

同期タッピングにおける主観的タイミング機構の分析

野島 満春* 下茂 博章* 三宅 美博*

Analysis of Subjective Timing Control Mechanism in Synchronization Tapping

Mitsuharu Nojima*, Hiroaki Shimo*, Yoshihiro Miyake*

Abstract –The purpose of this paper is to clarify the internal phase correction mechanisms for timing control in a synchronization tapping task. Here, the synchronization error (*SE*) is directly controlled using our experimental method, and its response is measured as the temporal development of the inter tap onset interval (*ITI*). As a result, two types of internal phase correction mechanism are revealed. The first type shows a strong negative correlation between *SE* change and *ITI* change, suggesting a simple negative feedback mechanism. The second one does not show this correlation and disappears under a dual task condition. These results suggest that there are two types of timing control mechanism in the phase correction of tapping task.

Keywords: timing control, synchronization tapping, phase correction, attentional resources

1. はじめに

人間は変化し続ける動的な環境に適応しつつ生活している。その適応機構の時間的側面に深く関与しているのがタイミングを合わせる能力である。音楽やキャッチボールはもちろん、会話などのコミュニケーションを考えたときにも、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重要な役割を担っている。また、最近では人間のタイミング制御機構を工学的に応用することにも注目が集まってきている[1][2]。そして本研究の目標は、このようなタイミング機構を明らかにしモデル化することである。

人間のタイミング機構を分析する手法として、音ないし光で与えられる周期的刺激に対してタップ動作を同期させる、同期タッピング課題というものがある。この課題においては、刺激タイミングに対してタップ動作のタイミングが数 10ms 程度先行する”負の非同期現象”という興味深い現象が観察されている[3-5]。これは、被験者の知覚上の同期状態において、タップが刺激に先行する現象であり、人間の内側における“主観としての時間”の生成を示唆するものである。それゆえ、タイミング制御機構を明らかにするためには、人間の外側からの客観的な分析だけでなく、被験者の主観的な側面からの分析も同時に必要になるものと考えられる。

このような同期タッピング課題のタイミング制御機構に関しては、これまでさまざまなモデルが提案されてきた[6-15]。例えば、Michonは反応の時間間隔が(ITI)が刺激の時間間隔(ISI)時系列の変化によって修正されるモデルを提案した[6]。これは、ITIの値を直前の反応タイミングに加算することで、次の反応タイミングが決定されるモデルであり、メトロノームのテンポ変化に追従してタップする現象を再現できる。また、Vos and HelsenはInternal Tickという概念を提案した[8]。これは、刺激と反応のタイミングの線形結合として表現されるタイミング生成機構である。しかし、これらのモデルでは外的な変数によって規定されるタイミング機構が扱われており、時間生成に関わる人間の内的なメカニズムが考慮されていないという問題が残されていた。

そして、これらの一連のモデル研究の中で本研究と深く関わるものがMatesモデル[12][13]である。その理由としては、このモデルは神経伝達の遅れも含む、人間の知覚に関わる内部表現を考慮したモデルになっているからである。特に負の非同期現象のように、外部から観察される物理的時間だけではなく、人間の内部で知覚される主観的時間によってタイミング機構が説明されなければならないという点において、Mates

モデルの重要性は明らかである。さらに、Matesモデルは、これまでのタイミング制御モデルにおける誤差修正機構を体系的にまとめている。具体的に、このモデルは二つの誤差修正機構を用いることによって同期タッピングにおいて観察されるさまざまな現象を説明可能にしている。以上の特長より、本研究ではMatesモデルをタイミング制御機構の基盤的モデルとして採用する。

ただし、Matesモデルは位相誤差と周期誤差の修正機構を主観的に知覚される変数によって記述しているため、人間の外側から観察できる物理的時間を介して、モデルと現象を関連づけることは困難であった。そのため先行研究においても、Matesモデルの実験的検証はなされていなかった。そこで本研究では主観的に知覚される位相誤差(タイミングのずれ)を、人間の外側から直接制御する実験系を新たに考案し、Matesモデルと実験結果を関連づけることで、そのタイミング制御機構を明らかにすることをめざす。

また、同期タッピングの神経基盤に関する先行研究からは、さまざまな知見が得られている[16-21]。近年は、タイミング制御機構と脳活動についての関連を調べるためにfMRIやMEG等の脳イメージング技術が用いられ、タイミング生成における小脳と大脳基底核の関与が報告されている[22]。また、小脳-皮質回路は運動のタイミング[23-25]やフィードバック学習[26]、時間的な予測[27]、や内的な感覚運動モデルに深く関わっており[28][29]、タイミング制御においても重要な役割を果たしていると考えられている。また、音刺激とタップの位相誤差の修正に小脳が関与していることを示唆する結果も示されている[30]。

さらに、我々の研究グループでは、二重課題法を用いることによって、同期タッピングのタイミング機構が、注意資源を必要としない身体的機構と注意資源を必要とする認知的機構に二重化されていることを示唆してきた[31-33]。これはタイミング機構に関与する高次認知機能の役割を初めて明らかにしたものである。しかし、このようなタイミング機構の神経基盤とMatesモデルの関係も未だ明らかにはされていない。

以上の背景より、本研究はMatesモデルを基盤とし、知覚上のタイミング誤差を直接制御する実験系を用いることで、主観的タイミング制御機構を明らかにすることを主たる目標とする。さらに、その神経基盤との関係を明らかにするために、二重課題法を用いることで二重化されたタイミング機構との関係も明らかにしていく。

2. 研究方針

2.1 Matesモデル

本研究ではMatesモデルを基盤として主観的タイミング制御機構を明らかにする。Matesモデルを使用する理由は、人間の内部で知覚される主観的時間によってタイミング機構が

* 東京工業大学大学院 総合理工学研究科

* Interdisciplinary Graduate School of Science and Engineering, Tokyo Institute of Technology

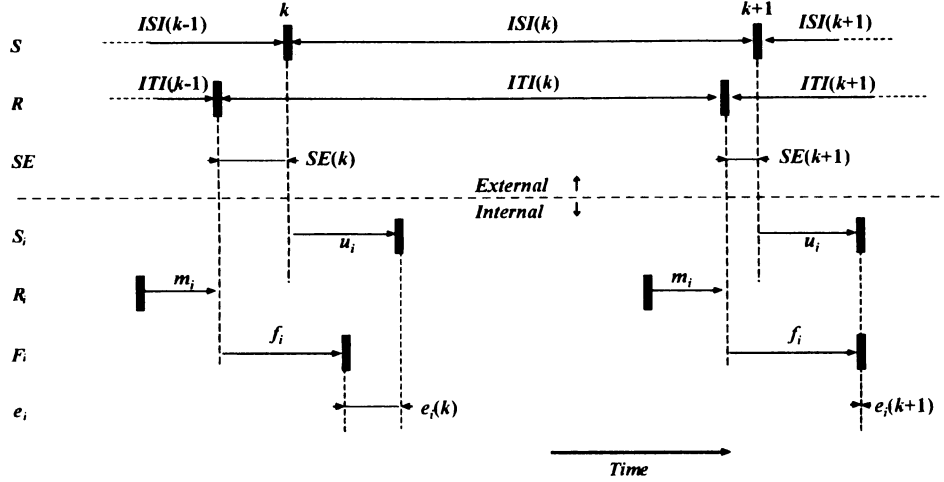


Fig. 1 Time scheme and definition of external (upper part) and internal (lower part) temporal parameters (variables) of sensorimotor synchronization process and time diagram of the hypothesized mechanism of subjective synchronization.

Variabl	Type	Description
External variables		
S	Event	Occurrence of stimulus onset
ISI	Interval	Inter Stimulus-onset Interval
R	Event	Occurrence of motor response onset
ITI	Interval	Inter Tap-onset Interval
SE	Interval	Synchronization Error
Internal variables		
u_i	Interval	Transduction delay of stimulus
m_i	Interval	Motor delay in execution of motor act
f_i	Interval	Transduction delay of feedback information from already executed onset of motor act
S_i	Event	Temporal central availability of stimulus
R_i	Event	Initiation of motor command
F_i	Event	Temporal central availability of feedback
e_i	Interval	Internal synchronization error (time difference between temporal central availability internal representations of some aspects of stimulus and response)
t_i	Interval	Internal timekeeper (reference) interval

Table 1. Variables of sensorimotor synchronization model

説明されている点、これまでの先行モデルを体系的にまとめている点、などが挙げられる。

この Mates モデルは、Fig.1 のタイミングチャートのように、同期タッピング課題におけるタイミング機構を説明することができる。図の上半分は外的に観測することができる物理的イベント、下半分は人間に内的に知覚される主観的イベントを表している。また、添え字の i は内的であることを表している。モデルを記述する全ての外的および内的変数の定義は Table 1 にまとめた。

Mates モデルは、式(1)の周期修正機構と式(2)の位相修正機構から構成されている。

$$T_i(n) = T_i(n-1) - \beta \cdot \{T_i(n-1) - \{S_i(n) - S_i(n-1)\}\} \quad (1)$$

$$R_i(n+1) = R_i(n) + T_i(n) - \alpha \cdot e_i(n) \quad (2)$$

ここで T_i は人間の内部で保持・更新されている基本周期、つまり“タイムキーパー”である。 S_i は音刺激を知覚した時刻、 R_i はタップ動作の運動指令が開始された時刻になっている。また、 e_i は知覚上のタップ時刻と刺激時刻の時間差、つまり“内的な位相誤差”である。 α , β は係数である。このときタイムキー

パーの変動 ΔT_i と内的位相誤差の変動 Δe_i を、以下のように定義すると、

$$\Delta T_i(n) = T_i(n+1) - T_i(n) \quad (3)$$

$$\Delta e_i(n) = e_i(n+1) - e_i(n) \quad (4)$$

Mates モデルは次の一つの式にまとめられる。

$$\Delta T_i(n) = -\beta \cdot \Delta e_i(n) - \alpha \cdot \beta \cdot e_i(n) \quad (5)$$

つまり Mates モデルは、知覚上の内的な位相誤差と、その変動からのフィードバックによって、タイムキーパーの時間変動を決定しているモデルである。

2.2 変数の変換

Mates モデルは知覚上での誤差修正モデルであるため、そのままでは実験的検証が困難である。そこで外的に観測可能な変数と内的に知覚される主観的な時間を関連付ける必要がある。まず、外側から観測可能な変数としては、Fig.1 のように、 n 番目の刺激時刻を $S(n)$ 、 n 番目のタップ時刻を $R(n)$ とおくと、刺激周期 ISI (Inter Stimulus-onset Interval)、タップ周期 ITI (Inter Tap-onset Interval)、刺激時刻とタップ時刻の差 SE (Synchronization Error) が、以下の式(6)-(8)のように定義される。

$$ISI(n) = S(n+1) - S(n) \quad (6)$$

$$ITI(n) = R(n+1) - R(n) \quad (7)$$

$$SE(n) = R(n) - S(n) \quad (8)$$

このとき本研究では2つの仮説を導入する。一つめの仮説は神経の伝達時間の遅れを一定と考えることである。Mates は、運動指令が出てから運動が遂行されるまでの時間の遅れと触覚フィードバックが知覚されるまでの遅れをランダムとして扱ったが、その明確な根拠及び数学的性質は示していない。そこで本研究ではこれらの伝達時間を一定と仮定する。このとき式(2)と式(3)から得られる下記の式(9)において、

$$\begin{aligned} \Delta T_i(n) &= T_i(n+1) - T_i(n) \\ &= \{R_i(n+2) - R_i(n+1) + \alpha \cdot e_i(n+1)\} \\ &\quad - \{R_i(n+1) - R_i(n) + \alpha \cdot e_i(n)\} \\ &= ITI_i(n+1) + \alpha \cdot e_i(n+1) - ITI_i(n) - \alpha \cdot e_i(n) \\ &= \Delta ITI_i(n) + \alpha \cdot \Delta e_i(n) \end{aligned} \quad (9)$$

伝達時間の遅れを一定とみなせば、 ΔITI_i を ΔITI で置き換えることができるので、以下のように表せる。

$$\Delta T_i(n) = \Delta ITI(n) + \alpha \cdot \Delta e_i(n) \quad (10)$$

したがって、Mates モデルを表す式(5)は、外側から観測可能

な変数 $\Delta ITI(n)$ を用いて、以下のように変換することができる。

$$\Delta ITI(n) = -(\alpha + \beta) \cdot \Delta e_i(n) - \alpha \cdot \beta \cdot e_i(n) \quad (11)$$

さらに、知覚上の位相誤差 $e_i(n)$ を外的に観測できる変数と関連づける必要がある。そのため以下のような2つめの仮説を採用する。本実験では、被験者には知覚上の同期状態を表現することが課されているので、 SE は、外側から捉えた物理的な同期状態と内側から捉えた知覚上の同期状態の時間差に対応するものと考えられる。これは負の非同期現象からも明らかである。したがって SE の平均値として定義される時刻を知覚上の同期時刻とし、それとタップの時間差を知覚上の位相誤差と考えることが可能である。つまり、

$$e_i(n) = 0 \Leftrightarrow SE(n) = \text{mean}SE \quad (12)$$

となる関係が成立すると考える。すると Mates モデルの知覚上の位相誤差 $e_i(n)$ を、外的に観測可能である $SE(n)$ に基づいて以下のように定義することができる。

$$e_i(n) = SE(n) - \text{mean}SE \quad (13)$$

以上の2つの仮説により、Mates モデルにおいて外的に観測可能な変数と内的に知覚される主観的な変数を実験的に関連づけることが可能になる。

2.3 実験課題

実験課題としては、Fig.2 のように、同期タッピング課題を2つの段階に分けて行う。第1段階(FISI condition)では、一定 ISI のもとで通常の同期タッピングを行い被験者の知覚上の同期状態と物理上の同期状態の時間差 SE を計測し平均値を算出する。ここで SE の平均値を知覚上の同期時刻と定義する。第2段階(FSE condition)では、知覚上の同期時刻を基準にして位相誤差 ΔSE を実験的に操作する。この方法によって知覚上の位相誤差を操作することが可能になる。そして制御量 ΔSE に対して応答量 ΔITI を関係づけることで、Mates モデルとの関係において、知覚上の主観的タイミング制御機構を明らかにすることができる。

まず、上記の式(12)で示される方法で、タッピングにおける m 回目において知覚上の位相誤差 e_i を 0 に固定し、 $m+1$ 回目以降の位相誤差を ΔSE に固定すると、 $m+1$ 回目において、

$$e_i(m) = 0, e_i(m+1) = \Delta SE \quad (14)$$

なる関係が成立する。このとき、式(11)より

$$\Delta ITI(m+1) = -(\alpha + \beta) \cdot \Delta SE \quad (15)$$

となる。また、 $m+2$ 回目以降のタップにおいても、 k を $m+1$ より大きい整数とすると、

$$e_i(k) = \Delta SE, e_i(k+1) = \Delta SE \quad (16)$$

なる関係が成立する。このとき式(11)より

$$\Delta ITI(k) = -\alpha \cdot \beta \cdot \Delta SE \quad (17)$$

したがって、式(15)と式(17)から明らかであるが、もしタイミング機構がMatesモデルに従うのであれば、本実験課題の制御変数 ΔSE と応答変数 ΔITI のあいだに線形な関係が観察されると予想される。こうして同期タッピングにおけるMatesモデルと実験データの関係を調べることが可能になる。さらに、本実験で得られる ΔITI と ΔSE の関係は、Matesモデルと直接的に対比することができるので、タイミング機構を定量的に分析することも可能になる。

3. 実験方法

3.1 手順

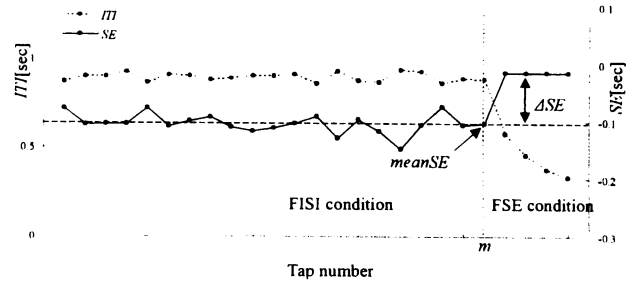


Fig.2 Design of the experimental task

被験者には、周期的な音刺激に可能な限りタイミングを合わせてタップする、同期タッピング課題が課されている。1 試行 30 タップとして構成され、不安定な最初の 5 タップを除く 25 タップをデータとして採用した。Fig.2 のように 25 タップを、20 タップ、1 タップ、4 タップの 3 つの区間に分ける。最初の 20 タップでは、 ISI を固定した状態(FISI condition)で通常の同期タッピング課題を行う。ここで、被験者の知覚上のタイミングと物理的タイミングの時間差である SE を計測し、その平均値 SE_1 を算出する。この SE_1 を以下の式(18)で定義する。

$$SE_1 = (\text{mean } SE \text{ in the FISI condition}) \quad (18)$$

次に、1 タップでは SE を SE_1 に固定した状態(FSE-1 condition)で同期タッピングを継続する。さらに、次の 4 タップで SE にさらに位相誤差 ΔSE を与え、 SE を固定した状態(FSE-2condition)で同期タッピング課題を継続する。このとき与える SE の大きさを SE_2 とし、以下の式(19)で定義する。

$$SE_2 = SE_1 + \Delta SE \quad (19)$$

本実験では ISI は 900ms で行った。13 種類の ΔSE (-90, -75, -60, -45, -30, -15, 0, 15, 30, 45, 60, 75, 90msec) が FSE-2 condition において用いられた。

3.2 データ解析

実際の実験ではゆらぎからの影響があり、(15)式と(17)式の関係性を分離して計測することは困難である。そこで本実験では新たに ΔSE に対する応答量として ΔITI_α を定義する。知覚上の位相誤差を与えた状態における ITI の回帰直線から予想される 1 タップあたりの変化量を ΔITI_α と定義する。このとき、 ΔITI_α は以下のように計算される。

$$\Delta ITI_\alpha = -\zeta \cdot \Delta SE \quad (20)$$

where $\zeta = \frac{2(k-m)(\alpha+\beta) + \alpha\beta(k-m-1) - 2(k-m+1)\{(k-m)(\alpha+\beta) + (k-2m-2)\}}{2(k-m+1)(k+m)}$

この式(20)より、タイミング機構が Mates モデルに従うのであれば、本実験課題のもとで観測される応答量 ΔITI_α と制御量 ΔSE は線形の関係になることが予想される。

3.3 二重課題法

本研究では、注意資源とタイミング機構の関係を調査するために二重課題法[34]を用いて解析を行った。同期タッピング課題のみを行う single 条件と、同期タッピング課題と同時に黙読課題を課す dual 条件を行い、その結果について比較した。single 条件では、被験者は瞑目状態で課題を行った。dual 条件では、PC 上で表示した文章をブラウザ(Firefox2.0.0.4)上で適切な速さでスクロールし、それを黙読させるという手法を用いた。被験者の注意が文章の意味理解に向いていたことを確認するため、各試行終了後に文章の内容に関する二択形式のテストを行った(Table2)。黙読課題には、Norbert Davis 著『The Mouse in the Mountain』の日本語

訳を用いた。さらに、この文章と同難易度の黙読課題のみを行った際のテスト結果との比較を行った(Table 3)。その結果、黙読課題と同時に同期タッピングを行った場合の正答率は黙読課題のみを行った場合の正答率よりも、有意に減少していることが分かった($p < 0.05$)。このことから、注意資源が黙読で十分に消費されていたと考えられる。

Table 2. Percentage of correct answers in reading task with tapping

Subjects	A	B	C	D	E	F	G	Average
Percentage(%)	87.5	83.3	66.7	75.0	78.6	75.0	59.1	74.9

Table 3. Percentage of correct answers in reading task without tapping

Subjects	A	B	C	D	E	F	G	Average
Percentage(%)	92.1	91.2	91.2	81.1	80.0	88.2	90.9	88.2

3.4 被験者・実験システム

被験者は、ボランティアとして20代男子7人(23-25歳)に依頼した。実験システムはPC(IBM, Thinkpad535)上のシングルタスクOS(IBM, PC-DOS200)にC言語を用いて実装された。音刺激は500Hz矩形波を100msの間イヤホンによって被験者の両耳に提示した。タップ動作は右手人差し指で行うように指示し、さらに、被験者は試行中にはタップを行うボタンから指を離さないように指示され、分割カウントなど、メンタルカウントも禁止された。実験は静かで明るく、被験者にとって適度な温度の部屋で椅子に座った状態で行われた。

4. 結果

4.1 SEとITIの時間発展

実験において得られたSEとITIの時間発展をFig.3に示す。制御量としての内的位相誤差の変化 ΔSE が0の状況では ΔITI_a も0近傍となり、応答量としてのタップ周期の変化が観察されなかった(Fig.3a)。 $\Delta SE > 0$ の状況では、応答量としてのタップ周期は減少し ΔITI_a は負となった(Fig.3b)。また $\Delta SE < 0$ の状況では、応答量としてのタップ周期は増加し ΔITI_a は正となった(Fig.3c)。

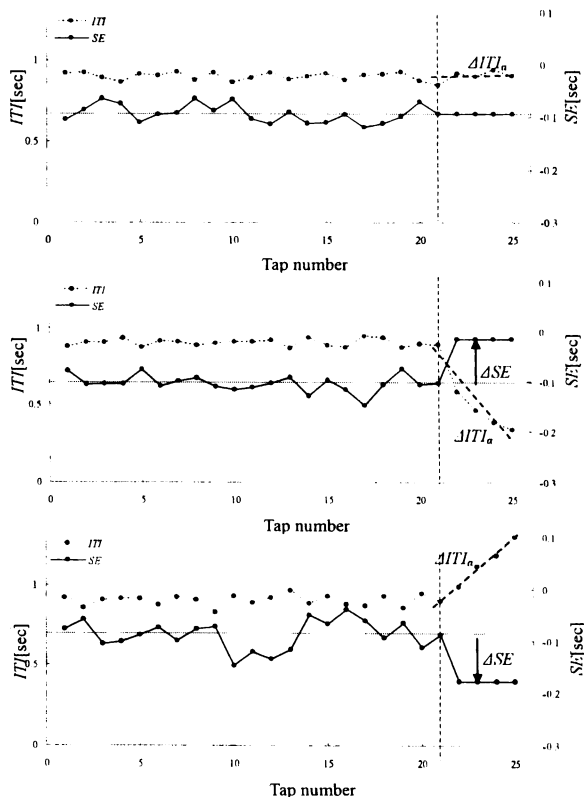


Fig.3 Temporal development of SE and ITI

4.2 制御量 ΔSE と応答量 ΔITI_a の関係

Fig.4は、横軸に制御した ΔSE 、縦軸にその応答である ΔITI_a をとったものである。2.3節で示したようにMatesモデルに従えば、 ΔITI_a と ΔSE は線形な関係を持つため、Fig.4において、データは原点を通る直線上に分布するはずである。実際、原点を通る直線上に集合しているのが確認できる。しかしそれ以外に、原点を通る直線上から外れたところにも集団が観察されたため、ワード法を用いてクラスタ分析を行った。ここで連続性のあるクラスタは一つのクラスタとみなした。その結果、以下に述べるように、大きく分けて3つのクラスタに分類できた。また、それらのクラスタと注意がどのように関係しているのかを調査するために、注意資源が使用できるsingle条件と、注意資源が使用できないdual条件の比較も同時に行った。

single条件では3つのクラスタが観察された。Fig.4において、原点近傍に直線状にデータが分布しsingle条件とdual条件の差があまりないクラスタ、 $\Delta SE > 0$ 側において原点を通る直線から少し離れた位置に分布しdual条件よりsingle条件の方が小さい値をとるクラスタ、 $\Delta SE < 0$ 側において原点を通る直線から大きく外れた位置に存在しsingle条件では存在するがdual条件では存在しないクラスタの、3つのクラスタが観測された。以降、便宜上、原点近傍の直線状のクラスタをクラスタ1、 $\Delta SE > 0$ 側に現れるクラスタをクラスタ2、 $\Delta SE < 0$ 側に現れるクラスタをクラスタ3と名づける。クラスタ1の直線性が強く回帰式の有意性も高いことから、クラスタ1の回帰直線と各クラスタのずれを観察した。ずれはクラスタ1の回帰直線からの二乗誤差を採用した。その結果をFig.5に示す。直線から大きくはば離れた部分と、Fig.4のクラスタ分析で得たクラスタの領域がほぼ一致した。さらに、一元配置分散分析($F_{2,88} = 67.60$; $p < 0.01$)および多重比較検定により、クラスタ1とクラスタ2の間および、クラスタ1とクラスタ3の間に二乗誤差に有意差があることがわかった。このことにより、クラスタ分析によるクラスタ分けが妥当であったことを確認するとともに、クラスタ2とクラスタ3がクラスタ1の回帰直線から逸脱していることも裏付けられた。

5. 考察

5.1 本研究の特徴

本実験の特徴は、大きく分けて2つある。一つめは、これまで用いられてきた物理的時間からの位相誤差制御とは異なり、各被験者の知覚上の位相誤差を制御することにより、主観的タイミング機構を明らかにした点である。Matesモデルは知覚上で誤差訂正を行う構造を持っているが、本研究の実験手法を用いることにより実験結果とモデルの対応を付けることができるようになった。制御可能な変数と観測可能な変数によってモデルを記述することができ、検証が可能になった。二つめは、二重課題法を用いて対比実験を行うことで、上記タイミング機構と注意資源の関係を明らかにした点である。

5.2 Matesモデルとの比較

2.3節で示したように、Matesモデルに従えば、 ΔITI_a と ΔSE は線形な関係を持つため、本研究の ΔSE に対する ΔITI_a の応答を表したFig.4において、プロットは原点を通る直線上に分布していなければならない。しかしながら、Table 2の結果を見ると、クラスタ1に関しては直線性が高いが、クラスタ2とクラスタ3に関しては直線性が比較的低く、クラスタ1から得られた回帰直線からも外れていることがわかった。以上の結果から、クラスタ1はMatesモデルによく整合し、クラスタ2とクラスタ3はMatesモデルから逸脱することが示唆された。

5.2.1 Matesモデルに整合する領域

Matesモデルによく整合するクラスタ1は、single条件、dual条件で共に観察される。つまり、注意資源を必要としない機構であることから、身体的機構を中心に構成されていることが予想される。このような身体的機構においては小脳が重要な役割を果たしていることが示されており[30, 35-38]、小脳とクラスタ1の機構と関与が予想される。小脳はリズム生成における同期誤差修正に深く関わっていることが示唆されている。

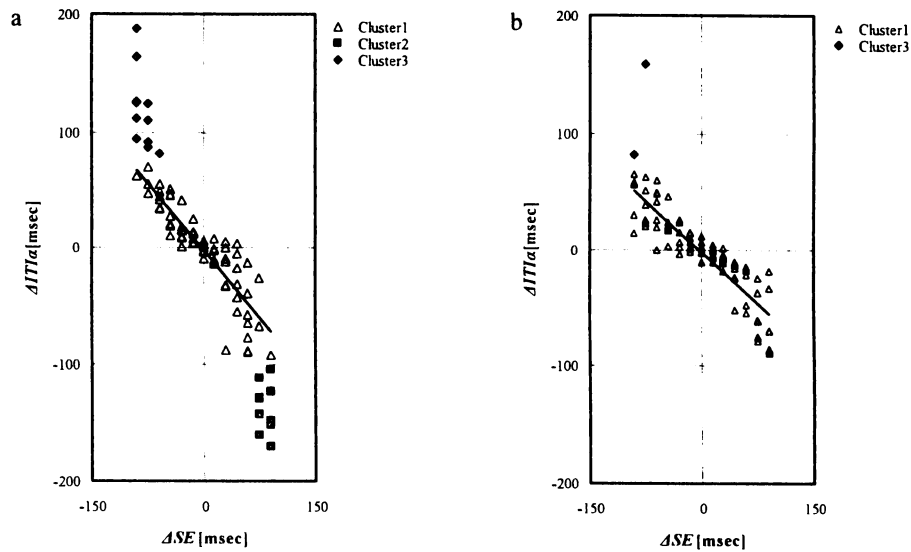


Fig. 4 Relationship between ΔSE and ΔITI_a
 a: single task condition b: dual task condition

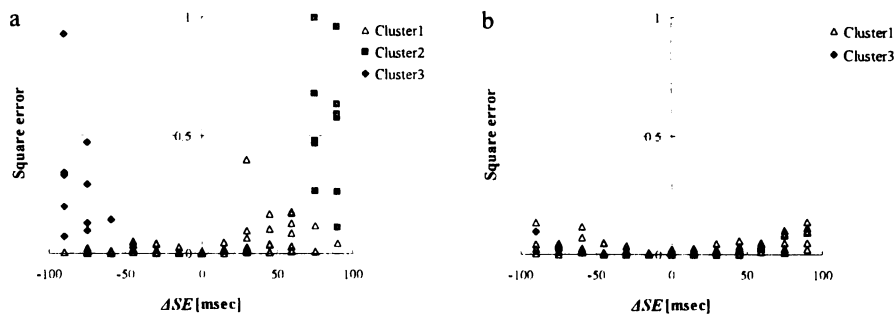


Fig. 5 Square error for regression line derived from Cluster 1
 a: single task condition b: dual task condition

[30]そして、同期タッピングで用いられるような短い時間の知覚については小脳のみでなく、聴覚野の活性も強くなることが知られている[37]。さらに、この機構の挙動はの引き込み現象とみなせることから、生物におけるリズム生成に重要な Central Pattern Generator(CPG)の関与も示唆される。CPGは脊髄などが大きな役割を果たしていると考えられている。

5.2.2 Mates モデルから逸脱する領域

Mates モデルを逸脱するクラスタ2とクラスタ3は主に single 条件で観測され、dual 条件で抑制される。今回 dual 条件の二重課題として用いた文章の黙読は、即時的な情報の保持と修正を行うワーキングメモリ[39][40]を消費していると考えられる。具体的には、ワーキングメモリのサブシステムである”音韻ループ”を使用していると予想される。黙読した文章は音韻ループ内の”音韻ストア”に一時的に保存され、また、音韻ストアはリズムや時間間隔に関する情報の保存に関係していることが知られている[41]。つまり、黙読課題によってこの音韻ストアが消費されることで、応答に変化が現れたのではないかと推察できる。

また、それらの神経基盤は前頭前野を中心とし、頭頂、側頭、大脳基底核などを含むネットワークが深く関わっていることが考えられる[39]。周期的にテンポ変化するメトロノームを用いたとき、前頭前野が活性化することが報告されている[42]。特に、眼窩前頭野と腹側前頭野が活性化し、これらはそれぞれ、追従運動と予測制御に深く関わっていると予測している。

また、刺激提示周期にランダムなゆらぎを付加した同期タッピングにおいて、認知できないような小さなゆらぎを与えた場合に対して、認知できるような大きなゆらぎを与えた場合の

方が、SE から ITI に対するフィードバックが強くなるということが先行研究で示されている [43]。このことから本研究においても制御した位相誤差 ΔSE を認知できたか否かが、Mates モデルを逸脱する領域に関わっていることが示唆された。

6. おわりに

本研究の目標は、同期タッピングにおける主観的タイミング制御機構を明らかにすることであった。そのために、同期タッピングにおけるタイミング機構を Mates モデルとの対比において分析し、さらにそのメカニズムに対する注意からの影響も評価した。具体的には、各被験者の主観的に知覚される位相誤差を直接制御することにより Mates モデルの検証を行った。また、二重課題法を導入することにより、位相誤差に対する応答特性と注意資源との関係も調査した。

その結果、2種類の主観的タイミング機構が存在することがわかった。与えた位相誤差に依存して、Mates モデルにより説明できるタイミング機構の他に、Mates モデルでは説明できない機構が存在することが明らかになった。与えられた位相誤差の絶対値が小さい場合は、ISI の大きさに関わらず身体的機構を中心にタイミング制御を行い、その他の場合においては身体的機構だけではなく、注意資源を必要とする戦略を用いていることが示された。そして、これは、人間が身体的機構と認知的機構の2種類の機構を用い、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。特に、この後者の知見は Mates モデルでは記述されておらず、今後さらに調べるとともに、その知見も組み込んだ新たなモデルを構築していく必要がある。

参考文献

- [1] Miyake, Y., Miyagawa, T., Tamura, Y., "Man-Machine Interaction as Co-Emergence Communication", *Transaction of the Society of Instrument and Control Engineers*, Vol.37, pp.1087-1096 (2001)
- [2] Watanabe, T., "E-COSMIC : Embodied Communication System for Mind Connection", *Technical report of IEICE*, Vol.101, pp.49-54 (2001)
- [3] Stevens, L.T., "On the time sense", *Mind*, Vol.11, pp. 393-404 (1886)
- [4] Fraiss, P., "The sensorimotor synchronization of rhythms", In Requin, J. (Eds.), *Anticipation et comportement*, pp.233-257, Centre national, Paris (1966)
- [5] Ashersleben, G., Prinz, W., "Synchronizing actions with events: The role of sensory information", *Perception & Psychophysics*, Vol.57, pp.305-317 (1995)
- [6] Michon, J.A., "Timing in temporal tracking", *Ergonomics*, Vol.12, pp.91-94 (1967)
- [7] Michon, J.A., Van der Valk, N.J.L., "A dynamic model of timing behavior", *Acta Psychologica*, Vol.27, pp.204-212 (1967)
- [8] Vos, P.G., Helsen, E.L., "Tracking Simple Rhythm: on-beat versus off-beat performance", In *Time, Action and Cognition. Towards Bridging Gap*, pp.287-299 (1992)
- [9] Wing, A.M., "Perturbations of auditory feedback delay and the timing of movement", *Journal of Experimental Psychology, Human Perception and Performance*, Vol.3, pp.175-186 (1977)
- [10] Hary, D., Moore G.P., "Synchronizing human movement with an external clock source", *Biological Cybernetics*, Vol.56, pp.305-311 (1987)
- [11] Hary, D., Moore G.P., "On the Performance and Stability of Human Metronome-Synchronization Strategies", *British Journal of Mathematical and Statistical Psychology*, Vol.40, pp.109-124 (1987)
- [12] Mates, J., "A model of synchronization of motor acts to a stimulus sequence: 1. Timing and error corrections", *Biological Cybernetics*, Vol.70, pp.463-473 (1994a)
- [13] Mates, J., "A model of synchronization of motor acts to a stimulus sequence: 2. Stability analysis, error estimation and simulations", *Biological Cybernetics*, Vol.70, pp.475-484 (1994b)
- [14] Thaut, M.H., Miller, R.A., Schauer, L.M., "Multiple synchronization strategies in rhythmic sensorimotor tasks: Phase vs. period correction", *Biological Cybernetics*, Vol.79, pp.241-250 (1998)
- [15] Kon, H., Miyake, Y., "An analysis and modeling of mutual synchronization process in cooperative tapping - (in Japanese)", *Transactions of Human Interface Society*, Vol.7, pp.61-70 (2005)
- [16] Ivry, R., "The representation of temporal information in perception and motor control", *Current Opinion in Neurobiology*, Vol.6, pp.851-857 (1996)
- [17] Ivry, R., "Neural mechanisms of timing", *Trends in Cognitive Science*, Vol.1, pp.163-169 (1997)
- [18] Mangels, J.A., Ivry, R., Naomi, S., "Dissociable contributions of the prefrontal and neocerebellar cortex to time perception", *Cognitive Brain Research*, Vol.7, pp.15-39 (1998)
- [19] Casini, L., Ivry, R., "Effects of divided attention on temporal processing in patients with Lesions of the cerebellum or frontal lobe", *Neuropsychology*, Vol.13, pp.10-21 (1999)
- [20] Pascual-Leone, A., "Increased variability of paced finger tapping accuracy following repetitive magnetic stimulation of the cerebellum in humans", *Neuroscience Letters*, Vol. 306, pp.29-32 (2001)
- [21] Rao, S.M., Harrington, D.L., Haaland, K.Y., Bobholz, J.A., Cox, R.W., Binder, J.R., "Distributed neural systems underlying the timing of movements", *The Journal of Neuroscience*, Vol.17, pp.5528-5535 (1997)
- [22] Middleton, F.A., Strick, P.L., "Basal Ganglia and Cerebellar Loops: Motor and Cognitive Critics", *Brain Research Review* (2000)
- [23] Ivry, R., "Cerebellar Timing System", *International Review of Neurobiology*, Vol.41, pp.555-573 (1997)
- [24] Ivry, R., Keele, S., Diener, H., "Dissociation of the Lateral and Medial Cerebellum in Movement Timing and Movement Execution", *Experimental Brain Research*, Vol.73, pp.167-180 (1998)
- [25] Penhume, V.B., Zatorre, R.J., Evans, A.C., "Cerebellar Contributions to Motor Timing : A PET Study of Auditory and Visual Rhythm Reproduction", *Journal of Cognitive Neuroscience* (1998)
- [26] Doya, K., "What are the Computations of the Cerebellum, the Basal Ganglia and Cortex", *Neural Networks*, Vol.12, pp.961-974 (1999)
- [27] Tesche, C.D., Karhu, J.T., "Anticipatory Cerebellar Responses during Somatosensory Omission in Man", *Human Brain Mapping*, Vol.9, pp.119-142 (2000)
- [28] Miall, R.C., Reckess, G.Z., "Anticipatory Cerebellum and the Timing of Coordinated Eye and Hand Tracking", *Brain and Cognition*, Vol.48, pp.48, pp.212-226 (2002)
- [29] Wolpert, D.M., Miall, R.C., Kawato, M., "Internal Models in the Cerebellum", *Trends in Cognitive Science*, Vol.2, pp.338-347 (1998)
- [30] Lutz, K., Specht, K., Shah, N.J., Jancke, L., "Tapping Movements according to Regular and Irregular Visual Timing Signals Investigated with fMRI", *Neuro Report*, Vol.11, pp.1301-1306 (2000)
- [31] Miyake, Y., Onishi, Y., Poeppel, E., "Two types of anticipation in synchronization tapping", *Acta Neurobiologiae Experimentalis*, Vol.64, pp.415-426 (2004)
- [32] Takano, K., Miyake, Y., "Two types of phase correction mechanism involved in synchronized tapping", *Neuroscience Letters*, Vol.417, pp.196-200 (2007)
- [33] Nakajima, M., Komatsu, T., Miyake, Y., "Time-series analysis of anticipatory timing control in synchronized tapping: Dual dynamics of cognitive process and embodied process", 第19回自律分散システムシンポジウム資料, pp.121-126 (2007)
- [34] Baddeley, A., *Working Memory*, Oxford University Press, New York (1986)
- [35] Kim, M., Nakamura, K., "A cerebellar model for synchronization of finger tapping to an auditory stimulus sequence - (in Japanese)", *Transaction of IEICE*, Vol.101, pp.175-182 (2002)
- [36] Nixon, P.D., Passingham, R.E., "The cerebellum and cognition: Cerebellar lesions impair sequence learning but not conditional visuomotor learning in monkeys", *Neuropsychologia*, Vol.38, pp.1054-1072 (2000)
- [37] Lewis, P.A., Miall, R.C., "Overview: An image of human neural timing, Functional and neural mechanisms of interval timing", In Meck, W.H. (Eds.), *CRC Press, Liverpool*, pp.515-532 (2003)
- [38] Molinari, M., Leggio, M., Filippini, V., Gioia, M., Cerasa, A., Thaut, M.H., "Sensorimotor transduction of time information is preserved in subjects with cerebellar damage", *Brain Research Bulletin*, Vol.67, pp.448-458 (2005)
- [39] Osaka, N., *Brain and working memory - (in Japanese)*, Kyoto University Press, Kyoto (2000)
- [40] Baddeley, A., "Working memory", *Comptes Rendus de l'Academie des Sciences - Series III - Science de la Vie*, Vol.321, pp.167-173 (1998)
- [41] Brown, S.W., "Attentional resources in timing: Interference effects in concurrent temporal and nontemporal working memory tasks", *Perception & Psychophysics*, Vol.59, pp.1118-1140 (1997)
- [42] Stephan, K.M., Thaut, M.H., Wunderlich, G., Schicks, W., Tian, B., Tellmann, L., Schmitz, T., Herzog, H., McIntosh, C., Seitz, R.J., Homberg, L., "Conscious and Subconscious Sensorimotor Synchronization- Prefrontal Cortex and the Influence of Awareness", *Neuro Image*, Vol.15, pp.345-352 (2002)
- [43] Muto, Y., Miyake, Y., Poeppel, E., "Timing mechanism with cognition in complex in environment - (in Japanese)", *Transaction of the Society of Instrument and Control Engineers*, Vol.43, pp.989-997 (2007)