

上半球正中面における上昇角知覚の手がかり

- 方向決定帯域理論とパラメトリック・ノッチ・ピーク頭部伝達関数モデルの統合 -

飯田 一博[†] 中村 風香[‡]

[†] 千葉工業大学先進工学部 〒275-0016 千葉県習志野市津田沼 2-17-1

[‡] 千葉工業大学大学院工学研究科

E-mail: [‡] kazuhiko.iida@it-chiba.ac.jp

あらまし 音像の上昇角知覚の手がかりについては、これまでに多くの研究がなされている。狭帯域信号を用いた音像定位実験により、実際の音源の方向とは無関係に特定の方向(前方, 上方, 後方)に知覚される方向決定帯域が存在することが明らかにされている。一方, 広帯域信号を用いた音像定位実験では, 頭部伝達関(HRTF)の 5 kHz 以上のノッチとピークが上昇角知覚に寄与していることが明らかにされている。この知見に基づき, われわれは上昇角知覚に必要な最少のノッチとピークで再構成したパラメトリック・ノッチ・ピーク頭部伝達関数モデル(PNP モデル)を提案している。このように, 特定の周波数成分の存在が重要であるとする方向決定帯域理論と, 特定の周波数成分の欠損(ノッチ)が重要であるとする PNP モデルは一見相反している。本研究では, まず前方, 上方, 後方に着目し, PNP モデルと方向決定帯域理論の統合を試みる。次に, 対象方向を上半球正中面全体に拡大し, 上昇角知覚の手がかりに関する仮説とそれを反映した拡張 PNP モデルを提案する。

キーワード 音像定位, 頭部伝達関数, 正中面, 方向決定帯域, ノッチ, ピーク

Cues for vertical sound localization in the upper median plane: Integration of directional band theory and parametric notch-peak head-related transfer function model

Kazuhiro IIDA[†] and Fuka NAKAMURA[‡]

[†] Faculty of Advanced Engineering, Chiba Institute of Technology 2-17-1 Tsudanuma, Narashino, Chiba,

275-0016 Japan

[‡] Graduate School, Chiba Institute of Technology

E-mail: [‡] kazuhiko.iida@it-chiba.ac.jp

Abstract A number of studies have examined cues for the perception of the vertical angle of a sound image. Sound localization tests using narrow-band signals revealed that there exist directional bands that were perceived in specific directions (front, above, and rear), regardless of the direction of the actual sound source. On the other hand, sound localization tests using wide-band signals revealed that spectral notches and peaks above 5 kHz in the head-related transfer function (HRTF) contribute to vertical angle perception. Based on this finding, a parametric notch-peak HRTF model (PNP model), which is reconstructed using the minimum number of notches and peaks required for vertical angle perception, has been proposed. Thus, the directional band theory, which claims that the presence of specific frequency components is important, and the PNP model, which suggests the importance of the absence of specific frequency components (notches), appear to be contradictory. In the present study, the authors first focus on the front, above, and rear directions and attempt to integrate the PNP model and the directional band theory. Then, expanding the scope to the entire upper median plane, a hypothesis regarding the cues for vertical angle perception and the extended PNP model are proposed.

Keywords Localization, Head-Related Transfer Function, Median plane, Directional band, Notch, Peak

1. はじめに

音像の側方角知覚の手がかりは 1900 年前後には知られていた(Lord Rayleigh, 1877, 1907). その後

1960 年代になって, 両耳間時間差および両耳間レベル差と音像の左右方向との定量的関係が示された(Sayers, 1964; Toole and Sayers, 1965). 上昇角知覚

については 1970 年代から多くの研究が進められ、頭部伝達関数(HRTF)の振幅スペクトルが手がかりとして寄与することが明らかになっている。これはスペクトラルキューと呼ばれている。さらに、スペクトラルキューの本質を解き明かす研究が進められている。

Blauert(1969/70)は無響室において狭帯域信号(1/3 oct. band noise)を正中面の前方, 上方, 後方からランダムに提示する音像定位実験を実施し, 音源の方向に関わらず特定の方向(前方, 上方, 後方)に音像を知覚する帯域が存在することを報告した。この帯域は方向決定帯域と呼ばれる。

一方, 広帯域信号を用いた音像定位実験により, HRTF の 5 kHz 以上のスペクトルのノッチとピークが音像の上昇角知覚に寄与していることが示されている(Hebrank and Wright, 1974; Butler and Belendiuk, 1977; Mehrgardt and Mellert, 1977; Musicant and Butler, 1984)。ノッチの周波数は音源の上昇角が前方から上方に移動するにつれて高くなり(Butler and Belendiuk, 1977; Shaw and Teranishi, 1968), このノッチ周波数の差異は聴取者によって検出可能であることが報告されている(Moore *et al.*, 1989)。したがって, ノッチ周波数の上昇角依存性は上昇角知覚の重要な手がかりの 1 つとして寄与すると考えられる。これらの知見に基づいて, 聴取者自身の実測 HRTF から抽出したノッチとピークのすべてまたは一部を用いて再構成したパラメトリック・ノッチ・ピーク HRTF モデル(以降 PNP モデルと呼ぶ)が提案されている(Iida *et al.*, 2007)。

このように, 狭帯域信号の上昇角知覚に対して特定の周波数成分の存在が重要であるとする方向決定帯域理論と, 広帯域信号の上昇角知覚に対して特定の周波数成分の欠損(ノッチ)の重要性を主張する PNP モデルは一見相反している。

本研究では, まず正中面の前方, 上方, 後方の 3 方向に着目して PNP モデルと方向決定帯域理論の従来の研究成果と最近の分析結果を併せて論考し, 両者の統合を試みる。次に対象とする方向を上半球正中面全域に拡張して上昇角知覚の手がかりに関する仮説を提案する。さらに, この仮説に基づいて PNP モデルを拡張する。

2. 上昇角知覚に関するパラメトリック・ノッチ・ピーク HRTF モデルと方向決定帯域理論

上昇角知覚の手がかりとして従来提案されている PNP モデルと方向決定帯域理論について詳しく説明する。

2.1 パラメトリック・ノッチ・ピーク HRTF モデル

Iida *et al.* (2007)は実測 HRTF をノッチとピークに

分解し, その全部もしくは一部を用いて再構成した PNP モデルを提案している。ノッチとピークは, 音源の上昇角に依存しない 3–4 kHz 付近のピーク (Shaw and Teranishi, 1968) を下限周波数として周波数順にラベル付けされ(P1, N1, P2, N2 など), IIR フィルタを用いて中心周波数, レベル, Q でパラメトリックに表現される。Fig. 1 に PNP モデルの例を示す。Fig. 1(a)の点線はある被験者の正面方向の実測 HRTF を示す。この HRTF を 4 つのノッチと 4 つのピークに分解し, それらの全てを用いて再構成した PNP モデルが実線で示す PNP(all)である。上半球正中面 7 方向(30°間隔)において, 様々な構成要素の PNP モデルを作成し, これらと広帯域白色雑音を畳み込んだ刺激を FEC(free air equivalent coupling to the ear)ヘッドホン(Møller, 1992)で提示する音像定位実験を行なった。その結果, 7 方向全てにおいて実測 HRTF と同等の音像定位精度を提供できるノッチとピークの最小構成は, 4 kHz 以上で最も周波数の低い 2 つのノッチ(N1, N2)と 1 つのピーク(P1)であること(Fig. 1(b))を示した。

また, 後に行った音像定位実験により, 聴取者によっては目標方向が上方の場合は P2 が必要であることが明らかになり, 上方の PNP モデルの最小構成に P2 を追加した(Iida and Ishii, 2018)。さらに, 最近の研究で 1 kHz 付近のピークが後方知覚に寄与していることを見出し(Nakamura and Iida, 2025), 後方の PNP モデルには P0 を追加した。Table 1 にこれらの結果も含めた上半球正中面 7 方向における PNP モデルの最小構成を示す。

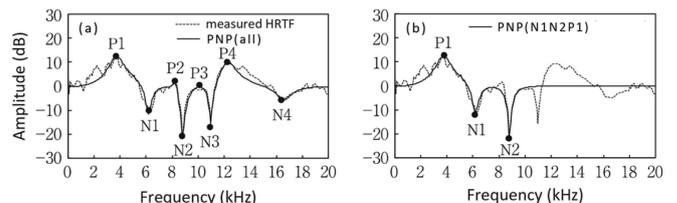


Fig. 1 Examples of PNP models. (a) Measured HRTF and PNP model with all notches and peaks, (b) PNP model reconstructed using N1, N2, and P1

Table 1 Minimum components of the PNP model in the upper median plane.

Target vertical angle (deg.)	N1	N2	P1	P2	P0
0, 30, 60, 120, 150	x	x	x		
90	x	x	x	x	
180	x	x	x		x

2.2 方向決定帯域理論

次に方向決定帯域理論について説明する。Blauert (1969/70)は無響室内の正中面の前方, 上方, 後方に設

置したスピーカの1つから 1/3 oct. band noise をランダムな順に提示する実験を行った。被験者は知覚した音像方向を前方、上方、後方の3領域から1つを選んで回答した。その結果、音源方向に関わらず前方、上方、後方に音像を知覚する帯域が存在することが明らかになった。これらの帯域は方向決定帯域と呼ばれている。前方の方向決定帯域の中心周波数は 315, 400, 500 Hz および 3.15, 4, 5 kHz, 上方は 8 kHz, 後方は 0.8, 1, 1.25, 1.6 kHz および 10, 12.5 kHz である。

その後、方向決定帯域は 1/3 oct. band noise だけで生じるのではなく、帯域幅を狭めた 1/6, 1/12, 1/24 oct. band noise や純音においても生じることが報告された(Itoh *et al.*, 2007; 飯田, 2017a)。逆に 1/6 oct. band noise の方向決定帯域が同じ方向に生じる連続した帯域を連結した刺激(1.12–3.15 kHz, 4–4.5 kHz, 6.3–9 kHz)においても、元の 1/6 oct. band noise と同じ方向に方向決定帯域が生じた(飯田, 2017a)。

さらに、方向決定帯域は広帯域信号の上昇角知覚に対しても寄与するか否かについて検討された。前方、上方、後方の方向決定帯域である中心周波数が 1.25, 4, 8kHz の 1/3 oct. band 卓越フィルタ(Table 2)のいずれかを広帯域白色雑音に畳み込んで、無響室内の前方、上方、後方に設置したスピーカからランダムな順に被験者に提示された(飯田, 2017a)。

Table 2 Specifications of 1/3 oct. band-boost filters.

Center frequency (kHz)	Band width (Oct.)	Boosted level (dB)
1.25, 4, 8	1/3	6, 12, 18, 24, 30

その結果、周波数および卓越量に関わらず、音像は提示したスピーカ方向(上昇角: 0, 90, 180°)に知覚された。つまり、広帯域信号においては、方向決定帯域の卓越は上昇角知覚には影響を及ぼさなかった。ただし、卓越量が 18 dB を超えると音像が2つに分離することがあった。音像が分離した場合は、卓越していない帯域の音像はスピーカ方向に知覚し、卓越させた帯域の音像は方向決定帯域の方向に知覚した。この結果は、広帯域信号においては、方向決定帯域は上昇角知覚の手がかりとして寄与しない、もしくは不十分であることを示している。

3. PNP モデルと方向決定帯域理論の統合

方向決定帯域で説明できる狭帯域信号の上昇角知覚と PNP モデルで説明できる広帯域信号の上昇角知覚はそれぞれ再現性の高い聴覚現象であり、両者を矛盾なく説明できる機序が存在するはずである。本章では、正中面の前方、上方、後方に焦点を当てて、PNP モデルと方向決定帯域理論の従来の研究成果と最近の分析結果を併せて論考し、両者の統合を試みる。

3.1 ノッチ・ピーク周波数と方向決定帯域の比較

まず、正中面内の音源の上昇角とノッチ・ピーク周波数の関係を論考する。ある被験者の正中面における実測 HRTF のカラーマップを Fig. 2 に示す。赤色の領域は HRTF の振幅レベルが高く、青色の領域は低いことを示す。また、ノッチ・ピークを実線で示す。N1, N2 周波数は正中面全体において音源の上昇角に応じて連続的に変化しており、上昇角知覚の手がかりとして効果的な振る舞いをしている。さらに詳細に観察すると、N1, N2 周波数はともに上昇角が 0° から 120° に向かうにつれて増加する。N1 周波数は 120° から 270° に向かって減少するが、N2 周波数は 270° に向かって N1 より緩やかに減少する。このように N1, N2 周波数は上昇角と 1 対 1 対応ではないため、N1, N2 のいずれか一方の周波数だけでは上昇角は一意的に決定されない。これが正中面上昇角知覚には2つのノッチが必要な理由であると考えられることができる。一方、P1, P2, P0 周波数は音源方向に関わらず一定であり、音源の上昇角を同定できる情報であるとは考えられない。

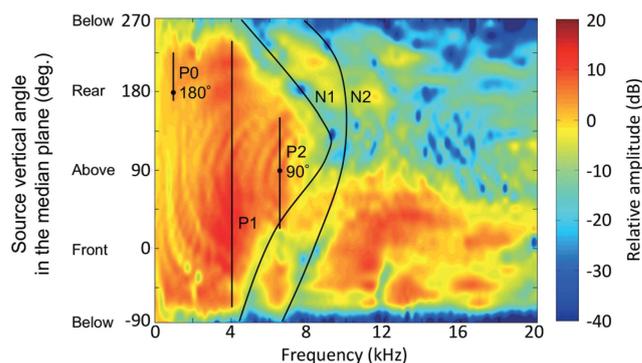


Fig. 2 Relative amplitude of the HRTFs for a subject in the median plane. Solid lines denote N1, N2, P1, P2, and P0.

次に、ピーク周波数と方向決定帯域を比較する。118 耳の実測 HRTF から P1, P2, P0 を抽出し、その中心周波数の中央値を算出した(Table 3)。これを Blauert が報告した前方、上方、後方の方向決定帯域(Table 4)と比較すると、P1, P2, P0 周波数はそれぞれ前方、上方、後方の方向決定帯域と一致することがわかる。

Table 3 Median values of the P1, P2, and P0 frequencies for 118 ears (kHz).

P1	P2	P0
4.0	8.3	1.0

Table 4 Frequency ranges of the Blauert's directional bands for the front, above, and rear directions (kHz).

Front	Above	Rear
2.8–5.6	7.1–9.0	0.7–1.8

3.2 仮説 1：パラメトリック・ノッチ・ピーク HRTF モデルと方向決定帯域理論の統合仮説

以上の知見より、方向決定帯域理論と PNP モデルに関する以下の仮説が導かれる。

仮説 1：PNP モデルはノッチ、および前方、上方、後方の方向決定帯域と同じ周波数のピークで構成したモデルである。言い換えると、PNP モデルは方向決定帯域理論を包含し、これにノッチを加えたものである。

4. 上半球正中面全域における音像の上昇角知覚の手がかり

第 3 章では、前方、上方、後方の 3 方向に着目して PNP モデルと方向決定帯域の統合について論考した。本章では、対象とする方向を上半球正中面全域に拡張して上昇角知覚の手がかりについて論考し、仮説を提案する。

4.1 上半球正中面の方向決定帯域

方向決定帯域は前方、上方、後方でだけ生じるものではない。Itoh *et al.* (2007)は Blauert と同様の音像定位実験を中心周波数が 0.8 kHz から 12.5 kHz までの 1/3 oct. band noise と 1/6 oct. band noise を用いて実施した。ただし、Blauert は被験者に知覚した音像方向を前方、上方、後方の 3 領域から 1 つを選んで回答させたのに対し、Itoh *et al.*は被験者にマッピング法で回答させることにより、知覚した上昇角をより精度よく求めた。その結果、刺激の中心周波数が 3 kHz 付近から 12.5 kHz 付近まで高くなるに従って、音像の上昇角は実際の音源方向に関わらず 0°から 150°付近まで連続的に変化した。刺激の中心周波数が 0.8 から 1.6 kHz では、多くの回答は 180°もしくは 150°付近に分布した。つまり、方向決定帯域は前方、上方、後方だけではなく、上半球正中面全域における連続的な方向で生じた。

4.2 上半球正中面 7 方向の卓越周波数

次に、上半球正中面全域における方向決定帯域と卓越周波数の関係を論考する。Blauert(1969/70)は前方の方向決定帯域では、前方の HRTF は後方の HRTF と比較してエネルギーが大きいことを報告した。これを参考にして、上半球正中面 7 方向の 118 耳の HRTF を用いて、上昇角ごとに振幅レベルが他の 6 方向と比較して最大となる周波数(卓越周波数)を分析した。卓越周波数の分解能は 93.75 Hz である。Fig. 3 に 118 耳の卓越周波数の相対度数を示す。円の半径は耳の相対度数に比例している。

個人差があるため卓越周波数の分布範囲はやや分散するが、上昇角が 0°から 120°での卓越周波数は 3 kHz 付近から 8 kHz 付近まで増加した。0°の卓越周波

数は P1 周波数と一致し、90°の卓越周波数は P2 周波数と一致する。一方、150°と 180°での卓越周波数が 0 から 120°の延長線上の周波数となる耳介は少数であり、多くの耳介は 1.5 kHz 以下となった。180°の卓越周波数は P0 周波数と一致した。また、HRTF の 2 kHz 以下の振幅スペクトルを平滑化すると前後誤判定が増加すると報告されており(Asano *et al.*, 1990)、1.5 kHz 以下に存在する卓越周波数が 150°と 180°の知覚に寄与することが示唆される。

このように、卓越周波数は上半球正中面全域で生じ、Itoh *et al.* (2007)が示した上半球正中面の方向決定帯域と概ね一致した。

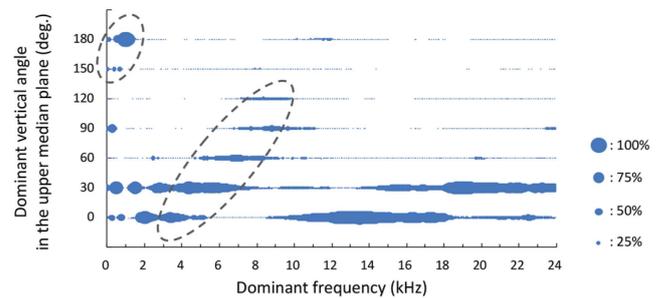


Fig. 3 Relationship between the dominant frequency and the dominant vertical angle for 118 ears. The radii of the circles are proportional to the relative frequency of the number of ears.

4.3 ピーク周波数、方向決定帯域、卓越周波数の比較

上半球正中面 7 方向のピーク周波数、方向決定帯域、卓越周波数を比較する。

まず、0, 90, 180°に着目する。Tables 3,4 に示したように P1, P2, P0 周波数は、0, 90, 180°の方向決定帯域とそれぞれ一致する。また、第 4.2 章で述べたように、0, 90, 180°の方向決定帯域は、0, 90, 180°の卓越周波数とそれぞれ一致する。したがって、0, 90, 180°の卓越周波数は、0, 90, 180°の知覚に寄与する P1, P2, P0 周波数とそれぞれ一致する。このことより、0, 90, 180°の HRTF の卓越周波数は、これらの方向の上昇角知覚に寄与すると考えられる。

次に、30, 60, 120, 150°に着目し、方向決定帯域と卓越周波数を比較する。これらの方向では P1, P2, P0 に類するピークの先行研究は存在しない。しかし、方向決定帯域は卓越周波数と一致する。このことより、0, 90, 180°と同様に、30, 60, 120, 150°の HRTF の卓越周波数は、これらの方向の上昇角知覚に寄与すると類推できる。

以上より、上半球正中面の各上昇角の HRTF における卓越周波数は、その上昇角を知覚する手がかりの 1 つとして寄与することが示唆される。

4.4 上半球正中面 7 方向の卓越周波数における平均卓越レベル

さらに、卓越周波数における平均卓越レベル(MDL: Mean Dominated Level)を求めた。各耳の上半球正中面 7 方向の HRTF を用いて、各離散周波数において、7 方向のうち最も大きい振幅レベルと他の 6 方向の振幅レベルの差の平均を算出した。さらに、その値の 118 耳での平均を求めた(式(1))。

$$MDL(f) = \frac{1}{118} \sum_{i=1}^{118} \left[\frac{1}{6} \sum_{j=1}^7 \{L(i, f)_{max} - L(i, j, f)\} \right] \text{ for } L(i, f)_{max} \neq L(i, j, f) \quad (1)$$

ここで、

i : 耳番号(1-118), j : 上昇角番号(1-7), f : 離散周波数(Hz), $L(i, j, f)$: HRTF の振幅レベル(dB), $L(i, f)_{max}$: 耳番号 i の HRTF の周波数 f における 7 方向の HRTF の振幅レベルの最大値(dB)。

MDL と 95%信頼区間を Fig. 4 に示す。MDL は周波数が高くなると大きくなる傾向が見られる。ここまでの議論で焦点を当ててきた 1-10 kHz では MDL はおおそ 3-6 dB であった。この値は従来報告されているピークの検知閾(Moore *et al.*, 1989)と比較して大きい。また、95%信頼区間は 0.5 dB 以下であった。HRTF の振幅スペクトルの個人差は大きいことが知られているが(飯田, 2017b), それと比較すると平均卓越レベルの個人差は小さいといえる。

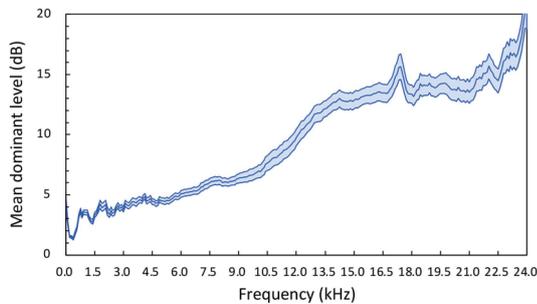


Fig. 4 Mean dominant level and 95% confidence interval for seven vertical directions in the upper median plane averaged over 118 ears.

4.5 P1 が上半球正中面全域において必要となる理由

以上の議論によれば、PNP モデルの最小構成要素は前方では N1N2P1, 上方では N1N2P2, 後方では N1N2P0 となるはずである。しかし、Table 1 に示したように、ヘッドホンを用いた音像定位実験(Iida *et al.*, 2007)では、P1 は前方だけでなく上半球正中面全域において必要であることが示されている。この実験の内観報告では、P1 を除外するとしばしば頭内定位が発生することが指摘されている。

また、P1 は耳甲介腔の共振であり、入射方向に関わらず 3-4 kHz 付近で振幅が大きいことが報告されている(Teranishi and Shaw, 1968). つまり、P1 は音波が頭外から到来して外耳の影響を受けて鼓膜に到達することを特徴づけるピークといえる。

以上より、P1 は前方の知覚に加えて、上昇角に関わらず頭外定位に寄与していると考えられる。これが上半球正中面全域において P1 が必要となる理由と考えられる。

4.6 仮説 2: 上半球正中面での上昇角知覚の手がかりに関する仮説

上記の論考により、上半球正中面での上昇角知覚の手がかりに関する仮説が導かれる。

仮説 2: 上半球正中面の上昇角知覚においては、音源の上昇角に依存して周波数が連続的に変化する N1, N2 および卓越周波数が手がかりとして寄与する。また、音源の上昇角に依存しない P1 が頭外定位に寄与する。

5. パラメトリック・ノッチ・ピーク HRTF モデルの拡張

第 4 章で論考した上半球正中面の上昇角知覚の手がかりに関する仮説 2 に基づいて、PNP モデルを拡張する。拡張 PNP モデルは、従来の PNP モデルの P2, P0 を、卓越周波数を反映した Dominant peak(Pd)に置き換えて、N1, N2, P1, Pd で構成する。拡張 PNP モデルは 0, 90, 180°では従来の PNP モデルと同じ構成であり、これら以外の上昇角では新たに Pd が加わる。

Fig. 2 の被験者の HRTF から算出した N1, N2, P1, Pd を Fig. 5 に示す。N1, N2, P1 は実線で Pd は破線で示している。白丸は 0, 90, 180°の卓越周波数であり、これは従来の PNP モデルの P1, P2, P0 周波数と一致する。黒丸は 30, 60, 120, 150°での卓越周波数である。0-120°の卓越周波数は 4 kHz 付近から 8 kHz 付近まで単調に増加している。

Pd は Fig. 5 の赤の領域の中でも特に音圧の高い円弧状の縞の上を通っている。また、Pd は N1 周波数とほぼ平行の関係にあり、0-120°の卓越周波数は N1 周波数よりも約 2 kHz 低い値であった。一方、150°と 180°の卓越周波数は 0.5-1 kHz の範囲の音圧の高い斜めの筋状の領域に付置した。このように、卓越周波数は 120°と 150°の間で不連続となる。

従来の PNP モデルで生成した HRTF では、目標上昇角が 60°や 120°では音像の輪郭がやや不明瞭であり、知覚した上昇角のばらつきが大きい(中村他, 2024)。しかし、拡張 PNP モデルでは、卓越周波数を再現することによって、音像の輪郭が明瞭になり、定位精度が向上することが期待される。

また、拡張 PNP モデルの卓越周波数を強調することにより、騒音環境においては本人実測 HRTF や実音源の音像定位精度を超える HRTF を生成できる可能性がある。日常生活においては、何らかの騒音が存在する環境下で目的音の音像を知覚していることが多いが、騒音により定位精度が低下する (Good and Gilkey, 1996)。彼らは、上昇角の定位精度の低下は側方角の定位精度の低下と比較して顕著であることを報告している。その理由は、側方角知覚の手がかりの両耳間時間差および両耳間レベル差は騒音が存在しても耳入力信号に保存されることが多いが、上昇角知覚の手がかりのノッチは騒音によって検知されなくなるからと考えられる。またピークも騒音によりマスクされるため感覚レベルが低下する。

これを解決するために、N1,N2 を強調(深く)しても騒音に埋もれるため定位精度の向上は見込めないが、Pd の卓越量を増強すれば手がかりが強調され、本人 HRTF を超える定位精度の達成が期待される。

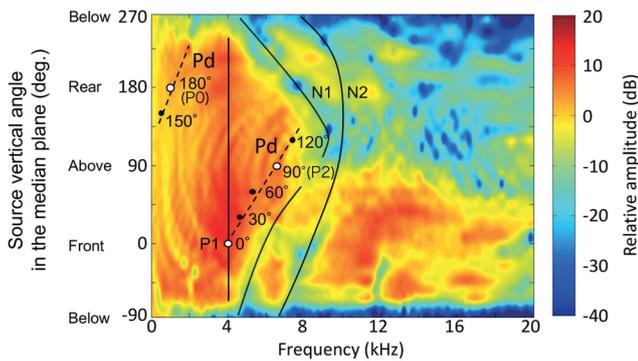


Fig. 5 Relationships between N1, N2, P1 (solid lines), and Pd (broken lines) for a subject in the median plane. Black closed circles denote dominant frequencies for 30, 60, 120, and 150°, and white closed circles denote dominant frequencies for 0, 90, and 180° in the median plane.

6. 考察

本章では、以下の4つの項目について論考する。1) 仮説2による従来の実験結果の説明、2) 卓越周波数の個人差、3) 卓越周波数の学習、4) 方向決定帯域の学習

6.1 仮説2による従来の実験結果の説明

第4章で提案した仮説2を用いて、第2.2章で紹介した狭帯域信号と広帯域信号の音像定位実験の結果の説明を試みる。

まず狭帯域信号を用いた音像定位実験の結果の説明を試みる。Blauert が方向決定帯域を発見した実験では、刺激が 1/3 oct. band noise であるため、被験者の耳入力信号には 1/3 oct. band noise と前方、上方、後方のいずれかの HRTF が畳み込まれた成分のみ

が含まれている。刺激を提示したスピーカ方向に音像を知覚しなかった理由は、スピーカの上昇角に対応する N1, N2, Pd が耳入力信号に含まれなかったためと考えられる。しかし、この耳入力信号の成分は前方、上方、後方のいずれかの卓越周波数と一致する。そのため、この卓越周波数に対応する方向決定帯域の方向に音像を知覚したと考えられる。

次に広帯域白色雑音において、ある 1/3 oct. band を卓越させた刺激を用いた音像定位実験の結果の説明を試みる。この実験では、スピーカの上昇角の N1, N2, Pd, P1 のすべてが耳入力信号に含まれている。一方、卓越させた帯域は前方、上方、後方のいずれかの方向決定帯域と一致するが、耳入力信号にはこの方向決定帯域の方向の N1,N2 は含まれておらず、方向決定帯域だけでは広帯域信号の上昇角知覚の手がかりとしては十分ではないと考えられる。そのため、方向決定帯域の方向ではなくスピーカ方向に音像を知覚したと考えられる。

6.2 卓越周波数の個人差

卓越周波数の個人差を考察する。Fig. 6 に典型的な3つの耳の HRTF の卓越周波数と卓越方向を示す。Ear 1 では、上昇角が 0°から 120°までの卓越周波数は 4 kHz から 10 kHz まで増加した。また、150°の卓越周波数は 400 Hz 付近、180°の卓越周波数は 1 kHz 付近となった。Ear 2 では、上昇角が 0°から 150°までの卓越周波数は 3.5 kHz から 10.5 kHz まで増加した。この耳では 150°が卓越する周波数は 1 kHz 以下の帯域には存在せず、0-120°の卓越周波数の延長線上の 10 kHz 付近に現れた。180°が卓越する周波数は 1 kHz 付近であった。Ear 3 では上昇角が 0°から 150°までの卓越周波数は 3 kHz から 8 kHz まで増加した。この耳では 150°が卓越する周波数は 8 kHz 付近と 500 Hz 付近の両方であった。180°が卓越する周波数は 1 kHz 付近であった。

この3耳の HRTF の卓越周波数と卓越方向との関係については、概ね Fig. 3 と同様の傾向が観察される。ただし、0-120°の卓越周波数の変化の傾向は被験者間で共通であったが、卓越周波数の値には個人差がみられた。また、150°の卓越周波数については、1) 0-120°の延長線上、2) 500 Hz 付近、3) その両方の3つのパターンが存在した。180°においては卓越周波数に個人差はほとんど見られなかった。

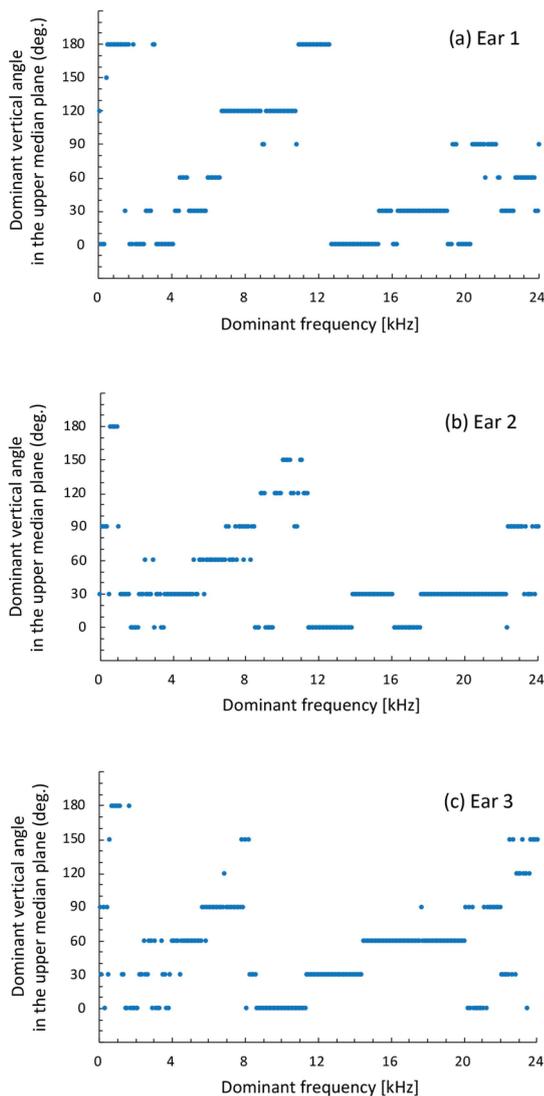


Fig. 6 Relationship between the dominant frequency and the dominant vertical angle for three individual ears.

ここで、0-120°と比較して180°での卓越周波数の個人差が小さい理由について考察する。0-120°での卓越周波数は4 kHz以上に存在する。HRTFの4 kHz以上のスペクトルには個人差が大きいことが報告されており(飯田, 2017b), この個人差は波長との関係から主に耳介形状の個人差により生じていると考えられる。このことは、0-120°での卓越周波数の個人差も耳介形状の個人差によって生じていることを示唆している。

一方、180°での卓越周波数(1-1.5 kHz)は、波長との関係から耳介の影響とは考えられない。Shaw(1997)は水平面の前方(frontal sector)のHRTFは1-1.3 kHzにおいて、直接音と肩からの反射音の干渉により極小となることを報告している。また、後方のHRTFではこのような現象は生じず、1-1.3 kHzの帯域は3-4 kHzを中心周波数とする耳甲介共振の裾野にあり、比較的音圧レベルが高い。180°の卓越周波数はこの2つの要

因によって生じていると考えられる。

以上より、180°の卓越周波数の個人差が小さい理由は、胴体や肩の形状の個人差が耳介形状の個人差と比較して小さいためであると考えられる。

6.3 卓越周波数の学習

卓越周波数の学習について考察する。われわれは日常生活において、音声や音楽あるいは騒音を聴いて上昇角知覚の手がかりを学習していると考えられる。これらの音源の音圧や振幅スペクトルは時々刻々変化するため、耳入力信号に含まれる個々の上昇角のHRTFの絶対的な振幅スペクトル情報を学習するのは困難であり、むしろ、さまざまな上昇角の振幅スペクトルを比較して、方向間の差異を学習する方が効率が良い。ある周波数が卓越するのはどの方向であるか、あるいは、ある方向では他の方向と比較してどの周波数が卓越しているかの知識を学習により獲得して、それを上昇角知覚の手がかりの1つとして利用していると考えられる。

6.4 方向決定帯域の学習

最後に方向決定帯域の学習について考察する。われわれは1/3 oct. band noiseのような狭帯域信号を日常的に聴いて方向決定帯域を学習しているとは考えにくい。むしろ、第6.3章で述べたように、われわれは日常生活で広帯域の音声や音楽あるいは騒音を聴いて卓越周波数を学習し、その結果、卓越周波数と同じ周波数である方向決定帯域に対して特定の方向に音像を知覚していると考えるのが妥当である。

7. 結論

本研究では、まず正中面の前方、上方、後方の3方向に着目してPNPモデルと方向決定帯域理論の統合を試みた。次に、対象とする方向を上半球正中面全域に拡張して上昇角知覚の手がかりに関する仮説を提案した。さらにこの仮説に基づいてPNPモデルを拡張した。結論を以下に記す。

1) パラメトリック・ノッチ・ピークモデルは、ノッチ、および周波数が方向決定帯域と一致するピークで構成されたモデルである。言い換えると、方向決定帯域理論はPNPモデルに包含される。

2) 上半球正中面上昇角知覚においては、音源の上昇角に依存して周波数が連続的に変化するノッチ(N1, N2)および卓越周波数が手がかりとして寄与する。また、音源の上昇角に依存しないP1が頭外定位に寄与する。

3) N1, N2, P1で構成した従来のパラメトリック・ノッチ・ピークモデルに卓越周波数を反映したPdを加えた拡張パラメトリック・ノッチ・ピークモデルを提案した。

謝辞

本研究の一部は JSPS 科研費 24K15052 の助成を受けて実施した。また、有益な議論をしていただいた神戸大学名誉教授の森本政之博士、パナソニック(株)の伊藤元邦博士に感謝します。

文 献

- Asano, F., Suzuki, Y., and Sone, T. (1990) "Role of spectral cues in median plane localization," *J. Acoust. Soc. Am.* 88,159–168.
- Butler, A., and Belendiuk, K. (1977). "Spectral cues utilized in the localization of sound in the median sagittal plane," *J. Acoust. Soc. Am.* 61, 1264–1269.
- Blauert, J. (1969/70). "Sound localization in the median plane," *Acustica*. 70, 205–213.
- Good, MD., and Gilkey RH. (1996). "Sound localization in noise: The effect of signal-to-noise ratio," *J. Acoust. Soc. Am.* 99, 1108–1117.
- Hebrank, J., and Wright, D. (1974). "Spectral cues used in the localization of sound sources on the median plane," *J. Acoust. Soc. Am.* 56, 1829–1834.
- Iida, K., Itoh, M., Itagali, A., and Morimoto, M. (2007). "Median plane localization using parametric model of the head-related transfer function based on spectral cues," *Appl. Acoust.* 68, 835–850.
- Iida, K., and Ishii, Y. (2018). "Effects of adding a spectral peak generated by the second pinna resonance to a parametric model of head-related transfer functions on upper median plane sound localization," *Appl. Acoust.* 129, 239–247.
- Itoh, M., Iida, K., and Morimoto, M. (2007). "Individual differences in directional bands," *Appl. Acoust.* 68, 909–915.
- Mehrgardt, S., and Mellert, V. (1977). "Transformation characteristics of the external human ear," *J. Acoust. Soc. Am.* 61, 1567–1576.
- Møller, H. (1992). "Fundamentals of binaural technology," *Appl. Acoust.* 36, 171–218.
- Moore, BCJ., Oldfield, R., and Dooley, GJ. (1989). "Detection and discrimination of peaks and notches at 1 and 8 kHz," *J. Acoust. Soc. Am.* 85, 820–836.
- Musicant, A., and Butler, R. (1984). "The influence of pinnae-based spectral cues on sound localization," *J. Acoust. Soc. Am.* 75, 1195–1200.
- Nakamura, F., and Iida, K. (2025). "Cue for rear sound image localization in head-related transfer function below 4 kHz," *Appl. Acoust.* 229, 110370.
- Sayers, B. McA. (1964). "Acoustic-Image Localization Judgements with Binaural Tones," *J. Acoust. Soc. Am.* 36, 923–926.
- Shaw, EAG., and Teranishi, R. (1968). "Sound pressure generated in an external-ear replica and real human ears by a nearby point source," *J. Acoust. Soc. Am.* 44, 240–249.
- Shaw, EAG. (1997). *BINAURAL AND SPATIAL HEARING in REAL AND VIRTUAL ENVIRONMENTS*, (Lawrence Erlbaum Associates, Publishers, Mahwah, NJ), Chap. 2.
- Teranishi, R., and Shaw, EAG. (1968). "External-Ear Acoustic Models with Simple Geometry," *J. Acoust. Soc. Am.* 44, 240–249.
- Toole, F. E., and Sayers, B. McA. (1965). "Lateralization Judgements and the Nature of Binaural Acoustic Images," *J. Acoust. Soc. Am.* 37, 319–324.
- 飯田一博. (2017a). 頭部伝達関数の基礎と 3次元音響システムへの応用, (コロナ社, 東京), 第 6 章.
- 飯田一博. (2017b). 頭部伝達関数の基礎と 3次元音響システムへの応用, (コロナ社, 東京), 第 4 章.
- 中村風香, 加古達也, 渡邊悠希, 千葉大将, 野口賢一, 飯田一博. "PNP HRTF モデルのノッチ・ピークレベルの最適化 – 2 種類のヘッドホンを用いた音像定位精度の検証 –," 音講論, 385-388 (2024.9).