

光学的音響計測における空間サンプリング特性の解析*

© 古平真理子, 吉野夏樹, 矢田部浩平 (農工大), 谷川理佐子, 石川憲治 (NTT)

1 はじめに

光学的音響計測は、音による空気の屈折率変化を利用して非接触に音場を計測する手法であり、特に音源近傍の音場の可視化に有効である [1]。ただし、光学的音響計測で得られる観測値は光路に沿った音圧の線積分値であるため、各位置の音圧を直接得ることはできず、音圧分布を求めるには音場復元が必要である [2]。しかし、音場復元には一般に複数方向からの観測が求められ、その観測データの取得には計測上の負担を伴う。そこで、設置位置の音圧を直接得られるマイクロホンを併用し、光学的観測を補うことを考える。これにより、音場復元を行う際の計測上の負担を軽減できる可能性がある。そこで本稿では、マイクロホンの併用が光学的観測に与える効果と、音場復元に有効な配置を検討するため、マイクロホンを併用した計測系が音場の情報をどの程度捉えられるかを、特異値分解 (SVD) により評価する。

2 干渉計とマイクロホンを併用した計測

振動面から放射される音場を、光学干渉計と M ch の直線マイクロホンアレイを併用して測定することを考える。光学干渉計による観測では、図-1 に示す平行光またはファンビームを測定領域に通過させる。

位置 $\mathbf{r}$ における複素音圧を $p(\mathbf{r})$ とする。光学干渉計では、センサ面上の各位置に対応する光路に沿った音圧の線積分値が得られる。このとき、センサ面を K 点に離散化し、 i 番目の位置に対応する光路を L_i とすると、得られる観測データは

$$\mathbf{d}_{\text{opt}} = \left[\int_{L_1} p(\mathbf{r}) d\mathbf{l}, \dots, \int_{L_K} p(\mathbf{r}) d\mathbf{l} \right]^T \in \mathbb{C}^K \quad (1)$$

と表せる。ただし、 $d\mathbf{l}$ は光路に沿った線素である。線積分値は光路に依存するため、平行光やファンビームのように光路が異なれば、同一の音場に対する観測データ $\mathbf{d}^{\text{opt}}$ も異なる。

一方、位置 $\mathbf{r}_1, \dots, \mathbf{r}_M$ に配置したマイクロホンでは各位置の音圧が得られ、その観測データは

$$\mathbf{d}_{\text{mic}} = [p(\mathbf{r}_1), \dots, p(\mathbf{r}_M)]^T \in \mathbb{C}^M \quad (2)$$

と表せる。本稿では、マイクロホンアレイは図-2 に示すように配置し、光学的観測データに追加する。

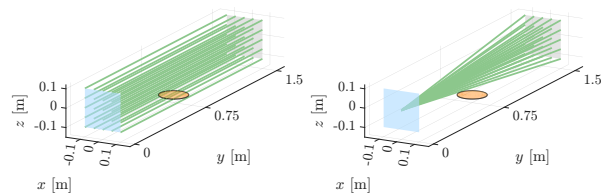


図-1 光学的音響計測における代表的な光路。左が平行光、右がファンビームを示す。手前 (青) がセンサ面、奥 (灰) がミラー、 x - y 平面上の円 (黄) は振動面を表す。センサ面とミラーの間隔は 1.5 m、開口幅は 0.20 m とした。振動面は直径 0.15 m、中心 $(0, 0.75, -0.11)$ m とした。

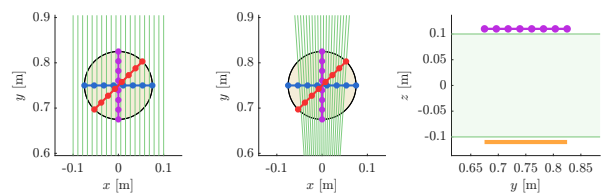


図-2 光学系と直線マイクロホンアレイの配置。左と中央はそれぞれ平行光とファンビームの上面図、右はマイクロホンと計測領域の高さ関係を示す y - z 断面図である。黒枠の円 (左・中央) および黄線 (右) は振動面を表す。青、紫、赤のアレイは、測定領域の中心を通る x 方向、 y 方向、 45° 配置を表す。マイクロホンは光路領域の上端から 1 cm 上に配置した。

このとき、両者を組み合わせた観測データは

$$\mathbf{d} = \begin{bmatrix} \mathbf{d}_{\text{opt}} \\ \alpha \mathbf{d}_{\text{mic}} \end{bmatrix} \in \mathbb{C}^{K+M} \quad (3)$$

と書ける。ただし、干渉計とマイクロホンでは観測する物理量が異なるため α でスケールしている。

3 特異値による計測系の評価

本稿では、音場を生じさせる振動面の粒子速度分布から観測データへの写像を構成し、その SVD によりサンプリング特性を評価する。これにより、マイクロホンの追加によって光学的音響計測のサンプリング特性がどの程度変わるかを明らかにでき、音場復元に適した計測系の検討を行える。

振動面 S 上の法線方向粒子速度分布が与えられると、その放射音場は Rayleigh 積分により求められる。積分の線形性より、粒子速度分布を直交系で展開することで、振動面が放射し得る任意の音場は、直交系の各関数に対応する音場の線形結合として表せる。そこで本稿では、振動面 S 上の粒子速度分布を、有限個のモード $\{\psi_n\}_{n=1}^N$ と、その係数 $\mathbf{a} = [a_1, \dots, a_N]^T$

* Analysis of spatial sampling characteristics in optical sound measurement. By Mariko KODAIRA, Natsuki YOSHINO, Kohei YATABE (Tokyo University of Agriculture and Technology), Risako TANIGAWA and Kenji ISHIKAWA (NTT)

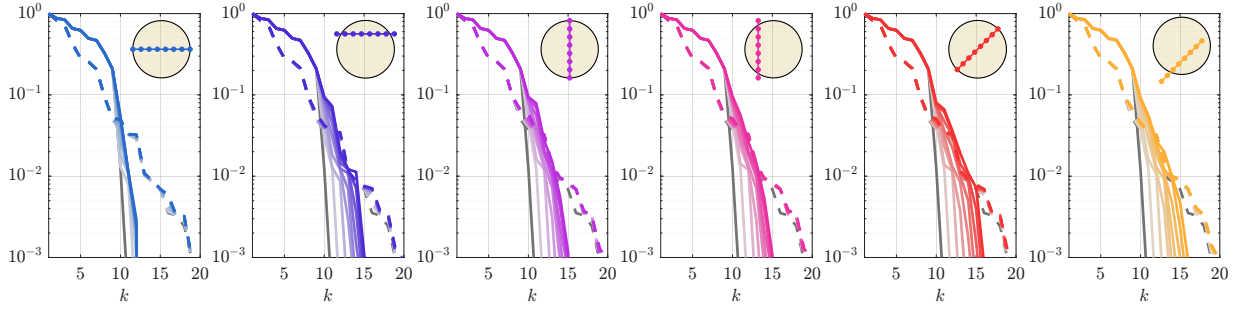


図-3 マイクロホンアレイを追加したときの正規化特異値 σ_k/σ_1 の比較. 各プロットの右上の挿入図は、マイクロホンアレイの配置を示しており、図-1、図-2 に対応している. 各列は左から、中心を通る x 方向アレイ、 y 方向に +4 cm シフトした x 方向アレイ、中心を通る y 方向アレイ、 x 方向に -4 cm シフトした y 方向アレイ、中心を通る 45° アレイ、および y 方向に -4 cm シフトした 45° アレイを表す. 実線は平行光、破線はファンビーム、灰色は光学の観測のみ、色線はアレイの一端から 1-8 ch を用いた場合を淡色から濃色で示す.

により近似的に展開する. このとき、音場は

$$p(\mathbf{r}) \simeq \sum_{n=1}^N a_n C_R \underbrace{\int_S \psi_n(\mathbf{r}_s) G(\mathbf{r}, \mathbf{r}_s) dS}_{p_n(\mathbf{r})} \quad (4)$$

となる. ただし、 ψ_n は法線方向粒子速度分布の第 n モード、 $p_n(\mathbf{r})$ はそのモードが生成する音場である. また、 C_R は音圧の法線勾配と法線方向粒子速度の関係を含む Rayleigh 積分の係数、 $\mathbf{r}_s$ は振動面上の積分変数、 dS はその周りの微小面積要素、 G は Green 関数である. このとき、光学の観測およびマイクロホン観測は音場に対して線形なので、音場 $p(\mathbf{r})$ の観測データは、各モードが作る音場 $p_n(\mathbf{r})$ に対する観測データの線形結合として表される. よって、 $p_n(\mathbf{r})$ に対する光学の観測データとマイクロホン観測データを、それぞれ $\mathbf{b}_{\text{opt}}^{(n)}$ および $\mathbf{b}_{\text{mic}}^{(n)}$ とすることで

$$\mathbf{d}_{\text{opt}} = \sum_{n=1}^N a_n \mathbf{b}_{\text{opt}}^{(n)}, \quad \mathbf{d}_{\text{mic}} = \sum_{n=1}^N a_n \mathbf{b}_{\text{mic}}^{(n)} \quad (5)$$

となり、両者を組み合わせた観測データは

$$\mathbf{d} = \begin{bmatrix} \mathbf{d}_{\text{opt}} \\ \alpha \mathbf{d}_{\text{mic}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{b}_{\text{opt}}^{(1)} & \cdots & \mathbf{b}_{\text{opt}}^{(N)} \\ \alpha \mathbf{b}_{\text{mic}}^{(1)} & \cdots & \alpha \mathbf{b}_{\text{mic}}^{(N)} \end{bmatrix} \mathbf{a} = \mathbf{B} \mathbf{a} \quad (6)$$

と表せる. 観測行列 $\mathbf{B} \in \mathbb{C}^{(K+M) \times N}$ の第 n 列は、 n 番目のモード ψ_n が生成する音場 $p_n(\mathbf{r})$ に対する観測値を表す.

観測行列 $\mathbf{B}$ は、モード係数 $\mathbf{a}$ を干渉計とマイクロホンを併用した観測データ $\mathbf{d}$ に写す行列である. 観測行列 $\mathbf{B}$ の各特異値 σ_k は、対応するモード係数成分が観測データに反映される大きさを表す. 特異値が小さい成分は、音場復元時にノイズの影響を受けやすいため、大きな特異値が高次まで保たれる計測系ほど、多くのモード係数を安定して推定できる.

4 数値実験

光路およびマイクロホンの配置による特異値分布の違いを確認するため、平行光またはファンビームに

よる単一方向の光学の観測に、最大 8 ch の直線マイクロホンアレイを追加した場合の正規化特異値を比較した. 周波数を $f = 10$ kHz、音速を $c = 343$ m/s とした. 光学系の幾何条件を図-1、図-2 に示す. 振動面上の直交系には、周方向次数 $0, \pm 1, \pm 2$ 、動径方向次数 $1, \dots, 4$ の計 $N = 20$ モードを用いた. センサ面を 80×20 点に離散化し、 $K = 1600$ 本の光路を設定した. マイクロホンは、8 ch アレイの一端から隣接するものを 1 ch ずつ追加し、 $M = 1, \dots, 8$ ch の各条件について計算した. また、式 (6) における係数 α は、行列の要素の絶対値のオーダーが揃うように設定した.

結果を図-3 に示す. 平行光とファンビームでは特異値の減少の仕方が異なり、光学系によってモード係数成分の観測されやすさが異なることが確認できる. マイクロホンの追加により、より高次の特異値まで大きな値が保たれた. 本条件では、特に平行光においてマイクロホンを追加したことによる特異値の変化が顕著であった. また、マイクロホンの追加による効果はアレイ配置にも依存した. 中心を通る x 方向アレイでは光学の観測のみとの差が小さかったが、アレイを $+y$ 方向に移動すると特異値の減少が緩やかになった. また、 y 方向および 45° 方向のアレイでは 45° 方向がわずかに緩やかな減少を示した.

5 むすび

本稿では、振動面上のモード係数から観測値への写像を構成し、SVD により空間サンプリング特性を評価した. 数値解析の結果、計測系ごとに特異値の減少傾向が異なり、マイクロホンアレイの併用によって小さな特異値を改善できることを確認した. 今後は、周波数ごとの特異値分布を解析する所存である.

参考文献

- [1] 矢田部浩平, 石川憲治, 谷川理佐子, 及川靖広, “光学的音響計測”, 信学会 *Fundam. Rev.*, **12**, 259–268 (2019).
- [2] 石川憲治, 矢田部浩平, 及川靖広, “光を用いた楽器近傍音場の計測,” 音響学会誌, **77**, 601–608 (2021).