

令和 3 年 6 月 22 日現在

機関番号：32660

研究種目：挑戦的研究（萌芽）

研究期間：2019～2020

課題番号：19K21949

研究課題名（和文）中耳再建素材の最適化プラットフォームの構築と耳小骨再建への臨床応用

研究課題名（英文）Development of an platform for optimization of reconstructed ossicles and its clinical application to ossicular chain reconstruction

研究代表者

朝倉 巧（Asakura, Takumi）

東京理科大学・理工学部機械工学科・講師

研究者番号：60778207

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 4,900,000円

研究成果の概要（和文）：耳小骨再建手術は、真珠腫性中耳炎、耳小骨離断などの気骨導差を生じる疾患に対し、伝音系を再建することで患者の聴力の回復を図る術式である。しかしながら、鼓室形成術の中には術後聴力成績が芳しくない症例が存在する。これまで、健康なヒト中耳の伝音特性に関する報告は多くみられるが、耳小骨再建手術によって再建された中耳の伝音特性に関する研究については、これまでにみられるものの多くの知見が蓄積されておらず、手術成功のための知見を得る必要がある。本研究では、数値解析および実験手法を用いて、健全なヒト中耳、および再建された中耳のそれぞれの伝音特性について離散的手法、および実験的手法を用いて比較検証を行った。

研究成果の学術的意義や社会的意義

伝音難聴は、患者のQOL低下を引き起こす。伝音難聴の手術治療として、破壊された耳小骨連鎖を人工的に再構築し、鼓膜から内耳への伝音を円滑にする目的で、耳小骨再建が行われるが、耳小骨の破壊の程度によっては聴力回復が困難な場合がある。特に、内耳に直接接続するアブミ骨が破壊されている場合には、処置が有効に機能しない場合がみられる。このような場合、振動音響工学の観点から、外耳から鼓膜、中耳における耳小骨連鎖、アブミ骨底板までの伝達特性を解析し、この特性に関する最適化設計を行うことが可能であり、これにより設計された再建耳小骨を利用することによる聴力回復が実現できれば、難聴患者の大きなQOL向上につながる。

研究成果の概要（英文）：Reconstructive surgery of the ossicular chain system is used to restore hearing in patients with diseases that cause air-bone conduction, such as otitis media with pearl ossicles and ossicular chain discontinuation. However, some cases of tympanoplasty have poor postoperative hearing outcomes. Although there have been many reports on the sound transmission characteristics of the healthy human middle ear, there have not been many studies on the sound transmission characteristics of the middle ear reconstructed by ossicular reconstruction surgery, and it is necessary to obtain knowledge for successful surgery of ossicular chain reconstruction. In this study, the sound propagation characteristics of a healthy human middle ear and a reconstructed middle ear using discrete and experimental methods were compared and verified.

研究分野：振動音響工学

キーワード：耳小骨連載 伝音特性 耳小骨再建 有限要素法 振動音響連成解析 加振実験

1. 研究開始当初の背景

耳小骨再建手術は、真珠腫性中耳炎、耳小骨離断などの気骨導差を生じる疾患に対し、伝音系を再建することで患者の聴力の回復を図る術式である。しかしながら、鼓室形成術の中には術後聴力成績が芳しくない症例が存在する。また既往の研究では健常なヒト中耳の伝音特性に関する報告(例えば小池ら, 日本音響学会誌, 1996)が多いものの、耳小骨再建手術によって再建された中耳の伝音特性に関する研究は Koike らによる報告 (*Otol Jpn*, 1998) はあるものの、多くは見られず、手術成功のための知見を蓄積する必要がある。

2. 研究の目的

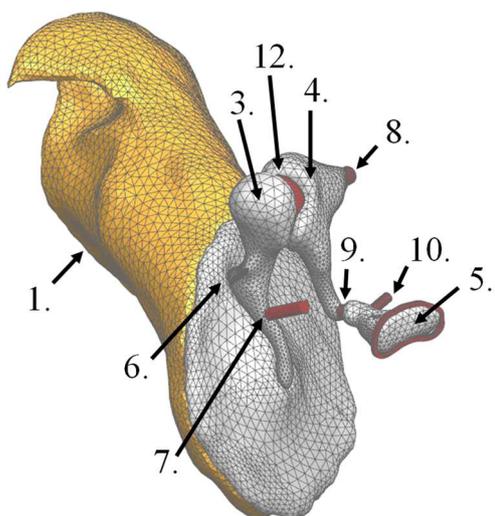
耳小骨形成術において用いられる各種術型の伝音特性を調べることを目的として、健全および再建ヒト中耳の伝音特性に関する数値解析的および実験的検討を行った。数値解析を用いた検討においては、有限要素法による振動音響連成解析を用いた。また、実験的検討においては、現在引き続き検討を進めている段階であるが、実験精度を高めるため、実寸法の耳小骨をスケールアップした拡大モデルを用いた加振実験を用いた検討を実施した。

3. 研究の方法

数値解析的検討において、耳小骨を介した伝音特性を解析するため、式(1)に示す運動方程式を有限要素法によって解析した。

$$\left(\begin{bmatrix} K_s & -C \\ 0 & K_A \end{bmatrix} + j\omega \begin{bmatrix} D_s & 0 \\ 0 & D_A \end{bmatrix} - \omega^2 \begin{bmatrix} M_s & 0 \\ C^T & M_A \end{bmatrix} \right) \begin{Bmatrix} x \\ p \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} f_s \\ f_A \end{Bmatrix} \quad (1)$$

ここで、剛性行列 K 、減衰行列 D 、質量行列 M 、連成行列 C 、変位ベクトル x 、音圧ベクトル p 、外力ベクトル f であり、構造系成分は下付きの S 、音響系成分は下付きの A で表す。解析には Siemens 社の汎用構造解析プログラム Simcenter Nastran を用いた。



Composition	Density [kg/m ³]	Young's modulus [MPa]	Poisson's ratio [-]	Loss factor [-]
2 Tympanic membrane (tensa)	1,200	33.4		0.5
2 Tympanic membrane (flaccida)	1,200	11.1		0.5
3 Malleus	2,390	1.20 × 10 ⁴		0.01
4 Incus	2,150	1.20 × 10 ⁴		0.01
5 Stapes	2,200	1.20 × 10 ⁴		0.01
6 Anterior malleolar ligament	2,500	21		0.5
7 Tensor tympani muscle	2,500	2.6	0.3	0.5
8 Posterior incudal ligament	2,500	0.65		0.5
9 Incudostapedial articulation	2,500	0.6		0.5
10 Stapedius muscle	2,500	0.52		0.5
11 Annular ligament	2,500	6.50 × 10 ⁻²		0.5
12 Incudomalleolar articulation	2,500	1.20 × 10 ⁴		0.5

Fig. 1 (Left) 3D FEM models of a human intact middle ear, and (right) Material properties used in the FE model.

本解析で使用した健常なヒト中耳の3次元モデルを図1(左)に示す。外耳道や鼓膜、耳小骨のモデルはマイクロコンピュータ断層撮影法によって作製された3Dモデル(Sieber et al., Scientific Data, 2019)を使用した。耳小骨に付着する腱や靭帯のモデルは円柱形状として単純化してモデル化し、マイクロコンピュータ断層撮影法を用いて測定された寸法(Sim et al., J. Assoc.

Res. Otol., 2008, Cheng et al., *J. Biomech. Eng.*, 2007) を参考に円柱の 3D モデルを作製した。なお、解析では、四面体二次要素を用いて離散化している。アブミ骨輪状靭帯に関しては小池ら（日本音響学会誌, 1996）と同様にアブミ骨底板に沿って幅 0.16 mm, 厚さ 0.20 mm となるように作製した。各部位の材料条件は既往の研究（小池ら, 日本音響学会誌, 1996）において、振動部の変位はナノメートルオーダーと報告されているため、モデル寸法に対する変位が十分に小さく、腱や靭帯の非線形性を無視できると仮定し、材料は全て等方弾性体とした。解析においては、物性値は小池（日本音響学会誌, 1996）、Homma ら（Homma et al., *J. Acous. Soc. Am.*, 2009）の報告を参考にして、図 1（右）に示す表に従って設定した。

上述した数値解析結果については、既往の文献において得られた結果との比較によって検証するほか、図 2 に示すような人中耳の縮尺模型を対象とした加振実験結果によっても検証を行っている。本加振実験では、外耳、鼓膜、中耳における耳小骨、アブミ骨までをモデル化しており、外耳入り口から音響励振を付加した場合における、アブミ骨底板の振動をレーザードップラー計によって計測する。最終的には、アブミ骨底板の振動変位を鼓膜面上の音圧で基準化した量を用いることにより評価することができる。

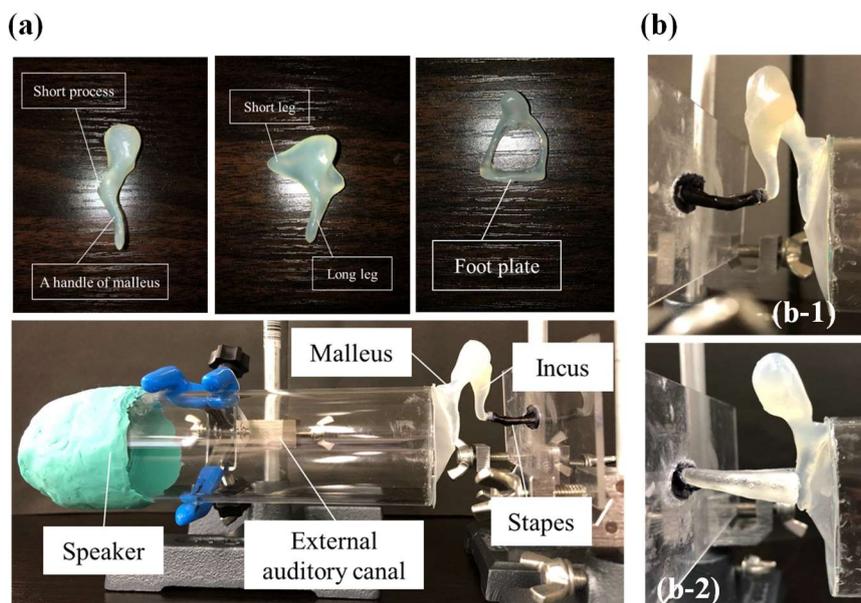


Fig. 2 Experimental setup for excitation test for the scale model of the middle ear models.

4. 研究成果

既往の研究結果（小池ら, 日本音響学会誌, 1996, Gan et al., *Ann Otol Rhinol Laryngol*, 2001）との比較によって、本解析の妥当性を検証した。既往の研究において用いられるアブミ骨頭の垂直方向変位について、解析結果から算出する。本検討では周波数範囲 0.1~10 kHz 内の対数軸上に等間隔に分布する 120 点を周波数応答解析によって算出した。また、図 3 に示すように外耳道開口中心に点音源を配置し、その結果得られたアブミ骨頭の z 方向変位を図 4 に示す。なお、既往の研究手法に併せるため、図 4(a)では鼓膜面近傍（外耳道側）の平均音圧が 80 dB となるように、(b)では 90 dB となるように基準化して示す。

小池らの解析結果、Gan らの側頭骨を用いた測定結果と比較すると、本解析結果がナノメートルオーダーとなり、類似した傾向が得られたことから、広範囲の周波数領域において本解析結果の妥当性が得られた。

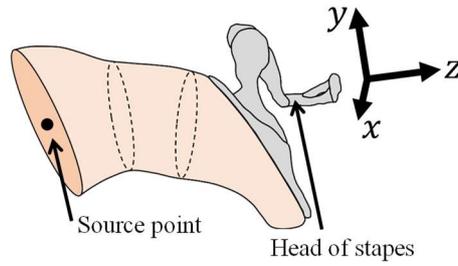


Fig. 3 Spatial relationship between the source point and the head of stapes.

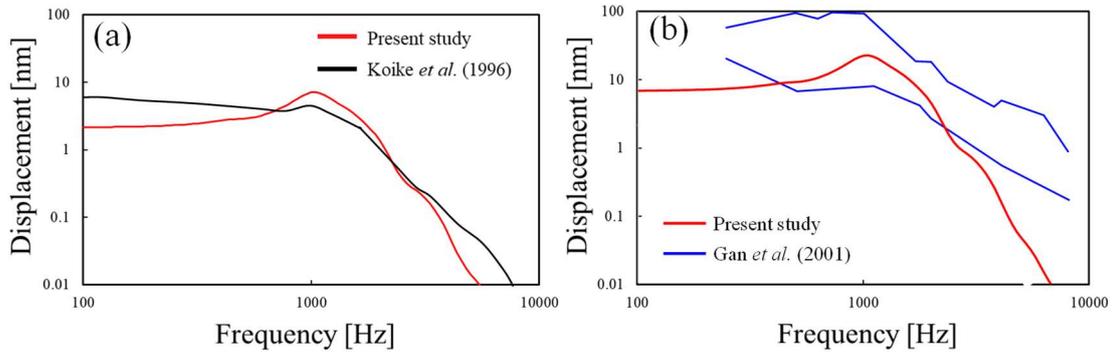


Fig. 4 Comparison of the obtained FEM results with (a) Ref. (Koike et al, 1996) and (b) Ref. (Gan et al, 2001), respectively.

有限要素法を用いた振動音響連成解析を行うことによって、健全中耳の伝音特性を求め、既往の研究結果との比較により、解析モデルの妥当性を検証した。そこで、本解析モデルを援用して、図 5 に示すような各種再建中耳モデルに関する解析を行った。これらの各種再建形状は、既に多数の耳鼻科医による術式として用いられており、定性的にこれらの形状間における伝音特性向上の優劣に関する知見が蓄積されている。これらの定性的所見を参考にしつつ、現在、同上の有限要素法によって得られた各種再建形状の伝音特性について検証を進めている。なお、各種再建形状のモデルとしては、下記のように共同研究者の耳鼻科医によって削り出された再建耳小骨形状を 3D モデル化し、これを鼓膜等のモデルと結合して解析モデルとして使用している。例えば鼓膜および再建したキヌタ骨の接合方法のモデル化方法など、解析結果に大きく影響を与える境界条件が多く存在するため、現在これらの取り扱い方法について、引き続き検討を進めている。

一方、上述した数値解析結果については、既往の文献において得られた結果との比較によって検証するほか、図 5 に示すような模型を対象とした加振実験結果によっても検証を行っている。健全ヒト中耳については、数値解析結果との対応性は確認できる段階にあり、今後、ほかの再建形状に関する条件についても、数値解析結果との対応について引き続き綿密な比較・検証が必要である。

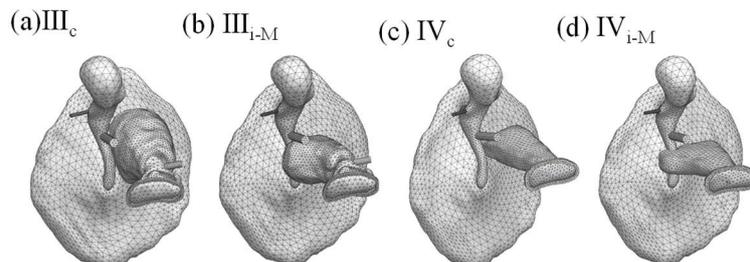


Fig. 5 3D reconstructed middle ear models for each of the types.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計3件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 T. Asakura, R. Ito, Y. Kurashina, G. Hirabayashi, S. Kurihara
2. 発表標題 Numerical simulation of vibroacoustic transmission characteristics via reconstructed bones of the human middle ear
3. 学会等名 ICSV 27 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 伊藤 瑠哉, 朝倉 巧, 倉科 佑太, 栗原 渉, 平林 源希
2. 発表標題 耳小骨再建モデルの伝音特性に関する検討
3. 学会等名 2020年日本音響学会春季研究発表会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 平林源希, 栗原渉, 伊藤瑠哉, 山本裕, 小島博己, 倉科佑太, 朝倉巧
2. 発表標題 耳小骨再建モデルの伝音特性に関する有限要素法解析による検討
3. 学会等名 第30回日本耳科学会総会・学術講演会
4. 発表年 2020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
研究分担者	倉科 佑太 (Kurashina Yuta) (40801535)	東京工業大学・物質理工学院・助教 (12608)	

6. 研究組織（つづき）

	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
研究分担者	栗原 涉 (Kurihara Sho) (90826926)	東京慈恵会医科大学・医学部・助教 (32651)	

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