

## 頭部伝達関数の第1・第2ノッチの検出方法に関する一考察\*

○飯田一博（千葉工大・工），蒲生直和，石井要次（千葉工大院・工学研）

### 1 はじめに

ヒトは，頭部伝達関数に含まれる両耳間差および第1・第2ノッチ（N1・N2）[1]を手がかりとして左右方向および前後・上下方向を知覚している．したがって，頭部伝達関数から，これらの手がかりを抽出あるいは算出し，それを適切に処理すれば，3次元方向の音像制御が可能となる．しかし，受聴者や音源方向によっては，N1・N2が明確ではない場合もあり，容易かつ確実にN1・N2を検出する方法が必要となっていた．

頭部伝達関数は，一般に耳介，頭部，胴体の影響を受けるが，N1・N2は耳介の影響を強く受けて形成されることが知られている．飯田ら[2]は，耳介の各部位を粘土で埋めて，正中面内での頭部伝達関数の測定および音像定位実験を行い，conchaを埋めることでN1・N2が消失し，また音像定位精度も有意に劣化することを示した．竹本ら[3]は，頭部形状をfMRIでデジタル化してFDTDによる数値計算を行い，N1・N2は耳介部分だけで形成されることを報告している．

これらの知見により，N1・N2は外耳道入口で測定した頭部インパルス応答の初期部分に含まれていると考えられる．そこで，本報では切り出し時間窓長を変化させて頭部インパルス応答の一部を抽出し，N1・N2の出現過程を観察した．

### 2 頭部インパルス応答の時系列分析アルゴリズム

具体的な振幅スペクトルの算出アルゴリズムとその概念図（Fig. 1）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）その最大値に窓関数の中心を合わせ，窓長 $2N$ を4から512まで増加させながら頭部インパルス応答を切り出す．

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．ただし，時間窓の中心は常に257サンプル目となるようにする．

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．

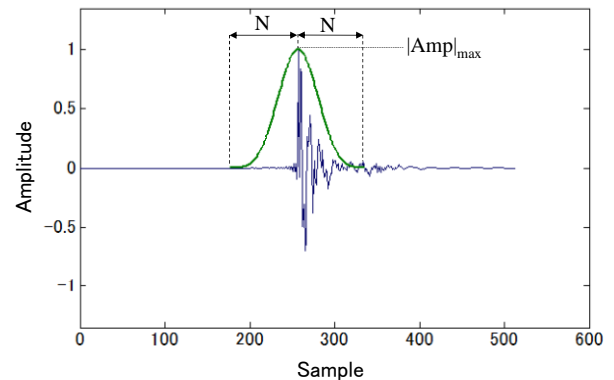


Fig. 1 Head-related impulse response and time window function.

### 3 N1・N2の検出シミュレーション

#### 3.1 頭部インパルス応答の分析区間と振幅スペクトルの関係

上記アルゴリズムで求めた振幅スペクトルの一例として，被験者ISTの正面方向の頭部インパルス応答（左耳）を分析した結果をFig. 2に示す．サンプリング周波数は48kHzである．時間窓は4項のBlackman-Harrisを用いた．図中，青の点線は従来われわれが一般的に頭部インパルス応答として切り出していた $N=256$ （ $2N=512$ ）の振幅スペクトルである．

$N=6$ では振幅スペクトルは比較的平坦である． $N=12$ では，ノッチが1つ出現している．ただし，この時点では，その周波数はN1でもN2でもない． $N=24$ （0.5ms）では深いノッチに成長し，周波数もほぼN1のそれとなっている． $N=48$ （1ms）ではN1，N2，N3が現れている． $N=256$ のグラフと比較すると，微細なスペクトル変動がほとんどなく，N1，N2，N3が非常に明確である．これは，この時間窓長の場合には，頭部や胴体からの応答が届く前，

\* A consideration on a method to detect the 1st and 2nd spectral notches in the head-related transfer functions, by Kazuhiro IIDA, Naokazu, GAMOH, and Yohji ISHII (Chiba Institute of Technology).

すなわち、耳介の応答だけを観察しているためであると考えられる。さらに、 $N=96$  (2ms),

$N=192$  (4ms) では、そのスペクトルは  $N=256$  とほぼ一致する。

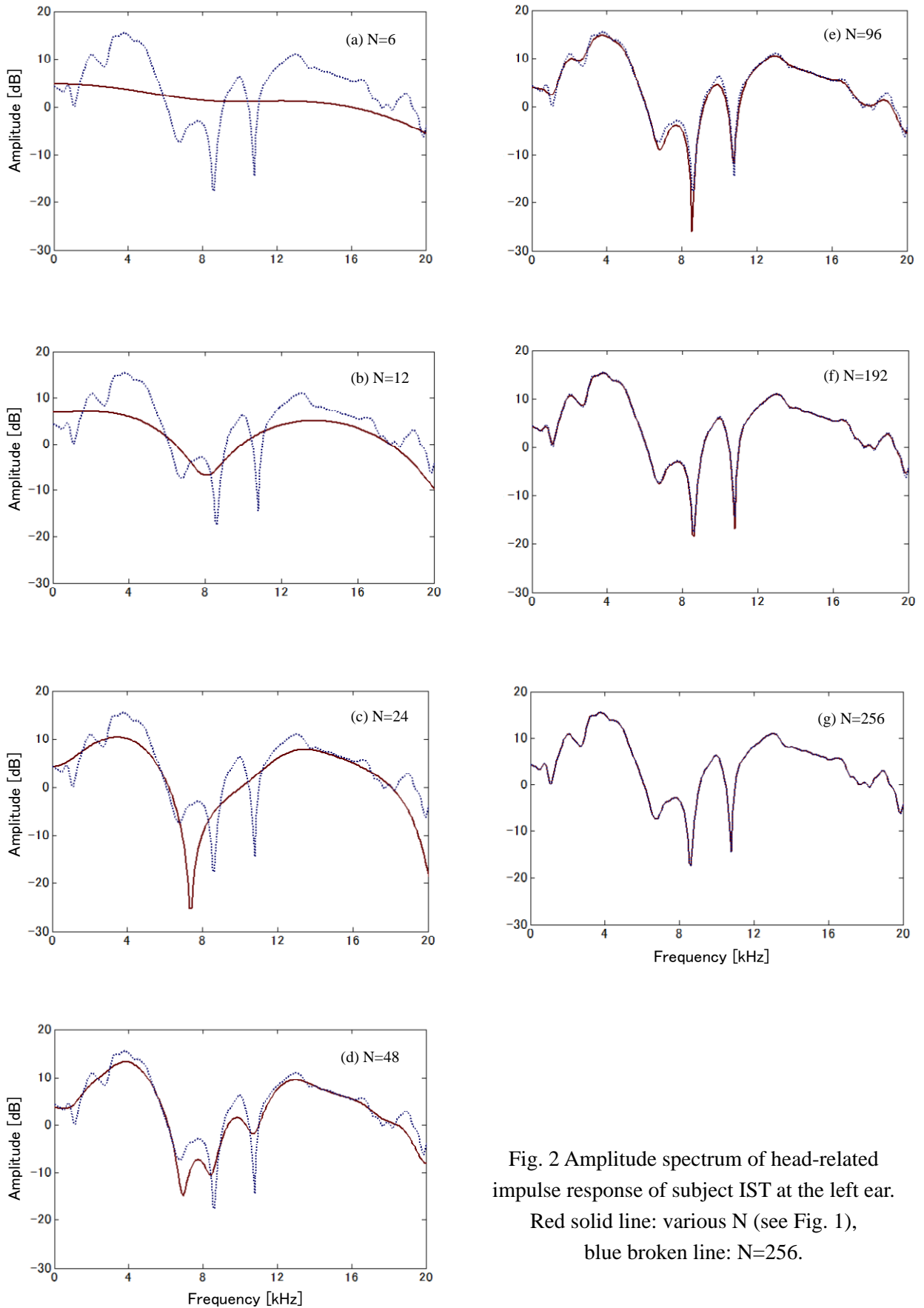


Fig. 2 Amplitude spectrum of head-related impulse response of subject IST at the left ear.  
 Red solid line: various N (see Fig. 1),  
 blue broken line:  $N=256$ .

### 3.2 頭部インパルス応答の分析区間とノッチの深さの関係

次に、正面方向の頭部伝達関数の N1・N2 の振幅を分析時間長 N の関数として求めた。Fig. 3 に 4 人の被験者の分析結果を示す。N1 (a) については、多少の個人差はあるが N=48 (1ms) 付近で最も深くなり、N=96 (2ms) 程度で収束している。

一方、N2 (b) については、被験者 ID は N=34 で最も深くなるが、その他の 3 人の被験者は N の増加に伴って徐々に深くなっている。また、この 3 人の被験者は N1 が N2 に先んじて出現しているが、被験者 ID は N2 が先に現れている。このような個人差は被験者の耳介形状の違いに依るものと考えられるが、その詳細は今後の検討課題である。

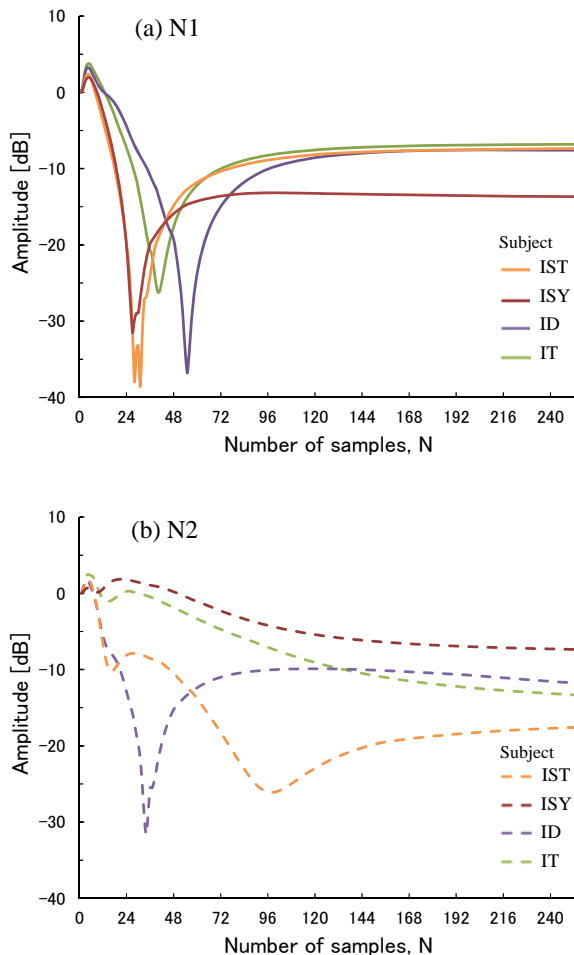


Fig. 3 Amplitude of N1 and N2 as a function of the length of the time window, N.

### 3.3 正中面内の頭部インパルス応答の分析

Fig. 4 に被験者 IST の上半球正中面 7 方向 (0 - 180°, 30°間隔) の頭部伝達関数を示す。赤の実線は N=48 (1ms) で頭部インパルス応答を切り出した場合、青の点線は従来通り N=256 で切り出した場合のスペクトルである。この図より、N=48 で分析すると正面方向のみならず、他の方向においても微細な変動が現れず、N1・N2 を明確に検出できることがわかる。

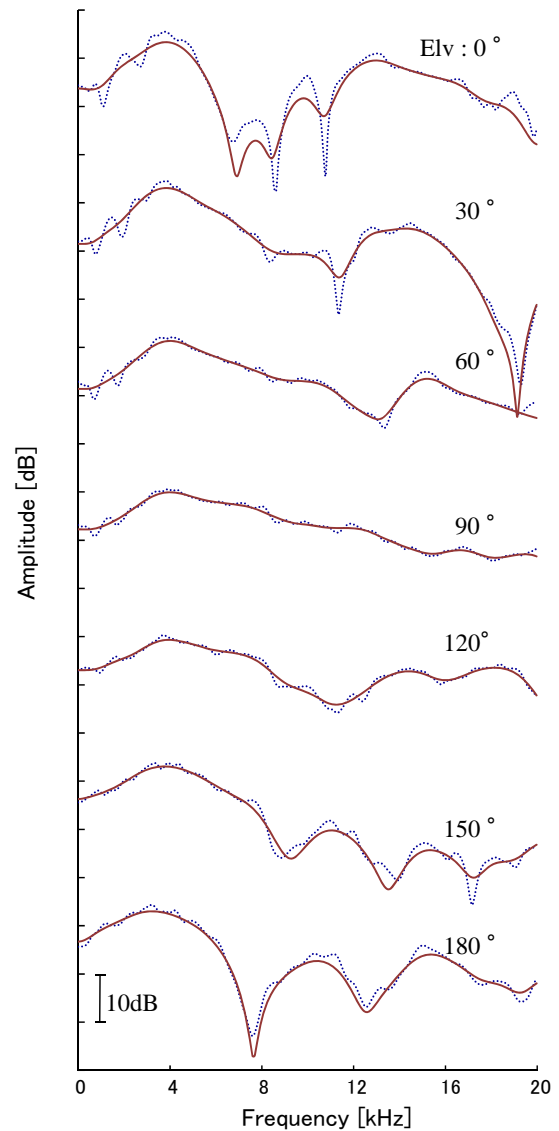


Fig. 4 Amplitude spectrum of head-related impulse response of subject IST at the left ear. Red solid line: N=48, blue broken line: N=256.

#### 4 本検出方法の適用例

従来法ではノッチの判別が難しかった頭部インパルス応答を取り上げて、本方法による N1・N2 の検出を試みた。ここでは、Fig. 2 および 4 で示した被験者 IST の反対側の耳、つまり右耳における正面方向の頭部インパルス応答を例に説明する。Fig. 5 (a) はその頭部インパルス応答と N=48 の時間窓であり、(b) は切り出した頭部インパルス応答である。(c)

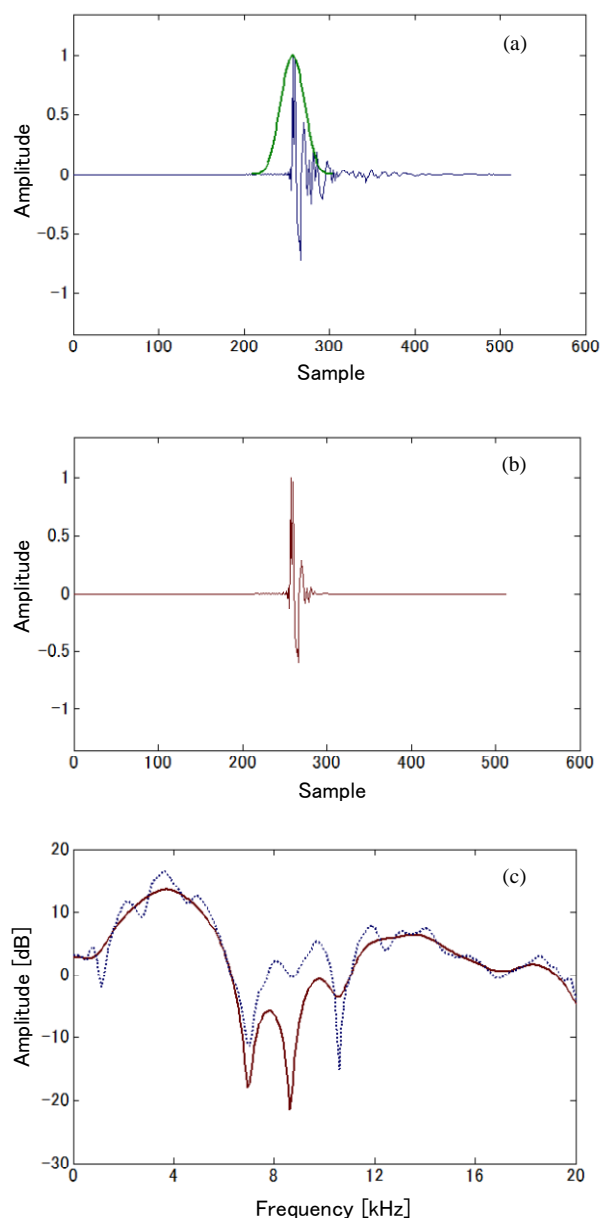


Fig. 5 An example of detection of N1 and N2. (a): head-related impulse response of subject IST at the right ear for the front direction, (b): extracted one by the time window (N=48), and (c): amplitude spectrum of head-related impulse response for N of 48 (red solid line) and that for N of 256 (blue broken line).

は N=48 で求めた振幅スペクトル (赤の実線) と従来法 (N=256) による振幅スペクトル (青の点線) を示す。

従来法では、9kHz 付近の浅いノッチを N2 とみなすべきかどうかの判断が難しいが、本検出法によれば、このノッチは耳介の影響で生じたものであることがわかる。つまり、浅いノッチではあるが、これは N2 であると判断できる。また、この被験者の左耳では 9kHz 付近に深い N2 が観察されていることから (Fig. 2), この判断は妥当であると考えられる。

#### 5 おわりに

N1・N2 は、耳介の影響を強く受けて形成されることから、外耳道入口で測定した頭部インパルス応答の初期部分に含まれていると考えられる。そこで、本報では切り出し時間窓長を変化させて頭部インパルス応答の一部を抽出し、N1・N2 の出現過程を観察した。

検出シミュレーションの結果、頭部インパルス応答の初期 1ms 程度を切り出して分析することにより、N1・N2 が明確に検出できることを明らかにした。

この時間窓長の妥当性については、さらに検討が必要である。Rayker *et al.*[4]は、頭部インパルス応答から胴体や膝からの反射を除去するために 1ms の時間窓を用いており、これは本研究の結果と一致する。今後、耳介部分のみを用いたインパルス応答 (pinna-related impulse response) の測定や数値計算により耳介のインパルス応答の収束時間を確認したい。

また、誌面では表現できないが、頭部インパルス応答の分析区間 N を 2 から 256 まで順に増加させ、その振幅スペクトルの変化を動画として連続的に観察すると、N1, N2 の発生、成長、収束の過程がさらによく把握できる。これについては、研究発表会において紹介したい。

#### 参考文献

- [1] Iida *et al.*, Applied Acoustics, 68, 835-850, 2007.
- [2] 飯田他, 音講論 (春), 439-440, 1997.
- [3] 竹本他, 音講論 (春), 1445-1448, 2009.
- [4] Rayker *et al.* JASA, 118, 364-374, 2005