

# 球体型 MPP 空間吸音体の特性予測

関西大学 環境都市工学部 建築学科

建築環境工学第 I 研究室 音ゼミ

建 17-58 登石怜奈

指導教員 豊田政弘

# 目次

第 1 章 序章.....	1
1.1 研究背景 .....	1
1.2 既往研究 .....	2
1.3 研究目的 .....	4
第 2 章 研究方法.....	5
2.1 計算方法 .....	5
2.2 case 1.....	6
2.3 case 2.....	8
2.4 case 3.....	10
第 3 章 各条件における結果と考察 .....	12
3.1 孔径 .....	12
3.2 板厚 .....	15
3.3 開孔率 .....	16
3.4 面密度.....	17
第 4 章 SMSA最適化の結果と考察 .....	18

4.1 孔径 0.25 倍での解析結果.....	18
4.2 孔径 0.5 倍での解析結果.....	21
4.3 孔径 4 倍での解析結果.....	23
4.4 その他の解析結果.....	24
<b>第 5 章 総括</b> .....	<b>27</b>
参考文献.....	28

# 第 1 章 序論

## 1.1 研究背景

MPP (Microperforated Panel)とは、厚さ 1mm 以下の薄板、膜などに直径 1mm 以下、開孔率 1%程度の微細孔を開けた微細穿孔板のことをいい、通常、背後に空気層を設けて Helmholtz 型吸音機構を構成することにより吸音を生ずる。MPP は、繊維系多孔質吸音材料のもつ衛生面、環境面、および、デザイン面での問題点を解決する次世代吸音材として、Maa[1]によって提案されて以来、多数の研究が行われており、広く注目を集めている。海外では、壁や天井に利用されているが、国内では消防法によって建材としての利用が規制されている。そこで、吸音パーティションとして利用することが提案され、その例としては、MPP を 2 重に重ね合わせた DLMPP(Double-leaf MPP)[2, 3]、3 重に重ねた TLMPP (Triple-leaf MPP)[4]がある。さらに、MPP をもっと気軽に利用するため、CMSA(cylindrical MPP space sound absorber)や RMSA(rectangular MPP space sound absorber)といった、立体型 MPP が提案された[5, 6]。こういった形状にすることで、天井から吊るしたり、机やいすの脚の部分に巻きつけたり、インテリアとして配置するだけで吸音体としての役割を果たすことができる。また、立体型 MPP として、昨今、球体型 MPP が提案された。球体型にすることで天井に吊るすなどインテリアとしてさらに幅が広がるほか、CMSA や RMSA と比べより高い吸音率も期待できることで注目されている。

## 1.2 既往研究

浜口によって CMSA と RMSA の理論的研究が行われた[7]。この研究では 2 次元解析を用いることによる誤差を 3 次元解析で解消し、最も大きい吸音率を示す立体型 MPP を計算によって求めることが目的であった。この研究によって CMSA と RMSA の吸音率はそれぞれの高さには依存しないこと、CMSA と RMSA の周の長さが大きい方が広帯域にわたって安定した吸音率をとり、100 Hz から 5000 Hz の範囲の平均値は大きくなること、100 Hz から 500 Hz の範囲においては RMSA よりも CMSA の方が高い吸音率をとることが示された (Figs. 1, 2)。

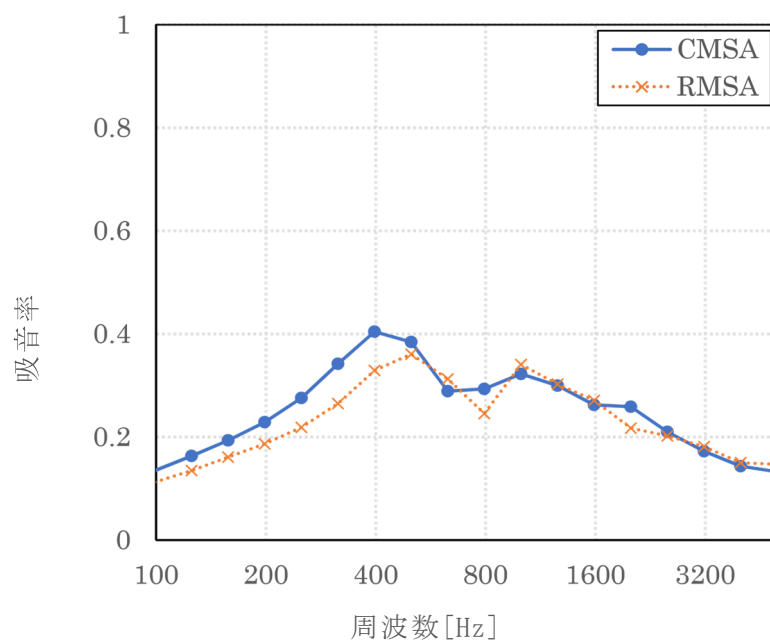


Fig. 1 周の長さ 1m の CMSA と RMSA の解析結果

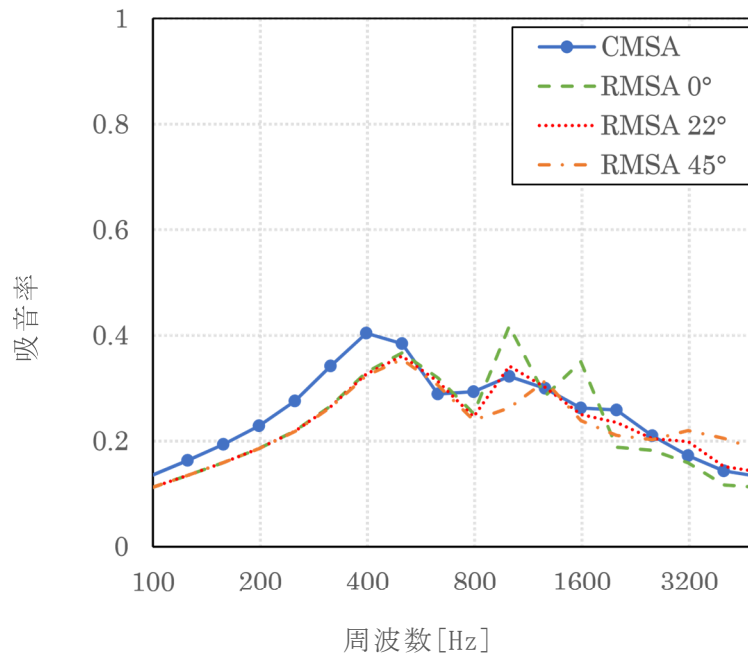


Fig. 2 音の入射角ごとの周の長さ 1 m の CMSA と RMSA の解析結果

また阪上らによって球体型 MPP の実験が行われている (Fig. 3)。[8]

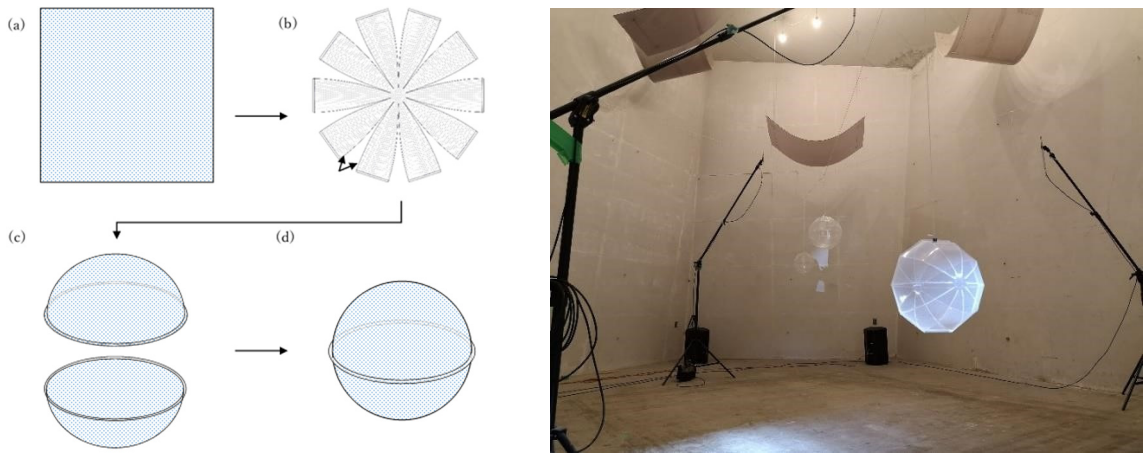


Fig. 3 球体型 MPP の実験の様子

### 1.3 研究目的

既往研究の結果より、筒形と比べ球体の方が音の入射角の影響を受けないため吸音率が高いのではないかと考えられる。また、球体型 MPP は実験段階であり、未だ最適化されておらず、適切な孔径、板厚、開孔率、面密度などは分かっていない。そこで 3 次元解析により各パラメータが吸音率に及ぼす影響を分析することによって球体型 MPP の最適化を行うこと、また、実験を行うための時間とコストの削減を本研究の目的とする。

## 第2章 研究方法

### 2.1 計算方法

既往研究[7]の3次元解析プログラムをもとに球体型MPPの吸音率を求める方法を考える。既往研究の計算方法では、表面積を $S$ 、吸音率を $\alpha$ とし吸音力を

$$A = S\alpha \quad (1)$$

と定義する。

吸音力 $A_a$ の吸音体に振幅1の平面波を当てた時の消費エネルギーを $E_a$ とする。そこで吸音力1、消費エネルギー $E_r$ の1m<sup>2</sup>の床面を想定する (Fig. 4)。吸音体の吸音力は

$$A_a = \frac{E_a}{E_r} \quad (2)$$

で求めることができる。ここでの消費エネルギー $E_a$ は下式の境界要素法を用いて求める。

$$\frac{\partial\phi_D(P)}{n_p} + \int \int_A \tilde{\phi}(Q) \frac{\partial^2 G(P, Q)}{\partial n_P \partial n} dS = \begin{cases} \frac{\partial\phi}{\partial n}, (P \in \Omega) \\ -\frac{i\omega p \tilde{\phi}(P)}{Z_r}, (P \in A) \end{cases} \quad (3)$$

吸音体の表面積を $S_a$ とすると吸音体の吸音率 $\alpha_a$ は

$$\alpha_a = \frac{A_a}{S_a} \quad (4)$$

で求まる。

これは、CMSA や RMSA は平面波が当たる場所によって見かけの表面積が異なり計算方法が複雑になるためこのような方法をとっていた。しかし、今回は球体であるためどこから平面波を当てても見かけの面積が変わらない。よって上記の方法をとる必要はないのではないかと考える。



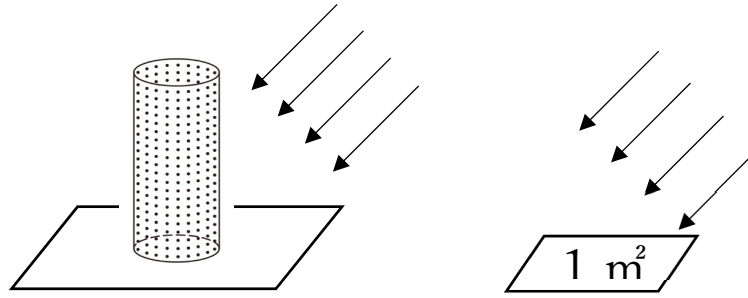


Fig. 4 CMSA の 3次元解析でのイメージ図

## 2.2 case 1

初めに case 1 として SMSA に入射するエネルギーを直接計算する方法を試みる。CMSA と違い SMSA は球体のためどこから平面波を当てても見かけの面積は変わらない。したがってエネルギー  $E_r$  は

$$E_r = \frac{(\rho_0 \omega)^2}{2\rho_0 c_0} r^2 \pi \quad (5)$$

で求めることができる。 $\rho_0$  は空気の密度、 $\omega$  は角周波数、 $c_0$  は音速である (Fig. 5)。

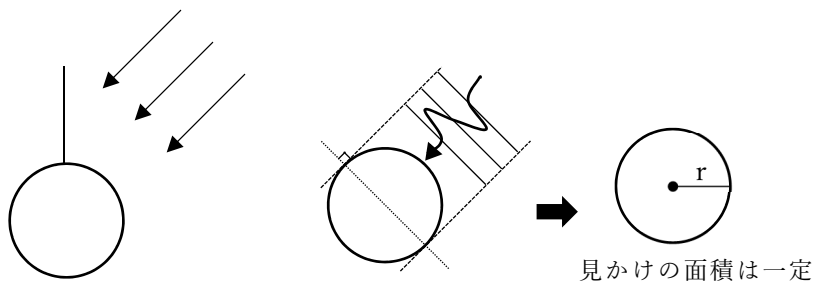


Fig. 5 case 1 イメージ図

(半径 0.152m の SMSA)

なお、本研究では既往研究[8]の SMSA (5 体配置) と SMSA(3 体配置)の実験値を真値としており、実験では SMSA を空間に吊り下げて吸音率を測定している。この実験値とプログラムによる解析結果とを 100 Hz から 5000 Hz の範囲で比較し、より実験値に近い値を求めることで SMSA の吸音率を求める計算方法を探る。

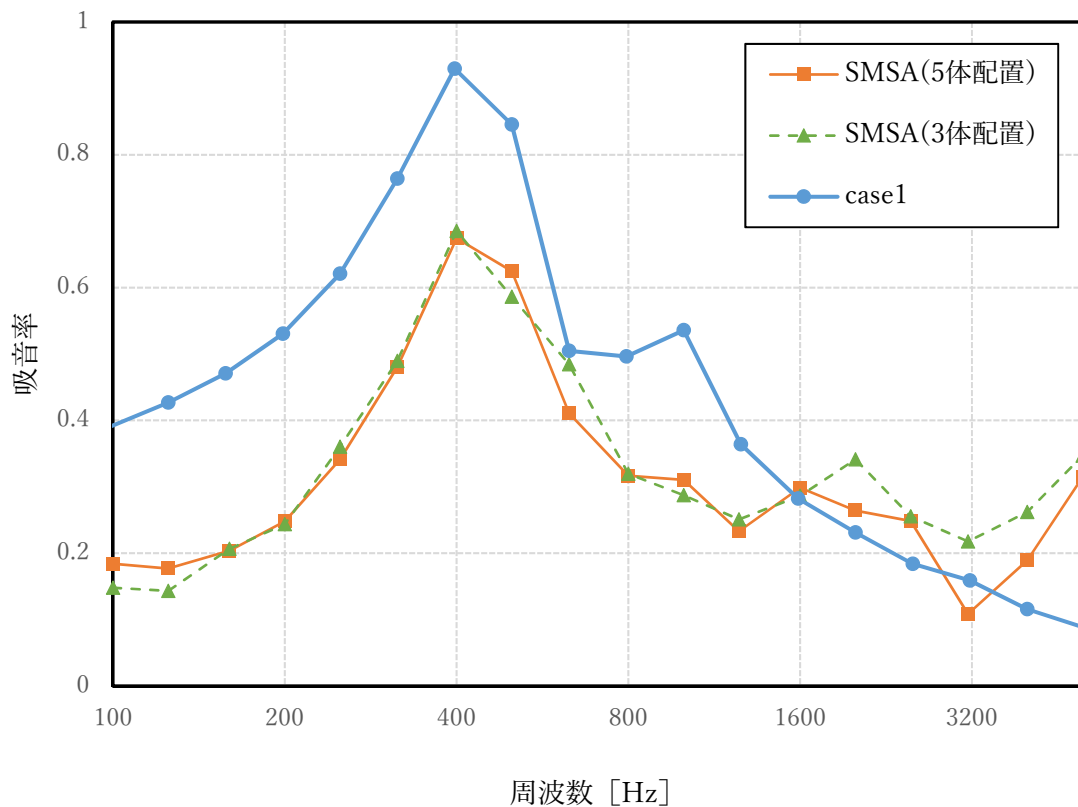


Fig.6 SMSA (5体配置) と SMSA (3体配置) の実験値と case 1 の解析結果

Fig.6 は SMSA (5体配置) と SMSA (3体配置) の実験値と case 1 による計算結果を表している。実験結果と比較するとどちらも 100 Hz から吸音率が上昇していき 400 Hz でピークを迎えその後吸音率が下がっている。グラフの形は似ているが、1600 Hz あたりまで吸音率が実験値より高い値を示している。この差異の原因はまだ検討中である。

### 2.3 case 2

次に case 2 として、既往研究[7]と同様に SMSA に振幅 1 の平面波を当てた時の消費エネルギーと、1 m<sup>2</sup>、吸音率 1 の床面に平面波を当てた時の消費エネルギーとを比較する方法を試みる (Fig. 7)。

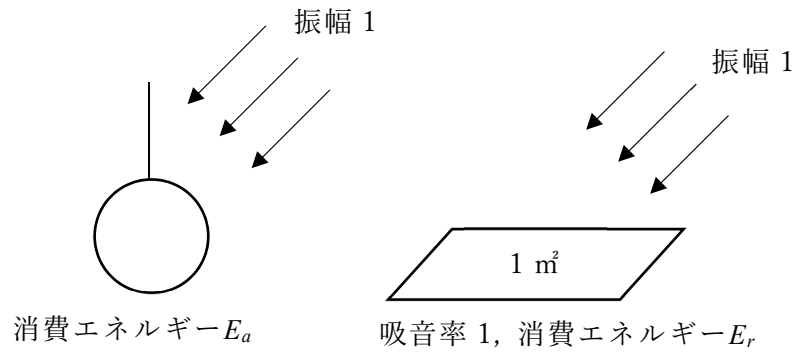


Fig. 7 case 2 イメージ図

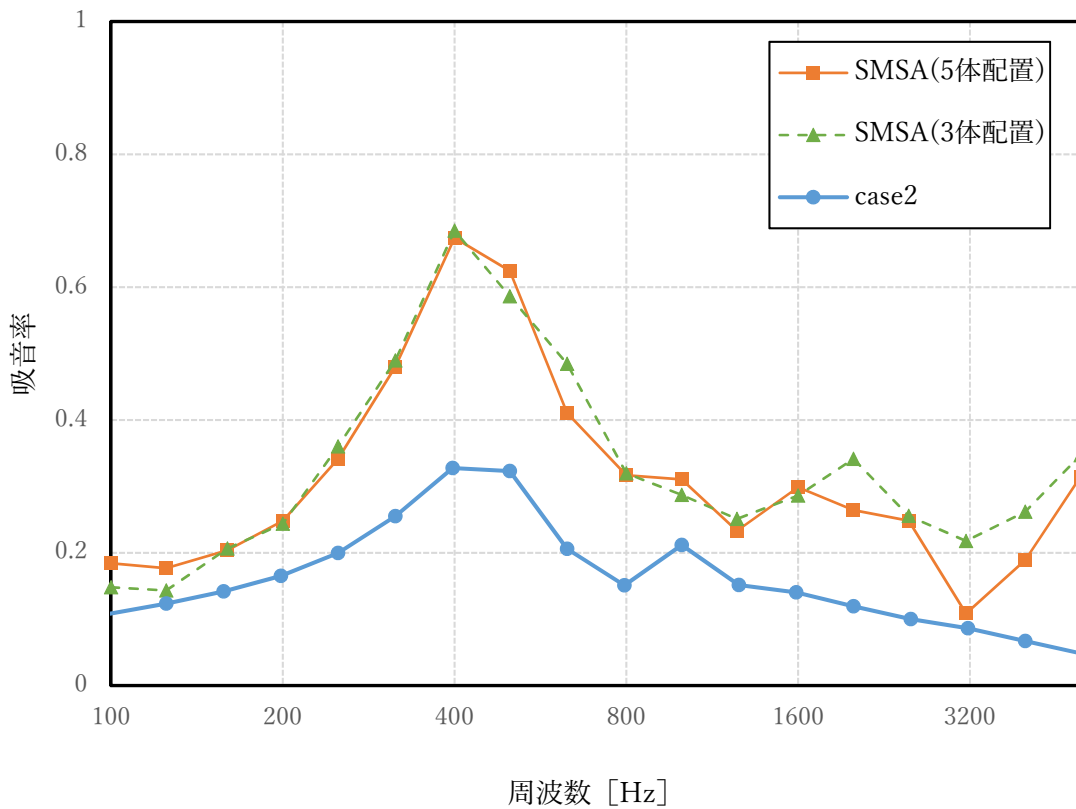


Fig. 8 SMSA (5体配置) と SMSA (3体配置) の実験値と case 2 の解析結果

Fig. 8 は SMSA (5 体配置) と SMSA (3 体配置) の実験値と case 2 の計算結果を表している。case 1 と同様にグラフの形は 400 Hz でピークを迎えその後減少傾向にあり実験値と似ている。しかし、case 2 では計算で求めた吸音率がどの周波数においても実験値を下回っている。この理由としては、この計算方法はもともと CMSA のように床においてある吸音体を想定しているが、今回は宙に浮いている SMSA を計算対象にしているため SMSA の消費エネルギーは床からの反射が考慮されていなかったことがあげられる。

## 2.4 case 3

case 3 として、基本的な計算方法は case 2 と同様にし、さらに case 2 に加えて SMSA の下に床を想定し検証する (Fig. 9)。

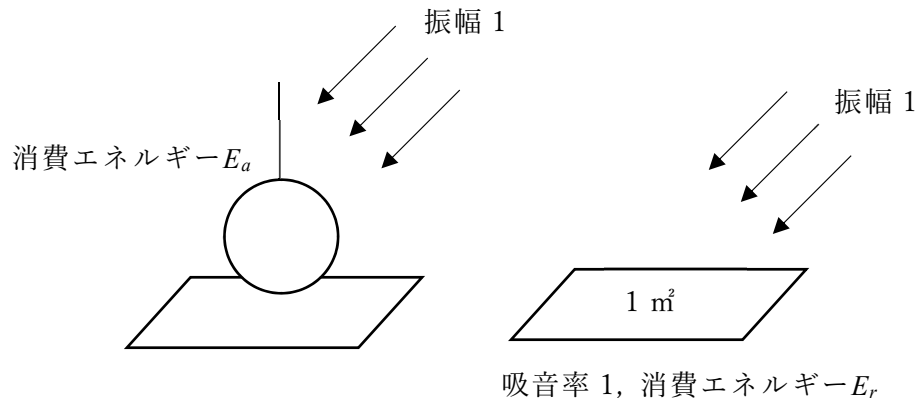


Fig. 9 case 3 イメージ図

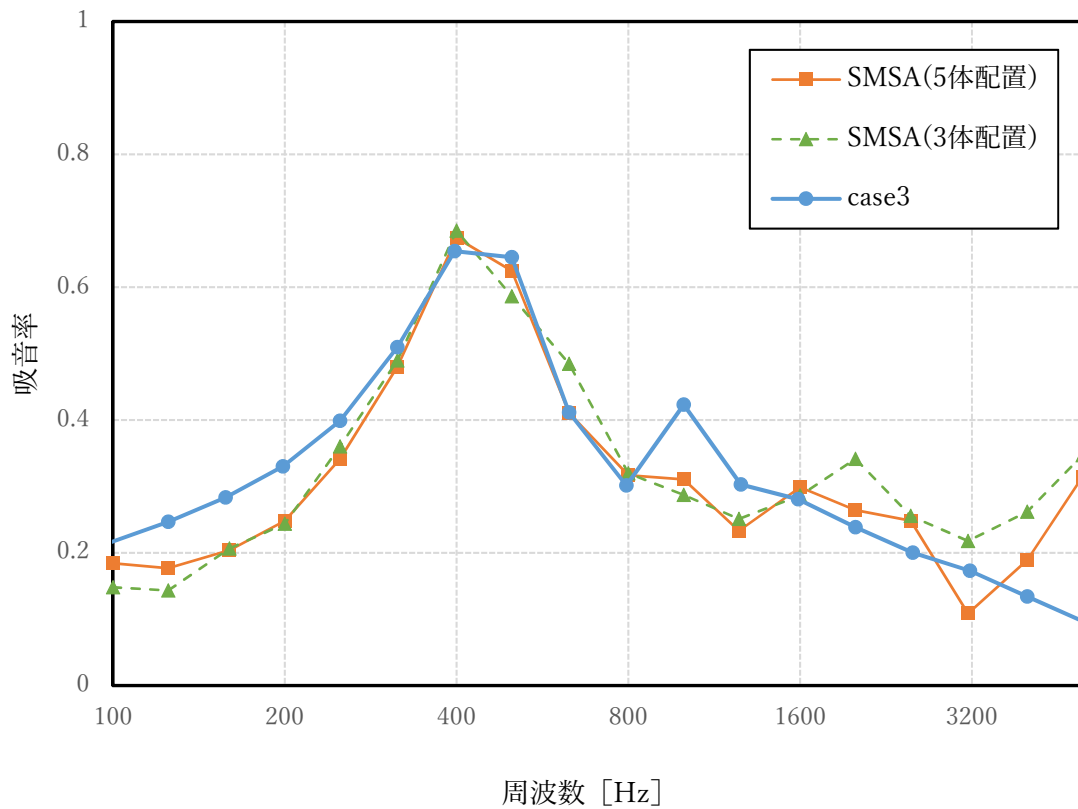


Fig. 10 SMSA (5体配置) と SMSA (3体配置) の実験値と case 3 の解析結果

Fig. 10 は SMSA (5 体配置) と SMSA (3 体配置) の実験値と case 3 の計算結果を表している。case 3 ではピークの位置など 100 Hz から 5000 Hz の範囲において実験結果とほぼ一致する。よって、この case 3 のプログラムを用いて孔径、板厚、開孔率、面密度の値を変え計算し、それぞれの条件が吸音率に与える影響の傾向を掴む。

### 第3章 各条件における結果と考察

実験[8]で用いたパラメータを本研究の基準値とする。各条件において基準値の0.25倍、0.5倍、2倍、4倍での吸音率を100 Hzから5000 Hzの範囲で求める。ただしその他の条件は基準値を用いる。基準値はそれぞれ孔径0.5 mm、板厚0.5 mm、開孔率0.785%、面密度0.6 kg/m<sup>2</sup>である。

#### 3.1 孔径

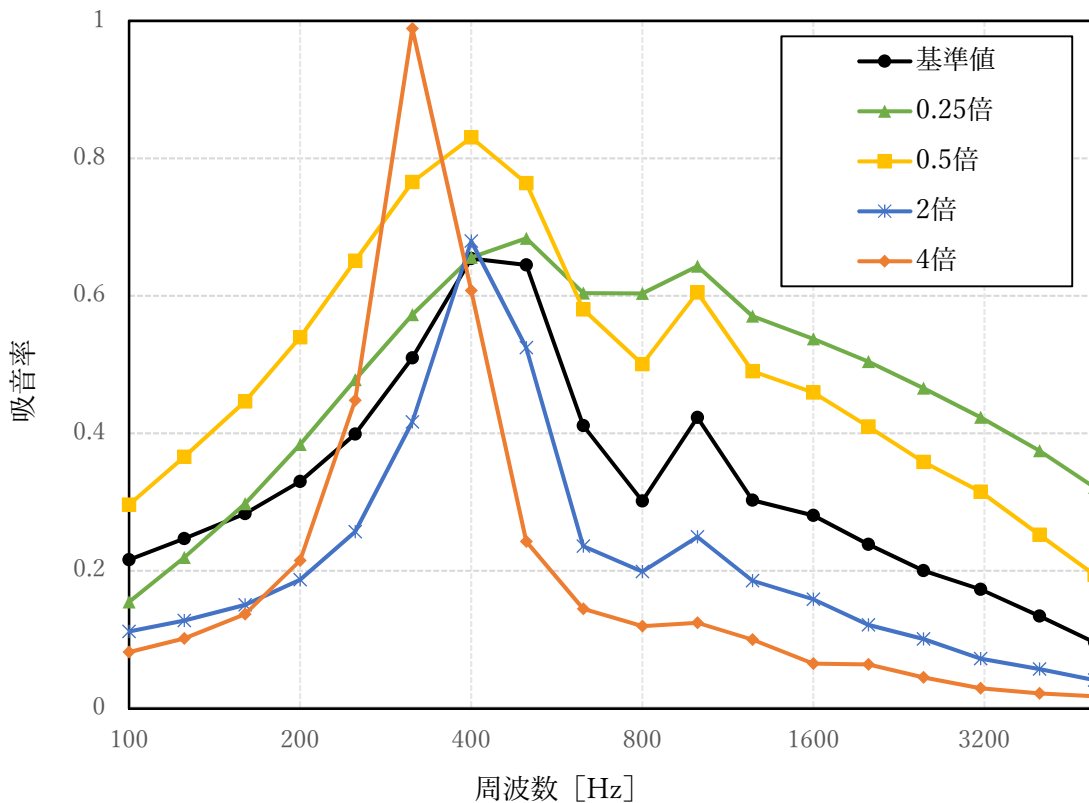


Fig. 11 孔径の基準値と0.25倍、0.5倍、2倍、4倍の解析結果

Fig. 11は孔径の基準値0.5 mmと孔径を0.25倍、0.5倍、2倍、4倍にして計算した時の結果を表している。0.25倍では基準値と比べピークを迎えた後の吸音率の減少が少ないことがわかる。0.5倍ではグラフの形はほぼ同じであるが、解析した周波数の範囲においては基準値より吸音率が0.1程度高くなっている。2倍ではピークは基準値と同じだがそ

れ以外は吸音率が低くなっている。4 倍ではピークの吸音率が一番高いが、ピーク以外が他と比べると低く吸音できる音域が狭くなっている。

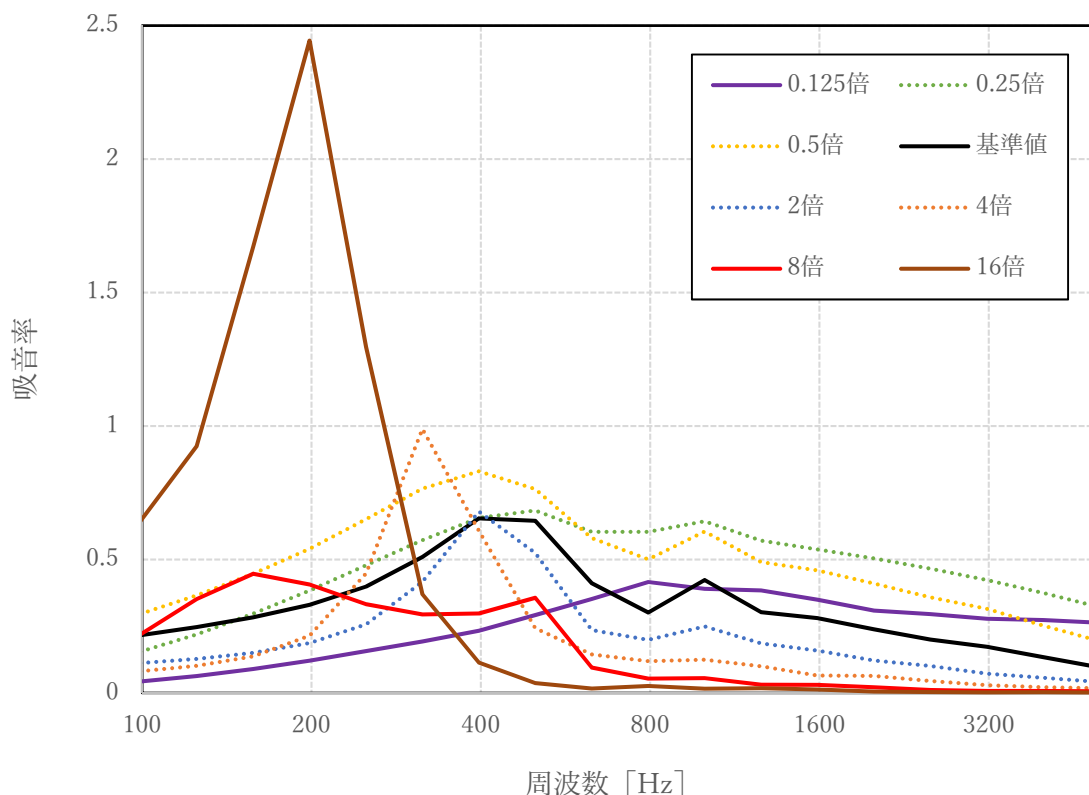


Fig. 12 孔径の基準値と 0.125 倍、0.25 倍、0.5 倍、2 倍、4 倍、8 倍、16 倍の解析結果

Fig. 12 は Fig. 11 だけでは傾向が読み取れなかったため Fig. 11 に加えて基準値の 0.125 倍、8 倍、16 倍を計算しその結果を表している。0.125 倍では全体として低い吸音率を示しているが 800 Hz からの減少が一番少ない。8 倍では 4 倍と比べピークも低く全体的に低い吸音率を示している。16 倍ではピーク時の吸音率が面積効果の影響で 1 を超えており、非常に高い吸音率を示している。また他と比べてピークが来るのも早く低音域の吸音に優れている。しかし、ピーク後は大きく減少し 400 Hz あたりからはとても低い吸音率となっている。全体の傾向としては、グラフの形に多少ばらつきがあるが、孔径が大き



なるほど低音域側の吸音率が優れ、孔径が小さくなるほど中高音域にかけての吸音率の減少が少ない。この原因としては、高音域の音は直進性が強く、小さい孔を透過しやすい特性があるため、その他の孔径より高音域へ向けての吸音率の減少が少なくなっていると考えられる。グラフの形にばらつきが見られたのは、孔径を変えることで抵抗が変わるなどほかの条件にも影響が出てしまうためこのような結果が出たのではないかと考えられる。

### 3.2 板厚

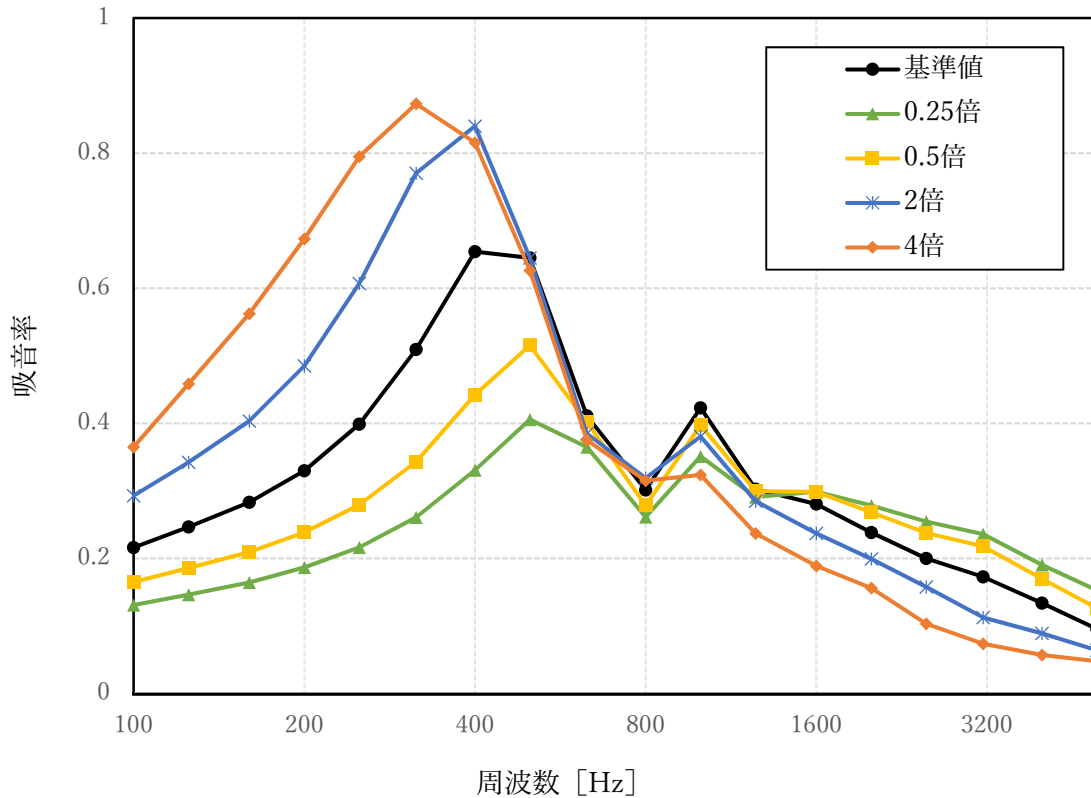


Fig. 13 板厚の基準値と 0.25 倍、0.5 倍、2 倍、4 倍の解析結果

Fig. 13 は板厚の基準値 0.5 mm と板厚を 0.25 倍、0.5 倍、2 倍、4 倍にして計算した時の結果を表している。100 Hz から 800 Hz までは板厚が大きいほど吸音率が高くなる傾向にある。しかし、800 Hz を境に板厚が小さいほうが吸音率が高くなる。多孔質吸音材では板厚が増すと中低音域の吸音率が増加することが分かっている。これは SMSA でも同じことが言えるのではないかと考える。

### 3.3 開孔率

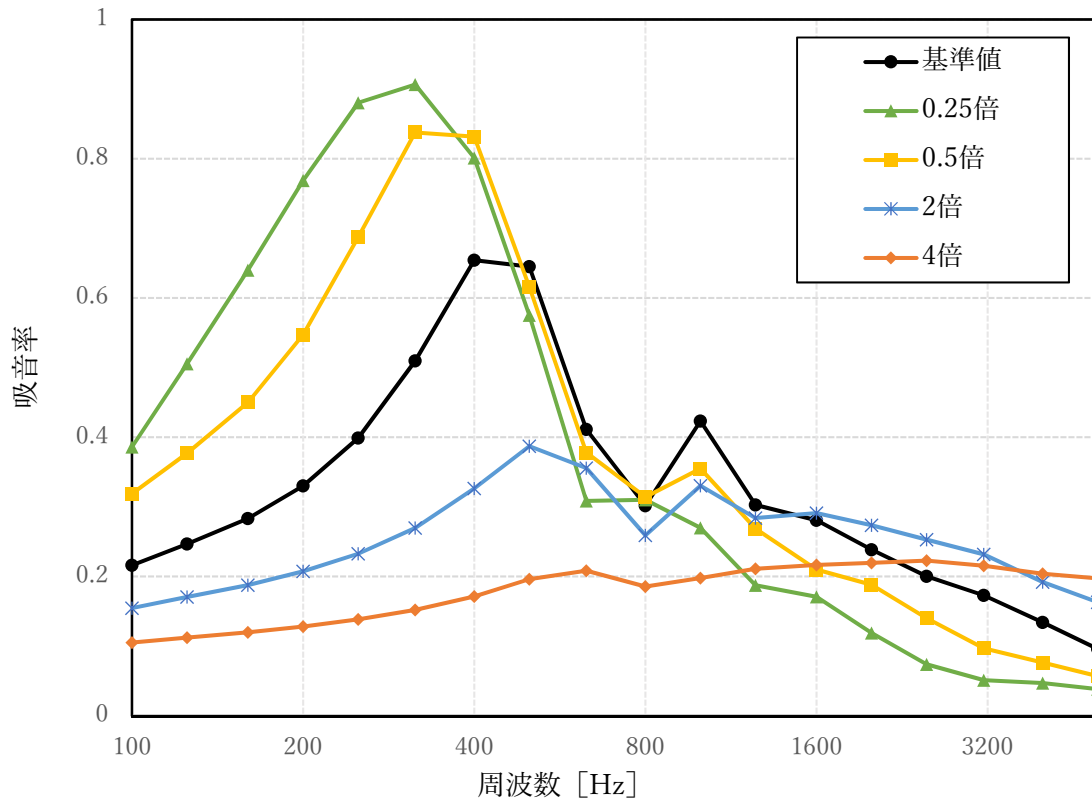


Fig. 14 開孔率の基準値と 0.25 倍、0.5 倍、2 倍、4 倍の解析結果

Fig. 14 は開孔率の基準値 0.785%と開孔率を 0.25 倍、0.5 倍、2 倍、4 倍にして計算した時の結果を表している。100 Hz から 800 Hz までは開孔率が低いほど吸音率が高い傾向にあるが、高音域になるにつれて開孔率が高いほど吸音率が高くなる。また開孔率が高くなるにつれて吸音率のピークが高音域側にずれ、さらにグラフの傾きがなだらかになっている。これは孔径と同様に高音域の音の直進性の強さに原因があると考えられる。

### 3.4 面密度

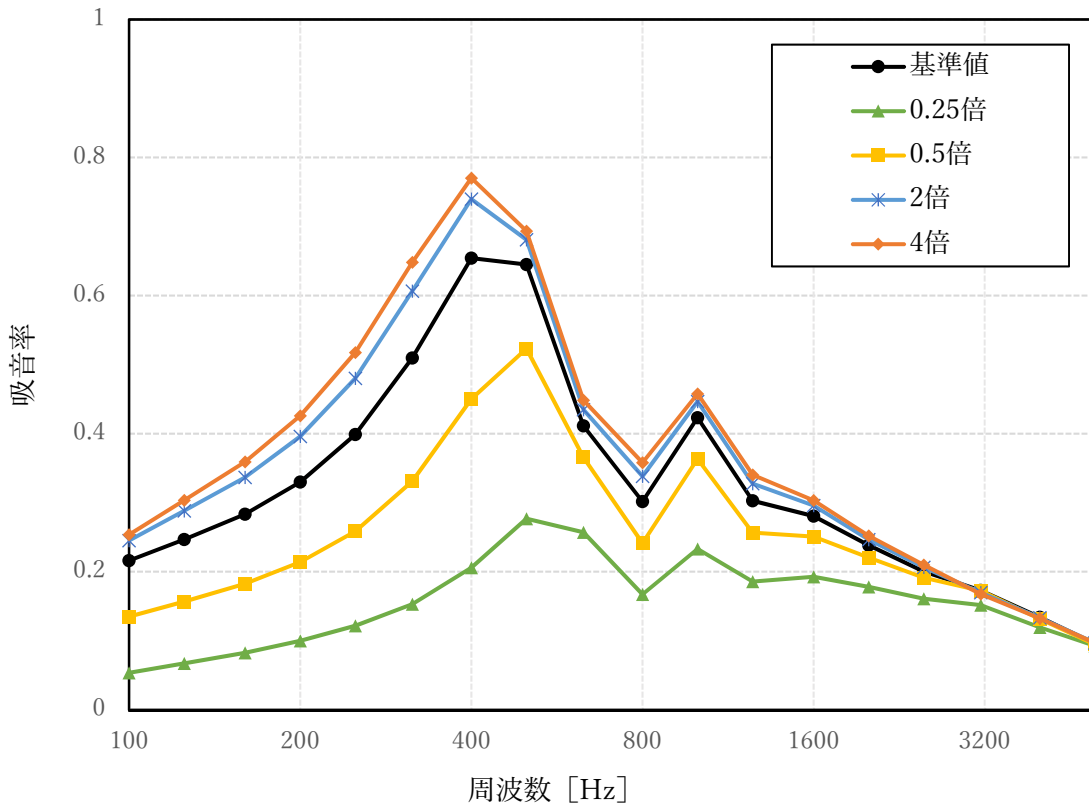


Fig. 15 面密度の基準値と 0.25 倍、0.5 倍、2 倍、4 倍の解析結果

Fig. 15 は面密度の基準値  $0.6 \text{ kg/m}^2$  と面密度を 0.25 倍、0.5 倍、2 倍、4 倍にして計算した時の結果を表している。どの面密度でもグラフの形に大きな差は見られないが、高音域になるにつれて吸音率の差は小さくなっている。解析した周波数の範囲においては面密度が高いほど吸音率が高い傾向にある。また、2 倍と 4 倍では他の面密度と比べ大きな差は見られない。

## 第4章 SMSA 最適化の結果と考察

孔径、板厚、開孔率、面密度の4パラメータの傾向からそれぞれを組み合わせてSMSAの最適化を考える。今回は、1回の解析で2つのパラメータを変え、残りの2つのパラメータは基準値を用いることとする。まず条件を変えるパラメータを第3章のグラフを元に考える。孔径はそれぞれのグラフの形に特徴があったため、ピーク後の減少が少ない0.25倍、基準値より全体的に吸音率が高い0.5倍、ピークが一番高い4倍の3つを解析に用いる。この3つの孔径に対して、孔径と板厚を変える、孔径と開孔率を変える、孔径と面密度を変える組み合わせを考える。なお、板厚、開孔率、面密度はそれぞれ一番吸音率が高い値を示したもので、板厚は4倍、開孔率は0.25倍、面密度は4倍を用いる。さらに板厚4倍と開孔率0.25倍、板厚4倍と面密度4倍、開孔率0.25倍と面密度4倍の組み合わせも解析する。解析結果のグラフには、第3章で行ったパラメータ1つを変更した結果を破線で、第4章で行うパラメータ2つを変更した結果を実線で表すこととする。

### 4.1 孔径 0.25 倍での解析結果

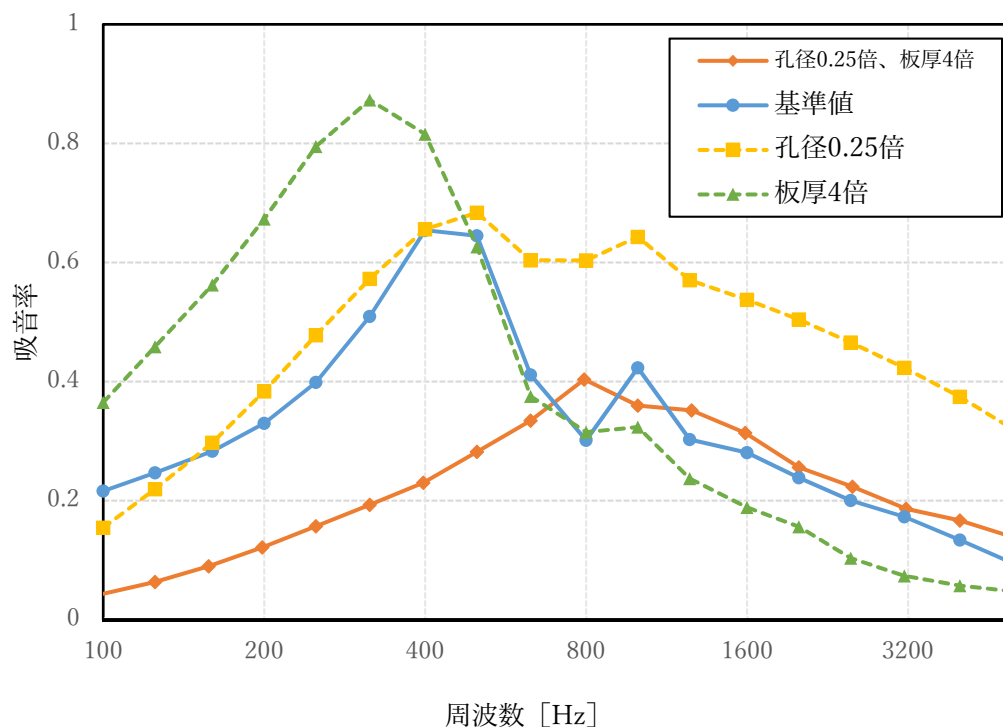


Fig. 16 孔径 0.25 倍、板厚 4 倍の解析結果

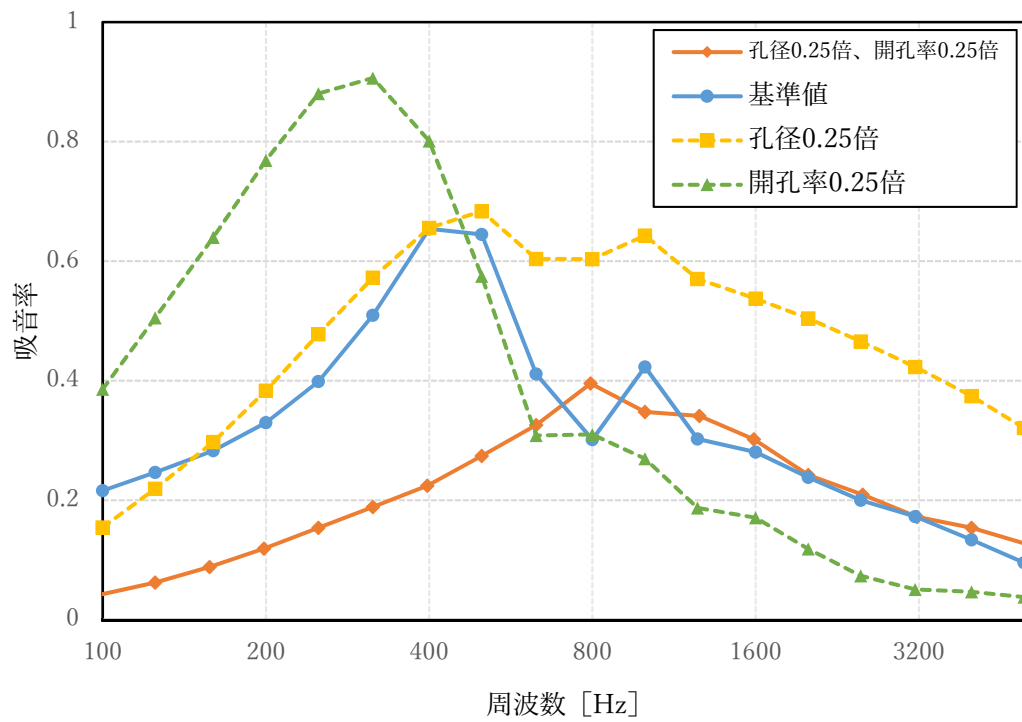


Fig. 17 孔径 0.25 倍、開孔率 0.25 倍の解析結果

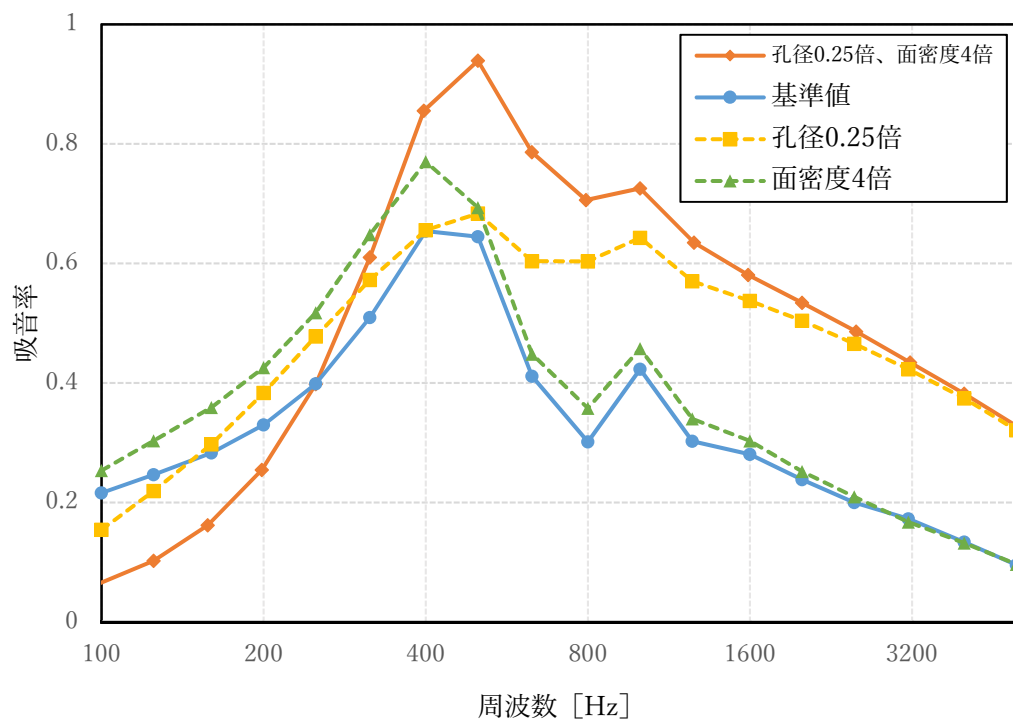


Fig. 18 孔径 0.25 倍、面密度 4 倍の解析結果

Fig. 16 は基準値から孔径を 0.25 倍にした時、板厚を 4 倍にした時、孔径を 0.25 倍かつ板厚を 4 倍で計算した時の結果、Fig. 17 は孔径を 0.25 倍にした時、開孔率を 0.25 倍にした時、孔径を 0.25 倍かつ開孔率を 0.25 倍で計算した時の結果、Fig. 18 は孔径を 0.25 倍にした時、面密度を 4 倍にした時、孔径を 0.25 倍かつ面密度を 4 倍で計算した時の結果を表している。板厚 4 倍との組み合わせ、開孔率 0.25 倍との組み合わせともに、低音域での吸音率が著しく減少し、いい結果は得られなかった。面密度 4 倍との組み合わせでは、低音域の減少も見られず、またピークも高く高音域側の吸音率も基準値より高くなっている。孔径 0.25 倍はピーク後の減少が少ないため、板厚、開孔率、面密度でみられる高音域にかけての吸音率の減少を抑えられるのではないかと思ったが、結果、面密度 4 倍との組み合わせのみがその効果を得られた。

## 4.2 孔径 0.5 倍での解析結果

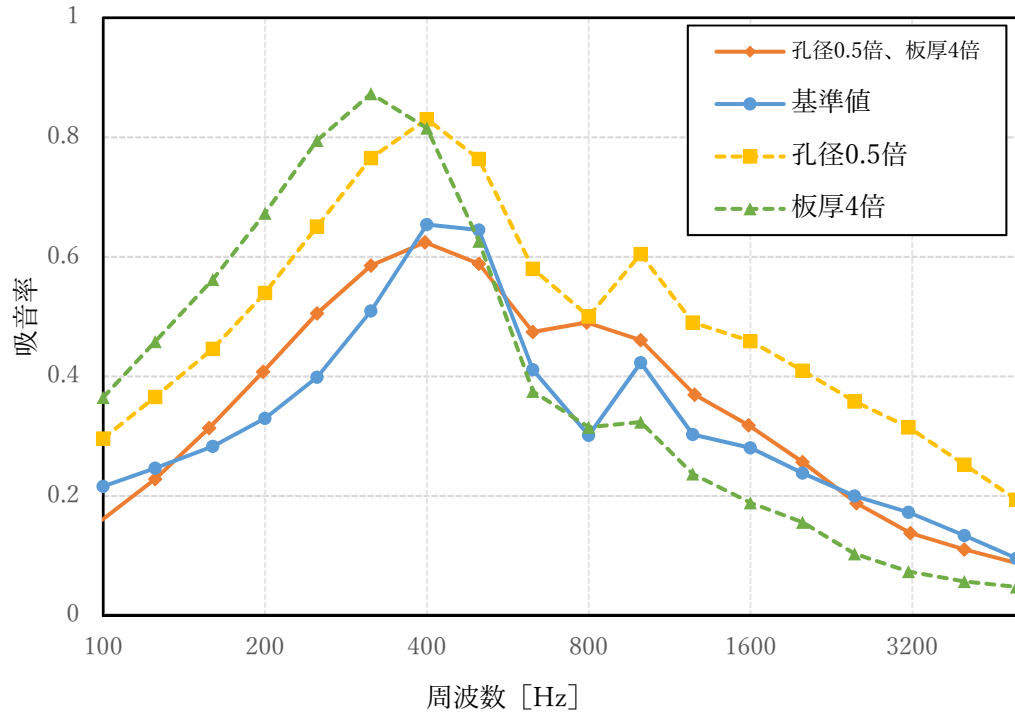


Fig. 19 孔径 0.5 倍、板厚 4 倍の解析結果

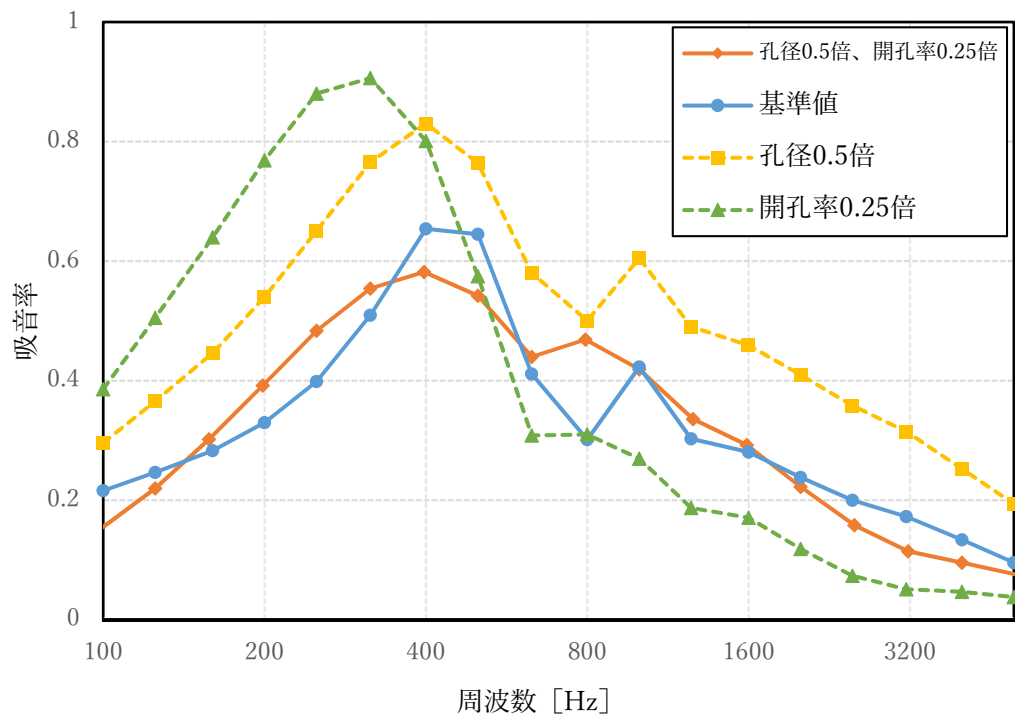


Fig. 20 孔径 0.5 倍、開孔率 0.25 倍の解析結果



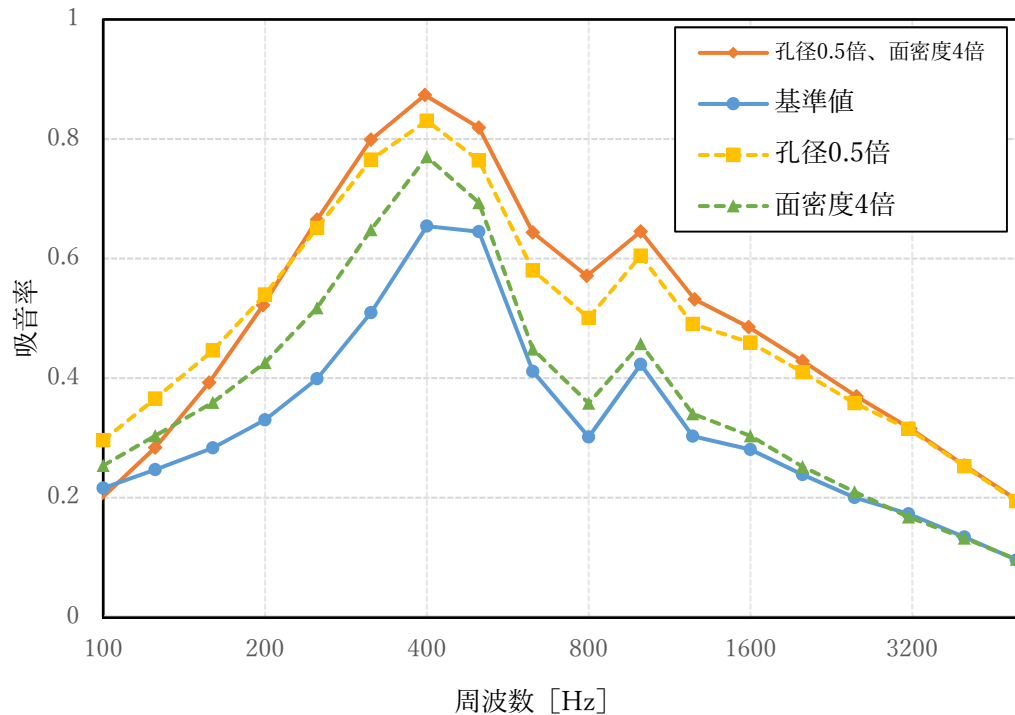


Fig. 21 孔径 0.5 倍、面密度 4 倍の解析結果

Fig. 19 は基準値から孔径を 0.5 倍にした時、板厚を 4 倍にした時、孔径を 0.5 倍かつ板厚を 4 倍で計算した時の結果、Fig. 20 は孔径を 0.5 倍にした時、開孔率を 0.25 倍にした時、孔径を 0.5 倍かつ開孔率を 0.25 倍で計算した時の結果、Fig. 21 は孔径を 0.5 倍にした時、面密度を 4 倍にした時、孔径を 0.5 倍かつ面密度を 4 倍で計算した時の結果を表している。孔径 0.5 倍では板厚、開孔率との組み合わせは基準値とほぼ変わらない結果であるが、元のグラフと比べ低音域側の吸音率が低下している。面密度との組み合わせでは全体的に基準値を超えている。しかし、どの条件においても Fig. 11 にあるように孔径のみを 0.5 倍した時の方が高い吸音率を示している。

### 4.3 孔径 4 倍での解析結果

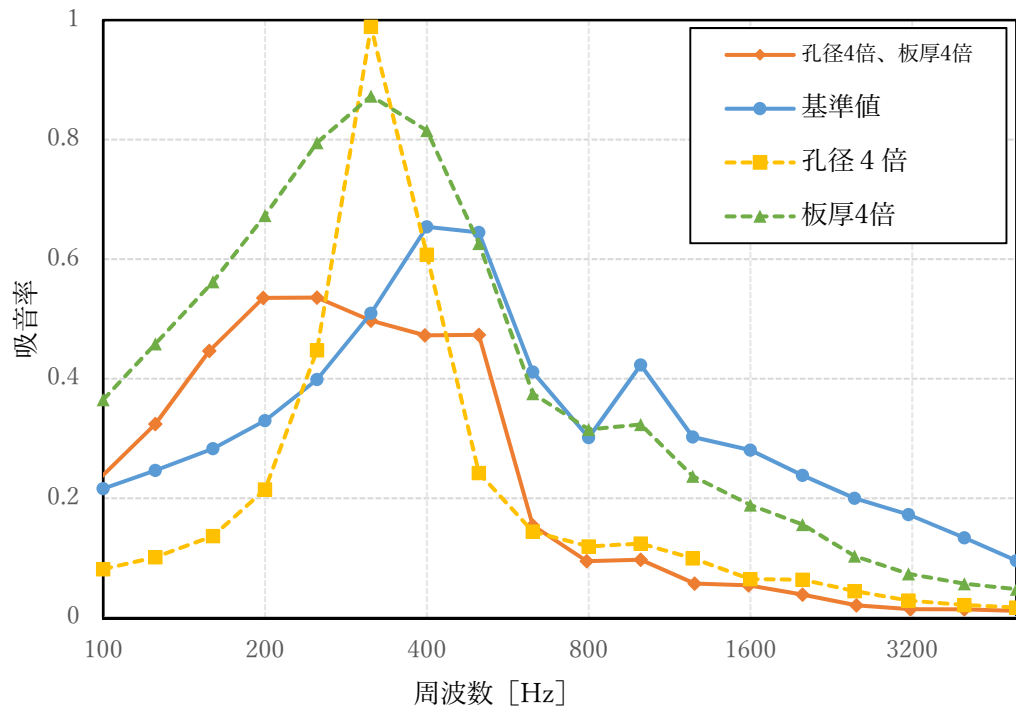


Fig. 22 孔径 4 倍、板厚 4 倍の解析結果

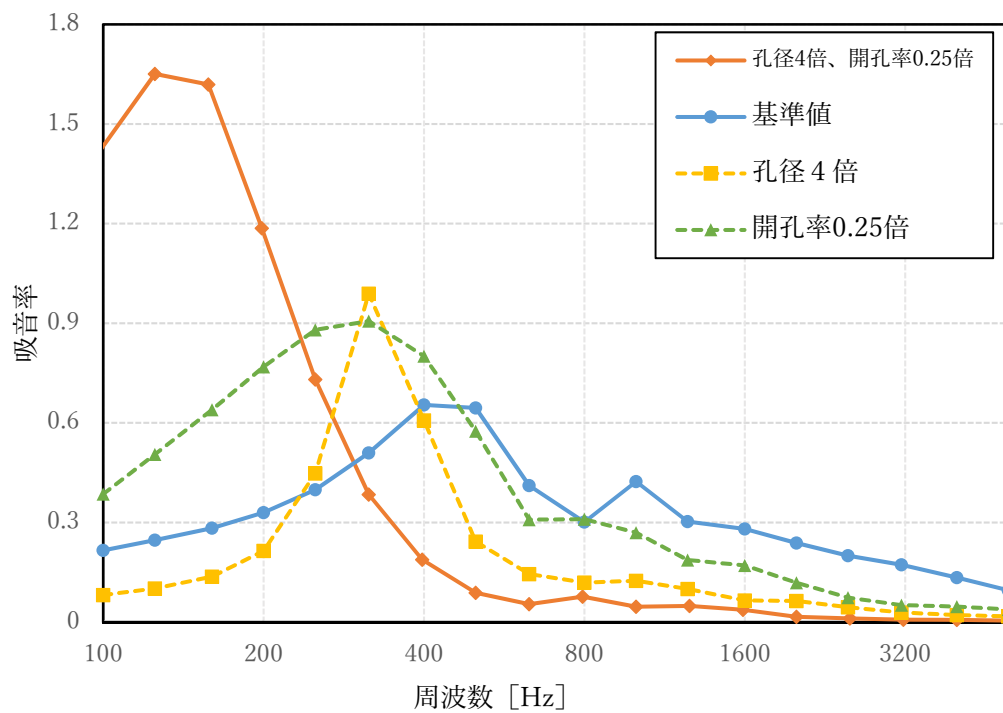


Fig. 23 孔径 4 倍、開孔率 0.25 倍の解析結果

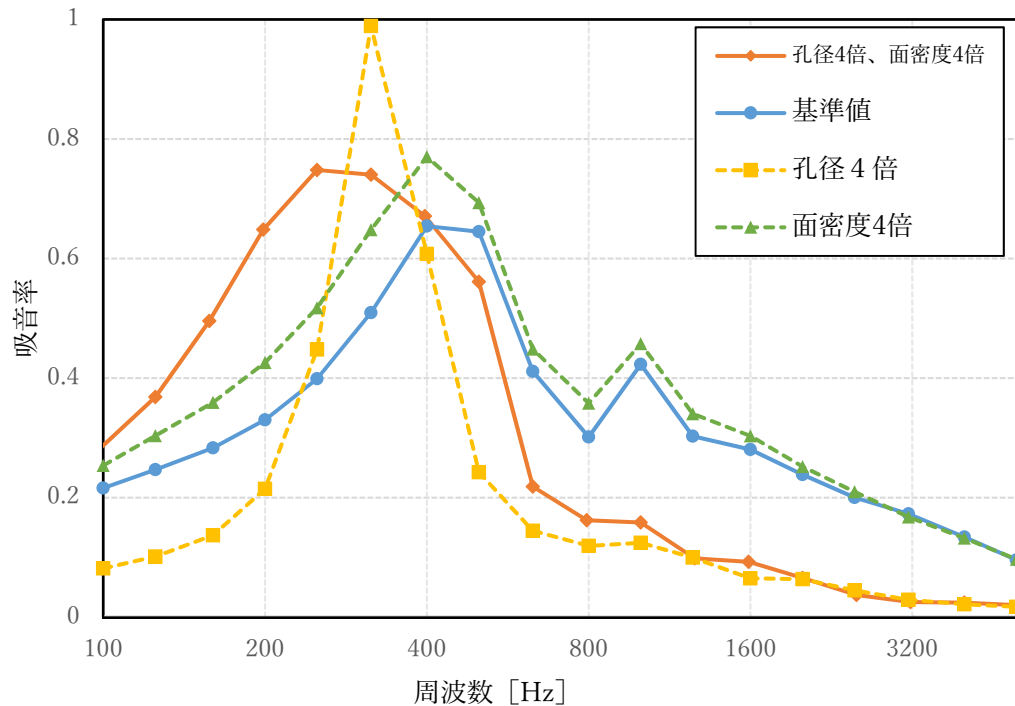


Fig. 24 孔径 4 倍、面密度 4 倍の解析結果

Fig. 22 は基準値から孔径を 4 倍にした時、板厚を 4 倍にした時、孔径を 4 倍かつ板厚を 4 倍で計算した時の結果、Fig. 23 は孔径を 4 倍にした時、開孔率を 0.25 倍にした時、孔径を 4 倍かつ開孔率を 0.25 倍で計算した時の結果、Fig. 24 は孔径を 4 倍にした時、面密度を 4 倍にした時、孔径を 4 倍かつ面密度を 4 倍で計算した時の結果を表している。孔径 4 倍ではピーク時の吸音率が高いためピーク時の吸音率上昇を期待したが、板厚との組み合わせではピーク時の吸音率が著しく低下し全体的にも吸音率が低い。開孔率との組み合わせでは、吸音率のピークが早くまた高い数値を示しており、低音域において優れた吸音率となっている。しかし、中高音域にかけて吸音率が非常に低い。全体として孔径 4 倍の高音域側の吸音率の低さがそのまま残っている。

#### 4.4 その他の解析結果

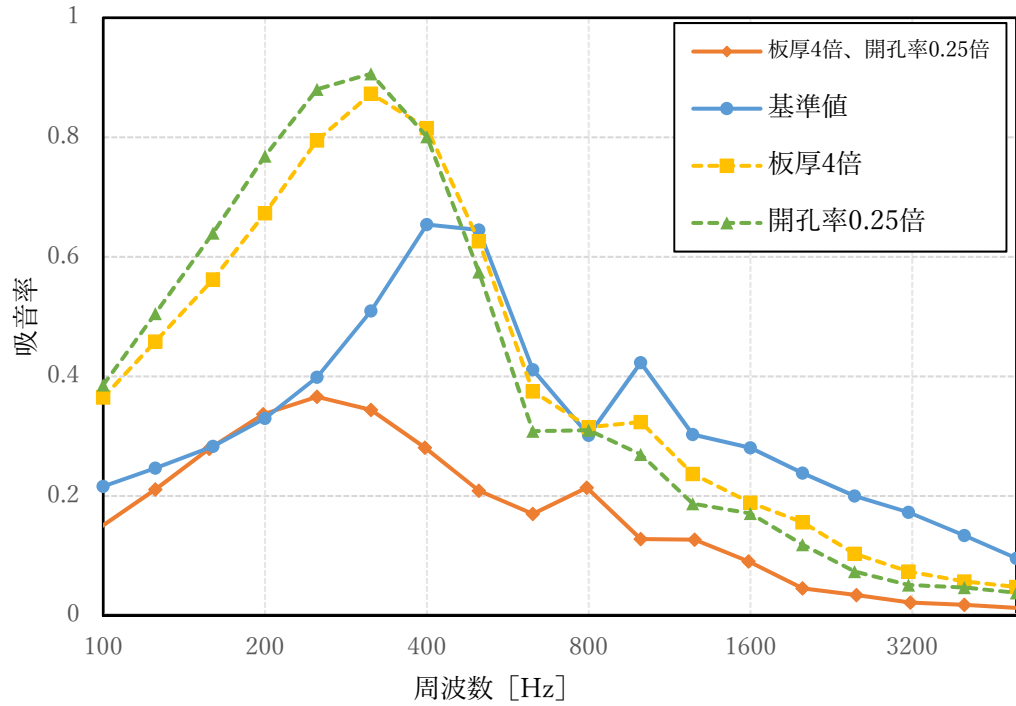


Fig. 25 板厚 4 倍、開孔率 0.25 倍の解析結果

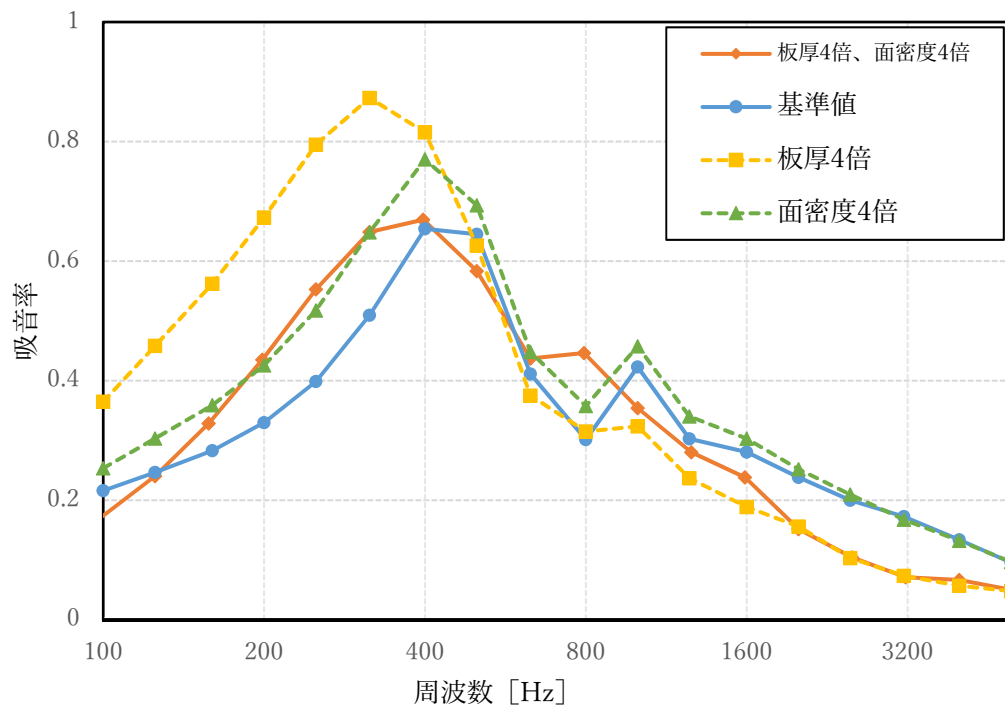


Fig. 26 板厚 4 倍、面密度 4 倍の解析結果

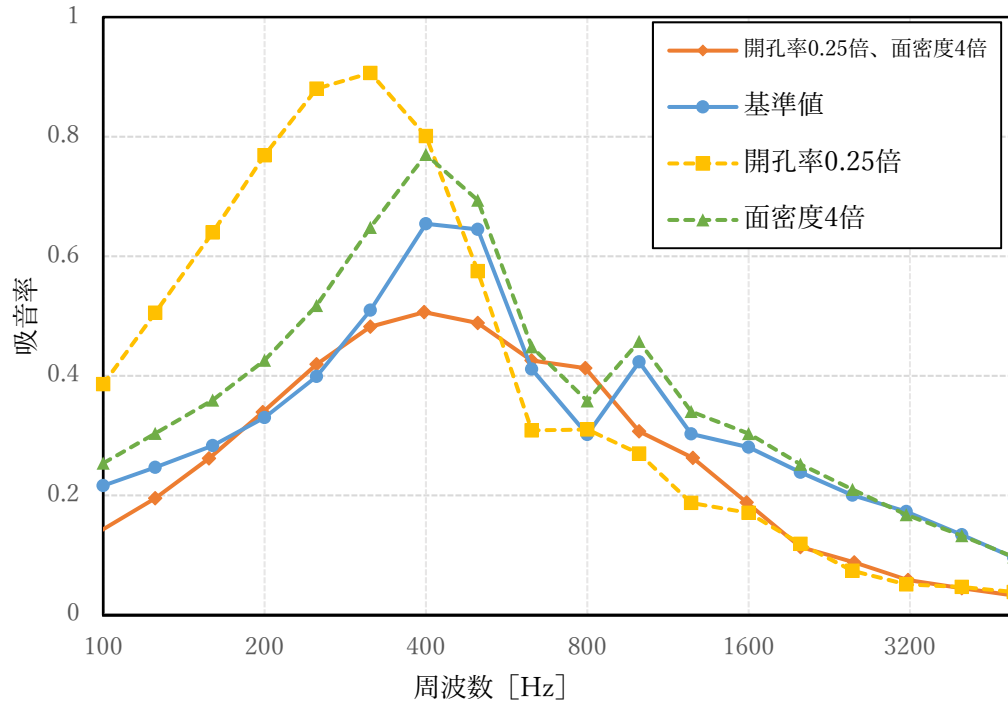


Fig. 27 開孔率 0.25 倍、面密度 4 倍の解析結果

Fig. 25 は基準値から板厚を 4 倍にした時、開孔率を 0.25 倍にした時、板厚を 4 倍かつ開孔率を 0.25 倍で計算した時の結果、Fig. 26 は板厚を 4 倍にした時、面密度を 4 倍にした時、板厚を 4 倍かつ面密度を 4 倍で計算した時の結果、Fig. 27 は開孔率を 0.25 倍にした時、面密度を 4 倍にした時、開孔率を 0.25 倍かつ面密度を 4 倍で計算した時の結果を表している。板厚と開孔率の組み合わせでは全体的に吸音率が低い。板厚と面密度、開孔率と面密度の組み合わせではどちらも基準値とほぼ変わらない数値を示しているが、全体的に元のグラフより吸音率が低くなっている

## 第5章 総括

本研究では、SMSA の孔径、板厚、開孔率、面密度の 4 つの条件が吸音率に及ぼす影響の傾向を掴み、それらの条件を組み合わせることで SMSA の最適化を目的とした。結果として、孔径は大きくなるほど低音域側の吸音率が高くなり、小さくなるほど中高音域にかけての吸音率の減少が少ないことが分かった。しかし、それぞれの条件は単体ではなく関連付けて考えなければならないため、グラフの形に大きくばらつきが出た。板厚は厚くなるほど、開孔率は小さくなるほど、低音域側の吸音率が高くなるが、中高音域にかけての吸音率の減少が大きくなってしまう。面密度は 100 Hz から 5000 Hz の間においては面密度が高いほうが吸音率が高いということが分かった。これらを組み合わせ SMSA の最適化を目指したが、単純な足し算ではなく 2 条件を変えると吸音率が複雑に変化するため大きな吸音率上昇にはつながらなかった。今後は、今回わかったそれぞれの条件における傾向と組み合わせた時の傾向から SMSA 最適化、さらには実際に SMSA 使用時の環境を想定し、その用途に適した周波数での吸音率上昇を検討する必要があると考えられる。

## 参考文献

- [1] Maa DY. Theory and design of microperforated panel sound-absorbing constructions. *Sci Sin* (1975) 17:55-71.
- [2] Sakagami K, Morimoto M, Koike W. A numerical study of double-leaf microperforated panel absorbers. *Appl Acoust* (2006) 67:609-19.
- [3] Nakamori T, Morimoto M, Yairi M. Double-leaf microperforated panel space absorbers: a revised theory and analysis. *Appl Acoust* (2009) 70:703-9.
- [4] Sakagami K, Yairi M, Morimoto M. Multiple-leaf sound absorbers with microperforated panels: an overview. *Acoust Australia* (2010) 38:64-9.
- [5] Sakagami K, Oshitani T, Yairi M, Toyoda E, Morimoto M. An experimental study on a cylindrical microperforated panel space sound absorber. *Noise Control Eng J* (2012) 60:22-8.
- [6] Sakagami K, Yairi M, Toyoda E, Toyoda M. An experimental study on the sound absorption of three-dimensional MPP space sound absorbers: rectangular MPP space sound absorbers (RMSA). *Acoust Australia* (2013) 41:156-9.
- [7] 濱口 修一、 立体型 MPP 空間吸音体の特性予測、関西大学卒業論文 (2017)
- [8] Sakagami K, Kusaka M, Okuzono T, Kido S, Yamaguchi D. Diffuse-field sound characteristics of a spherical-MPP space absorber.

## 謝辞

最後に、本研究を進めるにあたりご指導・ご鞭撻頂きました豊田政弘准教授、河井康人教授にこの場をお借り致しまして心より深く御礼申し上げます。有難うございました。