

○関根秀久 (神奈川大)
 寺尾道仁
 △大端健治

1. はじめに 多孔性材料内の固有音響特性，すなわち，複素伝搬係数および複素実効密度は，これを含む任意構造の音響要素特性を推定するために重要である．その音響管による測定方法については，従来から定在波測定による方法があり，さらにFFTによる多マイクロホン伝達関数測定法を導入した省力化がはかられている．最近は主に試料前後の音圧や粒子速度測定を行う方法[1-2]，2通りの材料厚[3]または背後空気層厚[4-5]における材料入射面のノーマルインピーダンス測定による方法などが研究されており，とくに後者[4]は商品化され吸音機構研究など[6]に利用されている．以上はいずれも端末を剛壁条件としており，約1kHz以上の周波数域での特異条件誤差[4]や約500Hz以下の周波数域での試料の一体共鳴運動による測定誤差[5]要因があるといわれる．ここでは試料近傍の終端剛壁を避け，パイプ中間部の試料配置による手法を案出し，実験的にその有効性を調べた．

また，その重要な応用として，任意形状の多孔質材料を含む任意構造要素の音響特性の推定に関して，この多孔質材料固有音響特性を用いた境界要素法による理論計算を行い，音響構造要素の反射係数（または吸音率など）について計算値と直接測定との良好な一致が得られることを明らかにする．

2. 測定原理 図1のように試料の境界面の内外の音圧をそれぞれ m および p とし，境界面からみた外向波および内向波を上添字+および-により表すものとすれば，試料の両面 i ($=1,2$) において，

$$p_i = m_i^+ + m_i^-, \quad u_i = (m_i^+ - m_i^-) / Z_e \quad (1)$$

ただし， Z_e は材料内の特性インピーダンスで，

$$Z_e = \rho_e c_e \quad (2)$$

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で，実効密度 ρ_{ef} および動的流動抵抗係数 Φ_e とは次の形のモデルで関連づけら

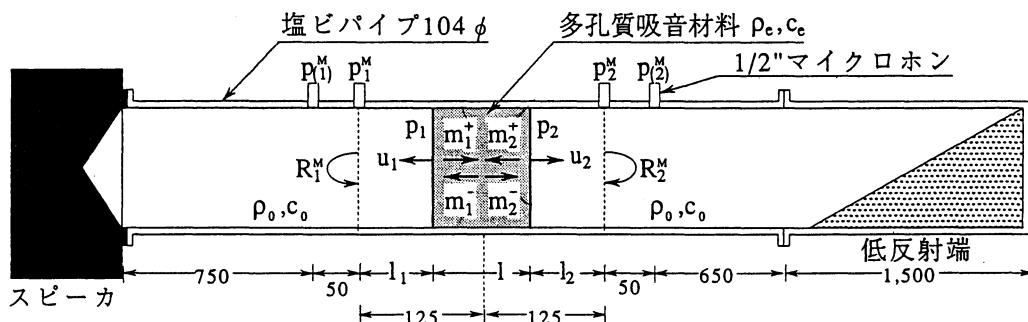


図1 多孔質吸音材料の音響特性の測定方法 [単位 mm]

* A new method to determine intrinsic acoustic properties of porous material.
 By Hidehisa Sekine, Michihito Terao and Kenji Ohata (Kanagawa University)

れる。

$$\rho_e \equiv \rho_{ef} - j\Phi_e / \omega \quad (3)$$

ただし ω は角周波数である。材料中の進行波の間には、

$$m_1^- / m_2^+ = m_2^- / m_1^+ = e^{-j(\omega/c_e)l} \quad (4)$$

ここで、材料内の伝搬係数 ω/c_e は位相速度 c_p (ω/c_e : 位相係数) および減衰係数 α_e と次の関係がある。

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

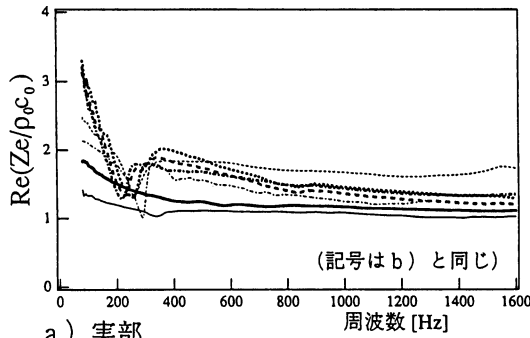
式(1)と(4)より次式(6)、さらに式(7)が得られる。

$$\frac{p_2 + u_2 Z_e}{p_1 - u_1 Z_e} = \frac{p_1 + u_1 Z_e}{p_2 - u_2 Z_e} = e^{-j(\omega/c_e)l} \quad (6)$$

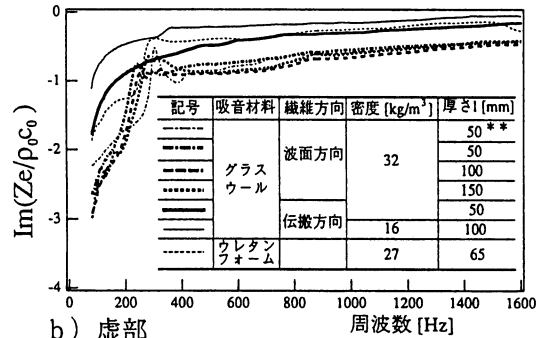
$$Z_e^2 = (p_1^2 - p_2^2) / (u_1^2 - u_2^2) \quad (7)$$

測定により p_i と u_i が得られれば、式(7)より Z_e 、また、これと式(6)より c_e 、すなわち、式(5)の c_p および α_e が求められる。この c_e と Z_e を用いて式(2)より ρ_e 、すなわち、式(3)の ρ_{ef} および Φ_e を得る。なお、 p_i と u_i とは P_i^M と $P_i^{(i)}$ との2マイクロホンを用いたチューブ内インピーダンス測定法[7]により求めている。

3. 測定結果 供試試料の概要はその記号とともに図2(b)内の表に一覧する。その固有音響特性量の測定結果を



a) 実部



b) 虚部

図2 特性インピーダンス Z_e [試料の直径は104mmφ, 50**のみ150mmφ]

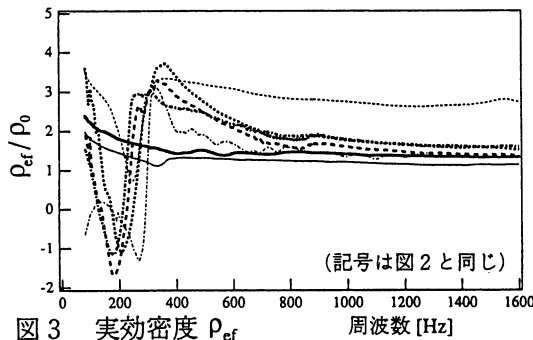


図3 実効密度 ρ_{ef}

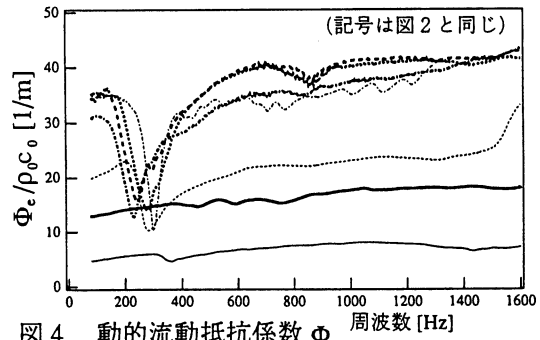


図4 動的流動抵抗係数 Φ_e

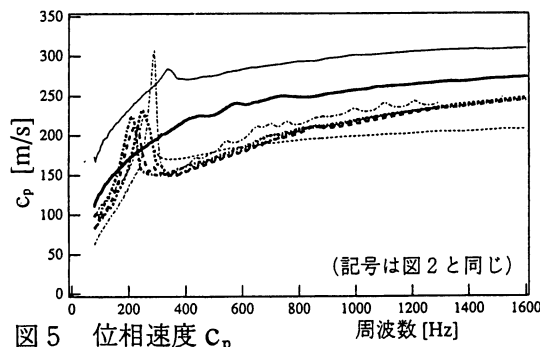


図5 位相速度 c_p

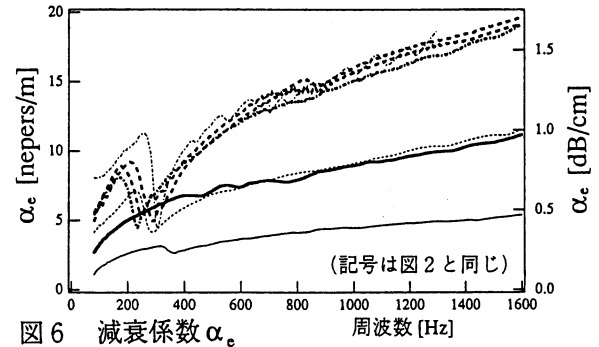


図6 減衰係数 α_e

図2～図6に示す。図中 ρ_0 および c_0 はそれぞれ空気の密度および音速である。すべての材料について、音源の試料にたいする方向を正・逆に配置して測定したが、いずれも入射面方向による有意な違いはみられなかった。図2の特性インピーダンス測定において文献[4]の方法は約1kHz以上では多くの周波数で著しい測定誤差が現れるのにたいし、本手法ではそのような困難はない。また、繊維が波面に平行に配置された場合に現れる約250Hz付近の顕著な山谷は繊維方向が伝搬方向の場合には現れない。この現象の存在はとくに文献[8]で明らかにされており、また、その機構については文献[9]による骨格の共鳴振動モデルの説明がある。これによれば、実効質量 ρ_{ef} は固定骨格モデルでは空気質量と付加質量の和であるのにたいし、弾性骨格モデルではさらに骨格細部運動による付加質量と復元力が加わる。この骨格細部の復元力に起因する250Hz付近の共振により図3の実効密度の山谷、さらに粒子速度と骨格との相対速度の低下による図4の動的流動抵抗および図6の減衰係数の低下、また図5の位相速度の上昇が説明される。なお、本手法では背後空間は存在しないから、ここでの250Hz付近の山谷は測定装置の背後空間と試料一体運動の共鳴（背後

空間法では起こり得る）とは区別できる。

4. 任意形状要素の音響特性予測

多孔質吸音材料を含む任意構造の音響要素の特性は、その多孔質材料の固有音響特性が知られれば理論的に求めることができる。

4. 1 予測手法

ここでは図7のような比較的簡単な音響要素の反射特性（これより吸音率などが求められる）の境界要素法による音響特性の予測精度について調べる。この場合の形状は図8に示すような二次元モデルで表現され、その境界要素は寸法1cmの一定要素で近似した。また、任意形状の多孔質材料を取り扱うため部分構造化し、その領域については多孔質材料の固有音響特性（複素実効音速 c_e および複素実効密度 ρ_e ）を用いている [10]。

4. 2 予測結果

多孔質吸音材料を含む構造の音響特性について、理論

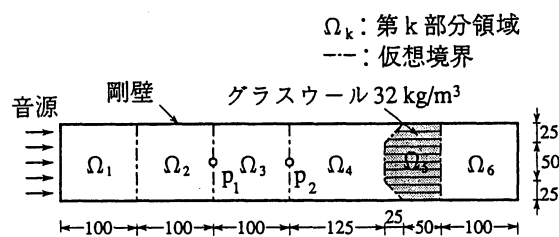


図8 二次元部分構造化境界要素モデル [単位 mm]

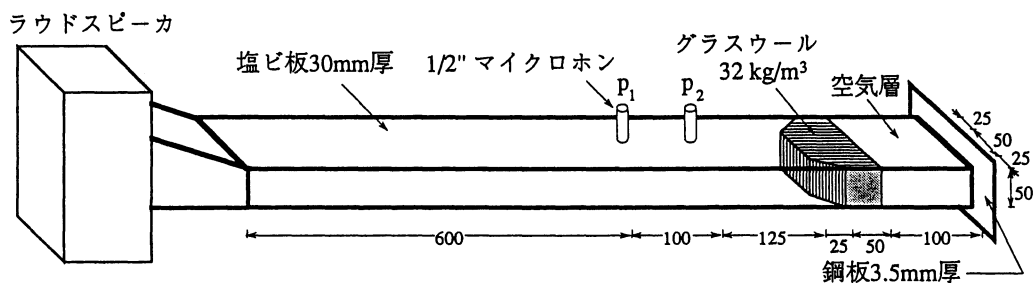


図7 吸音材を含む構造例およびその反射特性の測定 [断面側寸法は内寸, 単位 mm]

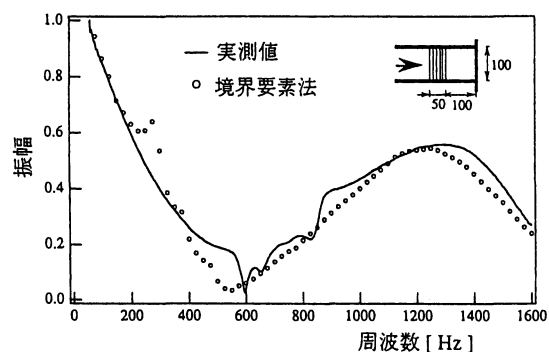


図9 グラスウール繊維が波面方向に配置された構造の音圧反射特性

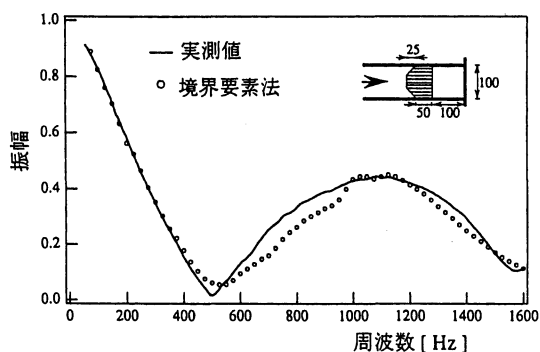


図10 グラスウール繊維が伝搬方向に配置された構造の音圧反射特性

予測と実測との音圧反射特性の比較結果例を図9および図10に示す。いずれの構造についても概ね良好な一致が得られている。ここで一致の程度が落ちる周波数領域が存在するが、その要因として次の2つが考えられる。その第1は理論計算において多孔質材料の非等方性を無視し、図9の構造では繊維が波面方向に平行な場合の固有音響特性、図10の構造では繊維が伝搬方向に平行な場合の固有音響特性を用いて計算したことが挙げられる。この異方性については現在その数値計算法の改良を行っているところである。不一致の要因の第2は、多孔質材料繊維密度の不均一があり、試料間、また、試料内の固有音響特性の違いが挙げられる。これは通常避けられない予測誤差要因であり、多孔質材料を含む構造の音響特性資料はある程度の誤差幅を考慮に入れて応用せざるを得ない。この

誤差幅を考慮すれば本予測手法は実用的精度を達成しているものと考えられる。

5. まとめ 多孔質材料の固有音響特性の新たなチューブ内測定法を明らかにし、実験によりその有効性を実証するとともに多孔質材料の固有音響特性に関する知見を得た。また、この特性を応用して理論的に、任意形状の多孔質材料を含む構造の実用精度の音響特性が得られることを示した。

文献

[1]伊積, 岩瀬, 日本音響学会講論集, 平成4年10月.
 [2] J. McIntosh et al, JASA, 88(4), 1990.
 [3]寺尾ほか, 日本音響学会講演論文集, 昭和62年3月.
 [4] H.Utuno et al, JASA, 86(2), 1989.
 [5]藤森ほか, 日本音響学会講演論文集, 昭和59年3月.
 [6]山口ほか, 日本音響学会講論集, 平成5年3月.
 [7] ASTM Standard, E1050, 1985.
 [8] M. D. Dahl, JASA, 87(1), 1990.
 [9] R. F Lambert, JASA, 93(3), 1993.
 [10]寺尾ほか, 境界要素法論文集, 第4巻, 1987年12月.