

AV機器の音質向上を目的としたメカ設計に関する研究 — スピーカ周辺構造のモデル化の効果 —

関, 光貴 / SEKI, Koki

(発行年 / Year)

2013-03-24

(学位授与年月日 / Date of Granted)

2013-03-24

(学位名 / Degree Name)

修士(工学)

(学位授与機関 / Degree Grantor)

法政大学 (Hosei University)

2012 年度

修士論文

AV 機器の音質向上を目的としたメカ設計に関する研究

ースピーカ周辺構造のモデル化の効果ー

STUDY ON MECHANICAL DESIGN AIMING AT IMPROVEMENT OF SOUND QUALITY
-INFLUENCE OF MODELING OF STRUCTURE AROUND LOUDSPEAKER-

指導教員 御法川 学 教授

法政大学大学院工学研究科

機械工学専攻修士課程

11R1126

セキ コウキ

関 光貴

ABSTRACT

In the field of mechanical design for information technology and audio equipments, it is important to prevent from worsening the quality of sound from loudspeaker due to the acoustic and vibration characteristics of the mechanical design. In the study, the effect of the structure around the loudspeaker such as the front perforated plate and the volume between the loudspeaker and the plate on the frequency characteristics were examined experimentally and analytically. As the result, the transmission loss by the perforated plate and the acoustic resonance due to the front volume influenced the frequency characteristics of the sound. Further, the subjective test was performed to examine the improvement of the sound quality by the modification of the design parameters.

Key Words : *Audio and visual equipment, Speaker grill, Transmission loss, Sound quality.*

AV 機器の音質向上を目的としたメカ設計に関する研究

-スピーカ周辺構造のモデル化の効果-

目次

第 1 章 緒論	5
1.1 研究背景	5
1.2 研究目的	6
1.3 使用記号	7
第 2 章 理論的検討	8
2.1 音質向上を目的としたメカ設計について	8
2.1.1 AV 機器設計におけるメカ設計の位置づけ	8
2.1.2 スピーカ周辺の構造と音質	9
2.1.3 音響解析におけるスピーカ周辺構造のモデル化	10
2.2 グリルの透過損失	11
2.2.1 音圧	11
2.2.2 粒子速度	11
2.2.3 デシベルと音圧レベル	12
2.2.4 FFT 分析	13
2.2.5 オーバーオール	14
2.2.5 音響特性インピーダンス	15
2.2.6 グリルの透過損失	15
2.3 スピーカ・グリル間体積の音響特性	17
2.3.1 音響管	17
2.4 グリルの振動特性	24
2.4.1 有限要素法の手法	24
2.5 官能試験	26
2.5.1 音質の評価量（心理音響メトリクス）	26
2.5.2 一対比較法	27
2.5.3 分散分析	27
2.6 音響解析	30
2.6.1 音場における媒質の運動方程式	30
2.6.2 音の波動方程式	32
2.6.3 PML (Perfectly Matched Layer) 境界を適用する場合の音響解析の基礎式	33
2.6.4 有限要素法による離散化	35
2.6.5 要素マトリクスの重ね合わせと解法	39

2.6.6 伝達アドミタンスによる音響透過物のモデル化	40
第3章 実験装置	41
3.1 供試スピーカ	41
3.2 供試グリル.....	42
3.3 供試リング	45
第4章 実験方法	46
4.1 グリルの透過損失.....	46
4.1.1 測定装置	46
4.1.2 測定方法	47
4.1.3 測定条件	50
4.2 スピーカ・グリル間体積の音響特性.....	53
4.2.1 測定方法	54
4.2.2 共鳴周波数・挿入損失の算出	55
4.3 グリルの振動特性.....	57
4.3.1 測定方法	57
4.3.2 固有値解析.....	59
4.4 官能試験	60
4.4.1 サンプル音の収録.....	60
4.4.2 試験方法	62
4.5 音響解析	63
4.5.1 解析方法	63
第5章 実験結果及び考察	68
5.1 グリルの透過損失.....	68
5.1.1 開口率を変化させた場合.....	68
5.1.2 板厚を変化させた場合	72
5.2 スピーカ・グリル間体積の音響特性.....	77
5.3 グリルの振動特性.....	83
5.4 官能試験	85
5.4.1 開口率の影響.....	85
5.4.2 板厚の影響.....	86
5.4.3 スピーカ・グリル間体積の影響.....	87
5.5 音響解析	88
5.5.1 放射音スペクトルの比較.....	88
5.5.2 減音量での比較	90
5.5.3 伝達アドミッタンス定義モデルについて検討.....	93
第6章 結論	94

参考文献	95
謝辞	96
付録	97
付録 1 透過損失及び減音量のグラフ（開口率比較）	97
付録 2 透過損失及び減音量のグラフ（板厚比較）	124
付録 3 リング取り付け距離変化の影響	151
付録 4 官能試験結果グラフ（その他開口率・板厚）	160
付録 5 有限要素法による音響解析結果（その他開口率・板厚）	163

第 1 章 結論

1.1 研究背景

近年、デジタルカメラや音響機器、液晶テレビといった AV 機器は広く普及し、高性能化と低価格化が進んでいる。製品開発においては低コスト化の弊害として音質が阻害されるようなメカ設計となることがあるため、機械設計と音質の

関係を明確にし、設計初期段階から音響特性を予測する手法が求められている。スピーカユニットを保護するために取り付けるグリルなどと呼ばれる多孔板は、高級オーディオにおいては取り外しが可能であったり、非常に軽く開口率が大きく作られているため、その音響特性を無視することができるが、汎用的な機器においては筐体と一体構造になっているなど、その影響を無視することができず、グリルの仕様によっては音響特性の変化が音質に悪影響を与える。

1.2 研究目的

本研究ではスピーカグリルの設計因子である開口率・板厚・取り付け位置を変化させたときの音質への影響を音響透過損失・音響共鳴・振動共振などの音響振動工学の観点で実験的に調査を行い、各現象がどのように音質へ影響を与えるかを明確にすると共に、実験結果を用いて設計初期段階からグリルを取り付けた場合の音響特性を簡易的に予測する手法の確立を目指した。

1.3 使用記号

t : 板厚[mm]

L : リング長さ[mm]

P_1 、 P_2 : グリル内側音圧、グリル外側音圧[Pa]

u_1 、 u_2 : グリル内側粒子速度、グリル外側粒子速度[m/s]

Z_1 、 Z_2 : グリル内側及び外側の音響インピーダンス[Pa・s/m]

R_l : 反射率[-]

τ : 透過率[-]

TL : 透過損失[dB]

Att : 減音量[dB]

c : 音速[m/s]

ΔL : 開口端補正[m]

k : 波数[m⁻¹]

ρ : 空気密度[kg/m³]

f : 周波数[Hz]

第2章 理論的検討

2.1 音質向上を目的としたメカ設計について

2.1.1 AV 機器設計におけるメカ設計の位置づけ

図 2.1.1 に AV 機器設計の全体の流れを示す。この中でメカ設計は、信号処理やスピーカで生み出された音をどれだけ阻害せずに再生できるかという点で大変重要となる。そのためには、メカ設計の設計因子と音質の関係を明確にし、設計に定量的に反映することが不可欠である。

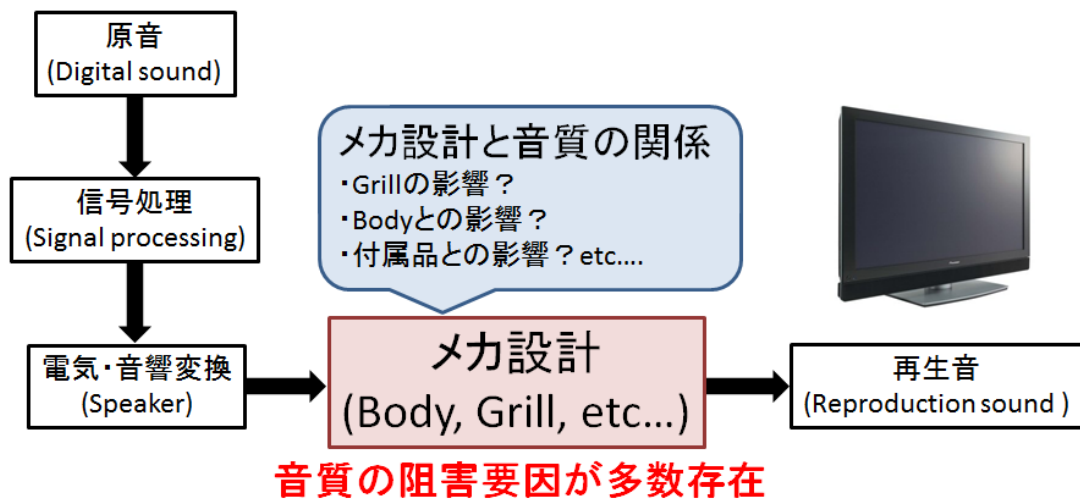


図 2.1.1 AV 機器設計の全体の流れ

2.1.2 スピーカ周辺の構造と音質

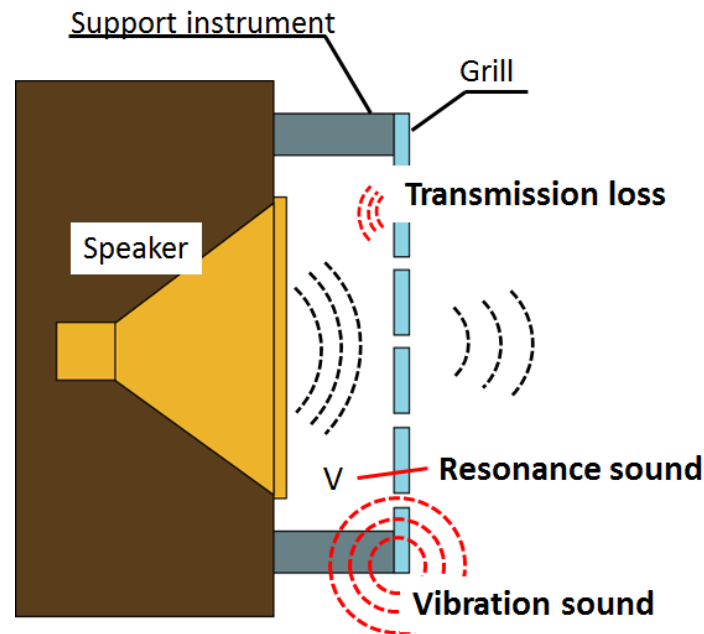


図 2.1.2 スピーカ前面の構造が音質に与える影響

図 2.1.2 はスピーカ前面の構造が音質に与える影響を模式的に示したものである。スピーカを保護する目的で取り付けられているグリルは、その透過損失によって、音響の周波数特性を変化させる。また、取り付け位置によっては、前面形状の変化（前面を囲うような形状）により音響共鳴や内部損失の影響なども出てくると考えられる。また、グリルが音響によって加振され、2 次的な音を発生することも考えられる。高級オーディオにおいては、グリルは非常に軽く、開口率が大きな材質で作られているため、その音響特性は無視できるが、汎用的な機器においては筐体と一体構造になっているなどして、その影響が無視できない。

以上のことをまとめると、スピーカ周辺のメカ設計による音質阻害要因は、

- (1) グリルの透過損失
- (2) スピーカ・グリル間体積の音響特性
- (3) 構造が加振されて発生する音

の 3 つに分類することができ、これらを低減させることで音質向上に繋がると考えられている。しかし、これらの音質阻害要因と各設計因子との関係に不明確な点が多く、また、発生機構によっては特性と対策が異なるため、メカ設計に反映することができない。

また、最終的な音の良し悪しを決めるのは物理的な量ではなく、人が実際

に音を聞いたときの主観的な感覚量である。そのため、人に実際に音を聞いて評価してもらう官能試験を用いて物理量と感覚量の調査を行い、設計に反映していくことが大変重要となる。

以上から、スピーカ周辺のメカ設計が及ぼす 3 つの音質阻害要因と設計因子との関係を明確にし、官能試験により主観的な感覚と物理量との関係の調査を行い、設計に反映することが必要となっているのが実状である。

2.1.3 音響解析におけるスピーカ周辺構造のモデル化

設計初期段階で音響特性を予測する手法としては、音響シミュレーションが一般的である。透過物の厚みが薄く単純な形状であれば 3D データなどの情報を用い、形状をモデル化することが可能であるが、微小な多数孔や厚み方向に傾斜を持つ格子形状など、形状が複雑になるとモデル化が困難かつ、解析自由度が増大する。

本研究では、音波が透過物を通過する前後の粒子速度と音圧の実測値から伝達アドミッタンスを求め、有限要素法による 3 次元音響モデルにおいて、透過物の面の境界条件として定義することで多孔板の形状をモデル化せずに透過物の音響特性を予測する手法の確立に取り組んだ。

2.2 グリルの透過損失

グリルの透過損失はグリル近傍の前後の音圧・粒子速度を測定し、音響インピーダンスを求めることで算出することができる。測定を行うに際し、使用する用語とその意味を下記に述べる¹⁾。

2.2.1 音圧

気体、液体、固体などの媒質を伝播する弾性波である音波(acoustic wave、sound wave)が、空気中を通過するとき、媒質の粒子は振動し、圧力に変動が生じる。このような圧力の音波による変化分を音圧(sound pressure)という。聴力の正常な若い人の聞き得る音圧は約 2×10^{-5} Pa から 20 Pa である。平面波の音の強さ(sound intensity) I と音圧(実効値) P との間には

$$I = \frac{P^2}{\rho c} [W/m^2] \quad (2.2.1)$$

の関係がある。ここに、 ρ は空気の密度であり ρc を空気の固有音響抵抗(音響)と呼ぶ。常温では $\rho=1.2$ [kg/m³]、 $c=340$ [m/s]で、 ρc は約 400 (MKS 単位)である。

2.2.2 粒子速度

一般的に粒子速度とは、媒質中を波が伝播するときの媒質粒子の速度を表す。音波が空気中を疎密波として伝播する時、空気分子は音圧により前後に動き、この空気分子の動きの速度を音響粒子という。音速との違いは、音速は波の伝搬速度を表すものであるのに対して、粒子速度はある場所における粒子の速度に着目している点で大きく異なる。

粒子速度は、2 マイクロホン法やPUプローブを用いて算出される。式(2.2.2)及び(2.2.3)は図 2.2.1 に示す 2 マイクロホン法による粒子速度の計算式である。

$$u(t) = -\frac{1}{\rho d} \int_{-\infty}^t [P_2(t') - P_1(t')] dt' \quad (2.2.2)$$

または、

$$U(f) = -\frac{1}{j\rho c d} [P_2(f) - P_1(f)] \quad (2.2.3)$$

$P_1(t)$ および $P_2(t)$ は2つのマイクロホンの出力、 j は虚数単位、 ρ は空気密度、 c は

音速、 $k = 2\pi f/c$ で波長定数である。

また、PU プロブ（熱線流速計）とは、電流を流すことによって加熱された細い金属線（熱線）を流体中に置き、流れの冷却作用によって熱線の温度が下がるとともに電気抵抗値も変化する。この抵抗値の変化から粒子速度を算出する方法である。

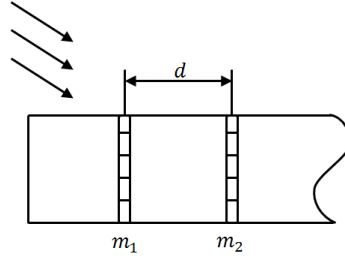


図 2.2.1 2 マイクロホン方式の音響インテンシティプロブ

2.2.3 デシベルと音圧レベル

ウェーバー・フェヒナによると、物理量 E によって感覚 L が生じているとき、 L は E に比例するのではなく、 L は $\log E$ に比例するという。そこで基準となる物理量 E_0 を考えたとき、次式のように表す。

$$L = k \log_{10} \frac{E}{E_0} \quad (2.2.4)$$

そこで、物理量として音の強さ I を取り上げると音の強さのレベル (sound intensity level) は

$$L_I = 10 \log_{10} \frac{I}{I_0} [\text{dB}] \quad (2.2.5)$$

で表される。ここで基準の音の強さ I_0 は 10^{-12} W/m^2 とする。一方、 $I = p^2 / \rho c$ の関係を考慮すると、

$$L_I = 10 \log_{10} \frac{p^2}{p_0^2} = 20 \log_{10} \frac{p}{p_0} [\text{dB}] \quad (2.2.6)$$

が得られる。 L_I の代わりに L_p （又は SPL）も使うから、

$$L_p = 20 \log_{10} \frac{p}{p_0} [\text{dB}] \quad (2.2.7)$$

L_p を音圧レベル (sound pressure level) という。 p_0 には $2 \times 10^{-5} \text{ Pa}$ が使われており、それを考慮すると式(2.2.7)は、

$$L_P = 20 \log_{10} \frac{P}{2 \times 10^{-5}} = 10 \log_{10} \frac{I}{10^{-12}} [\text{dB}] \quad (2.2.8)$$

以上のように 2 量の比の対数がベル (Bel) で、その 10 分の 1 がデシベル (decibel) であり、単位記号として [dB] を使う。

2.2.4 FFT 分析

騒音源の詳細な発生メカニズムや振動と騒音の関係を調べる際には、FFT (Fast Fourier Transform) 分析を用いる。

フーリエ級数を無限長の時間に展開し、時間の関数を周波数の関数に変換する作業をフーリエ変換と呼んでいる。またその逆の作業を逆フーリエ変換と呼ぶ。それぞれの式は

$$X(f) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) e^{-j2\pi ft} dt \quad (2.2.9)$$

$$x(f) = \int_{-\infty}^{+\infty} X(t) e^{j2\pi ft} dt$$

(2.2.10)

と表す。なお、デジタル信号処理においては、上式を離散して

$$X_i = \frac{1}{T} \sum_{k=0}^{N-1} x_k e^{-j2\pi ki / N} \quad (2.2.11)$$

$$x_k = \sum_{i=0}^{N-1} X_i e^{j2\pi ki / N} \quad (2.2.12)$$

(ただし、 $i=0 \sim N$ 、 $k=0 \sim N-1$ 、 N ：離散化したデータの個数)

と表される。これを離散的フーリエ変換 (DET : Descrete Fourier Transform) という。FFT は 2 のべき乗個の有限な時系列の離散データに対して高速の離散的フーリエ変換の演算を適用し、周波数スペクトルを得る方法である。

FFT 分析器の構成は図 2.2.2 のようになる。信号入力 (アナログ信号) は、増幅回路で適当に増幅された後、高周波成分をカットする低域通過 (ローパス) フィルタを通り、サンプリング回路、A-D 変換回路を経てデジタル信号に変換される。

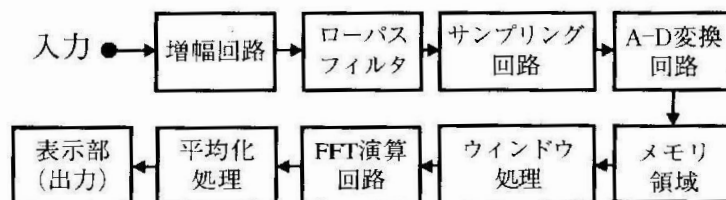


図 2.2.2 FFT 分析の構成

いま、図 2.2.3 のような音圧信号をサンプリングする場合を考える。ブロックデータの個数（サンプリング点数）を N 、上限となる解析周波数（ナイキスト周波数）を f_m 、サンプリング周波数を f_s とすると、これらには以下のような関係がある。

$$\Delta f = \frac{f_s}{N} = \frac{2.56 f_m}{N} \quad (2.2.13)$$

一方、記録時間長 T_R はサンプリング周期 t_s と N 、 f_s に以下の関係がある。

$$T_R = N \cdot t_s = \frac{N}{f_s} \quad (2.2.14)$$

この 2 式から

$$\Delta f \cdot T_R = 1 \quad (2.2.15)$$

なる関係が得られる。

したがって、FFT 分析においては、周波数分解能と時間分解能の間にトレードオフが生じる。

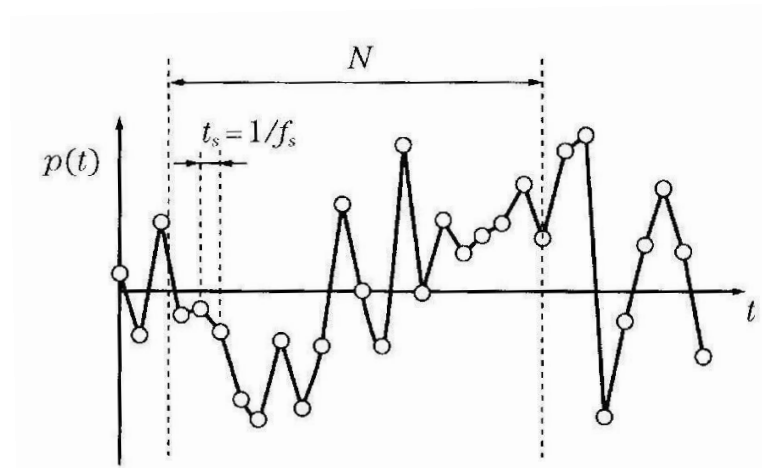


図 2.2.3 音圧信号のサンプリング

2.2.5 オーバーオール

上述の周波数分析を行った後、バンド毎の騒音レベル（音圧レベル）の総和をとった合成レベルをオーバーオールレベルという。

今、周波数バンド毎のバンドレベルを L_1 、 L_2 、 \dots 、 L_n [dB] としたとき、オーバーオールレベル L_{OA} [dB] は、次の式により求めることができる。

$$L_{OA} = 10 \log_{10} \left(10^{\frac{L_1}{10}} + 10^{\frac{L_2}{10}} + \dots + 10^{\frac{L_n}{10}} \right) \quad (2.2.16)$$

2.2.5 音響特性インピーダンス

一様な媒質中の音圧 P と粒子速度 u の比を音響特性（固有）インピーダンスといい、 $Z = P/u$ で表す。

2.2.6 グリルの透過損失

図 2.2.4 に示すように音波が異なる媒質に入射すると、境界面で媒質の固有音響インピーダンスの相違により入射音波の一部が反射し、残りが透過する。このとき、入口、出口側の媒質の音響特性インピーダンスを Z_1 、 Z_2 とすると、音の強さの反射率 R_I 、透過率 τ は以下の式で表される。

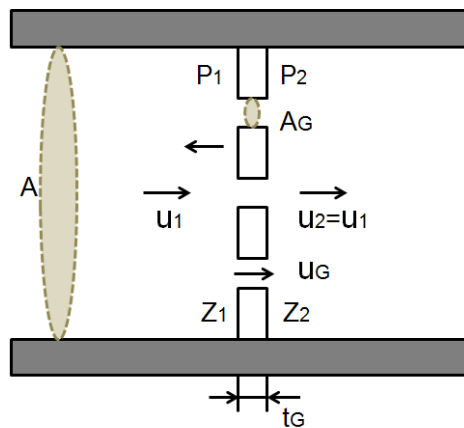


図 2.2.4 穴開き板の音響特性インピーダンス

$$R_I = \frac{(Z_2 - Z_1)^2}{(Z_2 + Z_1)^2} \quad (2.2.17)$$

$$\tau = \frac{4Z_1Z_2}{(Z_2 + Z_1)^2} \quad (2.2.18)$$

ここで、 τ の逆数を対数表示したものを透過損失 TL といい、音がそこでどれだけ減衰したかを表す。

$$TL = 10 \log_{10} \frac{1}{\tau} \quad (2.2.19)$$

これらのことは入口・出口側で同じ媒質でも、ダクトなどのように断面積が変化する場合や、薄い壁面の場合には同様のことが言える。したがって、グリル近傍の前後の音響インピーダンスを測定することで、グリルの音響特性を知ることができ、透過損失を算出することが可能である¹⁾。

しかし、透過損失はある条件下での音響特性を示すもので消費量（減音量）そのものではない。そのため、挿入前音圧 P_1 と挿入後音圧 P_2 の比で表した消費量を直接示す Att [dB]での検証も同時に行うことも必要である²⁾。

$$Att = 20 \log_{10} \left(\frac{P_1}{P_2} \right) \quad (2.2.20)$$

2.3 スピーカ・グリル間体積の音響特性

スピーカ・グリル間に構成される空間の寸法や体積は、機器によってさまざまである。例えば、音波は波長に比べ小さい内径の管内を伝搬すると平面進行波となり、管端で波が反射して、進行波と反射波が干渉し、音響共鳴が生じる。その結果、管端からの放射音には複雑な周波数特性が生じる。

また、この体積の空気質量がばねとして作用するような低周波数域では、固有周波数での特性の変化が現れる。一般にスピーカは広い周波数にわたって平坦な特性を有しているため、この体積による周波数特性の変化が無視できないものとなる^{2)、3)}。これらの現象を調査するに際し、これらの現象に起因する理論を下記に述べる。

2.3.1 音響管

発生した音響信号を伝搬したり、共鳴現象を利用して音響信号を発生させる目的で、一様な断面をもつ管がしばしば用いられる。波長に比べて小さい内径の管内を音波が伝搬する場合には、管内の音波は軸方向にのみ伝搬する平面波と見なすことができる。このような管を音響管 (sound tube) という。音響管内では 1 次元の音波が発生し、周辺部の反射、吸音、拡散などによるエネルギー損失が少ないため、音響信号を遠くへ伝搬するのに便利である。また、管内では進行波と後退波が生じるので音響計測にも応用される。

音波の波長と比較して管の内径が大きくなると、内径の影響が無視できなくなり、軸方向のみを考えた平面波と見なせなくなるので注意が必要である。ここでは小さい内径の音響管を取り扱うことにする。

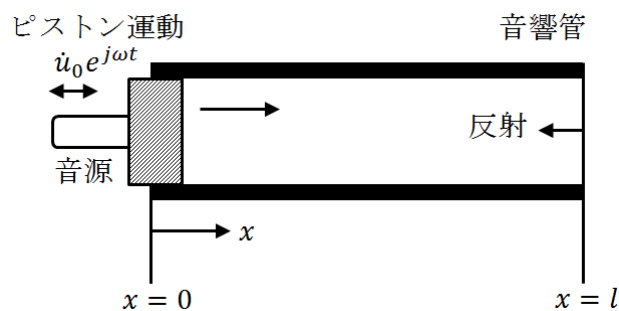


図 2.3.1 音響管

図 2.3.1 に示すように長さ l の音響管の一端に、音源となる振動板が管の軸方向にピストン運動をして平面波を発生しているとする。この平面波の粒子速度と音圧は、

$$\dot{u} = jk[Ae^{j(\omega t - kx)} - Be^{j(\omega t + kx)}] \quad (2.3.1)$$

$$P = j\omega\rho[Ae^{j(\omega t - kx)} + Be^{j(\omega t + kx)}] \quad (2.3.2)$$

と与えられる。

音響管内では進行波と後退波が存在するため、式中の積分定数 A 及び B をつぎの示す (1) と (2) の 2 つの境界条件によって決定する。

(1) 管の入口、すなわち $x = 0$ において粒子速度は音源の振動速度に等しい。

(2) 管の他端 $x = l$ において

(a) 閉口管の場合、粒子運動はできなくなるので粒子速度は 0 になる。

(b) 開口管の場合は開口端で完全反射が起こり、音圧は 0 になる。

このように閉口管と開口管で境界条件は異なるので、以下にそれぞれの場合について粒子速度、音圧及び共鳴周波数を求める。

[1] 閉口音響管の場合

$$\left. \begin{array}{l} x = 0 \quad \text{で} \quad \dot{u} = \dot{u}_0 e^{-i\omega t} \\ x = l \quad \text{で} \quad \dot{u} = 0 \end{array} \right\}$$

の条件を用いて、式(2.3.1)から

$$\dot{u}_{x=0} = jk(A - B)e^{j\omega t} = \dot{u}_0 e^{j\omega t} \quad (2.3.3)$$

$$\dot{u}_{x=l} = jk(Ae^{-jkl} - Be^{jkl})e^{j\omega t} = 0 \quad (2.3.4)$$

式と式から A および B を求めると

$$A = \frac{\dot{u}_0}{jk} \frac{e^{jkl}}{e^{jkl} - e^{-jkl}} \quad (2.3.5)$$

$$B = \frac{\dot{u}_0}{jk} \frac{e^{-jkl}}{e^{jkl} - e^{-jkl}} \quad (2.3.6)$$

となる。これらを式(2.3.1)と式(2.3.2)に代入し、 $c = \omega/k$ を用いて

$$\dot{u} = \dot{u}_0 \frac{e^{jk(l-x)} - e^{-jk(l-x)}}{e^{jkl} - e^{-jkl}} e^{j\omega t} = \dot{u}_0 \frac{\sin k(l-x)}{\sin kl} \quad (2.3.7)$$

$$\begin{aligned} P &= \rho c \dot{u}_0 \frac{e^{jk(l-x)} + e^{-jk(l-x)}}{e^{jkl} - e^{-jkl}} e^{j\omega t} \\ &= -j\rho c \dot{u}_0 \frac{\cos k(l-x)}{\sin kl} e^{j\omega t} \end{aligned} \quad (2.3.8)$$

となる。

閉口音響管の一端に軸方向にピストン運動する音源を設けたときの管内の粒子速度と、音圧分布を図 2.3.2 に示す。管の閉口端 $x = l$ において粒子速度は 0

となり、一方、音圧は最大となっている。この音圧が最大になる位置を腹 (Loop) とよび、音圧が最小になる位置を節 (ふし、node) という。図 2.3.2 をみると分かるように、粒子速度と音圧は、いずれも管内において大きくなる位置と小さくなる位置が波動によって分布していることがわかる。音響管の位置 $x = 0$ から管内を見た音響インピーダンス密度 z_0 は式 (2.3.7) と式 (2.3.8) から

$$z_0 = \frac{P_{x=0}}{\dot{u}_{x=0}} = -j\rho c \cot kl \quad (2.3.9)$$

となる。

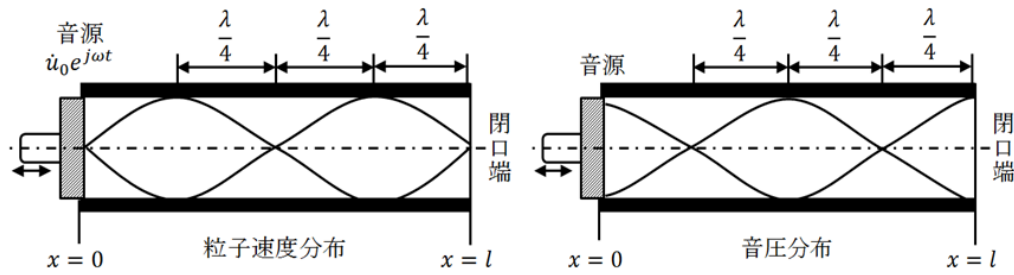


図 2.3.2 閉口音響管内の粒子速度と音圧の分布

また、 $x = l$ における音響インピーダンス密度 z_l は粒子速度が 0 となるので $z_l = \infty$ となる。

いま、音圧が 0 となるのは式 (2.3.8) からつぎの条件を満たす位置である。

$$\cos k(l - x) = 0$$

$$\therefore k(l - x) = \frac{\pi}{2}(2m + 1) \quad m = 0, 1, 2, \dots$$

$c = \omega/k$ から

$$c = \lambda f = \frac{\omega}{k} = \frac{2\pi f}{k}$$

$$\therefore k = \frac{2\pi}{\lambda} \text{ を用いると}$$

$$l - x = (2m + 1) \frac{\lambda}{4} \quad (2.3.10)$$

そこで、この式 (2.3.10) の条件を用いて式 (2.3.7) から粒子速度の最大値 \dot{u}_{max} を求めると

$$\dot{u}_{max} = \dot{u}_0 \frac{1}{\sin \left[2\pi \left(l/\lambda \right) \right]} e^{j\omega t} \quad (2.3.11)$$

となる。

次に、粒子速度が 0 となるのは式(2.3.7)からつぎの条件を満たす位置である。

$$\begin{aligned} \sin k(l-x) &= 0 \\ k(l-x) &= m\pi \quad m = 0, 1, 2, \dots \\ \therefore l-x &= \frac{m}{2}\lambda \end{aligned} \quad (2.3.12)$$

そこで、式(2.3.8)から音圧の最大値 p_{max} は

$$P_{max} = -j\rho c \dot{u}_0 = \frac{1}{\sin[2\pi(l/\lambda)]} e^{j\omega t} \quad (2.3.13)$$

となる。

両端開口管の共鳴周波数は

$$\begin{aligned} \sin kl &= 0 \\ \therefore kl &= m\pi \end{aligned}$$

の関係と $k = 2\pi/\lambda = 2\pi f/c$ を用いて

$$f = \frac{mc}{2l} \quad (2.3.14)$$

となる。

次に、一端開口端他閉口管の共鳴周波数を求める。先に求めたのと同様の方法により

$$\begin{aligned} \cos kl &= 0 \\ kl &= (2m+1)\frac{\pi}{2} \quad m = 1, 2, 3, \dots \\ \omega &= \frac{(2m+1)\pi c}{2l} \end{aligned}$$

したがって、共鳴周波数は

$$f = \frac{(2m+1)c}{4l} \quad (2.3.15)$$

となる。

一端開口他端閉口管内の粒子速度と音圧の分布を、

$f_1 = c/(4l)$ と $f_3 = 3c/(4l) = 3f_1$ について図 2.3.3 に示す。開口端では音圧は 0

となり、粒子速度は最大となっている。

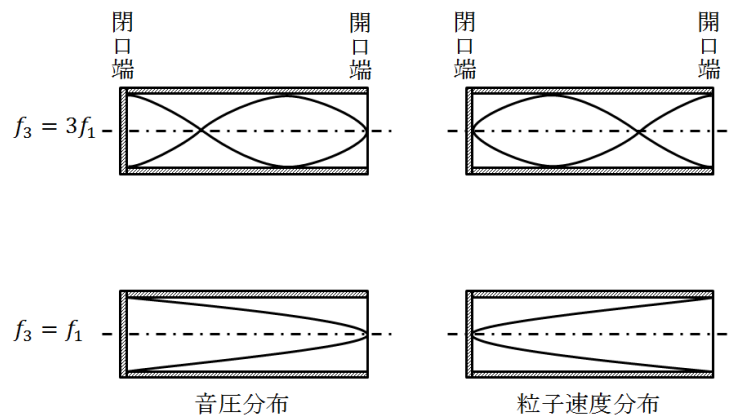


図 2.3.3 両端閉口管内の粒子速度と音圧の分布

開口端補正

音響管で述べたように、波長に比べて細い管を音波が伝搬するとき、管の長さを連続的に変化させると、ある長さにおいて音が大きくなる共鳴現象が生じる。この長さを実験により測定するには、シリンダの中をピストンが移動するようにし、シリンダである管内に音波を発生させ、管内のピストンを移動させて空気柱の長さを変化させ、管内に発生する共鳴音を外部の分析器に導き、音が最も大きくなるピストン位置を実験的に知ることができる。

共鳴周波数は両端閉口管の場合は式(2.3.14)、一端開口他端閉口管の場合は式(2.3.15)にそれぞれ理論式が示されている。これらの理論式が示されている。これらの理論式を用いて計算した共鳴周波数は、実験によって得られる共鳴周波数とは完全には一致しない。これは理論式を導くにあたり、管の開口端において管内を伝わる音波が完全に反射すると仮定しているが、厳密には外界の媒質へ一部が伝搬し、開口端において音圧は完全に 0 とはならないためである。したがって、管端から少し離れた点が実効的な管端となり、管の長さが実際の長さよりある長さだけ増加したと見なすことができる。したがって、端面条件の同じ両端開口管の場合には、管の長さ l を $(l + 2\Delta l)$ と置き換えることによって共鳴周波数は、

$$f = \frac{mc}{2(l + 2\Delta l)} \quad (2.3.16)$$

と書くことができる。この Δl を開口端補正 (Open end correction) という。この開口端補正は管の断面形状、端面の状態 (端面の肉厚寸法、フランジ付き端面など)、媒質の流動速度などによって影響を受けるものである。

いま、半径 a の円形断面をもつ管の開口端に、無限に広がるフランジが付いている場合の開口端補正は理論的に式(2.3.17)で求められている。

$$\Delta l = \frac{8a}{3\pi} \doteq 0.85a \quad (2.3.17)$$

さらに、端面にフランジの付かない円管の開口端補正は、実験によって

$$\Delta l = 0.6a \quad (2.3.18)$$

となっている。したがって、開口端補正は端面のフランジ部の大きさによって $0.85a$ から $0.6a$ の間に分布していることになる。

両端面の条件が異なる両端開口管の場合には、両端面それぞれの補正する必要があるので、その共鳴周波数は

$$f = \frac{mc}{2(l + \Delta l_1 + \Delta l_2)} \quad (2.3.19)$$

となる。ここで Δl_1 は一開口端の補正值、 Δl_2 は他開口端の補正值である。

管の開口端補正について Benade が木管楽器について実験した結果が報告されており、これがしばしば利用されている。それによると管の半径を a とすると、開口端補正 Δl は

$$\Delta l = aE \quad (2.3.20)$$

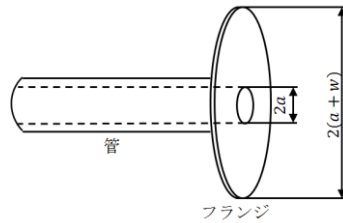


図 2.3.4 フランジ付き管

E は管の開口端の形状によって決まるもので、図 2.3.4 に示すように、管の開口端に半径 $(a + \omega)$ のフランジが付いている場合には、式(2.3.21)を実験によって導いている。

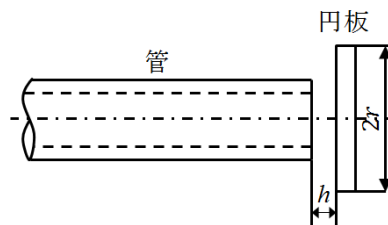


図 2.3.5 管の開口端面に円板を近接した場合

$$E = 0.821 - 0.13 \left[\left(\frac{\omega}{a} \right) + 0.42 \right]^{-0.54} \quad (2.3.21)$$

さらに、図 2.3.5 に示すように、半径 r の円板が管の開口端面から h の距離において、管の中心線に垂直に置かれている場合には

$$E = 0.61 \left(\frac{r}{a} \right)^{0.18} \left(\frac{a}{h} \right)^{0.39} \quad (2.3.22)$$

の実験式を Benade が導いている。

さらに、外半 R 径の管壁に半径 a の穴がある場合の穴の害外表面の端補正は、 $1.5 \leq R/a \leq 7$ の場合について

$$E = 0.64 \left[1 + 0.32 \ln \left(\frac{R}{a} \right) \right] \quad (2.3.23)$$

が適用できることを、実験によって示している⁴⁾。

2.4 グリルの振動特性

物体にある動的な外力が作用すると、物体は固有の振動を起こす。そして、その振動の周波数と外力の周波数が一致する場合には、振動が増減される。この現象を共振と呼び、固有の振動が生じる周波数を固有振動数と呼ぶ。音響機器においてはスピーカ振動の反力によってスピーカ周辺構造が加振され、固有振動数で放射音が生じる可能性がある。高級な音響機器では共振の影響を避けるために筐体を重くすることが許されるが、ABS樹脂のような軽量な材料を使用する場合、固有振動数が音響の周波数帯域となり、音質に悪影響を与えることが考えられる⁵⁾。

2.4.1 有限要素法の手法

固有値解析を行うに際し、使用した手法を下記に述べる。

サブスペース反復法⁶⁾

サブスペース反復法は、有限要素法のようにバンド性を有する大次元マトリックスの固有値問題に対する解法のうち、最も有力なものであるといわれており、一般固有値問題を直接解くところに特色がある。

サブスペース反復法では、解くべき問題は n 次元の一般固有値問題である。

$$(\omega^2[M] - [K])\{\delta_0\} = 0 \quad (2.4.58)$$

(1) $[K] = [L][D][L]^T$

ここで、 $[L]$ は対角線上の要素がすべて1である左下三角マトリックスであり、 $[D]$ で対角マトリックスである。このように剛性マトリックスをあらかじめ三角マトリックスと対角マトリックスの積に分解しておく(これは一般に LDU と呼ばれている)。

(2) 求めるべき固有値の数を ω_0 とするば、 n 行 m 列のマトリックス $[U_0]$ を仮定する。

(3) $[V_k] = [M][U_{k-1}]$

ここで添字 k は繰り返しの回数を示す。 $k = 1$ すなわち最初の段階では、ステップ(2)で定義した $[U_0]$ を用いる。

(4) $[K][W_k] = [V_k]$ を解いて $[W_k]$ を求める。この際、ステップ(1)であらかじめ $[K]$ を LDU 分解してあるので、 $[K]$ の逆行列を求めなくてもよい。

(5) $[K_k] = [W_k]^T[V_k]$

$$[M_k] = [W_k]^T[M][W_k]$$

ここで、 $[K_k]$ および $[M_k]$ は m 行 m 列の縮小された剛性および質量マトリックス

である。

(6) 縮小された一般固有値問題

$$(\omega^2[M_k] - [K_k])\{q\} = 0 \quad (2.4.59)$$

を解き、 m 個の全固有ペアを求める。求めた m 個の固有ベクトルを低次より順に各列に並べた m 行 m 列のマトリックスを $[Q_k]$ とする。

(7) $[U_k] = [W_k][Q_k]$

(8) 収束判定、ステップ(3)で用いた $[U_{k-1}]$ とステップ(7)で得た $[U_k]$ を比較して、十分に収束していれば、ステップ(6)で求めた ω_k とステップ(7)で求めた U_k のうち低次より m_0 個を取り、これらが式の固有ペアに等しいとみなす。一方収束が不十分であれば、 $k \rightarrow k+1$ としてふたたびステップ(3)にかえる。

以上がサブスペース反復法による計算の手順である。並列反復法でもサブスペース反復法でも、最も大切なことは最初のマトリックス $[U_0]$ をどのように選ぶかである。もちろん $[U_0]$ が求めるべき固有ベクトルに近いほど収束は早い、あまり最初の近似度がよくなくても比較的収束性はよいのがこれらの方法の特色である。Clough らによれば、サブスペース反復法において最初に $[U_0]$ の代わりに $[M][U_0]$ を次のように仮定している。すなわち $[M][U_0]$ の最初の列ベクトルを質量マトリックス $[M]$ の対角要素を用い、他の列ベクトルは、質量マトリックスと剛性マトリックスの対角要素の比 M_{ii}/K_{ii} の大きい列の値が 1 であり他のすべての行が零となる単位列ベクトルを用いる。このように仮定した $[U_0]$ を用いて繰り返し回数 10 回以内でよい収束が得られたことが報告されている。

2.5 官能試験

2.5.1 音質の評価量（心理音響メトリクス）

人間の聴覚は、音響分析器として非常に優れた汎用性を併せ持っていて、現状でもそれを完全に模倣する機器を作ることはできていない。また、物理的な分析手法を用いても音響センサーとしての聴覚機能を述べることも難しい。しかしながら、最近では心理音響学や両耳信号処理などを取り入れることによって、聴覚を特徴付けるパラメータを抽出できるようになっている。その内容は、バイノーラルヘッドを用いたバイノーラル録音のステレオ信号を周波数分析した後、そこからラウドネス、シャープネス、変動強度、調音性、ラフネスといった心理音響メトリクスを算出する。

以下に代表的な心理音響メトリクスを占示す。

ラウドネス (Loudness)

ラウドネスは、人間が感じる音の大きさを表す量で、単位は[sone]である。計算方法としては、臨界帯域とマスキングを考慮した ISO532B の E. Zwicker の方法により計算する。また、ラウドネス N からラウドネスレベル L への変換は、ISO R131 に記述された以下の(2.5.1)、(2.5.2)式を用いる。

$$L = 10 \log_{10} N + 40 \quad [\text{dB}] \quad (2.5.1)$$

$$N = 2^{(L-40)/10} \quad [\text{sone}] \quad (2.5.2)$$

シャープネス (Sharpness)

シャープネスは「耳障り感」と相関が強いといわれている評価量で、単位は[acum]。ラウドネス密度 $N'(z)$ を重み付け関数 $g(z)$ と臨界帯域 z で広域に重み付けをして積分した値を、ラウドネス N で規格化することにより求められる。すなわち、(2.5.3)式となる。

$$S = C \frac{\int_0^{24} N'(z) \cdot g(z) \cdot z \cdot dz}{N} \quad [\text{acum}] \quad (2.5.3)$$

ここで、重み付け関数 $g(z)$ は、次の(2.5.4)式で与えられる。

$$g(z) = \begin{cases} 1 & (z \leq 16) \\ e^{0.173(z-16)} & (z > 16) \end{cases} \quad (2.5.4)$$

また、係数 C は中心周波数 1kHz で帯域幅 160Hz 以下、音圧レベル 60dB の帯域

雑音の時、シャープネスが 1acum になるように決定される⁷⁾。

下記に官能試験を行うに際し、使用した手法を下記に述べる。

2.5.2 一対比較法

一対比較法とは、基準音と比較音を対で提示し、比較させる方法である。この方法は、被験者の判断が容易で試験結果も信頼できる。しかし、総当たりで試験を行うため、サンプル数が多いと実施が困難となる。

2.5.3 分散分析

分散分析の考え方はシェッフェの方法の変形した浦の変法を用いた。試料を A_1, A_2, \dots, A_t 、検査員を O_1, O_2, \dots, O_N とする。検査員 O_l が、順序ある対 (A_i, A_j) に与えた評点を x_{ijl} で表し、 x_{ijl} に (2.5.5) 式の構造を与える。

$$x_{ijl} = (\alpha_i - \alpha_j) + (\alpha_{il} - \alpha_{jl}) + \gamma_{ij} + (\delta + \delta_l) + \varepsilon_{ijl} \quad (2.5.5)$$

ここで

α_i ; 試料 A_i の平均的効果を示す。

$$\sum_i \alpha_i = 0$$

とする。

α_{il} : 試料 A_i に対して検査員 l がもっている嗜好度の個人差、つまり、検査員 l の嗜好度とパネルの平均嗜好度との差を意味する。

したがって、検査員 l は試料 A_i に対して $\alpha_i + \alpha_{il}$ の嗜好度を持つ。

$$\sum_{i=1}^l \alpha_{il} = 0, \quad \sum_{l=1}^N \alpha_{il} = 0$$

とする。

γ_{ij} : 組合せの効果を示す。

$$\sum_j \gamma_{ij} = 0, \quad \gamma_{ij} = -\gamma_{ji}$$

とする。

δ : 平均の順序効果

δ_l : 順序効果の個人差であって

$$\sum_l \delta_l = 0$$

とする。

ε_{ijl} : 誤差、統計的独立で、順序のある対 (i, j) に対し同じ平均をもち $V(\varepsilon_{ijl}) = \sigma^2$ 、後に正規性を仮定する。

一対比較法で試験した結果を統計処理する。その際の方法について述べる。比較の結果を点数で表す。そしてその点数に適当な構造を仮定して分析を行う。そしてこれらの推定値は、次式によって与えられる。

$$\text{平均嗜好度} \quad \hat{\alpha}_i = \frac{1}{2tN} (x_{i..} - x_{.i.}) \quad (2.5.6)$$

$$\text{嗜好度の個人差} \quad \hat{\alpha}_{il} = \frac{1}{2t} (x_{i.l} - x_{.il}) - \hat{\alpha}_i \quad (2.5.7)$$

$$\text{組合せ効果} \quad \hat{\gamma}_{il} = \frac{1}{2N} (x_{ij.} - x_{ji.}) - (\hat{\alpha}_i - \hat{\alpha}_j) \quad (2.5.8)$$

$$\text{平均の順序効果} \quad \delta = \frac{1}{t(t-1)N} x_{...} \quad (2.5.9)$$

$$\text{順序効果の個人差} \quad \delta_l = \frac{1}{t(t-1)N} x_{..l} - \delta \quad (2.5.10)$$

また、各効果の平方和は、次式によって計算する。

$$\text{主効果} \quad S_{\alpha} = \frac{1}{2tN} \sum_i (x_{i..} - x_{.i.})^2 \quad (2.5.11)$$

$$\text{主効果} \times \text{個人} \quad S_{\alpha(B)} = \frac{1}{2tN} \sum_i \sum_l (x_{i.l} - x_{.il})^2 - S_{\alpha} \quad (2.5.12)$$

$$\text{組合せ効果} \quad S_{\gamma} = \frac{1}{2N} \sum_i \sum_{j < i} (x_{ij.} - x_{ji.})^2 - S_{\alpha} \quad (2.5.13)$$

$$\text{順序効果} \quad S_{\delta} = \frac{1}{Nt(t-1)} x_{...}^2 \quad (2.5.14)$$

$$\text{順序} \times \text{個人} \quad S_{\delta(B)} = \frac{1}{t(t-1)} \sum_l x_{..l}^2 - S_{\delta} \quad (2.5.15)$$

$$\text{誤差} \quad S_{\varepsilon} = S_T - S_{\alpha} - S_{\alpha(B)} - S_{\gamma} - S_{\delta} - S_{\delta(B)} \quad (2.5.16)$$

$$\text{総平方和} \quad S_T = \sum_i \sum_j \sum_l x_{ijl}^2 \quad (2.5.17)$$

これらの平方和に対する自由度を示す。

$$\text{主効果} \quad S_{\alpha} = t - 1 \quad (2.5.18)$$

主効果×個人	$S_{\alpha(B)} = (t-1)(N-1)$	(2.5.19)
組み合わせ効果	$S_{\gamma} = 1/2 (t-1)(t-2)$	(2.5.20)
順序効果	$S_{\sigma} = 1$	(2.5.21)
順序効果×個人	$S_{\sigma(B)} = N-1$	(2.5.22)
誤差	$S_{\varepsilon} = t^2 N - \frac{t^2}{2} - 2tN + \frac{3}{2}t - 1$	(2.5.23)
総平方和	$S_T = t(t-1)N$	(2.5.24)

分散分析の結果、主効果が有意になったならば、次にどの α_i と α_j 間に有意差があるかを確かめる。そのためには、まず次のヤードスティック Y_{φ} を計算する。

$$Y_{\varphi} = q\sqrt{\sigma^2/2Nt} \quad (2.5.25)$$

ただし、 q_{φ} は付表から求める。このとき、数表中の記号 k は試料数であり、 f は分散分析表での誤算の自由度に等しい。また σ^2 は、分散分析表での誤差の不偏分散の値を用いる。

次に、 $\alpha_i - \alpha_j$ の信頼度 $1 - \varphi$ の信頼区間を次式によって求める。

$$\hat{\alpha}_i - \hat{\alpha}_j - Y_{\varphi} \leq \alpha_i - \alpha_j \leq \hat{\alpha}_i - \hat{\alpha}_j + Y_{\varphi} \quad (2.5.26)$$

この信頼区間が、+側と-側にまたがっているならば α_i と α_j に差があるといえない。区間が+側にあるならば $\alpha_i < \alpha_j$ となり、-側にあるならば $\alpha_i > \alpha_j$ と考える⁸⁾。

2.6 音響解析

音響解析を行うに際し、一般的な音響解析の理論を下記に述べる。

2.6.1 音場における媒質の運動方程式

図 2.6.1 に示すように、微小な直方体の中心 (x, y, z) における音圧を p とすれば、 x 軸に垂直な 2 つの面 $x \pm \Delta x / 2$ に作用する音圧は

$$p \pm \frac{1}{2} \frac{\partial p}{\partial x} \Delta x \quad (2.6.1)$$

と表される。したがって、この微小部分の x 方向の運動方程式は

$$\rho \Delta x \Delta y \Delta z \frac{\partial^2 u_x}{\partial t^2} = \left(p - \frac{1}{2} \frac{\partial p}{\partial x} \Delta x \right) \Delta y \Delta z - \left(p + \frac{1}{2} \frac{\partial p}{\partial x} \Delta x \right) \Delta y \Delta z \quad (2.6.2)$$

となる。ここで ρ は単位体積質量、 u は x 方向の変位を示す。(2.6.2) 式より、

$$\rho \frac{\partial^2 u_x}{\partial t^2} = - \frac{\partial p}{\partial x} \quad (2.6.3)$$

が得られ、 y, z 方向も同様に

$$\rho \frac{\partial^2 u_y}{\partial t^2} = - \frac{\partial p}{\partial y}, \quad \rho \frac{\partial^2 u_z}{\partial t^2} = - \frac{\partial p}{\partial z} \quad (2.6.4)$$

となる。ここで、 u_y, u_z は y, z 方向の変位を示す。

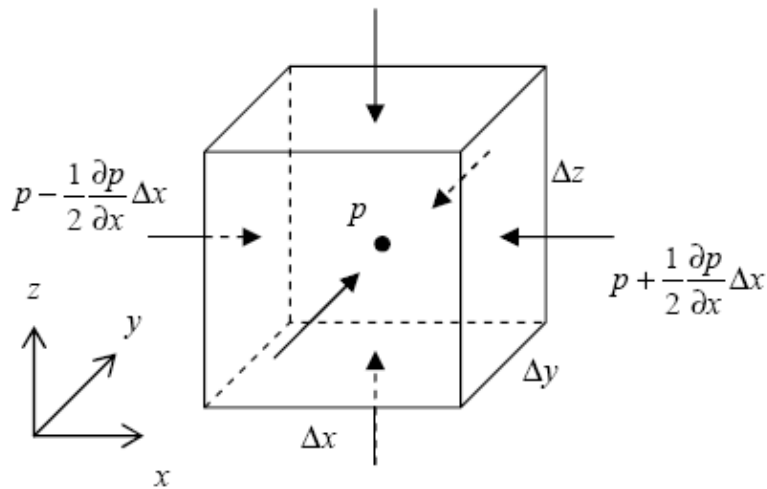


図 2.6.1 媒質の微小部分に作用する音圧

(2.6.3), (2.6.4) 式をまとめると、音場における媒質の運動方程式は以下のように表すことができる。

$$\rho \frac{\partial^2 \mathbf{u}}{\partial t^2} = -\nabla p \quad (2.6.5)$$

ここで、 \mathbf{u} と ∇p は以下のように表すことができる。

$$\mathbf{u} = \begin{bmatrix} u_x & u_y & u_z \end{bmatrix}, \quad \nabla p = \text{grad } p = \begin{bmatrix} \frac{\partial p}{\partial x} & \frac{\partial p}{\partial y} & \frac{\partial p}{\partial z} \end{bmatrix} \quad (2.6.6)$$

2.6.2 音の波動方程式

媒質の体積弾性率 (bulk modulus) を K とすると、音圧は

$$p = -K\Delta \quad (2.6.7)$$

と表される。ここで、 Δ は体積変化の割合

$$\Delta = \frac{V - V_0}{V_0}, \quad (2.6.8)$$

$$V_0 = \Delta x \Delta y \Delta z, \quad V = \left(1 + \frac{\partial u_x}{\partial x}\right) \left(1 + \frac{\partial u_y}{\partial y}\right) \left(1 + \frac{\partial u_z}{\partial z}\right) \Delta x \Delta y \Delta z$$

を表し、次式で定義される。

$$\Delta = \nabla \cdot \mathbf{u} = \text{div } \mathbf{u} = \frac{\partial u_x}{\partial x} + \frac{\partial u_y}{\partial y} + \frac{\partial u_z}{\partial z} \quad (2.6.9)$$

(2.6.7) 式を時間 t に関して 2 階微分すると

$$\frac{\partial^2 p}{\partial t^2} = -K \nabla \cdot \frac{\partial^2 \mathbf{u}}{\partial t^2} \quad (2.6.10)$$

上式に、運動方程式 (2.6.5) を代入すると

$$\frac{\partial^2 p}{\partial t^2} = \frac{K}{\rho} \nabla \cdot \nabla p = \frac{K}{\rho} \left(\frac{\partial^2 p}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 p}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 p}{\partial z^2} \right) \quad (2.6.11)$$

となり、音圧に関する波動方程式が得られる。この式は音圧が

$$c = \sqrt{\frac{K}{\rho}} \quad (2.6.12)$$

の速度で媒質中を波動として伝播することを意味する。

2.6.3 PML(Perfectly Matched Layer)境界を適用する場合の音響解析の基礎式

音波の波動伝播は、(2.6.11) 式の波動方程式を解くことによって求められるが、有限要素法の場合、次のような基本式を用いる。

$$\rho \frac{\partial \dot{\mathbf{u}}}{\partial t} = -\nabla p \quad (2.6.13)$$

$$\frac{\partial p}{\partial t} = -K \Delta \cdot \dot{\mathbf{u}} \quad (2.6.14)$$

ここで、(2.6.13) 式は (2.6.5) 式の運動方程式であり、(2.6.14) 式は (2.6.7) 式の両辺を時間に関して微分した式である。また、(2.6.13) (2.6.14) 式で \mathbf{u} の上付きドットは時間微分を表す。
(2.6.13) 式、(2.6.14) 式に減衰項を加えると、次のように表すことができる。

$$\rho \frac{\partial \dot{\mathbf{u}}}{\partial t} = -\nabla p - \alpha^* \dot{\mathbf{u}} \quad (2.6.15)$$

$$\frac{\partial p}{\partial t} = -K \Delta \cdot \dot{\mathbf{u}} - K \alpha p \quad (2.6.16)$$

ここで、 α^* は質量比例型の減衰係数、 α は剛性比例型の減衰係数（ただし、通常の剛性比例型とは異なる）を表す。

一方、境界で音波を吸収するための PML (Perfectly Matched Layer) 領域（境界の外側領域）では、音圧 p を仮想的に x, y, z 方向に分解して、(2.6.15), (2.6.16) 式を次のように書き換える。

$$\rho \frac{\partial \dot{\mathbf{u}}}{\partial t} = -\nabla p - \alpha_b^* \dot{\mathbf{u}} \quad (2.6.17)$$

$$\frac{\partial \mathbf{p}}{\partial t} = -K \Delta \cdot \dot{\mathbf{u}} - K \alpha_b \mathbf{p} \quad (2.6.18)$$

ここで、

$$p = p_x + p_y + p_z, \quad \mathbf{p} = [p_x \ p_y \ p_z] \quad (2.6.19)$$

また、 α_b, α_b^* は PML 領域内の減衰係数で、次式の境界からの反射を 0 にするためのインピーダンスのマッチング条件を満足する。

$$\alpha_b^* = \rho K \alpha_b \quad (2.6.20)$$

(2.6.17), (2.6.18) 式が PML 領域内の基礎式となる。

2.6.4 有限要素法による離散化

領域内部の基礎式 (2.6.16), (2.6.17) および PML 領域の基礎式 (2.6.18), (2.6.19) を重み付き残差法によって離散化する。基礎境界条件を満足する重み関数を用いて、(2.6.16), (2.6.17) 式の重み付き残差式を作成すると、以下ようになる。

$$\begin{aligned} & -\int_{\Omega} \mathbf{w}_u^T \left(\rho \frac{\partial \dot{\mathbf{u}}}{\partial t} + \nabla p + \alpha^* \dot{\mathbf{u}} \right) d\Omega - \int_{\Omega} w_p^T \left(\rho \frac{\partial p}{\partial t} + K \Delta \cdot \dot{\mathbf{u}} + K \alpha p \right) d\Omega \\ & + \int_{\Gamma_t} \mathbf{w}_u^T (\mathbf{t} - \bar{\mathbf{t}}) d\Gamma = 0 \end{aligned} \quad (2.6.21)$$

ここで、 Ω は領域内の体積、 Γ_t は自然境界、 \mathbf{t} は表面圧力で、 $\mathbf{t} = p \mathbf{n}$ を表す。ただし、 \mathbf{n} は境界表面における法線方向ベクトルを表す。また、 \mathbf{w}_u , w_p は重み関数となる。(2.6.21) 式の第1項の ∇p に関して、ガウスの発散定理を用いて部分積分すると、次のような弱形式の方程式が得られる。

$$\begin{aligned} & -\int_{\Omega} \mathbf{w}_u^T \left(\rho \frac{\partial \dot{\mathbf{u}}}{\partial t} + \alpha^* \dot{\mathbf{u}} \right) d\Omega - \int_{\Omega} w_p \left(\frac{\partial p}{\partial t} + K \Delta \cdot \dot{\mathbf{u}} + K \alpha p \right) d\Omega \\ & + \int_{\Omega} \Delta \cdot \mathbf{w}_u (p_x + p_y + p_z) d\Omega = \int_{\Gamma_t} \mathbf{w}_u^T \bar{\mathbf{t}} d\Gamma \end{aligned} \quad (2.6.22)$$

同様に、PML 領域の弱形式の重み付き残差式は次のようになる。

$$\begin{aligned} & -\int_{\Omega} \mathbf{w}_u^T \left(\rho \frac{\partial \dot{\mathbf{u}}}{\partial t} + \alpha_b^* \dot{\mathbf{u}} \right) d\Omega - \int_{\Omega} w_{pb}^T \left(\frac{\partial p}{\partial t} + K \Delta \cdot \dot{\mathbf{u}} + K \alpha_b p \right) d\Omega \\ & + \int_{\Omega} \Delta \cdot \mathbf{w}_u (p_x + p_y + p_z) d\Omega = \int_{\Gamma_t} \mathbf{w}_u^T \bar{\mathbf{t}} d\Gamma \end{aligned} \quad (2.6.23)$$

(2.6.22), (2.6.23) 式を有限要素法によって離散化する。本報では、有限要素として、図 2.6.2 に示すような 8 節点直方体要素を想定する。また、要素内の速度および圧力は線形とし、各節点での速度および圧力を用いて次式のよう

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{u}} &= \mathbf{N}_v \dot{\mathbf{U}}^e & \mathbf{w}_u &= \mathbf{N}_v \mathbf{W}_u^e \\ p &= \mathbf{N} \mathbf{P}^e & w_p &= \mathbf{N} \mathbf{W}_p^e \\ \mathbf{p} &= \mathbf{N}_v \mathbf{P}_b^e & \mathbf{w}_{pb} &= \mathbf{N}_v \mathbf{W}_{pb}^e \end{aligned} \quad (2.6.24)$$

ここでは、

$$\begin{aligned}
\dot{\mathbf{U}}^e &= \begin{bmatrix} \dot{\mathbf{U}}_x^e & \dot{\mathbf{U}}_y^e & \dot{\mathbf{U}}_z^e \end{bmatrix} \\
\dot{\mathbf{U}}_i^e &= \begin{bmatrix} u_{i1} & u_{i2} & u_{i3} & u_{i4} & u_{i5} & u_{i6} & u_{i7} & u_{i8} \end{bmatrix}, \quad i = x, y, z \\
\mathbf{P}^e &= \begin{bmatrix} p_1 & p_2 & p_3 & p_4 & p_5 & p_6 & p_7 & p_8 \end{bmatrix} \\
\mathbf{P}_b^e &= \begin{bmatrix} \mathbf{P}_{bx}^e & \mathbf{P}_{by}^e & \mathbf{P}_{bz}^e \end{bmatrix} \\
\mathbf{P}_{bi}^e &= \begin{bmatrix} p_{bi1} & p_{bi2} & p_{bi3} & p_{bi4} & p_{bi5} & p_{bi6} & p_{bi7} & p_{bi8} \end{bmatrix}, \quad i = x, y, z
\end{aligned} \tag{2.6.25}$$

であり、 $\mathbf{W}_u^e, \mathbf{W}_p^e, \mathbf{W}_{pb}^e$ についても同様とする。また、

$$\mathbf{N}_v = \begin{bmatrix} \mathbf{N} & 0 & 0 \\ 0 & \mathbf{N} & 0 \\ 0 & 0 & \mathbf{N} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{N} = \begin{bmatrix} N_1 & N_2 & N_3 & N_4 & N_5 & N_6 & N_7 & N_8 \end{bmatrix} \tag{2.6.26}$$

であり、形状関数 \mathbf{N} は次式のように記述される。

$$\begin{aligned}
N_1 &= \frac{1}{8} \left(1 - \frac{2x}{l_x} \right) \left(1 - \frac{2y}{l_y} \right) \left(1 - \frac{2z}{l_z} \right) & N_5 &= \frac{1}{8} \left(1 - \frac{2x}{l_x} \right) \left(1 - \frac{2y}{l_y} \right) \left(1 + \frac{2z}{l_z} \right) \\
N_2 &= \frac{1}{8} \left(1 + \frac{2x}{l_x} \right) \left(1 - \frac{2y}{l_y} \right) \left(1 - \frac{2z}{l_z} \right) & N_6 &= \frac{1}{8} \left(1 + \frac{2x}{l_x} \right) \left(1 - \frac{2y}{l_y} \right) \left(1 + \frac{2z}{l_z} \right) \\
N_3 &= \frac{1}{8} \left(1 + \frac{2x}{l_x} \right) \left(1 + \frac{2y}{l_y} \right) \left(1 - \frac{2z}{l_z} \right) & N_7 &= \frac{1}{8} \left(1 + \frac{2x}{l_x} \right) \left(1 + \frac{2y}{l_y} \right) \left(1 + \frac{2z}{l_z} \right) \\
N_4 &= \frac{1}{8} \left(1 - \frac{2x}{l_x} \right) \left(1 + \frac{2y}{l_y} \right) \left(1 - \frac{2z}{l_z} \right) & N_8 &= \frac{1}{8} \left(1 - \frac{2x}{l_x} \right) \left(1 + \frac{2y}{l_y} \right) \left(1 + \frac{2z}{l_z} \right)
\end{aligned} \tag{2.6.27}$$

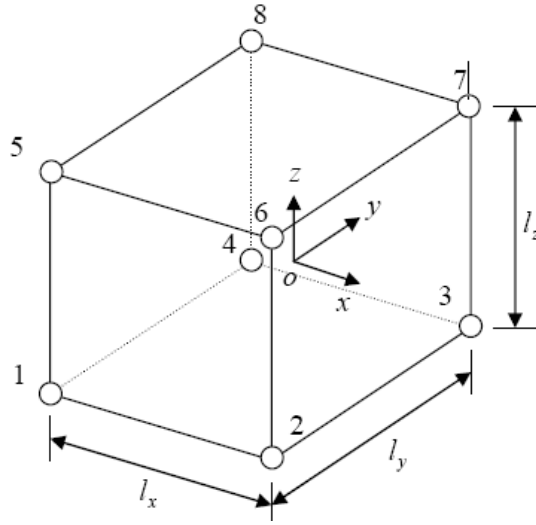


図 2.6.2 : 8 節点直方体要素

(2.6.24) 式を (2.6.22) 式に代入すると

$$\begin{aligned}
 & -\mathbf{W}_u^{eT} \int_{\Omega} \mathbf{N}_v^T \mathbf{N}_v \left(\rho \frac{\partial \dot{\mathbf{U}}^e}{\partial t} + \alpha^* \dot{\mathbf{U}}^e \right) d\Omega \\
 & -\mathbf{W}_p^{eT} \int_{\Omega} \mathbf{N}^T \left(\mathbf{N} \frac{\partial \mathbf{P}^e}{\partial t} + K \begin{bmatrix} \mathbf{N}_x & \mathbf{N}_y & \mathbf{N}_z \end{bmatrix} \dot{\mathbf{U}}^e + K \alpha \mathbf{N} \mathbf{P}^e \right) d\Omega \quad (2.6.28) \\
 & + \mathbf{W}_u^{eT} \int_{\Omega} \begin{bmatrix} \mathbf{N}_x & \mathbf{N}_y & \mathbf{N}_z \end{bmatrix}^T \mathbf{N} \mathbf{P}^e d\Omega = -\mathbf{W}_u^{eT} \int_{\Gamma_t} \mathbf{N}_v^T \bar{t} d\Gamma
 \end{aligned}$$

となり、上式を整理すると次のようになる。

$$\mathbf{G}^e \dot{\mathbf{V}}^e + \mathbf{H}^e \mathbf{V}^e = -\mathbf{F}^e \quad (2.6.29)$$

ここで、

$$\mathbf{G}^e = \begin{bmatrix} m & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \rho m & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \rho m & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \rho m \end{bmatrix}, \quad \mathbf{H}^e = \begin{bmatrix} K \alpha m & K q_x & K q_y & K q_z \\ -q_x & \alpha^* m & 0 & 0 \\ -q_y & 0 & \alpha^* m & 0 \\ -q_z & 0 & 0 & \alpha^* m \end{bmatrix} \quad (2.6.30)$$

$$\mathbf{V}^e = \begin{bmatrix} \mathbf{P}^e & \dot{\mathbf{U}}_x^e & \dot{\mathbf{U}}_y^e & \dot{\mathbf{U}}_z^e \end{bmatrix}, \quad \mathbf{F}^e = \begin{bmatrix} 0 & \mathbf{F}_x^e & \mathbf{F}_y^e & \mathbf{F}_z^e \end{bmatrix} \quad (2.6.31)$$

$$\begin{aligned} m &= \int_{\Omega^e} \mathbf{N}^T \mathbf{N} d\Omega, \quad q_x = \int_{\Omega^e} \mathbf{N}^T \mathbf{N}_x d\Omega, \\ q_y &= \int_{\Omega^e} \mathbf{N}^T \mathbf{N}_y d\Omega, \quad q_z = \int_{\Omega^e} \mathbf{N}^T \mathbf{N}_z d\Omega \end{aligned} \quad (2.6.32)$$

$$\mathbf{F}_x = \int_{\Gamma_t^e} \mathbf{N}^T \bar{\mathbf{t}}_x d\Gamma, \quad \mathbf{F}_y = \int_{\Gamma_t^e} \mathbf{N}^T \bar{\mathbf{t}}_y d\Gamma, \quad \mathbf{F}_z = \int_{\Gamma_t^e} \mathbf{N}^T \bar{\mathbf{t}}_z d\Gamma \quad (2.6.33)$$

を表す。

また、(2.6.24)式を(2.6.23)式に代入すると

$$\begin{aligned} & -\mathbf{W}_u^{eT} \int_{\Omega} \mathbf{N}_v^T \mathbf{N}_v \left(\rho \frac{\partial \dot{\mathbf{U}}^e}{\partial t} + \alpha^* \dot{\mathbf{U}}^e \right) d\Omega \\ & -\mathbf{W}_{pb}^{eT} \int_{\Omega} \mathbf{N}_v^T \left(\mathbf{N} \frac{\partial \mathbf{P}_b^e}{\partial t} + K [\mathbf{N}_x \quad \mathbf{N}_y \quad \mathbf{N}_z]^T \dot{\mathbf{U}}^e + K \alpha \mathbf{N}_v \mathbf{P}_b^e \right) d\Omega \quad (2.6.34) \\ & +\mathbf{W}_u^{eT} \int_{\Omega} [\mathbf{N}_x \quad \mathbf{N}_y \quad \mathbf{N}_z]^T [\mathbf{N} \quad \mathbf{N} \quad \mathbf{N}] \mathbf{P}_b^e d\Omega = \mathbf{W}_u^{eT} \int_{\Gamma_t} \mathbf{N}_v^T \bar{\mathbf{t}} d\Gamma \end{aligned}$$

となり、この式を整理すると、次式のようになる。

$$\mathbf{G}_b^e \dot{\mathbf{V}}_b^e + \mathbf{H}_b^e \mathbf{V}_b^e = -\mathbf{F}_b^e \quad (2.6.35)$$

ここで、

$$\mathbf{G}_b^e = \begin{bmatrix} m & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & m & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & m & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \rho m & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \rho m & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \rho m \end{bmatrix}, \quad \mathbf{H}_b^e = \begin{bmatrix} K\alpha m & 0 & 0 & Kq_x & 0 & 0 \\ 0 & K\alpha m & 0 & 0 & Kq_y & 0 \\ 0 & 0 & K\alpha m & 0 & 0 & Kq_z \\ -q_x & -q_x & -q_x & \alpha^* m & 0 & 0 \\ -q_y & -q_y & -q_y & 0 & \alpha^* m & 0 \\ -q_z & -q_z & -q_z & 0 & 0 & \alpha^* m \end{bmatrix} \quad \cdots (2.6.36)$$

$$\mathbf{V}_b^e = [\mathbf{P}_{bx}^e \quad \mathbf{P}_{by}^e \quad \mathbf{P}_{bz}^e \quad \dot{\mathbf{U}}_x^e \quad \dot{\mathbf{U}}_y^e \quad \dot{\mathbf{U}}_z^e], \quad \mathbf{F}_b^e = [0 \quad 0 \quad 0 \quad \mathbf{F}_x^e \quad \mathbf{F}_y^e \quad \mathbf{F}_z^e] \quad (2.6.37)$$

となる。

2.6.5 要素マトリクスの重ね合わせと解法

(2.6.29) 式、(2.6.35) 式を内部領域、PML 領域で重ね合わせる。

この際、問題となるのが PML 境界との結合部分の重ね合わせです。内部領域の要素では、節点における音圧の自由度が 1 つであるのに対して、PML 領域では、節点における音圧の自由度が 3 となる。しかし、(2.6.30) 式と (2.6.36) 式を比較すると、節点音圧部分に関しては、同じ値を x , y , z 方向性成分に分配すれば良いことがわかる。以上のことに留意して重ね合わせを行うと、領域全体の方程式は以下のように記述される。

$$\mathbf{G} \dot{\mathbf{V}} + \mathbf{H} \mathbf{V} = -\mathbf{F} \quad (2.6.38)$$

(2.6.38) 式を解くために、時間積分を 4 次精度の Runge-Kutta の公式を用いて行う。この場合、(2.6.38) 式を次のように書き換える。

$$\dot{\mathbf{V}} = \mathbf{P} \mathbf{V} + \mathbf{Q}(t) \quad (2.6.39)$$

ただし、 $\mathbf{P} = -\mathbf{G}^{-1} \mathbf{H}$ 、 $\mathbf{Q}(t) = -\mathbf{G}^{-1} \mathbf{F}(t)$ である。このとき Runge-Kutta の公式は、次式で表される。

$$\mathbf{V}_{n+1} = \mathbf{V}_n + \frac{1}{6} (\mathbf{C}_0 + 2 \mathbf{C}_1 + 2 \mathbf{C}_2 + \mathbf{C}_3) \quad (2.6.40)$$

ここで、 $\mathbf{C}_0 \sim \mathbf{C}_3$ は

$$\begin{aligned} \mathbf{C}_0 &= \Delta t (\mathbf{P} \mathbf{V}_n + \mathbf{Q}_n) \\ \mathbf{C}_1 &= \Delta t \left[\mathbf{P} \left(\mathbf{V}_n + \frac{1}{2} \mathbf{C}_0 \right) + \mathbf{Q}_{n+\frac{1}{2}} \right] \\ \mathbf{C}_2 &= \Delta t \left[\mathbf{P} \left(\mathbf{V}_n + \frac{1}{2} \mathbf{C}_1 \right) + \mathbf{Q}_{n+\frac{1}{2}} \right] \\ \mathbf{C}_3 &= \Delta t [\mathbf{P} (\mathbf{V}_n + \mathbf{C}_2) + \mathbf{Q}_{n+1}] \end{aligned} \quad (2.6.41)$$

で記述される。ただし、 Δt は時間増分、下添え字 n は t_n の時刻、 $n+1$ は

$t_n + \Delta t$ の時刻、 $n+1/2$ は $t_n + \Delta t / 2$ の時刻での値であることを意味する。なお、

(2.6.39) 式の \mathbf{P}, \mathbf{Q} の計算には \mathbf{G}^{-1} が必要となるため、 \mathbf{G} は各行の成分の総和を対角項とする対角化を行う。また、(2.6.39) 式の計算で \mathbf{P} を作るに膨大なメモリーが必要となるため、実際には各要素で $\mathbf{C}_0 \sim \mathbf{C}_3$ を計算し、ベクトル上で重ね合わせを行う。これで、有限要素法で PML を利用する手順がわかった⁹⁾。

2.6.6 伝達アドミタンスによる音響透過物のモデル化

通常のアドミッタンスは、音場のある点における振動粒子速度 u_1 と音圧 p_1 の比である $A = u_1/p_1$ として定義される。伝達アドミッタンスとは、同点におけるアドミッタンスを、 u_1 と p_1 の比に加え、 u_1 とグリル裏面における音圧 p_2 の比を用い $A_{1,2} = u_1/p_2$ として定義される量である。伝達アドミッタンスの境界条件を用いると、要素の表面における粒子振動速度 u_1 は、次の通りに表すことができる。

$$A_{1,1}p_1 + A_{1,2}p_2 = u_1 \quad (2.6.42)$$

この様に、伝達アドミッタンスとは、アドミッタンスの考えを境界面の表裏に拡張した考えである。この(2.6.42)式をグリルの表から裏への透過と、裏から表への透過に対して、別々に適用して取り扱うと、要素表裏の関係は(2.6.43)式の通りにまとめられる。

$$\begin{bmatrix} A_{1,1} & A_{1,2} \\ A_{2,1} & A_{2,2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p_1 \\ p_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \end{bmatrix} \quad (2.6.43)$$

グリルの表裏では表から裏、裏から表への影響が同じである(相反性)と仮定すると、表裏の音圧と粒子速度を実測することにより伝達アドミッタンスが求められる¹⁰⁾¹¹⁾。

第3章 実験装置

3.1 供試スピーカ

実験用スピーカは、典型的な AV 機器を模擬するため、図 3.1.1 に示すような (240mm×270mm×300mm) の合板製密閉型エンクロージャにφ100mm のフルレンジユニット(PARC Audio DCU-F121W)を取り付け、図 3.1.2 に示す密閉型スピーカを作成した。

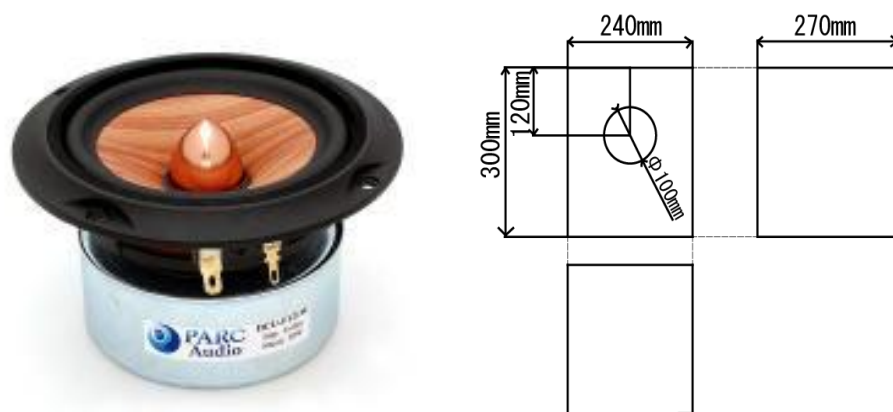


図 3.1.1 スピーカユニット及びエンクロージャ
※株式会社ドリームクリエーション HP より



図 3.1.2 供試スピーカユニット

3.2 供試グリル

供試グリルは、図 3.1.3 に示すように、直径 $\phi 150\text{mm}$ の ABS 樹脂の板材に、 $\phi 1\text{mm}$ の丸孔を 60° 千鳥型に配置したものを用いた。板厚は $t=0.5\text{mm}$ 、 1mm 、 2mm の 3 種類、開口率 $10\sim 60\%$ として計 18 枚を作成した。
表 3.1.1 に供試グリルの仕様を示す。

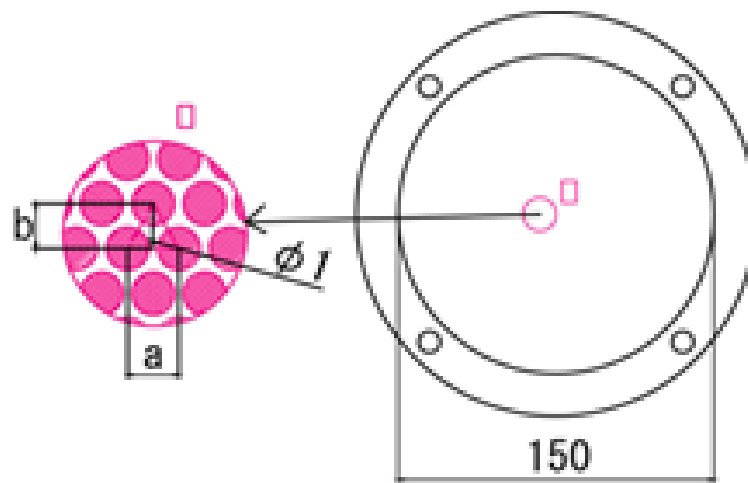


図 3.1.3 供試グリルの寸法

表 3.1.1 供試グリルの仕様

aperture ratio [%]	10%	20%	30%	40%	50%	60%
a(pitch) [mm]	3.01	2.13	1.74	1.51	1.34	1.22
b(height) [mm]	2.61	1.84	1.51	1.30	1.16	1.06

加工には、図 3.1.4 に示す切削機械（Roland 製 MDX-540）を使用した。 $\phi 1\text{mm}$ のエンドミルを使用し、開口率 10% ごと 1.5 時間をかけ 1 穴ずつ加工した。実際の加工風景、加工した供試グリル、グリルを取り付けた供試用スピーカの写真を図 3.1.5～図 3.1.7 に示す。



図 3.1.4 切削機械（Roland 製 MDX-540）

※ローランド DG 株式会社 HP より

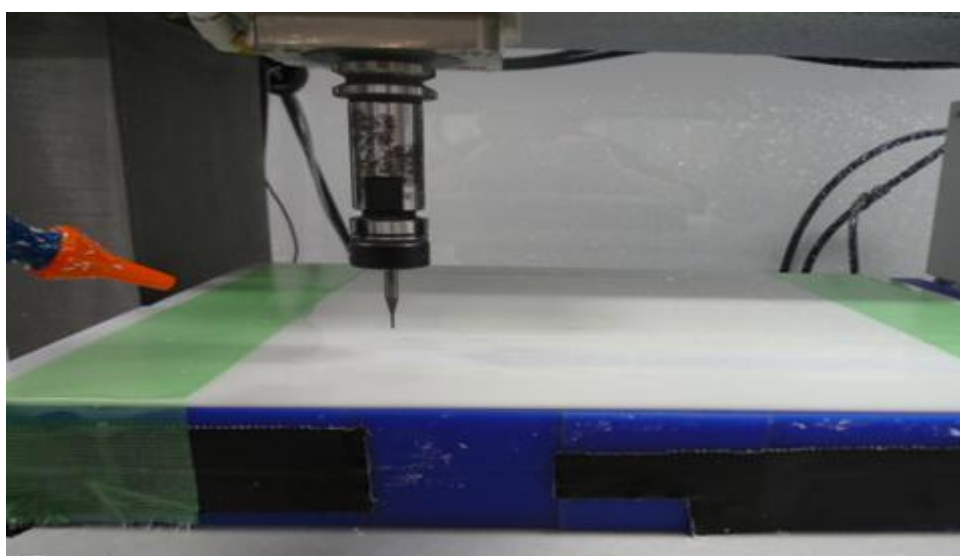


図 3.1.5 供試グリル加工

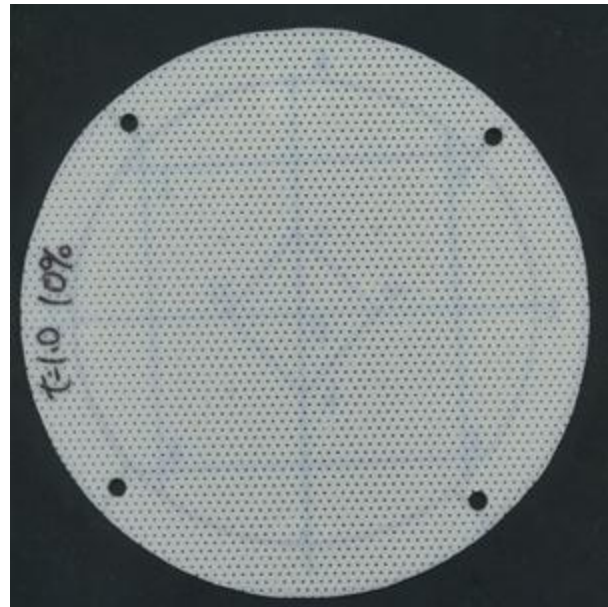


図 3.1.6 供試グリル（板厚 1.0mm、開口率 10%）

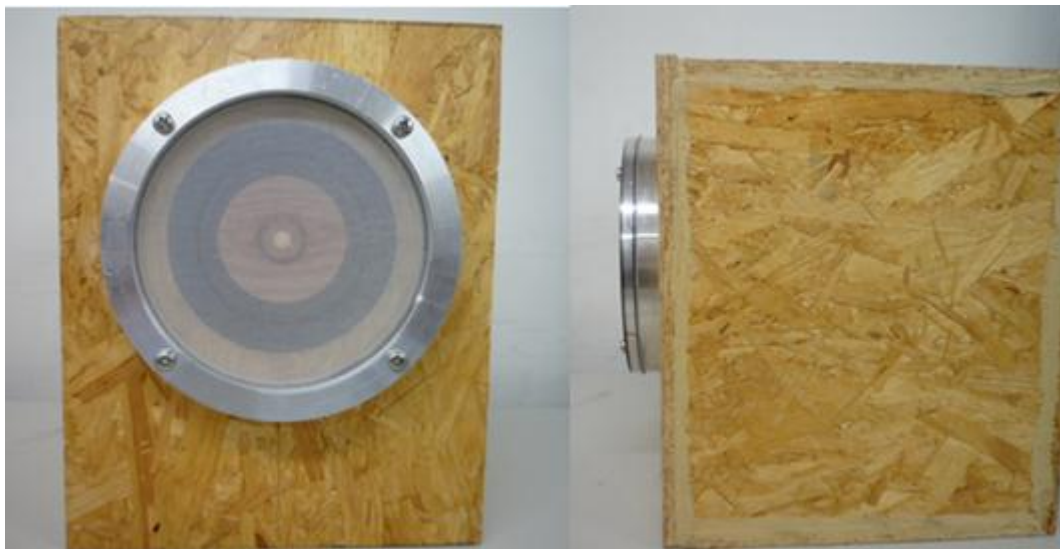


図 3.1.7 供試用スピーカ

3.3 供試リング

グリルをスピーカユニットに固定するため、図 3.1.8 に示すような固定部品（以下、リングと明記する）を製作した。リングは内側用（内径 150mm×外径 180mm×厚さ 15mm）、外側用（内径 150mm×外径 180mm×厚さ 10mm）の 2 枚を作成し、内側をスピーカに固定し、内側と外側でグリルを挟むような構造とした。材料はアルミニウムを使用した。図 3.1.9 にリングの写真を示す。

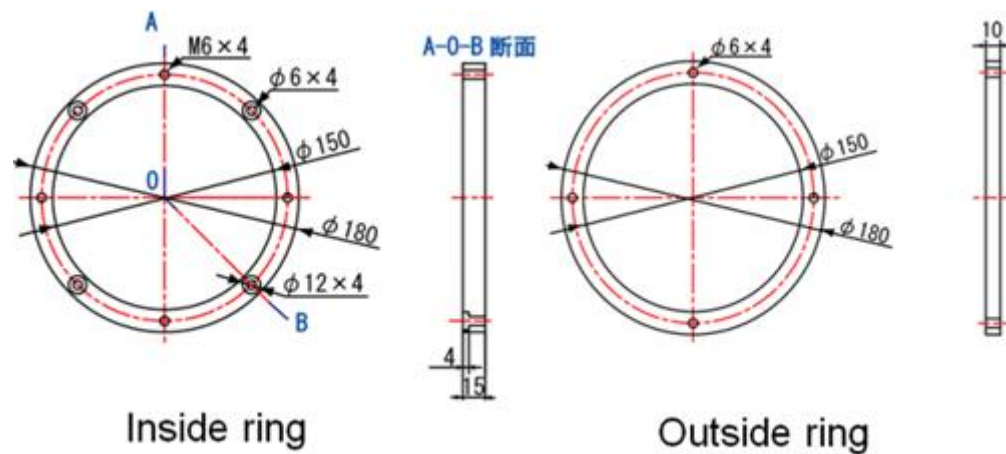


図 3.1.8 固定用リングの寸法



図 3.1.9 固定用リング（左：内側用 右：外側用）

第4章 実験方法

4.1 グリルの透過損失

グリルの透過損失はグリル近傍の前後の音圧・粒子速度を測定し、透過損失及び Att （減音量）を算出した。グリルは各板厚の開口率 10、30、40、60%の計 12 枚を使用し、グリルの諸元の違いによる影響を測定した。透過損失及び Att 算出には下記に示す式を用いた。

$$Z = \frac{P}{u} \quad (4.1.1)$$

$$R_I = \frac{(Z_2 - Z_1)^2}{(Z_2 + Z_1)^2} \quad (4.1.2)$$

$$\tau = \frac{4Z_1Z_2}{(Z_2 + Z_1)^2} \quad (4.1.3)$$

$$TL = 10 \log_{10} \frac{1}{\tau} \quad (4.1.4)$$

$$Att = 20 \log_{10} \left(\frac{P_1}{P_2} \right) \quad (4.1.5)$$

一様な媒質中の音圧 P と粒子速度 u の比を音響特性（固有）インピーダンスといい、式(4.1.1)で表す。内側、外側の媒質の音響特性インピーダンスを Z_1 、 Z_2 とすると、音の強さの反射率 R_I 、透過率 τ は式(4.1.2)、(4.1.3)で表され、 τ の逆数を対数表示した式(4.1.4)により透過損失 $TL[\text{dB}]$ を求めることができる。

また減音量 $Att[\text{dB}]$ は内側音圧 P_1 と外側音圧 P_2 の比で表し、対数表示した式(4.1.5)により求めた。

4.1.1 測定装置

グリル近傍の前後の音圧・粒子速度は、小型のマイクロホンと MEMS 技術を用いて作られた、空気の粒子速度を測ることのできる熱線がついた PU プローブと呼ばれるセンサを 2 つ用いた。グリルの内側の測定には図 4.1.1 に示す PU-MATCH（Micro Flown 社製）を、グリルの外側の測定には図 4.1.2 に示す PU-MINI（Micro Flown 社製）をそれぞれ用いた。



図 4.1.1 PU-MACTH



図 4.1.2 PU-MINI

※東陽テクニカ HP より

4.1.2 測定方法

測定は当研究室の簡易無響室にて行った。周波数発生器（Briel&Kjaer 製 Type1049）より 20Hz～20kHz の Swept Sine 波を、オーディオアンプ（YAMAHA 製 A100）を介してグリルを取り付けたスピーカから出力した。スピーカ出力はグリルを取り付けない状態でスピーカから正面 1m 位置で 74dB とした。スピーカから出力した Swept sine 波をデータレコーダ（RION 製 DA-40）で WAV ファイルとして保存し、周波数分析器（RION 製 SA-01）で解析を行った。また、スピーカ正面 1m 位置に騒音計を設置した時の測定も行った。

各装置の実際の写真を図 4.1.3～4.1.6 に示す。



図 4.1.3 周波数発生器 (Brüel&Kjær 製 Type1049)



図 4.1.4 オーディオアンプ (YAMAHA 製 A100)



図 4.1.5 データレコーダ (RION 製 DA-40)



図 4.1.6 周波数分析器 (RION 製 SA-01)

4.1.3 測定条件

測定点は図 4.1.7 に示す 3 点とする。測定点 1 はユニット中心部に触れない位置、測定点 3 はスピーカのエッジダンパー部の頂点付近、測定点 2 は測定点 1 と 3 の中間点とする。また、PU-Match をグリルの内側に入れ測定を行うため、各測定点に $\phi 6\text{mm}$ の穴を開けた。図 4.1.7 のように A～D に振り分け、右に回転させながら各点の測定を行い、A でグリルの内側の測定、C でグリルの外側の測定を行った。穴あけ加工による音圧透過、振動モード変化を防ぐため、使用していない測定穴は粘土とフィルム用いてカバーした。図 4.18 に実際に測定点 1 に設置した写真、図 4.19 に穴あけ加工を行ったグリルの写真を示す。

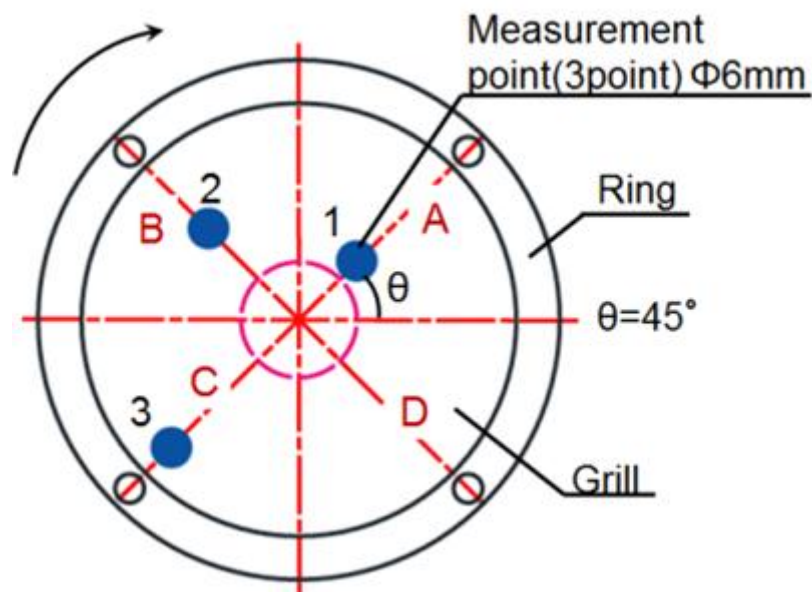


図 4.1.7 音圧及び粒子速度の測定点



図 4.1.8 測定点 1



図 4.1.9 穴あけ加工後グリル（板厚 2mm、開口率 10%）

測定距離は、図 4.1.10 に示すグリル表面から内側、外側それぞれ 2mm、4mm、6mm と距離を離れた 3 点とした。図 4.1.11 に実際に測定距離 2mm に PU プローブを設置した写真を示す。

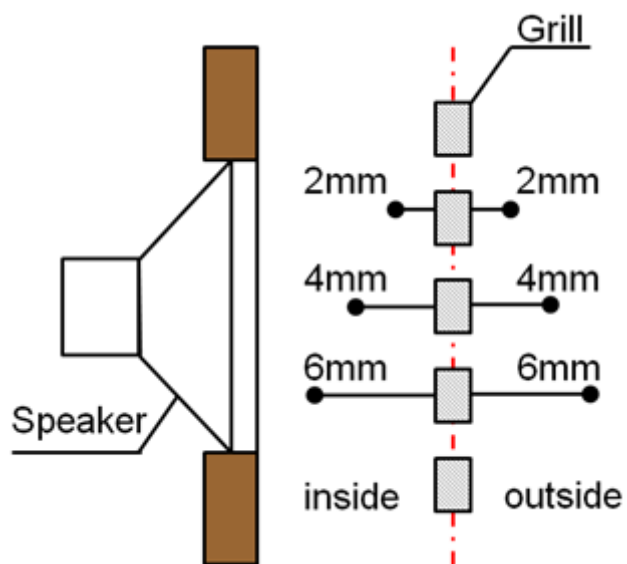


図 4.1.10 測定距離

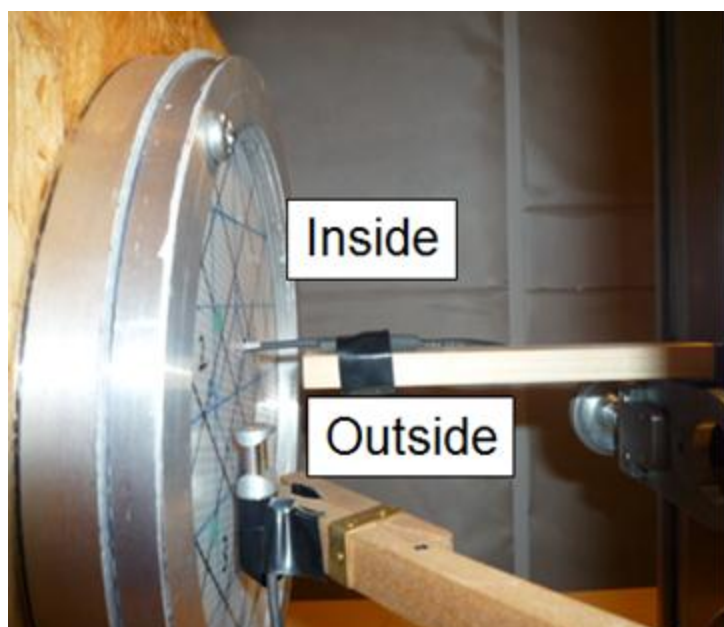


図 4.1.11 測定距離 2mm

4.2 スピーカ・グリル間体積の音響特性

取り付け位置(体積)による影響の調査は、図 4.2.1 に示すようにグリルを取り付けずリングの距離を 5mm 間隔で $L=5\sim 80\text{mm}$ と変化させ、放射音の周波数分析を行った。また、グリルによる影響も調査するため、グリルを距離 15mm の位置に外側用リング 10mm と挟んで取り付けたときの測定も同時に行った。そして、共鳴管の理論式より求めた共鳴周波数との比較を行った。図 4.2.2 に実際のリングの距離 25mm の状態の写真を示す。

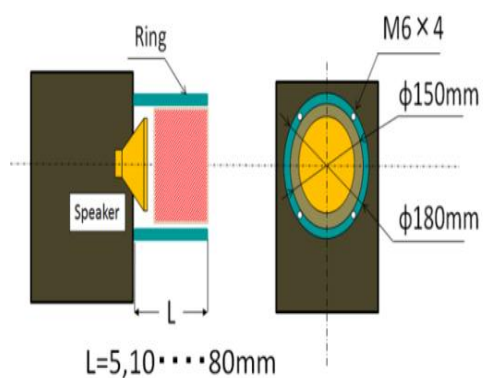


図 4.2.1 取り付け位置の変化

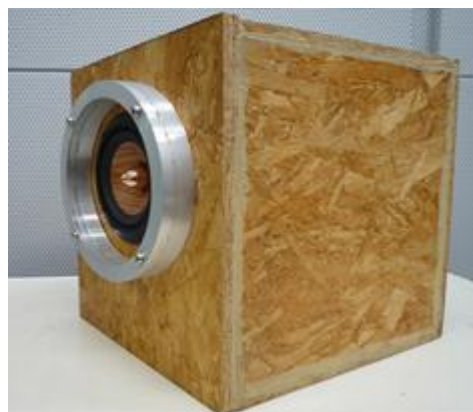


図 4.2.2 リングの距離 25mm

4.2.1 測定方法

測定は当研究室の半無響室にて行った。スピーカ正面 1m の位置に設置した精密騒音計（RION 製 NL-31）により放射音圧レベルの測定を行い、周波数分析器（図 4.1.6 参照）にて周波数分析を行った。なお、床面からの反射の影響を減らすため、床面から 1.3m 離れた位置にスピーカ及び騒音計を設置した。実際の測定の写真、使用した精密騒音計（RION 製 NL-31）の写真を図 4.2.3、図 4.2.4 に示す。

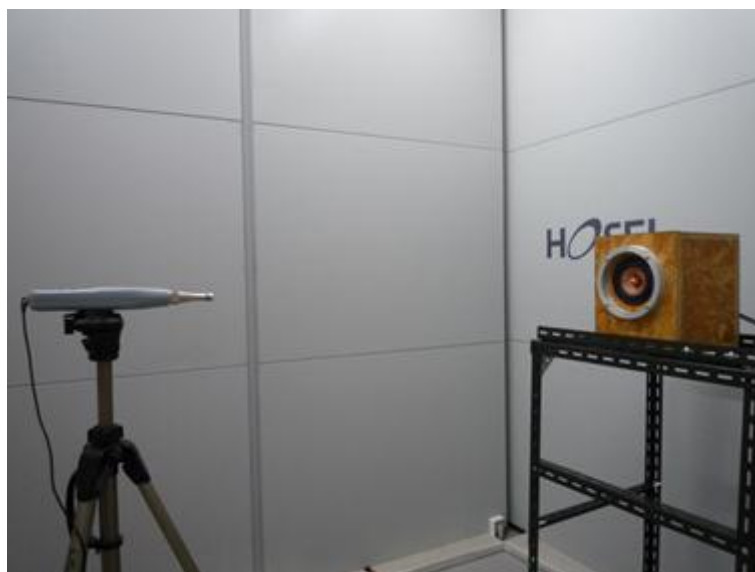


図 4.2.3 取り付け位置測定（L=25mm）



図 4.2.4 精密騒音計 (RION 製 NL-31)

4. 2. 2 共鳴周波数・挿入損失の算出

共鳴管

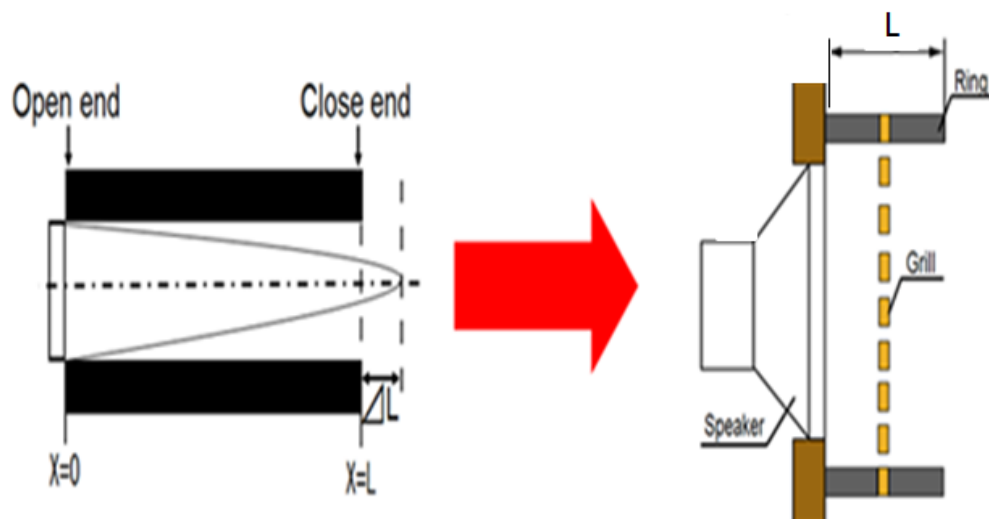


図 4.2.5 共鳴管の理論モデル

管における共鳴周波数は両端の状態の変化により異なる。本研究では片端はスピーカにより閉口端となっているため、片端開の境界条件として計算を行った。図 4.2.5 の理論モデルより共鳴周波数 f [Hz]と管の長さ L [m]の関係は式(4.2.1)で表される。なお今回はスピーカユニット部がホーン形状になっていることを考慮し、 $L = (l_1 + l_2)$ とした。 l_1 は計測の上、35mm とした。

$$f = \frac{(2m - 1)c}{4(L + \Delta L)} \quad (4.2.1)$$

但し、

m : 1、2、3、...

c : 音速 [m/s]

ΔL : 開口端補正 [m]

である。

4.3 グリルの振動特性

構造が加振されて発生する音の調査は、スピーカからホワイトノイズを再生しグリルを強制加振させたときの表面振動速度を測定した。また、有限要素法（FEM）による固有値解析も同時に行った。グリルは板厚 2mm の開口率 10、60% を使用した。

4.3.1 測定方法

測定は、加速度ピックアップの付加質量による振動抑制を避けるため、レーザドップラ振動計（小野測器製 LV-1720A）を用いた。測定点は図 4.3.1 に示す 57 点とし、スピーカからホワイトノイズを再生しグリルを強制加振させ、距離 200mm に設置したレーザドップラ振動計で 45° 刻んだ線上を半径方向に 10mm 間隔で表面振動速度を測定し周波数分析器（図 4.1.6 参照）で周波数分析を行った。なお床面などからの振動の影響を避けるため、スピーカ及び計測機器と作業台の間にゴム板を敷き対策を施した。設置条件の概略図、実際の測定の写真、レーザドップラ振動計（小野測器製 LV-1720A）の写真を図 4.3.2～図 4.3.4 に示す。

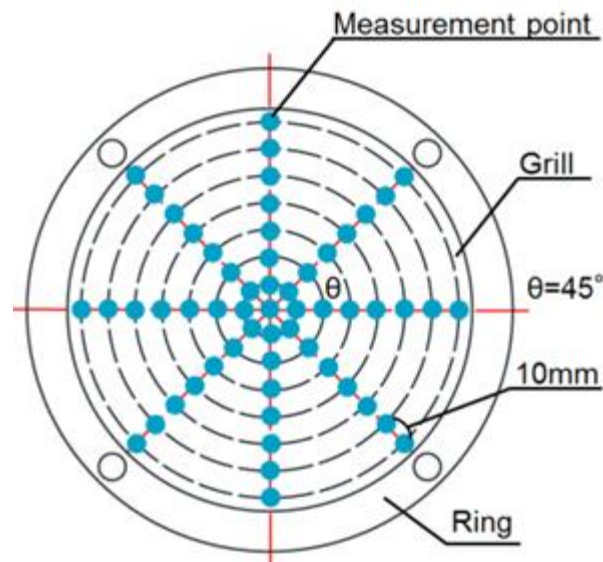


図 4.3.1 測定点（57 点）

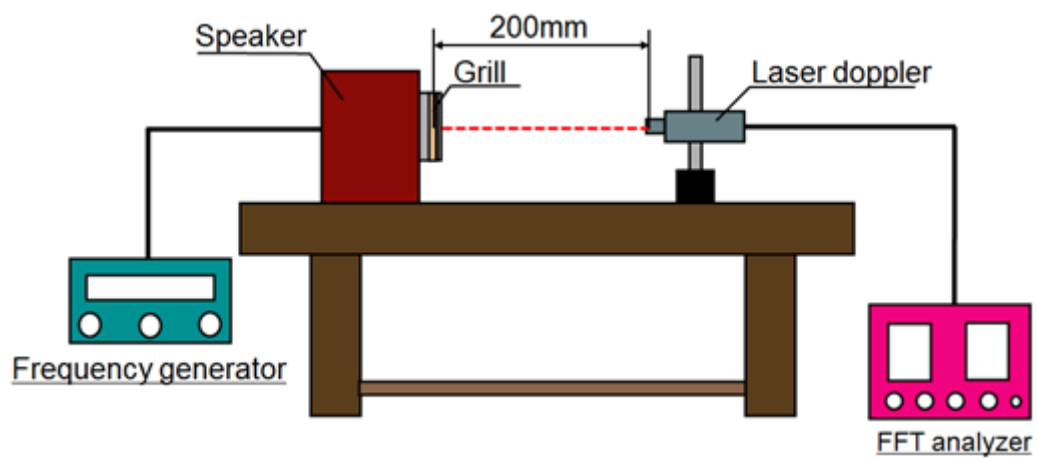


図 4.3.2 設置条件



図 4.3.3 表面振動測定



図 4.3.4 レーザドップラ振動計（小野測器製 LV-1720A）

4.3.2 固有値解析

有限要素法による固有値解析は CATIA V5R18（Dassault systems 社製）を用いた。解析条件として、全周拘束、要素数 49422 要素、材料特性は ABS 樹脂の材料特性を定義した。なお、解析では $\phi 1\text{mm}$ の丸孔をモデル化することが困難であったため、 $\phi 6\text{mm}$ の丸孔との表面振動測定の違いを確認後、 $\phi 6\text{mm}$ の丸孔で固有値解析を行った。図 4.3.5 に解析条件の詳細を示す。

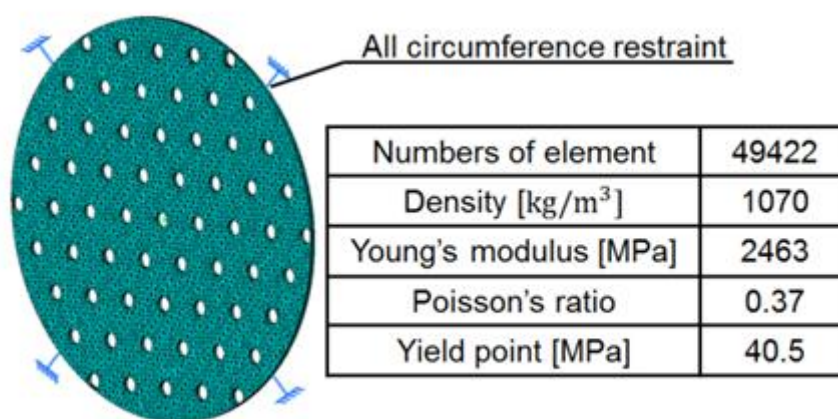


図 4.3.5 グリル解析条件（板厚 2mm 開口率 10%）

4.4 官能試験

4.4.1 サンプル音の収録

サンプル音の収録は簡易無響室にて行った。ホワイトノイズを PC で再生し、オーディオアンプ（Pioneer 製 A-D3）を介してスピーカから出力した。スピーカから発生した音をスピーカ正面 1m の位置に置いたダミーヘッド（Bruel&Kjaer 製 TYPE4100-D）にてバイノーラル録音し、周波数分析器（図 4.1.6 参照）で Wave ファイルとして保存した。サンプル音はホワイトノイズを原音とし、各グリルを内側用リング 15mm と外側用リング 10mm で挟んだ状態でスピーカに設置し、グリルの諸元の影響により異なる音を計 19 種類作成した。各サンプル音は再生 1s、無音 1s、再生 1s のバーストノイズ形状とした。収録風景の写真、加工後のサンプル音の音圧波形及びオーディオアンプ（Pioneer 製 A-D3）、ダミーヘッド（Bruel&Kjaer 製 TYPE4100-D）の写真を図 4.4.1～図 4.4.4 に示す。

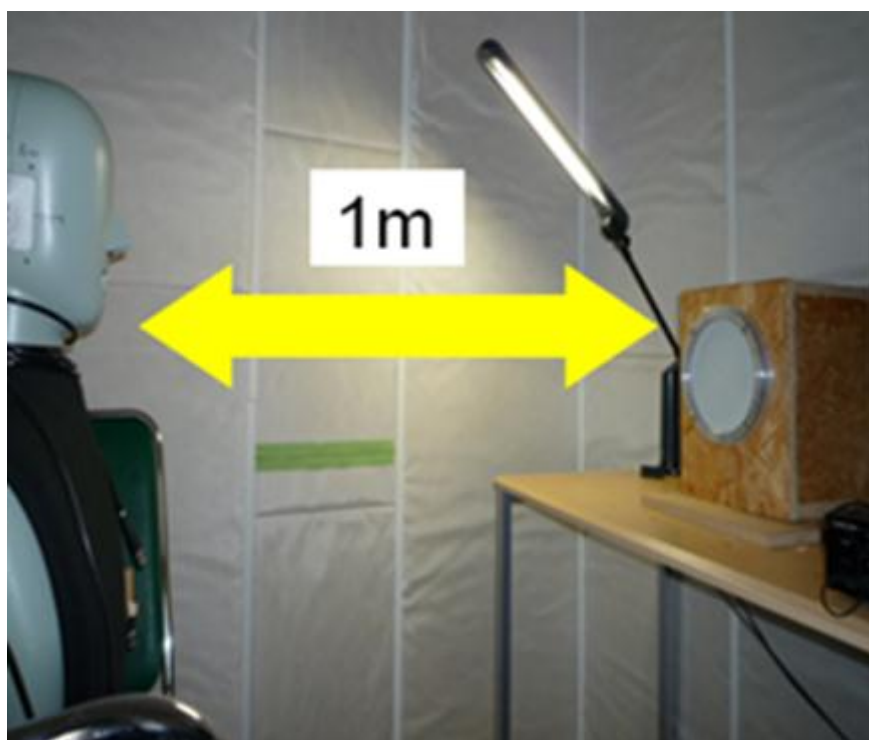


図 4.4.1 サンプル音収録

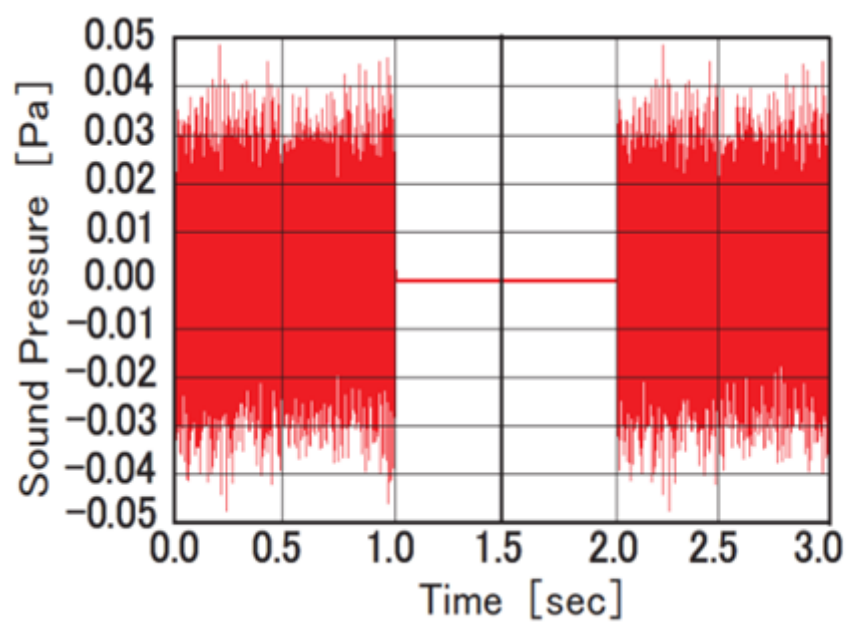


図 4.4.2 加工後のサンプル音の音圧波形



図 4.4.3 オーディオアンプ
(Pioneer 製 A-D3)



図 4.4.4 ダミーヘッド
(Brüel&Kjær 製 TYPE4100-D)

4.4.2 試験方法

試験方法は、正常な聴覚を持つ大学生 20 人に対して一対比較法により実施した。試験においては、「明瞭ーこもった」の形容詞対を評価軸に用いた。2つのサンプル音を順番に聞かせ、5段階評価でシートに記入してもらった。提示順序の影響を調べるため、すべての組み合わせ開口率を変化させた場合（Case 1）42通りを3パターン、厚さを変化させた場合の（Case 2）6通りを6パターン、前面体積を変化させた場合の（Case 3）20通りを2パターンの3ケースを実施し、一対比較法によって得られた主観的な順位（平均嗜好度）を、サンプル音の特性と比較した。図 4.4.5 に実際の官能試験の写真を示す。

サンプル音の提示は MATLAB のプログラムを使用し行い、提示の順番はランダムになるようにした。なお、比較する2つのサンプル音を A_i と A_j すると、下記のような点数づけを行った。

A_i が A_j に比べてかなり明瞭なとき + 2 点

A_i が A_j に比べて少し明瞭なとき + 1 点

A_i が A_j と同じ程度のとき ± 0 点

A_i が A_j に比べて少しこもったとき - 1 点

A_i が A_j に比べてかなりこもったとき - 2 点



図 4.4.5 官能試験

4.5 音響解析

4.5.1 解析方法

音響解析ソフト(LMS 社製 Virtual.Lab)を用いてスピーカからの音響放射解析を行った。音響解析では一般に音を伝える媒質の属性(空間形状・音速・空気密度)と音源の属性(振動放射面の形状・振動)を入力し音響特性を計算する。解析の手法は、各モデルをCATIA V5R18(Dassault systems 社製)を用いて作成した。なお、グリル形状としてφ1mmの丸孔をモデル化することが困難であったため、φ6mmの丸孔との差異を確認後、φ6mmの丸孔でグリル形状をモデリングした。

要素の辺の長さ(一番長い部分)は、解析する上限の周波数の波長に対し、 $\frac{1}{6}$ 以下の1以下に設定する必要がある。6000Hzまで計算する場合は、上限周波数の波長が56.6mmとなるので要素のサイズ(辺の長さ)は9.4mm以下になるように、ソリッド要素を作成する必要がある。

グリルの丸孔部分を正確に再現するために、グリル面は2mmで要素分割を行い、それ以外の部分は5mmで要素分割を行った。表4.5.1に各解析モデルの要素数・節点数、図4.5.1-4.5.6に各解析モデルを示す。

境界条件としてスピーカユニット表面に、レーザドップラ振動計で測定した表面振動速度を与えた。また、FEM音響メッシュの最外表面に無反射条件を定義し、無限空間への音の放射を再現した。今回の音響解析では、スピーカ単体のメッシュ、スピーカにリング25mmを取り付けたメッシュ、グリルの詳細形状をモデル化したメッシュ、グリル部分を伝達アドミタンスで表現するために一枚の薄板としたメッシュを用いて解析を行う。

解析結果として、スピーカ正面1m位置の音圧レベルを得た。

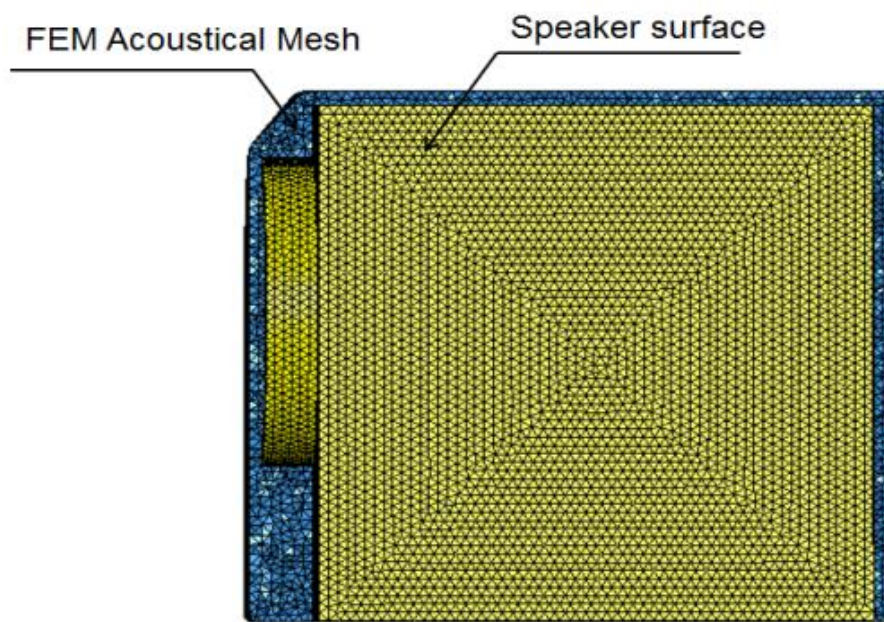


図 4.5.1 FEM 音響メッシュ

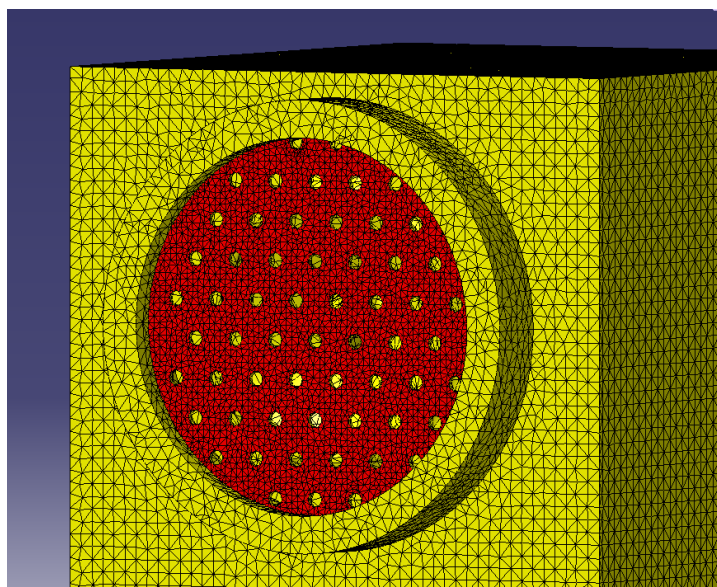


図 4.5.2 スピーカ表面 開口率 10%

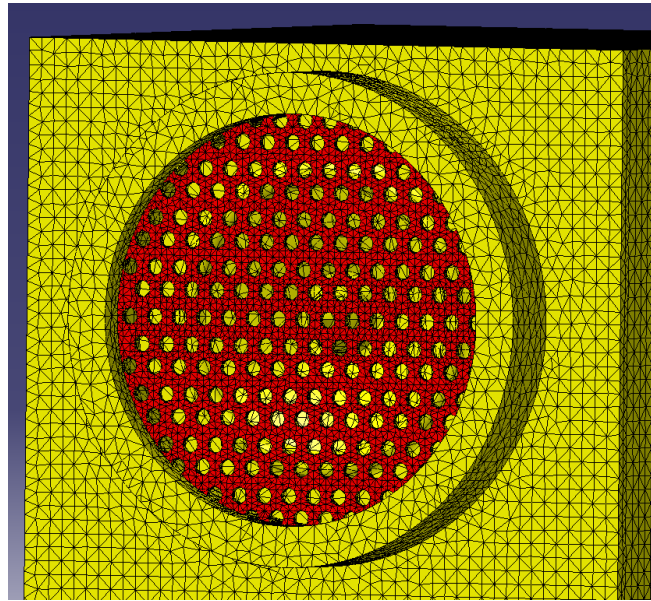


図 4.5.3 スピーカ表面 開口率 30%

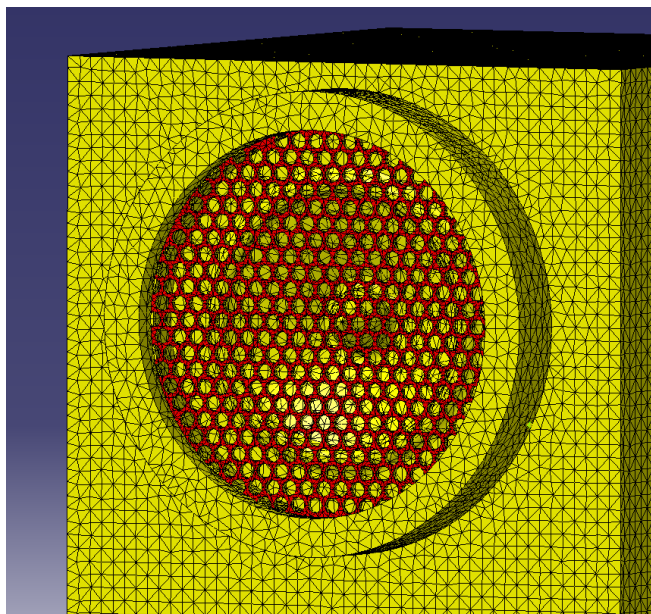


図 4.5.4 スピーカ表面 開口率 60%

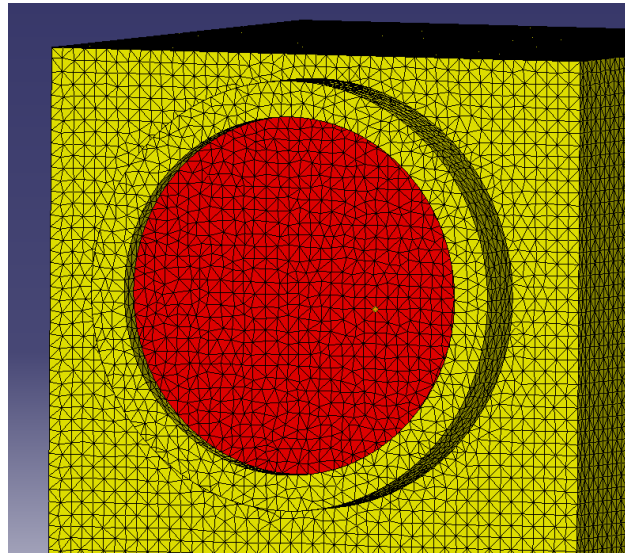


図 4.5.5 スピーカ表面 伝達アドミッタンス定義モデル

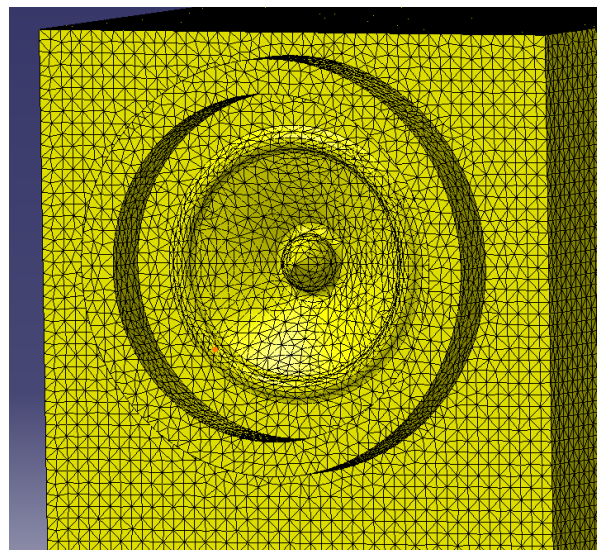


図 4.5.6 スピーカ表面 リング 25mm

表 4.5.1 FEM 音響メッシュの要素数・節点数

モデル名	要素数	節点数
Speaker only	152696	281483
Speaker ring 25mm	238468	406446
Grill model t=2mm 10%	228779	401879
Grill model t=2mm 30%	239101	419044

Grill model t=2mm 60%	251677	439460
Grill model t=0.5mm 10%	242829	419889
Grill model t=0.5mm 30%	250442	428606
Grill model t=0.5mm 60%	260090	442696
Transfer admittance model	194156	346416

第5章 実験結果及び考察

5.1 グリルの透過損失

透過損失でのグラフの各項目の表示は、図 5.1.1 に示すような表記となっている。

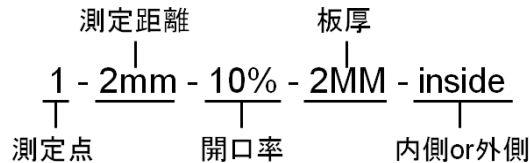


図 5.1.1 グリルの透過損失グラフにおけるラベル表示

5.1.1 開口率を変化させた場合

図 5.1.2、図 5.1.3 に開口率 10%、60%（測定点 1、測定距離 2mm、板厚 2mm）の内側・外側の音響インピーダンスを比較したグラフを示す。高周波に多少のばらつきを生じたが、開口率が小さいほど、内側と外側の差が大きくなっていることが分かる。図 5.1.4 に示す透過損失では、低周波数域で開口率 10%と 60%で 1dB 程の差がみられた。開口率 60%とグリルをつけない状態ではほとんど差がなく、開口率が小さいほど透過損失が大きくなることが確認できる。他の板厚及び測定点、測定距離でも同様な傾向がみられた。

また、図 5.1.5 にスピーカ正面 1m 位置に騒音計を設置した際の、グリルを付けていない状態からのオーバーオール値の差を示す。開口率が小さいほど総合減音量は大きく、板厚が厚いほどその影響は大きいことが分かる。

図 5.1.6、5.1.7 にラウドネス、シャープネスとの比較を示す。グリルを付けていない状態と比べ、開口率が小さいほどラウドネス・シャープネスともに小さくなることが分かった。これらのことから、開口率が小さいグリルでは音質を阻害していると考えられる。

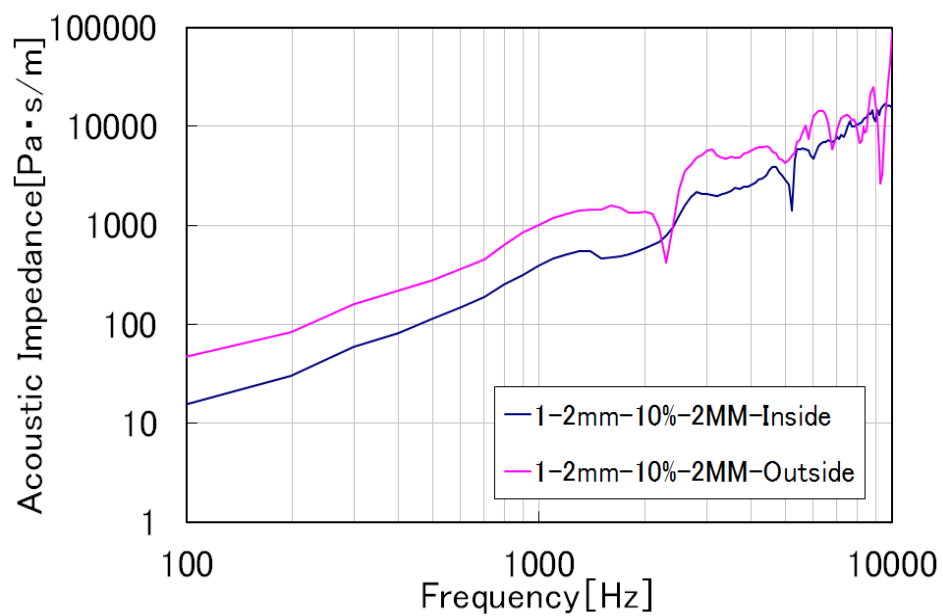


図 5.1.2 内側・外側の音響インピーダンス
(板厚 2mm、開口率 10%)

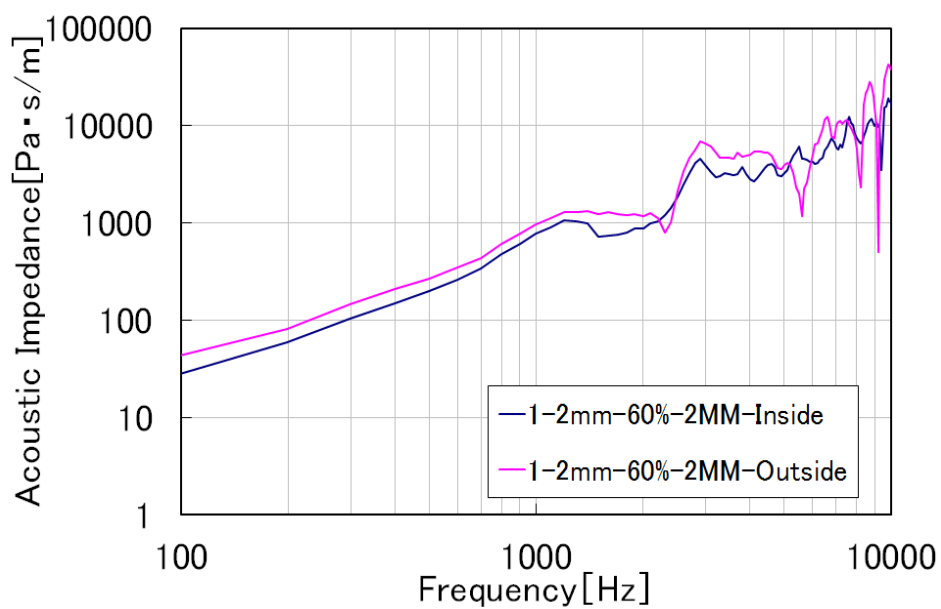


図 5.1.3 内側・外側の音響インピーダンス
(板厚 2mm、開口率 60%)

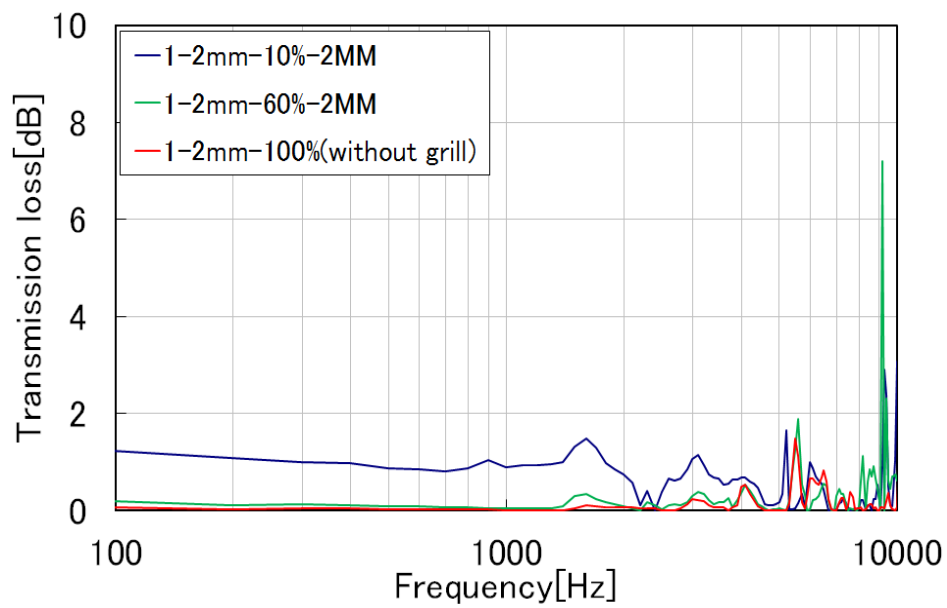


図 5.1.4 板厚 2mm における透過損失
(開口率 10%、60%、100%)

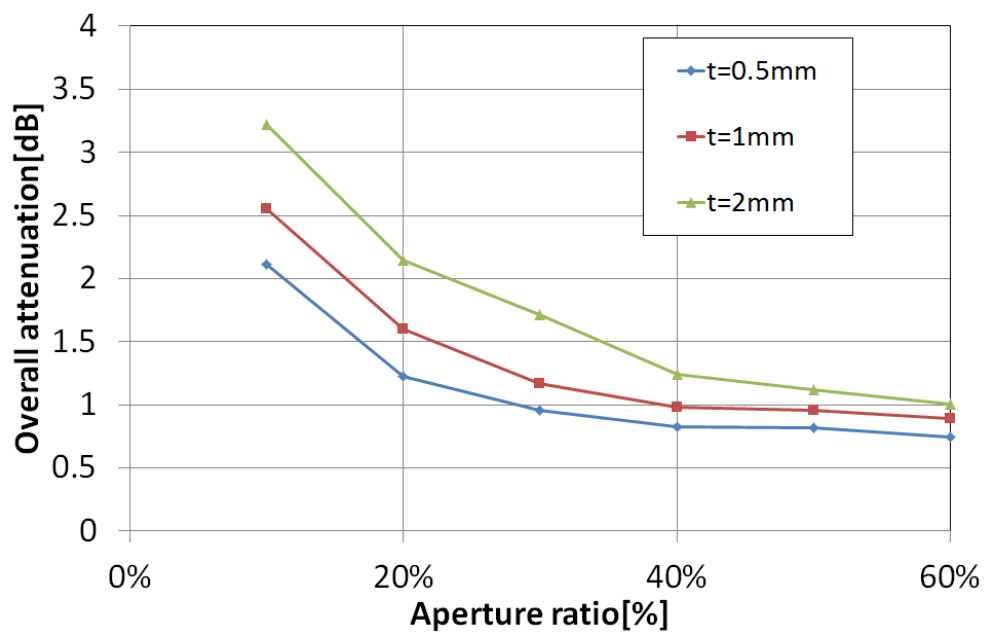


図 5.1.5 総合減音量の開口率比較

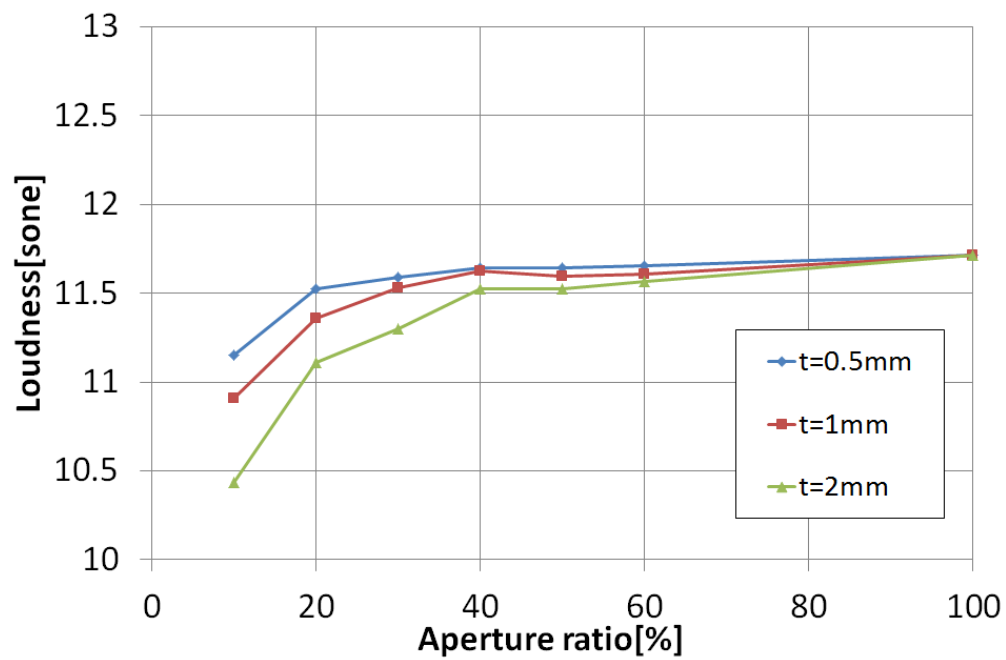


図 5.1.6 ラウドネスの開口率比較

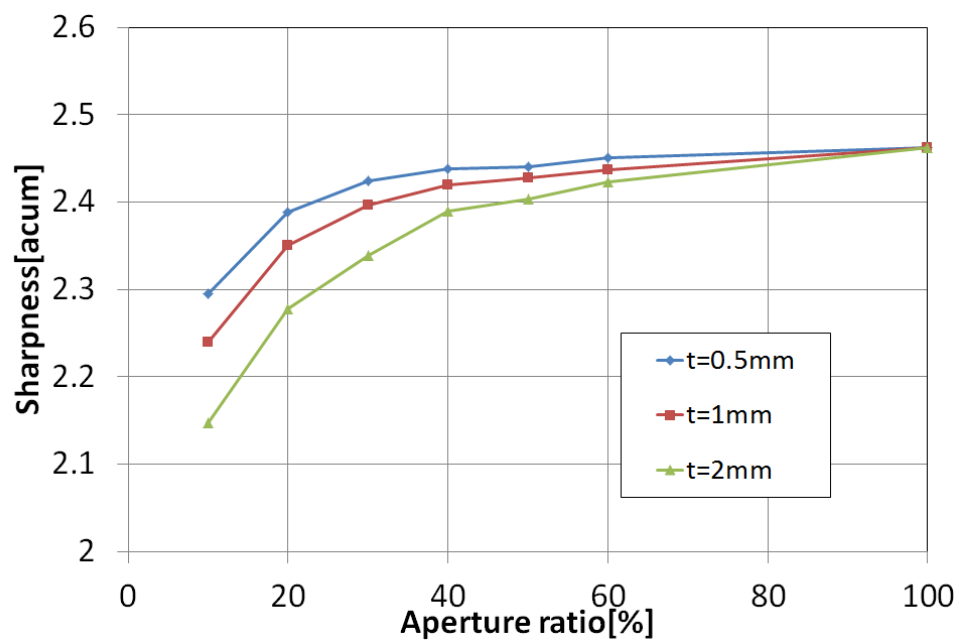


図 5.1.7 シャープネスの開口率比較

5.1.2 板厚を変化させた場合

図 5.1.8、5.1.9 に板厚変化による透過損失（測定点 1、測定距離 2mm、開口率 10%、60%）の結果を示す。いずれも高周波数域の特性にばらつきがみられ、低周波数域では板厚の違いによる明確な差はみられなかった。

しかし、図 5.1.10、5.1.11 に示す減音量では板厚が厚いほど、減音量が大きくなる傾向がみられた。また、開口率が 60% となるとその差はほとんどなくなることが分かる。

また、図 5.1.12 にスピーカ正面 1m 位置に騒音計を設置した際の、オーバーオール値の差を示す。板厚が厚いほど総合減音量は大きくなるが、開口率を変化させた時と比べるとその影響は小さいことが確認できる。

図 5.1.13、5.1.14 にラウドネス、シャープネスとの比較を示す。開口率が 10% の時は板厚が厚くなるにつれて、ラウドネス・シャープネスともに小さくなることが確認できるが、開口率が 60% の時はその差はほとんどないことが分かった。このことから、開口率が小さい状態では板厚の違いによる影響が強く現れると考えられる。

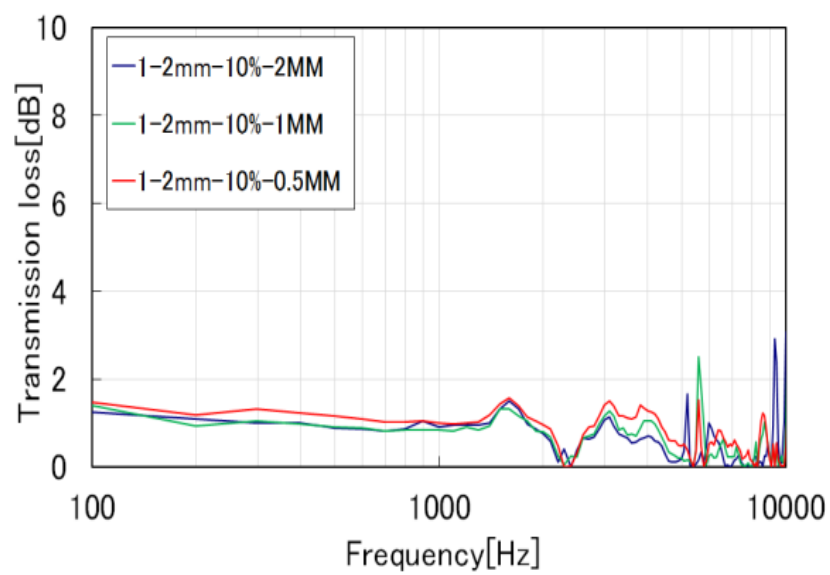


図 5.1.8 透過損失の板厚比較（開口率 10%）

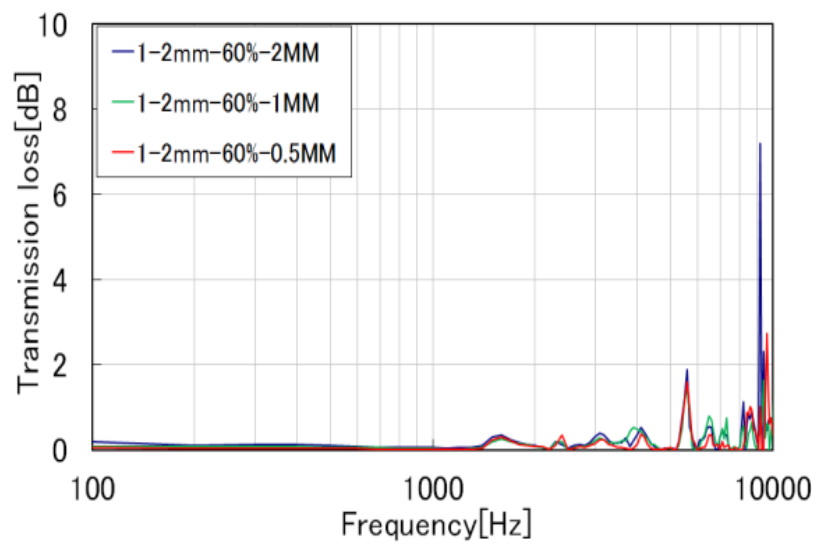


図 5.1.9 透過損失の板厚比較（開口率 60%）

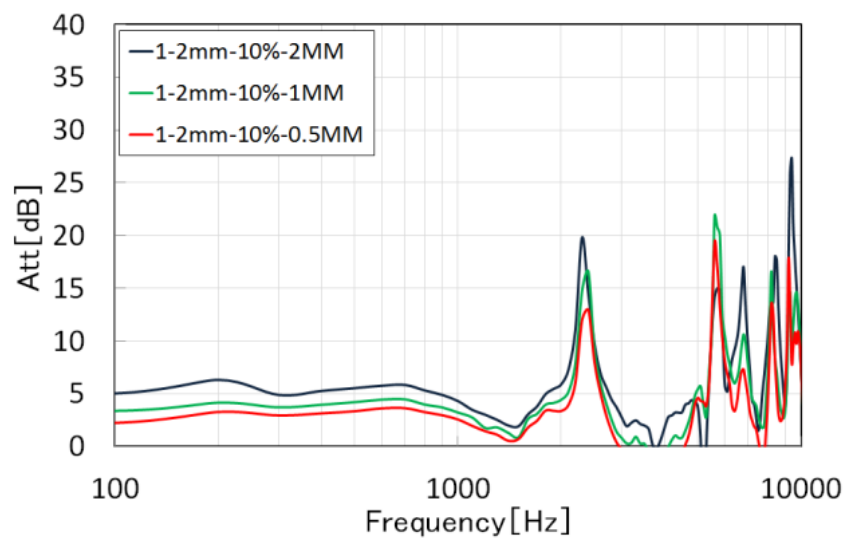


図 5.1.10 減音量の板厚比較（開口率 10%）

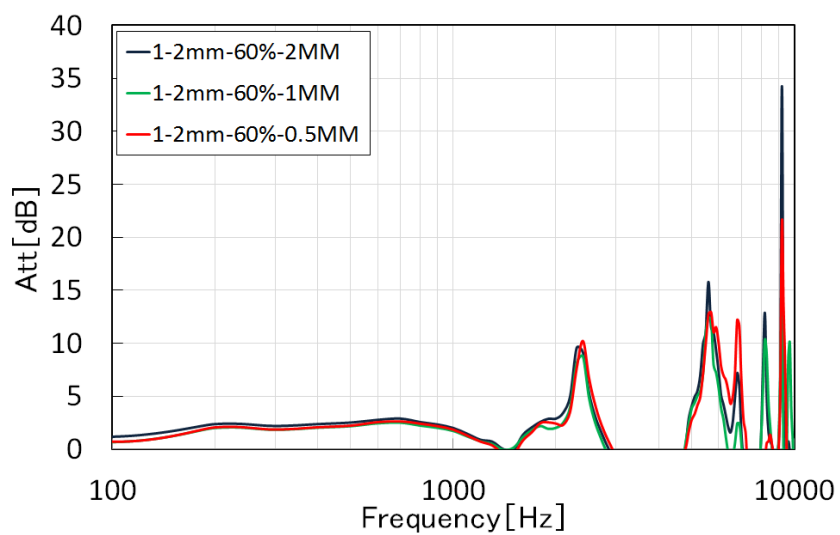


図 5.1.11 減音量の板厚比較（開口率 60%）

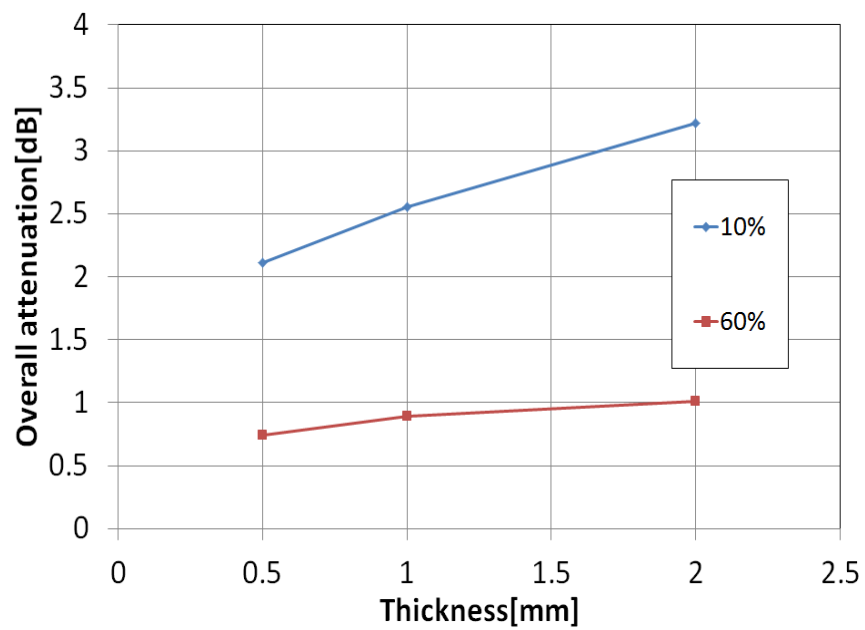


図 5.1.12 総合減音量の板厚比較（開口率 10,60%）

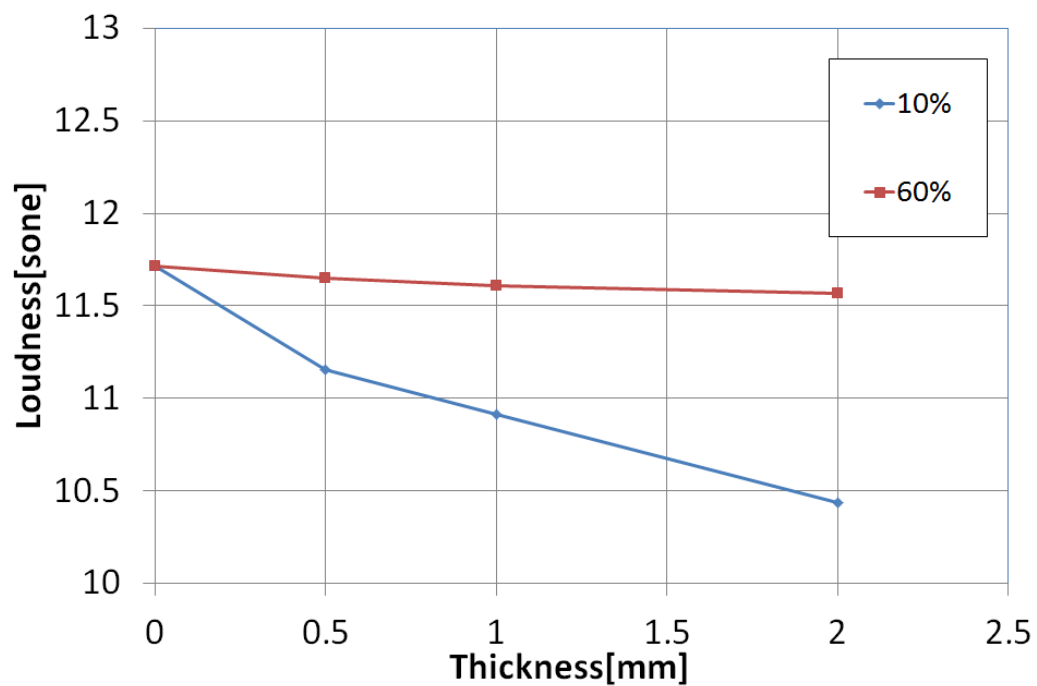


図 5.1.13 ラウドネスと板厚比較

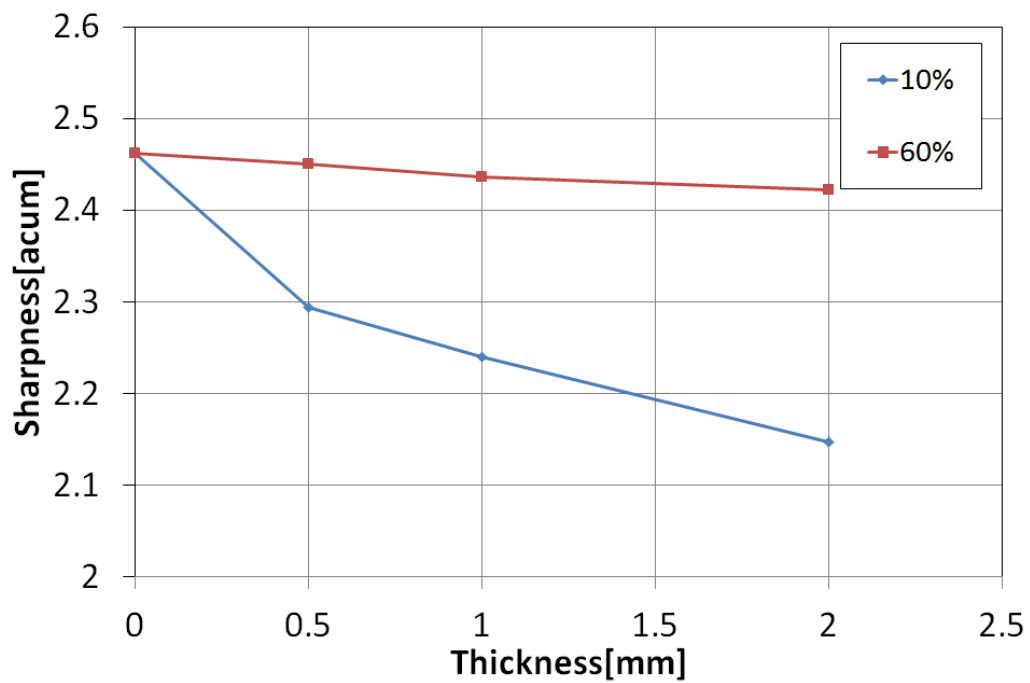


図 5.1.14 シャープネスと板厚比較

なお今回の測定では、測定距離 6mm では透過損失の影響が小さくなった。これは、グリルからの距離が離れたことにより、グリル近傍の音響インピーダンスの差が小さくなったためだと考えられる。

5.2 スピーカ・グリル間体積の音響特性

リングを取り付けた場合、取り付けていない場合の放射音スペクトルを図 5.2.1 に示す。リングを取り付けた場合では、3000Hz、8000Hz 付近で音圧減少を確認できる。一方、800Hz、2700Hz、10000Hz 付近では音圧が増加している。リングの長さが長くなると、スペクトルの変化も大きくなることが確認できる。これは前面体積がダクトの役割を果たし、音響共鳴・挿入損失が顕著になるためだと考えられる。表 5.2.1、5.2.2 には 4.2.2 で示した理論式により算出した、取り付け距離 $L=25\text{mm}$ 、 50mm の時の共鳴周波数を示す。開口端補正の影響などにより多少の差異は生じたが、放射音スペクトルにおいて音圧が増加する周波数と一致する。

リングの長さを変化させた時の総合減衰量，ラウドネス・シャープネスを図 5.2.2、5.2.3 に示す。総合減衰量はリングの長さにほとんど影響を受けていないことが確認できる。ラウドネスはリングの長さが長くなると僅かに増加する傾向があり，反対にシャープネスは僅かに減少する傾向が確認できる。前面体積の変化は周波数特性に影響を与え，音質を阻害することが考えられる。

また、各諸元のグリルを取り付けた場合の放射音スペクトルを図 5.2.4～図 5.2.7 に示す。グリルを取り付けた場合でも、音響共鳴・挿入損失の効果を確認することができ、板厚が厚く、開口率が小さい場合ではグリルを取り付けていない場合と比べ、音響共鳴・挿入損失の発生する周波数に多少の差異が生じ、音圧レベルの増減が顕著になった。これはグリルを取り付けることにより、スピーカとグリル間における定在波の影響が顕著になっているためだと考えられる。

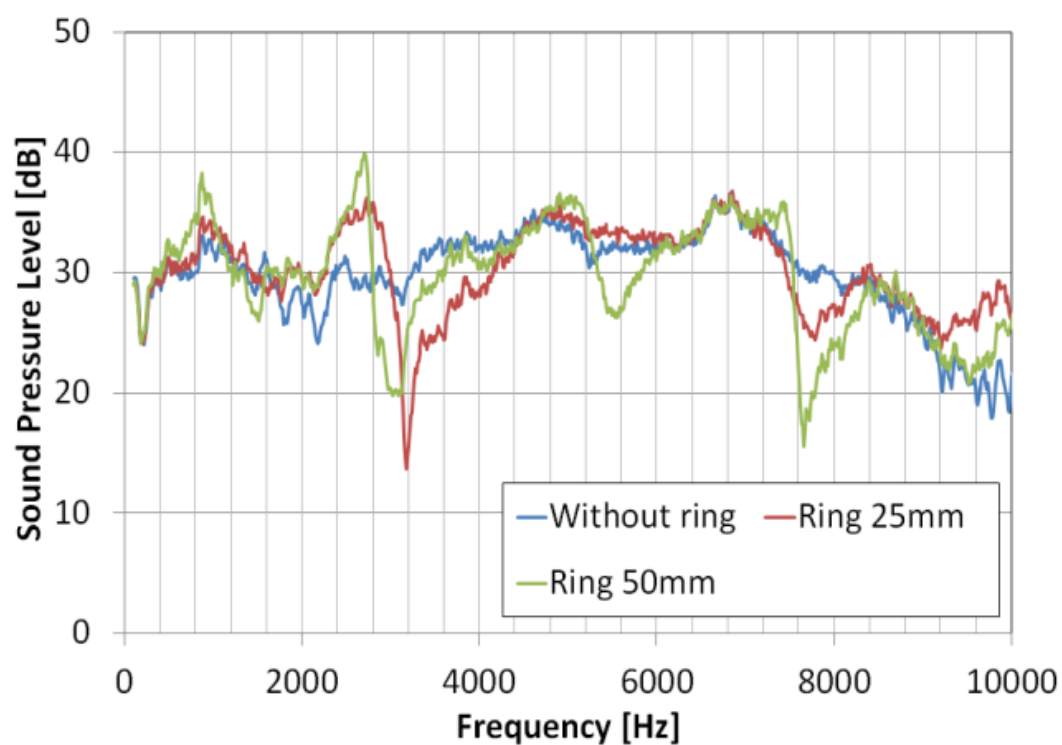


図 5.2.1 リングなし（原音）とリング 25mm の放射音比較

表 5.2.1 リングの共鳴周波数 (L=25mm)

m	Frequency[Hz]	m	Frequency[Hz]
1	957.7	6	10535.2
2	2873.2	7	12450.7
3	4788.7	8	14366.2
4	6704.2	9	16281.7
5	8619.7	10	18197.18

表 5.2.2 リングの共鳴周波数 (L=50mm)

m	Frequency[Hz]	m	Frequency[Hz]
1	747.2	6	8219.8
2	2241.8	7	9714.3
3	3736.3	8	11208.8
4	5230.8	9	12703.3
5	6725.3	10	14197.8

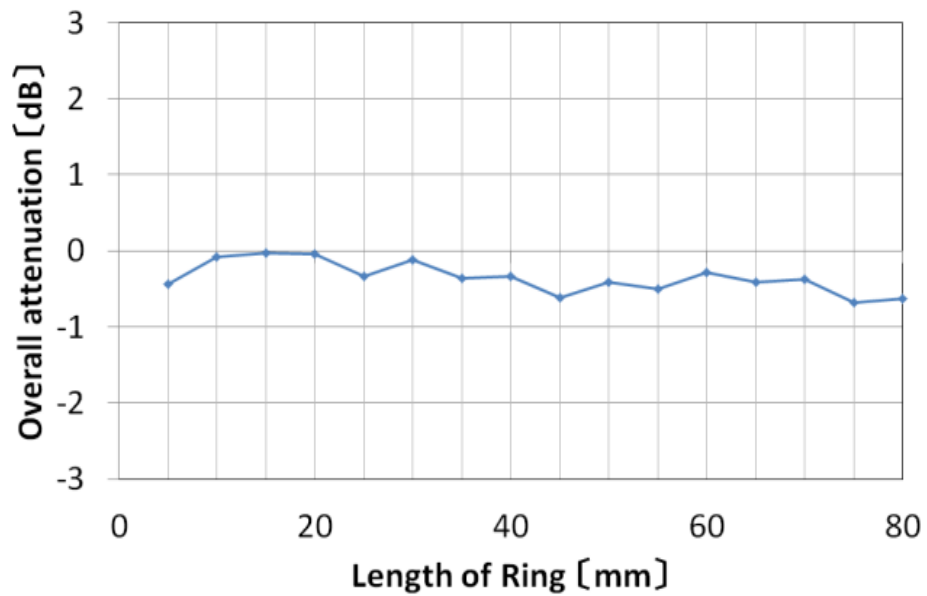


図 5.2.2 リングの長さで総合減衰量

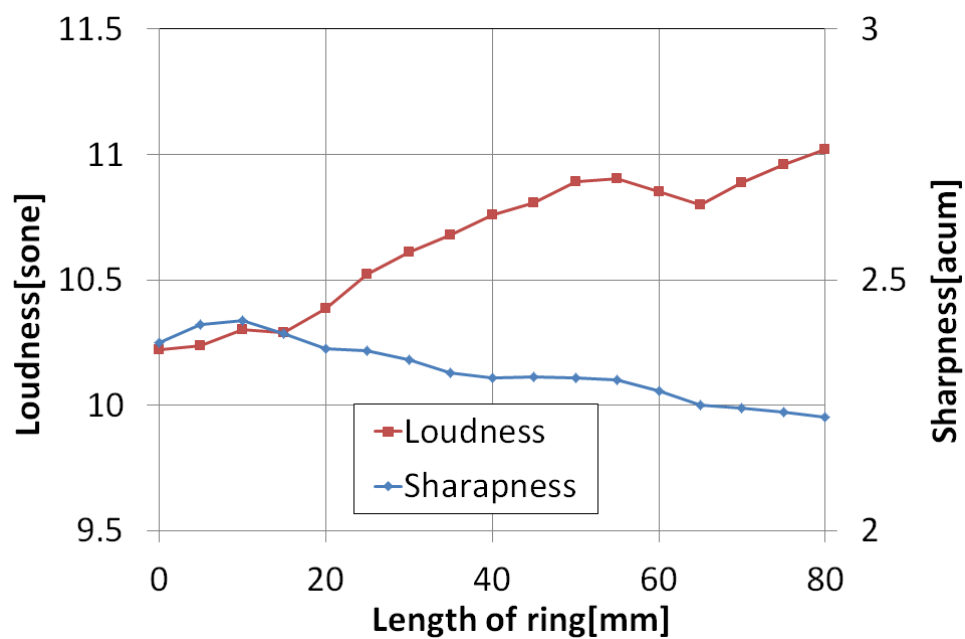


図 5.2.3 リングの長さでラウドネス・シャープネス

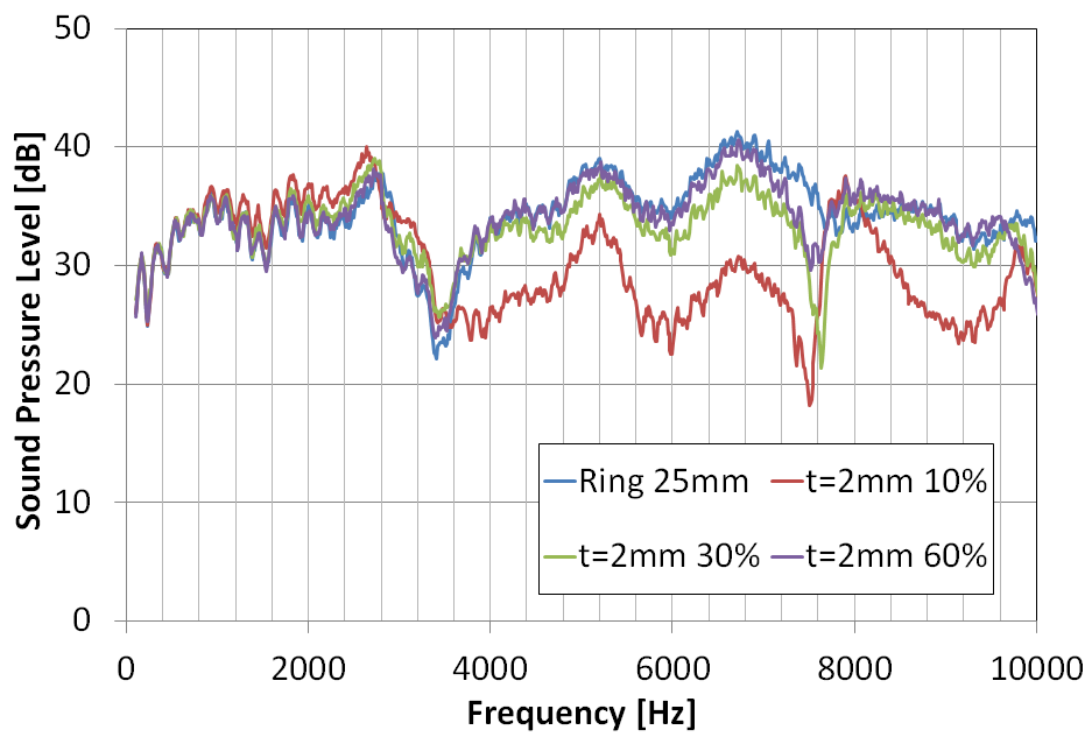


図 5.2.4 開口率変化による放射音比較 (板厚 2mm)

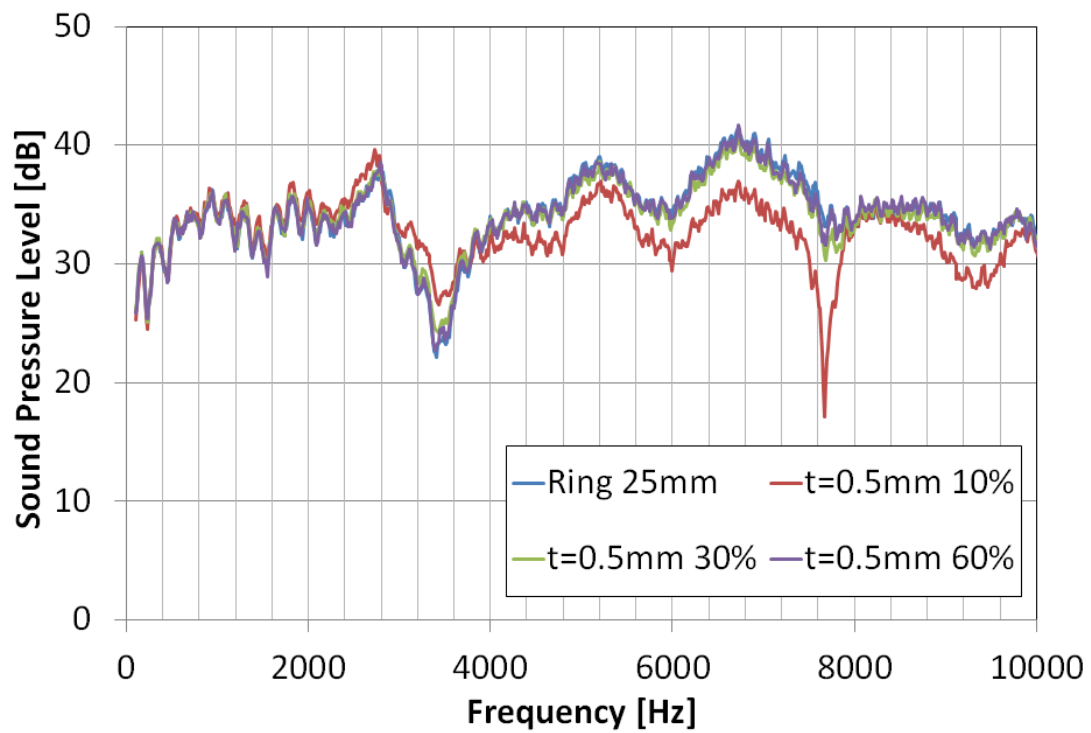


図 5.2.5 開口率変化による放射音比較（板厚 0.5mm）

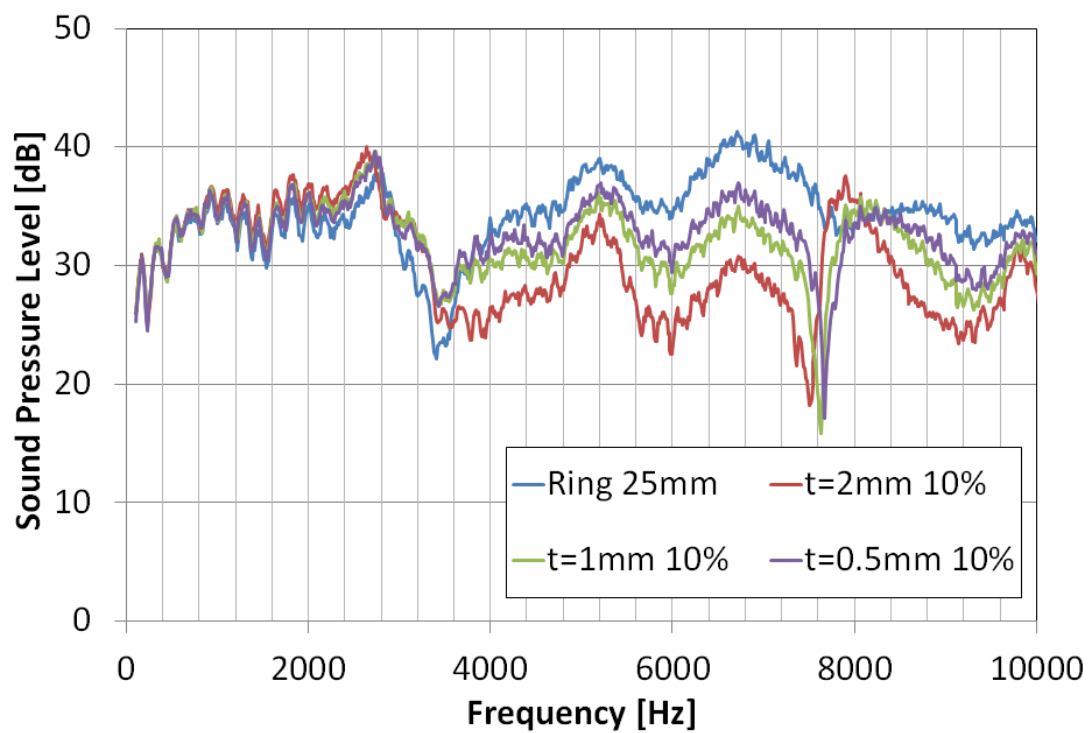


図 5.2.6 板厚変化による放射音比較（開口率 10%）

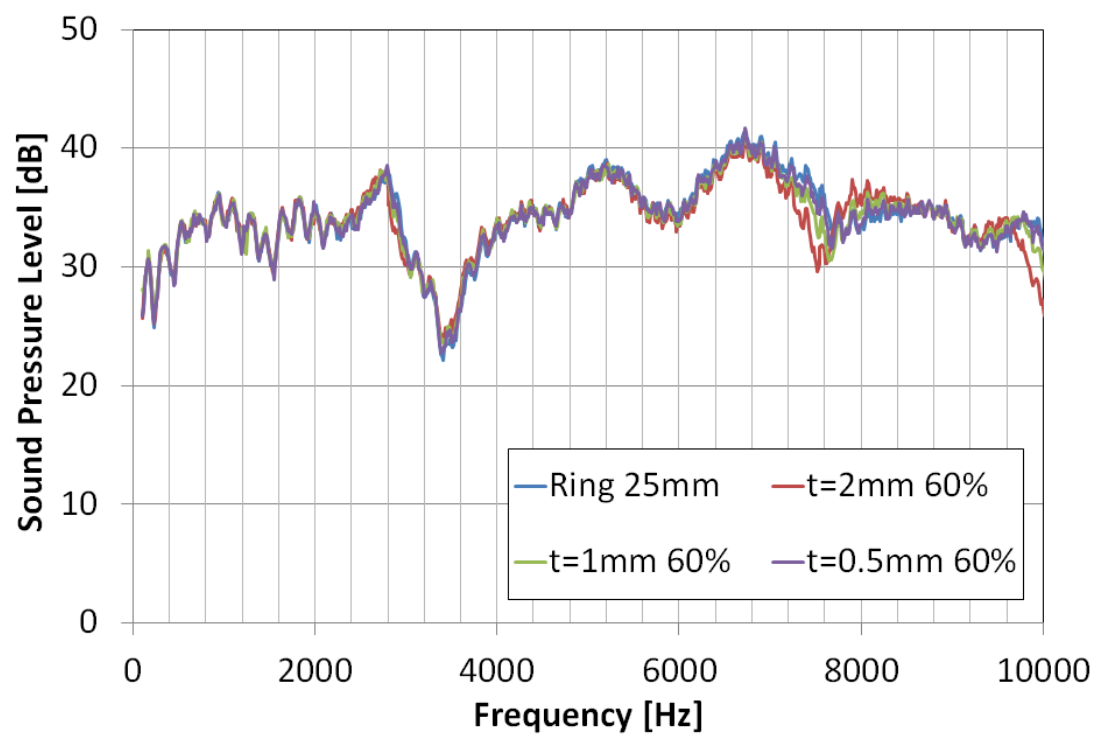


図 5.2.7 板厚変化による放射音比較（開口率 60%）

5.3 グリルの振動特性

表面振動測定と FEM による固有振動数の結果を表 5.3.1、5.3.2 に示す。図 5.3.1 の周波数分析結果と比較したところ、微小な差は生じるがグリルの振動による影響は小さい。これは他の開口率、板厚でも同様なことが言える。グリルは音波によって加振され固有モードを示すが、振動速度が最大でも $0.0002[\text{m/s}]$ と大変微小なため、音質への影響は微小であると考ええる。

表 5.3.1 固有モード、最大表面速度及び解析結果
(板厚 2mm 開口率 10%)

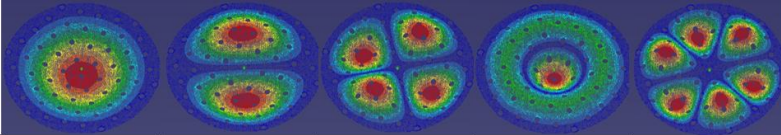
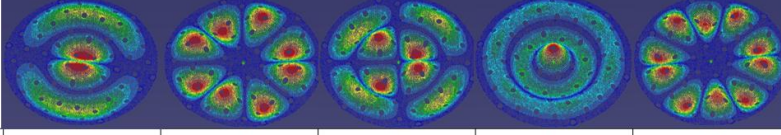
					
Mode	1	2	3	4	5
Measured	237.5Hz	487.5Hz	800Hz	912.5Hz	1275Hz
Velocity[m/s]	2×10^{-4}	4×10^{-5}	3.2×10^{-6}	2.4×10^{-5}	3.2×10^{-6}
Calculated	256.6Hz	533.3Hz	873.6Hz	996.2Hz	1286.1Hz
					
Mode	6	7	8	9	10
Measured	1387.5Hz	1575Hz	1925Hz	2012Hz	2087Hz
Velocity[m/s]	1.6×10^{-6}	1.86×10^{-6}	5.6×10^{-6}	1.7×10^{-5}	9.9×10^{-7}
Calculated	1520.4Hz	1737.4Hz	2109.6Hz	2220.5Hz	2257.2Hz

表 5.3.2 固有モード、最大表面速度及び解析結果
(板厚 2mm 開口率 60%)

Mode	1	2	3	4	5
Measured	175Hz	337.5Hz	550Hz	625Hz	950Hz
Velocity[m/s]	4.58×10^{-5}	4.58×10^{-4}	1.2×10^{-5}	9.23×10^{-5}	3.23×10^{-5}
Calculated	192.8Hz	400.6Hz	655.6Hz	746.9Hz	956.9Hz
Mode	6	7	8	9	10
Measured	1012Hz	1250Hz	1387Hz	1400Hz	1587Hz
Velocity[m/s]	9.6×10^{-6}	2.9×10^{-6}	2.5×10^{-5}	1.27×10^{-5}	1.27×10^{-6}
Calculated	1138.2Hz	1301.0Hz	1578.3Hz	1660.9Hz	1681.5Hz

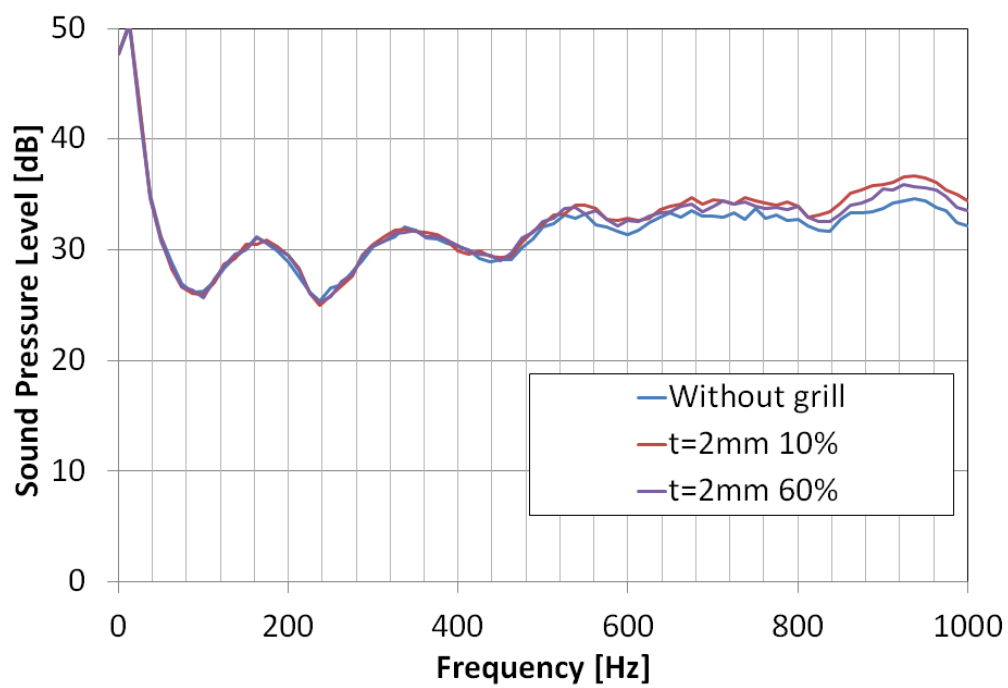


図 5.3.1 グリルの振動が音質に与える影響

5.4 官能試験

5.4.1 開口率の影響

図 5.4.1 に板厚 2mm の開口率の大小と主観的な明瞭感（平均嗜好度）の関係を示す。開口率が大きくなれば、明瞭感が大きくなることがわかった。他の板厚でも同様な結果であった。

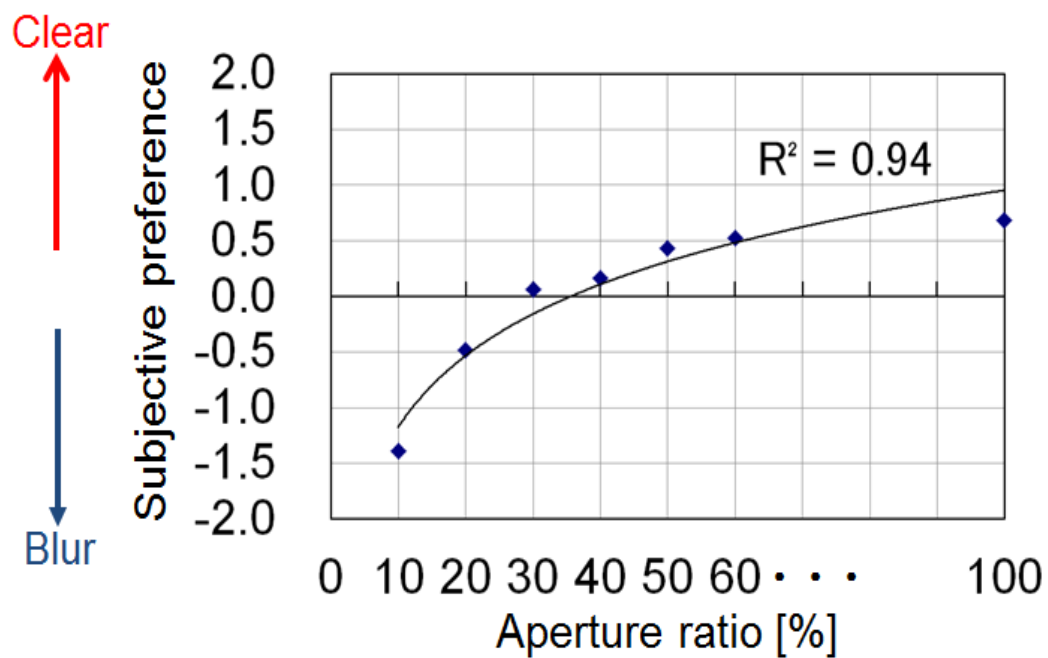


図 5.4.1 開口率と明瞭感の関係（板厚 2mm）

5.4.2 板厚の影響

図 5.4.2 に開口率 10%と 60%の板厚の違いと主観的な明瞭感（平均嗜好度）の関係を示す。10%の関係をみると、わずかであるが板厚が薄いほど明瞭であることがわかる。また、20～50%の場合でも同等な結果が出ている。しかし、60%では板厚による違いが表れなかった。

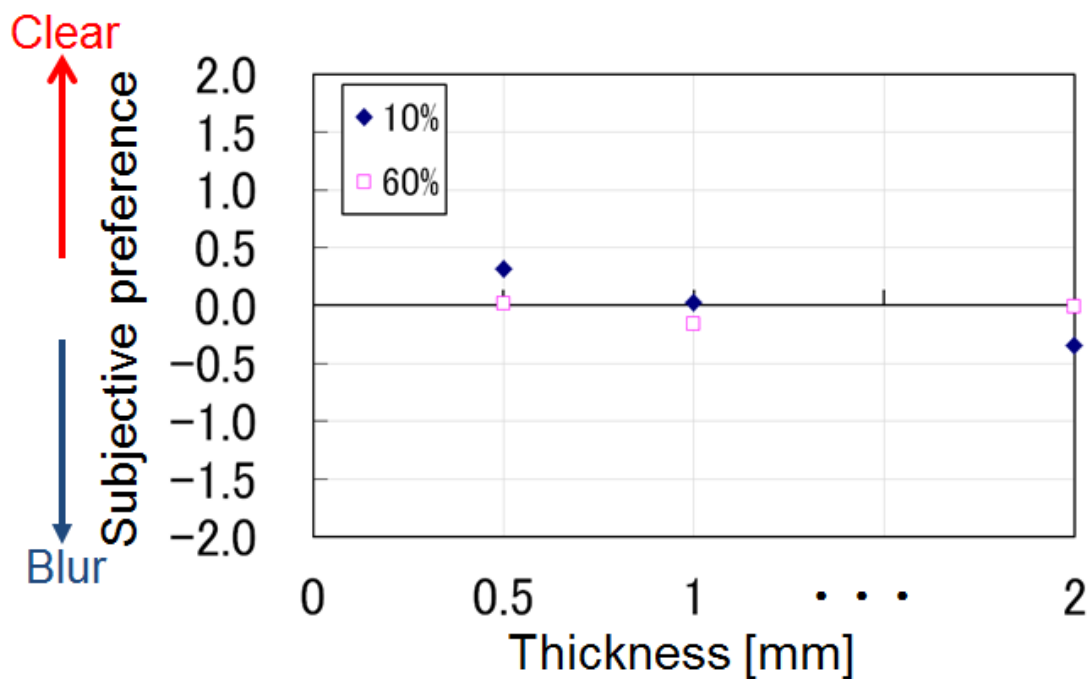
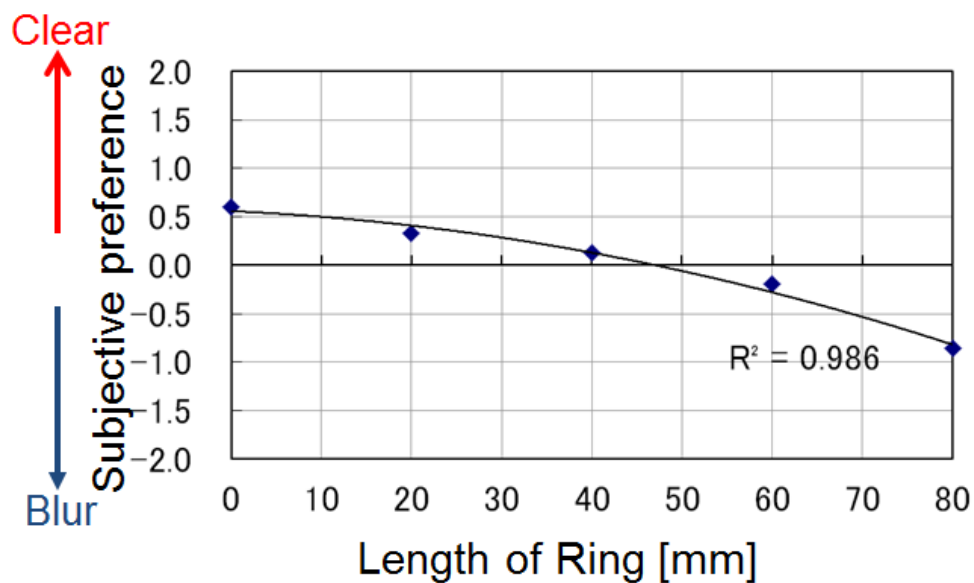


図 5.4.2 板厚と明瞭感の関係（開口率 10%、60%）

5.4.3 スピーカ・グリル間体積の影響

図に取り付けるリングの長さと主観的な明瞭感(平均嗜好度)の関係を示す。今回の官能試験からは、前面体積が主観的な明瞭度に与える影響を確認することはできなかった。



これらの結果は、グリルの諸元の変化による透過損失や取り付け位置による共鳴現象、付属品の振動などが再生音の音質を変えた結果、主観的な明瞭度に影響を与えることを示しており、今後は官能試験結果と前述のメカ設計を定量的にリンクすることが必要である。

5.5 音響解析

5.5.1 放射音スペクトルの比較

図 5.5.1-3 に受音点をスピーカ正面位置 1m に設置した時の実測結果，解析結果を示す。

グリルを取り付けた場合の実測結果とグリル形状をモデル化した解析結果を比較すると多少のレベル差が生じたが，近い傾向を示すことができた．しかし，グリル部分に伝達アドミッタンスを定義したモデルではいずれの開口率でも 2000Hz 以降での音圧減少が顕著にみられ，十分な解析精度を得ることができなかった．

図 5.5.4 に伝達アドミッタンスを定義したモデルでの比較を示す．グリルを付けていない状態での音圧・粒子速度から求めた伝達アドミッタンスを定義したモデルでも 2000Hz 以降での音圧減少が確認でき、実測と大きく異なることがわかる．

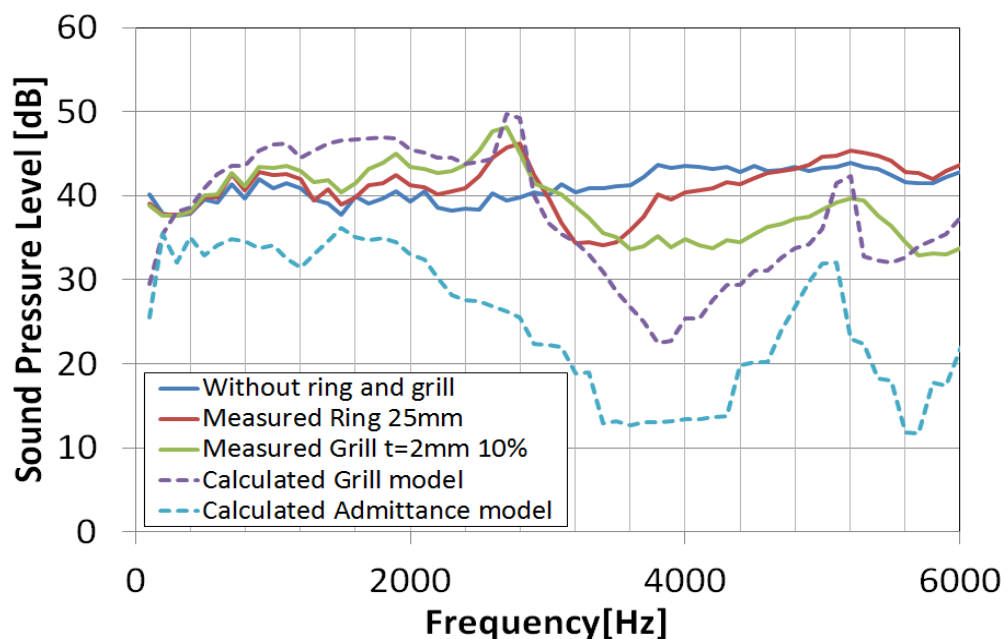


図 5.5.1 放射音比較 グリル t=2mm 10%
(実測-解析)

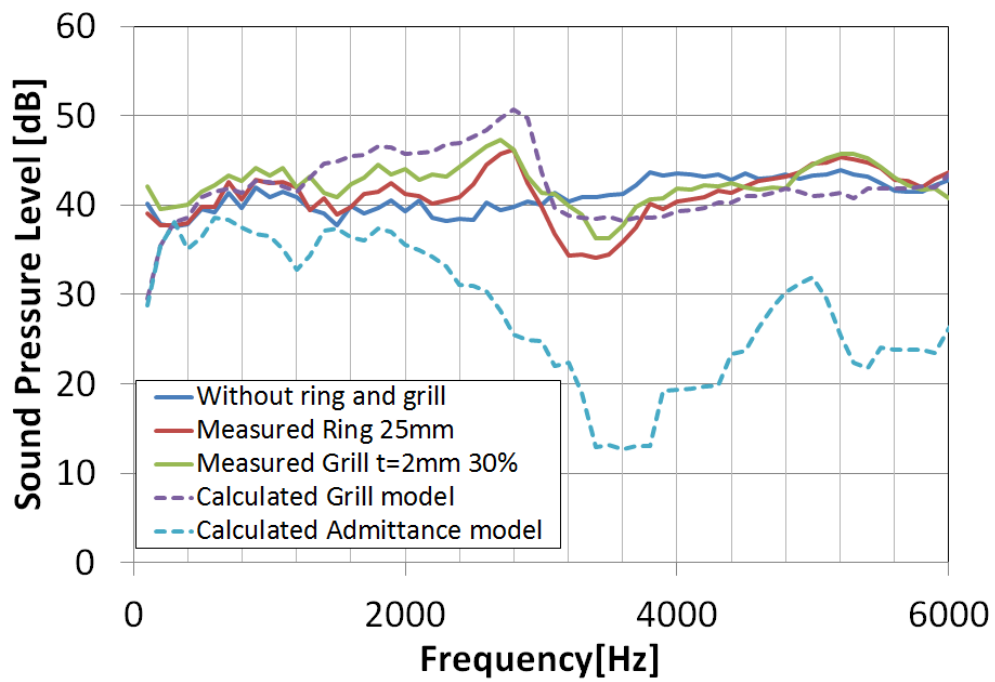


図 5.5.2 放射音比較 グリル $t=2\text{mm}$ 30%
(実測-解析)

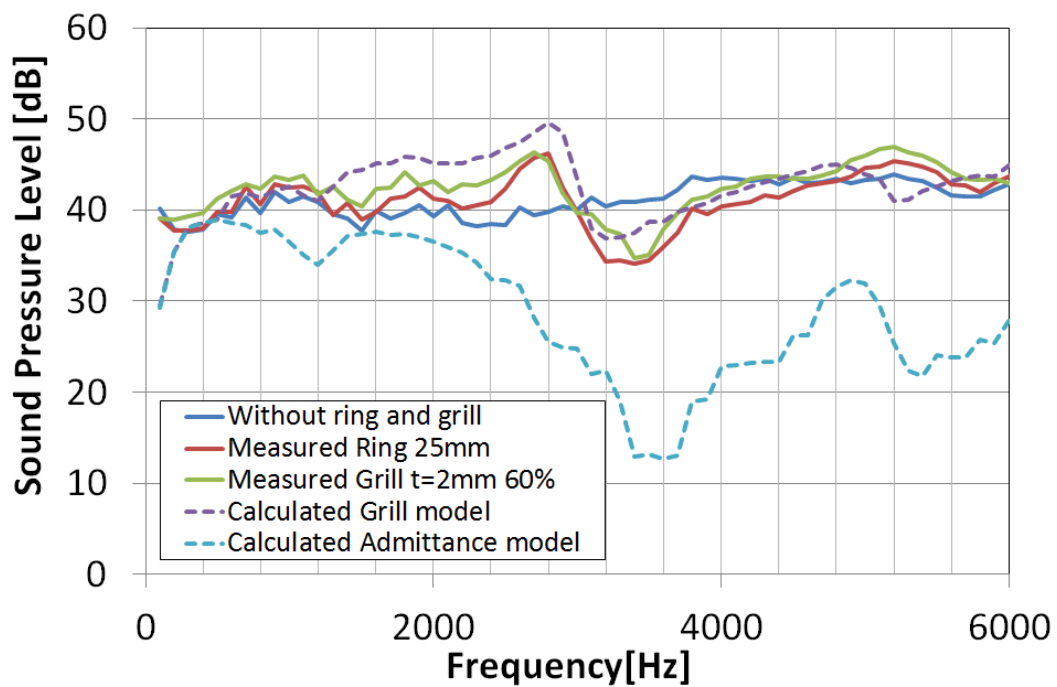


図 5.5.3 放射音比較 グリル $t=2\text{mm}$ 60%
(実測-解析)

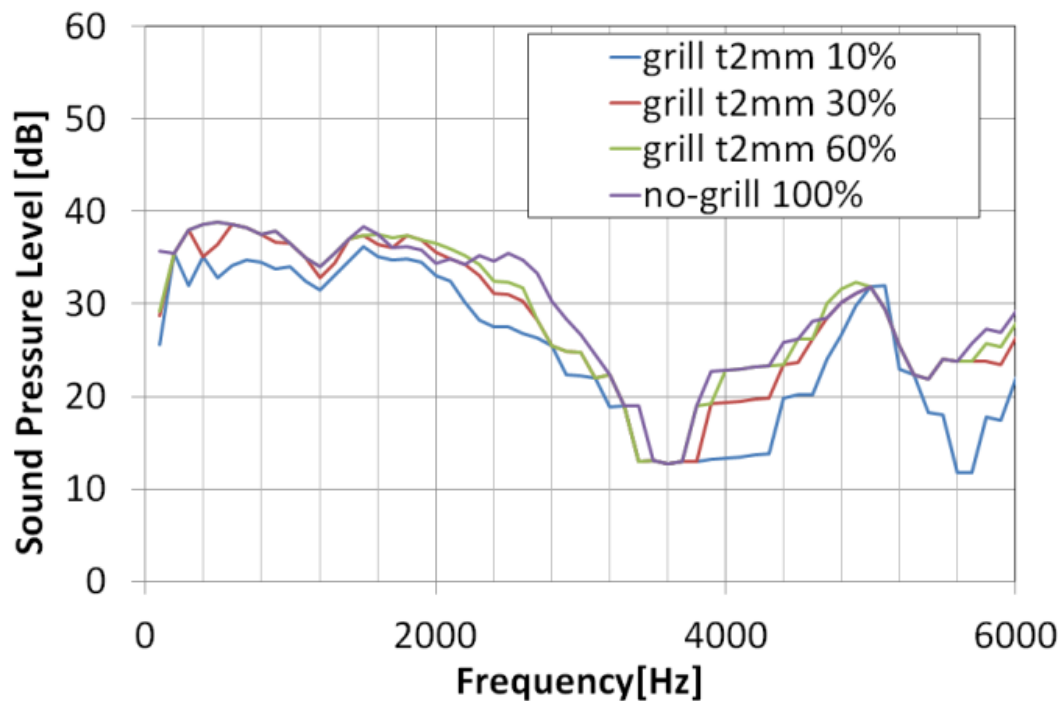


図 5.5.4 放射音比較
(伝達アドミッタンス定義モデルでの解析)

5.5.2 減音量での比較

図 5.5.5-7 に実測，グリル形状モデル，伝達アドミッタンス定義モデルでの減音量のグラフを示す．実測結果とグリル形状モデルでは近い傾向を示すことが確認できる．伝達アドミッタンス定義モデルでは 4000Hz 付近で近い傾向を得ることができるが，100Hz-2000Hz では実測，グリル形状をモデル化した解析とは異なる傾向となった．

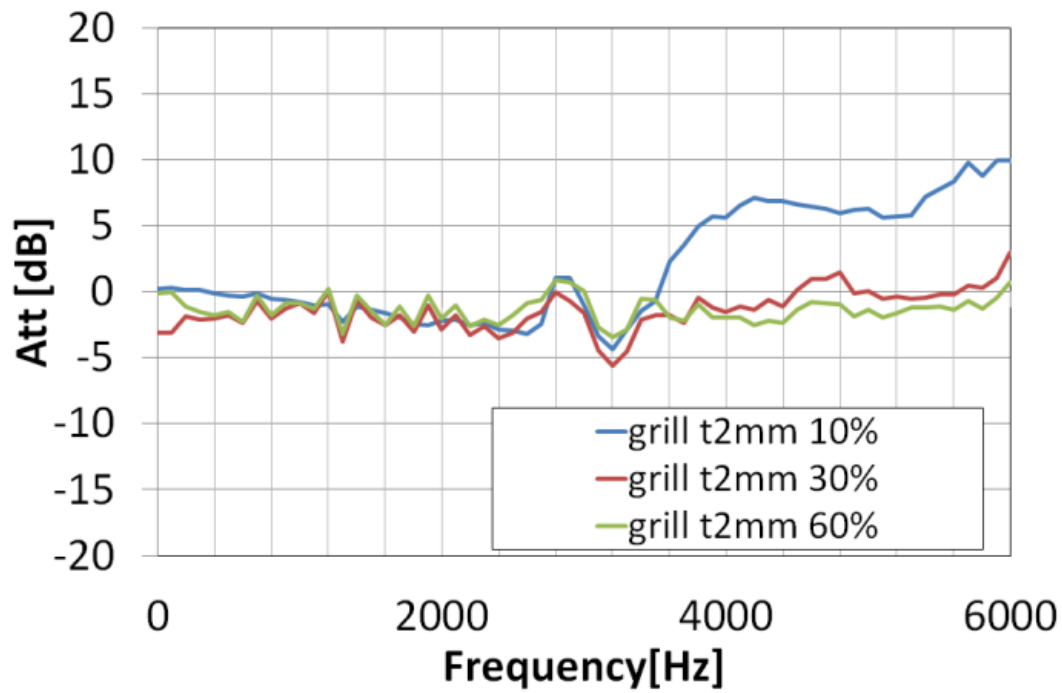


図 5.5.5 グリルの減音量
(実測)

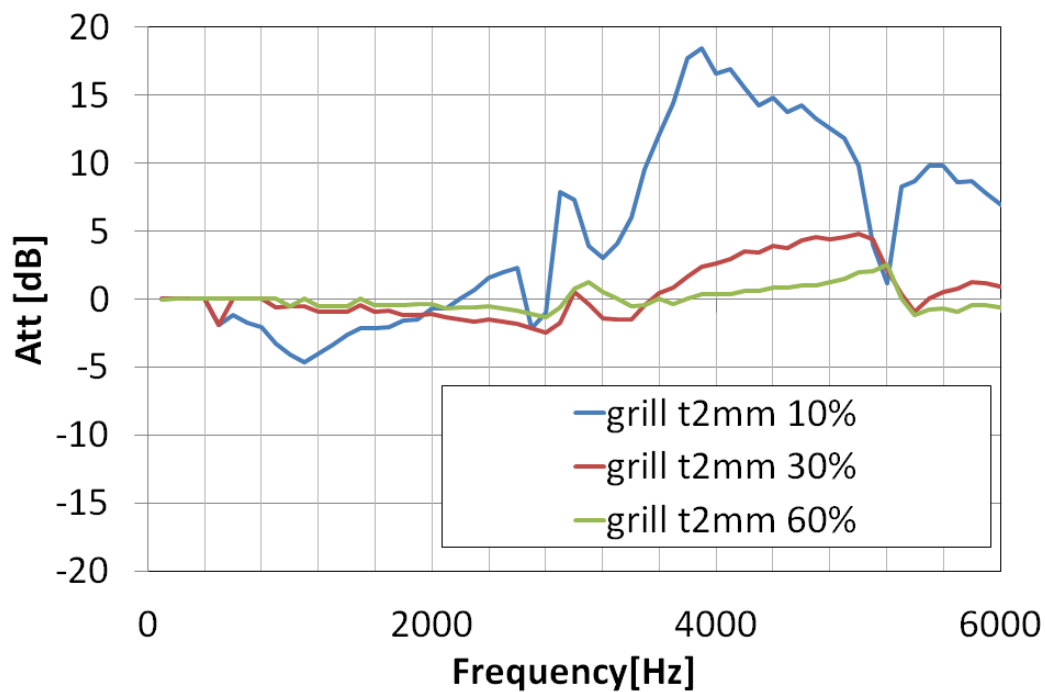


図 5.5.6 グリルの減音量
(解析・グリル形状モデル)

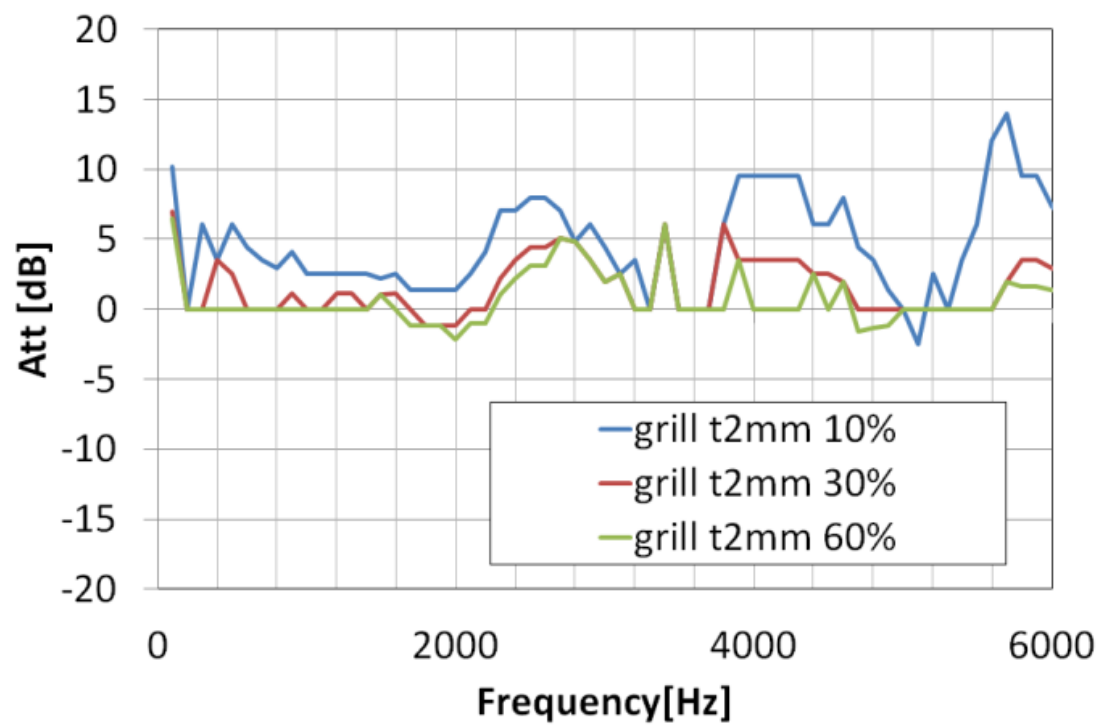


図 5.5.7 グリルの減音量
(解析-伝達アドミタンス定義モデル)

5.5.3 伝達アドミッタンス定義モデルについて検討

伝達アドミッタンスは 2 つの面の間の関係を定義するが、要素面では音圧と粒子速度を一定とみなし、入力端と出力端では平面進行波仮定となる。

平面進行波の仮定が成り立つ周波数域は、管の直径が音の波長に対して十分小さいことが条件となり、具体的には（径方向の最初の定在波（=2 分の 1 波長の共鳴モード）ができるまでの周波数として

$$\text{円管の場合} \quad dc < 0.586c/f \quad (5.5.1)$$

dc：円管の直径(m)

f：解析周波数(Hz)

c：音速 340(m/s)

今回の解析モデルではスピーカ前面部のリング内径が $\phi 150\text{mm}$ のため 1328Hz までは平面進行波の仮定が成り立つと考えられるが、それ以降の周波数域では平面進行波の仮定が成り立たないため十分な解析精度が得られなかったと考えられる。

第6章 結論

本研究ではスピーカグリルの設計因子である開口率や厚さ、取り付け位置を変化させたときの音質への影響を、音響透過損失、音響共鳴、振動共振などの音響振動工学の観点で詳細に調査を行い、各現象がどのように音質へ影響しているかを調べるとともに、音質の主観的な影響を調査するため、官能試験により主観的な感覚と物理量との関係の調査を行い、設計に反映することを目指し、以下の知見を得た。

- (1) グリルの透過損失は、開口率が小さく、板厚が厚いほど大きくなる。
- (2) スピーカ・グリル間体積の音響特性は、空間の寸法や体積により音響共鳴・挿入損失を生じ、寸法や体積が大きくなれば顕著に現れる。
- (3) グリルの振動はスピーカからの反力や音波による加振の影響で固有モードを生じるが、振動速度は微小であるため音質への影響は少ない。
- (4) 官能試験により、グリルの諸元の変化による透過損失や取付位置による共鳴現象、付属品の振動などが再生音の音質を変えた結果、主観的な明瞭度に影響を与えることがわかった。
- (5) スピーカ周辺構造を含む 3D モデルを作成し、FEM 音響解析により音響特性をシミュレーションした。その結果、グリル形状を正確にモデル化することで、6kHz 以下の特性を解析で再現することが出来た。
- (6) グリル表裏の音圧・粒子速度の実測値から伝達アドミッタンスを求め、FEM 解析における境界条件として定義することで、細かなグリル形状をモデリングせずに音響特性を表現することを試みたが、平面進行波の仮定では高周波数域で十分な精度を得ることが出来なかった。

これらのことにより、スピーカ前面のメカ設計では、透過損失、音響共鳴、挿入損失、共振現象を生じさせない設計を行うことが重要であると結論する。

特に、実際の音響機器設計において、開口率が小さく、板厚が厚いケースは多々ある。その際は、本報で述べた音響的検討を行うことで、音質劣化の少ないメカ設計を行うことができると考える。さらには、周波数特性のチューニングにより、心地よい音響特性への改善も期待できる。

参考文献

- 1) A.Selament, R.Singh, M.Samimy, T.Huff : ACOUSTIC CHARACTERISTICS OF DISSIPATIVE AND HYBRID SILENCER :Ohio University
- 2) 日本機械学会, 森田 勝久 : 機械音響ハンドブック (1991), 産業図書株式会社
- 3) 城戸 健一 : 基礎音響工学 (1990), コロナ
- 4) 一宮亮一 : 機械系の音響工学、(1992)、コロナ社
- 5) 鈴木浩平, 西田公至, 丸山晃市, 渡辺武 : 機械工学のための振動・音響学 (1989), サイエンス社
- 6) 振動工学ハンドブック編集委員会編、谷口 修 : 振動工学ハンドブック、(1985)、養賢堂
- 7) 難波精一郎, 桑野園子, 音の評価のための心理学的測定法, (1998), コロナ社
- 8) 日科技連官能検査委員会 : 新版官能検査ハンドブック (1973), 日科技連
- 9) 井戸浩登 : PML (Perfect Matched Layer) による FEM 音響解析
- 10) 山岸和子, 山内徹, 濱透, 梶本貴久, 御法川学 : 伝達アドミッタンスを用いた音響透過物のモデル化, (2012), 音講論(秋)
- 11) 梶本貴久, 大島拓也, 安田洋介, 佐久間哲哉 : 伝達アドミッタンス機能の高速多重極境界要素法への実装, (2012), 音講論(秋)
- 12) 鈴木昭次, 西村正治, 雉本信哉, 御法川学 : 機械音響工学, (1993), コロナ社
- 13) K.Seki, G.Minorikawa, S.Hasegawa : Study on mechanical design aiming at improvement of sound quality -Influence of structure around loudspeaker on sound quality-, (2012), Inter-noise2012

謝辞

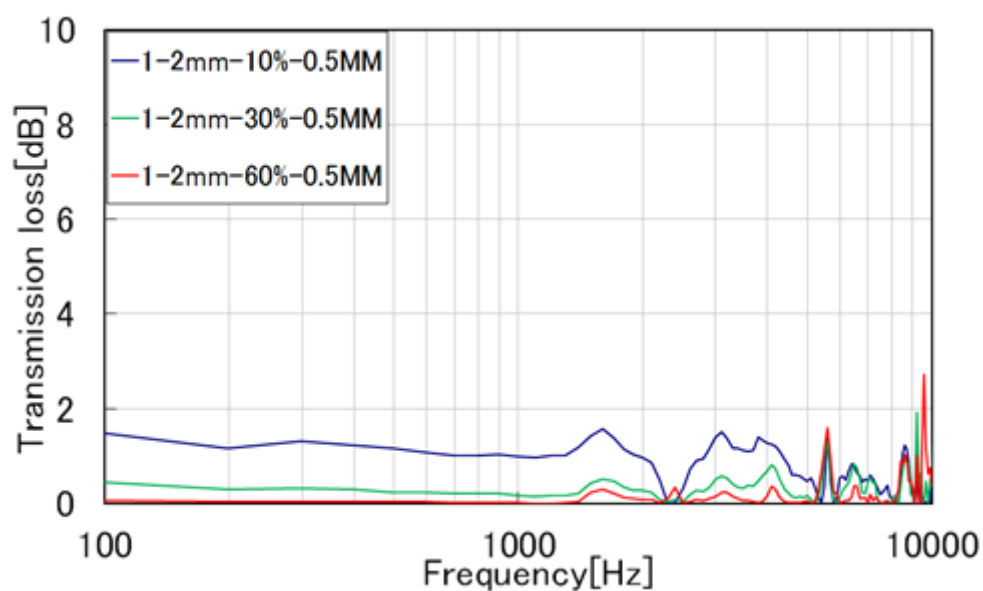
本研究を進行するにあたり、常に御指導および御助言をして頂きました指導教員であります御法川学教授に対し深い感謝の意を表します。

そして、実験及び解析の手法についてご協力して頂いた SONY 株式会社の関研一様、山内徹様、山岸和子様、エルエムエスジャパン株式会社の井戸浩登様に対し、この場をお借りして厚く御礼申し上げます。

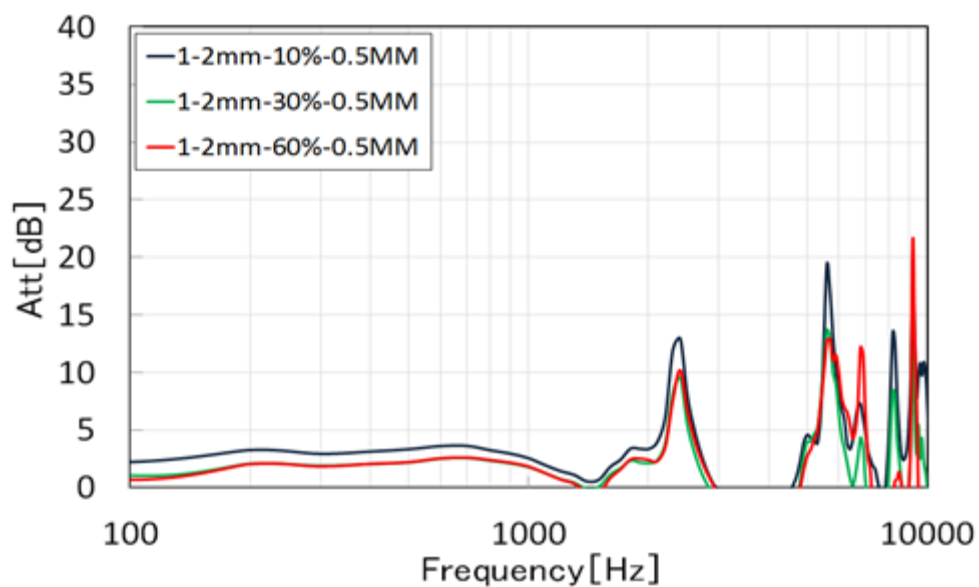
並びに、官能試験にご協力頂いた本大学の学生、実験データ整理や実験作業に協力してくれた御法川研究室の皆様に感謝致します。

付録

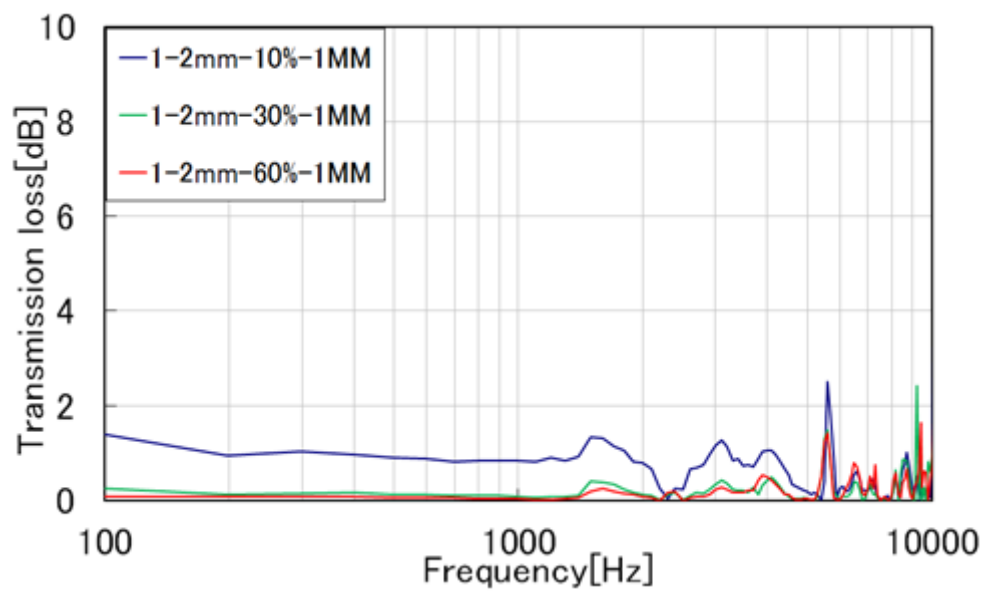
付録 1 透過損失及び減音量のグラフ（開口率比較）



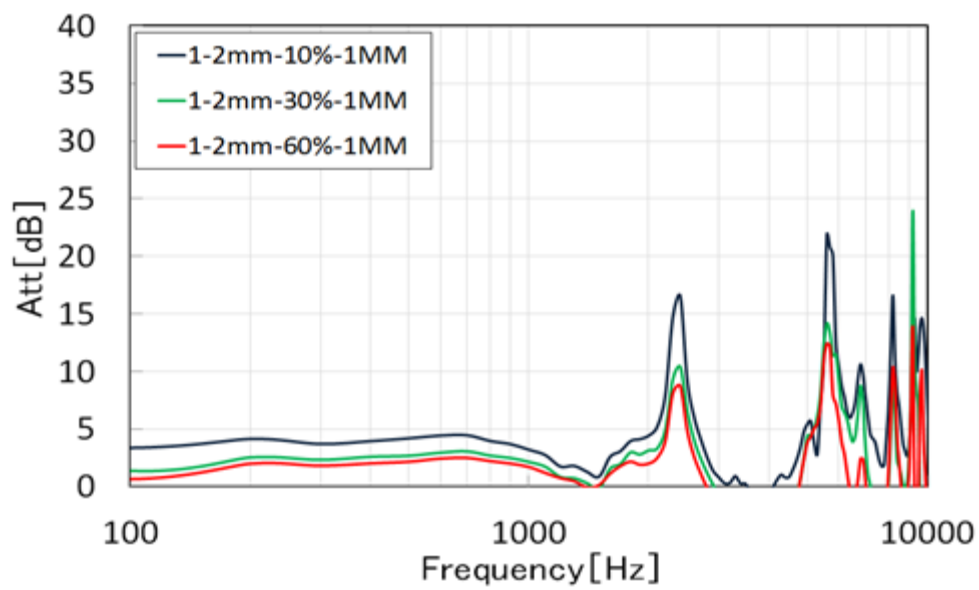
付録 1.1 透過損失
(測定点 1、測定距離 2mm、板厚 0.5mm)



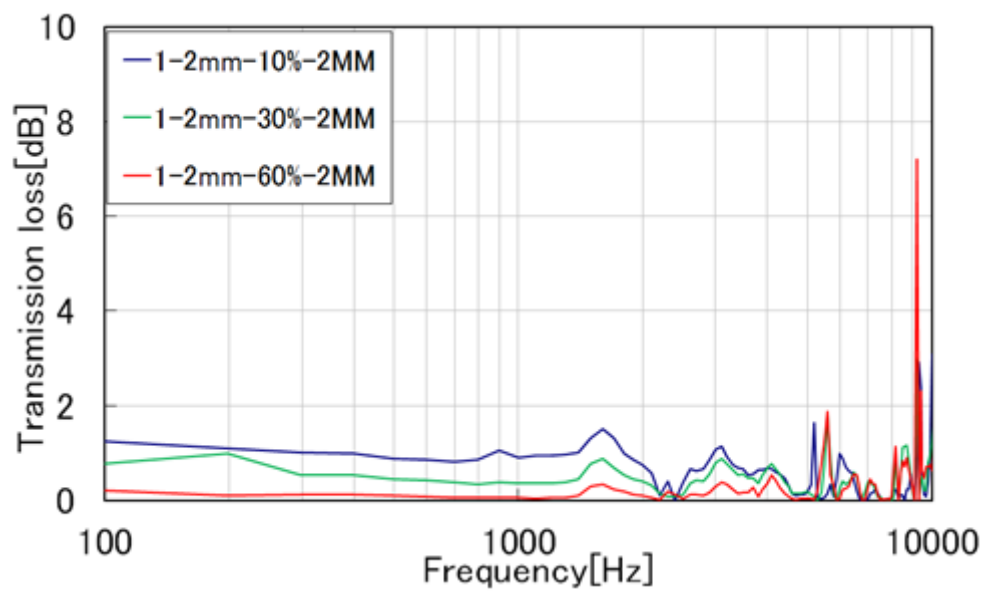
付録 1.2 減音量
(測定点 1、測定距離 2mm、板厚 0.5mm)



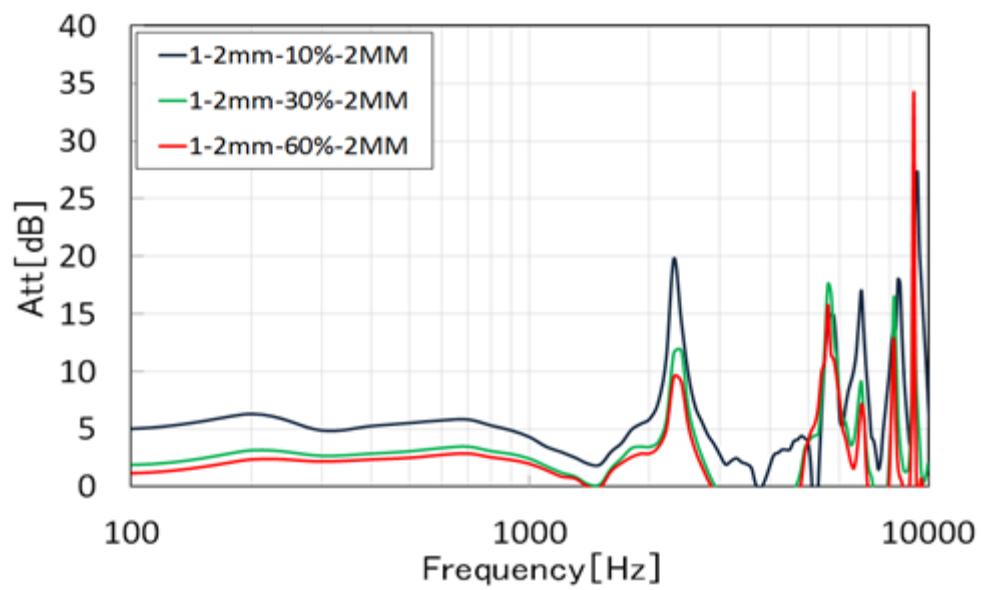
付録 1.3 透過損失
(測定点 1、測定距離 2mm、板厚 1mm)



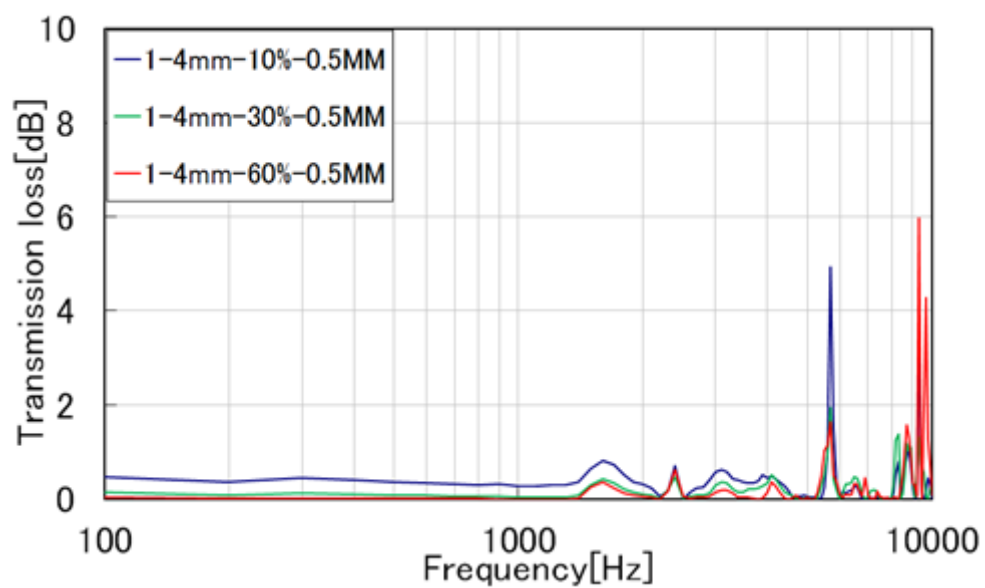
付録 1.4 減音量
(測定点 1、測定距離 2mm、板厚 1mm)



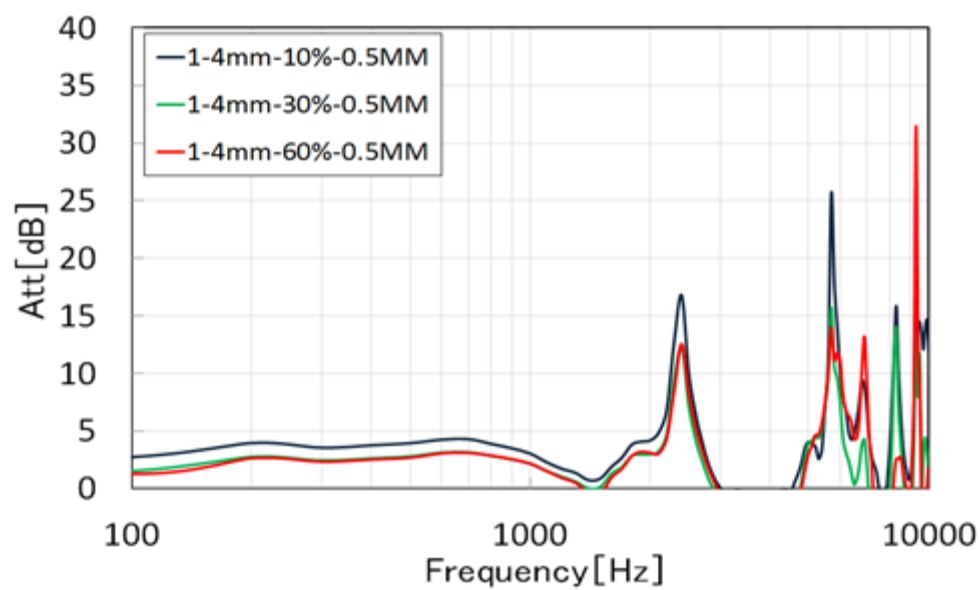
付録 1.5 透過損失
(測定点 1、測定距離 2mm、板厚 2mm)



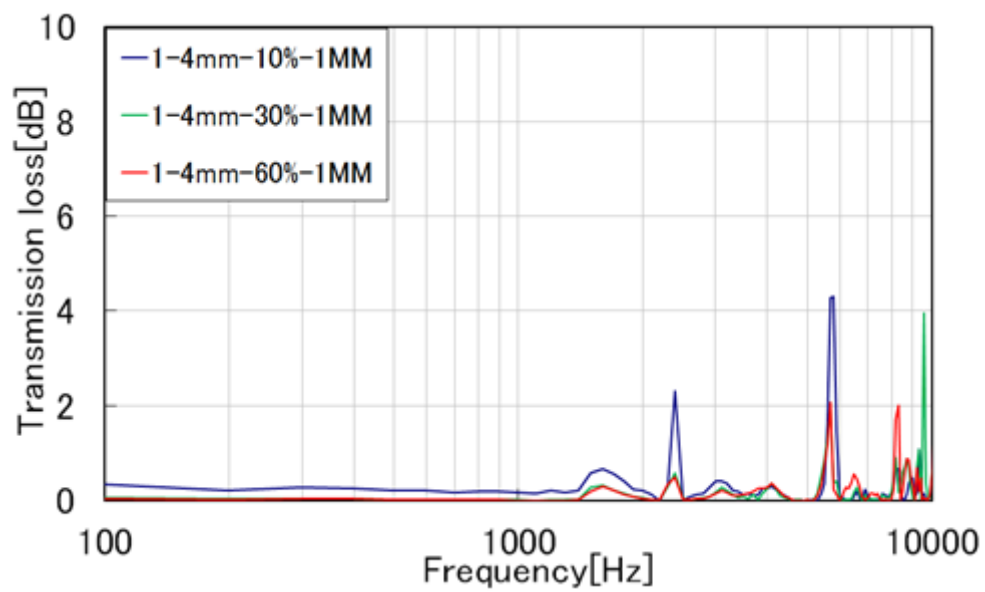
付録 1.6 減音量
(測定点 1、測定距離 2mm、板厚 2mm)



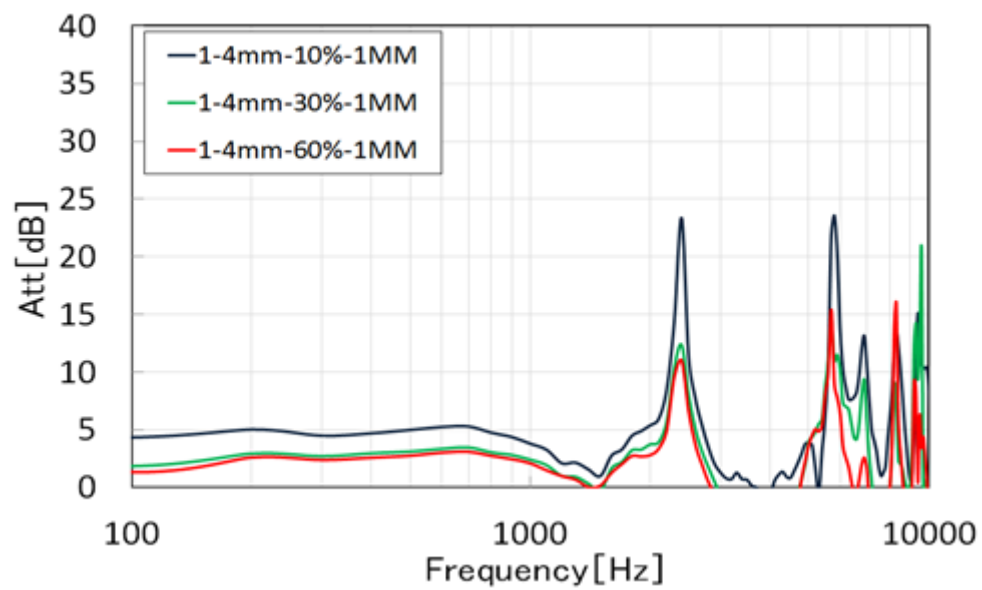
付録 1.7 透過損失
(測定点 1、測定距離 4mm、板厚 0.5mm)



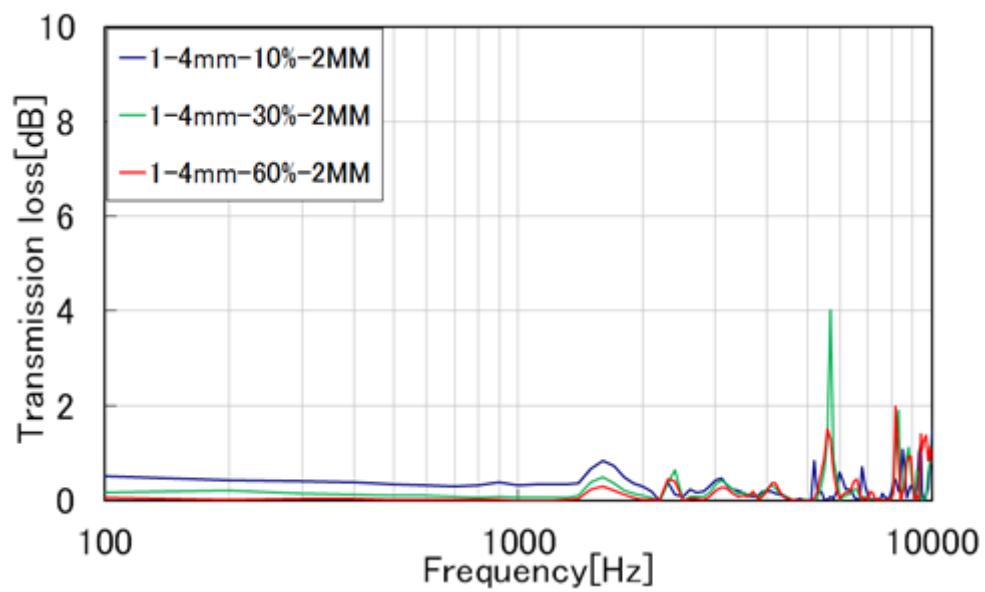
付録 1.8 減音量
(測定点 1、測定距離 4mm、板厚 0.5mm)



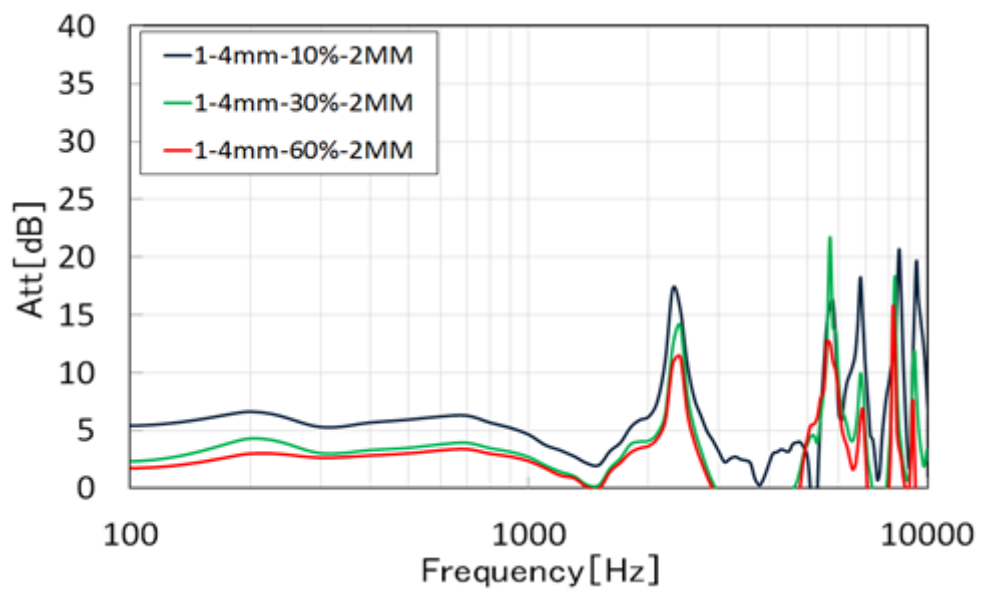
付録 1.9 透過損失
(測定点 1、測定距離 4mm、板厚 1mm)



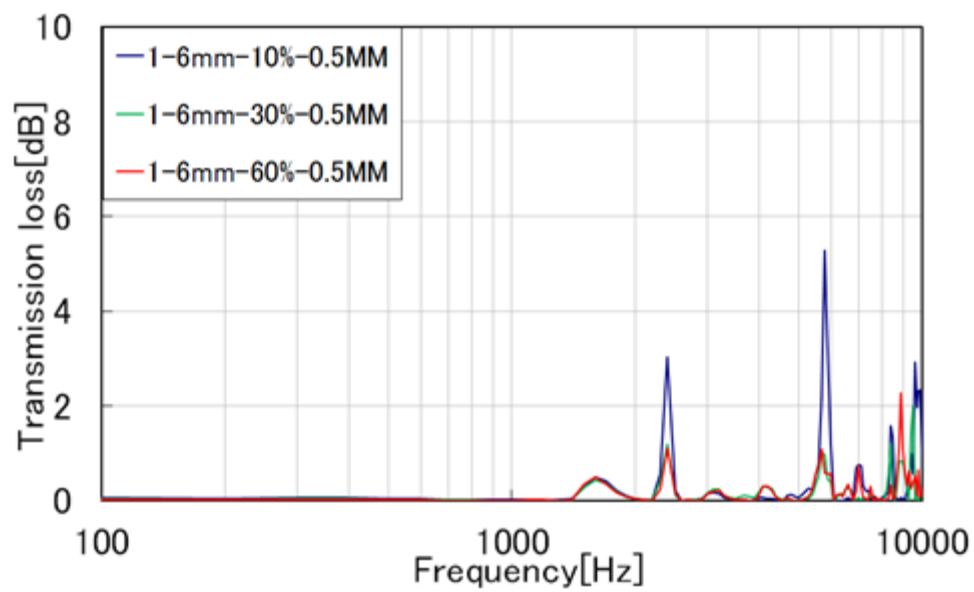
付録 1.10 減音量
(測定点 1、測定距離 4mm、板厚 1mm)



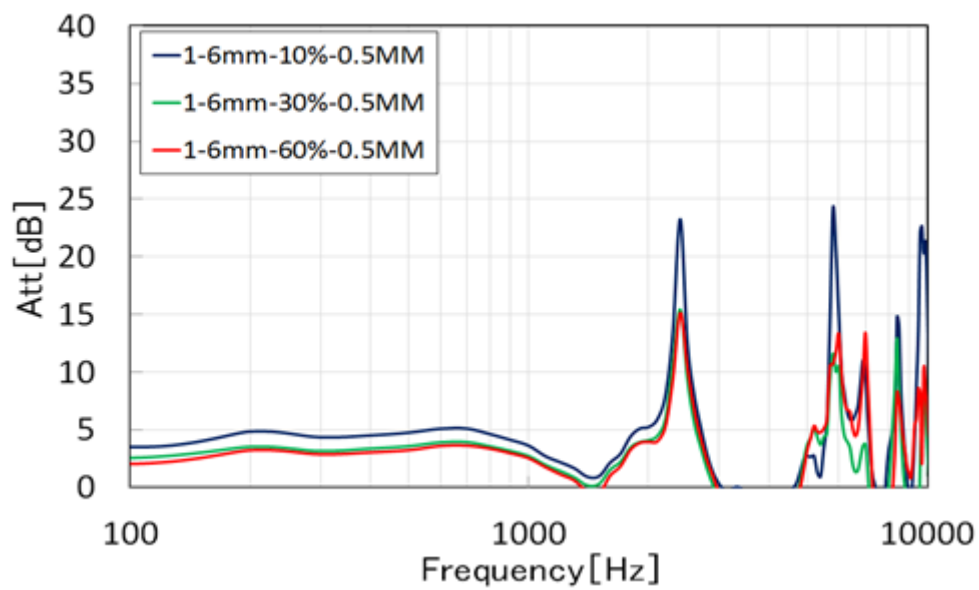
付録 1.11 透過損失
(測定点 1、測定距離 4mm、板厚 2mm)



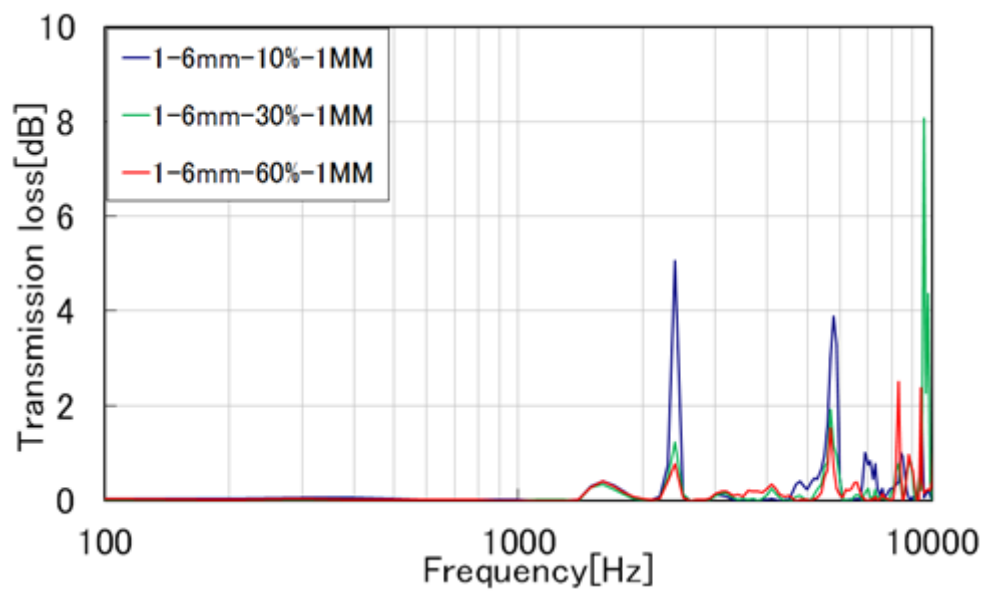
付録 1.12 減音量
(測定点 1、測定距離 4mm、板厚 2mm)



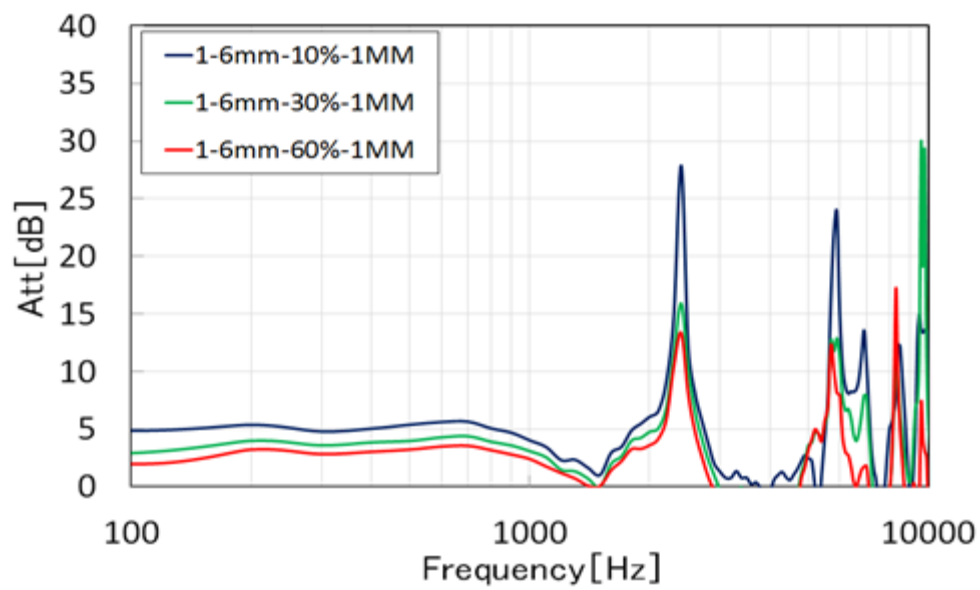
付録 1.13 透過損失
(測定点 1、測定距離 6mm、板厚 0.5mm)



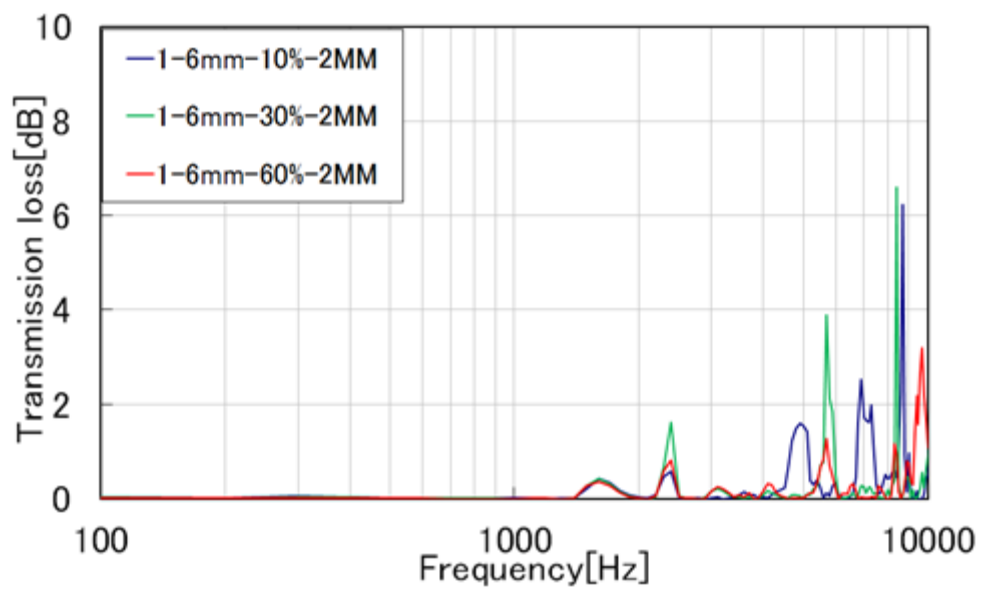
付録 1.14 減音量
(測定点 1、測定距離 6mm、板厚 0.5mm)



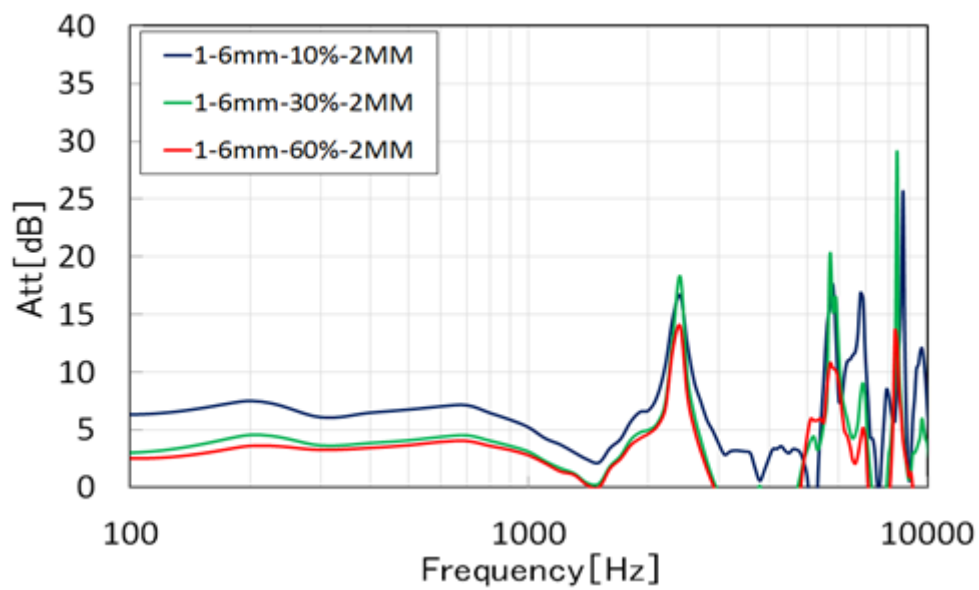
付録 1.15 透過損失
(測定点 1、測定距離 6mm、板厚 1mm)



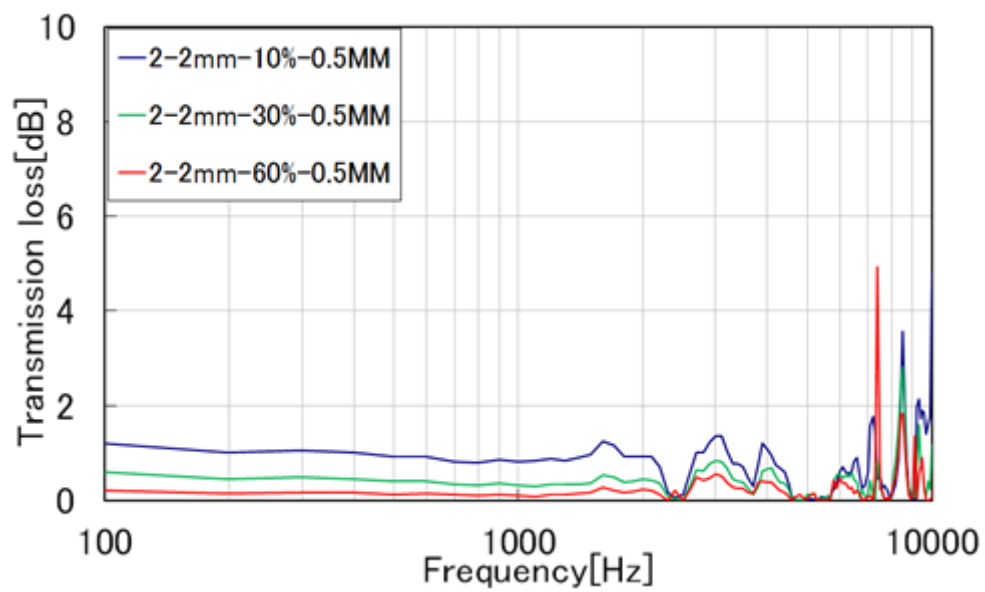
付録 1.16 減音量
(測定点 1、測定距離 6mm、板厚 1mm)



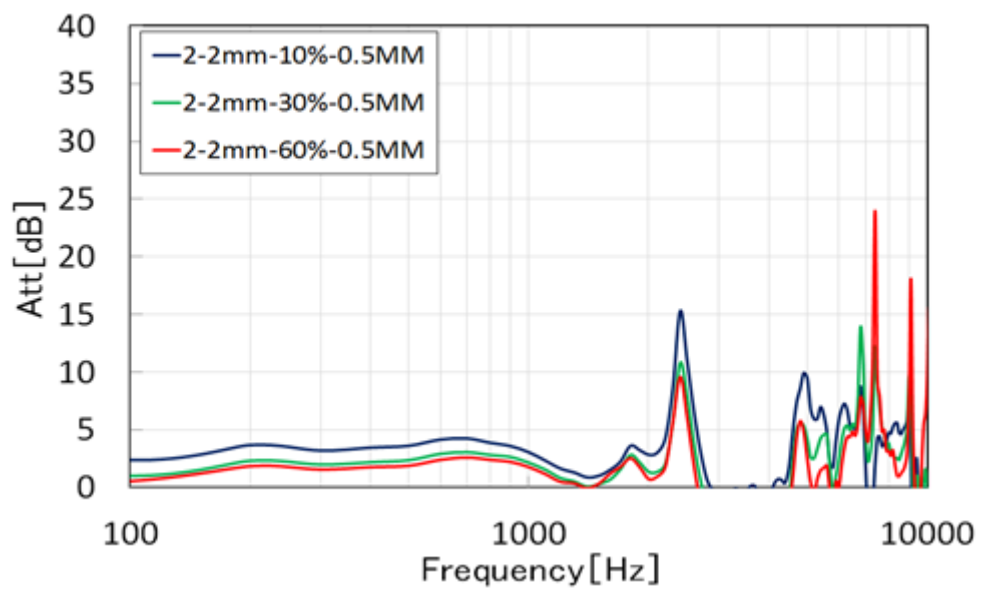
付録 1.17 透過損失
(測定点 1、測定距離 6mm、板厚 2mm)



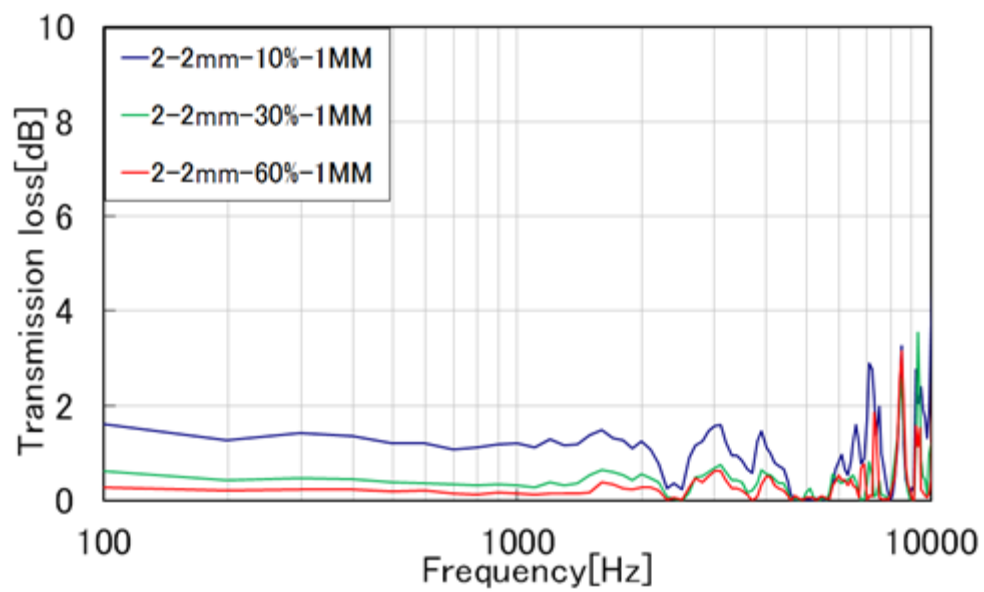
付録 1.18 減音量
(測定点 1、測定距離 6mm、板厚 2mm)



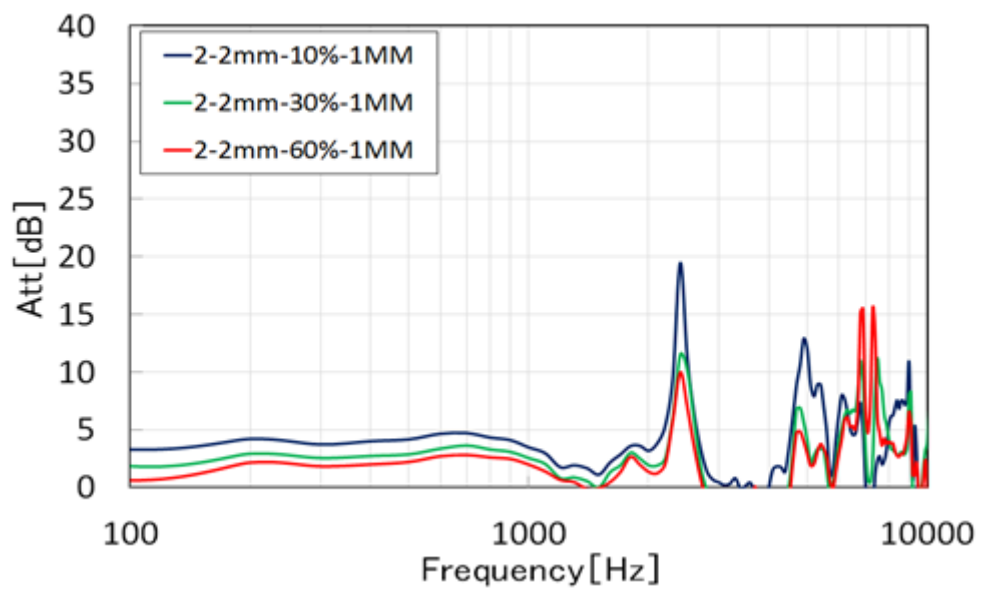
付録 1.19 透過損失
(測定点 2、測定距離 2mm、板厚 0.5mm)



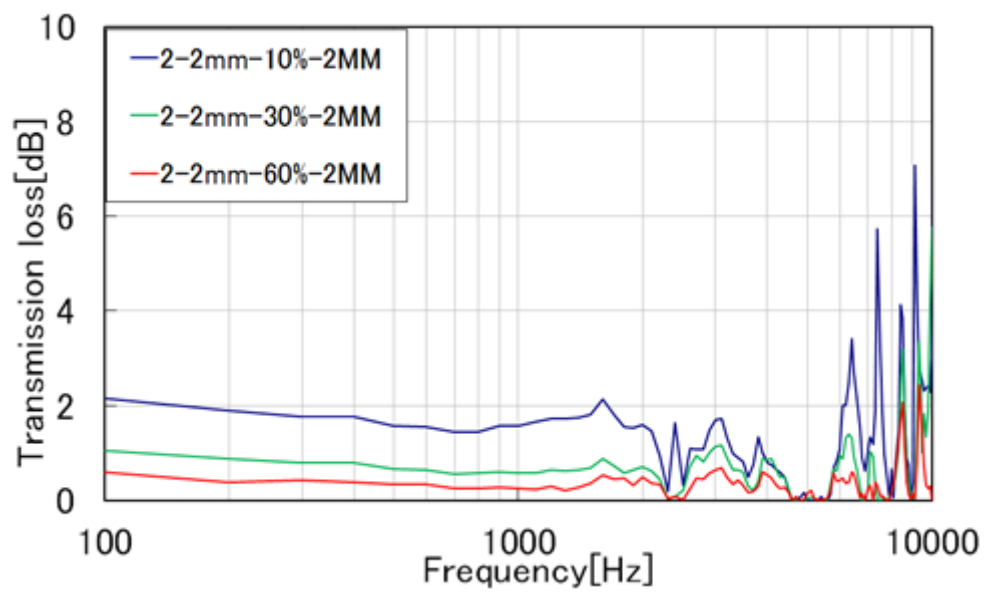
付録 1.20 減音量
(測定点 2、測定距離 2mm、板厚 0.5mm)



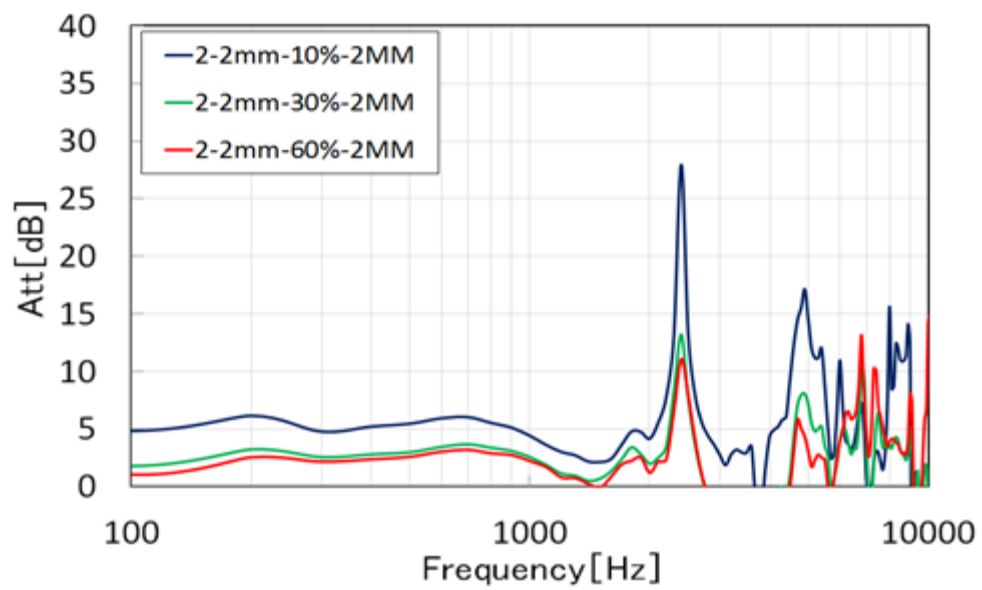
付録 1.21 透過損失
(測定点 2、測定距離 2mm、板厚 1mm)



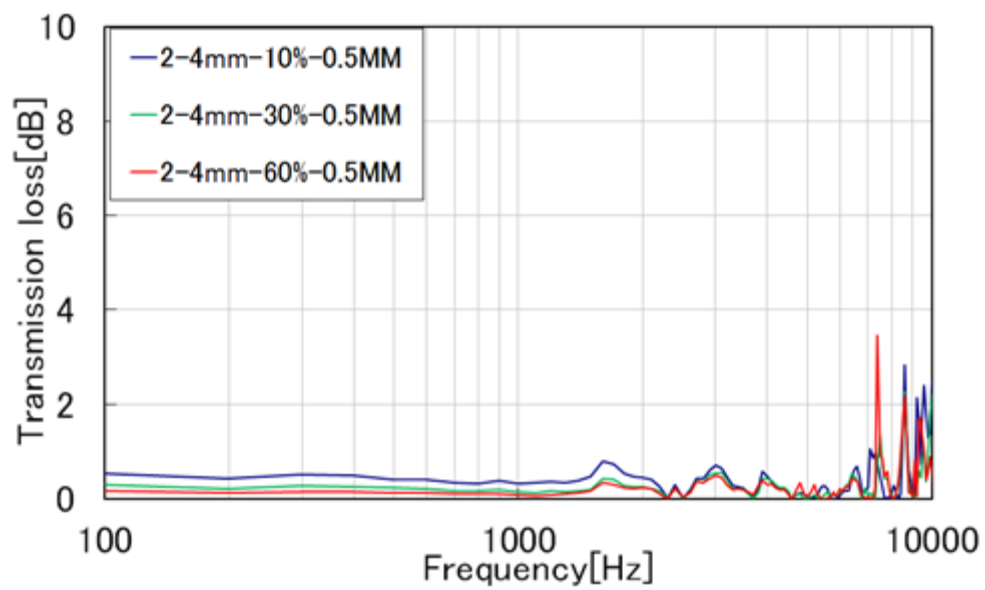
付録 1.22 減音量
(測定点 2、測定距離 2mm、板厚 1mm)



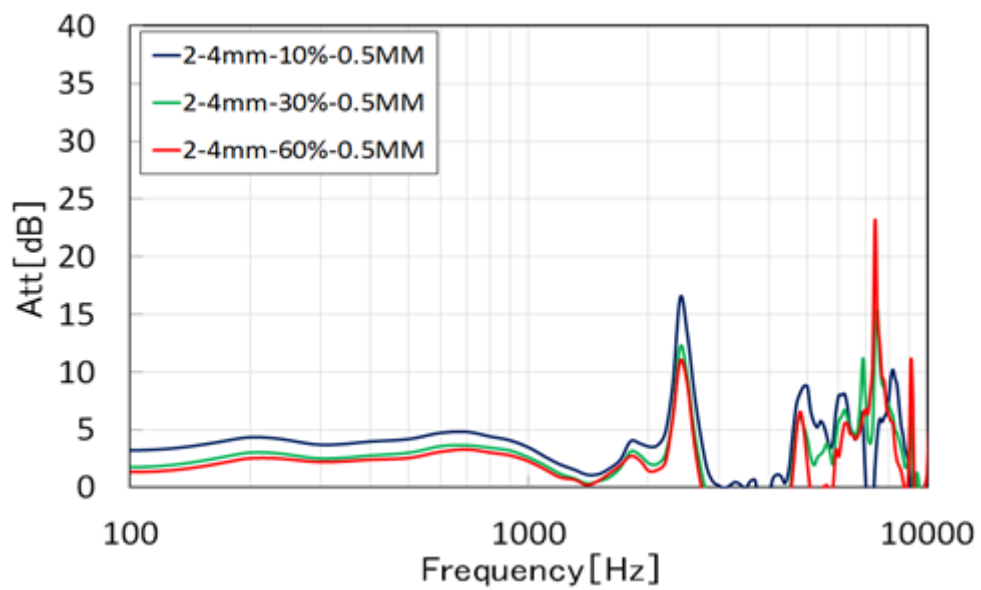
付録 1.23 透過損失
(測定点 2、測定距離 2mm、板厚 2mm)



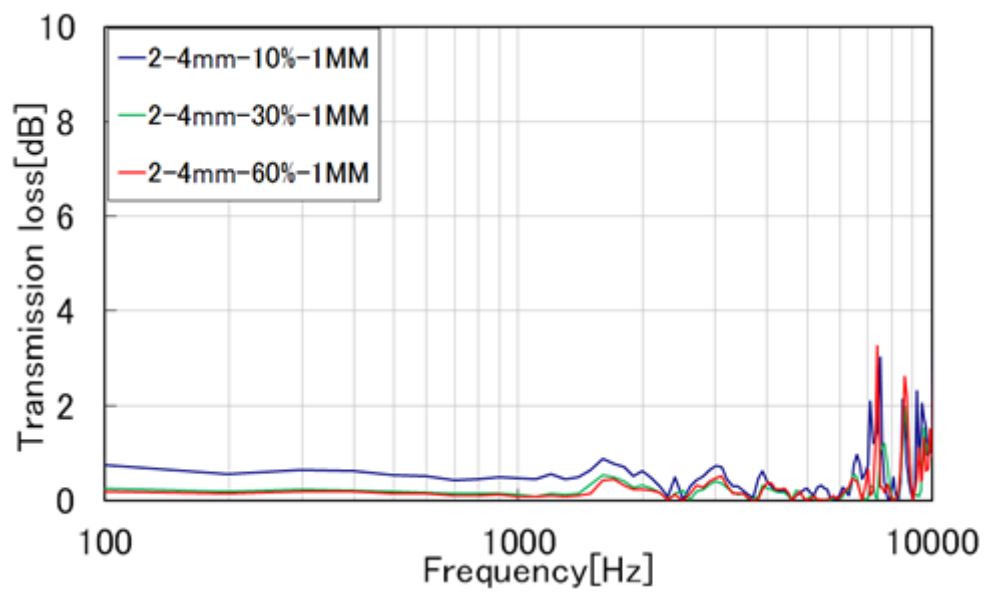
付録 1.24 減音量
(測定点 2、測定距離 2mm、板厚 2mm)



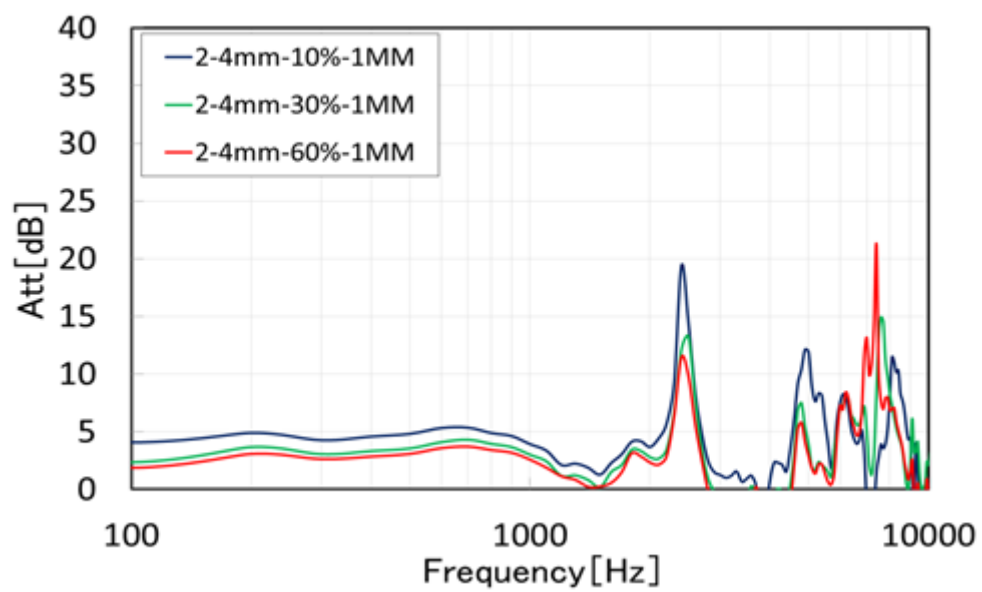
付録 1.25 透過損失
(測定点 2、測定距離 4mm、板厚 0.5mm)



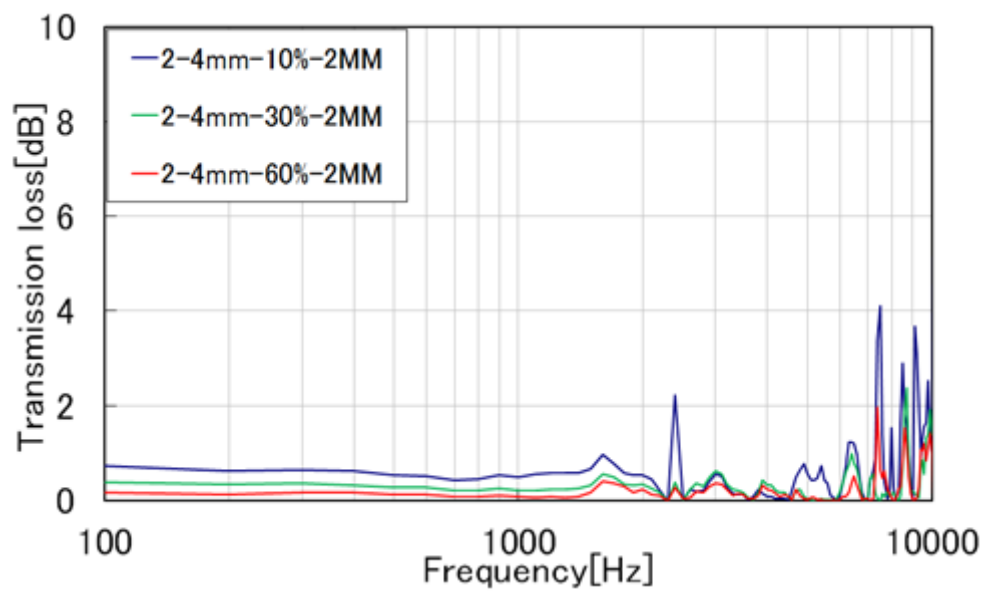
付録 1.26 減音量
(測定点 2、測定距離 4mm、板厚 0.5mm)



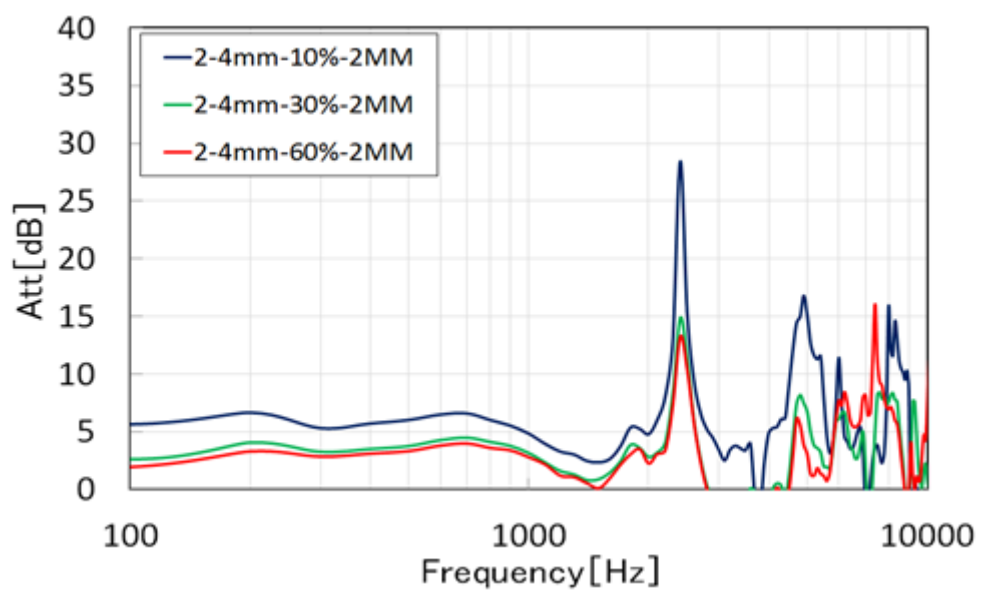
付録 1.27 透過損失
(測定点 2、測定距離 4mm、板厚 1mm)



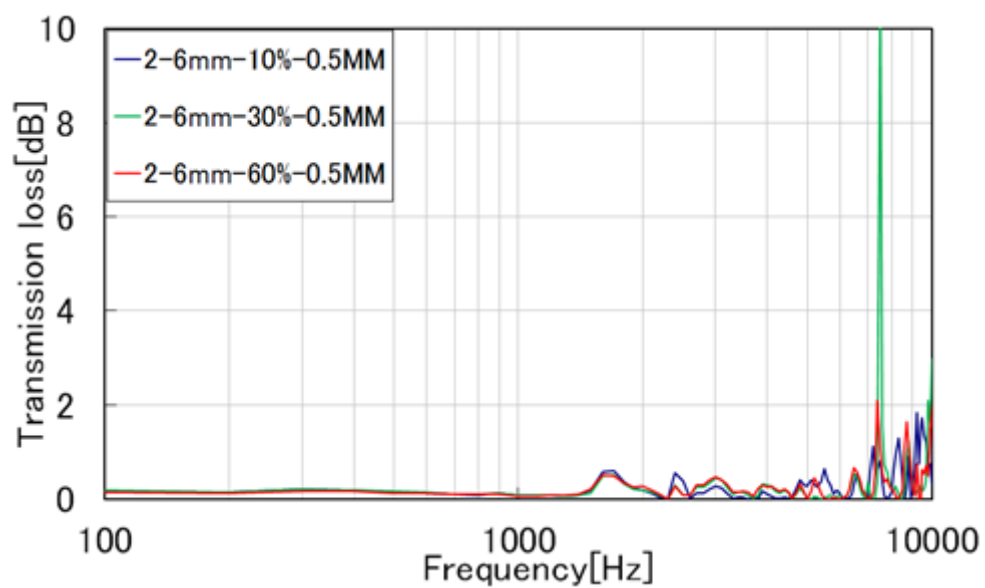
付録 1.28 減音量
(測定点 2、測定距離 4mm、板厚 1mm)



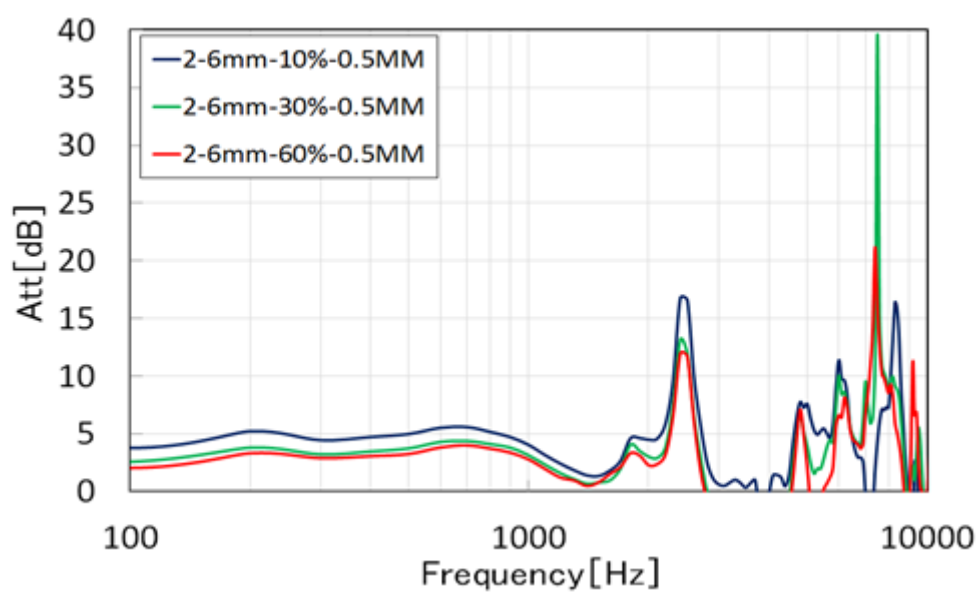
付録 1.29 透過損失
(測定点 2、測定距離 4mm、板厚 2mm)



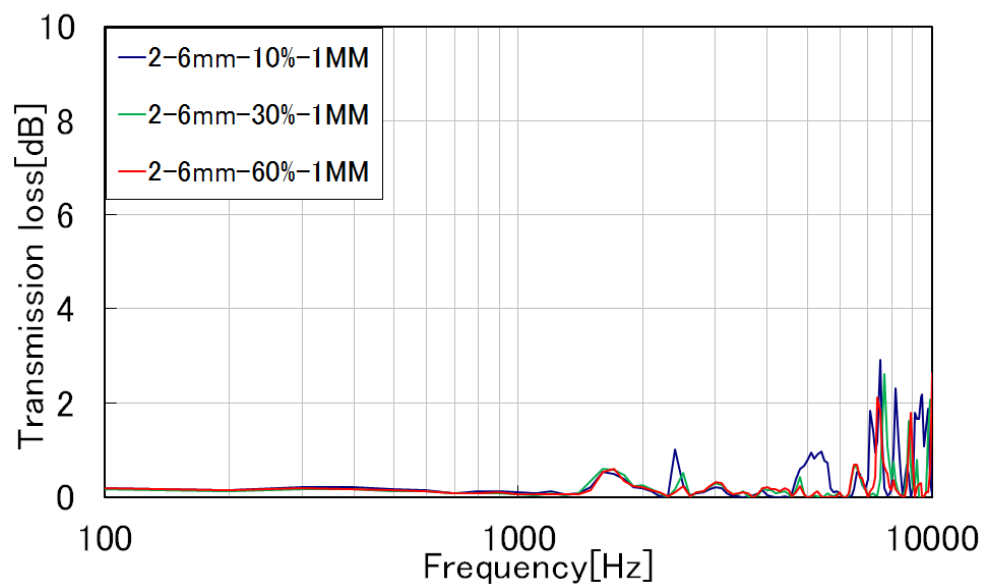
付録 1.30 減音量
(測定点 2、測定距離 4mm、板厚 2mm)



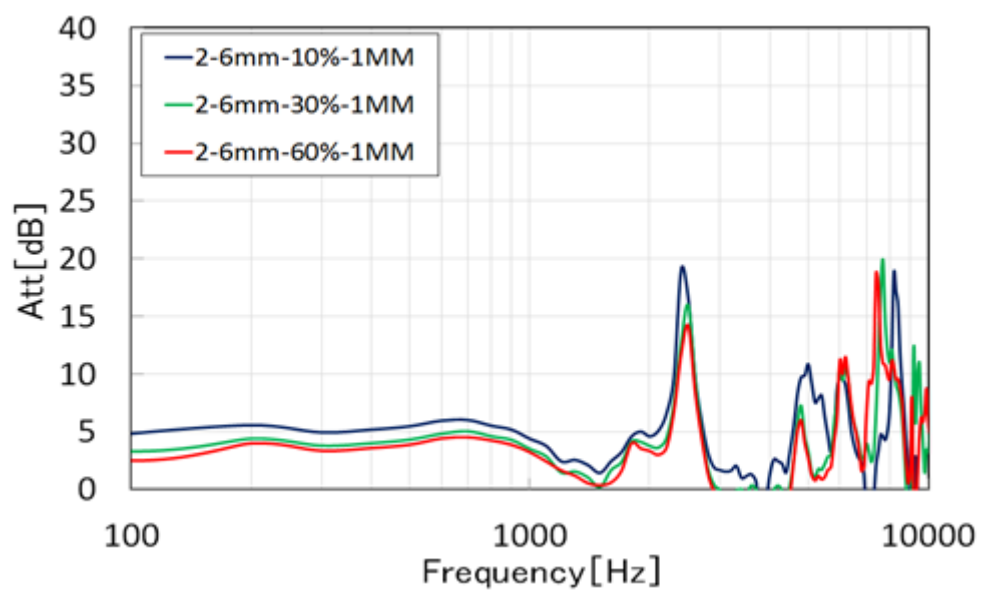
付録 1.31 透過損失
(測定点 2、測定距離 6mm、板厚 0.5mm)



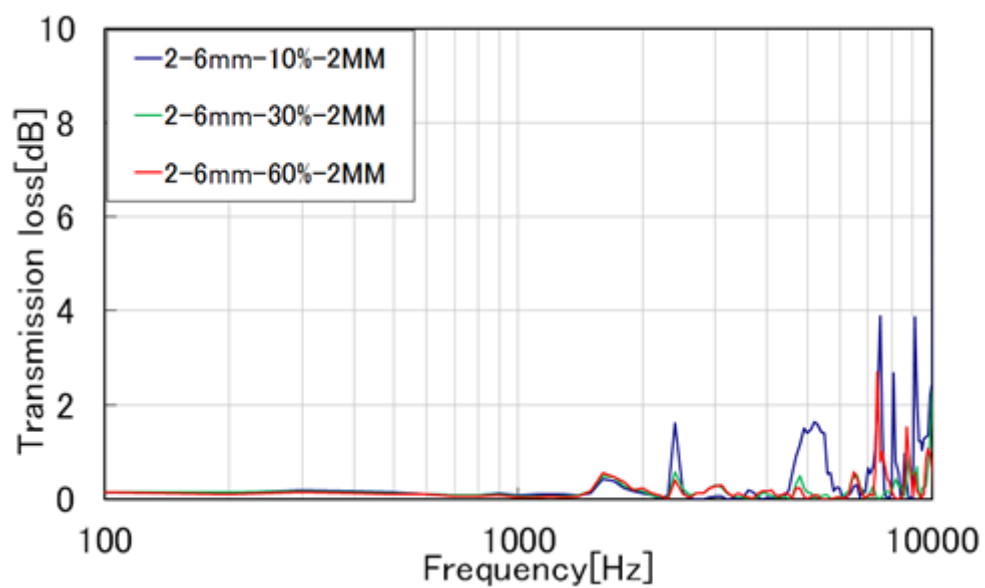
付録 1.32 減音量
(測定点 2、測定距離 6mm、板厚 0.5mm)



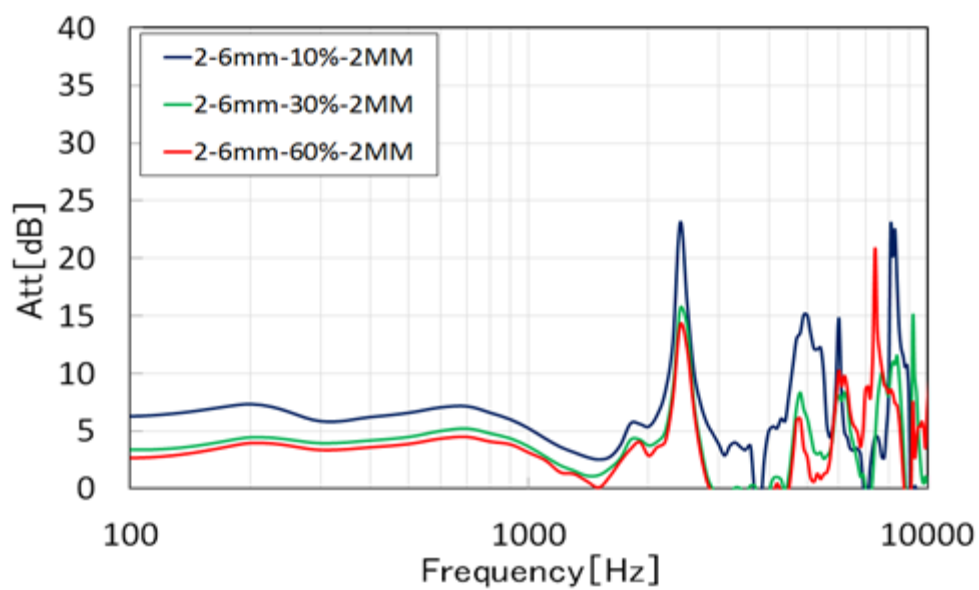
付録 1.33 透過損失
(測定点 2、測定距離 6mm、板厚 1mm)



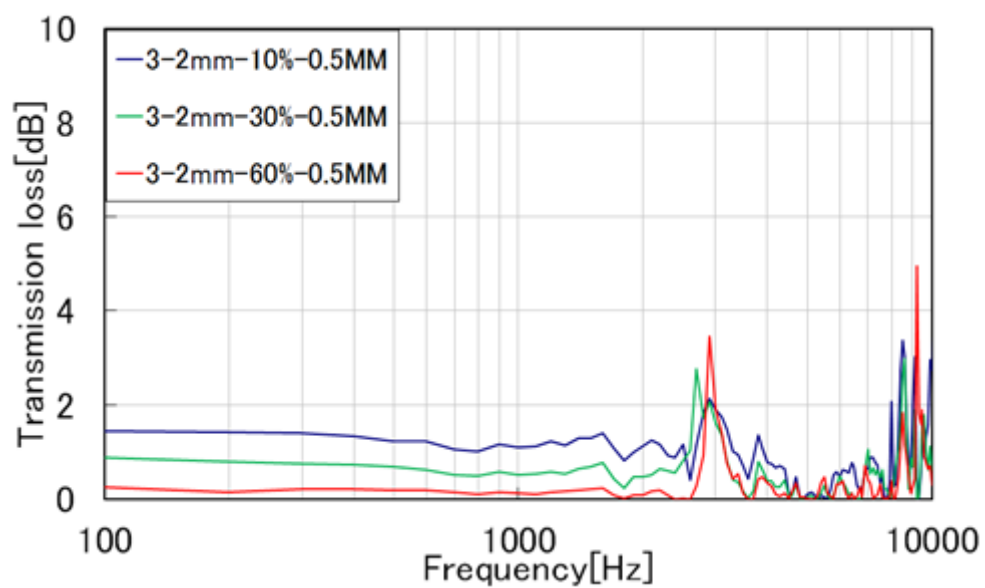
付録 1.34 減音量
(測定点 2、測定距離 6mm、板厚 1mm)



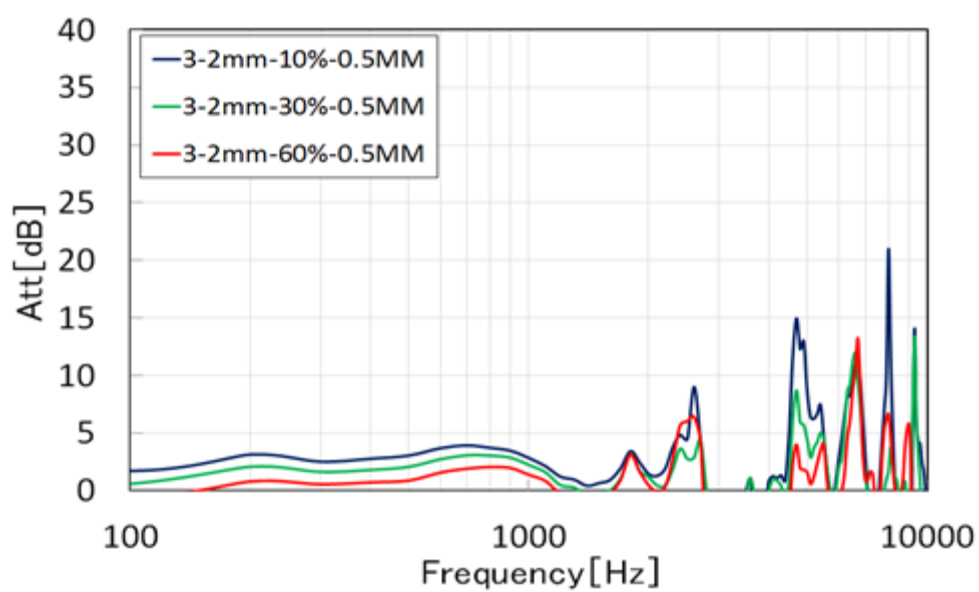
付録 1.35 透過損失
(測定点 2、測定距離 6mm、板厚 2mm)



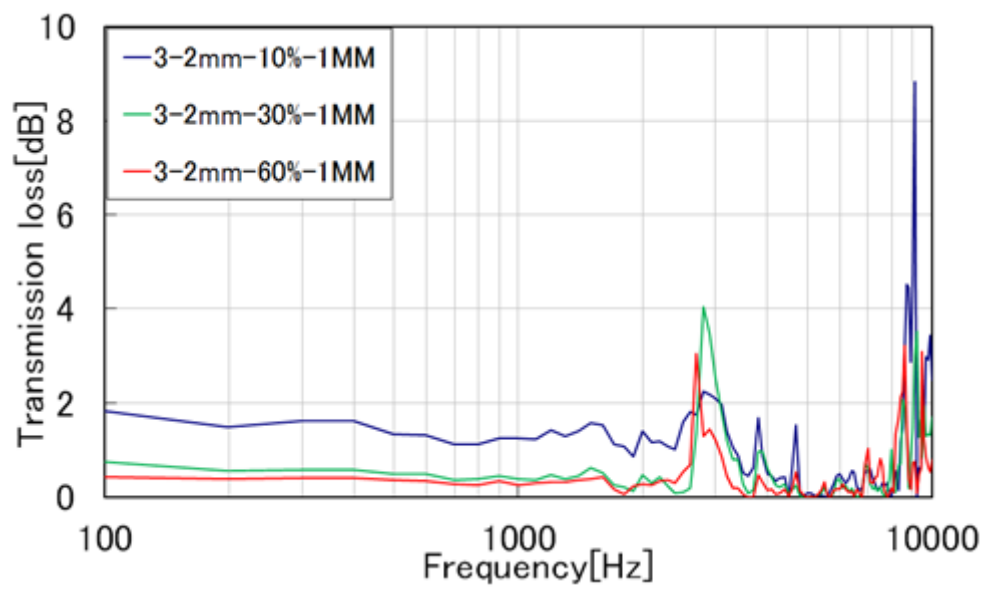
付録 1.36 減音量
(測定点 2、測定距離 6mm、板厚 2mm)



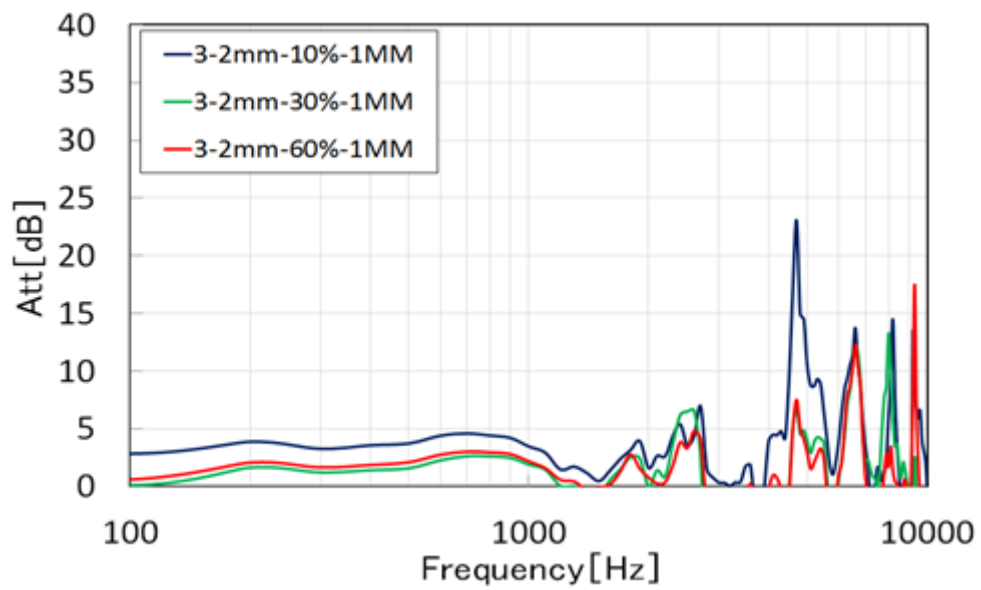
付録 1.37 透過損失
(測定点 3、測定距離 2mm、板厚 0.5mm)



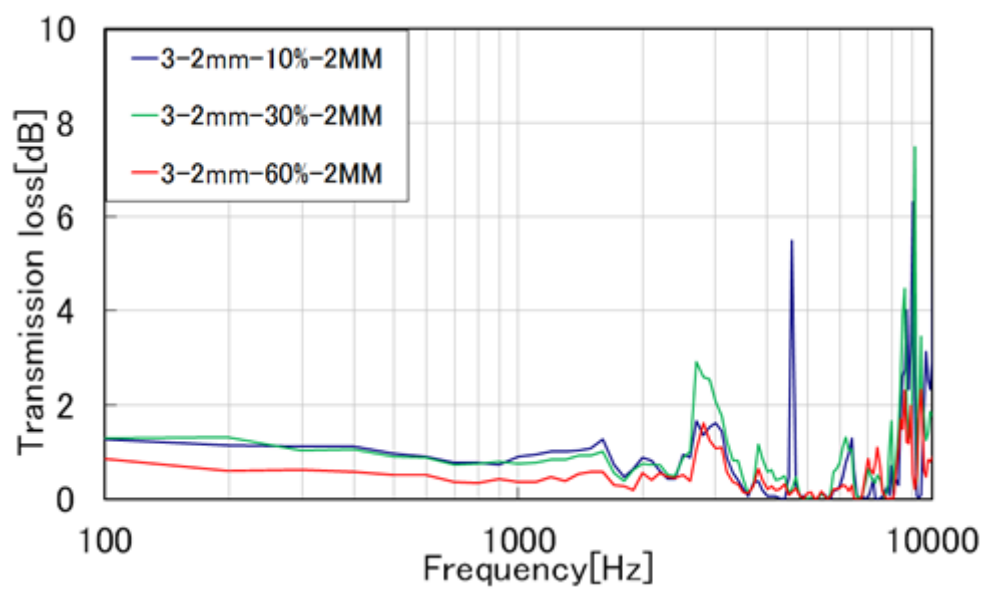
付録 1.38 減音量
(測定点 3、測定距離 2mm、板厚 0.5mm)



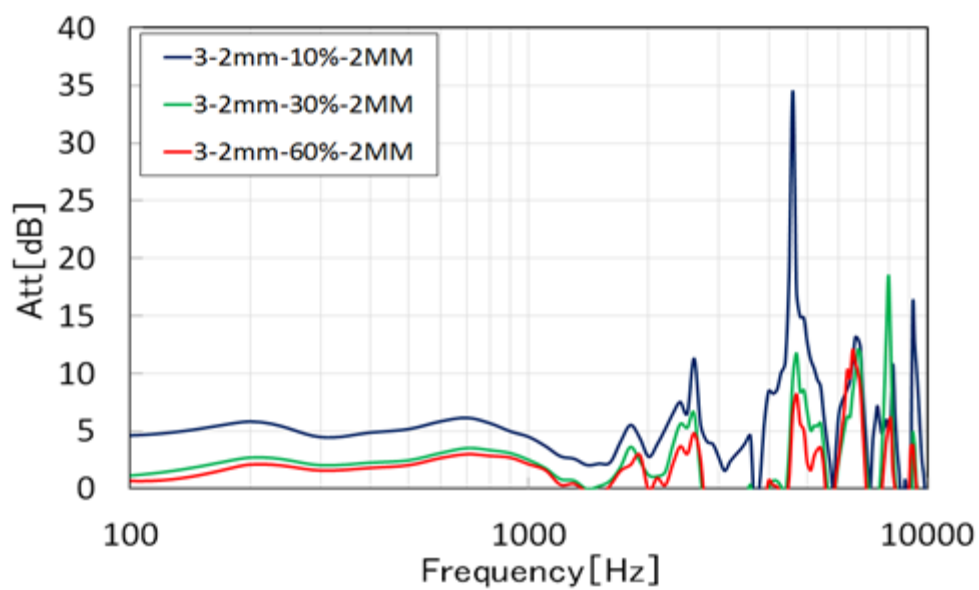
付録 1.39 透過損失
(測定点 3、測定距離 2mm、板厚 1mm)



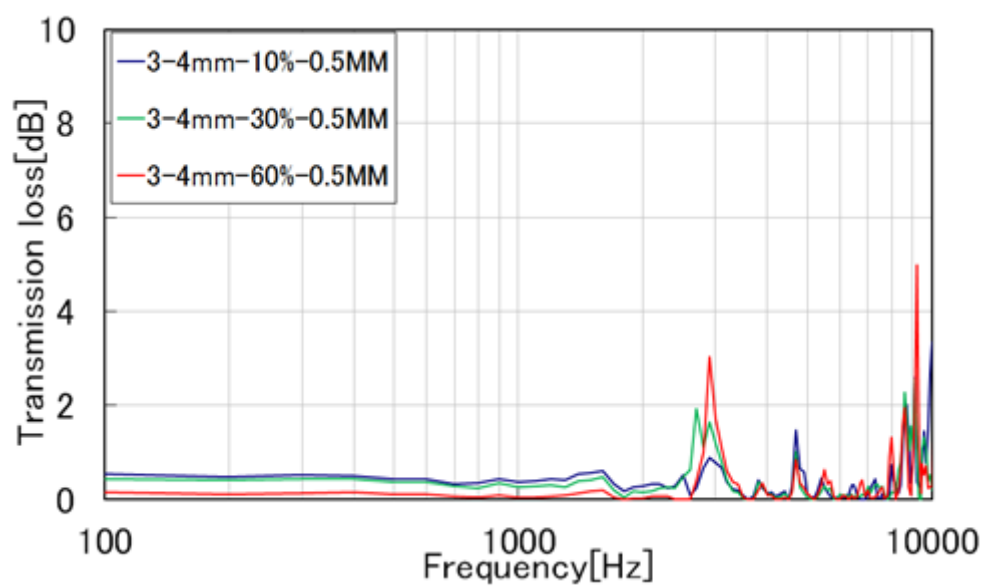
付録 1.40 減音量
(測定点 3、測定距離 2mm、板厚 1mm)



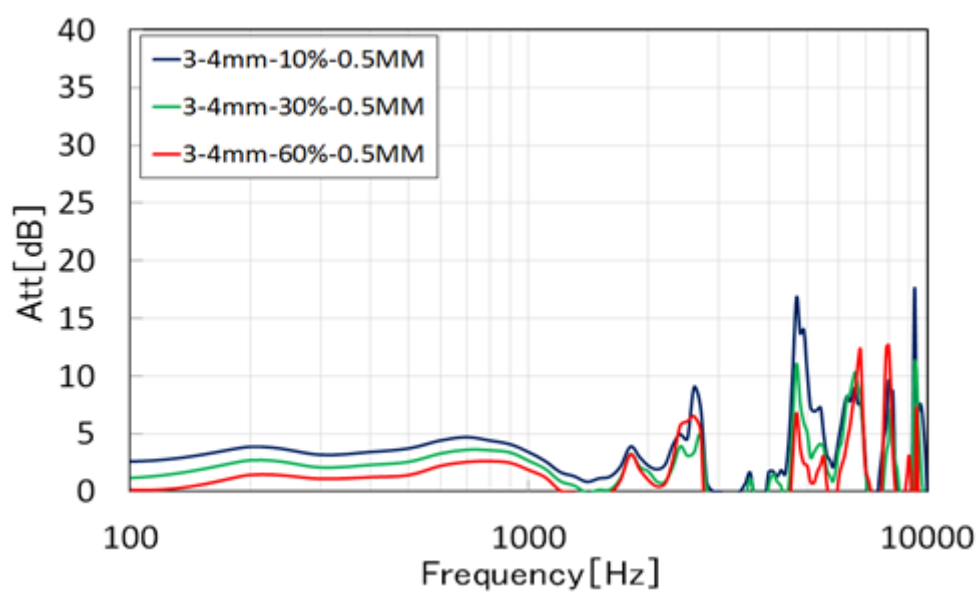
付録 1.41 透過損失
(測定点 3、測定距離 2mm、板厚 2mm)



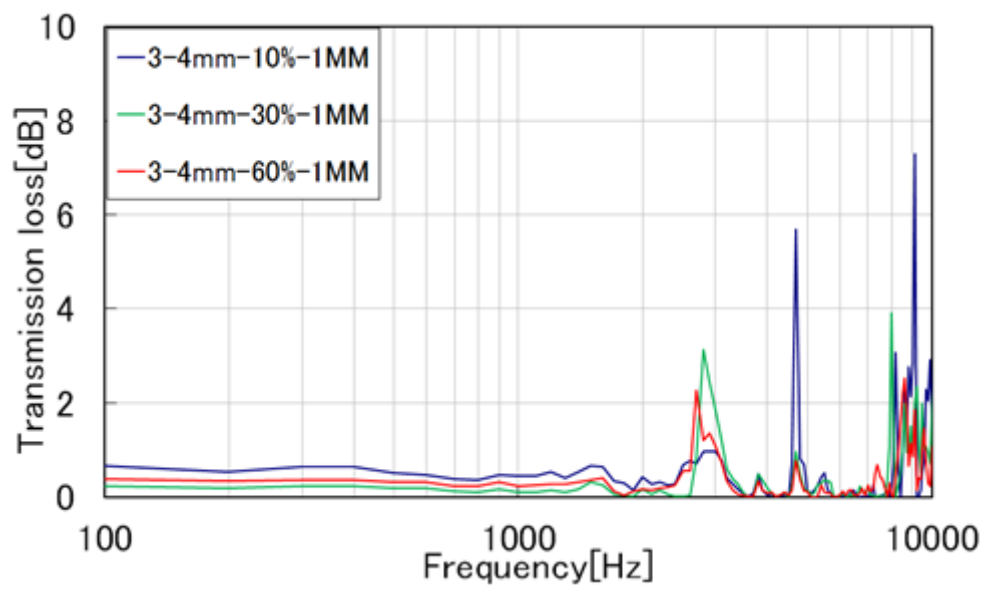
付録 1.42 減音量
(測定点 3、測定距離 2mm、板厚 2mm)



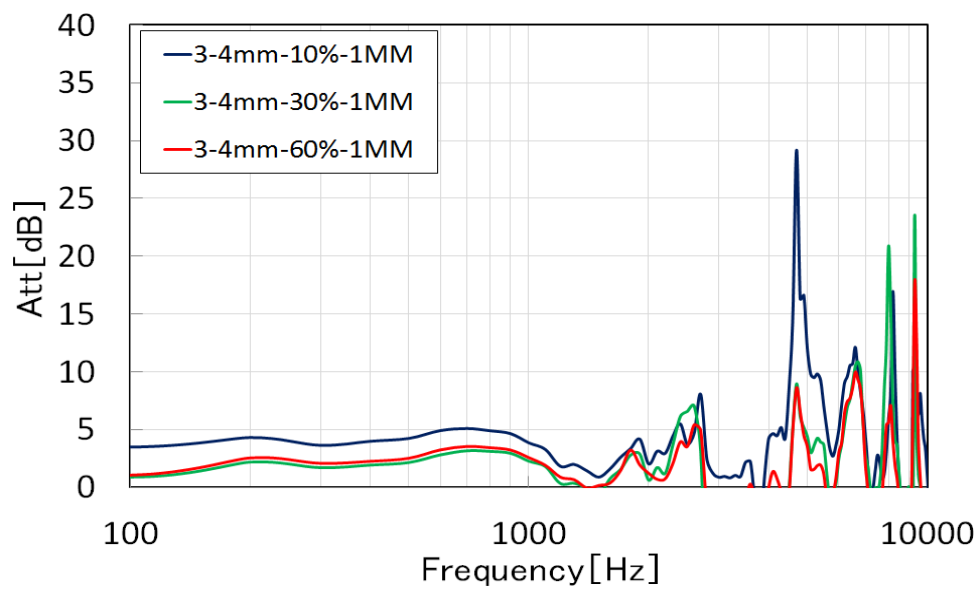
付録 1.43 透過損失
(測定点 3、測定距離 4mm、板厚 0.5mm)



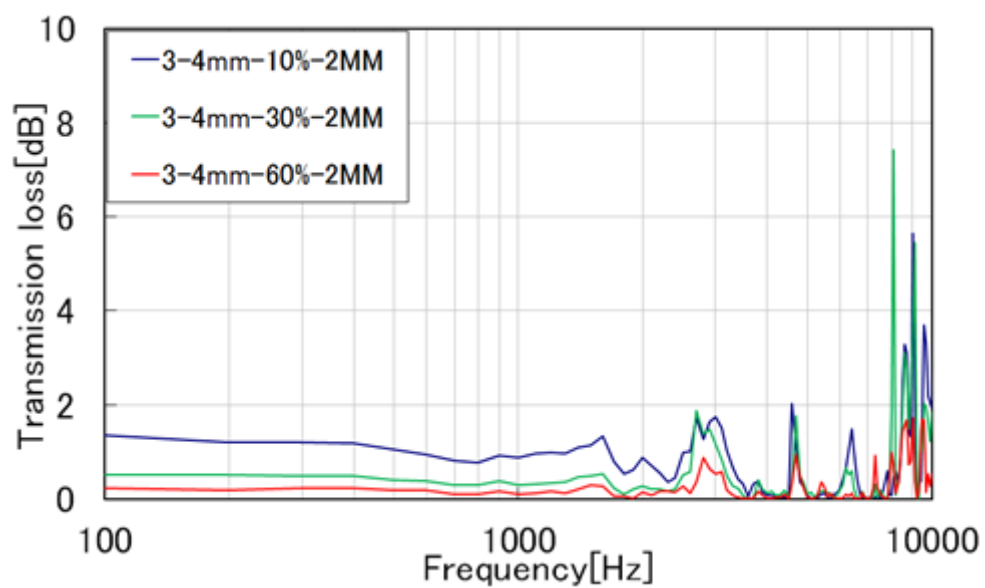
付録 1.44 減音量
(測定点 3、測定距離 4mm、板厚 0.5mm)



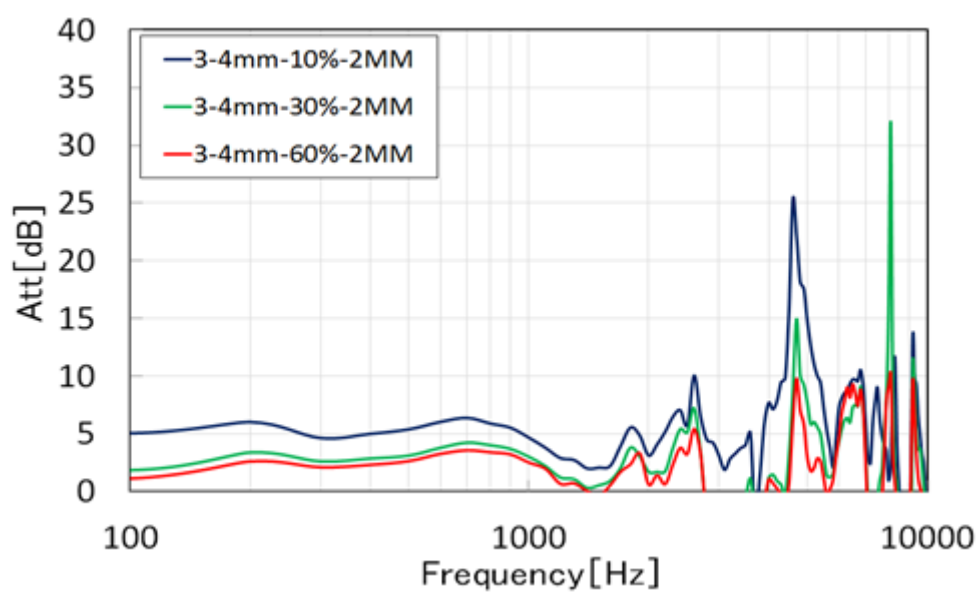
付録 1.45 透過損失
(測定点 3、測定距離 4mm、板厚 1mm)



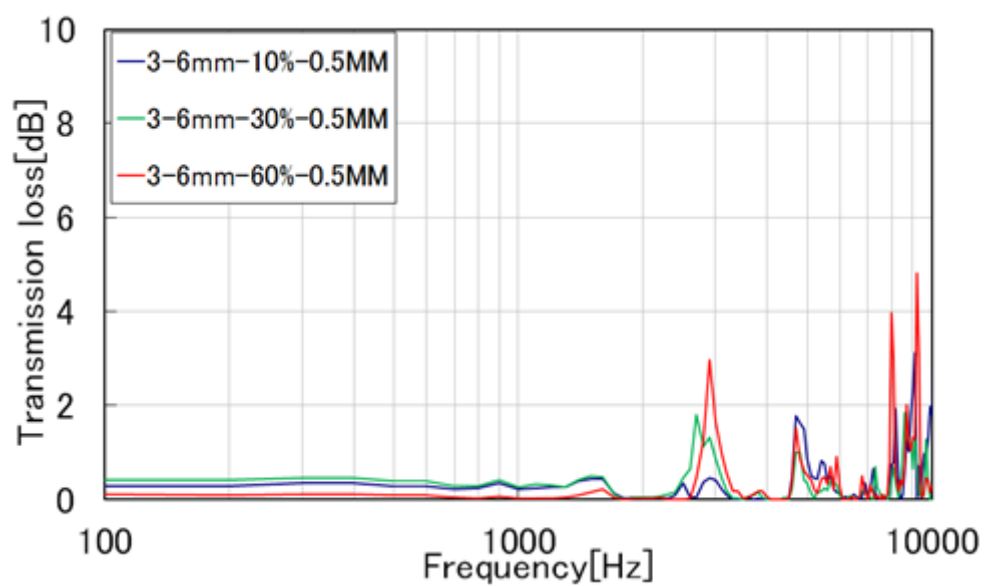
付録 1.46 減音量
(測定点 3、測定距離 4mm、板厚 1mm)



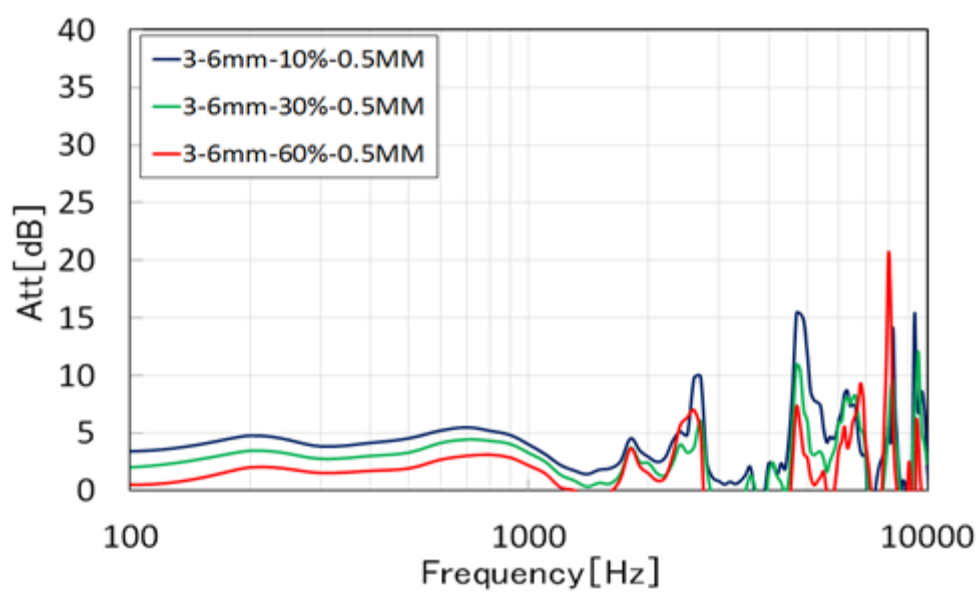
付録 1.47 透過損失
(測定点 3、測定距離 4mm、板厚 2mm)



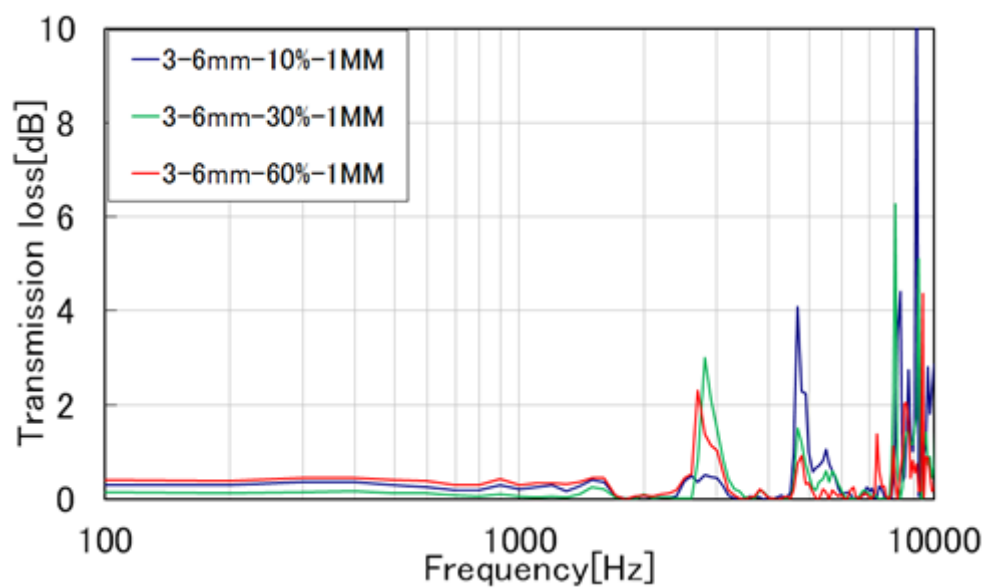
付録 1.48 減音量
(測定点 3、測定距離 4mm、板厚 2mm)



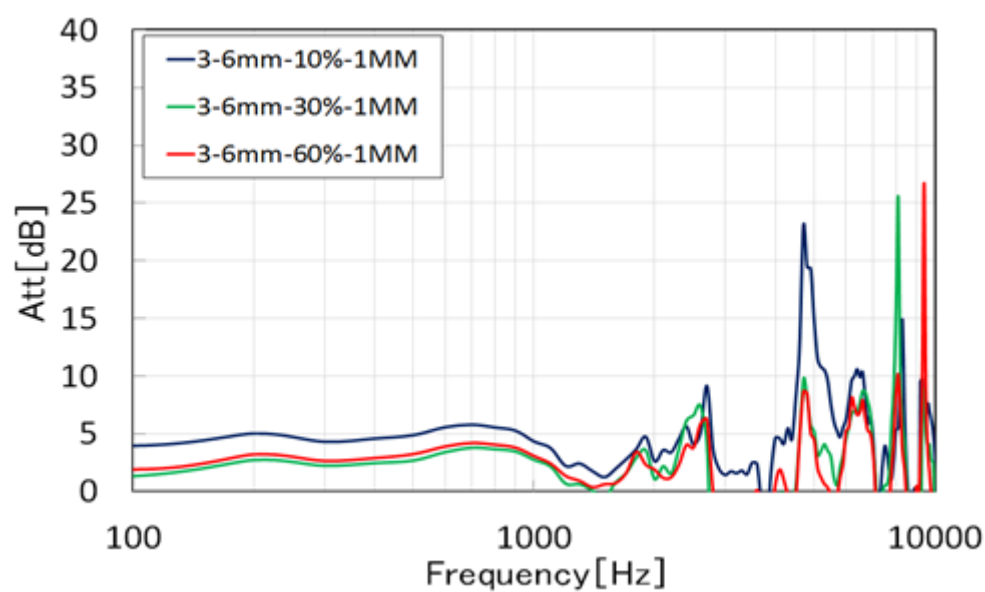
付録 1.49 透過損失
(測定点 3、測定距離 6mm、板厚 0.5mm)



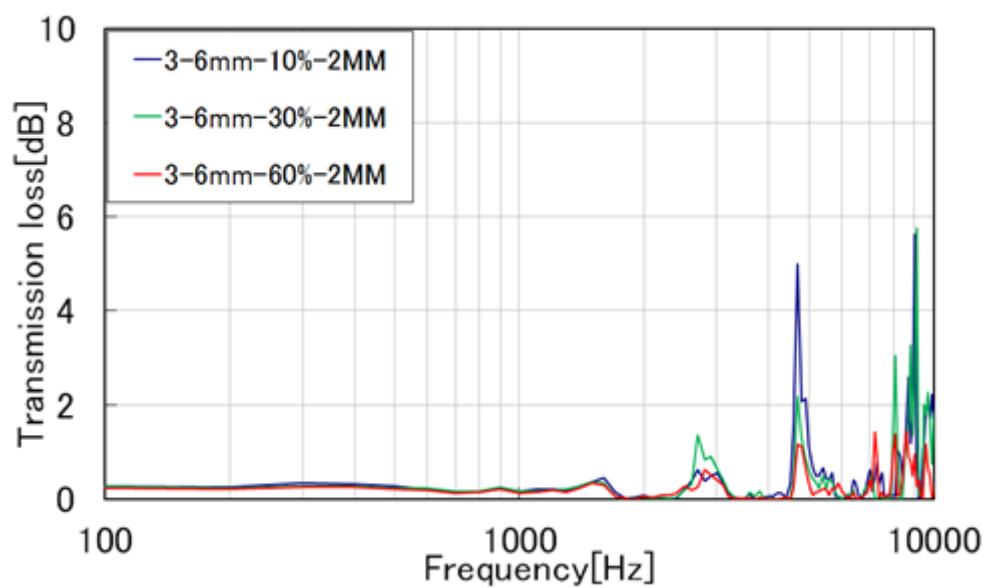
付録 1.50 減音量
(測定点 3、測定距離 6mm、板厚 0.5mm)



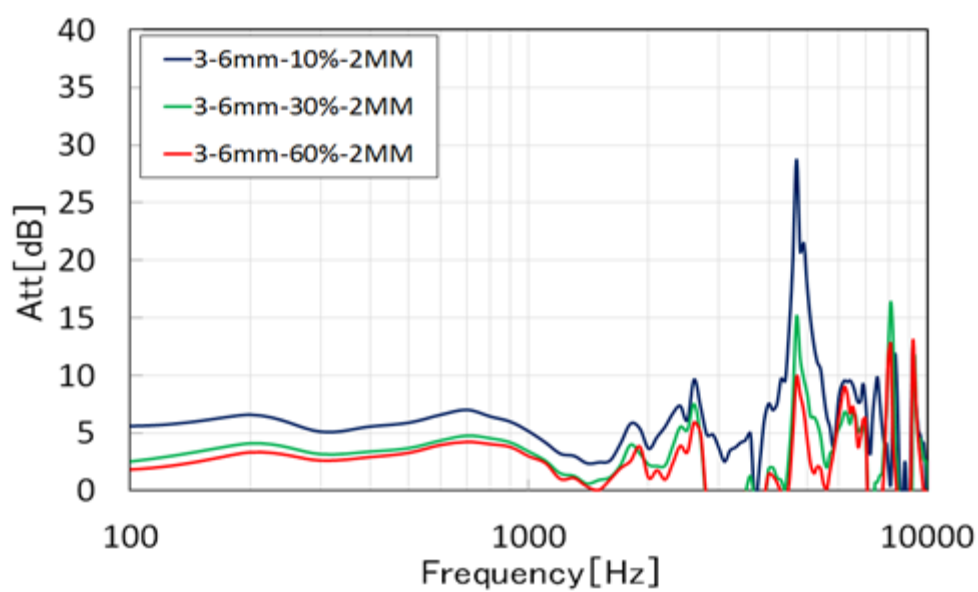
付録 1.51 透過損失
(測定点 3、測定距離 6mm、板厚 1mm)



付録 1.52 減音量
(測定点 3、測定距離 6mm、板厚 1mm)

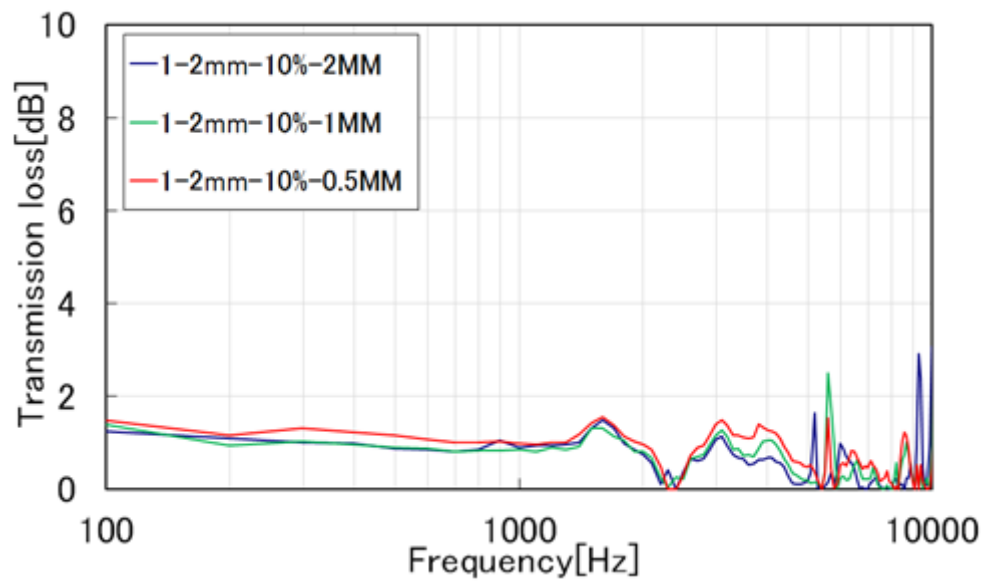


付録 1.53 透過損失
(測定点 3、測定距離 6mm、板厚 2mm)

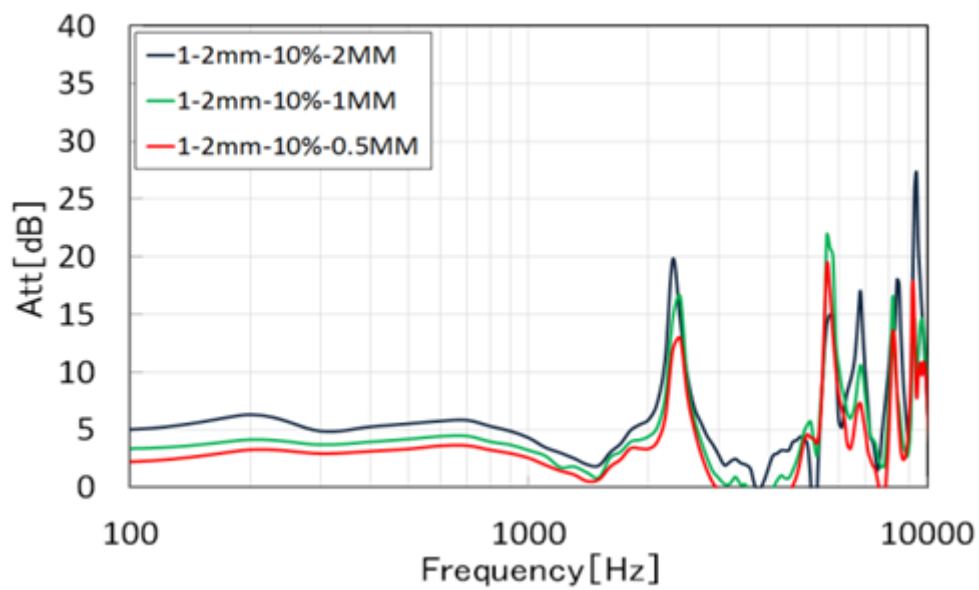


付録 1.54 減音量
(測定点 3、測定距離 6mm、板厚 2mm)

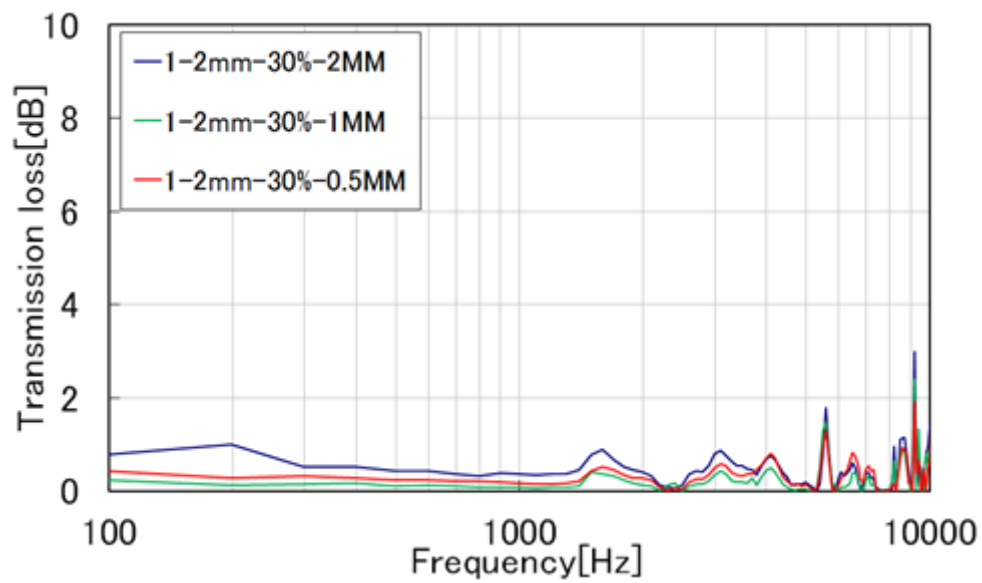
付録 2 透過損失及び減音量のグラフ（板厚比較）



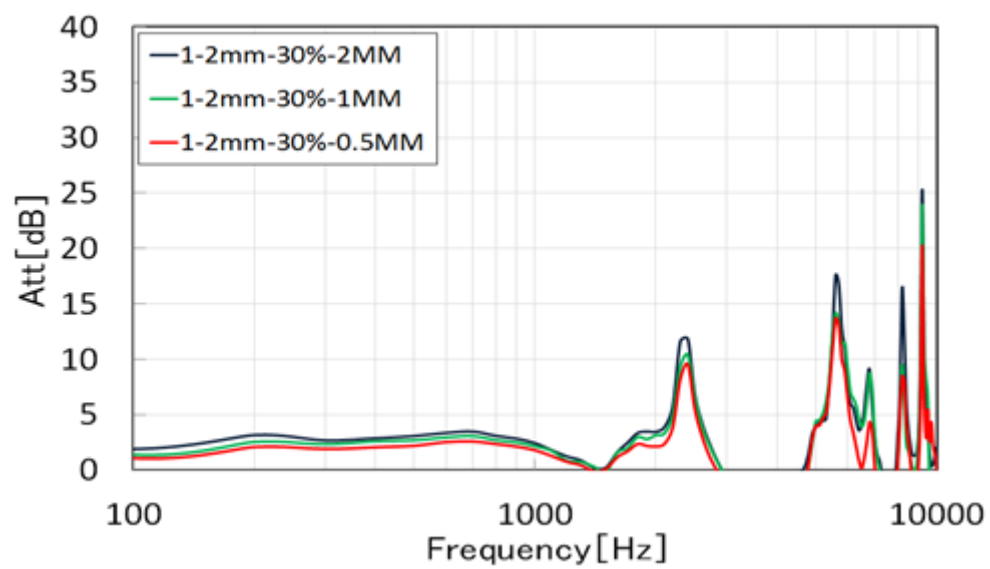
付録 2.1 透過損失
(測定点 1、測定距離 2mm、開口率 10%)



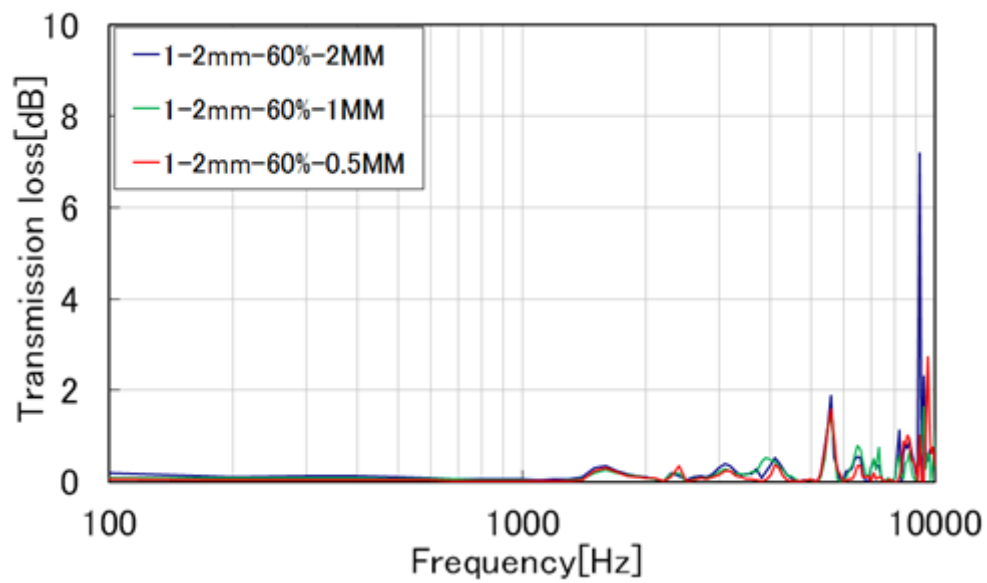
付録 2.2 減音量
(測定点 1、測定距離 2mm、開口率 10%)



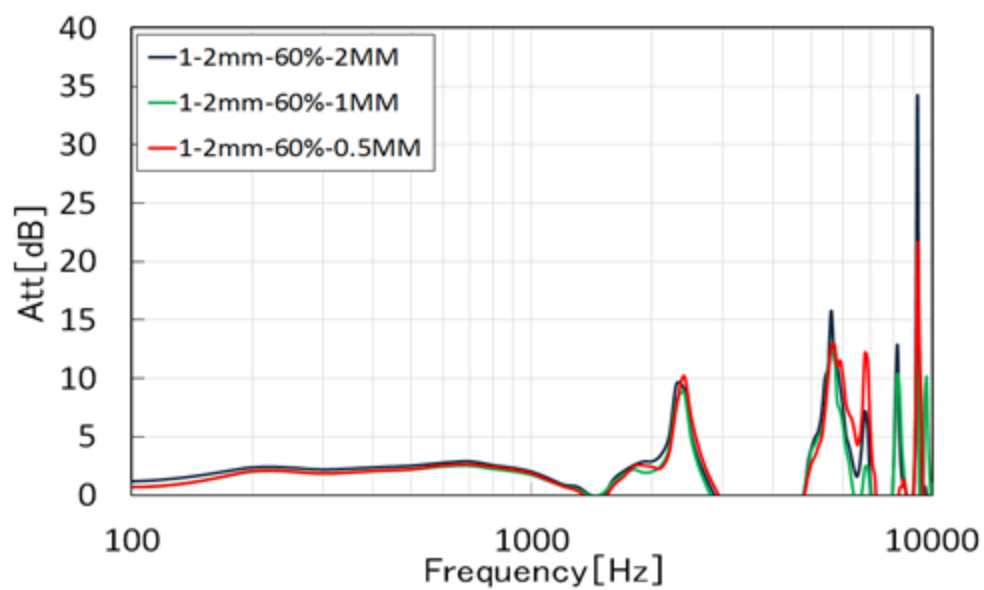
付録 2.3 透過損失
(測定点 1、測定距離 2mm、開口率 30%)



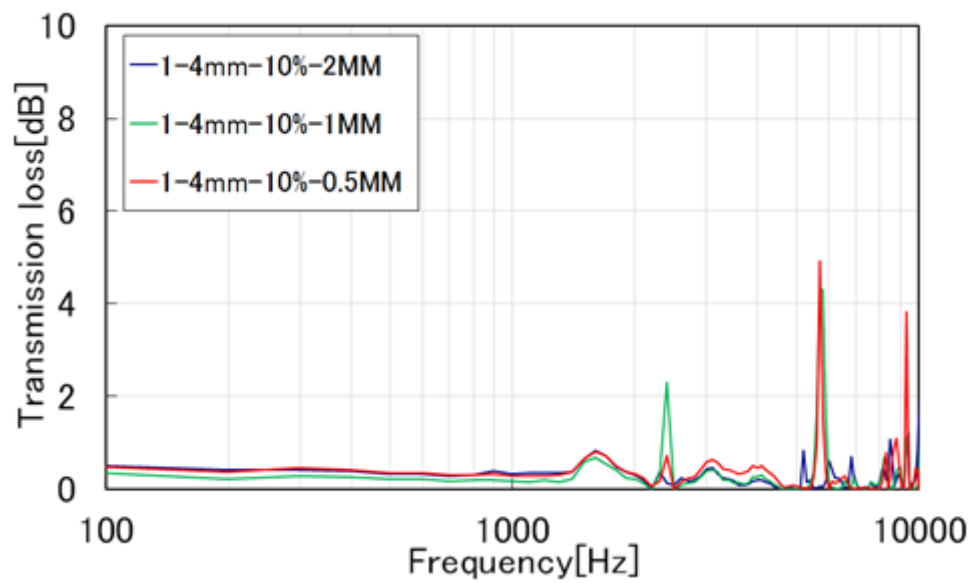
付録 2.4 減音量
(測定点 1、測定距離 2mm、開口率 30%)



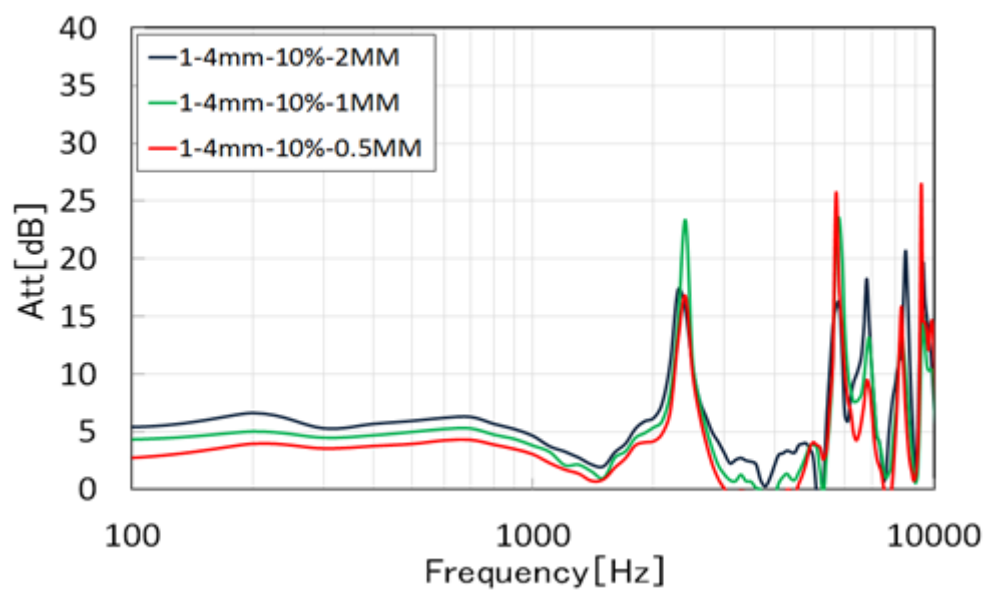
付録 2.5 透過損失
(測定点 1、測定距離 2mm、開口率 60%)



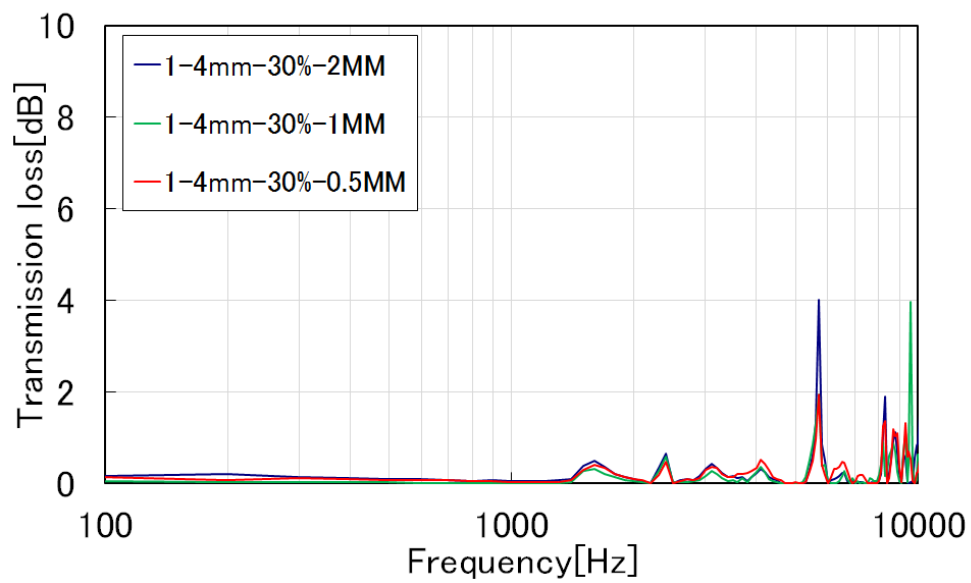
付録 2.6 減音量
(測定点 1、測定距離 2mm、開口率 60%)



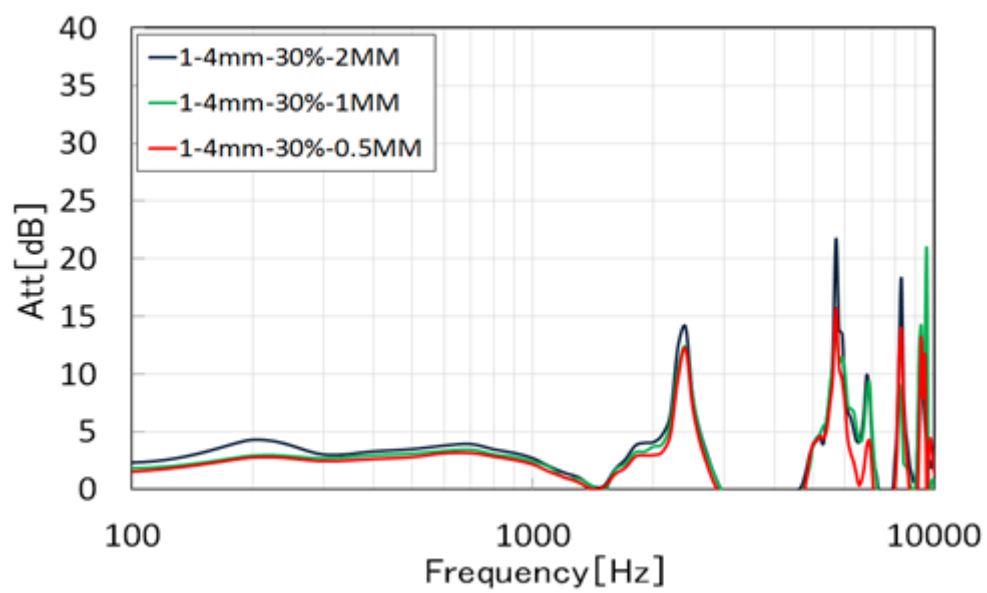
付録 2.7 透過損失
(測定点 1、測定距離 4mm、開口率 10%)



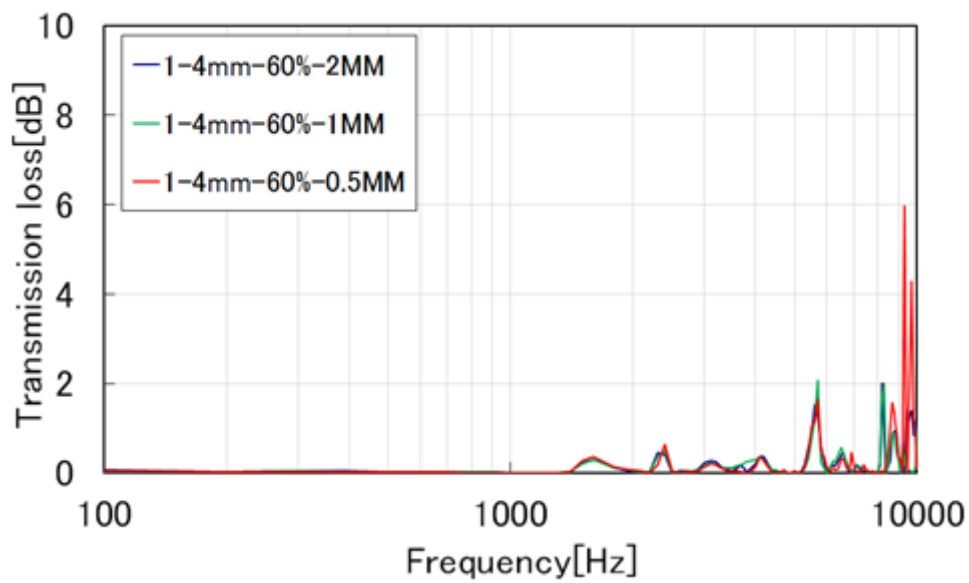
付録 2.8 減音量
(測定点 1、測定距離 4mm、開口率 10%)



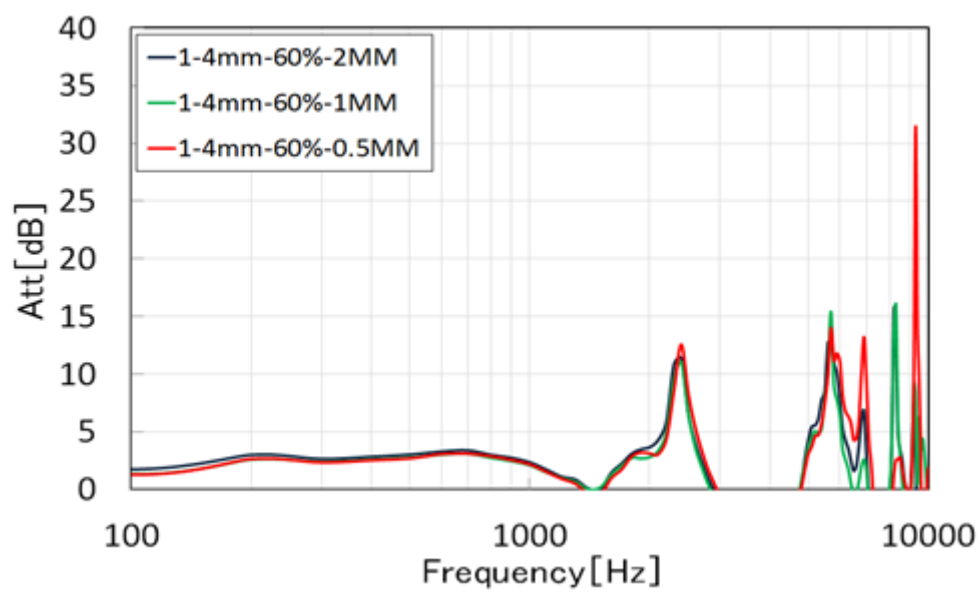
付録 2.9 透過損失
(測定点 1、測定距離 4mm、開口率 30%)



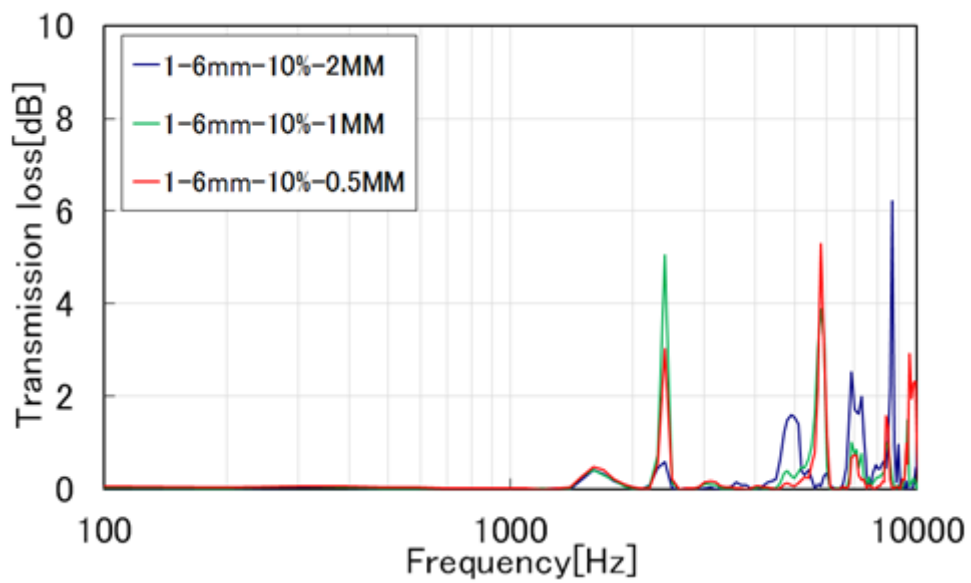
付録 2.10 減音量
(測定点 1、測定距離 4mm、開口率 30%)



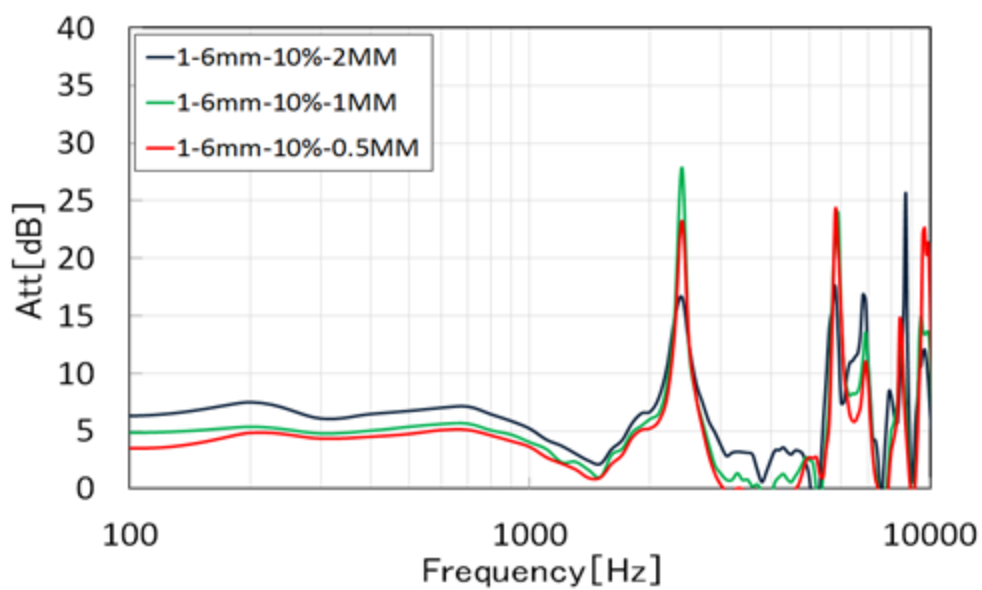
付録 2.11 透過損失
(測定点 1、測定距離 4mm、開口率 60%)



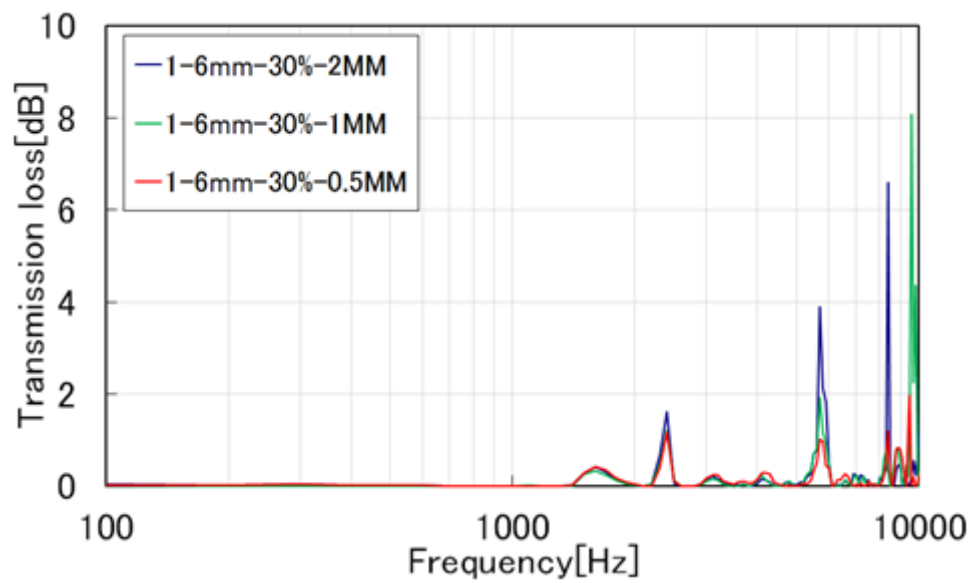
付録 2.12 減音量
(測定点 1、測定距離 4mm、開口率 60%)



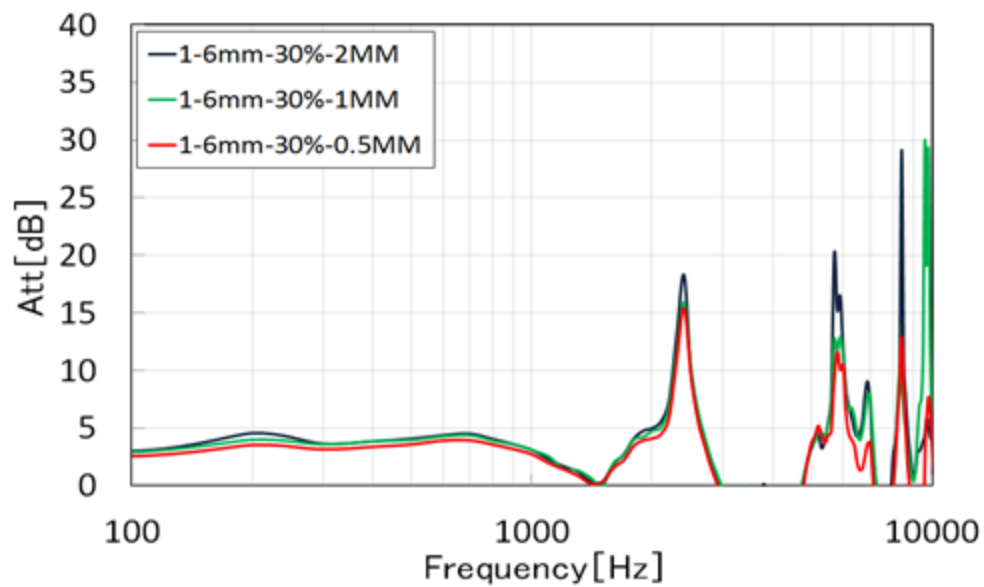
付録 2.13 透過損失
(測定点 1、測定距離 6mm、開口率 10%)



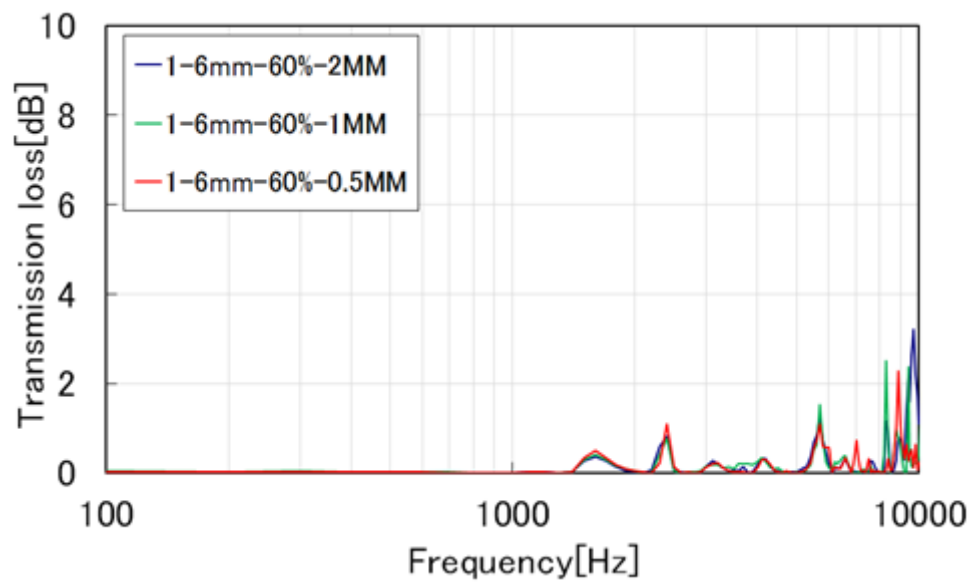
付録 2.14 減音量
(測定点 1、測定距離 6mm、開口率 10%)



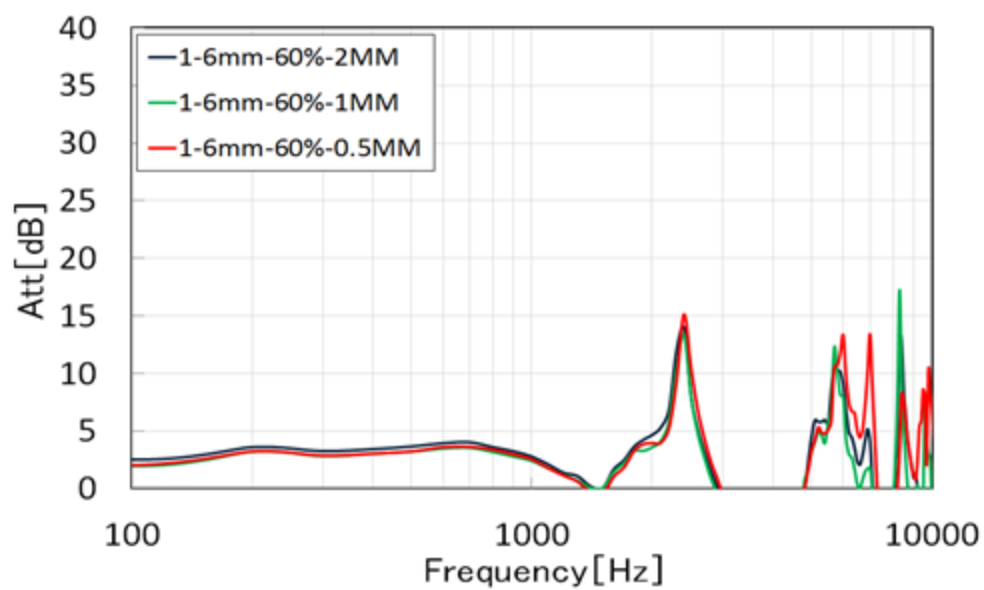
付録 2.15 透過損失
(測定点 1、測定距離 6mm、開口率 30%)



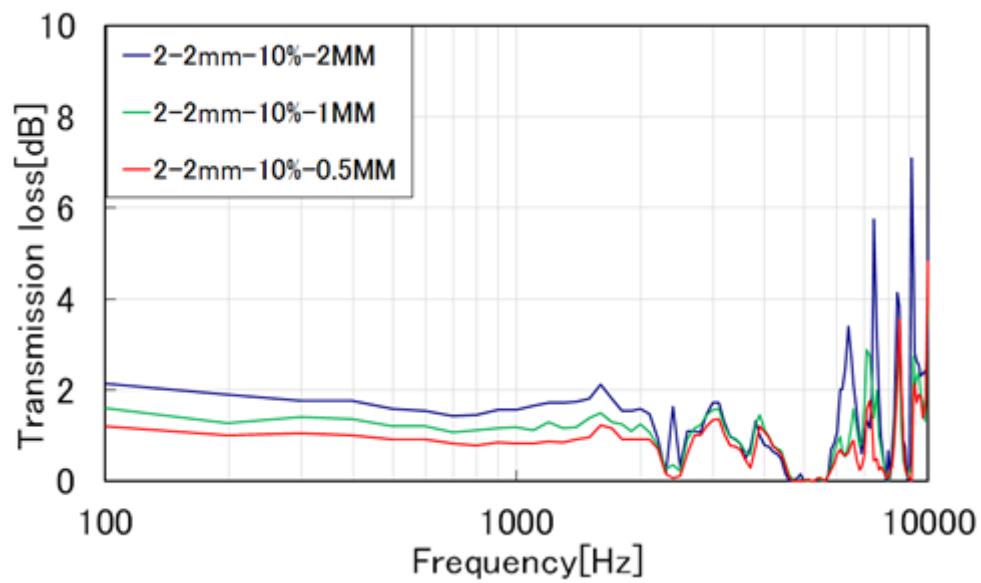
付録 2.16 減音量
(測定点 1、測定距離 6mm、開口率 30%)



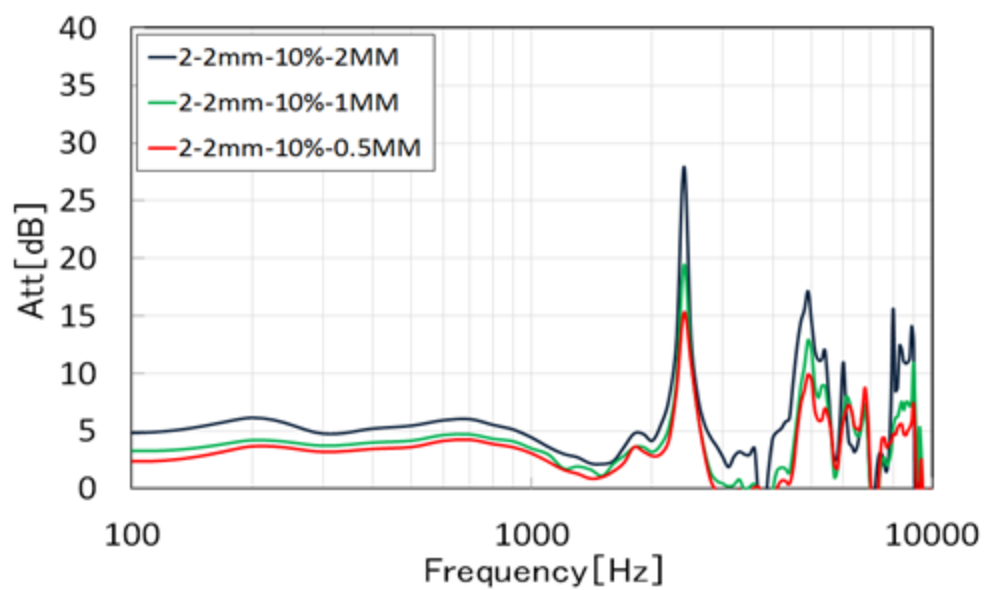
付録 2.17 透過損失
(測定点 1、測定距離 6mm、開口率 60%)



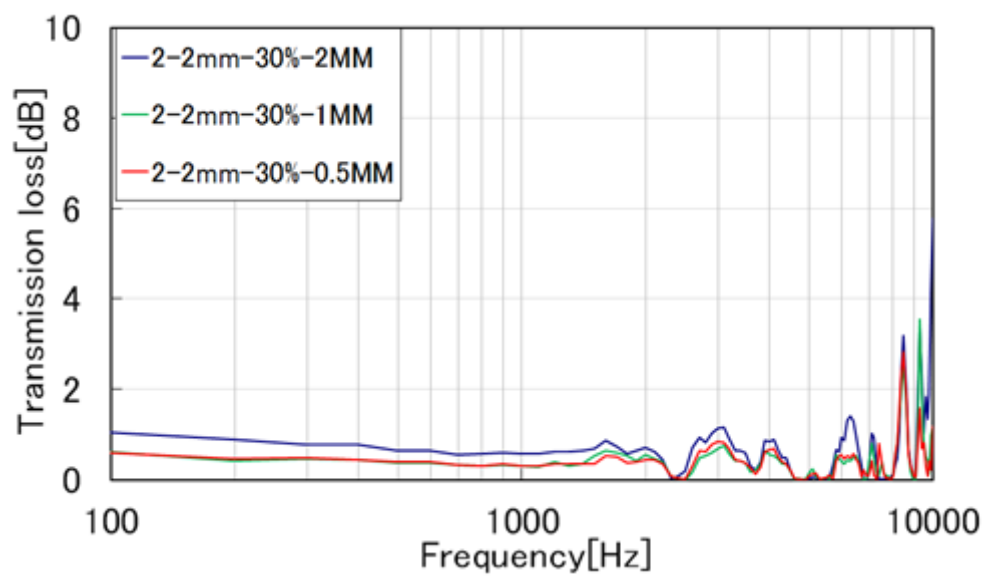
付録 2.18 減音量
(測定点 1、測定距離 6mm、開口率 60%)



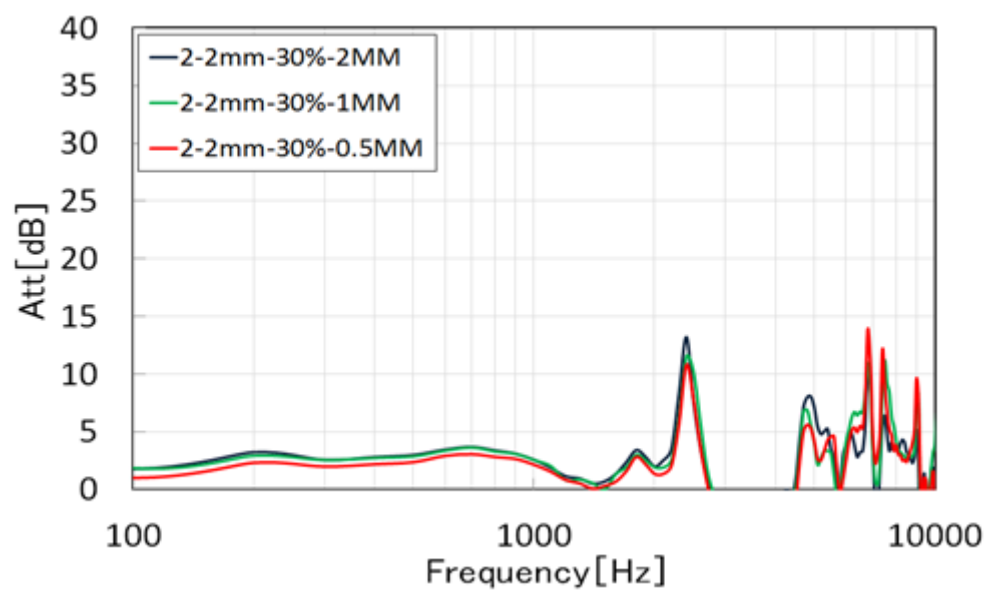
付録 2.19 透過損失
(測定点 2、測定距離 2mm、開口率 10%)



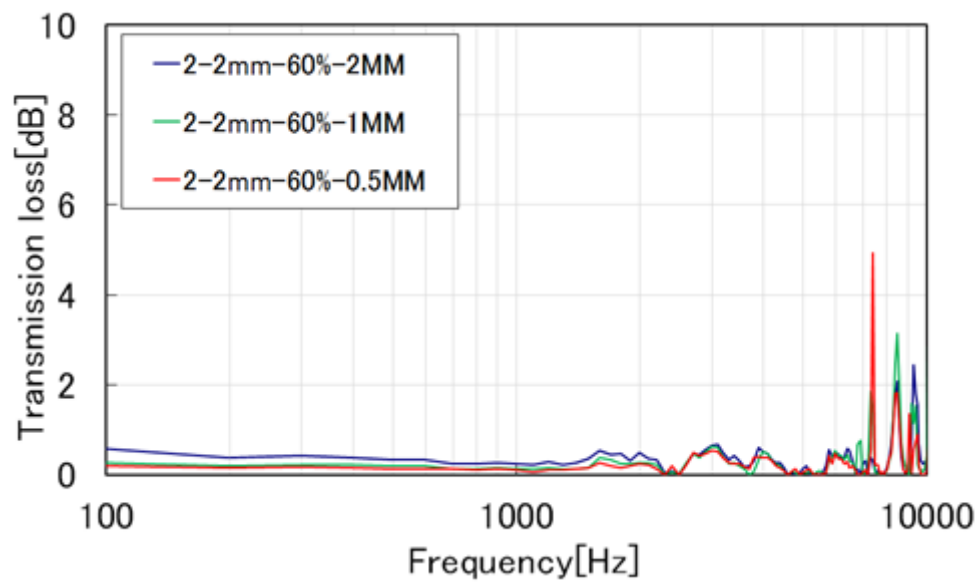
付録 2.20 減音量
(測定点 2、測定距離 2mm、開口率 10%)



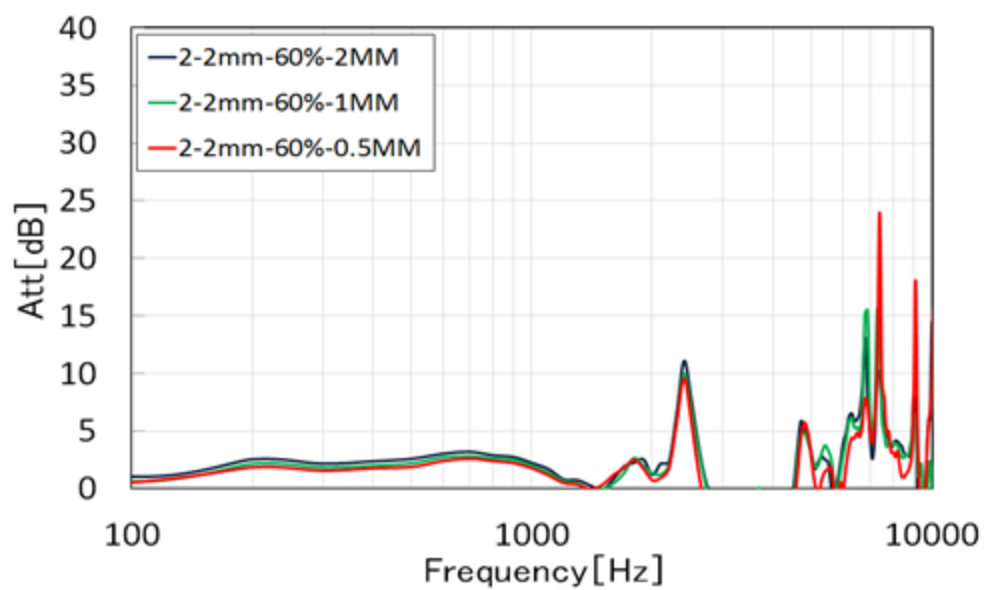
付録 2.21 透過損失
(測定点 2、測定距離 2mm、開口率 30%)



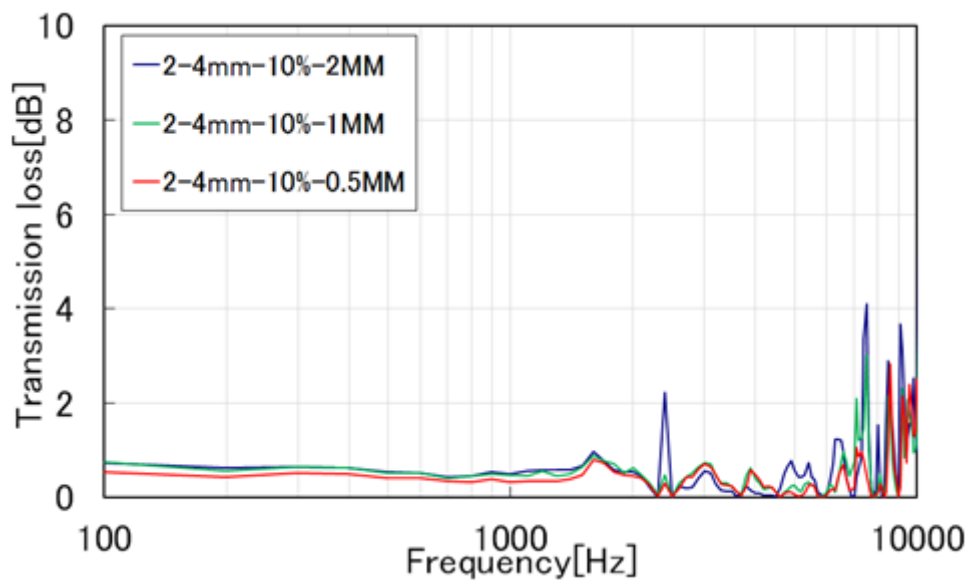
付録 2.22 減音量
(測定点 2、測定距離 2mm、開口率 30%)



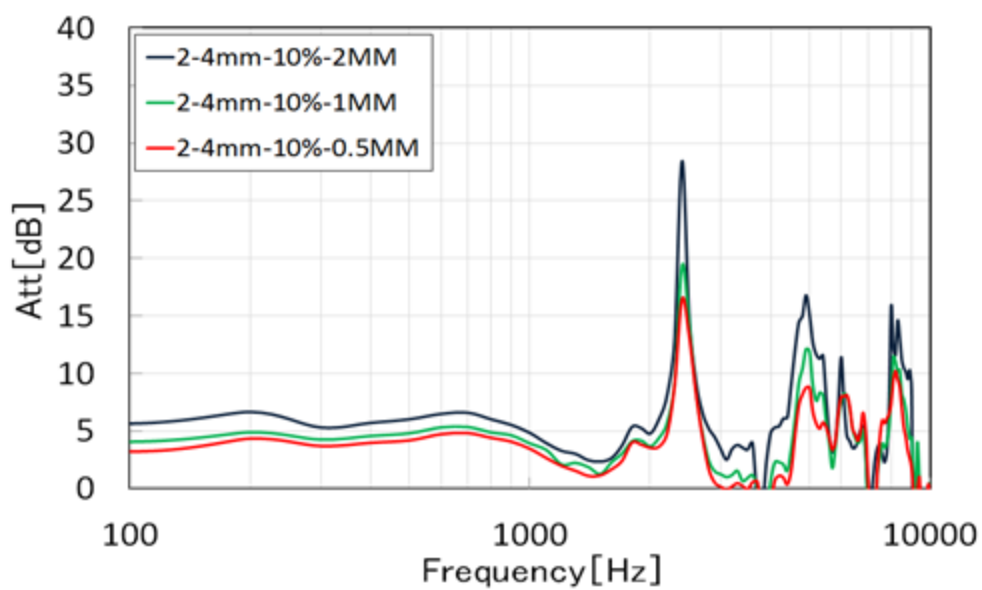
付録 2.23 透過損失
(測定点 2、測定距離 2mm、開口率 60%)



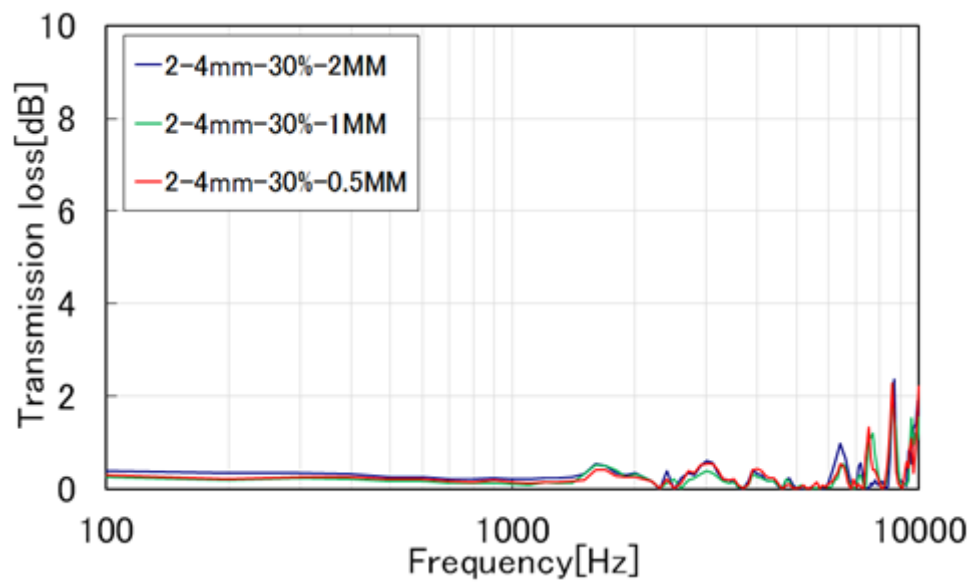
付録 2.24 減音量
(測定点 2、測定距離 2mm、開口 60%)



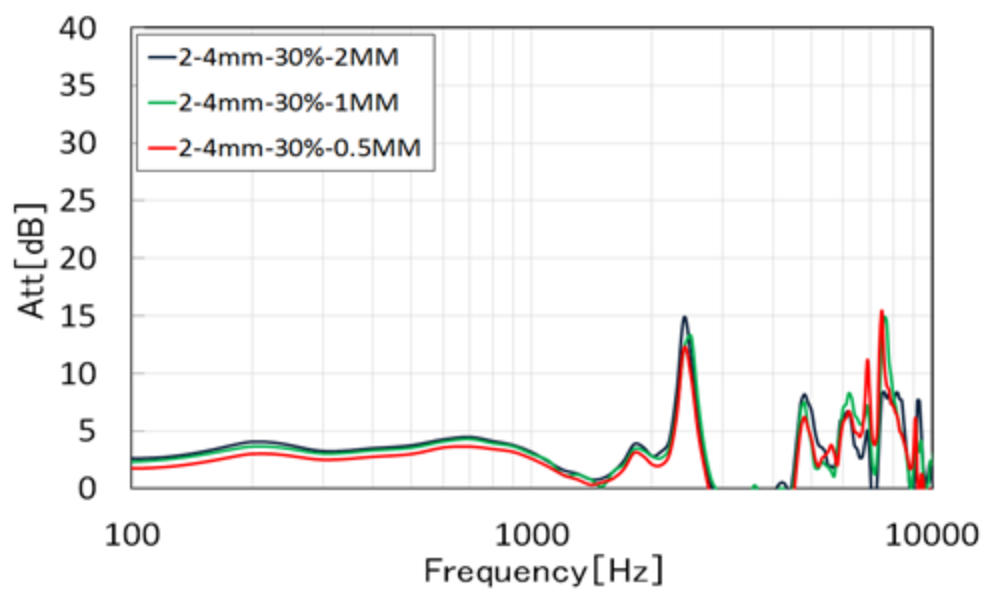
付録 2.25 透過損失
(測定点 2、測定距離 4mm、開口率 10%)



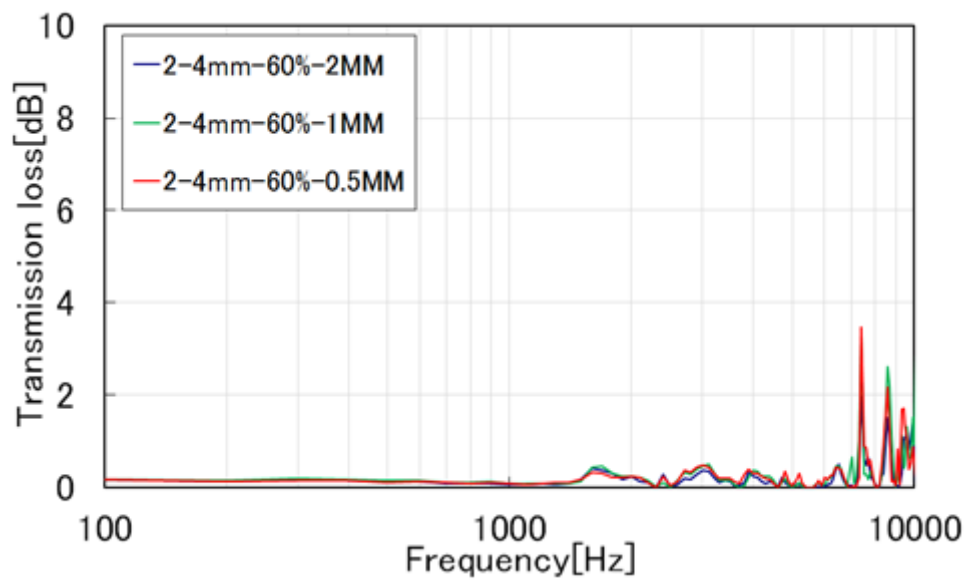
付録 2.26 減音量
(測定点 2、測定距離 4mm、開口 10%)



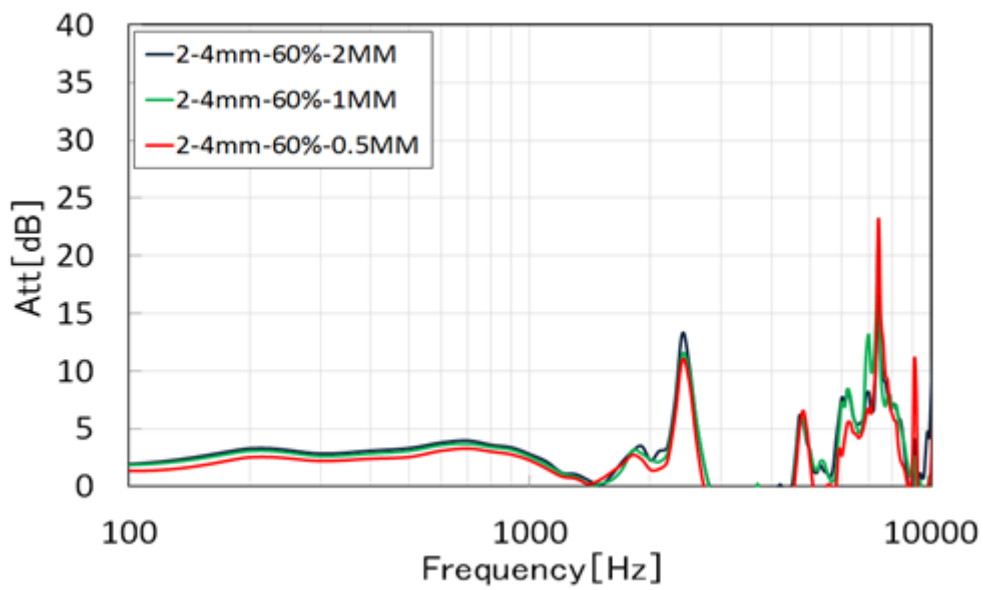
付録 2.27 透過損失
(測定点 2、測定距離 4mm、開口率 30%)



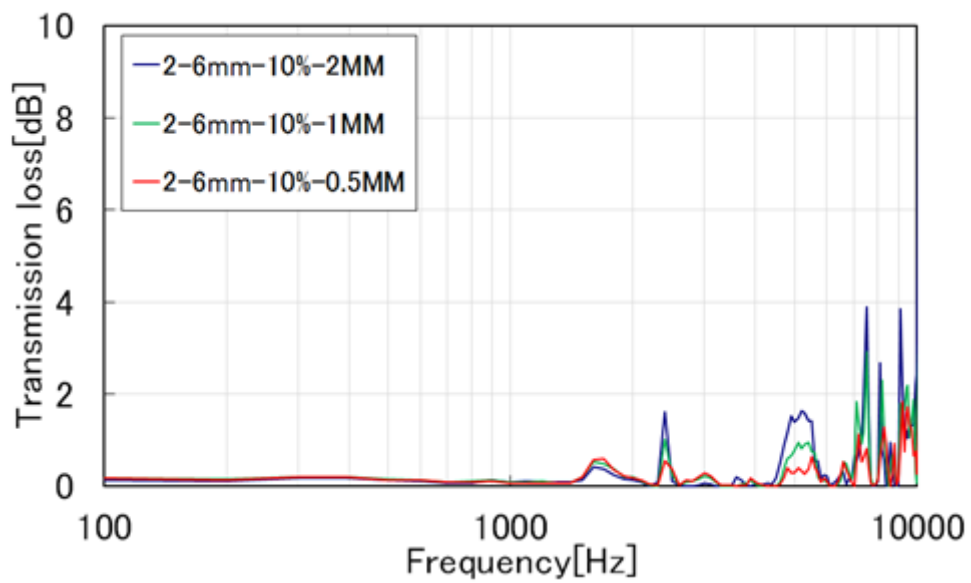
付録 2.28 減音量
(測定点 2、測定距離 4mm、開口 30%)



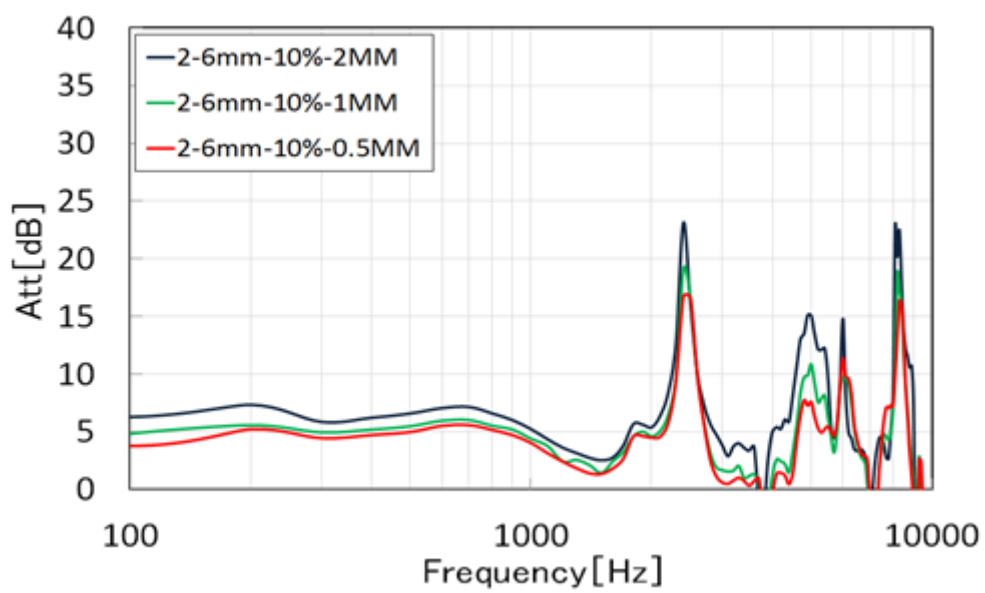
付録 2.29 透過損失
(測定点 2、測定距離 4mm、開口率 60%)



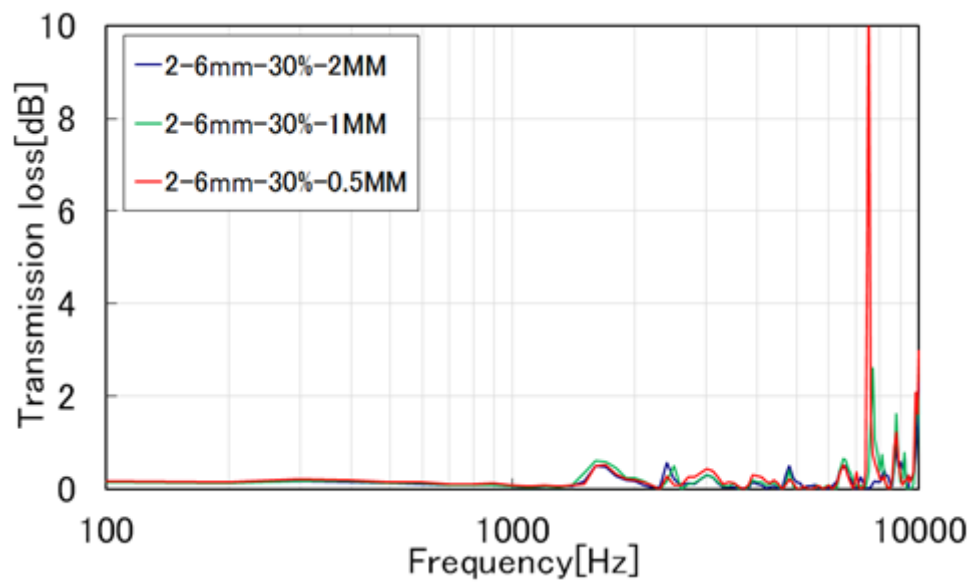
付録 2.30 減音量
(測定点 2、測定距離 4mm、開口 60%)



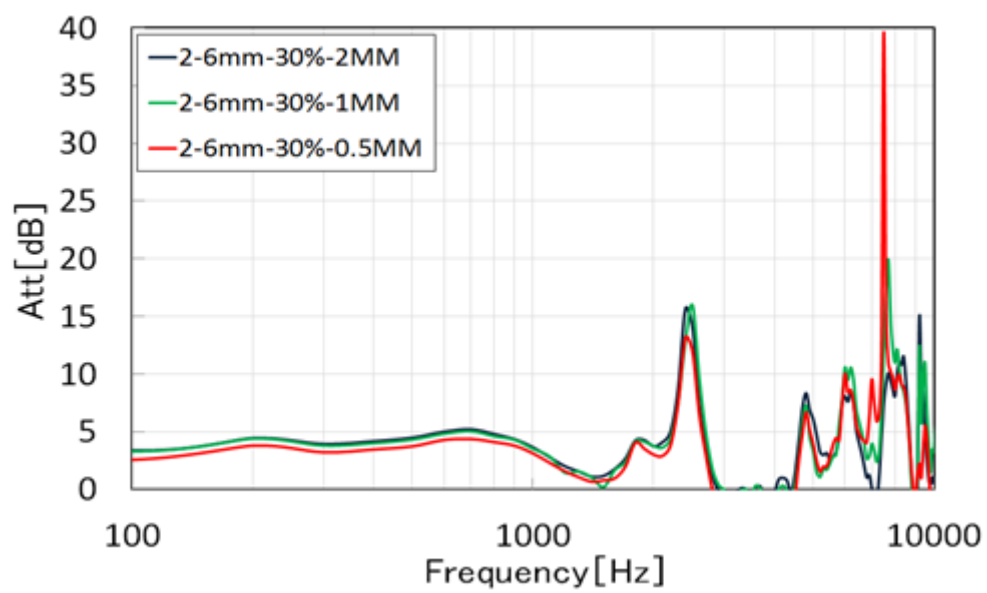
付録 2.31 透過損失
(測定点 2、測定距離 6mm、開口率 10%)



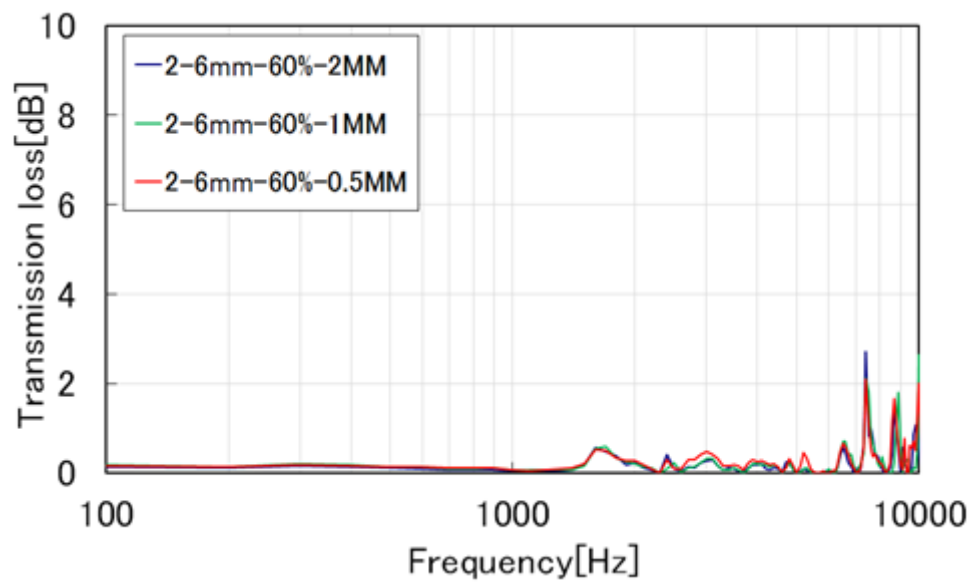
付録 2.32 減音量
(測定点 2、測定距離 6mm、開口 10%)



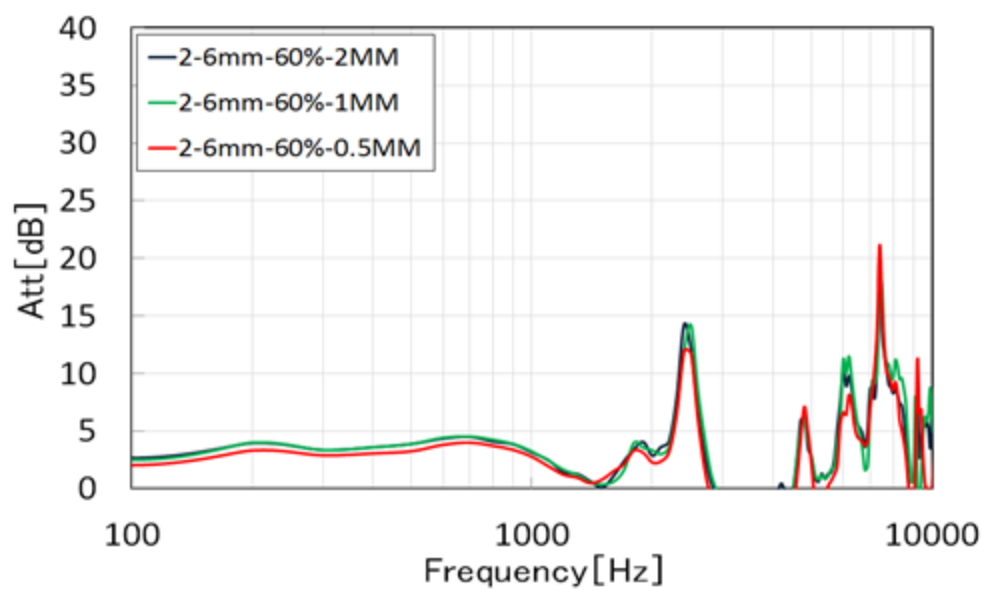
付録 2.33 透過損失
(測定点 2、測定距離 6mm、開口率 30%)



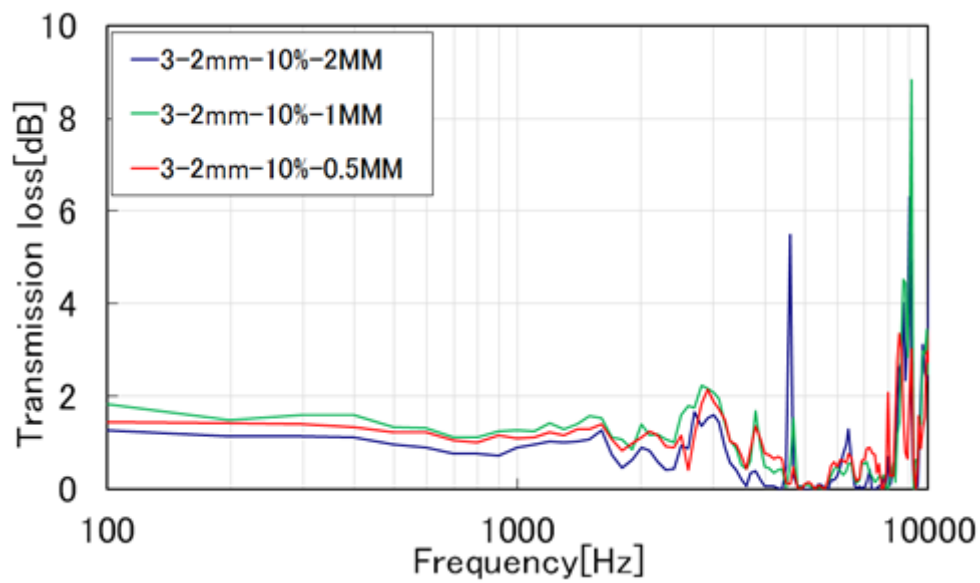
付録 2.34 減音量
(測定点 2、測定距離 6mm、開口 30%)



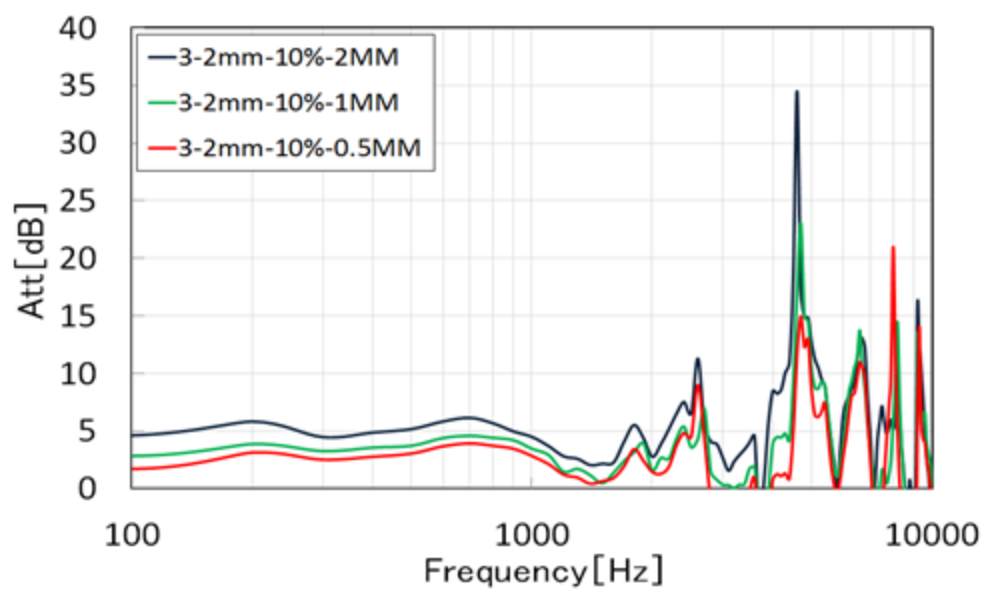
付録 2.35 透過損失
(測定点 2、測定距離 6mm、開口率 60%)



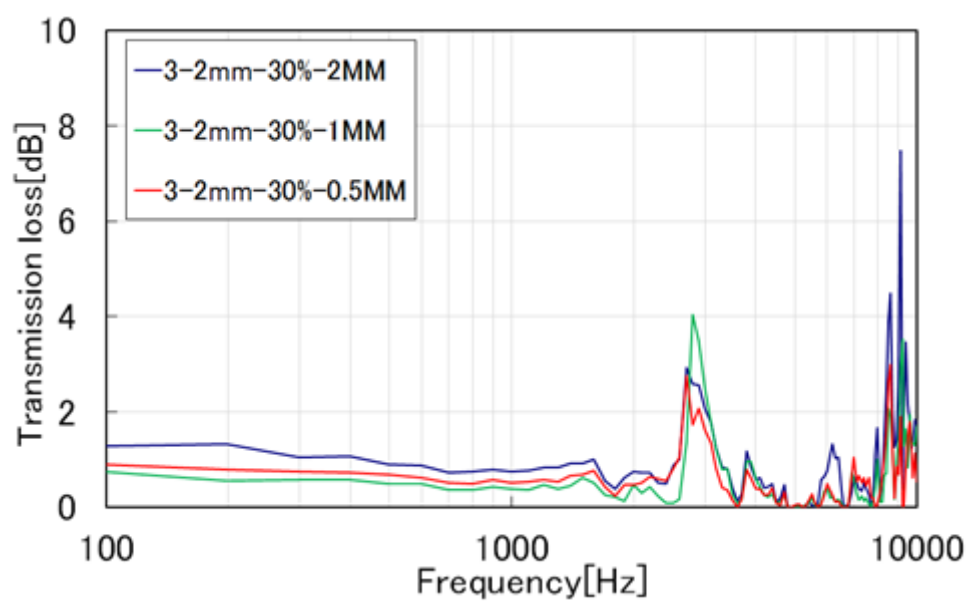
付録 2.36 減音量
(測定点 2、測定距離 6mm、開口 60%)



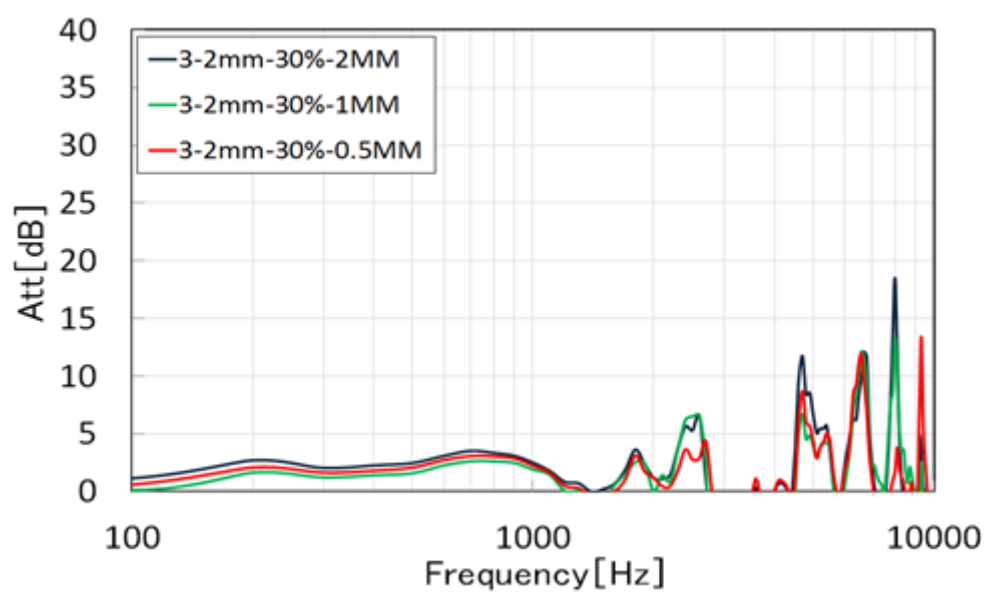
付録 2.37 透過損失
(測定点 3、測定距離 2mm、開口率 10%)



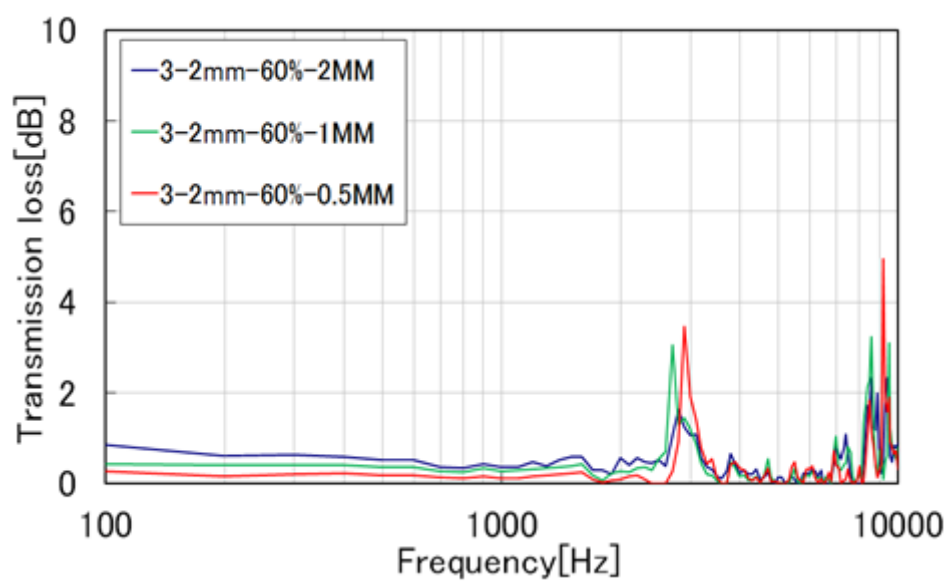
付録 2.38 減音量
(測定点 3、測定距離 2mm、開口 10%)



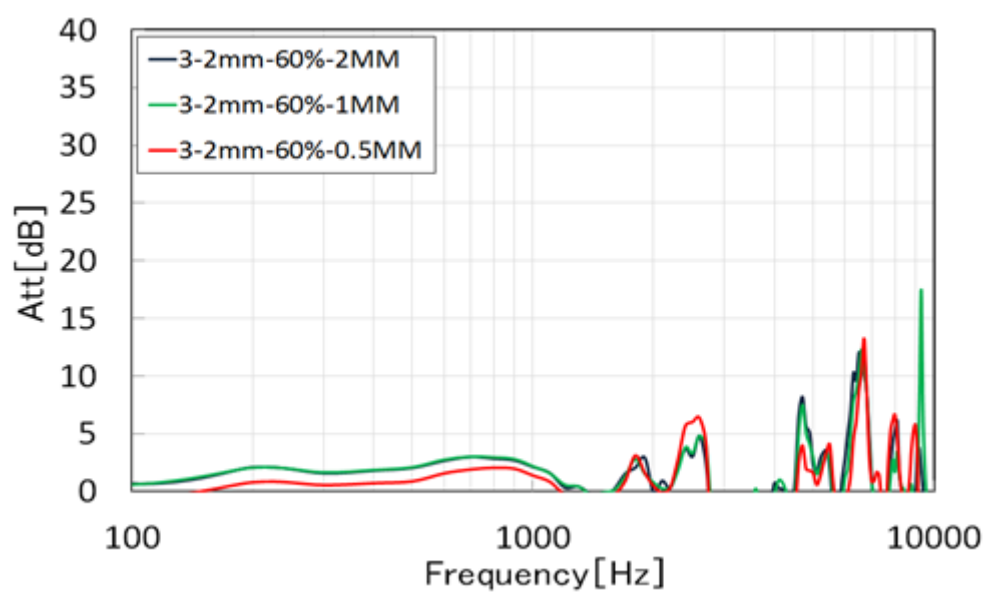
付録 2.39 透過損失
(測定点 3、測定距離 2mm、開口率 30%)



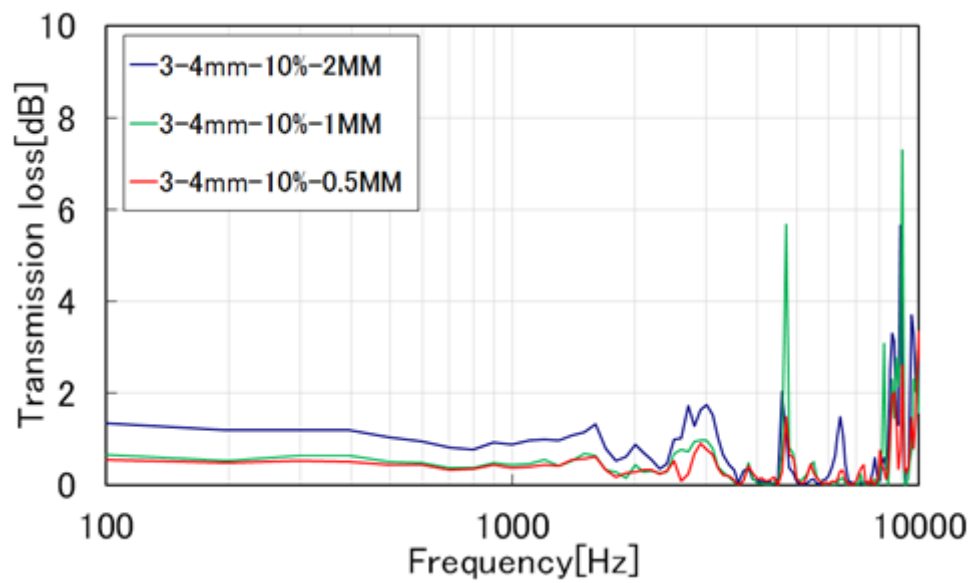
付録 2.40 減音量
(測定点 3、測定距離 2mm、開口 30%)



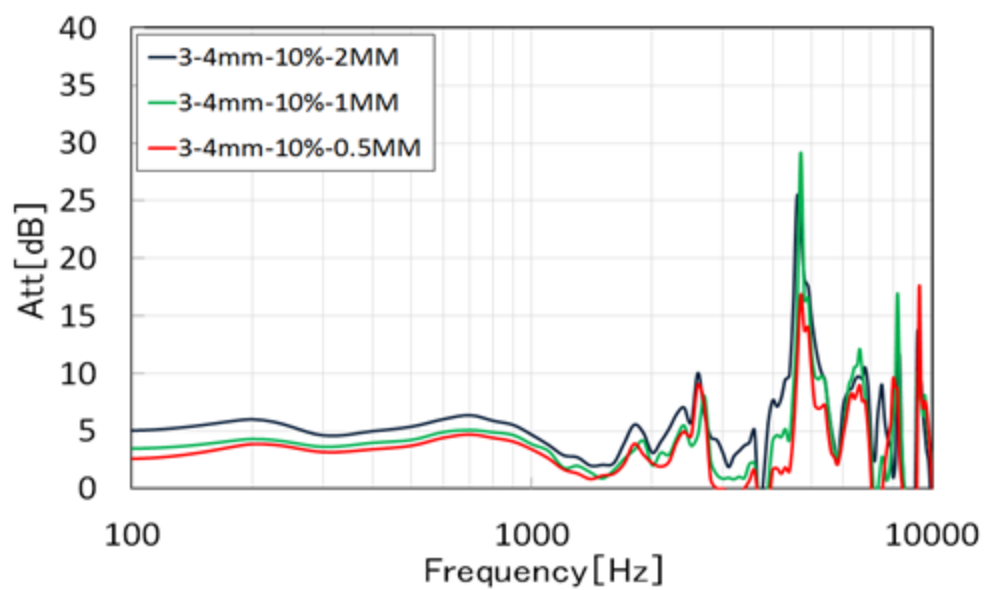
付録 2.41 透過損失
(測定点 3、測定距離 2mm、開口率 60%)



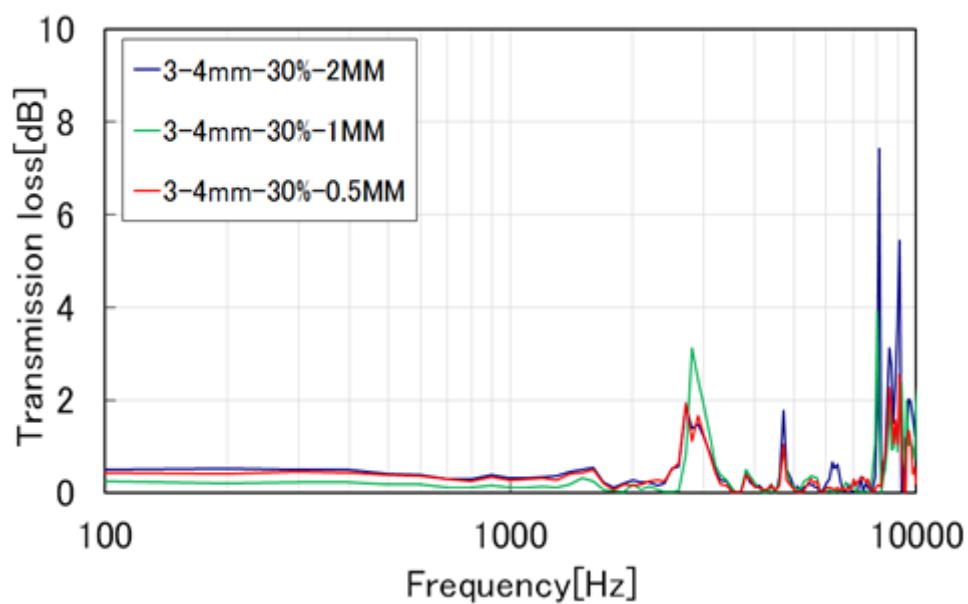
付録 2.42 減音量
(測定点 3、測定距離 2mm、開口 60%)



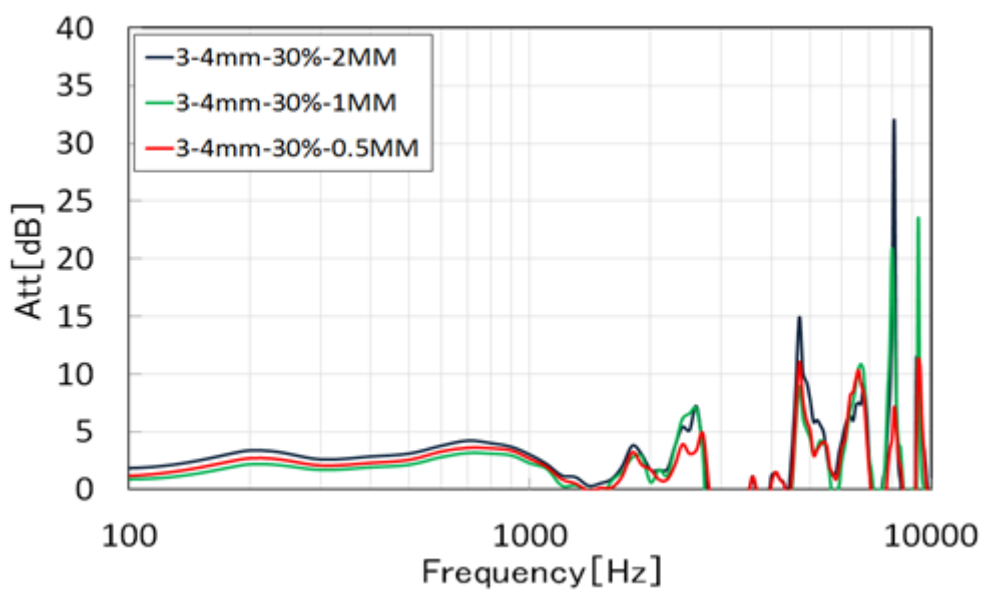
付録 2.43 透過損失
(測定点 3、測定距離 4mm、開口率 10%)



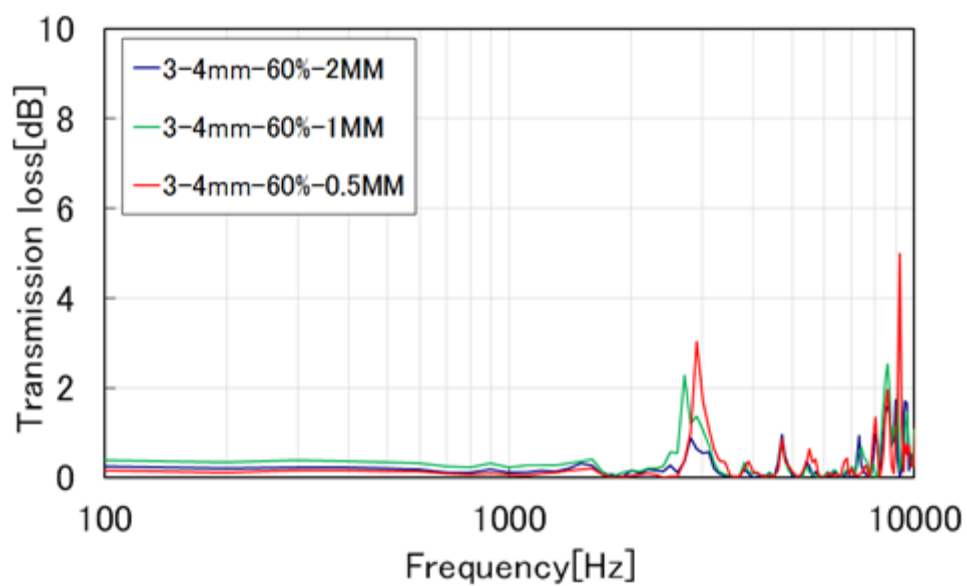
付録 2.44 減音量
(測定点 3、測定距離 4mm、開口率 10%)



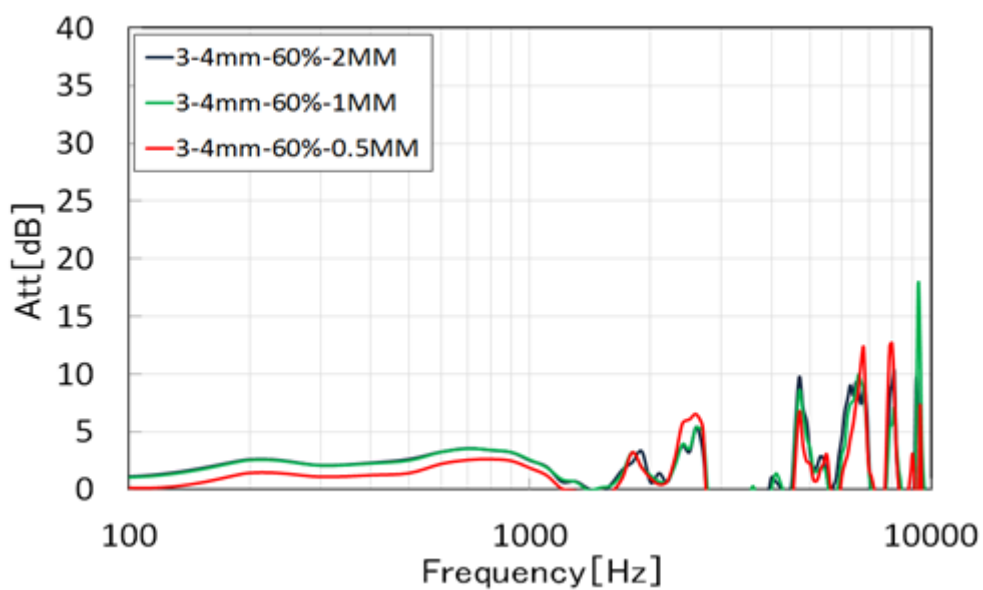
付録 2.45 透過損失
(測定点 3、測定距離 4mm、開口率 30%)



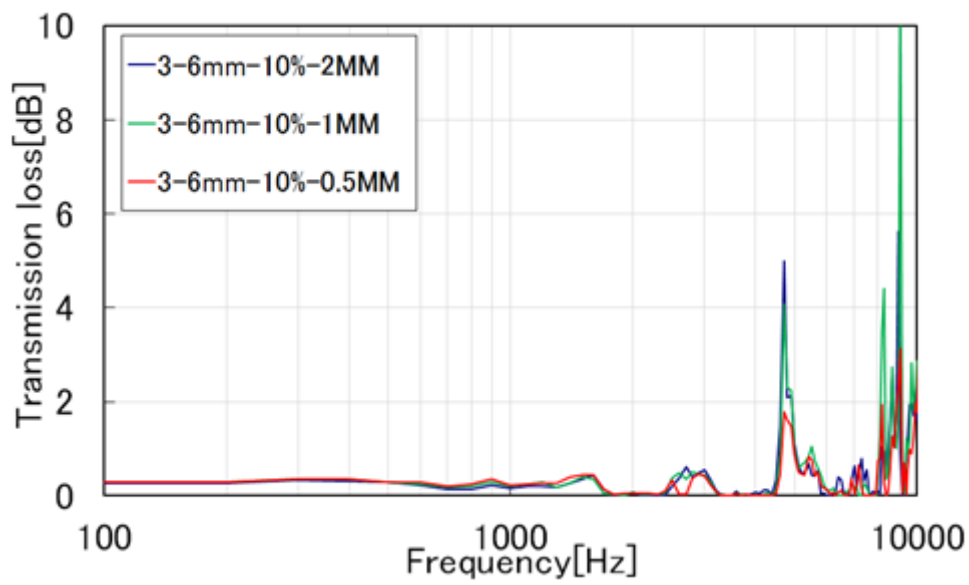
付録 2.46 減音量
(測定点 3、測定距離 4mm、開口率 30%)



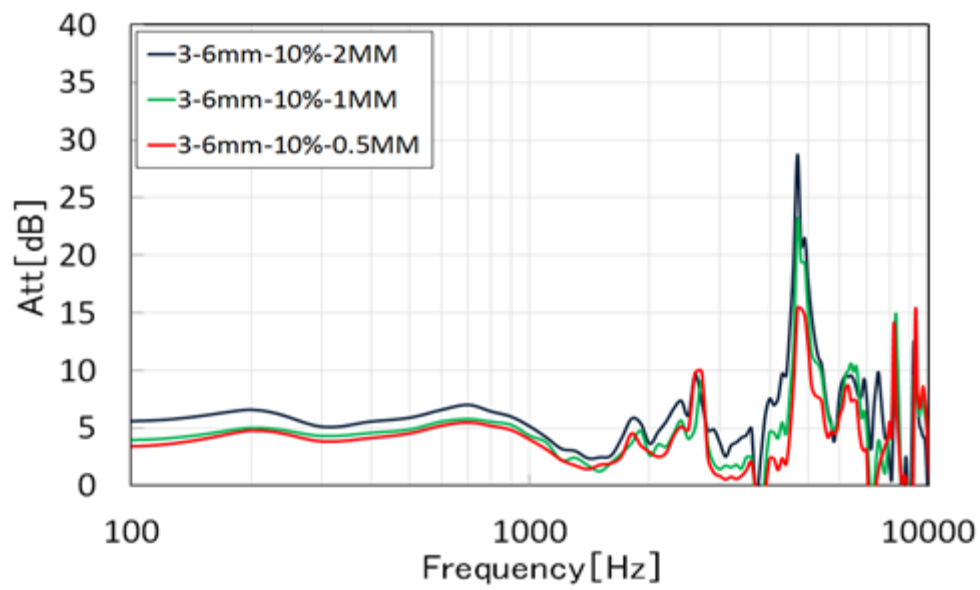
付録 2.47 透過損失
(測定点 3、測定距離 4mm、開口率 60%)



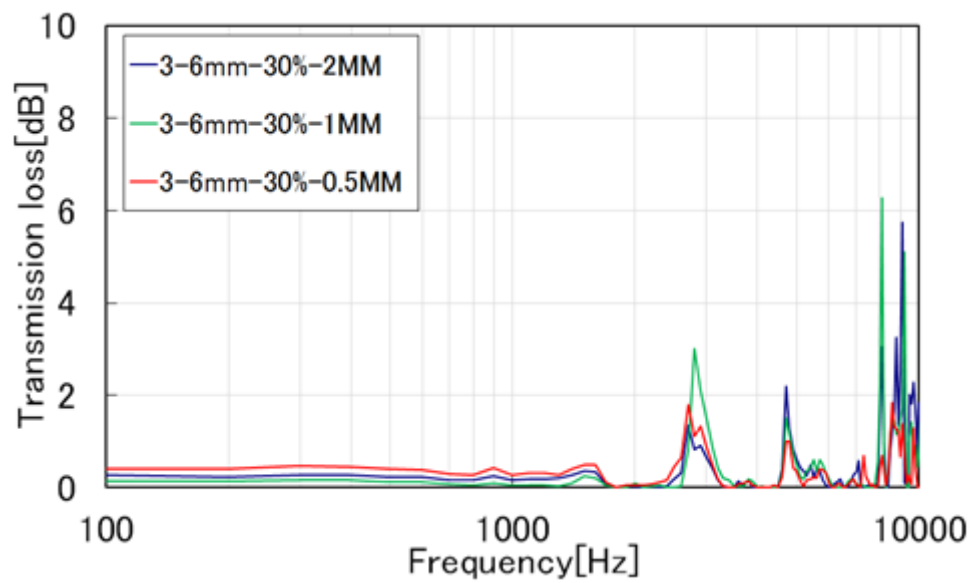
付録 2.48 減音量
(測定点 3、測定距離 4mm、開口率 60%)



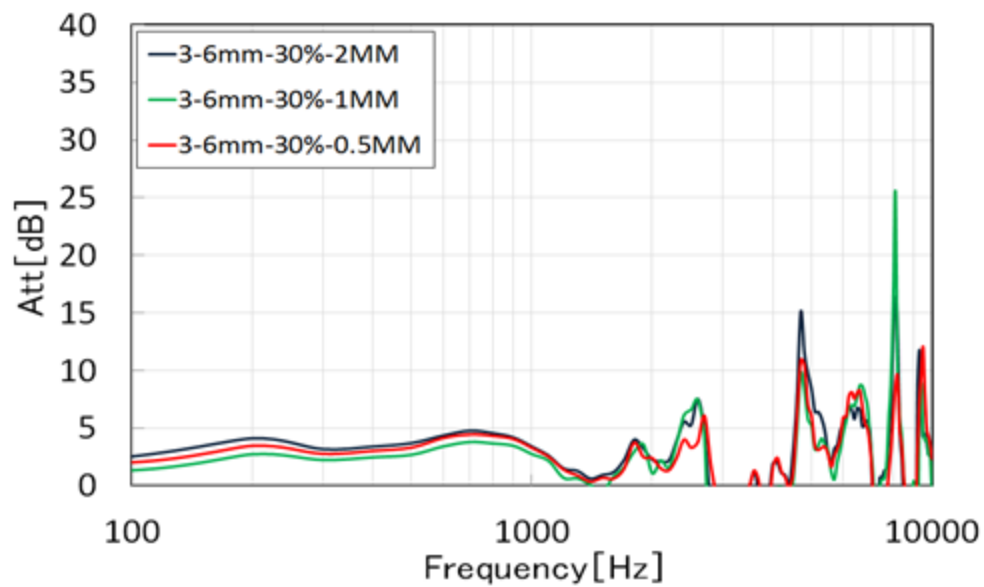
付録 2.49 透過損失
(測定点 3、測定距離 6mm、開口率 10%)



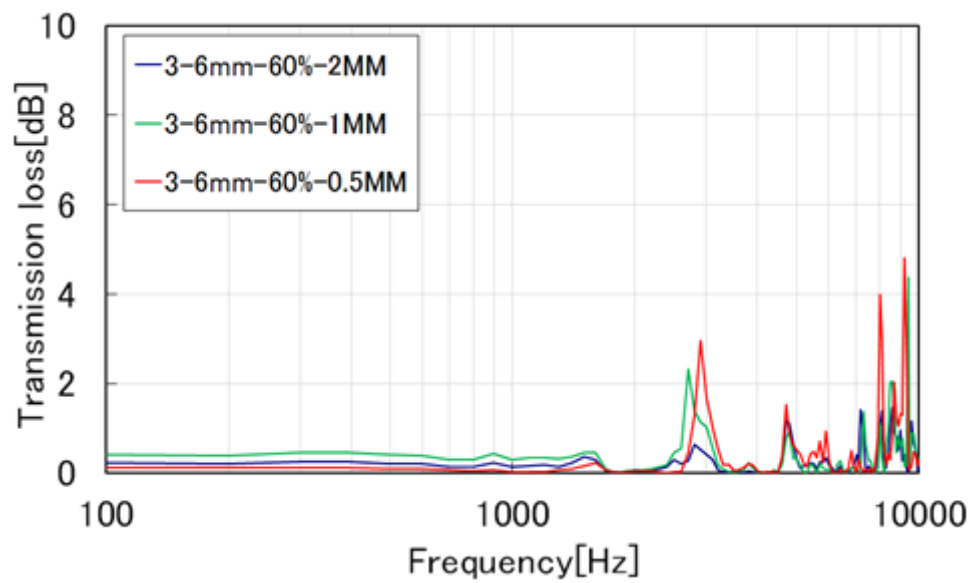
付録 2.50 減音量
(測定点 3、測定距離 6mm、開口率 10%)



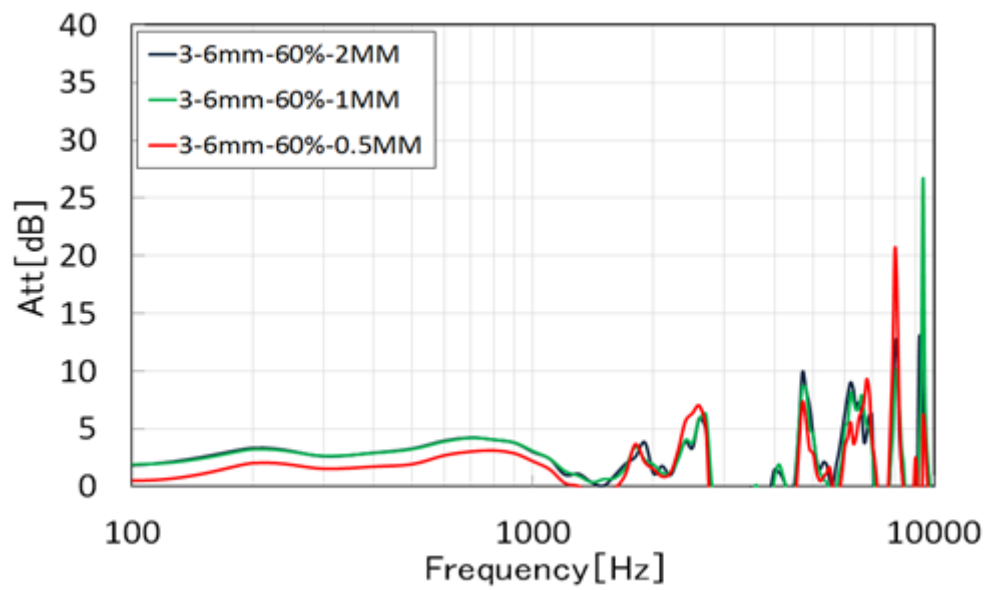
付録 2.51 透過損失
(測定点 3、測定距離 6mm、開口率 30%)



付録 2.52 減音量
(測定点 3、測定距離 6mm、開口率 30%)



付録 2.53 透過損失
(測定点 3、測定距離 6mm、開口率 60%)



付録 2.54 減音量
(測定点 3、測定距離 6mm、開口率 60%)

付録3 リング取り付け距離変化の影響

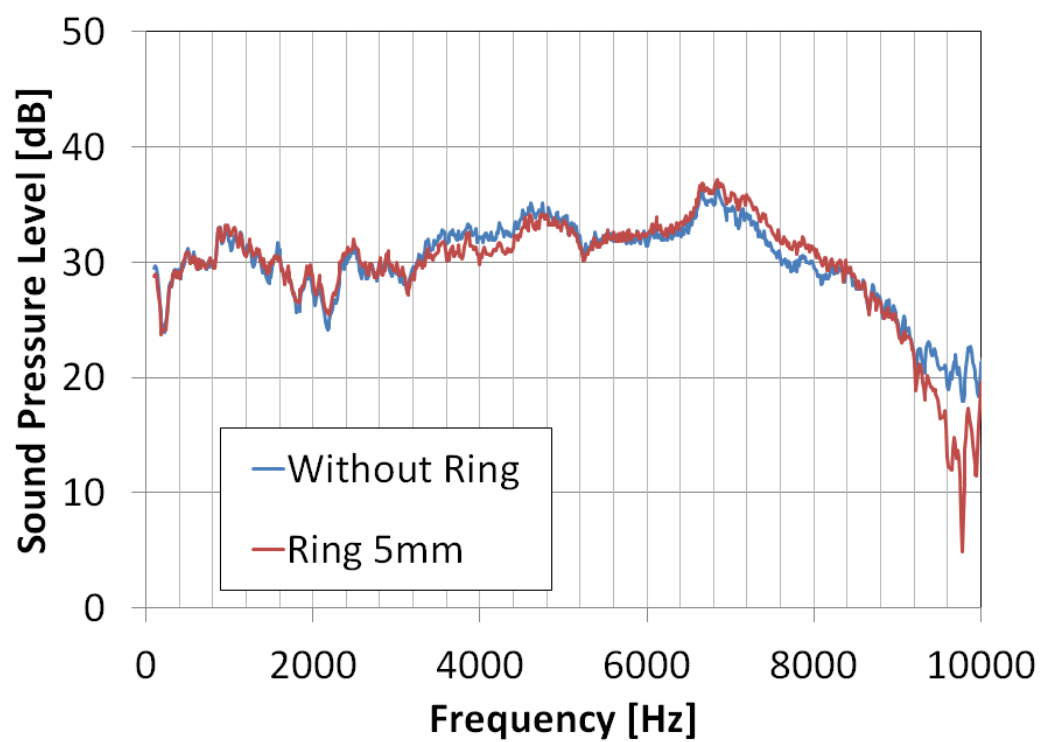


図 3.1 リングなし（原音）とリング 5mm の放射音比較

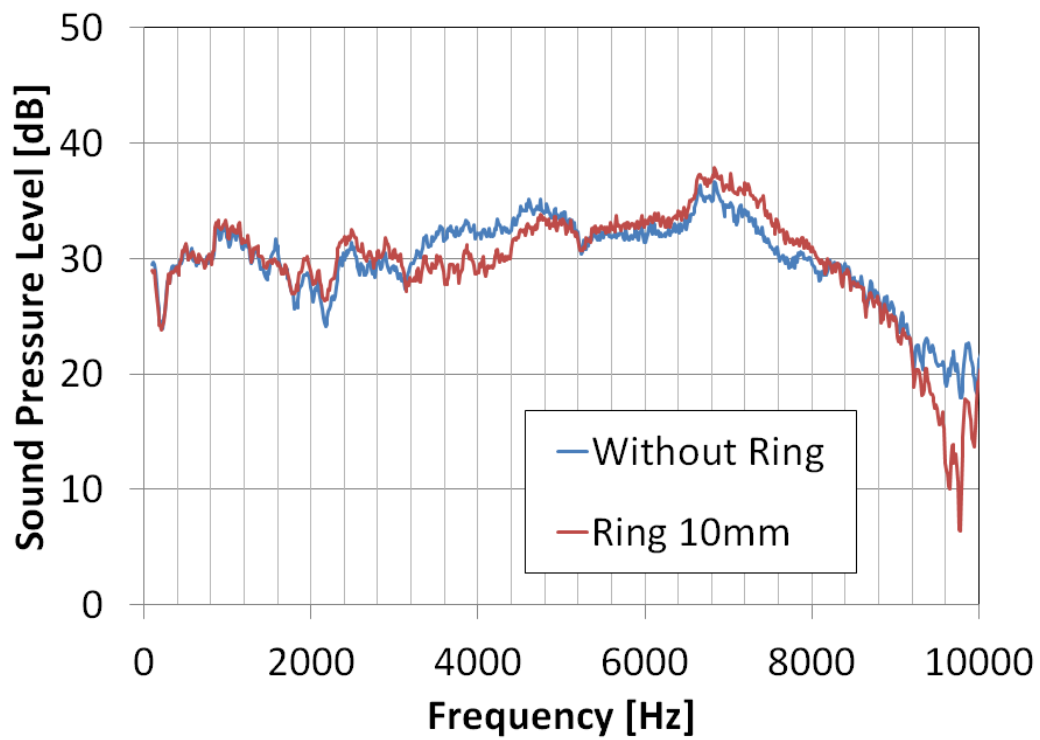


図 3.2 リングなし（原音）とリング 10mm の放射音比較

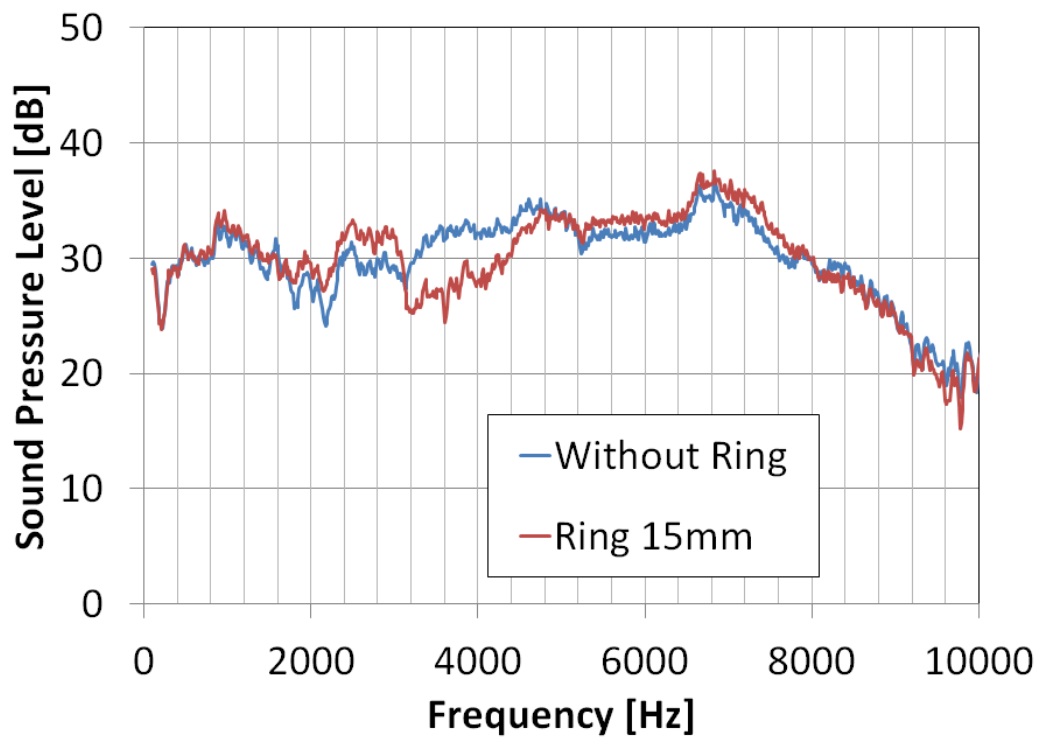


図 3.3 リングなし（原音）とリング 15mm の放射音比較

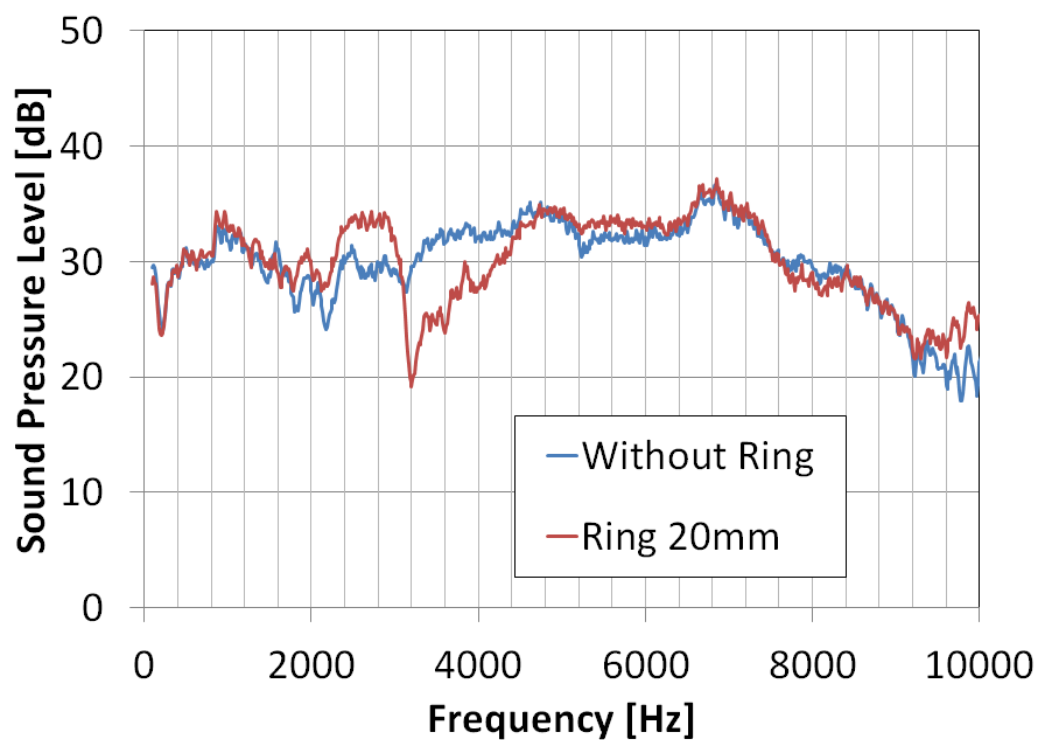


図 3.4 リングなし（原音）とリング 20mm の放射音比較

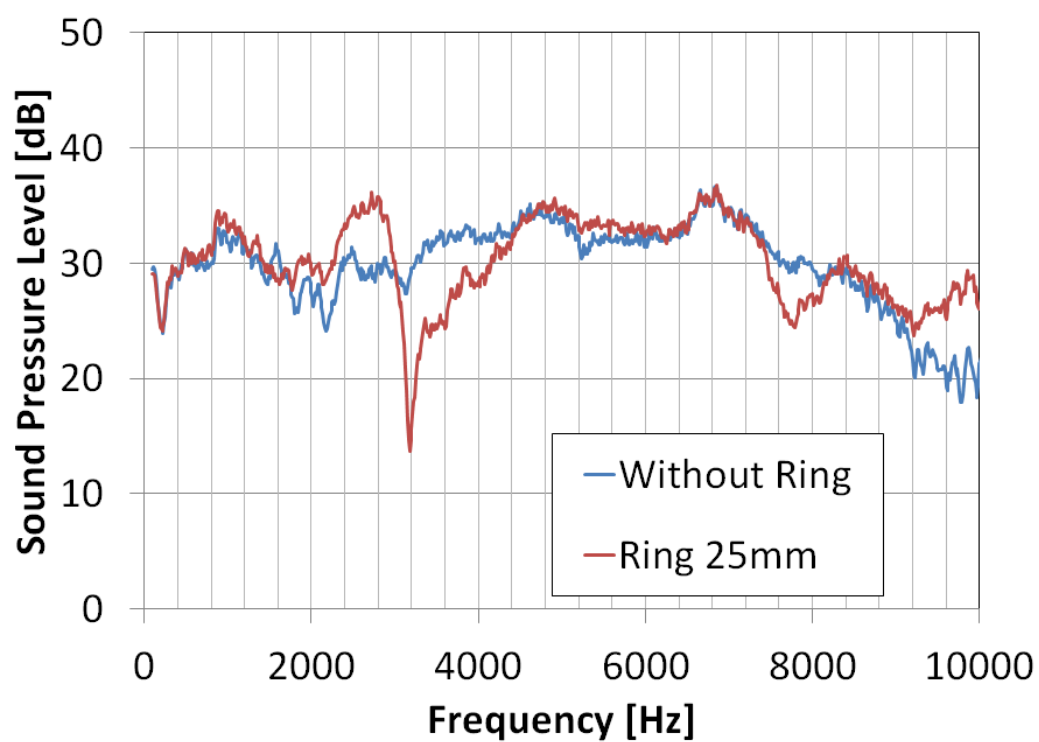


図 3.5 リングなし（原音）とリング 25mm の放射音比較

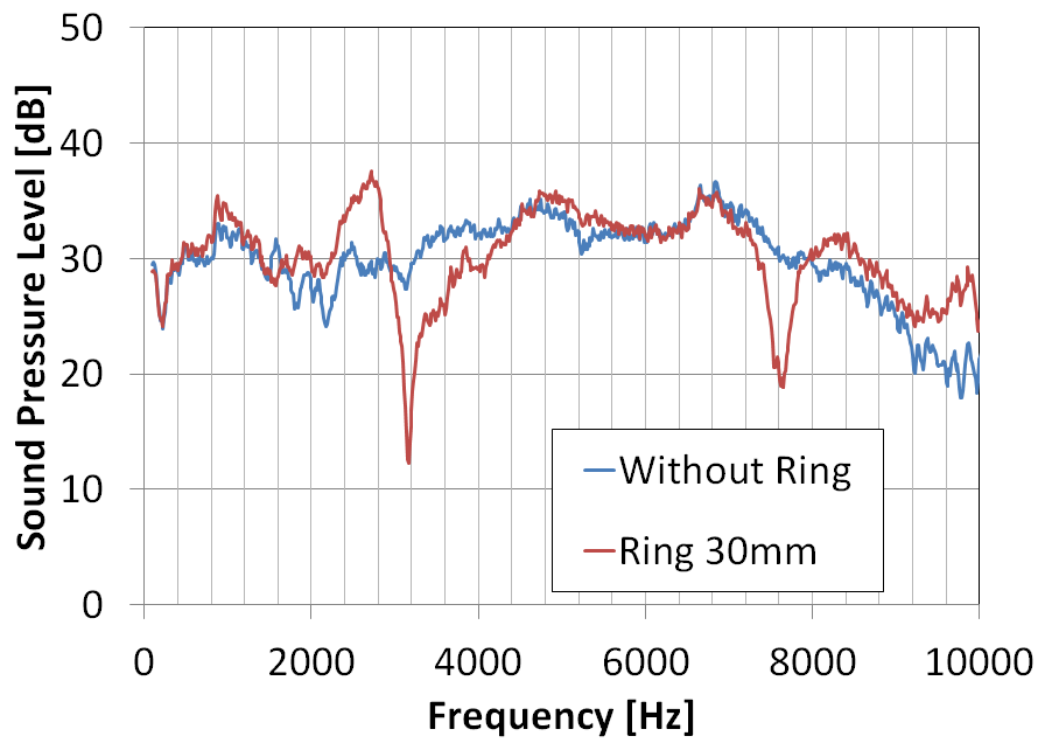


図 3.6 リングなし（原音）とリング 30mm の放射音比較

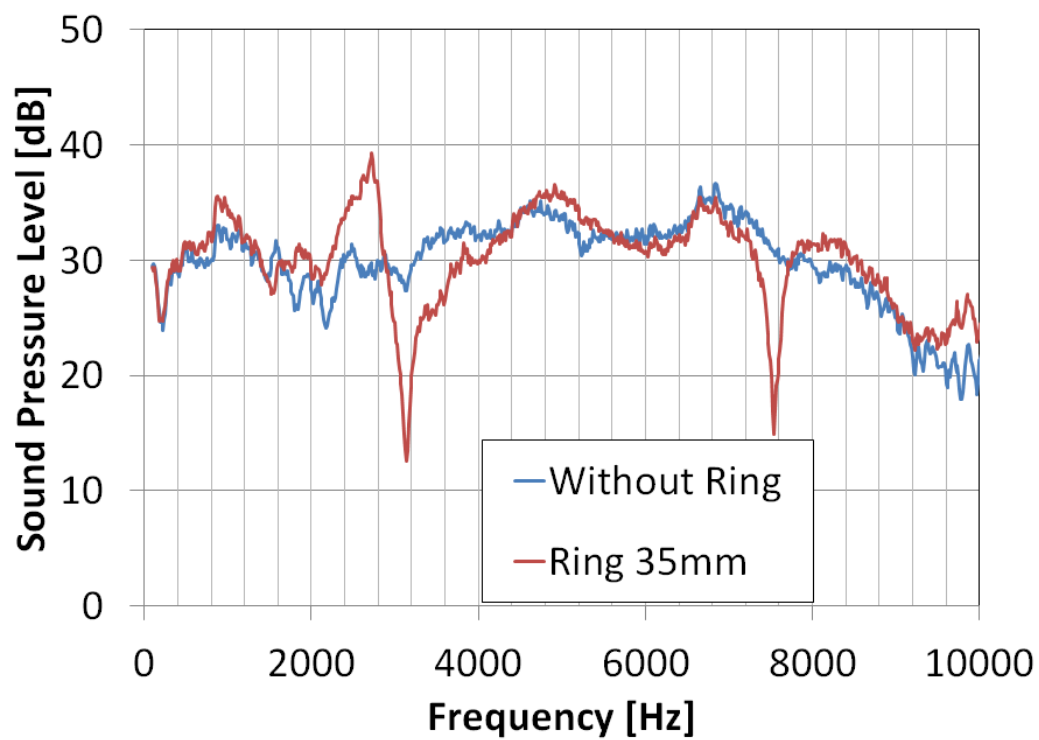


図 3.7 リングなし（原音）とリング 35mm の放射音比較

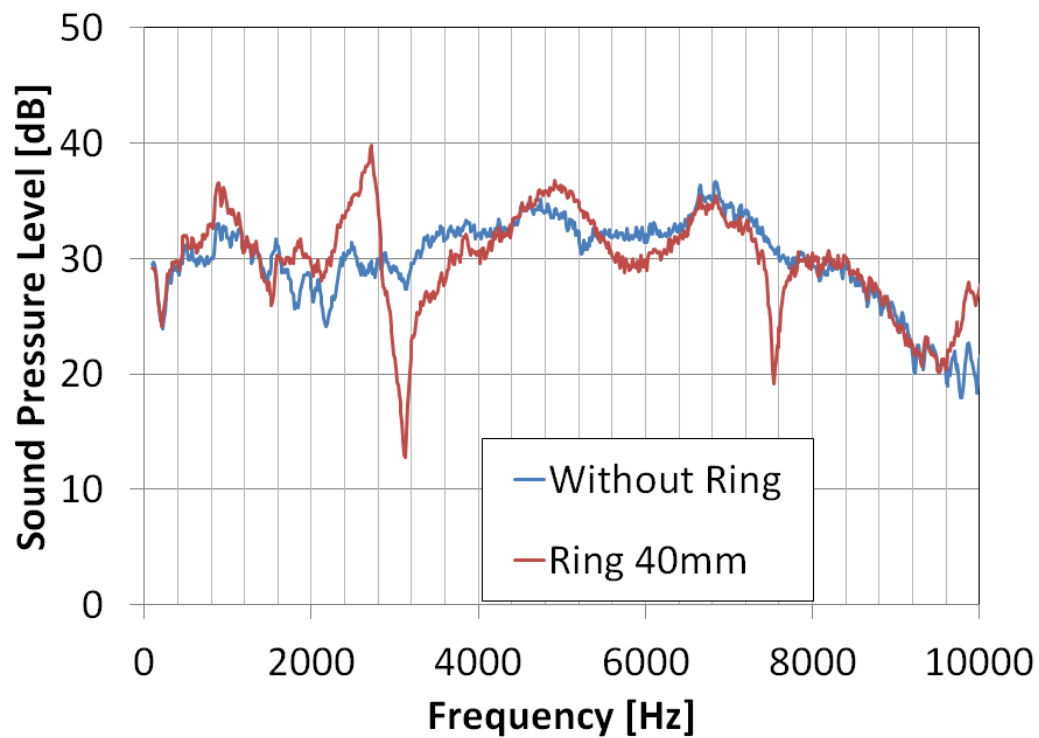


図 3.8 リングなし（原音）とリング 40mm の放射音比較

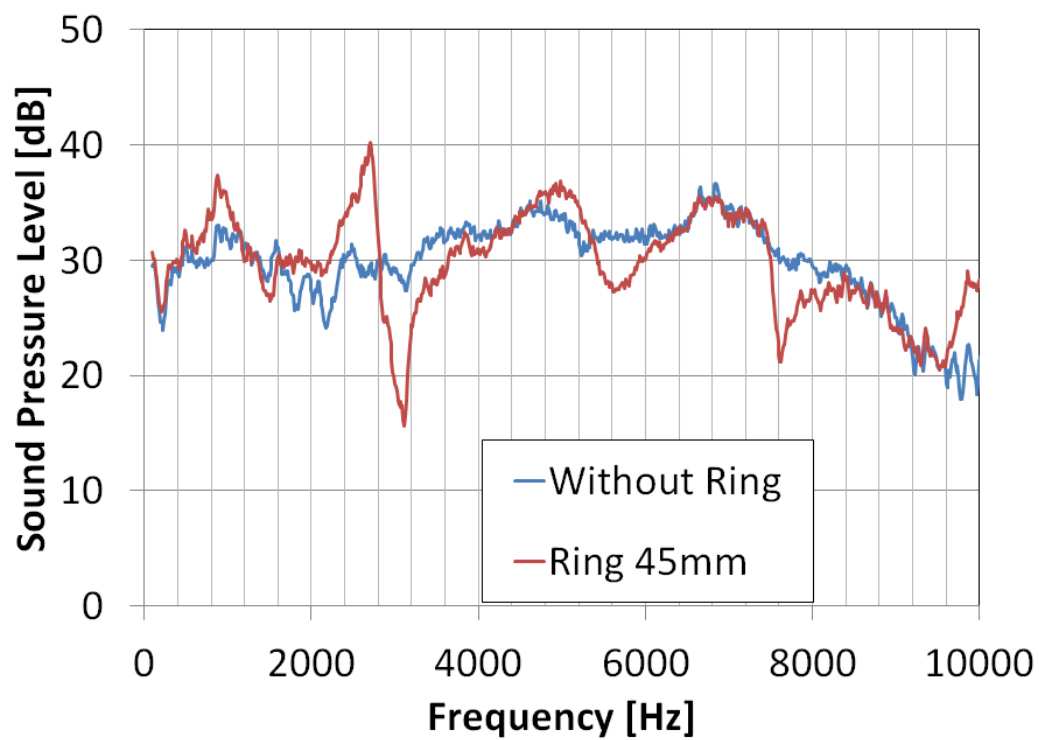


図 3.9 リングなし（原音）とリング 45mm の放射音比較

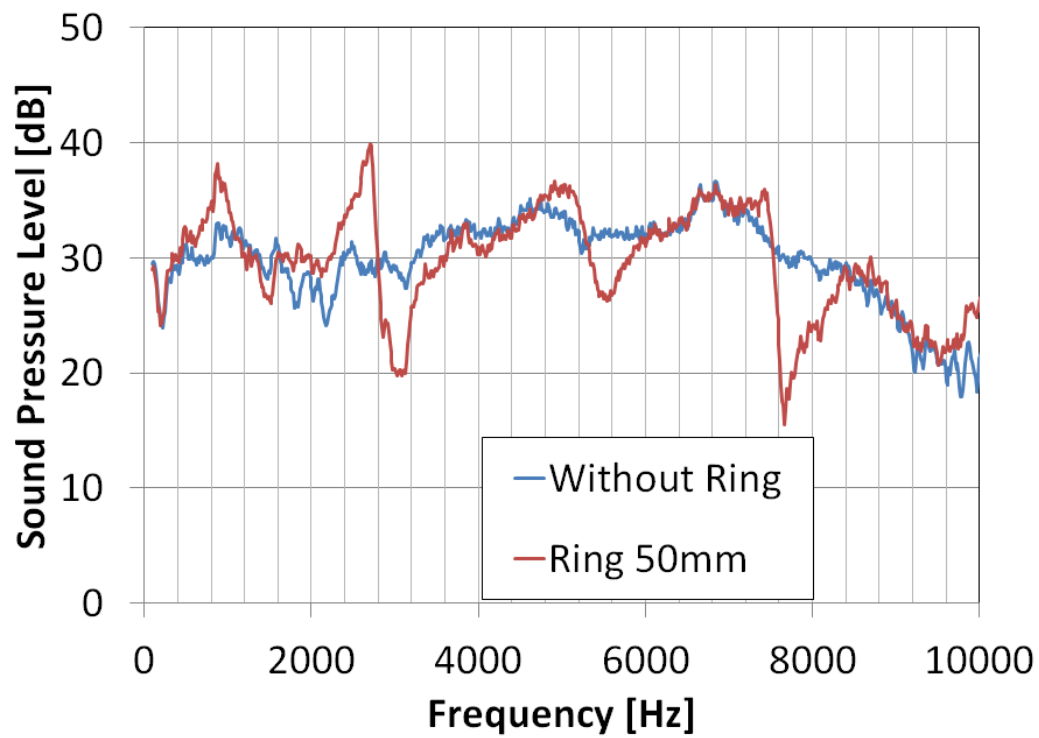


図 3.10 リングなし（原音）とリング 50mm の放射音比較

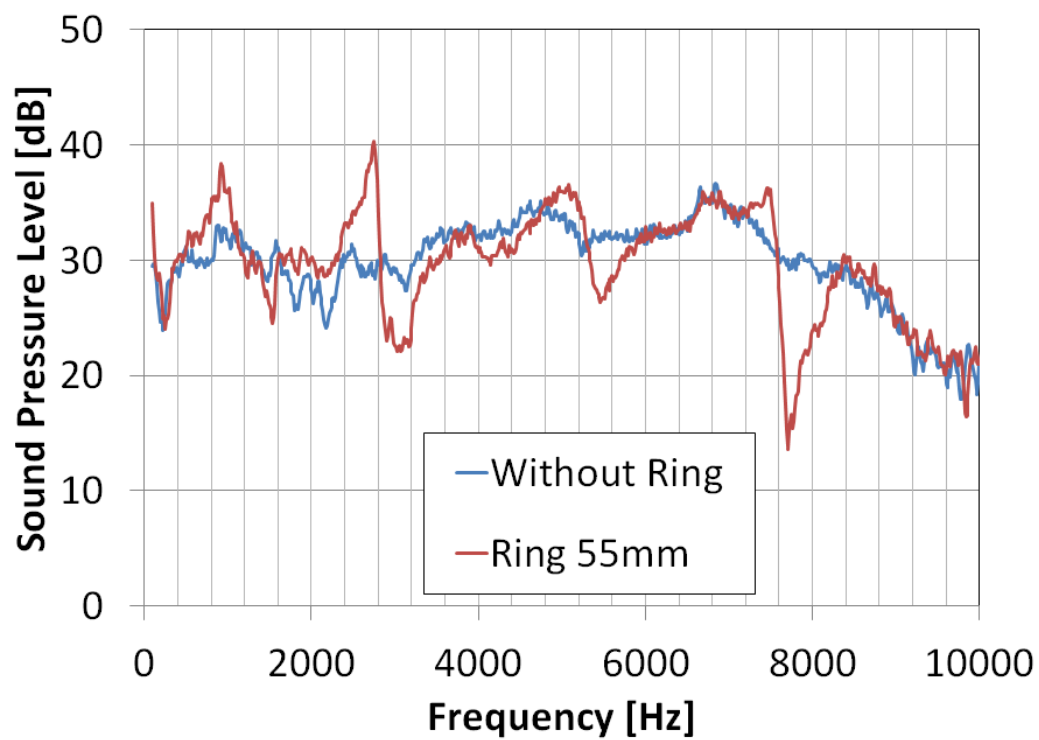


図 3.11 リングなし（原音）とリング 55mm の放射音比較

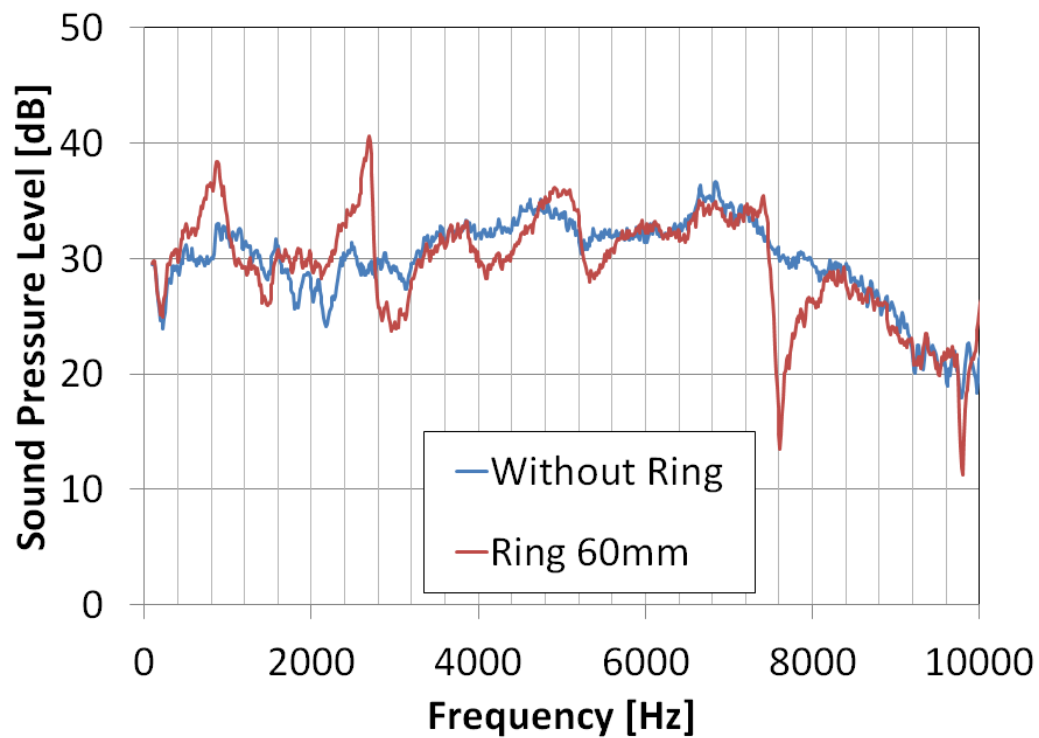


図 3.12 リングなし（原音）とリング 60mm の放射音比較

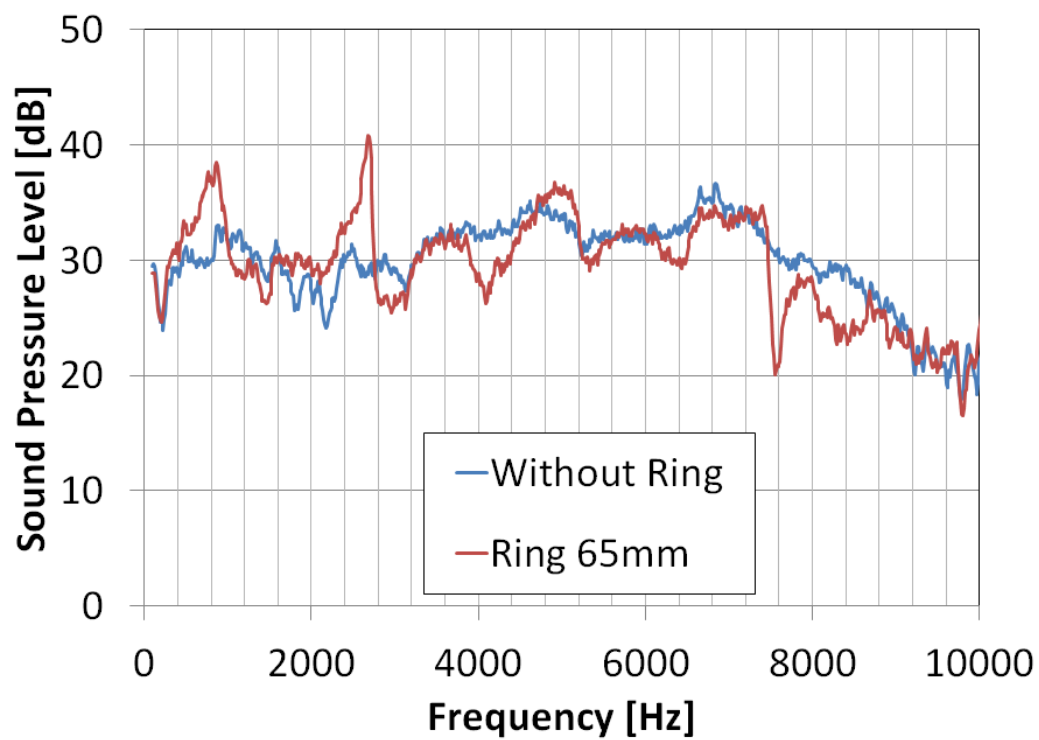


図 3.13 リングなし（原音）とリング 65mm の放射音比較

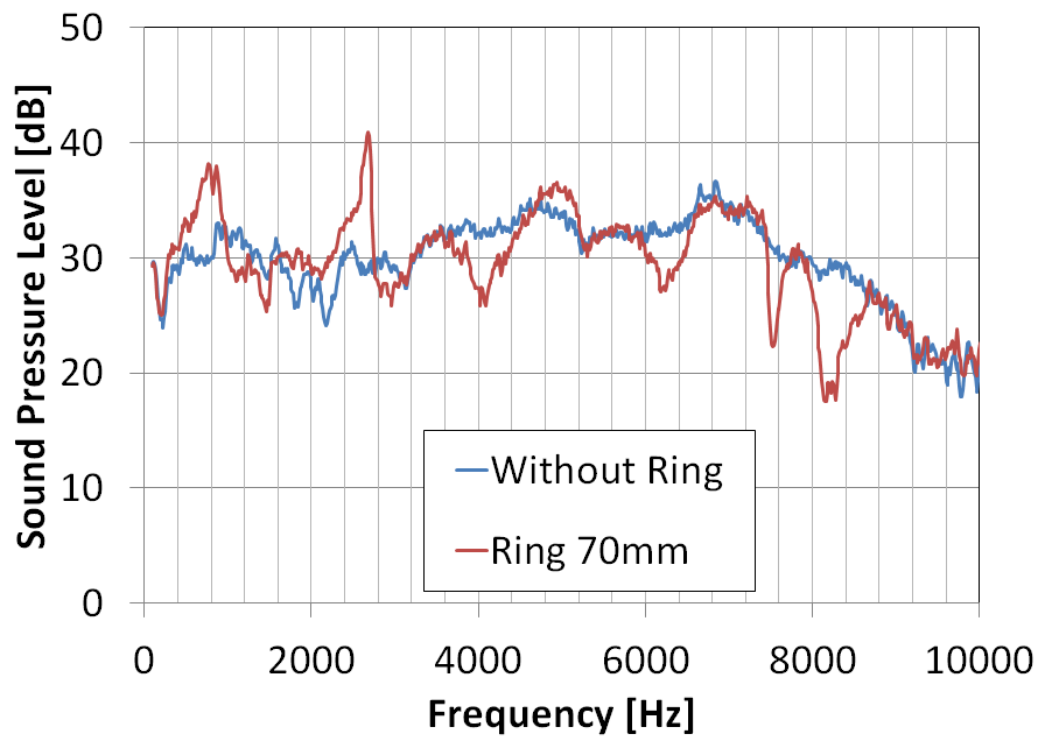


図 3.14 リングなし（原音）とリング 70mm の放射音比較

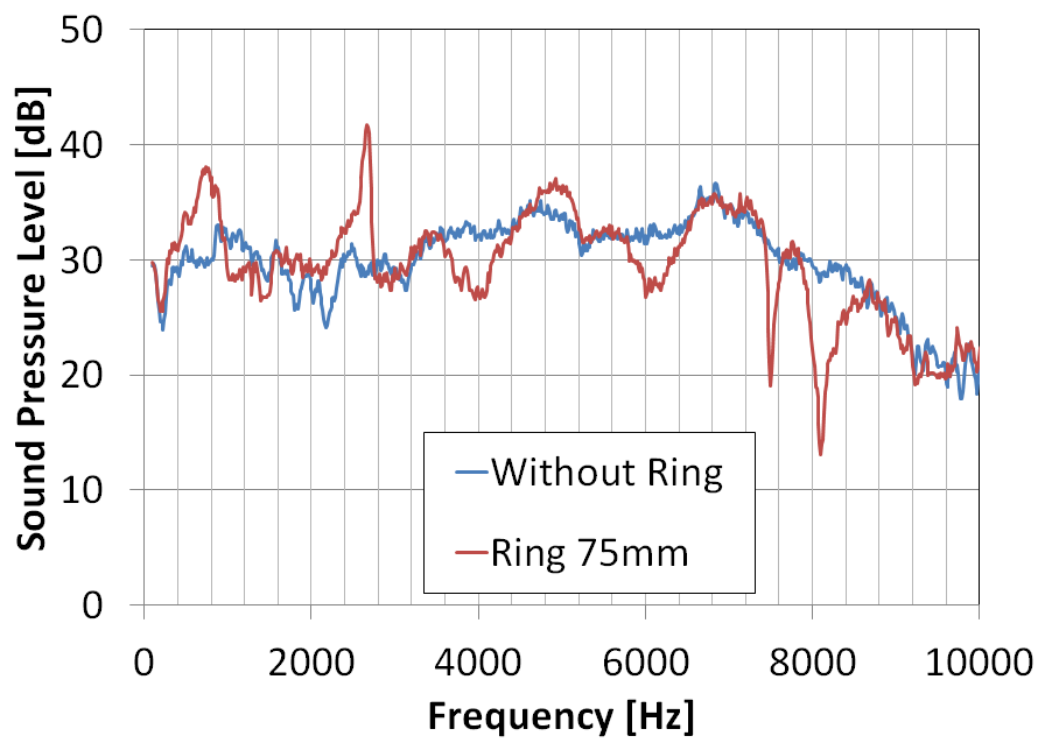


図 3.15 リングなし（原音）とリング 75mm の放射音比較

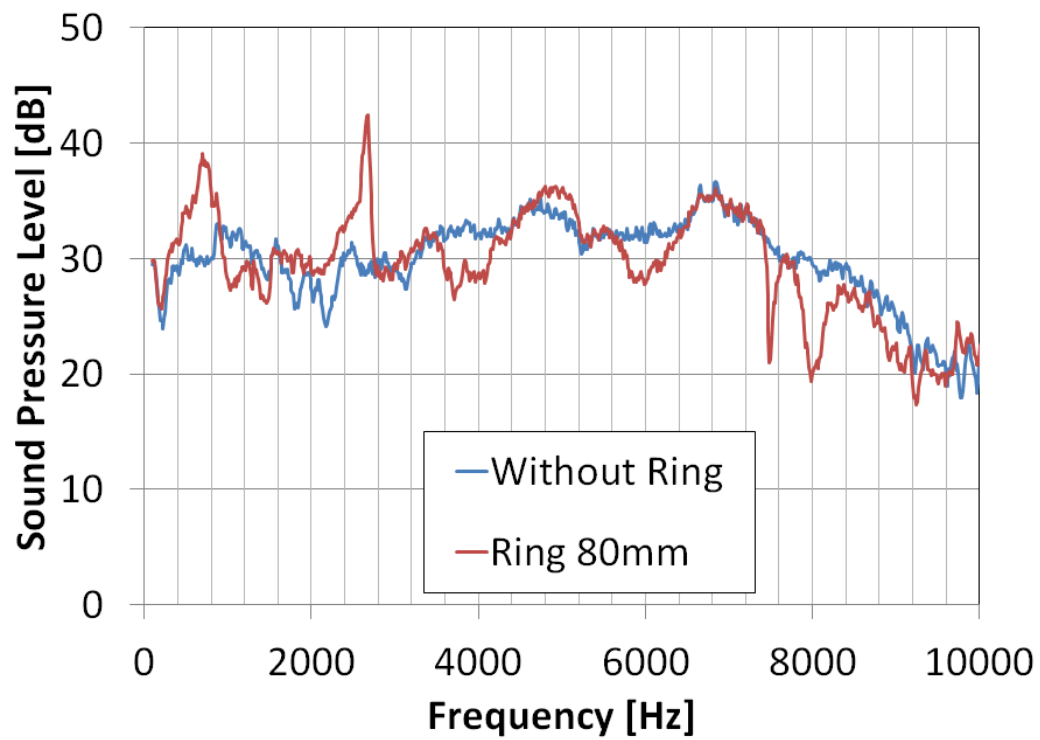
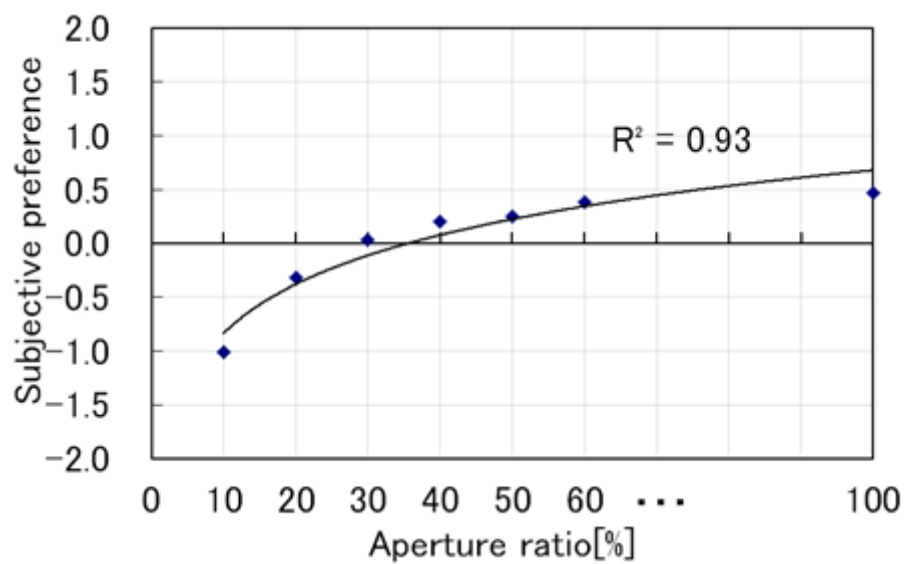
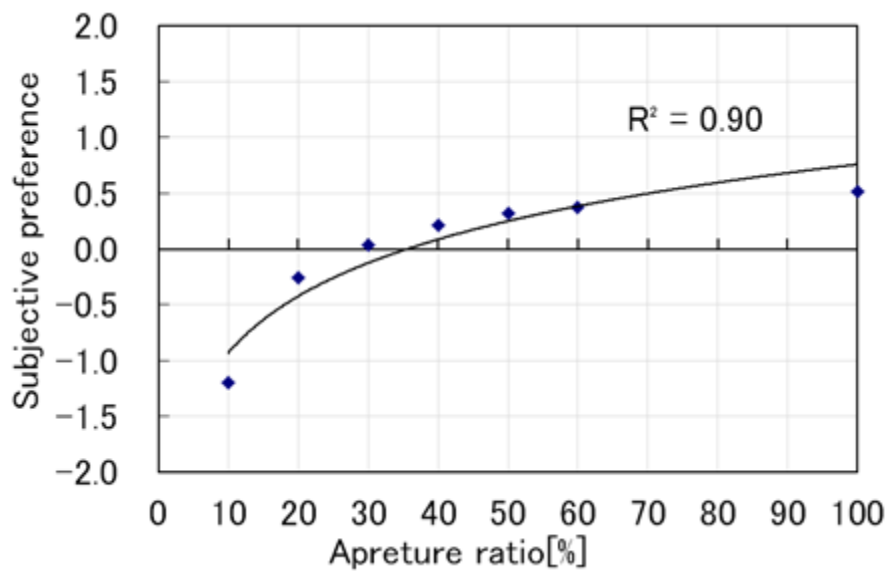


図 3.16 リングなし（原音）とリング 80mm の放射音比較

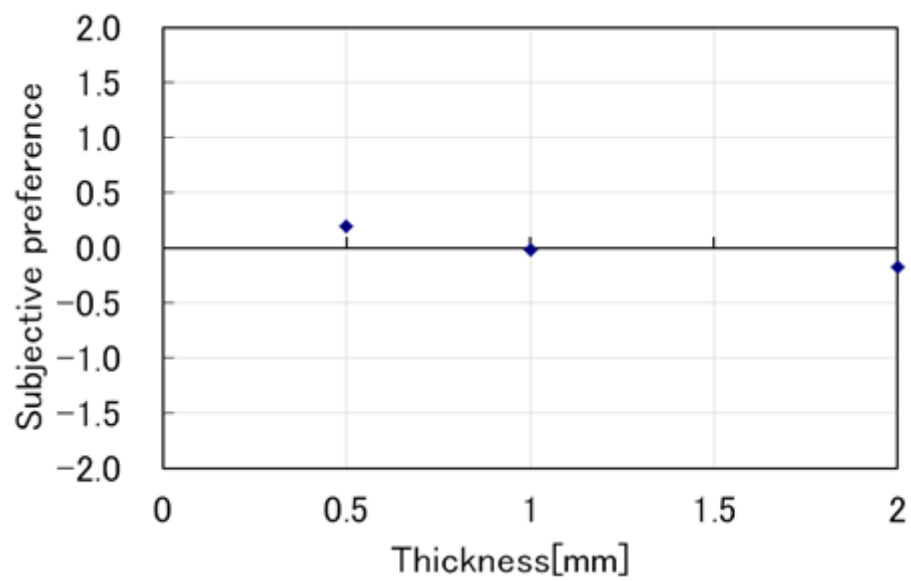
付録 4 官能試験結果グラフ（その他開口率・板厚）



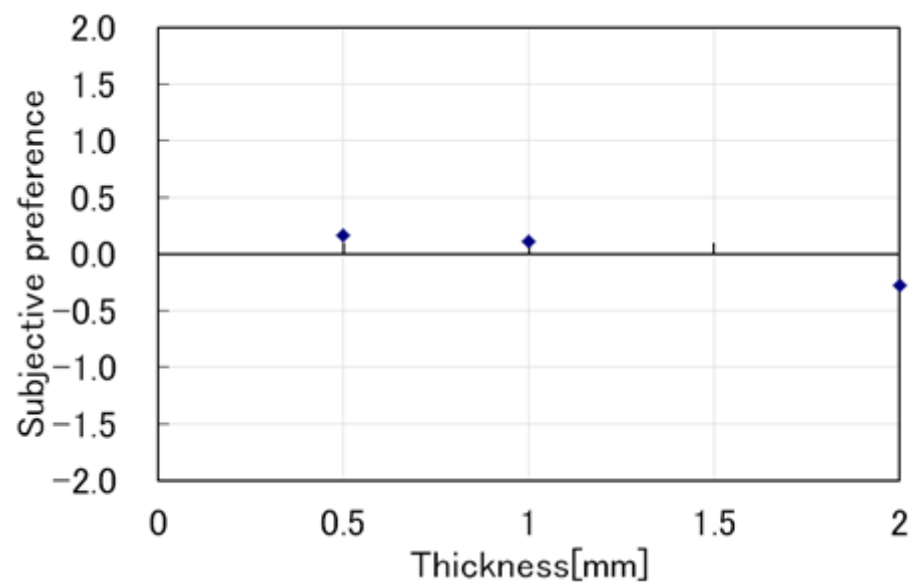
付録 4.1 開口率と明瞭感の関係（板厚 0.5mm）



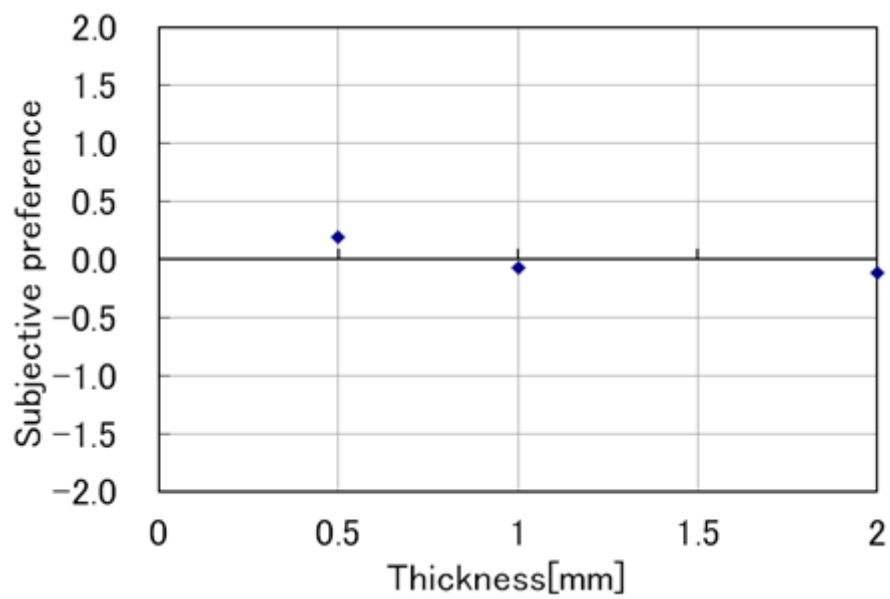
付録 4.2 開口率と明瞭感の関係（板厚 1mm）



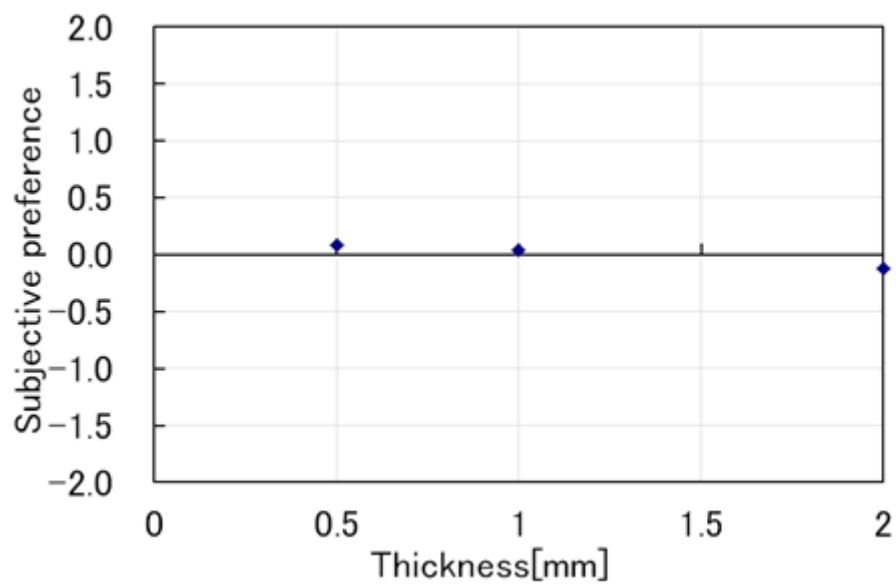
付録 4.3 板厚と明瞭感の関係（開口率 20%）



付録 4.4 板厚と明瞭感の関係（開口率 30%）



付録 4.5 板厚と明瞭感の関係（開口率 40%）



付録 4.6 板厚と明瞭感の関係（開口率 50%）

付録 5 有限要素法による音響解析結果（その他開口率・板厚）

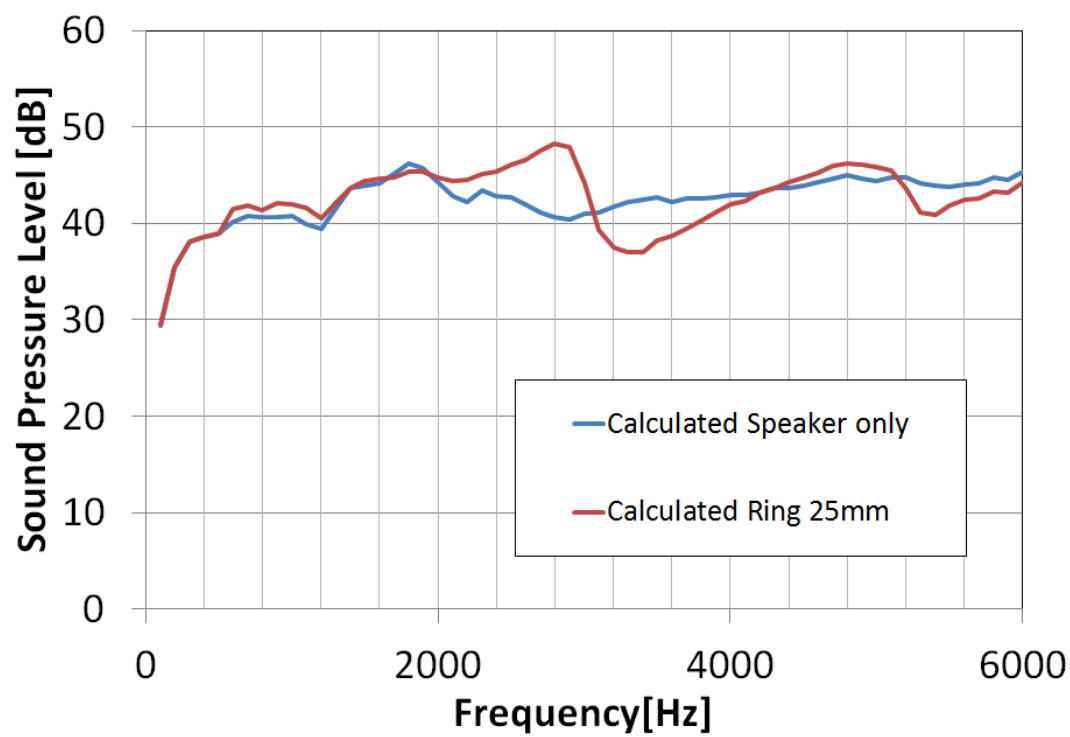


図 5.1 リングなし（原音）とリング 25mm の放射音比較

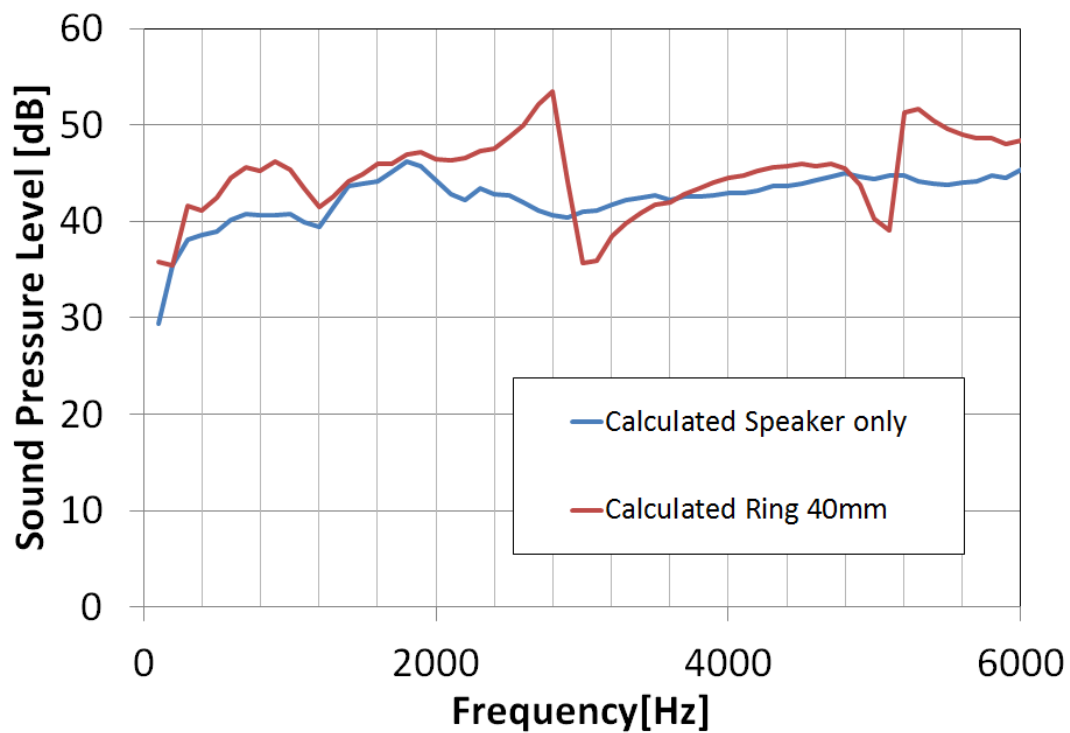


図 5.2 リングなし（原音）とリング 40mm の放射音比較

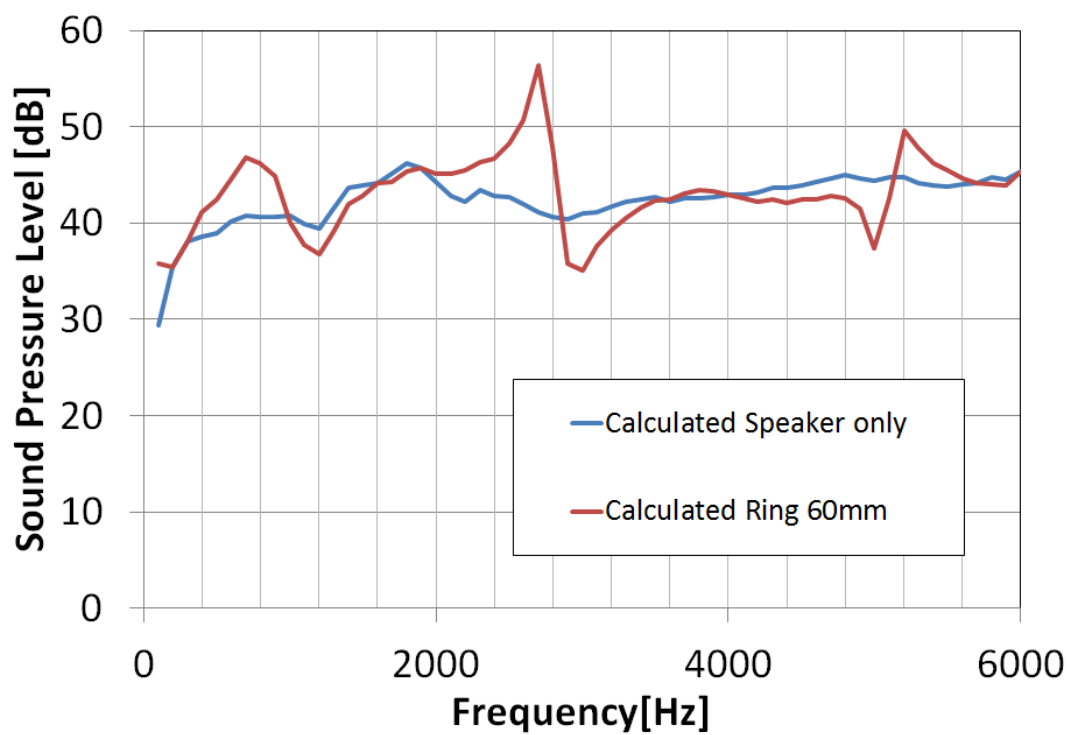


図 5.3 リングなし（原音）とリング 60mm の放射音比較

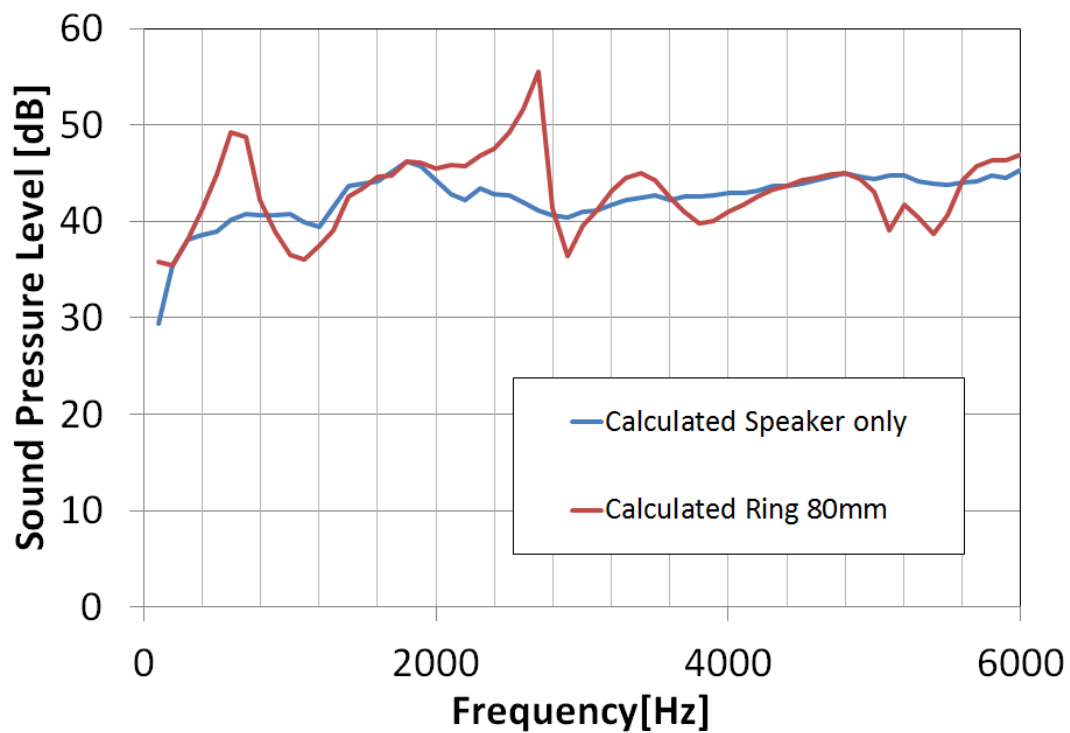


図 5.4 リングなし（原音）とリング 80mm の放射音比較

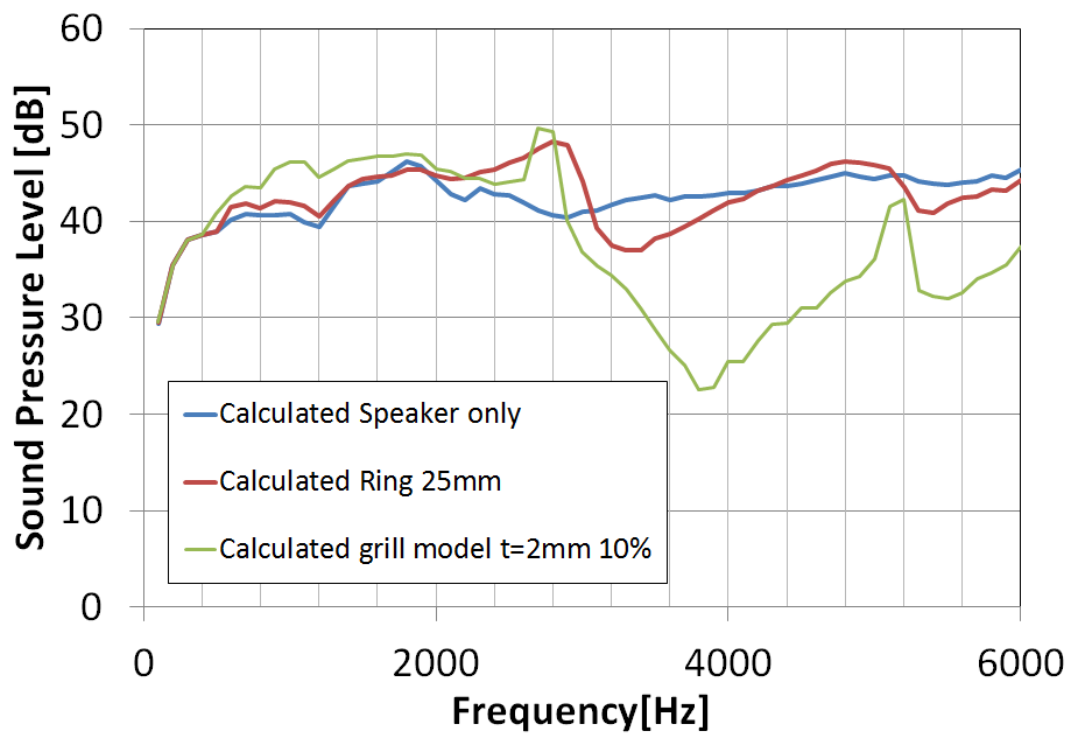


図 5.5 グリルなしとグリルあり(t=2mm 10%)の放射音比較

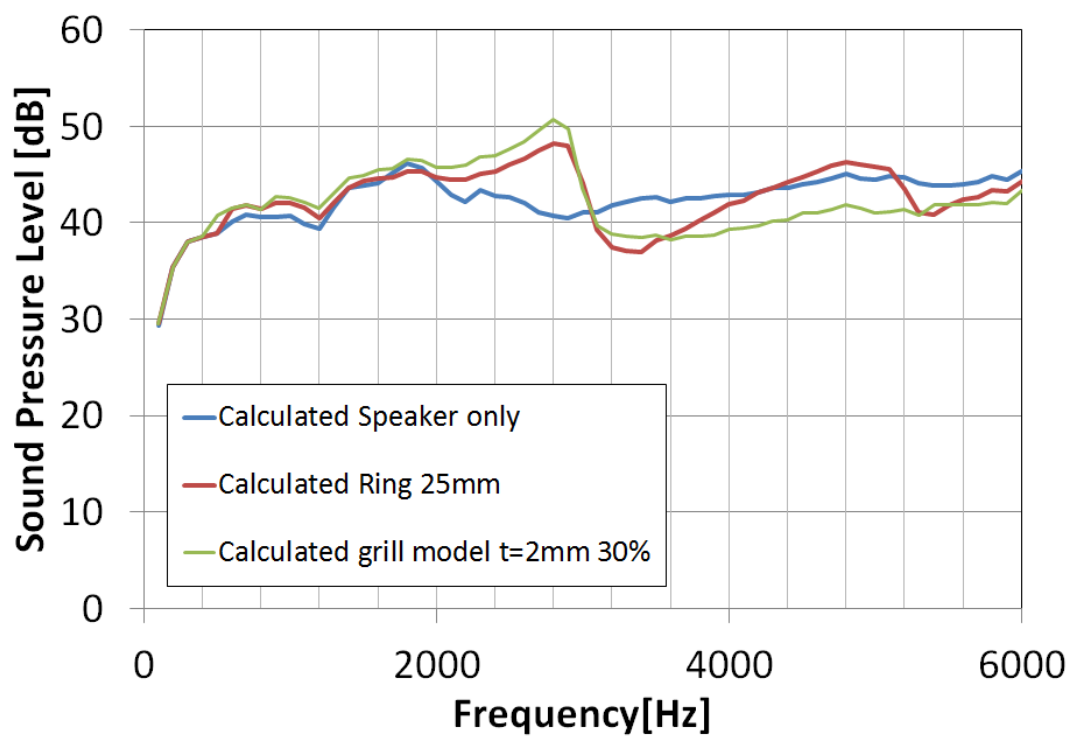


図 5.6 グリルなしとグリルあり(t=2mm 30%)の放射音比較

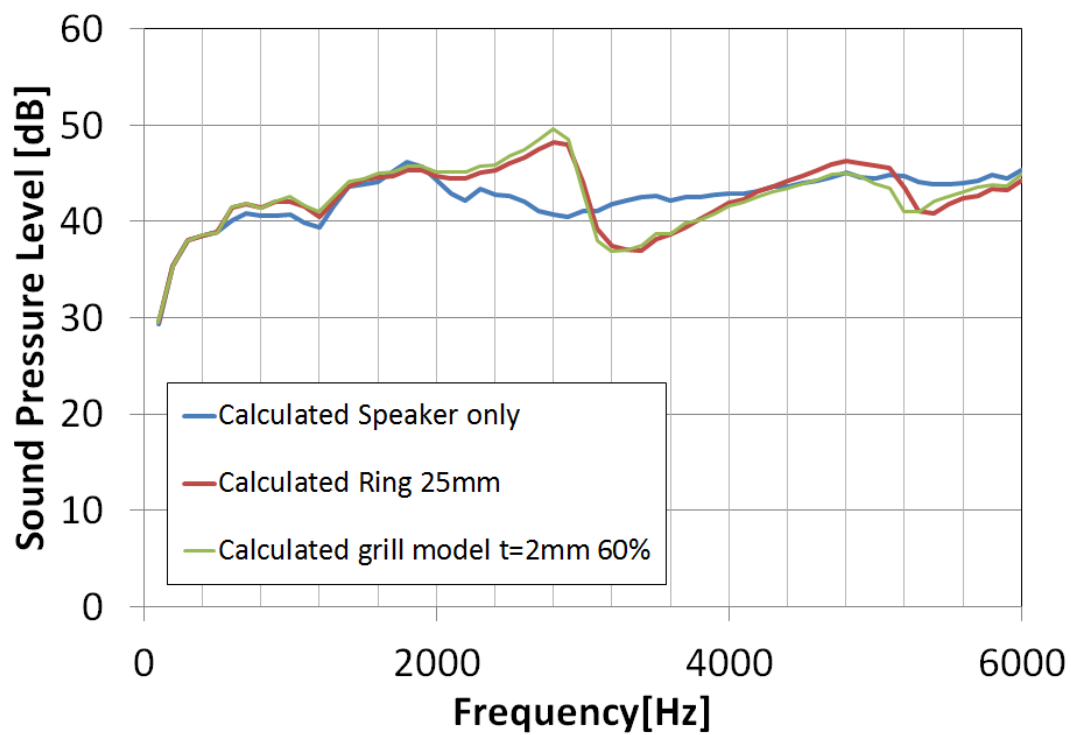


図 5.7 グリルなしとグリルあり(t=2mm 60%)の放射音比較

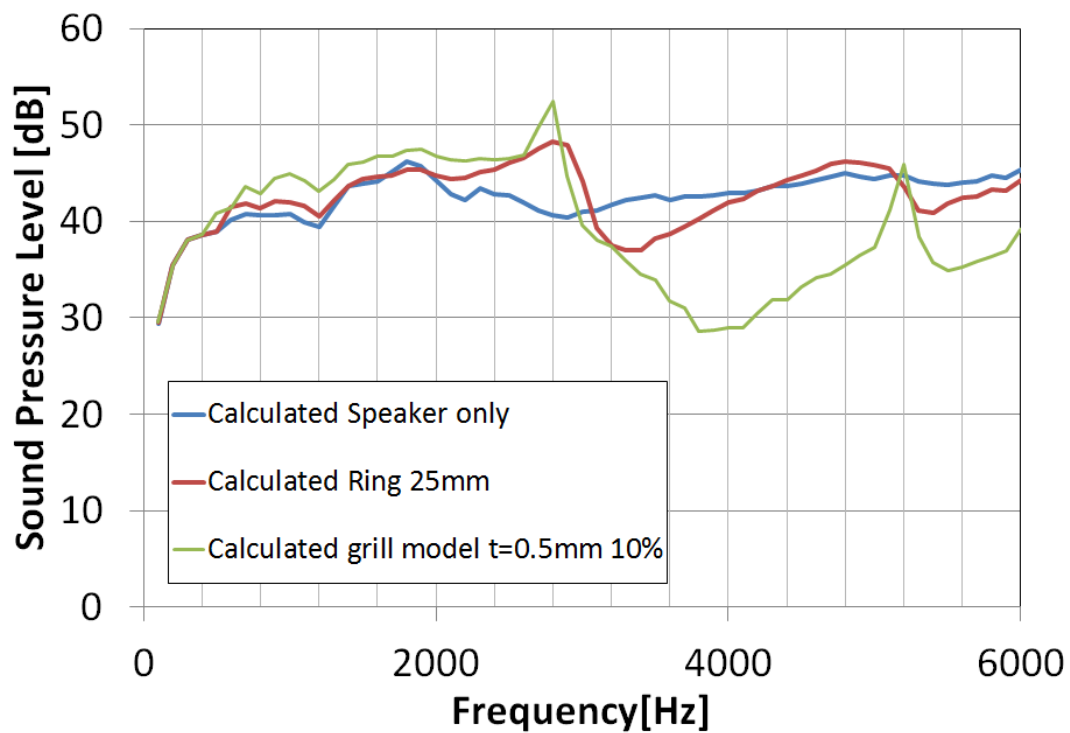


図 5.8 グリルなしとグリルあり (t=0.5mm 10%)の放射音比較

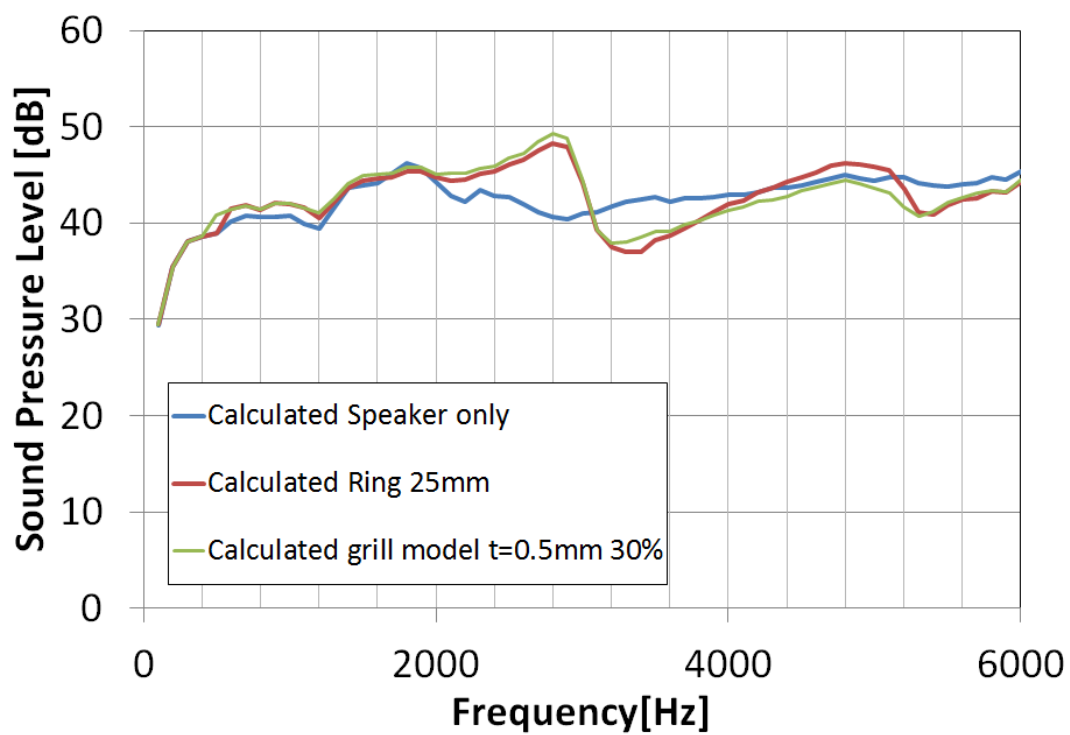


図 5.9 グリルなしとグリルあり (t=0.5mm 30%)の放射音比較

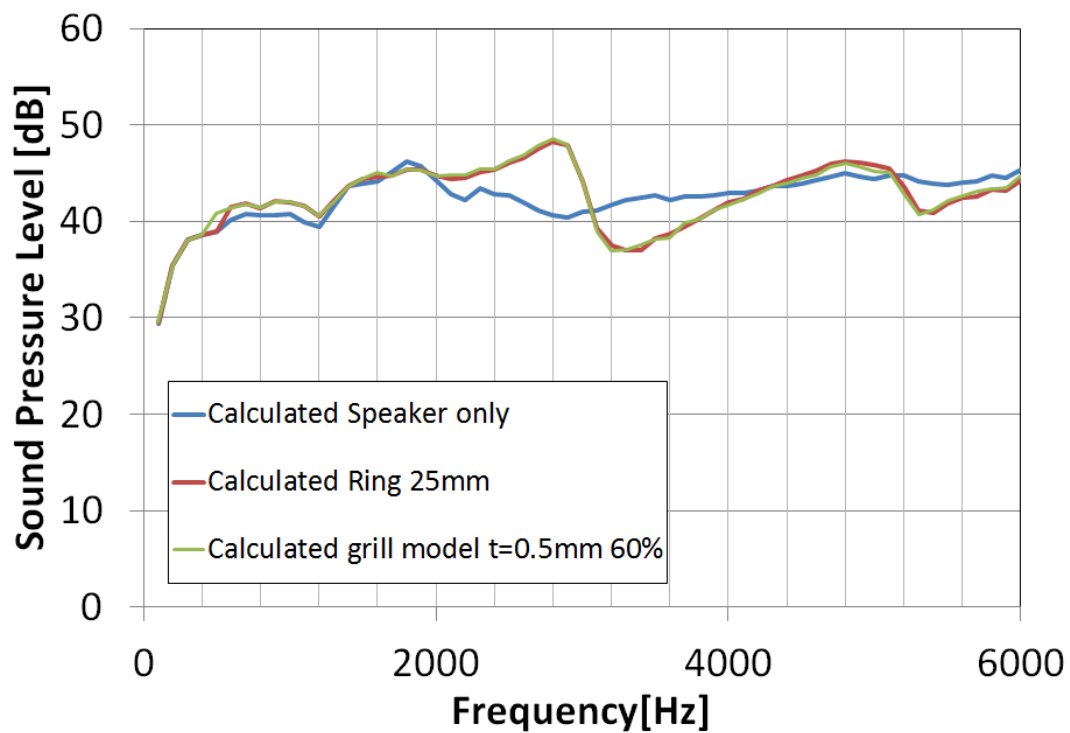


図 5.10 グリルなしとグリルあり($t=0.5\text{mm}$ 60%)の放射音比較

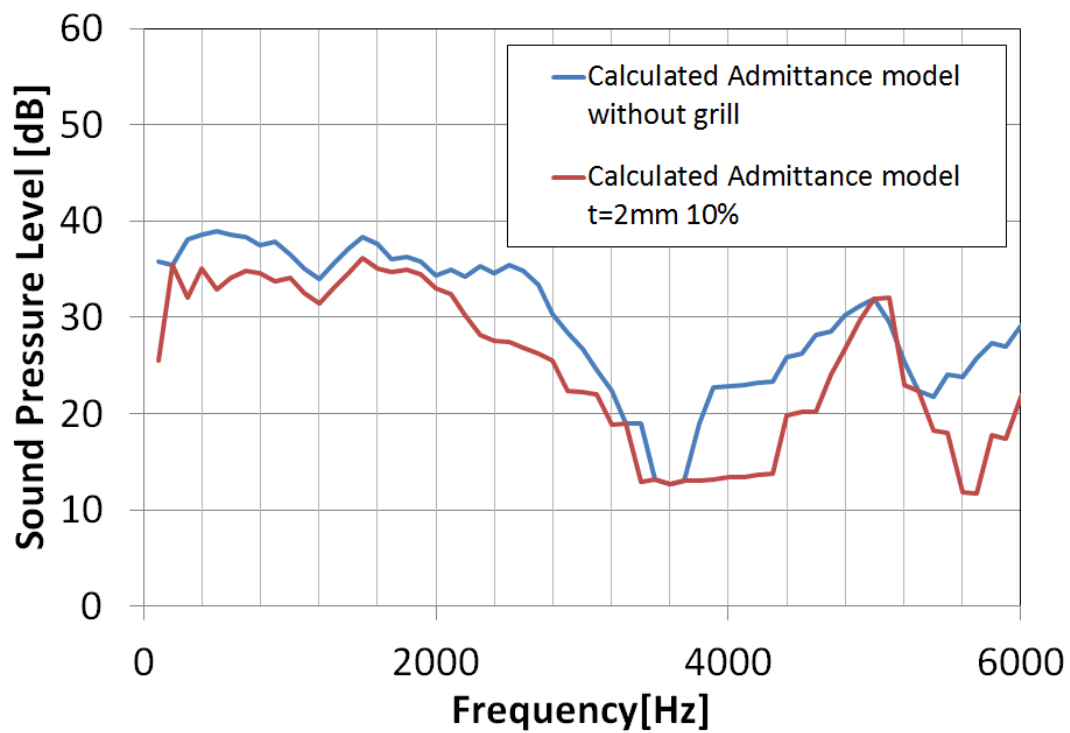


図 5.11 グリルなしとグリルあり($t=2\text{mm}$ 10%)の放射音比較
(伝達アドミッタンス定義モデル)

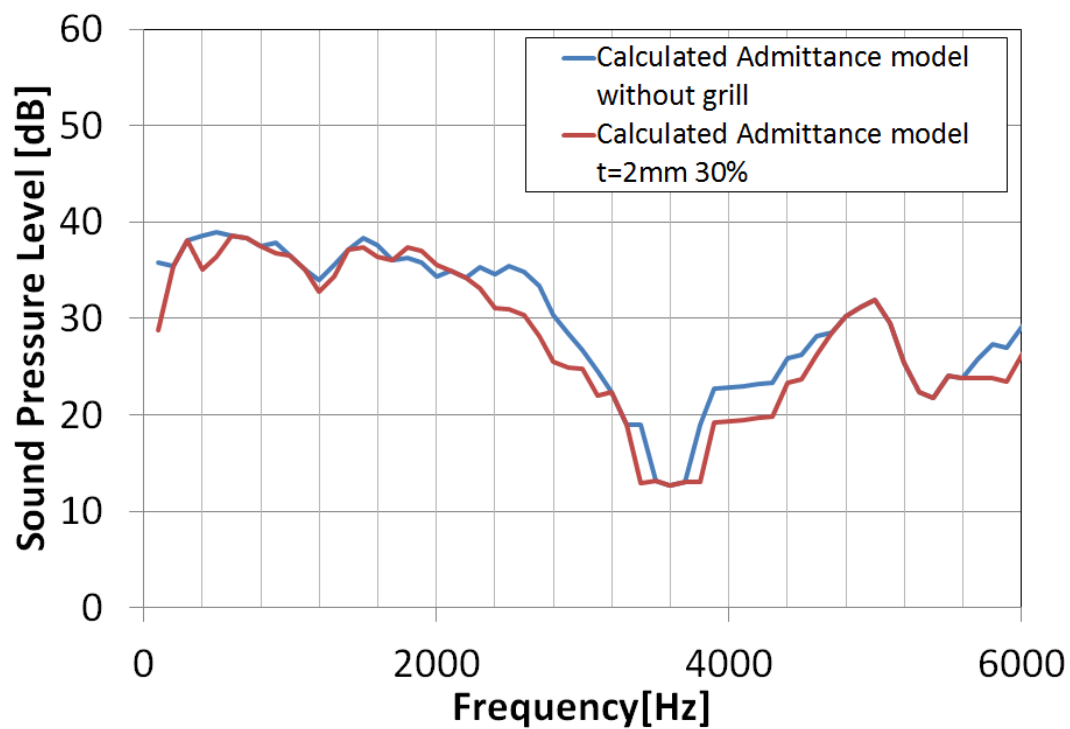


図 5.12 グリルなしとグリルあり(t=2mm 30%)の放射音比較
(伝達アドミタンス定義モデル)

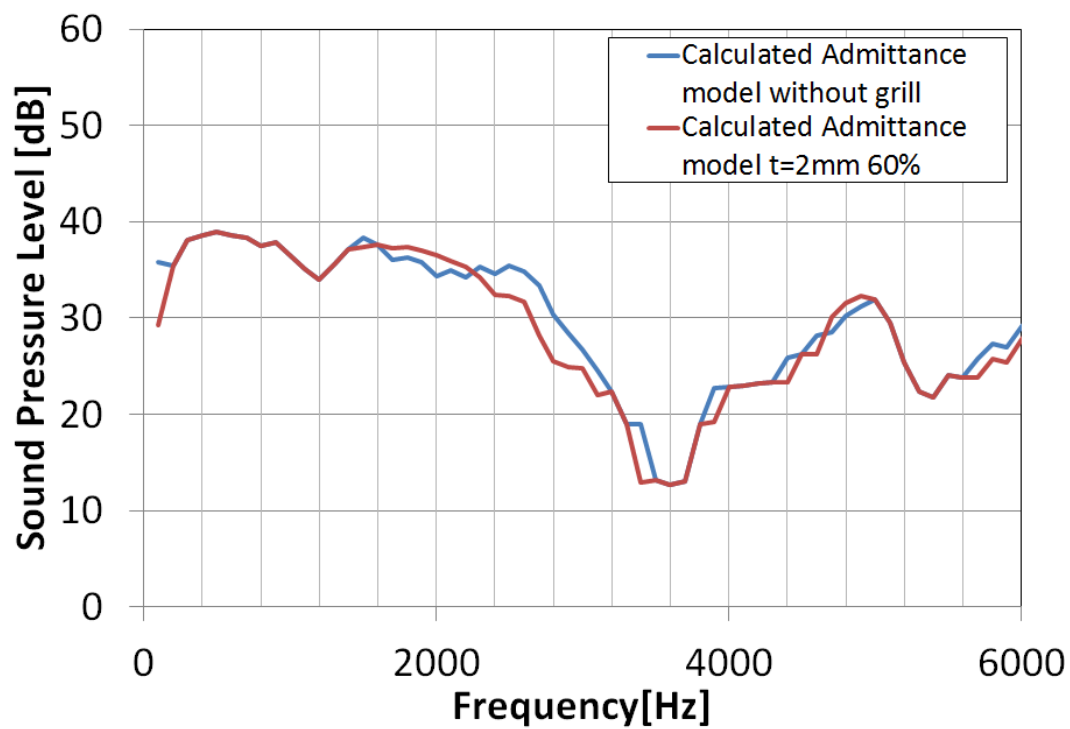


図 5.13 グリルなしとグリルあり(t=2mm 60%)の放射音比較
(伝達アドミタンス定義モデル)

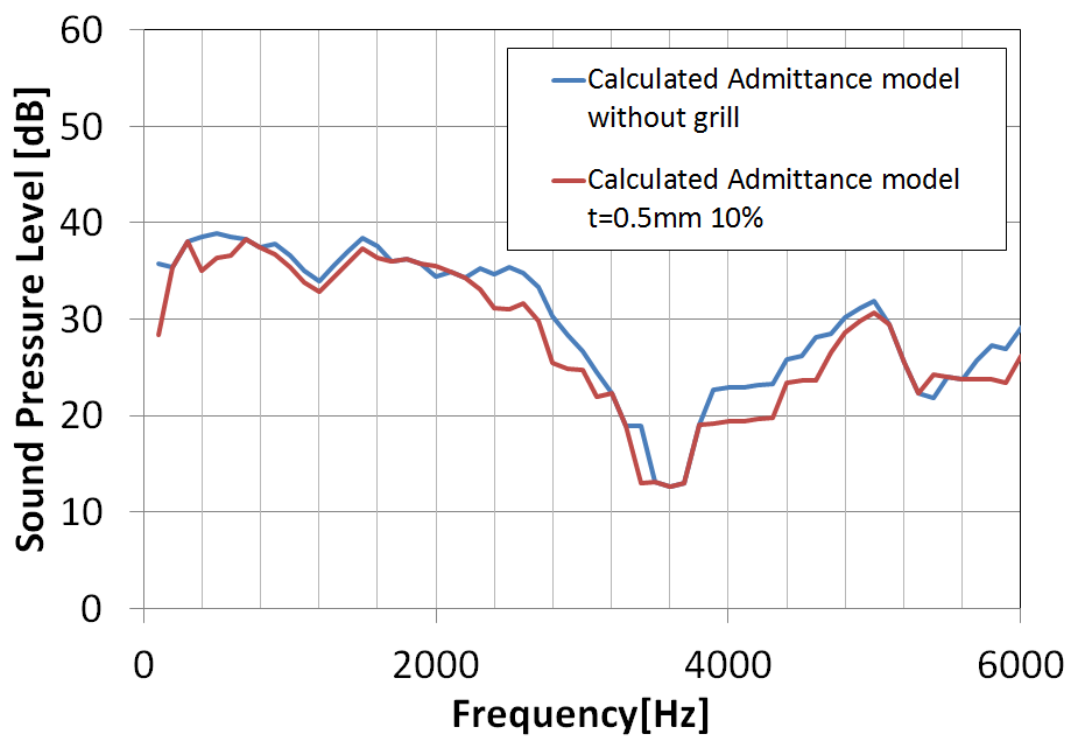


図 5.14 グリルなしとグリルあり($t=0.5\text{mm}$ 10%)の放射音比較
(伝達アドミッタンス定義モデル)

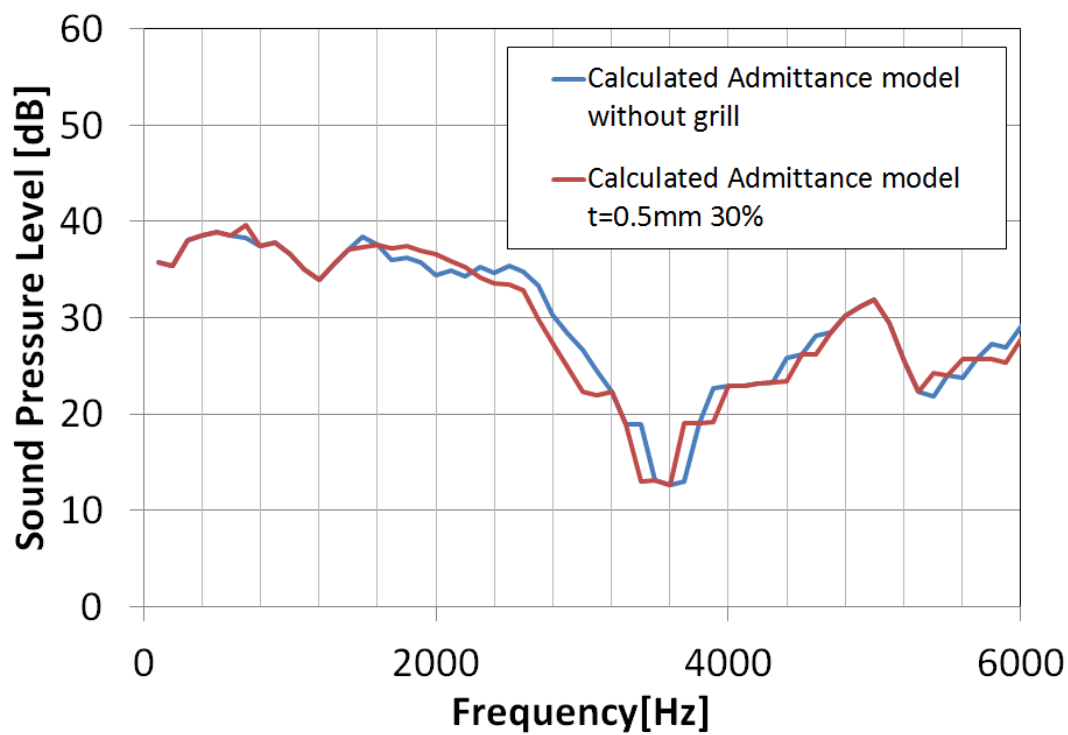


図 5.15 グリルなしとグリルあり($t=0.5\text{mm}$ 30%)の放射音比較
(伝達アドミッタンス定義モデル)

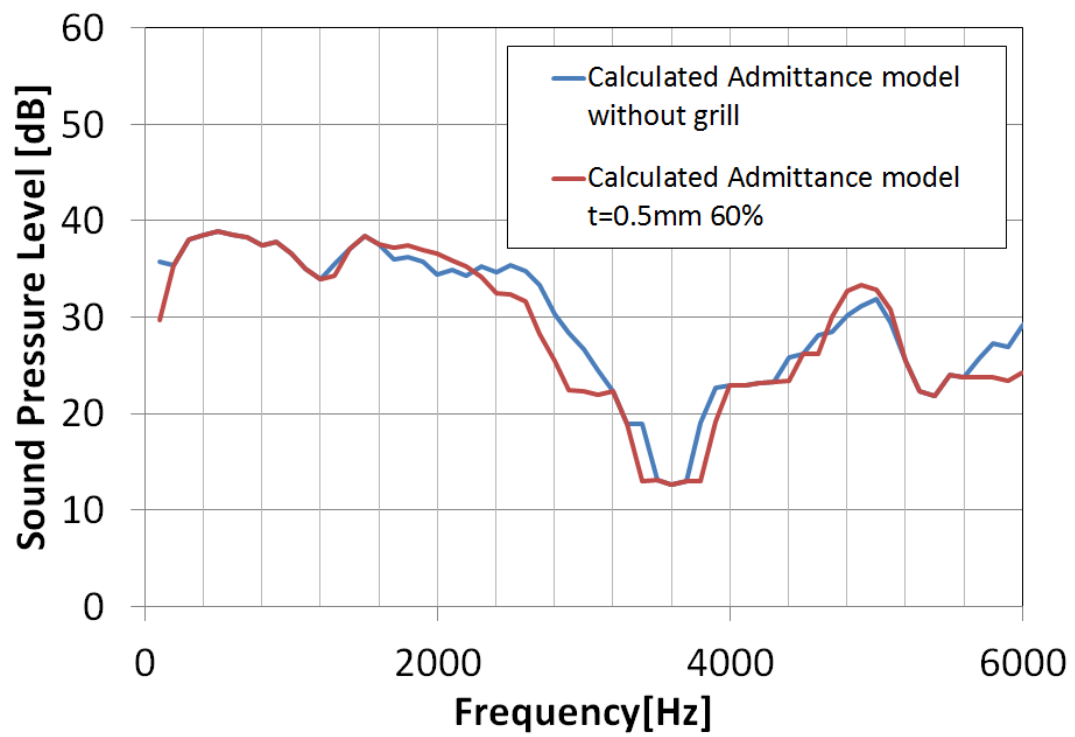


図 5.16 グリルなしとグリルあり (t=0.5mm 60%)の放射音比較
(伝達アドミッタンス定義モデル)