第67回

風洞騒音測定技術

はじめに

新幹線は1964年に営業走行が開始されましたが，開業当初210km/hであった営業最高速度が2013年時点で320km/hに達しています。この新幹線車両の高速化にともない，沿線騒音の低減が大きな課題となっています。**図1**に高速走行時の新幹線騒音の音源別寄与度の試算結果を示します[1]。320km/h以上で走行すると，空力音の寄与が卓越しています。これは空力音のパワーが列車速度の6乗に比例する性質を持ち，ほかの音源よりも速度依存性が大きいからです。空力音とは，気流の乱れに起因して発生する音です。新幹線の場合，気流が乱れる箇所（不整部），たとえば集電部，車間部，台車部，乗務員ドア，ワイパーなどが空力騒音源となります。このため今後の高速化にあたっては，これら新幹線車両の各部位から発生する空力音を低減することが重要となります。

風洞実験を活用した空力音評価

空力音の低減対策を講じるためには，その詳細な発生箇所やメカニズムを知ることが重要です。高速走行時の新幹線では空力音の寄与が増大しますが，新幹線全体からの騒音は発生メカニズムが異なるさまざまな種類の音が混在しています。このため，実際に走行する新幹線車両の騒音を測定した結果から空力音だけを抽出することは簡単ではありません。また，さまざまな実験条件を設定する上で，実際に走行する新幹線車両で検証することは容易なことではありません。このため，実際と同様の流れを再現し，静止した車両に気流をあてることで空力音の研究を行う風洞実験が広く行われています。風洞実験の歴史は古く，主として航空機の翼に関わる空力現象の研究のため，航空機の分野などで活用されてきました。空力音についても，風洞実験から評価する試みが航空機や自動車の分野で行われ始め，数多くの研究事例が報告されています。鉄道分野においても，1980年代から風洞による空力音評価が行われています。これは新幹線車両の高速化が進められ，空力音の低減が必要になってきたためです。

それでは，精度の高い空力音の評価を風洞で行うためには，どのようなことが必要でしょうか。このためには，風洞稼働時に発生する気流や機器による音（暗騒音）を小さくすること，測定対象となる車両部位からの空力音を評価できるようにする測定技術が必要です。風洞の暗騒音の低減に関する取り組みについては，主としてノズル噴き出し部や送風機から伝播する騒音の抑制や測定部，風路などでの壁面における吸音対策などが提案され，その成

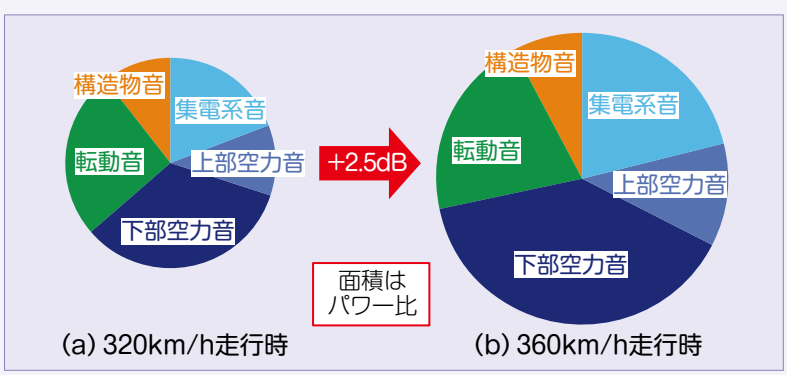

図1　新幹線速度向上時の沿線騒音の予測評価

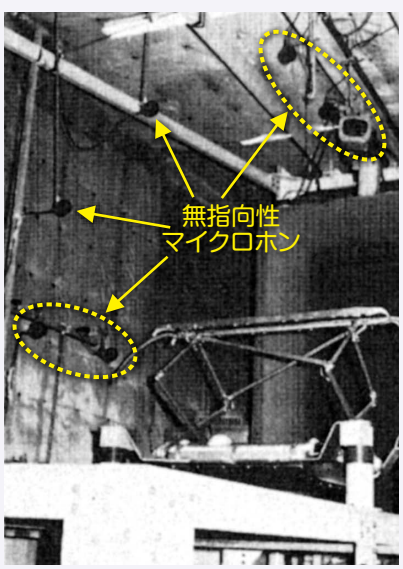

図2　1983年当時のパンタグラフの空力音測定例[2]
（実物スケールパンタグラフ）

図３　パラボラ型指向性収音装置を用いた空力音測定例

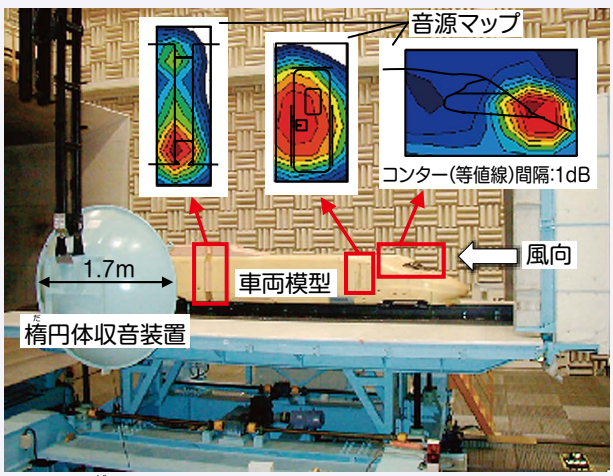

図４　楕円体型指向性収音装置を用いた空力音測定
（1/5縮尺模型，現車換算周波数800Hz帯）

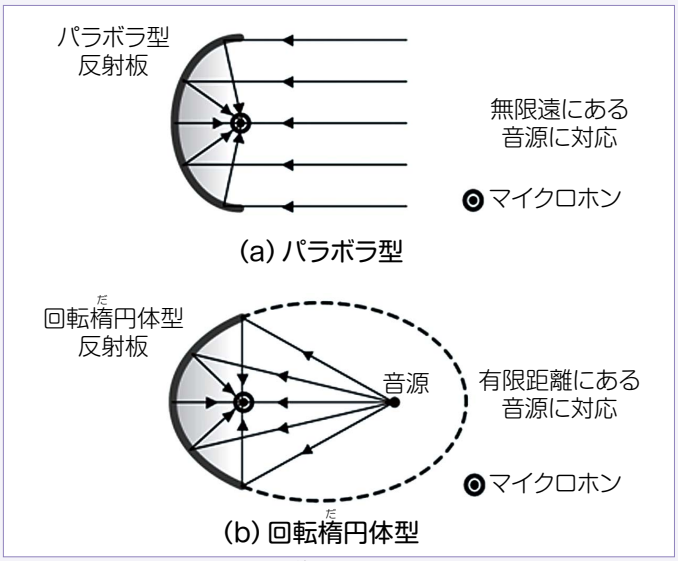

図５　パラボラ型と楕円体型反射板の原理の違い

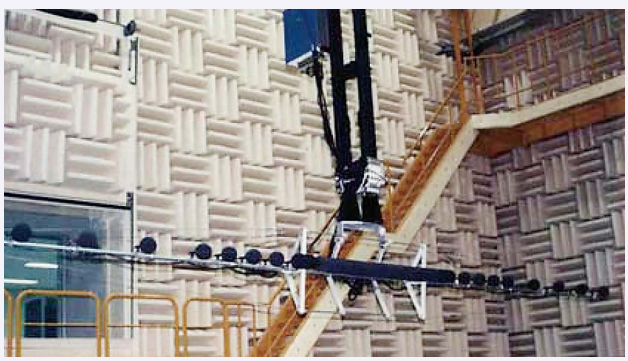

図６　一次元マイクロホンアレイ

果は1996年に鉄道総研が建設した大型低騒音風洞に活用されています。ここでは風洞での騒音測定について，空力音を測定する指向性マイクロホンの開発など，大型低騒音風洞でのこれまでの取り組みを中心に紹介します。

指向性マイクロホンの開発

風洞実験により空力音を評価する際，当初は一般的な無指向性マイクロホンが使用されていました。たとえば，風洞に設置した集電装置まわりにマイクロホンを複数配置することで空力音の評価を行った事例が報告されています（**図2**）[2]。この中では，空力音の測定結果に基づき，パンタグラフ構成部材の中でも舟体や配管などに着目した対策が重要であることや，形状に起因する対策の重要性が示されています。しかし，この方法では，測定対象部から発生する騒音に比べて風洞暗騒音が非常に大きい場合，十分な測定精度が得られません。このため，特定の方向から到来する音波のみを抽出する指向性マイクロホンの開発が続けられています。

指向性マイクロホンを原理別に分類すると，反射板型収音装置（**図3～図4**）とマイクロホンアレイ（**図6～図9**）に大別されます。反射板型収音装置は特定の場所から到来した音波を反射板で一点に集約させることによって鋭い指向性を得る装置です。またマイクロホンアレイは複数のマイクロホンを配列して個々のマイクロホンに到来する音波の位相情報を処理することで特定方向の鋭い指向性を得る装置です。ここでは，これまで開発してきた指向性マイクロホンとその測定結果の例について紹介します。

反射板式指向性収音装置

反射板式収音装置は，当初天文分野で広く活用されていたパラボラ型が使用されていました（**図3**）。この装置は，音源が収音装置から非常に遠い位置にあり，音波が平面波で到来することを仮定しています。このため，風洞実験のように収音装置と音源が比較的近い位置にある場合，高い周波数では音源分解能が悪くなる問題が生じていました。そこで，2つの焦点を持つ楕円型反射板式収音装置（**図4**）が開発されました[3]。この装置は，一方の焦点にマイクロホン，他方の焦点に測定対象部位が位置するように反射板形状を設計することによ

り，高い周波数まで性能を保つことが可能になりました（**図5**）。この装置を活用した車両模型まわりの音源分布では，車体で不整部となっているワイパー，台車部，車間部などから騒音が発生している状況が明らかとなりました。一方で，反射板式収音装置では一度に多数の測定点を測定することができないため，音源分布情報を得るためには長時間の測定を行う必要がありました。

マイクロホンアレイ

マイクロホンアレイはマイクロホンの配列形状によりその性能が決まります。一次元マイクロホンアレイ（**図6**）は，アレイ装置の中心から到来する音波のみを抽出することができ，風洞のノズルや風路からの暗騒音と観測したい騒音を分離するうえで有効な装置でした。ただし，指向性の向きが装置の正面に限定されるうえ，マイクロホンの配列方向に対して垂直な方向に分布する音源に対して分離ができないという問題がありました。

その後開発されたX型マイクロホンアレイ（**図7**）では，マイクロホンを2次元的に配列し，デジタル処理を行うことで反射板式収音装置に比べて短い測定時間で2次元的な音源分布を測定できるように設計されています[4]。これにより，当時明らかになっていなかった集電装置における舟体やヒンジ部などの音源を明瞭にとらえることができるようになりました。音源の2次元的な分布を可視化することが可能となり，対策を施すべき部位が明確になったことは，その後の研究開発に大きく役立つこととなりました。しかし，マイクロホンアレイでは実際の場所とは異なる位置に音源があるように見える虚像の問題が生じます。現在では，これを軽減したホイール型のマイクロホンアレイが導入され，研究開発に役立てられています（**図8**）[5]。

また，このほかの例として，主流に近接して設置したマイクロホンアレイにより，車間部から発生する空力音の音源分布を測定した結果を**図9**に示します[6]。このアレイ装置は，風洞のノズルまわりに形成される乱れの強い領域（自由せん断層）の内部に設置することで，流れの乱れによる音波の屈折の影響を小さくすることができます。これにより音源位置の同定精度ならびに空間分解能の改善を図ることができます。この装置の活用により，車間部の下流側の端部に音源があること，および車端部を丸み付けする対策を施すことによりこの部位からの騒音が低減することが確認できました。この知見の有効性は，その後の現車試験でも確認されています[6]。

近年の取り組み

低騒音風洞の活用により，鉄道車両の各部位から発生する空力音についてのさまざまな知見が得られてきました。一方，空力音の発生は物体まわりの気流の状態と密接に関連することから，風洞実験を行う際には車両まわりの気流をより実車に近い状態で模擬することも重要となります。たとえば，集電装置から発生する空力音については，集電装置の上流に乱流生成装置を設置して実写の屋根上の乱れた流れ（乱流境界層）を再現する技術が開発されています（**図10**）[7]。また，車両下部に位置する台車部などの空力音については，現地試験で得られた車両床下の流

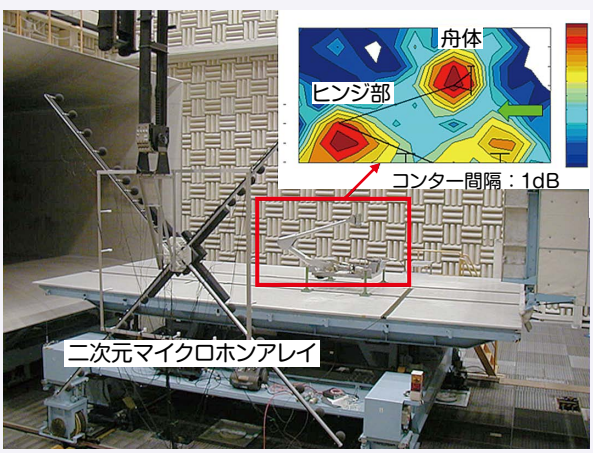

図7　X型マイクロホンアレイを用いたパンタグラフまわりの音源分布測定結果例（1250Hz帯）

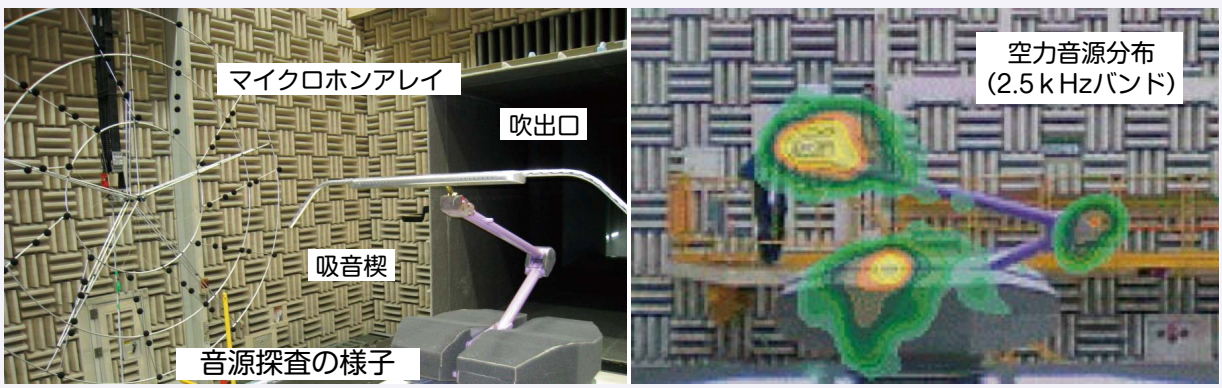

図8　ホイール型マイクロホンアレイを用いたパンタグラフまわりの音源分布測定結果例

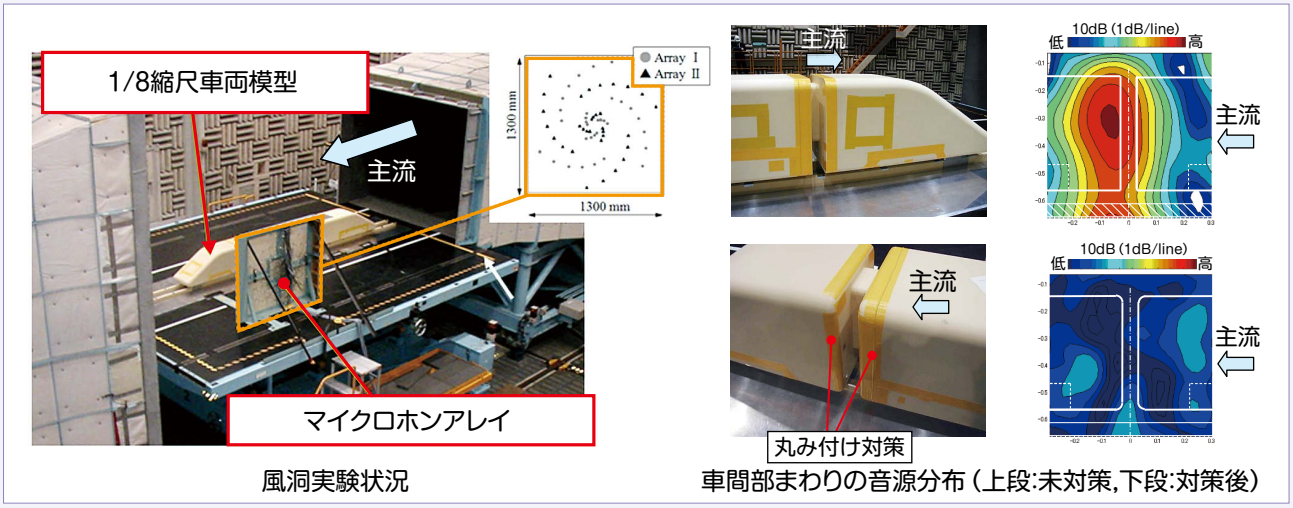

図９　主流近接設置型マイクロホンアレイによる新幹線車両車間部の音源分布測定事例

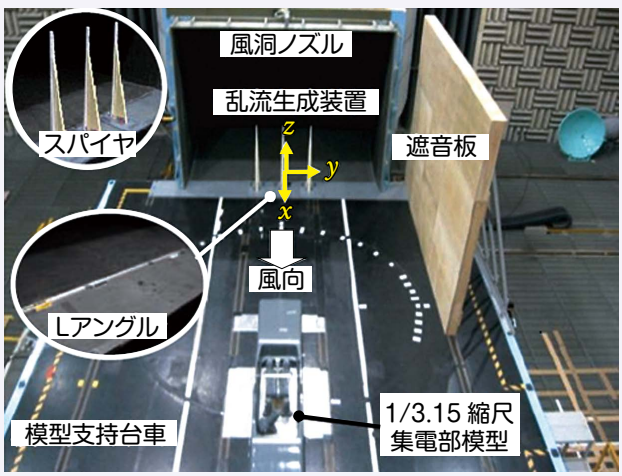

図10　新幹線の屋根上流れ場を再現した風洞試験の様子

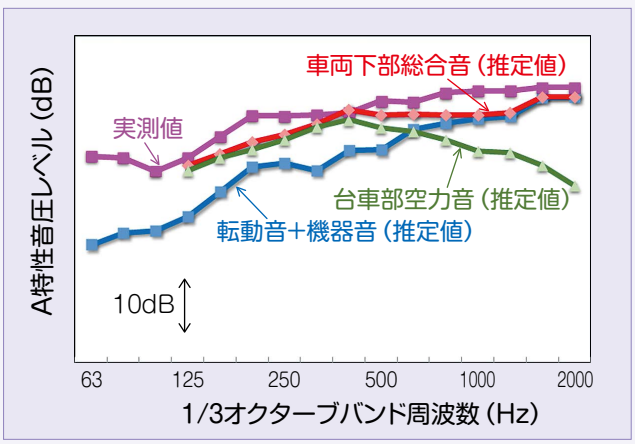

図11　車両下部の流れ場を模擬した風洞試験による新幹線車両下部音の推定結果（スラブ軌道上レール近傍測定点）

速分布を風洞実験で模擬する手法が開発されています[8]。**図11**は，新幹線の車両下部から発生する騒音について，スラブ軌道上で測定した実測値と推定値を比較したものです。ここで車両下部総合音の推定値は，風洞実験で得られた台車部空力音と，過去の研究で得られた転動音および機器音の成分を合計した結果を示しています。これにより，推定値が実測値と整合していることが確認できます。また，台車部空力音が500Hz帯以下の比較的低い周波数帯域で支配的になることが示されています。

このように，流れ場を再現した状況においてマイクロホンアレイを用いた測定･解析を実施することにより，精度の高い空力音の評価が可能になります。

おわりに

今後，鉄道沿線におけるより快適な環境を築くためには，鉄道騒音の低減を行っていく必要があります。これまでさまざまな音響解析技術によって，新幹線の高速化にともなう空力音問題の現象解明に貢献してきました。最高速度の向上と要求される快適性の高まりが大きくなると，風洞実験での音響解析に必要な技術的課題はますます高度化していくことが予想されます。今回紹介した騒音測定技術の向上を図りながら，今後も空力音現象の課題解決のために貢献していきたいと考えています。

（山崎展博／環境工学研究部
騒音解析研究室）

文　献

1) 飯田雅宣：高速化のための沿線環境の評価・対策, RRR, Vol.72, No.7, pp.44-47, 2015
2) 真鍋克士，森川武雄：パンタグラフの風切音に関する風洞実験，鉄道技術研究資料，Vol.40，No.9，pp.3-5，1983
3) 長倉清：反射板とマイクロホン配列による音源分布計測装置，鉄道総研報告，Vol.16，No.12，pp.11-16，2002
4) 長倉清，山崎展博：風洞実験における音響計測装置の開発，RRR，Vol.63，No.8，pp.16-19，2006
5) 池田充：新幹線用パンタグラフの開発に大型低騒音風洞を活かす，RRR，Vol.68，No.8，pp.14-17，2011
6) N.Yamazaki, T.Takaishi, M.Toyooka, K.Nagakura, A.Sagawa, H.Yano: Wind Tunnel Tests on the Control of Aeroacoustic Noise from High Speed Train, Proceedings of the 9th International Workshop on Railway Noise, pp.33-39, 2007
7) 高石武久，池田充：高速鉄道車両の屋根上流れを再現した風洞試験法，鉄道総研報告，Vol.25, No.11, pp.29-34, 2011
8) 山崎展博，北川敏樹：新幹線車両の台車周りで発生する空力音を探る，RRR，Vol.72，No.3，pp.8-11，2015