

# 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 —

## Time-Series Analysis of Anticipatory Timing Control in Synchronized Tapping — Dual Dynamics of Cognitive Process and Embodied process —

Masato Nakajima\*<sup>1</sup>, Tomoaki Komatsu\*<sup>2</sup>, Yoshihiro Miyake\*<sup>1</sup>

**Abstract** – An anticipatory behavior called "negative asynchrony" is well known in the sensory-motor coupling. This phenomenon means motion timings precede the cyclic onset of stimuli, and it is commonly observed in the synchronization tapping task. With the use of dual-task method, Miyake et al. had already analyzed this phenomenon and reported two types of anticipatory timing control. One is embodied anticipation and the other is cognitive one. In addition, Komatsu et al. introduced the time series analysis into the synchronization tapping, and discovered two types of dynamic characters. One is characterized by a  $1/f^n$  power-law relation between spectral power and frequency. The other is characterized by the combination of the significant peak and a white noise. In this research, we simultaneously applied the dual-task method and the time series analysis to the synchronization tapping to clarify the relationship between the two types of anticipatory timing control and the two types of dynamic characters.

**Keywords:** synchronization tapping, negative asynchrony, time-series analysis, dual task method

### 1. はじめに

人間は常に変化しつづける外的イベントに適応しつつ生活している。この能力は人間にとって不可欠であり、その適応の時間的側面に深く関係しているのがタイミングを合わせる能力である。そして、このタイミング制御機構には興味深い現象が観察されている。視聴覚・体性感覚などの外的イベントからの入力とそれに基づく応答出力とを結ぶ感覚運動連関において、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”である<sup>[1-3]</sup>。

これは「感覚刺激-知覚-身体運動」という単方向な流れだけでは説明が困難と考えられるものであり、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。また運動にともなう時間遅れを考えれば、時間発展する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<sup>[4][5]</sup>。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。そうした脳内の高度なタイミング制御機構の一端をあらわすものが Negative Asynchronyを始めとする現象ではないかと注目されている。またこれは、人間の協調プロセスを共創的に支援する人工物<sup>[6-10]</sup>を目指すわれわれの研究グループにとっても、人間と人工物の間で各々の内部時間を同期させるインターフェイスとして興味深いものである。

これらのタイミング制御機構の観察において、古くから用いられてきた実験系がある。それは「同期タッピング課題」であり、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課題である。

われわれの研究グループでは、この同期タッピング課題を用いた実験で、注意資源の影響を考慮した認知心理学的側面からの解析<sup>[11]</sup>や、時系列データ解析によるダイナミクスの推定<sup>[12][13]</sup>など、人間のタイミング制御に関連する様々な知見を明らかにしてきた。特に、認知心理学的側面からは、二重課題法を用いた実験により、人間のタイミング制御機構が身体的なタイミング機構と認知的なタイミング機構に二重化されていることを明らかにした。また時系列データ解析による研究では、自己相似型のダイナミクスと固有周期型のダイナミクスの二種類のダイナミクスが存在することが示唆された。

そこで本論文では、先行研究によって明らかにされている二重化されたタイミング機構と二種類のダイナミクスの間にどのような関係があるかを調べるものとする。さらにそれに基づき、Negative Asynchrony 生起における予測的なタイミング制御機構を明らかにするものである。

### 2. 先行研究

同期タッピング課題は、人間のタイミング機構や時間認知機構の解析手法として用いられてきた。以下に同期タッピング課題の先行研究をまとめる。

Dunlapは同期タッピング課題の体系的な研究を行い、Negative Asynchronyを初めて報告した<sup>[14]</sup>。この知見が同期タッピング課題の実行における感覚フィードバックの重要性を認識させ、Paillard-Frassie仮説が導かれた<sup>[15]</sup>。Paillard-Frassie仮説では、Negative Asynchrony現象が生起する理由が、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推測されている<sup>[16]</sup>。

また、平均や標準偏差という統計的手法だけではデータの時間的な構造を表すことができないのは明らかであ

\*1: 東京工業大学大学院 総合理工学研究科

\*1: Interdisciplinary Graduate School of Science and Engineering, Tokyo Institute of Technology

\*2: 国立リハビリテーションセンター研究所

\*2: Research Institute, National Rehabilitation Center for Persons with Disabilities

る。Michon and Van der Valkは、タッピング研究において被験者の応答の動的側面が反映されていない問題を初めて明確に指摘し、同期課題のモデル化のために線形システム理論を導入した<sup>[17]</sup>。また、被験者は知覚したタイミング誤差情報をもとに、短期修正を行っているという仮説<sup>[18][19]</sup>や、タイミング誤差情報をもとにダイナミクスを描くための自己回帰モデルも提案されている<sup>[20][21]</sup>。近年では、タイミング誤差の時間発展に注目し、時系列解析の手段として時間周波数解析も用いられており<sup>[22][23]</sup>、数百msの短周期の同期タッピングほど低周波成分の寄与が大きく1/f揺らぎに近づくことが報告されている。

我々の研究グループでは、上記の様なタイミング制御機構の身体的な側面だけではなく認知的な側面にも着目してきた。そして二重課題法を用いた同期タッピング課題によって、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<sup>[11]</sup>。また、数百msの短周期から1000ms以上の長周期までの同期タッピングを時系列解析することによって、上記の1/f揺らぎの他に、1000ms以上の周期では特定周波数からの寄与が大きくなる現象も明らかにしている<sup>[13]</sup>。しかしながら、これらの時系列解析による研究は、そのダイナミクスが人間の身体的あるいは認知的なタイミング機構とどのように関連するかについては明らかにしていない。

そこで本論文では時系列解析によって示されたタイミング予測の動的特性と身体的あるいは認知的タイミング制御機構の関係について調べるものとする。

### 3. 実験方法

#### 3.1. 実験課題

被験者に周期的な音パルスで聴覚刺激(以下BEATと記す)を提示し、その応答としての指運動(以下TAPと記す)を電気的に検知する。被験者には、提示されたBEATに可能な限りタイミングを合わせてTAPする、という同期タッピング課題が与えられている。ボタン押し動作は右手人差し指で行ってもらった。実験中は瞑目し、右手人差し指以外の体の部位を使ってリズムをとることは禁止した。

実験条件における可変項は、BEAT周期を示すISI (Inter Stimulus-onset Interval)である(Fig.1)。ISIの設定は450~3600msの範囲でISI ∈ {450,600,900, 1200,1500, 1800,2400,3600}の8通りを試行1セットとした。測定する特徴量はSE(Synchronization Error)である。これはBEATタイミングに対するTAPタイミングの時間差について遅れ方向を正としたものである(Fig.1)。

本研究では、上記の同期タッピング課題を以下の二種類の条件のもとで行うことで、認知に関わる注意資源からの影響について比較した。

Normal 条件：

各試行は270個のBEATからなり、その間のISIは一定であった。8種類のISIに対応して8試行を行った。

Reading 条件：

Normal 条件と同様の同期タッピングを文章の黙読と並行して行った。被験者の注意が文章に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。

いずれの被験者も80%を超える正解率を示しており、被験者が内容の正確な理解をし、注意資源を文章に持続的に分配していたことを保証している(Table1)。

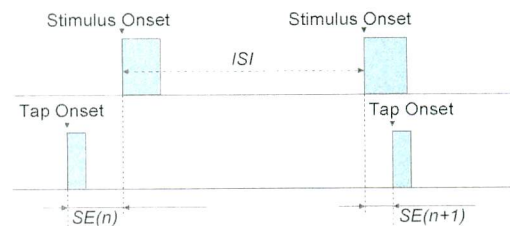


Fig.1 Timing-Chart of temporal relationship between tapping and auditory stimuli

#### 3.2. 被験者

課題を遂行する被験者は、ボランティアとして20代男女の大学院生8人(男子5人女子3人、平均年齢25.1)に依頼した。被験者はいずれもリズム音パルス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Tap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。

#### 3.3. 実験システム

実際のBEAT生成は、PC内蔵のタイマーチップにより供給されるリアルタイムクロックとシングルタスクOSで行った。TAPの記録も同精度で、パラレルポート経由(IBM PC-DOS2000)上のCプログラムにより、精度1/1024の同PCに行なわせている。設定した時間分解能が得られていることは確認を行なった。

聴覚刺激は、500Hzのものを各100ms間ずつ持続させた。このリズム音パルスはモノラルであり、カップ型ヘッドフォンを介して被験者の両耳へと等しく与えている。音量は、主観的に聴き取りやすい範囲で一定に設定した。1回の試行は270BEATから構成されており、そのうち最初の14BEATを除いた256BEATを実計測値として採用した。刺激を阻害する可能性のある要因、すなわちBEATと異なる周期をもった雑音源は知覚されないよう排除した環境を用意する。これら諸条件はいずれの被験者に対しても共通のものとした。

### 4. データ解析

本研究ではSE時系列に対しスペクトル解析を用い、先行研究によって示されている2つの動的特性を抽出する。また、DFA解析を用いて自己相似性の検討を行う。以下にその方法を述べる。

#### 4.1. スペクトル解析

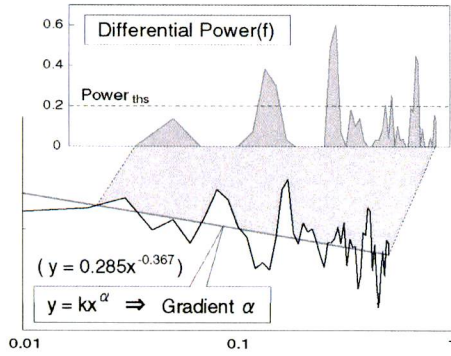
SEのデータ列を $x(t)$ 、全データ数を $N$ とし、平均0分散1に正規化する。そこから自己相関係数を導出する。

$$c(k) = \frac{1}{N} \sum_{t=0}^{N-k-1} x(t+k)x(t) \quad (1)$$

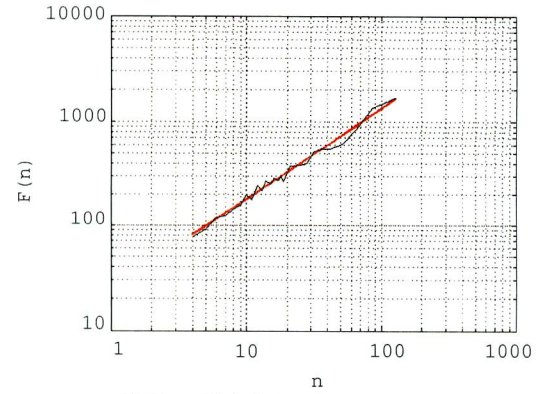
以上で導出された自己相関係数 $C(k)$ に対し、離散フーリエ変換(DFT)を適用してパワースペクトルを得る。

Table1 Percentage of correct answers.

Subject	A	B	C	D	E	F	G	H	Average
Percentage (%)	97.1	83.3	93.7	87.2	94.3	81.5	84.3	90.1	88.9



**Fig.2 Decomposition method of two attribute values from power spectrum**  
 Gradient  $\alpha$  : Slope of regression line on log-log plotting.  
 Differential Power(f) : Shift length from the line on log-log plotting.



**Fig.3 n-F(n) plot**  
 n : block size  
 F(n) : residual sum of squares

$$p(l) = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} c(n) \exp(-i2\pi \frac{l}{N} n) \quad (2)$$

時間スケールは以下のごとく  $\theta$  で表されるため、得られるプロットはサンプル数の半分となる。

$$\theta = \frac{2\pi l}{N} \quad (3)$$

$$\{l(\theta) | \theta = 0, \dots, \pi\} = \{0, \dots, \frac{N}{2}\}$$

また、“周波数(Frequency)”を以下の式(4)に定義する。

$$f = \frac{l(\theta)}{N} \quad (4)$$

本論文での周波数は ISI を基準とし、 $1\text{Hz}=1/\text{ISI}$  としている。こうして得られたパワースペクトルから信頼性が低い低周波側 0.05Hz 未満を削除し、解析に用いる。

## 4.2. 2種類の動的特性の抽出

パワースペクトルの解析について、我々の先行研究で有効性が示唆された指標を用いる。すなわち、周波数とパワーが反比例する自己相似型特性と特定周波数に強いパワーが現われる固有周期型特性である。

### 4.2.1 自己相似型特性

まずパワースペクトルに対し最小二乗法で直線近似を行う。回帰直線  $y=kx^\alpha$  から“傾き(Gradient)  $\alpha$ ”を定義し、これを自己相似型特性の指標とする(Fig.2)。

また、非定常時系列データの解析法の 1 つである DFA(Detrended Fluctuation Analysis)により、時系列に内在する自己相似性を評価し、回帰直線による傾き  $\alpha$  の近似の妥当性を検討する。

$$y(k) = \sum_{t=0}^k (SE(t) - \overline{SE}) \quad (5)$$

式(5)を用いて SE の時系列データを加法過程として表現し(平均を 0 に変換してあるため  $y(k_{\max})=0$ )、それを  $n$  点ずつのデータより成る等間隔の区間に分け、それぞれの区間で局所的なトレンドを最小二乗法により近似する。

さらに、各々の  $y$  に対して、近似値  $y_{is}$  との間に残差  $\Delta y = y - y_{is}$  が存在するが、全  $\Delta y$  よりの残差平方和からその平方根  $F(n)$  を求める。

$$F(n) = \sqrt{\sum \Delta y^2} \quad (6)$$

n-F(n)の両対数プロット(Fig.3)に線形の関係がある場合、 $n$  によるスケーリングが成立しており、統計的に自己相似性が示される。F(n)  $\sim n^\gamma$  におけるスケーリング指数  $\gamma$  とスペクトルの傾き  $\alpha$  との間には  $\alpha = -2\gamma + 1$  の関係があるため、DFA からホワイトノイズ( $\gamma=0.5$ )、1/f ゆらぎ( $\gamma=1$ )、ブラウンノイズ( $\gamma=1.5$ )などが分類できる。全 ISI において、DFA から求めたスペクトルの傾きと最小二乗法によって求めたスペクトルの傾きの間で  $t$  検定を行った結果、 $p > 0.8$  で有意差がないことを確認した。

### 4.2.2 固有周期型特性

次に、式(7)に従ってパワースペクトルが回帰直線から正方向に上回った距離を各周波数  $f$  について導出し、これを“パワー差分 DPower(f)”と定義する。

$$DPower(f) = p(N \cdot f) - kf^\alpha \quad (7)$$

そして、パワースペクトル上の顕著なパワー周波数成分が存在することの指標として DPower(f)の“ピーク出現率(PeakRate)”に注目する。以下の式(8)に従って“ピーク Peak(f)”を定義し、DPower(f)が閾値 0.3 を超えた場合(対数 plot なので、スペクトルと近似直線の比の値が 0.3 を超えた場合)に Peak(f)=1 とする。各 ISI における式(9)に従って“ピーク数 Peak<sub>ISI</sub>”を定義し、その数をカウントする(Fig.2)。

$$Peak(f) = \begin{cases} 1 & (DPower(f) \geq 0.3) \\ 0 & (DPower(f) < 0.3) \end{cases} \quad (8)$$

$$Peak_{ISI} = \sum_{f=0.05}^{0.5} Peak(f) \quad (9)$$

$$ISI \in \{450, 600, 900, 1200, 1500, 1800, 2400, 3600\}$$

その後、Normal 条件における Peak<sub>ISI</sub> の和と Reading 条件における Peak<sub>ISI</sub> の和を加算し“ピーク総和 Peak<sub>sum</sub>”とする。以下の式(10)に従って規格化し、各 ISI の“ピーク出現率 PeakRate”を算出する。

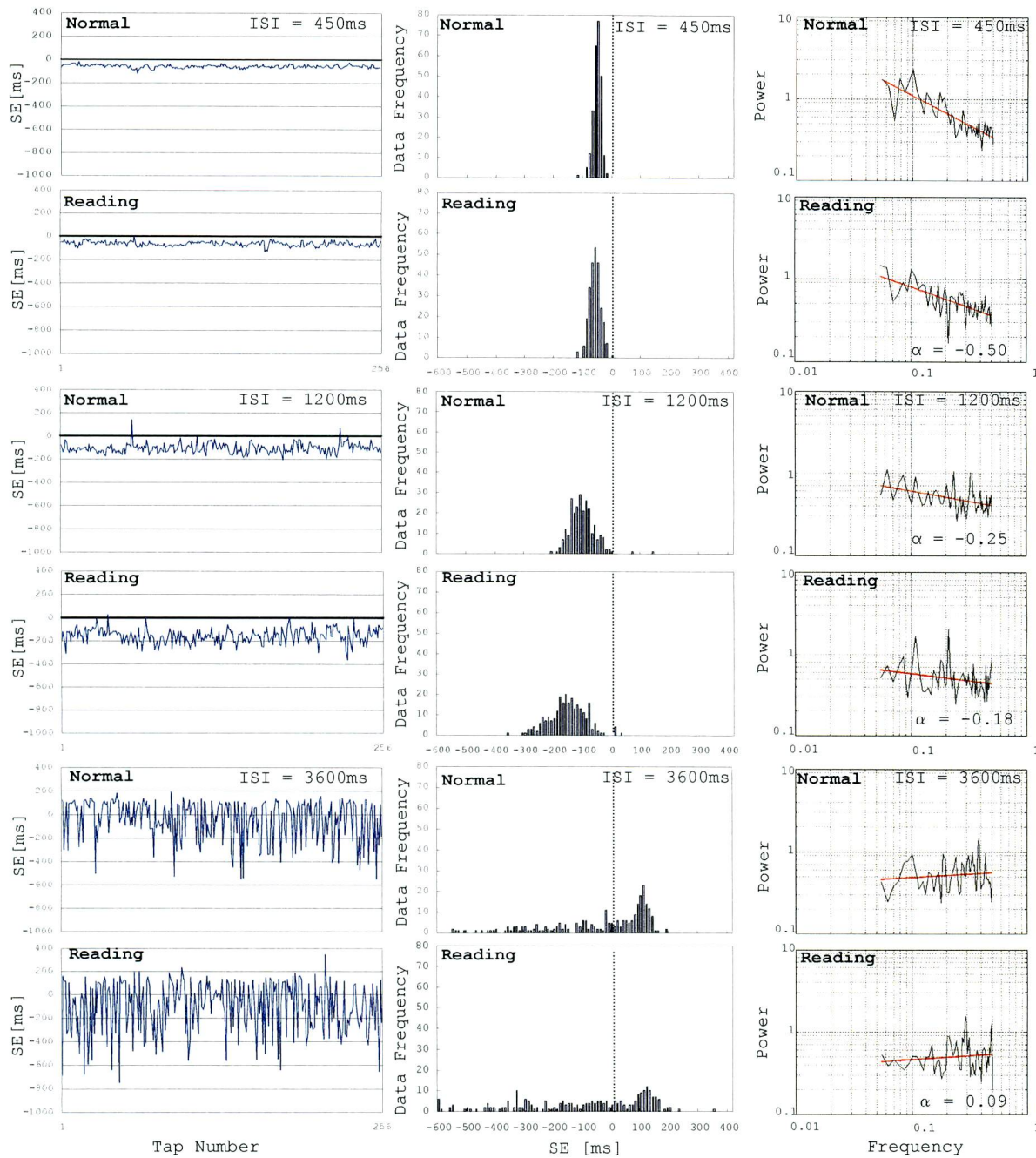


Fig.4 Temporal Development of SE

Fig.5 Histogram of SE

Fig.6 Power Spectrum of SE

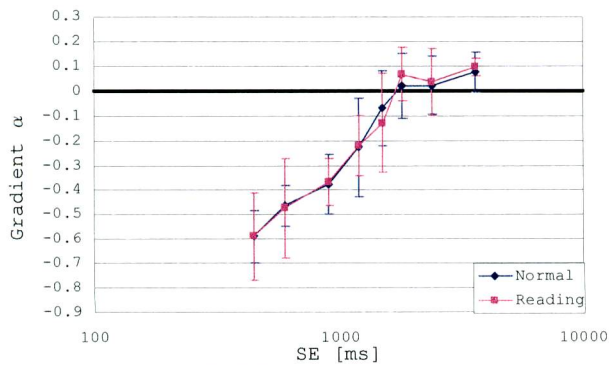


Fig.7 Gradient of power spectrum with respect to ISI

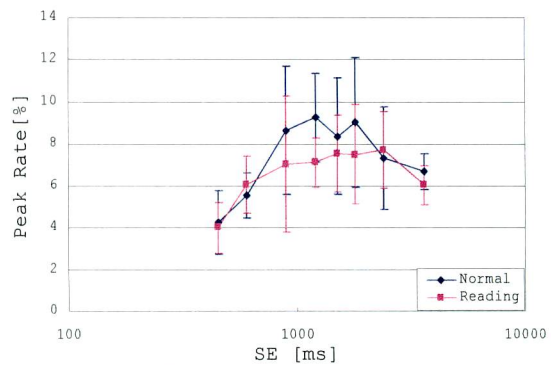


Fig.8 Mean counts of PeakRate with respect to ISI

$$PeakRate_{ISI} = \frac{Peak_{ISI}}{Peak_{sum}} \times 100 \quad (10)$$

この PeakRate を固有周期型特性の指標とする。

## 5. 結果

### 5.1. 統計処理

実験において得られた SE の時間発展およびヒストグラムの例を Fig.4 と Fig.5 に示す。SE の時間発展では ISI が増加するに従い SE のゆらぎの幅が大きくなっていることがわかる。また、ヒストグラムでは短 ISI 領域で-50ms 近辺にピークが見られ、Negative Asynchrony が確認できる。しかし、ISI 増加に伴いそのピークは失われ、SE=0 を挟んで正負双方へ分布が広がっている。これらは先行研究の結果<sup>[11]</sup>とよく一致しており、今回の実験系が正しく構築されていることを示している。

### 5.2. 周波数解析

短周期のパワースペクトルでは低周波側のパワーが強く現われている(Fig.6)。両対数プロット上でおおよそ直線分布とみなすことができ、周波数に対するパワーが反比例の関係を示していることがわかる。

一方長周期のパワースペクトルでは反比例関係を示さず、顕著なピークが現われている(Fig.6)。これは、SE のダイナミクスが特定周波数に強く依存していることを示している<sup>[12]</sup>。

### 5.3. 自己相似型特性の ISI 依存性

各 ISI に対して全試行の  $\alpha$  平均を求めたところ、Fig.7 のように ISI の増加にともなって傾きが緩和され、ISI=1500ms 以上で  $\alpha < 0.1$  となり、パワースペクトルがほぼ完全にホワイトノイズ化する傾向が見られた。また、全 ISI において Normal 条件と Reading 条件の間で t 検定を行った結果、 $p > 0.5$  となり条件間に有意な差は見られなかった(Table2)。

### 5.4. 固有周期型特性の ISI 依存性

各 ISI に対して全試行の PeakRate の平均を求めたところ、ISI が 900ms-1800ms を頂点とし両翼で PeakRate が低下していることが確認された(Fig.8)。また、全 ISI において Normal 条件と Reading 条件の間で t 検定を行った結果、Table2 に示すように ISI が 450ms-600ms および 2400ms-3600ms においては差が見られなかった( $p > 0.4$ )が、ISI が 900ms-1800ms において有意差および有意傾向が確認された。(  $p < 0.1$  )

Table2 Comparisons of Normal & Reading

ISI (ms)	450	600	900	1200	1500	1800	2400	3600
Gradient								
PeakRate			**	**	*	**		
		** p<0.05		* p<0.1			No difference	

## 6. 考察

### 6.1. 二種類の動的特性

以下に本研究で得られた結果をまとめる。Normal条件の結果からは、二種類の動特性の出現、消失がそれぞれ別のISI応答を持つことが見出された。

- 自己相似型のスペクトルパターンは、ISIが450ms-1500msの領域に顕著に現われ、ISIの増加に伴い失われていった。

- 固有周期型のスペクトルパターンは、ISIが900ms-1800msの領域に顕著に現われ、そのISI領域の両側に向けて減少していった。

これらの解析結果については、時間周波数解析を用いた先行研究<sup>[12][13]</sup>による知見と合致し、今回の実験および解析が妥当であったことを意味している。

次に、二重課題法によって新たに得られた結果は以下のようにまとめられる。

- 自己相似型の特性のISI依存性は、Reading課題の影響を受けなかった。
- 固有周期型の特性のISI依存性は、Reading課題から影響を受け、ISIが900ms-1800msの領域において有意に減少した。

自己相似型の特性がReadingの影響を受けないことから、注意資源の影響を受けない身体的な過程であることが示唆される。また、固有周期型の特性についてはISIが900ms-1800msにおいてPeakRateが有意に減少することから、注意資源を必要とする認知的な過程であることが示唆される。これは、二重課題法を用いた先行研究<sup>[11]</sup>と2種類の動特性の関係が明らかにされたことを意味する。

### 6.2. 従来モデルとの比較

これまで同期タッピング課題の再現モデルとしてはさまざまなものが提唱されている<sup>[24-26]</sup>が、基本的にはいずれも次回のタップタイミングを、ベースクロックによって維持される周期項と、それまでの誤差などを反映した修正項との結合で決定するものである。Reppのモデル<sup>[24]</sup>から、本論文で用いているパラメータへと変換したものを、式(11)に一例として挙げる。 $\alpha$ 、 $\beta$ は係数であり、ITI(Inter-Tap Onset-Interbal)はタップ周期、Tkは内的に保持、更新されている周期「タイムキーパー」である。このモデルでは、周期項がTk(n)、修正項が $\alpha SE(n)$ となっている。

$$ITI(n) = Tk(n) - \alpha SE(n) \quad (11)$$

$$Tk(n) = (1 - \beta)Tk(n-1) + \beta ISI(n-1)$$

ここでは一例を挙げたのみであるが、基本的には、ITIに対して即応性の修正と持続性の修正とが結合される形で構成されている。

しかし、これらのモデルは自己相似性を生成せず、また明確な周期性を与えるメカニズムも備えていない。AR過程を用いたモデルにおいて自己相似性が現われるという知見がある<sup>[23]</sup>が、周期性を備えてはいない。このことから、SEの時系列には従来のモデルでは説明不能なダイナミクスが内在していることが予想される。

### 6.3. 神経基盤について

短 ISI 側で顕著に見られる自己相似型特性は、傾き  $\alpha$  がかなり-1に近く、1/f ゆらぎに近いものとなっている。たとえば定常歩行の歩行周期において 1/f ゆらぎが現われる<sup>[27]</sup>が、歩行運動は主に Central Pattern Generator(CPG)と末梢からの感覚などで発生する反射の組み合わせから生成されている。また、CPGや反射の機構は主に脊髄に存在し、脳幹や小脳といった上位の神経系から調節を受けていることも知られている<sup>[28]</sup>。心拍周期についても、特定周波数ピークと 1/f ゆらぎを組み合わせたスペクトルになっていること<sup>[29]</sup>が報告されている。これらの自己相似型特性は、注意資源の影響を受けない身体的な過程であることを考慮すると、小脳・大脳基底核による運動タイミング制御であることが示唆される。

一方、ISI が 900ms-1800ms で顕著に現われる固有周期型特性は、注意資源からの影響を強く受けることから、このタイミング機構にはワーキングメモリが関与していることが予想される。なぜならば文章の黙読はワーキングメモリの音韻ループを使用すると考えられ、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るからである。この音韻ストアが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おり<sup>[30]</sup>、ISI が 900ms-1800ms の同期タッピングに影響を及ぼしたのではないかと推察できる。また ISI が 1500ms 以上の周期の同期タッピングにおいて、タッピング間隔に有意な負の C(1)自己相関が現われているとの知見<sup>[11]</sup>があり、フィードバック処理機構の関与が指摘されている。これらの知見から、タイミング制御のためのフィードバック機構がワーキングメモリの関与によって実現されていることが示唆される。

## 7. まとめ

われわれの研究グループは、人間の備えるインターフェイスが主観時間をもって実時間との同調を測っていることの表出として、感覚運動連関における負の非同期現象(Negative Asynchrony)に注目してきた。本研究では同期タッピングの先行研究における、2つの動的特性と2種類のタイミング制御機構との関連を調べ、自己相似型特性は身体的過程より、固有周期型特性は認知的過程から創出されていることを明らかにした。

今後は、身体的なタイミング制御機構と認知的なタイミング制御機構の間にどのような関係が存在し、またどのように時間発展していくのかということが重要になる。本研究では時系列解析を用いたものの、自己相似型特性と固有周期型特性については、全試行において定常であるという仮定のもとに成り立っており、今後はこれらの特性の非定常性を調べていくことが重要と考えられる。

## 参考文献

[1] L.T.Stevens: On the time sense, *Mind*, 11, 393/404 (1886)

[2] P.Fraiss: The sensorimotor synchronization of rhythms, In J.Requin(Ed.), *Anticipation et comportement*, Centre National, Paris, 233/257(1966)

[3] G.Ashersleben and W.Prinz: Synchronizing actions with events: The role of sensory information, *Perception & Psychophysics*, 57-3, 305/317(1995)

[4] D.N.Lee, D.S.Young, P.E.S.Reddish, T.H.Lough and T.M.H.Clayton: Visual timing in hitting an acceratiogng ball, *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 35, 333/346 (1983)

[5] 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)

[6] 三宅美博: 場と共創 (分担: "コミュニケーションと共生" 第4章 339/397), NTT 出版, 東京 (2000)

[7] 三宅, 宮川, 田村: 共創出コミュニケーションとして人間-機械系, 計測自動制御学会論文集, 37-11, 1087/1096 (2001)

[8] 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)

[9] 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)

[10] 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)

[11] Y.Miyake, Y.Onishi & E.Poeppl: "Two types of anticipation in synchronous tapping," *Acta Neurobiologiae Experimentalis*, 64, 415/426 (2004)

[12] 小松知章, 三宅美博: "同期タッピング課題における予測的挙動の時系列データ解析," 計測自動制御学会論文集, Vol.39, No.10, 952/960 (2003)

[13] 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)

[14] K.Dunlap: Reactions on rhythmic stimuli, with attempt to synchronize; *Psychological Review*, Vol. 17,399/416

[15] G.Aschersleben, G.Prinz: Synchronization actions with events; The role of sensory information; *Perception and Psychophysics*, Vol. 57,305/317(1995)

[16] P.Praisse: Sensorimotor synchronizations to rhythms; *Anticipation et comportement*, 233/257(1980)

[17] J.A.Michon & N. J. L.van der Valk: A dynamics model of timing behavior: *Acta Psychologica*, Vol.27,204/212(1967)

[18] D.Vorberg, A.Wing: Modeling variability and dependence in timing. (Heuer, H., Keele, S.W., Eds): *Handbook of perception and action 2*, Academic Press, London, 181/262(1996)

[19] J.Pressing, G.Jolley-Rogers: Spectral properties of human cognition and skill.: *Biological Cybernetics*, Vol76, 339/347(1997)

[20] A.M.Wing, A.B.Kristofferson :The timing of interresponse intervals.: *Perception and Psychophysics*, Vol.13-3,455/460(1973a)

[21] A.M.Wing, A.B.Kristofferson : Response delays and the timing of discrete motor responses. : *Perception and Psychophysics*, Vol.14-1, 5/12(1973a)

[22] H.Kadota, K.Kudo, T.Ohtsuki : Time-series pattern changes related to movement rate in synchronized human tapping: *Neuroscience letters*, Vol. 370,97/101(2004)

[23] M.Ding, Y.Chen, J.A.S.Kelso: Statistical analysis of timing error: *Brain and cognition*, Vol.48,98/106(2002)

[24] B.H.Repp: Processes underlying adaptation to tempo changes in sensorimotor synchronization, *Human Movement Science*, 20-12,277/279(2001)

[25] J.Mates, T.Radil, U.Muller, E.Poppel: Temporal Integration in Sensorimotor Synchronization, *Journal of Cognitive NeuroScience*,6-4,332/340(1994)

[26] 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, ヒューマンインタフェース学会論文誌,7-4,61/70(2005)

[27] J.Hausdofrr et al: Is walking a random walk?; Evidence for long-range correlation in stride interval of human gait, *Journal of Applied Physiology*,78,349/358(1995)

[28] 多賀巖太郎: 生命システムのデザイン原理をさぐる, 数理科学,394,5/13(1996)

[29] M.Kobayashi and T.Musha: 1/f Fractuation of heartbeat period, *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, 29, 456/457 (1982)

[30] S.W.Brown: Attentional resources in timing: interference effects in concurrent temporal and nontemporal working memory tasks, *Perception & Psychophysics*,59-7,1118/1140(1997)