

鉄道用駆動装置の台上試験による音源可視化技術の実用評価

笹倉 実* (鉄道総研) 竹下 真 三神 圭司 (小野測器) 前田 晋作 (三菱電機)

Practical Evaluation of Sound Source Visualization Technology by Bench Test of Railway Drive System

Minoru Sasakura*, (Railway Technical Research Institute) Takeshita makoto, Keiji Mikami, (Ono Sokki Co.,Ltd) Shinsaku Maeda, (Mitsubishi Electric Corporation)

In this study, we compared the beamforming method using a small tetra phone and the conventional method using a MEMS microphone and identified the noise source by visualizing the sound source of the driving device. The following results were obtained from this research. The position of the sound source center was approximated by two methods in the main frequency band (800Hz to 1500Hz) of the gear system. The proximity to the measurement plane improves the measurement accuracy in the high frequency range of the beamforming method. By using correlation analysis, we clarified the center of the sound source of the characteristic frequency caused by the structure-borne sound of the traction motor and gear system.

キーワード：駆動装置，騒音解析，音源可視化，ビームフォーミング法
(drive system, noise analysis, sound source visualization, beamforming method)

1. はじめに

鉄道用駆動装置の騒音源は、主電動機及び歯車装置であるが、台車内の狭い空間に複数の音源が存在し、騒音計による従来の測定では音源分離が難しく、駆動装置の総合的な騒音対策を困難にしている。近年は多数のマイクロホンや小型化カメラを用いて、騒音源の位置や強さ及び、騒音の流れを視覚化する各種の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。本研究では、従来装置より小型化したビームフォーミング法などの手法を用いて駆動装置の騒音源の解明を行った試験結果について報告する。

2. 音源可視化手法

本研究の代表的な 2 種の音源可視化手法について述べる。

〈2・1〉ビームフォーミング法による音源可視化

ビームフォーミング法 (以下 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) 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る。(図 1)。従来 BF のデータ処理は、図 2 の A に相当する。

本解析では、これに加え、図 2 の B に示す最小分散法 (Minimum Variance, MV 法、Capon 法とも呼ばれる) を加えることにより、多数のマイクロホンを必要とする従来 BF よりシステムの小型化を図っている⁽¹⁾。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を用いている (小野測器 BF-3200/MI-5420A)。一般に BF 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) が必要があるが、本方式では球面補正を行うことにより、近傍からの測定にも対応可能と考えられる。

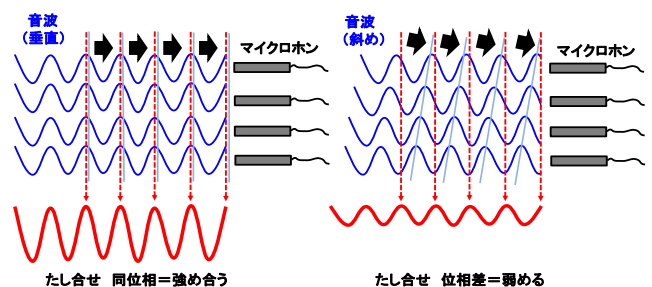


図 1 BF 測定の基本原理 (遅延時間推定法)

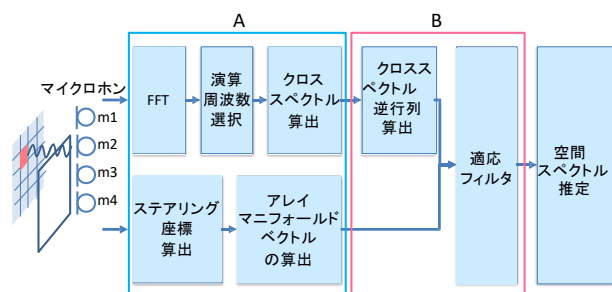


図 2 最小分散法による BF 処理

〈2・2〉超小型マイクロホンによる音源可視化 (従来法)

図 3 に示す超小型マイクロホン (以下 MEMS MIC と記す。小野測器製 MB-2200M10) を用いて、音圧の多点同時

計測を行う方法である。データ処理は、実験的振動モード解析の手法を用いている。周波数領域のカーブフィットにより、各マイクロホンの特定周波数の音圧と位相関係を求め、2次元音圧マップ(音響モード)をコンタ処理して音源中心を表現する。多数のMEMS MICを固定する作業が必要となることから、仮設及び調整作業に時間を要する。



図3 超小型マイクロホンの歯車箱貼付状況

3. 駆動装置の音源可視化試験

歯車箱付近の音源に対し、輪軸回転試験装置を用いてBF法と従来法の比較を行った。また、駆動装置の高速回転試験装置を用いて、相関解析とBF法により主電動機及び歯車装置の音源分離と騒音発生位置の評価を行った。

〈3・1〉輪軸回転試験装置の試験概要

輪軸回転試験装置は、歯車装置の小歯車側がベルトで駆動する。最大回転数(大歯車側)は約500RPM(走行速度換算で約80km/h)である。歯車装置の近傍にテトラホンを設置した(図4)。小型カメラの画角により歯車装置全体を捉えることが可能な位置とし、歯車箱板部から1m前後を目安とした。MEMS MICの位置は騒音放射面を考慮し、歯車箱側面及び上面の周囲部(赤丸)と、リブに囲まれた各板部の中心等(橙丸)の26点とした(図5)。

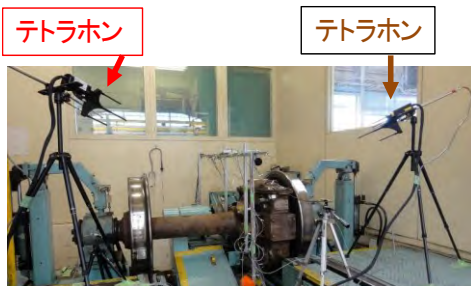


図4 テトラホンの位置(輪軸回転試験装置)

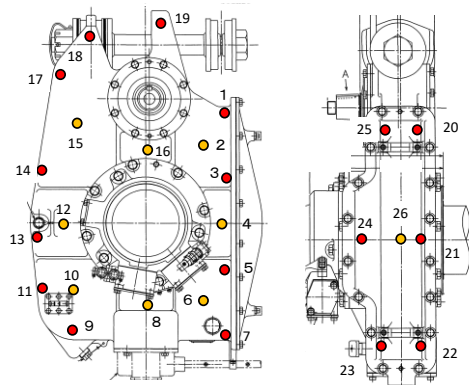


図5 MEMS MICの位置(歯車箱)

〈3・2〉高速回転試験装置の試験概要

高速回転試験装置は、駆動用主電動機(誘導電動機)から小歯車側に駆動トルクを伝達する構造であるが、車軸側から負荷用主電動機により駆動トルクと逆方向の釣り合いトルクを与えて歯車のかみ合い状態を再現している。

駆動装置の振動が固体伝搬音として騒音となる場合があるため、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(コヒーレンス解析)を行った。騒音発生との関連が高い周波数域を特定し、BF法を併用して解析を進めた。主電動機は、筐体円周方向の振動が騒音放射となることを想定し、中心部周方向に振動加速度計を貼付した。鉄道用歯車装置は、はすば歯車が多く、スラスト方向の振動が大きくなる傾向を持つ⁽²⁾。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。歯車箱近傍(24点)及び主電動機近傍(19点)のMEMS MICを用いて騒音を評価した(図6)。図7にMEMS MICとテトラホンの位置及び運転条件を示す。

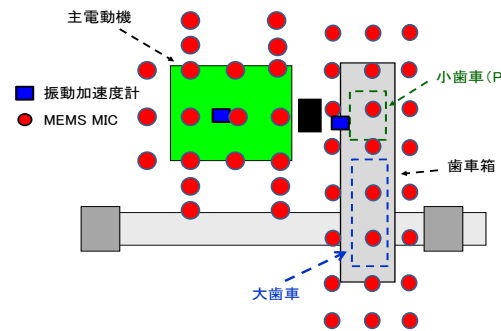


図6 駆動装置の相関解析(歯車箱及び主電動機)

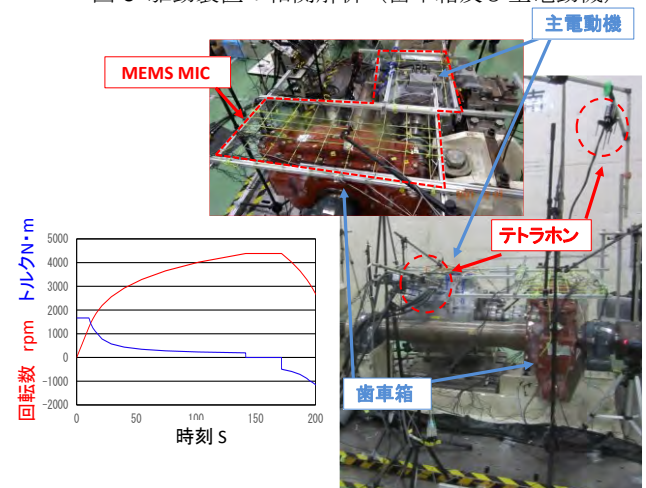


図7 MEMS MICとテトラホンの位置及び運転条件

4. 音源可視化解析結果

〈4・1〉歯車箱音源可視化手法の比較

(1) 従来法による音源可視化

図8は、輪軸回転試験装置で定速(約80km/h)のMEMS MIC26点の音圧平均である。次にカーブフィットにより得られた主な周波数別の音響モード(音圧分布)を2次元コンタにして示す(図9)。表示が赤に近いほど音圧が高い傾

域であり、その付近が音源中心と考えられる。低周波域 (308Hz) では、歯車箱側面全体が面内変形せずに大きく併進する、いわゆる剛体モードとなり、側面全体より、放射する分布を示す。同相で振動する音の放射面積が大きいため、この周波数域で音圧平均が高くなる原因になると推定できる。808Hz は、弾性的な板変形を示し、歯車箱の前位及び後位の板部中央の音圧が高い傾向にある。歯車騒音の主な要因である、かみ合い 1 次周波数 (80km/h で約 860Hz) に近い。これより周波数が高くなると歯車箱後位側 (980Hz) の値が大きく、さらに高い周波数 (1540Hz) では歯車箱底部が音源中心となる傾向を示した。

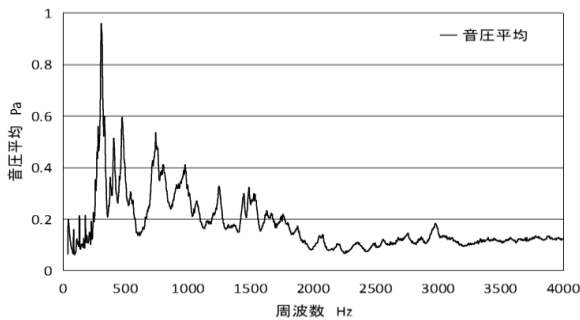


図 8 音圧平均 (MEMS MIC 26 点平均)

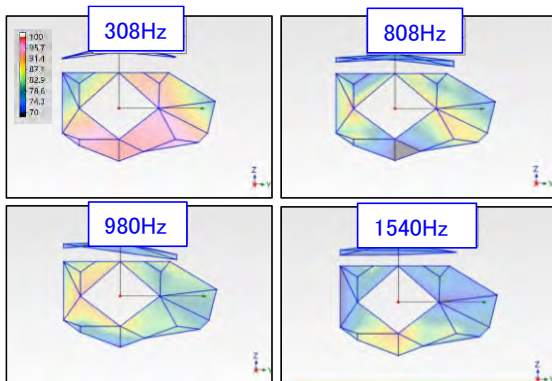


図 9 音響モード

(2) BF 法による音源可視化

測定対象 (歯車箱板部表面) から測定距離による BF レベルの違いを図 10 に示す。800~1000Hz 帯域が最も高いレベルを示す。距離 1.4m では、歯車箱側面の音源中心の結像が 800Hz~2200Hz の周波数帯域で再現し、音源中心の数は 6 例であるが、より近接距離 (0.5m) では、800Hz~3000Hz の周波数帯域に 9 例と、音源の抽出可能な周波数帯域が広がり抽出数も増加した。この理由として、過去に実施した一般的な鉄道用歯車装置の実験振動モード解析 (図 11) ⁽³⁾ より推測すると、高周波域 (3000Hz など) の歯車箱振動モードはリブに囲まれた各板部から発生する複数の音源中心をもつ形態となるので、音の近接回込み (エバネセント波) の影響が大きく、遠方では打消し合うことになること、テトラホンにおける音のレベルが近接では 5~10dB 程度高くなり、S/N の改善があるためであると推測される。これら歯車箱の特性を考慮すると高周波域までの評価には

近接測定の方が測定精度は良くなると考えられる。

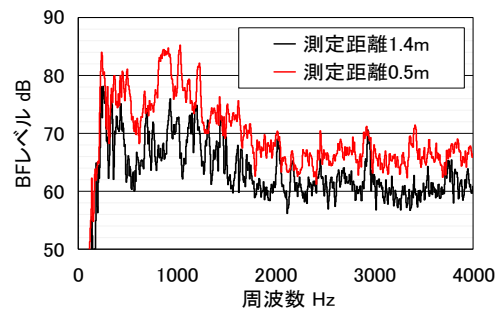


図 10 測定距離による BF レベルの違い (歯車箱板部方向)

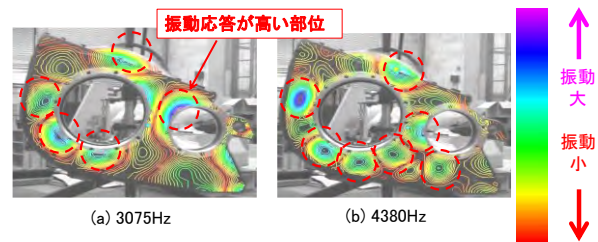


図 11 高周波域における鉄道用歯車箱の実験モード解析 ⁽³⁾

図 12 及び図 13(b)に側方距離 0.5m での主な BF 可視化例を、図 13(a)に前方 (0.6m) からの BF 可視化例を示す。従来法と BF 法の比較では、周波数カーブフィットの方法に違いがあるため、同一周波数の結果とならないが概ね 800~1100Hz 付近で歯車箱の前位及び後位の板部中央の値が高い結果を示し、さらに高い周波数 (1500Hz) は音源中心が後位及び底部に移動する傾向がみられた。両手法を比較すると低周波数域 (300Hz 付近) は BF 法で結像がみられないものの、800~1500Hz 付近の周波数域で概ね音源中心の傾向は両者で近い結果が得られた。周波数域ごとに放射部位の違いが識別できることから、低騒音化に向けた歯車箱の構造対策に本手法が活用できると考えられる。

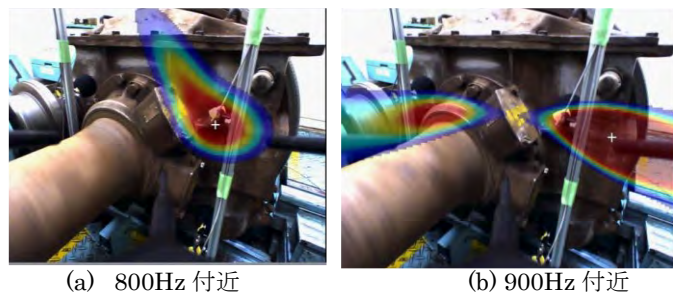


図 12 BF 法による音源可視化

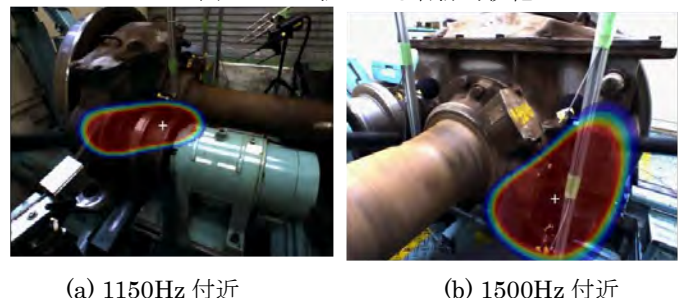


図 13 BF 法による音源可視化

〈4・2〉歯車装置及び主電動機の相関解析と BF 音源可視化
 図 7 に示す運転条件の高速域 (相当速度 120km/h) に達する直前のトルク負荷状態 (高速加速区間、図 14) での相関解析結果を図 15 に示す。主電動機振動と主電動機近傍騒音の相関は、周波数約 2500~3300Hz で高く、相関レベルは、やや低いものの、同じ周波数域で歯車近傍騒音との相関も高い。一方、歯車振動と歯車近傍騒音の相関が高い周波数域は 600Hz~1800Hz と、周波数帯域は低くなる。

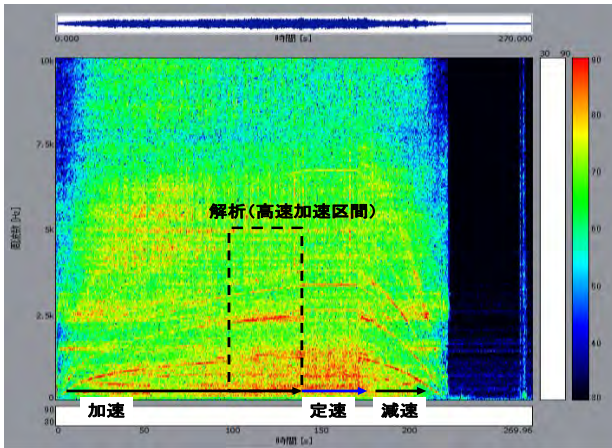


図 14 駆動装置の騒音周波数と解析区間 (点線枠)

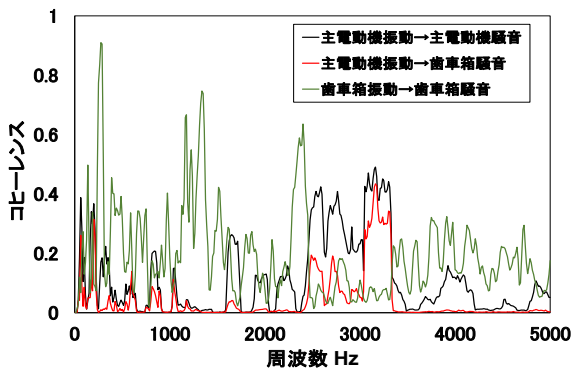
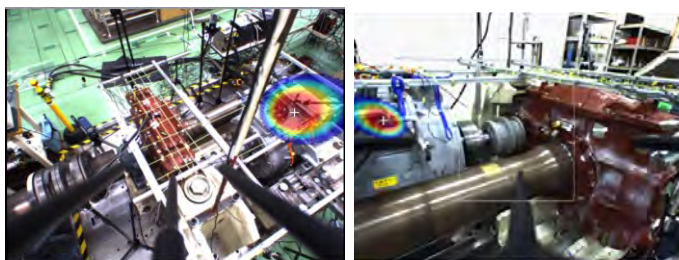


図 15 主電動機及び歯車箱の振動及び近傍騒音の相関性

図 16 は、主電動機筐体振動と相関が高い主電動機付近の音源中心である。主電動機中央部は電磁鋼板部であり、励磁により筐体周方向の振動を励起し、3150Hz 付近の磁歪音となっている状況であると考えられる。



(a) 上面方向より (b) 側面方向より
 図 16 主電動機振動と相関が高い主電動機音源中心 (3150Hz 付近)

3150Hz 付近の主電動機振動は、歯車騒音とも相関が高い結果を示しているが、図 17(a)に示す通り、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ことがある。

歯車振動と相関が高い歯車箱音源中心 (1100Hz) は、かみ合い 1 次周波数に相当するが、図 9 の解析結果のように歯車箱板部ではなく、車軸軸受まわりが音源中心となる (図 17(b))。先述の輪軸回転試験装置の結果に比較して試験装置からのトルク負荷が大きく速度も異なる。このため、はすば歯車のスラスト力の影響が異なり、板部の振動より軸受部の振動が大きく相対的に音響放射割合が変化している可能性が考えられる。



(a)主電動機振動と相関が高い (b)歯車振動と相関が高い
 (3150Hz 付近) (1100Hz 付近)

図 17 歯車箱音源中心

5. まとめ

鉄道用駆動装置の台上試験における音源可視化手法の比較と音源発生位置の評価を行った。本研究により、以下結果が得られた。

- (1) 従来法 (音響モード) と BF 法を比較すると、歯車装置の騒音中心となる周波数帯域 (800Hz~1500Hz 付近) で音源中心の傾向が近くなる結果が得られた。
- (2) 歯車箱の BF 測定は近接測定 (0.5m) の方が高周波域の測定精度が向上する。
- (3) 振動加速度と近傍騒音の相関解析を併用し、主電動機と歯車装置の固体伝搬音に起因する音源中心を解明した。

謝辞

輪軸回転試験装置の試験実施にあたり、御協力いただきました小田急電鉄 (株) に感謝の意を表します。

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 実他: 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)
- (3) 笹倉 実他: 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, 日本機械学会 (2016)