

FMBEM 入射指向性解析に基づく室内音場の拡散性評価

37226119 萩原 諒

1. はじめに

建築音環境の予測や検討は、音楽ホールや公共空間などにおける様々な目的を達成するために重要であり、そのために Sabine が初めて構築した残響理論[1]の基礎となっている拡散音場の仮定というものも今日でも広く用いられている。ところが、この仮定は一般的な建築空間だけでなく実験室内においてもなお成立せず、空間ごとに音場の拡散性は異なる。そのため、拡散音場の仮定に基づいて測定される音響指標について実験室ごとに誤差が生じることが知られており[2,3]、音場の拡散状態が音響指標に影響を与えていることも報告されている[4]。また、この問題に対し、Meyer[5] や Nolan[6] などにより音場の拡散性を定量的に評価するための指標が提案されているものの、室内空間にそれらを適用した例が無いのが現状である。

一方で、音場の効率的な解析手法である高速多重極境界要素法 (FMBEM) の計算過程を用いることにより定常音場中の特定の領域に対する入射指向性を効率的に計算することができ、さらに入射指向性の解析結果を用いていくつかの拡散性指標を算出することが可能である。

そこで本研究では、まず基礎的な検討として単純な直方体室における FMBEM 入射指向性解析に基づいて音場の拡散性指標を算出し、解析条件と指標の振る舞いの対応を確認した上で、指標の傾向について考察を行う。さらに、直方体室との比較として不整形室でも同様の解析を行うことで、室形状による指標への影響も考察する。

2. FMBEM 入射指向性解析

2.1 単一周波数解析

FMBEM による定常音場解析は大まかに 2 つの手順からなり、まず主処理で領域の境界上における音圧値を算出し、次に後処理でそれらに基づいて領域内の音場を計算する。また、全体の手順を通して計算を効率的に行うため、図 1 のように階層セル構造を用いて領域を分割し、要素間の代わりにセル間で寄与を算出する。ここで、後処理での各セル領域内の寄与は次式のように平面波展開することができる。

$$p(\mathbf{r}_p) = \frac{1}{4\pi} \sum_{i=1}^{N_\theta} E(\hat{\mathbf{k}}_i, \mathbf{r}_{pL}) s(\hat{\mathbf{k}}_i) w_i \quad (1)$$

$$s(\hat{\mathbf{k}}_i) = \frac{jk}{4\pi} \zeta(\hat{\mathbf{k}}_i) \quad (2)$$

ただし、 \mathbf{r}_p は観測点 p の位置、 N_θ は方向分割数、 \mathbf{k} は波数ベクトル、 $k = |\mathbf{k}|$ 、 $\hat{\mathbf{k}} = \mathbf{k}/k$ 、 \mathbf{r}_{pL} は局所展開点 L から点 p へのベクトル、 w_i は単位球面積分の重み係数、 ζ はセルにおける内向係数であり、 $E(\hat{\mathbf{k}}_i, \mathbf{r}_{pL})$ は平面波を表す。ここで、特定のセルを受音セルとすると、受音セル内の音場は図 2 のように各方向からの平面波の重ね合わせで表されることから、その係数である $s(\hat{\mathbf{k}}_i)$ を受音セルとその周辺に対する入射指向性としてみなすことができる[7]。

また、局所展開係数 L_{nm} と入射指向性 $s(\hat{\mathbf{k}}_i)$ は次式により互いに変換可能である。

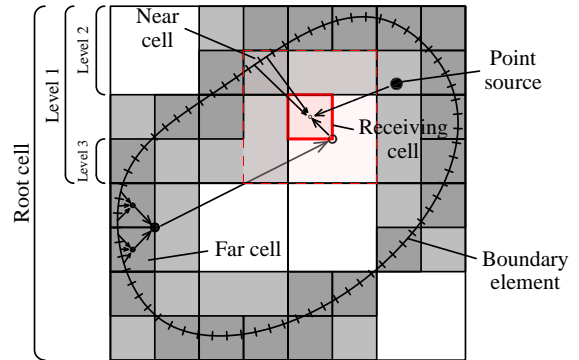


Figure 1 階層セル構造による領域の分割

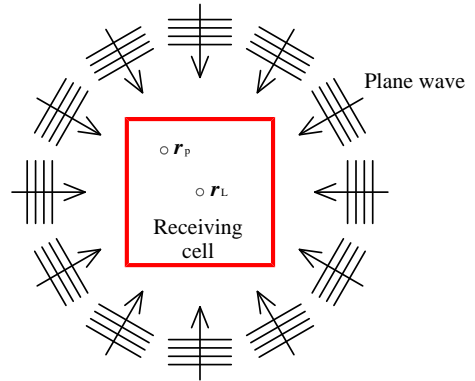


Figure 2 セルに入射する平面波の重ね合わせ

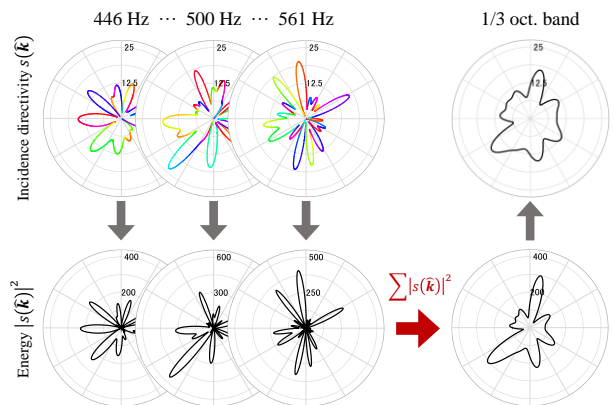


Figure 3 入射指向性のオクターブバンド解析の手順

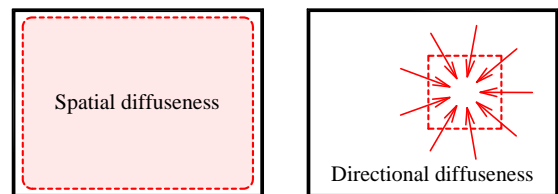


Figure 4 2 種類の拡散性の概略図

$$s(\hat{\mathbf{k}}_i) = \sum_{n=0}^{\infty} \sum_{m=-n}^n j^{-n} L_{nm} Y_{nm}(\hat{\mathbf{k}}_i) \quad (3)$$

$$L_{nm} = j^n \sum_{i=1}^{N_{\theta}} s(\hat{\mathbf{k}}_i) Y_{nm}^*(\hat{\mathbf{k}}_i) w_i \quad (4)$$

式 (3) の次数 n を有限の次数 N_L で打ち切ることによって平面波展開による音場の再現領域を受音セルの大きさに限定することができ[8], これにより再構築された $s(\hat{\mathbf{k}}_i)$ を受音セルに対する入射指向性とする。

さらに, 受音セルの近傍の要素と音源からのそれぞれによる寄与を入射指向性に含めるためには別途計算する必要があり, その際にそれぞれの寄与は局所展開係数 L_{nm} として算出される[9]。

2.2 オクターブバンド分析

複数の周波数についての入射指向性を図3のように全方向においてエネルギーとして加算することによりオクターブバンドにおける入射指向性 $|s_{\text{oct}}(\hat{\mathbf{k}})|$ が得られ, 次式によって表される。

$$|s_{\text{oct}}(\hat{\mathbf{k}})| = \sqrt{\frac{1}{N_f} \sum_{i=1}^{N_f} |s_{f_i}(\hat{\mathbf{k}})|^2} \quad (5)$$

ただし, N_f は対象のオクターブバンドにおいて計算に用いる周波数の個数, $s_{f_i}(\hat{\mathbf{k}})$ は周波数 f_i での入射指向性である。

3. 入射指向性に基づく拡散性指標

図4に示すように拡散音場の仮定は大きく2種類の仮定からなり, 音響エネルギーが室内で均一に分布しているとする空間的な拡散性と, 室内のあらゆる点で音響エネルギーの伝搬方向が全方向に等確率であるとする方向的な拡散性の両方を満たすものとされる。特に後者の方向的な拡散性に関しては, 入射指向性の方向的な均一さを数値的に評価することで指標化することが可能であり, 本論文では以下の2種類の指標を導入する。

3.1 指向拡散度 d_{θ}

Meyerにより提案された指向拡散度は, ある領域に到来する各方向の音響インテンシティ $I(\hat{\mathbf{k}}_i)$ を用いて次式により定義される[5]。

$$d_{\theta} = 1 - \frac{\mu}{\mu_0} \quad (6)$$

$$\mu = \frac{1}{4\pi\bar{I}} \sum_{i=1}^{N_{\theta}} |I(\hat{\mathbf{k}}_i) - \bar{I}| w_i \quad (7)$$

ただし, \bar{I} は音響インテンシティの方向平均, μ_0 は単一平面波のみが存在する音場における μ の値であり, μ_0 の値は入射指向性の打ち切り次数 N_L に応じて図5のように推移する。ここで, 式(7)は各方向の音響インテンシティについて偏差の平均を用いているため, 音響インテンシティが方向ごとに均一であるほど μ は0に近づき, d_{θ} は1に近い値となる。さらに, 基準値の μ_0 と対応する入射指向性の打ち切り次数 N_L は, 入射指向性の方向的な分解能を決定する値でもあることから, 式(6)の基準化は観測系の方向的な分解能を考慮したものであると言える。

3.2 等方性指標 d_l

Nolanにより提案された等方性指標[6]は, 田中らにより改善が行われており[10], 次式により定義される。

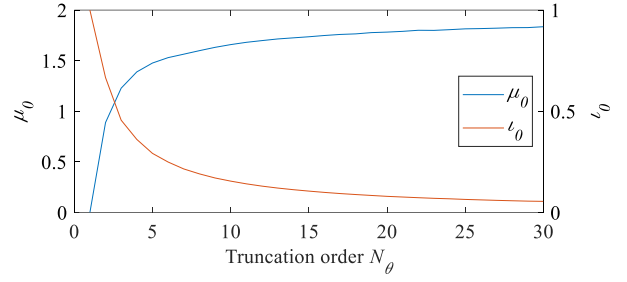


Figure 5 打ち切り次数と μ_0 , l_0 の関係

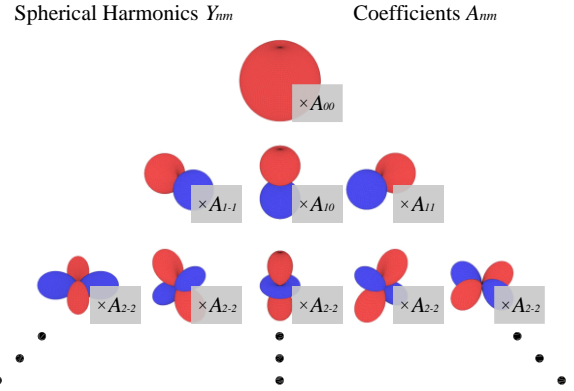


Figure 6 球面調和関数 Y_{nm} と展開係数 A_{nm}

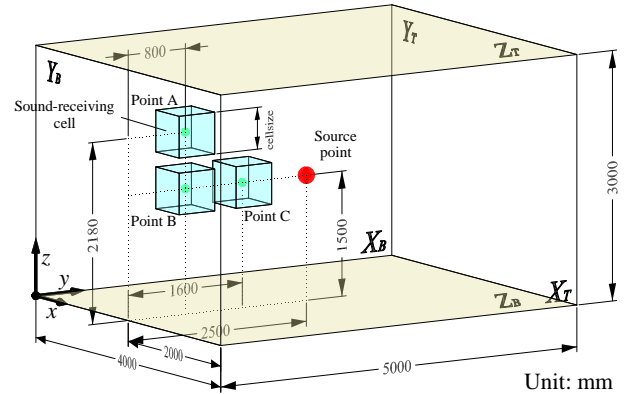


Figure 7 直方体室の解析モデル

Table 1 直方体室の吸音条件

	X _B	X _T	Y _B	Y _T	Z _B	Z _T
Case 1	0	0	0	0	0	0
Case 2	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
Case 3	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
Case 4	1	1	1	1	0	0
Case 5	0	0	0	0	1	1

$$d_l = \frac{l - l_0}{1 - l_0} \quad (8)$$

$$l = \frac{|A_0|}{\sum_{n=0}^{N_L-1} |A_n|} \quad (9)$$

$$|A_n| = \sqrt{\sum_{m=-n}^n |A_{nm}|^2} \quad (10)$$

ただし、 A_{nm} は図 6 に示すように到来する平面波の振幅の球面調和展開係数、 l_0 は単一平面波のみが存在する音場における l の値であり、 l_0 の値も入射指向性の打ち切り次数 N_L に応じて図 5 のように推移するため、式 (8) の基準化も式 (6) と同様に観測系の方向的な分解能を考慮したものとなる。ここで、到来する平面波の振幅が方向ごとに均一であるほど、展開係数の中で無指向成分に相当する A_{00} の占める割合が大きくなり、 l が 1 へと近づくことで d_l も 1 に近い値となる。

4. 直方体室における拡散性評価

室内音場における拡散性指標の振る舞いを明らかにするため、基礎的な検討として直方体室における数値解析を行い、上記の 2 種類の拡散性指標について検討する。

4.1 解析条件

解析モデルと音源・受音セルは図 7 のように設定し、解析周波数は 235 から 2030 Hz とし、室内 6 面の吸音率は表 1 のように 5 条件を与える。なお、室形状は JISA 1416:2000 [11] の Type II 試験室に適合するものとしている。また、入射指向性の算出の際には吸音条件の他に、受音セルの位置・大きさ、直接音の有無、周波数分析手法を変更し、それぞれにおいて計算される拡散性指標の比較を行う。

4.2 解析結果と分析

ここでは、全て直接音を含めた結果について示す。

受音セルの位置を A、大きさを 800 mm とした場合の各吸音条件における結果を図 8 に示す。全体の傾向として、周波数の上昇とともに d_θ は一定で推移するのに対し、 d_l は減少する。また、吸音率が室内全面で均一となっている Case 1 から Case 3 では、吸音率が上がるにつれて両指標が小さくなり、周波数に伴う変動も抑制されている。この傾向は、一般に吸音性の音場ほど拡散性が低くなることに対応すると考えられる。一方、吸音面の偏在により特定方向の音場が卓越する Case 4 と 5 では、両指標の固有周波数付近にディップが生じ、全体的な値としても Case 1 から Case 3 と比べて低くなっている。さらに、単一周波数とオクターブバンドの指標を比較すると、Case 1 と 2 においてはオクターブバンドの方が両指標で大きな値となっているのに対し、Case 3 から Case 5 では単一周波数とオクターブバンドの両指標が全て近い値で推移している。このことから、吸音率が比較的小さく、室内に生じるモードの方向の偏りが小さいほど、オクターブバンドの指標は大きくなると言える。

次に、受音セルの位置は A、大きさを 400 mm に縮小し、Case 2 において算出された指標を図 9 に示す。セルの大きさが 800 mm の図 8 (b) と比較すると、 d_l の方が単一周波数とオクターブバンドの両方の指標において d_θ よりも大きくなっている。これは、入射指向性の打ち切り次数が全周波数においてセルの縮小と共に小さくなることで、図 8 における低周波数側の傾向が図 9 の全体に現れているためと考えられる。

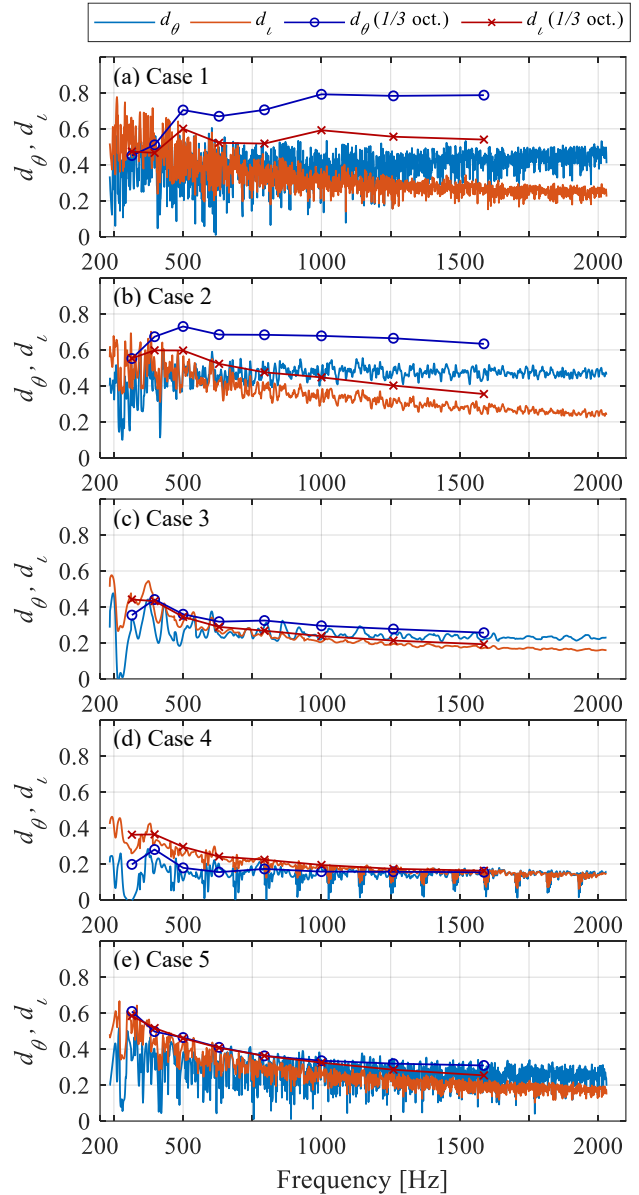


Figure 8 各吸音条件におけるセル A (800 mm) での指標

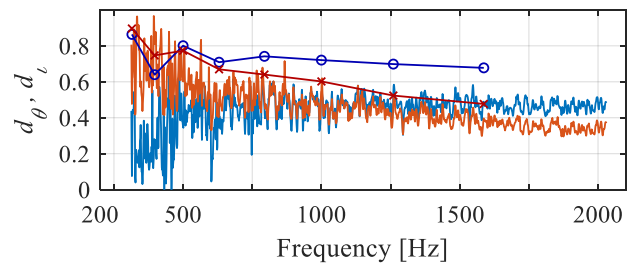


Figure 9 Case 2 におけるセル A (400 mm) での指標

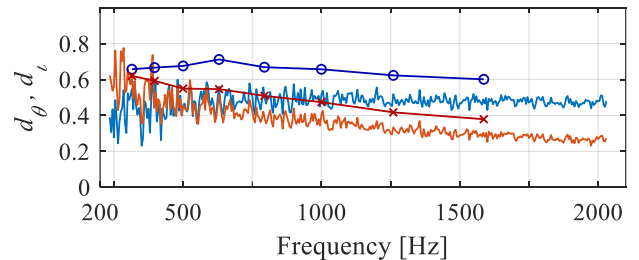


Figure 10 Case 2 におけるセル C (800 mm) での指標

また、受音セルの位置をC、大きさを800 mmとしてCase 2において算出された指標を図10に示す。セルの位置がAの図8(b)と比較すると全体的にわずかに大きな値となっており、これはCの位置がAよりも音源点に近く、音源からの直接音が球面波として指標に影響を与えているためと考えられる。

5. 不整形室における拡散性評価

直方体室における基礎的な検討を踏まえ、発展的な検討として不整形室における数値解析を行い、室形状が拡散性指標に与える影響について検討する。

5.1 解析条件

図11のように不整形室のモデルは約240 m³の形状とし、比較用に同程度の室容積の直方体室も設け、受音セルと音源位置の相対位置については同一となるように設定する。解析周波数は118から1015 Hzとし、4節と同様の項目について検討を行う。

5.2 解析結果と分析

ここでは、不整形室と直方体室の1600 mm四方の受音セルにおける直接音を含めた結果を図12に示す。吸音率が0の反射性の音場では全体的に不整形室の方が指標が大きく、特にオクターブバンドの指標で両室の差が顕著に現れている。このことから、不整形室における単一周波数の入射指向性には直方体室と程度の近い偏りがあるものの、周波数が増加するにつれてその形状の変化が直方体室よりも大きく、結果的にオクターブバンドでは直方体室よりも方向的に均されると考えられる。また、周波数の増加に伴う単一周波数の指標の変動についても不整形室の方が小さく、これは不整形室において生じるモードの方向の偏りが直方体室に比べて少ないために拡散性が安定した値となっているものと考えられる。

6. まとめ

本論文ではFMBEM入射指向性解析に基づいて室内音場における拡散性指標を計算し、その振る舞いについての基礎的な検討を通じて傾向を明らかにした。今後の展望としてはこれらの指標値の実用化に向けてさらに指標同士の詳細な比較などを行う必要があり、特に両指標の定義由来する指標値への影響について理論的に考察することで、それぞれの指標の詳細な違いや、各指標と拡散性との対応を明らかにする必要がある。

参考文献

1. W. C. Sabine. *Harvard University Press*, 1922.
2. M. Vercammen. *ISRA*, 2010.
3. 牧田他, 音響学会誌, 24, 381-392, 1968.
4. M. Nolan, et al. *EuroNoise*, 2015.
5. E. Meyer and R. Thiele. *Acustica*, 6: 425-444, 1956.
6. M. Nolan, et al. *JASA*, 143: 2514-2526, 2018.
7. 梶本他, 音講論 (秋), 473-474, 2020.
8. 安田他, 音講論 (春), 549-552, 2021.
9. 萩原他, 音講論 (秋), 741-742, 2022.
10. T. Tanaka and M. Otani. *Acoust.Sci.&Tech.* 44, 4, 2023
11. JIS A 1416:2000, 実験室における建築部材の空気音遮断性能の測定方法.

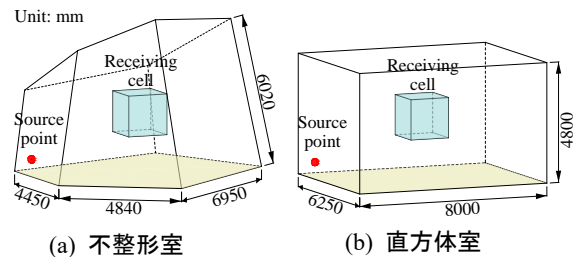


Figure 11 不整形室と比較用の直方体室の解析モデル

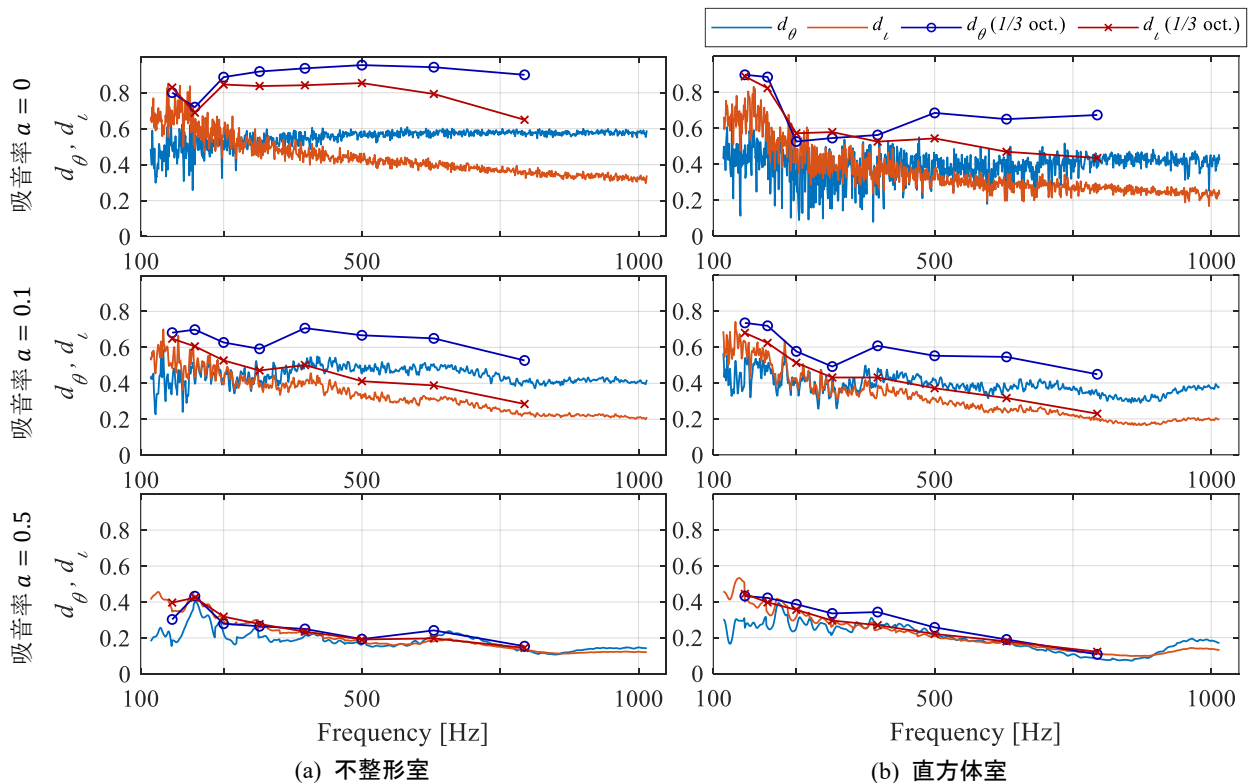


Figure 12 各吸音条件における1600 mm四方のセルでの指標