

2005 年度東京大学工学部建築学科卒業論文

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

目次

第1章	はじめに	
第1節	音場解析手法の実際	2
第2節	拡散係数	2
第3節	幾何音響シミュレーションソフト CATT の概要	4
第2章	実際の問題への適用	
第1節	非拡散音場とは	6
第2節	検討の条件	6
第3章	新手法の提案	
第1節	sc の与え方	8
第2節	x の与え方	8
第3節	n の与え方	9
第4章	結果と考察	
第1節	室形状の影響(Type N、床・天井 = 吸音、壁 = 反射)	10
	h=3m	11
	h=6m	13
	h=12m	15
第2節	壁面タイプの影響(床面のみ吸音)	17
	Type N	17
	Type O	19
	Type I	21
	Type D	23
	拡散体の効果	25
第5章	まとめ	27

第1章 はじめに

第1節 音場解析手法の実際

音場の解析手法は、波動方程式 $c^2 \nabla^2 \phi = \frac{\partial^2}{\partial t^2} \phi$ を数値的に解く「波動音響 Wave Acoustics」と、幾何光学の成果である ray tracing の手法を発展させた「幾何音響 Geometrical Acoustics」に大きく分けられる。どちらも物理モデルによる現象の近似であることに変わりはないが、波動音響では比較的現実の現象に近いことをシミュレートしているのに対し、幾何音響は波特有の現象（回折、干渉など）を全く考慮していないので現実と乖離してしまうことがある。光波の場合には波長がとても短いので、あまり回折や干渉などはおこらない。このため ray tracing による解析結果は妥当性をもつと考えられる。しかし音波は、光波と比べるとはるかに波長が長いので、波動性の影響が無視できないほど大きく、幾何音響で常に正しい予測結果を得ることは困難である。

このように幾何音響には欠点も多い。そのため学問的な研究ではもっぱら波動音響による結果が用いられる。ところが波動音響にも重大な欠点がある。それは非常に計算時間がかかるということである。また問題の設定が容易ではなく、実務上非常に重要なエコー経路の発見が難しい。このため修正点をすぐにシミュレーションに反映させる必要のある実務の現場では、幾何音響を用いた解析がほとんどである。よって幾何音響でより正確な結果を導き出すための研究がなされなければならないが、それは従来不十分であった。しかしながらその実務上の重要性から近年研究がすすめられつつあり、その成果がソフトウェア開発にも取り入れられつつある。その中のひとつが今回話題にする拡散係数 scattering coefficient (以下 sc)である。次節で、なぜこのようなパラメーターが導入されることになったのか、それによって幾何音響はどのように変わったのかということをもとめておこう。

Table1 幾何音響と波動音響の比較

	幾何音響	波動音響
計算時間	短い	非常に長い
正確さ	劣る	良い
モデルの設定	やさしい	難しい
予備知識	あまり必要ない	必要
エコー経路の発見	やさしい	難しい
ソフトウェア	豊富	あまりない

第2節 拡散係数

従来の幾何音響の最も大きな欠点は、反射の際に鏡面反射のみを仮定していたところであった。確かに音波は反射面が十分に剛であれば鏡面反射するが、柔らかい面では鏡面反射成分以外の拡散反射成分を持つことが知られている。また拡散体に当たれば当然拡散反射することになる。従来の幾何音響シミュレーションソフトウェアではこのような現象は考えず、すべて鏡面反射するものと扱ってきた。それでもコンサートホールのように、吸音率の低い材料が多く使われ、フラッターエコーなどの音響障害が起らないように設計された対象に用いる分には問題となることは少ない。

ところが音響的に特段の配慮がなされていない一般の空間においては、このことが大きなネックとなって正しい予測値を導き出せないことがある。例えば反射面が平行だとその間でフラッターエコーが起きるが、鏡面反射のみを仮定するとそれが実際よりも多く想定されることになってしまって、長い間減衰しないため、実際よりも残響時間 Reverberation Time(RT)が長く予測されてしまうからである。こういった問題を解決する有力な手段と期待されているのが sc である。定義は以下のようなものである。

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

すなわち sc とは全反射エネルギーのうちの鏡面反射成分のエネルギーとそれ以外の成分との比率を表す指標だと思えばよい。シミュレーションソフト“CATT”は、これを吸音率 とともに壁面の音響特性を表す物性値として導入している。Sabine の式などの残響時間予測式は残響時間の関数であると考えているが、CATT ではさらに sc の関数でもあるとして扱うことになる。

(1)の定義に従って考えてみると、 $sc=1$ であることは、完全拡散反射であることの必要十分条件ではなく必要条件である。 $sc=1$ 完全拡散反射は一般には成り立たない。 $sc=1$ とは鏡面反射成分がないということを示しているだけであり、反射角が入射角とわずかに違えば全く拡散していなくても $sc=1$ である。下の例を見て欲しい。左はランベルトの余弦則に従う完全拡散反射であり、右は入射角と反射角が異なるだけで全く拡散していない例であるがどちらも $sc=1$ である。このように sc だけから反射波の指向性を完全に決定することはできない。(注)

注 指向性まで含めた指標である拡散度 Diffusion Coefficient もあるが、測定が非常に難しいため今のところあまり用いられていない。

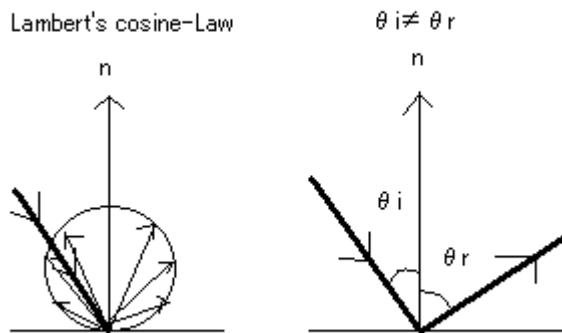


Fig.1 $sc=1$ となる例

しかしながらこのようなあいまいさを残したままではシミュレーションに用いることはできない。そこで sc の定義を拡張し以下のように仮定するのが普通であり、CATT もこれに従っている。

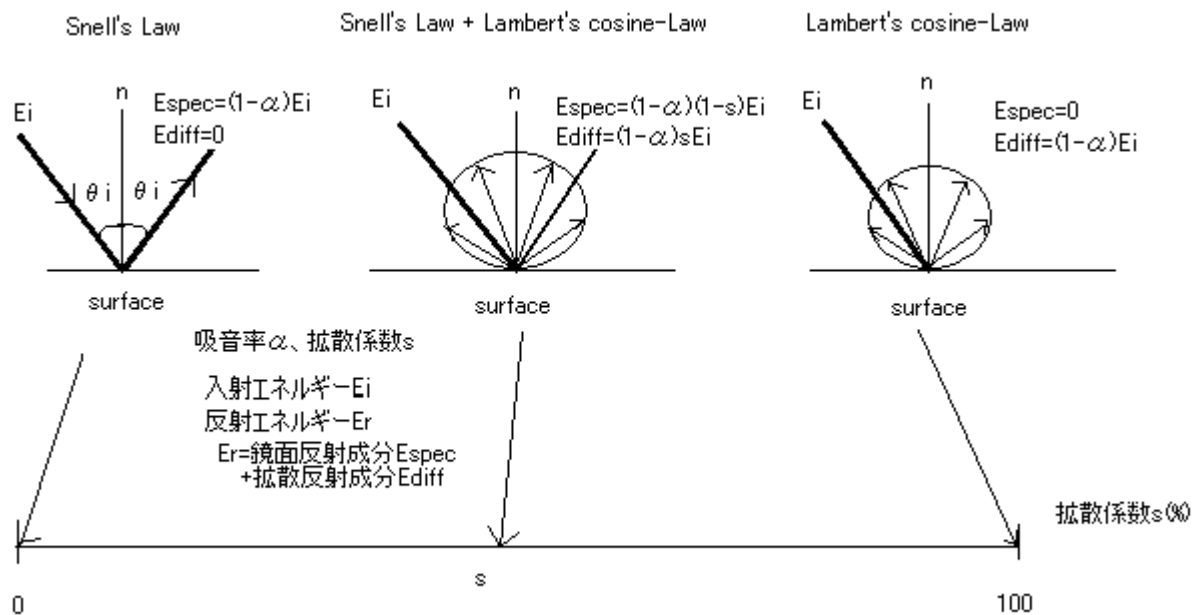


Fig.2 sc による反射波の仮定

< 反射波の仮定 >

仮定 1 $sc=0$ であれば鏡面反射 (= 現象もそうである。)

仮定 2 $sc=1$ であれば完全拡散反射 (= 現象はそうとはかぎらない。)

仮定 3 $0 < sc < 1$ であれば全反射エネルギーのうち $(1-sc)$ 倍が鏡面反射に使われ、 sc 倍が完全拡散反射に使われる。

このように仮定する。つまり、本来の sc の定義(1)よりも CATT で用いられる sc はより特殊で強い条件になっているのである。

第 3 節 幾何音響シミュレーションソフト CATT の概要

本研究で拡散係数を導入した幾何音響シミュレーションソフトとして用いる CATT は次のような特徴を持っている。

3 種類の独立な予測手法を用いることができる。

Audience area mapping で用いられる標準的な ray-tracing 手法。これは球面的な受音点を仮定する。

Early part detailed ISM で用いられる虚像法。これには 1 次の拡散反射を付加することができる。

Full detailed calculation で用いられる Randomized Tail-corrected Cone-tracing (RTC) 。これは鏡面反射には cone-tracing と の標準的な ray-tracing を用い、確認に虚像法を用いる手法である。具体的には次のようである。

(i) 拡散反射次数 >1 の時はモンテカルロ法による。すなわち反射が起こるごとに 0 以上 1 以下の乱数 M を発生させる。この M が与えた sc より小さければ上で述べたように Lambert's law に従う拡散反射が起こる。 M より sc が大きければ鏡面反射が起こるという具合である。

(ii) 拡散反射次数 $=1$ の時には、上で述べたように鏡面反射と拡散反射を sc によってエネルギーを分配しながら起こさせる。一次と二次の鏡面反射成分は重要であるので、虚像法を確認に用いている。

今回の検討では の Full detailed calculation で算出される残響時間を用いることにする。

第2章 実際の問題への適用

第1節 非拡散音場とは

拡散音場では Sabine の予測式などの残響時間予測式がよく一致することが知られている。しかし拡散音場の仮定(注)を満足しない非拡散音場の残響時間を、そのような式から予測することは困難である。そこで前章で説明した拡散係数を導入することで、そのような音場の残響時間を予測することを考える。

注 拡散音場の仮定

- (1) エネルギー密度が室内全体で均一
- (2) 空間内の一点の持つエネルギーは時間平均的に見てあらゆる方向に伝播

非拡散音場といっても拡散音場の仮定を満たさないものはすべて非拡散音場だから、その種類は膨大にある。今回は、そのような多くの問題の中から吸音面が偏在した室においては、吸音面が偏在した室を取り上げる。このような室では、中・高周波数の残響時間(以下残響時間)が低周波数域に比べ長くなる傾向がある。またそのような経験に基づき時間領域差分法(以下 FDTD)により解析を行った既往研究があるため、それと整合性を持つような sc の与え方を検討することができるからである。これによって適切な sc の与え方を発見することができれば、上部が開放された空間や長い廊下のような空間、ホールにおける拡散体の効果を幾何音響で検討することができるようになり有意義である。

第2節 検討の条件

検討の条件は FDTD による既往研究と同じにする。

- ・ 解析モデルは奥行き 24m、幅 12m を固定し、室高さを 3m, 6m, 12m と変える。
- ・ 吸音率 = 吸音面 50%、その他の面は剛として 5% とする。(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する。
- ・ 空気吸収は無視する。
- ・ 残響時間は 1/3 octave band 毎に算出する。(100Hz f 1kHz)
- ・ 吸音面の sc は残響時間にほとんど影響を与えない(*)ので無視する。(注)
- ・ 幾何音響シミュレーションソフト CATT を用いる。

注 これは一般には明らかでないが、今回の場合は吸音面と反射面では反射エネルギーがほぼ 2 倍違うので反射面の sc が残響時間に影響を与えそうであると予測される。実際 $h=6m$ 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% に固定して、壁面(反射面)を 10% ずつ変化させた場合の残響時間を示す。それらの差は 10% 程度に収まっており、これから吸音面の sc は残響時間の因子として支配的でないことが分かる

Table2 *であることを示す例(単位:秒)

条件 \ sc	10	20	30	40	50	60
全面	2.39	1.65	1.28	1.1	0.99	0.92
壁面のみ	2.57	1.82	1.38	1.2	1.11	1.02
増加率%	7.5	10	7.8	9.1	12	11

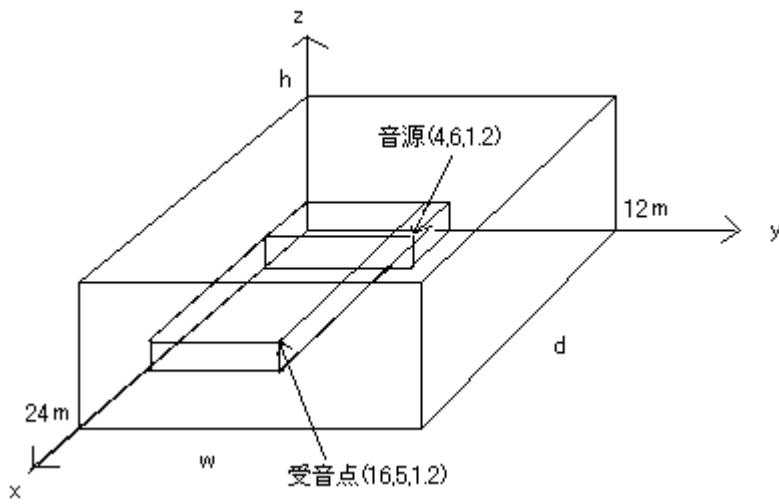


Fig.3 モデル

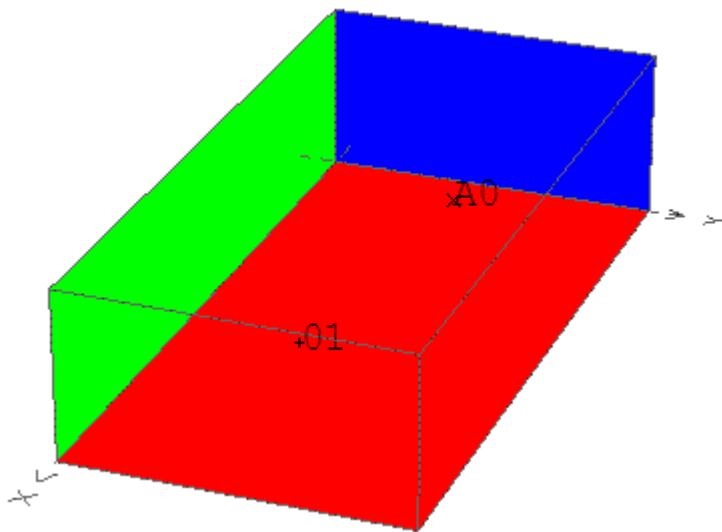


Fig.4 CATT での設定確認画面

第3章 新手法の提案

第1節 scの与え方

上で述べたように反射面の 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 を動かすことにする。 sc の与え方はいろいろ考えられるが、ここでは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 ($0 < x < \min(h, w)/2$)) の sc を未知として scp ($0 < scp < 100$) (黒地の部分) とおく。そして、その面積加重平均を面の等価 $sc(=sceq)$ として代入する。すなわち

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

とする。 S_1 : 中心部の面積、 S_2 : ペリメーターゾーンの面積

この場合
$$sceq = \frac{2scp \{(w + h)x - 2x^2\}}{wh} \quad (3)$$

である。...**仮定1**

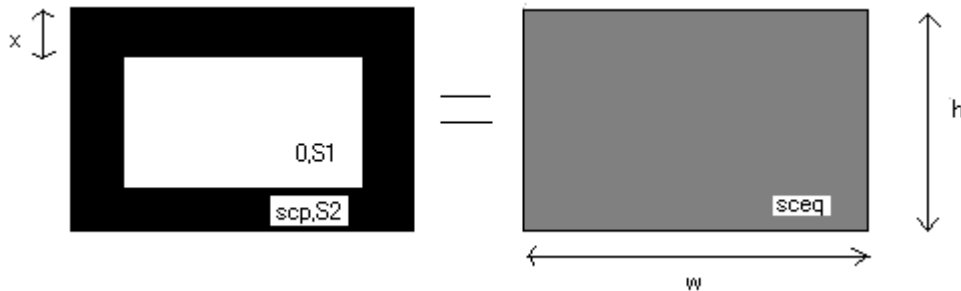


Fig.5 sceq の与え方の説明図

第2節 xの与え方

次にペリメーターゾーンの幅 x を与えなければならない。ここで物理現象に戻って考えると、波長が長い場合にはフラッターエコーがおきにくいので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 λ の関数 $x = g(\lambda)$ であると思われる。また式(1)より、

- (i) 0 のとき $x = 0$, (ii) $h/2$ のとき $x = h/2$ (今回は、 $h < w$) と推測される。線形近似を考え、

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

とおく。...**仮定2**

第3節 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、

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

では残響時間は Sabine の式に従うものとする。(注)...**仮定3**

注 これは全く明らかではない。実際本研究でも壁面タイプを考えるとときにはこの仮定は成り立っていない。どこかひとつの周波数バンドでの残響時間が分からないと使えないのはこの手法の弱点である。つまり仮定1, 2は本質的であるが、仮定3はそれを導くために便宜的に設けただけで仮定1, 2の補助的な仮定である。他のやり方でどこかの周波数周りで残響時間が分かれば仮定3は必要ない。

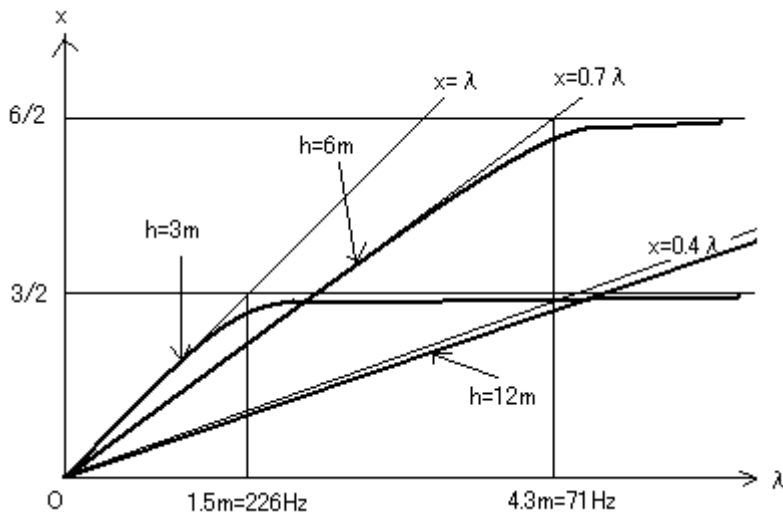


Fig.6 提案手法のイメージ

第4章 結果と考察

第1節 室形状の影響(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 を求めると以下のように n が求まる。参考までに fcr と Sabine の式による残響時間も同時に示す。

Table3 scp と n の関係

h \ sc%	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

以下のように FDTD 結果と割によく一致した。(6m,12m の FDTD の結果が途中までなのはメモリー量が不足したためか)下に相関係数を示す。ここから scp の取り方による変化はごく小さいことが分かる。

Table4 FDTD と CATT の相関

sc% \ h	3m	6m	12m	平均
100	0.93	0.98	0.99	0.97
80	0.99	0.99	0.96	0.98
60	0.94	0.99	0.97	0.97

ここで scp を変えても残響時間があまり変わらなかったのはなぜだろうか。scp として scp1,scp2 を取り、そのときの傾きを n1,n2 する。ペリメーターゾーンの四隅の重なりあっている部分が全体の面積に比べて十分小さいとすれば、式(3)において x^2 項を無視したと同じことになる。すなわち

$$s_{ceq} = \frac{2scp \times (w + h) \times x}{wh} \quad (6)$$

ここで w, h が同じなら $2(w+h)/wh=Const.$ である。さらに**仮定3**により cr で s_{ceq} が互いに等しいはずだから、

$$\frac{s_{ceq}}{Const.} = scp \times x = \begin{cases} scp_1 \times n_1 \lambda_{cr} \\ scp_2 \times n_2 \lambda_{cr} \end{cases} \Leftrightarrow \frac{n_1}{n_2} = \frac{scp_2}{scp_1} \quad (scp \neq 0) \quad (7)$$

なることが**仮定3**と必要十分である。よって2乗項が多少は効くにしても、scp の変化が n の変化に吸収され s_{ceq} はほとんど変化しない。とくに2乗項の影響が少ない室高さが高い場合にそれは顕著である。

h=3m

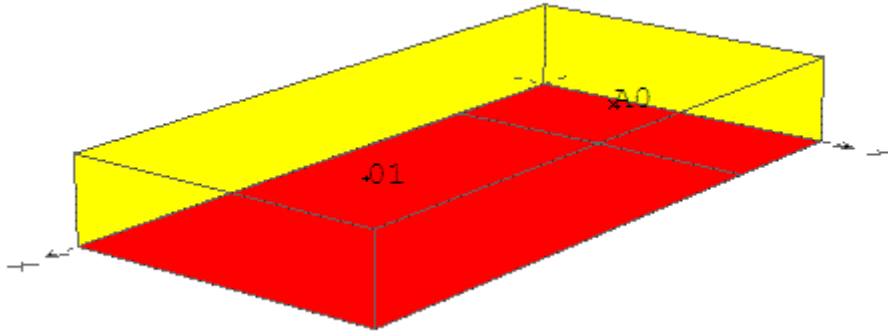


Fig.7 h=3m の場合のモデル

長辺方向の壁を A、短辺方向の壁を B とすると s_{eq} は以下の通り。黄色は f_{cr} での値。

Table5 scp=100 とした場合の s_{eq}

	100	125	165	200	227	250	315	400	500	630	800	1000
A	163	137	109	92	82	75	61	48	39	31	25	20
B	144	129	107	93	84	78	64	52	42	34	27	21.8

165Hz 以下はすべて 100 を代入

Table6 scp=80 とした場合の s_{eq}

	100	125	165	200	227	250	315	400	500	630	800	1000
A	153	130	105	89	80	73	60	48	39	31	25	19.9
B	124	116	100	88	80	74	62	50	41	33	27	21.6

200Hz 以下はすべて 80 を代入

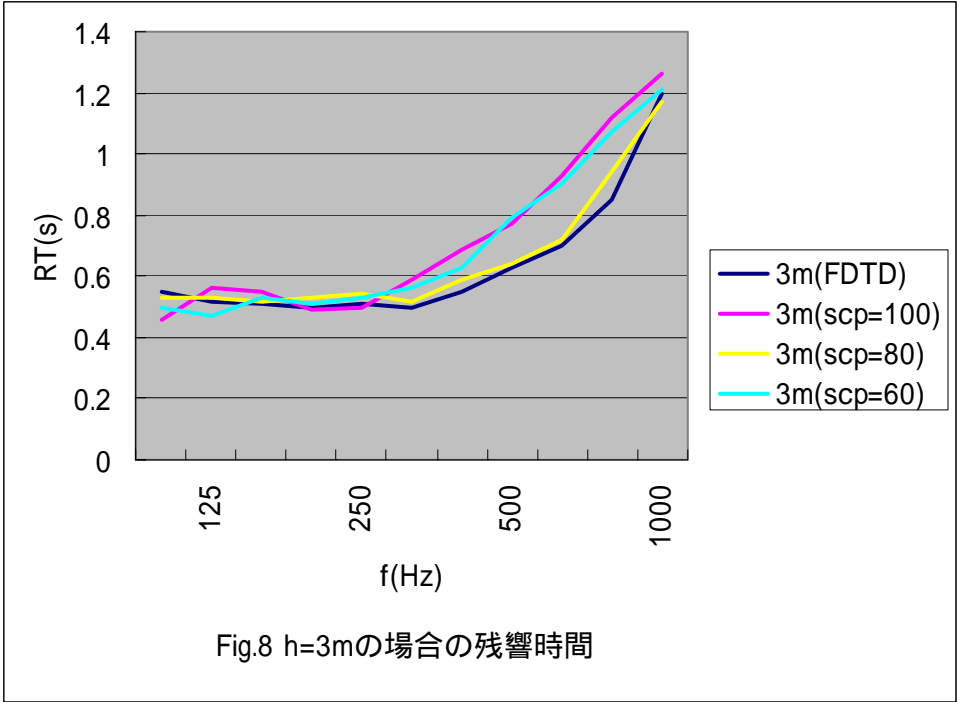
Table7 scp=60 とした場合の s_{eq}

	100	125	165	200	227	250	315	400	500	630	800	1000
A	139	123	102	88	80	74	60	49	40	32	26	20.7
B	87	94	89	81	76	71	60	50	42	34	27	22.3

250Hz 以下はすべて 60 を代入

Table8 h=3m の場合の残響時間 (秒)

h=3m \ f(Hz)	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1000
3m(FDTD)	0.55	0.52	0.51	0.5	0.51	0.5	0.55	0.63	0.7	0.85	1.2
3m(scp=100)	0.46	0.56	0.55	0.49	0.5	0.59	0.69	0.77	0.93	1.12	1.26
3m(scp=80)	0.53	0.53	0.52	0.53	0.54	0.52	0.59	0.64	0.72	0.94	1.17
3m(scp=60)	0.5	0.47	0.53	0.51	0.53	0.56	0.63	0.79	0.9	1.07	1.21



h=6m

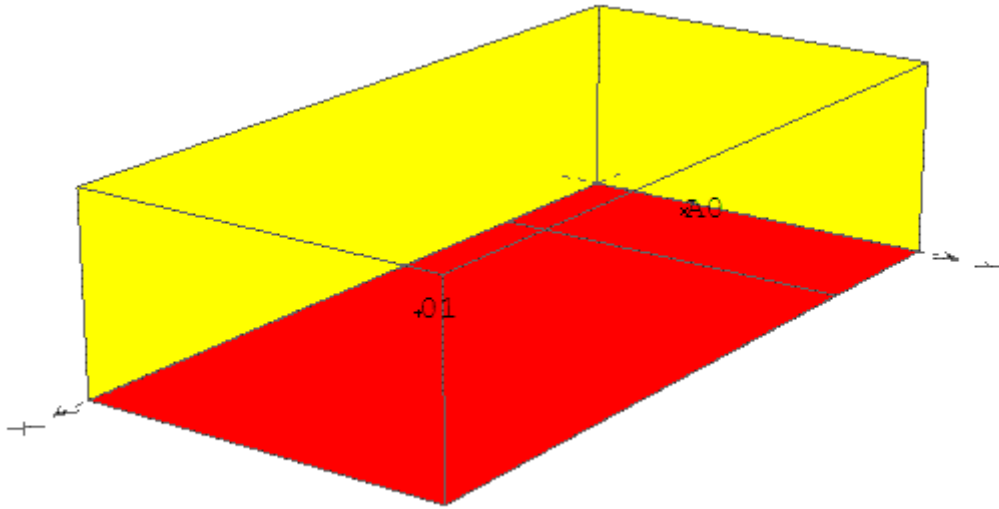


Fig.9 h=6m のモデル

長辺方向の壁を A、短辺方向の壁を B とすると sceq は以下の通り。

Table9 scp=100 の場合の sceq

	100	113	125	165	200	250	315	400	500	630	800	1000
A	68	61	56	44	37	30	24	19	15	12	9.6	7.69
B	74	67	62	50	42	34	28	22	18	14	11	9.16

Table10 scp=80 の場合の sceq

	100	113	125	165	200	250	315	400	500	630	800	1000
A	67	60	55	43	37	30	24	19	15	12	9.7	7.81
B	70	64	60	48	41	34	28	22	18	14	12	9.27

Table11 scp=60 の場合の sceq

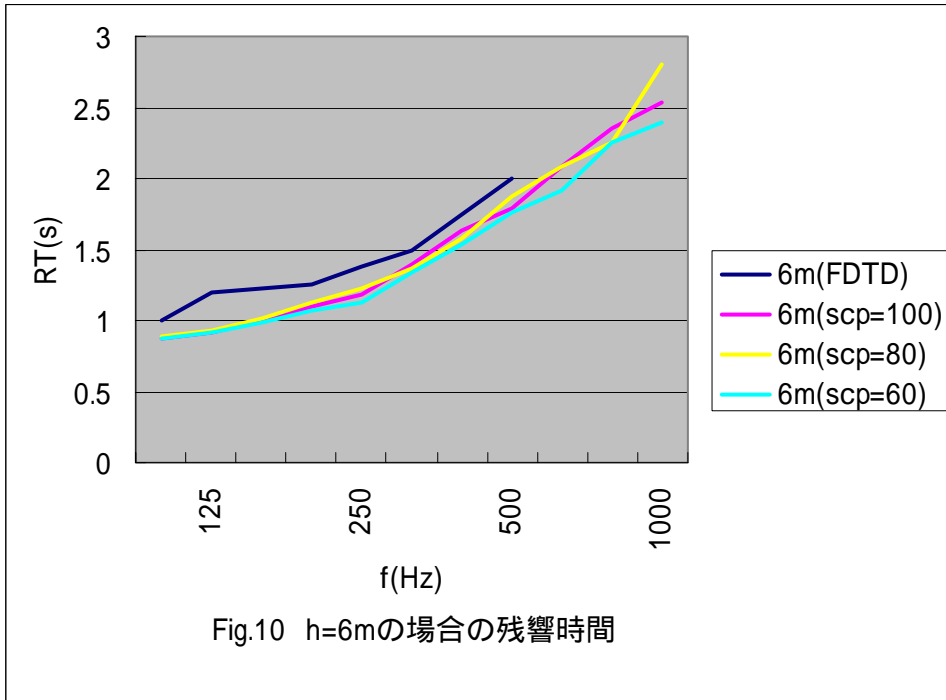
	100	113	125	165	200	250	315	400	500	630	800	1000
A	66	60	56	44	38	31	25	20	16	13	10	8.31
B	63	60	57	48	41	35	28	23	19	15	12	9.81

100Hz のときは 60 を代入

Table12 h=6m の場合の残響時間 (秒)

h=6m		125			250			500			1000
6m(FDTD)	1	1.2	1.22	1.25	1.38	1.5	1.75	2			
6m(scp=100)	0.87	0.92	1	1.1	1.19	1.39	1.63	1.79	2.08	2.35	2.54
6m(scp=80)	0.89	0.93	1.02	1.13	1.22	1.36	1.58	1.87	2.08	2.26	2.8
6m(scp=60)	0.87	0.91	0.99	1.07	1.13	1.34	1.54	1.76	1.91	2.25	2.39

(1/3octave band の中心周波数については h=3m のとき参照)



h=12m

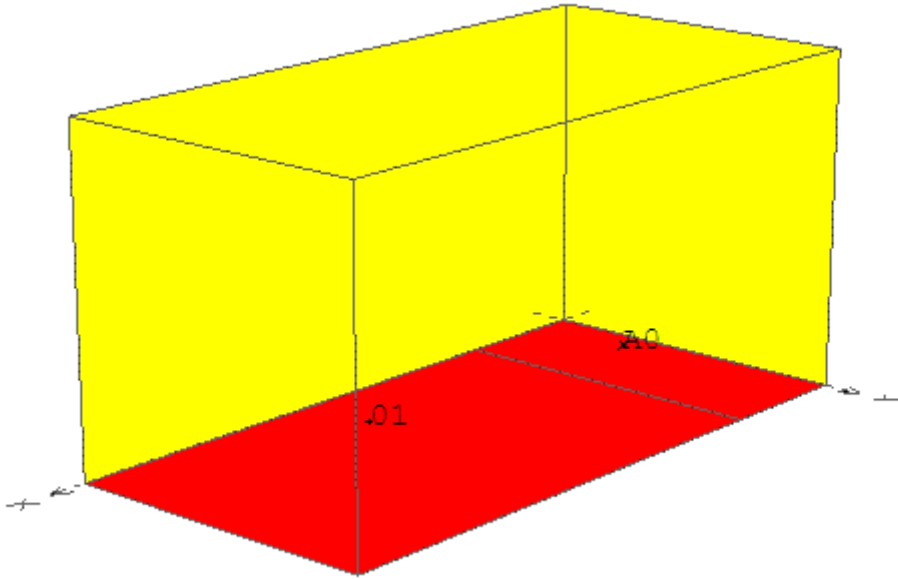


Fig.11 h=12m のモデル

長辺方向の壁を A、短辺方向の壁を B とすると sceq は以下の通り。

Table13 scp=100 の場合の sceq

	57	100	125	165	200	250	315	400	500	630	800	1000
A	34	20	16	13	10	8.3	6.6	5.2	4.2	3.3	2.6	2.11
B	44	26	21	16	14	11	8.8	7	5.6	4.4	3.5	2.81

Table14 scp=80 の場合の sceq

	57	100	125	165	200	250	315	400	500	630	800	1000
A	32	19	16	12	9.9	8	6.4	5	4	3.2	2.5	2.03
B	41	25	20	16	13	11	8.4	6.7	5.3	4.3	3.4	2.7

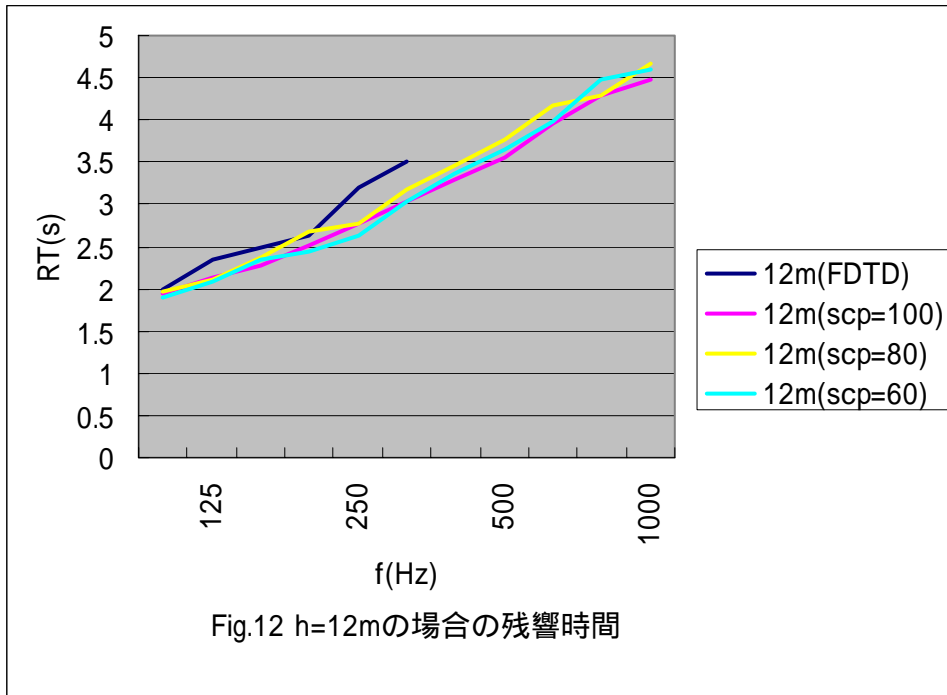
Table15 scp=60 の場合の sceq

	57	100	125	165	200	250	315	400	500	630	800	1000
A	34	21	17	13	11	8.9	7.1	5.6	4.5	3.6	2.8	2.28
B	42	27	22	17	14	12	9.3	7.4	6	4.8	3.8	3.02

Table16 h=12m の場合の残響時間 (秒)

h=12m		125			250			500			1000
12m(FDTD)	2	2.35	2.5	2.62	3.2	3.5					
12m(scp=100)	1.95	2.13	2.28	2.51	2.77	3.04	3.3	3.56	3.95	4.29	4.47
12m(scp=80)	1.97	2.1	2.36	2.68	2.78	3.17	3.46	3.76	4.17	4.28	4.68
12m(scp=60)	1.89	2.08	2.34	2.44	2.62	3.03	3.36	3.65	3.99	4.49	4.59

(1/3octave band の中心周波数については h=3m のとき参照)



第2節 壁面タイプの影響(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。

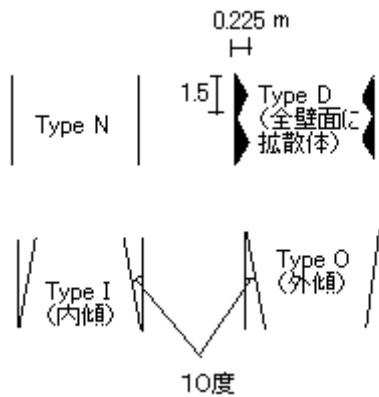


Fig.13 壁面タイプ

Type N

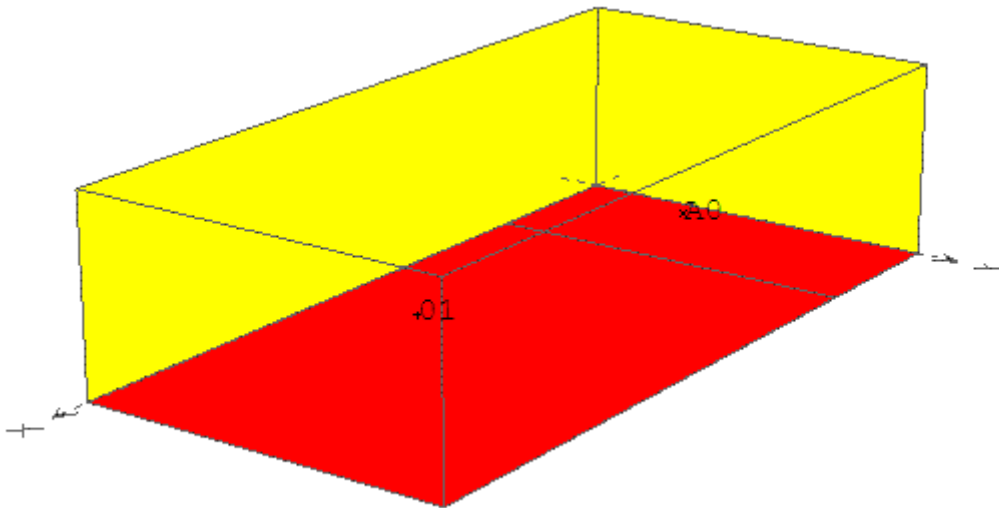


Fig.14 Type N のモデル

Sabine=1.57 秒($f_{cr}=113\text{Hz}$)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 12m($sc=100\%$)のときの検討結果と同じとする。

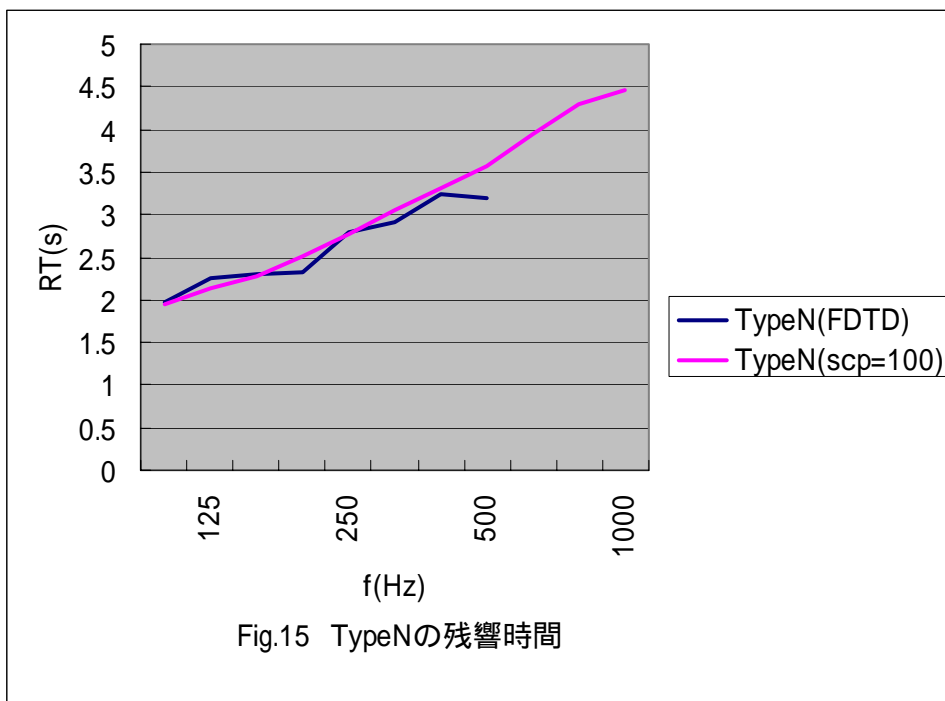
Table17 $sc_p=100, h=12\text{m}$, 床天井吸音の場合の s_{ceq} (Table13 と同じ)

	57	100	125	165	200	250	315	400	500	630	800	1000
A	34	20	16	13	10	8.3	6.6	5.2	4.2	3.3	2.6	2.11
B	44	26	21	16	14	11	8.8	7	5.6	4.4	3.5	2.81

Table18 Type N の場合の残響時間 (秒)

		125			250			500			1000
TypeN(FDTD)	1.98	2.25	2.3	2.32	2.8	2.9	3.25	3.2			
TypeN(scp=100)	1.95	2.13	2.28	2.51	2.77	3.04	3.3	3.56	3.95	4.29	4.47

(1/3octave band の中心周波数については h=3m のとき参照)



Type O

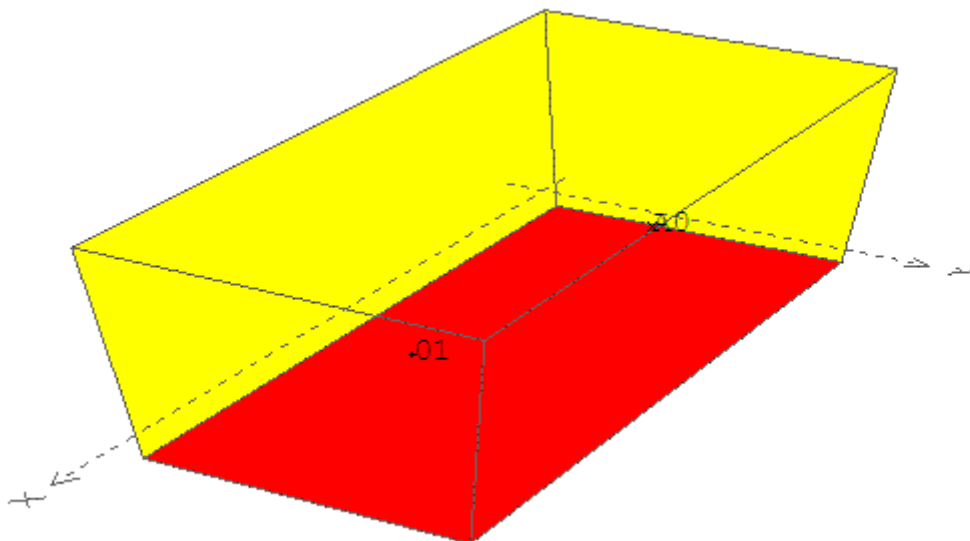


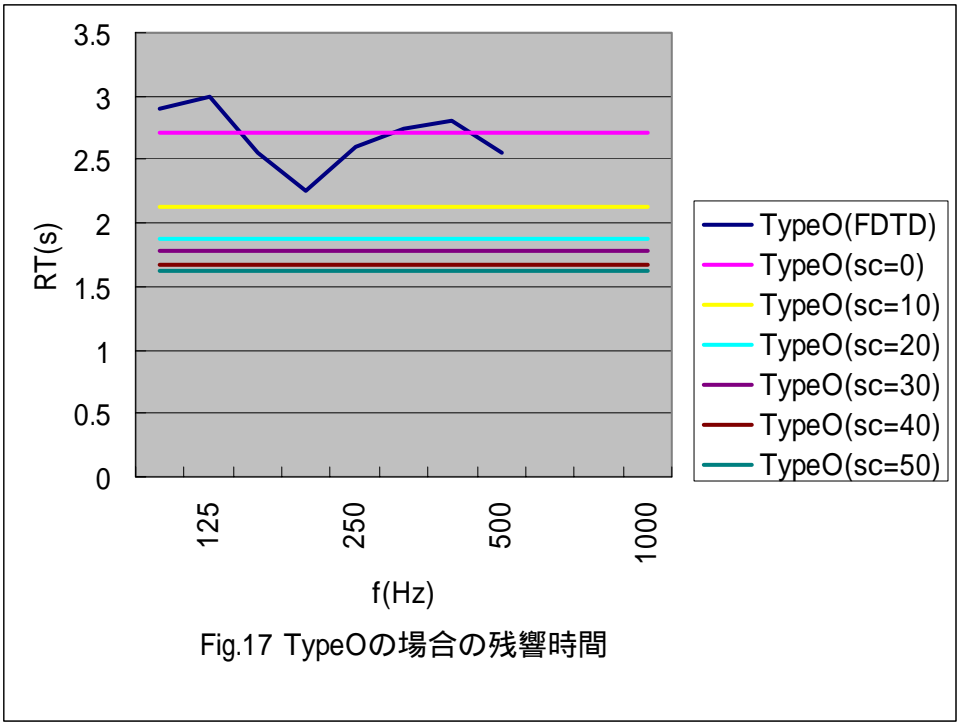
Fig.16 Type O のモデル

ロングパスエコーが形成され、残響時間が 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 $sc=0$ であることが分かる。そこから仮定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ので、仮定3を改善することでこのような音場も解析できる見込みはある。

Table19 Type O の場合の残響時間 (秒)

		125			250			500			1000
Type O(FDTD)	2.9	3	2.55	2.25	2.6	2.75	2.8	2.55			
Type O($sc=0$)	2.71	2.71	2.71	2.71	2.71	2.71	2.71	2.71	2.71	2.71	2.71
Type O($sc=10$)	2.13	2.13	2.13	2.13	2.13	2.13	2.13	2.13	2.13	2.13	2.13
Type O($sc=20$)	1.87	1.87	1.87	1.87	1.87	1.87	1.87	1.87	1.87	1.87	1.87
Type O($sc=30$)	1.78	1.78	1.78	1.78	1.78	1.78	1.78	1.78	1.78	1.78	1.78
Type O($sc=40$)	1.67	1.67	1.67	1.67	1.67	1.67	1.67	1.67	1.67	1.67	1.67
Type O($sc=50$)	1.62	1.62	1.62	1.62	1.62	1.62	1.62	1.62	1.62	1.62	1.62

(1/3octave band の中心周波数については $h=3m$ のとき参照)



Type I

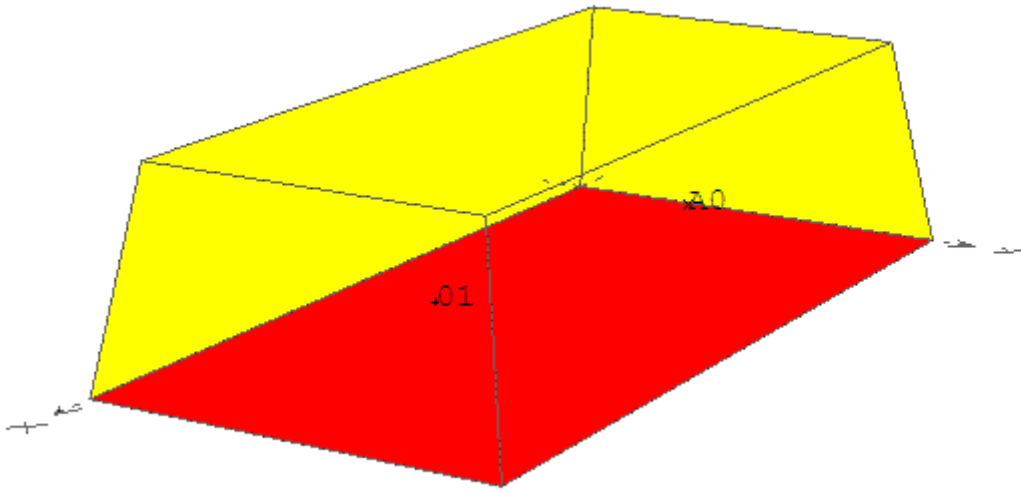


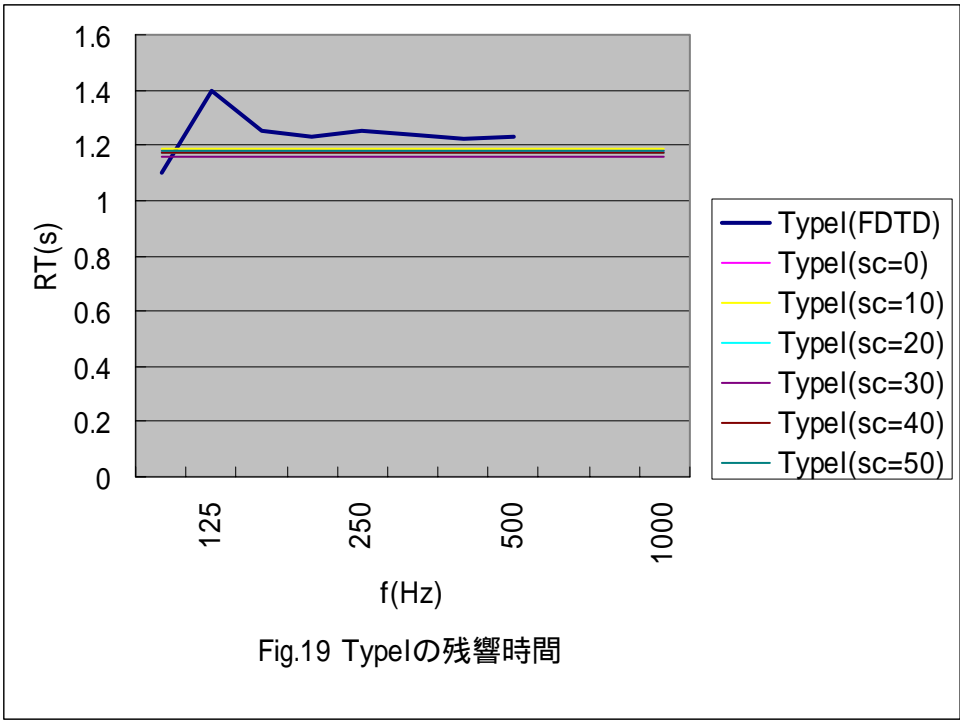
Fig.18 Type I のモデル

Type O と同様仮定 3 を満たさないため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° でも $RT(sc=0\%) \div RT(sc=50\%)=114\%$ ほどであった。)

Table20 Type I の場合の残響時間 (秒)

		125			250			500			1000
Type I(FDTD)	1.1	1.4	1.25	1.23	1.25	1.24	1.22	1.23			
Type I(sc=0)	1.18	1.18	1.18	1.18	1.18	1.18	1.18	1.18	1.18	1.18	1.18
Type I(sc=10)	1.19	1.19	1.19	1.19	1.19	1.19	1.19	1.19	1.19	1.19	1.19
Type I(sc=20)	1.17	1.17	1.17	1.17	1.17	1.17	1.17	1.17	1.17	1.17	1.17
Type I(sc=30)	1.16	1.16	1.16	1.16	1.16	1.16	1.16	1.16	1.16	1.16	1.16
Type I(sc=40)	1.17	1.17	1.17	1.17	1.17	1.17	1.17	1.17	1.17	1.17	1.17
Type I(sc=50)	1.18	1.18	1.18	1.18	1.18	1.18	1.18	1.18	1.18	1.18	1.18

(1/3octave band の中心周波数については $h=3m$ のとき参照)



Type D

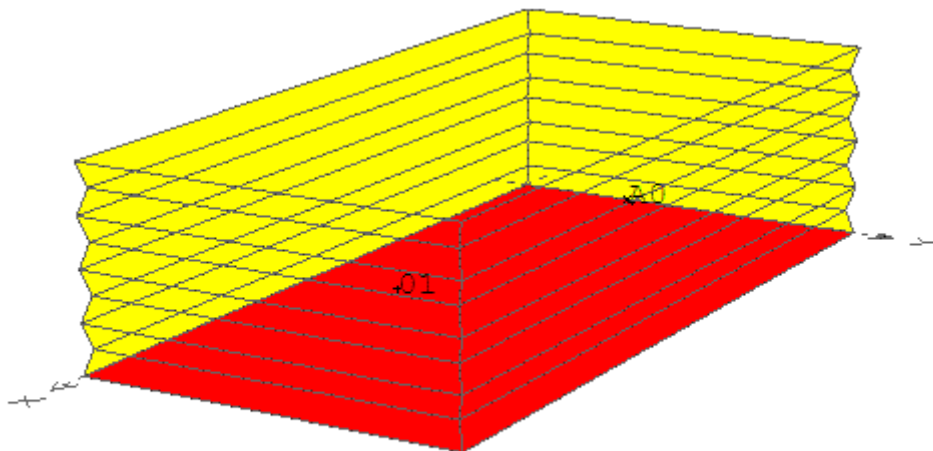


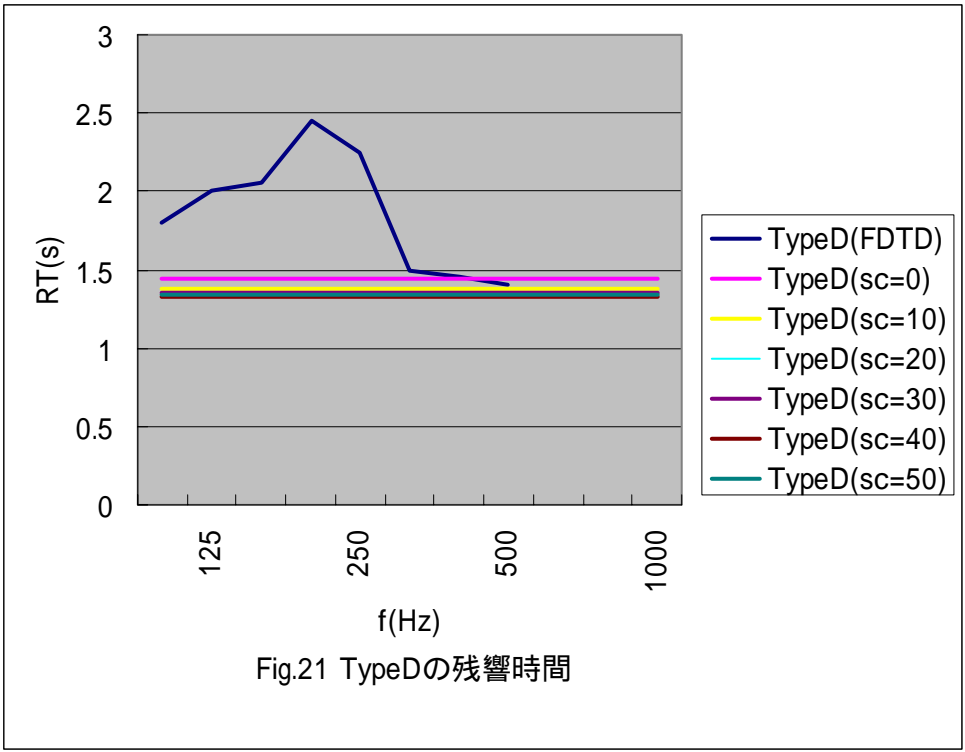
Fig.20 Type D のモデル (拡散体をモデリングしたもの)

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壁面の $sc=100$ となってしまう、周波数によって sc を変化させてもその変化は微小であるため RT が変化せず、周波数特性を考慮することはできない。

Table21 Type D の場合の残響時間 (秒)

		125			250			500			1000
Type D(FDTD)	1.8	2	2.05	2.45	2.25	1.5	1.45	1.4			
Type D($sc=0$)	1.44	1.44	1.44	1.44	1.44	1.44	1.44	1.44	1.44	1.44	1.44
Type D($sc=10$)	1.38	1.38	1.38	1.38	1.38	1.38	1.38	1.38	1.38	1.38	1.38
Type D($sc=20$)	1.33	1.33	1.33	1.33	1.33	1.33	1.33	1.33	1.33	1.33	1.33
Type D($sc=30$)	1.35	1.35	1.35	1.35	1.35	1.35	1.35	1.35	1.35	1.35	1.35
Type D($sc=40$)	1.33	1.33	1.33	1.33	1.33	1.33	1.33	1.33	1.33	1.33	1.33
Type D($sc=50$)	1.34	1.34	1.34	1.34	1.34	1.34	1.34	1.34	1.34	1.34	1.34

(1/3octave band の中心周波数については $h=3\text{m}$ のとき参照)



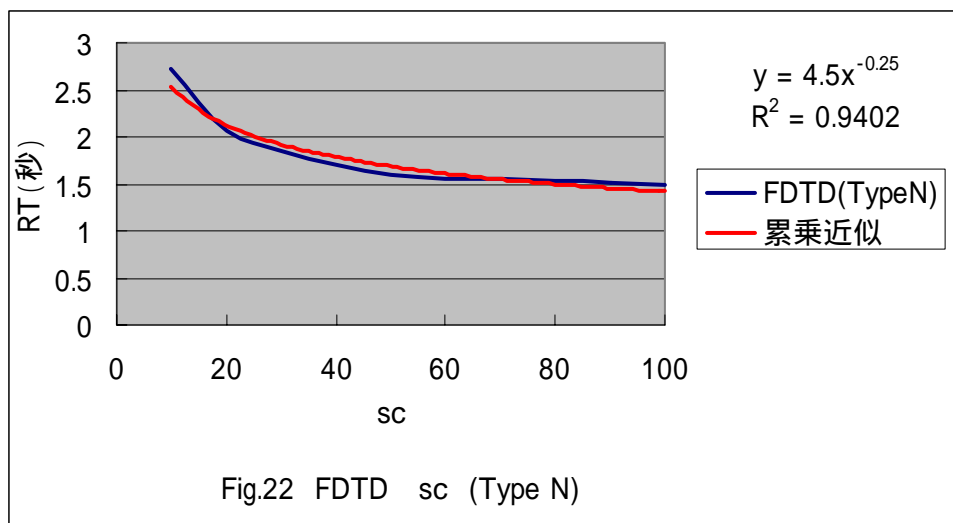
拡散体の効果

それでは Type D の場合に残響時間を予測することはできないのだろうか。ここで Type D の FDTD 結果から sc を逆算することを考える。

まずは Type I,O でやったのと同じようにして、Type N で反射面の sc を 10% ずつ動かして残響時間を求める。

Table22 Type N(6m)の場合の sc と残響時間の関係

10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
2.73	2.06	1.86	1.7	1.59	1.56	1.56	1.53	1.52	1.49



ここで上のグラフのように

$$RT = h(sc) \cong A(sc)^b = 4.5sc^{-0.25} \tag{8}$$

と近似する。(決定係数は 0.94)

$$\text{すると、} sc = h^{-1}(RT) = \left(\frac{4.5}{RT}\right)^4 \tag{9}$$

となる。($\frac{d(RT)}{d(sc)} = Ab(sc)^{b-1} = -1.1(sc)^{-1.25} < 0$ だから逆関数は一意にもとまる)

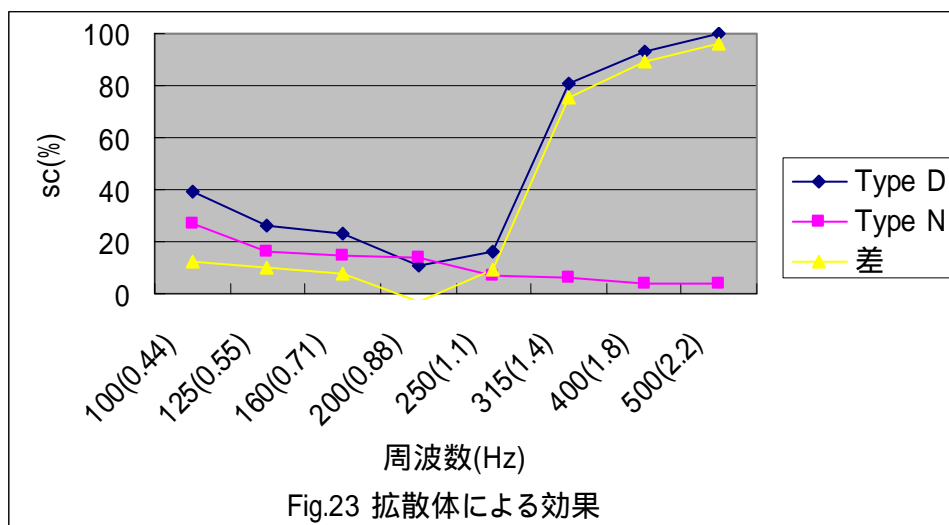
そしてこの関数を用いて Type N と Type D の場合の sc を FDTD 結果から逆算する。

Table23 拡散体の有無による sc の違い (単位%)

形状 \ Hz	100	125	160	200	250	315	400	500
Type D	39	26	23	11	16	81	93	100
Type N	27	16	15	14	6.7	5.8	3.7	3.9
差	12	10	8	-3	9.3	75	90	96

するとこの差が拡散体による散乱であると考えられる。これをまとめたのが Fig.7 である。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。



Type D の場合に残響時間を予測するためには、Type N のようなフラットな面の sceq を仮定 1 から 3 を用いて求める。次に 拡散体の sc を仮定する。、 の sc を足し合わせたものを Type D の sceq として代入することで残響時間を求める。このような手順を踏むことで Type D の場合の残響時間を近似的に求めることができる。

第5章 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 を満たさないなので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。

