

等価音源法を用いた音響拡散体による散乱音場の可視化

鬼澤 諒介[†] 松橋 遼[†] 津國 和泉[†] 池田 雄介[†]

[†]東京電機大

1 はじめに

音響散乱とは、音波が壁などの表面に衝突した際に、不規則な回折や反射が繰り返される現象である。部屋の壁面の材質や形状によって散乱の様子は異なり、複雑な音場の理解には可視化が有効な手段となる。音場の可視化には、境界要素法 [1, 2] など、散乱現象のシミュレーションが有効である。一方で、実際の散乱音場を理解するには、計測による可視化が重要であるが、多点の計測が必要となるため測定は容易ではない。

そこで、本研究では、等価音源法 [3] を用いて音場をモデル化することで、音響拡散体によって散乱した音場を少数の測定点から可視化する手法を提案する。シミュレーション実験によって音場の推定精度を評価し、その結果を示す。

2 提案手法

提案手法の概要図を図 1 に示す。音響拡散体を取り囲むようにマイクロホンを円形に配置し、スピーカから放射された音波に対する散乱音場を少数のマイクロホン信号から推定し、可視化する。

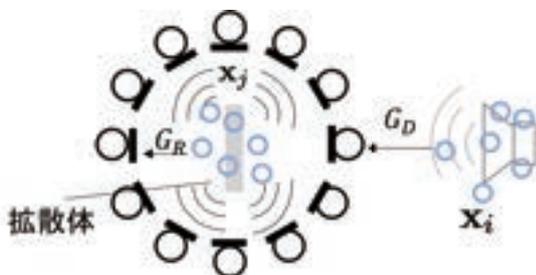


図 1: 提案手法の概要図

等価音源法に基づき、音場を等価音源の線形で表現する事を考える。特に、音場を直接音（入射音場）と散乱音場の 2 つに分けて考える。つまり、直接音はスピーカ周囲に配置された等価音源の伝達関数の線形和で表現し、拡散体周囲に配置された等価音源の伝達関数の線形和で散乱音場を表すことを考える。したがって、等価音源を用いることで、 \mathbf{x}'_l に位置する l 番目の

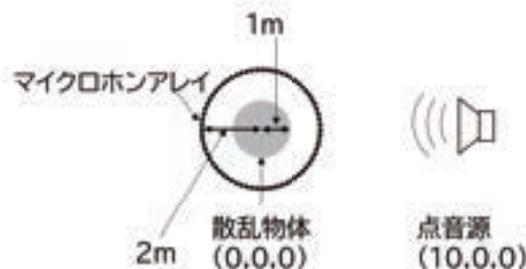


図 2: シミュレーション実験の配置

マイクロホン信号は

$$y(\mathbf{x}'_l) = \sum_{i=1}^I G_D(\mathbf{x}'_l, \mathbf{x}_i) w_{D,i} + \sum_{j=1}^J G_R(\mathbf{x}'_l, \mathbf{x}_j) w'_{R,j} \quad (1)$$

と表すことができる。ここで、 $G_D(\cdot)$ はスピーカ周囲の等価音源からの伝達関数、 $G_R(\cdot)$ は拡散体周囲の等価音源からの伝達関数、 w_D, w_R はそれぞれの重み係数である。また、 I, J は等価音源の数、 $\mathbf{x}_i, \mathbf{x}_j$ は i, j 番目の等価音源の位置を表し、 L はマイクロホン数を表す。

等価音源の伝達関数 G_D および G_R は、以下のように Green 関数を用いて解析的に求める。

$$G_{D,R}(\mathbf{x}'_l, \mathbf{x}_i) = \frac{1}{4\pi} \frac{e^{-ik|\mathbf{x}'_l - \mathbf{x}_i|}}{|\mathbf{x}'_l - \mathbf{x}_i|} \quad (2)$$

ここで、 k は波数、 \mathbf{x} はマイクロホン位置、 \mathbf{x}_s は等価音源の位置を示す。

式 (1) は L 本のマイクロホンで成立するため次のような行列で表せる。

$$\mathbf{y} = \mathbf{G}\mathbf{w} \quad (3)$$

ただし、

$$\begin{aligned} \mathbf{y} &= [y_1, y_2, \dots, y_{L-1}, y_L]^T, \\ \mathbf{G} &= [\mathbf{G}_D, \mathbf{G}_R], \\ \mathbf{G}_D &= \begin{bmatrix} G_D(\mathbf{x}'_1, \mathbf{x}_1) & \dots & G_D(\mathbf{x}'_1, \mathbf{x}_I) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ G_D(\mathbf{x}'_L, \mathbf{x}_1) & \dots & G_D(\mathbf{x}'_L, \mathbf{x}_I) \end{bmatrix}, \\ \mathbf{G}_R &= \begin{bmatrix} G_R(\mathbf{x}'_1, \mathbf{x}_1) & \dots & G_R(\mathbf{x}'_1, \mathbf{x}_J) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ G_R(\mathbf{x}'_L, \mathbf{x}_1) & \dots & G_R(\mathbf{x}'_L, \mathbf{x}_J) \end{bmatrix}, \\ \mathbf{w} &= [w_{D,1}, \dots, w_{D,I}, w_{R,1}, \dots, w_{R,J}]^T. \end{aligned}$$

等価音源数 I, J に対して、実在するスピーカおよび拡散体はそれぞれ単一であるため、少数の等価音源で

Visualization of scattering sound field by acoustic diffuser based on the equivalent source method

[†] Ryosuke Onizawa (19fi030@ms.dendai.ac.jp)

[†] Haruka Matsuhashi (21fmi18@ms.dendai.ac.jp)

[†] Izumi Tsunokuni(21udc02@ms.dendai.ac.jp)

[†] Yusuke Ikeda (yusuke.ikeda@mail.dendai.ac.jp)

Tokyo Denki University ([†])

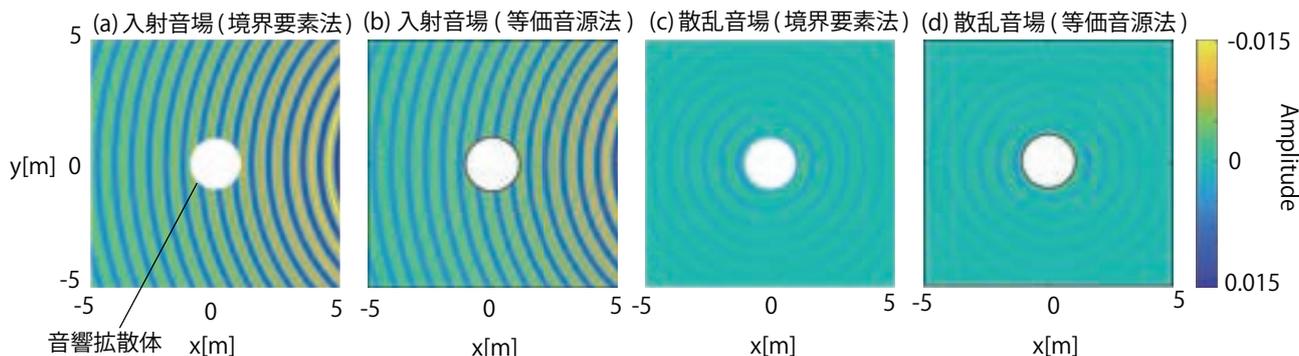


図 3: 境界要素法 (Ground Truth) と提案手法の音圧分布の比較

音場を表すことができると仮定し、等価音源の重みにスパース性を仮定する。したがって、等価音源の重み係数 \mathbf{w} は、以下の最適化問題で求まる。

$$\begin{aligned} & \underset{\mathbf{w}}{\text{minimize}} \quad \|\mathbf{w}\|_1 \\ & \text{subject to} \quad \|\mathbf{y} - \mathbf{G}\mathbf{w}\|_2 \leq \epsilon \end{aligned} \quad (4)$$

ここで、 $\|\cdot\|_1$ は ℓ_1 ノルム、 $\|\cdot\|_2$ は ℓ_2 ノルム、 ϵ は許容誤差を表す。

3 シミュレーション実験

3.1 実験条件

球形の音響拡散体を座標系中心に配置し、音波が入射した際の散乱音場を提案手法と境界要素法 (Ground Truth) で波面を比較する。シミュレーションの概要図を図 2 に、シミュレーション条件を表 1 に示す。

表 1: シミュレーション条件

| | |
|------------------|----------|
| 周波数 [Hz] | 500 |
| 散乱物体の中心 | (0,0,0) |
| 音源位置 | (10,0,0) |
| 等価音源数 [個] | 400×2 |
| 等価音源半径 (音源) [m] | 0.15 |
| 等価音源半径 (拡散体) [m] | 1.5 |
| マイクロホン数 [個] | 72 |
| マイクロホン半径 [m] | 2 |

また、本シミュレーションでのマイクロホン信号は境界要素法によって得られた音圧情報を使用する。等価音源の伝達関数の計算には SFSToolbox[4] を、境界要素法は bempp[5] を使用した。

3.2 実験結果

境界要素法と提案手法を用いて推定した入射音場の波面と散乱音場の波面の結果を図 3 に示す。

図 3(a)(c) が境界要素法で得られた波面 (Ground Truth)、(b)(d) が等価音源法によって音場をモデル化し推定された波面である。また、図 (a)(b) は入射音

場であり、図 (c)(d) は散乱音場 (反射音) の波面である。まず、入射音場に注目する。図 3(a)(b) から境界要素法と推定音場に大きな差異がないことが分かる。次に、散乱音場に注目する。推定した結果を境界要素法と比較すると、散乱全体の様子は類似しているが、細部に違いが生じていることが分かる。しかし、音場の可視化の観点からは十分な精度で推定可能であると考えられる。

4 おわりに

本研究では、等価音源法によって入射音場と散乱音場を同時にモデル化することで少数の測定点から散乱音場を可視化する手法を提案した。シミュレーション実験の結果、入射音場と散乱音場の両方で可視化に十分な再現精度が得られた。今後は、高周波数帯域での可視化や散乱物体のより複雑な形状の検討など、より高い再現精度で汎用性の高い散乱音場の可視化を目指す。

謝辞 本研究は JSPS 科研費 22K12099 の助成を受けたものです。

参考文献

- [1] Bonnet, M., "Boundary Integral Equations Methods in Solids and Fluids," xx, pp.391, Wiley, New York, 1999
- [2] Burton, A.J., Miller, G.F. "The application of integral equation methods to the numerical solution of some exterior boundary-value problems," Proc. R. Soc. London, Ser. A 323(1553) pp.201-210, 1971
- [3] Koopmann, G.H. *et al.*, "A method for computing acoustic fields based on the principle of wave superposition," J. Acoust. Soc. Am. 86, pp.2433-2438, 1989
- [4] H. Wierstorf, S. Spors - Sound Field Synthesis Toolbox. In the Proceedings of 132nd Convention of the Audio Engineering Society, 2012
- [5] Timo Betcke, *et al.*, - Bempp-cl: A fast Python based just-in-time compiling boundary element library. Journal of Open Source Software, 6(59), 2879., 2021