

○寺尾道仁, 関根秀久, △小川雄史, △坂下聡康(神奈川県大・工)

1. はじめに ISO10534-1:1996(インピーダンス管による吸音率及びインピーダンスの測定—第1部 定在波法)では, 管壁面の粘性・熱伝導音響消散を伴う一次元音場について, 入射波と反射波の減衰係数が相互に独立に Kirchhoff の理論式(1868)で表され, その音場が入射波と反射波の重ね合せで表現されることを前提にしている。

しかし, この重ね合せの妥当性については入射波と反射波の分離測定の困難があり, 必ずしも実証されていないように見受けられる。そこで最近の2マイクロホン分離測定手法を利用した実験を行い, その妥当性を調べる。

2. 実験装置および測定方法 Fig.1 に実験ダクトの音源, 終端条件および音圧測定点を示す。ダクトは, 厚肉鋼管(内径  $d=0.047\text{m}\phi$  と  $d=0.100\text{m}\phi$  の2通り)を用いた。ダクト内の2箇所  $x_1$  及び  $x_2$  における入射波と反射波音圧  $p_1^+$  と  $p_1^-$  及び  $p_2^+$  と  $p_2^-$  の分離測定は, それぞれの位置に  $p_1^+$  と  $p_1^-$  及び  $p_2^+$  と  $p_2^-$  の2組, 計4本の  $1/2''$ コンデンサマイクロホン(膜面はダクト内壁面に一致)を挿入し, 2マイクロホン法により行った。ペアマイクロホン間の間隔  $s$  は  $s=100\text{mm}$  と  $s=150\text{mm}$  の2通りとし, 入射波と反射波の分離計算においては, 簡単のため, 間隔  $s$  のダクト区間の管内減衰は無視した。

### 3. 管壁減衰を受ける進行波の表現

Fig.1 のような剛・直管内において, 軸方向の平面進行波のみが伝搬する場合を対象とする。

軸方向座標を  $x$  とし, その正及び負の方向に進む平面波の点  $x_i$  における複素音圧振幅をそれぞれ  $p_i^+$  と  $p_i^-$  とすれば, その一方の進行波のみ存在する場合には, 符号を複合同順として, 次式(1)により表すことができる。

$$p_i^{\pm} = p_0^{\pm} e^{\mp i k x} \quad (1a)$$

ただし,  $k$  は複素伝搬定数で

$$k = \omega/c - j\alpha_w \quad (1b)$$

その虚部  $\alpha_w$  は, ダクトの壁面粘性・熱伝導音響消散による減衰定数で, 境界層厚に較べて断面寸法が大きいダクトの場合, Kirchhoff の理論式が適用され, D. Weston によれば,

$$\alpha_w = \sqrt{\frac{\omega\mu}{2\rho}} \left[ 1 + \frac{\gamma-1}{\sqrt{\mu c_p / \kappa}} \right] \frac{L_p}{2cS_D} \quad (2a)$$

により表される[1]。

ここで,  $\omega$  は角周波数, 空気について,  $\rho$  は密度,  $c$  は音速,  $\mu$  は粘性係数,  $\kappa$  は熱伝導率,  $\gamma$  は比熱比,  $c_p$  は定圧比熱, また, ダクトについて  $S_D$  は断面積,  $L_p$  はペリメータ長である。

ISO10534-1 では, 円断面管にたいして直径を  $d$  (m), 周波数を  $f$  (Hz) として

$$\alpha_w = 1.94 \times 10^{-2} \sqrt{f / cd} \quad (2b)$$

を与えている。

$L_{12} = x_2 - x_1$  として, 2点  $x_1$  と  $x_2$  の進行波音圧比, すなわち, 負方向に進行する平面波の比  $p_2^- / p_1^-$  または正方向に進行する平面波の比  $p_2^+ / p_1^+$  を分離測定すれば, それぞれの式(1)における  $\alpha_w$  との関係は

$$\alpha_w = (\mp 1 / L_{12}) \ln(p_2^{\pm} / p_1^{\pm}) \quad (3)$$

のように書き直される。

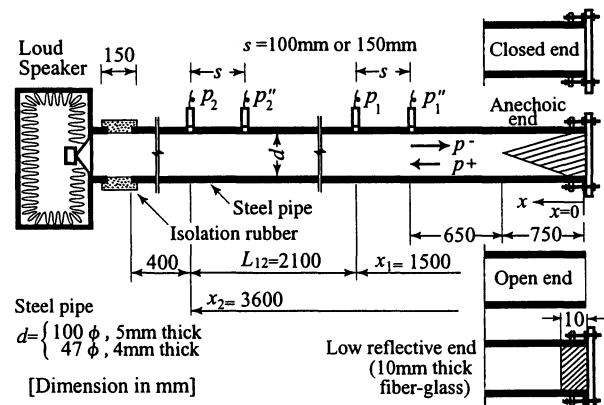


Fig. 1 Experimental set up

\*On attenuation constants of impedance tubes for absorption coefficients.

By Michihito Terao, Hidehisa Sekine, Yusi Ogawa, Akiyasu Sakasita (kanagawa university)

4. 実験結果 式(1)の成立を仮定して、式(3)により  $\alpha_w$  を求めた実験結果例を Fig.2 に示す。

(a)は、入射波(すなわち、 $p_2^- / p_1^-$ と式(3)により得られた減衰係数  $\alpha_w$ ) の場合である。分離測定精度が比較的高い  $s < \lambda/4$  ( $\lambda = c/f$  は波長)の周波数範囲において、無反射端の条件では減衰係数  $\alpha_w$  は式(2)と良好な一致を示す。すなわち、逆方向の進行波が存在せず、その干渉を受けない場合には、Kirchhoff 理論式(2) による式(1)の表現は有効であることが確認される。

一方、反射波が存在して干渉を生じる場合には、減衰係数  $\alpha_w$  は Kirchhoff 理論式(2)には従わない。閉鎖端と開放端の場合、減衰係数の周波数による変化は、式(2)を挟んで大きく変動し、その大きさは相互に逆になっている。低反射端の場合は閉鎖端の場合と類似している。

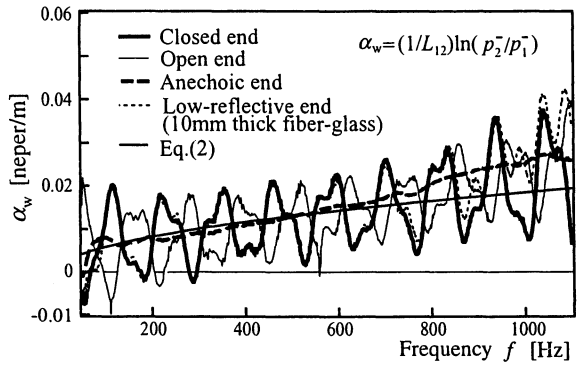
(b)は反射波(すなわち、 $p_2^+ / p_1^+$ と式(3)により得られた減衰係数  $\alpha_w$ ) の場合である。周波数変化に伴う  $\alpha_w$  の変化は、それぞれの終端条件ごとに(a) 入射波の場合と反転している。 $\alpha_w$  と周波数との関係は系統的であり、 $\alpha_w$  の実験値と Kirchhoff 理論式(2)との違いにおいて、分離測定誤差(偶然性の誤差)の寄与は小さいものと考えられる。

(a), (b)ともに、周波数によって  $\alpha_w$  が負、すなわち、減衰が負になる不合理も現れる。それはとくに低反射端の反射波(入射波にたいして相対的勢力が弱い)の場合に甚だしい。以上は、 $d = 0.100m\phi$ 、 $s = 100mm$  の場合であったが、 $d = 0.047m\phi$  の場合、 $s = 150mm$  の場合、また、音源と反射端を交換しても同様であった。

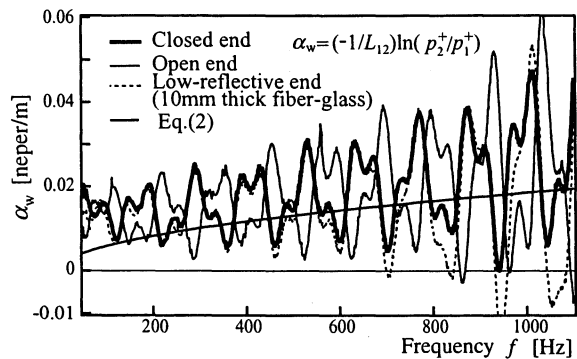
(c)は、(a)における閉鎖端の減衰係数  $\alpha_w$  にたいして、 $L_{12}$  内の理論的な粒子速度の二乗の空間平均値  $U = \langle u^2 \rangle_{L_{12}}$  (ただし、周波数に関する依存性と変動幅を調整)、また、 $L_{12}$  内の音響消散パワ ( $L_{12}$  への入射音響パワで規準化)を比較したものである。両者に強い相関がみられる。

以上により、相互に逆方向に進行する平面波が同時に存在して干渉する場合、一方の進行波の減衰係数  $\alpha_w$  はそれと逆方向の進行波との合成音場に支配され、その一方が他方に独立なモデルによる重ね合せは無意味であると判断される。

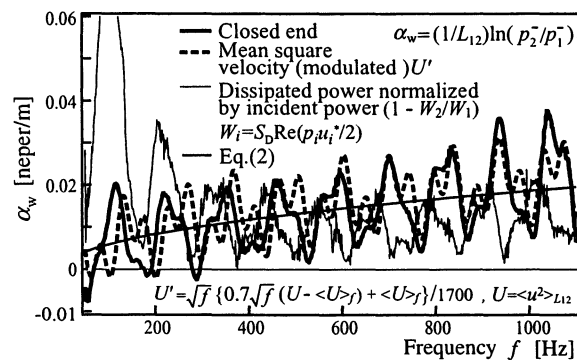
5. まとめ ダクト壁面粘性・熱伝導音響消散に関する Kirchhoff の理論式について、1方向のみの平面進行波の音場における定量的有効性が確認された。しかし、それは相互に逆方向に進行する平



(a) For incidence wave



(b) For reflected wave



(c) Comparison of a  $\alpha_w$ , the dissipated power and the square particle velocity averaged in the interval  $L_{12}$

Fig.2 Attenuation constant  $\alpha_w$  of a traveling wave if Kirchhoff model were used in the presence of another plane wave traveling in the opposite direction ( $d = 100mm$ ,  $s = 100mm$ )

面波が同時に存在して干渉する場合には無意味化し、ISO10534-1 における壁面音響消散を含めた平面進行波モデルの重ね合せは有効性が低いことが実証された。

参考文献

[1] D. E. Weston, Proc. Rhus. Soc., B66, pp695-709, 1953.