

折紙ヘルメットの設計とシミュレーション解析

Origami Helmet Design and Simulation Analysis

佐々木 淑恵 (Toshie Sasaki)<sup>1</sup>, 戸倉 直(Sunao Tokura)<sup>2</sup>, 萩原 一郎(Ichiro Hagiwara)<sup>1</sup>  
<sup>1</sup>明治大学 (Meiji University) , <sup>2</sup>(株) トクラシミュレーションリサーチ (TSR)  
e-mail: tsasaki8@meiji.ac.jp

1 概要

折紙による帽子を開発した. 改良なまこ折りとじゃばら折りを組み合わせた帽子は, 開発したアルゴリズムを使い, コンピューター援用設計による新たなデザインを創出した. 素材は, 画用紙で軽い. てっぺんが, じゃばら折りによる帽子は, 衝撃吸収効果があり, 帽子単体でも最大荷重は, 11.5kNだった. さらに, 高さ 50mm のハニカムコアやアッセンブリ・トラス・コアなどの衝撃吸収材は産業用ヘルメットの工業規格を満たし, これを帽子に取り付けることで標準範囲内のヘルメットにすることができる.

2 開発した折紙帽子

その具体的なデザインや特徴を図 1<sup>[1]</sup> に示す. 1 行目では, トップとひさしの部分は, じゃばら折り, 側面は, なまこ折りで構成している. 2 行目は, 側面はじゃばら折りで 1 段のなまこ折り模様がある. 3 行目はトップとひさし, 側面, 全てじゃばら折りだけで構成している. 頭から側面にかけて, 角張った形状や頭に沿ったまるい曲線形状をじゃばら折りの折角を変えることで実現している. 4 行目は, ひさしが無いタイプである. このように, なまこ折りとじゃばら折りの組み合わせ方により, 様々なデザインの帽子の制作が可能である.



Fig.1 Design and features of origami hats.

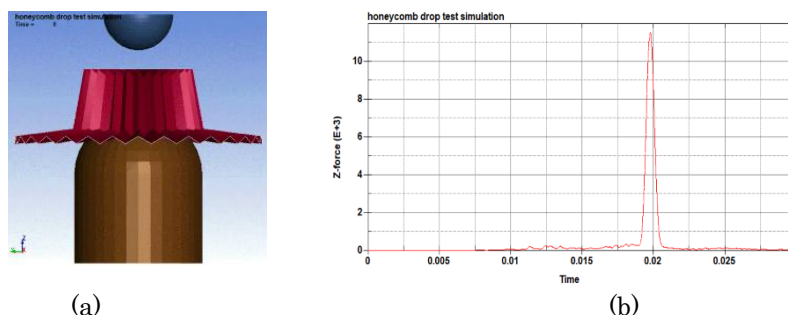


Fig.2 Simulation of the impact characteristics of an origami hat, the maximum load is 11.5 kN.

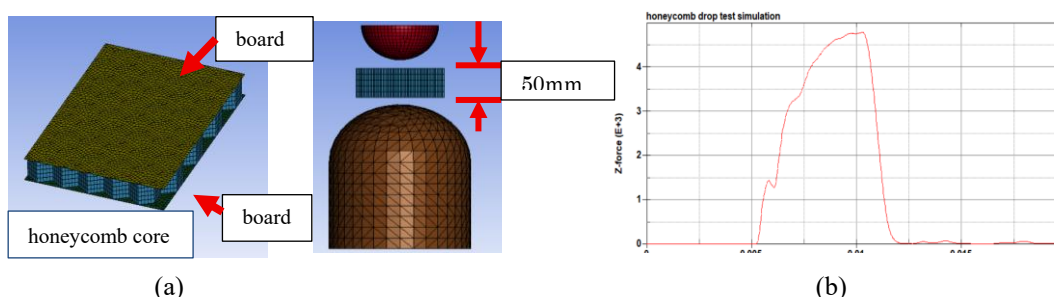


Fig. 3 (a) 3D honeycomb core model (b) Load-time curve of a 50 mm high honeycomb core  
The maximum load is 4.8 kN, and the shock absorber alone is within the standard range of industrial helmets. 50 mm high shock absorber can be attached to the hat.

### 3 ヘルメットの衝撃シミュレーション

衝突時の挙動を解析するために、非線形有限要素解析ソフトウェアであるLS-DYNAを用いて衝突シミュレーションを実施した。図2 (a) のように人間の頭を模擬したヘッドに検査する帽子を装着して、1m上から5kgの錘を落とし、その時、帽子とヘッドの間の点での荷重を計測し、最大荷重が4.9kN以下ならば作業ヘルメットの規格を満足する。図2 (b) に荷重-時間曲線を示す。蛇腹折り帽子の最大荷重は11.5 kNとなり、ある程度の衝撃吸収が得られるが、まだ、規定には達しない。そこで対策として、ハニカムコアと組み合わせて弱めることを考える。図3 (a) のようなハニカムコア単体でのシミュレーションを行い、高さ50mmのとき、図3 (c) の荷重曲線が示すように最大荷重は4.8kNとなり、目標値を下回ることが確認された。

### 4 結語

アルゴリズムによる設計は様々な構成の帽子を生み出した。ハニカム単体でも規定を満足することは、確認できたので、帽子に装着すれば、規定値に収まる。今後は、ハニカムコアの紙の厚さ、高さ、六角形コアの寸法といった設計変数で最適化を行い検討を行う。

### 謝辞

本研究は、明治大学 MIMS 数理科学プロジェクトの支援を受けて実施されたものであり、ここに記して深く感謝します。

### 参考文献

- [1]萩原一郎, 佐々木淑恵, “帽子”, 特願 2023-194075 (2023 年 11 月 15 日).
- [2]楊 陽, 奈良 知恵, 萩原 一郎, “折紙構造による折り畳みヘルメット適用に関する検討”, 日本シミュレーション学会論文誌 vol.11, No.1, pp1-13, 2019.

# 折り構造を応用した音響材料設計の基礎的検討

## Basic Investigation of Origami-Inspired Structures in Acoustic Materials Engineering

山崎 桂子(Keiko Yamazaki)<sup>1</sup>, 阿部 綾(Aya Abe)<sup>1</sup>, 米 大海(Mi Dahai)<sup>2</sup>, 萩原 一郎(Ichiro Hagiwara)<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 明治大学(Meiji University), <sup>2</sup> 計測エンジニアリングシステム株式会社(Keisoku Engineering System Co., Ltd.)

e-mail: keyyamazaki@meiji.ac.jp

### 1 概要

近年、構造音響におけるメタマテリアル的アプローチとして、周期構造や折紙構造を利用した音響制御が注目されている<sup>[1][2]</sup>。特に、軽量かつ成形性に優れた紙製シェル構造は、設計自由度の高さと機能性を両立する要素として有望である。本研究では、折紙構造を有するシェルの音響管内に配置し、その透過損失特性を COMSOL Multiphysics<sup>[3]</sup>を用いた 3 次元音響一構造連成シミュレーションにより評価した。

### 2 解析モデルと条件

音響管は縦横の長さが 500mm の正方形断面で長さ 1m、両端にポートを有する 3D 音響モデルである。図 1 に示す X の正方向に正弦波を入射する。中央部にテストピースとして、2 枚の蛇腹構造（折紙パターン）を稜線に沿って貼り合わせたシェル構造を設ける。材質は紙とし構造はシェル要素でモデル化した。

高さ (0.3m, 0.5m, 0.7m) および奥行き (0.08m, 0.10m, 0.12m) をパラメトリックスイープし、50Hz~1000Hz の範囲で S パラメータに基づく透過損失 (TL) を算出した。なお、上下左右対象の解析となるようにするため、ジオメトリを上下左右で 4 分割し、蛇腹前後の 100mm のエリアは最大で 14.3mm のメッシュ（最小波長の 24 分の 1 以下/固有値解析で収束を確認）で上部をメッシングし、下方に同じ最大メッシュサイズでスイープしている。その他の領域は最大で 56.7mm（最小波長の 6 分の 1 以下）でメッシュを作成した。

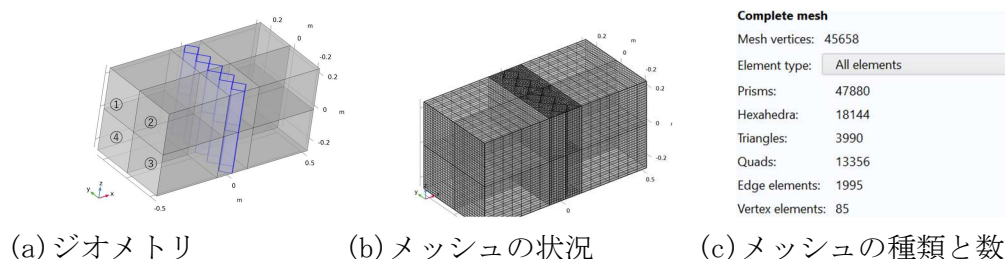


図 1 音響管モデルとメッシュ情報

### 3 結果と考察

#### 3.1 高さスイープ

蛇腹の高さが増加することで、全体的に透過損失が増加する傾向が確認された。図 2(a) に示す通り、特に 160Hz では 0.7m モデルで最大 15.4dB, 0.5m モデルで 1.2dB, 0.3m モデルで 0.5dB となった。400Hz では 0.5m モデルで最大 23.3dB, 0.3m モデルで 5.2dB, 0.7m モデルは

350Hz で 2.4dB のピークを示した。

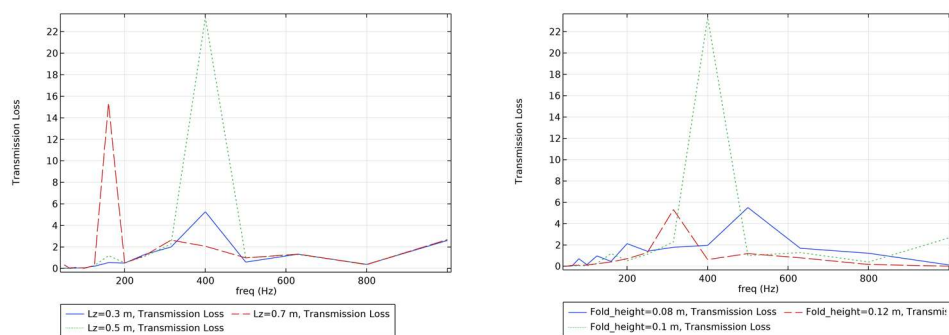
### 3.2 奥行きスイープ

蛇腹の奥行きによって透過損失ピーク周波数が変化した。図 2(b)に示す通り、奥行き 0.08m で 500Hz に 5.5dB、0.10m で 400Hz に 23dB、0.12m で 315Hz に 5.3dB のピークが見られた。他周波数帯では透過損失は 1dB 以下であった。

### 3.3 透過損失発生メカニズムの推定

透過損失は主に次の 2 つの要因により生じると考えられる。一つは蛇腹の突出により断面変化が生じ、インピーダンス不整合に起因する反射が発生する“反射による透過抑制”である。高さの増加により遮蔽面積が拡大し、反射エネルギーも増す。もう一つは、蛇腹内部に形成される細長い準閉空間が特定周波数で音響共鳴を起こし、音圧の局在化と干渉による透過抑制を引き起こす“構造共鳴による選択的透過抑制”である。透過損失ピーク周波数は奥行きに対してほぼ逆比例関係 ( $f \propto 1/L$ ) を示した。

これらの効果は相補的に作用し、構造条件が適合した際に 20dB を超える高い透過損失が得られる。



(a) 高さをスイープ (0.3m, 0.5m, 0.7m)

(b) 奥行きをスイープ (0.08m, 0.1m, 0.12m)

図 2 蛇腹の音響透過特性：設計パラメータの変更効果

## 4 結論

本研究では蛇腹シェル構造を音響管に挿入し透過損失特性を評価した。遮蔽による反射と内部共鳴による干渉の複合作用により特定周波数で顕著な透過抑制が発生することが明らかとなった。本構造は軽量で加工性が高く、選択的遮音フィルタなどへの応用が期待される。

**謝辞** 本研究は明治大学 MIMS 数理科学共同研究プロジェクトの助成を受け進めさせていただきました。ここに深く感謝いたします。

## 参考文献

- [1] 赤坂 修一, 音響メタマテリアル技術を用いた遮音材料の開発, 騒音制御, 44 巻 1 号 (2020), pp. 25-30.
- [2] Sunao Tomita, Kento Shimanuki, Hidekazu Nishigaki, Shin Oyama, Takashi Sasagawa, Daisuke Murai, Kazuhiko Umemoto, Origami-inspired metamaterials with switchable energy absorption based on bifurcated motions of a Tachi-Miura polyhedron, Materials & Design, Vol. 225 (2023), no. 111497
- [3] COMSOL Multiphysics v6.3. www.comsol.com, COMSOL AB, Stockholm, Sweden.

# 新しい解析技術を用いた折紙構造の吸音率の評価(三浦折り構造の低周波域挙動考察)

## Evaluation of Sound Absorption Rate of Origami Structures Using New Analysis Techniques (Consideration of the behavior in the low-frequency domain for Miura-ori structures)

阿部 綾(Aya Abe)<sup>1</sup>, 山崎 桂子(Keiko Yamazaki)<sup>1</sup>, 笹島 学(Manabu Sasajima)<sup>2</sup>,  
内田 善照(Yoshiteru Uchida)<sup>2</sup>, 米 大海(Dahai Mi)<sup>3</sup>, 萩原 一郎(Ichiro Hagiwara)<sup>1</sup>  
<sup>1</sup>明治大学 (Meiji University), <sup>2</sup>フォスター電機(Foster Electric Co., Ltd.), <sup>3</sup>計測エンジニアリングシステム (Keisoku Engineering Co., Ltd.)  
e-mail: aya\_abe@meiji.ac.jp

### 1 概要

スピーカは情報伝達の重要手段として家電や車に広く使われており、ユニットとボックスで構成される。音質には高能率、平坦な周波数応答、低歪、広帯域といった特性が求められる。これらの実現にはスピーカボックスの遮音・吸音性能が重要であり、吸音材を含む筐体や音響管による実験等で評価される。これまでに音響管による FEM 解析では理論解との乖離があり、石田らは 6db 理論解と離れることを示し<sup>[1]</sup>、阿部らにより原因は FEM では前進波と後退波の分離ができないことによると示された<sup>[2]</sup>。ヘルムホルツ方程式の差分解と FEM 解を組み合わせることで前進波と後退波を分離する計算手法を開発し、理論解と一致する結果が得られることを示した<sup>[3]</sup>。吸音材の効果や構造パラメータの影響などが明らかとなり、とくに折紙構造は 500Hz 以下の遮音に有効と判明する解が得られた<sup>[3]</sup>。ここでは複雑形状での FEM 適用や音響特性と音質要求との相関を検討する。更に将来的には機械学習と最適化解析で検討し、明確にする。

### 2 シミュレーションによる折紙構造遮音板を用いた評価

遮音板シェル要素と音響管内音場ソリッド要素との結合に関し COMSOL Multiphysics<sup>[4]</sup>により、これまでに検討されている。まず遮音板として検討すべき折紙構造の選択と創出を行い、折紙構造の遮音や吸音現象を分析することを目的とする。このとき、用いられる折紙構造として Origami Simulator<sup>[5]</sup>の中から遮音や吸音に効果を期待できそうな形状をいくつか選択し、それぞれについて詳細な分析を試みる。

#### 1) 音響流線について

熱粘性音響の時刻歴応答計算により時間変化による音響速度といった音響流線の表示を行い、

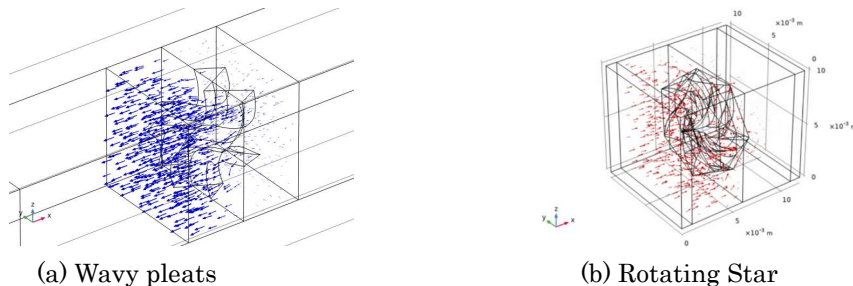


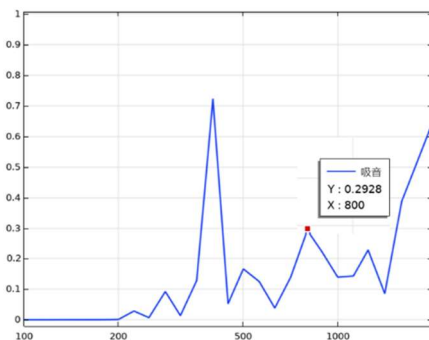
Fig.1 Vector displays of acoustic velocity at each time around the sound insulation plate.

その様子を動画として観察する．図 1 は遮音壁前後での音響速度ベクトルを示す．

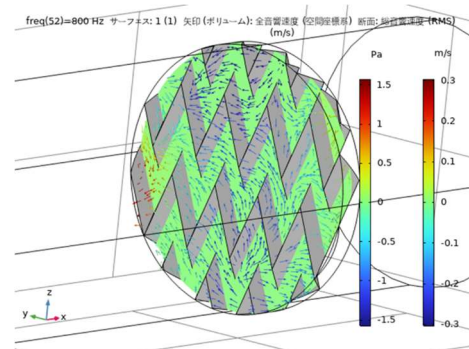
## 2) ミウラ折りテストピースでの吸音率の検討

本研究において、様々な形状の折紙テストピースによる実験からの知見として、ミウラ折りの場合に低周波数域(500~1000Hz)で良好な吸音率を示すということがあり、シミュレーション側からこの件について検討を行う．実験装置は音響管法 (ISO 10534-2) に準拠した内径 d100mm の音響管で、垂直入射吸音率を測定し、演算ソフトは WinZac<sup>[6]</sup> (日本音響エンジニアリング) を用いる．シミュレーションでは COMSOL Multiphysics<sup>[4]</sup> に内蔵する S パラメータによる吸音率計算方法を用いて算出する．

蓋付きミウラ折り構造による検討結果を以下に示す．当初、グラスウールのシミュレーション結果のように吸音率が右上がりのグラフとならなかったが、ダンピング設定で等方性損失係数  $\eta$  0.03 を設定することやミウラ折り構造と前後の平板と節点共有を確実に設定することにより、図 2(a) に示すようにある程度実験結果のような右上がりのグラフで数値的にも近い結果(800Hz で吸音率約 0.3)が得られた．また、800Hz のときのミウラ折り前面部分の空気層の音響流線に注目すると、ミウラ折りのジグザグ状の溝にある程度沿った経路で音響速度の矢印がプロットされている様子が確認でき、この経路の長さやダンピングの設定が吸音率に寄与することが考えられる．



(a) Sound absorption coefficient



(b) Acoustic streamlines

Fig.2 A new example of Acoustic Simulation Study.

(a) Sound absorption coefficient and (b) acoustic streamlines of Miura-Ori sandwich structure.

## 参考文献

- [1] 石田祥子, 森村浩明, 五島庸, 萩原一郎, “有限要素法による新しい透過損失算出手法”, 日本機械学会論文集, Vol. 80, No. 813 (2014), p. DR0127
- [2] 阿部綾, 屋代春樹, 萩原一郎, “有限要素法を用いた垂直入射遮音シミュレーション技術の開発と軽量コアへの適用”, 日本機械学会論文集, Vol. 86, No. 891 (2020) p. 20-00126
- [3] Aya Abe and Ichiro Hagiwara, “Development of New Sound Insulation Simulation Technology Using Finite Element Method for Efficiency of High Aspect Ratio Core in Low Frequency Range”, International Journal of Mechanical Engineering and Applications, Vol.10, No.1(2022-2), pp.7-1
- [4] COMSOL Multiphysics® v. 6.3. [www.comsol.com](http://www.comsol.com). COMSOL AB, Stockholm, Sweden
- [5] Origami Simulator <https://origamisimulator.org/>
- [6] WinZacMTX, USER' S MANUAL, 日東紡音響エンジニアリング株式会社