

複層吸音材の最適化に関する研究

関西大学
環境都市工学部 建築学科
建築環境工学第一研究室
建 08-88 山口 智弥
指導教官 豊田 政弘 助教

目次

1	序論	3
1.1	研究背景	3
1.2	研究目的	4
2	数値解析方法	5
2.1	吸音材モデル Miki モデル	5
2.2	吸音率計算方法 伝達マトリクス法	6
3	吸音性能評価法	11
3.1	平均吸音率を用いた手法	11
3.2	目的関数を用いた手法	11
3.3	標準偏差を用いた手法	12
4	条件設定	13
5	評価結果	14
5.1	平均吸音率を用いた手法	14
5.1.1	一種類の吸音材を使用した場合 と 複層吸音材を使用した場合	14
5.1.2	考察	18
5.2	目的関数を用いた手法	19
5.2.1	一種類の吸音材を使用した場合 と 複層吸音材を使用した場合	19
5.2.2	考察	28
5.3	標準偏差	29
5.3.1	一種類の吸音材を使用した場合 と 複層吸音材を使用した場合	29
5.3.2	考察	32
6	総括	33
7	参考文献	34
8	謝辞	35

1 序論

1. 1 研究背景

防音対策として吸音材を施工する場合、多くの場合吸音材を設置できる厚さが決められており設計者はどこにどの材料を適用するかを選定することになる。吸音材の構造にはいくつか種類がありその代表的構造といえるものが繊維材料などの多孔質構造である。

広い周波数領域で高い吸音率が求められるときに用いられる吸音材が多孔質構造の吸音材である。板振動構造や共鳴器型構造などの他の吸音構造に比べ、広い周波数領域で高い吸音率が得られる。とくに多孔質構造の代表格でもあるグラスウールはその断熱性能も相まって、多くの建築で採用されている。

この吸音材の特徴として、単純に吸音材の厚みを増すことで、その吸音性能を高めることができる、すなわち吸音率を上昇させることができることである。全周波数領域で吸音率は上昇し、低周波数領域においても吸音率を高めることができる。しかし吸音率が上昇する一方で、吸音材の厚みが増す分、場所を多くとってしまうという弊害を生む。

ゆえに省スペースの観点から、吸音材の厚みを縮小する取り組みが行われてきた。さらに一方で、吸音材の流れ抵抗を大きくして吸音率を大きくしようとした場合、音が吸音材内部に誘導されずに表面で反射されてしまうために、かえって吸音率が低下してしまうという問題点もある。

吸音材の厚さ縮小の取り組みには、吸音材を複層にしてその吸音性能を高めようとするものがある。異なる素材を積み重ね吸音材を作成した結果、吸音率に変化が起こることが分かった。

1. 2 研究目的

先行研究から吸音材を複層にすることで、吸音率に何らかの変化が生まれることが分かった[1]。さらに吸音率等の性質が異なる素材を組み合わせることで、その変化を生み出すことが出来るということが分かった。

本研究では、積層構造、複層構造からのアプローチにより、吸音性能を高めることを目的とする。また、積層構造にすることで、吸音率に単体の吸音材では起こらないような変化を持たせ、さまざまな環境に対応できるような吸音材を作ることを目的とする。

2 数値解析方法

本研究では吸音材モデルとして Miki モデル[2]を、吸音率計算手法として伝達マトリクス法を用いた。

2.1 吸音材モデル Miki モデル

吸音材のうち繊維材料に関しては、主として流れ抵抗が音響特性を支配する。本研究で扱う吸音材モデルは、流れ抵抗によって音響特性を表現できる Miki モデルでありこの関係式から吸音特性を求める。

吸音材内部を伝搬する音波の音響特性は音響特性インピーダンス z [$\text{kg}/\text{m}^2\text{s}$] と複素伝搬定数 γ [m^{-1}] で表される。音響特性インピーダンスとは、吸音材内部を伝搬する音波の圧力と空気粒子速度の比を、複素伝搬定数とは音波の伝搬速度と減衰の程度を示すもので、どちらも複素数で周波数の関数として表される。

音響特性インピーダンス z と複素伝搬定数 γ は吸音材の流れ抵抗を R [Ns/m^4] として

$$\gamma = k_0 \left[0.16 \left\{ \frac{R}{f} \right\}^{0.618} - i \left\{ 1 + 0.109 \left(\frac{R}{f} \right)^{0.618} \right\} \right] \quad (1)$$

$$z = \rho_0 c_0 \left\{ 1 + 0.07 \left(\frac{R}{f} \right)^{0.632} + 0.107i \left(\frac{R}{f} \right)^{0.632} \right\} \quad (2)$$

と表される。この吸音材モデルは Miki モデルとして用いられている。

このとき、 $k_0 = \omega/c_0$ とする。

ここで、 k_0 は波数、 ρ_0 [kg/m^3] は空気の密度、 c_0 [m/s] は空気の音速、 $\omega = 2\pi f$ [rad/s] は角周波数、 f [Hz] は周波数、 i は虚数単位である。

2. 2 吸音率計算方法 伝達マトリクス法

伝達マトリクス法は多層積層構造物の吸音率や透過損失の計算手法として広く用いられている手法である。

伝達マトリクス法では、図 2.1 に示すような積層構造において、音源側の音圧を p_0 [N/m²]、および気体粒子速度を v_0 [m/s]、壁面の音圧を p_n 、および気体粒子速度を v_n とすると以下のように表される。

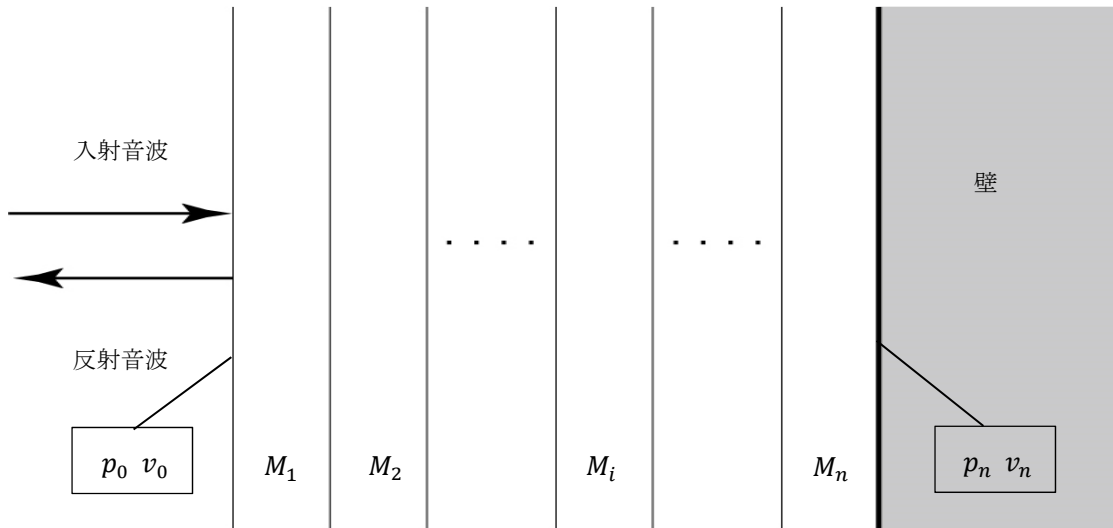


図 2.1 複層吸音材モデル

まず、この構造が一層の場合から考える。

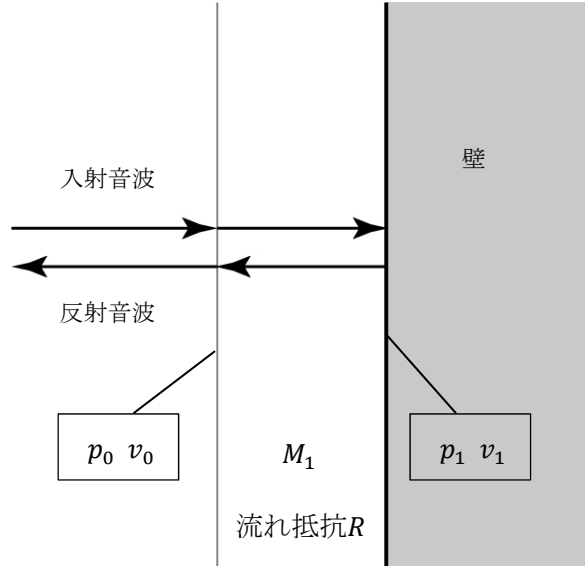


図 2.2 一層の場合における吸音材モデル

吸音材の伝達マトリクス M_1 は、吸音材の厚さ d_1 、波数 k_1 、音響特性インピーダンス z_1 [$\text{kg}/\text{m}^2\text{s}$]、複素伝搬定数 γ_1 [m^{-1}] として以下のように表される。

$$M_1 = \begin{pmatrix} \cos(k_1 d_1) & \frac{i \sin(k_1 d_1)}{K_1} \\ iK_1 \sin(k_1 d_1) & \cos(k_1 d_1) \end{pmatrix} \quad (3)$$

このとき、 $K_1 = -\frac{ik_1}{\gamma_1 z_1}$ 、 $k_1 = \sqrt{-(\gamma_1)^2 - k_0^2 \sin^2 \theta}$ とする。

ここで伝達マトリクス法を用いると壁面における音圧 p_1 、気体粒子速度 v_1 は、

$$\begin{pmatrix} p_1 \\ v_1 \end{pmatrix} = M_1 \begin{pmatrix} p_0 \\ v_0 \end{pmatrix} \quad (4)$$

と表すことが出来る。

n 層の多層構造物の場合、入射側から i 層目の吸音材の伝達マトリクス M_i は、

$$M_i = \begin{pmatrix} \cos(k_i d_i) & \frac{i \sin(k_i d_i)}{K_i} \\ iK_i \sin(k_i d_i) & \cos(k_i d_i) \end{pmatrix} \quad (5)$$

$$\begin{pmatrix} p_i \\ v_i \end{pmatrix} = M_i \cdots M_2 M_1 \begin{pmatrix} p_0 \\ v_0 \end{pmatrix} \quad (6)$$

ただし $(i = 1, 2, \dots, n)$

と表される。

吸音率計算の場合、完全剛な壁面において具体的には以下のように表される。

$$\begin{pmatrix} p_n \\ v_n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix} \quad (7)$$

よって求める音圧 p_0 、および気体粒子速度 v_0 は逆行列を求めることにより以下のように表される。

$$\begin{pmatrix} p_0 \\ v_0 \end{pmatrix} = M_1^{-1} M_2^{-1} \cdots M_n^{-1} \begin{pmatrix} p_n \\ v_n \end{pmatrix} \quad (8)$$

このとき、

$$M_i^{-1} = \begin{pmatrix} \cosh(k_i d_i) & -\frac{i \sinh(k_i d_i)}{K_i} \\ -iK_i \sinh(k_i d_i) & \cosh(k_i d_i) \end{pmatrix} \quad (9)$$

である。

以上のようにして求められた音源側の音圧 p_0 、および気体粒子速度 v_0 から、吸音率 α を導き出す。

入射音圧 p_I 、反射音圧 p_R 、入射速度 v_I 、反射速度 v_R とし、

$$v_I = \frac{p_I}{\rho_0 c_0} \quad , \quad v_R = -\frac{p_R}{\rho_0 c_0} \quad (10)$$

と与えられ、

$$p_0 = p_I + p_R \quad , \quad v_0 = (p_I - p_R)/\rho_0 c_0 \quad (11)$$

この二式から、

$$\frac{p_R}{p_I} = \frac{\frac{p_0}{v_0} - \rho_0 c_0}{\frac{p_0}{v_0} + \rho_0 c_0} \quad (12)$$

を導き、吸音率 α が得られる。

$$\alpha = 1 - \left| \frac{p_R}{p_I} \right|^2 \quad (13)$$

一種類一層、厚さ 200mm の場合の計算例を以下に示す。

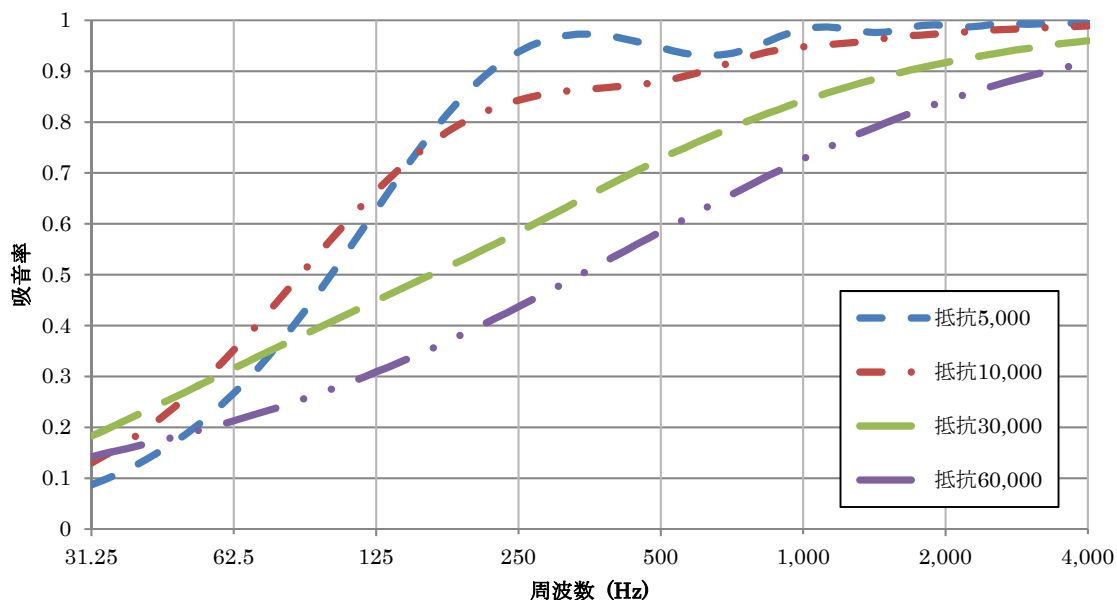


図2.3 厚み200mmの場合の吸音率変化

図 2.3 のような吸音率変化が見られた。抵抗が上昇するにつれて全体の吸音率は下がる傾向にある。特に中周波数領域から高周波数領域においてその吸音率の差は顕著であり、大きな変化が見られる。その一方で低周波数領域では抵抗が大きな吸音材の吸音率が高い傾向がある。抵抗 30000 をピークに抵抗 60000 では吸音率が下がってしまうが、抵抗 5000、10000 に比べ高くなっている。

抵抗 30000 と 60000 を比較すると、全周波数領域において前者の吸音率が上回っており、吸音性能は高いという結果になった。抵抗を大きくしすぎることによって、吸音材の表面で音の反射が促進され、かえって吸音率が低下するという結果となった。

3 吸音性能評価法

本研究において、吸音材の性能を評価する指標を3種類定義する。

3.1 平均吸音率を用いた手法

今回の研究で使用する平均吸音率とは、対数軸上で等間隔で決めた周波数ごとで与えられる吸音率の平均をとった値である。この値を採用した理由は、日常で吸音率を評価するときに最も用いられている値と考えられるからである。グラフから判断しやすいという利点、目で見て判断しやすいという利点を含めて、多くの人にわかりやすく理解してもらうためにこの指標を利用する。この平均吸音率が最大となる吸音材組み合わせを比較の対象とする。

3.2 目的関数を用いた手法

与えられた任意の関数に最も近い吸音率を求める指標である。ある吸音性能を持った吸音材を必要とするとき、その性能に最も近くなるような吸音材を導き出す手法である。

比較方法は、最小二乗法を一部利用する。求められた吸音率が初めに設定した吸音率を下回る場合のみ最小二乗法を使用し、逆に上回る場合はその差を0として積算し、その値が最小となるものを選定する。その理由は、任意で決められた吸音率を上回る値が求められた場合、その吸音性能は必要とする条件をクリアしているからである。

3.1で示した平均値では、全体の吸音率が上昇するかもしれないが、ある特定の周波数に対する吸音特性を実現するためにこの比較方法を用いる。必要とされる吸音材はその場所や環境によって異なるため、単純に吸音率を上昇させることだけでは必要な吸音材になるとは限らない。

3. 3 標準偏差を用いた手法

3. 1 で使用した平均吸音率と各周波数での吸音率との差を求め、その総計を比較する。
3. 2 と同様に最小二乗法を使用して比較する。

この値は、平均値とのズレを小さくする目的で評価する。最終的に求められた値が全周波数領域において、平均吸音率に近づくような吸音材を求める。全周波数域で吸音率が大きく変化しないような吸音材を求める方法である。

なお今回この評価を用いる際、平均吸音率の最低条件を 0.4 と設定し解析を行った。平均吸音率が 0 と選定されることを防ぐためである。

4 条件設定

複層の条件として、総厚み 200mm の中に吸音材を積み重ねる。

吸音材はグラスウールを使用し、流れ抵抗値が 5000、10000、30000、60000 のものを使用し、さらに空気層を含めた 5 種類の組み合わせとする。なお上記の流れ抵抗に対する吸音材とその密度はそれぞれ、グラスウール 24 kg/m^3 、 32 kg/m^3 、 80 kg/m^3 、ウレタンである[3]。

さらに、壁面は剛、吸音材に平面波が垂直入射する場合を考える。

5 評価結果

5.1 平均吸音率を用いた手法

5.1.1 一種類の吸音材を使用した場合 と 複層吸音材を使用した場合

・複層吸音材について

層厚み 200mm を 10 層に分けそこに流れ抵抗の異なる吸音材をあてはめて、平均吸音率が最大となる組み合わせを得た。

組み合わせは以下の通り。

入射側 5000 / 5000 / 5000 / 5000 / 10000 / 10000 / 10000 / 10000 / 10000 / 30000 壁側

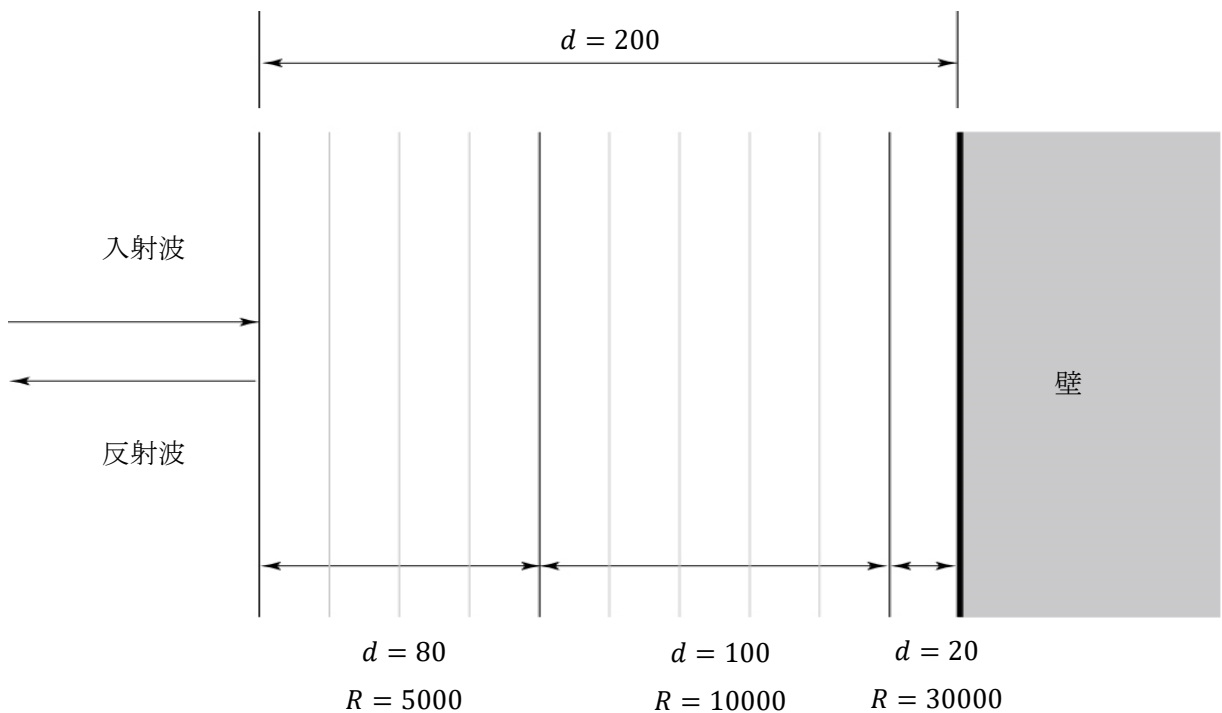


図 5.1 吸音率が最大となる吸音材の組み合わせ(平均吸音率)

表 5.1 単一吸音材と複層吸音材の平均吸音率

	流れ抵抗	平均吸音率
単一吸音材	5,000	0.7527835
	10,000	0.7454168
	30,000	0.6299564
	60,000	0.5204591
複層吸音材	平均吸音率の最大組合せ	0.7561225

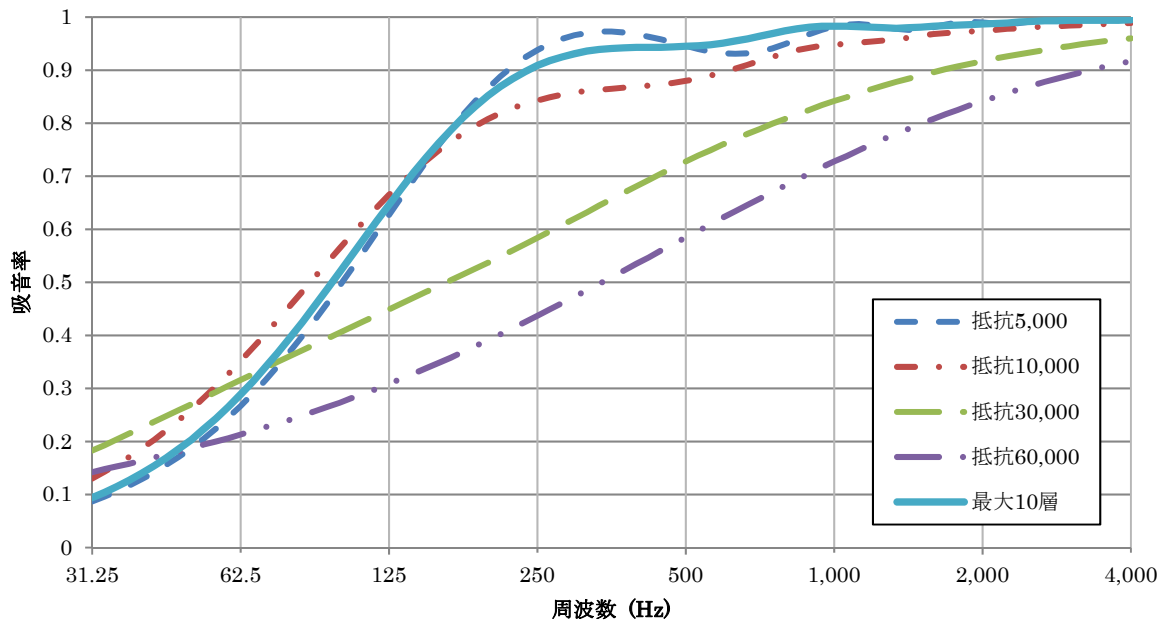


図5.2 単一流れ抵抗と複層吸音材の吸音率変化(平均吸音率)

それぞれの単一の吸音材と複層吸音材との比較

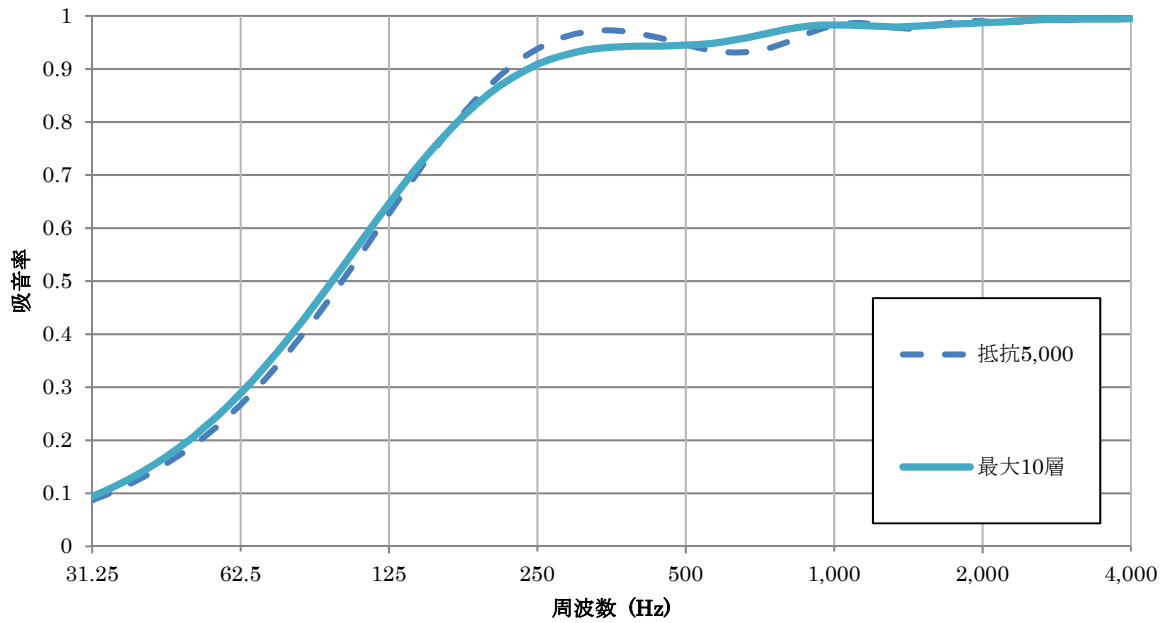


図5.3 流れ抵抗5000と複層吸音材の吸音率変化(平均吸音率)

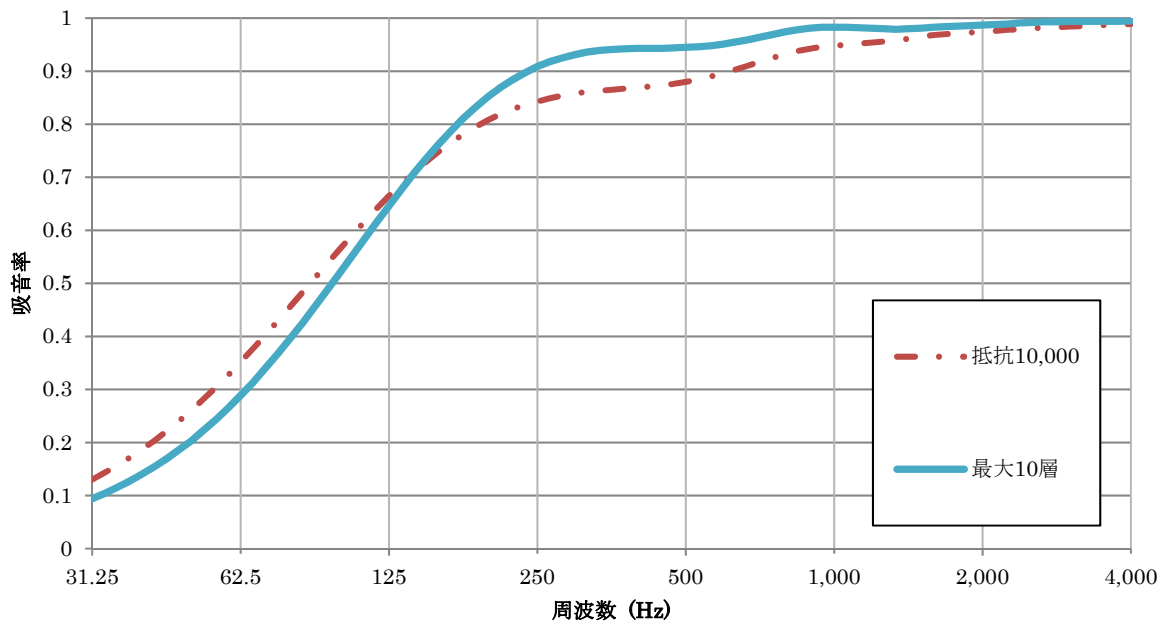


図5.4 流れ抵抗10000と複層吸音材の吸音率変化(平均吸音率)

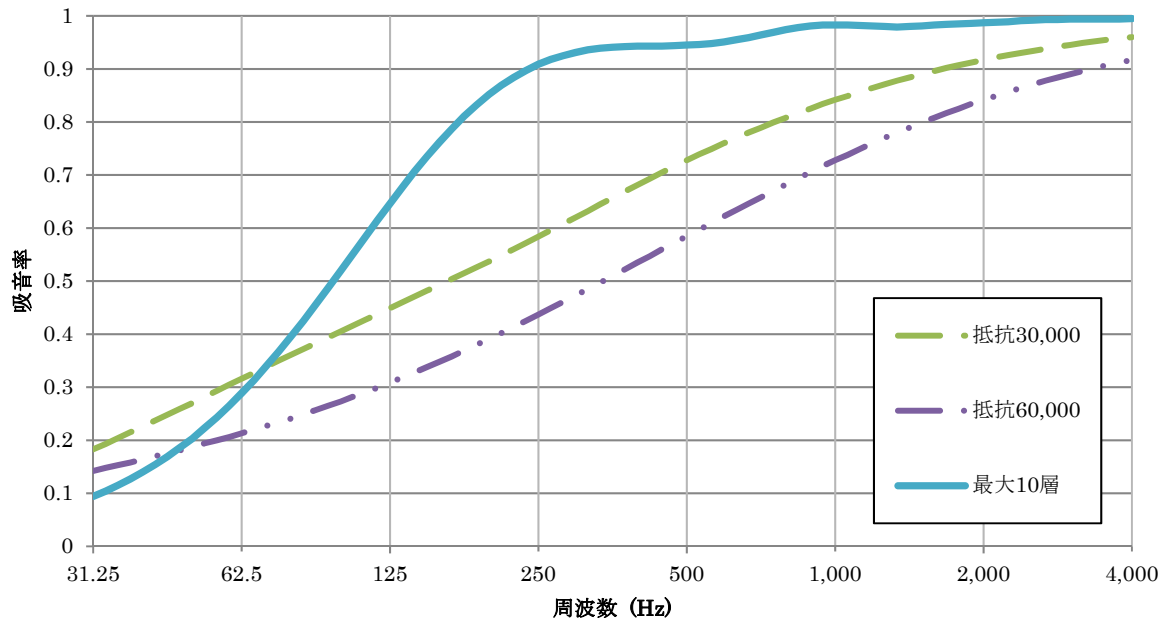


図5.5 流れ抵抗30000 60000と複層吸音材の吸音率変化(平均吸音率)

5. 1. 2 考察

平均値をとり比較した結果、わずかであるが単純に平均吸音率を上昇させることができた。しかしその一方で、周波数によって吸音率に差があった。グラフの特徴としては、250Hzまでの間は吸音率が上昇。それ以降の周波数では少しずつなだらかに上昇する。

流れ抵抗 5000 と比較した場合、全体的に大きな変化は起こらなかったが、低周波領域では複層吸音材の吸音率が高い。抵抗 5000 の場合、周波数が高域になるにしたがって吸音率が大きくなったり小さくなったりと変化が見られたが、複層の場合はそういった変化はない。抵抗 10000、30000 の場合、低周波領域では抵抗 10000、30000 の方が吸音率が高く、高周波領域になるに従い複層吸音材のほうが吸音率の高くなる。

全体を見れば平均吸音率は上昇しているものの、吸音性能という意味では向上しているとは言い難い。必要とされる吸音特性は、その場所・環境によって異なり、単純に流れ抵抗を複層にして組み合わせを変えることで平均吸音率を上昇させた吸音材と、単一の流れ抵抗の吸音材では、吸音の性能の優劣は単純にはつけられないと思われる。

5. 2 目的関数を用いた手法

5. 2. 1 種類の吸音材を使用した場合 と 複層吸音材を使用した場合

① 低周波領域で高い吸音率

31.25Hz から 125Hz の間の平均吸音率が最も高くなる組み合わせ。

入射側 30000 / 10000 / 10000 / 10000 / 5000 / 5000 / 10000 / 10000 / 10000 / 30000 壁側

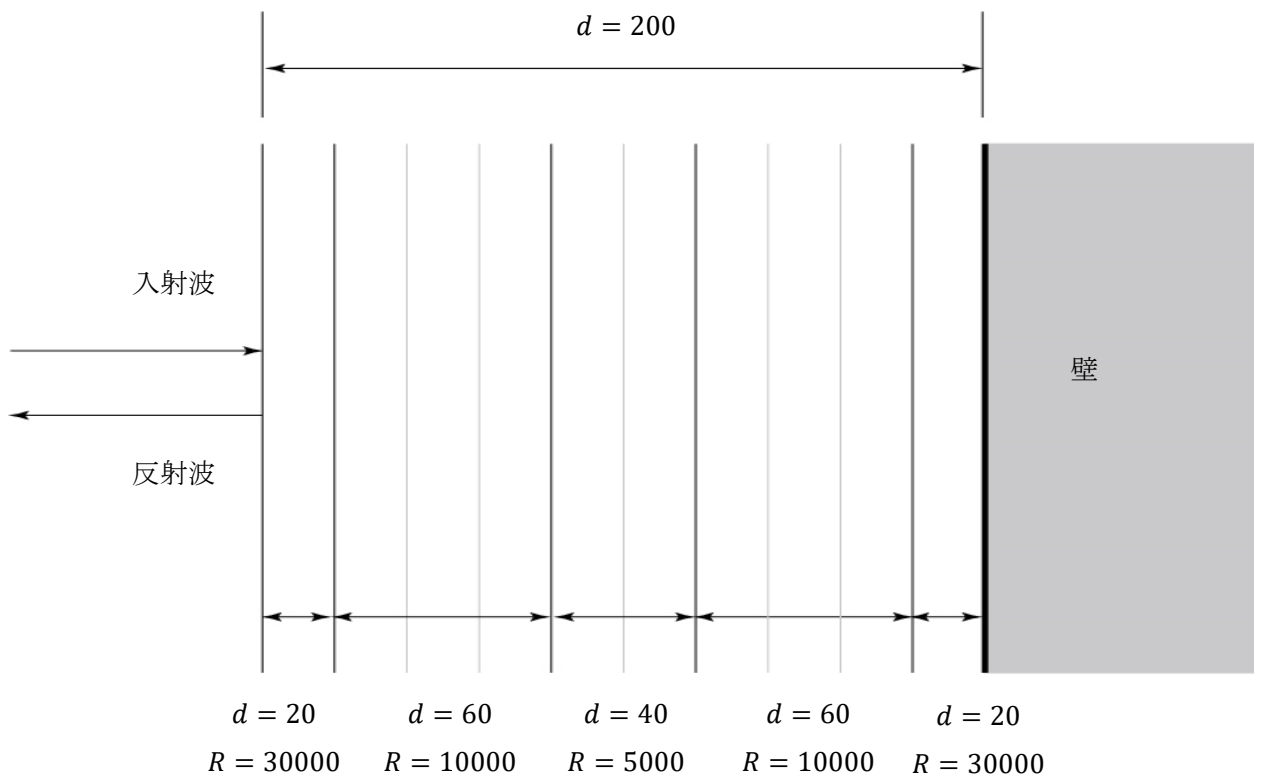


図 5.6 吸音率が最大となる吸音材の組み合わせ(目的関数①)

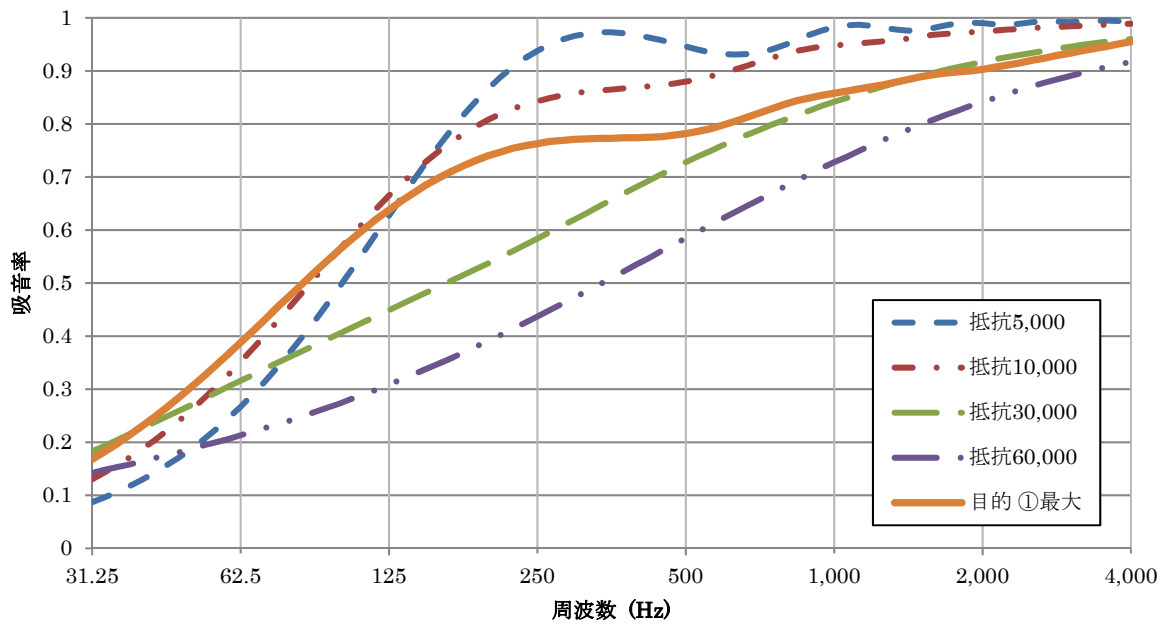


図5.7 単一流れ抵抗と複層吸音材の吸音率変化(目的関数①)

それぞれ単一の吸音材と複層吸音材との比較

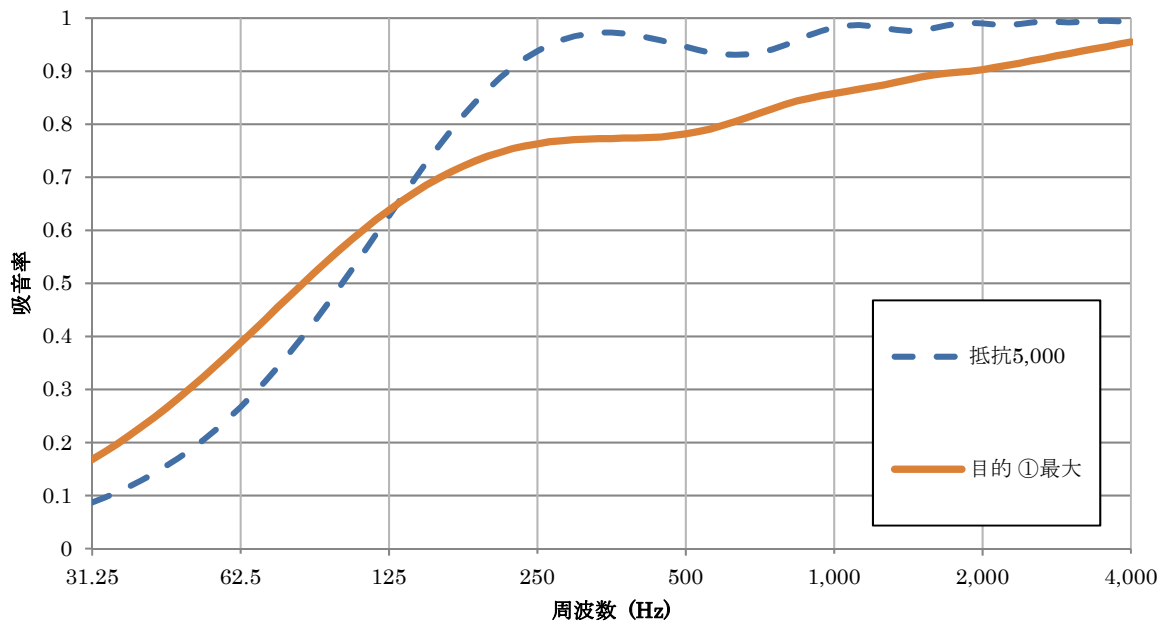


図5.8 流れ抵抗5000と複層吸音材の吸音率変化(目的関数①)

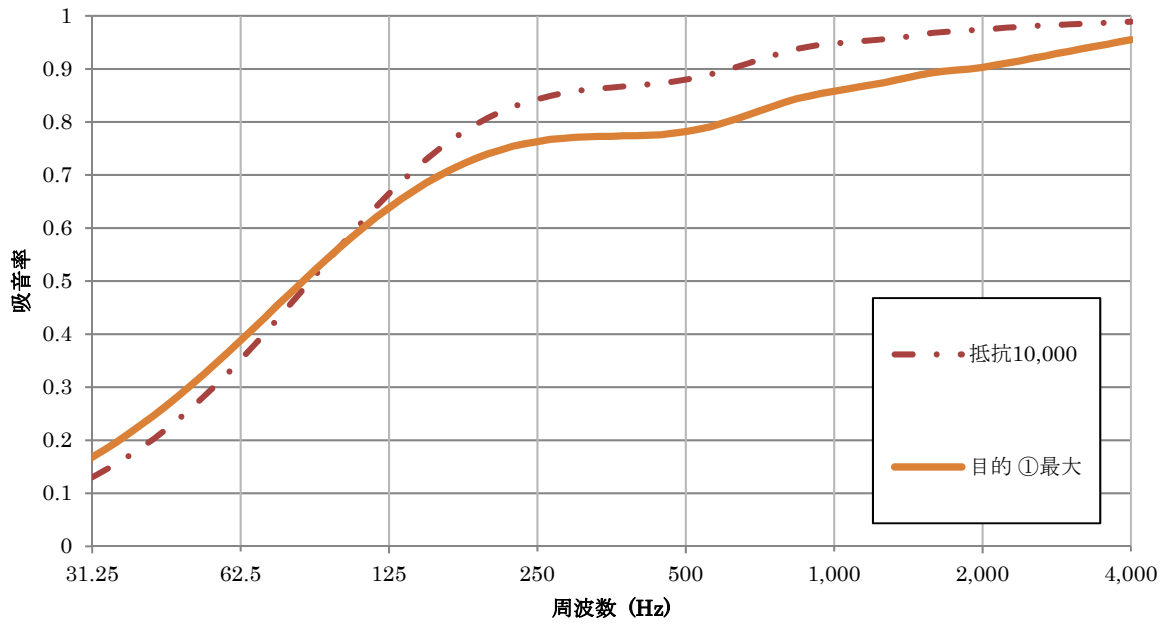


図5.9 流れ抵抗10000と複層吸音材の吸音率変化(目的関数①)

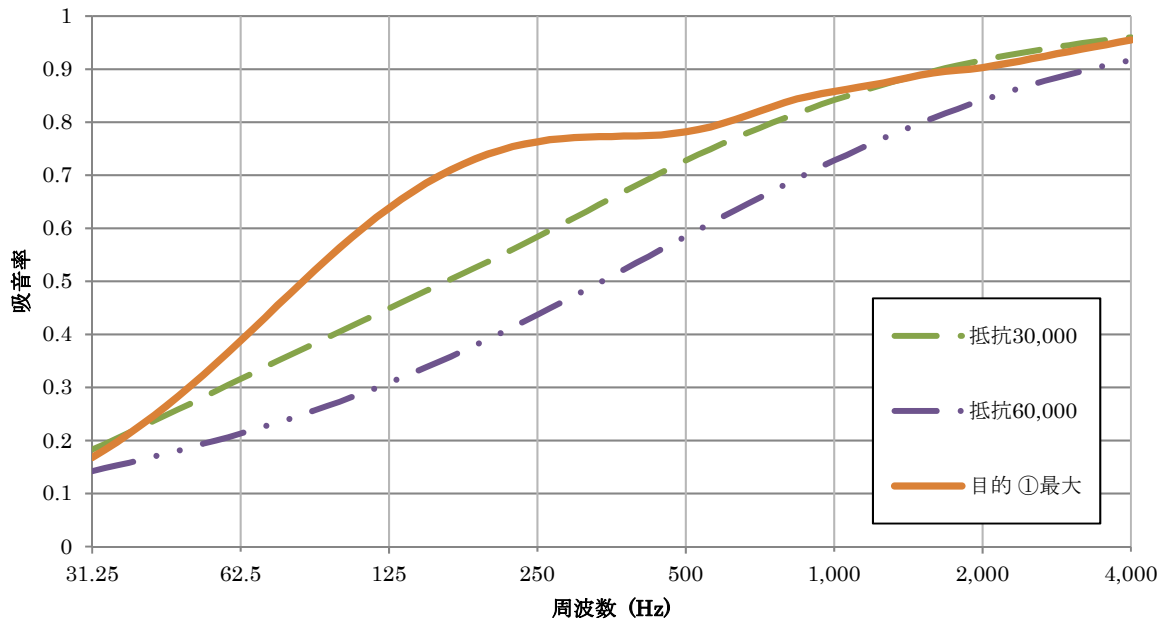


図5.10 流れ抵抗30000 60000と複層吸音材の吸音率変化(目的関数①)

② 高周波領域で高い吸音率

1000Hz から 4000Hz の間の平均吸音率が最も高くなる組み合わせ。

入射側 5000 / 5000 / 10000 / 30000 / 30000 / 5000 / 0 / 0 / 5000 / 30000 壁側

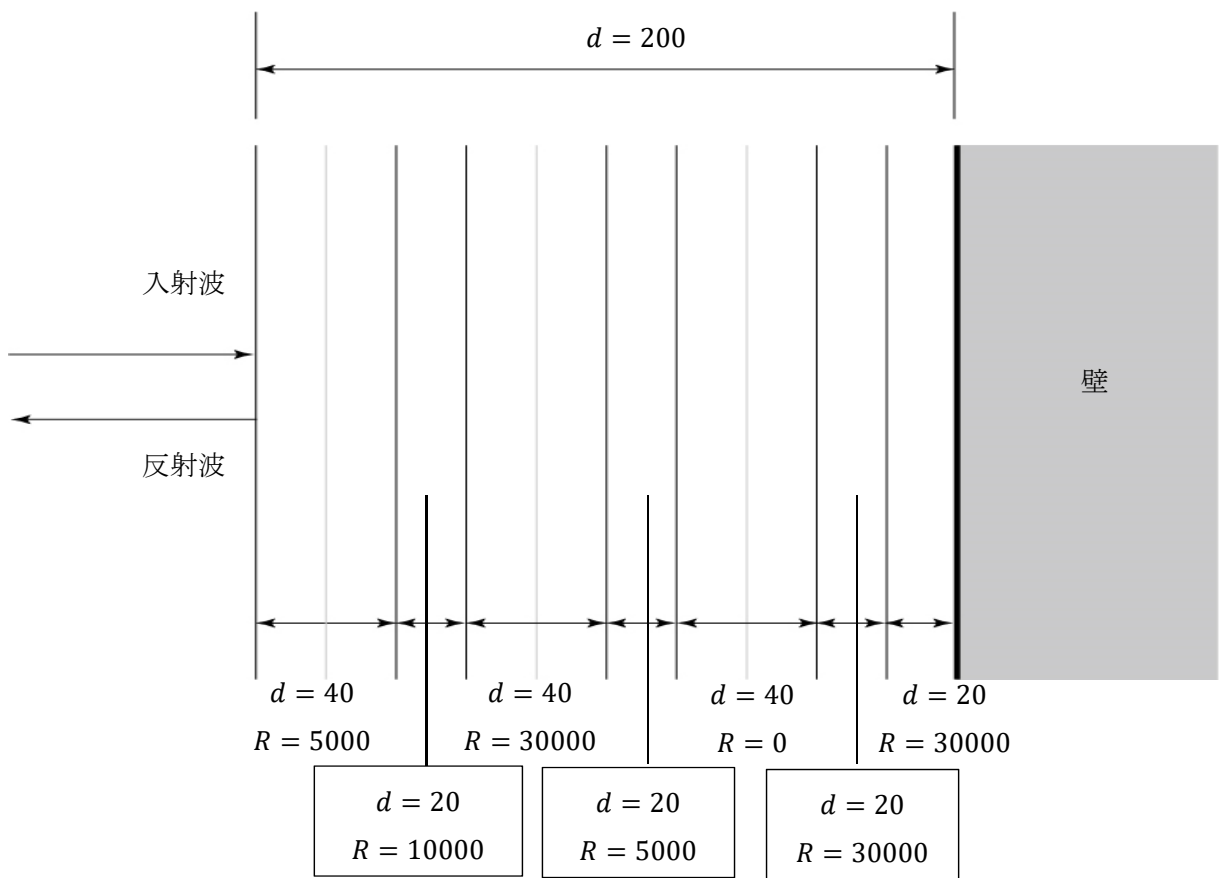


図 5.11 吸音率が最大となる吸音材の組み合わせ(目的関数②)

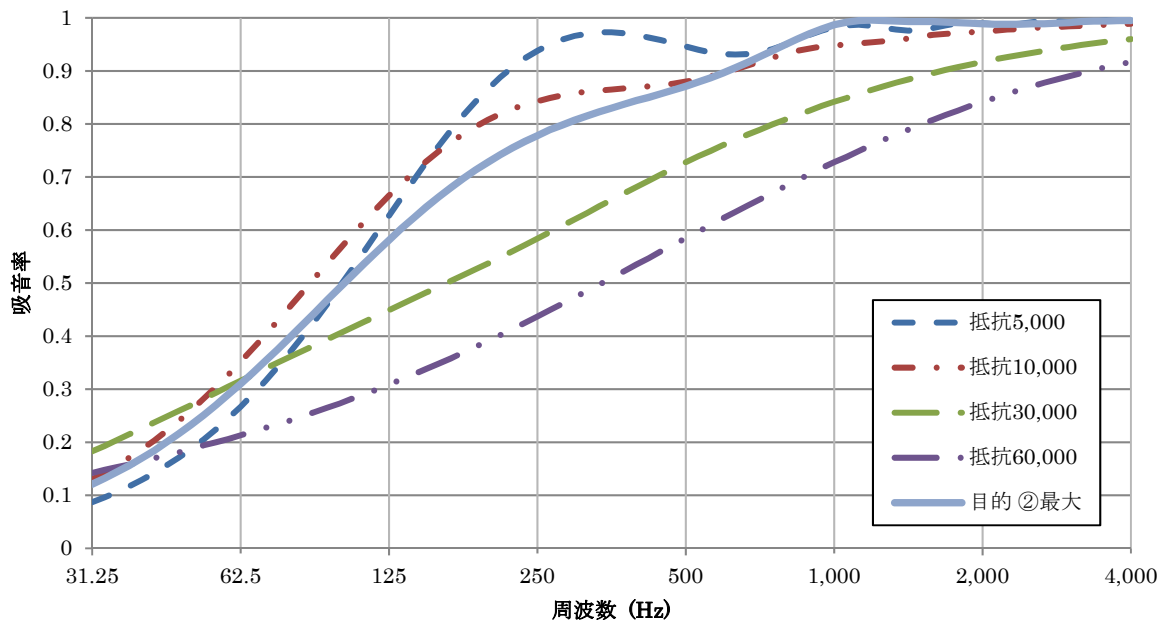


図5.12 単一流れ抵抗と複層吸音材の吸音率変化(目的関数②)

それぞれ単一の吸音材と複層吸音材との比較

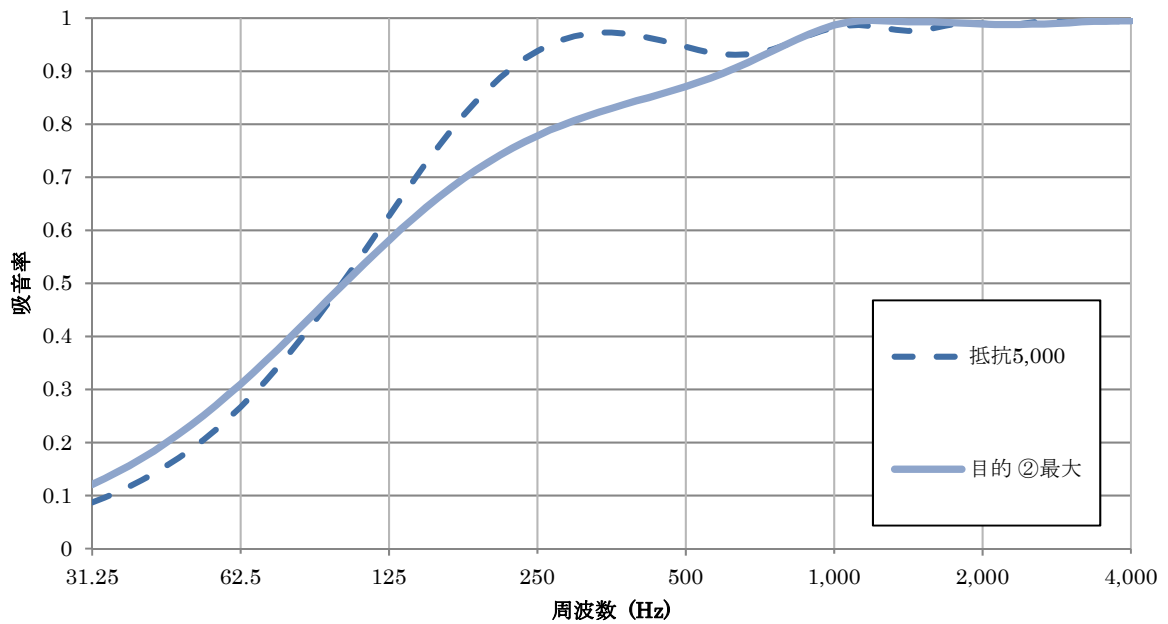


図5.13 流れ抵抗5000と複層吸音材の吸音率変化(目的関数②)

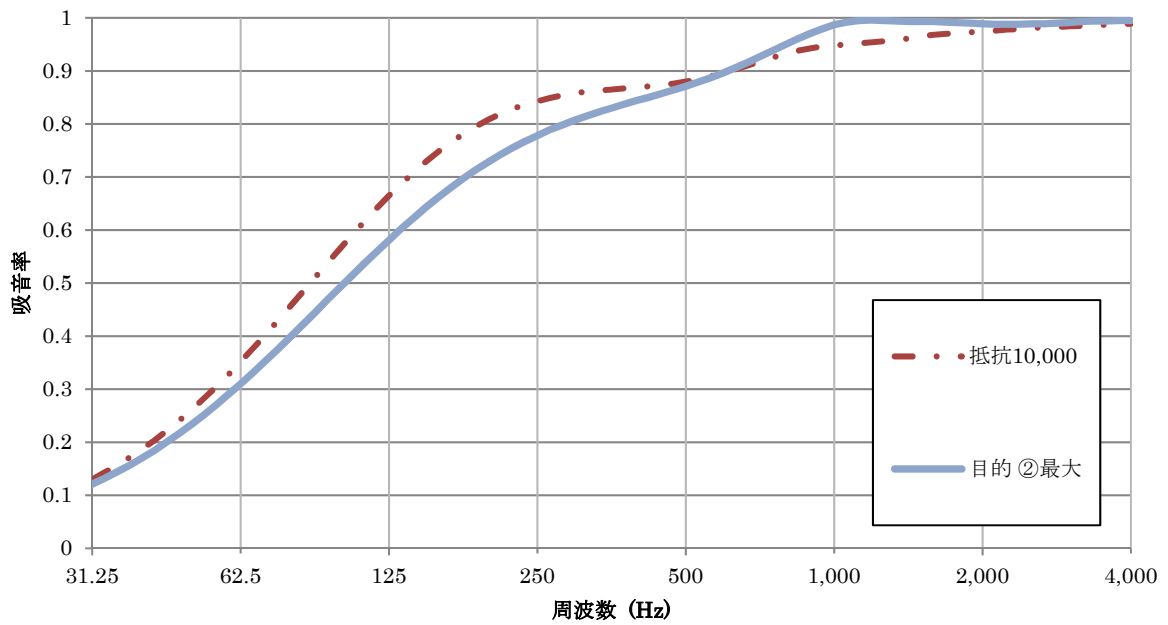


図5.14 流れ抵抗10000と複層吸音材の吸音率変化(目的関数②)

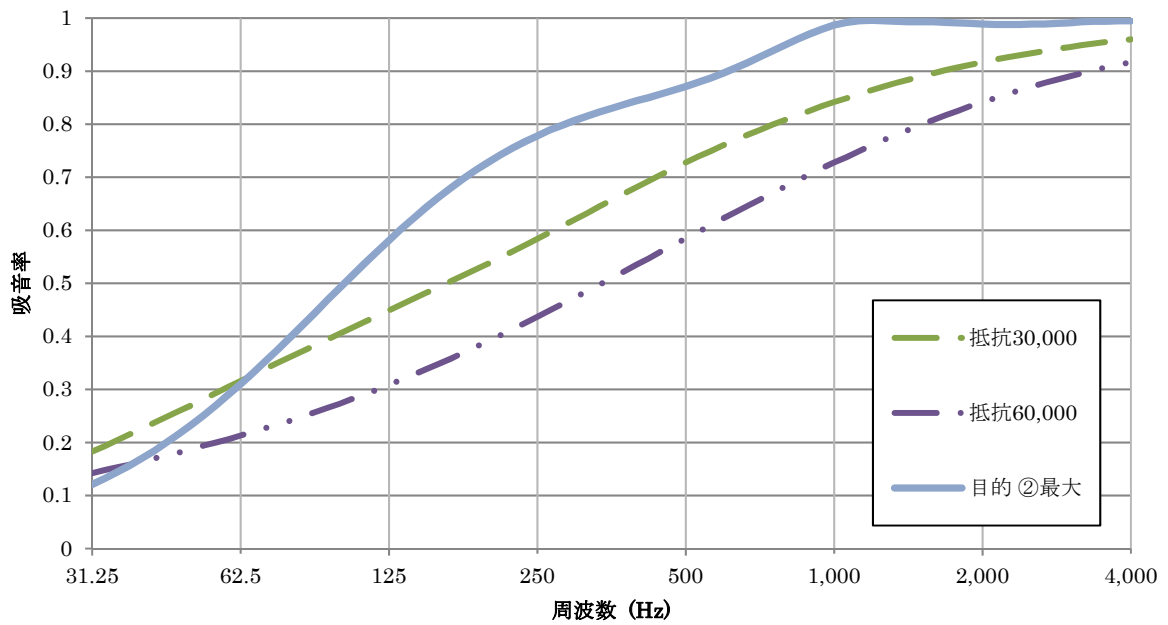


図5.15 流れ抵抗30000 60000と複層吸音材の吸音率変化(目的関数②)

③ ある任意の吸音率目的関数との比較

入射側 30000 / 30000 / 10000 / 5000 / 5000 / 5000 / 10000 / 10000 / 10000 / 30000 壁側

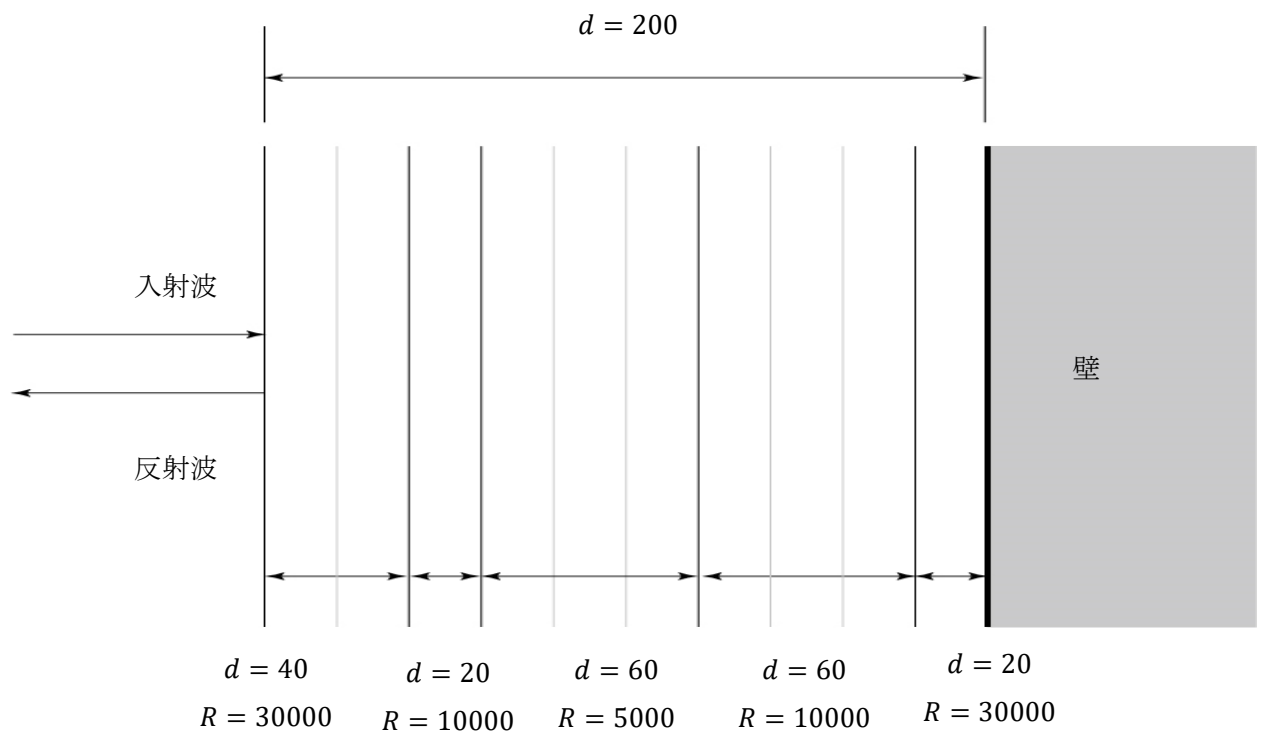


図 5.16 吸音率が最大となる吸音材の組み合わせ(目的関数③)

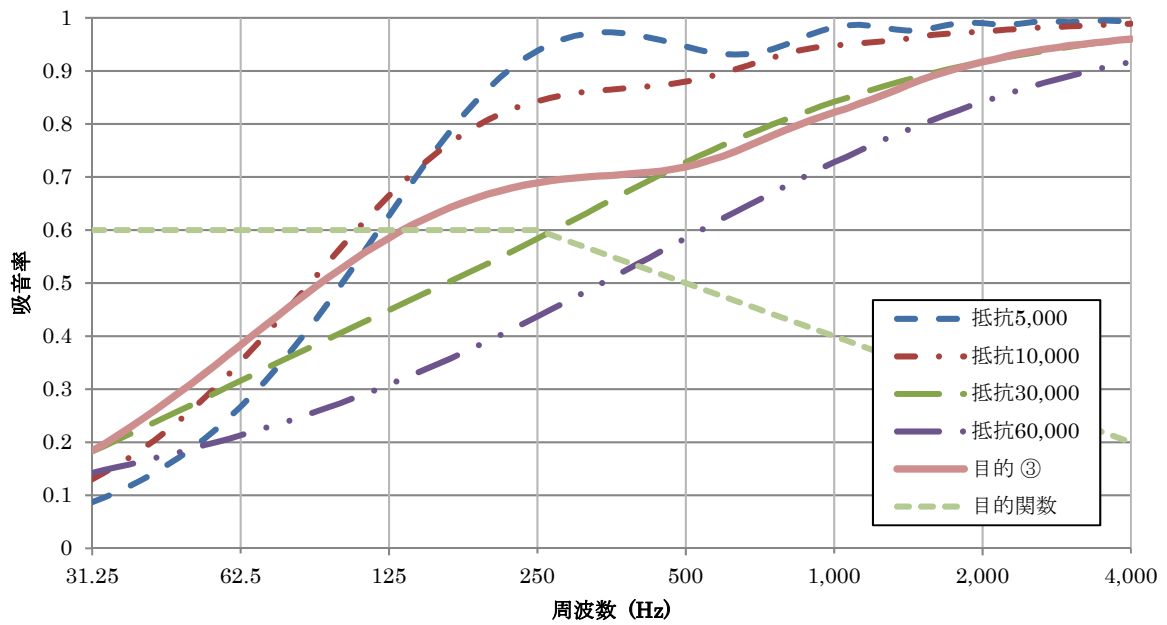


図5.17 単一流れ抵抗と複層吸音材の吸音率変化(目的関数③)

それぞれ単一の吸音材と複層吸音材との比較

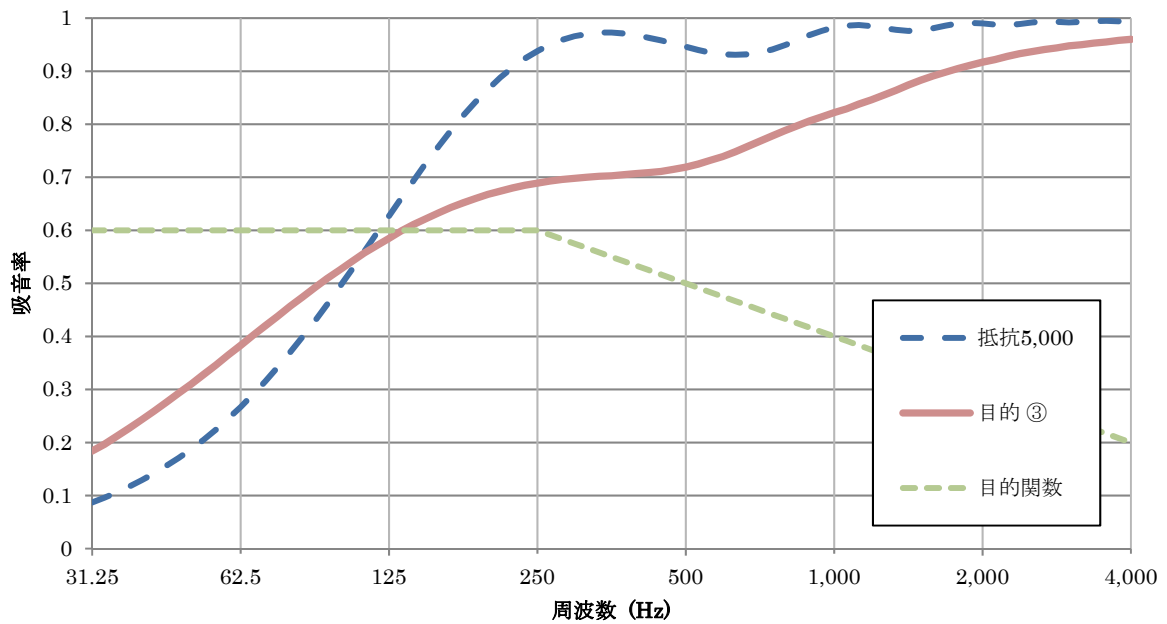


図5.18 流れ抵抗5000と複層吸音材の吸音率変化(目的関数③)

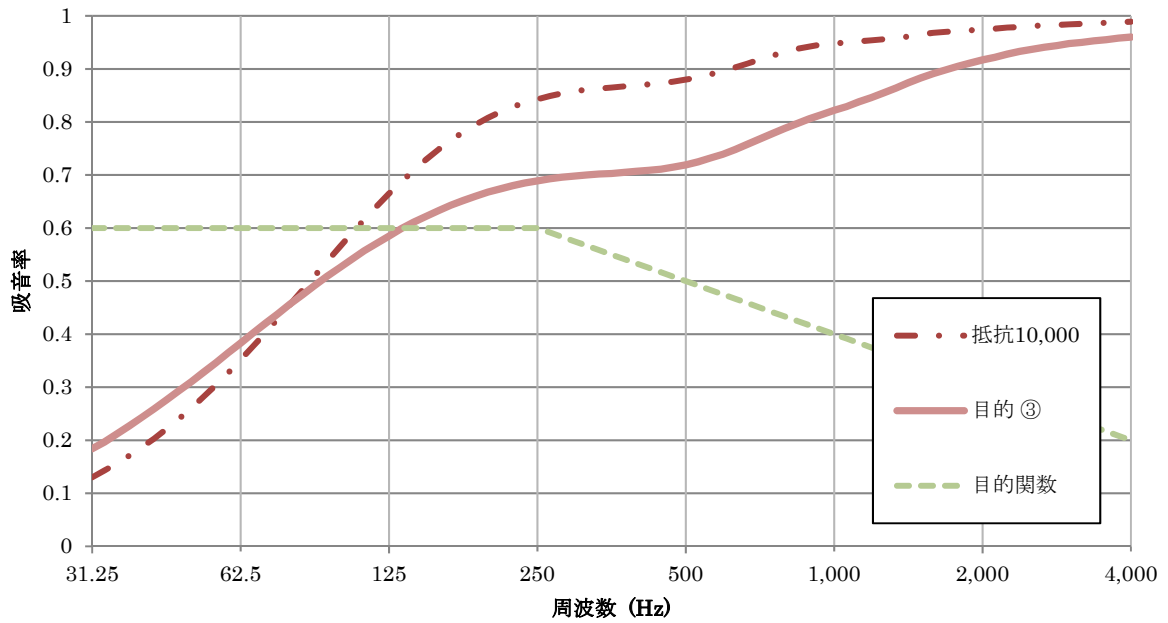


図5.19 流れ抵抗10000と複層吸音材の吸音率変化(目的関数③)

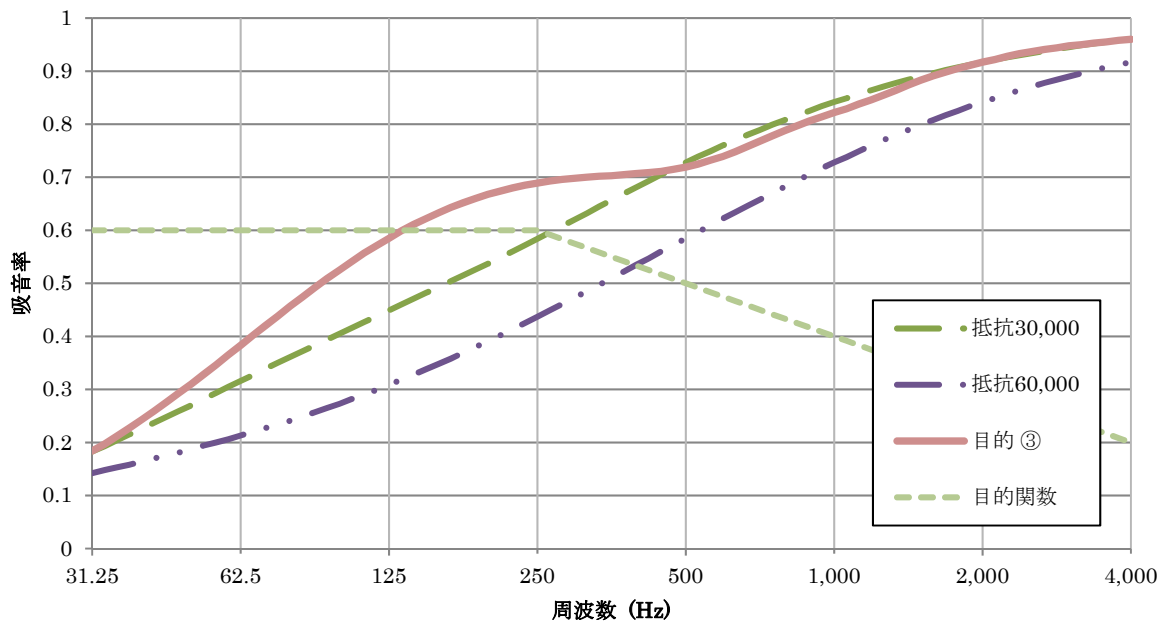


図5.20 流れ抵抗30000 60000と複層吸音材の吸音率変化(目的関数③)

5. 2. 2 考察

5. 1の平均値とは異なり、ある目的を持って吸音率を変化させた。吸音材の組み合わせを変化させることで吸音材の吸音率の特徴を変化させた。

①、②ではある特定の周波数で吸音率が高くなるような組み合わせを求めた。①では低周波領域が、②では高周波領域がそれぞれグラフからも見て取れるほど吸音率が大きくなった。ある周波数では吸音率を高く、一方で逆に吸音率を低くといったように変化させることが出来る。このことを踏まえ③の場合では図 5.17 中の点線で示される目的関数を作成した。

③において低周波領域で①の複層吸音材と同様の吸音率変化を見せているのは、入射側からの吸音材分布が一部同じためであると思われる。吸音率が目的関数を上回るまで、流れ抵抗 5000 や 10000 に比べて傾きは小さいが吸音率 0.6 のグラフに近づく値となっている。

5.3 標準偏差

5.3.1 一種類の吸音材を使用した場合 と 複層吸音材を使用した場合

今回は平均吸音率が 0.4 以上になるような吸音材組み合わせから最適なものを導き出した。

入射側 60000 / 5000 / 5000 / 5000 / 5000 / 5000 / 5000 / 10000 / 10000 / 30000 壁側

平均吸音率 0.6294894

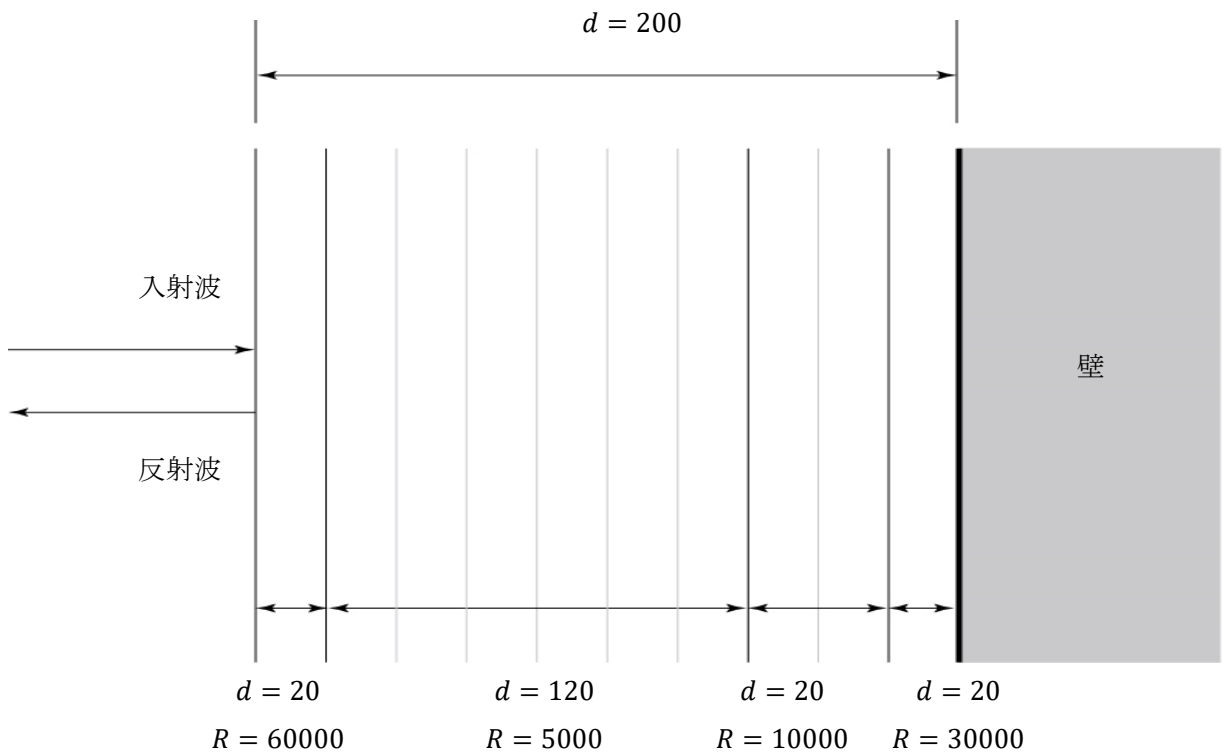


図 5.21 吸音率が最大となる吸音材の組み合わせ(標準偏差)

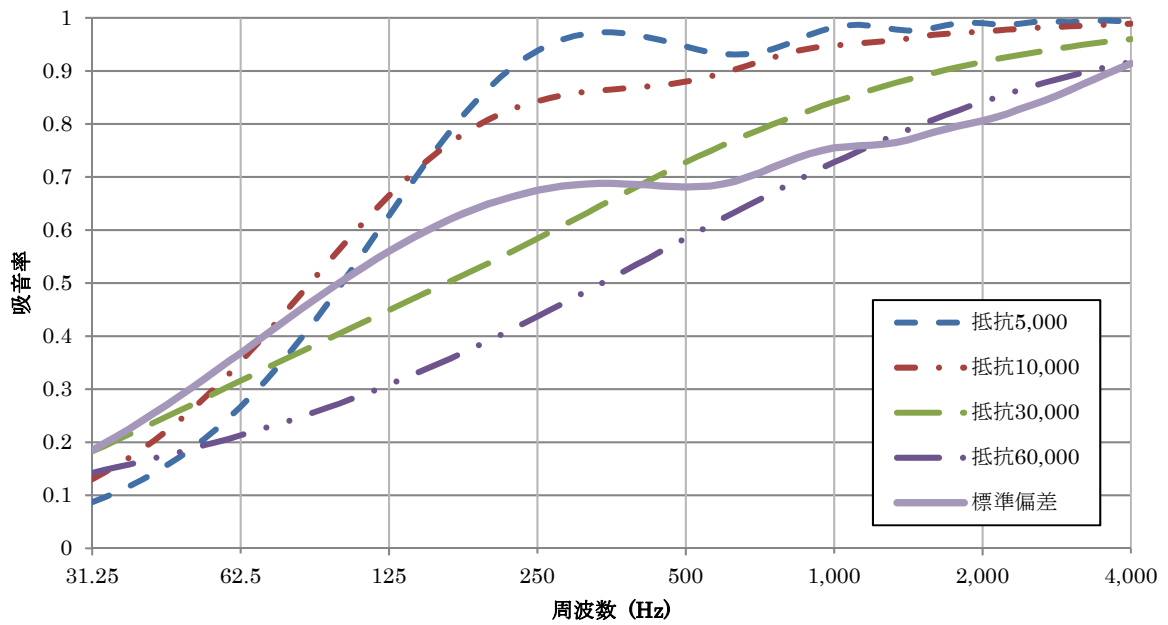


図5.22 単一流れ抵抗と複層吸音材の吸音率変化(標準偏差)

それぞれ単一の吸音材と複層吸音材との比較

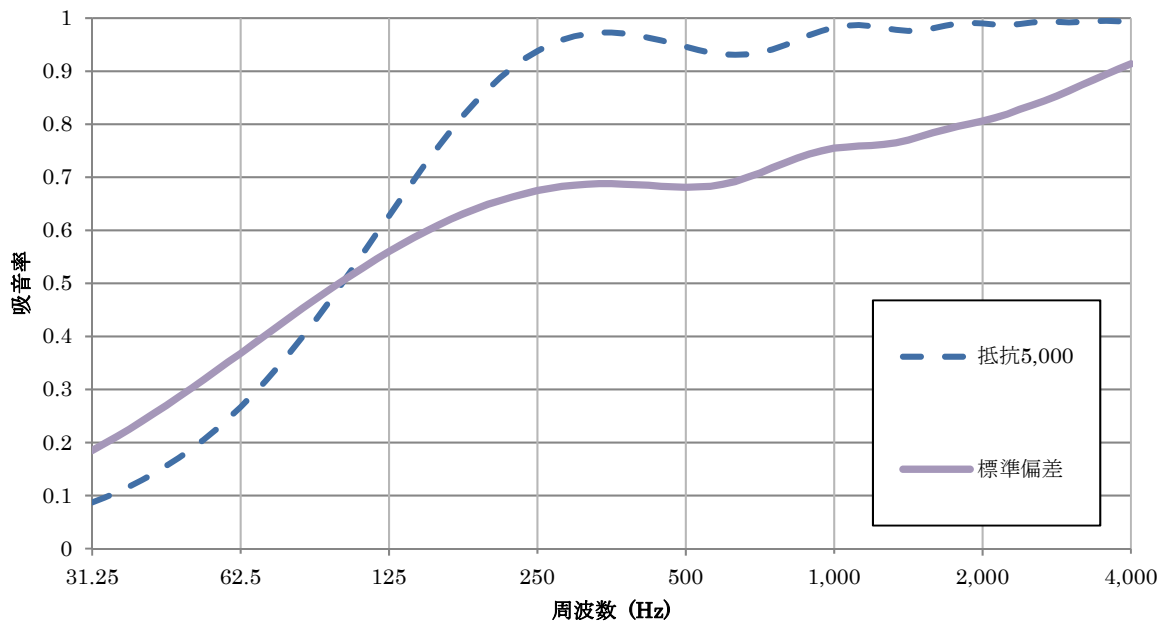


図5.23 流れ抵抗5000と複層吸音材の吸音率変化(標準偏差)

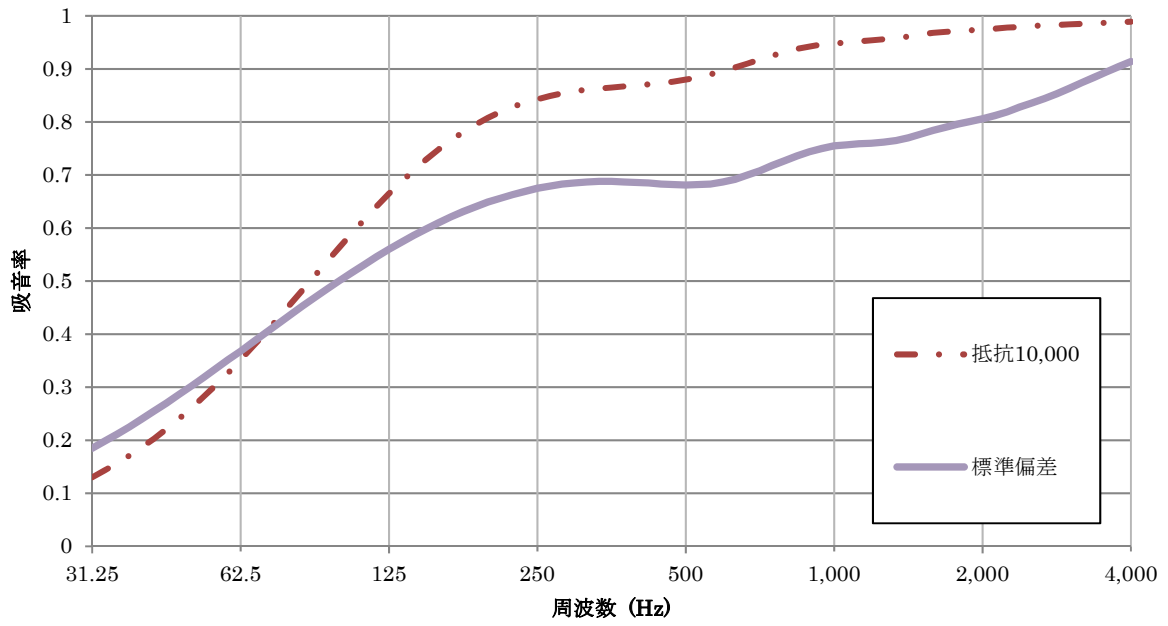


図5.24 流れ抵抗10000と複層吸音材の吸音率変化(標準偏差)

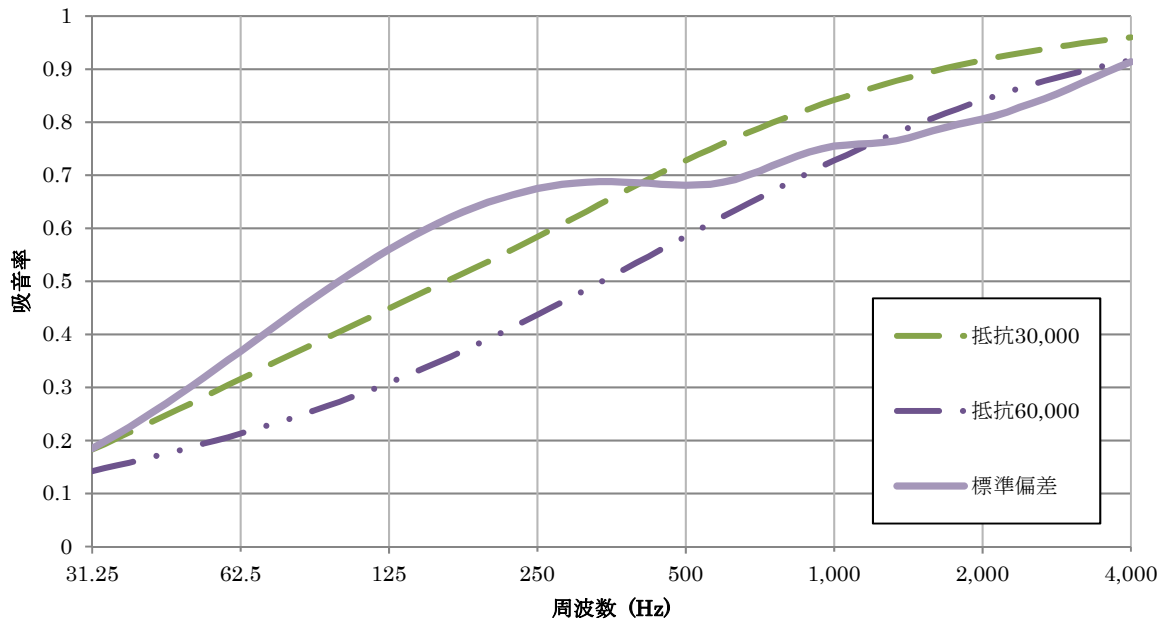


図5.25 流れ抵抗30000 60000と複層吸音材の吸音率変化(標準偏差)

5. 3. 2 考察

全周波数域で吸音率の変化が小さくなるようにすることが目的であったが、吸音率変化はそこまで大きく変わらなかった。しかし吸音率は、低周波領域では比較的大きく、高周波領域では小さいという結果となった。

入射側の一番端の吸音材の流れ抵抗が 60000 と大きいことがこのような結果の原因となったと考えられる。吸音材表面に流れ抵抗の大きな吸音材がある場合、入射する音波の一部は吸音材表面で反射してしまう。高周波領域においてはこの傾向が強くなり吸音率が小さくなったと考えられる。

全体の平均吸音率は流れ抵抗 5000 や 10000 に比べ小さくなってはいるが、低周波数領域においては単一吸音材の吸音率を上回り、高周波数領域では流れ抵抗 60000 の吸音率と同等の結果が得られた。

6 総括

吸音材を複層にすることで吸音率に一定の変化が見られた。広い範囲の周波数に対して高い吸音性能を持つグラスウールを使用し吸音率を変化させた。低周波領域における吸音率を大きくできた組み合わせでは、グラスウールの元々の特徴である高周波領域でも高い吸音率を持つため、広い周波数領域において性能が高まったといえる。

しかし、多孔質型の吸音材は元々中～高周波領域で吸音率が高いことが特徴であったが、低周波領域の吸音率を高めた結果、中～高周波領域において吸音率が流れ抵抗 5000 や 10000 に比べ小さくなってしまった。これは多孔質型吸音材の長所を消してしまう結果となった。元々ある有効な特性を保ちつつ、さらにそこに新たな吸音特性を付加することが求められる。

7 参考文献

- [1] 奥平 安藤 他 ,”紛体を素材にした音響材料の特性”, 信学技報 EA94-59 , 17-22 , 1994-11
- [2] Y.Miki,”Acoustical properties of porous materials – Generalizations of empirical models - ,J.Acoust.Soc.Jpn.(E) 11(1),25-28,1990
- [3] 中川 博,”流れ抵抗測定装置”, <http://www.noe.co.jp/technology/08/08meca1.html>

8 謝辞

本研究を行うにあたって、長期にわたりお忙しい中、数々のご指導、ご鞭撻頂きました豊田政弘助教に心より感謝するとともに、厚く御礼申し上げます。

また、河井康人教授、大学院生の内田さん、大西さん、建築環境工学第 I 研究室の皆様にご協力頂き、本研究を進めることが出来たことを非常に感謝しております。

最後ではありますが、この場を借りてご協力頂いた方々に改めて厚く御礼申し上げます。有り難うございました。