

第23回

鉄道騒音の測定・音源解析方法

はじめに

鉄道において騒音が問題として認識されたのは意外と古く、昭和初期に出版された「騒音：守田栄 著（岩波書店）」には、車輪が木製から鉄製に切り替わり、鉄と鉄の衝撃による振動や騒音に、沿線の人々から苦情が殺到したことが記されています¹⁾。鉄道騒音に関する調査や研究も、鉄道総研の前身である鉄道大臣官房研究所において古くから始められており、1930年代には、騒音測定の結果をもとに高架構造と騒音の関係や軌道からの離れと騒音との関係などが報告されています^{2,3)}。

その後も鉄道騒音に関する研究は進められてきましたが、研究が大きく進展し始めたのは、1964年に東海道新幹線が開業してからのことです。新幹線沿線での騒音が社会問題としてとり上げられるようになり、その現象解明や低減対策について、さまざまな研究が行われてきました。また、旧国鉄の分割民営化以降は、新幹線の高速化に向けた取り組みの一環として、鉄道騒音に関する研究はさらに重要度を増しています。研究の手法としては、現車試験、室内実験、数値シミュレーションなどの方法がありますが、本稿では、我が国における鉄道騒音に関する現車試験での測定方法および音源解析法に着目し、その変遷と今後の展望を紹介します。

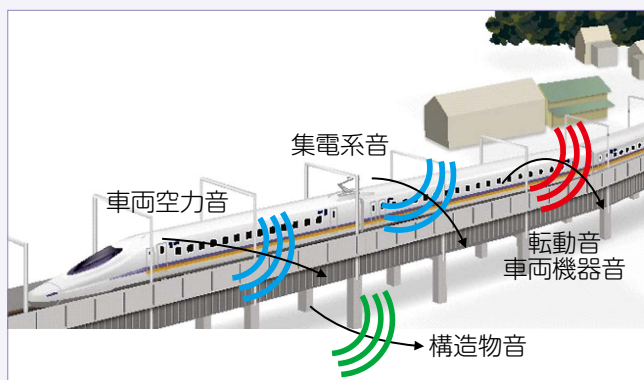


図1 鉄道騒音の発生源(新幹線の場合)

音源解析はなぜ必要か

鉄道車両が走行するときに発生する騒音は、さまざまな音が複雑に絡み合って成り立っています。車輪とレールから発生する転動音のほか、主電動機ファンや駆動装置から発生する車両機器音、鋼橋やコンクリート高架橋から発生する構造物音、高速で走行する車両と空気との相互作用によって発生する空力音などがあり、その発生源は多岐にわたっています(図1)。このような複合音である鉄道騒音を効果的に低減するためには、そのさまざまな騒音がどこから発生しているのか、それぞれが観測点における騒音にどれだけ寄与しているのかを把握し、最も大きな寄与を持つ音源から順番に対策を施すことが必要です。したがって、鉄道騒音の音源を特定し、沿線騒音に占める各音源の寄与を求める手法、すなわち音源解析が重要となってきます。

音源解析の基本的な考え方

鉄道騒音の音源を特定し、それぞれの沿線騒音への寄与度を推定する手法はさまざまですが、その考え方は以下のように分類されます。

- ①騒音測定結果から音源の位置を特定する。
 - ②車両、軌道、構造物、走行速度などの条件と騒音の関係を調べる。
 - ③騒音の周波数特性を把握する。
 - ④騒音発生の原因となる現象(車輪・レールなどの振動、車両周りの空気の流れなど)に関する物理量を測定する。
- ①音源の位置は、音源を特定するための有用な情報となります。ただし、沿線で通常の騒音測定を行う場合、鉄道から発生するさまざまな騒音を合わせて測定することになるため、音源位置を特定するためには、それらを分離できるような測定上の工夫が必要です。

②の方法は、車両、軌道、構造物などの条件と騒音の関

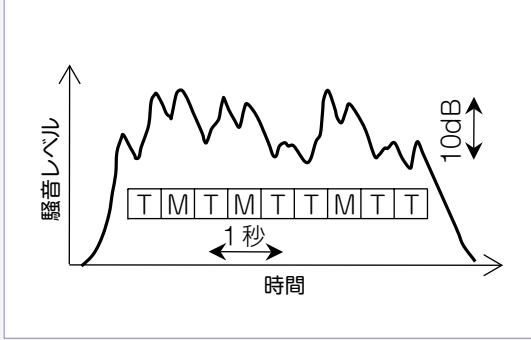


図2 軌道近傍へのマイクロホン設置状況と測定結果例

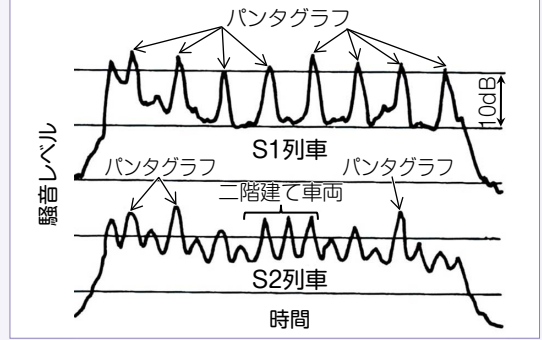


図3 アレイ式指向性マイクロホンの設置状況と測定結果例

係を直接調べることができるため、音源に関する多くの知見を得ることが可能です。試験線や試験列車を用いた試験では、これらの条件を比較的容易に変更することが可能であるため、この方法は特に有効です。

③の方法は、特徴的な周波数特性を持つ音源が卓越している場合には、音源を特定する決め手となることもあります。例としては、レールや車輪の波状摩耗による転動音の増大(列車速度/波状摩耗のピッチで決まる周波数)、ギヤ音(ギヤのかみ合い周波数)などがあります。

④の方法は、騒音の発生メカニズムにまで遡って音源を特定するものです。例えば、レールや構造物の振動を測定し、それらの振動に起因する騒音の特性を把握することは古くから行われています。

以下では、これらの方法の中で、鉄道騒音の現象解明へ向けて特に大きく貢献してきた、音源位置特定のための測定方法の開発事例、および試験線や試験車両を用いた音源解析事例を紹介します。

音源位置の特定方法

鉄道騒音においては、軌道から一定距離だけ離れた位置(12.5mあるいは25m離れた位置とすることが多い)を代表点として測定・評価することが一般に行われていますが、このような測定では騒音の大きさを評価することはできません。そこで、音源に対する詳細な情報を得ることはできません。そこで、音源解析に資するデータを取得するために、これまでに多くの取り組みが行われてきました。

(1) 音源の近傍での測定

音源の近くで測定する方法は、単純であり、音源位置を特定し、音源の性質を明らかにするための有力な手段となります。軌道の近傍で騒音を測定すれば、車両下周りに発生する騒音をとらえることができ、高架橋の直下で騒音を測定すれば高架橋から発生する構造物音をとらえることが可能になります。これらの測定方法は、はじめに述べた1930年代の文献においても、既に実施されています。図2は在来鉄道における軌道の近傍でのマイクロホン設置状況と、そこで測定した騒音レベルの時間変動を示した例です。列車の通過に伴い、レベルが大きく変動していますが、電動車(M車)および付随車(T車)に対応した騒音レベルを比較すると、前者が後者に比べて大きく、電動車に特有の騒音(この場合は主電動機ファン音)の寄与が大きいですことがわかります。

(2) 指向性を持つ装置での測定

音源の近くで測定することにより、音源の特性についてある程度の情報を得ることは可能ですが、高速で走行する新幹線車両においては、空力音の音源が車両のさまざまな箇所に分布しているため、それらの音源を分離してとらえるには、この方法では限界があります。そこで、特定の方向から伝搬する音波を抽出して測定する装置(指向性を持つ計測装置)が新幹線騒音の測定に使用されるようになりました。これらの装置のさきがけとなったのは、1970年代後半に開発されたアレイ式指向性マイクロホンです(図3)⁴⁾。この装置は、列車の長さ方向に直線状に配列した多数のマイクロホンの出力をアナログ回路に用いて演算

することにより、装置の正面方向から伝搬する騒音を抽出して測定するものです。この装置を鉄道沿線に設置して測定した騒音レベルの変動例を図3に示します。車両形式によりレベル変動パターンが異なっていますが、この違いは各車両条件の違いに対応しています。これらの測定結果により、列車の長さ方向に分布する音源を正確にとらえることができるようになりました。また、前述の軌道近傍や高架下での騒音測定結果と組み合わせることにより、新幹線騒音の沿線の評価点（例えば25m点）における音源別の寄与率を評価することも可能になりました。この装置は、比較的簡便に現場で使用可能であることから、現在においても、新幹線騒音の音源解析のための標準的な測定装置となっています。

ところで、アレイ式指向性マイクロホンは、車両の長さ方向に分布する音源の分離はできますが、上下方向に分布する音源を分離できないという欠点があります。その欠点を補うため、1990年代はじめ頃に、パラボラ型の反射板とマイクロホンを組み合わせた装置が開発されました（図4）。この装置は衛星放送の受信に使用されるパラボラアンテナの原理を音響計測に適用したもので、装置を車両のさまざまな方向に向けて測定することにより、車両の上下方向に分布する音源を分離して計測することが可能になりました。

(3) 音源の可視化

1990年代半ば頃から、新幹線騒音の音源分布をより明確に表すために、音源を2次元的なマップ上に可視化する試みが始まりました。同じ頃、音響計測データをデジタル処理する技術が急速に普及したことも重なり、この分野における技術が大きく進展しました。新たな手法として音響インテンシティ（音のエネルギーの流れ）を列車側方の異なる高さにおいて測定する手法が考案され⁵⁾、新幹線車両から発生する音源の分布を可視化することが可能になり



図4 パラボラ装置による測定状況

ました。前述のパラボラ装置を用いた測定方法についても、異なる高さで測定し、さらに反射板形状の変更、焦点付近への複数マイクロホンの配列などの改良をすることにより、詳細な音源分布の可視化が可能になっています⁶⁾。

また、アレイ式指向性マイクロホンを発展させたものとしては、マイクロホンを2次元的な面上に配列させた2次元マイクロホンアレイが開発されました（図5）^{7),8)}。これらのさまざまな測定方法によって得られた音源分布図により、音源を視覚的に理解することが可能になり、新幹線騒音の音源に関する理解が大きく進みました。

試験線、試験車両を用いた音源特定試験

東北新幹線開業前の1978年～1982年にかけて、小山地区の試験線において、新幹線走行に伴う騒音を軽減するための技術開発が大々的に行われました。開業前の試験線という有利な特殊条件を活用して、騒音の発生源解析や対策の総合的な実験と検討が行われました。ここでは、数ある試験メニューの中から試験線ならではのメニューである構造物音抽出用シェルターについて紹介します。

25m点などの沿線の評価点において、コンクリート高架橋の振動に伴って放射される構造物音のみを、高架橋上部の防音壁を乗り越えてくる音や車両上部から伝搬する音から分離して評価することは難しい課題です。この課題に

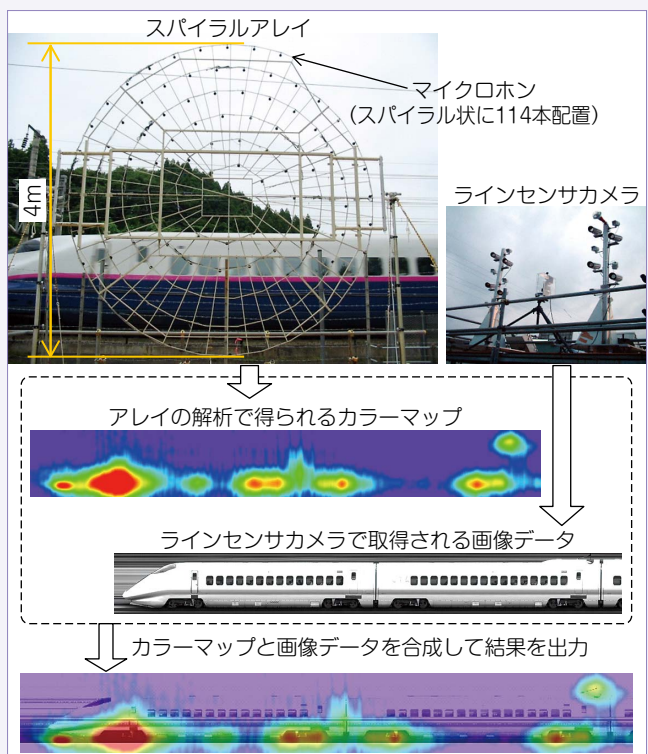


図5 2次元マイクロホンアレイによる音源可視化例⁸⁾

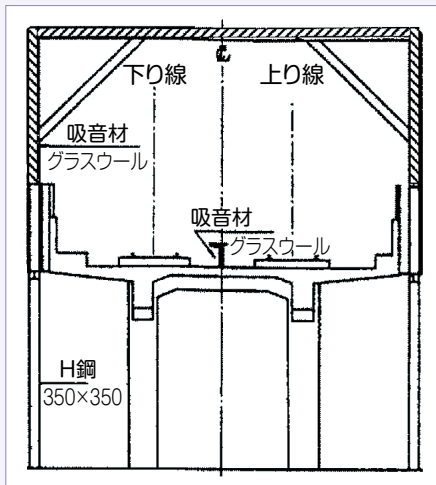


図6 構造物音抽出用シェルター



図7 高速走行試験車両
(左から300X, STAR21, WIN350)

取り組むため、小山地区の試験線では、高架橋上部を完全に覆ってしまうシェルターを作り、沿線には構造物音以外の音が伝搬しないようにした状態で騒音測定を実施しました(図6)。このシェルターは長さが250mに及ぶもので、高架橋の振動によりシェルターも振動しないように、高架橋とは独立した構造になっています。営業線においてはとても実現できない手段であり、実験線だからこそ取り組めた試験といえます。

この測定により、沿線における構造物音の周波数スペクトルが得られ、現在でも構造物音の伝搬特性を示す有力な基礎データとなっています。30年以上前の大規模な実験データが現在に生きている貴重な例です。

また、高速車両の開発においては、試験車両を用いた試験も数多く行われました。特に、1990年代には、JR各社においてWIN350, STAR21, 300Xなどの高速走行試験車両を用いた試験が実施されました。これらの試験では、車両側の条件を変更しながら騒音測定が実施され、前述のアレイ式指向性マイクロホンをはじめとする測定技術も大いに活用されました。これらの試験により、高速で走行する新幹線車両からの騒音に関する多くの知見が得られるとともに、集電系の低空力音化をはじめとするさまざまな低騒音化技術が開発され、後の500系, E2系, 700系などの車両の開発に活用されています。なお、これらの高速走行試験車両は、滋賀県米原市にある鉄道総研の大型低騒音風洞に隣接して保存されています(図7)。

今後の展望

鉄道騒音に関する現車試験での測定方法および音源解析法について、その変遷を紹介しました。過去の文献を振り

返ると、音源解析の重要性については古くから認識されており、その基本的な考え方はほとんど変わっていません。先人たちの英知を改めて感じます。一方、測定技術の進歩は著しく、一昔前には考えもつかなかった音源に関する詳細な情報が、測定により得られるようになってきています。また、本稿で紹介した音源位置特定のための測定技術以外にも、騒音発生の原因となる車輪、レール、構造物などの振動や車両周りの空気の流れなどの測定技術も進歩しており、これらの測定結果に基づいた騒音発生メカニズムの解明もさらに進展することが予想されます。今後も、最新の測定技術を採り入れていくことにより、鉄道騒音に関する理解が深まり、さらなる低騒音化が進むことを願ってやみません。

(長倉清／環境工学研究部)

文献

- 1) 善田康雄：新幹線からの騒音、騒音制御, Vol.34, No.2, 133-138, 2010
- 2) 広川原二：騒音の概念ならびに省線電車の騒音、鉄道大臣官房研究所業務研究資料, Vol.21, No.33, 1933
- 3) 川口利雄, 広川原二：高架線の構造と電車騒音、鉄道大臣官房研究所業務研究資料, Vol.22, No.10, 1934
- 4) 荒井昌昭, 智野貞弥：広帯域狭角度指向性マイクロホン, 日本音響学会講演論文集, pp.501-502, 1978
- 5) 河原瑞将, 堀田英俊, 廣江正明, 加来治郎：音響インテンシティ法による新幹線騒音の音源分離と予測, J-RAIL1997, pp.365-368, 1997
- 6) 村田香, 長倉清：新幹線騒音の音源解析, RRR, Vol.64, No.2, pp.2-5, 2007
- 7) 高野靖, 佐々木浩一, 佐藤寿一, 村田香, 前浩之, 後藤仁：高速移動体の音源可視化システムの開発, 日本機械学会環境工学総合シンポジウム講演論文集, 2003
- 8) 東日本旅客鉄道株式会社JR東日本研究開発センター編：JR東日本研究開発センター10年史, p.95, 2011