

# 速度 300km/h 超に対応した高速シンプル架線の開発

常本 瑞樹\*      清水 政利\*      入倉 佳祐\*\*  
森本 大観\*\*\*      山下 主税#      池田 国夫##

## Development of Simple Catenary System for the Operation over 300 km/h

Mizuki TSUNEMOTO      Masatoshi SHIMIZU      Keisuke IRIKURA

Hiroaki MORIMOTO      Chikara YAMASHITA      Kunio IKEDA

Compound catenary system for Shinkansen line has seen a period during which its large-scale renewal is required. In order to facilitate renewal and to reduce maintenance costs, the simple catenary system should be installed to the Shinkansen lines concerned instead of the renewal of the compound catenary system. In this study, a new types of simple catenary system for the operation at 320 km/h, which is the maximum speed of commercial Shinkansen lines, is developed. Moreover, the simple catenary system for the operation at 360 km/h is also developed.

キーワード：電気鉄道，集電，架線，離線，電流容量，コネクタ

### 1. はじめに

新幹線の高速区間における架空電車線(以下、架線)は、1964年の東海道新幹線開業時からコンパウンド系の架線が用いられていた。1997年の北陸新幹線 高崎・長野間開業時に初めてシンプル系の架線として整備新幹線用高速シンプル架線<sup>1)</sup>が実用化された。このシンプル架線はコンパウンド系の架線が用いられている線区と比較して列車密度が低い線区用に設計されており、新幹線用ヘビーコンパウンド架線の7割程度の電流容量が確保されている<sup>1)</sup>。

近年、新幹線用ヘビーコンパウンド架線および新幹線用高張力ヘビーコンパウンド架線がちょう架線張替などの大規模な更新を行うべき時期を迎えており、これを機にコンパウンド架線と比較して部品点数が少なく、更新工事の容易化や保守コストの削減が期待できるシンプル架線が最高速度 300km/h 未満の線区で採用されるようになった。さらに、これを超える速度の線区においてもシンプル架線への更新の機運が高まっている。しかし、シンプル架線は、コンパウンド架線と比較して支持点間隔(電柱と電柱の間)周期でのパンタグラフの上下振動が大きくなりやすく、また電流容量を確保するためにちょう架線に太い(重い)線条を採用するとハンガ間隔

周期の接触力変動が大きくなりやすいため、これらによる離線の増大が高速化における課題である。

そこで本研究では、この課題に対処するため、トロリ線の波動伝播速度や架線の総張力を検討し、現在の営業線最高速度である 320km/h 域用のシンプル架線を開発することとした。また、これに加えて、新幹線のさらなる速度向上が望まれていることから、360km/h 域用のシンプル架線も開発した。なお、本研究において、離線率が良好な集電性能の目安値である 10% 以内となることを開発架線の性能目標とした。

### 2. 速度 300km/h 超用シンプル架線の構造の検討

#### 2.1 トロリ線の波動伝播速度

トロリ線の質量と張力は、トロリ線とパンタグラフ間の接触性能に大きく影響する。特に走行速度がトロリ線の波動伝播速度の7割程度よりも大きくなると、トロリ線とパンタグラフ間の離線が増大することが示されている<sup>2)</sup>。トロリ線の線密度  $\rho_l$ 、張力  $T_l$  における波動伝播速度  $c_l$  は、式(1)で表される。

$$c_l = \sqrt{\frac{T_l}{\rho_l}} \quad (1)$$

図1に、銅合金トロリ線の断面積、張力と、目安となる波動伝播速度の7割の関係を示す。断面積 110mm<sup>2</sup> および 130mm<sup>2</sup> は PHC トロリ線の諸元、断面積 150mm<sup>2</sup> および 170mm<sup>2</sup> は Sn トロリ線の諸元を用いて計算している。なお、高張力ヘビーコンパウンド架線(トロリ線の断面積 170mm<sup>2</sup>、張力 19.6kN)のトロリ線波動伝播

\* 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 東日本旅客鉄道株式会社)

\*\*\* 電力技術研究部 き電研究室

# 電力技術研究部 集電管理研究室

## 東日本旅客鉄道株式会社

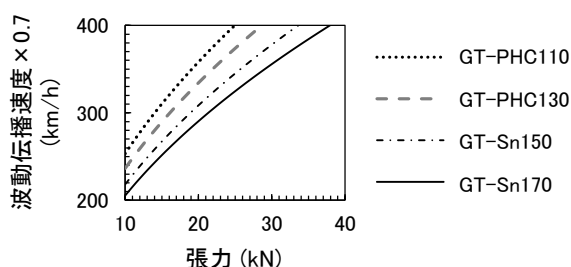


図1 トロリ線の張力と波動伝播速度の7割の関係

速度は411km/hであり、波動伝播速度に対して走行速度320km/hは78%となる。

## 2.2 トロリ線とパンタグラフ間の接触力変動

トロリ線とパンタグラフとの間の接触力は、過大の場合はトロリ線に著大な応力が生じてトロリ線の疲労破断などに至る恐れがあり、また過少の場合は離線が生じ、車両への電力供給を妨害することとなる。一般に、走行速度が高くなるにつれてさまざまな要因によりトロリ線とパンタグラフとの間の接触力変動が増加するため、この接触力変動を適切な範囲に保つ必要がある。接触力変動の要因としては、支持点間隔やハンガ間隔の周期など架線構造によるものやトロリ線高さ不整などがある。ここでは、支持点間隔およびハンガ間隔の周期の接触力変動について検討する。

支持点間隔周期の接触力変動は、主に径間内における架線の弾性が変化することによるもので、接触力変動振幅 $|F_{sp}|$ は、次式でモデル化される<sup>3)</sup>。

$$|F_{sp}| = \varepsilon B \frac{P_0}{K} i\omega_1 Z_p(i\omega_1) \quad (2)$$

$$B = \frac{1}{4 + \alpha_1^2 (1 - \beta_a^2)} \cdot \frac{(1 + \beta_a^2) + \sqrt{(1 - \beta_a^2)(1 - \beta_a^2 - \alpha_1^2 \beta_a^2)}}{\sqrt{1 - \beta_a^2 - \alpha_1^2 \beta_a^2 + \frac{i\omega_1 Z_p(i\omega_1)}{K}}}$$

$$K = 2\nu T, \nu = \sqrt{K_{s0}/T}, \beta_a = \nu/c_a, \alpha_1 = h_1/\nu, h_1 = 2\pi/S, \omega_1 = h_1\nu$$

ただし、 $P_0$ 、 $K$ 、 $T$ 、 $\varepsilon$ 、 $Z_p$ 、 $\nu$ 、 $c_a$ 、 $K_{s0}$ 、 $\beta_a$ 、 $S$ は、それぞれパンタグラフ静押上力、架線の平均等価ばね定数、架線総張力、架線弾性不等率、パンタグラフの機械インピーダンス、走行速度、架線全体の波動伝播速度、弾性支床弦モデルの平均分布ばね定数、架線全体の無次元化速度、径間長である。

また、ハンガ間隔周期の接触力変動は、主にハンガ点におけるトロリ線波動の反射によるもので、接触力変動振幅 $|F_{hg}|$ は、次式でモデル化される<sup>2)</sup>。

$$|F_{hg}| = \frac{2\rho_t g L_h}{\pi} |\gamma_R| \left| \frac{Z_p}{Z_t + Z_p} \right|_{\omega=\omega_0} \left| \frac{Z_p}{Z_t + Z_p} \right|_{\omega=\omega_0} \frac{(1 + \beta_t)\beta_t}{1 - \beta_t} \quad (3)$$

$$\omega_0 = 2\pi\nu/L_h, \omega_v = \omega_0(1 + \beta_t)/(1 - \beta_t), \beta_t = \nu/c_t$$

ただし、 $\rho_t$ 、 $g$ 、 $L_h$ 、 $\gamma_R$ 、 $Z_t$ 、 $\beta_t$ は、それぞれトロリ線の

線密度、重力加速度、ハンガ間隔、ハンガ点における反射係数、トロリ線の機械インピーダンス、トロリ線の無次元化速度である。また、ハンガ点における反射係数 $\gamma_R$ は、式(4)で表される。

$$\gamma_R = -\frac{Z_m}{Z_t + Z_m} \quad (4)$$

ただし、 $Z_i$  ( $i = t, m$ ) は線条の機械インピーダンスであり、式(5)で表される。添字 $i$ は、 $t$ がトロリ線を、 $m$ がトロリ線を吊架している線条を示す。

$$Z_i = 2\sqrt{\rho_i T_i} \quad (5)$$

## 2.3 線条断面積および張力の検討

### 2.3.1 320km/h 域用高速シンプル架線

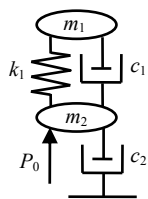
#### (1) 接触力変動計算

トロリ線は、保守等を考慮して、まず走行速度320km/h域用の高張力ヘビーコンパウンド架線と同じ断面積170mm<sup>2</sup>、張力19.6kNで検討した。ちょう架線については、電流容量を考慮して硬銅より線とし、許容荷重等を考慮して断面積200mm<sup>2</sup>のPH200を採用することとした。ちょう架線は張力が高いほど、式(2)より、架線の平均等価ばね定数 $K$ が上昇して支持点間隔周期の接触力変動振幅が低下する一方、式(3)～式(5)より、ちょう架線の機械インピーダンス $Z_m$ 、ハンガ点における反射係数 $\gamma_R$ が上昇するためハンガ間隔周期の接触力変動振幅は増加する。そこでハンガ間隔周期の接触力変動振幅について、走行速度320km/h域用の高張力ヘビーコンパウンド架線と比較して検討することとした。パンタグラフ条件は、表1に示す走行速度300km/h超に対応したパンタA<sup>4)</sup>を参考にして、簡単のため1質点モデルとし、その質量を12.4kg ( $m_1$ と $m_2$ の和)に設定した。

走行速度320km/hにおけるハンガ間隔周期の接触力変動振幅を式(3)より見積もった結果、高張力ヘビーコンパウンド架線は115Nであった。一方、シンプル架線では、総張力39.2kNで150N、総張力53.9kNで170Nであり、高張力ヘビーコンパウンド架線よりも35～55Nほど大きい。そこで、ハンガ間隔周期の接触力変動振幅を低減するため、トロリ線の波動伝播速度上昇を検討した。具体的には、トロリ線の摩擦代等を考慮して、トロリ線の断面積(質量)は変更せず、張力を22.54kN(2.3tf)へ増加することとした。トロリ線張力22.54kNの場合では、ハンガ間隔周期の接触力変動振幅は、総張力39.2kNで101N、総張力58.8kNで122Nとなり、高張力ヘビーコンパウンド架線と同等の接触力変動振幅となる。よって、トロリ線張力は22.54kNで検討することとした。なお、トロリ線の断面積170mm<sup>2</sup>、張力22.54kNでは波動伝播速度は440km/hであり、波動伝播速度に対して走行速度320km/hは73%となる。

表1 パンタグラフ条件

パンタグラフ	パンタ A	パンタ B
$m_1$ (kg)	0.6	9.2
$m_2$ (kg)	11.8	8.5
$k_1$ (N/m)	10750	10600
$c_1$ (Ns/m)	0.0	80.0
$c_2$ (Ns/m)	81.0(両きき)	96.8(片きき)
$P_0$ (N)	54	54
揚力 (N) (300km/h 時)	前方 35.0 後方 35.0	前方 36.9 後方 62.1



(2) 動特性評価

式(2)および式(3)でモデル化された接触力変動振幅は、定性的評価には有用であるものの、定量的評価には信頼性に欠ける。さらに、複数のパンタグラフを搭載した編成において、後方パンタグラフでは、列車速度や前方パンタグラフとの間隔、径間長などに依存して前方パンタグラフによる架線上下振動の影響を受ける。そこで、パンタグラフ間隔が後方パンタグラフの集電性能に及ぼす影響を定量的に評価するため、架線・パンタグラフの動的挙動シミュレーションによる動特性評価<sup>5)</sup>を実施した。

パンタグラフ条件は、表1に示す走行速度300km/h超に対応したパンタA<sup>4)</sup>と走行速度300km/hまでの営業運転に対応したパンタBとした。検討する走行速度は営業速度を考慮して、パンタAは320km/hまで、パンタBは300km/hまでとした。それぞれパンタグラフ数は2台、その間隔は50～300m(25m刻み)とした。検討した架線は、トロリ線張力は22.54kN、総張力は39.2～58.8kN(4.9kN刻み)である。図2に、シミュレーションにより求めた離線率の速度特性例を示す。図2より、パンタAではすべての速度で離線が発生しない条件がある一方、パンタBではすべての条件で離線が発生している。図3に示す総張力と離線率の関係において示している離線率は、ある総張力に対応するすべての条件の離線率をプロットしたものである。同図より、総張力が大きいほど離線率の最大値が低下し、全体的に離線率が低下している傾向がみられる。

シミュレーションにおけるトロリ線高さは、理想的に平滑な条件としているが、実際の架線には支持点間隔の勾配や金具取付位置のずれなどの施工誤差に起因するトロリ線凹凸があり、これらにより接触力変動が生じる<sup>6)</sup>ため、シミュレーション結果よりも離線が増大する恐れがある。そのため、本検討では開発目標とした離線率10%の半分の5%程度を目安として、総張力を決定することとした。図3より、総張力が53.9kN以上の条件では、パンタA、パンタBとも離線率が最大5%程度となっている。よって、走行速度320km/h域用高速シンプル架線の総張力を53.9kNとした。

(パンタグラフ間隔)

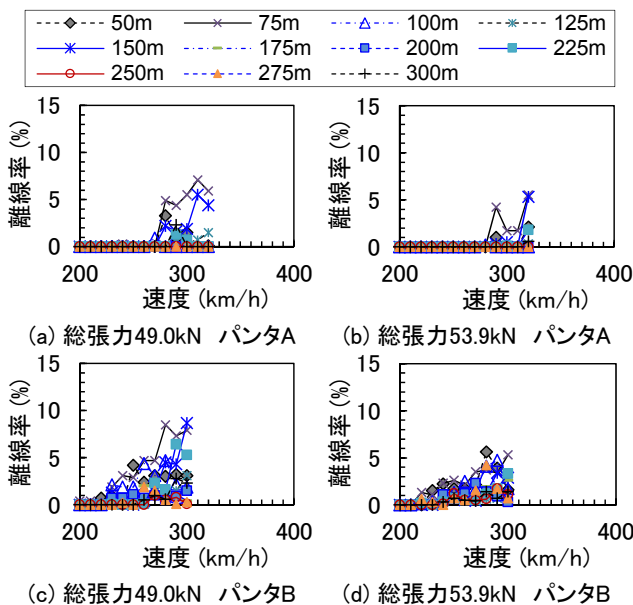


図2 離線率の速度特性

(320km/h 域用高速シンプル架線の検討)

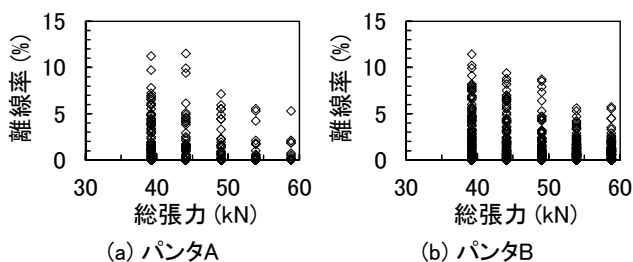


図3 総張力と離線率の関係

(320km/h 域用高速シンプル架線の検討)

2.3.2 360km/h 域用高速シンプル架線

トロリ線の張力は、トロリ線の張替工事や支持物、金具の強度などを考慮して決定する必要がある。そこで、トロリ線の張力は24.5kNとすることとし、これに対して波動伝播速度の7割を満たすためにトロリ線断面積は図1を参照して130mm<sup>2</sup>とした。この条件でのトロリ線波動伝播速度は528km/hであり、波動伝播速度に対して走行速度360km/hは68%となる。ちょう架線の線条については走行速度320km/h域用架線と同様に、電流容量を考慮して硬銅より線とし、許容荷重等を考慮して断面積200mm<sup>2</sup>のPH200を採用することとした。

(1) 接触力変動計算

式(3)より見積もった走行速度360km/hにおけるハンガ間隔周期の接触力変動振幅は、総張力39.2kNで66N、総張力58.8kNで75Nであり、高張力ヘビーコンパウンド架線の走行速度320km/hにおける値(115N)よりも40～50Nほど小さく、問題ない範囲であると考えられる。

(2) 動特性評価

図4に、架線・パンタグラフの動的挙動シミュレーション

特集：電力技術

ンによる総張力と離線率の関係を示す。同図より、図3の走行速度320km/h域用架線と同様に、総張力が大きいほど離線率の最大値が低下し、全体的に離線率が低下している傾向がみられる。また、図4より、良好な集電性能の目安値である離線率10%に対して、49.0kN以上ではすべて目安値以内となっている。さらに、総張力が53.9kN以上の条件では離線率の最大値が5%程度となっている。よって、走行速度360km/h域用高速シンプル架線の総張力を53.9kNとした。

以上の検討結果に基づいて、走行速度320km/h域用および走行速度360km/h域用の高速シンプル架線の諸元を、表2に示すとおりに定めた。なお、表2には、高張力ヘビーコンパウンド架線の諸元も示している。

3. 電流容量の検討

前章で検討した高速シンプル架線について、電車線の電流容量と温度上昇量を計算した。なお、比較として高張力ヘビーコンパウンド架線についても同様の計算を行った。列車速度については、300km/h、320km/h、360km/hとした。また、列車間隔は6分間隔(10本/h)と10分間隔(6本/h)とし、参考として4分間隔(15本/h)の場合についても検討した。なお、従来の諸検討を参考として、以下に記す仮定をした。

- 変電所(SS)1箇所脱落においても速度やノッチの制限無しで定時輸送を可能とすることを前提とし、現状新幹線における変電所配置を参考として、図5に示す延長き電系統で電流容量の検討を行う。30km地点(き電区分所:SP)と末端(被延長SS)の2箇所のみで上下タイとする。装柱は全線明かり標準装柱模擬とする。電源周波数は50Hzとする。
- 全線一律条件とするため、位置固有の条件となる停車駅、勾配、曲線はいずれも無しとする。ただし、走行抵抗は新幹線では明かり区間とトンネル区間で差が顕著なため、電源変電所側の40kmをトンネル区間、末端側の20kmを明かり区間と仮定し、電気鉄道ハンドブック<sup>7)</sup>の700系16両編成とE2系1000代10両編成の走行抵抗の計算式を用いる。
- 与えられた列車速度と区間種別における走行抵抗から、その速度で均衡力行となる機械仕事率を求め、車両の総合効率90%・力率1.0・パンタ点電圧25kVを仮定して1編成あたり集電電流を編成種別毎に求める。
- 列車の運行は一定間隔・一定速度均衡力行のパターンダイヤ(図6)とする。
- 温度上昇は、通電電流が最大となる箇所が電源変電所の直近であることから、その箇所を明かり区間の一般的な想定条件(周囲温度40℃、風速0.5m/s、輻射係数0.9、日射0.1W/cm<sup>2</sup>)とする。

- 列車位置に対するT相(電車線一括)の電流ならびに電車線の線条別分流比を予め数表として求めておき、列車間隔と列車速度にしたがって各列車を配置したときの電流を合算して、電源変電所直近におけるトロリ線電流と温度上昇量を算出する(図7)。

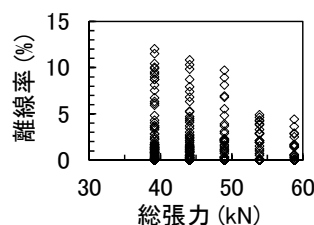


図4 総張力と離線率の関係

(360 km/h 域用高速シンプル架線の検討, パンタ A)

表2 検討により決定した架線の諸元

No.	架線	トロリ線 (標準張力)	補助ちよう架線 (標準張力)	ちよう架線 (標準張力)
1	320km/h 域用 高速シンプル	GT-SNN170 (22.54kN)	—	PH200 (31.36kN)
2	360km/h 域用 高速シンプル	GT-PHC130 (24.5kN)	—	PH200 (29.4kN)
3	高張力ヘビー コンパウンド	GT-Sn170 (19.6kN)	PH150 (9.8kN)	St180 (24.5kN)

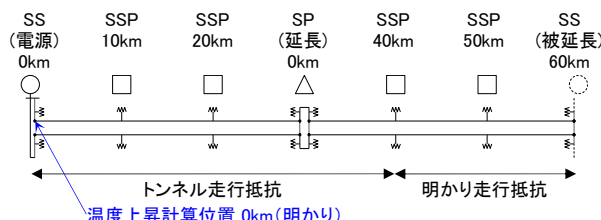


図5 電流容量・温度上昇検討用き電系統

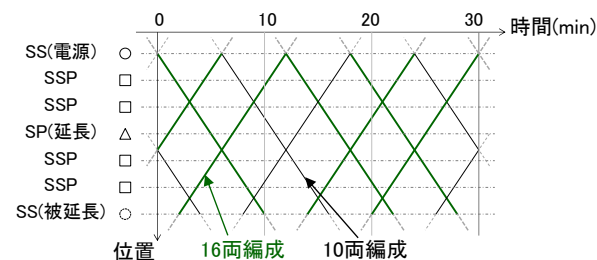


図6 パターンダイヤ例

(6分間隔, 360km/h, 16両編成と10両編成の割合2:1)

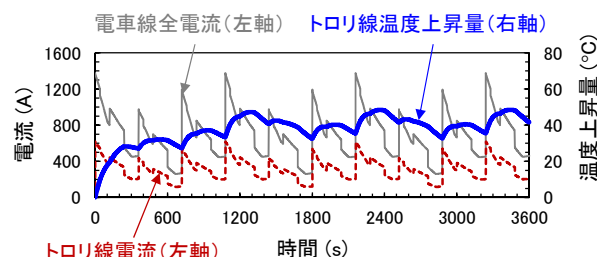


図7 温度上昇量計算例(下り線0km位置)

表3に、温度上昇計算結果を示す。すべての架線において最も厳しい条件として、トロリ線が標準張力に対して安全率を満たす最小の断面積（表3のトロリ線残存率）まで摩耗した場合で計算した。トロリ線温度の計算結果が許容温度である90℃以下であれば、温度上昇面で運行に耐え得るものと考えられる。320km/h域用および360km/h域用の高速シンプル架線は、6分間隔の全列車320km/h運転においてトロリ線最高温度は90℃以下である。一方、360km/h運転において、トロリ線最高温度は90℃を超えており、全列車を16両編成で運転することは温度上昇面で困難となる。10両などの短編成列車が混在する状態ではトロリ線最高温度は90℃以下であり、360km/h域用高速シンプル架線は使用に耐え得るものと予想される。なお、参考の4分間隔は、いずれの条件もトロリ線最高温度は90℃を超える。

最低電圧概算値は、変電所無負荷電圧57.4kV（T相・F相間の値、パンタグラフ・レール間に換算すると28.7kV）、き電用変圧器片座容量60MVA、百分率インピーダンス(%Z)=11.7%（受電短絡容量含む）としたときに、表3中の320km/h条件において、16両編成・6分間隔の場合は320km/h域用高速シンプル架線で25.7kV、360km/h域用高速シンプル架線で25.6kVとなり問題ない。ただし、この電圧降下は変電所き電用変圧器によるものも含んでいる（T-R間換算27.7kV）。一方、360km/h条件において、16両編成と10両編成の割合を2:1とした場合は360km/h域用高速シンプル架線で22.9kVとなるが、新幹線の最低電圧22.5kVを満たしている。

#### 4. 高架高用コネクタの検討

新幹線における架線の架高（支持点におけるちょう架線とトロリ線の距離）は、コンパウンド架線では明かり区間が1500mm、トンネル区間が1100mmであり、整備新幹線のシンプル架線では950mmである。コンパウンド架線からシンプル架線へ更新する場合には、施工、費用などの観点から架高を変更せずシンプル架線とする

表3 温度上昇計算結果

No.	架線条件	分流比 (計算値) (p.u.)	列車 間隔 (min)	列車条件	外気温40℃時 トロリ線最高温度(℃)	
					列車速度(km/h)	
					320	360
1	320 km/h 域用 高速シンプル (トロリ線残存率 67.5%)	ちょう架線:0.547 トロリ線:0.460	(4)	全列車 16両編成	103.1	132.0
			6	全列車 16両編成	75.7	88.7
			10	全列車 16両編成	62.8	67.9
2	360 km/h 域用 高速シンプル (トロリ線残存率 79.6%)	ちょう架線:0.561 トロリ線:0.450	(4)	全列車 16両編成	111.5	145.6
			6	全列車 16両編成	79.5	94.7
				16両編成:10両編成 2:1	/	88.5
				16両編成:10両編成 1:1	/	80.4
10	全列車 16両編成	64.5	70.5			
3	高張力 ヘビーコンパウンド (トロリ線残存率 73.2%)	ちょう架線:0.155 補助ちょう架線:0.489 トロリ線:0.390	(4)	全列車 16両編成	86.9	106.3
			6	全列車 16両編成	68.3	77.1
			10	全列車 16両編成	59.5	62.9

※列車間隔4分は参考

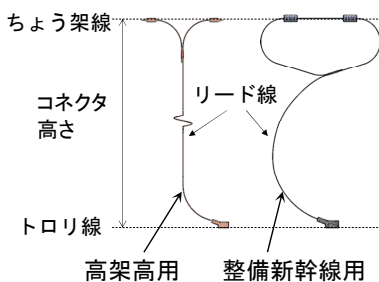


図8 コネクタの形状

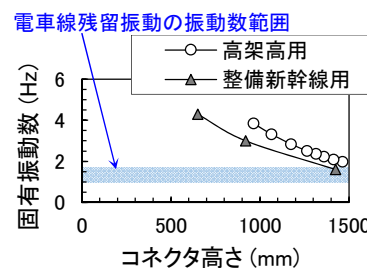


図9 コネクタ高さに対する1次固有振動数

方が有利である。しかしながら、ちょう架線とトロリ線間のコネクタは架高が高いほどコネクタの固有振動数が低下する<sup>8)</sup>ため、架高を1500mmから変更しない場合にはコネクタと架線の固有振動数が近くなり、コネクタが共振することによる疲労破断が懸念される。

そこで、図8に示すような、架高1500mm用に開発した高架高用コネクタ（リード線は軟銅より線100mm<sup>2</sup>）の疲労特性を、整備新幹線用コネクタ（リード線は軟銅より線40mm<sup>2</sup>）と比較して検証した。図9に、有限要素法による解析を用いて算出した、コネクタ高さに対する各コネクタの1次固有振動数を示す。また、文献8を参考に算出した電車線の残留振動における振動数範囲（1.0～1.7Hz）を同図に併記した。図9より、高架高用コネクタの固有振動数は整備新幹線用コネクタよりも高く、また電車線残留振動の固有振動数範囲外となり、高架高用コネクタは共振の恐れがないことを確認した。

#### 5. 営業線における架設試験

開発した高速シンプル架線を営業線に架設して、320km/hまでの速度範囲で集電性能測定等を実施した。架設した引留区間は、全区間明かりである。測定項目は、

特集：電力技術

離線（地上式）<sup>9)</sup>、トロリ線の押上量とひずみである。

図10～図12に、320km/h域用および360km/h域用の高速シンプル架線と、シンプル架線張替前の高張力ヘビーコンパウンド架線における測定結果をそれぞれ示す。これらの図には、架線・パンタグラフの動的挙動シミュレーションによる計算結果も示している。これらの図より、320km/h域用高速シンプル架線は、高張力ヘビーコンパウンド架線とほぼ同等の性能を有していることがわかる。なお、離線については、シミュレーションでは発生しないのに対して、320km/h域用高速シンプル架線および高張力ヘビーコンパウンド架線では測定において観測されており、これは2.3.1(2)で述べた架設誤差などの影響によるものと考えられる。

320km/h域用高速シンプル架線および360km/h域用高速シンプル架線とも開発架線の性能目標とした良好な集電性能の目安値である離線率10%以下であった。また、トロリ線の押上量とひずみは測定値と計算値は概ね同様の傾向であった。よって、両架線とも所期の性能を有していると考えられる。さらに、それぞれの架線について、約半年の架設期間が経過した時点で、トロリ線の局所的な摩耗進行もなく、良好な摩耗状態であった。

6. まとめ

新しい新幹線用高速シンプル架線として、営業線最高速度320km/h域用高速シンプル架線、さらなる速度向上に対応した360km/h域用高速シンプル架線をそれぞれ開発した。架線・パンタグラフの動的挙動シミュレーションおよび320km/hまでの速度範囲における営業線架設試験の結果より、両架線とも所期の性能を有していることを確認した。また、約半年の架設期間において、トロリ線は局所的な摩耗進行もなく、良好な摩耗状態であった。

今後、360km/h域用高速シンプル架線については、360km/h域において営業線の架設試験を実施する予定である。

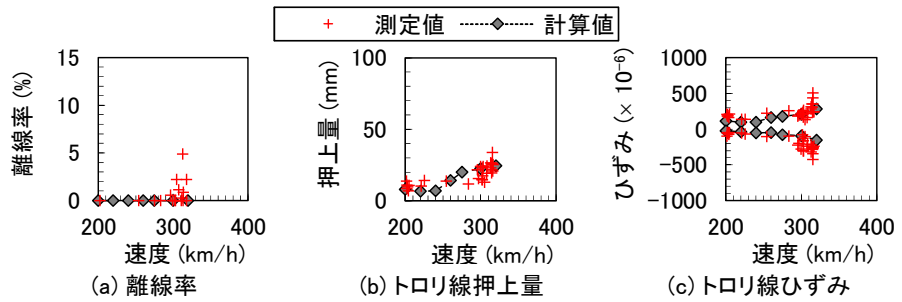


図10 動特性測定結果（320km/h域用高速シンプル架線）

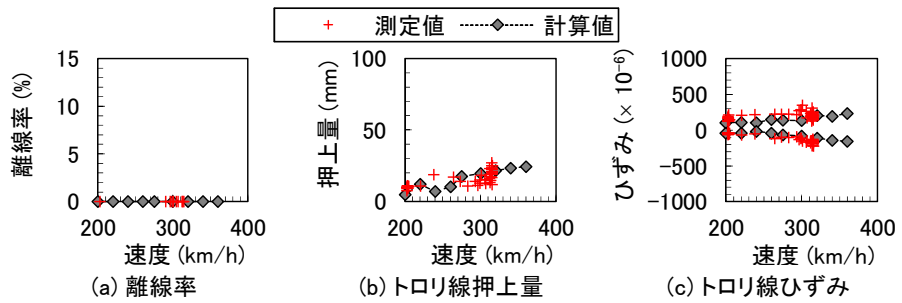


図11 動特性測定結果（360km/h域用高速シンプル架線）

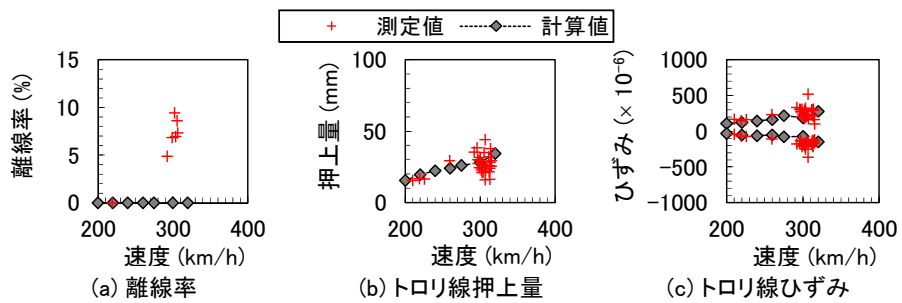


図12 動特性測定結果（高張力ヘビーコンパウンド架線）

文献

- 1) 網干光雄, 大浦泰, 小林輝雄, 円谷哲男, 上野勝禎, 金子誠：整備新幹線用高速シンプル架線の開発，電気学会論文誌D, Vol.115, No.4, pp.490-496, 1996
- 2) 網干光雄, 真鍋克士：架線・パンタグラフの接触力変動解析，鉄道総研報告, Vol.13, No.7, pp.7-12, 1999
- 3) Gilbert, G. and Davies, H.：Pantograph motion on a nearly uniform railway overhead line, PROC.IEE, Vol.113, No.3, pp.485-492, 1966.
- 4) 池田国夫, 西健太郎, 栗田健：新幹線の営業速度向上に対応した集電系の開発，電気学会論文誌D, Vol.131, No.2, pp.388-395, 2013
- 5) 網干光雄：動特性計算による架空電車線凹凸の評価法，電気学会論文誌D, Vol.126, No.7, pp.983-988, 2006
- 6) 網干光雄：架空電車線の凹凸精密測定とその評価法，電気学会論文誌D, Vol.124, No.9, pp.871-877, 2004
- 7) 電気鉄道ハンドブック編集委員会編：電気鉄道ハンドブック，コロナ社，2007
- 8) 山下主税, 小原拓也, 小林樹幸：電車線コネクタの疲労対策，鉄道総研報告, Vol.32, No.4, pp.17-22, 2018
- 9) 白田隆之, 池田充, 寺嶋充, 岡田健：紫外線検出式地上離線測定装置の開発，J-RAIL2008, pp.511-514, 2008