

新幹線鉄道騒音の解析・低減技術

長倉 清

環境工学研究部(騒音解析 研究室長)



ながくら きよし

はじめに

1964年に東海道新幹線が開業して以来、新幹線鉄道沿線における騒音の低減は大きな課題となっています。1975年には環境庁(現、環境省)告示として「新幹線鉄道騒音に係る環境基準」が定められ、この基準達成を目指した騒音低減対策技術に関する研究開発が進められてきました。鉄道総研においても、新幹線鉄道騒音に関する研究開発を継続的に実施してきています。特にパンタグラフをはじめとする車体各部と空気流との相互作用によって発生する車両空力音は新幹線鉄道特有の問題であり、その現象説明および低減策の開発のため、現車試験、風洞試験および数値シミュレーションなどの手法を用いて様々な取り組みを行ってきました。本稿では、これらの取り組みの経緯や主な成果を紹介します。

新幹線鉄道騒音の概要

新幹線鉄道騒音は、車輪・レールの振動から発生する転動音、コンクリート高架橋などの構造物の振動から発生する構造物音、パンタグラフをはじめとする車体各部と空気流との相互作用によって発生する車両空力音、パンタグラフが離線するときに発生するスパーク音、歯車装置などの車両機器から発生する音などから構成され、これらを発

生部位別に見ると図1のように分類されます。沿線における騒音に対するこれらの音源の寄与度は、時代とともに変わってきました。

新幹線の開業当初は防音壁が設置されておらず、沿線における騒音は、ほぼ転動音を主成分とする車両下部音の寄与で占められていましたが、防音壁の設置や車輪踏面状態の改善により転動音をはじめとする車両下部音が低減された結果、転動音と並んでパンタグラフのスパーク音が新幹線鉄道騒音の中心となってきました。その後、転動音に対してはレール表面に存在する騒音に影響する凹凸成分を除去する対策(レール削正)、スパーク音に対しては同一列車編成内の複数のパンタグラフを電氣的につなぐことによりスパーク発生を抑制する対策(特高圧母線引き通し)が行われ、相対的にパンタグラフを含めた車両上部から発生する空力音の占める割合が大きくなってきました。

そして、1992年の「のぞみ」の登場以来、新幹線の本格的な高速化が進み、空力音の寄与度はますます高くなってきました。空力音は高速で走行する車両周りの流れの時間変動に起因して発生し、そのパワーは列車速度の6乗に比例して大きくなります。これは200km/hから300km/hまでの速度向上(比率で1.5倍)に対して10dB強の空力音の上昇が起こることを意味します。240km/hを越える走行速度を目指して開発された車両では、車両上部の平滑化による空力音の低減、低騒音パンタグラフの開発による集電系空力音の低減などの新しい騒音低減技術が採り入れられ、騒音レベルの低減を実現しています。これらの車両においては、集電系を含む車両上部から発生する空力音の寄与度と転動音をはじめとする車両下部から発生する騒音の寄与度は拮抗しています。

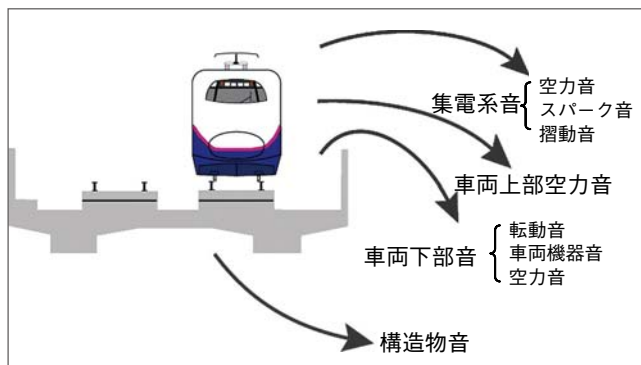


図1 新幹線鉄道騒音の音源

現車試験による取り組み

新幹線走行時の騒音源を把握するためには、実際に車両を走行させて騒音などのデータを取得する現車試験が基本



図2 アレイ式指向性マイクロホンによる騒音測定状況

となります。新幹線車両走行時に発生する様々な音源を分離してとらえるために広く用いられている測定装置として、アレイ式指向性マイクロホンがあげられます(図2)。この装置は直線上に配列した多数のマイクロホンの出力を演算することにより正面方向に強い指向性を持たせたもので、この装置を新幹線騒音測定における標準点(近接側軌道中心から25m離れ、地面からの高さ1.2mの点、以下「25m点」と称す)に設置して測定することにより、車両各部から発生する騒音源の25m点における寄与度を推定することが可能となります。

図3にアレイ式指向性マイクロホンによる騒音レベル変動例を示します。車両形式によりレベル変動パターンが異なりますが、この違いは各車両条件の違いに対応しています。例えば、S1列車ではパンタグラフに対応する位置に大きなピークが発生しており、これらは集電系空力音やスパーク音の影響が大きいことを示しています。S2列車ではパンタグラフ位置以外に二階建て車両に対応する位置に顕著なピークが現れており、その後の解析結果により車両肩部にある給排気用のルーバ構造から発生している空力音の寄与度が大きいことがわかりました。車両空力音の研究が始まった当時は、車両が高速で走行する場合の空力音は、車両表面の局所的な不整に起因して発生する音と車両表面全体に沿う乱流境界層から発生する音のどちらの寄与で決まるのかという問題が議論されていましたが、これらの測定結果から新幹線車両の空力音は車両表面の局所的な不整から発生する音が主体であることが明らかになりました。この知見は、その後の高速車両の開発における騒音対策の指針(集電系の低騒音化、車両上部の平滑化など)につながっています。

最近では回転楕円体型の反射板とマイクロホンを組み合わせた装置(楕円体型指向性集音装置)や平面上にマイク

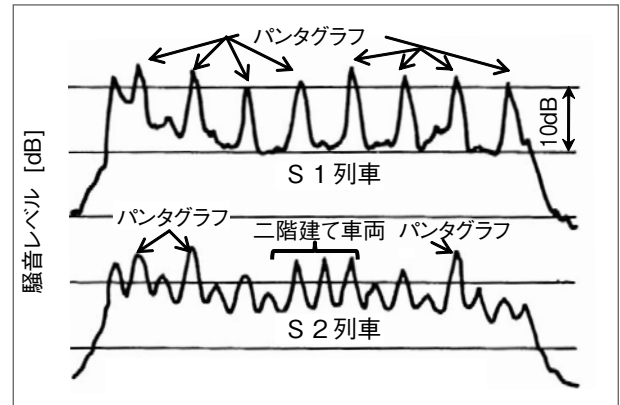


図3 アレイ式指向性マイクロホンによる騒音レベルの変動例(測定点: 25m点、列車速度=約220km/h、時定数=35ms)

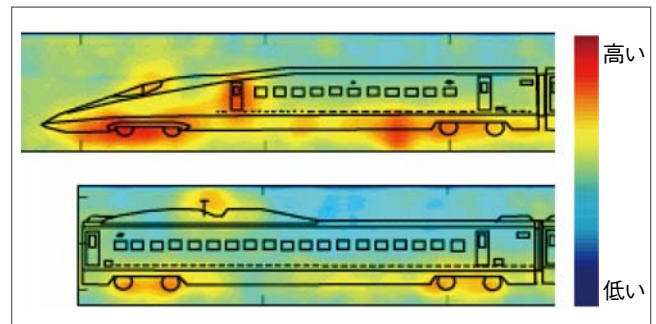


図4 マイクロホン配列型楕円体集音装置による新幹線車両音源分布(1000Hzバンド)

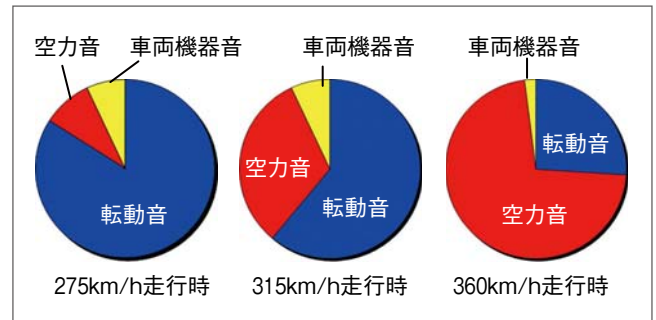


図5 レール近傍音に対する音源別寄与率推定結果

ロホンを配列した装置(二次元マイクロホンアレイ)による測定技術も開発され、より詳細な二次元的音源分布を得ることができるようになってきています(図4)。これらの計測装置は音源探索だけでなく、実際に対策を実施した場合に騒音低減効果を確認する際にも有効です。

一方、これらの計測結果と転動音に関する新たな知見とを組み合わせることにより、音源を更に細分化して寄与度を評価する試みも行われています。図5は車両下部から発生する騒音についてレール近傍点における転動音と空力音

の寄与度の推定結果を示したものです。発生メカニズムに基づいた予測手法を用いて転動音を定量的に評価し、現車試験での測定値からその寄与度を差し引くことにより、車両下部から発生する空力音を算出しました。これらの解析結果から、330km/hを超える速度域では車両下部から発生する騒音についても空力音の寄与度が転動音の寄与度を上回ることが示され、今後の更なる高速化のためには台車周りをはじめとする車両下部からの空力音についても検討を要することが明らかになりました。

風洞試験による取り組み

鉄道車両のように、ほぼ一定速度で移動する物体に生じる空気学的現象を明らかにする手段として、風洞試験が広く行われています。風洞とは大きなファンを用いて風を

吹かせる装置で、静止した車両模型に風を当てることによって、静止した空気に対して車両が走行する状況を模擬することができます。風洞試験では現車試験では困難な条件設定が容易であり、系統的な現象の追究が可能です。また、転動音などの他の音源に影響を受けることなく、純粋に空力音だけを評価することができます。

鉄道総研では、高速鉄道の空力音をはじめとする空気学的諸問題を研究するために、1996年に滋賀県米原市に大型低騒音風洞を建設しました。この風洞の特長は最大風速400km/hまでの試験が可能であること、標準点における暗騒音が300km/hで75dBと世界最高水準の低騒音性能を有していることです。計測部の大きさは幅3m×高さ2.5mであり、実物のパンタグラフや1/5～1/10程度の車両縮尺模型を用いた試験が可能です。

図6に1/5縮尺新幹線車両模型を用いた風洞試験の状況を示します。車両模型を流れの中に設置し、流れの外側から鋭い指向性をもった計測装置（楕円体型指向性集音装置や二次元マイクロホンアレイなど）を用いて測定することにより、車両表面に分布する空力音源を現車試験以上に詳細にとらえることが可能となりました。これらの結果に対して、模型縮尺、装置の音響特性および防音壁による遮蔽効果を考慮して、25m点における高速車両の空力音を発生部位別に推測した例を図7に示します。局所的に集中音源が数多く存在し、寄与度の大きいものから、①集電系空力音、②車体空力音の筆頭である車間部、台車部空力音、③次に問題になりそうな空力音、④当面は十分小さいと判断される空力音、に分類されることがわかります。これらの結果から、高速車両から発生する空力音の全体像がほぼ明らかになり、対策の優先順位や目安が得られるようになりました。

また、米原風洞は鉄道総研内の研究グループだけでなく、JR各社などの開発担当者からも活発に活用されています。特に、集電系構造の開発に際しては数多くの試験が実施され、その結果は新型車両の集電系構造として採用されている低騒音パンタグラフ+碍子カバー+2面側壁の組み合わせ、あるいは低騒音碍子の採用などの対策に反映されています。

数値シミュレーションによる取り組み

風洞試験は、空力音源の探査あるいは異なる条件における発生空力音の相対比較を行う場合には、特に有力なツールとなります。しかし、空力音の発生メカニズムを解明す

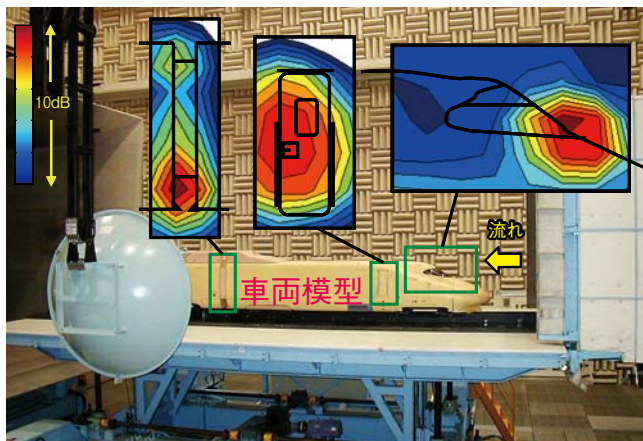


図6 1/5縮尺新幹線車両模型を用いた風洞試験での音源分布解析例

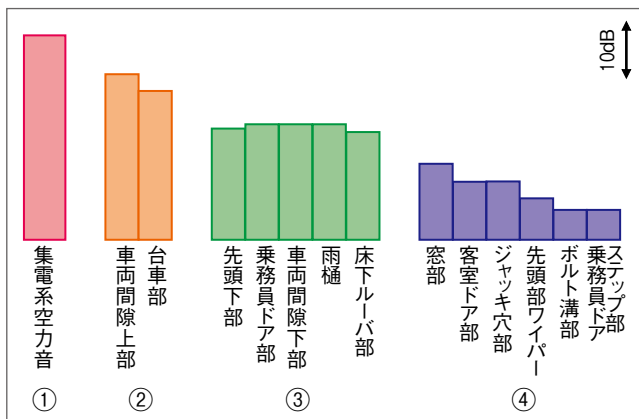


図7 風洞試験による空力音源評価例 (25m点における寄与度、速度300km/h、高さR.L.+2mの防音壁有り)

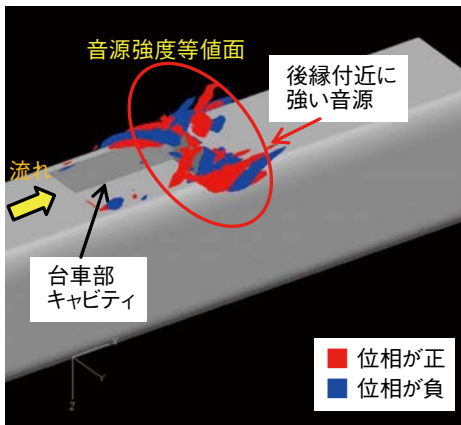


図8 台車部キャビティから発生する空力音源分布の計算例(車両を下方から見た図)

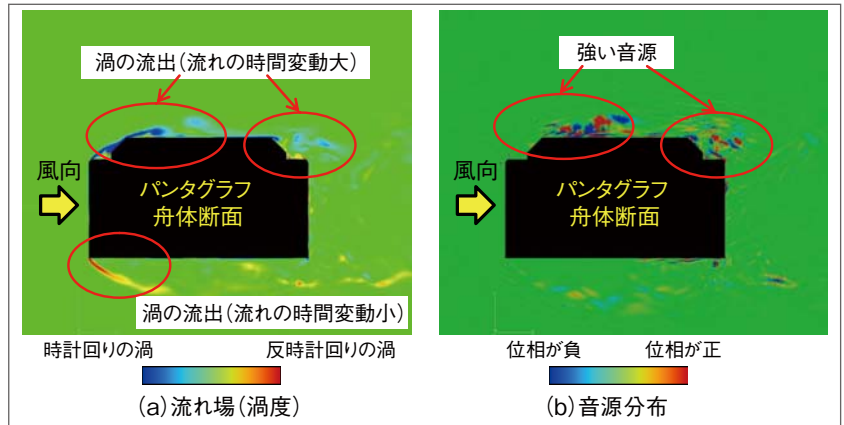


図9 パンタグラフ舟体周りの流れ場と空力音源分布の計算例

るためには、車両各部周りの流れがどのようなになっているのかを知ることが重要であり、そのような情報を風洞試験だけで収集するには多くの時間と労力を要する上、計測自体が困難な場合もあります。そこで、最近注目を集めているのが数値流体力学 (Computational Fluid Dynamics, CFD) です。CFDの利点としては、空力音の発生につながる流れ場の空間分布情報を得ることが挙げられます。また、現車試験や風洞試験では困難な状況も再現可能です。流れの複雑な運動を詳細に模擬するには、一般にCFDの計算量は膨大なものとなりますが、近年のコンピュータ性能の著しい向上により、数値シミュレーションによって空力音を予測する技術の開発が進み、既に実用的なツールとして活用されつつあります。

鉄道総研では、CFDによる流れの時間変動に関する計算と渦音理論と呼ばれる空力音の理論を応用した空力音の発生・伝搬過程に関する計算を組み合わせることにより、空力音源を評価する手法を開発しました。

図8は、数値シミュレーションによって求めた台車部まわりの空力音源分布を示したものです。この図から、流れ場の時間変動が大きく、かつ、形状変化が急な台車部後縁付近が強い音源となっていることがわかります。逆に、前縁付近や壁面に沿った境界層など、流れの時間変動が小さい箇所や、台車収納スペース底面のように、流れの時間変動は大きい形状変化が緩やかな箇所は、強い音源となることがわかりました。

図9はパンタグラフ舟体周りの流れ場と音源分布の計算例です。左図より、すり板の前縁・後縁、および舟体下面

の前縁で流れが大きく剥離して渦が放出されており、この流れ場の様子から揚力発生メカニズムを捉えることができます。右図より渦の流出により流れの時間変動が大きくなっている箇所が強い音源が形成されていることがわかります。これらの結果から、集電するために必要な押し上げ力の確保と低騒音化を両立させるためには、パンタグラフ舟体のこれらの箇所の形状を改良していく必要があることが明らかになりました。

このように、数値シミュレーションを用いることにより、現車試験や風洞試験では捉えることができない物理的なメカニズムを明らかにすることが可能になり、現車試験や風洞試験と併用することで、車両各部の低空力音設計に役立つことが期待されます。

まとめ

新幹線鉄道騒音の現象解明および対策技術の開発について、主に空力音に対する取り組みを中心に紹介しました。騒音を効果的に低減するには、音源の性質およびその寄与度を理解し、寄与度の大きい音源に対して優先的に対策を行う必要がありますが、地上対策の状況により寄与度や対策の優先度が変わります。そのため、現地試験、風洞試験、数値シミュレーションなどの各ツールについてその特徴を理解しながら活用していくことが重要です。この方針に則り、今後も新幹線鉄道騒音の現象解明および低減策の開発を実施していく予定です。[RRR]