

両耳間時間差の周波数依存性の成因 – 数値解析編 – *

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は両耳間時間差 (ITD: Inter-aural Time Difference), レベル差といった両耳聴による手がかりが用いられる。ITD は音源の水平角により変化するが, 特に側方に音源が位置する場合には ITD の値が高域よりも低域で大きい等, ITD が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について, 音響計測により検討を行い, 音波が音源側の耳に到達するまでの見かけの「音速」が周波数に依存して変化する現象により説明され得ることを示した [3]。本稿では, この現象について, 理想的な無響環境での音波の挙動を再現できる数値解析を用いて検討した結果について報告する。

2 方法

頭部表面を境界条件とする波動方程式に境界要素法 (BEM: Boundary Element Method) を適用した。計算法の詳細については文献 [4] を参照されたい。磁気共鳴画像装置 (島津, Marconi Magnex Eclips 1.5T, ATR-BAIC) を用いて撮像した聴取者の頭部断面画像から頭部表面形状を抽出し, 3次元ポリゴンモデルを作成し, 境界形状として用いた (図 1)。

外耳道はその入口部分で閉塞されており, 受音点はその表面から約 1 mm 外側の位置とした。点音源を左側方, 頭部中心から 1 m の位置に配置した。音速は 344 m/s (気温 20.5°C に相当) とした。頭部表面はすべて音響的に剛とし, 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本化周波数 44.1 kHz, 信号長 512 のインパルス応答を導出した。

3 結果

3.1 ITD の周波数依存性

周波数ごとの ITD 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。波形の立ち上がりの応答を観察するために, トーンバーストにはテーパをつけていない。図 2 に 500 Hz における音源信号及び両耳での観測波形を示す。

音源信号及び両耳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

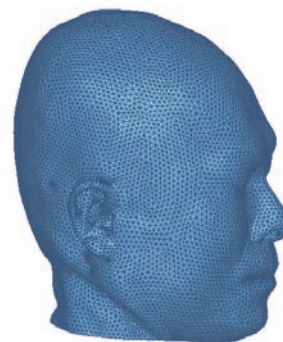


Fig. 1 Head surface shape model generated by MR scans.

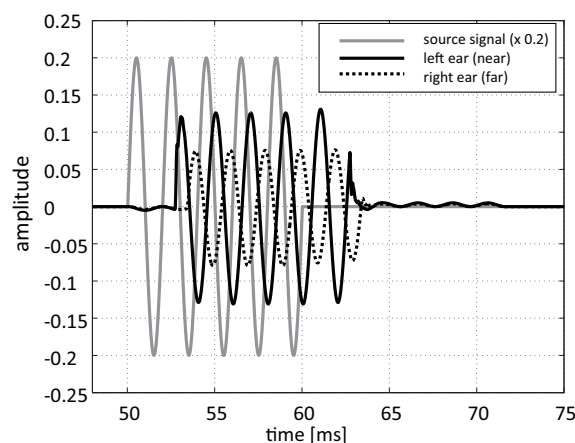


Fig. 2 Tone-burst responses at both ear-canal entrances for 500 Hz

が最大となる観測信号の遅延量 τ_L, τ_R を算出することで, 音源から両耳までの音波伝播時間, そしてその差分である ITD ($= \tau_R - \tau_L$) を算出した。

図 3 に, τ_L, τ_R 及びその差である ITD を周波数の関数として示す。横軸は対数軸である。 τ_R は周波数に比例してほぼ単調に増加しているのに対して, τ_L は 400 Hz と 3 kHz の間で急激に増加し, それ以外の帯域では右耳と同様に増加している。この結果として, 両者の差である ITD は, 400 Hz と 3 kHz の間では周波数とともに減少するが, それ以外の帯域ではあまり変化しない。なお, 図中の黒い円は実測結果から算出した ITD [3] であり, 600 Hz 以上で両者がほぼ一致していることが分かる。

3.2 ITD の周波数依存性の原因

前小節の結果から, 音波が音源から左耳に到達するまでの伝播時間が周波数によって変化し, このこ

* Origin of frequency dependence in ITD - Numerical simulation -, by OTANI, Makoto (Faculty of Engineering, Shinshu University) and HIRAHARA, Tatsuya (Faculty of Engineering, Toyama Prefectural University)

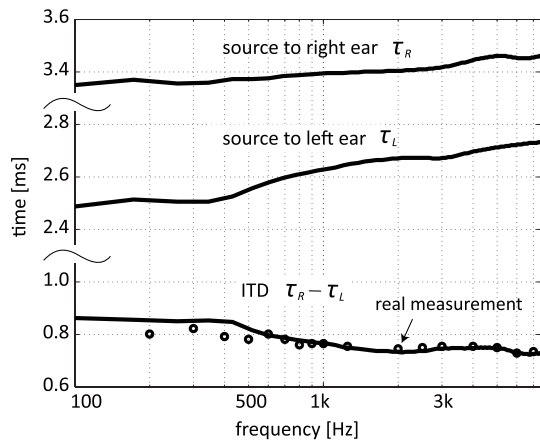


Fig. 3 Propagation time to both ears from source, τ_L and τ_R and ITD as a function of frequency. Black circle indicate ITD estimated by real measurement [3]

とが ITD の周波数依存性の原因となっていることが分かった。自由音場では、音源位置から左外耳道入口までの伝播時間は約 2.72 ms となるが、算出された伝播時間はこれより小さく、周波数が低くなるほどより小さい。この原因を調べるために、500 Hz において直接音成分と間接音成分を分離して算出した結果を図 4 に示す。直接音成分は自由音場において観測される波形と等しく、直接音成分と間接音成分の和が実際に観測された波形（以下、合成波と呼ぶ）と同一となることに留意されたい。図 4 より、直接音・間接音成分ともに波形の立ち上がり時刻はほぼ同じであることが分かる。しかし、間接音成分は、立ち上がり直後の波形が大きく歪んでおり、以降の時刻では直接波よりも早い時刻にピークが現れる。その結果、直接音と間接音の和である合成波のピークも直接音よりも早い時刻に現れる。したがって、ピーク位置や相互相関が最大となる遅延量などによって伝播時間を算出した場合、自由音場での伝播時間よりも小さく見積もられることになり、このことが ITD の周波数依存性を生じさせている。

図 5 に、直接波を基準とした間接波の位相差及び振幅比の周波数特性を示す。位相差の図より、3 kHz 以下の帯域では、間接波は直接波と比較しておおよそ 50 度から 80 度位相がずれており、この帯域で間接波が合成波のピーク位置を早い時刻にシフトさせるように働くことが分かる。一方、振幅比の図より、3 kHz 以下の帯域において、周波数が低くなるにつれて間接波の振幅が単調に減少していることが分かる。図 3 で示したように 400 Hz 以下で左耳への伝播時間及び ITD の周波数依存性が弱まるのは、この帯域では間接波の振幅が小さく、合成波の位相に与える影響が小さいことに起因していると考えられる。

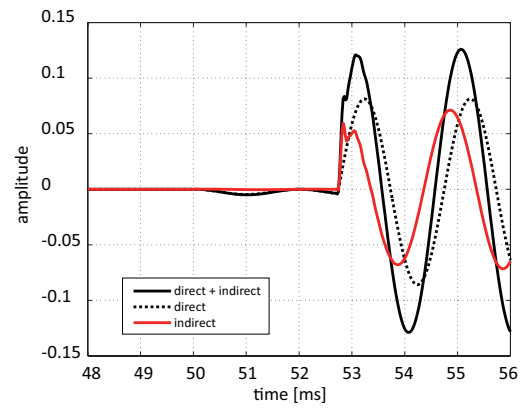


Fig. 4 Direct and indirect components of 500-Hz tone-burst response at left ear-canal entrance along with summed waveform.

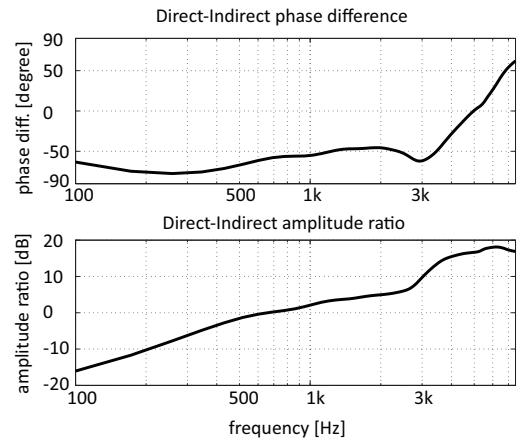


Fig. 5 Phase difference and amplitude ratio of indirect component compared to direct component.

4 結論

本稿での結果より、以下のことが明らかとなった。

- 間接波の位相変化が原因となって、音源側の耳への音波の到達時刻が見かけ上早くなる
- 周波数が低いほど、音源側の耳への見かけの伝播時間が短くなり、ITD は増加する
- 周波数が低いほど間接音の振幅は小さくなるため、その影響も小さくなる。その結果として、400 Hz 以下の帯域で ITD の周波数依存性は小さくなる。

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 (2012.3)
- [4] Otani *et al.*, *Proc. INTERNOISE2011* in CD-ROM, Osaka (2011).