

○寺尾道仁, 関根秀久 (神奈川大)

1. はじめに

多孔質材料を含む音響要素特性や音場の比較的low周波数域における数値解析を行う上でその固定骨格 (Rigid frame) 固有音響特性 (伝搬係数やTortuosityなど) が必要である。これは固定骨格モデルのみならず弾性骨格 (Elastic frame) モデル数値計算においても重要な特性量である。その測定法として小試料によるチューブ法は簡便であるが、試料支持条件に依存する骨格振動が固定骨格条件を著しく崩すことが多い [1-3]。ここではチューブ法において固定骨格条件を保つため針による試料固定法を試み、これにより得られた特性を通常の固定法やDelanyらの経験式 [4] と比較し、また、数値計算に適用してその有効性を調べる。

2. 固有音響特性とその測定方法

図1のように試料の両境界面の音圧と粒子速度をそれぞれ P_1, P_2 および u_1, u_2 とすれば [5],

$$\frac{P_1 + u_1 Z_e}{P_2 - u_2 Z_e} = \frac{P_2 + u_2 Z_e}{P_1 - u_1 Z_e} = e^{-j(\omega/c_e)l} \quad (1)$$

すなわち,

$$Z_e^2 = (P_1^2 - P_2^2) / (u_1^2 - u_2^2) \quad (2)$$

Z_e は材料内の特性インピーダンスで,

$$Z_e \equiv \rho_e c_e \quad (3)$$

ここで、 c_e は材料内の複素実効音速、ま

た、 ρ_e は材料内の複素実効密度 (Effective density, ρ_0 を空気密度として ρ_e/ρ_0 は Dynamic tortuosity) で、次の形で表す [6] ことができる。

$$\rho_e \equiv \rho_{ef} - j\Phi_e/\omega \quad (4)$$

ただし、 ω は角周波数、 ρ_{ef} は有効密度、 Φ_e は有効流動抵抗係数である。また、 ω/c_e は材料内の伝搬係数で位相速度 c_p および減衰係数 α_e と次の関係がある。

$$\omega/c_e = \omega/c_p - j\alpha_e \quad (5)$$

P_1, P_2 および u_1, u_2 の測定により、以上の関係式から固有音響特性 $Z_e, \omega/c_e$ および ρ_e が求められる。なお、 P_1, P_2 および u_1, u_2 の測定は図1に示す試料前後チューブ内のそれぞれ P'_1, P''_1 および P'_2, P''_2 における2マイクロホンインピーダンス測定法により行っている。

3. 試料設定方法

試料は密度 32kg/m^3 のガラスウール、厚さ50mm、繊維方向が波面方向に一致する場合 (low周波数域における骨格共振が生じやすい場合) とした。固定骨格条件を得るため図2のように畳針 (長さ150mm×直径2.1mm×16本) をそれぞれダクト壁から試料繊維を貫き、対向するダクト壁面に針先端が約1mmほど突き刺さるように固定する

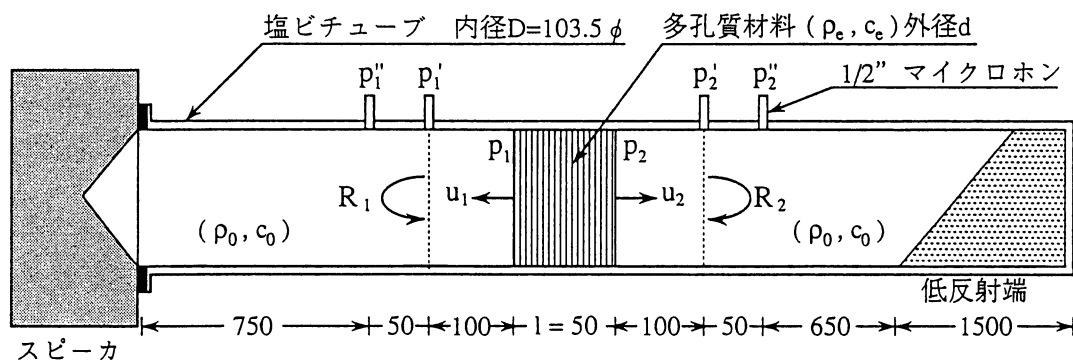


図1 多孔質材料音響特性の測定方法 [単位 mm]

* Needle fixation of sample in Kundt tube measurement of acoustical property of a fibrous material, by Michihito Terao and Hidehisa Sekine (Kanagawa university).

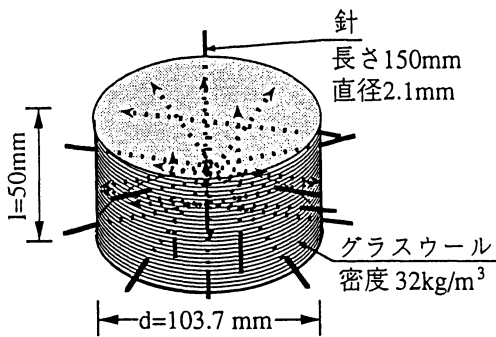


図2 試料の針固定(16本)

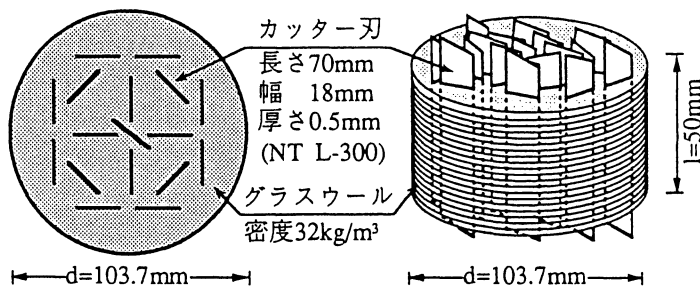
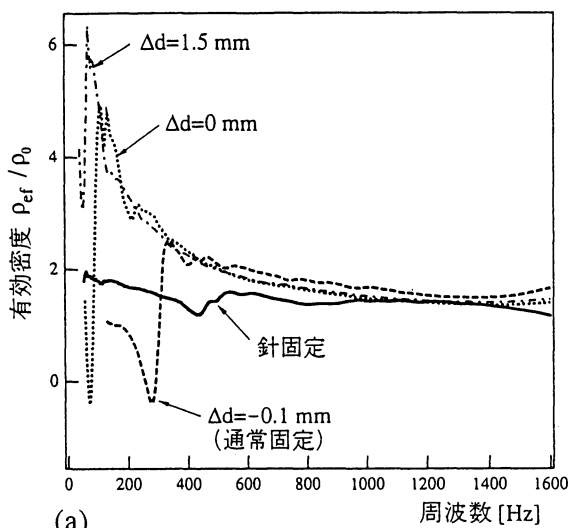
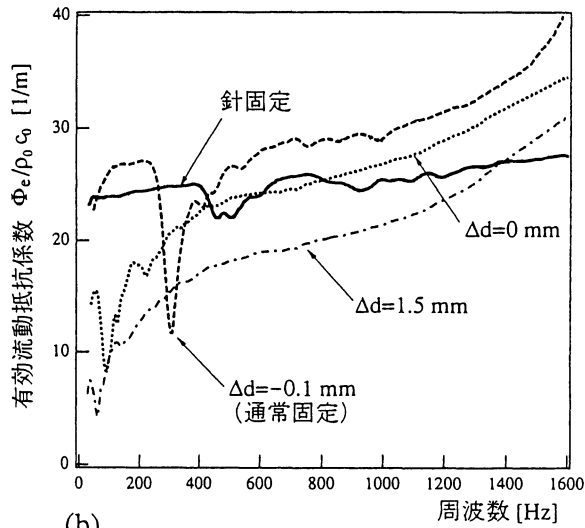


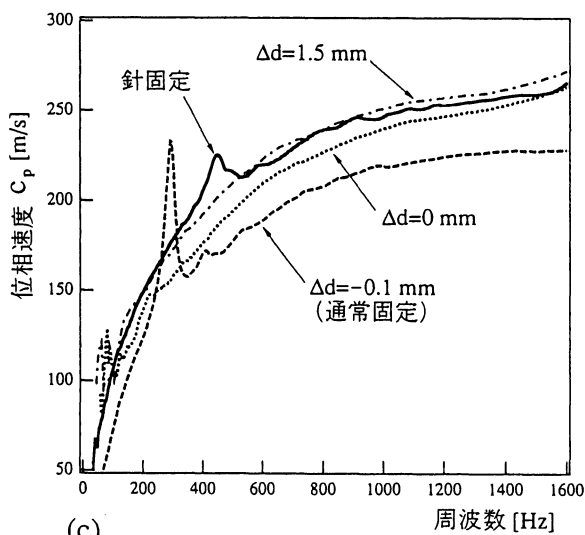
図3 試料のカッター刃固定(17枚)



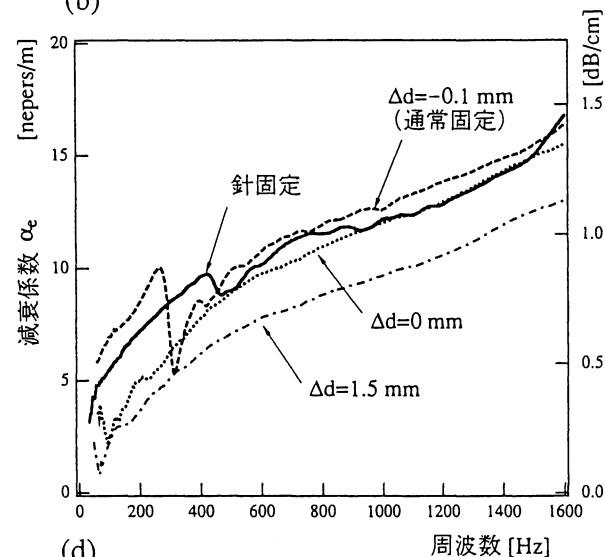
(a)



(b)



(c)



(d)

図4 固有音響特性測定値の固定法による変化

方法(針固定法), および図3のようにダクト軸方向への17枚のカッター刃を挿入しその慣性抵抗による固定法(カッター刃固定法)を試みた. このときダクト内径 $D=103.5\text{ mm}$ にたいし試料の直径 $d=103.7\text{ mm}$ (ダクト内径との隙間 $\Delta d=D-d=-0.2\text{ mm}$)である. 一方, 通常の試料設

定方法として直径 $d=103.6\text{ mm}$ (隙間 $\Delta d=-0.1\text{ mm}$), また, 周辺拘束を弱めた場合として $d=103.5\text{ mm}$ (隙間 $\Delta d=0$)および $d=102.0\text{ mm}$ (隙間 $\Delta d=1.5\text{ mm}$)を測定した. ここで, $\Delta d=0$ の試料はダクトとの接触面を紙やすりで平滑化(ダクトを垂直に立てると速度約 5 cm/s で落下する程

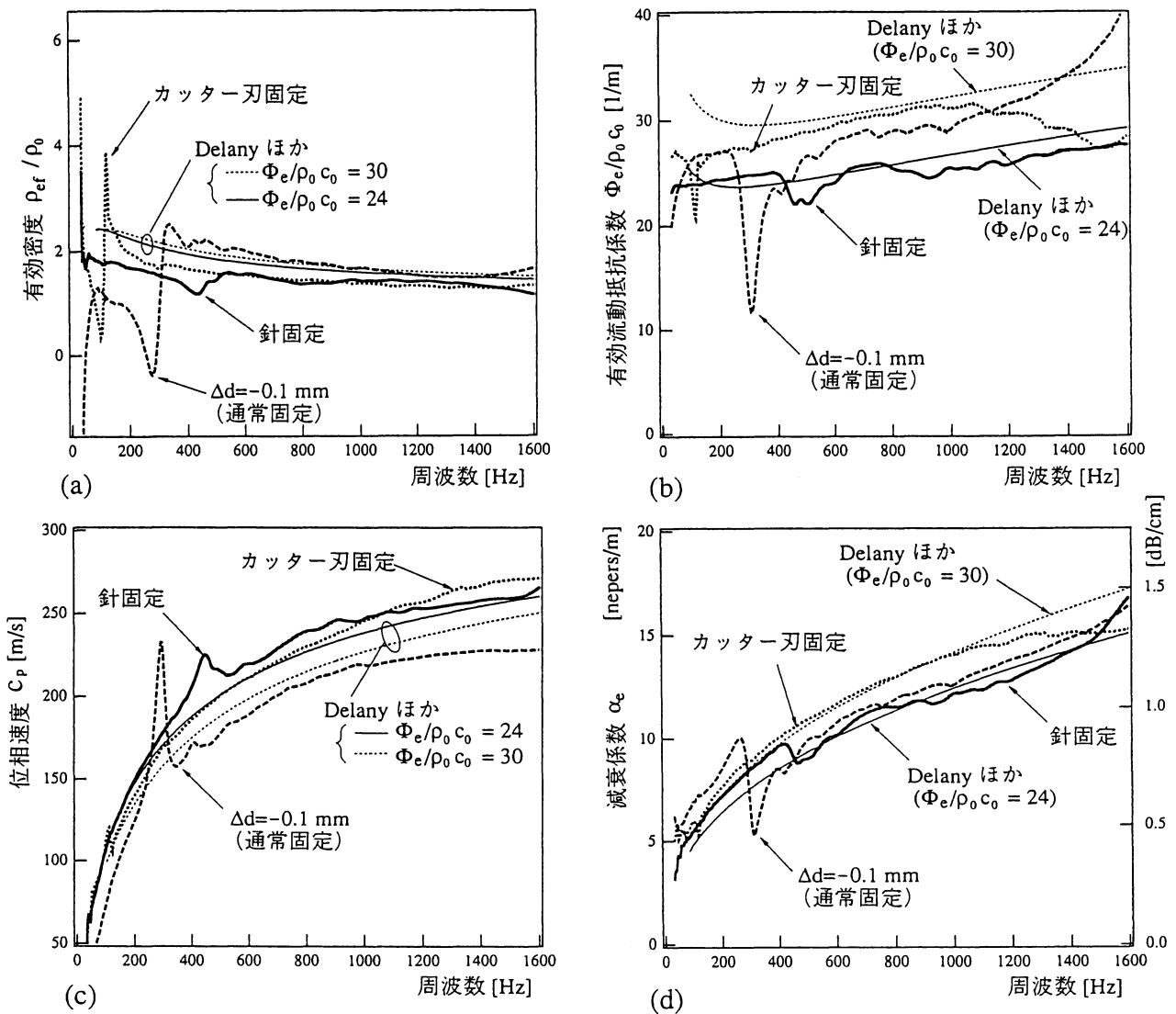


図5 固有音響特性測定値とDelanyらとの比較

度) している。

4. 測定結果

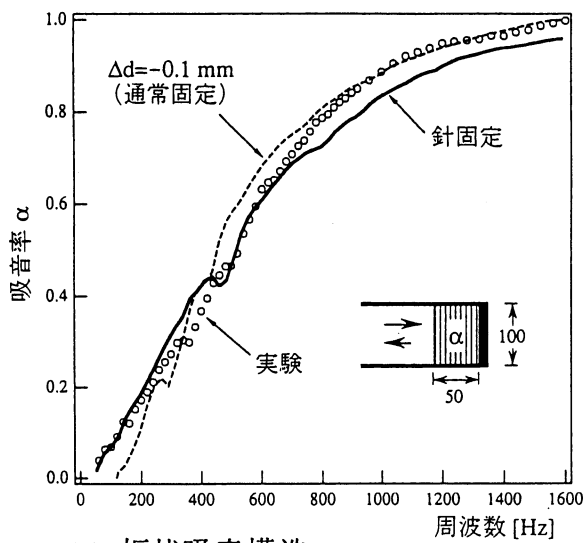
図4に各試料の音響特性測定結果を示す。針固定法は中音域にいくつかの弱い骨格共鳴の影響がみられるものの低周波数域の強い骨格共鳴が抑えられ、とくに有効流動抵抗係数 Φ_e は周波数全域にわたりほぼ一定の固定骨格特性 [6] が得られている。

これにたいし通常固定 (隙間 $\Delta d = -0.1$ mm) の場合は、骨格内伝搬波 (1,0) モード (レーザドプラ振動計観測) の310Hz付近で位相速度 C_p 、有効流動抵抗係数 Φ_e にそれぞれピーク、ディップが強く現れる。なお、約1400Hz以上の周波数域の特性測定結果は隙間 Δd や取付具合に敏感であり再現性は低い。なお、この骨格振動を抑える目

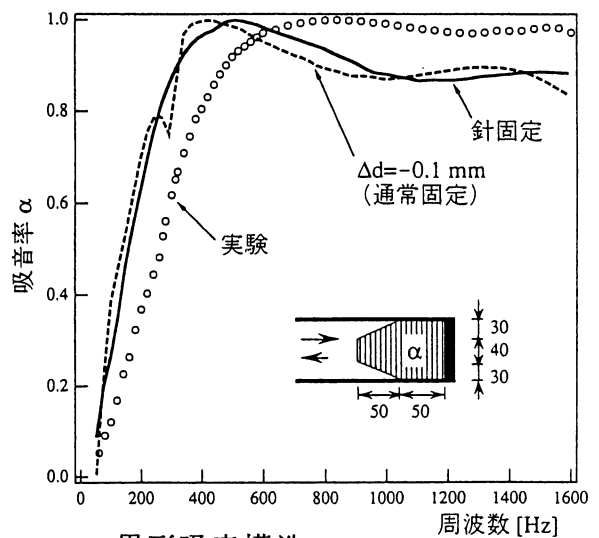
的で試料の両ダクト側からストローの束およびハニカムで押さえてみたが、これはほとんど効果がみられなかった。

一方、周辺拘束が弱い $\Delta d = 0$ と $\Delta d = 1.5$ mm の場合は、骨格共鳴がそれぞれ約90Hzおよび60Hz付近に低下するが、全周波数域において試料の一体的振動の影響 (Φ_e と α_e の低下) が現われ、 $\Delta d = 1.5$ mm のように隙間を大きくするととくに減衰係数 α_e において固定骨格特性 (針固定法) と著しい差異が生じる。

また、図5に示すようにカッター刃固定法は骨格共振周波数を100 Hz以下に低下させる効果がみられ、有効流動抵抗係数 Φ_e が周波数によらずほぼ一定の固定骨格特性を示している。しかし、針固定と比較して



(a) 板状吸音構造



(b) 異形吸音構造

図6 固有音響特性を用いた垂直入射吸音率の2DBEM数値計算結果

有効流動抵抗係数 Φ_e が大きくなっている。これはカッター刃の挿入が試料密度を大きくしてしまう結果であると考えられる。

図5はDelanyらの経験式に図5(b)の流動抵抗係数(針固定およびカッター刃によるそれぞれ $\Phi_e/\rho_0 c_0 \approx 24$ および 30)を与えた場合、針固定、カッター刃固定および通常固定の結果を比較したものである。ここで、Delanyらの経験式は無次元化を施せば次式で表される[7]。

$$\frac{Z_e}{\rho_0 c_0} = 1 + 0.057X^{-0.754} - j0.087X^{-0.732}$$

$$\frac{\omega/c_e}{\omega/c_0} = 1 + 0.0978X^{-0.700} - j0.189X^{-0.595}$$

$$X = \frac{\rho_0 f}{\sigma}, \quad 0.01 < X < 1.0 \quad (6)$$

ただし、 c_0 は空気の音速、 f は周波数、 σ は静的流動抵抗係数で図5では $\Phi_e = \Omega \sigma$ の関係[7]においてポロシティ $\Omega \approx 1$ とした。Delanyらとの対応は針固定は概ね良好であるが、通常固定およびカッター固定はとくに位相速度 c_p における不一致が著しい。

図6には、図5の固有音響特性を用いた固定骨格モデル二次元境界要素法[5]による垂直入射吸音率の数値計算結果を示す。

板状吸音構造(a)の場合、通常固定特性と針固定特性による解析結果は、おおむね実験結果と一致する。ただし、低周波数域で

は針固定特性の方が実験結果との一致がよく、通常固定特性はとくに約120 Hz以下で負の吸音率を与える不合理を生じている。一方、高周波数域では通常固定特性の方が実験結果との一致がよい。これはたまたま吸音率測定時の試料が固有特性時と同じく厚さ5cmで、通常固定特性が骨格弾性性状を含むことによるものとみられ、より一般的に予測精度向上をはかるためには固定骨格特性を用いた弾性骨格モデル計算が必要と考えられる。

異形吸音構造(b)の場合には、針固定特性と通常固定特性との相違よりも両者と実験値との不一致が目立つ。これは等方性モデル計算の限界とみられ、大略的予測のためには弾性骨格モデル計算よりもむしろ異方性の考慮が重要であるように考えられる。

5. まとめ

針による試料固定方法は繊維質材料の固定骨格固有音響特性のチューブ法測定を可能にする上で有望であることを示した。

参考文献

- [1] J. Allard et al., JASA, 89(1991).
- [2] 岩瀬ほか, 音響学会講論集, 平成6年10月.
- [3] 山口ほか, 音響学会講論集, 平成6年10月.
- [4] M. Delany et al, Applied Acoustics, 3 (1990).
- [5] 寺尾ほか, 騒音制御工学会講論集, 平成5年.
- [6] R.F. Lambert, JASA, 97(1995).
- [7] J.F. Allard, Elsevier Applied Science, (1993).