

氏 名	小 池 卓 二		
授 与 学 位	博 士 (工 学)		
学 位 授 与 年 月 日	平 成 8 年 3 月 26 日		
学 位 授 与 の 根 拠 法 規	学 位 規 則 第 4 条 第 1 項		
研 究 科 , 専 攻 の 名 称	東 北 大 学 大 学 院 工 学 研 究 科 (博 士 課 程) 機 械 工 学 専 攻		
学 位 論 文 題 目	有 限 要 素 法 に よ る 中 耳 の 挙 動 解 析		
指 導 教 官	東 北 大 学 教 授 和 田 仁		
論 文 審 査 委 員	東 北 大 学 教 授 和 田 仁	東 北 大 学 教 授 谷 順 二	
	東 北 大 学 教 授 林 叡	東 北 大 学 教 授 長 南 征 二	
	東 北 大 学 教 授 佐 藤 正 明		

論 文 内 容 要 旨

第 1 章 序 論

聴覚器官は人体に備わった一種の精巧な音響装置であり、空気中の音響振動を効率よく体内に取り入れる役割を果たしている。感覚細胞の存在する蝸牛内は、リンパ液で満たされているため、感覚細胞を刺激するにはリンパ液を振動させなければならず、空気中の振動はリンパ液の振動に変換される必要がある。聴覚器官は空気とリンパ液とのインピーダンス整合器として機能しており、効率良いインピーダンス整合を行なっている。しかし、その振動様式には不明な点が多く、伝音特性も十分には解明されていない。

近年、生体器官の構造および振動解析の有力な一手法として、有限要素法 (Finite Element Method : FEM) が多く用いられるようになった。FEM を用いる利点は、複雑な生体構造を容易にモデル化でき、細部の動きを把握できることにある。本論文では、FEM により、限りなく実際に近い聴覚系のモデル化を行う。そして、このモデルを用い、広帯域に亙り鼓膜と耳小骨の振動様式を解析し、聴覚系の伝音特性を解明する。

第 2 章 ヒトの聴覚機構

聴覚系に於ける音響刺激の情報処理過程は、音波を力学的な振動として、体内に取り込むプロセスと、力学的振動を電気信号に変換し、伝達・処理するプロセスに分けることができる。前者のプロセスは、外耳、中耳、内耳により処理され、後者のプロセスは、内耳内の有毛細胞や聴覚神経、大脳皮質により処理される。本章では、外耳と中耳および内耳の形状と機能について説明した。

第 3 章 中耳振動様式の測定法

中耳各パーツの物性値や境界条件は、未知であるものが多いため、それらの値は、実際の中耳振動と FEM 解析結果を比較しながら、決定する必要がある。本章では、中耳振動特性を実測するため、独自に開発した中耳動特性測定装置 (Sweep Frequency Impedance Meter : SFI) を用い、被験者の中耳インピーダンスを測定し、中耳の共振周波数を求めた。また、各病変が中耳振動特性に及ぼす影響も明らかにした。更に、従来の中耳振動測定法により得られた知見も、まとめて示した。

第4章 ヒト聴覚系のモデル化

本章では、ヒト聴覚系のモデルを構築した(図1参照)。鼓膜および耳小骨の形状は、側頭骨標本のコンピュータ支援3次元再構築の計測結果およびKirikae, 上房らの報告を基に決定した。また、耳小骨に付着している、前ツチ骨靭帯、後キヌタ骨靭帯、鼓膜張筋腱、アブミ骨輪状靭帯およびアブミ骨筋腱もモデル化した。鼓膜の離散化には232個の3角形薄肉シェル要素を、耳小骨および靭帯・筋腱には82個の6面体アイソパラメトリック要素を用いた。鼓膜輪は弾性支持とし、直線バネと回転バネを与えた。キヌタ・アブミ関節は、耳小骨に対してヤング率を小さくすることにより、その可動性を表現した。内耳からの抗力は、内耳の入力インピーダンスが主に減衰力によることから、アブミ骨底に粘性減衰器(粘性減衰係数: D_c)が接続されているものとして評価した。中耳含気腔および外耳道の気体領域の形状はKirikae, Egolfらの報告などを参考にして決定した。

第5章 FEMプログラム

解析には独自に開発した聴覚系解析専用FEMプログラムを使用した。マトリクス構築に当たり、中耳各部位はすべて等方弾性体とし、減衰はRayleigh減衰を仮定した。また、蝸牛からの抗力は、減衰マトリクスの対応要素に減衰係数 D_c を直接付加した。構築したマトリクスを運動方程式に代入し、Newmark- β 法によって、時間応答解析を行い、必要に応じFFTにより周波数応答を求めた。

第6章 境界条件および物性値の決定

鼓膜の物性値および耳小骨の密度は報告されているが、鼓膜輪の境界条件や靭帯・筋腱の物性値は未知である。そこで、これらの境界条件・物性値の決定には、第3章で用いたSFIにより、種々の操作を加えた側頭骨標本の中耳特性を測定し、得られた音圧の周波数変化とFEM解析結果とを比較することにより、境界条件および物性値を決定した。

第7章 中耳振動様式

中耳の機能は、空気の低インピーダンス系の振動を、蝸牛内リンパ液の高インピーダンス系の振動に変換することによりあり、そのため、中耳には音圧増幅作用があるものとされている。この増幅作用は、鼓膜とアブミ骨底の実効振動面積比と耳小骨連鎖のテコ作用による。しかし、中耳振動は単純ではなく、耳小骨連鎖の回転軸は周波数により移動し、複雑な振動形態をとるとの報告もなされている。本章では、第6章で決定した、中耳各パーツの境界条件と物性値を用い、鼓膜および耳小骨の振動様式を解析した。さらに、中耳各パーツの物性値変化が中耳振動に及ぼす影響について考察した。その結果、周波数の増加により、鼓膜の最大振幅部位が変化し(図2参照)、耳小骨の回転軸も移動することが明らかとなった(図3参照)。また、中耳の振動様式は、鼓膜や各靭帯・筋腱および蝸牛の物性値により変化することを示した。

第8章 中耳の非線形性

中耳の振動振幅は、入力音圧に対し線形性があることが知られている。一方、外耳道に静圧を加えるなどして、中耳を大変形させた場合には、中耳音響インピーダンスは非線形的に変化する。しかし、この中耳非線形挙動が、どのようなメカニズムで起こるかは明らかになっていない。本章では、中耳に静圧を加える過程で静的非線形解析を行ない、中耳形状の変化および物性値の非線形性を考察した。

第9章 中耳の伝音特性

ヒトが音として知覚できる純音の周波数は20Hz~20kHz程度とされている。また、音の強さについては周波数によって異なり、各周波数において、音として聞こえる最小レベルが存在する。これを聴力域値という。この聴力域値には、外耳や中耳からなる末梢聴覚系の伝音特性の影響が大きいことが考えられる。本章では、末梢聴覚系の伝音特性を解析し、聴力域値との関係を示した(図4参照)。これにより、外耳道および中耳の伝音特性は聴力特性に強い影響を及ぼすことが明らかとなった。

第10章 結 論

本論文では、FEMによる実際に近い聴覚系のモデル化を行い、鼓膜・耳小骨の振動様式および聴覚系の伝音特性を求めた。さらに、中耳各パーツの物性値変化が、振動モードおよび伝音特性に及ぼす影響を明らかにした。また、中耳の、静圧下における大変形に伴う非線形性についても解析を行った。そして、以下の知見を得た。

1. 鼓膜は、低振動数ではツチ骨柄の前後にピークを持つ振動モードを示した。周波数の増加と共に最大振幅部位は鼓膜下方に移行し、4 kHz以上では複数のピークを持つ複雑な振動モードとなった。
2. 耳小骨は、低周波数域では前ツチ骨靭帯と後キヌタ骨靭帯付近を軸とする回転運動をした。この回転軸は周波数の上昇と共に移動した。
3. 中耳の振動様式は、鼓膜や各靭帯・筋腱、蝸牛の物性値によって変化した。特に、アブミ骨周辺の状態変化は、中耳振動様式に大きな影響を及ぼした。
4. 静圧負荷時の中耳非線形性は、鼓膜の形状変化による非線形性と、鼓膜および筋腱・靭帯の材料非線形性に起因することが示された。
5. 外耳道・中耳の伝音系の特性が、聴力特性に強い影響を及ぼすことが示唆された。

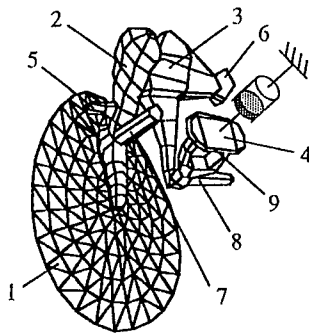


図1 中耳 FEM モデル

1,鼓膜; 2,ツチ骨; 3,キヌタ骨; 4,アブミ骨;
5,前ツチ骨靭帯; 6,後キヌタ骨靭帯; 7,鼓膜張筋腱; 8,アブミ骨筋腱; 9,アブミ骨輪状靭帯

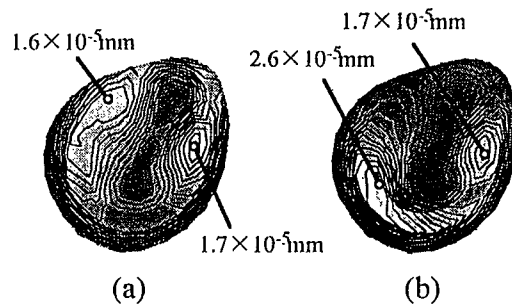


図2 鼓膜の振動様式

a, $f=0.85\text{kHz}$ (interval $3.0 \times 10^{-6}\text{mm}$);
b, $f=2.0\text{kHz}$ (interval $1.5 \times 10^{-6}\text{mm}$).

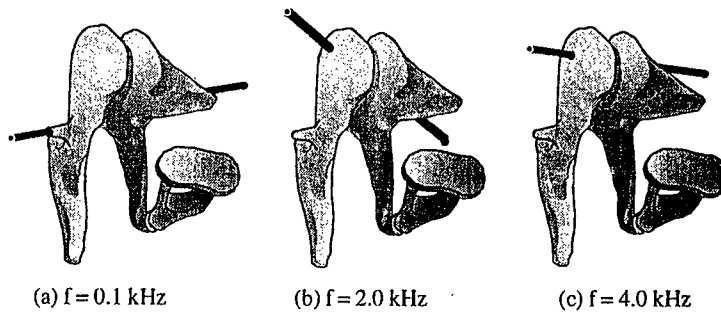


図3 耳小骨振動軸の移動

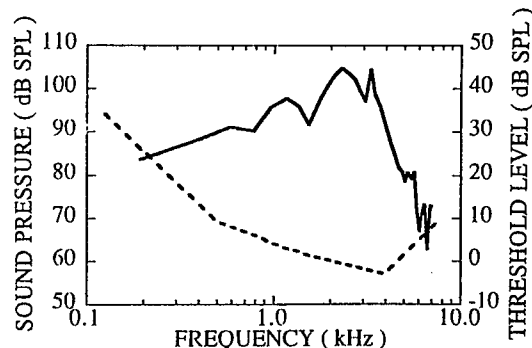


図4 聴覚系伝音効率と聴力域値

実線、外耳道入り口に80dB SPLを加えた場合に蝸牛内に生じる音圧; 破線、ヒトの聴力域値 (Sivian and White, 1933)

審査結果の要旨

聴覚器官は、人体に備わった一種の精巧な音響装置であり、空気中の音響振動を効率よく体内に取り入れる役割を果たしている。しかし、その振動様式には不明な点が多い。

本論文は、有限要素法 (Finite Element Method : FEM) により、実際に近いヒト聴覚系のモデル化を行い、鼓膜と耳小骨の振動様式および聴覚系伝音特性を明らかにしたもので、全編10章よりなる。

第1章は序論であり、研究の背景と目的を述べている。

第2章では、研究対象である、ヒトの聴覚機構の形態と機能について述べている。

第3章では、独自に開発した中耳振動様式測定法と、従来の測定法について説明し、各方法で得られた知見を述べている。

第4章では、中耳および外耳のモデル化を行なっている。

第5章では、解析に用いた、聴覚系解析専用 FEM プログラム並びに解析手法について述べている。

第6章では、第3章で述べた中耳振動様式測定法による側頭骨標本の測定結果と、FEM 解析結果とを比較することにより、中耳各部の境界条件および物性値の決定を行なっている。

第7章では、純音に対する、鼓膜と耳小骨各部の振動様式を明らかにしている。更に、中耳各部の物性値や形状変化が、これらの振動様式に及ぼす影響を示している。現在、生理的状态における鼓膜および耳小骨の振動様式は明らかとなっておらず、有限要素法により、これらの振動様式を得たことは極めて重要な成果である。

第8章では、外耳道に静圧を加えた場合に、中耳の音響インピーダンスが変化することに着目し、加圧による鼓膜および靭帯・筋腱の大変形に伴う中耳の非線形挙動について、接線剛性法に基づき検討を行なっている。

第9章では、外界の音刺激により、内耳蝸牛内に生ずる音圧の周波数特性、すなわち中耳の伝音特性を明らかにし、ヒトの聴力域値と伝音特性との関係について検討を行なっている。更に、中耳各部の物性値や形状および外耳道の形状変化が、伝音特性に及ぼす影響を明らかにしている。これは重要な成果である。

第10章は結論である。

以上要するに本論文は、有限要素法により、ヒト聴覚系のモデル化を行い、鼓膜と耳小骨の振動様式および伝音特性、並びに中耳大変形時の非線形挙動を明らかにしたもので、生体工学の発展に寄与するところが少なくない。

よって、本論文は博士 (工学) の学位論文として合格と認める。