

5 : 3 ポリリズム・タッピングで採用される学習ストラテジー

田島 誠*・調枝 孝治**

*広島大学大学院生物圏科学研究科

**広島大学総合科学部

Learning strategies adopted in 5 : 3 polyrhythmic tapping

Makoto TAJIMA* and Koji CHOSHI**

**Graduate School of Biosphere Sciences, Hiroshima University,
Higashi-Hiroshima 739, Japan*

***Faculty of Integrated Arts and Sciences, Hiroshima University,
Higashi-Hiroshima 739, Japan*

Abstract : Recently, bimanual coordination tasks with temporal constraints, such as polyrhythmic tapping, have been approached from two theoretically distinguished viewpoints. These are cognitive and dynamical approaches. However, there are situations that can not be explained by only one of the two approaches. The purposes of this study were to identify learning strategies adopted by subjects in the production of 5:3 polyrhythm, and to clarify the timing mechanisms of coordinating two hands by integrating the two approaches. Ten out of twenty subjects could learn 5 : 3 polyrhythmic tapping in a synchronized task and reproduce it in a test task. Learning strategies adopted by subjects were identified by deviations of observed interresponse intervals (IRIs) from expected IRIs and correlations between the adjacent IRIs. Results showed that an integrated chained organization was adopted in the first half of one cycle, whereas an integrated hierarchical organization was adopted in the last half of the same cycle. This indicated that one cycle of polyrhythm was separated into two units, and was performed with the two different strategies. These strategies were discussed in terms of a cognitive attentional perspective and a dynamical entrainment property of coupled nonlinear oscillators.

Key words : Bimanual coordination, Integrated chained organization, Integrated hierarchical organization, Attention, Entrainment

緒 言

リズム運動は系列情報を学習により習得、保持、組織化していくものである。これまでのリズム運動研究¹⁷⁻¹⁹⁾では、単純なリズムの習得と保持レベルに関する検討が中心であったが、それだけ

では複雑なリズム運動を学習していく上での組織化レベルを明らかにできない。タイピングやピアノ演奏のような両手の運動を協応させる活動は、単一なリズム運動ではなく、複数のリズム運動が同時に存在し、それらを同時に遂行していくことを要求する。最近では、このような両手協応を必要とするリズム運動を研究するための課題として、ポリリズム・タッピング (polyrhythmic tapping) が用いられている。この課題を正確に遂行するためには、2つ (あるいはそれ以上) の異なるリズム系列を左右の手や足などで同時に産出することが必要である。一般に、2つのリズム系列が同一、または一方のリズム系列の時間インターバルが他方のリズム系列の時間インターバルの整数倍になっている場合 (例えば、1 : 1, 2 : 1, 3 : 1 など) は、並行に (左右各手で1系列ずつ) 2つのリズム系列を同時に産出できる。しかし、2つのリズム系列がポリリズム (例えば、4 : 3, 5 : 3 など) のように各リズム系列の時間インターバルが互いに整数倍でない場合には、両手間に相互干渉が生じるため、同時に、しかも正確に産出することは非常に困難になる²⁾。

このように、ポリリズム・タッピングのようなタッピング位置が時間的に拘束された両手パフォーマンスの相互干渉の存在については一般的に認められているが、これらの相互干渉の発生する原因と両手の位相関係は明らかにされていない¹⁶⁾。現在の段階では、ポリリズム・タッピングといった行為は中枢機構に源を発していると考えられる認知的なアプローチと、タッピングする両手における神経運動システムのダイナミックな特性から行為が発生すると考えるダイナミックなアプローチから、別々に研究が進められている。そして、両手パフォーマンスの相互干渉に対して、前者では各手に対する注意の負荷の差異に原因があると説明し、後者では各手を結合非線形振動子 (coupled nonlinear oscillator) として捉え、それらの振動子のリズムとリズムとの間に生じる同期化現象 (引き込み現象: entrainment) が原因であると説明している。また、これら2つのアプローチにおいては、両手が同時に機能している際の両手間の調和したタイミングに対して、それぞれ異なった強調点が示されている。つまり認知アプローチでは、タイミングの中枢制御と注意機構の拘束と偏りを強調し、ダイナミック・モデルでは運動システムの機能的に低い末梢の効果器レベルの結合非線形振動子間の相互作用を強調しており、果たしてこれでよいのかという疑問がある。

どちらのアプローチであれ、両手協応の組織化では、両手の時間的な相互干渉が生じる場合は限定されているが、相互干渉が発生しない場合も存在する。そのような例としては、高いスキル・レベルを過剰学習により体得した場合 (例えば、ドラムやピアノの演奏など) や効果器システムがよく分化されている場合 (例えば、歩行と会話のリズムなど) が挙げられる。これらの熟練したリズム活動の説明として、ダイナミック・アプローチでは上記のような熟練したリズム運動を調整している振動子間の結合が弱いか無結合であるとして扱い、認知アプローチでは各リズム運動の意識的注意の負荷をほとんどゼロに減ずるとして扱っている¹⁶⁾。

以上のように、両手の時間的相互干渉が発生し、正確な運動は不可能であると推測される両手協応の組織化においても、正確で安定した運動を遂行できることが示されている。そして、このような運動を遂行可能にするためのいくつかの学習ストラテジーが提案されている。特に、ポリリズム・タッピングを遂行する際に採用される学習ストラテジーとして、2つの代表的な運動組織化が提案されている³⁾。それらの学習ストラテジーは、統合運動組織化 (integrated motor organization) と並行運動組織化 (parallel motor organization) である。統合運動組織化においては、各手のタッピングを相互に関連づけて行い、結果としてポリリズムの2系列を複雑ではあるが1系列のリズムとして遂行するというもので、その際の各手のタイミングは共通の時間管理プロセス (タイムキーパー) に基づいている。並行運動組織化においては、各手のタッピングを別々の独立したタイムキーパーにより制御し、ポリリズムの各反応系列を遂行すると仮定されている。2つの単純なリズムを

独立して同時遂行することは、複雑な統合的パターンとして結合したリズムを遂行することよりも理論的には容易である。また、5：3ポリリズムの5系列と3系列を独立して学習するため、学習した5系列は5：4、5：2ポリリズムに、3系列は3：2、4：3ポリリズムに適用可能であるように、各ポリリズムに対してそれぞれに合わせた複雑な統合パターンを習得することを回避できる^{3,10}。

しかし、ポリリズム・タッピングに関する先行研究は、並行運動組織化による2つの異なった系列の同時遂行は不可能であり、むしろ統合運動組織化を採用してポリリズム・タッピングを遂行していることを示唆している。Deutsch²⁾は、音楽熟練者にシンプル・リズム(1：1, 2：1, 3：1, 4：1, 5：1)とポリリズム(3：2, 5：2, 4：3, 5：3, 5：4)を音刺激に合わせてタッピングさせ、音刺激に対するタッピングの時間的位置の変動を測定した結果、ポリリズム・タッピングの正確性はシンプル・リズムの場合に比べて有意に低く、またポリリズムの複雑さが増加するほど低くなったことから、遂行者はポリリズムの各系列の表象を統合されたパターンとして発達させ、そのパフォーマンスの正確性はリズム・パターンの複雑さと反比例していると結論づけた。ポリリズムの各系列を各手が独立してタッピングしているのならば、ポリリズムとシンプル・リズムのタッピングの正確性の間には差は生じないと推測できるが、両者間に有意な差が認められたことから、両手間には相互干渉や相互作用が存在し、統合運動組織化の採用が示唆された。

さらに統合運動組織化には、連鎖性統合組織化 (Fig. 1(1)) と階層性統合組織化 (Fig. 1(2))

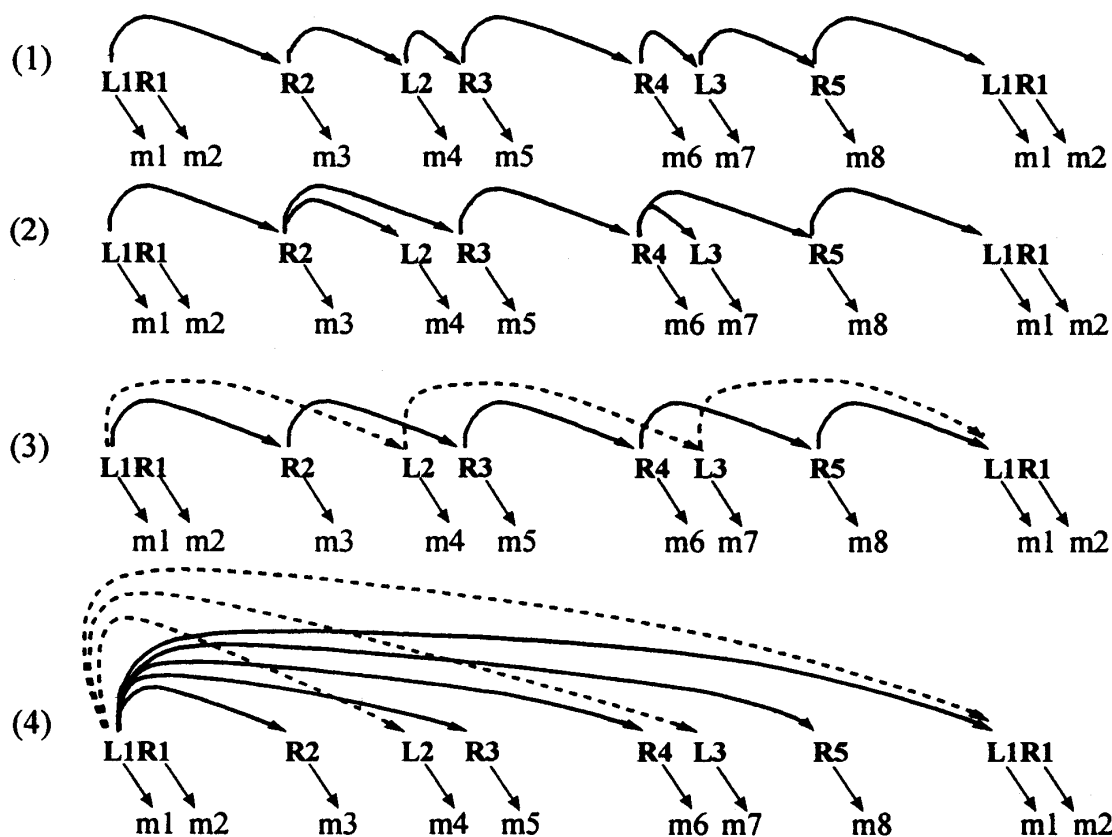


Fig. 1 Four models of motor organization for a 5:3 polyrhythm (adapted from Summers et al., 1993). (1) Chained integrated organization, (2) hierarchical integrated organization, (3) chained parallel organization, (4) hierarchical parallel organization. R represents the right hand tapping, L represents the left hand tapping, and the number represents the order of tapping in a cycle. m1-8 represents the motor delays associated with each tapping.

の2つのモデルが存在する。これらのモデルは、右手と左手の同時タッピングであるR1とL1（Rは右手のタッピング、Lは左手のタッピング、数字はサイクル内におけるタッピングの順序を示す）とタッピング数、タッピングの順序を手がかりとして遂行される。これらのモデルの1サイクルは、同時タッピングから次の同時タッピングまでで構成され、それが反復される。つまり、同時タッピングを1サイクルの区切りとし、各サイクルの終了と開始を認知させるため、同時タッピングは両モデルにおいて共通の時間的基盤となる。しかし、タッピング数とその順序は、両モデルで異なるとらえ方をされている。連鎖性統合組織化は、両手→右→左→右→右→左→右→両手という順序で認知、記憶して、前後の反応の時間的位置で反応する。つまり、全ての反応は、先行反応によって反応のきっかけが与えられるわけである。階層性統合組織化は、反応系列を全体的に順序だったものとしてとらえるのではなく、右手の反応を基準にして、R2の後にL2を、R4のあとにL3を反応するといった具合に、同時タッピングからの右手の数を目安として、適切な右手の反応の後に左手の反応を挿入するのである。

最近ではSummersら¹⁴⁾が、5種類のポリリズム（3：2，5：2，4：3，5：3，5：4）を用いた実験や5：1と1：3のシンプル・リズムを用いたトレーニングにより統合運動組織化の採用を促す条件と5系列と3系列を別々に学習するトレーニングにより並行運動組織化の採用を促す条件から、5：3ポリリズム・タッピングを遂行させた場合に採用する学習ストラテジーの違いを検討した実験¹³⁾、また8日間にわたる練習における学習ストラテジーの変化を観察した実験¹⁵⁾を行っている。その際、各学習ストラテジーを同定するために、被験者が産出した反応間インターバル（interresponse interval: IRI）を反応測度として、その変動係数や隣接したIRI間の相関、分散-共分散の関係から検討した結果、階層性統合組織化と連鎖性統合組織化の採用は見出せたが、並行運動組織化の採用は認められなかったことが報告されている。しかし、これらの運動組織化の詳細な検討はこれからである。

本研究では5：3ポリリズム・タッピング課題を用い、被験者が産出するIRIの変動係数と隣接したIRI間の相関、実際にタッピングした時間的位置と期待される時間的位置の差により、被験者が採用する学習ストラテジーが統合運動組織化か並行運動組織化かを同定し、さらに階層モデルや連鎖モデルを検討する。また、その場合に採用される学習ストラテジーが、両手協応を成立させているタイミング制御メカニズムにどのような役割を果たしているのかを、認知アプローチとダイナミック・アプローチの両観点から検討する。

実験方法

1. 被験者 18才から28才までの男子20名（右利きが18名、左利きが2名）を被験者とした。この20名の中に音楽熟練者はいなかった。また、2名の左利きの被験者が実験に参加したが、一般に運動時の注意は利き手の方に向くことが示されているが¹⁾、Summers & Kennedyの研究¹³⁾によると、ポリリズム・タッピングの場合では、利き手、非利き手という手の非対称性によって運動時の注意の偏向が生じるのではなく、タッピングの遅い手（本実験では左手）よりも速い手（右手）の方に注意が向くという課題の非対称性の点から注意配分を行っていることが示唆されているため、本実験では右利きと左利きの被験者の区別を行わなかった。

2. 実験課題 本実験は、聴覚的に提示される5：3ポリリズムの刺激音に左右の手のタッピングを同期させる練習を行わせる練習課題（70秒間4セット）と、開始10秒間は音刺激を提示し、後の60秒間は音刺激を提示しない条件下で5：3ポリリズム・タッピングを行わせるテスト課題（70

秒間4セット)から構成した。被験者には5:3ポリリズム(右手で5回タッピングしながら左手で3回タッピングする)を人差し指で2つのモルス・キーを繰り返しタッピングすることを要求した。ポリリズムの各サイクルは右手と左手の同時反応によって開始する。1サイクルの継続時間は2.1秒間であり、右手は0.42秒毎に、左手は0.7秒毎にタッピングしなければならない。

3. 実験装置 被験者に提示した2つの刺激音系列は、パソコン(PC-9821As/U7W)によって発生させ、ステレオ・ヘッドフォン(MDR-54)を介して被験者の各耳に提示した。提示した音の周波数はそれぞれ262Hz(左)と330Hz(右)であったが、サイクルの周期性を強調するために、サイクル開始時に同時提示した音は392Hzとした。刺激音系列はそれぞれ0.7秒毎(左耳)と0.42秒毎(右耳)に左右の耳に提示した。被験者はモルス・キーをおいたテーブルの前の椅子に座って、各手の人差し指で各モルス・キーをタッピングした。

4. 手続き 座位安静状態にある被験者に5:3ポリリズムの時間的關係を示したダイアグラ

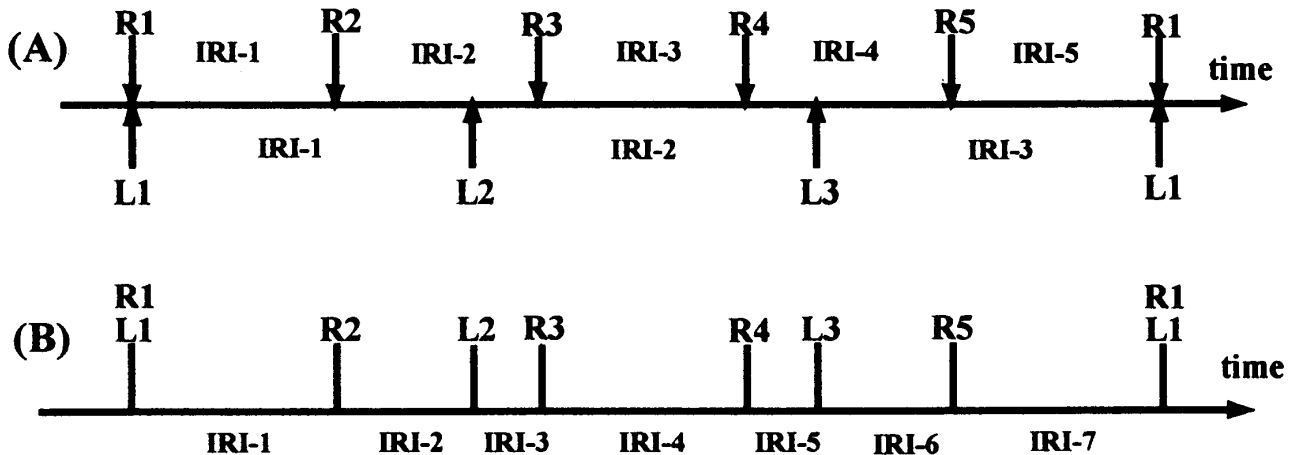


Fig. 2 Within-hand IRIs (A) and between-hand IRIs (B). R1 to R5 are taps with the right hand, L1 to L3 are taps with the left hand, and IRI-1 to IRI-7 represents the number of IRIs.

ム (Fig. 2(A)) を提示して、5:3ポリリズムの構造を口頭で説明し、右手は右耳から聞こえる音に、左手は左耳から聞こえる音に合わせてタッピングしなければならないことを教示した。また、右耳から聞こえる音は0.42秒毎に、左耳から聞こえる音は0.7秒毎に提示されることと、ダイアグラムのR1とL1の同時タッピングでは音が強調されていることも教示した。その後、ダイアグラムを提示したまま、60秒間ヘッドフォンによって刺激音系列を聞かせた。そして60秒間提示した後、被験者が左の音(262Hz)と右の音(330Hz)と同時に鳴った音(392Hz)を聞き分けたことを確認してダイアグラムを除去した。

60秒間の休憩をした後、練習課題を4セット、テスト課題を4セット遂行させた。この時、注意点として、同時タッピングはできる限り右手と左手のタッピングを合わせて遂行することを教示した。各セット遂行間には、60秒間の休憩を挿入した。また、テスト課題を開始する直前に、10秒間経過したら音を停止するが、音を提示していたときと同じようにタッピングし続けるように教示した。各セットは、被験者がうまくタッピングしようと、まったく反応できなくとも、70秒間が経過すると、その課題は終了とし、次の課題に移った。練習課題を4セット終了後、テスト課題に移り、4セット遂行後、終了とした。

5. 分析 測度変数として、被験者が産出したIRIを測定記録した。Fig. 2の(A)は手内IRIを示し、(B)は手間IRIを示している。手内IRIとは右手の反応と左手の反応を独立して表示した反応間インターバルのことで、右手のインターバルIRI-1~5、左手のインターバルIRI-1~3まで

ある。手間 IRI は、右手と左手の前後関係の反応によるインターバルであり、IRI-1~7 までである。これら 2 種類の IRI を用いて、その時間間隔や平均偏差、隣接した IRI 間の相関、実際にタッピングした時間的位置と目標となる時間的位置の差により、被験者が採用する学習ストラテジーを検討した。また、本実験で用いたデータは、最も学習が進んでいると考えられるテスト課題の 4 セット目のものとしたが、開始から 10 秒間のデータは音刺激提示をしていたために除外した。分析に用いた正反応サイクルの基準は、左右のタッピング数とその順序が正しく、同時タッピング (L1, R1) のズレが 50 msec 以内のものであった。

結 果

本実験に参加した 20 名のうち、5 : 3 ポリリズムの各サイクルを正反応基準内で産出できた被験者は 10 名のみであった。Table 1 は、基準内で産出できた被験者とできなかった被験者が産出した反応サイクルに対する正反応サイクルの産出比率とそのサイクル時間及び平均偏差の平均値と標準偏差を示している。ただし、本実験で求めた平均偏差は平均値との偏差を示すものではなく、期待値（ここでは 2.1 秒間）との偏差を示すものであった。産出できた被験者は 10 名とも完全に遂行できたが、逆に産出できなかった被験者は対照的に全く遂行不可能であった。以下に示すデータや結果は、産出できた被験者のみを対象としたものである。

Table 1 Means and standard deviations (SD) of proportions of correct cycles (Cyc), mean cycle durations (Dur) and the mean deviations (Md) that indicate the deviation from goal cycle duration, for subjects who could achieve criterion of correct cycle (S) and ones who could not (N).

Subjects	number	Cyc	Left Hand		Right Hand		
			Dur	Md	Dur	Md	
S	Mean	10	1.00	2.125	0.077	2.121	0.075
	SD	-	0.00	0.083	0.044	0.077	0.038
N	Mean	10	0.00	-	-	-	-
	SD	-	0.00	-	-	-	-

1. 各手のタッピングの配置

各手が産出した手内 IRI の平均値と標準偏差を、実際の時間間隔とサイクル間隔を 1 としたときの各 IRI の比率とに分けて Table 2 に示した。各手内 IRI の比率は、ポリリズム・タッピングがリズム課題であるため、実際の時間間隔が期待値と異なっても、そのサイクルに対する比率が一定ならば、そのリズムを正確に産出できたと考えられるために採用した。時間間隔における各手内 IRI の期待値と観察値を t 検定により比較すると、左手では期待値よりも IRI-1 が有意に長く ($t(9) = 3.80, p < .01$)、IRI-3 は有意に短かった ($t(9) = 3.25, p < .01$)。右手では、期待値よりも IRI-2 と IRI-4 が有意に長く ($t(9) = 4.99, p < .01$; $t(9) = 3.22, p < .05$)、IRI-1 と IRI-3 が有意に短かった ($t(9) = 3.22, p < .05$; $t(9) = 6.01, p < .01$)。これらの傾向は、比率でも顕著に示されていた。

Table 2 Means and standard deviations of time duration (Time) and the proportions for observed within-hand IRIs

		Left Hand			Right Hand					
		IRI-1	IRI-2	IRI-3	IRI-1	IRI-2	IRI-3	IRI-4	IRI-5	
Time	Expected	700.0	700.0	700.0	420.0	420.0	420.0	420.0	420.0	
	Observed	Mean	729.8**	741.6	653.8**	416.2*	453.4**	402.5**	430.9*	418.2
		SD	32.9	50.6	65.8	16.8	20.8	22.1	16.6	18.5
Proportion	Expected	.333	.333	.333	.200	.200	.200	.200	.200	
	Observed	Mean	.344	.349	.308	.196	.214	.190	.203	.197
		SD	.008	.024	.024	.004	.008	.005	.003	.005

* $p < .05$, ** $p < .01$

2. 各手のタッピングの変動性

各手が産出した手内 IRI の変動性を推測するために、変動係数を用いた。変動係数は標準偏差を平均値で割ったもので、百分率で表せるため左右によって絶対値の異なる値に対しても変動性の指標となる。第一に、各手が産出した手内 IRI を左右の系列毎に変動係数を求めると、左手が産出した 3 ビート系列の変動係数は 9.44%、右手は 7.53% と、右手の方が変動性が少なかった。第二に、各手が産出したサイクル内の各手内 IRI 毎に変動係数を求めると、Table 3 のような結果となった。これらの結果は、手内 IRI 間に差は認められるが、左手が産出した 3 種類の IRI の変動係数の平均は 4.34% であり、右手が産出した 5 種類の IRI の変動係数の平均は 4.81% とほとんど差がなく、むしろ右手の変動性が多少高かった。以上のように、左右の反応系列の変動性は左手の方が高かったが、サイクル内の各手内 IRI の変動性に関しては左右の差は明確でなく、全体的に低い値を示したことから、左右の各 IRI は安定して産出されたことがわかる。

Table 3 Means of coefficient of variation for within-hand IRIs .

		Left Hand			Right Hand				
		IRI-1	IRI-2	IRI-3	IRI-1	IRI-2	IRI-3	IRI-4	IRI-5
Mean		3.50	4.10	5.41	5.17	4.26	4.56	4.83	5.23

3. 各 IRI 間の関連性

産出された IRI 間の関連性を検討するために、各手内 IRI と手間 IRI の隣接した IRI 間の相関を Fig. 3 と Fig. 4 に示した。相互に関連性を持ったタッピング間のインターバルの間では負の相関が示されること¹⁷⁻¹⁹⁾から、手内 IRI 間で負の相関が高ければ、その手のタイミング制御は独立性が高く、逆に手間 IRI 間で負の相関が高ければ、左右の手の相互関連性が高いと言える。そのため、これらの IRI 間の相関により被験者が採用した運動組織化の同定が可能となる。

Fig. 3 に示した手内 IRI 間の相関によると、ほとんどが 0.5 ~ -0.5 内の相関しか示さず、隣接し

た手内 IRI 間に高い関連性は認められなかった。一方、Fig.4に示した手間 IRI 間の相関によると、IRI-5,6間に $-0.32 \sim -0.75$ という一貫して高い負の相関が示され、IRI-5とIRI-6との間に強い相互関連性が見出された。

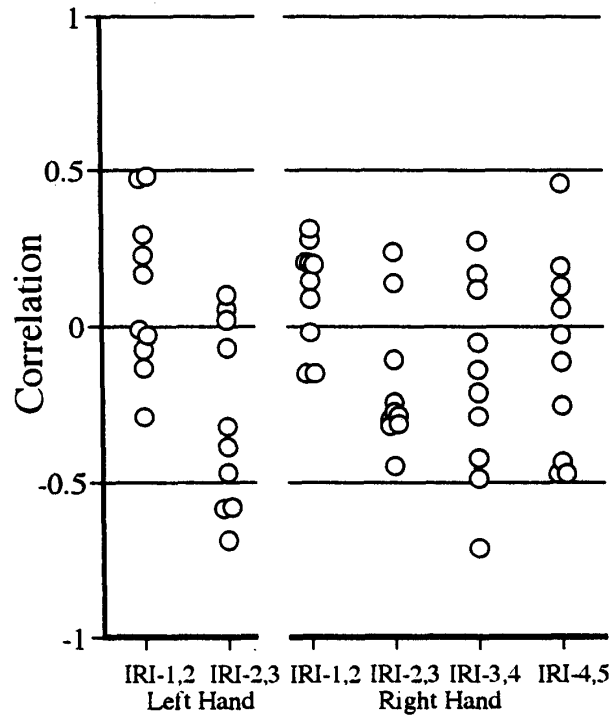


Fig. 3 Correlations between adjacent within-hand IRIs .

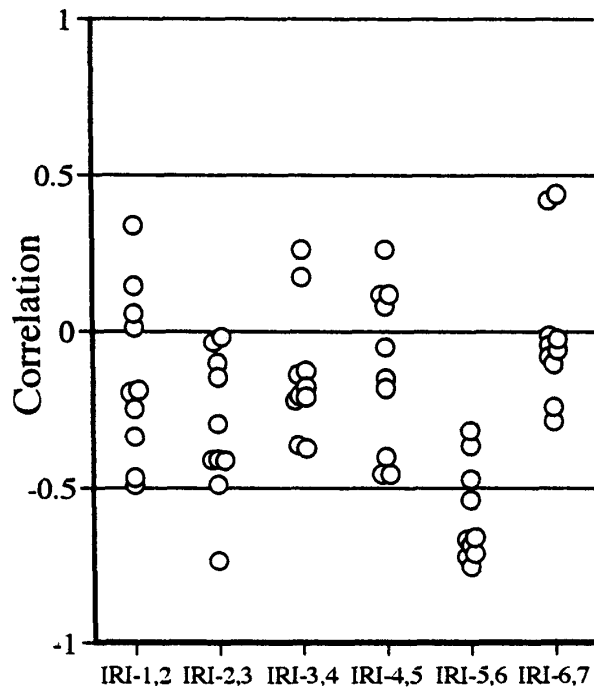


Fig. 4 Correlations between adjacent between-hand IRIs.

考 察

本実験において5：3ポリリズムを産出できた被験者は、参加人数の半数でしかなかった。では、産出できた被験者はリズム感が優れていて、産出できなかった被験者はリズム感が悪いと区別できるのだろうか。Summers & Kennedy¹³⁾は、各運動組織化の採用を促す条件に被験者を割り当て、それらの条件下でポリリズム・タッピングのトレーニングを行った。その結果、統合運動組織化促進条件下でトレーニングを受けた被験者全員はポリリズムを産出できたのに対し、並行運動組織化促進条件下でトレーニングを受けた被験者の大半がポリリズムを産出できなかった。この先行研究の結果から考えると、本実験では運動組織化の採用を促進する操作を行わなかったために、産出できなかった被験者は並行運動組織化の採用を試みて、そのために産出不可能になったのではないかと考えられる。また本実験は、練習も含めて8セットという非常に短期間の実験であったが、長期間のトレーニングを行えば、開始時には産出できなかった被験者もトレーニング終期には産出できたという報告もある¹⁵⁾。しかし、今回は長期間のトレーニングによる学習過程に焦点を当てているのではないため、産出できなかった被験者についてはこれ以上の分析や検討は行わない。

5：3ポリリズムを正確に産出できた被験者は、実際にどのような学習ストラテジーを採用していたのだろうか。本実験では、被験者が採用した学習ストラテジーが並行運動組織化か、それとも統合運動組織化かを同定することと、両手協応のタイミング制御メカニズムの検討を目的とした。そのため第一に、5：3ポリリズムの産出が学習ストラテジーの採用によるものであるかどうかを各手の変動性の点から検討した。もし、統合運動組織化や並行運動組織化が採用されて5：3ポリリズムの各IRIが産出されているのなら、当然その変動性は低いことが予測される。

各手の変動性は、各手の系列毎の変動係数の分析によると、左手が高く、右手の方が安定していた。この点から考えると、被験者は右手の5ビート系列を高い精度で学習し産出したが、左手の3ビート系列では低い精度で学習し産出したと考えられる。しかし、各手内IRIの変動係数からは、左右の手の変動性に差は認められなかった。もし、左手の学習が低いレベルにあるとすれば、各手内IRIにおいても左右の差は認められるはずである。しかも、各手内IRIの変動係数はともに低い値を示し、各手内IRIが安定して産出されたことを示唆している。つまり、左手のIRI-1~3の間には大きな差があり、そのため各サイクル内の変動は大きくなったが、各IRIのサイクル間での変動は非常に低いことが示された。このことから、5：3ポリリズム・タッピングは安定して遂行され、それは何らかの学習ストラテジーの採用があったことを示唆している。

第二に、統合運動組織化と並行運動組織化のどちらが採用されたかを同定するために、各手内IRIの比率について検討した。並行運動組織化は各手を独立に制御しているため、各手の産出するリズム系列は単純なリズムとして捉えることができ、その系列は一定であると推測できるが、結果からは左右の手内IRIは共にばらつきがあり、並行運動組織化を採用したとは考えにくい。また、もし並行運動組織化が採用されたのなら、隣接した手内IRI間の相互関連性が高いために、手内IRI間に高い負の相関が示されるはずであるが、本実験の結果からはそのような高い負の相関は示されず、そのような相互関連はほとんどないと考えられる。以上のことから、並行運動組織化の採用は否定される。

次に、統合運動組織化の採用について検討した。この組織化は各手のタッピングを相互に関連づけてポリリズムを産出すると仮定されるため、手内IRIではなく、手間IRIを指標として、そのタッピングの配置と隣接した手間IRI間の相関から、その採用が同定可能である。Fig. 5は、Table 2

に示した各手内 IRI の比率を同一線上にダイアグラムとして示した図である。実線の矢印は期待されるタッピング位置を示し、破線の矢印は期待されたタッピング位置から顕著にずれていた実際のタッピング位置を示す。統合運動組織化の特徴である各手の相互関連性を示す部分として、特に Fig. 5 の R2-L2-R3 と R4-L3-R5 に注目して検討した。L2 と R3 は同間隔で、期待されたタッピング位置よりも遅れており、しかも L2 と R3 に関するインターバルである手間 IRI 2-4 間の相関は低かった。もし、L2 と R3 のタッピングに互いに関連性がなければ、L2 のタッピング位置は R3 のタッピング位置に影響を与えないだろうし、R3 が R2 によってタッピングのタイミングを与えられているとすると、手間 IRI -2,3 の相関は高い負の値を示すと推測できる。しかし実際は、R3 は L2 によってタッピングのタイミングを与えられていることが示唆されている。なぜなら、L2 と R3 のタッピングの同間隔の遅れと相関の低さは、手間 IRI -3 が手間 IRI -2 の変化に関係なく産出されたことを示している。つまり、この部分においては連鎖性統合組織化という学習戦略を採用してタッピングを遂行していると言える。

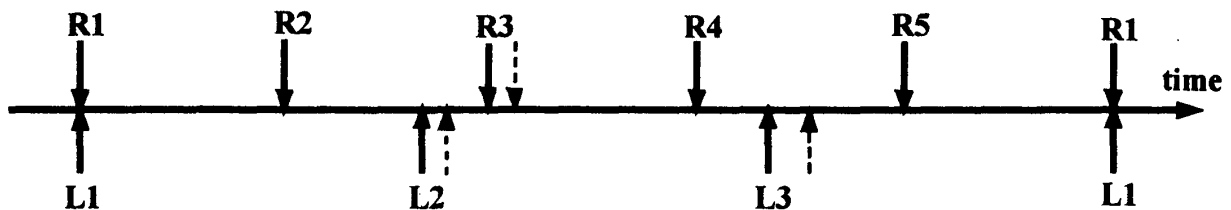


Fig. 5 A schema of the deviations from the expected proportions. Solid line arrows represent the goal positions of taps, dashed line arrows represent the observed positions remarkably deviated from the goal positions.

他方の R4-L3-R5 では、上述した場合とは異なり、R5 は L3 のタッピング位置の変化には影響されておらず、手間 IRI -5,6 の相関は高い負の値を示していた。このことから、手間 IRI -5 と IRI -6 は L3 のタッピング位置の変化に影響されて産出されているため、R4 は R5 によってタッピングのタイミングを与えられ、さらに L3 も R4 からタッピングのタイミングを与えられていたことが示唆される。つまり、この部分では、L3 という左手のタッピングを R4-R5 という右手のタッピング間に挿入し従属させる階層性の統合組織化を採用して遂行していたと考えられる。

以上のように、本実験で 5 : 3 ポリリズムを産出できた被験者が採用した学習戦略は統合運動組織化であり、ポリリズム産出に関連する殆どの先行研究^{2,3,7,8,11-16)}と一致した結果であった。しかし本実験では、連鎖性と階層性の混合タイプの統合運動組織化が採用されていた。この 2 つの統合運動組織化はそれぞれが別々のものとして取り扱われてきたが、サイクルの R2-L2-R3 部分では連鎖性統合組織化を採用し、R4-L3-R5 部分では階層性統合組織化を採用したのである。次に、これらの学習戦略の採用の違いの原因を考えるために、認知的な注意と結合非線形振動子のダイナミックな引き込み特性の観点から検討する。

まず、運動組織化の採用を両手活動のパフォーマンスにおける注意の要因との関連性から考えてみる。先行研究では、ポリリズムのような時間的に対応しない同時パフォーマンスでの拘束は、右手と左手の運動下位システムを制御している単一のタイムキーパー、もしくは中枢機構に起因すると解釈している^{8,9)}。そのようなモデルの基礎的な仮定は、中枢機構がどの程度両手に対して異なったタイミングの詳細な吟味を維持できるかに制限があるという仮定である。つまり、中枢機構はある動きの流れに注意の焦点を向け、他の運動の流れは間接的な注意によって導かれるように、注意

の配分のより大きい方に優先性を割り当てている。

また、運動組織化の採用をリズム・パフォーマンスの振動子理論に関連させて考えてみる。この理論のモデルでは、両手協応の拘束は上位制御機構の制限から発生しているという見解を否定し、リズムは神経運動システム自身のダイナミックな行動の創発的特性から形成されるとしている^{1,4,5)}。ここでいう創発性 (emergence) とは、「自律的に振る舞う個体 (要素) 間および環境との間の局所的な相互作用が大域的な秩序を発現し、他方、そのように生じた秩序が個体の振る舞いを拘束するという双方向の動的過程により、新しい機能、形質、行動などが獲得される」ことを意味している⁷⁾。このような創発的特性から、両手による同時運動の協応化の過程を検討すると、右手と左手を異なった位相で周期的に動かす際には、手間の安定した位相関係は同相と逆相だけに観察され、それ以外の位相関係で両手を協応させると、同相か逆相の状態に移行して協応パターンが形成されることが見出されている^{1,4,5,20)}。

以上のことを別々に考えると、本実験のように同じ系列の動きでも、前半と後半で異なった学習ストラテジーが採用されたことを説明することは困難である。今回の実験の被験者の注意の焦点は、系列によって配分されるのではなく、系列に関係なくタッピングの位置によって注意の配分が異なっていると考えられる。最も注意の焦点が向けられたのは同時タッピングである。同時タッピングには、周期性を強調するために、他の2系列の刺激音よりも強い刺激音が提示された。これによって、注意の焦点が同時タッピングに強く向けられたことがわかる。また、同時タッピングは、各サイクルの開始タッピングとして教示されたことから、注意の焦点が同時タッピングに向けられたと考えられる。この注意の焦点の配分の影響の差によって、サイクルをR2-L2-R3部分とR4-L3-R5部分に分類できる。前半部分は、同時タッピングによる注意の焦点の影響が強く作用して、そのために認知モデル的な連鎖性統合組織化を採用したと考えられる。それに対し、後半部分では、注意の焦点の影響が弱く、認知的影響が小さいため、手間の引き込み特性の影響を強く受けた階層性統合組織化を採用したと考えられる。このことは、左手タッピング (L3) をその前後のタッピングである右手タッピング (R4) と右手タッピング (R5) の中間近くにまで移行させたという逆相の位相関係を用いたことでも明らかである。この傾向は、両手を用いた協応の結合振動子モデルの支持者によって、同相と逆相運動が手を結合するための安定した方法であることを示した研究結果^{4,5,20)}と一致している。

学習とは、学習しようとするものに注意を向け、それを模倣し、保持することである。その保持にはいくつかのレベルがあると考えられる。低い保持レベルでは、認知と運動のバランスが取れず、どちらかに偏向した組織化を行ってしまう。つまり、本実験で観察したようなタイミングのずれが生じた学習ストラテジーを採用してしまうのである。しかし、学習が進めば、認知と運動のバランスが取れた高い保持レベルの学習ストラテジーが採用できる。このように、両手協応の学習レベルを明らかにするためには、認知的アプローチとダイナミック・アプローチの対応性を明らかにしなければならない。両手協応のメカニズムは、中枢 (認知) と末梢 (運動) の機能配分によって成立している可能性がある。また、Summers¹²⁾ は、ポリリズムのような両手の正確な位相調整を必要とする課題では、中枢制御を末梢の効果器レベルの振動子メカニズム上で用いることができると述べている。Fig. 6 は両手パフォーマンスの総合的なモデルを示している。Fig. 6 のモデルによると、二重課題の運動タイミングは、末梢レベルの振動子メカニズム間の引き込み現象の副次的な結果か、いくつかの上位レベルの制御プロセスを反映している。今後は、注意の焦点を操作することで、認知と運動の対応性を検討し、両手協応のメカニズムを検討することが重要である。

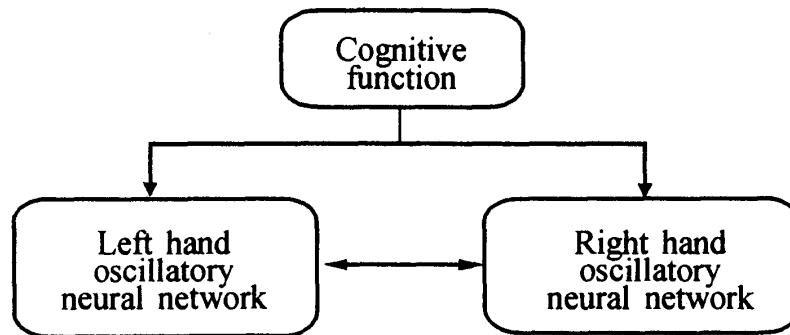


Fig. 6 General model for the timing of two-handed movement (adapted from Summers, 1989)

参 考 文 献

- 1) Carson, R. G. (1993) Manual asymmetries: Old problems and new directions. *Human Movement Science*. 12: 479-506.
- 2) Deutsch, D. (1983) The generation of two isochronous sequences in parallel. *Perception & Psychophysics*. 34: 331-337.
- 3) Jagacinski, R. J., Marshburn, E., Klapp, S. T., & Jones, M. R. (1988) Tests of parallel versus integrated structure in polyrhythmic tapping. *Journal of Motor Behavior*. 20: 416-442.
- 4) Kelso, J. A. S. (1984) Phase transitions and critical behavior in human bimanual coordination. *American Journal of Physiology*. 240: R1000-R1004.
- 5) Kelso, J. A. S., & Schoner, G. (1988) Self-organization of coordinative movement patterns. *Human Movement Science*. 7: 27-46.
- 6) 北村新三 (1996) 創発的機能形成のシステム理論に向けて 計測と制御. 35: 492-495.
- 7) Klapp, S. T., Martin, Z. E., McMillian, G. C., & Brock, D. T. (1987) Whole-task and part-task training in dual motor tasks. In L. S. Mark, J. S. Warm, & R. L. Hutton (Eds.), *Ergonomics and human factors*. New York: Springer-Verlag. pp. 125-130.
- 8) Peters, M., & Schwartz, S. (1989) Coordination of the two hands and effectors of attentional manipulation in the production of a bimanual 2:3 polyrhythm. *Australian Journal of Psychology*. 141: 215-224.
- 9) Peters, M. (1990) Interaction of vocal and manual movements. In G. R. Hammond (Ed.), *Cerebral control of speech and limb movements*. Amsterdam: North-Holland. pp. 535-574.
- 10) Shaffer, L. H. (1981) Performance of Chopin, Bach, and Bartok: Studies in motor programming. *Cognitive Psychology*. 13: 326-376.
- 11) Summers, J. J., Hawkins, S. R., & Mayers, H. (1986) Imitation and production of interval ratios. *Perception & Psychophysics*. 39: 437-444.
- 12) Summers, J. J. (1989) Temporal constraints in the performance of bimanual tasks. In D. Vickers & P. L. Smith (Eds.), *Human Information Processing: Measures, Mechanisms, and Models*. Elsevier Science Publishers B.V., North-Holland. pp. 661-680.
- 13) Summers, J. J., & Kennedy, T. M. (1992) Strategies in the production of a 5:3 polyrhythm. *Human Movement Science*. 11: 101-112.
- 14) Summers, J. J., Rosenbaum, D. A., Burns, B. D., & Ford, S. K. (1993a) Production of polyrhythms.

- Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance. 19: 416-428.
- 15) Summers, J. J., Ford, S. K., & Todd, J. A. (1993b) Practice effects on the coordination of the two hands in a bimanual tapping task. *Human Movement Science*. 12: 111-133.
 - 16) Summers, J. J., & Pressing, J. (1994) Coordinating the two hands in polyrhythmic tapping. In S. Swinnen, H. Heuer, J. Massion, & P. Casaer (Eds.), *Interlimb Coordination: Neural, Dynamical, and Cognitive Constraints*. New York: Academic Press. pp. 571-593.
 - 17) Vorberg, D., & Hambuch, R. (1978) On the temporal control of rhythmic performance. In J. Requin (Ed.), *Attention and Performance, VII*. Hillsdale, NJ: Erlbaum. pp. 535-555.
 - 18) Wing, A. M., & Kristofferson, A. B. (1973) Response delays and the timing of discrete motor responses. *Perception & Psychophysics*. 14: 5-12.
 - 19) Wing, A. M. (1977) Perturbation of auditory feedback delay and timing of movement. *Journal of Experimental psychology: human Perception and Performance*. 3:175-186.
 - 20) Yamanishi, J., Kawato, M., & Suzuki, R. (1980) Two coupled oscillators as a model for the coordinated finger tapping by both hands. *Biological Cybernetics*. 37: 219-225.