

上昇角知覚の手がかりに関する
ノッチ・ピークモデルと方向決定帯域理論の統合仮説の提案*
- 仮説の統合とノッチ・ピークモデルの再構築 -

○飯田一博（千葉工大・先進工） 中村風香（千葉工大・院）

1. はじめに

音の左右方向の知覚の手がかりは 1900 年前後には知られていた. 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[1,2].

一方, 前後上下方向(上昇角)の知覚の手がかりについては 1970 年代から研究が進められた. 上昇角の知覚の手がかりは頭部伝達関数(HRTF)の振幅スペクトルであることが多くの研究結果により示されている(スペクトラルキュー). 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, 狭帯域信号を用いた実験から Blauert は方向決定帯域理論を導いた[3]. 一方で, 広帯域信号を用いた様々な実験から, 5 kHz 以上のノッチとピークが重要であることが示されている. これらの研究成果は表層的には相反しており, 上昇角知覚の機序を体系的に説明できる仮説が俟たれる.

本研究では, まず正中面の前方, 上方, 後方に着目してノッチ・ピーク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, それに基づいてノッチ・ピークモデルを再構築する.

2. ノッチ・ピークモデルと方向決定帯域理論の相反

2.1 ノッチ・ピークモデル

筆者らは実測 HRTF をノッチとピークに分解し, その一部を用いて再構成したパラメトリック HRTF(Fig. 1)を提案している[4,5].

広帯域白色雑音を音源として, 様々な構成要素のパラメトリック HRTF を作成して音像定位実験を行い, 実測 HRTF と同等の音像定位精度を提供できる最小構成を求めた. モデルの提案当初は 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)が最小構成であると報告したが[4], 後に聴取者によっては上方では P2 が必要であることが判明し, 最小構成に追加した[5]. 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[6,7], 後方のパラメトリック HRTF には P0 を追加している(Table 1).

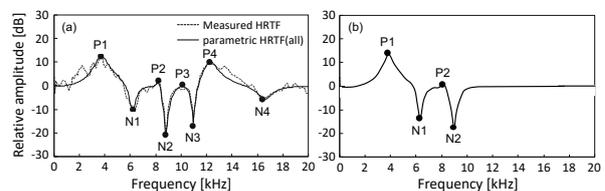


Fig. 1 Examples of parametric HRTFs. (a) measured and parametric HRTFs with all notches and peaks, (b) parametric HRTF reconstructed using N1, N2, P1, and P2.

Table 1 Components of the parametric notch-peak HRTF model in the upper median plane.

Target direction	N1	N2	P1	P2	P0
Entire upper median plane	✓	✓	✓		
Above	✓	✓	✓	✓	
Rear	✓	✓	✓		✓

2.2 方向決定帯域理論

Blauert は正中面の前方, 上方, 後方に設置したスピーカから 1/3 oct.バンドノイズを提示する実験により, 音源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発見し, 方向決定帯域と呼んだ[3]. 前方の方向決定帯域は 315–500 Hz および 3.15–5 kHz, 上方は 8 kHz, 後方は 800–1600 Hz および 10–12.5 kHz であると報告している.

また, 方向決定帯域は 1/3 oct.バンドノイズ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.バンドノイズや純音においても生じた[8,9]. 逆に 1/6 oct.バンドノイズを用いて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

* A proposal of integrated hypotheses of the notch-peak model and the directional band theory for the cues of vertical angle perception of a sound image – Integration of hypotheses and reconstruction of the notch-peak model –, by IIDA, Kazuhiro and NAKAMURA, Fuka (Chiba Institute of Technology).

kHz, 6.3–9 kHz)においても 1/6 oct.バンドノイズと同じ方向に方向決定帯域が生じた[9].

さらに、方向決定帯域は広帯域信号に対しても機能するか否かについても検討している[10]. 提示に用いるスピーカの方向(前方, 上方, 後方)とは異なる上昇角の方向決定帯域を卓越させた広帯域信号を用いて音像定位実験を行ったところ、音像はスピーカの方向に生じ、方向決定帯域の卓越は広帯域信号の上昇角知覚に影響を及ぼさなかった.

3. 前方・上方・後方におけるノッチ・ピークモデルと方向決定帯域の関係

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)の重要性を主張するノッチ・ピークモデルは一見相反している. しかし、方向決定帯域による狭帯域信号の音像定位とノッチ・ピークモデルによる広帯域信号の音像定位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仮説が存在するはずである. それを解き明かすために両者の比較を行う.

3.1 ノッチ・ピーク周波数と方向決定帯域の関係

ある被験者の実測 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. さらに、上昇角と N1, N2, P1 周波数の関係を実線で、上方の P2, 後方の P0 を点でプロットしている.

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有効な振る舞いをしている. 一方、P1 周波数は上昇角に依らず一定であり、これが上昇角知覚の手がかりになるとは考えられない.

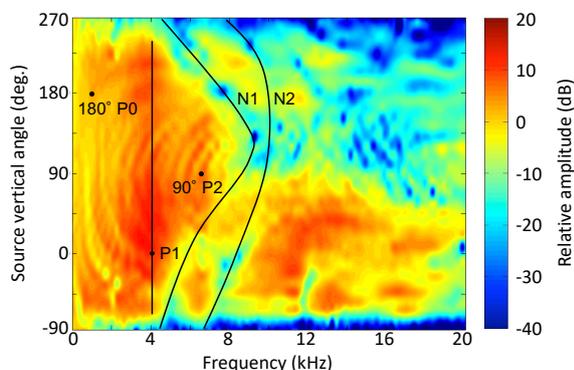


Fig. 2 Relationship between vertical angle of sound source and N1, N2, P1, P2(90°), and P0(180°) in the HRTFs in the median plane.

Nakamura and Iida [6]は 118 耳の実測 HRTF を用いて上昇角 180°の P0 および 0°の P1 周波数の中央値を求め(Fig. 3 (a),(b)の破線), これらは後方および前方の方向決定帯域(Fig. 3(a),(b)の矩形)と一致することを示した. 同様に、118 耳の上昇角 90°の実測 HRTF の P2 周波数の中央値を求めたところ、上方の方向決定帯域と一致した(Fig. 3(c)). つまり、ノッチ・ピークモデルの P0, P1, P2 周波数は後方, 前方, 上方の方向決定帯域と一致する.

3.2 ノッチ・ピークモデルと方向決定帯域理論の統合仮説

以上より、方向決定帯域理論はノッチ・ピークモデルに包含されるといえる. 言い換えると、ノッチ・ピークモデルはノッチおよび方向決定帯域と同じ周波数のピークで構成したモデルといえる.

3.3 ピークレベルと音源の上昇角の関係

P0, P1, P2 が方向決定帯域と一致することは明らかになったが、依然として P0, P1, P2 が上昇角知覚の手がかりとなる理由は不明である.

Blauert 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、卓越周波数帯域と呼んだ[3]. これを参考にして、耳介ごとに各離散周波数において、前方, 上方, 後方の HRTF の振幅レベルの差分を求め 118 耳介の平均を求めた(以降、平均差分スペクトルと呼ぶ). Fig. 3 に平均差分スペクトルを黒の実線および点線で示す.

まず、後方の算出結果(Fig. 3(a))をみると、後方-前方および後方-上方の平均差分スペクトルは、いずれも P0 周波数で極大(5 dB 程度)となった. つまり、後方の HRTF の振幅レベルは P0 周波数においては前方や上方と比較して大きい. しかし、他の周波数では前方や上方よりも小さい.

同様に Fig. 3(b)に前方の算出結果を示す. P1 周波数で前方-後方および前方-上方の平均差分スペクトルが極大(5 dB 程度)となった. 9 kHz と 14 kHz にも極大点があり、前方の HRTF の振幅レベルは、P0 周波数および P2 周波数を除いて、後方や上方よりも大きい.

上方(Fig. 3(c))においては、P2 周波数で上方-前方および上方-後方の平均差分スペクトルが極大(5–10 dB 程度)となった. 上方の HRTF の振幅レベルは、前方と比較すると P2 周波数を

除いてほぼ全帯域で小さい。一方、後方と比較すると P0 周波数を除いてほぼ全帯域で大きい。

以上より、P1, P2, P0 周波数においては、それぞれ前方、上方、後方の振幅レベルが他の2方向より卓越するといえる。

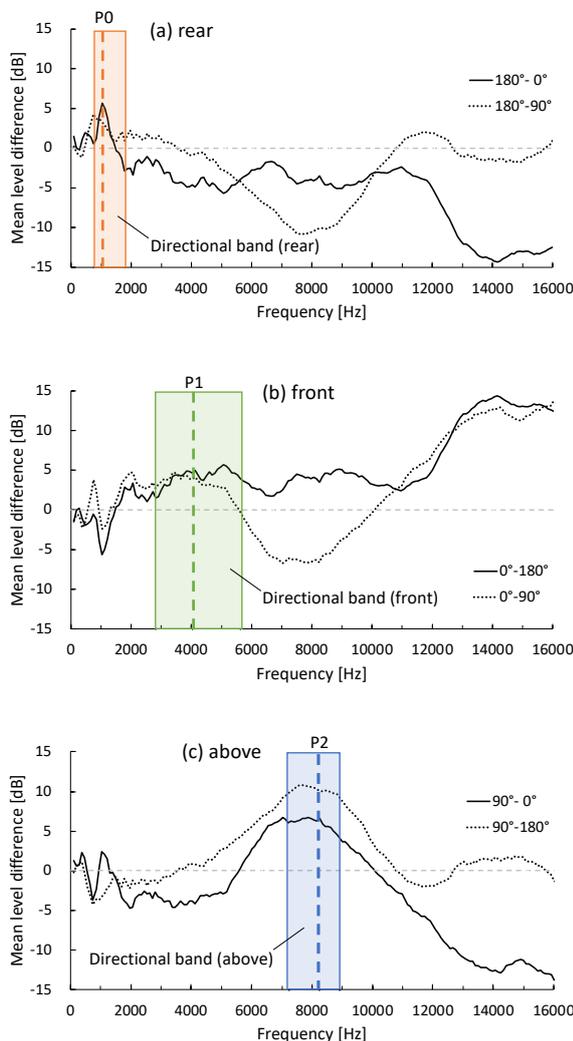


Fig. 3 Relationship between directional bands (rectangle), median of peak frequencies (dashed line), and mean directional difference spectra (black solid and dotted lines) for 118 ears.

3.4 前方・上方・後方知覚の機序

3.1-3.3 章で得られた知見から、前方・上方・後方知覚の機序として以下が導かれる。

“上半球正中面での前方・上方・後方知覚においては、音源の上昇角により周波数が連続的に変化する N1, N2 と、P1, 上方の P2, 後方の P0 により生じる卓越周波数帯域が手がかりとして寄与していると考えられる”。

この機序によれば、前方知覚では N1N2P1, 上方知覚では N1N2P2, 後方知覚では N1N2P0 が最小構成要素となる。しかし、Table 1 に示したように P1 は前方だけでなく上半球正中面

全体において必要であると報告されている[4]。その理由を次に説明する。

3.5 P1 が上半球正中面全域において必要となる理由

従来の音像定位実験の結果は上昇角に関わらず P1 は頭外定位に寄与していることを示している[4]。P1 は外耳道共振であり、入射方向に関わらず 3-4 kHz 付近で卓越する[11]。つまり、P1 は前方の卓越周波数帯域であることに加えて、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。これが上半球正中面全域において P1 が必要となる理由であると考えられる。

4. 上半球正中面 7 方向におけるノッチ・ピークモデルと方向決定帯域の関係

4.1 7 方向の方向決定帯域と卓越周波数帯域

方向決定帯域は前方・上方・後方にのみ生じるのだろうか。Itoh *et al.* [8]は Blauert と同様の音像定位実験を実施し、被験者にマッピング法で回答させることにより、上半球正中面全体において方向決定帯域が生じることを示した。Fig. 4 に示すように、中心周波数が 4 kHz 付近から高くなるに従って方向決定帯域は 0°から 150°付近まで連続的に変化した。

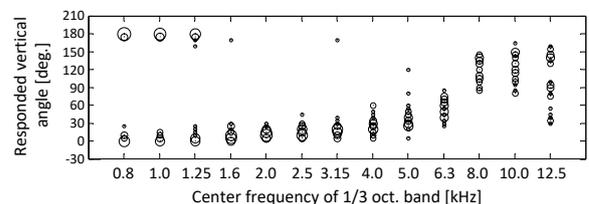


Fig. 4 Example of responses to the 1/3 oct. band noise for various center frequencies [8].

次に、118 耳の上半球正中面 7 方向の HRTF を用いて、離散周波数ごとに最も振幅レベルが大きくなる方向(卓越方向)を求めた。Fig. 5 は各上昇角において卓越方向となる耳の数の相対度数を周波数の関数としてプロットしたものである。円の半径は相対度数に比例している。

卓越方向は周波数によって変化することが観察される。個人差があるため周波数範囲はやや広がるが、3-4.5 kHz では 0°、7-10 kHz では 90°、1-1.5 kHz では 180°が卓越方向となり、前方、上方、後方の方向決定帯域と一致した。同様に 4-7 kHz では 30°、5-8.5 kHz では 60°、7-10 kHz では 120°が卓越方向となった。0.5-0.8 kHz では 150°が卓越方向となり、180°(1-

1.5 kHz)との連続性が観察された。

Fig. 2のカラーチャートにこの被験者の卓越周波数をプロットしたものをFig. 6に示す。卓越周波数は上昇角が増加するに従って高くなり、30、60、120°の卓越周波数は0°のP1周波数と90°のP2周波数を結んだ直線付近に布置した。150°の卓越周波数はFig.5と同様に180°のP0周波数よりやや低い値であった。

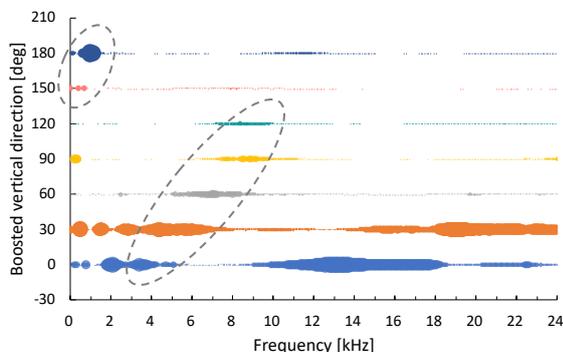


Fig. 5 Relationship between frequency and boosted vertical direction in the upper median plane. The diameter of the circles is proportional to the number of ears.

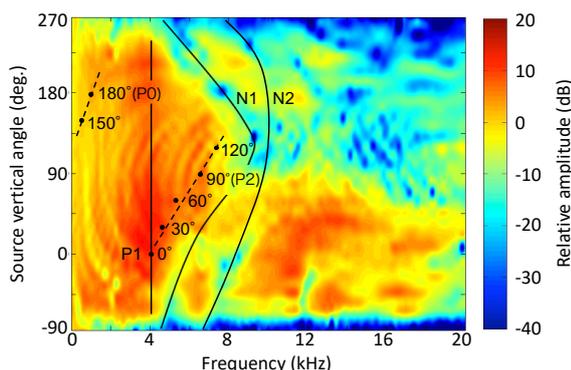


Fig. 6 Relationship between vertical angle of sound source and N1, N2, P1 (solid lines), and boosted band (dashed lines) in the median plane.

4.2 上半球正中面での上昇角知覚の機序

4.1章での論考より、対象を上半球正中面全域に拡張した以下の機序が導かれる。

“上半球正中面の上昇角知覚においては、音源の上昇角により周波数が連続的に変化するN1, N2と、P1および卓越周波数帯域が手がかりとして寄与していると考えられる”。

ここで、スペクトラルキューの学習について考察する。われわれは音を聴いている際にその音源方向のスペクトルを個別に学習しているのではなく、むしろ、他の音源方向との比較においてスペクトルの特徴を獲得していると考えられる。そうすると、ある方向では他の方向と比較してどの周波数帯域が卓越し

ているか、あるいは逆に、ある周波数帯域が卓越するのはどの方向であるかを知識として獲得して、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。

4.3 ノッチ・ピークモデルの再構築

得られた知見を用いてノッチ・ピークモデルを再構築する。新モデルはN1, N2, P1に加え、Fig. 6に示した卓越帯域を反映したP2(0-120°)とP0(150-180°)で構成する。特に0, 90, 180°以外では、今回新たに卓越帯域が加わるため、従来モデルと比較して定位精度の向上が期待される。また、卓越量の強調により、本人HRTFを超える定位性能をもつHRTFを生成できる可能性もある。今後、音像定位実験により新モデルの有効性を検証する。

5. まとめ

- 1) ノッチ・ピークモデルのピーク周波数は方向決定帯域と一致する。ノッチ・ピークモデルは方向決定帯域を包含するモデルといえる。
- 2) 上半球正中面の上昇角知覚においては、音源の上昇角により周波数が連続的に変化するN1, N2と、P1および卓越周波数帯域が手がかりとして寄与していると考えられる。
- 3) N1, N2, P1と卓越周波数帯域を反映したP2, P0で構成したノッチ・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。

参考文献

- [1] B. M. Sayers, J. Acoust. Soc. Am., 36, 923-926, 1964.
- [2] F. E. Toole and B. M. Sayers, J. Acoust. Soc. Am., 37, 319-324, 1965.
- [3] J. Blauert, ACUSTICA, 22, 205-213, 1969/70.
- [4] K. Iida *et al.*, Appl. Acoust. 68, 835-850, 2007.
- [5] K. Iida and Y. Ishii, Appl. Acoust. 129, 239-247, 2018.
- [6] F. Nakamura and K. Iida, Appl. Acoust. 229, 110370, 2025.
- [7] 中村と飯田, 音講論(春), 2-4-2, 2025.
- [8] M. Itoh *et al.*, Appl. Acoust. 68, 909-915, 2007.
- [9] 船岡と飯田, 音講論(秋), 773-776, 2014.
- [10] 竹内と飯田, 音講論(秋), 665-668, 2017.
- [11] E. A. G. Shaw and R. Teranishi, J. Acoust. Soc. Am., 44, 240-249, 1968.