

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 21 日現在

機関番号：32613

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26420590

研究課題名(和文)多孔質材の微視構造モデリングとマルチスケール解析による吸音率の微視構造依存性解明

研究課題名(英文) Micro structure modeling and its effect to sound absorption by homogenization method

研究代表者

山本 崇史 (Yamamoto, Takashi)

工学院大学・工学部・准教授

研究者番号：30613640

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,900,000円

研究成果の概要(和文)：研究代表者が開発した多孔質吸音材に拡張した均質化法を用いて、代表的な発泡材料および繊維材料の微視構造モデルをSEM画像をもとに作成し、垂直入射吸音率を算出し、実験値と比較した結果良く一致した。なお、モデル作成には水銀圧入法による平均孔径値も参考とした。また、発泡材料についてはユニットセルの大きさ、空孔径、セル間薄膜にある空孔、繊維材料については繊維径やその圧縮率について垂直入射吸音率への影響を分析した。それらの結果から、微視構造の形状や寸法の定量的な効果を明らかにすることができた。近年多孔質吸音材によく適用されている Biot モデルの材料パラメータを均質化法の結果から算出する手法も提案した。

研究成果の概要(英文)：Sound absorption coefficient in poroelastic media depends on microscopic geometries. Sound energy is absorbed by viscous dissipation at the boundary between solid and fluid phase, thermal dissipation to solid phase, and structural damping of elastic material. Multi-scale analysis method for sound-absorbing poroelastic media proposed by one of the authors is applied.

First, we apply the method to artificial poroelastic material with periodic pore of rectangular shape made by 3D printing technique and compare calculated sound absorption coefficient for normal incidence with measured one. Then, we calculate sound absorption coefficients from the microscopic structures. Here we capture the characteristics of micro structure of polyurethane foam and fibrous felt from the observation by SEM such as the pore size, thin membranes of polygonal faces and fiber diameter, and construct unit cell models. Finally, we propose a new method to identify the material parameters used in Biot's model.

研究分野：機械工学

キーワード：吸音材 吸音率 微視構造 繊維径 均質化法

1. 研究開始当初の背景

自動車・船舶などの輸送機器や、建築構造物の内部空間における静粛性を確保するために、多孔質吸音材が広く使われている。それらの性能を示す代表的な特性は吸音率であり、その予測は多孔質吸音材などの設計に欠かすことができない。一般的に多孔質吸音材は、基材となる固体相と、数 μm から数百 μm の幅の流路からなる流体相が混在した構造をしている。吸音現象は、吸音材に入射した音波により基材や流路内部の空気が振動し、基材の材料減衰や、空気の粘性減衰により、音響エネルギーが熱エネルギーに変換され散逸することによって生じる。したがって、吸音性能を表す吸音率は吸音材の微視構造に大きく依存する。

吸音率を予測するためにこれまで使われてきたモデルの一つは、Delany と Bazley による経験則に基づいたモデルである。必要となるパラメータは空気流れ抵抗のみであるが、流体相しか考慮しておらず、さらに流体相の体積分率が 100% に近い繊維系の吸音材にしか適用できない。近年では、Biot, Allard, Atalla らによる微小円管内の音響伝播に対する理論解に基づいたモデル (以降、Biot のモデル) が広く適用されている。このモデルは、固体相と流体相の両方の特性を考慮しており、弾性定数や流れ抵抗など 8 つのパラメータで表現されているが、パラメータは全てマクロスケールで定義されており、実際の微視構造と直接関係付けることはできない。このように、具体的な流路の形状・分布などの微視構造を考慮した力学的・音響的な解析は、これまで定式化がなされておらず、微視構造の吸音率に対する影響は解明されていない点が多い。

2. 研究の目的

本研究では、上述した背景およびこれまでの研究成果をもとに、多孔質吸音材に適用可能なマルチスケール解析を適用して様々な微視構造の吸音率に対する影響を解析的および実験的に調べる。

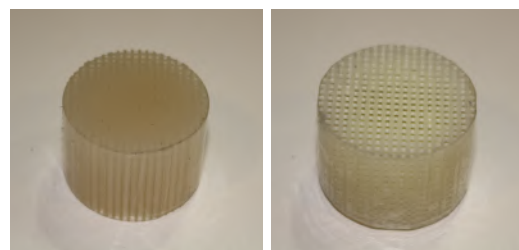
1. 矩形流路を有する微視構造からなる多孔質吸音材モデルを 3D プリンターにより試作する。音響管を導入して吸音率を計測し、実験的に検証する。
2. Kelvin モデルなど理想的なユニットセル形状を有する微視構造からなる場合について、吸音率に対するユニットセル形状の影響を解析的に調べ明らかにする。
3. 明らかにした特徴を反映した微視構造モデルを構築し、パラメータスタディにより吸音率に対する影響を数値解析により明らかにする。
4. パラメータスタディで検討した様々な微視構造モデルの中から、吸音特性の優れた微視構造を選択して 3D プリンターを用いて試作し、実験的にその影響を明らかにする。

3. 研究の方法

1. 予備研究で、単純な矩形形状の流路を有する微視構造からなる吸音材において、流路の大きさと垂直入射吸音率の関係を数値解析により明らかにしている。まず、3D プリンターにより矩形形状の流路を有する微視構造からなる試料を作成し、測定した吸音率と解析値を比較することで実験検証を行う。
2. これまでの予備研究では、単純な矩形形状の流路を有する微視構造を用いて分析しており、他の流路形状の場合にどのような影響があるかまだ不明である。そこで、一般的なポリウレタンフォームの理想的な微視構造として提案されている Kelvin モデルを用いて同様の分析を行い、微視構造のユニットセル形状による影響を明らかにする。
3. 微視構造の特徴を抽出したパラメトリックなユニットセルモデルを作成する。発泡材料は、Kelvin モデルが基本になると考えているが、実際の材料には、セルに膜が残存し気孔が連通していない場合や、膜に微小の穴があいていて気孔が連通している場合などが考えられ、こうした特徴をモデルに反映させるまた、繊維材は径や断面形状に加えて圧縮率に着目する。いずれもモデル構築後に実験値と比較して再現できているかどうかを検証する。
4. 微視構造を変えたときに、どの周波数帯の吸音率がどの程度変化するかを調べるため、微視構造の大きさや流路の幅などのパラメータを変化させてパラメータスタディを行う。他のパラメータとしては例えば、フェルトの繊維径および断面形状、残存膜の割合、残存膜に空いている穴の径などが考えられる。これらの解析結果から微視構造の吸音率に対する影響を定量的に把握する。

4. 研究成果

4. 1 3D プリンターにより造形した周期構造を有する多孔質材による検証



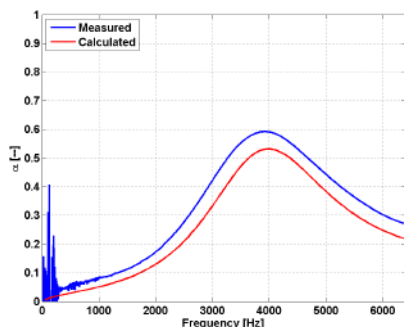
(a) Straight

(b) Orthogonal

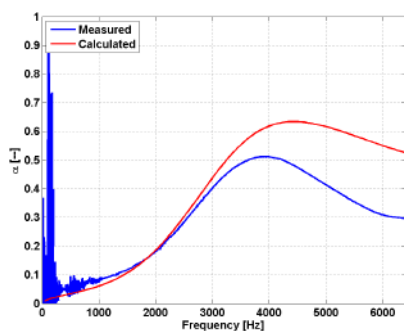
図 1: 3D プリンターにより造形した周期構造を有する多孔質材

図 1 は 3D プリンターにより造形した周期構造を有する多孔質材を示す。いずれも、ユニットセ

ルの大きさは 1.5 mm, 流路の大きさは 1.0 mm, 基材はアクリル樹脂である. (a) は 2 次元的に真っ直ぐな流路, (b) は 3 次元的に直交する流路となっている.



(a) Straight



(b) Orthogonal

図 2: 垂直入射吸音率の比較

図 2(a) は, 2 次元的な流路を有する多孔質材の場合について, 実験値と計算値の比較である. また, 図 2(b) は, 3 次元的な流路を有する多孔質材の場合について, 実験値と計算値の比較である. 両者は若干の乖離はあるが, おおむね良く一致しているのが分かる.

4. 2 ポリウレタンフォームのケルビンセルによるモデル化

ポリウレタンフォームの微視構造モデルとして,

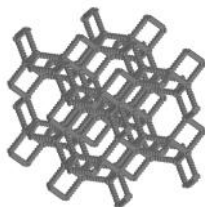


図 3: ケルビンセルモデル

多孔質発泡材料のモデルとして広く用いられているケルビンセルを適用する. ケルビンセルは, 図 3 に示すように, ユニットセルの 1/3 程度の大きさの四角形の空孔と 2/3 程度の大きさの六角形の空孔から構成される. なお, 図 3 では計 8

個のユニットセルを含んでいる.

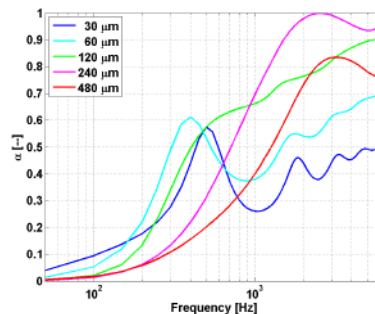


図 4: ユニットセルサイズの影響

図 4 はユニットセルの大きさをモデル上で変化させたときの垂直入射吸音率を示している. ユニットセルサイズの大きさが 240 から 480 μm 程度の際に 3 kHz で吸音率のピークが見られる.

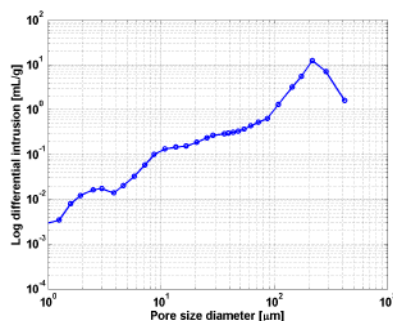


図 5: 水銀圧入法によるセル径分布

図 5 は水銀圧入法による計測した孔径の分布を示しており, 平均孔径は 220 μm であった.

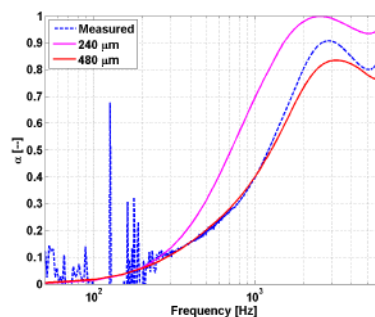
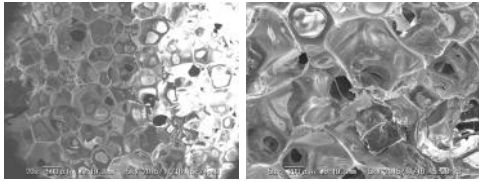


図 6: 垂直入射吸音率の比較

図 6 は, 実測した吸音率と均質化法により算出したケルビンセルフォームの吸音率の比較を示す. ユニットセルサイズの大きさが 480 μm の場合, 実測した吸音率におおむね一致していることが分かる. 矩形孔の大きさが 160 μm , 六角孔の大きさが 320 μm に相当し, 平均孔径は実測値にほぼ一致している.

4. 3 セル間薄膜の影響

図 7 に示すようにポリウレタンフォームなどの発泡材料ではセル間に薄い膜が残存しているものがあり, こうした材料では低中周波数域での吸音特性が優れることが経験的に知られている. セ



(a) (b)

図 7: ポリウレタンフォームのセル間薄膜

ル間全てに薄膜が残存していると空気粒子の運動が妨げられ吸音しないことになるため、実際には、一部のセルに薄膜があったり、薄膜に孔があいている。

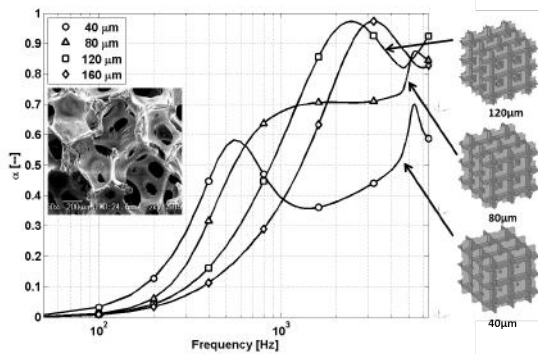


図 8: セル間薄膜にある孔の大きさの影響

ここでは、薄膜に孔があいているとし、その大きさを変更して吸音率への影響を検討した。ユニットセルの形状を矩形、一辺の大きさを $250 \mu\text{m}$ 、薄膜の厚さを $1 \mu\text{m}$ 、薄膜にあいた孔の形状を正方形として、その大きさを $40 \mu\text{m}$ から $160 \mu\text{m}$ まで変えて影響検討した結果を図 8 に示す。図から分かるように同じユニットセルサイズでも薄膜にあいた孔の大きさにより吸音率が大きく変化し、 $80 \mu\text{m}$ 以下の大きさにすると 1 kHz 以下の吸音率が大きくなっている。

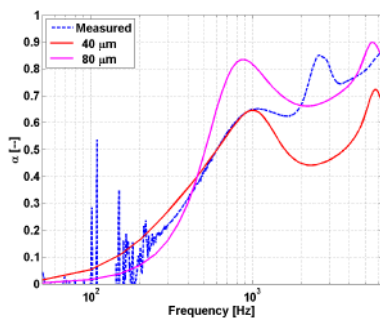


図 9: 実験値との比較

また、図 9 は実験値との比較であり、孔の大きさが $40 \mu\text{m}$ から $80 \mu\text{m}$ のときの結果と傾向が類似している。

4. 4 繊維材繊維径の影響

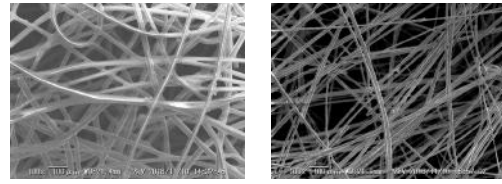


図 10: 繊維材の SEM 画像

図 10 は代表的な繊維材の SEM 画像で、繊維径は数 μm から数十 μm である。

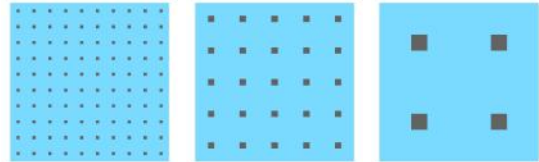


図 11: 繊維サイズ $4 \mu\text{m}$ 、 $8 \mu\text{m}$ 、および $20 \mu\text{m}$ の 2 次元モデル

まず、図 11 に示す 2 次元モデルで、空孔率が一定値 (0.96) で繊維径を $0.2 \mu\text{m}$ から $100 \mu\text{m}$ まで変え、吸音率に対する影響を検討する。なお、基材はポリプロピレンとした。

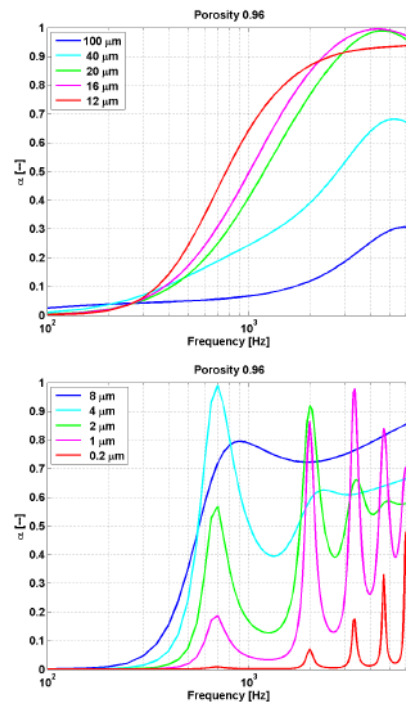


図 12: 繊維サイズの垂直入射吸音率への影響

図 12 は各繊維径に対する垂直入射吸音率で、繊維径 $15 \mu\text{m}$ 程度するとき 2 kHz から 6 kHz で吸音率が大きくなっている。また、繊維径が $5 \mu\text{m}$ 以下になると基材の振動により特定の周波数帯の吸音性能が大きくなる。

図 13 は均質化により得られた空気流れ抵抗値と繊維径の関係を示しており、繊維径・空気流れ抵抗の対数値が比例することが分かる。

4. 5 繊維材圧縮率の影響

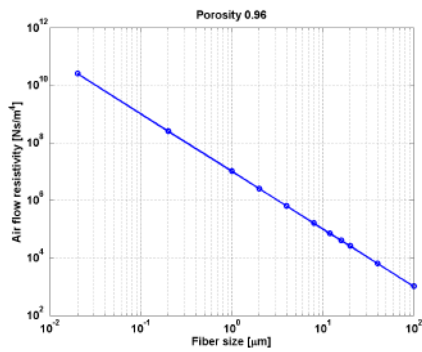


図 13: 繊維サイズと空気流れ抵抗の関係

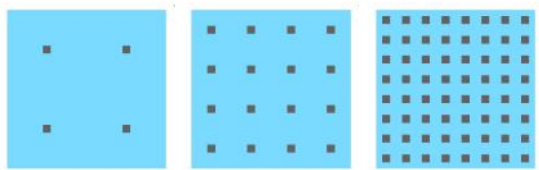


図 14: 繊維サイズ一定 ($20 \mu\text{m}$) で圧縮率の異なる 2 次元モデル (空孔率 0.99, 0.96, および 0.84)

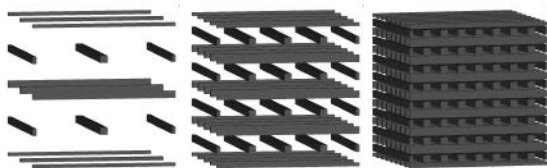


図 15: 繊維サイズ一定 ($20 \mu\text{m}$) で圧縮率の異なる 3 次元モデル (空孔率 0.98, 0.92, および 0.68)

繊維材は圧縮し面密度や空孔率を変えて製品化されることが多い。ここでは、繊維径を $20 \mu\text{m}$ に固定し、隣り合う繊維間の幅を変えることを考える。図 14 は 2 次元、図 15 は 3 次元において圧縮率を変えたモデルであり、2 次元は全繊維が平行、3 次元では簡単のため繊維方向は 0° と 90° のみとする。

図 16 は各圧縮率における吸音率を実線で、得られた空気流れ抵抗から Delany - Bazley モデルで計算した吸音率を点線で示す。空孔率が 0.92 から 0.98 程度までは Delany - Bazley モデルでも表現可能であることが分かる。

内部空気の粘性減衰が吸音エネルギーの大部分を担っていることから、ここでは平均繊維間距離と空気流れ抵抗の関係は、図 17 に示すように平均繊維間距離と空気流れ抵抗の対数値が比例する..

4. 6 Biot パラメータの算出

近年広く適用されている Biot のモデルのパラメータを微視構造から均質化法により算出する方法を検討した。Biot のモデルのパラメータはヤング率、損失係数、質量密度、ポアソン比、空孔率、空気流れ抵抗、トーチュオシティ、粘性特性長、温度特性長の 9 つである。

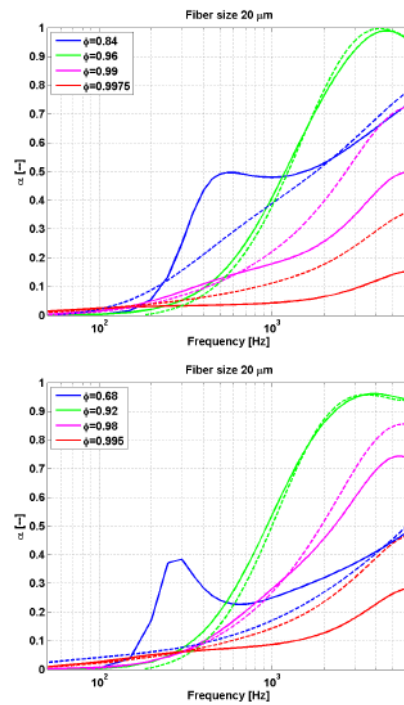


図 16: 圧縮率の吸音率に対する影響と Delany-Bazley モデルによる吸音率の比較

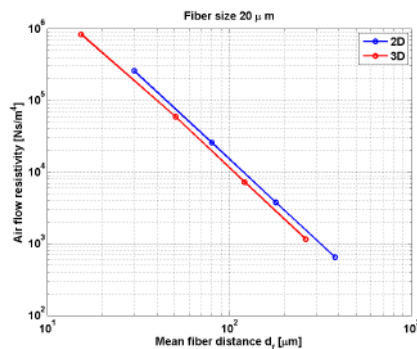


図 17: 平均繊維間距離と空気流れ抵抗の関係

Biot のモデルにおいて固体相は等方性線形弾性体が仮定されているため、均質化法により得られた弾性テンソルと、等方性線形弾性体の弾性テンソルとの残差二乗和を最小となる値を最小二乗法により求める。

空孔率 ϕ は流体相の体積分率であり、有限要素モデルから得られる。空気流れ抵抗は流体相のユニットセル内流れの結果から得られる。トーチュオシティ α_∞ と粘性および温度特性長 Λ, Λ' は Biot のモデルに特徴的な物性であり、均質化法の結果から直接得ることはできない。ここでは、Biot のモデルにおける流体相の等価密度の式が均質化法で求めた等価密度の値に近づくよう、Levenberg - Marquardt 法を用いてトーチュオシティ α_∞ と粘性特性長 Λ を同定する。また、Biot のモデルにおける流体相の等価体積弾性率の式が均質化法で求めた等価体積弾性率の値に近づくよう、温度特性長 Λ' を同定する。

図 18 に示すように $w = 120 \mu\text{m}$ の大きさのユニットセルに $100 \mu\text{m} \times 100 \mu\text{m}$ の矩形流路を有する弾性フレーム吸音材を例に考える。

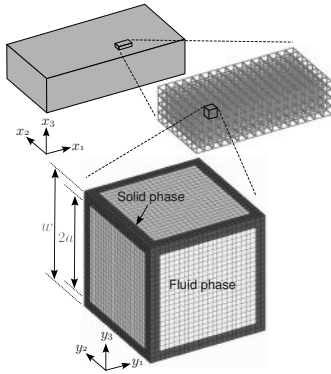


図 18: 矩形流路を有する弾性フレーム吸音材

空孔率 ϕ は 0.926 と容易に求められる。また、空気流れ抵抗は 35.9 kNs/m^4 となる。そして、均質化法において等価密度を 50 Hz から 6.4 kHz まで 50 Hz ごとに評価し、トーチューシティ α_∞ と粘性代表長さ Λ を同定すると $\alpha_\infty = 1.02$, $\Lambda = 53.7 \mu\text{m}$ と求められる。同様に温度代表長さ Λ' を同定すると $87.8 \mu\text{m}$ と求められる。また、ラメの定数 λ と μ は最小二乗法を用いると 69.6 kPa および 57.6 kPa となり、ヤング率 E とポアソン比 ν は $E = 147 \text{ kPa}$ および $\nu = 0.273$ と求められる。

5. 主な発表論文等 (研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 1 件)

T. Yamamoto, Y. Imae, Effect of membranes at microscopic polygonal faces of polyurethane foam by using homogenization method, *Proceedings of 5th Joint Meeting of Acoustical Society of America and the Acoustical Society of Japan*, 5pNSa2 (2016).

[学会発表] (計 12 件)

- [1] T. Yamamoto, Y. Imae, Prediction of sound absorption coefficients from microscopic structures of poroelastic material by homogenization method *Proceedings of International Conference on Technology and Social Science*, (2017).
- [2] 山本 崇史, 今江 勇貴, 多孔質材の均質化法による微視構造の吸音性能に対する寄与分析, 日本音響学会春季研究発表会, 2-3-1, (2017).
- [3] 山本 崇史, 自動車の遮音材・吸音材の構造設計とその評価・最適化, 高分子学会 第 60 回プラスチックフィルム研究会講座, (2017).
- [4] 今江 勇貴, 山本 崇史, 均質化法による繊維系吸音材微視構造の吸音率への影響検討と Biot パラメータの同定, 自動車技術会 関東支部 学術研究講演会, C1-3 (2017).
- [5] 今江 勇貴, 山本 崇史, 均質化法による吸音率予測手法を用いた繊維材の微視構造検

討, 制振工学研究会 技術交流会, SDT16012 (2016).

- [6] 山本 崇史, 今江 勇貴, 多孔質吸音材の均質化法による微視構造からのアプローチ, 日本音響学会建築音響研究会, (2016).
- [7] 今江 勇貴, 山本 崇史, 均質化法による多孔質吸音材微視構造の吸音率への影響検討と最小二乗法による Biot パラメータの同定, 日本機械学会 機械力学・計測制御部門 Dynamics and Design Conference 2016, No. 451 (2016).
- [8] 今江 勇貴, 山本 崇史, 均質化法による多孔質吸音材微視構造の吸音率への影響と妥当性の検証, 自動車技術会 関東支部 学術研究講演会, B2-1 (2016).
- [9] 今江 勇貴, 山本 崇史, 均質化法による吸音率予測手法を用いた多孔質吸音材薄膜の影響検討, 制振工学研究会 技術交流会, SDT15003 (2015).
- [10] 今江 勇貴, 山本 崇史, 吸音材マルチスケール解析の 3D プリンターにより造形した多孔質材料への適用, 日本機械学会 機械力学・計測制御部門 Dynamics and Design Conference 2015, No. 534 (2015).
- [11] T. Yamamoto, Y. Imae, Multi-scale analysis for sound absorption media by using microscopically periodic poroelastic material made by 3D printer *Proceedings of ICSV22*, (2015).
- [12] 今江 勇貴, 山本 崇史, 3D プリンタによる多孔質模型を用いた多孔質吸音材均質化法の実験検証, 制振工学研究会 技術交流会, SDT14017 (2014).

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 件)

名称: 発明者: 権利者: 種類: 番号: 出願年月日: 国内外の別:

○取得状況 (計 0 件)

名称: 発明者: 権利者: 種類: 番号: 取得年月日: 国内外の別:

[その他] ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究代表者

山本 崇史 (Yamamoto, Takashi)

工学院大学・工学部・准教授

研究者番号: 30613640

(2) 研究分担者 ()

研究者番号:

(3) 連携研究者 ()

研究者番号: