

多分割舟体による接触性能向上手法

白田 隆之* 光用 剛* 長尾 恭平*
久保田 喜雄** 若林 雄介***

Method of Enhancing Contact Performance by the Multi-segment Pantograph Head

Takayuki USUDA Takeshi MITSUMOJI Kyohei NAGAO
Yoshitaka KUBOTA Yusuke WAKABAYASHI

In developing a pantograph of a high speed train, reducing aerodynamic noise of the pantograph is one of the most important subjects. For reducing this noise, suitable configuration of the pantograph head, which has a smooth cross section profile, is proposed. However, the pantograph head with a smooth cross section profile and the conventional support system of the contact strip sometimes wrecks an undesirable lift force characteristic. Authors are developing a multi-segment pantograph head, which has a new support system for avoiding the abnormality of the lift force characteristic. This paper describes the configuration of a prototype of the multi-segment pantograph head and the validation result of this support system by model analysis and some bench test.
キーワード：高速用パンタグラフ舟体，多分割舟体，コンプライアンス，離線率

1. はじめに

新幹線用のパンタグラフには低空力騒音特性，安定した揚力特性および架線への十分な追従性が必要である。空力騒音のエネルギーはパンタグラフ周りの流速の6～8乗に比例して増加するため¹⁾，現状の騒音レベルを維持して，新幹線を更に高速化するためにはパンタグラフの空力騒音を大幅に低減する必要がある。空力騒音低減のための有効な手法の一つとして，断面形状を平滑化した舟体の適用が挙げられるが，すり板の摩耗による舟体断面形状の変化や，トンネル突入時などのパンタグラフ周りの流れ場の変化に起因して平均揚力が大きく変化する可能性がある。揚力はその値が過大な場合，トロリ線への著大な応力の作用や，支持点のトロリ線押上量の基準値超過などの現象を発生させ，その値が過小の場合は，パンタグラフとトロリ線の安定した接触状態を阻害しパンタグラフおよびトロリ線の損耗を引き起こす。そのため，過去の研究では，CFD解析と最適化手法を組み合わせた手法により，空力騒音の低減と揚力特性の安定化を両立する舟体の断面形状（以下，平滑化舟体）を提案している²⁾。一方，形状改良以外の方法として，パンタグラフの平均揚力を推定し^{3)～7)}，推定した平均揚力に基づいて，パンタグラフの押上力を制御する手法も検討されている。

なお，平滑化舟体のようになめらかな外形形状の舟体に対し，すり板を上下に動作させる追従機構を設けると，追従機構の動作に伴って，舟体の断面形状が変化し揚力変動が発生する。そこで，追従機構自身の動作により発生する揚力変動への対策として，筆者らは新たな追従機構として多分割舟体を提案している⁸⁾。

本報告では，多分割舟体の集電性能を評価するため，偏位中央付近のみを試作し，加振試験，モデル計算およびしゅう動試験により，従来のパンタグラフ舟体との性能比較を実施した結果について述べる。

2. 高速用パンタグラフ舟体の開発

2.1 高速用パンタグラフの開発方針

既存の新幹線の速度域からさらに速度向上を行う場合に，特に留意が必要と考えられるパンタグラフの要件を以下に示す。

- ① 必要な低空力騒音特性
- ② 安定したしゅう動に必要な揚力の安定性
- ③ 安定したしゅう動に必要な追従性

本研究では①については貫通孔付きの平滑化舟体と，舟体を支持する位置を適切に配置することにより，パンタグラフの空力騒音低減を検討している⁹⁾。②については，すり板の摩耗が平均揚力に与える感度について，平均揚力を推定^{6) 7)}・補償することで解決する（図1）。③についてはトロリ線に追従する部位の等価質量を低減することが非常に有効であり，すり板をまくらぎ方向に

* 鉄道力学研究部 集電力学研究室
** 材料技術研究部 摩擦材料研究室
*** 東日本旅客鉄道株式会社

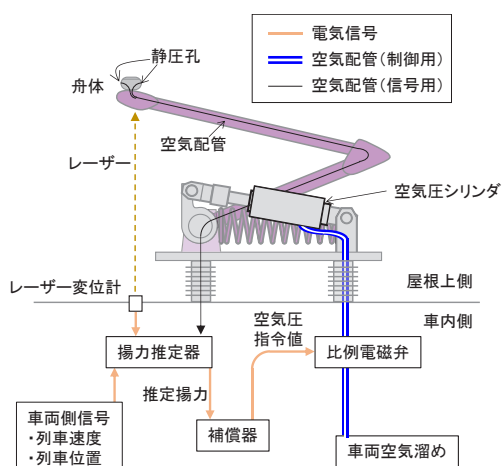


図1 平均揚力補償のイメージ

分割した多分割すり板なども使用されている¹⁰⁾。一方、1章でも述べたように、すり板を可動とする追従機構を平滑化舟体へ実装した場合、すり板の動作により舟体の揚力が変化することが懸念される。したがって、平滑化した舟体へ実装する追従機構は舟体の断面形状を変化させないものであることが望ましい。そこで、本報告ではこれらを解決する追従機構として多分割舟体を提案し、その効果について検証する。多分割舟体の概要図を図2に示す。多分割舟体は可動部の等価質量低減のため、すり板および舟体を左右方向に10個程度に分割し、各舟体が上下に可動する構造である。これにより、追従機構の動作による平均揚力の変化を低減でき、過去に提案した平滑化舟体²⁾と組み合わせることで、空力騒音の低減、揚力特性の安定化、追従性の確保の3点を達成する。また、さらなる可動部の等価質量の低減による追従性向上と、すり板の摩擦係数低減による安定したしゅう動の実現を狙って、C/C複合材製すり板を適用する。なお、本報告では次節で述べるように、図2の多分割舟体のうち、中央の5個のみ試作し、その動特性について検証する。

2.2 多分割試作舟体の構造

本節では、図3に示す多分割舟体の動特性確認用の試作機（以下、試作舟体とする）を製作し、動特性の検証や離線測定試験を実施した結果について報告する。試作舟体は図4に示すように、すり板支持部に分布的に配置されたばねで、すり板体を支持する構造となっており、図3に示すようにすり板体の前後にそれぞれ舟体外形状を構成する樹脂部材を取り付けることで構成される。すり板体と樹脂部材が剛に結合されるため、舟体の追従機構動作時にも舟体断面形状が変化しないことが特徴である。また、本試作舟体は多分割舟体の機構検討用の要素機のため、追従機構は偏位±200mmの範囲のみ舟体を5分割して製作し、偏位±200mmより外側の舟

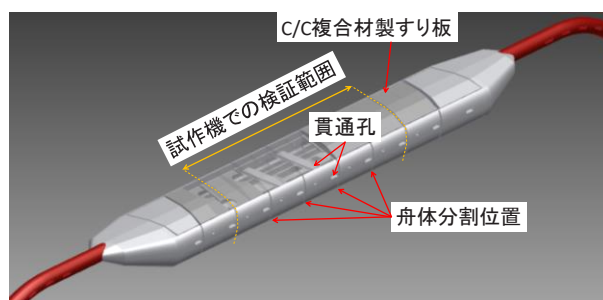


図2 多分割舟体の概要図

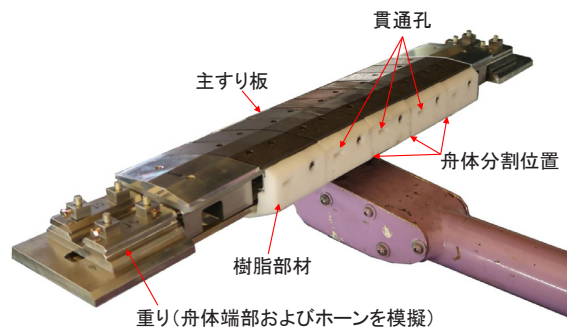


図3 試作舟体

体およびホーンは実機製作時と質量が等しくなるよう舟体端部に重りを固定して模擬した。ただし、中央の5個の多分割舟体のうち、両端の2個はそれぞれ外側がピン支持、内側が自由端となっている。すり板はC/C複合材製すり板（M40A）を適用し、すり板支持部の質量は8.6kg、すり板体および樹脂部材の質量は4.0kgである。分割された1箇所のすり板および樹脂部材のばね上質量は0.6kg、それ以外の舟体のばね下質量は12.0kgとなる。以下では本試作舟体をPT158パンタグラフ枠組に取付け、試験を実施した。また、パンタグラフの静押上力は54Nとした。

3. 試作舟体の追従性の評価

3.1 パンタグラフモデルとパラメータの同定

本章では試作舟体の加振試験結果から力学モデルを決定し、試作舟体の追従性をモデル計算により検証する。モデル計算用の力学モデルは図5に示す一般的なばね質点モデルを使用した。このパンタグラフモデルの定数を同定するため、鉄道総研のパンタグラフ加振試験装置（図6）で試作舟体のすり板を上下方向で加振する試験を実施し、加振力 $f_c(t)$ と加振器の変位 $x_1(t)$ から、式(1)によりパンタグラフの追従性能に関する周波数応答関数の一つであるコンプライアンス C を計算した。なお、大文字は周波数領域の変数であることを示す。

$$C(\omega) = \frac{\bar{F}_c X_1}{\bar{F}_c F_c} \quad (1)$$

加振試験は50Hzまでの疑似ランダム波で実施し、試

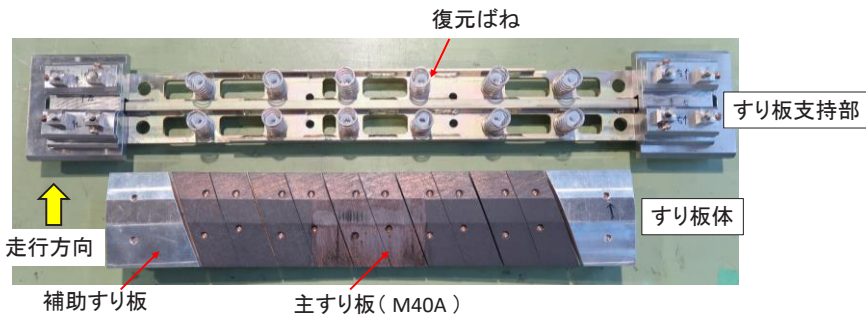


図4 試作舟体の内部構造

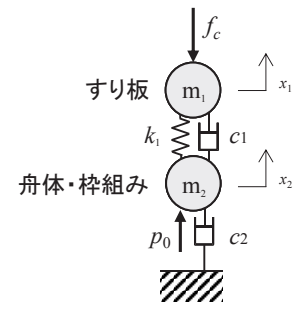


図5 パンタグラフのモデル

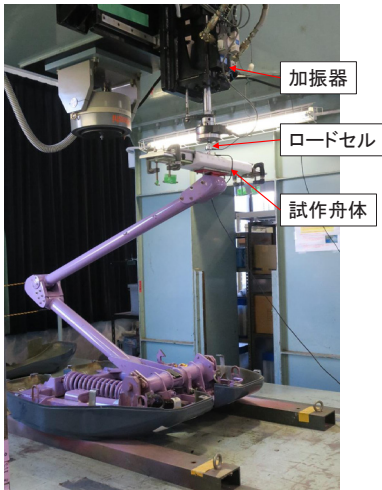


図6 パンタグラフ加振試験装置

表1 パンタグラフモデルの定数

	試作舟体 + PT158 枠組	PT158
m_1	1 kg	3 kg
m_2	19 kg	15 kg
k_1	21600 N/m	38000 N/m
c_1	20 N·s/m	30 N·s/m
c_2	120 N·s/m	120 N·s/m

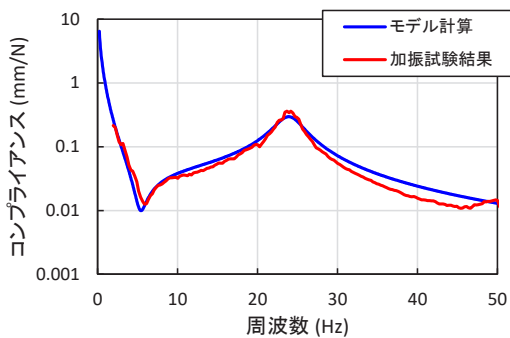


図7 試作舟体の同定結果

験結果のコンプライアンスと一致するようモデルのパラメータを同定した結果を図7に、同定したパラメータを表1に示す。図7から同定結果は50Hzまでは実験結果と良好な一致を示すことが確認できる。なお、同図の試験結果は約150回の平均化の結果、コヒーレンスが0.5以下となった箇所についてはプロットしていない。また、

表1には新幹線用パンタグラフ PT158 の定数についても併記した。

3.2 追従振幅のモデル計算の比較

試作舟体の追従性を検証するため、他の高速用パンタグラフの例として、PT158 パンタグラフ、およびすり板を多分割化した舟体を搭載した新幹線用パンタグラフ (Pt1) の定数¹¹⁾ を使用し、各条件のコンプライアンスを計算した結果を図8に示す。本結果から、試作舟体のコンプライアンスはPT158 に対し、7～50Hzの広い周波数帯において良好な特性を有することが確認できる。また、試作舟体と Pt1 パンタグラフのコンプライアンスを比較すると、試作舟体は5～20Hzにおいて若干の性能低下が確認されるものの、360～400km/hのハンガ間隔周期に相当する20～22Hzにおいては、ほぼ同等の特性を有することが確認できる。5～20Hzにおける試作舟体のコンプライアンスが Pt1 に対して低い要因は Pt1 パンタグラフに対し、試作舟体のばね定数 k_1 が約2倍大きいこと、枠組の等価質量 m_2 が約7kg増加していることなどによるものと推測される。

なお、線形な動作を仮定すると、コンプライアンスに静押上力を乗算すると単位周波数ごとの追従限界振幅 (追従振幅特性) と等価となるが、実際にはパンタグラフの追従機構はストップによる振幅依存などの非線形性を有しているため、コンプライアンスと追従振幅特性の傾向は完全には一致しない点に注意が必要である。

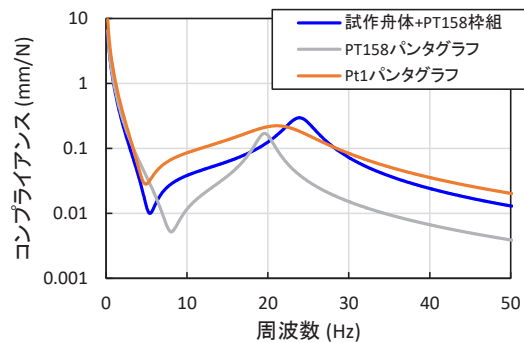


図8 各パンタグラフの追従性

特集：電力技術

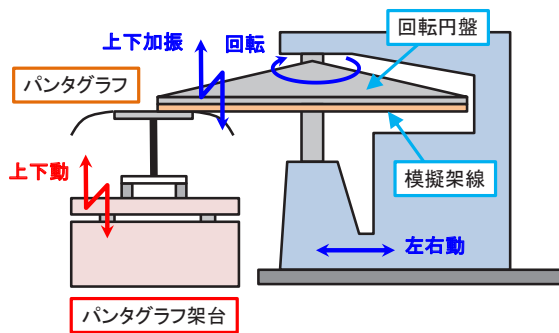
4. 試作舟体のしゅう動試験

4.1 試験条件

パンタグラフ総合試験装置(図9)を用いて剛体円盤とのしゅう動環境下で試作舟体, PT158 舟体, およびすり板を多分割化した舟体の例としてPS208 舟体の離線測定試験を実施した。いずれもパンタグラフ枠組はPT158 を使用し, 円盤の周速度は 100km/h, 200km/h および 300km/h の3速度, 加振条件は加振なし条件, 架線の50mの径間周期に起因した振動を模擬した周波数で, 回転円盤を片振幅 10mm で上下加振した条件(以下, 径間周期加振), および架線の5mのハンガ間周期に起因した振動を模擬した周波数で, 回転円盤を片振幅 0.5mm で上下加振した条件(以下, ハンガ間周期加振)の3条件である。パンタグラフの集電電流は非通電と, 通電(AC100V, 400A)の2条件とした。非通電時の場合の離線検出は5Vの直流電源で構成した離線検出回路を使用することで電気的に行い, 通電時の離線検出は離線アークに含まれる紫外線を光電子増倍管により測定した。円盤の左右動の移動範囲は試作舟体を供試体とした試験時は偏位±55mm, それ以外の舟体を供試体とした試験時は偏位±200mmとした。

4.2 非通電時の離線測定結果

非通電時のしゅう動試験の離線率および最大離線時間の測定結果をそれぞれ図10と図11に示す。各図ともに図(a)は加振なし条件, 図(b)は径間周期加振条件, 図



(a) 模式図



(b) 試験写真

図9 パンタグラフ総合試験装置

(c)はハンガ間周期加振条件である。また, 図10(b)および図10(c)には, 回転円盤の上下加振周波数も示した。本結果から, 各条件ともに円盤速度の上昇とともに離線率や最大離線時間が増加する傾向があることが確認される。また, PT158 舟体の離線率に対し, 試作舟体やPS208 舟体の離線率は平均的には約90%, 300km/hの条件において約80%低減されていることが確認される。試作舟体の離線率がPT158 舟体に対して全ての条件で低い理由としては, 試作舟体の追従性が十分確保されていることに加え, 試作舟体のみがカーボン系すり板を適用されていることにより, すり板とトロリ線間の摩擦係数が低く, しゅう動状態が安定している点があげられる。また, 図11から最大離線時間は条件毎のばらつきが大きくなるものの, 試作舟体, PS208 舟体ともにPT158 舟体に対する優位性が確認される。

4.3 通電時の離線測定結果

通電時のしゅう動試験の離線率および最大離線時間の測定結果をそれぞれ図12と図13に示す。各図ともに

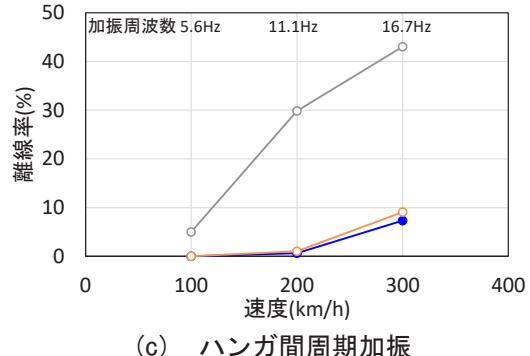
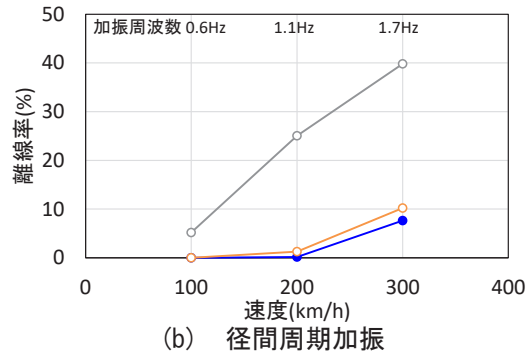
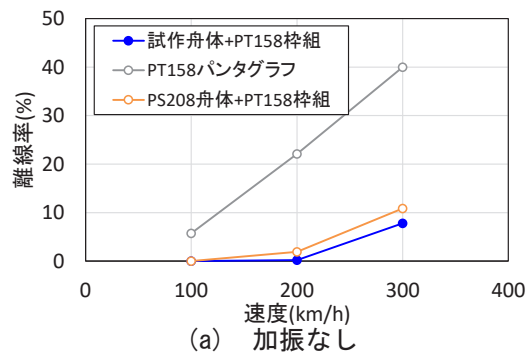


図10 離線率測定結果(非通電)

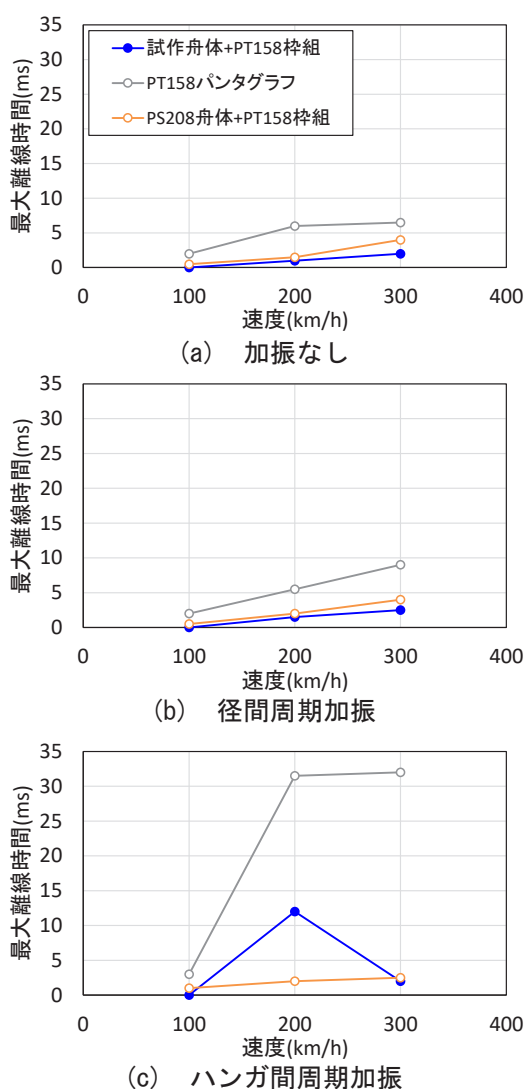


図 11 最大離線時間測定結果（非通電）

図 (a) ~ (c) の条件は 4.2 節と同様である。本結果から、通電条件や加振条件によらず PT158 舟体は円盤速度の上昇とともに離線率が増加する傾向にある。これに対し、試作舟体は 300km/h 以外の速度では離線の発生がほとんど確認されず、300km/h での離線率も PT158 舟体に対し、およそ半減していることが確認される。

次に、試作舟体と PS208 舟体との比較において、両者の離線率はほぼ同等であるが、図 10 では試作舟体の離線率が低く、図 12 では試作舟体の離線率が若干高くなっている。この要因として、試作舟体は図 14 に示すように、すり板摺動部の後縁側にテーパがついた非しゅう動部（図 14 赤破線部位）が存在し、この部位にアークが生じることで、アーク長が伸びやすく、離線アークが測定器から観測されやすくなっている可能性が想定される。本推測は試験後の試作舟体の当該部位にアーク痕が多数観察されたこととも一致する。さらに、集電電流がない場合にはカーボン系すり板が取り付けられた試作舟体は、鉄系焼結合金すり板が取り付けられた PS208

舟体と比べ、カーボンの自己潤滑性によりしゅう動状態が安定していたのに対し、通電時は電流による電気接点の温度上昇により、PS208 舟体でも十分な潤滑効果が得られ、しゅう動状態の差異が少なくなった可能性も想定される。ただし、図 13 の結果から、試作舟体と PS208 舟体はほぼ同等の最大離線時間であったため、前者の推測についてはさらなる検証が必要である。

また、図 12 と図 10 との比較から、通電時の離線アーク検出による離線率は、通電なしの条件における電圧式離線の離線率と比較して 1/10 程度の値となっている。この理由は離線アークが舟体やトロリ線の影となった条件では観測されないこと、交流の集電電流のゼロ点付近では機械的に離線が発生してもアークが生じないことなどによるものと推測される。

以上の結果より、試作舟体は通電の有無にかかわらず、良好な追従性能を有していることが確認された。

5. おわりに

本報告では新幹線で速度向上を行う際に必要とされる低空力騒音特性・揚力特性と追従性を両立させるための機構として、多分割舟体の有効性を検証した。本研究で得られた成果を以下に示す。

- (1) 多分割舟体は PT158 舟体に対し、可動部の軽量化とばね定数の適正設計の効果により大幅に追従性が向上する。また、すり板を多分割化したパンタグラフと比較しても多分割舟体は、高速走行時にハンガ間周期に起因した周波数帯において、概ね同等の追従性能を有する。
- (2) 多分割舟体は PT158 舟体と比べて、パンタグラフ総合試験装置で 300km/h までの離線率が大幅に低減され、PS208 舟体と概ね同等の離線率特性を有する。この理由としては舟体の追従性が十分確保されていることに加え、カーボン系すり板の適用により、すり板とトロリ線間の摩擦係数が低くなり、しゅう動状態が安定したためと考えられる。

今後は多分割舟体の実機を製作し、空力騒音特性、揚力特性などを含めた性能検証を進めていく予定である。

文献

- 1) 池田充：集電性能をめぐる研究の動向，鉄道車両と技術，200 号，pp.2-8，2013
- 2) 吉田和重，鈴木昌弘，池田充：揚力特性および低騒音性を考慮した舟体形状最適化の基礎検討，鉄道総研報告，Vol. 19，No. 9，pp. 23-28，2005
- 3) 池田充：架線偏位情報に基づくパンタグラフの揚力推定法，日本機械学会 2003 年度年次大会，pp.219-220，2003

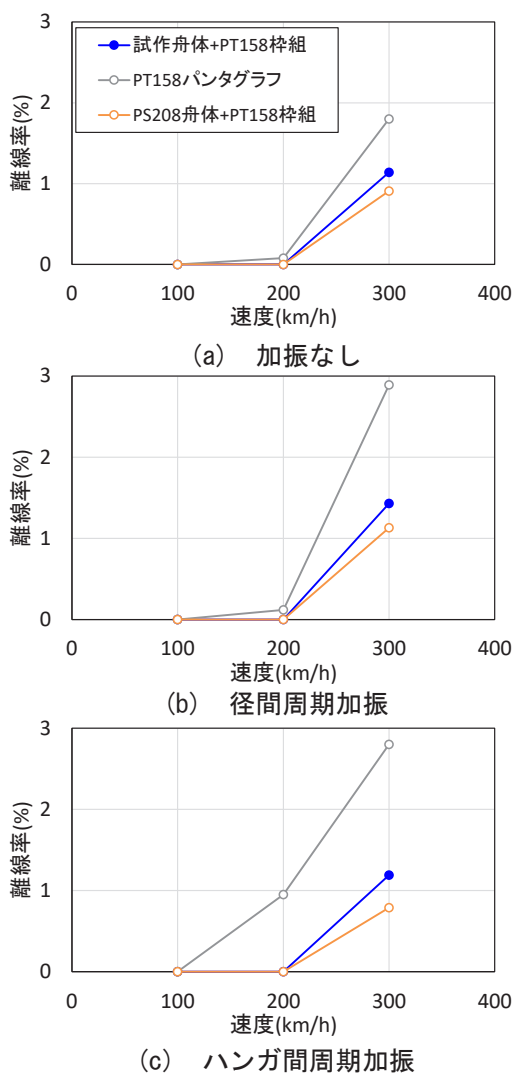


図 12 離線率測定結果（通電（400A））

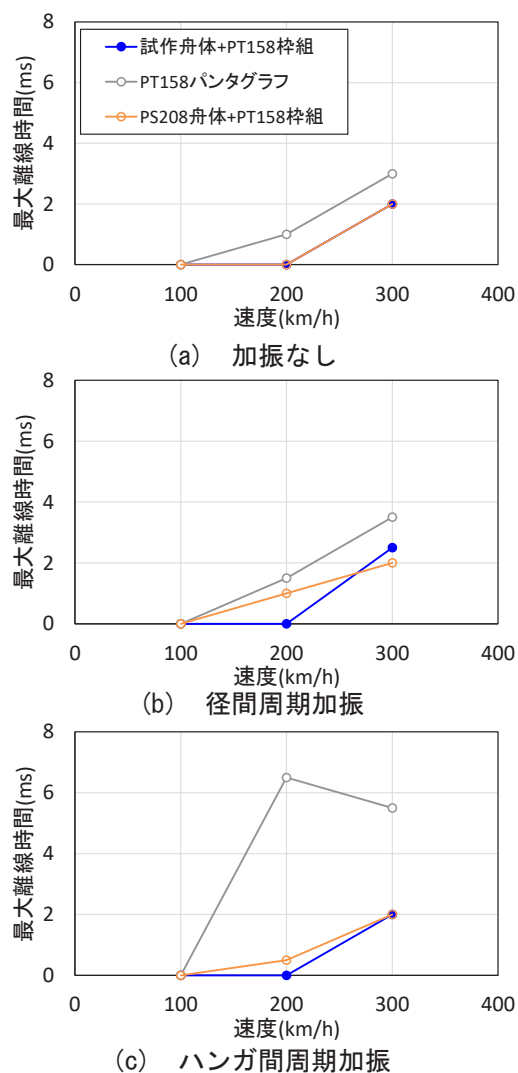


図 13 最大離線時間測定結果（通電（400A））

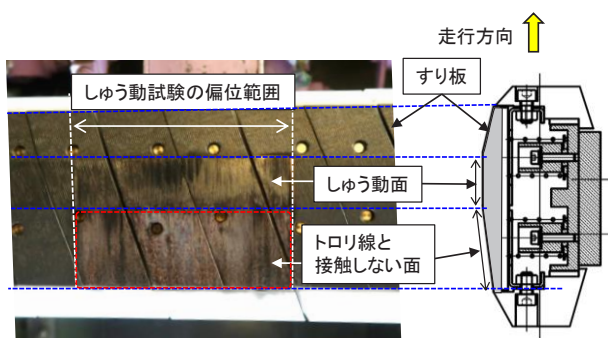


図 14 しゅう動試験終了後のすり板の損耗状態

- 4) 白田隆之, 池田充, 山下義隆: 架線におけるパンタグラフ接触力モニタリング手法, 日本機械学会 Dynamics and Design Conference 2009, pp.47, 2009
- 5) 網干光雄, 常本瑞樹, 池田国夫: トロリ線押上量観測によるパンタグラフ定常押上力のモニタリング, 第 15 回鉄道技術連合シンポジウム, pp.509-510, 2008
- 6) 白田隆之: パンタグラフ高さによるパンタグラフ揚力の

推定手法, 日本機械学会 2016 年度年次大会, G1800103, 2016

- 7) 山下義隆, 光用剛, 白田隆之: スパースモデリングによるパンタグラフの揚力係数推定手法, 日本機械学会論文集, Vol.84, No.868, p.18-00267, 2018
- 8) 白田隆之, 光用剛, 長尾恭平, 久保田喜雄: 外形平滑化を施したパンタグラフ舟体試作機の接触性能向上手法, 日本機械学会 2018 年度年次大会, G1800104, 2018
- 9) 光用剛, 佐藤祐一, 白田隆之, 山崎展博, 宇田東樹, 若林雄介: 舟体・舟支え部の形状改良によるパンタグラフの空力音低減, 鉄道総研報告, Vol. 31, No. 4, pp. 5-10, 2017
- 10) 栗田健: 新幹線のパンタグラフに関する技術の変遷, 鉄道車両と技術, 200 号, pp.9-14, 2013
- 11) 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.3, pp.388-395, 2011