

擬似頭の頭部伝達関数の境界要素解析と実測の比較*

大谷 真, 平原 達也 (富山県立大・工), 伊勢 史郎 (京大・工),
矢入 聡, 岩谷 幸雄 (東北大・通研), 戸嶋 巖樹 (NTT CS 研)

1 はじめに

頭部伝達関数 (Head-Related Transfer Function: HRTF) を得るための実測 (例えば [1]) 以外の手段として、人体形状を境界条件とする波動方程式を数値的に解く手法が研究されている (例えば [2])。実測と比較した場合、理想的な無響状態そして完全に静止した頭部など、物理環境を完全に一定に保てる事が HRTF の数値計算の利点である。しかし、数値計算による HRTF の妥当性は未だ充分には示されていない。

そこで、境界要素法 (Boundary Element Method: BEM) による HRTF の計算値の妥当性を示すことを目的として、胴体 (トルソ) 無しの擬似頭の HRTF の計算値と、2 つの計測サイトで測定した実測値の比較を行う。使用された測定系のうち 1 つでは、トルソの無い状態での測定も行った。これにより、トルソの有無による HRTF の差異について明らかにすると共に、トルソ無しの擬似頭の計算値と実測値を比較する。

2 数値計算

境界を離散化して解く BEM を波動方程式に適用し、境界面として擬似頭の表面形状を与えることで HRTF の数値計算を行う [3]。本研究で用いる擬似頭のコンピュータモデルは、レーザースキャナ (Cyberware 3030 RGB/I) と Mirco CT スキャナを用いて計測した Brüel & Kjær (以下、B&K) 4128C HATS の擬似頭の 3 次元形状を元に構築されたものである [3]。外耳道はその入口で閉塞し、首底面は平面とした。頭部表面は音響的に剛とした。

3 測定

サイト 1: NTT コミュニケーション科学基礎研究所 (厚木市) 及びサイト 2: 東北大学電気通信研究所 (仙台市) の 2 つの計測サイトにおいて擬似頭の HRTF の測定を行った。いずれのサイトにおいても、無響室内に B&K 4128C を設置し、その頭部中心を原点とした一定の半径を持つ

球面上に配置されたスピーカ及び小型のコンデンサマイクロフォン (Panasonic, WM62AT102) を用いて作成された耳栓マイクロフォンを用いて、TSP 法 [4] によりインパルス応答の測定を行った。

サイト 1 では、擬似頭にトルソを装着した状態で HRTF を測定し、サイト 2 では、トルソを装着した状態及び取り外した状態の 2 つの条件で HRTF を測定した。なお、サイト 1 及びサイト 2 における測定系及び測定方法の詳細については文献 [5] を参照されたい。

4 結果

Fig. 1 に各実測及び計算による水平面上の音源に対する右耳の HRTF のコンター図を示す。横軸が対数スケールの周波数、縦軸が音源の水平角、カラーバーはゲイン [dB] を表している。水平角は正面を 0° として時計回りが正方向である。

トルソ有のサイト 1 (M1) とサイト 2 (M2a) の結果では、水平角によらない 2 kHz 弱の浅いディップと、4 kHz 水平角 $100\sim 150^\circ$ の深いディップが見られる。一方で、サイト 2 のトルソ無の実測値 (M2b) では、どちらのディップも浅くなり顕著ではなくなる。したがって、胴体の存在がこれらのディップの主因であると考えられる。また、同じくトルソ無の計算値 (S) では何れのディップも見られない。

Fig. 1 において、S の $10\sim 15$ kHz、 $60\sim 90^\circ$ の間に見られるディップは全ての実測値においても見られるものの実測値の場合には周囲のディップと繋がっており、計算値とは若干異なる特性を示している。

しかし、Fig. 2 に示したサイト 1 での左耳における実測値は計算値に近い高域のスペクトルを示している。なお、Fig. 1 との比較を容易にするため、水平角を表す縦軸の値を反転させて表示している。このような計算値と実測値の差、および実測値同士の差の主因は明らかではないが、低域でのトルソによる影響を除けば計算値

* Comparison of dummy-head HRTFs between boundary element simulation and measurements, by OTANI, Makoto, HIRAHARA, Tatsuya (Toyama Prefectural Univ.), ISE, Shiro (Kyoto Univ.), YAIRI, Satoshi, IWAYA, Yukio (RIEC, Tohoku Univ.), TOSHIMA, Iwaki (NTT CS Labs.)

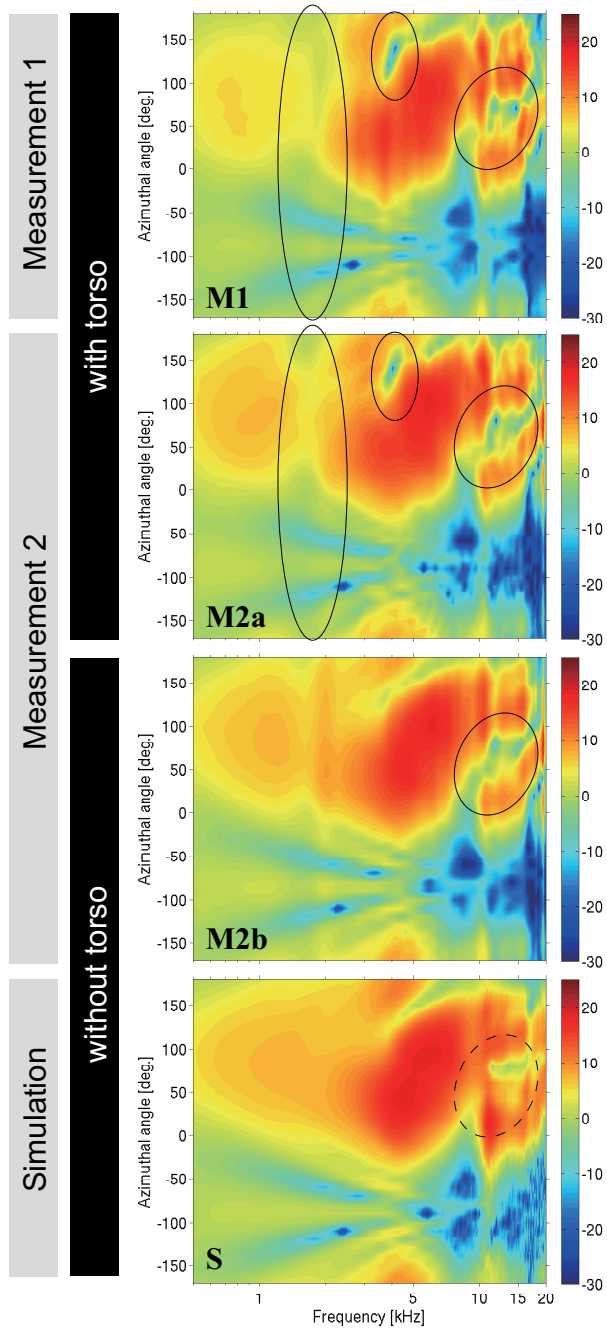


Fig. 1 Right-ear HRTF spectrum contours for each measurement and simulation.

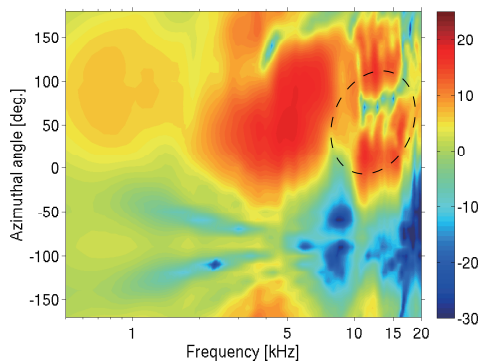


Fig. 2 A left-ear HRTF spectrum contour for site 1 measurement with torso. (M1)

Table 1 SD of HRTFs between simulation and each measurement. ([dB])

M1		M2a		M2b	
left	right	left	right	left	right
3.95	5.31	6.50	5.68	5.93	5.34

は実測値の主要な特徴を再現している。

Table 1 に計算値と実測値間の水平面 HRTF(10° 毎) のスペクトル距離 (Spectral Distance: SD) を 86 Hz から 20 kHz までで算出した結果を示す。サイト 1 での左耳の実測値と計算値の SD が最も小さい (3.95 dB)。この値は実測値の左右両耳間の SD の値 (M1: 4.62 dB, M2a: 5.46 dB, M2b: 5.09 dB) よりも小さく、サイト 1 での左耳の実測値と計算値が良好に一致している事が分かる。

5 まとめ

トルソの存在が HRTF スペクトルに与える影響を明らかにした。また、BEM により算出したトルソ無しの HRTF はトルソの有無により生じる実測 HRTF における差異を再現すると共に、サイト 1 で計測された実測値 (左耳) のピークやディップといった主な特徴のうちトルソの影響を受けない部分をほぼ再現しており、BEM によりトルソ無しの擬似頭の HRTF を再現できる事が分かった。

謝辞

本研究の一部は科研費 (18300042) 及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。数値計算に用いた頭部モデルは産業技術総合研究所、松下電器産業株式会社、京都大学が共同で構築したものであり、使用を許諾いただいた事に深謝する。また、小型マイクロフォン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 での測定に際してご協力いただいた東北大学の鈴木陽一教授及び千葉武尊氏に深謝する。

参考文献

- [1] W. Gardner and K. Martin, *J. Acoust. Soc. Am.*, **97**, 3907–3908 (1995).
- [2] B. Katz, *J. Acoust. Soc. Am.*, **110**(5), 2440–2448 (2001).
- [3] M. Otani and S. Ise, *J. Acoust. Soc. Am.*, **119**(5), 2589–2598 (2006).
- [4] Y. Suzuki, F. Asano, H-Y. Kim, and T. Sone, *J. Acoust. Soc. Am.*, **97**, 1119–1123 (1995).
- [5] 平原, 大谷, 矢入, 岩谷, 戸嶋, 聴覚研資, **38**(1) (2008.1).