基板インピーダンスの不連続性と誘発耳音響放射の関係

—— 数理モデルによる検討 ——

和田 仁¹⁾, 中島 隆哉¹⁾, 大山 健二²⁾

¹⁾東北大学大学院工学研究科

²⁾東北労災病院

要旨：誘発耳音響放射 (Transiently Evoked OAEs: TEOAEs) が生じる一因として、蝸牛内基板インピーダンスの不連続性が有力視されているが、その機序は明確になっていない。そこで本研究では、基板インピーダンスに不連続性を有する蝸牛の数理モデルを用いて、TEOAEs の数値シミュレーションを行い、TEOAEs の発生機序について、理論的に解明することを試みた。その結果、TEOAEs の波形は、刺激音周波数に近い CF をもつ部位で、OHC の働きが正常であり、なおかつ基板のインピーダンスが不連続をもつ場合に発生すると推察された。従って、トーンバースト音により発生する TEOAEs は、内耳蝸牛の一部の状態のみを反映していると考えられた。

— キーワード —

誘発耳音響放射, 不連続性, 蝸牛 1 次元モデル, 理論的解析

1. はじめに

耳音響放射 (Otoacoustic Emissions: OAEs) の一種に、トーンバースト音やクリック音などの発振時間の短い刺激音によって誘発される誘発耳音響放射 (Transiently Evoked OAEs: TEOAEs) がある。図 1 は、音圧 60 dB SPL, 周波数 1 kHz のトーンバースト音を入力したときの、外耳道内圧の時間変化の波形である。刺激音入力後、約 11 msec, 16 msec に、刺激音とは異なる波形が現れ、それぞれ fast component, slow component と名付けられている¹⁾。

現在、TEOAEs の各 component が生じる一因として、基板インピーダンスが、各部位で不連続に変化しているためという考え方が有力視されている^{2~4)}。この基板インピーダンスの不連続性は、コルチ器上の外有毛細胞 (Outer Hair Cell: OHC) の配列の不規則性が 1 つの原因であると考えられている^{5~7)}。また、基板は、蝸牛入口から蝸牛孔への長さ方向よりも幅方向の繊維が支配的であるため⁸⁾,

図 1 ヒトにおける TEOAEs の計測結果
刺激条件 P=60 dB SPL, f=1 kHz, トーンバースト音
11 msec に fast component, 16 msec に slow component が現れた。なお、0~5 msec までは、刺激音の波形を除去するため、ウィンドウをかけている。

幅方向の繊維の配列状態により、基板インピーダンスが長さ方向に不連続になっていることも考えられる。しかし、TEOAEs の各 component の発生機序はいまだ不明である。そこで本研究では、基板のインピーダンスが長さ方向に不連続であると仮定

し、蝸牛の数値モデルにより TEOAEs の数値シミュレーションを行い、TEOAEs の各 component の発生機序について、理論的に説明することを試みた。

2. 解析方法

本研究では、すでに報告したモデル⁹⁾ に不連続性を導入して解析を行った。この蝸牛 1 次元モデルでは、蝸牛入口から蝸牛孔方向に x 軸、前庭階の高さ方向に y 軸をとった。また、基板を 512 の微小要素に分割して、特徴周波数 (Characteristic Frequency: CF) を再現し、OHC の能動的な働きも考慮している。解析で使った基板の運動方程式は、

$$M(x) \frac{\partial^2 u(x, t)}{\partial t^2} + R(x) \frac{\partial u(x, t)}{\partial t} + K(x) u(x, t) = p(x, t) + P_{\text{OHC}}(x, t) \quad (1)$$

ここに、 x と t は、蝸牛入口からの距離と時間、 $M(x)$ 、 $K(x)$ 、 $R(x)$ は、それぞれ基板の質量、剛性、減衰係数である。また、 $u(x, t)$ 、 $p(x, t)$ 、 $P_{\text{OHC}}(x, t)$ は、それぞれ、基板の y 軸方向の変位、前庭階と鼓室階のリンパ液の圧力差、OHC が基板に及ぼす力を示している。図 2 に、解析で用いた CF 1 kHz における基板の速度と OHC が基板に及ぼす力の関係を示す。OHC が発生する力は、入力に対して出力が飽和する特性があることが報告されている¹⁰⁾。そこで、OHC が基板に及ぼす力は、基板の速度と同じ方向に働き、速度が増加するに従って増加し、やがて飽和するものとした。

本研究では、特定の要素において不連続となる関数 $\delta(x)$ を用い、基板インピーダンスに不連続性を導入した^{11~13)}。今、 $\delta(x)$ を、

$$\delta(x) = \{1 \times \delta'(x)\} \times 100 \quad (2)$$

$$\delta'(x) = \begin{cases} \alpha_i (x = x_i, i = 1, 2, 3, \dots, n) \\ 0 (x \neq x_i, i = 1, 2, 3, \dots, n) \end{cases} \quad (3)$$

とする。ここに、 α は不連続の大きさ、 x_i は不連続のある位置を表す。不連続性導入後の M 、 K 、 R は、不連続性導入前の基板の質量、剛性、減衰係数を M_0 、 K_0 、 R_0 とすると、

$$\left. \begin{aligned} M(x) &= M_0(x) \times \frac{\delta_M(x)}{100} \\ K(x) &= K_0(x) \times \frac{\delta_K(x)}{100} \\ R(x) &= R_0(x) \times \frac{\delta_R(x)}{100} \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

図2 解析で用いた CF 1 kHz における基板の速度と OHC が基板に及ぼす力の関係
OHC が基板に及ぼす力は、基板の速度と同じ方向に働き、速度が増加するに従って増加し、やがて飽和するものとした。

図3 不連続な関数 $\delta_M(x)$ と $\delta_M(x)$ 導入後の基板の質量
(a) 質量に導入した不連続な関数 $\delta_M(x)$ 。それぞれ CF 1.1kHz に +10%、0.9kHz に -10% の不連続点をもっている。
(b) $\delta_M(x)$ 導入後の基板の質量。CF 1.1kHz で 0.33mg/mm²、0.9kHz で 0.27mg/mm²、それ以外で 0.30mg/mm² となっている。

ここに、 δ_M 、 δ_K 、 δ_R はそれぞれ基板の質量、剛性、および減衰係数に関する関数である。例えば、図 3 (a) に示す質量に関する不連続関数 $\delta_M(x)$ を導入した場合、基板の質量は、不連続性導入前は各部位において一定ゆえ、不連続性導入後は、図 3 (b) に示すように図 3 (a) で指定された位置で不連続となる。

TEOAEs は、中耳の共振周波数 1 kHz で最も明瞭に計測されることから¹⁴⁾、TEOAEs に及ぼす中耳の影響は大きいと考えられる。そこで、中耳の力の伝達率を考慮に入れて解析を行った。中耳のフォワード、バックワードの伝達率を T_f 、 T_b とすると、鼓膜面での入力音圧 $p_{ti}(t)$ とそれにより生じる蝸牛入口での音圧 $p_{ci}(t)$ との関係は、

$$p_{ci}(t) = T_f p_{ti}(t) \quad (5)$$

また、内耳蝸牛の能動的な働きによりアブミ骨底に加わる音圧 $p_{co}(t)$ と鼓膜面で計測される OAEs の音圧 $p_{to}(t)$ との関係は、

$$p_{to}(t) = T_b p_{co}(t) \quad (6)$$

となる。 T_f 、 T_b は、Puria らの実験結果¹⁵⁾ における、1 kHz のフォワード、バックワードの伝達率を用いた。そして、数値シミュレーションにおいて、刺激音は、周波数 1 kHz、持続時間 3 msec のトーンバースト音を実際に OAEs 計測装置 (Otodynamics Ltd., ILO92) で発生させ、その波形を数値化して用いた。

解析は時間領域で行い、 x 軸に関して差分法を、時間に関しては、4 次の Runge-Kutta 法を用いた。なお、数値計算には、ワークステーション (SUN, SPARC station20) を使用した。

3. 解析結果

図 4 に、数値シミュレーションから得られた、基板インピーダンスへの不連続性導入前の鼓膜面での音圧変化を示す。その際、OHC の能動的な働きは、各部位において正常に作用するものとした。基板インピーダンスに不連続性を導入しない場合、その時間波形には、10 msec まで刺激音による波形が現れたが、10 msec 以降では、TEOAEs とみられる波形は現れなかった。

図 5 に、モデルの特性を調べるため、1 つの要素にのみ不連続性を導入した場合の鼓膜面での音圧変

図 4 不連続性を導入しなかった場合の解析結果
刺激条件 $P=60\text{dB SPL}$, $f=1\text{ kHz}$, トーンバースト音
OHC の能動的な働きは、各部位において正常に作用するものとした。TEOAEs とみられる波形は現れなかった。

化を示す。図 5 (a) は、導入した基板の質量に関する不連続関数 $\delta_M(x)$ であり、CF 1.2 kHz の部位で、他の部位に比べて基板の質量が 10% 大きいものとした。図 5 (b) は、そのときの数値シミュレーションの結果である。刺激音入力後 10 msec までは、不連続性を導入していない図 4 と同様に、刺激音による波形が現れた。しかし、刺激音入力後 10 msec 以降は、図 4 とは異なり、正弦波によく似た波形が現れた。図 5 (c) は、図 5 (b) の 10 msec 以降の波形を FFT 解析したものである。周波数スペクトルは、周波数 1.2 kHz で最大となり、図 5 (b) の 10 msec 以降の波形が、不連続が存在する部位の CF と同じ周波数 1.2 kHz の成分から成り立っていることがわかる。この時間波形の周波数成分と不連続を導入した部位の CF が一致する関係は、剛性および減衰係数に不連続を導入した場合にも現れた。

図 6 は、刺激条件を一定 ($P=60\text{dB SPL}$, $f=1\text{ kHz}$ のトーンバースト音) にし、不連続を導入する部位の CF を変化させ、CF を横軸に、また、そのとき現れる 10 msec 以降の波形の peak to peak を縦軸にとったものである。導入する関数 $\delta(x)$ の不連続の大きさは、(a) で +10%、(b) で -10% とした。質量、剛性、減衰係数いずれの場合も、10 msec 以降の時間波形の振幅は、不連続を CF 1 kHz 付近の部位に導入すると大きく、不連続をそれ以外の部位に導入すると小さくなった。また、10 msec 以降の時間波形に及ぼす影響は質量と剛性に比べて、減衰係数で小さかった。

図5 1つの不連続性を導入した場合の解析結果

刺激条件 $P=60\text{dB SPL}$, $f=1\text{ kHz}$, トーンバースト音

- (a) 導入した基板の質量に関する不連続関数 $\delta_M(x)$ 。CFが1.2kHzの部位で、他の部位と比べて、10%大きいものとした。
 (b) 得られた解析結果。10msec以降に、正弦波によく似た波形が現れた。
 (c) (b)の10msec以降の波形のFFT解析結果。1.2kHzで最大となった。

次に、2つの部位に不連続性を導入した場合の鼓膜面での音圧変化を示す。図7の太い実線で表される complex は、質量のCF 0.9kHzの部位に+10%、剛性のCF 1.2kHzの部位に-10%の2つの不連続

図6 不連続が存在する部位のCFと10msec以降の時間波形の振幅の関係

刺激条件 $P=60\text{dB SPL}$, $f=1\text{ kHz}$, トーンバースト音

(a) 正の不連続を導入した場合。

(b) 負の不連続を導入した場合。

CF 1 kHz 付近の部位に不連続を導入した場合、時間波形の振幅が大きくなった。時間波形の振幅に及ぼす影響は、質量や剛性に比べて、減衰係数の方が小さかった。

を導入した結果である。それに対し、破線で表される composite は、2つの不連続を個々に導入して得られる2つの時間波形(細い実線と破線)を10~20 msecの間で足しあわせた結果である。complex と composite の波形は、ほぼ一致した。このことは、質量と質量、減衰係数と剛性のような、他の組み合わせや、3つ以上の組み合わせにおいても生じた。つまり、複数の不連続性を導入した場合、個々に不連続を導入して得られる時間波形を線形的に足し合わせた時間波形が得られた。

これらの不連続性と時間波形の関係から、適当な不連続性を導入すれば、TEOAEsの波形をシミュレーションにより再現できると考えた。TEOAEsの波形を発生させる不連続関数は、無数の種類と組み合わせが存在するが、ここでは、図8(a), (b)に示す、質量および剛性に関する不連続関数 $\delta_M(x)$, $\delta_K(x)$

図7 2つの不連続を導入した場合
 刺激条件 $P=60\text{dB SPL}$, $f=1\text{ kHz}$, トーンバースト音
 — 2つの不連続を導入した場合。
 - - - 細線で表される2つの波形を足し合わせたもの。
 — 質量のCF 0.9kHzの部位に+10%の不連続を導入した場合。
 - - - 剛性のCF 1.2kHzの部位に-10%の不連続を導入した場合。
 2つの不連続を導入した場合、個々に不連続を導入して得られる時間波形を線形的に足し合わせた時間波形が発生した。

を導入した。不連続を、CF 1 kHz 付近に80Hz おきに配置した。なお、図6より、減衰係数の影響は小さいと考え、減衰係数には、不連続性を導入しなかった。図8(c)は、(a), (b)に示す不連続な関数 $\delta_M(x)$, $\delta_K(x)$ を導入したときの数値シミュレーション結果である。fast component, slow component とみられる波形が、刺激音入力後、それぞれ、10msec, 16 msec に発生し、実測値に類似した。

図9に、fast component, slow component の入出力特性の解析結果と計測結果を示す。解析結果は、計測結果と同様に、fast componentの方が刺激音圧に対して変化が大きく、刺激音圧が増加すると slow component の出力レベルをうわまわる傾向を示した。図10に、基板全体において一率に OHC の能動的な働きを低下させたときの、fast component, slow component の出力レベルの変化を示す。OHC の働きが低下するにつれて、fast component, slow component いずれも出力レベルは低下したが、slow component では、fast component と比較して、より急激に出力レベルが減少した。

TEOAEs と各部位における OHC の働きの関係を調べるため、図8(a), (b)に示した不連続性を変えずに、OHC の働きを部分的に弱め、シミュレーション

図8 TEOAEs の解析結果
 刺激条件 $P=60\text{dB SPL}$, $f=1\text{ kHz}$, トーンバースト音
 (a) 導入した基板の質量に関する不連続な関数 $\delta_M(x)$ 。
 (b) 導入した基板の剛性に関する不連続な関数 $\delta_K(x)$ 。
 (c) 解析結果。fast component, slow component とみられる波形が、それぞれ、10msec, 16msec に発生した。

を行った。図11(a)に示したように、OHC の働きを、CF 1 kHz の付近の部位で通常の50%に弱めた場合と、CF 1 kHz 以外の部位で通常の50%に弱めた場合に分けた。結果を図11(b)に示す。OHC の働きを CF 1 kHz の付近で弱めた場合は、TEOAEs の波形が出

図9 各 component の入出力特性の解析結果と計測結果
刺激条件 $f = 1 \text{ kHz}$, トーンバースト音
導入する不連続な関数は, 図 6 (a), (b) に示した $\delta_M(x)$, $\delta_K(x)$ を用いた。解析結果は, 計測結果と同様の傾向を示した。

図10 OHC の働きと各 component の出力レベル
刺激条件 $P = 60 \text{ dB SPL}$, $f = 1 \text{ kHz}$, トーンバースト音
導入する不連続な関数は, 図 6 (a), (b) に示した $\delta_M(x)$, $\delta_K(x)$ を用いた。OHC の働きが低下するにつれて, fast component と比較して slow component で, より急激に出力レベルが減少した。

現しなかったのに対し, 逆の場合は, TEOAEs が認められた。

4. 考 察

基底板インピーダンスに不連続性を導入しない場合は, OHC の能動的な働きが基底板に作用していたとしても, TEOAEs は発生しなかった。それに対し, ある 1 つの部位にのみ不連続を与えたとき得られた時間波形には, 10 msec 以降に, 不連続を導入した部位の CF と等しい周波数の正弦波が生じた。その理由として, 蝸牛内基底板に音刺激により生じる進行波の反射が挙げられる。基底板に生じた進行波は, 基

図11 TEOAEs と OHC の働きの関係
刺激条件 $P = 60 \text{ dB SPL}$, $f = 1 \text{ kHz}$, トーンバースト音
導入する不連続な関数は, 図 6 (a), (b) に示した $\delta_M(x)$, $\delta_K(x)$ を用いた。
(a) OHC の弱め方。CF 1 kHz の付近の部位を弱めた場合 (実線) と CF 1 kHz 以外の部位を弱めた場合 (破線) に分けた。
(b) 解析結果。OHC の働きを CF 1 kHz の付近で弱めた場合 (実線) は, TEOAEs の波形が出現しなかった。それに対し, CF 1 kHz 以外の部位を弱めた場合 (破線) は, TEOAEs の波形が出現した。

底板上を蝸牛基部から頂部へ進む。しかし, 進行波が不連続のある部位に達すると, インピーダンスの不連続性により反射がおこる。反射波は, 逆に蝸牛基部へ進み, 蝸牛入口で再度反射を起こす。不連続部位と蝸牛入口での反射の繰り返しの結果, 基底板上に定在波が発生し, 図 5 (b) の時間波形となって観察されたと推察される。また, 刺激音周波数に近い CF の部位に不連続を導入すると, 10 msec 以降の時間波形の振幅が大きくなった。基底板の進行波の振幅は, その刺激音周波数に相当する CF の部位で最大振幅となる。このため, その CF 近辺に不連続な部位が存在すると, その際, 生じる反射波の振幅も大きくなると推察される。2 つ以上の不連続を導入した

場合には、それぞれの反射波が足し合わされ、10msec以降の時間波形に現れると考えられた。

これらの不連続性と時間波形の関係を考慮し、適当な不連続性を導入して、解析を行った結果、TEOAEsと見られる波形が生じた。実際の TEOAEs の計測においては、刺激音圧の増加にしたがい、まず slow component が、その後、fast component が出現することが報告されている¹⁰⁾。そして、fast component は、刺激音圧に対して変化が大きく、音圧が増加すると slow component の出力レベルをうわまわることが知られている¹⁰⁾。図9に示す解析結果は、計測結果と同様の傾向を示した。また、難聴者を対象としたトーンバースト音による TEOAEs の傾向に関して、Tanaka らは、内耳に障害がある難聴者では、slow component が特に検出されにくくなると報告している¹⁾。図10に示す解析結果は、難聴が OHC の働きの低下に由来すると仮定するならば、計測と同様の傾向を示した。従って、これらの解析結果と計測結果の一致により、本研究で用いたモデルが妥当であり、実際の TEOAEs を再現していると考えた。図8(a), (b)の不連続性だけでなく、他の不連続性の配置や組み合わせでも、TEOAEs は再現できると推察される。いずれにせよ、TEOAEs が生じるためには、内耳蝸牛の基板インピーダンスに、不連続性が存在しなければならないこと自体は変わらない。従って、基板インピーダンスの不連続性が、TEOAEs の各 component を発生させる一因であると考えられた。また、OHC の働きを部分的に弱めて行ったシミュレーション結果から、その刺激音周波数に相当する CF 近辺の部位の OHC の働きのみが、TEOAEs の波形に影響を及ぼすことが考えられた。

以上の結果から、TEOAEs の発生する要因として、刺激音周波数に相当する CF の部位での OHC の働きが正常であり、なおかつ基板インピーダンスに不連続の存在することが挙げられる。要するに、ある刺激音周波数で計測された TEOAEs は、内耳蝸牛の特定部位の状態を反映したものであると考えられた。また、OHC が正常にもかかわらず、適当な基板インピーダンスの不連続性が存在しないために、TEOAEs のレベルが小さいことも考えられた。

5. ま と め

蝸牛 1 次元モデルを用いて、TEOAEs の数値シミュレーションを行った。その結果、TEOAEs の波形は、刺激音周波数に近い CF をもつ部位で、OHC の働きが正常であり、なおかつ基板のインピーダンスが不連続をもつ場合に発生すると考えられた。従って、トーンバースト音により発生する TEOAEs は、内耳蝸牛の一部の状態を反映したものであると推察された。

Relationship Between the Impedance Discontinuities on the Basilar Membrane and TEOAEs

—Consideration by Mathematical Model—

Hiroshi Wada¹⁾, Takaya Nakajima¹⁾, Kenji Ohyama²⁾

¹⁾Department of Mechanical Engineering, Tohoku University

²⁾Tohoku Rosai Hospital

Transiently Evoked Otoacoustic Emissions (TEOAEs) are believed to be attributed to the presence of impedance discontinuities on the basilar membrane in the cochlea. However, the generation mechanism of TEOAEs has not been clarified. In this study, using the mathematical model of a cochlea, which has the impedance discontinuities on the basilar membrane, TEOAEs were simulated. The results reveal that TEOAEs are produced by not only the active process associated with the outer hair cells, but also the presence of impedance discontinuities at a site of the basilar membrane whose characteristic frequency is equal to the stimulus frequency. Therefore it may be said that TEOAEs in response to a tone burst stimulus reflect the condition at the specific point of the cochlea.

参考文献

- 1) Tanaka Y, Suzuki M and Inoue T : Evoked

- otoacoustic emissions in sensorineural hearing impairment ; Its clinical implications. *Ear Hear* **11** (2) : 134-143, 1990
- 2) Kemp DT : Stimulated acoustic emissions from within the human auditory system. *J Acoust Soc Am* **64** : 1386-1391, 1978
- 3) Hilger AW, Furness DN and Wilson JP : The possible relationship between transient evoked otoacoustic emissions and organ of Corti irregularities in the guinea pig. *Hear Res* **84** : 1-11, 1995
- 4) Fukazawa T : Evoked otoacoustic emission in a nonlinear model of the cochlea. *Hear Res* **59** (1) : 17-24, 1992
- 5) Lonsbury-Martin BL, Martin GK, Probst R, et al : Spontaneous otoacoustic emissions in a nonhuman primate. II. Cochlear anatomy. *Hear Res* **33** : 69-93, 1988
- 6) Kim DO : Active and nonlinear cochlear biomechanics and the role of outer-hair-cell subsystem in the mammalian auditory system. *Hear Res* **22** : 105-114, 1986
- 7) Clark WW, Kim DO, Aurek PM, et al : Spontaneous otoacoustic emissions in chinchilla ear canals: Correlation with histopathology and suppression by external tones. *Hear Res* **16** : 299-314, 1984
- 8) Mikuni H, Fukuda S, Kucuk B, et al : The three-dimensional fibrillar arrangement of the basilar membrane in the mouse cochlea. *Eur Arch Otorhinolaryngol* **252** : 459-498, 1995
- 9) 和田 仁, 野口周一, 大山健二 : 蝸牛内基板の挙動解析。日本機械学会論文集 (C編) **61**-588 : 3259-3262, 1995
- 10) Cody AR and Russell IJ : The response of hair cells in the basal turn of the guinea-pig cochlea to tones. *Journal of Physiology* **383** : 551-569, 1987
- 11) Sun X, He N and Lam CF : Modeling the fine structure of the 2f1-f2 acoustic distortion product. I. Model development. *J Acoust Soc Am* **96** (4) : 2166-2174, 1994
- 12) Sun X, He N and Lam CF : Modeling the fine structure of the 2f1-f2 acoustic distortion product. II. Model evaluation. *J Acoust Soc Am* **96** (4) : 2175-2183, 1994
- 13) Wit HP and Avan P : Wavelet analysis of real ear and synthesized click evoked otoacoustic emissions. *Hear Res* **73** : 141-147, 1994
- 14) Wada H, Ohyama K, Kobayashi T, et al : Relationship between evoked otoacoustic emissions and middle-ear dynamic characteristics. *Audiology* **32** (5) : 282-292, 1993
- 15) Puria S and Rosowski JJ : Measurement of reverse transmission in the human middle ear : Preliminary results. *Diversity in Auditory Mechanics* : 151-157, 1996
- 16) 和田 仁, 野口周一, 大山健二 : 誘発耳音響放射発生機序の理論的解明。日本機械学会論文集 (C編) **62**-598 : 203-206, 1996

(原稿受付 平成11.3.2)