

リズム刺激がクロスモーダルな時間順序判断に与える影響

吉田 祥平

The Effect of the Rhythmic Stimulus on Cross-Modality Temporal Order Judgment

Shohei YOSHIDA

Abstract – In this study, we investigated the effect of the inter-trial time prediction by the memory and the within-trial time prediction by rhythmic stimulus on temporal order judgment. Participants made temporal order judgments (TOJs) regarding pairs of auditory and haptic stimuli under four conditions (Two sounds - Random condition (unpredictable), Two sounds - Fix condition (predictable inter-trial), Three sounds - Random (unpredictable), Three sounds - Fix (predictable within-trial)). The JNDs (just Noticeable Differences) results revealed that the inter-trial prediction did not facilitate the performance under the two sounds conditions (Two sounds-Random vs. Two sounds-Fix). By contrast, the inter-trial prediction facilitate significantly the performance under the three sounds conditions (Three sounds-Random vs. Three sounds-Fix), and within-trial prediction facilitate significantly the performance under the fix conditions (Two sounds-Fix vs. Three sounds-Fix). And PSSs (Point of Subjective Simultaneity) results were haptic-first side under each condition and showed that the inter-trial and within-trial prediction did not facilitate the performance under each conditions. These results suggest that the within-trial prediction enhances stronger attention than inter-trial prediction.

Keywords : simultaneity, temporal order judgment, time perception, time prediction, audio-haptic

1. はじめに

人間は視覚や聴覚、触覚など複数の感覚情報によって、環境を把握している。環境から得られる複数の感覚情報は、脳内で統合される必要があるが、その際に1つの対象やイベントに由来する情報を、同一の事象に属すると正確に知覚するためには、感覚間の時間的な整合性が必要であるとされており^{[1][2]}、Motion bounce illusionのように、ほんの少し刺激提示時刻がずれるだけで、人間の知覚が大きく変わってしまうこともある^[3]。つまり感覚情報統合のメカニズムを理解するためには、異種感覚間の時間知覚特性を調査することが必要不可欠である。

このような異種感覚間の時間知覚特性を調査するための課題の1つに時間順序判断課題 (TOJ: Temporal Order Judgment) がある。時間順序判断課題とは、提

示された2つの刺激がどちらが先であったかを判断する課題であり、2つの指標を用いて時間知覚特性を評価することが出来る^[4]。1つ目は、時間分解能を表す指標である刺激間のズレの弁別閾 (JND: just noticeable difference) である。2つ目は、人間が最も同時であると知覚しやすい点である主観的同時点 (PSS: point of subjective simultaneity) である。主観的同時点は、経験を積んだ被験者では、物理的同時点とほぼ一致するが^[5]、多くの場合、主観的同時点は物理的同時点と必ずしも一致しないことが報告されている^[6]。さらに近年では、刺激間のズレの弁別閾や主観的同時点で評価される人間の時間知覚特性が、注意や経験など様々な要因に依存して動的に変化することが明らかにされている^{[7][8]}。そのため、人間の時間知覚特性がどのような要因で変化するかが注目されている。

このように時間順序判断課題を用いて時間知覚特性

に関する研究がなされている一方で、同期タッピング課題を用いて感覚刺激に対する運動の同期メカニズムの解明を目的とした研究においても主観的同時点が注目されている^{[9][10]}。同期タッピング課題とは、周期的に提示されるリズム刺激にタップ動作を同期させる課題である^[11]。この同期タッピング課題において、タップ動作が聴覚刺激に対して20～50[ms]先行する負の非同期(NA: Negative Asynchrony)と呼ばれる現象が観察されている^[12]。この負の非同期現象が生じるためには、神経伝達や神経情報処理などによって生じる時間遅れを考慮すると、刺激の位置や提示時刻を予測することが不可欠であると考えられており、その発生メカニズムの解明のために同期タッピング課題を用いて時間予測モデルに関する研究が進められている^{[9][13]}。さらにThautらは、刺激音の周期に周期的な変化を加えた同期タッピング課題の先行研究において、応答周期が刺激周期に対して1ステップ遅れて追従することから、直前の刺激周期を用いて次の刺激提示時刻を予測していることを示唆しており^[14]、提示される刺激にリズムがあることによって、刺激提示時刻の時間予測を試行内で行うことができると考えられている。また同期タッピング課題における負の非同期現象は、最もタップする頻度の高い時刻を最も同期していると感じやすい点である主観的同時点と見なすと、聴覚刺激において触覚刺激が先行する側に主観的同時点が存在する傾向は時間順序判断課題での知見と一致するが、聴覚の時間順序判断課題では、主観的同時点と物理的同時点のズレは10数[ms]程度であり^[8]、量的な面では一致しているとは言えない。

このように同期タッピング課題と時間順序判断課題によって計測される時間知覚特性は、完全には一致していない。この不一致は、同期タッピング課題には時間順序判断課題に比べて運動や時間予測といった要素が含まれているために起こると考えられる。特に時間予測は、視覚の時間順序判断課題を用いた先行研究において、刺激提示時刻が予測できるように、ISIが短い、または長いという情報を含んだ視覚刺激のCueを与えた時、予測通りにTargetとなる刺激が提示される条件の方が、予測通りにTargetとなる刺激が提示されない条件よりも刺激間のズレの弁別閾を狭めることが報告されていることから^[15]、時間知覚特性を調査する上で重要であると考えられる。

以上のことから、先行研究では単一モダリティにおける時間予測ではあるが、時間的な選択的注意の影響

であると考えれば、異種感覚間の時間順序判断課題においても、時間予測が刺激間のズレの弁別閾を狭めるという仮説を立てることが出来る。さらに、仮に刺激提示時刻の時間予測が刺激間のズレの弁別閾を狭めるとすると、リズム刺激を用いると直前の刺激周期から次の刺激提示時刻をより正確に時間予測することが出来ると考えられるため、より一層刺激間のズレの弁別閾が狭まると考えることが出来る。

そこで本研究では、聴覚刺激の数で分類される2音条件と3音条件のそれぞれの条件において、聴覚刺激の提示時刻が予測できるFix条件と予測できないRandom条件の2条件(計4条件)で聴覚の時間順序判断課題を行い、各条件における刺激間のズレの弁別閾を比較することで、学習によって生じる刺激提示時刻の試行間での予測(以下、試行間予測とする)が刺激間のズレの弁別閾を狭めるという作業仮説を実証すると共に、2音Fix条件と3音Fix条件を比較することで、リズム刺激によって生じる直前の刺激間隔からの試行内での時間予測(以下、試行内予測とする)が、学習による試行間予測よりも刺激間のズレの弁別閾を大きく狭めるという作業仮説を実証する。また主観的同時点がどのように変化するかを観察し、リズム刺激がクロスモーダルな時間順序判断に対してどのような影響を与えるのか調査することを目的とする。

2. 実験方法

2.1 参加者

参加者は、20代(平均23歳)の健康な右利きの学生10名(男性9名、女性1名)であり、事前のアンケートですべての参加者が時間順序判断課題を行った経験がないことを確認した。

2.2 実験装置と刺激

実験は、聴覚刺激を妨害する恐れのある雑音を排除するために、遮音性の高いカナルタイプのイヤホンとイヤーマフを着用させることで、出来る限り静音下で行った。聴覚刺激は、残響の影響が少ないとされるホワイトノイズ(50[dB], 15[ms])を両耳に提示した。また触覚刺激は、Haptics DeviceであるPHANToM Desktop(SensAble)を用いて力覚(3[N], 15[ms])を参加者の右手に提示した(Fig. 1)。これらの刺激提示システムは、PHANToM Desktopの動作保証のあるPC(HP xw4600/CT Workstation)を用いて構築し、OS(Windows XP)上で起動するアプリケーションであるVisual C++ 2008を用いて開発および制御を行



Fig.1 Haptic stimulus (3[N], 15[ms]) was presented to participant's right hand by Haptic Device.

った。また刺激提示の際に生じる時間誤差は、どちらの刺激も 1[ms] 以下であった。

2.3 実験課題

本研究の課題は、聴触覚の時間順序判断課題 (Temporal Order Judgment) を用いた。この課題では、被験者は試行開始を告げる Cue(聴覚刺激) の後に提示される Target(聴覚刺激) とそれに合わせて若干のズレをもって提示される触覚刺激とのどちらが先に提示されたかを回答する。

2.4 実験条件

実験条件は、以下の 4 条件 (2 音 Random 条件, 2 音 Fix 条件, 3 音 Random 条件, 3 音 Fix 条件) である。

2 音 Random 条件

2 音 Random 条件は、Cue(聴覚刺激) の後に Target(聴覚刺激) が提示される。このとき、Cue と Target の刺激提示時刻の間隔である ISI (Inter Stimulus-onset Interval) は、Target の刺激提示時刻が予測できないように、600, 700, 800, 900, 1100, 1200, 1300, 1400[ms] の中から試行ごとにランダムに決定される。触覚刺激は、Target の提示時刻を基準として、SOA (Stimulus Onset Asynchrony) だけずらした時刻に提示される。SOA は聴触覚間の時間順序判断課題を行った先行研究に従って、-200, -90, -55, -30, -20, 20, 30, 55, 90, 200[ms] の 10 種類を用いた (負の SOA が触覚刺激先行を表す) ^[6]。

2 音 Fix 条件

2 音 Fix 条件は、2 音 Random 条件と試行内の流れは同一であるが、Target の刺激提示時刻が学習できるように ISI を 1000[ms] に固定した。これによって、試

行を繰り返す内に ISI を学習し、刺激提示時刻を試行間で予測できると考えられる。

3 音 Random 条件

3 音 Random 条件は、1 度目の Cue(聴覚刺激) の後に、1000[ms] の間隔をあけて 2 度目の Cue(聴覚刺激) が提示される。その後、Target の刺激提示時刻が予測できないように試行ごとに ISI を 600, 700, 800, 900, 1100, 1200, 1300, 1400[ms] の中からランダムに決定した。これによって、1 度目の Cue と 2 度目の Cue の時間間隔から、2 度目の Cue と Target との時間間隔である ISI を試行内で予測すると考えられるが、ISI は 1000[ms] になることはないため、予測は的中しない。

3 音 Fix 条件

3 音 Fix 条件は、3 音 Random 条件と試行内の流れは同一であるが、Target の刺激提示時刻を予測できるように ISI を 1000[ms] で固定した。これによって、Target の刺激提示時刻を直前の 1 度目の Cue と 2 度目の Cue との時間間隔から試行内の情報を用いて予測できると考えられる。

2.5 実験デザイン

本研究の実験全体は、練習 (1 ブロック) および本実験 (5 ブロック) の計 6 ブロックで構成される。1 ブロックは、2 音条件と 3 音条件のそれぞれにおいて Fix 条件 (1 セッション) と Random 条件 (1 セッション) の 2 条件があるため、合計で 4 セッションで構成され、各セッションは 10 種類の SOA を 5 試行ずつ行うため、50 試行の時間順序判断課題で構成される。そのため、本実験で各参加者が行った全試行数は 1200 試行である。なおセッション内の ISI や SOA、ブロック内のセッションの順序といった実験条件はランダムに決定した。また参加者は各セッション間に任意で休憩を取ることができ、休憩を含む実験全体の所要時間は 3 時間程度であった。

2.6 実験手順

試行が開始すると、まず聴覚刺激による Cue が条件に則して 1 度または 2 度提示される。その後、条件ごとに定めた ISI に従って、Target となる聴覚刺激が提示され、それに合わせて触覚刺激を提示される。その際の触覚刺激提示時刻は、10 個の SOA の中からランダムに決定した。刺激が提示された後、被験者は聴覚刺激と触覚刺激のどちらが先に提示されたかを二肢強制選択により判断し、左手でキーボードキーを用いて回答した。試行間の休憩は、回答が完了してから

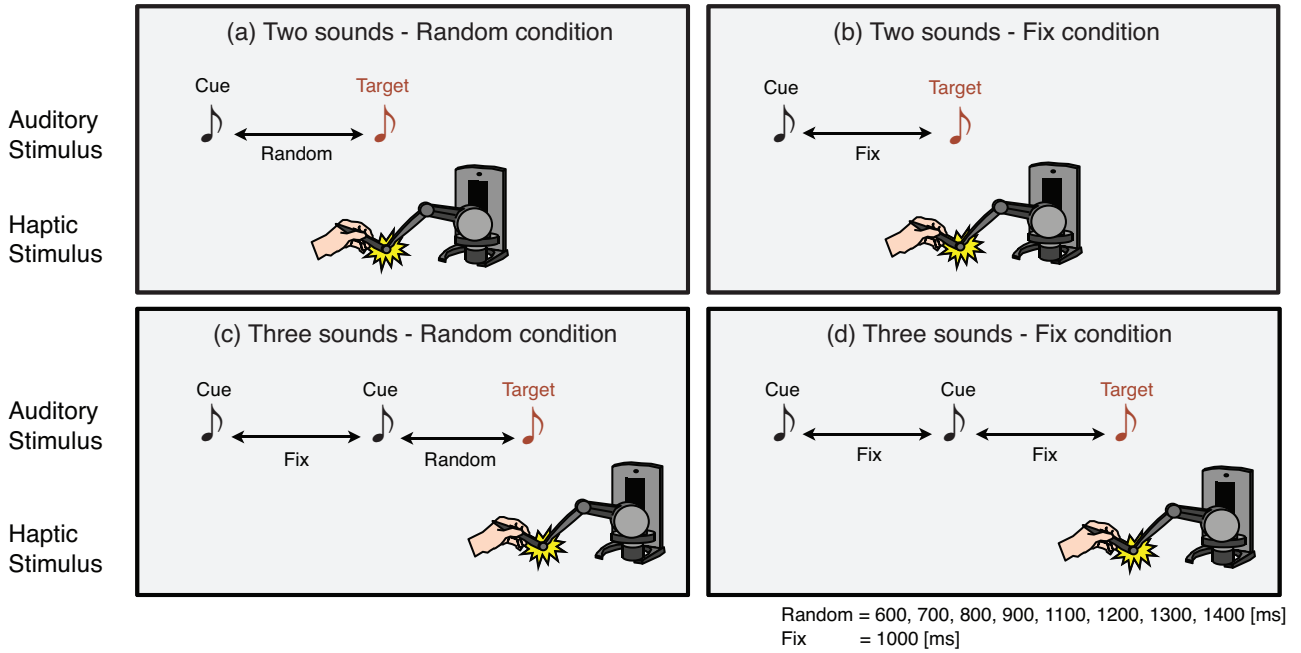


Fig.2 This study has four experimental conditions. (a) Two sounds - Random condition (unpredictable): ISI (Inter Stimulus-onset Interval) = 600, 700, 800, 900, 1100, 1200, 1300, 1400[ms]. (b) Two sounds - Fix condition (predictable inter-trial): ISI = 1000[ms]. (c) Three sounds - Random condition (unpredictable): ISI = 600, 700, 800, 900, 1100, 1200, 1300, 1400[ms]. (d) Three sounds - Fix condition (predictable within-trial): ISI = 1000[ms].

2000[ms] とした。

参加者には実験前の教示によって、試行中は視覚からの影響を排除するために瞑目し、聴覚刺激以外のリズムの影響を排除するために、手足など身体の一部を動かしてリズムを取ることを禁止した。さらに、2つの感覚情報が入力される際に、注意を向けた感覚情報がもう一方の感覚情報よりも先行しているように感じやすくなる prior entry effect という効果が確認されているため^[4]、参加者間で条件を揃えるために、試行中は常に指先に注意を向けるように教示した。

2.7 解析手順

各 SOA に対して聴覚刺激が先であると回答した頻度を算出し、縦軸に聴覚刺激が先に提示されたと回答した割合、横軸に SOA としてプロットした。また参加者の回答は、誤差が二項分布に従うと考えられるため、先行研究と同様の方法^[16]で一般化線型モデルに基づきロジスティック曲線により回帰した。回帰式として、以下の式を用いた。

$$y = \frac{1}{1 + e^{\frac{\alpha - x}{\beta}}} \quad (1)$$

また回帰によって得られる α および β を用いて、刺激間のズレの弁別閾値 (JND) と主観的同時点 (PSS) は

以下の式のように定義する。

$$JND = \frac{(x_{0.75} - x_{0.25})}{2} \quad (2)$$

$$= \beta \log 3 \quad (3)$$

$$PSS = x_{0.5} \quad (4)$$

$$= \alpha \quad (5)$$

このとき、 x_p は聴覚刺激が先と回答した割合 (縦軸 y の値) が p の時の刺激間のズレの大きさ (x 軸の値) である。

3. 結果

まず参加者ごとに聴覚刺激が先と回答した頻度を算出したところ、10 名中 1 名の参加者において、SOA=200[ms](触覚刺激に対して聴覚刺激が 200[ms] 先行して提示される) 条件で、聴覚刺激が先であると回答した割合が 75[%] より低かった。SOA=200[ms] では、一般的に 90[%] 程度の確率で音が先であると回答できるとされている^[4]。そのため、先行研究の基準に従い^[17]、課題が適切に行えなかったと判断し、この参加者を除いた 9 名のデータを用いて以降の解析を行った。

Table 1 Mean and standard errors of the JND and PSS values (in ms) for each conditons.

Condition		Two Sounds		Three Sounds	
		Random	Fix	Random	Fix
JND	Mean	56.2	48.2	52.4	42.2
	Standard Error	11.7	8.2	9.5	7.1
PSS	Mean	-18.4	-10.8	-14.9	-14.7
	Standard Error	13.1	6.0	8.3	5.2

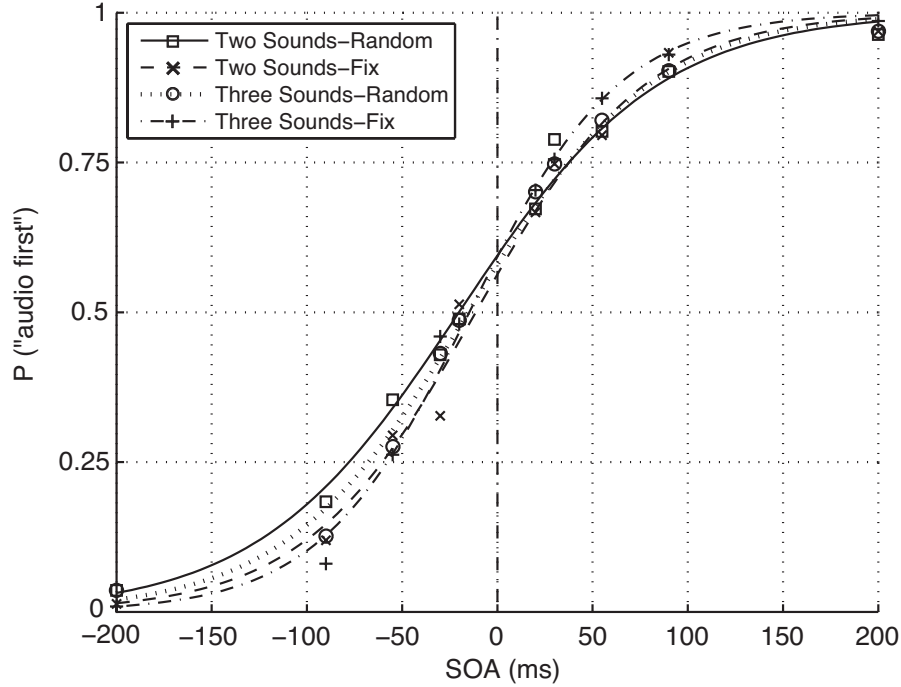


Fig.3 TOJ data and average psychometric functions across all participants under each condition.

有効なデータを取得できた9名の参加者のデータを平均し、回帰した心理物理曲線をFig. 3に示す。Fig. 3から、曲線の傾きには各条件間での違いが見られ、その結果、SOAが負の値を取る範囲で曲線がばらついている。さらに3音Fix条件においては、SOAが負の値を取る範囲だけでなく、SOAが正の値を取る範囲でも正答率が高く、他の3条件の曲線から乖離している。しかしながら、縦軸の値が0.5を取る時の横軸の値である主観的同時点には、各条件間で大きな変化が見られない。このようにFig. 3からは、定性的に条件間での差が観察された。そこで条件間の差を定量的に評価するために、参加者ごとに回帰を行うことで刺激間のズレの弁別閾値(JND)および主観的同时点(PSS)を算出し、統計処理を行うことで得られた平均

値および標準誤差をTable 1およびFig. 4, 5に示す。

この結果に対して、対応のある因子(試行内予測要因: 2音条件 vs. 3音条件)と対応のある因子(試行間予測要因: Random条件 vs. Fix条件)の二元配置分散分析(repeated measures within-within ANOVA)を用いて検定を行ったところ、Fix条件の方がRandom条件より5[%]水準で有意に刺激間のズレの弁別閾(JND)の値が小さかった(試行間予測要因の主効果: $F(1,8)=7.26, p=0.027$)。また3音条件と2音条件との間にも5[%]水準で刺激間のズレの弁別閾の値に有意な差が確認された(試行内予測要因の主効果: $F(1,8)=5.90, p=0.041$)。

このように刺激間のズレの弁別閾に関して、刺激提示時刻の試行間予測および試行内予測による主効果

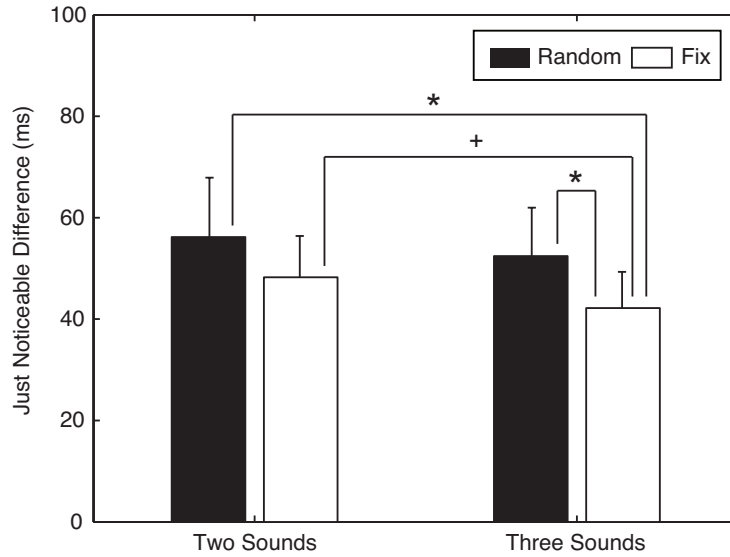


Fig.4 Just Noticeable Difference (JNDs) for the inter-trial prediction (Random (unpredictable) condition vs. Fix (predictable inter-trial) condition) for within-trial prediction (Two sounds condition (unpredictable) vs. Three sounds condition (predictable within-trial)), showing that the inter-trial prediction did not facilitate the performance under the two sounds conditions (Two sounds-Random vs. Two sounds-Fix). By contrast, the inter-trial prediction facilitate significantly the performance under the three sounds conditions (Three sounds-Random vs. Three sounds-Fix), and within-trial prediction facilitate significantly the performance under the fix conditions (Two sounds-Fix vs. Three sounds-Fix). The errors bars indicate the inter-subject standard errors of the means. An asterisk indicates significant difference ($p < 0.05$), and a plus indicates marginally significant ($p < 0.10$).

が確認された。この結果をより詳細に検討するために、刺激間のズレの弁別閾に対して、Bonferroni 補正法を用いた対応のある t 検定を行った。その結果、2 音 Random 条件と 2 音 Fix 条件の間の単純主効果には有意な差が確認できなかった ($t(8)=-1.78$, $p=0.11$, n.s.)。その一方、3 音 Random 条件と 3 音 Fix 条件の間の単純主効果には有意な差を確認した ($t(8)=-2.65$, $p=0.029$)。さらに、2 音 Fix 条件と 3 音 Fix 条件の間の単純主効果には有意な傾向を確認した ($t(8)=-2.21$, $p=0.058$)。

また主観的同時点 (PSS) は、Table 1 および Fig. 5 から、すべての条件で負の値を取り、触覚刺激が聴覚刺激に対して 10 数 [ms] 先行する点であり、Random 条件と Fix 条件との間にも、2 音条件と 3 音条件との間にも有意な差は確認されなかった (試行間予測要因の主効果: $F(1,8)=0.27$, $p=0.61$, n.s., 試行内予測要因の主効果: $F(1,8)=0.003$, $p=0.96$, n.s.)。しかしながら、Fig. 5 からは 2 音 Random 条件と 2 音 Fix

条件との間に差があるようにも見える。そこで、2 音 Random 条件と 2 音 Fix 条件の間の単純主効果を調査するために、刺激間のズレの弁別閾の下位検定と同様に Bonferroni 補正法を用いた対応のある t 検定を行ったが、2 音 Random 条件と 2 音 Fix 条件の間の単純主効果には有意な差が確認できなかった ($t(8)=0.80$, $p=0.45$, n.s.)。

4. 考察

本研究では、聴覚刺激の提示時刻の試行間予測ができない 2 音 Random 条件、試行間予測できる 2 音 Fix 条件、試行内予測が的中しない 3 音 Random 条件、試行内予測が的中する 3 音 Fix 条件の 4 条件で聴触覚の時間順序判断課題を行い、それぞれの条件間の刺激間のズレの弁別閾 (JND) と主観的同時点 (PSS) を比較することで、リズム刺激が時間順序判断に及ぼす影響について検討した。

その結果、刺激間のズレの弁別閾にはいくつかの条

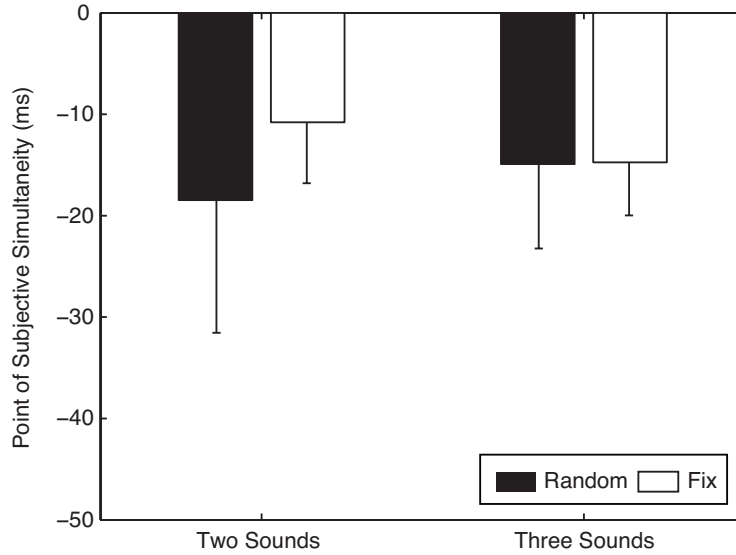


Fig.5 Point of Subjective Simultaneity (PSSs) for the inter-trial prediction (Random (unpredictable) condition vs. Fix (predictable) condition) for within-trial prediction (Two sounds condition (unpredictable) vs. Three sounds condition (predictable)), showing that the inter-trial and within-trial prediction did not facilitate the performance under the each conditions. The errors bars indicate the inter-subject standard errors of the means.

件間で有意な差が確認されたが、主観的同時点にはすべての条件間で有意な差は確認されなかった。

4.1 刺激間のズレの弁別閾 (JND)

刺激間のズレの弁別閾では刺激提示時刻の Random 条件と Fix 条件との間に有意な差が確認された ($F(1,8)=7.26, p=0.027$)。この結果は、刺激提示時刻の試行間予測の主効果であると考えられ、視覚の単一モダリティで試行間予測の主効果を調べた先行研究と同様の傾向を示す^[15]。また刺激提示時刻の試行間予測が刺激間のズレの弁別閾を狭め、クロスモーダルの時間順序判断においても弁別精度を高めるという仮説を支持する。

また3音条件と2音条件との間にも5[%]水準で刺激間のズレの弁別閾の値に有意な差が確認された ($F(1,8)=5.90, p=0.041$)。この結果は、刺激提示時刻の試行内予測の主効果であると考えられる。つまり、刺激提示時刻の試行内予測は、試行間予測と同様に刺激間のズレの弁別閾を狭めることが示唆できた。さらに、Bonferroni補正法を用いた下位検定(対応のあるt検定)では、試行間予測のみ(2音条件におけるRandom条件とFix条件との間の単純主効果)では、有意な差は確認されなかったが ($t(8)=-1.78, p=0.11$,

n.s.)、試行間予測と試行内予測の効果が重なる(3音条件においてRandom条件とFix条件との間の単純主効果)ことで、有意な差が確認できた ($t(8)=-2.65, p=0.029$)。この結果は、試行内予測が的中しないことで刺激間のズレの弁別閾が広がるか、試行内予測が的中することで試行間予測よりも大きく刺激間のズレの弁別閾を狭めるためと考えられる。また聴覚系の選択的注意の効果を調査した先行研究から、時間的な選択的注意に向けた時刻の前後600[ms]では急激に検出精度が低下するとされている^[18]。しかしながら、2音Random条件と3音Random条件を比較すると、有意な差はなく、平均値は3音Randomの方が小さい(2音Random: 56.2[ms], 3音Random: 52.4[ms], $t(8)=-1.06, p=0.321$, n.s.)。以上より、刺激提示時刻の試行内予測は的中した際は、試行間予測より大きく刺激間のズレの弁別閾を狭めるが、的中しなかった際には、試行間予測が的中しなかったときと同程度の影響しか及ぼさないことを示唆した。

以上より、試行間予測および試行内予測のどちらでも刺激間のズレの弁別閾を狭め、クロスモーダルの時間順序判断においても弁別精度を高めることが示唆された。この原因として、時間的な選択的注意の影響が

考えられる。刺激提示時刻の試行間の時間予測ができることによって、刺激提示時刻付近に時間的な選択的注意を向けることができると考えられる。時間的な選択的注意を向けることで、刺激提示時刻付近で感覚野の神経活動が増幅される^[19]。そのため、脳内での処理速度が上昇し、より時間分解能が上昇したために結果として刺激間のズレの弁別閾が狭まったと考えられる。このことから刺激提示時刻の試行間予測は、先行研究のような視覚の単一モダリティだけでなく、クロスモダルの時間順序判断においても、時間的な選択的注意が促進され、刺激間のズレの弁別閾を狭めるということが示唆できた。

また2音 Fix 条件よりも3音 Fix 条件の方が刺激間のズレの弁別閾が小さいという有意な傾向があったことから、試行間予測よりもリズムがある条件における試行内予測の方が、時間的な選択的注意をより強く働かせると考えられる。この原因として、リズム聴取時には側頭葉が活性化されることが知られており^[20]、その影響で時間順序判断に関与するとされている側頭-頭頂接合部 (TPJ: Temporal Parietal Junction)^{[21] [22]} が活性化されたと考えられる。

4.2 主観的同時点 (PSS)

Fig. 5 より、主観的同時点は、すべての条件で聴覚刺激に対して触覚刺激が10数[ms]先行する点に位置した。この結果は、聴触覚の時間順序判断課題を用いた先行研究と同様の傾向である^{[6] [8] [17]}。また2音 Fix 条件では主観的同時点が2音 Random 条件よりも物理的同時点に近づいているようにも見えるが、Bonferroni 補正法に従った下位検定 (対応のある t 検定) の結果でも、有意な差は確認できなかった ($t(8)=0.80$, $p=0.45$, n.s.)。またその他の条件間にも、有意な差は確認できなかった。このことから、刺激提示時刻の試行間予測および試行内予測は主観的同時点に影響しないことが示唆された。そのため、同期タッピング課題との主観的同時点の相違の原因は、提示される刺激がリズムを持つことではなく、同期のための運動による影響であることが示唆される。

またリズム知覚研究において、隣接する2つの短い刺激間隔において2つ目の時間間隔が過小評価されることが知られている^{[23] [24]}。視覚刺激を用いた先行研究においては、一定周期の繰り返し刺激で時間長を評価させると、予測できない最初の刺激は長く感じるのに対し、繰り返される後の刺激はより短かく感じる Repetition suppression という現象が確認さ

れており^[25]、脳機能計測を用いて調査が進められている^{[26] [27] [28]}。本研究では、刺激間隔長が予測できる2音 Fix 条件と3音 Fix 条件において、Repetition suppression が起きる可能性がある。仮に Repetition suppression が起こり、聴覚刺激と聴覚刺激の時間間隔が実際よりも短く感じていたとすると、後に提示された聴覚刺激が実際よりも早く提示されたと感じているはずである。その結果、主観的同時点が触覚刺激が先行する方向にずれることが予想される。しかしながら、本研究の結果では主観的同時点に有意な差はなく、Repetition suppression の効果は現れなかった。その原因として、本研究で用いた刺激間隔である ISI が1000[ms] という最も身近な時間間隔であったためと考えられる。Repetition suppression は、側頭葉内側部 (Medial Temporal lobe) の活動と相関があり^{[26] [27]}、側頭葉内側部は記憶形成に極めて重要であるとされていることから^[29]、Repetition suppression は記憶からの影響を受けることが示唆される。このことから、ISI が1000[ms] という身近な時間間隔であるため、日々の生活の中で学習した記憶を元に時間知覚に対して補正を掛けることで、他の時間間隔に比べてある程度正確に時間間隔を知覚することができ、そのために Repetition suppression の影響が小さかったと考えられる。

4.3 解析から除外した参加者

本研究の実験参加者は10名であったが、その内1名は先行研究の基準^[17]に従い、解析から除外した。解析から除外した参加者は Random 条件における2音条件および3音条件では、 $SOA=200[ms]$ (触覚刺激に対して聴覚刺激が200[ms]先行して提示される) 条件で、聴覚刺激が先であると回答した割合が75[%]より低く、刺激間のズレの弁別閾が140[ms]程度とかなり大きい値を取ってしまうが、Fix 条件における2音条件および3音条件では、聴覚刺激が先であると回答した割合が75[%]より大きく、先行研究の基準に従うとデータから除外されてしまう参加者においても、刺激提示時刻の試行間予測が刺激間のズレの弁別閾を狭める傾向が確認された。また実験後のアンケートで、前日の睡眠時間が他の参加者に比べて極端に短い3時間程度であった。そのため、課題に集中することが困難であったため、すべての条件で時間順序判断の精度が下がってしまったと考えられる。

5. まとめ

本研究では、聴覚刺激の提示時刻の試行間予測ができない2音 Random 条件、試行間予測できる2音 Fix 条件、試行内予測が的中しない3音 Random 条件、リズム刺激であるために試行内予測が的中する3音 Fix 条件の4条件で聴覚の時間順序判断課題を行い、それぞれの条件間の刺激間のズレの弁別閾 (JND) と主観的同時点 (PSS) を比較することで、リズム刺激が時間順序判断に及ぼす影響について検討した。

その結果、刺激提示時刻が予測できない Random 条件よりも、刺激提示時刻が予測できる Fix 条件の方が有意に刺激間のズレの弁別閾が狭いという結果を得たため、刺激提示時刻の試行間予測ができることで、刺激間のズレの弁別閾を狭めるという仮説を支持する結果を得た。さらに試行間予測ができる2音 Fix 条件よりも、試行内予測が出来る3音 Fix 条件の方が、刺激間のズレの弁別閾が狭まる有意な傾向が確認されたため、刺激提示時刻の試行内予測ができる条件の方が、試行間予測ができる条件よりも大きく刺激間のズレの弁別閾を狭めるという仮説を支持する結果も得た。このことから、試行内予測を可能にするリズム刺激を用いることで、時間順序判断の精度を上昇させることを示唆した。また刺激提示時刻の試行間予測および試行内予測は、Repetition suppression の効果を考慮すれば、主観的同時点に影響する可能性も考えられるが、本研究では主観的同時点は移動しないという結果を得たため、リズム刺激は主観的同時点に影響しないことを示唆した。

時間順序判断には側頭-頭頂接合部 (TPJ: Temporal Parietal Junction) が関与しているとされており^[21]^[22]、難読症や失語症などの障害では、刺激間のズレの弁別閾が広がるという知見がある^[30]^[31]^[32]。このことから、時間順序判断に対して影響する要因を調査することは、異種感覚統合のメカニズムの解明だけでなく、人間の特性を考慮したヒューマンインターフェースの設計、難読症や失語症などの病態生理の解明に寄与する可能性があると考えられる。

謝辞

本研究を進めるにあたり必要な環境を整えて頂き、熱心なご指導頂きました三宅美博准教授に心より感謝を申し上げます。またご審査頂いた中村清彦教授、小池康晴教授には、論文を修正するうえで非常に有意義

な助言を頂きました。ありがとうございました。

また実験条件のや解析方法、論文の執筆方法などに関して多くのご指導を頂きました東京農工大学の野澤孝之助教、東京大学の緒方大樹様に深く感謝いたします。

また予備実験における参加者を快諾して下さい、研究方針などで数多くの助言を頂くなど、三宅研究室の皆様には公私ともに大変お世話になりました。特に研究活動を進める上で必要な多くのことを教えて頂きました博士課程の武藤ゆみ子様、大良宏樹様、研究グループは異なるものの日々ディスカッションに加わってくださった同期の沖津健吾君、西辰徳君、一緒にグループとして活動してきた横山正典君に深く感謝いたします。

このように多くの方々にご指導およびご協力を頂きましたが、常に私の体調を気遣い支えとなってくくださった父と母に深く感謝いたします。ありがとうございました。

参考文献

- [1] M.A. Meredith. On the neuronal basis for multi-sensory convergence: a brief overview. *Cognitive Brain Research*, 14(1):31–40, 2002.
- [2] D.A. Slutsky and G.H. Recanzone. Temporal and spatial dependency of the ventriloquism effect. *Neuroreport*, 12(1):7, 2001.
- [3] S. Shimojo and L. Shams. Sensory modalities are not separate modalities: plasticity and interactions. *Current Opinion in Neurobiology*, 11(4):505–509, 2001.
- [4] C. Spence, D.I. Shore, and R.M. Klein. Multisensory prior entry. *Journal of Experimental Psychology General*, 130(4):799–832, 2001.
- [5] R. Efron. The effect of handedness on the perception of simultaneity and temporal order. *Brain*, 86(2):276, 1963.
- [6] M. Zampini, S. Guest, D.I. Shore, and C. Spence. Audio-visual simultaneity judgments. *Perception and Psychophysics*, 67(3):531–544, 2005.
- [7] M.J. Pesavento and J. Schlag. Transfer of learned perception of sensorimotor simultaneity. *Experimental Brain Research*, 174(3):435–442, 2006.
- [8] J.V.M. Hanson, J. Heron, and D. Whitaker. Recalibration of perceived time across sensory modalities. *Experimental Brain Research*, 185(2):347–352, 2008.
- [9] J. Mates. A model of synchronization of motor acts to a stimulus sequence. i. timing and error corrections. *Biological Cybernetics*, 70(5):463, 1994.
- [10] Y. Miyake, Y. Onishi, and E. Poeppel. Two types of anticipation in synchronous tapping. *Acta Neurobiologiae Experimentalis*, 64:415–426, 2004.
- [11] L.T. Stevens. On the time-sense. *Mind*, 11(43):393–404, 1886.
- [12] K. Dunlap. Reactions to rhythmic stimuli, with

- attempt to synchronize. *Psychological Review*, 17(6):399–416, 1910.
- [13] M.H. Thaut, R.A. Miller, and L.M. Schauer. Multiple synchronization strategies in rhythmic sensorimotor tasks: phase vs period correction. *Biological Cybernetics*, 79(3):241–250, 1998.
 - [14] MH Thaut, B. Tian, and MR Azimi-Sadjadi. Rhythmic finger tapping to cosine-wave modulated metronome sequences: Evidence of subliminal entrainment. *Human Movement Science*, 17(6):839–863, 1998.
 - [15] A. Correa, D. Sanabria, C. Spence, P. Tudela, and J. Lupianez. Selective temporal attention enhances the temporal resolution of visual perception: Evidence from a temporal order judgment task. *Brain research*, 1070(1):202–205, 2006.
 - [16] D.J. Finney. *Probit analysis: a statistical treatment of the sigmoid response curve*. University Press Cambridge, UK, 1952.
 - [17] V. Occelli, C. Spence, and M. Zampini. Audiotactile temporal order judgments in sighted and blind individuals. *Neuropsychologia*, 46(11):2845–2850, 2008.
 - [18] T. Mukai, H. Miyazono, T. Usagawa, and M. Ebata. Effect of an attention on auditory time window: Temporal analog of the attention filter. *Technical report of IEICE. EA*, 99(259):9–14, 1999.
 - [19] V. Poghosyan and A.A. Ioannides. Attention modulates earliest responses in the primary auditory and visual cortices. *Neuron*, 58(5):802–813, 2008.
 - [20] WCJ Alpherts, J. Vermeulen, MLO Franken, MPH Hendriks, CWM van Veelen, and PC van Rijen. Lateralization of auditory rhythm length in temporal lobe lesions. *Brain and Cognition*, 49(1):114–122, 2002.
 - [21] M. Husain and C. Rorden. Non-spatially lateralized mechanisms in hemispatial neglect. *Nature Reviews Neuroscience*, 4(1):26–36, 2003.
 - [22] B. Davis, J. Christie, and C. Rorden. Temporal order judgments activate temporal parietal junction. *Journal of Neuroscience*, 29(10):3182, 2009.
 - [23] Y. Nakajima, G. ten Hoopen, and R. Van der Wilk. A new illusion of time perception. *Music perception*, 8(4):431–448, 1991.
 - [24] Y. Nakajima, G. ten Hoopen, G. Hilkhuisen, and T. Sasaki. Time-shrinking: A discontinuity in the perception of auditory temporal patterns. *Perception & psychophysics*, 51(5):504–507, 1992.
 - [25] V. Pariyadath and D. Eagleman. The effect of predictability on subjective duration. *PLoS One*, 2(11), 2007.
 - [26] C.J. Brozinsky, A.P. Yonelinas, N.E.A. Kroll, and C. Ranganath. Lag-sensitive repetition suppression effects in the anterior parahippocampal gyrus. *Hippocampus*, 15(5):557–61, 2005.
 - [27] B.D. Gonsalves, I. Kahn, T. Curran, K.A. Norman, and A.D. Wagner. Memory strength and repetition suppression: multimodal imaging of medial temporal cortical contributions to recognition. *Neuron*, 47(5):751–761, 2005.
 - [28] D.B.T. McMahon and C.R. Olson. Repetition suppression in monkey inferotemporal cortex: relation to behavioral priming. *Journal of neurophysiology*, 97(5):3532, 2007.
 - [29] LR Squire and S. Zola-Morgan. The medial temporal lobe memory system. *Science*, 253(5026):1380, 1991.
 - [30] M. Laasonen, E. Service, and V. Virsu. Cross-modal temporal order and processing acuity in developmentally dyslexic young adults. *Brain and Language*, 80(3):340–354, 2002.
 - [31] V. Virsu, P. Lahti-Nuuttila, and M. Laasonen. Crossmodal temporal processing acuity impairment aggravates with age in developmental dyslexia. *Neuroscience letters*, 336(3):151–154, 2003.
 - [32] P Jaskowski and P. Rusiak. Temporal order judgment in dyslexia. *Psychological Research*, 72(1):65–73, 2008.