フラクタル次元からみた切替打球動作の巧みさ

鈴木啓央¹⁾・山本裕二²⁾

Dexterity of Switched Hitting Movement Using Fractal Dimension Analysis

Hiroo Suzuki¹ and Yuji Yamamoto²

Abstract

The purpose of this study was to quantify human dexterity by examining the movement involved in switching between forehand and backhand strokes when a ball moved from side to the other during table tennis. The hitting movements of expert and novice table tennis players were observed when balls were repeatedly moving in the same direction (periodic input condition) and when they were moving in two different directions successively (switching input condition). From the viewpoint of the switching dynamical system (Gohara and Okuyama, 1999a), the repeated movement under the periodic input condition was treated as an attractor, and the switching movement between strokes under the switching input condition was treated as transition of attractors. The dexterity with which movement were completed was quantified in terms of the fractal dimension. The fractal dimension was calculated according to Poincaré maps depicting the trajectories of the midpoint and angular velocities at the shoulder. Data from experts and novices almost reflected transitions of the third-order sequence effect, and the fractal dimensions included non-integers, which indicate that these fractal transitions had fractal properties. However, the fractal dimension of experts was lower than that of novices. The two output patterns corresponding to the two input patterns overlapped more for novices than for experts. The results suggest that the dexterity shown in switching movements can be quantified in terms of the fractal dimension based on the switching dynamical system.

Key words: attractor, fractal transition, motor control, switching dynamics, table tennis

1) 名古屋大学大学院教育発達科学研究科
〒464-8601 名古屋市千種区不老町
2) 名古屋大学総合保健体育科学センター
〒464-8601 名古屋市千種区不老町
連絡先：鈴木啓央
E-mail: hiroo@htc.nagoya-u.ac.jp

1 Graduate School of Education and Human Development,
Nagoya University
Furo-cho, Chikusa-ku, Nagoya, 464-8601
2 Research Center of Health, Physical Fitness and Sports,
Nagoya University
Furo-cho, Chikusa-ku, Nagoya, 464-8601
Corresponding author: Hiroo Suzuki

1. 序

巧みさは、多様な環境において行為者が直面する問題を、身体運動によって解決していく能力であるといわれている（ベルンシュタイン, 2003）。この巧みさの一例として、ベルンシュタイン（2003）は、運動遂行中にボールが折れてしまった棒高跳び選手が、空中で咄嗟に動作を修正し、宙返りをして着地する例を挙げている。このような巧みさについては、多くの研究がある（McLeod, 1987；Carlton, 1992；Runigo et al., 2005；中本・森, 2008；Runigo et al., 2010）。例えば、Runigo et al. (2005) は、捕捉する標的速度が急激に加速または減速する一致タイミング課題を用いて、テニス熟練者と未熟練者の運動を比較し、予測できない標的速度変化に対して動作を修正し始めるまでの時間が、未熟練者と比較して熟練者は短いことを示している。こうした巧みさは、突然の環境の変化や標的速度変化といった、入力パタンに対して、遂行している動作を素早く修正する巧みさといえる。ここでは、入力パタンを、ある時間幅のなかで時空間的に変化する情報と定義する（郷原, 1996）。

この巧みさは、多様な入力パタンが行為者に一回だけ与えられる環境における巧みさであるが、入力パタンが連続的に与えられる場合もある。ここでは、運動終了後にも続けて入力パタンが与えられるため、入力パタンに対応した動作を次々と遂行することが求められる。さらに、この連続的な運動には、一定の入力パタンに対して同種の動作を周期的に遂行する連続運動と、多様な入力パタンに対して異なる動作を切り替えながら遂行する複合運動がある（山本, 2002）。例えば、卓球やテニスにおいて、フォアサイドに繰り返し飛来するボールに対してフォアハンドを周期的に遂行する運動は連続運動であり、ボールが様々な方向に飛来することに対してフォアハンドやバックハンドを切り替えながらラリーをする運動は、複合運動である。本研究では、この複合運動における巧みさを定量化することを目指す。特に、対象とする

複合運動は卓球の打球動作とする。卓球は、台上の様々な位置にボールを打ち合う競技であるため、異なる動作の連続的な切替が観察しやすい。そして、ボールの飛来方向に応じてフォアハンドとバックハンドを連続的に切り替える切替打球動作に着目する。

これまで、連続運動の運動制御は、状態がある決定論的法則に従って時間的に変化する系、すなわち力学系の観点より検証されてきた。Kelso (1984) は、ヒトの身体運動に初めてこの観点を適用し、メトロノームに合わせて左右の人差し指を周期的に動かす連続運動を観察した。その結果、メトロノームの周波数の増加に伴い、 180° であった両指の位相差が突然 0° の位相差になることが発見された。この現象は、連続運動における協応構造（Kugler et al., 1980）の自己組織化現象として、Haken et al. (1985) によってモデル化された。これ以来、力学系の観点より連続運動を検証した多くの研究がある（Buchanan and Kelso, 1993；Carson et al., 1995；Schöner et al., 1986, など）。

しかしながら、このモデルは、単一の入力パタンの周波数を分岐パラメータとする同期現象を説明するもので、異なる動作を切り替える複合運動には適用できない。そこで本研究では、複数の入力パタンの連続的な切替を考慮した切替ダイナミクスモデル（Gohara and Okuyama, 1999a）を援用する。切替ダイナミクスモデルでは、同一の入力パタンが周期的に与えられる場合の出力パタンはアトラクタとなる。さらに、複数の入力パタンに対応した出力パタンの切替は、複数のアトラクタ間の遷移として捉えられ、そこにはフラクタル性がみられる（Gohara and Okuyama, 1999a）。このフラクタル性は、幾何学的な特徴としてフラクタル次元をもって定量化できる（Gohara et al., 1999c；Nishikawa and Gohara, 2008）。

切替ダイナミクスモデルを切替打球動作に援用した場合、ある方向に飛来するボールが1つの入力パタンとなり、飛来するボールと同時間幅の運動の時間変化が出力パタンに対応する。ボールが同一方向に繰り返し飛来する場合、こ

こで遂行される連続運動の出力ボタンはアトラクタと考えられる。そして、ボールの飛来方向の切替に対応した、異なる出力ボタンの切替はアトラクタの切替に対応する。Yamamoto and Gohara (2000) は、テニスにおけるフォアハンドとバックハンドの切替をアトラクタ間の切替と捉え、切替打球動作においてもフラクタル性が生じることを示唆している。しかしながら、この研究では、複合運動の巧みさを定性的には記述しているが、定量化には至っていない。そこで本研究では、その巧みさをフラクタル次元を用いて定量化することを試みる。

フラクタル次元は、フラクタル性を有する図形の幾何学的な複雑さを定量化するものである(高安, 1986)。フラクタル次元では、線分の次元は1、平面は2、空間は3となる。フラクタル次元が整数値である場合、例えば、次元が2である場合、点が無秩序に平面全体を覆っているとされ、その図形はフラクタル性を有していないとされる。他方、フラクタル次元が非整数値である場合、線分と平面の間の図形や、平面と空間の間のフラクタル性をもつ図形の複雑さを表す。例えば、代表的なフラクタル図形であるエノン写像 (Figure 2a) は、線分と平面の間のフラクタル図形で、そのフラクタル次元は1.21であることが確かめられている(Grassberger, 1983)。なお、フラクタル次元は、点の分布の大きさを示す値ではなく、どの程度フラクタル性という規則をもって分布しているかを定量化するものである。

本研究では、切替ダイナミクスモデルを卓球の切替打球動作に援用し、フラクタル性が生じることを確認するとともに、フラクタル次元によって巧みさを定量化することを目的とする。そのために、熟練度が異なる2群を設け、ある入力時間幅における両群のフラクタル次元を比較する。また、フラクタル性を顕在化させるために、ボールの投射系列に3次の系列効果を組み込む。

2. 方 法

2. 1. 実験参加者

実験参加者は、5年以上卓球の競技経験がある大学卓球選手7名と、授業以外で卓球の競技経験がない大学生7名であった。競技経験のある選手を熟練群、競技経験がない大学生を未熟練群とした。熟練群全員が競技場面で用いている打法はシェークハンド打法であった。実験参加者は全員右利きであった。

2. 2. 課題

実験参加者は、台から800mmの位置に立ち、投射マシン(ウメハラA1)よりフォアサイドまたはバックサイドのいずれかに飛来するボールを、飛来方向のターゲット枠内に打ち返す課題を行った(Figure 1)。実験参加者が打球動作を遂行するコートの反対側の台にターゲットを設置した。また、ターゲットを2段階に区別し、大きい枠内(684×380mm)は1点、小さい枠内(342×190mm)は2点として得点化した。実験参加者には、運動結果の得点化の方法を説明し、ターゲット枠内に打球が入った場合、フィードバック情報として実験補助者がベルを鳴らすことを伝え、できるだけ高得点を取ることを求めた。卓球の打法には、ラケットの握り方に依存し、大別してペンホルダー打法とシェークハンド打法の2つがある。ペンホルダー打法においてバックハンドドライブを遂行する場合、打者が体幹部を回旋させることなく打球し、フォアハンドドライブと大きく動作が異なってしまう。そのため、本研究ではフォアハンドドライブとバックハンドドライブともに体幹部を回旋させる必要があるシェークハンド打法を採用した。

2. 3. 実験設定

Figure 1に、実験設定を示す。実験参加者が打球動作を遂行するコートの反対側の台の端から500mm離れた距離に、投射マシンを設置した。ボールの投射時点を同定するために、光電管センサ(OMRON S3D2-CK)を投射マシン

の投射口に設置した。ボールを投射する時間幅は、日本代表の選手4名の試合分析から、打球して次のボールが打球されるまでの時間が6試合平均で766msであったとするYuza et al. (1992)を参考に、770msに設定した。ボール投射口の高さは、地面から950mmであった。投射マシンの前後方向の打ち出し角度は、参加者側のコートの端から300mmの位置にワンバウンドするように設定された。左右方向の打ち出し角度は、卓球台のセンターラインからフォアサイドが200mm、バックサイドが100mm離れた位置に飛来するように設定された。実験前に、ボールを100球投射し、投射マシンの精度を確認した結果、投射間隔の標準偏差は5.5ms、前後方向でのボール飛来位置の標準偏差は57mm、左右方向では13mmであった。フォアサイドとバックサイドにおいて左右方向の飛来位置が異なる理由は、ラケットを持つ右手の位置を中心として、左右対称にボールを投射するためであった。ボールが投射されてワンバウンドするのに要する時間は 415 ± 7 msであり、投射から実験参加者の立ち位置に到達するのに要する時間は 1000 ± 9 msであった。実験者が投射マシンの投射方向を変える装置を手動で操作することによって、ボール飛来方向の切替を実現した。投射口は特に遮蔽せず、実験参加者はボール飛来方向の切替を見ることができた。投射口を遮蔽しなかった理由は、ボールインパクト後に次のボールが投射されるまでの時間が100ms以下であることを予備実験で確かめており、インパクト後に時間的余裕をもって飛来方向の切替を見る時間が殆どないと考えたためであった。また、たとえ飛来方向の切替を見る時間があったとしても、その切替も含めて入力ボタンであると考えたため、投射口は遮蔽しなかった。

実験参加者の打球動作を、光学式モーションキャプチャシステムのカメラ (Qualysis oqus300) 6台を用いて、サンプリング周波数500Hzで記録した。実験参加者の左右肩峰に20mmのマーカを貼付し、左右肩峰の位置をデジタイズした。実験空間は、右手直交座標系を用いて、鉛

直上向き方向をZ軸の正、実験参加者と投射マシンを結ぶ方向をX軸の正とし、Y軸は他の2軸と直交する方向とした。キャリブレーションによる誤差は、1人の実験参加者が実験を行うごとにキャリブレーションを行ったために値は異なるが、いずれの場合も、カメラ6台各々の静的キャリブレーションの誤差が1.5mm以下で、動的キャリブレーションの誤差が1mm以下であった。

運動結果同定のため、打撃されたボールの飛来した位置を、デジタルビデオカメラ (SONY HDR-HC3) を用いて撮影した。投射マシンが設置されたコートの側方にカメラを設置し、打撃されたボールが台上に飛来した位置を同定することで、運動結果の得点を算出した。

2. 4. 実験条件

周期入力条件と切替入力条件という2種類の実験条件を設定した。周期入力条件は、フォアサイド (F) かバックサイド (B)、どちらか一方にのみボールが反復投射される条件であり、各飛来方向とも30球ずつ投射された。切替入力条件は、2種の飛来方向のいずれかが反復投射される条件であり、203球投射されたが、実験参加者の疲労を考慮し、203球を7セットに分け、1セットにおいて29球ずつであった。切替入力条件においてフラクタル性を顕在化するために、3次の系列効果を含む疑似ランダムで投射し、8種類の系列 (FFF, FFB, FBF, FBB, BFF, BFB, BBF, BBB) を組み込んだ。3次の系列であるために、各セットの始め2球を除いた27球を分析対象とした。分析対象であった189球 (7セット×27球) に、8種類の各系列を23球以上組み込み、端数分をランダムに振り分けた。参加者1名における総試行数は、周期入力条件 (フォアサイド: 30試行, バックサイド: 30試行) と切替入力条件 (203試行) の263試行であった。

2. 5. 手続

実験前に、参加者に課題および運動結果の得点化について説明し、マーカの貼付後、十分

な準備体操を行わせた。さらに実験設定に慣れるために、10分間の練習後に実験を行った。疲労による影響を除くため、セット間に3分以上の休憩を設け、次のセットの開始は参加者の意志に依るものとした。1人の参加者につき、実験に要する時間は1時間以内であった。

2. 6. 分析方法

Z軸上での両肩峰を結ぶ肩セグメントの midpoint の鉛直方向速度 (midpoint velocity) と、X-Y平面上での肩セグメントの回旋角速度 (angular velocity) を用いて、打球動作の振る舞いを記述した。この変数を用いた理由は、周期的動作における律動性が身体運動の巧みさを特徴づける指標となることが報告されており (マイネル, 1981)、本研究でも、一定の間隔で飛来するボールに対して、身体を鉛直方向に律動的に

動かす運動がみられたためである。また、打球動作の学習段階として、末端部のフォワードスイングが体幹部の回旋を伴わない上肢優位性 (arm domination) と、末端部のフォワードスイングと体幹部の回旋が同時に生じる単一動作 (unitary action) を経て、体幹部の回旋が末端部のフォワードスイングに先行する開放パターン (opening pattern) に移行することが報告されている (Wickstrom, 1975)。これより、打球動作の巧みさを観察するうえで体幹部の制御が重要な要素であると考えられた。特に、ラケットの質量が軽い卓球では、ラケットを操作する腕の近位にある肩セグメントの制御が、末端部における安定した運動の遂行に重要だと考えたため、肩セグメントの回旋角速度を変数として用いた。また、肘の屈曲伸展角度、角速度や腰セグメントの回旋角度、回旋角速度も同様に分析

Figure 1 Experimental set-up

し、本研究で用いた変数と同様の傾向がみられている。ラケットのような末端部の運動は、動きが素早いいため高周波となり、撮影を行うなかで生じる高周波ノイズと弁別しにくいいため、分析対象としなかった。

位置データの高周波ノイズを除去するため、各マーカーごとの遮断周波数を残差分析により決定し (Winter, 1990), 遮断周波数を6-11Hzとした2次のバターワース型デジタルフィルタをかけた。肩セグメントの角度は、左肩峰から右肩峰へと向かうベクトルをX-Y平面上で投影し、それがY軸と逆方向に向かうベクトルとなす角度と定義した。

切替ダイナミクスモデルに基づき、連続力学系について検討するため、肩セグメントの midpoint の鉛直方向速度 (x_1) と回旋角速度 (x_2) の時系列データを、超円筒状態空間M内の軌道として表現した (郷原, 1996)。ボール投射マシンよりボールが投射された時点を一周期分の軌道の始点 ($\theta=0$) とし、次のボールの投射時点を終点 ($\theta=2\pi$) とすると、一周時間分が円筒座標系の位相角 θ と対応し、その位相角と同時点の各変数 (x_1, x_2) の値によって、超円筒状態空間M内に1点が定まり、軌道はそれらの点の集合であった。さらに、幾何学的構造として特徴づけるため、超円筒状態空間M内の軌道の集合を、離散力学系であるポアンカレ断面 Σ ($\theta=2\pi$) 上のポアンカレ写像点として表現した。ポアンカレ写像点は、超円筒状態空間M内の軌道の集合をポアンカレ断面 Σ 上に写像したもので、軌道を縮約したものである (Gohara and Okuyama, 1999a)。フラクタル次元を、ポアンカレ断面 Σ 上での写像点の分布を用いて算出した。

運動結果およびフラクタル次元における熟練差を評価するため、 t 検定を用いた。また、ポアンカレ断面 Σ 上において、3次の系列効果がみられるか否かを評価するため、多変量分散分析を用いた。いずれの分析ともに、有意水準は5%とした。ただし、 t 検定の前提となる分散の等質性の検定を含んだ全体的有意水準を5%にするため、各々の検定の有意水準を2.5%と

した (Hogg, 1961; 竹内, 1973)。また、 t 検定および多変量分散分析において、G*Power 3を用いて、効果量 d および f^2 を算出した (Faul et al., 2007)。

2. 7. 相関次元

フラクタル次元の推定には、相関次元を用いた。相関次元は、フラクタル次元の一種であり、本来多くのデータ数が必要となるフラクタル次元の推定に対して、Grassberger-Procaccia (GP) 法により相関積分 (correlation integral) を求めることで、比較的少ないデータ数で相関次元を推定できる (Grassberger and Procaccia, 1983; 池口ほか, 1993; Shelhamer, 2007)。Figure 2は、エノン写像を例に、GP法により相関次元を求めた過程である。エノン写像は、

$$\begin{cases} x(t+1) = 1 - ax(t)^2 + y(t) \\ y(t+1) = bx(t) \end{cases} \quad (1)$$

で示される2次の非線形性を有する2次元写像である。Figure 2では、パラメータを $a=1.4$, $b=0.3$ として、500点をプロットしている。

相関積分は2点間距離の累積頻度関数であり、次式で定義される。

$$C(r) = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{N^2} \sum_{i,j=1}^N U(r - |r_{ij}|) \quad (2)$$

また、写像上の点を $v(i)$ とし、

$$v(i) = (v_1, v_2, v_3, \dots, v_N) \quad (3)$$

であり、 $r_{ij} = v(i) - v(j)$ である。ここで、 N は写像上での点の総数、 $U(\epsilon)$ はヘビサイド関数で、

$$U(\epsilon) = \begin{cases} 1 (\epsilon \geq 0) \\ 0 (\epsilon < 0) \end{cases} \quad (4)$$

である。

r は、 m 次元空間におけるアトラクタ上の1点 $v(i)$ を中心とする m 次元超球の半径である (Figure 2b)。相関積分は、点 $v(i)$ を除いた残りの $(N-1)$ 個の点 $v(j)$ ($j = 1, 2, \dots, N-1$) あ

るいは $v(k)$ ($k=1, 2, \dots, N-1$) (但し, $i \neq j \neq k$) が, 点 $v(i)$ を中心とする半径 r の m 次元超球内に入る個数を数え, この計算を全ての点 $v(i)$ を中心にして繰り返すことにより得られる (合原, 2000; 長島・馬場, 1992).

Figure 2cは, 半径 r と, 式 2 より得られた相関積分 $C(r)$ の両対数プロットである. 式 5 のように, 図中の両対数プロットのなかの適当な領域で推定された傾きが相関次元と定義されている.

$$\log C(r) \propto v(m) \log(r) \quad (5)$$

このとき, $v(m)$ は相関指数 (correlation exponent) であり, Figure 2c 中の白抜きの領域は推定領域を示している.

本研究では, 推定領域を求めるため, $\log(r)$ - $\log C(r)$ の傾きを, 6 点ずつを用いた最小二乗法により求めた (Boon et al., 2008; Cignetti et al., 2009; Todder et al., 2001). Figure 2dは, 両対数プロットの傾きを描いたものを $\log(r)$ の関数として示している. 推定領域は, この傾きが一定の値をとる安定した領域であり, Figure 2dでは $-5 < \log(r) < -1$ の範囲である. その領域での両対数プロットの傾きの平均を求め相関次

Figure 2 Example of calculation for the correlation dimension. (a) Hénon map ($N=500$, $a=1.4$, $b=0.3$). (b) Part of the Hénon map corresponding to the area of the gray square in Figure 2a. (c) Log-log plot of $C(r)$ versus r . (d) Slope of $\log C(r)$ as a function of $\log(r)$.

元と定義すると、 $D_2 \approx 1.20$ となり、先行研究で求められている $D \approx 1.21$ とおおよそ合致する (Grassberger, 1983). この方法を実データに適用することによって、相関次元を求めた。

3. 結 果

3. 1. 運動結果

周期入力条件および切替入力条件における各実験参加者の運動結果と、各群の平均と標準偏差を、Table 1に示した。ターゲットの大きい枠内に入った打球は1点、小さい枠内に入った打球は2点として、運動結果を得点化した。周期入力条件について、各群の平均の差を検定するため、分散の等質性検定および t 検定を行った。結果、分散の等質性が確かめられ ($F(6, 6) = 1.18, p = 0.843$)、さらに、 t 検定の結果、各群の平均は有意に異なっていた ($t(12) = 5.19, p < 1.0 \times 10^{-4}, d = 2.77, 95\% \text{ CI } [16.55 \ 59.31]$)。同様に、切替入力条件においても、分散の等質性が確かめられ ($F(6, 6) = 1.22, p = 0.819$)、さらに、 t 検定の結果、各群の平均は有意に異なっていた ($t(12) = 10.39, p < 1.0 \times 10^{-4}, d = 5.55, 95\% \text{ CI } [-21.89 \ 236.75]$)。したがって、両実験条件において各群の運動結果は異なり、熟練群は未熟練群よりも熟達していたといえる。

3. 2. ポアンカレ写像点の分布

3. 2. 1. 周期入力条件

周期入力条件について、熟練群および未熟練群1名ずつにおける、肩セグメントの midpoint の鉛

直方向速度および回旋角速度の時系列変化を Figure 3a, cに示し、超円筒状態空間 M における軌道を Figure 3b, dに示した。Figure 3bには、軌道の始点 ($\theta = 0$) からポアンカレ断面 Σ ($\theta = 2\pi$) の一周を6分割した時点と、おおよそそのインパクト時点における、打者のスティックピクチャーを示している。フォアサイドとバックサイドのいずれにおいても、 θ がおおよそ 1.8π の時点がボールインパクトの時点である。すなわち、ボールインパクト後、フォロースルーを遂行している最中の時点が、ポアンカレ断面 Σ ($\theta = 2\pi$) の時点である。軌道の集合は、各飛来方向に対応して実験参加者が遂行している連続運動をあらわし、安定した軌道の集合がみられた。これは、個々人で出力パターンは異なるが、各飛来方向に対応した出力パターンで打球動作を遂行していたことを示唆している。

Figure 5a, cは、熟練群および未熟練群1名ずつの周期入力条件のポアンカレ断面 Σ 上のポアンカレ写像点を示している。ポアンカレ断面 Σ 上の肩セグメントの midpoint の鉛直方向速度 (x_1) および回旋角速度 (x_2) の平均、標準偏差と、一要因の多変量分散分析の結果としてWilksの λ と効果量 f^2 を、Table 2に示した。ポアンカレ断面 Σ ($\theta = 2\pi$) 上のフォアサイド (●) とバックサイド (▲) に対応した写像点について、一要因の多変量分散分析を行った結果、全実験参加者において各飛来方向に対応した写像点の分布は有意に異なっていた。したがって、フォアサイドとバックサイドによって写像点の分布が異

Table 1 Outcomes in the periodic and switching input conditions

Condition	Expertise	Participant							M	S.D.
		#1	#2	#3	#4	#5	#6	#7		
Periodic	Expert	51	65	45	44	58	41	48	50.3	8.5
	Novice	41	22	34	15	17	23	27	25.6	9.3
Switching	Expert	137	153	161	136	179	134	150	150.0	16.3
	Novice	61	78	80	40	68	73	54	64.9	14.3

Figure 3 Dynamics for periodic input. (a) and (c) show time series of midpoint velocity (solid lines) and angular velocity (dotted lines) during 6 seconds for the periodic input condition of Expert #5 and Novice #4, respectively. The triangles indicate when a ball left the ball-projection machine. (b) and (d) show the corresponding trajectories, A_F and A_B in the hyper-cylindrical phase space $\mathcal{M}$. A trajectory starting from an initial state on Σ is drawn after cycling 30 times around the cylinder for each input.

なり、各飛来方向で異なる動作が遂行されていたといえる。

3. 2. 2. 切替入力条件

切替入力条件について、熟練群および未熟練群1名ずつにおける、各飛来方向に対応した肩セグメントの midpoint の鉛直方向速度および回旋角速度の時系列変化をFigure 4a, dにそれぞれ示し、超円筒状態空間 M 内における軌道をFigure 4b, eにそれぞれ示した。Figure 4c, fは、上記の軌道を各飛来方向で分けて示したものである。

熟練群および未熟練群1名ずつの切替入力条件のポアンカレ断面 Σ ($\theta=2\pi$) 上のポアンカレ写像点を、Figure 5b, dに示した。Figure 5中の

黒い記号 (●, ▲) は、1球前の入力パターンが現在の入力パターンと同じである場合であり、白い記号 (○, △) は、1球前の入力パターンが現在の入力パターンと異なる場合である。全実験参加者の肩セグメントの midpoint の鉛直方向速度 (x_1) および回旋角速度 (x_2) の平均、標準偏差と、一要因の多変量分散分析の結果として Wilksの λ と効果量 f^2 を、Table 3およびTable 4に示した。

Figure 5より、両実験参加者ともに、周期入力条件におけるポアンカレ写像点と比べ、切替入力条件における写像点の分布がより広がっていることがみてとれる。その写像点の分布において3次の系列効果があるかを同定するため

Table 2 Means, standard deviations, and Wilks' λ s and f^2 s of midpoint velocity (x_1) and angular velocity (x_2) in the periodic input condition

Participant		Expert					Novice				
		Foreside		Backside		Wilks' λ (f^2)	Foreside		Backside		Wilks' λ (f^2)
		M	S.D.	M	S.D.		M	S.D.	M	S.D.	
#1	x_1	0.38	0.08	-0.15	0.06	0.01***	0.05	0.03	0.02	0.02	0.03***
	x_2	-4.82	0.29	0.53	0.32	(141.86)	-2.13	0.40	1.45	0.23	(30.25)
#2	x_1	-0.06	0.09	-0.06	0.05	0.02***	-0.03	0.03	0.06	0.03	0.06***
	x_2	-3.34	0.54	1.36	0.28	(42.48)	-2.14	0.31	0.71	0.40	(16.54)
#3	x_1	0.23	0.09	-0.20	0.10	0.02***	0.10	0.02	0.03	0.04	0.12***
	x_2	-5.33	0.63	1.35	0.27	(49.00)	-1.09	0.32	0.23	0.20	(7.33)
#4	x_1	-0.20	0.06	-0.23	0.10	0.08***	0.14	0.06	-0.03	0.02	0.15***
	x_2	-1.58	0.66	1.60	0.35	(10.76)	-0.44	0.30	0.09	0.23	(5.62)
#5	x_1	0.07	0.11	0.02	0.08	0.01***	0.05	0.02	0.01	0.02	0.28***
	x_2	-4.59	0.35	1.37	0.41	(75.92)	-0.53	0.34	0.21	0.30	(2.52)
#6	x_1	0.01	0.15	0.08	0.11	0.03***	-0.03	0.07	0.09	0.05	0.23***
	x_2	-3.27	0.40	1.00	0.33	(34.71)	-1.20	0.63	0.41	0.31	(3.41)
#7	x_1	0.32	0.08	0.06	0.02	0.01***	0.19	0.03	0.03	0.02	0.09***
	x_2	-4.63	0.43	1.39	0.20	(82.33)	-0.25	0.59	0.51	0.19	(9.99)

*** $p < 0.001$, x_1 : midpoint velocity, x_2 : angular velocity.

Table 3 Means, standard deviations, and Wilks' λ s and f^2 s of midpoint velocity (x_1) and angular velocity (x_2) in the switching input condition for experts

Participant	Trial n		Foreside					Backside				
	Trial $n - 1$		Foreside		Backside		Wilks' λ	Foreside		Backside		Wilks' λ
			M	S.D.	M	S.D.	(f^2)	M	S.D.	M	S.D.	(f^2)
#1	x_1		0.53	0.14	0.55	0.20	0.79***	-0.22	0.12	-0.22	0.10	0.89**
	x_2		-4.67	0.34	-4.30	0.38	(0.27)	0.88	0.79	1.26	0.39	(0.12)
#2	x_1		0.04	0.14	-0.02	0.17	0.94*	-0.01	0.11	-0.10	0.09	0.81***
	x_2		-4.17	1.00	-4.16	1.13	(0.07)	0.58	0.35	0.84	0.42	(0.23)
#3	x_1		0.38	0.15	0.31	0.34	0.97	-0.11	0.17	-0.19	0.23	0.94
	x_2		-6.03	3.65	-5.38	3.99		0.99	1.66	0.84	0.57	
#4	x_1		-0.16	0.10	-0.18	0.10	0.89**	-0.09	0.13	-0.12	0.12	0.99
	x_2		-2.43	0.60	-2.05	0.62	(0.11)	1.18	0.42	1.19	0.44	
#5	x_1		0.07	0.10	0.11	0.08	0.91*	-0.05	0.10	0.01	0.07	0.84***
	x_2		-5.03	0.30	-5.21	0.35	(0.10)	0.94	0.28	0.98	0.23	(0.19)
#6	x_1		0.45	0.18	0.33	0.17	0.72***	0.16	0.13	0.14	0.11	0.98
	x_2		-2.20	0.93	-2.94	0.52	(0.38)	0.08	0.90	0.27	0.62	
#7	x_1		0.40	0.11	0.38	0.17	0.97	0.14	0.13	0.09	0.11	0.79***
	x_2		-5.55	0.46	-5.67	0.39		1.14	0.43	1.51	0.28	(0.27)

* $p < .05$., ** $p < .01$., *** $p < .001$, x_1 : midpoint velocity, x_2 : angular velocity.

Table 4 Means, standard deviations, and Wilks' λ s and f^2 s of midpoint velocity (x_1) and angular velocity (x_2) in the switching input condition for novices

Participant	Trial n		Foreside					Backside				
	Trial $n - 1$		Foreside		Backside		Wilks' λ	Foreside		Backside		Wilks' λ
			M	S.D.	M	S.D.	(f^2)	M	S.D.	M	S.D.	(f^2)
#1	x_1		0.06	0.03	0.05	0.05	0.87**	-0.02	0.05	0.04	0.03	0.72***
	x_2		-2.05	0.62	-1.31	1.27	(0.14)	1.02	1.18	1.85	0.55	(0.39)
#2	x_1		-0.02	0.04	-0.05	0.07	0.88**	0.07	0.04	0.08	0.02	0.84***
	x_2		-2.55	0.50	-2.19	1.23	(0.13)	0.54	0.92	1.09	0.49	(0.19)
#3	x_1		0.07	0.03	0.06	0.03	0.78***	0.03	0.03	0.04	0.04	0.87**
	x_2		-0.32	0.39	-0.68	0.46	(0.29)	0.20	0.31	0.43	0.31	(0.15)
#4	x_1		0.18	0.09	0.15	0.08	0.96	0.06	0.05	0.05	0.05	0.91*
	x_2		-1.19	0.66	-1.17	0.85		-0.32	0.84	0.06	0.38	(0.15)
#5	x_1		0.04	0.03	0.04	0.03	0.99	0.60	0.02	0.02	0.03	0.95
	x_2		-0.07	0.48	-0.09	0.65		-0.06	0.31	0.22	0.28	
#6	x_1		0.02	0.07	0.10	0.06	0.67***	0.14	0.11	0.06	0.06	0.56***
	x_2		-1.99	0.75	-1.88	0.81	(0.49)	-0.76	1.10	-0.09	0.62	(0.79)
#7	x_1		0.16	0.13	0.13	0.16	0.86**	0.06	0.12	0.13	0.09	0.82***
	x_2		0.77	1.91	0.30	1.59	(0.16)	1.07	1.64	1.75	0.87	(0.22)

* $p < .05$., ** $p < .01$., *** $p < .001$, x_1 : midpoint velocity, x_2 : angular velocity.

Figure 4 Dynamics for switching input. (a) and (d) show time series of midpoint velocity (solid lines) and angular velocity (dotted lines) during 12 seconds for the switching input condition of Expert #5 and Novice #4, respectively. The upward and downward triangles show the moments at which a ball was launched to the fore-side and backside, respectively. (b) and (e) show the corresponding trajectories, $\Gamma(c)$ in the hyper-cylindrical phase space $\mathcal{M}$. (c) and (f) show the trajectories for the fore-side ($\gamma_F(C_F)$) and backside ($\gamma_B(C_B)$) separately.

に、フォアサイドが2球連続して投射される系列 (FF: ●) と、1球前がバックサイドで次にフォアサイドが投射される系列 (BF: ○) に対応した写像点について、一要因の多変量分散分析を行った。また、バックサイドが2球連続して投射される系列 (BB: ▲) と、1球前がフォアサイドで次にバックサイドが投射される系列 (FB: △) に対応した写像点についても、同様の分析を行った。結果、フォアサイド

に関しては、熟練群7名のうち5名、未熟練群7名のうち5名について、1球前の入力パターンによって、次のボールの投射時点である写像点の分布が有意に異なっていた。バックサイドに関しては、熟練群7名のうち4名、未熟練群7名のうち6名について、1球前までの入力パターンによって写像点の分布の差が有意であった。各飛来方向ともに有意に分布の差がみられた実験参加者は熟練群3名、未熟練群5名であっ

Figure 5 Poincaré sections Σ for the periodic input and switching input of Expert #5 and Novice #4. (a) and (c) show the Poincaré maps for the periodic input condition, and (b) and (d) show the Poincaré maps for switching input condition. A black circle (●) indicates that the preceding and current input was foreside, and a white circle (○) indicates that the preceding input was backside and the current one was foreside. A black triangle (▲) indicates that the preceding and current input was backside, and a white triangle (△) indicates that the preceding input was foreside and the current one was backside.

た。すなわち、この8名においては、各飛来方向とともに、1球前までの入力パターンによって、

次のボールが投射される時点における写像点の分布が入力系列により有意に異なっていた。こ

Figure 6 Graphical representation of expansion of the average trajectories into the $\theta-(x_1, x_2)$ space for switching input. The top panel shows that a combination of two distributions (FF, BF) of the Poincaré map ($\theta=2\pi$) with four distributions (FF, BF, BB, FB) of the map ($\theta=0$) creates four trajectories at foreside. In the lower panel, a combination of two distributions (FB, BB) of the Poincaré map ($\theta=2\pi$) with four distributions (FF, BF, BB, FB) of the map ($\theta=0$) creates four trajectories at backside. The black lines show the average trajectories when the input before the current input and the input before that were the same. The gray lines show the average trajectories when the input before the current input and the input before that were different (data from Expert #5).

Table 5 Correlation dimensions for each participant

	Participant							M	S.D.
	#1	#2	#3	#4	#5	#6	#7		
Expert	1.24	1.57	1.23	1.65	1.25	1.55	1.35	1.41	0.18
Novice	1.61	1.49	1.77	1.92	1.93	1.81	1.69	1.75	0.16

の結果は、ポアンカレ断面 Σ 上に、1球前のボール (F, B) と次のボール (F, B) の組み合わせにより、写像点の分布が4種類 (FF, BF, BB, FB) 見られることを示している。Figure 6は、超円筒状態空間 M 内の平均軌道を、一球前のボール投射時点 ($\theta=0$) から次のボール投射時点 ($\theta=2\pi$) まで時間展開したものである。例えば、 $\theta=2\pi$ のFFに向かう軌道は、 $\theta=0$ のFFとBFから向かう2つの軌道があり、それぞれFFFとBFFという軌道になる。このことより、 $\theta=0$ の4つの写像点から $\theta=2\pi$ の4つの写像点に向かう8種の軌道が見られることが示され、出力パタンの切替に3次の系列効果があったことが明らかとなった。これらのことから、周期入力条件でみられた2種の出力パターンはアトラクタであるといえる (Yamamoto and Gohara, 2000)。

3. 3. ポアンカレ写像点のフラクタル次元

切替入力条件における写像点の分布に系列効果がみられたことから、2種のアトラクタ間を遷移する軌道がフラクタル性をもって遷移していたことが示唆された。そこで、切替入力条件におけるポアンカレ断面 Σ 上のポアンカレ写像点について、各実験参加者ごとに相関次元を求めた。各実験参加者の相関次元と各群での平均と標準偏差をTable 5に示し、それを図に表わしたものがFigure 7である。各実験参加者の相関次元は全て非整数値であった。すなわち、ポアンカレ写像点におけるフラクタル性が非整数値として定量化された。

熟練群および未熟練群における相関次元の平均の差を検定するため、分散の等質性検定およ

Figure 7 Means and standard deviations of correlation dimensions for experts and novices

び t 検定を行った。結果、分散の等質性が確かめられ ($F(6, 6)=1.28, p=0.772$)、さらに、 t 検定の結果、熟練群と未熟練群の相関次元の平均の差は有意であった ($t(12)=3.73, p=0.002, d=2.14, 95\% \text{ CI } [1.34 \ 1.82]$)。したがって、両群の相関次元は異なり、未熟練群は熟練群よりも相関次元が高いことが明らかとなった。

4. 考 察

本研究の目的は、多様な入力パタンの連続的な切替に対して、異なる動作を切り替えながら遂行する複合運動の巧みさを定量化することであった。そのため、卓球において熟練度が異なる2群を設け、ボールの飛来方向に応じてフォアハンドとバックハンドを連続的に切り替える切替打球動作を観察した。巧みさの定量化にはフラクタル次元を用い、両群のフラクタル次元を比較した。

まず、両群において熟練度の差異を確認するため、打球されたボールがターゲット枠内に入った数を運動結果として評価し、両群を比較した結果、周期入力条件および切替入力条件ともに熟練群の方が未熟練群よりも運動結果が高かった。これは、熟練群がより高い熟練度であったことを示している。

そこで、切替ダイナミクスモデルに基づき、周期入力条件および切替入力条件において、肩セグメントの midpoint の鉛直方向速度と回旋角速度を変数として、超円筒状態空間 M 内の軌道およびポアンカレ断面 Σ 上のポアンカレ写像点について検討した。周期入力条件において、両群ともに、各飛来方向に対応した軌道の集合がみられ、その写像点の分布は飛来方向で有意に異なっていた。この結果は、2種類の入力パタンそれぞれに対応した出力パタンをもって打球動作が遂行されていることを示している。この2種の出力パタンがアトラクタであるか否かを検討するため、切替入力条件における3次の系列効果を検証した。結果、熟練群3名および未熟練群5名については、フォアサイドおよびバックサイドという両飛来方向において系列効果がみられた。他の実験参加者においては、残りの2名を除き、両飛来方向のいずれか一方のみに系列効果がみられた。ポアンカレ写像点において系列効果がみられる場合、2種類の出力パタンはアトラクタであると考えられ、その2つのアトラクタ間を切り替わる軌道が、フラクタル性をもって遷移していることが明らかにされている (Gohara and Okuyama, 1999a; Yamamoto and Gohara, 2000)。ただし、超円筒状態空間 M 内の軌道においてフラクタル性がみられても、ノイズの影響により、ポアンカレ写像点において系列効果がみられないことが明らかになっている (Gohara and Okuyama, 1999b)。本研究で全ての実験参加者に系列効果がみられなかった理由は、ノイズの影響、すなわち、打球動作という全身運動を測定する際に生じた誤差によるものだと考えられる。上述したノイズの影響はあるが、殆どの打者に系列効果がみられたことは、2種の出力パタンがアトラクタであ

ると考えられ、ポアンカレ断面 Σ 上の写像点の分布がフラクタル性を有していることを示唆していた。

そこで、切替入力条件におけるポアンカレ写像点の分布のフラクタル性を定量化するため、フラクタル次元を相関次元によって算出した。その結果、全実験参加者の相関次元は1.23から1.93という非整数値となり、ポアンカレ写像点の分布がフラクタル性を有することを定量的に示すことができた。このことは、入力パタンが切り替わる場合の写像点の分布が、無秩序に分布しているのではなく、入力パタンに組み込まれた系列効果により、2種の出力パタンの分布がフラクタル性を有することを示している。

ただし、熟練度によって相関次元を比較した結果、未熟練群の相関次元の平均が1.75で、熟練群の平均の1.41よりも有意に高かった。この結果は、切替打球動作における熟練差が、フラクタル次元の高低として定量化できたことを示している。相関次元が2であるならば、2次元平面であるポアンカレ断面 Σ 上のポアンカレ写像点が断面全てを覆うような様相になる。この場合、フラクタル性が生じず、アトラクタ間の遷移が全くの無秩序であると言える (Gohara and Okuyama, 1999b)。人間の身体運動であるために、アトラクタ間の遷移が全くの無秩序になることは考えられない。しかし、未熟練群の相関次元が2に近いことは、入出力パタンの切替による運動が、熟練群に比べてより無秩序に近いことを示している。本研究における無秩序な運動とは、ある入力パタンに対して、それと対応しない出力パタンが遂行されることであると考えられる。これは、フォアサイドに飛来したボールに対して、バックハンドの出力パタンが遂行されるような場合である。実際、未熟練者のポアンカレ写像点 (Figure 5c, d) において、切替入力条件では、各入力パタンに対する出力パタンが重複し、明確に区別できない。そして、幾つかの写像点が、周期入力条件での写像点と大きく離れた位置に分布している。その顕著な例としては、Figure 5dにおいて、フォアサイドに対応した試技 (○) が図中の左端に

みられる場合や、バックサイドに対応した試技(△)が図中の右端にみられる場合である。このような試技は、入力パタンと出力パタンが対応していない試技である。一方、熟練者のポアンカレ写像点(Figure 5a, b)では、切替入力条件における殆どの写像点が、周期入力条件での写像点と近接した位置に分布している。すなわち、Figure 5bにおいて、フォアサイドに対応した試技(●, ○)が図中の上側にみられることはなく、また、バックサイドに対応した試技(▲, △)が図中の下側にみられることはない。これは、熟練者が、フォアサイドにはフォアハンドを用い、バックサイドにはバックハンドを用いて打球動作を遂行しており、入力パタンと出力パタンが対応していることを示している。つまり、このような入力パタンと出力パタンの対応関係が、フラクタル次元における熟練差として定量化できたと考えられる。

ただし、切替ダイナミクス理論では、アトラクタ間を遷移することによりフラクタル性が現れることのみについて言及しており、このフラクタル性が現れるアトラクタを生み出す力学系とカオスダイナミクスとの関係については言及されていない。また、本研究で用いられた実験参加者数は各群において7名であったが、群内において相関次元にばらつきがみられた。これは、熟練群と未熟練群という大まかな区分ではなく、競技年数や過去に行っていた競技などによってより細かく区分する必要があることが示唆される。加えて、最近の心理学研究全般において、効果量や検出力が重視されていることを考慮すると(鈴木・豊田, 2012)、今後サンプル数を増やすことにより、今回の結果を検証する必要がある。

本研究では、卓球における切替打球動作の巧みさをフラクタル次元を用いて定量化した。結果、フォアハンドとバックハンドを切り替える運動にフラクタル性がみられ、さらに、熟練度が高い打者ほどフラクタル次元が低いことが明らかとなった。このことから、複数の入力パタンに対する動作の切替を、力学系モデルにおけるアトラクタ間の遷移として捉えることによ

て、複合運動における巧みさをフラクタル次元で定量化可能であることが明らかになった。

謝 辞

本研究の一部は、文部科学省科学研究費補助金基盤研究(A)(No. 20240060, No. 24240085)の補助に基づくものである。記して謝意を表する。

文 献

- 合原一幸(2000) カオス時系列解析の基礎と応用。産業図書：東京。
- ベルンシュタイン：工藤和俊訳(2003) デクステリティ：巧みさとその発達。金子書房：東京。〈N. A. Bernstein (1996) On dexterity and its development.〉。
- Boon, M. Y., Henry, B. I., Suttle, C. M., and Dain, S. J. (2008) The correlation dimension: a useful objective measure of the transient visual evoked potential? *Journal of Vision*, 8: 1-21.
- Buchanan, J. J., and Kelso, J. A. S. (1993) Posturally induced transitions in rhythmic multijoint limb movements. *Experimental Brain Research*, 94: 131-142.
- Carlton, L. G. (1992). *Vision and Motor Control*, 3-31. Elsevier Science Publishers: Amsterdam.
- Carson, R. G., Kelso, J. A. S., and Elliott, D. (1995) Phase transitions and critical fluctuations in rhythmic coordination of ipsilateral hand and foot. *Journal of Motor Behavior*, 27: 211-224.
- Cignetti, F., Schena, F., and Rouard, A. (2009) Effects of fatigue on inter-cycle variability in cross-country skiing. *Journal of Biomechanics*, 42: 1452-1459.
- Paul, F., Erdfelder, E., Lang, A. G., and Buchner, A. (2007) G* power 3: a flexible statistical power analysis program for the social, behavioral, and biomedical sciences. *Behavior Research Methods*, 39: 175-191.
- 郷原一寿(1996) ダイナミカルシステムとしての生物。 *Bio Medical Engineering*, 10 : 3-10.
- Gohara, K., and Okuyama, A. (1999a) Dynamical systems excited by temporal inputs: fractal transition between excited attractors. *Fractals*, 7: 205-220.
- Gohara, K., and Okuyama, A. (1999b) Fractal transition: hierarchical structure and noise effect. *Fractals*, 7: 313-326.
- Gohara, K., Sakurai, H., and Sato, S. (1999c) Experimental verification for fractal transition using a forced damped oscillator. *Fractals*, 8: 67-72.
- Grassberger, P. (1983) On the fractal dimension of the hnon attractor. *Physics Letters*, 97A: 224-226.
- Grassberger, P., and Procaccia, I. (1983) Measuring the strangeness of strange attractors. *Physica D*, 9: 189-208.
- Haken, H., Kelso, J. A. S., and Bunz, H. (1985) A theoretical model of phase transitions in human hand

- movements. *Biological Cybernetics*, 51: 347-356.
- Hogg, R. V. (1961) On the resolution of statistical hypotheses. *Journal of the American Statistical Association*, 56: 978-989.
- 池口 徹・合原一幸・的崎 健 (1993) 相関次元解析について. *Technical Report of IEICE*, 93: 63-70.
- Kelso, J. A. S. (1984) Phase transitions and critical behavior in human bimanual coordination. *The American Physiological Society*, 246: R 1000- R 1004.
- Kugler, P. N., Kelso, J. A. S., and Turvey, M. T. (1980) On the concept of coordinative structures as dissipative structures: I. Theoretical lines of convergence. North-holland: Amsterdam.
- McLeod, P. (1987) Visual reaction time and high-speed ball games. *Perception*, 16: 49-59.
- マイネル: 金子明友訳 (1981) スポーツ運動学. 大修館書店: 東京. <Meinel, K. (1960) *Bewegungslehre*, Volk und Wissen Volkseigener: Berlin.>
- 長島弘幸・馬場良和 (1992) カオス入門—現象と解析と数理—. 培風館: 東京.
- 中本浩揮・森 司朗 (2008) 速度変化状況での一致タイミング課題における野球の熟達と運動修正との関係. *体育学研究*, 53: 39-50.
- Nishikawa, J., and Gohara, K. (2008) Automata on fractal sets observed in hybrid dynamical systems. *International Journal of Bifurcation and Chaos*, 18: 3665-3678.
- Runigo, C. L., Benguigui, N., and Bardy, B. G. (2005) Perception-action coupling and expertise in interceptive actions. *Human Movement Science*, 24: 429-445.
- Runigo, C. L., Benguigui, N., and Bardy, B. G. (2010) Visuo-motor delay, information-movement coupling, and expertise in ball sports. *Journal of Sports Sciences*, 1: 327-337.
- Schöner, G., Haken, H., and Kelso, J. A. S. (1986) A stochastic theory of phase transitions in human hand movement. *Biological Cybernetics*, 53: 247-257.
- Shelhamer, M. (2007) *Nonlinear dynamics in physiology*. World Scientific Publishing: Singapore.
- 鈴川由美・豊田秀樹 (2012) 心理学研究における効果量・検定力・必要標本数の展望的事例分析. *心理学研究*, 83: 51-63.
- 高安秀樹 (1986) フラクタル. 朝倉書店: 東京.
- 竹内 啓 (1973) 数理統計学的方法的基礎. 東洋経済新報社: 東京.
- Todder, D., Avissar, S., and Schreiber, G. (2001) Dynamic analysis of inter-words time intervals: a method to analyze the structure of communicative signals. *Medical Hypotheses*, 57: 772-779.
- Wickstrom, R. L. (1975) Developmental kinesiology: maturation of basic motor patterns. *Exercise and Sports Science Review*, 3: 163-192.
- Winter, D. A. (1990) *Biomechanics and motor control of human movement*. John Wiley and Sons: New York.
- Yamamoto, Y., and Gohara, K. (2000) Continuous hitting movements modeled from the perspective of dynamical systems with temporal input. *Human Movement Science*, 19: 341-371.
- 山本裕二 (2002) 連続および複合打球動作が打球成績に及ぼす影響: ダイナミカルシステムアプローチからの検討. *体育学研究*, 47: 243-251.
- Yuza, N., Sasaoka, K., Nishioka, N., Matsui, Y., Yamanaka, N., Ogimura, I., Takamatsu, N., and Miyashita, M. (1992) Game analysis of table tennis in top Japanese players of different playing styles. *International Journal of Table Tennis Sciences*, 1: 79-89.

(2012.5.11 受稿, 2013.2.26 受理)