高速車両の音源を可視化する —X 字形マイクロホンアレイによる解析—

Visualizing Noise Sources of High Speed Train
—Analysis Using X-Shaped Microphone Array—

高野 靖

Yasushi TAKANO

◎1957 年 5 月生まれ
◎1982 年京都大学工学部修士課程
修了、同年(株)日立製作所入社。
現在、高速新幹線車両の静音化研
究などに従事。研究・専門テーマ

は音場解析・音源探査による機器
の騒音制御
正員、(株)日立製作所 機械研究
所(〒300 上浦市神立町 502)

1. ま え が き

日本の新幹線の利用者の増加により、運行ダイヤは過密状態になっている。高速化による輸送能力の向上のため、1992 年に 270 km/h で営業運転を開始した「のぞみ」号に続く次世代新幹線の開発が JR 各社を中心に進められている。開発にあたっては、人工密集地域を高速で通過する車両の車外騒音低減が重要な開発テーマとなっている。

新幹線の支配的な騒音源は、車輪やレールの振動による転動音（振動騒音）と、車体全体から発生する風切り音（流体騒音）に分けることができる。このうち転動音は速度の約 2～3 乗、流体音は速度の約 6～8 乗に比例して増加することが実験的に知られている⁽¹⁾⁽²⁾。このため、図 1 に示したように、高速走行時には、流体騒音が支配的となり、車外騒音の低減のためには、流体騒音の発生箇所をみつけ、対策を施す必要がある。

流体騒音源の発生部位は、車体全体に分布しているため、車両のどの部分からどの程度発生しているかは自明ではない。一方、理論解析や風洞を用いた縮尺モデル実験から、実車両での騒音発生を定量的に予測することも、現時点では困難である。したがって、車両走行時の音源位置の特定・可視化技術の開発が重要である。このためマイクロホンアレイなどを利用した、さまざまな音源分離手法が開発されている。一般にマイクロホンアレイとは図 2 のようにマイクロホンを直線上に並

べたものである。その動作原理は各マイクロホンの出力の合成により、音波の到来方向などを測定するものである。

新幹線の騒音対策には、車両の低騒音化とともに、防音壁による対策が一般的である。しかし、防音壁は、車体下部から発生する転動音などには有効であるものの、高速走行時に騒音を支配するパンタグラフなどの流体騒音源は、防音壁による遮音効果の少ない車体の上部にも存在する。すなわち、音源の高さにより防音壁の効果が減少するため、車体の高さ方向での音源分布の解析も必要

図 1 騒音の速度に対する増加率

図 2 アレイへの球面波入射と平面波入射

である。

2. マイクロホンアレイによる音源探査

水中のソーナなどでも用いられている超指向性アレイの技術を用いた音源分離技術を最初に新幹線に適用したのは、昭和50年代の初期に当時の鉄道技術研究所の荒井氏らの開発した、一次元超指向性マイクロホンアレイが最初である⁽³⁾。このアレイは何度か改良され、現在でも広く新幹線の車両の音源探査に利用されている。このアレイは通常、新幹線の軌道中心より25mの位置に水平に設置され、図3のような車体の長手方向の音源分布が得られる。

図3 超指向性アレイによる解析結果の一例

3. 新幹線音源の探査

精度の高い音源分布の測定のためには音源に、できるだけ近い位置で計測すればよい。センサを線路の近くに設置するときの課題は、時速270 km/h (秒速75 m/sec) で通過する音源の追尾手法の開発である。音は波動であるため、その周波数を知るためには、一定時間、同一の音源からの音波を計測し、その時間内の周波数分析が必要である。

前記の荒井氏らの手法を含め、マイクロホンアレイを使用した解析においては、アレイの長さに比べて音源が遠く、平面波の入射条件を仮定できる遠距離音源で測定を行うことが多い。この場合には、アレイの性能は指向性分解能により定義される。しかしながら、図4に示したように、アレイが音源に近接している場合は、音波を球面波として取り扱う必要がある。この場合には、音源と個々のマイクロホンとの距離を計算し、虫めがねのように、音源に焦点をあてて観察する必要がある。

る。この焦点の位置を、音源の移動に合わせて動かせば、新幹線の音源を追跡できることになる。

以下に、数式を用いて音源追跡の計算方法について説明する。車両の音源モデルとして、自由空間中を音速よりも十分遅い速度 V m/s で移動する互いに無相関な騒音を発生する M 個の無指向性点音源 $s_i(t)$ を用いた。このときアレイ上の第 j マイクロホンでの音圧波形 $p_j(t)$ は式(1)で表現できる。

$$p_j(t) = \sum_{i=1}^M \frac{s_i\left(t - \frac{r_{ij}(t)}{c}\right)}{r_{ij}(t)} \quad (1)$$

c = 音速 (m/s), M = 音源の数

$p_j(t)$ = 第 j マイクロホン位置での音圧 (Pa)

$s_i(t)$ = 第 i 音源より単位距離での音圧 (Pa)

$r_{ij}(t)$ = 第 i 音源と第 j マイクロホン間の距離 (m)

すなわち、音がでた瞬間における音源位置とマイクロホンの距離 r_{ij} を音速 c で割った時間 r_{ij}/c だけ遅れてマイクロホンに音が到達する。音源はどんどん移動するため、距離 r_{ij} は時間 t の関数となっている。音源 $s_i(t)$ の推定のため、アレイ上のマイクロホンの出力 $p_j(t)$ から、音源 $s_i(t)$ を各マイクロホンへの時間遅れを補正により、近似的に式(2)となる。

$$s_i(t) \approx \frac{\sum_{j=1}^N W_j p_j\left(t + \frac{r_{ij}(t)}{c}\right)}{\sum_{j=1}^N \frac{W_j}{r_{ij}(t)}} \quad (2)$$

N = マイクロホンの数

式(2)で W_j は、アレイのサイドローブの低減のための窓関数で、式(3)に示したハミング窓な

図4 アレイへの球面波入射と平面波入射

どを用いることができる。

$$W_j = 0.54 + 0.46 \cos \left(\frac{2\pi_j}{N+1} \right) \quad (3)$$

以上の解析は、音源の時々刻々の移動を考慮する必要がある、リアルタイムに解析するというわけにはいかない。このため、現場での測定結果を実験室に持ち帰り、解析を行った。

4. 二次元音源分布の可視化

一次元のマイクロホンアレイは、アレイを含む平面内にのみ指向性を持っているため、車体の側面のどの部分から騒音が出ているかといった二次元的な音源の解析が困難である。このため筆者らは、二次元的なマイクロホンアレイと、3節で述べた音源の追跡手法を組み合わせた音源解析・可視化手法を開発している⁽⁴⁾。

二次元マイクロホンアレイは、一次元のアレイを交差させることにより実現可能である。二次元の音源分布の可視化はそれぞれのマイクロホンアレイに式(2)を適用し、得られた結果を合成することにより可能となる。

図5は開発したX字形のマイクロホンアレイの正面図を示す。測定はこのアレイを車両側面約6mの位置に車両と平行に設置して行った⁽⁵⁾⁽⁶⁾。

図5 X字形マイクロホンアレイ正面図

5. 可視化例

アレイの解析ではアレイの感度特性が重要な意味を持つ。そこで、新幹線車両の窓部にホーンスピーカを取り付け、走行中に音を放射させた状態での解析を行い、感度特性の実測を行った。実験では、山形新幹線「つばき」(400系)の車掌室の窓に設置したスピーカに、基本周波数 455 Hz の矩形波を入力し、基本周波数の整数倍のスペクトルをもつ音を放射させた。

このとき、図5に示したアレイを車両と平行に側面より約6mの位置に設置し、解析した結果を図6に示す⁽⁵⁾。図は音源の第2倍音である 910 Hz での解析結果である。図6(a)は、アレイの正面の前後 10 m の範囲での 2 m ごとの静止音源に対する理論的な指向特性を、平均して求めた理論的な指向特性である。図6(b)はX字形アレイによる解析結果で、3 dB ごとに色を変えている。図より音源付近で、静止音源モデルによる理論値とアレイの解析結果はよく一致していることがわかる。

図7に、東海道を走る2種類の新幹線車両を用いた解析結果を示す。図は周波数範囲 300 Hz ~ 1 kHz の範囲の結果を合計したもので、図7(a)は0系と呼ばれる初期の新幹線車両、図7(b)は

図6 スピーカ実験による音源分解能解析結果
(東日本旅客鉄道(株)「つばき」車両使用)

図 7 新幹線車両の音源解析結果
(東海旅客鉄道(株)「のぞみ」車両使用)

「のぞみ」(300系電車)での解析結果である。0系車両では屋根上のパンタグラフが大きな音源であるが、300系車両ではパンタグラフの数を減らしたことなどにより騒音低減の効果がみられる⁽⁶⁾。

6. ま と め

X字形のマイクロホンアレイを用いた音源分布の可視化方法と新幹線車両側面上の二次元的な音源分布の解析例を示した。解析結果は、新幹線車両の空力騒音源などの評価に役立てられている。

最後に、実車両での二次元音源分布解析にご協力頂いた東海旅客鉄道(株)と東日本旅客鉄道(株)の関係各位に深く謝意を表す。

文 献

- (1) Barsikow, B., The Importance of Aerodynamic Noise for Tracked Vehicles at Speeds Up to 500 km/h, *Proc. Inter Noise 90*, (1990-8), 1437-1440.
- (2) Takano, Y. ほか, Noise Reduction on the New NOZOMI Shinkansen Cars, *Proc. STECH '93*, 2 (1993-11), 39-44.
- (3) 荒井・ほか, 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, (1978-5), 501-502.
- (4) Takano, Y. ほか, Development of a 2 dimensional Microphone Array Measurement System for Noise Sources of Fast Moving Vehicles, *Proc. Inter Noise 92*, (1992-7), 1175-1178.
- (5) 高野・ほか, X字型マイクロホンアレイによる新幹線車両の音源分離精度の検討, 日本機械学会 *D & D'95*, No. 95-8, B (1995-8), 453-456.
- (6) Torii, A., Takano, Y. ほか, Shinkansen's Sound Source Measurements Using Microphone Arrays, *Proc. Inter Noise 92*, (1992-7), 1171-1174.

(原稿受付 1996年1月11日)