Vol.2020-MUS-127 No.25
Vol.2020-SLP-132 No.25
2020/6/7

すべての２音周波数組み合わせに対して知覚的同時性の範囲を予測可能な数式

岡崎 聡[1,a)]　一川 誠[2]　津崎 実[1]

概要：著者らはこれまで，2 つの純音の知覚的同時性の範囲の振る舞いを周波数ドメインで明らかにしてきた．本研究は，この振る舞いを数式で表現することに成功した．数式は，2 音の周波数領域と周波数距離の 2 変数で表される．特に，周波数距離を聴覚末梢の臨界帯域幅スケールで表すことによりシンプルな数式を得た．この数式により，知覚的同時性の範囲が，2 音のあらゆる周波数組み合わせに対して予測可能となった．

1. はじめに

2 音が物理的には非同時に開始していても知覚的には同時に開始したように感じられるわずかな時間差の範囲を「同時性の範囲」と呼ぶ．本論文では 2 つの純音に対する同時性の範囲の振る舞いを数式で表す．この数式により 2 音の同時性の範囲の値が任意の点で計算可能となる．このことは，ヒトの聴覚処理の時間解像度に興味のある読者（聴覚，音声，音楽の研究者など）に有用な情報となるだろう．

本論文では，同時性の範囲の振る舞いを周波数ドメインで扱う．2 音の周波数組み合わせ (f_1 と f_2, $f_2 > f_1$) は，連続量として系統的に 2 つの変数で表すことができる．f_1 と周波数距離 Δf である．ここで，f_1 に着目すると，f_1 の上昇は f_2 の上昇も引き起こすことから，f_1 は 2 音全体の周波数領域も表している．つまり，2 音の同時性の振る舞いは，周波数距離 f_1 と周波数領域 Δf の 2 つの変数の関数として表現することができる．

2. 同時性の範囲の図・表表現

我々はこれまで，2 つの純音に対する同時性の範囲の振る舞いをさまざまな f_1 と Δf で測定してきた [1], [2], [3]．これらの研究では $f_1 = 100$ Hz, 200 Hz, 800 Hz およびピッチ知覚可能な範囲の Δf で測定が行われた．その結果，具体的な値を報告せず条件差が有意であるか否かの報告しかしてこなかった先行研究と違い [4], [5], [6]，同時性の範囲の振る舞いを図形式で表すことに初めて成功した．**図 1** は

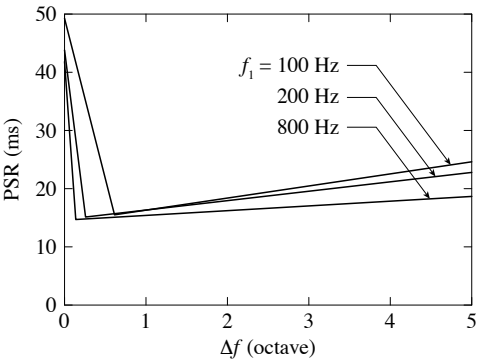


図 1　同時性の範囲-Δf の回帰曲線 (octave 軸)．

同時性の範囲の Δf に対する回帰曲線を $f_1 = 100$ Hz, 200 Hz, 800 Hz 条件ごとにプロットしたものである．Δf 軸は octave ($\log_2(f_2/f_1)$) で表現されている．同時性の範囲の値は Δf の増加とともに急峻に低下し，続いて緩やかに上昇する．曲線の折点の位置は f_1 により異なる．しかしながら，Δf を聴覚末梢の周波数距離表現である臨界帯域幅 Δz (Bark) で表すと，**図 2** に示すように，折点の位置はどの f_1 に対しても $\Delta z \approx 0.5$ Bark となる [3]．また，折点より左の直線は f_1 にかかわらず Δz 軸上で概ね一致する．折点より右側の直線は f_1 の増加とともにその傾きが低下する．**表 1** は，各回帰曲線のパラメータおよび折点の位置を示している．

3. 同時性の範囲の数式

ここで，同時性の範囲の数式を f_1 および Δz の関数として表す．これまで見てきたように，同時性の範囲の関数は Δz 軸上で下降直線と上昇直線からなる．そこで，この関数を折点 (x, y) で交わる以下の 2 つの直線区間で表す．

[1] 京都市立芸術大学
Kyoto City University of Arts, Kyoto 610–1197, Japan
[2] 千葉大学
Chiba University, Chiba 263–8522, Japan
[a)] sat.okazaki@kcua.ac.jp

ⓒ 2020 Information Processing Society of Japan

Vol.2020-MUS-127 No.25
Vol.2020-SLP-132 No.25
2020/6/7

表 1 各 f_1 に対する同時性の範囲-Δz の回帰曲線の下降部・上昇部の係数および折点の位置 ($y = \beta_0 + \beta_1 x$).

	Descending part		Ascending part		Breakpoint	
f_1	β_0	β_1	β_0	β_1	x	y
100	48.079	-62.784	16.366	0.568	0.501	16.651
200	42.959	-66.403	15.295	0.441	0.414	15.478
800	41.696	-50.442	14.639	0.179	0.535	14.734

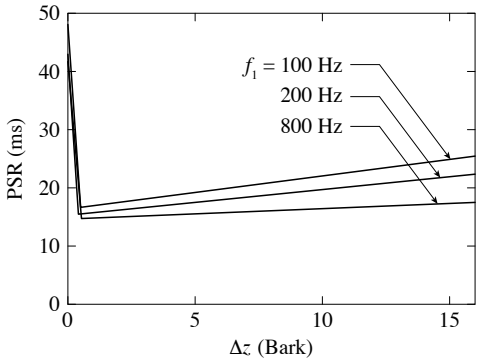


図 2 同時性の範囲-Δz の回帰曲線 (Bark 軸).

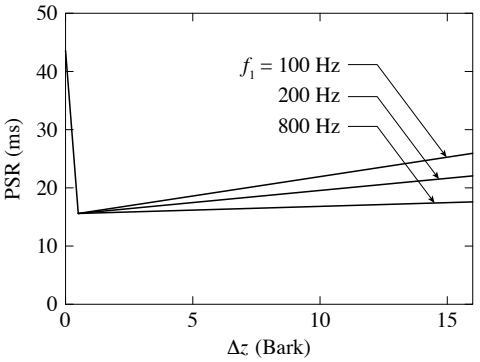


図 3 式 (3) による同時性の範囲-Δz の関数.

$$\begin{cases} \alpha(\Delta z - x) + y, & \Delta z \le x \\ \beta(\Delta z - x) + y, & \Delta z > x \end{cases} \tag{1}$$

ここで, 表 1 の折点の値から平均をとって, $x = 0.5, y = 15.6$ の値を得た．係数 α は，図 2 の下降直線が f_1 にかかわらずほぼ一致することから，定数となる．式 (1) の第一式を表 1 で示される下降直線に最小二乗法で回帰することにより，$\alpha = -56$ を得た．係数 β，すなわち折点より右の直線の傾きは，図 2 で示されるように f_1 によって変化する．同様の最小二乗回帰により，β に対し以下の近似式を得た．

$$\beta = [9(f_1/\mathrm{kHz}) + 0.6]^{-1}. \tag{2}$$

以上で得られた係数と式 (2) を式 (1) に代入することで，次式を得た．

$$\begin{cases} -56(\Delta z - 0.5) + 15.6, & \Delta z \le 0.5 \\ [9(f_1/\mathrm{kHz}) + 0.6]^{-1}(\Delta z - 0.5) + 15.6, & \Delta z > 0.5 \end{cases} \tag{3}$$

上式の第一式は次のようにシンプルに書ける．

$$-56\Delta z + 43.6 \tag{4}$$

この式に $f_1 = 100$ Hz, 200 Hz, 800 Hz を与えて Δz 軸上でプロットしたものが**図 3** である．図 2 の再現および簡素化に成功している．

4. 結論

我々は，同時性の範囲の振る舞いを周波数ドメインで記述する数式の導出に成功した．数式は f_1 (kHz) および Δz (Bark) を変数とし，下降直線と上昇直線からなる．折点は 0.5 Bark である．この数式により，読者はあらゆる 2 音の周波数組み合わせに対して同時性の範囲を計算することができる．

謝辞 本研究は JSPS 科研費 JP18J02110, JP16H01734 の助成を受けた．

参考文献

[1] Okazaki, S. and Ichikawa, M.: Perceptual simultaneity range as a function of frequency separation for two pure tones, *Acoust. Sci. Tech.*, Vol. 38, pp. 185–192 (2017).
[2] Okazaki, S. and Ichikawa, M.: Effects of frequency separation and fundamental frequency on perception of simultaneity of the tones, *Proc. Meet. Acoust.*, Vol. 29, p. 050004 (2017).
[3] Okazaki, S., Ichikawa, M. and Tsuzaki, M.: Perceptual simultaneity range as a function of frequency separation and frequency range for two tones, *Acoust. Sci. Tech.*, Vol. 40, pp. 367–373 (2019).
[4] Parker, E.: Auditory constraints on the perception of voice-onset time: The influence of lower tone frequency on judgments of tone-onset simultaneity, *J. Acoust. Soc. Am.*, Vol. 83, pp. 1597–1607 (1988).
[5] Sinico, M.: Influence of bichord interval on perception of simultaneity, *Percept. Mot. Skills*, Vol. 99, pp. 937–944 (2004).
[6] Wojtczak, M., Beim, J. A., Micheyl, C. and Oxenham, A. J.: Perception of across-frequency asynchrony and the role of cochlear delays, *J. Acoust. Soc. Am.*, Vol. 131, pp. 363–377 (2012).

ⓒ 2020 Information Processing Society of Japan