直接接続するため，コンパウンド架線と比較してコネクタ金具が大型化し，取り付け箇所の摩耗量が大きくなる傾向がある。そこで，ハンガイヤーとコネクタ金具を一体化したコネクティングハンガイヤーを開発した。

5.1 コネクティングハンガイヤーの仕様

コネクティングハンガイヤーの開発にあたり，各種仕様および性能の検討を行った。コネクティングハンガイヤーは図1のPHCシンプル架線に適用することとし，1径間について4本はダンパハンガ，その他をコネクティングハンガイヤーとする。コネクティングハンガイヤーの基本仕様は新幹線用のハンガイヤーおよびコネクタ金具の規格に準拠した。コネクティングハンガイヤーの基本仕様および性能を表4，表5に示す。ただし従来，コネクタ金具1本で供給していた電流がコネクティングハンガイヤーにより分散するため，コネクタ金具の電氣的仕様をそのまま適用するとオーバースペックとなる。そこで，コネクティングハンガイヤーの温度上昇や通過車両の最大集電電流等を考慮し，許容電流を500A・9秒間とした。また，コネクティングハンガイヤーに用いるリード線の仕様から，連続許容電流を120Aとした。これは車両停車時の最大補機電流30Aと比較して十分大きな値である。

表4 コネクティングハンガイヤーの基本仕様

項目	仕様
電車線方式	PHCシンプル架線
最長径間	60m
標準架高	950mm
標準ハンガ間隔	5m
最小ハンガ長さ	400mm
最大ハンガ長さ	950mm

表5 コネクティングハンガイヤーの基本性能

項目	性能
振動耐力*1	2 × 10 ⁶ 回以上
引張荷重耐力*2	3kN 1分間
ねじりモーメント耐力*2	2.5kN-cm 1分間
横滑り耐力*2	1kN 1分間
ハンガ引張耐力*2	1.5kN 1分間で著しい変形なし
ハンガ耐屈曲回数*2	16回以上
抵抗比*2	1以下
温度上昇*2	トロリ線，ちょう架線およびリード線等の許容温度以下
許容電流	500A (9秒間) 120A (連続)

*1 振幅±25mm，周波数3～5Hz

*2 振動耐力試験後，トロリ線に取り付けた場合

5.2 開発品の概要

前項の機械的・電氣的性能を満たしたコネクティングハンガイヤーを図6に示す。ハンガ上部は振動に対する耐久性が要求されるため，従来のハンガイヤーで実績があるりん青銅を用いることとした。ただし，りん青銅は導電性が低いため，ハンガ下部には導電性が高くりん青銅と同等の引張強さがあるクロム・ジルコニウム銅合金(MCZ/TL)を採用した。またリード線に用いるより線には，耐久性が高く導電率が十分高い錫インジウム銅合金より線(A-NN14mm² 88/0.45)を用いることとした。イヤヤー，クランプについては，導電性が高く架線金具として比較的扱いやすい析出硬化型銅合金(CRM-B)を採用することとした。

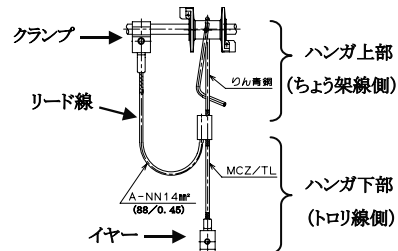


図6 開発したコネクティングハンガイヤー

5.3 コネクティングハンガイヤーの架設試験

開発したコネクティングハンガイヤーを営業線に架設して，特性の確認試験を実施した。試験では既存のコネクタ金具(MTコネクタ)を撤去し，前後2径間のダンパハンガを除く一般ハンガ10本をコネクティングハンガイヤーに交換して(図7)，交換前後で測定を実施した。測定項目はトロリ線の支持点押上量，支持点ひずみおよびハンガ点ひずみ，ハンガバー軸力およびひずみ，MTコネクタおよびコネクティングハンガイヤー電流とした。営業列車(速度約210km/h，270km/h)に対する各測定項目についての最大値を表6に示す。

交換前後でトロリ線の押上量および各点のひずみは，それぞれの目安値100mm，500 × 10⁻⁶以下である。また，コネクティングハンガイヤーのハンガバー軸力は一般ハ

特集：電力技術

ンガと比較して若干大きいですが、表5のハンガ引張耐力1.5kNと比較して十分小さい。ハンガバーのひずみに関する目安値はないが、材料の機械特性から許容されるひずみは 2000×10^{-6} 以下となり、コネクティングハンガイヤーのハンガバーに生じるひずみは十分小さい。コネクティングハンガイヤーの電流は径間内で分散するため、同箇所に取り付けたMTコネクタと比較して小さくなり、最大123Aとなる。この値は許容電流500A（9秒間）以下であり、またコネクティングハンガイヤーが径間内に1本の場合でも、線区の車両条件を考慮すると通電電流が500Aを超えることはないと考えられる。以上により、開発したコネクティングハンガイヤーの営業線における使用は十分可能であるといえる。

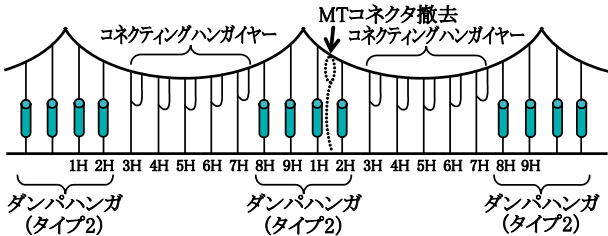


図7 コネクティングハンガイヤーの架設試験

表6 架設試験における各測定項目最大値

測定項目	一般ハンガ	コネクティングハンガイヤー
支持点押上量 (mm)	41	41
支持点トロリ線ひずみ ($\times 10^{-6}$)	330	360
ハンガ点トロリ線ひずみ ($\times 10^{-6}$)	251	246
ハンガバー軸力 ^{*1} (N)	143	190
ハンガバーひずみ ^{*2} ($\times 10^{-6}$)	445	432
MTコネクタ電流 (A)	157	—
コネクティングハンガイヤー電流 (A)	—	123

*1 第7, 第3ハンガイヤー根元より200mm位置
*2 第7, 第3ハンガイヤー根元位置

5.4 トロリ線摩耗量の比較

MTコネクタの代わりにコネクティングハンガイヤーを採用した場合について、トロリ線の局部摩耗抑制に対する効果を確認した。MTコネクタを撤去してコネクティングハンガイヤーを取り付けた直後、および20か月後にトロリ線高さ・摩耗測定を実施し、各箇所における残存直径から求めた摩耗量を表7に示す。MTコネクタの摩耗量は、PHCシンプル架線のドラムに含まれる6箇所の摩耗量を平均したものであり、コネクティングハンガイヤーの摩耗量は10箇所の平均である。また参考に、PHCシンプル架線における一般ハンガ(110箇所)の平均摩耗量を示す。

MTコネクタ箇所の平均摩耗量は0.15mmとなり、コネクティングハンガイヤー箇所と比較して1.27倍となっている。また、一般ハンガ箇所の平均摩耗量は0.10mmとなり、コネクティングハンガイヤー箇所の方が大きくなる。一般ハンガと比較してコネクティングハンガイヤーの質量は、ちょう架線クランプを含めたハンガ全体で0.49kg、クランプを除いたハンガ部分(トロリ線に作用する質量)

で0.15kg増加している。図2, 図3に示すように、PHCシンプル架線を架設したドラムの高さ構成は良好であり、一般ハンガとコネクティングハンガイヤーの摩耗量差は、質量の増加が原因になっていると推察される。ただし、MTコネクタ箇所と比較すると摩耗量は低減しており、コネクティングハンガイヤーの採用は局部摩耗抑制に対して有効な手段の一つに成り得ると考えられる。

表7 営業線におけるトロリ線平均摩耗量(20か月間)

箇所	平均摩耗量 (mm)	摩耗量比
MTコネクタ (6箇所)	0.15	1.27
コネクティングハンガイヤー (10箇所)	0.12	1.00
一般ハンガ (110箇所)	0.10	0.87

6. 高速走行試験における集電特性

東北新幹線で新幹線高速試験車による高速走行試験が実施された。その際、300km/h超の速度域におけるPHCシンプル架線の集電特性を確認するため、地上測定および車上離線測定を実施した。

6.1 地上測定

地上測定は一般ハンガ箇所、およびダンパハンガ箇所で行い、支持点トロリ線押上量、支持点トロリ線ひずみを主に測定した。また、ダンパハンガでの測定は図7の箇所で行い、ダンパハンガの動作長が範囲内に収まることを確認するためストロークも測定した。

今回の高速走行試験では、2種類の高速対応パンタグラフA, Bが用いられた。試験車のパンタグラフ条件を図8, 表8に示す。パンタグラフAでは275~315km/hで2パンタ走行, 325km/hから1パンタ走行としている。また、パンタグラフBでは全ての速度で1パンタ走行としている。なお、PHCシンプル架線区間における試験車の最高速度は、線路条件等の理由により355km/hとなっている。

地上測定の例として、試験車が315km/hで通過した際の時系列波形を図9に示す。ダンパハンガ箇所と比較して一般ハンガ箇所の支持点におけるトロリ線押上量の波形は、パンタグラフ通過後も振動が継続しているのに対し、ダンパハンガ箇所ではトロリ線の残留振動が抑制されていることがわかる。

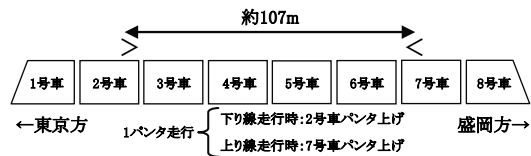


図8 新幹線高速試験車の概要

表8 PHCシンプル架線区間のパンタグラフ条件

条件	速度 (km/h)	パンタグラフ種別	個数
①	275 ~ 315	パンタグラフA	2
②	325 ~ 355	パンタグラフA	1
③	275 ~ 355	パンタグラフB	1

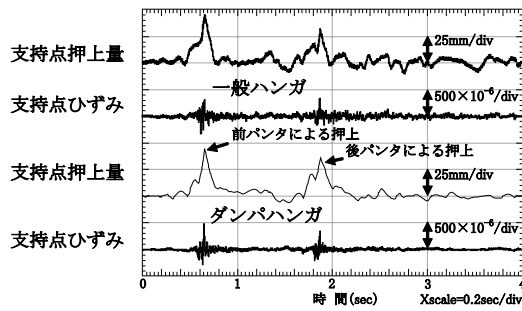


図9 地上測定における時系列波形 (315km/h)

6.1.1 トロリ線押上量

図10, 図11に各ハンガ箇所におけるトロリ線押上量の測定結果を示す。トロリ線押上量の最大値58mmはダンパハンガ箇所で見られるが、いずれのハンガ箇所でも目安値の100mmを超えることはなく、十分に余裕がある。また2パンタ走行である条件①では前パンタは反なびき方向となり揚力が高くなるため、トロリ線押上量は前パンタで大きくなっている。

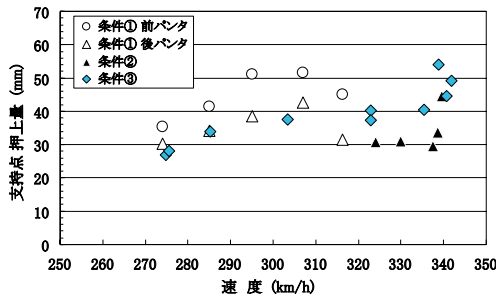


図10 一般ハンガ箇所のトロリ線押上量

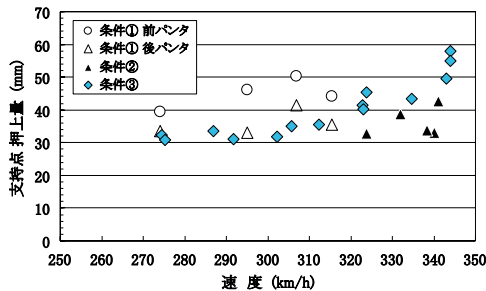


図11 ダンパハンガ箇所のトロリ線押上量

6.1.2 トロリ線ひずみ

図12, 図13に各ハンガ箇所におけるトロリ線ひずみの測定結果を示す。一般ハンガのトロリ線ひずみは最大で 713×10^{-6} 、ダンパハンガ箇所では 594×10^{-6} であった。また、トロリ線に生じるひずみの振幅(引張側と圧縮側の差)はダンパハンガ箇所と比較して一般ハンガ箇所で見られる傾向があり、ダンパハンガによるひずみの低減効果が見られた。ただし、ダンパハンガ箇所でも335km/h付近からひずみがトロリ線の目安値である 500×10^{-6} を超えることがある。しかし近年、PHCトロリ線の仕様が見直され、高強度仕様のPHCトロリ線の許

容ひずみを 1000×10^{-6} とする報告もあり⁷⁾、PHCシンプル架線における300km/h超の高速走行は十分可能であるといえる。また300km/h以下であれば一般ハンガでもトロリ線ひずみは 500×10^{-6} 程度以下となるため、この速度域では一般ハンガによる架線構成も可能であると考えられる。

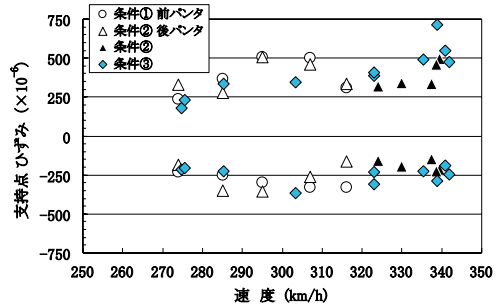


図12 一般ハンガ箇所のトロリ線ひずみ

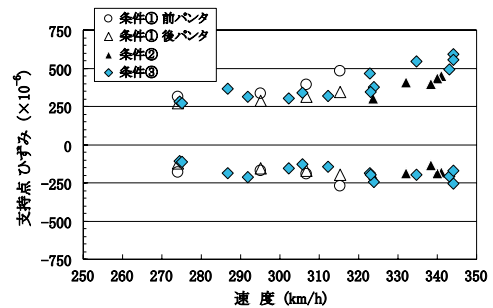


図13 ダンパハンガ箇所のトロリ線ひずみ

6.1.3 ダンパハンガのストローク

図14にダンパハンガのストロークを測定した結果を示す。ここでは、ストロークが比較的大きくなる第1ハンガの測定結果を示す。ストロークは最大45mmであり、タイプ2のダンパハンガの無荷重時における最大上方動作長の84mmに対して十分余裕がある。また、タイプ2と同等の機械特性を持つタイプ1の最大上方動作長73mmに対しても十分余裕があることから、300km/h超の高速走行にダンパハンガのストロークが問題となることはない。

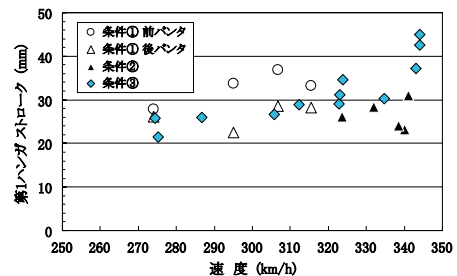


図14 ダンパハンガ(タイプ2)のストローク

6.2 車上離線測定

新幹線高速試験車に離線測定装置を取り付け、高速走行時の離線を測定した。ここで求めた離線率はドラム毎の値であり、PHCシンプル架線の離線には一般ハンガ箇

特集：電力技術

所も含まれている。また、参考のためPHCシンプル架線と隣接している高速対応ヘビーコンパウンド架線の測定結果も併せて示す。ここで高速対応ヘビーコンパウンド架線とは、110mm²のPHCトロリ線を用い、波動伝搬速度を向上させた架線である。なお、測定においてパンタグラフAの2パンタ走行では電流式離線測定方式、他の1パンタ走行では光学式離線測定方式を用いた。

図15にパンタグラフAによる離線測定の結果を示す。パンタグラフAの2パンタ走行では、PHCシンプル架線の離線率は最大12%となっており、比較的高くなっている。大きな離線は後パンタで生じているが、これは先に到来する反なびき方向のパンタグラフの揚力が大きく架線の振動を増大させ、次に到来するなびき方向のパンタグラフの揚力が小さいため架線の残留振動に追従できず、後パンタで離線が生じやすくなっていると推察される。なお、パンタグラフAの1パンタ走行では離線率は最大3.8%となり、良好な離線特性を示している。

図16にパンタグラフBによる離線測定の結果を示す。パンタグラフBでは300km/h超においてPHCシンプル架線で離線が発生するが、最大でも0.5%でありパンタグラフAと比較して低くなっている。これは、パンタグラフBがより高速走行に適した設計となっているためである。また、図3に示すように高速対応ヘビーコンパウンド架線の高さ変動が比較的大きいため単純には比較できないが、PHCシンプル架線の離線率との差は小さい。以上のことから、PHCシンプル架線の高さ構成を適切にすることにより、300km/h超の速度域においても良好な離線特性が得られると考えられる。

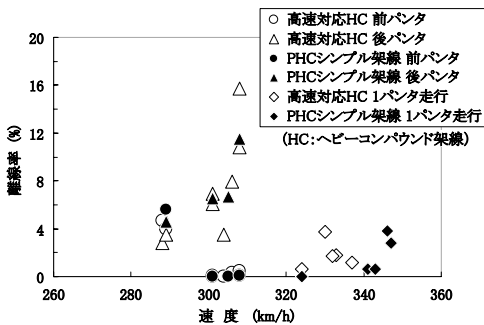


図15 PHCシンプル架線の離線率（パンタグラフA）

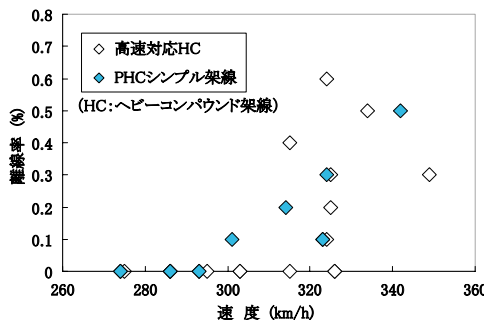


図16 PHCシンプル架線の離線率（パンタグラフB）

7. まとめ

ライフサイクルエネルギー等を考慮し、300km/h超の速度にも対応した新しいシンプル系架線であるPHCシンプル架線を開発し、東北新幹線の営業線に同架線を実際に架設し集電性能等の確認を行った。その結果は、次の通りである。

- (1) PHCシンプル架線の摩耗率は直径摩耗率で0.021mm/万パンタ、面積摩耗率で0.054mm²/万パンタであり、これらの値は同箇所架設したCSトロリ線の摩耗率と比較して低く、それぞれ81%、70%程度である。
- (2) 開発したコネクティングハンガイヤーについて架設試験を行い、機械的、電気的特性に問題なく、営業線における使用に耐えられることを確認した。
- (3) 高速走行試験において支持点のひずみが594 × 10⁻⁶となりトロリ線の目安値500 × 10⁻⁶を超えるが、高強度仕様のPHCトロリ線の許容値1000 × 10⁻⁶を考慮すると、300km/h超の走行は十分可能であると考えられる。
- (4) 高速走行試験における支持点押上量、ダンパハンガのばねストロークは許容値に対して十分余裕がある。
- (5) 高速走行試験において2パンタ走行では試験車のパンタグラフ条件により離線率が12%となるが、1パンタ走行では3.8%以下となり良好な離線特性を示していた。

最後に、試験の実施に際してご指導、ご協力いただきました関係各位に厚く御礼申し上げます。

文献

- 1) 金子誠：北陸新幹線の高速シンプル架線，鉄道と電気技術，Vol.7, No.12, pp.9-13, 1996
- 2) 網干光雄，中井一成，円谷哲男，金子誠：整備新幹線用シンプル架線の開発，鉄道総研報告，Vol.9 No.9, pp.37-42, 1995
- 3) 天海泰成，山本幸雄，矢島健児，須藤雄一郎，島田健夫三，長沢広樹：鉄道トロリ線の環境負荷評価，電気学会交通・電気鉄道研究会，TER-01-42, 2001.9
- 4) 清水政利，島田健夫三，横澤芳廣，塚越宏，小谷野昭一，嶋田隆三：速度300km/h超に対応したシンプル架線構造の開発，電気学会交通・電気鉄道研究会，TER-01-60, 2001.12
- 5) 清水政利，島田健夫三，横澤芳廣，塚越宏，鈴木実，嶋田隆三：速度300km/h超に対応したシンプル架線構造の開発，電気学会交通・電気鉄道研究会資料，TER-02-65, 2002.9
- 6) 清水政利，藤井保和：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, pp.19-24, 1995
- 7) 山下主税，菅原淳：PHCトロリ線の疲労特性，平成18年電気学会全国大会論文集 第5分冊，pp.245-246, 2006