

頭部伝達関数の高速計測法の検討*

○松永悟行, 平原達也 (富山県立大)

1 はじめに

頭部伝達関数 (HRTF : Head Related Transfer Function) は頭部や耳介の形状と音源の位置によって規定される音響伝達関数で、頭外に置いたスピーカから外耳道入口に置いたマイクロフォンまでのインパルス応答を、スピーカの位置を変えて繰り返し計測することによって得ている。このため、HRTF の計測は長時間に及び、実頭の HRTF 計測では、計測中の被験者の頭部運動に起因する計測誤差が大きな問題となる^[1]。

この問題を解決する方法として、スピーカとマイクロフォンの位置を入れ替えた相反法による HRTF 計測システムが Zotkin らによって提案されている^[2]。しかし、外耳道に挿入できる小型スピーカはあまりなく、その出力音圧も低いことから、この計測法は普及していない。

そこで、本研究では、高速に HRTF を高精度に計測するシステムの実現を目的として、相反法による HRTF 計測システムを実際に構築し、その問題点を明らかにする。

2 計測システム

本研究では直接法と相反法で HRTF の計測をし、比較を行った。計測サイトは富山県立大学の防音室で、有効寸法 3.24×3.54×2.30 m、暗騒音レベル 20 dB SPL である。

2.1 相反法

設計した計測システムは、円周状のマイクアレイの中心に、耳栓スピーカを取り付けたダミーヘッドを設置したものである (Fig.1(a))。マイクアレイは半径 1.05 m の円周状のフレーム (アルミ丸棒、φ4 mm) を高さ 1 m の位置に固定し、マイクロフォン (Primo, EM133) を 30 度間隔で計 12 個取り付けたものである (Fig.1(b))。耳栓スピーカは小型スピーカ (Knowles, DTEC-30008) をシリコン印象材に埋め込んだものである (Fig.1(c))。ダミーヘッドはエポキシ樹脂製で、内部を吸音材で埋

めた。

電気音響系は以下のとおりである。PC に接続した D/A 変換器 (EDIROL, UA-101) の出力電圧はヘッドホンアンプ (audio-technica, AT-HA20) を経て耳栓スピーカを駆動する。マイクロフォンの出力電圧はマイクアンプ (audio-technica, AT-MA2) で増幅され A/D 変換器 (EDIROL, UA-101) に入力される。

インパルス応答計測用の TSP 信号は変則時間引き伸ばし信号 (Warped-TSP)^[3] を使用した。サンプリング周波数は 44.1 kHz、信号長は 65536 点、加算平均回数は 20 回とした。

方位角 0 度を正面とし、計 36 点の受音点位置の伝達関数を得るため、ダミーヘッドを左 10、0、右 10 度に向け計 3 回計測した。

HRTF スペクトルは、計測した各インパルス応答に 512 点の矩形窓を適用して切り出しを行ったものより算出した。

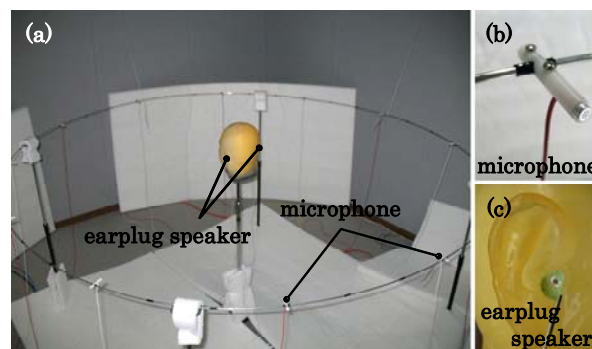


Fig. 1 Reciprocal HRTF measurement system

本システムと Zotkin らのシステムとの比較を Table 1 に示す。いずれの小型スピーカも Balanced Armature 型 (電磁型) で、挿入型イヤフォンのドライバとして使用されているものである。そのため、このスピーカは開空間に対して音を放射する設計にはなっていない。本システムで用いている DTEC-30008 は Knowles 社の 3 種類の小型スピーカ (ED-29689、BK-28510、DTEC-30008) の出力音圧の比較を行った結果選択した。マイクロフォンは高感度 ECM を選択した。

*Study on a fast HRTF measurement system, by MATSUNAGA, Noriyuki and HIRAHARA, Tatsuya (Toyama Prefectural University).

Table 1 Measurement setup

	Matsunaga	Zotkin
Earplug speaker	Knowles DTEC-30008 7.87×4.09×5.59 mm wrapped silicone	Knowles ED-9689 6.33×4.31×2.97 mm wrapped silicone
Microphone	Primo EM133 -36 dB @1 kHz φ:5.8, h:3.0 mm	Knowles FG-3629 -53dB @1 kHz φ:2.57, h:2.57 mm
Signal	Warped-TSP (max freq 22 kHz) 65536 points Fs:44.1 kHz	Linear Frequency Upsweep Pulse (max freq 16 kHz) 96 points Fs:39.0625 kHz
Averaging	20 times	48 times

インパルス応答計測用の TSP 信号は暗騒音による雑音性誤差を低減するために、低域における放射時間の長い Warped-TSP を選択した。加算平均回数は 20 回よりも大きくしても、得られる HRTF に変化は見られなかった。

3 HRTF の計測結果

直接法および相反法によって求めた筆者のそっくりダミーヘッド左耳の HRTF のコンター図を Fig.2(a)(b)に示す。同図より、相反法で求めた HRTF は、主要なスペクトルの特徴が直接法で求めたものと類似しているが、16 kHz 以上の帯域において大きな差異が生じている。この差異は耳栓スピーカの出力音圧レベルが低いため十分な S/N の TSP 応答信号が得られないことが原因である。同様に、0.5 kHz 以下の帯域においても TSP 応答信号の S/N は十分でない。また、方位角が 80~100 度で見られる縦縞は 0.6 m 後方にある壁面からの反射によるカラーレーションである。二つの HRTF の平均スペクトル距離は 0.1~20 kHz において 6.7 dB、0.5~14 kHz において 3.8 dB であった。

4 まとめ

相反法による HRTF 計測システムを構築し、ダミーヘッドの HRTF を計測した。Zotkin らは、小型スピーカの出力帯域の狭さ、暗騒音による雑音性誤差の問題を指摘している。小型スピーカの出力帯域の狭さは本実験においても問題となった。特に、スピーカの周波数特性には 16 kHz に谷があるため、求めた HRTF に大きな誤差が生じた。この問題は加算平均回数を増加させても改善することは

できなかった。また、暗騒音による雑音性誤差は Warped-TSP を使用することによってある程度改善できたが、0.5 kHz 以下の帯域では十分な S/N は得られなかった。

直接法による HRTF と相反法による HRTF を比較した結果、相反法は 0.5 kHz 以下および 16 kHz 以上の帯域において直接法の HRTF とは一致しなかった。この原因は耳栓スピーカの出力帯域が狭く最大出力音圧も低いため、十分な S/N の TSP 応答信号が得られないことにある。この問題を解決することによって、相反法により高精度な HRTF を極めて短時間で計測することができると思う。

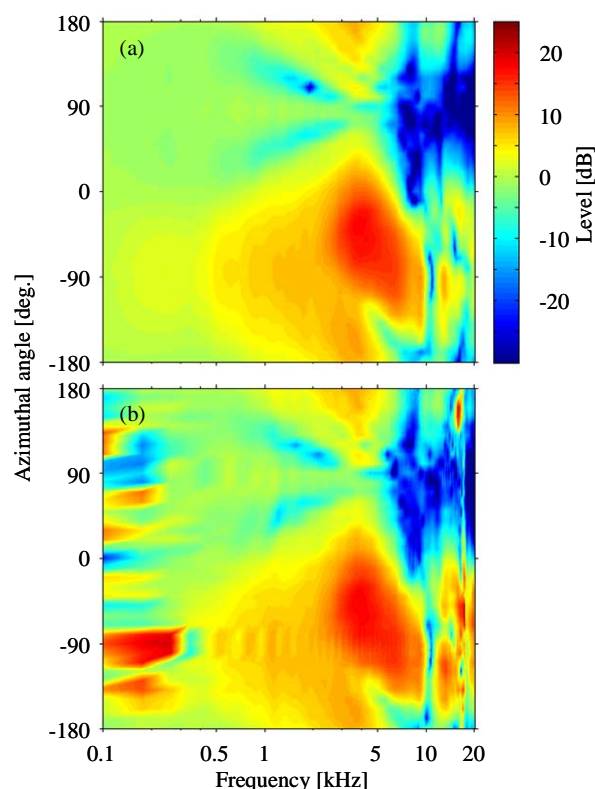


Fig. 2 HRTF contour patterns

(a) Direct method (b) Reciprocal method

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関する諸問題, *Fundamental Review*, 2(4), 68-85, 2009.
- [2] Zotkin D.N. *et al*, Fast head-related transfer function measurement via reciprocity, *J.Acoust. Soc. Am.*, 120(4), 2202-2215, 2006.
- [3] 森勢将雅 他, 暗騒音と高調波ひずみに頑健なインパルス応答測定用信号, *電子情報通信学会論文誌*, J89-A(1), 7-14, 2008.