

〔総 説〕

運動技能の制御・学習への力学系理論からの接近

山本 裕二

(名古屋大学)

Dynamical system approach to motor control and learning

Yuji YAMAMOTO¹⁾

【Abstract】

Motor control and learning are among the main themes in sport psychology. The development of research regarding motor control and learning encompasses two different approaches: the information processing or computational approach and the ecological or dynamical system approach. The motor program is a key concept in the information processing approach, derived from the development of informatics. Schema theory and the hypothesis of practice variability were supported by various motor tasks. On the other hand, the ecological perspective was developed in relation to the problem of degrees of freedom. The concept of self-organization was applied to the generation of movement patterns through applications of the dynamical system to individual skills. When applied to the act of striking a tennis ball, the dynamical system with temporal input revealed a fractal transition between two attractors during switching between forehand and backhand strokes. Based on these results, a new training method was proposed, and the effect was examined. Next, concerning interpersonal skills, the synchronization of two opposing players was examined in games of tag and kendo using relative phase analysis based on oscillator dynamics. The anti-phase synchronization of the forward-backward step movement was increased with learning sessions in playing tag. Expert kendo players also switched between anti-phase and in-phase movements corresponding to the critical interpersonal distance. The triadic coordination of a 3-vs-1 ball possession task was examined from the perspective of symmetry breaking, and the expert showed less symmetry breaking. The simulation results were confirmed based on the social force model, and the cooperative force was identified as most important. Training equipment that enhanced cooperative force was developed, and the effects were examined. Finally, we proposed that future research should focus on interpersonal skills as sport skills.

1) *Nagoya University*

Keyword : Interpersonal skill, Self-organization, Ecological approach

キーワード : 対人運動技能, 自己組織化, 生態学的アプローチ

本稿では, 運動技能の制御・学習研究の歩みを簡単に振り返り, 個人運動技能, 対人運動技能に力学系理論を適用した研究を紹介する。

1. 運動技能の制御・学習研究の歩み

1.1 情報処理装置

情報による人の理解 情報科学は, コンピュータ (computer) 工学, 通信 (communication) 工学, 制御 (control) 工学の3Cから構成されている (西垣, 2004)。そしてこれらは, フォン・ノイマンらの発明したデジタル・コンピュータ, クロード・シャノンの情報理論 (Shannon, 1948), ノーバート・ウィナーのサイバネティクス (Wiener, 1948) が基盤で, すべて1940年代に現れた。

1970年代になり, 情報という観点から, 人間を捉える情報処理心理学, あるいは認知心理学が台頭してきた (Neisser, 1976; Lindsay & Norman, 1977; Rumelhart, 1977)。コンピュータは, 入力装置, 記憶装置も含めた処理装置, 出力装置から構成されており, この構成がヒトを情報処理装置として理解することを促した。つまり, 情報がヒトの入力装置である感覚器官から処理装置である脳へ流れ, そこで処理・変換され, 出力装置である身体運動が制御されると考えたのである。

運動プログラムとフィードバック ノイマン型コンピュータは, プログラム内蔵方式のコンピュータで, このプログラムという概念を用いて, Keele (1968) は, 動作系列の開始前に構造化され, その系列全体が末梢からのフィードバックに影響されずに実行することが可能な筋への命令群を, 運動プログラム (motor program) と呼んだ。そしてこの運動プログラムに基づく運動制御を, 事前プログラム制御 (preprogrammed control) とよび, フィードバック要素を持たない制御である。

他方, 運動遂行中に筋運動感覚などの自己受容器, あるいは視覚などの外受容器を介して, 感覚

系から脳へのフィードバックが行われている。例えば, 捕球動作において, 捕球する手の情報を遮蔽した際に, 熟練者では手の空間定位のエラーは影響を受けないが, 非熟練者では空間定位のエラーが増大する (Fischman & Schneider, 1985; Diggles et al., 1987)。これは, 熟練者では手の空間定位は事前プログラム制御で行われており, 筋運動感覚はその制御ができていないかの確認のみに使われ, ボールを掴むタイミングの制御のために視覚情報が使われていることを示す。しかしながら, 非熟練者では手の空間定位にも視覚情報のフィードバックが必要であることを示している。

スキーマ理論と変動性練習仮説 ヒトを情報処理装置と捉えると, フィードバックによる記憶された運動プログラムの精緻化が運動学習であるという考え方に行き着く。それが, Adams (1971) の閉回路理論 (closed-loop theory) であり, その記憶容量の問題をスキーマという概念で解決しようとしたのが, Schmidt (1975) のスキーマ理論 (schema theory) である。つまり, 一つの般化運動プログラム (generalized motor program) を用いて, パラメータを変更することで多様な出力が可能になるとする。そしてこの般化運動プログラムにパラメータを与えるのが運動プログラミングで, パラメータと実行結果との関係を再生スキーマ, 実行結果とその際の感覚結果の関係を再認スキーマとして学習していくとするものである。つまり, ここでいうスキーマは経験に基づいて作られるルール, 概念, 関係などを表す。

したがって, このスキーマを学習するためには, 同じ目標値を目指して同じパラメータを用いるよりは, 多様なパラメータを用いて, それに対応した多様な実行結果を得る方が学習は促進するというのが変動性練習仮説 (variability of practice hypothesis) である。さらに, 転移 (例えば, Battig (1966) など) や記憶の研究 (例えば,

Bartlett (1932) など) から、練習順序に関する文脈干渉効果 (contextual inference effect) と関連したスキーマ理論の検証が行われてきた (van Rossum, 1990). 実験室課題や実際のスポーツ課題においても、ボールを投げる、打つなどの離散的な運動課題に関してはおおむね支持されており、多様なパラメータを用いて、ランダムな組み合わせで練習する方が、学習速度は遅くなるが、保持や転移に優れていると考えられている。

ヒトを情報処理装置と捉え、誤差のない正確な動作を反復することができるのがすぐれた運動制御で、それを獲得する学習過程は、フィードバックを有効に用いて誤差を減少させる過程と考えられてきた。

1.2 生態学的アプローチと力学系理論

Bernstein 問題 他方、Bernstein (1967) は歩行やピアノを弾く動作など周期的な運動は、いくつかの三角関数の和として表されるとし、すべての運動指令を運動プログラムとして生成する必要はないとした。つまり、複雑な全身運動を行う際には、関節運動、筋収縮からニューロン活動のレベルまでの自由度を考えるとすべての運動指令を指示することは原理的に困難であると指摘し、これがのちに Bernstein 問題、あるいは自由度問題と呼ばれている (山田, 1997)。そして、この問題の解法として提案したのが、協応構造 (coordinative structure) で、自律的なシステムとして、他の筋との協働 (synergy) が重要であるとした。

また、ヒトの運動システムは解剖学的・力学的・生理学的多義性があるため、同じ運動指令から同じ運動結果を得られるとは限らない。これが Bernstein (1967) の指摘した文脈多義性で、冗長性 (redundancy)、あるいは不良設定問題 (ill-posed problem) と呼ばれ、腕の運動軌道生成を最適化する際にも問題となる (川人, 1996)。

生態学的知覚論 伝統的な知覚論では、生物が空間を認知し、空間の中に存在する情報を刺激として利用して行動すると考えてきた。他方、Gibson (1979) は、環境と相対的な生物の動きによって生じる光流 (optical flow) の変化から情報は抽

出され、知覚行為結合 (perception-action coupling) によって、行為は持続するとした。

また、光流の変化によって運動が制御されていることを示す予見性視覚情報タウ (predictive visual information: τ) が定式化され (Lee, 1976)、走り幅跳びの助走における踏切前の歩幅の調整 (Lee et al., 1982) など、行為の分節化に用いられているとされた。つまり、何かを知覚して事前にプログラムを生成し、実行するのではなく、運動による知覚 (光流) の変化が、次の運動を生成していくという連続制御の立場をとる。

自己組織化 Kugler, Kelso, and Turvey (1980) は、熱力学における散逸構造 (dissipative structure) (Prigogine & Nicolis, 1971) と、リミットサイクル発振 (limit-cycle oscillation) の原理 (Iberall, 1970) を援用し、運動の協応構造を自律系のシステム (autonomous system) とみなす自己組織的情報システム (self-organizing information system) のモデルを提出した。一般には、砂山が時間とともに崩れるように秩序ある状態からランダムな状態へと向かうが、系内部の非線形要因によって、エネルギーが散逸して秩序構造が維持されることを自己組織化 (self organization) という。

これは生態学的知覚論の光流を情報一般に拡張し、特定の知覚運動循環の場の探索と、その場において環境の情報を利用しながら、環境との適応のために自己組織的に協応する生物システムを仮定した。したがって、生命体、環境、課題の制約によって場が特定され、その特定された場における情報の流れに従って、行為は自己組織化されると考える (Newell, 1986)。

HKB モデル 自己組織化の特徴として、水の状態が氷から水、水から蒸気へ一定の温度で急激に状態 (相) が切り替わる相転移現象があげられる。この相転移現象を指振り実験で検証し、定式化したのが著者らの名前を付けた Haken-Kelso-Bunz (HKB) モデルである (Haken, Kelso, & Bunz, 1985)。左右の指を左右へ動かす逆相同期から徐々に動きを速くしていくと、ある時点で内側外側に両方の指が動く同相同期に突然切り替わる。しか

しながら、初めから両手を内側外側に動かしている場合には、速くなってもそのままの動きを維持する。これを結合振動子 (coupled oscillator) によって定式化したのが、HKB モデルである。

このモデルは、四肢のリズミカルな協応運動 (Carson et al., 1995 ; Fitzpatrick et al., 1996), 音と運動の協調 (Kudo et al., 2006), 対人間の協調運動 (Schmidt et al., 1990 ; Schmidt & Turvey, 1994) にも拡張され、スポーツ場面における動きにも適用されている (Miura et al., 2011 ; Diniz et al., 2014 ; Varlet & Richardson, 2015 ; Caron et al., 2017). HKB モデルは、結合振動子の同期モデルであるため、リズミカルで周期的な運動を課題にしたものがほとんどである。

2. 個人運動技能への力学系理論の適用

2.1 打動作と切替ダイナミクス

スポーツにおける個人運動技能は、環境からの入力に対応しない閉鎖技能 (closed skill) と、環境からの入力への対応が求められる開放技能 (open skill) という分類が行われてきた (Poulton, 1957 ; 吉田, 2008). 打動作のような開放技能においては、環境からの外部入力によって運動パターンを切り替えながら生成するモデルが必要となる。そこでここでは、時間的に変化する外部入力を考慮した切替ダイナミクスのモデルを援用する (Gohara & Okuyama, 1999a, 1999b).

切替ダイナミクス 外部からの入力パターンを陽に取り込んだのが、切替ダイナミクスのモデルである。式 (1) は、状態 x の変化 (\dot{x}) は、自分の状態 (x) のみで決まることを表し、自励系のシステム (autonomous system) である。式 (2) は、状態 x の変化は、自分の状態と外部入力パターン $I(t)$ によって決まることを表し、非自励系のシステム (non-autonomous system) である。HKB モデルは、外部入力パターンの切替が緩徐な場合である。また式 (2) は式 (3) とも書け、 $A(\lambda)$ は自分の状態 (内部状態) を表す。

$$\dot{x} = f(x) \quad (1)$$

$$\dot{x} = f(x, I(t)) \quad (2)$$

$$= A(\lambda)x + I(t), x \in R^N \quad (3)$$

図1は、切替ダイナミクスのシミュレーション結果の例である (Gohara & Okuyama, 1999b). このシミュレーションでは、3つの入力パターンを確率的に切り替え、その入力パターンに対応した出力パターンが得られている (図1A). この出力パターンを、入力パターンの時間長を1周期として、超円筒状態空間上の軌道として描いたものが図1Bである。ポアンカレ断面と呼ばれるΣから軌道は出発して、入力パターンの時間長で円筒内を一周しポアンカレ断面Σに戻る。そしてこのポアンカレ断面上の写像点を見たのが、図1Cである。ここでは、限られた時間内に入力パターンが切り替わることによって、軌道が拡がり、フラクタル図形になることを示すためにシェルピンスキーギャスケット (Sierpinski gasket) になるように入力パターンを設定している。つまり、外部入力の切替に対応した出力はフラクタル遷移となる。

複雑に見える動きに潜む規則性 この切替ダイナミクスを、テニスの打動作に援用することによって、複雑に見える動きに潜む規則性が明らかになる (Yamamoto & Gohara, 2000). 図2Aは、フォアハンド側とバックハンド側に飛来するボールに対応した肩と腰の向きの時間変化で、フォアハンドとバックハンドストロークを入力パターンに対応して打っていることを示す。図2Bは、その動きを超円筒状態空間上に軌道として表したものであるが、複雑な軌道を示す。そこでポアンカレ断面に着目すると、図2Cのように、前の入力パターンが今の入力パターンと異なる時 (BF: バックハンドからフォアハンド, FB: フォアハンドからバックハンド) に、前の入力と同じ時 (FF: フォアハンドの繰り返し, BB: バックハンドの繰り返し) よりも分布が外に広がっていることがわかる。つまり、上からBF, FF, BB, FBの順に並ぶ。これは、図2Dで示す回転のあるコントロール

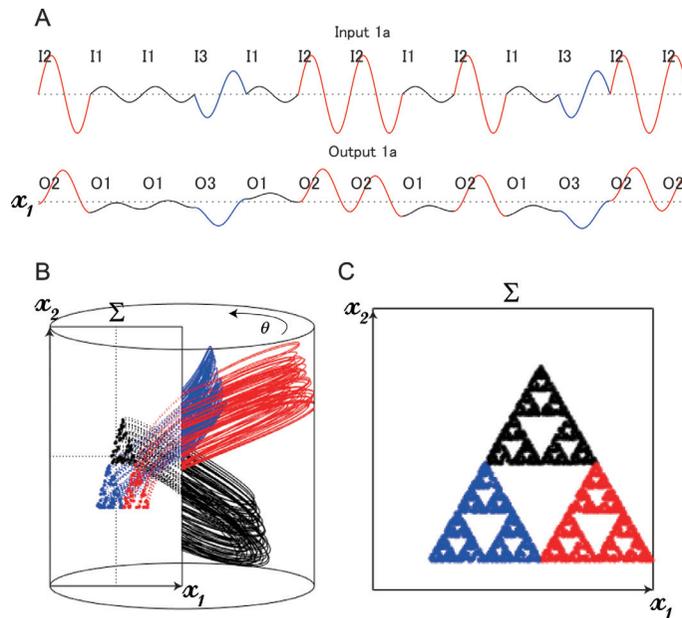


図 1 A:3つの入力パターン (I1, I2, I3) の切替とそれに対応した出力パターン (O1, O2, O3) の切替. B:入力パターンの1周期に対応した出力パターンの超円筒状態空間での軌道. C:ポアンカレ断面 Σ 上のポアンカレ写像点

集合の時間発展と一致する。カントール集合はフラクタル図形の一つで、テニスにおいてフォアハンドとバックハンドストロークを確率的に切り替えた時に、その動きには単純な規則から生じるフラクタル遷移という特徴がみられることがわかる。これはテニスのストロークにおける体幹の回旋慣性によるものと考えられる。

2.2 学習環境のデザイン

我々の動きは、さまざまな制約によって自己組織化される。前述したテニスの打動作に潜む規則性も、打球間隔が長くなると、待球姿勢がリセットされ、フラクタル遷移は見られず、機械のように同じストローク動作が生じる。入力パターンの時間長が制約となり、時間長によって生じる運動は大きく異なることが実証されている (Suzuki & Yamamoto, 2015)。したがって、制約を用いることによって新たな練習方法や効率的な学習環境を考えることができる。これをここでは、学習環境のデザインと呼ぶ。

テニスのストローク練習では、フォアハンドとバックハンドを別々に練習することが多い。ストローク動作では体幹を回旋させるため、慣性が生じる。したがって、フォアハンドストロークを繰り返すには、ボールを打ち終わった後の回旋慣性に抗して逆方向の回旋をしなければいけない。すると、初心者ではどうしても「手打ち」となり、ストローク動作に伴う大きな体幹の回旋を習得することが難しい。そこで、フォアハンド、あるいはバックハンドを打ち終わった後の回旋慣性を利用するには、フォアハンドとバックハンドを交互に行えばよいことになる。つまり、フォロースルーの回旋方向を次のバックスイングの回旋方向と一致させればよい。実際に、交互にストローク練習を行う場合と、従来のようにフォアハンドあるいはバックハンドを反復する練習を比較すると、初心者では交互に練習した方が体幹の回旋量が増加することが確かめられている (Yamamoto, 2004)。動きの生成機序を知ることで、新たな学習環境のデザインが可能となる。

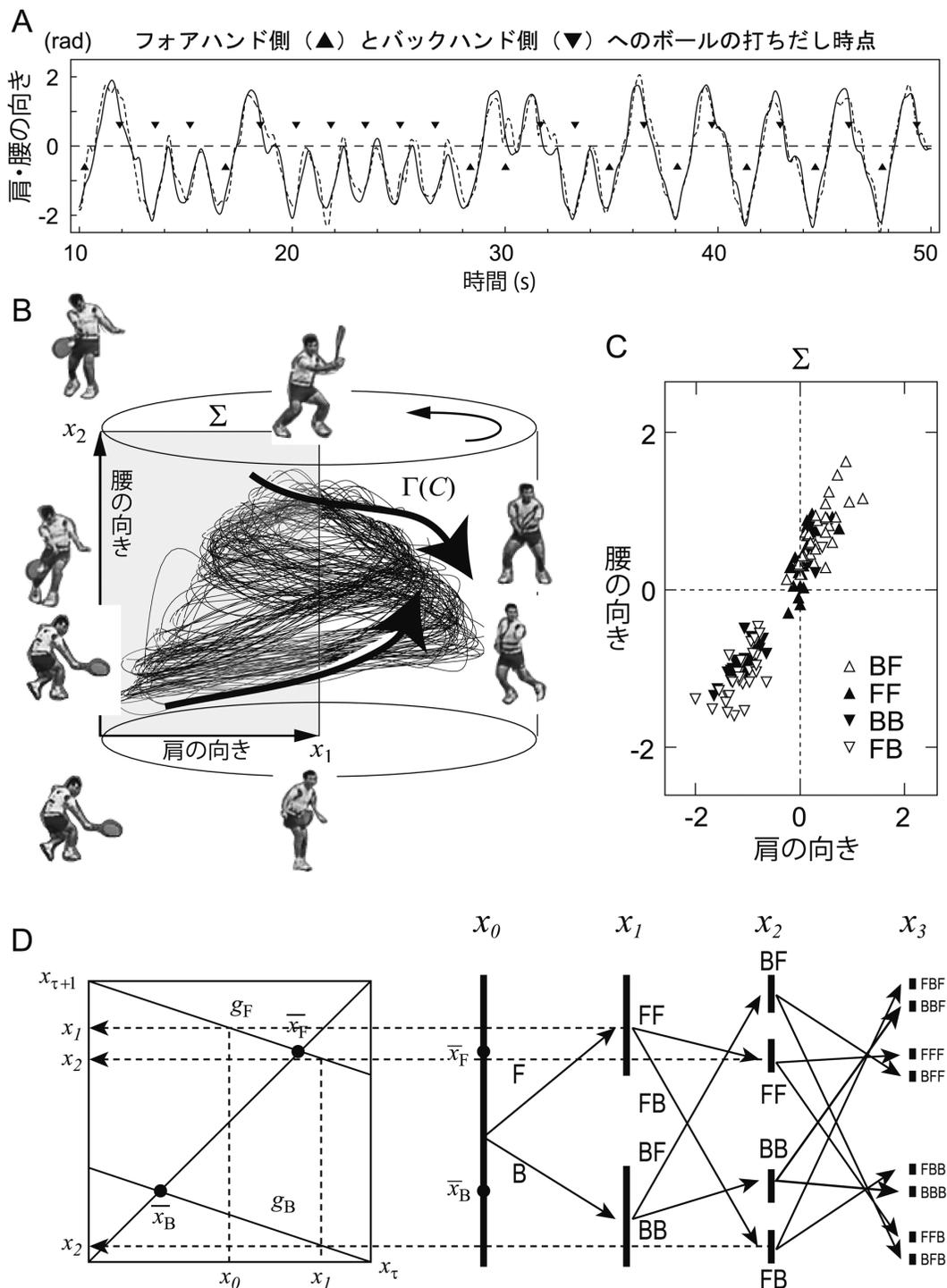


図 2 A: フォアとバックへ飛来するボールに対する肩と腰の向きの変化。 B: 超円筒状態空間での軌道。 C: ポアンカレ断面 Σ 上のポアンカレ写像点。 D: 回転のあるカントール集合の時間発展。

3. 対人運動技能への力学系理論の適用

3.1 二者競合と結合振動子ダイナミクス

従来、運動技能に関する研究は、投げる、打つなど個人の運動技能に関するものがほとんどであった。しかしながら、力学系理論では要素間の相互作用による全体の振る舞いを考えるため、対人や集団の運動技能を検討することが可能となった。ここでは、まず二者の競合による振る舞いについて、結合振動子ダイナミクスにおける同期現象から解明していく。

同期現象 同期現象は、大航海時代の1665年にオランダの科学者クリスティアーン・ホイヘンスが、航海中の経度を正確に測定するために作成していた二つの精密な振り子時計によって気づいた現象である。ホイヘンスは、吊るしておいた二つの振り子時計が、片方が「チック」と打つと、他方が「タック」と打つように、「共感 (sympathy)」することを見つけ、そしてそれが、二つの振り子時計を吊るしている板を伝わる振動によって生じることを見出した (Strogatz, 2003)。

リズムの同期、あるいは引き込みは、心臓の鼓

動を支えるペースメーカー細胞の同期、コオロギやカエルの鳴き声の同期などいたるところで見られる。これらはすべて、個々の細胞や鳴き声が周期的であり、あるリズムを持っていることから、振動子 (oscillator) と呼ばれる。

図3Aは、一つの振動子の角速度と位相角を表したものである。振り子を例にとると、振り子の角度を θ として、x軸に θ を、y軸に θ の時間微分を取ると、振り子の運動は単位円上を角速度 ω で等速円運動する物体として考えることができる。この単位円上を運動する物体の角度が位相角 ϕ で、この位相角 ϕ を時間微分したものが、角速度 ω となる。こういった動作をするものを振動子と呼び、 $\phi = \phi(t)$ を振動子の位相 (phase) と呼ぶ。 ω は時間に依存しない定数で、位相 ϕ の値は、 $0 \leq \phi < 2\pi$ で定義できる。そして、位相差、あるいは相対位相 (relative phase, $\Delta\phi$) とは2つの振動子の位相の差を求めたもので、角速度 ω が同じで位相が一致すれば、すなわち位相差が0度であれば、同相同期と呼ばれ、角速度は同じだが位相がちょうど逆になれば、すなわち位相差が π (180度) であれば逆相同期と呼ぶ (図3B)。また、

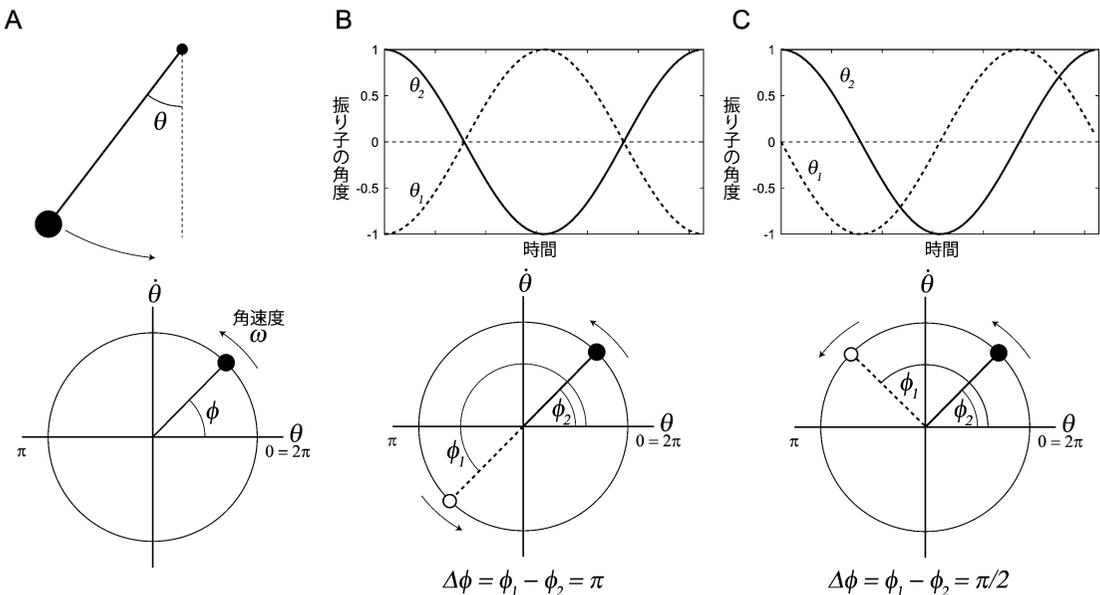


図3 A: 振り子の運動 (上) と位相角. B: 逆相同期の時系列 (上) と位相.
C: 位相差 $\pi/2$ の同期の時系列 (上) と位相.

図3Cには少しずらして振った時(片方が最下点で、他方が最大振幅で位相差 $\pi/2$)の、2つの振り子の角度変化と位相角の差(位相差)を示している。振動子が結合したことによって生じるリズムの同期は、結合振動子モデルと呼ばれている(Winfrey, 1967; Kuramoto, 1984)。

距離勲の獲得 柔道や剣道は二者の競合による対人格闘技型競技に分類される。これらの競技では、攻守が表裏一体で、相手との「間合い」が重要となる。この「間合い」の攻防は、結合振動子の同期現象として記述でき、二者が対戦を繰り返す中で「間合い」を学習することが示されている(Kijima et al., 2012)。

図4には、両腰にタグをつけ、二者が相手のタグを取り合うというゲームを、同じ相手と10回繰り返した際の最短試技と最長試技の二者の詰め引きの動きにおける相対位相を示してある。

縦軸は頻度で、横軸が相対位相で、左が同相同期、すなわち両者がお互いに詰め-詰めか、引き-引きという動きを行い、右側が逆相同期で一方が詰めれば他方が引くという動きとなる。図4Aは各ペアの最短試技での相対位相を示しているが、一定の傾向は見られない。しかしながら、図4Bの最長試技での相対位相を見ると、すべてのペア

で逆相同期が多くなっている。つまり、対戦を重ねるごとに、相手のタグを取りに行く戦略から、自分のタグを取られない戦略という、「負けない戦略」を身につけていたことがわかる。その結果、最短試技に比べ、最長試技のプレー時間は大幅に長くなっている。

熟達者の距離勲 剣道の熟達者の試合中での動きを、同様に結合振動子の同期から見たものが図5である(Okumura et al., 2012)。図5Aは、試合中の二者間距離の頻度分布である。2つの山があり、遠い間合いと近い間合いに相当する。なお、2.65mの縦線は、別に測定した打突可能距離を表す。したがって、多くは、この打突可能距離よりも少し離れた距離の間合いを取っていることがわかる。図5Bは、0.6mから30cmごとの距離における相対位相である。2.4mまでの近い間合いでは逆相同期が優勢で、3.0mより長いところでは同相同期が優勢である。しかしながら、最も頻度が多い2.7~3.0mの間では分布がほぼ平坦である。そこで、この2.7~3.0mの間を10cmごとに相対分布を求めたのが図5Cである。これを見ると、2.7~2.8mでは逆相同期、2.9~3.0mでは同相同期で、2.8~2.9mでほぼ平坦であることがわかる。つまり、わずか10cmの二者間距離の違い

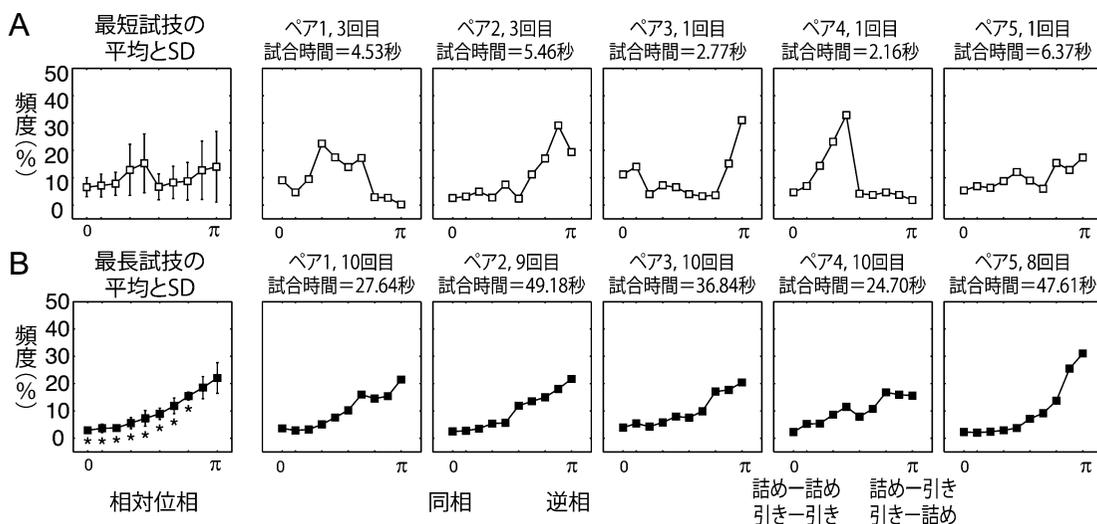


図4 A: 最短試技での相対位相。B: 最長試技での相対位相。

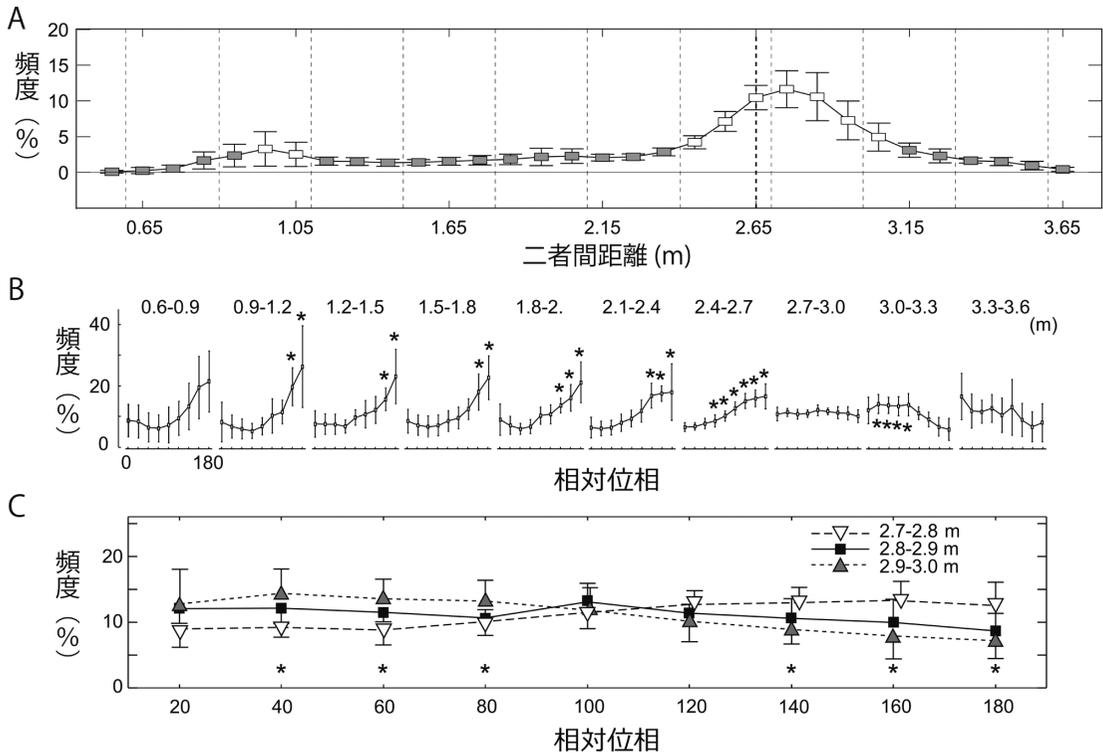


図 5 A: 試合中の二者間距離の分布. B: 30 cm ごとに見た相対位相. C: 2.7 m から 3.0 m までを 10 cm ごとに見た相対位相.

を感じて、攻防の仕方を切り替えていることがわかる。2.7 m 以上離れたところでのわずか 10 cm の違いを見極める、驚異の距離勘と言える。

3.2 三者連携と対称性の破れ

結合振動子と対称性の破れ 二者あるいは多数の結合振動子のダイナミクスは、蔵本モデル (Kuramoto, 1984) で記述することができる (Frank & Richardson, 2010; 山本他, 2015)。しかしながら、3 個以上の少数の結合振動子では、蔵本モデルの平均場近似は適用できず、3 つ以上の連立方程式からはそのダイナミクスを理解することは難しい。そこで、空間的な対称性から、時間的な対称性の破れを理解する群論に基づく対称性のホップ分岐理論が提案され (Golubitsky & Stewart, 1985, 2002)、動物の歩容 (Collins & Stewart, 1992, 1993) や、粘菌の時空間パターン生成 (Takamatsu

et al., 2004; Takamatsu, 2006) で検証されている。

三者連携の見えない力 サッカーにおける 3 対 1 ボール保持課題で、上級者と初級者の連携技能の違いを、対称性のホップ分岐理論から検証した (Yokoyama & Yamamoto, 2011)。図 6A に示すような、6 m 四方の中でのボール保持課題の際にできる角度を計測し、時系列で表したのが図 6B である。三角形の内角の和は 180 度であることから、2 つの角度が決まれば残りの角度は決まるため、位相平面上の軌道として表すことができ、その時間頻度を示したのが図 6C, D である。対称性のホップ分岐理論から予測される同期パターンと照合すると、上級者は位相平面上で円の軌道を示す回転パターン、初級者は三角形の軌道を示す部分逆位相パターンと一致することがわかる。これは上級者は三者がそれぞれ少しずつずれながら動い

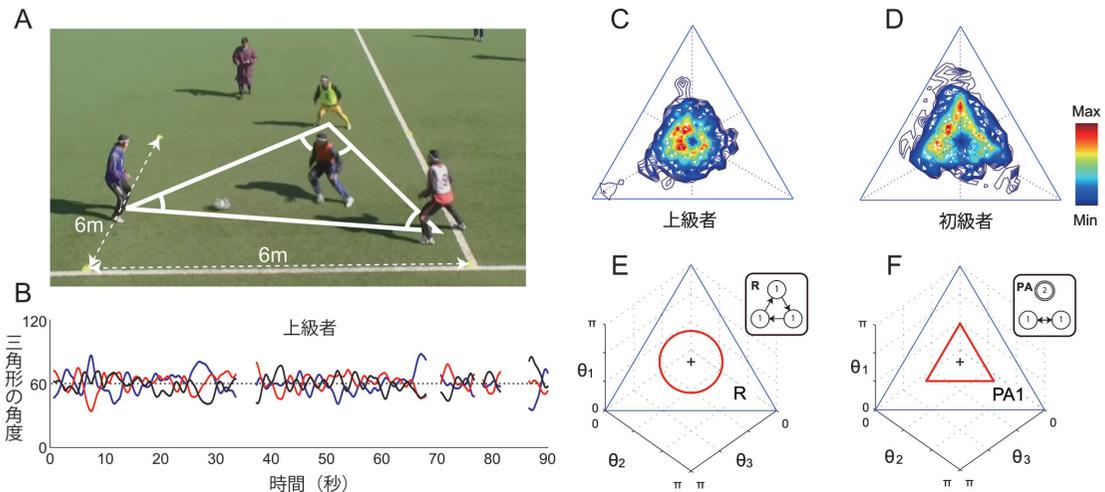


図 6 A : 計測の様子. B : 上級者の 3 者の角度時系列. C : 上級者の位相平面での頻度分布. D : 初級者の位相平面での位相分布. E : 上級者の回転パターン. F : 初級者の部分逆位相パターン

ているのに対し、初級者は一人が動き、他の二者が止まっていることを示す。

また、社会行動の数理モデル (social force model) (Helbing & Molnár, 1995) を援用して、この上級者の三者連携を可能にする見えない力を 3 種類仮定することによって、洗練された連携に必要な力を推定した (Yokoyama et al., 2018). 3 種類の力は、プレイエリアにとどまる「空間力」、相手から遠ざかる「回避力」、仲間との距離を保つ「協調力」である。シミュレーションの結果、洗練された三者連携には「協調力」が最も重要であることが明らかになった。

三者連携を促す練習用具 洗練された三者連携に仲間との距離を保つ「協調力」が重要であることから、初心者でもこの「協調力」を感じることができれば、上手な三者連携が可能にあると考え、三者をゴムバンドで繋ぐ練習用具を開発した (横山他, 2020a). サッカー経験のない小学生を対象に練習用具の効果を検討した結果、ゴムバンドを着けない状態よりも、より正三角形に近い状態でボール回しができることが明らかになった (Yokoyama et al., 2020). また、大学生を対象として練習用具を使ったトレーニング実験の結果に

おいても、練習用具を外した状態でのテスト試行で、パス回しの回数が増え、パスの乱れに対応した動きを獲得していることが示された (横山他, 2020b).

4. まとめにかえて：個人運動技能から対人運動技能へ

力学系理論は、それまでの情報処理理論と対立しながらも、さまざまな身体運動に適用されてきた (Meijer & Roth, 1988). 生態学的知覚論は、立位姿勢制御に適用され (Lee & Lishman, 1975), 走り幅跳びの歩幅調整 (Lee et al., 1982) などに拡張された。その後、自己組織情報システム (Kugler et al., 1980) を周期的な 3 つ玉ジャグリング (Beek & Beek, 1988) や台上でのスキースラローム課題 (Vereijken et al., 1992) に適用したのがスポーツ技能では最初と思われる。HKB モデルは四肢の協応動作といった身体運動へ適用が多く行われていたが、二者間の協応への適用が確認された (Schmidt et al., 1990) 後は、テニスコート上での相対する二人の左右の動きへの適用 (Palut & Zanone, 2005), またスポーツ場面における意思決定 (decision making) へも適用されてきた (Araújo et al., 2006).

しかしながら、これらの多くは個人運動技能に関する研究で、対人運動技能を扱った研究はまだ少ない。ここでいう対人運動技能の特徴は、環境が物理的・静的な環境ではなく、「生命」的・動的環境に対する運動技能である。したがって、他者の意図を完全に理解することはできないという前提のもと、ある時間的制約の中で運動を遂行しなければならない技能である。従来の対人・集団スポーツの学習のように、個人運動技能の獲得に戦略・戦術を付加するというのではなく、対人運動技能の獲得ができるように、今後は対人運動技能の本質を解明していく必要がある。

最後に関連する研究領域として、共同行為 (joint action) に関する領域がある (Knoblich et al., 2011)。ここでは、哲学的 (Searle, 1990; Bratman, 1992)、認知科学的 (Sebanz et al., 2006)、神経科学的 (Abe et al., 2019)、あるいは進化心理学的 (Tomasello, 2009) 接近法も、生態学的あるいは力学系理論による接近法とともに用いられ、共感 (sympathy) や意図の共有 (shared intentionality) などのキーワードのもと、研究が進められている。

謝 辞

ここで紹介した研究は、木島章文氏、奥村基生氏、門田浩二氏、横山慶子氏らとの共同研究によるものです。記して感謝いたします。また、これらの研究の一部は JSPS 科研費 20240060, 24240085, 17H02152, 20H00572 の助成を受けたものです。

文 献

Abe, M. O., Koike, T., Okazaki, S., Sugawara, S. K., Takahashi, K., Watanabe, K., & Sadato, N. (2019). Neural correlates of online cooperation during joint force production. *NeuroImage*, **191**, 150–161.

Adams, J. A. (1971). A closed-loop theory of motor learning. *J. Mot. Behav.*, **3**, 111–149.

Araújo, D., Davids, K., & Hristovski, R. (2006). The ecological dynamics of decision making in sport. *Psychol. Sport Exerc.*, **7**, 653–676.

Bartlett, F. C. (1932). *Remembering: a study in experimental & social psychology*. London:

Cambridge University Press.

Battig, W. F. (1966). Facilitation and interference. In E. A. Bilodeau (Ed.), *Acquisition of skill*, 215–244. New York: Academic Press.

Beek, P. J. & Beek, W. J. (1988). Tools for constructing dynamical models of rhythmic movement. *Hum. Mov. Sci.*, **7**, 301–342.

Bernstein, N. A. (1967). *The co-ordination and regulation of movements*. London: Pergamon Press.

Bratman, M. E. (1992). Shared cooperative activity. *Philos. Rev.*, **101**, 327–341.

Caron, R. R., Coey, C. A., Dhaim, A. N., & Schmidt, R. C. (2017). Investigating the social behavioral dynamics and differentiation of skill in a martial arts technique. *Hum. Mov. Sci.*, **54**, 253–266.

Carson, R. G., Goodman, D., Kelso, J. A. S., & Elliot, D. (1995). Phase transitions and critical fluctuations in rhythmic coordination of ipsilateral hand and foot. *J. Mot. Behav.*, **27** (3), 211–224.

Collins, J. J. & Stewart, I. N. (1992). Symmetry-breaking bifurcation: A possible mechanism for 2: 1 frequency-locking in animal locomotion. *J. Math. Biol.*, **30**, 827–838.

Collins, J. J. & Stewart, I. N. (1993). Coupled nonlinear oscillators and the symmetries of animal gaits. *J. Nonlinear Sci.*, **3**, 349–392.

Diggles, V. A., Grabiner, M. D., & Garhammer, J. (1987). Skill level and effector visual feedback in ball catching. *Percept. Mot. Skills*, **64**, 987–993.

Diniz, A., Barreiros, J., & Passos, P. (2014). To pass or not to pass: a mathematical model for competitive interactions in rugby union. *J. Mot. Behav.*, **46**, 293–302.

Fischman, M. G. & Schneider, T. (1985). Skill level, vision, and proprioception in simple one-hand catching. *J. Mot. Behav.*, **17** (2), 219–229.

Fitzpatrick, P., Schmidt, R. C., & Carello, C.

- (1996). Dynamical patterns in clapping behavior. *J. Exp. Psychol. Hum. Percept. Perform.*, **22**, 707-724.
- Frank, T. D. & Richardson, M. J. (2010). On a test statistic for the Kuramoto order parameter of synchronization: An illustration for group synchronization during rocking chairs. *Physica D*, **239**, 2084-2092.
- Gibson, J. J. (1979). *The ecological approach to visual perception*. Boston: Houghton Milton. (古崎敬・古崎愛子・辻敬一郎・村瀬旻 共訳 (1985). 『生態学的視覚論』. 東京:サイエンス社.)
- 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.
- Golubitsky, M. & Stewart, I. (1985). Hopf bifurcation in the presence of symmetry. *Arch. Ration. Mech. Anal.*, **87**, 107-165.
- Golubitsky, M. & Stewart, I. (2002). *The symmetry perspective: from equilibrium to chaos in phase space and physical space*. Basel, Switzerland: Birkhäuser Verlag. (田中玲子 監訳 (2003). 『対称性の破れとパターン形成の数理』. 東京:丸善.)
- Haken, H., Kelso, J. A. S., & Bunz, H. (1985). A theoretical model of phase transitions in human hand movements. *Biol. Cybern.*, **51**, 347-356.
- Helbing, D. & Molnár, P. (1995). Social force model for pedestrian dynamics. *Phys. Rev. E*, **51**, 4282-4286.
- Iberall, A. (1970). Periodic phenomena in organisms seen as non-linear systems. *Theoria to theory*, **4**, 40-53.
- 川人光男 (1996). 『脳の計算理論』. 東京:産業図書.
- Keele, S. W. (1968). Movement control in skilled motor performance. *Psychol. Bull.*, **70** (6), 387-403.
- 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.
- Knoblich, G., Butterfill, S., & Sebanz, N. (2011). Psychological research in joint action: Theory and data. In B. Ross (Ed.), *The Psychology of learning and motivation*, Vol. 54, 59-101. Academic Press.
- Kudo, K., Park, H., Kay, B. A., & Turvey, M. T. (2006). Environmental coupling modulates the attractors of rhythmic coordination. *J. Exp. Psychol. Hum. Percept. Perform.*, **32**, 599-609.
- Kugler, P. N., Kelso, J. A. S., & Turvey, M. T. (1980). On the concept of coordinative structures as dissipative structures: I. Theoretical lines of convergence. In G. E. Stelmach & J. Requin (Eds.), *Tutorials in motor behavior*, 3-47. Amsterdam: North-Holland.
- Kuramoto, Y. (1984). *Chemical oscillations, waves, and turbulence*. Berlin: Springer-Verlag.
- Lee, D. N. & Lishman, J. R. (1975). Visual proprioceptive control of stance. *J. Hum. Mov. Stud.*, **1**, 87-95.
- Lee, D. N., Lishman, J. R., & Thomson, J. A. (1982). Regulation of gait in long jumping. *J. Exp. Psychol. Hum. Percept. Perform.*, **8** (3), 448-459.
- Lee, D. N. (1976). A theory of visual control of braking based on information about time-to-collision. *Perception*, **5**, 437-459.
- Lindsay, P. H. & Norman, D. A. (1977). *Human information processing: an introduction to psychology*. New York: Academic Press. (中溝幸夫・箱田裕司・近藤倫明 訳 (1984). 『情報処理心理学入門 I 感覚と知覚, II 注意と記憶, III 言語と思考』. 東京:サイエンス社.)

- Meijer, O. G. & Roth, K. (Eds.) (1988). *Complex movement behaviour: 'The' motor-action controversy*. Amsterdam: Elsevier Science Publishers B.V.
- Miura, A., Kudo, K., Ohtsuki, T., & Kanehisa, H. (2011). Coordination modes in sensorimotor synchronization of whole-body movement: A study of street dancers and non-dancers. *Hum. Mov. Sci.*, **30**, 534-549.
- Neisser, U. (1976). *Cognition and reality: principles and implication of cognitive psychology*. San Francisco: W. H. Freeman. (古崎敬・村瀬旻 訳 (1978). 『認知の構図—人間は現実をどのように捉えるか—』. 東京:サイエンス社.)
- Newell, K. M. (1986). Constraints on the development of coordination. In M. G. Wade & H. T. A. Whiting (Eds.), *Motor development in children: Aspects of coordination and control*, 341-360. Dordrecht, The Netherlands: Martinus Nijhoff.
- 西垣通 (2004). 『基礎情報学』. 東京:NTT 出版.
- 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.
- Palut, Y. & Zanone, P.-G. (2005). A dynamical analysis of tennis: Concepts and data. *J. Sports Sci.*, **23**, 1021-1032.
- Poulton, E. C. (1957). On prediction in skilled movements. *Psychol. Bull.*, **54** (6), 467-478.
- Prigogine, I. & Nicolis, G. (1971). Biological order, structure and stabilities. *Q. Rev. Biophys.*, **4** (2 & 3), 107-148.
- Rumelhart, D. E. (1977). *Introduction to human information processing*. New York: John Wiley & Sons, Inc. (御領謙 訳 (1979). 『人間の情報処理—新しい認知心理学へのいざない—』. 東京:サイエンス社.)
- Schmidt, R. C., Carello, C., & Turvey, M. T. (1990). Phase transitions and critical fluctuations in the visual coordination of rhythmic movements between people. *J. Exp. Psychol. Hum. Percept. Perform.*, **16**, 227-247.
- Schmidt, R. C. & Turvey, M. T. (1994). Phase-entrainment dynamics of visually coupled rhythmic movements. *Biol. Cybern.*, **70**, 369-376.
- Schmidt, R. A. (1975). A schema theory of discrete motor skill learning. *Psychol. Rev.*, **82**, 225-260.
- Searle, J. R. (1990). *Collective intentions and actions*, chap. 19, 401-415., Cambridge, MA: MIT Press.
- Sebanz, N., Bekkering, H., & Knoblich, G. (2006). Joint action: Bodies and minds moving together. *Trends Cogn. Sci.*, **10**, 70-76.
- Shannon, C. E. (1948). A mathematical theory of communication. *Bell Syst. Tech. J.*, **27**, 623-656.
- Strogatz, S. (2003). *SYNC: the emerging science of spontaneous order*. New York: Hyperion Books. (蔵本由紀 監修 長尾力 訳 (2005). 『SYNC —なぜ自然はシンクロしたがるのか—』. 東京:早川書房.)
- Suzuki, H. & Yamamoto, Y. (2015). Robustness to temporal constraint explains expertise in ball-over-net sports. *Hum. Mov. Sci.*, **41**, 193-206.
- Takamatsu, A. (2006). Spontaneous switching among multiple spatio-temporal patterns in three-oscillator systems constructed with oscillatory cells of true slime mold. *Physica D*, **223**, 180-188.
- Takamatsu, A., Tanaka, R., & Fujii, T. (2004). Hidden symmetry in chains of biological coupled oscillators. *Phys. Rev. Lett.*, **92**, 228102.
- Tomasello, M. (2009). *Why we cooperate*. Cambridge, MA: MIT Press. (橋彌和秀 訳 (2013). 『ヒトはなぜ協力するのか』. 東京:勁草書房.)
- van Rossum, J. H. A. (1990). Schmidt's schema

- theory: Empirical base of the variability of practice hypothesis. *Hum. Mov. Sci.*, **9**, 387-435.
- Varlet, M. & Richardson, M. J. (2015). What would be Usain Bolt's 100-meter sprint world record without Tyson Gay? Unintentional interpersonal synchronization between the two sprinters. *J. Exp. Psychol. Hum. Percept. Perform.*, **41**, 36-41.
- Vereijken, B., van Emmerik, R. E. A., Whiting, H. T. A., & Newell, K. M. (1992). Free (z) ing degrees of freedom in skill acquisition. *J. Mot. Behav.*, **24**, 133-142.
- Wiener, N. (1948). *Cybernetics, or control and communication in the animal and the machine*. Cambridge, MA: MIT Press. (池原止戈夫・彌永昌吉・室賀三郎 共訳 (1957). 『サイバネティックス: 動物と機械における制御と通信』. 東京: 岩波書店.)
- Winfrey, A. T. (1967). Biological rhythms and the behavior of populations of coupled oscillators. *J. Theor. Biol.*, **16**, 15-42.
- 山田憲政 (1997). 運動の自由度. 宮本省三・沖田一彦 (編), 『運動制御と運動学習』, 269-295. 東京: 協同医書出版社.
- 山本裕二・横山慶子・木島章文・奥村基生 (2015). 2振動子系の同期による対人格闘競技の理解. 『総合保健体育科学』, **38**, 1-11.
- Yamamoto, Y. & Gohara, K. (2000). Continuous hitting movements modeled from the perspective of dynamical systems with temporal input. *Hum. Mov. Sci.*, **19**, 341-371.
- Yamamoto, Y. (2004). An alternative approach to the acquisition of a complex motor skill: Multiple movement training on tennis strokes. *Int. J. Sport Health Sci.*, **2**, 169-179.
- 横山慶子・山本裕二・田渕規之・鈴木大介・上向井千佳子 (2020a). トレーニング用具. 特許 6722905.
- 横山慶子・田渕規之・山本裕二 (2020b). 連携技能に関わる練習道具のトレーニング効果を検証する. 『スポーツパフォーマンス研究』, **12**, 193-208.
- Yokoyama, K., Shima, H., Fujii, K., Tabuchi, N., & Yamamoto, Y. (2018). Social forces for team coordination in ball possession game. *Phys. Rev. E*, **97**, 002400.
- Yokoyama, K., Tabuchi, N., Araújo, D., & Yamamoto, Y. (2020). How training tools physically linking soccer players improve interpersonal coordination. *J. Sports Sci. Med.*, **19**, 244-245.
- Yokoyama, K. & Yamamoto, Y. (2011). Three people can synchronize as coupled oscillators during sports activities. *PLoS Comp. Biol.*, **7**, e1002181.
- 吉田茂 (2008). 技能分類. 日本スポーツ心理学会 (編), 『スポーツ心理学事典』, 183-185. 東京: 大修館書店.