

## 頭部インパルス応答の初期部分に含まれる 胴体からの反射波に関する検討

☆川村海斗, 竹本浩典, 荻木禎史, 飯田一博 (千葉工大)

### 1 はじめに

頭部伝達関数 (Head-Related Transfer Function: HRTF) は主に耳介によって特徴づけられているが、頭部における回折波や胴体からの反射波の影響も含んでいる。しかし、胴体からの反射波は遅れて到達するため、頭部インパルス応答 (Head-Related Impulse Response: HRIR) に適当な窓かけを行うことでその HRTF への影響を抑制できる。従って、胴体からの反射波を抑制した HRTF は元の HRTF に比べて、耳介の形状パラメータからより精度よく推定できる可能性がある。

上半球正中面において HRIR の振幅が最大となる時刻を中心に前後 1 ms に対して Blackman-Harris 窓をかけ、切り出した初期 HRIR は、元の HRTF に含まれる主要なピークやノッチを含んでおり、音像定位精度は元の HRTF と同程度である[1]。また、そのスペクトルである初期 HRTF は全体として滑らかでピークやノッチを特定しやすい。そのため、耳介の形状パラメータから重回帰によって初期 HRTF を推定する研究が進められている[2]。

しかし、Raykar らは、正中面において HRIR の振幅が最大になる時刻より 1 ms 以内にも胴体からの反射波は含まれていること、真上方向から離れるほど胴体からの反射波が早く到達することを示している[3]。これは、窓かけによる胴体からの反射波の抑制の効果が仰角によって異なることを意味しているが、詳細は明らかになっていない。そこで、本研究では、音響計測用マネキン KEMAR の形状データと 3 次元音響シミュレーションを用いて、HRIR の初期部分に含まれる胴体の反射波の影響が HRTF にどのように現れるかを検討する。以降、HRIR の直接波における振幅最大の時刻から前後 1 ms を初期部分とする。

### 2 HRIR・HRTF の計算

音響計測用マネキン KEMAR (Large Pinna) の 3 次元形状データから「頭部+胴体」、「頭部のみ」の 2 形状を切り出した。これらの形状から時間領域差分法により、正中面における頭部中心から 1 m, 仰角 $-50^{\circ}$ ~ $230^{\circ}$  ( $10^{\circ}$ 間隔)の範囲で、HRIR を計算し、HRTF を求めた。この仰角の範囲は先行研究[4]とほぼ一致させた。なお、空間離散化間隔を 2 mm としたため、14 kHz 以上の成分は除去した。

### 3 結果と考察

右耳・左耳で同様の傾向がみられたため、以降は左耳のデータを示す。図 1 は「頭部+胴体」の HRIR と「頭部のみ」の HRIR の差の絶対値を「頭部+胴体」の HRIR の直接波の最大振幅で正規化したものである。これは主に胴体からの反射波であると考えられる。赤の直線は直接波の振幅が最大の時刻を示し、破線はその時刻から 1 ms 後を示す。すなわち、この範囲の反射波が HRIR の初期部分に含まれる。胴体からの反射波は真上方向では遅く (約 0.65 ms)、真上方向から離れるほど早く現れた (直接波の振幅最大と同時刻)。また、反射波の振幅は真上方向から離れるほど大きく、特に前下方では最も大きくなった。これらの結果は Raykar らの結果と一致する[3]。

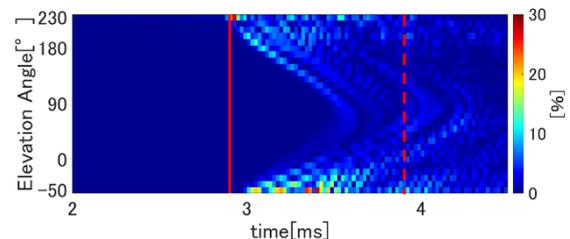


図 1 胴体からの反射波

図 2 は胴体からの反射波に図 1 における赤の直線の時刻の前後に 1 ms の長さの

\* A study on waves reflected from the torso included in the initial part of head-related impulse response”, by KAWAMURA, kaito, TAKEMOTO, Hironori, CHISAKI, Norifumi, and IIDA, Kazuhiro (Chiba Institute of Technology).

Blackman-Harris 窓をかけ、パワースペクトルにしたものである。つまり、HRIR の初期部分に含まれる胴体の反射波のスペクトルである。真上方向でレベルが低く、下方向ほどレベルが高い。これは図1で示したように、下方向ほど胴体からの大きな反射波が早く到達するため、窓かけによる抑制が有効でないことを表している。このスペクトルが「頭部のみ」の HRTF にそのまま加算されて「HRIR の初期部分」の HRTF になるわけではないが、レベルの高い部分はこの HRTF に影響を与えられとされる。すなわち、「HRIR の初期部分」の HRTF では、真上方向に近づくほど胴体からの反射の影響が小さく、遠ざかるほど影響が大きくなると予想される。

図3は「頭部+胴体」の HRTF、図4は「頭部のみ」の HRTF である。図3では仰角 90° を線対称軸とした縞模様がみられるが、図4

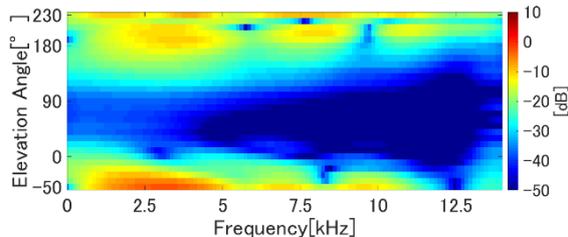


図2 窓かけ後の胴体からの反射波のパワースペクトル

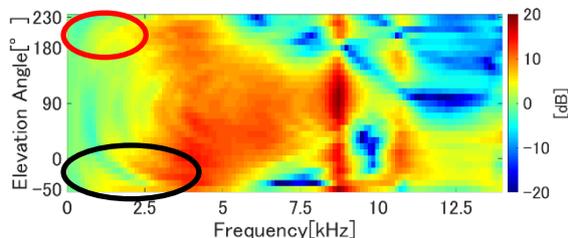


図3 「頭部+胴体」の HRTF

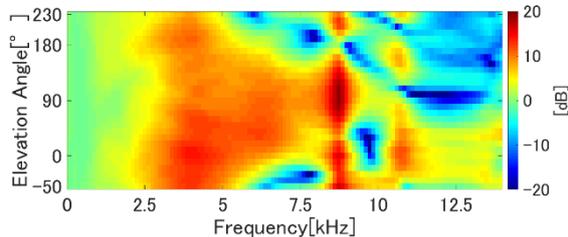


図4 「頭部」の HRTF

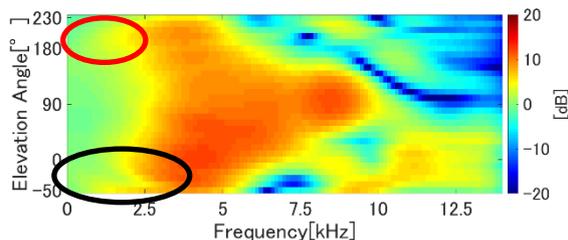


図5 「HRIR の初期部分」の HRTF

ではみられない。この縞模様は胴体からの反射波の影響である [5]。この影響は広い仰角にわたって表れていた。

図5は「頭部+胴体」の HRIR の直接波の振幅が最大となる時刻の前後 1 ms に Blackman-Harris 窓をかけて得られた「HRIR の初期部分」の HRTF である。水平面より下の仰角で低い周波数に図3でみられる胴体からの反射波の影響がみられる(図3, 4の黒と赤の丸)。一方、水平面より上の仰角(0°~180°)では胴体からの反射波の影響である縞模様がみられず、図4の「頭部のみ」の HRTF と類似する。これらの結果は、図2による予想と一致した。すなわち、胴体からの反射波は下の仰角ほど早く到達するため、窓かけによる抑制が十分でなく、その影響は「HRIR の初期部分」の HRTF にも現れたと考えられる。

また、窓かけは胴体からの反射波のみを抑制するわけではなかった。図3, 4では約9 kHzにはほぼすべての仰角で観察されるレベルの高いピークが存在する。ところが図5ではこのピーク共鳴は90°を中心とする狭い仰角にしか現れず、レベルも低下した。このピーク生成時の音圧分布を解析したところ、耳介の縦方向の第2共鳴であった。この共鳴は非常に強く、継続時間が長いので窓かけによりそのレベルが抑制されたと考えられる。

#### 4 まとめ

HRIR の最大振幅となる時刻を中心に前後 1 ms の Blackman-Harris 窓をかけて求めた初期 HRTF は、上半球正中面において胴体の影響をほぼ含まないが、下半球正中面においては特に 2.5kHz 以下の帯域において影響が観察された。

#### 謝辞

本研究は JSPS 科研費 JP19K12068 の助成を受けた。

#### 参考文献

- [1] Iida and Oota, Applied Acoustics.139, 14-23, 2018.
- [2] Iida *et al.*, Applied Acoustics.155, 280-285, 2019.
- [3] Raykar *et al.*, JASA.118(1), 364-374, 2005.
- [4] Algazi *et al.*, Proc. IEEE W ASPAA2001, 99-102, 2001.
- [5] Algazi *et al.*, JASA.112(5),2053-2064,2002.