

# 有孔板の透過特性の解明

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 16-21 大谷建太  
指導教官 豊田政弘

# 目次

第1章 序論.....	1
1.1 既往研究.....	1
1.2 研究背景.....	2
1.1.1 既往研究の問題点.....	2
1.1.2 新たな提案.....	2
1.3 研究目的.....	2
第2章 研究方法.....	3
2.1 多孔質吸音材透過率の導出方法.....	3
2.2 有孔板透過率の導出方法.....	5
第3章 透過特性の比較.....	8
3.1 比較方法.....	8
3.2 多孔質吸音材の透過特性.....	9
3.3 有効板の透過特性.....	10
3.4 比較結果.....	13
第4章 エッジ効果抑制型遮音壁としての機能比較.....	17
4.1 比較方法.....	17
4.2 多孔質吸音材.....	18
4.3 有孔板.....	19
4.4 比較、結果.....	20
第5章 総括.....	21

# 第 1 章 序論

## 1.1 既往研究

波長と比較して十分薄い剛な平面の片方の面に平面波が垂直入射した場合、音圧振幅は平板の音波が入射する面とその裏面で大きな差が生じ、そのため、平面のエッジ付近では、急激な音圧振幅の変化が生じる。また、空気の粒子速度振幅の分布は平面上では 0 となるが、平面の外側では、エッジ付近に大きな粒子速度の領域が現れ、この領域では直接音に、音圧差によって生じる粒子速度が付加される。この薄い物体のエッジに沿って起こる現象をエッジ効果という。

適切な流れ抵抗を持つ薄い吸音材を遮音壁の上部に設置することで、前述に述べた、エッジ付近に生じる大きな粒子速度を抑制することができる。この遮音壁上部に設置する薄い吸音材をエッジ効果抑制型遮音壁という。しかし、エッジ効果を抑制するために、物理特性が一様の分布を持ち、インピーダンスの大きい吸音材をエッジ効果抑制型遮音壁として設置した場合、吸音材上端付近にもエッジ効果が生じてしまい、ある一定以上の性能向上が見込めない。

エッジ効果抑制型遮音壁としての性能を高めるためには、吸音材下部付近のエッジ効果を抑制し、吸音材上部付近のエッジ効果の発生を抑えるために、インピーダンスが下端部では大きい値を持ち、上部に向かうにつれ、減少し先端では 0 となるような吸音材を用いることでエッジ効果をかなり抑えることができる。つまりグラデーション型の吸音材を用いることである。[1]

## 1.2 研究背景

### 1.2.1 既往研究問題点

エッジ効果抑制型遮音壁の性能向上、つまり吸音材のインピーダンスを上部に行くにつれ減少させ、先端で 0 にするには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。つまり雨風、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ことである。2つ目は、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。つまり、斜めにカットすることが困難である。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。

### 1.2.2 新たな提案

多孔質吸音材の問題点を踏まえ、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。有孔板には耐候性があり、薄く軽くすることができ、物性値の細かい制御が可能といった3つメリットがある。

## 1.3 研究目的

多孔質吸音材の問題点、そして新たに提案した有孔板の性質を踏まえ、本研究では有孔板の透過特性を解明することにより、有孔板でエッジ効果抑制型遮音壁として十分な効果が得られるかを検討する。また現在使用されている多孔質吸音材と比較し、その効果の程度を示す。

## 第2章 研究方法

### 2.1 多孔質吸音材透過率の導出方法

支配式、境界条件は以下のように与えられる。

支配式 (時間項 $e^{-i\omega t}$ ) は

$$P_1(x) = e^{ik_0x} + Re^{-ik_0x} \quad (1)$$

$$P_2(x) = Ae^{ik_ax} + Be^{-ik_ax} \quad (2)$$

$$P_3(x) = Te^{ik_0x} \quad (3)$$

$$V_1(x) = \frac{1}{\rho_0 c_0} (e^{ik_0x} - Re^{ik_0x}) \quad (4)$$

$$V_2(x) = -\frac{ik_a}{r_a z_a} (Ae^{ik_ax} - Be^{-ik_ax}) \quad (5)$$

$$V_3(x) = \frac{1}{\rho_0 c_0} Te^{ik_0x} \quad (6)$$

であり、境界条件は

$$P_1(0) = P_2(0) \quad (7)$$

$$V_1(0) = V_2(0) \quad (8)$$

$$P_2(d) = P_3(d) \quad (9)$$

$$V_2(d) = V_3(d) \quad (10)$$

で表される。 $e^{ik_0x}$ は入射波、 $Re^{-ik_0x}$ は反射波、 $Te^{ik_0x}$ は透過波、 $d$ は板厚、 $k_a$ は複素波数( $k_a = ir_a$ )、 $r_a$ は伝搬定数、 $z_a$ は複素特性インピーダンスである。伝搬定数および特性インピーダンスを Miki の式で表すと、

$$r_a = k_0 \left[ 0.16 \left( \frac{R_f}{f} \right)^{0.618} - i \left\{ 1 + 0.109 \left( \frac{R_f}{f} \right)^{0.618} \right\} \right] \quad (11)$$

$$z_a = \rho_0 c_0 \left\{ 1 + 0.07 \left( \frac{R_f}{f} \right)^{0.632} + 0.107 \left( \frac{R_f}{f} \right)^{0.632} \right\} \quad (12)$$

となる。支配式を境界条件に代入すれば、 $P_1(0) = P_2(0)$ より

$$1 + R = A + B \quad (13)$$

$V_1(0) = V_2(0)$ より

$$\frac{1}{\rho_0 c_0} (1 - R) = -\frac{ik_a}{r_a z_a} (A - B) \quad (14)$$

$P_2(d) = P_3(d)$ より

$$Ae^{ik_ad} + Be^{-ik_ad} = Te^{ik_0d} \quad (15)$$

$V_2(d) = V_3(d)$  より

$$-\frac{ik_a}{x_a z_a} (Ae^{ik_a d} - Be^{-ik_a d}) = \frac{1}{\rho_0 c_0} T e^{ik_0 d} \quad (16)$$

となる。式(13), (14)より

$$\frac{z_a}{\rho_0 c_0} (1-R) = 2A - 1 - R \quad (17)$$

である。以後、 $\frac{z_a}{\rho_0 c_0} = S$  とおくと、式 (17) より

$$A = \frac{1}{2}(R - RS + 1 + S) \quad (18)$$

となる。同様に、

$$B = \frac{1}{2}(R + RS + 1 - S) \quad (19)$$

である。式(15)より

$$T = A e^{id(k_a - k_0)} + B e^{-id(k_a + k_0)} \quad (20)$$

であり、また、式(16)より

$$ST = A e^{id(k_a - k_0)} - B e^{-id(k_a + k_0)} \quad (21)$$

であるので、式(20), (21)より

$$S(A e^{id(k_a - k_0)} + B e^{-id(k_a + k_0)}) = A e^{id(k_a - k_0)} - B e^{-id(k_a + k_0)} \quad (22)$$

となる。この両辺を  $e^{-id(k_a + k_0)}$  で割り整理すると

$$A e^{2idk_a} (1-S) = B(1+S) \quad (23)$$

となる。式(9)に式(5), (6)を代入すると

$$e^{2idk_a} (R - RS + 1 + S)(1-S) = (R + RS + 1 - S)(1+S) \quad (24)$$

となる。ここで、式(24)を  $R$  について整理していくと

$$e^{2idk_a} \{R(1-S)^2 + (1-S^2)\} = R(1+S)^2 + (1-S^2) \quad (25)$$

となり、式(25)の左辺を  $R$  についてまとめると

$$R \{e^{2idk_a} (1-S)^2 - (1+S)^2\} = (1-S^2)(1 - e^{2idk_a}) \quad (26)$$

である。よって、式(26)より

$$R = \frac{(1-S^2)(1 - e^{2idk_a})}{e^{2idk_a}(1-S)^2 - (1+S)^2} \quad (27)$$

と表される。反射率、透過率はそれぞれ  $|R|^2$ ,  $|T|^2$  で求めることができる。

## 2.2 有孔板透過率の導出方法

支配式（時間項 $e^{-i\omega t}$ ）は

$$P_1(x) = e^{ik_0x} + Re^{-ik_0x} \quad (28)$$

$$P_2(x) = Te^{ik_0x} \quad (29)$$

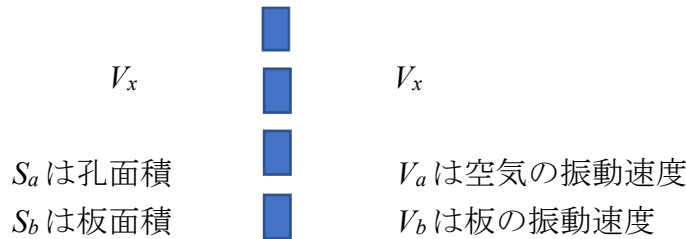
$$V_1(x) = \frac{1}{\rho_0 c_0} (e^{ik_0x} - Re^{ik_0x}) \quad (30)$$

$$V_2(x) = \frac{1}{\rho_0 c_0} Te^{ik_0x} \quad (31)$$

であり、境界条件は有孔板の両面で粒子速度が等しいことより

$$V_1(0) = V_2(0) = V_x \quad (32)$$

で表される。



（開孔率  $\sigma$ ）

ただし  $V_a$  は  $V_b$  に対する相対速度

図1 有効版両面の音圧差と粒子速度の関係

図1から体積速度の連続性、板の運動方程式、孔のインピーダンスの関係式を導くことができる。体積速度の連続性により

$$(S_a + S_b)V_x = S_a V_b + S_a (V_b + V_a) \quad (33)$$

となる。式(33)を  $V_x$  について整理すると

$$V_x = \frac{S_b}{S_a + S_b} V_b + \frac{S_a}{S_a + S_b} (V_b + V_a) \quad (34)$$

となる。ここで  $\frac{S_a}{S_a + S_b}$  は開孔率  $\sigma$  にあたるので以後  $\frac{S_a}{S_a + S_b} = \sigma$  とおくと式(34)より

$$V_x = \sigma V_a + V_b \quad (35)$$

となる。板の運動方程式より、板の面密度を  $m$  とおくと

$$m \frac{dV_b}{dt} = P_1(0) - P_2(0) \quad (37)$$

であり、式(37)より

$$-i\omega m V_b = P_1(0) - P_2(0) \quad (38)$$

となる。孔のインピーダンスの関係式は

$$V_a = \frac{P_1(0) - P_2(0)}{Z_0} \quad (39)$$

である。\$Z\_0\$は孔のインピーダンスを表しており、孔のインピーダンスを Maa の式で表すと

$$Z_0 = Z_{\text{resist}} + Z_{\text{react}} \quad (40)$$

$$Z_{\text{resist}} = \frac{8\eta_0 h}{(d_p/2)^2} \left( \sqrt{1 + \frac{X^2}{32}} + \frac{\sqrt{2}}{8h} d_p X \right) \quad (41)$$

$$Z_{\text{react}} = -i\rho_0 \omega h \left( 1 + \frac{1}{\sqrt{9 + (X^2/2)}} + \frac{0.85 d_p}{h} \right) \quad (42)$$

$$X = \frac{d_p}{2} \sqrt{\frac{\rho_0 \omega}{\eta_0}} \quad (43)$$

となる。\$\eta\_0\$は空気粘性、\$h\$は板厚、\$d\_p\$は孔の直径、\$\rho\_0\$は空気粘性である。ここで、式(35)に式(38),(39)を代入すると

$$V_x = \sigma \frac{P_1(0) - P_2(0)}{Z_0} + \frac{P_1(0) - P_2(0)}{-i\omega m} \quad (44)$$

となり、式(40)の右辺を整理すると

$$V_x = \left( \frac{\sigma}{Z_0} - \frac{1}{-i\omega m} \right) \{P_1(0) - P_2(0)\} \quad (45)$$

となる。ここで \$\left( \frac{\sigma}{Z\_0} - \frac{1}{-i\omega m} \right)\$ を \$\zeta\$ とおくと

$$V_x = \zeta \{P_1(0) - P_2(0)\} \quad (46)$$

となり、式(32)に式(46)を代入すると

$$V_1(0) = V_2(0) = \zeta \{P_1(0) - P_2(0)\} \quad (47)$$

となる。ここで式(30),(31)それぞれに \$x=0\$ を代入すると

$$V_1(0) = \frac{1}{\rho_0 c_0} (1 - R) \quad (48)$$

$$V_2(0) = \frac{T}{\rho_0 c_0} \quad (49)$$

となる。また、式(28),(29)に \$x=0\$ を代入し差をとると

$$\begin{aligned} P_1(0) - P_2(0) \\ = 1 + R + T \end{aligned} \quad (50)$$

となる。式(32)より \$V\_1(0) = V\_2(0)\$ なので、式(48),(49)より



$$1-R=T \quad (51)$$

となる。式(47)に式(49),(50)を代入すると

$$\frac{T}{\rho_0 c_0} = \zeta(1+R+T) \quad (52)$$

となる。よって式(51),(52)より連立方程式を解くと

$$T = \frac{2\zeta}{1+2\zeta\rho_0 c_0} \quad (53)$$

$$R = \frac{1}{1+2\zeta\rho_0 c_0} \quad (54)$$

となる。反射率、透過率はそれぞれ $|R|^2$ ,  $|T|^2$ で求めることができる。

## 第3章 透過特性の比較

### 3.1 比較方法

第2章より多孔質吸音材、有孔板、それぞれの透過率の式が導出できたことにより、この透過率の式を用いて、それぞれが最も効果を発揮する物性値での透過特性の比較を行う。比較方法としては、まず既往研究で行われたエッジ効果抑制型遮音壁の実験結果より、多孔質吸音材の最も効果を発揮する物性値を求め、次に多孔質吸音材の結果をもとにそれと最も近い透過特性を与える有孔板の物性値を求め、最後に比較する。

既往研究により行われた実験の詳細と材料物性値は図2と表1のとおりである。

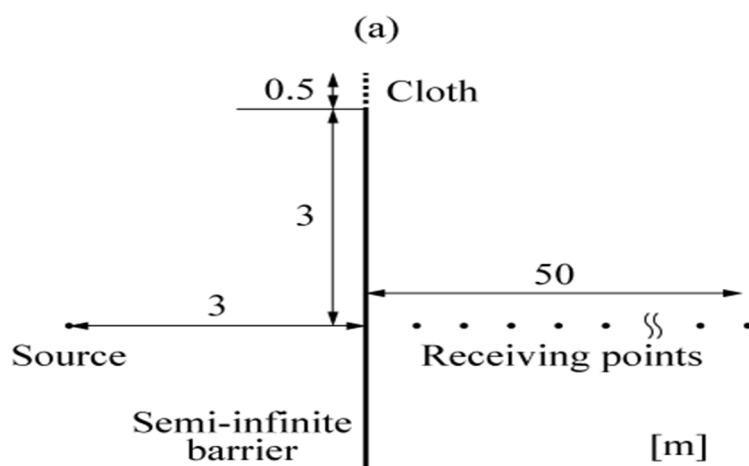


図2 エッジ効果抑制型遮音壁実験条件

Specimen No.	1	2	3	4	5
Surface density ( $\text{kg/m}^2$ )	12	24	48	96	192
Flow resistance ( $\text{N.s/m}^3$ )	400	800	1600	3200	6400

表1 エッジ効果抑制型遮音壁実験使用検体

図2のClothの部分、つまり幅0.5mの布の部分に表1に示した1から5の物性値を持った布を物性値を変化させずそのままの状態と物性値を徐々に変化させグラデーション型の2パターンそれぞれ設置した際の距離ごとの挿入損失を表したのが図3である。

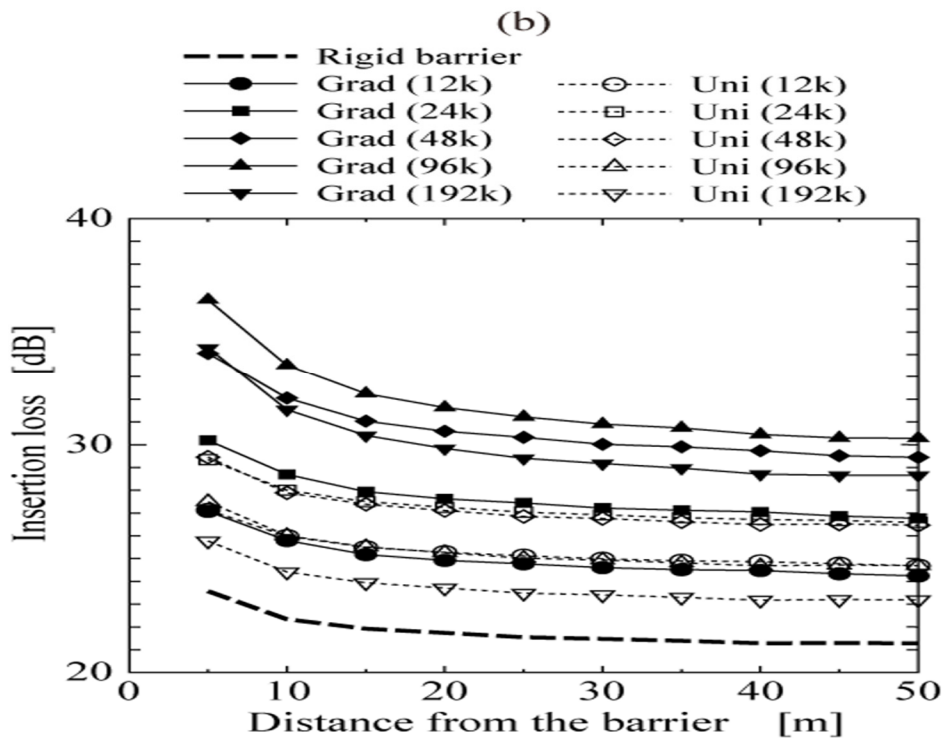


図3 各検体の距離ごとの挿入損失

### 3.2 多孔質吸音材の透過特性

図3の実験結果を見てみると、流れ抵抗  $3200 \text{ Ns/m}^3$  のグラデーショ状の布がエッジ効果抑制型遮音壁として最も効果を発揮していることがわかる。この結果より、流れ抵抗  $3200 \text{ Ns/m}^3$  の多孔質吸音材を使用するのが最適といえる。多孔質吸音材の透過率の計算には流れ抵抗率に置き換える必要があるので、流れ抵抗を流れ抵抗率で表すと  $64000 \text{ Ns/m}^4$  となる。この多孔質吸音材の厚さを  $1 \text{ cm}$  ごとに  $1\sim 5 \text{ cm}$ 、 $30\sim 8000 \text{ Hz}$  までの透過率を求め、図4に示す。

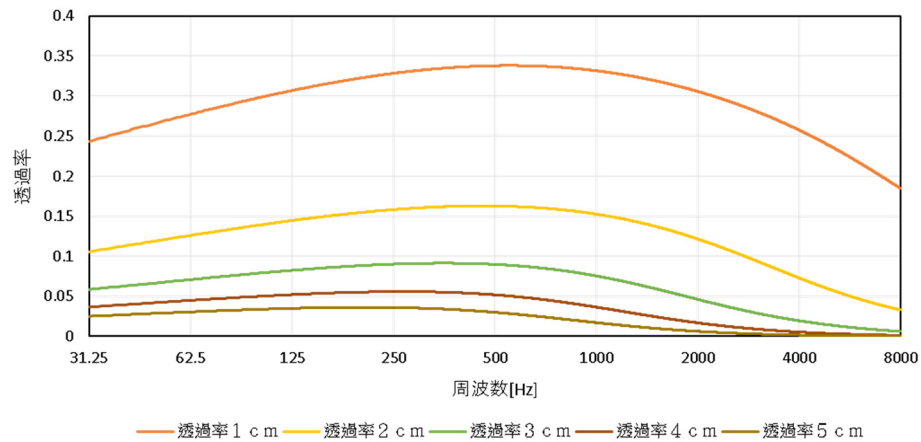


図4 流れ抵抗率  $64000 \text{ Ns/m}^4$ 、厚さ 1~5 cm の多孔質吸音材の周波数ごとの透過率

図4のグラフが多孔質吸音材においての最も効果を発揮する物性値のもとで求められた結果であり、この結果をもとに有孔板においても、最も効果を発揮する物性値を求め、グラフに示す。

### 3.3 有孔板の透過特性の解明

有孔板の物性値、孔の直径、板厚、開孔率、面密度の組み合わせにより、図4のグラフ、つまり板厚 1~5 cm の多孔質吸音材の透過率グラフそれぞれに対して、適切な有孔板の物性値で透過率グラフを求める。

まずはそれぞれの物性値の変化が透過率の変化にどのように影響するかを、それぞれの物性値ごとにグラフ化する。それにあたりまず基準値を定める。基準値は表2のとおりである。ただしこの基準値に関しては明確な決まりはない。

基準値	
孔の直径	$dp=0.25 \text{ mm}$
板厚	$hp=0.4 \text{ m}$
開孔率	$pr=0.00755$
面密度	$sd=10000 \text{ kg/m}^2$

表 2 有孔板物性値の基準値

表 2 の面密度に関してはできるだけ重い材を使うという意味でここでは  $10000 \text{ kg/m}^2$  と定めている。

表 2 の基準値をもとにそれぞれ 1 つの物性値のみを変化させたときのそれぞれの透過率の変化を図 5～7 に示す。

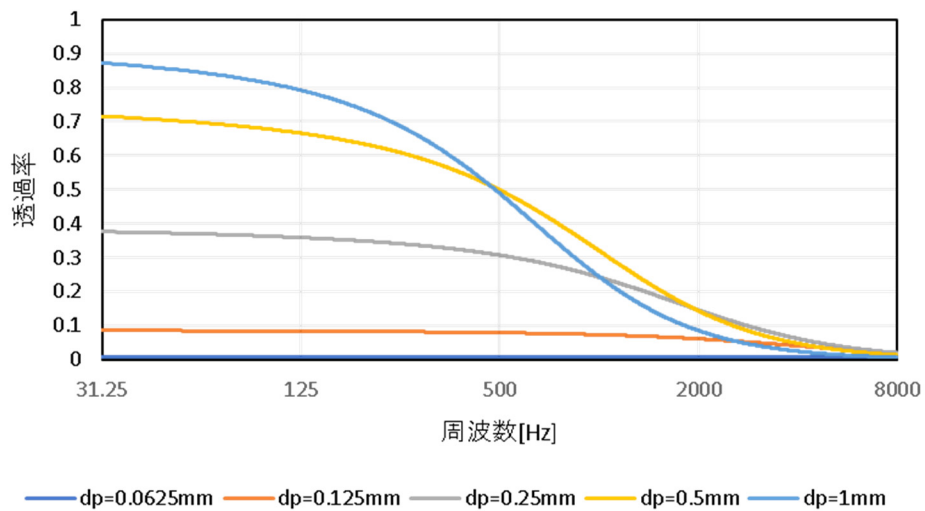


図 5 有孔板、孔の直径の変化と周波数ごとの透過率の関係

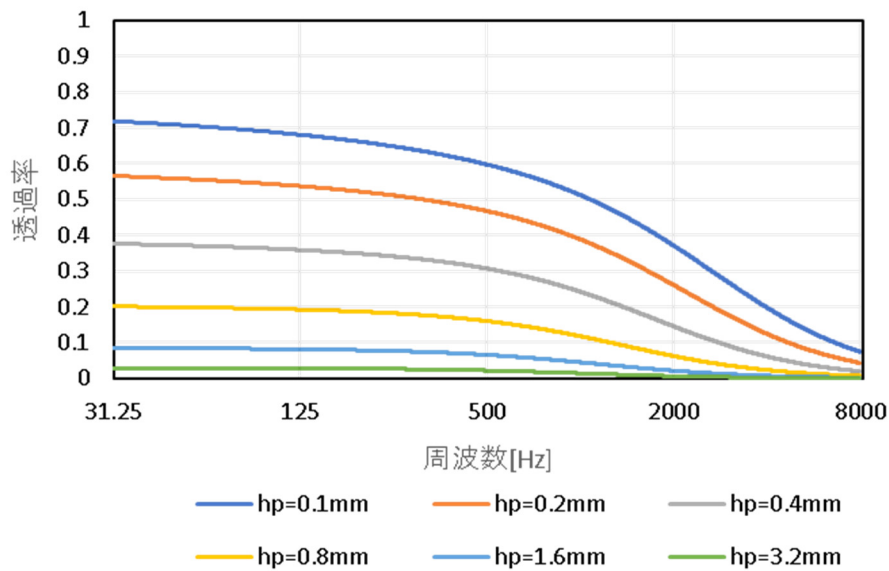


図 6 有孔板、板厚の変化と周波数ごとの透過率の関係

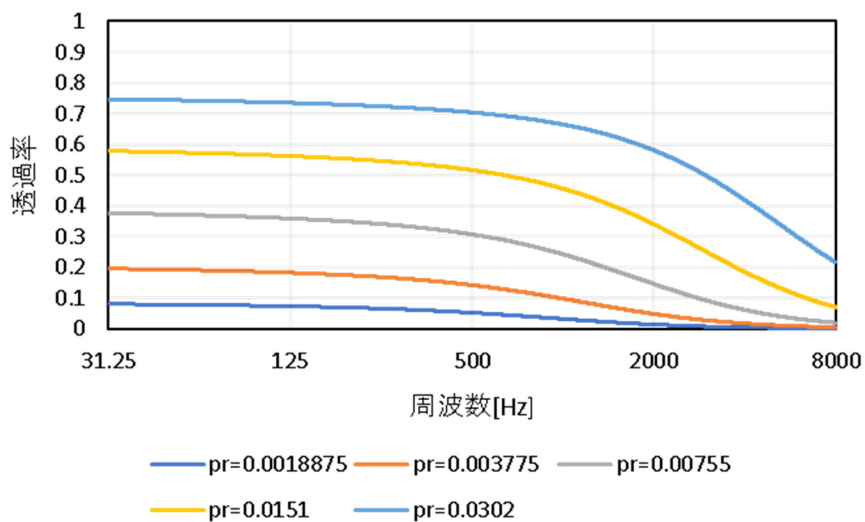


図 7 有孔板、開孔率の変化と周波数ごとの透過率の関係

図 5～7 のようなグラフの結果になったが、あくまでこのグラフは有孔板の透過率グラフを多孔質吸音材の透過率グラフに近づけるために参考とするグラフであるので、このグラフを参考に有孔板の透過率グラフを導き出す。

### 3.4 比較、結果

多孔質吸音材の透過率グラフと有孔板の透過率グラフを厚さごとに比較したグラフを図 8～12 に示す。

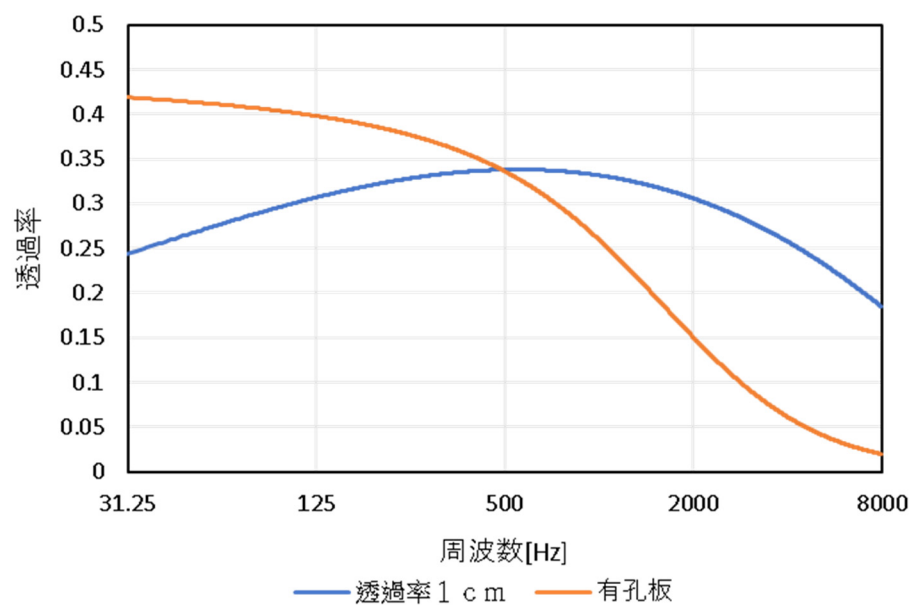


図 8 多孔質吸音材、流れ抵抗率  $64000 \text{ Ns/m}^4$ 、板厚  $1 \text{ cm}$  と有孔板、孔の直径  $0.27 \text{ mm}$ 、板厚  $0.4 \text{ mm}$ 、開孔率  $0.00755$ 、面密度  $10000 \text{ kg/m}^2$  の周波数ごとの透過率比較結果

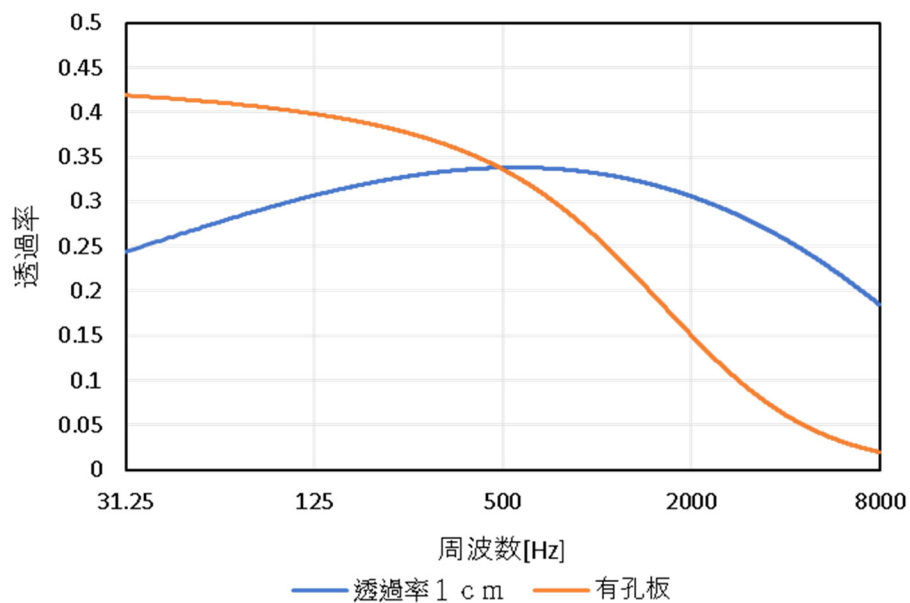


図9 多孔質吸音材、流れ抵抗率  $64000 \text{ Ns/m}^4$ 、板厚  $2 \text{ cm}$  と有孔板、孔の直径  $0.169 \text{ mm}$  板厚  $0.4 \text{ mm}$ 、開孔率  $0.00755$ 、面密度  $10000 \text{ kg/m}^2$  の周波数ごとの透過率比較結果

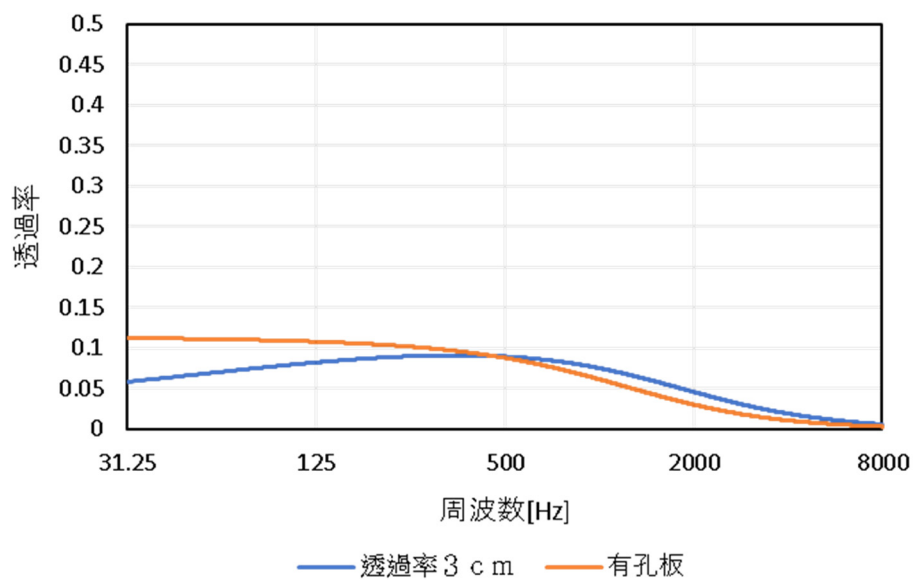


図10 多孔質吸音材、流れ抵抗率  $64000 \text{ Ns/m}^4$ 、板厚  $3 \text{ cm}$  と有孔板、孔の直径  $0.25 \text{ mm}$  板厚  $1.3 \text{ mm}$ 、開孔率  $0.007555$ 、面密度  $10000 \text{ kg/m}^2$  の周波数ごとの透過率比較結果



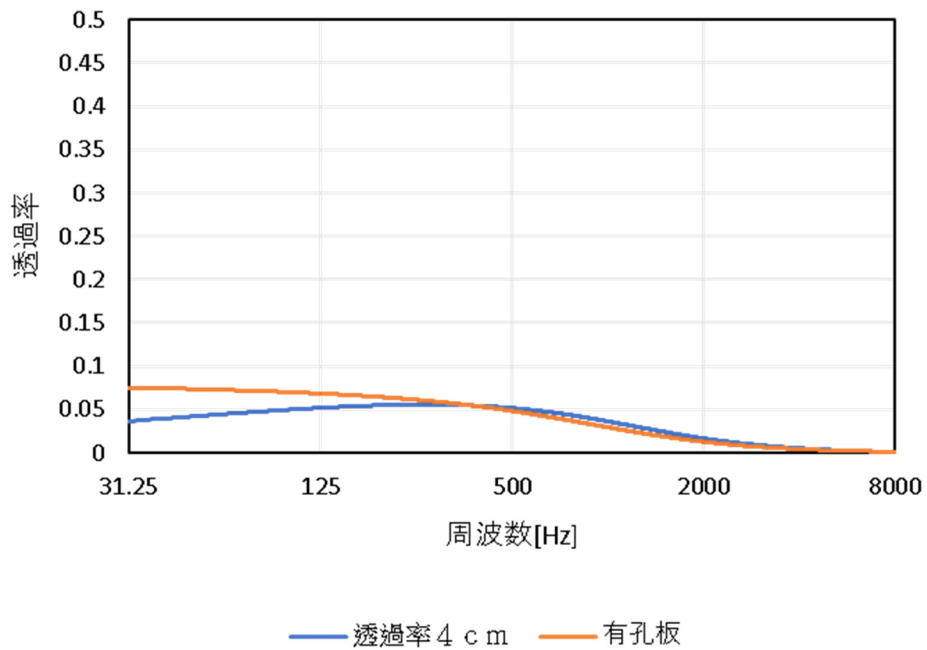


図 11 多孔質吸音材、流れ抵抗率  $64000 \text{ Ns/m}^4$ 、板厚  $4 \text{ cm}$  と有孔板、孔の直径  $0.25 \text{ mm}$  板厚  $0.4 \text{ mm}$ 、開孔率  $0.0018$ 、面密度  $10000 \text{ kg/m}^2$  の周波数ごとの透過率比較結果

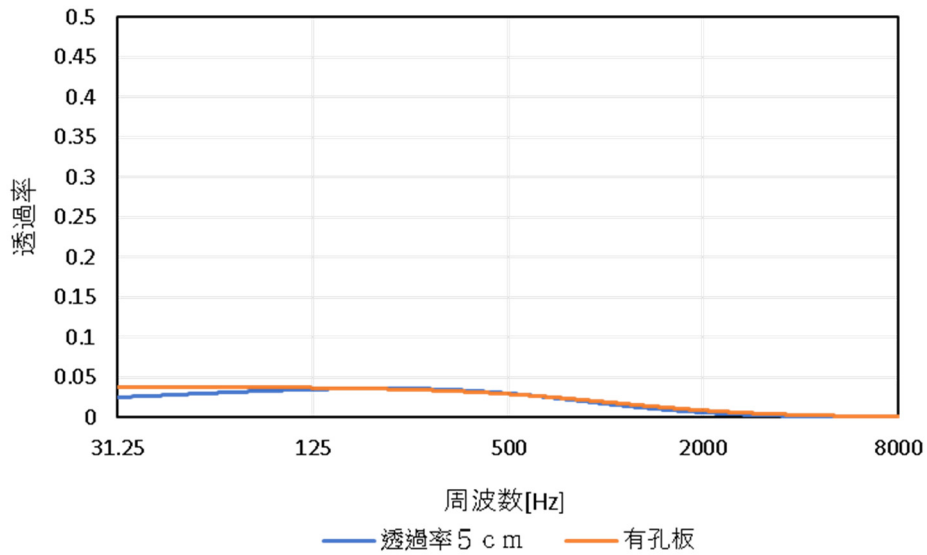


図 12 多孔質吸音材、流れ抵抗率  $64000 \text{ Ns/m}^4$ 、板厚  $5 \text{ cm}$  と有孔板、孔の直径  $0.25 \text{ mm}$  板厚  $2.72 \text{ mm}$ 、開孔率  $0.00755$ 、面密度  $10000 \text{ kg/m}^2$  の周波数ごとの透過率比較結果

図 8～12 の多孔質吸音材と有孔板の比較グラフを見てもわかるように、500 Hz 付近でそれぞれの透過率ができるだけ一致するように有孔板の物性値の値を定めた。理由としては、30 Hz 付近の低周波域で多孔質吸音材と有孔板のグラフを一致させようとした場合、有孔板のグラフを多孔質吸音材のグラフのように山なりになるように、つまり 8000 Hz 付近の高音域の透過率並みに 30 Hz 付近の低音域の透過率を下げる必要がある。有孔板において、30 Hz 付近の低周波域の透過率は面密度に依存し、面密度が大きければ大きいほど透過率も下がるが、その効果には限界があり、多孔質吸音材のように山なりのようなグラフにすることはできない。従って、低周波域でそれぞれのグラフを一致させることはできず、さらに高周波域で一致させると、30～500 Hz 付近での差がより大きくなってしまうため、平均的に全体の差が小さくなると判断し、500 Hz 付近で一致させた。

## 第 4 章 エッジ効果抑制型遮音壁としての性能比較

### 4.1 比較方法

第 3 章で求めた物性値を持つ多孔質吸音材と有孔板を実際にエッジ効果抑制型遮音壁として設置し、その機能を比較する。エッジ効果抑制型遮音壁として設置する際は、既往研究で行われた実験の条件の下で行う。

実験の詳細は図 13 のとおりである。ただし、設置する材の幅は 20 cm とする。理由は、物性値を 5 段階に変化させやすくするためである。

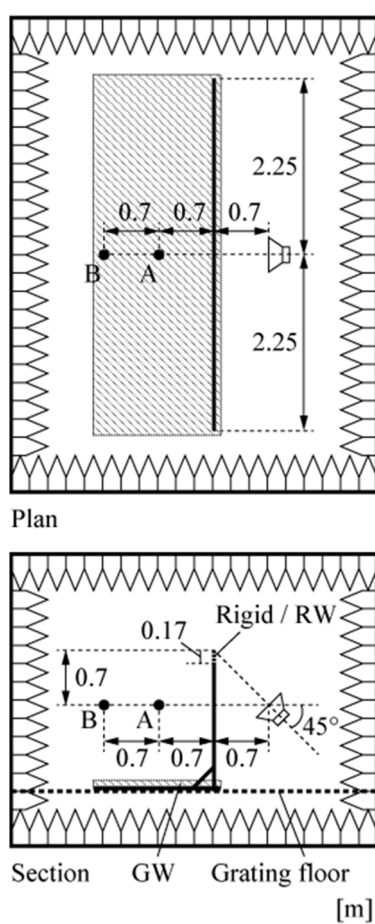


図 13 エッジ効果抑制型遮音壁実験条件

## 4.2 多孔質吸音材

図 13 の実験条件の下、多孔質吸音材を設置する。設置する多孔質吸音材の詳細は表 3 のとおりである。

流れ抵抗	$R = 3200 \text{Ns/m}^3$
面密度	$sd = 5 \text{kg/m}^2$
0 m ~ -0.04 m	→ $R \times 0.2 \quad sd \times 0.2$
-0.04 m ~ -0.08 m	→ $R \times 0.4 \quad sd \times 0.4$
-0.08 m ~ -0.12 m	→ $R \times 0.6 \quad sd \times 0.6$
-0.12 m ~ -0.16 m	→ $R \times 0.8 \quad sd \times 0.8$
-0.16 m ~ -0.20 m	→ $R \times 1.0 \quad sd \times 1.0$

表 3 エッジ効果抑制型遮音壁として設置する多孔質吸音材の幅ごとの物性値

### 4.3 有孔板

多孔質吸音材と同様に有孔板も設置する。設置する有孔板の詳細は表4のとおりである。

0～-0.04 m		-0.12 m ～ -0.16 m	
孔の直径	0.00027 m	孔の直径	0.00025 m
板厚	0.0004 m	板厚	0.0004 m
開孔率	0.00755	開孔率	0.0018
面密度	10000 kg/m <sup>2</sup>	面密度	10000 kg/m <sup>2</sup>
-0.04 m ～ -0.08 m		-0.16 m ～ -0.20 m	
孔の直径	0.000169 m	孔の直径	0.00025 m
板厚	0.0004 m	板厚	0.00272 m
開孔率	0.00755	開孔率	0.00755
面密度	10000 kg/m <sup>2</sup>	面密度	10000 kg/m <sup>2</sup>
-0.08 m ～ -0.12 m			
孔の直径	0.00025 m		
板厚	0.0013 m		
開孔率	0.00755		
面密度	10000 kg/m <sup>2</sup>		

表4 エッジ効果抑制型遮音壁として設置する多孔質吸音材の幅ごとの物性値

#### 4.4 比較、結果

表 3 と表 4 で示した物性値を持つ多孔質吸音材と有孔板、それと既往研究の実験で用いられた剛板を図 13 の実験条件の下、エッジ効果抑制型遮音壁として取り付けられた時の周波数と挿入損失の関係を図 14 に表す。

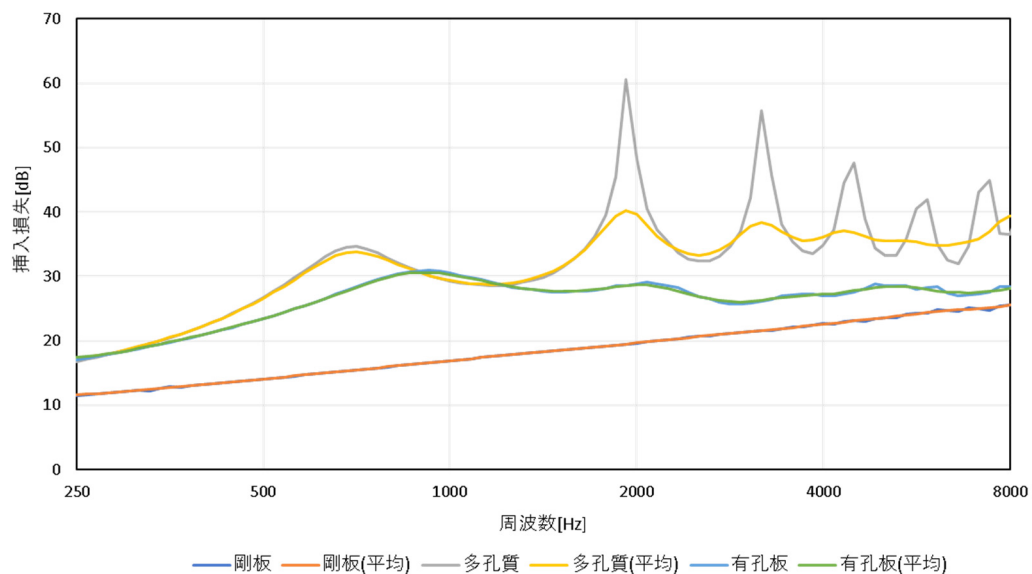


図 14 多孔質吸音材、有孔板、剛板、の周波数ごとの挿入損失

図 14 を見てみると、1000 Hz 付近までは多孔質吸音材と有孔板の効果に大きな差はないがそれ以上の周波数域では差が生じている。

## 5 章 総括

本研究では有孔板がエッジ効果抑制型遮音壁として十分な効果を発揮できるかどうかの検討を行ったが、結果的に言うと効果を発揮できるのは 30 Hz～1000 Hz 付近に限られた周波数域のみであり、その効果も現在使用されている多孔質吸音材の効果を超えるものではなかった。しかしながら、1000 Hz 付近のごく一部の周波数域でほんの少し有孔板の効果が多孔質吸音材の効果を上回った。一方、8000 Hz 付近に近づくほど効果は低くなり、多孔質吸音材の効果とは大きな差が生まれている。これはエッジ効果抑制型遮音壁として設置する以前に、一部周波数域において透過率の比較グラフに大きな差が生まれているからだと考えられる。この透過率の差は本研究のアプローチではこれ以上小さくすることはできなかったため、有孔板をエッジ効果抑制型遮音壁として使用するには透過率の差をまた別のアプローチにより小さくする必要があり、その方法はまだ模索中である。ただし、一部の周波数域とはいえ、エッジ効果抑制型遮音壁としての十分な効果を得られたことは大変興味深い結果であった。

## 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