

Analysis of Dual Timing Control Mechanism in Synchronization Tapping

Mitsuharu Nojima

Abstract – The purpose of this paper is to clarify internal phase correction mechanisms affecting timing control in a synchronization tapping task. Synchronization error (SE) was directly controlled within 450-1800 ms of the inter stimulus onset interval (ISI) using our experimental method. As a result, two types of internal phase correction mechanism were revealed. The first showed a strong negative correlation between SE change and change in inter tap onset interval (ITI), suggesting a simple negative feedback mechanism. The second type was inhibited in a dual task condition. These results suggest that there are two types of internal phase correction mechanism.

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へても明らかな様に、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りを担っているものと考えられる^[1-3]。

人間のタイミング機構を解析する手法として、音ないし光で与えられる周期的パルスに対して Tap を同期させる、同期タッピング課題というものがある。同期タッピング課題において、提示刺激に対して身体反応が数 10ms 程度先行する”負の非同期減少”という興味深い現象が観察されている^[4-6]。これは、人間の内部における”主観としての時間流れ”の成立を示唆している。また、この同期タッピング課題の研究は大きく分けて、タイミング機構のメカニズムに関する研究と、その神経基盤を明らかにする研究の 2 つに分けることができる。

メカニズムに関する研究からは多くのタイミング制御のモデルが提案されている^[7-14]。現在提案されている多くのモデルの基となっているのがタップ周期誤差と位相修正誤差に注目した、式(1)および(2)で示される Mates モデルである。このモデルは単純な負のフィードバックによる位相誤差修正と周期誤差修正とが結合される形で構成されている。

タイミング機構の神経基盤に関する研究に関して、人間の内部で、時間間隔がどう知覚され扱われているかについては、すでに重要な知見が得られている^[15,16-21]。われわれの研究グループでも、二重課題法を用いることにより、人間は時間間隔の長さ依存した身体的機構、認知的機構という二種類のタイミング機構を使っていることを示唆してきた^[22]。ここでは、注意資源を必要としない機構を身体的機構、注意資源を必要とする機構を認知的機構と定義している。

しかし、先行研究においては、Mates モデルを含む多くの

タイミング制御のモデルが位相誤差と周期誤差の修正機構で記述されているにもかかわらず、誤差そのものを直接制御する方法がほとんど行われていない^[23,24]。さらに誤差を制御して行われた研究に関しても、Mates モデルが知覚上のパラメータを使用しているにもかかわらず、物理的時間から誤差を制御した研究のみで、知覚上の誤差を直接制御した研究はない^[25]。そのため実験結果とモデルの明確な比較がほとんど行われていないのが実情である。また、タイミング制御が身体的な機構と認知的な機構に二重化されていることが明らかとなってきたが^[7]、タイミング機構のメカニズムとそれらの関係も明らかになっていない。

そこで本研究では Mates モデルを基に、知覚上の位相誤差を直接制御する新たな実験系を導入し、タイミング制御のメカニズムを明確に調査する。さらに、二重課題法を用いて対比実験を行うことで注意からの影響も明らかにするものである。

2. 方針

本研究では、Mates モデルを基盤として実験を行う。さらに二重課題法を用いた対比実験を行うことにより、認知的機構との関係を実験的に明らかにする。Mates モデルを採用した理由としては、2.1 節で説明したように、知覚に関する内部表現を考慮している点や、位相・周期に関する誤差訂正機構を体系的にまとめている点を挙げるができる。また、他のモデルの基本構造として使用されている^[9-13]ことも含めて、その構造の妥当性が高いと考えられる。

2.1 Mates モデル

上述した Mates モデルは下記のように記述される。

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

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

ここで α, β は係数であり、 S_i は音刺激を知覚した時刻、 R_i

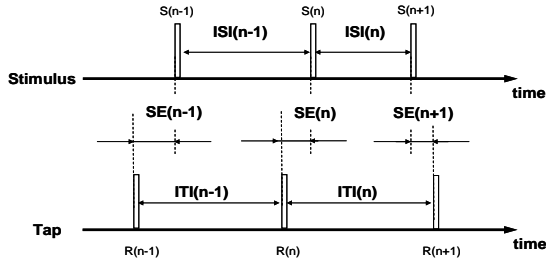


Fig. 1 Timing-chart of temporal relationship between taps and auditory stimulus

は Tap 動作の運動指令が開始された時刻になっている。また、 T_i は内的に保持・更新されている周期“タイムキーパー”であり、 e_i は内的な Tap 時刻と音刺激時刻の非同期量である。タイムキーパーの変動 ΔT_i と位相誤差の変動 Δe_i を以下のように定義すると、

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

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

(1)式と(2)式は次の1つの式で表現される。

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

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、タイムキーパーの変動を決定しているモデルである。

2.2 知覚上の位相誤差

上述の Mates モデルは知覚上のパラメータを用いて記述されているが、実際に計測できるのは物理時間上の外的なパラメータである。そこで外的に計測できる同期タッピングのパラメータの定義を行う。記録された n 番目の刺激時刻を $S(n)$ 、 n 番目の Tap 時刻を $R(n)$ として、刺激周期である ISI (Inter Stimulus-onset Interval)、Tap の時間間隔である ITI (Inter Tap-onset Interval)、刺激時刻に対する Tap 時刻の時間差である SE (synchronization Error)を以下の式(6)~(8)のように定義した。

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

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

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

本研究では SE が平均となる場合を知覚上の同期点と考え、Mates モデルの知覚上の位相誤差 $e(n)$ と外的に計測される $SE(n)$ の関係を以下のように定義する。

$$e_i = SE(n) - \text{mean}SE \quad (9)$$

つまり、 SE の平均からのずれを知覚上の位相誤差と定義する。

2.3 実験課題の設計

本研究における具体的な位相誤差の制御方法は、位相誤差訂正機構と周期誤差訂正機構が切り分けられないものと考え、Mates モデルを1つの式で表現した式(5)を基準に考える。

まず第1段階では、被験者の知覚上の時間と物理上の時間

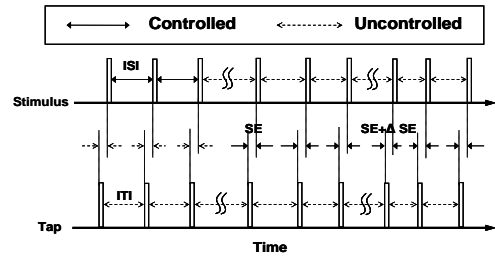


Fig. 2 Experimental image

のずれ、つまり SE を計測する。第2段階では、第1段階で得られた SE の平均値で SE を制御し、知覚上の位相誤差を0、つまり $e_i=0$ とした後、位相誤差 ΔSE を与える。

このような制御を行う理由は、上述した知覚上の位相誤差を制御する以外に、一般には観測不可能なパラメータ $\Delta T_i(n)$ を外的に得られるパラメータで記述するためである。それを以下で示す。まず、

$$\Delta ITI(n) = ITI(n+1) - ITI(n) \quad (10)$$

を定義する。ここで、

$$\begin{aligned} ITI(n) &= R(n+1) - R(n) \\ &= \{R_i(n+1) + m_i\} - \{R_i(n) + m_i\} \\ &= R_i(n+1) - R_i(n) \end{aligned} \quad (11)$$

より、 ITI に関しては、知覚上の ITI と外的に観測される ITI が一致する。 m 回目まで位相誤差を0で制御し、 $m+1$ 回目から位相誤差 ΔSE を与えるとすると、 $m+1$ 回目において、 $e_i(m) = 0$ 、 $e_i(m+1) = \Delta SE$ より

$$\Delta T_i(m) = \Delta ITI(m) + \alpha \cdot \Delta SE \quad (12)$$

である。 $\Delta e_i(m) = \Delta SE$ と合わせて、Mates モデルを表す(5)式は、以下のように

$$\begin{aligned} \Delta T_i(n) &= -\beta \cdot \Delta e_i(n) - \alpha \cdot \beta \cdot e_i(n) \\ \Rightarrow \Delta ITI(m) &= -(\alpha + \beta) \cdot \Delta SE \end{aligned} \quad (13)$$

と記述でき、Mates モデルを本実験の制御パラメータと観測可能なパラメータの線形な関係で記述することができる。

また、 $m+2$ 回目以降においても、 k を $m+1$ 以上の整数とすると、

$$\begin{aligned} e_i(k) &= \Delta SE, e_i(k+1) = 0 \text{ より} \\ \Delta T_i(k) &= \Delta ITI(k) \end{aligned} \quad (14)$$

である。 $\Delta e_i(k) = 0$ と合わせて Mates モデルを表す(5)式は以下のように

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

$$\Rightarrow \Delta ITI(k) = -\alpha \cdot \beta \cdot \Delta SE \quad (15)$$

と書くことができ、Mates モデルを本実験の制御パラメータと観測可能なパラメータの線形な関係で記述することができる。実際の実験ではノイズがあるため、(12)式と(14)式を個別に観察することは困難である。そこで本研究では ΔITI_e を以下のように平均を用いて定義する。まず、知覚上の位相誤差が 0 となるように制御した状態での ITI の平均を基準の ITI とし、 ITI_1 とする。そして、位相誤差 ΔSE を与えた状態での ITI の平均を応答して変化した後の ITI とし、 ITI_2 とする。つまり ITI_2 が ITI_1 からどれだけ変動したかで ΔITI_e を定義する。

$$(\text{mean ITI in the } e_i = 0 \text{ condition}) = ITI_1 \quad (16)$$

$$(\text{mean ITI in the } e_i = \Delta SE \text{ condition}) = ITI_2 \quad (17)$$

とすると、 ΔITI_e は以下のように表される。

$$\Delta ITI_e = ITI_2 - ITI_1 \quad (18)$$

ここで、 ΔITI_e を ΔITI で記述し、(13)、(15)式を代入すると、

$$\begin{aligned} \Delta ITI_e &= \frac{1}{k-m} \sum_{n=m+1}^k \sum_{l=m+1}^n \Delta ITI(l) \\ &= -\left\{ \alpha + \beta + \frac{k-(m+1)}{2} \cdot \alpha \cdot \beta \right\} \cdot \Delta SE \\ &= -const \cdot \Delta SE \end{aligned} \quad (19)$$

となる。式(19)を見ると、Mates モデルに従えば本研究で観測する ΔITI_e と制御する ΔSE は線形の関係になっていることがわかる。よって、本研究で観測する ΔITI_e と制御する ΔSE を、Mates モデルと対応づけることができ、任意の ΔSE を与え、その応答である ΔITI_e を観察することによりタイミング機構のメカニズムを観察することが可能になる。

2.4 二重課題法

本研究では、注意資源とタイミング制御の関係を調査するために二重課題法^[26]を用いて解析を行う。今回は、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する。

3. 方法

3.1 実験課題

被験者には提示された聴覚刺激に可能な限りタイミングを合わせてタップする、という同期タッピング課題が与えられている。タップ動作は右手人差し指で行ってもらった。

1 試行を 80 タップとして、不安定な最初の 5 タップを除く 75 タップをデータとして採用した。75 タップを、最初の 15 タップ、中間の 20 タップ、最後の 40 タップの 3 つのフェーズに分ける。

まず、被験者の知覚上の時間と物理上の時間のずれを計測するのが、第 1 フェーズである最初の 15 タップである。ここでは ISI を固定した状態(以後、FISI 条件と記す)で同期タッピン

グ課題を行う。

次に、被験者の知覚上の同期点から位相誤差 ΔSE を与える段階に入るのだが、ここは 2 つのフェーズから構成されている。まず、中間の 20 タップである第 2 フェーズにおいて、知覚上の位相誤差を擬似的に 0 にする。具体的には、SE を固定した状態(以後、FSE₁ 条件と記す)で同期タッピング課題を行う。このとき与える SE の大きさを SE₁ とし、以下の式(20)で定義する。SE₁ の値は FISI 条件下で得られた 15 タップの SE の平均であり、その値は FISI 条件の 15 タップが完了した時刻に計算される。

$$SE_1 = (\text{mean SE in the FISI condition}) \quad (20)$$

最後の 40 タップである第 3 フェーズにおいて、知覚上の位相誤差 ΔSE を与える。このフェーズにおいても SE を固定した状態(以後、FSE₂ 条件と記す)で同期タッピング課題を行う。このとき、与える SE の大きさを SE₂ とし、以下の式(21)で定義する。

$$SE_2 = SE_1 + \Delta SE \quad (21)$$

ISI は 450ms, 900ms, 1800ms の 3 種類で、制御する ΔSE は -150 ~ 150ms の範囲で $\Delta SE \in \{-150, -120, -90, -60, -30, 0, 30, 60, 90, 120, 150\}$ の 11 通りで制御した。

本研究では二重課題として黙読課題を採用し上記の同期タッピング課題のみを行う single 条件と、上記の同期タッピング課題と共に黙読課題を行う dual 条件の二種類の条件のもとで行った。

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スクロールし、それを黙読させるという新たな手法を用いた。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。黙読課題には、Robert Louis Stevenson 著「宝島」の日本語訳を用いた。

Table1 Percentage of correct answers

Subject	A	B	C	D	E	Average
Percentage(%)	78.2	71.4	85.7	82.1	71.1	77.7

3.2 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(21-24 歳、平均年齢 22.6 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。提示音刺激は 500Hz 矩形波を 100ms 間、イヤホンによって被験者の両耳に提示した。

dual 条件では PC(IBM, ThinkpadR50e: Fig. 2)を用い、ブラウザ(Firefox2.0.0.4)上で適切な速さでスクロールし文章を表示させた。

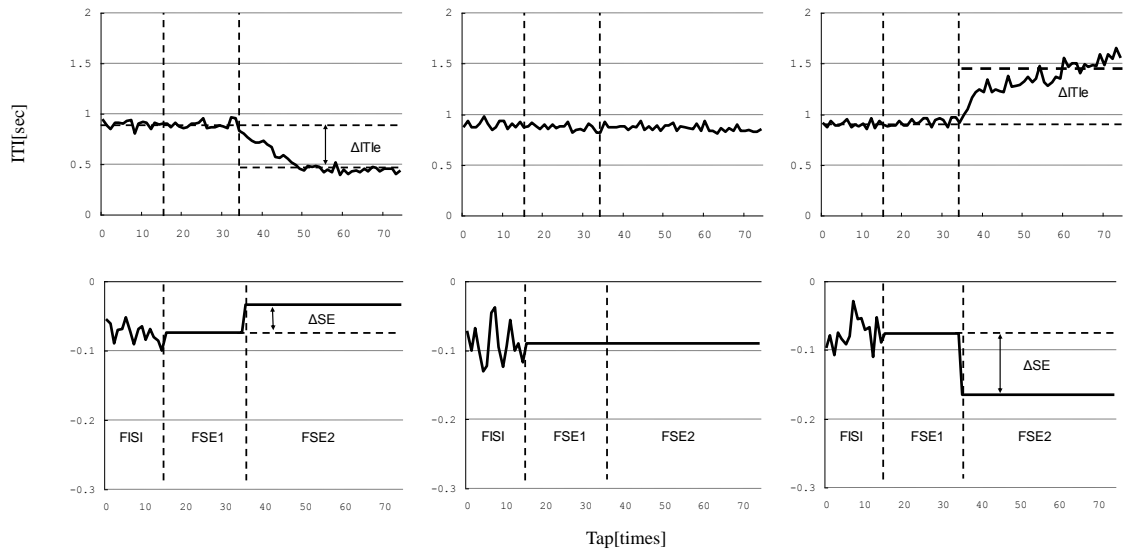


Fig.6 Temporal development of SE and ITI

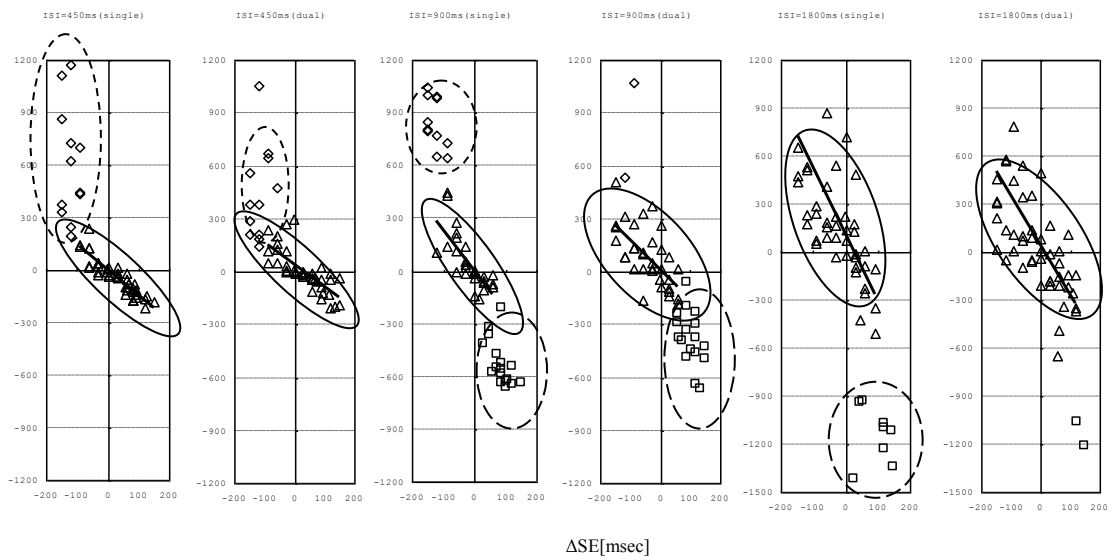


Fig.8 Relationship between ΔSE and ΔITI_e under single task condition and dual task condition

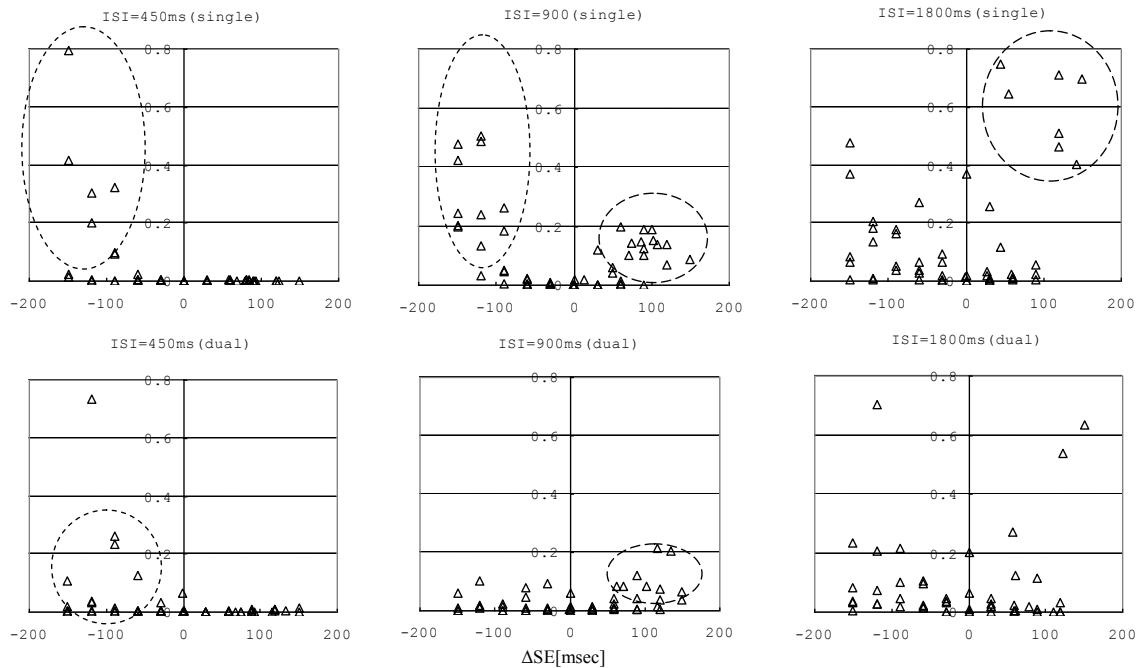


Fig. 9 square error for regression line derived from cluster 1

Table 2 statistical significance of regression line

		Cluster 3	Cluster 1	Cluster 2
single	ISI=450ms	0.58	**	-
	ISI=900ms	0.09	**	*
	ISI=1800ms	-	**	0.73
dual	ISI=450ms	0.60	**	-
	ISI=900ms	-	**	0.06
	ISI=1800ms	-	**	-

**: $p < 0.01$ *: $p < 0.05$  not significant

結果

4.1 SE および ITI の時間発展

実験において得られた ITI の時間発展を Fig. 3 で示す。制御量としての位相誤差の変化 ΔSE が 0 の状況では ΔITI_e 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。また $\Delta SE > 0$ の状況では、応答量としてのタップ周期は減少し ΔITI_e は負となった。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_e は正となった。

4.2 ΔSE に対する ΔITI_e の応答

Fig.4 は、横軸に制御した ΔSE 、縦軸にその応答である ΔITI_e をとったものである。3.3 節で示したように Mates モデルに従えば、 ΔITI_e と ΔSE は線形な関係を持つため、Fig.4 において、プロット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プロットが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、ウォード法を用いてクラスタ分析を行い、プロットをクラスタに分類した。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 条件の比較も行う。

Fig.4 の ISI=900ms のグラフを例にとると、原点近傍に直線状にプロットが分布し 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 と命名する。

これらのクラスタを回帰分析したときの回帰直線の有意水

準をまとめたものが Table1 である。この結果を見るとクラスタ 1 に関しては、すべての条件下でその有意性が認められた。クラスタ 2・クラスタ 3 についても、single 条件・ISI=900ms のクラスタ 2 に関してのみ $p < 0.05$ で有意性が認められたが、その他の場合は有意性が認められなかった。

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。直線から大きくはずれた部分と、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。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・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 本実験の特徴

本実験の特徴は、大きく分けて 3 つある。1 つ目は、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したことである。それによって、モデルとの対比を可能にし、制御量から被験者依存性を排除することにも成功した。2 つ目として、困難であると言われてきた^[27]Mates モデルの検証を行ったことがある。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制御パラメータと観測可能パラメータ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。最後に 3 つ目は、二重課題法を用いて対比実験を行うことで、これまであまり行われてこなかったメカニズムと注意の関係を観察したことがある。

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_e と ΔSE は線形な関係を持つため、本研究の ΔSE に対する ΔITI_e の応答を表した Fig.5 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、Table1 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・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 モデルに良く整合し、クラスタ 2・クラスタ 3 は Mates モデルから逸脱することが示唆された。

Mates モデルに良く整合するクラスタ 1 は、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^[27-30]、小脳とクラスタ 1 の機構と関与が予想される。

また、Fig.5 を見てもわかるように、ISI が長周期になるほど負の傾きが大きくなっている。このことから ISI が長周期になるにつれてフィードバックが強く働いていることがわかる。さらに、各 ISI において dual 条件よりも single 条件の方が負の傾きが大きくなっており、その差は ISI が長周期になるほど顕著になっている。このことから、この Mates モデルに良く整合する領域は、注意資源を必ずしも必要としないが、そのフィードバックの調節に注意資源を利用していることを示唆している。

Mates モデルを逸脱するクラスタ 2・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^[31]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^[32]。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^[31]、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^[33]。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、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^[34]。このことから本研究においても与えた位相誤差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。

7. おわりに

本研究は、タイミング制御機構のメカニズムを調査し、さらにそのメカニズムに対する能動的注意からの影響も観察するものであった。具体的には、各被験者の知覚上の位相誤差を直接制御することにより Mates モデルの検証を行い、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、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、ISI が短周期において負の位相誤差が与えられた場合と ISI が長周期において正の位相誤差が与えられた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唆された。

このことは、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示している。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共に、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] 渡辺富夫:コミュニケーションにおける身体性、ヒューマンインターフェース学会誌、**1-2**, 14/18 (1999)
- [2] 長岡千賀:対人コミュニケーションにおける非言語行動の2者相互影響に関する研究、対人社会心理学研究、**6**, 101/112 (2006)
- [3] 長岡、小森、中村:対話における交替潜時の対話者間影響、人間工学、**38-6**, 316/323 (2002)
- [4] L.T.Stevens: On the time sense, *Mind*, **11**, 393/404 (1886)
- [5] P.Fraiss: The sensorimotor synchronization of rhythms, In J.Requin(Ed.), *Anticipation et comportement*, Centre National, Paris, 233/257(1966)
- [6] G.Ashersleben and W.Prinz: Synchronizing actions with events: The role of sensory information, *Perception & Psychophysics*, **57-3**, 305/317(1995)
- [7] Michon J.A.: Timing in Temporal Tracking, Institute for Perception RVO-TNO, Soesterberg, The Netherlands(1967)
- [8] Michon J.A., Van der Valk N.J.L.:A dynamic model of timing behavior, *Acta Psychol*, Vol.27 204/212(1967)
- [9] Wing A.M. : Perturbations of auditory feedback delay and the timing of movement, *Journal of Experimental Psychology, Human Perception and Performance*, Vol.3, 175/186(1977)
- [10] Hary D., Moore G.P.: Synchronizing human movement with an external clock source, *Biol Cybern*, Vol.56, 305/311(1987)
- [11] 今誉, 三宅美博: 協調タッピングにおける相互同調過程の解析とモデル化, ヒューマンインターフェース学会論文誌, Vol.7, No.4, 61/70 (2005).
- [12] Thaut M.H. and Kenyon G.P.: Rapid motor adaptations to subliminal frequency shifts in syncopated rhythmic sensorimotor synchronization, *Human Movement Science*, Vol.22, 321/338(2003)
- [13] Thaut, M.H, Miller, R.A, Schauer, L.M.: Multiplesynchronization strategies in rhythmic sensorimotor tasks: Phase vs period correction:*Biological Cybernetics*, Vol.79, pp.241-250 (1998)
- [14] Mates, J.: A model of synchronization of motor acts to a stimulus sequence: I . Timing and error corrections, *Biological Cybernetics*, vol.70, 463/473 (1994a).
- [15] Fraisse P.: Sensorimotor synchronizations to rhythms, *Anticipation et comportement*, 233/257 (1980).
- [16] Ivry R: The representation of temporal information in perception and motor control, *Curr, Opin, Neurobiol*, Vol.6, 851/857 (1996).
- [17] Casini L. and Ivry R.: Effects of Divided Attention on Temporal Processing in Patients With Lesions of the Cerebellum or Frontal Lobe, *Neuropsychology*, Vol.13, No.1, 10/21 (1999)
- [18] Mangels J.A., Ivry R. and Naomi S.: Dissociable contributions of the prefrontal and neocerebellar cortex to time perception, *Cognitive Brain Research*, Vol.7, No.1, 15/39 (1998).
- [19] R.Ivry: Neural mechanisms of timing, *Trends in Cognitive Science*, 1-5, 163/169(1997)
- [20] A.Pascual-Leone: Increased variability of paced finger tapping accuracy following repetitive magnetic stimulation of the cerebellum in humans, *Neuroscience Letters*, **306-1-2**, 29/32(2001)
- [21] S.M.Rao, D.L.Harrington, K.Y.Haaland, J.A.Bobholz, R.W.Cox and J.R.Binder: Distributed neural systems underlying the timing of movements, *The Journal of Neuroscience*, **17-14**, 5528/5535(1997)
- [22] Y.Miyake, Y.Onishi and E.Poeppe: "Two types of anticipation in synchronization tapping", *Acta Neurobiologiae Experimentalis*, 64,415/426(2004)
- [23] Thaut M.H., Tian B, Azimi-Sadjadi M.R.: Rhythmic finger tapping to cosine-wave modulated metronome sequences: Evidence of subliminal entrainment *Human Movement Science*, Vol.17, 839/863 (1998).
- [24] Repp B.H.: Processes underlying adaptation to tempo changes in sensorimotor synchronization, *Human Movement Science*, Vol.20, 227/312 (2001).
- [25] K. Takano and Y. Miyake: Two types of phase correction mechanism involved in synchronized tapping, *Neuroscience Letters*, Volume 417, Issue 2, 1 May 2007, Pages 196-200
- [26] R.E. Ornstein: On the experience of time. , Penguin books Harmondsworth UK. (1969)
- [27] 金, 中村: 音刺激と Finger tapping の同期化機構の小脳モデル. 電子情報通信学会論文誌, **101-737**, 175/182 (2002)
- [28] M. Molinari , M. Leggio , V. Filippini , M. Gioia, A. Cerasa and M. Thaut : Sensorimotor transduction of time information is preserved in subjects with cerebellar damage, *Brain Research Bulletin*, **67**, 448/458 (2005)
- [29] Lewis PA and Miall RC.: Overview: An image of human neural timing. In: Functional and neural mechanisms of interval timing. Ed: Warren H Meck. CRC Press.(2003)
- [30] Nixon PD and Passingham RE.: The cerebellum and cognition: cerebellar lesions impair sequence learning but not conditional visuomotor learning in monkeys. *Neuropsychologia*, **38**, 1054/1072, (2000)
- [31] 荻原直行編著: 脳とワーキングメモリ, 京都大学学術出版会 (2000).
- [32] A.Baddeley: Working memory, *Comptes Rendus de l'Academie des Sciences – Series III – Science de la Vie*, **321-2-3**, 167/173(1998)
- [33] S.W.Brown: Attentional resources in timing: interference effects in concurrent temporal and nontemporal working memory tasks, *Perception & Psychophysics*, **59-7**, 1118/1140

(1997)

- [34] 武藤ゆみ子, 三宅美博, エルンスト ペッペル: "複雑な環境変動における認知を伴うタイミング機構 —環境の複雑性を考慮したインターフェース設計のための基礎的研究—," 計測自動制御学会論文集 Vol. **43**, No.11, 1/9 (2007)