

## 複雑な環境変動における認知を伴うタイミング機構

武藤 ゆみ子<sup>\*1</sup> 三宅 美博<sup>\*2</sup> エルンスト ペッペル<sup>\*2</sup>

### Timing Mechanism with Cognition in Complex Environment

Yumiko Muto<sup>\*1</sup>, Yoshihiro Miyake<sup>\*1</sup> and Ernst Pöppel<sup>\*2</sup>

**Abstract** - In this study, to evaluate the timing control mechanism in dynamical complex environment, we proposed a new experimental method which was able to control the complexity of temporal structure of environment and analyzed response characteristics. The result showed significant differences between below and above the threshold for conscious detection against the complexity of temporal structure. It is suggested that the timing control mechanism was affected by cognition against the complexity of temporal structure of environment.

**Keywords:** timing control, sensori-motor synchronization, time perception and cognition

#### 1. はじめに

人間は、動的に変動する環境に適応する能力をもち、その環境変動が未知な場合でも柔軟に対応することができる。このような高度なタイミング機構は、他者との共同作業やコミュニケーションを円滑に達成するうえでも重要な役割を担っているものと考えられる。そこで本研究では、このような複雑な時間構造をもつ動的環境への人間の適応行動に注目し、そのタイミング機構を認知と関連づけて明らかにし、新たなインタフェース技術として活用するための知見を得ることを目標としている。

これまで、われわれの研究グループでは、コミュニケーションや協調プロセスにおけるタイミング共有の重要性に注目し研究を進めてきた<sup>[1][2]</sup>。母子コミュニケーションにおいては、ことばの獲得以前に幼児の動作が母親の発話タイミングに同調することが報告されており<sup>[4]</sup>、タイミング共有はコミュニケーションの基盤にあるものと考えられている。また、言語機能が未熟な0-2歳頃までは、感覚や運動を通して環境に適応しようとするのが知られている。しかし、その後の身体の運動能力の発達に伴い、自己を取り巻く環境を媒介として、外界の認知能力の獲得に寄与していることも示されている<sup>[5]</sup>。これらの発達心理学の知見に関し、環境とその適応方法に着目すると、感覚や運動を通して環境に適応しようとする感覚運動期は、身体能力が未熟なために取り巻く環境が制限されている。そして、その後の運動能力の発達により取り巻く環境は広がり、その適応には認知が徐々に導入されていくことがわかる。

これまでの人間のタイミング機構の解析は、固定され

た、あるいは単調なルールに従って変化する環境を対象として解析されてきたため、「感覚-運動連関」のなかだけの問題として扱われていた。しかし、人間は認知機能を用いることで動的に変動する環境に柔軟に対応していることが推測され、実世界での使用を目的とするインタフェース開発のためには、環境の複雑性と認知の関係を明らかにすることが必要である。

日常生活においてタイミングを合わせるとき、その環境変動は合わせやすいものばかりではない。たとえば、音楽に合わせてダンスを踊るとき、単調で一定なリズム音にステップを合わせることは、容易に自動的に行うことができる。しかし、難易度の高い複雑なリズム音に合わせる場合、われわれ人間は音を意識して合わせようとする。このような経験的な事実から、環境がもつ時間構造の複雑性に依存して、タイミング機構には、身体化された自動的過程と意識を伴う認知的課程の両方が必要になると考えられる。そして、このような作業仮説に基づき、われわれはこれまで、複雑な時間構造をもつ環境変動における2種類のタイミング機構の存在を明らかにしてきた<sup>[3]</sup>。そこで本研究では、さらに解析を加え、この2種類のタイミング機構の関係を明らかにする。

#### 2. 実験方法

##### 2.1 実験方針

本研究における実験方針の詳細を以下に示す。

1. タイミング制御の実験手法として、一定周期の音刺激(感覚入力)に合わせて指でボタンを押す(運動応答)“同期タッピング課題”<sup>[6]</sup>を用いる。
2. 複雑な環境変動を実験的に構成するために、同期タッピング課題の一定周期の音刺激に試行ごとに大きさの異なる“周期ゆらぎ”を外乱として加える。このゆらぎの大きさを環境の複雑さの指標として用いる。

\*1: 東京工業大学 知能システム科学専攻

\*2: ミュンヘン大学 医学的心理学研究所

\*1: Dept. of Computational Intelligence and Systems Science, Tokyo Institute of Technology

\*2: Institute of Medical Psychology, University of Munich, Germany

3. 被験者が初めて刺激周期の変化を認知した際の周期ゆらぎの大きさを、被験者の認知の指標とする。
4. 環境の複雑さに応じた感覚入力と運動応答の相関解析を行う。この結果と認知の指標から、複雑な環境下におけるタイミング制御機構を認知と関連付けて明らかにする。

## 2.2 被験者

被験者は、著者を含む21から47歳(平均29.8)までの健康で右利きの男女12人(男性8人、女性4人)であり、無償で実験への協力を依頼した。いずれの被験者も同期タッピング課題を遂行する上での聴覚障害および運動障害はなかった。12人がタッピング実験の被験者としての経験が複数回あった。また音楽能力が同期タッピング課題の遂行に影響を及ぼすと考えられるため<sup>[7]</sup>、特別な音楽訓練を受けたことがない被験者を募った。

## 2.3 実験課題

### 2.3.1 同期タッピング課題

被験者は、一定周期で発生する音刺激がヘッドフォンを介して提示される環境で、その音発生開始時刻と可能な限り同時に利き手人差し指によってボタンを押すように依頼された。また、実験開始前には、同期タッピング課題に慣れるために約3分間の練習が行われた。

### 2.3.2 特徴量の定義

n回目の音刺激タイミングをS(n)、その刺激に対するタップのタイミングをR(n)と表し、本実験で用いられるパラメータを式(1)-(3)のように定義する(図1)。

- ISI(Inter-Stimulus-Interval: 刺激周期)

$$ISI(n) = S(n+1) - S(n) \quad (1)$$

- SE (Synchronization Error: 同期誤差)

$$SE(n) = R(n) - S(n) \quad (2)$$

- ITI (Inter-Tap-Interval: タップ周期)

$$ITI(n) = R(n+1) - R(n) \quad (3)$$

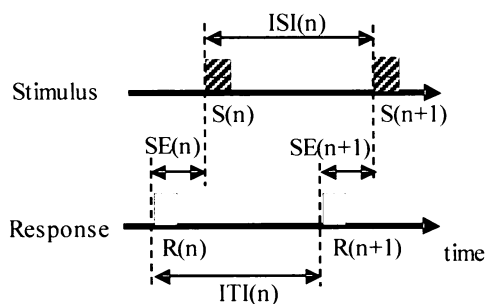


図1. 特徴量の定義

### 2.3.3 “複雑さ”の制御

複雑な環境変動を実験的に構築するため、同期タッピング課題の一定周期の音刺激に試行ごとに大きさの異なる周期ゆらぎを外乱として加えた。このゆらぎの大きさを環境の複雑さの指標とし、実験の制御パラメータとして変化させた。

具体的には、刺激周期 ISI を分布関数が平均  $\mu$  と標準偏差  $\sigma$  で表されるガウス分布(式4)に従う正規乱数で変化させた。

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} e^{-x^2/2\sigma^2} \quad (4)$$

計算機における ISI の生成方法に関して、まず乱数生成精度が高いとされるメルセンヌ・ツイスター法<sup>[8]</sup>を用いて(0,1]の独立な一様乱数を2対発生させた。得られた乱数の系列  $x_n, x_{n+1}$  をボックス・ミュラー法により変換し、正規分布  $N(\mu, \sigma^2)$  の正規乱数で与えられる  $ISI(n), ISI(n+1)$  を得た(式5)。

$$ISI(n) = \sqrt{-2 \ln x_n} \cdot \sin(2\pi x_{n+1}) \cdot \sigma + \mu \quad (5)$$

$$ISI(n+1) = \sqrt{-2 \ln x_n} \cdot \cos(2\pi x_{n+1}) \cdot \sigma + \mu$$

このように、刺激周期 ISI の標準偏差  $\sigma$  の大きさを制御パラメータとすることにより、刺激の複雑さを制御することが可能となる。以下、ISI の標準偏差  $\sigma$  を“ $\sigma_{ISI}$ ”と表記する。

## 2.4 実験装置

本研究で使用された実験システムは、シングルタスク OS(IBM, DOS2000) を搭載した PC 上に実装された。実験用プログラムは C 言語で記述されていた。音刺激(500 Hz, 100 ms)は、PC にパラレルポートを介して接続した外部音源から、ヘッドフォンを介して被験者の両耳に提示される。また音量は全被験者が十分聞き取れる範囲内で一定とした。時間分解能は 1/1024 秒であった。

## 2.5 実験手順

刺激周期 ISI の平均値  $\mu$  は 800ms に固定され、ISI の標準偏差  $\sigma_{ISI}$  は 0 から 80ms まで 10ms 刻みで 9 種類設定された。一定間隔で揺らぎのない  $\sigma_{ISI}=0$ ms の条件から徐々に  $\sigma_{ISI}$  が大きい条件を提示した。実際に実験に用いた刺激のうち  $\sigma_{ISI}=0, 10, 30$ ms における ISI の時間発展の例を図2に示した。1試行につきタップ数は110回であり、最初の10回を除く100回を解析に用いた。なお、本研究で用いた  $ISI=800$ ms は、ISI と SE の標準偏差の比が最小であり、最も同期タッピング課題の遂行が容易であると示唆されている値である<sup>[9]</sup>。

さらに被験者の認知状態を計測するため、被験者に何試行目、すなわちどの周期ゆらぎの時点で刺激の変化に気づいたか質問した。被験者が刺激変化に過剰に注意を向けることを避けるため、質問内容について事前には知らされていない。

また、先行研究<sup>[10]</sup>による知見、つまり ISI の大きさに対し 5% の変化が気づくことができる閾値であるとの報告に基づき、確実に被験者が刺激変化に気づくと考えられる第 4 試行 ( $\sigma_{ISI}=30\text{ms}$ ) 後に質問を提示した。

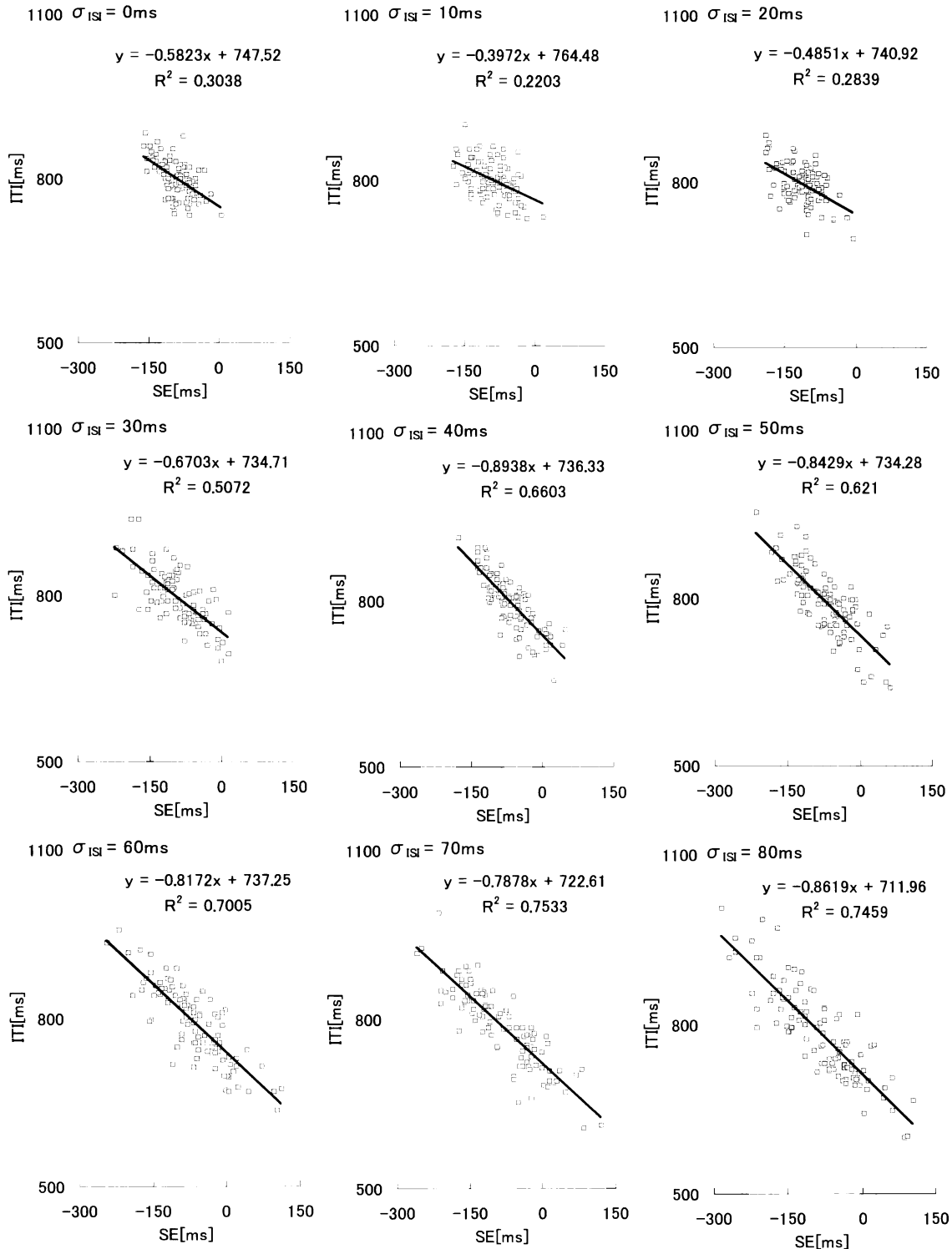


図 2. SE (同期誤差) と ITI (タップ周期) の関係を示す散布図

### 3. 結果

#### 3.1 認知状態の計測

被験者が刺激周期 ISI の変化に初めて気づいたと回答した周期ゆらぎ  $\sigma_{ISI}$  の値を 図 3 に示した。12 人中 8 人が  $\sigma_{ISI}=20\text{ms}$ 、残りの 4 人は  $\sigma_{ISI}=30\text{ms}$  で初めて刺激変化に気づいたと答えた。以上の結果から、 $\sigma_{ISI}=0-10\text{ms}$  の条件では被験者は刺激周期の変化を認知していなかったが、 $\sigma_{ISI}=40-80\text{ms}$  の条件では刺激周期の変化を認知していたことが明らかになった。

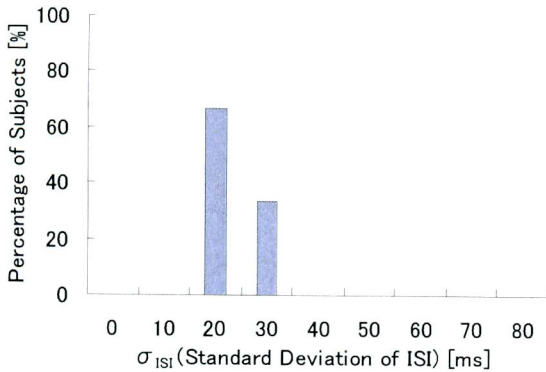


図 3. 被験者の認知状態

#### 3.2 SE と ITI の相関

本研究では、あるタップにおける同期誤差 SE が次のタップに及ぼす影響を調べるため、SE(n)と ITI(n)の関係に着目し、各周期ゆらぎの条件のもとで相関解析を行った。SE(n)と ITI(n)の関係を示す散布図の一例を図 3 に示す。その結果から SE と ITI の間に強い負の相関関係が推測される。被験者間で平均化された相関係数(Pearson product moment correlation coefficient) と  $\sigma_{ISI}$  の関係を図 4 に示す。環境の複雑さを表す周期ゆらぎ  $\sigma_{ISI}$  の値が大きくなるに従い、相関係数の値が 1 に近づいていることがわかる。

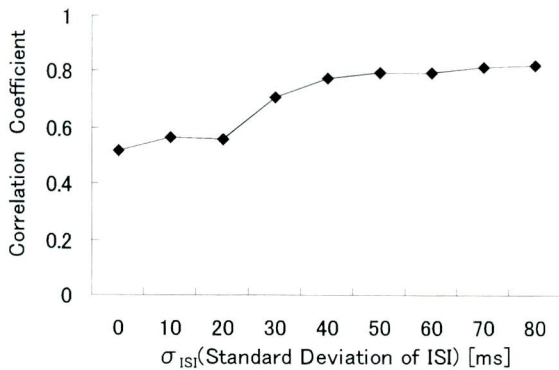


図 4. 相関係数の平均値

また、この相関係数の変化と認知の関係を明らかにするため、被験者が刺激周期の変化に気づいたと回答した  $\sigma_{ISI}=20-30\text{ms}$  の区間を除いて、その上下で相関係数の比較を行った。被験者間で平均された相関係数に関し、一元配置分散分析を用いた結果( $F(8,88)=10.609, p<0.01$ )および多重比較検定(Fisher's PLSD post hoc comparison test)から、被験者が刺激周期の変化を認知しなかった  $\sigma_{ISI}=0-10\text{ms}$  と被験者が刺激周期の変化を認知した  $\sigma_{ISI}=40-80\text{ms}$  の間で、相関係数に有意差のあることが明らかになった( $p<0.01$ )。

さらに、周期ゆらぎ  $\sigma_{ISI}$  ごとの違いを対比較としてまとめ図 5 に示す。 $\sigma_{ISI}=20-30\text{ms}$  を除外し、その他全ての条件について比較したところ、 $\sigma_{ISI}=0\text{ms}$  と  $\sigma_{ISI}=10\text{ms}$  の間、 $\sigma_{ISI}=40\text{ms}$  から  $\sigma_{ISI}=80\text{ms}$  の間には、有意水準 5% で差が得られなかった。しかしながら、 $\sigma_{ISI}=0-10\text{ms}$  と  $\sigma_{ISI}=40-80\text{ms}$  の条件には有意差が観察された( $p<0.01$ )。

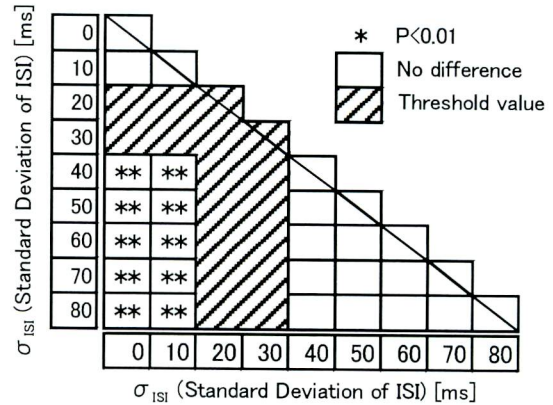


図 5. 多重比較検定結果(相関)

次に、SE と ITI の相関関係を詳細に調べるため、単回帰分析により回帰係数  $\alpha$  を求めた。被験者間で平均された回帰直線の傾きの値(回帰係数  $\alpha$ )と周期ゆらぎ  $\sigma_{ISI}$  の大きさの関係を図 6 に示す。環境の複雑さを表す周期ゆらぎ  $\sigma_{ISI}$  の値が大きくなるに従い、 $\alpha$  の値が -1 に近づいていることがわかる。

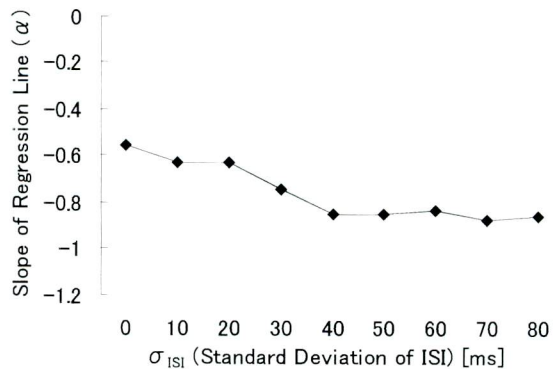


図 6. 推定される回帰係数  $\alpha$  の平均値

また、この回帰係数  $\alpha$  の変化と認知の関係を明らかにするため、 $\sigma_{ISI}=20-30\text{ms}$  の区間を除いて、その上下で比較を行った。被験者間で平均された  $\alpha$  の値に関し、一元配置分散分析を用いた結果 ( $F(8,88)=16.965, p<0.01$ )、および多重比較検定 (Fisher's PLSD post hoc comparison test) から、被験者が刺激周期の変化を認知しなかった  $\sigma_{ISI}=0-10\text{ms}$  と被験者が刺激周期の変化を認知した  $\sigma_{ISI}=40-80\text{ms}$  の間で、回帰係数  $\alpha$  の値に有意差があることが明らかになった ( $p<0.05$ )。

さらに、周期ゆらぎ  $\sigma_{ISI}$  ごとの違いを対比較としてまとめ図7に示す。 $\sigma_{ISI}=20-30\text{ms}$  を除外し、その他全ての条件について比較したところ、 $\sigma_{ISI}=0\text{ms}$  と  $\sigma_{ISI}=10\text{ms}$  の間、 $\sigma_{ISI}=40\text{ms}$  から  $\sigma_{ISI}=80\text{ms}$  の間には、有意水準5%で差が得られなかった。しかしながら、 $\sigma_{ISI}=0-10\text{ms}$  と  $\sigma_{ISI}=40-80\text{ms}$  の条件には有意差が観察された ( $p<0.05$ )。

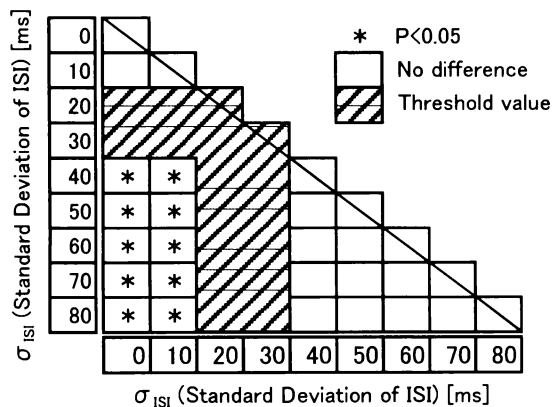


図7. 多重比較検定結果 (回帰係数  $\alpha$ )

以上の結果から、SE と ITI の相関係数および回帰係数  $\alpha$  の値に関して、認知を伴わない条件  $\sigma_{ISI}=0-10\text{ms}$  と認知を伴う条件  $\sigma_{ISI}=40-80\text{ms}$  の2種類に分類できることが明らかになった。このことはタイミング制御機構が環境の複雑さに依存して2種類存在することを意味している。

#### 4. 考察

本研究は、複雑な環境変動へ適応するタイミング機構を解明することを目的として、同期タッピング課題において、刺激周期にランダムなゆらぎを付加する新しい実験手法を開発した。この手法は、これまで用いられてきた比較的単純な時間構造の刺激を用いる手法に比べ、被験者にとっての環境の時間構造の複雑性を実験者が制御することを可能としている。したがって、これは環境変動の複雑な時間構造の予測メカニズムを検討するための新たな実験パラダイムを提案するものである。この実験によって得られた結果を以下にまとめる。

- 被験者の回答から、刺激周期の変化がなかったと答えた実験条件 ( $\sigma_{ISI}=0-10\text{ms}$ ) と刺激周期に変化があったと答えた条件 ( $\sigma_{ISI}=40-80\text{ms}$ ) の2つに分類された。前者は被験者の認知を伴わない条件であり、後者は認知を伴う条件である。
- 相関解析の結果、SE と ITI から推定される相関係数および回帰係数  $\alpha$  が認知を伴わない  $\sigma_{ISI}=0-10\text{ms}$  と認知を伴う  $\sigma_{ISI}=40-80\text{ms}$  の条件で有意に異なることが明らかになった。さらに  $\sigma_{ISI}=40-80\text{ms}$  の条件での  $\alpha$  の値は、 $\sigma_{ISI}=0-10\text{ms}$  の条件における  $\alpha$  の値に比べ負の大きな値を示した。

以上の結果から、環境変動の複雑性の違いにより、認知を伴うタイミング制御の領域とそれを伴わないタイミング制御の領域に二分されることが明らかになった。さらに、この2種類の領域に対する相関解析から、SE と ITI の回帰係数  $\alpha$  の値が有意に異なることも明らかになった。したがって人間は認知機構を用いることで、環境の時間構造の複雑性に対応していることが示唆される。

従来、単調な外的イベントに対する同期タッピングにおいて、位相修正機構(式6)と周期修正機構(式7)の2種類の誤差修正機構が考察され、以下のモデル<sup>[11][12]</sup>が提案されている。

$$\text{位相修正機構: } ITI(n) = -\alpha SE(n) + T(n) \quad (6)$$

$$\text{周期修正機構: } T(n) = T(n-1) - \beta [t(n-1) - ISI(n-1)] \quad (7)$$

$T(n)$  は、式(6)における位相差  $SE(n)=0$  のときの周期の値を示し、内部的に保持・更新されるフィードフォワード機構としての“timekeeper period”と定義される。

これまで位相修正機構における傾き  $\alpha$  の値は-0.6程度となることが知られている<sup>[10][13]</sup>。この報告における  $\alpha$  の値と、本研究で得た  $\sigma_{ISI}=0-10\text{ms}$  の条件における  $\alpha$  の値はほぼ一致している。また、被験者が刺激周期の変化がなかったと答えた条件 ( $\sigma_{ISI}=0-10\text{ms}$ ) において、回帰係数  $\alpha$  の値に有意な変化が見られなかった。このことから認知を伴わない領域におけるタイミング機構は、従来の同期タッピング課題で報告された機構と対応するものと考えられる。

従来の同期タッピング課題では、指でボタンを押すタイミングが数十ミリ秒先行するという「負の非同期現象」<sup>[14]</sup>が観察されることが知られている。この現象が安定に観察される条件では、タイミング制御に注意資源が必須ではないことが知られており<sup>[2]</sup>、認知の関わらない自動的な制御が行われていると考えられる。また、自動的な制御において重要な役割を果たしている小脳が関与することも知られている<sup>[15]</sup>。これらの知見から、 $\sigma_{ISI}=0-10\text{ms}$  では認知を伴わない自動化されたタイミング機構を中心として構成されていることが予想される。

一方、認知を伴う  $\sigma_{ISI}=40\text{-}80\text{ms}$  のタイミング制御機構では、SE と ITI の回帰係数  $\alpha$  の値が、 $\sigma_{ISI}=0\text{-}10\text{ms}$  の条件に比べ有意に大きな負の値を示していた。このことから、位相修正機構それ自体の変化は見られないが、そのフィードバックのゲインが相対的に大きくなっていることがわかる。これは、周期ゆらぎが大きくなったため、フィードフォワードに加えて、感覚入力の認知を介するフィードバック制御が強化されていることを示唆している。このことから、複雑な周期変動が行われている  $\sigma_{ISI}=40\text{-}80\text{ms}$  では、自動的機構に加えて認知的フィードバック制御が強く働いているものと予想される。

以上から、環境変動が単調な場合では、フィードフォワードを中心とした身体的な制御を行っているのに対し、複雑な環境変動におけるタイミング制御では、感覚入力の認知を必要とする認知的フィードバック制御のゲインを大きくすることで対応している。このような柔軟な対応をすることで、環境の動的変化に追従し、未知の環境にも対応することを実現していると考えられる。

## 5. おわりに

本研究では、環境変動の複雑性に注目し、そのような環境における人間のタイミング制御機構を、認知機構との関連から明らかにすることを目標とした。具体的には、環境の時間構造の認知とその予測メカニズムの関係を検討するため、環境変動の複雑性を制御できる新たな実験パラダイムを提案し、それに対する人間の応答特性の解析を行った。その結果、環境の複雑性に起因する認知の有無によって、人間が異なるタイミング制御戦略を用いていることが明らかになった。さらに、単調な環境では身体化された自動的機構を中心としてタイミング制御を行っているが、複雑な環境では自動的過程だけでは対応ができず、認知を必要とする過程を併用する戦略を用いていることが示唆された。これは、人間が自動的機構と認知的機構の2種類の戦略を用い、動的で複雑な環境への適応を実現していることを意味している。この2種類のタイミング制御は、異なる神経基盤で行われている可能性も考えられる。このことについては今後さらに調べていく予定である。

昨今、コンピュータ技術の発展に伴い、コミュニケーションを支援する人工物が多数提案されてきている。しかしこれらは、複雑な環境を前提としたものではないため、実世界に適応させる上で多くの問題を残している。この原因の一つとして、人間の持つタイミング機構が人工物において十分に考慮されていないことが挙げられる。タイミング同調などの認知的時間の共有は、人間の発達過程においてことばの獲得以前に行われていることが知られており、コミュニケーションの根底にあると考えられている。また最近では人間の対話において、一方の話

者が話し終わってから次の話者が話し始めるまでの時間間隔（「交替潜時」）の長さが話者の印象を形成する要因のひとつになっていることも報告されている<sup>[16]</sup>。したがってコミュニケーション支援を行う人工物では、タイミングを考慮することにより、ロボットなど人工物との自然な会話の実現や、人工物への印象の変化などが期待される。われわれは、本研究で明らかにした自動的な過程と認知的な過程を取り入れたタイミング制御機構を導入することで、複雑な実世界に適応可能なインタフェース設計が可能になると考えている。

## 参考文献

- [1] 三宅, 辰巳, 杉原: 交互発話における発話長と発話間隔の時間的階層性, 計測自動制御学会論文集, **Vol. 40**, No.6, pp.670-678 (2004)
- [2] 三宅, 大西, ペッペル: 同期タッピングにおける2種類のタイミング予測, 計測自動制御学会論文集, **Vol.38**, No.12, pp.1114-1122 (2002)
- [3] 武藤, 三宅, ペッペル, "外乱を含む同期タッピング課題における認知が運動に与える影響," ヒューマンインタフェースシンポジウム2006講演会予稿集, pp.289-294 (2006)
- [4] Condon, W.S., Sander L.W.: Neonate movement is synchronized with adult speech, *Science*, **Vol.83**, pp. 99-101(1974)
- [5] ピアジェ, J. 滝沢武久訳: 思考の誕生 論理操作の発達, 朝日出版社 (1980)
- [6] Dunlap, K.: Reactions to rhythmic stimuli, with attempt to synchronize, *Psychological Review*, **Vol.17**, pp.399-416 (1910)
- [7] Franek, M. M., Mates, J., Radil, T., Beck, K., Pöppel, E.: Finger tapping in musicians and nonmusicians, *International Journal of psychophysiology*, **Vol.11**, pp. 187-192 (1991)
- [8] Matsumoto, M., Nishimura, T.: Mersenne Twister: A 623-dimensionally equidistributed uniform pseudo random number generator, *ACM Trans. on Modeling and Computer Simulation*, **Vol.8**, pp.3-30 (1998)
- [9] Woodrow, H.: The effect of rate of sequence upon the accuracy of discrete motor responses, *Journal of Experimental Psychology*, **Vol.15**, pp.357-359 (1932)
- [10] Repp, B.H.: Processes underlying adaptation to tempo changes in sensorimotor synchronization, *Human movement science*, **Vol.20**, pp.277-312 (2001)
- [11] Mates, J.: A model of synchronization of motor acts to a stimulus sequence. I. Timing and error corrections, *Biological Cybernetics*, **Vol.70**, pp.463-473 (1994a)
- [12] Mates, J.: A model of synchronization of motor acts to a stimulus sequence. II. Stability analysis, error estimation and simulations, *Biological Cybernetics*, **Vol.70**, pp.475-484 (1994b)
- [13] Semjen, A., Schulze, H.-H., & Vorberg, D.: Timing precision in continuation and synchronization tapping, *Psychological Research*, **Vol.63**, pp.137-147 (2000)
- [14] Fraisse, P.: Sensorimotor synchronizations of rhythms, In J. Requin(Ed.), *Anticipation et comportement*, Centre National, Paris, pp.233-257 (1996)
- [15] Lewis PA, Miall RC.: Overview: An image of human neural timing. In: *Functional and neural mechanisms of interval timing*, Ed: Warren H Meck. CRC Press (2003)
- [16] 長岡, Draguna, 小森, 中村: 音声対話における交替潜時が対人認知に及ぼす影響, ヒューマンインタフェースシンポジウム予稿集, pp.171-174 (2002)