

正中面の耳介伝達関数における第1ノッチが生じる仰角と周波数の関係*

○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)の第1ピーク(P1)周波数は音源の仰角方向によらず一定だが, 第1・第2ノッチ(N1, N2)周波数は音源が下方にあるときは低く, 上方に移動すると上昇するという特徴があり, これらは音源の仰角知覚の手がかりになっていると考えられている[1]。そのため, われわれはこれまで正中面におけるHRTFのピークやノッチの成因の解明に取り組んできた。その結果, ピークやノッチの基本パターンは耳介で生成されること, ピークでは外耳道の入り口に音圧の腹が, ノッチでは外耳道の入り口に音圧の節が生成されることを明らかにした[2]。しかし, なぜ音源の仰角が連続的に変化するとノッチ周波数も連続的に変化するのかという問題に関しては十分に解明できていない。

音響の相反定理によれば, ある仰角方向から正弦波が到来したときに外耳道入口に音圧の節が生成されるなら, 逆に外耳道入口に正弦波音源を置いて励振すれば, その仰角方向に音圧の節線が生じると予想される。そこでわれわれは, 時間領域差分法(Finite-Difference Time-Domain method: FDTD法)で耳介周辺の音場を計算し, N1について音源の仰角方向に節線が生じることを確認した[3]。本研究では, この研究を一步進めて, 節線が生じる仰角方向と音源の周波数および位相差の関係を定式化できるか検討する。

2 材料と方法

まず, 磁気共鳴画像法で計測した男女各2名(M1, M2, F1, F2)の頭部から左の耳介を切り出し, 耳介伝達関数(Pinna-Related Transfer Function: PRTF)を計算した[2]。計算に当たっては, 外耳道入口を閉塞してそのすぐ外側に音源点を置き, この点を中心とする半径0.1mの矢状面内の円周上に1度間隔で360個の

観測点を置いた。そして, 20msのガウスパルス応答をFDTD法で計算してPRTFを求めた。なお, 正面は仰角0°, 真上は仰角90°である。

次に, M2の耳介を用いて耳介周辺の節線を可視化した。外耳道入口に正弦波音源を置き, PRTFから抽出したP2周波数である5950Hzおよびその近傍の5750Hzと6350Hzとで耳介を励振した。音場が定常状態に達した後, 瞬時音圧分布をボリュームレンダリングで可視化した。

3 結果と考察

3.1 耳介周辺の音圧の節線

Fig. 1はM2の耳介を5750Hz, 5950Hz(P2), 6350Hzで励振して定常状態に達したときの瞬時音圧分布である。図中の点は, 10°ごとの観測点の位置を示す。また, それぞれの図の2つの直線は, 励振周波数におけるN1の仰角方向を表しており, 節線と一致する。なお, その仰角は, (a)では19°と221°, (b)では26°と216°, (c)では37°と186°である。励振周波数が上昇するにつれて, 耳介の前方の節線の仰角は増加し, 後方の節線の仰角は減少する。言い換えれば, 2つの節線は, 周波数が上昇すると耳介の上端の方向に近づき, 周波数が下降すると耳介の下端の方向に近づく。

P2周波数である5950Hzでは, 耳甲介腔と耳甲介舟および三角窩にかけての部分に1つずつ同じ周波数を持ち, 位相が逆の音圧の腹が生成され[2, 3], この2つの腹から放射される正弦波の干渉で節線が生成されると考えられる。また, その上下の周波数であってもP2周波数と類似した音圧分布となっていることから, 節線は周波数が同じで位相の異なる2つの仮想的な音源から放射される正弦波の干渉によって生じると考えられる。

*Elevation-frequency relationship for the first spectral notch of pinna-related transfer functions in the median plane, by TAKEMOTO, Hironori, MOKHTARI, Parham, KATO, Hiroaki, NISHIMURA, Ryouichi (NICT), and IIDA, Kazuhiro (Chiba Institute of Technology).

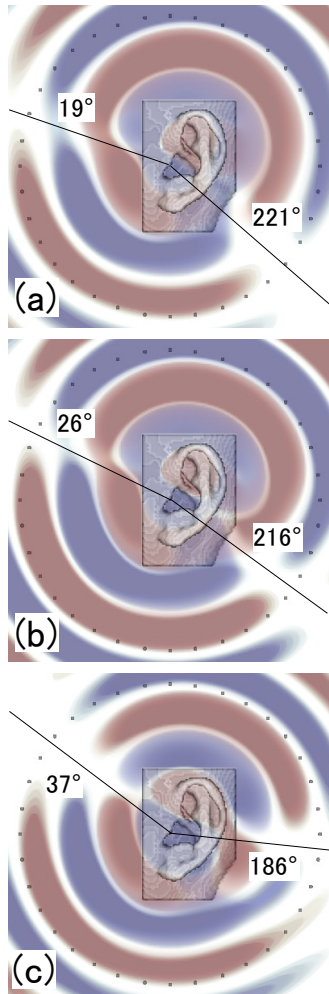


Fig. 1 Instantaneous pressure distribution patterns at (a) 5750 Hz, (b) 5950 Hz (P2), and (c) 6350 Hz. Red voxels are local maxima, while blue ones are local minima. Solid lines indicate elevation angles for N1 at that frequency.

3.2 2つの正弦波音源による節線の生成

この節では、周波数が同じで位相差を持つ2つの正弦波音源の干渉によって節線が生じるかどうか、まず自由空間で検討する。空間のある1点から流量 $q(t) = A \sin \omega t$ が湧き出しているとする。ここで、 $\omega = 2\pi f$ 、 f は周波数、 t は時間、 A は振幅である。この点から距離 r だけ離れた点 P における速度ポテンシャルを ϕ とすると、

$$\phi(r, t) = -\frac{q(t - kr)}{4\pi r} = -\frac{A \sin(\omega t - kr)}{4\pi r} \quad (1)$$

である。ここで、 $k (= \omega/c)$ は波数である。空

気の密度を ρ とすると、点 P における音圧 p は次の式で表される。

$$p(r, t) = -\rho \frac{\partial \phi}{\partial t} = \frac{A \rho \omega \cos(\omega t - kr)}{4\pi r} \quad (2)$$

次に、2つの正弦波音源を S_1 、 S_2 とおき、それぞれの音源点から湧き出す流量を $q_1(t) = A_1 \sin(\omega t + \theta)$ 、 $q_2(t) = A_2 \sin(\omega t)$ とする。ここで、 A_1 、 A_2 は振幅、 θ は2つの音源の位相差とする。このとき、空間の任意の点 $P(x, y, z)$ における音圧 p は(2)式より、

$$p(x, y, z, t) = \frac{A_1 \rho \omega \cos(\omega t - kr_1 + \theta)}{4\pi r_1} + \frac{A_2 \rho \omega \cos(\omega t - kr_2)}{4\pi r_2} \quad (3)$$

と表される。ここで、 r_1 は点 S_1 から点 P までの距離、 r_2 は点 S_2 から点 P までの距離である。

この音場が定常状態に達したときの音圧分布は、(3)式の時間項を消去した以下の式で得られる。

$$p(x, y, z) = \frac{A_1 \rho \omega \cos(-kr_1 + \theta)}{4\pi r_1} + \frac{A_2 \rho \omega \cos(-kr_2)}{4\pi r_2} \quad (4)$$

次に、節線上では音圧の時間変動が極小になるから、音源の振幅によらず、2つの音源からの位相差を考慮した経路差がちょうど半波長になると考えられる。そこで波長を λ とすると節線は、

$$r_2 - r_1 = \frac{\lambda}{2} - \frac{\lambda}{2\pi} \theta = \frac{c}{2\pi f} (\pi - \theta) = \frac{\pi - \theta}{k} \quad (5)$$

となることが予想される。これは双曲面の式であり、2つの音源点を通る平面では、節線はこの2点を焦点とする双曲線上に現れることを意味する。

ここで、2つの音源点が $2d$ だけ離れている

と仮定し, S_1 , S_2 を xy 平面上に置き,
 $S_1(0,-d)$, $S_2(0,d)$ とする。すると, (5)式は,

$$\frac{x^2}{a^2} - \frac{y^2}{b^2} = -1 \quad (6)$$

となる。ここで, $b = \frac{\pi - \theta}{2k}$, $a = \sqrt{d^2 - b^2}$ で

ある。なお, a は実数なので $d^2 - b^2 \geq 0$ を満たす必要があるから, これを解くと以下の不等式が得られる。

$$\pi - k \cdot 2d \leq \theta \leq \pi + k \cdot 2d \quad (7)$$

この式は, 2つの音源が逆位相を中心とするある範囲の位相差をもつとき節線が生成され, それは(6)式 of 双曲線であることを示す。

また, (6)式より, 双曲線の2つの漸近線は,

$$y = \pm \frac{b}{a} x = \pm \frac{\frac{\pi - \theta}{2k}}{\sqrt{d^2 - \left(\frac{\pi - \theta}{2k}\right)^2}} x \quad (8)$$

$$= \pm \frac{\pi - \theta}{\sqrt{(k \cdot 2d)^2 - (\pi - \theta)^2}} x$$

である。節線は, (6)式で表される双曲線上に現れるが, 音源から離れると(8)式の漸近線で近似できる。節線の仰角は, 漸近線の傾きによって決定され, 励振周波数によって決まる波数 k , 音源間の位相差 θ と距離 $2d$ の関数である。特に, 2つの音源が逆位相, すなわち位相差が π のとき, 漸近線は $y = 0$ となり, x 軸と一致する。これは, 2つの音源点の垂直二等分線上に節線が現れることを示す。

耳介を P1 周波数で励振すると単一の音圧の腹が生じ, P2 周波数で励振すると位相が逆の2つの音圧の腹が生じることから, 励振周波数が上昇するにつれて音源が2つに分離し, しかも位相差が増大すると考えられる。

Fig. 2 は, $2d = 2.8$ cm として固定し, 振幅を同じにして励振周波数と位相差をともに増加させたときの音圧分布と, (8)式で計算した2つの漸近線をプロットしたものである。2つの音源の干渉によって節線が生じ, 節線は漸近線と一致する。よって, 自由空間においては, 同じ周波数, 異なる位相差を持つ2つ

の正弦波音源の干渉によって節線が生成され, その節線は双曲線あるいはその漸近線上に現れることが示された。また, 2つの節線は励振周波数と位相差が上昇するにつれて下方から上方へと変位した。これは y 軸を耳介の長軸とすると, Fig. 1 の結果と類似する。

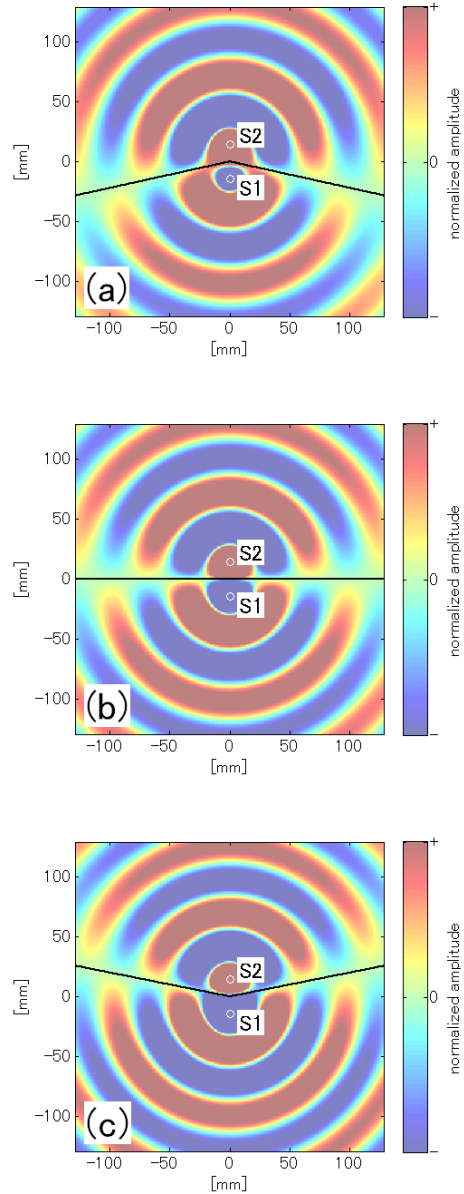


Fig. 2 Nodal lines (solid lines) caused by two sinusoidal sources. Red voxels are local maxima, while blue ones are local minima. (a) $f = 5750$ Hz, $\theta = 0.8 \pi$, (b) $f = 5950$ Hz, $\theta = \pi$, (c) $f = 6350$ Hz, $\theta = 1.2 \pi$.

3.3 PRTF における N1 パタンの推定

耳介を励振したときに生じる音圧の腹は, 耳輪脚や対輪などに囲まれた, 半ば閉じた空間に生成されるので, 自由空間における正弦波音源と放射特性が大きく異なる。しかし,

本節では2つの音圧の腹をそれぞれ自由空間に置いた正弦波音源で近似し、(8)式を用いてPRTFにおけるN1パタンの推定を試みる。そのために、4つの仮定をおいた。まず、2つの仮想音源は周波数によらず存在すると仮定した。次に、その音源間の距離は一定で、P2周波数の半波長であると仮定した。これは、耳介の形状によって音圧の腹からの放射点が限定されると考えたためである。そして、音源間の位相差はP1で0、P2で π と線形に変化すると仮定した。耳介をP1周波数で励振すると耳介の腔の空気はすべて同相で振動し、P2では耳介の腔に2つの音圧の腹が生じて逆相で振動する。ここでは、周波数によらず2つの音源が存在すると仮定したので、その位相差はP1で0、P2で π とし、その変化は第1次近似として線形を仮定した。なお、P2より高い周波数では外挿で位相差を求めた。最後に、(6)式のy軸が耳介の長軸に対応すると仮定した。これは、2つの音圧の腹がほぼ長軸に沿って発生するためである[2]。

Fig. 3は、正中面における4つのPRTFに推定した節線の周波数と仰角をプロットしたものである。推定したN1パターンは実際のパターンと概形が一致した。よって、N1の成因である耳介における節線は、自由空間においた同じ周波数で異なる位相を持つ2つの仮想的な正弦波音源の干渉によって生じると見なすことが可能で、またその節線は(8)式で示した双曲線の漸近線上に現れることも示された。

4 おわりに

本稿では、まず耳介を励振する周波数を変化させてN1の生成要因となる節線の変動を可視化した。その結果、節線は耳介に生じた同じ周波数で異なる位相を持つ2つの仮想的な正弦波音源の干渉によって生じると考えた。次に、自由空間において、2つの正弦波音源の干渉によって耳介の場合と類似した節線が生じること、その節線はこれら2つの音源を焦点とする双曲線あるいはその漸近線の上に現れることを示した。最後に、4つの仮定をおくことによって、漸近線の式から4つの耳介のPRTFにおけるN1パタンの概形を推定することができた。これらの仮定の妥当性についてはさらに検討が必要だが、N1の生成要因である節線は、定性的には同じ周波数で異

なる位相を持つ自由空間においた2つの正弦波音源の干渉によって生成され、その節線は2つの音源を焦点とする双曲線あるいはその漸近線の上に現れると結論できる。そして、その漸近線の傾きは、2つの音源の周波数と位相差、距離によって決定されると言える。

なお、第3ピーク近傍の高い周波数では、耳介に音圧の腹が3つ現れるので、3つの正弦波音源を仮定する必要があると思われるが、本稿では2つの音源しか仮定しなかった。これがN1パタンの推定における誤差の一因であると考えられる。

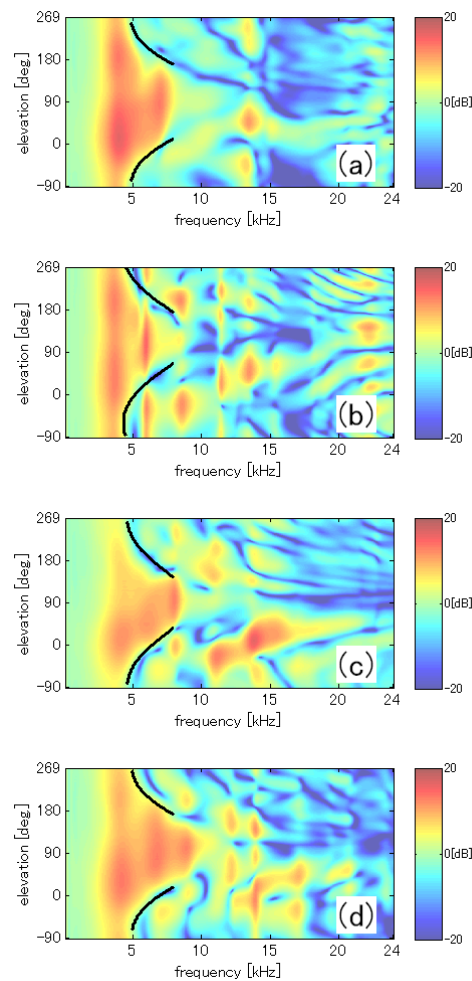


Fig. 3 Estimated N1 trajectories (bold lines) on PRTFs in the median plane for subjects (a) M1, (b) M2, (c) F1, and (d) F2.

参考文献

- [1] Iida *et al.*, *Applied Acoustics*, 68, 835-850, 2007.
- [2] Takemoto *et al.*, *JASA*, 132, 3832-3841, 2012.
- [3] 竹本ら, *音講論 (秋)*, 459-462, 2012.