

## 打球動作の制御・学習へのダイナミカルシステムアプローチ

Application of a dynamical system approach to the control and the learning of human hitting skills

山本 裕二\*

Yuji YAMAMOTO\*

Studies into the learning of hitting skills in human movement were reviewed from the viewpoint of timing behavior and the coordination of movements considered to be important factors in hitting skills. Timing behavior includes internal and external timing problems. As for the internal timing problem, it was considered that consistency of movement controlled by a motor program was necessary for timing accuracy. The external timing problem has been studied as a coincidence anticipation ability. In these timing studies, coordination structure of movement has not been dealt with. On the other hand, studies of movement coordination were developed by a model of self-organization. The model couldn't apply the coordination of movement in hitting skills because the model doesn't have external input. Finally, as a non-autonomous dynamic system, where external inputs change with time, the excited attractor model (Gohara, 1995) was referred. We examined the application of the model to the learning of hitting skill in human movement. Some experimental results have suggested the existence of the excited attractor and the transition between attractors. Further studies are needed to clarify the learning of hitting skills as a dynamic system through a detailed examination of hitting movements including preparatory posture.

### 序

人間の運動は生体内外の情報を能動的に取り込んで適応的に行動する脳の最終出力であり、その機構の解明は運動に要求される時間的・空間的制約条件からの記号処理的な情報処理過程だけでは説明できない。最近では、運動の情報処理について心理学<sup>41)</sup>、神経科学<sup>56)</sup>、計算論的アプローチ<sup>22)</sup>などによる研究が行われてきている。

本稿では、運動の中でも日常生活における運動（例えば、書字や把持動作など）よりも大きな空間的な広がりを持ち、その空間域の広さゆえに運動に関与する筋群は全身に及ぶ打球動作を対象として、その制御・学習過程を検討するための枠組みについて考察する。本稿では、対象（球）が動いている場合の打動作を打球動作とするが、この打球動作は、空間・時間的正確性が要求されるだけでなく、力量発揮が重要な課題となる。すなわち、打球動作は、時空間的正確性という一致タイミングの問題と、大きな力量を発揮・調整するために身体各部位を協応させるという2つの課題

をあわせもつ、空間域の広い、全身の筋群が関与する運動であると定義される。

しかも、運動協応は主に視覚に基づく外界の情報トリガーとしており、タイミングと運動協応は相互に密接な関係がある。つまり、打球動作を一つの情報処理システムとして考えるならば、時間的に変化する外部入力に対応して、空間・時間的正確性ととも力量発揮の調整を必要とする出力を持った非線型非平衡力学系の開かれた系として捉えることができる。

しかし従来、外的事象への応答に関する研究はタイミング研究として、知覚見越しや運動プログラムの観点から研究が行われてきた。また、運動の協応構造に関する研究については、リミットサイクルを持つ散逸系<sup>24)</sup>としてわずかな振動で自己発振を起こす調和振動のような閉じた系（自励系）<sup>55)</sup>の中で行われる、ある条件下での繰り返しを課題として行われることが多かった。これらの研究を概観した上で、外的な事象によって引き起こされる協応構造の生起という打球動作の学習過程を検討するために、新たに外部入力を陽に取り込んだ非自励系のダイナミカルシステムについて

\* 名古屋大学総合保健体育科学センター

\* Research Center of Health, Physical Fitness and Sports, Nagoya University

て触れ、打球動作の制御と学習への応用可能性を探る。

## 1. タイミング研究

人間のタイミング行動や見越し行動に関する心理学的研究は古くから行われてきた。

Poulton<sup>40)</sup>は追跡課題の分析に基づき、静止した物体に素早く触る反応の正確性を高めるための効果器見越し (effector anticipation)、動作にかかる時間を見越すことができた後、物体の移動先は見えているが移動する位置を見越す受容器見越し (receptor anticipation) と、さらに物体の移動先がわからなくても、移動先を見越す知覚見越し (perceptual anticipation) の3つに見越しを分類した。

Hick and Bates (Belisle<sup>41)</sup>による)は、Poultonの知覚見越しを必要とし、さらに物体を連続的に追従していくのではなく、離散的に反応する課題を通過点反応 (transit reaction) と呼んだ。その後通過点反応課題を Belisle<sup>41)</sup>が一致見越し課題 (coincidence-anticipation task; CAT) と呼んだ。この課題が打球動作に関連するタイミングの問題といえる。

この一致見越し課題では、反応の開始と終了が中心課題となるため、反応を開始するための移動指標の時間的評価、すなわち入力に関する研究と、反応動作にかかる時間の正確な評価、すなわち出力に関する研究に分類される。

### 1.1 入力に関する研究

外部の入力情報の処理に関する研究では、反応キーを押したり離したりという単純な動作が用いられるようになった。これは反応速度がタイミングの正確性に影響を及ぼすと考えられたからである<sup>46)</sup>。

一致見越し能力は性差<sup>37), 38), 68)</sup>や、子どもの発達<sup>9), 17), 19)</sup>などの観点から研究されてきた。その結果、男子の方が女子よりも、また子供でも年齢があがるにつれて一致タイミング点の見越しは正確になることが明らかにされている。

さらに外部入力である移動指標の特性としては、移動指標が水平面で正面から近づいてくるときに最も一致タイミング点の見越しが正確になり<sup>36), 37)</sup>、移動指標の見える距離は長い方がより正確に見越すことができ<sup>35)</sup>、速度は速い方が一致タイミングの誤差が少ないことが報告されている<sup>17), 19), 38)</sup>。

これらの研究によって、タイミング見越しの時間的正確性に及ぼす個人差要因や刺激の特徴が明らかにされてきたといえる。しかしながらこれらの研究においては、外部入力の情報処理能力のみを研究対象として

扱っており、その能力の獲得、学習という観点は見受けられない。

Wrisbergら<sup>67), 69), 70)</sup>は、大人 (平均年齢 22.3 才) と小学 1 年生 (平均年齢 7 才 2 ヶ月と 6 才 10 ヶ月) に対して、数種類の速度条件 (大人の場合には 2.2, 3.1, 4.9, 5.8m/s で、子どもの場合には 1.3, 1.8, 2.2, 2.7, 3.1m/s) を様々に組み合わせて一致タイミング動作の学習を行わせている。その結果、大人では試行ごとに速度条件を変えた学習が有効であるが、子供には何試行かをブロックにして数種の速度を練習するのが最も一致タイミングの誤差は少なくなることを報告している。Wrisbergらの研究は、Schmidt<sup>48)</sup>のスキーマ理論に立脚して、スキーマ形成と学習条件の関係を、発達に伴う情報処理能力の観点からみた検証実験である。これらの研究は、子供では学習条件としての入力の複雑さが、情報処理への過負荷になり学習が停滞するとして、情報処理能力の差異としてとらえられているに過ぎず、運動技能との関わりに関しては述べられていない。

### 1.2 出力に関する研究

一方、タイミングの出力の処理に関する研究は、運動プログラムの研究として発展していくことになる。Schmidt<sup>47)</sup>は移動指標に対しスライダー (slider) を異なる動作時間で動かし、移動指標を「打つ」ような動作でタイミングを一致させる課題を行わせた。その結果、動作時間が短いほどタイミングの正確性が向上し、また動作開始時間とタイミング誤差との相関が高いことを示した。これは、動作時間を短縮することによって動作のプリプログラミング (preprogramming) が行われ、動作時間の見積もりが正確になる。したがって動作開始時間の調整が可能なため、タイミングの正確性が向上するとしている。

さらに Newell, Hoshizaki, Carlton, and Halbert<sup>32)</sup>はスピードと正確性の調整関係 (speed-accuracy trade-off) に関する実験として、タイミング課題では動作速度が速い方がタイミングの正確性も向上するという結果を報告している。しかもその効果は動作時間とは独立であり、平均動作速度が 15cm/s 以下の遅い動きのときにタイミングの正確性が低下するとしている。

つまり、タイミングの正確性の向上には、動作時間の短縮による移動指標を見る時間の相対的な延長と、動作速度の増加による動作時間の安定化の2つの要因があるとするものである。これらの要因が運動のプログラム化によって可能であり、タイミングの正確性が向上するという結論を導いている<sup>49)</sup>。

### 1.3 操作的タイミング仮説

運動プログラムによる動作の安定が、タイミングの正確性に影響するという考え方は、実際のスポーツ技能の詳細な観察からも支持された。Tyldesley and Whiting<sup>57)</sup>は、卓球選手のフォアハンドドライブという打球動作の分析を例にとり、動作の時間的・空間的安定によって、その動作の開始時間のみを操作すればタイミングは正確になるという操作的タイミング仮説 (operational timing hypothesis) を提唱している。つまり、熟練者は動作の時間的・空間的安定により、動作開始時間の調節だけでよい。しかしながら、初心者も、動作が空間的にも時間的にも不安定なため、技能向上とともに動作の空間的安定が認められるまでは、動作開始時間の安定はないとしている。

Franks, Weicker, and Robertson<sup>11)</sup>はフィールドホッケーのショットを課題として、操作的タイミング仮説の検討を行っている。熟練者が3種類の速度条件下 (8.9, 13.4, 17.9m/s) で転がってくるボールを、特定の的に向かってショットをすることが求められた。フィルム分析が行われ、動作のキネマティクス、位相、タイミングが検討された結果、熟練者のダウンスイングは一定であるが、その前の動作であるバックスイングを調整していたことを明らかにした。これは、時間的に一定のダウンスイングを得るために、バックスイングなどの準備動作に重点をおいていたこととなり、操作的タイミング仮説を支持する結果を得ている。

また、Wollstein and Abernethy<sup>71)</sup>はスカッシュプレイヤーのフォアハンドストロークについて実験室とフィールド実験を行っている。2つの実験から熟練者の動きを分析したところ、どちらの実験においてもダウンスイングの時間がほとんど一定であったことを明らかにしている。つまり異なる速度においても動作時間は一定していたことを示している。運動プログラムを用いて動きのパターンを生成するためには、個々の筋の時間的配列などを制御するための内的タイミング (internal timing) が重要になるが、熟練者においては運動プログラムが獲得されていたため、内的タイミングは一貫していたと考えられる。したがってタイミングにおいて重要なことはその動きをいつ開始し、どう外的事象に一致させるかといった外的タイミング (external timing) が重要であるとして操作的タイミング仮説を支持している。

これまでにみてきた打球動作に関するタイミング研究の多くは、情報処理モデルに基づいて、人間を入力装置、中枢処理装置、出力装置を持つ一つの情報処理システムと見なしている。そこでは、主に入力装置に

相当する知覚能力に関する研究や、中枢処理装置・出力装置に関する運動プログラムの研究がなされてきたと言える。しかしながら、運動プログラムの研究においては、人間本来の多関節での協応を必要とする出力装置の特性を考えないで済むように、できるだけ単純な動作を用いた研究か、あるいは出力装置の特性 (動作の内容) には言及しない研究がほとんどであったと言えよう。また、出力制御に関しては運動プログラムの修正やプリプログラミングを仮定している。したがって、これらの研究は本来一つである情報処理システムを階層的に捉え、個々の要素に焦点を当てた研究といえ、情報の流れは系列的に捉えられ、各要素間の相互作用については十分考慮されていたとはいえない。

### 1.4 捕球動作

打球動作と類似した動作として捕球動作 (catching) があげられる。大築<sup>34)</sup>は「キャッチとは標的を捕捉することである」と定義し、「捕」と「打」は物体の加速度をゼロにするか、加速度を変化させるかの違いがあるだけとし、「打」を「捕」の一つの形態として見なしている。この捕球動作に関しては、打球動作と異なるアプローチの進展が見られているので、「捕」に関する研究を概観してみる。

Whiting らの一連の研究では<sup>50), 51), 62) - 64)</sup>、ボール投射機から投げ出されるボールの飛行中の軌跡をある部分だけ遮蔽することにより、ボールの飛行軌跡を見る情報量とボール捕球動作のパフォーマンスとの関係を検討している。その結果、ボールを見る時間と捕球成績との関係は必ずしも直線関係ではなく、捕球前のボールの飛行軌跡がほぼ 200ms 以上見えれば、遮蔽時間が長くても捕球は成功することを確かめている。これらの結果を情報処理理論に基づいて解釈し、情報の入力処理と中枢での処理にそれぞれ時間を要するため、遮蔽時間よりもボールが見えてからボールと接触するまでの全体時間の方が捕球成績に影響するとしている。

さらに Smyth and Marriott<sup>52)</sup>は捕球動作におけるエラーを、手の空間定位のエラーとボールを掴むタイミングのエラーに分類した。そこで捕球する手に関する視覚情報を除去する実験を行った結果、空間定位のエラーを増加させることを明らかにしている。これは、自己受容器からの筋感覚情報による手の空間定位の制御が視覚情報によって修正されていることを示すものである。

一方、Fischman and Schneider<sup>10)</sup>や Diggles, Grabiner, and Garhammer<sup>8)</sup>は捕球動作に熟練した被験者を用いて同様な実験を行った結果、手に関する視覚情報

の減少は非熟練者においては空間定位のエラーを増大させるが、熟練者においては影響しないことを明らかにした。この結果から視覚情報は主にボールを掴む動作のタイミングに影響し、手の空間定位は自己受容器からの筋感覚情報のみでも可能であると考えた。

これらの研究は、捕球動作を捕球のための手の空間定位と実際にボールを掴む動作に分割して検討したことに意味がある。熟練者では、ボールを掴む動作に関しては事前にプリプログラミングされており、視覚情報から動作の開始に関する時間的情報を抽出するだけで良い。手の空間定位については自己受容器からの筋感覚情報のみによって制御可能であると考えられる。しかしながら、非熟練者では自己受容器からの筋感覚情報が不十分であるため、手の空間定位に関して視覚情報による連続的な修正が必要となると考えられる。捕球動作による課題を分割し、それぞれの課題に必要な情報源が特定されるという意味から非常に興味深いものである。

### 1.5 視覚性運動制御

視覚入力と運動出力のつながり、すなわち視覚情報が動作開始の引き金になるということは、Gibson<sup>12)</sup>の直接知覚に基づいて理論化されてきた。Lee<sup>26)</sup>は自動車のブレーキをかける動作を検討し、行為者と環境の関係から生じる行為者の網膜上の光学的流動(optical flow)が行為の制御に直接利用されるとする、予見的な情報タウ( $\tau$ )を数学的に表現した。

以後、捕球動作の研究においても、実際に捕球動作に利用されている情報をめぐって研究が進められているが、捕球者がボールと接触するまでの残り時間を特定するタウ( $\tau$ )によるとするもの<sup>2), 25), 43), 44)</sup>や、両眼視からの空間位置<sup>21)</sup>や垂直方向の加速度情報<sup>29), 30)</sup>、手の動きによる位置情報の取得<sup>39)</sup>などのそれ以外の情報も使われているとするものがある。

打球動作においては、Bootsma and Van Wieringen<sup>7)</sup>が卓球選手のフォアハンドドライブの動作を分析し、環境からの視覚情報が運動の開始前に利用されているだけではないことを示している。つまり、環境からの情報はボールとの衝突まで運動を環境に適應させるため連続的に利用されていることを示した。

また、Matsuo and Kasai<sup>28)</sup>は野球のバッティング動作について、打球速度とコースを発光ダイオード(LED: Light-Emitting Diode)でシミュレートした実験を行っている。この結果、打球速度が異なる場合でも動作の開始に変化がなく、また同じ速度でも動作時間に違いが認められることから、動作開始後に運動の調整が行われているを示した。

これらの研究において、視覚入力と運動出力のつながりは明らかにされつつある。これらの研究で注目すべき点は、従来のタイミング研究では、動作は単純で、実験室的な動作(単関節の屈曲やボタン押しなど)であったのに対し、実際の運動技能を課題としてその運動の記述を正確に行っている点である。ただ、身体各部位の動作まで言及しているものは見あたらない。

## 2. 運動協応の研究

運動の協応構造はBernstein<sup>5)</sup>がシナジー(synergy: 協働<sup>注)</sup>)と呼んだもので、人間の出力装置の特性として運動協応が重要であることは古くから指摘されている。打球動作においても、タイミングの正確性ととも力量の効率的発揮と言う観点から運動の協応は重要な問題である。

運動の協応を考える場合には、人間の運動制御における「自由度の問題」があげられる。例えば、人間の上肢を構成する関節には3関節があり、肩関節は3つの運動方向が、肘関節は前腕も含め2つ、手関節は2つの計7方向への動きが可能である。したがって、上肢の動きを制御するためには少なくともこれらの7方向への運動命令が必要となる。さらに、関節の運動方向を決定する筋の収縮を、さらに、それを支配する運動ユニットで考えれば莫大な数の値を決定しなければならない。Bernsteinはこの自由度の問題を解決するためには、関節の自由度の減少による力量の効率的制御のために、運動器官を組織化することによる運動の協応構造を考える必要があるとした。

### 2.1 ダイナミックパターン

Kugler, Kelso, and Turvey<sup>24)</sup>は、熱力学における散逸構造(dissipative structure)とリミットサイクル発振(limit-cycle oscillation)の原理を適用して、運動の協応構造を自律系のシステムとして見なし、運動の制御と協応に関する自己組織化のモデルを提出した。

この自己組織化のモデルはVereijkenらによって、スキースラロームの学習実験課題によって検証されてきた。当初はフィードバックの種類と学習について実験が行われたが、フィードバックがなくても学習が進むことが明らかになり<sup>59), 65)</sup>、左右への移動のテンポは学習者の好みのテンポでよいことを振幅、回数、滑らかさという従属変数から明らかにした<sup>58)</sup>。さらに

注 synergy は一般に協同の訳語が当てられるが、Bernstein<sup>5)</sup>の用法としては、「協応して働く」と言った意味合いであることからここでは「協働」とした。



スラローム運動の特性を明らかにするために下肢関節の相互相関の分析を行っている。その結果、学習者は学習初期に関節の自由度を減少させ、学習の進展にともない関節の自由度を再び増加させることを示した<sup>60)</sup>。また、このスラローム課題を学習者-装置システムとして数学的にモデル化し、システムの振る舞いである振幅と速度をともに表す変数という意味での集合変数 (collective variable) として、学習者の重心高変位と装置の角度変位との位相差を抽出した。この集合変数は力を加えるタイミングを表すもので、位相差が学習によって変化することは、自己組織化によって力を入れるタイミングが変化することを示す。この集合変数を導入した再分析の結果では、好みのテンポで行う発見学習よりはテンポを増していく方が自己組織化の効果が高いことを示した<sup>61), 65)</sup>。

この一連の研究では、「どのように学習されるか」よりも「何が学習されるか」について研究が進められた点が非常に興味深い。

また、Kelso and Schönner<sup>23)</sup>は、システムを構成する要素のミクロな挙動とマクロな挙動の秩序性をシステムの協同現象として統一的に取り扱ったハーケン (Haken)<sup>15)</sup>の自己組織化のモデルを協応動作の学習に適用し、彼のモデルを検証している。Kelsoらは両手の人指し指をある周波数に合わせて左右に動かす動作を繰り返し、周波数が低い場合には、両手の同じ筋が同時に収縮する同相 (in-phase) と反対になる逆相 (anti-phase) のいずれかになるが、周波数をあげ、ある周波数以上になると必ず両手の同じ筋が同時に収縮する同相になることを見いだした。この実験結果からさらにモデルを発展させ、両指の位相差を両指を動かすサブシステム間の関係を表す秩序パラメータ (order parameter) とし、コントロールパラメータ (control parameter) である指を動かす周波数の変化によって相転移を引き起こすという Haken-Kelso-Bunz モデル<sup>16)</sup>を提唱した。その後、手と足の協応<sup>21)</sup>、周期的な視覚刺激の追従動作<sup>67)</sup>や対人間での下肢のリズミカルな動きの協応<sup>46)</sup>などによって検証されている。

これらの運動協応に関する研究は、Hakenの自己組織化のモデルに立脚しているため、外部入力の変化が運動の変化に比べて遅い場合のダイナミカルシステムであるといえる。タイミング研究の用語を借りれば内的タイミングの問題を扱っているといえよう。

## 2.2 協応動作のモデル化

Abbs, Gracco, and Cole<sup>1)</sup>は、発話の詳細な分析に基づき、発話という複雑な運動のプログラミングと協応についてのモデルを提出している。運動のプログラミ

ングは最終的な運動命令までも決定するのではなく、課題遂行のために必要な感覚運動経路の準備を行う。後はその経路によってさまざまな動きの調整がなされるとするものである。すなわち、従来のあらかじめ決定された運動命令の系列としての運動プログラムを、動作の計画のみを行うものとし、実際の筋への命令はそれぞれの部位で自律的に動きを組織化していくと考えるものである。

また、Taga<sup>53)</sup>は、自律的に活動する神経振動子で歩行の運動制御回路を構築し、二足歩行モデルを提出している。すなわち脊髄にあるとされるセントラルパターンジェネレータが上位中枢からの入力によって、自律的に活動し、神経系と筋骨格系を相互に引き込んで歩行運動を自律的に生成していくというものである。このモデルでも、上位中枢からの入力はプランニングに関わることのみで、実際の動きは自己組織的に生成されるという点で Abbsら<sup>1)</sup>のモデルと共通している。

これらのモデルにおいては、上位中枢と末梢の役割を区別して考え、上位中枢で行われているのが運動プログラミングで、実行に際しては末梢で自律的に動きが創出されていると考えており、情報処理の階層性 (hierarchy) と重層性 (heterarchy) に重要な示唆を与えているものである。

Newell<sup>33)</sup>は、Kugler et al.<sup>24)</sup>の自己組織化の立場を基本的には支持しながら、身体各部位の位相の特徴 (topological characteristics) を分析することによって、Anderson and Sidaway<sup>3)</sup>が呼ぶところの学習の2段階説 (two-stage model) を提唱している。ここでは、学習初期に適切な身体や四肢の動きの位相の特徴を学習し、その後の学習において自己組織化が起こり、熟練したパフォーマンスを示すとしている。これは、Abbsら<sup>1)</sup>や Taga<sup>53)</sup>の考え方と考え合わせると、学習初期には位相の特徴を学習するための上位中枢の働きが必要になるものと考えられる。特に新奇な課題の場合にはこうした上位中枢による動作の計画やプランニングは重要な役割を果たしているものと考えられよう。

Newellの学習2段階説は、全ての制御 (協応) が自律的に創出されるとする自己組織化のモデルに対して、学習による中枢神経系の変化、特に知識の変化が運動の制御には欠くことができないとする批判<sup>27)</sup>とも一致する点である。さらに Taga<sup>53)</sup>も指摘しているように、これらのモデルは予期できない環境において予測的な運動の生成に対する答えを持たない。いいかえればこれらのモデルもまた外部入力のない、あるいは外部入力の変化が遅い場合のダイナミカルシステムとして位置づけられる。

### 3. 今後のダイナミカルシステムアプローチの適用可能性

さて、本稿で問題としている打球動作の制御や学習に関してはどうであろう。打球動作はシステムとして外部入力があるつど変化することが特徴の一つであった。したがって、これまでの Haken-Kelso-Bunz モデル<sup>16)</sup>や Abbs ら<sup>1)</sup>、Taga<sup>53)</sup>のモデルをそのまま適用するわけにはいかない。

#### 3.1 励起アトラクタモデル

郷原<sup>13)</sup>は外部入力のある場合のダイナミカルシステム、すなわち時間的に変化する信号入力から、時間的に変化する信号の連続的出力を持つシステムとして励起アトラクタモデル (excited attractor model) を提案している。

外部入力のない場合の  $n$  個のユニットの相互作用は、 $n$  個の常微分方程式から構成される以下のような連立常微分方程式によって表現される。

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

ここで、 $x$  は  $n$  次元ベクトル  $x \equiv (x_1(t), x_2(t), \dots, x_n(t))$  とする。(1)式は  $n$  次元空間でのベクトル場を定義しており、解  $x(t)$  は初期状態を  $x_0$  とすれば、

$$x(t) = \phi(t, x_0) \quad (2)$$

であり、ベクトル場に描かれた一本の軌道  $\phi$  として幾何学的に捉えることができる。このように表される系を自励系という。これが2次元空間ならば、ポイントアトラクタや周期アトラクタとして知られているもので、3次元以上の多次元状態空間では、概周期アトラクタやカオスアトラクタも存在し得る。さらに、ユニット間の相互作用を変化させる  $\lambda$  パラメータ (ハーケン<sup>15)</sup> はコントロールパラメータと呼んだ) の変化によってベクトル場が変化し、アトラクタが質的に異なる場合がある。これを分岐という。この分岐が、Kelso らの運動協応における相転移である。

では外部入力があるということはどういうことなのか。系の入力依存性を(1)式に陽 (explicit) な形で取り込み、以下のように表現する。

$$\dot{x} = f(x, I(t)) \quad (3)$$

ここで  $I(t)$  は、時間的に変化する入力パターンをあらわす。これは、お互いに相互作用しあうユニット

の状態変化  $\dot{x}$  が、状態  $x$  ばかりでなく、外部入力に依存していることを表し、非自励系という。自励系の時間変化を表すベクトル場は系の内部状態のみで決定されるのに対し、非自励系では、ベクトル場が時間依存性を持つ。すなわち入力の時空間パターンに対応した周期ベクトル場が、その周期時間内に変化し、出力に変換されることを意味する。時間的に変化しない一定値を外部入力と考えれば、自励系は非自励系の特殊な場合として位置づけられる。したがって、このようにそれぞれの入力パターンに対応して入出力パターン変換を満たすアトラクタを、入力パターンに励起されるという意味から励起アトラクタと呼んでいる。

図1に励起アトラクタモデルによる入出力の1対1対応の場合を示した。励起アトラクタモデルでは、2つの異なる入力パターン  $\tilde{I}_1, \tilde{I}_2$  は異なるベクトル場を持つ2つの力学系を定義することになる。各々の力学系は図に示した円筒空間で数学的に定義される。うすく塗りつぶされた面はある時点で軌道が横切る断面であり、ポアンカレ断面と呼ばれる。例えばある周期を持った入力パターン  $\tilde{I}_1$  が入力された場合には、システムの動作はポアンカレ断面の1点から出発し、その周期内に励起アトラクタ (各入力パターンに固有なアトラクタ) に漸近しながら再びポアンカレ断面の1点に戻ってくる一本の軌道としてとらえることができる。この円筒空間は多次元状態空間であることから、この軌道はシステムの内部状態そのものを示すと考えられる。

ここで励起アトラクタ間の遷移可能な条件について考える必要がある。アトラクタへ行き着く初期状態の集合をベイスンと呼ぶ。励起アトラクタモデルでは複数の励起アトラクタに対応するポアンカレ写像点が、異なるベイスンに共有されていると考える。したがって、入力パターンの変化によって別の励起アトラクタに対応するベイスンに切り替わった場合に、ベクトル場が切り替わり、励起アトラクタの遷移が起こる。これは別の励起アトラクタに対応するベイスン内に初期状態が含まれなければならないことを意味する。いいかえれば、初期状態が複数の励起アトラクタに対応するベイスンの中にあるのであれば、入力の変化によっていずれの励起アトラクタにも遷移可能であるということである。つまり、励起アトラクタモデルでは、励起アトラクタの形成と励起アトラクタ間の遷移を考慮することによって、時空間パターンの入出力変換を記述することのできるモデルといえる<sup>14), 54)</sup>。

入力の変化に応じて、出力が切り替わることを励起アトラクタモデルが表しているならば、毎回入力異なり、その入力に対応して時空間的正確性と力量発揮



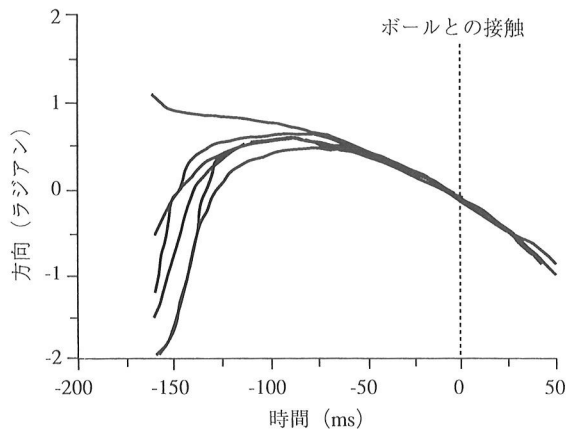


図2 Bootsma & Van Wieringen (1990)による卓球選手のフォアハンドドライブのラケット面の変化

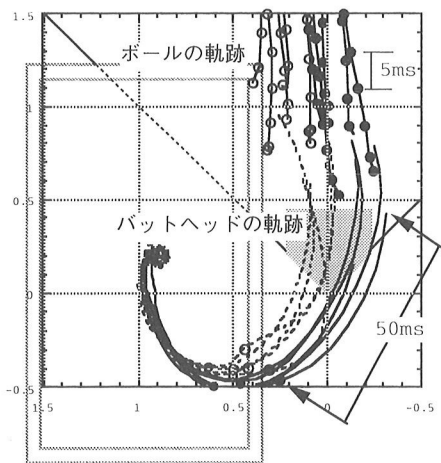


図3 異なるコースに投球されたボールに対するバットヘッドの軌跡 (山本ら、1997)

投球に対応した打球動作が行われていることを明らかにしている。これは、同じ初期状態から行き着く先が異なっていることを示している。つまり、この打球動作は投手の投球リリースという入力が入る時点での初期状態にのみ依存した動作とは考えられず、投球の軌跡という入力パターンの時間的な変化（この例の場合は2種類）に強く依存した動作であることを示唆している。

野球の打球動作について投球のリリースから打球のインパクトまでを1周期として円筒空間で示したものが図4である。ここでは肩関節の角度と角速度の2変数を抽出している。投球のリリース時点が入力の開始であるため、その時点での打球動作の準備状態もしくは動作の開始状態が励起アトラクタモデルにおける初

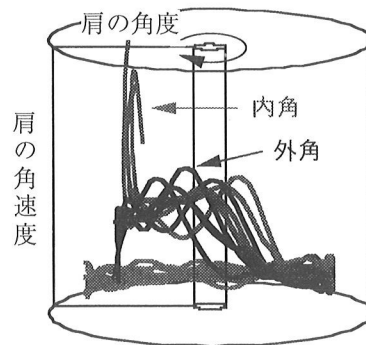


図4 野球の打動作における肩関節角度と角速度の円筒空間 (Yamamoto et al. 1997)

期状態に対応する。また、投球コースによる動作の違いは、入力パターンに対応した励起アトラクタと考えられる。さらに、投球コースに対応して同じ動作となる準備状態がベイスンに対応する。つまり、図1の例では、入力パターン  $\tilde{I}_1$ 、 $\tilde{I}_2$  をそれぞれ内角と外角という投球コースとして考えると、どちらのコースに打球がくるかわからないときには、両方の励起アトラクタに対応するベイスン内（ベイスン  $b^1$  と  $b^2$  の重なった部分）に準備状態（初期状態）が含まれていればよい。そして投球コースによって、入力パターンに対応した励起アトラクタ（内角なら  $a^1$ 、外角なら  $a^2$ ）に漸近していくことが、システムの内部状態としてあらわれており、これがバット先端の動きの違いとなってあらわれていると考えられる。

したがって、打球動作のように動作の開始と終了が比較的明確な動作の場合には、動作の開始状態（初期状態）が重要であることは、励起アトラクタの遷移という点から予想される。すなわち、ある初期状態を満たすことによってのみ、アトラクタ間の遷移が可能であり、入力パターンに応じた出力パターンが出力可能であると考えられる。前述した野球の打球動作のように、対応すべき入力パターンが離散の場合（投球間隔がある）には、新たに初期状態をリセットする考えればよい。また、テニスや卓球の打球動作のように連続した非周期的入力の場合（打球間隔が異なるが連続）には、異なる初期状態（動作の終了）から打球開始の初期状態へアトラクタ間の遷移が起これば、結果的には同じ初期状態から打球動作は開始されると考えられる。

### 3.3 打球動作学習における初期状態としての準備姿勢

Bernstein<sup>6)</sup>は系統発生・個体発生の両面から運動協

応について述べる中で、体幹部の制御が運動協応の源であるとしている。これはまさに、姿勢制御という観点から準備姿勢の学習が運動協応に不可欠であり、時間的・空間的正確性ととも力量を発揮する課題における鍵となることを指摘している。

また打球動作においては、準備姿勢、導入動作、主動作、終末動作という時間的的局面構造の重要性も指摘されている<sup>31)</sup>。したがって、準備姿勢が励起アトラクタモデルにおける初期状態に相当し、この準備姿勢がそれ以後の動作（出力パターン）を規定していると考えられる。つまり、異なる励起アトラクタに対応したベースンの重なりに初期状態（準備姿勢）が含まれていれば、時空間的な入力パターンに対して、入出力パターン変換が可能となり、結果的に望ましい出力パターンが創発可能であると考えられる。

佐々木・鈴木<sup>42)</sup>が行為の中に指摘する「変形」と「探索」を可能にするのも姿勢制御の問題として考えられる。Bootsma and Van Wieringen<sup>7)</sup>が示した運動開始後の「変形」や「探索」は、ラケットの開始位置よりもさらに時間的に先行して行われていた姿勢の制御にまで言及して初めて打球動作の学習に有益な示唆を与えるものであると考えられる。これまでの打球動作の研究では、主動作への関心が高く、準備姿勢や準備動作の観察が行われてこなかったため、励起アトラクタモデルの応用可能性を示唆する研究は少ない。

山本<sup>74)</sup>は、テニスのグランドストロークの学習過程を分析した結果、学習による変化で顕著なのは、準備姿勢における下肢の屈曲であるという事例を報告している。すなわち、打球動作の学習によって打球動作が向上するのだが、それは入力が開始されるボールの飛び出し時の準備姿勢によるところが大きいということである。さらにYamamoto<sup>75)</sup>はこうした準備姿勢が打球動作の準備動作である体幹の回旋動作を早めることを明らかにし、Howorth<sup>18)</sup>のスポーツにおける動的準備姿勢<sup>34)</sup>の存在を実験的に検証している（図5）。準備姿勢の獲得は運動の協応（ここでは体幹の回旋動作）にとって、単に神経系の促進を促すだけでなく、解剖学的にも関節可動域の増加として有効な方策であることから、その重要性はさらに高い。

したがって、主動作の観察だけでなく、創出された運動の初期状態からの詳細な観察が、励起アトラクタモデルの有効性を示すためには必要である。さらに、終末動作から次の準備姿勢までへの移行動作までも検討することが必要であると考えられる。こうした分析によって、励起アトラクタ間の遷移と打球動作の主動作に及ぼす準備姿勢の制御と学習が明らかにされるものと考えられる。脳における情報処理の最終出力が運

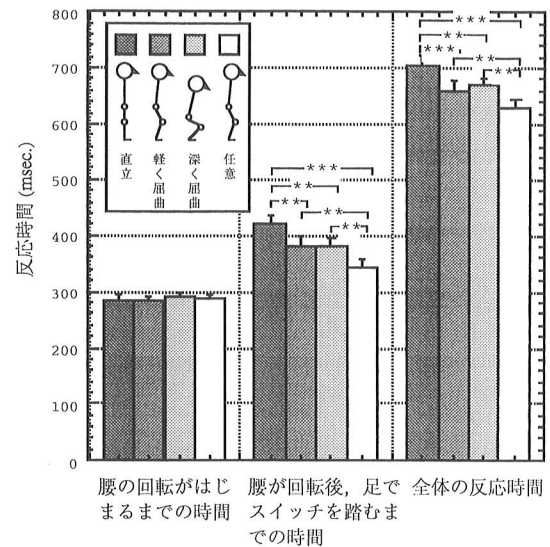


図5 準備姿勢の違いによる体幹回旋動作の反応時間の相違 (Yamamoto, 1996)

動であるとするならば、運動経過を詳細に観察することによって脳をダイナミカルシステムとして統一的に理解することも可能であると思われる。

#### 4. まとめと今後の展望

打球動作は外的なタイミングと運動協応が主たる課題であるが、従来は要素還元論的に研究が行われてきた。タイミング研究では、知覚見越しの研究と運動プログラムの研究が主であり、ここで扱われた運動プログラムはほとんど協応を必要としない動作であったか、協応構造は分析されなかったかのいずれかである。一方協応構造に着目した研究では、いわゆるクローズドスキルに分類されるような動作が主で、外的な事象に対する反応動作というよりは、ある条件下での動作の繰り返しを課題としていることがほとんどである。外的な事象によって引き起こされる協応構造の生起という打球動作の特性を満足するような研究はほとんどないというのが現状であろう。

対象とする運動が身体運動の中でも外部入力に対応した協応構造という出力が必要とされる打球動作においては、従来の知覚面だけの研究でも不十分であるし、外部入力を持たない自己組織化のモデルでも不十分である。いいかえれば、これまで内的タイミングと外的タイミングの問題として分離して考えてきた問題に対して、それらを包括して解釈していけるモデルが望まれる。Kelsoらが、非平衡熱力学のモデルから動作の



協応を説明してきたように、今後入力パターンにも依存した新たなモデルによる動作の協応を説明していかなければならないであろう。そうした意味で、外界との相互作用によって入出力パターン変換が創出されるとする郷原らの励起アトラクタによるダイナミカルシステムモデルは有効なものと考えられ、今後打球動作を含む人間の運動における実験的な検証が望まれる。

### 引用文献

- 1) Abbs, J., Gracco, V. L., and Cole, K. J. (1984) Control of multimovement coordination: Sensorimotor mechanisms in speech motor programming. *Journal of Motor Behavior* 16: 195-231.
- 2) Alderson, G. J. K., Sully, D. J., and Sully, H. G. (1974) An operational analysis of a one-handed catching task using high speed photography. *Journal of Motor Behavior* 6: 217-226.
- 3) Anderson, D. I. and Sidaway, B. (1994) Coordination changes associated with practice of a soccer kick. *Research Quarterly for Exercise and Sport* 65: 93-99.
- 4) Belisle, J. J. (1963) Accuracy, reliability, and refractoriness in a coincidence-anticipation task. *Research Quarterly* 34: 271-281.
- 5) Bernstein, N. (1967) *The co-ordination and regulation of movements*. Pergamon Press: New York.
- 6) Bernstein, N. (1996) On the dexterity and its development. In M. L. Latash and M. T. Turvey (Eds.), *Dexterity and its development*. Lawrence Erlbaum Associates: New Jersey, pp. 2-244.
- 7) Bootsma, R. J. and Van Wieringen, P. C. W. (1990) Timing an attacking forehand drive in table tennis. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance* 16: 21-29.
- 8) Diggles, V. A., Grabiner, M. D. and Garhammer, J. (1987) Skill level and effector visual feedback in ball catching. *Perceptual and Motor Skill* 64: 987-993.
- 9) Dorfman, P. W. (1977) Timing and anticipation: A developmental perspective. *Journal of Motor Behavior* 9: 67-79.
- 10) Fischman, M. G. and Schneider, T. (1985) Skill level, vision, and proprioception in simple one-hand catching. *Journal of Motor Behavior* 17: 219-229.
- 11) Franks, I. M., Weicker, D., and Robertson, D. G. E. (1985) The kinematics, movement phasing and timing of a skilled action in response to varying conditions of uncertainty. *Human Movement Science* 4: 91-105.
- 12) Gibson, J. J. (1966) *The senses considered as perceptual systems*. Houghton Mifflin: Boston.
- 13) 郷原一寿 (1996) ダイナミカルシステムとしての生物 *BME* 10: 3-1.
- 14) 郷原一寿 (1995) 時空間パターンに励起されたニューロダイナミクスー励起アトラクタモデルー. *信学技報 NC94-153*: 299-306.
- 15) ハーケン: 牧島邦夫・小森尚志 (訳) (1991) 協同現象の数理. 東海大学出版会: 東京. < Haken, H. (1978) *Synergetics: An introduction*, 2nd ed. Springer: Heidelberg. >
- 16) 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.
- 17) Haywood, K. M. (1977) Eye movements during coincidence-anticipation performance. *Journal of Motor Behavior* 9: 313-318.
- 18) Howarth, B. (1946) Dynamic posture. *Journal of American Medical Association* 131: 1398-1404.
- 19) Isaacs, L. D. (1983) Coincidence-anticipation in simple catching. *Journal of Human Movement Studies* 9: 195-201.
- 20) Jeka, J. J., Kelso, J. A. S., and Kiemel, T. (1993) Spontaneous transitions and symmetry: Pattern dynamics in human four-limb coordination. *Human Movement Science* 12: 627-651.
- 21) Judge, S. J., and Bradford, C. M. (1989) Adaptation to telestereoscopic viewing measured by one-handed ball-catching performance. *Perception* 17: 783-802.
- 22) 川人光男 (1996) 脳の計算理論. 産業図書: 東京.
- 23) Kelso, J. A. S. and Schönner, G. (1988) Self-organization of coordinative movement pattern. *Human Movement Science* 7: 27-46.
- 24) Kugler, P. N., Kelso, J. A. S. and Turvey, M. T. (1980) On the concept coordination structures as dissipative structures: I. Theoretical lines of convergence. In G. E. Stelmach and J. Requin (eds.), *Tutorials in Motor Behavior*. North-Holland Publishing Company: Amsterdam, pp. 3-47.
- 25) Lacquaniti, F. and Maioli, C. (1989) The role of preparation in tuning anticipatory and reflex responses during catching. *The Journal of Neuroscience* 9: 134-148.
- 26) Lee, D. N. (1976) A theory of visual control of braking based on information about time-to contact. *Perception* 5: 437-459.
- 27) Marteniuk, R. G., MacKenzie, C. L., and Leavitt, J. L. (1990) The inadequacies of a straight physical account of motor control. In H. T. A. Whiting, O. G. Meijer, and P. C. W. van Wieringen (Eds.), *The natural-physical approach to movement control*. VU University Press: Amsterdam, pp. 95-115.
- 28) Matsuo, T. and Kasai, T. (1994) Timing strategy of baseball-batting. *Journal of Human Movement Studies* 27: 253-269.
- 29) McLeod, P. and Dienes, Z. (1996) Do fielders know where to go to catch the ball or only how to get there? *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance* 22: 531-543.
- 30) Michaels, C. F., and Oudejans, R. R. D. (1992) The optics and actions of catching fly balls: Zeroing out optical acceleration. *Ecological Psychology* 4: 199-222.
- 31) マイネル: 金子明友 (訳) (1981) スポーツ運動学. 大修館書店: 東京. < Minel, K. (1960) *Bewegungslehre*. Volks und Wissen Volkseigener Verlag: Berlin. >
- 32) Newell, K. M., Hoshizaki, L. E. F., Carlton, M. J., and Hal-

- bert, J. A. (1979) Movement time and velocity as determinants of movement timing accuracy. *Journal of Motor Behavior* 11: 49-58.
- 33) Newell, K. M. (1985) Coordination, control and skill. In D. Goodman, R. B. Wilberg, and I. M. Franks (Eds.), *Differing perspectives in motor learning, memory, and control*. North-Holland: Amsterdam. pp. 295-317.
- 34) 大築立志 (1988) 「たくみ」の科学. 朝倉書店: 東京.
- 35) Payne, V. G. (1986) The effects of stimulus runway length on coincidence-anticipation timing performance. *Journal of Human Movement Studies* 12: 289-295.
- 36) Payne, V.G. (1987) Effects of angle of stimulus approach on coincidence-anticipation timing performance. *Journal of Human Movement Studies* 13: 383-390.
- 37) Payne, V. G. (1988) Effects of direction of stimulus approach, eye dominance, and gender on coincidence-anticipation timing performance. *Journal of Human Movement Studies* 15: 17-25.
- 38) Payne, V. G. and Michael, D. (1990) Effects of location of stimulus occlusion, stimulus velocity, and gender on coincidence-anticipation timing performance. *Journal of Human Movement Studies* 18: 243-250.
- 39) Peper, L., Bootsma, R. J., Mestre, D. R., and Bakker, F. C. (1994) Catching balls: How to get the hand to the right place at the right time. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance* 20: 591-612.
- 40) Poulton, E. C. (1957) On prediction in skilled movements. *Psychological Bulletin* 54: 467-478.
- 41) 佐々木正人・三嶋博之 (1994) 運動制御への生態学的アプローチ. 川人光男ほか著 岩波講座 認知科学 4 運動. 岩波書店: 東京, pp. 1-29.
- 42) 佐々木正人・鈴木健太郎 (1994) 行為の中心にあること. *心理学評論*, 37: 454-472.
- 43) Savelsbergh, G. J. P., Whiting, H. T. A., and Bootsma, R. J. (1991) Grasping tau. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance* 17: 315-322.
- 44) Savelsbergh, G. J. P., Whiting, H. T. A., Burden, A. M., and Bartlett, R. M. (1992) The role of predictive visual temporal information in the coordination of muscle activity in catching. *Experimental Brain Research* 89: 223-228.
- 45) Schmidt, R. C., Carello, C., and Turvey, M. T. (1990) Phase transitions and critical fluctuations in the visual coordination of rhythmic movements between people. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance* 16: 227-257.
- 46) Schmidt, R. A. (1968) Anticipation and timing in human motor performance. *Psychological Bulletin* 70: 631-646.
- 47) Schmidt, R. A. (1969) Movement time as a determiner of timing accuracy. *Journal of Experimental Psychology* 79: 43-47.
- 48) Schmidt, R. A. (1975) A schema theory of discrete motor skill learning. *Psychological Review* 82: 225-260.
- 49) Schmidt, R. A. (1988) *Motor control and learning*. 2nd ed. Human Kinetics Publishers: Champaign.
- 50) Sharp, R. H. and Whiting, H. T. A. (1974) Exposure and occluded duration effects in a ball-catching skill. *Journal of Motor Behavior* 6: 139-147.
- 51) Sharp, R. H. and Whiting, H. T. A. (1975) Information-processing and eye movement behaviour in a ball catching skill. *Journal of Human Movement Studies* 1: 124-131.
- 52) Smyth, M. M. and Marriott, A. M. (1982) Vision and proprioception in simple catching. *Journal of Motor Behavior* 14: 143-152.
- 53) Taga, G. (1994) Emergence of bipedal locomotion through entrainment among the neuro-musculo-skeletal system and the environment. *Physica D* 75: 190-208.
- 54) 高木秀彦・郷原一寿 (1995) 励起アトラクタの実験的検証. *信学技報 NC94-154*: 307-314.
- 55) 武田暁 (1997) 脳と力学系. 講談社: 東京, pp. 110-113.
- 56) 丹治順 (1988) 運動意志の発現. 伊藤正男・佐伯胖編 認識し行動する脳. 東京大学出版会: 東京, pp. 91-111.
- 57) Tyldesley D. A. and Whiting H. T. A. (1975) Operational timing. *Journal of Human Movement Studies* 1: 172-177.
- 58) Van Emmerik, R. E. A., Den Brinker, B. P. L. M., Vereijken, B., and Whiting, H. T. A. (1989) Preferred tempo in the learning of a gross cyclical action. *The Quarterly Journal of Experimental Psychology* 41A: 251-262.
- 59) Vereijken, B. and Whiting, H. T. A. (1990) In defense of discovery learning. *Canadian Journal of Sport Science* 15: 99-106.
- 60) Vereijken, B., Van Emmerik, R. E. A., Whiting, H. T. A., and Newell, K. M. (1992) Free(z)ing degrees of freedom in skill acquisition. *Journal of Motor Behavior* 24: 133-142.
- 61) Vereijken, B., Whiting, H. T. A., and Beek, W. J. (1992) A dynamical systems approach to skill acquisition. *The Quarterly Journal of Experimental Psychology* 45A: 323-344.
- 62) Whiting, H. T. A., Gill, E. B., and Stephenson, J. M. (1970) Critical time intervals for taking in flight information in a ball-catching task. *Ergonomics* 13: 265-272.
- 63) Whiting, H. T. A., Alderson, G. J. K., and Sanderson, F. H. (1973) Critical time intervals for viewing and individual differences in performance of a ball-catching task. *International Journal of Sports Psychology* 4: 155-164.
- 64) Whiting, H. T. A. and Sharp, R. H. (1974) Visual occlusion factors in a discrete ball-catching task. *Journal of Motor Behavior* 6: 11-16.
- 65) Whiting, H. T. A. and Vereijken, B. (1993) The acquisition of coordination in skill learning. *International Journal of Sport Psychology* 24: 343-357.
- 66) Wimmers, R. H., Beek, P. J., and Van Wieringen, P. C. W. (1992) Phase transitions in rhythmic tracking movements: A case of unilateral coupling. *Human Movement Science* 11: 217-226.
- 67) Wrisberg, C. A. and Ragsdale, M. R. (1979) Further tests of Schmidt's schema theory: Development of a schema rule for a coincident timing task. *Journal of Motor Behavior* 11: 159-166.

- 68) Wrisberg, C. A., Paul, J. H., and Ragsdale, M. R. (1979) Subject gender, knowledge of results, and receptor anticipation. *Research Quarterly* 50: 699-708.
- 69) Wrisberg, C. A. and Mead, B. J. (1981) Anticipation of coincidence in children: A test of schema theory. *Perceptual and Motor Skills* 52: 599-606.
- 70) Wrisberg, C. A. and Mead, B. J. (1983) Developing coincident timing skill in children. *Research Quarterly for Exercise and Sport* 54: 67-74.
- 71) Wollstein, J. R. and Abernethy, B. (1988) Timing structure in squash strokes: Further evidence for the operational timing. *Journal of Human Movement Studies* 15: 61-79.
- 72) 山本裕二・池上康男・桜井伸二(1997) 打動作における柔らかさと固さ—バッティング動作における視覚情報との同期—. *日本認知科学会第14回大会論文集*, 145-146.
- 73) Yamamoto, Y., Ikegami, Y. and Sakurai, S. Body dynamics of the baseball batting swing involved in in-side and away-side hitting. (in preparation)
- 74) 山本裕二(1996) 身体運動における打動作の学習に関する事例的検討. *認知科学* 3: 87-98.
- 75) Yamamoto, Y. (1996) The relation between preparatory stance and trunk rotate movement. *Human Movement Science* 15: 899-908.

(1998年11月27日受付)