[計測自動制御学会論文集]
[Vol. 38, No. 12, 1114/1122 (2002)]

同期タッピングにおける2種類のタイミング予測

三宅美博*・大西洋平*・エルンストペッペル**

Two Modes of Timing Anticipation in Synchronization Tapping

Yoshihiro MIYAKE*, Yohei ONISHI* and Ernst PÖPPEL **

Anticipation in timing control is one of the important human's ability to cooperate with dynamic environment. In this research, we studied synchronization tapping as an example of timing control and Negative Asynchrony phenomenon in which the tap onset precedes to the onset of tone was observed. To clarify the mechanism of this anticipatory response from the viewpoint of time perception, effect of subject's attention was investigated. In order to control the attention, we used the silent reading as a secondary task of dual task method. In this condition, we measured the range of the period of tonal stimuli (Inter Stimulus Interval; ISI) which may be affected by the subject's attention using synchronization tapping task on ISI range of 450 to 6000ms. Consequently, it was revealed that the mechanism of this timing control depending on a subject's attentional resources works on ISI for about 1800ms or more. This result suggests that there are two modes of anticipatory timing control, an automatic one and an intentional one.

Key Words: anticipation, timing control, synchronization tapping task, negative asynchrony, attentional resources

1. はじめに

人間はコミュニケーションを介して協調関係をリアルタイムに創り上げることができる. われわれの研究グループでは, このような共に創り上げられる創出的関係(「共創」)を理想として, 人間と人工物のインタラクションに関する新たな設計原理を提案することをめざしている[1)~6)].

そもそも人間の協調関係の実現には、個々人の主観的時間と空間が共有される中で, 動作タイミングが相互に揃うことが重要と考えられる. しかし, 人間にとっての主観的なタイミングの同期と物理的な同期の間に時間ずれが存在するという事実(たとえば第2章に示される負の非同期現象)がすでに知られている. したがって, 人間の協調プロセスを支援する人工物は, 物理的なリアルタイム性を実現するだけでは不十分であり, 人間の主観の側からも支援できなければならない. ここに, 人間のインタラクションを, 共創という心を含めたコミュニケーションの領域において統合的に捉えなおす必然性がある. そして, 本研究ではこのような背景から, 人間のタイミング制御機構に関する心理学的な解析を進めることとする.

動作のタイミングを正確に合わせられるということは, 協調関係の実現にとって重要な運動スキルのひとつである. たとえば, 身近な例として, 対面コミュニケーションでは, 両者の身振りが自発的に同調することが報告されている[7),8)]. そして, このようなタイミングを合わせる, すなわちある外的なイベント(刺激)の発生と自発的な行為生成の時間的同期をとるためには, 外的イベントの時間発展に関する主観の側からの予測機構が必要と考えられる. 飛んできたボールを片手でキャッチする運動の場合であれば, ボールをつかむ動作が開始されるのは, 平均してボールが手に接触する約33~50ms前のことであるという[9),10)]. 類似した予測的振舞いが対面コミュニケーションの頷き動作においても観察されている[7)].

このように, 動作タイミングが揃うためには外的イベントと自己の運動の予測的な同期が不可欠であり, コミュニケーションを介してそのような主観的時間と空間を相互に共有できることが, 共創としての協調関係を実現する上での必要条件になると考えられる. そして, この仕組みを明らかにするためには, 人間の主観領域における予測的時間の知覚と処理の機構が解析されなければならない. 本研究の目標は, 同期タッピング課題を具体的な実験系として用いることで, このような人間の共創的タイミング制御に関わる心のメカニズムについての知見を得ることにある.

2. 先行研究

人間の予測的なタイミング制御の機構を調べるための最も簡単な実験系として, 同期タッピング課題(Synchronization Tapping Task)がある. これは, 周期的に繰り返される音や光などの等性質の刺激に, 被験者の指などの運動を同期させる実験

* 東京工業大学 大学院総合理工学研究科 横浜市緑区長津田町4259
** ミュンヘン大学医学的心理学研究所
* Tokyo Institute of Technology, 4259 Nagatuta, Midori, Yokohama
** Ludwig-Maximilians Universität München, Goethestrasse 31 München D-80336, Germany
(Received May 20, 2002)
(Revised September 24, 2002)

課題である.同期タッピング課題において,予測的なタイミング制御が生じていることを示すもっとも顕著な例は,各タッピング動作の開始時刻が対応する刺激の開始時刻に対して数10ms先行するという現象である[11)~13)].この被験者自身には意識されない先押し現象は,指を動かすための運動命令が少なくとも音より前に発生し,予測的な運動制御が行なわれていることを示している.このようなタッピングの先行による負の時間ずれは「Negative Asynchrony(負の非同期)」あるいは「Negative Synchronization Error(負の同期誤差)」と呼ばれており,実験条件および被験者にある程度依存するものの,周期的な音刺激に対する同期タッピング課題において必ず観測される現象である.

このような現象において,MatesとPöppelら[14)]は,300~4800msの範囲の周期的音刺激を用いた同期タッピング実験を行ない,生起の程度に差があるものの,上記すべての刺激周期でNegative Asynchronyが生じることを確認した.さらに彼らは,ゆらぎが小さい定常的なNegative Asynchronyの生じる上限が,音刺激周期(Inter Stimulus-onset Interval; 以下ISIと略記する)にして2000~3000msであることを明らかにした.そして,この程度のISIを境にして音刺激に対して時間遅れを伴う反応的応答が見られるようになることを報告している.

このような現象の背景として,同期タッピング課題やそのほかの時間判別,時間再生課題を用いた種々の研究から,1sec以下の短い時間間隔の知覚を支える神経メカニズムとして小脳や大脳基底核の働きが重要であることが示されている[15)~18)].また,2~3secをこえる時間間隔の知覚には,注意や,ワーキングメモリ(Working Memory)のような,より高次の脳機能の働きが関与しているといわれている[19),20)].さらに,Ivryらは,小脳および前頭前野損傷患者に対して,ショート(400ms)とロング(4sec)の2種類の条件について時間判別課題を行なわせた.そして,前頭前野損傷患者はロング条件だけで成績低下を示し,ワーキングメモリ機能にも障害が観察されることを明らかにした.このことから,彼らは長い時間の知覚に果たすワーキングメモリの役割の重要性を指摘している[21)].

したがって,Negative Asynchronyの生起には,これら2つの時間知覚の機構が関与している可能性がある.しかし,MatesとPöppelらの同期タッピング実験では,Negative Asynchronyが,上記のような時間知覚機構の違いを反映するものかどうかについては全く明らかにされなかった.しかも,そのような広い範囲にわたってタッピング機構を時間知覚との関係から明らかにした研究もこれまでに存在しない.そこでわれわれは,このような予測的タイミング制御は2種類の時間知覚機構に基づいており,特に,2~3secをこえるISIで生じるNegative Asynchronyが,被験者の注意やワーキングメモリのような高次の脳機能が関与する時間知覚機構から生じているという仮説を提案してきた[22)].そこで,本研究ではこの仮説に基づき,予測的なタッピングの制御において,これら高次機能からの影響を特定するための実験を行なうことになる.

本論文では,第3章で被験者の注意を制御するための具体的な研究方針を述べる.第4章では,本研究が用いた同期タッピング課題の詳細な実験方法について記述する.第5章では実験により得られた結果を示し,第6章で考察し,最後に第7章でまとめを行なう.

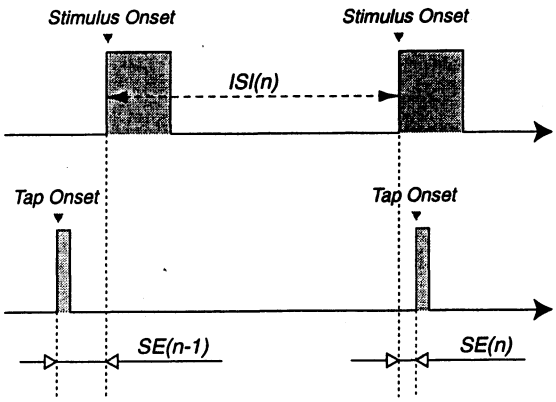
3. 研究方針

2~3secをこえる時間間隔の知覚と注意の関係について,これまでいくつかの認知モデルが提案されている.このうち,時間情報の処理系と,時間とは関係のない心的な活動の処理(非時間情報処理)系のどちらにどの程度注意の配分がなされるかによって判断時間が左右されると考えるのが,"注意の配分モデル"である[20),23)].ワーキングメモリの中央実行系(Central Executive)は,この注意の配分にかかわっているとされている[24)].カーネマンの"注意の容量モデル"によれば,一般的に,配分可能な注意資源には限界容量が存在し,知覚情報処理における処理の限界を規定している[25)].心的活動の遂行には注意という資源が不可欠であり,複数作業の同時遂行は,注意資源が各人の傾向や意図によってそれぞれの作業に適切に分配されることで可能になる.このとき,配分される注意資源の量は,与えられた心的処理の負荷の大きさによって定量化することが可能である.

このようなモデルに基づき,われわれは,同期タッピング課題において被験者の注意が影響を及ぼすISIの範囲を調べる.同期タッピング時における被験者の注意をタッピング以外の情報処理に向けさせると,注意資源の限界容量のうち,その処理に必要な分はタッピング課題の遂行にとって使用不可能となる.そして,タッピング課題が必要とする注意資源が,残された注意容量を超えた場合,時間情報の処理系に十分な処理資源が配分されず,時間の判断が狂い,予測的タイミング制御に影響が現れると考えられる.

被験者の注意の制御には,二重課題法(Dual Task Method)を用いる.これは,対象とする課題(一次課題)を遂行中にほかの課題(二次課題)を課すことによって,一次課題の遂行に必要な特定のシステムの処理能力を減少させる実験手続きである.短文の音読と単語の記憶課題を同時におこなうことでワーキングメモリ容量を測定するリーディングスパンテスト[26)]や,記憶などの認知活動と同時に"the"や"a"などの言葉を繰り返し呟くことで,音韻情報のコーディングの仕組みを調べる構音抑制法[27)]などがよく知られている.われわれは,被験者の注意を制御するための二次課題として,文章の黙読課題を用いる.

文章を読む課題においては,一時的な情報の保持が重要な役割を果たしているといわれている[26)].文章の読みでは,ことばの意味を追いながら,少しの時間ではあるが,すでに読んだ内容を心の中に保持しておく必要がある.文字のパターン認知と単語の意味処理はある程度並列的に進行するので,処理内容を一時的に保持し,かつそれらの情報を逐次統合していかねばならない.このような一時的な記憶はワーキングメモリの機能



ISI : Inter Stimulus-onset Interval
SE : Synchronization Error

Fig.1 Illustration of temporal relationship between tapping and auditory stimulus. Gray area expresses the duration of each auditory stimulus(100ms).

であるとされており,被験者の注意資源を奪うための二次課題として,文章の読みは適していると考えられる.文章を読む課題には,音読課題と黙読課題の2種類が考えられる.本研究では,発声(あるいは構音)作業が被験者から奪う注意の資源について考慮する必要を避けるため,黙読課題を用いて実験を行なった.

4. 実験方法

4.1 タスク

実験条件として被験者に与えられた課題は,周期的なパルス音刺激の開始時刻に同期させてボタンを押すことである.ボタン押しは右手人差し指を用いて行なう.用いたISIは,450, 600,900,1200,1500,1800,2400,3600,4800,6000msの10種類である.各刺激音の持続時間は100ms,周波数は500Hz,音圧は,音刺激を明瞭に聞き取ることのできる適切な大きさに設定し,すべての試行,被験者を通して共通である.

4.2 特徴量の定義

実験を通して取得されたデータは,音刺激の開始時刻(Stimulus Onset)およびタッピングの開始時刻(Tap Onset)であった.そして,刺激と行為の時間的関係を反映する指標として,音刺激開始時刻とタッピング開始時刻の時間差(Synchronization Error, SE)を主に解析の対象とした.SEの符号が正の場合は,被験者のタッピングの開始時刻が音刺激の開始に対して遅れていることを表わす.MatesとPöppelらの実験で見られたように[14],被験者の行なうタッピングは,①Negative Asynchrony現象が生じているタッピングと,②音に反応的なタッピングの大きく2種類に分けられる.本研究では前者を予測的タッピング,後者を反応的タッピングと呼ぶ.**Fig.1**に,これらの特徴量の関係を模式的に示した.

4.3 被験者

健常な20代男子大学院生6名に協力をお願いした.いずれの被験者も,別の実験,あるいは本研究の予備実験などを通して,同期タッピング課題には十分馴れていた.いずれの被験者も聴力に異常はなく,右利きであった.

4.4 システム

本実験で使用したシステムは,シングルタスクOS(IBM PC-DOS2000)を搭載したPC(IBM ThinkPad535)上に実装された.機械音は,PCにパラレルポートを介して接続した外部音源から,ヘッドフォンを通して被験者に提示される.また,被験者が押すボタンも,パラレルポートを介してPCに接続されている.実験用プログラムはC言語を用いて記述されている.ボタン押しおよび機械音提示の時間計測はPC内臓のRTC(リアルタイムクロック)を使用しておこない,その時間分解能は1msであった.

4.5 手続き

実験条件として被験者に与えられた課題は,周期的なパルス音刺激に合わせてボタンを押すことであった.この課題を以下の二つの条件下で行なった.

①N条件:統制条件.各試行は110個の音刺激からなり,その間ISIは一定であった.10種類のISIに対応して,計10試行が行なわれた.最も短い試行で66sec,最も長い試行で660sec(=11min)であった.試行の間,被験者はできるだけ正確に,音刺激の開始と同時に手元のボタンを押すことを要求された.被験者の定常的な反応を見ることが目的であるため,解析には11～110番目までの計100個のデータを用いた.

②R条件:N条件と同様のタッピングを,文章の黙読と並行して行なわせた.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に,各試行においてボタン押しの終了後,文章の内容に関する簡単なテストを行なった.文章は,小学校から中学校の国語教科書程度の平易な日本語で書かれた小説あるいはエッセイ(ルルとミミ(夢野久作),セロ弾きのゴーシュ(宮沢賢治),幸福の王子(オスカー・ワイルド・結城浩訳),つめたいよるに(江国香織),わがモノたち(原田宗典))を用いた.すべて,A4横使いの用紙に,縦書きで右から左に向かって書かれたものを使用した.テストは,文章の内容に関する,簡単な○×クイズ形式のものを作成した.ボタン押しとテストの間に休憩は入れなかった.そのほかの実験条件はN条件と同様であるが,ISIが600, 900, 1200, 1500, 1800msの各試行に関しては,用意した文章を読み終わるまでボタン押しを続けさせた.この場合,テストは文章全体の内容について行なった.N条件同様,解析には11～110番目までの計100個のデータを用いた.さらに,タッピング中に心の中で数を数えたり,体の一部を使ってリズムを取ったりしてタイミングを計ることは禁止した.また,各試行は適当な間隔を置いて行なわれた.これは,先行する試行の影響が後続試行に波及しないようにするためと,疲労により被験者の集中力が試行中に低下するのを防ぐ

ためである.

5. 結果

5.1. 文章黙読課題におけるテストの正答率

Table 1 に，各試行後に行なった簡単な○×テストの正答率を被験者ごとに示した．各被験者の値は，全10試行の平均値である．いずれの被験者も80%をこえる正答率を示しており，被験者が内容の正確な理解をし，注意資源を黙読課題に持続的に分配していたことを保証している．

5.2. SE(同期誤差)の分布

被験者Aの，各ISIにおけるSEの分布を**Fig.2**に示す．負のSEは，タップが音刺激に先行していることを表わしている．N条件の分布を見ると，450～1800ms程度までの小さいISIでは，SEの分布は中心が負の方向にずれ，小さな広がりをもつことがわかる．これは，予測的タッピング，すなわちNegative Asynchrony現象が生じているタッピングに対応する分布である．ISIの増加に伴い，分布のばらつきは大きくなり，さらに大きなISI(4800,6000ms)では，分布は正の側に鋭いピークとなって表われている．この正のピークは，反応的タッピング，すなわち音を聴いてから反射的にボタンを押すタッピングに対応している．2400～3600ms程度の中間的なISIでは，大きな負のSEをもつ予測的タッピングと，反応的タッピングが混在

Table 1 Percentage of correct answers. The value of each subject shows the average value of all 10 trials.

Subject	Percentage of correct answers [%]
A	92.6
B	87.2
C	84.8
D	84.8
E	96.4
F	91.6
Average	89.6

しているようすが見て取れる．R条件でもほぼ同じ特徴をもつ分布が見られるが，N条件では反応的タッピングがISI=3600ms付近から顕著であるのに対し，R条件では2400ms付近から見られ始めるという点で異なっている．

5.3. 反応的タッピングの分離と生起率

われわれの目的は，被験者の予測的なタイミング制御に関する知見を得ることであるから，単なる反射運動である反応的タッピングは解析の対象としない．そのためには，2種類のタッピング方略を分離する必要がある．ここで，Fig.2における

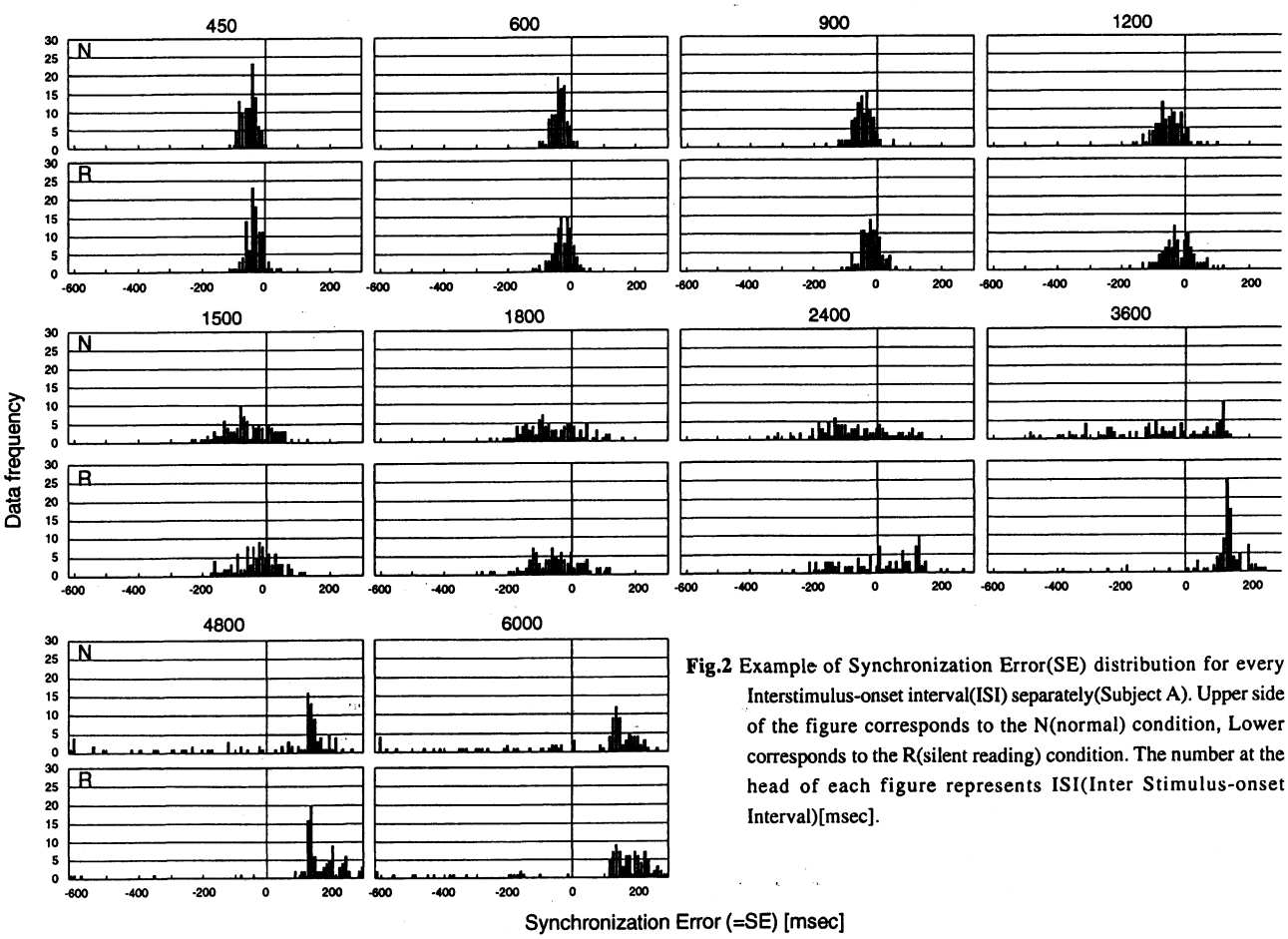


Fig.2 Example of Synchronization Error(SE) distribution for every Interstimulus-onset interval(ISI) separately(Subject A). Upper side of the figure corresponds to the N(normal) condition, Lower corresponds to the R(silent reading) condition. The number at the head of each figure represents ISI(Inter Stimulus-onset Interval)[msec].

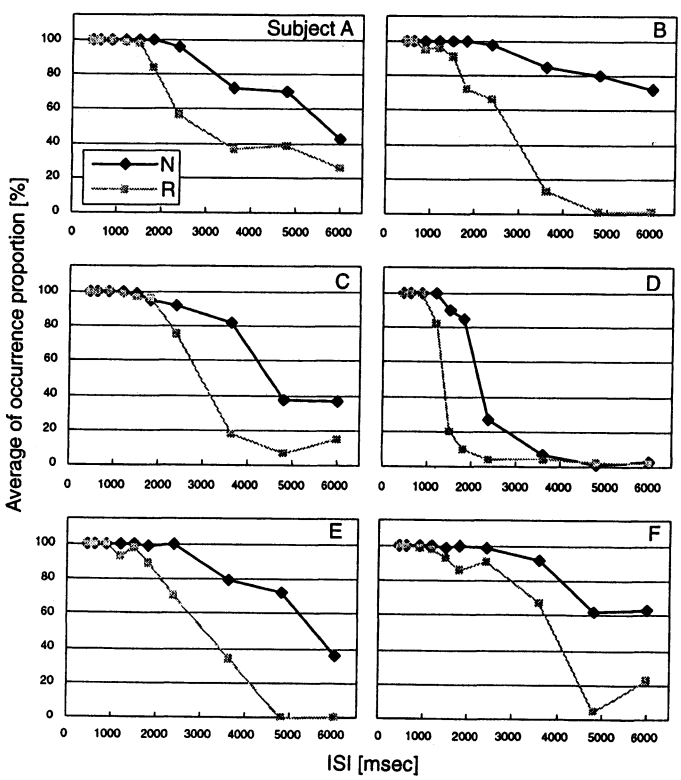
ISIが6000msのタッピングのSE分布に注目すると，ほとんどのタップが反応的になっており，さらに音に先行するタップのSEが充分小さいため，両者の分離が比較的容易にできることがわかる．そこでISIが6000msのタッピングにおいて反応的と考えられるタップだけを選び出し，各被験者のSEの平均値に基づいてSEの被験者間平均値を算出したところ，N条件で151m s(被験者間標準偏差＝15.7)，R条件では261ms(被験者間標準偏差＝79.3)となった．そこで，すべての被験者・ISIについて一律にSE＝100msを基準値(α)として定め，これより大きなSE値を反応的タッピングとして分離した．そして，これ以外を予測的タッピングとして分類した．

Fig.3に，N-R条件それぞれについて算出した，各被験者の各ISI中に占める予測的タッピングの割合と，その被験者間平均値を示した．以下，この割合のことを，予測的タッピングの生起率(Occurrence Proportion)と呼ぶ．まずN条件に関しては，個人差があるものの，被験者D以外では2400ms程度のISIまで100%近い水準が保たれている．しかし，ISIが増加するにつれて予測的タッピングの生起率も減少し，6000msでは60%程度を反応的タッピングが占めるようになる．MatesとPöppelらが示した2～3secという時間容量は，この，N条件において反応的タッピングが増加しはじめるISIに対応している．一方R条件においても，個人差はあるが1200～1800ms付近のISIまでは100%近い値を保っていることがわかる．ISIが増加すると反応的タッピングが増加する点も同様であるが，R条件では予測的タップ生起率の減少が急速である．

Table2には，N-R条件間でおこなった，予測的タッピング生起率の被験者間平均に関するt検定の結果をISIごとに示した．N条件とR条件で予測的タッピングの生起率に差が見られなかったISIの範囲は，本の黙読課題(二次課題)による注意の阻害の影響を受けなかったタッピングに対応していると考えられる．一方，N-R条件間で差が見られたISIの範囲では，タッピング課題の遂行に注意が影響を与えていたと考えられる．このように，6sec以下の音刺激周期に対する同期タッピングは，被験者の注意に影響を受けるものとそうでないものに分類されることが明らかとなった．注意の影響を受けないタッピングが

Table 2 Result of t-test about average value of all subjects. "*" and "#" shows the significant difference by p<0.05 and 0.05<=p<0.10 respectively. Blank column shows other results. We tested except the ISI of 450 and 600ms, because occurrence proportions in both conditions were 100% in these range.

ISI [msec]	N - R
450	
600	
900	
1200	*
1500	
1800	#
2400	#
3600	*
4800	*
6000	*



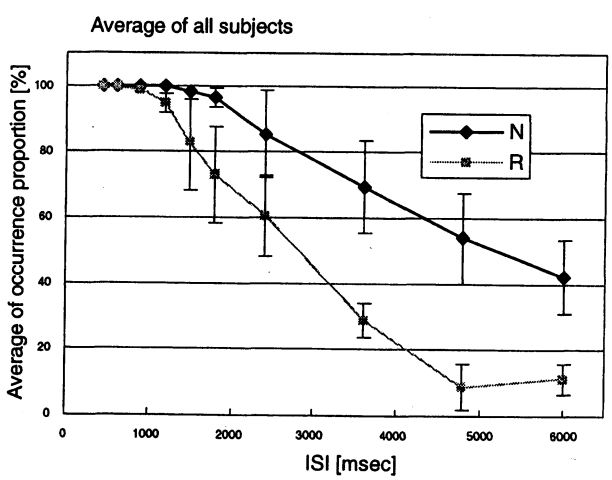


Fig.3 Occurence proportion of anticipatory tapping for each ISI for 6 subjects (left) and average between subjects (right). N represents the normal synchronization tappinng, and R represents the tapping with silent reading. Error bar shows the Standard Error of all subjects.

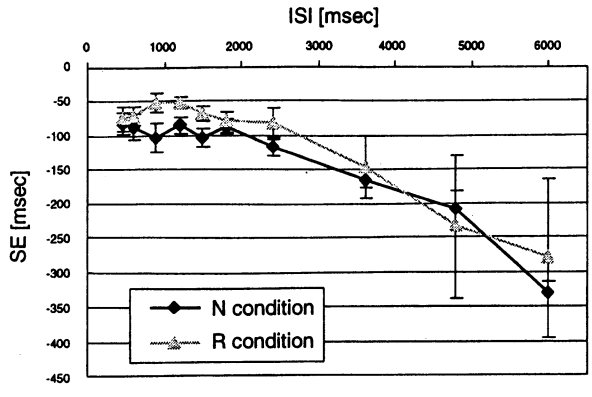


Fig.4a Average of SE and standard error of anticipatory tapping. Error bar shows the Standard Error of all subjects.

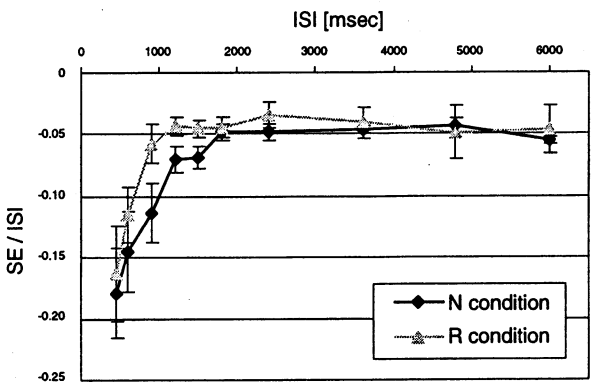


Fig.4b Average of SE/ISI and standard error of anticipatory tapping. Error bar shows the Standard Error of all subjects.

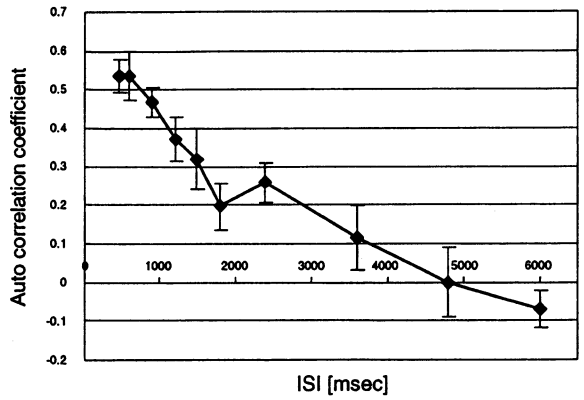


Fig.5a Auto correlation coefficient (Lag=1) of the time series of SE (not divided in two modes). This shows the average value of all subjects. Error bar shows the Standard Error of all subjects.

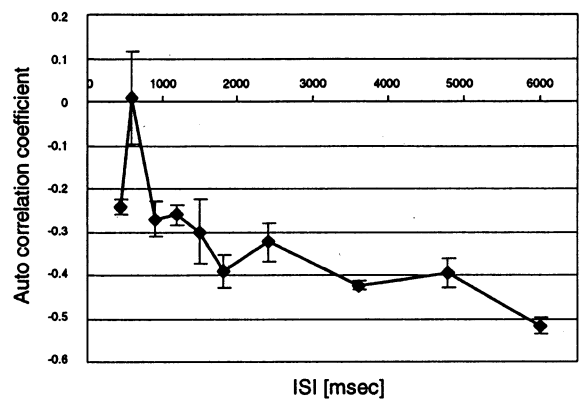


Fig.5b Auto correlation coefficient (Lag=1) of the time series of ITI (not divided in two modes). This shows the average value of all subjects. Error bar shows the Standard Error of all subjects.

行なわれる上限のISIは，個人差があるものの，1200～1800msの範囲であった．ただし，1200msにおいて，生起率がN-R条件間で実質的に差がないにも関わらず有意な差として判定されたのは，N条件の生起率が全被験者で100%となり分散が0であったことに起因している．

また，注意の影響を受けるISIにおいては，二次課題としての黙読課題の影響で反応的タッピングの生起率は増加したものの，すべてが反応的になったわけではなかった．このことは，この範囲のISIにおいてタッピング課題と黙読課題は，注意資源の消費において互いに競合しその処理効率が決定される，いわゆるトレードオフの関係にあったことを示している．これは，当初に仮定した"注意の容量仮説"に適合する結果である．

5.4. SEの平均値およびSE/ISIの平均値

あるISIを境界としてタイミングの制御機構が異なることは，SEの値をISI間で比較することによっても明らかになる．予測的タッピングだけを取り出し，SEおよびSEを各ISIで割った値の平均値を被験者ごとに算出して，**Fig.4a,4b**に被験者6人についての平均値を示した．これらのデータの特徴は，予測的タッピングだけに限定すれば，N-R条件によらず，SEあるいはSE/ISIが一定となるようなISIの範囲が存在することである．SEの平均値は，450～1800msの範囲でほぼ一定の値をとり，それ以上では負に大きくなることがわかる．一方SE/ISIの平均値は，1800msより大きいISIにおいてほぼ一定の値をとっている．ただし，ISIが4800や6000msの場合には，予測的タッピングの生起率が非常に低くサンプル数が少ないため，平均値に関する信頼性は高くないことを考慮しておく必要がある．

これらの結果は，各被験者の予測的タイミング制御のメカニズムが，1800ms付近を境に異なっていることを示唆している．450～1800ms程度の比較的短いISIでのタッピングでは，被験者のタイミング制御過程においてISIの大きさに関する情報は重要ではないといえる．一方、1800～3600ms程度のISIでは，Negative Asynchronyの大きさがISIでスケーリングされて表わされるといえる．このことは，1800msより大きい時間間隔の予測においても，ある規則性を持った時間予測のメカニズムが存在することを示唆している．少なくとも，1800～3600msでのタッピングがそれ以下の450～1800ms程度のISIでのタッピングと予測的タイミング制御のメカニズムにおいて異なっていることは明白である．

5.5. SEとITIの自己相関係数

短いISIと長いISIで異なる予測的タイミング制御の機構が存在することを示す結果は,タッピングの時系列データの解析からも得られている. **Fig.5a**は, N条件において連続する100個のSE値について, ラグ1の自己相関係数を求めてISIごとにプロットしたものである. 6人の被験者の平均値と, その標準誤差が示されている. その結果450～1500ms程度までのISIで0.3を越える強い正の相関をとっていることがわかる. これは, この範囲のISIにおけるタッピングは, 脳の中に蓄えられた時間に関する情報をフィードバック的に処理して生じていたのではなく,フィードフォワード的に運動を生成していたことを示唆している. 運動のタイミング制御を司るといわれている小脳半球外側部では,末梢からのフィードバックを直接には受け取らず,かなり純粋な形で前向き(フィードフォワード)制御が行なわれていることが知られている[28]. Fig.4aにおいて, 1800ms以下のISIでSEの大きさがISIに依存しなかったのは, このようなフィードフォワード的なタイミング制御によるものではないかと考えられる.

Fig.5bは, N条件において連続する100個のITI(Inter Tap-Onset Interval, 連続する2つのタッピング間の時間差)値について, ラグ1の自己相関係数を求めてISIごとにプロットしたものである. 6人の被験者の平均値と, その標準誤差を示した. その結果, 600msという短いISIでは相関が0に近くなるが, 1800ms以上のISIでは-0.3よりも小さい強い負の相関をとっていることがわかる. これは, 短いISI領域では, ITI, つまりタッピング周期についてのフィードバック的な処理が弱く,上記のSEに関するフィードフォワード機構が重要であることを示唆している. しかし, 1800msを越える範囲では, むしろITIについてのフィードバック処理が強くなり,それによってタイミングを調整していることを強く予想させる. Fig.4bにおいて, 1800ms以上のISIでSE/ISIの値が一定であったことは, このような,刺激の周期に関する情報をフィードバック処理する機構に起因するものと考えられる.

6. 考察

本研究では, 予測的なタイミング制御機構において注意が影響を及ぼすISIの範囲を明らかにするために, 同期タッピング課題と,心理的負荷を要求する二種類の課題の干渉作用を調べた. その結果得られた知見はつぎのようなものであった.

・450～1800ms程度のISIの範囲では, Negative Asynchronyの生起率は, 二次課題の影響を受けなかった.

・1800ms以上のISIの範囲では, Negative Asynchronyの生起率は, 二次課題の同時遂行により減少した.

MatesとPöppelらは, 2～3secのISIを境にして反応的タッピングが生じはじめ,Negative Asynchronyの性質が変わることをすでに報告したが, われわれが行なった実験のうち, N条件については彼らの実験条件[14]と基本的に同等のものであった. そこでは, 2400msのISIを境にして反応的タッピングが実質的に出現しはじめ(Fig.3),SEの分布特性(Fig.2)までを含めて, 彼らの結果とよく一致した. このことは本実験の方法およびその基本条件が適切であることを意味している. そこで, われわれは本研究において,Negative Asynchronyの生起機構を明らかにするために, 被験者の注意を考慮した実験を行なった. その結果, Negative Asynchronyは, 1800ms程度のISIを境に存在する質的に異なる2つのタイミング予測機構に基づいて生起することが, 初めて明らかにされたのである.

450～1800ms程度のISIでは, 二次課題の遂行による注意資源の減少が, Negative Asynchronyの生起率に影響を与えなかった. 当初に仮定した注意の容量モデルによれば, 同期タッピング課題と二次課題の同時遂行は,両者が必要とする注意資源が限界容量の範囲内である場合に可能であった. ここで, 黙読課題の正答率が90%程度であったという事実(Table 1)は, 黙読課題に必要とされる注意資源が限界容量に近かったことを示している. それにも関わらずタッピング課題が影響を受けなかったという結果は, この範囲のISIでは注意資源に依存しないタイミング制御の機構が働いていたことを意味している.

このように心的処理と独立に実行可能な運動は"自動的"と呼ばれ[25], 脊髄系による運動制御が関与することが知られている[29]. たとえば, 歩行運動などに必要な律動性の筋活動を作り出すセントラルパターンジェネレーター(CPG)のような, 脳幹, 脊髄のリズム生成系[30]は, 時間知覚・産出のペースメーカーモデル[31]において周期的パルスを発信するタイマー機能に相当するのではないかという見方もある[7]. さらに, 自己相関係数の解析より, この範囲のISIではタッピングがフィードフォワード的に制御されている可能性も示唆された. 特に, 運動のタイミング制御を司るといわれている小脳半球外側部では, 末梢からのフィードバックを直接には受け取らず, かなり純粋な形で前向き(フィードフォワード)制御が行なわれていることがすでに知られている[28]. 本研究で見られた自動的な予測的タッピングには, これらの機構が関わっていることが予想される.

1800ms程度以上のISIでは, 同期タッピング課題は二次課題の遂行による注意資源の減少の影響を大きく受けていた. ただし, 黙読課題の影響で反応的タッピングの生起率は増加したものの, すべてのタッピングが反応的になったわけではなかった. このことは, この範囲のISIにおいてタッピング課題と黙読課題は, 注意資源の消費において互いに競合しその処理効率が決定される, いわゆるトレードオフの関係にあったことを示している. ただし, この範囲のISIにおける予測的タッピングの生成機構についてより詳細に知るためには, 二次課題が被験者から奪った注意資源が, どのような処理に用いられたのかを考える必要がある. 黙読課題が必要とする処理には, 一次的な情報の保持のほかに, 識字に関わる作業, 意味処理などが挙げられる[26]. これらのうち, どの処理がどの程度注意資源を要求

していたかを特定することは，黙読課題からだけでは難しい．

しかし，たとえば単語記憶課題などを併用すれば，維持リハーサルを伴う単語の保持作業からの影響を評価できる可能性はある．このような維持リハーサルは，ワーキングメモリのサブシステムのひとつである音韻ループにより行なわれると考えられている[32]．獲得された(単語の)音韻情報は，音韻ループの下位システムのひとつであり，1～2secのメモリーバッファーを有するとされる音韻ストアに自動的に入力され，この音韻ストアはリズムや時間間隔に関する情報の保持に関係していることが知られているからである[20),27)]．実際に，音韻ループの機能に起因する音韻的類似性効果が，タッピング課題によって失われるという報告もある[27)]．さらに，本実験においても，ITIの自己相関係数の解析より，この範囲のISIではITIについてのフィードバック的な処理が行なわれ，タイミング制御している可能性が示唆された．したがって，1800ms以上のISIでSE/ISIの値が一定であったこと(Fig.4b)は，ワーキングメモリにおける，このような刺激の周期に関する情報の保持とそれに基づくフィードバック処理機構の存在を示唆するものである．

最後に，MatesとPöppelらの実験において2～3secのISIを境にして反応的タッピングが生じはじめるという事実と，本実験において1800ms程度のISIを境に異なる予測機構が存在するという事実の関係について補足説明しておく．本実験でも，MatesとPöppelらの実験と対応するN条件においては2400ms程度のISIを境に反応的タッピングが生じはじめており，それと1800msでの区分は矛盾しているようにも思われる．しかし，N条件においては2種類の予測機構の両方が作用するのに対して，R条件では注意に依存しない自動的な予測機構のみである．そして本研究の特徴は，N条件およびR条件の差として2つの予測機構を分離した点にある．これがそのような差異の原因であろうと予想される．

7. おわりに

われわれは，人間がコミュニケーションを介して協調関係をリアルタイムに創り上げる共創的はたらきを理想として，人間と人工物のインタラクションに関する新たな設計原理の提案をめざしている．そして，本研究では，このような共創的コミュニケーションに不可欠と考えられるタイミング予測において，その時間知覚機構に関する実験的解析を進めた．その結果，時間知覚に関わる被験者の注意という観点から，同期タッピング課題における予測メカニズムに2つのタイプが存在することを初めて明らかにした．ひとつは注意の影響を受ける予測的タッピングであり，もう一つはその影響を受けない自動的なタッピング機構である．

したがって，予測的タイミング制御とは，自動的な予測機構と時間情報の処理に基づく予測機構が協同的に働いて遂行される二重化された過程であると考えられる．このような知覚と運動の統合過程に，どのようにして注意や意識のような高次の脳機能が関わるのかは非常に難しい問題である．しかし，時間という概念は高度に抽象化された心的な概念でありながら比較的定量化もしやすく，本研究で採用した同期タッピング課題は，このような問題への足掛かりとして有効と考えられる．今後，fMRI等のイメージング技術などを併用することによって時間知覚機構の生理学的な基盤が明らかになっていけば，本研究で明らかにされた二重化されたタイミング予測機構のモデル構築も可能になるものと期待される．

すでに，われわれは，共創的コミュニケーションの基本的構造として，自己意識の創出に関わる明在性と身体の潜在的働きに関わる暗在性という情報処理の「二重性」の重要性を主張してきた[1)~5)]．本研究において明らかにされた二重化されたタイミング予測機構において，注意の影響を受ける予測機構を明在性に、注意の影響を受けない自動的な予測機構を暗在性に対応させることが可能であれば、それらの相互関係の解析を進めることによって，共創システムの設計原理へ向けた研究がさらに深化されるものと期待される．

最後になったが，本研究を進める上で多くのご議論を頂いた清水博教授(金沢工業大学・場の研究所)，三輪敬之教授(早稲田大学)，M.Wittmann博士(ミュンヘン大学)，心理実験およびその装置作成に熱心に協力してくれたJ.Heissさん(インスブルック大学)，C.Adamczyk君(ミュンヘン大学)，武藤剛君(以下、東京工業大学)，山本知仁君，田中順平君に感謝する．また海外の大学において自由に研究できる機会を与えて下さった小林重信教授(東京工業大学)に感謝します．

参考文献

1) 清水，久米，三輪，三宅：場と共創，NTT出版 (2000)
2) 清水博: 生命知としての場の論理，中公新書 (1996)
3) 三宅美博: 「生命」における設計，現代思想, **25**-6, 301/317 (1997)
4) 三宅美博: 2中心モデルとインタフェース表現，ファジィ学会誌, **9**-5, 637-647 (1997)
5) 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)
6) 武藤，三宅: 歩行介助を目的とした人間-ロボット協調系における共創出過程の解析，計測自動制御学会論文集, **38**-3, 316-323 (2002)
7) エドワード・ホール: 文化としての時間(宇波彰訳), TBSブリタニカ (1983)
8) 渡辺富夫: 身体的コミュニケーションにおけるエントレインメント，bit別冊 身体性とコンピュータ，共立出版，246/256 (2000)
9) D.N.Lee, D.S.Young, P.E.S.Reddish, T.H.Lough and T.M.H.Clayton: Visual timing in hitting an accelerating ball, Quarterly Journal of Experimental Psychology, **35**, 333/346 (1983)
10) 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)
11) L.T.Stevens: On the time sense, Mind, **11**, 393/404 (1886)
12) P.Fraisse: The sensorimotor synchronization of rhythms, In J. Requin(Ed.), Anticipation et comportement, Centre National, Paris , 233/257(1966)
13) G.Aschersleben and W.Prinz: Synchronizing actions with events: The role of sensory information, Perception & Psychophysics, **57**-3, 305/317 (1995)
14) J.Mates, T.Radil, U.Müller and E.Pöppel: Temporal integration in sensorimotor synchronization, Journal of Cognitive NeuroScience, **6**-

4, 332/340 (1994)
15) R.Ivry: The representation of temporal information in perception and motor control, Current Opinion in Neurobiology, 6, 851/853 (1996)
16) R.Ivry: Neural mechanisms of timing, Trends in Cognitive Science, **1**-5, 163/169 (1997)
17) 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)
18) 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)
19) A.Kagerer: Cortical involvement in temporal reproduction: evidence for differential roles of the hemispheres, Neuropsychologia, **40**, 357/366 (2002)
20) S.W.Brown: Attentional resources in timing: interference effects in concurrent temporal and nontemporal working memory tasks, Perception & Psychophysics, **59**-7, 1118/1140 (1997)
21) A.Mangles, B.Ivry and N.Shimizu: Dissociable contributions of the prefrontal and neocerebellar cortex to time perception, Cognitive Brain Research, **7**-1, 15/39 (1998)
22) Y.Miyake, J.Heiss and E.Pöppel: Dual-anticipation in sensory-motor synchronization, Proc. of 1st Int. Symp. on Measurement, Analysis and Modeling of Human Functions (ISHF2001), Sapporo, Japan, 61/66 (2001)
23) R.Macar and L.Casini: Multiple approaches to investigate the existence of an internal clock using attentional resources, Behavioral Processes, **45**, 73/85 (1999)
24) 苧阪直行: 脳とワーキングメモリ, 京都大学学術出版会 (2000)
25) ドナルド・A・ノーマン: 記憶の科学(富田達彦他訳), 紀伊国屋書店 (1978)
26) 苧阪満里子, 苧阪直行: 読みとワーキングメモリ容量・日本語版リーディングスパンテストによる測定, 心理学研究, **65**, 339/345 (1994)
27) 斉藤智: 音韻的作動記憶に関する研究, 風間書房 (1997)
28) 川人光男: 脳の計算理論, 産業図書 (1996)
29) 森茂美: 運動の階層性制御, 運動制御と運動学習(第2章), 協同医書出版社 (1997)
30) 多賀巌太郎: 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)
31) 松田文子: 心理的時間, 北大路書房 (1996)
32) A.Baddeley: Working memory, Comptes Rendus de l'Academie des Sciences -- Series III -- Science de la Vie, **321**-2-3, 167/173 (1998)

「著 者 紹 介」

三 宅 美 博 (正会員)

1989年東京大学大学院薬学系研究科博士課程修了(薬学博士). 金沢工業大学情報工学科助手, 講師, 助教授を経て, 96年より東京工業大学大学院総合理工学研究科知能システム科学専攻助教授. 99年よりミュンヘン大学客員教授併任. 主として生命的自律性の研究に従事, 生物物理学会, IEEEなどの会員.

大 西 洋 平

2000年東京工業大学生命理工学部卒業. 2002年東京工業大学大学院総合理工学研究科知能システム科学専攻博士前期課程修了. 同年, (株)日本電気に入社.

エルンスト ペッペル

1968年, インスブルック大学にて心理学博士を取得. 76年よりミュンヘン大学医学的心理学研究所教授, 77年より同研究所所長, 主として意識と時間に関する研究に従事.