

# ユニットサイレンサの高性能化に関する研究

岡野, 裕征 / OKANO, Hiroyuki

---

(発行年 / Year)

2006-03-24

(学位授与年月日 / Date of Granted)

2006-03-24

(学位名 / Degree Name)

修士(工学)

(学位授与機関 / Degree Grantor)

法政大学 (Hosei University)

2005年度 修士論文

ユニットサイレンサの高性能化に関する研究

指導教授 長松 昭男 教授

法政大学大学院工学研究科機械工学専攻修士課程

学生証番号 04r1112

オカノ ヒロユキ

岡野 裕征

## 目次

第一章 緒言	1
1.1 本研究の背景	2
1.2 使用記号表	4
第二章 評価と測定方法	5
2.1 サイレンサの目的	6
2.2 サイレンサの効果の評価方法	9
第三章 共鳴型サイレンサの理論	11
3.1 1自由度系の運動方程式	12
3.2 四端子定数による表示	18
3.3 限界周波数	23
第四章 振動試験	24
4.1 振動試験	28
4.2 信号処理	
第五章 音響実験装置及び実験方法	30
5.1 計測器	32
5.2 供試サイレンサ	36
5.3 実験装置全体及び方法	45
第六章 実験結果及び考察	49
6.1 音響試験におけるサイレンサの減音特性	50
6.2 振動試験によるサイレンサの振動の減音特性への影響調査	58
第七章 境界要素法による音響解析	60
7.1 緒言	61
7.2 理論	61
7.3 解析方法	71
7.4 解析結果および考察	73
第八章 結言	84

# 第一章

## 緒言

## 第一章 緒言

### 1.1 本研究の背景

近年，産業用送風機の大型化や自動車の性能向上などの急速な技術進歩が見られる中で，環境保全という社会要請にともない公害問題のうちのひとつとして騒音問題が取り上げられているが，その騒音防止の技術が社会的要請に対して，まだ不十分な現状である。それ故，更なる騒音技術が望まれている。騒音とは，“望ましくない音”の総称であり，その対策として人間が“望ましくない音”に感じないように音質を改善する方法，騒音のレベルそのものを低減する方法など様々ある。この研究同様，送風機騒音や自動車排気音の騒音低減に欠かせない。サイレンサ（消音器）についての研究は以前から多数発表されているが，未だ解明されていない点が多く，十分なものとは言えない。

サイレンサとは，その原理，構造などにより，グラスウール等の吸音材を用いて消音させるパッシブ形（*Passive*）と，音の反射，干渉などを利用して消音させるリアクティブ形（*Reactive*）に大別できる。

吸音形サイレンサ（パッシブ形マフラ）は，グラスウール，ロックウールなどの吸音材と空気の間にはたらく摩擦によって，音のエネルギーを最終的に熱エネルギーに変換して減音させるものであり，中高周波数域，特に波長の短い高周波数域に優れている。しかし，ダストなどの吸音材を目づまりさせる雰囲気中での使用に不向きであり，特に自動車用マフラでは耐久性の点で不向きである。また低中音域の減音量を得ようとする場合には大型になる欠点がある。

これに対して，リアクティブ形サイレンサは吸音材を使用せず，音の反射，共鳴，干渉などを積極的に利用しようとするものであり，低中音域において容易に大きな減音量が得られるので，送風機やエンジンの排気系等の消音器に適している。一般に，リアクティブ形の膨張形サイレンサ等は吸音形に比べて気流による圧力損失は大きくなるが，これらを軽減できれば応用範囲は，更に拡大するものと考えられる。

本研究では，リアクティブ形サイレンサの中の共鳴形サイレンサについて研究を行った。共鳴形サイレンサは，*Helmholtz* 共鳴器の応用であり，その特徴は，共鳴周波数付近での減音効果が大きく，吸音材形サイレンサでは難しい低周波数域においても減音効果が大きく，しかも圧力損失が小さいことである。そのため，例えば，送風機などにおける回転騒音のように，卓越した成分があらわれる場合の消音に有効である。

一方，サイレンサの設計には，経験的要素が多く，減音量の見込みや，共鳴周波数のずれなどの問題があり，設計手法の確立が望まれている。

プラントやトンネル換気塔の排風ダクト内の騒音を低減する場合，ユニット式サイレンサ

と呼ばれる吸音形サイレンサが広く利用されている。このサイレンサはユニットの個数を変えて使用することで、異なるダクト寸法に対応したり、減音量を調整したりすることが可能である。最近、ユニット式サイレンサに共鳴形を採用し、低周波数域の減音を得ようとする試みがなされている。一方、ユニット式サイレンサは薄板構造であり、共鳴周波数付近での板振動や音響透過の影響が減音特性に現れてしまうことがある。

本研究は、共鳴型ユニットサイレンサの開発に関して、その設計手法を確立するため、音響試験による減音特性の実験的解明および境界要素法による減音特性の理論解析を行うものである。

1.2 使用記号表

$f$	= 周波数 [Hz]
$f_r$	= 共鳴周波数 [Hz]
$c$	= 音速 [mm/s]
$n$	= 孔数
$V$	= 共鳴室内の容積 [ $mm^3$ ]
$t$	= ネック部の長さ (内筒の板厚) [mm]
$d$	= 孔の直径 [mm]
$r$	= 孔の半径 [mm]
$D$	= ダクトの直径 [mm]
$S$	= ダクトの断面積 [ $mm^2$ ]
$S_o$	= 共鳴室の断面積 [ $mm^2$ ]
$D_o$	= 外筒の直径[mm]
$L_o$	= 外筒の長さ [mm]
$Att$	= 減音量 (減衰量)

## 第二章

# 評価と測定方法



## 第二章 評価と測定方法

## 2.1 サイレンサ（消音器）の目的

ある音場において、サイレンサ出口のパワーが  $W_2$  でパワーレベル  $PWL$  のとき、出口から距離  $r$  離れた観測点での  $SPL$  は次のようになる。

$$SPL = PWL + 10 \log \left( \frac{D}{4 r^2} \right) \quad [\text{dB}] \quad (2.1.1)$$

$D$  は、音源の位置による係数で、自由音源なら  $D = 1$ 、半自由音源なら  $D = 2$  である。また、出口のパワーレベルは、

$$PWL = 10 \log W_2 + 120 \quad [\text{dB}] \quad (2.1.2)$$

であるから、音源のパワーを  $W_0$  とすると、任意の位置における音圧レベルは、

$$SPL = 10 \log W_0 + 10 \log \left( \frac{W_2}{W_0} \right) + 120 + 10 \log \left( \frac{D}{4 r^2} \right) \quad [\text{dB}] \quad (2.1.3)$$

となる。

すなわち  $SPL$  を小さくするには、音源  $W_0$  を小さくするか、 $W_2 / W_0$  を小さくするか、距離  $r$  を大きくするか、 $D$  を小さくするか、減衰  $L_{re}$  を大きくするなどしなければならない。以上のことをまとめると、

- 1) 距離  $r$  を大きくする。そのために、音源から離れるか、又は、音源を離す。
- 2) 音源  $W_0$  を小さくする。音源自体の改善。
- 3)  $W_2 / W_0$  を小さくする。管路自身の問題。

となり、サイレンサは3)の分類である。また、サイレンサへの入力パワー  $W_1$  を用いて、

$$\frac{W_2}{W_0} = \frac{W_2}{W_1} \times \frac{W_1}{W_0} \quad (2.1.4)$$

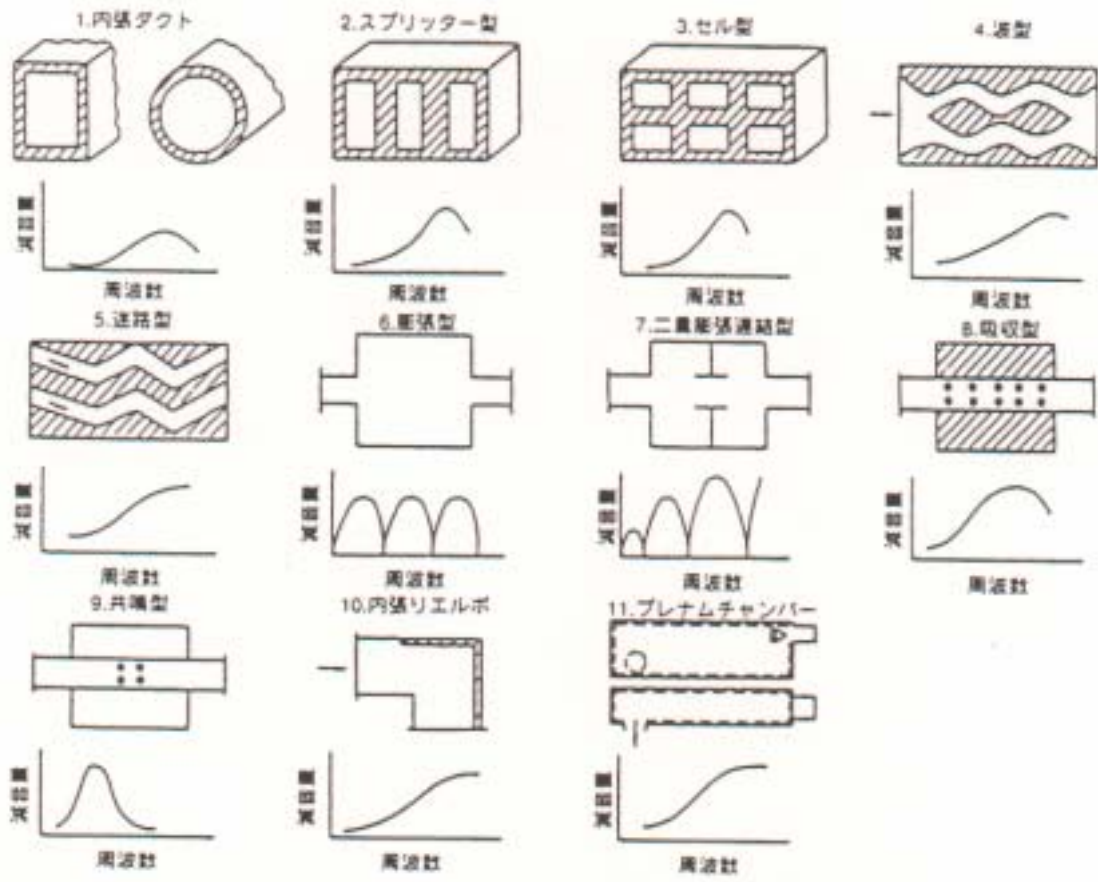
とすると、第1項  $W_2/W_1$  を小さくするには、サイレンサでのエネルギーを吸収すれば良い。そのためには、媒質の粘性を利用して壁面との間や狭い通路での摩擦を用いたり、繊維質や多孔質の吸音材などを用いる。このように内部エネルギー吸収を目的とした消音器を吸音型消音器という。

第2項  $W_1/W_0$ 、管路内でのエネルギー吸収がないとき、あるいは無視できるときは  $W_1 = W_2$  で、この場合は  $W_2/W_0 = W_1/W_0$  となり、 $W_1/W_0$  を小さくしなければならない。この目的に用いられる消音器をリアクティブ形消音器という。種類としては、空洞を持った膨張形、共鳴形と、空洞を持たない物（断面積変化、オリフィス、エルボ）とに分かれる。

実際にはリアクティブ形消音器でも、媒質の粘性による損失がわずかながら存在する。また、2つ以上を合わせた消音器も多い。パッシブ型サイレンサリアクティブ型サイレンサの種類を表 2.1 及び図 2.1 に示す。

Table 2.1 代表的な消音器

パッシブ型マフラ	リアクティブ型マフラ
<ul style="list-style-type: none"> <li>・内張りダクト・内張りエルボ</li> <li>・スプリッタ型・吸収型</li> <li>・セル型</li> <li>・波形</li> <li>・迷路型</li> <li>・プレナムチャンバ</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・膨張型</li> <li>・二重膨張連結型</li> <li>・共鳴型</li> </ul>



## 2.2 サイレンサの効果の評価方法

サイレンサを評価するには、サイレンサを装着することの効果である「減音量」を指標とする。しかし、減音量にもいくつかの種類があり、いろいろな定義がある。そこで、代表的な下記の3種類について取り上げ、説明する。

2.2.1 透過損失 ( *Transmission Loss* :  $TL$  )

サイレンサや吸音材の性能を評価するときに用いられる。透過損失は、サイレンサの入口と出口の進行波音波のエネルギー比で定義されサイレンサの入口と出口の進行波の音圧振幅をそれぞれ  $|A_1|$  ,  $|A_2|$  , 断面積を  $S_1$  ,  $S_2$  とすると

$$TL = 10 \log \frac{|A_1|^2 S_1}{|A_2|^2 S_2} \quad (2.2.1)$$

と表される。この透過損失の理論計算はサイレンサのない場合を考える必要がないので比較的容易であるが、透過損失の計測は進行波と後退波を分離して計測する必要があり、やや困難である。しかし、サイレンサ以降に反射のない場合は、他の減音量より適した評価が得られる。

2.2.2 挿入損失 ( *Insertion Loss* :  $IL$  )

挿入損失はサイレンサのない場合音圧レベル  $L_p$  とサイレンサを付けた場合の音圧レベル  $L'_p$  の差で定義され、

$$IL = L_p - L'_p \quad (2.2.2)$$

と表される。なお、挿入損失を求めるときのサイレンサ出口から騒音計測点までの距離と方向は、消音器がない場合の排気口から計測点までの距離と同じ方向である。供試体を設置する前と設置後の比較なので、「設置することによる効果」を表す。しかし、理論式を導

き難いという点が問題である。

### 2.2.3 消音効果 ( *Attenuation* : *ATT* )

消音効果はサイレンサがない場合の音圧レベル  $P_1$  とサイレンサを付けた場合の音圧レベル  $P_2$  の比で定義され、

$$ATT = P_1 - P_2 \quad (2.2.3)$$

と表される。内燃機関の吸排気系のサイレンサの評価にはこの消音効果を用いるのが最もよい。なお、本実験においてはこの消音効果をサイレンサの評価に用いる。また、減衰量は、音響工学でも非常に広義に用いられ、その定義に留意する必要がある。

## 第三章

### 共鳴型サイレンサの理論

## 第3章 共鳴型サイレンサの理論

### 3.1 1自由系の運動方程式

1自由系は、振動系の中で最も簡単な系であり、しかも、線形多自由度系の振動や弾性体の振動の各モードが、1自由度系と全く同じ挙動をする。そのため、1自由度系の振動特性は振動の基礎となる。そこで、本筋では機械系（直線振動、ねじり運動）、電気系（LCR回路）、音響系（ヘルムホルツ型共鳴器）について運動方程式について述べる。

#### 3.1.1 機械振動系（直線振動）

自動車の懸架装置や防振を考慮して据え付けられた機械の系は、Fig.3.1.1のように、質量  $m$  [kg]の物体がばね定数  $k$  [N/m]のばねと減衰係数  $c$  [Ns/m]をもつ粘性減衰器で支えられている系でモデル化される。

いま、物体に励振力  $F(t)$  [N]が作用する時、つりあいの位置を基準として、変位  $x$  [m]の座標を下向きに正にとれば、系の運動方程式は、力のつりあい（ダランベールの原理）から

$$-m\ddot{x} - c\dot{x} - kx + F(t) = 0 \quad [\text{N}] \quad (3.1)$$

である。書き直して

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx - F(t) = 0 \quad (3.2)$$

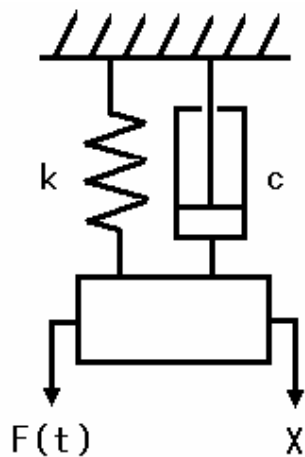


Fig.3.1.1 直線運動

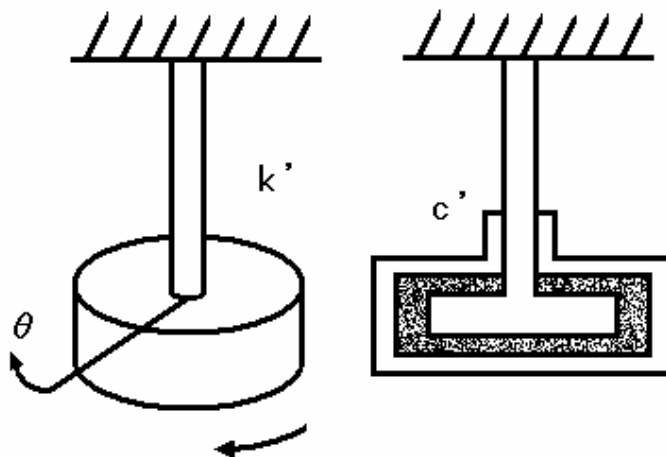


Fig.3.1.2 ねじり運動

### 3.1.2 機械振動系（ねじり運動）

Fig.3.1.2(a)は、ねじりばね定数  $k'$  [Nm/rad]の軸に、慣性モーメント  $I$  [kg m<sup>2</sup>]の板を取り付けた系に、外力のモーメント（励振トルク）  $M(t)$  [Nm]が作用している系である。そして、同(b)図に示すように、円板は、ケーシング内の流体によって粘性減衰（係数[Nms]）を受けるとすると、系にはねじり減衰モーメント  $-c'$ が作用する。

平衡位置からのねじれ角を  $\theta$  [rad]とするとねじり振動系の運動方程式は

$$-I\ddot{\theta} - c'\dot{\theta} - k'\theta + M(t) = 0 \quad [\text{Nm}] \quad (3.3)$$

書き直して

$$I\ddot{\theta} + c'\dot{\theta} + k'\theta - M(t) = 0 \quad (3.4)$$

である。

### 3.1.3 電気回路振動系

Fig.3.1.3 に示すような、コンデンサ  $C$  [F]、抵抗  $R$  [ $\Omega$ ]、インダクタンス  $L$  [H]が直列に結合された電気回路に起電力  $E(t)$  [V]がかかっている系を考える。電気量を  $q$  [C]と



すると、電流  $i = dq/dt$  [A] である。オームの法則により抵抗  $R$  の両端の電圧は  $R_i = R\dot{q}$  であり、インダクタンスの両端の電圧は  $L(di/dt) = L\ddot{q}$ 、コンデンサの両端の電圧は  $(1/C)\int i dt = q/C$  である。ニュートンの第2法則の代わりに、起電力は  $R$ 、 $L$ 、 $C$  の間の3つの電圧の和に等しいというキルヒホッフ (Kirchhoff) の第2法則を用いると、回路の方程式は

$$L\ddot{q} + R\dot{q} + \frac{1}{C}q = E(t) \quad [V] \quad (3.5)$$

となる。

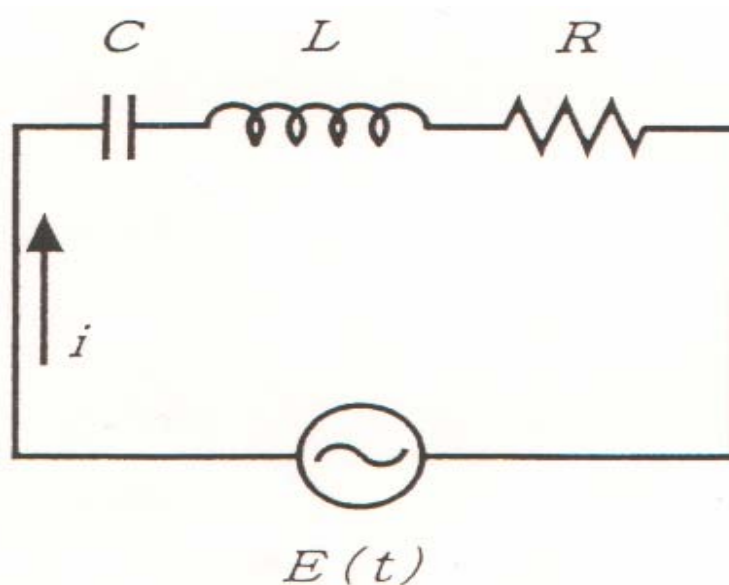


Fig.3.1.3 LCR回路

### 3.1.4 音響振動系

Fig.3.1.4 のような、容積  $V$  [m<sup>3</sup>] の空洞が長さ  $l$  [m]、断面積  $A$  [m<sup>2</sup>] の小さな開口部によって外部と通じており、開口部の空気が出口圧と空洞内圧力との差によって運動する系 [ヘルムホルツ (Helmholtz) の共鳴器] を考える。空気密度を  $\rho$  [kg/m<sup>3</sup>] とすると、開口部の空気の質量は  $\rho l A$  であり、この空気が剛体のように左右に運動すると考える。いま、 $x$  [m]

だけ微小変位したとすると、空洞内では $\Delta p$  [Pa]だけ圧力が減少する。そのときの復元力は

$$-\Delta p A = K \frac{\Delta A}{V} A = \frac{\rho a^2 A x}{V} A = \frac{\rho a^2 A^2}{V} x \quad (3.6)$$

である。ただし、 $\Delta V = Ax$ 、 $a = \sqrt{K/\rho}$  は音速  $c$ [m/s]の定義であり、 $K = -V(\Delta p/\Delta V)$ は体積弾性率[Pa]である。系には、通常音の放射によるエネルギー減衰と、空気の流動による粘性抵抗による減衰があるので、それらをまとめて $-c_a \dot{x}$ の減衰が作用していると考えられる。また、開口部の出口で振動子により  $p(t)$  [Pa]なる励振力が作用する場合の力のつりあいは、

$$-\rho \ell A \ddot{x} - c_a \dot{x} - \frac{\rho a^2 A^2}{V} x + A p(t) = 0 \quad [\text{N}] \quad (3.7)$$

運動方程式は  $Ax = W$  [m<sup>3</sup>]とにおいて、圧力の単位でそろえると、

$$\frac{\rho \ell}{A} \ddot{W} + \frac{C a}{A^2} \dot{W} + \frac{\rho a^2}{V} W - p(t) = 0 \quad [\text{Pa}] \quad (3.8)$$

である。空気のばね定数  $\rho a^2/V$  の逆数  $V/\rho a^2$ 、 $K/\rho$  を音響キャパシタンスと呼ぶことがある。それは、式(3.8)を式(3.5)の電気振動の式と比較すればその意味は明らかになる。

以上の結果から、機械系の直線振動とねじり振動、電気回路の振動、そして音響振動は、すべて同じ形の微分方程式になることがわかった。Table 3.1.1 に示すように、これらの間には対応関係がある。例えば、電気系のインダクタンス  $L$  による電圧  $L(di/dt)$  は、機械系の  $m(dv/dt)$  に対応する。また機械系での運動エネルギーは  $(1/2)mv^2$  は、電気系ではインダクタンスに蓄えられるエネルギー  $(1/2)Li^2$  に対応する。

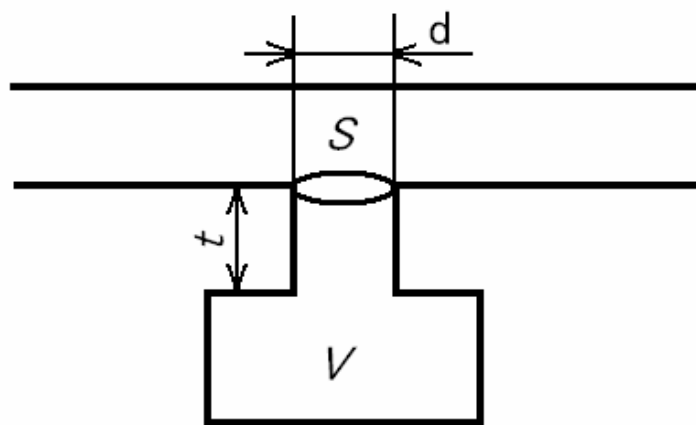


Fig.3.1.4 ヘルムホルツ型共鳴器

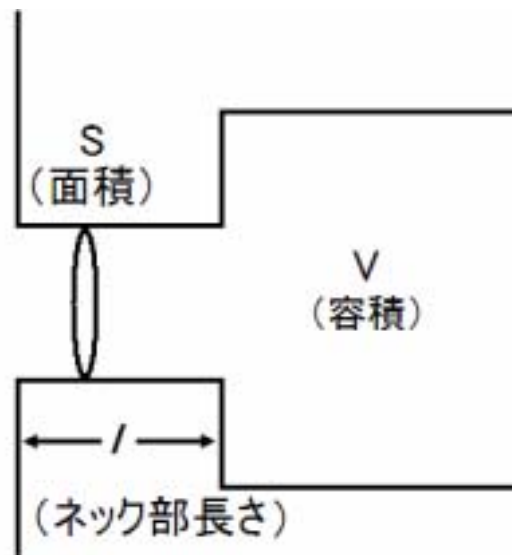
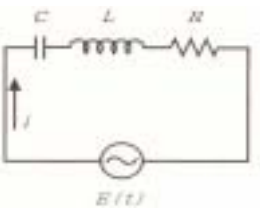
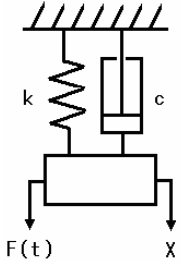



Fig.3.1.5 音響系等価回路

Table.3.1.1 共振系の電気、機械、音響系の等価回路

	等価回路	方程式	共振周波数
電気系		$L\ddot{q} + R\dot{q} + \frac{1}{C}q = E(t)$	$\frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$
機械系		$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx - F(t) = 0$	$\frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{k}{m}}$
音響系		$\frac{\rho l}{A}\ddot{W} + \frac{Ca}{A^2}\dot{W} + \frac{pa^2}{V}W - p(t) = 0$	$\frac{c}{2\pi}\sqrt{\frac{S}{V(l + \frac{\pi}{2}r)}}$

3.2 四端子定数による表示

3.2.1 直管の四端子定数表示

Fig.3.2.1 に示すように、長さ  $l$ 、断面積  $S$  の直管の入口の音圧  $\dot{p}_1$ 、体積速度  $\dot{U}_1$ 、出口のそれらを  $\dot{p}_2$ 、 $\dot{U}_2$  とすれば、これらの間には次の関係が成り立つ。

$$\begin{bmatrix} \dot{p}_1 \\ \dot{U}_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{p}_2 \\ \dot{U}_2 \end{bmatrix}$$

ここで、 $ABCD$  は四端子定数で

$$\begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos kl & j \frac{\rho c}{S} \sin kl \\ j \frac{S}{\rho c} \sin kl & \cos kl \end{bmatrix} \quad (3.9)$$

$j$  : 虚数単位

$\rho c / S = Z_1$  : 管の特性インピーダンス

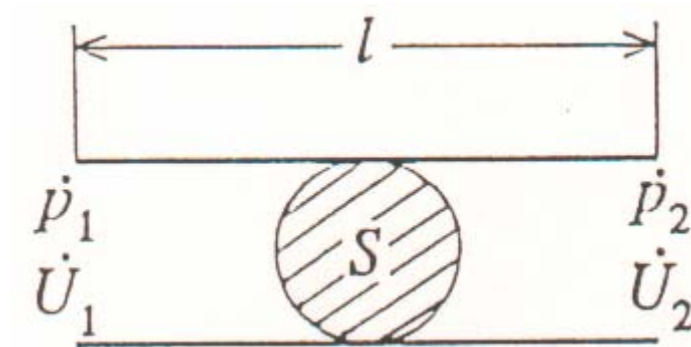


Fig3.2.1 四端子定数 (直管)

3.2.2 共鳴器の四端子定数表示

Fig.3.2.2 に示すような回路図で表される共鳴器の場合、共鳴器の結合点からインピーダンスとすれば、結合点における音圧と体積速度の連続の式から、

$$\begin{bmatrix} \dot{p}_1 \\ \dot{U}_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{p}_2 \\ \dot{U}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ \frac{1}{\dot{Z}_p} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{p}_2 \\ \dot{U}_2 \end{bmatrix}$$

ここで、サイドブランチ形の場合 (Fig.3.2.4), 共鳴器のインピーダンス  $\dot{Z}_p$  は次式で表される。

$$\dot{Z}_p = \frac{1}{j \tan kl} \frac{\rho c}{S_p} = j \frac{\rho c}{S_p} \frac{-1}{\tan kl}$$

ヘルムホルツ形共鳴器の場合 (Fig.3.2.4) は次のように表される (ただし、集中定数範囲において)。

$$\dot{Z}_p = j\omega m_p + \frac{1}{j\omega C_p} \quad (3.10)$$

ここで、

$m_p = \rho l / S_p$  : イナータンス

$C_p = V / \rho c^2$  : 音響キャパシタンス

$\omega = 2\pi f$  : 角周波数

$l$  : 共鳴器の頸部 (ネック部) の長さ (管端補正長を含む)

$S_p$  : 共鳴器の頸部の断面積

$V$  : 共鳴器の背後空間の容積

したがって、

$$\dot{Z}_p = j \left( \omega m_p - \frac{1}{\omega C_p} \right) = j \frac{\rho c}{S_p} \left( kl - \frac{S_p l}{V} \frac{1}{kl} \right)$$

ここで、

$G = S_p / l$  : 頸部の伝導率

共鳴周波数 (減音効果のもっとも大きい周波数)  $f_r$  は  $Z_p$  とおくことにより, 次式で与えられる.

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{m_p C_p}} = \frac{c}{2\pi} \sqrt{\frac{S_p}{lV}} = \frac{c}{2\pi} \sqrt{\frac{G}{V}} \quad (3.11)$$

また, 頸部が  $n$  個の場合には,

$$f_r = \frac{c}{2\pi} \sqrt{\frac{nG}{V}} \quad (3.12)$$

$G$  は開口端補正を含んだ孔の伝導率で,

$$G = \frac{S_p}{l} = \frac{\pi r^2}{t + \frac{r}{2}} \quad (3.13)$$

よって, このサイレンサのヘルムホルツの共鳴周波数は

$$f_r = \frac{c}{2} \sqrt{\frac{Sn}{V(t + \frac{r}{2})}} \quad [\text{Hz}] \quad (3.14)$$

となり, 本実験ではこの式を用いて, サイレンサを設計する.  
サイレンサを含む系(入口管, サイレンサ及び尾管)を断面積の様な要素に分割すれば, 各要素の四端子定数は, 式 3.16 または式 3.17 で表され, これらを掛け合わせるにより系全体の四端子定数 ABCD を求めることができる.

$$\begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_1 & B_1 \\ C_1 & D_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A_2 & B_2 \\ C_2 & D_2 \end{bmatrix} \cdots \begin{bmatrix} A_i & B_i \\ C_i & D_i \end{bmatrix} \cdots \begin{bmatrix} A_n & B_n \\ C_n & D_n \end{bmatrix} \quad (3.15)$$

ここで、 $\begin{bmatrix} A_i & B_i \\ C_i & D_i \end{bmatrix}$   $i$  番目の要素の四端子定数

$$(i = 1, 2, 3, \dots, n)$$

$n$  : 要素数

である。

要素が直管 ( Fig.3.2.1 ) の場合

$$\begin{bmatrix} A_i & B_i \\ C_i & D_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos kl_i & j \frac{\rho c}{S_i} \sin kl_i \\ j \frac{S_i}{\rho c} \sin kl_i & \cos kl_i \end{bmatrix} \quad (3.16)$$

要素が共鳴器 ( Fig.3.2.3 または Fig3.2.4 ) の場合

$$\begin{bmatrix} A_i & B_i \\ C_i & D_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ \frac{1}{Z_p} & 1 \end{bmatrix} \quad (3.17)$$



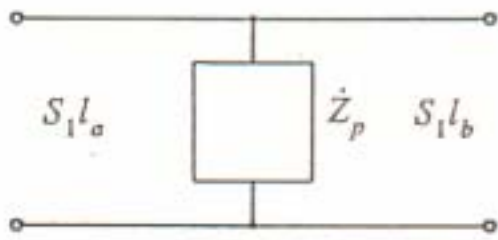


Fig.3.2.2 共鳴器の回路図

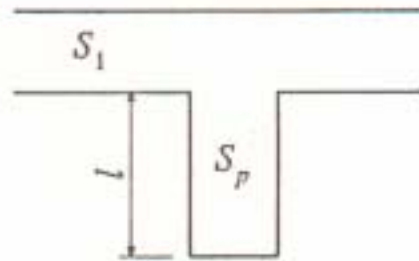


Fig.3.2.3 サイドブランチ形

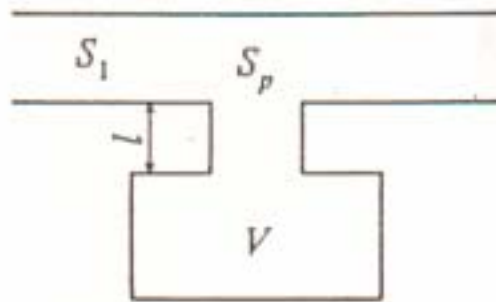
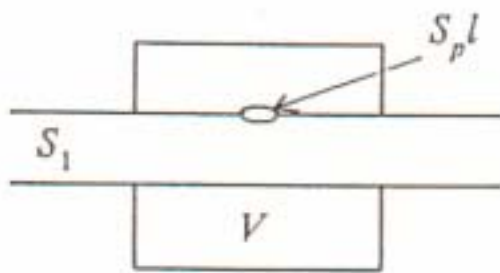


Fig.3.4.4 ヘルムホルツ型共鳴器

## 3.3 限界周波数

膨張型サイレンサにおいて、音波の周波数が高くなって、波長が短くなると空洞の半径方向に共振現象を生じ、一般に減音量が低下する。限界周波数に達すると、音波はダクトの中を平面波として進行できなくなる。それまでは1次元で音が進むと考えているが、以降は2次元、3次元的な動きを見せるので理論が成り立たなくなり、周波数自体の動きが読めなくなる。この限界周波数

$f_r$  は次式で与えられる。

$$f_r = \frac{1.22c}{2r} \quad (3.18)$$

$c$  : 空気中の音速,  $r$  : 空洞部の半径

本実験に使用する供試サイレンサにおいて、孔を全て塞いだ場合、膨張型サイレンサとしての特性を示すと思われるため、各サイレンサにおいて限界周波数を求めた。

サイレンサA ; 約900 [Hz]

サイレンサB ; 約775 [Hz]

この結果から、これ以上の周波数に対しては、共鳴による特性が正確に求まらないと思われる。

## 第四章

## 振動試験

## 第4章 振動試験

### 4.1 振動試験

本研究では、構造物であるサイレンサを対象としているが、サイレンサの共鳴孔に近い位置において実験を行った。サイレンサ使用時と同じで平らな台に置いて行った。本研究での実験は、インパルス・ハンマを使った打撃試験装置で実験対象のある1点に加速度ピックアップを固定し、応答を得るといった形で実験を行った。

Fig.4.6.1 にインパルス・ハンマによる加振風景を示す。Table.4.1.1 に機材の詳細を示し、Fig.4.1.2 にインパルス・ハンマ、Fig.4.1.3 に加速度ピックアップ、Fig.4.1.2 に FFT アナライザを示す。



Fig. 4.1.1 インパルス・ハンマによる加振



Fig.4.1.2 インパルス・ハンマ



Fig.4.1.3 加速度ピックアップ



Fig.4.1.4 FFT アナライザ

Table.4.1.1 機材の詳細

---

インパルス・ハンマ：	小野測器	086M36A
加速度ピックアップ：	PCB PIEZOTRONICS	356A32
FFT アナライザ：	RION	SA-01
モード解析用シームレスソフト：	CATEC	CAT・System

---

## 4.2 信号処理

振動試験で得た加振力と応答の測定結果から、信号処理によって周波数応答関数を求める。FFT アナライザに入力されたインパルス・ハンマと加速度ピックアップによる2つの信号は、毎回フーリエ変換し、各加振点での(応答/加振)の伝達関数として記録した。解析条件は表 4.6.2 を参照。内板・構造体のサイレンサの計測には、FFT と CAT・System (パソコンによる機械系振動騒音計測解析システム) を使用した。CAT・System は、市販の A/D ボードを使用してパソコンで実験データ計測～解析を行うシステムである。本研究では、結果を EXCEL 等で読み込める形式 (CSV 形式) で保存させ、図 4.2.1 に本研究の実験システムを示す。

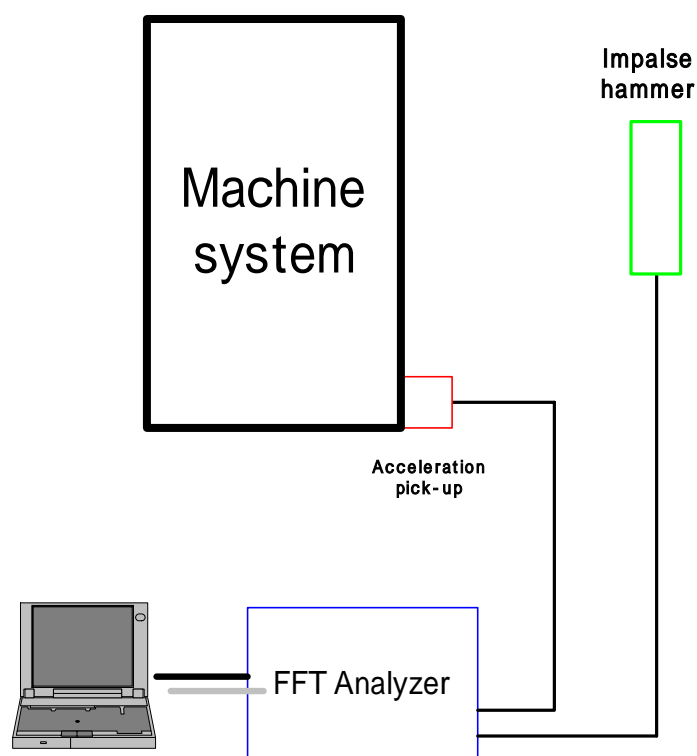


Fig. 4.2.1 実験システム

Table.4.2.1 解析条件

---

解析周波数：	500(Hz)
解析サンプリング点数：	4096 (打撃試験)
窓関数：	使用せず
平均化回数：	5回 (打撃試験) 試験回数 10回

---



### 4.3 サイレンサの振動解析

#### 4.3.1 振動試験

本研究では、構造物であるサイレンサを対象としているが、サイレンサの共鳴孔に近い位置において実験を行った。サイレンサ使用時と同じで平らな台に置いて行った。本研究での実験は、インパルス・ハンマを使った打撃試験装置で実験対象のある1点に加速度ピックアップを固定し、応答を得るという形で実験を行った。

図 4.6.1 にインパルス・ハンマによる加振風景を示す。表 4.3.1 に機材の詳細を示し、図 4.3.2 にインパルス・ハンマ、図 4.3.3 に加速度ピックアップ、図 4.3.2 に FFT アナライザを示す。



図 4.3.1 インパルス・ハンマによる加振



図 4.3.2 インパルス・ハンマ



図 4.3.3 加速度ピックアップ



図 4.3.4 FFT アナライザ

表 4.3.1 機材の詳細

---

インパルス・ハンマ：	小野測器	086M36A
加速度ピックアップ：	PCB PIEZOTRONICS	356A32
FFT アナライザ：	RION	SA-01
モード解析用シームレスソフト：	CATEC	CAT・System

---

## 4.3.2 信号処理

振動試験で得た加振力と応答の測定結果から、信号処理によって周波数応答関数を求める。FFT アナライザに入力されたインパルス・ハンマと加速度ピックアップによる2つの信号は、毎回フーリエ変換し、各加振点での(応答/加振)の伝達関数として記録した。解析条件は表 4.3.2 を参照。内板・構造体のサイレンサの計測には、FFT と CAT・System (パソコンによる機械系振動騒音計測解析システム) を使用した。CAT・System は、市販の A/D ボードを使用してパソコンで実験データ計測～解析を行うシステムである。本研究では、結果を EXCEL 等で読み込める形式 (CSV 形式) で保存させ、MATLAB 言語で組んだ m ファイルによってモード特性同定用のバイナリーファイルとテキスト形式ファイルに変換する。図 4.3.5 に本研究の実験システムを示す。

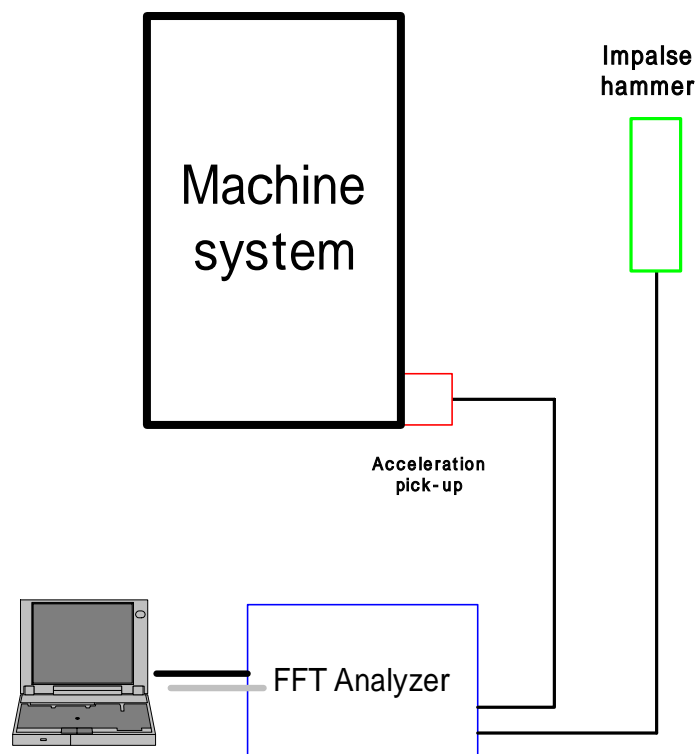


図 4.3.5 実験システム

表 4.3.2 解析条件

---

解析周波数：	500(Hz)
解析サンプリング点数：	4096 (打撃試験)
窓関数：	使用せず
平均化回数：	5回 (打撃試験) 試験回数 10回

---

## 第五章

# 音響実験装置及び実験方法

## 第5章 音響実験装置及び実験方法

本実験では、気流を流さないでスピーカを用いた静的音響実験を行った。音源は、純音（サイン波）を用いた。本実験室内においては、スペースの問題により自由音場が確保されない。そのため、サイレンサの一端を音源であるスピーカ、他端を無反射端とする管内法によって、暗騒音の影響を少なくし実験を行った。

なお、減音効果の評価の方法として、減衰量（Att）を用いた。

ここに、サイレンサの理論的な特性を論じるに際し、次の仮定を設ける。

- (1) 管内の音圧は、管内の気体の平均音圧に対して十分小さい。
- (2) サイレンサの後ろに接続される尾管は無反射端で終端されて、尾管内には軸長方向の定在波が存在しない。
- (3) サイレンサやそれに接続された管の壁面は、音響エネルギーを透過しない。
- (4) 尾管を含めて管内には平面波のみが存在する。
- (5) 管内流体の粘性の影響は、管と空洞の結合部（孔及びネック）以外の所では無視できる。
- (6) 孔やネック内で流体の粘性が問題となる境界層の厚さは、孔径やネックの長さに比べ十分小さい。
- (7) サイレンサの寸法は対象とする音波の波長に比べて十分小さい。

本実験は、上記の仮定を元に、薄板サイレンサ（サイレンサ TYPE-A）、厚板サイレンサ（サイレンサ TYPE-B）について減音量の測定を行った。

5.1 計測器

本実験で使用した計測器を Table.5.1.1 及び Fig.5.1.2 ~ 5.1.7 示す .

Table.5. 1 . 1 測定器

計測器の名称	メーカー	メーカー型式
Speaker	FOSTEX	FW-200
Power Amplifier	YAMAHA	A100
Sine/Noise Generator	B&K	Type 1049
1/2inch Condenser Microphone	B&K	Type 4190
Measuring Amplifier	B&K	Type 4190
FFT	小野測器	CF-350

また , マイクのスペックを以下に示す

Open-circuit Sensitivity,  $S_o$  : -25.8[dB re 1V/Pa]

Equivalent to : 51.0[mV/Pa]

Uncertainty, 95% confidence level : 0.2[dB]

Capacitance : 16.7[pF]

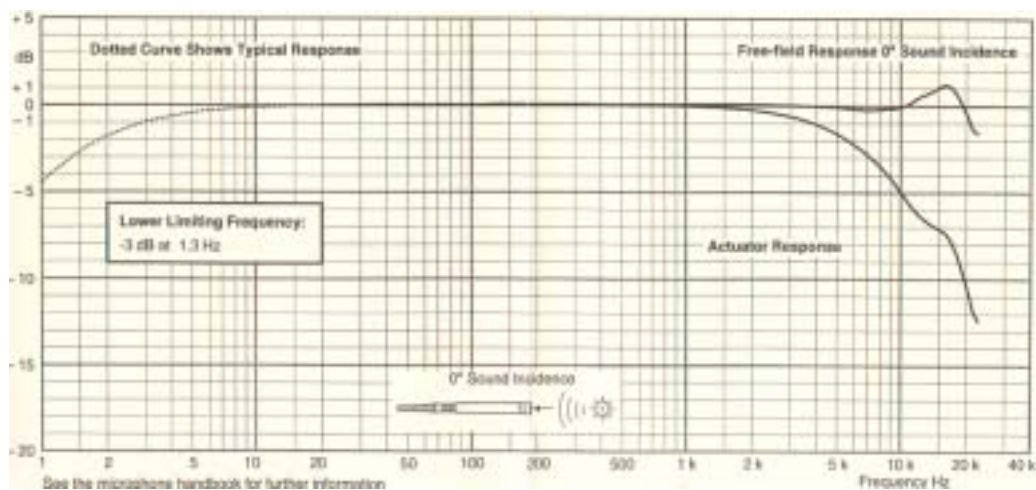


Fig.5.1.1 マイクの特性





Fig.5.1.2 計測器全体図



Fig.5.1.3 パワーアンプ

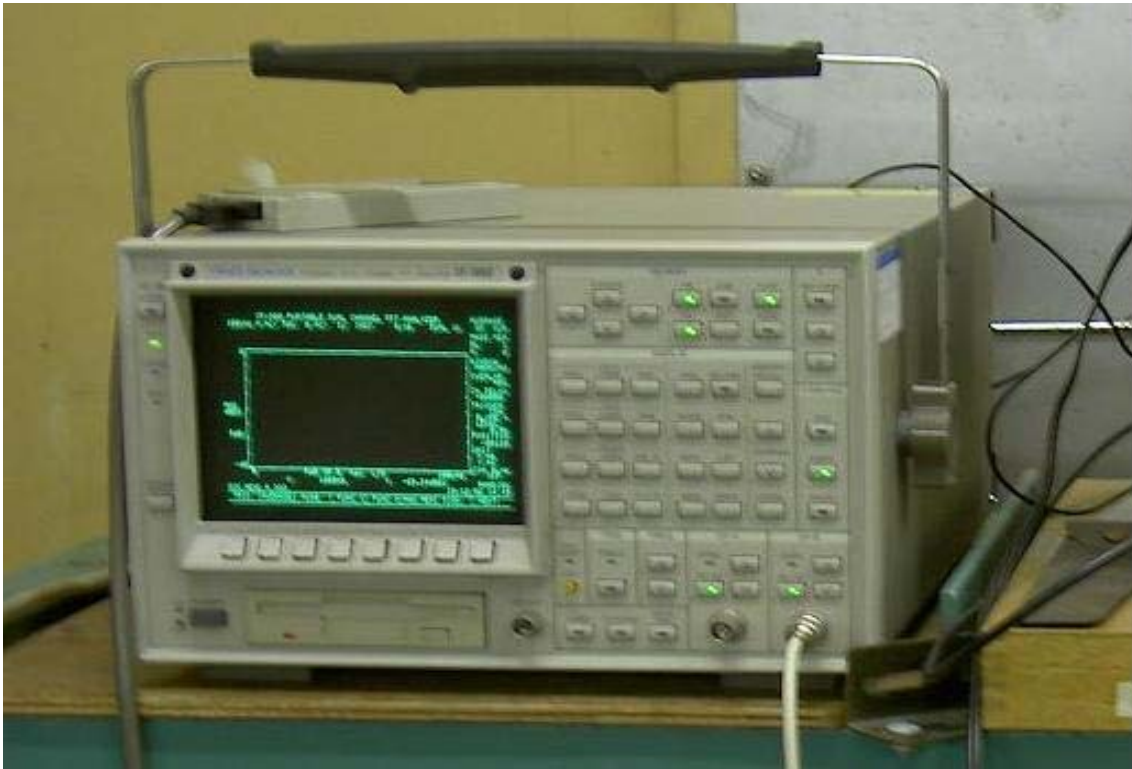


Fig.5.1.4 サイン/ノイズジェネレータ



Fig.5.1.5 メジャリングアンプ



Fig.5.1.6 F F T



Fig.5.1.7 1/2 インチコンデンサマイク

5.2 供試サイレンサ

サイレンサ内部の詳細図を 5.2.1 に、共鳴型サイレンサを詳細図 5.2.2~5.2.5 に、サイレンサ取り付け図を Fig.5.2.6 に示す。サイレンサにおける設計要素は、孔径  $d$ 、ネック部の長さ（本実験では板厚） $t$ 、孔数  $n$ 、孔の断面積  $S$ 、共鳴室内容積  $V$  である。本実験では、サイレンサ内部に一面あたり最大で 9 個、計 36 個の孔を設置することができる。これらを考慮に入れ、共鳴周波数 135 [Hz] の薄板サイレンサ(サイレンサ TYPE A)、107 [Hz] の厚板サイレンサ(サイレンサ TYPE B)を用い、孔数  $n$  を変え実験を行った。

また、各サイレンサの仕様を Table.5.2.1 に示す。孔数ごとに、サイレンサ A を 5 種類、サイレンサ B を 5 種類に分ける。各サイレンサにおける理論共鳴周波数も示す。孔数が 0 のときは、理論共鳴周波数は存在しない。また、部分的にネック長を変更できるように 40mm, 20mm, 10mm の長さのパイプを用意した。それぞれの孔数ごとサイレンサごとの仕様を Table.5.2.2, Table.5.2.3, Table.5.2.4 にパイプの写真を Fig.5.2.7, Fig.5.2.8, Fig.5.2.9 に示す。

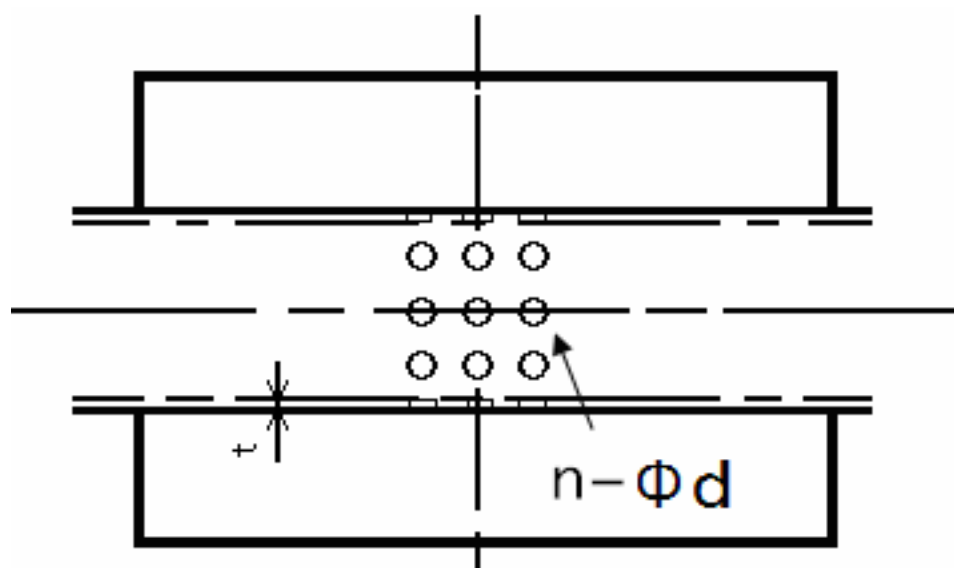


Fig.5.2.1 サイレンサ内部詳細図

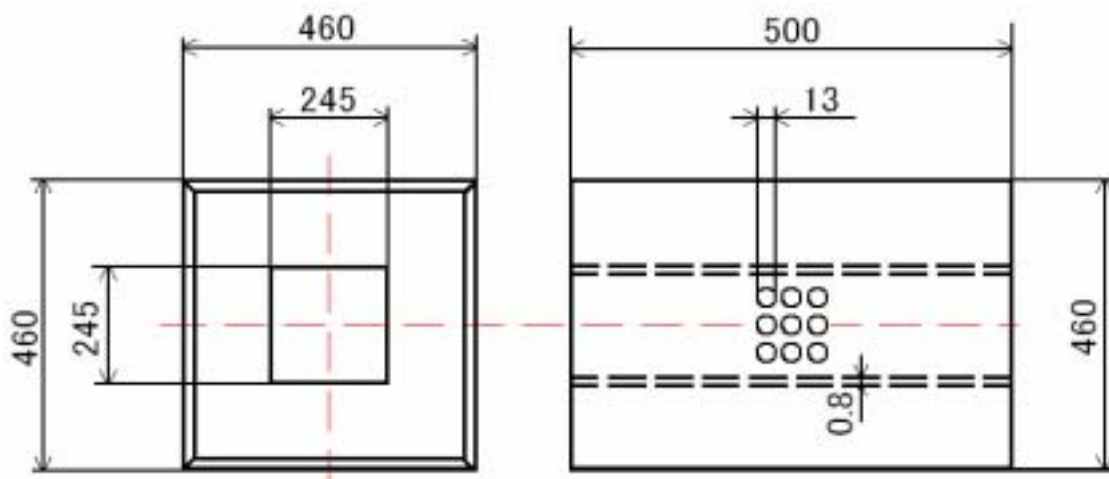


Fig.5.2.2 薄板サイレンサ

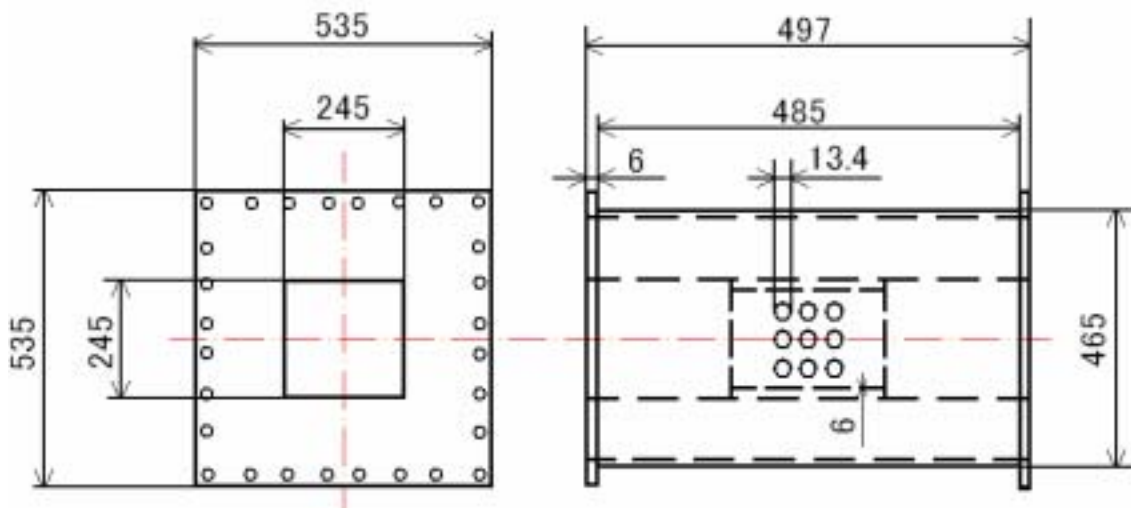


Fig.5.2.3 厚板サイレンサ

Table.5.2.1 供試サイレンサの仕様

TYPE	孔数 $n$	板厚 $t$ [mm]	理論共鳴周波数 $f_r$ [Hz]
A-1	0	0.8	-
A-2	9		67.2
A-3	18		95.0
A-4	27		116.4
A-5	36		134.3
B-1	0	6	-
B-2	9		57.2
B-3	18		80.9
B-4	27		99.1
B-5	36		114.4

Table.5.2.2 40mm パイプ装着時の供試サイレンサの仕様

TYPE	孔数 $n$	板厚 $t$ [mm]	理論共鳴周波数 $f_r$ [Hz]
A-11	0	40	-
A-21	9		25.7
A-31	18		36.4
A-41	27		44.5
A-51	36		51.4
B-11	0		-
B-21	9		25.7
B-31	18		36.4
B-41	27		44.5
B-51	36		51.4

Table.5.2.3 20mm パイプ装着時の供試サイレンサの仕様

TYPE	孔数 $n$	板厚 $t$ [mm]	理論共鳴周波数 $f_r$ [Hz]
A-12	0	20	-
A-22	9		33.7
A-32	18		47.6
A-42	27		58.3
A-52	36		67.4
B-12	0		-
B-22	9		33.7
B-32	18		47.6
B-42	27		58.3
B-52	36		67.4



Table.5.2.4 10mm パイプ装着時の供試サイレンサの仕様

TYPE	孔数 $n$	板厚 $t$ [mm]	理論共鳴周波数 $f_r$ [Hz]
A-13	0	10	-
A-23	18		57.6
A-33	36		81.5
B-13	0		-
B-23	18		57.6
B-33	36		81.5



Fig.5.2.4 薄板サイレンサ



Fig.5.2.5 厚板サイレンサ



Fig.5.2.6 サイレンサ取り付け図



Fig.5.2.7 10mm プラスチックパイプ



Fig.5.2.8 20mm アルミパイプ



Fig.5.2.9 40mm アルミパイプ

### 5.3 実験装置全体及び方法

本実験では、次の3つの設定において測定を行った。

- 1, 直管における測定
- 2, 薄板サイレンサにおける測定
- 3, 厚板サイレンサにおける測定
- 4, 薄板サイレンサパイプ挿入時における測定
- 5, 厚板サイレンサパイプ挿入時における測定

#### 5.3.1 直管における測定

まず、ダクトにサイレンサを挿入せず、直管の状態での測定を行う。これは、無反射端やマイクの性能評価や、入り口測定点の特性が一定になるかを調べるものである。実験における測定ダイヤグラムを Fig.5.3.1 に示す。測定には、20 [Hz] ~ 1000 [Hz]までの純音(サインノイズ)を周波数自動掃引して変化させて、スピーカからダクト内に出力する。その際、サイレンサ入口のフィードバックマイクにより、出力電圧を制御し、平坦な周波数特性を得られるようにしてある。ダクト内の音圧レベルは1/2 インチコンデンサマイクロフォンによって測定し、メジャリングアンプを通して FFT アナライザによって記録する。なお、サイレンサ入力側の測定点の音圧が一定になるようにフィードバック制御を行い、出力電圧を制御している。

減音量  $Att$  はサイレンサの入口  $P_1$  と出口  $P_2$  の音圧レベルの差から求めた。なお、管の他端は吸音クサビによって無反射としている。

#### 5.3.2 薄板、厚板サイレンサにおける測定

実験の測定ダイヤグラムを Fig.5.3.2 に、実験装置の全体図を Fig.5.3.3 に示す。測定方法は、直管における測定方法と同じである。孔あきサイレンサの減音特性が孔の共鳴によるものなのか、板振動によるものなのかを明確にするために、板振動の影響が少ない厚板でサイレンサを製作し、薄板サイレンサとの特性比較を行った。ここでは、孔数を変化させる(すなわち共鳴周波数を変化させる)ことにより減音特性にどのような違いがあるかの検証を行った。

4.3.3 サイレンサに3種類のパイプを挿入した時の減音特性

共鳴孔のアスペクト比の影響を調べるため、各サイレンサの孔部に3種類のパイプを挿入してネック長を長くすることで、共鳴周波数を変化できるかどうかを検証した。20mm,40mmパイプは金属製、10mmパイプはプラスチック製のものを使用した。

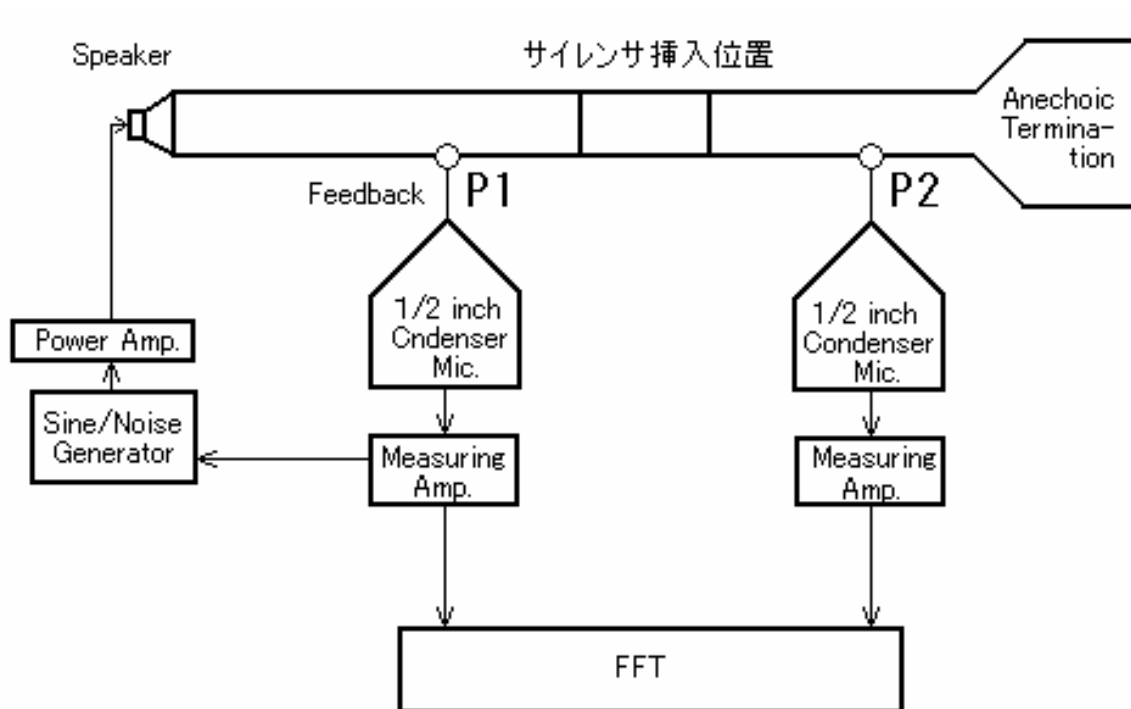


Fig.5.3.1 直管での測定における測定ダイヤグラム

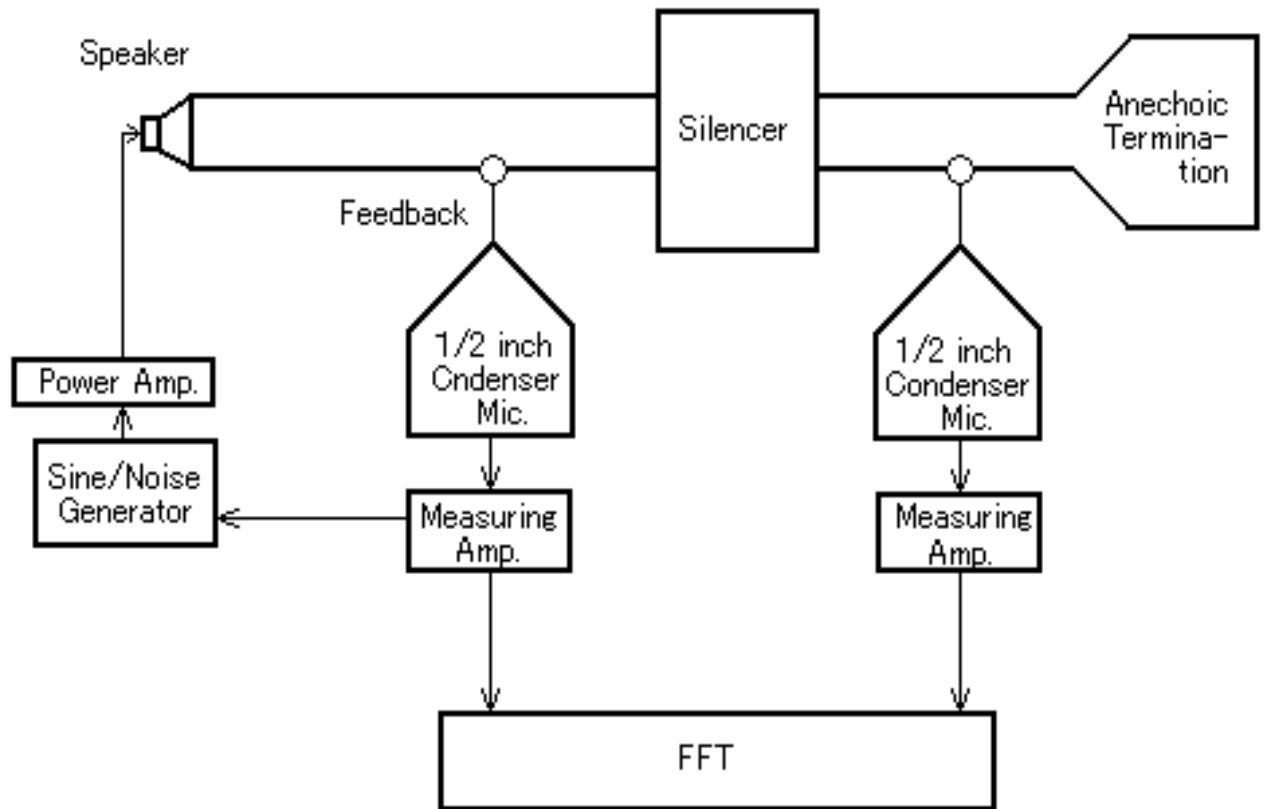


Fig.5.3.2 測定ダイヤグラム

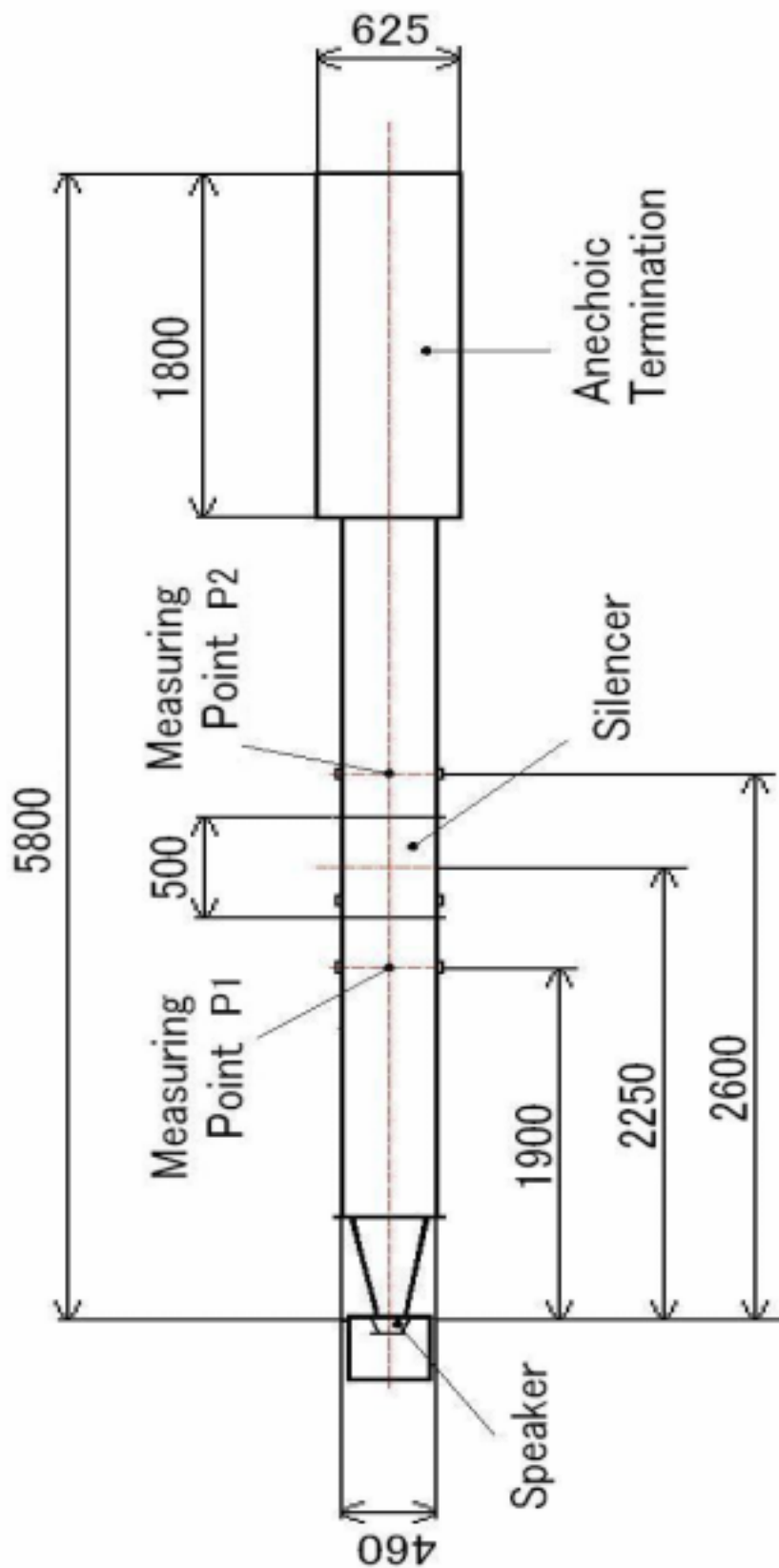


Fig.5.3.3 実験装置全体図



## 第六章

### 実験結果及び考察

## 第六章 実験結果及び考察

### 6.1 音響試験におけるサイレンサの減音特性

#### 6.1.1 直管の特性

マイク挿入において直管の特性を計測する。Fig.6.1.1, Fig.6.1.2 に入口マイク, 出口マイクの個別の特性を, Fig.6.1.3 にそれより算出した減音量の特性を示す。入口マイク A は一定の特性を示しており, フィードバックによる出力電圧制御が正確に効いていると思われる。出口マイクは $\pm 5$  [dB]程上下しており, これは実験装置の振動やダクト結合部分のずれ, 無反射端の特性によって現れたものであると思われる。

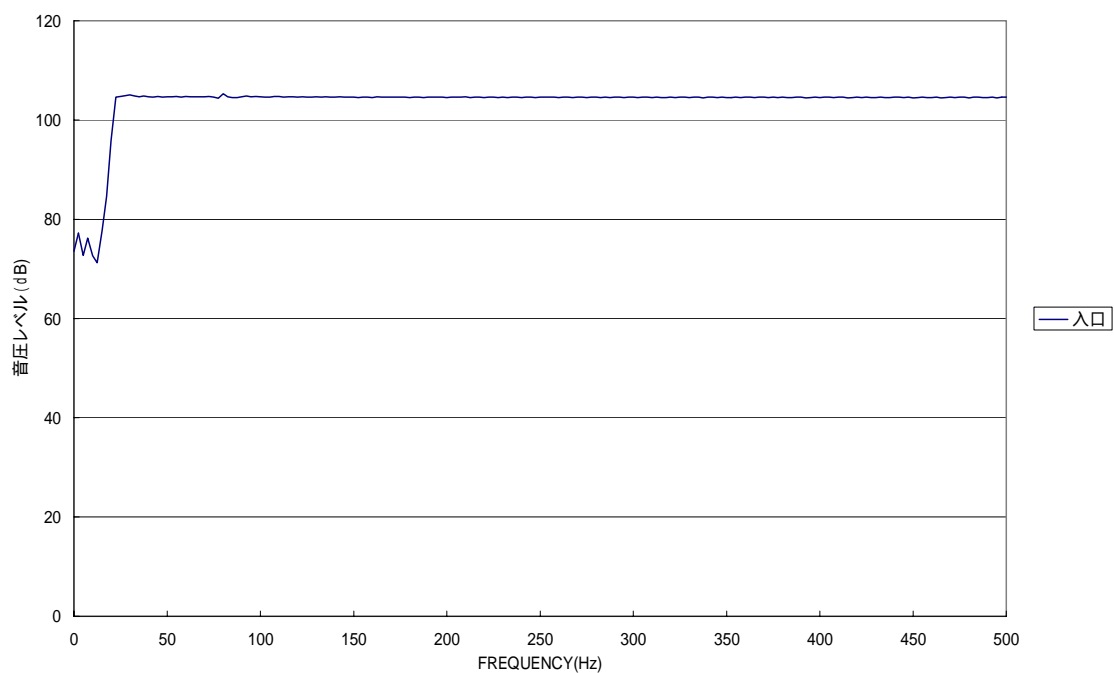


Fig.6.1.6 入口マイクの特性

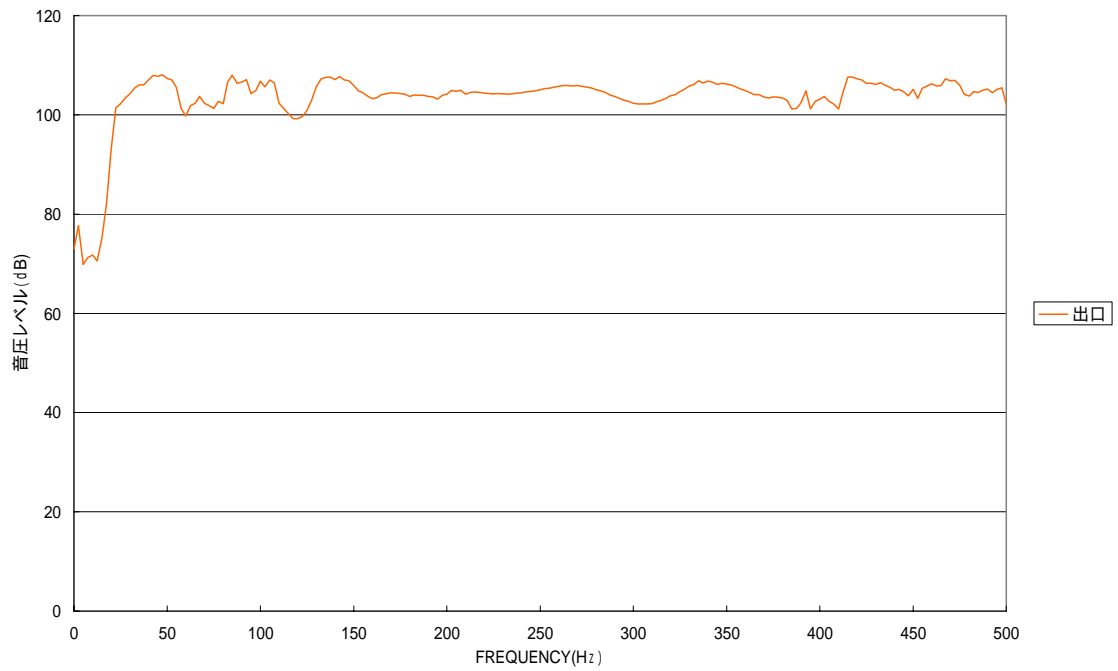


Fig.6.1.7 出口マイクの特徴

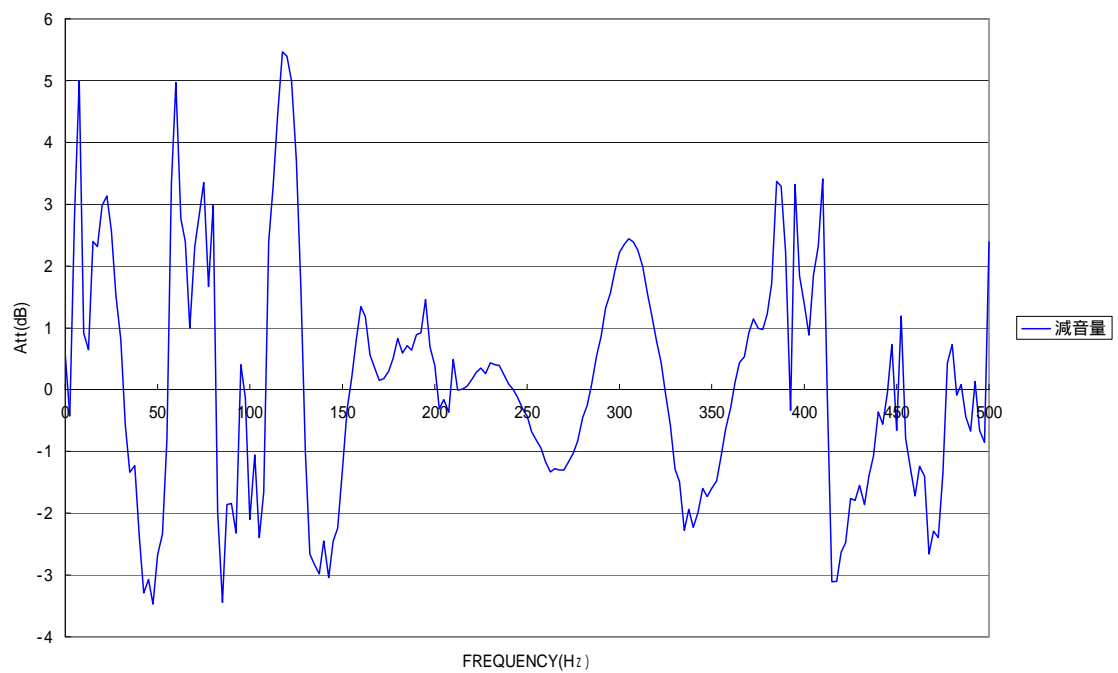


Fig.6.1.8 直管の特徴

## 6.2 薄板，厚板の孔数変化による減音特性比較

Fig.6.2.1 に示すように，薄板においては実験の減音ピーク周波数は理論値と比べて，孔数9個では約+60 Hz，その他では約+40 Hz ずれていた．また，孔数が増えると，ピーク周波数だけでなく，100 Hz から400 Hz の範囲で減音量が増大した．ピーク周波数における減音量の最大値は孔数36個のピークで約32 dBであった．

Fig.6.2.2 に示すように，厚板においては実験の減音ピーク周波数は理論値と比べて， $\pm 10\%$ 程度のずれであった．また薄板同様に孔数が増えると減音量が大きくなる周波数帯域が存在し，減音量の最大値は孔数36個のピークで約31 dBであった．

厚板の減音ピーク周波数においては，各孔数の場合で理論値と実験値が近く，共鳴による減音がおこっている印象を受ける．一方，薄板に関しては誤差が非常に大きく，振動や音の透過による影響か，ネック部のアスペクト比（孔径/ネック長）が大きく，共鳴そのものがおこっていない可能性がある．

減音ピーク周波数以外での減音量を比較すると，孔数0個の単純膨張型サイレンサを基準とした場合，孔数が大きくなるほど広い帯域での減音量が増加している．すなわち，特定の共鳴周波数にこだわらなければ，同一径の孔であれば多く開けたほうが有利であると言える．また，孔数が多くなると，孔部のヘルムホルツ共鳴ではなく，背後体積が膨張部として作用している可能性もある．

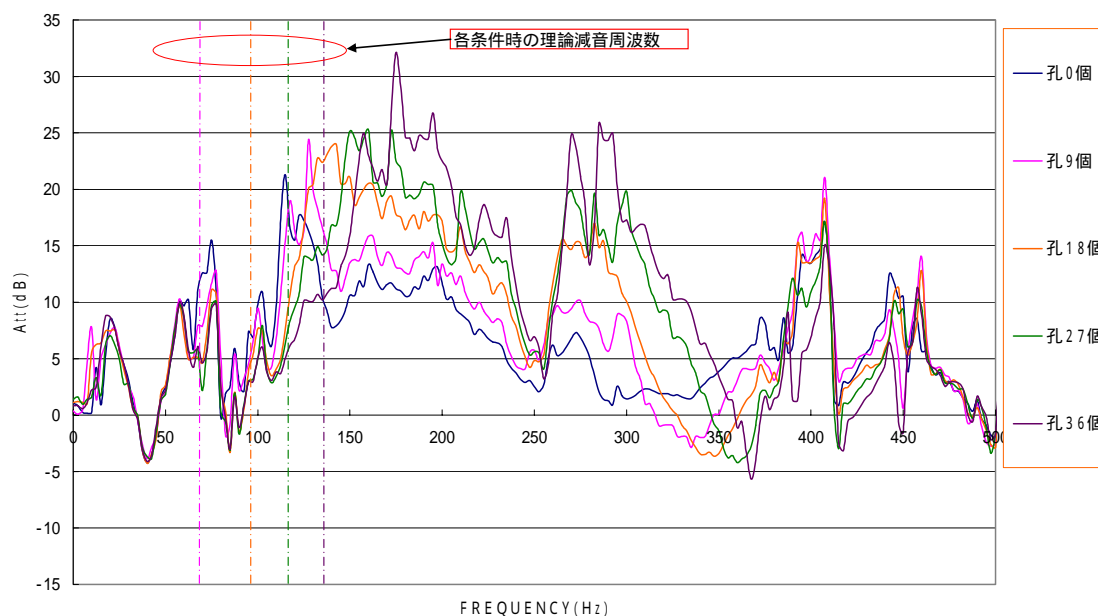


Fig.6.2.1 薄板サイレンサ孔数比較

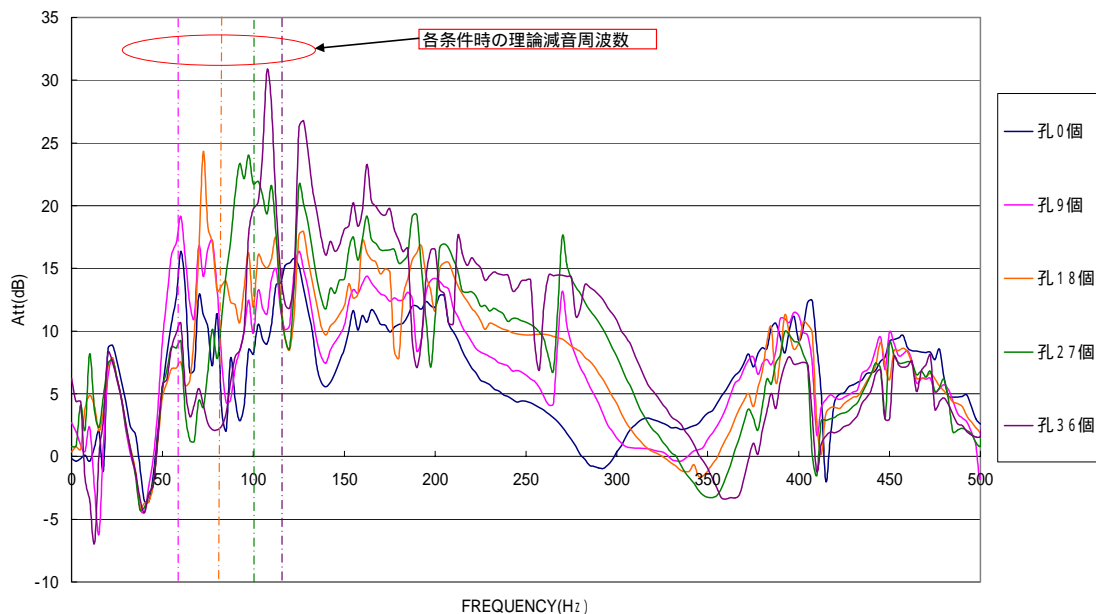


Fig.6.2.2 厚板サイレンサ孔数比較

### 6.3 各サイレンサに 10mm, 20mm, 40mm パイプを挿入した時の減音特性

前項で懸念のあった共鳴孔のアスペクト比の影響を調べるため、各サイレンサの孔部に 3 種類のパイプを挿入してネック長を長くすることで、共鳴周波数を変化できるかどうかを検証した。20mm, 40mm パイプは金属製、10mm パイプはプラスチック製のものを使用した。

Fig.6.3.1 は薄板サイレンサ (孔数  $n=36$ ) においてネック長 (パイプ長) を変化させた場合の減音量の比較である。ネック長の変化に対応してピーク周波数がシフトしているのがわかる。しかしながら、減音のピーク周波数は理論値とは大きくずれており、共鳴周波数が変化した結果なのかやはり、薄板であることの振動の影響なのかは不明瞭である。Fig.6.3.2 は厚板の場合であるが、こちらも同様にネック長の変化に応じてピーク周波数がシフトしており、またそれらは理論値に近くなっている。ピーク周波数以外の帯域では、薄板、厚板ともにパイプを付けない場合の減音効果が最も大きく、ネック長が長くなるにつれて減音効果が悪化し、孔なしの特性に近づいてしまうことがわかった。

Fig.6.3.3 ~ Fig.6.3.8 は各ネック長で孔数による減音特性を比較したものである。ネック長 40mm では、孔数による減音特性の変化はあまり見られないことから、ネック長を長くすると、共鳴孔がほとんど作用していないと考えられる。なお、孔数が少ない場合は理論共鳴周波数が 50Hz 以下のかかなり低い周波数になるので、本研究で使用している実験系では十分な精度で実験ができていない。一方、ネック長が 20mm, 10mm と短くなるにつれ、

孔数が多いほど広帯域での減音特性が向上しており，厚板ではその傾向が強い．なお，いずれのネック長の場合も理論共鳴周波数と減音ピーク周波数の対応が悪く，共鳴周波数の変化を観察できているとは言い難い．

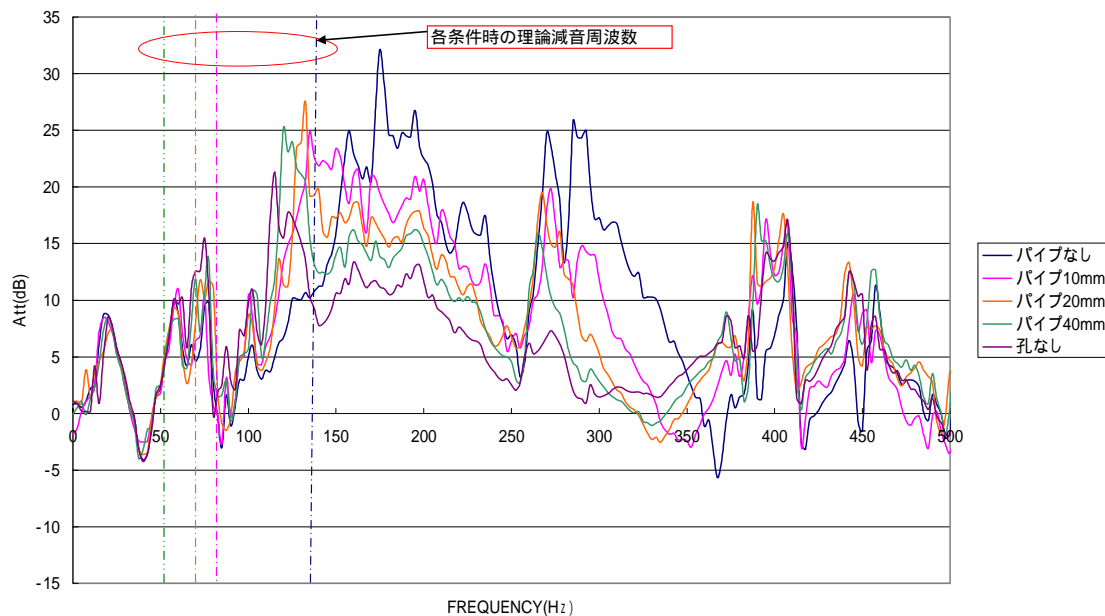


Fig.6.3.1 ネック長減音比較（薄板，n36）

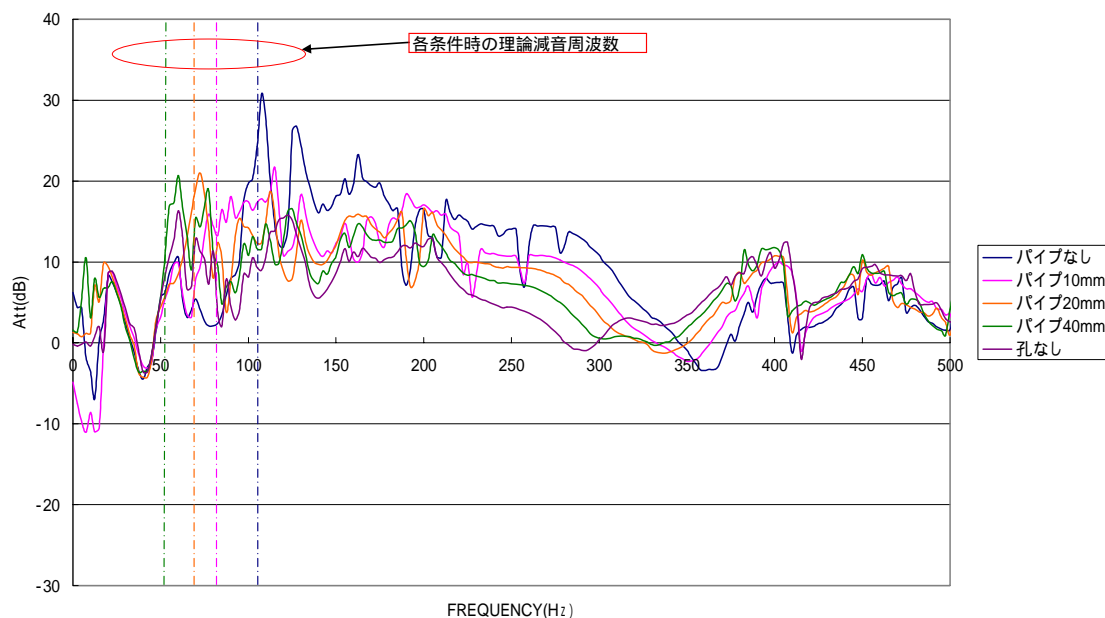


Fig.6.3.2 ネック長減音比較（厚板，n36）

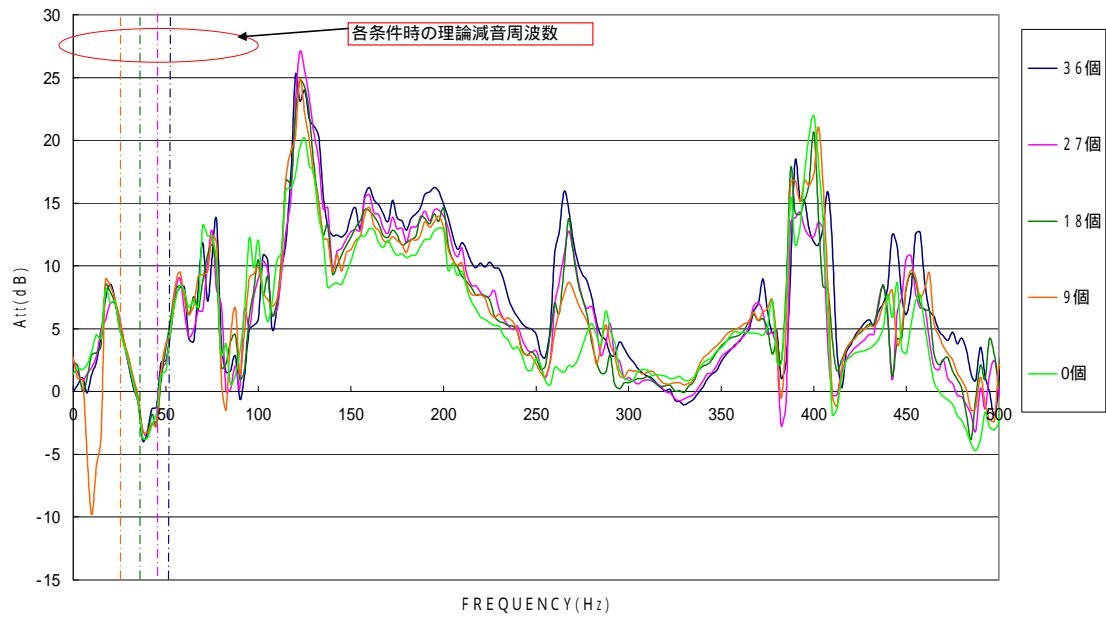


Fig.6.3.3 40 mmパイプ装着時の減音特性（薄板）

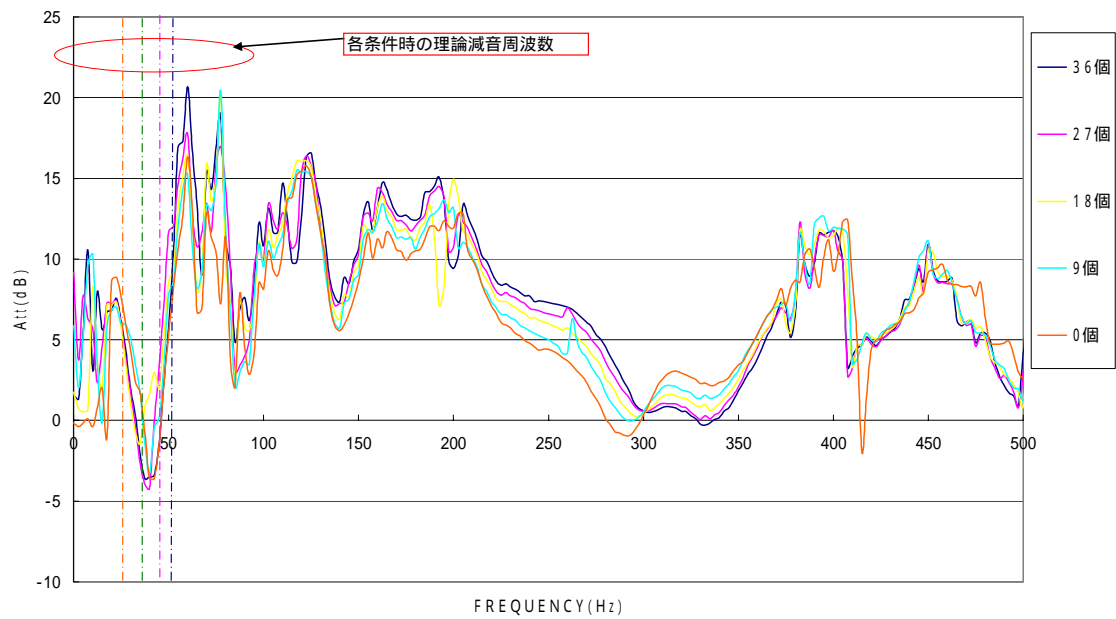


Fig.6.3.4 40 mmパイプ装着時の減音特性（厚板）

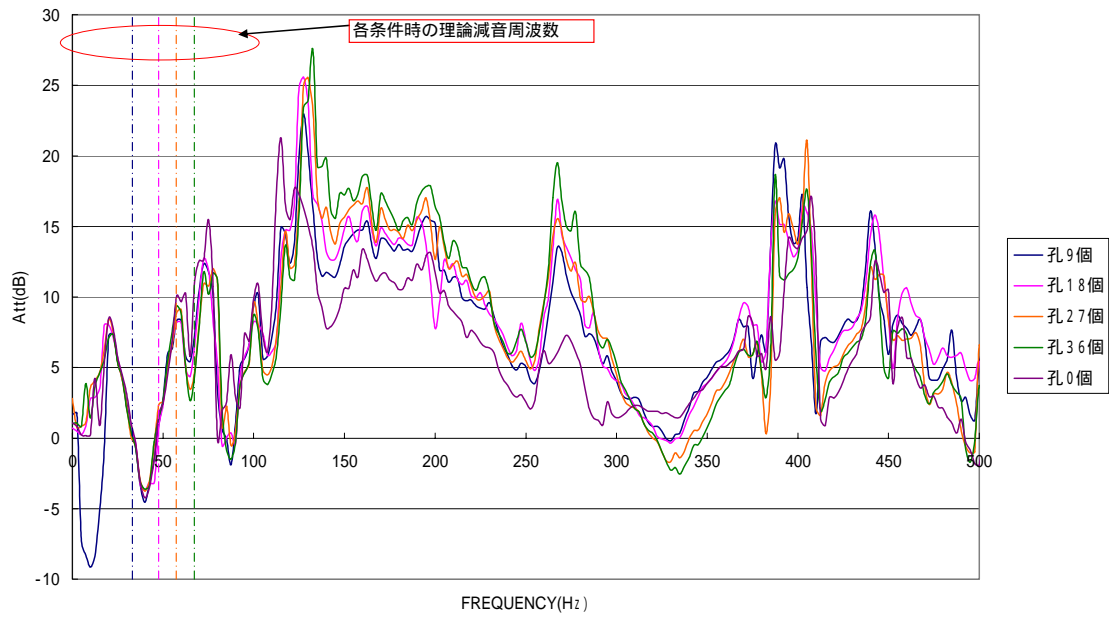


Fig.6.3.5 20mmパイプ装着時の減音特性（薄板）

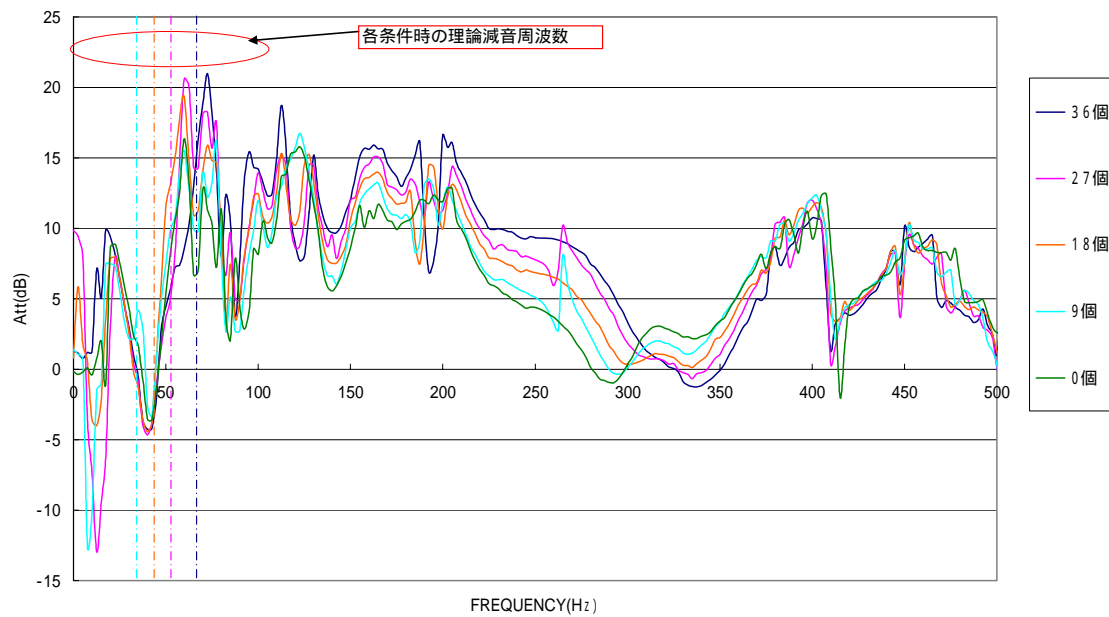


Fig.6.3.6 20mmパイプ装着時の減音特性（厚板）



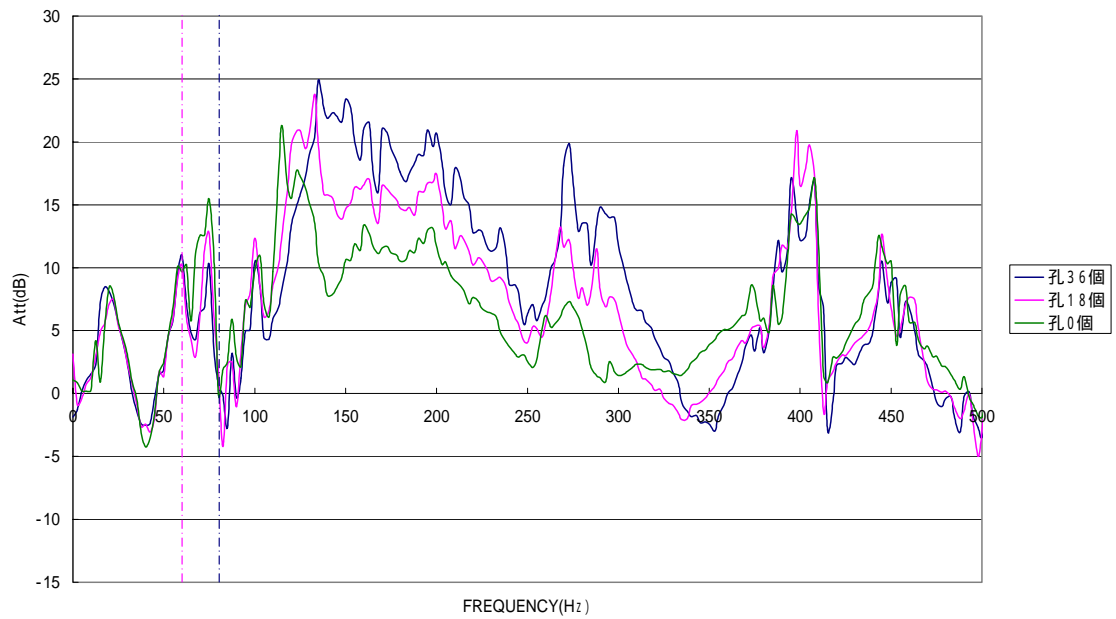


Fig.6.3.7 10 mmパイプ装着時の減音特性（薄板）

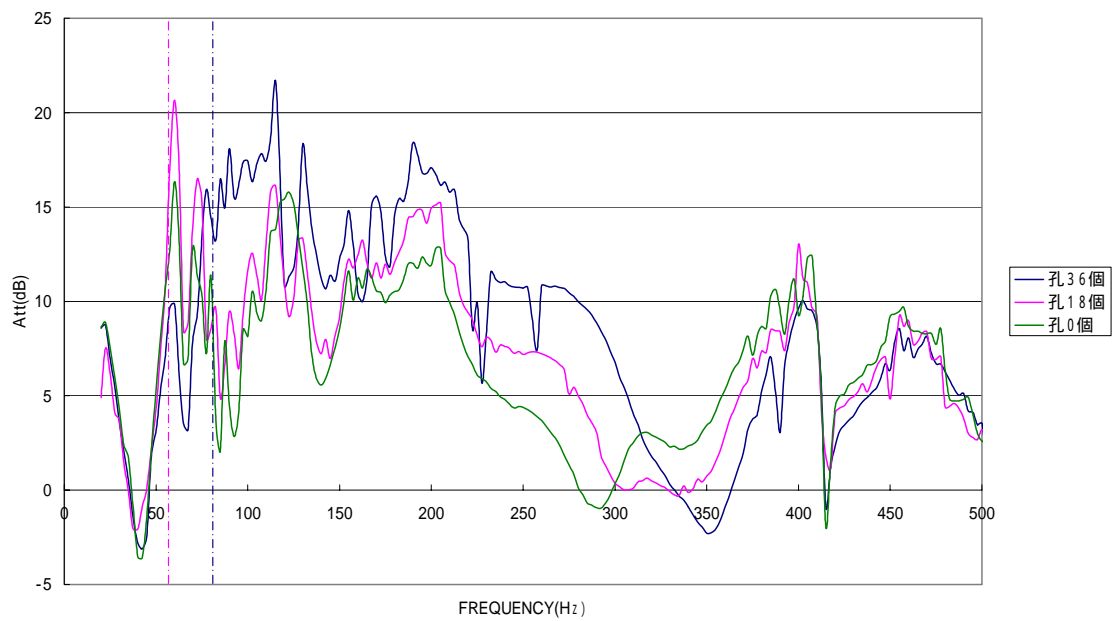


Fig.6.3.8 10 mmパイプ装着時の減音特性（厚板）

## 6.4 振動試験によるサイレンサの振動の減音特性への影響調査

各サイレンサにおいて打撃加振による内板の振動を調査した。また、通常時に使用している制振材で内板の振動を抑えている場合とそうでない時の音響特性がどのようになるかを調査した。

Fig.6.4.1 に打撃加振時の周波数応答関数を示す。ここでは入力に打撃加振，出力に内板の加速度を取っている。薄板と厚板とでは伝達関数の振幅に大きな違いが見られた。これは板厚による重量の違い，剛性の違いに起因している。すなわち，厚板は薄板に比べて剛性および重量が大きく，伝達関数のゲインが小さくなっており，振動の影響は少ないといえる。

Fig.6.4.2 は制振材の有無による伝達関数の比較である。制振材を張った場合には無しの場合と比較して全体的にピークの数と高さが少なく二乗和で比較しても振動量としては小さいといえる。Fig.6.4.3 は薄板における制振の有無による減音特性の比較だが，減音のピークが制振ありよりもさらに高周波数に移っている。その他の周波数域においても減音量が向上していることがわかった。これらの結果から，板振動が大きい方が理論値よりも高周波数領域に減音ピークを持ってしまいが、総合的な減音特性はよい方向に改善されることがわかった。

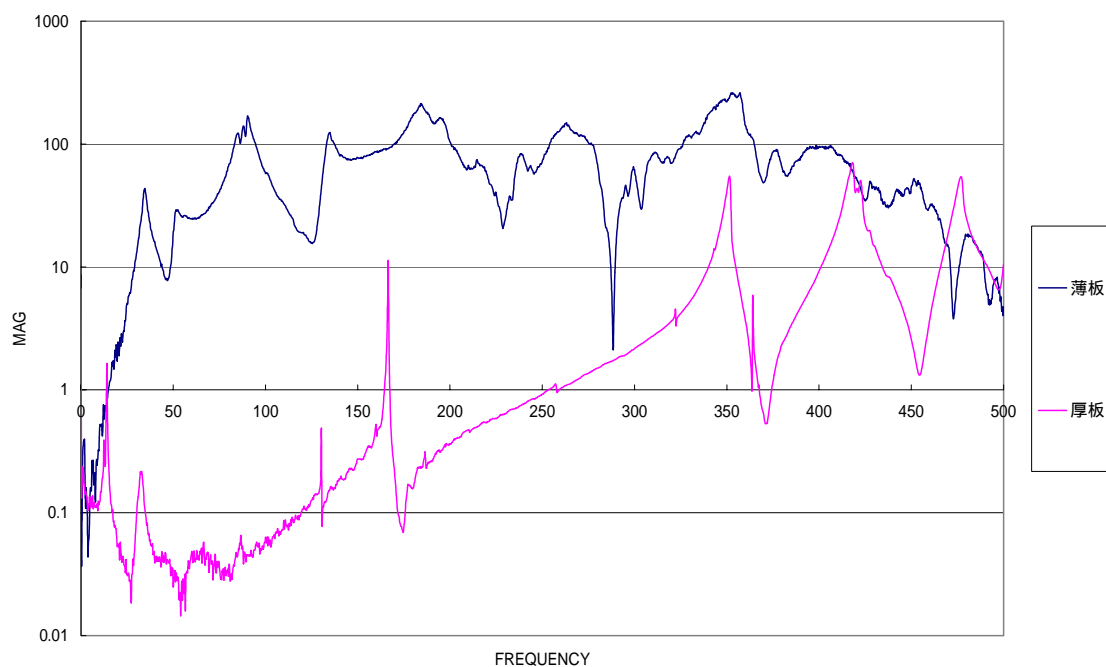


Fig.6.4.1 打撃加振時の各サイレンサ周波数応答関数比較

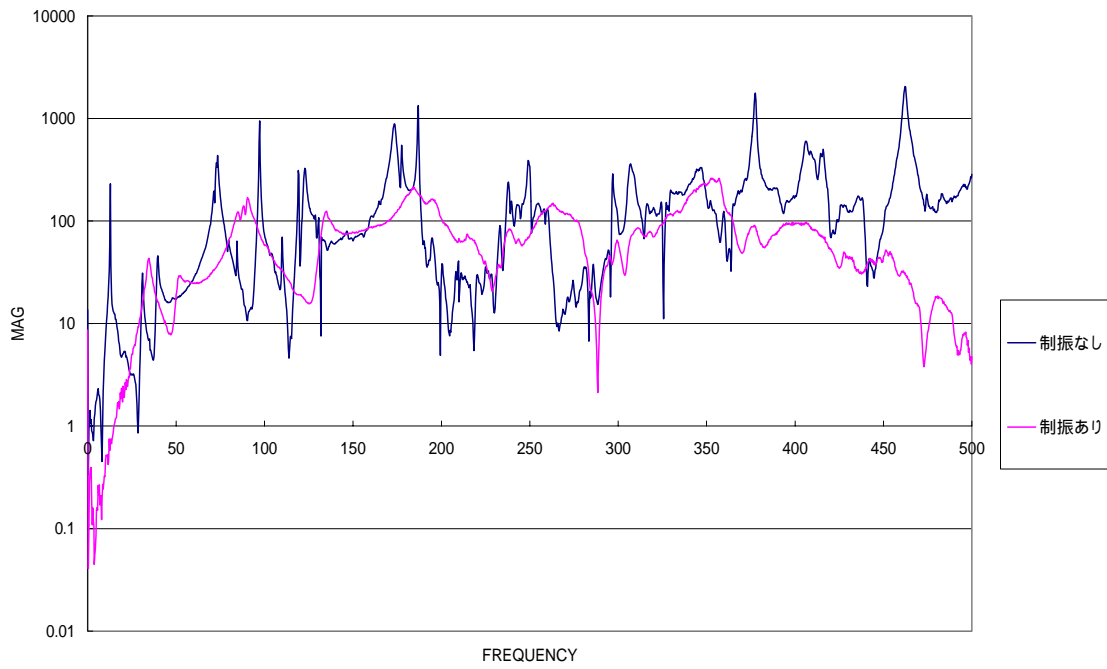


Fig.6.4.2 打撃試験による薄板サイレンサ伝達関数（制振有無比較）

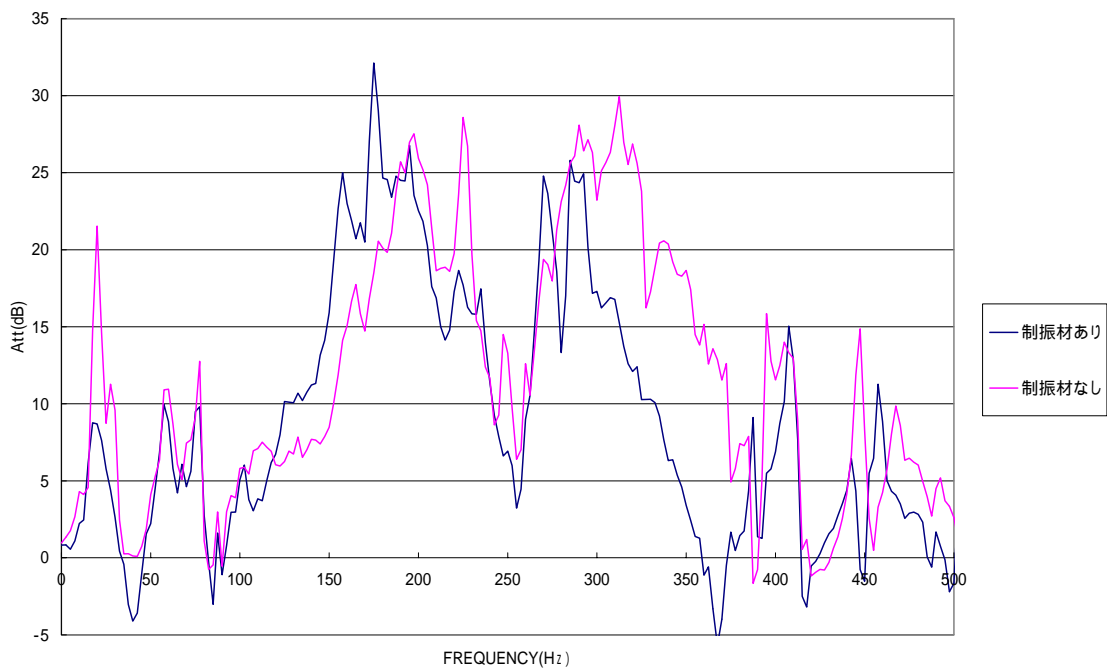


Fig.6.4.3 薄板サイレンサ減音特性（制振有無比較）

## 第七章

# 境界要素法による音響解析

## 第七章 境界要素法による音響解析

### 7.1 緒言

空中の音や騒音の伝播は理想気体の振動としてモデル化でき、微小振幅で定常振動する場合の音場はヘルムホルツ ( Helmholtz ) 方程式で表現できる。この音響問題は無限の広がりをもつ場を解析の対象にする必要が多く、これを厳密に考慮して解析できる境界要素法 ( BEM: boundary element method ) が他の数値解法に比べて効率的かつ解析精度がよいので、広く用いられている。

### 7.2 理論

#### 7.2.1 境界積分方程式による定式化

均質媒体からなる二次元または三次元の音場  $\Omega$  を考え、その境界面を  $\Gamma$  とする ( Fig. 7.2.1 )。振動体から無限の広がりをもつ空間への伝播する音の問題を外部問題 ( Fig. 7.2.1(a) )、有限の閉空間の音場は内部問題 ( Fig. 7.2.1(b) ) と呼び区別することが多い。音場内部の媒質の振動が微小であると仮定すれば、場所  $x$  と時間  $t$  を変数とする音圧  $P(x, t)$  を用いて、この音場は次のような波動方程式で支配される。

$$\nabla^2 P(x, t) + F(x, t) = \frac{1}{C_0^2} \ddot{P}(x, t) \quad (7.2.1)$$

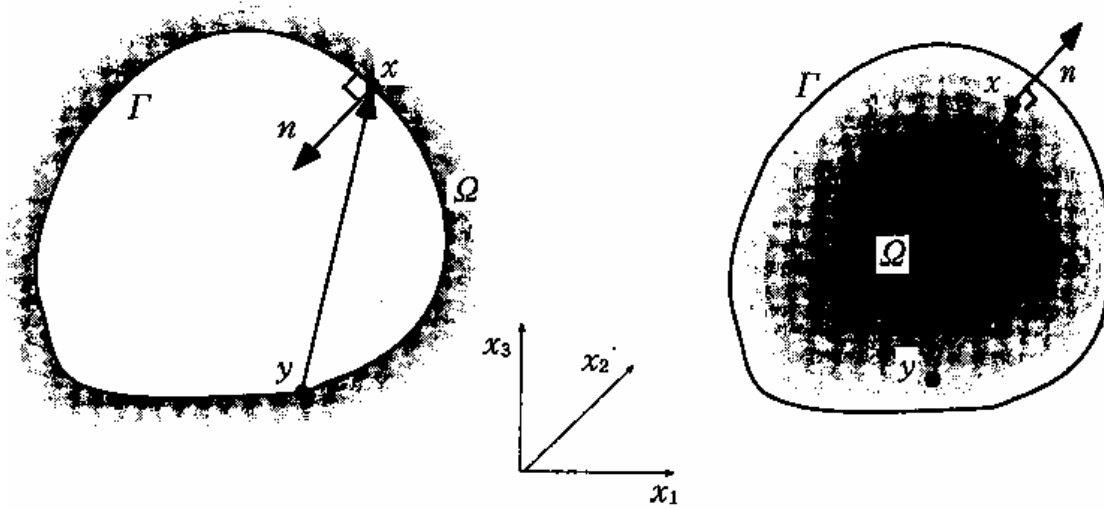
ただし、 $\nabla^2$  はラプラス演算子、 $C_0$  は位相速度 ( 音速 )、上付きドットは時間微分であり、 $F(x, t)$  は音場内部の音源である。式 ( 7.2.1 ) は、例えば源で発生した音の伝搬の時間を追跡するときに用いることができる。

音源が定常振動している場合は解析が比較的簡単で実用上十分なことが多く、定常振動している音場を解析する方法が幅広く研究されている。この場合は、式 ( 7.2.1 ) において音圧  $P(x, t)$  と非同次項  $F(x, t)$  ( 集中音源項など ) が、時間に関する次の調和関数で表されるものとして仮定して以下の理論を展開する。すなわち、

$$P(x, t) = p(x) \exp(j\omega t) \quad (7.2.2)$$

$$F(x, t) = f(x) \exp(j\omega t) \quad (7.2.3)$$

ただし、 $\omega$  は角振動数、 $j$  は虚数単位である。このとき基礎微分方程式 ( 7.2.1 ) は次のようになる。



(a) 開空間問題(外部問題)

(b) 閉空間問題(内部問題)

Fig.7.2.1 内部問題と外部問題

$$\nabla^2 p(x) + k^2 p(x) + f(x) = 0 \quad (7.2.4)$$

ただし、 $k$  は波数と呼ばれるもので、次式で与えられる。

$$k = \frac{\omega}{C_0} \quad (7.2.5)$$

式(7.2.4)はヘルムホルツ方程式と呼ばれ、音場解析ではきわめて重要な微分方程式である。この問題を境界要素法(BEM)で解くには、微分方程式(7.2.4)と等価な境界積分方程式を導く必要がある。

微分方程式(7.2.4)に対する境界積分方程式の定式化は次のように進められる。まず、式(7.2.4)にある関数  $p^*(x, y)$  をかけて領域全体にわたって積分した次の恒等式を考える。

$$\int_{\Omega} \{ \nabla^2 p(x) + k^2 p(x) + f(x) \} p^*(x, y) d\Omega(x) = 0 \quad (7.2.6)$$

関数  $p^*(x, y)$  として種々の既知関数を導入することもできるが、境界要素法では、無限媒体において次式を満足するヘルムホルツ方程式の基本解を用いる。

$$\nabla^2 p^*(x, y) + k^2 p^*(x, y) + \delta(x - y) = 0 \quad (7.2.7)$$

ただし,  $x$  と  $y$  はそれぞれの観測点とソース点を表す場の点であり(Fig.7.2.1),  $\delta(x-y)$  はディラック (Dirac) のデルタ関数である. 式(7.2.7)を満足する基本解は, 二次元及び三次元問題に対して次のように与えられる.

二次元問題:

$$p^*(x, y) = -\frac{j}{4} H_0^{(2)}(kr) \quad (7.2.8)$$

$$q^*(x, y) \equiv \frac{\partial p^*(x, y)}{\partial n(x)} = -\frac{jk}{4} H_1^{(2)}(kr) \frac{\partial r}{\partial n} \quad (7.2.9)$$

三次元問題:

$$p^*(x, y) = -\frac{1}{4\pi r} \exp(-jkr) \quad (7.2.10)$$

$$q^*(x, y) = -\frac{1+jkr}{4\pi r^2} \frac{\partial r}{\partial n} \exp(-jkr) \quad (7.2.11)$$

ただし,  $r$  は観測点  $x$  とソース点  $y$  との距離を表す.

式(7.2.6)を2回部分積分し, 基本解の性質を利用すれば次の境界積分方程式を導くことができる.

$$\begin{aligned} c(y)p(y) + \int_{\Gamma} q^*(x, y)p(x)d\Gamma(x) \\ = \int_{\Gamma} p^*(x, y)q(x)d\Gamma(x) + \int_{\Omega} p^*(x, y)f(x)d\Omega(x) \end{aligned} \quad (7.2.12)$$

ただし,

$$q(x) = \frac{\partial p(x)}{\partial n(x)} \quad (7.2.13)$$

粒子速度を  $v(x)$  とすると, 次式の関係が成り立つ.

$$q(x) \equiv \frac{\partial p(x)}{\partial n(x)} = -j\omega\rho v(x) \quad (7.2.14)$$

ところで、ヘルムホルツ方程式の基本解はラプラス方程式の基本解と同じ特異性をもつので、式(7.2.12)の $c(y)$ は次式を満足する。

$$c(y) + \int_{\Gamma} Q^*(x, y) d\Gamma(x) = 0 \quad (7.2.15)$$

ただし、 $Q^*(x, y)$ はラプラス方程式の基本解を $p_L^*(x, y)$ としたとき、二次元問題と三次元問題についてそれぞれ次のような関係がある。

二次元問題：

$$Q^*(x, y) \equiv \frac{\partial p_L^*(x, y)}{\partial n(x)} = -\frac{1}{2\pi r} \frac{\partial r}{\partial n} \quad (7.2.16)$$

三次元問題：

$$Q^*(x, y) \equiv \frac{\partial p_L^*(x, y)}{\partial n(x)} = -\frac{1}{4\pi r^2} \frac{\partial r}{\partial n} \quad (7.2.17)$$

これらの関係式を式(7.2.12)に用い、 $c(y)$ を消去して整理すると最終的に次式が得られる。

$$\begin{aligned} & \left[ \int_{\Gamma} \{q^*(x, y) - Q^*(x, y)\} d\Gamma(x) \right] p(y) + \int_{\Gamma} q^*(x, y) \{p(x) - p(y)\} d\Gamma(x) \\ & = -j\omega\rho \int_{\Gamma} p^*(x, y) v(x) d\Gamma(x) + \int_{\Omega} p^*(x, y) f(x) d\Omega(x) \end{aligned} \quad (7.2.18)$$

境界積分方程式の定式化で用いる基本解は、ソース点 $y$ と観測点 $x$ との間の距離で表され、しかもそれが $r \rightarrow 0$ のときに特異解を持つ。これを解決するには特異積分を精度よく評価する必要があり、かなり厄介な問題が含まれている。しかしながら、式(7.2.18)のように表せば、積分方程式のため、式(7.2.12)を解く代わりに境界積分方程式(7.2.18)を用いれば、係数マトリックスの積分は標準的なガウス数値積分方程式を用いて行うことができる。

さて、定常振動の音響問題は境界値問題であって、境界上において音圧 $p$ 、法線方向粒子速度 $v$ 、または音響インピーダンス $z$ の値を境界表面上で与えて問題を解くことができる。すなわち境界条件としては次のようなものがある。



$$p = \bar{p} \quad \Gamma_p \text{ 上} \quad (7.2.19)$$

$$v = \bar{v} \quad \Gamma_v \text{ 上} \quad (7.2.20)$$

$$z = \bar{z} \quad \Gamma_z \text{ 上} \quad (7.2.21)$$

ただし,  $\Gamma_p$ ,  $\Gamma_v$ ,  $\Gamma_z$  はそれぞれ音圧, 法線方向粒子速度および音響インピーダンスの値が与えられる境界である. 音響インピーダンスは次式で定義されるものを用いる.

$$z = \frac{p}{v} \quad (7.2.22)$$

上式の  $z$  は垂直入射音響インピーダンスであり, 壁面の吸音特性の最も簡単なモデル化である.

### 7.2.2 音響内部の点での音圧と粒子速度

音場内部の点  $y$  での音圧は, 境界上の音圧および粒子速度が求められた後, その値を用いて次式より求めることができる.

$$p(y) = -\int_{\Gamma} \{q^*(x, y) - Q^*(x, y)\} d\Gamma(x) \cdot p(x_0) - \int_{\Gamma} q^*(x, y) \{p(x) - p(x_0)\} d\Gamma(x) \\ - j\omega\rho \int_{\Gamma} p^*(x, y) v(x) d\Gamma(x) + p(x_0) + \int_{\Omega} p^*(x, y) f(x) d\Omega(x) \quad (7.2.23)$$

ただし,  $Q^*(x, y)$  はラプラス方程式の基本解であり, 式(7.2.15)で使われているものと同じである. 式(7.2.23)ではソース  $y$  が領域内部に観測点  $x$  が境界上にあるので特異性が生じないが, 2点 が極めて近い状態では疑似特異性が生じて数値計算の精度が悪くなる. それを避けるために,  $p(x_0)$  はソース点から最も近い境界点  $x_0$  での音圧の値を用いて「正則化」を施した形にしてある.

音場内部の点  $y$  における粒子速度のデカルト座標成分は, 音場内部の音圧に対する積分方程式(7.2.23)を直接微分した次式より求める.

$$\begin{aligned}
 v_i(y) &\equiv -\frac{1}{j\omega\rho} \frac{\partial p(y)}{\partial y_i} = \frac{1}{j\omega\rho} \int_{\Gamma} \left\{ \frac{\partial q^*(x, y)}{\partial y_i} - \frac{\partial Q^*(x, y)}{\partial y_i} \right\} d\Gamma(x) \cdot p(x_0) \\
 &+ \frac{1}{j\omega\rho} \int_{\Gamma} \frac{\partial p^*(x, y)}{\partial y_i} \{p(x) - p(x_0)\} d\Gamma(x) \\
 &+ \int_{\Gamma} \frac{\partial p^*(x, y)}{\partial y_i} v(x) d\Gamma(x) - \frac{1}{j\omega\rho} \int_{\Omega} \frac{\partial p^*(x, y)}{\partial y_i} f(x) d\Omega(x)
 \end{aligned}
 \tag{7.2.24}$$

ここで， $\partial r / \partial y_i = -\partial r / \partial x_i$  の関係から  $\partial r / \partial y_i$  は境界上の  $x_i$  で評価することができる。

### 7.2.3 離散化と解法

正則化された境界積分方程式(7.2.18)の二次アイソパラメトリック境界要素による離散化手法を，まず二次元問題について説明しておく，境界要素法では，境界面を境界要素に分割し境界積分を数値的に評価する。このためには境界の形状をいくつかの簡単な関数で記述される要素の集合として考え，さらに要素内の任意点での  $p, v, z$  は，それぞれ要素内に設けた節点の座標およびその点における関数値で補間(内挿)することにより近似される。形状と関数の補間に同じ関数を用いるのがアイソパラメトリック要素である。

まず，境界積分方程式(7.2.18)の数値解を求めるために，曲線境界にたいする二次アイソパラメトリック要素 (Fig.7.2.2) を用いて境界表面を  $N_e$  個の境界要素に分割する。要素内の任意点における  $p, v, z$  は，それぞれ要素上に設けた3節点での値を用いて無次元座標  $\xi$  を用いて次式で補間できるものとする。

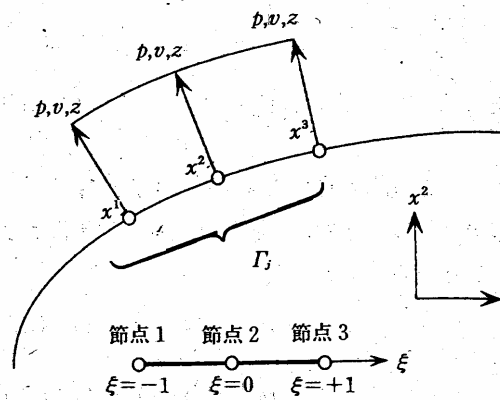


Fig.7.2.2 二次要素と無次元座標

$$\begin{aligned}
 p(\xi) &= \sum_{k=1}^K \phi^k(\xi) p_j^k, \\
 v(\xi) &= \sum_{k=1}^K \phi^k(\xi) v_j^k \\
 z(\xi) &= \sum_{k=1}^K \phi^k(\xi) z_j^k
 \end{aligned} \tag{7.2.25}$$

ただし,  $K$  は要素の総節点数,  $\phi^k(\xi)$  は内挿関数,  $p_j^k, v_j^k, z_j^k$  は  $j$  番目の境界要素上の節点  $k$  での  $p, v, z$  の値を示す. ソース点  $y$  を節点  $i$  に置いたときに, 境界積分方程式(7.2.18) は次式のような代数方程式で近似できる.

$$\sum_{j=1}^{Ne} \sum_{k=1}^K \{h_{ij}^k - H_{ij}^k\} p_i + \sum_{j=1}^{Ne} \sum_{k=1}^K h_{ij}^k \{p_j^k - p_i\} = \sum_{j=1}^{Ne} \sum_{k=1}^K g_{ij}^k v_j^k + \sum_{j=1}^{Ne} \sum_{k=1}^K G_{ij}^k p_j^k + l_i A \tag{7.2.26}$$

ただし, 境界  $\Gamma_v$  上では  $1/z_j = 0$ , 境界  $\Gamma_z$  上では  $v_j = 0$  とする. また領域内部のソース  $f(x)$  は, 強さ  $A$  の点ソースであると仮定している. 式(7.2.26)における  $h_{ij}, g_{ij}, l_i$  は次式で与えられる.

$$\begin{aligned}
 & \int_{\Gamma_j} \{q^*(x, y^i) - Q^*(x, y^i)\} d\Gamma(x) \cdot p(y^i) \\
 &= \sum_{k=1}^K \int_{-1}^1 \{q^*(\xi) - Q^*(\xi)\} \phi^k(\xi) J(\xi) d\xi \cdot p_i = \sum_{k=1}^K \{h_{ij}^k - H_{ij}^k\} \cdot p_i
 \end{aligned} \tag{7.2.27}$$

$$\begin{aligned}
 & \int_{\Gamma_j} q^*(x, y^i) \{p(x) - p(y^j)\} d\Gamma(x) \\
 &= \sum_{k=1}^K \int_{-1}^1 \{q^*(\xi) \phi^k(\xi) J(\xi) d\xi\} \{p_j^k - p_i\}
 \end{aligned} \tag{7.2.28}$$

$$- \int_{\Gamma_i} p^*(x, y^i) v(x) d\Gamma(x) = - \sum_{k=1}^K \int_{-1}^1 \{p^*(\xi) \phi^k(\xi) J(\xi) d\xi\} v_j^k = \sum_{k=1}^K g_{ij}^k v_j^k \tag{7.2.29}$$

$$G_{ij}^k = g_{ij}^k / z_j^k \tag{7.2.30}$$

$$l_i = p^*(x_s, y^i) \delta(x_s - y^i) \tag{7.2.31}$$

ただし,  $\Gamma_j$  は  $j$  番目の境界要素を示す. また,  $|J(\xi)|$  は全体座標系  $x_i$  から要素の局座標系  $\xi$  への座標変換に関するヤコビアンである.

さて, 式(7.2.26)は次の形のマトリックス方程式にまとめることができる.

$$[H]\{p\}_\Gamma = [G]\{v\}_\Gamma + \{f\}_\Omega \quad (7.2.32)$$

ただし, 式(7.2.32)の右辺第2項  $\{f\}$  は, 式(7.2.31)で与えられる列ベクトルにソース点の強さ  $A$  を掛けたものであり, 既知量である. また, 添字  $\Gamma$  は境界上の値, 添字  $\Omega$  は音場内部の値であることを示す. また, 係数マトリックス  $[H]$  と  $[G]$  は基本解から計算できる. したがって境界条件を適用して式(7.2.32)を境界上の音圧と粒子速度の未知節点値について解けば問題が解決できる.

音場内の任意点での音圧と粒子速度を計算するには, これらと境界上の音圧および粒子速度との関係を表す積分方程式(7.2.23)と(7.2.24)に同様の離散化を施せばよい. すなわち,

$$\{p\}_\Omega = -[A]\{p\}_\Gamma + [B]\{v\}_\Omega \quad (7.2.33)$$

$$\{v_i\} = -[C_i]\{p\}_\Gamma + [D_i]\{v\}_\Gamma + \{f_i\}_\Omega \quad (7.2.34)$$

ここで, マトリックス  $[A], [B], [C_i], [D_i]$  は基本解を用いて計算される既知の係数マトリックスであり, 添字  $i$  は  $i$  方向に関する値であることを示す. また,  $\{f_i\}_\Omega$  は  $\{f\}_\Omega$  を  $i$  方向に関して微分したものである. 境界条件を適用して式(7.2.32)を解くことにより境界上のすべての未知節点量が求められるので, その結果を式(7.2.33)と(7.2.34)に代入すれば音場内の任意点での音圧と粒子速度を計算できる.

ところで, 三次元問題の解析は, Fig.7.2.3 に示すような二次アイソパラメトリック曲面境界要素により離散化して行うことができる. この場合も解析の流れは二次元問題と同様である.

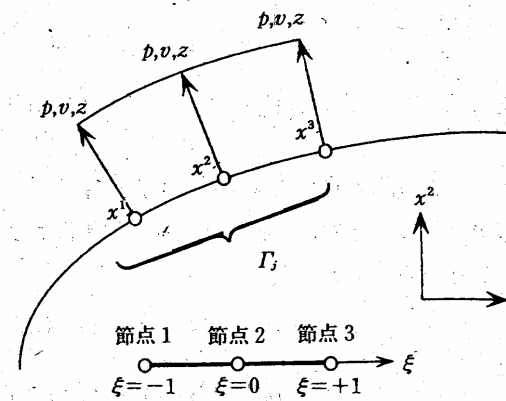


Fig.7.2.3 三次元問題に対する境界要素の例

### 7.2.4 領域分割解法

複雑な形状の音場や、物質定数が異なるいくつかの領域からなる音場を解析する必要もある。このような問題を取り扱うには、簡単な形の部分領域に分割したり、物質定数が同じ領域ごとに分割して、それぞれの領域ごとに境界積分方程式を導く。そして、部分領域の境界面を要素分割して式(7.2.32)の方程式をつくり、それらを異なる領域間の界面における音圧と粒子速度の連続性を考慮して、全体を一つの方程式系にまとめて解けばよい。以下では、二つの部分領域に分けたときを例にとって領域分割解法を説明する。

Fig.7.2.4のように二つの領域 $\Omega_1, \Omega_2$ からなる問題を考える。式(7.2.32)は領域 $\Omega_1$ 、領域 $\Omega_2$ に対してそれぞれ次のようになる。

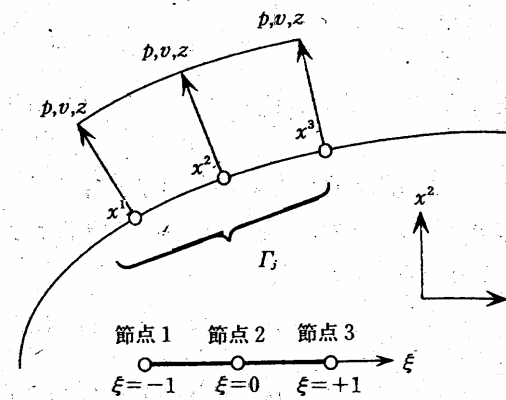


Fig.7.2.4 領域の分割

$$\begin{bmatrix} H^1 & H^1_i \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} p^1 \\ p^1_i \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} G^1 & G^1_i \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} v^1 \\ v^1_i \end{Bmatrix} + \{f^1\} \quad (7.2.35)$$

$$\begin{bmatrix} H^2 & H_I^2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} p^2 \\ p_I^2 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} G^2 & G_I^2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} v^2 \\ v_I^2 \end{Bmatrix} + \{f^2\} \quad (7.2.36)$$

ただし，用いた記号は次のような意味を持つ．

$p^1, v^1$  : 境界  $\Gamma_1$  における音圧ベクトルと粒子速度ベクトル

$p_I^1, v_I^1$  : 領域  $\Omega_1$  から見た境界  $\Gamma_I$  における音圧ベクトルと粒子速度ベクトル

$p^2, v^2$  : 境界  $\Gamma_2$  における音圧ベクトルと粒子速度ベクトル

$p_I^2, v_I^2$  : 領域  $\Omega_2$  から見た境界  $\Gamma_I$  における音圧ベクトルと粒子速度ベクトル

また，界面  $\Gamma_I$  において次の条件が成り立つ．

$$p_I^1 = p_I^2 = p^I \quad (7.2.37)$$

$$v_I^1 = -v_I^2 = v^I \quad (7.2.38)$$

上式(7.2.35)と式(7.2.36)を用いると，二つの領域についての方程式系は次のように一つにまとめることができる．

$$\begin{bmatrix} H^1 & H_I^1 & 0 \\ 0 & H_I^2 & H^2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} p^1 \\ p^I \\ p^2 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} G^1 & G_I^1 & 0 \\ 0 & -G_I^2 & G^2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} v^1 \\ v^I \\ v^2 \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} f^1 \\ f^2 \end{Bmatrix} \quad (7.2.39)$$

$\Gamma_I$  において  $p^I, v^I$  のいずれも未知量であることに注意して，式(7.2.39)に境界条件を適用し，未知量に関する部分を左辺に，既知量に関する部分を右辺に移行すると連立方程式系が得られる．これを未知量に解けばよい．

## 7.3 解析方法

実験においてサイレンサがどのような減音特性をもっているかどうかは確認できるが、音圧がダクト内部においてどのように分布しているか、どのような設計変更がよりよい減音特性を持つことができるかを検証するのは難し。そこで、境界要素法を用いた音響解析を行い、実験データ、理論式との比較を行った。まずはサイレンサの孔部を閉じて、単純膨張型サイレンサとしての特徴を有するかどうかの検証をした。モデル作成には3DCADソフト SolidWorks を、境界要素メッシュは ALTAIR/HyperMesh を、音響解析は LMS SYSNOISE を使用した。Fig.7.3.1 に3Dモデルを、Fig.7.3.2 にBEMモデルを示す。

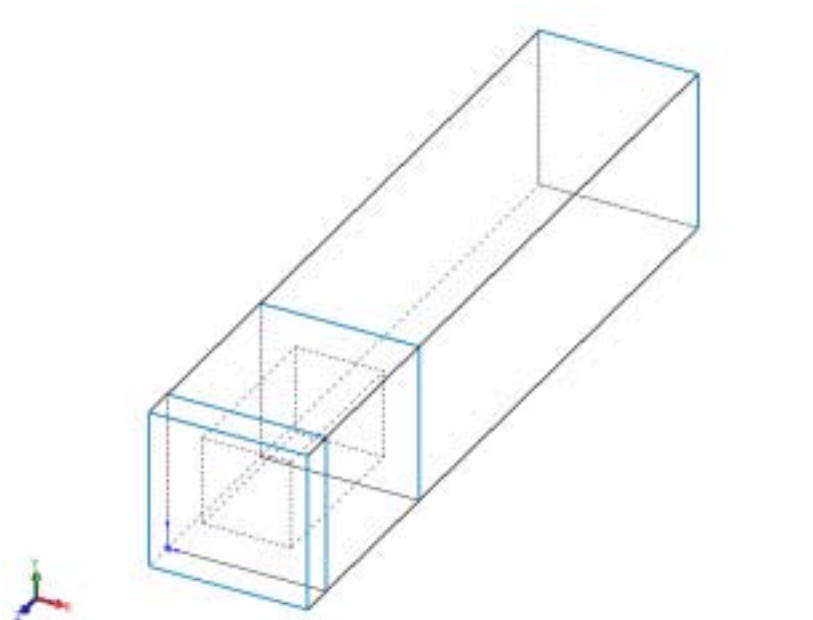


Fig.7.3.1 サイレンサの3Dモデル

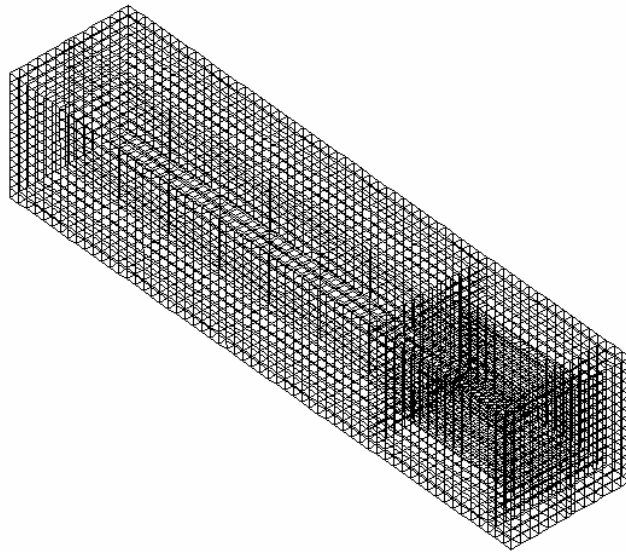


Fig.7.3.2 サイレンサの境界要素モデル



## 7.4 解析結果および考察

Fig.7.4.1 に共鳴孔なしの実験値と比較した周波数応答関数のグラフを示す。また，Fig.7.4.2～7.4.4 に単純膨張型で減音量に特徴がみられた音圧分布を示す。

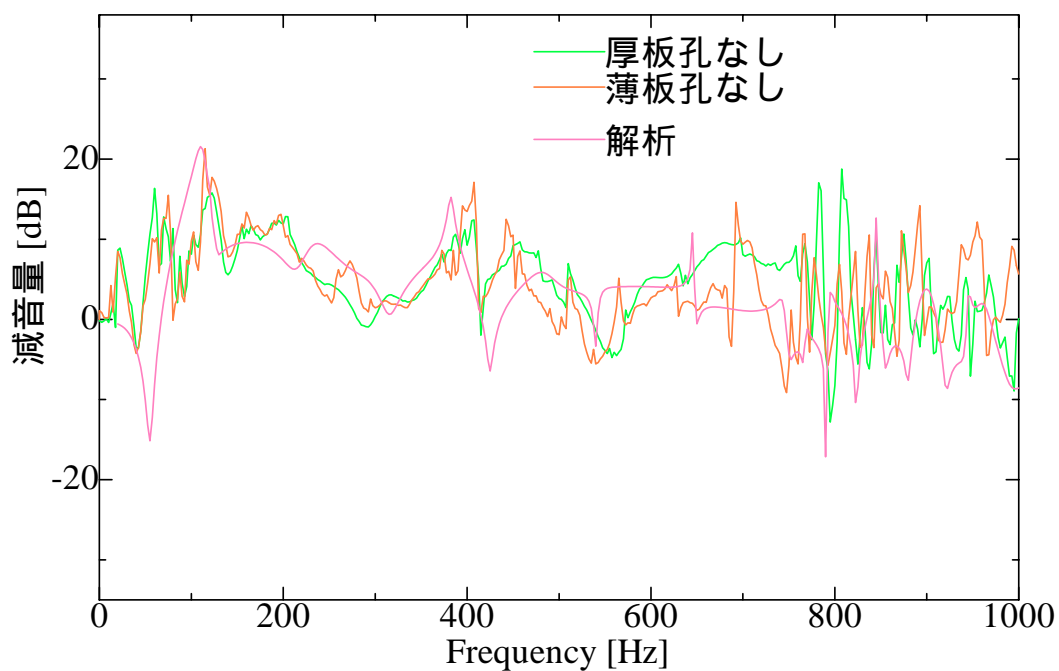


Fig.7.4.1 実験値と理論値の周波数応答関数比較

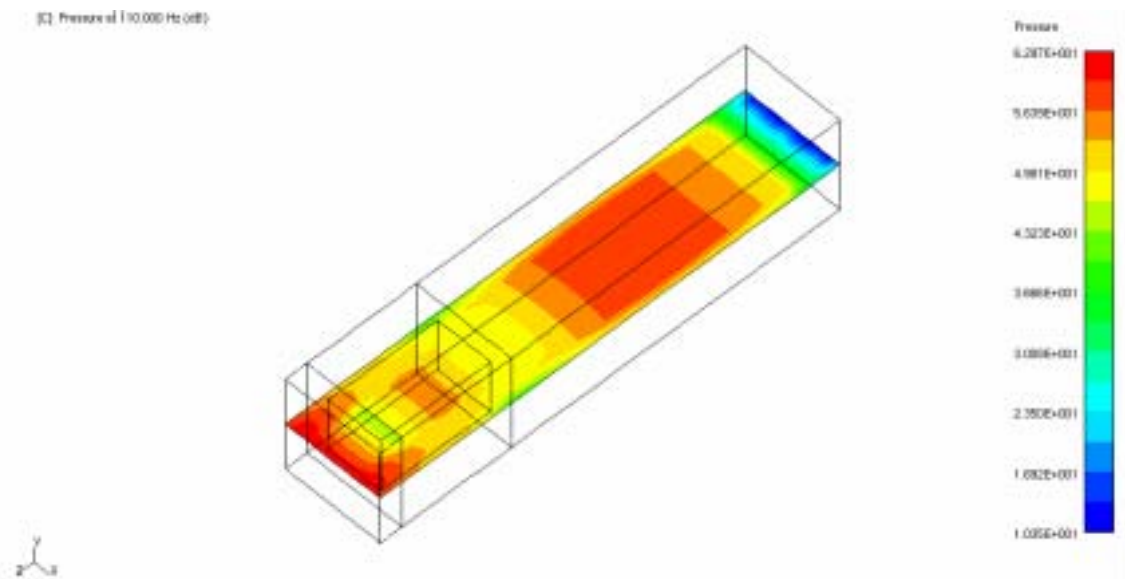


Fig.7.4.2 音圧分布 (110.0Hz)

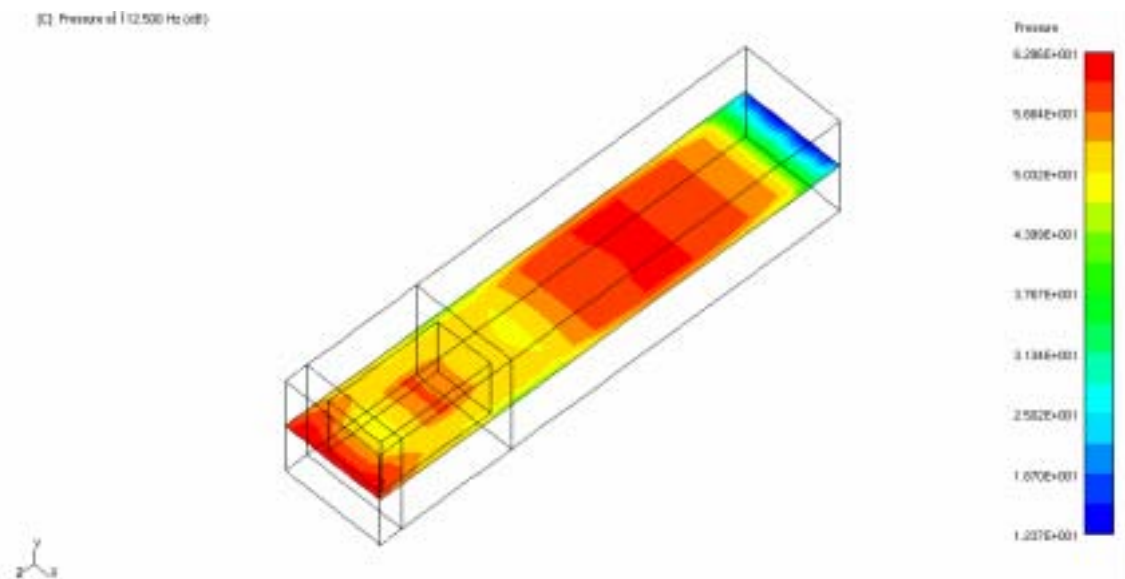
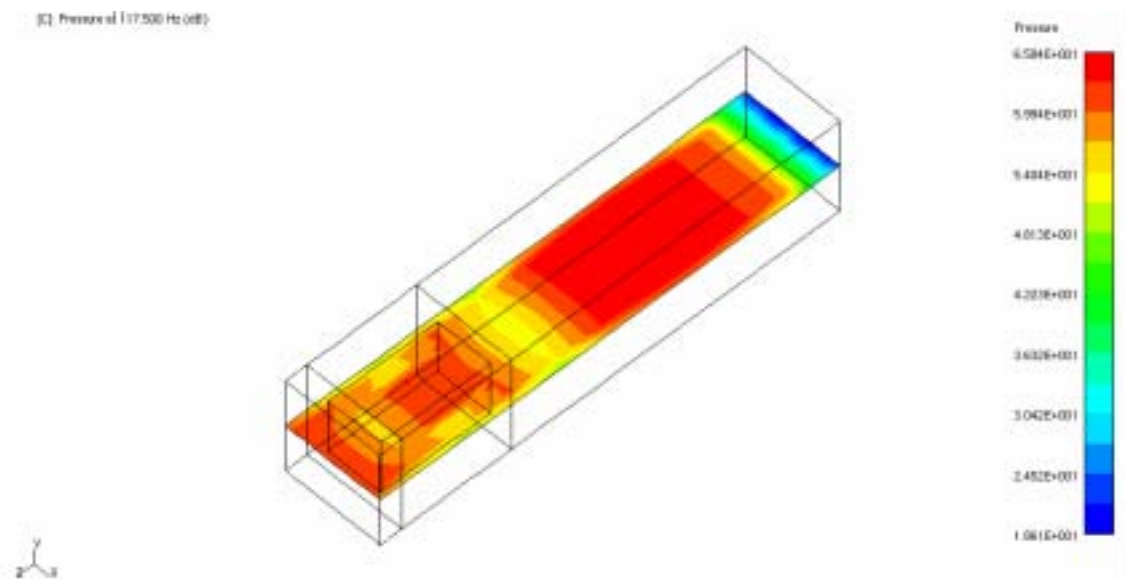
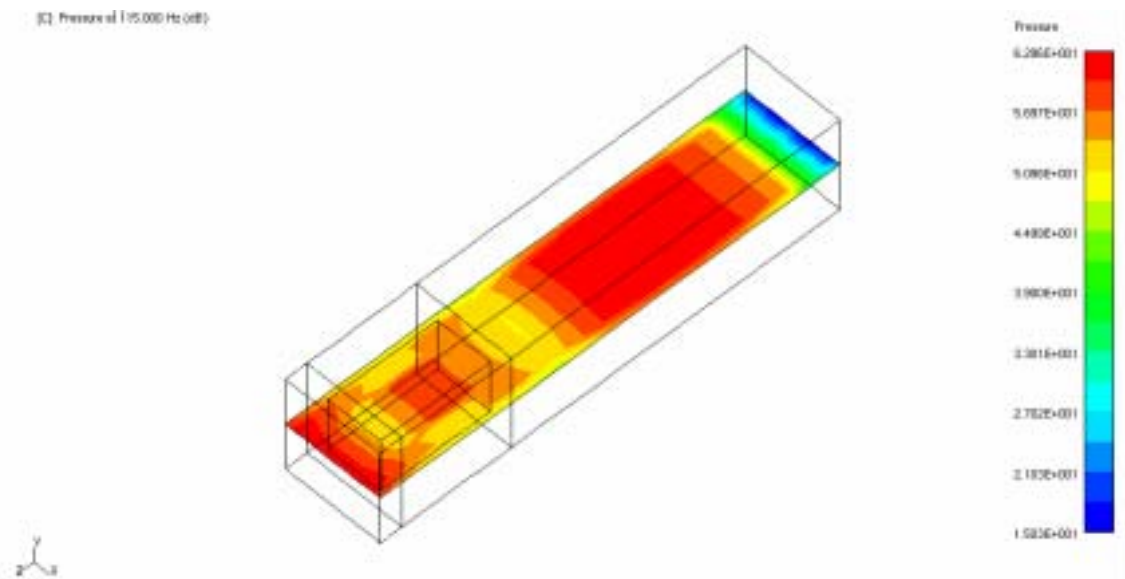


Fig.7.4.3 音圧分布 (112.5Hz)



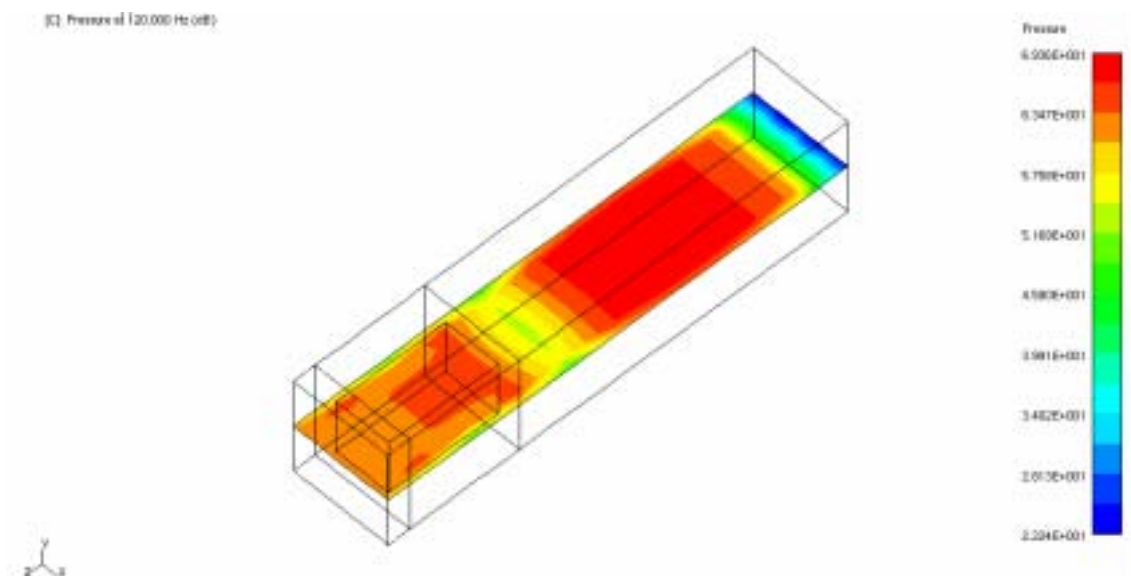


Fig.7.4.6 音圧分布 (120.0Hz)

実験と周波数応答関数を比較すると、1次ピークは近い値をとっているが全体的にはまだ合っているとはいえない。音響解析は剛体が前提であり、板振動の影響などは排除できるので、サイレンサの音響特性を把握するには有効である。また、モデルを精密にすれば、共鳴孔の影響なども検討できるので、今後の課題である。

# 第八章

## 結言

## 第八章 結言

### 8.1 結言

(1) 板振動が減音特性に与える影響を調べるために、音響加振されにくい厚板サイレンサを製作し、その特性を薄板サイレンサと比較した。その結果、厚板の減音ピーク周波数では実験値と理論値が非常に近い値となった。これは薄板と比較した場合に内板の振動が小さいこと、板が厚い分透過音の影響が小さいことを考慮すると、厚板であれば共鳴による減音が行われていると考えられる。一方、薄板については減音ピーク周波数が理論値と大きく離れ、薄板であることの何らかの影響があることが示唆された。また、孔数が大きい方がピーク周波数での減音量が大であり、加えて広帯域の周波数において減音効果が向上することがわかった。

(2) 薄板の減音ピーク周波数が理論値と大きく離れる理由を調べるため、孔部にパイプを挿入してアスペクト比を変え、共鳴周波数を変化させる実験を行った。その結果、減音ピーク周波数をシフトさせることはできたが、依然として数値にはズレがあった。また、パイプ長を長くすると減音効果が悪くなり、孔なしサイレンサの特性に近づいてしまうことも確認した。

(3) 薄板サイレンサ内板のインパルスハンマによる伝達関数を計測し、厚板、薄板の板振動の様子を調べた。また、制振材の有無による伝達関数および減音量の比較を行った。その結果、薄板の振動は厚板に比べて大きくなっていた。また、薄板で通常使用している制振材を取るとより振動が大きくなり、より減音ピークは理論ピークとずれてしまうが、減音量は向上することがわかり、板の振動が減音ピークを高周波数へシフトしてしまうということと減音する周波数領域が広がり全体的な減音特性を向上させるということが示唆された。

### 8.2 今後の課題

- (1) 薄板、厚板両者の特徴を活かした、サイレンサ設計手法の確立・定式化。
- (2) 振動を考慮した薄板および、パイプ挿入時の理論値計算の再検討
- (3) 音響解析のモデル化の精度向上、設計への実用化