

遺伝的アルゴリズムを用いた ラティス構造の吸音特性最適化及びその評価

Optimization of Sound Absorption Properties of Lattice Structures Using Genetic Algorithms

三宅青司¹⁾, 牛島邦晴²⁾, 山本崇史³⁾

Seiji Miyake, Kuniharu Ushijima, and Takashi Yamamoto

1) 東京理科大学 工学研究科 機械工学専攻 修士課程 (〒125-8585 東京都葛飾区新宿6-3-1)

2) 博(工) 東京理科大学 工学部 機械工学科 教授 (〒125-8585 東京都葛飾区新宿6-3-1, E-mail: kuniharu@rs.tus.ac.jp)

3) 博(工) 工学院大学 工学部 機械工学科 教授 (〒192-0015 東京都八王子市中野町2665-1 12号館103号室,

E-mail:takashi_yamamoto@cc.kogakuin.ac.jp)

This study proposes an optimization method for lattice structures to achieve desired sound absorption characteristics, which is based on the genetic algorithm (GA). By revisiting the design variables identified in previous research, the arrangement of internal plates was determined as the most effective variable for optimization. A novel lattice structure model with additional plates between cells was developed. Considering the discrete nature of the design variables and the strong multimodality of the objective function caused by resonance mechanisms, a genetic algorithm was employed. Results demonstrated significant improvement in the objective function compared to the initial design, validating the proposed approach. To enable practical optimization within a reasonable timeframe, the lattice structure was modeled using equivalent acoustic properties. This study demonstrates the feasibility of efficiently optimizing lattice structures for advanced acoustic applications.

Key Words : Lattice Structures, Sound Absorption, Finite Element Method, Optimization, Genetic Algorithms

1. 緒言

工業の発展に伴い、騒音が問題となっている。騒音対策には、音源の静音化に加え、発生した音を遮音材で反射させる手法や、吸音材を用いて音エネルギーを熱に変換する手法が広く利用されている。特に、吸音材として通気性を持つポーラス体が広く採用されている。それは音波が細かな構造内部を通過する際に、粘性や摩擦によってエネルギーが吸収されるためである。

近年、ポーラス体と類似した構造を持つ構造体としてラティス構造が注目されている。ラティス構造は、はりや面で構成されたユニットセルが周期的に配置された構造体である。セルの設計自由度が高いため、機械的特性の調整が容易である利点がある。加え、3Dプリンターでの製造が可能であるという特長を有している。

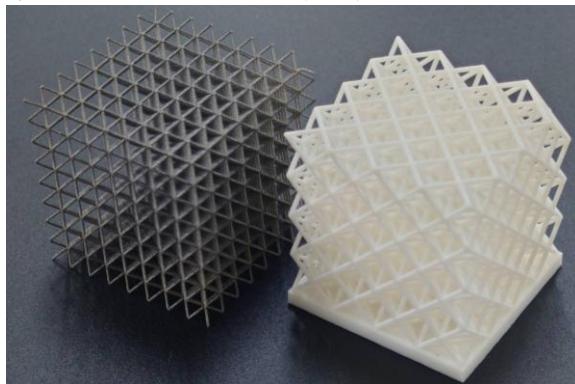


図-1 ラティス構造の例

このため、ラティス構造は音響メタマテリアルとしての応用が期待され、関連する研究が進められている[1]。

先行研究では、ラティス構造が特定の周波数帯域において高い吸音率を示す一方、他の周波数帯域では吸音率が著しく低下する「共鳴型吸音特性」を有することが確認されている[2]。

そこで本研究では、全周波数帯域で最大限の吸音性能を発揮することを目標に、遺伝的アルゴリズムによる数理的最適化を用いてラティス構造を最適化設計することを目的とする。

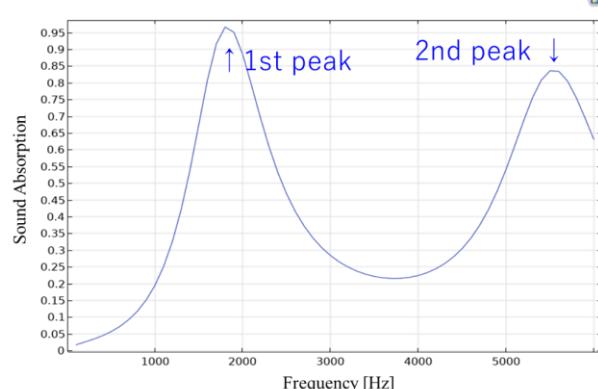


図-2 ラティス構造の吸音特性例

2. 解析手法

本研究では、数値解析に有限要素法（FEM）汎用解析ソフトウェア COMSOL Multiphysics 6.2 を用い、COMSOL 内の Acoustics Module に含まれる Pressure Acoustics を使用した。なお、固体層内での音波減衰は無視できるほど小さいことが知られているため、解析対象は空気層のみに限定している。本解析では、固体層と流体層の境界に Thermoviscous Boundary Layer Impedance 境界を定義し、滑りなし等温条件とした。Thermoviscous Boundary Layer Impedance 境界は壁面の音響境界層における熱および粘性散逸による損失を近似できるため、これにより音波の減衰を軽量に解析できる。また、空気の物性値は表-1 に示す値を用いている。

表-1 空気の物性値

密度 ρ [kg/mm ³]	1.2043
伝播速度(音速) c [m/s]	343.2

3. 設計変数の選定

数理最適化を行うには、ラティス構造における最適化対象(設計変数)を明確にする必要がある。先行研究では、ユニットセルを構成するはり径と面配置が吸音特性に大きな影響を与える主要な因子であることが示されている[3]。

本研究では、これらの設計変数が吸音特性に影響を与えるメカニズムを調査した。その結果、はり径と面配置はそれぞれ異なる共鳴現象を引き起こすことが分かった。特に、面配置は構造体内部での音波伝搬経路を複雑化させることで吸音特性に影響を与え、ピーク周波数に大きく影響を与えることが明らかになった。ラティス構造の「特定の周波数で吸音できない音響特性」を考慮すると、ピーク周波数の設計が重要であると判断した。以上より、本研究では面配置を設計変数として採用した。

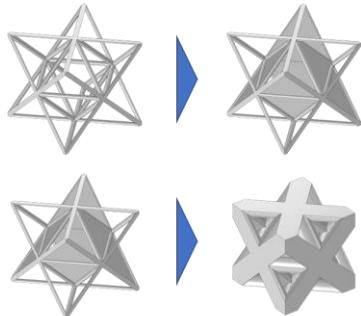


図-3 面配置とはり径を変化させた例

4. 等価物性化

(1) 概要

ラティス構造は形状が複雑であるため、直接モデリングしてFEM解析を行う場合、計算コストが膨大となる欠点がある。そこで本研究では、ラティス構造のユニットセルを立方体で置き換え、ラティス構造と同等の挙動をする物性値を入れてFEM解析をした。これは一般的に等価物性と言われる手法である。このアプローチにより、従来1日を要していた計算時間を24秒に短縮し、現実的な時間

内での最適化を可能とした。

等価物性化は、伝播係数と特性音響インピーダンスを複素数化することで実現した[4]。伝播係数の複素数化によりラティス構造内部における音波の減衰を数値計算に反映させ、特性音響インピーダンスの複素数化によって音波入射時の反射や位相ずれを再現している。本研究では、厚さ10~100セルのFEM解析データに対してTwo-thickness method[6]を用いることで等価物性値を算出した。また、ラティス構造のセルサイズのスケールでは空気層とラティス構造の境界が曖昧になる。この曖昧さを回避する為、Two-microphone method[5]を用いて境界から離れた点で評価した。解析モデルを以下に示す。

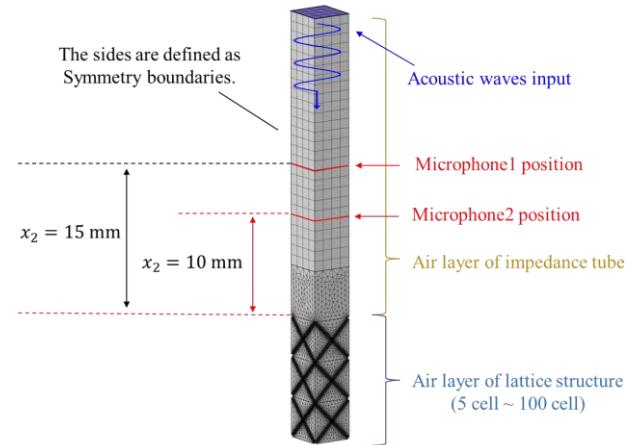


図-4 等価物性算出のための解析モデル

(2) 理論

表-2に変数を示す。等価物性の算出を以下に示す。

表-2 変数定義一覧

音響管	Microphone1	試験片との距離	x_1
		音圧	p_1
	Microphone2	試験片との距離	x_2
空気		音圧	p_2
	密度	ρ	
	伝播速度	c	
等価物性		伝播係数	k
		複素密度	ρ_c
		複素伝播速度	c_c
		複素特性音響インピーダンス	Z_c
		複素伝播係数	k_c
		周波数	$freq$

垂直入射音圧反射率 r と試験片と空気層の境界における比音響インピーダンス Z は以下の式で示される。

$$r = \frac{p_2 - e^{-j \cdot k(x_1 - x_2)}}{p_1 - e^{j \cdot k(x_1 - x_2)} - \frac{p_2}{p_1}} \quad (1)$$

$$Z = \rho \cdot c \frac{1 + r}{1 - r} \quad (2)$$

ある厚さ d , $2d$ の試験片における比音響インピーダンス Z を Z_1 , Z_2 とすると、係数 a を定義して以下の様になる[6].

$$Z_c = \{Z_1(2Z_2 - Z_1)\}^{\frac{1}{2}} \quad (3)$$

$$k_c = \frac{1}{2d \cdot j} \ln \left(\frac{1+a}{1-a} \right) \quad (4)$$

$$a = \left(\frac{2Z_2 - Z_1}{2} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (5)$$

ただし、 k_c は式内部に複素対数関数が存在するため偏角が一意に定まらない。今回はunwrap[6]することで偏角を定め、関数の連続性を担保した。さらに、以下の式を用いて複素密度と複素伝播速度に変換することで、シミュレータに導入する物性値として適する形にした。

$$c_c = \frac{2\pi \cdot freq}{k_c} \quad (6)$$

$$\rho_c = \frac{Z_c}{c_c} \quad (7)$$

(3) ばらつき対策

FEM解析による等価物性値の計算結果を以下に示す。これらを見ると、非常に大きい外れ値が発生していることがわかる。本来、Two-thickness method[6]は均一材料に用いる手法である。そのため、ラティス構造のスケールの大きさに由来する不均一性が影響したものと考えられる。

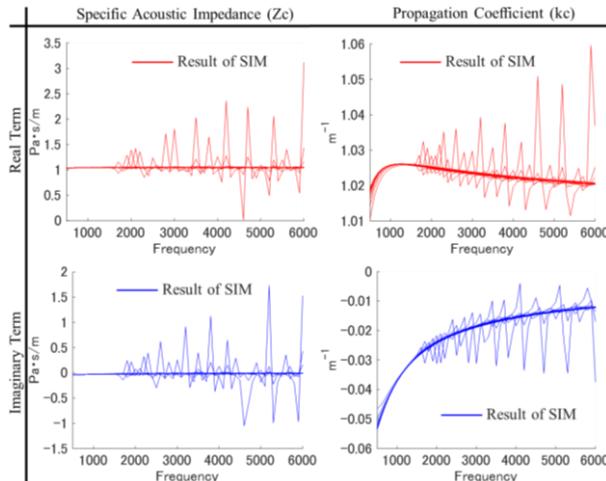


図-5 等価物性算出値

外れ値の影響を軽減する為、平均土標準偏差範囲外のデータを平均土標準偏差の上限又は下限の近い点に配置するクリッピング処理を行った。このクリッピング処理を100回行うことで次のようなグラフを得ることが出来た。なお、このクリッピング処理を施した結果をもとに等価物性の近似曲線を算出しており、同様にグラフに記載している。以降は、この近似曲線を等価物性値として扱っている。

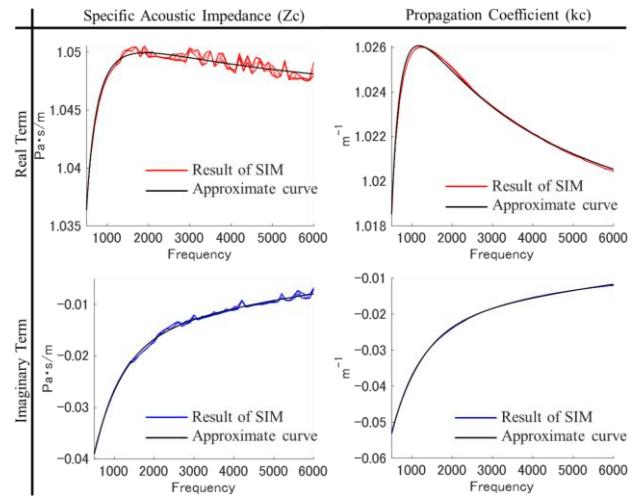


図-6 クリッピングを施した等価物性値と近似曲線

5. 最適化対象

(1) 最適化対象モデル

本研究では下記に示すラティス構造モデルを考案した。29 mmの円柱形内部にラティスを充填したモデルであり、ラティスのユニットセル形状はどのセルも外形4 mm、はり直径0.2 mmのOctet（図-7中のユニットセル）である。そして、そのラティス構造の任意のセルとセルの間に面を配置している。本研究では構造全体におけるこの面の配置の仕方を最適化する。なお、直径29 mmの音響管に入れることを前提としている。

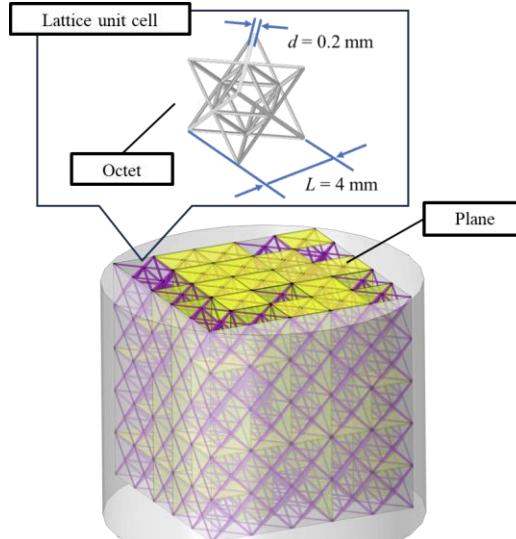


図-7 最適化対象モデルとユニットセル

(2) 等価物性値も用いた解析手法

等価物性を用いる手法では、ラティスの各セルを立方体としてモデル化し、複素特性音響インピーダンス Z_c と複素伝播係数 k_c から算出される複素密度 ρ_c と複素伝播速度 c_c を物性として当てはめることで解析している。更に、立方体の境界にCOMSOL標準機能にある遮音境界を表現するInterior Sound Hard Boundaryを適用することで面の配置を近似的に再現した。

周波数範囲は500~6000 Hzにて最適化を行っている。メッシュサイズは解析周波数におけるCOMSOLの自動

設定を用いており、粗さは9段階中3番目に粗いcoarserを用いている。音の入射は管の音響入射条件であるPort機能を用いている。吸音率は以下の式で算出している。なお、ここでのacpr.S11はPort境界における入射波と反射波の音圧比率である。

$$\alpha = 1 - \text{abs}(\text{acpr.S11})^2 \quad (8)$$

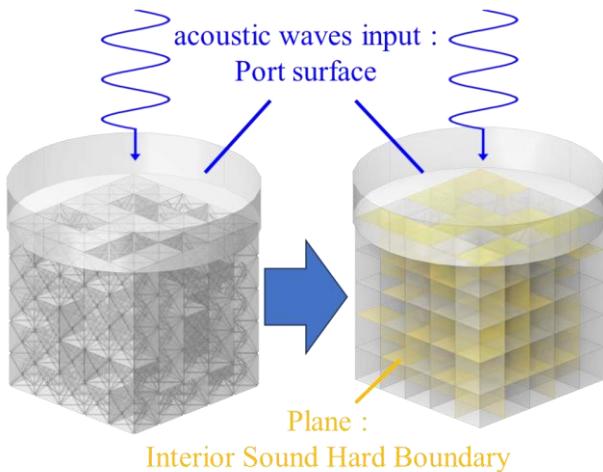


図-8 直接モデリングと等価物性化の解析モデルの比較

(3) 最適化手法

本研究で採用した設計変数は、ラティス構造内の面を配置するか否かを選択する離散的な要素で構成されている。この設計変数の特性に加え、吸音原理が共鳴に基づく特性を持つことから、目的関数は多峰性が強いと推測できる。これらの要因に対応するため、最適化アルゴリズムとして遺伝的アルゴリズムを採用した。

今回の設計変数は Boolean 配列で示している。具体的には、面配置の有無を Boolean 変数で表現し、面配置可能な全ての地点を対象とするため Boolean 配列にした。設計変数の初期値は seed を用いたランダム生成を行っており、遺伝的アルゴリズムの交叉操作には一様交叉 (uniform crossover) を採用した。また、エリート選択を導入することで、優良個体の情報を次世代に継承しながら最適解への収束を促進した。目的関数には吸音率の周波数帯域における積分値を用いることで、広帯域での吸音性能を評価した。

6. 一般的な最適化結果

以下のパラメータ設定により最適化を行った。

表-1 最適化パラメータ

パラメータ名	値
集団サイズ (Population Size)	40
突然変異確率 (Mutation Probability)	5 %
エリート率 (Elitism Rate)	10 %
世代数 (Number of Generations)	2000

最適化の結果例を以下に示す。図-9に世代ごとの目的変数値の変化を示す。なお、ここでのグラフは目的変数値の上位4個体のみを示している。このグラフから、本手法での収束性を確認することが出来た。最適化結果のモデルを図-10に示す。

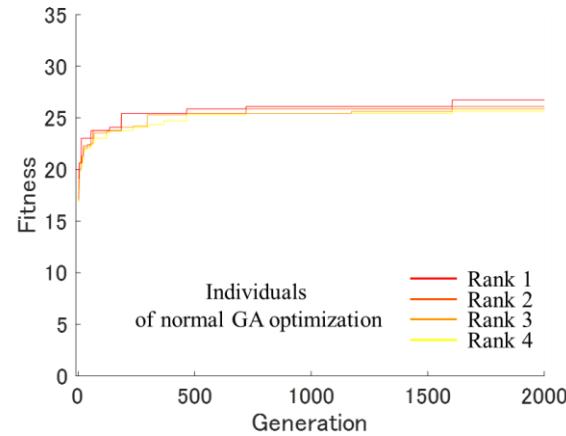


図-9 上位4個体の目的関数値変化

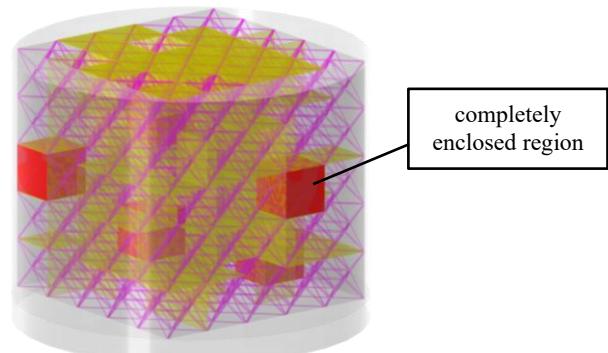


図-10 一般的なGA最適化結果構造

なお、図-10での赤色の立方体は面で完全に囲まれた領域を示している。この様な領域は造形性に問題を起こすだけでなく、ラティスに音波が侵入しなくなることから吸音性能に悪影響を与えていく可能性もある。

7. 分割領域検出アルゴリズムの活用

(1) パラメータと収束性

面で完全に囲まれた領域の発生を防止するため、幅優先探索 (BFS) を利用した分割領域の検出を導入した。本手法では BFS を用いて完全に面で囲まれた分割領域を探索し、見つけた場合には一か所ランダムに面を取り扱操作を行っている。なお、音波が侵入できる領域との境界面のみ取り扱うことで、構造の変化を最低限にしている。

BFS に加え、以下のパラメータ設定により再度最適化を行った。

表-2 最適化パラメータ

パラメータ名	値
集団サイズ (Population Size)	40
突然変異確率 (Mutation Probability)	1 %
エリート率 (Elitism Rate)	10 %
世代数 (Number of Generations)	2000

最適化の結果例を以下に示す。BFS を導入することによって、図-11の様により最適な結果を得ることが出来た。

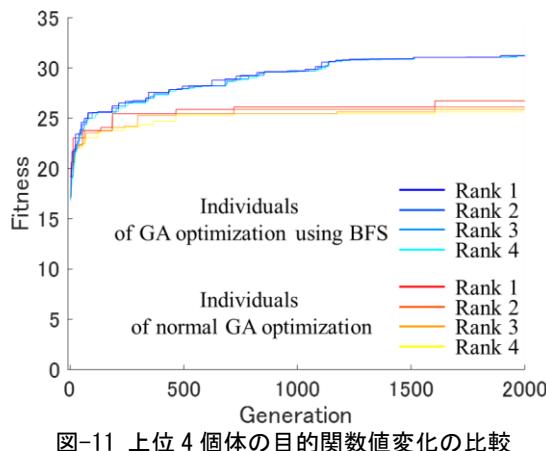


図-11 上位 4 個体の目的関数値変化の比較

(2) 目的関数（吸音率）の結果への考察

図-12に最適化結果の吸音率を示す。最適化の結果、ピークが最適化を施した周波数（500～6000 Hz）にて密集するような結果となった。面を配置していないラティスモデルと比較して、面配置を最適化したモデルでは吸音率が大幅に向上了。特に、最適化結果では吸音率が0.2以上となる周波数が大半を占めている。これは吸音材における基準を超えていいるものである[7]。よって、本研究で提案した最適化手法が吸音構造の設計において有用であることが確認できた。

また、最適化結果の等価物性モデルと直接モデリングを比較すると、多少誤差があるものの出現するピークの特徴は同様なものである。よって、シミュレーションコスト削減が重要になる遺伝的アルゴリズムにおいて、今回の等価物性化手法は有用であると考えられる。

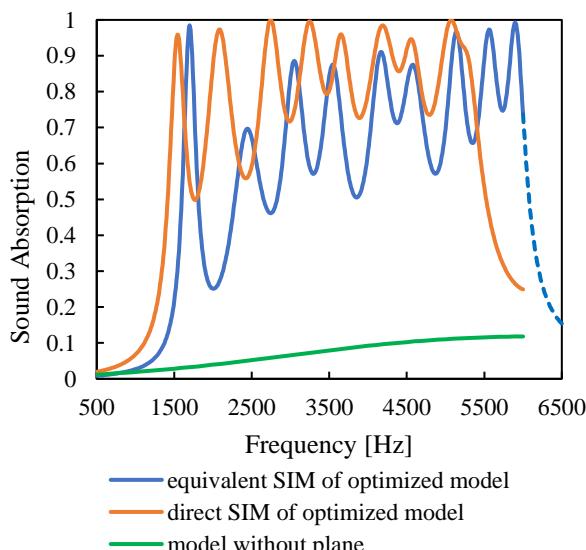


図-12 最適化前後のシミュレーション結果

(3) 最適化結果の構造への考察

下図に最適化結果の構造を示す。COMSOLのStreamlineを用いて伝播経路を可視化したものを図-14、15に示す。なお、図-14、15の配色は音圧の違いを示している。これらを見ると面が伝播経路を構成するように配置されている。このように構成された伝播経路が図-12のピークに起因していると考えられる。

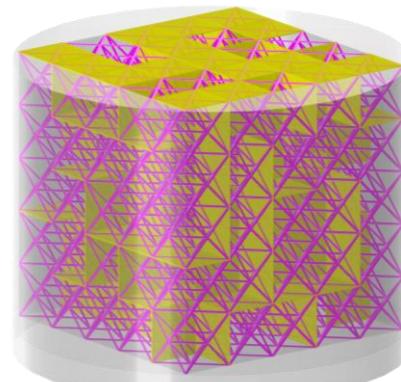


図-13 分割領域を無くした GA 最適化結果構造

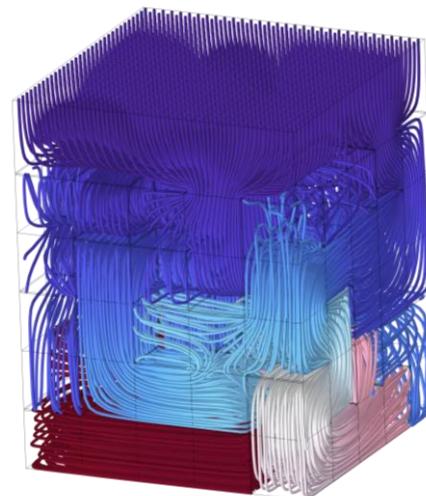


図-14 Streamlineを用いた伝播経路可視化（視線1）

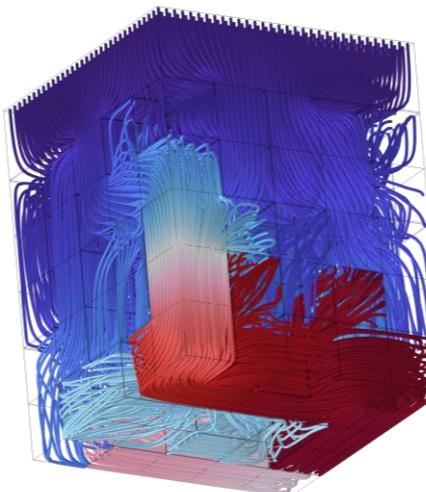


図-15 Streamlineを用いた伝播経路可視化（視線2）

参考文献

- [1] Li, X. et al.: 3D-Printed Lattice Structures for Sound Absorption: Current Progress, Mechanisms and Models, Structural-Property Relationships, and Future Outlook, *Adv. Science*, Vol.11, 2305232, 2023.

- [2] Chua, J.W. et al.: Novel slow-sound lattice absorbers based on the sonic black hole, *Composite Structures*, Vol.304, Part 2, 116434, 2023.
- [3] 増田直樹他: 選択的レーザー溶融法で造形したラティス構造の吸音特性評価, 日本機械学会論文集, 86, 883, pp. 19-00311, 2020.
- [4] Delany, M.E. and Bazley, E.N.: Acoustical properties of fibrous absorbent materials, *Applied Acoustics*, Vol.3, No.2, pp.105-116, 1970.
- [5] JIS A 1405-2:2007: 2022, 音響管による吸音率及びインピーダンスの測定—第2部：伝達関数法
- [6] Palumbo, D.L. et al.: Improvements to the Two-Thickness Method for Deriving Acoustic Properties of Materials, *Proc. of NOISE-CON 2004 Summer Meeting and Exposition, Baltimore, MD*, July 2004.
- [7] Zhang, X.H. et al.: Experimental study on the sound absorption characteristics of continuously graded phononic crystals, *AIP Advances*, Vol.6, No.10, 105205, 2016.