

令和 7 年 6 月 25 日現在

機関番号：24201

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2021～2024

課題番号：21K03820

研究課題名（和文）QOL向上のための鼓膜再建用軟骨板の形状最適設計

研究課題名（英文）Shape Optimization of Cartilage Plates for Tympanic Membrane Reconstruction to Improve Quality of Life

研究代表者

呉 志強 (WU, Zhiqiang)

滋賀県立大学・工学部・教授

研究者番号：10274333

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,200,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、鼓膜穿孔を修復する際に用いる軟骨片の最適な板厚分布を、数値解析により導出する手法を提案した。中耳の高精度有限要素モデルを構築し、特に修復面積が大きい場合の聴覚特性を解析した結果、軟骨の材料特性に起因する固有振動数の低下と周波数応答の劣化が確認された。これに対し、形状最適化理論を適用し、固有振動数の最大化および広帯域振幅規定問題に対応する最適設計手法を開発した。さらに、粘弾性ダンパを考慮した効率的な最適化手法を提案し、健常時の聴覚特性に近づく形状設計が可能であることを示した。提案手法は鼓膜修復のみならず、粘弾性構造を含む一般構造物の最適設計への応用も期待される。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究は、鼓膜修復における聴覚特性の改善を目的として、軟骨片の形状を数理的に最適化する手法を確立した点で、学術的意義が高い。医学的な観点から従来は均一板厚で用いられた修復材に対し、最適設計を導入することで、より生理的な機能回復が可能であることを示した。また、提案手法は手術の個別最適化を支援し、術後の聴力回復やQOL向上に寄与することから、超高齢社会を迎える中での医療の質向上にもつながる社会的意義を有する。さらに、運動方程式が非連成化できない場合においてもモーダル法を活用可能とする効率的な形状最適化手法を提案したことで、粘弾性減衰を有する構造を対象とした高速な最適設計に貢献できる。

研究成果の概要（英文）：This study developed a numerical method to optimize the thickness distribution of cartilage grafts used in tympanic membrane repair. A finite element model of the middle ear was constructed, and auditory performance in large-area repairs was analyzed. The results revealed that differences in material properties between cartilage and the native membrane cause reduced natural frequencies and degraded frequency response. To address this, shape optimization techniques were applied to maximize natural frequencies and improve broadband vibration response. An efficient optimization method considering viscoelastic damping was also proposed, enabling designs that better reproduce healthy auditory characteristics. The proposed approach has potential applications not only in tympanic membrane reconstruction but also in the optimal design of structures incorporating viscoelastic materials.

研究分野：計算力学、医工学

キーワード：形状最適化 鼓膜穿孔 鼓膜再建 聴覚特性 モード解析 有限要素解析 最適設計

1. 研究開始当初の背景

鼓膜は中耳の外側に位置し、外部からの異物の侵入を防ぐとともに、音の空気振動を機械的振動に変換し、耳小骨を介して内耳へと伝達・増幅する役割を担っている。鼓膜穿孔は鼓膜に穴があいた状態であり、細菌の侵入や聴力の低下を引き起こす。外傷によるものもあるが、中耳炎などの感染症の繰り返し発症に起因するケースが最も多く、特に乳幼児や高齢者に多く発症する。高齢社会を迎える日本では、今後患者数の増加が見込まれる。

鼓膜穿孔は自然に治癒する場合もあるが、鼓膜形成術などの外科的修復が必要となることもある。修復材料としては、鼓膜との親和性が高い軟骨が用いられる。手術では、軟骨を 0.5mm 以下の厚さにスライスし、必要な大きさ・形状にトリミングした上で、フィブリンを用いて鼓膜に接着・固定する。また、穿孔の範囲が広い場合には、鼓膜のエッジのみを残し、全体を軟骨で置き換える術式もある。

これらの術式により穿孔自体は修復されるものの、術後の聴力が十分に回復しない場合がある。特に、修復面積が大きい場合にはその傾向が顕著であり、術後の生活の質 (QOL) にも影響を及ぼす。その一因として、軟骨と本来の鼓膜とで材料定数 (ヤング率や密度など) が大きく異なることが挙げられる。

術後の聴覚特性を向上させるために、近年では数値解析を用いて最適な軟骨の厚さを検討する研究が進められている。しかし、既往の研究では耳小骨関節、靭帯、筋肉、鼓膜の境界条件などを単純化したモデルが用いられ、軟骨板の厚さ分布も均一であると仮定されている。このため、会話に必要な広い周波数帯において解析誤差が生じ、聴力回復の改善も十分とは言えない。

実際のヒト鼓膜は部位によって厚さ分布が異なっており、均一ではない。また、修復に用いる軟骨はヤング率が異なるため、鼓膜本来の厚さ分布をそのまま模倣しても、最適な聴覚特性が得られるとは限らない。したがって、軟骨を用いた修復においては、その材料特性を踏まえた上で最適な板厚分布を再設計する必要がある。

2. 研究の目的

鼓膜穿孔を修復する際に使用される軟骨片の最適な形状は、穿孔の形状や修復面積によって異なり、それぞれの症例に応じて個別に設計する必要がある。本研究では、ヒト本来の聴覚特性に近づくことを目的として、軟骨片の最適な板厚分布を数値解析によって導出するための手法を提案する。まず、マイクロ CT スキャンのデータを基に、中耳の構造を忠実に再現した高精度な有限要素モデルを構築する。次に、軟骨を用いて鼓膜を修復した場合の聴覚特性への影響を解析する。さらに、形状最適設計の理論を適用し、修復後の聴覚性能が最大化されるような最適な板厚分布を導出する。

3. 研究の方法

以下の主なプロセスを経て研究を進めた。

(1) 軟骨板を用いて鼓膜穿孔を修復した場合の聴覚特性への影響を解析する。ウェブサイトで公開された他の研究者がマイクロ CT スキャンで得た形状データを用いて数値検討用の有限要素 (FE) モデルを構築する。図 1 に示すように、この FE モデルには、鼓膜、耳小骨、靭帯、関節、アブミ骨筋、およびその他の構造が含まれている。内耳の蝸牛には液体が含まれており、その複雑な構造のため、モデリングが困難である。そこで、蝸牛内液体の粘性をダンパで表現することで単純化する。このダンパはアブミ骨底板に取り付けられ、減衰係数は 0.06 Ns/m と設定される。90 dB の音圧レベルに基づいて計算された圧力を鼓膜表面に与え、アブミ骨底板 (SFP) における周波数応答 (振幅) を、聴覚特性の指標として評価する。

また、図 2 に示すように、鼓膜穿孔および軟骨片によって修復された鼓膜を想定したモデルでもシミュレーションを行う。修復モデルでは、軟骨片の厚さを $0.3 \text{ mm} \sim 0.7 \text{ mm}$ に変化させアブミ骨底板の周波数応答曲線を求める。

(2) 上記のモデルでの数値解析より、軟骨板を用いて鼓膜穿孔を修復した場合、健常時の周波数応答曲線に比べ、次の二つの問題点が見つかっている。①アブミ骨底板の周波数応答のピーク周波数が低下している；②広い周波数範囲内において、アブミ骨底板の周波数応答の低下している。①に対処するために、寄与度の大きい第 1 次固有振動数と第 2 次固有振動数を最大化のための形状最適化解析を行う。これには研究代表者が行っていた機械構造の形状最適化手法を適用する。それぞれ、1 次固有振動数、2 次固有振動数の最大化を目的として導出される形状勾配関数を用い、H1 勾配法 (力法) を利用して、軟骨板の最適な板厚分布を求める。固有振動数最大化の後、周波数応答関数の変化を確認する。

(3) ②の広い周波数範囲内におけるアブミ骨底板の周波数応答の低下問題に対処する。広い周波数帯域において、人間本来の聴覚特性に近い動的特性を有する鼓膜の形状設計問題を、広帯域振幅規定問題における形状最適設計問題として定式化し、形状最適化の手法を開発する。目的関数は各サンプリング周波数における修復後のアブミ骨底板の変位と健常時の変位の二乗差とし、

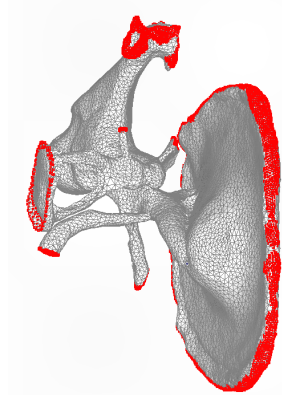
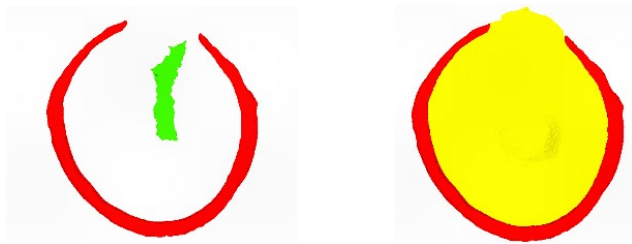


図1 中耳の有限要素モデル



(a) 穿孔状態の鼓膜 (b) 軟骨板で修復した鼓膜

図2 穿孔状態の鼓膜と軟骨板による修復モデル例

速度法の理論と随伴変数法を適用し、その目的関数の最小化のための形状勾配関数を導出する。導出される形状勾配関数に基づき、H1 勾配法を利用する最適化のプログラムを開発し、形状最適化を行う。広い周波数範囲内における形状最適化は、周波数サンプリング数の増加につれて、計算量が増えるため、計算効率が重要になる。そのため、モーダル法を適用することを試みる。

4. 研究成果

2021 年度：有限要素モデルの構築と軟骨板による鼓膜修復の場合の力学の観点からみた問題点を検討した。軟骨板のヤング率が不足しているのが原因で、健常時の中耳に比べ、聴覚特性に主に寄与している固有振動数が低下し、それにより、聴覚特性曲線におけるピーク位置の周波数が低下していることを確認した。そして、この状況を改善するために、軟骨板の形状設計において、形状最適設計の手法を導入し、低下した固有振動数を上げるアプローチを試みた。図3は、左から、それぞれ第1次固有振動数最大化、2次固有振動数最大化、1次と2次固有振動数の和の最大化を実施した解析結果である。各場合において、目的関数が増加していることが確認された。また、その結果として、1kHz 付近での周波数曲線も改善されていることが確認できた。ただし、ヤング率の差が大きいため、各固有振動数は健常時の値まで回復していない。

1次固有振動数最大化 2次固有振動数最大化 1次+2次固有振動数最大化

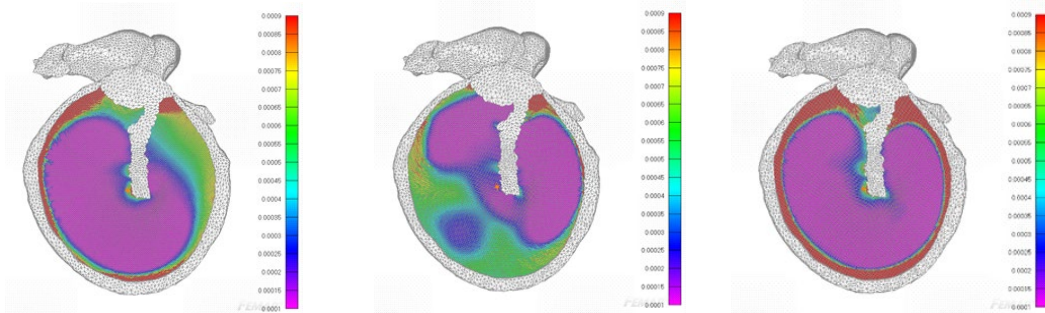


図3 固有振動数最大化解析後の鼓膜の板厚分布例

2022 年度：広い周波数帯域において、人間本来の聴覚特性に近い動的応答を示す鼓膜の形状設計問題を、広帯域振幅規定問題として定式化し、これに対する形状最適化手法を開発した。本手法では、内耳の蝸牛の動的特性を模擬するため、ダンパ要素を考慮している。広帯域解析では周波数のサンプリング数が多く、応答および形状勾配関数の計算に膨大な計算量を要するが、モード解析の結果を活用することで計算効率を向上させた。

ダンパ要素を含む場合、運動方程式の非連成化が困難であり、実数モード解析結果の直接利用ができない。これに対し、本研究ではダンパ関連の少数自由度による複素連立方程式を広帯域にわたって解くことで、この課題を克服した。提案した手法を簡単な機械構造の最適化問題に適用

し、所望の周波数応答曲線に一致するような最適形状を導出した。さらに、この手法を中耳振動モデルに応用し、目標とする周波数帯域において、アブミ骨底板の垂直変位が健常時の変位曲線に近づくよう、鼓膜をほぼ全体的に軟骨板で置き換えた場合の形状最適化を行った。図 4 は最適化後の鼓膜の板厚分布、図 5 は最適化前後の周波数応答曲線の比較を示す。最適化後のモデルでは、初期形状に比べて、周波数応答関数が広帯域にわたり健常時の応答に近づいていることが確認された。

しかしながら、軟骨板のヤング率が本来の鼓膜と大きく異なるため、周波数応答曲線の完全な回復には至らなかった。この結果は、修復面積が大きい場合には、鼓膜の材料特性に近い生体材料を用いることで、より高精度な聴覚機能の再現が可能であることを示唆している。また、本研究で提案した手法は、材料の違いを考慮した上での形状最適化にも柔軟に適用可能である。

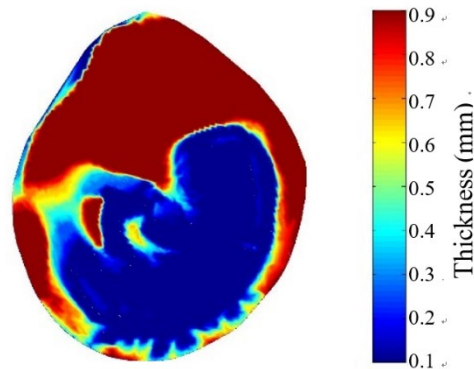


図 4 最適化後の鼓膜の板厚分布例

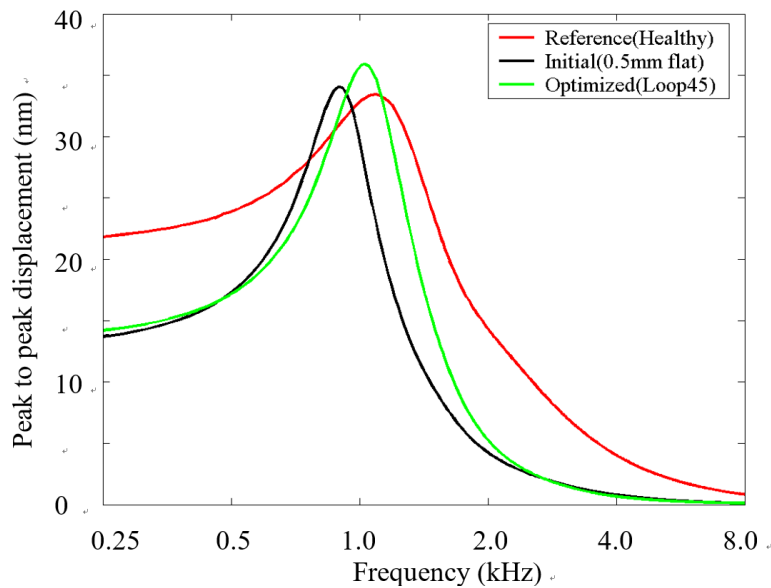


図 5 アブミ骨底板の周波数応答曲線

2023 年度：粘弾性ダンパの一種である Maxwell 型ダンパを用い、広帯域振幅規定問題に対する形状最適設計問題を定式化し、対応する形状勾配関数を導出した。また、モーダル法の利用を可能にするため、形状勾配関数に必要な変位および随伴変数を、粘弾性ダンパを含まない状態でのモードベクトルおよび固有値を用いて効率的に算出する手法を提案した。

開発したプログラムを用いて軟骨板の形状最適化を行い、最適化後のモデルでは、初期形状に比べて周波数応答関数が広帯域において健常時の応答曲線に近づくことを確認した。ただし、応答特性や最適化後の形状はこれまでの粘性ダンパモデルによる解析結果と類似している。

2024 年度：鼓膜修復用軟骨板の形状最適化解析の成果を整理し、国内外の学術会議で発表するとともに、学術誌への投稿を行った。

また、本研究の重要な成果として、粘弾性ダンパを考慮した効率的な形状最適化手法を確立できた点が挙げられる。この手法は鼓膜の再建にとどまらず、機械構造や建築構造における振動制

御を伴う形状最適化への応用が期待される。その応用例として、板状ソリッド体に対して、形状最適化と粘弾性ダンパ配置の最適化を同時に実施した結果を図 6 および図 7 に示す。広い加振周波数帯域において、全振動エネルギーを目的関数とし、その最小化を目指した。図 6(a)は最適化前、図 6(b)は最適化後の形状を示し、図 7 は形状最適化する前に求めた最適なダンパ配置を示している。候補 25 箇所から 7 個のダンパを選択する組合せ最適化には大規模な計算を要したが、これも開発したモーダル法ベースの手法により実行が可能となった。

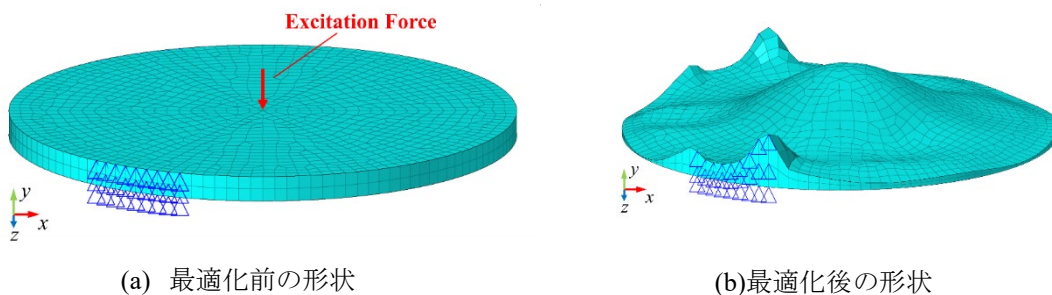


図 6 振動エネルギー最小化解析例

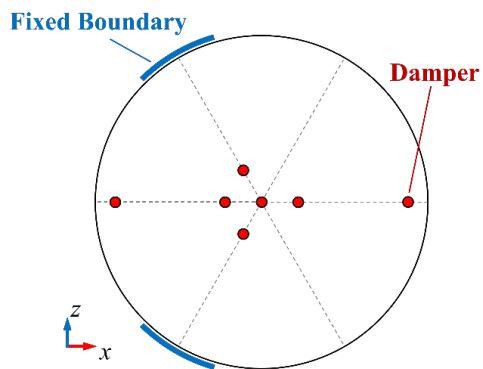


図 7 最適化されたダンパの配置例

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Zhiqiang WU, Katsuhiko OKAMOTO, and Tomonori SHIGEYOSHI	4. 巻 13
2. 論文標題 Shape Optimization Approach to the Design of a Cartilage Plate Used in Cartilage Tympanoplasty	5. 発行年 2025年
3. 雑誌名 Journal of Research and Applications in Mechanical Engineering	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計6件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 岸 尚輝, 吳 志強, 重吉 智仁
2. 発表標題 Maxwell型ダンパを有する構造物の振動抑制を目的とした形状最適化
3. 学会等名 日本機械学会2024年度年次大会
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 Naoki KISHI, Zhiqiang WU and Tomonori SHIGEYOSHI
2. 発表標題 Simultaneous Optimization of Damper Arrangement and Shape in Vibration Problems (Approach using GA)
3. 学会等名 International Conference on Design and Concurrent Engineering 2023 & Manufacturing Systems Conference 2023 (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 重吉智仁、吳 志強
2. 発表標題 ダンパ要素を有する場合のひずみエネルギー最小化問題における形状最適化
3. 学会等名 日本機械学会 2022年度年次大会 2022年09月
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 呉 志強、岡本克洋、重吉智仁
2. 発表標題 粘性ダンパーを有する構造の広帯域振幅規定問題における形状最適設計(鼓膜の再建に向けて)
3. 学会等名 第14回最適化シンポジウム2022
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 神谷一貴、岡本克洋、呉 志強
2. 発表標題 鼓膜形成手術用軟骨の厚み設計による聴覚特性の改善(固有振動数設計によるアプローチ)
3. 学会等名 日本機械学会関西支部第97回定時総会講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 重吉智仁、呉 志強
2. 発表標題 粘性減衰境界を有する周波数応答問題の形状最適化
3. 学会等名 2021年度関西学生会卒業研究発表講演会
4. 発表年 2022年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------