

	の	ぐ	ち	し	ゅう	い	ち
氏	名	野	口	周	一		
授	与	学	位	博	士	(工	学)
学	位	授	与	年	月	日	平成9年3月25日
学	位	授	与	の	根	拠	法
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		
		3	次	元	モ	デ	ル
		に	よ	る	蝸	牛	動
		特	性	の	解	析	
指	導	教	官	東	北	大	学
		教	授	和	田	仁	
文	審	査	委	員	主	査	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

空気の粗密波である音は、鼓膜、耳小骨連鎖からなる中耳で、機械振動となり、内耳蝸牛へ伝播する。そして、蝸牛内の基底板と呼ばれる膜が振動する。この基底板上には、コルチ器という器官が存在し、この部分で、機械振動が電気信号に変換される。このように、蝸牛は機械-電気変換を行う聴覚末梢器官である。

近年、蝸牛にきわめて急峻な周波数特性があることが確認されたことと、耳から音が出てくる現象、すなわち、耳音響放射(Otoacoustic Emissions: OAEs)が発見されたことにより、蝸牛は単なる変換器でなく、自らエネルギーを発生する増幅器としての働きもあると考えられるようになった。この増幅機構は、コルチ器内の外有毛細胞(Outer Hair Cell: OHC)の優れた運動性に起因すると考えられている。蝸牛のメカニズムを解明するためにこれまで多くの研究が行われているが、その挙動には不明な点が多い。

本論文では、1次元蝸牛モデルを構築し、蝸牛内基底板の挙動解析を行い、OAEsの数値シミュレーションを行った。次に、実際の蝸牛形状に近い3次元FEMモデルを構築し、1次元モデルでは解析が不可能であった、基底板挙動に及ぼす、その形状や物性値の影響などを検討した。さらに、構築した3次元モデルに、OHCの働きを導入し、蝸牛増幅機構の解析を行った。

### 第2章 1次元蝸牛モデル

1次元蝸牛モデルを構築するにあたって、次のような仮定を導入した。

- (1) 蝸牛のらせんを直線状とする。
- (2) ライスネル膜の存在を無視し、蝸牛は前庭階と鼓室階から構成されているとする。
- (3) 前庭階、鼓室階の高さを等しく、蝸牛の長さに沿って断面積は一定とする。
- (4) リンパ液は非粘性・非圧縮の理想流体とする。

これらの仮定のもと、図1のような蝸牛モデルを構築し、比較的、発振時間の短いトーンバースト音によって誘発される、誘発耳音響放射(Transiently Evoked OAEs: TEOAEs)のシミュレーションを試みた。図2は蝸牛の増幅機構に大きく寄与していると考えられている、OHCの働きを示したものである。図は、OHCが基底板に及ぼす単位面積当たりの力、すなわち圧力を、基底板の位置および刺激音入力からの時間に対して、3次元的に表したものである。

このように、OHCの働きが、基底板の位置および時間を限定して2度強まると仮定し解析を行い、計測結果に

似た波形を得た。このことから、TEOAEsが発生するのは、OHCの働きが2度強まるためであると考えられた。なお、数値計算には、東北大学大型計算機センターのスーパーコンピュータSX-3/44Rおよび汎用コンピュータACOS3900/20を使用した。

### 第3章 3次元蝸牛モデル

3次元蝸牛モデルを構築するにあたって、次のような仮定を導入した。

- (1) 蝸牛のらせんを直線状とした。
- (2) ライスネル膜を基板に対して水平に存在するものとした。
- (3) リンパ液を理想流体とした。

これらの仮定のもと、図3のような蝸牛モデルを構築した。基板形状を図4のように定め、解析を行った結果が図5(a)である。図5(a)は、2, 4, 6kHzの純音を刺激音とした場合の、基板各位置の速度振幅である。図のように、刺激音周波数によって、グラフのピークが異なり、基板に存在するといわれる周波数弁別機能が再現された。図5(b)は、基板の幅および厚さを、蝸牛基部から頂部にわたって一定と仮定し解析を行った結果である。図のように、グラフのピークはいずれの刺激音周波数についても蝸牛基部側に現れ、周波数弁別機能は得られなかった。以上のことから、蝸牛内基板の形状が、蝸牛の周波数弁別機能に大きく寄与していることが明らかとなった。

次に、病変として、内リンパ水腫のシミュレーションを行った。図6は、内リンパ水腫の場合の基板の変位を示したものである。内リンパ水腫によって、低周波数領域の聴力が低下するのは、図6のように、頂部で基板の変形が大きくなり、その上に存在するコルチ器を圧迫するためであると考えられた。

### 第4章 蝸牛増幅機構

第3章にて構築した3次元モデルに、外有毛細胞(OHC)の発生する力を導入し解析を行った結果を、図6に示す。図7において、実線はOHCの働きがあるACTIVEな場合、破線はOHCの働きがないPASSIVEな場合であり、刺激音周波数は2および6kHzである。図のように、OHCの働きによって基板振動が約10倍増加するとき、必要な外有毛細胞1個の力は、最大で約1nNであった。

### 第5章 結論

本研究の総括として、各章で得られた結論をまとめている。

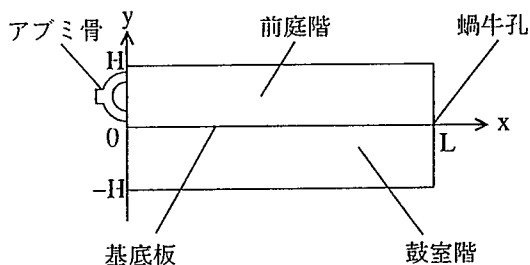


図1 1次元蝸牛モデル.

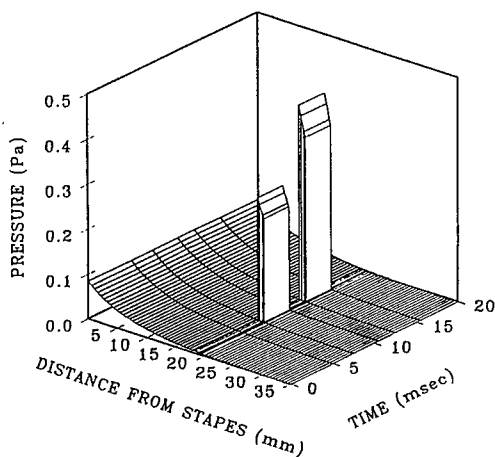


図2 OHCが基底板に及ぼす圧力.

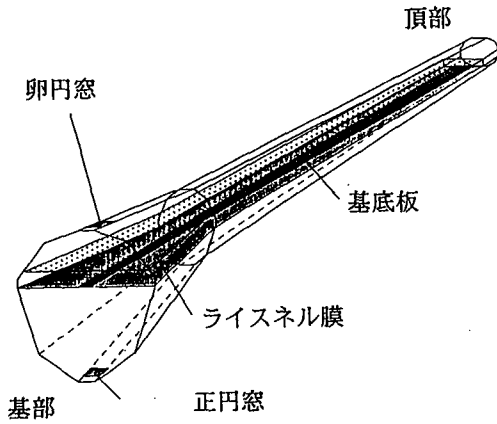


図3 3次元蝸牛モデル.

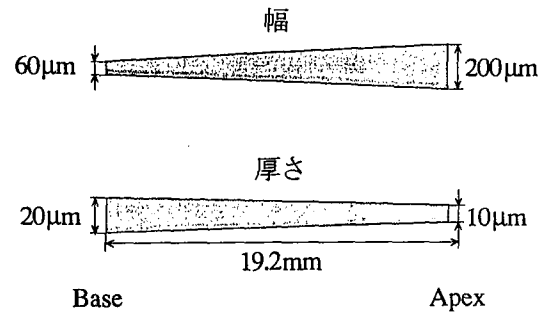


図4 3次元モデルの基底板形状.

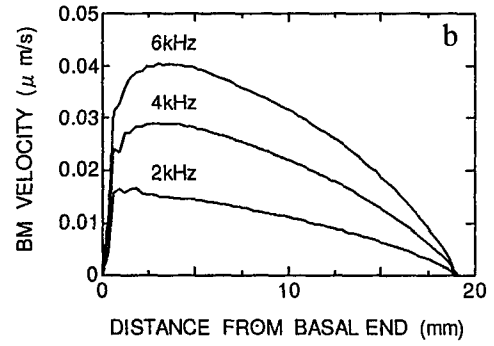
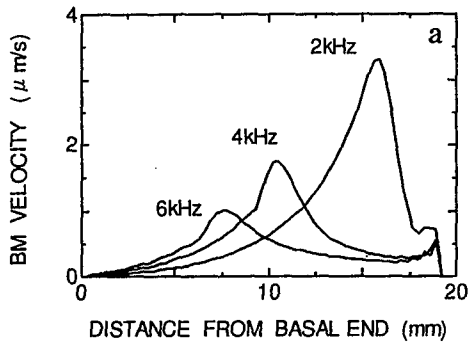


図5 基底板振動の速度振幅. (a) 図4で示した基底板形状の場合. (b) 基底板の幅、厚さが一定の場合.

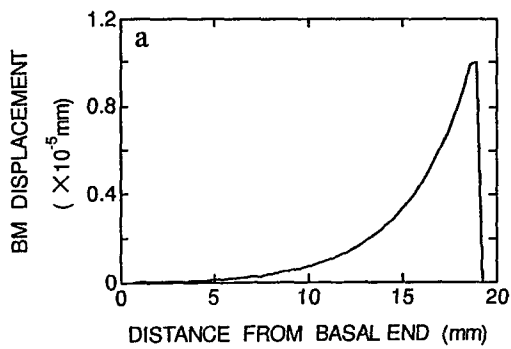


図6 内リンパ水腫の場合の基底板変位.

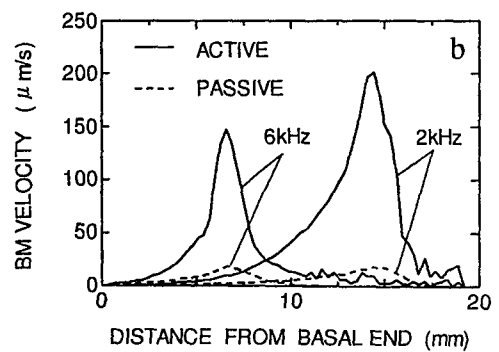


図7 OHCの働きがある場合の基底板振動.

## 審査結果の要旨

空気の粗密波である音は、鼓膜、耳小骨連鎖からなる中耳で機械振動となり、内耳蝸牛へ伝播する。蝸牛はこの機械振動を電気信号に変換して、聴神経へ伝達する変換器の役割と、自らエネルギーを発生し、伝播した振動を増幅する働きを持つ。しかし、その挙動には不明な点が多い。本論文は、内耳蝸牛の数学モデルを構築し、数値シミュレーションを通して、蝸牛の動特性を解析したもので、全文5章より成る。

第1章は序論である。

第2章では、1次元蝸牛モデルを構築し、蝸牛増幅機構の源であると考えられている、外有毛細胞の発生する力をモデルに導入した。そして、刺激音によって誘発され、耳から音が出てくる現象である誘発耳音響放射の発生機序を検討した。その結果、誘発耳音響放射が発生するのは、外有毛細胞の働きが、2度強まるためであることを示した。これは重要な知見である。

第3章では、3次元蝸牛モデルを構築し、蝸牛内の基板の形状が、蝸牛の周波数弁別機能に大きく寄与していることを明らかにした。また、蝸牛内のライスネル膜は、蝸牛頂部の基板振動を抑制することを明らかにした。さらに、ライスネル膜の振動が顕著となる位置は、基板の振動の影響を受け、刺激音周波数に応じて変化することを明らかにした。次に、病変として、内リンパ水腫のシミュレーションを行い、低周波数領域の聴力が低下するのは、蝸牛頂部の基板が大きく変形するためであることを示した。また、ライスネル膜は、蝸牛全体にわたって大きく変形することを明らかにした。これらは重要な知見である。

第4章では、第3章まで用いた3次元モデルに、外有毛細胞の発生する力を導入した。そして、蝸牛増幅機構を実現するために必要な外有毛細胞1個の力は、最大で約1nNであることを明らかにした。これは重要な知見である。

第5章は結論である。

以上要するに本論文は、蝸牛内基板とライスネル膜の挙動および、外有毛細胞の発生する力を、数値シミュレーションを用いて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を認める。