

耳介形状が頭部伝達関数に及ぼす影響に関する 基礎的検討*

○竹本浩典, モクタリ パーハム, 加藤宏明, 西村竜一 (NICT/ATR),
飯田一博 (千葉工大)

1 はじめに

頭部伝達関数 (HRTF)には, 個人に特有の頭部や耳介の複雑な形状 (Fig. 1) に起因するピークとノッチが存在する。ピークとノッチの周波数は, 音源の方向によっても変化するため, 人間はこの変化を手がかりとして音源の位置を知覚していると思われる。Iida らは正中矢状面内の仰角方向の知覚に最初のピーク (P1), 1 番目と 2 番目のノッチ (N1, N2) が重要な役割を持つことを明らかにした[1]。特に N1, N2 は角度に応じて規則的に遷移する。これらのピークやノッチの成因についての解明が試みられているが[例えば 2], まだ十分に解明されているとはいえない。

われわれは, 時間領域差分法 (Finite Difference Time Domain method: FDTD 法) を用いた音場シミュレータを開発した[3-6]。FDTD 法は有限要素法や境界要素法に比べて並列計算による高速化が有効な手法である。われわれの開発した音場シミュレータでは, 片側の耳の距離 1 m の HRTF を約 100 分で計算可能である。しかし, ピークやノッチの成因を明らかにするために, 耳介形状に変動を加えては HRTF への影響を見るシミュレーションを繰り返すとしたら, さらに計算時間を短縮できることが望ましい。



- | | |
|----------------------------|-------------------------------|
| (a) 珠間切痕 | (g) 対輪 |
| (b) 対珠 | (h) 耳甲介舟
(cymba) |
| (c) 耳珠 | (i) 三角窩
(triangular fossa) |
| (d) 耳甲介腔 <small>くう</small> | (j) 舟状窩 <small>か</small> |
| (e) 外耳道 | (k) 耳輪
(scapha) |
| (f) 耳輪脚 | |

Fig. 1 Anatomical part names of the pinna.

そこで本稿では, まず, 頭部全体を用いて計算した HRTF と, 耳介周辺部のみで計算した HRTF を比較し, 計算領域の縮小によって計算時間の短縮が可能であるかどうかを検証した。次に, P1 の成因を明らかにするため, P1 周波数で励振させたときの音圧分布を計算した。最後に, 耳介各部の形状に変動を加えて HRTF に現れる影響について基礎的な検討を行ったので報告する。

2 材料と方法

2.1 形状データ

成人男性 1 名の頭部形状を ATR-BAIC (脳活動イメージングセンタ) の fMRI (島津 Marconi 社製, MAGNEX ECLIPSE 1.5T Power Drive 250) を用いて, 解像度 1.2 mm で計測した。これを空気と体組織間で二値化し, 外耳道入り口を閉鎖した頭部形状を作成した。また, 耳介周辺のみを切り出したデータも作成した (Fig. 2)。

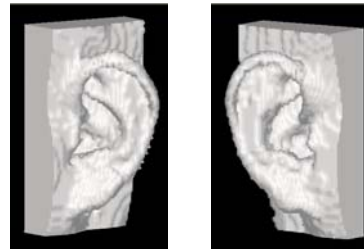


Fig. 2 Left and right segmented ears.

2.2 FDTD法によるHRTFの計算

FDTD 法に基づく音場シミュレータを用いて HRTF を計算した[3, 4]。このシミュレータは, キルヒホッフ・ヘルムホルツの積分方程式に基づき, 解析物体を含む閉空間の音圧と粒子速度の分布から, 任意距離の点の音圧変化を計算することができる[5, 6]。この方法は, 音波が物体から離れた空間を伝播する間の計算を省くことで計算時間を短縮することがで

*Basic investigation for effects of pinna shapes on head related transfer functions, by TAKEMOTO, Hironori, MOKHTARI, Parham, KATO, Hiroaki, NISHIMURA, Ryouichi (NICT/ATR), and IIDA, Kazuhiro (Chiba Institute of Technology).

きる。さらに、空間を伝播中のグリッド分散による波形の崩れを防ぐことが可能である。

頭部全体の形状データに関しては、正中矢状面内で頭部中心から半径 1 m の円弧上の HRTF を計算した。耳介周辺のみ形状データに関しては、外耳道入り口を通る矢状面内で、外耳道入り口から半径 1 m の円弧上の HRTF を計算した。すなわち、頭部全体から見れば、外耳道入り口を通る側矢状面内の HRTF である。仰角は正面が 0 度、真上が 90 度として、 $-80 \sim 260$ 度までを 10 度刻みで計算した。

シミュレーションは、外耳道入り口に置いた点音源から Gaussian Pulse を入力し、円弧上に置いた各観測点で音圧変化を記録して求めた。シミュレーションの計算周波数は 1 MHz、シミュレーションの時間長は 8 ms である。これを 4 CPU、4 GB のメモリを積んだ計算機を 4 台用いて並列計算を行った。

2.3 励振シミュレーション

ある特定の周波数をもつ正弦波で解析領域を励振することにより、耳介周辺の音圧変化の分布パターンを計算した。耳介のある部分が共鳴すると、その部分では音圧変化が大きく、共鳴しない部分では音圧変化は小さい。そこで、励振を開始して定常状態になった後、シミュレーションステップごとに各点の音圧の絶対値を求めてこれを加算した。計算結果はボリュームレンダリングの手法を用いて可視化した。なお、このシミュレーションは、左の耳介周辺の形状データだけを用いて行った。

2.4 耳介各部の形状の変動シミュレーション

耳介各部の形状が HRTF に及ぼす影響を調べるため、本稿では耳甲介舟、三角窩、舟状窩をこの順で埋めた場合と、耳甲介腔の下部と後部を埋めた場合の HRTF を計算した。耳介形状の編集は目視で行った。なお、このシミュレーションも左の耳介周辺の形状データだけを用いて行った。

3 結果と考察

3.1 頭部全体で計算した HRTF と耳介周辺だけで計算した HRTF の比較

Fig 3 (a), (b) は、左耳の HRTF で、Fig 3 (a) は頭部全体の形状から計算したもので、Fig 3 (b) は耳介周辺の形状から計算したものである。

同様に、Fig 3 (c), (d) は右耳の HRTF で、Fig 3 (c) は頭部全体の形状から計算したもので、Fig 3 (d) は耳介周辺の形状から計算したものである。頭部全体の形状から計算した HRTF と耳介周辺のみ形状から計算した HRTF の平均スペクトル歪みは、左耳で 1.77 dB、右耳で 1.90 dB であり、両者は非常によく類似していることを示している。

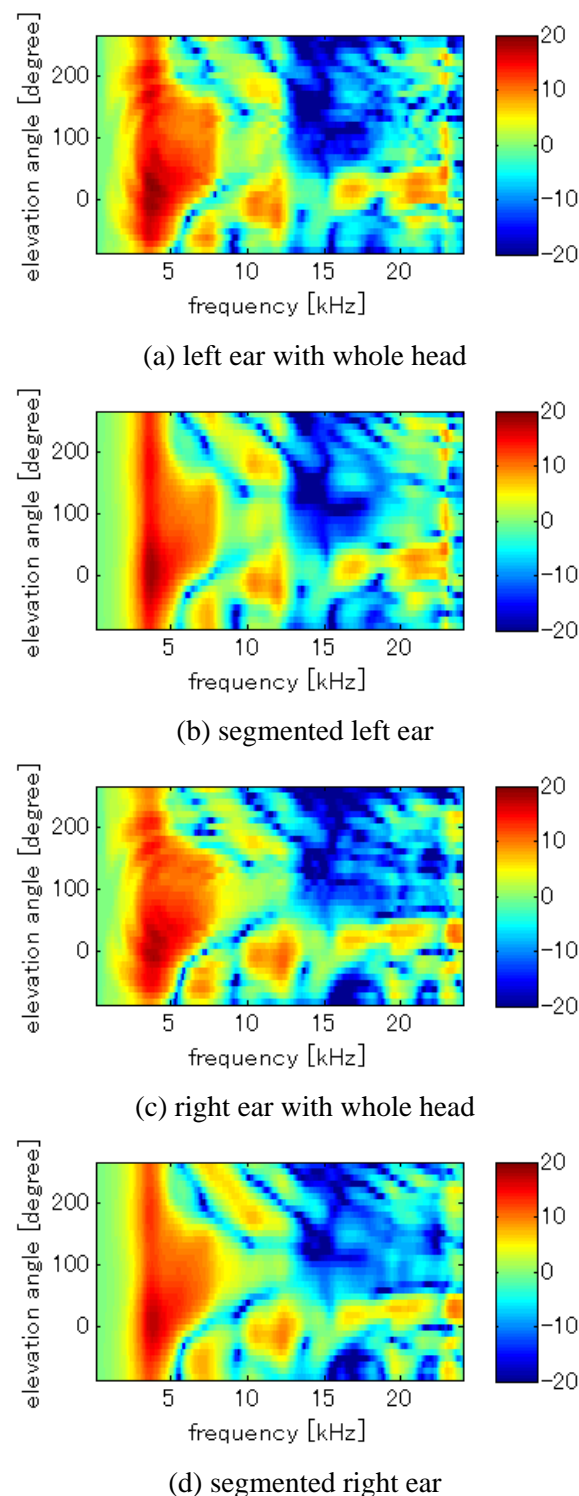


Fig. 3 Calculated HRTFs in the sagittal plane.

耳介周辺の形状から計算した HRTF は、頭部全体の形状から計算した HRTF に比べて滑らかである。これは、頭部および顔面の形状による影響を受けていないためと考えられる。しかし、ピークとノッチのパターンは両者でよく一致している。このことから、ピークとノッチの成因を解明するためのシミュレーションとして、耳介周辺のみの形状データを用いることは妥当であると結論できる。

なお、頭部全体の形状から HRTF を計算するには約 100 分を要したが、耳介周辺のみでは約 100 秒であり、計算時間が 1/60 に減少する。

3.2 P1 の成因について

左の耳介周辺から計算した HRTF (Fig. 3 (b)) に現れる P1 は、3625 Hz であった。このピークは角度に依存せず出現することから、正面方向、外耳道入り口から距離 10 cm の位置に点音源を置いて励振シミュレーションを行った。

Fig. 4 (a) は音圧変化の分布パターンを 3 次元的に可視化したものである。赤い部分ほど音圧変化が大きく、青いほど音圧変化が小さい。音圧変化が大きい部位は、耳珠、耳輪脚、下方の対輪脚、耳輪、対珠、珠間切痕に囲まれた腔で、外耳道入り口、耳甲介腔、耳甲介舟および三角窩の一部を含んでいる。

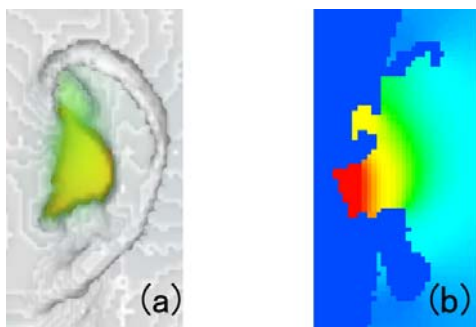


Fig. 4 Pressure distribution pattern at P1. (a) 3D view and (b) coronal section.

Fig 4 (b)は Fig. 4 (a)の耳甲介腔中央での冠状断面である。この図では、内側で音圧変化が大きく、外側で音圧変化が小さいことから、上記の腔を円筒管にみなした場合、外耳道入り口を閉鎖端とする、いわゆる 1/4 波長の共鳴が起こっていることが推測される。円筒管の直径を 2 cm、長さを 1.7 cm として、Adachi and Yamada のモデル[7]で第 1 共鳴周波数を計

算すると 3795 Hz であり、ほぼ P1 と一致することから、この推測は妥当であると思われる。

Shaw and Teranishi は、外耳道を含む耳介の模型を使って、鼓膜部分での伝達関数を計測した[8]。計測した伝達関数では 2~7 kHz に広がりを持つピークが見られるが、このピークの成因として外耳道の入り口から外側部分の第 1 共鳴を上げている。この共鳴周波数における音圧変化の分布パターンをプローブマイクロホンで計測した結果、耳甲介腔、耳甲介舟で大きな音圧変化が観測されており、三角窩をのぞいて本稿の結果と一致した。

3.3 耳介各部の形状の変動

Fig. 5 (a) は正面方向 (仰角 0 度) に音源を置き、HRTF の N1 周波数 (7500 Hz) で励振したときの音圧変化の分布パターン、Fig. 5 (b) は真上方向 (仰角 90 度) に音源を置いて HRTF の P2 周波数 (7375 Hz) で励振したときの音圧変化の分布パターンを示している。Fig. 5 (a) の耳介前面、Fig 5 (b) の耳介上面に現れる音圧変化の大きい部分は、それぞれ音波の到来方向と正対しているため、反射による相互作用で生じたものであると思われる。耳介内の音圧変化パターンに注目すると、いずれの場合も耳甲介舟、舟状窩で大きな音圧変化が見られる。そこで、この部分の形状に変動を加えると、N1, P2 の双方に影響が現れることが予想される。

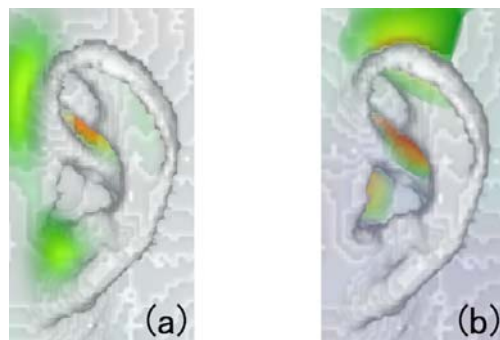
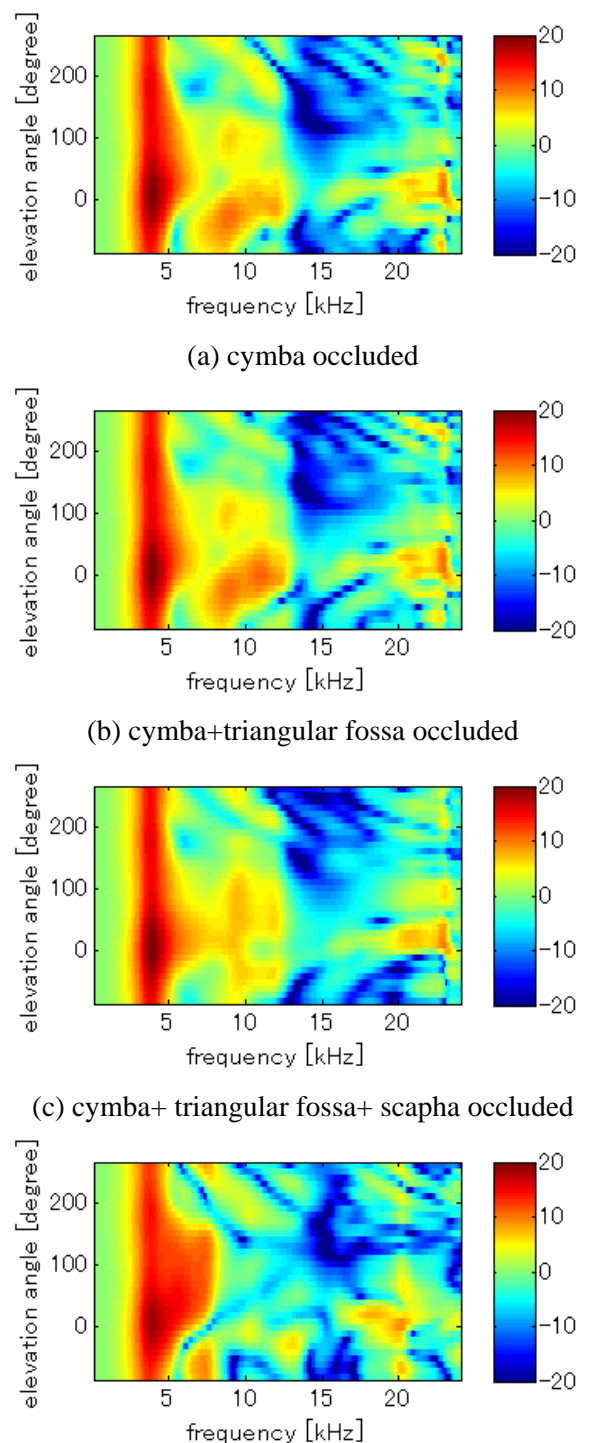


Fig. 5 (a) Pressure distribution pattern at N1 for 0 degrees elevation and (b) Pressure distribution pattern at P2 for 90 degrees elevation.

Fig. 6 (a) は耳甲介舟を埋めたときの HRTF である。耳甲介舟を埋めると、仰角 30~150 度で約 7.5 kHz に現れていた P2 がはっきりしなくなった。N1 は全体として浅くなり、仰角 -80~-40 度で約 9 kHz に現れていた N2 は

消失した。一方で、仰角 200~260 度で 10~12 kHz に現れていた N2 はほとんど影響を受けていない。また、仰角 -80~0 度、70~120 度で 8 kHz 付近にピークが出現した。

Fig. 6 (b) は耳甲介舟と三角窩を埋めたときの HRTF である。耳甲介舟に加えて三角窩を埋めると、N1 がさらに浅く不明瞭になり、仰角 200~260 度で 10~12 kHz に残存していた N2 も不明瞭になった。



(d) inferior and posterior part of concha occluded

Fig. 6 HRTFs calculated from modified ear.

Fig. 6 (c) は耳甲介舟と三角窩と舟状窩を埋めたときの HRTF である。Fig. 6 (a), (b) の 8 kHz 付近に見られたピークが消失し、かわって仰角 -60~120 度の 10kHz 付近に P2 が出現した。また、仰角 0~50 度では、P1 と P2 が連続的になり、広いピークを形成した。

一連の操作で、N1, N2 は明確に観測されなくなり、P2 に大きな変動が生じた。しかし、完全に N1, N2 が消失したかどうかはさらに検討を要する。

Fig. 6 (d) は耳甲介腔の下部と後部のみを埋めたときの HRTF である。この操作では、P1, N1, N2 にはほとんど変化が現れなかったが、10 kHz, 12 kHz 付近にあったピークが消失しており、変動を加えていない場合に N1 の軌跡が不明瞭な仰角 50~120 度において、N1 の軌跡が明瞭になった。これは、耳甲介腔を埋めることによって N1, N2 が消失するという飯田らの結果[9]に反している。その理由としては耳甲介腔の埋め方の違いと、耳介形状の個人差が考えられる。

4 おわりに

本稿では、正中矢状断面における HRTF のピーク・ノッチの成因の解明には、耳介周辺部分のみの形状だけで十分なことを示した。また、P1 が外耳道入り口、耳甲介腔、耳甲介舟および三角窩の一部を含む部分の第 1 共鳴であることを示し、耳甲介舟、三角窩、舟状窩が N1, N2, P2 の生成に関与することを示した。

参考文献

- [1] Iida *et al.*, *Applied Acoustics*, 68, 835-850, 2007.
- [2] 関本ら, *音講論 (春)*, 879-880, 2008.
- [3] Takemoto *et al.*, *JASA*, 123 (5), 3323, 2008.
- [4] 竹本ら, *音講論 (秋)*, 607-610, 2008.
- [5] Mokhtari *et al.*, *Proc. of ISUC'08*, 435-440, 2008.
- [6] モクタリら, *音講論 (秋)*, 611-614, 2008.
- [7] Adachi and Yamada, *JASA*, 105 (5), 2920-2932, 1999.
- [8] Shaw and Teranishi, *JASA*, 44 (1), 249-249, 1968.
- [9] 飯田ら, *音講論 (春)*, 439-440, 1997.