

相関行列のLU分解による音場再現領域推定法を用いた BoSC マイクロホンの評価*

☆梶田雄太郎, 三浦一希, 渡邊祐子, 伊勢史郎 (東京電機大)

1 はじめに

境界音場制御 (BoSC: Boundary Surface Control) の原理に基づけば, 原音場においてある領域を囲む境界面において音を取録し, 再生室内の音響特性を打ち消す逆システムを畳み込むことにより, 原音場の領域内の3D音場を再生室内に再現することが可能となる [1, 2]。これまで相関行列のLU分解を用いて音場再現領域を推定する手法を提案し, BoSC マイクロホンの小型化の検討における実験と数値計算の比較により, その妥当性を検証した [3]。本稿では, 同様の手法でさらに詳しいマイクロホンアレイの配置による再現性能の違いを比較する。

2 解析手法

2.1 音場再現領域推定法

アクティブ騒音制御 (ANC) の分野では拡散音場における相互相関関数を用いた Quiet Zone の推定式が提案されているが, Quiet Zone の推定式は音場再現領域の推定式として利用可能である [4, 5]。すなわち M 個のマイクロホンを点 $P_i (i=1, \dots, M)$ に配置し, 各マイクロホン位置は完全な制御が行われていると仮定した場合, さらに P_{M+1} に評価用マイクロホンを配置すると, 点 P_i と点 P_l の相関係数 $\rho_{i,j} (i, l=1, \dots, M+1)$ を用いた相互相関行列 $[C_{il}]$ は次のように表される。

$$[C_{il}] = \begin{pmatrix} 1 & \rho_{1,2} & \cdots & \rho_{1,M+1} \\ \rho_{2,1} & 1 & \cdots & \rho_{2,M+1} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \rho_{M+1,1} & \rho_{M+1,2} & \cdots & 1 \end{pmatrix} \quad (1)$$

このとき点 $[P_{M+1}]$ における再現精度誤差 E は次のようになる。

$$E = 2d_{M+1, M+1} \quad (2)$$

ただし, $d_{M+1, M+1}$ は $[C_{il}]$ をLDU分解したときに得られる対角行列 $[D_{il}]$ の $M+1, M+1$ 要素である。Quiet Zone における騒音抑圧量は音場再現における音場再現精度と読み替えることができるので, 音場再現精度 R は次のように表される。

$$R = -10 \log_{10} E(x_i) \quad (3)$$

ただし, x_i は評価用マイクロホンの位置である。

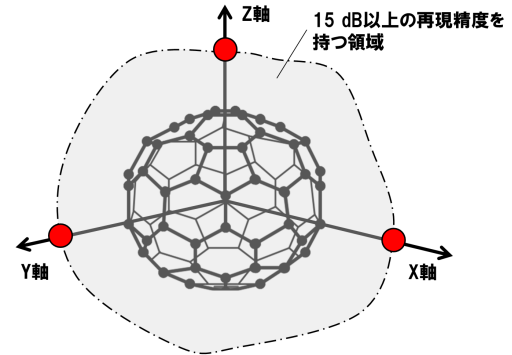


Fig. 1 音場再現領域

2.2 音場再現領域の定量化

Fig.1のようにマイクロホンアレイ周辺にできる音場再現領域の大きさを定量的に求める。ただし, 本検討では解析対象を受聴者頭部を覆うことが可能な球状配置のマイクロホンアレイとする。次の手順を周波数毎に実行し, 音場再現領域の大きさを推定する。

1. 式 (3) を用いて, 0.05m 間隔ごとに x 軸上の音場再現精度を推定する
2. 15 dB 以上の音場再現精度を有し, 中心から最も離れた位置の距離を求める
3. y, z 軸においても同様の計算をおこない, それぞれを2倍した平均値を音場再現領域の大きさとする

また, 3次元拡散音場を想定して相関係数 $\rho_{i,j}$ については式 (4) を用いる。

$$\rho_{i,l} = \text{sinc} \left(2\pi \frac{s_{i,l}}{\lambda} \right) \quad (4)$$

ただし, $s_{i,l}$ は点 P_i と点 P_l の距離である。

3 配置手法による音場再現領域の違い

3.1 解析条件

ここではマイクロホンアレイの配置と音場再現領域の関係について検討する。まずマイクロホンを配

* A Study of Relationship between Microphone-Positions and BoSC-System Reproduced-Area using Sound-Field Estimation-Method with LU Decomposition. by KAJITA, Yutarô, MIURA, Kazuki, WATANABE, Yûko, ISE, Shiro (Tokyo Denki University)

置する座標を決める手法として、球状の分子構造から求める手法と球表面を三角形により分割する手法について検討する [6]。それぞれの手法により、頂点数の異なる3種類のマイクロホン配置を Table.1 のように作成する。各配置においてマイク間隔を 4 cm にした場合のマイクロホンアレイの直径を採用することで、3次元の音空間情報が保存可能な上限周波数の値 F_{alias} を 4250Hz に統一する。

Table 1 マイクロホンアレイ配置

配置手法	名称	頂点数	直径
分子構造	(a) ドデカヘドラン	20 個	11cm
	(b)C60 フラーレン	60 個	20cm
	(c)C80 フラーレン	80 個	23cm
三角分割	(d) 正 20 面体	12 個	8cm
	(e)80 面体	42 個	15cm
	(f)180 面体	92 個	23cm
分子構造 + 各面に追加	(g)C80+42ch	122 個	27cm

3.2 結果

(c)C80 フラーレンと (f)180 面体における周波数毎 (500-5000 Hz , 100 Hz 間隔) の再現領域の大きさを Fig.2 に示す。2500 Hz 以下において、(f) の領域が 5 cm から 20 cm 程度広いことがわかる。それ以上の周波数では、再現領域が無くなる周波数があり、その値を音場再現が可能な上限周波数 F_{max} とすると、(c) と (f) では 1500 Hz の差がみられる。

配置手法と上限周波数 F_{max} の関係を調べるために、同様の解析を行った。Fig.3 は 6 種類のマイク配置における F_{max} である。三角形により分割する手法では 4000 Hz 程度まで再現が可能であるのに対して、分子構造から求める手法では 3000 Hz 程度であった。全ての配置で F_{alias} は 4250 Hz であるが、 F_{max} は手法によって差があることがわかった。これは分子構造から求める手法の面の位置においてマイクの密度が希薄であることが原因であると考えられる。そこで、(c) の 42 面の中心位置にマイクロホンを追加した配置 (g) を作成し、密度の違いによる検討を行った。(g) は密度を高めたマイクロホン配置の結果である。再現領域の大きさと F_{max} が向上し、再現領域が 4400 Hz まで生成できることがわかった。

4 おわりに

BoSC システムにおけるマイクロホンアレイの構造を決めるために球状の分子構造から求める手法と球表面を三角形により分割する手法を比較検討した結

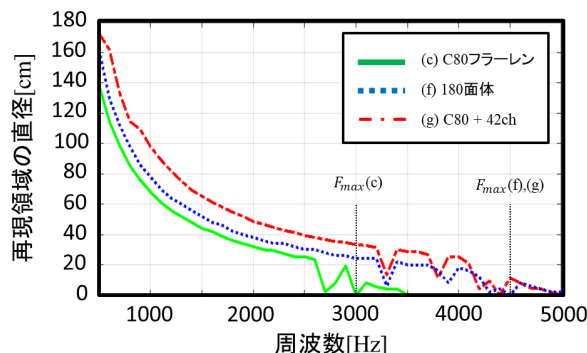


Fig. 2 再現領域の直径の比較

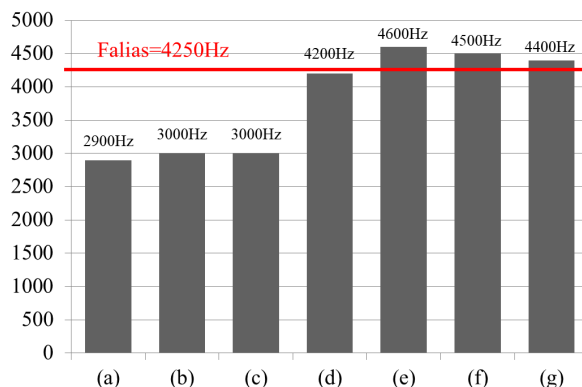


Fig. 3 各配置の上限周波数の比較

果、球表面を三角形により分割する手法の方が音場再現が可能な上限周波数が高いことがわかった。これはより均等なマイクロホン間隔でマイクロホンアレイを構成できるためと考えられる。

参考文献

- [1] 伊勢史郎, “キルヒホッフヘルムホルツ積分方程式と逆システム理論に基づく音場制御の原理”, 音響学会誌, 53(9), 706-713, 1997.
- [2] 伊勢史郎, 池田雄介 “複数の演奏空間をネットワーク接続する「音響樽」の実現”, 計測と制御, 51(12), 110-1115, 2012.
- [3] 梶田雄太郎, “境界音場制御の原理に基づく音場再現システムのための小型マイクロホンアレイの開発”, 信学技報, vol. 117, no. 255, 35-39, 2017.
- [4] 三好正人, 金田豊, “音場の逆フィルタ処理に基づく能動騒音制御”, 音講論, 46(1), 3-10, 1990.
- [5] 仲島崇博, “多点アクティブノイズコントロールにおける Quiet Zone の推定式の一般化”, 音講論, 763-764, 2000.
- [6] Robert Sadourny, “Integration of the non-divergent barotropic vorticity equation with an icosahedral-hexagonal grid for the sphere”, Monthly Weather Review, Volume 96 No. 6, 351-356, 1968