

## 頭部モデルの3D解像度による頭部伝達関数の変化\*

○森川大輔, △加賀充晃, モクタリ パーハム (富山県立大)

### 1 はじめに

頭部伝達関数 (HRTF: Head-Related Transfer Function) は立体音の呈示に重要である。HRTF には大きな個人差があるが、個人の HRTF を得るのは容易ではない。そのため、近年のファブリケーション技術の発展を利用し、3D スキャナと 3D プリンタを用いてダミーヘッドを作成することで本人の負担を軽減した HRTF の計測が検討されている[1]。また、森川は 3D プリンタの印刷精度について検討し、市販されている 3D プリンタの 0.1~0.4 mm 程度の精度で作成したダミーヘッドであっても、計測される HRTF にほとんど影響しないことを明らかにした[2]。しかし、ダミーヘッドの作成には頭部モデルの取得も必要となるが、頭部モデルに求められる精度は不明である。また、頭部モデルを元にシミュレーションによって HRTF を計算する試みも多数ある。これらのシミュレーションには頭部形状がそのシミュレーションの空間分解能に応じて簡略化されて用いられる[3,4]が、簡略化がどの程度であれば問題ないのかは実環境で確認されていない。

そこで本報告では頭部モデルの精度が HRTF に与える影響を明らかにするために、3D 解像度を操作して印刷したダミーヘッドを用いて HRTF の計測を行った結果について述べる。

### 2 計測方法

頭部と同じサイズのダミーヘッドの印刷はコストが高いため、相似側に基づき縮小ダミーヘッドを用いて HRTF の計測[5]を行った。また、計測は音源位置にマイクを置き、受音位置にスピーカを置く相反法[6]を用いて行った。

#### 2.1 頭部モデルの 3D 解像度

頭部モデルは、MRI で 1 pixel を 1 × 1 mm で撮像した頭部の表面を平滑化し STL 形式に変換したものである[7]。この頭部モデルを

構成する三角形のメッシュの各頂点に対して、水平面、矢状面、冠状面のすべてを、2, 3, 4 mm 刻みにすることで 3D 解像度を下げた。頭部モデルを 1/2 に縮小し、3D プリンタ (XYZ Printing, da Vinci 1.0 AiO) で、3D 解像度を操作していない DH<sub>0</sub>、3D 解像度を 2, 3, 4 mm 刻みに下げた DH<sub>2</sub>, DH<sub>3</sub>, DH<sub>4</sub> の 4 種の縮小ダミーヘッドを作成した。素材は ABS 樹脂、積層ピッチは 0.1 mm、内部充填密度は 30% である。3D 解像度を操作した頭部モデルとダミーヘッドを図 1 に示す。

#### 2.2 計測システム

計測システムを図 2 に示す。計測システムは、Windows PC、AD/DA 変換器 (RME, Fireface UCX)、ヘッドホンアンプ (audio-technica, AT-HA21)、超小型スピーカ (Foster, MT006B)、マイク (Primo, EM-258)、マイクアンプ (audio-technica, AT-MA2) と縮小ダミーヘッドで構成されている。スピーカは縮小ダミーヘッド右耳の外耳道入口に挿入し印象材 (EM-57Y, リオン) で固定した。

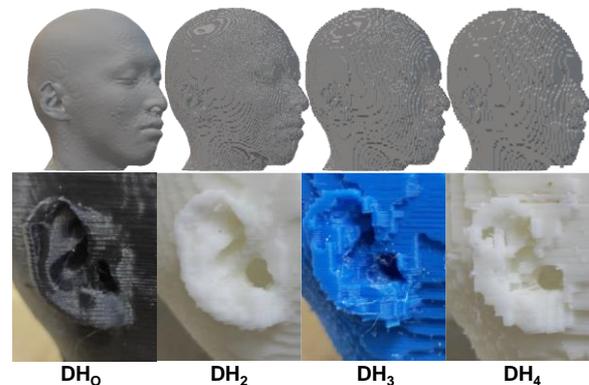


Fig. 1 3D 解像度とダミーヘッド

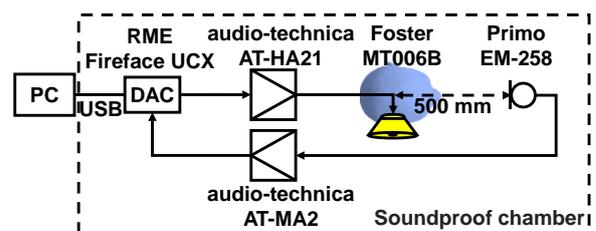


Fig. 2 計測システム

\* Changes in head-related transfer function due to 3D resolution of head model, by MORIKAWA, Daisuke, KAGA, Mitsuaki, MOKHTARI, Parham (Toyama Prefectural University).

### 2.3 計測条件

AD/DA 変換器のサンプリング周波数は 96 kHz とし、信号長  $2^{18}$  点の Linear-TSP 信号[8] を用いて計測を行った。3 周期の TSP 信号を放射し、2 周期目からインパルス応答を算出し、反射波成分を除去するために 384 点の窓で切り出した。縮小ダミーヘッドを用いて計測したインパルス応答と、ダミーヘッドなしで頭部中心位置にスピーカを置いたインパルス応答を、周波数領域で除して HRTF を得た。計測点は、高さ 600 mm の水平面における半径 500 mm の円周上で、正面を  $0^\circ$  とした  $0^\circ, 90^\circ, 180^\circ, 270^\circ$  の 4 点である。相似側により半径 1 m の HRTF を得ていることとなる。

### 3 結果と考察

図 3 に計測した HRTF を示す。横軸の周波数は実寸での測定と等価になるよう 1/2 倍している。DH<sub>0</sub> と DH<sub>2</sub> の HRTF は 15 kHz 以下で同様の傾向を示し、特に頭部が遮蔽物にならない  $0^\circ, 90^\circ$  ではピークとノッチはほぼ一致している。DH<sub>3</sub> も 15 kHz 以下のピークやノッチの周波数はおおよそ一致しているが、そのノッチは浅くなった。DH<sub>4</sub> では 15 kHz 以下であってもピークやノッチの周波数にずれがみられた。したがって、HRTF の測定に用いる頭部モデルの 3D 解像度は 2 mm 以下であることが望ましいと考えられる。また、15 kHz 以上で結果のバラツキが大きくなった原因は、マイクとスピーカ特性による高域の SN が影響している可能性がある。

ただし、DH<sub>2~4</sub> のすべてで、DH<sub>0</sub> との平均振幅スペクトル距離 SD(Spectral Distance)は  $0\sim 270^\circ$  のすべてで 6 dB を下回っており、異なる「頭」の SD の 6 dB 以上[9]より小さく、同一被験者を複数回測定した場合の SD[10]とも遜色はない。

### 4 まとめ

3D 解像度を操作した縮小ダミーヘッドの HRTF を計測した。解像度が 2 mm では解像度を変えない場合とほぼ一致し、問題なく HRTF が得られること、3 mm ではノッチの周波数は変わらないものの浅くなってしまふこと、4 mm ではノッチ周波数が変化してしまうことがわかった。ただし、SD には問題がないため、音像定位実験や SD 以外の評価尺度での検討が必要である。

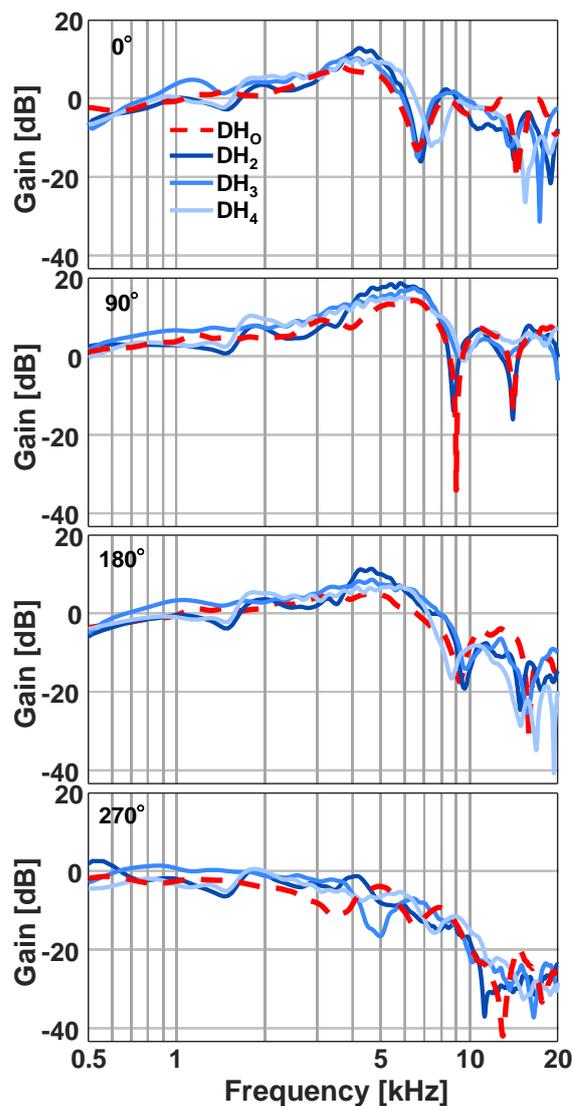


Fig. 3 各ダミーヘッドの頭部伝達関数  
謝辞

本研究の一部は科研費(20K19828, 17K00260)、飴久晴富山県内大学等研究助成基金の助成を受けた。

#### 参考文献

- [1] 高根他, VR 学会誌, 26(4), 266-276, 2021.
- [2] 森川, 音講論(秋), 677-678, 2016.
- [3] Prepelita *et al.*, J.Acoust. Soc. Am., 139(5), 2489-2504, 2016.
- [4] Mokhtari *et al.*, Sci. Rep., 9(7477), 2019.
- [5] 森川他, 音講論(秋), 361-362, 2020.
- [6] Zotkin *et al.*, J.Acoust. Soc. Am., 120(4), 2202-2215, 2006.
- [7] Takemoto *et al.*, Acoust. Sci. & Tech., 25(6), 468-474, 2019.
- [8] 金田, 音響誌, 69(10), 549-554, 2013.
- [9] 平原他, Fundam. Review, 2(4), 68-85, 2009.
- [10] 飯田, 頭部伝達関数の基礎と 3 次元音響システムの応用, コロナ社, 93-94, 2013.