

局所耳介表面反射が耳介伝達関数に及ぼす影響の感度解析による検討*

☆廣田裕太郎, モクタリ パーハム, 森川大輔 (富山県立大)

1 はじめに

受聴者本人の頭部伝達関数 (HRTF) を用いることで, ヘッドホンなどで立体的な音を呈示できる. HRTF のスペクトルに見られるピークやノッチをスペクトラルキュー (SC) と呼ぶ. SC には波長の関係から耳介形状によって生じる音の反射や回折が大きく影響していると考えられている. SC の中で, 特に仰角方向の音像知覚の手がかりとして第1ノッチ (N1) が知られている^[1]. 直接波に耳介表面での逆位相の反射波が干渉することで, 外耳道入り口付近に N1 が発生するという仮説がいくつか報告されており, Takemoto ら^[2]は, 耳介上の音圧分布を可視化し, 音源の仰角に応じた3つの N1 生成メカニズムの仮説を立てた. Mokhtari ら^[3,4]は, 耳介形状の微小摂動解析を用いて, HRTF の中で耳介形状の特性を表す耳介伝達関数 (PRTF) を算出し, ピークとノッチの周波数感度が強い耳介箇所を明らかにした. また, 大谷ら^[5]は, 耳甲介舟や舟状窩での反射をなくすことで, PRTF に大きな影響を与えることを示した.

本稿では, これらの研究を発展させ, N1 の生成メカニズムを明らかにするため, 局所耳介表面の反射率の感度解析により, 耳介全体の N1 の振幅感度パターンについて述べる.

2 FDTD 法を用いた PRTF の算出

2.1 3次元耳介形状モデルの作成

磁気共鳴画像 (MRI) 装置で撮像したヒトの頭部データ^[6]を, 1辺2mmにボクセル化した. 次に, 右耳とその周囲のボクセルを直方体で切り出した. 作成した右耳表面の耳介形状モデルを Fig.1 に示す. モデルの外耳道入り口は閉塞されている. モデル表面を構成するボクセルは1786個であった.

2.2 局所耳介表面における反射率の設定

作成した耳介形状モデルの表面は, 音響的にはほとんど剛 (反射率: 0.99) である. 耳介表面を構成する1786個のボクセル1つずつに対して, そのボクセルの表面のみ垂直方向の反射率を0.5とし, 1786パターン設定した.

2.3 PRTF の算出

反射率を変更した耳介モデルの PRTF を算出した. 算出には, 波動方程式を用いて音場解析用に構築された時間領域有限差分 (FDTD) 法^[2,5]を用いた. 作成した耳介形状モデルを配置し, 音源位置を閉塞した外耳道入り口の1つ外側のボクセル (Fig.1 の黄色), 受音点を頭部中心位置からの距離1.0mの正中面上の仰角 $0^{\circ} \sim 70^{\circ}$ とした. 距離はキルヒホッフ・ヘルムホルツの積分定理^[7]で近似した. 音源位置に3msのガウシアンパルスを加し, 受音点におけるガウシアンパルス応答を算出した. 次に, 1つのボクセルの反射率を0.5とした1786パターンと, すべてのボクセルの反射率が0.99の耳介モデルを用いて得られたガウシアンパルス応答から PRTF を算出した. そして, PRTF の N1 を求めた. 正面の PRTF の N1 は振幅値 -22.57 dB であり, 反射率変化前を基準とした1786パターンの N1 の振幅変化量 ΔA [dB] の範囲は, -14.42 dB \sim 6.32 dB であった.

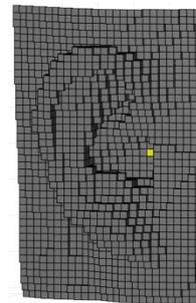


Fig.1 耳介形状モデル

3 結果と考察

3.1 正面における N1 の振幅感度マップ

正中面1.0mにおける PRTF の N1 の振幅感度マップを Fig.2 に示す. 仰角 $0^{\circ}, 10^{\circ}, 30^{\circ}, 50^{\circ}, 70^{\circ}$ を (a) ~ (e) としている. これらの感度マップは, 各ボクセルの反射率の変更によって生じた ΔA を表している. 反射率を下げることによって, 赤色のボクセルでは N1 が浅くなり, 青色のボクセルでは N1 が深くなったことを示している. また, 仰角ごとに基準となる N1 の振幅値が異なる. そのため, 影響の大きい箇所を見やすくするためにカラースケールは個別で設定しており, (b) は基準となる

* An investigation of the effect of local pinna-surface reflection on the pinna-related transfer function by sensitivity analysis, by HIROTA Yutaro, MOKHTARI Parham and MORIKAWA Daisuke (Toyama Prefectural Univ).

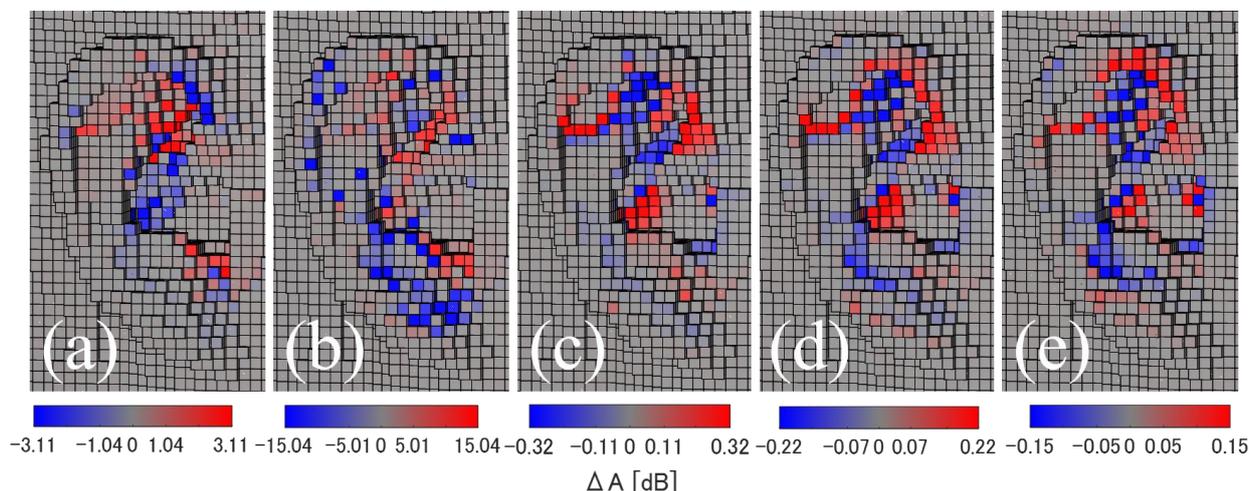


Fig.2 正中面 1.0 m における N1 の振幅感度マップ (a) 0°, (b) 10°, (c) 30°, (d) 50°, (e) 70°

N1 が最も鋭く深いノッチとなったため、(b)以外よりもカラースケールを広く設定した。

Fig.2-(a) より、仰角 0°において、N1 の振幅の深さ生成には赤色箇所が重要であり、逆に青色箇所によって N1 の深さ生成が阻害されていると考えられる。赤色箇所は、耳甲介舟や三角窩、舟状窩、珠間切痕に分布している。耳甲介舟と舟状窩が重要であるという結果は、大谷らの結果^[5]と一致している。このマップは耳介全体における N1 の振幅感度をより詳細に示すものである。また、耳甲介舟と珠間切痕は、局所耳介表面の形状を微小変化させ N1 周波数への影響を調べた Mokhtari らの先行研究^[4]と同様の結果となった。

3.2 正中面上の N1 の振幅感度マップ

Fig.2-(a)~(e) より、仰角 0° ~ 70°において、全ての仰角において外耳道入り口位置付近以外の耳甲介腔では灰色となった。(a) から (b) への変化は急であり、三角窩や舟状窩での変化は小さく、青色箇所が耳輪や耳朶にランダムに分布している。(c)~(e) では、仰角上昇に応じて耳甲介舟、耳甲介腔の後ろ壁、後耳介溝へと移動した。加えて、三角窩付近の耳輪では赤色が濃くなった。(a) と (c)~(e) では、三角窩や耳甲介舟、耳輪、耳輪脚、耳甲介腔の後ろ壁、珠間切痕において逆のカラーパターンとなり、(c)~(e) では珠間切痕での影響は小さい。また、先行研究で挙げられた耳介箇所に加えて、三角窩も強い影響を与えることがわかった。

Takemoto らの仮説では、音波の到来方向が前下方 (仰角 0°以下) と前上方 (仰角 30° ~ 70°) の 2 種類で、N1 の生成メカニズムが分かっている。それは、到来した音波と逆位相と

る耳介箇所が仰角とともに移動するが、耳甲介腔では音圧の節が生じるというものである。Fig.2 の感度マップの傾向は仮説と一致している。

4 まとめ

本稿では、耳介表面での音の反射が、耳介伝達関数の第 1 ノッチの振幅生成に与える影響を明らかにするために、局所耳介表面の音の反射率を半減させ、耳介伝達関数の N1 の振幅感度マップを作成した。その結果、N1 の深さを生み出す箇所や深さ生成を阻害する箇所がわかった。また、三角窩も N1 の深さに強い影響を与えることが分かった。

今後の課題は、N1 の生成メカニズムを明らかにするために、複数のボクセルの反射率を変えた際、同様の傾向が得られるかを調べることである。

謝辞 本研究の一部は科研費 (17K00260) の支援を受けた。

参考文献

- [1] Iida *et al.*, *Applied Acoustics*, 68, 835-850, 2007.
- [2] Takemoto *et al.*, *J. Acoust. Soc. Am.* 132(6), 3832-3841, 2012.
- [3] Mokhtari *et al.*, *Principles and applications of spatial hearing*, (World Scientific, 2011), 205-215.
- [4] Mokhtari *et al.*, *Proc. ICASSP*, 2408-2411, 2011.
- [5] 大谷ら, 音講論 (春), 887-890, 2011.
- [6] 平原ら, *Fundamentals Review*, 2(4), 68-85, 2009.
- [7] Mokhtari *et al.*, 音講論 (秋), 611-614,