

同期タッピングにおける二重化されたタイミング機構の解析

下茂 博章

Analysis of Dual Timing Control Mechanism in Synchronization Tapping

Hiroaki Shimo

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

人間は変化しつづける動的環境に適応しつつ生活しているが、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。その能力の重要さは、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ても明らかである。実際、人間同士の対話においてうなずきなどの身振りが自然に同調することが知られている^[1]。また、対話の交替潜時が個体間で一致傾向を示すこと^[2]、そして、それによって対人印象が変化すること^[3]も報告されている。このように、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。

タイミング制御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被験者がスイッチを押すタッピング動作を同期させる、同期タッピング課題という実験系が古くから用いられてきた。同期タッピング課題においては、提示刺激に対して身体反応が数 10ms 程度先行する“負の非同期現象(Negative Asynchrony)”という興味深い現象が観測されている^[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、認知的な時間を予測的に創出していることを示唆している。このように人間は、高度な内外イベントのタイミング合わせによって、時間遅れに対する予測的挙動を実現していると考えられる。しかしながら、人間の共同作業におい

て、未だ物理的な時間を前提とする外側からのコーディネーション支援のみが行われているのが現状である。そのため、認知的な空間の創出を前提にした内側からのコーディネーション支援を研究する必要がある。

われわれの研究グループは、上記のような人間の協調プロセスを共創的に支援しうる人工物を目指し、人間の協調プロセスにおけるタイミング機構に注目し研究を進めている^[7-11]。注意資源を必要としない機構を身体的機構、また、注意資源を必要とする機構を認知的機構と定義し、タイミング機構が身体的機構と認知的機構に二重化されていることを明らかにしてきた^[12]。

一方で、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ため、様々なモデルが提案されている^[13-20]。しかし、これらのモデルと上記の二重化された機構の関係については、未だわかっていない。

そこで本研究では、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モデルと、認知的機構の関係を明らかにすることを目的とし、二重化されたタイミング機構をさらに詳細に解析する。具体的には、多くのタイミング機構のモデルにおいて基礎となっている Mates モデルを基に、同期タッピングにおいて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た。また、二重課題法を用いて対比実験を行うことでタイミング機構と注意との関係を考察した。

以下、第 2 章において、同期タッピング課題における先行研究について説明する。第 3 章では、

本実験で用いた位相誤差制御方法について述べ、それに基づき研究方針を示す。第4章に具体的な実験方法を述べ、第5章に結果を示す。第6章において考察し、最後に第7章で本研究をまとめる。

2. 先行研究

2.1 同期タッピング課題

同期タッピング課題は、タイミング機構の研究に古くから用いられてきた。Dunlap は初めて同期タッピング課題を用いた実験を行い、周期的な刺激に対して身体反応が数10ms程度先行する“負の非同期(Negative Asynchrony)現象”を報告した^[21](Fig.1)。この現象は、触覚や筋運動感覚フィードバックにおける信号伝達にかかる時間が、音刺激からの信号到達よりも長いためであると考えられており、それは Paillard- Fraitse 仮説として知られている^{[6] [22]}。このような予測的(anticipatory)現象から、外的イベントに対してミリ秒単位で同期をとる予測性が不可欠であると考えられており^{[23][24]}、これまで多くの研究において身体応答と刺激提示時刻から算出される位相誤差(Synchronization Error)の値を用いて解析されてきた。その成果は大きく分けて、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。以下でその2つを説明する。

2.2 タイミング機構のメカニズムに関する研究

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^[13-20]が提案されている。まず始めに、Tap周期を持続するモデルが提案された^[13]^[14]。しかしこれらは同期誤差が徐々に蓄積されていくという問題があった^[25]。そのため、聴覚フィードバックを取り入れ、周期を維持するためのタイムキーパーの生成とタップ周期と刺激周期の誤差を随時修正する周期誤差修正機構がモデル化された^[15]。そしてさらに、応答と刺激のずれである位相誤差を次の応答へとフィードバックさせることにより誤差を小さくする位相誤差訂正の考えが生まれた^[16]。そして、現在提案されている多くの誤差修正モデル^[17-19]の基となったのが Mates のモデル^{[20][26]}である。このモデルは神経伝達の遅れも考慮した人間の知覚に関する内部表

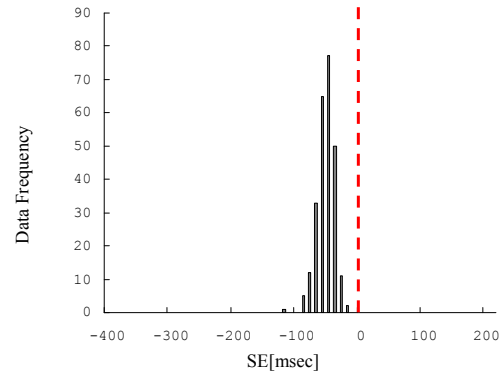


Fig. 1 Histogram of SE

現を考慮したモデルであり、同期タッピング課題でのタイミング制御における位相誤差訂正と周期誤差訂正両機構を体系的にまとめている。

2.3 タイミング機構の神経基盤に関する研究

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、すでにいくつかの重要な知見が得られている。近年は、タイミング生成機構と脳部位の活性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、その結果、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が分かってきた。

身体的機構とは注意資源を必要としない、自動的にタイミングを生成する機構である。この機構では、内的な振動子やペースメーカーのような時間情報の基礎となるシステムを、主として小脳が担っていると考えられている^[27]。小脳損傷患者を用いた時間弁別課題において、そのパフォーマンスに注意負荷の影響は認められなかったこと^[28]や、秒範囲よりもミリ秒範囲の課題において顕著な障害を示すこと^[29]から、身体的機構としての小脳の時間知覚は後述する注意資源の影響が無く、1sec以下の短い時間知覚において重要であると考えられる。^{[22][30-32]}

認知的機構とは、タイミング合わせに注意資源を必要とする機構である。この機構では周期等の時間情報の生成においてワーキングメモリの働きが重要であると考えられている^{[29][33]}。ワーキングメモリは前頭前野、頭頂連合野、側頭連合野、大脳基底核、小脳、海馬など様々な部位と結びつく分散協調型の脳内ネットワークで記述でき、それらを管理する中央実行系の役割は前頭前野が担っていると考えられている^[34]。タイミング制御との関連から考えると、ワーキングメモリにおけ

る音韻ループがリズムや時間間隔などの情報の保持と処理に関わる^[35]ことが重要となる。さらに、前頭前野損傷患者による時間弁別課題において、ミリ秒範囲では見られない時間知覚に対する影響が秒範囲において見られた^[29]。これらのことから、認知的機構の時間知覚は注意資源を必要とし、2sec以上のやや長い時間知覚において重要であると考えられる^{[36][37]}。

2.4 本研究の位置づけ

われわれの研究グループでも、タイミング制御のメカニズムと神経基盤の両側面から研究を行ってきた。具体的には前者のメカニズムに関する研究として、協調行動におけるタイミング機構のモデル化を行った研究^[17]や、位相誤差訂正機構を調査した研究^[38]などがある。また後者の研究においては、その神経基盤として注意資源に注目し、二重課題法(詳細は 3.3 節で後述する)を用いて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を明らかにした^[12]。また、同期タッピングを時系列解析することによって、1/f ゆらぎの他に 1000ms 以上の周期では特定周波数からの寄与が大きくなること^[39]、さらにその 1/f 型特性は身体的機構から、固有周期型特性は認知的機構から創出されていることも明らかにした^[40]。

しかし、課題も残されている。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および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研究がほとんど行われていない^{[41][42]}。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用い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^[38]。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^[12]、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、タイミング機構のメカニズムとそれに対

する注意資源からの影響も明らかにするものである。

3. 方針

3.1 研究方針

本研究の実験方針は、2 つの方針からなる。1 つ目の方針は、Mates モデルを基に知覚上の位相誤差を直接制御できる実験系を導入するということである。2 つ目の方針は、二重課題法を用いて対比実験を行い、注意からの影響を調査することである。つまり、知覚上の位相誤差を直接制御し、その応答としてタップ周期がどう変化するかを観察することによって、タイミング機構のメカニズムを観察する。さらに、二重課題法を用いた対比実験の結果と照らし合わせることで、その注意からの影響を調査する。

3.2 Mates モデル

本研究ではモデルを基盤として研究を行い、そのモデルとしては Mates モデルを採用した。上述のようにこのモデルと、身体的機構・認知的機構の関係はわかっていない。そこでモデルを基準に実験を行い、さらに二重課題法を用いた対比実験を行うことにより、その部分を実験的に検証する。Mates モデルを採用した理由としては、2.2 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ことができる。また、他のモデルの基本構造として使用されている^[15-19]ことも含めて、その構造の妥当性が高いと考えられる。

3.2.1 Mates モデルの性質

Fig.2 は、同期タッピングの各パラメータを時系列として表したもので、Mates モデルは上述したように点線以下の知覚上のパラメータ(Table1 参照)を用いて記述されている。上述したように、知覚上の時間で周期誤差を訂正する機構に相当する式(1)と、位相誤差を訂正する機構に相当する式(2)とで表される。

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

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

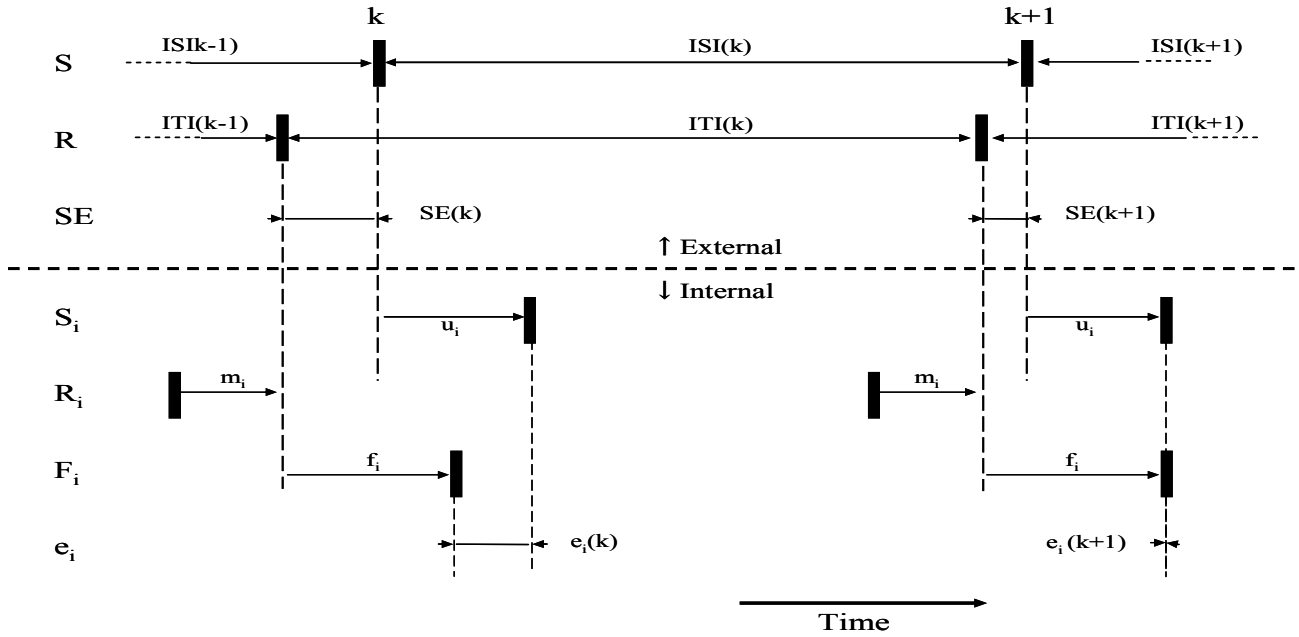


Fig. 2 Time scheme and definition of external (upper part) and internal (lower part) temporal parameters (variables) of sensorimotor synchronization process and time diagram of the hypothesized mechanism of subjective synchronization.

式(1)、式(2)からわかる通り、 R_i に対して、単純な負のフィードバックによる位相誤差訂正と周期誤差訂正とが結合される形で構成されている。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 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、 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 はタップしたと知覚された時刻と音刺激が知覚された時刻の差、つまり内的なタップ時刻と刺激提示時刻の非同期量である。

また、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。(導出に関する詳細は、末尾の appendix1 を参照)

Table 1 Sensorimotor synchronization model variables

Variable	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

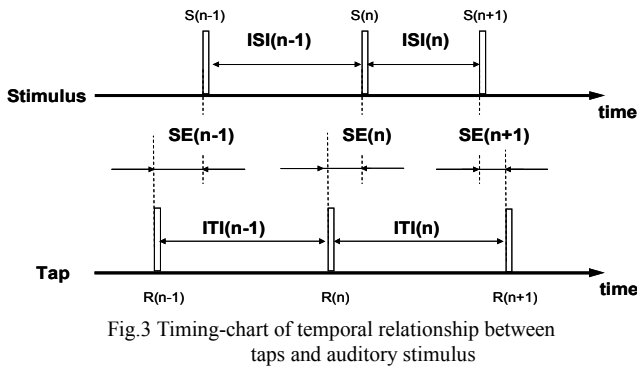


Fig.3 Timing-chart of temporal relationship between taps and auditory stimulus

3.2.2 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上の外的なパラメータである。そこで外的に計測できる、物理時間上の同期タッピングのパラメータの定義(Fig.3)を行う。記録された n 番目の刺激時刻を $S(n)$ 、 n 番目のタップ時刻を $R(n)$ とし、刺激周期である ISI (Inter Stimulus-onset Interval)、連続するタップの時間間隔である ITI (InterTap-onset Interval)、刺激時刻に対するタップ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。

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

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

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

以下で、Mates モデルの知覚上の位相誤差 $e(n)$ と、外的に計測される位相誤差 $SE(n)$ の対応を行う。Fig. 1 は ISI が一定の同期タッピングにおける SE のヒストグラムであるが、この場合、 SE の平均である $SE \approx -70ms$ をピークに分布を描いていることがわかる。つまり、この被験者においては、 SE の平均である $SE \approx -70ms$ の状態で主観的に同期しており、知覚上の位相誤差は 0 となっていると考えられる。よって本研究では、 SE が平均となる場合を知覚上の同期点と考え、Mates モデルの位相誤差 $e(n)$ と、3.1 章で定義した外的に計測される $SE(n)$ の関係を以下のように定義する。

$$e_i(n) = SE(n) - meanSE \quad (9)$$

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。

このことから本研究では、試行の前半において ISI が一定の同期タッピングを行い、前半が完了

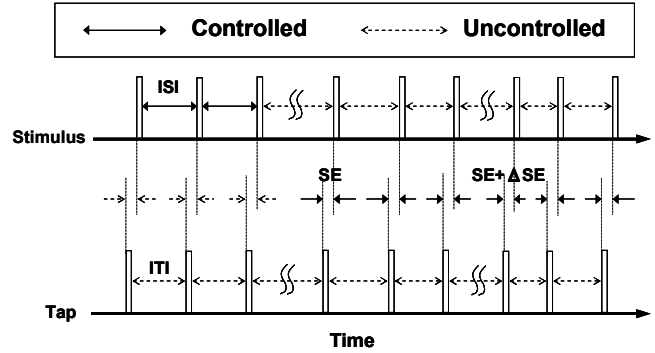


Fig.4 Experimental image

した時点で SE の平均を算出する。その SE の平均の値、つまり知覚上の位相誤差が 0 の場合を基準に位相誤差を制御することにより、知覚上の位相誤差を直接制御することを可能とする。

また、その同期点は被験者に依存しているため従来の物理的時間から誤差を制御した研究では制御量に被験者依存性が残るという問題点があったが、本研究では各被験者の同期点から位相誤差を与えているため、その被験者依存性を排除することができる。

3.2.3 実験課題の設計

具体的な位相誤差の制御方法は Mates モデルを 1 つの式で表現した式(5)から導かれる。その理由は、式(1)に相当する周期誤差訂正機構と、式(2)に相当する位相誤差訂正機構の切り分けが困難であるという点が挙げられる。つまり、本研究で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。

ただし、ここで問題がある。それは先行研究^[43]でも言及されている通り、Mates モデルは知覚上で誤差訂正を行う構造を持っているため、外的に得られたデータからのモデルの検証が非常に困難であるということである。式(5)においても、 $e_i(n)$ と $\Delta e_i(n)$ は 3.2.2 節の考え方をを用いると制御可能なパラメータであるが、 $\Delta T_i(n)$ は一般には観測不可能なパラメータである。そこで本研究では限定した条件化で実験を行い、外的に得られたデータからモデルの検証を目指す。そのため、本実験では同期タッピング課題を 2 つの段階に分けて行う。(実験の模式図は Fig.4 参照)

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のずれを計測する。 SE が被験者の知覚上の時間と物理上の時間のずれと考えられるこ

とから、音刺激の提示周期を固定し一定のリズムでタップを行い、SEを計測する。

第2段階では、被験者の知覚上の同期点から位相誤差 ΔSE を与える段階である。具体的には、まず第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。

以下の詳細な導出は、末尾の appendix2 にまとめられている。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、

$$e_i(m) = 0, \quad e_i(m+1) = \Delta SE \text{ より}$$

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

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

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

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。

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、

$$e_i(k) = \Delta SE, \quad e_i(k+1) = 0 \text{ より}$$

$$\Delta T_i(k) = \Delta ITI(k) \quad (14)$$

である。 $\Delta e_i(k) = 0$ と合わせて、Matesモデルを

表す式(5)は、以下のように

$$\begin{aligned} \Delta T_i(n) &= -\beta \cdot \Delta e_i(n) - \alpha \cdot \beta \cdot e_i(n) \\ \Leftrightarrow \Delta ITI(m) &= -\alpha \cdot \beta \cdot \Delta SE \end{aligned} \quad (15)$$

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。

以上に本実験の条件下でMatesモデルがどのように記述されるかを示したが、実際の実験ではノイズがあるため、式(12)と式(14)を個別に観察することは困難である。そこで本研究ではノイズからの影響を少なくするため 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、式(13)と式(15)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 は線形な関係になっていることがわかる。この式によって、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た。よって、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。

3.3 二重課題法

注意資源とタイミング制御の関係については、二重課題法を用いて解析を行う。二重課題法はOrnsteinの注意資源の蓄積容量仮説^[44]に基づいた実験手法である。Ornsteinの仮説によると、人間の注意資源は全体の容量が決まっており、その容

量が足りない場合は注意資源を必要とするシステムが稼働できない。これに従って、注意資源との関係を調査したい対象課題について、その対象課題のみを行った場合と、対象課題と同時に別の注意資源を消費する課題を行った場合の結果を比較してその差から対象課題における注意資源の役割について調査を行うことができる。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。それによって、注意資源とタイミング制御の関係について調査を行う。

4. 方法

4.1 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。実験中は右手人差し指以外の体の部位を使ってリズムを取ることは禁止した。

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。SE を固定する方法は、タップを検出した瞬間から SE₁ の時間遅れを持って音刺激を提示することによって行う。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

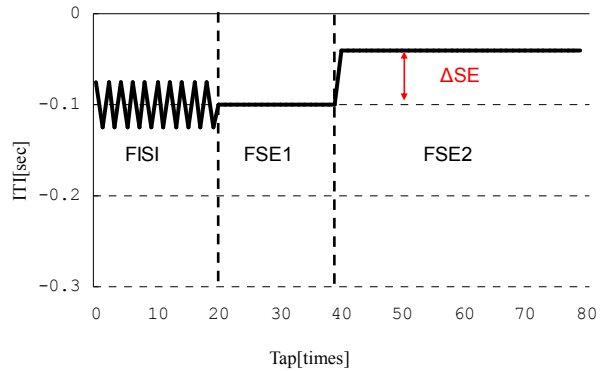


Fig.5 Temporal development of SE (Experimental image)

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。SE₂ の値は SE₁ から ΔSE だけ変化させたものである。第 2 フェーズにおいて知覚上の位相誤差が近似的に 0 になっていることから、SE₂ の値で SE を制御することによって知覚上の位相誤差 ΔSE を与えることができる。

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

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。従来の紙に印刷された文章を読む手法に比べて、ページめくりという外乱を排除できる点と、スクロール速度を制御できる、つまり読書量をある程度制御出来る点で優れており、より効果的に注意資源を消費させることが可能となった。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、Robert Louis Stevenson 著「宝島」の日本語訳を用いた。

Table2 Percentage of correct answers

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

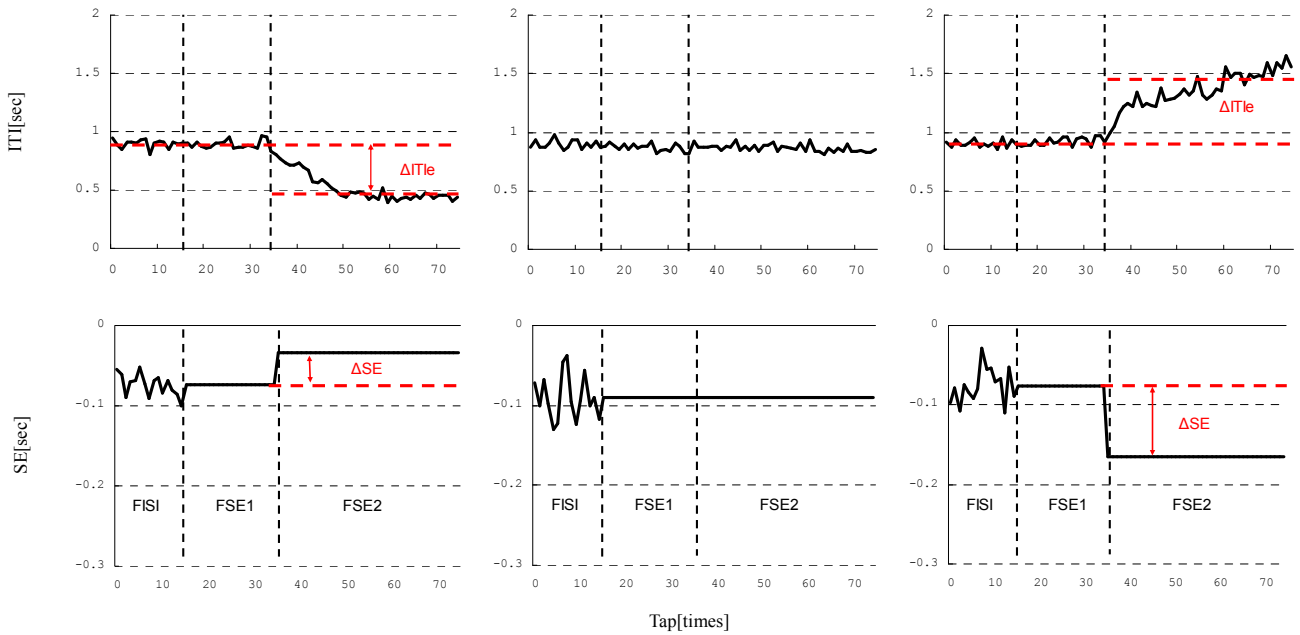


Fig.6 Temporal development of SE and ITI

4.2 被験者

課題を遂行する被験者は、ボランティアとして20代男子5名(21-24歳、平均年齢22.6歳)に依頼した。被験者はいずれも音刺激を聴き取るにあたっての障害が無く、かつ右利きで、応答のタップ動作は右手人差し指にて行なった。なお被験者は同様なタッピング実験において予備的な試行を通じた習熟を行ない、滞りなくタップ動作を行なえることを確認している。

4.3 実験システム概要

タッピングシステムは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、音刺激を提示するイヤホン、タップを検出するボタンからなる(Fig. 7)。Tap時刻は同様のPCを用い、パラレルポートを介して1/1024sの時間精度で記録した。提示音刺激は、



Fig. 7 Equipment of tapping system

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。音量は、被験者の主観的に聴き取り易い範囲で一定に設定した。実験環境として、聴覚刺激を阻害する可能性のある雑音源をできるだけ排除するため静かな環境を用意し、さらに、遮音性の高いイヤーマフを使用した。また、dual 条件では PC(IBM, ThinkpadR50e)を用い、ブラウザ(Firefox2.0.0.4)上で文章を表示させた。各被験者の黙読速度を調査した上で、注意資源を消費するのに適切なスクロールの速さを設定した。

5. 結果

5.1 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. 6 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 ITI は変化しなかった。また、 ΔSE が正の場合は ITI が減少し、 ΔSE が負の場合は ITI が増加した。ここで、3.2.3 節で説明したように、Mates モデルとの対応をとるため、制御量である位相誤差の変化 ΔSE に対する応答量として式(18)で定義したタップ周期の変化 ΔITI_e を、改めて式(22)で定義する。

$$\Delta ITI_e = (\text{mean ITI in the } FSE_2 \text{ condition}) - (\text{mean ITI in the } FSE_1 \text{ condition}) \quad (22)$$

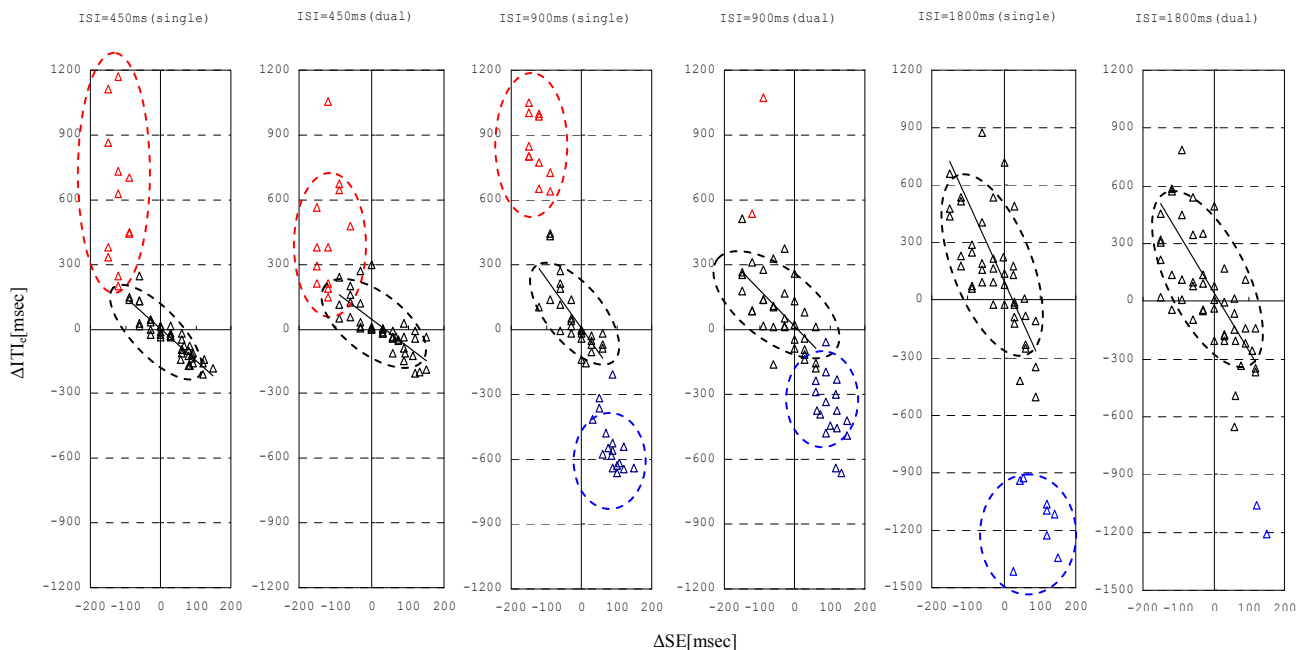


Fig.8 Relationship between ΔSE and ΔITI_e under single task condition and dual task condition

ここで ΔITI_e を、 FSE_1 条件における ITI の平均と FSE_2 条件における ITI の平均の差として定義したのは、平均を取ることでデータの不安定さを出来るだけ排除するためである。

結果としては、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。

本研究の意図した通りに制御できていれば、 $\Delta SE > 0$ を与えることは、知覚上で正方向に位相誤差を与えることを示している。つまり、被験者はタップ動作が遅れたと感じ、タップ周期が減少するはずであり、実際に応答量としてのタップ周期が減少している。また、 $\Delta SE < 0$ を与えることは、知覚上で負方向に位相誤差を与えることを示している。つまり、被験者はタップ動作を早くしすぎたと感じ、タップ周期が増加するはずであり、実際に応答量としてのタップ周期が増加している。これらのことと、 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ことを合わせて、 ΔSE を制御することで、知覚上における位相誤差を制御する

ことに成功していると考えられる。

5.2 ΔSE に対する ΔITI_e の応答

Fig.8 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。3.2.3 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、Fig.8 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、クラスタ分析を行い、プロットをクラスタに分類した。クラスタ分析は各 ISI にウォード法を適用し、 ΔSE と ΔITI_e から計算される平方和距離を用いてクラスタ化を行った。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.8 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

Table 3 Result of cluster analysis

		Cluster 3	Cluster 1	Cluster 2
single	ISI=450ms	22%	78%	-
	ISI=900ms	20%	49%	31%
	ISI=1800ms	-	79%	15%
dual	ISI=450ms	23%	76%	-
	ISI=900ms	-	62%	31%
	ISI=1800ms	-	92%	-

Table 5 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	-	**	-

Table 4 determination coefficient

		Cluster 3	Cluster 1	Cluster 2
single	ISI=450ms	0.03	0.83	-
	ISI=900ms	0.28	0.57	0.33
	ISI=1800ms	-	0.49	0.02
dual	ISI=450ms	0.03	0.58	-
	ISI=900ms	-	0.43	0.22
	ISI=1800ms	-	0.37	-

**: $p < 0.01$ *: $p < 0.05$ [stippled box] not significant

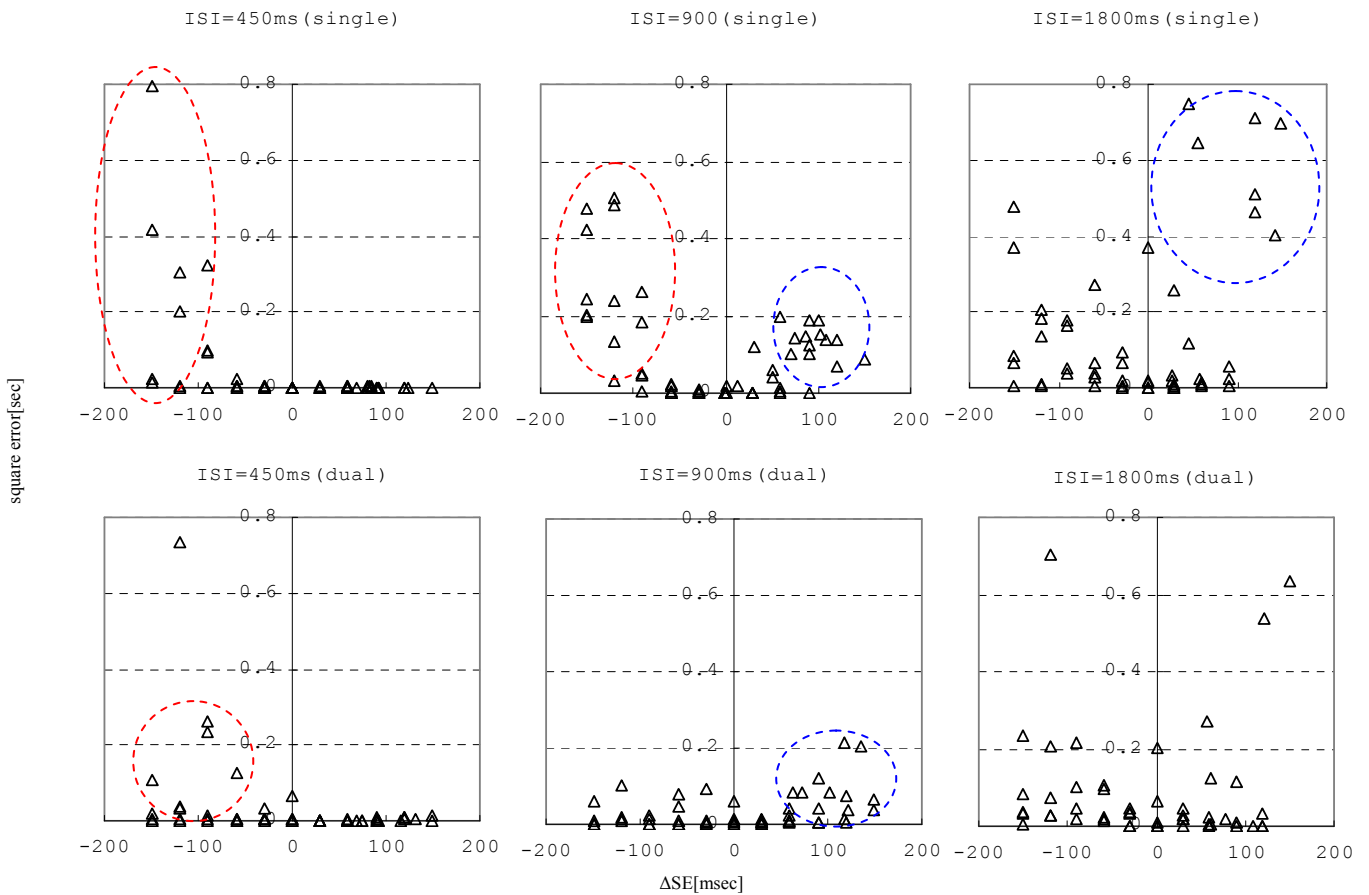


Fig. 9 square error for regression line derived from cluster 1

ラスト、 $\Delta SE < 0$ 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。

比較的短周期である $ISI = 450ms$ においては、クラスタ 1 が single 条件と dual 条件ともに観測され、クラスタ 3 は single 条件では存在するが dual 条件ではやや抑制される傾向にあった。しかし、クラスタ 2 は、single 条件と dual 条件の両方で観測されなかった。

比較的長周期である $ISI = 1800ms$ においては、クラスタ 1 が single 条件と dual 条件ともに観測され、クラスタ 2 は single 条件では存在するが dual 条件では抑制される傾向にあった。クラスタ 3 と呼べるような集団は、single 条件でも dual 条件でも観測されなかった。

これらのクラスタの生起率をまとめたのが Table 3 である。dual 条件の $ISI = 450ms$ 、 $900ms$ においては、クラスタ 2・クラスタ 3 が発生しているもののクラスタ 1 からの乖離が小さいため、薄い色で表記している。クラスタ 1 はどの ISI でも出現するのに対し、クラスタ 2 は主に ISI が長周期側で、クラスタ 3 は主に ISI が短周期側で観測されることがわかった。また、クラスタ 1 は single 条件と dual 条件に関わらず観測されるのに対し、クラスタ 2・クラスタ 3 は主に single 条件で観測された。

Table 4 は、各クラスタを回帰分析したときの決定係数である。この結果を見ると、クラスタ 1 は比較的大きな値をとっており直線性が強く、それに対してクラスタ 2・クラスタ 3 は、比較的小さい値をとっており、直線性が低いことが示唆された。実際、求めた回帰式の有意性の検定を行うと、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 に関しても、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 (Table 5)。

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。結果を表したのが Fig. 9 であるが、二乗誤差が大きくなっている部分、つまり直線から大きくはずれた部分と、Table 3 の

クラスタ分析で得たクラスタの領域がほぼ一致する。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。

6. 考察

6.1 結果のまとめ

本研究では同期タッピングにおいて位相誤差を直接制御する新たな実験系を導入した。さらに Mates モデルを基にした実験を行うことにより、タイミング制御のメカニズムを調査した。また、二重課題法を用いて対比実験を行うことで、メカニズムと注意との関係を観察した。その結果、タイミング制御の誤差訂正機構に大きく分けて 2 つの機構が存在することが明らかとなった。

クラスタ 1 は、主に与えられた位相誤差が小さい場合に、刺激提示周期に依存せず観測された。また、single 条件と dual 条件の両方で観察されることから注意資源を必要としない機構であると考えられる。

クラスタ 2 は、比較的大きな正の位相誤差を与えた場合に観測される。主に ISI が長周期側で観測されることから ISI 依存性も有していると推定される。また、single 条件と比べて dual 条件では抑制されていることから、注意資源が関与していると考えられる。最後にクラスタ 3 に関してだが、比較的大きな負の位相誤差を与えた場合に観測される。主に ISI が短周期側で観測されることから ISI 依存性も有していると推定される。また、single 条件と比べて dual 条件では抑制されていることから、注意資源を必要とする機構であると考えられる。

6.2 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^[48]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である。さらに二重課題において、従来の紙に印刷された文章を読む手法に代わり、PC上でスクロールさせた文章を黙読させるという手法を用いたことで、より効率的に注意資源を消費させることを可能にした。

6.3 Mates モデルとの比較

3.2.3 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.8 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、Table4 および Table5 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。

6.3.1 Mates モデルと整合する領域

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^[45-48]、小脳とクラスタ1の機構と関与が予想される。

また、ここで興味深い結果も得られている。クラスタ1の回帰直線の傾きをまとめたものが Fig.10 であるが、大きく分けて以下の2つの特徴がある。まず1つ目は、ISI が長周期になるほど負の傾きが大きくなるということである。このことから、ISI が長周期側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。そして2つ目は、各 ISI において single 条件の負の傾きの方が dual 条件の負の傾きより大きくなっており、その差は ISI が長周期になるほど顕著になるということである。このことから、傾きの変化に注意資源が関わっている可能性が示唆される。つまりこの 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可能性がある。

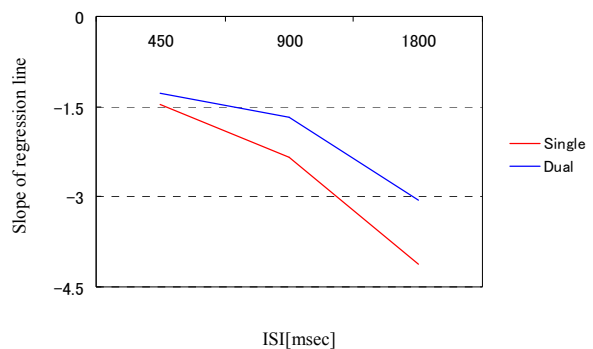


Fig 10 Slope of regression line

6.3.2 Mates モデルを逸脱する領域

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。この結果を意味づけるためにまず、single 条件に比べて dual 条件がタイミング機構にどのような影響を与えているかを考察する。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^[35]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^[49]。黙読した文章は音韻ループ内の下位システムである“音韻ストア”に一時的に保存されることが知られている^[35]。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与していることが知られている^[37]。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課題において、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^[50]。本研究の Mates モデルを逸脱する領域が、 ΔSE の絶対値が比較的大きい場合に観察されることと、また ΔSE の絶対値が比較的小さい場合に観測される Mates モデルに整合する領域に比べて、 ΔSE から ΔITI_e に対するフィードバックが強くなっていることより、先行研究^[50]で観測された知見と良く類似している。このことから、本研究では調査していないが、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与している可能性も考えられる。

Table6 determination coefficient

	single		dual	
	linearization	cubic polynomial approximation	linearization	cubic polynomial approximation
SubjectA	0.82	0.94	0.90	0.91
SubjectB	0.82	0.85	0.80	0.84
SubjectC	0.81	0.94	0.89	0.95
SubjectD	0.95	0.99	0.92	0.94
SubjectE	0.79	0.84	0.82	0.86

6.4 モデルの拡張に向けて

本研究で得られた結果から、人間のタイミング機構が、Mates モデルのみでは説明できないことが明らかとなった。この結果から、Mates モデルで記述されているような線形の単純なフィードバック機構以外に、より複雑なフィードバック機構の存在が推測される。以下でその仮説を提案する。

6.4.1 非線形性を有するフィードバック機構

クラスタ 2・クラスタ 3 が、 ΔSE の絶対値の比較的大きい場合に出現すること、また、そのとき ΔSE から ΔITI_e に対するフィードバックがクラスタ 1 の場合よりも強くなっていることから、 ΔSE に対して ΔITI_e が指数的に変化すると仮定することは自然である。その可能性を次に提案する。

本研究では、 ΔITI_e を以下のように平均値を用いて定義することで、ノイズの影響を抑えた。

$$\Delta ITI_e = (\text{mean } ITI \text{ in the } FSE_2 \text{ condition}) - (\text{mean } ITI \text{ in the } FSE_1 \text{ condition}) \quad (22)$$

ここで、 ΔITI_e と Mates モデルにおける ΔITI との関係を見ると(導出は appendix2 を参照)、

$$\Delta ITI_e = \frac{1}{k-m} \sum_{n=m+1}^k \sum_{l=m+1}^n \Delta ITI(l) \quad (23)$$

となっており、 ΔITI_e は ΔITI からの影響を増幅したパラメータになっている。このことは、今回の Mates モデルと整合する機構と Mates モデルから逸脱する機構を切り分ける際の、分解能の向上に少なからず貢献していると推測されるが、その反面、モデルの具体的な構造を見えにくくしている側面もある。そこで、モデルの具体的な構造を観察するため、位相誤差 ΔSE を与えた直後の 1 ステップで ITI がどのように変化したかについても調査した。なぜなら ΔSE を与えた直後の 1 ステップ

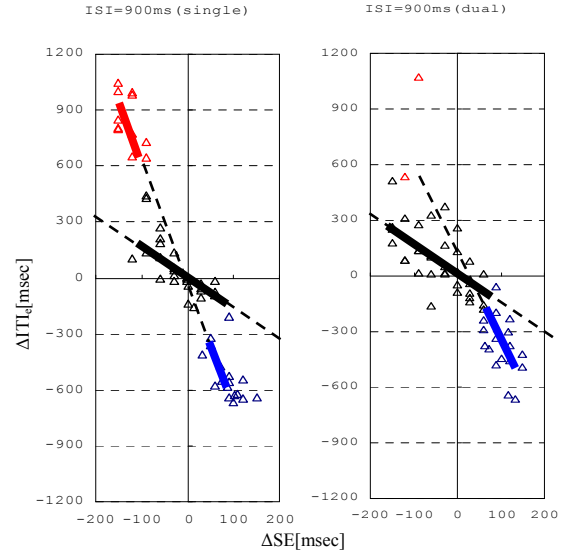


Fig.11 Tow feed back mechanisms

のみ場合は(導出は appendix2 を参照)、

$$\Delta ITI_e = \Delta ITI(m) = -(\alpha + \beta) \cdot \Delta SE \quad (24)$$

となり、観測パラメータ ΔITI_e が Mates モデルの ΔITI と等価であるため構造が観察しやすいためである。

以下で $ISI=900ms$ のときの single 条件と dual 条件における、各被験者の ΔSE - ΔITI_e 応答の結果を観察する(結果は appendix3 を参照)。 ΔSE に対して ΔITI_e が指数的に変化するという仮定に基づいて、各 ΔSE - ΔITI_e 応答のデータに線形近似を行ったとき、3 次の多項式で近似したときの決定係数を比較した。結果をまとめたのが、以下の Table6 である。single 条件と dual 条件ともに、3 次の多項式で近似したときの方が、決定係数が大きくなる傾向があったが、ウィルコクソン検定及び t 検定を行ったところ有意差($p < 0.05$)が出たのは single 条件のみであった。このことから、注意資源を十分使用できる条件においては、タイミング機構に Mates モデルで記述されていない、非線形な構造を持つ可能性を言及することはできるだろう。

6.4.2 二重化されたフィードバック機構

本節ではもう 1 つの可能性として、2 種類のフィードバック機構を有する場合を提案する。Fig.11 のように、クラスタ 1 に対応する注意資源を必要としないフィードバック機構と、クラスタ 2・クラスタ 3 に対応する注意資源を必要とする機構が二重化されている、と仮定する。この 2 つの機構の切り替えに注意資源、もしくは、位相誤差を認知したかどうかに関わっているとすれば、

6.3.2 節で述べた先行研究とも良く一致する。また、注意資源の容量は個人差が大きいことが知られており^[51]、その個人差によってクラスタ 2・クラスタ 3 の相関が低くなっていると説明することもできる。しかし 6.3.1 節 6.3.2 節ともに仮説・推測の域を超えるものではなく、この部分については今後さらに調査されるべきである。

7. おわりに

本研究は、タイミング制御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した。具体的には 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手法や、知覚上のパラメータで記述される Mates モデルを外的に得られる制御パラメータと観測可能パラメータで検証可能にする新たな実験系を導入し、位相誤差に対する人間の応答特性の解析を行った。また、二重課題法に効果的に注意資源を消費できる手法を導入し、位相誤差に対する人間の応答特性と注意資源との関連も調査した。

その結果、刺激提示周期や与えられた位相誤差の大きさによって、人間が異なるタイミング制御機構を用いていることが明らかになった。さらに、与えられた位相誤差の絶対値が小さい場合は、刺激提示周期に関わらず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こと、そしてそれに対して、刺激提示周期が短周期で負の位相誤差が与えられた場合と刺激提示周期が長周期で正の位相誤差が与えられた場合は自動的過程だけでは対応できず、注意を必要とする戦略を用いていることが示唆された。そしてこれは、人間が自動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。

謝辞

本研究を進める上で、熱心なご指導をいただきました、三宅美博准教授に心より感謝申し上げます。また、未熟な筆者に数々の指摘・提案をしてくださった、高野弘二さん、武藤ゆみ子さんにも感謝の意を表します。そして 1 年間一緒に研究を進めてくれた野島満春君、実験に参加してく

ださった被験者の方々、研究活動を進める上でたくさんのお話をさせていただいき公私共にお世話になった三宅研究室の皆様に深く感謝いたします。最後に、私を常に支え続けてくれた家族および親しい友人達に心より感謝します。

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] 三宅美博: 場と共創 (分担: "コミュニケーションと共生成" 第 4 章 339/397), NTT 出版, 東京 (2000)
- [8] 三宅, 宮川, 田村: 共創出コミュニケーションとしての人間-機械系, 計測自動制御学会論文集, **37-11**, 1087/1096 (2001)
- [9] 高梨豪也, 三宅美博: 共創型介助ロボット "Walk-Mate" の歩行障害への適用, 計測自動制御学会論文集, **39-1**, 74/81 (2003)
- [10] 三宅美博, 辰巳勇臣, 杉原史郎: "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, 670/678 (2004)
- [11] Y.Miyake: "Co-creation system and human-computer interaction," In T Sakai, K Tanaka, K Rose, H Kita, T Jozen, H Takada (Eds.), 3-rd Conference on Creating, Connecting and Collaborating through Computing (C5 2005), 169/172, IEEE Computer Society Press, Los Alamitos (2005)
- [12] Y.Miyake, Y.Onishi and E.Poeppl: "Two types of anticipation in synchronization tapping", *Acta Neurobiologiae Experimentalis*, **64**, 415/426(2004)
- [13] Michon J.A.: Timing in Temporal Tracking, Institute for Perception RVO-TNO, Soesterberg, The Netherlands(1967)
- [14] Michon J.A., Van der Valk N.J.L.: A dynamic model of timing behavior, *Acta Psychol*, Vol.27 204/212(1967)
- [15] 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)
- [16] Hary D., Moore G.P.: Synchronizing human movement with an external cock source, *Biol Cybern*, Vol.56, 305/311(1987)
- [17] 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集, Vol.7, No.4, 61/70 (2005).
- [18] 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)
- [19] 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)
- [20] 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).
- [21] K.Dunlap: Reactions to rhythmic stimuli, with attempt to synchronize; *Psychological Review*, Vol. 17,399/416
- [22] Fraisse P.: Sensorimotor synchronizations to rhythms, *Anticipation et comportement*, 233/257 (1980).
- [23] D.N.Lee, D.S.Young, P.E.S.Reddish, T.H.Lough and T.M.H.Clayton: Visual timing in hitting an acceleration ball, *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 35, 333/346 (1983)
- [24] 三嶋博之: エコロジカル・マインド知性と環境をつなぐ心理学, NHK ブックス(2000)
- [25] Wing A.M., Kristofferson A.B.: Response delays and the timing of discrete motor responses., *Perception and Psychophysics*, Vol.14, No.1, 5/12 (1973b).
- [26] 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)
- [27] Ivry R: The representation of temporal information in perception and motor control, *Curr, Opin, Neurobiol*, Vol.6, 851/857 (1996).
- [28] 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)
- [29] 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).
- [30] R.Ivry: Neural mechanisms of timing, *Trends in Cognitive Science*, 1-5, 163/169(1997)
- [31] 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)
- [32] 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)
- [33] 丹治順, 吉澤修治編: 脳の高次機能, 朝倉書店 (2001).
- [34] Baddeley A.: Working memory, *Science*, Vol.255, 556/559 (1992).
- [35] 荻阪直行編著: 脳とワーキングメモリ, 京都大学学術出版会 (2000).
- [36] A.Kagerer: Cortical involvement in temporal reproduction; evidence for differential roles of the hemispheres, *Neuropsychologia*, 40,357/366(2002)
- [37] S.W.Brown: Attentional resources in timing: interference effects in concurrent temporal and nontemporal working memory tasks, *Perception & Psychophysics*, 59-7, 1118/1140 (1997)
- [38] 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
- [39] 小松知章, 三宅美博: "同期タッピング課題における非同期量の時間発展," 計測自動制御学会論文集 Vol. 41, No.6, 518/526 (2005)
- [40] 中島壯人, 小松知章, 三宅美博: "同期タッピングにおける予測的タイミング機構の時系列解析-認知的過程と身体的過程の二重化されたダイナミクス-", 第19回自律分散システム・シンポジウム資料, pp.121-126 (2007)
- [41] 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).
- [42] Repp B.H.: Processes underlying adaptation to tempo changes in sensorimotor synchronization, *Human Movement Science*, Vol.20, 227/312 (2001).
- [43] 高野: 同期タッピング課題を用いた人間のタイミング制御機構に関する研究 (2007)
- [44] R.E. Ornstein: On the experience of time. , Penguin books Harmondsworth UK. (1969)
- [45] 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)
- [46] 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)
- [47] 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)
- [48] 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)
- [49] A.Baddeley: Working memory, *Comptes Rendus de l'Academie des Sciences - Series III - Science de la Vie*, 321-2-3, 167/173(1998)
- [50] 武藤ゆみ子, 三宅美博, エルンスト ベッペル: "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)
- [51] 荻阪直行, ワーキングメモリと前頭葉機能 — 実行系機能の個人差 —, 認知神経科学, Vol.7, No.3, 250-255. (2005)

appendix 1

Mates モデルの性質

Mates モデルは、知覚上の時間で周期誤差を訂正する機構に相当する式(a1)と、知覚上の時間で位相誤差を訂正する機構に相当する式(a2)とで表される。

$$T_i(n) = T_i(n-1) - \beta \cdot [T_i(n-1) - \{S_i(n) - S_i(n-1)\}] \quad (\text{a1})$$

$$R_i(n+1) = R_i(n) + T_i(n) - \alpha \cdot e_i(n) \quad (\text{a2})$$

e_i は知覚上の位相誤差であり、以下のようにタップの触覚フィードバックが知覚された時刻 F_i と提示刺激が知覚された時刻 S_i の非同期量で定義される。

$$e_i(n) = F_i(n) - S_i(n) \quad (\text{a3})$$

ここで、タップの運動指令が出された時刻 R_i とタップの触覚フィードバックが知覚された時刻 F_i の関係は、運動指令が出されてから運動が遂行されるまでの遅れ m_i と、運動が遂行されてから触覚フィードバックが知覚されるまでの遅れ f_i を用いて次のように表現される。

$$F_i = R_i + m_i + f_i \quad (\text{a4})$$

式(a3)と式(a4)より以下を得る。

$$e_i(n) = R_i(n) - S_i(n) + m_i + f_i \quad (\text{a3})'$$

先行研究^[20]において Mates は m_i 及び f_i を乱数で表したが、その明確な根拠及び数学的性質については示されていない。本研究では簡単のためこれらを定数として扱う。ここで式(a3)'を式(a2)に代入し、式変形を行うと、

$$\begin{aligned} e_i(n+1) + S_i(n+1) - m_i - f_i &= e_i(n) + S_i(n) - m_i - f_i - \alpha \cdot e_i(n) + T_i(n) \\ \Leftrightarrow e_i(n+1) &= e_i(n) + \{S_i(n) - S_i(n+1)\} - \alpha \cdot e_i(n) + T_i(n) \\ \Leftrightarrow e_i(n+1) &= (1-\alpha) \cdot e_i(n) + T_i(n) - \{S_i(n+1) - S_i(n)\} \\ \Leftrightarrow T_i(n) - \{S_i(n+1) - S_i(n)\} &= e_i(n+1) - (1-\alpha) \cdot e_i(n) \quad (\text{a2})' \end{aligned}$$

である。また、式(a1)より、

$$\begin{aligned} T_i(n+1) &= T_i(n) - \beta \cdot [T_i(n) - \{S_i(n+1) - S_i(n)\}] \\ \Leftrightarrow T_i(n+1) - T_i(n) &= -\beta \cdot [T_i(n) - \{S_i(n+1) - S_i(n)\}] \quad (\text{a1})' \end{aligned}$$

と書ける。式(a2)'を式(a1)'に代入することで、Mates モデルは以下の1つの式で表すことが出来

る。

$$\begin{aligned} T_i(n+1) - T_i(n) &= -\beta \cdot \{e_i(n+1) - (1-\alpha) \cdot e_i(n)\} \\ &= -\beta \cdot \{e_i(n+1) - e_i(n) + \alpha \cdot e_i(n)\} \\ &= -\beta \cdot \{e_i(n+1) - e_i(n)\} - \alpha \cdot \beta \cdot e_i(n) \quad (\text{a5}) \end{aligned}$$

ここで、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、

$$\Delta T_i(n) = T_i(n+1) - T_i(n) \quad (\text{a6})$$

$$\Delta e_i(n) = e_i(n+1) - e_i(n) \quad (\text{a7})$$

式(a5)は、次の1つの式で表現される。

$$\Delta T_i(n) = -\beta \cdot \Delta e_i(n) - \alpha \cdot \beta \cdot e_i(n) \quad (\text{a8})$$

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。

appendix 2

実験課題の設計

本実験では同期タッピング課題を2つの段階に分けて行う。

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のずれを計測する。SEが被験者の知覚上の時間と物理上の時間のずれと考えられることから、音刺激の提示周期を固定し一定のリズムでタップを行い、SEを実際に計測する。

第2段階では、被験者の知覚上の同期点から位相誤差 ΔSE を与える段階である。具体的には、まず第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以下の通りである。まず、

$$\Delta ITI(n) = ITI(n+1) - ITI(n) \quad (a9)$$

を定義する。ここで、

$$\begin{aligned} ITI(n) &= R(n+1) - R(n) \\ &= \{R_i(n+1) + m_i\} - \{R_i(n) + m_i\} \\ &= R_i(n+1) - R_i(n) \end{aligned} \quad (a10)$$

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、

$$e_i(m) = 0, e_i(m+1) = \Delta SE, \text{式(a2)、式(a5)より}$$

$$\begin{aligned} \Delta T_i(m) &= T_i(m+1) - T_i(m) \\ &= \{R_i(m+2) - R_i(m+1) + \alpha \cdot e_i(m+1)\} \\ &\quad - \{R_i(m+1) - R_i(m) + \alpha \cdot e_i(m)\} \\ &= ITI(m+1) + \alpha \cdot \Delta SE - ITI(m) \\ &= \Delta ITI(m) + \alpha \cdot \Delta SE \end{aligned} \quad (a11)$$

である。 $\Delta e_i(m) = \Delta SE$ と合わせてMatesモデルを表す式(a8)は、以下のように

$$\begin{aligned} \Delta T_i(n) &= -\beta \cdot \Delta e_i(n) - \alpha \cdot \beta \cdot e_i(n) \\ \Leftrightarrow \Delta ITI(m) &= -(\alpha + \beta) \cdot \Delta SE \end{aligned} \quad (a12)$$

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。

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、

$$e_i(k) = \Delta SE, e_i(k+1) = 0, \text{式(a2)、式(a5)より}$$

$$\begin{aligned} \Delta T_i(k) &= T_i(k+1) - T_i(k) \\ &= \{R_i(k+2) - R_i(k+1) + \alpha \cdot e_i(k+1)\} \\ &\quad - \{R_i(k+1) - R_i(k) + \alpha \cdot e_i(k)\} \\ &= ITI(k+1) - ITI(k) \\ &= \Delta ITI(k) \end{aligned} \quad (a13)$$

である。 $\Delta e_i(k) = 0$ と合わせてMatesモデルを表す式(a8)は、以下のように

$$\begin{aligned} \Delta T_i(n) &= -\beta \cdot \Delta e_i(n) - \alpha \cdot \beta \cdot e_i(n) \\ \Leftrightarrow \Delta ITI(m) &= -\alpha \cdot \beta \cdot \Delta SE \end{aligned} \quad (a14)$$

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。

本実験の条件下でMatesモデルがどのように記述されるかはわかったが、実際の実験ではノイズがあるため、式(a12)と式(a14)を個別に観察することは困難である。そこで本研究ではノイズからの影響を少なくするため 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。

$$\begin{aligned} (\text{mean ITI in the } e_i = 0 \text{ condition}) &= ITI_1 \\ (\text{mean ITI in the } e_i = \Delta SE \text{ condition}) &= ITI_2 \end{aligned}$$

とすると、 ΔITI_e は以下のように表される。

$$\Delta ITI_e = ITI_2 - ITI_1 \quad (a15)$$

ここで、 ΔITI_e をMatesモデルと対応づけるために ΔITI で記述すると、

$$\begin{aligned} ITI_2 &= \frac{1}{k-m} \sum_{n=m+1}^k ITI(n) \\ &= \frac{1}{k-m} \sum_{n=m+1}^k \{ITI_1 + \sum_{l=m+1}^n \Delta ITI(l)\} \\ &= ITI_1 + \frac{1}{k-m} \sum_{n=m+1}^k \sum_{l=m+1}^n \Delta ITI(l) \end{aligned} \quad (a16)$$

より、

$$\Delta ITI_e = \frac{1}{k-m} \sum_{n=m+1}^k \sum_{l=m+1}^n \Delta ITI(l) \quad (a17)$$

である。また、式(a12)と式(a14)より、

$$\begin{aligned}\sum_{n=m+1}^k \Delta ITI(n) &= -(\alpha + \beta) \cdot \Delta SE - \{k - (m+1)\} \cdot \alpha \cdot \beta \cdot \Delta SE \\ &= -[\alpha + \beta + \{k - (m+1)\} \cdot \alpha \cdot \beta] \cdot \Delta SE \quad (\text{a18})\end{aligned}$$

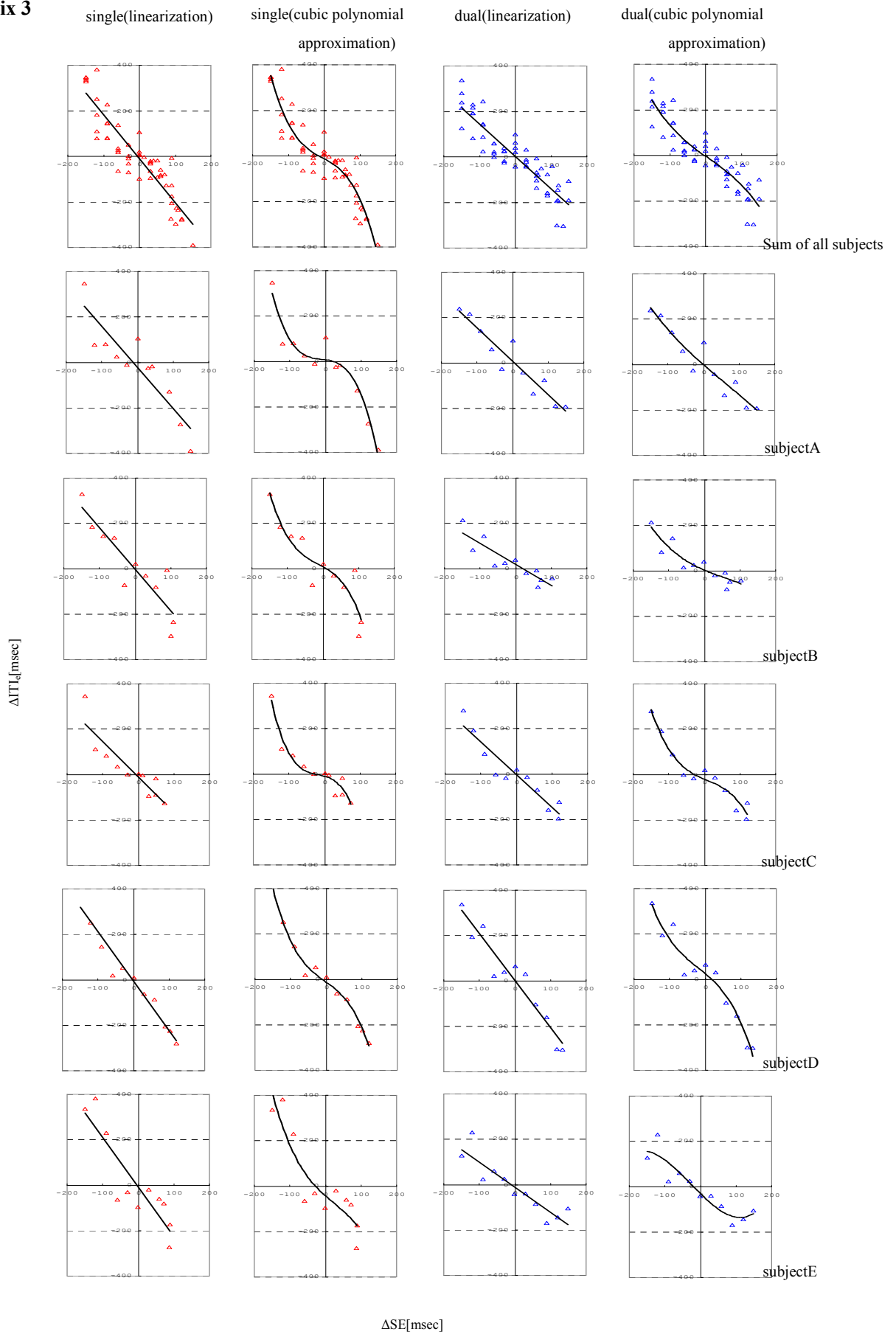
である。よって、式(a17)に式(a18)を代入して

$$\begin{aligned}\Delta ITI_e &= \frac{1}{k-m} \sum_{n=m+1}^k \sum_{l=m+1}^n \Delta ITI(l) \\ &= -\left[\frac{1}{k-m} \sum_{n=m+1}^k [\alpha + \beta + \{n - (m+1)\} \cdot \alpha \cdot \beta] \right] \cdot \Delta SE \\ &= -\left[\frac{1}{k-m} \left[\sum_{n=m+1}^k \{\alpha + \beta - (m+1) \cdot \alpha \cdot \beta\} \right. \right. \\ &\quad \left. \left. + \sum_{n=m+1}^k n \cdot \alpha \cdot \beta \right] \right] \cdot \Delta SE \\ &= -\left\{ \alpha + \beta - (m+1) \cdot \alpha \cdot \beta + \frac{m+k+1}{2} \cdot \alpha \cdot \beta \right\} \cdot \Delta SE \\ &= -\left\{ \alpha + \beta + \frac{k - (m+1)}{2} \cdot \alpha \cdot \beta \right\} \cdot \Delta SE \quad (\text{a19})\end{aligned}$$

を得る。この式によって、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る。つまり式(a19)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。

このようにして任意の ΔSE を与え、その応答とである 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。

appendix 3



Appendix Fig.1 Relationship between ΔSE and ΔITI_c under single task condition and dual task condition