

## (10) 重機騒音解析のための卓越周波数を利用した方向推定

Direction of arrival (DOA) estimation by utilizing dominant frequency  
in noise analysis of heavy machine永井将紀<sup>1</sup>・若槻尚斗<sup>2</sup>・水谷孝一<sup>3</sup>・金澤朗蘭<sup>4</sup>

Nagai Masanori, Wakatsuki Naoto, Mizutani Koichi, and Kanazawa Laura

**抄録**：土木・建築工事における問題の一つに重機騒音が挙げられる。重機騒音の調査は多くが屋外で実施されるため、測定された騒音には重機騒音の他に環境雑音なども含まれている。本研究は重機騒音以外の雑音を含む測定結果から重機騒音の影響を正しく評価するための音源方向推定技術に関する。重機騒音はエンジンの回転により発生する騒音を主成分とするものが多いため、特定の周波数成分に強いパワーを有する（卓越周波数）。この重機騒音の特徴を利用した方向推定手法を提案し、計算機実験によりその有効性を確認した。

**キーワード**：騒音解析, 卓越周波数, 方向推定

**Keywords** : noise analysis, dominant frequency, DOA estimation

## 1. はじめに

土木・建築分野では重機騒音が問題となりうるため、工事前の騒音調査・近隣への騒音の影響の検証に騒音解析が必要になる。騒音解析はマイクロホンを利用した音源の騒音測定結果を用いて音圧レベル評価と周波数分析を行う。重機騒音はエンジンの回転により発生する騒音を主成分とするものが多く、卓越周波数を持つ。卓越周波数とは他の周波数に比べ強いパワーを持つ周波数であり、重機騒音において卓越周波数の評価は重要である。

重機騒音の測定は屋外で実施されることが多いため、測定点で得られる音圧と周波数が周囲の雑音(交通騒音や風雑音など)により変化してしまう可能性がある。そのため、測定結果から重機の卓越周波数を検出し、卓越周波数が対象音源のものであるかを確認する必要がある。測定データが対象音源によるものかを確認する方法について、現在は対象音源と測定点の両方で計測を行い、測定者の勘や経験のもと対象音源であるかを判断している<sup>1)</sup>。

近年では、測定者の経験ではなく測定点から対象音源の方向を推定する音源方向推定技術により、測定データが対象音源によるものであるかを確認する手法が研究されている。音源方向推定の主な手法として相互相関法・CSP法、遅延和アレイ法があげられる<sup>1)</sup>。相互相関法・CSP法は複数音源に対して音源方向を推定することができない。また、対象音源の周波数帯域が狭いと雑音の影

響を受けやすい。遅延和アレイ法はマイクロホンアレイにより指向性マイクを形成し全方向のパワー分布を計測して音源方向を推定する。しかし、周波数帯域が低い音に関しては十分な指向性を確保できず、角度分解能が低くなる問題がある。重機騒音の卓越周波数は周波数帯域が狭く、相互相関法・CSP法による手法では複数音源の方向推定は難しい。また、卓越周波数が低周波数域であるため、指向性を形成する遅延和アレイ法では十分な推定精度を確保できなくなる。

本研究は、重機騒音は定常騒音であり卓越周波数成分は時間方向に連続であるという卓越周波数の特徴を利用し、測定結果から卓越周波数と音源方向を推定する手法を提案した。提案手法は複数の卓越周波数と音源方向の推定が可能であり、卓越周波数の特徴を利用しているため、従来の方向推定に比べ交通騒音や風雑音などの影響に頑強である。

## 2. 原理

本研究では二つのマイクロホンの受信信号の到来時間差を用いる音源方向推定法を基本原理として、卓越周波数の特徴を利用する音源方向推定法を提案する。提案手法は、受信信号のクロススペクトルの位相差から得られた音源方向情報を時間-周波数毎に計算し、卓越周波数を特定する。

1 : 非会員 学士(工学) 筑波大学 大学院システム情報工学研究科 学生  
(〒305-8573 茨城県つくば市天王台 1-1-1, Tel :029-853-5468, E-mail : nagai-m@aclab.eys.tsukuba.ac.jp)  
2 : 非会員 工学博士 筑波大学 大学院システム情報工学研究科 准教授  
3 : 非会員 工学博士 筑波大学 大学院システム情報工学研究科 教授  
4 : 非会員 芸術工学修士 榎奥村組 技術研究所 研究員(〒300-2612 つくば市大砂 387)

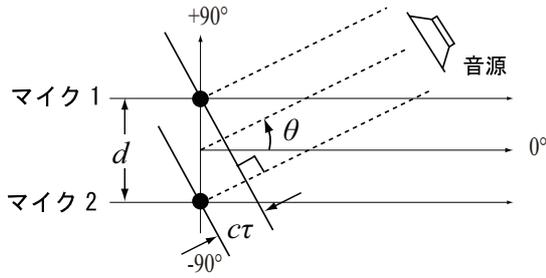


図-1 到来時間差に基づく方向推定原理

### (1) 到来時間差に基づく方向推定

本研究では、間隔  $d$  で設置されたマイクロホンの音波の到来時間差を測定することにより音源方向を推定する。

図-1 において音源が  $\theta$  方向から二つのマイクロホン(マイク 1, マイク 2) に入射してくる際、マイクロホン間に音波の到来時間差が生じる。この到来時間差を  $\tau$  とすると音速  $c$  を用いて到来距離差は  $c\tau$  となる。また、マイクロホン間距離  $d$  は既知であるため、式(1) に示される関係より音源方向  $\theta$  が推定される。

$$\theta = \sin^{-1}\left(\frac{c\tau}{d}\right). \quad (1)$$

### (2) 卓越周波数の特徴を利用する音源方向推定法

本研究では騒音源を移動のない固定音源で卓越周波数を持つと仮定する。この騒音をマイクロホンアレイで受信するとき、マイクロホン間に生じる到来時間差は常に一定となる。そのため受信信号の位相差は周波数に対して線形である。本手法では、まず受信信号のクロススペクトルを求め、その位相差から得られた音源方向情報を時間-周波数軸上のデータとして計算する。その後、得られたデータから卓越周波数を特定する。

提案手法の処理の流れを以下に示す。音源の信号を  $s(t)$  とするとマイク 1 とマイク 2 の受信信号  $x_1(t)$ ,  $x_2(t)$  は式(2), (3) で示される。 $\tau_1, \tau_2$  はマイク 1 マイク 2 の受信信号の位相を表す。

$$x_1(t) = s(t - \tau_1), \quad (2)$$

$$x_2(t) = s(t - \tau_2). \quad (3)$$

**Step 1:** 受信信号をフーリエ変換しクロススペクトルを求める。 $X_1(f), X_2(f)$  は  $x_1(t), x_2(t)$  のフーリエ変換であり、 $s(t)$  のフーリエ変換  $S(f)$  と受信信号の位相  $\tau_1, \tau_2$  を用いて式(4), (5) で示される。クロススペクトルは  $X_1(f)$  と  $X_2(f)$  の複素共役の積で表され、式(6) で示される。 $X^*(f)$  は  $X(f)$  の複素共役を表す。式(6) において  $2\pi f(\tau_1 - \tau_2)$  は受信信号の位相差を表す。この時  $(\tau_1 - \tau_2)$  が目的音の到来時間差  $\tau$  となる。

$$X_1(f) = S(f)\exp(-j2\pi f\tau_1), \quad (4)$$

$$X_2(f) = S(f)\exp(-j2\pi f\tau_2), \quad (5)$$

$$X_1(f)X_2^*(f) = |S(f)|^2 \exp(-j2\pi f(\tau_1 - \tau_2)), \quad (6)$$

$$\tau = \tau_1 - \tau_2. \quad (7)$$

**Step 2:** 得られた到来時間差を音源方向に変換し、音源方向を時間-周波数軸上のデータとして保存する。

- 本論文では得られたデータを視覚的に表現するため、縦軸を周波数、横軸を時間、音源方向を色、パワースペクトル密度を色の濃さで示すスペクトログラムとして表示している。

**Step 3:** パワー閾値をかけた範囲  $P$  と音源方向閾値をかけた範囲  $\Theta$  を設ける。

- スペクトログラム上ではパワー閾値内の音源方向情報が色の濃さに対応している。本論文でパワー閾値は最大値を 0 dB として -40 dB で閾値を設けている。  
- 音源方向閾値はある角度  $\theta_t$  において  $\theta_t \pm \delta\theta$  となるようにする。本論文で音源方向閾値は  $-70^\circ$  から  $+70^\circ$  各  $5^\circ$  毎の方向に対し  $\pm 5^\circ$  の範囲で設けている。

**Step 4:** パワー閾値と音源方向閾値を共に満たしたデータを 1, 閾値外を 0 とし、データの二値化を行う。

- データの二値化により周波数毎に横軸時間、縦軸 0/1 となる信号  $s(\theta_t, f, t)$  が定義できる。

$$s(\theta_t, f, t) = \begin{cases} 1 & \text{if } (S(f)^2, \theta) \in (P, \Theta) \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}. \quad (8)$$

もし、卓越周波数が雑音のない理想的な状況でパワー閾値と音源方向閾値を共に超えたならば、 $s(\theta_t, f, t)$  は常に 1 となる。

**Step 5:** 周波数毎に  $s(\theta_t, f, t)$  の時間積分  $C(\theta_t, f)$  を計算する。

$$C(\theta_t, f) = \int s(\theta_t, f, t) dt. \quad (9)$$

- この時、 $C(\theta_t, f)$  の最大値は観測時間によるため、 $C(\theta_t, f)$  を観測時間で正規化する。

**Step 6:**  $\theta_t$  の設定をかえ Step 3 から Step 5 の処理を行い、 $C(\theta_t, f)$  の値が大きくなる  $f, \theta_t$  を求める。

-  $C(\theta_t, f)$  の値が大きくなる  $f, \theta_t$  が卓越周波数と音源方向を示し、本論文では得られた値を視覚的に表現するため音源方向-周波数軸に  $C(\theta_t, f)$  の値を表示している。

表-1 計算機実験条件

マイク個数	2 個
マイク間距離 $d$	0.6 m
計測時間	60 秒
サンプリング周波数 $f_s$	8 kHz
処理時間	60 秒
窓関数	Blackman 窓
時間窓長	0.5 秒
時間シフト長	0.25 秒
DFT 点	8000 サンプル
パワー閾値	-40 dB
音源方向閾値 $\delta\theta$	$\pm 5^\circ$

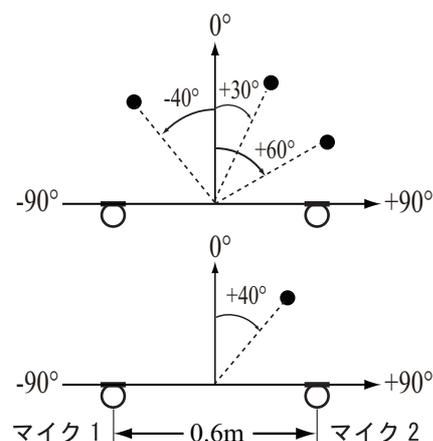


図-2 実験概略図

### 3. 計算機実験

#### (1) 計算機実験条件

提案手法の有効性を示すために音源に単一周波数の正弦波を 3 種類用いた場合と重機騒音を用いた場合に対して計算機実験を行った。実験条件を表-1 に、概略図を図-2 に示す。マイク間距離  $d$  は 0.6 m を想定し、計測時間は 60 秒間とした。パワー閾値は最大値を 0 dB として -40 dB で閾値を設けた。これは、相対的にパワーの小さい音源に対しても処理を行うためである。音源方向閾値は  $\pm 5^\circ$  の範囲で設け  $-70^\circ$  から  $+70^\circ$  まで  $5^\circ$  毎に処理を行った。

##### a) 単一周波数の正弦波を 3 種類用いた場合

音源には周波数 60, 90, 140 (Hz) の正弦波を用い、それぞれの正弦波に対し音源方向  $\theta$  は  $-40^\circ, 60^\circ, 30^\circ$  とした。雑音は屋外であらかじめ録音した風雑音、交通騒音などが混入したものをを用いた。この正弦波と雑音を計算機上で信号対雑音比が 0 dB になるよう合成し、マイクへの受信信号としている。

##### b) 重機騒音を用いた場合

重機騒音は主に 69, 138, 207 (Hz) 付近に卓越周波数を持つデータを用い、音源方向  $\theta$  は  $40^\circ$  とした。雑音は上記と同様のものをを用いた。この重機騒音と雑音を信号対雑音比が -10 dB になるよう計算機上で合成し、マイクへの受信信号とした。

#### (2) 結果

図-3, 図-5 は横軸を時間、縦軸を周波数、音源方向を色、パワー密度を色の濃さで示すスペクトログラムである。図-4, 図-6 は横軸を音源方向-周波数とした  $C(\theta, f)$  のグラフである。音源に単一周波数の正弦波を 3 種類用いた結果を図-3, 図-4 に示し、重機騒音を用いた結果を図-5, 図-6 に示す。

図-3 のスペクトログラムにより 60, 90, 140 (Hz) 付近に卓越周波数が表れ、 $-40^\circ, 60^\circ, 30^\circ$  方向を示す色で確認される。このスペクトログラムのデータに対し提案手法

の処理を行い  $C(\theta, f)$  を表示したグラフが図-4 である。これより、 $-40^\circ, 60^\circ$  Hz と  $60^\circ, 90^\circ$  Hz と  $30^\circ, 140^\circ$  Hz 付近の場所に他より高い値が確認され、これより各々の周波数と音源方向が推定された。

図-5 のスペクトログラムでは 69, 138, 207 (Hz) 付近に卓越周波数が  $40^\circ$  方向を示す色で確認できる。しかし、69 Hz 付近の卓越周波数はほとんどの領域で雑音に埋もれてしまっている状態である。図-6 の結果を見ると  $40^\circ, 138^\circ$  Hz と  $40^\circ, 207^\circ$  Hz 付近の場所に他より高い値が確認された。これより、卓越周波数成分は 138, 207 (Hz) で音源方向は  $40^\circ$  方向と推定できる。しかし、69 Hz 付近周波数においては高い値が得られず、音源方向の特定が不可能であった。

#### (3) 考察

3 種類の正弦波を音源とし、得られた結果から本研究の提案手法は卓越周波数を持つ音源が複数存在している場合においても各々の周波数と音源方向を特定することが可能であることを示した。重機騒音のうち 69 Hz 付近の周波数において高い値が得られなかったのは、卓越周波数がほぼ雑音に埋もれてしまったためと考えられる。しかし、本論文の実験条件では信号対雑音比が -10 dB とし雑音の多い環境を想定しているため、信号対雑音比が本論文よりも高い条件であればより高い値が得られ卓越周波数の方向推定が可能であると考えられる。また、本論文ではパワー閾値の設け方として、最大値を 0 dB として -40 dB の値でかけているが、閾値の設け方を -20 dB 以上 0 dB 以下や -40 dB 以上 -20 dB 以下などと変化させることで特定の音圧レベルの音源の方向推定が可能であると考えられる。

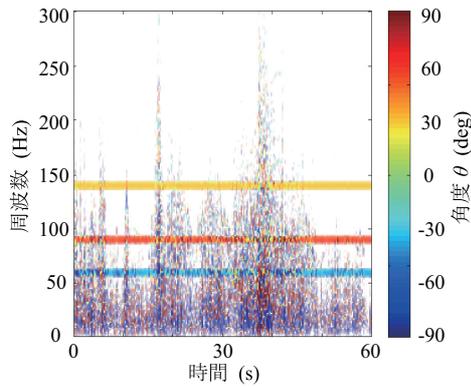


図 - 3 提案手法のスペクトログラム  
(音源:正弦波)

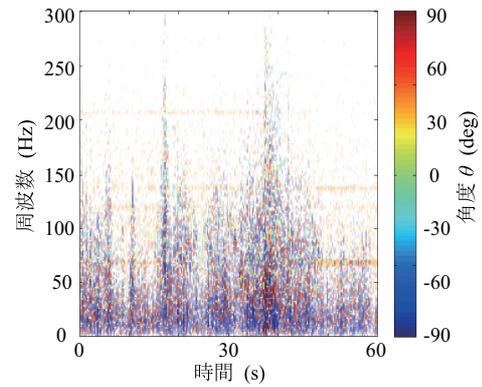


図 - 5 提案手法のスペクトログラム  
(音源:重機騒音)

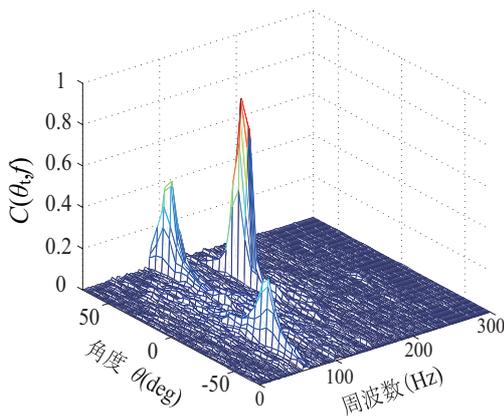


図 - 4  $C(\theta, f)$  のグラフ (音源:正弦波)

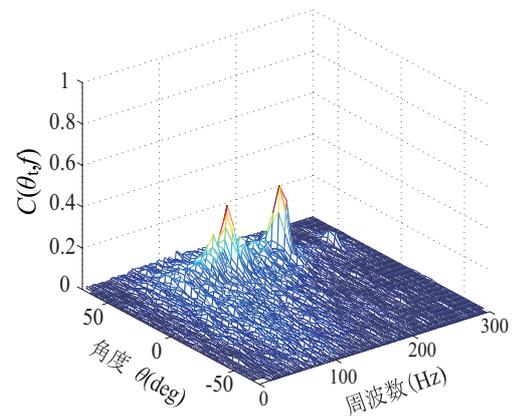


図 - 6  $C(\theta, f)$  のグラフ (音源:重機騒音)

#### 4. まとめ

本論文は、卓越周波数が時間方向に連続である定常音の特徴を利用し、重機の卓越周波数と音源方向を推定する手法を提案し、計算機実験によりその有効性を確認した。計算機実験により、まず 3 種類の単一周波数を持つ正弦波を音源に用いて 3 方向の複数音源に対する評価を行った。結果としてそれぞれの音源に対し、周波数成分と音源方向が得られた。

次に重機騒音を用いて、実際の音源で卓越周波数の音源方向推定を行った。結果として卓越周波数と思われる 138, 207 (Hz) 付近の周波数成分に他より高い値が得られ、音源方向が目的方向の 40° 方向であると確認された。しかし、雑音にほぼ埋もれていた 69 Hz 付近の周波数においては高い値が得られなかったが、信号対雑音比が本論文よりも高い -10 dB 以上の条件であればより高い値が得られ卓越周波数成分の方向推定が可能であると考えられる。よって計算機実験により、

- ・複数音源の卓越周波数の方向推定が可能
- ・実際の重機音においての方向推定可能

であり、提案手法の有効性が示された。また、パワー閾値の設け方により特定の音圧レベルの音源方向の特定も可能であると考えられる。

今後は、屋外環境における実機実験と同じ周波数成分に複数の音源が存在する場合の方向推定について検討を行う予定である。

#### 参考文献

- 1) 日本騒音制御工学会, 騒音用語辞典, 技報堂, pp. 173-183, 2010年.
- 2) 中野有朋: 騒音・振動環境入門, オーム社, pp. 81-117, 2010年.
- 3) 環境庁: 低周波音の測定方法に関するマニュアル, <<http://www.env.go.jp/air/teishuha/manual/index.html>>, (入手 2000.10) .
- 4) 電子情報通信学会, 大賀寿郎, 金田豊, 山崎芳男: 音響システムとデジタル処理, 東京出版, 1995年.
- 5) 金田 豊: マイクロホンアレーによる指向性制御, 日本音響学会誌, VI- 51, pp. 390-394, 1995年5月.
- 6) 奥村元, 趙國, 西浦敬信, 山下洋一: 分散マイクロホンシステムを用いた音源位置同, 信学技報, No. 487/V1-106, pp. 61-66, 2007年.