

## 音響管二位置マイクロホン法インピーダンス測定における 管内減衰の補正法\*

○寺尾 道仁, 関根 秀久, △石井孝憲, △服部康章 (神奈川大・工)

1. はじめに 音響管による反射係数測定時の管内減衰の補正法については ISO10534 に記述があるが、減衰定数の位置依存性が無視されているため、その精度には原理的に限界がある。そこで減衰定数の位置依存性を考慮した管内減衰補正手法を用意しその有効性を調べると共に ISO 法についてもその改良を試みた。

2. 音響管内の一次元波動表現 Fig.1 に示すように、点  $x$  における音圧 (以下、複素音圧振幅)  $p$ 、入射波及び反射波の音圧  $p^-$  及び  $p^+$ 、また、反射係数  $r$  は次式により表される。

$$p = p^- + p^+, \quad p^+ = p_0^+ e^{-jkx} \quad (1a,b)$$

$$r = p^+ / p^-, \quad k = \omega/c - j\bar{\alpha}_w \quad (1c,d)$$

$$\bar{\alpha}_w = [R_v + R_h] L_p / (2\rho c S_D) \quad (2)$$

ただし、反射係数  $\rho$  は空気密度、 $c$  は空気音速、 $S_D$  はダクトの断面積、 $L_p$  はダクトのペリメータ長である。また、 $\omega$  を角周波数、 $\mu$ 、 $\kappa$ 、 $\gamma$  及び  $c_p$  を、それぞれ、空気の粘性係数、熱伝導率、比熱比及び定圧比熱として

$$R_v = \sqrt{\frac{\rho\omega\mu}{2}}, \quad R_h = \frac{\gamma-1}{\sqrt{\mu c_p / \kappa}} R_v \quad (3a,b)$$

3. 管壁音響消散率と減衰定数 壁面音響境界層の比音響アドミッタンス  $\beta_w$  は、 $\nabla_T^2$  を壁面方向のラプラシアンとして

$$\beta_w = (1+j) \left[ \frac{R_h}{c} - \frac{cR_v}{\omega^2} \nabla_T^2 \right] \quad (4)$$

により表され、 $x$  における壁面外向きの音響インテンシティ  $I_w$  は式(5)のように導くことができる。

$$I_w = I_w^{(h)} + I_w^{(v,irev)} + I_w^{(v,rev)} \quad (5a)$$

$$I_w^{(h)} = \frac{R_h |p|^2}{2\rho^2 c^2}, \quad I_w^{(v,irev)} = \frac{R_v |u|^2}{2} \quad (5b,c)$$

$$I_w^{(v,rev)} = \frac{-R_v}{\rho\omega} \operatorname{Re} \left\{ (1-j) \frac{d}{dx} \frac{p^+ u}{2} \right\} \quad (5d)$$

単位長さ当りの管壁音響消散率  $\delta$  を

$$\delta = L_p I_w / P_x^-, \quad P_x^- = (S_D / \rho c) |p^-|^2 / 2 \quad (6)$$

により定義すれば、 $x$  と  $x+dx$  面間の音響パワーの差をとることにより次の関係が得られる。

$$\alpha_w = \delta / (1 + |r|^2) \quad (7)$$

ここで  $\alpha_w$  は位置依存減衰係数で  $\bar{\alpha}_w$  と区別する。

### 4. 管内減衰の補正法

4.1 ISO の補正法とその改良 ISO 法では観測点反射係数  $r_i$  から試料面反射係数  $r_0$  を

$$r_0 = r_i e^{2jkx_i} \quad (8)$$

により求める。波長定数  $k$  に含まれる減衰定数  $\alpha_w$  について、現行 ISO 法では  $R_v$  と  $R_h$  の温度依存性を無視して  $\bar{\alpha}_w$  を適用する。それにたいし、ここでは  $R_v$  と  $R_h$  の温度依存性を考慮し、また、二点音圧法反射係数観測における  $\alpha_w^{(s)}$  を  $\alpha_w^{(s)} = 0$  に代えて  $\alpha_w^{(s)} = \bar{\alpha}_w$  とする。これを改良 ISO 法 (ISO improved, ISOimprv と略記) と呼ぶ。

### 4.2 位置依存減衰定数による管内減衰の補正法

観測点の音圧  $p_i$  と反射係数  $r_i$  及び式(7)を手掛りに未知かつ位置依存性の  $\alpha_w$  を推定する。すなわち、 $x_i$  と  $x_0$  のダクト区間を微小区間 (長さ  $l_n$ 、ここでは  $l_n = 10\text{mm}$  一定) に分割し、各区间について  $r$  及び  $\alpha_w$  を求める。その際、第  $n-1$  区間の試料側の反射係数  $r_i^{(n)} = r_i^{(n-1)}$  を用いて、第  $n$  区間の  $\alpha_w$  を式(5)、式(6)などと式(7)を用いて求め、

$$r_i^{(n)} = r_i^{(n)} e^{+2j(\omega/c - j\alpha_w)l_n} \quad (9)$$

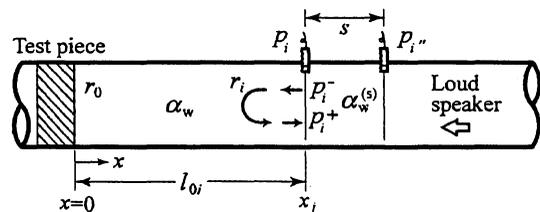


Fig.1 Impedance-tube two-microphone-position method for reflection factors.

\*On correction for test tube attenuation in determination of reflection factors by impedance-tube two-microphone-position method.

By TERA0 Michihito, SEKINE Hidehisa, ISHII Takanori and HATTORI Yasufumi (Kanagawa Univ.)

により第  $n$  区間の試料側の反射係数  $r_i^{(n)} = r_i^{(n+1)}$  を求める。これを反射係数観測値  $r_i$  から、順次、各区间について実行して試料面の反射係数  $r_0$  を得る。この新たな管内減衰補正手法を以下では位置依存減衰係数法 (PosDepAtt と略記) と呼ぶ。

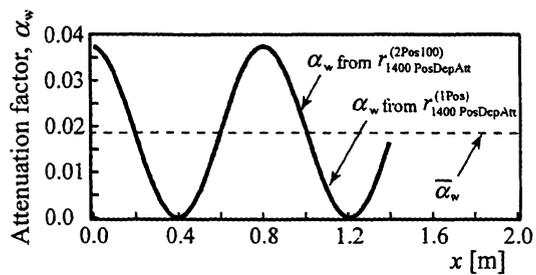
5. 減衰係数の位置依存性 Fig.2 は反射係数  $r$  および減衰係数  $\alpha_w$  の位置依存性に関する数値解析結果例である。ここで上添字 2Pos100 は  $s=100\text{mm}$  の二位置音圧法反射係数観測, また, 下添字の 1400 は反射係数観測点位置  $x_i$  が  $1400\text{mm}$  であることを表わす。

Fig.2(a)には, 位置依存減衰係数法から得られた減衰係数  $\alpha_w$  を示す。 $\alpha_w$  はその反射係数の観測手法や観測点に依る違いが小さく  $\alpha_w$  及び  $r$  の同定手法 4.2 の信頼性は高いものと判断される。

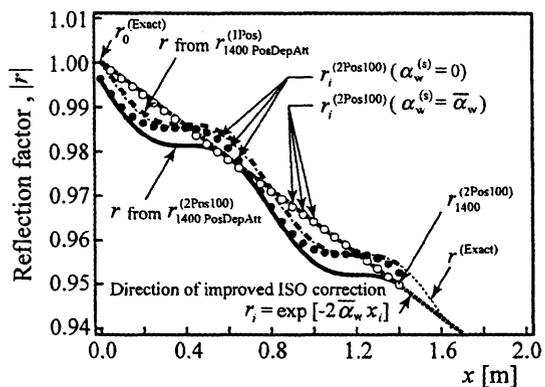
Fig.2(b)には, 観測点反射係数  $r_i$  から試料の反射係数  $r_0$  に至る反射係数  $r$  の位置依存性を示す。一点法 (音圧と粒子速度観測) 反射係数による位置依存減衰係数法  $r$  from  $r_i^{(1\text{Pos})}$  は真値  $r^{(\text{Exact})}$  によく一致する。反射係数の観測精度が高い場合には位置依存減衰係数法 (PosDepAtt) は極めて有効である。

一方, 二点音圧法反射係数観測法については,  $\alpha_w^{(s)} = \bar{\alpha}_w$  とした場合 (改良 ISO 法) と  $\alpha_w^{(s)} = 0$  とした場合 (現行 ISO 法) の反射係数観測値をそれぞれ  $r_i^{(2\text{Pos}100)} (\alpha_w^{(s)} = \bar{\alpha}_w)$  及び  $r_i^{(2\text{Pos}100)} (\alpha_w^{(s)} = 0)$  とし  $x_i = 100 \times \text{imm} (i=1, 2, \dots)$  の  $100\text{mm}$  ごとに示す。 $r_i^{(2\text{Pos}100)} (\alpha_w^{(s)} = \bar{\alpha}_w)$  は,  $r_0 = 1$  とした式(8)の直線にほぼ重なる。 $r_i^{(2\text{Pos}100)}$  が  $r_i^{(\text{Exact})}$  に一致しない観測点でも, その  $r_i^{(2\text{Pos}100)}$  から式(8)により  $r_0$  を求めれば  $r_0^{(\text{Exact})}$  にごく近い値に到達するため改良 ISO 法による補正と相性がよい。それに対して現行 ISO 法による  $r_i^{(2\text{Pos}100)} (\alpha_w^{(s)} = 0)$  は  $r_i^{(2\text{Pos}100)} (\alpha_w^{(s)} = \bar{\alpha}_w)$  に比べ  $r_i^{(\text{Exact})}$  に近い値になるにもかかわらず補正式(8)との相性はよくない。

他方, 位置依存減衰係数法は  $x_i = 1400\text{mm}$  の反射係数観測値による反射係数  $r$  from  $r_i^{(2\text{Pos}100)}$  からみられるように,  $r_i^{(2\text{Pos}100)}$  と  $r_i^{(\text{Exact})}$  との不一致が大きい観測点の場合には, その誤差  $\Delta r_i^{(2\text{Pos}100)} = r_i^{(2\text{Pos}100)} - r_i^{(\text{Exact})}$  がそのまま試料の反射係数  $r_0$  の誤差として反映されてしまい, 管内減衰補正能力を十分に生かすことができない。



(a) Attenuation factor



(b) Reflection factor

Fig.2 Position dependence of attenuation and reflection factors (Rigid end, BEM, 210Hz).

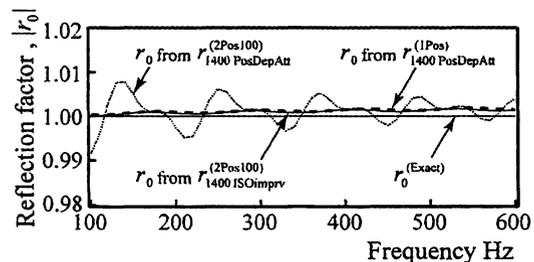


Fig.3 Diference of Reflection factors by reflection detection and duct attenuation correction methods (Rigid end, BEM).

$r_i^{(2\text{Pos}100)} (\alpha_w^{(s)} = \bar{\alpha}_w)$  による場合, 誤差  $\Delta r_i^{(2\text{Pos}100)}$  の絶対値は, Fig.2(a) と (b) を見比べると分かるように  $\alpha_w = \bar{\alpha}_w$  の位置で大きくなっている。

## 6. 二位置音圧反射係数観測法の精度

Fig.3 に試料の反射係数観測値の反射係数観測手法及び補正手法による違い (剛壁端の場合) を示す。各周波数について Fig.2(b) に述べた内容が反映されている。

7. まとめ 音響管二点音圧法インピーダンス測定における管内減衰補正法について, 減衰係数の位置依存性を考慮した新たな手法を導入し, その基本的有効性を示した。また, ISO 法の改良を試み, その実用的有効性を示した。