

論文・解説

25

## 材料モデルベースリサーチ (MBR) による多孔質材料の 振動制御モデル技術の開発

### Development of Vibration Control Model Technology for Porous Materials by Material Model Based Research (MBR)

山川 啓介 <sup>*1</sup> Keisuke Yamakawa	桂 大詞 <sup>*2</sup> Daiji Katsura	山本 崇史 <sup>*3</sup> Takashi Yamamoto	井上 実 <sup>*4</sup> Minoru Inoue	畠山 望 <sup>*5</sup> Nozomu Hatakeyama
三浦 隆治 <sup>*6</sup> Ryuji Miura	岡島 淳之介 <sup>*7</sup> Junnosuke Okajima	稲葉 賢二 <sup>*8</sup> Kenji Inaba	石澤 由紀江 <sup>*9</sup> Yukie Ishizawa	遊川 秀幸 <sup>*10</sup> Hideyuki Yukawa
伊東 博之 <sup>*11</sup> Hiroyuki Ito	石元 孝佳 <sup>*12</sup> Takayoshi Ishimoto	大下 浄治 <sup>*13</sup> Joji Ohshita		

#### 要約

マツダでは、クルマの価値を向上させ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) の考え方にに基づき、多機能同時制御モデル技術の開発を進めている。これまでに、車室内の静粛性や快適性に寄与する多孔質材料に対して、限られた質量と容積の中でねらいの吸音機能、断熱機能を実現するために、その微視構造を効率的に設計する技術を開発した。今回、これまで構築した技術を応用して、新たに防振機能設計のための基礎的な微視構造モデルを構築し、主要因子である弾性の発現メカニズムを検討したので報告する。

#### Abstract

Mazda has been developing multi-functional simultaneous control model technology based on the concept of material model-based research (MBR), which efficiently develops innovative materials that lead to enhance vehicle value. Up to this point, for porous materials that contribute to quietness and comfort in the cabin, we have developed a technology to efficiently design their micro-structures in order to achieve the targeted sound absorption and heat insulation functions within a limited mass and volume. In this paper, we report on the development of a new fundamental microstructure model for controlling vibration isolation function by applying the technology we have developed so far, and on the mechanism of elasticity, the main factor in the design of vibration isolation functions.

**Key words** : Vibration isolation, Quietness, Porous material, CAE simulation, Homogenization method

#### 1. はじめに

2050年カーボンニュートラルに向けて、マツダでは更なるエネルギー効率向上や軽量化のための技術開発を加速している。その一方で、自動車の室内においては、お客様にとって安全・安心かつ快適な移動環境をサポートする静粛性、空調性能、乗り心地などの快適性も同時

に高次元で成り立たせなければならない。限られた質量・空間・コストの中でこの要求を満たすためには、防音、断熱、防振などの複数機能を高いレベルで統合した部品を設計・製造する必要がある。

このような中マツダは、平成30年度地方大学・地域産業創生交付金事業に採択された「ひろしまものづくりデジタルイノベーション創出プログラム」に参画し、モ

\*1,2,10 技術研究所  
Technical Research Center

\*4 装備開発部  
Interior & Exterior Components Development Dept.

\*11 (株)東洋シート  
TOYO SEAT Co., Ltd.

\*3 工学院大学  
Kogakuin University

\*5~9 東北大学  
Tohoku University

\*12,13 広島大学  
Hiroshima University

データベースリサーチを活用した材料の研究開発プロジェクトに取り組んでいる<sup>(1)</sup>。

材料のデータベースリサーチとは、必要機能からのバックキャストにより材料開発を効率的に行う研究手法<sup>(2)</sup>のことで、材料の微視構造内部で生じている現象をそのメカニズムに基づいた数式でモデル化し、所望の部品特性に対する微視構造レベルでの材料の制御因子を明らかにして、必要機能を発現する微視構造設計を行うものである。

著者らは、吸音材、断熱材及び防振材料として活用されている多孔質材料に焦点を当て、三つの性能が背反することなく高い次元で成立する材料制御モデル技術の開発を目指している (Fig. 1)。これまでに、多孔質材料を周期構造と仮定し、その微視構造で生じる現象からマクロ構造における特性を導出する手法である均質化法<sup>(3)</sup>を用い、多孔質材料の微視構造から吸音特性と断熱性能を予測する手法を構築した<sup>(4)(5)(6)</sup>。微視構造スケールとしては一般的な吸音材、断熱材として用いられる多孔質材の空隙サイズである数 $\mu\text{m}$ ～数百 $\mu\text{m}$ を対象としている。吸音特性については、この手法を利用して、所望の特性を得るのに必要な多孔質材の微視構造を低計算コストで効率的に設計する手法<sup>(7)(8)</sup>を構築し、自動車のエンジンカバーの吸音部品に適用した<sup>(9)(10)</sup>。

今回、多孔質材の防振機能設計のための基礎的な微視構造モデルを構築し、主要因子である弾性の発現メカニズムを検討した<sup>(11)</sup>ので報告する。

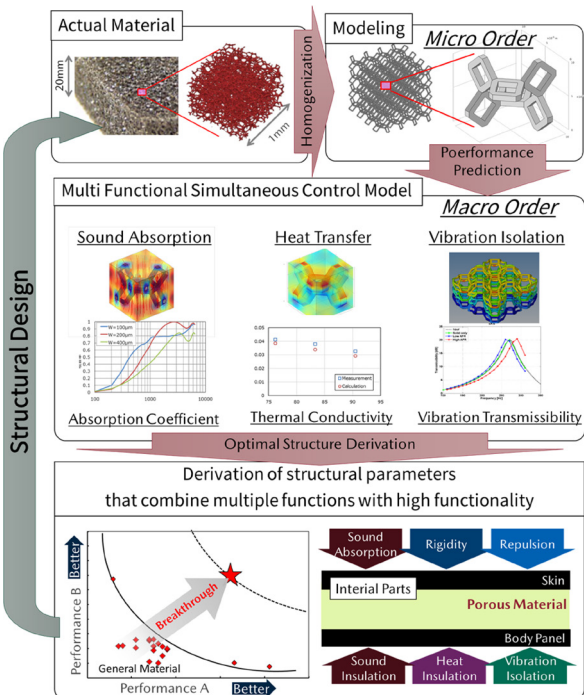


Fig. 1 Approach to Development of High Performance and Multi-functional Material by Model Based Research

## 2. 多孔質材の微視構造モデル構築

本研究の対象とする振動現象は二つである。一つはフロアパネルなどの車体パネルに伝わる数十 Hz から数百 Hz の現象で、車室内へ音を放射するもしくは足裏で直接感じる振動である。もう一つはシートを介して乗員の身体に伝搬する乗り心地性能に関わる現象で、数 Hz から十数 Hz の振動である。

前者は繊維や発泡樹脂で構成されたフロアマットをばね、表皮をマスとしたばね-マス系、後者は発泡樹脂製シートをばね、人体荷重をマスとしたばね-マス系の防振構造により振動が抑制されている。ばね-マス防振系の振動伝達率の理論式<sup>(12)</sup>と周波数特性グラフを式 (1) と Fig. 2 に示す。

$$\tau_{\text{vib}} = \sqrt{\frac{1 + \left(2\zeta \frac{f}{f_0}\right)^2}{\left(1 - \frac{f^2}{f_0^2}\right)^2 + \left(2\zeta \frac{f}{f_0}\right)^2}} \quad (1)$$

ただし、 $f$ : 周波数、 $f_0 = (1/2\pi)\sqrt{k/m}$ : 系の共振周波数、 $\zeta$ : 臨界減衰比、 $m$ : 質量、 $k$ : ばね定数である。

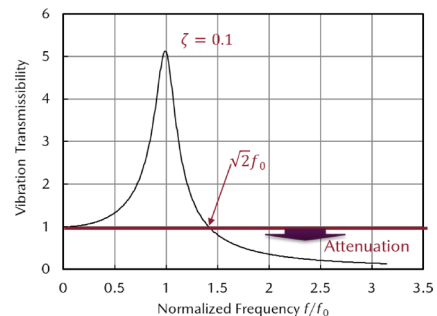


Fig. 2 Vibration Transmissibility Normalized by Resonance Frequency: Critical Damping Ratio  $\zeta=0.1$

Fig. 2 から分かるように、防振のコンセプトは、系の共振周波数をできるだけ低くして、防振される周波数帯域を広くとることである。振動を大きく増幅する共振周波数  $f_0$  が車室内音場やシートの骨格構造、人体などの他の系の共振周波数と重ならないように正確に制御することが重要である。したがって、多孔質材による防振設計をする場合、その弾性を正確に予測することが重要である。

多孔質材中を伝わる振動現象を正確に予測するためには、その骨格部分に伝わる振動と流体に伝わる空気振動の相互作用を考慮する必要がある<sup>(13)</sup>。また、シートのように人が座ることにより比較的大きな歪みが生じた状態での弾性は無荷重の時とは異なるため、大変形を考慮した非線形な弾性特性も考慮する必要がある。

以上より、本研究では、骨格と流体との相互作用を考慮した線形領域の振動モデルと大変形を考慮した非線形領域の振動モデルの構築を行った。

2.1 固体相と流体相の相互作用を考慮した線形振動モデル

多孔質材内部を伝搬する振動は固体相である骨格部に生じる振動と流体相に生じる振動が相互に影響しながら伝わっていく。前述のように、これまでに音響エネルギーが多孔質材内部で熱エネルギーに変換される吸音現象を模擬するために、材料を周期構造と仮定して均質化法によって固体相と流体相の相互作用を考慮したモデル化を行った<sup>(4)</sup>。吸音現象と今回取り扱う振動伝搬現象との違いは、入力音が音響加振であるか構造加振であるかの違いであり、エネルギー伝搬のメカニズムは同じである。そこで加振条件のみを構造加振に変更し、同じモデルを用いて振動伝搬現象を模擬した。Fig. 3 にモデル化の概要を示す。

まず微視構造における骨格と流体の相互作用を考慮した定式化 ((1) 固体相弾性場, (2) 流体相流れ場, (3) 流体相熱伝導場 (対流, 輻射はなし), (4) 固体-流体間の界面での変位・応力・温度の連続条件) を行う。これを有限要素法 (FEM) によって解いて、マクロな等価弾性率などの均質化特性を導出する。その均質化特性を用いた多孔質材料とパネル等で形成される巨視的なばね-マス系を有限要素法によってモデル化する。これを解いて系の振動伝達特性が求められる。

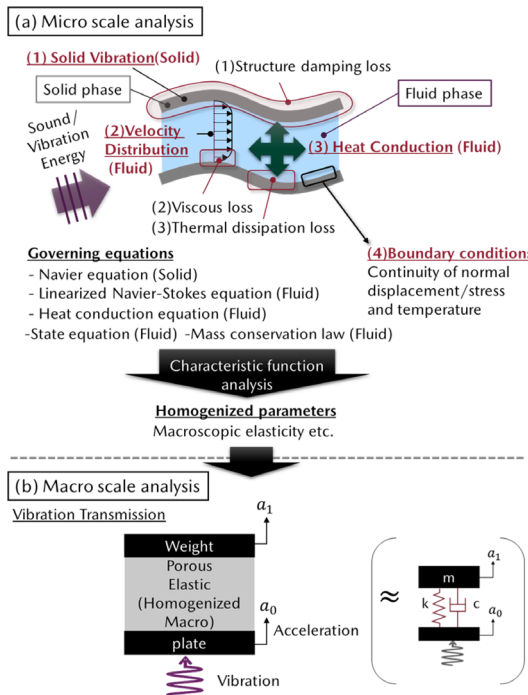


Fig. 3 Schematic View of Linear Vibration Analysis Model by Homogenization Method

今回の検討では一般的な防振材に使われる発泡ウレタンを対象とする。微視スケールでの構造モデルとして、その骨格モデルとして良く用いられる Kelvin セルを採用する (Fig. 4)。

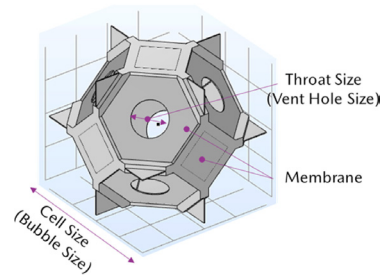


Fig. 4 Kelvin Cell Model for Linear Vibration Analysis of Foamed Porous Material in Micro Scale

また、振動伝達率  $\tau_{vib}$  を次式のように伝達側パネルの加速度と加振側パネルの加速度の比で定義する。

$$\tau_{vib} = \frac{a_1}{a_0} \tag{2}$$

2.2 大変形を考慮した非線形静解析モデル

シートのように人間が座ることを前提とした部材の振動伝達制御を考える場合、荷重により多孔質材が圧縮された状態での弾性特性が重要である。共振周波数を高精度に制御するには、歪みに応じた基材の弾性率を予測する必要がある。線形領域外の大変形を考慮した非線形解析を行い、準静的な応力歪み特性を得なければならない。また、発泡樹脂材のような多孔質材の場合、大きな荷重が加わると骨格部分が座屈しながら他の骨格部分と接触をしつつ変形をしていくため、座屈や多数点での接触解析を行う必要がある。このためこのような現象を取り扱える汎用有限要素法解析ソフト Abaqus<sup>(14)</sup> を用いることとした。材料と形状の非線形性を考慮し、かつペナルティ法による一般接触の定義によって接触発生箇所・順序及び複雑な変形による相互接触状態を予測できるよう静解析を行う。Fig. 5 に概要を示すように、この非線形静解析により得られる応力歪み特性から必要な荷重域での弾性率を求め、振動伝達率の解析を行う。

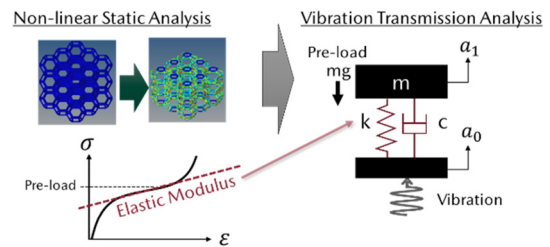


Fig. 5 Schematic View of Non-linear Vibration Analysis Model

対象とする材料は、シート用基材として一般的な軟質発泡ウレタンである。セル構造としては 2.1 のモデルと同様 Kelvin セルを用いるが、シート用のウレタンの骨格には膜がほとんど残っていないため、Fig. 6 のように骨格だけの Kelvin セルを用いる。

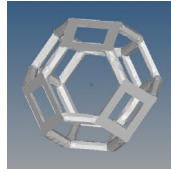


Fig. 6 Kelvin Cell Model for Nonlinear Compressive Analysis (Porous Foam without Membrane)

### 3. 解析結果

#### 3.1 固体相と流体相の相互作用を考慮した線形振動解析

前述のように多孔質材中を伝搬する振動を正確に予測するためには、固体相と流体相の相互作用を考慮しなければならない。ここでは振動伝達の主要な制御因子である多孔質材の弾性に対して、固体相と流体相がどのように影響するかを検討する。まず最初に流体相の有無による影響検討を行う。続いて多孔質材料の吸音機能の主要な制御因子の一つである流れ抵抗<sup>(13)</sup>が振動伝達に与える影響検討を行う。Fig. 7 に巨視スケールでの振動伝達率の解析モデルを示し、Table 1 に微視構造の固体相（ポリウレタン）の物性値を示す。

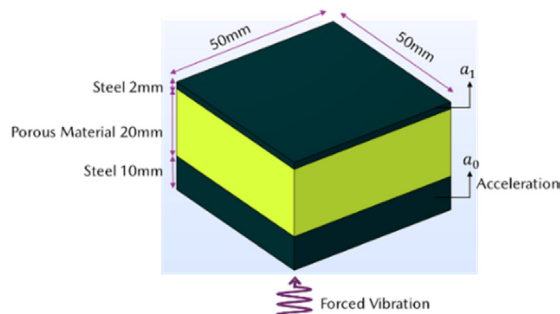


Fig. 7 Vibration Transmission Analysis Model of Foamed Porous Material in Macro Scale

Table 1 Material Properties of Solid Phase (Polyurethane) for Analysis in Micro Scale

Young's Modulus [MPa]	Poisson's Ratio	Density [kg/m <sup>3</sup> ]	Loss Factor
24	0.35	1280	0.1

まず、流体相がある場合とない場合（真空相当）で多孔質材のマクロな振動伝達特性がどのように変化するかを検討した。ユニットセルサイズは防振材として一般的なサイズの400 $\mu$ m、骨格サイズは27 $\mu$ mとした。六角形の膜部分のみに5 $\mu$ mの通気孔が空いているものとした。このときの空隙率（流体相の割合）は0.95である。

微視スケールでの均質化特性解析結果をTable 2に、巨視スケールでの振動伝達率解析結果をFig. 8に示す。流体相がない場合は10%程度共振周波数が低下しており、マクロな弾性率の低下が伺える。つまり、多孔質材のマ

クロな弾性率には固体相の弾性だけでなく流体相の等価体積弾性率も影響しており、本モデルのように両相の相互作用を考慮しなければ正確な弾性率が予測できないことが示唆される。

Table 2 Analysis Results of Homogeneous Properties of Kelvin Cell (Cell Size: 400 $\mu$ m, Throat Size: 5 $\mu$ m, Porosity: 0.95)

Solid Phase	Effective Elastic Modulus [MPa]	0.449
Fluid Phase	Flow Resistivity [Pa $\cdot$ s/m <sup>2</sup> ]	2.06 $\times$ 10 <sup>6</sup>
	Effective Bulk Modulus [MPa]	0.102

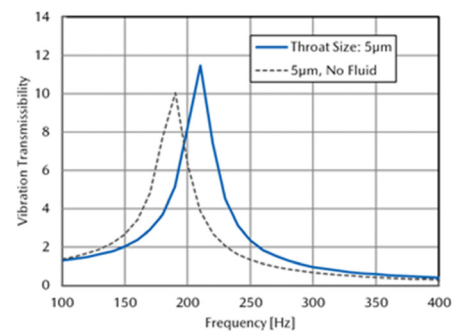


Fig. 8 Analysis Results of Vibration Transmissibility: Comparison between With and without Fluid Phase

この影響を考察するために式(1)の振動伝達率の解析解を用いて検討を行った。固体相と流体相の等価弾性率からそれぞれのばね定数を算出した。固体相のばねのみを考慮した場合及び固体相と流体相のばねの並列ばねとして表した場合の解析結果をFig. 9に示す。解析解の結果と均質化法によるマクロ解析の結果は一致しており、流体相も考慮した多孔質材のマクロな弾性率は、固体相と流体相の等価弾性率の和になっていることが分かる。

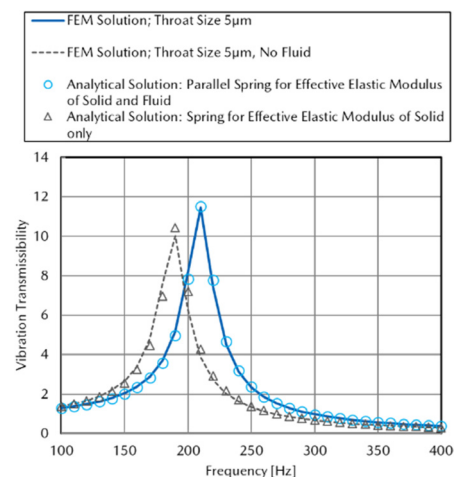


Fig. 9 Analysis Results of Vibration Transmissibility: Comparison of FEM Solution and Analytical Solution with and without Fluid Phase

続いて吸音機能の制御因子である流れ抵抗がマクロな弾性率に与える影響を検討する。これまでの研究<sup>(9)</sup>から、Fig. 4 に示すユニットセルの膜の通気孔のサイズの違いにより、固体相の弾性率や流体が通り抜けるときの通気抵抗が変化することが分かっている。ユニットセルサイズは400 $\mu\text{m}$ 、骨格サイズは27 $\mu\text{m}$ で固定とし、六角形の膜部分のみに5 $\mu\text{m}$ 、50 $\mu\text{m}$ 、100 $\mu\text{m}$ 、200 $\mu\text{m}$ の通気孔が空いているときの計4ケースについて解析を行った。

微視構造解析により算出された均質化特性（固体相の等価縦弾性率、流体相の単位厚流れ抵抗及び等価体積弾性率）をTable 3に示す。固体相の等価縦弾性率及び流体相の流れ抵抗は孔径が大きくなるほど低下しており、これは孔径が大きくなることにより、それぞれ構造としての強度が低下したこと及び通気がしやすくなったことに起因するものと考えられる。一方、流体相から固体相への熱伝導によって変化する流体部の等価体積弾性率<sup>(13)</sup>の値は通気孔径によらずほぼ同じである。これは流体と固体の接触面である固体相の表面積に大きな差が無かったためと考えられる。

Table 3 Analysis Results of Homogeneous Properties of Kelvin Cell (Cell Size: 400 $\mu\text{m}$ )

Throat Size [ $\mu\text{m}$ ]		5	50	100	200
Porosity		0.950	0.951	0.953	0.960
Solid Phase	Effective Elastic Modulus [MPa]	0.449	0.422	0.363	0.245
	Flow Resistivity [ $\text{Pa} \cdot \text{s}/\text{m}^2$ ]	$2.06 \times 10^6$	$5.11 \times 10^5$	$6.84 \times 10^5$	$7.51 \times 10^3$
Fluid Phase		0.102	0.102	0.102	0.102

次に巨視スケールでの振動伝達率解析結果をFig. 10に示す。気孔径が大きいほど振動伝達の共振周波数が低下している。ここでこの共振周波数変化に対する固体相の等価縦弾性率と流体相の流れ抵抗の寄与度を確認するために、通気孔径200 $\mu\text{m}$ の等価縦弾性率が5 $\mu\text{m}$ の場合と等しくなるように、初期値として与える骨格の弾性率を調整したときの振動伝達率解析を行った。解析結果をFig. 11に示す。両者の解析結果は一致しており、多孔質材のマクロな弾性率は、流体相の流れ抵抗には依存せず、流体相及び固体相の等価縦弾性率で決まることが分かる。

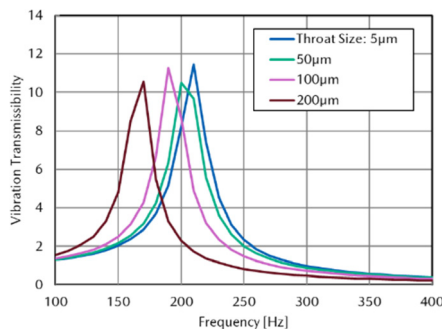


Fig. 10 Analysis Results of Vibration Transmissibility: Comparison of Different Throat Sizes

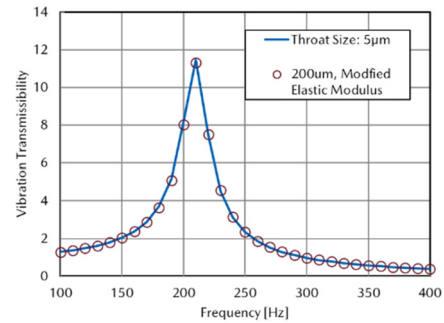


Fig. 11 Analysis Results of Vibration Transmissibility: Modified One Input Young's Modulus so that Homogeneous Effective Elastic Modulus is the Same

以上より、防振設計に重要な共振周波数を決める多孔質材のマクロな弾性率は、固体相と流体相の等価弾性率の和となっており、流体相の流れ抵抗は寄与していないことが分かった。

### 3.2 大変形を考慮した非線形静解析

シートに人が座るときのような大きな荷重が多孔質材にかかる場合、そのマクロな弾性は非線形な挙動を示すことが知られている。ねらいの荷重がかかったときに想定した弾性になるかどうか、防振設計においては非常に重要となる。ここでは構築した非線形静解析モデルを用いて、弾性の非線形な挙動の予測とそのメカニズムの推定を行う。

Fig. 6に示すKelvinセルに対して、固体相の座屈や固体相同士の接触が生じるような大荷重がかかった圧縮時のマクロな見かけ弾性率を導出するために、非線形圧縮解析を行う。固体相の微視的な弾性率としては、市販の熱可塑性ポリウレタンの応力歪み特性の実測結果 (Fig. 12)を用いた。

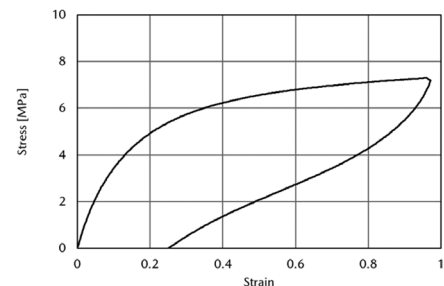


Fig. 12 Measured Nominal Stress-strain Properties of Thermoplastic Polyurethane Used in Analysis

座屈と多数の接触を考慮する解析を安定的に行うには高い計算コストがかかるため、できるだけセルの数を減らす必要がある。そこで面内方向への変位の伝わり方も最低限観察できるように、面内方向には3 $\times$ 3=9個だけのセルを配置し、その側面の境界面にのみ対称境界条件を設定することとした。また、高さ方向については事前にセルの数を1段、3段、24段、100段と変化させたとき

の応力歪み特性を解析した。100 段というのは実測で用いるテストピースの最大厚 (500 $\mu$ m $\times$ 100=50mm) を想定した高さである。解析結果を Fig. 13 に示す。このように、3 段ではほぼ 100 段と同じ値に収束することが分かった。この結果と計算時間も考慮して、今後の解析は 3 $\times$ 3 $\times$ 3=27 個のセルに対して行うこととした。

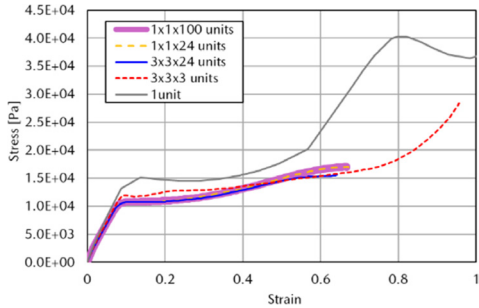


Fig. 13 Analysis Results of Stress-strain Properties: Comparison of the Number of Cells in Height Direction

解析するユニットセルのサイズは後述のテストピースとほぼ同等の 500 $\mu$ m で固定とし、骨格の太さを変えて空隙率を 85%, 90%, 95% と変化させたときの応力歪み特性の解析結果を Fig. 14 に示す。またウレタンテストピース (平均気泡径 450 $\mu$ m, 空隙率 94%, 直径 100mm, 厚さ 50mm) の応力歪み特性の実測結果を Fig. 15 に示す。

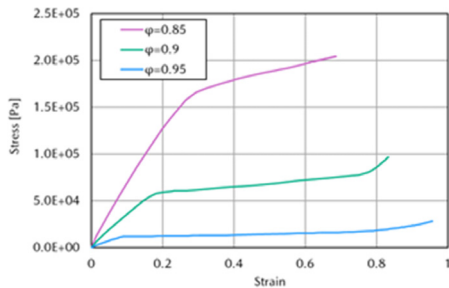


Fig. 14 Analysis Results of Stress-strain Properties: Comparison of Porosity  $\phi$  Differences (Cell Size: 500 $\mu$ m)

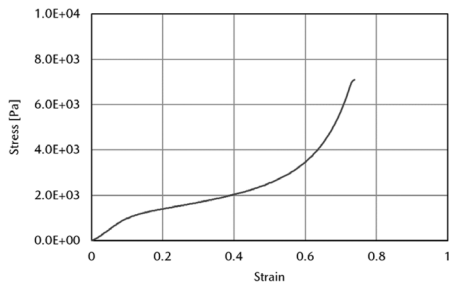


Fig. 15 Measurement Results of Stress-strain Properties: Polyurethane Foam (Average Cell Size: 450 $\mu$ m, Porosity: 0.94, Diameter: 100mm, Thickness: 50mm)

Fig. 14 より、解析結果は空隙率が大きくなる、すなわち骨格が細くなるにしたがって材料の見かけ弾性が下がっていることが分かる。また、空隙率 0.9 及び 0.95 の応力歪み特性は、大きく三段階に分かれて変化していることが分かる。すなわち、歪み量がゼロから増えていくにしたがって最初はほぼ一定傾きで推移していくが、ある歪み量になったときに急激に傾きが小さくなってある程度一定傾きのまま推移し、またある歪み量になったときに傾きが大きくなっている。この傾向は Fig. 15 に示す実測値の傾向と定性的に一致している。このように大変形を生じさせたときの多孔質材のマクロな見かけ弾性は歪み量に応じて大きく変わるため、振動特性を評価する前に、対象部材の評価荷重に対応した弾性率を把握する必要がある。

一方で、Fig. 14 の空隙率 0.95 の解析結果と Fig. 15 の実測結果 (空隙率 0.94) を比較すると、縦軸のスケールが一桁異っており、解析結果の弾性率 (グラフの傾き) の方が数倍から 10 数倍程度大きい傾向を示し、定量的な予測精度には課題を残す。原因としては、まず骨格の応力歪み特性を Fig. 12 のように発泡していない熱可塑性ポリウレタンの特性で代用していることが考えられる。また実物の気泡形状と Kelvin セルの形状に差異があることなども考えられる。今後の課題として、前者については発泡ウレタンの実物の弾性率を測定する方法を、後者については実形状をどのように単純化してモデル化するか検討中である。

弾性が三段階に変化するメカニズムを推定するために、空隙率 95% の時の応力歪み特性解析結果と変形モード・応力分布・接触面分布を合わせて Fig. 16, 17 に示す。最初の傾き (図中の①) ではセルが線形に圧縮されているが、最初の変曲点において 2 段目のセルに応力が集中しはじめ (図中の②)、座屈が始まる様子が伺える。更に変形が進むと上下段のセルも座屈し、骨格がつぶれて他の骨格と接触し始め (図中の③)、完全に骨格がつぶれた (図中の④) 後に、また曲線の傾きが大きくなっている (図中の⑤)。

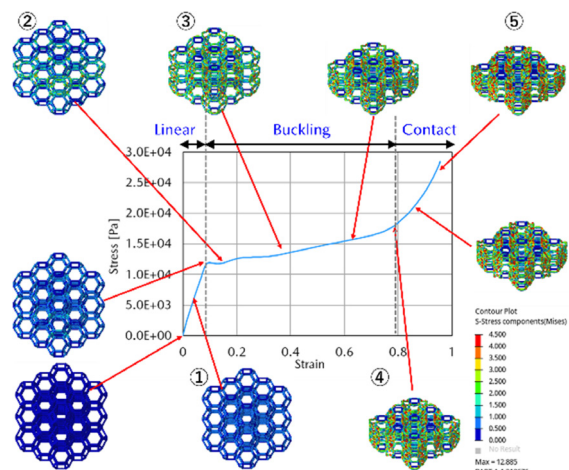


Fig. 16 Stress-strain Properties and Deformation by Analysis (Cell Size: 500 $\mu$ m, Porosity: 0.95)

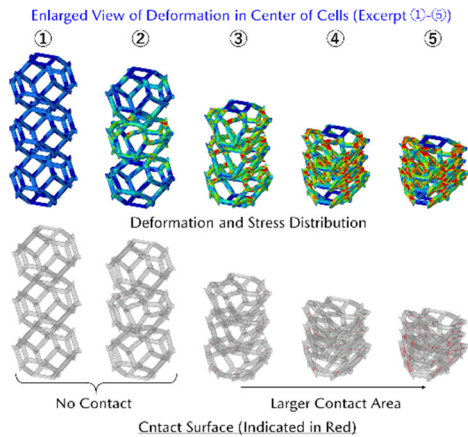


Fig. 17 Deformation and Contact Surface Distribution of Cells According to Stress Values by Analysis  
(① to ⑤ Correspond to Those in Fig. 16)

今後モデルの精度を高めて、想定される荷重範囲に対してねらいの弾性をロバストに発現できるように、変曲点の位置を制御できるような因子を導出できるようにする。そして別途構築中の発泡樹脂材料の工法モデル<sup>(15)</sup>と組み合わせ、ねらいの特性をもつ材料開発を行っていく。

#### 4. おわりに

本稿では、材料モデルベースリサーチのアプローチにより、静粛性に関わる低中周波域の微小線形変形領域及び乗り心地性能に関わる低周波域の大変形領域における振動を制御する多孔質材料の微視構造設計のための基礎モデル技術について報告した。今後、本技術の精度の検証と向上を実施するとともに、これまで構築してきた吸音・断熱特性予測モデルと組み合わせ、吸音・断熱・防振機能の同時制御モデルを構築して、質量・空間・コストの要件も満たしながら、全機能を高い次元で両立させる革新的多孔質材料の開発に活用していく。

#### 参考文献

- (1) 広島大学 デジタルものづくり教育研究センター,  
<https://hudmerc.hiroshima-u.ac.jp/>
- (2) 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 (2019)
- (3) 寺田ほか：均質化法入門, 丸善 (2003)
- (4) 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)
- (5) 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.75-88 (2011)
- (6) 桂ほか：モデルベースリサーチ (MBR) による熱マネ・NV 制御材料モデル技術の開発 第 1 報, 自動車技術会学術講演会予稿集 (2021)
- (7) 山本ほか：均質化法による吸音材微視構造の最適設計法, 自動車技術会学術講演会予稿集 (2018)
- (8) 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, 自動車技術会学術講演会予稿集 (2019)
- (9) 山川ほか：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, [マツダ技報, No.37, pp.75-80 \(2020\)](#)
- (10) 神田ほか：SKYACTIV-X NVH 技術, [マツダ技報, No.36, pp.38-43 \(2019\)](#)
- (11) 山川ほか：モデルベースリサーチ (MBR) による振動制御材料モデル技術の開発, 自動車技術会論文集, Vol.53, No.5, pp.886-891 (2022)
- (12) 前川ほか：建築・環境音響学, 共立出版, 2011, p.137
- (13) J.F. Allard, et al.: *Propagation of sound in porous media*, Chapter 6, Wiley (2009)
- (14) Dassault Systems: *Abaqus United FEA* (2021)
- (15) 石澤ほか：モデルベースリサーチ (MBR) による熱マネ・NV 制御材料モデル技術の開発 (第 3 報)～発泡樹脂材の気泡制御工法モデル技術の構築～, 自動車技術会学術講演会予稿集 (2023)