

論文・解説

13

## 材料モデルベースリサーチによる 多孔質吸音材微視構造設計技術の開発と吸音部品設計への適用

### Development of Microstructural Design Technology of Porous Sound Absorbing Material and its Application to Sound Absorbing Component Design Based on Material Model Based Research

山川 啓介<sup>\*1</sup> 桂 大詞<sup>\*2</sup> 山本 崇史<sup>\*3</sup>  
Keisuke Yamakawa Daiji Katsura Takashi Yamamoto

#### 要約

マツダでは、クルマの価値向上につながる革新的な材料を効率的に開発する材料モデルベースリサーチ (MBR) の考え方に基づいた研究開発を進めている。本研究では、車室内の静粛性向上に寄与する多孔質吸音材に対して、限られた質量と容積の中でねらいの音響特性を実現するために、その微視構造を効率的に設計する技術を開発した。本技術は、材料の微視構造特性から平均的な巨視構造特性を導出する手法である均質化法と、比較的簡便な吸遮音性能予測モデルである Biot のモデルを組み合わせたもので、微視構造の形状や寸法に対する高精度かつ効率的なパラメトリック計算を可能とするものである。本技術の概要とエンジンカプセル化技術への適用事例について紹介する。

#### Summary

Aiming to improve the value of cars, Mazda has been developing technologies with the concept of Material Model-Based Research (MBR) for the efficient development of innovative materials. In this study, aiming to achieve desired acoustic characteristics with a limited mass and volume of a porous sound-absorbing material that improves quietness in a car, we have developed technology that efficiently designs the microstructure of the material. This technology is a combination of the homogenization method that derives an average macro-structural property from the micro-structural property of the material and Biot model which is relatively simple prediction model for sound absorption/insulation performance. This technology enables highly accurate and efficient parametric calculations for microstructure's shape and size. Here we introduce the outline of this technology and the application of the technology to engine encapsulation.

**Key words** : Noise, Acoustic material, CAE, Homogenization method, Biot's model

#### 1. はじめに

車室内の静粛性能は、運転者、同乗者の安全・安心で快適なドライビング環境をサポートする重要な性能の一つであり、マツダ車の性能も年々進化している<sup>(1)(2)(3)</sup>。一方で、他性能や軽量化と相反することも多く、これらと整合のとれた開発を効率良く行う必要がある。そのためにはできるだけ開発の早期に他性能とのバランスを取りながら、必要最小限の質量、容積での防音防振部品の設計要件を導出することが重要である。

マツダでは、材料の微視構造内部で生じている物理現象をそのメカニズムに基づいた数式でモデル化し、材料

全体としての性能や機能と結び付けることで、微視構造レベルでの制御因子を明らかにし、必要機能からのバックキャストによって材料開発を効率的に行う、材料モデルベースリサーチ (MBR)<sup>(4)</sup> の考え方に基づいた研究開発をしている。本研究では、室内の静粛性を高めるために一般的に用いられる多孔質吸音材について、限られた質量と容積の中でねらいの特性を実現する材料の設計技術構築に取り組んでいる。

これまでに、材料の微視構造から巨視構造における特性を導出する手法である均質化法<sup>(5)(6)</sup> と、比較的簡便な多孔質材の吸遮音性能予測モデルである Biot のモデル<sup>(7)</sup> を組み合わせて、ねらいの吸音特性を実現するために必

\*1~2 技術研究所  
Technical Research Center

\*3 工学院大学 工学部機械工学科  
Kogakuin University, Graduate School of Mechanical Engineering

要な微視構造を効率よく設計する技術を構築した<sup>(8)(9)</sup>。この技術を活用して、低減したい音の特性と限りのある配置スペースに対応した吸音材を効率的に設計し、CX-30, MAZDA 3 のエンジンカプセル化技術に適用した。本稿では、本技術の概要とエンジンカプセル用吸音材の開発事例を報告する。

## 2. 多孔質吸音材微視構造設計技術の開発

本研究で取り扱う多孔質材料とは、細い繊維を重ね合わせたり、樹脂を発泡させたりすることにより、数 $\mu\text{m}$ ～十数 $\mu\text{m}$ の骨格部（固体相）と数十 $\mu\text{m}$ ～数百 $\mu\text{m}$ の空隙部（流体相）の二相からなる連通孔の材料のことであり、一般的に吸音材や断熱材として広く用いられているものを指す（Fig. 1）。マツダでは、モノを作って試行錯誤しながら仕様を決定するモノベースの開発ではなく、欲しい性能を得るために必要な微視構造パラメータ（骨格形状、骨格と空隙の寸法など）を机上で設計するモデルベースでの開発を目指している。

多孔質材料の音響性能を予測するために一般的によく用いられる手法として、Biot のモデルによる手法がある<sup>(7)</sup>。この手法は比較的低い計算コストで解析できるが、材料微視構造と解析に必要なパラメータとの関係が不明確であり、材料設計に用いることは難しい。一方、山本らは、材料の微視構造と巨視構造の特性を関連付けることのできる均質化法を用いて、多孔質材料の音響特性を解析する手法を開発した<sup>(6)</sup>。微視構造設計を可能とする手法であるものの、比較的計算コストがかかるため、所望特性を得るためのパラメータスタディを実施するには改善の余地がある。

そこで本研究では、均質化法と Biot モデルを組み合わせたハイブリッド手法を考案し、多孔質材料の微視構造をパラメトリックに計算する手法を開発した<sup>(8)(9)</sup>。本章では、Biot モデルと均質化法の概要を説明した後、両者のハイブリッド手法による材料微視構造設計技術及びそこで必要な関係式の導出事例について述べる。

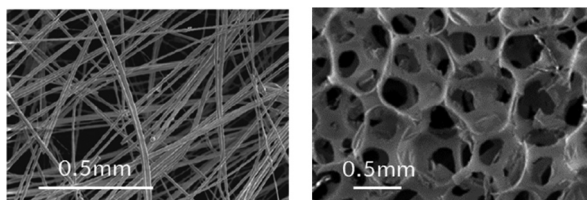


Fig. 1 Enlarged Image of Porous Material  
Left: Fiber Type, Right: Foam Resin Type

### 2.1 Biot モデルによる多孔質材料の音響特性解析

Biot モデルは、音響エネルギーが多孔質材内部に入射した時の固体相と流体相の振る舞いについて、両者の相互作用を考慮して解析するモデルである（Fig. 2）。このモデルでは材料内部の骨格構造形状について直接的には

考慮せず、固体相と流体相の相互作用影響を複数のパラメータ、いわゆる Biot パラメータ<sup>(10)</sup> によって表し、多孔質材内部で生じるエネルギー損失を求める。このモデルを例えば伝達マトリクス法<sup>(10)</sup> に適用して垂直入射吸音率<sup>(11)</sup> を計算する場合、1 ケース当たり十数秒程度で結果が得られる。計算コストが比較的低く、予測精度が高いため、多孔質材の吸音特性予測に広く用いられているモデルである。しかしながら、Biot パラメータは実験的に同定する必要があり、微視構造との関係が不明確なものが複数あるため、材料設計への適用は容易でない。

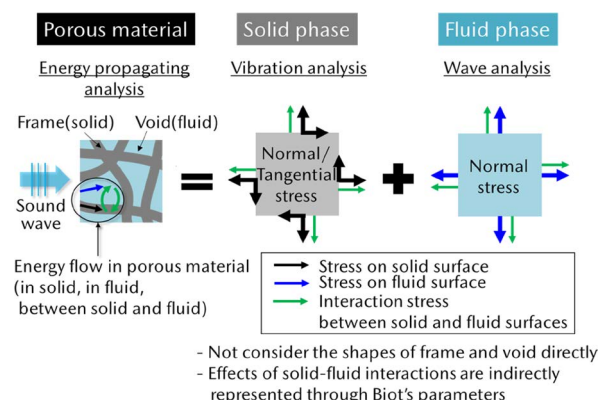


Fig. 2 Biot's Model Overview

### 2.2 均質化法による多孔質材料の音響特性解析

均質化法とは、材料内部の微視構造を平均的に等価な特性をもつ周期的で均質な構造（ユニットセル）が並んだものに置き換え、ユニットセルの挙動を解いて平均化して、巨視構造の特性を得る手法である（Fig. 3）。

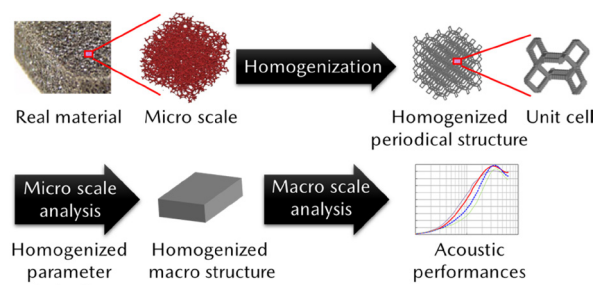


Fig. 3 Schematic View of Homogenization of Poroelastic Material

山本らはこの手法を多孔質材内部での音振動エネルギー伝搬現象に適用した。その概略について Fig. 4 の流れに沿って説明する（詳細は文献（6）を参照）。

微視構造について、固体相を線形弾性場として、流体相を圧縮性の線形流れ場として取り扱い、それぞれ Navier 方程式と Navier-Stokes 方程式を適用する。境界面において変位と垂直応力の連続条件を考慮する。温度場については、固体相の比熱が流体相の比熱に対して十分大きいことから、固体相では温度は平衡状態であると

仮定し、流体部のみに熱伝導方程式を適用する。境界面では温度の連続条件を考慮する。これら3つの方程式を解くことによって、吸音材内部での主な音響エネルギー損失（熱エネルギーへの変換）、すなわち、構造減衰損失、粘性損失及び熱散逸損失を定量的に解析することができ、巨視的な吸音特性の解析が可能となる。更に質量保存則及び状態方程式も考慮して、全ての支配方程式を解き、得られた微視構造特性関数について微視構造内で体積平均することで巨視的なパラメータ（均質化パラメータ）を得ることができる。そしてこの特性を用いて材料の巨視的な挙動を解析することで音響性能が求められる。以上により、構造パラメータと音響性能とが紐づいた解析が可能となる。解析は全て有限要素法（FEM）で実施され、1ケースの計算時間は計算専用のPCにて数十分～数時間を要する。

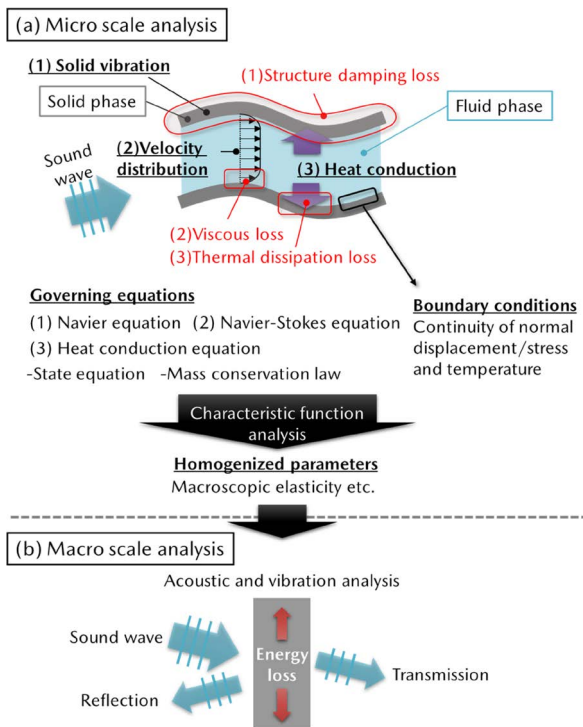


Fig. 4 Acoustic/Vibration Energy Propagation Analysis Model Inside Porous Material by Homogenization Method

この手法を発泡樹脂多孔質材に適用して、吸音率を予測した結果を Fig. 5 に示す。実測値と良い整合が得られている。なおユニットセルとしては後述する Kelvin セル構造を適用した。

### 2.3 均質化法と Biot モデルのハイブリッド手法による多孔質吸音材微視構造設計プロセスの開発

多孔質材の微視構造パラメータと Biot パラメータの関係が定量的に分かれれば、計算コストの低い Biot モデルが利用でき、微視構造と音響特性が紐づいた解析を短時間で行うことが可能となる。両パラメータの関係に

ついて研究した事例としては、ヤング率や流れ抵抗など一部の Biot パラメータについて、構造を単純化することで解析的に求めた事例<sup>(12)</sup> や、微視構造寸法との関係式を実験的に同定した事例がある<sup>(13)(14)</sup>。一方、山本らは、均質化法により全ての Biot パラメータを導出する手法を開発した<sup>(15)</sup>。

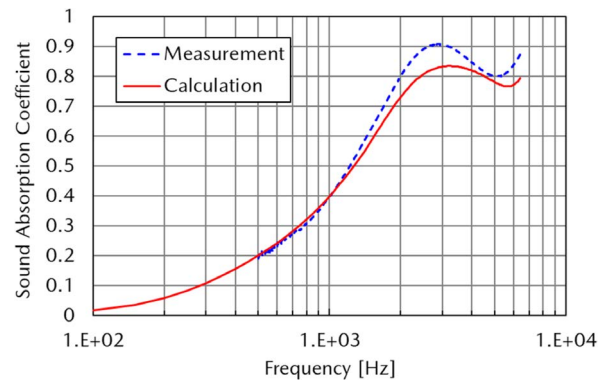


Fig. 5 Comparison of Normal Incidence Sound Absorption Coefficient Calculated by Homogenization Method and Measured: Foamed Resin Porous Material (Porosity 90%, Averaged Void Diameter 251 μm)

本研究ではこの山本らの手法を利用して、微視構造に関するパラメータスタディを多数回行うことで、両パラメータの関係式を導出することとした。一旦この関係式が得られれば、微視構造パラメータを変更した場合の音響特性を Biot モデルによって短時間で算出することができるようになる。ここに最適化アルゴリズムなどによる多数のパラメータスタディを適用することで、比較的短い時間でねらいの吸音特性を実現する微視構造パラメータを求めることができる。このようにして所望の音響特性を実現するために必要な多孔質材料微視構造を高精度かつ効率的に設計する手法を構築した。一連の微視構造パラメータ設計プロセスを Fig. 6 に示す。

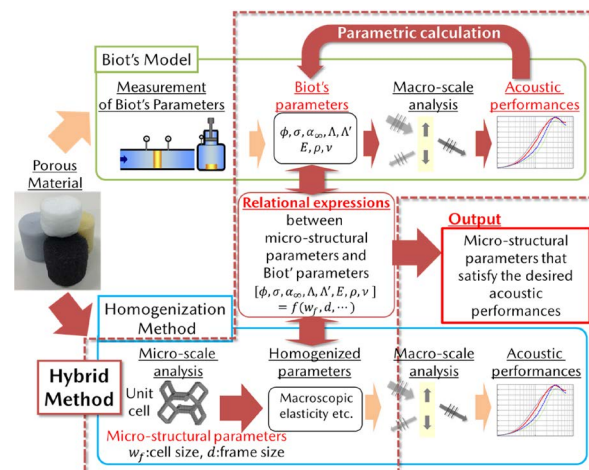


Fig. 6 Micro-structure Design Process of Porous Sound-Absorbing Material by Hybrid Method of Homogenization Method and Biot's Model

2.4 微視構造パラメーターと Biot パラメーターの関係式導出

繊維系及び発泡樹脂系の多孔質材について、微視構造パラメーターと Biot パラメーターの関係式の導出を行った事例を示す。Biot パラメーターのうち、固体相に関連する見掛けのヤング率  $E$ 、質量密度  $\rho$ 、ポアソン比  $\nu$ 、流体相に関連する空孔率  $\phi$ 、単位厚流れ抵抗  $\sigma$  は均質化法で直接求めることができる。また、迷路度  $\alpha_\infty$  と粘性特性長  $\Lambda$  は等価密度、熱的特性長  $\Lambda'$  は等価体積弾性率から最小二乗法を用いて同定する<sup>(15)</sup>。

(1) 繊維系多孔質材

繊維系材料に対するユニットセルの形状としては Fig. 7 に示す井桁構造を用いた。単純化するため、ここでは厚さ方向の繊維のつながりは考えていない。したがってここでは流体相に関するパラメーターのみを求める。

繊維径  $d$  を  $0.5\mu\text{m} \sim 100\mu\text{m}$ 、空孔率  $\phi$  を  $0.75 \sim 0.99$  の範囲に設定して計 50 のサンプリングを行って、各々 Biot パラメーターを導出した。更に微視構造パラメーターを繊維間平均距離  $d_f$  と空孔率  $\phi$  として、最小二乗法により各 Biot パラメーターとの関係式を導出し、式 (1)～式 (4) に示す結果を得た。流れ抵抗  $\sigma$  は  $d_f^2$  に反比例、特性長  $\Lambda$ 、 $\Lambda'$  は  $d_f$  に比例しており、経験的に知られている関係と一致している。

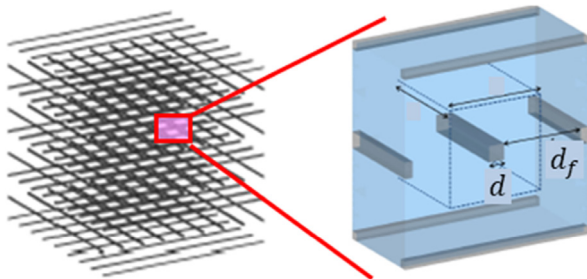


Fig. 7 Unit Cell and Microscopic Structural Parameters of Fibrous Porous Materials: Girder Structure

$$\alpha_\infty = 1.0 + 1.03(1.0 - \phi) \quad (1)$$

$$\sigma = 3.33 \times 10^{-4} d_f^{-2} (1.0 - \phi)^{0.16} \quad (2)$$

[Pa·s/m<sup>2</sup>]

$$\Lambda = 0.70 d_f (1.0 - \phi)^{-0.15} \text{ [m]} \quad (3)$$

$$\Lambda' = 0.76 d_f (1 - \phi)^{-0.13} \text{ [m]} \quad (4)$$

(2) 発泡樹脂系多孔質材

発泡樹脂系材料に対するユニットセルの形状としては、Fig. 8 に示すような泡の三次元構造の一種として知られる Kelvin セル構造を用いた。微視構造は棒状の骨格による四角形と六角形で構成されている。今回検討したのはユニットセルの 3 辺の長さが同じ場合で ( $w_x = w_y = w_z = w_f$ )、四角形及び六角形の空孔の大きさはそれぞれおよそ  $1/3w_f$  及び  $2/3w_f$  である。ここでは、 $1\mu\text{m} \leq w_f \leq 1\text{mm}$ 、 $0.905 \leq \phi \leq 0.992$  の範囲において計 50 のサンプリング

を行い、Biot パラメーターの導出を行った。求めた  $w_f$ 、 $\phi$  と Biot パラメーターの関係式を式 (5)～式 (10) に示す。ここで、 $E_0$  は発泡樹脂の素材のヤング率である。流れ抵抗は  $w_f^2$  に反比例、特性長は  $w_f$  に比例しており、経験的に知られている関係と一致している。

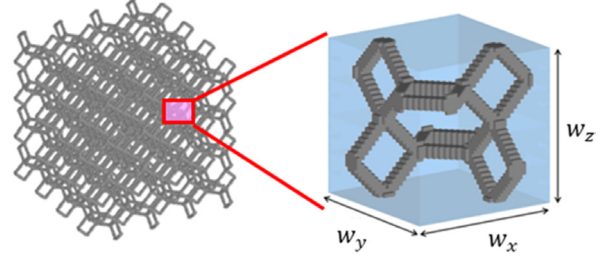


Fig. 8 Unit Cell and Microscopic Structural Parameters of Foamed Resin Porous Material: Kelvin Cell

$$\alpha_\infty = 1.43 - 0.43\phi \quad (5)$$

$$\sigma = 3.88 \times 10^{-3} w_f^{-2} (1 - \phi)^{0.355} \quad (6)$$

[Pa·s/m<sup>2</sup>]

$$\Lambda = 0.094 w_f (1 - \phi)^{-0.359} \text{ [m]} \quad (7)$$

$$\Lambda' = 0.383 w_f (1 - \phi)^{-0.149} \text{ [m]} \quad (8)$$

$$E = \frac{2(1 - \phi)^2}{3(1.9 - 0.9\phi)} E_0 \text{ [pa]} \quad (9)$$

$$\nu = \frac{\phi}{2(2 - \phi)} \quad (10)$$

3. エンジンカプセルの吸音部品開発への適用

CX-30, MAZDA3 に搭載されている SKYACTIV-X エンジンでは、燃費性能と静粛性能を両立させるため、エンジンルーム内のカプセル化技術が施されており、断熱性能と吸音性能の高い部品でエンジンが覆われている<sup>(16)(17)</sup>。ここでは構築した吸音材微視構造設計プロセスをエンジンカプセルの吸音部品開発へ適用した事例を示す。

エンジンカプセルの吸音部品に用いられる発泡樹脂材を Kelvin セルでモデル化した。2.3 に示した設計プロセスにおいて、微視構造のパラメータスタディを遺伝的アルゴリズムによって行い、吸音率を最大化する微視構造パラメーターを求めた。吸音材の厚さは 20mm で、目的関数は低減したい 1kHz～5kHz における垂直入射吸音率の平均値とした。材料選定の段階で、耐熱性、成形性、コストなどの要件から、材料をウレタンに絞り込み、セルサイズ  $w_f$  のみを設計変数としてその最適なサイズを求めることとした。材料の特性値を Table 1 に示す。

スタディ数を  $N=600$  として、遺伝的アルゴリズムを用いて垂直入射吸音率の予測計算を実施した結果、目的関数を最大化する解として  $w_f=200\mu\text{m}$  が得られた。このときの吸音率算出結果を  $w_f=280\mu\text{m}$ 、 $360\mu\text{m}$  のときの結果と合わせて Fig. 9 に示す。

Table 1 Properties of Urethane Foam used in the Development of Sound Absorbing Materials

Porosity $\phi$	Young's Modulus $E_0$ [MPa]	Density $\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	Loss Factor $\eta$
0.88	24	1,280	0.1

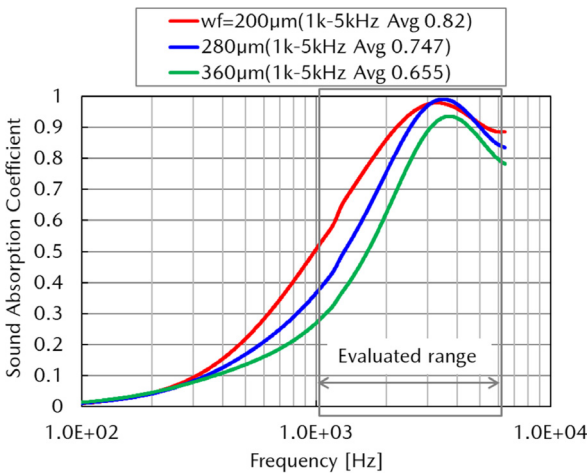


Fig. 9 Calculated Sound Absorption Coefficient of Material in Table 1 for Normal Incidence (Unit Cell Size  $w_f=200\mu\text{m}$  Maximizes Performance)

この結果を踏まえ、現状の製品製造プロセスを使って、空隙サイズを変えた 2 種類 ( $w_f=286\mu\text{m}$ ,  $647\mu\text{m}$ ) の吸音材を製作した。それらの垂直入射吸音率の実測値を Fig. 10 に示す。ウレタンのセルサイズを目的関数が最大となる解析結果に近づけることで、ねらいの周波数帯域で高い吸音性能を得た。

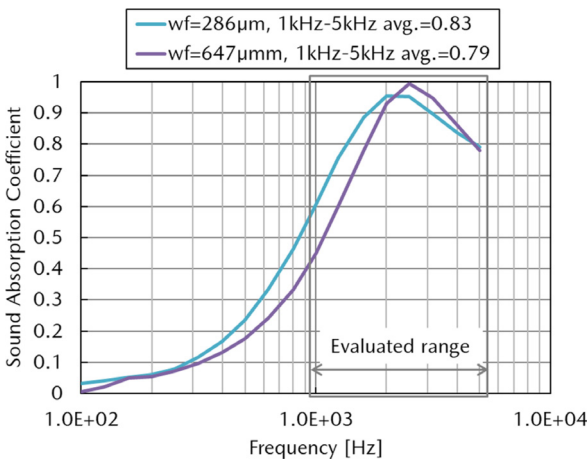


Fig. 10 Measured Sound Absorption Coefficient for Normal Incidence of Engine Cover made of Foamed Resin Material

最後に、最大の吸音性能を得る材料特性を導出するために、固体相に関する全ての特性値  $w_f$ ,  $\phi$ ,  $E_0$ ,  $\rho$ ,  $\eta$  を設計変数とした場合の計算事例を示す。目的関数は先ほ

どと同様 1kHz ~ 5kHz における垂直入射吸音率の平均値とした。スタディ数  $N=600$  として、遺伝的アルゴリズムにより得られた目的関数を最大化する設計変数を Table 2 に示す。また、このときの垂直入射吸音率算出結果を Fig. 11 に示す。1kHz 以上の吸音率がほぼ 0.9 と、ねらいの周波数帯域において平坦で高い性能を示している。非常に小さなセルサイズ  $84.7\mu\text{m}$  を実現することによって、高い吸音性能を達成できる可能性があることを示唆している。

Table 2 Material Properties that Maximize Sound Absorption Performance

Cell size $w_f$ [ $\mu\text{m}$ ]	Porosity $\phi$	Young's Modulus $E_0$ [MPa]	Density $\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	Loss Factor $\eta$
84.7	0.989	152	1,069	0.395

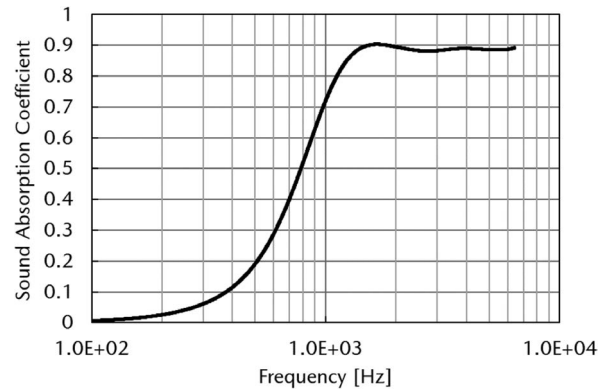


Fig. 11 Calculated Sound Absorption Coefficients for Normal Incidence using Properties in Table 2 (1kHz – 5kHz avg. 0.87)

#### 4. まとめ

本稿では、材料 MBR の考え方に基づき開発した、所望の音響性能を得るために必要な多孔質吸音材微視構造を高精度かつ効率的に設計する技術の概要と、本技術を自動車の吸音部品開発に適用した事例について報告した。より高い性能の吸音材を開発するためには、多孔質材のセルサイズのばらつきを小さくし、ねらいのサイズにするための製造方法の開発が必要である。

一方、今後ますます厳しくなる燃費規制をクリアして環境負荷を大きく低減しつつ、お客様価値を向上させていくためには、コスト・重量効率を飛躍的に向上させていかななくてはならない。このためには部品の高機能化に加え多機能化が必須である。材料 MBR のアプローチを断熱性能など他性能に対する材料設計にも適用して、多機能統合材料実現のための複数機能同時制御設計技術の構築を進めていく。

## 参考文献

- (1) 伊藤 ほか：新型 MAZDA3 の静粛性開発について，[マツダ技報](#)，No.36, pp.96-101 (2019)
- (2) 永本 ほか：新型 CX-5 の静粛性開発について，[マツダ技報](#)，No.34, pp.20-24 (2017)
- (3) 清水 ほか：新型 CX-9 の静粛性開発について，[マツダ技報](#)，No.33, pp.33-38 (2016)
- (4) 坂手：自動車の革新を支える材料技術への期待と課題～材料モデルベースリサーチによる挑戦～，自動車技術会春季大会フォーラムテキスト，pp.31-38 (2019)
- (5) 寺田 ほか：均質化法入門，丸善 (2003)
- (6) T. Yamamoto, et al.: A generalized macroscopic model for sound-absorbing poroelastic media using a homogenization method, *Comput. Methods in Appl. Mech. Eng.*, Vol.200, pp.251-264 (2011)
- (7) M.A. Biot: Theory of propagation of elastic waves in a fluid-saturated porous solid., *J. Acoust. Soc. Am.*, Vol.28, pp.168-191 (1956)
- (8) 山本 ほか：均質化法による吸音材微視構造の最適設計法，No.72-18，自動車技術会春季大会講演予稿集 (2018)
- (9) 山川 ほか：均質化法による発泡樹脂吸音材の材料内部構造モデル化技術の開発，No.152-19，自動車技術会秋季大会講演予稿集 (2019)
- (10) J.F. Allard, et al.: *Propagation of Sound in Porous Media*, Wiley (2009)
- (11) JIS A 1405-2：音響管による吸音率及びインピーダンスの測定一第 2 部：伝達関数法，日本産業規格 (2007)
- (12) M.M. Tomadakis, et al.: Viscous Permeability of Random Fiber Structures: Comparison of Electrical and Diffusional Estimates with Experimental and Analytical Results, *J. Compos. Mater.*, Vol.39(2), pp.163-188 (2005)
- (13) C. Boutin, et al.: Estimates and bounds of dynamic permeability of granular media, *J. Acoust. Soc. Am.*, Vol.124, pp.3576-3593 (2009)
- (14) 見坐地 ほか：繊維体吸音材の Biot パラメーターの推定，自動車技術会論文集，49 巻，pp.787-792 (2018)
- (15) 山本 ほか：均質化法による多孔質吸音材の等価特性の導出，日本機械学会論文集 C 編，77 巻，pp.75-78 (2011)
- (16) 幸徳 ほか：SKYACTIV-X 用熱マネージメント技術，[マツダ技報](#)，No.36, pp.32-37 (2019)
- (17) 神田 ほか：SKYACTIV-X NVH 技術，[マツダ技報](#)，No.36, pp.38-43 (2019)

## ■著者■



山川 啓介



桂 大詞



山本 崇史