

き電ちょう架式コンパウンド架線の開発

常本 瑞樹* 早坂 高雅* 清水 政利*
近成 健二** 野口 利雄***

Development of Compound Catenary Equipment Equipped with Feeder Messenger

Mizuki TSUNEMOTO Takamasa HAYASAKA Masatoshi SHIMIZU
Kenji CHIKANARI Toshio NOGUCHI

Compound catenary equipment equipped with feeder messenger has been developed for meter-gauged railway line. This overhead contact line is able to make a train run at the speed of 160 km/h, and in addition, has the features of labor-saving maintenance and reduction of construction cost. The authors performed theoretical analyses and dynamic-characteristic evaluation to confirm the validity of develop the overhead contact line. Moreover, we conducted test run to verify the current collection performance of the overhead contact line.

キーワード：電気鉄道，架線，集電，き電ちょう架式，コンパウンド架線

1. はじめに

現在，国内の在来線における営業速度は最高 160km/h であり，ほくほく線と成田スカイアクセス線で営業運転されている。ほくほく線の架線は，明かり区間では高張力化したコンパウンド架線，トンネル区間ではダンパ付ばねハンガを取り付けたツインシンプル架線である^{1) 2)}。これらの架線は，トロッコ線とちょう架線の他にこれらへ電力を供給するき電線を架設した従来型の架線を 160km/h に対応させたものである。

近年，首都圏や関西圏の在来線においてき電ちょう架式の架線が多く導入されており，新線の建設時に採用されるだけでなく，従来型の架線からき電ちょう架式の架線への変更も行われている。き電ちょう架式架線は，ちょう架線にき電線の機能を統合し，ちょう架線にき電線と同等の電流容量を持つ線条を採用した架線である。もともとは主にき電線を設けるスペースがない断面積の小さいトンネル内を電化する時に採用されていた。き電ちょう架式の架線は，従来型の架線に比べて部品点数の削減やメンテナンスの省力化，建設コストの低減が可能であり，また美観が向上するなどの特長があることから注目されている³⁾。

そこで著者らは，160km/h の在来線高速走行に対応したき電ちょう架式架線「き電ちょう架式コンパウンド架線」を開発した。この架線は成田スカイアクセス線に導

入され，160km/h での営業運転が行われている。き電ちょう架式で 160km/h に対応した架線は，この架線が初めてとなる。本論文では，き電ちょう架式コンパウンド架線の集電性能に関する理論検討や試験，空力特性に関する試験について述べる。そして，き電ちょう架式コンパウンド架線の高速集電性能確認のため，成田スカイアクセス線の開業前に実施した現車走行試験について報告する。

2. き電ちょう架式コンパウンド架線の概要

2.1 架線構成

図 1 に，き電ちょう架式コンパウンド架線の概要を示す。図 1 には，現行のき電ちょう架式架線の例として，き電ちょう架線 2 条のシンプル架線も示している。き電ちょう架線 2 条のシンプル架線は，首都圏の線区やつくばエクスプレスなどで採用されており，最高 130km/h で営業運転が行われている。以下，図 1 に示した 2 つの架線について性能を比較する。き電ちょう架式コンパウンド架線を「FM コンパウンド」，き電ちょう架線 2 条のシンプル架線を「FM シンプル」と記す。

FM シンプルは上述したように首都圏の線区で用いられており，負荷電流の大きな高密度線区に対応した架線である。FM コンパウンドの電流容量が高密度線区にも対応できるよう，FM コンパウンドは FM シンプルと同じ線条（PH356 が 2 条と GT-M-Sn170）とすることとした。また，FM コンパウンドの総張力は，FM シンプルや新幹線用ヘビーコンパウンド架線と同じ 53.9kN とす

* 電力技術研究部 電車線構造研究室
** (独) 鉄道建設・運輸施設整備支援機構
*** 成田高速鉄道アクセス株式会社

特集：電力技術

ることとした。これは、金具、支持物の強度などの点で新たな開発要素が少なく、コスト面で有利であると考えられるからである。線条の張力配分は、波動伝播速度や最大径間長などを考慮して決定した。

2.2 集電性能

集電性能を良好に保つためには、トロリ線とパンタグラフ間の接触力が安定している必要がある。接触力が何らかの理由で変動して、過小となると離線が発生して電力供給の妨げとなり、過大となるとトロリ線に機械的なダメージを与える。以下に、集電性能について検討した項目について記す。

(1) 架線のばね定数

架線の上下方向のばね定数は一定であることが望ましい。しかしながら、実際には、径間の中央が最も押し上がりやすくなる。このため、パンタグラフは径間ごとに上下に運動することとなる。一般に、シンプル方式に比べてコンパウンド方式は、ばね定数の変動が小さいという特性がある⁴⁾。図2に、FMコンパウンドとFMシンプルの径間内におけるばね定数を示す。どちらの架線とも、ばね定数の最大値は支持点に近いハンガ点であり、最小値は径間中央である。FMコンパウンドは、FMシンプルに比べて径間内におけるばね定数の差が小さいことがわかる。径間内におけるばね定数の最大値、最小値、平均値をそれぞれ k_{max} , k_{min} , \bar{k} とすると、ばね定数の不等率 ε は、次式で表される。

$$\varepsilon = \frac{k_{max} - k_{min}}{2\bar{k}} \quad (1)$$

不等率 ε が小さいほど、走行するパンタグラフの径間ごとの上下運動が小さくなる。不等率 ε は、FMコンパウンドが0.36、FMシンプルが1.18である。FMコンパウンドの不等率は、FMシンプルの1/3程度となる。

(2) トロリ線波動伝播速度

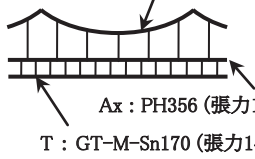

トロリ線の張力を T 、線密度を ρ とすると、波動伝播速度 c は、次式で表される。

$$c = \sqrt{\frac{T}{\rho}} \quad (2)$$

走行速度がトロリ線波動伝播速度の7割程度以上となると離線率が高くなる傾向にあることが示されている⁵⁾。また、弾性支床梁モデルにおいて、走行速度がトロリ線波動伝播速度に近づくにつれてトロリ線押上量とひずみが増加する⁴⁾。FMコンパウンドとFMシンプルはトロリ線の種別及び張力が同じであるので、トロリ線波動伝播速度はどちらも353km/hである。波動伝播速度の7割は247km/hであり、目標速度の160km/hにおいてはどちらの架線とも問題のない速度域であると考えられる。

(3) ハンガ点反射係数

ハンガ点反射係数が大きいほど、ハンガ点におけるト

No.	架線方式	架線構成
1	き電ちよう架式 コンパウンド架線 (FMコンパウンド)	 <p>FM : PH356 (張力24.5kN) Ax : PH356 (張力14.7kN) T : GT-M-Sn170 (張力14.7kN)</p>
2	現行のき電ちよう 架式架線の例 (FMシンプル)	 <p>FM : PH356×2 (張力19.6kN/条) T : GT-M-Sn170 (張力14.7kN)</p>

※ FM:き電ちよう架線, Ax:補助ちよう架線, T:トロリ線

図1 き電ちよう架式コンパウンド架線の架線構成

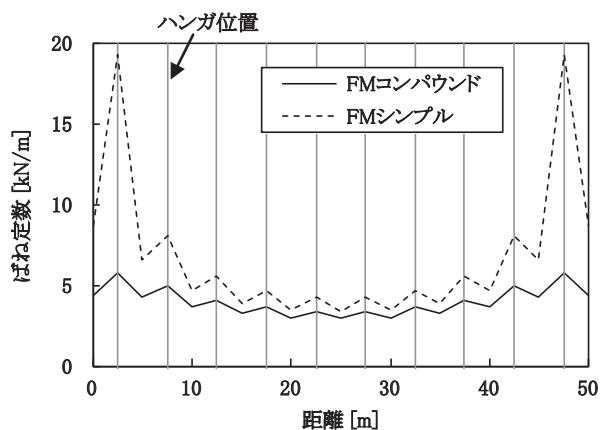


図2 架線のばね定数 (径間長 50m)

ロリ線を伝播する波動の反射量が大きいことを表す。ハンガ点の反射係数 γ_R は、次式で表される。

$$\gamma_R = -\frac{Z_m}{Z_t + Z_m} \quad (3)$$

ただし、機械インピーダンス $Z_i (i = t, m)$ は、次式で表される。

$$Z_i = 2\sqrt{\rho_i T_i} \quad (4)$$

添字 i は、 t がトロリ線を、 m がトロリ線を吊っている線条 (FMコンパウンドは補助ちよう架線、FMシンプルはちよう架線) を示す。反射係数の大きさ $|\gamma_R|$ は、FMコンパウンドが0.59、FMシンプルが0.77となる。波動の反射量が大きいほどハンガ間周期の接触力変動は大きくなる。FMコンパウンドとFMシンプルは同じ線条で同じ総張力であるが、コンパウンド方式としたFMコンパウンドは、FMシンプルと比べてハンガ間周期の接触力変動が小さく高速走行に適している。

2.3 空力特性

架線は空力的に安定した特性を有することが求められる。従来型の架線と比較して、き電ちょう架式の架線は線条の直径が太く、空力的な影響を受けやすいと考えられる。空力特性の重要なものの一つとして、ギャロッピング特性が挙げられる。ギャロッピングとは、物体に空気が負の減衰力として作用することにより振動的な運動を生じるもので、その発生条件は次式（以下、ギャロッピング条件式と記す）により判別される⁶⁾。

$$C_D + \frac{dC_L}{d\alpha} < 0 \quad (5)$$

ただし、 C_D 、 C_L 、 α はそれぞれ物体の抗力係数、揚力係数、迎角 [rad] である。

2本の線条が近接した場合のギャロッピング特性を調べるため、風洞試験を実施した。風洞は鉄道総合技術研究所の小型低騒音風洞（吹出口：幅720mm×高さ600mm）にて行った。図3に、測定概要を示す。試験においてはPH356（直径24.5mm）相当の直径25mmのアルミ棒を用いた。図4のように、条件は2本を束合した場合（中心間隔25mm）と、中心間隔100mmの場合とした。図5に、風洞試験における試験結果を示す。試験風速は30m/sである。束合した場合には±86°付近、中心間隔100mmの場合には±66°付近でギャロッピング条件式が負となっており、ギャロッピングが発生する可能性があることを示している。FMコンパウンドにおいて、ちょう架線と補助ちょう架線の配置は迎角が0°付近となること、架高1.5mで径間50mにおけるちょう架線と補助ちょう架線の最低中心間隔は300mmであることから、ギャロッピングは起きないと考えられる。

3. シミュレーションによる動特性評価

FMコンパウンド架線の集電性能を予測するため、架線-パンタグラフシミュレーションにより動特性を評価した。図6にパンタグラフの力学モデルを示す。パンタグラフは5基で全て38m間隔（10両編成で車両2両ごとにパンタグラフ1基の想定）とした。また、パンタグラフの揚力は100km/hで9Nの増加とした。

図7に、標準径間長50mの場合のシミュレーション結果を示す。図7(a)に示す支持点のトリリ線押上量は、FMコンパウンドでは最大30mm程度、FMシンプルでは最大10mm程度である。FMシンプルよりもFMコンパウンドのほうが全体的に押上量は大きい。2.2節で述べたように、架線のばね定数がFMシンプルよりもFMコンパウンドのほうが小さいためであると考えられる。なお、支持点のトリリ線押上量についての目安値は70mm⁴⁾であり、どちらの架線も問題のない範囲である。図7(b)(c)に示す接触力は最後位パンタグラフの結

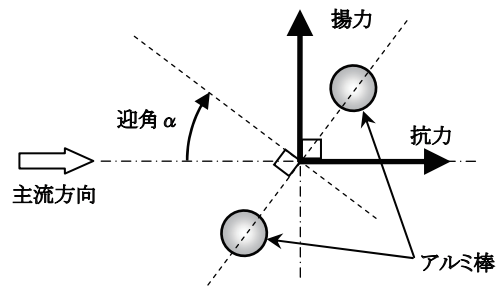


図3 風洞試験概要

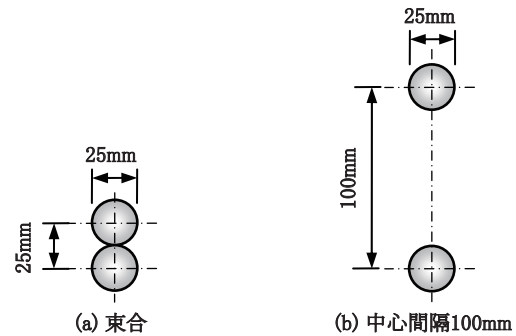


図4 風洞試験条件

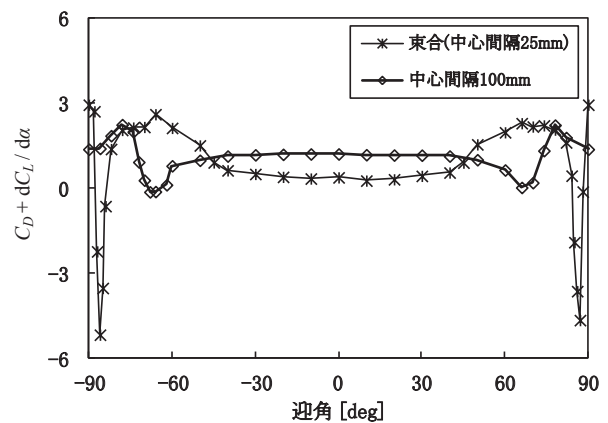


図5 風洞試験結果（ギャロッピング条件式）

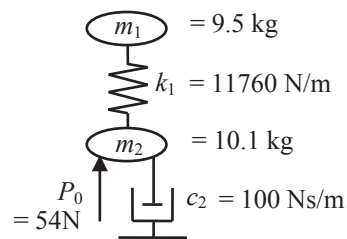


図6 パンタグラフの力学モデル

果を示している。FMシンプルでは140km/h以上の速度で接触力最小値が低下している。接触力が0Nになると離線することを意味するので、FMシンプルは非常に離線しやすい状態である。接触力のばらつきを示す標準偏差は小さいほど接触力が安定していることを示すことから、FMシンプルと比較してFMコンパウンドは安定した集電状態であることがわかる。

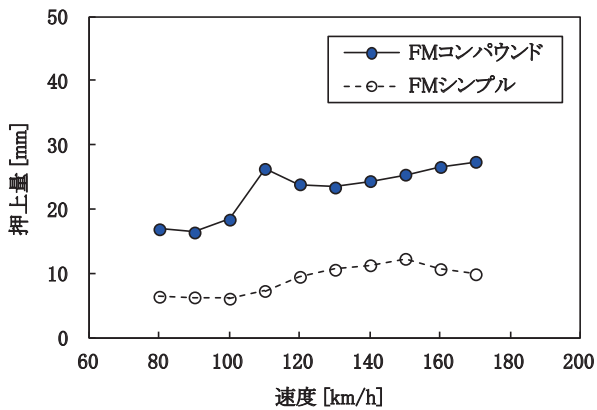
特集：電力技術

複数パンタグラフの走行においては、架線の共振現象が起こる恐れがある。これは架線の固有振動数とパンタグラフ到来周期がほぼ一致するときに架線振動によりパンタグラフの上下運動が大きくなる現象である。共振速度は列車の定常運転速度から離れていることが望ましい。共振速度 V は、次式で表される⁴⁾。

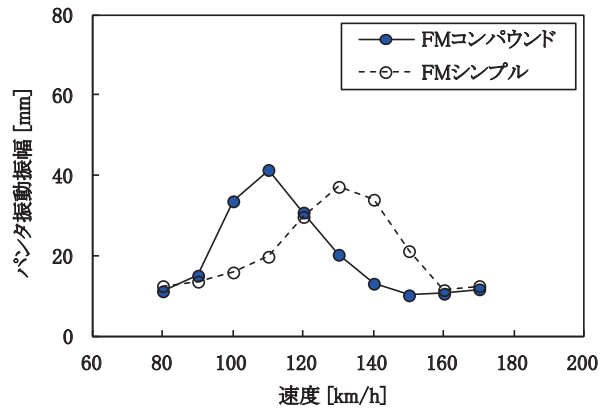
$$V = \frac{\gamma L_p}{2nL_s} C_A \quad (6)$$

ただし、 L_p 、 L_s 、 C_A はそれぞれパンタグラフ間隔、架線の径間長、架線全体の波動伝播速度である。 n はパンタグラフが到来する間に架線が上下する回数であり、一般

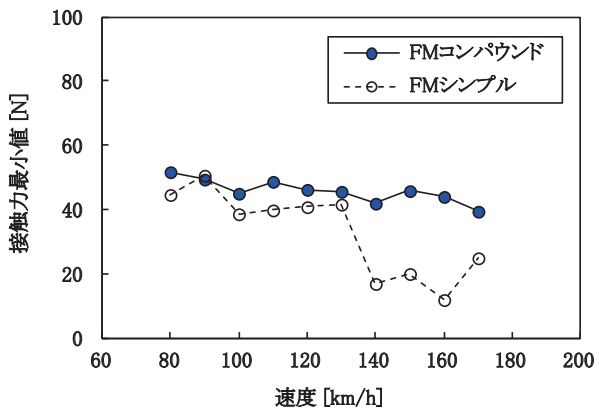
に $n=1$ の場合が最も大きな共振が発生する。 γ は励起される架線の振動モードによるパラメータであり、シンプル架線では 0.8 程度、コンパウンド架線では 0.9 程度となる。一般に、径間長がパンタグラフ間隔に近い場合に架線の共振現象による影響が大きく現れる。図 8 に、パンタグラフ間隔 38m に近い径間長 40m のシミュレーション結果を示す。振動振幅と接触力は最後位パンタグラフの結果を示している。図 8 (a) に示す振動振幅は FM コンパウンドが 110km/h、FM シンプルが 130km/h で最大となっている。式 (6) において、 $n=1$ のときの共振速度 V は、FM コンパウンドが 113km/h、FM シンプル



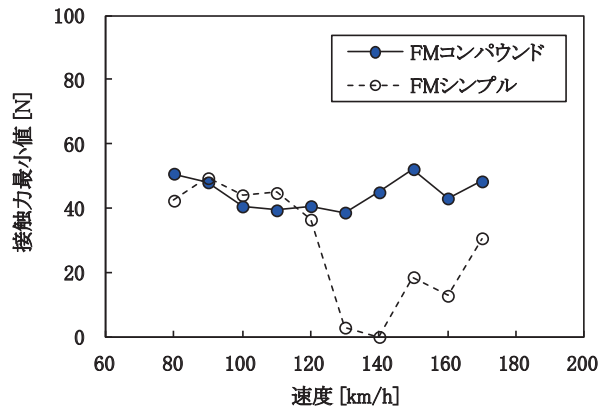
(a) 支持点トロリ線押上量



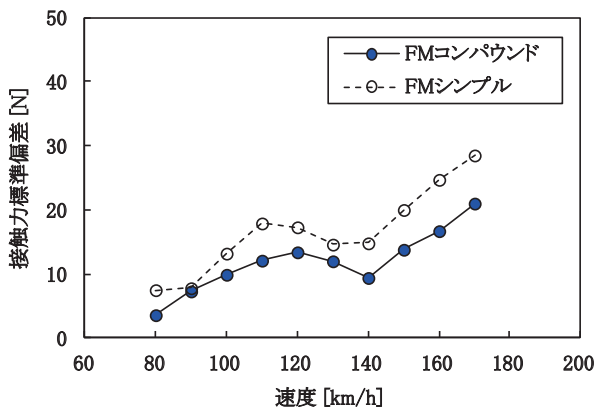
(a) パンタグラフ上下振動振幅



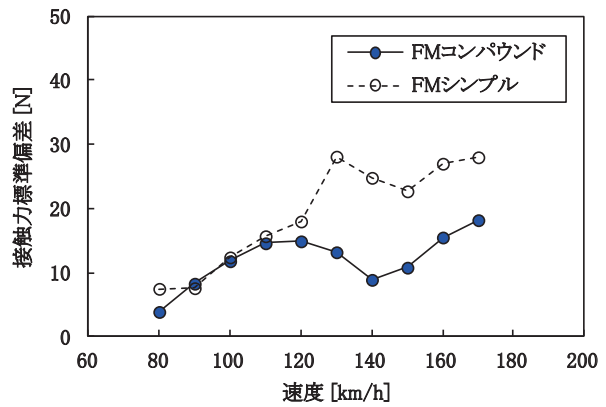
(b) パンタグラフ接触力最小値



(b) パンタグラフ接触力最小値



(c) パンタグラフ接触力標準偏差



(c) パンタグラフ接触力標準偏差

図7 シミュレーション結果 (径間長 50m)

図8 シミュレーション結果 (径間長 40m)

が127km/hとなることから、架線の共振現象によりパンタグラフ振動振幅が大きくなっていると考えられる。なお、FMコンパウンドとFMシンプルの架線全体の波動伝播速度はどちらも296km/hである。接触力について、図8(b),(c)からFMシンプルでは130km/h以上の速度で接触力最小値は低下しており、接触力標準偏差は増加する。また、140km/hでは接触力最小値が0Nとなり離線が発生している。一方、FMコンパウンドは共振現象により振動振幅が大きくなる110km/h付近において、接触力標準偏差は増加するが、接触力最小値は低下することはなく安定した集電状態であることがわかる。

4. 集電試験装置における走行試験

鉄道総合技術研究所の集電試験装置にFMコンパウンドを架設し、走行試験を行った。パンタグラフは在来線の特急形車両などに用いられるPS32とした。

図9に、集電試験装置における走行試験の測定結果を示す。離線率は最大1%程度、トロリ線押上量は最大25mm程度、トロリ線ひずみは最大 150×10^{-6} 程度である。目安値は、離線率が3%、押上量が70mm、ひずみが 500×10^{-6} である⁴⁾。すべての項目で目安値より小さい値であり、良好な集電状況である。

以上の理論検討や試験結果より、FMコンパウンドは160km/hにおいても良好な集電性能であることが確認された。これに基づき、成田スカイアクセス線の架線として導入されることとなった。

5. 現車走行による性能確認試験

5.1 試験概要

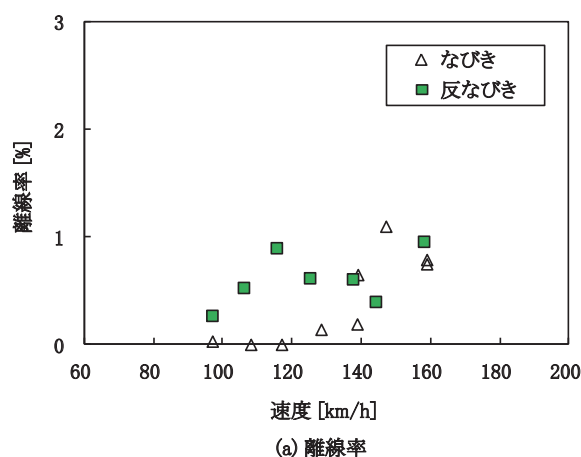
成田スカイアクセス線において、開業前に集電性能を確認するための走行試験を実施した。図10に、成田スカイアクセス線におけるFMコンパウンドの架設状況を示す。走行試験においてはパンタグラフの離線、トロリ線押上量・ひずみを測定した。パンタグラフの離線は、光学式離線測定方法により測定した。また、トロリ線押上量・ひずみについては支持点のトロリ線に変位計とひずみゲージを取り付けて測定した。なお、トロリ線押上量・ひずみを測定した支持点は下り線の1箇所である。図11に、試験列車のパンタグラフ配置を示す。パンタグラフは38m間隔で4基である。パンタグラフはシングルアームであり、下り線走行時にはなびき方向、上り線走行時には反なびき方向となる。

5.2 測定結果

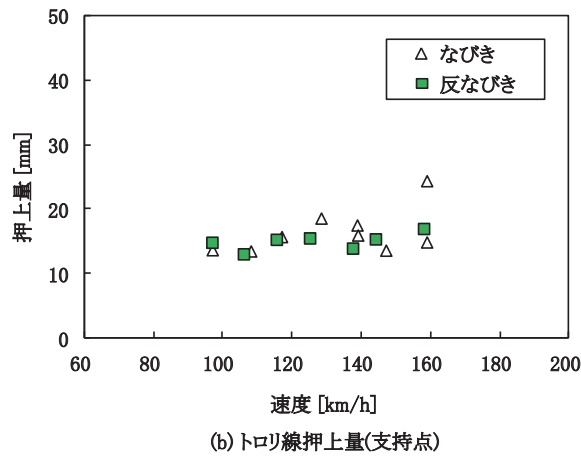
図12に、現車走行試験の測定結果を示す。離線率は最後位パンタグラフについてドラムごとに示し、押上量

とひずみは最大値を示している。離線率は最大1%程度、押上量は最大20mm程度、ひずみは最大 200×10^{-6} 程度である。離線率は最大1%程度であり良好な集電状況であるが、下り線走行に比べて上り線走行がやや小さい値となっている。これはパンタグラフが向きにより揚力特性が異なるためであると考えられる。

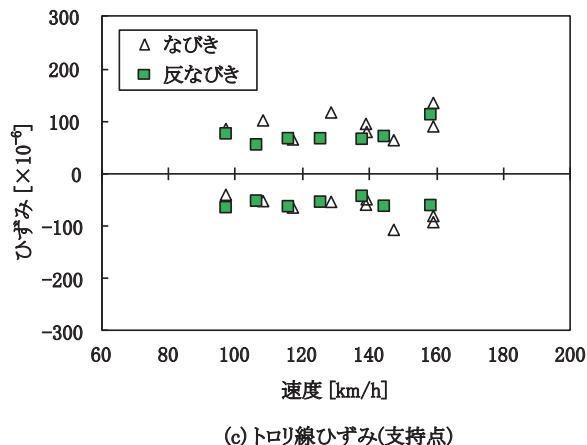
以上より、離線率と支持点押上量・ひずみはすべて目安値より小さい値であり、良好な集電状況であることを確認した。



(a) 離線率



(b) トロリ線押上量(支持点)



(c) トロリ線ひずみ(支持点)

図9 集電試験装置における試験結果

特集：電力技術



図 10 き電ちょう架式コンパウンド架線

6. まとめ

在来線高速走行に対応したき電ちょう架式コンパウンド架線 (FM コンパウンド) を開発した。この架線は在来線高速走行に対応するだけでなく、従来型の架線に比べて部品点数の削減やメンテナンスの省力化、建設コストの低減が可能であるなどの特長がある。理論検討や所内試験の結果、FM コンパウンドは優れた集電性能を有することが確認された。

FM コンパウンドはその優れた性能が認められ、成田スカイアクセス線の架線として導入された。成田スカイアクセス線開業前の現車走行試験において、在来線における最高速度 160km/h においても良好な集電性能であることが確認された。

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) 君塚和夫, 金子誠, 川井重男, 吉田真琴, 奥谷民雄, 芳村照士: 北越北線 160km/h 高速走行の電気設備, 鉄道と電気技術, Vol.8, No.4, pp.45-57, 1997
- 2) 網干光雄, 澤井誠, 河相隆: 単径間ツインシンプル架線の集電性能, 平成 3 年電気学会全国大会, Vol.8, pp.196-197, 1991
- 3) 島田健夫三: 新しいき電ちょう架式電車線, RRR, Vol.62, No.4, pp.22-25, 2005
- 4) 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, 1993
- 5) 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
- 6) 谷口修・藤井澄二 訳, Den Hartog, J.P. 著: 機械振動論, コロナ社, 1967

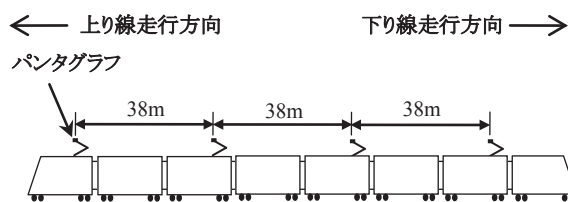
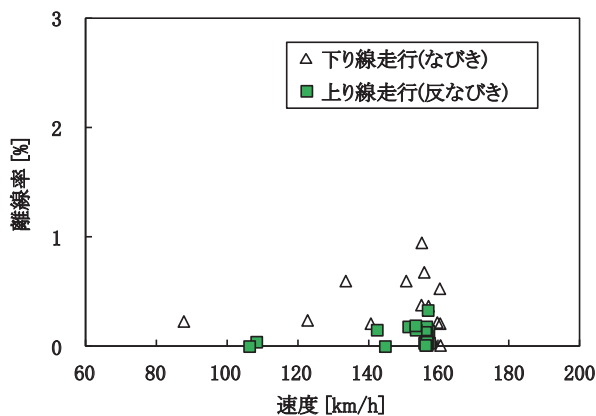
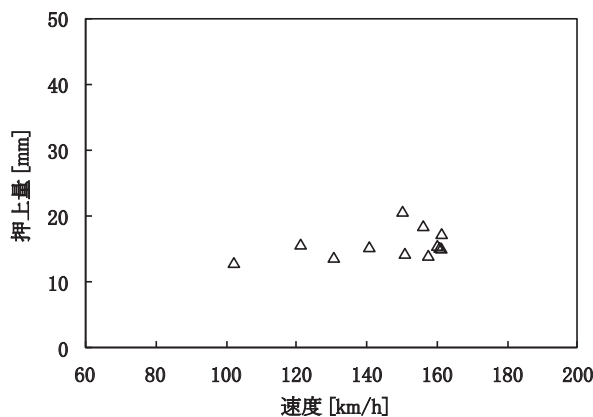


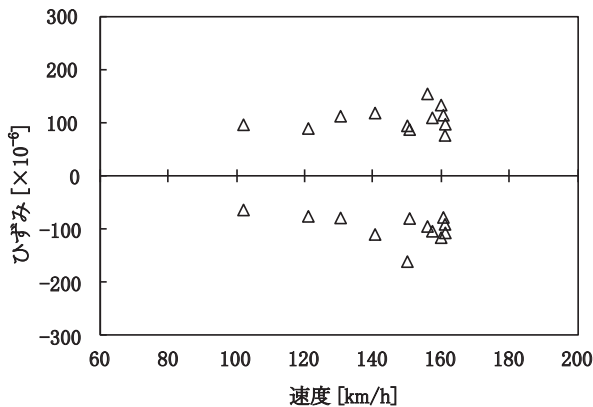
図 11 試験列車のパンタグラフ配置



(a) 離線率(ドラムごと)



(b) トロリ線押上量(支持点)



(c) トロリ線ひずみ(支持点)

図 12 現車走行試験結果