

# スペクトラルキューに基づいた頭部伝達関数の個人化方法とその精度について\*

☆石井要次, 蒲生直和, 飯田一博 (千葉工大・工)

## 1 はじめに

頭部伝達関数(HRTF: Head-Related Transfer Function)には個人差が存在し, 3次元音像再生において, 他人のHRTFを用いると前後誤判定や音像の上昇など, 誤った方向に定位する現象がしばしば発生する. 受聴者本人のHRTFを測定していない場合, 精度の良い3次元音像再生を行うための1つの方法として, データベースから適合するHRTFを探索することが挙げられる. 今までにいくつかの探索方法が提案されている[1,2]. しかし, それらの方法ではデータベースに含まれるHRTFの個数が多くなると探索に多大な時間が必要になるなどの問題点がある.

そこで, 著者らは前報[3]で仰角知覚のスペクトラルキューがHRTFの第1, 2ノッチ(N1, N2)であること[4]に着目し, 少数のparametric-HRTF(pHRTF)で構成されるデータベースを用いた探索方法を提案した. 探索に用いるpHRTFの個数は実測HRTFのデータベースに依らず一定である.

本報告では, 提案したデータベースの探索精度を音像定位実験により検証した.

## 2 探索方法の概要

前報で提案した探索方法の概要を紹介する. 以下の手順のように, 最小のデータベースを作成し, 受聴者に提示することで, 適合するHRTFを探索する.

- 1) データベースを構成する探索用pHRTFのパラメータはN1, N2の周波数, レベル, 尖鋭度である. 周波数は多人数の正面方向から求めたN1, N2周波数の分布範囲をNotch Frequency Distance (NFD)[5]の許容範囲で分割し, その格子点における値である. レベル, 尖鋭度は方向知覚の手がかりとなるために必要な値とした.
- 2) 受聴者は音源信号に探索用pHRTFを畳込んだ刺激を聴き, 適合するpHRTFを選

択する. このとき, 少なくとも1つは受聴者に適合するpHRTFが存在すると考えられる.

- 3a) 探索された正面方向のN1, N2から, 他の方向のpHRTFを作成する.
- 3b) もしくは, 探索された正面方向のN1, N2から, 実測HRTFを既存のデータベースから選定する.

## 3 pHRTF データベースの構築

### 3.1 周波数

N1, N2周波数の分布範囲を求め, その分布範囲をNFDの許容範囲で分割し, その格子点におけるN1, N2周波数で探索用pHRTFを作成した.

#### 3.1.1. N1, N2周波数の分布範囲

Figure 1に50人(100耳)の正面方向の実測HRTFから求めたN1, N2周波数の分布を示す. N1周波数は約5000-10000 [Hz], N2周波数は約7000-13000[Hz]に分布している. これをNFDの許容範囲によって分割を行った.

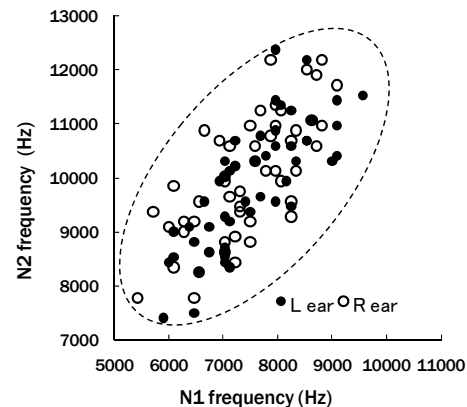


Fig. 1 N1 and N2 frequencies of 50 subjects for the front direction

#### 3.1.2. NFD とその許容範囲

NFDはN1, N2周波数の個人差の指標である. NFDは式(1)-(3)で表される.

$$NFD_{1,j,k} = \log_2 \{f_{N1}(HRTF_j) / f_{N1}(HRTF_k)\} [\text{oct.}] \quad (1)$$

$$NFD_{2,j,k} = \log_2 \{f_{N2}(HRTF_j) / f_{N2}(HRTF_k)\} [\text{oct.}] \quad (2)$$

$$NFD_{j,k} = |NFD_{1,j,k}| + |NFD_{2,j,k}| [\text{oct.}] \quad (3)$$

\* On a method of individualization of the head-related transfer functions on the basis of the spectral cues and its accuracy. - by ISHII yohji, GAMOH naokazu, IIDA kazuhiko (Chiba Institute of Technology)

ここで,  $f_{N1}$ ,  $f_{N2}$  は  $N1, N2$  周波数

音像定位実験によって NFD の許容範囲を求めた.

### 3.1.3. 実験方法

実験は無響室で行った. 実験システムは, ノート PC, オーディオインターフェース (RME Hammerfall DSP), ヘッドホン (SONY MDR-F1), A/D コンバータ (Roland EDIROL M-10MX), イヤーマイクロホンで構成した. 音源信号は 200–20000 [Hz] のホワイトノイズで, 刺激の提示時間は 1.2 秒 (前後に 0.1 秒の立ち上がり/下がりを含む) である. 被験者はヘッドホンとイヤーマイクロホンを装着した状態で座り, 再生系の伝達関数  $C(\omega)$  を測定した. 測定後はイヤーマイクロホンを取り外し, 刺激  $P(\omega)$  を式(4)によって算出し, 被験者に提示した.

$$P(\omega) = S(\omega) \cdot H(\omega) / C(\omega) \quad (4)$$

ここで,  $S(\omega)$  は音源信号,  $H(\omega)$  は pHRTF

実験で用いた pHRTF は, 被験者本人の正面方向の  $N1, N2, P1$  で再構成した pHRTF を基準とし, その  $N1, N2$  周波数をそれぞれ  $\pm 0.1, \pm 0.2, \pm 0.4, +0.6$  [oct.] 移動した 26 種類である (Fig. 2). 26 個の刺激をランダムに並べたものを 1 試行とし, 全 10 試行からなる実験を 5 つのセクションに分けて行った. 被験者は 20 代男性 2 名 (ISY, IST) である. 被験者は知覚した音像の上昇角をマッピング法によって回答した.

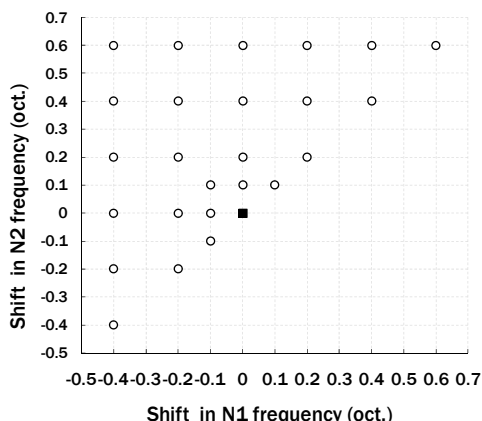


Fig. 2 Twenty-six parametric HRTFs with shifted  $N1$  and  $N2$  frequencies, ■: subject's own pHRTF

### 3.1.4. 実験結果

各刺激の正答率を Fig. 3 に示す. 横軸は NFD, 縦軸は正答率 (目標方向  $0^\circ$  から  $\pm 15^\circ$  以内に回答した割合) である.

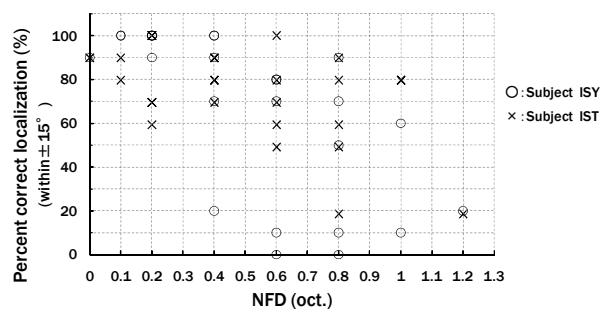


Fig. 3 Percent correct localization as the function of NFD

正答率 80% 以上となる NFD は被験者 ISY では 0.2 [oct.] 以内, 被験者 IST では 0.1 [oct.] 以内であった. そこで, pHRTF における NFD の許容範囲は 0.1 [oct.] 程度であるとみなした.

次に, NFD の許容範囲 0.1 [oct.] で  $N1, N2$  周波数の分布範囲を分割した. その格子点における  $N1, N2$  周波数で探索用 pHRTF を作成した (Fig. 4). その結果, pHRTF の個数は 38 であった.

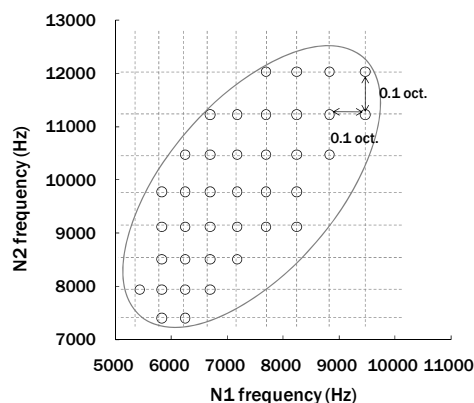


Fig. 4 Extracted pairs of  $N1$  and  $N2$  dividing the distribution range by the acceptance range of NFD

## 3.2 レベル

被験者本人の  $N1, N2$  のレベルを変化させて方向知覚の手がかりとして必要となるレベルを実験により求めた.

### 3.2.1. 実験方法

実験方法は 3.1.3 項で記した方法と同様である. ただし, 実験で使用した pHRTF は以下に示すものを用いた.  $N1, N2$  の周波数と尖鋭度は被験者本人のものであり,  $N1, N2$  のレベルをそれぞれ  $0 \sim -40$  [dB] の範囲を 10 [dB] 間隔で変化させた 25 種類と, 被験者本人の  $N1, N2, P1$  の周波数, レベル, 尖鋭度で再構成したものを加えた合計 26 種類である. 被験者本人の  $N1, N2$  のレベルを Table 1 に示す.

Table 1 N1 and N2 levels of the subjects (dB)

	N1 Level (dB)		N2 Level (dB)	
	L	R	L	R
ISY	-17	-11	-10	-15
IST	-13	-21	-15	-14

### 3.2.2. 実験結果

各刺激に対する正答率(目標方向 $0^\circ$  から $\pm 15^\circ$  以内に回答した割合)を Fig.5 に示す. 横軸は N1 のレベル, 縦軸は N2 のレベルである. 色が薄い部分は正答率が高いことを表し, 色が濃い部分は正答率が低いことを表している.

まず, 本人の N1, N2 のレベルを用いた場合では, 被験者 ISY, IST の正答率はそれぞれ 100 [%], 80 [%]であり, 高い値であった. 被験者の N1, N2 レベルに近い場合(N1, N2 ともに $-20$  [dB])でも, 両被験者の正答率は高かった.

一方, N1, N2 の片方または両方のレベルが  $0$  [dB]の場合では, 両被験者のすべての正答率が低かった. N1, N2 の片方または両方のレベルが $-10$  [dB]の場合では, どちらの被験者においても一部で正答率が高いものがあるが, 正答率が低いものが多かった. N1, N2 のレベルがともに $-20$  [dB]以下であれば, 両被験者の正答率が比較的高い結果となった. 以上の結果から, ノッチのレベルは $-20$  [dB]以下にする必要があると考えられる.

以上の結果から, 今回作成したデータベースの N1, N2 のレベルは安全側を取って N1,N2 ともに $-30$  [dB]とした.

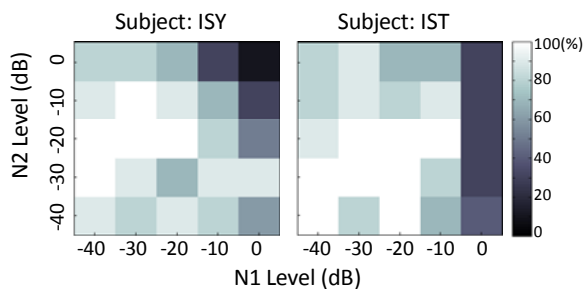


Fig 5 Percent correct localization for N1 and N2 levels

### 3.3 尖鋭度(Q)

Q は式(5)で定義される[6].

$$Q = f_0 / \Delta f \quad (5)$$

ここで,  $f_0$  は中心周波数,  $\Delta f$  は半値幅

方向知覚の手がかりとして必要となる Q を求めた.

### 3.3.1. 実験方法

実験方法は 3.1.3 項で記した方法と同様である. ただし, 実験で使用した pHRTF は Table 2 に示す 2 種類である. pHRTF2 で使用した Q は 3.1 節で求めた格子点内の N1, N2 周波数が最も近い点において, ノッチを作成できる最小の Q を参考に 23 とした.

Table 2 Parameters of pHRTFs used in the experiment

	pHRTF1	pHRTF2
Frequency (Hz)	own	own
Level (dB)	own	-30
Q	own	23

### 3.3.2. 実験結果

pHRTF1 を用いた場合の正答率(目標方向 $0^\circ$  から $\pm 15^\circ$  以内に定位した割合)は, 被験者 ISY, IST ともに 100 [%]であった. pHRTF2 を用いた場合, 被験者 ISY は 100 [%], IST は 90 [%]であった. 以上の結果から, 最小のデータベースを構成する探索用 pHRTF の N1, N2 の Q を 23 とした.

以上の結果をまとめると, 最小のデータベースを構成する探索用 pHRTF の N1, N2 周波数の対は 38 であった. それらのレベル, Q はそれぞれ $-30$  [dB], 23 で一定とした.

## 4 探索精度の検証

3 章で構築した最小のデータベースを用いて被験者に適合する HRTF の探索の精度を確認した.

### 4.1 実験方法

データベースに含まれる 38 個の探索用 pHRTF をランダムな順に各 10 回被験者に提示した. 実験システムは 3 章で記したものと同様である. 被験者は 20 代男性 3 名(ISY, GMU, YSM), 使用した HRTF は, 3 章で構築した最小のデータベースである. 被験者は, 知覚した音像の方向が, 「正面」または「正面以外」のいずれかで回答した.

### 4.2 実験結果

Figure 6 に「正面」と回答した割合が 80% 以上の選択された格子点を示す. 選択された点は塗りつぶした. 図中の×は被験者本人の N1, N2 周波数である.

どの被験者においても、本人の N1, N2 周波数に近い点が選択されている。このことは、提案した探索方法の妥当性を示しているといえる。

一方、被験者本人の N1, N2 周波数から遠い点も選択されている。そこで、正面方向の実測 HRTF と、選択された pHRTF を比較した。Fig. 7 に被験者 YSM の正面方向の実測 HRTF と、選択された pHRTF を示す。pHRTF の番号は Fig. 6 の図中に記載したものに従う。

pHRTF①では、被験者本人の N1, N2 とほぼ一致している。pHRTF②では N2 周波数だけが本人の N2 周波数に近い値である。pHRTF③では、N2 周波数だけが本人の N1 周波数に近い値である。被験者 GMU も似た傾向であった。このことから、被験者本人の N1, N2 から遠い点が選択される理由として、他のノッチが影響していると考えられる。

今後はこれらの原因を検証し、複数の選択された pHRTF から被験者本人の N1, N2 周波数から遠いものを除外する方法の検討を行う。

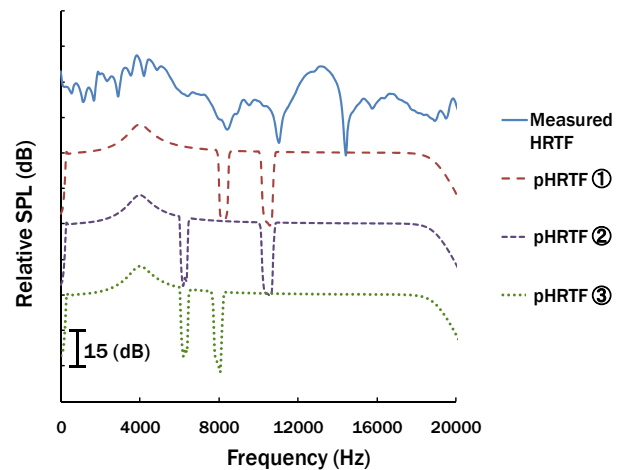


Fig. 7 Measured HRTF and selected pHRTFs

## 5 まとめ

N1, N2 周波数の個人差に基づいて構築した pHRTF データベースの探索精度を検証した。その結果、被験者本人の N1, N2 周波数に近い点が選択されることを確認した。

一方、被験者本人の N1, N2 周波数から離れた点も選択されていた。今後は、複数の選定された点から本人の N1, N2 に近い周波数をもつ点を求める方法を検討していく。

## 6 謝辞

本研究の一部は文部科学省の学術フロンティア推進事業による私学助成を得て行われた。

## 7 参考文献

- [1] Y. Iwaya, *Acoust. Sci. Tech.*, 27(6), 340-343, 2006.
- [2] J. C. Middlebrooks, *J. Acoust. Soc. Am.* 106, 1480 - 1492, 1999.
- [3] 石井他, 音講論(秋), 521 - 522, 2009.
- [4] K. Iida *et al.*, *Applied Acoustics*, vol.68, 835-850, 2007.
- [5] 飯田他, 音講論(春), 1473-1476, 2009.
- [6] 日本音響学会編, “新版音響用語辞典,” コロナ社, 2003.

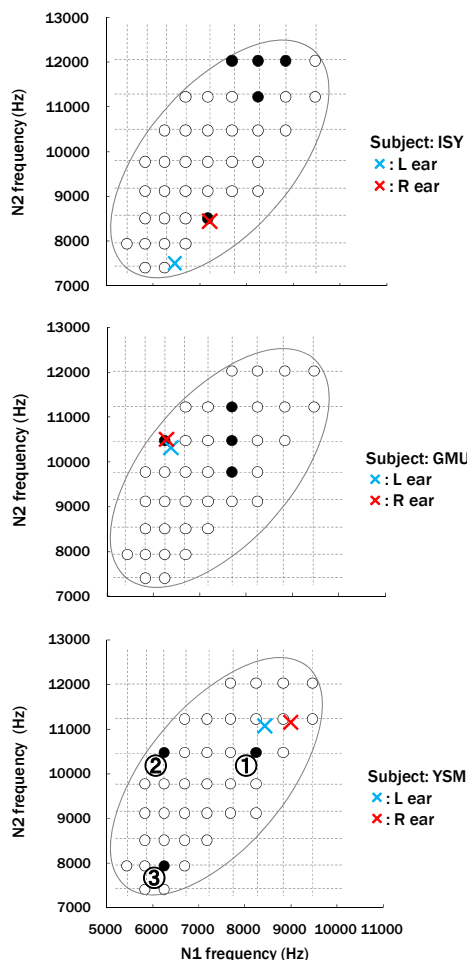


Fig. 6 ●: Selected frequencies of N1 and N2, for which the subjects localized at the front direction, ×: subject's own N1 and N2 frequencies