

両耳間時間差の周波数依存性の成因—音響計測編—*

○ 平原達也 (富山県立大学)、大谷 真 (信州大学)、森川大輔 (富山県立大学)

1 はじめに

両耳間時間差 (ITD: Interaural Time Difference) は、音像の水平角判断に利用される音響的特徴の一つである。ITD は、音源から両耳までのインパルス応答波形の時間的なずれとして測られる。インパルス応答は、広帯域信号を用いて測定されるので、ITD は全帯域の代表的な値になる。しかし、周波数ごとに ITD を測ると、低域の ITD は高域の ITD よりも長くなる[1, 2]。この ITD の周波数依存性については理論的な考察もなされているが、その成因についてはよくわかっていない。

本稿では、純音バースト信号を用いて頭部側方の音源に対する ITD を測り、その周波数依存性の成因を検討した結果について述べる。

2 方法

2.1 計測方法

ダミーヘッドは、1.5T の MRI 装置で計測した頭部形状データに基づいて光造形した、エポキシ製のダミーヘッドである。ラウドスピーカ (Vifa, MG10SD0908) はダミーヘッドの耳軸上で左耳から 1060 mm 離して真横に設置し、スピーカコーンの前面 60 mm に小型マイクロホン M_{sp} を設置した。ダミーヘッドの両耳には、外耳道にシリコン印象剤を充填した中に小型マイクを埋め込んだ、耳栓マイクロホン M_L と M_R を装着した。マイクロホンは全て ECM-77B (SONY)、マイクロホンプリアンプは 1021 (Earthworks) である。

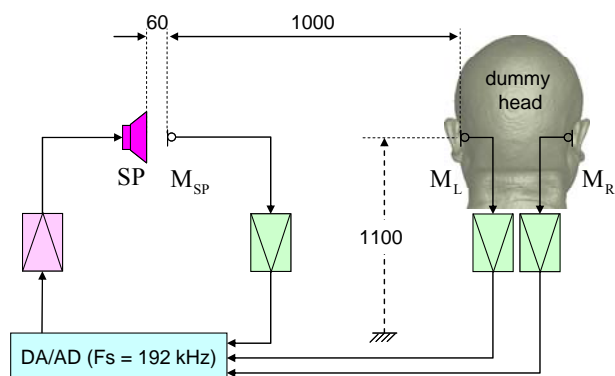


Fig.1 計測システムの概要

コンピュータから周波数 f の正弦波 5 周期のトーンバースト信号を出力し、パワーアンプ (SONY, TA-F501) を用いてスピーカを駆動し、三つのマイクロホンで受音した信号波形をコンピュータに取り込んだ。D/A と A/D 変換器は UA-101 (Roland) で、サンプリング周波数は 192 kHz、量子化精度は 24 bit とした (Fig. 1)。計測は暗騒音レベル 16.5 dB の防音室 (3580×3240×2300 mm) の中で行い、測定時の気温、湿度、気圧を記録した。

なお、三つのマイクロホンを同じ位置においた場合、受音信号に時間のずれが全くないことは別途確認した。

2.2 解析方法

三つのマイクロホン M_{sp} , M_L , M_R の受音信号をそれぞれ $S_{sp}(t)$, $S_L(t)$, $S_R(t)$ とし、 $S_{sp}(t)$ と $S_L(t)$ 、および $S_{sp}(t)$ と $S_R(t)$ の相互相関関数の値が最大となる観測信号の遅延時間を算出し、音源から左耳までの音波の伝播時間 τ_L と τ_R を求めた。ITD は τ_L と τ_R の差である。

なお、500 Hz 以下の低域では、スピーカの立ち上がり時の過渡応答によって、放射音波形 $S_{sp}(t)$ が変形して第一波の周期が短くなる。また、測定室の天井からの反射波がトーンバーストの放射後約 7.5 ms 以降に重畳するため、受音信号 $S_L(t)$ と $S_R(t)$ が変形する。そのために、低域では、それらの相互相関から正しい遅延時間を算出できない。そこで、低域では、受音信号が最初に極小値となる時刻から τ_L と τ_R を求め、それらの参考値とした。

3 結果

Fig.2 は $f = 1$ kHz の場合の各受音信号波形である。 $S_{sp}(t)$ には放射されたトーンバースト波形が現れている。しかし、 $S_L(t)$ はトーンバースト波形の最初と最後の部分がいずれも大きく変形しているとともに、後方には室内反射波が重畳している。一方、 $S_R(t)$ の波形は最初の部分ではあまり変形していない。この時

* Origin of frequency dependence in ITD - Acoustical measurement, by HIRAHARA Tatsuya (Toyama Pref. Univ.), OTANI Makoto (Shinshu Univ.) and MORIKAWA Daisuke (Toyama Pref. Univ.)

の τ_L は 2.828 ms、 τ_R は 3.594 ms、ITD は 0.766 ms であった。

Fig.3 は周波数を変えて計測した伝播時間 τ_L と τ_R 、およびその差である ITD を描いたものである。●は相互相関により求めた値、○は第一波の極小値から求めた参考値である。

ITD は 2 kHz 以上で約 0.75 ms だが、600 Hz では 0.802 ms で、低・中域の ITD は高域の ITD よりも長い。また、音源から両耳までの音波の伝播時間は低周波ほど短く、特に、左耳までの伝播時間 τ_L は急に短くなっている。

実線は中域 (600 Hz~1.25 kHz) および高域 (2 kHz~8 kHz) の τ_L および τ_R から求めた回帰直線である。 τ_L と τ_R の回帰直線の傾き ($\Delta\tau/\Delta\log_{10}f$) の比は、中域で 3.1、高域で 1.25 である。

4 考 察

測定条件では、自由音場における音速の理論値は周波数によらず約 340.2 m/s で、距離 1 m の伝播時間は約 2.939 ms である。これに対して、 τ_L は 4 kHz では 2.938 ms であったが、1 kHz では 2.828 ms、600 Hz では 2.771 ms と理論値よりも短かった。

$S_L(t)$ は第一波の先頭部分が急激に立ち上がっている。また、 $S_L(t)$ の第一波の $\pi/4 \sim 3\pi/4$ の波形を $S_{SP}(t)$ の波形に合わせると、第一波の約 $3\pi/4$ 以降 $S_L(t)$ 全体が前側にずれている。一方、 $S_R(t)$ ではこのような波形の変形とずれは少ない。そして、ダミーヘッドが無い場合このような受音波形の変形と位相のずれはない。したがって、 $S_L(t)$ の変形と位相のずれは、受音点のすぐ後側にある耳介と側頭面での反射波が音源からの直接波に重畳したために生じた、と考えられる。このことは、シミュレーションで検証している[3]。

このように、反射面に置かれた受音点では、周波数に依存して受音信号の位相がずれ、音源からの見かけの伝播時間が短くなる、あるいは、見かけの音速が速くなる。このため、低い周波数では ITD が長くなる。

また、実測した水平面の頭部インパルス応答全体から求めた ITD と 1 kHz 以下の帯域から求めた ITD では、最大約 170 μ s もの差異があった。私たちの聴覚が利用する ITD は約 1 kHz 以下の帯域のものなので、「ITD」の取り扱いには注意が必要と考えられる。

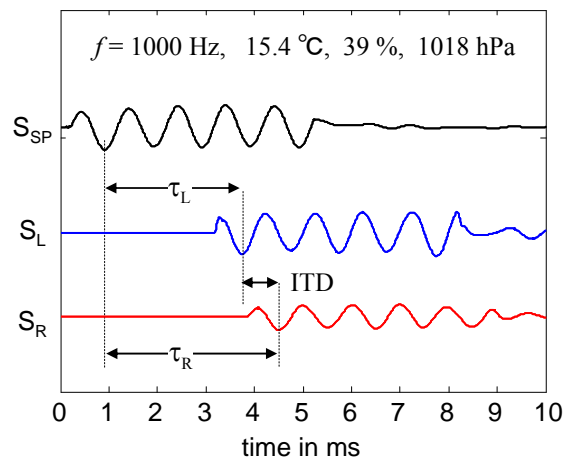


Fig.2 三つのマイクロホンの受音信号波形

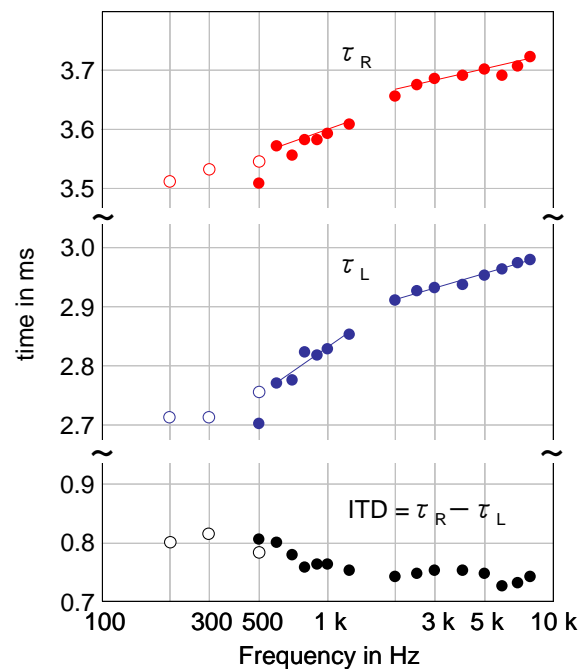


Fig.3 各周波数における τ_R , τ_L , ITD

5 結 論

側方の音源位置に対するダミーヘッドの ITD が低い周波数で長くなるのは、頭部による反射によって、音源から音源側の耳への音波の見かけの伝播時間が、周波数が低いほど短くなることに起因することがわかった。

謝 辞

本研究の一部は科研費(22300061)の助成を受けた。

参考文献

- [1] Kuhn, "Model for the interaural time differences in the azimuthal plane," *JASA* 62(1), 157-167 (1977).
- [2] 鈴木, 東山, "KEMAR 擬似頭の無響室における両耳間相関係数," 信学技報 81(37), EA81-7, 23-30 (1981).
- [3] 大谷, 平原, "両耳間時間差の周波数依存性の成因—数値解析編—," 音講論 (2012.03).