パンタグラフの空力音を低減する

現在，新幹線は最高速度320km/hで営業運転を行っています。今後，新幹線のさらなる高速化を実現するためには，沿線騒音の低減が必須であり，なかでもパンタグラフから放射される空力音を低減することは重要な課題の一つとなっています。ここでは，新幹線用パンタグラフの開発の歴史を概説するとともに，パンタグラフの空力音低減に関する最近の研究内容として，舟体・舟支え部の形状改良，多孔質材の適用，流れ場制御の適用の3つの手法について紹介します。


光用　剛
Takeshi Mitsumoji
鉄道力学研究部
集電力学研究室
主任研究員
[専門分野] 架線／パンタグラフ系に関わる空力現象


池田　充
Mitsuru Ikeda
電力技術研究部
部長
[専門分野] 架線／パンタグラフ系の動的相互作用，パンタグラフの低騒音化


末木　健之
Takeshi Sueki
環境工学研究部
騒音解析研究室
主任研究員
[専門分野] 鉄道騒音


臼田　隆之
Takayuki Usuda
鉄道力学研究部
集電力学研究室
室長
[専門分野] 架線／パンタグラフ系の動的相互作用

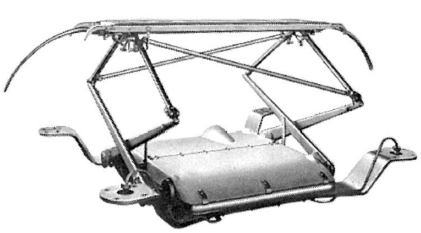

深潟　康二
Koji Fukagata
慶應義塾大学
理工学部機械工学科
教授
[専門分野] 流体力学全般／流れの制御／乱流

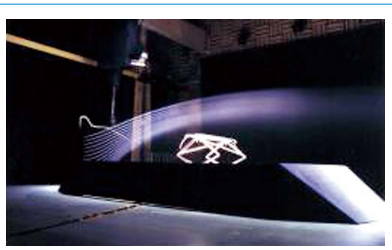
はじめに

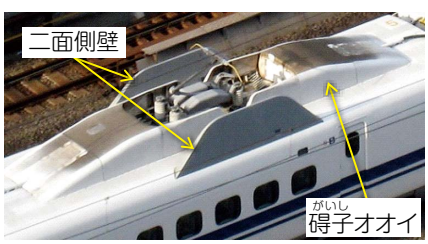
開業以来50年以上の開発を経た現在の新幹線パンタグラフは，空力音低減を目的として部材点数の削減や形状改良などの対策が進められたものが使用されています。今後さらなる空力音の低減を実現するためには，効果的な形状改良をさらに進めることはもちろん，形状改良によらない新しい空力音低減対策も必要になると考えられ，研究開発を行っています。ここでは，新幹線パンタグラフの歴史を概説したうえで，パンタグラフの空力音低減に関する最近の研究内容として，形状改良，多孔質材の適用，流れ場制御手法の適用について紹介します。

パンタグラフの空力音低減の歴史

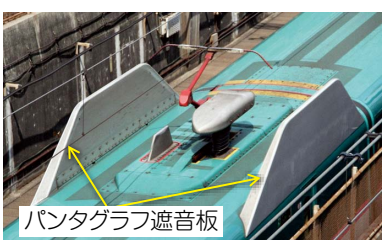
1964年の東海道新幹線開業当時は，パンタグラフに起因する主な騒音は離線アークによって生じるアーク音でした。その後，1985年から複数のパンタグラフを電気的に接続する，いわゆる高圧母線の引き通しが逐次実施された


(a) 0系のパンタグラフ


(b) パンタグラフカバー



(c) 碍子（がいし）オオイ+シングルアームパンタグラフ



(d) 低騒音碍子（がいし）+シングルアームパンタグラフ

図1　新幹線用パンタグラフの変遷

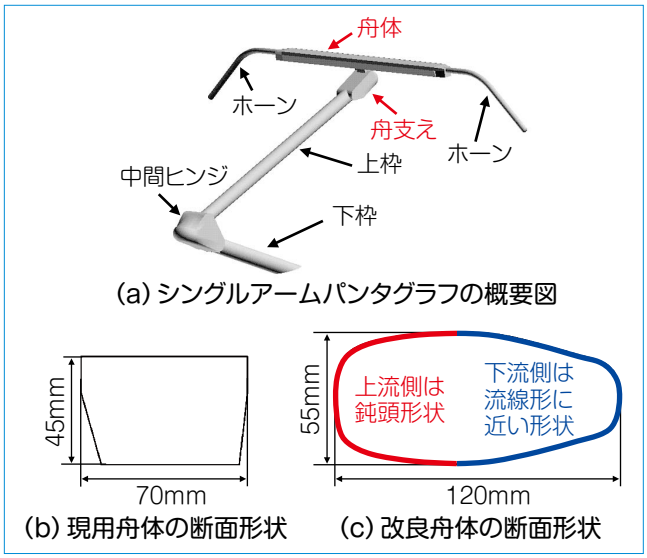


図2　パンタグラフの概要図と舟体断面形状

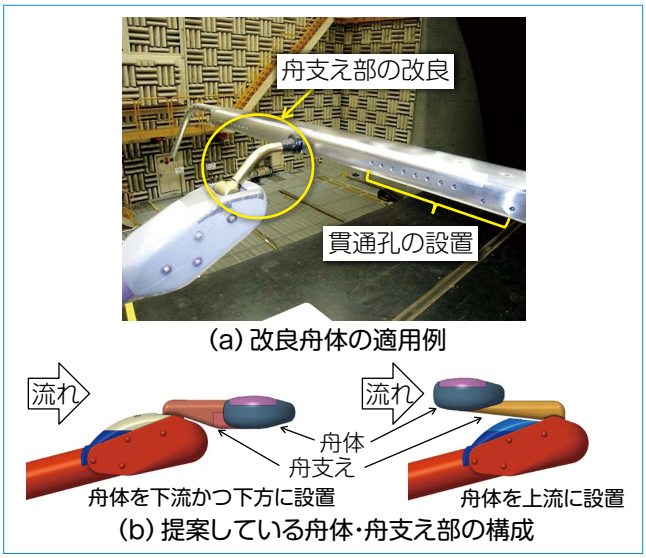


図3　舟体・舟支え部の改良例

結果，アーク音が大幅に低減し，かわりに風切り音（以下，空力音）が顕在化するようになりました。東海道新幹線開業当時の新幹線パンタグラフは，**図1 (a)** に示すような下枠交差型のパンタグラフが用いられており，アーム（枠組）部分など気流にさらされる部材点数が多く大きな空力音が発生していました。そこで，1987年からパンタグラフの空力音低減対策として順次行われたのがパンタグラフカバーとよばれる大型のフェアリングによってパンタグラフを覆う対策でした（**図1 (b)**）。これにより，パンタグラフが高速の気流にさらされることを防ぐとともに，パンタグラフからの放射音を遮音することができるなど，空力音の発生と伝播の両面から対策がなされました。一方で，低屋根化が図られた300系以降の車両においては，パンタグラフカバー大型化の影響による車両動揺の増加，パンタグラフカバー自体からの空力音の発生[1]，車両重量の増加といった問題が目立つようになったほか，新在直通車両への適用が困難であるという課題も生じました。

そこで，これらの課題を解決するとともに，さらなる高速化を実現するという観点から，パンタグラフ自体の低騒音化を図った低騒音パンタグラフの開発が進められ，部材点数を削減したシングルアームパンタグラフやT型パンタグラフなどの低騒音パンタグラフが1997年に登場しました。これら低騒音パンタグラフは，パンタグラフの支持碍子周辺のみを覆う程度の高さの碍子オオイと併用して用いられました（**図1 (c)**）。さらに，2002年以降には，軽量化を主目的として碍子オオイを併用しないタイプのシングルアームパンタグラフも用いられるようになりました。この場合には，**図1 (d)** のように，支持碍子の低騒音化のために，外形状を流線形化して空力音低減を図った低騒音碍子が用いられています。また，**図1 (c) (d)** に示したパンタグラフには，パンタグラフからの放射音を遮音する目的で，二面側壁あるいはパンタグラフ遮音板とよばれる板状部材が車両屋根上に設置されています。

このように，現在の新幹線パンタグラフは，空力音低減を目的としたさまざまな対策が進められたものが使用されています。以下では，さらなる空力音の低減を目的として実施している最近の研究内容を紹介します。

形状改良による空力音低減

空力音の低減で最も一般的に行われる対策が形状改良です。**図2 (a)** に一般的なシングルアームパンタグラフの概要図を示します。パンタグラフ各部材のなかでも，舟体・舟支え部は主要な空力音源となっていることが知られています。このうち，舟体は架線とのしゅう動を担う重要な部材であるため，走行中のパンタグラフの対向風向の変化やすり板摩耗による断面形状変化に対して気流による揚力が変化しにくいことも重要な性質となっており，現状では，**図2 (b)** に示すような矩形に近い断面形状が採用されています。ただし，このような断面形状では，物体背後に交互に発生する強い渦（カルマン渦）が発生し，これが大きな空力音を発生させます。そのため，舟体の空力音低減においては，安定した揚力特性を有する矩形のような形状と，後流に渦が発生しにくい流線形形状の両方の特性を兼ね備えた断面形状を選定することが重要になりますが，これらは相反する性質であり，その両立は容易ではありません。そこで，シミュレーション技術を活用した設計手法を開発し，**図2 (c)** に示す舟体断面形状（以下，改良舟体と記します）を提案しました。改良舟体は，揚力特性への影響が大きい上流側は鈍頭形状となっている一方で，後流の渦生成に影響する下流側は流線形に近い滑らかな形状となっており，揚力特性の安定化と空力音の低減の両立を実現しています。**図3 (a)** は，

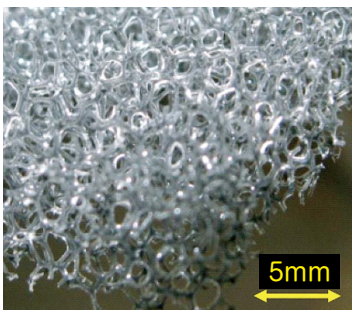


図4　連続気孔を有する多孔質材

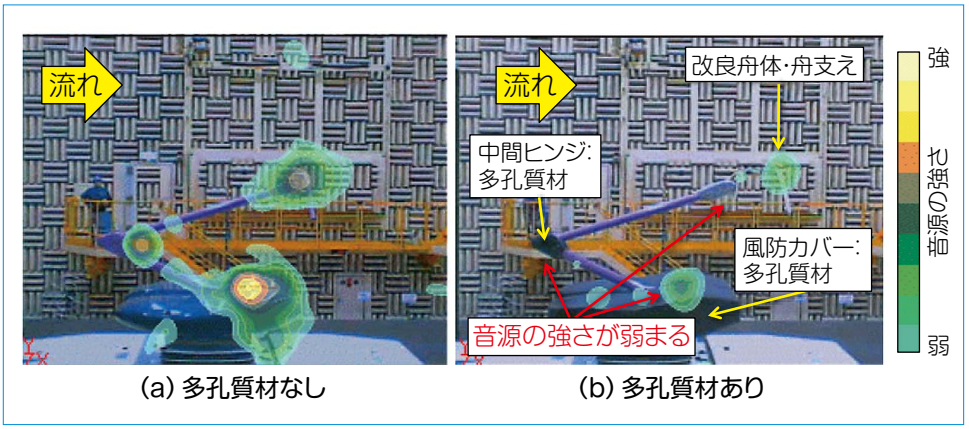


図5　多孔質材を適用したパンタグラフの音源探査結果

この改良舟体を実機パンタグラフに適用した例であり，舟体を前後に貫通する孔（貫通孔）を設けて舟体後流の渦を弱める対策を併用しています。さらに，平滑な形状を有する舟体と舟支え部との接合部近傍は，両者の流れが相互に干渉して強い乱れを生成し，大きな空力音源となることがわかってきたため，舟体と舟支え部を離して設置する対策を提案しています。

現在，舟体・舟支え部の流れの干渉については，効果的に空力音が低減可能な舟体と舟支え部の位置関係についての研究を進め，**図3 (b)** に示すように，舟支え部に対して舟体を下流かつ下方に設置する，あるいは上流に設置する提案を行うとともに，実用化に向けた検討を進めています。

多孔質材の適用

パンタグラフ各部のなかには，機構上の制約などから形状改良が困難な部位もあり，その対策として部材の表面性状を変更して空力音を低減する手法についても研究を行っています。表面性状を変更する手段としては，**図4**に示すようなスポンジ状の多孔質材を物体表面に貼り付ける手法を提案しています。多孔質材とは，内部に無数の気孔を有する部材のことですが，とくにここで用いた多孔質材は，隣り合う気孔同士がつながっている，いわゆる連続気孔を有するものです。この多孔質材自体には，空力音などの騒音を吸収するような作用はなく，多孔質材による空力音低減効果は，多孔質材の表面で自然に流れが浸み込んだり吹き出したりすることによって物体周りの流れが変化し，空力音の発生要因となる渦や乱れの生成が弱まることによって得られることがわかっています。

図5はパンタグラフの風防カバーおよび中間ヒンジ（**図2 (a)** 参照）の表面に多孔質材を適用した場合について，風洞試験において空力音の音源を探査した結果を示しています。なお，**図5 (b)** の舟体·舟支え部には，**図3 (a)** に示した改良舟体・舟支えが搭載されています。**図5**より，パンタグラフの部材表面に多孔質材を適用することで，部材周辺の音源強度が弱まっていることが確認できます。

多孔質材は，物体形状を大きく変更することなく，表面に貼り付けるだけで適用可能な有力な空力音低減対策であり，現車への適用に向けた検討を進めています。

流れ場制御手法の適用

形状改良や多孔質材の適用は，流体力学的には受動的な手法に分類されます。一方，これら受動的な手法の適用が困難な部位や，受動的な対策がすでに適用された部位のさらなる空力音の低減を実現するためには，流れ場を能動的に制御する手法も必要になると考えており，流れ場制御による空力音低減手法の研究を実施しています。

流れ場制御手法としては，流れの剥離を抑制することを目的として以下の二つの手法の開発に取り組んでいます。一つ目の手法は，物体表面で流れを制御する手法であり，制御デバイスにプラズマアクチュエーター（以下，PAと略記）を用いた検討を行いました。PAとは物体表面においてプラズマを発生させ，その作用によって物体表面の接線方向下流側に向かう流れを起こすとともに，周囲の流れを引き寄せる作用を持つデバイスのことです（**図6 (a)**）。PAは，空力特性に影響しない程度に薄く，かつ，可動部を持たないといった流れの制御に有利な特長を有しています。

図6は，**図2 (b)** に示した現用舟体の1/2縮尺模型に対し，剥離点となる上流側上下角部近傍（**図6 (a)**）にPAを適用した場合について，風洞試験で流れを可視化した結果を示しています。舟体にPAを適用することで，舟体後流のカルマン渦の巻き込みが弱くなっている様子が確認できます。また，別途実施した高風速域におけるCFD（数

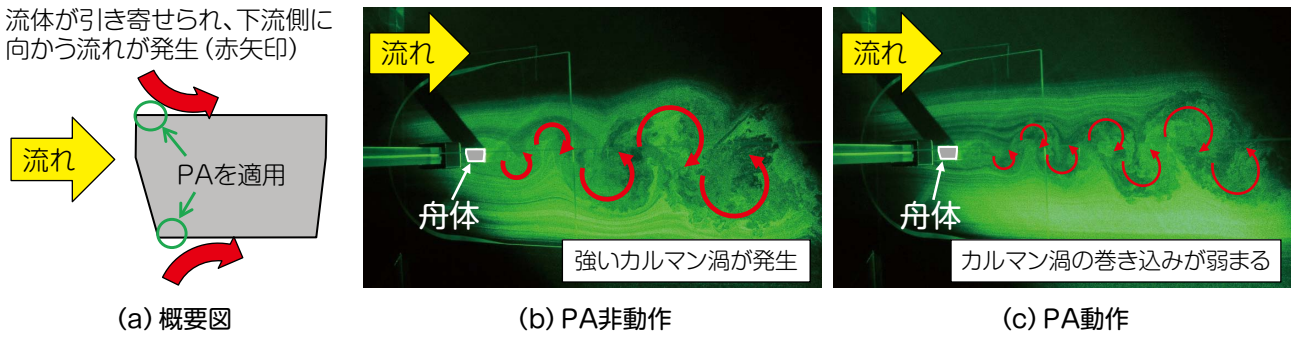


図6　現用舟体にPAを適用した場合の流れの可視化結果

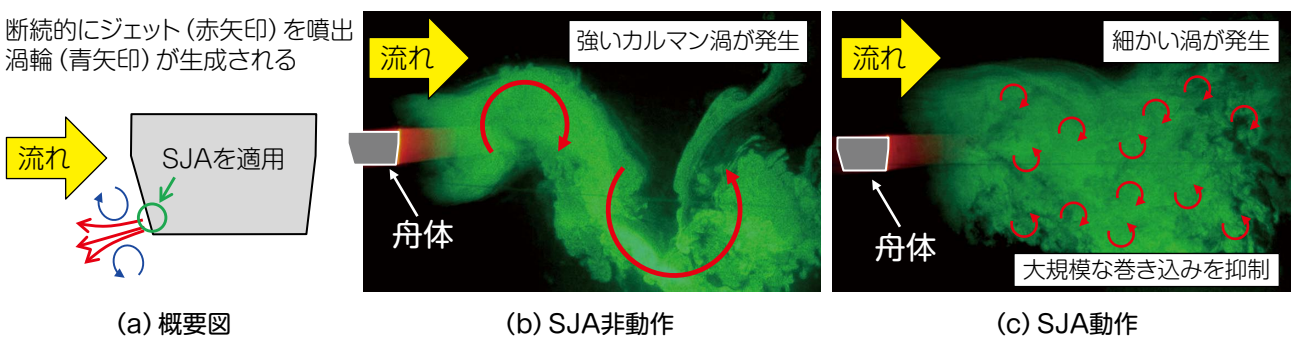


図7　現用舟体にSJAを適用した場合の流れの可視化結果

値流体力学）解析からは，PAによりカルマン渦の巻き込みを弱めることで空力音低減効果が得られることを確認しています。

二つ目の手法は流れに対して能動的に乱れを付与して剥離を抑制する手法です。デバイスとしてはシンセティックジェットアクチュエーター（以下，SJAと略記）を用いた検討を行いました。SJAとは，狭い吹き出し口がある容器の容積を周期的に変化させ，吹き出し口から交互に吹き出し，吸い込みを行うことによって渦輪を生成して，流れ場に乱れを与えるデバイスです。SJAは外部空気源が不要で，かつ，任意の周波数で動作可能である点が大きな特長です。**図7**は小型スピーカーに噴出孔を設けた蓋を取り付けて，スピーカーの動作によって容積が変化するよう構成したSJAを舟体模型に内蔵し，舟体前面の下方角部近傍において渦輪を放出するように動作させた場合の流れの可視化結果です。**図7**より，SJAを動作させた場合は後流に細かい渦が生じる一方で，カルマン渦の大規模な巻き込みが抑制されていることがわかります。また，風洞試験により，SJAの動作により風速25m/s程度の風速域において，カルマン渦に起因する狭帯域音を低減できることを確認しています。ただし，現在使用しているSJAは，スピーカーの出力を上げる，つまりスピーカーから大きな音を出さないと流れ場が制御できないことや，風速が速くなるにつれてSJAによる制御効果が徐々に得られなくなることもわかってきています。そのため，小さな出力で大きな空力音低減効果が得られるよう，SJAの噴出口の形状や配置，噴出の周期などの改良を進めています。

流れ場制御を用いた手法は，現時点ではデバイス自体の出力が小さいことや，パンタグラフにどのように内蔵するかについても検討事項が多くあり，直ちに現車に適用するにはまだ課題がある手法ですが，将来的な空力音低減技術の一つとして，研究を進めています。

おわりに

ここでは，新幹線パンタグラフの空力音低減に関する最近の研究内容を紹介しました。パンタグラフの空力音低減は新幹線の高速化を実現するうえで重要ですが難度の高い課題でもあり，世の中の技術動向などもとらえながら，今後もさまざまなアプローチで研究を推進していきます。RRR

文　献

1）望月旭：新幹線電車の技術の真髄，交通新聞社，2015