

# 正中面のスペクトラルノッチと耳介形状の個人差に関する考察 — 定量的個人差情報を備えた頭部伝達関数データベースの構築 —\*

◎石井要次, 西岡伸介 (千葉工大院・工学研), 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)を鼓膜上で再現することによって任意の方向に音像を制御することができる[1]. ヒトは HRTF に含まれる情報のうち, 左右方向では両耳間差, 前後・上下方向ではスペクトル[2-4]を方向知覚の手掛かりとしている. さらに, 4kHz 以上の最初のノッチ(N1), およびその次のノッチ(N2)がスペクトラルキューとして重要な役割を果たしていることが知られている[5](Fig. 1). また, N1, N2 は, 耳介の主な3つの窪み(耳甲介腔, 耳甲介舟, 舟状窩)によって生成されることが報告されている[6]. しかし, N1, N2 は, 個人差があるため, 他人の HRTF を用いた場合, 頭内定位や前後誤判定などの現象がしばしば発生する[1]. したがって, 精度の高い3次元音像制御を実現するためには, 各受聴者に適合した HRTF を用いる必要がある.

HRTF の個人化については, 写真などから得た耳介形状データから N1, N2 を推定し, 適合する HRTF を生成する方法や, 既存のデータベースからノッチ周波数の近い HRTF を選択する方法などが検討されている[7]. しかし, 従来提案されている HRTF データベース[例えば 8,9]には, スペクトラルノッチや耳介形状の個人差情報を定量的に記述したものはなく, これらを備えたデータベースの構築が望まれる.

本研究では, ①耳介形状情報, ②頭部伝達関数, ③N1, N2 情報からなるデータベースを構築し, これを用いて耳介形状および正中面内のスペクトラルノッチの個人差について考察した.

## 2 耳介形状の個人差

耳介形状の個人差については, これまで多くの研究機関において検討が進められている

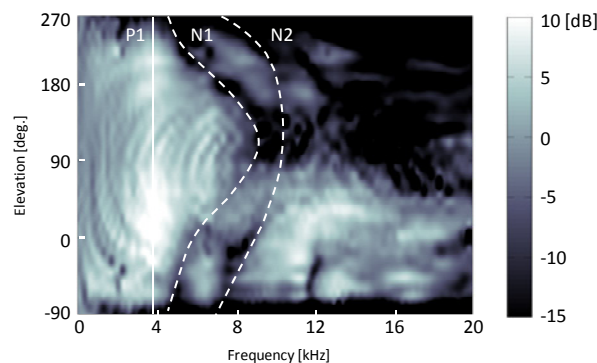


Fig. 1 HRTF の振幅スペクトルと N1, N2, P1

[8,10,11]. 本研究では, スペクトラルピーク・ノッチの形成に寄与する耳甲介腔, 耳甲介舟, 舟状窩を含めた耳介の各部位(Fig. 2, Table 1)の寸法を 111 名(222 耳)の耳型からデジタルノギスで計測した. ただし, 耳介の傾き(x13)については, 21 名について両耳の写真を撮り, 横断面と耳介の内寸(x9)をとる線分のなす角により求めた.

計測結果を Fig. 3 に示す. 計測値の分布範囲は耳介部位により異なり, 10 - 30mm となった. 耳介の傾きについては, 10 - 40° の広い範囲に分布した.

また, それぞれの耳介部位の個人差の分布について, 「計測値が正規分布している」という帰無仮説を立て, シャピローウィルク検定を行った. その結果, 耳介の内寸(x9)を除き, 有意水準 5% で帰無仮説は棄却されなかった. x9 では, 有意水準 5% で帰無仮説が棄却された. x9 では計測値が大きい方に偏って分布している.

Table 2 に各耳介部位の計測値の統計量をまとめた. まず, 平均値についてみる. 耳介全体の大きさに関する部位(x1, x5)の平均値は, それぞれ 34.4, 65.7mm であった. cavity の幅に関する寸法(x2 - x4)の平均値は, それぞれ 19.3, 8.5, 25.5mm であった. 耳介の内寸

\* Consideration on the individual difference of the pinna shape and the spectral notches on the median plane - Construction of the HRTF database with the quantitative individual difference information -, by ISHII, Yohji, NISHIOKA, Shinsuke and IIDA, Kazuhiro (Chiba Institute of Technology).

(x9)の平均値は 44.5mm であった. また, 各窪みの長さ(x6 - x8)の平均値は, 21.1, 5.7, 17.7mm であった. 耳介の傾き(x13)の平均値は 25.4° であった.

次に, 個人差の大小を評価するため, 変動係数 CV(式 1)を求めた.

$$CV = \frac{\sigma}{\bar{x}} \quad (1)$$

ここで,  $\sigma$  は標準偏差,  $\bar{x}$  は平均値である.

CV は 0.07 - 0.32 の範囲にあり, 耳介部位により違いがみられた. 最も CV が大きい耳介部位は, 耳介の傾き(x13)であり, 次いで耳甲介舟の長さ(x7), 耳底線から珠上切痕の幅(x11)であった. 最も CV が小さい耳介部位は, 最大耳長(x5)であり, 次いで最大耳幅(x1), および耳甲介腔の長さ(x6)であった.

窪みの幅に関する耳介部位(x2 - x4)についてみる. 最も CV が大きい耳介部位は珠間切痕の最大幅(x3)であり, 次いで耳輪の最大幅(x4), 耳甲介腔の最大幅(x2)であった.

窪みの長さに関する耳介部位(x6 - x9)についてみる. 窪み全体の長さである耳介内寸(x9)の CV は小さい(0.09)が, 耳甲介舟の長さ(x7)は大きい(0.30).

次に, 耳甲介腔について着目する. 耳甲介腔は, HRTF の 4kHz 付近に存在するピーク(P1)(Fig. 1)の生成に特に寄与することが報告されている[6]. 耳甲介腔の最大幅(x2), 長さ(x6), および深さ(x10)は, いずれも CV が小さく, P1 の個人差が小さいことと対応している.

さらに, 岡松ら[12]は, 耳介を 3 つの直方体の窪みで構成した耳介モデルを用いて, それぞれの窪みの幅が N1, N2 周波数に与える影響について検討し, 珠間切痕の最大幅(x3)が N1, N2 周波数に影響を与えることを報告している. x3 の個人差をみると, 平均値(8.5mm)に対する最大値(12.0mm)および最小値(3.8mm)の比はそれぞれ 1.41 および 0.45 であった.

### 3 上半球正中面の HRTF の個人差

耳介形状を計測した 111 名の被験者のうち, 76 名に対して HRTF の測定, および N1, N2 の抽出を行い, HRTF の個人差について検討した.

ここで, 音源方向は, 正面 0° から真後ろ

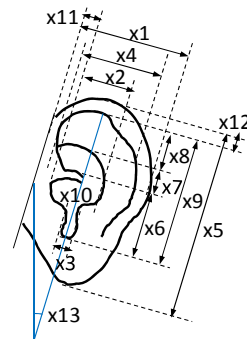


Fig. 2 計測箇所

Table 1 計測箇所の名称

計測箇所	名称
x1	最大耳幅
x2	耳甲介腔の最大幅
x3	珠間切痕の最大幅
x4	耳輪の最大幅
x5	最大耳長
x6	耳甲介腔の長さ
x7	耳甲介舟の長さ
x8	舟状窩の長さ
x9	耳介の内寸
x10	耳甲介腔の深さ
x11	耳底線から珠上切痕の幅
x12	最大耳長をとる線分内の耳輪の長さ
x13	耳介の傾き

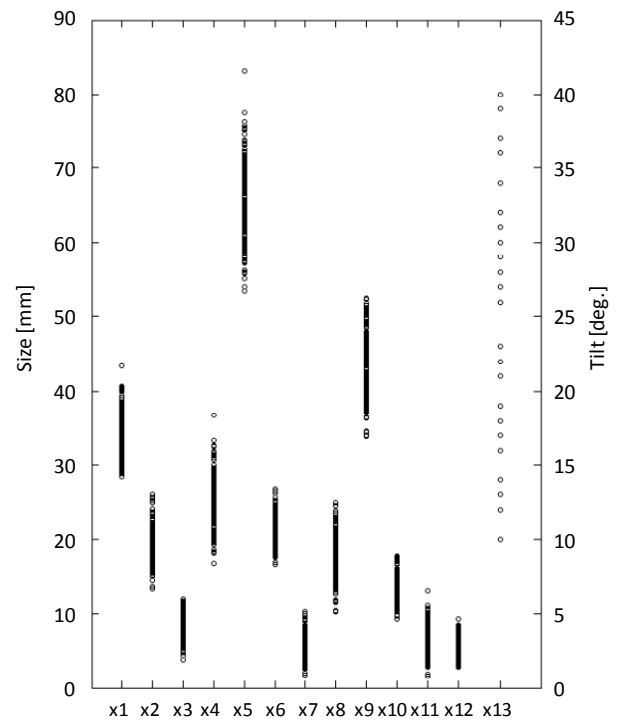


Fig. 3 各耳介部位の計測結果

Table 2 各耳介部位の計測値の統計量

計測箇所	平均値 [mm]	最大値 [mm]	最小値 [mm]	標準偏差 [mm]	変動係数
x1	34.4	43.4	28.4	2.9	0.08
x2	19.3	26.1	13.4	2.2	0.11
x3	8.5	12.0	3.8	1.6	0.19
x4	25.5	36.8	16.8	3.2	0.13
x5	65.7	83.2	53.5	4.7	0.07
x6	21.1	26.7	16.6	1.8	0.08
x7	5.7	10.3	1.7	1.7	0.30
x8	17.7	25.0	10.4	2.8	0.16
x9	44.5	52.6	33.8	4.0	0.09
x10	13.5	17.7	9.3	1.6	0.12
x11	6.5	13.0	1.5	1.9	0.29
x12	5.8	9.3	2.8	1.3	0.22
x13	25.4 [deg.]	40 [deg.]	10 [deg.]	8.1 [deg.]	0.32

180° までの上半球正中面内の 7 方向(30° 間隔)である.  $HRTF_{l,r}$  は式 2 によって求めた.

$$HRTF_{l,r}(\omega) = \frac{G_{l,r}(\omega)}{F(\omega)} \quad (2)$$

ここで,  $F(\omega)$  は無響室で測定した, 受聴者がいない状態での音源から受聴者の頭部中心位置に相当する位置までの伝達関数であり,  $G_{l,r}(\omega)$  は無響室で測定した, 音源から外耳道までの伝達関数である.

### 3.1 N1, N2 の抽出方法

N1, N2 の抽出には, 飯田ら[13]が提案した方法を用いた. これは, 頭部インパルス応答の初期応答部分(約 1 - 2 ms)を時間窓で切り出し, それをフーリエ変換する方法であり, N1, N2 を容易に抽出することができる.

### 3.2 N1, N2 の周波数の個人差

N1, N2 周波数の分布を Fig. 4 に示す. いずれの方向においても, 4000 - 6000Hz に亘る個人差があった. 仰角と N1 周波数の関係(Fig. 4 (a))については, 音源方向が 0° から 120° 付近になるにつれて高くなり, そこから 180° に向かって低くなる傾向がみられる. N2 周波数(Fig. 4 (b))については, 音源方向が 0° から 120° 付近になるにつれて高くなるが, 120° から 180° の間の変化は小さい.

各音源方向における全被験者(152 耳)の N1, N2 周波数の平均値および標準偏差を Fig. 5 に示す. 各音源方向において N1, N2 周波数の標準偏差は 1000 - 1500Hz であった.

各音源方向の N1, N2 周波数の分布について, 「計測値が正規分布している」という帰無仮説を立てシャピローウィルク検定を行った. その結果, N1 周波数では 60° を除いた方向で有意水準 5% で帰無仮説は棄却されなかった. N2 周波数では 60, 120 - 180° を除いた方向で, 有意水準 5% で帰無仮説は棄却されなかった. N1, N2 周波数の 60° では, 有意水準 5% で帰無仮説が棄却された. N1, N2 いずれにおいても, 低い周波数に偏って分布している. また, N2 周波数の 120° では有意水準 5% で, 150° および 180° では有意水準 1% で帰無仮説が棄却された. 120° では, 低い周波数に外れ値があり, 150° では低い周波数に偏って分布し, 180° では高い周波数に偏って分布している.

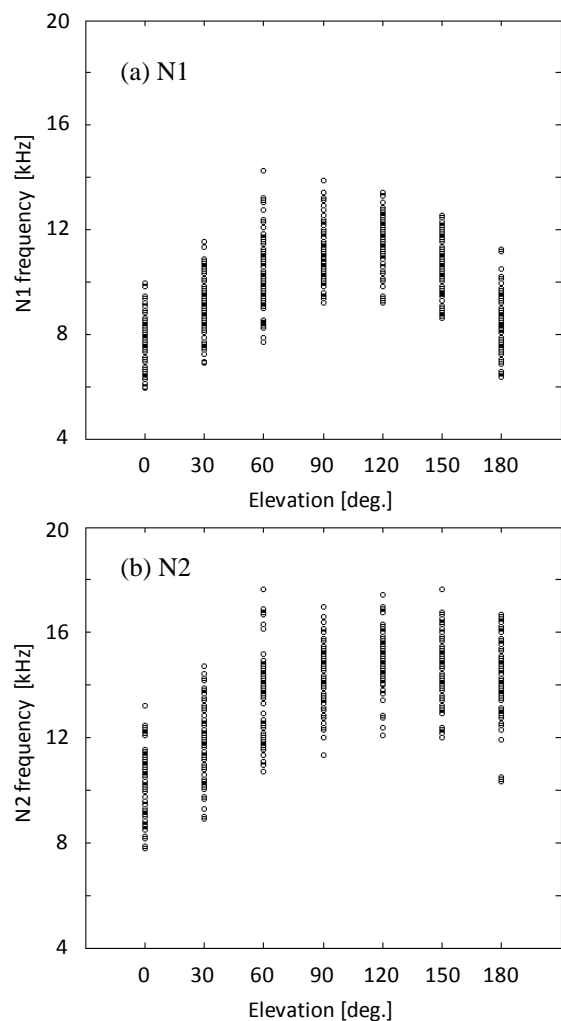


Fig. 4 上半球正中面の N1, N2 周波数の分布 (a)N1 周波数, (b)N2 周波数

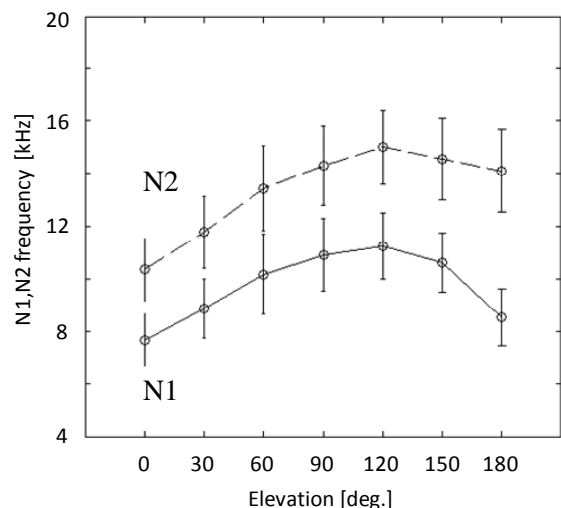


Fig. 5 上半球正中面における全被験者の N1, N2 周波数の平均値および標準偏差

次に, 音源の仰角と全被験者の N1, N2 周波数の平均値の関係(Fig. 5)を各被験者の N1, N2 周波数にも適用できるか否かを検討した. これが適用できれば, 例えば個人の正面方向の

N1,N2 周波数を求めることで、他の仰角の N1,N2 周波数を容易に推定できるようになる。Table 3 は、上半球正中面における全被験者 (152 耳=76 名×2 耳)の N1,N2 周波数の平均値 (Fig. 5)と個々の耳の N1,N2 周波数の相関をとった結果である。非常に強い相関( $r>0.8$ )となったのは N1,N2 とともに全体の 80%であった。また、相関がある( $r>0.6$ )となったのは N1 では 96%, N2 では 97%であった。したがって、全被験者の N1,N2 周波数の仰角依存性の平均値を個人に適用できる可能性が高い。相関が 0.6 未満となった被験者については、今後、詳細な分析を進める。

Table 3 上半球正中面における全被験者の N1,N2 周波数の平均値と個々の耳の N1,N2 周波数の相関

相関係数の範囲	耳の数		割合 [%]		累積度数 [%]	
	N1	N2	N1	N2	N1	N2
$0.9 \leq r < 1.0$	86	65	57	43	57	43
$0.8 \leq r < 0.9$	36	57	24	38	80	80
$0.7 \leq r < 0.8$	20	12	13	8	93	88
$0.6 \leq r < 0.7$	6	12	4	8	97	96
$0.5 \leq r < 0.6$	2	2	1	1	99	97
$0.4 \leq r < 0.5$	1	2	1	1	99	99
$0.3 \leq r < 0.4$	1	2	1	1	100	100
$0.2 \leq r < 0.3$	0	0	0	0	100	100
$0.1 \leq r < 0.2$	0	0	0	0	100	100
$0.0 \leq r < 0.1$	0	0	0	0	100	100

#### 4 まとめ

耳介形状の個人差について検討し、以下のことを示した。

- 1) 最も個人差が大きい耳介部位は、耳介の傾き(x13)であった。
- 2) 窪みの長さに関する耳介部位で個人差が大きい箇所は、耳甲介舟の長さ(x7)であった。
- 3) 窪みの幅に関する耳介部位で個人差が大きい箇所は、珠間切痕の最大幅(x3)であった。

次に、上半球正中面内での N1, N2 周波数の個人差について検討し、以下のことを示した。

- 4) いずれの仰角においても、N1, N2 とともに 4000 - 6000Hz に亘る個人差があった。
- 5) N1 周波数は、 $0^\circ$  から  $120^\circ$  になるにつれて高くなり、そこから  $180^\circ$  に向かって低くなる傾向があった。
- 6) N2 周波数は、音源方向が  $0^\circ$  から  $120^\circ$

になるにつれて高くなるが、 $120^\circ$  から  $180^\circ$  の間の変化は小さかった。

- 7) 全被験者(152 耳)の N1,N2 周波数の平均値と、個々の耳の N1,N2 周波数の間で相関分析を行った結果、全体の 80%に 0.8 以上の相関がみられた。

#### 謝辞

本研究の一部は科研費(基盤研究(A) 22241040)により実施した。

耳型の一部は、神戸大学大学院の森本政之名誉教授および大学院生板垣篤恵氏(現(株)竹中工務店)から提供頂いた。また、当研究室大学院生の岡松俊哉君、坂口慎治君、土屋宏樹君には耳介形状の計測に協力頂いた。記して感謝いたします。

#### 参考文献

- [1] M. Morimoto and Y. Ando, J. Acoust. Soc. Jpn. (E), vol.1, pp. 167-174, 1980.
- [2] Hebrank and Wright, J. Acoust. Soc. Am., Vol. 56, No.6, December, 1974.
- [3] S. Mehrgardt, V. Mellert, J. Acoust. Soc. Am. 61, pp. 1567-1576, 1977.
- [4] E. A. G. Shaw and R. Teranishi, J. Acoust. Soc. Am. 44, pp. 240-249, 1968.
- [5] K. Iida *et al.*, Applied Acoustics, vol.68, pp. 835-850, 2007.
- [6] H. Takemoto *et al.*, IWPASH 2009, 2009.
- [7] 石井他, 音講論(秋), pp. 467-470, 2011.
- [8] The CIPIC database: [http://interface.cipic.ucdavis.edu/CIL\\_html/CIL\\_HRTF\\_database.htm](http://interface.cipic.ucdavis.edu/CIL_html/CIL_HRTF_database.htm)
- [9] MIT HRTF Measurements of a KEMAR Dummy-Head Microphone: <http://www.sound.media.mit.edu/KEMAR.html>
- [10] V. R. Algazi *et al.*, IEEE Workshop on Applications of Signal Processing to Audio and Acoustics, pp. 99-102, 2001.
- [11] 渡邊他, 音講論(秋), pp. 469-472, 2010.
- [12] 岡松他, 音講論(秋), 2012.
- [13] 飯田他, 音講論(秋), pp. 473-476, 2010.