

# 減圧二重壁の透過損失に関する理論的研究

福田基一\*・小嶋直哉\*

## A Theoretical Study on the Sound Transmission Loss of the Double Wall with Decompressed Air Space

Motokazu FUKUDA and Naoya KOJIMA

### Abstract

Sound transmission through walls varies with the frequency of the sound and the mass and stiffness of the construction.

An effective way of obtaining a large amount of sound insulation for a given weight per unit area is by means of a double wall construction.

For simplicity, consider a double wall made of two single panels, each of which alone would have the mass law transmission loss characteristic. Place these two panels  $m_1$  and  $m_2$  parallel to each other at a distance  $d$  apart, with only air in space between. Assume that the panels are very large and that they are clamped around the edges in such a way that there is no flanking.

The air space between the two panels behaves like a simple spring. The stiffness of this spring is inversely proportional to the spacing. The two panels are simply two masses, one on each end of the spring.

The transmission loss of the double wall increases as the separation of the two parts of the double wall increase, provided the distance between them is less than a wave length, and the combined transmission loss of two panels should be the sum of the transmission losses for the separate panels when the distance between them is much greater than the wave length of the transmitted sound.

Sound is not transmitted in vacuum space. If the pressure of the space between walls is very small, it is possible for the transmission loss to become even greater than the value as discussed above.

In this paper, the authors studied on the transmission loss of the double wall with decompressed air space and the theoretical equations of TL were investigated.

### 1. 緒 言

吸気音や吐出音のような空気音は、筆者らの消音器に関する一連の研究<sup>(1)~(22)</sup>によって、かなりの精度で設計をすすめることができる域にまで達するに至っている。

しかし、一般に機械の騒音全体の低減や工場騒音の低減の目的の場合には遮音や吸音による方法が有効である。

遮音の効果については、衆知の法則として Mass Law があるがその透過損失は、壁の面密度を倍増しても 5dB しか増えないので、その効果には限度がある。透過損失を増大せしめる方法の一つに二重壁が考

えられるが、中間空気層の間隔が小さい場合にはその効果もあまり期待できない。

ここで筆者は、中間空気層の距離が小さい場合でも遮音効果を増す方法の一つとして、中間空気層を減圧することに着目した。音波は真空の中は伝搬されないものであるから真空にすることができれば問題はないが、材料の剛性の上から真空にすることは容易ではない。

そこで、中間空気層の圧力を低減することによって音波の透過損失はどのように変化するかという問題について理論的解析を試み、理論式を誘導し、さらに電子計算機で数値計算を行って、減圧二重壁の遮音効果に及ぼす壁面の面密度、空気層の間隔、減圧度などの影響について調べることにした。

\* 機械工学科

## 2. 理論式の誘導のための仮説

すべて理論式は一定の条件のもとに誘導される。本報に示す減圧二重壁の透過損失の一般式の誘導に際して、筆者は次の仮定を設定した。

- 1) 音源から遮音壁の壁面に入射する音波、および反射波、透過波はすべて平面波である。
- 2) 壁面は十分に広く、かつ固体結合による音波の伝搬や迂回による音波の伝搬はない。
- 3) 壁の両面における振動は一体で位相のずれはない。
- 4) 壁の起振源は音源からの音波のみである。
- 5) 二重壁の内部の空気層の圧力は、外部の圧力と必ずしも同一ではないが、音速は同一である。
- 6) 気流その他による影響は無視できる。

## 3. 基礎式

いま壁 I について入射音圧を  $p_{1i}$ 、反射音圧を  $p_{1r}$ 、透過音圧を  $p_{1t}$  とする。壁 I の左面の振動速度を  $u_1$  とすると、図 1 において

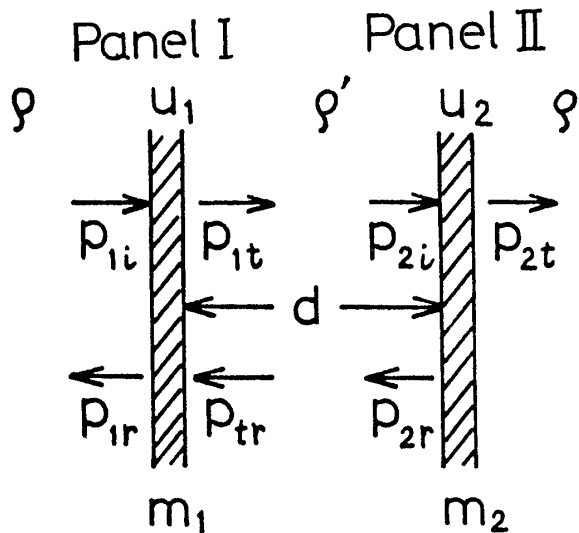


Fig. 1 A double wall construction

$$u_1 = \frac{p_{1i} - p_{1r}}{\rho c} \quad (1)$$

ここで  $\rho, c$  は大気 の 比 重 量 お よ び 大 気 中 の 音 速 である。

壁 I の右面の振動速度も左面と同じく  $u_1$  であるとし、二重壁内の空気 の 比 重 量 を  $\rho'$ 、壁 II からの入射音圧を  $p_{1r}$  とすると

$$u_1 = \frac{p_{1t} - p_{1r}}{\rho' c} \quad (2)$$

壁 I の単位面積あたりの重量、すなわち面密度を  $m_1$  とすると

$$i\omega m_1 u_1 = p_{1i} + p_{1r} - p_{1t} - p_{1r} \quad (3)$$

同様にして壁 II について入射音圧を  $p_{2i}$ 、反射音圧を  $p_{2r}$ 、透過音圧を  $p_{2t}$  とし、壁 II の左面も右面も一体振動で振動速度を  $u_2$  とすると、左面では

$$u_2 = \frac{p_{2i} - p_{2r}}{\rho' c} \quad (4)$$

右面では

$$u_2 = \frac{p_{2t}}{\rho c} \quad (5)$$

壁 II の単位面積あたりの重量、すなわち面密度を  $m_2$  とすると

$$i\omega m_2 u_2 = p_{2i} + p_{2r} - p_{2t} \quad (6)$$

次に、中間空気層については、間隔を  $d$ 、波長定数を  $k$  ( $k = \omega/c$ ) とすると

$$p_{1t} = e^{ikd} p_{2i} \quad (7)$$

$$p_{1r} = e^{-ikd} p_{2r} \quad (8)$$

以上 8 つの基礎式が考えられ、未知数は  $p_{1i}$ 、 $p_{1r}$ 、 $p_{1t}$ 、 $p_{1r}$ 、 $p_{2i}$ 、 $p_{2r}$ 、 $p_{2t}$ 、 $u_1$ 、 $u_2$  の 9 つである。

## 4. $p_{1i}$ と $p_{2t}$ の比

壁 I への入射音圧  $p_{1i}$  と壁 II からの透過音圧  $p_{2t}$  の比を示す式を導くことにする。まず式 (1)、(2) より

$$p_{1i} - p_{1r} = \frac{\rho}{\rho'} (p_{1t} - p_{1r}) \quad (9)$$

式 (3) より

$$p_{1i} + p_{1r} = \frac{i\omega m_1}{\rho' c} (p_{1t} - p_{1r}) + p_{1t} + p_{1r} \quad (10)$$

この両式より

$$p_{1i} = \frac{1}{2} \left\{ \left( 1 + \frac{\rho}{\rho'} + \frac{i\omega m_1}{\rho' c} \right) p_{1t} + \left( 1 - \frac{\rho}{\rho'} - \frac{i\omega m_1}{\rho' c} \right) p_{1r} \right\} \quad (11)$$

次に式 (5)、(6) より

$$p_{2i} = \left( 1 + \frac{i\omega m_2}{\rho c} \right) p_{2t} - p_{2r} \quad (12)$$

式 (4)、(5) より

$$P_{2r} = P_{2i} - \frac{\rho'}{\rho} P_{2t} \quad (13) \quad + e^{-ikd} \left( 1 - \frac{\rho}{\rho'} - \frac{i\omega m_2}{\rho'c} \right)$$

この両式より

$$\begin{aligned} P_{2i} &= \left( 1 + \frac{i\omega m_2}{\rho c} \right) P_{2t} - P_{2i} + \frac{\rho'}{\rho} P_{2t} \\ &= \frac{1}{2} \left( 1 + \frac{\rho'}{\rho} + \frac{i\omega m_2}{\rho c} \right) P_{2t} \quad (14) \end{aligned} \quad \left( 1 - \frac{\rho'}{\rho} + \frac{i\omega m_2}{\rho c} \right) \left. \begin{aligned} &= \frac{1}{4} \left[ \left\{ 2 + \frac{i\omega(m_1+m_2)}{\rho c} \right\} e^{ikd} \right. \\ &\quad \left. + \left\{ 2 + \frac{i\omega(m_1+m_2)}{\rho c} \right\} e^{-ikd} \right] \end{aligned}$$

上式を式(7)に代入して

$$P_{1t} = \frac{1}{2} e^{ikd} \left( 1 + \frac{\rho'}{\rho} + \frac{i\omega m_2}{\rho c} \right) P_{2t} \quad (15) \quad + \left\{ \frac{\rho'}{\rho} + \frac{\rho}{\rho'} + \frac{i\omega(m_1+m_2)}{\rho'c} - \frac{\omega^2 m_1 m_2}{\rho \rho' c^2} \right\} e^{ikd}$$

同様に式(4), (5), (6)より

$$P_{2r} = \frac{1}{2} \left( \frac{i\omega m_2}{\rho c} - \frac{\rho'}{\rho} + 1 \right) P_{2t} \quad (16) \quad - \left\{ \frac{\rho'}{\rho} + \frac{\rho}{\rho'} + \frac{i\omega(m_1+m_2)}{\rho'c} - \frac{\omega^2 m_1 m_2}{\rho \rho' c^2} \right\} e^{-ikd}$$

上式を式(8)に代入すると

$$P_{1r} = \frac{1}{2} e^{-ikd} \left( \frac{i\omega m_2}{\rho c} - \frac{\rho'}{\rho} + 1 \right) P_{2t} \quad (17) \quad - \left\{ \frac{\rho'}{\rho} + \frac{\rho}{\rho'} + \frac{i\omega(m_1+m_2)}{\rho'c} - \frac{\omega^2 m_1 m_2}{\rho \rho' c^2} \right\} e^{-ikd}$$

式(15), (17)を式(11)に代入すると

$$\begin{aligned} P_{1i} &= \frac{1}{2} \left\{ \left( 1 + \frac{\rho}{\rho'} + \frac{i\omega m_1}{\rho'c} \right) P_{1t} \right. \\ &\quad \left. + \left( 1 - \frac{\rho}{\rho'} - \frac{i\omega m_1}{\rho'c} \right) P_{1r} \right\} \\ &= \frac{1}{2} \left\{ \left( 1 + \frac{\rho}{\rho'} + \frac{i\omega m_1}{\rho'c} \right) \frac{1}{2} e^{ikd} \right. \\ &\quad \left. \left( 1 + \frac{\rho'}{\rho} + \frac{i\omega m_2}{\rho c} \right) P_{2t} \right. \\ &\quad \left. + \left( 1 - \frac{\rho}{\rho'} - \frac{i\omega m_1}{\rho'c} \right) \frac{1}{2} e^{-ikd} \right. \\ &\quad \left. \left( 1 - \frac{\rho'}{\rho} + \frac{i\omega m_2}{\rho c} \right) P_{2t} \right\} \\ &= \frac{1}{4} P_{2t} \left\{ e^{ikd} \left( 1 + \frac{\rho}{\rho'} + \frac{i\omega m_1}{\rho'c} \right) \right. \\ &\quad \left. \left( 1 + \frac{\rho'}{\rho} + \frac{i\omega m_2}{\rho c} \right) \right. \\ &\quad \left. + e^{-ikd} \left( 1 - \frac{\rho}{\rho'} - \frac{i\omega m_1}{\rho'c} \right) \right. \\ &\quad \left. \left( 1 - \frac{\rho'}{\rho} + \frac{i\omega m_2}{\rho c} \right) \right\} \quad (18) \end{aligned} \quad \begin{aligned} &= \frac{1}{4} \left[ \left\{ 2 + \frac{i\omega(m_1+m_2)}{\rho c} \right\} (e^{ikd} + e^{-ikd}) \right. \\ &\quad \left. + \left\{ \frac{\rho'}{\rho} + \frac{\rho}{\rho'} + \frac{i\omega(m_1+m_2)}{\rho'c} - \frac{\omega^2 m_1 m_2}{\rho \rho' c^2} \right\} (e^{ikd} - e^{-ikd}) \right] \\ &= \left\{ 1 + \frac{i\omega(m_1+m_2)}{2\rho c} \right\} \cos kd + \frac{i}{2} \left\{ \frac{\rho'}{\rho} - \frac{\rho}{\rho'} \right. \\ &\quad \left. + \frac{i\omega(m_1+m_2)}{\rho'c} - \frac{\omega^2 m_1 m_2}{\rho \rho' c^2} \right\} \sin kd \quad (19) \end{aligned}$$

### 5. 減圧二重壁の透過損失の一般式の誘導

壁 I への入射音圧  $P_{1i}$  と壁 II からの透過音圧  $P_{2t}$  の比を decibel 表示し透過損失 TL として表示するための式を誘導する。

まず式(19)を実数部と虚数部にかけて整理すると

$$\begin{aligned} \frac{P_{1i}}{P_{2t}} &= \left\{ \cos kd - \frac{1}{2} \frac{\omega(m_1+m_2)}{\rho'c} \sin kd \right\} \\ &\quad + \frac{i}{2} \left\{ \frac{\omega(m_1+m_2)}{\rho c} \cos kd + \frac{\rho'}{\rho} \sin kd \right. \\ &\quad \left. + \frac{\rho'}{\rho} \sin kd - \frac{\omega^2 m_1 m_2}{\rho \rho' c^2} \sin kd \right\} \quad (20) \end{aligned}$$

上式の絶対値の平方は実数部の平方と虚数部の平方の和であるから

$$\left| \frac{P_{1i}}{P_{2t}} \right|^2 = \cos^2 kd - \frac{\omega(m_1+m_2)}{\rho'c} \cos kd \cdot \sin kd$$

これより  $P_{1i}$  と  $P_{2t}$  の比は次式で与えられる。

$$\begin{aligned} \frac{P_{1i}}{P_{2t}} &= \frac{1}{4} \left\{ e^{ikd} \left( 1 + \frac{\rho}{\rho'} + \frac{i\omega m_1}{\rho'c} \right) \right. \\ &\quad \left. \left( 1 + \frac{\rho'}{\rho} + \frac{i\omega m_2}{\rho c} \right) \right. \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& + \frac{1}{4} \left\{ \frac{\omega(m_1+m_2)}{\rho'c} \right\}^2 \sin^2 kd \\
& + \frac{1}{4} \left[ \left\{ \frac{\omega(m_1+m_2)}{\rho c} \right\}^2 \cos^2 kd \right. \\
& + \left( \frac{\rho'}{\rho} \right)^2 \sin^2 kd + \left( \frac{\rho}{\rho'} \right)^2 \sin^2 kd \\
& + \left( \frac{\omega^2 m_1 m_2}{\rho \rho' c^2} \right)^2 \sin^2 kd \\
& + \frac{2\rho'}{\rho} \frac{\omega(m_1+m_2)}{\rho c} \cos kd \cdot \sin kd \\
& + 2 \frac{\rho}{\rho'} \frac{\omega(m_1+m_2)}{\rho c} \cos kd \cdot \sin kd \\
& - 2 \frac{\omega^2 m_1 m_2}{\rho \rho' c^2} \frac{\omega(m_1+m_2)}{\rho c} \cos kd \cdot \sin kd \\
& + 2 \sin^2 kd - \frac{2\rho'}{\rho} \frac{\omega^2 m_1 m_2}{\rho \rho' c^2} \sin^2 kd \\
& \left. - \frac{2\rho}{\rho'} \frac{\omega^2 m_1 m_2}{\rho \rho' c^2} \sin^2 kd \right] \\
& = \left[ 1 + \left\{ \frac{\omega(m_1+m_2)}{2\rho c} \right\}^2 \right] \cos^2 kd \\
& + \frac{\rho}{\rho'} \frac{\omega(m_1+m_2)}{2\rho c} \left\{ \left( \frac{\rho'}{\rho} \right)^2 \right. \\
& - 1 - \frac{\omega^2 m_1 m_2}{(\rho c)^2} \left. \right\} \sin kd \cdot \cos kd + \frac{1}{4} \left[ \left( \frac{\rho}{\rho'} \right)^2 \right. \\
& \left. \frac{\omega^2(m_1+m_2)}{(\rho c)^2} + \left( \frac{\rho'}{\rho} + \frac{\rho}{\rho'} \right)^2 - 2 \frac{\omega^2 m_1 m_2}{(\rho c)^2} \right. \\
& \left. + \left( \frac{\rho}{\rho'} \right)^2 \left\{ \frac{\omega^2 m_1 m_2}{(\rho c)^2} \right\}^2 \right] \sin^2 kd \quad (21)
\end{aligned}$$

よって、減圧二重壁の透過損失  $TL$  の一般式は

$$\begin{aligned}
TL &= 10 \log_{10} \left| \frac{P_{1t}}{P_{2t}} \right|^2 \\
&= 10 \log_{10} \left| 1 + \left\{ \frac{\omega(m_1+m_2)}{2\rho c} \right\}^2 \cos^2 kd \right. \\
&+ \frac{\rho}{\rho'} \frac{\omega(m_1+m_2)}{2\rho c} \left\{ \left( \frac{\rho'}{\rho} \right)^2 - 1 - \frac{\omega^2 m_1 m_2}{(\rho c)^2} \right\} \\
&\quad \sin kd \cdot \cos kd \\
&+ \frac{1}{4} \left\{ \left( \frac{\rho'}{\rho} - \frac{\rho}{\rho'} \right)^2 + \left( \frac{\rho}{\rho'} \right)^2 \frac{\omega^2(m_1^2+m_2^2)}{(\rho c)^2} \right. \\
&\quad \left. - 2 \frac{\omega^2 m_1 m_2}{(\rho c)^2} + \left( \frac{\rho}{\rho'} \right)^2 \frac{\omega^4 m_1^2 m_2^2}{(\rho c)^4} \right\} \sin^2 kd \Big| dB \\
&\quad (22)
\end{aligned}$$

いま二重壁の内部の圧力を外部の大気圧の  $1/\alpha$  に減圧したとすると、 $TL$  は次式で表わされる。

$$\begin{aligned}
TL &= 10 \log_{10} \left| 1 + \left\{ \frac{\omega(m_1+m_2)}{2\rho c} \right\}^2 \cos^2 kd \right. \\
&\quad - \frac{\alpha \omega(m_1+m_2)}{2\rho c} \left\{ 1 - \frac{1}{\alpha^2} + \frac{\omega^2 m_1 m_2}{(\rho c)^2} \right\} \\
&\quad \sin kd \cdot \cos kd \\
&\quad + \frac{\alpha^2}{4} \left[ \left( 1 - \frac{1}{\alpha^2} \right)^2 + \left( \frac{\omega}{\rho c} \right)^2 \left\{ (m_1^2 + m_2^2) \right. \right. \\
&\quad \left. \left. - \frac{2m_1 m_2}{\alpha^2} \right\} + \frac{\omega^4 m_1^2 m_2^2}{(\rho c)^4} \right] \sin^2 kd \Big| dB \quad (23)
\end{aligned}$$

## 6. 特例式の誘導

一般式(22)または(23)より次の各特例式が導かれる。

### 6.1 $m_1 \neq m_2, \rho' = \rho$ のとき

$$\begin{aligned}
TL &= 10 \log_{10} \left| 1 + \left\{ \frac{\omega(m_1+m_2)}{2\rho c} \right\}^2 \cos^2 kd \right. \\
&\quad - \frac{\omega(m_1+m_2)}{2\rho c} \frac{\omega^2 m_1 m_2}{(\rho c)^2} \sin kd \cdot \cos kd \\
&\quad + \frac{1}{4} \left[ \frac{\omega^2(m_1-m_2)^2}{(\rho c)^2} + \left\{ \frac{\omega^2 m_1 m_2}{(\rho c)^2} \right\}^2 \right] \sin^2 kd \Big| dB \\
&\quad (24)
\end{aligned}$$

### 6.2 $m_1 = m_2 = m, \rho' \neq \rho$ のとき

$$\begin{aligned}
TL &= 10 \log_{10} \left| 1 + \left( \frac{\omega m}{\rho c} \right)^2 \cos^2 kd \right. \\
&\quad + \left( \frac{\rho}{\rho'} \right) \frac{\omega m}{\rho c} \left\{ \left( \frac{\rho'}{\rho} \right)^2 \right. \\
&\quad \left. - 1 - \left( \frac{\omega m}{\rho c} \right)^2 \right\} \sin kd \cdot \cos kd \\
&\quad + \frac{1}{4} \left\{ \left( \frac{\rho'}{\rho} - \frac{\rho}{\rho'} \right)^2 + 2 \left\{ \left( \frac{\rho}{\rho'} \right)^2 - 1 \right\} \left( \frac{\omega m}{\rho c} \right)^2 \right. \\
&\quad \left. + \left( \frac{\rho}{\rho'} \right)^2 \left( \frac{\omega m}{\rho c} \right)^4 \sin^2 kd \right| \\
&= 10 \log_{10} \left| 1 + \left[ \frac{\omega m}{\rho c} \cos kd - \frac{1}{2} \left( \frac{\rho}{\rho'} \right) \right. \right. \\
&\quad \left. \left. \left\{ 1 - \left( \frac{\rho'}{\rho} \right)^2 + \left( \frac{\omega m}{\rho c} \right)^2 \right\} \sin kd \right]^2 \right| dB \quad (25)
\end{aligned}$$

### 6.3 $m_1 = m_2 = m, \rho/\rho' = \alpha$ のとき

$$\begin{aligned}
TL &= 10 \log_{10} \left| 1 + \left( \frac{\omega m}{\rho c} \right)^2 \cos^2 kd \right. \\
&\quad + \alpha \left( \frac{\omega m}{\rho c} \right) \left\{ \frac{1}{\alpha^2} - 1 - \left( \frac{\omega m}{\rho c} \right)^2 \right\} \sin kd \cdot \cos kd
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & + \frac{1}{4} \left\{ \left( \alpha - \frac{1}{\alpha} \right)^2 + 2(\alpha^2 - 1) \left( \frac{\omega m}{\rho c} \right)^2 \right. \\
 & \left. + \alpha^2 \left( \frac{\omega m}{\rho c} \right)^4 \right\} \sin^2 kd \Big| \\
 = & 10 \log_{10} \left| 1 + \left[ \frac{\omega m}{\rho c} \cos kd \right. \right. \\
 & \left. \left. - \frac{\alpha}{2} \left( 1 - \frac{1}{\alpha^2} + \left( \frac{\omega m}{\rho c} \right)^2 \right) \sin kd \right]^2 \right| \\
 = & 10 \log_{10} \left| 1 + \left( \frac{\omega m}{\rho c} \right)^2 \left\{ \cos kd \right. \right. \\
 & \left. \left. - \frac{\alpha}{2} \left( \frac{\omega m}{\rho c} + \frac{1 - \frac{1}{\alpha^2}}{\frac{\omega m}{\rho c}} \right) \sin kd \right\}^2 \right| \text{ dB} \quad (26)
 \end{aligned}$$

6.4  $m_1 = m_2 = m, \rho' = \rho$  のとき

$$\begin{aligned}
 TL = & 10 \log_{10} \left| 1 - \left( \frac{\omega m}{\rho c} \right)^2 \left\{ \cos kd \right. \right. \\
 & \left. \left. - \frac{1}{2} \frac{\omega m}{\rho c} \sin kd \right\}^2 \right| \text{ dB} \quad (27)
 \end{aligned}$$

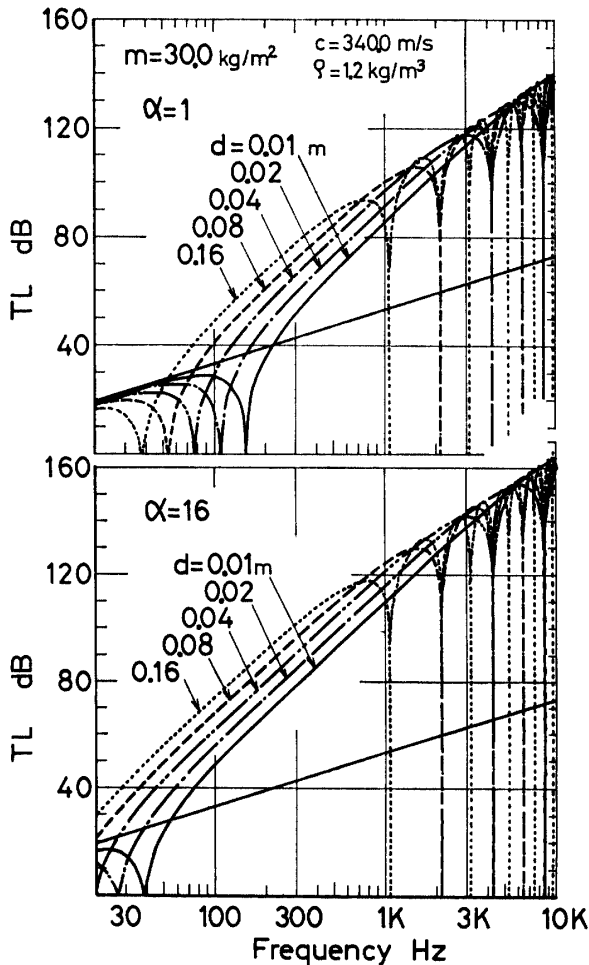


Fig. 2 Effect of  $d$  (Theoretical values)

7. 計算と考察

図1から図8までに、電子計算機による計算結果を示している。以下にこれに対する考察を述べる。

7.1 空気層の間隔の影響

図2は、中間空気層の間隔  $d$  を変化したときの透過損失  $TL$  を示している。上図は減圧なしの場合、下図は1/16気圧に減圧した場合である。1 KHzより高い周波数における通過帯域は  $f=c/2d$  によるもので空気層の内部に吸音性をもたせることにより軽減することができる。減圧によって  $TL$  は著しく増大しているが、減圧の有無にかかわらず、空気層の間隔が2倍になるにしたがってほぼ6 dB づつ  $TL$  が増加している。

7.2 減圧度の影響

図3は、中間空気層の空気を次第に抜いていったときの減圧度  $\alpha$  による  $TL$  の変化を示している。上図

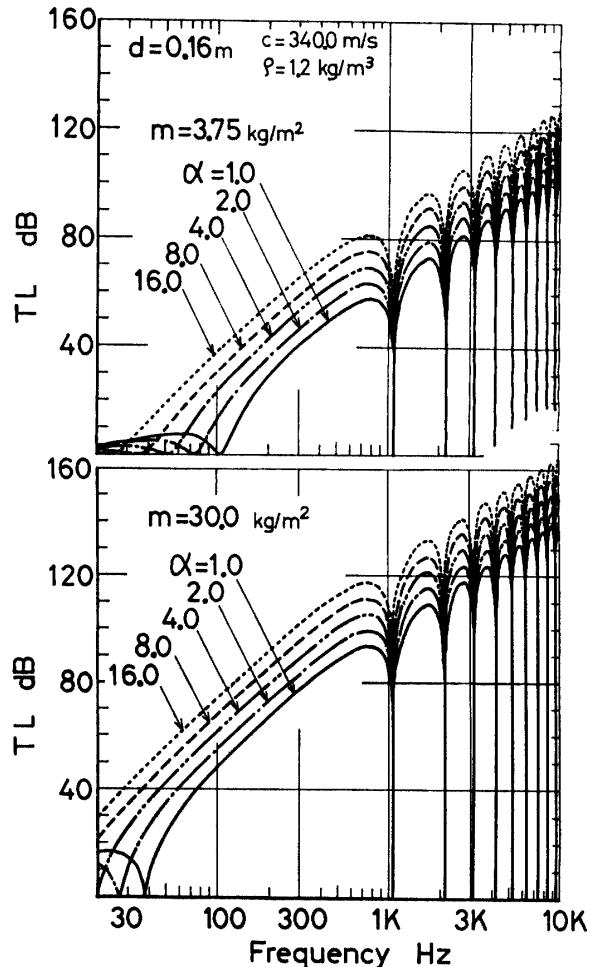
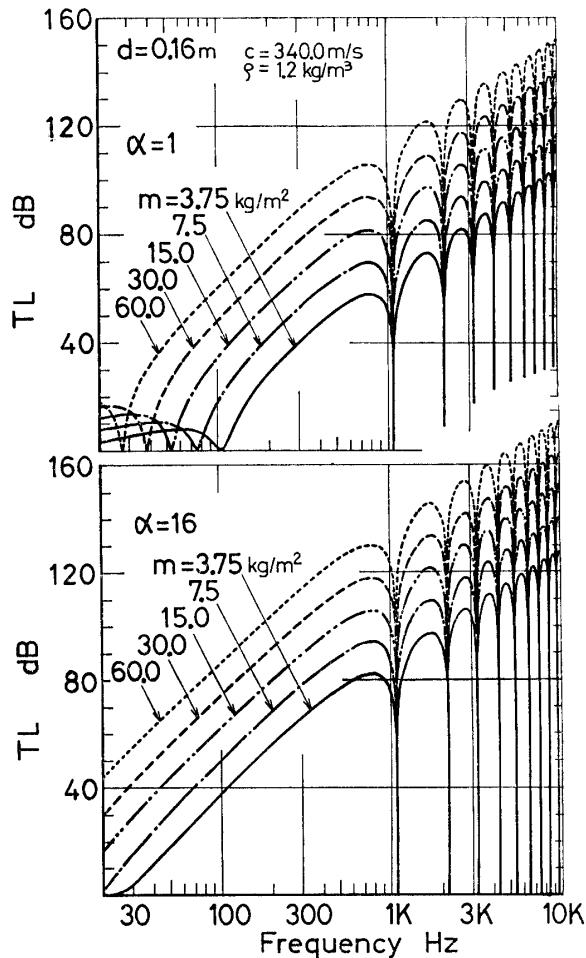


Fig. 3 Effect of  $\alpha$  (Theoretical values)

Fig. 4 Effect of  $m$  (Theoretical values,  $d=0.16$  m)

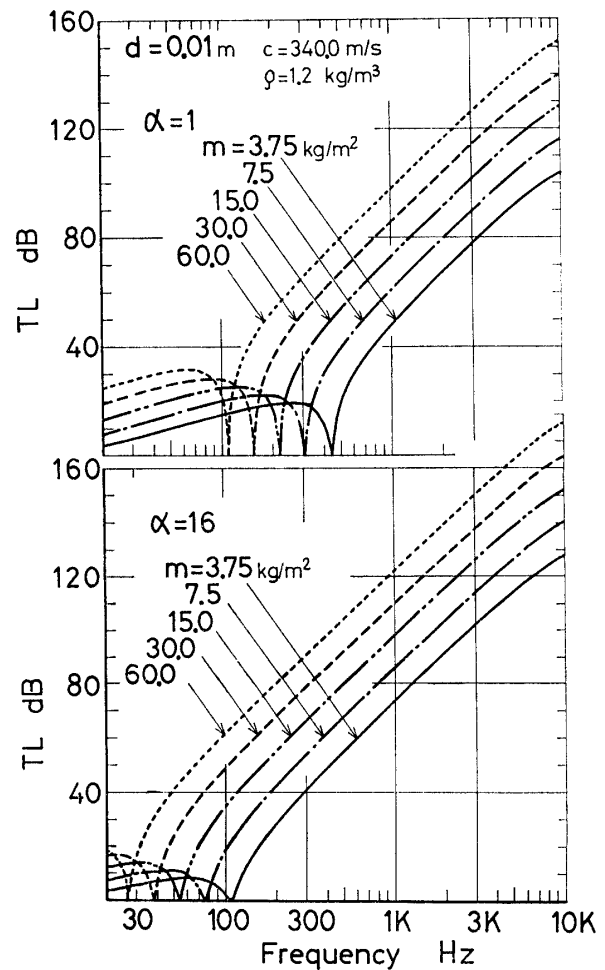
は面密度  $m$  が小 (たとえば密度  $0.75 \text{ g/cm}^3$ , 厚さ  $5 \text{ mm}$  図3のテックスなど) の場合, 下図は面密度が約その10倍 (たとえば密度  $7.8 \text{ g/cm}^3$ , 厚さ  $4 \text{ mm}$  の鉄板など) の場合である.  $m$  が大きいほど  $TL$  は増加しているが,  $m$  や  $d$  が一定の場合には減圧度  $\alpha$  が2倍になるにしたがってほぼ  $6 \text{ dB}$  ずつ  $TL$  が増加している.

### 7.3 面密度の影響

二重壁の壁材の面密度  $m$  を変化したときの  $TL$  の変化を図4および図5に示している.

図4は, 空気層の間隔が  $16 \text{ cm}$  の場合, 図5は  $1 \text{ cm}$  の場合で, いずれも  $m$  の2倍に対して  $TL$  はほぼ  $12 \text{ dB}$  ずつ増加しており,  $m$  の影響が大きいことを示している.

図6は, それぞれの面密度の比  $m_1/m_2$  を変化したときの  $TL$  の変化を示したもので,  $m_1/m_2$  が増すにつれて低周波域における共振のピークが鋭くなる傾向が認められる. なおこの場合の  $TL$  は,  $m_1 \times m_2$  の2

Fig. 5 Effect of  $m$  (Theoretical values,  $d=0.01$  m)

倍に対してほぼ  $6 \text{ dB}$  ずつ増加している.

### 7.4 共振周波数

二重壁は両端に重り  $m_1, m_2$ , 中間にばね  $K$  をもつ振動系であるから, 当然機械結合による共振周波数が生ずれはらずであり, 図2から図6までの各図の低周波域において発生している通過帯域がそれである. この周波数は, 空気層  $d$ , 減圧度  $\alpha$ , 面密度  $m$  が大になるほど低域に移行する.

図7は, 共振周波数の変化拡大して示したもので, 上図は  $m$  変化, 下図は  $\alpha$  変化である. 減圧度  $\alpha$  による周波数の低域への移行の状況は, 面密度  $m$  変化の場合の移行の状況にかなり類似しているが, その立ち上りによる  $TL$  にはかなりの相違があることが示されている.

### 7.5 $mf$ による整理

$mf$  によって整理した場合の  $TL$  の変化を図8に示す. 図において, 下の直線は  $m_1$  または  $m_2$  の一方を

零とした場合すなわち一重壁の場合の  $TL$  である。  
 また上の直線は、二重壁の場合の  $m$  変化による  $TL$  のピーク値を連ねたものである。

二重壁の  $TL$  は、実用的にはこの二本の線で囲まれる範囲の値とすることができる。

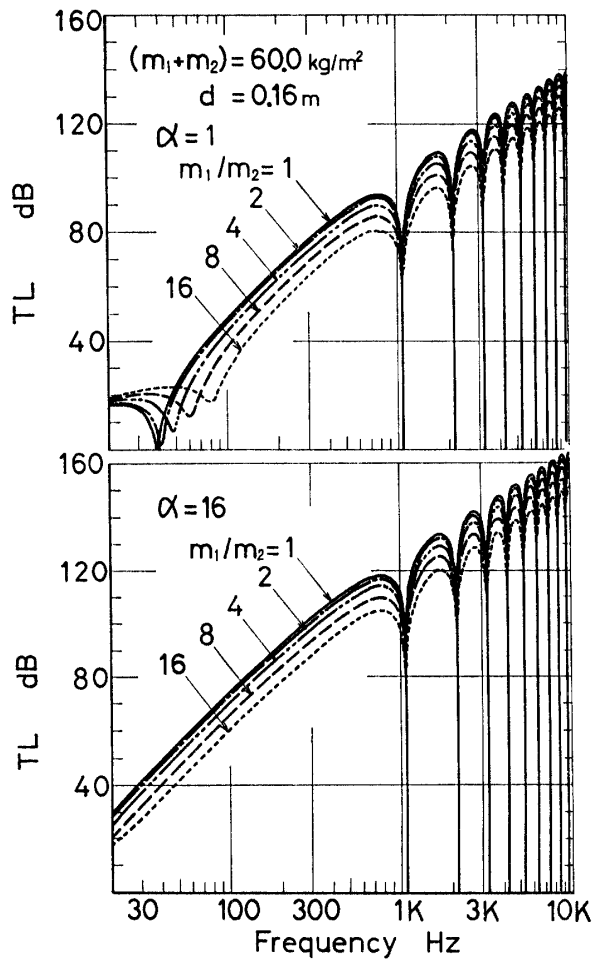


Fig. 6 Effect of  $m_1/m_2$  (Theoretical values)

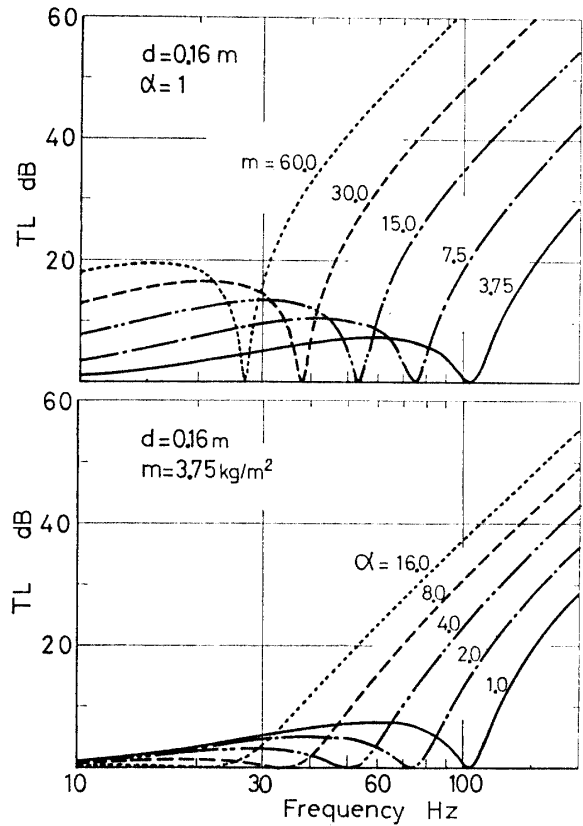


Fig. 7 Resonance frequency of double wall

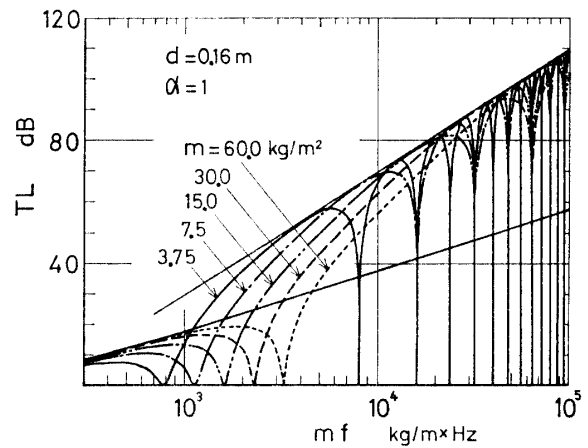


Fig. 8 Regulation of  $TL$  by  $mf$

## 8. 結 論

本研究では内部に減圧された空気層をもつ二重壁の遮音効果の理論式について研究を行い、一般式および特例式を導いた。

またこれらの式に数値を代入して電子計算機による計算を行い、壁の面密度、空気層の間隔、減圧度等の各因子が透過損失に及ぼす影響について調べた。その結果、外圧に較べて空気層の圧力を  $1/2$ ,  $1/4$ ,  $1/8$ …と半減するにしたがって透過損失はほぼ  $6\text{ dB}$  (ただし実用的数値計算範囲) ずつ増大することが判った。また共振周波数も低周波数の方に移ることが認められた。

これらのことから、二重壁の空気層の間隔をどうしても大きくとり得ないような場合に、空気層の圧力を低くすることは有効な方法であるように思われる。

なお本論文において、理論式の誘導については福田が担当し、電子計算機による数値計算および作図は小嶋が担当したことを付記する。

## 参 考 文 献

- 1) 福田基一, 城戸健一, 二村忠元: “消音器における吸音物の効果(第1報)”, 日本音響学会誌, **15**, 4 (1959) p. 240.
- 2) 福田基一, 二村忠元, 城戸健一: “同上(第2報)”, 日本音響学会誌, **16**, 1 (1960) p. 28.
- 3) 福田基一, 城戸健一, 二村忠元: “吸音壁面をもつ内燃機関排気消音器に関する研究”, 日本機械学会論文集, **26**, 171 (1960), p. 1667.
- 4) 福田基一: “内燃機関の排気消音器に関する基礎的研究(第1報)”, 日本機械学会論文集, **26**, 168 (1960), p. 1167.
- 5) 福田基一: “同上(第2報)”, 日本機械学会論文集, **26**, 168 (1960), p. 1174.
- 6) 福田基一: “同上(第3報)”, 日本機械学会論文集, **28**, 192 (1962), p. 966.
- 7) 福田基一: “同上(第4報)”, 日本機械学会論文集, **29**, 198 (1963), p. 415.
- 8) 福田基一: “内燃機関の排気消音器に関する二三の理論的考察”, 山口大学工学部研究報告, **14**, 1 (1964), p. 33.
- 9) 福田基一: “内燃機関の吸排気管効果における諸整理数の統一的考察”, 日本機械学会誌, **69**, 567 (1966), p. 455.
- 10) 福田基一ほか18名共著: “騒音対策ハンドブック”, 技報堂刊 (1966), p. 215.
- 11) 福田基一, 奥田襄介: “機械の騒音とその対策”, 共立出版刊 (1967)
- 12) 福田基一, 和泉晴夫: “空どう形消音器の特性に関する研究(単純化した理論式による計算と実験)”, 日本機械学会論文集, **34**, 263 (1968), p. 1294.
- 13) 福田基一, 奥田襄介: “空どう形消音器の特性に関する研究(消音効果の一般式)”, 日本機械学会誌(技術論文), **72**, 604 (1969) p. 603.
- 14) 福田基一: “騒音防止工学”, 日本機械学会誌, **73**, 618 (1970)
- 15) 福田基一: “Attenuation for a Cavity-Type Muffler with a Tail Tube of Finite Length”, 日本音響学会誌, **26**, 3 (1970)
- 16) 福田基一: “自動車の騒音と消音装置”, 日本機械学会誌, **74**, 626 (1971), p. 302.
- 17) 福田基一, 和泉晴夫, 永久洋治, 国広一矩: “内燃機関の背圧および軸出力に及ぼす排気管長の影響”, 日本機械学会論文集, **38**, 307 (1972), p. 611.
- 18) 福田基一: “内燃機関の排気騒音の特性”, 自動車技術, **27**, 8 (1973), p. 873.
- 19) 福田基一: “リアクタンス形消音器に関する基礎理論”, 音響技術, **4** (1973), p. 35.
- 20) 福田基一: “自動車工学便覧(第2分冊第1章エンジン, 4・3 騒音と対策)”, 自動車技術会刊 (1974)
- 21) 福田基一: “マフラーに関する理論的考察”, 自動車技術, **29**, 8 (1975)
- 22) 福田基一: “機械工学便覧(第14編内燃機関, 1・5 消音器)”, 日本機械学会刊 (1976)

(昭和51年4月12日 受理)