

○ 関根 秀久, 寺尾 道仁 (神奈川大)

1. はじめに 音源の音響特性として、音響駆動力（駆動波音圧または無反射端音響パワ）のような能動特性のみならず音源内部減衰のような受動的特性も要求される。前報[1]では音源の能動特性が各接続ダクト（ポート）間でコヒーレントな場合に限定したが、ここではとくに空力音源のようにそれが必ずしもコヒーレントでない場合も含めた音源特性の測定方法とそのダクト網音響予測への応用方法、さらに中規模ダクト網実験によりそれら手法の有効性を示す。

2. コンポーネントの音響特性

(a) ポート間音響方程式

各接続直管ダクトの平面波モード周波数領域を対象とすれば、図1に示すようにMポートのコンポーネント（通常の空気ダクト系ではMは3以下）について、その受動・能動固有音響特性および各ポートにおける外向および内向平面波の複素音圧、 p_k^+ および p_k^- の関係[1]は、

$$p_k^+ = f_k^+ + \sum_{j=1}^M \tau_{kj} p_j^- \quad , (k=1, M) \quad (1)$$

ここで τ_{kj} は $j \neq k$ のときポート j からポート k への特性透過係数、 τ_{kk} および f_k^+ はそれぞれポート k における特性反射係数および駆動波の複素音圧である。

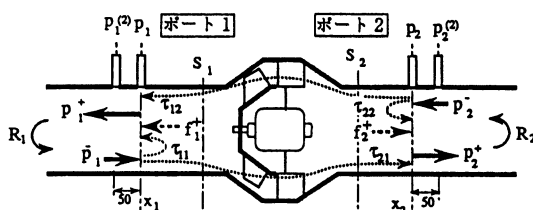


図1 2ポートコンポーネントの音響特性測定方法

(b) 負荷結合受動特性

式(1)は次のように変形される。

$$f_k^+ = \sum_{j=1}^M \eta_{kj} p_j^+ \quad , (k=1, M) \quad (2)$$

ただし、 η_{kj} は負荷結合受動特性で、各ポートの端末側の反射係数を

$$R_j = p_j^- / p_j^+ \quad (3)$$

として、

$$\eta_{kj} = \delta_{kj} - \tau_{kj} R_j \quad (4)$$

ここで、 δ_{kj} は $j \neq k$ のとき $\delta_{kj} = 0$ 、 $j = k$ のとき $\delta_{kj} = 1$ である。また、式(2)の逆関係は

$$p_k^+ = \sum_{j=1}^M \zeta_{kj} f_j^+ \quad , (k=1, M) \quad (5)$$

ただし、 ζ_{kj} は η_{kj} を要素とする $M \times M$ 行列にたいする逆行列の要素である。

(c) ポート間非コヒーレント音源

ポート間のコヒーレンスが必ずしも1でない音源を含めるため、式(2)にたいして各ポート間のクロススペクトルをとれば、

$$\mu_{kj}^{(f+)} |f_k^+| |f_j^+| = \sum_{n=1}^M \sum_{l=1}^M \eta_{kn}^* \eta_{jl} \mu_{nl}^{(p+)} |p_n^+| |p_l^+| \quad (6)$$

その逆関係は同様に式(5)より

$$\mu_{kj}^{(p+)} |p_k^+| |p_j^+| = \sum_{n=1}^M \sum_{l=1}^M \zeta_{kn}^* \zeta_{jl} \mu_{nl}^{(f+)} |f_n^+| |f_l^+| \quad (7)$$

ただし、 $\mu_{kj}^{(f+)}$ および $\mu_{kj}^{(p+)}$ はそれぞれ2

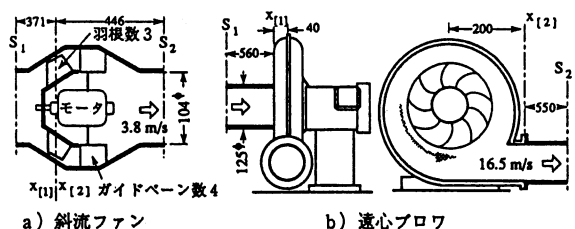


図2 供試送風機

* On source acoustical characteristics for sound prediction of an air duct network.
By Hidehisa Sekine and Michihito Terao (Kanagawa University).

ポートkとjとの間の駆動波および進行波音圧のコヒーレンス，すなわち

$$\mu_{kj}^{(f+)} = \langle (f_k^+) (f_j^+)^* \rangle / |f_k^+| |f_j^+|$$

および

$$\mu_{kj}^{(p+)} = \langle (p_k^+) (p_j^+)^* \rangle / |p_k^+| |p_j^+| \quad (8)$$

また， $(\cdot)^*$ は複素共役，絶対値および記号 $\langle \cdot \rangle$ で表された量はアンサンブル平均値である．

式(6)においてすべての n, l について $|p_n^+|$ および $\mu_{nl}^{(p+)}$ が与えられれば，まず， $j=k$ の場合について $\mu_{kk}^{(f+)}=1$ を考慮して $|f_k^+|$ ， $k=1,2,\dots,M$ が求められ，さらに $j \neq k$ の場合について $\mu_{kj}^{(f+)}$ も求められる．逆に $|f_k^+|$ および $\mu_{kj}^{(f+)}$ が与えられれば，同様に式(7)により $|p_k^+|$ および $\mu_{kj}^{(p+)}$ が求められる．

3. 固有音響特性の受動・能動2段階測定法[2]

能動特性測定に先だち，まず， f_k^+ に無相関な試験音を用いて稼動中のコ

ンポーネントおよび接続ダクトの受動特性， τ_{kj} および R_j ，を測定する[1]．

次に，試験音を取り除き $|p_k^+|$ および $\mu_{kj}^{(p+)}$ を測定して式(6)により能動特性 $|f_k^+|$ および $\mu_{kj}^{(f+)}$ を陽的に得る．ここで $|p_k^+|$ は，ポート音圧振幅 $|p_k|$ を測定[1]して次式により求める．

$$|p_k^+| = |p_k| / |1 + R_k| \quad (9)$$

一方，進行波音圧のポート間のコヒーレンス $\mu_{ki}^{(p+)}$ は，音圧のポート間コヒーレンス $\mu_{ki}^{(p)}$ を測定し，式(9)より導かれる次式により求める．

$$\mu_{kj}^{(p+)} = \frac{|1 + R_k|}{(1 + R_k)^*} \frac{|1 + R_j|}{(1 + R_j)^*} \mu_{kj}^{(p)} \quad (10)$$

ただし，

$$\mu_{kj}^{(p)} = \langle (p_k) (p_j)^* \rangle / (|p_k| |p_j|) \quad (11)$$

4. 音源特性の測定例

図2に示す斜流型および遠心型送風機について，受動・能動2段階法による送風機稼動時（一部非稼動時も比較）の固有音響特性の測定結果を図3およ

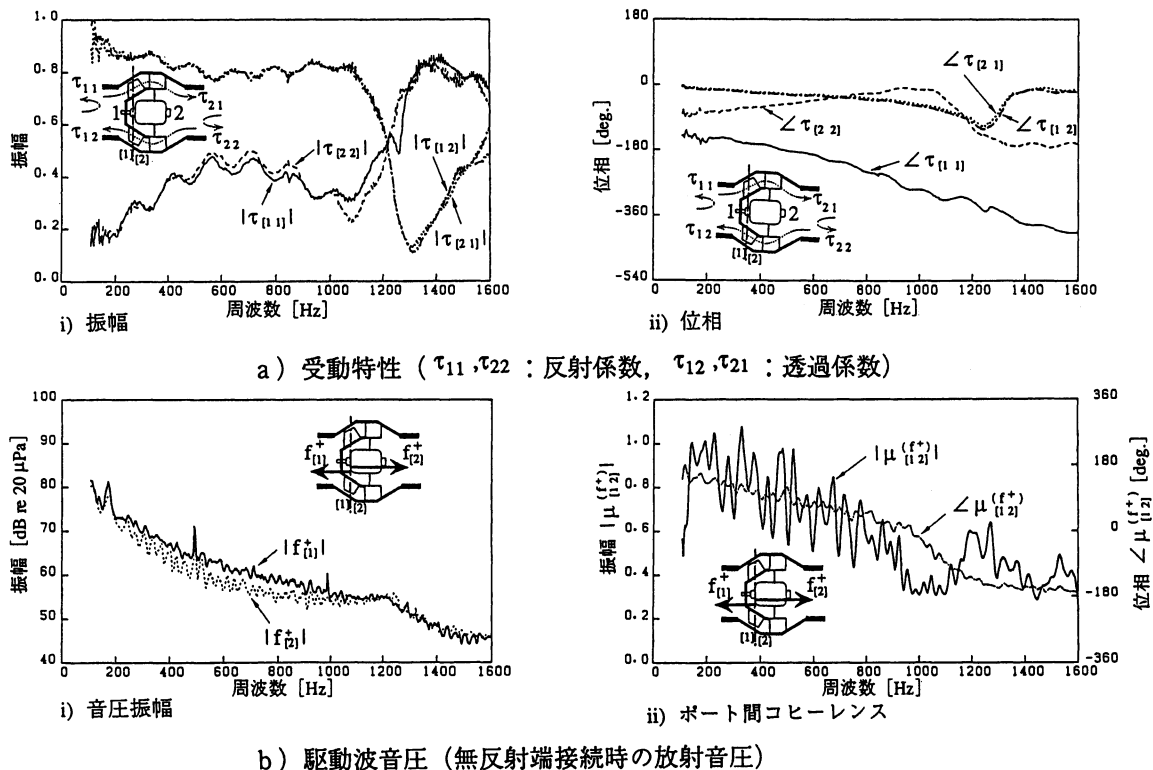


図3 斜流ファン稼動時の音響特性（接続ダクト内平均風速 3.8m/s）

び4に示す．図3 a)から流速が小さい斜流ファンでは，検査面間の距離がないこともあり透過率の相反則が成立している．一方，図4 b)および c)にみられる通り，遠心ブロアの場合，ポート検査面間に距離があり，そこでの平均流

速のため透過率の相反則は成立しない．図3 b)および図4 d)に示すように，両接続ダクト方向への駆動波音圧の違いは大きくても10dB程度である．駆動波音圧のポート間コヒーレンスはこのターボブロワの場合とくに低い．

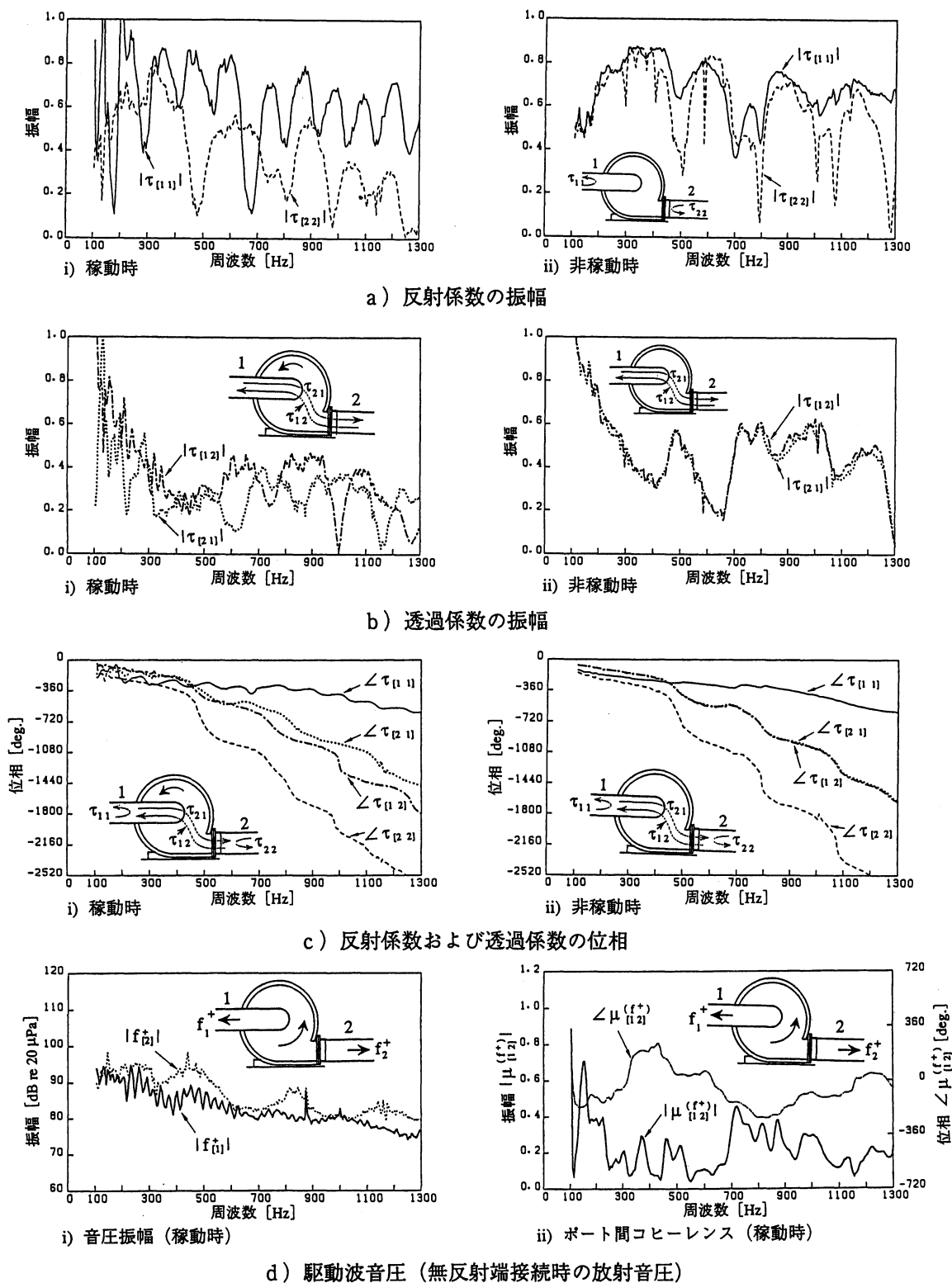
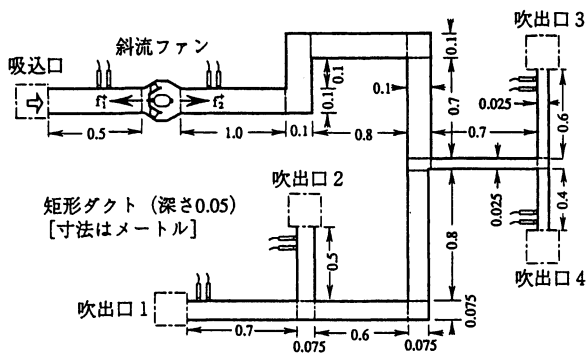
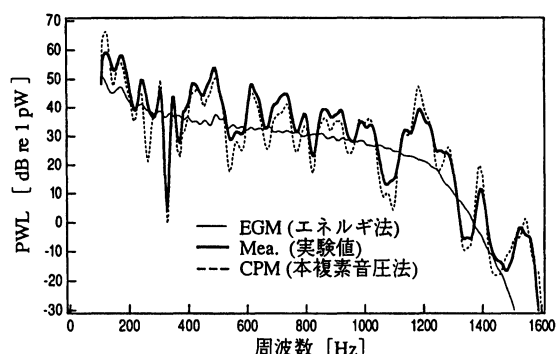


図4 遠心ブロワ非稼動時および稼動時（平均風速 16.5 m/s）の音響特性



a) 実験に用いたダクト網



b) 吹出口 4 からの放射音の音響パワースペクトル

図5 空気調和ダクト網の音響予測例

5. ダクト網音響予測への応用[3]

(a) ダクト網結合時の各コンポネント透過・反射係数

ダクト網のある受動コンポネント

($f_k=0$) について音源側のポート番号を 1 とすれば、式(1)より

$$T_k = \tau_{k1} + \sum_{j=2}^M \tau_{kj} R_j T_j, \quad (k=1, M) \quad (12)$$

ただし、 T_j は第 1 ポート（音源側ポート）にたいする第 j ポートへのダクト網結合時の透過係数で、

$$T_j = p_j^+ / p_1^-, \quad (j=1, 2, \dots, M) \quad (13)$$

すなわち、あるコンポネントについて

端末側反射係数 $R_j = p_j^+ / p_j^-$ ($j=2, M$) が与えられれば、式(12)を解いて透過係数

$T_j = p_j^+ / p_1^-$ ($j=2, M$) および音源側の反射係

数 $1/T_1 = p_1^+ / p_1^-$ が定まる。したがって、端末側から音源側に向かって順次各コンポネントの端末側反射係数を与えれば、その透過係数および音源側反射係数が得られ、最終的に音源コンポネントの端末側反射係数も求められる。これと音源の固有受動・能動特性および式(7)により、音源ポートの外向き波音

圧 p_k^+ が定まり、以下音源から端末側に向かって順次すべてのコンポネント・ポートの進行波音圧などが求められる。

(b) ダクト網における検証実験

図5 a)に示すような実際の1/5縮尺程度のダクト網にたいする実験結果を

図5 b)に示す。予測計算における各コンポネントの音響特性として、本手法(CPM)では送風機については図3の f_k^+ ,

$\mu_{kj}^{(f+)}$ および τ_{kj} , それ以外のコンポネントについてはFEM数値計算によるすべての向きの透過係数 τ_{kj} [4]を、従来法(EGM)では送風機については図3の $|f_k^+|$, それ以外のコンポネントについてはASHRAE[5]によるエネルギー透過率を用いた。実験値 (Mea.) に比較して干渉効果を見逃した従来法では10dBを越える危険側の予測を与える周波数が多い。これにたいし本手法は、実験での共鳴周波数における無損失条件達成の困難および暗騒音の存在を考慮すれば、極めて良好な予測結果を得ている。

6. まとめ 空気ダクト網音響予測のための音源特性として、従来の能動特性、すなわち、ポート駆動波音圧の振幅（無反射端時の放射パワに相当）の他にそのポート間コヒーレンスおよび受動特性、すなわち、反射・透過係数が必要であること、この音源特性についてその測定法、ダクト網音響予測への適用方法および有効性を示した。

参考文献

- [1] 寺尾, 関根; 日本騒音制御工学会技術発表会講演論文集, pp.117-120, 平成3年9月.
- [2] Terao.M., Bernhard.R.J., Denton.N.L. and Sekine.H., Proc. INTER-NOISE, p591-594, Aug. 1990.
- [3] Terao.M., Proc. INTER-NOISE, p571-576, July 1986.
- [4] 寺尾, 関根, 田辺; 日本音響学会講演論文集, 昭和60年9月.
- [5] ASHRAE HANDBOOK, Systems, Chapter 32, 1984.