

## 両耳間時間差の周波数依存性の成因 – 円板モデルによる検討 – \*

大谷 真 (信州大学 工学部), 平原達也 (富山県立大学 工学部)

### 1 はじめに

音像の水平角の判断に重要な役割を果たしている両耳間時間差 (ITD: Interaural Time Difference) は、特に側方に音源が位置する場合にその値が高域よりも低域で大きくなる等、周波数に依存して変化することが知られている [1, 2]。我々は、このような ITD の周波数依存性の成因が、音源側の耳への音波の見かけの伝播時間が周波数に依存して変化する現象にあること [3]、また、この現象が頭部からの間接音に起因した音圧波形の位相変化により生じること [4]、を明らかにした。しかし、頭部のどの部位が原因となって ITD に影響を与える間接音を生じさせているのかは不明であった。

そこで、本稿では、頭部を単純な形状すなわち円板でモデル化し数値解析を行い、ITD の周波数依存性の原因をさらに検討した結果について報告する。

### 2 方法

#### 2.1 数値シミュレーション

厚みを持つ円板モデルを作成し、これを境界条件とする波動方程式に境界要素法 (BEM: Boundary Element Method) を適用し、音源側の耳に相当する受音点におけるインパルス応答を算出することで、周波数毎の音波の見かけの伝播時間を算出した。計算法は頭部モデルの場合 [4] と同様である。

円板の半径を  $r$  mm、厚を  $d$  mm とし、受音点を円の表面中心から 1 mm 外側、点音源を 1,000 mm 外側に配置した (図 1)。音速は 344 m/s (気温 20.5°C に相当) とした。円板表面は音響的に剛とし、86 Hz ごとに 20 kHz までの周波数応答を算出し、フーリエ逆変換により標準化周波数 44.1 kHz、信号長 512 のインパルス応答を導出した。円板の形状・寸法の影響を調べるために、 $(r, d) = (75, 2), (75, 10), (75, 20), (100, 10), (150, 10)$  の 5 条件で計算を行った。

#### 2.2 音波の見かけの伝播時間

周波数毎の音波の見かけの伝播時間を算出するために、両耳において観測されたインパルス応答に、様々な周波数のトーンバースト (5 波長分) を畳み込むことで両耳でのトーンバースト応答を算出した。音源信号及び受音点で観測された音圧信号に 8 倍のアップサンプリングを施し、両者の相互相関関数の値が最大

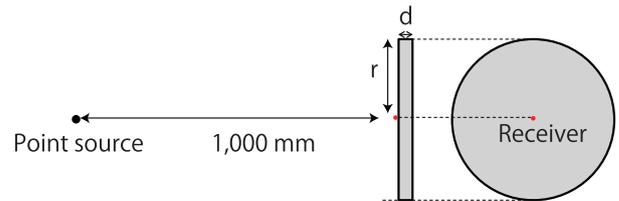


Fig. 1 Source and receiver configuration. The circular plate has radius  $r$  mm and thickness  $d$  mm.

となる観測信号の遅延量  $\tau$  を算出することで、音源から受音点までの音波の見かけの伝播時間を求めた。

### 3 結果

#### 3.1 頭部モデルとの比較

図 2 に、円板の厚を固定し ( $d = 10$  mm)、半径  $r$  を 75, 100, 150 mm とした場合の見かけの伝播時間を頭部モデルの結果 [4] と併せて示す。頭部モデルでは、音源から頭部中心までの距離を 1,000 mm と設定したため、受音点までの距離は 933.66 mm となる。このため、頭部モデルの見かけの伝播時間は、円板モデルよりも約 0.2 ms 短くなっている。円板・頭部の双方の結果において、

- 高域 (数 kHz 以上) では見かけの伝播時間はあまり変化せず、音波の実際の伝播時間 (円板の場合、約 2.9 ms) とほぼ等しい
- 中域 (数百 Hz ~ 数 kHz) では周波数が小さくなるほど見かけの伝播時間は減少する
- 低域 (数百 Hz 以下) では見かけの伝播時間はあまり変化しないが、その値は実際の伝播時間よりも顕著に小さい

といった特徴が見られ、円板の場合においても、頭部の場合と同様に、低域ほど見かけの伝播時間が小さくなるという現象が生じていることが分かる。また、上記 3 点の特徴が現れる帯域の境界周波数は円板の半径によって異なるが、 $r = 150$  の場合に頭部の場合の境界周波数 (2 kHz, 400 Hz) に最も近い特性を示しており、半径が小さくなるほど境界周波数は高域ヘシフトする。

図 3 に円板の半径  $r$  を 75, 100, 150 mm とした場合に受音点で観測されるインパルス応答を示す。円板の半径に関わらず、直接音のピークに続いて負の音圧を持つピークが生じており、他には大きな値を持つ

\* Origin of frequency dependence in ITD: Examination using circular plate, by OTANI, Makoto (Faculty of Engineering, Shinshu University) and HIRAHARA, Tatsuya (Faculty of Engineering, Toyama Prefectural University)

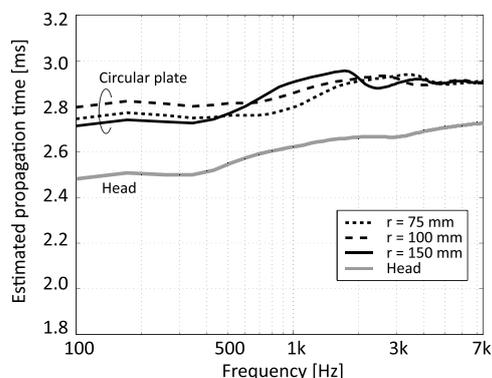


Fig. 2 Estimated propagation time  $\tau$  for circular plate model ( $d = 10$ ) with various radius  $r$ , along with that for head model.

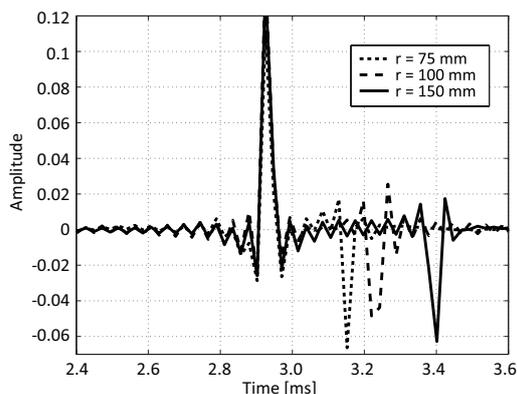


Fig. 3 Impulse responses for circular plate model with various radius.

成分は見られない。したがって、これらの負のピークが見かけの伝播時間を実際の音波の伝播時間よりも小さくする原因であることが分かる。直接音のピーク時刻を基準とすると、これらの負のピークはそれぞれ、 $0.23 \text{ ms}$  ( $r = 75$ ),  $0.30 \text{ ms}$  ( $r = 100$ ),  $0.48 \text{ ms}$  ( $r = 150$ ) 後に生じており、直接音と円板の縁辺を経由する間接音の経路差に対応している。したがって、これらの負のピークが円板の縁あるいは側面により生じる間接音であることが分かる。

### 3.2 円板の厚の影響

図 4 に、円板の半径を固定し ( $r = 75 \text{ mm}$ )、厚  $d$  を 2, 10, 20 mm とした場合の  $\tau$  を示す。 $d = 10, 20$  の場合には、見かけの伝播時間が周波数により変化しており、両者にはほとんど差は見られない。しかし、 $d = 2$  の場合には、見かけの伝播時間は自由空間における伝播時間 (約  $2.9 \text{ ms}$ ) とほぼ同じ値で一定となっている。図 5 に、各条件で観測されるインパルス応答を示す。図 4 に示した結果と同様に、いずれの厚の場合でも負のピークが現れるが、 $d = 2$  の場合のインパルス応答では、 $d = 10, 20$  の場合と比べて、その振幅が小さい。したがって、円板の厚が小さい場合には、直接音の影響が支配的となるために、見かけの伝播

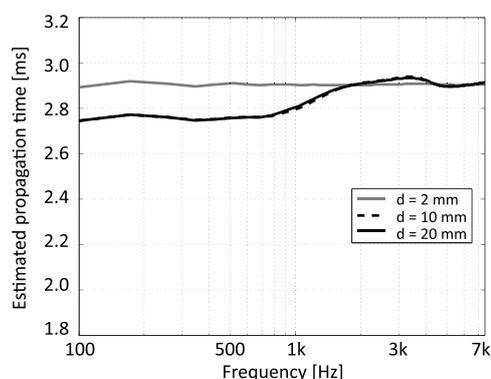


Fig. 4 Estimated propagation time  $\tau$  for circular plate model ( $r = 75$ ) with various thickness  $d$ .

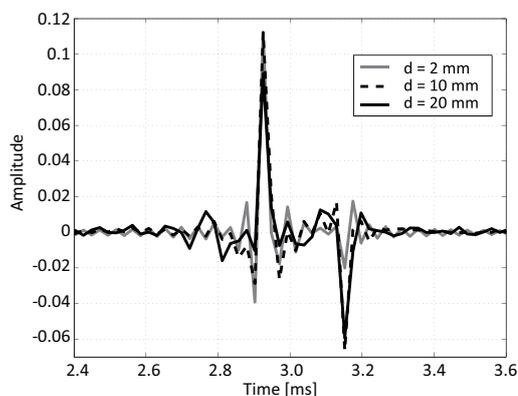


Fig. 5 Impulse responses for circular plate model with various thickness.

時間は周波数によらず実際の伝播時間と等しくなるものと考えられる。また、円板の厚、すなわち円板の側面の表面積に依存して負のピークの振幅が変化することから、この負のピークは円の縁ではなく円板の側面によって生じる間接音であることが分かる。

## 4 まとめ

頭部を円板により模擬した数値シミュレーションにより、ITD の周波数依存性の成因について検討を行った。結果より、円板の側面によって負の音圧を持つ間接音が生じ、この間接音が音源側の受音点における音波の見かけの伝播時間に周波数依存性を生じさせていることが分かった。円板の場合に観測された見かけの伝播時間の周波数特性は頭部の場合の特性と概ね一致していることから、頭部においても、同様の間接音を原因として、見かけの伝播時間及び ITD の周波数依存性が生じているものと考えられる。

謝辞 本研究の一部は、文部科学省科学研究費補助金若手研究 B(No. 23700142) による。

### 参考文献

- [1] Kuhn, *JASA* **62**(1), 157–167 (1977)
- [2] 鈴木他, 信学技報 **81**(37), EA81-7, 23–30 (1981)
- [3] 平原他, 音講論集 (春), 733–734 (2012)
- [4] 大谷他, 音講論集 (春), 735–736 (2012)