

モデル化した耳介の正中面における音響特性の解析*

○竹本浩典, Parham Mokhtari, 加藤宏明, 西村竜一 (NICT), 飯田一博 (千葉工大)

1 はじめに

われわれはこれまで、時間領域差分法 (Finite-Difference Time-Domain method: FDTD 法)を用いて、頭部や耳介形状から頭部伝達関数 (Head-Related Transfer Function: HRTF) や耳介伝達関数 (Pinna-Related Transfer Function: PRTF) を計算し、正中面におけるピークやノッチの生成メカニズムの解明を進めてきた [1]。その結果、例えば第 1 ピーク (P1) は耳介の腔の内外方向の 1/4 波長共鳴、第 2, 第 3 ピーク (P2, P3) はそれぞれ腔の上下方向の 1/2 波長共鳴と 1 波長共鳴に由来することが明らかになった [1]。そして、これらのメカニズムを実装した、単純な形状の耳介モデル、Three-step model を考案した [2, 3]。このモデルは、耳介をあらゆる板状の直方体と、耳介の腔をあらゆる 3 つの直方体の窪みで構成され (Fig. 1)、正中面の PRTF では実耳と類似したピーク・ノッチパターンを生成する (Fig. 2)。

人間の耳介は極めて複雑な形状をしているため、その形態と PRTF の特徴量とを直接的に関係づけることは難しい。そこで、実耳の各部の寸法をモデルの各部の寸法に対応づける研究を行ってきた [例えば 4]。本稿では、モデル自体の音響的な性質を追及するために、モデルの各部の寸法を独立に変動させたときの正中面の PRTF における P1, P2, P3 の周波数とレベルの変動を分析し、第 1, 2 ノッチ (N1, N2) への影響も検討したので報告する。

2 材料と方法

2.1 耳介モデルとその変形

Fig. 1 に示す Three-step model を基本モデルとして、各部の寸法 (単位: mm) を変動させた。数字だけで示された寸法は固定で、略称=値という形式で示された 7 つの寸法を変動させた。なお、このモデルは左の耳介を表しており、Fig. 2 はこのモデルの PRTF (仰角 0 度は前方, 90 度は上方) である。

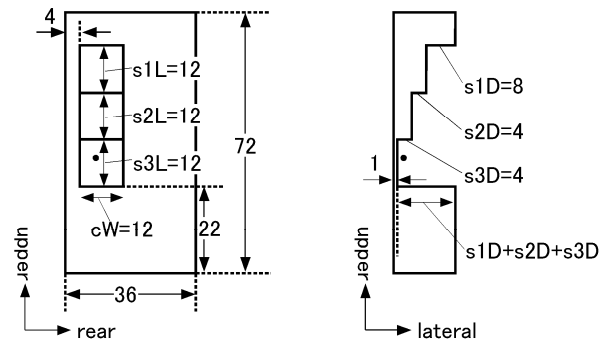


Fig. 1 Original pinna model. Left panel: lateral view. Right panel: longitudinal section. Values are indicated in mm. The black circle indicates the source point. Abbreviations are explained in text.

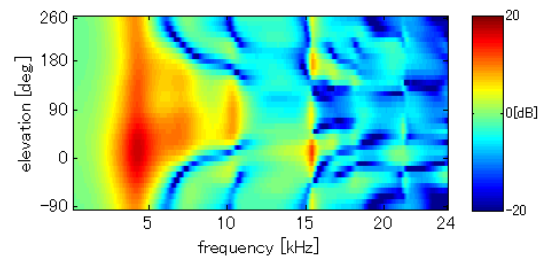


Fig. 2 PRTFs in the median plane calculated from the original model.

以下は、略称と変動させた寸法である。

- (1) s1D (step 1 depth): 1 段目の深さ
- (2) s2D (step 2 depth): 2 段目の深さ
- (3) s3D (step 3 depth): 3 段目の深さ
- (4) cW (cavity width): 耳介の腔の横幅
- (5) s1L (step 1 length): 1 段目の長さ
- (6) s2L (step 2 length): 2 段目の長さ
- (7) s3L (step 3 length): 3 段目の長さ

基本モデルの各寸法は、s1D=8 mm, s2D=4mm, s3D=4 mm, cW=12 mm, s1L=12 mm, s2L=12 mm, s3L=12 mm である。これらの寸法をそれぞれ独立に 25 %増減させた。

*An analysis of the acoustic characteristics of a modeled pinna in the median plane, by TAKEMOTO, Hironori, MOKHTARI, Parham, KATO, Hiroaki, NISHIMURA, Ryouichi, (NICT), and IIDA, Kazuhiro (Chiba Institute of Technology).

2.2 PRTFの計算

耳介モデルは、長軸が真上を向き、外側面が矢状面と平行になるように置いた後、上から見て時計回りに10度回転させた。これは、人体では耳介がやや前方に向いているためである。そして、耳介の腔に音源点を置き、音源点から10 cm離れた円周上に10度ごとに置いた36の観測点における5 msのガウスパルス応答から音響の相反定理に基づいてPRTFを求めた[1]。音源点は耳道開口部に相当する3段目の腔の内側前下方の隅から外側へ1 mm、後方へ5 mm、上方へ7 mm離れた位置に置いた。観測点を含む円周は、音源点を通る矢状面に置いた。ガウスパルス応答はFDTD法で計算し、空間離散化間隔は1 mm、時間離散化間隔は1 μ sとした。

なお、音源点の位置の影響も検討するために、音源点を上下に2 mm移動させたときの基本モデルのPRTFも計算した。

3 結果と考察

Table 1は、それぞれの寸法を独立に変動させた時のP1, P2, P3の周波数である。左端の列は、変動させた寸法とその値を示す。例えば、s1D=6は、1段目の深さを6 mmにしたモデルである。なお、orgは基本モデルである。Table 2は正規化した各ピークの変動量である。すなわち、第nピークの周波数Pn, その変動量を ΔP_n とすると、 $100 \cdot \Delta P_n / P_n$ である。

Table 1 Frequencies (Hz) of the first three peaks (P1, P2, and P3) for each modification.

	P1	P2	P3
org	4250	7100	10350
s1D=6	4750	7650	10600
s1D=10	3850	6650	10050
s2D=3	4500	7000	10600
s2D=5	4050	7150	10100
s3D=3	4400	7200	10400
s3D=5	4150	6950	10250
cW=9	4500	7450	10450
cW=15	4050	6750	10250
s1L=9	4250	7400	11250
s1L=15	4300	6650	9700
s2L=9	4300	7500	11100
s2L=15	4250	6650	9750
s3L=9	4400	7400	10750
s3L=15	4150	6800	9950

Table 2 Normalized amount of peak shift (%) for each modification.

	$100 \cdot \Delta P1 / P1$	$100 \cdot \Delta P2 / P2$	$100 \cdot \Delta P3 / P3$
s1D=6	11.8	7.7	2.4
s1D=10	-9.4	-6.3	-2.9
s2D=3	5.9	-1.4	2.4
s2D=5	-4.7	0.7	-2.4
s3D=3	3.5	1.4	0.5
s3D=5	-2.4	-2.1	-1.0
cW=9	5.9	4.9	1.0
cW=15	-4.7	-4.9	-1.0
s1L=9	0.0	4.2	8.7
s1L=15	1.2	-6.3	-6.3
s2L=9	1.2	5.6	7.2
s2L=15	0.0	-6.3	-5.8
s3L=9	3.5	4.2	3.9
s3L=15	-2.4	-4.2	-3.9

3.1 耳介の腔の深さ方向の変動

P1は耳介の腔の深さ方向に生じる1/4波長共鳴に由来する[1]。そこで、耳介の腔を、底面が閉鎖端で内側から外側へ次第に断面積が大きくなる3つの音響管で近似する。すなわち、断面積が $cW \cdot s3L$, $cW \cdot (s3L + s2L)$, $cW \cdot (s3L + s2L + s1L)$ と変化する3つの連続した円筒形の管と仮定する。この第1共鳴周波数を連続音響管モデル[5]で求めたところ4267 Hzであった。これはTable 1で示す基本モデルのP1周波数(4250 Hz)とほぼ一致する。よってP1に関しては、耳介の腔はFig. 3(a)で示す断面積関数で表現できる。

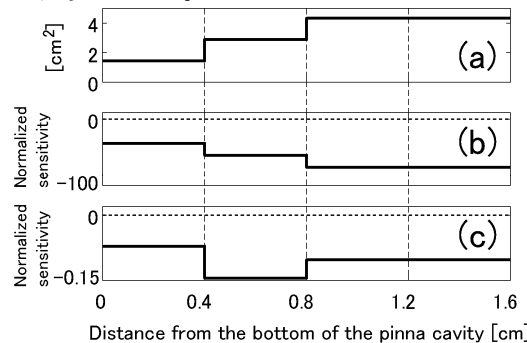


Fig. 3 (a) area function, (b) normalized length sensitivity function, (c) normalized area sensitivity function.

Table 2で示すように、s1D, s2D, s3Dを大きくするとP1周波数が下降し、小さくする

と上昇した。そして、P1 周波数の変動は、外側の寸法を変動させたときほど大きかった。Fig. 3 (b)は、Fig. 3 (a)から計算によって求めた音響感度特性[6]である。この特性は無次元の量で、各音響管をそれぞれ単位長さだけ伸張したときの共鳴周波数の変動の方向と量を示し、値が負であれば周波数が下降し、絶対値が大きいほど変動量が大きいことを意味する。Fig. 3 (b)は、最も外側の音響管の伸張が P1 周波数を最も下降させることを示す。よって、s1D の変動が P1 周波数に最も影響を与えることが縦続音響管モデルでも裏付けられた。

また、これらの深さ方向の寸法を変動させると、耳介の腔の長軸に沿った長さ方向に生じる 1/2 波長、1 波長共鳴に由来する P2, P3 周波数[1]も変動した。s2D を大きくすると P2 周波数は上昇し、小さくすると下降したが、それ以外では、どの寸法を大きくしても、P2, P3 周波数は下降し、小さくすると上昇した。

なお、s1D の変動は、P1 だけでなく、ピーク・ノッチパターンに全体として大きな影響を及ぼした。Fig. 4 は s1D=6 mm としたとき、Fig. 5 は s1D=10 mm としたときの PRTF である。s1D を小さくすると、ピークレベルは減少、ノッチレベルは増加し、全体としてピーク・ノッチパターンが曖昧になった。一方、s1D を大きくするとこれとは逆になった。しかし、広い仰角にわたって P2, P3 のレベルが増加したため、0 度と 180 度付近で N1 は曖昧になり、N2 は観察されなくなった。

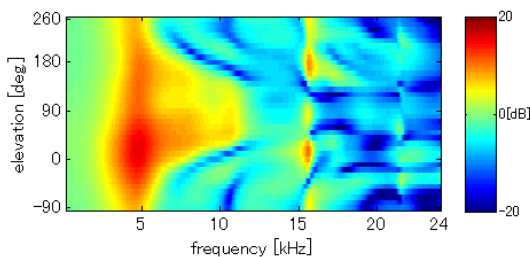


Fig. 4 PRTFs for s1D=6 mm

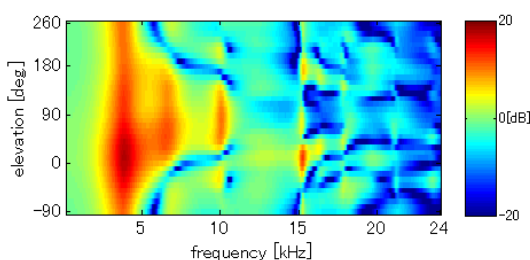


Fig. 5 PRTFs for s1D=10 mm

3.2 耳介の腔の横方向の変動

耳介の腔の横方向の寸法である cW を大きくすると、すべてのピーク周波数は下降し、小さくすると上昇した。その効果は P1, P2 で大きく、P3 で小さかった。

また、Figs. 6, 7 で示すように、s1D と同様に cW の変動も PRTF のピークとノッチ、とくにピークのレベルに大きな影響を及ぼした。しかし、その影響は s1D の変動と逆で、cW を小さくするとピーク・ノッチパターンが明瞭になり、大きくすると曖昧になった。これらの結果は、腔の幅に対する深さの比率が大きいとピーク・ノッチパターンは明瞭に、小さくなると曖昧になることを示す。なお、cW が大きくなると、腔の横方向に生じる 1/2 波長の共鳴が 13 kHz 付近に現れ、この周波数領域のピーク・ノッチパターンが複雑になった。

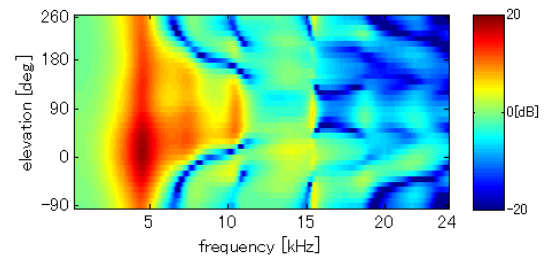


Fig. 6 PRTFs for cW=9 mm

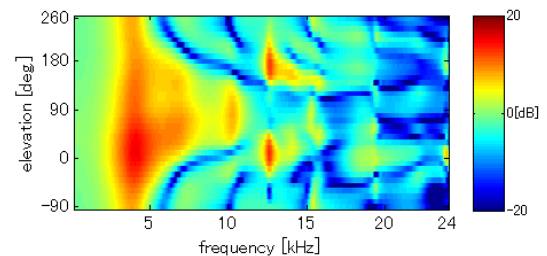


Fig. 7 PRTFs for cW=15 mm

3.3 耳介の腔の長軸方向の変動

耳介の腔の長軸方向の寸法である s1L, s2L, s3L を大きくすると P2, P3 周波数は下降し、小さくすると上昇した。これは、P2, P3 が耳介の腔の長軸方向に生じる 1/2 波長、1 波長共鳴に由来するため[1]であると考えられる。

s1L, s2L を変動させても P1 周波数はほとんど変動しなかったが、s3L を変動させると変動した。Fig. 3 (c)は、耳介の腔を内外方向に縦続した 3 つの音響管と見なした場合の断面積の変動に対する P1 周波数の音響感度特性である[6]。内側から 1, 2, 3 番目の音響管の断面積は、それぞれ $cW \cdot s3L$, $cW \cdot (s3L + s2L)$,

$cW \cdot (s3L + s2L + s1L)$ であるので、 $s3L$ を増加させるとすべての音響管の断面積が、 $s2L$ を増加させると2,3番目の音響管の断面積が、 $s1L$ を増加させると3番目の音響管の断面積が増加する。音響感度はすべて負であるので、どの管の断面積を増加させても周波数は下降する。 $s3L$ を増加させるとすべての断面積が増加するので、P1周波数が下降する量が最大になると考えられる。しかし、音響感度分析では、 $s1L$ の増加でP1が50 Hzほど上昇している原因は明らかにすることができなかった。

また、 $s1L$ を変動させると、PRTFのピークとノッチ、特にノッチのレベルに大きな影響が生じた。Fig. 8に示すように、 $s1L$ を小さくすると、ピークのレベルはあまり変化しなかったが、ノッチのレベルが減少してN1, N2とも明瞭になった。逆に、Fig. 9に示すように、 $s1L$ を大きくするとノッチのレベルが増加してN1, N2とも曖昧になった。

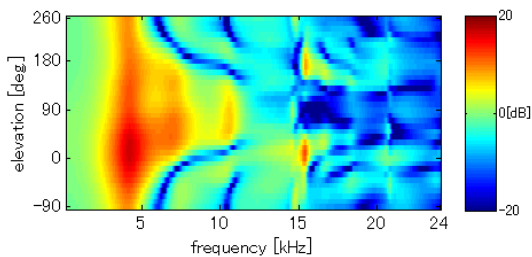


Fig. 8 PRTFs for $s1L=9$ mm

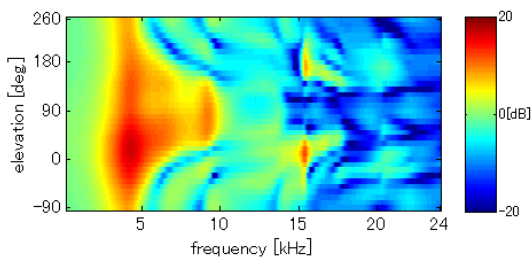


Fig. 9 PRTFs for $s1L=15$ mm

3.4 音源点の上下方向の変動

Figs. 10, 11は音源点の位置を2 mm上方または下方にそれぞれ移動させたときのPRTFである。音源点を移動させてもピークの周波数は変化しなかったが、レベルは大きく変化した。また、音源点を2 mm上方に移動させると、N1が真上方向(仰角90度)でも明瞭になった。これは、音源点が、腔の長軸方向の $3/2$ 波長共鳴(第3共鳴)における音圧の節の位置に近づき、その周波数ではノッチが現れたためである。

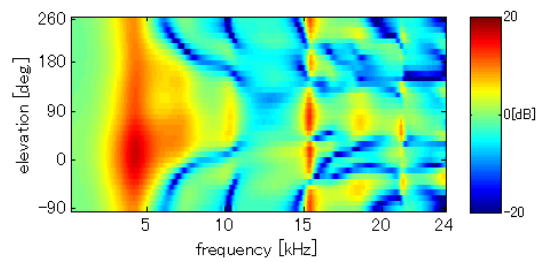


Fig. 10 PRTFs for original model when the source point was moved 2 mm upward

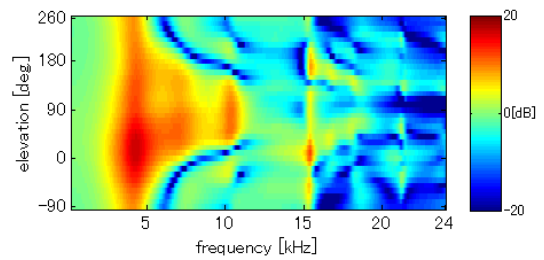


Fig. 11 PRTFs for original model when the source point was moved 2 mm downward

4 まとめ

本稿では、Three-step modelの7つの寸法を独立して変動させ、正中面におけるPRTFのピーク・ノッチパターンに与える影響を検討した。そして、寸法を変動させることによって多様なピーク・ノッチパターンを生成できることを示した。

もし、ある特定の耳介と、Three-step modelとが類似したピーク・ノッチパターンを持つならば、その耳介の形態的な特徴と、モデルの各部の寸法を対応付けることができる。Three-step modelは単純な形状であるため、ピーク・ノッチパターンを完全には再現できないかもしれないが、再現を試みることによって実耳の形態とPRTFの特徴量とを対応付ける手がかりを得ることが期待できる。

参考文献

- [1] Takemoto *et al.*, JASA, 132, 3832-3841, 2012.
- [2] 竹本他, 音講論(春), 577-580, 2010
- [3] Takemoto *et al.*, Proc. 20th ICA, 2010.
- [4] 岡松他, 音講論(秋), 455-458, 2012.
- [5] Adachi *et al.*, JASA, 105, 2920-2932, 1999.
- [6] Adachi *et al.*, JASA, 121, 3874-3885, 2007.