

# 高速多重極境界要素法に基づく室内音場の入射指向性解析

03200093 萩原 諒

## 1. はじめに

音の指向性は、建築音響や電気音響、さらに聴覚心理などの多くの分野で研究されており、その定量的な把握には必要がある。また定量化の手法は、音響インテンシティに基づいて1点におけるエネルギーの流れとする場合や、ある領域に対して全方向から入射する波面の分布により入射指向性として算出する場合などが挙げられる。前者の手法では、計測や予測によって容易にその値を把握できるが、後者のように方向毎の詳細な指向性は得られない。一方で後者の手法では、計測を行う場合に膨大な数のマイクが必要となってしまう。また予測に関しては波動音響数値解析で一般的に用いられる高速多重極境界要素法 (FMBEM) に基づく手法が基礎的な検討 [1,2] と有限平板への適用 [3] まで報告されているが、まだ実用化へは至っていない。

そこで本研究では初の試みとして、この入射指向性解析の適用対象を室内空間へと拡張することと、吸音面の偏在による指向性への影響や、鏡像法に基づく参照値との比較も同時に検討することを目的とする。

## 2. FMBEM に基づく入射指向性

3次元音場はヘルムホルツ方程式に従うため、境界要素法 (BEM) を用いることで離散化の対象を境界面に限定することができる。

しかし、BEM でも依然として境界要素間の寄与計算に多くの計算コストを要するため、図1に示すような高速多重極法 (FMM) を適用してさらに効率化を図った FMBEM が一般的に用いられる。この手法では以下の式により音場の基本解の寄与を計算する。

$$\frac{\exp(jkr_{pq})}{jkr_{pq}} = \frac{1}{4\pi} \oint E(\hat{\mathbf{k}}, \mathbf{r}_{pL}) s(\hat{\mathbf{k}}) d\hat{\mathbf{k}} \quad (1)$$

$$E(\hat{\mathbf{k}}, \mathbf{r}_{pL}) = \exp(j\mathbf{k} \cdot \mathbf{r}_{pL}) \quad (2)$$

$$s(\hat{\mathbf{k}}) = T(\hat{\mathbf{k}}, \mathbf{r}_{LM}) E(\hat{\mathbf{k}}, \mathbf{r}_{Mq}) \quad (3)$$

$$T(\hat{\mathbf{k}}, \mathbf{r}_{LM}) = \sum_{l=0}^{N_p-1} j^l (2l+1) h_l^{(1)}(kr_{LM}) P_l(\hat{\mathbf{k}} \cdot \hat{\mathbf{r}}_{LM}) \quad (4)$$

ここで、 $\mathbf{k}$  は波数ベクトル、 $\hat{\mathbf{k}} = \mathbf{k}/|\mathbf{k}|$  は三次元極座標の方向、 $p$  は受音点、 $q$  は音源点、 $L$  は局所展開点、 $M$  は多重極点、 $N_p$  は無限和の打ち切り次数を表し、 $h_l^{(1)}$  は第一種球ハンケル関数、 $P_l$  はルジャンドル多項式である。

ここで式(1)の過程に現れる  $s(\hat{\mathbf{k}})$  は音場再現領域内における各方向の平面波そのものであり、この値が入射指向性を表していると解釈される。この  $s(\hat{\mathbf{k}})$  を球面調和展開した際の高次成分を除いて再合成することで、音場再現領域の大きさを制限し [1]、その領域での指向性を得られる。ここで、再合成前の  $s(\hat{\mathbf{k}})$  と再合成後の  $\hat{s}(\hat{\mathbf{k}})$  を用いて式(1)によりそれぞれ音場を再現した際の相対誤差  $\varepsilon$  を求めることで、その分布により再合成後の音場再現領域の大きさを評価する。

## 3. 解析モデル

実用性などに鑑みて JIS A 1416 : 2000 のタイプ II 試験室に適合するモデル (図4) を用い、室中央に点音源を設置した。また室内の吸音条件を表1のように変化させ、各条件を図5の鏡像と対応させることで、境界要素

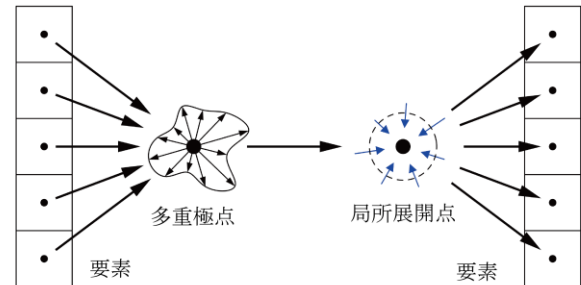


図1 FMBEMにおける要素間の寄与計算.

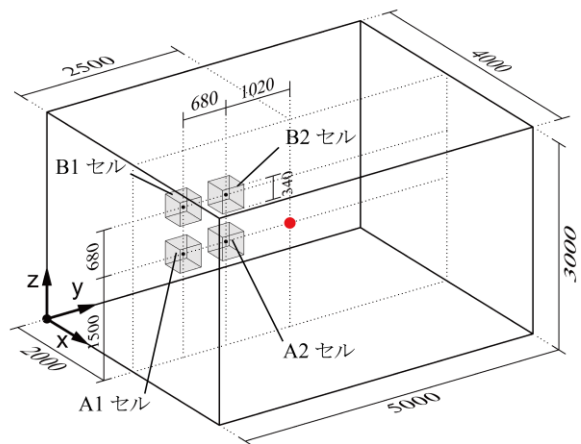


図2 解析モデルの俯瞰図.

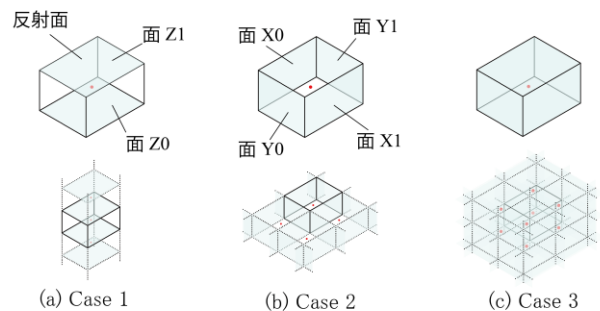


図3 解析条件毎に対応する鏡像の図.

の代わりに鏡像音源を実際に並べたモデルでも参照値として指向性を算出した。

## 4. 結果と考察

### 4.1 Case1 の結果

図4は、Case1.1のA1セルにおける周波数ごとの入射指向性を表している。高い周波数ほど音源の方向を示すような鋭い指向性が得られており、周波数が高いほど方向分解能も高くなっていることがわかる。また鏡像法に基づく参照値が解析結果と似ている様子も見られる。一方で1000Hzや2000Hzにおける結果で、左上と左下を向く指向性がFMBEMに基づく値に現れていることがわ

表1：それぞれの解析における吸音条件

条件	吸音率						実音源と鏡像の合計個数
	X0	X1	Y0	Y1	Z0	Z1	最大反射回数 20
Case 1.1	1	1	1	1	0	0	41
Case 1.2	1	1	1	1	0.1	0.1	
Case 1.3	1	1	1	1	0.5	0.5	
Case 2.1	0	0	0	0	1	1	841
Case 2.2	0.1	0.1	0.1	0.1	1	1	
Case 2.3	0.5	0.5	0.5	0.5	1	1	
Case 3.1	0	0	0	0	0	0	11521
Case 3.2	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	
Case 3.3	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	

かるが、この方向には鏡像が存在せず、鏡像法に基づく指向性にも見られない特徴である。このことから、反射だけでなく天井端部における回折のような影響も現れていると考えられる。なお、Case1.2とCase1.3では入射指向性に大きな変化が見られなかった。

#### 4.2 Case2の結果

図5は、Case2のB2セルにおける2000Hzでの指向性を表しており、四周壁の反射面に吸音率を与えていく際の変化が見られる。特に、完全反射面が存在するCase2.1では、鏡像法に基づく指向性とFMBEMに基づく値がやや異なっており、一方で反射面の吸音率が上がるCase2.2とCase2.3では値がより近くなっている。

#### 4.3 Case3の結果

図6は、Case3のA2セルにおける1000Hzでの指向性を表しており、反射面となる室内全面にCase2と同様の段階で吸音率を与えていく際の指向性を示している。完全反射面が存在するCase3.1では、FMBEMに基づく値において直接音による成分がほぼ打ち消されており、鏡像法に基づく結果とも一致しないため、遠方の鏡像による影響などが関係している可能性が考えられる。

#### 5. まとめ

室内における入射指向性として、幾何学的な考察とおよそ一致する値が得られ、さらに周波数や吸音面の偏在によるいくつかの特徴も得られた。その一方で、完全反射面が存在する場合にはあまり幾何学的な考察と一致せず、特にこれは鏡像法に基づく考察で考慮できない遠方の鏡像や回折現象による影響のためと考えられる。

#### 6. 参考文献

- [1] 榎本貴之, 井上尚久, 安田洋介, 佐久間哲哉. FMBEMに基づく入射指向性解析に関する基礎的検討. 日本音響学会秋季研究発表会講演論文集, pp. 473-474, 2020.
- [2] 安田洋介, 榎本貴之, 井上尚久, 佐久間哲哉. FMBEMに基づく入射指向性解析 その1-平面波展開に起因する誤差の検討-. 日本音響学会春季研究発表会講演論文集, pp. 549-552, 2021.
- [3] 榎本貴之, 安田洋介, 井上尚久, 佐久間哲哉. FMBEMに基づく入射指向性解析 その2-有限平板による散乱音場への適用-. 日本音響学会春季研究発表会講演論文集, pp. 553-554, 2021.

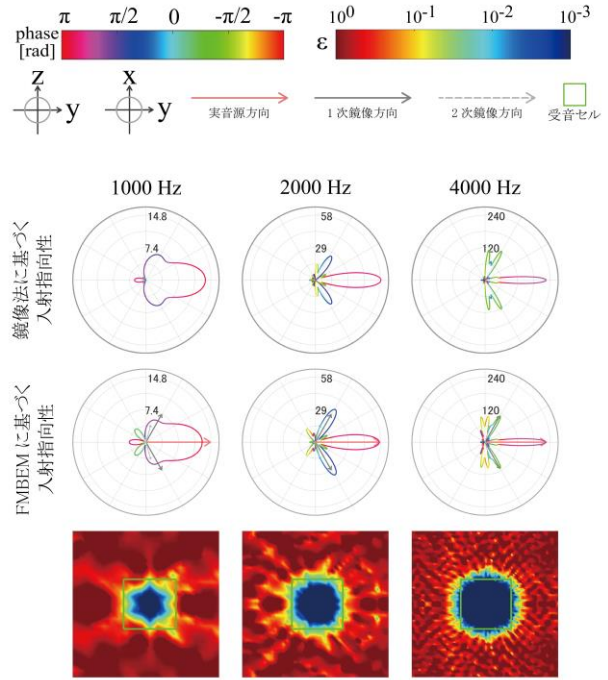


図4 Case 1.1 A1セルのyz平面における結果

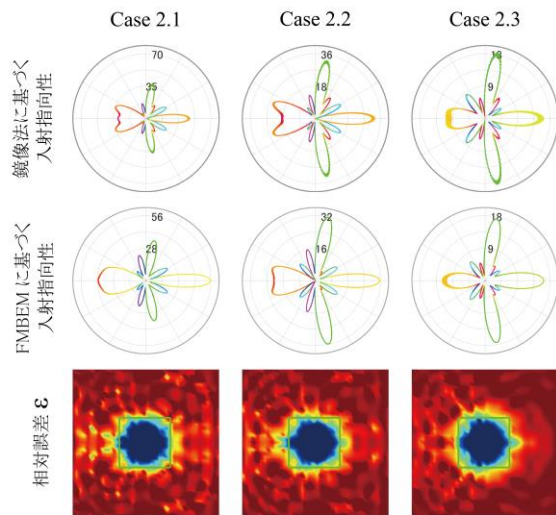


図5 Case 2 B2セルのxy平面における2000Hzの結果

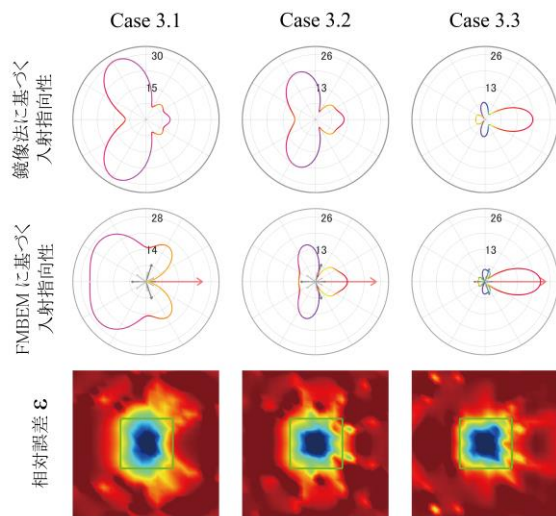


図6 Case 3 A2セルのyz平面における1000Hzの結果