

原 著

## 複雑な両手協応運動のパターン形成における移行経路

田 島 誠<sup>\*1</sup>

### 要 約

これまでの複雑な両手協応運動を用いた研究は、外部刺激に反応を同期させることによって目標とする両手協応パターンを学習させてきた。しかし、そのような同期学習を設定することによって、ダイナミックな引き込み現象の観点からパターン形成を検討することができなかった。そこで、本研究では同期学習を設定せずに、目標とする両手協応パターンを形成していく移行経路を検討することによって、複雑な両手協応パターンの形成過程を明らかにすることを目的とした。10名の被験者に5：3ポリリズム・タッピングを遂行させた。このポリリズム・パターンの形成過程を明らかにするために、右手と左手の運動振動数比の移行経路を分析した。その結果、5：3ポリリズム・パターンは1：1や2：1，3：1パターンから移行して形成されたことが示された。このことから、複雑な両手協応パターンは両手間の引き込みによって形成されやすい単純な両手協応パターンから移行して形成されることが見出された。この過程は Farey tree における低レベルの両手協応パターンから高レベルの両手協応パターンへの移行を表している。

### 緒 言

私たちのリズム運動の中には、複数の運動部位間に相互干渉が発生するような複雑な協応パターンが存在している。運動制御の研究者は運動部位を制御する神経系を結合非線形振動子として捉え、運動部位間のダイナミックな引き込み現象(entrainment)の観点からそれらのパターン形成を検討している。特に、人間や動物の歩行運動は詳細に検討されており、以上の見解が支持されている<sup>1-4)</sup>。歩行以外の運動では、主に両手協応運動が知られている。例えば、単純な両手協応運動では、正確で安定した両手間の位相関係は同相モードと逆相モードだけであり、その他の位相関係は不安定であり、結果として逆相モードか同相モードへ引き込まれる傾向が現れる<sup>5)</sup>。また、運動振動数を徐々に増加していくと逆相モードは不安定になり、ある臨界振動数を超えると同相モードへと相転移(phase transition)してしまう<sup>6-9)</sup>。これらの現象は、右手と左手を1：1の運動振動数比で周期運動させた場合には、その両手協応パターンがより安定した位相モードへと引き込まれて形成されることを示唆している。しかし、これらの研究で用いられた運動パターンは実験開始前から習得されていたため、運動部位間の引き込み

現象によって新しい運動パターンが形成されるかどうかは明らかにされていない。

そこで、最近では複雑で未習得な両手協応運動であるポリリズム・パターン(polyrhythmic pattern)の形成過程の研究が進められている。例えば、複雑な3：8や5：8ポリリズム・パターンは制御パラメータである運動振動数を増加させることによって、より単純な2：1や3：1パターンへと移行することが示されている<sup>10-14)</sup>。この結果は、運動振動数の増加によって不安定になった両手協応パターンが、より単純で安定したパターンへと移行したことを示唆している。これは両手間の引き込みによって形成されにくいパターンから形成されやすいパターンへの移行を意味しており、これらのパターン形成には両手間の引き込み現象が深く関与していると考えられている。

しかし、上述した先行研究には、「外部刺激への反応同期による学習過程の説明不足」や「異なった反応事態に対する同一分析」などの問題点がある。さらに、これらの研究では複雑なパターンから単純なパターンへの移行だけが示されているが、これは複雑な運動パターンを形成していく人間の運動学習とは全く逆の過程であるため、複雑な運動パターンの形成過程についても検討する必要がある。

\*1 川崎医療福祉大学 医療技術学部 健康体育学科  
(連絡先)田島 誠 〒701-0193 倉敷市松島288 川崎医療福祉大学

このような必要性に対し、複雑なポリリズム・パターンを形成するためには、呈示されるポリリズムの各拍子系列に各手の反応を同期させる習得段階が不可欠であった<sup>15-21)</sup>。しかし、この同期学習事態では認知的制御によってポリリズム・パターンが形成されることが明らかとなっているため<sup>22)</sup>、両手間の引き込み現象というダイナミカル制御による複雑なパターン形成について直接検討することができなかった。そこで、本研究では習得段階である同期学習を設定せずに、最初から5:3ポリリズム・パターンを産出させることによって、複雑な両手協応パターンの形成過程について両手間の引き込み現象というダイナミカル制御の観点から明らかにすることを目的とした。

### 実験方法

#### 1. 被験者

20~22才の大学生10名(男性5名,女性5名)を被験者とした。また、自己申告と利き手判別アンケート<sup>23)</sup>の日本語版(筆者訳)の回答から、本実験の被験者は右利き8名と左利き2名であったが、両者を区別しなかった。

#### 2. 実験課題(図1を参照)

運動課題として、5:3ポリリズム・タッピング(右手で5拍子タッピングしながら、同時に左手で3拍子タッピングする)を用いた。ただし、目標刺激系列を呈示しないため、被験者は任意のテンポでモールス・キーをタッピングすることとした。また、転移課題として、3:2ポリリズム・タッピング(右手で3拍子タッピングしながら、同時に左手で2拍子タッピングする)を設定した。

#### 3. 手続き

実験を開始する前に、すべての被験者に対して、実験に要する時間と実験の主な内容について十分に説明し、実験参加への同意を得た。被験者は2つのモールス・キーを置いたテーブルの前の椅子に座り、右手と左手で各モールス・キーをタッピングするように要求された。最初に被験者に5:3ポリリズム・パターンのダイアグラムを呈示し、その特徴を口頭で説明した。その後ダイアグラムを除去し、5:3ポリリズム・タッピングを遂行させた。1試行は60秒とし、試行間には60秒の休憩を挿入した。本実験では試行数を制限せず、被験者が5:3ポリリズム・パターンを95%以上の確率で産出できるまで試行を繰り返すこととした。最後に、転移段階として3:2ポリリズム・タッピングを1試行だけ遂行させた。

#### 4. パフォーマンス測定

被験者の同手のタッピング間インターバルを測定し、右手と左手の同時タッピングから次の同時タッピングまでを1サイクルとし、その1サイクル内における右手と左手の運動振動数比( $f_{right} : f_{left}$ )を算出し、両手協応パターンとした。ただし、同時タッピングは右手と左手のタッピング間インターバルが50ミリ秒以下とした。

### 実験結果

5:3ポリリズム・パターンが形成されるまでの移行経路として、10名の被験者が産出した両手協応パターンの比率を検討した。表1は10名の被験者が学習初期段階と学習中期段階、学習後期段階、および転移段階において産出した運動振動数比の平均比

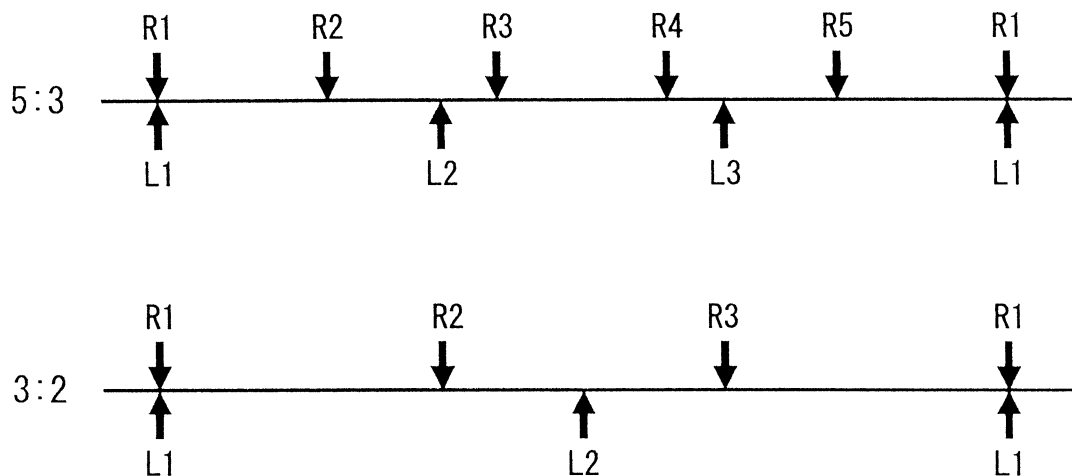


図1 Diagrams of the temporal relationships between the two hands required in the performance of 5:3 and 3:2 polyrhythmic tapping. Vertical arrows with R1 to R5 are taps with the right hand and vertical arrows with L1 to L3 are taps with the left hand.

表1 Percentage (%) of bimanual coordinative patterns produced at the initial, middle, and final learning stages and the transfer stage.

Stage	Pattern										
	1:1	2:1	3:1	4:1	5:1	3:2	4:3	5:2	5:3	5:4	Others
Initial	21.35	40.78	11.65	0.59	1.12	4.60	6.11	3.99	2.47	0.00	7.34
Middle	18.76	12.70	9.14	1.55	0.00	3.75	10.65	0.88	31.62	10.08	0.88
Final	1.26	0.69	0.00	0.00	0.00	0.72	0.42	0.00	96.04	0.53	0.34
Transfer	2.07	0.59	0.00	0.00	0.00	97.13	0.21	0.00	0.00	0.00	0.00

率を示している。ここで、両手協応パターンの産出比率と学習にともなう変化を検討するために、各比率を逆正弦変換した値に対して、両手協応パターン(11)×学習段階(3)の繰り返しのある2要因分散分析を行なった。下位検定にはFisherのPLSDテスト(p<.05)を用いた。

その結果、両手協応パターンに有意な主効果(F(10,297)=32.06, p<.001)と両手協応パターンと学習段階間に有意な交互作用(F(20,297)=18.78, p<.001)が示された。そこで、各要因における単純主効果の検定とその下位検定から導かれた結果を以下に示した。学習初期段階では1:1や2:1, 3:1パターンが他よりも有意に高い比率で産出されていたが、学習中期～後期段階になるとそれらのパターンの産出比率は有意に減少した。また、学習段階を通して、4:3や5:2パターンも有意な減少を示した。これに対し、目標である5:3パターンの産出比率は学習を通して有意な増加を示し、学習後期段階では他のパターンよりも有意に高い産出比率を示した。これらの結果から、目標とする複雑な両手協応パターンは単純な両手協応パターンから移行して形成されることが示された。

また、転移段階では他のパターンをほとんど産出することなく、要求された3:2パターンを非常に高い比率で産出することができていた。学習段階では3:2パターンの練習をまったく行っていないにもかかわらず3:2パターンを形成することができたことから、その前に形成された5:3パターンから3:2パターンへの移行が容易であることが示された。

ここで、5:3ポリリズム・パターンが形成されるまでの過程を時系列的に検討するために、代表的な3名の被験者の両手協応パターン( $f_{left}/f_{right}$ )の移行経路を図2に示した。ただし、図の関係上、ここでは上述した「m:n」という振動数比の表現を「n/m」という分数の形で表現することとした。図

2-(a)では、1/1と1/2, 2/3, 3/4パターンへの不規則な移行が現れた後に3/5パターンが形成されていた。図2-(b)では、初期段階において1/1と1/2パターンの周期的な移行が現れ、次に1/1と3/4パターンの周期的移行から次第に1/1と3/5パターンの周期的移行へと遷移していった。これに対し、図2-(c)の初期段階では、1/2パターン周辺に非常に不明瞭なパターンが現れていた。しかし、2試行目以降になると、1/1や1/2, 2/3パターンが頻繁に形成されるようになり、最終的には3/5パターンを形成していった。また、この被験者だけの特徴として、比較的顕著に4/5パターンを形成していた。一方、転移段階では、図2に示した3名を含む10名の被験者全員がほとんど他のパターンへと遷移することなく、最初から安定して2/3パターンを形成していた。

### 考 察

本研究では従来の研究とは異なり、目標となる音刺激系列に各手の反応を同期させることによって両手協応運動を習得させる同期学習を設定しなかった。したがって、被験者は外部情報によって右手と左手の動作を協応させ、組織化するのではなく、外部情報に依らずに自己組織的に右手と左手の動作を協応させなければならなかった。このような事態における複雑な両手協応パターンの形成過程を明らかにするために、右手と左手の運動振動数比の移行経路について検討した。

緒言で示したように、1:1の運動振動数比における両手協応パターンは、両手間の引き込み現象によって形成されることが示されている<sup>6-9)</sup>。同様に、ポリリズム・タッピングにおいても、運動振動数の増加にともなって、複雑な両手協応パターンから単純な両手協応パターンへと移行することが示されている<sup>10-14)</sup>。一般に、生体系のような非平衡開放系において形成されるパターンは、熱力学第二法

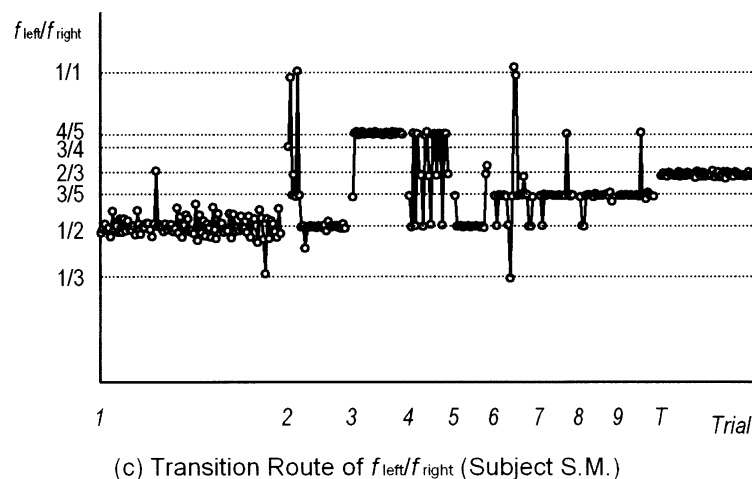
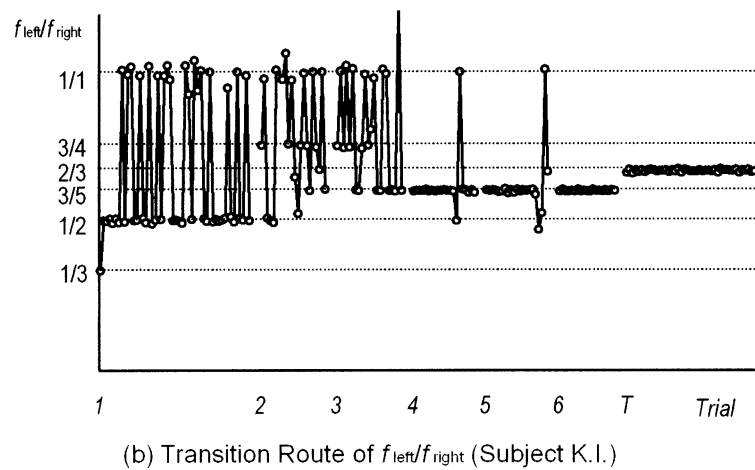
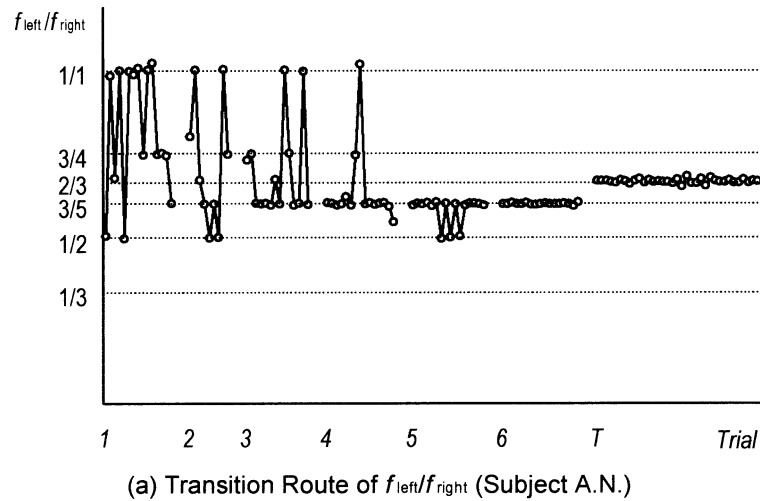


図2 Three typical transition routes of frequency ratios.

則にしたがって一方的に消失するのではなく、継続的なエネルギー散逸によってある定常状態において自己組織化される。これらの知見から、既習の運動パターンが不安定になると、エネルギー散逸構造的に安定した新しい運動パターンが創発されることが

見出されている。

このような観点から考えると、人間の運動学習はエネルギー散逸構造的に複雑な運動パターンを自己組織的に形成していく過程であると理解することができる。本研究では、 $1:1$ や $2:1$ 、 $3:1$ パター

ンから最終的には5 : 3ポリリズム・パターンへの移行が発生することが示された。エネルギー散逸構造的な観点から考えると、5 : 3ポリリズム・パターンは1 : 1や2 : 1, 3 : 1パターンよりも複雑な構造であるといえる。以上のことから、目標とする複雑な両手協応パターンは単純な両手協応パターンから移行して形成させることが見出された。このような移行の特徴は図3に示したFarey treeによって表すことができる。このFarey treeは2つの非線形振動子間の振動数の引き込みパターンの関係を示しており、低レベルの振動数比パターンほど発生し易く、安定であると考えられている。

本研究の結果は、複雑な5 : 3ポリリズム・パターンの形成以前には、単純な1 : 1や2 : 1, 3 : 1パターンといったFarey treeにおいて5 : 3パターンよりも低レベルの安定したパターンの形成とそれらからの移行を示した。つまり、両手間の引き込みによって形成されやすい単純なパターンから、目標とする複雑なパターンへと移行することによって、新しいパターンが形成されることが見出された。また、転移課題における安定した3 : 2ポリリズム・パターンの形成は、5 : 3ポリリズム・パターンの形成過程において3 : 2の構造を内在的に遷移していったためではないかと考えられる。

以上のことから、複雑な両手協応パターンの学

習過程として、Farey treeの低レベルの両手協応パターンから高レベルの両手協応パターンへの移行経路が明らかにされた。また、他の特徴として、1 : 1や2 : 1といった単純なパターンが形成される前に、図2-(c)の1試行目に見られるような非常に不安定なパターンが形成されていた。この結果から、単純なパターンは非常に不安定でランダムに近い関係性の中から両手間の引き込みによって形成されたと考えられる。

本研究は「平成12年度川崎医療福祉大学プロジェクト研究」の研究費補助によって行なわれたことを記し、ここに謝意を表します。

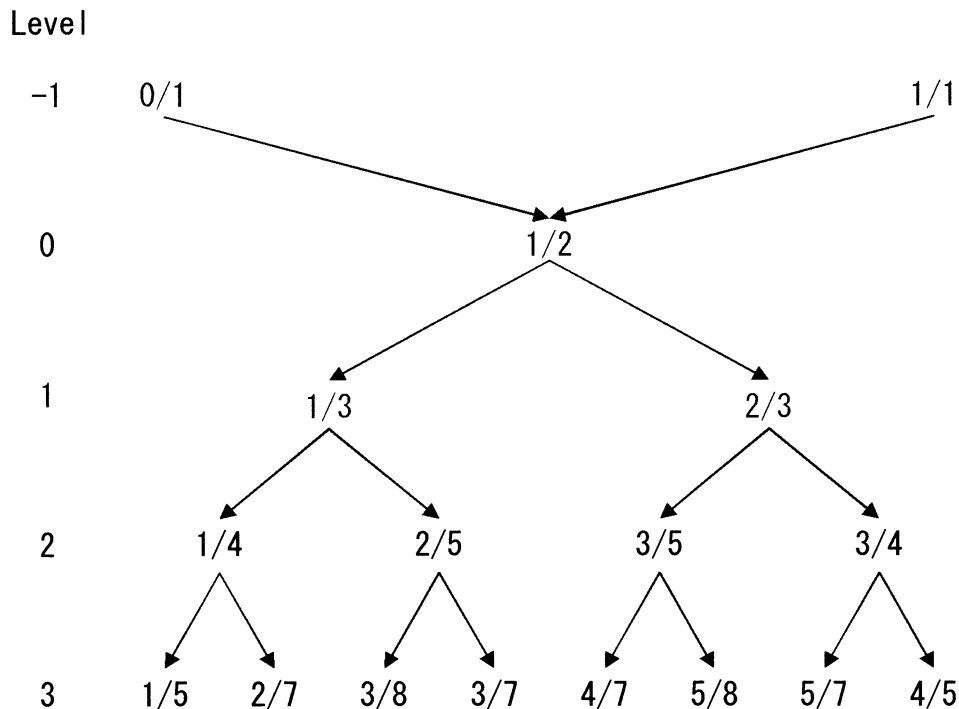


図3 A schema of the Farey tree, which indicates the relation of frequency ratios of entrainment in the bimanual coordination.

- 1) 多賀殿太郎: 歩きをデザインする—二足歩行の自己組織化—. 科学, **64**, 19–26, 1994.
- 2) 多賀殿太郎: 生命システムのデザイン原理をさぐる—人間の歩行運動から—. 数理科学, **394**, 5–13, 1996.
- 3) Taga G, Yamaguchi Y and Shimizu H: Self-organized control of bipedal locomotion by neural oscillators in unpredictable environment. *Biological Cybernetics*, **65**, 147–159, 1991.
- 4) Yuasa H and Ito M: Coordination of many oscillators and generation of locomotory patterns. *Biological Cybernetics*, **63**, 177–184, 1990.
- 5) Yamanishi J, Kawato M and Suzuki R: Two coupled oscillators as a model for the coordinated finger tapping by both hands. *Biological Cybernetics*, **37**, 219–225, 1980.
- 6) Haken H, Kelso JAS and Bunz H: A theoretical model of phase transitions in human hand movements. *Biological Cybernetics*, **51**, 347–356, 1985.
- 7) Kelso JAS: Phase transitions and critical behavior in human bimanual coordination. *American Journal of Physiology*, **240**, R1000–R1004, 1984.
- 8) Kelso JAS and Schönner G: Self-organization of coordinative movement patterns. *Human Movement Science*, **7**, 27–46, 1988.
- 9) Schönner G and Kelso JAS: Dynamic pattern generation in behavioral and neural systems. *Science*, **239**, 1513–1520, 1988.
- 10) Beek PJ, Peper CE and van Wieringen PCW: Frequency locking, frequency modulation, and bifurcations in dynamic movement systems. In Stelmach GE and Requin J, *Tutorials in Motor Behavior II*. Elsevier Science, Amsterdam, 599–632, 1992.
- 11) Peper CE, Beek PJ and van Wieringen PWC: Bifurcations in polyrhythmic tapping: In search of Farey principles. In Requin J and Stelmach GE, *Tutorials in Motor Neuroscience*, Kluwer, Dordrecht, 413–431, 1991.
- 12) Peper CE, Beek PJ and van Wieringen PWC: Coupling strength in tapping a 2:3 polyrhythm. *Human Movement Science*, **14**, 217–245, 1995.
- 13) Peper CE, Beek PJ and van Wieringen PWC: Frequency-induced phase transitions in bimanual tapping. *Biological Cybernetics*, **73**, 301–309, 1995.
- 14) Peper CE, Beek PJ and van Wieringen PWC: Multifrequency coordination in bimanual tapping: Asymmetrical coupling and signs of supercriticality. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, **21**, 1117–1138, 1995.
- 15) Jagacinski RJ, Marshburn E, Klapp ST and Jones MR: Tests of parallel versus integrated structure in polyrhythmic tapping. *Journal of Motor Behavior*, **20**, 416–442, 1988.
- 16) Klapp ST, Hill MD, Tyler JG, Martin ZE, Jagacinski RJ and Jones MR: On marching to two different drummers: Perceptual aspects of the difficulties. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, **11**, 814–827, 1985.
- 17) Klapp ST, Martin ZE, McMillian GC and Brock DT: Whole-task and part-task training in dual motor tasks. In Mark LS, Warm JS and Hutton RL, *Ergonomics and human factors*, Springer-Verlag, New York, 125–130, 1987.
- 18) Summers JJ and Kennedy TM: Strategies in the production of a 5:3 polyrhythm. *Human Movement Science*, **11**, 101–112, 1992.
- 19) Summers JJ, Ford SK and Todd JA: Practice effects on the coordination of the two hands in a bimanual tapping task. *Human Movement Science*, **12**, 111–133, 1993.
- 20) Summers JJ, Rosenbaum DA, Burns BD and Ford SK: Production of polyrhythms. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, **19**, 416–428, 1993.
- 21) Tajima M and Choshi K: Effects of learning and movement frequency on polyrhythmic tapping performance. *Perceptual and Motor Skills*, **90**, 675–690, 2000.

- 22) 田島誠, 調枝孝治: 両手協応運動における引き込み現象とパターン形成の解析. スポーツ心理学研究, 24(1), 44-55, 1997.
- 23) Bryden MP: Measuring handedness with questionnaires. *Neuropsychologia*, 15, 617-624, 1977.

(平成15年6月5日受理)

## Transition Routes on Pattern Formation of Complicated Bimanual Coordinative Movement

Makoto TAJIMA

(Accepted Jun. 5, 2003)

Key words: POLYRHYTHM, ENTRAINMENT, TRANSITION, FAREY TREE

### Abstract

Previous research that has examined complicated bimanual coordination has made as its goal bimanual coordinative patterns learnt by synchronizing the response with the external stimulus. However, the pattern formation was not able to be considered from a viewpoint of a dynamical entrainment between both hands by setting up the synchronous learning. Therefore, the present study examined the transition routes on pattern formation of complicated bimanual coordination without the synchronous learning. 10 subjects performed a 5 : 3 polyrhythmic tapping and without external help. To clarify the process of polyrhythmic pattern formation, the transition routes of frequency ratios were analyzed. Analysis showed that the 5 : 3 polyrhythmic pattern was formed by transition from 1 : 1, 2 : 1, and 3 : 1 patterns. Consequently, transitions were induced from simple coordinative patterns to more complicated coordinative patterns. This process could be represented as a shift from lower- to higher-order ratios in the Farey tree.

Correspondence to : Makoto TAJIMA

Department of Health and Sports Sciences, Faculty of  
Medical Professions, Kawasaki University of Medical Welfare  
Kurashiki, 701-0193, Japan  
(Kawasaki Medical Welfare Journal Vol.13, No.1, 2003 71-77)