

研究論文

# ノッチフィルタの中心周波数が広帯域雑音の音像定位に及ぼす影響

山高 正烈\*, 坂本 修一\*\*, 鈴木 陽一\*\*\*

(2022年9月30日受理)

## Effects of center frequency of notch filters on sound localization of broadband noise

Zhenglie CUI\*, Shuichi SAKAMOTO\*\*, Yôiti SUZUKI\*\*

(Received September 30, 2022)

### Abstract

The perception of the position of sound sources is called sound localization. The spectral shape of the head-related transfer function plays an important role in sound localization, particularly in the median plane. On the other hand, the timbre of sound is also closely related to their frequency spectrum. Interestingly, humans can separately perceive both the timbre and position of sound sources even though the frequency spectrum of a sound reaching the listener's each ear is a mixture of both frequency spectra. Our previous studies reported that listeners can detect one of the spectral notches in the HRTF, known as N1 and commonly centered around 7 kHz, by the changes it causes on the perceived timbre. In this study, we investigated the influence of the N1 on sound localization when the center frequency changed. Results shows that the influence of the center frequency deviation of N1 on the sound localization is small.

キーワード: 音空間知覚, 頭部伝達関数, 音像定位, 知覚手がかり

Keywords : Spatial hearing, HRTF (head-related transfer function), Sound localization, Perceptual cue

### 1. はじめに

人間の両耳に到達する音信号には、音源からの直接音だけでなく反射音や回折音等が含まれており、耳介周りの外耳道や耳甲介腔による共振も生じる[1]. このため、両耳で観測される音の周波数スペクトルは音源の相対方向に応じて変化する. この周波数スペクトルの変化を伝達関数として表現したものを頭部伝達関数(HRTF: head-related transfer function[2])と呼ぶが、頭部伝達関数は音像定位[3]の重要な手がかりとなっている. 特に、両耳に入力される音の時間差や強度差がほとんどない正中面や、その変化があまりない矢状面上 (cone of confusion [4]) に位置する音源の音像定位については、頭部伝達関数のスペクトル形状が非常に重要な知覚手がかりとされている (以降、スペクトラルキュー呼ぶ).

一方、人間は音を聞く際に、音の方向のみならず音色も同時に知覚できる. 音色とは、音源が何であるかを認知するための手がかりとなる特性であり、音を聞いた主体が音から受ける印象の諸側面の総称と定義される[5]. 音色の知覚は、主に音の周波数特性が影響しており、音源の周波数スペクトルによって変化する[6][7]. このように、人間の耳に入力される音信号は、音色の手がかりと音像定位の手がかりが混在した状態であり、両方とも耳入力信号の周波数特性が手がかりであると考えられている.

ところで、耳入力信号の周波数特性が音色の知覚と音像定位両方の手がかりとなっている中で、例えば、ある人の声の方向によって音色が変わって聞こえたり、若しくは、聞き慣れない音の到来方向が分かり難くなったりする等の現象が起こってもおかしくない. しかし、人間は音色と音像の双方を明確に知覚することが

\* 愛知工科大学工学部情報メディア学科, 〒443-0047 愛知県蒲郡市西迫町馬乗 50-2

Department of Media Information, Aichi University of Technology, 50-2 Manori, Nishihasama-cho, Gamagori 443-0047, Japan

\*\* 東北大学電気通信研究所, 〒980-8577 仙台市青葉区片平 2-1-1

\*\*\* 東北文化学園大学, 〒981-8551 仙台市青葉区国見 6-45-1

可能であり、音の方向が変わっただけで別の音色に聞こえることを日常生活で経験することはないであろう。即ち、人間は日常的に耳入力信号から音色の情報と音像位置の情報を何らかの仕組みで切り分けて知覚し、それぞれの情報を別々に利用していると考えられる。この機序を解明することは、頭部伝達関数に含まれる音像定位の手がかり、スペクトラルキューを調べる上で有用な知見になると言える。

先行研究を俯瞰すると、音色弁別のスペクトラルキューについては従来から研究が行われ、いくつかの知見が示唆されている。例えばMooreら[8]は、仰角によって系統的に変化する頭部伝達関数の 7 kHz付近に現れるノッチ(N1)や、ピーク(P1)に着目し、広帯域雑音に長方形のスペクトルノッチN1 またはピークP1 を課し、N1 やP1 の中心周波数の変化を識別するための閾値を測定した。その結果、中心周波数の帯域幅が増加するにつれ、N1 の検出率が改善し得ることが示唆された。我々の先行研究[9-11]では、広帯域雑音中に付加したN1 ノッチフィルタの帯域幅や中心周波数を系統的に変化させ、それに対応する音色変化の検知限と聴取者自身の頭部伝達関数を比較することで、音色と音像定位のスペクトラルキューについて検討した。その結果、N1 の中心周波数の変化は音色の変化としては知覚され得るが、仰角方向の音像定位に充分寄与するとは言えないことが示された。また、これらの先行研究[9-11]において、音色の弁別が充分可能なノッチ幅を実験条件として設けた問題点を踏まえ、新たに狭いノッチ幅を実験条件として設定し、N1 中心周波数の偏移が音色の弁別にどのような影響を及ぼすかを調べた[12]。その結果、中心周波数の偏移よりも、N1 の帯域幅自体が音色弁別のスペクトラルキューとなり得る可能性が示唆された。

このように、音色のスペクトラルキューについてはいくつかの知見が示されつつあるが、正中面音像定位のスペクトラルキューについては未だに明らかにされていない。過去の研究では、2 kHz以上の周波数帯域における頭部伝達関数の概形を再現すれば高精度の音像定位が可能であり、そのスペクトラルキューとして仰角によって系統的に変化する複数帯域のレベル差が示唆されている[13]。また、仰角によって系統的に変化する 7 kHz付近に現れるノッチがスペクトラルキューであるという報告もなされている[4]。しかし、聴覚系における周波数分析機構を司る聴覚フィルタの特性を考慮すると、N1 のように鋭いスペクトル上のノッチは、元の形状よりもはるかに緩やかで浅い興奮パターンを示すと考えられる[14]。したがって、音像定位の手がかりはN1 そのものの形状やその変化ではなく、聴覚興

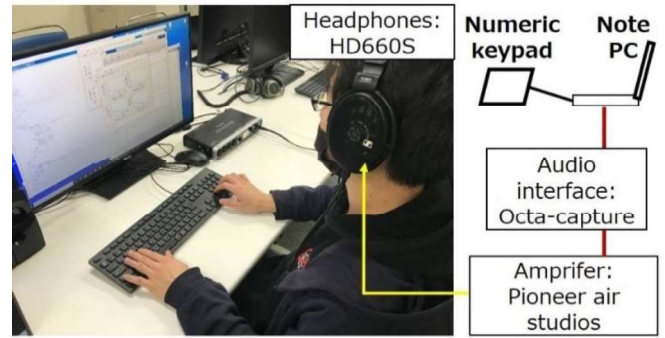


Fig.1 Experimental setup

奮パターンの形状にあるとも考えられる。実際、頭部伝達関数の 2 kHz以上の帯域を平滑化しても音像定位が可能であるという報告や[13]、8 kHzを中心とする 3/4 オクターブ中心周波数帯域において、それ以外の帯域とは仰角の変化に伴う帯域のレベルの変化が異なる様相を呈することを示した報告もなされている[15]。

以上のように、正中面音像定位の工学的制御にノッチN1 が重要であることは明らかであるが、それに起因する聴覚興奮パターン上のスペクトラルキューが何なのかについては統一的な理解が得られていない。そこで本研究では、これら先行研究の知見を踏まえ、頭部伝達関数の周波数スペクトル上に顕著に表れるN1 を模擬したノッチをピンクノイズに付加し、ノッチの中心周波数N1 を広範囲にわたり変化させた場合、N1 の中心周波数の変化が仰角方向の音像定位知覚にどのような影響を及ぼすかを検討した。具体的に、実験 1 では高域ノッチN1 中心周波数について、実験 2 では低域ノッチN1 中心周波数について調べ、両者を比較・検討した。

## 2. 実験1(高域ノッチ中心周波数条件)

### 2.1 目的

実験 1 では、ピンクノイズにN1 を模擬した反共振形ノッチを付加し、その中心周波数を 7 kHzから大きく増加させた場合、N1 の中心周波数が音像定位にどのような影響を及ぼすかを検討した。

### 2.2 聴取者と実験環境

正常な聴力を有する、20 代の成人男性 8 名が聴取実験に参加した。実験環境の概略をFig.1 に示す。実験は愛知工科大学の実験室で行った。音の提示には、オーディオインターフェース(Roland, Octa-capture)と耳介開放型ヘッドフォン(SENNHEISER,

HD660S)を用いた。

### 2.3 実験刺激

実験は、2つの音を連続して提示し比較する方法で実施した。以降、2つの音について、先に提示する音を参照音、後に提示する音を比較音と呼ぶ。音刺激は、参照音と比較音ともに、周波数が1オクターブ増加するごとにパワーが半減する特徴を持つピンクノイズにノッチを加えて生成した。ノッチフィルタ[16]の帯域幅と深さは参照音と比較音で共通しており、帯域幅は0.5 ERBと3.0 ERBのいずれかで、深さは20 dBの値を用いた。

中心周波数( $f_0$ )については、参照音と比較音で異なる値を用いており、参照音では実験を通じて $f_0 = 7$  kHzで固定した。比較音には5種類の値を用いた。1つは参照音と同一の中心周波数 $f_0$ で、 $f_0$ から2 ERBずつずらし、それぞれ( $f_0 + 2$ ) ERB, ( $f_0 + 4$ ) ERB, ( $f_0 + 6$ ) ERB, ( $f_0 + 8$ ) ERBの値を用いた。以下、N1ノッチフィルタを例に、フィルタの設計について説明する。設計に当たっては、 $g$ ,  $r$ ,  $\omega_0$ をパラメータとした式(1)で表される2次のIIRフィルタを用いて反共振ノッチフィルタを作成した。ここで $f_n$ ,  $G_c$ ,  $G_n$ ,  $B$ は、それぞれ中心周波数[Hz], 帯域幅を定めるカットオフのレベル[dB], ノッチの深さ[dB],  $G_c$ における帯域幅[Hz]を表す。なお、 $f_s$ はサンプリング周波数である。深さ $G_n$ は-20 dB, 帯域幅はノッチ両側の平坦な帯域のレベルから-3 dB低下する周波数間の値であり、+1.5 ERBに固定した。作成した刺激の形状をFig.2に示す。

$$H(z) = \frac{1-2r\cos\omega_0z^{-1}+r^2z^{-2}}{1-2\frac{g}{r}\cos\omega_0z^{-1}+\frac{2g-1}{r^2}z^{-2}} \quad (1)$$

$$g = \frac{1}{1+\tan\left(\frac{B_0}{2}\right)\frac{\sqrt{1-A_c^2}}{A_c}}$$

$$r = 1 - A_n \frac{B_0}{\pi}, \quad \omega_0 = 2\pi \frac{f_n}{f_s}$$

$$A_c = 10^{\frac{-G_c}{20}}, \quad A_n = \frac{1}{A_c} 10^{\frac{-G_n}{20}}, \quad B_0 = 2\pi \frac{B}{f_s}$$

### 2.4 実験手続き

実験では、参照音と比較音をランダムな順に0.5秒間隔で連続して提示した。これを1試行とし、1セッションに40回行い、計4セッション(40×4=160試行)実施した。4セッション中に、参照音と異なる4種類の比較音を各20試行ずつ提示し、残りの80試行は各セッションで20試行ずつ、参照音と同一の比較音を用いた。これは、実験を通していつも異なる刺激が提

示されるとの知覚バイアスをなくすためであった。被験

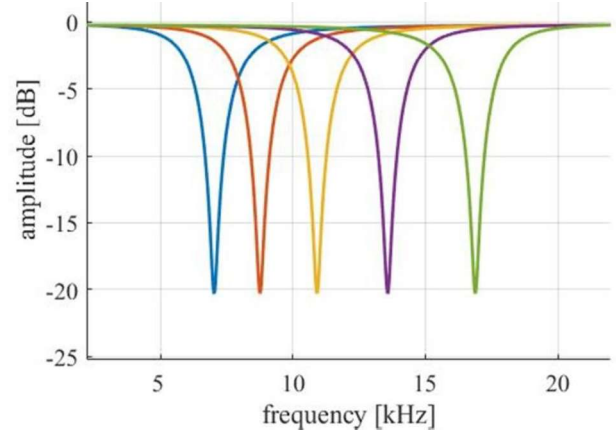


Fig.2 N1 notch filter for high frequency

者には、最後に提示した音が前の音と比べて仰角方向の音像定位の偏移が上下どちらに変化したかを、マウスの上下ボタンを押して判断させた。

### 2.5 実験結果

各被験者ごとに、参照音に対し比較音が上方に偏移したと判断した割合を算出し、Fig.3に示す。図から、N1の帯域幅を3 ERBで固定した条件のもと、中心周波数を先行研究[12]よりも偏移量の大きい2~8 ERB偏移させた場合においても、被験者全員の弁別閾が50~60%水準で推移していることが見て取れる。即ち、すべての被験者が仰角方向の音像定位ができていなかったと考えられる。このことから、先行研究[12]で示された帯域幅3 ERB条件下において、中心周波数が7 kHzから約6 ERB以上偏移しても、正中面音像定位に影響を及ぼさないことが示唆される。

## 3. 実験2(低域ノッチ中心周波数条件)

### 3.1 実験目的

実験1の結果から、ノッチN1の中心周波数の偏移量を、7 kHzを基準に大きく変移させても仰角方向の音像定位に影響を及ぼさないことが分かった。即ち、高域ノッチ中心周波数の偏移は音像定位に影響を及ぼさないことが示された。そこで実験2では、人間の肩から反射して両耳に入る音信号が概ね1~2 kHz付近であることを考慮し、ノッチN1の中心周波数を1 kHz付近に設定し、低域ノッチ中心周波数が音像定位にどのような影響を及ぼすかを検討した。

### 3.2 実験内容

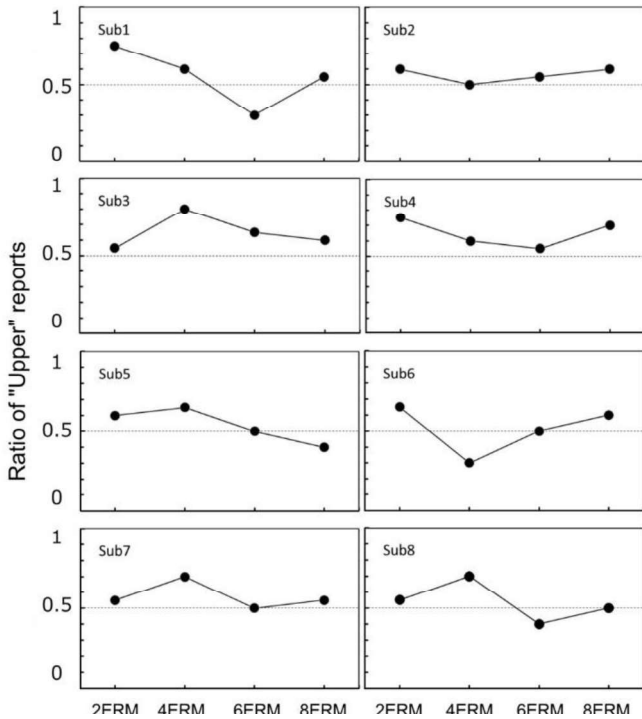


Fig. 3 Sound localization discrimination for high frequency band

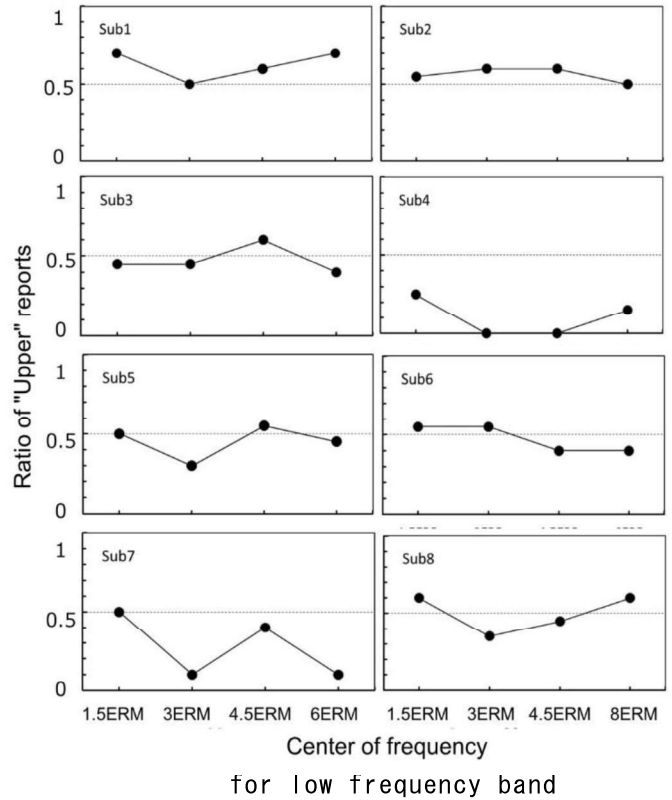
被験者と実験環境は実験 1 と同様であった。ただし、ノッチの中心周波数を、1 kHz を基準に 1.5 ERB ずつ 6 ERB まで偏移させた。即ち、比較音は参照音と同一の中心周波数  $f_0 = 1$  kHz から、右方向に 1.5 ERB ずつずらし、それぞれ  $(f_0 + 1.5)$  ERB,  $(f_0 + 3)$  ERB,  $(f_0 + 4.5)$  ERB,  $(f_0 + 6)$  ERB と、計 5 条件を用いた。実験 1 と同様に、被験者には最後に提示した音が前の音と比べて音像定位の仰角方向の偏移が上下どちらに変化したかを判断させた。

### 3.3 実験結果

実験 1 と同様に、被験者ごとに、参照音に対し比較音が上方に偏移したと判断した割合を算出し、Fig. 4 に示す。図から、弁別閾が 50~60% 水準で推移している被験者群いる一方、実験 1 と異なり、被験者 4 や被験者 7 のように弁別閾が 50% より大幅に低く、負の方向にシフトする被験者群もいることが見て取れる。

弁別閾が 50~60% 水準で推移している被験者群は、実験 1 と同様に仰角方向の音像定位ができていなかったと考えられる。即ち、音色弁別が充分可能な N1 の帯域幅 3 ERB 条件下において、中心周波数が 1 kHz から約 6.00 ERB 以上偏移しても、正中面の音像定位に影響を及ぼさないと考えられる。一方、弁別

閾が 50% より大幅に低く、負の方向にシフトした被験



者群は、仰角方向の音像定位を「上」ではなく、「下」方向にシフトして定位していた可能性が考えられる。

### 4. 総合考察

実験 1 では、ピンクノイズに N1 を模擬した反共振形ノッチを付加し、その中心周波数を 7 kHz から大きく増加させた場合、N1 の中心周波数が音像定位にどのような影響を及ぼすかを検討した。実験結果、ノッチ N1 の中心周波数の偏移量を 7 kHz を基準に大きく増加させても、仰角方向の音像定位に影響を及ぼさないことが分かった。この結果から、高域ノッチ中心周波数の偏移は、音像定位に影響を及ぼさない可能性が考えられる。

一方、実験 2 では、人間の肩から反射して両耳に入る音信号が概ね 1~2 kHz 付近であることを考慮し、ノッチ N1 の中心周波数を 7 kHz から更に低い 1 kHz 付近に設定し、低域ノッチ中心周波数の偏移が仰角方向の音像定位にどのような影響を及ぼすかを検討した。実験結果、実験 1 とは異なり、仰角方向の音像を「下」方向へと定位する被験者群と、仰角方向の音像定位自体が全くできていない 2 グループの被験者群が現れた。そのため、両者を 2 グループに分けて比較・検討した。

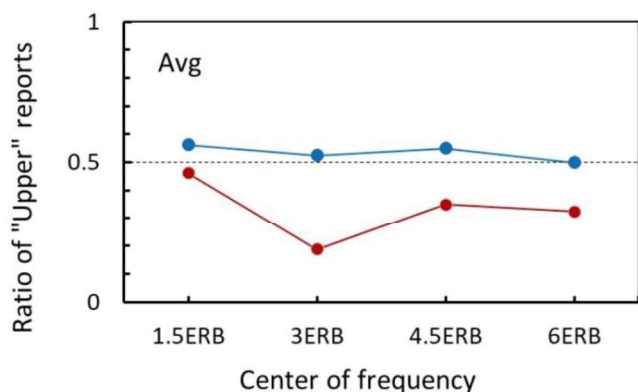


Fig. 5 Comparison for sound localization discrimination between two listeners group

音像を「下」方向に定位した被験者群と、音像定位が全くできていない被験者群に分けてその平均割合を算出し、各実験条件ごとにFig.5 に示す。図の下線は音像を「下」方向に定位した被験者群の平均値であり、上線は回答率が 50～60%と音像定位が全くできていないと思われる被験者群の平均値である。

下線に着目すると、音像を「下」方向に定位した被験者群の場合、中心周波数の偏移幅が 3 ERBの時に「下」方向への判断率が 80%以上であり、中心周波数の偏移幅が 4.5 ERBと 6 ERBの場合においても 70%程度と常に高い値となっている。このことから、これらの被験者群においては、低い中心周波数帯域の偏移が、正中面音像定位のスペクトラルキューになり得る可能性が考えられる。

## 5. まとめ

本研究では、正中面音像定位のスペクトラルキューの解明を目指して、頭部伝達関数の周波数スペクトル上に顕著に表れるN1を模擬した反共振ノッチをピンクノイズに付加し、中心周波数を広範囲にわたり移動させながら、N1の中心周波数の偏移が仰角方向の音像定位にどのような影響を及ぼすかを検討した。具体的には、実験1では高域N1ノッチ中心周波数について、実験2では低域N1ノッチ中心周波数の影響について調べ、両者を比較・検討した。

実験1の結果、中心周波数が7 kHzから約6 ERB以上偏移しても、正中面音像定位に影響を及ぼさないことが分かった。実験2では、人間の肩から耳に入る音信号が1～2 kHz付近であることを考慮し、N1の中心周波数を1 kHzから1.5 ERBずつ偏移させた。実験結果、仰角方向の音像を「下」方向へと定位する被験

者群と、仰角方向の音像定位自体が全くできていない被験者群に分けられることが分かった。

両者を2グループに分けて比較・検討した結果、音像を「下」方向に定位した被験者群の場合、中心周波数を3 ERB以上偏移させた時に「下」方向の判断率 70%以上と高い値となった。このことから、これらの被験者群においては、低い中心周波数帯域の偏移が、正中面音像定位のスペクトラルキューになり得る可能性が考えられる。N1の中心周波数が1～2 kHz付近で見られるこれらの特徴から、低中心周波数帯域の偏移が、正中面音像定位に何らかの影響を及ぼしている可能性が示唆された。ただし、被験者群間に見られる、これら音像定位の様相の差異が何に起因するかは不明なままであり、今後被験者を増やして更に検討する必要がある。

また、低周波数帯域を含め、N1中心周波数の偏移が音像定位に及ぼす影響は限定的であった。今後は、N1の操作のみではなく、頭部伝達関数に広く現れるP1やN2を含めた幅広い特徴量を模擬して同様に検討を行い、正中面音像定位のスペクトラルキューの解明を目指したいと考えている。

## 謝辞

本研究の一部はJSPS科研費19H02396の助成を受けた。本研究の聴取実験にご協力いただいた愛知工科大学の橋本祐輝君に感謝する。

## 参考文献

- [1] E. A. G. Shaw, "Transformation of sound pressure level from the free field to the eardrum in the horizontal plane," J. Acoust. Soc. Am, vol.56, no.6, pp.1848-1861, 1974.
- [2] M. Morimoto and Y. Ando, "On the simulation of sound localization," J. Acoust. Soc. Jpn. (E), vol.1, pp.167-174, 1980.
- [3] J. Blauert, "Spatial Hearing- The Psychophysics of Human Sound Localization," Revised edition (MIT Press, Cambridge, Mass.), 1996.
- [4] K. Iida, M. Itoh, A. Itagaki and M. Morimoto, "Median plane localization using a parametric model of the head-related transfer function based on spectral cues," Applied Acoustics, no.68, pp.835-850, 2007.
- [5] 日本音響学会, "音響用語辞典," コロナ社, 2003.

- [6] H. L. F. Helmholtz, "On the sensations of tone as a physiological basis for the theory of music," Translated by A. J. Ellis, 1954.
- [7] S. Namba, "Dimensions of timbre, in Diversity in harmony, insights from psychology," Proc. 31st Intl. Cong. Psychology, John Wiley & Sons, 2018, Part I, p. 145-163.
- [8] B. C. J. Moore, S. R. Oldfield and G. J. Dooley, "Detection and discrimination of spectral peaks and notches at 1 and 8 kHz," J. Acoust. Soc. Am., Vol. 85, No. 2, 1989, p. 820-836.
- [9] 齋藤優一, 鈴木陽一, 坂本修一, "ノッチフィルタが広帯域雑音の音色弁別に及ぼす影響," 日本音響学会聴覚研究会資料, pp.77-82, 2016.
- [10] 日吉啓, 鈴木陽一, 坂本修一, "広帯域ノイズ中のノッチ中心周波数の偏位が音色と音像定位に与える影響," 電子情報通信学会技術研究報告, EA2018-44, pp.103-108, 2018.
- [11] 山高正烈, 坂本修一, 鈴木陽一, "ノッチフィルタが広帯域雑音の音像定位に及ぼす影響," 愛知工科大学紀要第18巻, pp.21-26, 2021.
- [12] 山高正烈, 坂本修一, 鈴木陽一, "頭部伝達関数におけるノッチ幅と中心周波数の偏移が音色知覚と音像定位に及ぼす影響," 愛知工科大学紀要第19巻, pp.19-24, 2022.
- [13] F. Asano, Y. Suzuki and T. Sone, "Role of spectral cues in median plane localization," J. Acoust. Soc. Am., no.88, pp.159-168, 1990.
- [14] 北島周, 鈴木陽一, 坂本修一, "周波数振幅スペクトル上のノッチによる音色変化の検出限と弁別限," 日本音響学会講演論文集, 2-P-9, pp.819-820, 2015.
- [15] 曲谷地哲, 岩谷幸雄, 鈴木陽一, "仰角依存性の強い帯域のレベルを模擬した頭部伝達関数による正中面定位," 聴覚研究会資料, vol.42, no.1, pp.47-52, 2012.
- [16] 川浦純一, 鈴木陽一, 曾根敏夫, 相馬次郎, "悪条件の伝達関数の逆特性推定のための新しい方法," 電子通信学会論文誌, J69-A, pp.914-917, 1986.