

## 多分割舟体の追従機構と揚力補償手法

白田 隆之\*    小林 樹幸\*    山下 義隆\*  
 光用 剛\*    長尾 恭平\*    若林 雄介\*\*

## The Contact Mechanism of Multi-segment Pantograph Head and Compensation Method for Lift Force

Takayuki USUDA    Shigeyuki KOBAYASHI    Yoshitaka YAMASHITA  
 Takeshi MITSUMOJI    Kyohei NAGAO    Yusuke WAKABAYASHI

In developing a pantograph of a high-speed train, reducing aerodynamic noise from 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. Therefore, authors are developing multi-segment pantograph head, which have a new support system for avoiding the abnormality of the lift force characteristic. Furthermore, in order to stabilize the lift characteristic at high speeds due to wear of the contact strip and so on, authors are also developing a method to actively control method of the lift by some pressure on the pantograph head surface and the working height of the pantograph. This paper describes the validation result of the multi-segment pantograph head and lift control method by bench test and wind tunnel test.

キーワード：高速用パンタグラフ舟体，多分割平滑化舟体，コンプライアンス，離線率，揚力推定，揚力補償

## 1. はじめに

新幹線用のパンタグラフは優れた空力音特性，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<sup>1)</sup>，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音を大幅に低減する必要がある。空力音低減のための有効な手法の一つとして，主たる音源である舟体の断面形状を平滑化した平滑化舟体<sup>2)</sup>を適用することが挙げられる。文献2では，空力音の低減と揚力特性の安定化の両立を考慮した平滑な舟体断面形状が提案されているものの，矩形断面の舟体と比べるとすり板の摩耗による舟体断面形状の変化，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やパンタグラフの作用高さの変化により，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，トロリ線に著大な応力を作用させ，支持点のトロリ線押上量の超過などの現象を発生させる。また，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，離線アークによってパンタグラフおよびトロリ線の損耗を引き起こすだけでなく，顕著な負の揚力が生じた場合にはパンタ

グラフの降下などの現象を引き起こす。

架線への追従機構は高速走行時にトロリ線に追従する十分な性能を有していることに加え，その追従機構の動作によって大きな揚力変化を生じさせないことが重要である。しかし，平滑化された断面形状の舟体に対し，すり板を上下動作させる従来の追従機構を実装する場合，断面形状の変化に伴い，揚力が敏感に変化しやすくなるという問題がある。この問題を解決するため，筆者らは平滑化した舟体を実装しても空力的な不具合が発生しにくい追従機構として，舟体を左右方向に分割し，それぞれをばねで支持する多分割舟体の機構を提案し，可動部の質量低減と摩擦係数の低減を狙ってC/C複合材製のM40Aすり板<sup>3)</sup>を組み合わせたパンタグラフ舟体の要素機を開発し，その基本特性を確認している<sup>4)</sup>。

本報告では舟体断面形状を平滑化したうえで，多分割舟体機構を適用した多分割平滑化舟体を開発し，集電性能の検証を行った結果について報告する<sup>5)</sup>。また，平滑化された断面形状の舟体を実装したパンタグラフが，すり板の摩耗やパンタグラフへの対向風の風向およびパンタグラフの作用高さなどの条件変化により揚力特性が不安定になることを防止するため，パンタグラフの時間平均揚力（以下，平均揚力）を推定し，パンタグラフに実装した空気シリンダで押上力を調整することで，平均揚力を補償する平均揚力補償機構<sup>6) 7)</sup>についても報告する。

\* 鉄道力学研究部 集電力学研究室

\*\* 東日本旅客鉄道株式会社

## 2. 多分割平滑化舟体

### 2.1 多分割平滑化舟体の機構

多分割平滑化舟体の外観図、内部構造および断面図をそれぞれ図1(a)～(d)に示す。多分割平滑化舟体には図1(a)に示すように、パンタグラフが高速の気流にさらされた際に舟体後流に発生するカルマン渦を抑制し、空力音を低減するため、9箇所の貫通孔を設けた(図1(d)ピンク色部位)。また、トロリ線と直接しゅう動する可動部の質量を軽減するため、C/C複合材製のM40Aすり板を適用し、可動部の追従性を向上するため、舟体基部(図1(b)左側、図1(c)青色部位)に分布的に配置されたばねで、左右方向に7つに分割されたすり板体(図1(c)黄色色部位)をばね支持する構造となっている。また、左右方向に分割された各舟体は可動部であるすり板体の前縁および下面と、後縁に樹脂部材(図1(a)の緑色の

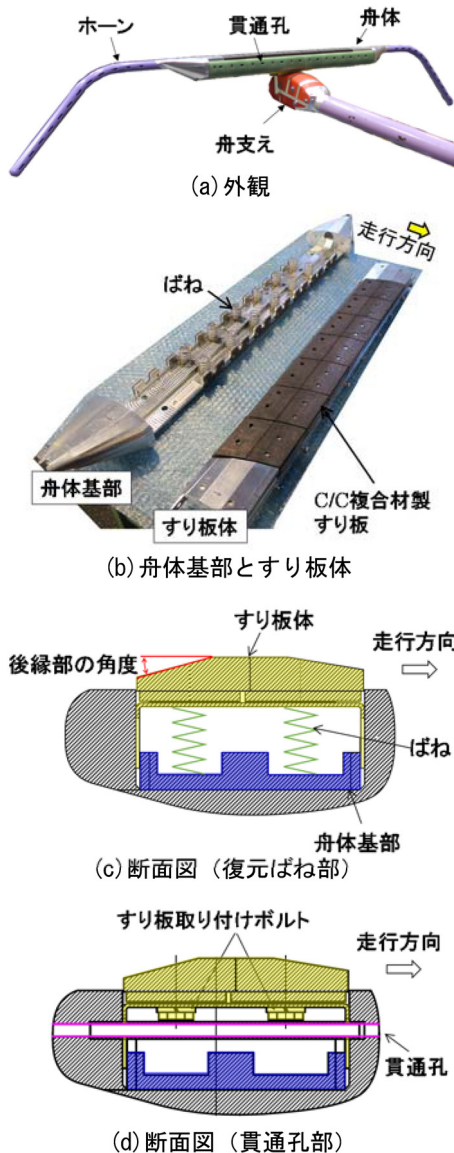


図1 多分割平滑化舟体

部材、図1(c)白黒網掛け部位)を取り付けた構成となっている。この構成により、すり板体と舟体周囲の樹脂部が一体となって上下動するため、舟体の追従機構動作時にも、隣接する舟体との接合部を除いて舟体断面形状が変化しないことが特徴である。

### 2.2 多分割平滑化舟体の追従性

本節では多分割平滑化舟体の動特性について述べる。パンタグラフを図2に示すばね・質点モデルと仮定し、多分割平滑化舟体を搭載したパンタグラフの加振試験結果に基づいて、パンタグラフの各定数を同定した。同定した定数を表1に示す。

表1の結果を用いて、多分割平滑化舟体の追従性を計算し、それを他形式の新幹線用パンタグラフと比較した。他の高速用パンタグラフの例として、すり板を連続したたわみ板で弾性支持する構造の舟体を搭載したPT158パンタグラフと、すり板を多分割化して、ばね上質量を軽量化し、追従性の向上を図った舟体を搭載したパンタグラフ(Pt1)の定数<sup>8)</sup>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3に示す。

本結果から、多分割平滑化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、多分割平滑化舟体とPt1パンタグラフのコンプライアンスを比較すると、ピーク周波数以外で若干の性能低下があるが、360～400km/hのハンガ間隔周期に相当する20～22Hzにおいては、ほぼ同等の追従性を有していることが確認できる。

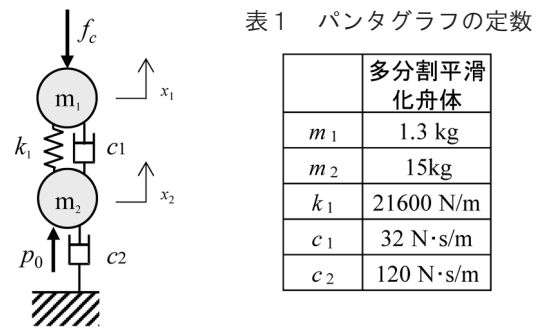


図2 パンタグラフのモデル図

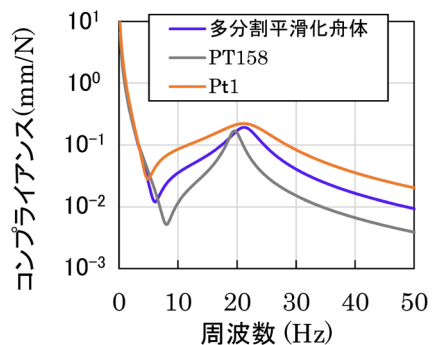


図3 他のパンタグラフとの比較

2.3 すり板後縁部の角度の影響

本節および次節では、多分割平滑化舟体の集電性能を検証するため、PT158 パンタグラフに多分割平滑化舟体を搭載し、パンタグラフ総合試験装置でしゅう動試験を行った。本節では、すり板後縁部の面取り角度（以下、後縁部角度。図1(c)の赤色部位）が離線アークの発生頻度に与える影響を評価するため、通電ありの条件で、舟体の後縁部角度を変更して離線アークの測定を行った。すり板後縁部の面取り角度は図4に示す15°と45°の2種類とした。複数の加振条件のうち、離線アークの発生が顕著に確認されたハンガ周期加振（片振幅1.0mm）時について、円盤の回転速度を100km/h、200km/h、300km/hとした際のアーク離線率とその平均値を図5に示す。本結果から、後縁部角度15°の条件は後縁部角度45°の条件に対して、有意な離線アークの増加が確認される。この理由としては後縁部角度15°のすり板はトロリ線とすり板間で発生した離線アークが円盤の回転に伴ってすり板後縁に移動し、トロリ線とすり板

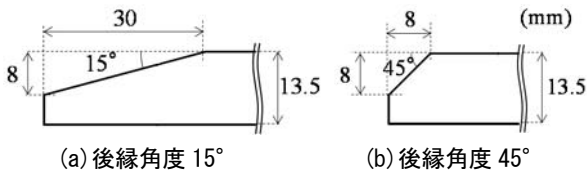


図4 すり板後縁部角度

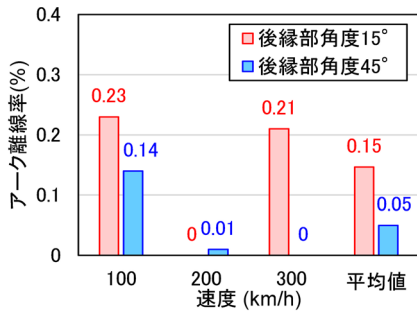
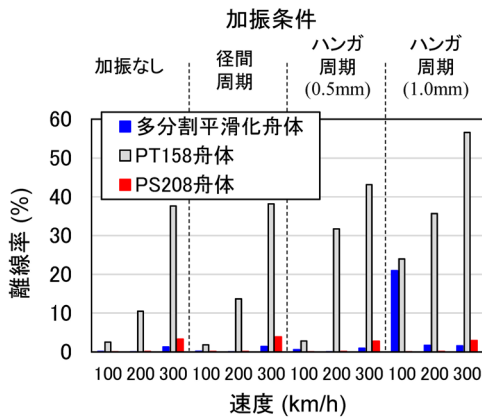


図5 離線率測定結果 (400A)

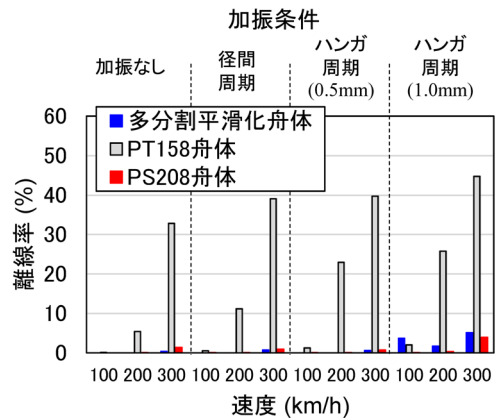


(a) 静押上力 54N

後縁の面取り部位間のアークとなることで、アーク長が伸びやすくなり、その結果アークが検出されやすくなったためと考えられる。また、後縁部角度15°の条件では、試験後の面取り部に顕著なアークスポットが観察されており、この推測と整合する。しゅう動部位以外へのアークスポットの集中はアークによるすり板部材の溶損を招く恐れがあるために望ましくない。そこで、以降の試験では後縁部角度45°を標準とした。ただし、本現象は通電時の電圧や電流の影響も受けるものと考えられるため、今後更なる調査が必要である。

2.4 パンタグラフ総合試験装置による集電性能の検証

本節では多分割平滑化舟体の集電性能を検証するため、通電なしの条件で、電圧式離線率の測定を行い、PT158 舟体、すり板を多分割化した PS208 舟体<sup>9)</sup>の結果と比較した。試験結果を図6に示す。図6(a)は押上力54N、図6(b)は押上力75Nの条件における離線率の測定結果である。図6(a)から、PT158 舟体は加振条件や速度によらず円盤速度の上昇とともに離線率が増加する傾向にあるのに対し、多分割平滑化舟体は一部の条件を除いて、すり板を多分割化した PS208 舟体<sup>9)</sup>の条件とほぼ同等の低い離線率となっていることが確認できる。ただし、多分割平滑化舟体はハンガ周期加振（片振幅1.0mm）で回転速度100km/hの条件において離線率が高くなっている。この原因としては、100km/h 走行時のハンガ間隔周期の加振周波数5.6Hzが図3の多分割平滑化舟体のコンプライアンスの極小値の周波数とほぼ一致していることや、多分割平滑化舟体の追従機構のストロークが5mmと比較的短いことが想定されるが、低速条件下での現象であり、かつPT158 舟体の離線率よりも低いため、実用上問題ではないと考えられる。また、約20Nの揚力が作用している状態を想定した図6(b)において、多分割平滑化舟体は概ね低い離線率となっており、良好な集電性能を有していることが確認できる。



(b) 静押上力 75N

図6 電圧式離線率測定の結果

### 3. 平均揚力補償機構

#### 3.1 平均揚力補償機構の概要

多分割平滑化舟体のように平滑形状の舟体を搭載したパンタグラフの揚力はすり板摩擦や対抗風の風向変化などによって変化しやすい。そこで、圧力測定用静圧孔を設置した多分割平滑化舟体を搭載したパンタグラフを対象とし、すり板の摩擦による形状変化、パンタグラフへの風向変化およびパンタグラフの作用高さ変化に起因するパンタグラフの平均揚力の変化を推定・補償する平均揚力補償機構を開発した。平均揚力補償機構は後述する推定手法によって平均揚力を推定し、パンタグラフに実装した空気圧シリンダで押し上げ力を調整することで、パンタグラフの平均揚力と空気圧シリンダによる押し上げ力調整値の合計（以下、補償済み揚力）を目標値に保つ制御を行う。ここで、揚力は流体的な現象であるのに対し、空気圧シリンダは押し上げ力の調整を行っているだけで、実際に揚力を直接制御しているわけではない点に注意されたい。また、揚力の短時間変動については本機構の対象としない。

平均揚力補償機構の概要図を図7に示す。本図に示すように、パンタグラフの主ばねと並列に複数型エアシリンダが設置されており、エアシリンダの発生力がてこを介して主軸にモーメントとして作用する。エアシリンダには電空比例弁で圧力を調整した圧縮空気を送るが、電空比例弁を非加圧部へ設置することにより当該パンタグラフを加圧環境下で使用する場合にも制御電圧の加圧部への伝送が不要となり、実装上の優位性がある。

なお、提案手法を実現する上で、次節で述べる静圧孔の選定および、制御パラメータの決定の過程で、正確なパンタグラフ揚力を測定する必要がある。そのため、図7に示すように舟支えとパンタグラフ基部に設置したロードセルとの間に張り渡した金属ワイヤを介して風洞試験によりパンタグラフ揚力を測定した。

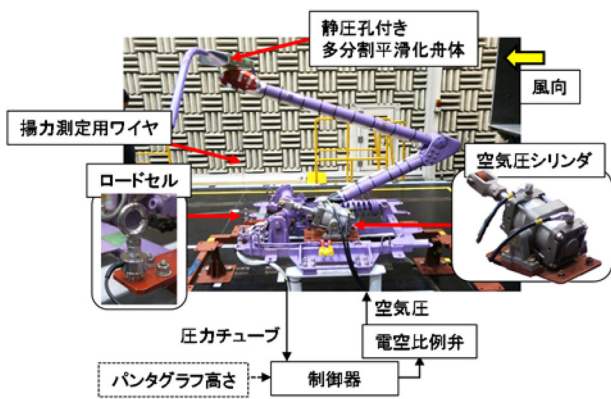


図7 平均揚力補償機構の概要図

#### 3.2 平均揚力推定用舟体

本節では平均揚力の推定手法について述べる。原理的には舟体表面の多数点の圧力を測定し、これを面積分することで、舟体の揚力を推定可能であるが、多数点の圧力測定は実用上現実的でない。そこで、舟体圧力の測定点の選定と、推定のための係数を決定する過程にスパースモデリングを適用し、数点の舟体表面圧力で平均揚力を推定可能な測定点と回帰係数を決定する<sup>6)</sup>。スパースモデリングとは、大規模なデータにおけるスパース性（データサイズが大きくとも有意なデータは少なく、本質的な関係がもっと少ない変数でも表現可能である状態）を仮定して、少ない情報により現象を表現するためのモデル化手法である。

スパースモデリングの適用に必要な舟体表面の圧力を測定するため、図8に示すように舟体の前縁および後縁のそれぞれ4箇所の樹脂部を静圧孔付きのパーツ（濃緑色部）に変更し、赤色の点で示す箇所など合計35箇所に静圧孔を設けた。静圧孔の配置の模式図を図9に示す。同図上段に舟体の上面図、下段に舟体の断面図を示す。多分割平滑化舟体の左右方向の中心を0mmとして、0mm, 160mm, 240mm および 320mm の断面の外周に静圧孔を設けた。中心を除く3断面にはそれぞれ10箇所の静圧孔を設けた。中心断面は静圧孔からの圧力管の配線経路と干渉する舟体後縁部を除く、舟体前縁部の5

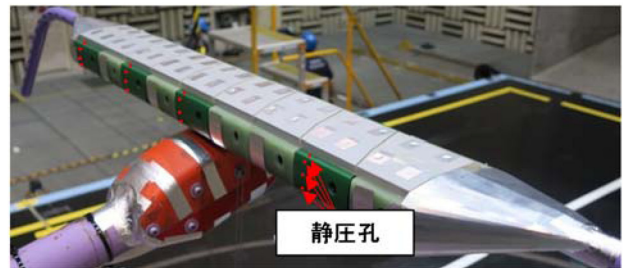


図8 静圧孔付き多分割平滑化舟体

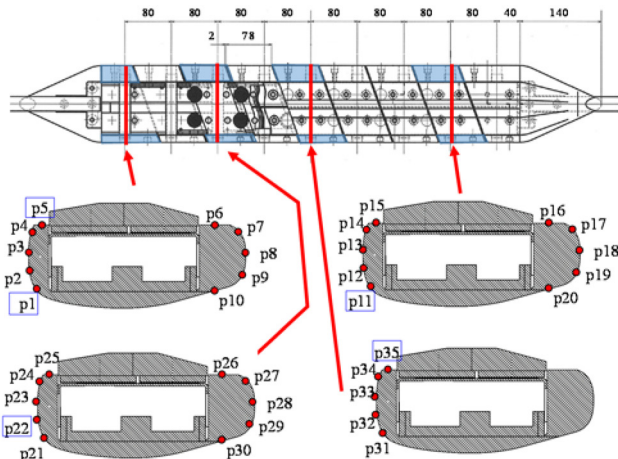


図9 多分割平滑化舟体の静圧孔配置図

箇所静圧孔を設けた。なお、静圧孔の設置位置については、迎角変化やすり板の摩耗による断面形状変化に対して圧力が大きく変化するすり板前縁側角部周辺の圧力変化を捉えることが重要であるが、しゅう動走行時にはすり板が摩耗するため、実用上その表面圧力の測定が困難である。また、迎角変化による揚力変化を抑えるために舟体底面の圧力も重要であるが、舟体底面での圧力測定は多分割平滑化舟体の機構上困難である。以上の理由によりすり板と舟体底面には静圧孔を設けなかった。また、圧力測定点の選定時には、多数点の舟体表面圧力のデータを取得する必要があるため、舟体内部に多数の空気配管を実装する必要がある。そのため、図8に示すように、静圧孔を設けた分割舟体については貫通孔を省略して空気配管を配置するとともに、他の分割舟体についても貫通孔を塞いだ状態で試験を実施した。また、各分割舟体を支持するばねをスペーサに交換することで、すり板支持部に対し各分割舟体を固定した。

### 3.3 平均揚力の推定手法

本項ではパンタグラフの揚力の推定のために、舟体表面の静圧孔における表面圧力とパンタグラフ高さの信号を入力として、パンタグラフの揚力係数を推定する手法について説明する。ピトー管の静圧を基準圧とした舟体上の*i*番目の静圧孔の圧力をピトー管の動圧で除した圧力係数を $C_{Pij}$ 、パンタグラフ高さの信号を $h_j(i=1,2,\dots,N, j=1,2,\dots,M)$ とする。ここで、*N*は静圧孔の総数であり、*M*は試験条件数に対応する。パンタグラフの揚力をピトー管の動圧と代表面積で除した揚力係数を $C_{Lj}$ とおき、揚力係数を舟体の圧力係数とパンタグラフ高さで表現する回帰モデルを式(1)で示す。

$$\mathbf{C}_L = \mathbf{C}_P \mathbf{a} \quad (1)$$

ここで、

$$\mathbf{C}_L = [C_{L1} \ C_{L2} \ \dots \ C_{LM}]^T \quad (2)$$

$$\mathbf{C}_P = \begin{bmatrix} C_{P11} & C_{P21} & \dots & C_{PN1} & h_1 \\ C_{P12} & C_{P22} & \dots & C_{PN2} & h_2 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ C_{P1M} & C_{P2M} & \dots & C_{PNM} & h_M \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$\mathbf{a} = [a_1 \ a_2 \ \dots \ a_N \ b]^T \quad (4)$$

である。式(1)の回帰係数 $\mathbf{a}$ は通常は最小二乗法などで計算するが、その場合は全ての圧力測定点のデータが必要となり実用性の無い解となる。この問題の対策としてスパースモデリングを導入し、式(5)のLasso型最適化問題を設定する。

$$\arg \min_{\mathbf{a}} \left( \frac{1}{2\lambda} \|\mathbf{C}_L - \mathbf{C}_P \mathbf{a}\|_2^2 + \|\mathbf{a}\|_1 \right) \quad (5)$$

なお、 $\lambda$ は使用する圧力測定点数と推定精度との関係

についての重み付けをするパラメータである。式(5)に風洞試験データを適用し、これを解くことで回帰係数 $\mathbf{a}$ のうちの多くの変数は0となり、一部の変数のみが非零の値となる。このうち、非零の値となった $a_i$ や $b$ が揚力係数を推定するための回帰係数となり、それに対応する信号がスパースモデリングにより選定された情報となる。

なお、静圧孔の圧力とパンタグラフ高さの情報はそのままでは単位の異なる物理情報であるため、スパースモデリングで取り扱う際には両者を無次元化した上で扱う方が自然であり、さらに式(5)の最適化問題として定式化する上で、各入力変数は比較的オーダーの近い値とする必要がある。式(3)の $C_{Pij}$ は静圧孔の位置により大きく値が異なるが、後述する試験において最小で-1.8、最大で1.0の無次元数となったため、 $h_j$ は一般的な新幹線用パンタグラフの作用高さの範囲であるレール頭頂面から4800mm~5300mmの高さをそれぞれ-1.0と1.0とし、線形に正規化した。

回帰係数の算出のため、鉄道総研の大型低騒音風洞にパンタグラフを設置し、揚力測定試験を行った。揚力測定試験のパンタグラフの設置条件はすり板の摩耗条件3種類(新品, 3mm 摩耗, 6mm 摩耗)に対し、パンタグラフ作用高さ5種類(4800mm, 4900mm, 5000mm, 5100mm, 5300mm)や、パンタグラフに対する迎角5種類(+3.0°, +1.5°, 0°, -1.5°, -3.0°)を変更した27条件とした。なお、これらの条件については、顕著な揚力変化が生じるように、すり板摩耗については左右方向に一樣にすり板を摩耗させた状態を設定し、迎角については通常想定される迎角変化量 $\pm 2^\circ$ よりも大きい $\pm 3^\circ$ を設定した。各条件に設定されたパンタグラフに対して、それぞれ風速150km/h, 220km/h, 320km/h, 360km/hおよび400km/hの5速度段で一定時間の送風を行い、これらの測定結果から式(5)を解き、図9の青枠で囲んだ5点の静圧孔を選定し、静圧孔とパンタグラフ高さの信号に対する回帰係数を算出した。

### 3.4 平均揚力補償試験結果

前節の平均揚力の推定手法を用いて、パンタグラフの平均揚力と空気圧シリンダによる押上力の調整値の合計である補償済み揚力をリアルタイムで目標値に制御する平均揚力補償試験を行った。本報告では補償済み揚力の目標値を360km/hにおいて46Nとなる風速の2次関数と設定した。なお、揚力補償試験の速度段は揚力測定試験と同一とし、効果の検証を目的として、すり板の摩耗条件、パンタグラフ作用高さおよびパンタグラフに対する迎角を変更した条件での補償済み揚力をロードセルによって測定した。また、平均揚力の推定にパンタグラフ高さを使用しなかった場合(以下、Case A)と、パンタグラフ高さを使用した場合(以下、Case B)の2ケース

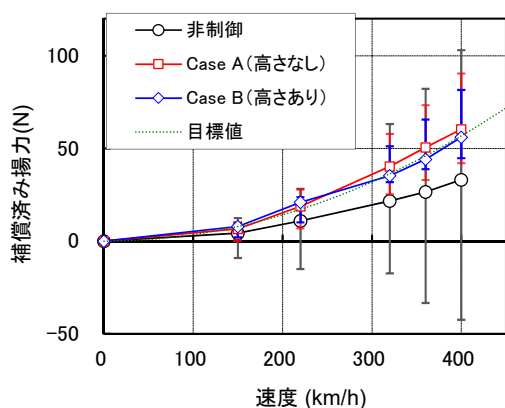


図 10 平均揚力補償試験結果

で試験を実施した。

揚力補償試験結果と補償済み揚力の目標値を図 10 に示す。非制御時、Case A および Case B の結果をそれぞれ黒、赤および青で示す。各制御条件における補償済み揚力の平均値をプロットで、補償済み揚力の最大値と最小値をエラーバーで示す。また、補償済み揚力の目標値を緑色の破線で示した。本図から、非制御時には各種のパンタグラフ条件の変化による 360km/h における平均揚力の変化範囲が -33~82N と 115N の幅があったのに対して、Case A の揚力補償を行うことで補償済み揚力が 33N~73N と 40N の範囲に大幅に改善することが確認できる。また、Case B の揚力補償を行うことで、補償済み揚力が 39N~66N と 27N の範囲に安定化し非制御時の平均揚力の変化範囲と比較して約 1/4 に低減していること、さらに補償済み揚力の平均値が目標値とほぼ一致していることが確認できる。

Case A に対し Case B で顕著な性能向上が得られた理由としては、当該パンタグラフの形状と静圧孔の配置条件では、パンタグラフの作用高さの変化に応じて生じる枠組の揚力変化を十分に捉えることが困難であり、パンタグラフの作用高さの情報はこの問題を補完する情報として有効であったことによると推測される。

#### 4. 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音特性・揚力特性と追従性を高い次元で両立させるための機構として、多分割平滑化舟体と平均揚力補償機構を提案し、提案機構の有効性を定置試験装置や風洞試験で検証した。本研究で得られた成果を以下に示す。

- (1) 多分割舟体はすり板の後縁部の角度が浅い場合にアーク離線率が有意に増加する。ただし、本現象は通電時の電圧や電流の影響も受けると考えられる。
- (2) 多分割平滑化舟体は、パンタグラフ総合試験装置で

の 300km/h までの離線率が PT158 舟体と比べて大幅に低減され、PS208 舟体と概ね同等の離線率特性を有する。

- (3) 平均揚力補償機構を開発した。揚力の推定は舟体表面の 5 箇所静圧孔の信号により行い、パンタグラフの揚力の時間平均とパンタグラフに実装した空気圧シリンダによる押上力の合計値を安定化するように制御した。また、揚力の推定にパンタグラフの作用高さの信号を併用することで補償効果を向上可能であることを確認した。
- (4) 平均揚力補償機構により、多分割平滑化舟体を搭載したパンタグラフのすり板摩耗などの条件変化に起因した平均揚力の変化範囲を約 1/4 に低減できること、補償済み揚力の平均値をほぼ目標値に調整可能であることを確認した。

今後はさらに高速・高電圧・大電流通電下での集電性能の検証について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，レールアンドテック出版，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) 久保田喜雄：新幹線車両へのカーボン系パンタグラフすり板適用に関する基礎的検討，第 25 回鉄道技術連合シンポジウム講演論文集，1311, 2018
- 4) 白田隆之，光用剛，長尾恭平，久保田喜雄，若林雄介：多分割舟体による接触性能向上手法，鉄道総研報告，Vol. 33, No. 6, pp. 41-46, 2019
- 5) 白田隆之，光用剛，長尾恭平，磯野達志，若林雄介：多分割舟体実機による集電性能検証試験，第 26 回鉄道技術連合シンポジウム講演論文集，S1-1-2, pp. 3-6, 2019
- 6) 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
- 7) 白田隆之，小林樹幸，山下義隆，光用剛，磯野達志，平川裕雅：スパースモデリングによるパンタグラフの揚力補償手法，日本機械学会，第 28 回交通・物流部門大会，3004, 2019
- 8) 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，電学論 D, Vol.131, No.3, pp.388-395, 2011
- 9) 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