

◎伊藤誠, 寺尾道仁, 関根秀久, 加藤正雄 (神奈川県)

1. はじめに

従来, 空気調和・換気ダクト網の音響予測は吸排気系とは異なり, 単に, 音源から順次, 各ダクト部分における音響パワの低減量を累積して端末の放射パワを求める手法がとられてきた。空気調和・換気ダクト網は, その大半が樹状網であり分岐は主要な構成要素であるが, 分岐の音響特性としては, 分岐における反射は無視し, かつ, 分岐の透過側ダクトの断面積比で音響パワが配分されるとして計算している。しかしながら, この取り扱い, 個々の分岐での誤差が数 dB 程度であるとしても, 大規模ダクト網で端末まで多数の分岐を経る場合には, 支配的な予測誤差要因となり得る。

そこで, 基本的なT型分岐について, その特性透過・反射係数の基礎的性質を数値実験により調べる。ただし, ここでは, 無風時とし, 接続ダクト内において基本モードのみ伝搬可能な周波数領域に限定する。また, 特性透過・反射係数

の観測には無反射端末の接続ダクトを必要としない受動・能動2段階観測手法[1]を適用する。しかし, この手法はポート数(接続ダクト数)の増加に伴い観測精度の低下が危惧される。その有効性は2ポート要素以下の場合については確認されている[2]が, 3ポートの分岐ダクト要素については未確認である。そこで, 数値実験と物理実験との比較により, その有効性を調べる。また, この受動特性の応用として分岐内のダイポール音源による各ダクトへの発生音の配分比などの基礎的性質を調べる。

2. 基本モード進行波の分離検出方法

ある対象要素について, これと他の要素とを接続するダクトで, 剛壁直管部が長く不連続部近距離モード波が無視できる程度に低減する領域(遠距離伝搬モード領域, ここでは基本モードのみ存在)があるとき, 以下では, これを接続ダクトと呼ぶ。対象要素の接続ダクトの数を L (ここでの分岐では $L=3$) とし, 各ダ

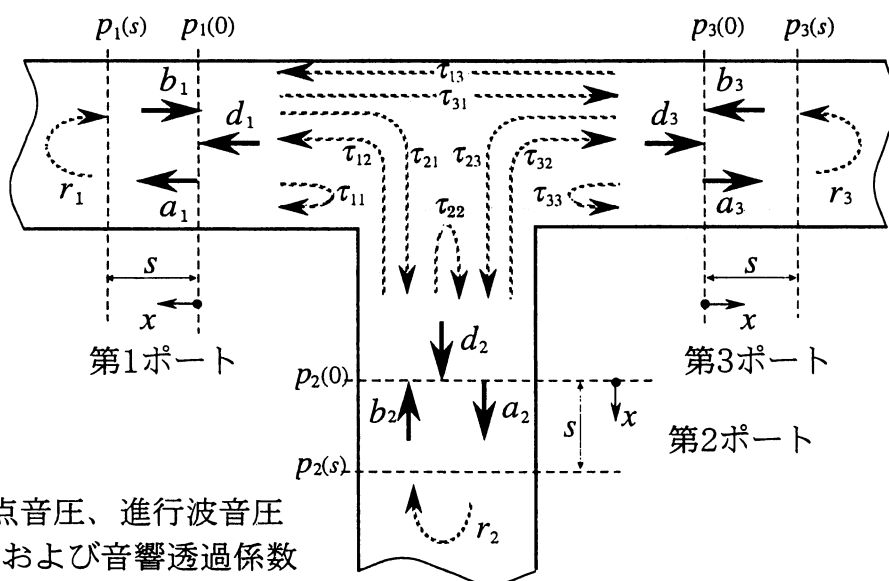


図1 観測点音圧、進行波音圧 および音響透過係数

*Sound reflection and transmission coefficients of branch take offs of T-shape. By M. Itoh, M. Terao, H. Sekine, M. Katoh (Kanagawa University).

クト毎に軸方向座標 x を定義して、遠距離モード領域内に検査面（ポートと呼ぶ）をとりその座標を $x=0$ とする（図1参照）。この領域内における音圧は

$$p_\ell(x) = a_\ell \exp(-jkx) + b_\ell \exp(+jkx) \quad (1)$$

ここで、 a_ℓ と b_ℓ はそれぞれ検査面における外向きおよび内向きの基本モード進行波音圧の複素振幅、 $k=2\pi f/c$ （ただし、 f は周波数、 c は音速）は波数である。 a_ℓ と b_ℓ およびその比（反射係数） $r_\ell = b_\ell/a_\ell$ は $p_\ell(0)$ と $p_\ell(s)$ の2点音圧（ただし、 s はマイクロホン間隔）の伝達関数 $H_\ell = p_\ell(s)/p_\ell(0)$ の観測により次式により求められる[3]。

$$\begin{aligned} a_\ell &= p_\ell(0)/(1+r_\ell) \\ b_\ell &= p_\ell(0)r_\ell/(1+r_\ell) \end{aligned} \quad (2)$$

ここで

$$r_\ell = [\exp(-jks) - H_\ell]/[H_\ell - \exp(+jks)] \quad (3)$$

3. 各ポート進行波音圧の関係

進行音波の重畳原理により各ポートの内向き・外向き進行波音圧の関係は

$$a_\ell = d_\ell + \sum_{\ell'=1}^L \tau_{\ell\ell'} b_{\ell'} \quad (4)$$

のように表現される（図1参照）。ただし、 a_ℓ は第 ℓ ポート ($\ell=1,2,\dots,L$) 外向き波音圧、 $b_{\ell'}$ は第 ℓ' ポート内向き波音圧、 d_ℓ は発生音の第 ℓ ポートへの駆動波音

圧、また、 $\tau_{\ell\ell'}$ は第 ℓ' ポート内向波音圧の第 ℓ ポート外向波音圧への寄与係数、すなわち、特性透過係数 ($\ell=\ell'$ のときは特性反射係数とも呼ぶ) である。なお、 A_ℓ を第 ℓ ポートの断面積として、第 ℓ' ポートへの入射波パワ $A_{\ell'}|b_{\ell'}|^2/\rho c$ にたいする第 ℓ ポートへの透過波パワ $A_\ell|\tau_{\ell\ell'}|^2|b_{\ell'}|^2/\rho c$ の比、すなわち、エネルギー透過率は $|\tau_{\ell\ell'}|^2 A_\ell/A_{\ell'}$ である。

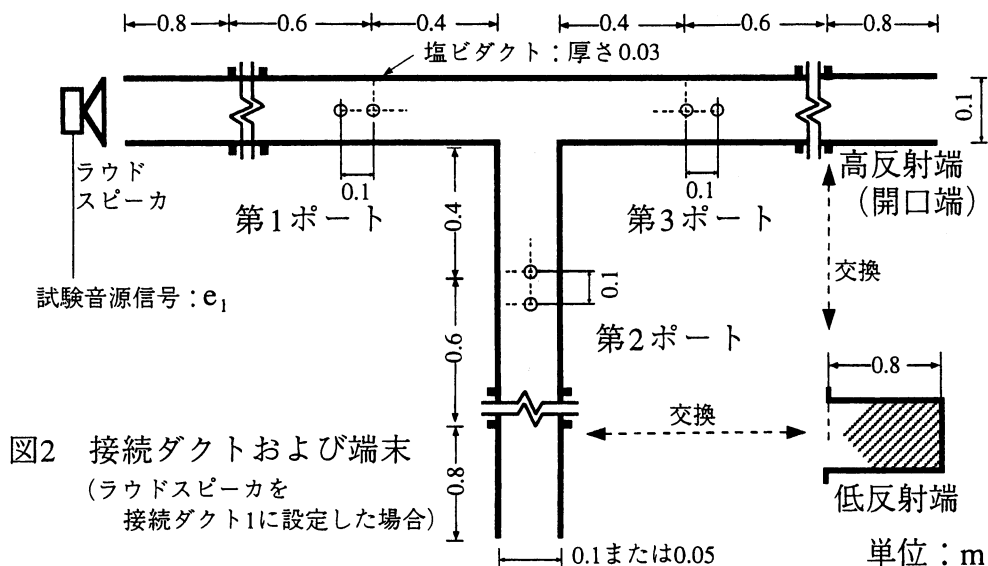
4. 特性透過係数の観測方法

図2に示すように、各接続ダクト末端側 ($m=1,2,\dots,L$ の L 通り) から対象要素の発生音とは独立な音源信号 e_m による音波を重畳して、この信号 e_m と各検査面音圧 $p_\ell(0)$ との伝達関数 $p_\ell^m = \langle p_\ell(0)e_m^* \rangle / \langle e_m^* e_m \rangle$ を観測する。ここで、 $*$ は共役複素数、 $\langle \rangle$ はアンサンブル平均を表す。式(2)および(4)の各項を $e_m^*/\langle e_m^* e_m \rangle$ 倍し、そのアンサンブル平均による関係式から次式を得る。

$$a_\ell^m = \sum_{\ell'=1}^L \tau_{\ell\ell'} b_{\ell'}^m \quad (5)$$

ただし、

$a_\ell^m = p_\ell^m/(1+r_\ell)$ 、 $b_{\ell'}^m = p_{\ell'}^m r_{\ell'}/(1+r_{\ell'})$ と書き、 $d_\ell^m = \langle d_\ell e_m^* \rangle / \langle e_m^* e_m \rangle = 0$ を考慮した。この L 個の方程式(4)から $\ell=1,2,\dots,L$ の各々について L 個の特性透過係数 $\tau_{\ell\ell'}$ が求められる。



5. 駆動波音圧の観測方法

各ポートへの駆動波音圧は、式(4)から分かるように無反射末端接続時 ($b_{\ell} = 0$) の外向き進行波音圧を指す。各ポート駆動波の相互のコヒーレンスが1でないときは多少複雑になるが[1], それが1であるときは、直接、式(2)より a_{ℓ} と b_{ℓ} を観測すれば ($\tau_{\ell \ell}$ は既知), 各ポートの駆動波音圧 d_{ℓ} が求められる。

6. 特性透過・反射係数の実験結果

本観測手法の3ポート要素における有効性を調べるため、T型分岐について図2に示すような接続ダクトおよび末端条件で数値実験および物理実験を行った。接続ダクトの末端条件は、図2に示すような低反射端と高反射端(開口端)の2通りとした。図2はポート1を音源端, 他のポートの接続ダクト末端を開口端(高反射端)とした場合であるが, 実験はこれら音源端, 高反射端, 低反射端を順次交換して行った。数値実験では部分領域境界要素法(要素寸法5mmの一定要素)により各観測点音圧を得て, 式(5)により特性透過係数を求めた。高反射端および低反射端の反射係数を図3に示す。

図4に各末端条件で実験したT型分岐 ($A_1 = A_3 = A_2$ の場合) の特性透過・反射係数の観測結果をエネルギー反射・透過率 $|\tau_{\ell \ell'}|^2 A_{\ell'} / A_{\ell}$ により示す。また, 図5に $A_1 = A_3 = 2A_2$ の分岐の場合を比較のため示す。特性透過・反射係数は高反射

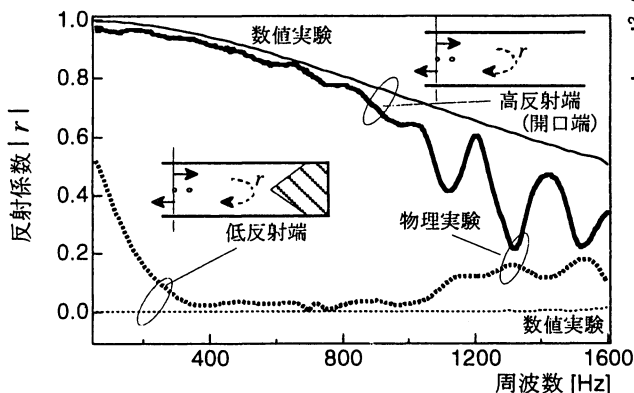
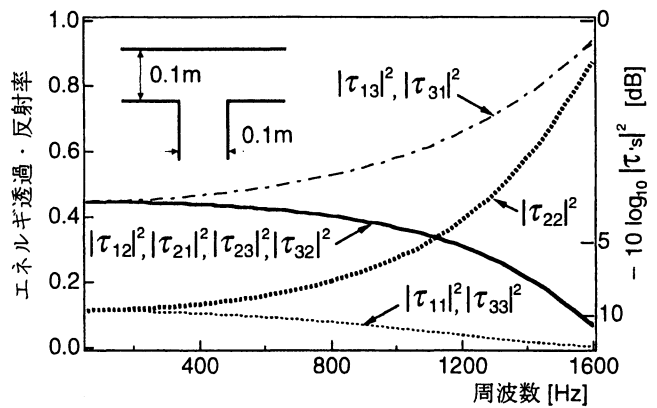
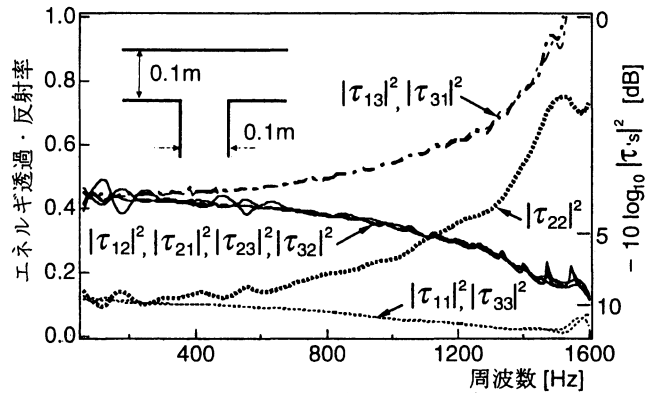


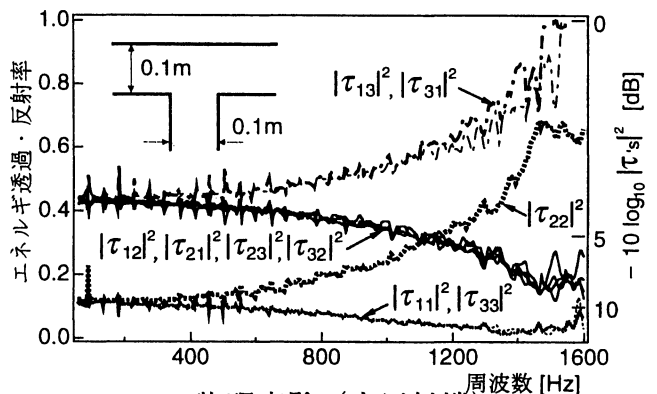
図3 ダクト末端の反射係数



(a) 数値実験 (低・高反射端)



(b) 物理実験 (低反射端)



(c) 物理実験 (高反射端)

図4 特性透過・反射率 ($A_1 = A_2 = A_3 = 0.1\text{m}$)

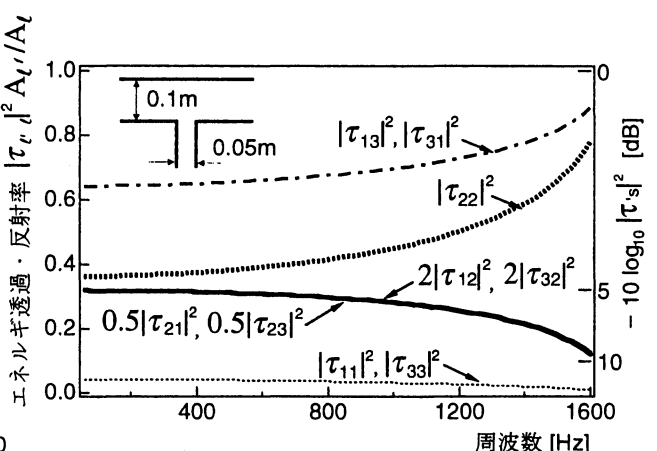


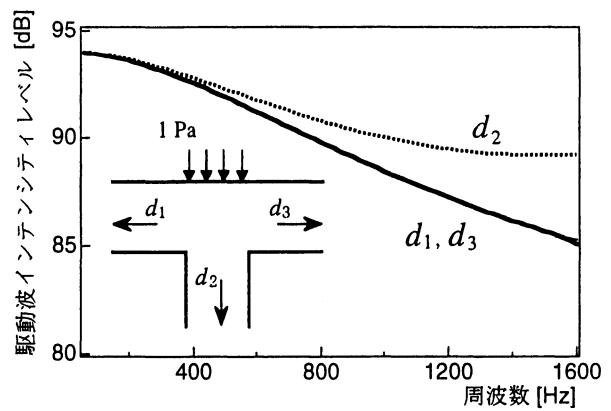
図5 特性透過・反射率 ($A_1 = A_3 = 0.1\text{m}$, $A_2 = 0.05\text{m}$)

末端条件の周波数領域で山谷が激しいが、それぞれ移動平均すれば遠距離伝搬モード領域の前提が崩れる1次モード Cut-on 周波数 (1700Hz) 付近を除き、よく一致している。ただし、数値実験では完全無損失条件であるのにたいし物理実験はそうでないため物理実験値が僅かに小さめである。基本的な性質として、透過エネルギーの相反則 ($l \neq l'$ のとき $|\tau_{l l'}|^2 A_l / A_{l'} = |\tau_{l' l}|^2 A_{l'} / A_l$) の成立、また、どのポート ($l' = 1, 2, \dots, 3$) の入射についても全ポートへのエネルギー透過・反射率の総和 $\sum_{l=1}^3 |\tau_{l l'}|^2 A_l / A_{l'}$ が 1 であることを確認できる。

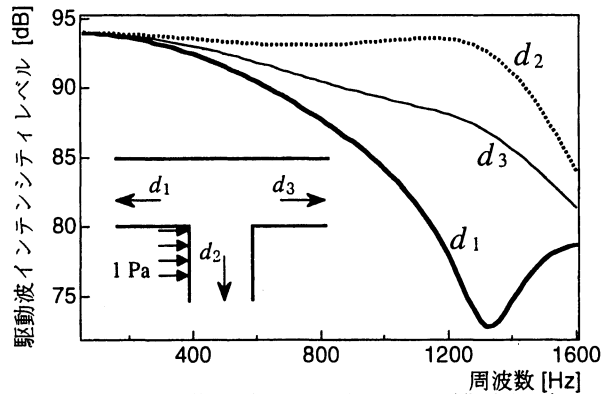
従来のダクト網音響予測では、反射パワは無視し、入射パワは断面積比で透過するとみなして計算してきたが、とくに接続ダクト 2 への入射波にたいする反射 (エネルギー反射率 $|\tau_{22}|^2$) は無視できない。透過波パワについても、断面積比による配分 (この場合 $A_l / \sum_{l' \neq l} A_{l'} = 0.5$, ただし、 l' は入射ポート) とは周波数によっては大幅な相違がでてくる。ダクト網音響予測において、個々の分岐の反射波の無視、また、透過率の誤差は累積すると大きな誤差に達することが確認される。

7. ダイポール型発生音の数値実験結果

図 6 は、単位の乱流変動圧力 (1Pa) でダクト断面寸法の程度のコンパクトな音源分布の場合について、音源分布の位置や接続ダクト方向による発生音駆動波パワの違いをみたものである。この場合、ダイポール音源モデル[4]に該当するが、境界要素解析においては境界上に働く乱流変動圧力分布の反作用圧力を設定するだけである。図 6 より、低周波数領域を除き各ダクトへの発生音 (駆動波音圧) が異なること、とくに乱流変動圧力分布が図 6(a) と図 6(b) との場合では第 1 ダク



(a) 乱流変動圧力が分岐頂部面に働く場合



(b) 乱流変動圧力が分岐側面に働く場合

図6 単位の乱流変動圧力による駆動波 ($A_1=A_2=A_3=0.1\text{m}$)

ト方向への発生音が大幅に異なることがわかる。

8. 終わりに

無反射末端を必要としない固有音響特性の受動 (透過・反射) 特性と能動 (発生音) 特性の 2 段階観測手法について、3 ポート要素の場合における有効性を T 型分岐により確認した。分岐での無反射の仮定の限界や分岐ダクト面積比で音響透過エネルギーが配分されるとする仮定の限界などダクト網音響予測に重要な知見を得た。

参考文献

- [1] 寺尾, 関根, 騒音制御工学会講論集, 1991.
- [2] M.Terao, R.J.Bernhard et al., Proc. Inter-noise90, pp591-594, 1990.
- [3] ASTM Standard, E1050, 1985.
- [4] N.Curle, Proc.Roy. Soc., pp505-514, 1955.