

頭部伝達関数のピーク・ノッチに対する 頭部形状の個人差の影響*

○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

頭部伝達関数 (Head Related Transfer Function: HRTF) のピークやノッチは、頭部や耳介の形状に起因するとされている。周波数の低い方から数えて1番目のピーク (P1) と1番目, 2番目のノッチ (N1, N2) は、正中矢状面における音源の仰角の知覚に重要な役割を果たしていることが知られている[1]。しかし、これらのピークやノッチの成因の解明は試みられているものの[例えば2], まだ十分とはいえない。

われわれは、時間領域差分法 (Finite Difference Time Domain method: FDTD 法) [3-5]を用いて、正中矢状面におけるピークとノッチの成因の解明を進めている。これまでの研究で、ピークとノッチの生成の双方に、耳甲介腔, 耳甲介舟, 三角窩, 舟状窩 (Fig. 1 参照) の共鳴が関係していることが明らかになった[6]。これら各部の共鳴パターンに応じてピークとノッチが生ずる。ピークとは耳甲介腔が音圧の腹になり、外耳道入り口で音圧変化が増大する振動モードである。ノッチとは耳甲介腔が音圧の節またはそれに近い状態になり、外耳道入り口で音圧変化が小さくなる振動モードである。

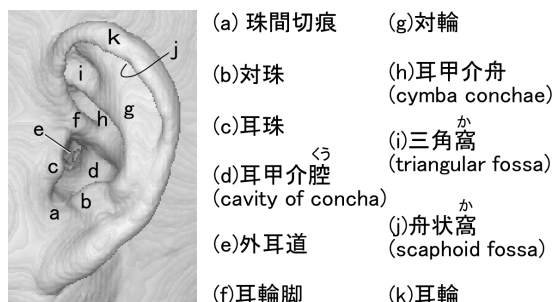


Fig. 1 Anatomical part names of the pinna.

これらの知見は、2名の男性被験者の頭部形状を用いた音響解析により得られたもので

ある[6]。本稿では、これに加えて2名の女性被験者の音響解析を行い、これまでの知見を検証し、頭部形状の個人差とピークとノッチの成因について検討する。なお本稿では、耳介形状も含めて頭部形状と呼ぶことにする。

2 材料と方法

2.1 MRIデータ

成人男性2名と成人女性2名の頭部形状をATR 脳活動イメージングセンタ (ATR-BAIC) のMRI装置 (島津 Marconi 社製 MAGNEX ECLIPSE 1.5T Power Drive 250) を用いて計測した。男性2名 (被験者 M1, M2) の画像解像度は1.2 mm, 女性2名の画像解像度は1.1 mm (被験者 F1) と1.0 mm (被験者 F2) である。これを空気と体組織間で2値化し、外耳道入り口を閉塞して頭部全体の形状データとした。また、左耳の周辺のみを切り出したデータも作成した。

2.2 HRTFの計算

FDTD法に基づく音場シミュレータを用いて左耳のHRTFを24 kHzまで計算した[4, 5]。頭部全体のデータに対しては、正中矢状面内で頭部中心から半径1 mの円周上の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側矢状面内で半径10 cmの円周上のHRTFを計算した。なお、仰角は、正面が0度、真上が90度であり、HRTFは10度刻みで計算した。

2.3 励振シミュレーション

左耳介周辺のみ形状データを用いて、HRTFのピークやノッチ周波数でどのような音響現象が起きているのか可視化するシミュレーションを行った。観測点は外耳道入り口に置き、音源点は観測点を通る側矢状面で半径10 cmの円周上に置いた。注目する仰角に対応する音源に、ピークまたはノッチ周波数を持つ正弦波を印加して解析領域全体を励振

*Effects of individual difference of head shape on head related transfer functions, by TAKEMOTO, Hironori, MOKHTARI, Parham, KATO, Hiroaki, NISHIMURA, Ryouichi, (NICT), and IIDA, Kazuhiro (Chiba Institute of technology).

した。励振を開始して定常状態に達した後、全解析領域の音圧を 200 kHz のサンプリングレートで 0.5 ms の間記録した。また、各タイムステップにおける音圧分布は、ボリュームレンダリングによって可視化した。

3 結果と考察

3.1 頭部全体と耳介周辺のHRTFの比較

Fig. 2 は 4 名の被験者の頭部全体の形状を用いて計算した HRTF (距離 1 m) と、耳介周辺のみから計算した HRTF (距離 10 cm) である。

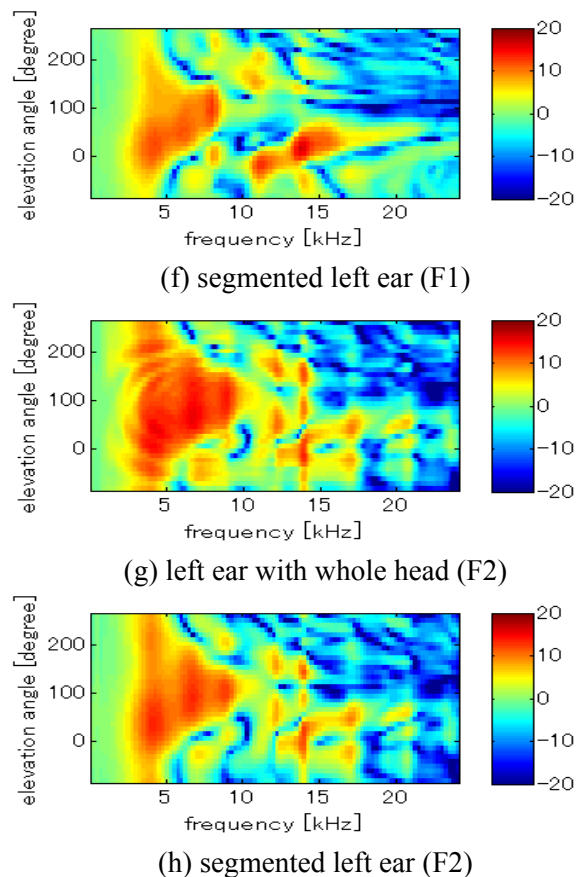
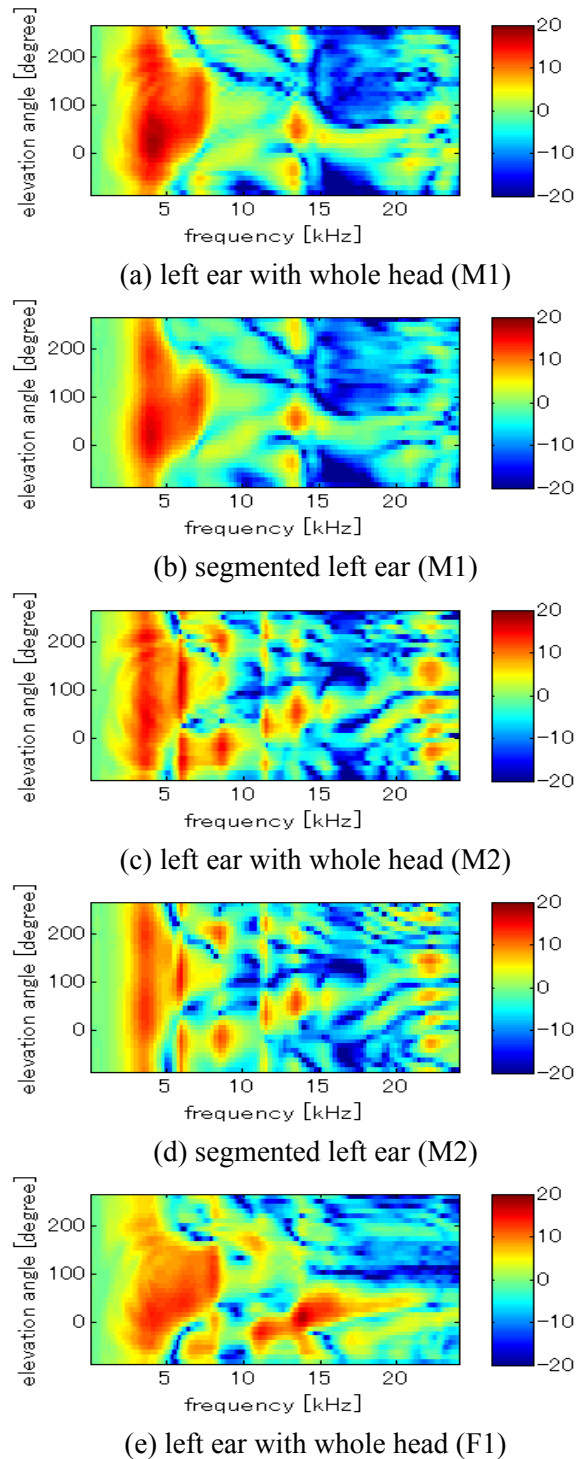


Fig. 2 Calculated HRTFs in the sagittal plane.

頭部そのものの影響は、主として 5 kHz 以下の周波数領域に現れ、Fig. 2 の(a), (c), (e), (g) では仰角 90 度付近を中心とする同心円状のパターンとなって現れる。これは、頭部を回り込む音波によって形成されると思われる。しかし、主要なピークとノッチ、すなわち P1, P2, P3, N1 のパターンへの頭部の影響は見られない。これより、正中矢状断面における HRTF のピークとノッチの基本パターンは、頭部ではなく耳介形状のみによって決定されるといえる。すなわち、耳介周辺のみからデータを音響解析することで、ピークとノッチの成因を解明することができる。Fig. 3 は解析に用いた左の耳介周辺のデータを等縮尺で可視化したもので、大きさや形態の比較が可能である。なお、頭部全体から計算した HRTF と耳介周辺のみから計算した HRTF の平均スペクトル誤差は、それぞれ、M1: 2.38 dB, M2: 2.87 dB, F1: 2.49 dB, F2: 2.76 dB であった。

次に、ピークとノッチのパターンについて述べる。10 kHz 以下では、M1 では 2 つ、それ以外の被験者では 3 つのピークがあり、一定の周波数を持つ。M1 では、仰角が約 100 度、10 kHz 付近に不明瞭なピークがあり、これが

P3 に対応する可能性がある。P1 は仰角によらず存在するが、P2, P3 の存在する仰角は限られている。これは、耳介形状と音源の仰角による相互作用で指向性が生じているためと、N1 の周波数が仰角の負から 120 度にかけて上昇、120 度より大きくなると下降する過程で、P2, P3 を分断するためである。また、この N1 と P1 によって縁取られた三角形の領域は、広い周波数帯域でピークを形成しているともいえる。つまり、約 120 度では 10 kHz 以下に 3 つのピークが連なるため、広い帯域で感度が良く、それより仰角が小さいか大きいと感度の良い帯域が狭まり、低域のみになる。また、N1 は常に負 (0 dB 以下) とは限らない。これは、N1 では必ずしも耳甲介腔が常に音圧の節になるとは言えず、節に近い状態で音圧変化が比較的小さくなる場合もあることを意味する。また、どの被験者でも N2 の明確な遷移パターンは確認できなかった。

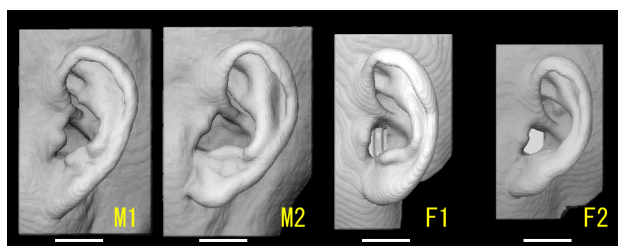


Fig. 3 Segmented pinna shapes. Each scale bar (white line) indicates 2 cm.

3.2 ピーク (P1, P2, P3) 生成時の音圧分布

Fig. 4 は励振源を仰角 0 度に置いたときの P1 生成時の音圧分布である。以下の音圧分布を示す図では、音圧が正で絶対値が大きい部分が赤、負で絶対値が大きい部分が青、音圧の絶対値が小さい部分が緑である。すなわち、青と赤は音圧の腹である。また、画像は見やすくするために耳介の大きさで正規化してある。P1 は全ての被験者で、同じ音圧分布を示した。すなわち、耳甲介腔、耳甲介舟、三角窩、舟状窩が全体として音圧の腹になる。P1 の周波数は、M1: 4 kHz, M2: 3.5 kHz, F1: 4 kHz, F2: 4 kHz であった。

Fig. 5 は励振源を仰角 60 度に置いたときの P2 生成時の音圧分布である。P2 は M1, M2, F2 では耳甲介腔と、耳甲介舟から三角窩にかけての部分が音圧の腹となり、それぞれが逆相となる 2 次モードであった。F1 では耳甲介腔と、三角窩の部分が逆相の腹となった。こ

れは、耳介形状の差によると思われる。なお、この振動パターンは仰角によらず同じであった。また、P2 は M1: 7 kHz, M2: 6 kHz, F1: 6 kHz, F2: 6.75 kHz であり、P2 周波数と耳介の単純な大きさとは無関係であると思われる。

Fig. 6 は励振源を M1 では 210 度、F1, F2 では 90 度においたときの P3 生成時の音圧分布である。P3 は耳甲介腔と三角窩が同相、舟状窩が逆相でそれぞれ音圧の腹になる 3 次モードであった。この振動パターンは仰角によらず同じであるが、F2, F3 では仰角によっては三角窩にある音圧の腹が後方の舟状窩に移動した。P3 の周波数は、M2: 8.5 kHz, F1: 8 kHz, F2: 8.75 kHz であり、P2 と同様に P3 周波数は耳介の単純な大きさとは無関係であると思われる。また、M1 で P3 が出現しない原因を明らかにすることはできなかった。

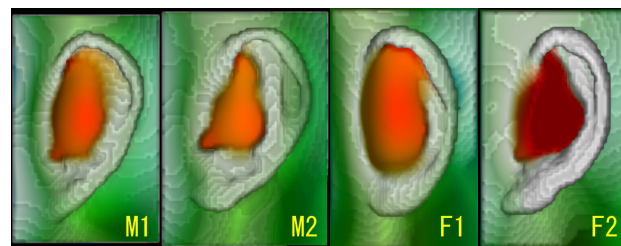


Fig. 4 Pressure distribution patterns at P1.

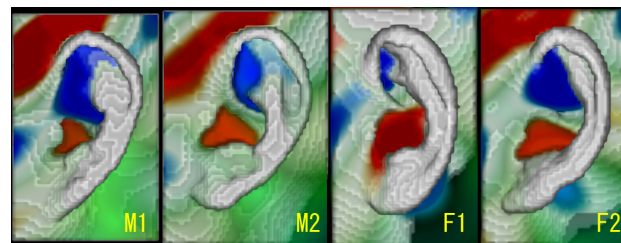


Fig. 5 Pressure distribution patterns at P2.

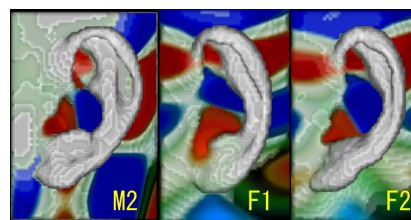


Fig. 6 Pressure distribution patterns at P3.

3.3 ノッチ (N1) 生成時の音圧分布

Fig. 7 は励振源が前下方または後下方にあるときの N1 周波数における音圧分布を示している。被験者ごとの仰角と周波数は、M1: -60° (6.25 kHz), M2: 240° (5.25 Hz), F1: -30° (5.75 kHz), F2: 240° (6.25 kHz) である。

このとき、耳甲介舟、三角窩から舟状窩にかけての部分が音圧の腹となり、耳甲介腔が

節になっている。また、これは音圧の腹になっている部分が、到来する音波に対して逆相で振動することにより、結果として耳甲介腔の部分で迎え撃つ形で打ち消しあい、音圧変化が小さくなる現象であるともいえる。

Fig. 8 は励振源が前上方または後上方にあるときのN1周波数における音圧分布である。被験者ごとの仰角と周波数は、M1: 150° (9.5 kHz), M2: 60° (7.25 Hz), F1: 40° (8.5 kHz), F2: 170° (9.5 kHz)である。

このとき、舟状窩、三角窩、耳甲介舟に沿って2箇所互いに逆相の音圧の腹が生じ、耳甲介腔が節となっている。励振源が前上方にあるときは、到来する音波に対して耳甲介舟と耳甲介腔の後縁で逆相の振動が起きて相殺し、耳甲介腔で音圧変化が小さくなる。一方、励振源が後上方にあるときは、励振源に対して耳甲介腔より耳甲介舟のほうが前方に位置している。この場合は、耳甲介舟を通過する音波に対して、耳甲介舟で起きた逆相の振動が相殺し、耳甲介腔での音圧変化が小さくなる。

Fig. 9は最もN1周波数が高い時の音圧分布である。仰角と周波数は、M1: 120° (13.25 kHz), M2: 120° (10.75 Hz), F1: 120° (10.25 kHz), F2: 110° (12.75 kHz)である。

このときの振動モードは複雑で、舟状窩、三角窩、耳甲介舟、耳甲介腔後縁に沿って複数の音圧の腹が生じ、到来する音波と干渉した結果、観測点での音圧変化が小さくなる。なお、N1周波数が最高になる仰角はほぼ120度で、これは観測点から耳介縁までの距離が最も長くなる方向である。

まとめると、N1は舟状窩、三角窩、耳甲介舟、耳甲介腔後縁に沿ったS字の部分で共鳴が起こり、これが到来する音波と相殺して耳甲介腔に節を生じる現象である。このとき、仰角が増大するにつれて高次モードへ移行し、複数の腹と節が出現する。約120度を超えると再び低次モードへ移行する。モード間は基本的に不連続であるが、S字部分は境界があいまいなため、多少仰角が変化しても、少しずれた位置で同じ振動モードが発生し、これによってN1周波数がシフトすると思われる。

4 おわりに

本稿では、4名の被験者を用いて正中矢状

面のHRTFのピークとノッチの成因および頭部・耳介形状の影響を検討した。頭部形状は主として5kHz以下の低い周波数領域に影響を及ぼすが、その影響は小さく、HRTFのピーク・ノッチの基本パターンは耳介形状によって決定されることが明らかになった。また、耳介形状に個人差はあるが、ピーク・ノッチの生成メカニズムは共通している。しかし、ピーク・ノッチ周波数と耳介形状との対応関係を明らかにすることはできなかった。

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] 竹本ら, *音講論 (春)*, 1445-1448, 2009.

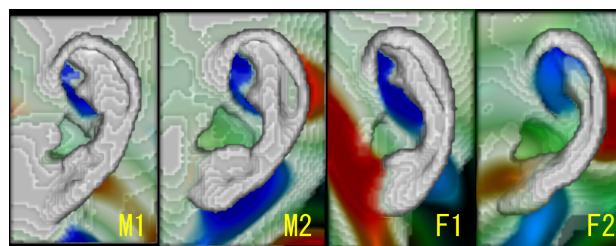


Fig. 7 Pressure distribution patterns at N1 in anteroinferior and posteroinferior directions.

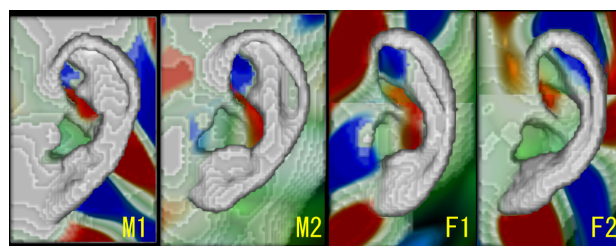


Fig. 8 Pressure distribution patterns at N1 in anterosuperior and posterosuperior directions.

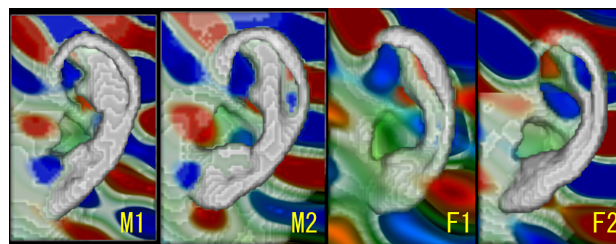


Fig. 9 Pressure distribution patterns at the highest N1 frequencies.