

仰角知覚のスペクトラルキューの形成における 初期頭部インパルス応答の寄与*

☆蒲生直和, 石井要次 (千葉工大・工研), 飯田一博 (千葉工大・工)

1 はじめに

ヒトは、頭部伝達関数の振幅スペクトルで音の仰角方向を知覚している。Iida *et al.*[1]は頭部伝達関数の振幅スペクトルにおけるピークやノッチの一部または、全部を再構成したパラメトリック頭部伝達関数を用いた音像定位実験から、第1・2ノッチ ($N1 \cdot N2$) がスペクトラルキューであると報告した。竹本ら[2]は FDTD 法を用いて頭部伝達関数と耳介のみの伝達関数を計算した。その結果、頭部伝達関数の $N1 \cdot N2$ が耳介のみの伝達関数でも出現することを報告した。飯田ら[3]は、様々な窓長の時間窓 (4 項の Blackman-Harris) を用いて、頭部インパルス応答の初期部分を切り出し、その振幅スペクトルを観察した。その結果 1-2 ms 以内の応答で $N1 \cdot N2$ が形成されることを報告した。

しかし、このような時間窓では、窓の中心から端にかけて、振幅が元の大きさより小さくなるため、1-2 ms 以内のどこまでの部分が $N1 \cdot N2$ の形成に寄与しているかを厳密に検討することは難しい。

そこで本報では、ゼロクロスサンプルで切り出す矩形窓を用いて、1-2 ms 以内のどこまでの部分が $N1 \cdot N2$ の形成に寄与しているかを詳細に分析した。

2 矩形窓を用いた初期頭部インパルス応答の分析

2.1 分析アルゴリズム

本研究では、被験者 4 名 (IST, ISY, IT, ID) の両耳の正面方向の頭部インパルス応答を対象として分析した。頭部インパルス応答のサンプリング周波数は 48kHz, サンプル長は 512 である。

振幅スペクトルの算出アルゴリズムを以下に示す。

手順 1) 頭部インパルス応答の振幅の絶対値の最大値を検出する。

手順 2) 始点が第 1 サンプル, 終点が 1) で求めた最大値をとるサンプルから N サンプルである矩形窓で頭部インパルス応答を切り出す。ただし, N は振幅がゼロクロスするサンプルとする (Fig.1)。

手順 3) すべての値を 0 とした 512 サンプルの時系列データに 2) で切り出した頭部インパルス応答を上書きする。

手順 4) このようにして切り出した頭部インパルス応答をフーリエ変換して振幅スペクトルを観察する。

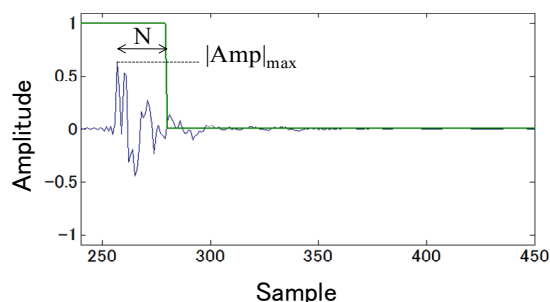


Fig. 1 Head-related impulse response and rectangular window function

2.2 分析結果

上記のアルゴリズムで分析した結果、被験者間で同様の振幅スペクトルの変動が観察された。その例として、被験者 IST の左耳の振幅スペクトルを Fig.2 に示す。赤の実線は N サンプルで切り出した頭部インパルス応答の振幅スペクトル, 青の点線は元の頭部インパルス応答の振幅スペクトルである。

$N=5$ ではノッチが 1 つ出現するが、この時点では、その周波数は $N1$ でも $N2$ でもない。 $N=11$ では $N1$ が出現するが、 $N2$ は出現していない。 $N=16$ では $N1$ および $N2$ が出現する。しかし $N2$ は浅い。 $N=23$ では $N1$, $N2$, および $N3$ が出現する。 $N2$ は深いノッチに成長している。

Fig.3 にもとの頭部インパルス応答と一致

* Contribution of early part of head-related impulse response in forming spectral cue of vertical localization, by GAMOH, Naokazu, ISHII, Yohji, IIDA, Kazuhiro (Chiba Institute of Technology).

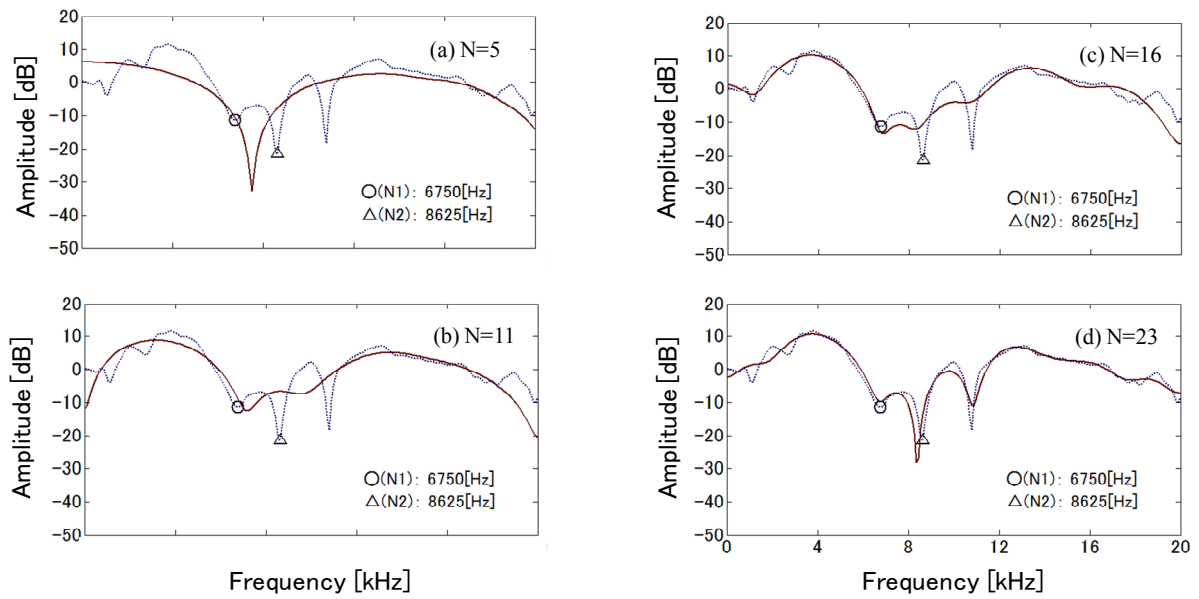


Fig. 2 Amplitude spectrum of head-related impulse response for front direction of subject IST at the left ear. Red solid line: various N (see Fig.1), blue dotted line: N=256.

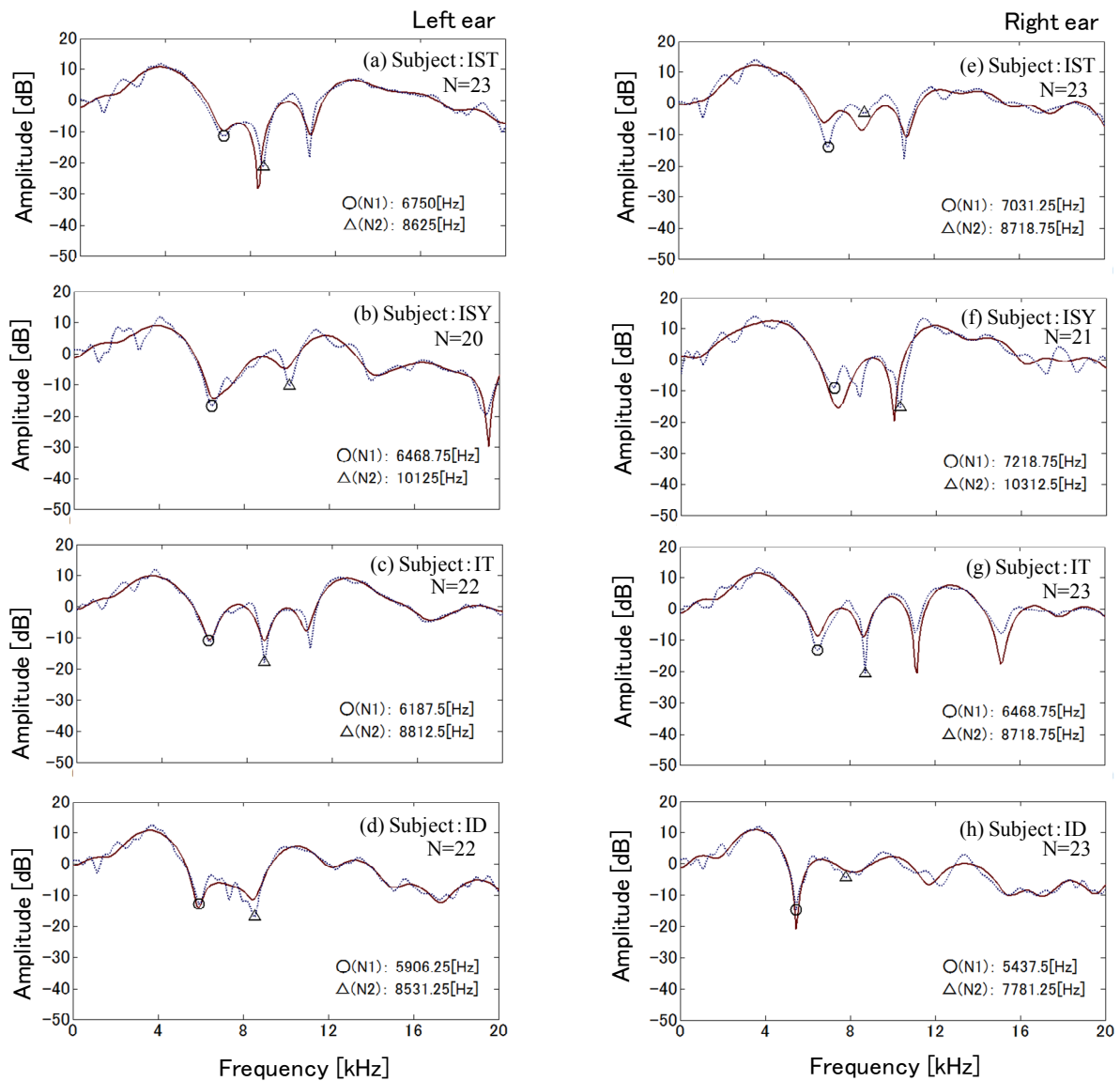


Fig. 3 Amplitude spectrum of head-related impulse response for front direction of four subjects. Red solid line: N=20 - 23 (approximately 0.5ms), blue dotted line: N=256.

する $N1 \cdot N2$ が出現する最小の N と、その振幅スペクトルを示す。いずれの被験者も $N=20 \sim 23$ で $N1 \cdot N2$ が出現している。

以上の結果から、約 0.5 ms ($N=24$) までの頭部インパルス応答が正面方向の $N1 \cdot N2$ の形成に寄与していると考えられる。

3 考察

3.1 初期頭部インパルスの応答の特徴的な応答パターンの観察

$N=20 \sim 23$ の正面方向の頭部インパルス応答の波形を観察した (Fig.4)。赤の実線は $N1 \cdot N2$ が出現した $N=20 \sim 23$ で切り出した応答、青の点線は元の頭部インパルス応答である。応答の形状に着目すると、連続した山(P)と連続した谷(V)があり、PPVVPPVV と連なる特

徴的な応答パターンが観察される。

ここで、この応答パターンをより詳細に観察するため、サンプリング周波数 96 kHz の頭部インパルス応答を測定した。Fig.5 に測定結果を示す。橙の実線と青の点線は、それぞれサンプリング周波数 96 kHz および 48 kHz の頭部インパルス応答である。 96 kHz の場合でも同様の応答パターンが確認できる。

なお、頭部インパルス応答は、Eq.1 で求めているが、この特徴的な応答パターンは $g_{lr}(t)$ で観察され、測定系のインパルス応答 $f(t)$ は単純なパルス波形であった。

以上より、正面方向の $N1 \cdot N2$ は初期 0.5 ms の PPVVPPVV という応答パターンにより形成されていると考えられる。

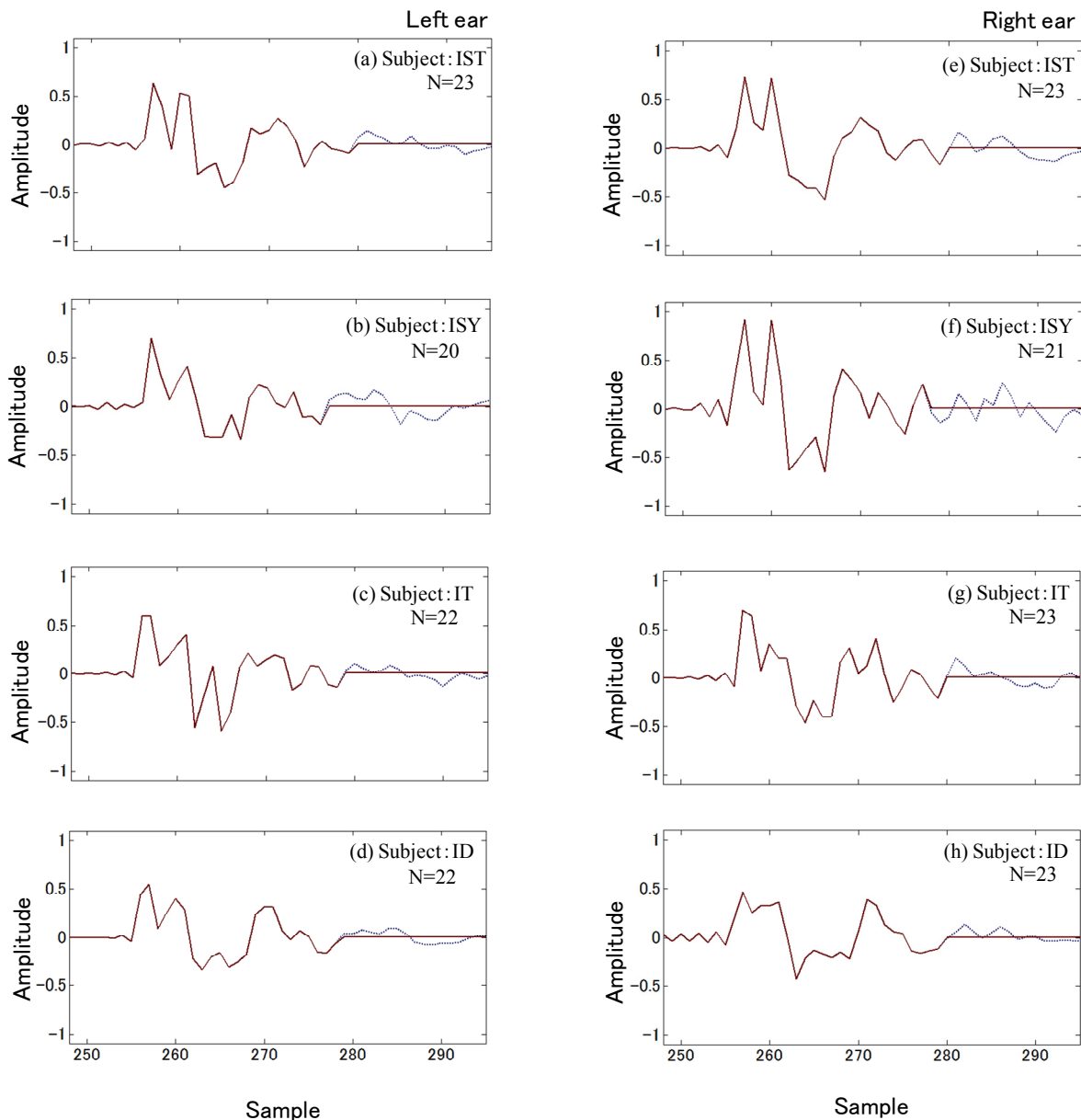


Fig. 4 Head-related impulse response for front direction. Red solid line: extracted response by rectangular window function with length N of 20-23, blue dotted line: original one.

$$hrir_{lr}(t) = F^{-1}\{G_{lr}(\omega) / F(\omega)\} \quad (1)$$

ここで、

$G_{lr}(\omega)$: 音源から外耳道入口までのインパルス応答 $g_{lr}(t)$ のフーリエ変換.

$F(\omega)$: 受聴者がいない状態での音源から受聴者の頭部中心に相当する位置までのインパルス応答 $f(t)$ のフーリエ変換.

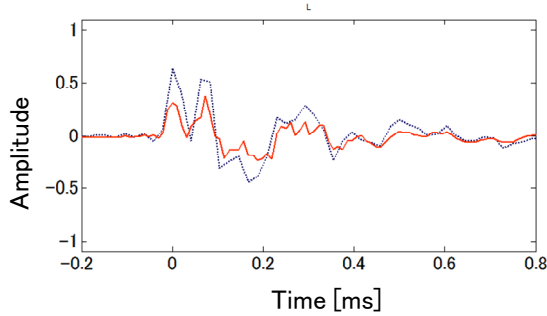


Fig.5 Head-related impulse response for front direction of subject IST at the left ear with sampling frequency of 96 kHz (orange solid line) and that of 48 kHz (blue dotted line).

3.2 N1・N2の形成メカニズムに関する考察

PPVVPPVV という特徴的な応答パターンと N1・N2 の形成メカニズムの関係について考察した.

Raykar *et al.*[4]は、外耳道入口に直接到達する音波と耳甲介腔の壁で反射して到達する音波との単純な干渉からスペクトラルノッチが生じると考え、Eq.2 でノッチ周波数を予測できるとしている.

$$f_n(\varphi) = \frac{(2n+1)}{2t_d(\varphi)}, \quad n=0,1,\dots \quad (2)$$

ここで、 f_n はノッチ周波数[Hz], t_d は直接波と反射波の時間差[s], φ は直接波の入射角, n はノッチの番号である.

いま、PPVVPPVV の初めの P を直接波で生じた応答、次の P を反射波で生じた応答とみなして、Eq.2 から f_0, f_1 を算出した. f_0, f_1 はそれぞれ N1, N2 周波数に対応する. Table 1 に 4 名の左耳での f_0, f_1 の計算結果と N1, N2 周波数を示す. IT の N1 を除き、 f_0, f_1 と N1, N2 周波数は一致していない. したがって、直接波と反射波の単純な干渉モデルで N1・N2 の形成を説明できるとは言えない.

Table 1 Calculated f_0, f_1 frequency and measured N1, N2 frequency.

Subject	IST	ISY	IT	ID
t_d [ms]	0.0625	0.0833	0.0833	0.0625
f_0 [Hz]	8000	6000	6000	8000
f_1 [Hz]	24000	18000	18000	24000
N1[Hz]	6750	6468.75	6187.5	5906.25
N2[Hz]	8625	10125	8812.5	8531.25

一方、竹本ら[2]は、FDTD 法による数値計算で upper cavities(耳甲介舟、舟状窩、三角窩)における共鳴がノッチ生成の主要因であると報告している. さらに、ガウスパルス応答の解析で直接波から 0.2ms 程度遅れて到達する upper cavities からの反射波がノッチ形成に寄与している[5]. この反射波は遅れ時間から考えると、PPVVPPVV の 3,4 個めの P に相当する.

4 おわりに

矩形窓を用いて正面方向の頭部インパルス応答の 1-2 ms 以内のどこまでの部分が N1・N2 の形成に寄与しているかを分析した. その結果、以下のことを示した.

- 1) 頭部インパルス応答の 0.5 ms までの応答が N1・N2 の形成に寄与する.
- 2) 0.5 ms までの応答に連続した山(P)と連続した谷(V)があり、PPVVPPVV と連なる特徴的な応答パターンが観察される.
- 3) 外耳道入口に到達する直接波と反射波の単純な干渉モデルで N1・N2 の形成を説明することはできない.

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.

参考文献

- [1] Iida *et al.*, Applied Acoustics, 68, 835-850, 2007.
- [2] 竹本他, 音講論 (秋), 523-526, 2009.
- [3] 飯田他, 音講論 (秋), 473-476, 2010.
- [4] Raykar *et al.*, JASA, 118, 364-374, 2005.
- [5] 竹本他, 音講論 (春), 2-6-2, 2011.