

○寺尾道仁, 関根秀久 (神奈川大)

1. はじめに

吸音材料内貼りダクトの音響減衰量については, Morse [1], Scott [2] および Kurze [3] により理論式が与えられており, その複素根解法も Morse chart さらに D. Chriatie による Newton-Raphson 法[4]が用意されている. Morse は Local reactive 材料に限定されるが, Scott は Bulk reactive 材料まで, さらに Kurze は直交非等方材料まで考慮している. しかし, 矩形断面に限定され, しかも Scott と Kurze は断面の1対向面が剛壁, 残る1対向面が吸音材料としており応用範囲が少ない. R. Astrey ら[5]は FEM 数値解析により Bulk reactive 材料を含め任意断面形状まで拡大した. しかし, いずれも無限長内貼り直管の場合に限定される. ここでは, さらに無限長および直管の制約をなくすため部分構造化 BEM[7]を適用し, また, 長大なダクト音場の解析を可能とするため, 部分的 Gauss-Jordan 解法の導入[6]を行う. ただし, 吸音材料は実験的[8,9]にも検証し尽くされている等方性 Bulk-

reactive モデルおよび Local reactive 材料に限定し, 非等方性 Bulk reactive 材料は含めていない. まず, 本 BEM の有効性を上記理論と比較して確認する. 次に, 長大ダクト実験が困難なため, 不明確のまま残されている助走長などの無限長内貼りダクト理論の適用限界を調べる.

2. 部分 Gauss-Jordan 部分構造化 BEM

数値解析対象とした内貼りダクトを図1に示す. これは Wassilieff の実験[9]における構成に従ったものである. 部分領域は2次元の場合4節点線素を各辺(5cm)とする四辺形, 3次元の場合16節点面素を各面(5cm×5cm)とする6面体としている[6]. 連立方程式の解法はフロント法により部分構造毎に全般的には Gauss 法で消去を進めていく[7]が, 後退代入過程に要する膨大な記憶容量を省略するため, 結果出力を要する領域のみ Gauss-Jordan 解法で実行する. 吸音材料の特性インピーダンス z_e および伝搬係数 γ_e は次の Delany ら[10]のモデルを用いた.

$$z_e = \rho c \left[1 + 0.0571X^{-0.754} - j0.087X^{-0.732} \right]$$

$$\gamma_e = k \left[0.189X^{-0.595} + j(1 + 0.0978X^{-0.700}) \right]$$

(1)

ここで ρ は空気密度, c は空気の音速, また, f を周波数として, $\omega = 2\pi f$, $k = \omega/c$, $X = \rho f/\sigma$, $0.01 < X < 1.0$ である. σ は静的流動抵抗係数で $8,500 \text{ Pa}\cdot\text{s}/\text{m}^2$ とした. また, Local reactive モデル[1]で必要なノーマルインピーダンス Z_n は

$$Z_n = -j(z_e/\rho c) \cot(-j\gamma_e d) \quad (2)$$

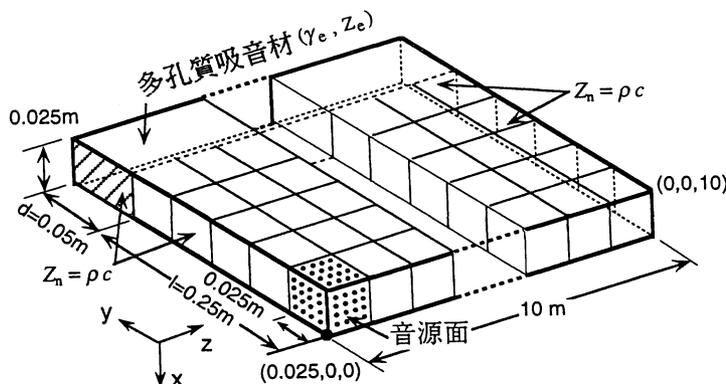


図1. Wassilieff[9]の内貼りダクト

* A study on the lining duct theories by a numerical analysis, by Michihito Terao and Hidehisa Sekine (Kanagawa university).

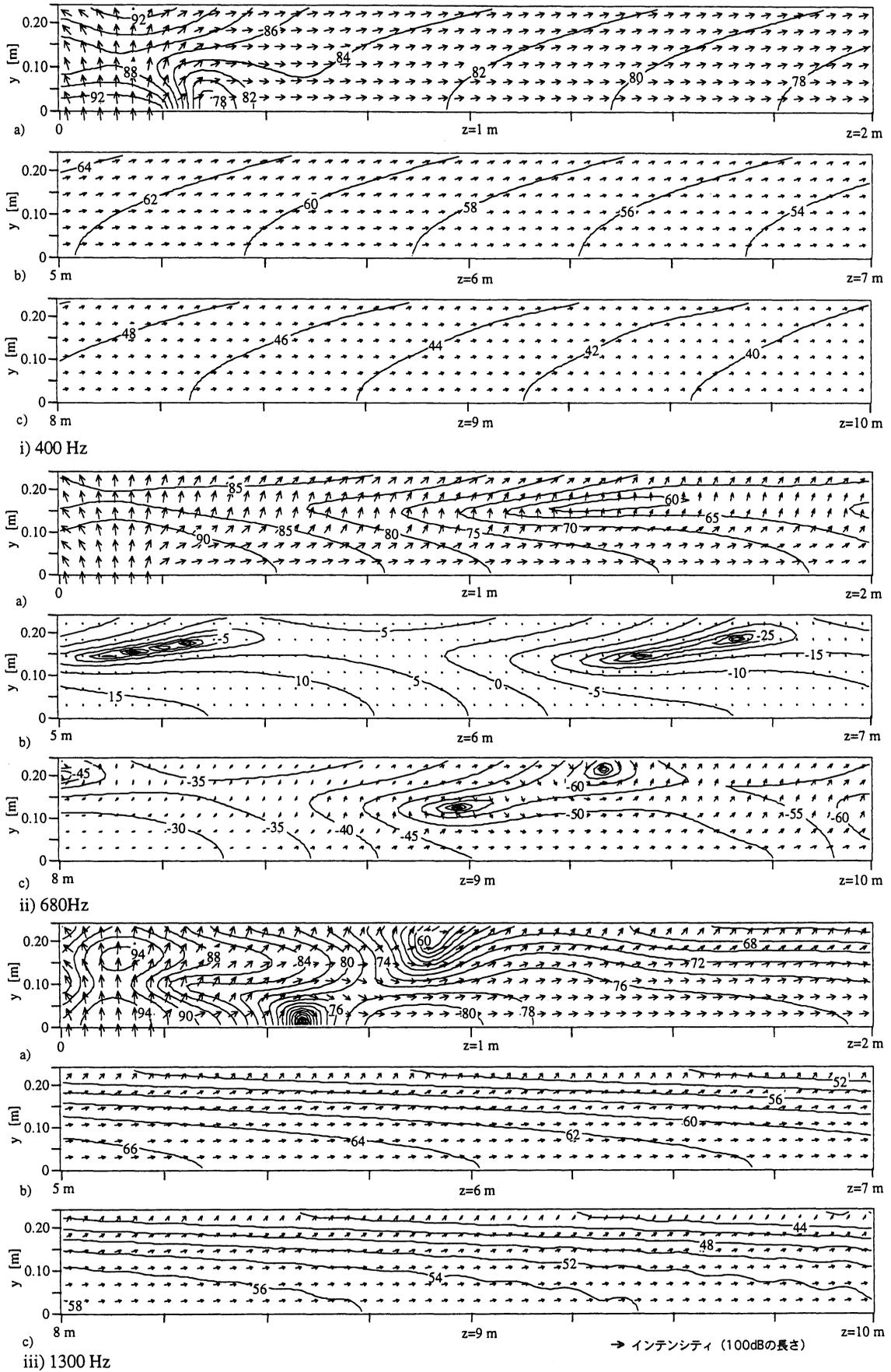


図2. 数値計算による音圧およびインテンシティ分布の例

ここで、 z_y と γ_y はy方向にたいする z_e と γ_e を意味する。

3. 内貼りダクトの理論式

直交非等方性材料を含む矩形無限長内貼りダクトの一般化理論は、最小減衰モード（基本モード）について Kurze[3,9]により

$$w \tan w = \frac{-j\rho\omega q}{z_y \gamma_z} \tan\left(\frac{\gamma_y dq}{\gamma_z l}\right) \quad (3)$$

ただし、 γ_z は吸音材料のz方向の減衰係数、 z_y はy方向にたいする特性インピーダンス、また、 $w^2 = (\Gamma l)^2 + (kl)^2$ 、 $p^2 = -(\gamma_z l)^2 - (kl)^2$ 、 $q^2 = w^2 + p^2$ とした。

ここで、 Γ は空気側の減衰係数で、その実部が求めたい音響減衰量(Napers/m)である。その解は w について次のNewton-Raphson法により得る。

$$w_{k+1} = w_k - f(w_k)/f'(w_k), \quad k=0,1,2,\dots \quad (4)$$

式(3)で $\gamma_y = \gamma_z = \gamma_e$ とすれば等方性材料の場合のScottモデル[2]の式が得られ、

$$f(w) = w \tan w + q\rho/\rho_e \tan(dq/l) \quad (5)$$

ただし、 ρ_e は材料内の複素音速で $\rho_e = z_e \gamma_e / j\omega$ の関係がある。式(5)の w に関する微係数 $f'(w)$ は

$$f'(w) = (2w + \sin 2w)/(1 + \cos 2w) \quad (6)$$

また、局所作用材料の場合は $\Gamma/\gamma_z = 0$ として式(5)および式(6)の第2項がそれぞれ $-jkl/Z_n$ および0、すなわち、Morseモ

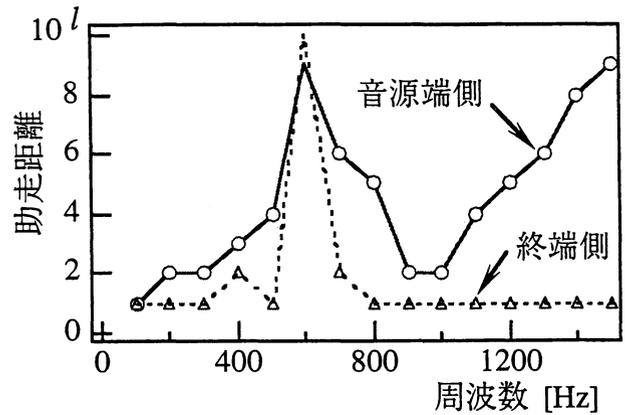


図3. 無限長内貼り直管状態に要する端部助走距離

デル[1]の式が得られる。

Scottモデルにおいて、初期値 w_0 は極く低周波数では $0 + j0$ 、極く高周波数では $\pi/2 + j0$ として収斂値を得る。これを順次その近傍の周波数にたいする初期値として用いる[4,9]。一方、Morseモデルの場合は(0,2)モード cut-on 以上の周波数域で収斂性が悪いため、Scottモデルの収斂値を初期値として与える手法[4]を用いた。なお、空気側の理論音圧分布は

$$p \sim \exp(-\Gamma z) \cos(wy/l) \quad (7)$$

により与えられる[2,3]。数値計算では無限長直管状態領域（音圧分布がz位置に独立な領域）において、y位置が同じでz位置の異なる2点音圧の伝達関数から Γ が求められる。

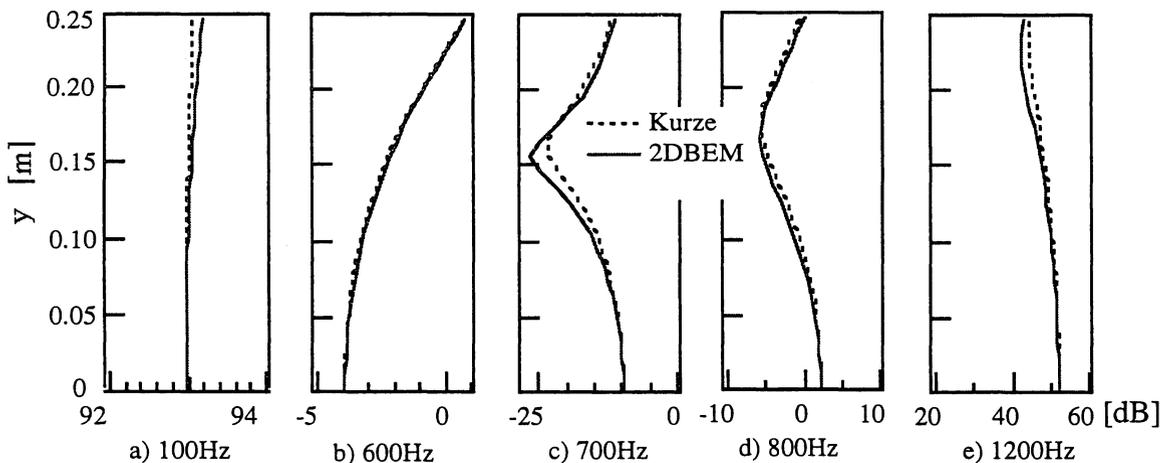
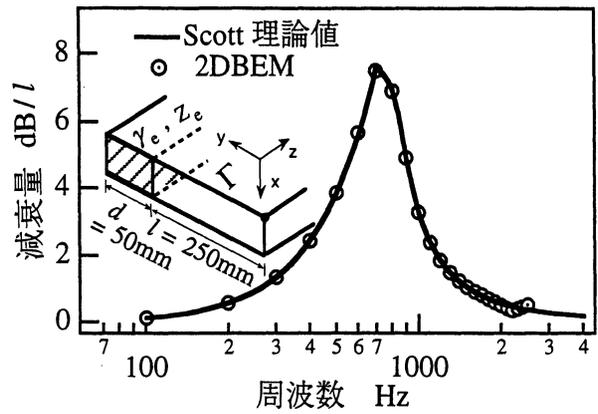


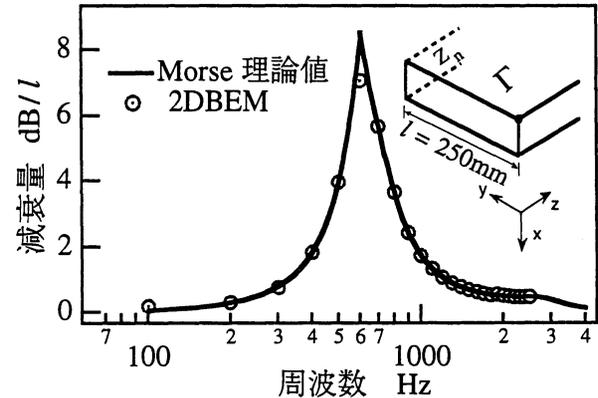
図4. 無限長内貼り直管内の断面方向音圧分布 ($z = 5m$)

4. 数値解析および理論計算結果

数値解析の結果得られた音圧およびネットインテンシティ分布の例を図2に示す。3次元計算と2次元計算とではdB表現では差がないため2次元解析の結果のみを示した。ダクトの中間部分(b)で無限長内貼り直管状態領域を得るためにダクト長を10mと大きくとった。減衰が僅かな100Hzの場合(図は省略)には吸音材終端部からの僅かな反射波(終端部空気側のみ無反射端とした)の影響が残る。また、基本モード波の減衰量が極大となる周波数(680Hz)付近では無限長内貼り直管状態領域が得られていない。この周波数付近では音源側と端末側のレベル差が約150dBに達するため、数値計算におけるダイナミックレンジの不足(実験では絶望的)に起因するものとみられる。それ以外の周波数ではダクトの中間部分で無限長内貼り直管状態と見做し得る領域が存在する。ダクトの音源側と終端側の音圧分布(a)および(c)から有限長内貼りダクト両端の不連続部からの散乱波(Evanescent mode)が消滅し、無限長内貼り直管状態に達するまでに要する助走距離を図3に示す。ダクト幅 l にたいする(0,2)モード cut-on 周波数(680 Hz)付近を除き、助走距離は内貼り材料終端側では $1l$ 程度であるが、音源端側では周波数によっては $10l$ 程度に達することがわかる。ダクト中間($z=5m$)位置の断面音圧分布を理論式(7)と相対比較して図4に示す。高周波数域を除いて概ね良好な一致を示している。ダクト中間部(b)における2点音圧伝達関数から求めた無限長内貼り直管の減衰量を図5に示す。数値解析値と理論値とはBulk reactiveモデルでは数値誤差の大きくなる高周波数域を除き、また、Local reactiveモデルでは(0,2)モード cut-on 周波数(680Hz)付近を除いて極めて良好な一致を示す。



a) 等方性多孔質材料



b) 局所作用多孔質材料

図5. 無限長内貼り直管の減衰量
($d = 50mm, l = 250mm, \sigma = 8,500Pa \cdot s/m^2$)

5. まとめ

長大ダクトのBEM数値解析を可能とするため部分 Gauss-Jordan 消去法を導入した。その有効性は無限長内貼りダクトの理論解と比較して確認した。また、その音圧分布から有限長内貼りダクト端部における助走長の目安を得た。

参考文献

- [1] P. M. Morse, JASA, 11(1939).
- [2] R. A. Scott, Proc. Phys. Soci., 58(1946).
- [3] U. J. Kurze et al, Journal of S&V, 24(1972).
- [4] D. Chriatie, Journal of S&V, 17(1971).
- [5] R. J. Astrey et al, Journal of S&V, 116(1987).
- [6] 寺尾ほか, 音響学会講論集, 平成8年3月.
- [7] 寺尾ほか, 境界要素法研究会論文集, 1987.
- [8] A. Bokor, Journal of S&V, 10(1969).
- [9] C. Wassilieff, Journal of S&V, 114(1987).
- [10] M. Delany et al, Applied Acoustics, 3 (1990).