

通気性を有する音響メタマテリアルの遮音性能の評価

Evaluation of Sound Insulation Performance of Acoustic Metamaterials with Ventilation

電子・機械技術部 ロボット・制御科 菊地悠介

3D プリンタを用いて通気性を有する音響メタマテリアルを作成し、遮音性能を評価した。また、有限要素法のシミュレーションにより検証を行った。460[Hz]周辺の音の遮音を目的とした音響メタマテリアルを作成したが、実験の結果、630[Hz]から 800[Hz]で遮音効果が大きいことがわかった。シミュレーションで検証したところ、音響メタマテリアルの螺旋状の経路の幅によって遮音される周波数帯の範囲が変わり、遮音効果の大きさのピークが変化することがわかった。

Key words: 音響メタマテリアル、遮音、シミュレーション

1. 緒言

通常、遮音材にはグラスウール等を用いた多孔質材料が用いられるが、遮音する音の波長の 1/4 程度の厚さが必要になり、空間的な制約が発生してしまう¹⁾。また、多孔質材料では開口部を設けることができず、送風ダクト等の通気性が必要な個所に用いることができないという課題がある。

音響メタマテリアルとは、基本的に音の波長よりも短い長さの周期構造により、通常材料とは異なる遮音性能等を発揮するものである。R. Ghaffarivardavagh²⁾らは、ダクト等で用いることが可能な、開口部を設けた音響メタマテリアル消音機を開発し、通気性を持ちつつ、特定の周波数に対して遮音効果を発揮することを示した。また、遮音効果を発揮する周波数は設計のパラメータを変更することで調整できることを示した。

本研究では、R. Ghaffarivardavagh らが開発した音響メタマテリアルを、当所の 3D プリンタを用いて作成し、遮音性能の検証を行った。

2. 音響メタマテリアルの作成

2. 1. 音響メタマテリアルの設計

作成する音響メタマテリアルの外観と断面図を図 1 に示す。円筒形であり、外側に 6 つの螺旋状の経路を持つ。中央の穴を通過する音と螺旋状の経路を通過する音で位相が反転すると、音が干渉によって打ち消し合い、遮音効果を発揮する。よって、螺旋の経路の長さが、遮音したい音の波長の半分と等しくなるように、音響メタマテリアルの内半径 r_1 、外半径 r_2 、厚さ t 及び螺旋の角度 ϕ を定めればよい。

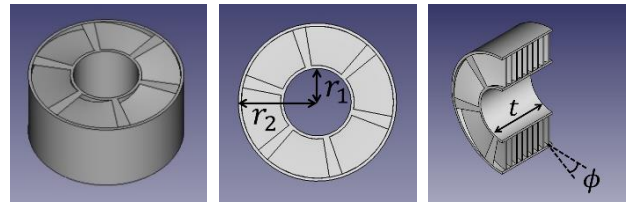


図 1 作製する音響メタマテリアルの外観と断面図

今回は 460[Hz]周辺の音の遮音を目的とし、内半径 $r_1=22.47$ [mm]、外半径 $r_2=52.50$ [mm]、厚さ $t=52.71$ [mm]、螺旋の角度 $\phi=8.2$ [°]で設計した。このとき、螺旋の長さは 369.57[mm]となり、460[Hz]の音の波長 739[mm]の約 1/2 となる。

2. 2. 音響メタマテリアルの作成

音響メタマテリアルの作成には光造形方式 3D プリンタ Form3L を用いた。造形の際に、螺旋状の経路の内部にサポート材が付くことを考慮し、図 2 のように 4 つのパーツに分割し、造形した。造形材料はスタンダードレジン(Clear Resin V4)を使用した。造形したパーツはサポート材を除去した後、造形材料と同じレジンを使用して接着した。試作した音響メタマテリアルを図 3 に示す。

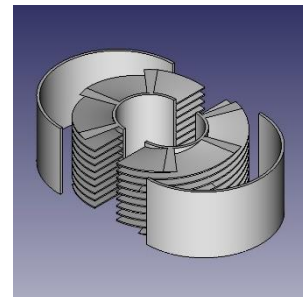


図 2 分割したパーツ



図3 試作した音響メタマテリアル

3. 実験

実験は送風ダクトを想定した、長さ 1060[mm]、直径 105[mm]の塩ビパイプを用いて、当所の無響室にて図4のような配置で行った。



図4 実験の配置

音響メタマテリアルは塩ビパイプの上端に取り付けた。また、スピーカーは塩ビパイプの下端に設置し、接地面からの音の反射を小さくするため、スピーカーの下に吸音材を設置した。測定はスイープ信号を用いて、音響メタマテリアルを取り付ける前後で3回ずつ実施し、1/3 オクターブバンド解析を行った。

4. 結果

4. 1. 実験の結果と比較

音響メタマテリアルを取り付ける前後の1/3 オクターブバンド解析の結果及び音圧レベルの差を表1に示す。また、測定結果の誤差範囲付きグラフ、音圧レベルの差のグラフをそれぞれ図5及び図6に示す。図5のグラフは3回の測定の平均値で、測定の誤差をひげで表した。

表1 測定結果とその比較

周波数[Hz]	音圧レベル[dB]		差[dB]
	取り付け前	取り付け後	
250	35.687	27.954	7.733
315	33.505	28.229	5.276
400	35.610	30.075	5.535
500	40.840	31.830	9.010
630	44.086	29.310	14.776
800	45.219	30.460	14.759
1000	45.015	36.322	8.693

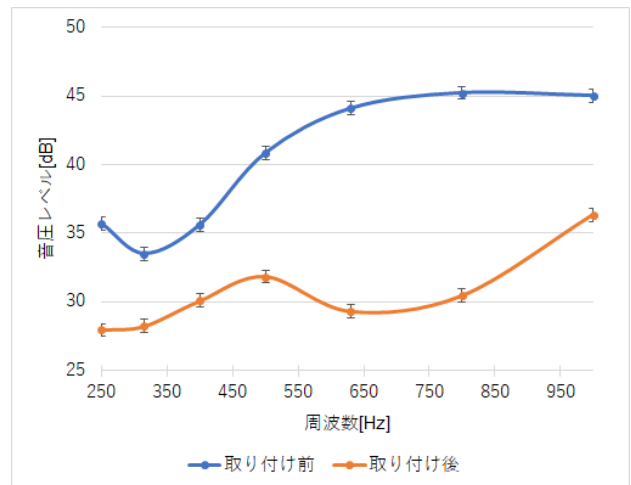


図5 測定結果

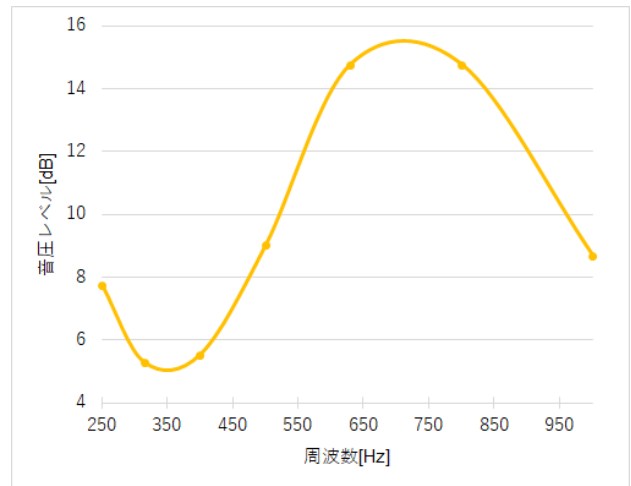


図6 取り付け前と取り付け後の音圧レベルの差

4. 2. シミュレーション

実験の結果を評価するため、ANSYS で有限要素法による音響透過損失のシミュレーションを実施した。音響透過損失とは、壁や遮音材の遮音性能を表し、入射音に対し、透過音がどの程度小さくなったかを示す数値である。よって、実験から得た音圧レベルの差と、音響透過損失を比較することで、音響メタマテリアルの遮音性能を評価できると考える。

シミュレーションでは、音響メタマテリアルの構造による遮音性能を評価するため、塩ビパイプ及び音響メタマテリアルは剛体であると仮定した。

実験と同様な配置でシミュレーションした場合の音響透過損失を表2に示す。また、表1の音圧レベルの差と表2の音響透過損失のグラフを図7に示す。

表2 シミュレーションの結果

周波数[Hz]	音響透過損失[dB]
251.7	23.628
316.76	22.575
398.65	20.742
501.7	13.148
631.39	28.492
794.6	25.305
1000	10.015

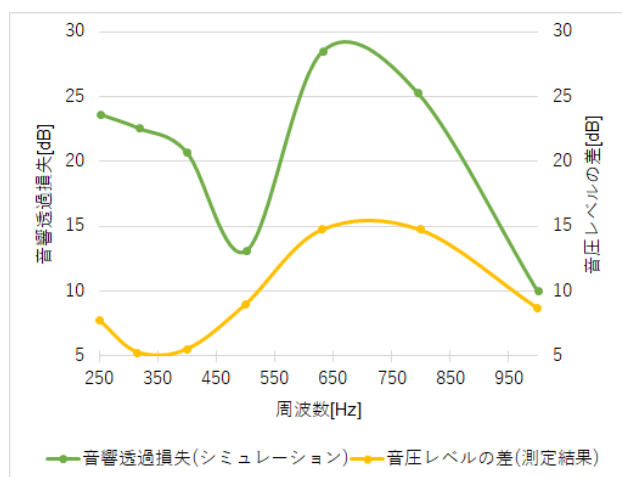


図7 シミュレーションと測定結果の比較

5. 考察

460[Hz]周辺の音に対して遮音効果を発揮するように設計したが、表1、表2、図6及び図7から、今回作成した音響メタマテリアルは630[Hz]から800[Hz]の広い範囲で遮音効果を発揮することがわかった。広い範囲で遮音効果が発揮された原因は、螺旋状の経路の長さが関係していると考えられる。簡単のため円で考える。今回作成した音響メタマテリアルは内半径 $r_1=22.47[\text{mm}]$ 、外半径 $r_2=52.50[\text{mm}]$ である。よって、中央の穴の円周長は $141.18[\text{mm}]$ 、音響メタマテリアルの外側の円周長は $329.87[\text{mm}]$ となる。音響メタマテリアルの螺旋状の経路は、約1.5周して入口から出口まで至っている。したがって、螺旋状の経路の内側と外側の経路の長さは、それぞれ $210[\text{mm}]$ 、 $500[\text{mm}]$ 程度と考えられる。R. Ghaffarivardavagh らによると、本研究で作成した音響メタマテリアルは、螺旋の経路長の2

倍の波長をもつ領域で遮音する。今回作成した音響メタマテリアルは、経路長が $210\sim 500[\text{mm}]$ 程度であるので、遮音する波長領域は波長 $420\sim 1000[\text{mm}]$ 程度となる。これは周波数としては $340\sim 810[\text{Hz}]$ となり、遮音効果のピークは $630\sim 800[\text{Hz}]$ に見られたと考える。

シミュレーションでは、塩ビパイプと音響メタマテリアルを剛体と仮定しているが、実際は音が塩ビパイプや音響メタマテリアルを透過したり、音によって振動したりすると考えられる。これにより、シミュレーションから得られた音響透過損失の値と比較して、実験から得られた音圧レベルの差の値が小さくなったと考える。また、固有振動が発生する可能性もあるため、管の長さを考慮する必要があると考える。

以上のことから、音響メタマテリアルを送風ダクト等を実装する場合には、送風ダクトや音響メタマテリアルの物性、ダクト長などを考慮したうえで、音響メタマテリアルを設計する必要があると考える。

6. 結言

本研究ではR. Ghaffarivardavagh らが開発した音響メタマテリアルを、当所の3Dプリンタを用いて作成し、遮音性能の検証を行った。460[Hz]周辺の音の遮音を目的として音響メタマテリアルを作成したが、想定とは異なり、630[Hz]から800[Hz]で大きな遮音効果があることがわかった。遮音性能は管や音響メタマテリアルの物性、管の長さが関係していると考えられるため、音響メタマテリアルはこれらを考慮して設計される必要があると考えられる。今後は、目的とする周波数帯で十分な遮音効果を発揮する現実的な条件を得るために、周波数応答解析だけでなく流体音響解析にも取り組んでいきたい。

参考文献

- 1) 山本崇史. 音響メタマテリアルの研究背景と動向. 日本音響学会誌, 2023, 79 巻, 8 号, pp. 397-403.
- 2) R. Ghaffarivardavagh et al. Ultra-open acoustic metamaterial silencer based on Fano-like interference, Phys.Rev. 2019,B99,024302.