

# 線音源/面音源による頭部伝達関数の高速計算法の検討\*

大谷真, 平原達也 (富山県立大・工), 伊勢史郎 (京大・工)

## 1 はじめに

これまでに境界要素法 (Boundary Element Method: BEM) に基づいて, 点音源に対する頭部伝達関数 (Head-Related Transfer Function: HRTF) を高速に算出する計算法を開発してきた [1, 2]. 本計算法は, BEM の計算過程を音源位置に依存しない部分 (pre-process) と依存する部分 (post-process) に分割し, post-process の計算量を最小化する事によって実現される. このような計算法と頭部のコンピュータモデルを用いる事により, 任意の音源位置に対する HRTF を高速に算出可能となる.

本計算法を用いれば音源の位置だけでなく点/面/線音源といった音源のタイプについても pre-process 終了後に設定可能であり, 本稿ではその方法について述べる.

一方, HRTF には距離依存性があり, 剛球モデルや実測を用いて検討が行われてきた (例えば [3]). 本稿では, HRTF の距離依存性について点/面音源に対する HRTF の数値計算を用いて検討する.

## 2 点/面/線音源に対する HRTF の算出法

BEM において最も計算時間を費やす計算過程は連立方程式を解いて境界要素上の音圧  $\hat{P}$  を算出する部分である. BEM の定式化に基づけば, 連立方程式は次のように表せる [1].

$$\left(\frac{1}{2}\mathbf{I}_M + \mathbf{G}_n + j\omega\rho\mathbf{G}\mathbf{Y}\right)\hat{\mathbf{P}} = g\mathbf{A} \quad (1)$$

従来の BEM では, 領域内の任意の点  $s$  における音圧は (1) 式で表される連立方程式の解を用いて,

$$P(s) = g_s - (\mathbf{G}_{ns} + j\omega\rho\mathbf{G}_s\mathbf{Y})\hat{\mathbf{P}}$$

と表される.

境界条件と受音点が一定で音源位置のみが変化するような計算条件を想定した場合, 次の手順により計算速度の向上が可能である. まず, pre-process として連立方程式

$$\left(\frac{1}{2}\mathbf{I}_M + \mathbf{G}_n + j\omega\rho\mathbf{G}\mathbf{Y}\right)^T \mathbf{Q}^T = (\mathbf{G}_{ns} + j\omega\rho\mathbf{G}_s\mathbf{Y})^T$$

を解き, 境界要素から受音点までの伝達関数を表すベクトル  $\mathbf{Q}$  を得る [2]. ここで,  $T$  は転置を表す. 次に, post-process として  $\mathbf{Q}$  を,

$$P(s) = g_s - \mathbf{Q}g$$

に代入する事で  $P(s)$  を算出する. ここで,  $g_s$  及び  $g$  はそれぞれ音源-受音点間及び音源-境界要素間の伝達関数であり, 次に示す 3 種の音源タイプに対して算出可能である.

- 点音源

$$g_s = \frac{e^{-jk\mathbf{r}_s}}{4\pi\mathbf{r}_s}, \quad g = \frac{e^{-jk\mathbf{r}}}{4\pi\mathbf{r}}$$

- 線音源

$$g_s = \frac{1}{4j}H_0^2(k\mathbf{r}_s), \quad g = \frac{1}{4j}H_0^2(k\mathbf{r})$$

- 面音源

$$g_s = e^{-jk\mathbf{r}_s}, \quad g = e^{-jk\mathbf{r}}$$

ここで,  $j$  は虚数単位,  $k(=\omega/c)$  は波数,  $\mathbf{r}_s$  は音源-受音点間距離,  $\mathbf{r}$  は音源-境界要素間距離,  $H_0^2$  は第 2 種 0 次 Hankel 関数である. このようにして, 事後的に定義される音源のタイプ及び位置に対する HRTF を高速に算出可能である.

## 3 点音源に対する HRTF の距離依存性

本節では, 前節で述べた数値計算法を利用して, 音源距離に依存しない面音源に対する HRTF と比較することにより点音源に対する HRTF の距離依存性について検討を行う. 本稿では, それぞれを”面音源 HRTF” 及び”点音源 HRTF” と呼ぶこととする.

B&K HATS 4128C の頭部コンピュータモデル (28,000 要素 Fig.3 左図) を用いて, 面音源を配置した場合と頭部中心から 0.1 ~ 3.0 m (0.01 m 毎) に点音源を配置した場合の外耳道入り口における 12 kHz までの応答を算出した. Fig.1 に水平角 30 度 (右前方), 頭部中心からの距離 3.0, 1.0, 0.5, 0.1 m に点音源を配置した場合及び同

\* A fast calculation method of HRTF for line and plane wave source by OTANI, Makoto, HIRAHARA, Tatsuya (Intelligent Systems Design Eng., Toyama Pref. Univ.), ISE, Shiro (Graduate School of Eng., Kyoto Univ.)

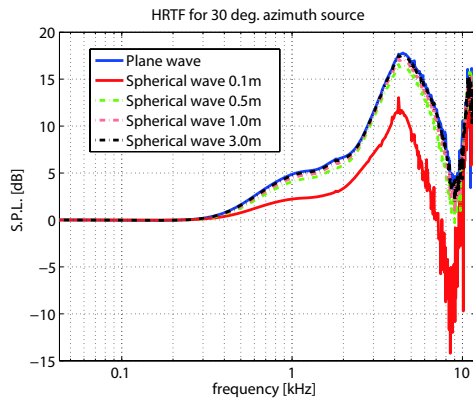


Fig. 1 HRTFs for plane and spherical waves.

じ方向に面音源を配置した場合の右耳における HRTF を示す。音源距離 3.0 m の点音源 HRTF は面音源 HRTF とほとんど差がないが、頭部に近づくにつれて両者の差は大きくなる。特に頭部中心からの距離が 0.1 m (体表から約 0.01m) の場合は高帯域におけるノッチ(谷)の位置がずれている。2種類の音源による差を定量的に表すために、Fig.2 に点音源 HRTF と面音源 HRTF のスペクトル距離(SD)を示す。音源方向は水平角 30, 120, -30, -120 度、点音源の距離は 0.1 m~ 3.0 m を対象とした。いずれの音源方向の場合でも音源距離が 1.0 m 以下になると SD の値すなわち両者の差が増大するものの、1.0 m 以上の距離では差の変化は小さく距離依存性が小さい。

Fig.3 に今回計算を行った全ての音源距離に対する点音源 HRTF のコンター図(水平角 30 度)を示す。なお、面音源 HRTF は距離に依存しないため省略する。Fig.3 からは、音源距離が 1.0 m 以上の場合は点音源 HRTF もほとんど変化は見られないが、1.0 m 以下では高域のノッチの現れる周波数と深さが変化していく様が見てとれる。比較のために、Fig.4 に外耳のみのモデル(8,340 要素 Fig.4 左図)を用いて同様の条件で計算した応答を示す。この図においても高域におけるノッチの現れる周波数と深さは Fig.3 と同じように変化しており、音源を頭部に近付けた場合に特に高域で変化が現れるのは耳介の影響であることが分かる。これは、音源が頭部中心に近づくにつれて耳介からみこんだ音源方向が大きく変化し [4]、また耳介の影響が高域において顕著に現れるためと考えられる。

#### 4 まとめ

これまでに提案してきた HRTF の高速計算法を用いて線音源及び面音源に対する HRTF を算出する方法について述べた。さらに、点音源と面音源に対する HRTF を比較することにより、

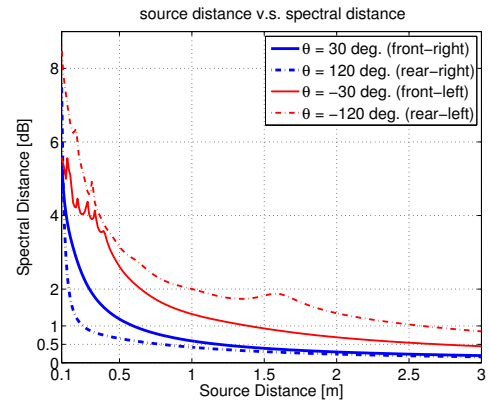


Fig. 2 Spectral distances of HRTFs between plane and spherical wave sources.

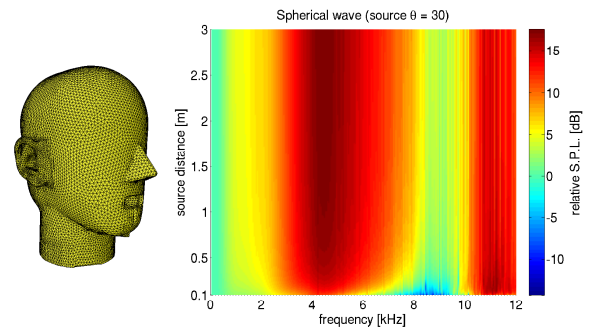


Fig. 3 HRTFs as a function of source distance.

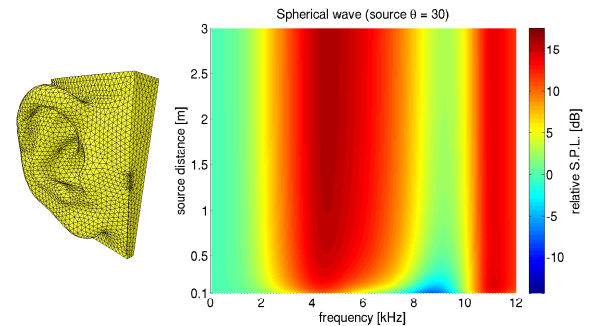


Fig. 4 Outer ear's transfer functions as a function of source distance.

HRTF の距離依存性について検討を行った。その結果、水平角 30 度において頭部中心からの方向を一定として点音源の距離を変化させた場合、1.0 m 以下では音源距離によって特にノッチの位置や深さが変化するが、逆にそれ以上の距離では、距離依存性の無い面音源 HRTF の特性に近く、また距離依存性が弱い事を数値計算によって確認した。

#### 参考文献

- [1] M. Otani *et al.*, *Acoust. Sci. & Tech.*, **24**(5), 259-266, 2003.
- [2] M. Otani *et al.*, *J. Acoust. Soc. Am.*, **119**(5), 2589-2598, 2006.
- [3] D.S. Brungart *et al.*, *J. Acoust. Soc. Am.*, **106**(3), 1465-1479, 1999.
- [4] Y. Suzuki *et al.*, *In Proc. of the 16th Intern. Cong. on Acoust. and 135th Meeting of the Acoust. Soc. of Am.*, VII, 2903-2904, 1998.