

## 仰角知覚手がかりを残した耳介形状の単純化\*

○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

仰角に対する頭部伝達関数 (HRTF) のピーク・ノッチの変化には一定のパターンがある [1-3]。Fig. 1 に示すように、約 10 kHz 以下に 3 つのピーク (P1, P2, P3) があり、これを取り巻くように第 1 ノッチ (N1) が出現する。P1 は仰角によらず出現するが、P2, P3 は主として 120 度を中心とする高い仰角に対して出現する。仰角に対して P1, P2, P3 周波数は一定しているが、N1 周波数は大きく変化する。N1 周波数は、低い仰角では P2 周波数よりやや低く、仰角の増大に伴って急激に上昇し、約 120 度で最高になり、それ以降では下降して再び P2 周波数を下回る。このような仰角に対する系統的な HRTF の変化パターンは、音源の仰角知覚の手がかりになっていると考えられている [4]。

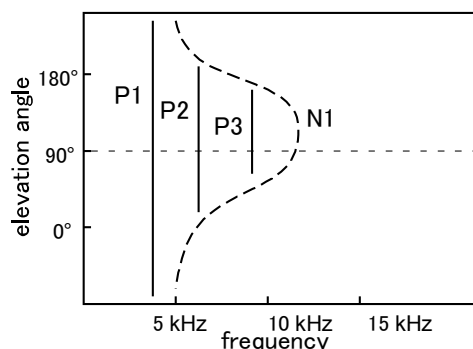


Fig. 1 Schematic representation of peak-notch pattern of HRTF in the median plane

われわれは、これらのピークやノッチの成因について、MRI で計測した耳介形状に基づいて時間領域差分法 (FDTD 法) によるシミュレーションで検討してきた [1-3]。その結果、(1) ピークとノッチは、共に耳介の 4 つの腔 (耳甲介腔、耳甲介舟、三角窩、舟状窩: Fig.2 参照) の共鳴により生成され、頭部の影響は小さいこと、(2) ピークは耳甲介腔が音圧の腹になる共鳴パターンであること、(3) ノ

ッチは耳甲介腔以外の腔の共鳴が到来する音波を耳甲介腔上で打ち消す共鳴パターンであることを明らかにした [3]。

しかし、耳介形状は非常に複雑であるため、どのような形態的要素がピークやノッチに影響を与えるかを検討することは極めて困難である。そこで、本研究では、Fig. 1 に示すような音源の仰角知覚手がかりを残して耳介形状を単純化する試みを行う。

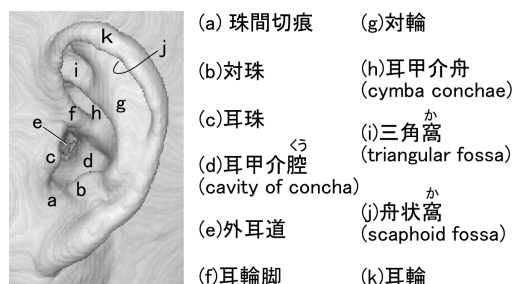


Fig. 2 Anatomical part names of the pinna.

## 2 材料と方法

## 2.1 原型モデルとHRTFの計算方法

Fig. 3 (a) は耳介の原型モデル (original model) である。左の耳介を縦 72 mm, 横 36 mm, 厚さ 17 mm の平板で表現した。このモデルでは、図の左側が人体の前方、上側が上方、図の手前側が外側にそれぞれ対応する。この平板に縦 33 mm, 横 16 mm, 深さ 15 mm の四角の穴を穿った。これを本研究では原型腔 (original cavity) と呼ぶ。この腔の前下方 (底面から 1 mm 外側、前面から 5 mm 後方、下面から 6 mm 上方) を外耳道入口として観測点を置いた。

この観測点を中心とする半径 10 cm の円周上で HRTF を計算する。計算では、相反定理により、観測点に Gaussian Pulse を印加し、円周上に 10 度刻みに置いた点で FDTD 法により圧力変動を計算して 24 kHz までの伝達関数を求めた [3]。仰角は正面が 0 度、上方が 90 度とした。なお、人体では、耳介は左右に張り出しており、耳介の表面は矢状面と平行

\*Pinna shape simplification maintaining perceptual cues of source elevation, by TAKEMOTO, Hironori, MOKHTARI, Parham, KATO, Hiroaki, NISHIMURA, Ryouichi, (NICT), and IIDA, Kazuhiro (Chiba Institute of technology).

ではない。そこでこれを表現するため、Fig. 3 (c)で示すように、モデルを上から見たときに円周が含まれる平面（矢状面）に対して耳介を5度傾けた。

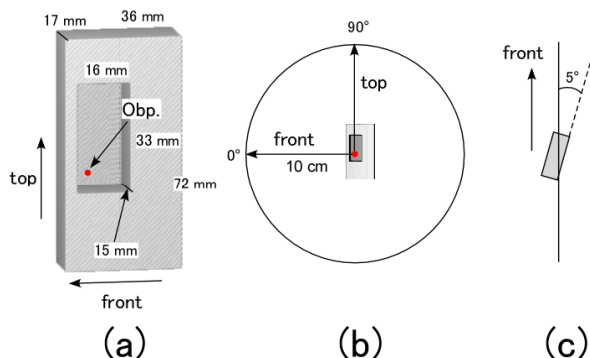


Fig. 3 Original model (a) and lateral (b) and top (c) views of HRTF calculation field. Obp: observation point.

## 2.2 モデルの変形

原型モデルに対して以下の4種類の変形を行い、HRTFを計算した。なお、全ての変形で原型腔の横幅は変化させない。

(変形1) 原型腔の高さの縮小：原型腔の高さを2/3, 1/3倍した。以下、2/3 height model, 1/3 height modelと呼ぶ (Fig. 4 (a), (b))。

(変形2) 原型腔の移動：観測点が原型腔の高さの1/3, 1/2の位置に来るように観測点ではなく、原型腔を下方へ移動した。以下、1/3 position model, 1/2 position modelと呼ぶ (Fig. 4 (c), (d))。

(変形3) 原型腔の上部2/3をそれぞれ8 mm, 4 mm浅くして原型腔を2段にした。以下、8 mm two-step model, 4 mm two-step modelと呼ぶ (Fig. 5 (a), (b))。

(変形4) 原型腔の上部1/3から2/3の部分を4 mm浅くし、さらに上部1/3を8 mm浅くして原型腔を3段にした。以下、three-step modelと呼ぶ (Fig. 5 (c))。

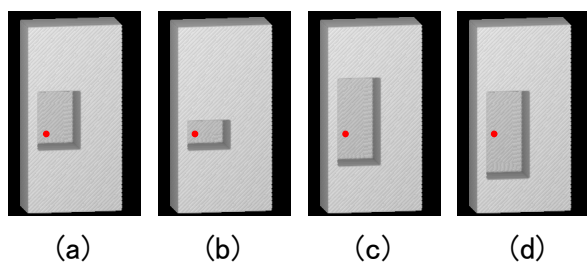


Fig. 4 (a) 2/3 height model, (b) 1/3 height model, (c) 1/3 position model, (d) 1/2 position model. Red point: observation point.

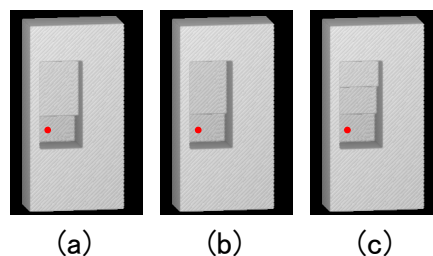


Fig. 5 (a) 8 mm two-step model (b) 4 mm two-step model, (c) three-step model. Red point: observation point.

## 2.3 音圧分布パタンの解析

特定の仰角・周波数における音響現象を理解するために、音圧分布パターンを解析した。この解析では、音源を仰角に応じた円周上に置き、注目している周波数を持つ正弦波で励振した。解析領域全体が定常状態に達した後、音圧分布を記録して可視化した。

## 3 結果と考察

### 3.1 変形結果の検討

Fig. 6はoriginal modelのHRTFである。original modelでは、腔が一つしかないにもかかわらず、低い周波数帯域に、Fig. 1のP1, P2に類似したピークと、N1に類似した遷移パターンを持つノッチが出現した。ただし、ノッチは0度以下と180度以上の仰角のみで出現し、0度と180度で2番目のピークと相殺する。15 kHz以下には、3.5 kHz, 6.75 kHz, 11.25 kHz, 11.75 kHz, 13 kHzに5つのピークが出現し、出現する仰角はピークによって規則的に変化した。Fig. 7は各ピーク生成時の瞬時音圧の分布を示す。これより、第1ピークは、original cavityが内外の方向に共鳴する1次モード、第2ピークは上下の1次モード、第3ピークは上下の2次モード、第4ピークは前後の1次モード、第5ピークは平面的なモードであることが明らかになった。

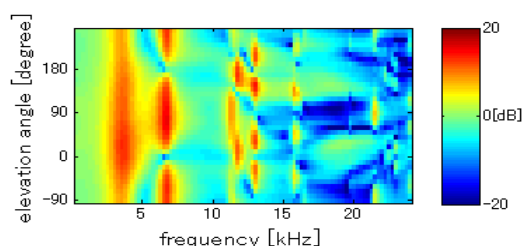


Fig. 6 HRTFs for original model

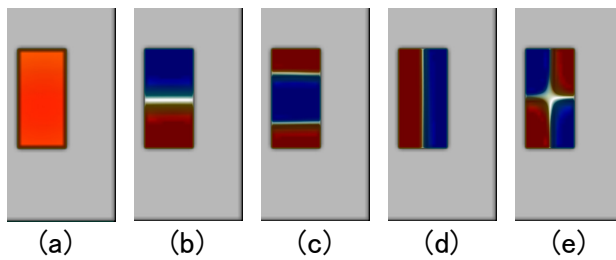


Fig. 7 The first five resonance modes for the original model. Red: high positive pressure, blue: high negative pressure. The frequency and source elevation angle for each peak is as follows: (a) 3.5 kHz, 90°, (b) 6.75 kHz, 90°, (c) 11.25 kHz, 90°, (d) 11.75 kHz, 0°, (e) 13 kHz, 30°

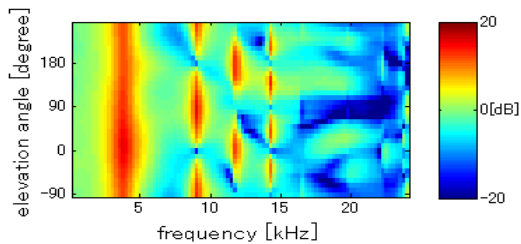


Fig. 8 HRTFs for 2/3 height model

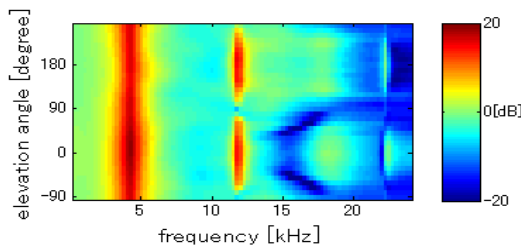


Fig. 9 HRTFs for 1/3 height model

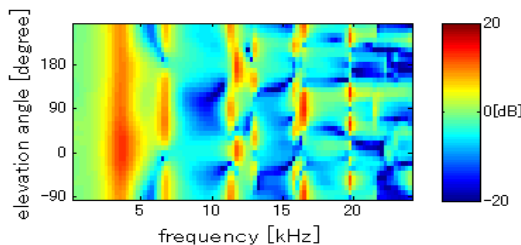


Fig. 10 HRTFs for 1/3 position model

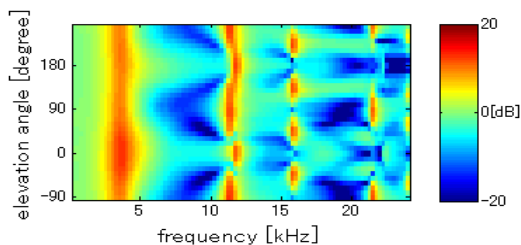


Fig. 11 HRTFs for 1/2 position model

次に、変形1の結果を検討する。Fig. 8は2/3 height model, Fig. 9は1/3 height modelのHRTFである。音圧分布を解析した結果、Fig. 8の第1から第4ピークは、それぞれ、内外の1次モード、上下の1次モード、前後の1次モード、平面的なモードであり、Fig. 9の

第1,2ピークはそれぞれ、内外の1次モード、前後の1次モードであった。Fig. 1のN1と類似したノッチは、2/3 height modelの2番目のピークより低い周波数領域の0度以下と180度以上の仰角に対して現れたが、1/3 height modelでは消失した。これは、ノッチが上下方向のモードと関連していることを示唆する。

次に、変形2の結果を検討する。Original model (Fig. 6)と1/3 position model (Fig. 10)では、基本的なピーク・ノッチパターンは共通しているが、7 kHz付近の第2ピークの振幅が後者で減少した。1/2 position modelでは、この7 kHzのピークが消失した (Fig. 11)。これは、original modelの第2ピークが腔の上下方向の第1共鳴であり、その中央が音圧の節になっているため、1/3 position modelでは観測点が節に相対的に近づいたことにより振幅が減少し、1/2 position modelでは観測点が節と一致したことによりピークが失われたためである。逆に言えば、観測点が腔の下端に近い位置にあれば、腔の上下方向の共鳴によるピークが現れる。実際の耳介形状では、外耳道は耳介の4つの腔の下端である耳甲介腔に開口しているため、このような耳介の上下方向の共鳴によるピークが必ず発生する。

また、1/3 position modelでは、0度以下と180度以上の仰角でN1と類似したノッチパターンが見られたが、1/2 position modelでは腔の上下方向の第1共鳴の消失とともにノッチも消失した。この事実も、ノッチが腔の上下方向の共鳴と関連して発生する現象であることを示唆する。

次に、変形3の結果について検討する。Fig. 12, 13に示すように、8 mm two-step modelと4 mm two-step modelでは、ピーク・ノッチの基本パターンは類似しているが、第2ピークの振幅が前者で小さい。特に、0度以下と180度以上では、ピークとノッチがともに消失している。また、4 mm two-step modelでは、90度を中心とした狭い範囲の仰角で12 kHz付近に3番目のピークが出現し、全体としてFig. 1のピーク・ノッチパターンに類似した。また、original modelでは見られなかった、0度から180度の仰角に対するあいまいなノッチパターンが出現した。

最後に、変形4の結果を検討する。Fig. 14はthree-step modelのHRTFである。4 mm

two-step model に比べて主に 3 つの点で変化が生じた。まず、0 度から 180 度のノッチパターンが明瞭になった。次に、10 kHz 以上の帯域に、1 番目のノッチとほぼ同じ遷移パターンを示す 2 番目のノッチ (N2) が出現した。このノッチパターンは、他のモデルでも存在するが、明確ではなかった。最後に、2 番目のピークが約 1 kHz 上昇し、3 番目のピークが約 0.5 kHz 下降して 2 つのピークが接近した。このとき、2 番目のピークの振幅は減少してブロードになり、3 番目のピークの振幅は増加した。これらの変化は、3 段になったことにより生じたと考えられるが、詳しい原因は解明できなかった。しかし、three-step model は単純な形状ながら、Fig. 1 と類似したピーク・ノッチパターンを生成した。

### 3.2 実際の耳介形状との対応

実際の耳介には、Fig. 2 で示すように 4 つの腔が存在する。three-step model の 3 つの段は、下部からそれぞれ、耳甲介腔、耳甲介舟、三角窩および舟状窩と対応すると思われる。

また、実耳では N1 が最高周波数に達する仰角は約 120 度であるが、本研究で明瞭に N1 が現れたモデルでは 90 度であった。これは、実耳の長軸が鉛直方向より後方へ約 30 度傾いているからであると考えられる。

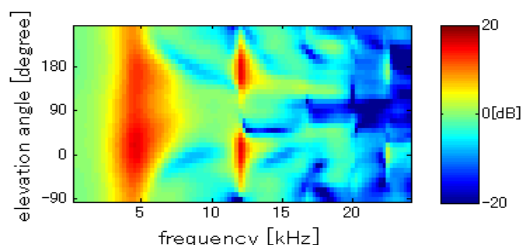


Fig. 12 HRTFs for 8 mm two-step model

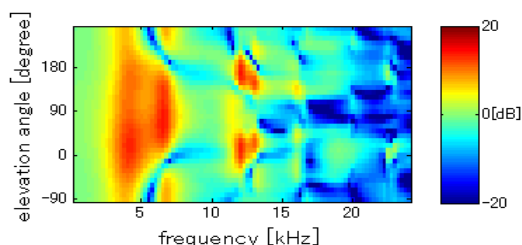


Fig. 13 HRTFs for 4 mm two-step model

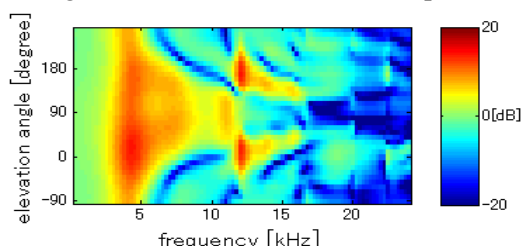


Fig. 14 HRTFs for three-step model

## 4 おわりに

本研究では、音源の仰角知覚手がかりとなる HRTF のピーク・ノッチパターンを生成する単純な耳介形状のモデル化を行った。耳介の腔を上下方向に長くしてその下端に観測点を配置すること、およびその腔を 3 段にすることによって、実耳に近いピーク・ノッチパターンを生成することができた。

ピークには、音源の仰角に対して指向性の小さい共鳴と、指向性の大きい共鳴が混在している。耳介の腔の第 1 共鳴 (P1) は内外方向に発生し、腔の底部を閉鎖端、開口部を開放端とする片開き管の第 1 共鳴であり、その強度は音源の仰角による影響が小さい。耳介の腔の第 2, 3 共鳴 (P2, P3) は、耳介の長軸に沿った方向に発生し、腔の上部・下部をそれぞれ閉鎖端とする両側閉管に類似した第 1, 2 共鳴である。腔の下部は共鳴時に圧力変動の腹となるため、この部分に観測点があることでピークとして観測される。その強度は、音源が長軸方向にあるときに極大となる指向性を持つ。なお、腔の内部の段差は、長軸に沿って音響的な不連続性を生じさせ、上下方向の第 1, 第 2 共鳴の周波数や強度を変化させる要因となるとと思われる。

ノッチは長軸方向の共鳴に伴って出現する。0 度以下と 180 度以上の仰角では、original model でもノッチは確認できたが、0 度から 180 度の仰角では、two-step model あるは three-step model でノッチパターンが明瞭になった。これより、0 度から 180 度の仰角のノッチに対しては、耳介の腔の上部の構造が重要であることが明らかになった。これは、N1 の生成には耳甲介舟、三角窩、舟状窩の共鳴が関与しているというこれまでの結果[3]と一致する。しかし、ノッチ周波数の系統的な変化の要因については、更なる解析が必要である。

## 参考文献

- [1] 竹本ら, 音講論 (春), 1445-1448, 2009.
- [2] 竹本ら, 音講論 (秋), 523-526, 2009.
- [3] Takemoto *et al.*, Proc. IWPASH, 2009.
- [4] Iida *et al.*, Applied Acoustics, 68, 835-850, 2007.