

解説

インピーダンス管を用いた材料の音響特性の計測技術*

寺尾道仁 (神奈川大学工学部)**

43.55.Ev, Rg

1. はじめに

本年4月20日に JIS A 1405-1:2007 (音響管による吸音率及びインピーダンスの測定—第1部: 定在波比法) [1] 及び JIS A 1405-2:2007 (音響管による吸音率及びインピーダンスの測定—第2部: 伝達関数法) [2] が制定・公示された。それぞれ ISO 10534-1:1996 [3] 及び 2:1998 [4] の翻訳規格である。筆者もその原案作成委員会の委員の一人として、特に第2部: 伝達関数法の原案作成に関係したので、浅学をかえりみず、伝達関数法を中心にこの測定手法及びその周辺について述べたい。

2. 音響管による音響測定の特徴

図-1 に音響管による測定装置 (伝達関数法の場合) の概念図を示す。この構成からなる測定装置は、主要な音響測定機器メーカーにより市販されている。音響管の直径は 2 cm から 10 cm 程度、長さ 1 m 程度の手軽な装置である。

なお、インピーダンス管 (impedance tube) は、Kundt tube, 定在波管 (standing wave tube, swt) などと呼ばれるが、ここでは JIS A1405 に従って、単に「音響管」と呼ぶことにする。

音響管による音響測定は、管断面寸法が波長に比較して小さく、管軸方向に伝搬する平面進行波のみ存在することを利用して利用している。その条件は円形断面管の場合、その直径を d として $d < 0.58$ 波長であり、これが測定周波数の上限を与える。この手法の主たる特徴として、(1) 残響室や自由音場では困難が多い 100 Hz 程度以下の低周波数域の音場は、音響管では比較的容易に実現できる。(2) 装置が小型で、無響室や残響室のような特殊

な大型施設を必要としない。暗騒音の影響が少ない。(3) 小さな試験体で済み、試行錯誤を要する製品開発などに有利である。(4) 高い周波数分解能の測定が容易である。(5) 垂直入射条件の特性が得られる、などを挙げることができる。

3. 音響管内の反射率の測定手法

音響管法における反射率の測定手法には、定在波比法と伝達関数法がある。

3.1 定在波比法 (JIS A 1405-1)

純音を供給し、プローブマイクロホンなどにより管軸方向の音圧分布を測定し、その最大値と最小値の比、すなわち、定在波比から音圧反射率を求める。この方法は 1900 年代早々 (J. Tuna (1902)) から応用されていたようである [5]。また、少なくとも 1950 年代には試験規格 ASTM C384-58 (1958) [6] も確立していた。

定在波比法は、精密なマイクロホン移動装置を必要とし、音響管の長さも 1 波長程度 (100 Hz の場合、約 3 m) と伝達関数法に比べて大型になる [7]。

3.2 伝達関数法 (JIS A 1405-2)

伝達関数法は、1980 年代に普及した市販 FFT により現実化した。定在波比法に比較して測定所要時間が数百分の 1 の程度と圧倒的に測定能率が良い。この手法の出現により音響管を用いた音響要素の測定は 1990 年代から著しく普及した。米国では ASTM E1050-98 [8] が ISO10934-2 に対応する規格で、1989 年に 10 箇所を超える測定機関で持回り試験が実施されている。

伝達関数法は、間隔 s だけ離れた 2 断面位置 x_1 及び x_2 の音圧の間の伝達関数 $H_{x_1x_2} = p_{x_2}/p_{x_1}$ を測定して、 x_1 位置の反射係数 r_{x_1} を

$$r_{x_1} = (H_{x_1x_2} - e^{-jks}) / (e^{+jks} - H_{x_1x_2}) \quad (1)$$

の関係により求める手法である [9]。ただし、式 (2) の分母の零点を避けるため、 $s < 1/2$ 波長の制約

* Measurement techniques of acoustic properties of materials by using impedance tubes.

** Michihito Terao (Faculty of Engineering, Kanagawa University, Yokohama) e-mail: terao@kanagawa-u.ac.jp

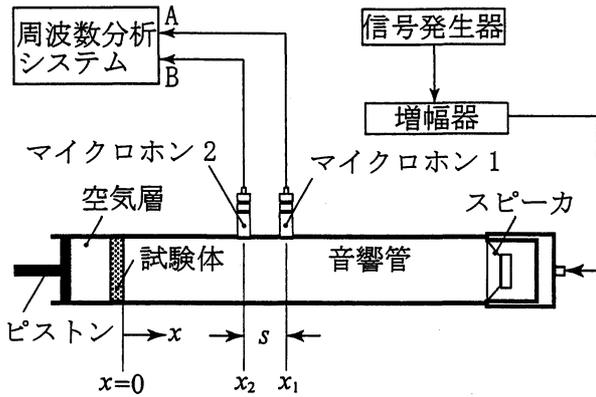


図-1 音響管法による測定装置の例

がある。これによる測定可能周波数の上限は、マイクロホンの音響中心の同定誤差も勘案すると高周波数域の測定については前述のダクト寸法 d による上限よりも厳しい。

また、 k は複素波長定数で、 ω を角周波数、 c を位相速度、また、 α_w を減衰定数（管壁の粘性・熱伝導境界層における消散）として、一般的に

$$k = \omega/c - j\alpha_w \quad (2)$$

の形で表現されている。管内減衰 α_w は定在波分布、すなわち、位置に依存する場合によってはその反射率測定 [10] や管内減衰補正に及ぼす影響に留意する必要がある [11]。

(1) 1 マイクロホン法 (2 位置 [12], 4 位置)

音源信号を基準に 1 本のマイクロホンを用いて順次 2 マイクロホン位置で伝達関数を測定し、その比をとって 2 マイクロホン位置間の伝達関数とする。マイクロホン特性の校正の必要がない。

(2) 2 マイクロホン法

伝達関数測定のための 2 位置に 2 本のマイクロホンを取り付けて同時測定する。この場合、2 本のマイクロホン系統の特性について同定をしておく必要がある。それには 2 手法が使われている。その一つは管の同一断面で相対特性を測定しておき事後処理する方法である。もう一つは、2 位置のマイクロホンを入れ替える手法 [13] である。

4. 反射率、吸音率及び表面インピーダンス

試験体表面の音圧反射率は試験体表面から x だけ離れた測定点の音圧反射率を e^{2jkx} 倍（往復距離 $2x$ に対応）して求められる。この試験体表面の音圧反射率は垂直入射条件のものであり、これから直ちに垂直入射の吸音率及び比音響インピー

ダンスが求められる。試験体表面の両（入・反射）進行波音圧振幅、また、音圧、粒子速度などの相対値も求められる。

5. 剛骨格モデルのバルク音響特性

多孔質材料は、剛骨格・一様・等方性材料の場合には、そのバルク音響特性、すなわち、波長定数 $k_e = \omega/c_e = \alpha_e + j\omega/c_{ph}$ 、又は伝搬定数 $\Gamma_a = jk_e$ 、特性インピーダンス $Z_a = \rho_e c_e$ 、実効密度 ρ_e 、実効音速 c_e 、体積弾性率 $K_e = \rho_e c_e^2$ 、など（そのいずれか二つを知れば他は導かれる）が知られれば、任意厚の吸音層、多層吸音層、更に吸音材がどのような複雑な形状で使われようとも数値解析により非局所作用（nonlocally/bulk reacting）条件を含めて音場の予測ができる。

バルク音響特性については、流れ抵抗係数 σ のみの関数とする Delany ら [14] の経験式、また Allard や Johnson らの構造パラメータによる予測モデル [15] がある。それらにたいし伝達関数法によれば、むしろ流れ抵抗を測定するよりも容易に、直接、バルク特性が得られる。

5.1 バルク音響特性の測定手法

音響管内の中央部に厚さ d の試験体を置き、その両面に対する検査面をそれぞれ添え字 1 及び 2 により示せば、次のような縦続行列で表される。

$$\begin{bmatrix} p_2 \\ u_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos k_e d & jZ_a \sin k_e d \\ jZ_a^{-1} \sin k_e d & \cos k_e d \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p_1 \\ -u_1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

ここに含まれる二つの未知数 k_e と Z_a の同定法としては、二つの条件式を用意して解けばよく、以下のような手法がある。

(1) 4 マイク位置法

試験体の表裏両面に音響管を設けそれぞれ 2 マイク位置で音圧を測定し、式 (3) の音圧と粒子速度を求める。

a. 二音源法 [16]

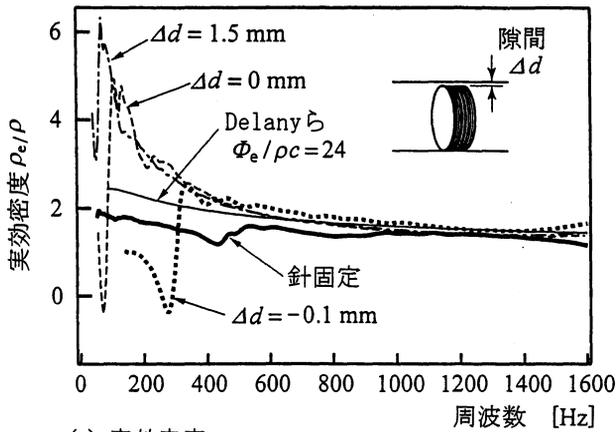
表裏両面側に音源を入れ替えて測定する。

b. 一音源法 [17]

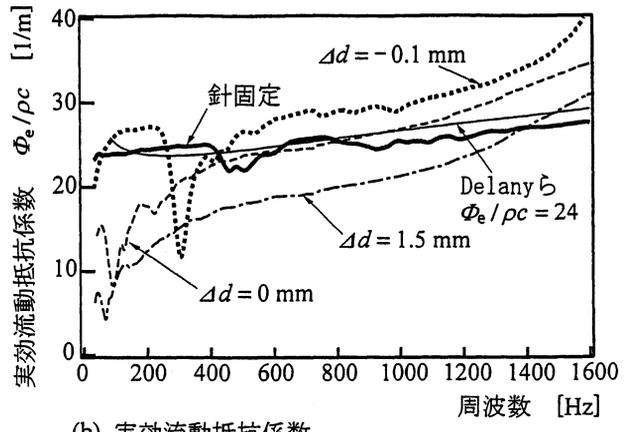
試料の一面側のみ音源を配置して測定する。これによる測定例を図-2 に示す [18]。

(2) 一表面側音圧・粒子速度測定手法

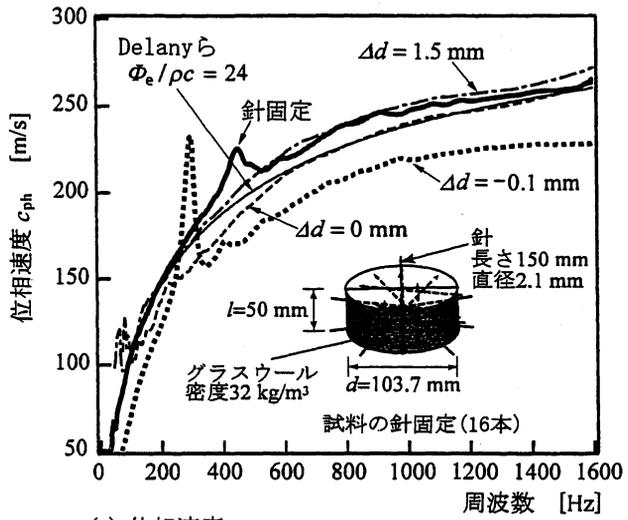
以下の条件で式 (3) の p_1 及び u_1 を測定する。



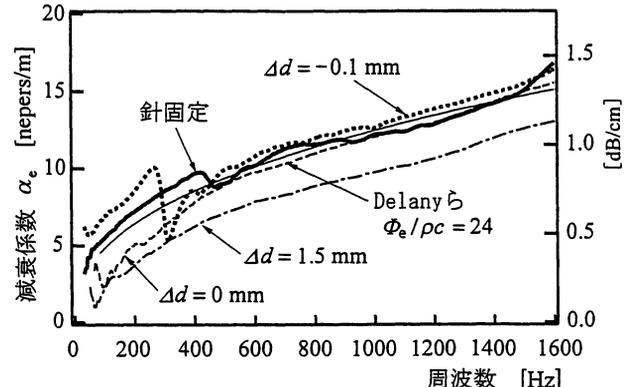
(a) 実効密度



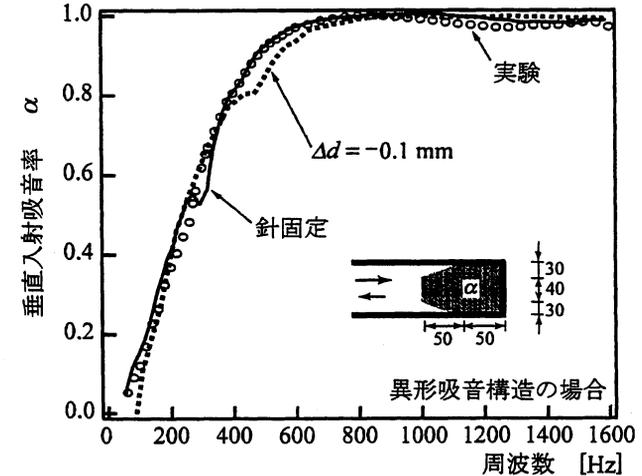
(b) 実効流動抵抗係数



(c) 位相速度



(d) 実効流動抵抗係数



(e) バルク音響特性によるBEM数値解析例

a. 背面剛壁条件法

i. 背面音圧測定手法 [19]

背面剛壁 ($u_2 = 0$) の条件で p_2 を測定する。

ii. 試料厚変化法 [20, 21]

背面剛壁 ($u_2 = 0$) の条件で、二つの異なる試料厚で測定する。

b. 背面音圧開放条件法 (JIS A1405)

$u_2 = 0$ 及び $p_2 = 0$ の二つの条件で測定する。

本手法は、ロックウールについて子安 [22], 繊維質材料にたいする Delany ら [14], また、連続気泡プラスチックフォームにたいする Wu Qunli [23] において定在波比法で使用している。

c. 2 背後空気層法 [24, 25]

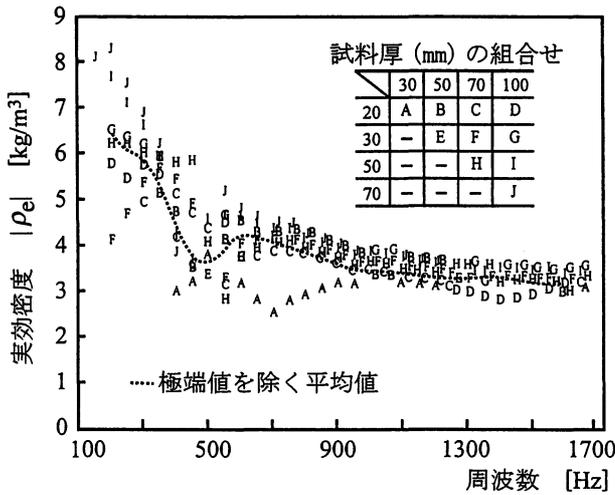
背後空気層の厚み 2 通りについて測定する。宇津野はその陽的解を与えた。現在、この手法が普及しており、2 マイクロホン法の項で述べた市販測定装置において、試料ホルダをピストン方式空気層深さ可変タイプにしたものが用意されている。

5.2 弾性骨格多孔質材に対する適用例

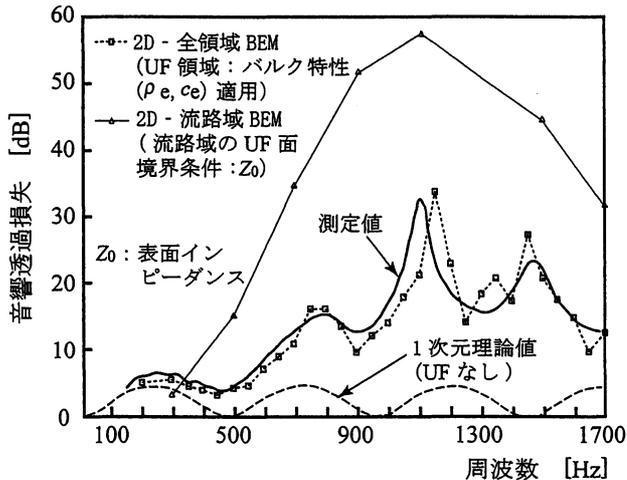
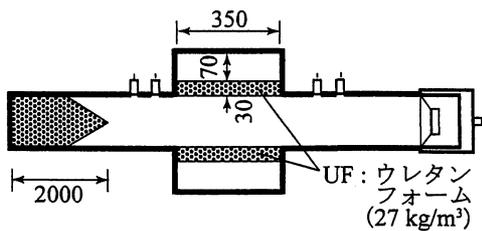
骨格の振動が無視できない場合にはバルク特性

図-2 多孔質材料のバルク音響特性の測定とその応用例 [17]

パラメータ ρ_e , c_e のみでの予測は無理があるが、ウレタンフォームについてその骨格振動を無視して測定及び解析した例を図-3に示す [21]。(a) に材料厚変化法による ρ_e を例示する。敢えて測定技術が稚拙であった初期 (1980 年代) の実験例を取り上げた。どの周波数についても測定条件による変化幅が大きい。しかし、その平均値 (各周波数ごとに) を用いた BEM 解析結果は実験値と比較的良好に対応しており、骨格共振を反映できない



(a) ウレタンフォーム (UF, 27kg/m³) のバルク音響特性の測定例 (試料厚変化法)



(b) バルク音響特性を応用した音響消散型膨脹管消音器の解析

図-3 弾性骨格多孔質材のバルク音響特性とその応用例 [21]

ことに留意しつつ応用すれば多くの実用に耐えるものと考えられる。

6. 音響要素の透過損失及び四端子定数の測定

消音器などの研究において、音響管による透過損失や四端子定数の定在波比法による測定は容易ではなかった [26]。伝達関数法による反射率測定はこれを著しく簡易にした。

6.1 各種測定手法

試験体の表面側及び裏面側の検査面に対してそ

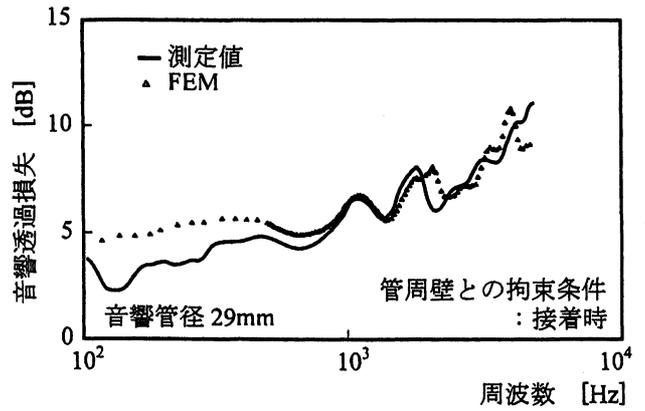


図-4 ウレタンフォーム平板 (30 kg/m², 厚 28 mm) の音響透過損失 [29]

れぞれ外向き波に正、内向き波に負の右肩符号により表せば、その複素音圧の関係は、

$$\begin{bmatrix} p_1^+ \\ p_2^+ \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \rho_1 & \tau_{12} \\ \tau_{21} & \rho_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p_1^- \\ p_2^- \end{bmatrix} \quad (4)$$

のような散乱行列で表すことができる。ここで、 ρ_1 及び ρ_2 は反射率、 τ_{12} 及び τ_{21} は透過率で試験体固有の音響特性である。透過率 τ_{21} の絶対値のデシベル表現が音響透過損失である。

その同定には以下のような手法が提案されている。最も一般的には四つの固有音響特性 ρ_1 , ρ_2 , τ_{12} 及び τ_{21} が未知として四つの方程式を用意する。それには、(1) 音響要素表面の一方を音源側とし他方を負荷側として、負荷側を2条件変化させる方法 (Two-load 法), (2) 音源側と負荷側を入れ替える方法 (Two-source 法 [27, 28]) がある。(3) 通常は透過係数は相反則が成立して $\tau_{12} = \tau_{21}$ となる。更に表裏対称のときには反射係数についても $\rho_1 = \rho_2$ が成立するから未知数は二つに低減し負荷を変化させる必要がなくなる (One-load 法 [29])。 (4) 一方、従来から使われてきた手法に無反射終端法がある。これは透過側反射波音圧をゼロとすることにより、音源側のみ入射波と反射波音圧を分離して τ_{21} を求める手法である [30]。

6.2 音響要素固有特性の測定例

図-4 にウレタンフォームの音響透過損失について、無反射端2マイクロホン法による測定例を Biot 理論に基づく FEM 解析結果 [30] と共に示す。周辺拘束条件がスリップ条件のときは実験との一致がよかった (図省略) にもかかわらず、固定条件とした場合には、実験が理想的な固定条件にできないことから低周波数域の不一致が生じている。

音響管による遮音測定は質量則領域が対象になるため、試験体は管壁に対しスリップ条件にする必要がある。スリップ条件でかつその隙間からの音響透過を防止する取り付け方法に課題を残している。

7. 試験体取り付け時の周辺拘束条件

(1) 吸音率測定における周辺拘束条件

吸音率測定の場合、試験体は、実際の構造又はその構成要素ではなく、大断面の吸音材料の一部をくり抜いたサンプルについて測定が行われることが多い。

音響管法では繊維方向が音波の粒子速度方向と一致するときには骨格共鳴は見られないが、それが粒子速度方向と直交し特に密度が大きい場合に骨格振動が甚だしくなる [7]。これは背面拘束に伴う 1/4 波長共鳴 [31] とは違う弾性骨格のせん断モードであり、音響管測定における周辺拘束条件に依存する特性で自由音場の測定では生じない現象である [32-34]。

単層板や多層板への垂直入射条件の場合、材料内ではせん断抵抗は働かない。従って大きな平板から切り出した試験体の管内への取り付けについてはスリップ条件とする必要がある [35]。

(2) バルク音響特性測定における周辺拘束条件

剛骨格モデルのバルク音響特性は、材料骨格の拘束条件に独立な特性であり、音響管への取り付けに伴う周辺拘束条件に関係する骨格振動が現れた場合には、得られたバルク特性は無意味になる。これに対して、図-2 に示したように試料と管内壁との間の隙間 Δd の影響は大きい。針固定手法は Delany らの経験式との一致もよく妥当な結果が得られており、一つの有効な手法と考えられる。

図-3 にも見られるように弾性骨格の多孔質材についても骨格共振を除けば、単純な剛骨格モデルにより基本的な予測が得られることが多い [15, 23, 28]。しかし、本格的な弾性骨格モデル解析については、最近 Biot のモデルに基づく研究がフランスを中心に進められている。そこでは骨格の弾性率やポアソン比など材料パラメータが更に必要になるほか解析も境界条件も非常に複雑になる [15]。

8. おわりに

音響管による吸音率や透過損失測定については非常に多くの重要な研究があるが、取り上げることができなかったものが多い。また、筆者の誤った見解をおそれています。ご指摘賜れば幸甚に存じます。

文 献

- [1] JIS A 1405-1:2007, “音響管による吸音率及びインピーダンスの測定—第 1 部：定在波比法” (2007).
- [2] JIS A 1405-2:2007, “音響管による吸音率及びインピーダンスの測定—第 2 部：伝達関数法” (2007).
- [3] ISO 10534-1:1996, “Acoustics — Determination of sound absorption coefficient and impedance in impedance tubes — Part 1: Method using standing wave ratio” (1996).
- [4] ISO 10534-2:1998, “Acoustics — Determination of sound absorption coefficient and impedance in impedance tubes — Part 2: Transfer-function method” (1998).
- [5] E.T. Paris, “On the stationary wave method of measuring sound-absorption at normal incidence,” *Proc. Phys. Soc. Lond.*, 39, 267-295 (1927).
- [6] ASTM standard C384-58, “Impedance and absorption of acoustic materials by the tube method,” American Society for Testing and Materials, Philadelphia (1958).
- [7] M.D. Dahl, E.J. Rice and D.E. Groesbeck, “Effects of fiber motion on the acoustic behavior of an anisotropic, flexible fibrous material,” *J. Acoust. Soc. Am.*, 87, 54-66 (1990).
- [8] ASTM standard, E1050-98, “Standard test method for impedance and absorption of acoustical material using a tube, two microphones and a digital frequency analysis system” (1998).
- [9] A.F. Sybert and D.F. Ross, “Experimental determination of acoustic properties using a two-microphone random -excitation technique,” *J. Acoust. Soc. Am.*, 61 (1977).
- [10] Y.S. Choy and L. Huang, “Measurement of induct acoustic properties by using a single microphone with fixed position,” *J. Acoust. Soc. Am.*, 116, 3948-3504 (2004).
- [11] M. Terao, H. Sekine, T. Ishii and Y. Hattori, “A correction method of tube attenuation in impedance-tube two-microphone-position method for absorption coefficient,” *Proc. Inter-Noise 06* (2006).
- [12] W.T. Thu, “Transfer function technique for impedance and absorption measurements in an impedance tube using a single microphone,” *J. Acoust. Soc. Am.*, 80, 555-560 (1986).
- [13] D.A. Blaster and J.Y. Chung, “A transfer function technique for determining the acoustic characteristics of duct system with flow,” *Proc. Inter-Noise '78* (1978).
- [14] M.E. Delany and E.N. Bazly, “Acoustical properties of fibrous materials,” *Appl. Acoust.*, 3, 105-116 (1990).
- [15] J.F. Allard, *Propagation of Sound in Porous Media* (Elsevier Applied Science, London and New York, 1993), Eq. 5.93.
- [16] M.L. Munjal and A.G. Doige, “Theory of a two

- source-location method for direct experimental evaluation of the four-pole parameters of an aeroacoustic element," *J. Sound Vib.*, 141, 323-333 (1990).
- [17] 関根秀久, 寺尾道仁, 大端健治, "多孔質材料固有音響特性の一測定法," 騒音制御工学会講論集, pp. 257-260 (1993. 9).
- [18] 寺尾道仁, 関根秀久, "繊維質材料音響特性チューブ内測定時の試料針固定," 騒音制御工学会講論集, pp. 321-324 (1995. 9).
- [19] 岩瀬昭雄, 伊積康彦, "音響管を用いた新しい音響伝搬定数の計測法," 音響学会誌, 52, 411-419 (1996).
- [20] M.A. Ferrero and G.G. Sacerdote, "Parameters of sound propagation in granular absorbent materials," *Acustica*, 1, 137-142 (1951).
- [21] M. Terao and H. Sekine, "On substructure boundary element techniques to analyze acoustic properties of air-duct components," *Proc. Inter-Noise 87*, pp. 1523-1526 (1987).
- [22] 子安 勝, "多孔質材料の吸音特性," 音講論集, pp. 111-112 (1954. 11).
- [23] W. Qunli, "Empirical relations between acoustical properties and flow resistivity of porous plastic open-cell foam," *Appl. Acoust.*, 25, 141-148 (1988).
- [24] 藤森 威, 富岡 一, "流れ抵抗と吸音率の関係について," 音講論集, pp. 549-550 (1984. 3).
- [25] H. Utsuno, T. Tanaka, T. Fujikawa and A.F. Seybert, "Transfer function method for measuring characteristic impedance and propagation constant of porous materials," *J. Acoust. Soc. Am.*, 86, 637-643 (1989. 8).
- [26] W.K.R. Lippert, "A method of measuring discontinuity effects in ducts," *Acustica*, 4, 307-312 (1954).
- [27] M. Terao and H. Sekine, "In-duct pressure measurements to determine sound generation, characteristic reflection and transmission factors of an air moving device in air-flow," *Proc. Inter-Noise 89*, pp. 143-146 (1989).
- [28] A.F. Seybert, R.A. Seman and M.D. Lattuca, "Boundary element prediction of sound propagation in ducts containing bulk absorbing materials," *J. Vib. Acoust.*, *Trans. ASME*, 120, 976-981 (1998).
- [29] O. Olivieri and J. S. Bolton, "Measurement of transmission loss of materials using a standing wave tube," *Proc. Int. Conf. Noise Control Engineering* (2006).
- [30] Y.J. Kang, B.K. Gardner and J.S. Bolton, "An axisymmetric poroelastic finite element formulation," *J. Acoust. Soc. Am.*, 106, 565-574 (1999).
- [31] J.F. Allard, C. Depollier, P. Guignouard and P. Rebillard, "Effect of a resonance of the frame on the surface impedance of glass wool of high density and stiffness," *J. Acoust. Soc. Am.*, 89, 999-1001 (1991).
- [32] B.H. Song and J.S. Bolton, "Investigation of the vibrational modes of edge-constrained fibrous samples placed in a standing wave tube," *J. Acoust. Soc. Am.*, 113, 1833-1849 (2003).
- [33] 岩瀬昭雄, 佐藤純一, "多孔質材料の振動モードの観察," 音講論集, pp. 895-896 (1994. 10).
- [34] 山口道征, "各種多孔質材料の音響特性," 音講論集, pp. 893-894 (1994. 10).
- [35] D. Pilon, R. Panneton and F. Sgard, "Behavioral criterion quantifying the edge-constrained effects on foams in the standing wave tube," *J. Acoust. Soc. Am.*, 114, 1980-1987 (2003).
-