

## 頭部伝達関数の第1ノッチの生成に寄与する音圧の節の空間分布\*

○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)のピーク周波数は、音源の仰角によらず一定であるが、ノッチ周波数は音源の仰角によって変動する[1]。そのため、第1ノッチ(N1)は音源の仰角知覚の重要な手がかりである[2]。そこで、われわれはこれまでN1の成因について検討を重ねてきた。前報[3]までは正中面でのみ検討を行ってきたが、本稿ではこれを全方位に拡張して検討する。

われわれは最初に、ある仰角方向に音源を置いてN1周波数で励振し、耳介に生じる音圧の腹や節(以下、単に腹、節と呼ぶ)の配置を分析した[1]。その結果、N1周波数では閉塞した外耳道のすぐ外側(以下、外耳道入口)に節が生じることが明らかになった。しかし、N1の周波数と音源の仰角との関係は明らかにできなかった。

そこで次に、逆に外耳道入口に音源を置いてN1周波数で励振し、正中面において節が現れる仰角を可視化した[4]。これは、音響の相反定理により、この節の上に音源をおいて励振すると、外耳道入口に節が生じるからである。その結果、第2ピーク(P2)近傍の周波数では、励振によって耳介に位相差のある2つの腹が生じ、その腹から放射される正弦波が打ち消し合う境界に節が生じた。打ち消し合うためには位相差が必要であることから、耳介の腹の位相差が節を生成する本質的な要因であることが明らかになった。また、励振周波数を変化させると2つの腹の位相差も変化し、結果として節の位置が変化した。すなわち、N1の周波数の変化は2つの腹の位相差を変化させ、N1の生成に寄与する節の現れる仰角を変化させることが明らかになった。

以上の結果は、正中面における節の可視化によって得られたものである。本稿では、こ

の手法を拡張し、頭部中心から半径50cmの空間における節の空間分布の周波数による変化を可視化して検討する。

### 2 材料と方法

#### 2.1 頭部データ

男女1名ずつ(M2, F1)の頭部[1]をMRIで計測して解析に用いた。撮像時の空間解像度は、M2で1.2mm, F1で1.1mmであったが、ともに2mmになるようにリサンプルし、体組織と空気で2値化した。なお、外耳道は入口で閉塞した。

#### 2.2 HRTFの計算

M2, F1の頭部データを用いて、時間領域差分法[1]により、左耳のHRTFを計算で求めた。この計算では、まず、外耳道入口にガウスパルスを印加し、Fig.1で示すように、頭部中心からの距離が50cmの球面上で、側方角 $\alpha$ 、上昇角 $\beta$ で決定される観測点での応答を計算した。なお、観測点の数は、側方角 $\alpha$ を0度、 $\pm 18$ 度、 $\pm 36$ 度、 $\pm 54$ 度、 $\pm 72$ 度、上昇角 $\beta$ を $-90$ 度から10度ごとに260度までとしたので、合計 $9 \times 36 = 324$ 点であった。次に、各観測点で得られた応答を、頭部を除去して頭部中心にガウスパルスを印加したときの応答で除してHRTFを求めた。なお、空間解像度が2mmなので、14kHzまでのHRTFを計算した[5]。

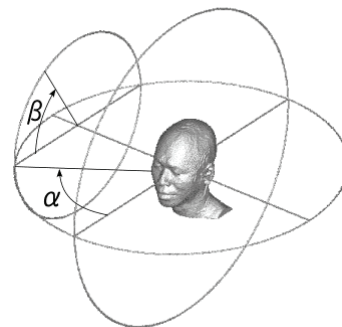


Fig. 1  $\alpha$ : lateral angle,  $\beta$ : vertical angle.

\*Spatial distribution of pressure nodes that contribute to generating the first spectral notch of head-related transfer functions, by TAKEMOTO, Hironori, MOKHTARI, Parham, KATO, Hiroaki, NISHIMURA, Ryouichi (NICT), and IIDA, Kazuhiro (Chiba Institute of Technology).

### 2.3 音圧の腹と節の可視化

いくつかの周波数における腹と節の空間分布を以下の手順で可視化した。まず、左の外耳道入口に音源を置いてある周波数で励振し、解析領域が定常状態に達した後、各点における音圧変化の最大値を求めた。次に、頭部を除去し、頭部中心に同じ周波数を持つ正弦波音源を置いて励振したときの各点における音圧変化の最大値を求めた。そして、前者を後者で除して音圧レベルを求めた。なお、本稿では、音圧レベルが 0 dB 以下の部分を便宜的に節とみなし、音圧レベルが 12 dB 以上の部分を便宜的に腹とみなしてボリュームレンダリングとサーフェスレンダリングを用いて可視化した。

## 3 結果と考察

### 3.1 HRTF

Fig. 2 は F1 の HRTF の一部である。(a)~(e) の側方角はそれぞれ -72 度, -36 度, 0 度, 36 度, 72 度であり、上昇角はすべて -90~260 度である。左耳の HRTF なので、音源が左側、すなわち側方角が負で絶対値が大きくなるほど全体のレベルは高くなり、音源が右側、すなわち側方角が正で絶対値が大きくなるほど全体のレベルは低くなる。そのため、HRTF のピーク・ノッチパターンは側方角が大きくなると曖昧になる。ピーク周波数は側方角による変動はほとんどなく、第 1~3 ピーク (P1~P3) の周波数は、それぞれ 4000 Hz, 5875 Hz, 7750 Hz であった。上昇角に対する N1 パターンの変化は、側方角によらず類似しているが、(a), (b) で見られるように、側方角が負で絶対値が大きくなると下方 (-90~0 度, 180~260 度) での N1 の周波数は上昇した。なお、この傾向は、M2 の HRTF でも確認した。また、大まかなピーク・ノッチパターンは側方角によらず類似していることから、正中面の HRTF を用いて上昇角を、両耳間時間差と両耳間レベル差で側方角を制御して立体音を提示する手法[6]は妥当であると言える。

### 3.2 腹と節の空間分布

Fig. 3 は、励振周波数を変化させたときの腹と節の空間分布を示している。Fig. 3 (a) は、腹と節を表示していない状態の頭部と、9 つの側方角 (0, ±18, ±36, ±54, ±72 度) における頭部中心からの半径 50 cm の球面の断

面 (観測点を置いた円) を示している。

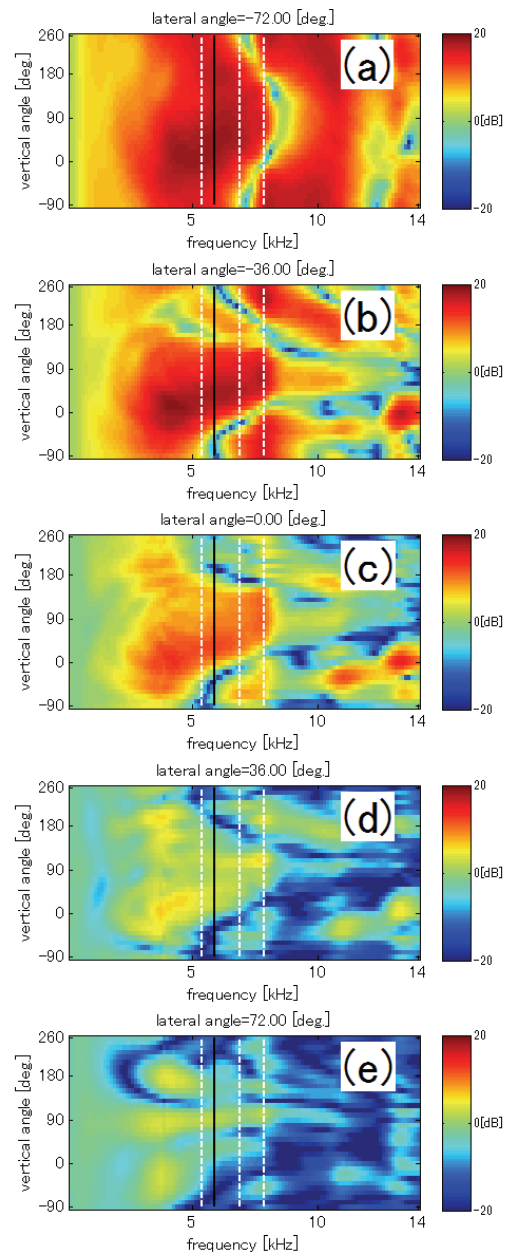


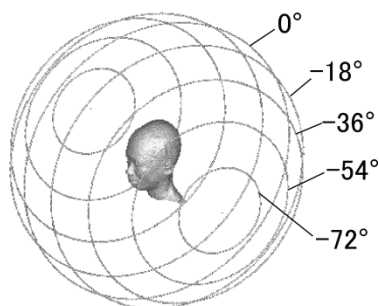
Fig. 2 HRTFs for F1. A black line indicates the P2 frequency (5875 Hz), and three white dashed lines indicate 5375 Hz, 6875 Hz, and 7875 Hz.

Fig. 3 (b)~(e) は、それぞれ左の外耳道入口に音源を置き、5375 Hz, 5875 Hz (P2), 6875 Hz, 7875 Hz で励振したときの腹と節の空間分布である。頭部の位置と方向はすべて Fig. 3 (a) と同じである。緑の面は音圧レベルが 0 dB の等値面、青は 0 dB 以下の領域である。すなわち、緑と青の領域は節である。よって、音響の相反定理より、ある周波数における緑と青の領域に音源を置いて左耳の HRTF を求めれば、その周波数でのレベルは 0 dB 以下となり、ノッチが生じる。一方、黄色の面は音圧レベルが 12 dB の等値面である。また、音圧レベ

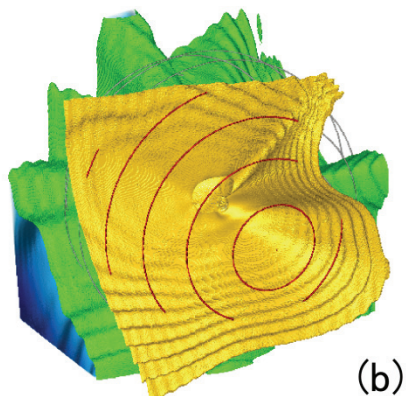
ルが 12 dB 以上の空間にある観測点を置いた円弧は赤で示されている。すなわち、この領域は腹である。よって、音響の相反定理より、ある周波数における腹の領域に音源を置いて左耳の HRTF を求めると、その周波数でのレベルは 12 dB 以上となり、ピークが生じる。

頭部の右側は頭の影になり、腹が存在しないので、左側の腹と節の分布について述べる。励振周波数が低いとき、上方へ腹が広がり、下方へ節が広がっていた。励振周波数が上昇すると、上方の腹は下方から狭くなり、下方の節は狭くなりながら上昇した。このとき、Fig. 3 (c), (d) では見えないが、下方にも腹があり、励振周波数の上昇と共に広がりを増した。この下方の腹は、最も励振周波数の高い Fig. 3 (e) では上方の腹と同程度に広がり、上下の腹に挟まれる狭い領域に節が位置した。

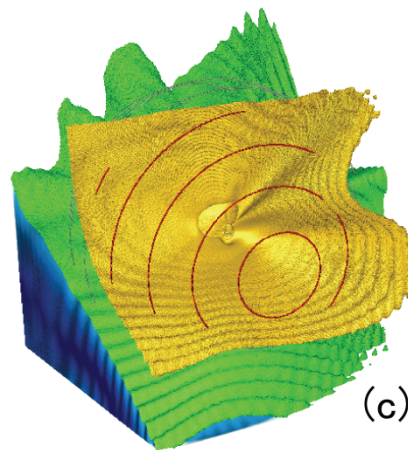
このような励振周波数による腹と節の分布の変化が、Fig. 2 で示した HRTF にどのように反映されているか検討する。腹は、励振周波数によらず側方から上方にかけての広い領域に広がっている。これが、側方角が負、すなわち音源が左側にあるとき、HRTF のレベルが全体として高くなる原因である。



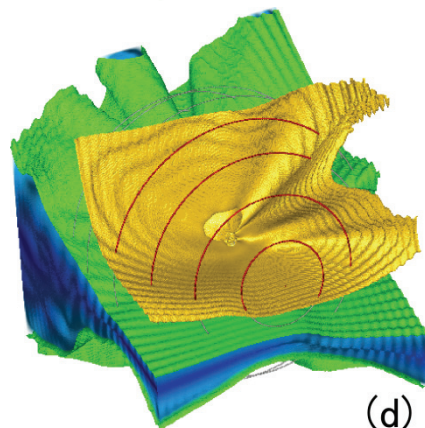
(a)



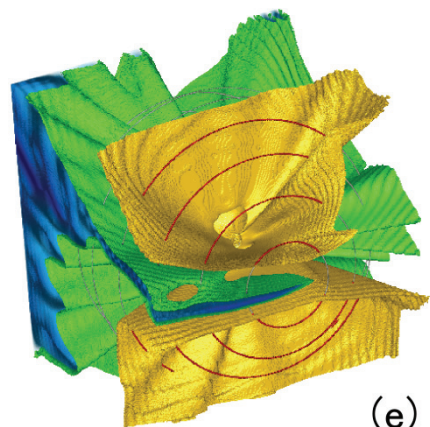
(b)



(c)



(d)



(e)

Fig. 3 Pressure nodes (green and blue) and anti-nodes (yellow) for F1 at (b) 5375 Hz, (c) 5875 Hz (P2), (d) 6875 Hz, and (e) 7875 Hz. Note that (a) is a reference image.

一方、節は、励振周波数が低いとき (Fig. 3 (b)), 側方角が負で絶対値が大きくなるほど下方に位置する。そのため、側方角が負で絶対値が小さい観測点を置いた円と節は交わるが、側方角が負で絶対値が大きい観測点を置いた円と節とは交わらない。励振周波数が高くなると (Fig. 3 (d), (e)), 節は水平に広がるため、側方角が負で絶対値が大きい観測点を置いた円とも交わる。これが、Fig. 2 で示し

た、側方角が負で絶対値が大きくなると下方での N1 の周波数が上昇する原因である。

次に、耳介に生じる 2 つの腹の位相差と節の位置について検討する。前報では、耳介の上下に生じる 2 つの腹を、自由空間に置いた位相差を持つ 2 つの正弦波音源とみなして正中面に生じる節の位置を検討した[3]。この結果を正中面以外にも拡張すると、次のようになる。位相差が $\pi$ のとき、2 つの音源の中点を通して 2 つの音源を結ぶ直線に垂直な平面上に節が生じる。位相差が $\pi$ より小さいとき、2 つの音源を焦点とする上に凸の方の双曲面の上に節が生じる。位相差が $\pi$ より大きいとき、2 つの音源を焦点とする下に凸の方の双曲面の上に節が生じる。すなわち、2 つの腹の位相差が大きくなると節の位置は上昇する。

Fig. 3 で示すように、実際の耳介でも励振周波数が高くなるにつれて節の位置が上昇した。このとき、耳介に生じる腹の位相差も増大したと考えられる。これは、自由空間に置いた位相差を持つ 2 つの正弦波音源による節の生成と定性的に同じ挙動である。よって、正中面以外でも、耳介に生じる 2 つの腹の位相差によって節の位置が決まるといえる。

しかし、耳介に生じた音圧の腹と、自由空間に置いた正弦波音源は放射特性が大きく異なる。Fig. 3 (c)で示すように、P2 周波数で励振しても節は平面状ではない。これは、耳介の影響により、それぞれの腹が複雑な放射特性を帯びるためであると考えられる。

なお、P2 周波数で励振したときの腹と節の分布にも個人差がある。F1 では、Fig. 3 (c)で示したように、上の腹が下の腹に比べてかなり大きかった。これは、正中面の HRTF である Fig. 2 (c)で P2 が上方にのみ観察されることにも表れている。対照的に、M2 では上下の腹の大きさはほぼ等しかった。Fig. 4 は M2 の左の耳介を P2 周波数 (5875 Hz) で励振したときの腹と節の空間分布である (注: P2 周波数は F1 と M2 で偶然に一致)。頭の位置と方向は、Fig. 3 (a)と同一である。図で示すように、上下に腹が大きく広がり、その間の狭い領域に節が生じている。これは、正中面の HRTF (Fig. 5) で P2 が N1 との交点を除くほぼすべての仰角で観察されることにも表れている。このように同じ第 2 ノーマル・モードであっても、腹と節の空間分布には個人差が

ある。これは、耳介に生じる腹の放射特性が、耳介形状によって変化することを示唆する結果である。

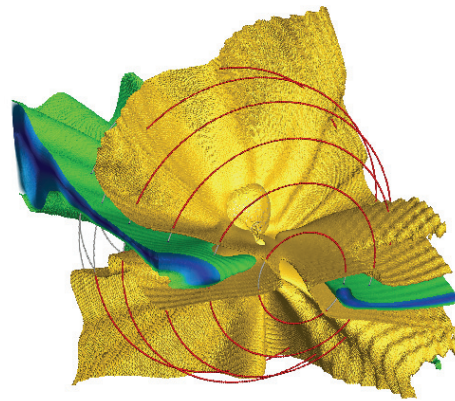


Fig. 4 Pressure nodes and anti-nodes for M2 at 5875 Hz (P2).

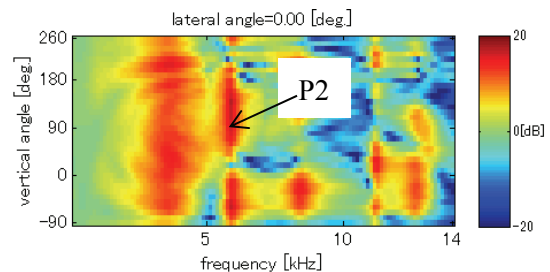


Fig. 5 HRTFs in the median plane for M2.

#### 4 おわりに

本稿では、頭部モデルの左の外耳道入口に音源を置いて様々な周波数で励振し、音圧の腹と節の分布を可視化した。その結果、励振周波数が増えると、下方に広がっていた節が上方に移動した。これは、正中面以外でも、耳介に生じる 2 つの腹の位相差が節の位置を決定する主要因であることを示す結果である。本稿では、計算機の制約により、頭部中心から 50 cm の範囲で可視化を行ったが、HRTF の距離による影響が無視できる 1 m の範囲でも可視化できるか検討する必要がある。

#### 参考文献

- [1] Takemoto *et al.*, JASA, 132, 3832-3841, 2012.
- [2] Iida *et al.*, Applied Acoustics, 68, 835-850, 2007.
- [3] 竹本ら, 音講論 (秋), 843-846, 2013
- [4] 竹本ら, 音講論 (秋), 459-462, 2012.
- [5] Mokhtari *et al.*, Proc. ICA, No. 790, 2010.
- [6] Morimoto *et al.*, AST, 24, 267-275, 2003.