

両耳聴ヘッドトルソにおける音の回折が両耳間時間差に及ぼす影響について

Effect of Sound Diffraction on Interaural Time Difference Using Head and Torso

霜山 竜一[†]

Ryuichi Shimoyama

1. はじめに

動物は、低い周波数は音圧の両耳間時間差(ITD)、高い周波数は両耳間強度差(ILD)を利用して音源方向を推定することが知られている。生理学実験によると、鳥類と哺乳類では、ともに内耳部で音の周波数弁別が行われ、各周波数の特定の位相で神経パルスが聴覚中枢へ送られるが、その後のITDを推定するメカニズムが異なる[1][2]。哺乳類の両耳聴システムは、その特性が調整される高度な動的システムであると云われる[3]。いわばハードウェアとソフトウェアの両方で構成されているようにみえる。哺乳類の聴覚中枢において、数多くのニューロンが、その動物が経験しないと考えられるITD値に反応するように調整されている[3]など、動物の両耳聴システムの機能の多くは未だ解明されていない。

本研究では、両耳聴ヘッドトルソを用いて測定された、2系統の音響信号間の位相差の周波数特性から、両耳間時間差を計算した。位相差の多義性に起因して、時間差も多義的になることや、頭部や外耳による音の回折が両耳間時間差に及ぼす影響について述べる。

2. 時間差の計算法

図1に示すように、音源から放射された音はヘッドトルソの頭部や外耳等によって回折し、両耳奥に設置されたマイクロホンに到達する。音の回折によって、両マイクロホンに到達する音圧間の時間差は回折しない場合より長くなることが予想される。周波数 f_i における両耳間時間差 Δt_i は音圧の位相差 $\Delta\phi_i$ を用いて次式で表される。

$$\Delta t_i = \frac{\Delta\phi_i}{2\pi f_i} \quad (1)$$

位相差の多義性を考慮すると、式(1)は、

$$\Delta t_{ni} = \frac{\Delta\phi_i + 2\pi n}{2\pi f_i} \quad (2)$$

と変形できる。ここで n は整数である。式(2)は両耳間時間差が周波数に反比例し、 n の値に応じて複数の値をとることを示す。しかし、ある方向から到来する音に対して両耳間時間差は一定となり音の周波数に依存しないはずである。これは何に起因するのか。

[†]日本大学生産工学部 College of Industrial technology, Nihon University.

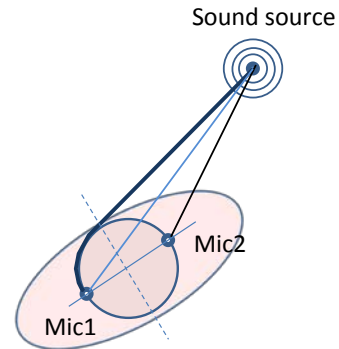


図1 ヘッドトルソによる音の回折とマイクロホンの位置

その理由は、式(2)で示される時間差値ではなく、周波数軸に沿う時間差の分布が音源方向と関係付けられるからである。時間差の分布を評価するために、式(2)から得られる複数の時間差値を用いて式(3)の評価関数 $L(\Delta t)$ が最大となる、すなわち周波数に依存しない時間差 Δt を求めた。

$$L(\Delta t) = \sum_n \sum_i \Delta t_{ni} \quad (3)$$

3. 実験結果

両耳聴ヘッドトルソから1[m]離して設置したゴルフボール大のスピーカから広帯域雑音を発生させた。回転台上のヘッドトルソ(Brüel&Kjær,4100-D)の向きを変えて音源の方向を設定した。ヘッドトルソの両耳部に内蔵されたマイクロホンの間隔は約13[cm]である。24[bit]分解能のA/D変換ボード(NI,PCI-4474)を装備したワークステーション(DELL,GX280)で2系統の音圧波形を同時収録した。サンプリング周波数は24[kHz]、各チャンネルの1フレームは4800個のデータを含む。ハニング窓を用いた。

音源方向40[°]で式(2)の $n=0$ とした場合の、両耳間時間差の周波数特性を図2に示す。時間差は、1[kHz]以下の周波数では1[ms]近くまで表示されるが、周波数が高いほど短くなるのが分かる。これは、周波数の全範囲にわたり1波長以下に相当する時間差のみが表示されるためである。当然のことながら1波長は周波数が高いほど短いから、時間差も短く表示される。黒く集中した時間差の分布は周波数軸と平行ではなく、この分布に式(3)を適用しても周波数に依存しない時間差を求めることは難しい。図3に音源方向40[°]で $n=-1,0,1,2,\dots,12$ の場合の両耳間時間差の周波数特性を示す。これは図2の分布に n の異なる13種類の分布を重ねて表示したものである。周波数の全範囲にわたり1波

長以上に相当する時間差が表示される。約 1[kHz]以上の周波数で時間差の集中する分布が複数箇所みられ、位相差の多義性に伴い時間差にも多義性が生じたことが分かる。時間差の分布は 300[μ s]付近で周波数軸に平行になった。この分布は、図 2 にはみられず、 n の値を多く設定し多義性を考慮した計算によってはじめて得られた。図 3 の両耳間時間差の周波数特性に対応するヒストグラムを図 4 に示す。音源方向が 40[$^{\circ}$]の場合に、評価関数 $L(\Delta t)$ が最大を示す両耳間時間差は 320[μ s]となった。図 5 は種々の音源方向に対して評価関数が最大となる両耳間時間差を計算した結果である。周波数に依存しない両耳間時間差は音源方向に比例して増加することが分かる。音源が真横にある場合の時間差は 730[μ s]であり、ヒトの両耳間時間差 700[μ s]に近い[4]。音が回折しない状況を想定し(頭部を無視)、真横(90[$^{\circ}$])から到来する音の到達時間差を計算すると約 393[μ s]となる。回折のない場合と比較して、頭部による回折によって両耳間時間差は約 1.9 倍になった。

4. あとがき

両耳聴ヘッドトルソを用いて測定された 2 系統の音響信号間の位相差の周波数特性から両耳間時間差を計算した。その結果、1) 周波数に依存しない両耳間時間差と音源方向は正比例する、2) 回折のない場合と比較して、頭部による回折によって両耳間時間差は約 1.9 倍になる、ことが分かった。今後は、多義性を考慮した両耳間時間差による音源方向推定法について検討する予定である。

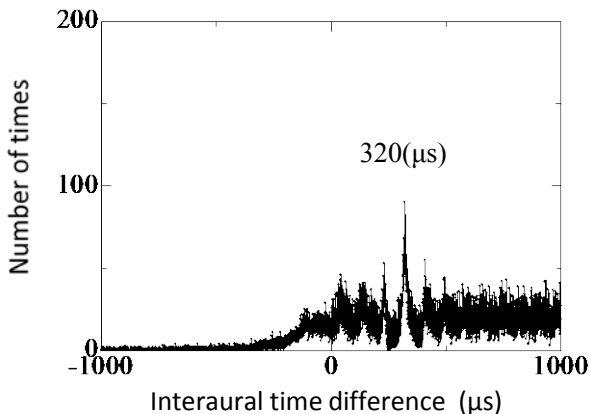


図 4 多義性を考慮した両耳間時間差の分布のヒストグラム : $L(\Delta t)$ (40° , $n = -1, 0, 1, \dots, 13$)

参考文献

- [1] G. Ashida and C. E. Carr
"Sound localization: Jeffress and beyond"
Current opinion in neurobiology, 21, pp. 745-751 (2011).
- [2] B. Grothe, M. Pecka and D. McAlpine
"Mechanisms of sound localization in mammals,"
Physiol. Rev. 90, pp. 983-1012 (2010).
- [3] P. Joris and T. C. T. Yin
"A matter of time: internal delays in binaural processing,"
TRENDS in neurosciences, 30, 2, pp.70-78 (2006).
- [4] F. L. Wightman and D. J. Kistler
"The dominant role of low-frequency interaural time differences in sound localization," J. Acoust. Soc. Am., 91, 3, pp.1648-1661 (1992).

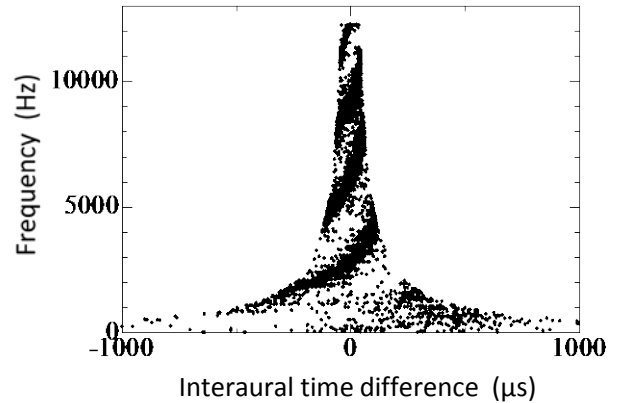


図 2 多義性を考慮しない両耳間時間差の周波数特性 (40° , $n = 0$)

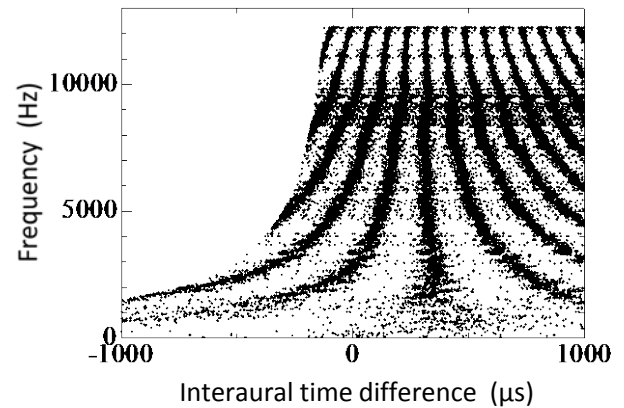


図 3 多義性を考慮した両耳間時間差の周波数特性 (40° , $n = -1, 0, 1, \dots, 13$)

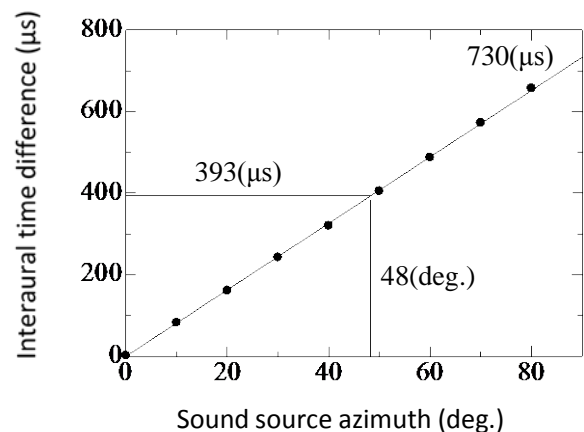


図 5 周波数に依存しない両耳間時間差と音源方向の関係