

## 耳介各部の微小変形が伝達関数に与える影響の検討

☆川村海斗, 竹本浩典 (千葉工大)

## 1 はじめに

ヘッドホンなどを用いて高い精度の音像定位を実現するためには, 受聴者に適合した頭部伝達関数 (Head-Related Transfer Function: HRTF) を用いる必要がある[1]。そのため, 現在, 耳介をカメラで撮影し, その形状を計測して得られた形状パラメータから重回帰により本人の HRTF を推定する研究がおこなわれている[2]。その推定精度を高めるためには, より効果的な耳介の計測部位を探索する必要がある。その候補として, 耳介形状に微小変形を加えたときに HRTF に与える変動量が大きな部位が考えられる。そこで本研究では, 複数の耳介に対してトポロジカルに同じ点に微小変形を加えたときの伝達関数の変動量を検討する。

## 2 材料と方法

## 2.1 薄板スプラインを用いた変形点の写像

複数の耳介でトポロジカルに同じ点を決定するために以下の処理を行った。まず, 12 人の頭部を磁気共鳴画像法で撮像して切り出した左耳周辺の形状からそれぞれ Fig. 1a の青, 赤, 黄の線で示す 3 つの輪郭を手動で抽出した。青, 赤, 黄の線はそれぞれ, 40 点, 30 点, 30 点からなり, 各線を構成する点群は等間隔とした。次に, 外耳道入口に置く音源点の座標が一致するように 12 耳の輪郭を平行移動した後, 輪郭を構成する各点の幾何学的重心を求めて輪郭を再構成して平均耳介とした (Fig. 1b)。そして, この平均耳介から各耳介への変形を薄板スプラインで記述した。薄板スプラインとは二つの形態間の非線形な変形を記述する写像関数で, 形態学などで用いられている[3]。これにより, 平均耳介のある点在各耳介のどの点に写像されるかを一意に求めることが可能となる。最後に, 平均耳介上にある 22 の直交格子点 (Fig. 1b の赤点) が各耳介のどの座標に写像されたかを薄板ス

プラインで求めた (Fig. 1c の赤点)。これにより, 平均耳介上の 22 の格子点が全ての耳介上にトポロジカルに同じ点として写像されるので, これを変形点として次節で述べる微小変形を加えた。

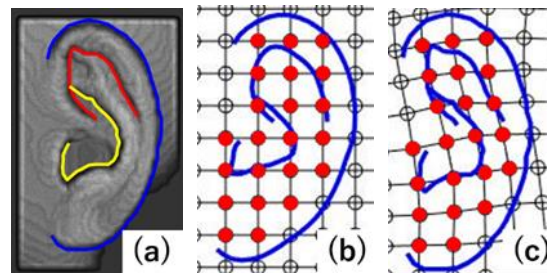


Fig. 1 (a) 耳介のトレース画像, (b) 平均耳介と直交格子, (c) ある耳介に薄板スプラインを用いて写像した格子点

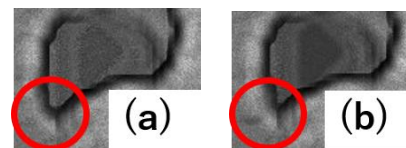


Fig. 2 (a) 変形前の耳介切痕部, (b) 膨張処理後の耳介切痕部

## 2.2 耳介形状に加える微小変形

各耳介に写像した 22 の変形点 (Fig. 1c の赤点) を中心とした半径 3 mm の耳介表面のボクセルに六近傍法を用いて 1 ボクセルだけ膨張・収縮処理を行うことによって微小変形を加えた (Fig. 2)。なお, 耳介が薄いため, 収縮により耳介に穴が開いてしまう耳介は分析から除外した。

## 2.3 PRTF の計算

12 耳の形状データから時間領域差分法[4]により耳介伝達関数 (Pinna-Related Transfer Function: PRTF) を求めた。PRTF は HRTF とほぼ等価であるので, 本研究では PRTF に着目した[5]。PRTF は, 外耳道入り口に置いた音源点から音源点と同じ矢状面で距離が 10 cm, 仰角 $-90^{\circ}$  ~ $260^{\circ}$  の範囲に  $10^{\circ}$  間隔で置

\* Effects of small deformation of the pinna on its transfer function”, by KAWAMURA, Kaito and TAKEMOTO, Hironori (Chiba Institute of Technology).

いた観測点までのガウシアンパルス応答から相反定理で求めた。なお、空間解像度は 1 mm, シミュレーション周波数は 0.8 MHz, PRTF の上限周波数は 20 kHz とした。微小変形を加えた耳介と元の耳介から同じ仰角方向に対する PRTF を計算してそのスペクトル距離 (Spectral Distance: SD) を求めた。スペクトル距離とは、2 つの PRTF の周波数ビンごとの差の絶対値を平均したものである。

### 3 結果と考察

Fig. 3 は耳介上の 22 個の変形点に微小変形を加えたときの平均 SD (全被験者の全仰角に対する SD を平均した値) を平均耳介にマップしたものである。Fig. 3a は膨張処理, Fig. 3b は収縮処理を行った場合である。2 つのマップは類似した傾向を示した。どちらも、耳介切痕 (★) と耳甲介舟 (▼) で平均 SD が 1, 2 番目に大きかった。続いて、耳甲介腔内部および周囲の点と、三角窩内部の点、および舟状窩の後端で平均 SD が大きかった。

Fig. 4 は耳介切痕と耳甲介舟を微小変形させたときの全被験者の全仰角における平均 PRTF と PRTF の変動量を周波数ビンごとに平均したものである。つまり、どの周波数帯で変動が大きいかを示す。耳介切痕を微小変形させると、耳甲介舟に比べて約 8 kHz 以下と約 12 kHz 以上の帯域で変動量が大きかった。また、耳甲介舟を微小変形させると、耳介切痕に比べて、8~12 kHz の帯域で変動量が大きかった。この傾向は、膨張処理と収縮処理の両方に共通していた。

平均 PRTF の 8 kHz 以下の帯域には第 1, 2 ピークが存在する。従って耳介切痕の微小変形はこれらのピークに影響を及ぼすと考えられる。先行研究によれば、第 1 ピークは耳介の深さ方向の 1/4 波長共鳴、第 2 ピークは耳介の表面方向の 1/2 波長共鳴であり、いずれも耳甲介腔前部の外耳道入口付近に音圧の腹が生成される[5]。そのため、音圧の腹に近い耳介切痕を微小変形させるとピークの周波数やレベルに影響を与えたと考えられる。

また、平均 PRTF の 10 kHz 付近のレベルは顕著に低い。これは、この帯域にノッチが生成されるためである。従って、耳甲介舟の微小変形はこの周波数帯域のノッチに影響を与えたと考えられる。先行研究によれば、ノッ

チは耳介表面に沿って生じた定在波の節が外耳道入口に位置することによって生じる[5]。耳甲介舟はこの定在波の生成に大きく関与しているため[5]、この部分の微小変形が定在波の節の位置を変化させ、ノッチの周波数やレベルが変動したと考えられる。

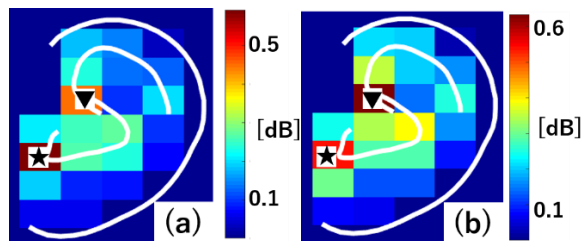


Fig. 3 平均 SD の平均耳介へのマップ (a) 膨張時 (b) 収縮時

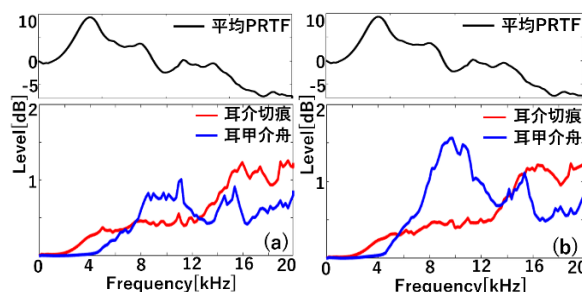


Fig. 4 全被験者の全仰角における平均 PRTF と PRTF の変動量を周波数ビンごとに平均したもの (a) 膨張時 (b) 収縮時

### 4 まとめ

本研究では、耳介切痕と耳甲介舟の微小変形が PRTF の変動に最も大きな影響を与えることが明らかになった。従って、これらの部位の形状を適切に反映する計測点を検討する必要があると考えられる。

### 謝辞

本研究は JSPS 科研費 19K12068 の助成を受けた。

### 参考文献

- [1] 飯田一博, 頭部伝達関数の基礎と 3 次元音響システムへの応用, コロナ社, 2017.
- [2] Iida *et al.*, *Applied Acoustics*.155, 280-285, 2019.
- [3] 生形貴男, *日本第四紀学会誌*, 44 (5), 297-313, 2005.
- [4] 竹本浩典, *日本音響学会誌*, 73 (3), 166-172, 2017
- [5] Takemoto *et al.*, *JASA*, 132, 3832-3841, 2012.