

繊維系防音材の繊維特性による Biot パラメータ 及び音響特性の推定

日大生産工(院) ○石井 仁樹 日大生産工(学部) 森木 俊輔 日大生産工 高橋 亜佑美 日大生産工 見坐地 一人
ニチアス(株)浜松研究所 三木 達郎 ニチアス(株)浜松研究所 藤澤 安藤 ニチアス(株)浜松研究所 大介

1 まえがき

近年の車外騒音規制, 及び燃費基準値の強化に伴い, 自動車の防音部品には今まで以上の高性能化と軽量化が求められている. 今までは, 防音材の積層構造や, フィルムを貼ることによる通気性の調整などにより, 防音材の高性能化を行ってきた. しかし, 上記手法によるこれ以上の高性能化は難しくなっており, 今までと異なる観点からの研究が必要となってきた. そこで, 我々は防音材の素材そのものから考える必要があると考え, その中でも環境にやさしく, 耐熱性のある無機繊維系に着目した. そして, 無機繊維系の繊維特性と防音材の音響特性の関係を明らかにする必要があると考えた. 繊維特性から音響特性を予測することができれば, 高性能な音響特性を有する防音材の設計が可能になると考えたからである.

本研究では, 繊維径 1.5, 1.8, 2.4, 4.1, 5.0 μm , 高密度7~33 kg / m^3 の60種類の繊維系材料(ガラスウール)を用いた. 繊維特性から防音材の音響特性予測手法で用いられる Biot パラメータとの関係明らかにし, Biot パラメータから音響特性を予測する. 具体的には以下3つの項目について実施を行う. まず, 繊維特性と流れ抵抗との実験関係式を作成する. つづいて, 粘性特性長と熱的特性長を既存の理論式から推定し, 予測精度を確認する. 最後に, 音響特性予測手法の一つである JCA (Johnson-Champoux-Allard) モデルに上記手法で求めた推定 Biot パラメータを代入し, 音響特性の一つである吸音率を予測する. その後, 精度検証として音響管を用いて測定した垂直入射吸音率との比較を行う.

2 繊維特性

本研究で定義した繊維特性を表1に示す. つづいて, 主な繊維特性の測定方法及び評価方法を示す.

表1 繊維特性

繊維長	: 繊維の長さ	厚さ(L)	: 繊維整形体の厚み
繊維部	: 繊維の骨格部	表面積	: 繊維の表面積
空隙部	: 繊維間の隙間	比表面積(S_v)	: 単位体積あたりの表面積
繊維径(D)	: 繊維の直径	繊維配向	: 繊維の向き及び偏り具合

2.1 繊維径

繊維径は日本電子製の走査型電子顕微鏡(SEM)で形状観察を行い, 体面積平均径を代表繊維径とした. SEMによる繊維のイメージを図1に, 体面積平均径の定義式を式(1)に示す

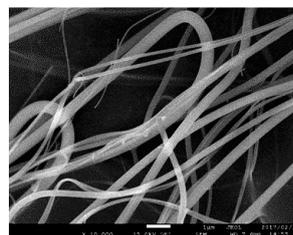


図1 SEMによる繊維のイメージ

$$D = \frac{\sum n_i d_i^3}{\sum n_i d_i^2} \quad (1)$$

2.2 比表面積測定

比表面積は, BET法(ガス吸着法)を用いて測定した. BET法とは, 多孔質材料の表面に気体分子を吸着させて, その吸着量から表面積を求める方法である. BET法の概念図を図2に示す.

Estimation of Biot parameters and acoustic characteristics used fiber properties of fiber type Soundproof material

Masaki ISHII, Shunsuke MORIKI, Tatsuro MIKI, Ikuma FUJISAWA, Daisuke ANDO, Ayumi TAKAHASHI, and Kazuhito MISAJI

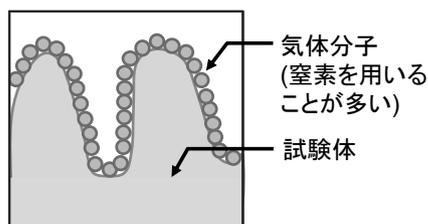


図2 BET法概念図

2.3 繊維配向

繊維配向は、X線CTスキャンを用いてMIL (Mean Intercept Length : 平均切断長) を算出し、得られたMILテンソルを正規化して作成するMIL楕円の形状から求められると考えた。繊維が均等に配向している、つまり配向が等方的な場合は、MIL楕円は真球形状となる。また、配向に偏りがある場合は、繊維が偏っている方向に伸びた楕円形状を取る。X線CTスキャンによる断面図の一つを図3-(a)に、その際のMIL楕円の形状を図3-(b)を示す。

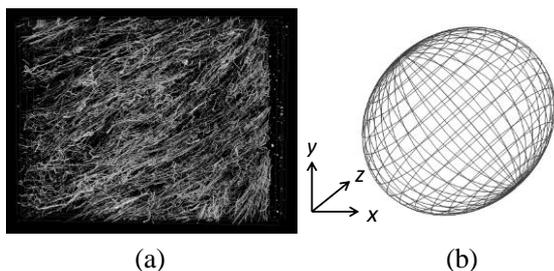


図3 繊維断面図とMIL楕円

図3-(a)のような右上がり方向への繊維の配向がある場合、MIL楕円は図3-(b)のような右上がりに伸びた楕円形状を取る。我々は、試験体を一方に圧縮することにより、繊維の配向を変えた試験体を作成できるのではないかという仮定のもと、図3の試験体をy軸方向に対してそれぞれ67%、17%となるように圧縮し、再度解析を行った。67%圧縮時の結果を図4に、17%圧縮時の結果を図5に示す。仮定が正しい場合、圧縮するにつれて配向はx軸と平行となり、MIL楕円はx軸方向に沿って伸びた形状を取るはずである。しかし、今回は狙った結果を得ることができなかった。これは、硬いガラスウールの繊維が途中で折れてしまったためと考える。本来であれば、繊維配向を変えたサンプルを作成し、流れ抵抗推定式の変数として利用しようと考えていたが、今回は繊維配向を除いて考えることとした。

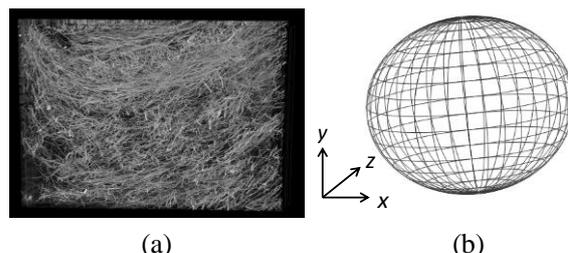


図4 67%に圧縮時の繊維断面図とMIL楕円

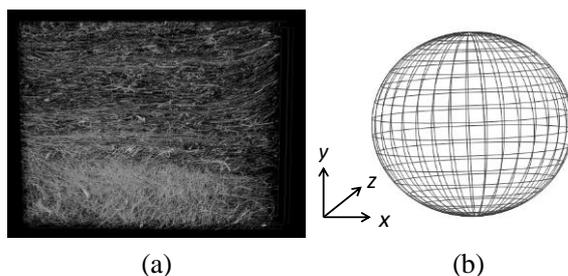


図5 17%に圧縮時の繊維断面図とMIL楕円

3 Biotパラメータ

Biotパラメータとは、音響特性予測手法で用いられる多孔質材料のパラメータであり、これを表2に示す。また、今回は音響系Biotパラメータを用いるので、音響系Biotパラメータの求め方についてそれぞれ記述する。

表2 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	嵩密度 [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]		

3.1 流れ抵抗 (Flow resistivity)

流れ抵抗とは多孔質材料中の流体の流れにくさを表すパラメータで、流れ抵抗測定器を用いて各流速における圧力損失を測定し、流れ抵抗を式(2)より求めた。

$$\sigma = \frac{\Delta P}{uL} \quad (2)$$

ここで、 ΔP は圧力損失、 u は気体の流速を示す。

3.2 空隙率 (Porosity)

空隙率とは繊維における空隙部の割合を表すパラメータである。今回は直接測定ではなく、試験体の見かけ上の密度 (嵩密度) と、繊維部の密度 (真密度) を測定して式(3)より算出した。

$$\phi = 1 - \frac{\rho}{\rho_t} \quad (3)$$

ここで、 ρ は嵩密度、 ρ_t は真密度を示す。

3.3 迷路度 (Tortuosity)

迷路度とは、多孔質材料中の流体経路の比であり、式(4)で近似が可能である。

$$\alpha_\infty \cong \left(\frac{C_0}{C} \right)^2 \quad (4)$$

ここで、 C は試験体中の音速、 C_0 は空気中の音速を示す。迷路度は理論上1以下にはならないはずだが、今回は1より小さくなってしまいう試験体が見られた。これは音速の測定に用いた超音波の減衰が、今回のような極細繊維径においてとても大きく、厚い試験体になればなるほど計測精度が低くなってしまったためと考えられる。しかし、すべての繊維径においておおよそ1に近い値になったため、本研究ではすべて1として計算した。

3.4 粘性特性長・熱的特性長 (Viscous characteristic length · Thermal characteristic length)

粘性特性長とは、高音域における実効密度の挙動を表すパラメータであり、熱的特性長とは、高音域における複素体積弾性率の挙動を表すためのパラメータである。本件球での測定方法としては超音波によるQΔ法を用いた。式(5)に、QΔ法の式を示す。

$$\lim_{\omega \rightarrow \infty} \frac{1}{Q\delta_{(air,Ar)}} = \frac{1}{\Lambda} + \frac{\gamma_{(air,Ar)} - 1}{B_{(air,Ar)}\Lambda'} \quad (5)$$

ここで、 Q はクオリティファクター、 δ は境界粘性層、 γ は比熱比、 B はプラントル数を示す。粘性特性長と熱的特性長、二つの未知数を、異なる気体での計測によって求めている。

4 JCA (Johnson-Champoux-Allard)⁽¹⁾ モデル

JCAモデルは、多孔質材料中の空気部を伝わる空気伝播音を、実効密度と実効体積弾性率で表現したモデルである。JCAモデルにおける実

効密度、実効体積弾性率の理論式を式(6),(7)に示す。

$$\tilde{\rho}(\omega) = \frac{\alpha_\infty \rho_0}{\phi} \left[1 + \frac{\sigma \phi}{i\omega \rho_0 \alpha_\infty} \sqrt{1 + i \frac{4\alpha_\infty^2 \mu \rho_0 \omega}{\sigma^2 \Lambda^2 \phi^2}} \right] \quad (6)$$

$$\tilde{k}(\omega) = \frac{\gamma P_0 / \phi}{\gamma - (\gamma - 1) \left[1 - i \frac{8\kappa}{\Lambda^2 \omega} \sqrt{1 + i \frac{\Lambda^2 \omega}{16\kappa}} \right]^{-1}} \quad (7)$$

ここで、 ρ_0 は空気の密度、 μ は空気の粘度、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 は温度拡散率を示す。

5 Biotパラメータの推定

5.1 流れ抵抗推定式構築

流れ抵抗の推定式としては過去に式(8)が、D. A. BIESら⁽²⁾によって提案されている。しかし、式(8)を作成するためのモデル数が少なかつたことや、異なる真密度の防音材において適応することができない等の問題があると考えられる。

$$\sigma = A \rho^B D^C \quad (8)$$

ここで、 D は繊維径を示している。上記の理由により、本研究では推定式を新しく作成した。まず、異なる真密度の防音材に対応可能なように、繊維の充填率を使用した。これを式(9)に示す。

$$\sigma = A(1 - \phi)^B D^C \quad (9)$$

ここでの未知数 A, B, C は式(8)とは違う値であるが、便宜上以降も同様に A, B, C と表記する。

また、多孔質材料中における低レイノルズ数流体の場合、Darcyの法則より圧力損失を式(10)で表すことができる。

$$\Delta p = \frac{\mu u L}{k} \quad (10)$$

式(10)を流れ抵抗の定義式である式(2)に代入することで、式(11)を得ることができる。

$$\sigma = \frac{\mu}{k} \quad (11)$$

式(11)より、流れ抵抗は流体のパラメータである粘度と、多孔質材料の形状に起因する透過率で表すことができる。よって我々は繊維形状

から流れ抵抗を推定している式(9)に流体のパラメータである粘度を追加した式(12)を、本研究の推定式とし、未知数である A, B, C の値を実験結果より最小二乗法を用いて算出した。

$$\sigma = A\mu(1-\phi)^B D^C \quad (12)$$

5.2 粘性特性長の推定

Johnson ら⁽⁴⁾によると、粘性特性長は式(13)で予測できるとされている。また c は1に近い値であることも示されている。よって、本研究では上記式を用いて粘性特性長の推定を行った。

$$\Lambda = \sqrt{\frac{8\eta\alpha_\infty}{\sigma\phi}} \frac{1}{c} \quad (13)$$

5.3 熱的特性長の推定

粘性特性長は式(14)と定義されており、展開することで式(15)を得ることができる。また、繊維を円柱形状と近似することで、式(16)を得ることができる。

$$\Lambda' = 2 \frac{\int_V dV}{\int_S dS} \quad (14)$$

$$\Lambda' = 2 \frac{\phi}{(1-\phi)Sv} \quad (15)$$

$$\Lambda' = \frac{\phi}{2(1-\phi)} D \quad (16)$$

本研究では、式(15),(16)にそれぞれBET法で測定した比表面積と、SEMによって計測した代表繊維径を適応することで、熱的特性長を推定した。推定した結果、今回の試験体において超音波測定の数値を真とした場合、式(15)に近い値を示したので式(15)を本研究における推定式とした。

6 音響特性予測結果

5章で推定したBiotパラメータをJCAモデルに適応することで、吸音率を求めた。3つのサンプルにおける予測吸音率と、音響管測定により求めた垂直入射吸音率の結果を図6に示す。

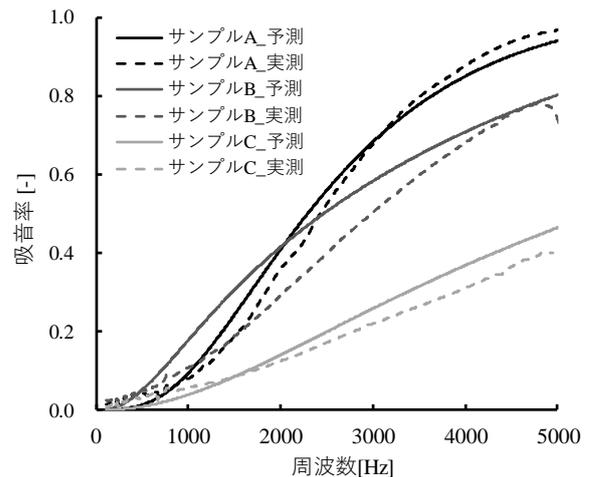


図6 吸音率比較結果

図6より、繊維特性から吸音率を予測できることが確認できた。なお、サンプルBの差については、試験体の密度むらがあったため流れ抵抗実測値より推定式が大きくなったことが原因であると考えられる。

7 まとめ・考察

本研究では、新たな提案式によってさまざまな繊維特性の繊維系防音材の流れ抵抗を推定することを可能とした。また、粘性特性長および熱的特性長を求める既存推定式の精度を確認することができた。最後に、Biotパラメータを測定しなくても、繊維系防音材の繊維特性から音響特性が予測可能であることを確認できた。これにより、繊維特性から高性能な繊維系防音材の開発が可能であることを示すことができた。今後の課題としては、さらに密度のばらつきの少ない試験体を作成して精度を上げることや、今回流れ抵抗式に取り入れることのできなかつた繊維配向を検討すること、繊維径のばらつきによる影響、繊維断面形状や繊維長の影響などを研究する必要があると考えている。

「参考文献」

- 1) Propagation of Sound in Porous Media
- 2) Flow Resistance Information for Acoustical Design
- 3) Determination of the viscous and thermal characteristic lengths of plastic foams by ultrasonic measurements in helium and air
- 4) Dynamic tortuosity and bulk modulus in air-saturated porous media