

相反法による近接場HRTFの計測*

松永悟行, 平原達也 (富山県立大学)

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(直接法)。このスピーカとマイクロフォンの位置を入れ替えたHRTF計測法がZotkinらによって提案されている(相反法)^[1]。我々は録音チャンネル数が12chの相反法によるHRTF計測システムを構築し、音源距離を1 m、方位角を10度毎、計36個の水平面におけるHRTFを計測した。その結果、0.4~14 kHzの帯域におけるHRTFを高速かつ高精度に計測できた。

本報告では、マルチトラックレコーディング用のA/D変換器を用いて同時収録チャンネル数を36chに増やし、直接法ではスパーク音源などの特殊な音源が必要とされる頭部近傍HRTF^[2]を相反法により計測した結果について述べる。

2 計測システム

2.1 相反法

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0.2 mの円周状のフレーム(ピアノ線、1.5 mm)を高さ1 mの位置に固定し、マイクロフォン(Primo, EM133)を10度間隔で計36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, ED-29689)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(PreSonus, DIGIMAX FS)に入力され、FireWireオーディオ・インタフェース(PreSonus, FireStudio Lightpipe)を介してPCに取り込まれる(Fig. 2)。PC1からPC2, 3に録音開始の命令がTCP/IPによって送信される。PC2, 3の録音開始時刻は異なるため、ADC3, 4に基準信号を入力し時刻を合わせた。また、5台のA/D変換器と2台のオーディオ・インタフェースはワードクロック同期を取っている。

計測は内寸3.24×3.54×2.30 m、暗騒音レベル16.5 dB(A)の防音室で行った。インパルス応答計測用のTSP信号はOATSPを使用した。サンプリング周波数は48 kHz、信号長は65,536点、加算平均回数は20回とした。

HRTFスペクトルは、計測した各インパルス応答に有効窓長300点の矩形窓(立ち上がり、立下りは22点のコサインカーブ)を適用して切り出しを行ったものより算出した。

2.2 耳栓スピーカ

耳栓スピーカを作成するために使用した小型スピーカは、バランスド・アーマチュア型(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。そのため、このスピーカはHRTF計測のような開空間に対して音を放射する設計にはなっていない。

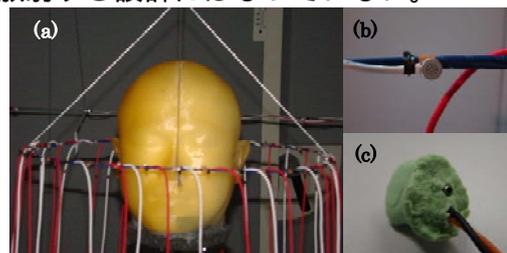


Fig. 1: Measurement system, (a) Overview of the system, (b) ECM and (c) earplug speaker.

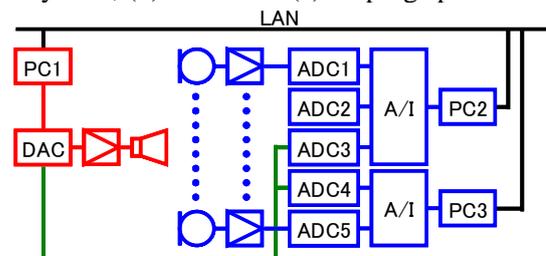


Fig. 2: Block diagram of reciprocal HRTF measurement system.

*Near-field HRTF measurement using reciprocal method, by MATSUNAGA, Noriyuki and HIRAHARA, Tatsuya (Toyama Prefectural University).

スピーカ-マイクロフォン間隔を 0.2 m としたときの耳栓スピーカの周波数特性を Fig. 3 に示す。DTEC-30008 は 0.5 ~ 12 kHz、ED-29689 は 0.8 ~ 18 kHz の帯域で出力音圧が 20 dB 以上である。DTEC-30008 は低・中域、ED-29689 は高域において S/N を確保できるため HRTF を高精度に計測できると考える。

3 HRTF の計測結果

二つの耳栓スピーカを用いて計測したダミーヘッド左耳の頭部近傍 HRTF のコンター図を Fig.2(a)(b)に示す。(a)は 0.4 ~ 12 kHz、(b)は 2 ~ 20 kHz の帯域において、実測 HRTF は数値計算により算出した HRTF^[3]と類似した

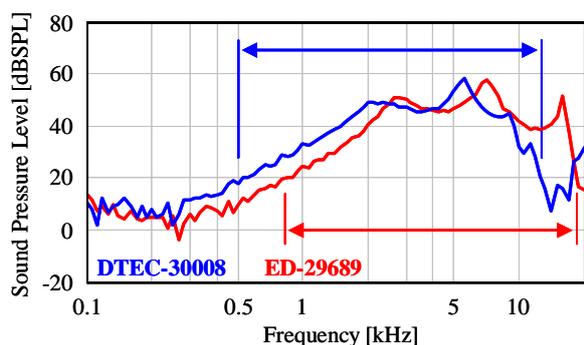


Fig. 3: Frequency responses of earplug speakers ($r = 0.2$ m).

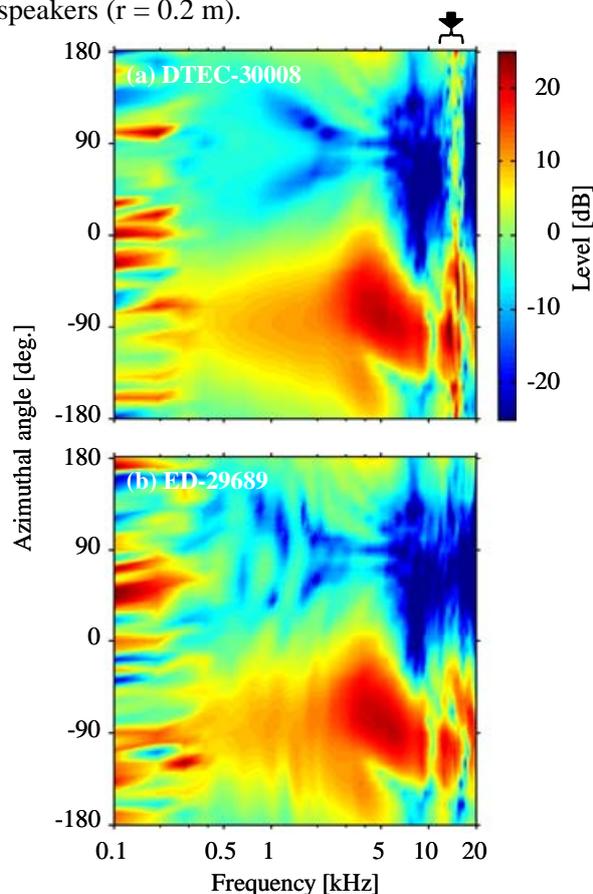


Fig. 4: Near-field HRTF contour patterns measured with, (a) DTEC-30008 and (b) ED-29689.

スペクトルの特徴を持つ。

しかし、(a)(b)ともに 0.4 kHz 以下の帯域において TSP 応答信号の S/N が低いことによる計測誤差が生じている。

また、(a)では 12 ~ 16 kHz の帯域において HRTF スペクトルに異常が認められる (Fig. 4(a)矢印)。この異常は、頭部中心スピーカと各マイクロフォン間の伝達特性に深いスペクトルノッチがあり、それらが HRTF では極となることにより生じたものである。

さらに、(b)では 0.4 ~ 2 kHz の帯域においてカラーレーションが生じている。これは計測耳スピーカと各マイクロフォン間の伝達特性に浅いスペクトルノッチが生じているからである。この原因は、高調波歪、低 S/N な TSP 応答信号、耳栓スピーカの物理形状の変化ではないことを確認している。ただ、耳栓スピーカの挿入位置を 1 mm 外に出すと、上述したスペクトルノッチはより浅くなった。しかし、波長を考慮すると、この 1 mm の差が反射に影響するとは考え難い。このためカラーレーションの原因は特定できていない。

4 まとめ

マルチトラックレコーディング用 A/D 変換器を用いて 36ch の HRTF を相反法により計測するシステムを構築し、ダミーヘッドの頭部近傍 HRTF を計測した。その結果、水平面音像定位に必要な帯域 (2 ~ 12 kHz) を含む帯域において高速に HRTF を計測できた。

音源距離が 0.2 m のときは、音源距離が 1 m のときよりもマイクロフォン位置での音圧が 14 dB 高くなるが、いずれの場合も 0.4 kHz 以下の S/N が不足していた。一方、12 kHz 以上の高域については、高出力音圧のスピーカを用いることによって、いずれの場合も HRTF を計測できた。すなわち、相反法による HRTF 計測は小型スピーカが十分な出力音圧を出す帯域に大きく依存することがわかった。

参考文献

- [1] Zotkin D.N. *et al*, Fast head-related transfer function measurement via reciprocity, *J.Acoust. Soc. Am.*, 120(4), 2202-2215, 2006.
- [2] 荒木潤二 他, スパーク音源を用いた頭部伝達関数の測定, *音響誌*, 60(6), 314-318, 2004.
- [3] 大谷真 他, 水平面上の頭部伝達関数の距離依存性の数値的検討, *音響誌*, 63(11), 646-657, 2007.