

切替混合力学系はテニスの試合に履歴現象を見出せるか

Can a switching hybrid dynamical system reveal hysteresis in the movements of tennis players?

山 本 裕 二*

横 山 慶 子*

郷 原 一 寿**

Yuji YAMAMOTO *

Keiko YOKOYAMA *

Kazutoshi GOHARA **

We applied a switching hybrid dynamical system to tennis singles matches to find hysteresis in the movements of the players. Players' movements in nine international soft-tennis matches were analyzed from the viewpoint of a coupled switching hybrid dynamical system. First, the cycle, external input pattern, and state variables were defined. The cycle was defined as the interval of sequential opponent hitting and the external input pattern was defined as the deuce side or the advantage side, depending on the opponent hitting course. The state variables were defined as the angle and the tangential velocity in polar coordinates for which the origin was the center of the court. We considered the second-order sequence effect and the trajectories in hyper cylindrical state space using the state variables corresponding to the four kinds of external input for all rallies and the final rally of each point. Poincaré maps were depicted and analyzed. Hysteresis of the players' movements during the matches could not be revealed because, in disadvantage situations, players would adopt a strategy to overcome the disadvantage. This result suggests that players in ball-over-net games or reciprocal interpersonal competitions tend to clear the hysteresis and adopt the "not to lose" strategy.

1 序

スポーツにおける二者の協調や競合は、個体内協調を説明するための結合振動子理論に基づいた力学系理論を、個体間に拡張する形で研究されてきた。そこでは、鬼ごっこ、剣道や三者連携に適用され、同期パターンを解析できることが示された。そこでは、学習による同相同期から逆相同期への変化 (Kijima et al., 2012)、二者間距離のわずかな違いによる同相同期と逆相同期の切り替え (Okumura et al., 2012)、熟達差による同期パタンの違い (Okumura et al., 2017)、対称性のホップ分岐理論から予想される同期パターンと熟達差の関係 (Yokoyama & Yamamoto, 2011) などを明らかにしてきた。しかしながら、鬼ごっこや剣道は格闘技型の二者間競合であり、攻守が明確でない弱結合型振動子 (weakly coupled oscillators) と考えられる (Yamamoto et al., 2016, 2018)。また、三者連携は、環状に三つの振動子が結合したものである。

他方、テニスや卓球、バドミントンなどネット型競技

は、必ず交互に打球することがルール上規定されていることから、二者が強く連結した強結合型振動子 (strongly coupled oscillators) と考えられる。こうしたネット型競技に関しても、従来の結合振動子を用いて現象の説明がなされている。Palut and Zanone (2005) は、テニスの実験的なラリーの中で左右の動きを分析し、同相同期あるいは逆相同期で安定しているパターン、同相同期から逆相同期へ、あるいは逆相同期から同相同期へ遷移するパターンを見出すとともに、相対位相では50度と250度にピークがあり、250度がより安定しているとしている。そしてこれは、相手の打球を見てからそれを返球するために移動することによる時間遅れによるものだとしている。また McGarry (2006) は、スカッシュのラリーを分析し、中央からの横方向の距離では180度の逆相になるが、135度にも安定点があり、左右の距離で見ると70度 (90-20度) と290度 (270+20度) と20度の位相のずれにピークあり。これが仕掛ける方と仕掛けられる方の位相のずれであるとしている。

こうした二者間協調や競合に対する結合振動子によ

* 名古屋大学
** 北海道大学工学研究院
* Nagoya University
** Faculty of Engineering, Hokkaido University

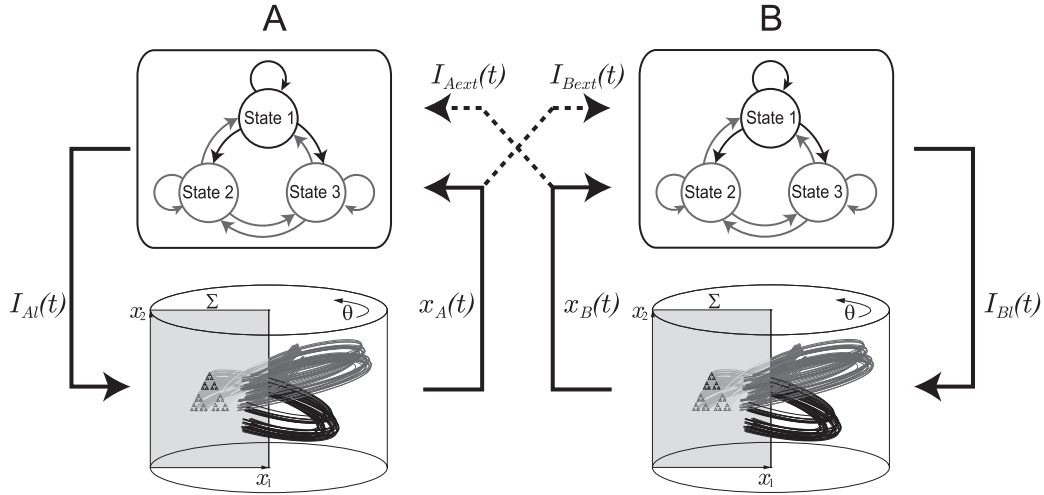


Figure 1 Coupled switching hybrid dynamical system. (Yamamoto et al. (2018), licensed under Creative Commons Attribution (CC BY))

る説明とは異なり、我々は連続力学系と離散力学系の切替混合力学系 (switching hybrid dynamical system) を提案してきた。そして、連続打球動作 (Yamamoto & Gohara, 2000; Suzuki & Yamamoto, 2015) や、連続標的照準動作 (Hirakawa et al., 2016) や切替追従動作 (Hirakawa et al., 2017) に潜む履歴現象 (hysteresis) や自己相似性を明らかにしてきた。さらに、二者間の協調や競合の説明するために、二つの切替混合力学系を結合した結合切替混合力学系を提案してきた (Yamamoto et al., 2018)。

切替混合力学系とは、離散力学系と連続力学系をフィードバック結合したもので、時間的に変化する外部入力パタンによって離散力学系の状態が遷移し、その状態に基づいて連続力学系が切り替わり、その出力も離散力学系の入力となるという非自励系の力学系モデルである (郷原, 1996; Gohara & Okuyama, 1999a, 1999b; Gohara & Nishikawa, 2004)。離散力学系は、脳における意思決定などに相当すると考えられ、他方、連続力学系は質量を伴う身体運動に相当すると考えられる。そして、この切替混合力学系を二つ結合することによって、二者の協調や競合を説明しようとするのが結合切替混合力学系である。すなわち、相互に他者の運動出力が外部入力パタンとなり、その外部入力パタンと自らの運動出力から状態が決定され、その状態に従って次の運動出力が決まるというものである。

本研究では、この結合切替混合力学系を、テニスのシングルスゲームに適用して、その説明可能性を探ることが目的である。先述したように、ネット型競技は、二者が交互に打球を繰り返すというところに特徴がある。すなわち、交互対人競技 (reciprocal interpersonal competition) といえ、会話のような話者交替 (turn-taking) のよう

に、相手の出力に対応して、次の自らの出力を決めていくことを繰り返すという、一種のコミュニケーションである。したがって、今の自らの出力は他者の出力に対して制約となるが、その他者の出力は次の自らの出力の制約となる。つまり、今の自らの出力が次の自らの出力に対する制約ともなるという構造を有しているのが特徴である。言いかえれば、二次、三次の系列効果がこのネット型競技には潜んでいるものと考えられる。こうした系列効果がネット型競技に潜む特徴であるかを、結合切替混合力学系で検討することが本研究の目的となる。

2 方法

2.1 分析材料

分析対象とした試合は、第8回アジアソフトテニス選手権大会 (2016) で行われたシングルスゲーム9試合を、コート後方からコート全体を撮影したものである。これらは国別対抗戦とシングルの双方に出場した10選手のもので、分析対象となった選手と試合数は Table 1 に示す。そのうち、サービスを除いて9回以上ラリーが続いた98ポイントを分析対象とした。これは各選手の2次の系列効果を検討するためであった。なお、分析対象となった選手は全員右利きの選手であった。この98ポイントに関して、ベースライン方向を X 軸、サイドライン方向を Y 軸とし、各選手の足元 (両足の間) を 30Hz で、Frame Dias IV (DKH 社製) を用いて二次元座標を得た。

2.2 分析方法

切替混合力学系を適用するために、以下に周期、外部入力パタン、状態変数を定義する。そして、これらの定

Table 1 Analyzed players and the number of matches.

Player	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
Number of matches	4	3	2	2	2	1	1	1	1	1

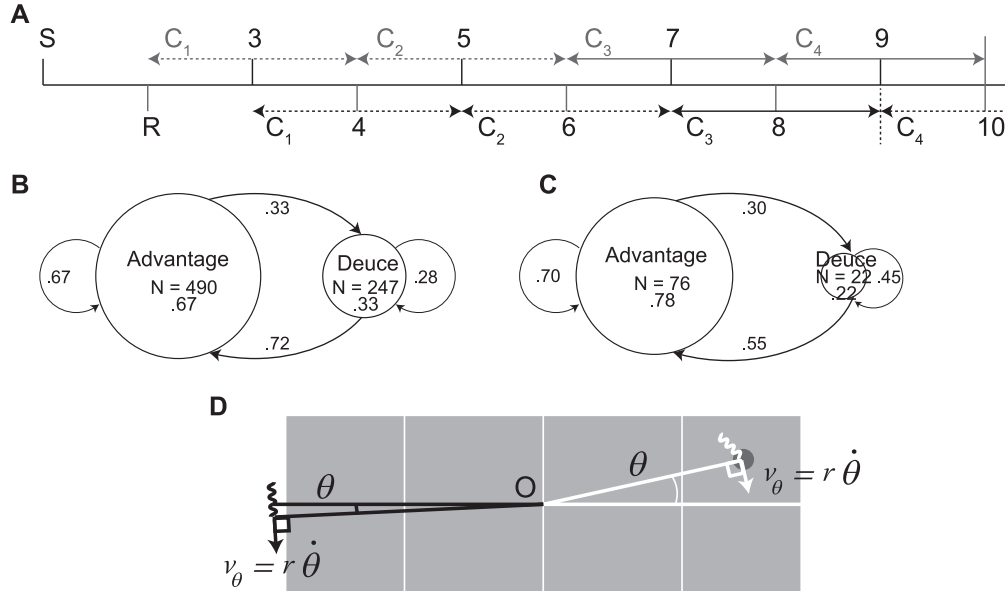


Figure 2 Cycle, external input, and state variables. A: Definition of the cycle. B: State transition probabilities for all external input pattern. C: State transition probabilities for final external input pattern. D: Definition of state variables.

義に基づき分析し、超円筒状態空間（以下、円筒空間と呼ぶ）に状態変数の軌道を描き、その特徴を解析する。

2.2.1 周期

周期は、他者の打球時点から、次の他者の打球時点までを1周期とした。したがって自らの打球時はその1周期の間に入る（Fig 2A）。ただし、サービスは両者が止まった状態から始まるため打球時点とせず、レシーブを最初の周期の始まりとした。また、二次の系列効果を検討するために、最初の2周期は分析対象とせず、3周期目からを分析対象とした。そのために、サービス側の選手に関してはレシーブ側の選手が通算8打目を打った時点まで、レシーブ側の選手は通算9打目を打った時点まで、すなわち全部で9ラリー以上続いたポイントのみを分析した（Fig 2Aの C_3 以降）。また、すべての分析可能なラリーと、98ポイントの各ラリーの最終周期のみを分析した。

2.2.2 外部入力パターン

外部入力パターンは、相手打球がデュースコートかアドバンテージコートによって分類することとした。これは、今回の分析対象となった選手が全員右利きであった

ため、結果的にフォアサイド（デュースコート）とバックサイド（アドバンテージコート）と対応していた。

すべてのラリーにおける、この外部入力パターンの遷移確率を示したものが、Fig 2Bである。デュースコートへの打球が全体の33%、アドバンテージコートへの打球が67%であった。また、デュースコートを繰り返す場合が28%、デュースコートからアドバンテージコートへ遷移する場合が72%、アドバンテージコートを繰り返す場合が67%、アドバンテージコートからデュースコートへ遷移する場合が33%であった。このことから、ソフトテニスのシングルスゲームにおいては、アドバンテージコートへの打球が多く、またそれが反復される場合が多いことがわかる。

また、ラリーの最終周期のみを見た場合（Fig 2C）には、デュースコートへの打球が全体の22%、アドバンテージコートへの打球が78%であった。また、デュースコートを繰り返す場合が45%、デュースコートからアドバンテージコートへ遷移する場合が55%、アドバンテージコートを繰り返す場合が70%、アドバンテージコートからデュースコートへ遷移する場合が30%であった。ラリーの最終周期においても、アドバンテージコートへの打球が多いことがわかる。

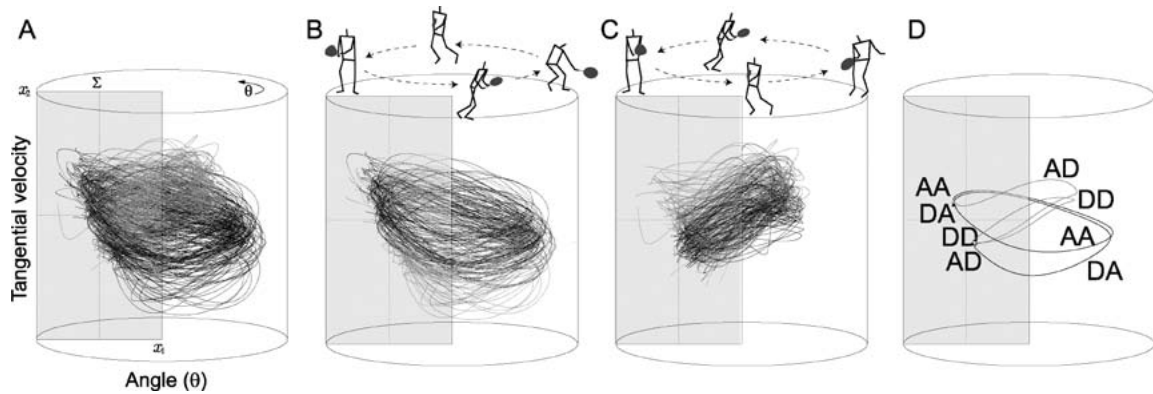


Figure 3 Trajectories in the hyper cylindrical phase space in all rallies. A: Each 60 trajectories corresponding to the advantage side (black) and deuce side (gray) input. B: Trajectories corresponding to the advantage side input including previous both input, AA and DA. C: Trajectories corresponding to the current deuce side input including previous both input, DD and AD. D: Mean trajectories corresponding to DD, AD, DA, and AA input as second order sequence effect.

2.2.3 状態変数

システムの状態変数は様々な方法で定義可能であるが、位置と速度の二変数が最低条件である。そこで本研究では、コート中心を原点とする極座標系で、選手の状態を位置と速度を表すことにした。すなわち、位置は角度 (θ)、速度は接線方向の速度 ($r\dot{\theta}$) とした (Fig 2D)。

2.2.4 円筒空間

選手の振る舞いを見るために、2つの状態変数、すなわち位置 (θ) と速度 ($r\dot{\theta}$) を用いた円筒空間内に各周期ごとの軌道として描いた (Gohara & Okuyama, 1999a, 1999b; Yamamoto & Gohara, 2000)。そして、次元を縮小したポアンカレ断面上のポアンカレ写像点に着目し、その軌道の特徴を分析した。

2.2.5 統計処理

ポアンカレ写像点の二次の系列効果、すなわち履歴現象を検討するために、2 (一つ前の入力パターン) \times 2 (今の入力パターン) の多変量分散分析 (MANOVA) を用いた。統計量は Wilks' Λ を用い、有意水準を 5% とし、効果量として多変量 η^2 を用いた。なおこれらの計算には、R 言語 (R3.4.3) を用いた。

なお本研究は、名古屋大学総合保健体育科学センターにおける健康・スポーツ系研究倫理委員会の承認 (30-13) を受けて行われた。

3 結果

3.1 円筒空間内の軌道

Fig 3 は、二次の系列効果について、すべての外部入力パターンに対する振る舞いを、60 試行分ずつ描いたもの

である。Fig 3A の黒い軌道はアドバンテージコート (A) への打球に対するもので、グレーの軌道はデュースコート (D) への打球に対するものである。したがって、これらにはデュースコートからアドバンテージコート (DA)、アドバンテージコートからアドバンテージコート (AA)、アドバンテージコートからデュースコート (AD)、デュースコートからデュースコート (DD) へという 4 種類の二次の系列効果を含む入力パターンが含まれている。そして、今の入力パターンがアドバンテージコートの場合とデュースコートの場合に分けて示したのが、それぞれ Fig 3B と Fig 3C である。ここで黒い軌道の一つ前の入力パターンと今の入力パターンが同じ場合、グレーの軌道の一つ前の入力パターンと今の入力パターンが異なる場合を示している。そして Fig 3D は、これらの 4 種類の入力パターンに対応した平均軌道を示したものである。黒い軌道がアドバンテージコートで、グレーの軌道がデュースコートへの軌道である。

Fig 4 は、二次の系列効果について、ラリーの最終周期の外部入力パターンに対する振る舞いを描いたものである。Fig 4A-D は、Fig 3 と同じである。

3.2 ポアンカレ写像点

Fig 5A は、すべてのラリーにおける二次の系列効果を含む 4 種類の外部入力パターンに対するポアンカレ写像点であり、Fig 5B は、その平均ポアンカレ写像点と 80% の等確率楕円を示したものである。Fig 5C は、ラリーの最終周期における二次の系列効果を含む 4 種類の外部入力パターンに対するポアンカレ写像点であり、Fig 5D は、その平均ポアンカレ写像点と 80% の等確率楕円を示したものである。

多変量分散分析の結果、すべてのラリーにおいては、

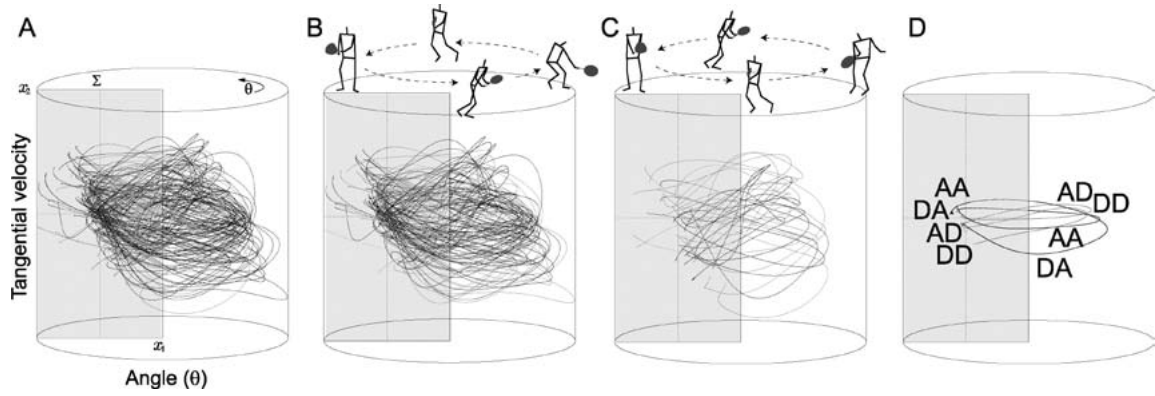


Figure 4 Trajectories in the hyper cylindrical phase space in final rallies. A: Trajectories corresponding to the advantage side (black) and deuce side (gray) input. B: Trajectories corresponding to the advantage side input including previous both input, AA and DA. C: Trajectories corresponding to the current deuce side input including previous both input, DD and AD. D: Mean trajectories corresponding to DD, AD, DA, and AA input as second order sequence effect.

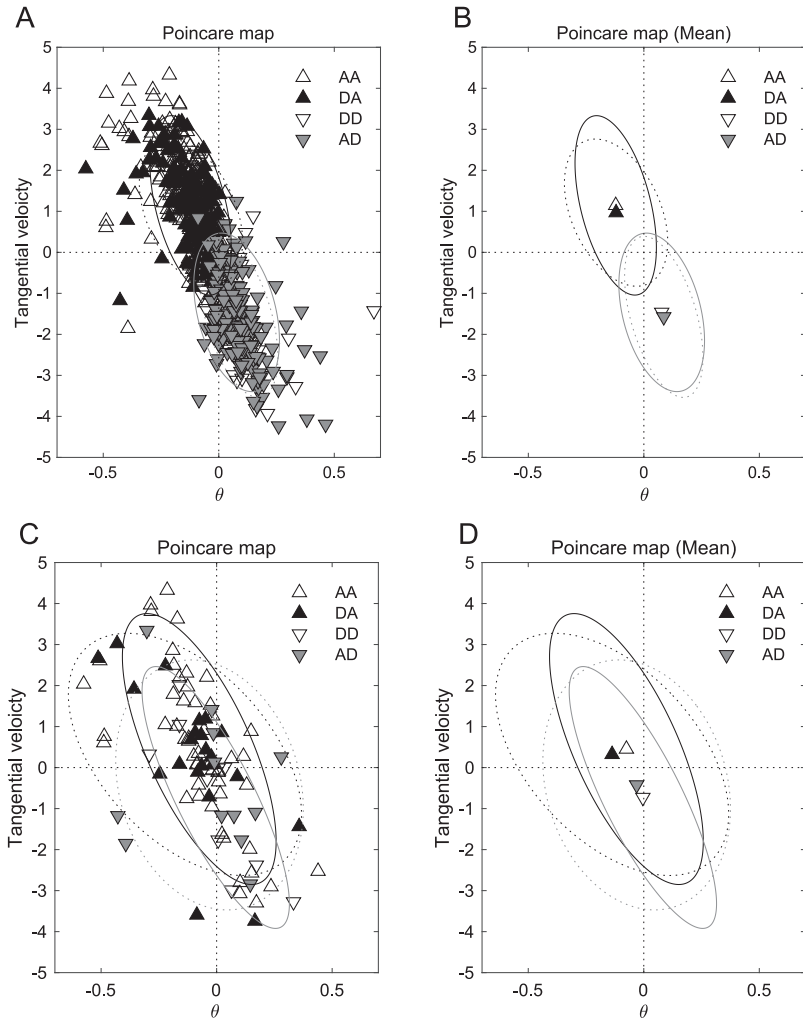


Figure 5 Poincaré maps. A: Poincaré map in all conditions. B: Mean Poincaré map and 80% equiprobability ellipse in all conditions. C: Poincaré map in final rallies. D: Mean Poincaré map and 80% equiprobability ellipse in final rallies.

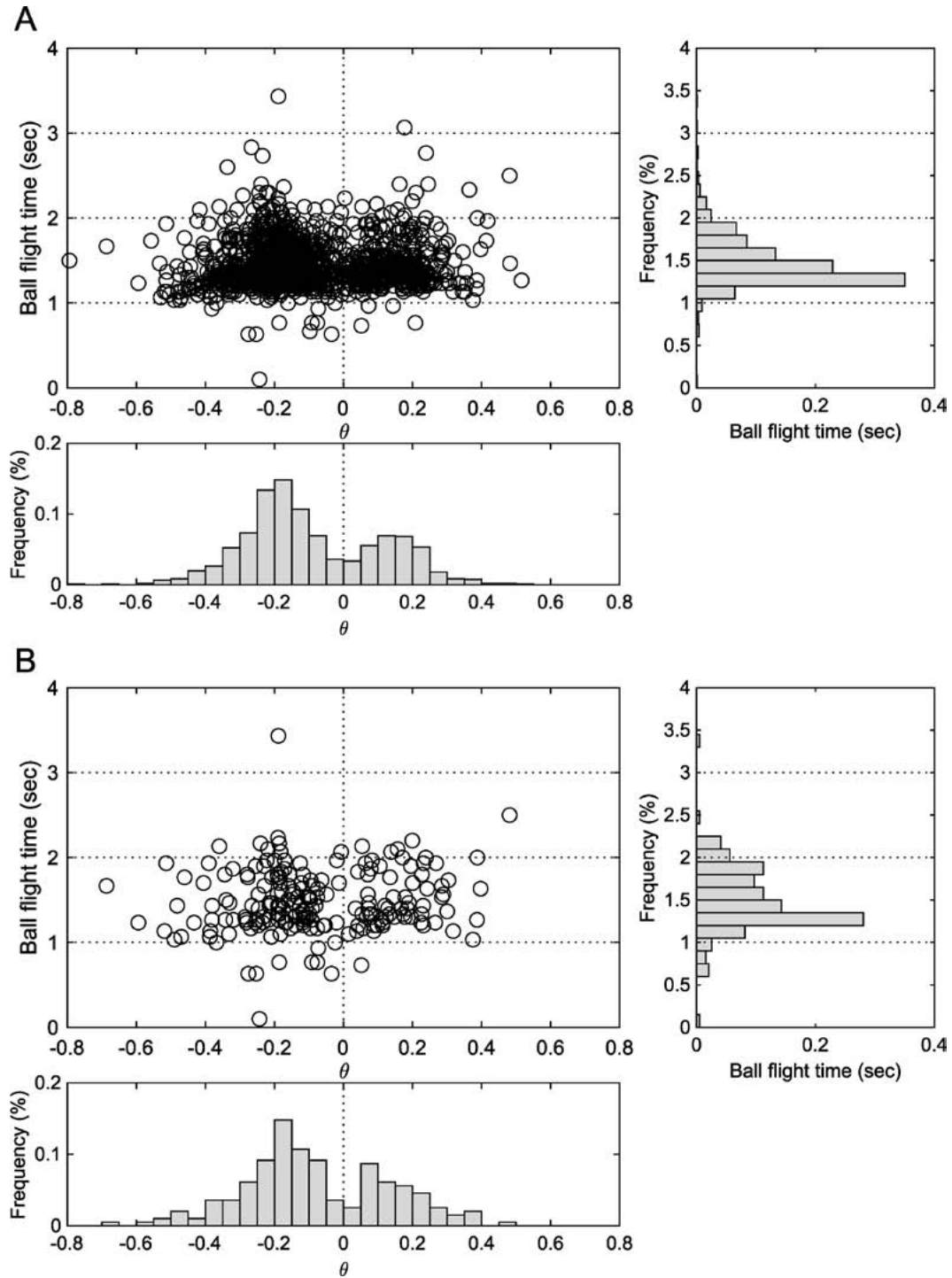


Figure 6 Relationship between θ and ball flight time and histograms of variables. A: Relationship between θ and ball flight time in all conditions. B: Relationship between θ and ball flight time in final rallies.

今の入力パタンの主効果だけが有意であった (Wilks' $\Lambda = 0.407$, $F = 532.2$, $df = 2,732$, $p < 2.0 \times 10^{-16}$, $\eta^2 = 0.59$)。またラリーの最終周期の場合では、いずれも有意な主効果・交互作用は見られなかった。このことは、すべてのラリーで見た場合には、一次の系列効果、すなわち今の入力パタンに影響しか見られないことを示し、ラリーの最終周期においては、今の入力パタンによっても振る舞いが異なるとは言えないことを示す。これは、Fig 5B, D の等確率楕円の重なり具合からも理解できる。

4 考察

本研究では、テニスシングルスゲームにおける選手の動きに潜む履歴現象を、切替混合力学系から検討することを目的とした。そのために、ソフトテニスの国際大会におけるラリー中の選手の動きを、極座標系における角度と速度から状態変数を定義して分析を行った。その結果、分析したラリー全体では今の外部入力パタンによってのみ影響を受け、ラリーの最終周期だけを見るとその影響も見られなかった。つまり、試合中の選手の動きには想定した履歴現象を見出すことはできなかった。この理由について考えてみる。

Fig 6A, B は、打球時の位置 (θ) と、その打球の飛翔時間との関係を、それぞれラリー全体、ラリーの最終周期ごとに見たものである。この飛翔時間とは、自らの打球時点と次の他者の打球時点との時間差であり、1～2秒の間に多く分布している。これはシュートボールと呼ばれる比較的速い打球とロビングと呼ばれる比較的遅い打球があることがわかる。特にラリーの最終周期では、ラリー全体に比べ、2秒に近いところに分布が移動している。これは、自らが打球後に態勢を立て直す時間を作るために、比較的遅い打球を行っていたものと考えられる。つまり、実際の試合では、打球時の位置や速度が大きくなり、すなわち不利な態勢になると、自らの打球によって飛翔時間を増加させ、態勢を立て直す戦略がとられると考えられる。これは、履歴現象を消失させる効果があり、不利な状況から均質な状況への転換戦略である。言いかえれば、履歴現象は不利な状況が累積されていくことであり、有利な状況と不利な状況の差が大きくなることともいえる。したがって、こうした不利な状況を解消しようとする戦略、言いかえれば「負けない戦略 (not to lose strategy)」は、実践の場面では数多くみられると考えられ、試合の膠着状態を招くと考えられるが (Kijima et al., 2012)、ネット型競技において定量的に明らかにしたものはこれまでに見られない。結合切替混合力学系を適用した結果として、選手の動きに潜むと考えられた履歴現象を見出すことはできなかったが、実践

的な場で生じている現象を記述することはできたと考えられる。

本研究では、周期を他者が打球した時点から、次に再度他者が打球するまでの時点を一周期とした。また、外部入力パタンをデュースコートとアドバンテージコートとした。そして、状態変数を、極座標系における位置 (θ) と速度 ($r\dot{\theta}$) とした。これら、周期、外部入力パタン、状態変数の定義の方法は無限に考えられる。テニスシングルスゲームを系としてみた場合に、系の特徴を表す方法が無限にあるということである。今後はさらに、系の特徴をよりよく表す方法を検討する必要がある。

文 献

- 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 (4), 3-10.
- Gohara, K. & Nishikawa, J. (2004). Fractals in neurodynamics: from hybrid dynamical systems point of view. *Artificial Life and Robotics*, 7, 189-192.
- Gohara, K. & Okuyama, A. (1999a). Dynamical systems excited by temporal inputs: Fractal transition between excited attractors. *Fractals*, 7, 205-220.
- Gohara, K. & Okuyama, A. (1999b). Fractal transition: Hierarchical structure and noise effect. *Fractals*, 7, 313-326.
- Hirakawa, T., Suzuki, H., Gohara, K., & Yamamoto, Y. (2017). Inverse proportional relationship between switching-time length and fractal-like structure for continuous tracking movement. *International Journal of Bifurcation and Chaos*, 27, 1730040.
- Hirakawa, T., Suzuki, H., Okumura, M., Gohara, K., & Yamamoto, Y. (2016). Switching dynamics between two movement patterns varies according to time interval. *International Journal of Bifurcation and Chaos*, 26, 1630026.
- Kijima, A., Kadota, K., Yokoyama, K., Okumura, M., Suzuki, H., Schmidt, R. C., & Yamamoto, Y. (2012). Switching dynamics in an interpersonal competition brings about 'Deadlock' synchronization of players. *PLoS ONE*, 7, e47911.
- McGarry, T. (2006). Identifying patterns in squash contests using dynamical analysis and human perception. *International Journal of Performance Analysis in Sport*, 6, 134-147.
- Okumura, M., Kijima, A., Kadota, K., Yokoyama, K., Suzuki, H., & Yamamoto, Y. (2012). A critical interpersonal distance switches between two coordination modes in kendo matches. *PLoS ONE*, 7, e51877.
- Okumura, M., Kijima, A., & Yamamoto, Y. (2017). Perception of affordance for striking regulates interpersonal distance maneuvers of intermediate and expert players in kendo matches. *Ecological Psychology*, 29, 1-22.
- Palut, Y. & Zanone, P.-G. (2005). A dynamical analysis of tennis: concepts and data. *Journal of Sports Sciences*, 23, 1021-1032.
- Suzuki, H. & Yamamoto, Y. (2015). Robustness to temporal constraint explains expertise in ball-over-net sports. *Human Movement Science*, 41, 193-206.
- Yamamoto, Y. & Gohara, K. (2000). Continuous hitting movements modeled from the perspective of dynamical systems with

- temporal input. *Human Movement Science*, **19**, 341–371.
- Yamamoto, Y., Kijima, A., Okumura, M., Yokoyama, K., & Gohara, K. (2018). A switching hybrid dynamical system: Toward understanding complex interpersonal behavior. *Applied Sciences*, **9**, 39.
- Yamamoto, Y., Okumura, M., Yokoyama, K., & Kijima, A. (2016). 13. Interpersonal Coordination in Competitive Sports Contexts: Martial Arts. In P. Passos, K. Davids, & J. Y. Chow (Eds.), *Interpersonal Coordination and Performance in Social Systems*, 179–194. Oxford, UK: Routledge.
- Yokoyama, K. & Yamamoto, Y. (2011). Three people can synchronize as coupled oscillators during sports activities. *PLoS Computational Biology*, **7**, e1002181.