

# 受聴者の耳介形状による 頭部伝達関数のスペクトラルノッチ周波数の推定\*

◎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

受聴者本人の頭部伝達関数(HRTF)を鼓膜上で再現することで任意の方向に音像を制御できるが, 他人の HRTF を用いると, 前後誤判定や頭内定位などの現象がしばしば発生する[1].

しかしながら, すべての受聴者について HRTF を測定することは, 膨大な時間と無響室などの設備が必要であり, 現実的ではない. 一方, 耳介の写真などから受聴者の HRTF を推定することが考えられるが[2], 受聴者の HRTF がもつ全ての情報を推定することは困難である. そこで, ヒトが方向知覚の手掛かりとして利用している情報のみを推定することを考える.

方向知覚の手掛かりのうち, 左右方向の両耳間差キューについては, 両耳間距離などの身体的特徴から予測することができる[3].

前後・上下方向のスペクトラルキューについては, HRTF の 4kHz 付近に存在するピーク(P1), および 4kHz 以上に存在する最初のノッチ(N1)とその次のノッチ(N2)(Fig. 1)が知られている[4].

写真などから得られる耳介形状データから, 受聴者の N1, N2, P1 周波数を推定し, HRTF データベース[5]から N1, N2 周波数が近いものを選出することにより, 精度の高い3次元音像制御が実現できると考えられる.

本研究では, 写真などから得られる受聴者の耳介形状データから N1, N2, P1 周波数を推定する方法を提案する.

## 2 分析に用いたデータ

### 2.1 耳介形状

N1, N2, P1 が耳介の主な3つの窪み(耳甲介腔, 耳甲介舟, 舟状窩)の共鳴現象によって生成されるという知見[6]に基づき, 被験者から採取した耳型から 11 種類の耳介形状(Fig. 2,

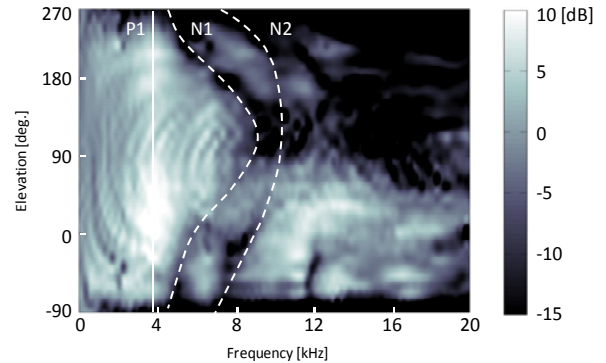


Fig. 1 Distribution of frequencies of N1, N2, and P1 in the median plane

Table 1)をデジタルノギスを用いて計測した. なお, 耳介の傾き( $x_a$ )については, 耳介の写真から算出した.

46 耳の計測結果を Fig. 3 に示す.  $x_1 - x_{10}$  の分布範囲は, 10 - 20mm であり, 耳介の傾き  $x_a$  は 4 - 40° の広い範囲に分布した.

### 2.2 N1, N2, P1 周波数

耳介形状データを求めた46耳のHRTFを無響室で測定した. 音源には Swept-sine signal ( $2^{18}$ sample)を用いた. スピーカから頭部中心位置までの距離は 1.2m である. 被験者は, 耳栓型マイクロホン[3]を装着して測定した. HRTF は式 1 によって算出した.

$$HRTF_{l,r}(\omega) = \frac{G_{l,r}(\omega)}{F(\omega)} \quad (1)$$

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, 音源から外耳道入口までの伝達関数である.

N1, N2 の抽出には飯田ら[7]が提案した方法を用いた. これは, 頭部インパルス応答の

\* Estimation of spectral notch frequencies of listener's individual head-related transfer function from anthropometry of listener's pinna, by ISHII, Yohji, NISHIOKA, Shinsuke and IIDA, Kazuhiro (Chiba Institute of Technology).

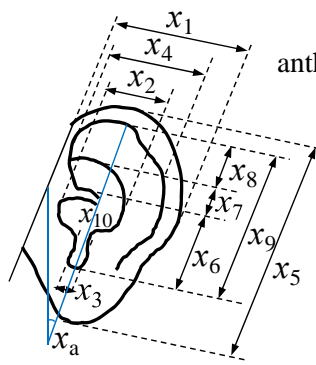


Fig. 2 Eleven anthropometric parameters used in analysis.

Table 1 Definition of anthropometric parameters

| 計測箇所     | 名称       |
|----------|----------|
| $x_1$    | 最大耳幅     |
| $x_2$    | 耳甲介腔の最大幅 |
| $x_3$    | 珠間切痕の最大幅 |
| $x_4$    | 耳輪の最大幅   |
| $x_5$    | 最大耳長     |
| $x_6$    | 耳甲介腔の長さ  |
| $x_7$    | 耳甲介舟の長さ  |
| $x_8$    | 舟状窩の長さ   |
| $x_9$    | 耳介の内寸    |
| $x_{10}$ | 耳甲介腔の深さ  |
| $x_a$    | 耳介の傾き    |

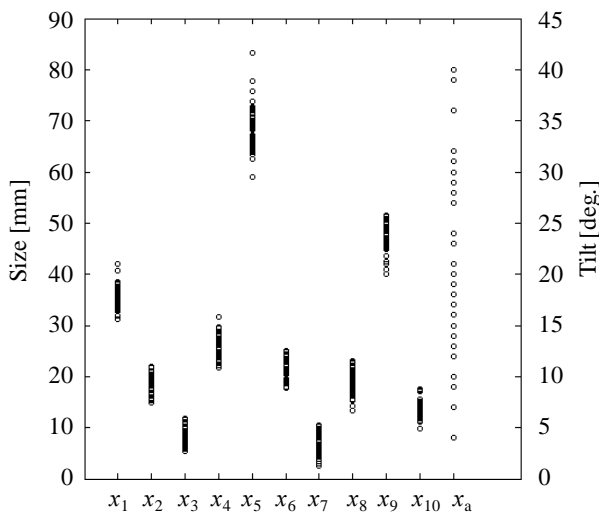


Fig. 3 Distribution of 11 measured anthropometric parameters (46 ears).

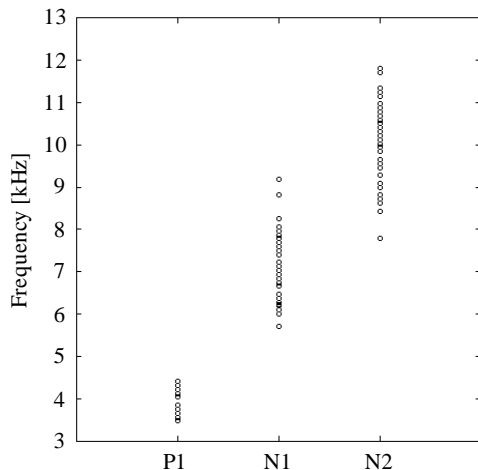


Fig. 4 Distribution of N1, N2, and P1 frequencies for the front direction (46 ears).

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.

46 耳の正面方向の N1, N2 および P1 周波数の分布を Fig. 4 に示す. N1 周波数は 5.5 -

9.5 kHz(0.79 oct.), N2 周波数は 7.5 - 12.0 kHz(0.68 oct.)の範囲に分布した. P1 周波数は 3.5 - 4.5 kHz(0.36 oct.)の範囲に分布し, N1, N2 周波数に比べて個人差が小さい.

### 3 正面方向の N1, N2, P1 周波数の推定

受聴者の正面方向の N1, N2 および P1 周波数を目的変数, 耳介形状データを説明変数とした重回帰分析(式 2)を行った. なお, 変数間での多重共線性はみられなかった.

$$f(S, \beta)_{N1|N2|P1} = a_1x_1 + a_2x_2 + \dots + a_nx_n + b [\text{Hz}] \quad (2)$$

ここで,  $S$  は被験者,  $\beta$  は上昇角,  $a_i$  は回帰係数,  $x_i$  は耳介形状データ,  $b$  は定数である.

ここでは, 以下の 2 つの回帰モデルによって N1, N2, P1 周波数の推定精度を検証した.

- A. 説明変数に 2 章で求めたすべての耳介形状データ( $x_1 - x_{10}, x_a$ )を用いた場合
- B. 回帰モデル A の説明変数のうち, 耳介の写真から求めることができない耳甲介腔の深さ( $x_{10}$ )を除いた場合

求めた統計値, および各回帰モデルの回帰係数  $a_i$  を Table 2, 3 に示す. 上昇角知覚に対する N1, N2 周波数の正確な弁別閾は現在検討中であるが, 凡そ 0.10 - 0.20 oct. の範囲内にあると考えられる[8]. そこで, 0.15 oct. を目安とし, 残差の絶対値が 0.15 oct. 以内となる耳の割合についても算出した. また, Fig. 5 に実測値と推定値の対応関係を示す.

N1 周波数では, 回帰モデル A, B の実測値と予測値の間の重相関係数は, それぞれ 0.78, 0.74 であり, いずれも強い相関がみられた. 残差の絶対値の平均値は, 回帰モデル A, B それぞれ 389, 409 Hz であった. 残差の絶対値が 0.15 oct. 以内となる耳の割合は, モデル A, B いずれも 87 % であった.

N2 周波数では, 回帰モデル A, B の実測値と予測値の間の重相関係数は, それぞれ 0.82, 0.81 であり, いずれも強い相関がみられた. 残差の絶対値の平均値は, 回帰モデル A, B それぞれ 449, 458 Hz であった. 残差の絶対値が 0.15 oct. 以内となる耳の割合は, モデル A, B いずれも 96 % であった.

P1 周波数については, 回帰モデル B の危険率  $p$  が非常に高いことから, 変数減増法[9]

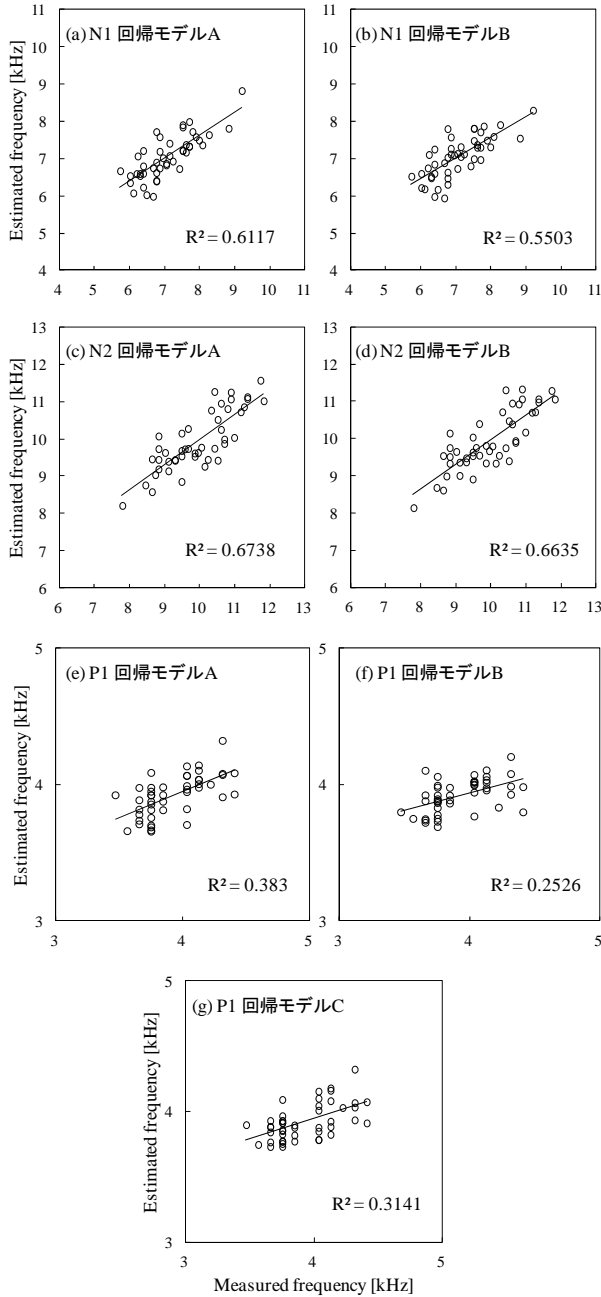


Fig. 5 Relation between the measured and estimated N1, N2, and P1 frequencies.

Table 3 Regression coefficients

|          | N1      |         | N2      |         | P1     |        |        |
|----------|---------|---------|---------|---------|--------|--------|--------|
|          | A       | B       | A       | B       | A      | B      | C      |
| $a_1$    | -10.15  | -21.57  | -59.76  | -65.77  | -5.83  | -11.21 | -      |
| $a_2$    | 173.42  | 179.32  | 25.69   | 28.80   | -55.75 | -52.97 | -39.51 |
| $a_3$    | -188.44 | -166.42 | -107.49 | -95.90  | 14.71  | 25.09  | -      |
| $a_4$    | -23.62  | -4.42   | 72.22   | 82.32   | 13.63  | 22.68  | -      |
| $a_5$    | 53.56   | 53.58   | 69.86   | 69.87   | 3.94   | 3.95   | -      |
| $a_6$    | -240.26 | -321.36 | -227.46 | -270.14 | 21.55  | -16.70 | 66.31  |
| $a_7$    | -148.75 | -176.97 | 93.11   | 78.26   | -40.51 | -53.82 | -      |
| $a_8$    | -213.35 | -251.41 | -118.06 | -138.09 | -58.51 | -76.46 | -      |
| $a_9$    | 32.11   | 80.73   | -154.18 | -128.60 | 27.52  | 50.45  | -      |
| $a_{10}$ | -131.26 | -       | -69.07  | -       | -61.91 | -      | -59.27 |
| $a_{11}$ | -31.55  | -28.43  | -19.87  | -18.23  | 0.84   | 2.31   | -      |
| b        | 13890   | 11953   | 20871   | 19852   | 4908   | 3994   | 4079   |

Table 2 Statistics of regression models

| 回帰モデル | 相関係数                  | 危険率 $p$ | 残差の絶対値の平均 |        | 残差が0.15 oct.未満の割合[%] |    |
|-------|-----------------------|---------|-----------|--------|----------------------|----|
|       |                       |         | [Hz]      | [oct.] |                      |    |
| N1    | A: 全変数                | 0.78    | 0.0002    | 389    | 0.080                | 87 |
|       | B: $x_{10}$ を除く       | 0.74    | 0.0006    | 409    | 0.084                | 87 |
| N2    | A: 全変数                | 0.82    | 0.0000    | 449    | 0.066                | 96 |
|       | B: $x_{10}$ を除く       | 0.81    | 0.0000    | 458    | 0.067                | 96 |
| P1    | A: 全変数                | 0.62    | 0.0719    | 148    | 0.054                | 96 |
|       | B: $x_{10}$ を除く       | 0.50    | 0.3349    | 156    | 0.057                | 96 |
|       | C: $x_2, x_6, x_{10}$ | 0.56    | 0.0011    | 160    | 0.059                | 96 |

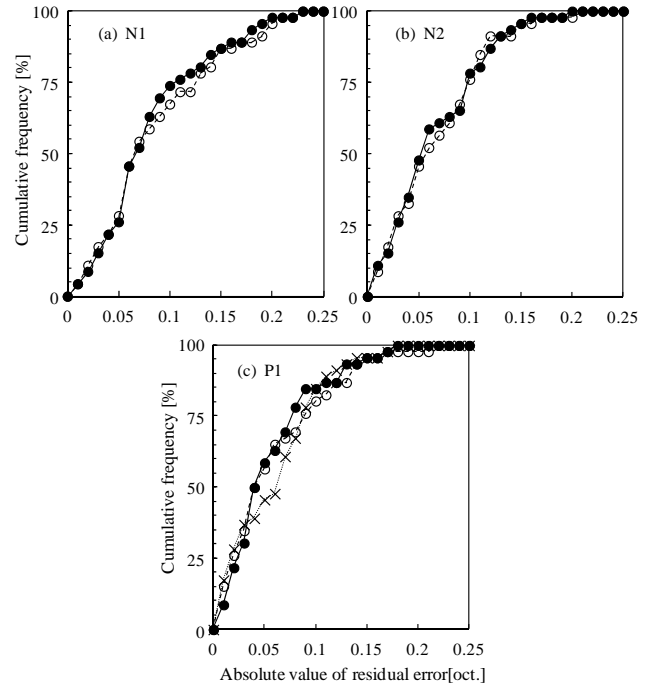


Fig. 6 Cumulative frequency of absolute residual error.

●: regression model A, ○: B, ×: C

によって F 値が 2.0 以上となる説明変数を求めた。この結果および P1 が耳甲介腔の共鳴現象によって生成されること[10]に基づき、耳甲介腔の幅、長さ、および深さ( $x_2, x_6, x_{10}$ )だけを用いた場合(以降回帰モデル C と表記する)についても分析を行った。回帰モデル A, B, C の実測値と予測値の間の重相関係数は、それぞれ 0.62, 0.50, 0.56 であった。残差の絶対値の平均値は、回帰モデル A, B, C それぞれ、148, 156, 160Hz であった。残差の絶対値が 0.15 oct.以内となる耳の割合は、いずれの回帰モデルにおいても 96%であった。

次に、残差の絶対値の累積度数曲線を求めた。N1 周波数(Fig.6(a))では、回帰モデル A, B の累積度数曲線はほぼ等しく、累積度数が 75%となる残差の絶対値は約 0.13 oct.であった。また、約 0.20 oct.で累積度数はほぼ 100%となった。

N2 周波数(Fig. 6(b))では、回帰モデル A, B

の累積度数曲線はほぼ等しく，累積度数が75%となる残差の絶対値は約0.10 oct.であった．また，0.15 oct.で累積度数はほぼ100%となり，N1周波数よりも推定精度が高い．

P1周波数(Fig. 6(c))では，回帰モデルA, B, Cの累積度数曲線はほぼ等しく，累積度数が75%となる残差の絶対値は約0.08oct.であった．また，0.15oct.でほぼ100%となった．

#### 4 受聴者に適合する正面方向 HRTF

以下に示す手順によって受聴者に適合する正面方向のHRTFを選出する．

手順1：まず，3章で述べた方法で，受聴者の耳の写真で得た耳介形状データから正面方向のN1, N2およびP1周波数を推定する．

手順2：推定した受聴者のN1, N2, P1周波数と，データベース内の各HRTFのN1, N2, P1周波数のNotch Frequency Distance[8]が弁別閾内かつ最小となるHRTFを選出する．

#### 5 任意の3次元方向の音像制御への展開

選出した正面方向のHRTFから，正中面および任意の3次元方向の音像制御に展開する．

##### 5.1 正中面への展開

以下のいずれかの方法で正中面内HRTFを求める．

方法1：正面方向で選出したHRTFと同一被験者の正中面内HRTFを用いる．

方法2：Fig.7に示す回帰曲線を用いて，正面のN1, N2周波数( $b_{N1}$ ,  $b_{N2}$ )から，正中面内の任意の上昇角( $\beta$ )のN1, N2周波数を求め，上昇角ごとにNFDが最小となるHRTFを選出する．なお，この回帰曲線と全体の80%以上の被験者のN1, N2周波数には0.8以上の強い相関があることが報告されている[5]．

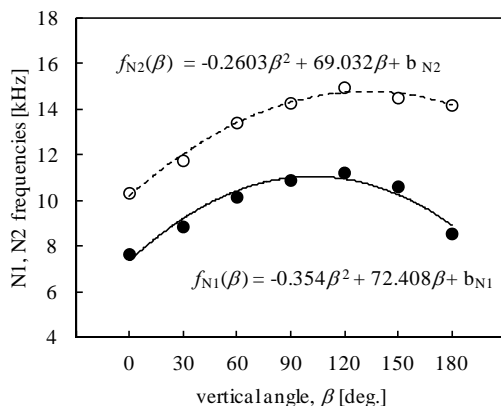


Fig. 7 Relation between vertical angle,  $\beta$ , in the median plane and average frequencies of N1 and N2 among 156 ears. [5]

#### 5.2 任意の3次元方向への展開

5.1節で求めた受聴者に適合する正中面内のHRTFに側方角に対応する両耳間時間差を与えることにより，任意の3次元方向に音像を制御できる[11]．

#### 6 結論

本研究では，正面方向のN1, N2, P1周波数を目的変数，耳介の形状データを説明変数とした重回帰分析を行った．その結果，以下のことを示した．

- 46耳による重相関分析の結果，N1, N2周波数の実測値と予測値の間の重相関係数は，それぞれ0.78, 0.82と強い相関関係となった．P1周波数については，0.62であった．
- 残差の絶対値が0.15oct.以内となる確率は，N1では87%，N2では96%，P1では96%であった．

以上より，耳介の写真から得られる形状データによって，正面方向のN1, N2, P1周波数を実用的な水準の精度で予測できる．

#### 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．

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] R. Sottek and K. Genuit, Proc. DAGA, 1999
- [3] 飯田，森本，“空間音響学”，コロナ社
- [4] K. Iida *et al.*, Applied Acoustics, vol.68, pp. 835-850, 2007.
- [5] 石井，飯田，音講論(秋)，pp. 463-466, 2012
- [6] H. Takemoto *et al.*, JASA, 132, pp. 3832 - 3841, 2012.
- [7] 飯田他，音講論(秋)，pp. 473-476, 2010.
- [8] K. Iida and Y. Ishii, Proc. inter-noise 2011, 2011.
- [9] 久米，飯塚，“回帰分析”，岩波書店，1987
- [10] E. A. G. Shaw and R. Teranishi, JASA, 44, pp. 240-249, 1968.
- [11] M. Morimoto *et al.*, AST, pp. 267-275, 2003