# 1507 300km/h を超える速度に対応した集電系の開発

正[電]〇池田 国夫 (鉄道総研) 正[機] 栗田 健 (東日本旅客鉄道)

Development of the current collection system suitable for over the speed of 300-km/h

Kunio IKEDA, Railway Technical Research Institute 2-8-38, Hikari-cho, Kokubunji City Takeshi KURITA, East Japan Railway Co.

We have developed current collection system, consisted of overhead catenary and pantograph, which enables commercial run over the speed of 320-km/h. In order to increase the commercial speed of Shinkansen, we have to reduce the noise level more than current condition. One of the most effective ways to reduce the noise level furthermore is to decrease the number of pantographs to one per a train set. In present Shinkansen train, usually it has two pantographs connected with a bus line. And they are installed to complement contact loss each other. Thus one-pantograph system requires high quality performance to follow the overhead contact wire more than ever. Therefore, we developed current collection system in order to achieve high-speed train operation with only one pantograph.

Keywords: current collection system, electric railway, speedup

## 1. はじめに

新幹線のパンタグラフ数は東海道新幹線開業当初の 1 編成あたり 8 台から削減されてきて、現在では、1 編成あたりのパンタグラフ数を 2 台とし、相互を母線で接続する方式が一般的となっている $^{(1)}$ 。

こうした中、今後、300km/h を超える営業速度を達成するためには、現状より一層の低騒音化が必須となる<sup>(2)</sup>。その方策の一つとして、空力音を低減させるために、パンタグラフ数をさらに削減し、列車1編成あたり1台とすることに取り組むこととした。列車の速度を向上していくと、パンタグラフがトロリ線から離れる現象(これを離線という)が急増することが知られている<sup>(3)</sup>。また、複数のパンタグラフが母線で結ばれていると、これらの離線率の積となる1編成あたりでみた離線率は低下するが、パンタグラフを1台とするとこうした効果が得られない。従って、より一層、離線の少ない集電系が必須とされる。筆者らは、360km/h 域までの走行を念頭に、その開発に取り組んだので報告する。

# 2. 集電理論

### 2.1トロリ線波動と接触力変動

列車の走行速度がトロリ線波動伝播速度に近づくと、ハンガ間中央付近での周期的な大きな離線が顕著となることが知られている<sup>(3)</sup>。

この現象を解析するために、図1に示すようなモデルを考える。ここで、ハンガ間の弛度凹凸によって励起され、進行方向に伝播し、直近ハンガ点で $\gamma_R$ 倍反射した波動がパンタグラフに入射して、接触力変動が生じると考えると、接触力変動振幅 $F_v$ は次式で表される $^{(4)}$ 。

$$|F_{\nu}| = \frac{2\rho g L_h}{\pi} |\gamma_R| \frac{Z_p}{Z_t + Z_p}|_{\omega = \omega_0} |\frac{Z_p}{Z_t + Z_p}|_{\omega = \omega_v} \frac{(1+\beta)\beta}{1-\beta} \cdots (1)$$

ここに、 $\rho$  はトロリ線線密度、g は重力加速度、 $L_h$  はハンガ間隔、 $Z_p$  はパンタグラフ機械インピーダンス、  $Z_t$  はトロリ線機械インピーダンスを表し、j を虚数単位として、

$$Z_p = j\omega m_1 + \frac{1}{\frac{j\omega}{k_1} + \frac{1}{D_2 + j\omega m_2}}, \quad Z_t = 2\sqrt{\rho T}$$
 ....(2)

である。また、 $\beta$ は、走行速度 V とトロリ線波動伝播速度 c との比で、トロリ線張力を T とすると、

$$c = \sqrt{T/\rho}$$

$$\beta = V/c$$
(3)

と求めることができる。さらに、 $\omega$  は入射波動の振動角周波数で、 $\omega_0$ および  $\omega_v$ は、次式で表される。

$$\omega_0 = 2\pi V / L_h, \quad \omega_v = 2\pi \frac{(1+\beta)\beta}{1-\beta} \frac{c}{L_h}$$
 ....(4)

(1)式において、 $\beta$ = 1 になると、接触力変動が急増し、 離線を生じやすくなることわかる。同式から、トロリ線波 動による接触力変動を抑制し、離線率を低減するには、 $\beta$ を小さく、すなわちトロリ線波動伝播速度を高くするこ と、また、トロリ線の軽量化やパンタグラフの機械インピ ーダンスを小さくすることなどが有効とわかる。

# 2.2 パンタグラフの追随特性

パンタグラフが電車線との接触を維持しようする性能を評価する指標として追随振幅がある。ここで、パンタグラフを剛体部材に接触させ、部材をある周波数で加振した際に、部材の振幅がある値を超えるとパンタグラフが周期的に離線する。この離線を開始する振幅を追随振幅という。パンタグラフを図2のように2元系でモデル化し、簡単のため減衰要素を無視すると、その追随振幅Yは次式で得られる<sup>(5)</sup>。

ここに、ωは振動角周波数、 $P_0$ は静押上力である。 高周波での近似ω→∞を考えると、

$$|Y|=|1/m_1\omega^2|P_0$$
 .....(6)

[No.09-65] 日本機械学会第16回鉄道技術連合シンポジウム講演論文集 [2009-12.2~4. 東京]

となることから、高速域ではパンタグラフ上部等価質量 m<sub>1</sub>の軽量化が有効となることがわかる。また、

 $\omega_0 = \sqrt{(m_1 + m_2)k_1/m_1m_2}$  .....(7)
で極大となり、追随振幅が大きくなる。

#### 3. 集電特性の評価法

集電系の動特性を評価する指標として、離線率、支持 点トロリ線押上量、トロリ線ひずみ量があり、これらの 基準として目安値が示されている<sup>(6)</sup>。

離線率については、現在 2 台のパンタグラフを 1 台とすることから、2 台のパンタグラフが同時に離線した場合を考慮し $^{(7)}$ 、従来の「良好な状態」とされる限度 20% から、 $0.2^2 = 0.04$  (4%) 以下とすることを目標とした。

表 1 に、開発にあたっての目標値(基準値)を示す。なお、表 1 中の GT-Sn と PHC は使用するトロリ線の線種を示す。PHC トロリ線は析出強化加工工程などを通じて機械的強度が強化されていることから、トロリ線ひずみ量の目標値を  $1,000 \mu$  以下とした<sup>(8)</sup>。

#### 4. 高速に適した架線

現在の営業速度(275km/h)~320km/h までは、経済性を考慮して既存のトロリ線(GT-Sn170mm²)を再用してその張力を高くすることで波動伝播速度の向上を行う。以後、この架線を320km/h 架線(catenary320)という。また、320km から360km/h までに対しては、高張力化に加え、トロリ線を軽量なもの(PHC110mm²)~と取り替える。以後、この架線を360km/h 用架線(catenary360)という。本論文で対象とするトロリ線の諸元を表2に示す。

# 5. 高速に適したパンタグラフ

# 5.1 パンタグラフの舟体

パンタグラフの追随性の向上を図るために、図3に示す3形式の舟体を試作し、現用のパンタグラフとともにパンタグラフ総合試験機において比較を行った。パンタグラフ総合試験機は、図4に示すように、パンタグラフを搭載する車両の特性を模擬するための加振台と、架線を模擬するための回転円板とにより構成され、パンタグラフの追随振幅特性、パンタグラフの離線測定やパンタグラフの耐久性(耐アーク、耐疲労、耐摩耗)試験等を行う試験機である。

舟体 1 は、現用パンタグラフに左右のばねとリンク機構を追加して可動性(動きやすさ)を高めた。舟体 2 はさらに、舟体 1 のすり板体を 2 分割して、各々のすり板体を単位に動作することで軽量化を行うとともに、リンク機構を追加してさらに可動性の向上を図った。舟体 3 は、すり板を現用の 4 分割から 10 分割へと小片化し、ばね支持構造を変更し、個々のすり板、もしくは隣接するすり板を単位に動作するようにして軽量化を図った。

各舟体に用いるばねは、現用パンタグラフの主枠に搭載して静押上力(54N)を作用させた際に、ストロークが±4mmとなるようなものを選定した。このストロークは現用パンタグラフの可動範囲(8mm)に合わせている。

試験は、加振無し、径間周期での加振、ハンガ間周期での加振に対して離線率を測定した。表3に試験条件を示す。また、表4に、図5に示すように追随振幅特性から求めたパンタグラフの等価定数を示す。

図 6 に、高速域で着目すべき 300km/h、ハンガ間周期 (16.7Hz)で加振した結果を示す。 舟体 3 が良好な結果となった。これは、 $m_1$ が他の舟体に比べて軽量であることが作用していると考えられる。 なお、現用パンタグラフ

では模擬架線(回転円板)が舟体端部に移ると、共振による舟体の変動が見られ、このため離線率が高くなった。

この結果を踏まえ、舟体3を採用することとした。以後、これを多分割すり板舟体と呼ぶ。

#### 5.2 パンタグラフの主枠

主枠には、図7に示す2形式を試作した。Type1は現用パンタグラフと同形なもので、Type2は下枠以下を風防カバー内に収め、騒音を抑制する形状としている。

図8に、多分割すり板舟体をTypel およびType2 それぞれの形状の主枠に搭載して、パンタグラフ総合試験機にて測定した追随振幅特性から求めたパンタグラフの等価定数を示す。

### 5.3 パンタグラフの配置

1編成あたりのパンタグラフ数は1台とするものの,図9に示すように、新幹線専用編成(はやて型)と新幹線-在来線直通編成(こまち型)との併結運転を計画している。従って、1列車あたりのパンタグラフ数は2台となる。

音源となる2台のパンタグラフは離して配置した方が 騒音は小さくなる。しかしパンタグラフを編成の先頭車 両に配置すると、境界層が発達していないために速い流 れがパンタグラフに当たるのでパンタグラフ音源のパワ ーレベルそのものが上昇し、集電系音は逆に大きくなっ てしまう恐れがある。

これら、2 台のパンタグラフは離して配置し、かつ先 頭車両に近い場所は避けるという条件を勘案し、高速試 験車両のパンタグラフを図9のように配置する。なお、 連結器を介して電気的に接続することは困難なことから、 これらパンタグラフ間の電気的な接続はない。

以後,本論文では第1パンタグラフを Type1,第2パンタグラフを Type2 とした場合について述べていく。

# 6. 運動シミュレーションによる特性の確認

以上に述べた,図8にモデル化したパンタグラフと表2に示すトロリ線を条件に、パンタグラフと架線の運動シミュレーション<sup>(10)</sup>により、離線率、支持点トロリ線押上量およびひずみ量の計算を行った。パンタグラフの揚力は、風洞試験結果を基に、Type1は300km/hで35N、Type2は300km/hで25Nとした。パンタグラフ間隔は、図9に示すように198mとした。

図 10 に、離線率の算出結果を示す。また、320km/h 用 架線における 320km/h までの離線率、トロリ線押上量・ ひずみ量の最大値は、それぞれ 1%、41mm、454 $\mu$ である。さらに、360km/h 用架線における 360km/h までの最 大値は、それぞれ 0.8%、49mm、522 $\mu$ であり、いずれも 開発目標値以内となる。

#### 7. フィールド試験

シミュレーション結果も良好であったことから,東北 新幹線において,図9に示すような編成の試験列車 FASTECH360を用いて,360km/h 域までの高速走行試験 を行った。試験に使用したトロリ線とパンタグラフの諸 元は,それぞれ表2,図8のとおりである。

図11に,第2パンタグラフでの離線率測定結果を示す。 第1パンタグラフの離線率は,最大0.5%である。また, 測定結果の最大値を表5に示す。いずれも開発の目標と した値以内に収めることを達成できた。

#### 8. まとめ

320km/h を超える営業速度を実現に向けて、1 編成あたりのパンタグラフ数を1台とできる, 離線の少ない集電系の開発を行った。その概要をまとめると,

- (1) 架線には、320km/h までに対し、張力を高くして既存のトロリ線を再用した。それを超える速度域に対しては、高張力化に加えてトロリ線の軽量化を行った。
- (2) パンタグラフには, 高速域の特性を向上させるために, 上部質量の軽量な多分割すり板舟体を導入した。
- (3)上記の電車線とパンタグラフを用いて走行試験を行ったところ、離線率、トロリ線押上量・ひずみ量について、開発目標値を達成することができた。

# 参考文献

- 鉄道総合技術研究所・鉄道技術講座「電車線とパンタ グラフ」、pp4・6-pp4・8,2008
- 2) 栗田健, 若林雄介, 山田晴夫, 堀内雅彦・新幹線高速 試験電車 FASTECH360 の騒音性能, 日本機械学会第 17 回環境工学総合シンポ 2007, No7-12, pp.54-57, 2007
- 3) 真鍋克士・新幹線架線の改善方法, 鉄道総研報告, vol.4, No.12, pp1-8, 1990
- 4) 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, pp7-12, 1999
- 5) 鉄道総合技術研究所編·電車線とパンタグラフの特性, 研友社, pp.37-43, 1993
- 6) 大浦泰・速度向上に伴う集電系の基礎技術とその動向(2),車両と機械、vol.3、No.12、pp31~pp34
- 久須美俊一,寺田泰隆・新幹線における同時離線の 発生状況,電学交通電気交通研究会,TER-02-41, pp11~pp14,2002
- 8) 菅原淳・高強度と高導電性を兼ね備えた PHC トロリ 線, RRR, 2009.4, pp.14-17, 2009
- 鉄道総合技術研究所編・電車線とパンタグラフの特性, 研友社, pp.58-64, 1993
- 10)網干光雄·動特性計算による架空電車線凹凸の評価法, 電学論 D, Vol.126, No.7, 2006

Table 1 Target value for development

C++ 1	II-1:0 [1	Strain [-]	
Contact loss ratio [%]	Uplift [mm]	GT-Sn	PHC
4	100	500 μ	$1,000 \mu$

Table 2 Specifics of contact wire

Speed range	Density [kg/m]	Tension [N]	c [km/h]	v/c
Current (~275km/h)	1.511 (GT-Sn)	17,640	389	0.71
Under 320km/h (275~320km/h)	1.511 (GT-Sn)	19,600	410	0.78
Under 360km/h (320~360km/h)	0.991 (PHC)	19,600	506	0.71

Table 3 Test conditions

	Oscillation	Speed	Frequency
Non vibration	0 mm	200,250, 300km/h	0Hz
Pole cycle vibration	20mm	200,250, 300km/h	1.1,1.4 1.7Hz
Hanger cycle vibration	2mm	200,250, 300km/h	11.1,13.9 16.7Hz

Table 4 Specifics of test product pantograph

	$m_{1 \text{ kg}}$	k <sub>1 N/m</sub>	$m_{2 \text{ kg}}$	$D_{2 \text{ Ns/m}}$
Head 1	4.6	23000	13.4	81
Head 2	1.1	14200	14.4	81
Head 3	0.6	10750	11.8	81

Table 5 Measured maximum values

	Catenary for under 320km/h		Catenary for over 320km/h	
	Value	Speed at	Value	Speed at
Contact loss ratio %	4.0	310km/h	3.2	345km/h
Uplift mm	67.5	326km/h	54.7	362km/h
Strain $\mu$	457	326km/h	576	362km/h

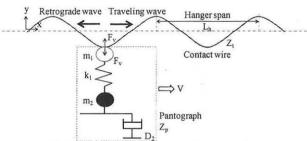


Fig.1. Model of pantograph and contact wire

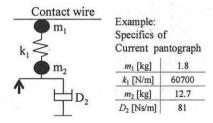


Fig.2 Pantograph model

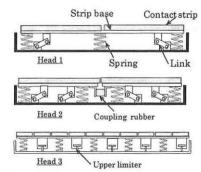


Fig.3 Test production pantograph head

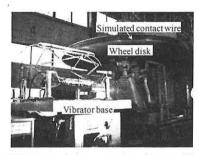


Fig.4 Pantograph integrated testing machine

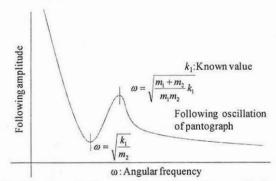


Fig.5 Pantograph characteristics of following amplitude

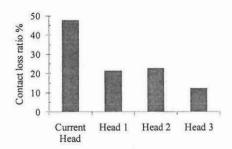


Fig.6 Results on Pantograph integrated testing machine

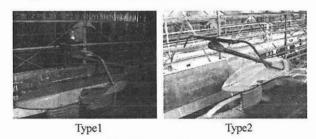
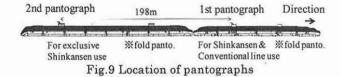


Fig.7 Figures of frame

$m_1$		Type1	Type2
. S	m <sub>1</sub> [kg]	0.6	0.5
1	k <sub>1</sub> [N/m]	10750	11000
$m_2$	m <sub>2</sub> [kg]	11.8	5.6
	$D_2$ [Ns/m]	81	48

Fig.8 Specifics of developed pantograph



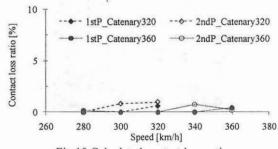


Fig.10 Calculated contact loss ratio

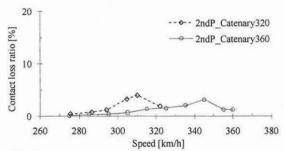


Fig.11 Measured contact loss ratio at 2nd pantograph