

頭部・耳介による音の干渉を考慮した音響伝達関数の計算

田口 東 中村 学
山梨大学工学部電子情報工学科

音像定位の問題を考える上で、頭部や耳介の複雑な形状を考慮に入れた音響伝達関数を求めることは重要で基礎的な問題である。この問題を考えるために、まず、450面の四辺形から構成される人間の片耳の数値モデルを作り、それを頭と同じ位の大きさの回転楕円体の対称な位置に取付けて頭部モデルを作成した。そして、このモデルに平面進行波が定まった方向から入射するときの音場を、境界要素法を用いて計算した。計算結果から、入射波の方向、耳の左右、耳介の境界条件、を変化させると、耳介付近の点における周波数特性が大きく変化することが分かった。

Computer Simulation of Acoustic Wave Propagation to Human Head in Free Space

Azuma TAGUCHI and Manabu NAKAMURA
Department of Electrical Engineering and Computer Science
Faculty of Engineering, Yamanshi University

It is basic and important to find head-related acoustic transfer function to a human ear from a sound source, when the sound localization problem is considered. We made a numerical model for a human external ear consisting of 450 rectangular patches, then, attach one and its copy symmetrically to a ellipsoid of revolution to make a model for human head. Then, using the boundary element method, we solved the sound propagation problem where a plane wave in a fixed direction comes to this model placed in 3-dimensional free space. It was observed that the sound frequency responses near left and right external ears vary drastically according to the changes in incident direction and/or boundary conditions on the ear.

1. はじめに

聴覚は視覚とともに人間が外界からの刺激を受け入れる手段として、重要な役割を果たしている。光が水晶体を通して網膜上で像を結ぶように、空気の振動である音が鼓膜を振動させて耳内の感覚器官に受け取られ、音として知覚される。そして、受け取られた音に対して脳において複雑な情報処理がなされているが、そのひとつに、音源の位置を認識することができる音像定位という感覚がある。音像が定位するのは、主として、左右の耳に到達する音の大きさの差、時間差が影響していると考えられている。また、音源が移動したり頭を左右に移動したりすると定位がより明確になることが知られている^[2]。そのときに、

- (1) どのような周波数帯域の音が主として貢献するのか、
 - (2) 頭部や耳介による反射や回折がどのように影響しているか、
 - (3) 視覚の助け、経験などの心理的な要因はどう作用するのか、
- といったことが興味の対象となる。

これらの要因は、条件の整った部屋で被験者に音を聞かせ、その反応を問う実験によって調べられる。ここで、スピーカから発せられた音が知覚されるまでに、

- (a) 部屋の音響特性、
 - (b) 頭部伝達関数、
 - (c) 脳の情報処理機構
- の影響を受ける。(a)は平易な条件となるように実験を行うとしても、(b)と(c)とが混在している。頭部や耳介の影響を明らかにするには(b)を取り出す必要があり、心理的な要因を考える上でも、(b)と(c)とが分離されていることが望ましいことは言うまでもない。

このためには、生体や頭の模型(ダミーヘッド)を使った実験や解析が従来より行われている。これに対して、本報告では3次元測定された耳介をモデルとして、計算機による数値シミュレーションを行うことにする。この方法は計算量がかなり膨大となるという欠点を持っているが、頭部や耳介の一部を取り去ったり、表面の音響インピーダンスを変化させたり、といった条件の変化に簡単に対応できるという点で優れている。

2 音場の方程式

図1に示すような十分大きな境界 C_∞ に囲まれた3次元空間内に頭部 Ω がおかれ、遠くから来た入射波が Ω に入射して散乱されるというモデルを考える。空間から Ω を除いた領域を V 、音速を c とすると、音の波動方程式は、速度ポテンシャル ϕ を用いて次式のように書ける。

$$\nabla^2 \phi = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \phi}{\partial t^2}$$

さらに、角振動数 ω が一定の正弦波を仮定して

$$\phi = f(\mathbf{r}) \exp i\omega t$$

とおくと、ヘルムホルツ方程式

$$\nabla^2 f + k^2 f = 0 \quad (1)$$

を得る。ここで、波数 $k = \omega/c$ である。空気密度を ρ とすると音圧 p および粒子速度 u は次式で与えられる。

$$p = i\omega\rho\phi$$

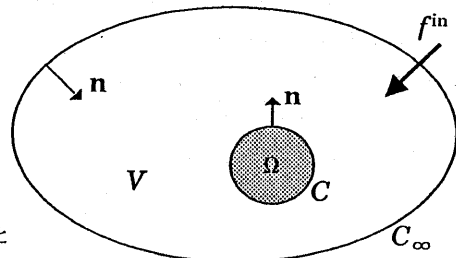


図1 3次元空間内におかれた頭部 Ω

$$u = -\nabla\phi$$

次に、数値解法として境界要素法を用いるので、方程式の積分表現を導いておく[3]。自由空間のグリーン関数で点 r' を中心とし、遠くへ広がって行く条件を満たすものは

$$G(r, r') = \frac{\exp-ik|r-r'|}{4\pi|r-r'|}$$

のように与えられる。関数 G を用いると、式(1)を満足する解 f を、 $r \in V$ に対して

$$f(r) = \int_{C+C_\infty} \left(f(r') \frac{\partial G(r, r')}{\partial n} - G(r, r') \frac{\partial f}{\partial n} \right) ds' \quad (2)$$

と表すことができる。次に、入射波を f^{in} 、反射波を f^r とし、

$$f = f^{in} + f^r$$

と分解する。境界 C_∞ を十分遠くにとると反射波 f^r の C_∞ 上の積分は無視することができる。また、 Ω がない場合には C_∞ で囲まれた領域では f^{in} はヘルムホルツ方程式を満足し、式(2)の積分領域を C_∞ とした式を満たすので、これを式(2)に代入することにより、

$$f(r) = f^{in}(r) + \int_C \left(f(r') \frac{\partial G(r, r')}{\partial n} - G(r, r') \frac{\partial f}{\partial n} \right) ds' \quad (3)$$

を得る。点 r を境界 C 上にとった場合には、その点から空間 V の方を見込む立体角を Θ として

$$\frac{\Theta}{4\pi} f(r) = f^{in}(r) + \int_C \left(f(r') \frac{\partial G(r, r')}{\partial n} - G(r, r') \frac{\partial f}{\partial n} \right) ds' \quad (4)$$

となる。

次に境界条件を考える。境界が音響的に堅いと仮定できる場合には、その点における粒子速度が0となるように境界条件

$$\frac{\partial f}{\partial n} = 0 \quad (5)$$

を与える。また、耳介の各部位の影響を調べるために、音波のエネルギーが伝わるような境界条件(吸音)も考える(図2)。このときには、音波によって運ばれる実際のパワーが最も効率よく伝わるような平面波のインピーダンス

$$I = \frac{p}{u} = \rho c$$

を壁面で与える。図の法線方向に注意して、

上式を ϕ を使って書き直すと、境界条件

$$\frac{\partial f}{\partial n} + \omega \left(-\frac{i}{c} \right) f = 0 \quad (6)$$

を得る。

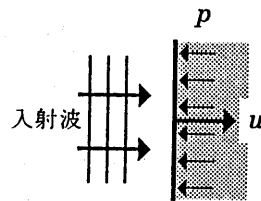


図2 境界条件

3. 境界要素法による離散化

境界面を四辺形または三角形の要素に分割する。各要素 S_j 内で局所座標系 (ξ, η) をとり、接点 j における座標 (x_j, y_j, z_j) 、関数 f の値 f_j 、法線方向導関数 $\partial f / \partial n$ の値 q_j 、および、座標を補間する補間関数 $\{h_j^e\}$ 、関数を補間する補間関数 $\{g_j^e\}$ によって、座標と未知関数を

$$x = \sum_j h_j^e(\xi, \eta), \quad y = \sum_j h_j^e(\xi, \eta), \quad z = \sum_j h_j^e(\xi, \eta),$$

$$f = \sum_j f_j^e(\xi, \eta), \quad q = \sum_j q_j^e(\xi, \eta)$$

のように近似する。これを式(4)において r を境界上の節点 i にとった式に代入し

$$a_{ij} = \sum_{j \in S_e} \int_{S_e} g_j^e(r') \frac{\partial G(r_i, r')}{\partial n} ds', \quad b_{ij} = \sum_{j \in S_e} \int_{S_e} G(r_i, r') \frac{\partial g_j^e(r')}{\partial n} ds'$$

の各項の積分を数値積分によって求めることにより、節点 i に関する方程式

$$0 \cdot f_i = f_i^{in} + \sum_j a_{ij} f_j - \sum_j b_{ij} q_j$$

を得る。数値積分はGauss-Legendre公式によって行ったが、要素 S_e が点 r_i を含む場合には b_{ij} の積分は特異積分となるので、2重指数関数型数値積分公式[4]によった。

4. 数値計算

頭部のモデルは次のように作った。まず、実際に右耳介の型を取って計測し、450面から成る片耳のモデルを作った。次に、頭部を回転楕円体で表現し、5500Hz以下の計算に用いる粗い分割と、5500Hz以上の計算に用いる細かい分割の2種類を用意した。それに、先に作った耳介を対称に取り付けて計算モデルを作成した。表1にモデルの大きさを示す。

計算プログラムは数値積分を行う部分と、連立1次方程式を解く部分とからなる。この方程式の係数行列は、複素数、非対称な密行列である。単精度計算で、軸を部分選択するLU分解に用いて解を求め、反復改良を行った。

表1 頭部モデルの大きさ

	点数	面数	最小辺長
分割粗	1064	1150	33mm
分割細	1667	1754	16mm

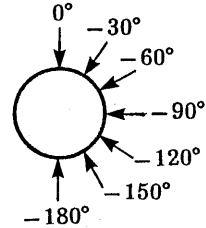


図3 入射方向

計算したケースは次の通りある。入射波は平面波とし、進行方向は図3に示す30度おきの7方向を選んだ。周波数は500Hzから14000Hzまでの24点とした。耳介の境界条件は

- I 全体に剛体壁の境界条件式(5)を与えたもの
- II 全体に平面波のインピーダンス(6)を与えたもの
- III 外耳道入口周辺に平面波のインピーダンスを与えたもの
- IV 耳介上部に平面波のインピーダンスを与えたもの

の4種類を考えた。

一つの周波数、一つの入射方向について解を求めるのに要したCPU時間を表2にまとめる。

表2 1周波数、1入射方向に対する計算時間

未知数の数	係数行列を作る (CPU秒)			LU分解 (CPU秒)		
	ACOS 850	SX-2A(NV)	SX-2A(V)	ACOS 850	SX-2A(NV)	SX-2A(V)
1064	650	219	395	755	194	28
1667			513			106

計算には、汎用コンピュータACOS 850(36ビット)とスーパーコンピュータSX-2Aを使用した。粗い分割に対して、SX-2Aのベクトル化機能を使う場合と使わない場合との比較を行った。係数値積分にはベクトル化の効果はなく、行列演算には効果が多大であることがわかる。計算精度は、修正量の最大値ノルムが相対値で 10^{-4} 以下になったときに反復改良を打ち切るようにした。ACOS 850では1回目、SX-2Aでは2回目の修正量がこの条件を満足した。

剛体モデルIについて、左右の耳の外耳道入口における周波数特性(絶対値)を入射方向ごとに図4~10に示す。全方向とも2000Hz以下では平坦であり、2500Hz(波長13.2cm)付近に鋭いピークが見られる。これは、外耳道の音響管としての1/4波長の共振であると思われる。左右のレベル差は-30度よりも-60度、-150度よりも-120度の方が著しい。後方からの音は周波数の高い音のレベルが低下していることが特徴である。また、入射方向が異なると、山や谷の周波数がズレていることがわかる。これらの図は音圧レベルの左右差を表したものであるが、音像定位には時間差(位相差)も重要な役割を果たしている。

外耳道入口吸音モデルIIIの周波数特性を、入射方向が正面と60度について、それぞれ図11、12に示す。特に周波数の高い領域でレベルが低下しており、山谷の差も小さくなっている。2500Hzの共振点が4000Hzへと高い方に移動しているが、境界条件の変更が耳道を短くする効果をもたらしたものと考えられる。図13、14に耳介全体吸音モデルIIの周波数特性を示す。これはモデルIIIの図と非常によく似ており、外耳道入口付近の役割が重要であることを示唆している。

次に剛体モデルの耳介上の等ポテンシャル線を、正面入射について図15に示す。周波数を高くしていくと、共振している部位が様々に変化する様子が分かる。このような等ポテンシャル線の様子は入射方向や左右の耳介によってかなり異なっている。

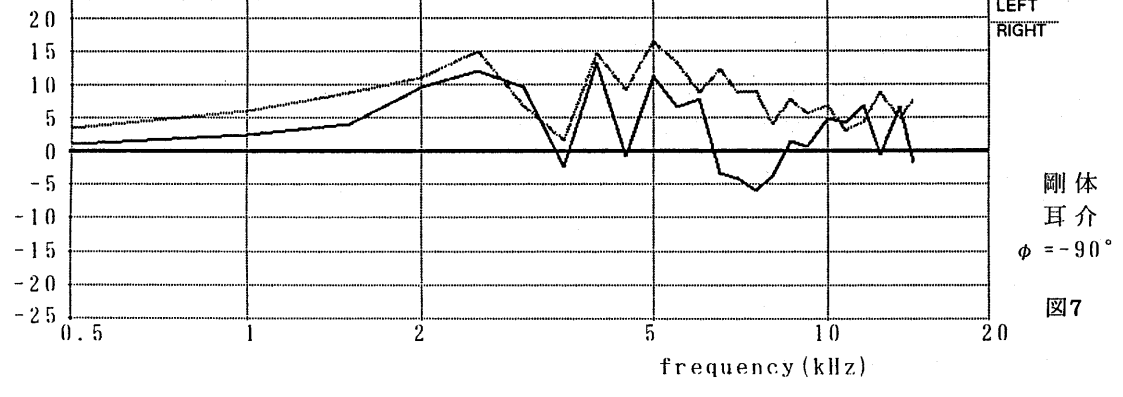
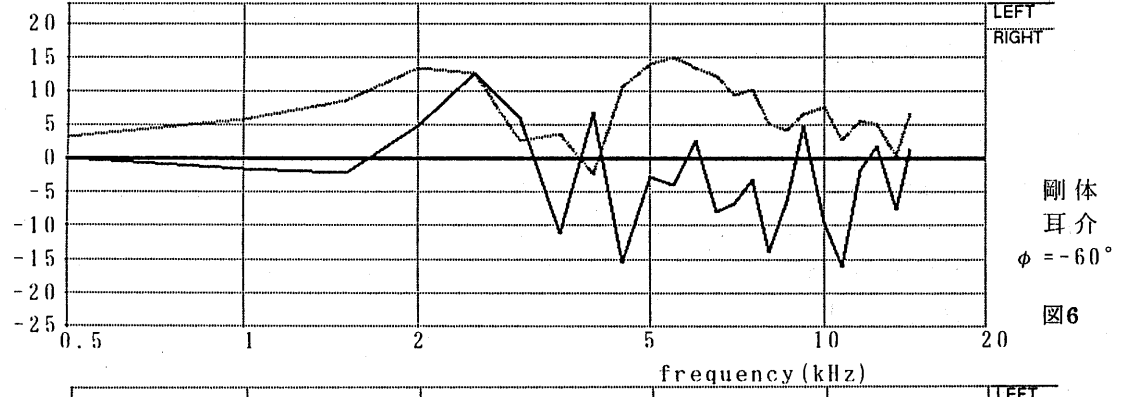
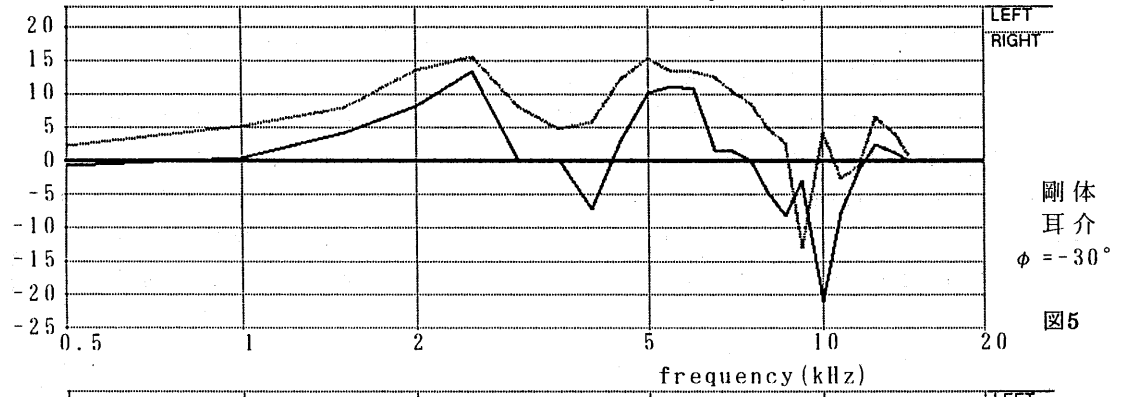
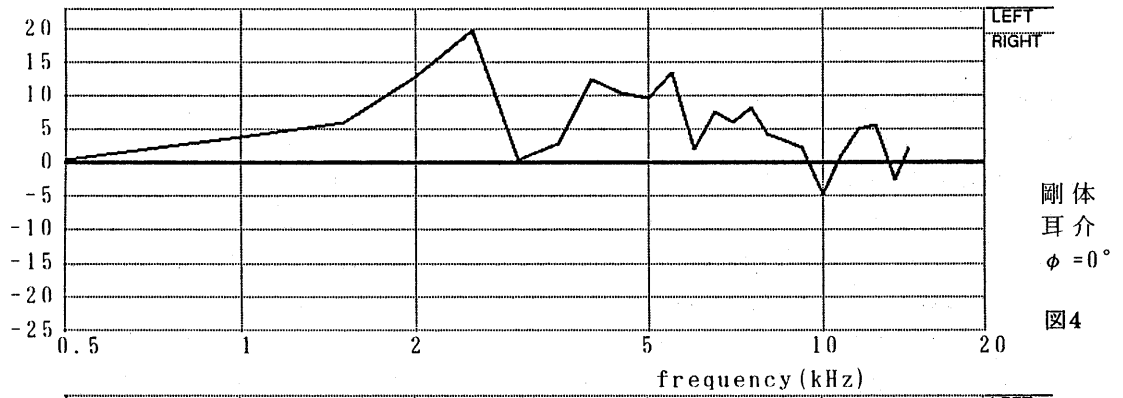
5. まとめ

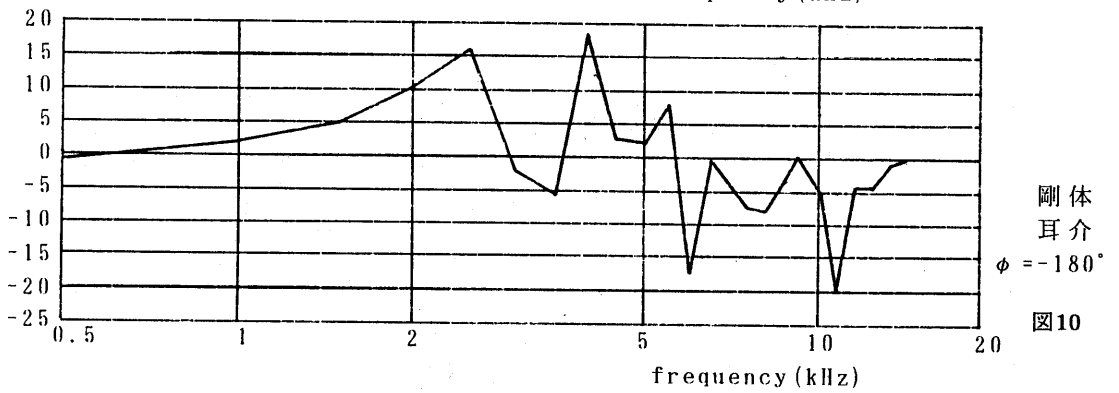
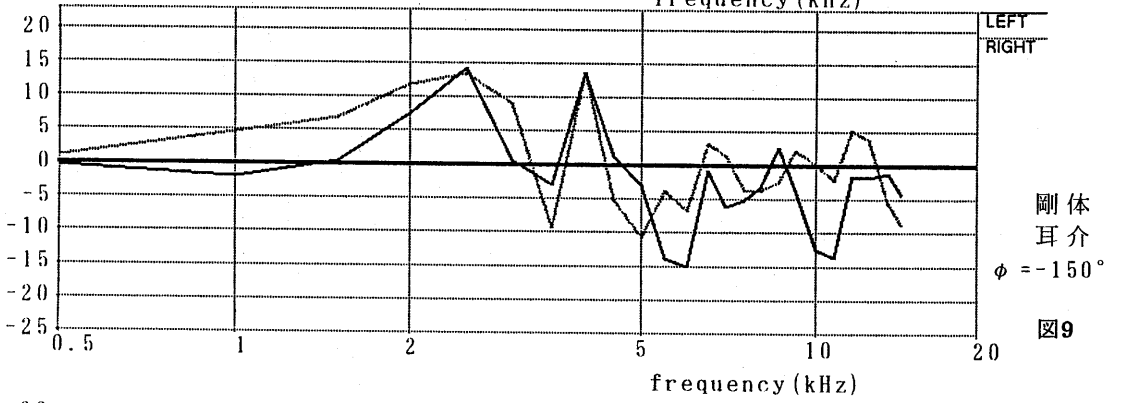
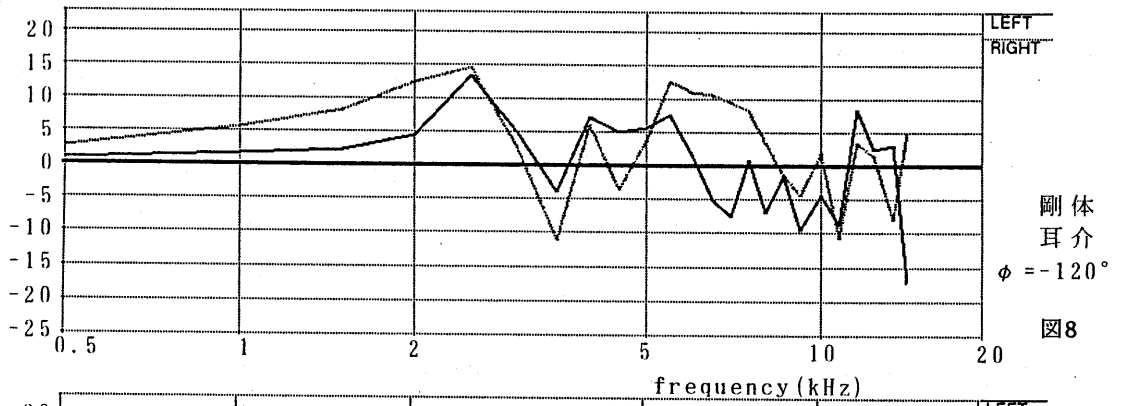
現在は計算結果を整理して特徴を把握することに努力している。また、ここで計算した周波数特性をイコライザーを用いて実現し、聴覚実験も行っている。

最後にCPU提供制度を利用させていただいた株式会社リクルート・スーパーコンピュータ研究所に深く感謝いたします。

参考文献

- [1] 早坂寿雄: 電気音響学(岩波全書), 岩波書店, 1979.
- [2] イェンス ブラウエルト, 森本政之, 後藤敏幸編著: 空間音響, 鹿島出版会, 1986.
- [3] 熊谷信昭, 森田長吉: 電磁波と境界要素法, 森北出版, 1987.
- [4] 森 正武: 数値計算プログラミング, 岩波書店, 1986.





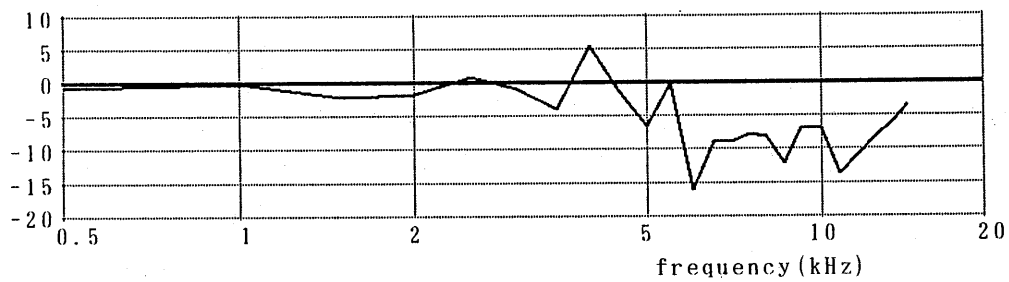


图11

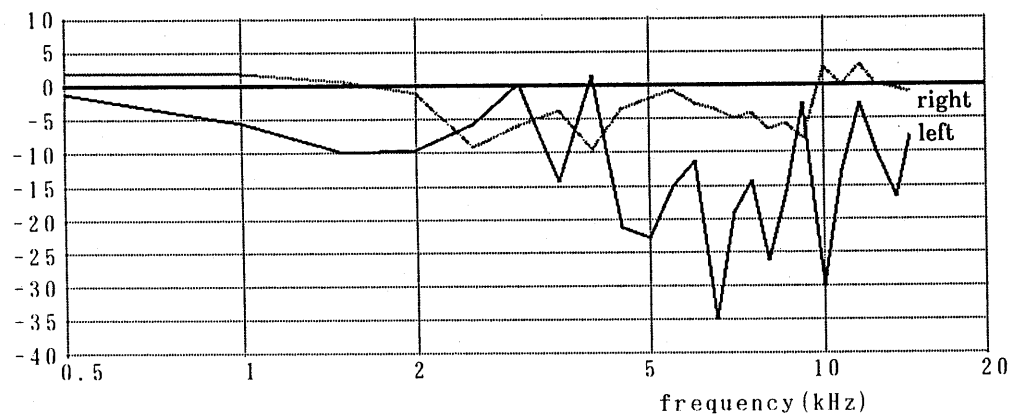


图12

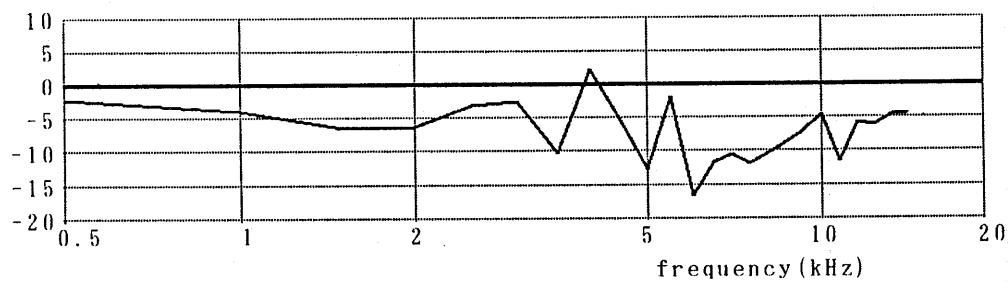


图13

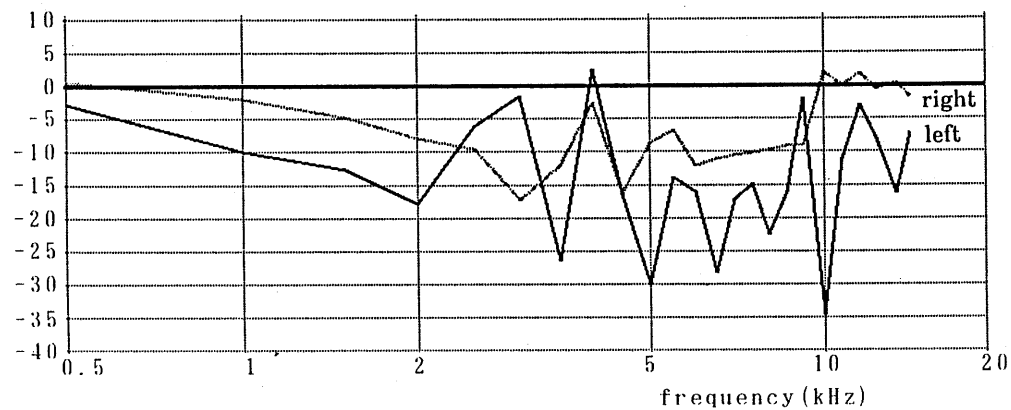


图14

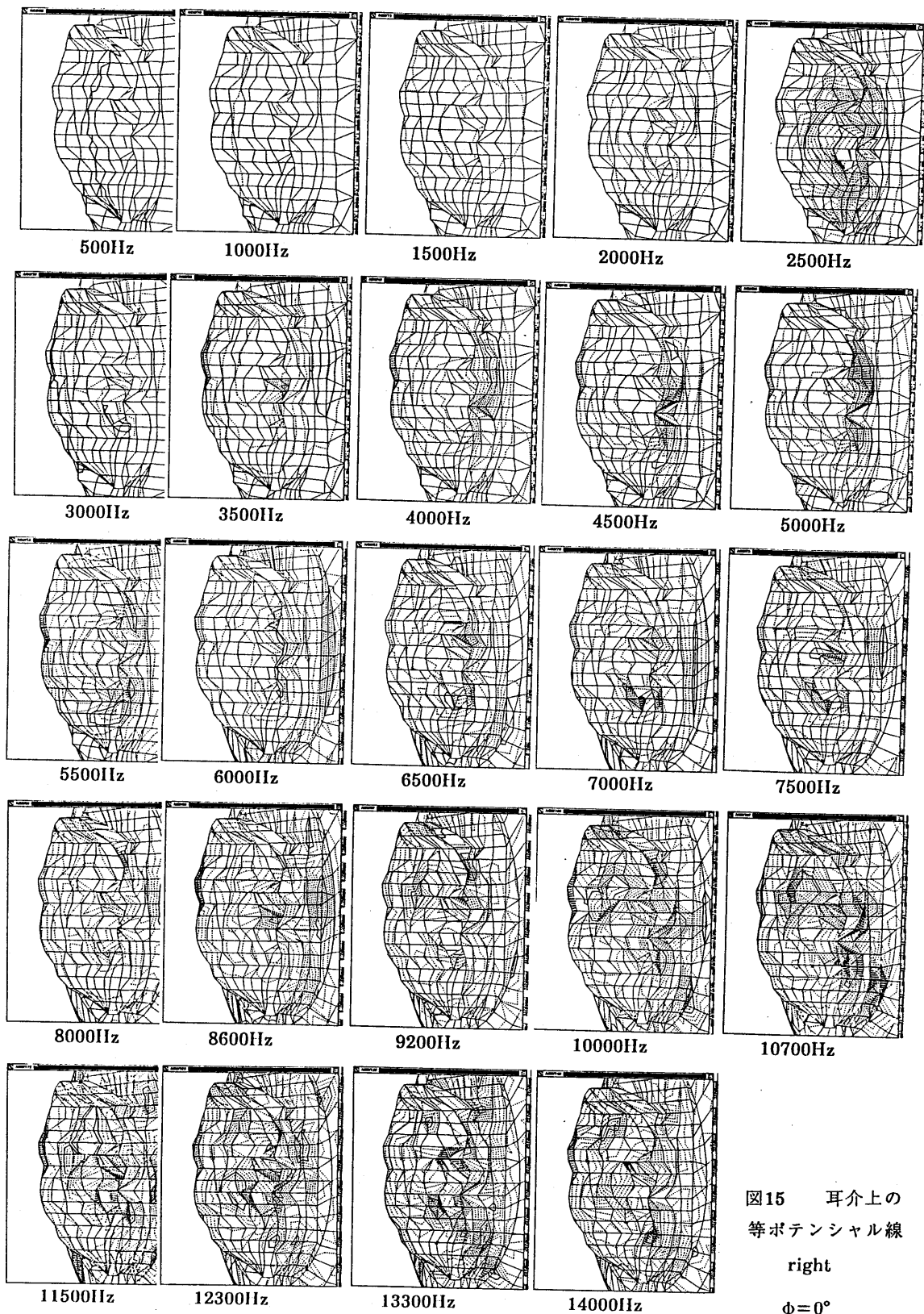


図15 耳介上の
等ポテンシャル線
right
 $\phi = 0^\circ$