

- 鉄道一般
- 車両
- 施設
- 電気
- 運転・輸送
- 防災
- 環境
- 人間科学
- 浮上式鉄道

# 駆動装置から発生する騒音源を探る

鉄道車両の床下には、モーターやエンジンなど動力を発生する装置や、動力を伝達する継手や歯車装置があります。そのほかにインバーターなどの制御機器があります。これらの装置からはさまざまな騒音が発生しています。騒音の解明と低減対策を検討するには速やかな発生源の特定や伝搬経路の解明が必要です。ここでは、音源中心の位置や、音の強さを視覚化するビームフォーミング法など最新の音源可視化技術の概要、歯車装置に、この技術を応用した解析事例について紹介します。



**笹倉 実**  
Minoru Sasakura  
車両制御技術研究部  
動力システム研究室  
主任研究員  
[専門分野] 駆動システム、振動・騒音

## はじめに

鉄道車両から発生する騒音は、集電系騒音や空力騒音のほかに、モーターや歯車装置などの駆動装置から発生する騒音、さらにはレール・車輪から発生する転動騒音があります。駆動装置から発生する騒音のうち、モーターから発生する騒音は、全閉形永久磁石モーター(※参照)が普及しつつあり、大幅に低下する傾向にありますが、そ

の陰に隠れていた歯車装置の騒音が目立ちつつあります。そのため、現在では、歯車装置の騒音対策も重要になってきました<sup>1)</sup>。

これら騒音の低減対策を検討するには、騒音の発生源や、騒音の流れを正確に把握する必要があります。従来の騒音計では、騒音発生源の特定は困難であり、音の流れ全体の解明が難しい面があります。近年は小型カメラと複

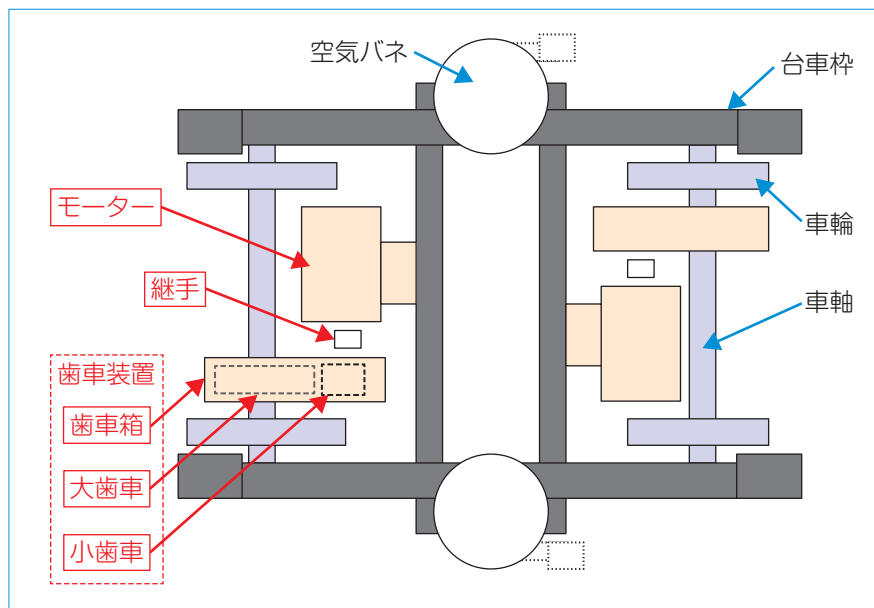


図1 電動車の駆動装置

数のマイクロホンを組み合わせ、これらの課題を速やかに解決可能な可視化技術が進んでいます。

### 駆動装置から発生する騒音

電動車の駆動装置は、図1のようにモーター、歯車、歯車箱および継手などの要素から構成されます。

駆動装置各要素の主な騒音帯域は、歯車装置が0.5kHz～3kHzと考えられます。

一方、モーター騒音や車輪から発生する転動騒音は1kHz～2kHz付近を中心にみられることがあります<sup>2)</sup>。

駆動装置回りの騒音環境の特徴として、①1kHz付近など、各要素から発生する騒音の周波数帯域が重なる場合が多い。②床下の狭い空間に複数音源が密に存在する。③台車カバーなどに囲まれて閉空間に近く、軌道側からの音の反射も含めて残響性が高い。④運転条件により騒音の発生状況が大きく異なる。などが考えられます。

とくに歯車装置の騒音は、速度依存性のほか、トルク依存性、潤滑油の温度や粘度依存性<sup>3)</sup>などがあり、とても複雑な騒音特性を示します。従来機器(騒音計など)では個別の音源特定が困難であり、騒音解明を難しくしています。

### 騒音可視化技術の種類と特長

近年、複数のマイクロホンを用いて、騒音源の位置や強さ、騒音の流れを視

#### 全閉形永久磁石モーター

モーターの回転子(ローター)に永久磁石を採用しており、外筒が密閉式構造になっています。冷却用ファンをもたないため騒音が小さいことが特長です。

#### 離散音

特定周波数のスペクトルと、その倍数のスペクトルをもつような周波数特性をもつ音のこと。

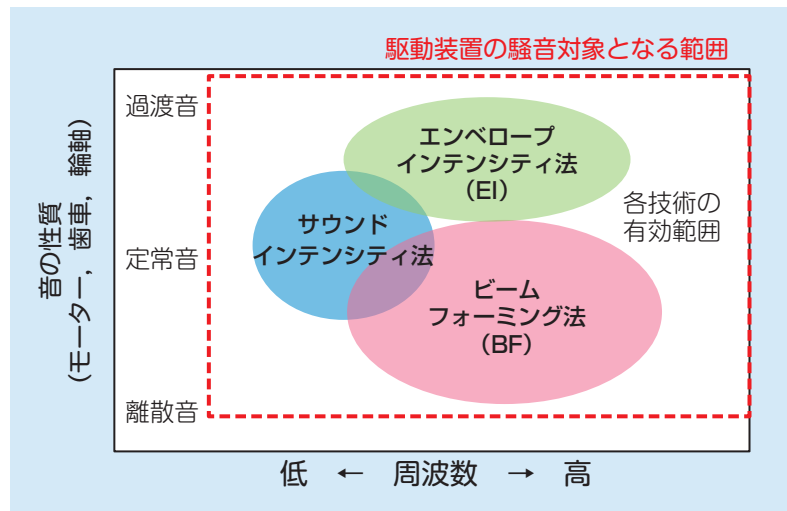


図2 騒音可視化技術の適用イメージ

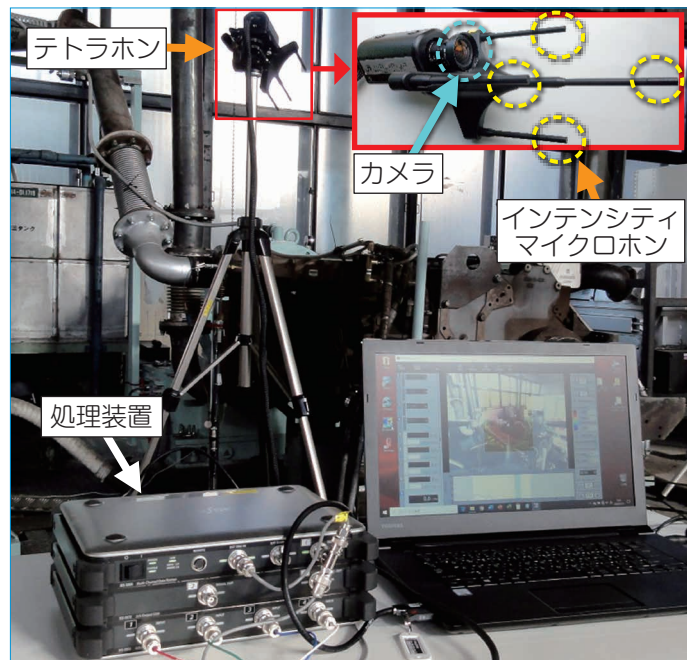


図3 テトラホン型BF装置の概要

覚化する騒音可視化技術が進んでいます。これら技術の特長は、無響室や残響室など、特別な測定環境がなくても、車両工場や屋外などで精度の高い騒音評価が可能になることです。騒音の発生位置や大きさを視覚で直ちに認識・特定できるため、装置不具合の判断や、開発品の騒音低減の効果などの確認が迅速に行えます。

図2に、駆動装置の騒音対象となる範囲(赤い点線)と各騒音可視化技術の適用イメージを示します。一定の回

転数で稼働する発電機は時間的に変動しない定常音とよばれ、モーター、エンジンおよび歯車は、速度により回転数が異なり、騒音レベルが過渡的に大きくなる場合もあります(過渡音)。そのほか、インバーター系から発生する騒音は、周波数スペクトルが基本周波数の整数倍となる離散音(参照)となります。

騒音可視化手法の一つとしてビームフォーミング法(以下BF)があります。従来のBFでは、多数のインテン

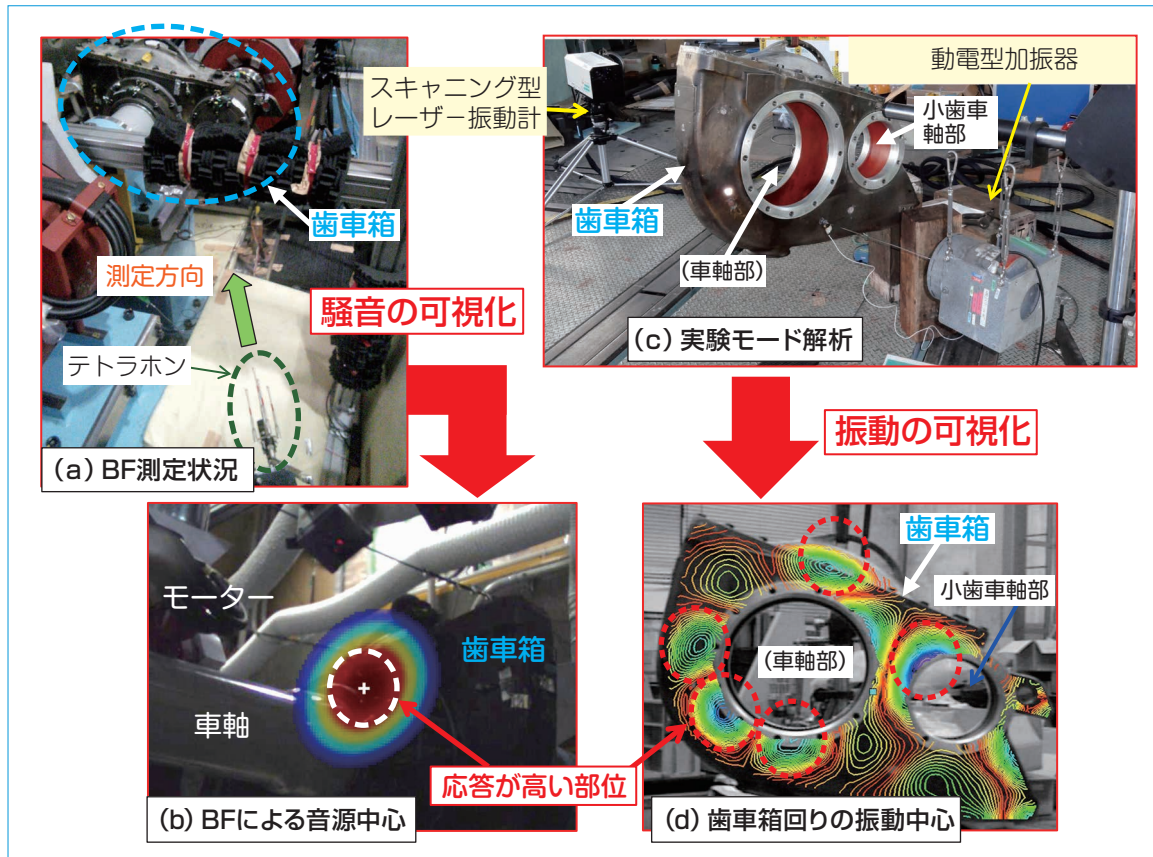


図4 歯車装置から発生する騒音と振動の可視化

シティマイクロホン (☞参照) を等間隔で格子型に配列する方式や、円状に不規則な間隔で配列する方法がありますが、近年は、図3に示す4本のインテンシティマイクロホンを正四面体構造に配列し、その中央部にカメラを取り付けて全体を小型化したテトラホンとよばれる装置を用いる方式もありま

す。BFは、各マイクロホンの位置の違いにより、入射波の到達時間の差(遅延時間推定法 (☞参照) とよばれます)を利用して、指向性をもたせることにより音の空間を探索する原理を用いています。これにより特定方向の音源把握が可能となります。カメラの視覚画像と音源の位置座標を重ね合わせるこ

とにより、2次元的な色わけ図での音源の位置を可視的に示します。

BFの入射波は、平面波 (☞参照) を前提としており、音源とマイクロホンは十分に離れている(波長の数倍が目安)必要があります。高い周波数は4kHzまたは8kHz程度まで測定可能ですが、低い周波数(0.5kHz以下)では精度が低下する欠点があります。

エンベロップインテンシティ法(以下EI)は、テトラホンの構成がBFと共通ですが、音源中心の表現方法は2次元の図でなく、1次元の点での移動軌跡で表現されます。EIの利点として、BFに比較して瞬時の音の識別性能が非常によく、BFでは解析の難しい歯車のガタ打ちのような過渡音も視覚化することが可能です。

サウンドインテンシティ法は、BFのように音源中心を求めるものでなく、音源から周囲に放射される音のエネルギー(インテンシティ)の流れを2次元

#### ☞ インテンシティマイクロホン

音響インテンシティとは、単位時間あたり単位面積を通過する音のエネルギーのことであり、これを測定できるマイクロホンのこと。通常の騒音用マイクロホンでは、音の圧力のみ測定可能であるが、インテンシティマイクロホンは、一定距離にある2つのマイクロホンで構成され、これにより音の粒子速度(空気の粗密における空気分子の振動速度)を算出することが可能となり、音のエネルギー(音圧×音の粒子速度)が測定できます。

#### ☞ 遅延時間推定法

複数信号の位相差から遅延時間を計算する推定法。BFではマイクロホン信号に遅延子を挿入し、入射波の位相を調整することにより、音響ビームを形成します。音響ビームのスキャンにより、音源位置を推定します。

#### ☞ 平面波

一定の進行方向に垂直な波面をもつ波のこと。音源から遠く離れて広がった波は近似的に平面波とみなすことができます。

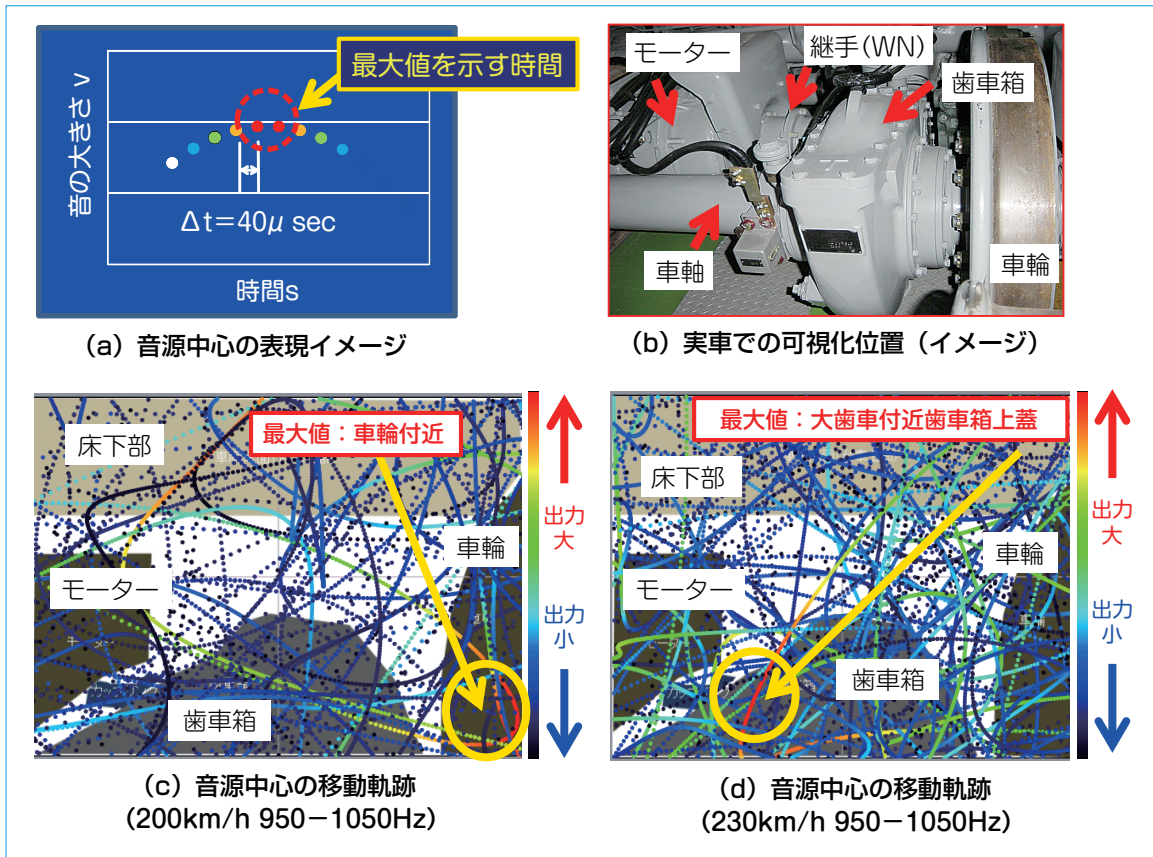


図5 台車音源中心の移動軌跡 (EI)

または3次元空間のベクトル (矢印) で視覚化して表す方法です。

### 歯車装置の騒音可視化

歯車装置から発生する騒音のBFによる可視化事例について紹介します<sup>4)</sup>。図4 (a) は、テトラホンと歯車箱の位置関係を示しています。図4 (b) は、高速回転時の歯車箱の音源中心であり、大歯車軸受付近より騒音が発生している状況がわかります。同じ駆動装置に対し、図4 (c) に示す実験モード解析 (参照) とよばれる解析手法により得られた図4 (d) の振動形状 (振動モード) を観察しますと、歯車装置の車輪周りは振動が発生しやすく、この部位

より、騒音が大きくなりやすい特性をもつことがわかります。

図5 (a) は、EIで示す音源中心の表現イメージであり、ここでは瞬時 (100万分の40秒ごと: 40 $\mu$ sec) の音源中心の音の大きさを色分けで示します。図5 (b) の可視位置で示す高速走行時の歯車装置付近の音源中心の移動軌跡<sup>5)</sup>を、図5 (c) および、図5 (d) に示します。同じ騒音の周波数帯でも走行速度の違いにより、過渡的な騒音

の発生位置は、歯車装置と車輪で違いのあることがわかります。

### おわりに

今後は、ここで紹介した騒音可視化装置などを用いて、車両騒音評価への適用研究をすすめ、振動や騒音の発生源と、発生要因の解明をおこない、速やかな低減対策をすすめることにより、快適な車両開発を続けてゆきます。

RRR

#### 実験モード解析

加振器やインパルスハンマーなどを用いて対象物を加振し、加振力と応答の関係から、特定周波数のモーダルパラメータ (固有振動数、モード形状など) を同定する実験的な解析手法。

#### 文献

- 1) 笹倉実, 近藤稔: モーター・歯車装置からの音と振動を減らす, RRR, Vol.71, No.11, pp.12-15, 2014
- 2) 笹倉実, 佐藤潔: 在来線車輪の形状因子による振動騒音特性評価, 鉄道総研報告, Vol.22, No.5, pp.17-22, 2008
- 3) 笹倉実, 柳館直成, 江崎雄也, 前田晋作, 野崎精彦: 鉄道歯車の振動と騒音性能に影響する因子の評価, D&D2019講演論文集, 2019
- 4) 笹倉実, 高重達郎, 長恵美子, 岩波健, 島宗亮平, 小野寛, 前川澄天, フランソワ ブテイ, 羽倉守人, 小西昌之, 三神圭司: 実験的測定手法を用いた鉄道歯車装置の振動及び騒音現象の解明, D&D2016講演論文集, 2016
- 5) 笹倉実, 鈴木史比古, 三神圭司: 鉄道歯車装置の振動・騒音解析と高強度球状黒鉛鋳鉄を用いた騒音低減の研究, D&D2014講演論文集, 日本機械学会, 2014