

部材間干渉緩和と多孔質材貼付による パンタグラフ空力音低減

池田 充* 末木 健之** 光用 剛*

Aerodynamic Noise Reduction of a Pantograph by Relaxation of Interference between Pantograph Members and by the Surface Covering with Porous Material

Mitsuru IKEDA Takeshi SUEKI Takeshi MITSUMOJI

To reduce aerodynamic noise generated by a pantograph, the authors have already proposed some techniques, that is, shape-optimization of a panhead, relaxation of aerodynamic interference between panhead and articulated frame, and covering the surface with porous material. To evaluate the integrated noise reduction effect of them, a wind tunnel testing was performed with a Shinkansen pantograph to which these techniques were applied. As a result, it was found out that the noise level of the improved pantograph is lower by about 4dB than that of the currently-used pantograph.

キーワード：パンタグラフ，騒音，空力音，揚力，空力干渉，多孔質材

1. はじめに

近年の新幹線ネットワーク拡大に伴い、航空機や自動車に対する競争力を高める施策として速度向上に対する期待が高まりつつある。しかし、新幹線騒音に対する厳しい環境基準が定められている日本では、速度向上の可否は沿線騒音低減技術がその鍵を握っているといっても過言ではない。新幹線車両から発生する騒音のうち、空力音はそのパワーが列車速度の6~8乗に比例するため¹⁾、高速走行時には転動音など他の騒音に対して空力音が卓越する。パンタグラフは車両屋根上に電気的な絶縁離隔を確保して設置されるため、高速気流にさらされ、強い空力音源となりやすい。そのため、新幹線高速化においてパンタグラフの空力音低減は重要な課題の一つである。

これまで、パンタグラフの空力音対策として、部材の形状平滑化を進めた低騒音パンタグラフが開発され、新幹線の沿線騒音低減に大きな役割を果たしてきた。ただし、今後300km/hを大幅に超える速度域においてパンタグラフ空力音のさらなる低減を実現するためには、部材単位の形状平滑化を進めるだけではもはや不十分である。そこで鉄道総研では、最適化手法を援用した部材の平滑化形状決定手法を提案するとともに、部材の形状平滑化と合わせて部材間の空力干渉緩和をはかる方法や、形状平滑化が難しい部材に対して多孔質材貼付を行う方法などを提案してきた。本論文では、これら手法をパンタグラフ実機に適用し、その空力音低減効果を確認した

* 鉄道力学研究部（集電力学）

** 環境工学研究部（騒音解析）

結果と、揚力特性、追従振幅特性などへの影響について調べた結果を報告する。

2. 舟体の形状最適化と舟体・枠組間の空力干渉緩和

舟体（図1）は投影面積が大きく、しかも列車速度と同程度の対向風にさらされるため、パンタグラフ空力音の主たる音源の一つとなっている。そのため、舟体形状の決定は低騒音化を進める上で重要な作業である。また、集電性能を確保するうえでは安定した揚力特性（迎角変化やすり板摩耗に対して揚力変化が小さいこと）の確保もまた必須の要件であり、舟体形状はこれを実現する上でも重要なファクタである。しかしながら、空力音低減と揚力特性安定化とは舟体形状に対して相反する要求を与えるため、この2つの要件を同時に満足させる舟体形状を見出すことは容易ではない。

そこで鉄道総研では、数値流体解析（CFD解析）と最適化手法を組み合わせることにより、空力音低減と揚力特性

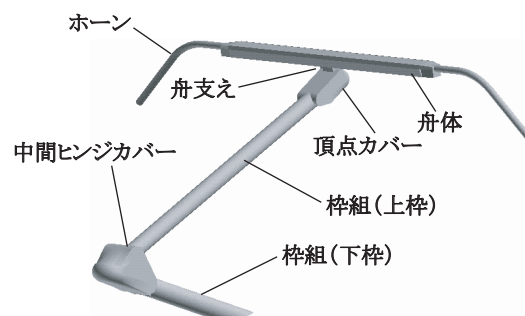


図1 低騒音パンタグラフ各部の名称

特集：鉄道力学

安定化を両立可能な舟体形状の探査法を提案している²⁾。この手法は、迎角変化やすり板摩耗を考慮したうえで舟体形状を決定するものである。現用の新幹線用パンタグラフに用いられている舟体形状の例を図2 (a) に示すとともに、本手法を適用し、走行方向を一方に限定（前後非対称形状を許容する）したうえで、舟体幅 120mm という制約条件を与えて求めた舟体形状を図2 (b) に示す³⁾。

このようにして得られた舟体形状を適用すると、舟体単体の条件では空力音の大幅低減が実現することを確認している³⁾。しかし、舟体を枠組に取り付けた条件では、舟体の形状平滑化を進めると枠組との間に強い空力干渉が発生し、新たな空力音を誘起してしまうため、所期の空力音低減効果が得られないことがわかってきた^{4) 5)}。この原因は、舟体と枠組の接合部に強い縦渦が形成され、比較的高い周波数の空力音が発生するためである⁶⁾。そこで、図3 (b) に示す新しい舟支え構造を提案している。この構造は、舟支え部をφ22の長い円断面部材で構成し、舟体を枠組部から空間的に分離していることが特徴である。もちろん、現用品と同じくリンク機構を構成することにより、舟体は常に水平に支持される。

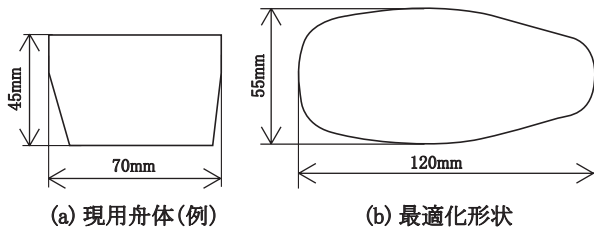


図2 最適化手法により求めた舟体断面形状

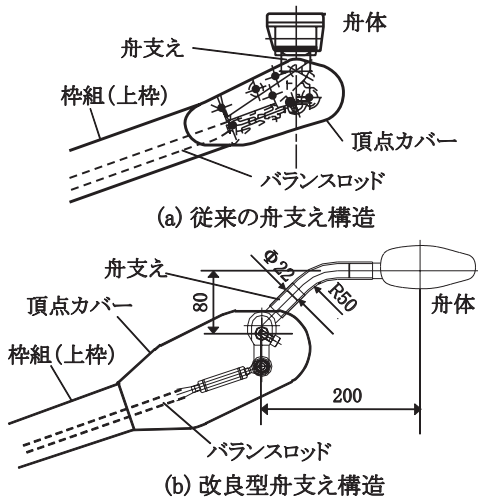


図3 舟支え構造

3. 多孔質材によるパンタグラフ空力音の低減

前章で述べた部材の形状平滑化は、空力音低減に対し非常に有効な手段である。しかし、パンタグラフとしての機能を満足させる必要上、部材の形状平滑化には制約

を伴う場合も多い。このような部材の空力音低減手法として、鉄道総研では部材表面に多孔質金属材料を貼付する方法を提案している^{7) 8)}。

多孔質材には種々の形態があるが、空力音低減に有効なものはオープンセルタイプ（空隙が連通している形態）の多孔質材である。そこで、三次元骨格網状構造を持ち、97%の高い空隙率を有するオープンセルタイプの多孔質材を選定した。多孔質材の目の粗さは#13（1インチの線分上にセルが平均13個存在する粗さ）である。図4にその外観を示す。貼付する多孔質材の厚みは5～10mmとした。これまでに実施した風洞実験により、多孔質材の形状が同じであれば、その材質や剛性は空力音低減効果に対してほとんど影響を与えないことがわかっている⁷⁾。そのため、現車に適用する場合には耐久性に優れた金属製多孔質材を適用する必要があるが、風洞試験等の室内試験に供する場合には取扱いが容易な樹脂製多孔質材を適用すればよい。

パンタグラフに対する多孔質材貼付の適用部位として、ここでは実用性や適用容易性を考慮してFRP製のフェアリング部材を選定した。具体的には、枠組関節部に設けられるフェアリング（中間ヒンジカバー：図1参照）と、台枠のフェアリング（台枠風防カバー）である。中間ヒンジカバーは上枠と下枠の接合部に設けられるフェアリングであり、可動部であることから形状決定の自由度が少なく、空力音低減が容易ではない。一方、台枠風防カバーに関しては、形状平滑化は比較的容易であるものの、枠組の押上機構を内蔵する空間を確保することから、形状平滑化を行うと前後方向への大型化が避けられず、重量増加を招く恐れがある。したがって、いずれの部材も多孔質材貼付による空力音低減が実現できれば効果的である。

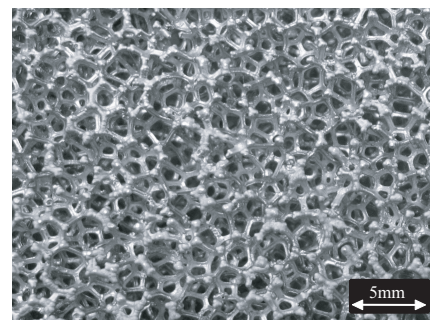


図4 多孔質材の骨格構造

4. 提案する空力音低減手法を適用した試作パンタグラフ

現用の低騒音パンタグラフに対し、2章ならびに3章で述べた空力音低減手法、すなわち舟体の形状最適化と舟体・枠組間の空力干渉緩和、および台枠や枠組関節部のフェアリングへの多孔質材貼付を同時に適用し、パンタグラフ全体としてどの程度の空力音低減効果が得られ

るのかを評価するため、低騒音碍子タイプの現用新幹線パンタグラフをベースに、舟体および舟支え部を改造するとともに、FRP製フェアリング部への多孔質材貼付を実施した。ただし、集電装置として使用するために必要な機能、すなわち接触力変動を緩和するためのばね機構や通電のための電流経路などを備えることを前提とした。

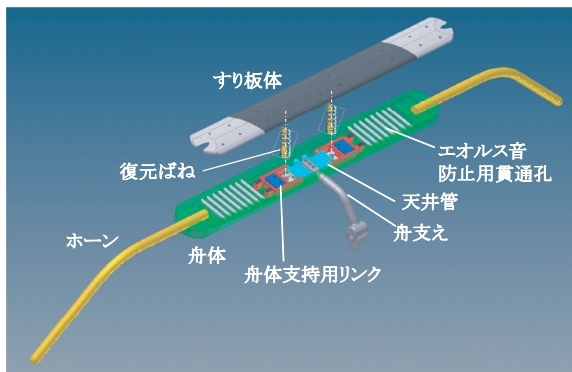
今回新たに試作した改良舟体を図5に示す。断面形状は前述の最適化手法により得た形状(図2(b))をそのまま適用した。さらに、エオルス音対策としてφ6の貫通孔を20mmピッチで計20個設け、より一層の空力音低減の実現を図ることとした。エオルス音防止用貫通孔は、図5に示すように舟体内部にパイプを貫通させることによって実現した。なお、この舟体は前後非対称形状であるため、今回はなびき条件で使用するよう舟体の向きを設定した。

舟支え部は図3(b)に示した構造・形状に変更した。試作した改良舟支え構造の外観を図6に示す。舟支えには比較的大きな荷重が作用するため、中実円管部材を用いている。接触力変動低減のためのばね機構を設けるため、舟支え頂部に天井管を取付け、舟体に固定されたすり板体との間に復元ばねを設けた(図5(a))。

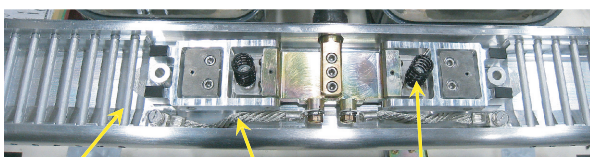
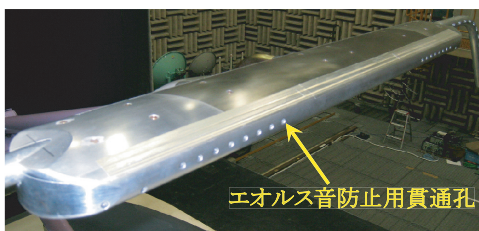
一方、多孔質材貼付については、実用性・耐久性を考慮すると高強度の多孔質金属材を使用することが求めら

れる。しかし、高い強度をもつ多孔質金属材を、曲率半径の小さい曲面が多用されたフェアリングに貼付するためには、多くの工程が必要となり、コスト面での懸念がある。そこで、サイズの大きな台枠風防カバーについては、高強度多孔質材の貼付を容易とするため、多孔質材貼付による空力音低減効果をあらかじめ見込んで、外形形状を単純な箱形に変更した(図7)。一方、中間ヒンジカバーについては、形状変更によってパンタグラフの揚力特性が大きく変化する可能性があることから、形状は現行のままとした。

なお、前述のように空力音評価には多孔質材の材質は影響しないことから、今回の試験で実際に使用したのは取扱いの容易なウレタン製多孔質材である。

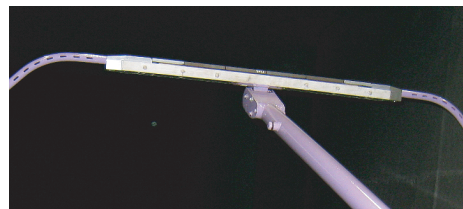


(a) 改良舟体の構造

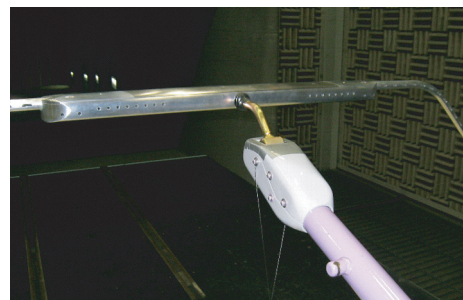


(b) 改良舟体の外観

図5 試作した改良舟体



(a) 現用舟支え構造

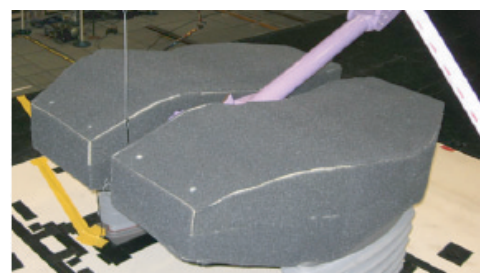


(b) 改良舟支え構造

図6 試作した改良舟支え構造



(a) 現行の台枠風防カバー



(b) 箱形台枠風防カバー+多孔質材

図7 台枠風防カバーの形状単純化

特集：鉄道力学

5. 試作パンタグラフの風洞試験

5.1 提案する空力音低減手法の空力音低減効果

試作したパンタグラフの風洞試験を実施し、空力音低減効果の評価を行った。試験は鉄道総研が所有する大型低騒音風洞（滋賀県米原市）の開放型計測部（吹出口3m×2.5m、最大風速400km/h）を用いて行った。既述のとおりパンタグラフはなびき条件とし、低騒音碍子を介して地面に固定した。パンタグラフの設置位置は図8に示す通りとし、パンタグラフ中心（碍子中心）がノズル先端より1700mm下流側となるように設置した。

空力音は、パンタグラフの舟体側方5m位置に設置した無指向性マイクロホン（図8参照）により計測した、風速300km/hにおける空力音測定結果を図9に示す。比較条件として、①現用パンタグラフ、②現用パンタグラフに対し[改良舟体+改良舟支え構造]を適用したもの、③現用パンタグラフに対し多孔質材貼付を実施したもの、④現用パンタグラフに対し前章で述べた改造を全て施したもの（以下、試作パンタグラフと記す）、の4条件である。図9より、提案した空力音低減手法を適用することにより、風速300km/hにおいて3.7dBの空力音低減が実現していることが確認できる。

ただし、[改良舟体+改良舟支え構造]のみを適用した

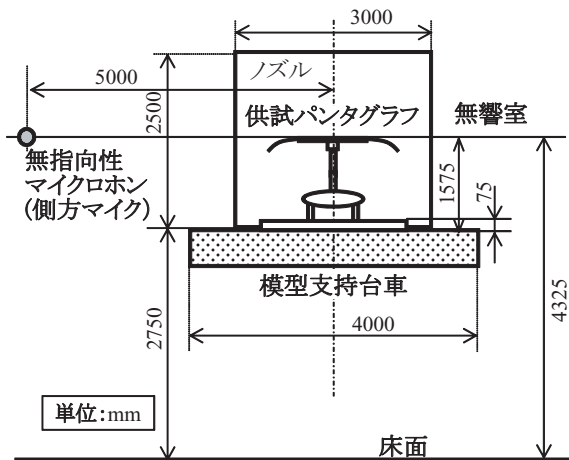


図8 風洞試験における供試体設置条件

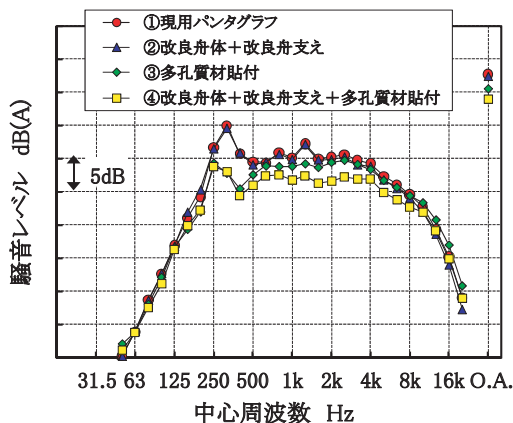


図9 試作パンタグラフの空力音低減効果

条件②の場合、現用パンタグラフに対する空力音低減効果は300km/hにおいて0.3dBに留まる。これは、舟体ならびに舟支え構造の改良効果が小さいためではなく、舟体から発生する空力音の寄与に比べて台枠近傍から発生する空力音の寄与の方が大きいためと思われる。そこで、舟体ならびに舟支え構造の改良による空力音低減効果、ならびに多孔質材貼付による空力音低減効果を定量的に評価するため、直径4mのWheel Array型マイクロホンアレイを用いて部位ごとの空力音低減量評価を行った。

この作業に先立ち、これら2つの空力音低減手法を独立に評価しても問題ないかどうかを確認するため、図9に示した上記4条件の測定結果をもとに、舟体ならびに舟支え構造の改良による空力音低減量、ならびに多孔質材貼付による空力音低減量を算出し、これら2つの値を条件①の騒音レベルに対してパワー減算した。その結果を図10に示すが、2kHz近傍を除けばパワー減算の結果は試作パンタグラフの騒音レベルとほぼ一致した。したがって、これら2つの空力音低減手法を互いに独立して評価しても問題ないと判断した。

そこで、現用パンタグラフと試作パンタグラフを対象に、風速300km/hにおいて音源探査を実施した。その結果を図11に示す。なお、音源探査は1/3オクターブバンド毎に実施しているが、ここでは315Hzバンド、800Hzバンド、および2.5kHzバンドについてのみ示している。この図より、低周波領域では台枠部の空力音の寄与が大きく、高周波になるほど舟体近傍の寄与も大きくなっていく様子がわかる。また、現用パンタグラフに対し、試作パンタグラフでは台枠部および舟体近傍の音源強度がともに低減している様子もよくわかる。

この結果を利用し、図12に示す2つの領域、すなわち舟体および舟支え近傍（領域A）および台枠近傍（領域B）から発生する空力音について、それぞれの領域ごとのパワー平均を求め、現用パンタグラフと試作パンタグラフとの空力音比較を行った結果を図13に示す。厳密に言えば、マイクロホンアレイの指向特性は周波数によって異なるため、これを正規化して補正する必要がある。し

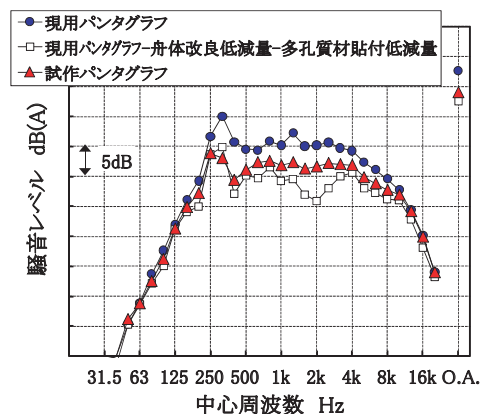


図10 舟体ならびに舟支え構造改良と多孔質材貼付との空力的干渉の検討

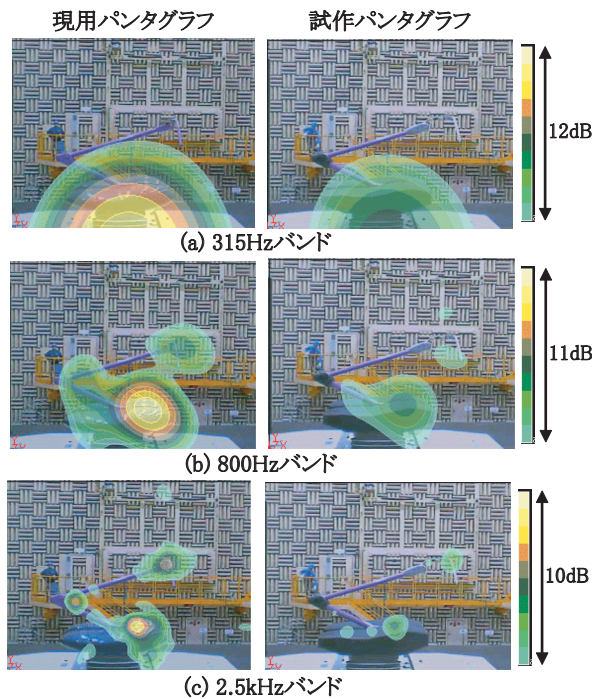


図 11 風速 300km/h における音源探査結果

かし、今回の場合は2つの領域の音源相互の干渉が小さいうえ、興味の対象が空力音の絶対値ではなく、空力音低減効果であることから、特別な正規化は行っていない。

図 13 を参照すると、領域 A、領域 B のどちらについても改良によって現行パンタグラフに対し約 4dB ずつ空力音が低減していることがわかる。つまり、舟体ならびに



図 12 空力音評価のための領域設定

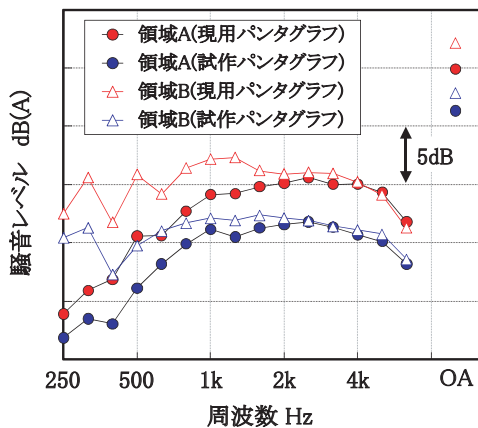


図 13 音源別の空力音比較 (300km/h)

舟支え構造の改良と、台枠に対する多孔質材の貼付は、ともにほぼ同程度の空力音低減効果を有しており、これらを組み合わせることによって現行パンタグラフに対して約 4dB の空力音低減が実現できていることがわかる。

5.2 試作パンタグラフの揚力特性

舟体および舟支え部の形状改良がパンタグラフの揚力特性に与える影響を調べるため、現行パンタグラフと試作パンタグラフの揚力測定を前節と同一条件で行った。その際、舟体の取付角度を $\pm 2^\circ$ の範囲で変え、パンタグラフ近傍の流れの角度が変化した状態を模擬した。その結果を図 14 に示す。これより、舟体および舟支え構造の改良を行っても、揚力の迎角依存性（迎角変化に対する揚力変化量）は現行パンタグラフとほぼ同程度に抑えられており、高速用パンタグラフとして重要な要件である安定した揚力特性が維持されていることが確認できる。

なお、舟体および舟支え構造の改良を行うと、標準条件（迎角 0° ）における揚力が現行パンタグラフに対し大きく低下し、どの速度でもほぼ 0 に近い値となった。これは、舟体および舟支え構造の改良によって舟体・枠組間の空力干渉緩和が実現したことと起因すると思われる。既述のように、現行パンタグラフでは舟体と枠組との間に強い空力干渉が生じているが、これが大きな揚力発生要因にもなっていることが過去の研究により確かめられている⁴⁾。試作パンタグラフではこうした空力干渉が緩和されたため、揚力が低下したものと思われる。見方を変えると、試作パンタグラフでは舟体単体の揚力特性と枠組単体の揚力特性とをそれぞれ把握すれば、パンタグラフ全体の揚力特性をおおむね見積もることができるため、現行パンタグラフより揚力調整が容易である。

このような舟体・枠組間の空力干渉緩和が実際に実現できていることを確認するため、現行パンタグラフと試作パンタグラフの舟支え後流における流速分布測定を実施した。試験は鉄道総研の小型低騒音風洞で行い、粒子

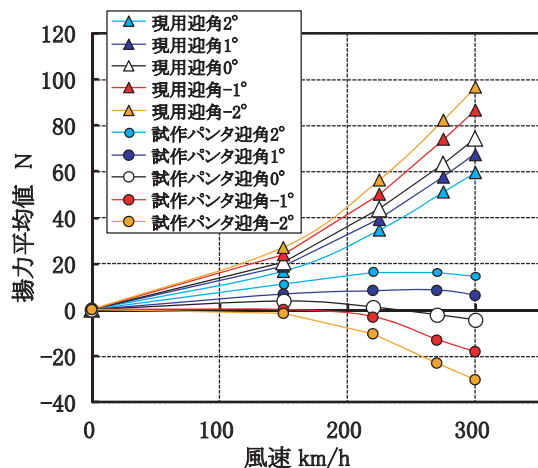


図 14 舟体迎角を変えた時のパンタグラフ揚力

特集：鉄道力学

画像流速測定法 (PIV) により流速分布を計測した。この風洞の吹出口は 720 × 400mm でありパンタグラフよりも小さいが、舟支え部後流の流れ場を概観することは十分可能であると判断した。主流速度は 150km/h (41.7m/s) とし、舟体下方より舟支え部を見上げる形で流速分布を計測した。その結果を図 15 に示す。この図より、現用パンタグラフの舟支え部後流には舟体との干渉により 1 対の強い渦が生じている様子が捉えられているのに対し、試作パンタグラフの舟支え部の後流にこのような顕著な渦の発生は認められず、空力干渉緩和が実現できていることがわかる。

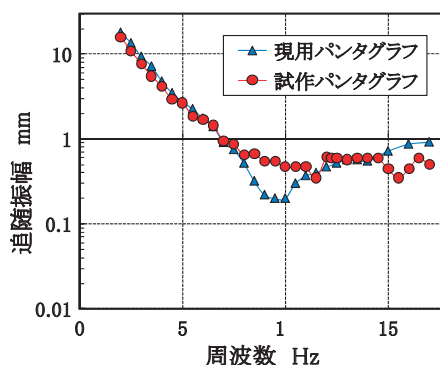


図 16 試作パンタグラフの追従振幅特性

6. 試作パンタグラフの追従性能

今回試作したパンタグラフが集電装置として必要な追従性能を具備しているかどうかを確認するため、鉄道総研所有のパンタグラフ総合試験装置を用いて試作パンタグラフの追従振幅特性を測定した。その結果を図 16 に示す。比較として現用パンタグラフの追従振幅特性も示しているが、試作パンタグラフの追従性能は現用パンタグラフとほぼ同程度であった。したがって、今回提案した新しい舟体構造、舟支え構造は新幹線用パンタグラフとして十分適用可能であると考えられる。

グに対する多孔質材貼付を同時に現用パンタグラフに適用し、風洞試験によりその空力音低減効果を評価したところ、パンタグラフ空力音を約 4dB 低減することが可能であることを確認した。また、パンタグラフ揚力の迎角依存性は現用パンタグラフと同程度に抑えられており、安定した揚力特性が維持されていることを確認した。さらに、追従振幅特性についても現用パンタグラフとほぼ同等であることを示した。

今後は実用化にむけて、舟支え部の機械的な耐久性の検討や、多孔質材の長期にわたる耐候性の確認などを進めていく予定である。

7. まとめ

高速用パンタグラフの空力音低減手法として提案している、舟体の形状最適化と舟体・枠組間の空力干渉緩和のための舟支え構造改良、ならびに台枠や枠組関節部のフェアリン

文 献

- 1) Lighthill, M.J., "On sound generated aerodynamically. 1 General Theory," Proc. Roy. Soc., A211, pp.546-587, (1952)
- 2) 鈴木; パンタグラフの空力最適化, 日本機械学会2003年度年次大会講演論文集 (II), pp325-326, (2003)
- 3) 吉田, 鈴木, 池田; 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)
- 4) 池田, ほか2名; 舟体と枠組の空力干渉緩和によるパンタグラフ空力騒音の低減効果, 日本機械学会2005年度年次大会講演論文集 (VII), pp.231-232, (2005)
- 5) 池田, 小山, 鈴木; 舟体と舟支えの空力干渉緩和によるパンタグラフ空力音の低減, 鉄道総研報告, Vol.20, No.11, pp.5-10, (2006)
- 6) 光用, 池田; 数値流体解析による舟体・枠組間の空力干渉の検討, 鉄道総研報告, Vol.23, No.2, pp.21-26, (2009)
- 7) 末木, 池田, 高石; 多孔質材の表面貼付による空力音低減効果と集電装置への応用, 鉄道総研報告, Vol.22, No.5, pp.11-16, (2008)
- 8) 末木, ほか4名; 金属製多孔質材付き高速用パンタグラフの空力音低減効果, 第18回環境工学総合シンポジウム, (2008)

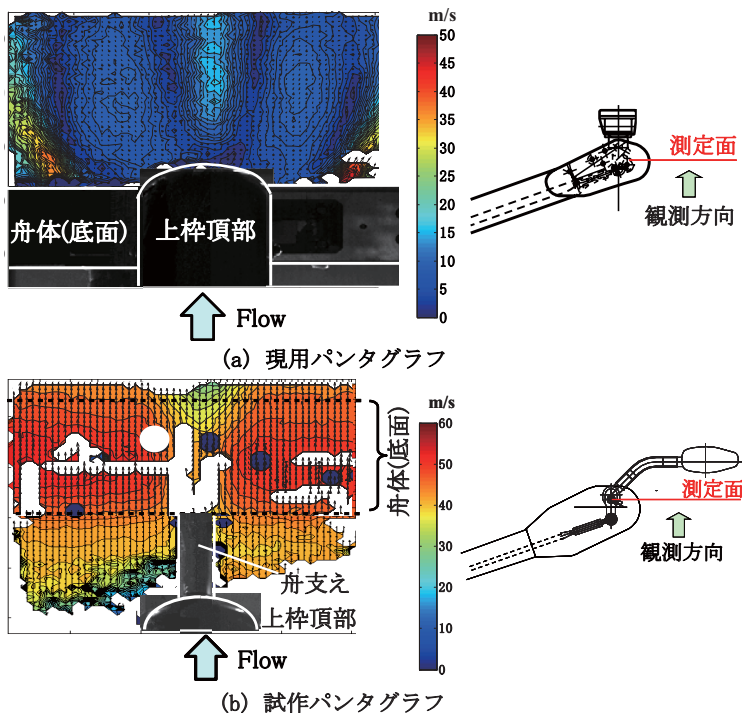


図 15 舟支え部後流の流速分布
(主流方向成分を表示: 主流速 41.7m/s)