

音源可視化手法による台車付近の騒音解明

笹倉 実*

Elucidation of Noise Near the Bogie using Sound Source Visualization Method

Minoru SASAKURA

There are many sources of noise generated from equipment such as gear devices for a railway vehicle installed in the narrow space of a bogie frame under the floor of a vehicle. Therefore, it is difficult to separate sound sources onboard a vehicle with a sound level meter, and up to now there is no method for separating sound sources. As a method to solve this problem, we are working on applying a sound source visualization method to noise measurement of railway drive device. As the sound visualization method, the 4-channel beamforming method (BF method) and the envelope intensity method (EI method) are used as appropriate, and the test results are compared. This paper reports the results of noise measurement using a sound source visualization method in a bench test of a drive device, and the results of a study on improving accuracy. We confirmed that the beamforming method has excellent imaging stability for transient sounds, and that image processing using multiple small microphone arrays improves the imaging accuracy of the BF method.

キーワード：駆動装置，台車，騒音解析，音源可視化，ビームフォーミング法

1. はじめに

電動車駆動装置の騒音源は、主電動機及び歯車装置等であり、台車内の狭い空間に複数の音源が存在する。普通騒音計による従来の騒音測定では、個別の音源分離が難しいこともあるため、正確な騒音発生位置を把握しにくく、低騒音対策や故障対策を困難にしている面がある。

近年は多数のマイクロホンや小型カメラを用いて、騒音源の位置や強さ及び、音響エネルギーの流れを視覚化する各種可視化技術が進んでいる。これら技術の特長は、無響室などの特別な測定環境を必要とせず、車両工場や屋外などで精度の高い騒音源の特定が可能になることである。分析に時間をかけることなく、その位置を視覚により直接認識・特定できるため、装置不具合の判断や、開発品の騒音低減効果の確認を迅速に行うことが可能となる。

本研究では、台車装置付近の近接測定に適し、従来の音源可視化装置より小型で計測が可能な4ch型ビームフォーミングによる手法（以下BF法）を中心に駆動装置の音源解明と手法の有効性についてまとめた。

2. 駆動装置の騒音環境

電動車駆動装置は、車両床下の台車枠に取付けられているが、周囲1~2m程度の限られた空間内に主電動機、

継手及び歯車装置が存在し（図1）、各装置から騒音が同時発生する。また駆動装置からの騒音のほかに車輪及びレールの凹凸が起振源となる転動騒音も同時に存在する。車両走行時の床下騒音周波数は高く、その帯域も概ね300Hz~4kHz程度と広い（図2）。特に1kHz付近では、転動騒音の主たる周波数帯域と重なる場合が多く、正確な音源位置の把握を困難にしている。これらの状況により騒音測定の技術面から現象が捉えにくく、詳細な解明が困難な状況がこれまでに見られた。駆動装置の騒音低減対策には、それぞれ個別の発生源の把握と要因評価が不可欠であり、音源分離が可能な解析技術の確立が必要である。

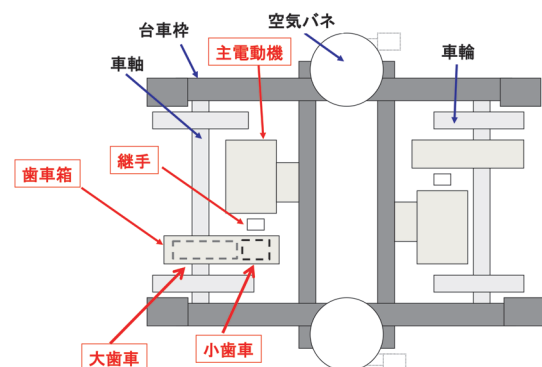


図1 電動車の駆動装置

* 車両技術研究部 駆動システム研究室

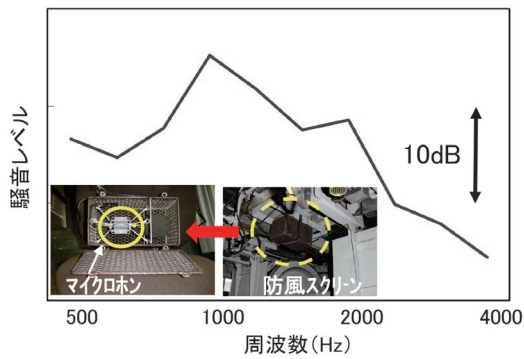


図2 走行時の床下騒音周波数帯

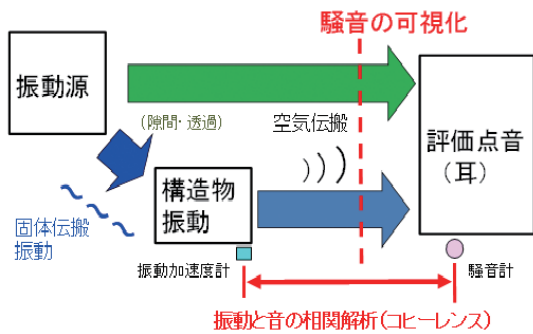


図3 振動及び騒音の経路と可視化手法の関係

3. 音源可視化手法と測定原理

駆動装置より発生する騒音は、歯車かみ合いなどが起振源となる場合があるが、振動発生源と騒音発生部が必ずしも一致するわけではなく、固体伝搬振動により起振源から離れた部位より発生する場合があります、現象の解明が困難な場合があります。本研究では、BF法を中心とする音源可視化手法の適用性を調べるとともに、振動加速度計と騒音計を用いた相関解析もあわせて実施した(図3)。

音源可視化手法の比較を表1に示す。BF法は、各マイクロホンの位置の違いによる入射波の到達時間の差を利用して指向性を持たせることにより(遅延時間推定法)、音源の空間分布を探索する原理を用いている(図4)。これにより特定方向の音源把握が可能となる。BF法の有効周波数範囲は比較的広く、500Hz~8kHz程度である。これは、図2に示す駆動装置の騒音周波数帯をほぼ含んでおり、BF法の適用性は高いと考えられる。

一方、エンベロープインテンシティ法(EI法)はBF法と共通の小型マイクアレイを用いるが、音源中心の表現方法は、BF法のような2次元マップでなく、一定時間内の点の移動軌跡で表現される。BF法の時間分解能がmsecオーダーであるのに対し、EI法の時間分解能はμsecオーダーであり、急激に大きさや発生位置が変化するような過渡的な音でも視覚化することが可能であると言われている。EI法は音響信号(時間波形)の包絡

表1 音源可視化手法の比較

測定手法	センサー	処理原理	音源表示	長所	短所
ビームフォーミング法(BF法)	マイクロホン(少数)	遅延時間推定	2次元マップ	広帯域 過渡音O (時間分解能msec)	低周波域の精度低下 ゴースト(虚像)
エンベロープインテンシティ法(EI法)	マイクロホン(少数)	ヒルベルト変換	一定時間内の点群軌跡	過渡音O (時間分解能μsec)	表示時間短い
従来法(多点音圧マップ)	マイクロホン(多数)	モード分離	2次元マップ(音響モード)	低周波域 複数音源分離	仮設作業に時間 多数MICを必要とする

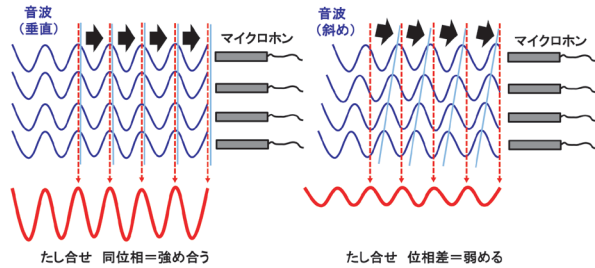


図4 BF法の基本原理(遅延時間推定法)

線(エンベロープ)から、ヒルベルト変換による複素時間信号に置き換えることにより、瞬時振幅と瞬時位相を算出する手法である。

従来BF法のデータ処理は、図5のAに相当する。多数のマイクロホンを等間隔で格子型に配列する方法や、円状に不規則な間隔で配列する方法などがあるが、求められる空間分解能や対象とする周波数帯域によっては、多数のマイクロホンが必要となり、構成するマイクロホンアレイの規模も大きくなる。本研究では、図5のAに加え、Bに示す最小分散法(Minimum Variance, MV法, Capon法とも呼ばれる)を採用することにより、少数のマイクロホンで雑音を抑制することが可能となり、システムの小型化を図っている¹⁾。図6に示す4本の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マイクアレイ(以下、小型マイクアレイと記す。)とよばれる装置を用いる方式としている。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次元的なコンタ図での音源の位置を可視的に示す。従来のBF法の入射波は平面波を前提としており、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)必要があったが、本研究では、球面波を前提としたデータ処理(球面補正)を行っており、近傍からの測定にも対応可能と考えられる。

4. 駆動装置回転試験装置による音源可視化²⁾

本章では、駆動装置回転試験装置の概要、BF法等の測定方法及び、相関解析について述べる。

回転試験装置は、高速回転(在来線用歯車の場合、130km/h程度)が可能であり、駆動用主電動機(かご形

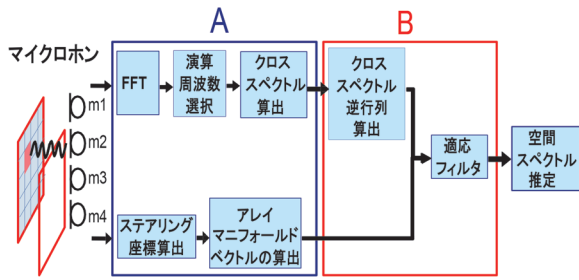


図5 BF法のデータ処理

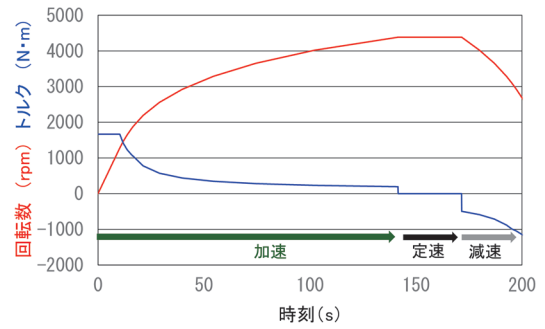


図7 駆動装置回転試験装置の運転条件

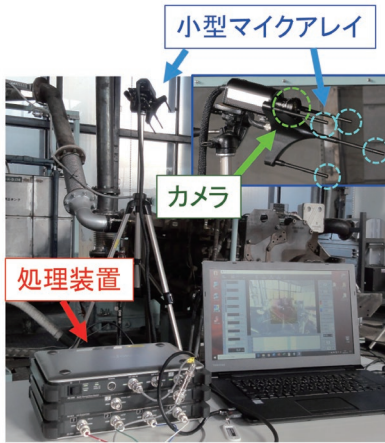


図6 BF小型マイクアレイ測定装置

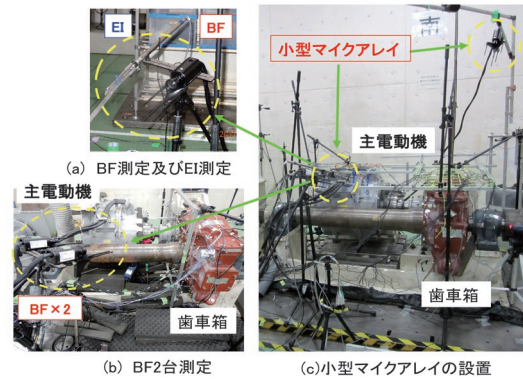


図8 小型マイクアレイの設置状況

三相誘導電動機) からWN継手を介して小歯車側に駆動トルクを伝達する方式であり、実車駆動装置同様の構成で試験が可能である。なお、車軸両側に圧入されている車輪は取外している。また、車軸は、負荷用主電動機にリンクされており、これにより、駆動トルクと逆方向の負荷トルクを与えて歯車のかみ合い状態を再現している。

回転条件は、図7に示す加速、定速及び減速のパターンとした。供試歯車は、在来線型であり、歯車比5.65(96/17)、モジュール6、圧力角 26° 及び、ねじれ角 23° である。

図8に小型マイクアレイの設置状況を、図9に小型マイクアレイの測定範囲を示す。測定位置は、歯車箱側面及び主電動機側面を測定対象とした位置1と、歯車箱上面及び主電動機上面を測定対象とした位置2とした。なお、位置1は、床面からの高さが約1m、測定対象との距離が約0.9mであり、実車走行試験で床下装着を前提としても搭載可能な位置を模擬している。カメラの広角性を生かし、歯車装置と主電動機を同時に処理範囲内に収めることが可能な位置となっている。また、本試験ではBF法による音源可視化測定と、加速度計等による相関解析を併せて実施した。また位置1においては、速度変化による過渡的な音源移動に対し、EI法との比較を行った。また、複数の小型マイクアレイによるBF法の測定も行った。

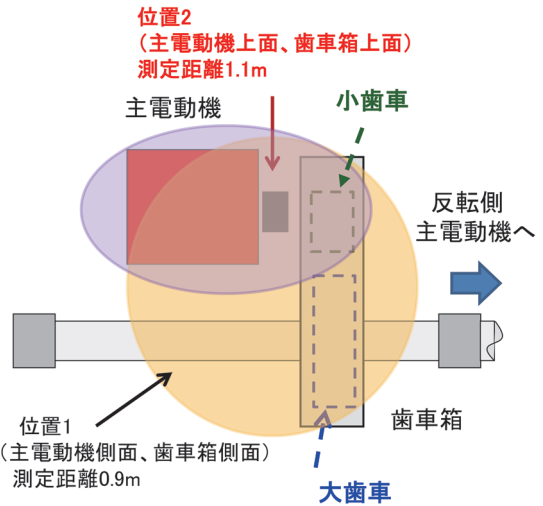


図9 小型マイクアレイの測定範囲

4.1 駆動装置の相関解析

駆動装置の表面に発生する振動が騒音源となる場合がある。振動源と推定される位置に振動加速度計を貼付し、近傍騒音と相関解析(コヒーレンス算出)を行った。相関解析により、当該部位からの振動放射の可能性が高い周波数帯を特定し、BF法での解析周波数帯を絞込むことにより、対象となる騒音現象の結像精度の向上と計算負荷を減少させることが可能となる。主電動機は、筐体径方向の振動が騒音放射源となることを想定し、中心部に

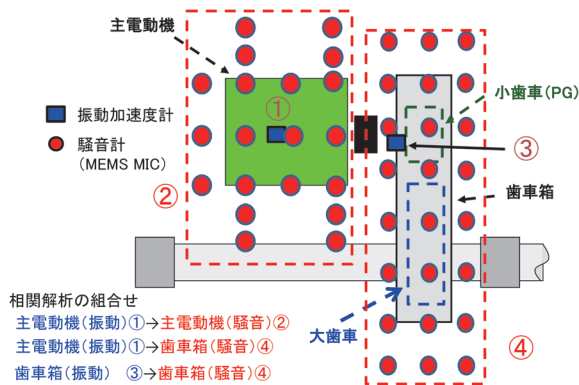


図 10 駆動装置の相関解析 (歯車箱及び主電動機)

振動加速度計を貼付した。鉄道用歯車は、はすば歯車が多く、接触分力から、かみ合いによるスラスト方向の振動が大きくなる傾向を持つ³⁾。このため小歯車近傍の歯車箱左右方向に振動加速度計を貼付した。近傍騒音測定は、超小型マイクロホン (小野測器製 MB-2200M10 以下、MEMS MIC と記す) を用い、歯車箱近傍 (24 点) 及び主電動機近傍 (20 点) に配置した。図 10 に相関解析に用いた振動加速度計及び MEMS MIC の配置を示す。また、解析の組合せを図中①～④に示す。なお④は、6 章で述べる従来法のマイクロホン配置と共通としている。

4.2 複数の小型マイクアレイによる BF 法結像精度向上

従来の BF 法測定では、小型マイクアレイを固定位置に 1 台のみ設置するが、位置によっては、過渡的な音源移動や、周囲音響反射の影響により、音源中心となる結像が安定しないことがある。本試験の測定対象は、狭い空間内に多数の音源をもち、試験場内も残響性が高い環境である。この測定環境での改良法として、同一測定方向に対し、設置位置が異なる複数 (2 台) の小型マイクアレイを使用して、処理画像を合成することで、結像精度向上を行った。2 台の小型マイクアレイは水平方向に 200mm 間隔とした。データ処理は、次の流れで行った (図 11)。

最小分散法を用いて、マイクアレイ毎の結像計算を行う。結像安定性を図るため、移動平均処理を行う。移動平均処理後の音源中心座標に対し、一定時間 (ここでは 10 秒間) の出現回数を求めた。2 台の小型マイクアレイ視差補正後の音源中心座標を重ね合わせ、一定回数一致した座標を音源中心と判定し、一致しなかった座標 (1 台のみ音源中心とされた) を本来の音源ではないノイズ成分とみなして結果から除く処理とした。なお、今回の計算では一致回数を 1 回と設定した。

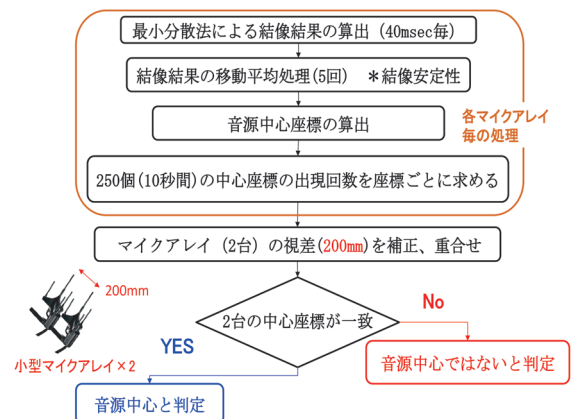


図 11 マイクロホンアレイの結像結果処理

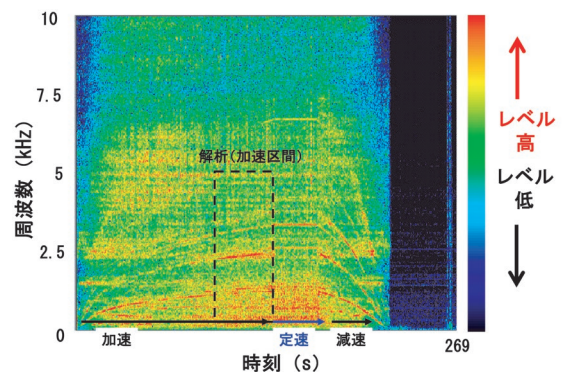


図 12 駆動装置騒音のスペクトログラム

5. 音源可視化解析結果²⁾

本章では、BF 法を中心に、駆動装置の音源分離、過渡音比較、結像安定性に関する解析結果について述べる。

5.1 駆動装置の振動と騒音の相関性

図 7 に示す運転条件では、高速域 (速度換算約 120km/h) に達する直前のトルク負荷状態 (加速区間) で騒音が顕著となる。小型マイクアレイによる駆動装置騒音のスペクトログラムを図 12 に示す。当該区間での相関解析結果を図 13 に示す。主電動機騒音は、図 10 ② に示す MEMS MIC 20 点の音圧平均、歯車箱騒音は、図 10 ④ に示す MEMS MIC 24 点の音圧平均としている。主電動機振動と主電動機近傍騒音は、周波数約 2500~3300Hz の高周波域で相関性が高くなる。これより相関レベルは低いものの、同じ周波数域で歯車近傍騒音との相関性も高くなる。この周波数帯での主電動機振動は、主電動機騒音のほか、歯車箱騒音にも影響が大きいことがわかる。一方、歯車振動と歯車近傍騒音の相関性が高い周波数域は 300Hz~2400Hz と、周波数帯域は低くなる。この周波数帯には歯車箱の複数の共振周波数や、かみ合い周波数成分が含まれていると考えられる。

5.2 駆動装置の音源中心

図14 (a) 及び図14 (b) は、主電動機筐体振動と騒音の相関性が高い3150Hz付近におけるBF解析により得られた主電動機筐体中央部付近の音源中心である。この部位は電磁鋼板部であり、励磁により筐体径方向の振動を励起して磁歪音となっている状況であると考えられる。

3150Hz付近の主電動機振動は、歯車箱騒音とも相関性が高い結果を示している。図15 (a) に示すように、歯車装置との結合部付近 (PG 付近) にも音源中心が見られる結果を示した。主電動機より発生した当該周波数成分の振動がWN継手を介し、歯車装置で音響放射している状況が推定できる。図15 (b) は、歯車振動と歯車箱騒音との相関性が高い周波数域 (1100Hz) におけるBF解析により得られた歯車装置付近の音源中心である。この周波数域は、歯車のかみ合い1次周波数に相当する。はすば歯車のスラスト力により大歯車軸受まわりが音源中心となることがわかる。

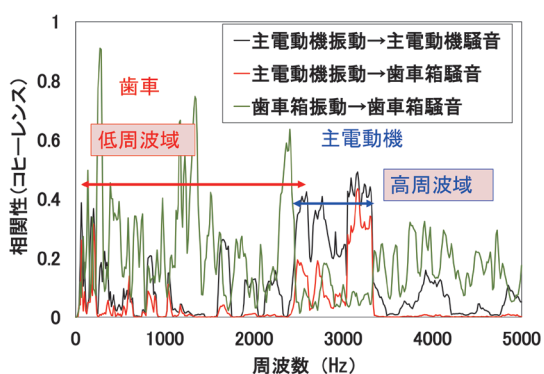
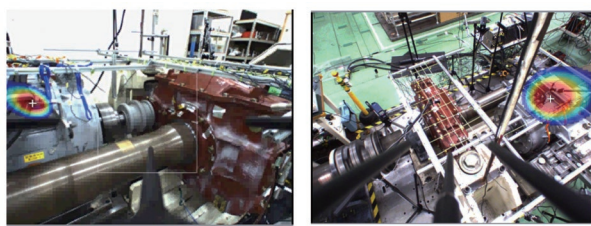


図13 主電動機及び歯車箱の振動及び近傍騒音の相関性



(a) 上面方向より (位置1) (b) 側面方向より (位置2)

図14 主電動機音源中心 (3150Hz 付近)



(a) 3150Hz 付近

(b) 1100Hz 付近

図15 歯車箱音源中心

5.3 過渡音に対する手法比較

力行から定速に移る場合、歯車系 (小歯車、大歯車及びWN継手歯車) かみ合い状態の変化や、回転慣性等の影響により、駆動装置の振動状態が変化することによる過渡音の発生が考えられる。図16中の枠で示す部分は、その領域であるが、歯車箱付近の主たる騒音である歯車かみ合い1次周波数は1200Hzから1300Hz付近となる。この枠内でのBF法による解析結果を図17 (a) に示す。力行時には、歯車スラスト力による大歯車軸受周りの音源中心がみられる (図17 (a) ①) が、定速に移行する付近で、音源中心がWN継手またはPG軸付近に移る (図17 (a) ②)。この時点では、WN継手のバックラッシュ等による振動状態の変化により、音源中心の移動があると推定される。その後 (図17 (a) ③) は、再び大歯車軸受回り又は、歯車箱後位に移動する状況がわかる。同様に、EI法による解析結果を図17 (b) ①～図17 (b) ③に示す。約200μsec毎の音源中心の移動軌跡を示しており、矢印で示した赤丸部分は、ある瞬間において高い音圧を示している箇所である。BF法のような安定的な音源移動はなく、音源範囲のバラツキが拡大する。特にWN継手付近に移動すると考えられる図17 (b) ②は、不安定な結像状況である。駆動装置のほかに回転装置からの外部騒音を含め、干渉及び床面反射等の影響もある。このため、時間分解能の高いEI法は、外乱影響を受けやすくなり、結像安定性が悪くなることが考えられる。本測定環境での過渡的な騒音評価には、BF法の方がむしろ良好な結果を示すことがわかる。

5.4 複数小型マイクアレイによる結像精度の向上

図18 (a) は、最高速度 (約120km/h) に至る力行状態において、小型マイクアレイ (左) における約10秒間の速度変化に伴う音源中心の移動軌跡であり、これを白色の+で示す。図18 (b) は、同様に、小型マイクアレイ (右) での結果である。解析周波数帯は当該速度域の歯車かみ合い1次周波数相当 (1000～1100Hz) としている。いずれも歯車箱の後部付近が音源中心となる結果を示しているが、両者の結像範囲は開きがある。各図中■で示す結像の位置は、2台のカメラの結像が重なる部分であるが、これ以外の結像が重ならない位置 (歯車箱上部及び、車軸部) は本来の音源中心でなく、床面からの反射影響など、ノイズ成分的なものと考えられる。これらの像を除外することにより、より精度の高い音源中心を判定することが可能となった。

6. 音源可視化手法の有効性検証²⁾

BF法の音源中心と、従来法 (多点マイクロホンによる音響モード法 図19) の音源中心の結像性を確認するこ

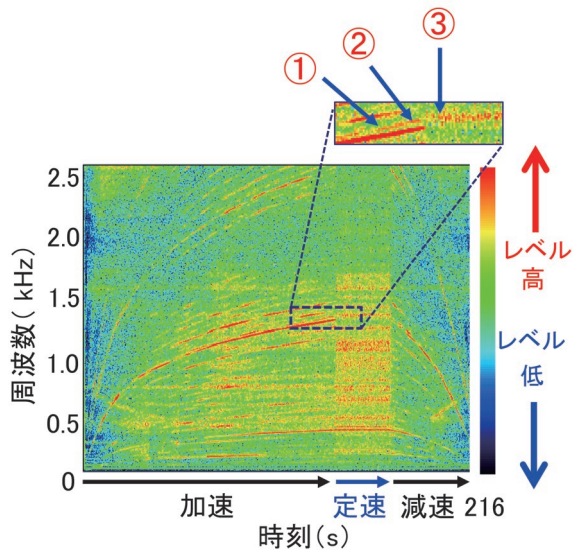


図 16 駆動騒音のスペクトログラムと解析区間

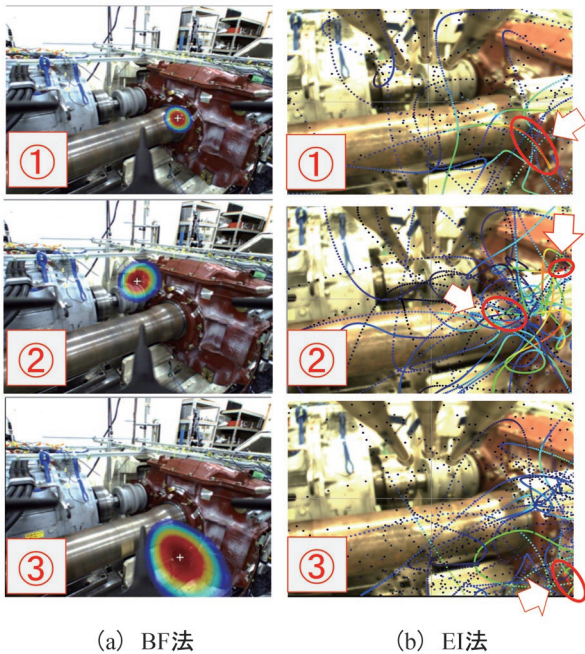
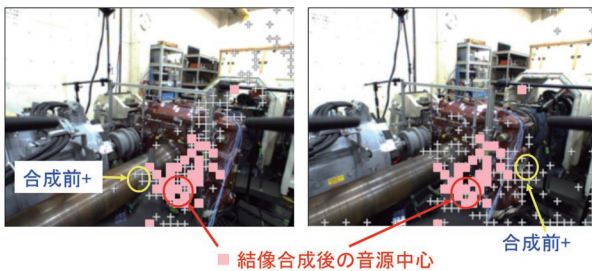


図 17 加速から定速に移行する過渡的な音源中心移動



(a) 小型マイクアレイ (左) (b) 小型マイクアレイ (右)

図 18 BF 法による解析結果

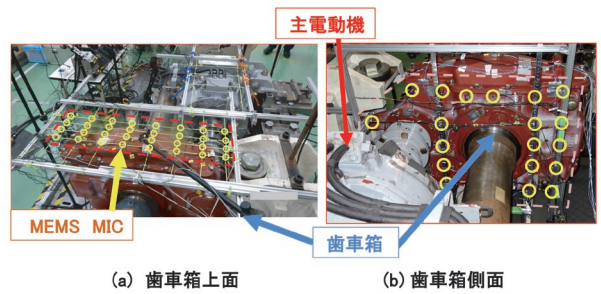


図 19 従来法による音源可視化(駆動装置回転試験装置)

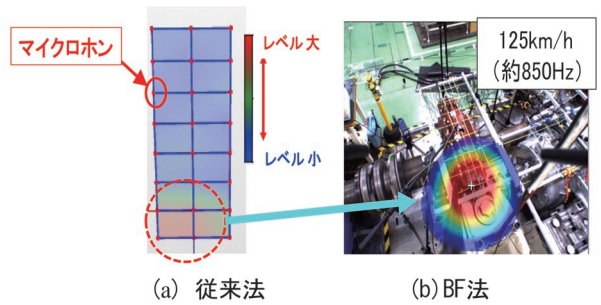


図 20 音源可視化手法の音源中心 (歯車箱上面)

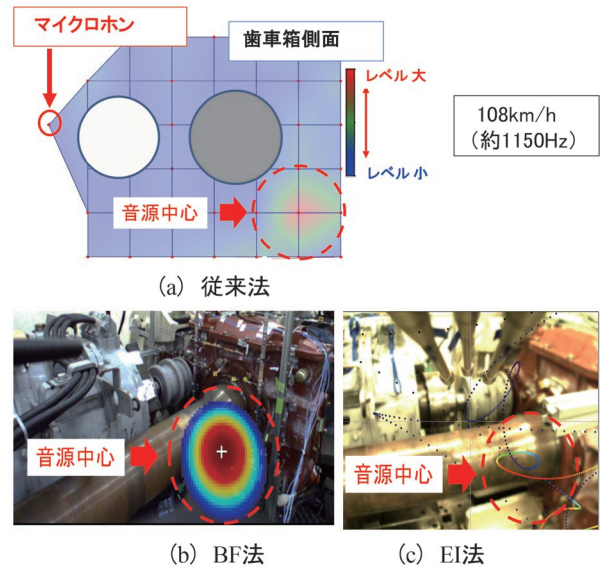
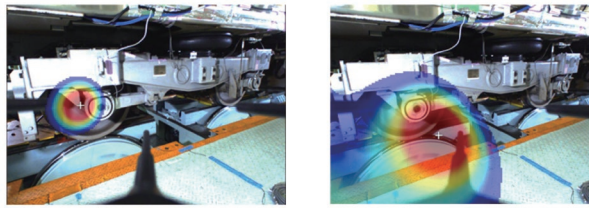


図 21 音源可視化手法の音源中心 (歯車箱側面)

とにより、手法の有効性を確認した。BF 法の特長上、低周波数域(約 500Hz 以下)で結像が得られないが、標準的な力行及び定速運転条件では、応答性は良好で、結像位置(音源中心)は、両者でほぼ一致した結果を得た。EI 法についても同様に一致した結像が得られた(図 20 及び図 21)。

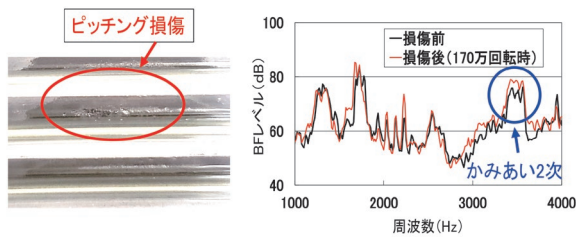
7. 音源可視化手法のその他適用例

音源可視化手法は駆動装置以外にも多方面に応用が可能であり、その適用例について述べる。



(a) 車輪側音源 (750Hz) (b) 軌条輪側音源 (1100Hz)

図 22 BF 法による転動騒音の音源分離
(速度 115km/h)



(a) 歯車の損傷状況 (b) 音のスペクトル変化

図 23 高面圧回転試験による縮尺歯車のピッチング損傷との音のスペクトル変化

7.1 転動騒音に対する適用例

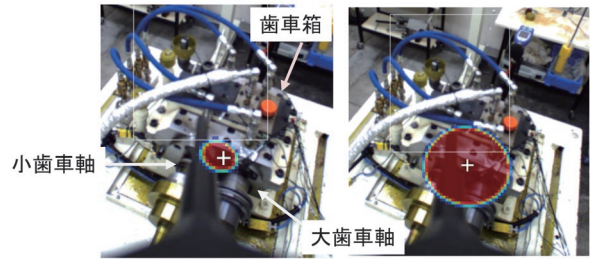
車両試験台試験上での高速走行 (約 115km/h) では、750Hz 及び 1100Hz にレベルの高い周波数成分が見られる。転動騒音の発生位置に違いが見られ、750Hz の音源中心は車輪側 (図 22 (a))、1100Hz の音源中心は、軌条輪側 (レール側) (図 22 (b)) であることを示した。

7.2 歯車損傷に対する適用例

音源可視化は騒音発生位置の特定のほか、結像状態の変化により、騒音発生源の状態監視にも応用できると考えられる。歯車装置を模擬した 1/3 縮尺歯車による耐久試験では、歯面の面圧条件が高い場合 (2.25GPa)、累積回転数が約 170 万回でピッチングとみられる損傷が歯車かみ合い部に発生し始める (図 23 (b))。音のスペクトルは、損傷前の状態と比較して、かみ合い 2 次周波数付近 (約 3500Hz) を中心とする高周波数域 (3000Hz 以上) の変化がわずかに見られるが (図 23 (b))、聴感による異音が感じられる程度ではない。BF 法による状態監視を行った場合は、歯車損傷の発生後は、かみ合い 2 次周波数の音源中心は、大歯車軸及び小歯車軸間の軸受中央部付近にあり、この付近の結像レベルが大幅に拡大することにより損傷発生から早い段階で検出が可能であることを示している (図 24)。

8. まとめ

鉄道用駆動装置の台上試験において BF 法を中心とし



(a) 損傷前 (b) 損傷後

図 24 縮尺歯車のピッチング損傷と BF 結像の拡大
(2000rpm, 約 3500Hz)

た音源可視化手法の適用と騒音発生位置の評価を行った。本研究により、以下の結果を得た。

- (1) 駆動装置回転試験で振動と騒音の相関解析を併用しつつ、主電動機中心の高周波数域 (約 3150Hz) 音源と、歯車装置中心の低周波数域 (約 1100Hz) 音源を分離した。前者の音源は主電動機筐体中央部付近、後者の音源は大歯車軸受付近にみられることがわかった。
- (2) 運転状態変化時の過渡音解析では、外乱影響等の少ないビームフォーミング法 (BF 法) の方が、エンベロープインテンシティ法 (EI 法) より結像安定性に優れることがわかった。
- (3) 複数の小型マイクアレイによる画像処理により BF 法の結像精度を向上した。
- (4) 従来法 (多点マイクホロンによる音響モード法) との結像比較により BF 法及び EI 法の有効性を確認した。

謝 辞

本研究の実施にあたり、呉工業高等専門学校、三菱電機株式会社及び、青梅鑄造株式会社には多大なご協力をいただいた。この場を借りて厚くお礼申し上げる。

文 献

- 1) 伊藤幹也, 瀬戸真智子, 石田康二: 4ch ビームフォーミングによる音源可視化装置の開発, 自動車技術会自動車技術, Vol.71, No.7, 「振動騒音をデザインする」, pp.62-66, 2017
- 2) 笹倉実, 竹下真, 小曾戸卓美, 三神圭司, 前田晋作: 鉄道用駆動装置の台上試験環境における音源可視化技術の適用性, D&D2023 講演論文集, 日本機械学会, 2023
- 3) 笹倉実, 鈴木史比古, 長恵美子, 嶋村和則: 鉄道車両の歯車かみ合い振動の発生と振動・騒音解析, D&D2015 講演論文集, 日本機械学会, 2015