

# 折紙構造による音響空間の開発のための 音響解析シミュレーション

Acoustic Analysis Simulation for Developing an Acoustic Space with Origami Structure

山崎桂子<sup>1)</sup>, 米大海<sup>2)</sup>, 橋口真宜<sup>2)</sup>, 萩原一郎<sup>1)</sup>

Keiko Yamazaki, Mi Dahai, Masanori Hashiguchi and Ichiro Hagiwara

1) 明治大学 (〒101-8301 東京都千代田区神田駿河台1-1グローバルフロント8F408研究室M, E-mail:

keyyayamazaki@meiji.ac.jp, ihagi@meiji.ac.jp)

2) 計測エンジニアリングシステム株式会社 (〒101-0047 東京都千代田区内神田1丁目9-5 Sf内神田ビル, E-mail:

dahai1722@gmail.com, topology117@gmail.com)

The purpose of this research is to develop a simple sound-reducing shade to enjoy playing music at home. The requirements for the shade are relatively inexpensive, foldable, suitable size and acoustic environment, and most importantly sound dampening ability. Normally, the development of such a product requires many prototypes and verifications, but in this research, by utilizing finite element analysis (FEM), it is possible to find the optimum material and shape without producing a large number of prototypes. In this paper, we designed a new sound-reducing shade that incorporates the ideas of Origami engineering. We also report the results of the feasibility study by FEM analysis of the sound-reducing shade.

**Key Words :** Sound-reducing shade, Origami engineering, Metamaterial, Finite element analysis

## 1. はじめに

コロナ禍を契機として自宅滞在時間が増加し、住居での騒音問題が顕在化した。リモート会議の音声や、幼児・子供が発する音といった通常の生活に伴う音だけでなく、歌や楽器を嗜む人・時間が増加したために音楽に関する音の問題も増えている [1,2]。騒音問題の解決策として防音室がまず考えられるが、その設置には工事を要し賃貸住宅では実現が難しい。また本体及び工事費は高額であり、趣味のレベルでの導入は困難である。

そこで、本研究では、防音室ほどの機能までは持たないものの、比較的安価で折り畳み収納が可能であり、内部の空間の大きさと残響時間が演奏に適したものであり、かつ外部への音を居住地域の騒音基準値である55dB（昼間）（参考45dB（夜間））まで下げられる減音シェードの開発に取り組む。通常このような製品の開発には多くの試作と検証が必要となるが、本研究では有限要素解析（FEM）を活用することで、試作品を大量に制作することなく最適な素材、形状の減音シェードを得ることを目的とする。本稿では、主として空気中を伝わって届く音である空気伝搬音（透過音）を低減する効果のあるシェードとして折紙・切紙工学の考え方を取り入れた新しい遮音シェードの概念設計を行った。折紙・切り紙構造をもつ減音シェードのFEM解析によるフィジビリティの検討を行った結果とともに報告する。

## 2. 本研究で目指す防音シェード

### (1) 既存の簡易防音室

従来、防音ツールはいくつかありすでに販売されてい

る[3][4]がそれらには、次の課題がある。①購入者自らが組み立てられるがほとんどの製品で組立に最低二名が必要であり、移動や頻繁な収納は困難である。②ほとんどの製品で重量があり地震発生時にリスクとなりうる。③構造が不透明な材料で作成されており、内外の視認が出来ないことから万が一の際の安全確保が困難である。④：狭い、違和感、閉塞感がある。⑤天井空調ファンは内部環境に必要であるが、騒音源となり得る。⑥多くの楽器は100 dB程度の音まで発するが夜間の騒音基準値45dBはクリア困難である。⑦構造が可変となっておらず楽器の周波数特性に適応する必要が生じた場合は変更困難と推察する。

### (2) 本研究で目指す防音ツールの概念設計

- a) 一般家庭でコンパクトに片づけられるために折畳み可能とすること
- b) 内部スペースが演奏に必要なサイズがあり、内部の残響時間が適切であること
- c) 設置工事が不要で移動が簡単なこと。これは賃貸住宅などでは特に必要であること
- d) 騒音基準値を下回る性能があること。マンションなど規約があればその数値を下回ること

## 3. 有限要素法(FEM)による検討例

すでに述べたように減音シェードを試作レスで行うことも本研究の大きな目的である。試作レスを実現するには数値解析の適用が適しており、製品形状を忠実に表現できる手法としてFEMを適用することとした。試作レスを実現するには試作に含まれる物理現象を数値解析で表

現できねばならない。そこで多重物理連成の市販ソフトウェアCOMSOL Multiphysics[5]を利用して周波数領域での圧力音響解析と減音シェードの変形応力解析を実施した。

### (1) 形状の検討

高さを2mにそろえた5種類のシェード形状につき、内部音源を設けてシェード内外の音圧分布及び応力分布を解析する。シェードの形状は、円柱、直方体、及び3種類の底面形状の反転らせん構造(以下、「RSO」と記す)であり、RSOの底面形状は正方形、正五角形及び正十角形でその大きさは内接円の半径が円柱の半径となるサイズとする。

五種類のシェード共通のセッティングとして、シェードの天井部は側面と同一素材で側面と滑らかにつながって一体化しており、シェードの下端は閉じておらず設置床面に接触しているが拘束はされていないものとする。また、図-1の通り100dBの音圧を発する球体音源を1.3m高さに設置し、また、シェードの周りに仮想的な境界としてPML (Perfectly Matched Layersの略で、開放的で無反射の無限領域を模倣するために音響モデルに追加される領域または層)を設け、50Hzから500Hzまで50Hz刻みでシミュレーションする。音圧測定位置はシェード中央から30cmの位置(a)と150cmの位置(b)であり、床より85~180cm高さの範囲を座っている人の座高から長身の男性の耳位置高さ範囲であると想定し、この範囲で音圧を平均する。

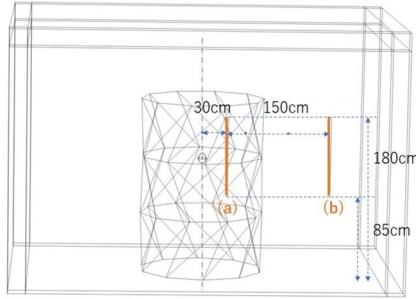


図-1 五種類のシェード共通のセッティング

ポリプロピレンのシェードの場合、500Hzでの応力分布は、図-2の通り円柱及び直方体で角の部分と音源近くの壁面の応力が高くなり、RSOでは、底面形状の頂点の数が増えるにつれ折り目の部分へ応力が集中している様子が見られる。

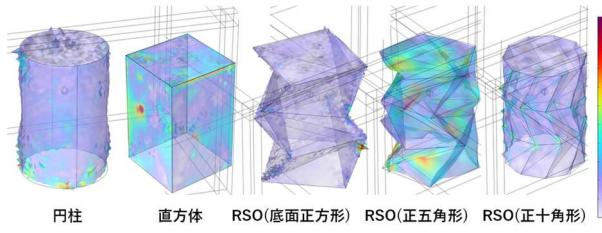


図-2 500Hzでのフォン・ミーゼス応力 (Pa)

シェード内外の音圧の状況を図-3に示す。おおむねいずれのグラフでもシェードを設けるとシェード外側の音圧は下がるが、一部の周波数では却って音圧が上がっている

部分がみられる。シェードを設けた場合音圧が高くなる部分に赤の点線を描画しているが、そこではシェード内側でも音圧が高くなっている。その周波数においてシェード自体が振動し音を增幅しているか、もしくはシェード内部表面で反射した音が内部の別の面に反射し音を增幅していると考えられる。

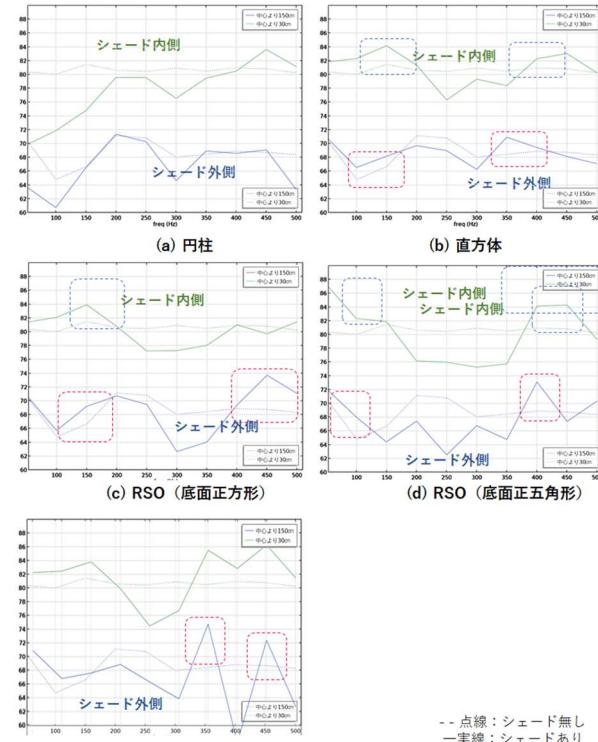


図-3 ポリプロピレンのシェード内外の音圧の状況

### (2) 素材の検討

ここまで素材としてポリプロピレンを用いていたが、紙を素材としたものと比較し、素材による音響への影響を検討する。ポリプロピレンの物性値はヤング率1313MPa、ポアソン比0.3、密度906 kg/m<sup>3</sup>であり厚み0.33mmである。これに対し、紙の物性値は実際にスケールモデルを作成した厚み0.22mmの厚紙について、段ボール製品の強度解析技術に関する研究（第2報）[6]を参考に密度818.18kg/m<sup>3</sup>、ヤング率 2626.55MPa、ポアソン比0としている。

図-4に示す通り、素材を紙に変えた場合もシェードを設けた方がシェードの外側の音圧が上がるシェード形状及び周波数があるものの、全体的にポリプロピレンより音圧が下がる傾向がみられた。特に底面が正十角形のRSOモデルでその傾向が顕著である。但し、350Hzと450Hzではポリプロピレン素材のシェードより紙素材のシェードの方が音圧低減効果が大きく、逆に400Hzでは紙素材のシェードの方が音圧を下げる効果が小さくなっている。

その理由を考察するため、正十角形のモデルについて先に挙げた350Hz、400Hz及び450Hzに関して音響圧力の等価面を図-5に示す。

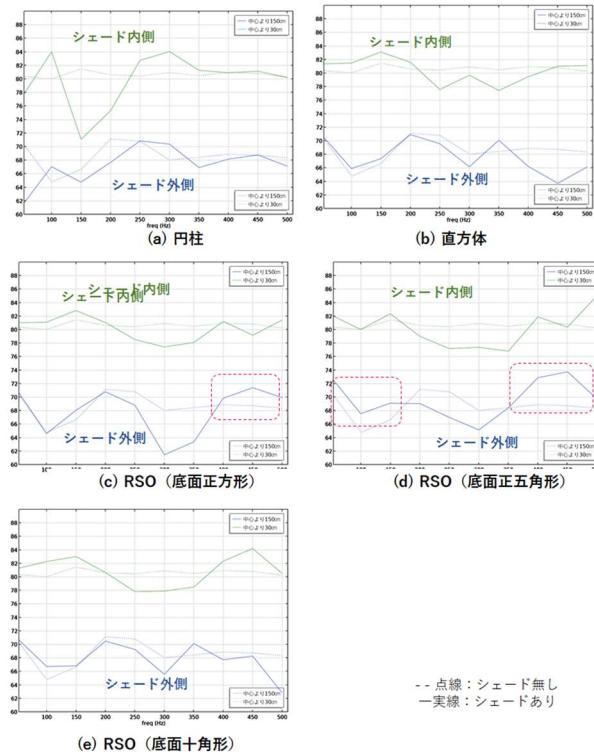


図-4 紙素材のシェード内外の音圧の状況

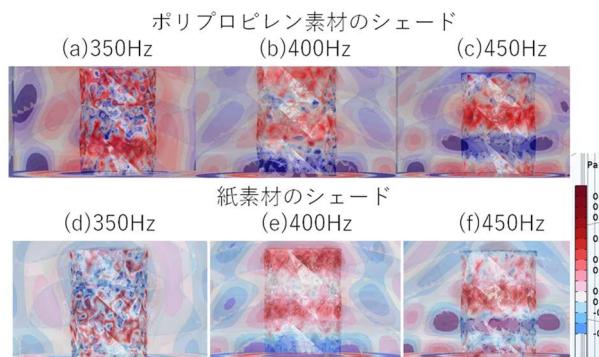


図-5 音響圧力 等値面表示 [Pa]

音圧の下がった350Hz及び450Hzの音響圧力等値面ではポリプロピレン素材の場合に音響圧力の高かった部分が穏やかに抑えられ、400Hzにおいては両素材で同じ場所に音響圧力が高い部分が分布し、紙の方がシェード近くで高くそれに合わせてシェード外側の音響圧力が高い様子が観察される。

ポリプロピレンは紙に対し重さで1.66倍であり質量則に従うならばポリプロピレンの方が音圧低減効果を発揮すると考えられるが、今回の結果からは紙のヤング率がポリプロピレンより2倍近く大きいことが音圧低減効果を生んだとみられる。

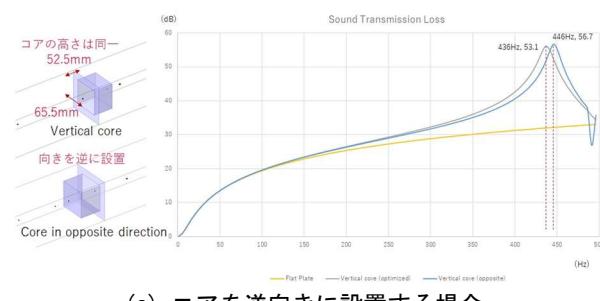
### (3) アタッチメントとしての垂直コアに関する検討

音響管において垂直コアの透過損失が低周波領域で一重平板の透過損失を大きく上回ることがAbe-Hagiwara[7]によって示されている。

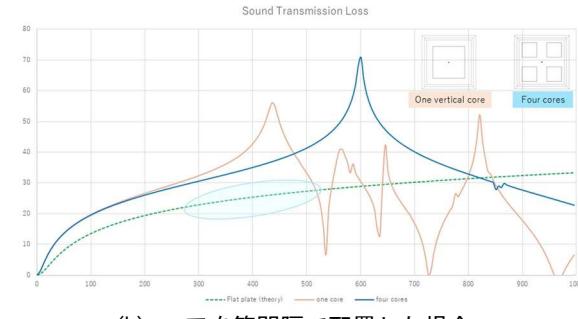
このコアをシェードにアタッチメントとして適用でき

るか検討する。

文献[7]では一つの垂直コアを入射側から透過側に突き出す向きに設置しそのサイズを最適化しているが、実際の構造に適用する場合はこれを複数個設置する必要があることから、まず(a)コアを逆向きに設置する場合の透過損失を調べ、元の向きの場合に比べ遜色ない透過損失を得ることを図の通り確かめた。次に(b)コアを等間隔で配置した場合の透過損失を調べたところ、図の通りより高い周波数領域でも高い透過損失を得ることが出来た。コアの向きが逆でも効果があることと併せて、こうしたコアを音圧が大きくなる部分を選んで設置する方法も今後シェードに適用検討を進めたい。



(a) コアを逆向きに設置する場合



(b) コアを等間隔で配置した場合

図-6 垂直コアを音響管に設置した場合の透過損失

## 4. まとめ

5種類のシェード形状に関する周波数領域での圧力音響解析の結果、軽量な紙素材であっても低周波領域で音圧を下げる効果を持つことを示した。また、折の形状によってその効果の現れる周波数が異なることから、今後は最適な折パターンをシミュレーションを用いて検討してゆきたい。さらに、最適な形状のシェードを得られた場合にさらにアタッチメントとして適用可能な複数の垂直コアを組み合わせたものの音圧低減効果を示した。今後はシェードの天井部の最適形状及び素材の模索によりより音圧低減効果の高い折り畳み可能シェードの実現にとりくむ。

## 5. 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] 経済産業省, “みなさんはどのように過ごしていますか? ; コロナ禍で増えたおうち時間、楽器を楽しむ方が増えたようです”, [https://www.meti.go.jp/statistics/toppage/report/minikaisatsu/hitokoto\\_kako/20210528hitokoto.html](https://www.meti.go.jp/statistics/toppage/report/minikaisatsu/hitokoto_kako/20210528hitokoto.html), (参照日 2023年4月1日).
- [2] 株式会社nana music, “新型コロナウイルス感染症の影響による、Stay Home期間中の音楽の楽しみ方の変化について”, <https://prtimes.jp/main/html/rd/p/000000082.000011341.html>, (参照日 2023年4月1日).
- [3] 株式会社ピアリビング, “組立式防音ブース おてがる一む”, [https://www.pialiving.com/c/soundproofing\\_mat/tatami\\_connectingmat](https://www.pialiving.com/c/soundproofing_mat/tatami_connectingmat), (参照日 2023年4月1日).
- [4] 合同会社 アーチ リテイルズ, “簡易 防音室 防音ルーム 日本製 簡単組み立て KANADE”, <https://item.rakuten.co.jp/arch-global/kanade/>, (参照日 2023年4月1日).
- [5] COMSOL Multiphysics v6.0. [www.comsol.com](http://www.comsol.com). (2022), COMSOL AB, Stockholm, Sweden.
- [6] 川島 義隆, 多賀 郁生, 伊田 徹士, 原田 匠人, 梅津 康義, 松井 和己, 手塚 明, “段ボール製品の強度解析技術に関する研究（第2報）－IT/MT分野におけるシミュレーション技術の適用に関する研究－”, 岐阜県生産情報技術研究所 編, no.7, pp.18-23, 2006
- [7] Abe Aya, , 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, pp.7-16, 2022