

繊維系多孔質吸音材料のBiotパラメータの推定

研究開発本部 CAE室 三木達郎

1. はじめに

2016年から国内で自動車の車外騒音規制が施行された¹⁾。2020年には2dB, 2024年には4dB (いずれも2016年基準)の騒音低減が要求されている。また、燃費・CO₂基準や規制が強化され、2020年からは2015年より20%以上の燃費改善が必要になる²⁾。騒音と燃費両面の規制強化に対応するため、防音部品のさらなる性能向上と軽量化が期待されており、これに有効な材料が繊維系多孔質材料である^{3), 4)}。繊維系多孔質材料の音響性能はBiot理論によって計算できることが知られている⁵⁾。Biot理論は、材料特有のBiotパラメータを測定することで、任意形状の製品や、組み合わせた材料の音響性能を予測することが可能である。すなわち、Biot理論を用いることで、製品試作を行うことなく迅速に材料の組み合わせを検討することができる。しかしながらBiotパラメータは、同種材料であってもかさ密度が異なれば、再試作し再測定する必要がある。

当社はこれまでに自動車の防音部品の高性能化と設計迅速化を目的に、Biot理論を用いた音響性能の予測モデル構築に取り組んできた。今回、Biotパラメータを繊維特性から定量的に推定する技術を構築した。その結果再測定を伴わなくても材料の密度や繊維径からBiotパラメータの推定が可能になった。これにより繊維系多孔質材料の繊維特性から吸音率を予測可能な技術を確立したので、その技術について紹介する。

2. 吸音率予測の流れ

本稿ではまず、繊維系多孔質材料の音響系Biotパラメータをそれぞれ実測し、繊維特性とBiotパラメータの相関を確認する。次に繊維特性から、Biotパラメータを推定する式を作成し、その精度を確認する。さらに熱的特性長、粘性特性長を繊維特性から求める既存理論式の精度を確認する。最後に、推定したBiotパラメータとBiotモデルをベースとしたJCA (Johnson-Champoux-Allard) モデルを用いて、吸音率を予測し、実測吸音率と比較する。

3. JCAモデル

JCAモデルでは、多孔質材料中の隙間を通過する空気伝播音は、実効密度と実効体積弾性率で表現する。特に、空気の粘性摩擦によるエネルギー減衰を実効密度に、空気の圧縮膨張による熱的散逸を実効体積弾性率に組み込んだことを特徴とする。さらに、Biotモデルをベースとすることで、多孔質材料の骨格を介した固体伝播音も表現に加えることができる。ここで、一般的な吸音率はエネルギー反射率を用いて式(1)で表される。

$$a = 1 - |r|^2 \dots\dots\dots(1)$$

詳細な式展開は省略するが、エネルギー反射率は、JCAモデルを用いることで以下の式(2), (3)で示す実効密度、実効弾性率によって表すことができる。

$$\tilde{\rho}(\omega) = \frac{\alpha_\infty \rho_0}{\varphi} \left[1 + \frac{\sigma \varphi}{i \omega \rho_0 \alpha_\infty} \sqrt{1 + i \frac{4 \alpha_\infty^2 \mu \rho_0 \omega}{\sigma^2 \Lambda^2 \varphi^2}} \right] \dots\dots\dots (2)$$

$$\tilde{K}(\omega) = \frac{\gamma P_0 / \phi}{\gamma - (\gamma - 1) \left[1 - i \frac{8 \kappa}{\Lambda^2 \omega} \sqrt{1 + i \frac{\Lambda'^2 \omega}{16 \kappa}} \right]^{-1}} \dots\dots\dots (3)$$

ここで、 α_∞ は迷路度、 ρ_0 は空気の密度、 ϕ は空隙率、 σ は流れ抵抗、 i は虚数単位、 ω は角振動数、 μ は空気の粘度、 Λ は粘性特性長である。また、 γ は比熱比、 P_0 は平衡時の圧力、 κ は温度拡散率、 Λ' は熱的特性長を示す。音響性能をBiotモデルで表現することにより、周波数領域に連続的に表現された吸音率スペクトルをBiotパラメータに縮約することができる。表1にBiotパラメータの一覧を示す。なお、 ρ はかさ密度で真密度の ρ_t とは以下の関係式が成り立つ。

$$\rho = \rho_t (1 - \phi) \dots\dots\dots (4)$$

表1 Biotパラメータ

音響系Biotパラメータ	構造系Biotパラメータ
σ 流れ抵抗 [Ns/m ⁴]	ρ かさ密度 [kg/m ³]
ϕ 空隙率 [-]	η 損失係数 [-]
α_∞ 迷路度 [-]	E ヤング率 [N/m ²]
Λ 粘性特性長 [m]	ν ポアソン比 [-]
Λ' 熱的特性長 [m]	

4. 実験

4.1 試験体

試験体には、平均繊維径1.5、1.8、2.4、4.1、5.0 μm のグラスウールを用いて、かさ密度7～33kg/m³の繊維系多孔質材料を60種類用意した。繊維の代表径の評価はSEM（走査型電子顕微鏡、日本電子製、JSM7600F）で形状観察（図1）を行い、体面積平均径を代表径とした。

4.2 流れ抵抗測定

作製した試験体の流れ抵抗を評価するため、流れ抵抗測定装置（日本音響エンジニアリング製、AirReSys）を用いて流速0.5、1.0、1.5、2.0、2.5、3.0mm/sにおける圧力損失を測定し、流れ抵抗を換算した。その流れ抵抗値を縦軸にし、横軸

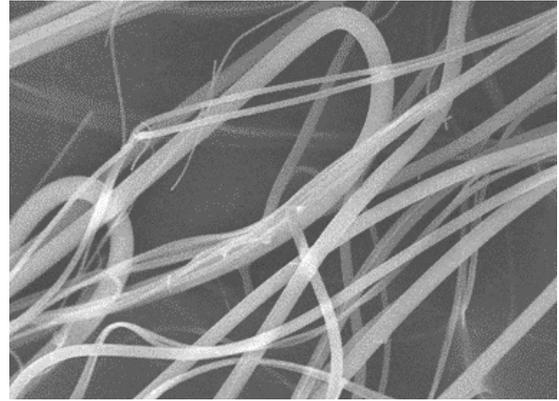


図1 試験体を使用したグラスウールの一例（SEM像）

に各試験体のかさ密度、媒介変数を各試験体の平均繊維径としたグラフを図2に示す。気孔率の値が同じ場合は、平均繊維径が小さい1.5 μm の流れ抵抗が最も大きくなり、平均繊維径が大きい5.0 μm の流れ抵抗が最も小さくなった。

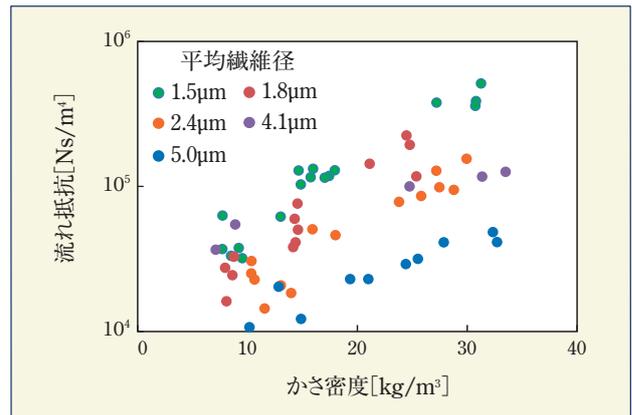


図2 試験体のかさ密度と流れ抵抗の関係

4.3 迷路度・特性長測定

作製した試験体の迷路度、粘性特性長、熱的特性長を超音波測定装置（日本音響エンジニアリング製、Torvith）を用いて測定した。迷路度はn2法、特性長はアルゴンガスと空気を用いたQ δ 法で求めた。測定周波数は100～1000kHzである。

迷路度の代表的な測定結果を図3に示す。迷路度については繊維種や多孔度によらず、ほぼ1であることがわかった。

熱的特性長および粘性特性長の代表的な測定結果を図4、5に示す。



図3 n2法で求めた試験体の迷路度

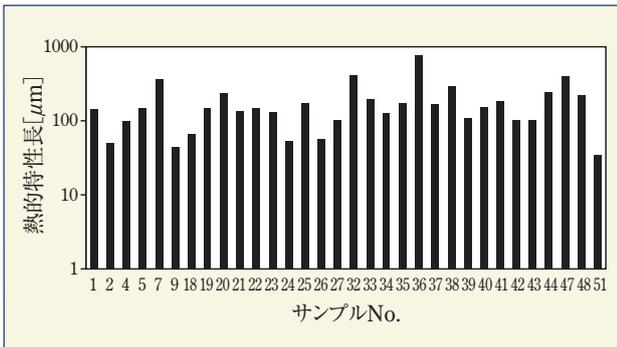


図4 Qδ法で求めた試験体の熱的特性長

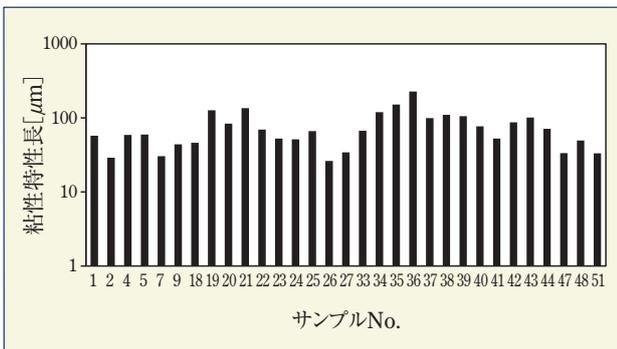


図5 Qδ法で求めた試験体の粘性特性長

ここで u は空気の流速, L は試験体厚さ, k は透過率。

一方, 流れ抵抗の定義式は式 (6) で表される。

$$\sigma = \frac{\Delta p}{uL} \dots\dots\dots (6)$$

従って, 流れ抵抗は空気の物性値である粘度と多孔質体の形状因子である透過率で表すことができる。

$$\sigma = \frac{\mu}{k} \dots\dots\dots (7)$$

そこで本稿では, 流れ抵抗を空気の粘度と繊維特性の関数を用いた実験式で表せると考え, 未知係数を流れ抵抗の実験値から最小二乗法を用いて決定した。

$$\sigma = A\mu(1 - \phi)^B D^C \dots\dots\dots (8)$$

ここで, D は繊維径, A, B, C は実験から求めるフィッティング係数である。

流れ抵抗に対する近似関数のカーブフィット結果を図6に示す。それぞれ $A = 8.89 \times 10^5$, $B = 1.40$, $C = -1.12$ とすると良好にフィットしていることがわかる。なお, 平均繊維径が $5.0 \mu\text{m}$ の試験体については, 試料中に密度のバラツキが大きく, 局所的に密度の低い部分が生じるため, 実測の流れ抵抗が近似式よりも低くなる傾向にあると考えられる。

5. 音響系Biotパラメータ推定

5.1 流れ抵抗

多孔質材料中における低レイノルズ数流体の場合, Darcyの法則に従い, 式5に示すように圧力損失は粘度, 流速, 厚さに比例し, 透過率に反比例することが知られている⁶⁾。

$$\Delta p = \frac{\mu u L}{k} \dots\dots\dots (5)$$

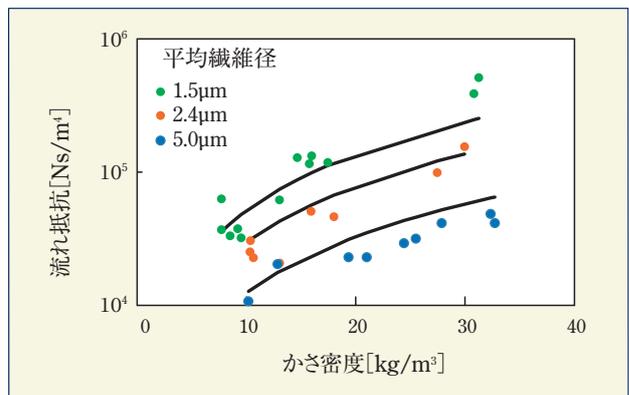


図6 流れ抵抗に対する近似関数のカーブフィット

5.2 熱的特性長・粘性特性長

4.3.で用いたQδ法は、超音波のエネルギー減衰を異なるガス中で測定することで2種類の特性長を算出することができる。しかしながら、細径繊維の試料においては超音波のエネルギー減衰が大きくなるので、超音波が試料を透過しづらくなり測定が困難になる問題がある。そこで、本稿では超音波による特性長測定を他の測定法と比較することで測定の妥当性を評価するとともに、各特性長に対しての予測式を検証した。

熱的特性長は式(9)で示すように表面積と空隙体積で定義されており⁷⁾、式(10)のように変換することで比表面積と多孔度で置き換えることができる。

$$\Lambda' = 2 \frac{\int_V dV}{\int_S dS} \dots\dots\dots (9)$$

$$\Lambda' = 2 \frac{\phi}{(1-\phi)S_v} \dots\dots\dots (10)$$

ここで、Sは繊維表面積、Vは空隙の体積、S_vは繊維の比表面積（単位体積当たりの全表面積、体積と表面積は固体分の実質体積と実質表面積）である。

また、繊維を円柱形状と近似すれば、式(11)のように多孔度と繊維径のみで表現することもできる。

$$\Lambda' = \frac{\phi}{2(1-\phi)} D \dots\dots\dots (11)$$

つまり、SEMおよび比表面積測定装置（BET）を用いて繊維径や比表面積を測定することで熱的特性長を求めることが可能である。図7にSEMと超音波（Qδ法）で測定したそれぞれの熱的特性長の比較例を示す。また、図8にBETと超音波（Qδ法）で測定したそれぞれの熱的特性長の比較例を示す。超音波測定と繊維径および比表面積から求めた熱的特性長に大きな差異はなく、式(11)で予測可能であることが分かった。

粘性特性長はJohnsonらによると式(12)で予測することができる⁸⁾。cは多孔質体の空隙形状に依存するパラメータでありおおむね1であることが知られている。

$$\Lambda = \sqrt{\frac{8\eta\alpha_\infty}{\sigma\phi}} \frac{1}{c} \dots\dots\dots (12)$$

c=1として、式(12)と超音波（Qδ法）の測定結果との比較を図9に示す。式(12)が超音波の測定結果をよく表していることがわかる。

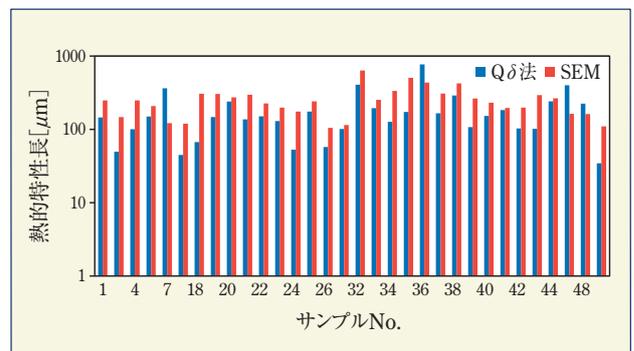


図7 繊維径および超音波（Qδ法）で測定した試験体の熱的特性長の比較例

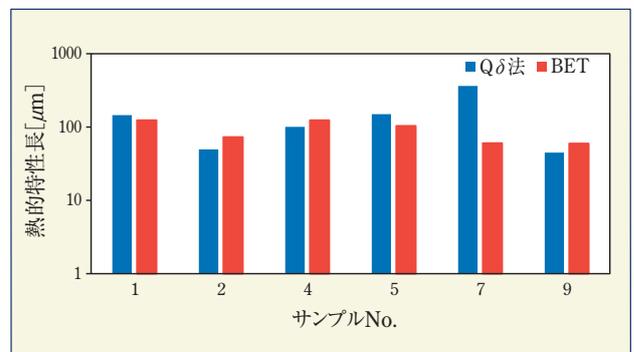


図8 BETおよび超音波（Qδ法）で測定した試験体の熱的特性長の比較例

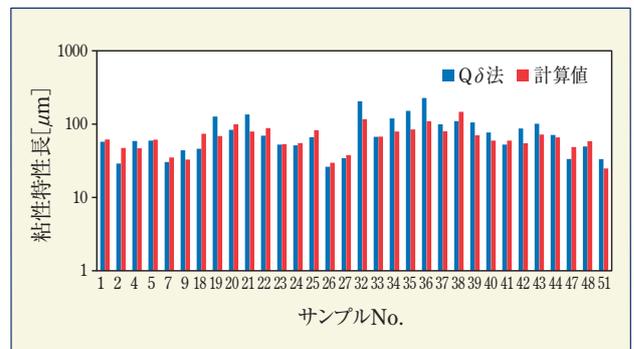


図9 式(12)による計算結果と超音波（Qδ法）で測定した試験体の粘性特性長の比較

このことから、式(12)において $c=1$ としても非常に有益な結果が得られることがわかった。

熱的特性長と粘性特性長の比は、試料の繊維配向分布によって0.5から1.0までの値をとることがAllardらによって予測されている⁹⁾。そこで、本測定から熱的特性長と粘性特性長の比を取った結果、0.56(標準偏差0.3)となり、おおむねAllardらの予測範囲に収まった。なお、大きな標準偏差となった理由としては、試験体中の密度のバラツキの可能性があると考えられるが、今後詳細を明確にしたい。

6. 垂直吸音率によるBiotパラメータ推定値の検証

各試験体の背後剛壁条件における垂直入射吸音率を測定し、前章で推定したBiotパラメータを用いてJCAモデルから求めた吸音率の予測値との比較を行った。結果の一例を図10～12に示す。図10、11から平均繊維径1.5 μm 、2.4 μm

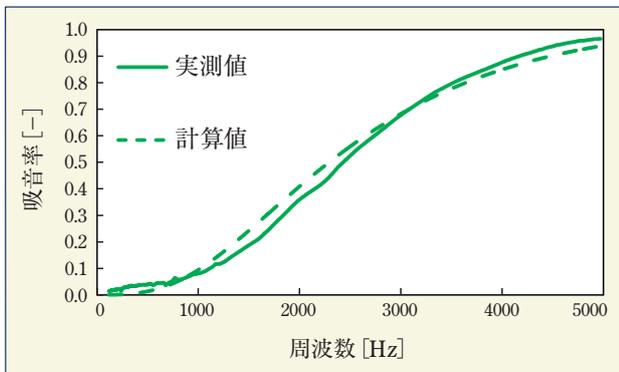


図10 垂直入射吸音率の実測値と予測値の比較(平均繊維径1.5 μm)

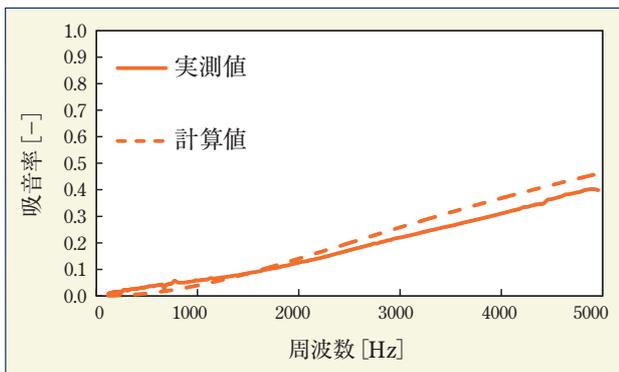


図11 垂直入射吸音率の実測値と予測値の比較(平均繊維径2.4 μm)

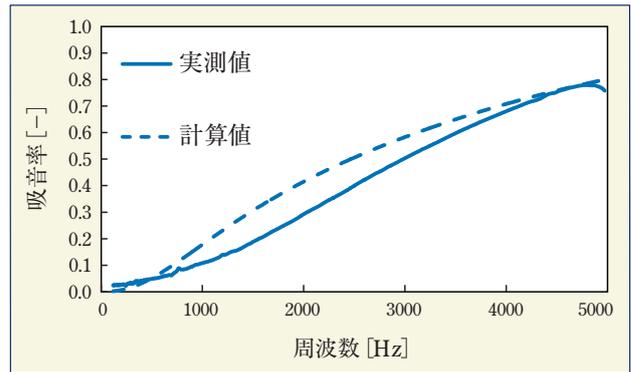


図12 垂直入射吸音率の実測値と予測値の比較(平均繊維径5.0 μm)

の試験体は、吸音率の測定値と予測値が良好にフィットしていることがわかる。平均繊維径5.0 μm の試験体(図12)は、前章でも示したように試験体内の密度のバラツキが大きく、局所的に密度の低い部分が生じ、実測の流れ抵抗が近似式よりも低くなる傾向にあるため吸音特性の誤差が大きくなったと考えられる。

以上より、本稿で示した繊維径、多孔度、気体の粘度による流れ抵抗の推定式と、繊維径、多孔度、繊維の比表面積を用いて熱的特性長、粘性特性長を求める既存理論式を用いることにより吸音率が予測可能であることが示された。

7. おわりに

Biotパラメータの実測結果に基づいて、繊維特性によりBiotパラメータを定式化した。その定式化した値を用いてJCAモデルで吸音率を予測し、実測値と比較検討した結果、吸音率を繊維特性である繊維径、多孔度と空気の物性値で予測可能であることがわかった。これにより、防音部品の材料選定や形状設計が容易になり、音響性能の高い防音材料開発の方向性を迅速に決定することが可能になった。

当社は防音材メーカーとして自動車向け防音材を供給し、自動車の性能向上に貢献してきた。今後も今回の成果を取り入れながら、より高性能な防音材の開発を迅速に行っていく所存である。

参考文献

- 1) Proposals for the 03 series of amendments to Regulation, No. 51 (Noise of M and N categories of vehicles).
- 2) 乗用自動車のエネルギー消費性能の向上に関するエネルギー消費機器等製造事業者等の判断の基準等（平成二十五年経済産業省・国土交通省告示第二号）。
- 3) 野口，土居隆之，多田寛子，見坐地一人：次期大衆車軽量防音パッケージの開発，自動車技術会学術講演会前刷集，No.123-05，p.11-15(2005)。
- 4) Tada, H., "Establishment of Performance Design Process for Vehicle Sound-Roof Packages Based on SEA Method," SAE Int. J. Passeng. Cars - Mech. Syst. 8(1):8-15, 2015.
- 5) J. F. Allard and N. Atalla: Propagation of Sound in Porous Media, New York, John Wiley & Sons, Ltd., 2009, 372p.
- 6) H. P. G. Darcy: Les Fontaines Publiques de la Ville de Dijon, Paris, Victor Dalmont, 1856, 655p.
- 7) Y. Champoux and J. F. Allard: Dynamic tortuosity and bulk modulus in air - saturated porous media, Journal of Applied Physics volume 70, issue 4, pp.1975-1979 (1991).
- 8) D. L. Johnson, J. Koplik and R. Dashen: Theory of dynamic permeability and tortuosity in fluid-saturated porous media, Journal of Fluid Mechanics, volume 176, pp.379-402 (1987).
- 9) J. F. Allard and Y. Champoux: New empirical equations for sound propagation in rigid frame fibrous materials, The Journal of the Acoustical Society of America, volume 91, issue 6, pp.3346-3353 (1992).

*本研究は日本大学見坐地教授との共同研究の成果であり，自動車技術会2017年 秋季大会における発表内容の概要である。

著者紹介



三木 達郎

研究開発本部 CAE 室
防音材の音響解析に従事

ニチアスの自動車部品



クルマの環境イノベーションに
『断つ・保つ』技術で貢献します。



シール関連部品

- ゴム/金属複合ガスケット
メタコート®
メタフォーム®
- 排気系&軟質ガスケット
CR ボルテックス®
ジョイントシート
- 摺動材
エクセライド®

熱関連部品

- 遮熱・保温材
インサルカバー™
N-フレチューブ™
- 熱制御
ウォータージャケットスパーサー
- 触媒担体保持材
エコフレックス™

音関連部品

- ブレーキシム材
メタプラス™積層シム
- 防音カバー
エアトーン®

※®が付されている名称はニチアス(株)の登録商標です。
※TMが付されている名称はニチアス(株)の商標です。
ただし「エコフレックス」は英国Safill Ltdの商標です。