

頭部伝達関数の陥穽*

○ 平原達也、大谷真（富山県立大学工学部）、矢入聡、岩谷幸雄（東北大学電気通信研究所）
戸嶋巖樹（NTT コミュニケーション科学基礎研究所）

1 はじめに

頭部伝達関数（HRTF）は、頭部が無い場合の音源から頭部中心位置に置いたマイクロフォンまでの伝達特性 $H_0(\omega)$ と、頭部がある場合の音源から外耳道入口に置いたマイクロフォンまでの伝達特性 $H_E(\omega)$ を計測し、 $H_E(\omega)/H_0(\omega)$ を与えるインパルス応答波形として与えられる。これまでに多くの HRTF が計測され、その一部は公開されているが、HRTF 計測系の信頼性や、計測された HRTF の精度等についてはあまり公にされていない。

本報告では、同じ頭部の HRTF を異なる計測サイトで測定した結果を比較し、実測 HRTF の差異を評価するとともに、HRTF 計測に際して配慮すべき事項等について述べる。

2 頭部伝達関数の計測

2.1 2つの計測サイト

HRTF は NTT コミュニケーション科学基礎研究所（サイト 1）と東北大学電気通信研究所（サイト 2）で計測した。両計測サイトの HRTF 計測にかかわる主要な緒元を Table 1 に示す。

なお、HRTF は外耳道閉塞状態で計測し、耳栓マイクロフォンは両計測サイトで同一のものを用いた。また、両サイトとも、サンプリング周波数 48 kHz、量子化精度 16 bit の計測システムを用いた。計測システムと計測方法の詳細は文献[1]を参考されたい。

2.2 インパルス応答

Fig.1 (a) (b) は、両計測サイトにおいて、

真正面 $(\theta, \phi) = (0, 0)$ のスピーカから頭部中心位置に置いた同じ耳栓マイクまでのインパルス応答の波形である。サイト 1 でのインパルス応答は、最大値からすぐに収束しているが、床格子等からの反射があるために 200 点 (4.2 ms) ほど尾を引いている。サイト 2 でのインパルス応答は、最大値から 100 点ほど振幅の大きな成分があるとともに、200 点ほど尾を引いている。さらに 400 点および 800 点後に大きな反射波成分がある。直接波との行路差を考えると、これらはスピーカアレイからの反射と考えられる。なお、両サイトで用いたスピーカは同じではない。

聴覚ディスプレイに用いられる HRIR の長さは 512 点程度なので、遅延時間の長い反射波成分の影響は受けないが、遅延時間の短い反射波成分は含まれることになる。インパルス応答に反射波成分が含まれていると、カラーレーションが生じ HRTF 振幅スペクトルは波打ち、コンター図を描くと縦縞が現れる。そのため適切な窓掛け処理が必須である。

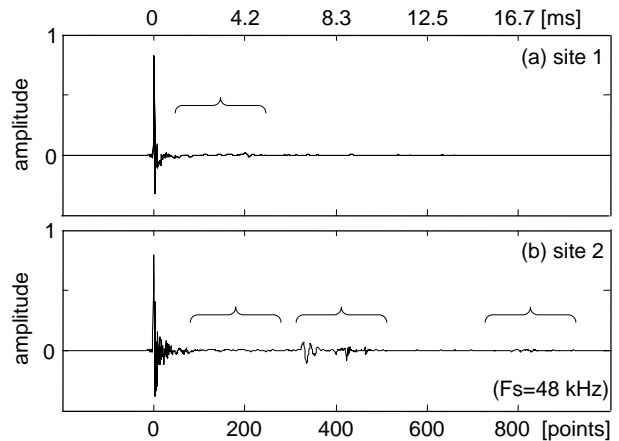


Table 1 Specification of two HRTF measuring sites.

Fig. 1 Impulse responses of head-centered microphone

	無響室		スピーカ		計測信号			その他	
	内寸 [m]	暗騒音	移動装置	音源位置	種類	加算回数	音圧	頭部位置	計測時間
NTT-CS研	5.4 × 4.8 × 3.7H	< 10 dB	弧状回転トランス、1個のSPを移動	143点 r = 1.2 m	OATSP 32768点	10	70 dB	床上 1.3 m	90分
東北大通研	7.5 × 7.5 × 4.3H	18 dB	球状スピーカアレイ、18個のSPを回転	613点 r = 1.5 m	OATSP 8192点	4	60 dB	床上 2.1 m	90分

* Pitfall of head-related transfer function measurement, by Hirahara, Tatsuya, Otani Makoto (Toyama Prefectural Univ.), Yairi Satoshi, Iwaya Yukio (Tohoku Univ. RIEC) and Toshima Iwaki (NTT CS Labs.)

3 頭部伝達関数の比較

被験者 3 名の実頭と 3 種類のダミーヘッドの HRTF を両計測サイトで計測した。Fig. 2 は両サイトで計測したある実頭の右耳の水平面 HRTF のコンター図である。2 つの HRTF の概形は似ているが、音源位置が測定耳と同側の 1~2 kHz 周辺のピークとディップ、両側の 5~10 kHz にあるディップの水平角に対する変化、対側の 12 kHz および 16~19 kHz のディップの位置と深さ等が異なっている。

この 2 つの水平面と正中面の測定点 49 点から算出した HRTF の平均振幅スペクトル距離 (SD) は 5.5 dB、全体の測定点 143 点から算出した SD は 5.7 dB であった。また、2 つの計測サイト間の、3 名の実頭の SD の平均値は 5.3 dB ($\sigma = 0.8$ dB)、3 種類のダミーヘッドの SD の平均値は 5.8 dB ($\sigma = 0.9$ dB) であった。

一方、3 名の実頭間の SD の平均値はサイト 1 で 7.1 dB ($\sigma = 0.5$ dB)、サイト 2 で 6.6 dB ($\sigma = 0.3$ dB) であった。3 種類のダミーヘッドについては、サイト 1 で 8.4 dB ($\sigma = 1.1$ dB)、サイト 2 で 6.9 dB ($\sigma = 1.3$ dB) であった。

このように、異なるサイトで計測した同一の頭部の HRTF の差は、同一サイトで計測した異なる頭部の HRTF との差よりも 1~2 dB 小さいだけである。サイト 1 で、あるダミーヘッドを設置したまま複数回測定した HRTF の SD は 0.45 dB、再設置した場合の SD は 2.6 dB であった[1]。したがって、同じ頭部であるにもかかわらず、計測サイトの違いで生じた 5~6 dB の SD 値の半分は、頭部の位置決め精度の不足と計測中の実頭の動き[1]に起因すると考えられる。残り半分は、計測系の差異に起因すると考えられる。なお、シミュレーション実験に拠れば、両サイトの音源距離の違いはほとんど影響しない[2]。

4 まとめ

HRTF の計測は、言うまでも無く「精密」な音響計測そのものである。計算機上での信号処理に慣れてしまった私達は、音波の波長との関係で様々な物体が計測結果に影響を与えるといった、物理世界の基本現象を忘れぬよう心がけねばならない。尤も、計算機の高性能化と計算音響学[2][3]の進展により HRTF の計測は不要になるかもしれない。

また、HRTF スペクトルという開空間の音

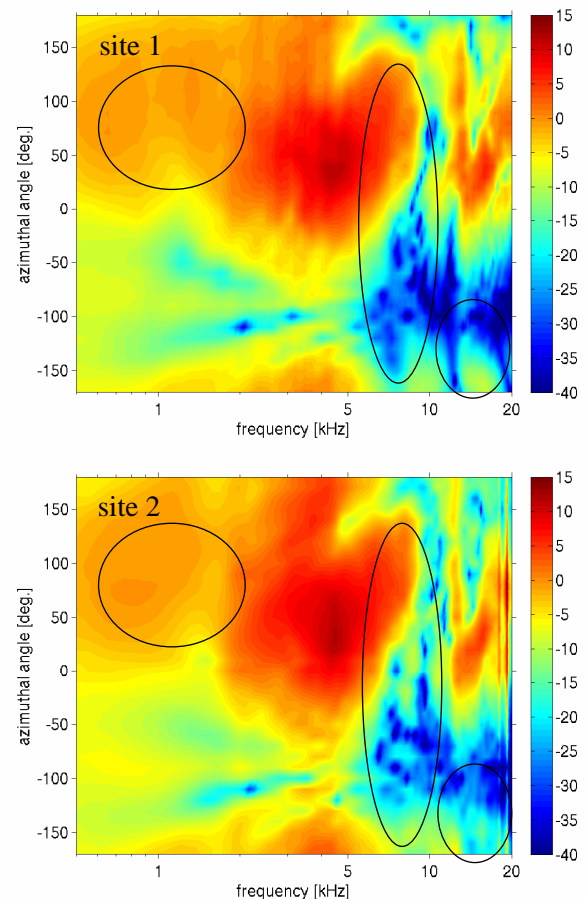


Fig. 2 Comparison of horizontal HRTFs of a real head (right ear) measured at two different sites.

響伝達特性の差を測る尺度として、音声スペクトルという閉空間の音響伝達特性の差を測るのに有用な SD という尺度を転用しているが、この SD は HRTF を形成する頭部形状の差や HRTF によって生成される音像の定位性能の差と必ずしも相関が高くない。この 3 者を結びつける適切な「物差し」を見出すことも必要である。

謝辞： 本研究の一部は科学研究費補助金 (18300042) および東北大学電気通信研究所共同プロジェクト研究による。ECM の入手と耳栓マイクの作成法についてご支援を賜った千葉工業大学の飯田一博教授、サイト 2 での HRTF 計測にご支援・ご協力いただいた東北大学の鈴木陽一教授と千葉武尊氏に深謝する。

参考文献

- [1] 平原 他 “頭部伝達関数論考” 聴覚研究会資料, 38(1), 2008.
- [2] 大谷 他 “水平面上の頭部伝達関数の距離依存性の数値的検討” 響学誌, 63(11), 646-657, 2007
- [3] M. Otani *et al* “Fast calculation system specialized for head-related transfer function based on boundary element method,” *J. Acoust. Soc. Am.*, 119(5), 2589-2598, 2006.