

耳介の窪みの寸法と頭部伝達関数の第2ピークの関係 - 直方体の窪みで構成した耳介モデルを用いた検討 - *

☆土屋宏樹 (千葉工大院・工学研), 竹本浩典 (NICT), 飯田一博 (千葉工大・工)

1 はじめに

頭部伝達関数には個人差があり, 精度の高い3次元音像再生を行うためには, 受聴者に適合したものを提供する必要がある。

頭部伝達関数に含まれる情報のうち, 前後・上下方向の知覚においては, 振幅スペクトルの第1, 第2ノッチ(N1, N2)が手がかりであることが知られている[1]。また, N1, N2は耳介の影響を強く受けて形成されることが報告されている[2]。

しかし, ヒトの耳介形状は非常に複雑であるため, N1, N2との定量的な関係を明らかにすることは難しい。そこで, 著者らはこれまで直方体の窪みで耳介をモデル化する方法を検討してきた[3, 4]。

竹本ら[5]は, 時間領域差分法(FDTD法)を用いて頭部伝達関数のピーク・ノッチの成因の分析を行い, 第2ピーク(P2)は耳介の窪みの長軸方向の共鳴により発生しており, N1と密接に関連していることを示した。しかし, P2と耳介形状の定量的な関係に関しては, まだ十分に検討されていない。

本報では, 直方体の窪みで構成した耳介モデルの伝達関数の測定および数値計算を用いた分析より, 耳介の窪みの寸法とP2周波数の関係について検討した。

2 閉管内の固有振動とP2周波数の関係

Fig. 1は, P2周波数で耳介を励振したときの瞬時音圧分布である[5]。音圧が正で絶対値の大きい部分を赤, 音圧が負で絶対値の大きい部分を青, 音圧の絶対値が小さい部分を緑で示す。図を見ると分かるように, P2生成時には, 窪みの上下に位相が逆の音圧の腹が生成される。Fig. 2は, 両端が閉じた管(閉管)内の固有振動の1次モードである。両者を比

較すると, 耳介の窪みは閉管とは言えないが, 逆相の2つの音圧の腹が生成されている点は同様である。このことから, 頭部伝達関数のP2周波数を閉管内の固有振動の1次モードの式(1)より推定できる可能性が考えられる。ここでは, 式(1)より被験者のP2周波数に対応する寸法を算出し, それを窪みの長さ(Fig. 3, l_y)とした耳介モデルの検討より, P2周波数が閉管内の固有振動で説明できるのかについて検討した。

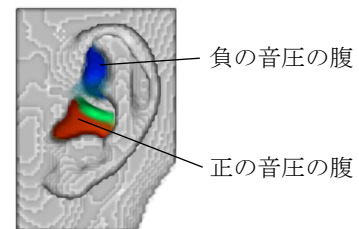


Fig. 1 P2生成時の瞬時音圧分布[5]

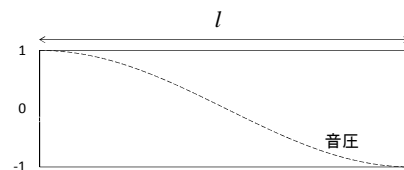


Fig. 2 閉管内の固有振動(1次モード)

$$f_m = \frac{c}{2 \cdot l} \quad [\text{Hz}] \quad (1)$$

ここで, f_m は固有振動数, c は音速, l は管の長さである。

2.1 耳介モデル

被験者Aの実測P2周波数に対応する寸法を式(1)より算出し, Fig. 3に示すモデルAを作成した。被験者AのP2周波数は5950 Hzであり, それに対応する寸法は29 mmである。なお, 音速は340 m/sとして計算した。また, 窪みの幅(Fig. 3, l_x), 深さ(Fig. 3, l_z)などの寸法については, 実耳のものを使用した。

*Relation between length of pinna cavity and frequency of the second peak in head-related transfer function - A study using simple pinna models with a rectangular cavity -, by TSUCHIYA, Hiroki, (Chiba Institute of Technology), TAKEMOTO, Hironori (NICT), and IIDA, Kazuhiro (Chiba Institute of Technology).

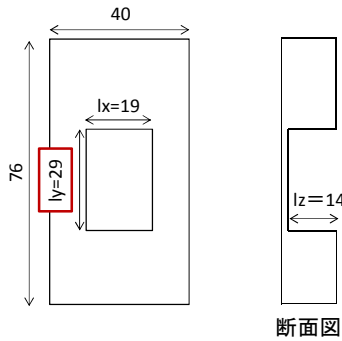


Fig. 3 モデル A (単位は mm)

2.2 伝達関数の計算方法

伝達関数の計算には FDTD 法を用いた。窪みの左端から 4 mm, 下端から 7 mm の位置に音源点を置き, この点から 1.2 m 離れた円周上に 10° 間隔で 36 個の観測点を置いて, 10 ms のガウスパルスを放射し, 音響の相反定理に基づいて伝達関数を計算した。耳介モデルは真上から見て窪みが前方に向くように 5° 傾け, 真横から見て上端が後方に向くように被験者に合わせて 23° 傾けた。

2.3 結果

モデル A の伝達関数を Fig. 4 に示す。モデル A の P2 は, 7400 Hz に出現していた(赤実線)。被験者 A の P2 周波数(5950 Hz, 赤破線)と比較すると, モデルの P2の方が約 1500 Hz 高い周波数に出現している。したがって, 式(1)から P2 周波数を推定することはできない。なお, P2 周波数と式(1)の計算値の間に差が生じた理由として, 耳介モデルでは, 閉管と違い, 窪みの 1 面が開いているという点が挙げられる。

ただし, モデル A の P2 生成時の瞬時音圧分布(Fig. 5)を見ると, 実耳の場合と同様に, 窪みの上下に位相が逆の音圧の腹が生成されていることが分かる。

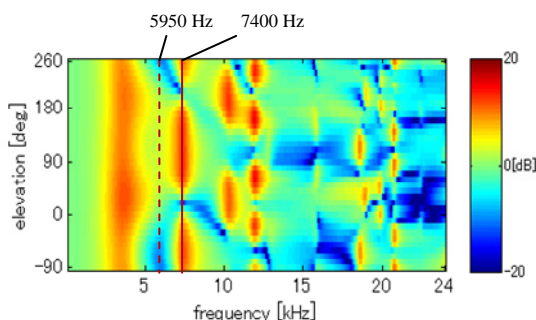


Fig. 4 モデル A の伝達関数
(破線: 被験者 A の P2, 実線: モデル A の P2)



Fig. 5 P2 生成時の瞬時音圧分布
(赤: 正の音圧, 青: 負の音圧)

3 耳介モデルの l_y の寸法と P2 周波数の関係

P2 が窪みの長軸方向の共鳴により発生していることから, 耳介モデルの l_y の寸法は P2 周波数に大きな影響を与えると推測できる。そこで, 耳介モデルの l_x および l_z の寸法を固定し, l_y のみを伸縮させて, l_y の寸法と P2 周波数の関係について検討した。

3.1 耳介モデル

検討した耳介モデルを Fig. 6 に示す。モデルの l_y は, 297 耳の寸法を計測したデータを参考に 20~55 mm とし, 5 mm ステップで計 8 個のモデルを検討した。なお, l_y 以外の寸法は, 297 耳の平均値とした。また, 本研究では, $l_y=20$ mm のモデルを $ly20$ と呼び, それ以外のモデルについても, 同様に呼ぶことにする。

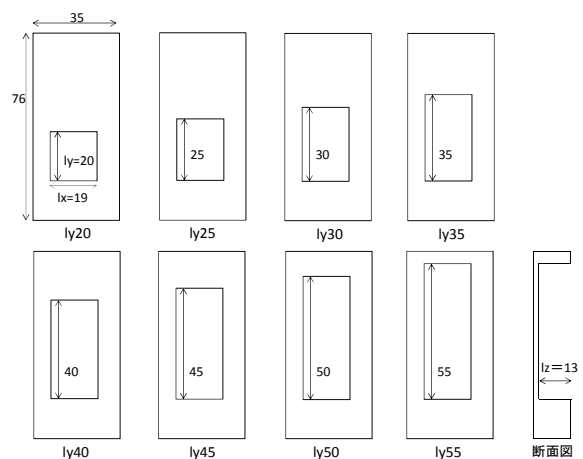


Fig. 6 検討した耳介モデル (単位は mm)

3.2 伝達関数の測定および計算方法

耳介モデルの伝達関数は, 実測と数値計算の 2 通りの方法で求めた。

実測については, シリコンで作成した耳介モデルの伝達関数を無響室で測定した。測定音源には, swept-sine 信号を用いた。音源信

号のサンプリング周波数は 48000 Hz, サンプル長は 2^{18} である. 音源方向は, 観測点を通る矢状面内の仰角 9 方向 ($-60 \sim 180^\circ$, 30° 間隔) である.

計算方法については, 2.2 節と同様である. 耳介モデルの傾きについては, 真上から見た際の傾きは 2.2 節と同様とした. ただし, 真横から見た際の傾きは, より一般的な場合についての検討を行うため 0° とした.

3.3 結果

実測と計算の結果がほぼ同様であったため, ここでは実測の結果を示す. 一例として, モデルの長軸の延長線上である音源方向 90° の伝達関数を Fig. 7 に示す. なお, 各モデルの P2 生成時の瞬時音圧分布を確認したところ, いずれのモデルにおいても, P2 はモデル A と同様の成因により発生していた.

Fig. 7 を見ると, モデルによって P2 周波数が大きく異なっており, その範囲は 5~10 kHz にわたっている. また, l_y の寸法が大きくなるに従って, P2 周波数が低くなっている. ここで, 耳介モデルの P2 と実耳の P2 が同様の成因により発生していることを考慮すれば, 実耳においても, 窪みの長軸方向の寸法が P2 周波数に大きく影響を与えると推測できる.

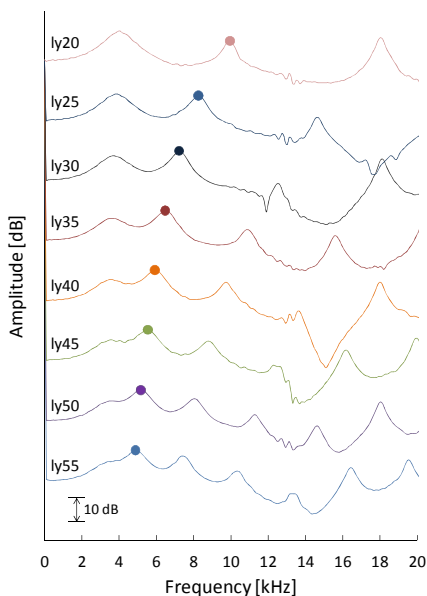


Fig. 7 各モデルの 90° の伝達関数 (● : P2)

3.4 回帰分析

モデルの l_y の寸法と P2 周波数の関係を定量的に分析するため, 目的変数をモデル $l_y20 \sim l_y55$ の P2 周波数, 説明変数を l_y の寸法とした回帰分析を行った.

l_y の寸法と P2 周波数の関係を Fig. 8 に示す. 比較のため, 式(1)の計算値も併せてプロットした(赤破線). P2 と式(1)の計算値を比較すると, 総じて P2(図中▲)の方が約 1500 Hz 高い周波数に出現しているが, 両者の間には対応関係がみられる. そこで, 式(1)の形に合わせ, a/l_y+b となるような a, b を最小二乗法により求めた(式(2)).

$$P2_{freq.} = \frac{157.97}{l_y} + 1981.92 \quad [\text{Hz}] \quad (2)$$

式(2)を青の実線で示す. 決定係数は 0.9995 と高い値となっており, l_x が 19 mm, l_z が 13 mm という条件であれば P2 周波数が精度良く求められると考えられる.

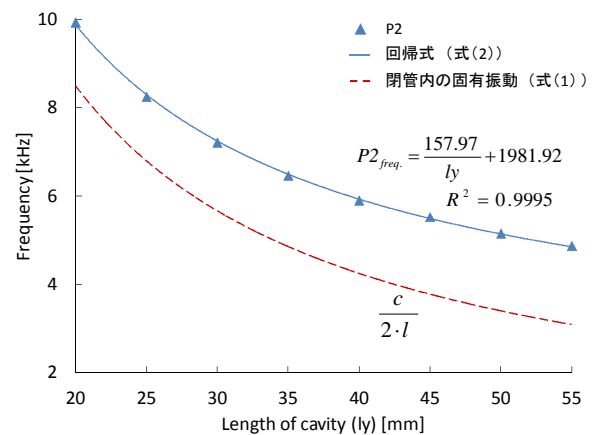


Fig. 8 l_y の寸法と P2 周波数の関係

4 P2 生成に寄与する耳介部位に関する検討

P2 生成に寄与する耳介部位に関する検討を行うため, 式(2)を用いて被験者の実測 P2 周波数に対応する l_y を算出し, それを耳介写真と比較した.

耳甲介の幅が 19 ± 0.5 mm 以内, 深さが 13 ± 2.0 mm 以内の範囲に入る 4 名を被験者(A~D)とした.

被験者 A~D の実測 P2 周波数に対応する l_y を式(2)より算出した. 各被験者の P2 周波数および算出した l_y を Table 1 に示す. 被験者の P2 周波数は, 5950~7969 Hz であり, 算出した l_y は 26.4~39.8 mm であった.

被験者の耳甲介の幅を l_x , 式(2)より算出したものを l_y とした長方形を耳介写真上にプロットした(Fig. 9). なお, 上述の通り, P2 は

窪みの長軸方向の共鳴であり，上下に位相が逆の音圧の腹が現れ，中央が節となる．そこで，長方形の下端を外耳道入口の下端に合わせてプロットした．

被験者 A では，算出した l_y は，外耳道入口の下端から三角窩の上端までの寸法に相当した．それに対し，他の被験者(B~D)では，外耳道入口の下端から耳甲介舟の上端までの寸法に相当した．

各被験者の耳介を比較すると，被験者 A は他の被験者に比べ，耳甲介舟が狭いように見える．そこで，耳甲介舟の l_y 方向の寸法を計測したところ，被験者 A が 2.5 mm，他の被験者は 6.2~8.0 mm であった．耳甲介舟は P2 に影響を与えることが報告されており [6]，これが結果に個人差が見られた要因の 1 つとして考えられる．しかし，その詳細に関しては今後の検討課題である．

5 おわりに

本研究では，直方体の窪みで構成した耳介モデルの分析より，モデルの伝達関数の P2 に関して，以下のことを示した．

- 1) P2 生成時には，実耳の場合と同様に，窪みの上下に位相が逆の音圧の腹が生成される．
- 2) 閉管内の固有振動の計算値よりも高い周波数に出現する．
- 3) 窪みの長さが大きくなるに従って，周波数が低くなる．

2)のような結果となった理由として，耳介モデルでは，閉管と違い，窪みの 1 面が開いているという点が挙げられる．

次に，P2 生成に寄与する耳介部位に関する検討を行うため，回帰式(目的変数：モデルの P2 周波数，説明変数：モデルの窪みの長さ)より被験者の実測 P2 周波数に対応する直方体の窪みの寸法を算出し，耳介写真との比較を行った．その結果，以下のことを示した．

- 4) P2 周波数に対応する直方体の窪みの寸法は，外耳道入口の下端から耳甲介舟の上端もしくは三角窩の上端までの寸法に相当する．

Table 1 被験者の実測 P2 周波数および式(2)より算出した l_y

被験者	実測P2周波数 [Hz]	算出した l_y [mm]
A	5950	39.8
B	7688	27.7
C	7969	26.4
D	7313	29.6

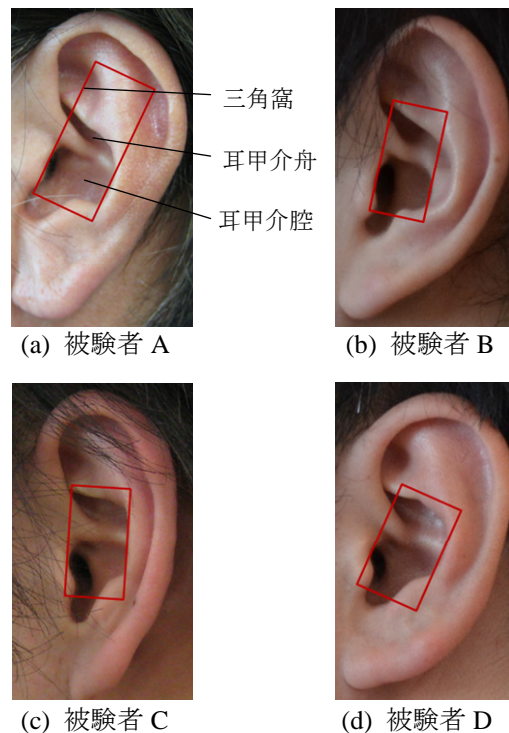


Fig. 9 式(2)より算出した l_y と実耳の比較

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, pp.835-850, 2007
- [2] Takemoto *et al.*, *JASA*, 132(6), pp.3832-3841, 2012
- [3] 石井他，音講論(秋)，pp.467-470，2011
- [4] 土屋他，音講論(春)，pp.565-566，2012
- [5] 竹本他，音講論(秋)，pp.459-462，2012
- [6] 竹本他，音講論(春)，pp.1445-1448，2009