



Title	ヒトのフィンガータッピングの研究：分散および位相遷移曲線による制御機構の解析
Author(s)	山西, 潤一
Citation	大阪大学, 1980, 博士論文
Version Type	VoR
URL	https://hdl.handle.net/11094/325
rights	
Note	

The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA

<https://ir.library.osaka-u.ac.jp/>

The University of Osaka

ヒトのフインガーツッピングの研究
——分散および位相遷移曲線による制御機構の解析——

1980年2月

山西潤一

目 次

第1章 緒言	1
第2章 タッピング時間間隔の分散と制御機構の考察	5
2.1 まえがき	5
2.2 実験方法	6
2.3 結果	9
2.3.1 学習した時間間隔と自発的タッピング時間間隔の関係	9
2.3.2 タッピングの平均時間間隔と標準偏差の関係	13
2.3.3 タッピングの平均時間間隔とクエーハー比	17
2.3.4 タッピング時のスイッチオン時間の測定	17
2.4 タッピング時の脳波測定	20
2.5 結果	22
2.6 考察	25
2.7 まとめ	34
第3章 位相遷移曲線によるフィンガータッピング神経機構の解析	35
3.1 まえがき	35
3.2 位相遷移曲線	36
3.2.1 位相遷移曲線の定義	36
3.2.2 位相遷移曲線の性質	38
3.2.3 位相遷移曲線の回帰	40
3.3 3種の課題に対する位相遷移曲線	43
3.3.1 課題と被験者	43
3.3.2 タッピング時間間隔の学習	45
3.3.3 位相遷移曲線の計測	45

3.3.4 結果	48
3.4 フィンガーテッピングの位相遷移曲線の性質	50
3.4.1 課題と被験者	50
3.4.2 タッピング周期と位相遷移曲線の関係	51
3.4.3 学習効果による位相遷移曲線の変化	53
3.4.4 運動負荷の変化に対する位相遷移曲線の変化	53
3.4.5 位相遷移曲線における左右差	56
3.5 考察	59
3.6 まとめ	62
 第4章 両手タッピングの位相遷移曲線による解析	64
4.1 はじめに	64
4.2 両手タッピングのパフォーマンスの評価	65
4.3 2振動子の相互作用によるモデル	70
4.4 2振動子の相互作用モデルによる両手タッピングの解析	75
4.5 考察	80
4.6 まとめ	82
 第5章 結言	83
謝辞	86
参考文献	87

第1章 緒言

ヒトは単純な運動から非常に複雑な運動まで、種々の運動パターンを遂行することができる。このような運動パターンは特定の筋肉の協調活動によって発現される。そこで、ある運動の発現にはその運動に使用される筋肉群の活動のタイミングが重要な役割を果す。このタイミングの制御は筋肉内の何らかの神経回路が関与しているものと思われる。特に周期的な運動のタイミングの制御には、ある種の振動回路が存在することと考えられる。このような振動回路の性質やタイミング機構を研究するため、自発的なフィニガーナッピングを用いた心理実験が多くなされてきた。古く、Scripture (1897) はナッピング頻度の分散が最小となるナッピング周期があることを指摘している。

近年にみられて Bartlett (1959), Wing (1973), Michon (1966), Getty (1976) などはナッピング運動における分散に注目して振動回路の性質について議論している。又、Treisman (1963) は分散の大小により被験者の意識水準を評価し、Michon (1964) は分散を指標として作業の難易度を評価している。

一方、臨床的にフィニガーナッピングを応用してみると小さな子。例えば小脳疾患者においては、ナッピング速度の低下、規則性の乱れなどによる歩行不稳などの知られる (Babinski, 1902, Nakamura, 1975)。

X. 110-キンリ=ズ"ム ズ"イズ 速度の低下はみられるか、規則性は保たれるかを
知る研究 (Wertham, 1929)。 X. ツッコ=ゲを用いて脳の運動部位
の機能について推定した報告が多々。 Luria (1969) は 運動前野
に 病巣を持つ患者に強..2拍子と弱..3拍子を含むリズムで"フィニガ"-
タッコ=ゲを行なわせると 患者は個々の 2拍子、3拍子をタップして返すが、
2拍子より3拍子へと切り替えて転ずることで分かる。この運動前野は
個々の要素的運動をみる時間構造へ統合する役割を果すと想定
している。

このようにヒトの運動的な神経回路の性質を調べたり、心理状態
を評価したり、運動制御に使う脳の機能的役割を調べる
手段として、簡単でかつ有効な方法としてフィニガ-タッコ=ゲ
がよく用いられてきた。

ところで、近年、無脊椎動物についても、神経系のみならず
生物のリズム現象（心拍、呼吸、歩行、飛翔など）が内因的な
リズム発生機構によって発現されてることが明らかになってきた (Kennedy
& Davis, 1977)。つまり、1個または複数個のペースメーカー細胞やノード
細胞、あるいは10数個のニューロンから成る神経回路から不規則の
ペイ-ド・パックによってリズム現象を制御していることが明らかになってきた。
脊椎動物のリズム現象についてのところを参考文献を記す。

om (Shik & Orlovsky, 1976, Grillner & Zanger, 1979), 4の神経系の複雑さから考えて、リズム発生の神経回路は非常に多岐のニューロンが構成された想像される。

一方、日周期リズム、生化学的振動子、ペースメーカー細胞など生物の周期的現象の解析には位相反応曲線あるいは位相遷移曲線の計測が有効な手段となる。
113 (Pittendrigh, 1957, Perkel, 1964, Pinsky, 1977)。Winfree (1970, 1977) はこれらの振動子について、与える刺激の強さによって、2つの型の位相遷移曲線が得られることが指摘している。また Kawato (1978) はこれをホモトピー論を使って数学的に証明している。

本論文はヒトのフィードバックループも前述したとおり因的で振動する性質を持つ神経回路で構成されていると考え、
その性質について、分散および位相遷移曲線を使って
心理学的手法やモデル解析により、その制御機構を明らかにする
ものである。本論文より明らかにされた知見は、運動のタイミング
機構や振動回路の性質に関する脳の役割を推定する上で
何らかの示唆を与えるものと信ずる。

以下に本論文のあらましを記す。

第2章では、タッピング時間間隔の分散を注目して、200ms~1000msの時間間隔とその標準偏差との特徴的な関係のみことばを調べた。

また、 $\Delta\text{C}^{\circ}\text{N}^{\circ}$ の神経機構の概念モデルをもと、その関係が 2 つの異なる制御機構、すなはち フィードフォワード制御とフィードバック制御とを反映した構造を示す。

第3章では、周期的出入り出る二つの振動的な神経回路の発現と共に、 $\Delta\text{C}^{\circ}\text{N}^{\circ}$ とし、種々の課題で位相反応実験を行ない、その結果得られた位相遷移曲線から、タッピング運動の制御における神経回路と、課題と制御しておる神経回路との相互作用について考察した。

第4章では、両手による協調的なタッピングが考察された。両手による協調的なタッピングのモデルとして 2 つの振動的な神経回路が相互作用するモデルを考察し、左右どちらかのタッピング時刻計測された位相遷移曲線を用いてこのモデル系の振舞いが解明された、両手による協調的なタッピングとの左右の神経回路によつて制御されることが考察された。

第5章では、本研究の結果、明らかにされ、結果が要約して述べられた。

第2章 タッピング時間の分散と制御機構の考察

2.1 まとめ

運動の発現には、その運動に使用される筋肉群の活動のタイミングが重要であることが知られています (Van der Gon, 1965, 1973)。このタイミングの制御は何かの神経回路によって行われる、特に周期的な運動のタイミングの制御のために、ある種の振動回路が存在することが示されています。このような振動回路の性質やタイミング機構を研究するため、自発的なタッピングを使った心理実験が多くなっています。例えば、近年、Bartlett (1959), Wing (1973), Michon (1966), Getty (1976) など、タッピング運動における時間間隔の分散に注目して、この振動回路の性質について議論している。しかししながら、これらによて明らかにされた結果は、実験条件の差異、タッピング運動肢の差異などによって必ずしも一致した結果を得られない。標準偏差とタッピング時間間隔の関係においても、タッピング時間間隔の増加によって標準偏差が直線的に比例するか、ほとんど変化しないかなどさまざまな。

本章では、最初、同様の観点から、フィンガータッピングを行ない、200~1000ms の時間間隔でタッピングを行なわせ、その平均時間間隔と標準偏差との関係を調べた。次に対象がヒトであるので、頭皮よりタッピング時間間隔の差異による脳波直流成分の変動を記録した。最後に、タッピング神経機構の概念モデルを提起し、これらの結果がどのような神経制御機構を反映したものであるか考察した。

2.2 実験方法

予め設定した時間間隔で音信号(20ms継続)を発し、被験者に、音信号に同期してマイクロスイッチを押すか、タッピングの間隔を記憶してもらう(学習期)。音信号はヘッドホンを通じて与えた。マイクロスイッチは小さな板に固定しタッピングし易い位置に自由に移動できるようになってある。タッピングを行なう指としては利き腕の人指し指を指定した。マイクロスイッチを押すのに必要な力は最低20gであった。1回の学習期は約20回のタッピングからなり、オンラインでこの学習期の時間間隔の平均値、分散、時間間隔ヒストグラムを求め、結果の良悪を被験者に、前方に設置したランダムボードのランプの点滅によって、「良くてやめて」、「設定時間間隔より長い」、「設定時間間隔より短い」等の指示を与えた。

2~3回の学習期の後、被験者は今度は音信号なしで、今覚えた時間間隔でタッピングを40回繰り返す指示された(自発的タッピング)。

設定時間間隔は200, 250, 300, 350, 400, 450, 500, 600, 700, 800, 900, 1000msの12段階を設定した。

この12段階の時間間隔について学習期と自発的タッピングを行なう小時を1セッションとした。1セッションを行なうのに要する時間は約20分で、全部で6セッションの実験を行なった。時間間隔の提示順序は6セッションとランダムに行なった。

被験者がスイッチを押し損ねて、およそ2倍の時間間隔が記録される場合がある。又逆に、1回のタッピングによってスイッチが2回も開閉する

然れど、2個の時間間隔が記録される場合がある。このような場合に、時間間隔コストグラムの表示によって「たやすく検出される」、これがデータを棄却して、同じ時間間隔でもう一度実験を繰り返してみる。このように2度棄却されたデータは全体の5%未満であった。

こうして各設定時間間隔で得られた「自発的タッピング」の時間間隔のデータが後の解析に供された。

被験者としては大学院学生5名(N.I., H.T., Y.O., J.Y., M.K.)を使用した。全員右利子であった。図1に実験システムの概要を示す。

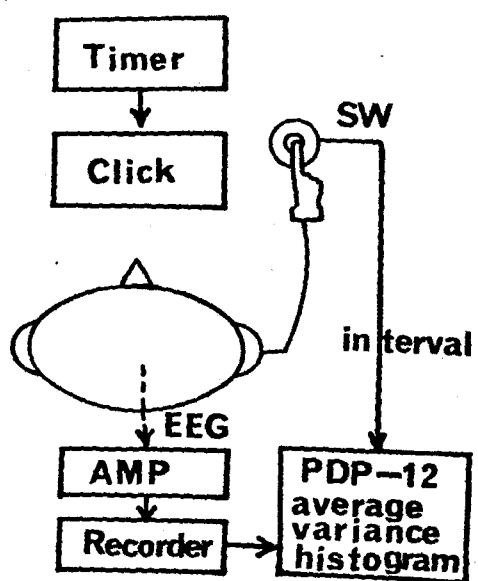


図1. 実験システムの概要図

2.3 結果

2.3.1. 学習した時間間隔と自発的なタッピング時間間隔の関係

提示された時間間隔かとの程度正確に再現できるかということは非常に興味ある問題である。図2に各被験者の学習した平均時間間隔(AT_T)と自発的なタッピングの平均時間間隔(AT_s)の関係のセッションでの平均の結果と5人の被験者について平均した結果を示す。

学習した平均時間間隔(AT_T)については、練習中の連続した16個のタッピング時間間隔の平均値を2個求め、それを平均(IT)の2倍用いた。自発的なタッピングの平均時間間隔(AT_s)については、得られたタッピング時間間隔のうち、最初の32個を16個ずつ2組16分で、各々の平均値の平均を採用した。タッピング時間間隔の標準偏差(SD)については、各々が16個のタッピング時間間隔の分散を2個求め、その平均値の正の平方根を採用した。

図2からわかるように、各被験者について、タッピングの平均時間間隔が設定時間間隔よりも長くなる傾向や短くなる傾向がある(図2fに一点鎖線で示す)。しかし、5人の被験者の平均とすれば、図2fに示すように、非常に良い再現性を示している。各被験者の各設定時間間隔における、自発的なタッピングの時間間隔の平均値(AT_s)と設定時間間隔(IT)との間の差の有意差検定(t -検定)の結果と、5人の被験者の結果を70-111で求めた AT_s と IT との差の有意差検定の結果を

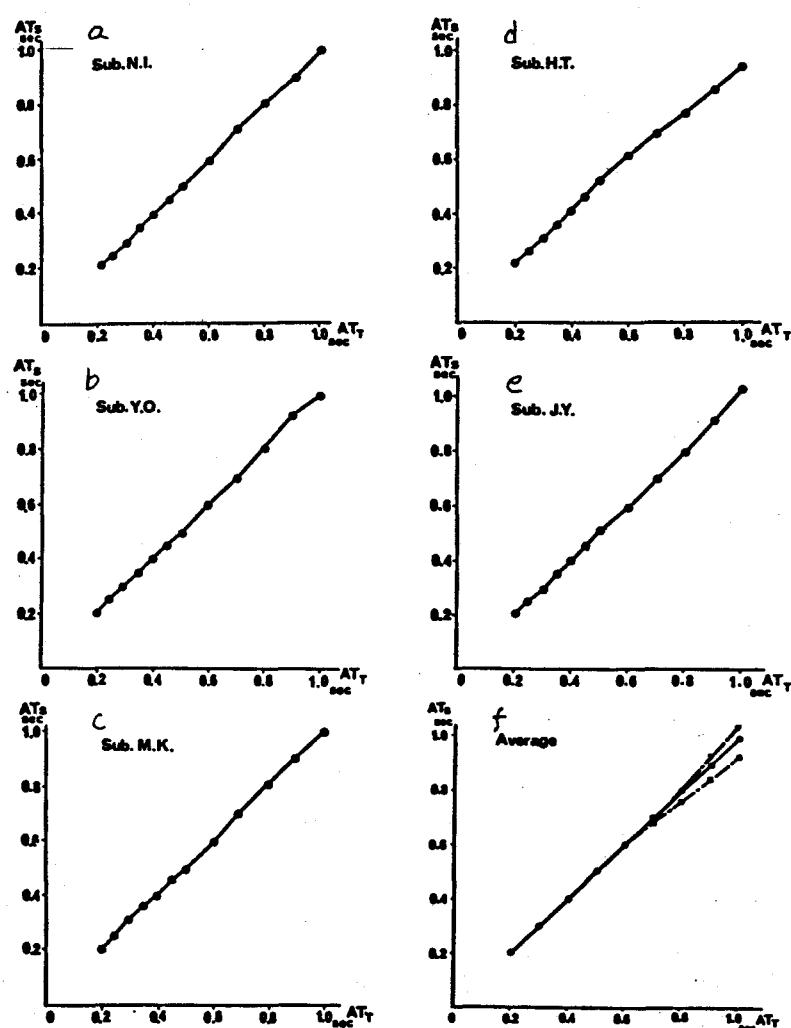


図2. 学習した時間間隔(AT_r)と自発的なランピング時間間隔(AT_s)との関係

表1に示す。5人の被験者全體としては、 $IT=450ms$ の時間間隔を除いて、設定した時間間隔とタッピングの平均時間間隔の間には有意な差は認められなかつた。 $IT=450ms$ のみで、5人中4人の被験者で、差が有意になつてゐるのか顯著である。 $IT=300ms$ において、提示された時間間隔の再現性か他の設定時間間隔に比べて困難であると思われる。5人の被験者のうち、H.T.は設定時間間隔の長・領域にありタッピングの時間間隔が短くなる傾向を示した。又、逆に、 $IT=500ms$ 以下の設定時間間隔にありては、タッピングの時間間隔が長くなる傾向を示してゐる。このようす、設定時間間隔によつて、短い時間間隔を長く感じ、長い時間間隔をより短く感じるとする傾向は、時間知覚の実験においては頻繁にみられるものである。Treisman(1963)は、産出法、再生法、比較法等の種々の手法を用いて実験を行つて、このような傾向を明らかにしたが、又逆に、長い設定時間間隔において、時間知覚が長い方向に偏る被験者も存在することを報告してゐる。それで前者の45%の被験者は偏りの傾向が著しいのに比して後者の45%の被験者は偏りの傾向がそれ程著しくないことを示してゐる。これは本実験で得られた結果と一致してゐる。

subj.	200	250	300	350	400	450	500	600	700	800	900	1000
HT	7.25**	2.38	5.17**	2.04	3.85*	3.28*	3.68*	2.34	0.63	5.08**	4.78**	7.62**
JY	0.79	0.90	3.43*	0.98	0.45	0.66	1.17	1.64	0.08	0.07	1.62	2.91**
NI	3.48*	2.38	5.15**	0.93	0.14	0.29	0.09	1.72	0.67	0.57	0.98	0.04
MK	0.56	2.34	8.41**	4.24**	2.18	2.11	0.05	0.40	1.31	1.73	0.61	0.07
YO	1.44	0.92	0.00	1.79	0.18	0.27	2.58*	0.06	0.77	0.26	4.50**	0.09
TOTAL	1.44	0.72	0.41	0.93	1.45	2.45*	0.88	0.54	0.06	0.17	0.29	0.62

$$t(5, 0.05) = 2.571, \quad t(5, 0.01) = 4.032$$

$$t(29, 0.05) = 2.045, \quad t(29, 0.01) = 2.756$$

* : 5% 有意 ** : 1% 有意

表1. 自発的なタッピングの時間間隔の平均値と設定時間間隔との差の有意差検定 (t-検定)

2.3.2. タッピングの平均時間間隔と標準偏差の関係

各被験者のタッピングの平均時間間隔(ATS)と標準偏差(SD)の関係の6セッションでの平均の結果と、これら5人の被験者について平均した結果を図3-1に示す。図3-1における破線は、練習中のタッピングの平均時間間隔と標準偏差の関係を示したものである。

次に各設定時間間隔におけるタッピングの時間間隔の分散の被験者間の差異を調べるために、分散分析を行なった。その結果を表2-1に示す。表から明らかなるよるべく、時間間隔が350ms, 450msの場合には1%有意で被験者間の分散値に差があるといつて帰無仮説は棄却され、タッピングの110-フターマンスによると、かなりの個人差があることを認めざるを得ない。このように、被験者によって分散の大きさに差異があるわけだ、その信頼曲線にはかなり共通性が特徴がある。すなはち、図3-1に示すよるべく、時間間隔が200ms~350msの領域では、標準偏差は平均傾向に増加する傾向を示す。350ms~500msの領域ではほとんど増加しない。500ms~1000msの領域では再び、時間間隔に比例して直線的に増加する傾向を示す。

表3-1は、5人の被験者について得られる分散値をホールしたものを用いて相満たし設定時間間隔における分散値の有意差検定の結果を示す。

表3-1
200ms < 250ms, 250ms < 300ms, 300ms < 350ms の順序

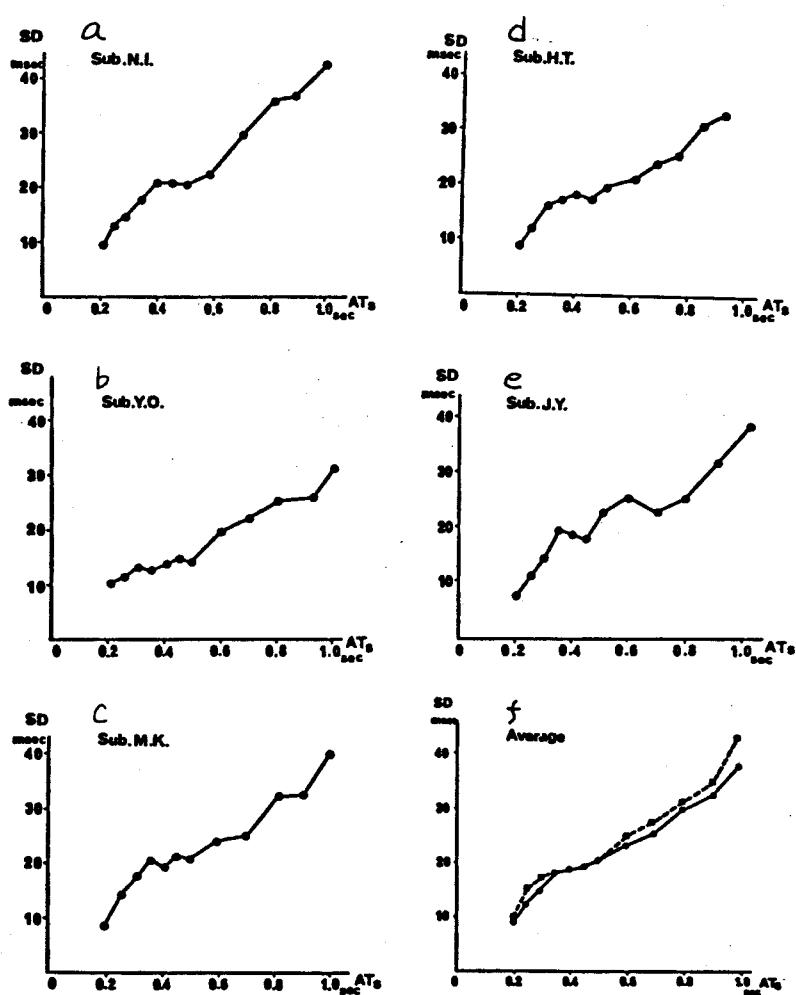


図3. 自発的なタッピングの平均時間間隔(ATs)と標準偏差(SD)の関係

IT (msec)	200	250	300	350	400	450	500	600	700	800	900	1000
Va	1127	7563	20286	75315	55155	63161	95619	75086	191657	533039	383913	752088
Ve	875	5582	8873	9749	13840	13220	27726	39781	50034	129429	171687	194357
F	1.29	1.36	2.29	7.73**	3.99*	4.78**	3.45*	1.89	3.83*	4.12*	2.24	3.87*

$$F(4,25;0.05)=2.76, F(4,25;0.01)=4.18$$

* : 5%有意 ** : 1%有意

Va: 被験者間の分散 Ve: 誤差分散

表2. 自発的なタッピングの時間間隔の分散の被験者間の差の検定(F-検定)

IT	200 -250	250 -300	300 -350	350 -400	400 -450	450 -500	500 -600	600 -700	700 -800	800 -900	900 -1000
t	5.14**	3.35**	2.85**	0.42	0.36	1.01	2.41*	1.86	2.39*	1.41	3.03**
P				> 0.5	> 0.5	< 0.4		< 0.1		< 0.2	

$$t(58, 0.05) = 2.001, \quad t(58, 0.01) = 2.663$$

*: 5% 有意. **: 1% 有意.

表3. 相隣の設定時間における分散の有意差検定 (t-検定)

顕著な差がみられた。一方、350ms < 400ms, 400ms < 450ms, 450ms < 500ms の間には有意な差がみられない。500ms 以上の長さの時脈間隔領域では、350ms 以下の時間間隔に比べて程で有意な差がみられた。

2.3.3. タッピングの平均時間間隔とクエーバーピー

図3に示すようにタッピングの平均時間間隔(ATS)と標準偏差(SD)の関係をタッピングの平均時間間隔(ATS)とクエーバーピー(R)との関係に書き直すと(a)が図4である。ここでクエーバーピー(R)は^a次のようして定義される。

$$R = SD / ATS \times 100.$$

前述したタッピングの平均時間間隔に対するものはつきの増加の様子の異なりがより明確に示された。図4fにおける破線は練習中のタッピングの平均時間間隔とクエーバーピーの関係を示すものである。

2.3.4. タッピング時のスイッチのオン時間の測定

タッピング時にみられるマイクロスイッチのオン状態によってなる時間(CONT)を測定した。図5は3セッションの平均の結果を示す。練習時のオン時間と、自発的なタッピングの際のオン時間との間にには、どの被験者につけても差違は認められなかったので、練習の際のオン時間と自発的なタッピングの際のオン時間の平均を取った。Bouisset (1974) は前腕の水平方向の回転運動(手指で標的を指す運動)において、

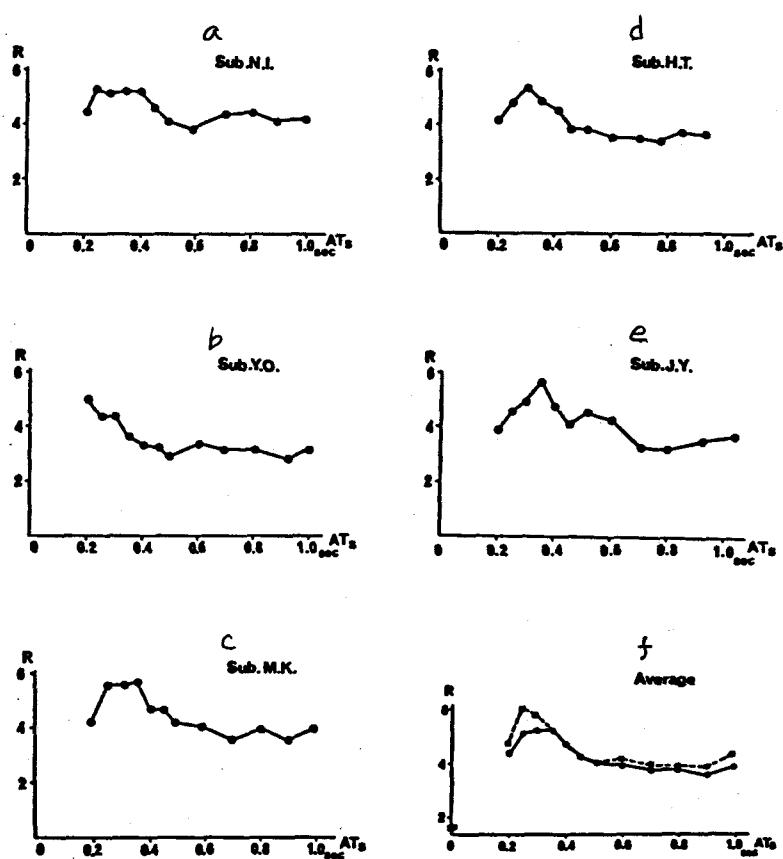


図4. 自発的バタッピングの平均時間間隔(ATs) × バタッピング(R)の関係

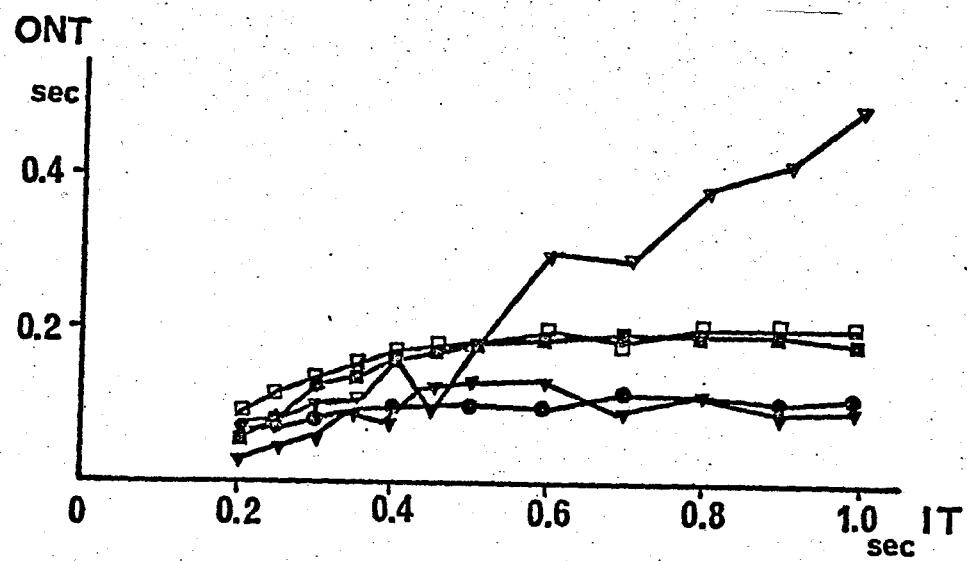


図5. タッピング時におけるスイッチャオン時間(ONT)の平均値

▽: J.Y. □: H.T. ▽: Y.O. ●: N.I. ■: M.K.

運動の速度（特に最大速度 V_{\max} ）が最も重要なパラメータであることを報告している。本実験では、タッピングの速度を直接測定することは不可能であるため、スイッチのオン時間 t_{on} と、タッピング速度 $V = \frac{1}{t_{on}}$ と想定して設定時間間隔 Δt とこのオン時間の推移を調べた。この結果、被験者 J.Y. を除く他の 4 人の被験者においては、時間間隔 Δt が 400 ms 以上の領域においてオン時間 t_{on} が直線的に増加する傾向が示された。

2.4. タッピング時 の 脳波測定

2.3 節で示した結果から、短かい時間間隔のタッピングと長い時間間隔のタッピングでは機能してくる運動制御系の異なっていることが推察される。

Stark (1968) や 塚原 (1972) の視覚による追従実験では、刺激周波数によって反応動作から予測動作へと制御モードが変化することが認められている。特に塚原は頭皮より誘発脳波を導出し、1 Hz の視覚刺激と M 系列の視覚刺激までの振幅の差違から、中枢での文理過程の一連の過程を想定している (図 6 参照)。

一方、近年、Walter (1964), McAdam (1969), Hillyard (1969) によると、期待、動機、注意などの被験者の意識レベルの大小によつて脳波の直流レベルに陰性変動がみられることが報告されている。

この電位変化は、実験条件の差異によつて、随伴性陰性変動、期待波、準備電位、運動電位などと呼ばれてゐる。本節では、この脳波の直流レベルの変動がタッピングの時間間隔の差によつてどう変化するかと

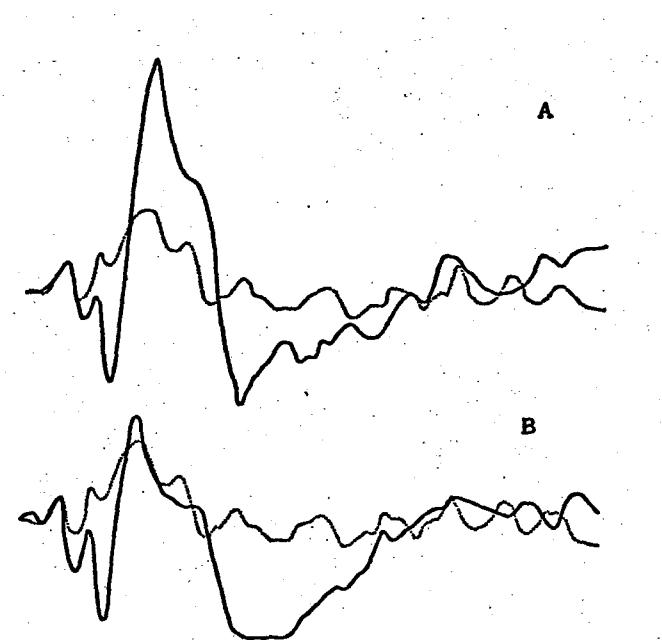


図6. 視覚刺激に対する加算誘発潜伏波

点線は1秒ごとの刺激、実線Aは6秒ごと、実線Bは
不規則な刺激に対する反応（塙原、1972より引用）

測定した。

実験システム および タッピングの方法は 2.2 節で述べたのと同様である。

脳波は 自発的タッピングの際のみ計測した。 脳波は、時定数 3.5 秒
利得 80 dB, 入カインコ-ダンス 10 MΩ の脳波計を用い、单極誘導で

導出した。 開電極の装着に際しては、国際式 10~20 導出法の
Cz(頭頂葉), Fz(前頭葉) を用い、不開電極は耳介 A1 に装着した。

タッピングの時間間隔として 250, 500, 750 ms の 3 段階を設定
した。 被験者は 2 名 (Y.O. N.I.) で行った。 タッピング実験の

終了後、各設定時間間隔について、波形の平均加算を行った。

タッピングによるマイクロスイッチのオン時刻を時刻の原点として、その前
後の波形を平均加算した。 250, 500, 750 ms の設定時間間隔
について、それぞれ、時刻の原点の前後 125, 250, 360 ms の脳波
記録の中から視察に付し、筋電位、眼電位等のアーテクトの公
テータを除外して平均加算した。 加算回数は 各時間間隔について
60 回であった。 なお 平均加算の処理は PDP-12 を用いた。

2.5. 結果

2名の被験者についての平均加算の結果を図 7a, b に示す。

図 7 において 橫軸は タッピング時のマイクロスイッチのオン時刻の

前後の時間表示。 0 は マイクロスイッチのオン時刻を表す。

縦軸は 不開電極による各部位での平均加算電位を示す。

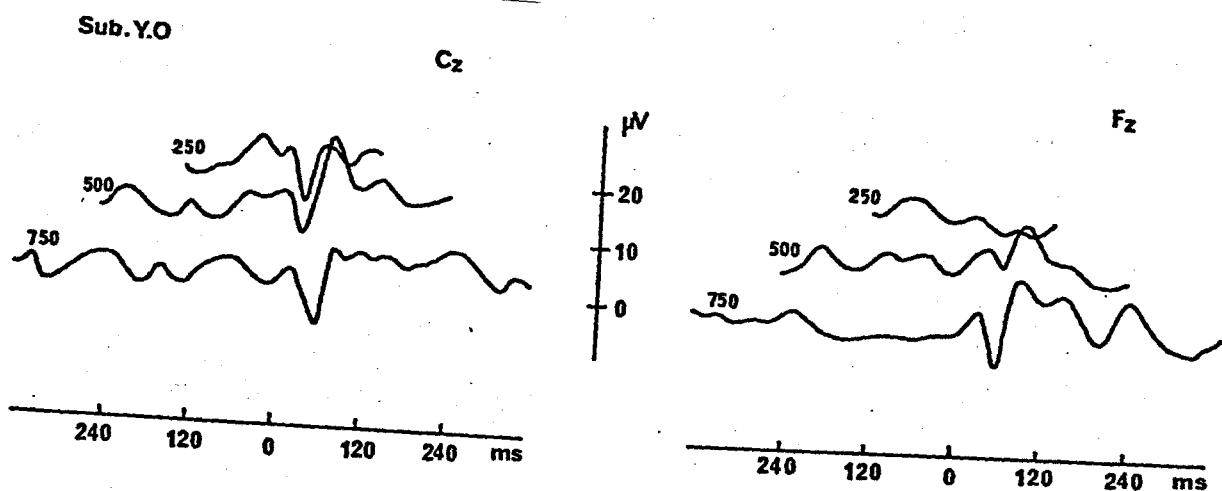


図7a. タッピング時の中間波測定記録(被験者.Y.O.)

記録部位, Cz(頭頂葉), Fz(前頭葉), 不関電極は A1(耳介).

平均加算回数 60 回. 横軸 0 はマイクロスイッチのオン時点を表わし,
図中の数字はタッピング間隔を表わす。

Sub.N.I.

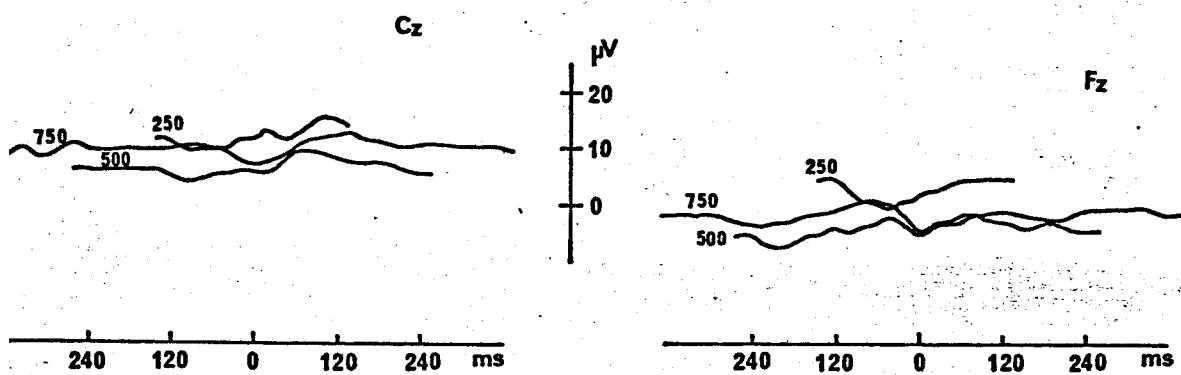


図7b. タッピング時の脳波測定記録(被験者N.I.)

被験者 Y.O. 1=7171は、運動性誘発脳波がみられず、被験者 N.I. 1=7171は、顕著には観測できなかった。また、被験者 Y.O. では設定時間間隔が 250 ms から 750 ms に変化するにつれて、20 μ V 程度の基線の変動がみられる。一方、被験者 N.I. 1=7171は、250 ms と 500 ms では被験者 Y.O. と同様の基線の変動がみられるが、750 ms のタップングにおいてのみ、異なる傾向を示している。導出部位 C₃ (頸頂葉), F₃ (前頭葉) による電位変化の違いは、2人の被験者共に明らかでない。

2.6. 考察

実験結果 2.3.2 において述べたように、タップングの平均時間間隔と標準偏差との関係は 200 ~ 1000 ms の設定時間間隔において、個別の異なる領域が明らかになる。すなはち、標準偏差がタップングの平均時間間隔の増加に伴ない、平方根的に増加する領域、平均時間間隔の増加に対し標準偏差の増加が著しく小さく、あるいは一定となる領域、平均時間間隔の増加に伴ない標準偏差が直線的に増加する領域である。一定時間間隔のタップングにおいて、このよろず時間間隔のばらつきの差異はどのような神経制御機構を反映したものなのであるか考察する。図 8 にタップング運動の制御機構についての我々の考え方概念的示す。

モデル中の controller と neural oscillator は、生物のリズム現象が内因的なリズム発生機構によって制御されて可能性が強く示唆されており

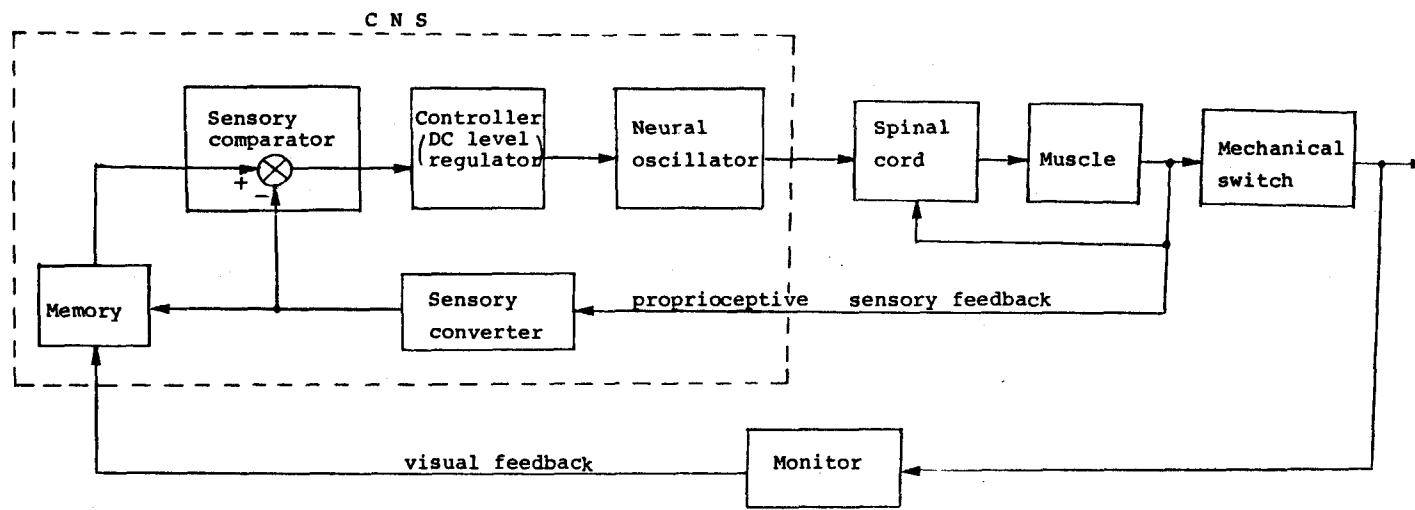


図8. タッピング制御機構の概念モデル

こと (Kennedy & Davis, 1977) を考慮して仮定したものである。

Controller は Memory の出力される時間間隔信号を適当な直流信号に交換する働きを有し, Neural oscillator では, その信号レベルに応じて種々の周波数の信号出力を行なうものと仮定した。工学的には, このような機構を示す発振器として, 宽压制御発振器が知られる。またこの宽压制御発振器では, 中心周波数の 18.57Hz, 制御電圧の 18.57V は DC 3.14 などとかも知られてる。このような機構は Reiss (1962) が相互通制御モデル, Stent (1979) の CIL の運動の神経回路モデルなどにも取り入れられてゐる。

ところで, 一定間隔のタッピング学習時には Monitor を通じての直覚アートバイブルにはどう 現在進行中のタッピング間隔 (T) の良否か判断される。その結果, 良いとの判断がなされた時には 時間間隔 T の記憶とその最適タッピング中に得られた自己受容器からの感覺性アートバイブル信号の記憶がなされる。これは 運動パターン発生モデルとして Hoyle (1974) によって 提出された Motor tape & sensory tape と 16 種の概念である。伊藤 (1972) は 運動学習のモデルとして, このようなアートバイブル信号によって 一連の運動のためのモデルが 小脳内に形成されると考えてゐる。ここでこの 16 のタッピング制御モデルは 小脳の特定部位の機能に関する議論ではない。あくまで, タッピング時間間隔のはしづかさなどのような神経機構の働き生じてゐるかと

「うことべつて議論する。ところで、学習により記憶される時間間隔も実は正確な時間間隔を記憶しておわけではなく誤差を含む。

Hebb の法則に従い、時間間隔を T 、誤差を ΔT とすると

$$\frac{\Delta T}{T} = K \quad (K \text{ は定数})$$

の関係が成立する。熟練すれば " ほど ΔT が小さくなるので " K の値も小さくなる。さて、自発的タップコンタの神経機構について考える。

Memory に記憶された時間間隔 $T \pm \Delta T$ が controller で反応する直流信号に変換され、Neural oscillator により同期的な神経信号が"出力される。この神経信号により知覚器の筋肉活動が一定の時間間隔で行なわれタップコンタが実現される。一定時間間隔のタップコンタがこのような機構で成るとして仮定すると今的时间間隔のばらつきには 2つの要素を考える。一つは Memory 自身の時間間隔のばらつきで、上述で $\frac{\Delta T}{T} = K$ の関係より標準偏差は時間間隔に比例して増加する ($SD = KT$)。一方、神経信号にはさまざまなレベルで雑音が混入してくるものと考えられ、これらの雑音の混入による時間間隔のばらつきが生じる。単位時間あたりの雑音の量を一定とすると、時間間隔の増すに伴な、雑音の量が増加するので、分散は比例して増加する。従って標準偏差は平方根的に増加する ($SD = \sqrt{KT}$)。

ところで、フィードバック機構の働きがあり、これらの雑音に対する時間間隔の変動は sensory comparator により記憶した時間間隔 T との比較か

行なわれ、最適値へ修正されます。このように考えると、タップコング時間間隔のはづつきの特性はアードバック機構による sensory comparator が復元して 113か否かによって特徴的な 2つの領域にわけられます。

アードバック機構が運動を始めた時間は個人差があります。反応時間から推測して 300ms 前後と考えられます。そこでアードバック機構の運動からタップコング(アードフォワードモード)では Memory 自身の時間間隔のばつきと雑音によるとばつきとが加算され、 $SD = \sqrt{KT + KT}$ の曲線となる。一方アードバック機構の運動からタップコング(アードバックモード)では Memory 自身のばつきばつきだけとなり $SD = KT$ の特性を示す。これらの結果を図 9 に示す。ここで K は被験者のパフォーマンスを表す可変数で熟練するとほど K の値は小さくなると考えられます。

ところで、 $R = K - KT - CL$ の曲線について述べた 2 つのモードの関係式
 $R = \sqrt{KT^{-\frac{1}{2}}} + K$ と $R = K$ の関係が得られ 図 10 に示すような曲線が描かれます。

さて、上述したような概念モデルで得られる理想的な結果と 5人の被験者について得られたデータとを比較すると、被験者 N.I. Y.O. M.K. についてはこのような特徴がみられます。中でも被験者 Y.O. については、このような特性が顕著に示されています。L.O. S., 被験者 H.T. J.Y. については、このような特性の他に、H.T. では 200, 250ms, J.Y. では 200, 250, 300ms の早いタップコングで標準偏差の增加が $SD = KT^2$

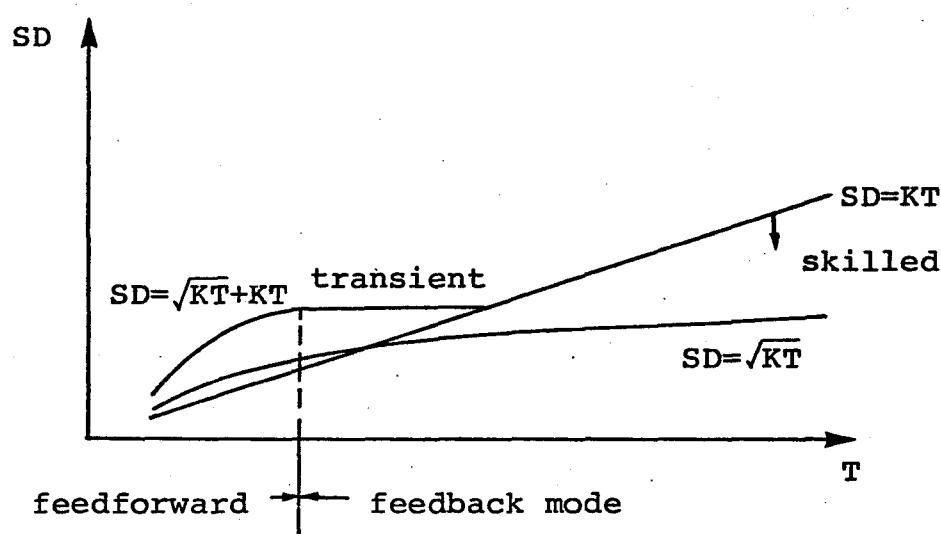


図9. 概念モデルによるタッピング間隔と標準偏差の関係

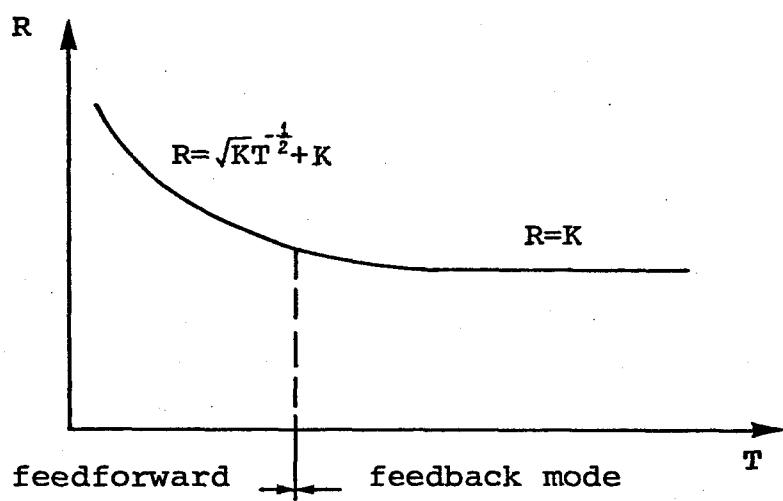


図10. 概念モデルによるタッピング間隔とアーカー比の関係

になる領域がみられる。エーハー比の曲線の傾きが正になると領域である。この特性については、どのような神経機構を反映したのか現在のところ明らかでないが、Wing(1973)らが非常に熟練した被験者を使って 180~350ms と長い時間間隔について我々と同様の計測を行ったデータにおいては、このような領域はないことない(図11参照)。また、図4fに示したように、練習時よりも実験時の方がこの領域の傾きが小さいことから、この領域は学習を積むにつれて消えていくと考えられる。

以上述べたように、タッピングの平均時間間隔との標準偏差の関係から、短かい時間間隔のタッピングと長い時間間隔のタッピングでは機能していける運動制御系の異なっていることが推察される。次に脳波の測定結果からこの点について考察する。本実験では、平均加算された脳波にはタッピングによる誘発電位が重なり合ってまとまることさえあるが、波形そのもののタッピングの際の脳波の特性については詳しい議論はない。ところが、基底線の変動に注目すれば、单極誘導であるので運動時の局所的な電位変化が観測され、随伴性陰性変動と同様の議論が可能であると考えられる。

図7a,bに示したように、タッピングの時間間隔の変化によって基底線の変動がみられる。時間間隔が長くなるにつれて陰性の度合が

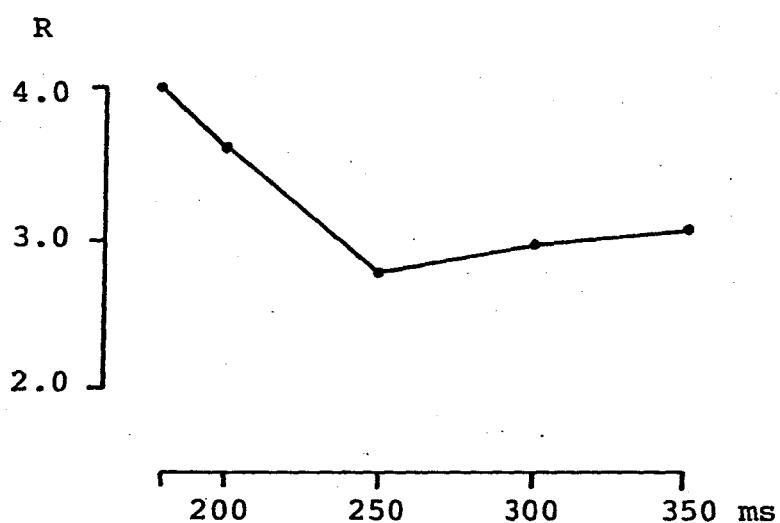


図11. 熟練した被験者での $180\text{ms} \sim 350\text{ms}$ におけるタッピング間隔と
ウェーバー比の関係 (Wing, 1973 のデータより改変)

が強くなる。この傾向は被験者Y.O.において顕著にみられる。

これらの結果と、250ms 間隔と「短い時間間隔のタッピング」は無意識的に行なえるが、750ms 間隔と「長い時間間隔のタッピング」は注意の集中と緊張状態の維持が必要であったという被験者の内感報告を参考すると、やはり一定時間間隔のタッピングにおいてフットフォワード型の運動制御とスタートバック型の運動制御の2種の運動制御機構が働くものと考えられる。

2.7. まとめ

200ms ~ 1000ms の時間間隔のタッピングにおいて、タッピングの平均時間間隔とその標準偏差とに特徴的な関係のあることが認められた。次にタッピングの概念モデルを考え、Y.O.の関係が2つの異なる制御機構、すなはち、フットフォワード制御とスタートバック制御とを反映したことであることが示された。

第3章 位相遷移曲線によるフィンガーツッピング神経機構の解析

3.1 チヌガニ

運動は、特定の時刻に特定の筋肉を活動させることによって発現する。つまり、ある運動の発現には、その運動に使用される筋肉群の活動のタイミングが重要なおり、このタイミングの制御は何かの神経回路によつて行われる。特に、周期的な運動のタイミングの制御のために、ある種の振動回路が存在することが考えられる。

さて、最近、無脊椎動物について、神経系から見て、生物のリズム現象（心拍、呼吸、歩行、飛翔など）が内因的なリズム発生機構によつて作り出されることが知られてきた。つまり、1個または複数個のペースメーカー細胞やバースト細胞、あるいは、10数個のニューロンから成る神経回路が末梢からのフィードバックなしでリズム現象を制御できることが明らかになつた（Kennedy & Davis, 1977）。

脊椎動物のリズム現象については、このような考え方を配り、Shik & Orlowski, 1976, Grillner & Zanger, 1979）が、その神経系の複雑さから考えて、リズム発生の神経回路は非常に多数のニューロンから成ると思像される。このフィンガーツッピングの場合、外乱を与えたも周期がやがて元に戻ることから考えて、やはり安定な内因的に振動する性質を持つ神経回路で制御されていると考えられる。

ところで、日周期リズム、生化学的振動子、ペースメーカー細胞等、生物の周期的現象の解析には位相反応曲線、あるいは、位相遷移曲線の計測法有効な手段となる（Pittendrigh, 1957, Perkel et al, 1964, Pinsky, 1977）。Winfree (1970, 1977) はこれらの振動子について、与えられた

の強さにより、二つの型の位相遷移曲線が得られることを指摘している。

Kawato & (1978) はこれをホモトピー論を使って説明し、これで 刺激強度が小さなと平均の化粧子 1 の位相遷移曲線 (1 型) が得られ、刺激強度が大きなと平均の化粧子 0 の位相遷移曲線 (0 型) が得られることが示された。

そこで我々は、フィンガーツッピングの神経回路をこの位相遷移曲線を用いて研究した。すなはち、左右どちらかの指によるツッピング運動時に、合図に応じて諸課題を遂行させ、その時のツッピング運動の位相の変化を調べた。こうして得られた位相遷移曲線の形から フィンガーツッピングの神経回路と諸課題を制御している神経回路との機能的な相互作用を解明した。

3.2 位相遷移曲線

3.2.1 位相遷移曲線の定義

図 12 に示すように観測できる物理量 x が周期で振動しているとする。

ある目印になる出来事 (例えば x の極大) の起る時刻を 時間 t_0 基準として、位相 ϕ を $\phi \equiv t/t_0 \pmod{1}$ と定義する。この振動が T にわたる時間 T の刺激を位相 $\phi - T/t_0$ から与える。刺激終了時の位相 ϕ を τ_i とすれば、 i 日位相と呼ぶ。 i 番目の遅れ τ_i も、刺激によって i 番目の目印になる出来事 x と“いた” i 遅れ τ_i ($\tau_i < 0$)、進んだ τ_i ($\tau_i > 0$) を示す量となる。これが i 番目の新位相 ϕ'_i と次のように定義する。

$$\phi'_i \equiv \phi + \tau_i \pmod{1}$$

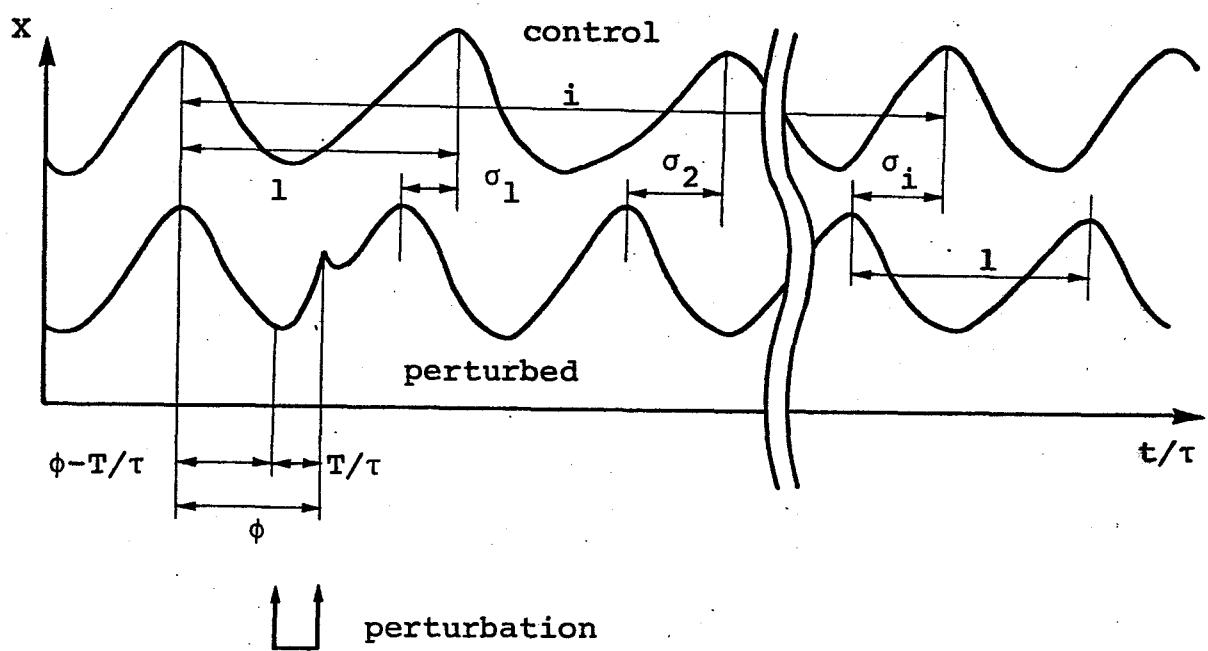


図12. 位相遷移曲線の定義

刺激の後、時間が経つと乱れた周期が正常に戻るとして、 ϕ' は極限 τ 、 ϕ' を持ち、これをそれが遅れ、新位相と呼ぶ。 $\phi' = \phi + \tau$ だから、新位相 ϕ' は旧位相 ϕ から刺激によって遷移した新しい位相を表すのである。 τ 、 ϕ' は ϕ の関数になると、 $\phi(\phi)$ を位相反応曲線、 $\phi'(\phi)$ を位相遷移曲線と呼ぶ。

3.2.2 位相遷移曲線の性質

位相遷移曲線、位相反応曲線は日周期の振動子、神經生理学の振動子、生化学的振動子など種々の対象について測りられてみると共通の基本的な性質がある。すなはち ϕ' を ϕ に対して定義されると位相遷移曲線 $\phi'(\phi)$ は又周期的である。

また、位相遷移曲線は連続であるので ϕ が0から1まで変化する時、 ϕ' は整数部分だけ増加または減少する。これまでに計測された位相遷移曲線は ϕ が0から1まで変化する間に ϕ' が1だけ増加するか、変化しないの2種だけである。前者はI型、後者はO型と呼ばれる（図13参照）。

特に図13の(a)(b)の中の点線で示した位相遷移曲線は典型的なI型である。前者は $\phi'(\phi) = \phi$ で、刺激が最終的には振動子に全く影響を与えない場合である。後者は、いつ刺激が与えられても必ず振動子が一定の位相に遷移すると意図される。

Winfree(1970)は、生物の種々の器官の日周期リズムの振動子に対して、刺激と持続時間一定の可視光線の光パルスを用いて14の位相反応実験の論文から16個の位相遷移曲線を再構成して、それを上で述べた典型的なI型からO型へと

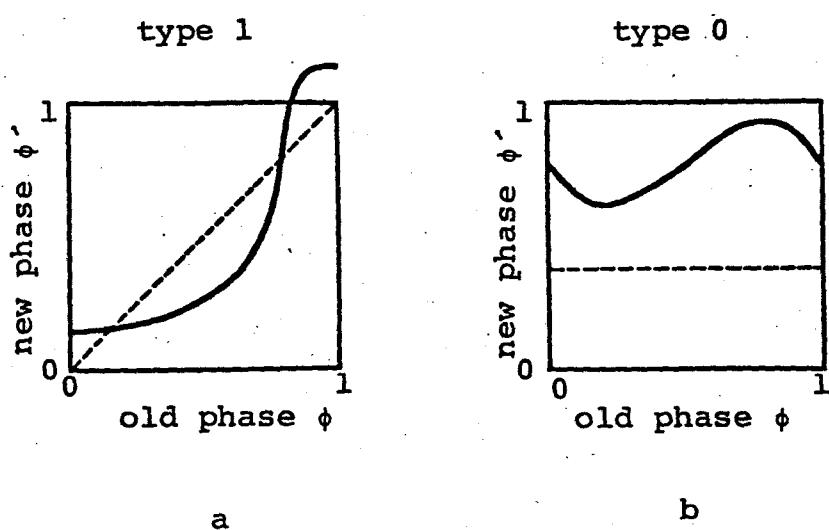


図 13. 位相遷移曲線の 2 つの異なる型。
a は I 型, b は 0 型を表わす。図中点線は
典型的な I 型, 0 型を表わす。

順に並べた。その結果を図14に示す。ただし、ここで Δt は旧位相に対する心拍数、 θ は新位相に対する心拍数である。図中の(a)は 1型と 0型の境の特異な位相遷移曲線となるおり、(b)より前のアルファベットの位相遷移曲線は 1型、後のアルファベットの位相遷移曲線は 0型となる。又 (d)と (k)では、同一の現象に対して光ノルム持続時間を考えることによって 1型と 0型の位相遷移曲線が得られる。Winfree (1975) はこの点を詳しく検討する爲、酵母菌の解糖振動系の実験で、小さな刺激強度では 1型、大きな刺激強度では 0型の位相遷移曲線の得られることを示した。また Kawato (1978) には示すとおり論じて、数学的にこれを証明している。さらに、図 15 で示したように、刺激強度 m の変化によって、 $0 \leq m < m_1$ の時は 1型、 $m_2 < m$ の時は 0型の位相遷移曲線が得られ、 $m_1 \leq m \leq m_2$ の時は位相遷移曲線が得られないことを示した。

3.2.3 位相遷移曲線の回帰

実験では位相遷移曲線は限られた数の旧位相中についてしか計測していない。そこで、位相遷移曲線の型の分類や形の解析を容易にするため、この実験データから回帰曲線を求める。この場合、位相遷移曲線 $\phi'(\phi)$ は連続でしかも周期的なので単なる直線回帰、多項式回帰では不適当である。 $\phi = 2\pi$ 旧位相中 $\phi / 2\pi$ 周期となることに留意して次のよろび Fourier 級数型の回帰式を求める。

$$\phi'(\phi) = a \cdot \phi + \sum_{k=0}^K \{ b_k \sin(2\pi k \phi) + c_k \cos(2\pi k \phi) \}$$

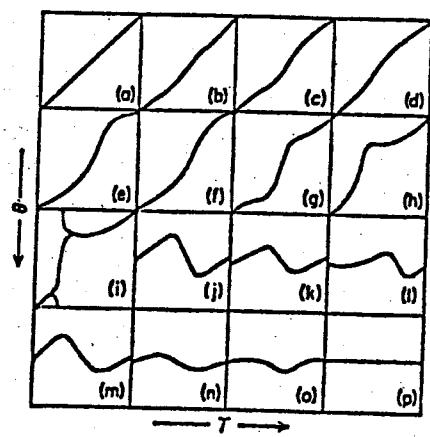


図14. 日周期リズムについて測りした位相遷移曲線の変化
Tは旧位相, θ は新位相に対応する (Winfree, 1970より引用)

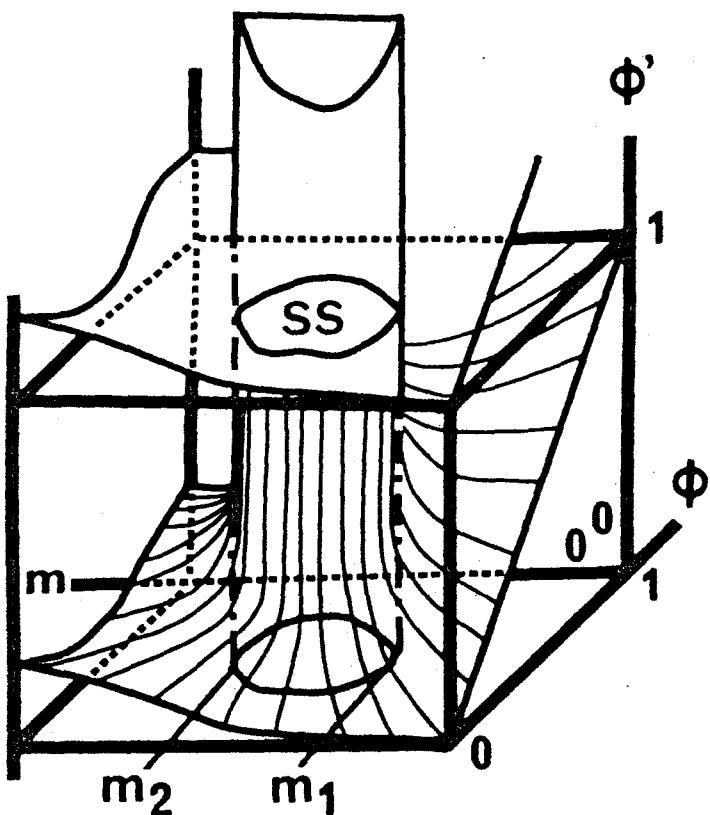


図15. 刺激強度の変化による位相遷移曲線の変化。

前後軸は旧位相 ϕ 、左右軸は刺激強度 m 、縦軸は新位相 ϕ' を表す。(Kawato, 1978より引用)

ただし、ここで α は位相遷移曲線が I 型か O 型かにより、その値は 1, 0 をとする。観測点を $\{(\phi_i, \phi'_i), i=1 \dots, N\}$ とし、 a, b_k, c_k は二乗誤差

$$\sum_{i=1}^N \{dis(\phi'(\phi_i) - \phi'_i)\}^2$$

が最小になるように決められた。ただし、 ϕ' が 1 を周期とすることが

$$dis(\phi'(\phi_i) - \phi'_i) = \min(E_i, 1-E_i)$$

$$E_i = \phi'(\phi_i) - \phi'_i \pmod{1}$$

である。回帰式の次数 k は 4 次とし、計算は極値探索法で行った。

図 16 は 実験値と回帰曲線の例を示す。

3.3. 3 種の課題に対する位相遷移曲線

3.3.1. 課題と被験者

ファインガーナップピングを行って 113 被験者に、各回に応じてあらかじめ指定した課題を遂行させた。そしてこの課題がナップピングに与える影響と位相遷移曲線を計測するところより解明した。課題としては次の 3 課題を設定した。

課題 1：光信号に速やかに応答して、ナップピングを行って 10 手のスザン手袋で 1 回手袋を押させる。手袋押すのに必要な力は 20g である。光信号としてはモニタースコープ上に 1 辺 5mm の正方形图形を 20ms 提示した。

課題 2：1 と同じ光信号に速やかに応答して "S" 音を発生させる。

課題 3：光信号として直径 5mm の O 印と X 印のどちらかを 20ms 提示し、それを判別させてナップピング終了時に報告させる。

被験者としては、正常の運動機能を有する大学院生 4 名 (T.F., H.T., N.K., Y.M.) を使用した。全員右利きである。

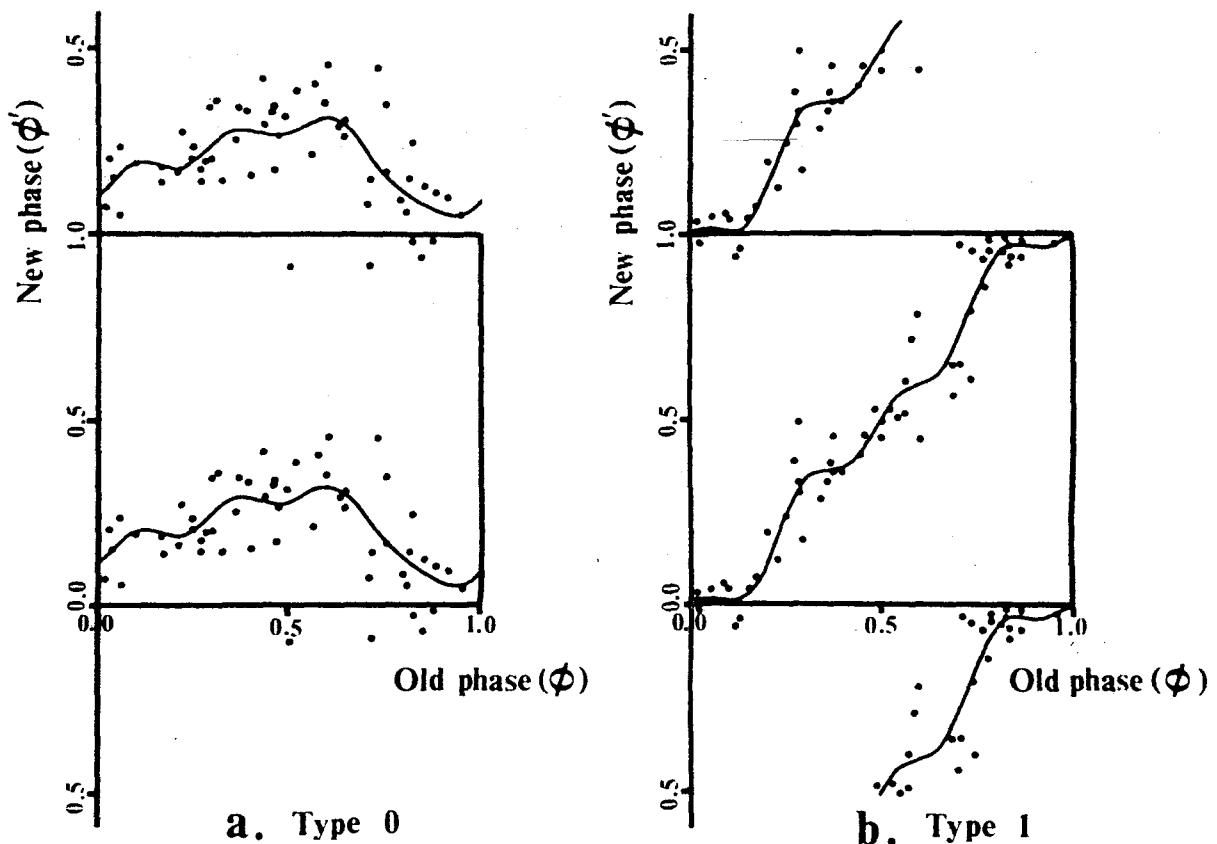


図16. 位相遷移曲線の回帰

3.3.2. タッピング間隔の学習

図17は実験システムの概要を示す。あらかじめ設定した時間間隔で光信号をモニタースコープ上に提示する。この光信号に同期して、被験者にマイクロスイッチを押させ、タッピング間隔を学習させる。モニタースコープと被験者の距離は約75cm、提示光信号は1辺5mmの正方形图形、提示時間は20msである。被験者の学習完了の合図で、今度は光信号の提示なしで今度は時間間隔でタッピングを約30回繰り返せる。寺尾ら(1977)は十分学習がなされた場合は、自発的タッピングの間隔の標準偏差が平均時間間隔の約1/20になることを調べた。そこで、ある一定の標準偏差を決めておき、この1/20秒の範囲で自発的タッピングが行なえる状態で位相遷移曲線の計測を行なった。タッピングの時間間隔は1000msとした。タッピングを行なう指は親指と人差し指を指定した。タッピングおよび課題用のマイクロスイッチは小さな板に固定し、タッピングや課題開始を行なう位置は自由に移動できるようとした。特に人差し指以外の部分を押してタッピングしないように注意した。

3.3.3. 位相遷移曲線の計測

30回の自発的タッピング中でモニタースコープ上に1~3回光信号が表示される。被験者はこの光信号に応じて、速やかにあらかじめ定められた課題を行なう指示された(図18参照)。光信号はタッピングによるマイクロスイッチのON時間からタッピング時間間隔の1/10, 1/10, ..., 9/10の時間後、すなはる10倍の位相で提示した。30回の自発的タッピング中の何回目に

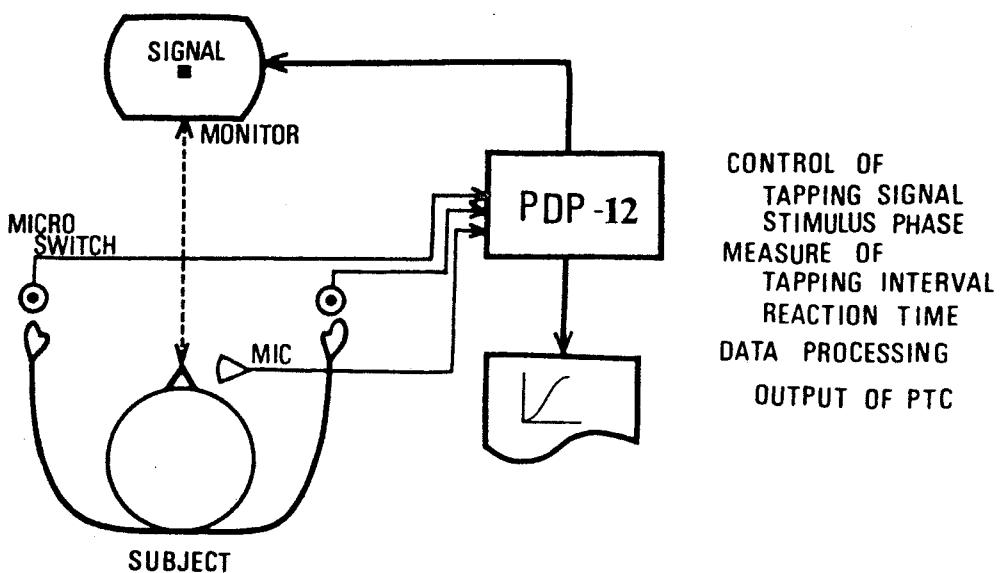


図17. 実験システム

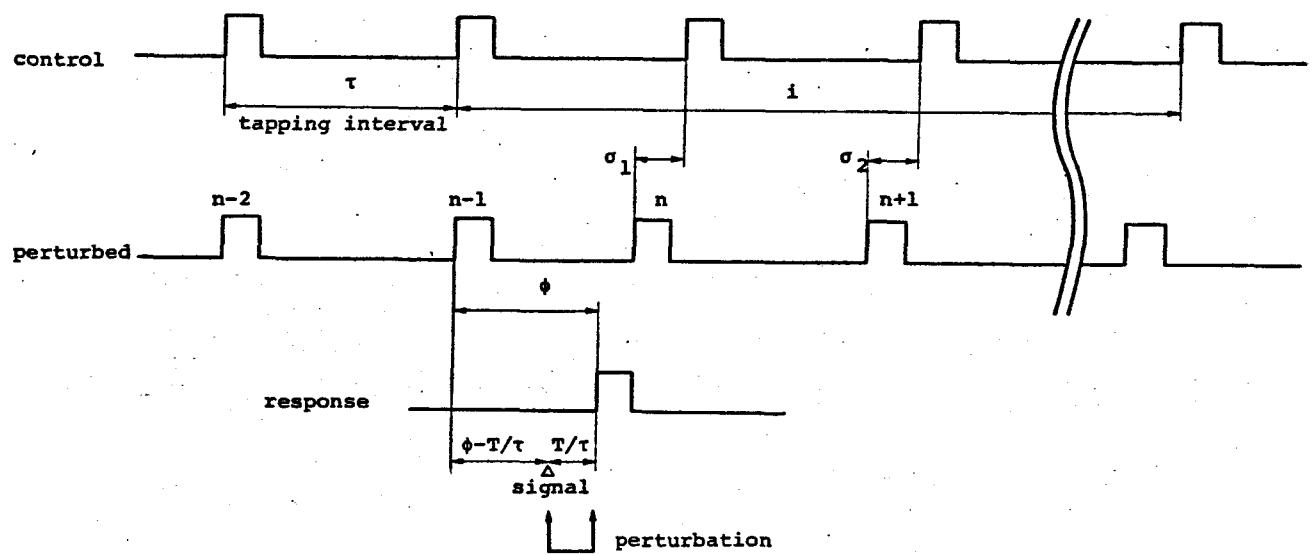


図18. フィンガータッピングにおける位相遷移曲線の計測法

どのような位相で光信号が提示されるかは被験者に予測してさうしようとタームに決めた。光信号の提示は各タッピング時間間隔で10段階の位相のそれそれに4回以上行ない、この合計約60回の光信号の提示とそれに応じての課題の遂行を1試行とした。1試行の実験時間は約1時間である。3課題に対する各1回の試行を3試行を1セットとし、学習による位相遷移曲線の形の変化をみるため実験は5セット行った。

光信号に応じての課題の遂行がタッピングには「可影響」は短い時間しか続かない、課題の遂行後2回目は、3回目のタッピングで「タッピング間隔」は一定周期に戻るので、遅山ではこの2番目から3番目の遅山まで、すなとし新位相の計算した。

喇叭の持続時間Tは、各々の課題について2次のようにして決めた。課題1の場合には光信号に対する反応時間、課題2の場合には光信号の提示から“S”音の発声によって一定閾値の音声電圧が出るまでの時間、課題3ではT=0とした。現実には認識に要する時間Tが存在するはずであるが、T=0として位相遷移曲線の(1)はグラフの右上45度方向に平行移動するが、そのためにはならない。

タッピング間隔の計測、種々の位相での光信号の提示、実験データの処理などはPDP-12計算機を使用してオンラインで行った。

3.3.4 結果

3種の課題に対する位相遷移曲線を図19に示す。実験結果は3.2.3節で述べた回帰曲線で表わす。図中の数字は典型的な1型の位相遷移曲線からのずれ(遅山、進み)の大きさを表す指標として、

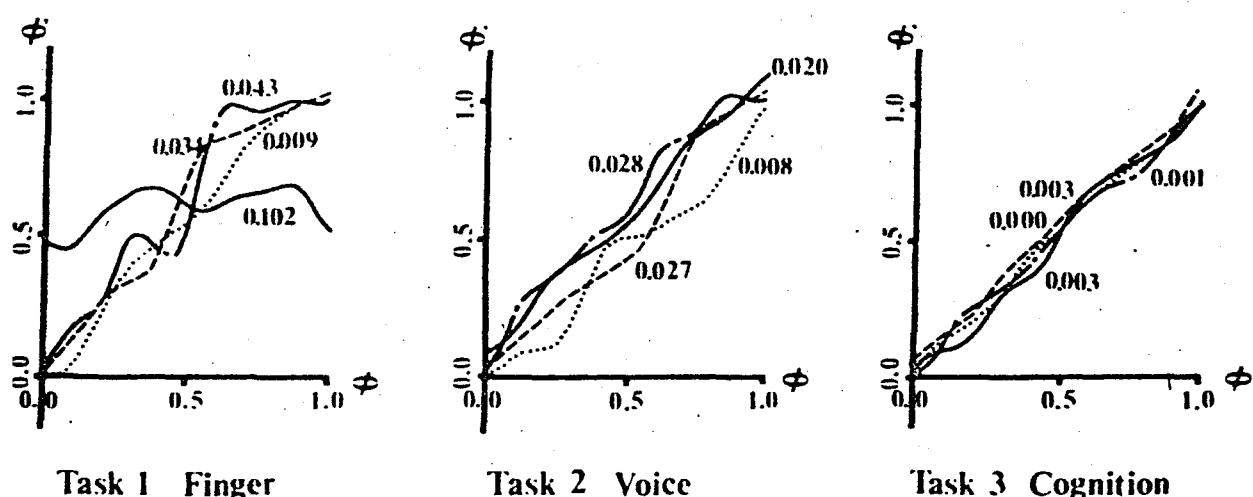


図19. 3種の課題(キー押し応答, 発声応答, 図形識別)に対する
位相遷移曲線。運動負荷 20g, タッピング肢は右手, タッピング
間隔 1000ms, $t=2$ セットの試行結果を示す。実線, 破線,
点線および一点鎖線は各々, 被験者, T.F., N.K., Y.M. および
H.T. のデータを示す。

\bar{d} は二乗和の平均

$$\bar{d} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \{ \text{dis}(\phi_i - \phi(\phi_i)) \}^2$$

を示したものである。以下の実験結果も回帰曲線との指標 \bar{d} で示す。

図19は、5セットの試行のうちの2セット目の試行の結果を示したものである。5セットの試行のうちの場合は、課題2, 3では1型の位相遷移曲線が得られた。これに対して、課題1では0型を示す被験者と1型を示す被験者がみられた。課題1, 2, 3の \bar{d} の指標 \bar{d} はこの順に大きかった。又、試行回数が増すごとに、AからBへなる化痕跡がみられ、1型の位相遷移曲線を示す被験者では型の変化はみられないが、0型を示す被験者では1型への移行のみられる。課題1～3では、位相遷移曲線の型が被験者の過去の学習経験にかなり依存しているようで個人差が大きい。次節では、学習経験の違いによって2つの被験者グループを設け、課題1について更に詳しく検討した。

3.4 アニガーラッピングの位相遷移曲線の性質

3.4.1 課題と被験者

実験システムならびに位相遷移曲線の計測方法は前節に述べたのと同様である。実験条件は次の10通りである。

まず、タッピング周期の影響を調べるために、負荷20gでタッピング周期を1000, 700, 400, 200ms の4通りに設定した。

次に、運動負荷の影響を調べるために、周期1000ms と400msにおける運動負荷(手押しに必要な力)を200 および800g の2通り選んだ。

したく、運動系の左右差について調べるために、周期 1000 と 400ms の 2 通りの負荷でタッピング手とキー押し反応手の交代させた。

以上 10 通りの実験を 1 セットとし、前節での実験と同様に全部で 5 セット繰り返した。

被験者としては、正常の運動機能を有する大学生 4 名 (グル-701; T.I., Y.O., H.N., T.M.) とタッピング運動の習熟者と考えられる音楽大学ピアノ科学生 5 名 (グル-702; K.M., T.T., E.M., Y.T., Y.M.) の 2 群の被験者群を使用した。

3.4.2. タッピング周期と位相遷移曲線の関係

図 20 にタッピング周期を変化させた時の位相遷移曲線を示す。同図はオセットの試行の結果である。上段はグル-701 の被験者の例であり、O 型の位相遷移曲線、下段はグル-702 の被験者の例であり、I 型の位相遷移曲線が得られた。グル-702 の被験者の場合、113ms の被験者は、どのタッピング周期においても典型的な I 型の位相遷移曲線が得られ、又側手の反応がタッピングの神経回路にほとんど影響を及ぼさなかつた。一方、2 のよう運動学習を経験したことのあるグル-701 の被験者においては、210ms の O 型の位相遷移曲線を示し、又側手の反応が強く影響を与えて 113ms にいたる。この影響力はタッピング周期に依存していふ。つまりは、400 × 1000ms を比較してみると、400ms では全位相における対側手のキー押し反応へのタッピング運動の強度が 3.17 であるが、1000ms では位相 0.6 以上における強度が 0.43 である。この生理学的意味に

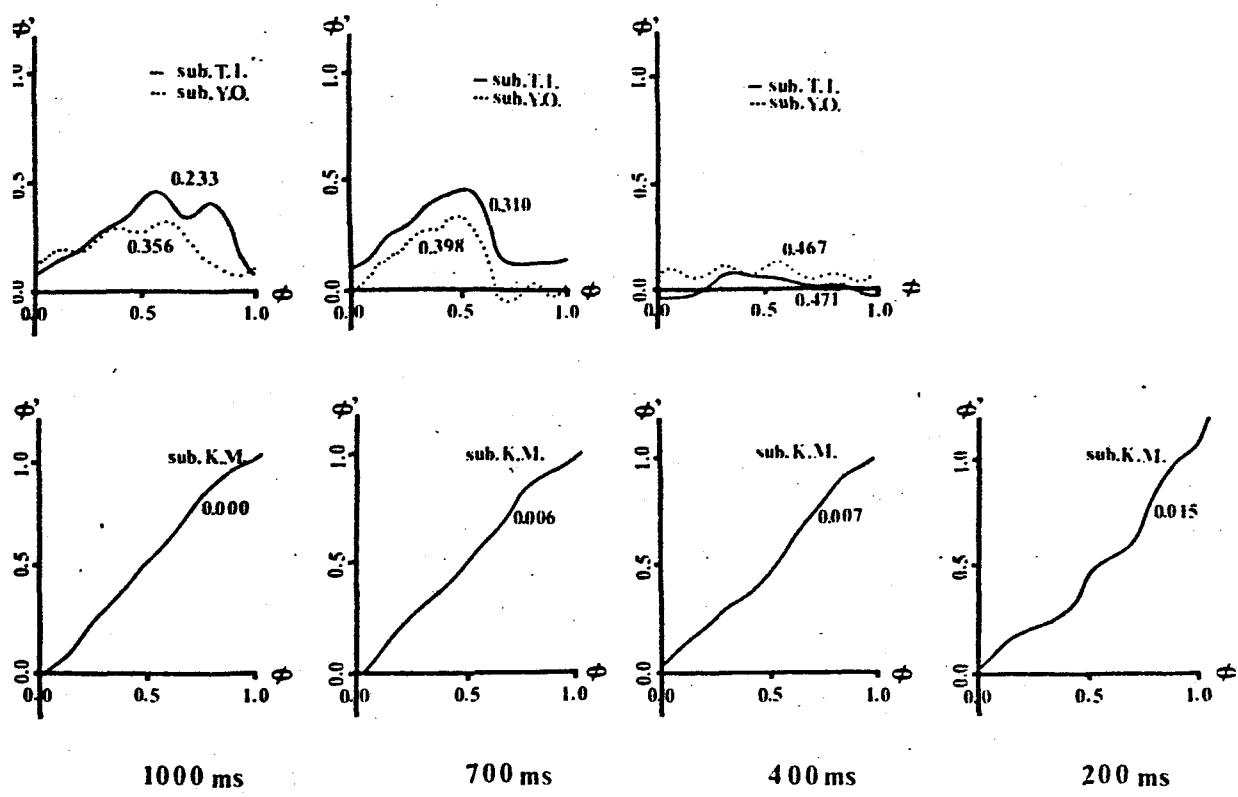


図20. 種々のタッピング周期に対するオセットの位相遷移曲線
運動負荷20g, タッピング肢は右手, 上段はゲル-7°1の被験者,
下段はゲル-7°2の被験者の例を示す。

つりては不明確であるが、コアノ上級者と普通の被験者との17°の違いから、学習経験の差によって左右運動系の分離度、すなはち、左右運動系を制御している神経回路間の結合強度が違うことかと想され、それが位相遷移曲線の上でO型とI型の違いとなって現れることが予想される。次節では、学習効果による型の変化を調べることでこの問題について検討した。

3.4.3. 学習効果による位相遷移曲線の変化

図21はO型を示した被験者の5セットの実験結果を示す。図の左側のグラフに1000および400msのどちらかI型へと変化していく。400msの方が変化が遅いこと、1000msは100msで400msの周期で「タップタップ」という時の方がより強く影響力を及ぼすことわかる。

ところで、学習効果によって右側手の反応時間が遅くなると、特定の位相に顕著な反応時間の短縮がみられるといふことはなく(図22参照)、反応時間の変化が位相遷移曲線の型の変化に影響しているとは考えられない。左右の運動系の相互作用が学習によって予測された結果が型の変化に反映したのかと考えられる。

3.4.4. 運動負荷の変化に対する位相遷移曲線の変化

運動負荷の変化として、反応時のマイクロスイッチの重さを20gから10倍の200gにえた時、被験者の反応時間は約20%程度増えたが、位相遷移曲線における型の変化はみられない。そこで、マイクロスイッチの重さを

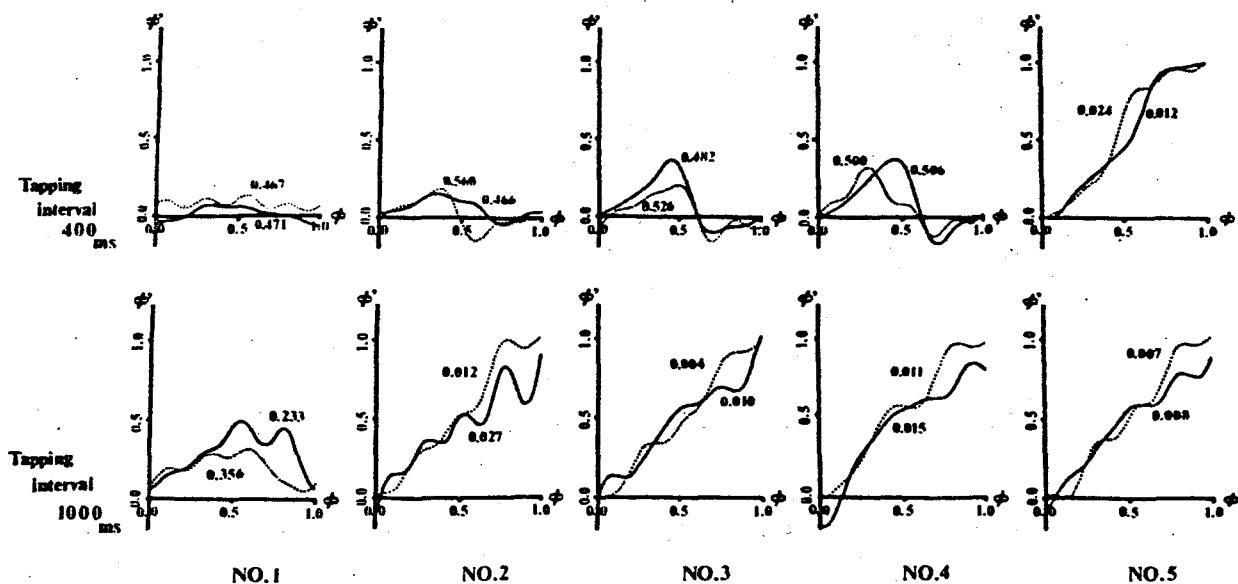


図21. 学習効果による位相遷移曲線の変化

運動負荷 20g. タッピング肢は右手, NO. 1はセット数を表す。

実線は被験者(T.I.)の結果, 破線は被験者(Y.O.)の結果を示す。

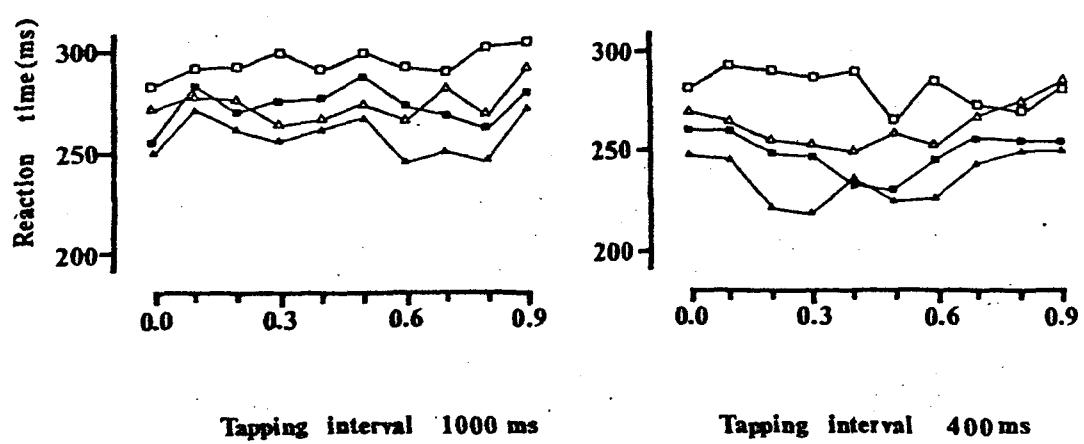


図22. 刺激位相による反応時間の変化

□・■ 13歳児被験者 T.I. のオ1セットとオ5セット,
△・▲ は 15歳児被験者 Y.O. のオ1セットとオ5セット
の結果を示す。

マスク4倍の800gにて要えて実験を行なった。図23(a),(b)に示すように型の変化といふうな顕著な変化はみられない。負荷の増えてI型からO型へと移行することが期待されたのであるが、逆に、負荷を増やすことより典型的なI型に近づくような傾向がみられる。このような運動の変化は、被験者に、より視覚正しく周期で"タッピング"という意図を働きかけ、タッピングをより安定して系統化したようと思われる。

3.4.5 位相遷移曲線における左右差

図23(a),(c)にタッピング運動肢と応答運動肢を交代させた時の位相遷移曲線を示す。オ1セットの結果である。グル-7°2の被験者の場合、右手、左手ともタッピング運動に習熟しており、タッピング間隔の分散は小さくなっている。一方、グル-7°1の被験者では、右手で"今"の手の運動は分散が多く、一定間隔のタッピングの学習に時間を使っている。特に、運の周期のタッピングは難度の大きい。しかし、このような条件のもとで計測される位相遷移曲線は図23(a),(c)に示すように、I型を示す被験者の場合も、O型を示す被験者の場合もほとんど左右同じ特性を示していた。この結果、周期的な出力を出す神経回路の応答特性は左右対称構造をしておりと推察される。図24は第5セットでの左右の位相遷移曲線を示す。グル-7°2の被験者の方が左右対称性が良好であることを示している。

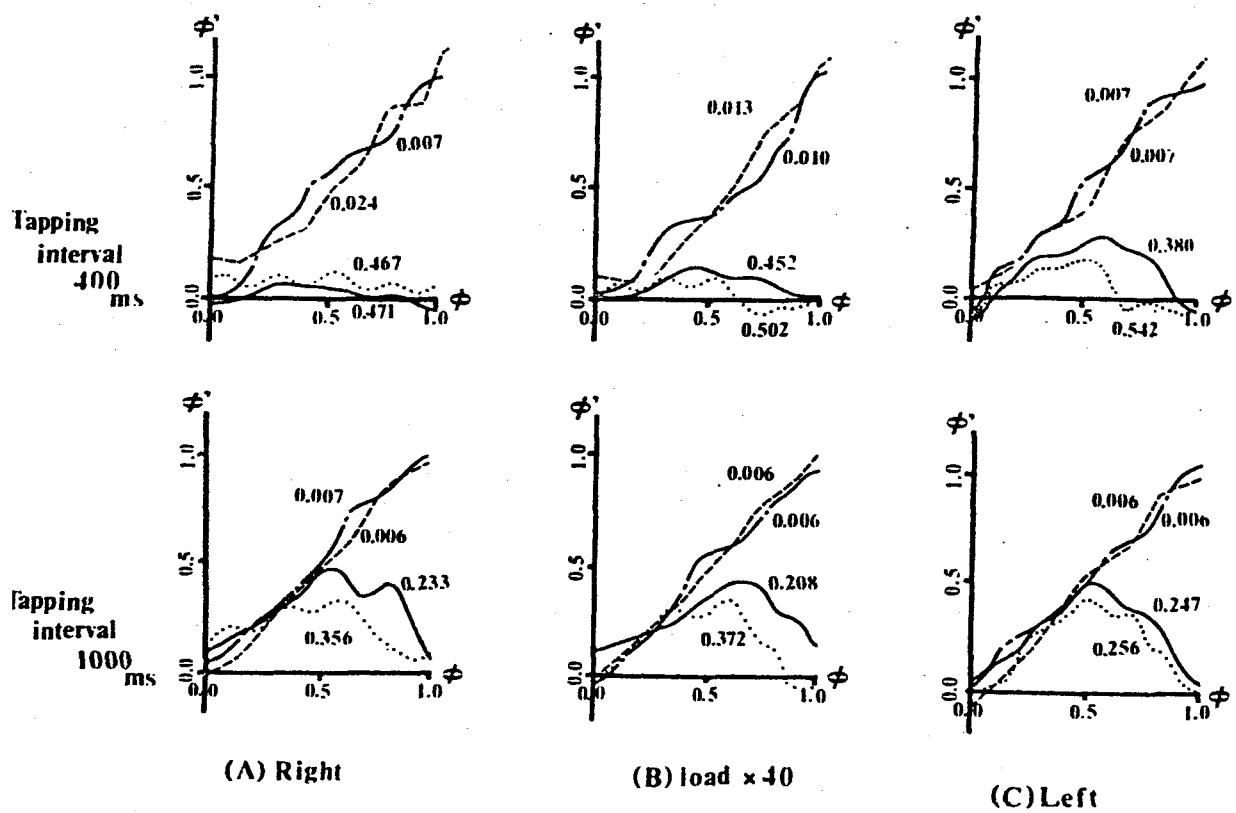


図23. 異なる負荷に対する位相遷移曲線と左右手の位相遷移曲線

(A) 右手タッピング, 負荷 20g. (B) 右手タッピング, 負荷 800g.

(C) 左手タッピング, 負荷 20g.

ケル-701のオーナメントの結果を示す。[T.I.(実線), H.N.(破線),
Y.O.(点線), T.M.(-点鎖線)]

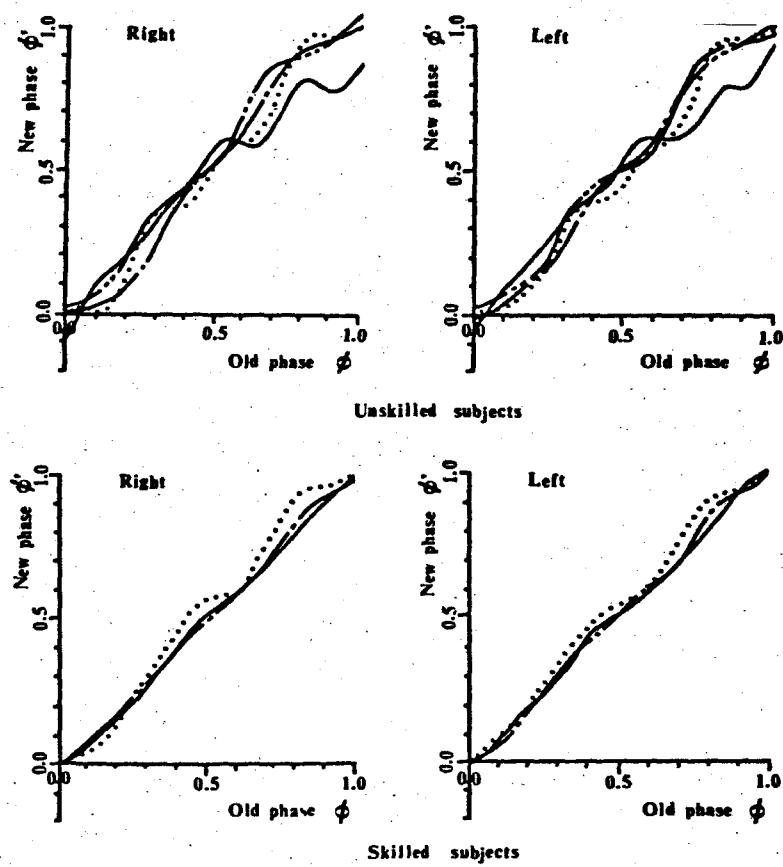


図24. 左右手の位相遷移曲線

上段は グル-7°1, 下段は グル-7°2 の 25セットの結果を示す。

3.5 考察

従来、運動制御系の神経機構を調べる方法としては、神経生理学的手法、脳波や筋電位による方法、あるいは、心理学的手手法などがあった。

本章で、我々が行った位相遷移曲線を計測する方法は、神経回路の構造については不明であるが、機能的な意味での神経回路門の相互作用を明らかにするという点では新たな方法となる。

ところで、はじめより述べたように生理学的には明らかでないが、我々は振動的な出力を出可神経回路が存在するかと考えてゐる。タッピングでは諸課題を遂行させてその位相の変化はみられるが、周期的な変動は少ない、かなり安定な周期的出力を出可神経回路が存在するかと考へられる。そこで、フィンガーラッピングに対する諸課題の影響の強さは、課題を制御する神経回路とフィンガーラッピングを制御する神経回路との相互作用の大きさによるものと考えた。ここで食鳥食により得られる結果をまとめめる。

- 1) キ-押し応答、発声応答、图形識別別の課題はすべて計測された。位相遷移曲線では、キ-押し応答ではO型とI型の両方を得られるが、他の課題はI型のみしか得られない。特に图形識別では典型的なI型が得られる。I型からずれの指標では、キ-押し応答、発声応答、图形識別の順位は逆転する。

- 2) 運動負荷の変化による位相遷移曲線の形の変化は次の如きである。
- 3) 位相遷移曲線の形は、被験者のタッピング運動に対する学習経験によつてかなり異なることが示される。すなはち、熟練者は典型的な1型のみでなく小さなカクたか型、未熟練者はO型を示す被験者が多く全体的にスミカツた。
- 4) 学習によってO型から1型へと位相遷移曲線が移行することが示される。
- 5) タッピング周期の短かい程、O型の位相遷移曲線を示す傾向がある。位相遷移曲線の形はタッピング周期に依存するといふことが示される。
- 6) 左右の手で計測して位相遷移曲線は非常に類似した特性を示した。

ここで、アインガーラッピング反射律動における神経回路と課題反射律動における神経回路との、どのような関係にあるかを考察してみる。

図25 1: このような神経回路の概念モデルを示す。図中の太線は、相互作用を示す。

キ-押し応答、発声応答では図中の相互作用1, 2, 3との存在すると言えらるが、图形識別では相互作用1のみである。結果(1)より、图形識別における典型的な1型が得られることが、この相互作用1は非常に弱いものと考えられる。結果(2)1: 示されたように、運動負荷の増大によつて位相遷移曲線の形が変化しなかつたことから、相互作用3も非常に弱いものと考えられる。何故なら、負荷の増大によつて活動量は

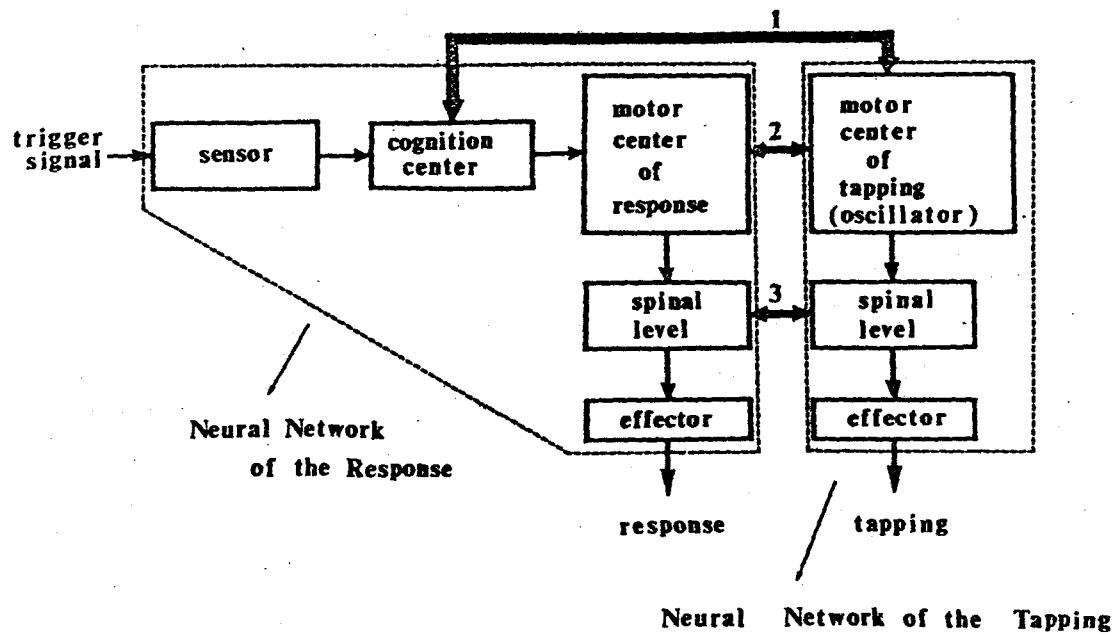


図25. フィンガーテンピングと課題応答を制御していふ
神経回路のプロセスダイアグラム

運動ニユーロン数が増大したり、それが他の運動ニユーロンの活動度が増大したりすることから²⁵され、相互作用3が存在する²⁶。以上の影響が位相遷移曲線の形の変化となって表されるはずである。而後、チ-押し応答、发声応答などの運動課題を制御する神経回路とタッピングを制御する神経回路との相互作用2は²⁷、運動回路と²⁸、²⁹と見られる。チ-押し応答の場合、この相互作用2が非常に強い³⁰。以下、この相互作用2のみを³¹問題とする。

3.2.2 タッピング学習的には刺激強度を増やすことで、位相遷移曲線が³²1型から0型へと変化することが明らかにされて³³いる。結果(3)より、学習経験の差によって相互作用の強さが異なることが示され、又、結果(4)より、学習1³⁴で0型から1型へと移行が示されたことは、学習2³⁵で左右運動系の分離が進み、相互作用が弱まることは解釈できる。又、結果(6)1³⁶で示され、左右の位相遷移曲線の形が类似していることから、周期的出力を出す神経回路の応答特性は、左右とも示す構造を有していると推察される。

3.6 参考

周期的出力を出すヒトの運動的な神経回路の発現³⁷、
フィンガータッピング³⁸とさえ、語音課題³⁹に対する位相遷移曲線を計測⁴⁰した。課題⁴¹は、タッピング運動肢の交叉側肢⁴²はチ-押し応答、

発声応答、图形識別の3課題を設定した。位相遷移曲線の特性の変化からこれら3課題を各小脳削除群と神経回路の、タップ音を削除してみた神経回路に対する影響の強さについて検討した。その結果、神経回路間の機能的な意味での相互作用のレベルは、干-押(アル)答、発声応答、图形識別の順位に強かった。タップ音/周期の変化の実験では、周期が短くなるにつれ、相互作用が入っていた。

又、同一課題に対する学習による $10^{\circ}-\pi-2\pi$ の変化が位相遷移曲線の上では、O型からI型への移行として示された。運動負荷の変化による位相遷移曲線の形の変化はみらなかった。次に、左右の位相遷移曲線の計測から、周期的な出力を出す神経回路の特性は、左右交換しない構造を有していると推察された。

第4章 両手タッピングの位相遷移曲線による解析

1. まとめ

協調のとくに運動を行なうには、使用される筋肉群の運動の空間パターンと時間パターンの制御が円滑でなければなりません。これらの制御は筋肉の神経回路によって行われるのであります。特に周期的な運動のタイミングの制御の場合は、ある種の振動回路が存在することが考えられます。

我々は前章において、この周期的運動の制御の振動的出力を手ての神経回路によて行なわれることと考えて、フィンガータッピングについて位相反応実験を行ない、ある課題の遂行を外乱として与えた時に得られる位相遷移曲線の形から、タッピングの制御によっての神経回路とその課題を制御しての神経回路との相互作用について議論してきた。

ところで、日常の運動の様子を考えてみると、左右の手の運動系の協調動作がよくみられる。タッピングに類似するとすれば、ピアノやライドライターの打鍵などが挙げられるよう。このような左右の運動系の協調による一連の運動はどのように神経回路で制御されるのであるか? 我々はギターや他の楽器が相互作用する神経振動子によって制御されるよう、この両手による協調的なタッピングも相互作用する神経振動子により制御されるのではないかと考えた。

つまり、片手のタッピングを制御する左右小さな振動的な神経回路が両手のタッピング時刻を揃え、この2個の振動子の相互作用が両手タッピングの制御に入り込む役割を果すと考えた。そこで本章では、被験者に両手で一定の位相差を持ったタッピングを行なわせ、約110-オーマンスを評価した。一方、前章で計測した左右の位相遷移曲線から2つの振動的な神経回路の相互作用モデルを仮定し、左右運動系の協調運動について考察した。

2. 手タッピングのハーフオーマンスの評価

実験方法 実験システムの概要、タッピング間隔の学習について、前章で述べた方法と同様である。被験者は「のり法」で、左右手のどちらで「タッピング」間隔1000msの「自発的」インカーテッピングが行なえるように訓練された。この被験者を用いて、両手を併せて「タッピング」を行なわせた（図26参照）。モニタースコ-フ⁰に2つの光信号（右側の光信号は右手のタップ⁰、左側の光信号は左手のタップ⁰）から一定の位相差をもつて周期的に30回提示される。光信号の提示時間は20ms、周期は1000ms、左の光信号の右の光信号に対する提示時間差は、0, 100, 200, … 900msの「< 100ms」と「10段階」を設定した。つまり、左の信号の右の信号に対する位相差は、0.0, 0.1, 0.2 … 0.9の10段階である。この位相差を基準位相差と呼ぶ。被験者はモニタースコ-フ⁰上のこの光信号に合わせてタッピングし、両手でのタッピングを学習してもらう。左手のタップ⁰と右手のタップ⁰に対する位相差が基準位相差から±0.05以上ずれる場合は、「位相差小さく」ある「」と「位相差大きく」の警笛表示がなされ、こうして、光信号の提示によって一定の位相差の両手タッピングが行なえる状態まで練習を行なった。練習終了後、モニタースコ-フ⁰上に練習した10段階の位相差のうちの一つの位相差で光信号が提示される。被験者はまず光信号に合わせて両手でタッピングを行なう。光信号は10回の点滅で終了するが、被験者はそのまま両手のタップ⁰の位相差を保つようにしながら両手タッピングを続けるよう指示された（Self-paced coordinated tapping）。自発的両手タッピングが20回行なわれるとタッピング終了の合図が被験者に送られる。

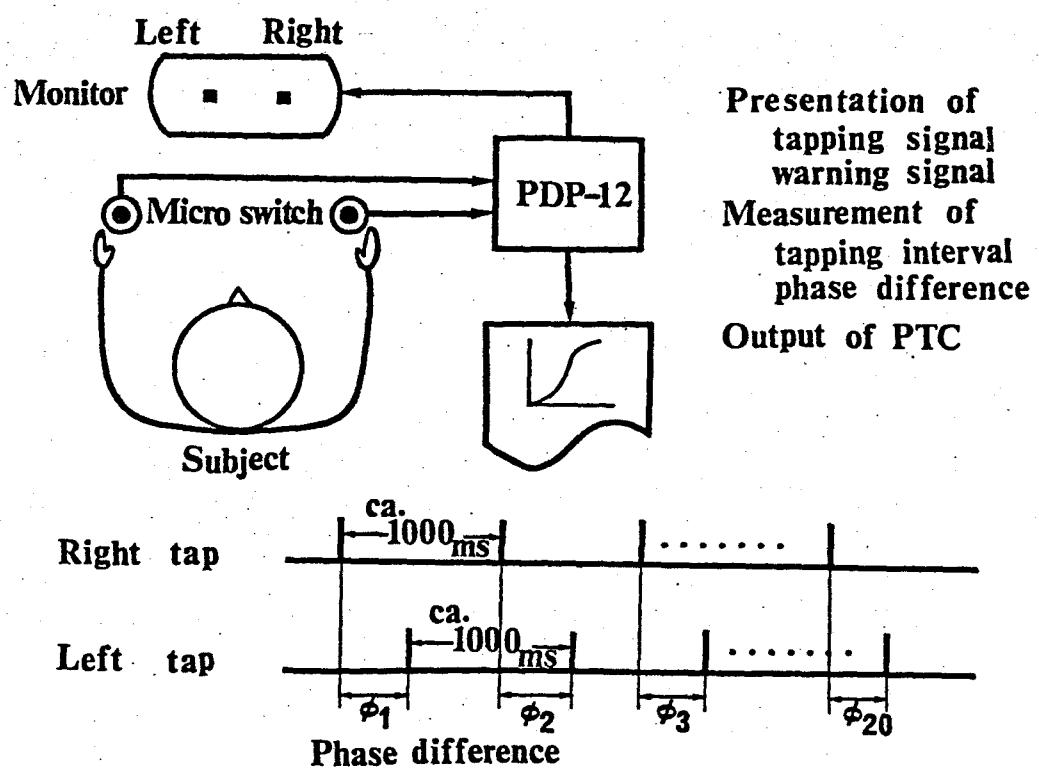


図26. 兩手タッピングの実験システム

0回の自発的タッピングの間の左手のタッパーの右手のタッパーに対する位相差 $\phi_1, \phi_2, \dots, \phi_{20}$ は PDP-12 でオンラインで計算され処理された。10秒毎に位相差の光信号はランダムな順序で提示され、各位相差は4回ずつ提示された。この40回の式 $\phi_i - \phi_{i+1}$ を一セットとし、全部で4セット実験を行った。

自発的両手タッピングの精度で評価されるところ、特定の位相差が110°-フーマンスの良いところがあるから調べるために、自発的両手タッピングを320個(20回のタッパー×4回提示×4セット)の位相差のデータから各位相差へ基準位相差からのずれの平均値(系統誤差)と標準偏差を求めた。

被験者としては正常の運動機能を有する大学生4名(girl-7°1; T.I., Y.O., H.N., T.M.)とタッピング運動からみて両手による協調運動の熟練者と考えられる音楽大学ピアノ科学生5名(girl-7°2; K.M., T.T., E.M., Y.T., Y.M.)の29名被験者群を使用した。被験者は全員右利きであった。

実験結果

図27は各被験者の自発的両手タッピング時の系統誤差差(A_d)と標準偏差(SD)を示す。横軸は基準位相差である。T=7°1, 位相差0.0と1.0は同一である。図から明らかなように、左右手の位相差が0.0と0.5の場合、他の位相差に比べてどちらの被験者girl-7°1より位相差の標準偏差が小さく、運動の110°-フーマンスが良いことがわかる。これ以後、位相差0.0へタッピングを同相リズム110ターン、位相差0.5のタッピングを交互リズム110ターンと呼ぶ。girl-7°2の被験者の方か、girl-7°1の被験者より位相差の標準偏差が小さく予想どおりであった。また系統誤差のグラフからも同相リズム110ターンと交互リズム110ターンの110°-フーマンスが良いことわかる。

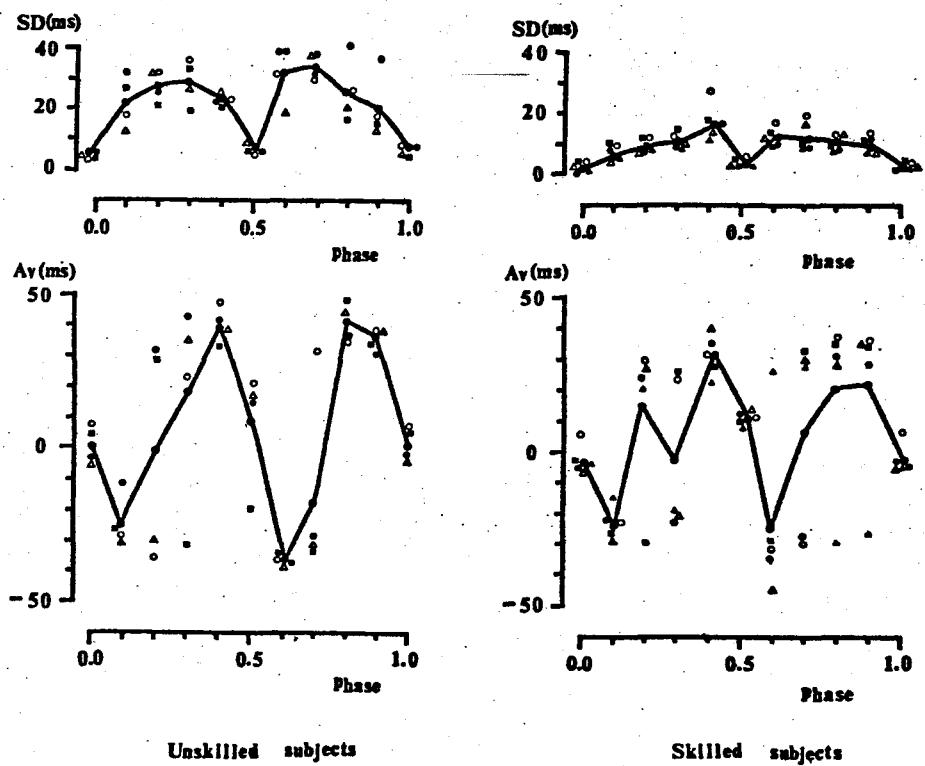


図27. 系統誤差(A_v)とその標準偏差(SD)

$$A_v = \frac{1}{320} \sum_{i=1}^{320} (\phi_i - \bar{\phi}_s), \quad SD = \sqrt{\frac{1}{320} \sum_{i=1}^{320} (\phi_i - \bar{\phi}_s)^2}$$

ϕ_s は規準位相差を表す。

左図はゲル-7°1 (○---Y.O., ●---T.I., ■---T.M., △---H.N.)

右図はゲル-7°2 (○---E.M., ●---T.T., △---Y.M., ▲---K.M., ■---Y.T.)

「ル-7°1の被験者の系統誤差のグラフで説明しよう。されば、基準位相差 0.1 (100ms) のタップピングでは、系統誤差が -30ms である。實際の位相差の平均値は 70ms であり、同相リズムノイターンに近づくに従向かう。逆に、基準位相差 0.9 (900ms) では、系統誤差が 40ms で位相差の平均値は 940ms となり、やはり同相リズムノイターンに近づくに従向かう。全体的に、同相リズムノイターンに近い基準位相差 (0.1, 0.8, 0.9) では位相差が同相リズムノイターンに近づくようになり、交替リズムノイターンに近い基準位相差 (0.3, 0.4, 0.6, 0.7) では交替リズムノイターンに近づくようになる。

数学的と言えば、位相差 0.0 やび 0.5 は、系統誤差の曲線の傾きが負であるとかく、安定な定常状態であると言える。グループ 1 の被験者においては、位相差 0.2 やび 0.75 も又定常状態である。これらは、曲線の傾きが正であるて不安定である。個々の被験者の系統誤差の結果を注意深くみてみると、位相差 0.0 やび 0.5 では、平均値の回りにデータが集まつて、他の位相差(0.2, 0.3, 0.6, 0.7, 0.8, 0.9)では、データは 2 つの分布を示してゐる。例えは、グループ 2 の被験者の位相差 0.7 の場合は、○, △, ▲ の 3 人は正の系統誤差を示しているのに、○○の 2 人の被験者は負の系統誤差を示してゐる。これらのデータの分布は通常の正規分布とは異なつて、むしろ 2 通りの分布持性をもつてゐると考えられる。これは、同相リズム 110 バンド位相差リズム 110 バンドの安定性：起因するかのと思われる。すなはち、位相差 0.7 の両チップビングにおいては、次のような 2 通りの傾向が示されてゐるものと考えられる。

1 人は、位相差 0.5 の位相差リズム 110 バンド：引き寄せる傾向で、この場合は系統

誤差が負になる。他の一つは、位相差 1.0 の 同相リズムパターンに3拍寄せらる化傾向で、この場合は、系統誤差は正になる。

次に時間間隔 1000ms をタッピングする間に指示された時、両手を交互にタップした場合のタッピング間隔の標準偏差を図28に示す。様々の位相差について、時間間隔の標準偏差がどうなるかを示しているのである。図中点線で示したのは、右手のみのタッピング時の時間間隔の標準偏差である。データは各グループの平均値で示してある。グルーピングの被験者では、両手でタッピングした場合と片手でタッピングした場合での、指示されたタッピング間隔の再現性に差異はみられない。グルーピングの被験者では、両手でタッピングした方が"間隔が"正確になることが示された。タッピング間隔の下限標準偏差が一定の位相差で、小さくとか大きとかとなら化傾向は、どちらの被験者グルーピングみらる。

4.3. 2振動子の相互作用によるモデル

フィンガーハンドタッピングを制御する神経機構は生理学的には明らかでない。我々は内因的に周期的出力を出す神経回路が存在するかと考えてゐる。片手のフィンガーハンドタッピングを制御する神経回路の特性は前章で、位相差を多角線で測ることにより調べられた。つまり、被験者にタッピングさせながら発声応答をさせたり、图形識別を行なわせたり、片側肢による手押し応答を行なわせて位相差を計測し、タッピングを制御する神経回路と問題の遂行を制御する神経回路との相互作用を研究した。その結果の一つとして、右手のタッピングを制御する神経回路と左手のタッピングを制御する神経回路とは、ほぼ同一性質を持つことことが明らかにされた。

さて、両手によるフィンガーハンドタッピングを制御する神経回路と片手のフィンガーハンドタッピングを制御する神経回路とは、どのような関係にあるのだろう。

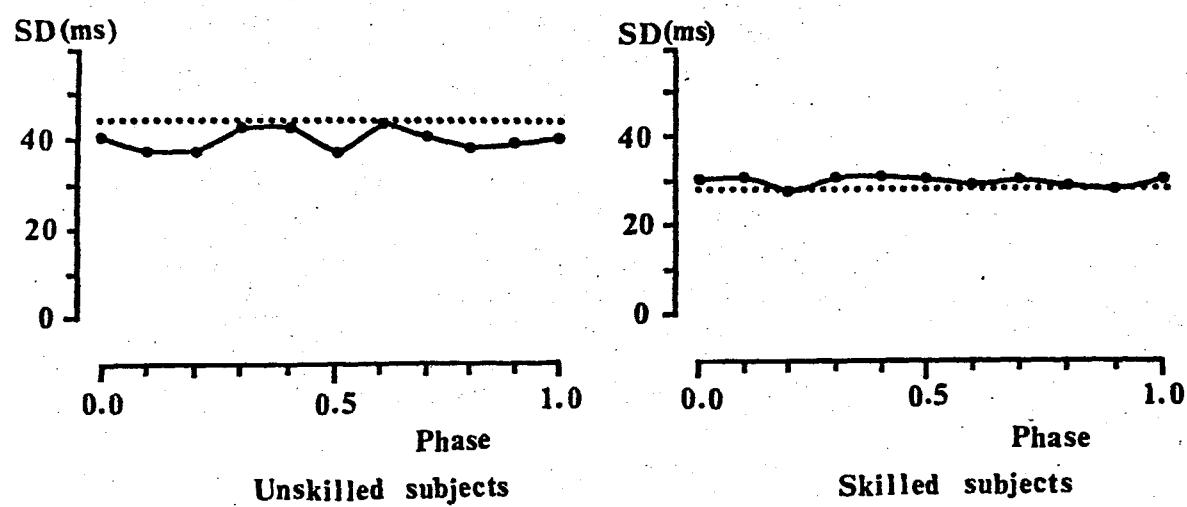


図28. 両手タッピングにおけるタッピング間隔の標準偏差
破線は右手タッピングのみの結果を示す。

両手タッピングで制御する神経回路は片手タッピングで制御する左右の神経振動子の結合系から成り立つ。作業仮説に立て、本節では、左右分けた片手タッピングの位相遷移曲線を用いて2個の振動子の結合系の振舞いを解析する。

複数の振動子の相互作用の位相反応曲線、位相遷移曲線などにより古くから多くの研究がなされてきた。例えば、Perkel (1964) はヘ-スメーカー網膜の発火や周期的な IPSP などのような影響因子から位相反応曲線を予測しているし、又、Stein (1974) は、サルの脛部神経節内にある遊泳筋の運動を制御する神経振動子が前後の振動子と相互作用して、その結果協調した運動を支配していくことを発見した。特に Stein の場合は、後の神経振動子が前の神経振動子への相互作用について位相反応曲線を計測し、その結果から遊泳筋の協調運動を理解しようとした。

これは2個の振動子間に一方向性の相互作用だけがある場合の振動子の結合系の振舞いの解析である。これに対して、Daan & Berde (1978) はゲッ歯類の日周期リズムヘ-スメーカーを構成すると考えられる2個の振動子間に一方向性の相互作用があるとして、その相互作用が仮想的な位相反応曲線で表せるとの振舞いを解析し、日周期リズムのシビュレーションを行なってみる。

さて、我々は、Daan & Berde の方法と左右の片手フィンガータッピングについて得られた位相遷移曲線を用いて、2個の片手フィンガータッピングを制御してみる振動回路の相互作用について見てみる。どのようない位相差の片手タッピングが可能かを調べる。右手のタッピングを制御する振動子 R と左手のタッピングを制御する振動子 L を考える。例えば、右手のタッピングを制御する振動子 R の周期 1000ms で興奮し、その1周期に1度、右手の筋肉系に信号を送り、タッピングを起すものとする。R と L は同じ周期 $T = 1000\text{ms}$ で振動し、R の左手の1回

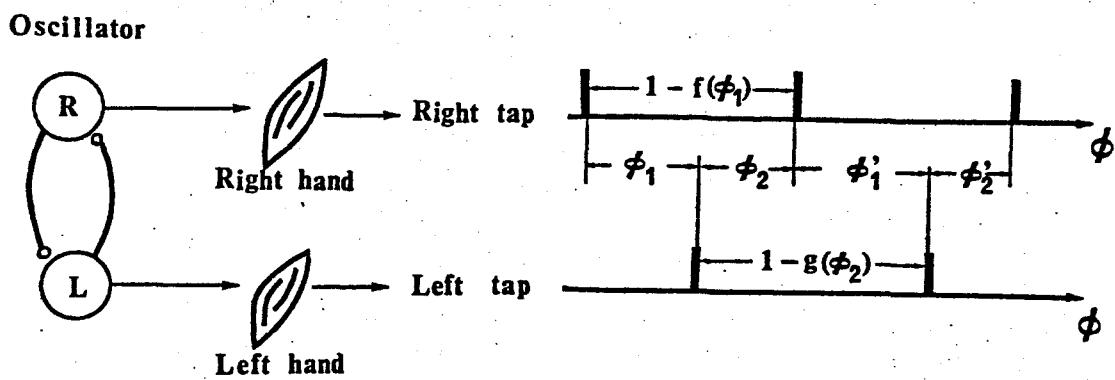


図29. 2振動子の相互作用モデル

キ-押しによる位相反応曲線を $f(\phi)$ 、Lの右手の1回キ-押しによる位相反応曲線を $g(\phi)$ とする。図29は示すように、RとLが同時に振動するときの右手の位相差 ϕ_1 と左手の位相差 ϕ_2 の関係式である。この式は、RとLの相互作用によって次の簡略化式に従って変化する。 $\tau = \tau_0 - \tau_1$ で、 ϕ_1 は右手のタップ度数と左手のタップ度数の間の位相差、 ϕ_2 は左手のタップ度数と右手のタップ度数の間の位相差である。 ϕ'_1 は二つの手のタップ度数の位相差である。

$$\left\{ \begin{array}{l} \phi_3 = 1 - f(\phi_1) - \phi_1 = 1 - (\phi_1 + f(\phi_1)) = F(\phi_1) \\ \phi'_1 = 1 - g(\phi_2) - \phi_2 = 1 - (\phi_2 + g(\phi_2)) = G(\phi_2) \end{array} \right. \quad (1)$$

$(\phi_1 + f(\phi_1))$, $(\phi_2 + g(\phi_2))$ はそれぞれ R, L の位相遷移曲線である。

前章で計測した $f(\phi)$, $g(\phi)$ はそれぞれ左右側股の1回キ-押し応答に対するものであった。本節でのモデルの場合、左右のタップ度数は通常の相互作用によって $f(\phi)$, $g(\phi)$ の適用は必ずしも妥当とは言えないと分かる。振動子 R および L の状態点は突然を除いては各々のリバウンドサイクルによってくるとの仮定のもとで、 $f(\phi)$, $g(\phi)$ を使用した。実験的にこの仮定を証明するため Winfree (1973), Pittendrigh (1974) らによるシミュレーションによる実験結果を用いた。

定常な振動状態では、右手と左手のタップ度数の位相差は一定になるので、 $\phi'_1 = \phi_1$, $\phi'_2 = \phi_2$ となり、定常位相差 (ϕ_{1e}, ϕ_{2e}) は 2π の割合

$$\left\{ \begin{array}{l} \phi_2 = 1 - (\phi_1 + f(\phi_1)) = F(\phi_1) \\ \phi_1 = 1 - (\phi_2 + g(\phi_2)) = G(\phi_2). \end{array} \right. \quad (2)$$

の交点とされる。その定常位相差が安定か不安定かは (1) と (2) の

代入し、 ϕ_1 の漸化式

$$\phi_1' = G(F(\phi_1)) \quad (15)$$

の 平衡点 (ϕ_{1e}, ϕ_{2e}) の 線形化式

$$|G'(\phi_{2e}) \cdot F'(\phi_{1e})| < 1 \quad (16)$$

の 安定性の条件であることを示す。 平衡点 (ϕ_{1e}, ϕ_{2e}) の 曲線の傾きは
 $F'(\phi_{1e}) = 1/G(\phi_{2e})$ となるので、 安定平衡点 ϕ_{1e} は $F(\phi_1)$ の 傾き $G(\phi_2)$ は 水平に近くなるので、 安定、不安定の判別は 図式的に 容易に 可能である。

4.4. 2振動子の相互作用モデルによる両チップングの解析

さて、 実際にある被験者(E.M.)による試行の左右の位相遷移曲線を 図30a に、 それから求めた(3)(4)のグラフを 図30b に 示す。 図30b からわかるように 4つ 平衡点 がある。 平衡点の安定性は (6)式の条件で決まり、 この被験者の場合、 位相差 $\phi_1 = 0.45, 0.95$ の 両チップングが 安定となり、 $\phi_1 = 0.32, 0.70$ の 両チップングが 不安定となる。 他の被験者の5試行の位相遷移曲線から、 このような安定平衡点、 不安定平衡点の 分布を調べたところ、 平衡点の位相差 ϕ_1 が、 $0.95 \leq \phi_1 < 0.05$, $0.05 \leq \phi_1 < 0.15$, $0.15 \leq \phi_1 < 0.25 \dots 0.85 \leq \phi_1 < 0.95$ の 10 区間のうちに入っているのが観察される。 ここで、 i番目の被験者について、 $m_i(\phi_1')$, $n_i(\phi_1')$ を 2つの数値で 表す。 $m_i(\phi_1')$ は 平衡点の座標が i番目の区間、 すなはち $[\phi_1'/10 - 0.05, \phi_1'/10 + 0.05)$ に 存在する 安定平衡点の 10 数である。 同様にして $n_i(\phi_1')$ を 不安定平衡点の 10 数とする。

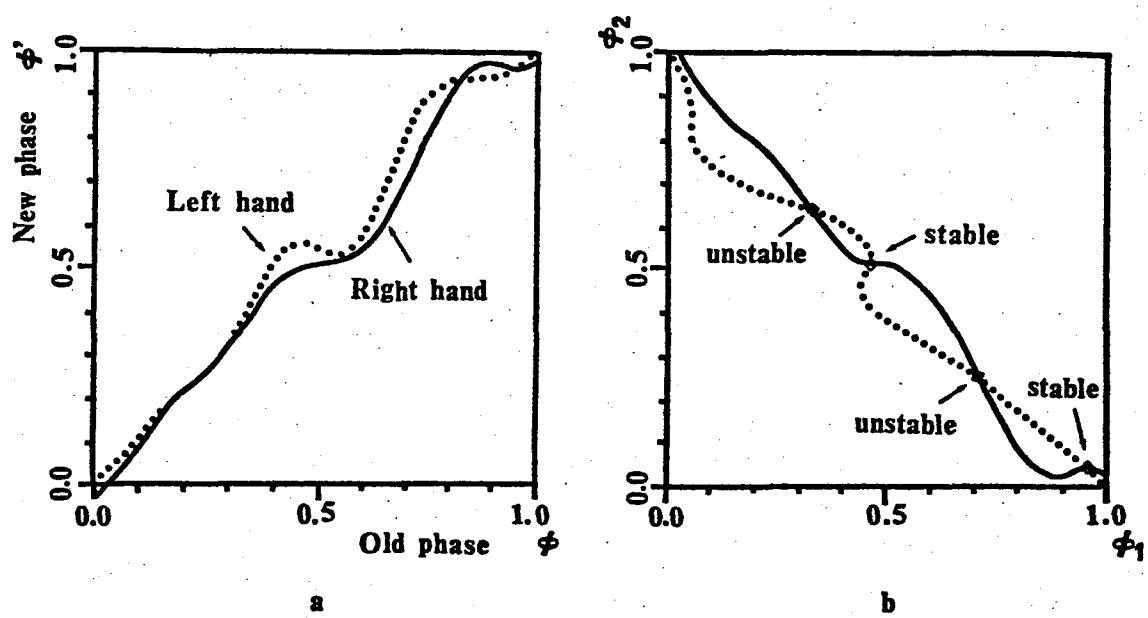


図30. 左右の位相遷移曲線による平衡点の図式解法

各ゲル-7°ごとにテータを平均すると、各ゲルのゲル-7°の安定平衡点、不安定平衡点の分布を次のようすである。

$$m_u(j) = \frac{1}{4} \sum_{k=1}^4 m_k(j), \quad m_u(j) = \frac{1}{4} \sum_{k=1}^4 n_k(j)$$

$$m_s(j) = \frac{1}{5} \sum_{k=1}^5 m_k(j), \quad m_s(j) = \frac{1}{5} \sum_{k=1}^5 n_k(j)$$

T=T'で m_u, n_u は $\gamma''L-7^{\circ}1$ の被験者の安定平衡点、不安定平衡点の分布を表す。
 m_s, n_s は $\gamma''L-7^{\circ}2$ の同様の分布である。

これらの結果を図3/1に示す。実線は安定平衡点、破線は不安定平衡点の分布を示す。これらの結果より、両方の被験者ゲル-7°共に、位相差0.0と0.5は安定平衡点が多く、位相差0.2, 0.3, 0.7 および0.8は不安定平衡点が多かった。又、両方の被験者ゲル-7°のデータを比較してみると、 $\gamma''L-7^{\circ}2$ の被験者では、安定平衡点が1倍とんど位相差0.0と0.5が集まっているが、 $\gamma''L-7^{\circ}1$ の被験者ではその分布はかなりのばらつきがある。不安定平衡点は $\gamma''L-7^{\circ}2$ の被験者の方がゲル-7°1の被験者に比べて、左右の位相差移曲線の対称性が良いこと(図24参照)を反映して多いと見受けられる。位相差0.0と0.5は安定平衡点が多く分布することが、これら位相差の両子タッピング(同相リズム/1拍と反相リズム/1拍)が他の位相差両子タッピングに比べて行なう易いと考えられる。

これらの結果は平衡点の分布のみを示したものなので、次に各平衡での安定度について検討を加える。

平衡点での(1)式、(2)式の線形近似の固有値を調べることによって、各平衡点の安定度、不安定度を調べることとする。たとえば、状態点が平衡点で微少な振動を受ける時、すなはち

$$\Phi_i = \Phi_{i0} + \delta$$

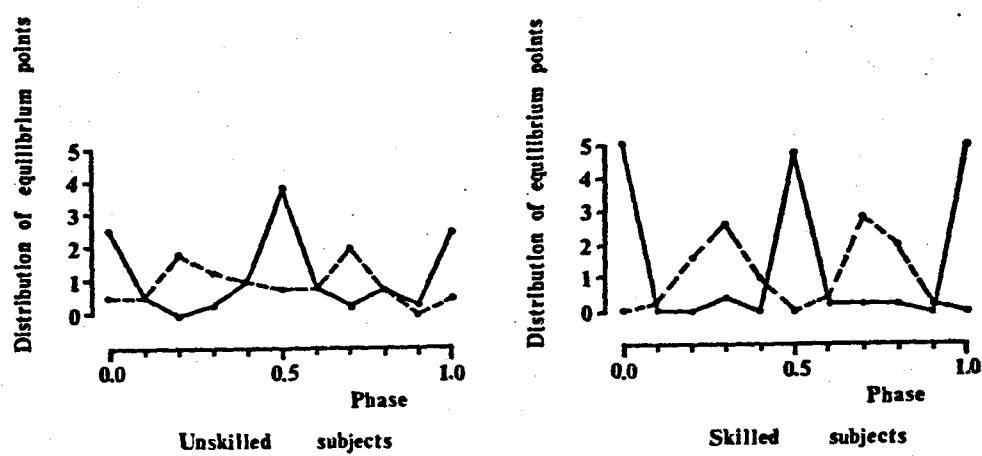


図31. 左右の位相遷移曲線から計算した平衡点の分布
実線は安定平衡点、破線は不安定平衡点の分布を示す。
左図はゲル-7°1, 右図はゲル-7°2の被験者の結果を示す。

α時，2振動子の相互作用によつて、次回の ϕ_1 は

$$\phi_1 = \phi_{1e} + (G' \cdot F') \delta$$

のように表わされる。そのため、 $|G' \cdot F'|$ は微少振動子の増幅度を示す指標と考えることとする。また $|G' \cdot F'|$ が1より小さければ“平衡点は安定で”，0に近づけば“近づく程、その安定度が高くなる”。逆に、 $|G' \cdot F'|$ が1より大きければ“大きくなる程、その不安定度が増加する”。もし $|G' \cdot F'|$ が1と等しければ“その平衡点は中立安定である”。これらの結果を考慮して、各平衡点の安定度、不安定度を示す評価関数として次の式を定義する。

$$c_i = 10 (|G'(\phi_{ie}) \cdot F'(\phi_{ie})| - 1) \quad (7)$$

ただし、 i は i 番目の平衡点を示す。

(7)式より、安定平衡点に対しては c_i が負となり、不安定平衡点に対しては c_i が正となることわかる。ちなみに c_i が減少すれば“程、安定度が増加し、 c_i が増加すれば”程、安定度が減少する。

次に各位相の安定度を評価するのに、位相中の安定度を次のよう定義する。

$$C(\phi) = 1/n \sum_{i=1}^n c_i \quad (8)$$

たゞ、nは ϕ の座標が $(\phi - 0.05, \phi + 0.05)$ における平衡点の個数である。例えば、ゲル-70の被験者の場合、位相0.5において、安定平衡点が15個、不安定平衡点が3個存在する。そのため、位相0.5の安定度 $C(0.5)$ は平衡点15個1個の安定度 c_i から次のよう求められる。

$$C(0.5) = 1/18 \sum_{i=1}^{18} c_i$$

ゲル-7°1とゲル-7°2の被験者に対するこれらの結果を図32の下段に示す。比較の為に、図27に示した両手タッピング時における系統誤差の標準偏差を図32の上段に示す。

我々は両手タッピング時の神経振動子の結合系によって制御されていると考えた。高々安定度を示す位相差での両手タッピングは他の位相差での両手タッピングに比べ、容易に行なえ、かつ精度が高いと考えられる。

これらの結果から位相差0.0の同相リズムノットンと位相差0.5の交替リズムノットンが他の位相差の両手タッピングに比べ、安定ノットンであることわかる。

4.5 考察

両手を握ってのタッピング"か"と"のよろこび神経機構"との間に何が生理性的には明らかになっていない。前節まで述べたように、我々は2つの振動子の結合系のモデルを考え、左右各半身に計測され位相差移曲線を得て、このよろこびの振舞について解釈して見た。図32に示した結果から、安定度の多いのグラフが標準偏差の変化のグラフとよく一致していふのがわかるであろう。

ところで、2つの被験者ゲル-7°の結果を詳細にみてみると、ゲル-7°1の被験者の安定度曲線の最大値がゲル-7°2の被験者の最大値よりも大きく、最小値についても、ゲル-7°2の被験者の最小値よりも小さくなる。

したがつて、ほとんどの全ての位相で、ゲル-7°1の被験者の安定度曲線のオレハルからの変位がゲル-7°2の被験者の約5%大きくなっている。

以上の結果は2振動子の相互作用の強さの増加関数に沿つて、2つの

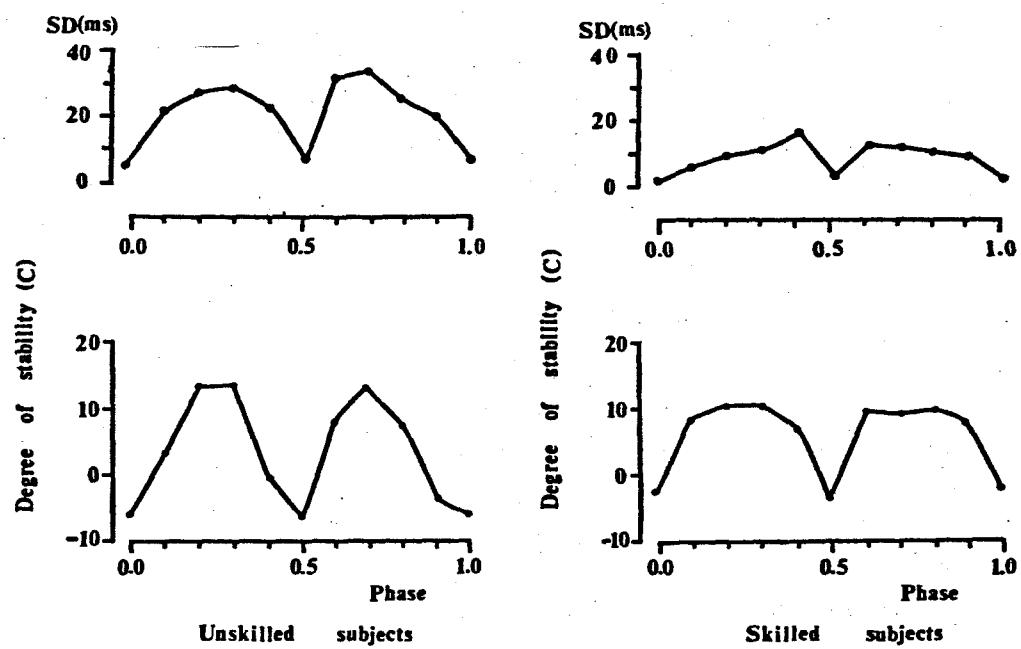


図32. 安定度指標(C)と位相差の標準偏差(SD)の対比
左図は $\gamma^{\circ}IL-7^{\circ}1$, 右図は $\gamma^{\circ}IL-7^{\circ}2$ の未経験者の結果を示す。

これらの結果は、グルーフ⁰1の被験者において、左右2つの振動子の相互作用がグルーフ⁰2の被験者における相互作用より強いことを示唆している。

3.4.3節において、左右の神経回路の相互作用が学習によって強められ、その結果位相遷移曲線の0型から1型への変化となることが示された。グルーフ⁰2の被験者の方か習熟者であるので、2振動子の結合モデルから右側験者の方か左の相互作用が弱いという傾向が示された。これらの結果より、両手タッピングが左右どちらか片手タッピングを制御している神経振動子の結合系によって制御され、両手の振動子の相互作用が学習によって強められると言えられる。

勿論、両手タッピングの神経支配を考える時、学習直前の下地過程(3.3)な位相差でのタッピングの容易さが正確にどのようになることか、2振動子の結合モデルよりも左右の位の神経支配を考慮しないことはないだろう。

4.6 まとめ

左右両方の手で一定の位相差のあるタッピングを行なめると、位相差0.0の同リズム(10ターン)と位相差0.5の交替リズム(10ターンの10-フォーマンス)が良いことが知られた。このモデルとして、左右の振動的な神経回路の相互作用系を考へ、片手タッピングの神経回路で得られた位相遷移曲線から、この系の定常状態における振舞の解析を行なった。その結果、同リズム10ターンおよび交替リズム10ターンが安定になることが多いことが示された。この結果は、両手タッピングにおける10-フォーマンスの良い位相とよく一致しているので、両手タッピングを制御する神経回路には、左右の片手タッピングを支配する2つの神経振動子の相互作用系が組み込まれていることが示唆された。

第5章 結 言

この章では、この研究によって明らかにされたことを要約して述べる。

第2章では タッピング時間間隔の分散と注目して、 $200\text{ms} \sim 1000\text{ms}$ の間のタッピング時間間隔の平均値とその標準偏差の関係と種類の異なる領域が存在することを明らかにした。すなはち、標準偏差がタッピングの平均時間間隔の増加に伴ない平方根的に増加する領域($200 \sim 350\text{ms}$)、平均時間間隔の増加に比して標準偏差の増加が著しく小さい、または一定となる領域($350 \sim 500\text{ms}$)、平均時間間隔の増加に伴ない標準偏差が直線的に増加する領域($500 \sim 1000\text{ms}$)である。次にアインガーテッピングの神経機構の概念モデルを提起して、この3つの時間間隔と標準偏差の関係が2つの制御機構を反映したことであることが示された。一つはフィードフォワード制御機構であり、この機構のまとめは、記憶されている時間間隔自身のまとめと神経信号伝導時間のまとめによる時間間隔のまとめとか加算される結果、時間間隔(T)と標準偏差(SD)の間には $SD = \sqrt{KT + KT}$ の関係の成立ることが明らかである。
 一つはフィードバック制御機構であり、この機構のまとめは、記憶されている時間間隔自身のまとめと時間間隔のまとめとなって現れるもので $SD = KT$ の関係の成立ことが明らかにされた。
 さらにタッピング時の脳波の測定から、非常に短い時間間隔(250ms)と長い時間間隔(750ms)とで制御機構の異なることが示唆された。

第3章では、周期的出力を出す二つの振動的な神経回路の発現にて、フィンガーナッピングをとらえ、種々の課題で“位相反応実験を行ふ”。その結果得られた位相遷移曲線から、ナッピング運動を制御する神経回路と、課題を制御してその神経回路との相互作用について考察された。

課題としては、ナッピング運動肢の右側肢のチ押し応答、发声応答、图形識別の3課題を設定した。その結果、神経回路間の機能的な意味での相互作用のレベルは、チ押し応答、发声応答、图形識別の順に強くなることが明らかになった。ナッピング周期の変化の実験では、周期が短くなるにつれ相互作用が大きくなることが示された。一方、運動負荷の変化における相互作用の変化がみられない。また、同一課題に対する学習によって位相遷移曲線のO型から1型への移行が示され、学習によって神経回路間の相互作用が弱くなることが明らかになった。最後に左右の位相遷移曲線の計測から、周期的の出力を出す神経回路の特性は左右対称構造を有することが明らかにされた。

第4章では、両手による協調的なナッピングが考察された。最初に左右両手の手で一定の位相差のあるナッピングを行なうと、位相差0.0の同リズムナットンと位相差0.5の交替リズムナットンの10-オーマンスが“良”ことが明らかにされた。次にこのモデルとして、左右の振動的な神経回路の相互作用系を考え、左右それぞれのナッピングで得られた位相遷移曲線を用いて、この系の定常状態における振舞が解析された。その結果、同リズムナットンより交替リズムナットンが“安定”になることが示され、両手ナッピングを制御する

神経回路には、左右の片チックピングを支配する 7 つずつの神経回路の
相互作用系が組み込まれていることが明らかにされた。

謝　辞

本研究の遂行ならびに本論文の作成において、終始熱心な御指導と御便宜を賜わった大阪大学基礎工学部生物工学科 鈴木良次教授に心より謝意を表します。また、本論文の作成において有意義な御意見を頂いた大阪大学基礎工学部生物工学科 大沢文夫教授ならびに塙原伸晃教授に心から感謝いたします。

さらに研究を進めるに際し、断えず有益な御討論を頂いた大阪大学基礎工学部生物工学科 佐藤俊輔助教授、末田統助手、小林欣吾助手、真島澄子技官ならびに鈴木研究室の大学院生諸氏に対し深くお礼申し上げます。また、人間科学部 宮本健作教授には、脳波測定に際し、貴重な御助言を頂きました。深くお礼申し上げます。

第2章の研究は寺尾 豊氏(現 西宮東高校教諭)との共同研究であり、第3章、第4章の研究は大阪大学基礎工学部生物工学科大学院生 川入光男氏との共同研究の成果である。両氏の御尽力に対し深く感謝いたします。

終りに研究上の御便宜を賜わり、御激励下さいました富山大学工学部 八木 寛教授、若林嘉一郎教授ならびに富山大学教育学部 杉本啓郎助手に深謝いたします。

参考文献

- Babinski,J.: Sur le rôle du cervelet dans les actes volitionnels nécessitant une succession rapide de mouvements (Diadococinésie). Rev. neurol., 10, 1013-1015 (1902)
- Bartlett,N.R. and Bartlett,S.C.: Synchronization of a motor response with an anticipated sensory event. The Psychological Review, 66, 203-218 (1959)
- Bouisset,S. and Lestienne,F.: The organization of a simple voluntary movement as analysed from its kinematic properties. Brain Research, 71, 451-457 (1974)
- Daan,S., and Berde,C.: Two coupled oscillators; Simulations of the circadian pacemaker in mammalian activity rhythms. J. theor. Biol., 70, 297-313 (1978)
- Dijkstra,Sj. and Van del Gon,J.J.D.: An analog computer study of fast isolated movements. Kybernetik, 12, 102-110 (1973)
- Getty,J.D.: Counting process in human timing. Perception and Psychophysics, 20, 191-197 (1976)
- Getty,J.D.: Discrimination of short temporal intervals, A comparison of two models. Perception and Psychophysics, 18, 1-8 (1975)
- Grillner,S. and Zangger,P.: On the central generation of locomotion in the low spinal cat. Exp. Brain Res., 34, 241-261 (1979)
- Hillyard,S.A.: Relationships between the contingent negative variation and reaction time. Physiology and Behavior, 4, 351-357 (1969)

Hoyle,G.: Exploration of neuronal mechanism underlying behavior in insects, Neural Theory and Modeling. 346-376, Ed. by Reiss, R.F., Stanford University Press, Stanford, California (1964)

伊藤正男：神経中枢の運動制御，真島，猪飼編「生体の運動機構とその制御」pp. 202-227，杏林書院(1972)

Kawato,M., and Suzuki,R.: Biological oscillators can be stopped. Topological study of a phase response curve. Biological Cybernetics, 30, 241-248 (1978)

Keele,S.W.: Movement control in skilled motor performance. Psychological Bulletin, 70, 387-403 (1968)

Keele,S.W. and Posner,M.L.: Processing of visual feedback in rapid movements. J. Exp. Psychology, 77, 155-158 (1968)

Kennedy,D. and Davis,W.J.: Organization of invertebrate motor systems. In "Handbook of physiology. vol.1" Ed. by Kandel, E.R. pp.1023-1087, Bethesda, Maryland, American Physiological Society (1977)

Luria,A.R.: Frontal lobe syndromes. In "Handbook of Clinical Neurology, vol.2" Eds. by Vinken,P.J. and Bruyn,G.W. pp. 725-757, North-Holland, Amsterdam (1969)

McAdam,D.W. and Seales,D.M.: Bereitschaftspotential enhancement with increased level of motivation. Electroencephalogram and clinical Neurophysiology, 27, 73-75 (1969)

Michon,J.A.: Studies on subjective duration. 1. Differential sensitivity in the perception of repeated temporal intervals. Acta Psychologica, 22, 441-450 (1964)

Michon,J.A.: Tapping regularity as a measure of perceptual motor load. Ergonomics, 9, 401-412 (1966)

Michon,J.A.and Van der Valk,N.J.L.: A dynamic model of timing behavior. *Acta Psychologica*,27,204-212 (1967)

Michon,J.A.: Programs and "Programs" for sequential patterns in motor behavior. *Brain Research*,71,413-424 (1974)

中村隆一：小脳疾患・110-キンソニスムの反復交互動作障害，
神経進歩 第19巻 4号, pp 712-724 (1975)

Pearson,K.G.and Iles.J.G.: Nervous mechanisms underlying inter-segmental coordination of leg movements during walking in the cockroach. *J. Exp. Biol.*,58,725-744 (1973)

Perkel,D.H.,Schulman,J.H.,Bulloch,T.H.,Moore,G.P.and Segundo, H.P.: Pacemaker neurons; Effect of regularly spaced synaptic input. *Science* 145,61-63 (1964)

Pinsker,H.M.: Aplysia bursting neurons as endogeneous oscillators. 1.Phase response curves for pulsed inhibitory synaptic input. *J. Neurophysiol.* 40,527-543 (1977)

Pittendrigh,C.S.and Bruce,V.G.: An oscillator model for biological clocks. In "Rhythmic and synthetic processes in growth" Ed. by Rudnick,D. pp.75-109, Princeton,N.J., Princeton University Press (1957)

Pittendrigh,C.S.: Circadian oscillations in cells and the circadian organization of multicellular systems. In "The Neurosciences; Third study program." Eds. by Schmitt,F.O. and Worden,F.G. pp.437-458, The MIT Press (1974)

Reiss,R.F.: A theory and simulation of rhythmic behavior due to reciprocal inhibition in small nerve nets. *Proc. AFIPS Spring Joint Computer Conference*, 171-193 (1962)

- Shik,M.L.and Orlovsky,G.N.: Neurophysiology of locomotor automatism. Physiological Reviews 56,465-501 (1976)
- Stark,L.: Neurological control systems, Studies in bioengineering. Plenum Press, New York (1968)
- Stein,P.S.G.: Neural control of interappendage phase during locomotion. Amer. Zool.,14,1003-1016 (1974)
- Stent,G.S.,Kristan,W.B.,Friesen,W.O.,Ort,C.A.,Poon,M.and Calabrese,R.L.: Neural generation of the leech swimming movement. Science,vol,200,23,1348-1357 (1978)

寺尾豊,山西潤一,鈴木良次: タッピングのタイミング機構について,
第16回日本ME学会大会論文集, za-c-3 (1977)

- Treisman,M.: Temporal discrimination and the indifference interval; Implications for a model of the "Internal clock". Psychological Monographs 576,1-31 (1963)

塙原進: 人の動作におけるアートリーリバウンドとアートフォワード,
真島,猪飼編「生体の運動機構とその制御」,pp231-251.
杏林書院 (1972)

- Van der Gon,J.J.D.and Thuring,J.Ph.: The guiding of human writing movements. Kybernetik,2,4,145-148 (1965)

- Walter,W.G.,Cooper,R.,Aldridge,V.J.,McCallum,W.C.and Winter,A.L.: Contingent negative variation; An electric sign of sensorimotor association and expectancy in the human brain. Nature,203,380-384 (1964)

- Wertham,F.I.: A new sign of cerebellar disease. J.nerv.ment.Dis. 69,486-493 (1929)

Winfree,A.T.: Integrated view of resetting a circadian clock.
J. theor. Biol.,28,327-374 (1970)

Winfree,A.T.: Resetting the amplitude of Drosophila's circadian chronometer. J. Comp. Physiol.,85,105-140 (1973)

Winfree,A.T.: Resetting biological clocks. Physics Today 28,
34-39 (1975)

Winfree,A.T.: Phase control of neural pacemakers. Science
197,761-763 (1977)

Wing,A.M.and Kristofferson,A.B.: The timing of interresponse intervals. Perception and Psychophysics,13,455-460 (1973)

Wing,A.M.and Kristofferson,A.B.: Response delay and the timing of discrete motor responses. Perception and Psychophysics,
14,5-12 (1973)

山西潤一,川人光男,鈴木良次: 位相反応曲線による"インガーナッピング"の神経機構の解析, 第17回日本ME学会大会論文集, 2-E-5 (1978)

山西潤一,川人光男,鈴木良次: ヒトの"インガーナッピング"の位相遷移曲線の計測, 日本ME学会誌 医用電子と生体工学, 第17卷 4号, 271-277 (1979)

Yamanishi,J.,Kawato,M.and Suzuki,R.: Studies on human finger tapping neural networks by phase transition curves.
Biological Cybernetics.33,199-208 (1979)

Yamanishi,J.,Kawato,M.and Suzuki,R.: Two coupled oscillators as a model for the coordinated finger tapping by both hands. Biological Cybernetics. (1980) in Press

山西潤一, 川入光男, 鈴木良次 : ヒトの両手タッピングの位相遷移曲線
による解析. 日本ME学会誌 医用電子と生体工学 (投稿中)

Yamanishi,J.,Kawato,M.and Suzuki,R.: Studies on the coordinated
finger tapping by both hands with phase transition curves.
Neuroscience Letters, Supplement (1980) in Press