

擬似頭を用いた受聴試験による方向知覚特性の検討

徳光 夕麻† 徳永 幸生† 杉山 精‡

芝浦工業大学† 東京工芸大学‡

1. はじめに

近年、様々なオーディオプレイヤの普及に伴い、音の臨場感を自在に制御する技術が求められている。音の臨場感とは、あたかもその場で体験しているかのような感覚を引き起こすものである。臨場感を得る1つの手段として音の方向知覚がある。人間は、両耳に到達するそれぞれの音に対して頭部や耳介の影響によって生じる時間差と音圧差から、音源がどの方向にあるのかを判断する^[1]。音は人間の鼓膜に到達する前に、頭部や耳介の影響によって変化する。この音の変化を表したものを頭部伝達関数(Head Related Transfer Function 以下、HRTF)という。このHRTFを試聴音に畳み込み、ヘッドホンで聞くことによって、臨場感のある音を再現する試みが行われている。これまでに楕円体モデルについて受聴試験を行い検討を行った^[2]。島田^[3]は人間を模した擬似頭SAMRAI(図1)を用いて、HRTFの周波数特性と時間特性を求めた。本報告では、これを用いた受聴実験を行い、耳介が方向知覚に与える影響を検討する。



正面 側面 耳介あり頭部 耳介無し頭部

図1 擬似頭SAMRAI

2. HRTFについて

HRTFは音源から出た音が鼓膜上に到達した音圧と自由音場音圧の比で式(1)のように定義される^[1]。擬似頭の場合、HRTFを3項目に分割できる^[3]。式で示すと

$$\begin{aligned}
 HRTF &= \frac{\text{信号} \times \text{スピーカー} \times \text{空間伝搬} \times \text{鼓膜} \times \text{マイク}}{\text{信号} \times \text{スピーカー} \times \text{自由空間} \times \text{マイク}} \\
 &= \frac{\text{空間伝搬} \times \text{鼓膜}}{\text{自由空間}} \\
 &= \left(\frac{\text{耳介ありのSAMRAI}}{\text{耳介なしのSAMRAI}} \right) \times \left(\frac{\text{耳介なしのSAMRAI}}{\text{耳介なし外耳道閉塞のSAMRAI}} \right) \\
 &\quad \times \left(\frac{\text{耳介なし外耳道閉塞のSAMRAI}}{\text{自由空間}} \right) \quad \dots(1)
 \end{aligned}$$

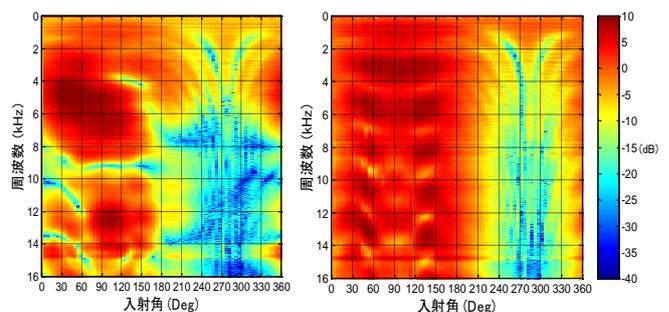
ここで、第1項は耳介を削ぎ落とす前後の耳孔入口音圧の比から耳介の集音効果、第2項は耳介を削ぎ落とした状態の鼓膜上の音圧と耳孔入口を閉塞したときの耳孔入口の音圧の比から外耳道の伝達効果、第3項は前記の音圧と自由音場音圧の比から頭部の回折係数を表している。本報告はイヤホン受聴を対象としているので、耳孔入口にマイクロホンを挿入した状態でのHRTFを改めてHRTF'とし、これを検討する。

$$\begin{aligned}
 HRTF' &= \frac{\text{信号} \times \text{スピーカー} \times \text{空間伝搬} \times (\text{外耳道入口のマイク})}{\text{信号} \times \text{スピーカー} \times \text{自由空間} \times \text{マイク}} \\
 &= \left(\frac{\text{耳介あり外耳道閉塞のSAMRAI}}{\text{耳介なし外耳道閉塞のSAMRAI}} \right) \times \left(\frac{\text{耳介なし外耳道閉塞のSAMRAI}}{\text{自由空間}} \right) \quad \dots(2)
 \end{aligned}$$

3. SAMRAIの測定

測定は長岡技術科学大学無響室で行われた^[3]。測定用信号は16次M系列信号、標本化信号は48kHz、スピーカ・SAMRAI 頭部中心は同一水平面内にありその距離は1.5mである。

右耳の耳孔入口における [(耳介あり外耳道閉塞のSAMRAI)/(自由空間)] および [(耳介なし外耳道閉塞のSAMRAI)/(自由空間)] の周波数特性を図2(a), (b)に、図2(a), (b)の周波数応答からインパルス応答を求めた結果を図3(a), (b)にそれぞれ示す^[3]。



(a) 耳介あり (b) 耳介なし

図2 SAMRAIの周波数特性

A Study on Sound Localization Properties Using artificial head by Auditory Test

†Yuma TOKUMITSU(ma11112@shibaura-it.ac.jp)

†Yukio TOKUNAGA (tokunaga@sic.shibaura-it.ac.jp)

‡Kiyoshi SUGIYAMA

†Shibaura Institute of Technology

‡Tokyo Polytechnic University

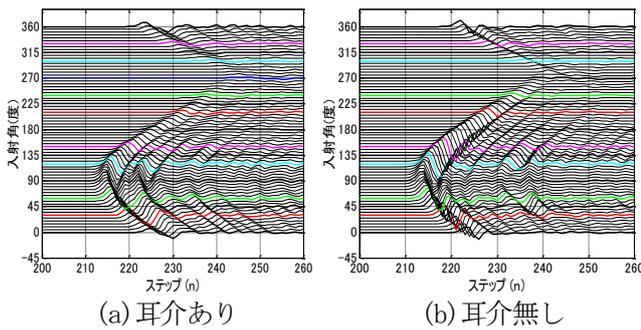


図3 SAMRAI のインパルス応答

図2の周波数特性から耳介の有無は入射角が90度の場合、4kHz から8kHz において集音効果があり、9kHz では集音効果がないことを示している。また、図3のインパルス応答では入射角90度では耳介ありの場合、第2の応答は主応答から7ステップ遅れて現れ、耳介なしの場合は5ステップ遅れて現れることを示している。

4. 畳み込み演算

式(2)で求めたHRTFは周波数特性なので時間系列であるインパルスレスポンスに変換する必要がある。因果律を満たすフーリエ逆変換を行ったインパルスレスポンスを $h(n)$ とし、音声信号 $x(n)$ とインパルスレスポンス $h(n)$ を畳み込むと音声の到来方向を制御できる。受聴信号 $y(n)$ は式(3)のように求められる。

$$y(n) = \sum_{k=0}^{N-1} h(n-k) * x(k) \quad (3)$$

5. 受聴試験

耳介ありと耳介なしのモデルについてそれぞれ作成した受聴音を使用して受聴試験を行った。被験者は男子大学生2名である。受聴音は16次M系列信号で標本化周波数32kHz、16ビットで量子化されたモノラル信号である。被験者には、受聴した音(以下、提示角)に対して、どの方向から聞こえてきたか(以下、応答角)を答えてもらう。その際、例えばどのような距離に音源があるのか、何度おきに作成した音なのかといった受聴音の情報は一切与えていない。被験者には0度から360度まで15度おきの角度の25個の受聴音を2回ずつ、計50個の受聴音をランダムに聞かせ、回答してもらった。0度と360度の受聴音は同じものであるが、確認のために両方とも使用した。図3を例にすれば、受聴音は90度のインパルスレスポンス $h(n)$ で畳み込んだ音を右耳に、270度の $h(n)$ の音を左耳に提示したとき、90度の提示角とした。提示角と応答角は、被験者の正面を0度とし、時計回りに音の方向と角度が対応している。なお、使用したヘッドホンは静電型長円形発音体、後方解放型エンクロージャのものである。

被験者2人の試験結果をそれぞれ図4に示す。耳介

ありのモデルの試験結果を四角形、耳介なしのモデルの試験結果を三角形でプロットした。提示角と応答角が一致した場合、結果は右肩上がりの直線を描く。図4(a)では耳介を加えたモデルでは直線に近い結果となっている。しかし、図4(b)では提示角に対する応答角の分布がS字曲線を描いており、前後誤判定が一部で起きている。特に、どちらの試験結果からも提示角0度から90度、270度から360度の範囲に前後誤判定が多く起こっており、前方向から音が聞こえにくいという傾向が見られる。ただし、このことから左右方向の取り違えはほとんど見られない。

図2の周波数特性および図3の耳介なしのインパルスレスポンスをみると、入射角0度、180度の特性には差異がみられないので前後誤判定が起り易いことは容易に推定される。

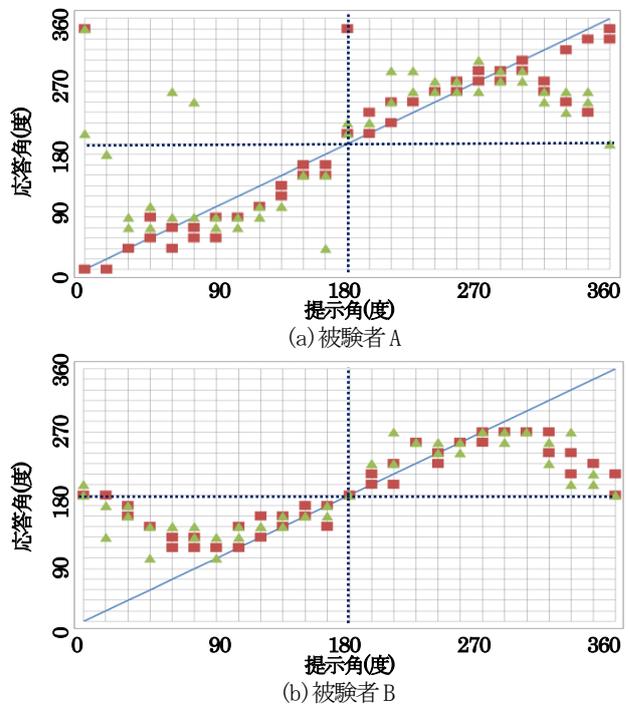


図4 受聴試験結果

6. おわりに

耳介を加えることにより、図4相当の受聴試験は前後誤判定が減少するといわれている^[1]。図4(a)の被験者は前後誤判定の減少が見られたが、図4(b)の被験者の試験結果には大きな改善は得られなかった。今後は何故、試験結果にこのような差が出たか検討を進めていく予定である。

参考文献

[1] J. Blauert, 森本政之, 後藤敏幸: 空間音響, 鹿島出版会(1986)
 [2] 徳光夕麻, 徳永幸生, 杉山精: 受聴試験による楕円体モデルを用いた方向知覚特性の検討, FIT 第10回科学技術フォーラム, E-018 (2011)
 [3] 島田正治, 杉山 精, 穂刈治英: 波動方程式と頭部伝達関数モデル, 亀田ブックサービス(2011)