

# 拡散係数を導入した幾何音響シミュレーションに関する検討 非拡散音場の残響時間の予測

40085 太刀岡勇気

## 1. はじめに

音場の解析手法には、波動方程式を数値的に解く「波動音響解析」と、幾何光学的手法による「幾何音響解析(以下GA)」がある。しかしながら音波は光と比べて波長が長く波動性が無視できないので、GAで常に正しい予測結果を得るのは難しい。そのため学問的研究には主として波動音響解析が用いられるが、計算コストが大きい上に、問題の設定が難しく、実務上非常に重要なエコー経路の発見が困難なため、実務ではGAを用いた解析がほとんどである。そこで本研究ではGAでは予測が困難な問題の中から非拡散音場を取り上げ、適切な予測手法と妥当性を検討する。

## 2. 研究の対象と目的

非拡散音場とは、拡散音場の仮定を満たさないものすべてなので、その種類は膨大にある。今回その中から吸音面が偏在した室を取り上げる。このような室では中・高周波数域の残響時間(以下RT)が、低周波数域のそれに比べ長くなる傾向が観測されており、波動音響解析の一種である時間領域差分法(以下FDTD)により解析を行った既往研究があるため、妥当性の検討が可能だからである。このような音場が解ければ、上部が開放された中庭空間や長い廊下の残響時間などをGAで検討でき、有意義である。

このような音場で予測が困難なのは、通常のGAが鏡面反射のみを仮定しているため、反射面間のフラッターエコーを過大に見積もってしまい、RTが実際よりも長く予測されてしまうからである。そこで近年鏡面反射以外の拡散反射を導入するためのパラメーターとして

$$\text{拡散係数} := \frac{1 - \text{鏡面反射成分のエネルギー}}{\text{全反射エネルギー}} \quad (1)$$

を吸音率とともに導入した幾何音響手法が目ざされている。拡散係数 scattering coefficient(以下sc)を適切に与え、鏡面反射に加えて拡散反射を起こさせれば、このような音場でも残響時間の予測が可能であろう。そしてその適切な与え方を検討することが本研究の目的である。

## 3. 検討の条件

- 解析モデルは  $d=24, w=12, h=\{3, 6, 12\}$ (m)の直方体室
- 幾何音響シミュレーションソフト CATT を用いる

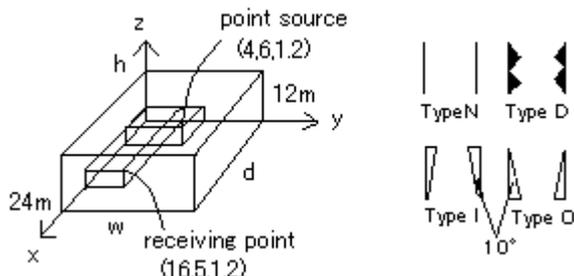


Fig.1 An analyzed model Fig.2 Types of the walls

- 吸音率 = 吸音面 50%、その他の面は剛として 5%(いずれも周波数によらない)
- 音源は無指向性の点音源を使用し、受音点を図の通り設置
- 空気吸収は無視
- RTは1/3 octave band 毎に算出 ( $100\text{Hz} \leq f \leq 1\text{kHz}$ )

- 吸音面の sc は RT にほとんど影響を与えない(\*)  
(例:  $h=6\text{m}$  で、全面の sc を 10% ずつ変化させた場合と、天井・床面(吸音面)を 0% に固定し、壁面(反射面)を 10% ずつ変化の場合の RT を示す。これらと比べると反射面の sc が RT の支配因子であることが分かる)

Table1 An example of a small influence of the absorbent surfaces' sc on RT (second)

conditions \ sc %	10	20	30	40	50	60
all surfaces	2.39	1.65	1.28	1.1	0.99	0.92
walls only	2.57	1.82	1.38	1.2	1.11	1.02
÷ %	7.5	10	7.8	9.1	12	11

## 4. 適切な予測手法の検討

### 4-1 scの与え方

上で見たように反射面の sc が支配的だから、吸音面の sc を 30% に固定し(任意の値でよい)、反射面の sc を動かす。sc は以下の仮定から導かれる sc を壁面に一様に与えることにする。本来反射面が十分剛ならば、 $sc=0$ (鏡面反射)のはずだが、実際はエッジで生じる回折波の影響で sc は 0 にはならない。ここでは問題を単純化し、図のように面の中心部を  $sc=0$ (白地の部分)とし、面のペリメーターゾーン(幅  $x(0 < x \leq \min(h, w)/2)$ )の sc(黒地の部分)を未知として  $scp(0 < scp \leq 100)$  とおく。そして、面積加重平均を面の「等価  $sc$ 」= $sceq$  として代入する。すなわち

$$sceq = \frac{(0 \times S_1 + scp \times S_2)}{S_1 + S_2} \quad (0 < sceq \leq scp) \quad (2)$$

とする。S1:中心部の面積、S2:ペリメーターゾーンの面積  
この場合  $sceq = 2scp \times \{(w+h)x - 2x^2\} / wh$  (3)  
である。...**仮定1**

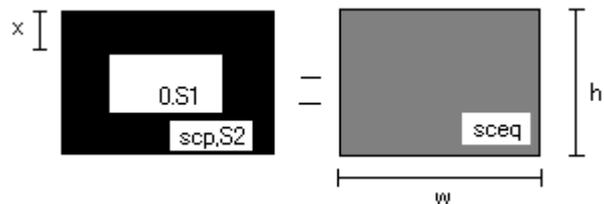


Fig.3 The way of giving sc to the surfaces

### 4-2 xの与え方

前節で導入したペリメーターゾーンの幅 x は、物理的意味を考えると、波長が長くなれば鏡面反射成分が減少し、波長が短くなれば鏡面反射成分が増えることから、x は波長の関数  $x=g(\lambda)$  である。すなわち式(1)より、(i) 0 のとき  $x=0$ 、(ii) のとき  $x=h/2$ (今回は、 $h \leq w$ ) と推測される。線形近似を考え、

$$x = n\lambda \quad (0 < x \leq h/2) \quad (4)$$

とおく。...**仮定2**

### 4-3 nの与え方

つぎに傾き  $n(n>0)$  を与えなければならない。原点を通ることは分かっているが、もう一点必要である。理論的に解くことは難しいので、

$$\lambda \geq \lambda_{cr} = \min(w, d, h) / 2 \quad (f_{cr} = c / \lambda_{cr} \text{ とおく}) \quad (5)$$

ではRTはSabineの式に従うものとする。...**仮定3** (これは仮定1, 2の補助的な仮定であり必然的でない)

## 5. 結果と考察

### 5-1 室高さの影響(Type N, 床・天井=吸音、壁=反射)

このモデルで考えているパラメータはscpとnの二つあるが、**仮定3**によりそれらは独立ではない。scp={60,80,100}に固定しnを求めると、以下ようになる。(参考までにfcrとSabineの式によるRTも示す。)

Table 2 The relations between scp and n

h \ scp%	100	80	60	fcr(Hz)	Sabine(s)
3m	0.8	1	1.4	226	0.47
6m	0.55	0.7	1	113	0.91
12m	0.25	0.3	0.45	57	1.7

すると以下のようにFDTD結果と割によく一致した。(相関係数は平均して0.97程度(最低でも0.93)である。)ここからscpによる変化は小さく、ある程度大きな数値であれば、どのように代入してもかまわない(nの値が変わるだけ)といえる。(ペリメーターゾーンの四隅の面積 $4x^2 = 4(n\lambda)^2$ が、全体の面積 $w \times h$ に比べて十分小さければ $s_{eq} \approx n \times scp$ であることが数学的にいえる)

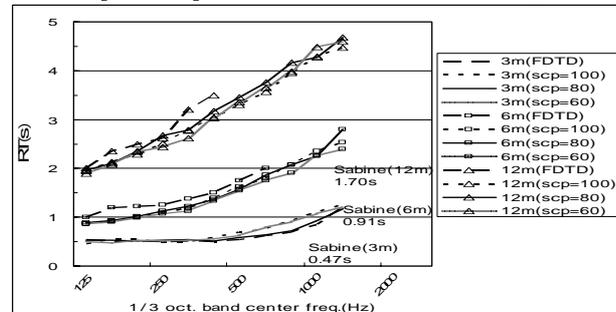


Fig.4 The comparisons of FDTD and the proposed method on the RT predictions in the case of different room heights

### 5-2 壁面タイプの影響(h=6m、床面のみ吸音)

次に壁面タイプによる影響を考える。壁面タイプはFig.2に示したように4種類ある。

**Type N** Sabine=1.57秒(fcr=113Hz)であるが、これを直接入れても合わない。しかしながら鏡像の原理により「床のみ吸音の場合」は、「2倍の高さで床・天井吸音とした場合」と相似であることが分かっているので、12mで床・天井吸音のケースとして解けばよい。つまりの12m(sc=100%)のときの検討結果と同じとする。

**Type O** ロングバスエコーが形成され、RTがSabineの予測式とかけ離れたものになり、**仮定3**を満たさないため提案手法がそのまま使えない。そこでひとまず反射面のscを10%ずつ動かしてみることにしよう。Fig.6を見ればわかるようにsc=0が一番よく合い、scを大きくすると値が乖離することが分かる。しかしながら先にも述べた通り**仮定3**はnを求めるための補助的なものだから、別の形でfcrの残響時間が求められれば、そのときすでにsc=0であることが分かり、仮定1, 2よりそれ以上の周波数ではsc=0であることがいえる。よって**仮定3**を改善すれば、このような音場も解析できるだろう。

**Type I** Type Oと同様**仮定3**を満たさない。同じように解析してみると、scはRTによりほとんど変化せず $RT(sc=0\%) = RT(sc=50\%)$ である。(壁の傾きが $5^\circ$ でも $RT(sc=0\%) \div RT(sc=50\%) = 114\%$ ほどであった。)

**Type D** 実際に拡散体をモデリングしたものは、scによ

りほとんど変化せず、300Hz以上のRTにしか一致しなかった。これは拡散現象が音波の波動性によるもので、垂直入射条件のときに $f_{min} = c/L$  (L: 周期)(この場合 $f_{min} = 340/1.5 = 229\text{Hz}$ )で表される最低周波数以上でしか拡散体は効いてこないためである。GAでは拡散体をモデリングした時点で拡散が起こってしまうため、本手法に基づいてscを変化させてもその変化は微小でありRTが変化しないため、周波数特性を考慮することはできない。

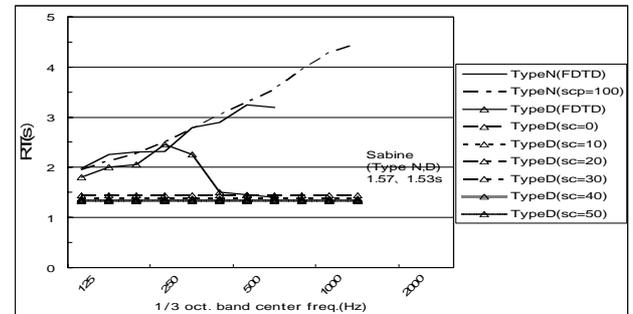


Fig.5 The comparisons of FDTD and the proposed method on the RT predictions in the case of different wall types

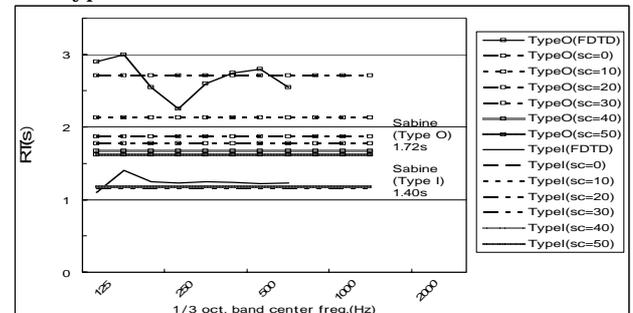


Fig.6 The comparisons of them in the case of different wall types

**拡散体の効果** ここでType N,DのFDTD結果からscを逆算する。(すなわちType O,Iと同じように、Type Nの場合に反射面のscを10%ずつ動かしてGAでRTを求め、scとRTの対応から $RT = h(sc) \approx 4.5(sc)^{-0.25}$ と近似し、逆関数 $sc = h^{-1}(RT)$ を求め、この逆関数にType N,DのFDTD結果を代入しscを求める。)するとこのscの差が拡散体のscであると考えられる。これがFig.7で、実際低音域でscが小さく、>dから立ち上がり、高音域で100に近づくという拡散体のscの特徴によくあっている。

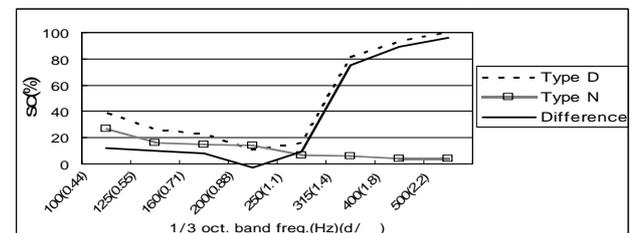


Fig.7 sc of the diffusers

## 6. まとめ

吸音材が偏在していても、平行壁面の高さによる残響時間の変化は提案手法のようにscを設定すればGAでも予測可能である。しかし、Type OやType I, Type Dの場合は**仮定3**を満たさないためそのまま本手法は適用できない。Type O,Iはsc=0とすればよい。Type Dの場合には拡散体をモデリングするのではなく、Type Nのscに拡散体のscを付加することで予測することができる。