

## 外耳道入口までの音響特性の補正による 臨場感再現のためのヘッドホンの定位改善\*

工藤翔輝 (法政大学情報科学部), 伊藤克亘 (法政大学情報科学部)

### 1 はじめに

近年の新型コロナウイルスのパンデミックはオンラインライブやSNS、動画配信サイトを通じた配信での活動を活性化させた。しかし、オンラインライブではリスナー各々が使用する音響機器が違ふ為ライブの臨場感を損なう一面がある。また、音像定位についてはスピーカーは頭外定位、ヘッドホンは頭内定位となり、聴感も大きく異なる。実際のライブでは、会場に設置されたスピーカーから出力された音を聴取する為、頭外定位となる。臨場感の再現に適しているのはスピーカーでの再生であるが、音響機器の普及状況や移動中や騒音問題等の再生環境を考慮した時、手軽に楽しめるという点ではやはりヘッドホンが優位である。これらの観点から、ライブの臨場感を自宅や外出先でも再現する為、臨場感の一因と考えられるヘッドホンの頭内定位を改善する必要がある。

改善を行うにあたり問題となるのが、身体構造の差である。人間の外耳、中耳、内耳の構造は個人差があり、計測する事ができる。しかし、リスクやコストがかかる為、ユーザー自身が計測を行う事は考えにくい。一方で目視で確認できる耳殻から外耳道入口までの個人差は比較的シミュレートしやすい。

本研究ではスピーカーとヘッドホンの差を無くす為に、外耳道入口までの音響信号に対してイコライジングを施し、頭内定位を改善し、音定位の改善を行う。

### 2 従来研究

#### 2.1 HRTF と HpTF

人間がスピーカーから音を聴取する場合、HRTF(Head Related Transfer Function) [4] と呼ばれる伝達関数と外耳道の影響を受け、鼓膜を通過する。外耳道のインピーダンスを  $Z_{ec}$ 、鼓膜のインピーダンスを  $Z_{ed}$  として、図1にモデル化したものを示す。

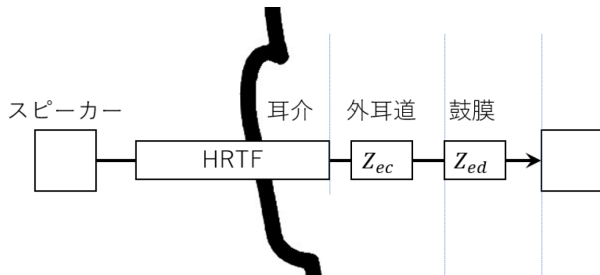


図1. スピーカーを使用したときの人間の音響情報処理

人間がヘッドホンから音を聴取する場合、ヘッドホンから外耳道、鼓膜のインピーダンスまでを伝達関数とし

\* Improvement of localization of headphones for realistic reproduction by calibrating acoustic characteristics up to the entrance of the ear canal by Kudo Kakeru. (Hosei Univ) et. al.

た HpTF(Headphone-To-Ear Transfer Function) を考慮する。図2にヘッドホンを使用した場合の、人間の音響情報処理モデルを示す。ここで  $Z_s$  は耳介とヘッドホンのイヤークップ内のインピーダンス、 $Z_{ec}$  は外耳道のインピーダンス、 $Z_{ed}$  は鼓膜のインピーダンスである。HpTF の計測結果からは外耳道の断面積は信号のゲインに影響し、外耳道の長さは HpTF の構造に影響がある事が明らかになっている [2]。しかし、実際に人間の外耳道の長さを正確に測定することは難しくリスクもある。

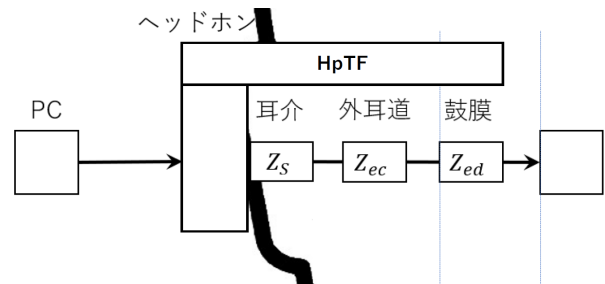


図2. ヘッドホンを使用したときの人間の音響情報処理

HpTF と HRTF の逆関数で畳み込んだキャリブレーションで仮想聴空間を作成した実験も行われている [3]。被験者に音の発生源の座標を問い、実際の音定位と比較する。結果として、キャリブレーションが適切に行われず、不十分な結果であった。これは人体構造の個人差に起因するものと考えられ、HpTF を畳み込むことにより 4-10kHz 付近の歪みを引き起こした。この歪が誤定位を発生する要因となると考えられる。

#### 2.2 HRTF/自由音場特性補正

HRTF/自由音場特性補正とは、ヘッドホンでもスピーカーと同じように自由音場特性を基準とした評価値を得るために補正である [5]。測定方法は、まずダミーヘッドに装着されたヘッドホンからの測定信号の入力に対する周波数特性をダミーヘッド特性としてデータ化する。そのダミーヘッド特性の逆特性でフィルタリングし HRTF/自由音場特性補正を行う。これによりスピーカーとヘッドホンの特性を同列に扱える。

### 3 耳介付近伝達関数

本研究では HRTF/自由音場特性補正を施し、外耳道入口までの HRTF と HpTF の一部である耳介付近伝達関数の逆特性を任意の音響信号に畳み込むことで仮想聴空間を作成する。定義する耳介付近伝達関数は図3に示す部分の伝達関数である。HRTF/自由音場特性補正はスピーカーで測定し、外耳道入口までのダミーヘッド特性の逆フィルタをヘッドホン特性へ畳み込み適用する。

外耳道以降の影響は、聴取者ごとに、全ての聴取方式

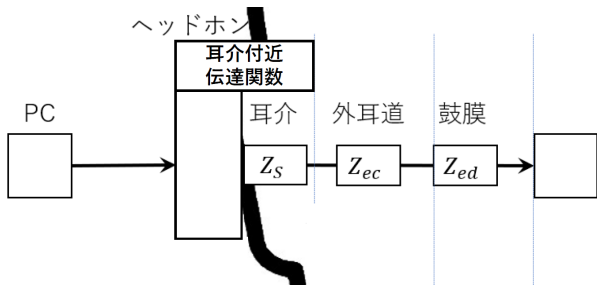


図 3. 定義する耳介付近伝達関数

に共通である。これらの観点から外耳道入口までの影響を伝達関数とし補正する。耳介付近伝達関数の逆フィルタを推定するまでの一連の信号処理を図 4 に、実際にシステムとして適用する際の信号処理を図 5 に示す。

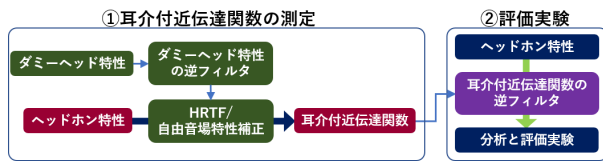


図 4. 本研究での信号処理

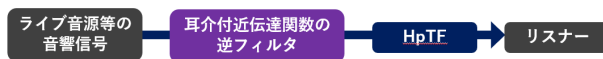


図 5. システムの概要

実験にはクローズドバックヘッドホン (Scarlett HP60 MkIII), オープンヘッドホン (ATH-AD900X), インサートヘッドホン (JABRA ELITE 4 ACTIVE) の 3 種類のヘッドホン (図 6,7 では各々 Closed, Open, Insert と表記する) を使用し, ダミーヘッドは 3Dio FS Pro2 を使用する。HRTF/自由音場特性補正を行うスピーカーには FOSTEX P804-S を使用した。音響機器から線形掃引信号 (TSP 信号) を発生させ, 接続したレコーダーで録音を行う。信号はサンプリング周波数 44.1kHz である。

### 3.1 測定方法

TSP 信号を入力として, ダミーヘッドのバイノーラルマイクを使用し外耳道入口までの音源をレコーダーで録音する。その後, 分析器で各々の音響機器の外耳道入口までの音圧周波数応答を推定し, HRTF/自由音場特性補正 (図 7 では Calibration と表記する) を施す。推定された耳介付近伝達関数の逆フィルタを推定する。

### 3.2 測定結果

ヘッドホン特性を図 6 に, 耳介付近伝達関数を図 7 に示す。結果から HRTF/自由音場特性補正によって 12kHz 地点までの低周波成分が減衰し, 17kHz 付近のノッチが緩和されている事が分かる。実際に聴取した音響信号には楽曲とホワイトノイズを選択した。クローズドヘッドホンについては他の形状のヘッドホンと比較し距離が離れているように聞こえる。一方でオープンヘッドホンは補正前と比較し方向定位が明瞭になっているように感じる。インサートヘッドホンは補正を行うと他の形状と比較して近い位置に音像が定位する。

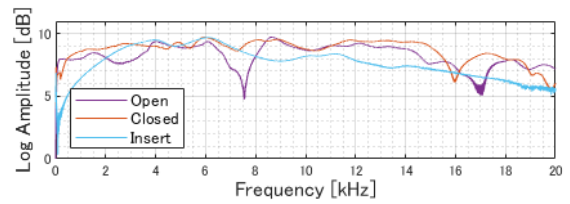


図 6. ヘッドホン特性

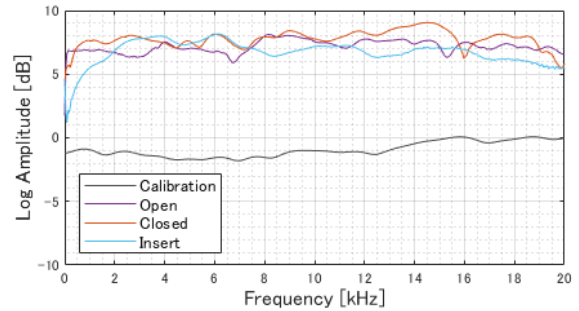


図 7. HRTF/自由音場特性補正と耳介付近伝達関数

## 4 まとめ・今後の展望

従来研究の結果と本研究の結果からヘッドホン装着時の外耳道入口までの音響特性の変化が音像定位に大きく影響していることが分かる。また本研究ではダミーヘッドを使用し実験を行っているが, 外耳道入口までの測定であれば実際の人頭での実験もリスクが少ない為, 測定用のバイノーラルマイクさえあれば個人性を保つことが可能である。また, HRTF/自由音場特性補正に関しても, 無響室での録音とフラットな特性を持つスピーカーを使用できれば, より音場再現性の高い補正が可能になる。

評価方法は立体音響と同等に評価をする。これは疑似的に HRTF/自由音場特性補正を施し, 仮想聴覚空間を作成している為である。ヘッドホンに起因するピークとヘッドホンの形状による特性の特徴を観察する為, 補正後の周波数特性を評価する。その後スピーカーで聴取した際の方向定位との正解率で評価する。これは, 頭内定位が改善されれば, 音像が頭外に定位し, 受聴者が方向を認識できると考えた為である。受聴者を中心とした水平方向 (仰角 0°) の斜め方向の 90° 置きに 4 箇所と仰角 45° の 4 箇所の HRTF を畳み込んだ音源に対して伝達関数の逆フィルタを畳み込んだ音源を被験者に, ヘッドホンで受聴してもらう。

### 参考文献

- [1] 岩谷幸雄, “頭部伝達関数による音像定位,” 音響学会誌, 73, 173-180 (2017).
- [2] J. Liu et al., “Headphone-To- 761 Ear Transfer Function Estimation Using Measured 762 Acoustic Parameters”, Applied Sciences, vol. 8, 763 no. 6, 2018
- [3] Pralong, et. al., “The role of individualized headphone calibration for the generation of high fidelity virtual auditory space.” Journal of the Acoustical Society of America, 100(6): December 1996.
- [4] 平原達也 他, “頭部伝達関数の計測とバイノーラル再生にかかわる諸問題,” 信学 FR 誌, vol.2, no.4, pp.68-85, April 2008.
- [5] 電子情報技術産業協会 (JEITA) 規格 RC-8140C 「ヘッドホン及びイヤホン」 (2020)