

耳介周辺の音場の音響インテンシティ解析*

○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

正中面における頭部伝達関数 (Head-Related Transfer Function: HRTF) において, ピークは音源の仰角によって振幅は変化するが周波数は一定である。しかし, ノッチは音源の仰角によって振幅も周波数も変化する。HRTF のピークやノッチのこのような性質を利用して, 人間は音源の仰角を知覚していると考えられている[1]。これまでわれわれは, このピークとノッチの成因の解明に取り組んできた。まず, 時間領域差分法 (Finite-Difference Time-Domain method: FDTD 法) を用いて, 頭部全体の形状から計算した HRTF と, 同じ頭部から切り出した耳介形状のみから計算した耳介伝達関数 (Pinna-Related Transfer Function: PRTF) とを比較することによって, HRTF のピークとノッチは基本的に耳介に由来することを明らかにした[2]。次に, ピークやノッチの周波数で耳介を励振したときに生じる定在波を可視化することによって, ピークやノッチの成因を検討した。その結果, ピークとノッチは, それぞれ定在波の音圧の腹または節が外耳道入口に位置することによって生じることを明らかにした[2]。

しかし, ノッチの周波数と仰角との関係についての解明は不十分である。すなわち, なぜ音源の仰角が変化するとノッチの周波数も変化するのか, なぜある周波数においてピークは広い仰角に現れるのにノッチは狭い仰角にしか現れないのか, などは明らかになっていない。そこで本稿では, 外耳道入口に正弦波音源を置いて励振したときの耳介周辺の音場を, 複素インテンシティで解析し, ノッチが生じる仰角について検討したので報告する。

2 材料と方法

磁気共鳴画像法で撮像した, 日本人成人男性 1 名の左耳の耳介形状を解析した。空間解像度は 1.2 mm, 外耳道入口は閉塞した。

まず, この耳介形状から正中面の PRTF を計算した。閉塞した外耳道入口のすぐ外側(以下, 外耳道入口)に音源点を置き, ガウスパルスを入力した。この音源点を通る矢状面内の半径 0.1 m の円周上に 1 度ごとに観測点を置き, FDTD 法を用いてガウスパルス応答を 20 ms の間計算した。得られた応答をガウスパルスの特性で補正して PRTF を得た。

次に, PRTF の計算と同じ音源点に正弦波を入力し, 定常状態に達してから 0.5 ms 間の瞬時音圧と粒子速度を 200 kHz のサンプリング速度で記録した。音場の各格子点における音圧と粒子速度の変化から, 複素音響インテンシティ[3]を計算して正中面上のベクトルをプロットし, 耳介周辺の音場を可視化した。

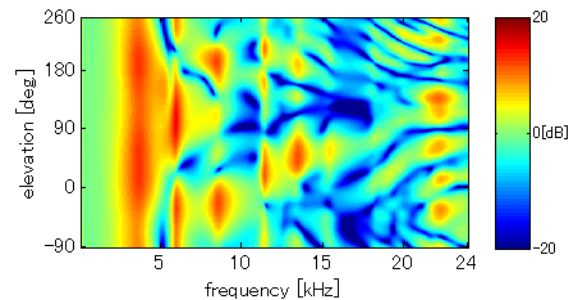


Fig. 1 PRTFs in the median plane calculated from a segmented pinna shape

3 結果と考察

3.1 PRTF

Fig. 1 は正中面の PRTF である。ピークは, それぞれ固有の周波数を持ち, 低い周波数のものほど広い仰角にわたって現れるため, 縦軸に沿った帯として観察される。一方, ノッチは, その周波数が仰角によって変化するので曲線として現れる。

最も周波数の低いノッチ (N1) に関して, 仰角と周波数の連続的な変化が最も明瞭に観察されたのは, 2 番目のピーク (P2) 近傍であった。Fig. 2 は, P2 およびその近傍の 4 つの周波数 (5500, 5750, 5950, 6350, and 7000

*Acoustic intensity analysis of sound field around the pinna, by TAKEMOTO, Hironori, MOKHTARI, Parham, KATO, Hiroaki, NISHIMURA, Ryouichi (NICT), and IIDA, Kazuhiro (Chiba Institute of Technology).

Hz)における N1 が現れる仰角を示している。すなわち、Fig. 2 は Fig. 1 の縦軸に沿った 5 つの断面である。周波数が 5500 Hz から 7000 Hz まで上昇すると、前方に現れる N1 の仰角は 7 度から 44 度に上昇する。後方に現れる N1 の仰角は、224 度から 180 度に変化する。すなわち、周波数が上昇すると、N1 が現れる仰角は真上方向へ接近する。

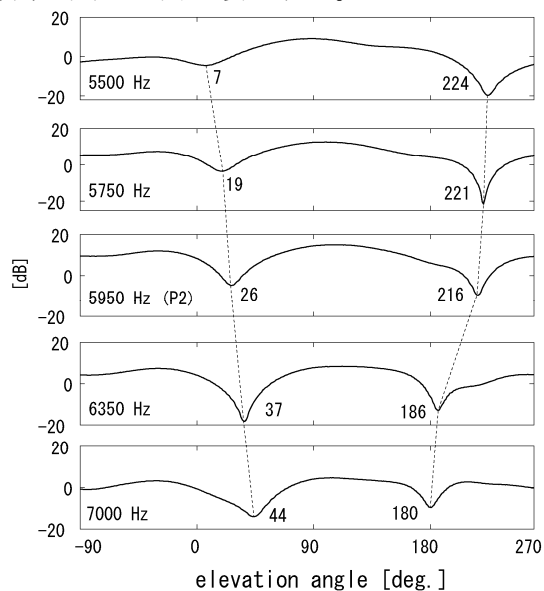


Fig. 2 Changes in angle at which N1 appeared at five frequencies. Numerals indicate N1 angles.

3.2 複素インテンシティ解析

まず、P2 周波数 (5950 Hz) における耳介周辺の音場の複素インテンシティ解析の結果について述べる。Fig. 3 はリアクティブ・インテンシティを青の矢印で、PRTF の正の振幅を赤で外向きに、負の振幅を青で内向きに仰角に合わせてプロットしたものである。また、図中の黒丸は観測点の位置を 10 度ごとに表示したものである。なお、リアクティブ・インテンシティでは、ベクトルが放射状に広がる部分で音圧が極大 (腹) になり、ベクトルが向き合う部分で音圧が極小 (節) になる。Fig. 3 では、仰角-30 度と 120 度をそれぞれ中心とする 2 つの広い仰角でベクトルが放射状に広がっており、これらの方向に音圧の腹があつて音が強く放射されることを示す。そのため、これらの仰角では PRTF でピークが現れる (赤の外向きの線)。一方、仰角 30 度と 210 度では、ベクトルが向き合っており、音圧の節が nodal line となっていることを示す。そのため、これらの仰角では、PRTF でノッチが現れる (青の内向きの線)。

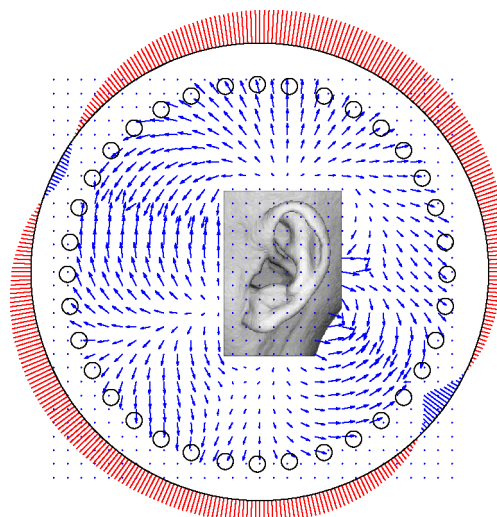


Fig. 3 Reactive intensity and amplitude of PRTFs for elevation angles at 5950 Hz (P2)

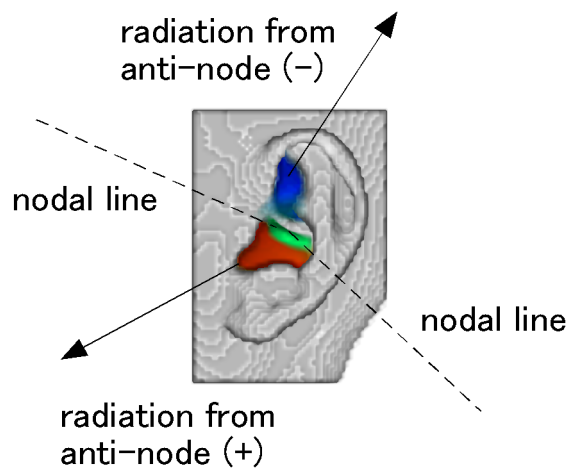


Fig. 4 Pressure anti-nodes and nodal lines at P2

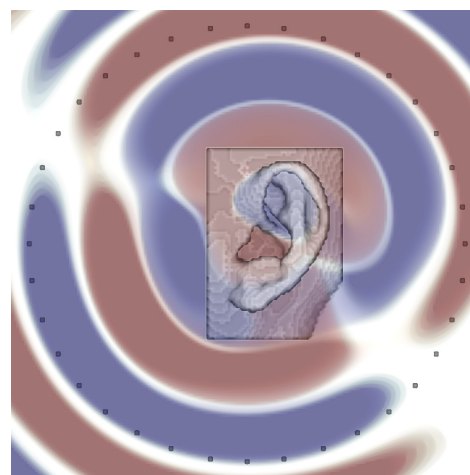


Fig. 5 Instantaneous pressure distribution pattern at P2 frequency. Red voxels are local maxima, while blue ones are local minima.

次に、これらの音圧の腹と節が生成される要因を考察する。P2 は耳介の 2 次のノーマル・モードであり、Fig. 4 はその定在波の腹と節を可視化したものである。耳甲介腔が赤（位相が正の音圧の腹）、耳甲介舟および三角窩が青（位相が負の音圧の腹）、耳輪脚の部分が緑（音圧の節）になっている。2 つの矢印は、Fig. 3 で示した、音が強く放射される方向である。これらは、耳介に生じる定在波の 2 つの音圧の腹から音が放射される主な方向であると考えられる。すなわち、 -30 度の方向へは耳甲介腔に生じた音圧の腹（下部の腹）から、 120 度の方向へは耳甲介舟および三角窩の腹（上部の腹）から音が強く放射される。これら 2 つの腹から放射された正弦波は位相が逆であるため、点線の位置で上下に接してお互いに打ち消しあい、nodal line を形成すると考えられる。Fig. 5 は、P2 周波数を持つ正弦波音源を外耳道入口において励振したときの瞬時音圧分布である。上部の腹、下部の腹から放射された 2 つの正弦波が接する境界では、位相が逆であるため相互に打ち消しあって透明になっており、nodal line であることを示す。音響の相反定理[4]に基づいて音源点と観測点を入れ替えて考察すると、nodal line 上をのぞく広い仰角方向に音源点があるときは、耳介に 2 次のノーマル・モードを励起して、外耳道入口で音圧変化が極大になり、PRTF のピークとなる。ところが、nodal line 上に音源点があるときだけノーマル・モードが励起されず、外耳道入口で音圧変化が極小となり、PRTF のノッチとなる。これが、ノッチが狭い仰角にしか現れない原因である。

これらの結果と考察を踏まえて、P2 より低い 2 つの周波数における、耳介周辺の音場の複素音響インテンシティ解析の結果を考察する。Fig. 6, 7 はそれぞれ 5750 Hz と 5500 Hz の場合である。まず、Fig. 6 は Fig. 3 と類似しており、前下と後上方に音圧の腹があり、これらの方向に音が強く放射される。しかし、Fig. 6 では、前下方にある PRTF の振幅が正である仰角が狭くなっている。さらに前下方では、後上方と比べて PRTF の正の振幅が小さくなっている。これを Fig. 4, 5 に基づいて解釈すると、耳介には P2 に類似した位相が逆の 2 つの音圧の腹を持つ定在波が生じているが、上部の腹に比べて下部の腹からの放射が

相対的に弱くなったと考えられる。そのため、上部と下部の腹から放射された位相が逆の正弦波が打ち消しあう境界、すなわち nodal line が下方へ移動したと解釈できる。さらに、Fig. 7 で示す 5500 Hz の場合では、下部の腹からの放射がさらに弱くなり、PRTF でも振幅がほとんど零になっている。これによって、5750 Hz より nodal line がさらに下方へ移動したと考えられる。

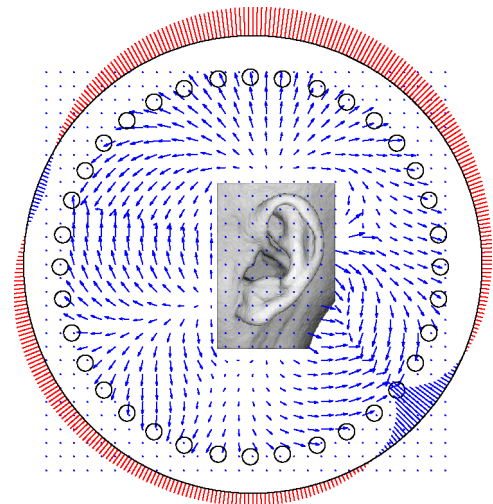


Fig. 6 Reactive intensity and amplitude of PRTFs for elevation angles at 5750 Hz

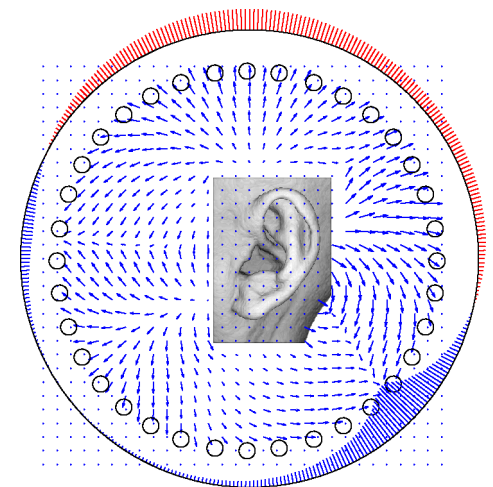


Fig. 7 Reactive intensity and amplitude of PRTFs for elevation angles at 5500 Hz

次に、P2 より高い 2 つの周波数における、解析結果を考察する。Fig 8 は 6350 Hz の場合である。Fig. 8 は、Fig. 3 と類似し、前下方と後上方に音圧の腹があり、この方向に音が強く放射されている。これより、耳介に P2 と類似した位相が逆の 2 つの音圧の腹を持つ定在波が生じていると思われる。しかし、Fig. 3 より後上方への放射が弱まっており、PRTF で振幅が正の仰角が狭くなっている。そのた

め、P2 より低い周波数の場合と逆に、上部と下部の腹から放射された正弦波が打ち消しあう境界、すなわち **nodal line** が上方へ移動したと解釈することができる。

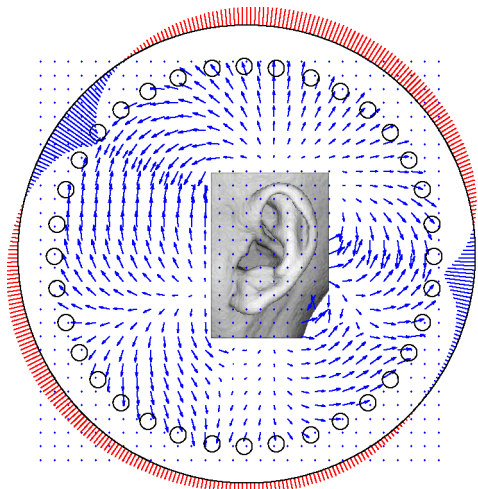


Fig. 8 Reactive intensity and amplitude of PRTFs for elevation angles at 6350 Hz

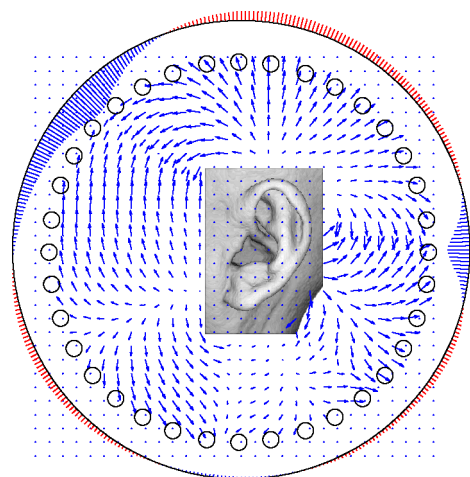


Fig. 9 Reactive intensity and amplitude of PRTFs for elevation angles at 7000 Hz

次に、Fig. 9 は 7000 Hz の場合である。前下方、後上方、後下方でベクトルが放射状に広がっており、これら 3 方向に音圧の腹が生じて音が強く放射されることを示している。一方、前上方、後方ではベクトルが向き合っており、**nodal line** が生じている。P2 に比べて周波数が約 1000 Hz も高いこと、3 つの方向に強く音を放射していることから、耳介ではもはや P2 に類似した定在波が発生していると解釈することはできない。しかし、6350 Hz の場合と同様に、後上方への音の放射が弱まったことにより、位相が逆の正弦波が打ち消しあう境界である **nodal line** がさらに上方へ移動したと考えられる。

4 おわりに

本稿では、外耳道入口に正弦波音源を置いて P2 周波数およびその近傍の 4 つの周波数で耳介を励振し、耳介周辺の音場を複素音響インテンシティで解析し、N1 が現れる仰角とその成因について検討した。

P2 周波数を持つ正弦波音源を外耳道入口において励振すると、耳介の上下に位相が逆の 2 つの音圧の腹が生成される。上部の腹からは後上方に、下部の腹からは前下方に、それぞれ正弦波が強く放射される。上部と下部の腹では位相が逆であるため、そこから放射された正弦波も位相が逆であり、両者が接する境界では、お互いに打ち消しあって **nodal line** が生じる。音響の相反定理から、この **nodal line** 上に音源があるときのみ、外耳道入口では音圧変化が極小になり、N1 が生じる。これが、N1 が非常に狭い仰角にしか現れない原因であると思われる。

また、P2 より低い周波数では、耳介の前下方に放射される音が相対的に弱まり、耳介の後上方から放射された位相が逆の正弦波と接する境界である **nodal line** が下降し、その結果 N1 の現れる仰角が下方へ移動する。逆に P2 より高い周波数では、耳介の後上方に放射される音が前下方に放射される音に比べて相対的に弱まり、**nodal line** が上昇し、その結果 N1 の現れる仰角が上方へ移動する。

このような **nodal line** の上下動は、耳介に生じる定在波の 2 つの音圧の腹の位相差とその放射の強度によって決定される。しかし、なぜ前下方と後上方への放射の相対的な強度が P2 を境にして変化するのか、本研究では明らかにすることが出来なかった。また、本稿で論じたのは P2 周波数の近傍の現象であり、P3 周波数の近傍では、3 つの音圧の腹に基づいた考察が必要であると思われる。

参考文献

- [1] Iida *et al.*, *Applied Acoustics*, 68, 835-850, 2007.
- [2] Takemoto *et al.*, *Principles and Applications of Spatial Hearing*, 179-194, 2011.
- [3] 橘ら, *生産研究*, 39, 456-459, 1987.
- [4] Pierce, *Acoustics: an introduction to its physical principles and applications*, 180-183, 1989.