

縮小ダミーヘッドを用いた頭部伝達関数の計測*

○森川大輔, 堀田元輝, 寺島眞生, 平原達也 (富山県立大)

1 はじめに

頭部伝達関数(HRTF)は音源位置から両耳の受音点までの音響伝達関数である[1]。通常、HRTF は頭部の周囲に置いたラウドスピーカから音波を放射し、被測定者の外耳道入口のマイクで収録して算出する。HRTF は被測定者の頭を模したダミーヘッドを用いて測定されることもある。ダミーヘッドを用いる場合、測定中の頭部の動きによる誤差がなくなる。

縮小模型を用いた音響計測は、コンサートホールの音響伝達関数の計測に古くから用いられている[2]。また、Rönkkö はヒトの耳介の拡大模型を用いて耳介の各位置における音響インテンシティの測定を行っている[3]。このように音響伝達関数の計測は、相似則に基づいた計測対象の拡大縮小が可能である。

模型の縮小によって、音源とマイクの距離が近づき S/N が向上し、見かけ上の反射点が遠のくため、計測環境に求められる条件が下がり、模型の作成コストも低下する。ただし、模型を n 倍すると周波数は $1/n$ 倍になる。したがって、縮小倍率に応じて高周波数の再生と収録が必要になる。数分の 1 倍であればヒトの可聴帯域を、いわゆるハイレゾ対応機器で計測できる。また、一般的な家庭用 3D プリンタの造形サイズでは、実寸のダミーヘッドは作成できないが、数分の 1 倍のダミーヘッドは問題なく作成することができる。

そこで本稿では、相似則に基づき縮小ダミーヘッドを用いて HRTF を計測した結果について述べる。

2 計測方法

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[4]を用いて行った。計測システムを図 1 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)、耳栓スピーカ(Foster, MT006B)、マイ

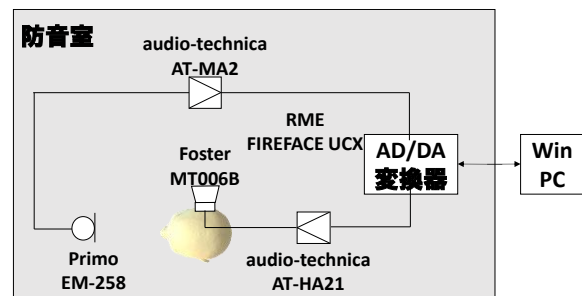


Fig. 1 計測システム

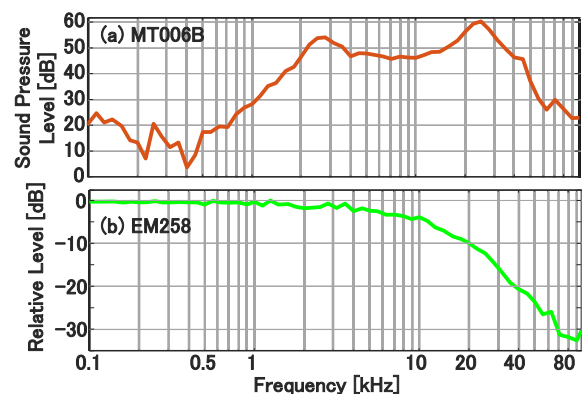


Fig. 2 機器の周波数特性

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。耳栓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た。AD/DA 変換器のサンプリング周波数は 96 kHz、耳栓スピーカの入力電圧は 0.25V とした。図 2 に MT006B と EM-258 の周波数特性を示す。MT006B の特性は 48 kHz まで 40 dB 以上で、EM-258 の特性は 48 kHz までに -20 dB 程度の減衰であり、48 kHz までの S/N は十分である。

縮小ダミーヘッドは MRI で計測した頭部形状データを 1/2 に縮小し、3D プリンタ (XYZ Printing, da Vinci 1.0 AiO) で ABS 樹脂を用いて作成した。積層ピッチは 0.1 mm、内部充填密度は 30% である。ダミーヘッドを図 3 に示す。

インパルス応答(IR)の計測には金田式プログラム[5]のサンプリング周波数を 96 kHz に変更して用いた。計測信号は信号長 2^{18} 点の Linear-TSP 信号である。3 周期の TSP 信号を

* Head-related transfer function measurement with a downscaled dummy head, by MORIKAWA, Daisuke, HORITA, Genki, TERASHIMA, Mao and HIRAHARA, Tatsuya (Toyama Prefectural University).

放射し、2周期目から IR 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 IR_R と、ダミーヘッドなしで頭部中心位置に超小型スピーカを置いた IR_O を、周波数領域で除して HRTF を得た。計測点は半径 50 cm の水平面円周上の 15° 間隔 24 点である。

3 結果

ダミーヘッドの正面(0°)の HRTF を青線で図 4 に示す。サンプリング周波数は 96 kHz で計測されているが、周波数軸は 1/2 倍して示している。また、実寸のダミーヘッドで計測点を半径 1 m とし、計測した HRTF を図 4 に赤線で示す。同図から 1 kHz 以上においてピークやノッチの周波数がおおよそ一致していることがわかる。縮小ダミーヘッドと実寸ダミーヘッドの 1 kHz~20 kHz の SD は 4 dB であった。

水平面の HRTF のコンター図を図 5 に示す。図 5(a) は縮小ダミーヘッドの計測結果、図 5(b) は実頭の計測結果である。全ての角度でピークやディップの周波数がおおよそ一致していることがわかる。

4 考察

測定結果から縮小ダミーヘッドは HRTF の計測に十分に利用可能であることがわかった。

実寸の HRTF において 1 kHz 以下の変動が縮小模型に対して大きくなっているのは、縮小ダミーヘッドに比べて、半径が倍になり、S/N が低くなったためと考えられる。

今回用いた機器の特性上はさらにダミーヘッドを縮小できる。ただし、ダミーヘッドを縮小するほどにマイクやスピーカが相対的に大きくなり、点音源と見なせなくなる可能性がある。

また、ダミーヘッドの作成に求められる造形精度や、頭部の 3D モデルの作成に求められる撮像精度がどの程度であるかを調べることも今後の課題である。

5 結論

本稿では、相似則に基づき縮小ダミーヘッドを用いて HRTF を計測した。その結果、1/2 の縮小ダミーヘッドで、実寸ダミーヘッドや実頭と遜色のない HRTF が計測できることがわかった。

謝辞

本研究は飴久晴富山県内大学等研究助成基金の支援を受けて行われた。

参考文献

- [1] 平原達也 他, “頭部伝達関数の計測とバイノーラル再生にかかわる諸問題,” *Fundamentals Review*, 2(4), 68-85, 2009.
- [2] 小口恵司, “ホール室内音響設計における模型実験,” *音響誌*, 63(9), 531-536, 2007.
- [3] Pekka Rönkkö, “Measuring Acoustic Intensity Field in Upscaled Physical Model of Ear,” Aalto University Master Thesis, 2019.
- [4] Zotokin, *et al.*, “Fast head-related transfer function measurement via reciprocity,” *J. Acoust. Soc. Am.*, 120(4), 2202-2215, 2006.
- [5] 金田豊, インパルス応答見本プログラム 2016, *IR_mes_12.m*.
http://www.asp.c.dendai.ac.jp/IR_mes_01.html.



Fig. 3 縮小ダミーヘッドと実寸ダミーヘッド

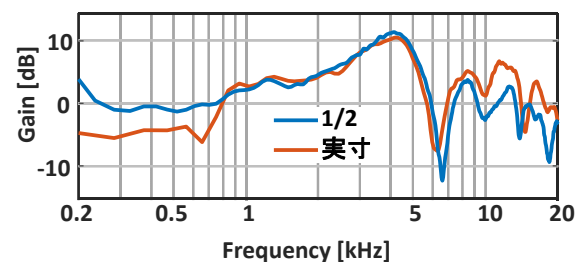


Fig. 4 正面(0°)の HRTF

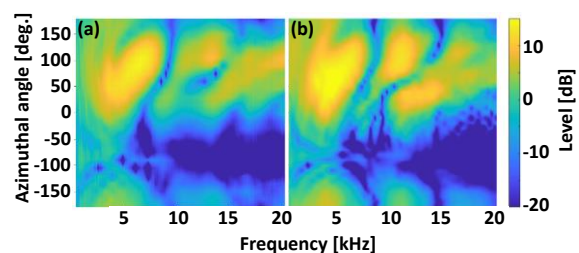


Fig. 5 水平面の HRTF