

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

A Study on Sound Localization Properties Using Spheroid Model by Auditory Test

徳光 夕麻 徳永 幸生[†] 杉山 精[‡]

Yuma Tokumitsu Yukio Tokunaga Kiyoshi Sugiyama

1. はじめに

近年、様々なオーディオプレイヤーの普及に伴い、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(図1)。この音の変化を伝達関数で表したものが頭部伝達関数(以下、HRTF)である。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。HRTFは身体形状に強く依存するため、他人のHRTFで再現された音を受聴した場合、方向判断に誤りが生じるといわれている。しかし、個人に合わせたHRTFを毎回測定し作成することは困難である。そのため、人体の各部分がHRTFにどのように貢献するかを藤本^[2]は楕円体モデルで検討している。本報告では、受聴試験により楕円体モデルの妥当性を検討し、また人体各部分が方向知覚にどのように貢献するかを明らかにしたい。

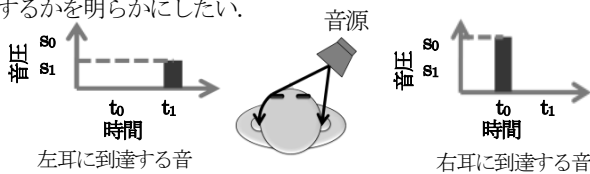


図1 音の変化の様子

2. 頭部伝達関数と回折係数との関係

HRTFは音源から出た音が鼓膜上に現れる音圧(p_3)と自由音場音圧(p_0)の比で式(1)のように定義される。

$$\begin{aligned} HRTF &= \frac{\text{信号} \times \text{スピーカー} \times \text{空間伝搬} \times \text{鼓膜} \times \text{マイク}}{\text{信号} \times \text{スピーカー} \times \text{自由空間} \times \text{マイク}} \\ &= \frac{\text{空間伝搬} \times \text{鼓膜}}{\text{自由空間}} \\ &= \frac{p_3}{p_0} = \frac{p_3}{p_2} \times \frac{p_2}{p_1} \times \frac{p_1}{p_0} \quad (1) \end{aligned}$$

擬似頭の場合、HRTFを3項目に分割できる^[3]。第1の項目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の項目は耳介を削ぎ落とした状態の鼓膜上の音圧(p_2)と耳孔入口を閉塞したときの耳孔入口の音圧(p_1)の比から外耳道の伝達効果、第3の項目は前記の音圧(p_1)と自由音場音圧(p_0)の比から頭部の回折係数を表す。

本報告では、図2に示すように、擬似頭を上から見ると頭部は扁平回転楕円体(以下、楕円体)とみなせ、耳介は頭部楕円体に円板が半分食込んだ状態とみなせる。本報告では第1の段階として、楕円体と円板とを組み合わせたモデルを考える。モデル図を図3に示す。

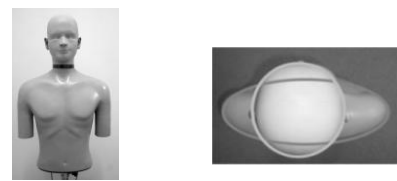


図2 擬似頭

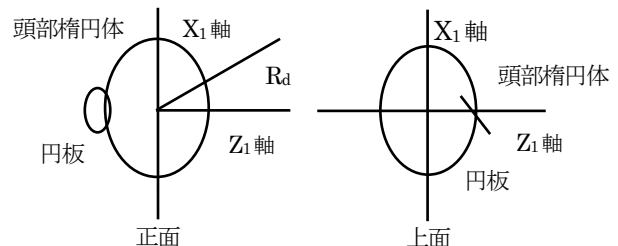


図3 モデル図の一例(頭部・耳介)

3. 頭部伝達関数の計算

楕円体と円板が同時に存在するときの耳孔位置相当のHRTFを波動方程式から直接に求められないので、音源からの入射波と各物体からの散乱波の重ね合わせを考える。

$$HRTF = \frac{\phi_E}{\phi_0} = \frac{\phi_{1r} + \phi_{1s} + \delta\phi_{3s}}{\phi_0} \quad (2)$$

ここで、 ϕ_{1r} は点音源から頭部楕円体の耳孔位置への入射波、 ϕ_{1s} は ϕ_{1r} の入射によって生ずる散乱波、 ϕ_{3s} は点音源から円板に入射して耳孔位置に到達する円板からの散乱波のそれぞれの速度ポテンシャルである。係数 δ は円板の貢献係数であり、 ϕ_0 は頭部楕円体の中心における点音源からの自由音場における速度ポテンシャルである。計算にあたって、頭部楕円体は長軸を20.34cm、短軸を15.8cmとし、円板は直径6.3cm、傾斜角30度で頭部楕円体表面の短軸上に円板の半分が埋め込まれた状態である。音源は頭部楕円体の中心から1.5mの所に点音源があるとしている。結果を図4に示す^[2]。

4. 畳み込み演算

先に求めた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

[†] 芝浦工業大学 mal1112@shibaura-it.ac.jp

[‡] 東京工芸大学

$x(n)$ 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)のように求まる^[4]。

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

頭部楕円体単体および頭部楕円体と耳介を組み合わせた時の $h(n)$ を図5に、「一週間ばかりニューヨークを取材した」という女声を用いたときの時間波形の一部を図6に示す。

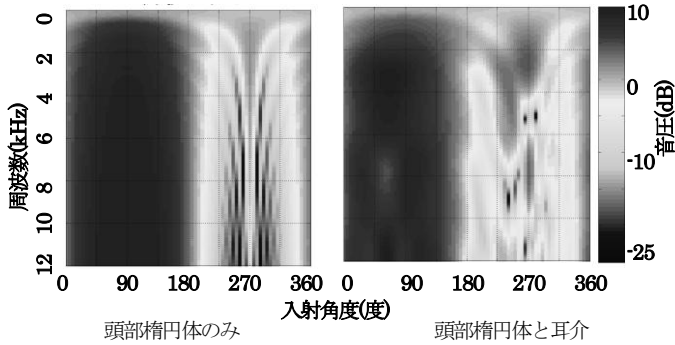


図4 周波数特性

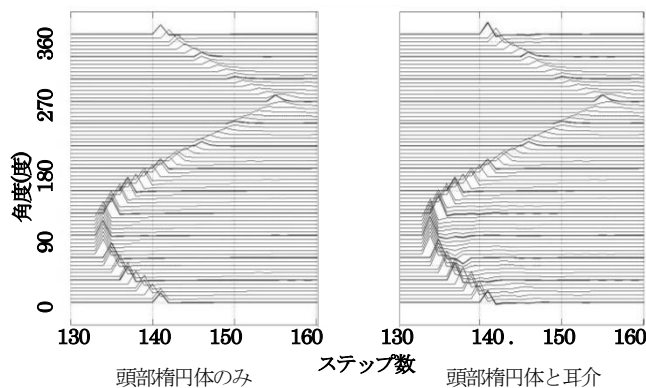


図5 インパルスレスポンス

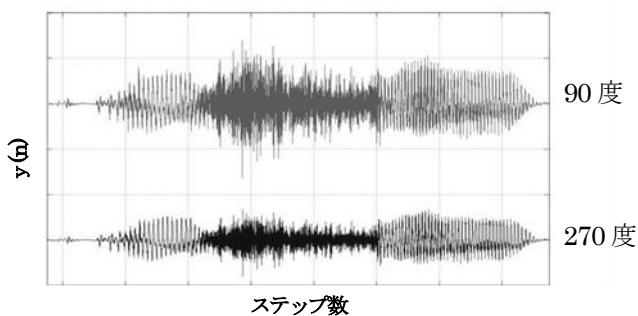


図6 畳み込まれた音声波形の一例

5. 受聴試験

頭部楕円体、頭部楕円体と円板のモデルについてそれぞれ作成した音声を使用して受聴試験を行った。被験者は男子大学生10名である。音声は女声で標準化周波数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5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ーのものである。

試験結果をそれぞれ図7に示す。被験者10人のうち2人の試験結果をプロットし、10人の試験結果の平均を線で結んだ。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。しかし、図7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4の周波数特性および図5の頭部楕円体のみ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。

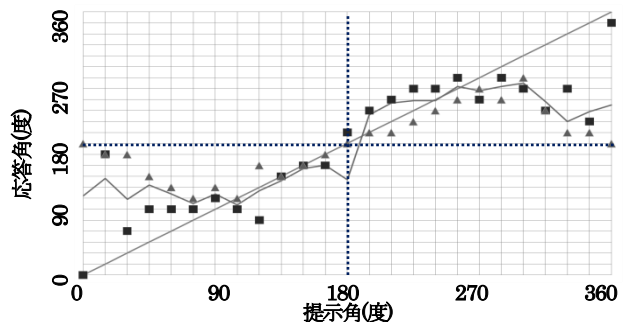


図7 頭部楕円体モデルを用いた試験結果

6. おわりに

頭部を球で作成した場合、図6相当の受聴試験はS字曲線になるといわれている^[1]。それを改善するために、頭部を楕円体にしたが試験結果に大きな改善は得られなかった。今後は前後誤判定を解決するために、耳介相当の円板を付加したモデルと肩・胸を付加したモデルを含めて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] 藤本和貴, 徳永幸生, 杉山精: 楕円体-円板系の回折係数, 信学技報, EA2009-75(2009)
- [3] K. Sugiyama: "Sound collection effect of a pinna of an artificial head," *Acoust. Sci. & Tech.*, 24(5) pp.311-314 (2003)
- [4] 有本卓: 信号・画像のデジタル処理, 産業図書(1993)