

有孔板を用いたエッジ効果抑制型 遮音壁の高性能化

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

建 17-108 吉村 龍星

指導教官 豊田 政弘

第1章	序論	1
1.1	研究背景	1
1.2	既往研究	1
1.2.1	エッジ効果抑制型遮音壁	1
1.2.2	エッジ効果抑制型遮音壁の課題	2
1.3	研究目的	2
1.4	研究概要	2
1.5	研究目標	3
第2章	研究方法	4
2.1	計算方法	4
2.2	計算条件	8
2.3	研究計画	8
第3章	物性値の設定	9
3.1	基準となる物性値の設定	9
3.2	物性値の設定範囲	10
3.3	孔径、板厚、開孔率と挿入損失の関係性	10
3.4	計算過程の一例	14
3.5	計算結果1	16
3.6	計算結果2	17
第4章	有孔板のグラデーション	19
4.1	有孔板のグラデーション方法	19
4.2	グラデーション結果	19
4.3	新たなアプローチ	23
4.4	計算結果1（グラデーション後）	25
4.5	計算結果2（グラデーション後）	26
第5章	総括	27

第1章 序論

1-1 研究背景

交通量が多い幹線道路沿いなどでは、環境基準達成のために非常に高い遮音壁を設置する必要があり、風圧に耐えられる構造にするために設置コストの増加、日照阻害または景観確保等の問題が懸念される。遮音壁自体の高さを抑えることが望ましいため、過去に様々な遮音壁が開発された。例えば、先端改良型遮音壁と呼ばれるパッシブやアクティブな吸音機構で遮音する音圧に着目した遮音壁が開発されてきたが、先端へ吸音機構を設けてもあまり大きな効果は得られず、遮音性能を向上させるためには遮音壁を高くする必要があった。

1-2 既往研究

1-2-1 エッジ効果抑制型遮音壁

上記の問題に対し、粒子速度に着目して遮音効果が向上した遮音壁が「エッジ効果抑制型遮音壁」である[1]。この壁は、従来ほとんど認識されていなかったエッジ効果に着目している。エッジ効果という現象は、遮音壁の頭頂部（エッジ部）のごく近傍で空気の粒子速度が非常に大きくなる現象である。このエッジ効果は回折音場に非常に大きな影響を与える為、エッジ効果をいかに抑えるかが遮音のポイントとなり、回折音を抑える為には、寄与が一番大きい先端付近の大きな粒子速度を抑える必要がある。その為には抵抗が大きい密な板などを設置すれば振動は止められるが、伸ばした先端にまたエッジ効果が生じてしまう。そこで、適切な流れ抵抗を持つ多孔質吸音材を遮音壁の頭頂部に設置し、更に上部に行くに従って抵抗を小さく（グラデーション）するようにすれば、先端部の両面の音圧差を抑制できる。その為、上端にエッジ効果ができにくくなり、遮音壁の頭頂部を回って伝わる音のエネルギーを小さくすることができる理論を応用し、高い減音効果を得た壁がエッジ効果抑制型遮音壁である。適切な流れ抵抗をもつ吸音材としてよく使われるものは、アルミ繊維やグラスウールなどである。通常3mの遮音壁において、遮音壁が無い時に比べるとおよそ15dB程度、騒音レベルを下げるができる。

1-2-2 エッジ効果抑制型遮音壁の課題

現在エッジ効果抑制型遮音壁として利用されている多孔質吸音材には大きく分けて2つの問題点がある。まず1つ目は、吸音材に耐候性がないことである。雨風、湿気に弱いため、吸音材にカバーが必要になり、そのカバーがエッジ効果抑制効果を減少させてしまう。2つ目は、先端に向けて徐々に抵抗を小さくするにあたって、吸音材の物性値を徐々に減少させることが困難であることである。これは、多孔質吸音材が非常に細かい繊維であるため、斜めにカットすることが困難なためである。現在は薄い吸音材を重ね段階的に減少させているが、より連続的に物性値を減少させたい。このような問題点があるため、多孔質吸音材ではエッジ効果抑制型遮音壁としての性能向上に限りがある

1-3 研究の目的

多孔質吸音材の問題点を踏まえた新たな提案が、エッジ効果抑制型遮音壁として多孔質吸音材ではなく、有孔板を利用することである。有孔板には ①耐候性がある ②薄く軽くすることができる ③物性値の細かい制御が可能 ④様々な素材でつくることができる、といった4つメリットがあり、先ほど記した多孔質吸音材の問題点をカバーしている。そこで、エッジ効果抑制型遮音壁において、多孔質吸音材を有孔板で代用できるようにすることが本報の目的である。そのためには有孔板を用いて、多孔質吸音材のエッジ効果抑制型遮音壁と同程度、またはそれ以上の遮音効果を発揮させる必要がある。

1-4 研究概要

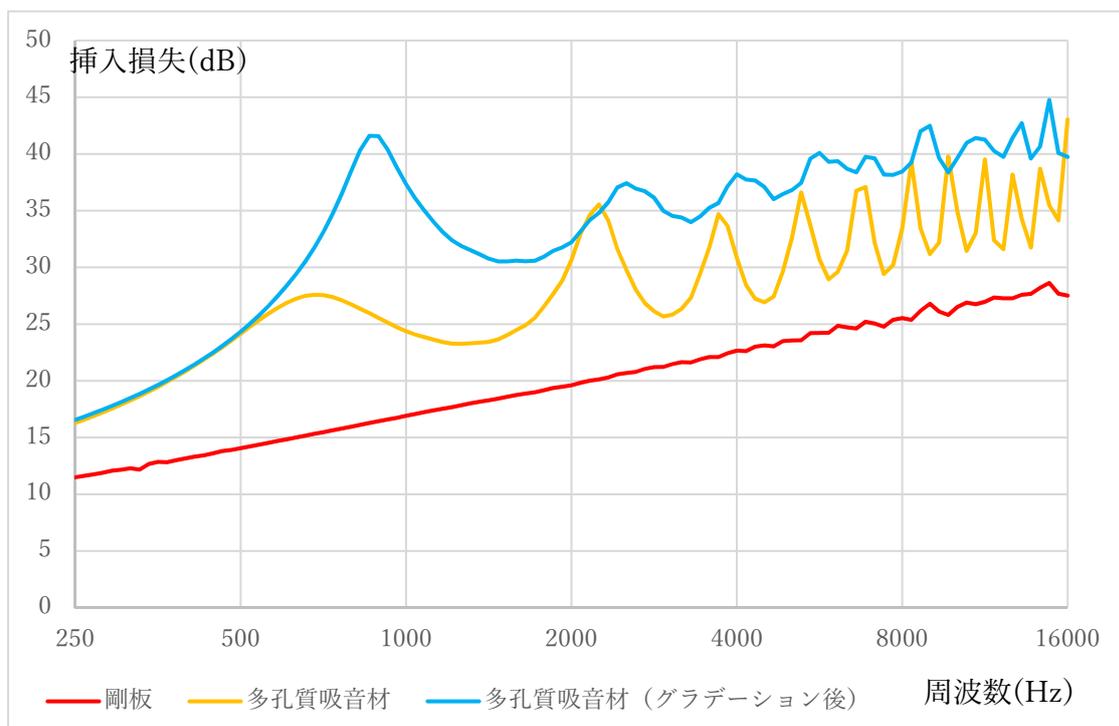
有孔板を用いた既往研究がある。その既往研究は、「多孔質吸音材と同じ透過率の有孔板を用いれば、同じ性能のエッジ効果抑制型遮音壁になるのではないか？」といった仮説のもとに行われた。しかし、結果としては、有孔板では多孔質吸音材と同じ透過率を実現することは不可能であった。また、できる限り同じ透過率を持つ有孔板を用いても多孔質吸音材ほどの遮音効果は得られなかった。

今回の研究は、上記の既往研究結果を踏まえた上で行う。本研究では、「多孔質材料と同じ透過率を持つように」という条件に縛られず、色々な孔の大きさや孔の間隔、板厚を持つ有孔板を自在に組み合わせて、有孔板を用いた場合の最も遮音性能が高いエッジ効果抑制型遮音壁の探索をする。その際、有孔板の挿入損失に影響する ①孔の直径（孔径）②板厚③開孔率（穴がどれだけ空いているか）④面密度（有孔板の重さ）を変化させることによって、有孔板を用いた際に高い遮音効果が得られる物性値を探索する。

1-5 研究目標

本研究では、有孔板を設置した遮音壁の挿入損失と、多孔質吸音材、グラデーションした多孔質吸音材それぞれを設置した遮音壁の挿入損失を比較する。実際に日常で発せられる音には様々な周波数が入り混じっている（高い音は周波数が高く、低い音は周波数が低い）。そのため、どの周波数にも対応できる遮音壁でなければならない。そこで、周波数による挿入損失の変化を調べるため、グラフの横軸を周波数（Hz）、縦軸を挿入損失（dB）に設定したグラフを作成する。

以下のグラフ1は、剛壁のみの場合と、多孔質吸音材、グラデーションした多孔質吸音材それぞれを挿入したときの周波数（Hz）－挿入損失（dB）関係式を記しており、黄色線が多孔質吸音材（グラデーション前）、水色線が多孔質吸音材（グラデーション後）、赤線が剛板（先端に何もつけていない状態）を表している。本論文では、この色付けで固定するものとする。



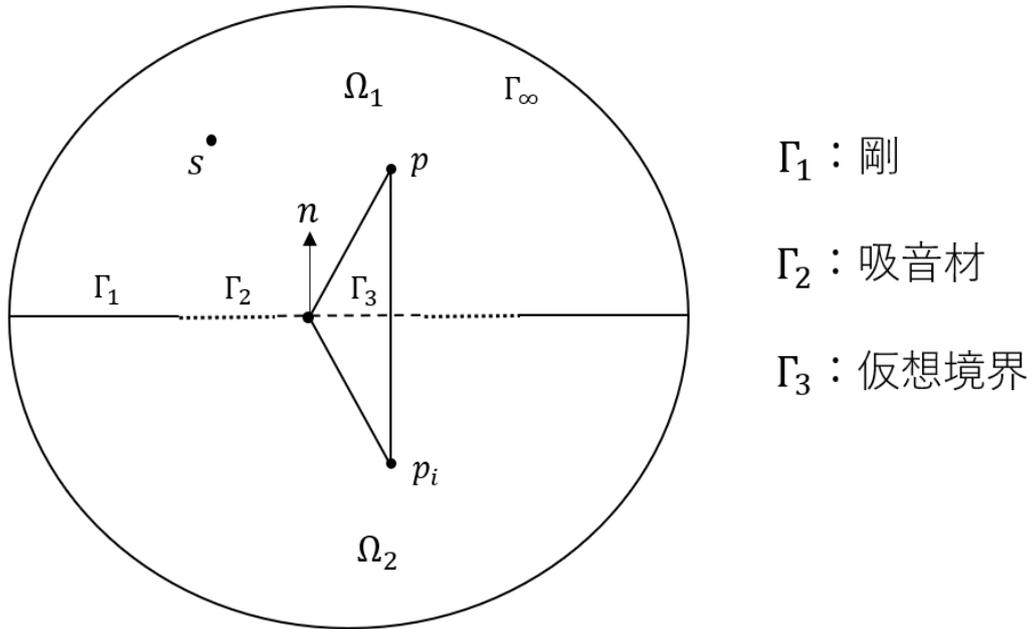
グラフ 1

この研究は、有孔板を用いて、多孔質吸音材のエッジ効果抑制型遮音壁と同程度、またはそれ以上の遮音効果を発揮させることが目的であるため、有孔板の挿入損失が水色線の多孔質吸音材（グラデーション後）を超えることが最終的な目標である（グラフ内の周波数250～1600（Hz）全体において有孔板が多孔質吸音材（グラデーション後）を超えることが理想である）。

第2章 研究方法

2-1 計算方法

1-5で記した周波数 (Hz) - 挿入損失 (dB) 関係式を導くための過程を以下に記す。



Ω_1 (法線内向き)

(実受音点)

$$\begin{aligned}
 \phi_d(r_p) + \int_{\Gamma_1 + \Gamma_2 + \Gamma_3 + \Gamma_\infty} \left\{ \phi_1(r_q) \frac{\partial G(r_p, r_q)}{\partial n_q} - \frac{\partial \phi_1(r_q)}{\partial n_q} G(r_p, r_q) \right\} dS \\
 = \begin{cases} \phi_1(r_p) & (p \in \Omega_1) \\ \frac{1}{2} \phi_1(r_p) & (p \in \Gamma_{1, 2, 3}) \end{cases} \quad (1)
 \end{aligned}$$

(虚受音点)

$$\begin{aligned} \phi_d(r_{p_i}) + \int_{\Gamma_1+\Gamma_2+\Gamma_3+\Gamma_\infty} \left\{ \phi_1(r_q) \frac{\partial G(r_{p_i}, r_q)}{\partial n_q} - \frac{\partial \phi_1(r_q)}{\partial n_q} G(r_{p_i}, r_q) \right\} dS \\ = \begin{cases} \frac{1}{2} \phi_1(r_{p_i}) & (p_i \in \Gamma_{1, 2, 3}) \\ 0 & (p_i \notin \Omega_1) \end{cases} \quad (2) \end{aligned}$$

$$G(r_p, r_q) = \frac{e^{ikr}}{4\pi r} \quad , \quad G(r_{p_i}, r_q) = \frac{e^{ikr_i}}{4\pi r_i} \quad , \quad G'(r_p, r_q) = \frac{e^{ikr}}{4\pi r} + \frac{e^{ikr_i}}{4\pi r_i}$$

境界条件より $\frac{\partial \phi_1(r_q)}{\partial n_q} = 0$ ($p \in \Gamma_1$)、位置関係より $\frac{\partial G'(r_p, r_q)}{\partial n_q} = 0$ 、 $G'(r_p, r_q) = 2G(r_p,$

$r_q)$ 、放射条件より $\int_{\Gamma_\infty} \{ \} dS = 0$

p が $\Gamma_{1, 2, 3}$ 上にある時、 $\phi_d(r_p) = \phi_d(r_{p_i})$ 、 $\phi_1(r_p) = \phi_1(r_{p_i})$ より、(1) + (2) は

$$\begin{aligned} \phi_d(r_p) + \phi_d(r_{p_i}) + \int_{\Gamma_1+\Gamma_2+\Gamma_3+\Gamma_\infty} \left\{ \phi_1(r_p) \frac{\partial G'(r_p, r_q)}{\partial n_q} - \frac{\partial \phi_1(r_q)}{\partial n_q} G'(r_p, r_q) \right\} dS \\ = \frac{1}{2} \phi_1(r_p) + \frac{1}{2} \phi_1(r_{p_i}) \end{aligned}$$

$$\rightarrow 2\phi_d(r_p) + \int_{\Gamma_2+\Gamma_3} \left\{ -\frac{\partial \phi_1(r_q)}{\partial n_q} G'(r_p, r_q) \right\} dS = \phi_1(r_p)$$

$$\rightarrow 2\phi_d(r_p) - \int_{\Gamma_2+\Gamma_3} \left\{ \frac{\partial \phi_1(r_q)}{\partial n_q} G(r_p, r_q) \right\} dS = \phi_1(r_p) \quad (3)$$

Ω_2 (法線外向き)

(実受音点)

$$\begin{aligned} - \int_{\Gamma_1+\Gamma_2+\Gamma_3+\Gamma_\infty} \left\{ \phi_2(r_q) \frac{\partial G(r_p, r_q)}{\partial n_q} - \frac{\partial \phi_2(r_q)}{\partial n_q} G(r_p, r_q) \right\} dS \\ = \begin{cases} \phi_2(r_p) & (p \in \Omega_2) \\ \frac{1}{2} \phi_2(r_p) & (p \in \Gamma_{1, 2, 3}) \end{cases} \quad (4) \end{aligned}$$

(虚受音点)

$$\begin{aligned}
 & - \int_{\Gamma_1 + \Gamma_2 + \Gamma_3 + \Gamma_\infty} \left\{ \phi_2(r_q) \frac{\partial G(r_{p_i}, r_q)}{\partial n_q} - \frac{\partial \phi_2(r_q)}{\partial n_q} G(r_{p_i}, r_q) \right\} dS \\
 & = \begin{cases} \frac{1}{2} \phi_2(r_{p_i}) & (p_i \in \Gamma_{1, 2, 3}) \\ 0 & (p_i \notin \Omega_2) \end{cases} \quad (5)
 \end{aligned}$$

境界条件より $\frac{\partial \phi_2(r_q)}{\partial n_q} = 0$ ($p \in \Gamma_1$)、位置関係より $\frac{\partial G'(r_p, r_q)}{\partial n_q} = 0$ 、 $G'(r_p, r_q) = 2G(r_p, r_q)$ 、

放射条件より $\int_{\Gamma_\infty} \{ \} dS = 0$

p が $\Gamma_{1, 2, 3}$ 上にある時、 $\phi_d(r_p) = \phi_d(r_{p_i})$ 、 $\phi_2(r_p) = \phi_2(r_{p_i})$ より、(4) + (5) は

$$\begin{aligned}
 & - \int_{\Gamma_1 + \Gamma_2 + \Gamma_3 + \Gamma_\infty} \left\{ \phi_2(r_q) \frac{\partial G'(r_p, r_q)}{\partial n_q} - \frac{\partial \phi_2(r_q)}{\partial n_q} G'(r_p, r_q) \right\} dS = \frac{1}{2} \phi_2(r_p) + \frac{1}{2} \phi_2(r_{p_i}) \\
 & \rightarrow - \int_{\Gamma_2 + \Gamma_3} \left\{ - \frac{\partial \phi_2(r_q)}{\partial n_q} G'(r_p, r_q) \right\} dS = \phi_2(r_p) \\
 & \rightarrow 2 \int_{\Gamma_2 + \Gamma_3} \left\{ \frac{\partial \phi_2(r_q)}{\partial n_q} G(r_p, r_q) \right\} dS = \phi_2(r_p) \quad (6)
 \end{aligned}$$

連続条件 (境界条件)

$\phi_1(r_p) = \phi_2(r_p)$ ($p \in \Gamma_3$)、 $\frac{\partial \phi_1(r_q)}{\partial n_q} = \frac{\partial \phi_2(r_q)}{\partial n_q}$ ($q \in \Gamma_{2, 3}$)、 $\frac{p_2 - p_1}{v_n} = z$ ($p \in \Gamma_2$) より

$\phi_1(r_p) - \phi_2(r_p) = -\frac{z}{i\omega\rho} \frac{\partial \phi_1(r_p)}{\partial n_p}$ ($p \in \Gamma_2$)

(3) - (6) より

$$\begin{aligned}
 & 2\phi_d(r_p) - 2 \int_{\Gamma_2 + \Gamma_3} \left\{ \frac{\partial \phi_1(r_q)}{\partial n_q} G(r_p, r_q) \right\} dS - 2 \int_{\Gamma_2 + \Gamma_3} \left\{ \frac{\partial \phi_2(r_q)}{\partial n_q} G(r_p, r_q) \right\} dS \\
 & = \phi_1(r_p) - \phi_2(r_p) \\
 & \rightarrow 2\phi_d(r_p) - 4 \int_{\Gamma_2 + \Gamma_3} \left\{ \frac{\partial \phi_2(r_q)}{\partial n_q} G(r_p, r_q) \right\} dS = \begin{cases} -\frac{z}{i\omega\rho} \frac{\partial \phi_2(r_p)}{\partial n_p} & (p \in \Gamma_2) \\ 0 & (p \in \Gamma_3) \end{cases}
 \end{aligned}$$

	Γ_2	Γ_3		
Γ_2	$4 \int_{\Delta S} G(r_p, r_q) dS - \frac{z}{i\omega\rho} \delta$	$4 \int_{\Delta S} G(r_p, r_q) dS$	$\frac{\partial\phi_2(r_p)}{\partial n_p}$	$2\phi_d(r_p)$
Γ_3	$4 \int_{\Delta S} G(r_p, r_q) dS$	$4 \int_{\Delta S} G(r_p, r_q) dS$	$\frac{\partial\phi_2(r_p)}{\partial n_p}$	$2\phi_d(r_p)$

ポテンシャル $p \in \Omega_1 (p_i \notin \Omega_1)$ の時、(1) + (2)により

$$\phi_1(r_p) = \phi_d(r_p) + \phi_d(r_{p_i}) - 2 \int_{\Gamma_2 + \Gamma_3} \left\{ \frac{\partial\phi_1(r_q)}{\partial n_q} G(r_p, r_q) \right\} dS$$

$p \in \Omega_2 (p_i \notin \Omega_2)$ の時、(4) + (5)により

$$\phi_2(r_p) = 2 \int_{\Gamma_2 + \Gamma_3} \left\{ \frac{\partial\phi_2(r_q)}{\partial n_q} G(r_p, r_q) \right\} dS$$

(遮音壁あり)

$$P_2(r_p) = \rho \frac{\partial\phi_2(r_p)}{\partial t} = -i\omega\rho\phi_2(r_p) = -i\omega\rho \cdot 2 \int_{\Gamma_2 + \Gamma_3} \left\{ \frac{\partial\phi_2(r_q)}{\partial n_q} G(r_p, r_q) \right\} dS$$

(遮音壁なし)

$$P_0(r_p) = \rho \frac{\partial\phi_0(r_p)}{\partial t} = -i\omega\rho\phi_0(r_p) = -i\omega\rho \cdot \frac{e^{ikr}}{4\pi r}$$

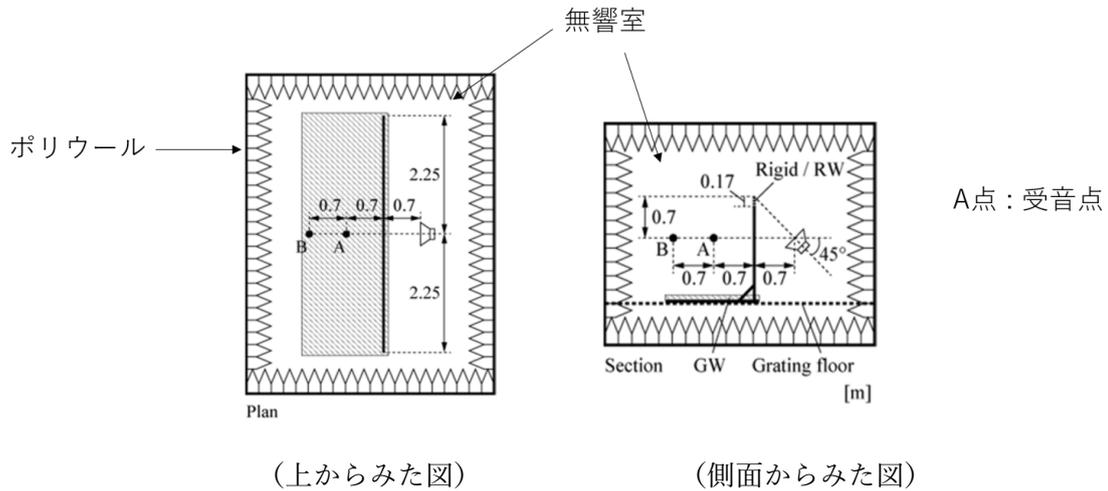
$|P_0|$ 、 $|P_2|$ は振幅であるから、

$$\text{挿入損失 (dB)} = 20 \log_{10} \frac{|P_2|}{|P_0|} = 20 \log_{10} \frac{8 \int_{\Gamma_2 + \Gamma_3} \left\{ \frac{\partial\phi_2(r_q)}{\partial n_q} G(r_p, r_q) \right\} dS}{\frac{e^{ikr}}{\pi r}}$$

$k = \frac{\omega}{c} = \frac{2\pi f}{c}$ であり、 f (Hz) は周波数であるため、この式から、ある周波数 f (Hz) における挿入損失を求めることができる。

2-2 計算条件

本研究では、既往研究で使われた以下の図の条件で計算を行う。また、計算には Fortran を利用する。



ポリウールは無響室空間をつくりだすために使用する。また、この図ではA、B点2つの受音点があるが、本研究ではA点のみを受音点とした条件で計算する。

2-3 研究計画

本研究の流れとしては、有孔板の挿入損失に影響を与える孔径 (dp)、板厚 (hp)、開孔率 (pr)、面密度 (sd) のそれぞれを変化させ、有孔板をグラデーションする前において大きな挿入損失が得られる物性値を探索する所から始める。そして、特に大きな挿入損失が得られた物性値を先端につれて流れ抵抗が小さくなるようにグラデーションすることで、遮音壁としての精度を高めていく。具体的なグラデーション方法は後述する。

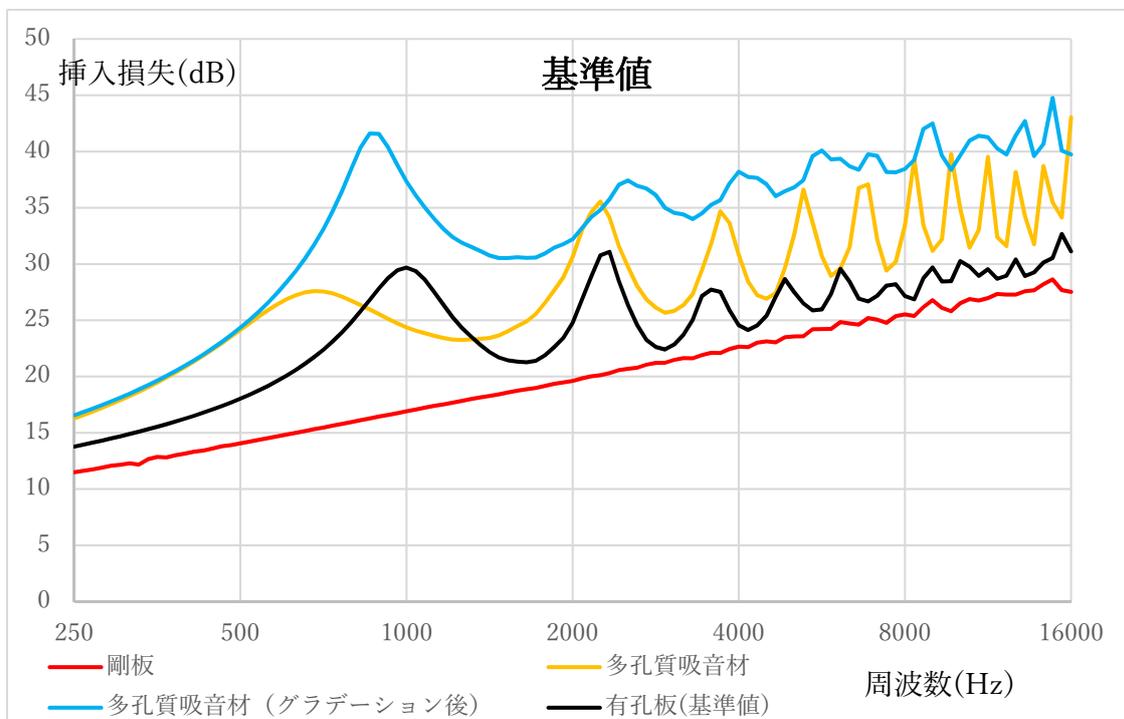
第3章 物性値の設定

3-1 基準となる物性値の設定

有孔板で大きな挿入損失が得られる物性値を探索するにあたって、孔径、板厚、開孔率のうち一項目のみを変化させることで、その項目の変化が有孔板の挿入損失に与える影響を調べる。面密度については、既往研究で挿入損失に大きな影響を与えないと判断したため、本研究では変化させず、 0.6 kg/m^2 として固定する。孔径、板厚、開孔率の一項目のみの変化を調べるためには、まずは基準となる物性値設定が必要である。そこで、基準となる物性値の値を表1、周波数 (Hz) - 挿入損失 (dB) 関係式をグラフ2に記す。

基準値	
孔の直径	$d_p=0.0005 \text{ m}$
板厚	$h_p=0.0005 \text{ m}$
開孔率	$p_r=0.00785 (0.785\%)$
面密度	$s_d=0.6 \text{ kg/m}^2$

表 1 有孔板物性値の基準値



グラフ 2

3 - 2 物性値の設定範囲

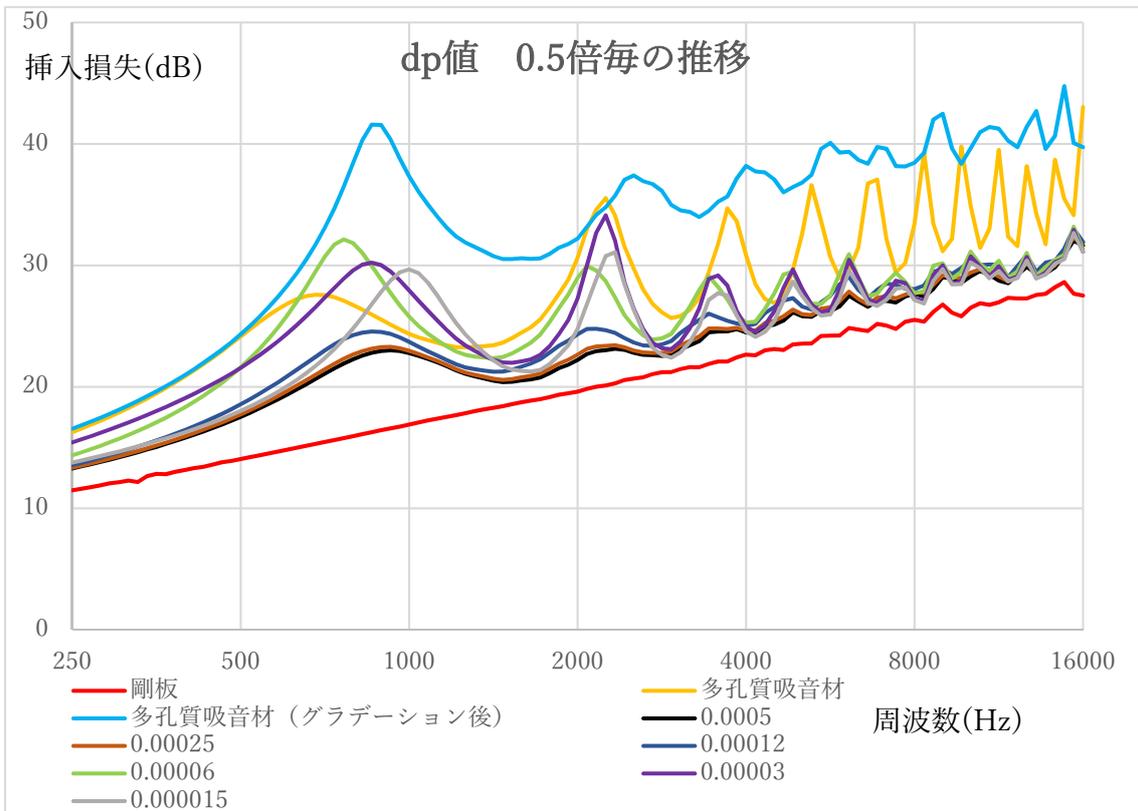
物性値設定において、設定数値の範囲は無限大という訳にはいかない。例えば、板厚を非常に薄くする場合、実現にあたっては非常に高い技術が必要となる。ましてや実現不可能という事態にもなりかねない。そこで、実現可能な範囲で数値設定をする必要がある。本研究では以下表2の範囲で数値設定を行う。

数値設定範囲	
孔の直径	$dp = 0.00001 \sim 0.1 \text{ m}$
板厚	$hp = 0.00001 \sim 0.1 \text{ m}$
開孔率	$pr = 0.000001 \sim 0.3$
面密度	$sd = 0.01 \sim 500 \text{ kg/m}^2$

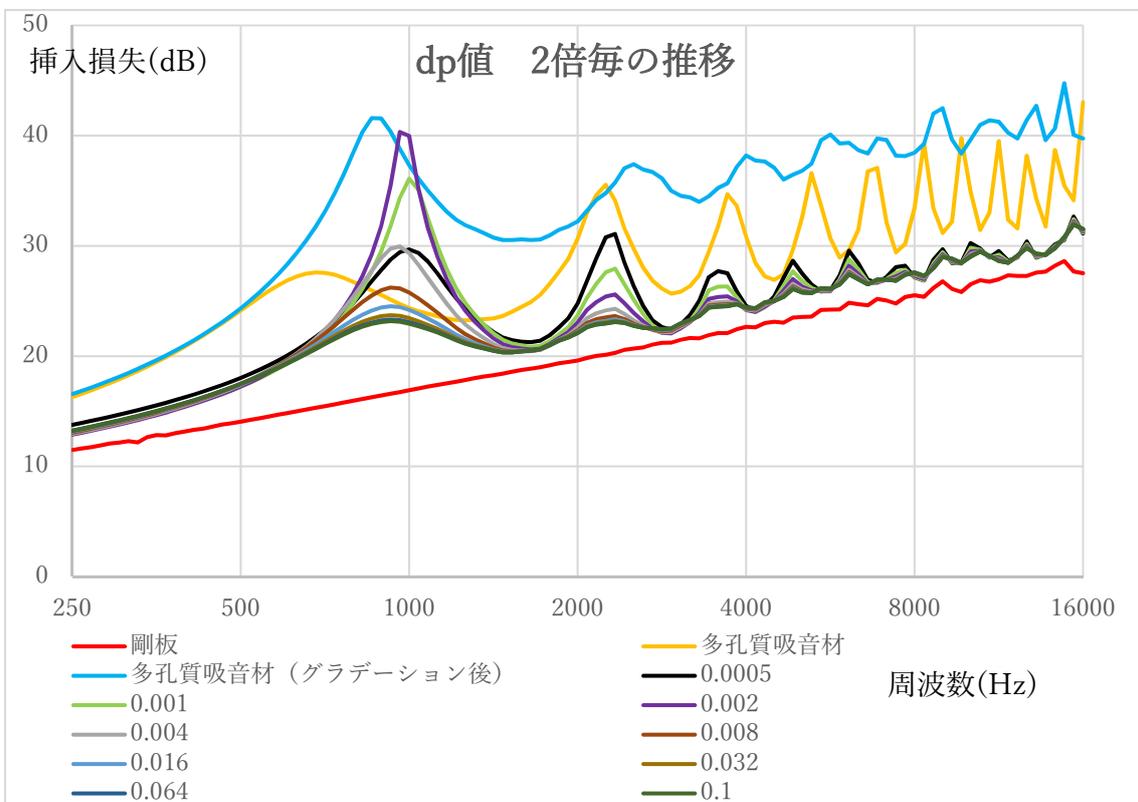
表2 有孔板物性値の数値設定範囲

3 - 3 孔径、板厚、開孔率と挿入損失の関係性

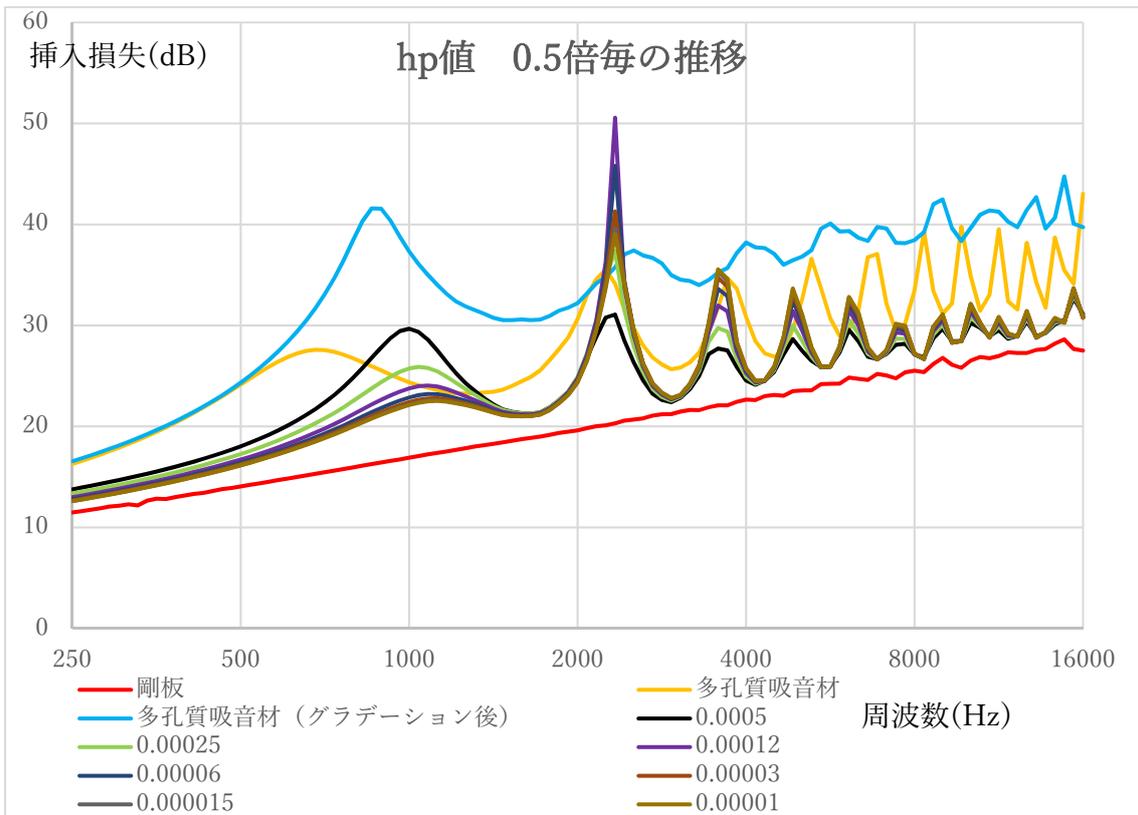
孔径、板厚、開孔率それぞれの変化が有孔板に及ぼす影響を調べる方法としては、予め設定した基準値 ($dp=0.0005 \text{ m}$ $hp=0.0005 \text{ m}$ $pr=0.00785$ $sd=0.6 \text{ kg/m}^2$) から一項目のみを変化させることで、その項目の変化が挿入損失に与える影響を調べる。変化の度合いとしては、基準値から2倍毎、0.5倍毎に数値を設定し、計算する。できるだけ設定範囲ぎりぎりまで計算していくものとする。以下グラフ3~8は、計算結果を周波数 (Hz) - 挿入損失 (dB) 関係式で表したものである。孔径、板厚、開孔率のうち一項目のみの2倍毎、0.5倍毎の推移を表している。



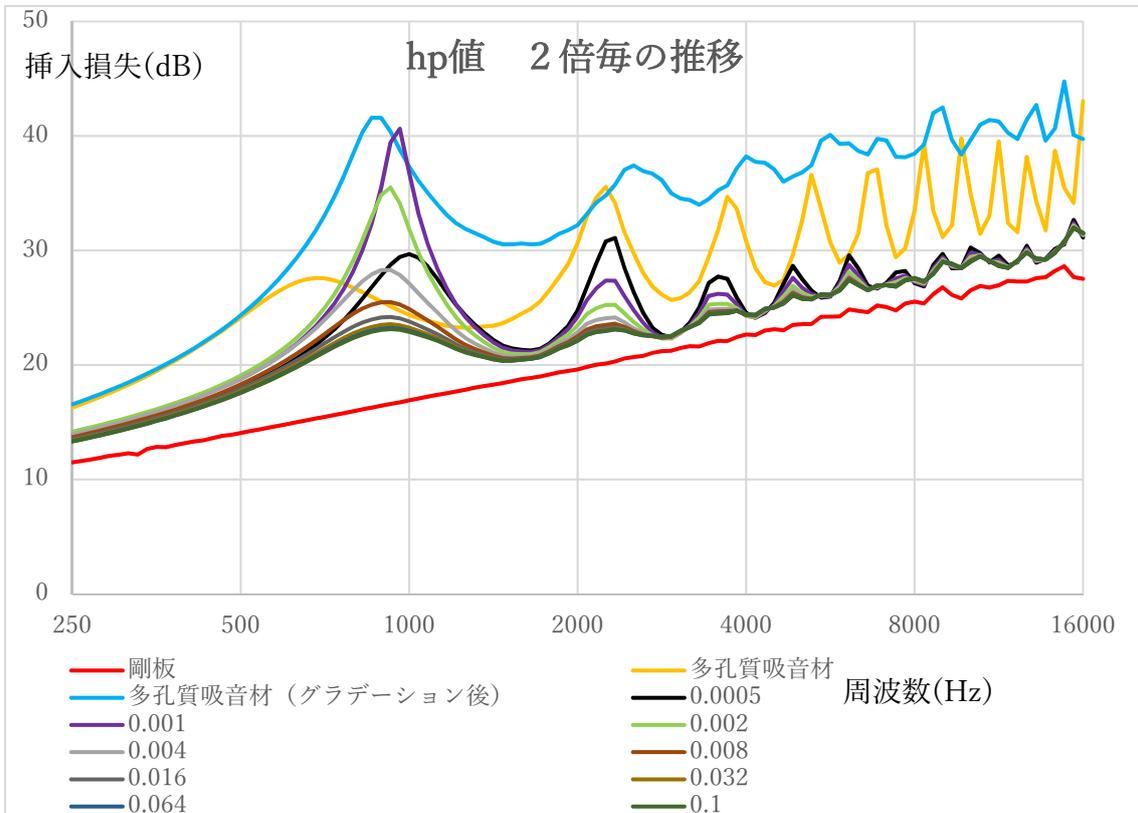
グラフ 3



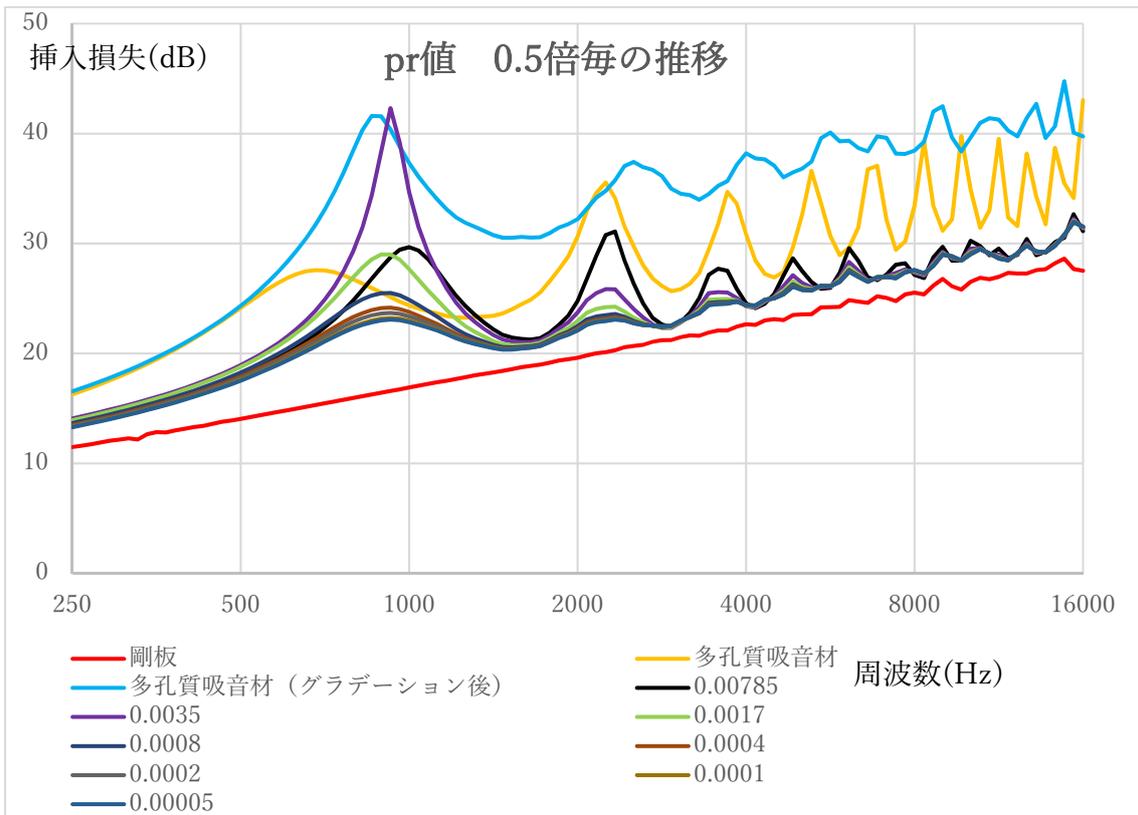
グラフ 4



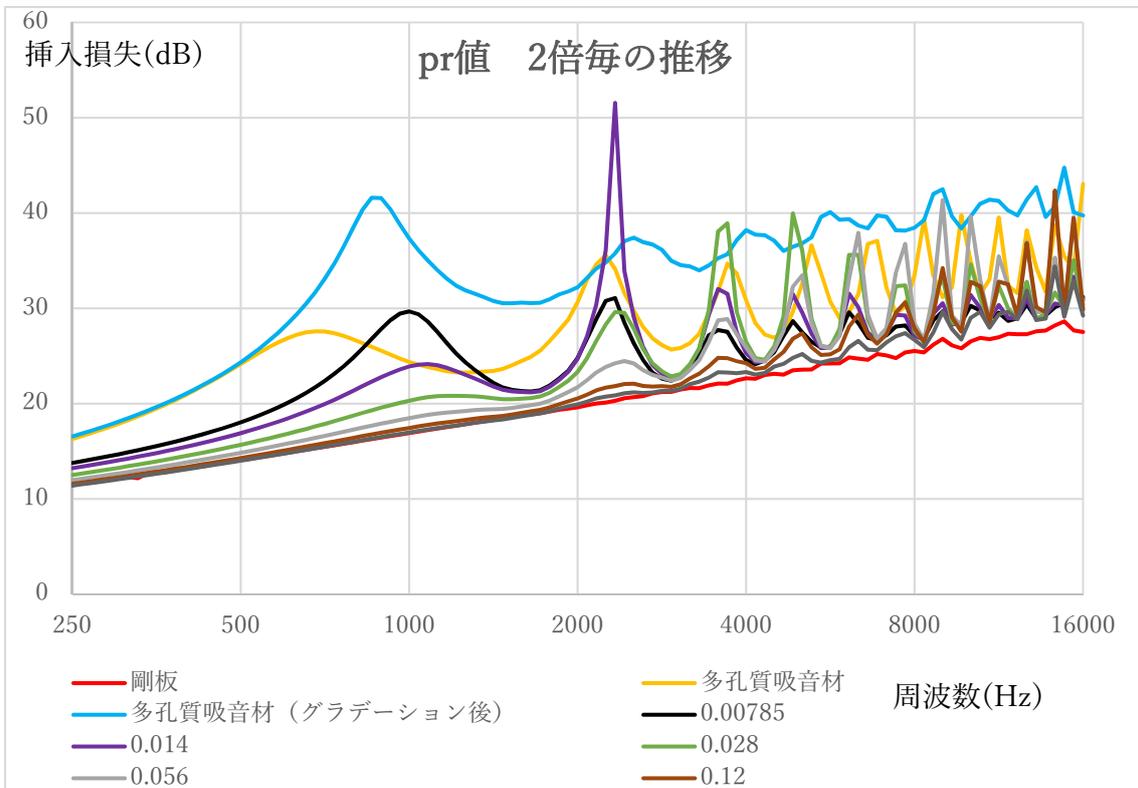
グラフ 5



グラフ 6



グラフ 7



グラフ 8

3-4 計算過程の一例

3-3 でのグラフ 3~8 の結果より、孔径、板厚、開孔率それぞれの数値を上げた時、下げた時において、ある特定の周波数で有孔板の挿入損失に大きな変化が表れていることが見受けられる。この結果から、孔径、板厚、開孔率、それぞれの変化が有孔板の挿入損失に及ぼす影響をある程度予想することができる。これらの結果を踏まえた上で、グラデーションをする前において高い挿入効果が得られることができそうな物性値を予想し、計算する。まず、この時点で目標にしたことが、有孔板が多孔質材よりも大きな挿入損失を得ることである（どちらもグラデーション前）。つまり、有孔板（グラデーション前）のグラフが黄色線を超えることをこの時点での目標とした。3-3 でのグラフ 3~8 の結果を踏まえ、様々な予測をすることができるが、この論文では自身が実際に予測し、計算した一例を記載する。

前文でも記したように、孔径、板厚、開孔率それぞれの数値を上げた時、下げた時において、ある特定の周波数に挿入損失の変化をみることができる。例えば、孔径 (dp) の値を 0.5 倍毎に変化させた際にはグラフ 3 (3-3) より、約 600~1500 (Hz) の範囲で挿入損失が大きくなる傾向が見受けられる。また、板厚 (hp) の値を 0.5 倍毎に変化させた際にはグラフ 5 (3-3) より、約 1600~3000 (Hz) の範囲で挿入損失が非常に大きくなる傾向が見受けられる。その中でも特にこれらの傾向を顕著に表している物性値が以下の 2 つである。

物性値 1 孔径 $dp=0.00012\text{m}$ 板厚 $hp=0.0005\text{m}$ 開孔率 $pr=0.00785$ 面密度 $sd=0.6\text{ kg/m}^2$
(基準値と比べて孔径の値が小さい)

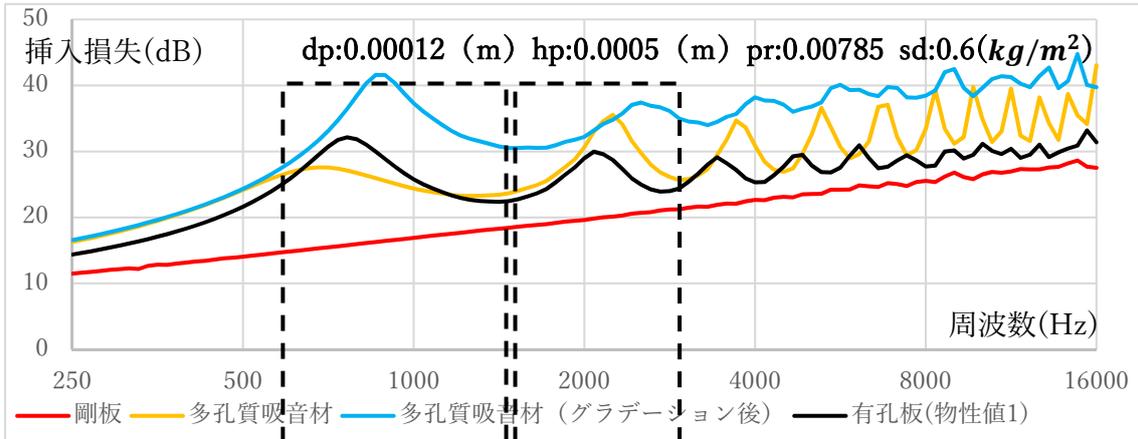
物性値 2 孔径 $dp=0.0005\text{m}$ 板厚 $hp=0.00012\text{m}$ 開孔率 $pr=0.00785$ 面密度 $sd=0.6\text{ kg/m}^2$
(基準値と比べて板厚の値が小さい)

これらの物性値の周波数 (Hz) - 挿入損失 (dB) 関係式を以下のグラフ 9、10 に記した。物性値 1 は約 600~1500 (Hz) の範囲で挿入損失が大きいが、その他の周波数では多孔質吸音材と比べて挿入損失は小さい。一方で物性値 2 は約 1600~3000 (Hz) の範囲で挿入損失が非常に大きいが、その他の周波数では多孔質吸音材と比べて挿入損失は小さい。

そこで、「同じ基準値から変化し、相反する効果をもつようになったこれらの 2 つの物性値を組み合わせることで、お互いの挿入損失の低い周波数を補うことができるのではないか?」と考えた。つまり、物性値 1 は基準値から孔径の値のみを小さくし、物性値 2 は板厚の値のみを小さくしたのだが、これらの変化を 1 つに統合することである。要するに基準値から 2 つの項目を変化させることである(今回の場合、孔径と板厚の値共に小さくする)。このような考えの元、物性値 1 と物性値 2 を組み合わせてできた物性値 3 の周波数 (Hz) - 挿入損失 (dB) 関係式を以下のグラフ 11 に記した。

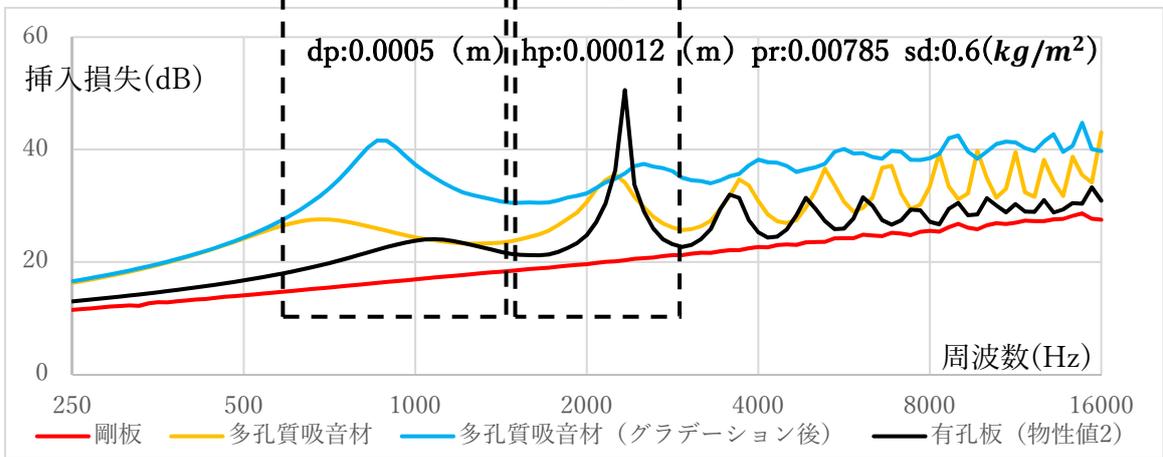
物性値 3

孔径 $dp=0.00012\text{m}$ 板厚 $hp=0.00012\text{m}$ 開孔率 $pr=0.00785$ 面密度 $sd=0.6\text{ kg/m}^2$
(基準値と比べて孔径、板厚ともに小さい)

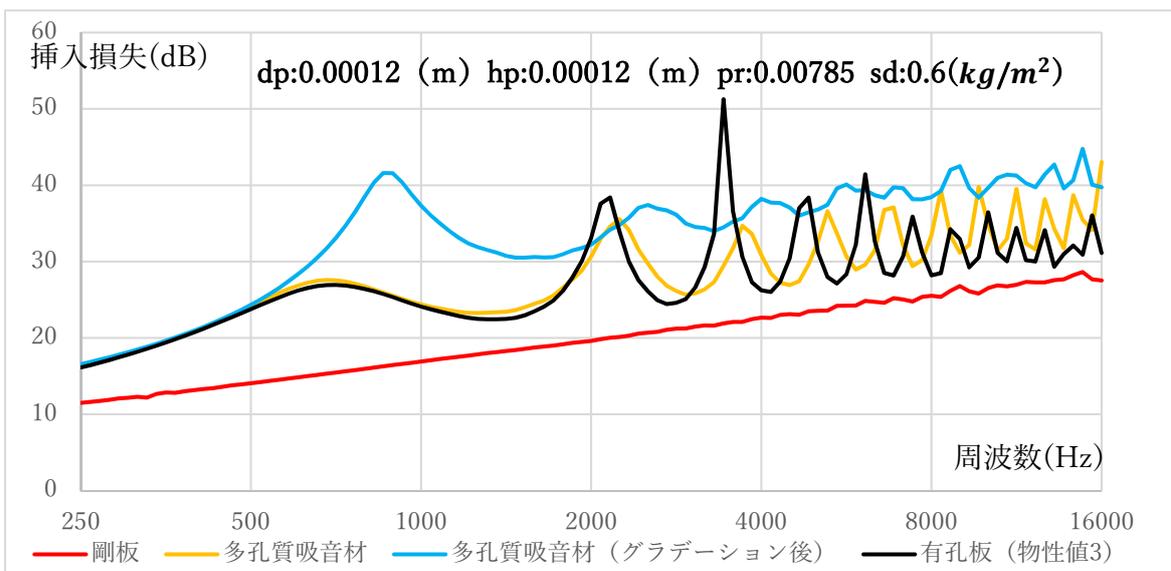


+

グラフ 9 (物性値 1)



グラフ 10 (物性値 2)



グラフ 11 (物性値 3)

2つの物性値を組み合わせた物性値3（グラフ11）では、全体的に挿入損失が大きく向上したことが見受けられる。これは成功例の一例を示したものであり、実際に自身が3-3の結果を元にして挿入損失が高くなりそうな物性値を予想し、計算した数は110に及ぶ。

3-5 計算結果1

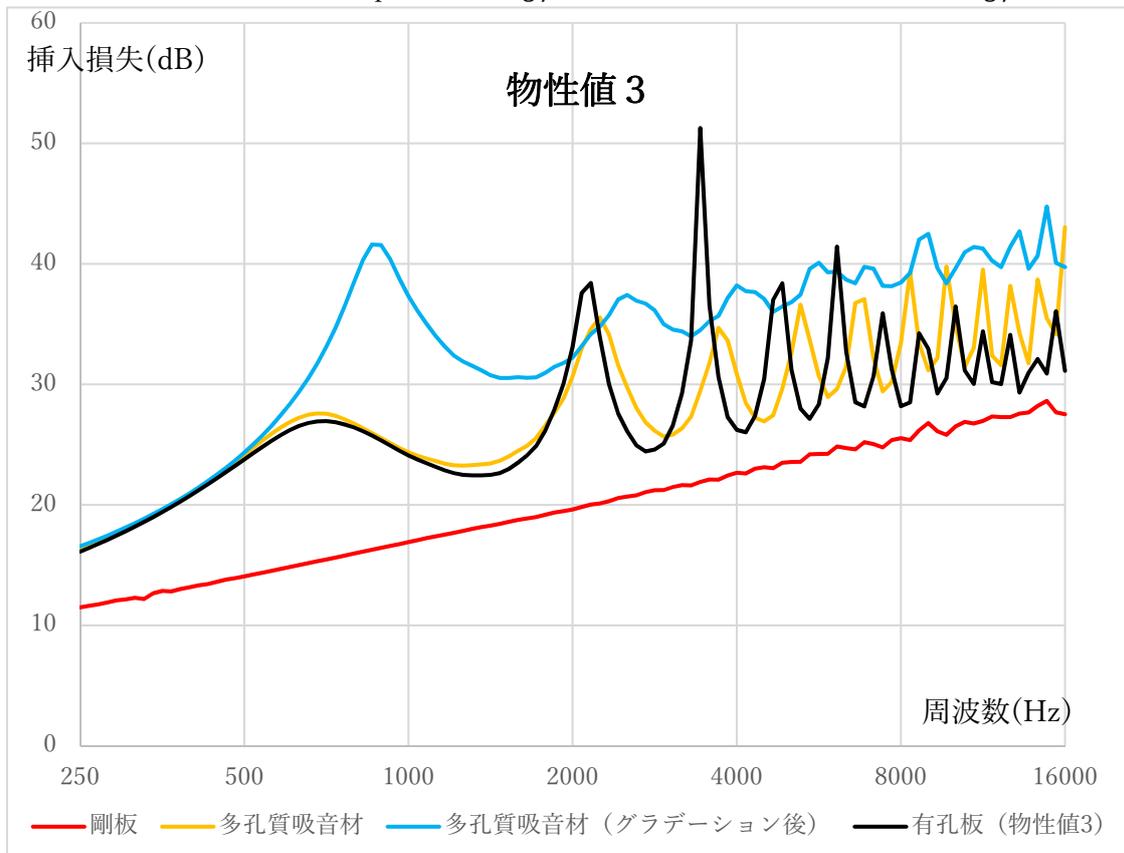
（幅広い周波数で挿入損失が大きい物性値）

3-3の結果を元にして実際に自身が予想し、計算した物性値の中でも特に幅広い周波数で、大きな挿入損失が得られた物性値を表3、周波数（Hz）－挿入損失（dB）関係式をグラフ11、12に記した。

物性値3		物性値4	
孔の直径	dp=0.00012 m	孔の直径	dp=0.00012 m
板厚	hp=0.00012 m	板厚	hp=0.0005 m
開孔率	pr=0.00785 (0.785%)	開孔率	pr=0.014 (1.4%)
面密度	sd=0.6 kg/m ²	面密度	sd=0.6 kg/m ²

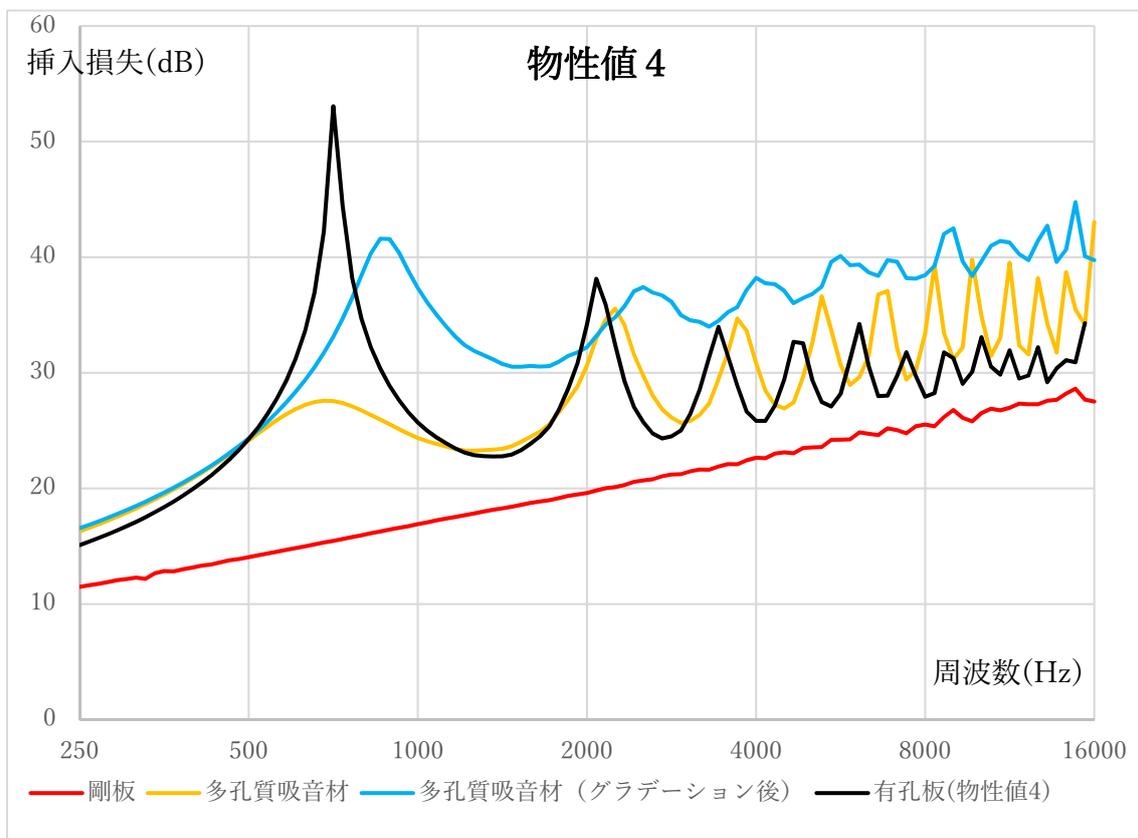
表3 幅広い周波数で大きな挿入損失が得られた物性値

【物性値3の体積密度 (sd/hp) = 5000kg/m³ チタン (Ti) の密度：4510 kg/m³】



グラフ11

【物性値4の体積密度 (sd/hp) = アクリル (PMMA)、ポリカーボネート (PC)、ウレタンゴム (U) の密度 = 1200kg/m^3 】



グラフ 12

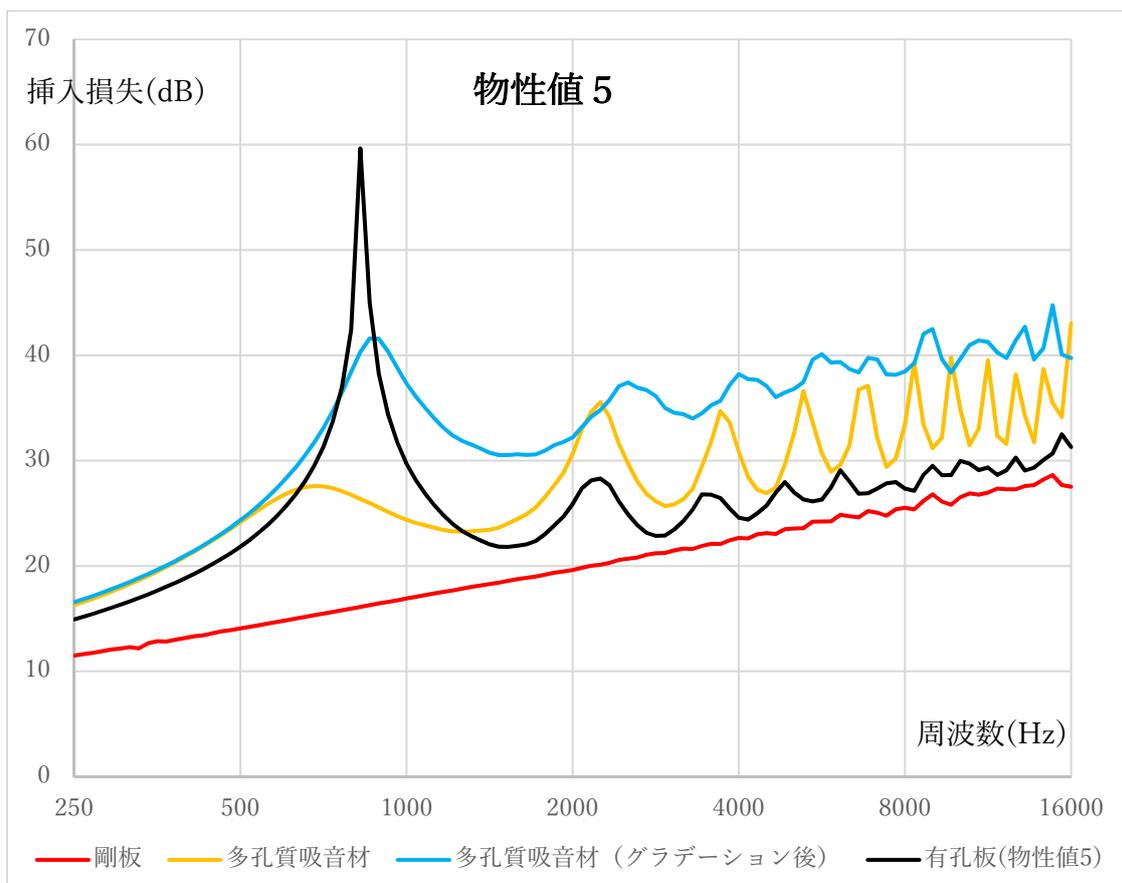
3-6 計算結果 2

(特定の周波数で挿入損失が非常に大きい物性値)

3-5 では、幅広い周波数で高い挿入損失が得られた物性値を記したが、計算した物性値の中には、特定の周波数で非常に挿入損失が大きくなるようなものもみられた。鉄道や高速道路などのような様々な周波数を発する音を遮音する場合、3-5 で記した有孔板物性値のように、どのような周波数でもある程度遮音可能である必要がある。しかし、ファン (送風機) のように、発せられる音の周波数が限定的である場合は、遮音すべき音の周波数と特に大きな挿入損失が得られる周波数が一致しているとすれば、十分にその利用価値はあると考えている。グラデーション前において特定の周波数で非常に大きな挿入損失が得られた物性値を以下の表 4、周波数 (Hz) - 挿入損失 (dB) 関係式をグラフ 13 に記した。

物性値 5	
孔の直径	$d_p=0.00025 \text{ m}$
板厚	$h_p=0.001 \text{ m}$
開孔率	$pr=0.00785 \text{ (0.785\%)}$
面密度	$sd=0.6 \text{ kg/m}^2$

表 4 特定の周波数で非常に大きな挿入損失が得られた物性値
【物性値 5 の体積密度 (sd/h_p) = 桜の密度 = 600 kg/m^3 】



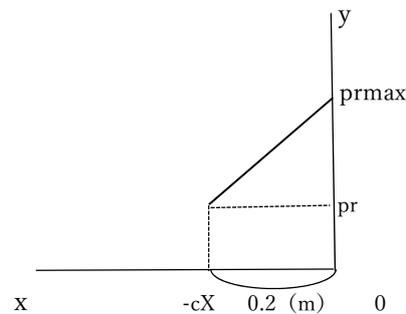
グラフ 13

第4章 有孔板のグラデーション

4-1 グラデーション方法

多孔質吸音材では吸音材の先端に行くにつれて抵抗を徐々に小さくすること（グラデーション）によって遮音効果がより高まった。有孔板においても多孔質吸音材と同様にグラデーションすることによって遮音効果を高めたい。本研究では、第3章の計算で特に大きな挿入損失が得られた有孔板の物性値3、物性値4、物性値5をグラデーションする。有孔板のグラデーション方法としては、開孔率（ pr ）を先端に行くにつれて徐々に大きくすることにより行う。有孔板の高さを0.2mとし、0.005m毎に先端に向けて徐々に開孔率を大きくしていく（40段階で区切る）。ある有孔板の高さにおける開孔率は以下の計算で求める。

$$y = \frac{pr_{max} - pr}{cX} x + pr_{max}$$



変数 y は開孔率、変数 x は遮音壁高さ (m)

$x=0$ の点は有孔板の先端

$x = -cX$ の点は有孔板が遮音壁と接する部分

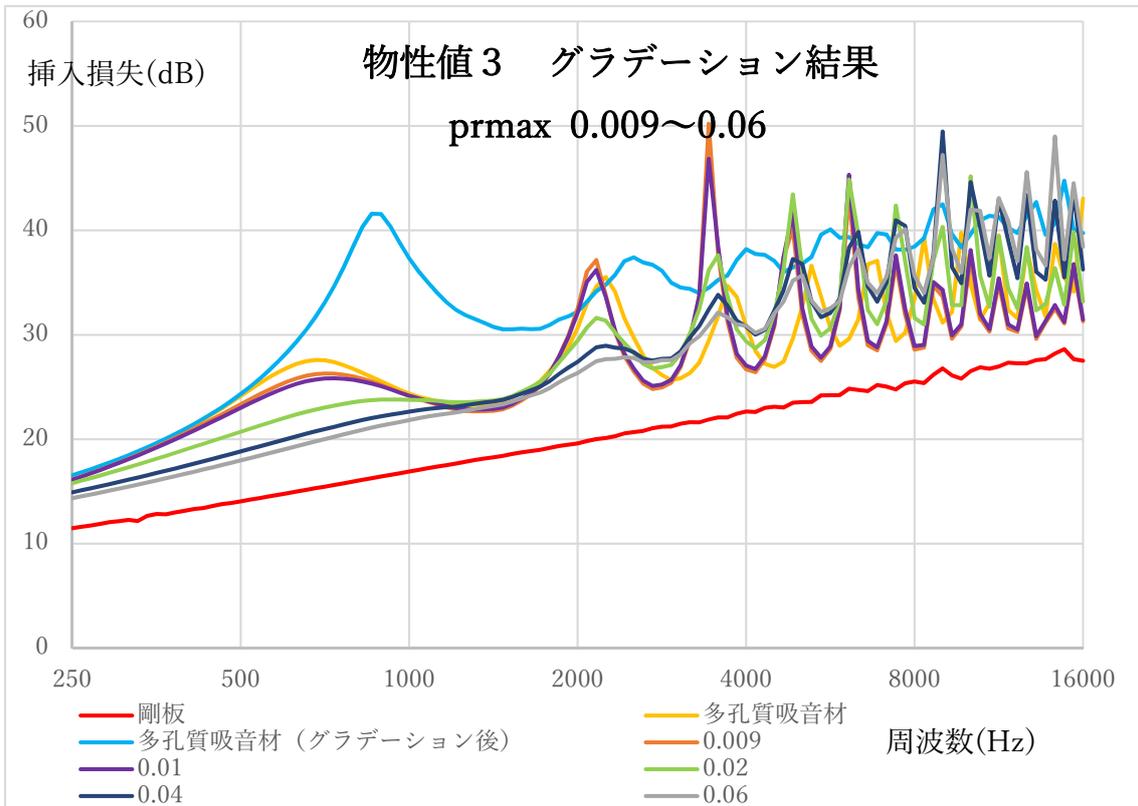
$y = pr_{max}$: 有孔板の先端開孔率

$y = pr$: 遮音壁と接する部分の有孔板の開孔率

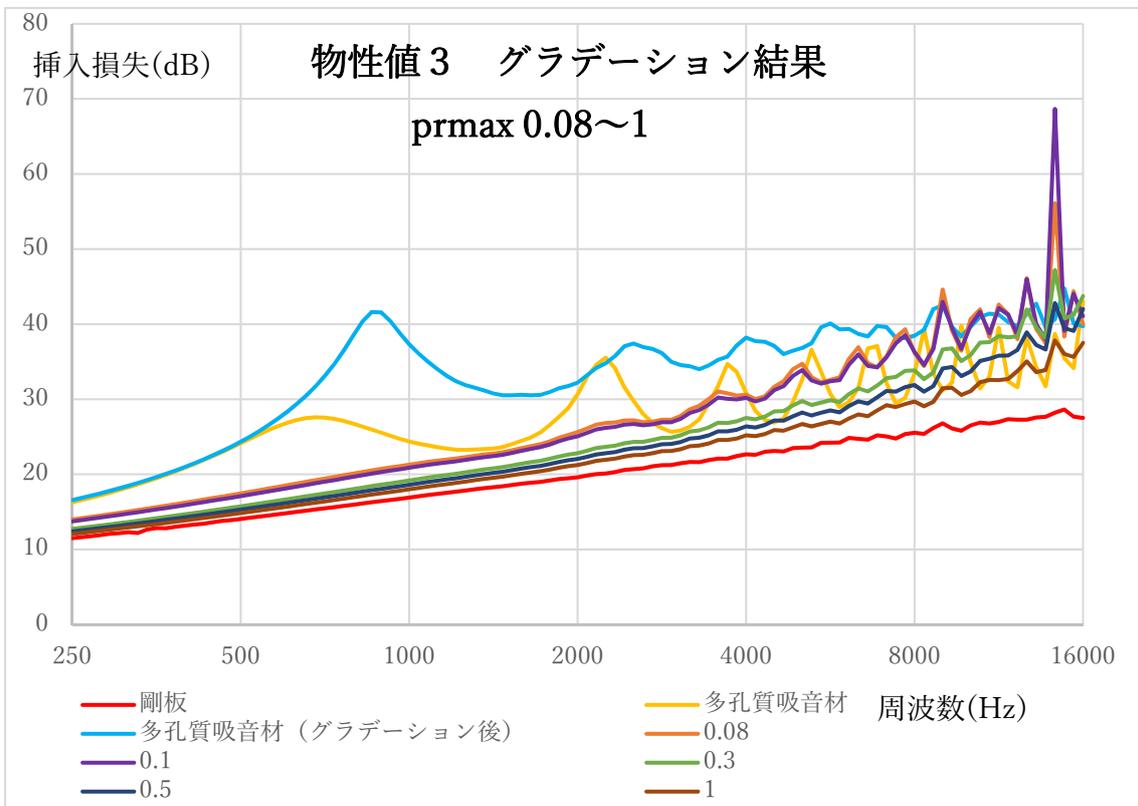
x を 0.005 (m) 毎に代入することで、その有孔板高さ x における有孔板の開孔率を求め、第2章3-1、3-2と同様の計算方法、条件で計算する。

4-2 グラデーション結果

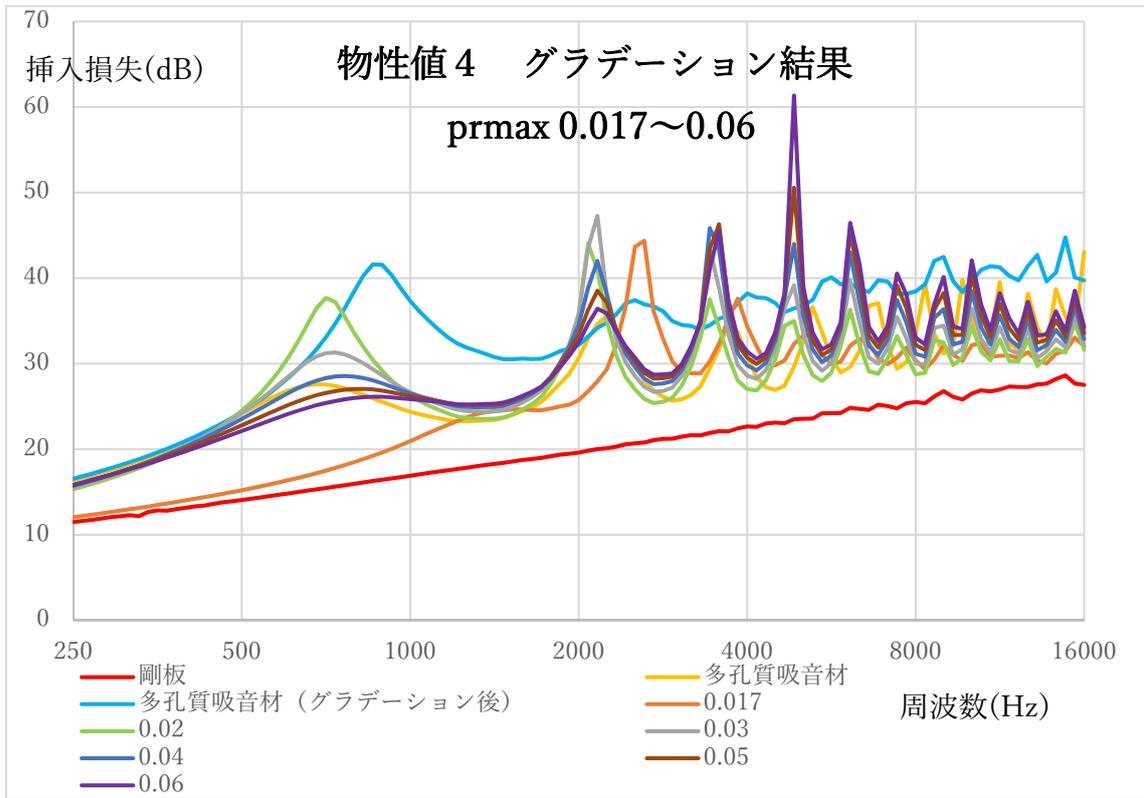
物性値3~5でのグラデーション結果を以下のグラフ14~19に記した。このグラフからも見受けられるように、物性値3~5においてグラデーションにより遮音効果を大幅に高めることはできなかった。グラデーションすることで遮音効果の高まった部分も見受けられるが、その効果は小さい。この結果より、自身はこれらの物性値ではこれ以上、さらに細かな pr_{max} 値を設定したとしても、大幅な遮音効果の向上につながらないと判断した。



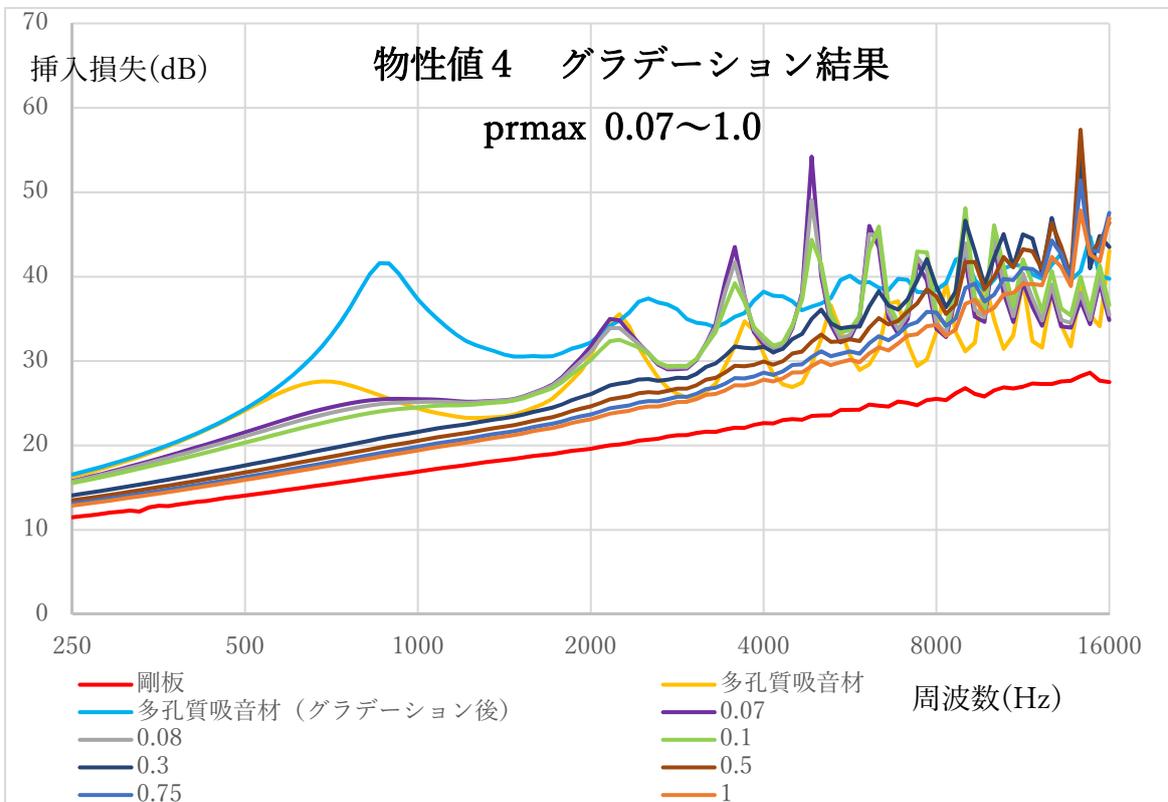
グラフ 14



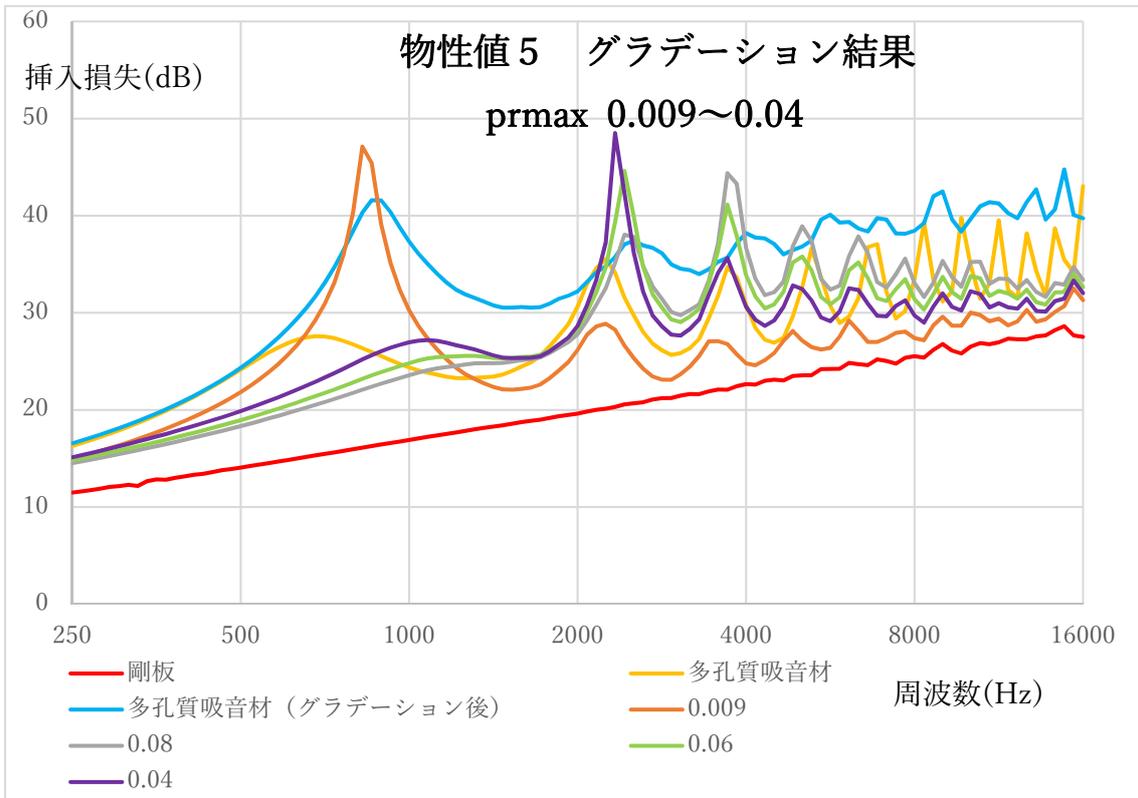
グラフ 15



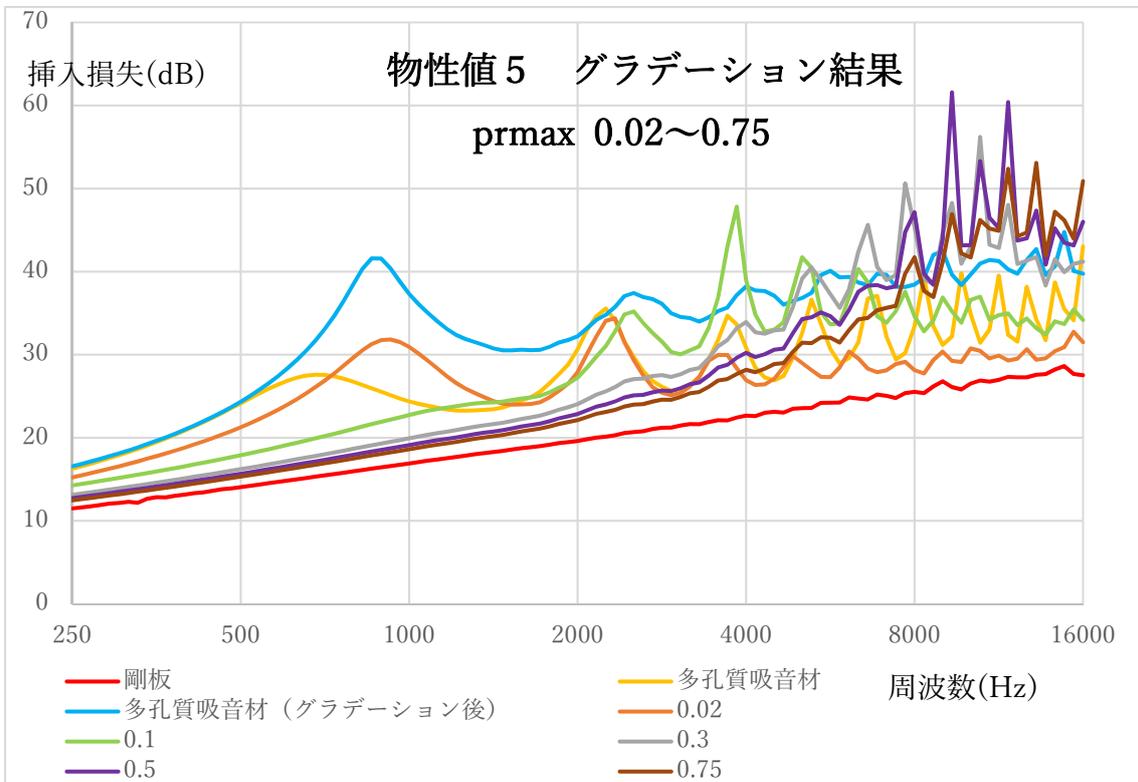
グラフ 16



グラフ 17



グラフ 18



グラフ 19

4-3 新たなアプローチ

物性値3~5では、グラデーションすることで遮音効果を大幅に高めることはできなかった。そこで、自分なりに更なるアプローチを考え、実行した。まず、はじめに試みたのが以下の①である。

① グラデーション前における新たな物性値設定

→挿入損失が特に高かった物性値をグラデーション

新たな物性値の探索においては、第3章で特に高い遮音効果が得られた物性値3、4を基準にして孔径、厚板、開孔率のそれぞれを小刻みに変化させ、物性値3、4よりもさらに遮音効果の高い物性値を探索した。しかし、物性値3、4と比べて大きく遮音効果が向上するような結果が得られなかったため、グラデーション後においても目立った結果は得られなかった。そこで、次に新たなアプローチを試みた。それが以下の②である。

② これまでのグラデーション後の結果を基にして、開孔率と先端の開孔率

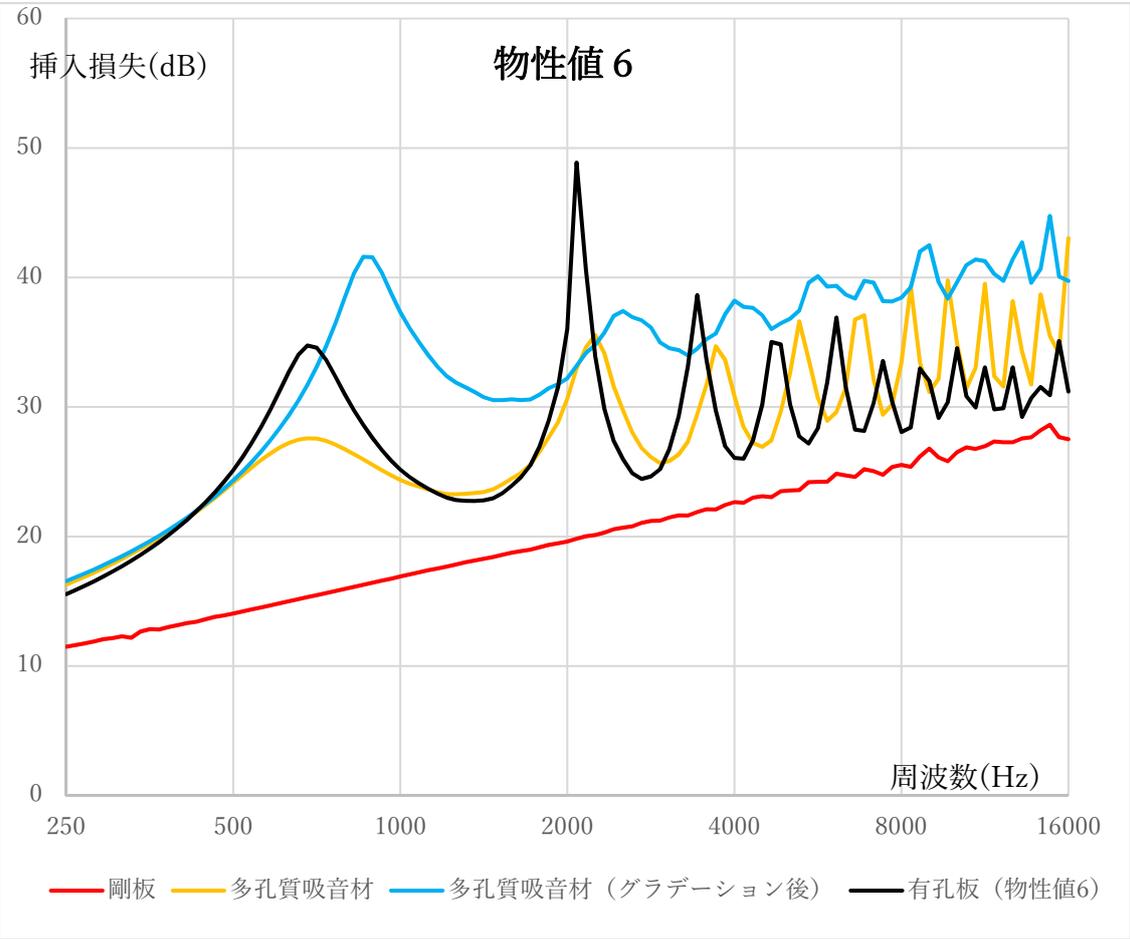
(pr-prmax 値)を固定した状態で、孔径と板厚を変化させることで高い遮音効果のある物性値を探索する。

この考えに至った経緯としては、これまでのグラデーション結果を並べた際に、孔径または板厚のみが違ってそれ以外の値がすべて同じといった物性値が多く、それらを比較することで、板厚または孔径の変化に伴う挿入損失の変化傾向を掴むことができると考えたからである。グラデーション後の結果で孔径、または板厚のみが違った物性値が多かったのは、①のアプローチにおいて物性値3、4から孔径、板厚のみを変化させ、それをグラデーションしたような結果が多かったからである。①のアプローチは断念してしまったが、その過程で、遮音効果において物性値3、4の良い点をあわせもつ物性値が得られたので、以下の表5、周波数 (Hz) - 挿入損失 (dB) 関係式 をグラフ 20 に記した (グラデーション前)。

物性値 6	
孔の直径	dp=0.00012 m
板厚	hp=0.00037m
開孔率	pr=0.014 (1.4%)
面密度	sd=0.6 kg/m ²

表 5

【物性値 6 の体積密度 (sd/hp) $\approx 1622 \text{ kg/m}^3$ 炭素繊維強化プラスチックの密度 (CFRP) = 1500 kg/m^3 、フッ素ゴム (FKM) = 1800 kg/m^3 】



グラフ 20

4-4 計算結果1 (グラデーション後)

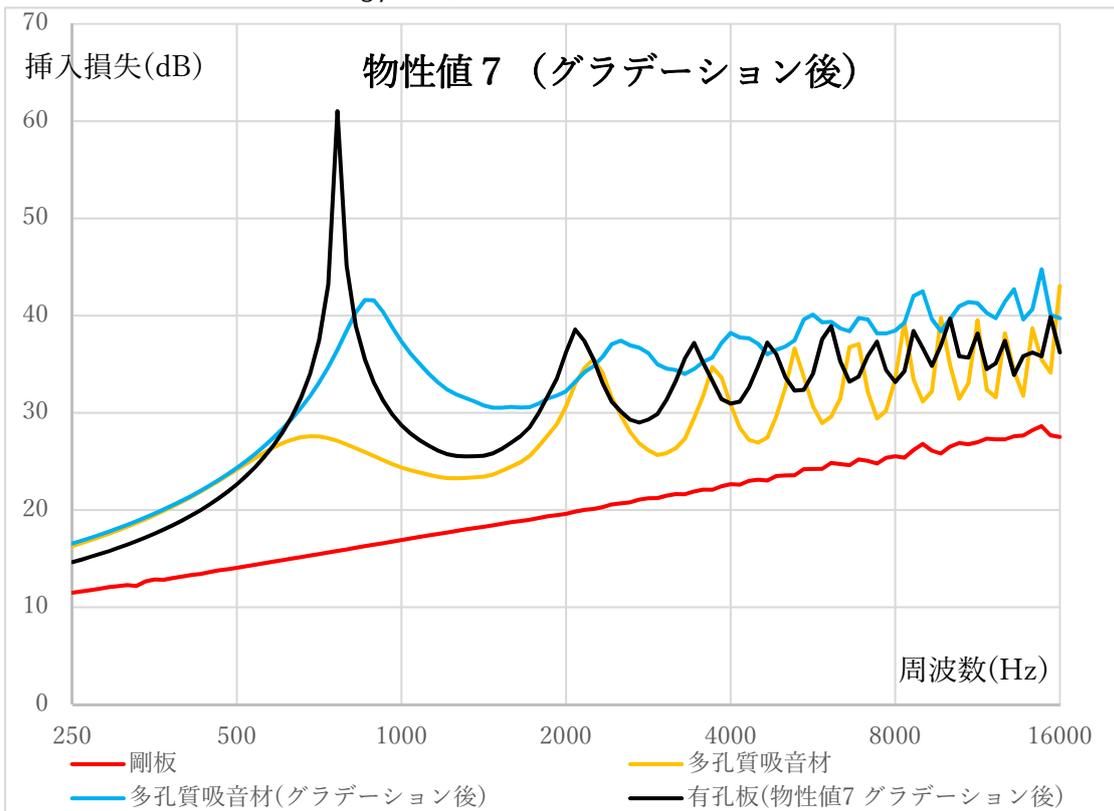
(本研究において、最も挿入損失が大きい結果)

4-3 の②で記したような試みを行う中で、最も大きな挿入損失が得られたグラデーション結果を以下の表6、周波数 (Hz) - 挿入損失 (dB) 関係式 をグラフ 21 に記した。

物性値7	
孔の直径	$d_p=0.00006$ m
板厚	$h_p=0.0005$ m
開孔率	$p_r=0.014$ (1.4%)
面密度	$s_d=0.6$ kg/m ²
先端の開孔率	$p_{rmax}=0.08$ (8.0%)

表 6

【物性値7の体積密度 (s_d/h_p) = アクリル (PMMA)、ポリカーボネート (PC)、ウレタンゴム (U) の密度 = 1200 kg/m³】



グラフ 21

これが、本研究において最も大きな遮音効果を発揮した結果である。周波数 250~1600 (Hz) 全体でみても本研究で最も挿入損失が高く、また、特定の周波数だけをみても一番である。

4-5 計算結果 2 (グラデーション後)

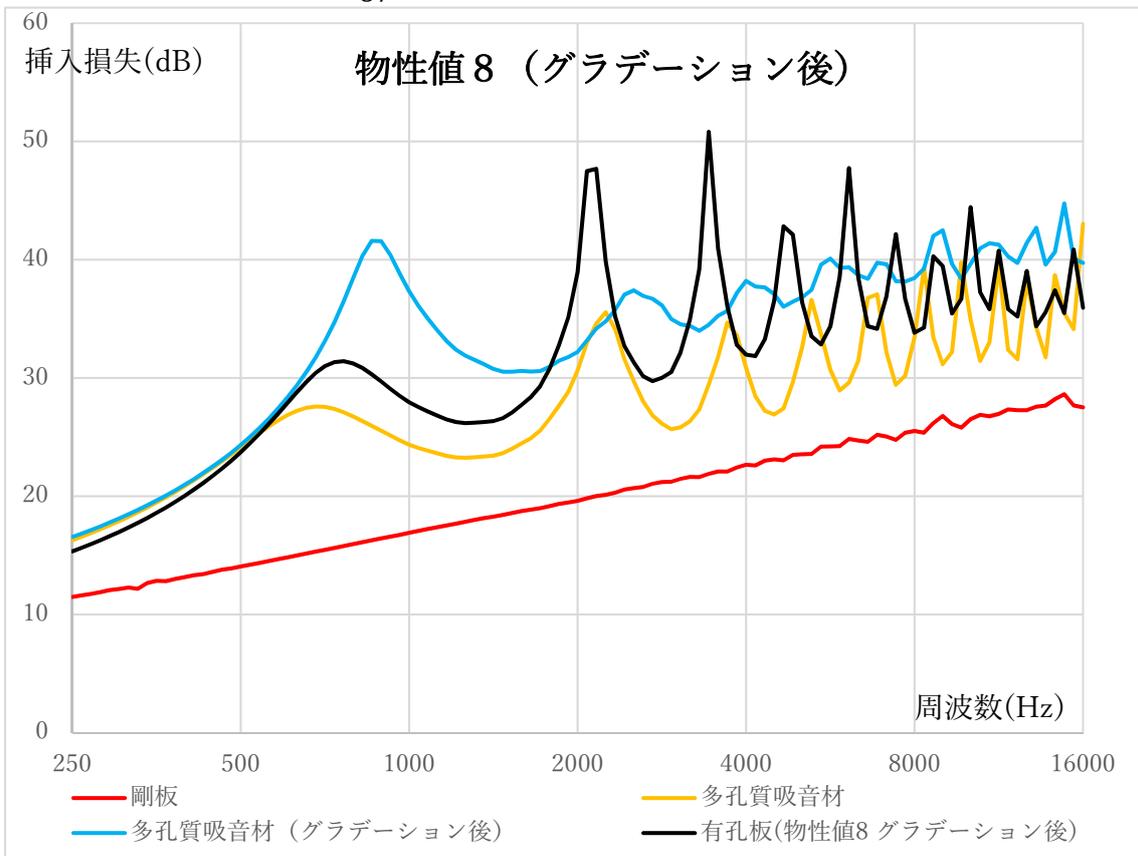
(比較的挿入損失が大きいグラデーション結果)

4-4 で記した結果は本研究で最も遮音効果の高い結果であるが、周波数が高くなると挿入損失が小さくなる傾向がある。ここでは、周波数が高い部分でも比較的挿入損失が大きく、全体的にみても大きく挿入損失が落ち込む部分のなかった結果を記す。その結果を表 7、周波数 (Hz) - 挿入損失 (dB) 関係式 をグラフ 22 に記した。

物性値 8	
孔の直径	$dp=0.00008 \text{ m}$
板厚	$hp=0.0005 \text{ m}$
開孔率	$pr=0.014 \text{ (1.4\%)}$
面密度	$sd=0.6 \text{ kg/m}^2$
先端の開孔率	$pr_{max}=0.08 \text{ (8.0\%)}$

表 7

【物性値 8 の体積密度 (sd/hp) = アクリル (PMMA)、ポリカーボネート (PC)、ウレタンゴム (U) の密度 = 1200 kg/m^3 】



グラフ 22

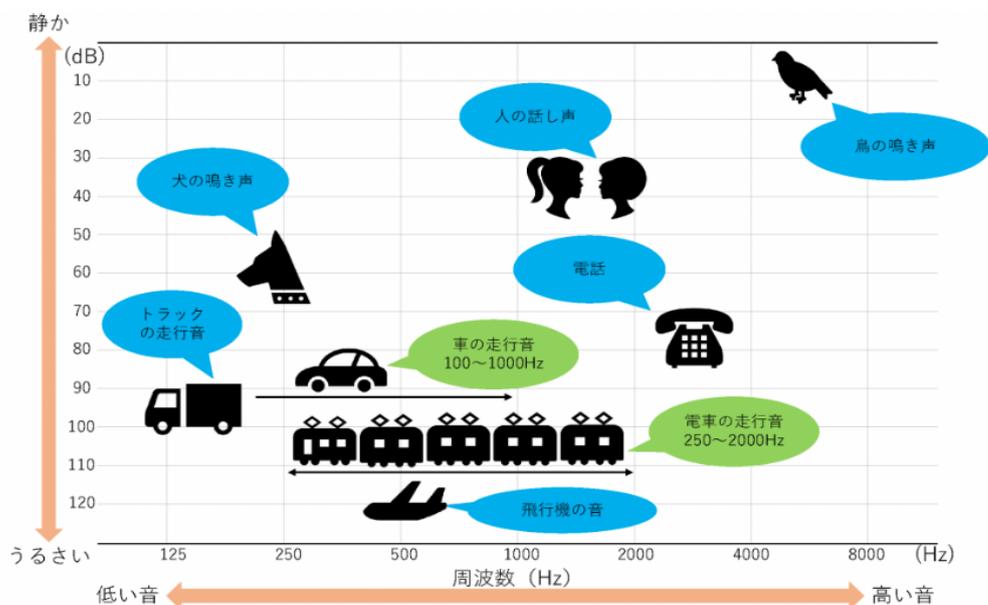
第5章 総括

本研究での結果としては、250～16000 (Hz) の周波数の全範囲で有孔板がグラデーション後の多孔質吸音材の挿入損失を超えるまでには至らなかった。しかし、特定の周波数において有孔板がグラデーション後の多孔質吸音材の挿入損失を大幅に上回った。また、その他の周波数においてもグラデーション後の多孔質吸音材の挿入損失程には至ってないが、グラデーション前の多孔質吸音材以上の挿入損失を維持させることに成功した(物性値7、グラフ21を参照)。

また、グラデーション前の段階においては、250～16000 (Hz) の範囲の大部分で有孔板が多孔質吸音材の挿入損失を上回ることに成功した。(物性値3、4、6 グラフ11、12、20参照)

このグラデーション段階前の3つの有孔板物性値に共通する特徴として、周波数が非常に高い部分で挿入損失が多孔質吸音材と比べて小さくなることである。しかし、逆に周波数がそこまで高くなければ多孔質吸音材以上の挿入損失が得られている。もう少し細かく記述すると、物性値3の有孔板では250～約4000 (Hz) の範囲で多孔質吸音の挿入損失を上回り、物性値4の有孔板では250～約1500 (Hz) の範囲で多孔質吸音の挿入損失を大幅に上回る。私たちの身の回りの音のほとんどが250～4000 (Hz) の範囲である(下図参照)ことを考慮すると、これらの有孔板は多孔質吸音材と比べて、日常生活で聞こえてくる音の大部分を遮音する効果があると考えられる[2]。

私たちの身の回りの音



グラデーション後の物性値7（グラフ 21）を本研究で一番遮音効果が高いと判断した理由も、一般的な日常会話が 250～4000（Hz）の範囲である（上図参照）ことを考慮している。本研究の周波数の中で特に注目したのが、250～4000（Hz）の範囲である。計算過程の中では、4-5 で記したような、比較的周波数の高い部分で大きな遮音効果を発揮するような結果もあったが、より利用価値があると考えたのは、250～4000（Hz）の範囲において高い遮音効果を発揮するような結果である。以上のことを踏まえて、グラデーション後の物性値7（グラフ 21）を本研究の中でも最も遮音効果の高い結果であると位置づけた。

今回の研究では、時間の許す限り有孔板の物性値設定を行ったが、グラデーション後の多孔質吸音材の挿入損失を完全に超えることができなかったことは悔しい点であった。しかし、エッジ効果抑制型遮音壁における有孔板のポテンシャルを示す一つのきっかけになったのではないかと考えている。

参考文献

- [1] 河井康人、「エッジ効果抑制型遮音壁」、日本音響学会誌、2014 年 70 巻 2 号 p79～82
- [2] 周波数と聴力の関係 - シグニア補聴器（signia.jp）