

博士論文

打球動作における複合運動学習

平成 12 年度

山本 裕二

筑波大学

目次

第1章 序論	1
1.1 はじめに	1
1.2 身体運動の複雑さ	2
1.2.1 運動の協応構造	3
1.2.2 運動の局面構造	3
1.2.3 環境との相互作用	4
1.2.4 身体運動の連続性と多様性	5
1.3 身体運動における打球動作の定義	6
1.4 関連研究領域の概観	8
1.4.1 運動学習に関するモデル	8
1.4.2 一致タイミング	11
1.4.3 運動の協応構造	17
1.5 問題の所在	21
1.5.1 運動課題の分類	22
1.5.2 運動制御理論の到達点	27
1.5.3 運動制御理論と運動指導の問題	30
1.5.4 運動観察の方法論的問題	32
1.5.5 まとめ	33
第2章 目的	37
第3章 単離散打球動作の運動制御	38
3.1 はじめに	38

3.2	打球動作学習における運動の協応構造と局面構造の検討	39
3.2.1	目的	39
3.2.2	方法	40
3.2.3	結果	43
3.2.4	考察	48
3.3	準備姿勢と導入動作の関連	52
3.3.1	目的	52
3.3.2	方法	53
3.3.3	結果	56
3.3.4	考察	59
3.4	まとめ	61
第4章	複離散打球動作の運動制御	64
4.1	はじめに	64
4.2	選択的一致タイミング課題の運動制御	65
4.2.1	目的	65
4.2.2	予備実験	67
4.2.3	方法	71
4.2.4	結果と考察	73
4.2.5	考察	78
4.3	環境の多様性が打球動作の運動制御に及ぼす影響	80
4.3.1	目的	80
4.3.2	方法	82
4.3.3	結果	85
4.3.4	考察	90
4.4	まとめ	91
第5章	連続・複合打球動作の運動制御	94
5.1	はじめに	94

5.2	複合運動によって生ずる複雑さ	95
5.2.1	目的	95
5.2.2	方法	96
5.2.3	結果	98
5.2.4	考察	106
5.3	身体運動の複雑さの構造	107
5.3.1	目的	107
5.3.2	方法	108
5.3.3	結果	111
5.3.4	考察	125
5.4	まとめ	126
第6章	打球動作の複合運動学習	128
6.1	はじめに	128
6.2	複合運動による練習効果の可能性	129
6.2.1	目的	129
6.2.2	方法	130
6.2.3	結果および考察	130
6.3	複合打球動作がパフォーマンスに及ぼす影響	135
6.3.1	目的	135
6.3.2	方法	136
6.3.3	結果	137
6.3.4	考察	138
6.4	複合運動学習の検討	140
6.4.1	目的	140
6.4.2	方法	141
6.4.3	結果	146
6.4.4	考察	150
6.5	まとめ	152

第7章 総括	154
7.1 はじめに	154
7.2 本論文の要約	154
7.3 運動指導への示唆	160
付録	165
文献	174
付記	185
謝辞	186

第1章

序論

1.1 はじめに

1999年のウインブルドンテニスの男子決勝の第1セットでは、サービスエースやダブルフォルトを除くと44回のラリーがあった。1回のラリーでは平均3.6回のショットがあり、1回のラリーの平均時間は2.7秒であった。相手がボールを打ってから、自分が打つまでの平均時間は0.9秒しかなかったことになる。このような短時間に相手の打球に合わせて、適切な位置に移動し、適切なショットを選択して、打たなければならないのである。この動作をできるだけ正確に、適切にかつ素早く繰り返すことができた選手がチャンピオンになるのである。

こうしたラリーでは、同じようなボールが飛んでくるが、全く同じボールは飛んでこない(と考えると良い)。したがって、傍目には同じような打ち方をしているが、全く同じ打ち方をしているわけではない。そして我々観客の目を引くのは、もう追いつかないと思われるボールに追いつき、なおかつそこから素晴らしいパッシングショットを打つような時である。一体どうしてこんなにいろいろな打ち方が瞬時にできるのだろうか。この一見多様で、複雑な動きがどのようにして生ずるのかについて、運動制御の観点から検討するのが本論文のねらいである。この機構の解明が、複雑に見える動きの新たな獲得方略や練習方法への示唆に繋がるものと期待される。さらには、人間の複雑に見える身体運動制御の一端を垣間見ることでもできよう。

1.2 身体運動の複雑さ

人間にとって運動は、重要な機能である。契約書にサインするために万年筆で字を書くにも、喉の渇きをいやすためにコップの水を飲むのも運動によってしか実現できない。そしてこの運動は、知覚と行為が密接に結びついたものであり、脳における複雑な情報処理の結果として出力されるものである。つまり「複雑系」の最たる人間を理解する上で、最も複雑で重要な機能が運動であると思われる。

しかしながら、これまでの科学が普遍性・論理性・客観性を求め、部分化による日常生活あるいは生活世界との遊離に向かわせてきたという批判(中村, 1992)は、運動に関する研究にも当てはまるであろう。例えば、運動学習の理論が現場の体育教師に受け入れ難いのは、単に理論と実践の橋渡しがいいだけでなく、理論自体にも問題があるのかもしれない。東(1982)は「偽科学からの離陸」と題する中で「教育学の研究者のいらだちの原因について考えるならば、そのひとつは、心理学が、その方法に合うように問題を縮小したり単純化したり変形したりした上で解いておきながら、もとの問題を科学的に解いたように振舞う」ことだとし「問題が…正当化されるためには問題の本質が保たれていることが必要で、そうでなければ問題のすり替えということになってしまう」と述べている。さらに「心理学のみの範囲内で正当化できても、教育の問題に短絡的に結びつけばすり替えになっている場合も少なくない(p. 2)」とこれまでの学習心理学の問題を述べ「人にとって有意味な、具体的な教育や学習の過程を、できるだけそのままの形で取り上げるべきだと思う(p. 10)」と今後の方向を示唆している。運動に関する研究についても同じことが当てはまりはしないかと思う。

この東(1982)の指摘は、問題ないしは現象を「複雑な(complex)」現象としてとらえるか「ごちゃごちゃ込み入った(complicated)」現象として捉えるかの違いと言い換えられる。この二つの現象について吉永(1996)は、後者は「全体は部分の和である」というスローガンに象徴される要素還元論的な方法で解明できる現象であるのに対し、前者は「全体は部分の総和以上である」という性質を持つ現象だとしている。つまり部分に分解可能な問題と、分解すると全体としての意味を失う現象があると考えられる。

これらのことから、身体運動の運動制御を考える場合に、一つのまとまりのある運動は、時間的・空間的に部分に分解することなく、全体を複雑な現象としてありのままに捉

えることの必要性を示唆していると思われる。これが複雑に見える身体運動を理解する上で本論文の基本的な構えであり、そのための視点は、身体システム側の運動の協応構造とその局面構造、身体システムと環境との相互作用の3点に集約される。

さらに、実際の運動技能においては、これらのひとまとまりの運動は、1回だけで完結する場合、反復して繰り返される場合や異なる運動が連続する場合などに分けられる。こうした運動の多様性とその連続性の問題が身体運動の複雑さを生み出す要因でもある。

以下それぞれの要因について、簡単に述べていく。

1.2.1 運動の協応構造

人間の身体は、多数の骨、筋、それに腱と関節といった各要素によって成り立っている。そうした身体を動かすときに、これらの各要素が相互作用し、全体としての動きとなるとともに、その動きが各要素に影響を与える。このことを指摘したのが、Bernstein (1967) の協働 (synergy) である。

ある合目的な運動を行う際に、その目的を達成する動きは幾通りも存在し、一義的には決まらない。しかしながら、目的を達成するという意味からは非常に正確に動くことができるのである。つまり、コップの水を飲む場合にでも、座って飲む場合、立って飲む場合、移動中の車内で立って飲む場合など様々な場合が考えられるが、いずれの場合にも我々は水を飲むことはできる。目的を達成するという意味からはいずれの場合でも正確な動きが実現されているといえる。しかしながら、その時のコップを持つ手の軌跡だけを観察すると様々な異なる軌跡となって観察できよう。それは、その時の姿勢との相互作用において手の軌跡が決定されているからである。つまり、観察される現象としては、複雑に見える動きから正確な結果を生み出すこと、そして、それは身体各部位の相互作用によることが人間の身体運動の特徴であるといえる。これが「運動の協応構造」の問題である。

1.2.2 運動の局面構造

もうひとつの特徴は、動きの単位である。Johansson (1973) は、人の前額、両肩、両肘、両手首、両腰、両膝、両足首に光点をつけて、暗闇の中で光点だけを観察した場合、

人が静止している場合にはその光点が何であるかを判断することは難しいが，人が歩いたり走ったりすることによって，すぐにその「動き」を判断できることを示した．また Runeson and Frykholm (1983) は，様々な人の動きを Johansson (1973) のパッチライト法 (patch light technique) で提示し「動き」の情報だけから人の運動を正確に知ること確かめている．とくに興味深いのは，重さの異なる物を持ち上げる運動をしているときに，その持ち上げるまでの準備姿勢から持ち上げる物の重さを判断でき，さらには虚偽の重さを持ち上げる演技さえも我々は判断できるという事実である．このことから知覚システムは静止したものを知覚しているのではなく，時間的に変化する刺激から情報を抽出し，事象知覚 (event perception) すると考えられている．

こうした考え方は，Gibson (1966, 1979) の生態学的視覚論によるところが大きい．Gibson が事象の知覚について主張するのは，環境内で生ずる物体の物理的運動と光の配列の中での光学的構造の変化，すなわち光学的運動とは異なるということである．そしてこの光学的運動を光流 (optical flow) と呼び，この構造の変化が事象の知覚および行為には重要であるとする．さらに彼は，Newton 力学的には，物質を構成する原子・分子の運動は可逆的であるが，生態学的な事象は非可逆的であると述べている (Gibson, 1979, p. 110) .つまり，生態学的事象は始まりから終わりまでを，終わりから始まりへと逆転することはできず，事象の順序性が逆転できない「時間の矢 (Eddington, 1928)」の上で起こる出来事であるとしている．人間の身体運動を考える場合に，不可逆的な時間的構造を持っていることが第二の特徴である．運動学ではこれを「運動の局面構造」と呼んでいる (Meinel, 1960) .あるまとまりのある動きがいくつかの単位に分節化でき，その単位の系列が意味を持つのである．

1.2.3 環境との相互作用

さらに前述の例では，移動中の車内で立って飲む場合に最も複雑な動きが観察される．これは，単に身体システムの各要素間の相互作用，すなわち運動の協応構造だけでなく，環境システムとの相互作用が生ずるからである．歩行や走運動などのように身体システム内だけの相互作用によって行われているように見える身体運動であっても，歩行路や走路といった環境システムとの相互作用が無視できないことは容易に理解できる．歩き始めた

ばかりの幼児は、砂利道ではすぐに転倒するが、小学生にもなれば砂利道を走り抜けることもできるのである。この環境システムとの相互作用が、身体運動を複雑に見せる大きな要因であるといえる。

行動に基づく人工知能研究を提唱している Brooks (1991) は、「生存と生殖を最低限保持するのに十分なほど周囲を知覚し、動的な環境世界を動き回ることのできる能力 (p. 141)」が、知能の本質的な問題だと述べている。これは、知覚と行為の結びつきを強調するとともに、動的な環境との相互作用の中で運動が重要であることを指摘している。すなわち、身体運動の最大の特徴は動的な環境との相互作用であると考えられる。

こうした指摘は、Bernstein (1996, p. 226) にも見られる。彼は、巧みさ (dexterity) を、「いかなる外的状況に対しても解決できる運動を見出す能力」であるとし、「直面する運動問題を、適切で正確に、素早く、効率的合理的に、そして機転を利かせて解決する能力である」としている。ここで Bernstein が強調するのも動的な環境であり、その中でいかに環境に適応的に合目的な運動を行えるかが問題であるとするものである。そしてこうした運動が人間の運動を特徴づけるものと考えられる。したがって、複雑な身体運動の研究において「環境との相互作用」は無視できない要因となる。

1.2.4 身体運動の連続性と多様性

身体運動はその連続性から、離散運動 (discrete movement) と連続運動 (continuous movement) という分類がなされることが多い。これは Meinel (1960) の非循環運動 (azyklische Bewegung) と循環運動 (zyklische Bewegung) という分類にほぼ対応する。非循環運動は、1 回だけ経過する完結した運動であり、例えば、跳ぶこと、突くこと、投げることなどである。循環運動とは同種の運動の繰り返しであり、例えば、ボートを漕ぐこと、歩くこと、走ることなどである。同種の運動を繰り返す循環運動を、本論文では連続運動と呼ぶ。さらに異なる 2 つ以上の運動が連続する場合は運動組み合わせ (Bewegungskombination) と呼ばれている。例えば、捕投の結合や体操競技などの運動である。ここではこうした運動組み合わせに相当する運動として「複合運動」(complex movement) という語を用いることにする。Meinel (1960) では、異なる技が組み合わせられて一連の運動が構成されている場合に連続運動 (Übungsfolge) という語を用いているが、同種の運動を繰り返す連続

運動と区別するためにも本論文では複合運動と呼ぶことにする。

ダーツ投げや垂直跳びなどは単一の運動を離散的に行う運動であるといえる。しかしゴルフのラウンドプレーでは、1回1回の打動作は離散運動（非循環運動）であるが、全体を見ると異なる打具（クラブ）で、異なる距離にボールを打つことから多様な離散運動を繰り返しているといえる。また、トレッドミル上を歩いたり走ったりする運動は、連続運動（循環運動）であり、環境の変化がなければ単一の運動の繰り返しである。しかしクロスカントリーのように様々な路面をスピードの変化をつけて走れば、複合運動（運動組み合わせ）に分類されよう。

では、冒頭の例のようなテニスのラリーはどのような運動として分類できるのか。1回1回の打球動作を見れば、非循環運動で離散運動であるが、短いインターバルでのラリーでは連続運動のように見える。ましてや様々なボールに対応してラリーを繰り返している運動は、まさに異なる2つ以上の運動が連続する複合運動に分類される。

つまり、環境の多様性に対応して運動の多様性も見られるし、環境からの時間的制約の要請によって運動は離散運動から連続運動へ連続的に変化していく。通常複雑に見える身体運動は、こうした多様な環境との連続的な相互作用の中で見られる。しかも異なる2つ以上の運動の運動組み合わせが高速になればなるほどその見た目での複雑さは増すようである。いいかえれば、環境との相互作用によって運動の多様性と連続性による複雑さが決定されるのである。

1.3 身体運動における打球動作の定義

本論文では、環境との相互作用が時間的制約の中で求められる運動として、打球動作を取り上げる。つまり、複雑な身体運動の中でも、身体システム内だけでなく、環境システムとの相互作用も含まれる、より複雑な現象を示す動作である。したがって打球動作は身体運動の複雑さを生み出す運動の協応構造と局面構造、さらに環境との相互作用という3つの要因を合わせ持つ動作といえる。また、環境との連続的相互作用の時間的制約が緩い場合には離散運動に、時間的制約が厳しい場合には連続運動となるという特徴を持っており、さらに環境の多様性に対応して単離散運動と複離散運動、連続運動（単連続運動）と

複合運動(複連続運動)の分類・操作が可能な動作であるといえる。これらの点から、複雑に見える身体運動の運動制御を研究する上で有効な運動課題となると考えられることが、本論文において打球動作を運動課題とした理由である。

一般に個々の運動技能に相当する動作については、バイオメカニクスの分野で研究されている。バイオメカニクスの分野において身体運動における打動作は、「道具(ラケット、竹刀、シューズなど)を含めた身体の端を効果器とし、衝撃力を大きくするためにそれを加速し、ボールあるいはヒトといった対象物にその衝撃力を与えること」(平野, 1992, p. 3)として定義されている。このような定義に基づき、打動作は、力学的な手法や生理学的な手法を用いて研究がなされてきている。そこでの関心は、四肢の関節運動(永田・室・北本, 1983; 吉澤・熊本, 1983)やラケットの動きの記述(大道, 1984; 友末・瀬戸・宮下, 1982)、筋作用機序、床反力(室, 1983)、動作の再現性(Knudson, 1990; 大道, 1984)などから熟練者の特徴を明らかにすることであり、打動作における熟練者の動作の空間的ないし力量的記述であるといえる。これらの研究は、打動作が運動連鎖やムチ動作といった運動の協応構造を有していることを明らかにしている。

また、運動の局面構造としては、例えば、テニスのフォアハンドストロークは、準備局面として構えからバックスイング(ラケットを引き終わるところ)、主要局面としてバックスイングからフォワードスイング(振り出し)とインパクト、終末局面としてフォロースルーといった運動局面に分割して考えることができる。こうした局面構造は指導場面では良く用いられるものである。

本論文では、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、インパクトの空間的・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、これらの定義や概念を参考に本論文における打球動作を定義すると、「打球動作はインパクトにおける時空間的正確性という一致タイミングの問題と、インパクトで大きな力量を発揮・調整するための姿勢制御も含めた運動の協応構造という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、運動の協応構造は主に視覚に基づく環境からの情報を引き金としており、一致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、時間的に変化する環境に対応して、空間的・時間的正確性と

ともに力量発揮の調整を必要とする運動が要求される。これは、環境との相互作用を全身の協応構造と姿勢制御によって局面構造を持った身体運動として実現しているといえる。

1.4 関連研究領域の概観

学習は比較的永続的な変化であるが、運動技能の獲得において何をどのように学習するのかという運動学習の問題と運動の機構を考える運動制御の問題とは表裏一体である。そこで、まず運動学習に関するこれまでの研究を概観する。その後、打球動作と関連が深い一致タイミングの研究と運動の協応構造に関する運動制御の研究について概観する。なお本節は、打球動作の運動制御と学習について論じた山本 (1997, 1999a) に一部基づいている。

1.4.1 運動学習に関するモデル

運動の学習過程の研究は Bryan and Harter (1897, 1899) のモールス信号の処理に関する研究を端緒とすると言われている。彼らは、モールス信号の受信の学習において、高原現象 (plateau)、すなわち練習を進めても成績が停滞する時期があることを見つけると同時に、学習に伴いその処理単位が文字から単語に移り、単語の受信が限界に達したときに高原現象が表われ、その後単語から意味的まとまりのある文章の受信が可能になるという過程を見いだした。これらの研究から、技能の階層構造とその学習過程について考察したが、学習のメカニズムについては触れられていない。

その後 Thorndike (1911) が、学習される連合 (association) は反復によって強められられるとし、それを効果の法則 (law of effect) として定式化した。すなわち、「同一状況に対してなされた複数の反応のうち、その動物に満足をもたらす満足を伴う反応が、他の条件が等しい限りその状況と強く結合し、結果として、同じ状況が生ずるとき満足を伴う反応が再び生ずる確率が高くなる。他方、その動物に不快をもたらす不快を伴う反応は、他の条件が等しい限りその状況との結合が弱くなり、結果として、同じ状況が再生起るとき不快を伴う反応の生起確率が小さくなる (Thorndike, 1911, p.244 を Logan and Wagner (1965) より引用)」。これは後の S-R 理論における強化 (reinforcement) に相当

する考え方である。さらに Thorndike は運動学習においても研究を進め、現在では結果の知識 (knowledge of results: KR) と呼ばれている報酬が学習を促進することを報告している (Thorndike, 1927)。このような反応性フィードバック (response-produced feedback) が学習を促進するという考え方は、閉回路理論 (closed-loop theory) の先駆けともいえるが、ここでのフィードバックは次の試行の刺激として働いているのであり、事前に行った運動の誤差検出や修正のために用いられているのではないという点で、後述する Adams (1971) の閉回路理論とは異なる。さらに、この反応性フィードバックと効果の法則が、連続する運動制御の説明にも適用され、後に連合連鎖理論 (associative chain theory, Lashley (1951) による) や反応連鎖仮説 (response chaining hypothesis, Adams (1990) による) と呼ばれている。

この反応性フィードバックと効果の法則による運動制御の説明に異を唱えたのが Lashley (1917) である。彼は、銃弾を受けた左膝関節が知覚麻痺した患者の研究に基づき、単関節の動きの正確性は健常者と変わらず、随意運動では素早い動きの方が正確に行われることを見いだした。さらに動きの正確性の制御は動作時間とは独立で、運動強度に依存し、運動開始後の運動強度の制御は活性化された末梢器官からの興奮がなくても可能であると考えた。また、Lashley (1951) はピアニストやタイピストの打鍵速度に注目し、連合連鎖理論ではこうした継時的な素早い動作を説明することができないと考え、末梢の感覚器官からのフィードバックなしに運動することができると考えた。そこで運動の中枢による制御を強調し、これが後の運動プログラムの基となる。

また Adams (1971) は、トラッキング (追跡) 動作の分析から KR が単に反応の強化のためだけに用いられるのではなく、前回の誤差、すなわち KR は次の試行においてより正しい反応を行うための修正に用いられていると考えた。つまり、反応によって引き出されるフィードバック情報、すなわち筋感覚情報や KR が知覚痕跡 (perceptual trace) と呼ばれる記憶状態に取り込まれ、基準値と比較されることによって、誤差の検出と修正が行われる。またどのような運動を選択し開始するかを決めるために、もう一つの記憶状態である記憶痕跡 (memory trace) を仮定した。それは、反応生成と反応の評価は同一メカニズムではできないこと、最初の反応はフィードバックを利用できないので開回路 (open-loop) である運動プログラムの利用が必要であること、反応の再生と刺激あるいは

反応の再認は独立した過程であることによる。この2つの記憶状態を仮定したのが閉回路理論 (closed-loop theory) である。

この閉回路理論のもつ特に新奇性と記憶容量の問題、すなわち新しい状況に対応して新しい運動プログラムを生成していく問題と、刺激と反応が1対1対応では記憶する量が膨大になる問題に対して、Schmidt (1975) はスキーマ理論 (schema theory) を提唱している。スキーマ理論は記憶の経済性を重視した運動記憶のモデルとしてとらえることができ、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、そのためのパラメータの値と実行結果との関数関係に関する知識データベースである再生スキーマと、実行された結果を評価するために過去の運動結果と運動に伴う感覚との間の法則に関する知識データベースである再認スキーマを学習により獲得するとしている。また、般化運動プログラムの仮定により新奇な課題にも対応できるとしている。しかしながら、Adams や Schmidt の初期のスキーマ理論は基本的には自由度 (degrees of freedom) が1つの単純な動作でいかにして正確性を高めるかという学習過程の理論であることから、スポーツにおける運動のように、多関節で自由度の大きい身体各部位の協調的・協応的働きが問題となる運動の学習への適用には限界があると思われる (Marteniuk, 1992)。

一方、Arbib (1985, 1989) のスキーマ理論では、脳を神経回路網 (neural network) としてとらえ、一つの動作 (例えば、物を掴む動作) について、いくつかの構成要素からなる協応制御プログラムを神経生理学的知見に裏付けられた計算論から説明している。また、Abbs, Gracco, and Cole (1984) も神経生理学的知見と発話行動の運動分析から、多くの運動の協調が必要とされる課題において感覚運動学習理論を提唱しており、運動プログラムは個々の動作や筋の活動を事前に記述するものではなく、感覚運動の調整によって形成されるものであり、課題の制約条件 (constraints) によってこれらの感覚運動の結びつきは決定されてくるとしている。これらのモデルに共通して興味深い点は、Schmidt らの運動学習理論とは異なり、フィードフォワードを重視している点と複雑な運動に対しての入出力の適応的メカニズムを仮定している点である。さらにこれらのモデルが日常生活における自然な動作を対象とした綿密な観察によって構築されたものである点が注目される。

このように，人間の運動に関する学習モデルは，出力系を中心とした単関節で自由度が小さい動作のモデルから，入出力のシステム内での多関節でより自由度の大きな日常生活における複雑な運動のモデルになりつつある．つまり，運動技能の場合にもこうしたモデルが援用できる可能性を示唆しており，複雑に見える運動技能を綿密に検討し直し，技能が学習されていく場合に，全体として表出する動作相互の階層性や協応動作の変容を検討していく必要性を示唆するものであると考えられる．

1.4.2 一致タイミング

ここでは打球動作の一方の課題である一致タイミングに関する研究を概観する．

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てきた．これは反応速度が一致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 (Schmidt, 1969) ．

一致見越しタイミング (coincident anticipation timing : CAT) の正確性は，性差 (Payne, 1988; Payne & Michael, 1990; Wrisberg, Paul, & Ragsdale, 1979) や子どもの発達 (Dorfman, 1977; Haywood, 1977; Isaacs, 1983) 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 (Payne, 1987, 1988) ，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 (Payne, 1986) ，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 (Haywood, 1977; Isaacs, 1983; Payne & Michael, 1990) ．

これらの研究によって，一致見越しタイミング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 (Wrisberg & Mead, 1981, 1983; Wrisberg & Ragsdale, 1979) は、大人 (大学生と大学のスタッフで年齢不明) と小学 1 年生 (平均年齢 7 才 2 ヶ月と 6 才 11 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, 5.8 m/s で、子供の場合には 1.3, 1.8, 2.2, 2.7, 3.1 m/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方法が有効であるが、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見越し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 (1988) 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ついては述べられていない。

出力に関する研究

一方、一致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きている。Schmidt (1969) 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一致タイミングの正確性が向上し、また動作開始時点と一致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事前プログラミング (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点の調整が可能のため、一致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 (1979) は速度正確性相反関係 (speed-accuracy trade-off) に関する実験として、一致タイミング課題では動作速度が速い方が一致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 15 cm/s 以下の遅い動きのときに一致タイミングの正確性が低下するとしている。

つまり、一致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、一致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 (Schmidt, 1988)。

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、一致タイミングの正確性に影響するという考え方は、実際の運動技能の詳細な観察からも支持された。Tyldesley and Whiting (1975) 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一致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、動作開始時点の調節だけでよい。しかしながら、初心者は、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時間的・空間的安定が認められるまでは、動作開始時点の安定はないとしている。

Franks, Weicker, and Robertson (1985) 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。熟練者に3種類の速度条件下 (8.9, 13.4, 17.9 m/s) で転がってくるボールを、特定の標的に向かって打ち返すことを求めた。フィルム分析が行われ、動作のキネマティクス、位相、一致タイミングが検討された結果、熟練者のダウンスイング時間は一定であるが、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導入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 (1988) はスカッシュプレー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ぼ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。

したがって一致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一致させるかといった外的タイミング (external timing) 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一致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いえる。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構造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いえよう。また、出力制御に関しては運動プログラムの修正や事前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。

捕球動作

打球動作と類似した動作として捕球動作 (ball catching) があげられる。大築 (1988) は「キャッチとは標的を捕捉することである (p. 14)」と定義している。つまり「捕」と「打」は物体の運動量をゼロにするか、運動量を変化させるかの違いがあるだけとし、打球動作を捕球動作の一種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、投球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捕球成績との関係を検討している (Sharp & Whiting, 1974, 1975; Whiting, Alderson, & Sanderson, 1973; Whiting, Gill, & Stephenson, 1970; Whiting & Sharp, 1974)。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 200 ms 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 (1982) 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、空間定位のエラーが増加す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 (1985) や Diggles, Grabiner, and Garhammer (1987) 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興味深いものである。

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とは、Gibson (1966) の直接知覚 (direct perception) に基づいて理論化されてきた。直接知覚とは、行為者が環境にある情報を断片的に知覚するのではなく、環境と行為者の相対的な動きによって生ずる光流 (optical flow) の変化の中から情報が抽出されるというものである。

Lee (1976) 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ず

る行為者の網膜上の光流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 (τ) を数学的に表現した。つまり、環境の対象あるいは行為者が移動することによって行為者の網膜上の写像は、対象の移動速度と移動距離に比例する。したがって、行為者は対象の実際の移動速度や距離という環境内に存在する情報を知ることなく、網膜上に写像された距離と移動速度という行為者内に生ずる情報のみから接触 (collision) までの残り時間 (time-to-contact) を特定できるというものである。

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 (τ) によるとするもの (Alderson, Sully, & Sully, 1974; Lacquaniti & Maioli, 1989; Savelsbergh, Whiting, & Bootsma, 1991; Savelsbergh, Whiting, Burden, & Bartlett, 1992) や、両眼視からの空間位置 (Judge & Bradford, 1989) や垂直方向の加速度情報 (McLeod & Dienes, 1996; Michaels & Oudejans, 1992)、手の動きによる位置情報の取得 (Peper, Bootsma, Mestre, & Bakker, 1994) 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 (1990) 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は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、ボールとの接触までの運動を環境に適応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 (1994) は野球のバッティング動作について、投球速度とコースを発光ダイオード (light-emitting diode : LED) でシミュレートした実験を行っている。この結果、投球速度が異なる場合でも動作の開始には変化がなく、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ことを示した。

このように動作開始後も連続的に動作の修正が行われていることは捕球動作においても検証されてきた。Peper et al. (1994) は、つり下げられたボールを様々な角度から落として、同じ点を通るようにし、その際の視覚情報を検討している。その結果、同じ点をボールが通る場合でも、角度が異なれば、手の動きが異なることを見だし、通過点を予測しているのではなく、捕球に必要な手の速度は視覚情報と実際の手の動きに基づいて連続的に制御していると考えている。このような制御様式を Bootsma ら (Bootsma, Fayt,

Zaal, & Laurent, 1997; Bootsma, Houbiers, Whiting, & van Wieringen, 1991; Bootsma & Peper, 1992) は、動作開始時の動作のばらつきは大きい、捕球時の動作のばらつきは小さいことから漏斗形制御 (funnel-like type of control) と呼び、プログラム制御モデル (preprogrammed control model) と区別するため連続制御モデル (continuous control model) と呼ばれている。

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。その中で注目すべき点は、従来的一致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、身体各部位の協応構造まで言及しているものは見あたらない。

また、プログラム制御モデルにおいては、結果としての正確性を学習する際に、そのための運動を生成する過程、すなわち入力情報の処理や入力された情報の中枢での処理、さらにはそこから出力される過程が正確になることが必要であると考えてきた。しかしながら、連続制御モデルでは、結果として正確であるために運動の生成過程では絶えず調整がなされていると考えている点がプログラム制御モデルとは大きく異なる。

1.4.3 運動の協応構造

運動の協応構造は Bernstein (1967) が協働 (synergy) 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。"synergy" は一般に「協同」の訳語が当てられることが多いが、Bernstein (1967) 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。打球動作においても、一致タイミングの正確性ととも力量の効率的発揮という観点から運動の協応構造は重要な問題である。

運動の協応構造を考える場合には、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、人間の上肢は体幹と連結する上肢帯 (shoulder girdle) と肩・肘・手の3関節によって、その運動を制御している (中村・斎藤, 1992, pp. 422-426)。上肢帯の運動方向は、屈曲・伸展 (flexion vs. extension) と挙上・引下げ (elevation vs. depression) の2方向がある。肩関節は屈曲・伸展、外転・内転 (abduction vs. adduction)、外旋・内旋

(external rotation vs. internal rotation) と水平屈曲・水平伸展 (horizontal adduction vs. horizontal abduction) の 4 方向がある。また、肘関節は屈曲・伸展と前腕の回内・回外 (pronation vs. supination) の 2 方向が、手関節にも背屈・掌屈 (extension vs. flexion) と橈屈・尺屈 (radial flexion vs. ulnar flexion) の 2 方向がある。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 10 方向への運動指令が必要となる。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 (1967) はこの自由度の問題を解決するためには、関節の自由度を減少させて力量を効率的に制御できるように、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。

ダイナミックパターン (dynamic pattern)

Kugler, Kelso, and Turvey (1980) 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 (Haken, 1983; Iberall, 1970; Prigogine & Nicolis, 1971) を適用して、運動の協応構造を自律系のシステム (autonomous system) と見なし、運動の制御と協応構造に関する自己組織化のモデルを提出した。それ以来多くの研究が、状態がある決定論的法則にしたがって時間的に変化する系、すなわちダイナミカルシステム (dynamical system) の観点から行われてきた。

先駆的な研究として Kelso (1981, 1984) は、被験者に人差し指あるいは手首をリズムカルに屈曲するように指示し、その屈曲の周波数を変更していった。そこで、被験者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) のいずれかの 2 つの安定した位相でのみ遂行することができるとともに、連続的に運動の周波数が高くなっていくと急激な相転移 (phase transition) が認められた。この実験的事実に基づき、非平衡系における自己組織化とパターン形成、とくにシナジェティクス (synergetics) の理論 (Haken, 1983) から理論的枠組みが形成された (Haken, Kelso, & Bunz, 1985; Schönner, Haken, & Kelso, 1986)。このモデルの中心概念は協応パターンを記述する集合変数 (collective variables) とパターンの重要な特徴である安定性 (stability) であった。さらに、行動情報 (behavioral information) として環境 (environmental)、記憶 (memorized)、意図的 (intentional) な情報がこのモデルに付加するように導入された (Kelso, Scholz, & Schönner, 1988; Schönner, 1989;

Schöner & Kelso, 1988b, 1988c) .

相転移現象は両肢間 (Baldissera, Cavallari, & Civaschi, 1982; Fitzpatrick, Schmidt, & Carello, 1996a) , 四肢間 (Carson, Goodman, Kelso, & Elliot, 1995; Jeka, Kelso, & Kiemel, 1993) , 知覚 - 行為協応 (Byblow, Chua, & Goodman, 1995; Kelso, DelColle, & Schöner, 1990; Schmidt, Carello, & Turvey, 1990; Wimmers, Beek, & van Wieringen, 1992) や学習 (Fontaine, Lee, & Swinnen, 1997; Swinnen, Walter, Lee, & Serrien, 1993; Zanone & Kelso, 1992a, 1992b, 1994, 1997) において検証されてきた . さらには , 人の脳における相転移の概念が理論的に示され (Jirsa, Friedrich, Haken, & Kelso, 1994) , 聴覚刺激と指の動きの実験において相転移現象が超伝導量子干渉計 (superconducting quantum interference devices : SQUIDs) を用いた脳の微弱磁場測定 (Fuchs, Kelso, & Haken, 1992; Kelso, Bressler, Buchanan, DeGuzman, Ding, Fuchs, & Holroyd, 1991; Kelso, Bressler, DeGuzman, Ding, Fuchs, & Holroyd, 1992) や脳電図 (electroencephalogram : EEG) で検証されてきている (Wallenstein, Kelso, & Bressler, 1995) .

他にも人間と環境の協調システムを説明するアプローチが , 情報の流れとしての自己組織化の観点から行われている (Kugler & Turvey, 1987, 1988; Turvey, Rosenblum, Schmidt, & Kugler, 1986) .

またこのダイナミカルシステムは , 発達 (Corbetta & Thelen, 1996; Fagard & Pezé, 1997; Fitzpatrick, Schmidt, & Lockman, 1996b) や運動技能の獲得 (Beek & van Santvoord, 1992; Vereijken, Emmerik, Bongaardt, Beek, & Newell, 1997; Vereijken, Whiting, & Beek, 1992; Whiting & Vereijken, 1993) についても適用されてきた .

相関次元 (長島・馬場, 1992) と呼ばれる力学系の分析方法の有効性についてもまた検証されてきている (Kay, 1988; Mitra, Amazeen, & Turvey, 1998; Mitra, Riley, & Turvey, 1997) .

これらの研究は多くの成果を残してきた . まず , 巨視的レベルでのシステムの大域的特徴を集合変数 (collective variables) あるいは秩序パラメータ (order parameters) で統合的に表したことである . また , それらの中で特に鍵となる変数を特定し , 力学的特性を同定したことである . さらに , 数学的に理論化されたモデルが実験データと明確に結びつけられたこともあげられる . 最後に , 複雑な人間の動きを , 開放・非平衡系のシステム

(open, non-equilibrium system) として力学的に表現あるいは記述できることを示したことである。

一方、これらの研究はすべて時間的入力 of 急激な変化が連続しない自励系 (autonomous system) のモデルに基づいている。時間依存性は学習モデル (Schöner, 1989) の中では、接触前の時間を特定して運動の開始を行う視覚性運動情報 (Lee, 1976) としてダイナミカルシステムに陽 (explicit) に取り込み、知覚 - 運動システムの理論的枠組みが示されている。ここでは網膜上に写る物体の拡大率 (retinal expansion rate) を、従来のダイナミカルシステムに対する外部からの環境情報 (environmental information) あるいは意図的情報 (intentional information) として扱い、拡大率が臨界値に達すると、行為のダイナミクスとして定義されてきた 2 つの定常状態が切り替わるとしている (Schöner & Kelso, 1988b, 1988c)。Lee and Reddish (1981) は、カツオドリが獲物の魚を目がけて水中に突入する際の翼をひろげた状態から翼を畳んだ状態への姿勢の変化を例示している。したがって、視覚情報は 2 つの動作 (状態) の切り替えのための情報として扱われており、動作としては一つの初期状態から一つの目標状態への切り替えに言及しているのみで、多様な運動を生成するものではない。

協応動作のモデル化

Abbs et al. (1984) 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構造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指令までを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様々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指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、実際の筋への指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 (1994) 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中枢パターン発生器 (central pattern generator: CPG) 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 et al. (1984) 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るものである．

Newell (1985) は，Kugler et al. (1980) 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 (1994) 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についての特徴を学習し，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 et al. (1984) や Taga (1994) のモデルと統合すると，学習初期には位相の特徴を学習するために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とは異なり，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考え (Marteniuk, MacKenzie, & Leavitt, 1990) と一致している．さらに Taga (1994) 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．

1.5 問題の所在

これまでの運動の制御や学習に関する研究は，サイバネティクスや機械工学などを祖とする情報処理論的な運動制御に関する研究と，熱力学などの力学的な自己組織化を祖とする運動の協応構造に関する研究とに大別される．前者は記号によって表象された情報の

計算によるとするコンピュータ類例による計算論的立場であり，表象主義ともいえる（橋田，1994）．これを本論文では計算論的アプローチと呼ぶ．これに対して後者は，知覚は表象を仮定しない環境と生体の直接的な過程であるとする Gibson (1966, 1979) の生態学的アプローチとも関連が深いし，Bernstein (1967) の自由度問題とも結びつけて論ぜられることが多い．そして非線形非平衡熱力学やシナジェティクスに依って立つ観点であることから，本論文ではこれをダイナミカルシステムアプローチと呼ぶ．こうした論争は Meijer and Roth (1988) が運動 - 行為論争 (motor-action controversy) として取り上げている問題であるが，それぞれの立場によって扱う運動が異なり，いかえればそれぞれの立場で説明しやすい運動を課題に選んで論争している感がある．しかしながら，我々が扱うべき問題・課題の本質は「縮小したり単純化したり」せずに「人にとって有意味な，具体的な教育や学習の過程を，できるだけそのままの形で取り上げる（東，1982, p. 10）」ことが重要であると考えられる．したがって，予め2つのアプローチを二者択一的に選択し運動課題を設定するのではなく，ある運動課題の運動制御と学習を検討するために双方のアプローチを適用することによって，問題の本質が明らかになると考えられる．

そこで以下では，これまでの研究における運動課題と制御理論の到達点，さらに実際の運動指導上の問題をまとめることによって，本論文で扱う問題点を整理する．

1.5.1 運動課題の分類

身体運動の複雑さを考える場合に，身体システムとしての運動の協応構造と局面構造，さらに環境との相互作用が重要な要因となる．また，その複雑さの決定要因として，環境のもつ連続性と多様性が考えられた．そこで，本研究で扱う打球動作，すなわち外的で移動する対象物を全身の協応動作で打ち返すという課題が，これまでの運動制御に関する研究で扱われてきた課題の中でどのように位置づけられるのかをみていく．

これまで運動制御に関する研究で用いられてきた運動課題を，これらの観点から分類したものが表 1.1 である．運動の協応構造がなく，局面構造も持たない離散運動に分類される運動課題は，反応時間パラダイムなどで用いられてきたキー押しやボタン押しなどの反応 (reaction) 課題である．1.4.2 項で見えてきたような一致タイミング課題の多くはこうした反応課題に基づくものであるが，単関節で運動空間は非常に限定されており，運動の自

表 1.1: 身体運動の複雑さから見た運動課題の分類

運動の種類	姿勢	協応構造 (DFs)	局面構造	連続性	多様性	対象物体	従来の運動課題名
反応 (reaction)	座位 "	無 (1) "	1 "	離散 "	単 多	静止 "	SRT paradigm CRT paradigm
操作動作 (manipulating)	座位	小 (2 以上)	2	離散	多	静止	grasping
到達運動 (reaching)	座位 " "	小 (2 以上) " "	2 " "	離散 連続・複合 連続	多 " "	静止 " "	reaching, aiming reaching, writing bimanual coordination
移動操作 (transporting)	座位 立位	" "	2 3	離散 "	単 "	静止 "	cup-to-mouth archery, dart
追従動作 (tracking)	座位 "	" "	1 2	連続 連続・複合	単 多	静止 "	pursuit tracking continuous tracking
姿勢制御 (postural control)	立位 " 移動	中 (3 以上) " "	1 " 2	連続 " "	単 多 単	無し " "	postural control swinging room locomotion
移動 (locomotion)	" " "	" " "	" " "	" " 連続・複合	" " 多	静止 " "	time-to-contact uneven terrain
捕球 (catching)	座位 立位	中 (3 以上) 大 (5 以上)	2 2-3	離散 "	単 多	移動 "	critical viewing time tau strategy
打球 (hitting)	立位 移動 "	大 (5 以上) " "	3 " 2-3	離散 " 連続・複合	多 " "	静止 移動 "	putting discrete hitting continuous hitting

DFs は自由度を表す！「連続・複合」は連続運動が主であるが複合運動も含まれる場合があることを表す
また「連続性」と「多様性」は環境との相互作用による

自由度は 1 つしかないのが特徴で，入力情報の処理過程を明らかにするために用いられてきたといえる．

運動空間は狭いが操作対象（環境）が多様なため，運動も多様性を持つものとして把持動作（grasping）や操作動作（manipulating）があげられる．さらに，日常生活での把持動作に伴うのが到達運動（reaching）である．日常生活での運動に拡張するために，単関節から 2 関節以上の運動が課題とされ，自由度としては 2 つ以上の運動を扱っている．さらに，これを拡張する運動として移動操作（transporting）を伴う運動課題がある．ここでは合目的に運動の連続性が扱われることになるので，運動軌道生成や運動の企画・プランニングなどの運動出力のための脳の処理過程に関する研究で用いられてきた．こうした運動の連続性をさらに拡張すると，書字運動（writing）や楽器演奏，タイプライティングなどの課題となる．また，ダイナミカルシステムアプローチで用いられる四肢の周期的協応動作（1.4.3 項）も，合目的な運動ではないが連続運動であり，この到達運動の拡張とみ

なされるものである。

また、操作対象が移動するものとして、追従動作 (tracking) がある。これは眼球による対象の追従のような追跡型の追従と車の運転などのような補償型の追従に大別される。運動は連続的で、連続運動あるいは複合運動が見られるが、必ずしも環境の多様性はなく、周期的な追従動作も含まれ、出力の制御特性や予測の問題として扱われてきた。一致タイミング研究 (1.4.2 項) では眼球運動による追跡型追従に反応課題を組み合わせたものといえる。

しかしながら、これらの運動課題は通常座位姿勢で行われる。すなわち立位での姿勢制御を必要としない、上肢の運動課題である。したがって、全身の協応構造は考慮されていない。

これに対して、全身の協応構造を必要とし、運動の連続性に着目する運動課題として立位での姿勢制御 (postural control) があげられる。さらにこの立位での姿勢制御を発展させた運動課題が移動様式 (locomotion)、すなわち歩・走・跳などの運動課題である (歩に関しては 1.4.3 項で少し触れた)。ただこうした立位での姿勢制御や移動様式は、同種の運動を繰り返す連続運動であり、ある一定の環境内での適応的な運動制御に関する研究で用いられてきた運動課題である。こうした姿勢制御や移動様式の課題は、視覚性運動制御 (1.4.2 項) に関連して、立っている部屋の壁が前後に移動したときの姿勢制御を検討するスウィングルーム (swinging room) (Lee & Lishman, 1975) や接触・衝突までの残り時間 (time-to-contact) のパラダイムでも用いられている。

これまでの運動課題がより基本的な日常生活における運動課題・動作であったのに対して、運動技能に近い課題としてはこれらの基礎的動作の組み合わせによる捕球動作や投球動作がある。ダーツ投げやバスケットボールのフリースロー課題のような投球動作は、操作動作や把持動作に到達運動や移動操作を組み合わせたものとして考えられる。また捕球動作は、この操作動作・把持動作・到達運動に追従動作を組み合わせたものとして理解できる。つまり投球動作と捕球動作では操作対象が元々静止状態か移動状態かの違いによって、移動操作が要求されるか追従動作が要求されるかが異なると考えられる。捕球動作については、追従動作の拡張として入力情報の情報量や視覚性運動制御の問題として扱われてきた (1.4.2 項)。

さらにこうした捕球動作や投球動作は，座位姿勢と立位姿勢の両方で検討がなされており，全身の協応構造が要求される場合もあるが，いずれも上肢を用いた運動であることから，上肢の運動を検討するととどまり，立位姿勢下での課題遂行においても捕球動作時・投球動作時の姿勢制御を検討したものは見当たらない．力学的な手法や生理学的な手法での検討はなされているが（打球動作の定義（1.3 節）で述べたとおりである），関節運動や力の発揮などの運動の記述を目的とするものであり，本論文で問題とする運動全体を観察した運動制御の観点からは行われていない．

さて本論文で扱う打球動作は，操作動作・把持動作・到達運動・移動操作・追従動作のそれぞれの動作要素を組み合わせて行われるものである．したがって，捕球動作や投球動作よりもさらに複雑であると同時に，立位での姿勢制御と移動が含まれる．実際の打球動作（実験室でのシミュレーションではなく）を運動課題とした運動制御の研究はきわめて少なく，操作的タイミング仮説（1.4.2 項）を提唱した Tyldesley and Whiting（1975）の卓球のドライブ，この仮説検証を試みた Franks et al.（1985）のフィールドホッケーのショットと Wollstein and Abernethy（1988）のスカッシュのフォアハンドストロークの研究と，視覚性運動制御（1.4.2）に関連した Bootsma and van Wieringen（1990）の卓球のドライブなどに見られるのみである．しかもこれらのすべての研究では，打具や上肢の動作分析のみで，これらもまた姿勢制御も含めた全身の協応構造に言及しているものはない．

これらを概念的に示したのが図 1.1 である．例えば，反応時間パラダイムでは，協応構造も局面構造もない離散運動である．したがって，情報処理論的に入力や処理の部分の検討に用いられてきた．また，一致タイミング課題では，小さな協応構造（自由度が 2 程度）で，局面構造を持つ（小さな導入動作）課題はあり，離散運動で，出力（運動プログラム）の検討にも用いられてきた．また，両手協応動作課題では，両手の協応構造を周期的な環境からの入力に合わせた連続運動として，その協応構造の自己組織化が検討されてきた．しかしながらそこでの運動は局面構造を持たないものがほとんどであった．

そこで本論文で打球動作を運動課題として検討を加える意義は，環境との相互作用の連続性と多様性から見て複合運動が要求され，全身の協応構造が要求される課題であることは先に述べたとおりである（1.3 節参照）．複雑な身体運動の運動制御を検討する本論文の主旨から，運動課題として打球動作を採用した理由はここにある．

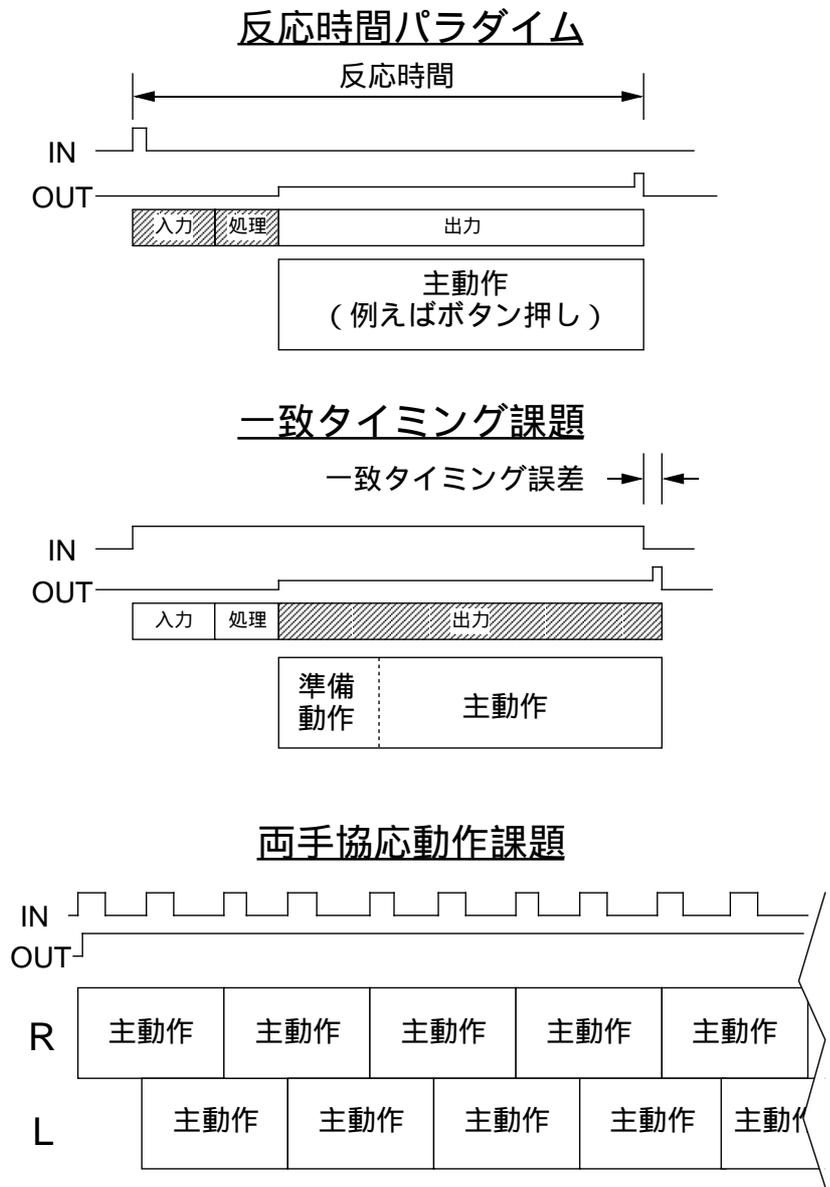


図 1.1: 従来の運動課題の概念図。反応時間パラダイムでは、局面構造を持たない離散運動。一致タイミング課題では、局面構造がある離散運動。両手協応動作課題では、局面構造がない連続運動。

1.5.2 運動制御理論の到達点

これまでの運動制御に関する理論的枠組を整理しておく．上で見てきた運動課題の分類とも関連して，運動制御理論とそこで扱われた運動課題を整理することによってこれまでの運動制御理論の到達点を明らかにし，身体運動の複雑さを検討する上での観点が明確になる．

Wiener (1961) のサイバネティクス (cybernetics) 以来，生体の基本原理はフィードバックであるとされてきた．したがって，運動制御理論においても制御系の基本要素であるフィードバック要素を組み込んだ 1 自由度系の運動制御理論が中心であった．したがって，こうした運動制御理論は，上肢の 1 関節運動，特に到達運動において腕の軌道生成を中心に検討が加えられてきた．

しかしながら，小脳を含む運動制御回路が明らかになりフィードフォワード要素の重要性が指摘されることによって (Ito, 1970)，1 自由度系の制御理論は 2 自由度系の制御理論に拡張されることになった．こうした制御理論は，特に肩と肘の 2 関節運動の研究を中心に，腕の運動軌道生成のモデルが多数提案されてきた．中でも実験結果との再現性と予測性に優れたものとして Flash and Hogan (1985) の躍度最小モデルや Uno, Kawato, and Suzuki (1989) のトルク変化最小モデルなどがあげられる．ここではこれらのモデルが上肢の随意運動の軌道生成を扱ったモデルであり (大須 (1995) を参照)，こうしたモデルの拡張の中では，人間のもつ非線形性が取入れられてきていることには留意しておきたい．

運動制御の計算理論に大きな役割を果たしたものとして仮想軌道制御 (virtual trajectory control) 仮説がある．これは，Fel'dman (1966) や Bizzi ら (Bizzi, Accornero, Chapple, & Hogan, 1984; Bizzi, Polit, & Morasso, 1976) によって提唱されたもので，筋肉のバネ特性に着目し，屈筋と伸筋の活動レベルを調整することで平衡位置の制御が可能であり，完全なフィードフォワード制御だけで腕の運動軌道が生成されるとする平衡位置制御 (equilibrium-point) 仮説に基づいている．このモデルは質量 - バネモデル (mass-spring model) ともいわれ，従来のフィードバック重視の運動制御に対して，フィードフォワードの役割，いいかえれば筋骨格系の平衡姿勢の力学的安定性によってのみ運動制御が可能であることを示している．さらに中枢神経系は，単に最終の平衡点のみを指定し，実際の運動軌道は手と筋肉固有の慣性や粘弾性によって決まるとする終端位置制御 (end point control) 仮説に

拡張された．さらにこの平衡位置が軌道として計画され，実際の軌道はこの仮想軌道を追いかけるように実現されるとするのが仮想軌道制御仮説である．これらの仮説で重要なのは，筋骨格系の粘弾性特性を利用して逆ダイナミクスの計算（望ましい軌道が位置や速度として与えられた時それを実現する張力やトルクなどの制御変数を決定する問題．伊藤・伊藤 (1991) や川人 (1996) を参照）が脳内では必要でないことを主張したことである．前に述べた最近の計算論的アプローチでは，逆ダイナミクスの計算を考慮した方が実験結果との整合性が高いため否定されているが，逆にこの点が自己組織化を主張するダイナミカルシステムアプローチへの萌芽となった点である．脳内の計算や表象を必要としないという仮想軌道制御仮説は，Gibson (1966, 1979) の生態学的アプローチにおける直接知覚や自己組織化 (self-organization) の理論と融合することになる．

ホップ分岐のように，安定な不動点が，システムの外的な条件を表すパラメータの増大とともにある臨界値に達したときに不安定化し，不安定不動点を取り囲む周期解が出現する現象に対して，分岐後の新たな動的構造を Prigogine and Nicolis (1971) は散逸構造と呼んだ．このようにパラメータが臨界値を越えることによって，新しい周期的変化という秩序に移行することが様々な自然現象でも明らかにされてきた．Haken (1983) は少し異なる観点からレーザー光のように自発的に秩序が形成される現象を研究した．彼のいう隷属化原理 (slaving principle) によると，それまで互いに無関係だった内部変数のうち一部が不安定化し，それを通して残りの多数の内部変数の動きを支配する．その結果，多数の内部変数の動きに統一的な関係が生ずるというもので，この理論がシナジェティクス (synergetics) と呼ばれるものである．そして，安定した他の変数を隷属させる不安定な内部変数を秩序パラメータ (order parameters) と呼んだ．

こうした理論的な進展は，Bernstein (1967) の自由度問題を積極的に評価することを可能にし，運動の協応構造に関する研究に進展した．これがダイナミカルシステムアプローチと呼ばれるもので，運動の自己組織化とも呼ばれる．したがって，ここで扱われる運動は周期的な関節の屈曲・伸展運動であり，メトロノームなどの外部からのパラメータ（これが制御パラメータ：control parameter）を変化させることによって相転移現象を観察し，運動の協応構造をモデル化してきたといえる（1.4.3 項参照）．

しかしながら計算論的アプローチで扱ってきたような到達運動のような運動課題に対

しては、ダイナミカルシステムアプローチでは説明できないため、この2つのアプローチは運動 - 行為論争 (motor-action controversy) (Meijer & Roth, 1988) と呼ばれる論争に発展することになる。ダイナミカルシステムアプローチにおいても、離散的な到達運動をモデル化する試みもある (Mottet & Bootsma, 1999; Schöner, 1990)。また、捕球動作や打球動作の研究においては、一致タイミング研究におけるプログラム制御から知覚 - 行為結合 (perception-action coupling) による連続制御モデルへの進展も見られる。プログラム制御モデルは、結果としての正確性は、過程としての正確性に起因すると考える。一方、連続制御モデルでは、結果としての正確性と過程の正確性とは必ずしも一致しない。いいかえれば、プログラム制御モデルにおいては唯一正確無比な過程が正確な結果を生み出すと考える計算論的立場あるいは決定論的立場をとるが、連続制御モデルでは正確な結果を生み出す過程の多様性を認める生態学的立場あるいは確率論的立場をとる。しかしながら、この立場においては記憶や表象といった高次の認知機能が仮定されており、それが制御 (control) という言葉に反映されている。生態学的立場あるいは確率論的立場をとる連続制御モデルにおいても、厳密に言えば決定論的な立場の延長線上にあり、線形・平衡力学系のモデルと考えられるが、そこから確率論的立場、非線形非平衡力学系への拡張を模索している段階といえよう (Bootsma et al., 1997; Peper et al., 1994)。

これまでの運動制御理論の進展を振り返り指摘できる点は、運動の協応構造を含まない離散運動においては、特に到達運動課題を中心として腕 (上肢) の運動軌道生成の計算論的アプローチが多く行われてきた。これは合目的的な運動を行う際に、与えられた一定の環境の中でいかに計算によって運動を実現するかという視点であるといえる。

一方、運動の協応構造に注目した研究では、周期的な運動の繰り返しである連続運動に分類される両手協応動作課題を中心に、運動パターンの創出 (新たな運動パターンの出現) に関するダイナミカルシステムアプローチが多く行われてきた。これは、連続運動の制御パラメータの緩徐な変化によって、運動の協応構造がどのように変化するかという視点である。

したがって、本論文で問題にしている運動の協応構造、局面構造と環境との相互作用を含み、かつ環境との相互作用による多様性や連続性を持った複雑な身体運動に関しては未だ有益な知見はない。このことは運動課題の分類とも関連するが、双方のアプローチとも

実験室的には複雑な身体運動を扱っているが、実際の身体運動と比較すると部分しか扱っていない。つまり実際の運動場面では重要な姿勢制御を含めた協応構造や局面構造、さらには環境との連続的な相互作用などが欠落しているように思われる。しかもこれらの要因が密接にかかわり合って身体運動の複雑さを形成していることから考えれば、部分的に抽出して検討するだけでは、少なくとも実際の運動技能の獲得には生かすことができないと思われる。そこで新たな理論的拡張が要請される。すなわち、複合運動によって生ずる身体運動の複雑さ、いいかえれば環境との相互作用によって新たな運動の協応構造と局面構造が生ずる機構を考えなければならない。

1.5.3 運動制御理論と運動指導の問題

これまでに運動制御理論の検討のために用いられてきた運動課題と運動制御理論の到達点について検討してきた。ここでは特に本研究で扱う打球動作に関して、これらの研究成果と実際の運動指導との関連について問題点を整理しておく。

従来の運動指導の多くは、計算論的アプローチに基づいていたといえる。単純な運動技能から複雑な運動技能へと段階的に学習を進めていく方法である。ここで単純な運動技能とは離散運動に相当し、複雑な運動技能が連続あるいは複合運動に相当する。テニスのストロークの指導を例にとれば、近い位置からトスされるボールのフォアハンドストロークの練習を繰り返し、段階的に飛来するボールの距離を伸ばし、最終的にはベースライン付近から飛来するボールの打球練習を行う。その後、バックハンドストロークも同様に練習していく場合が多い。これは、全く同じ動作を繰り返し行う単離散運動としての打球動作の運動指導で、フィードバックを重視してそれぞれの運動プログラムの精緻化を図ろうとする。そしてフォアハンドとバックハンドがある程度できるようになると、相手とのラリーを行い、フォアハンドとバックハンドの2つの運動プログラムを統合しようとするものである。つまり、計算論的アプローチに基づく運動指導では、同じ般化運動プログラム (generalized motor program) を用いる同一運動類型内の運動を個々に学習し、その後はテニスやバドミントンのラリーを行うように、連続あるいは複合運動の学習を行う。この連続あるいは複合運動の運動指導は、指導者がそれぞれの技能レベルに合わせて、ゲーム分析等の結果を参考にしながら指導方法を創意工夫しており、理論的には裏付けられていな

いが現状であろう。

すなわち，運動技能は個々の下位技能の総和であると考え，個々の技能要素に分解し，それぞれの精緻化を図る．その後，学習した個々の下位技能を総和し全体にまとめる．ある目的を持った機械を作るために，機械を構成するために必要な要素（部品）に分解し，それぞれの部品を作った後，それらを組み立てて全体としての機械を作るという方法である．しかしながら従来の運動制御理論では個々の部品の組み立て方には言及しておらず，つまり個々の下位技能を結びつけて試合場面で有効な技能を指導する方法に対しては計算論的アプローチに基づく運動制御理論では説明できない．

運動プログラムの精緻化のためには，同一動作の反復練習に変動性を持たせた方が良いという，スキーマ理論から導き出された変動性練習仮説 (practice variability hypothesis) がある (Schmidt, 1975)．変動性練習仮説は変動の与え方，すなわち練習計画に関して文脈干渉効果 (contextual interference effect) (Battig, 1966) と組み合わせて研究がなされてきた．文脈干渉効果とは，複数の課題間の干渉が高いほど，いいかえれば課題の類似度が低いほど学習しにくい，保持にはすぐれているというものである．例えば，Goode and Magill (1986) や Wrisberg ら (Wrisberg, 1991; Wrisberg & Liu, 1991) は，バドミントンのショートサービスとロングサービスについて，ショートサービスを続けて練習した後ロングサービスを続けて練習するよりも，ショートサービスとロングサービスを交互に練習した方が保持や転移に効果的であるとしている．野球での直球，カーブ，チェンジアップに対するバッティングについても文脈干渉効果と組み合わせた変動性練習仮説は支持されており (Hall, Domingues, & Cavazos, 1994)，同一運動類型内の複雑運動の運動指導には有効である．

しかしながら，異なる運動類型間の運動指導においては，文脈干渉効果と組み合わせた変動性練習仮説の有効性は支持されていない (Bortoli, Robazza, Durigon, & Carra, 1992; French, Rink, & Werner, 1990; Hebert, Landin, & Solmon, 1996)．これは，スキーマ理論が般化運動プログラムとスキーマによって運動の習熟を説明することによる限界である．同一運動類型内の運動においては，例えばバドミントンのショートサービスとロングサービスはフォアハンドサービスという同一の般化運動プログラムに基づいていると考えられ，変動性練習によって相対的力 (relative force) に関するスキーマを獲得していく．しか

しながら、バレーボールのアンダーハンドパスとオーバーハンドトスとは異なる般化運動プログラムを必要とするのである。したがって、変動性練習仮説は異なる運動類型間の複雑運動の運動指導には適用できない。

また、熟練者の巧みな動きや身体の捌きを獲得するためには、学習者の身体能力や練習量に負うところが多く、運動指導に関しては経験的に論じられるのみである。これは連続あるいは複合運動としての打球動作の運動制御に関する研究成果がないためである。そこで、複雑に見える連続あるいは複合運動の運動制御を明らかにすることによって、運動指導の領域へ新たな学習方略が提案できるものとする。

1.5.4 運動観察の方法論的問題

また、もう一つ重要な問題としては、運動を観察する上での方法論の問題をあげておく。自然科学や社会科学にかかわらず、複雑系の科学の隆盛が見られる。複雑系の科学の出現の必然性は、カオス理論と非平衡系科学の自己組織化論の展開上にある。さらにいえば、古典力学の決定論と統計力学の確率論にそれぞれ代表される単純な系の科学とランダムな系の科学の矛盾から生まれたものといつてよい(吉永, 1996)。実際は複雑に見える現象を還元論的に単純化し、非対称の世界を対称な世界として記述(法則化)してきたこれまでの自然科学が、その方法が有効な場合のみを扱い、それに当てはまらない事象を排除してきたのではないかという疑問が投げかけられている。そして現象としての「複雑性や多様性を扱うには、方法そのものから考えなければならない(池内, 1996, p. 16)」という指摘である。

運動学習に関するモデル(1.4.1項)は、単関節で自由度の小さい運動のモデルから、多関節で自由度の大きな運動を扱うモデルへと発展しつつあるが、そこには運動の記述方法の変化が見られる。つまり、反応時間や到達位置といった離散的な記述から、運動軌道や筋活動の記録といった連続的な記述への進歩が、より複雑な運動のモデルの構築には不可欠であった。

こうした具体的な方法論に関しては、バイオメカニクス分野で行われてきた運動の映像解析が運動学習や制御の分野でも有効な手段となると考えられる。これは特に運動協応の研究で最近多く用いられるようになった方法であるが、撮影対象の身体運動を拘

束することなく，広い運動空間内で身体運動を記録および力学的解析できる利点がある．特に 2 台以上のカメラを用いて 3 次元的に身体運動を記録するための DLT (direct linear transformation) という方法 (池上, 1983) が開発され，記録装置が 16mm フィルム等から VTR テープに移行するのに伴い，さらに簡便に身体運動の 3 次元的記録ツールとして有用になってきた．また，この 3 次元的解析方法の進歩によって肩や腰の回転運動や捻りなどの人間の運動の中でもこれまでの 2 次元的解析方法では記録できなかった動きが記録・解析可能となってきたことは特筆すべきであろう．このような新しい方法論を用いることによって，これまで一致タイミング研究と運動協応の研究として個別に扱われてきた現象，すなわち計算論的アプローチとダイナミカルシステムアプローチの両方の理論をさらに拡張しなければ観察できない打球動作という複雑な動作をそのまま扱うことが可能になった．

1.5.5 まとめ

本論文では複雑に見える身体運動の運動制御と学習について検討を加える．この身体運動の複雑さは，身体システムの運動の協応構造と局面構造，さらに環境との相互作用を構成要素とし，環境の連続性と多様性に左右されると考えられる．この環境の連続性と多様性によって，身体運動は離散運動，連続運動と複合運動に分類できる (1.2 節)．そして，身体運動の複雑さの構成要因を持つ運動課題として，一致タイミングと運動の協応構造という 2 つの課題を合わせ持つ打球動作を，複雑な身体運動を解明するための運動課題として最適であるとして採用した (1.3 節, 1.5.1 項)．すなわち，環境の連続性と多様性を実験的に操作することにより，身体運動の複雑さを変えることができ，それぞれの複雑さにおける運動制御を検討できる．

そして運動制御を検討していく理論的枠組みは，従来の運動制御・学習理論の蓄積を踏まえ (1.4 節)，計算論的アプローチとダイナミカルシステムアプローチの双方を用いる．これは，計算論的アプローチが一致タイミング課題の運動制御に，ダイナミカルシステムアプローチが運動の協応構造に対しての知見を蓄積していることによるが，打球動作は双方の課題を有していることから，理論的にも双方の枠組みに準拠することになる．ただし，これまでの運動制御理論では，複雑さを増した複合運動としての打球動作の運動制御

は説明できないことから，新たな理論的拡張が必要となる．

以上の要点をまとめると次のようになる．

1. 身体運動の複雑さは，運動の協応構造と局面構造，さらに環境との相互作用が構成要素である．また，環境の連続性と多様性によって運動は離散運動，連続運動と複合運動に分類できる．
2. 運動制御・学習に関する研究は，運動プログラムなどの表象を仮定する計算論的アプローチと自己組織化理論に基づくダイナミカルシステムアプローチとに大別できる．
3. 計算論的アプローチでは，運動の協応構造を含まない，局面構造も少ない離散運動を中心に研究が進められてきた．打球動作における一つの課題である一致タイミングに関しては，この計算論的アプローチによって多くが研究されてきた．
4. ダイナミカルシステムアプローチでは，運動の協応構造に着目したが，連続運動でその運動には局面構造が含まれない．さらに環境との相互作用は緩徐である．打球動作の運動の協応構造に関しての研究はない．
5. 打球動作に関する研究も含めて，運動の協応構造と局面構造，さらには環境との相互作用を同時に扱い，環境の連続性と多様性を加味した複合運動に関しての研究はない．
6. 運動指導においては，同一運動類型内の離散運動学習に計算論的アプローチの成果が応用されているに過ぎず，連続あるいは複合運動の運動指導に有効な運動制御理論はない．

これらの先行研究に基づき，打球動作における複合運動学習を検討するための問題は以下のように集約できる．

1. まず，最も単純な単離散運動としての打球動作の運動制御を検討し，打球動作における運動の協応構造と局面構造を明らかにする．
2. 次に，複離散運動としての打球動作の運動制御について，運動の協応構造や局面構造への環境との多様な相互作用が加わった場合の影響を検討する．
3. さらに，環境の連続性を加味し，離散運動であった打球動作を連続運動と複合運動へと複雑さを増した場合の，運動の協応構造と局面構造に及ぼす影響を検討する．これ

は複雑に見える身体運動の運動制御の検討となる。

4. 連続運動と複合運動としての打球動作の運動制御から，複雑に見える打球動作獲得の学習方略を検討する。

これらを概念的に図示したのが図 1.2 である。運動制御理論は，フィードバック制御からフィードフォワード制御へ，そして計算論的アプローチとダイナミカルシステムアプローチへと分化・拡張してきた。一方運動課題は，その理論の構築・検証のために離散運動かあるいは連続運動を扱ってきたと考えられる。その中で，環境のもつ連続性と多様性に対応する複合運動として位置づけられる打球動作に関して，その理論的拡張を図り，実際の複雑に見える運動技能の獲得への示唆を得ることが本研究のねらいである。つまり，複合運動の制御を検討することによって，複合運動の学習を考える。

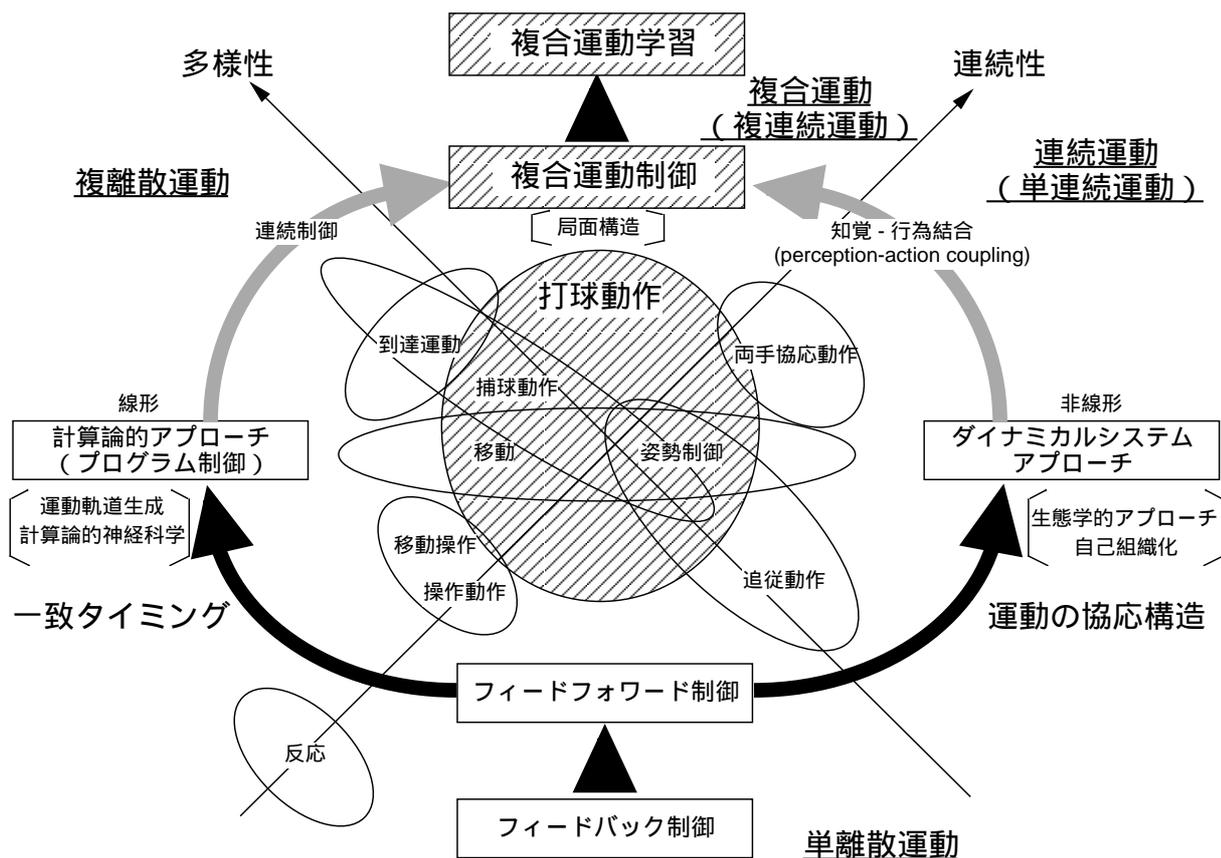


図 1.2: 運動制御理論の拡張と環境のもつ多様性・連続性から見た運動の分類に基づく本研究のねらい。中央の打球動作が本研究で扱う運動課題で、単離散運動，複離散運動，連続運動，複合運動を順に検討していき，その複合運動制御と複合運動学習を考えることがねらいとなる。

第2章

目的

本研究の目的は，単純な離散運動から複雑に見える複合運動へとその運動制御を段階的に検討していくことによって，複雑に見える複合打球動作の学習方略への示唆を得ることである．そのために，以下のように運動の協応構造と局面構造，さらには環境との相互作用を含む運動課題として打球動作を対象とし，環境の連続性と多様性を操作することによってその運動制御について検討し，打球動作の複合運動学習について提案する．

1. 打球動作における運動の協応構造と局面構造について，単離散運動としての打球動作の運動制御を検討する．そのために，初心者の学習過程における協応構造と局面構造の変化を明らかにし，さらに準備姿勢が導入動作に及ぼす影響について検討を加える（第3章）．
2. 複離散運動としての打球動作について，環境の多様性との相互作用が加わった場合の，運動の協応構造や局面構造への影響を検討する（第4章）．
3. 連続・複合打球動作の運動制御について，環境の連続性と多様性を加味し，離散運動であった打球動作を連続運動と複合運動へと複雑さを増した場合の，運動の協応構造と局面構造に及ぼす影響から，身体運動の複雑さの構造を検討する（第5章）．
4. 連続・複合打球動作における運動制御理論に基づき，打球動作の複合運動学習を提案する（第6章）．

第3章

単離散打球動作の運動制御

3.1 はじめに

本章では、打球動作という運動課題における運動の協応構造と局面構造を明確にすることが目的となる。従来、運動の協応構造は同種の運動を繰り返す連続運動によって検討されてきており、打球動作の協応構造に関してはバイオメカニクスの分野で、熟練者の四肢の関節運動やラケットの動きを記述しているのみである。さらに、こうした研究においては主要局面での運動の記述がほとんどである。しかしながら、特に初心者や初級者では準備局面や、待球姿勢といった準備姿勢が指導上問題になることが多い。

そこで本章では、まず初心者の学習過程における運動の協応構造の変化を、運動の局面構造を考慮して検討を加える。ここでは一定の環境での離散運動という単離散運動としての打球動作を扱うが、この時に、準備局面だけでなくその前の準備姿勢をも含めて検討していく。これは、従来の打球動作の動作分析では、インパクトを基準にして検討する場合がほとんどであったが、ここでは環境と運動の相互関係を検討するため、飛来するボールとの対応を中心に検討する。これは既に山本 (1996) において発表したものに基づいている。

次に、準備姿勢がその後の導入動作に及ぼす影響について、導入動作の体幹回旋反応時間に及ぼす準備姿勢の影響を実験的に検討する。この体幹の回旋動作は打球動作の導入動作として重要なものであり、運動の局面構造として準備姿勢から導入動作への局面に注目する。これは、Yamamoto (1996) において発表したものに基づいている。

これらの実験を通して、打球動作という運動課題における運動の協応構造と局面構造を明らかにしていく。

3.2 打球動作学習における運動の協応構造と局面構造の検討

3.2.1 目的

Whiting, Vogt, and Vereijken (1992) は運動の制御と学習に関するレビューの中で, Flash and Hogan (1985) の躍度最小モデル (minimum jerk model) に代表されるような高次の計算機構あるいは不変な内的表象の存在を前提とする立場と, これらの計算機構および表象を考えず行動パターンは感覚, 神経および筋の相互作用による結果であるとする立場 (Kugler, 1986; Kugler et al., 1980), すなわち計算論的立場と生態学的立場に両極化してきたことを指摘している. しかしながら, どちらの立場においても大きな自由度 (Bernstein, 1967) があるにもかかわらず, 非常に協調的で時間的に順序立てられた人間や動物の動作パターンを解明する必要があるという点では一致しつつあるとしている. そして, 計算論的立場では協応動作の獲得としての運動プログラムの起源, すなわち新奇性の問題として, また生態学的立場では行為者と環境との間で生ずるパターン生成過程の問題として, 熟練者でない者 (非熟練者) のパフォーマンスに焦点を当てるべきであると指摘している.

従来の打球動作に関する心理学的・バイオメカニクスのアプローチはいずれも入力系もしくは出力系のみに着目した静的 (static) な運動の記述が主であったが, 学習の特徴は入出力を一つのシステムとした上での動的 (dynamical) な変化であると考えられる. すなわち, 運動の協応構造そのものが変容すると考えられるが, 打球動作という運動課題においてこの協応構造の変化は明らかにされていない. さらに, 四肢の関節運動を記述したものがあ (吉澤・熊本, 1983) が, 主要局面に関してだけであり, 準備局面における協応構造を検討したものはない.

本実験では, 力量の発揮が必要な一致タイミング動作といえる打球動作の中でテニスのフォアハンドストロークを課題として, その学習過程を事例的に検討することを目的とした. ここでは, 身体の協応動作パターンの変容を検討するために, 3次元の動作分析の手法 (池上, 1983; 池上・桜井・矢部, 1991) を用い, また, 内省報告によって認知面の変容も合わせて検討した.

3.2.2 方法

被験者

被験者は、N大学の一般体育実技でテニスの授業を受講した右利きの1年生の女子学生1名であった。授業受講前のテニス経験は、ほとんどなかったが、中学生のときにはバスケットボール部に所属していた。彼女が本実験における学習者であった。また、N大学のテニス部に所属する右利きの男子学生を、学習後期の参考対象とし、熟練者として位置づけた。彼はいわゆるエキスパートではないが、経験年数も10年を越え、学習段階からいえば十分熟練しているといえる。

学習期間と内容

学習内容と期間は図3.1に示したとおりであるが、彼女は大学における体育実技のテニスコースを選択し、週1回90分の授業を他の学生50名程と一緒に半年間受講した。学習形態としては、7面のテニスコートを使用して、他の受講生とともに、基本的には一斉指導を受けていた。

手続き

学習過程の認知的側面の変容を検討するために、各授業後に内省報告として、練習内容と指導者の意図の認識、その練習に対する学習者の意図等の内容に対する自由記述を求めた。学習過程における動作の変容を検討するために、学習前・中・後の3回、2台の8mmビデオカメラを用いて、フォアハンドのグランドストロークを撮影した。実験条件としては、ネットの手前で実験者からアンダーハンドスローで投げ出したボールを打ち返す条件(hand-throwing speed: 以下HS条件と表記し、ボールの平均初速度は3.7 m/s)と、ネット越しにラケットで打ったボールを打ち返す(racket-hitting speed: 以下RS条件と表記し、平均初速度は6.1 m/s)2つの条件を設定した。どちらの条件においてもほぼその場で打てるボールであり、前者が緩いボールに対する動作を、後者がやや速いボールに対する動作の検討を意図したものであった。また、そのボールをまっすぐに打ち返すように指示した。各回とも打球練習後、HS条件、RS条件の順に6試行ずつが行われ、その中

VTR撮影 第1回	10/27	全体説明とラケットティング, ボレー・ボレー
	11/3	(祝日)
		練習メニュー 練習内容に対する認識 練習への意図
	11/10	ボレー・ボレーとショートストローク 身体を左右に向けてとる 腕を伸ばしてラケットを身体から離して構える
	11/17	(休講) 横を向いて(ボールを)とろうとした 肘を伸ばそうとした
	11/24	ボレー・ボレーとキャッチストローク ボールの高さがちょうど腰くらいになるところに動く ボールの位置に気をつけて正しい位置に動かそうとした 身体を横に向けるようにした
	12/1	軸回転の原理の説明とトレーニング (雨天で体育館)
	12/8	ボレー・ボレーとストローク ボールをいつも同じ態勢で打つようにする 同じ姿勢で, 同じスイングでボールを打つ
	12/15	ストロークとサービス ボールの高さに注意した 身体を横に向けて打つようにする
VTR撮影 第2回	12/22	ボレー・ボレーとショートストロークとグループストローク (雨上がりでオールウエザーの3面のみ使用) (冬期休業)
	1/12	ストロークとサービスと半面シングルスゲーム ラケットを引く動作を早くすること まずラケットを引くこと それからボールを追おうと思った
	1/19	ストロークとサービスと半面シングルスゲーム ラケットを早く引く 相手のところにうまく返せるように
	1/26	ストロークとダブルスゲーム
VTR撮影 第3回	2/2	ストロークとサービスのテスト

図 3.1: 学習内容および学習者の練習への意図

で指示した方向へボールを打ち返せた 2 試行ずつを分析した。これはできるだけ同じ打球結果が得られた試行の打球動作を分析するためであった。また熟練者については、各条件 1 試行ずつの 2 試行を分析し、計 8 試行を以下の手続きによって分析した。

動作分析の手続き

図 3.2 に測定場面の模式図を示した。カメラ位置は打球前のボールと打球動作の関係を検討できるように設置した。動作速度の速い部分の画像を鮮明にするために $1/250$ s のシャッタースピードを用いた。また、分析時に身体各部位の位置を明確にするために、関節位置にテープによるマーカーを付けた。撮影によって得られた 2 本のテープそれぞれについて、1 秒間に 30 コマずつ身体 13 点、ラケットヘッド及びボールの座標計測を行った。これらのデータとあらかじめ動作範囲を囲む空間に設定したコントロールポイントの座標計測値より、DLT 法 (Adbel-Aziz & Karara, 1971; 池上, 1983) を用いて身体各部位、ラケットヘッド、ボールの 3 次元座標値を求めた。なお、2 本のテープの同期にはインパクト時を用いた。本実験では、ベースラインとシングルスサイドラインの交点を原点とし、Z 軸は鉛直に、X 軸は打球方向 (シングルスサイドラインと平行)、Y 軸はベースラインの方向とした。得られた 3 次元座標値から、上体の向き、股関節・膝関節の角度を計算で求めた。上体の向きは、ボールが飛んでくる方向のベクトルを X-Y 平面に投影したベクトルを基準として、左肩から右肩へ向かうベクトルを X-Y 平面に投影したベクトルとの成す角を肩の向きとし、同様に左腰から右腰に向かうベクトルを X-Y 平面に投影したベクトルとの成す角を腰の向きとした。股関節・膝関節角度は、右肩から右腰、右腰から右膝に向かうベクトルを左腰から右腰に向かうベクトルに垂直な平面上に投影したベクトルの成す角を右股関節角度とし、また、右腰から右膝、右膝から右足首に向かうベクトルを投影して求めたものを右膝関節角度とした。左股関節角度・左膝関節角度も同様にして求めた。計測誤差を 12 点のコントロールポイントの計測値と計算値のずれの平均と標準偏差として求めた結果、X 軸方向 -0.1 ± 2.1 cm、Y 軸方向 0.1 ± 3.3 cm、Z 軸方向 -0.1 ± 1.6 cm であった。

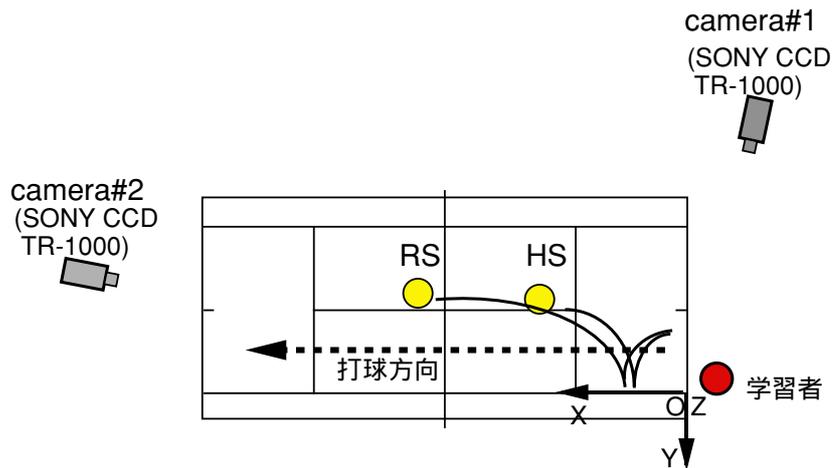


図 3.2: 測定条件および撮影状況

3.2.3 結果

認知的側面の変容

学習者の認知的側面の変容について、特に練習の意図に関しては図3.1に示した。これらから「ボールと身体的位置関係(特に身体の向き)」「インパクト時のボールの高さ」「バックスイングの始動時期」「相手のところにうまく返せるように」といった点に練習の意図が変容したようである。当然この学習者の意図は、指導内容と密接に関連するものであり、指導者の与える練習内容や助言の方向を反映するものであったが、導入動作の空間的調整から主動作の空間的調整、それから再び導入動作の時間的調整、最後に主動作の空間的・力量的調整へと練習の意図が変化しているといえる。つまり、実験室での一致タイミング課題と異なるのは、学習初期には、ボールに当たるという程度の時間的正確性があれば、力量発揮のための空間的身体操作に重点がおかれる。その後主動作に学習者の意図が向くものの、主動作がうまく行かない原因を導入動作に求め、導入動作の時間的操作の中で主動作の時間的正確性の向上を学習者が意図していたと思われる。この点については、Tyldesley and Whiting (1975)のいうところの操作的タイミング仮説 (operational timing hypothesis) を支持するような内容と考えられる。つまり、学習初期では出力系を安定させて(運動のプログラム化)、中枢処理における運動系の負担を軽減させ、あとはその運動プログラムの実行開始時期を調整するという学習方略をとったもの

と考えられる。しかしながら，本例では主に導入動作の安定を意図していた段階であり，主動作に関する意図は発現していなかった。

動作の変容

主動作 学習の進行具合を検討するため，パフォーマンスを決定づける主動作の最終局面となるインパクト時の身体各部位と打点との位置関係を分析した。ボール・ラケット・腕・肩・腰・足首の位置を X-Y 平面に投影したものが図 3.3 である。インパクト時の頭と打点との関係についてみると，学習にともない頭よりも打球方向（前）で，また，前足（この場合には左足）よりも前に打点が移動していた。このように打点が前足付近になるのは上級者の特徴であるとされており（吉澤・熊本, 1983），事実，熟練者のものと比較すると，熟練者はさらに前方でボールをインパクトしていることがわかる。

また，インパクト時の上体の向きについては，学習が進むにつれて肩ならびに腰の向きが打球方向に対して垂直に近づいている。これは，Wickstrom (1975) が打球動作の，特にサイドアームの打球動作の発達段階として示した 3 つのステージのうち，上肢が主として使われる上肢優位性 (arm domination) を示す最初のステージから，上肢のスイングにあわせて体幹と腰が同時に単体として回旋する単体動作 (unitary action) を示す 2 番目のステージへの移行と一致するものであった。さらに，熟練者の場合にはインパクト時には腰と肩の向きが一致しておらず，腰よりも肩の方が打球方向に対して回旋していることがわかる。これは，3 番目のステージ，すなわち身体の各部が単体としてではなく，別個に動く開放パターン (opening pattern) に相当するものと考えられる。

しかしながら，ここでみてきたインパクトは，あくまでも動作遂行の結果であって，必ずしも学習者の意図を反映したものでないことはいうまでもない。そこで，主動作の変容のもう一つの観点としてフォワードスイングの開始時期を，両肩の中心点が打球の X 軸方向に移動する速度に対しての右肘，右手首，ラケットヘッドの相対的速度がマイナスからプラスに変化する時点として求めた。これは，上体の並進運動を除外した打具をもった上肢の打球方向への振り出しを意味する。

このフォワードスイング開始時期を，ボールのワンバウンドした時期を基準として求めたものが図 3.4 である。HS 条件においては学習による変化は認められなかったが，RS

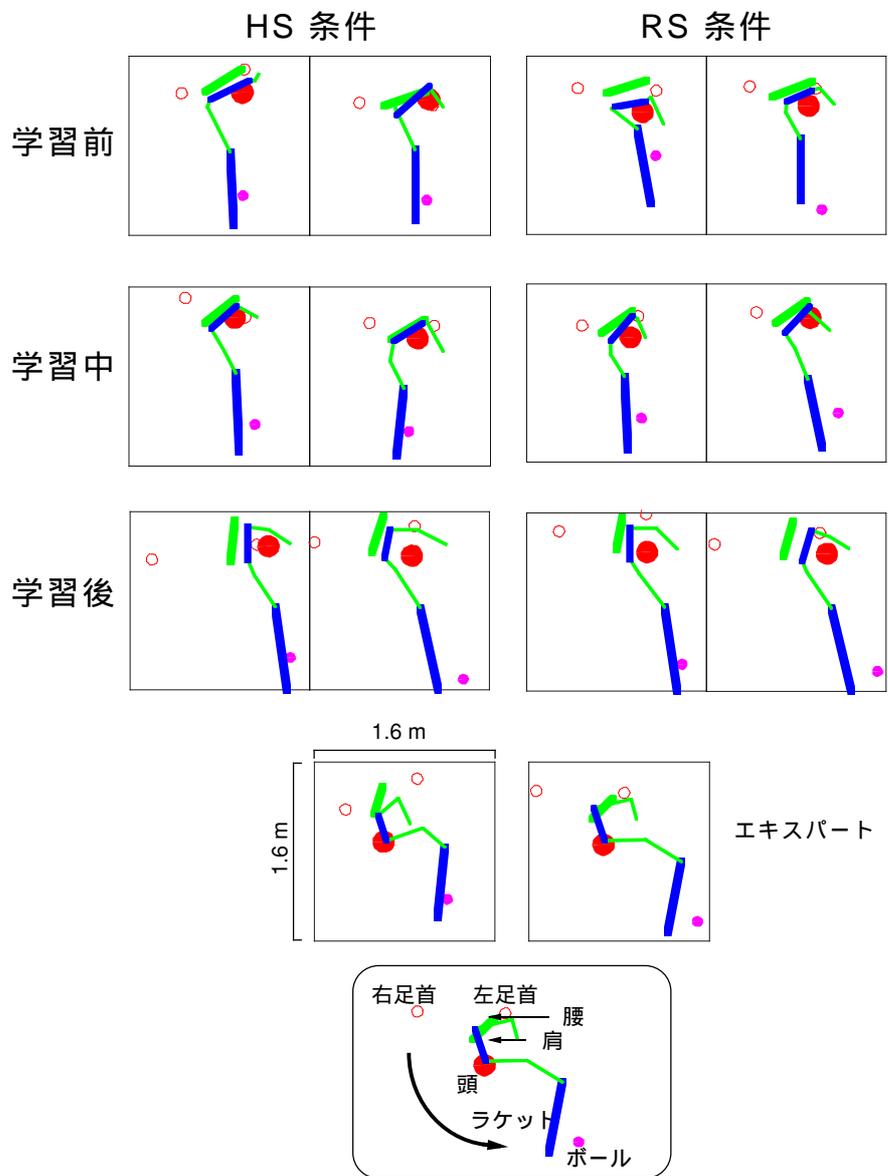


図 3.3: インパクト時の身体各部位および打点の位置関係

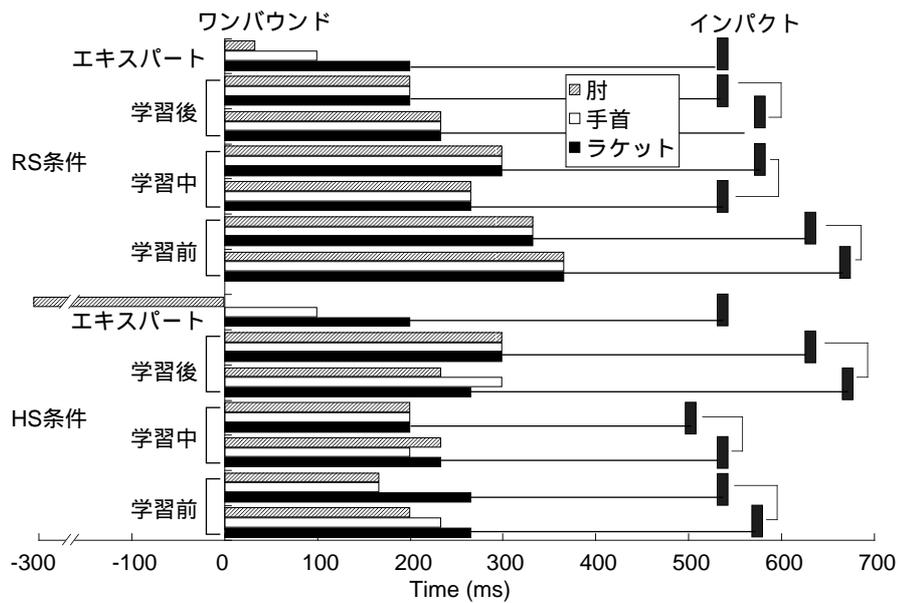


図 3.4: 肘・手首・ラケットのフォワードスイングの開始時期

条件においては、学習が進むにつれてフォワードスイングの開始時期が早くなっているようであった。しかしながら、ここで問題となるのは、熟練者と異なり、ラケットヘッド・右手首・右肘といった部位の開始時期が非常に近い点である。これは、肩から先の身体部位がラケットヘッドも含めて同期して始動していることを示すものであり、力量の発揮に効率良いとされる位相のずれが見られず、ムチ動作 (堀田・宮本・山地・北村, 1988) は期待できない。したがって、この段階ではまだ上肢の効率的な使い方が十分できていないといえよう。

以上、主動作の分析から、本実験での学習者が十分ではないが学習が進行していることは確認できたものと考えられる。そこで次にこうした主動作にみられる変容に対する導入動作の変容を検討した。

導入動作

導入動作の完了をバックスイング終了時として考え、ボールの飛来方向に対する肩および腰の向きが最小になったところをバックスイングの終了時期とし、その時点でのそれぞれの角度をバックスイングの大きさとした。このバックスイング終了時期を、ボールのワンバウンドした時期を基準として求めたものが図 3.5 である。HS 条件ではほとんど変化

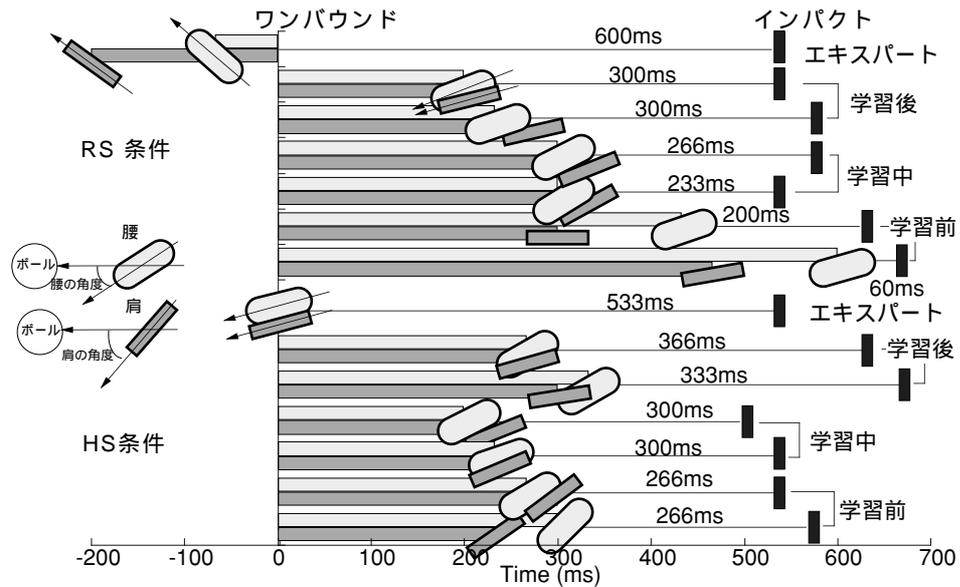


図 3.5: 肩と腰のバックスイングの終了時期およびその大きさと主動作の動作時間

が認められないが，RS 条件においては学習が進むにつれ，徐々にバックスイング終了時期が早くなっている（ワンバウンド時に近づいている）ことがわかる．これは図 3.5 の中に示した主動作の動作時間の変容からも示されるように，学習者が同一の主動作を行うために，ボール速度に合わせて導入動作終了時期を早めたものと考えられる．しかしながら，熟練者と比較した場合には，まだ十分早いとはいえない．

また，そのバックスイングの大きさについては，多少学習により大きくなっているようだが，特に腰の回旋が不十分であることが肩の回旋にもまして顕著になっている．腰の回旋は，体幹の回旋エネルギー（角運動量）を用いる場合には非常に重要な要素と考えられるが，この結果からは体幹の回旋を用いた打球が難しいことを示唆している．

しかしながらこれらのバックスイングの終了時期とインパクト時の身体各部位との関係を見ると，上述した Wickstrom (1975) の発達段階と一致していることがさらに理解できる．

なぜ学習者の意図とは反対に腰や肩の回旋が不十分であったのか，これを考えるために，バックスイング終了直前の股関節と膝関節の角度変化に注目した．バックスイング終了前 666 ms の間の平均角度とその標準偏差を示したのが 図 3.6 である．HS 条件においても RS 条件においても熟練者と異なるのは股関節角度である．また，RS 条件において，

いくらかの学習効果が認められるようである。これは、図 3.5 の結果と考えあわせるとき、この股関節の屈曲が肩や腰の回旋を容易にさせた原因と考えることができる。股関節の屈曲は、いわゆる「腰を落とした」状態を作り、運動技能では基本姿勢として重要視されているものである。

Howorth (1946) は様々な運動中の姿勢の観察から、運動準備中の静止している姿勢を基本動的姿勢 (basic dynamic position) として区別し、また大築 (1988) は姿勢の保持が目的であるものと姿勢そのものは究極の目的ではなく動作のための準備としての姿勢とを区別している。本実験の結果もこの基本動的姿勢、あるいは大築 (1988) の分類による導入動作に影響を及ぼす姿勢の重要性を示唆するものである。

3.2.4 考察

Meinel (1960) はスポーツ運動のモルフォロジー的考察から、非循環運動を空間的・時間的に分節としてとらえ、準備局面 (導入動作)・主要局面 (主動作)・終末局面 (終末動作) という局面構造をもつとし、準備局面が達成効果にきわめて決定的な役割を果たすと述べている。そこで行われる導入動作の特徴として、主動作に対して反対方向に行われることをあげている。

本研究で取り上げている打球動作は、最初に力量を発揮するために主動作に対して反対方向へ動く導入動作 (バックスイング) があり、その導入動作完了後にインパクトまで加速していく主動作 (フォワードスイングからインパクト) がある。さらに、飛来するボールに対して主動作を完了しなければいけない一致タイミング動作であることから、導入動作を早期に完了しておくことが、主動作の成否を決定づけることは明らかである。

本事例では、導入動作の時間的な向上が主動作の向上につながり、またその導入動作はそれ以前の準備姿勢の変化に基づいていたと考えられる。つまり、準備姿勢における股関節の屈曲が導入動作の完了を早め、そのことが主動作の開始時期を早めることになり、結果的にインパクトとしての動作結果の向上につながったと考えられる。特に股関節の屈曲、導入動作の完了時期、主動作の開始時期において、飛来するボール速度の速い場合 (RS 条件) に、遅い場合 (HS 条件) よりも学習効果が顕著であったことは、主動作の動作時間を一定に確保するために、導入動作を早期に完了するという合目的な動作が発現

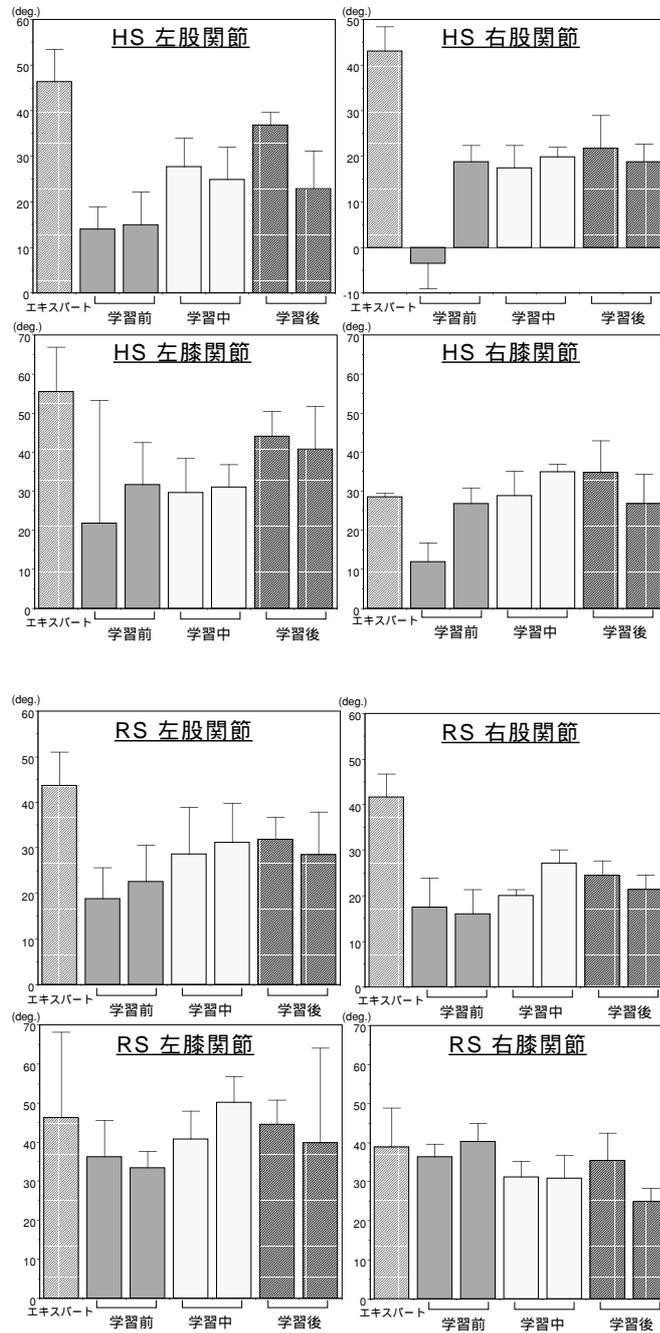


図 3.6: バックスイング終了前の股関節と膝関節の平均屈曲角度とその標準偏差

したものと考えられる．これらは学習者の認知的側面の変容とも一致していた．

こうした局面構造を Arbib (1984, 1985) の運動スキーマの階層構造と対応づけて考えると，導入動作は主動作と反対方向へ行われる体幹の回旋スキーマであり，主動作は打撃スキーマと仮定できる．また打撃スキーマは，空間的な調整を行う（ボールに当てる）下位スキーマと力量発揮の調整を行う（ボールを飛ばす）下位スキーマとによって構成されると仮定される．到達運動 (reaching) などの動作とは異なり，体幹回旋スキーマのゆっくりした動きの相の完了が打撃スキーマの加速する相への引き金となる．したがって，打撃スキーマが仮に学習されたとしてもそれに先行する体幹回旋スキーマの開始が遅れると，結果として打撃スキーマは十分機能しないものと考えられる．これは，フォワードスイングでの上肢の開始時期の位相のずれやバックスイング終了時の肩と腰の回旋角度として表される運動の質に学習効果が認められず，その時期にだけ RS 条件で学習効果が認められたことから，体幹回旋スキーマの完了時期だけが早くなっており，打撃スキーマや体幹回旋スキーマの質は変化しなかったと考えられる．つまり，運動スキーマの質は学習によってほとんど変化しなかったが，その時間構造が変化したと考えられる．

そこで，運動スキーマの時間構造の変化に影響を及ぼしたと考えられる準備姿勢の変化について考えてみる．スポーツにおいて強調される基本姿勢は，本事例で獲得されたような股関節と膝関節を屈曲した準備姿勢である．この準備姿勢の利点は以下のいくつかの観点から説明できる．

まず第一に，運動開始前の関節角度の違いがそれよりも遠位や近位の関節の屈曲動作による反応時間に影響することが，様々な方法で検討されており，屈曲や伸展肢位の方が基本肢位よりも反応時間が短いことが明らかにされている (笠井, 1981; 中村・斎藤, 1974; 奈良・笠井, 1991)．そこでは， α 運動ニューロンプールの興奮性の指標として，筋収縮に先立つ拮抗筋の単シナプス反射 H 波を用いている．肢位変化による筋の長さの変化によってこの H 波振幅が増大を示し， α 運動ニューロンプールの興奮性が高い時に反応時間が短縮すると説明している．つまり準備姿勢での股関節屈曲に関与する大腿直筋の筋の長さの変化が α 運動ニューロンプールの興奮水準をあげることになり，結果として脳からくる次の運動指令（体幹の回旋）をより速く当該筋へ伝えることができると考えられる．また，大腿直筋が 2 関節筋によって制御されており，かつ神経支配比の大きな筋であるこ

とから、脳としては数少ない運動指令を出すだけで姿勢の変化を調節することができると考えられる。

また、解剖学的には股関節の屈曲は靭帯の緊張による制限を除くことにより、立位で人間が移動するために必要な体幹の回旋につながる股関節の外旋・内旋の関節可動域を大きくするという観点(中村・斎藤, 1992)からも、基本姿勢の重要性が指摘されよう。

さらに、Lee (1980) は静止直立姿勢において片方の上腕を挙上する視覚単純反応時間課題を用いて、課題遂行に関連する三角筋よりも姿勢制御にかかわる大腿二頭筋の筋放電が先行するとして、随意運動の一部としてフィードフォワードによる姿勢制御が考えられるとしている。また、Woollacott, Bonnet, and Yabe (1984) は同様に静止直立姿勢における前腕のレバー操作による視覚反応課題を行わせ、同様の視覚に基づく予測性の姿勢制御を明らかにしている。これらに共通しているのは、主課題遂行前に主課題の動作開始に合わせて姿勢制御が働いていることを示している点で、このメカニズムとして、姿勢保持筋群が運動指令の受け手である α 運動ニューロンの興奮性を高めており、この興奮性が現象として観察される課題関連筋群の筋放電のタイミングに影響しているというものである。

本事例の導入動作を主課題と考えた場合に、準備姿勢における股関節の屈曲は体幹の回旋のための予測性の姿勢制御の一部として考えられる。さらに飛来するボール速度が速い場合に股関節屈曲の学習効果が認められたことは、ボールの速度情報を得る知覚スキーマが股関節の屈曲を引き起こし、その姿勢が体幹回旋スキーマの素早い開始を可能にしたものと考えられる。すなわち、知覚スキーマによる基本姿勢の制御が体幹回旋スキーマの開始に影響を及ぼし、結果として打撃スキーマ開始の時期が早まることによってパフォーマンスが向上していくという学習過程が考えられる。

本事例のみで身体運動における打球動作の学習過程について論ずることはできないが、単離散打球動作の学習によって変化したのは主動作の局面ではなく、導入動作の局面であり、この導入動作に影響を及ぼす準備姿勢であった。これは、準備局面・主要局面・終末局面という運動局面の時間構造の変化であり、身体運動の連続性における準備局面の重要性が裏づけられるだけでなく、運動における構えといえる準備姿勢、すなわち協応構造の重要性を支持する結果といえる。このことは、打球動作の運動制御を検討する上で、姿勢

制御も含めた運動の協応構造と局面構造の問題が重要な要因になることを示唆した。いいかえれば、準備姿勢から導入動作、導入動作から主動作という一連の運動を一つのまとまりのある運動として、その協応構造と局面構造を検討しなければならないことを示すものである。

特に、股関節・膝関節の屈曲といった準備姿勢とその後の回旋動作との関係を検討することは、姿勢制御が運動の協応構造や局面構造に及ぼす影響を検討する上で重要なことと考えられる。

3.3 準備姿勢と導入動作の関連

3.3.1 目的

前節では、股関節や膝関節の屈曲といった準備姿勢がその後の回旋動作に影響することが示唆された。これは多くの運動技能、特にボールゲームにおいては、前後方向あるいは左右方向に素早く反応するための事前の構えが重要になってくると考えられ、膝関節を曲げ、拇指球に体重を乗せるような姿勢が伝統的に良いとされている。

Howorth (1946) は、肘関節、股関節、膝関節、足関節を軽く屈曲し、かつ頭部、体幹を軽く前傾した姿勢がスポーツにおける姿勢として望ましいことを、日常生活における多くの姿勢を観察した結果から考え、これを基本動的姿勢 (basic dynamic position) と提唱した。彼はこの姿勢が正確さ、スムーズ、力強さ、バランス、良いタイミング、リズム、協応などの運動の基本となると述べている。

しかしながら次の動作の種類や動作の方向が異なれば、どのような姿勢がもっとも早く反応できるかはわからない (Cotten & Denning, 1970; Slater-Hammel, 1953)。MacKenzie (1992) は把持動作 (grasping) の詳細な分析結果から、把持動作は把持の目的や遂行者の過去の経験といった高次の制約、対象物の特性や環境の特徴といった物理的制約、遂行者の解剖学および生理学的特性と関連する感覚運動的制約の中で行われている動作であることを明らかにしている。Marteniuk, MacKenzie, Jeannerod, Athenes, and Dugas (1987) は課題の制約とスピードと正確性の条件についてさらに明確に述べている。つまり、同じ把持動作でも対象が異なれば異なる動作として計画・制御され、また目的や遂行者の経験

によっても動作は異なるため，運動制御は課題の特殊性，与えられた動作の目的といった環境と遂行者の相互関係で定義されるとしている．

またモルフォロギー的立場から運動技能を観察した Meinel (1960) は，運動を局面構造としてとらえることを提唱している．彼は，非循環運動（例えば，テニスのストロークなど）においては準備局面が主要局面に重要な影響を及ぼすとしている．この準備局面での身体の動きは体幹の回旋動作であり，多くの運動技能にみられるものである．

これらの点から，準備姿勢は準備局面における体幹の回旋動作にとって必要な姿勢として最適化され，特定されるであろう．いいかえれば，準備姿勢，特に下肢の適度な屈曲がその後の体幹の回旋動作を早めると考えられる．そこで本研究では，特に膝関節と股関節の屈曲が体幹の回旋動作反応時間に及ぼす影響を検討することを目的とした．

3.3.2 方法

被験者

N 大学の男子大学生 12 名が被験者であった．各被験者はそれぞれ 1 時間のセッションを個別に行った．

装置

被験者は，明るく静かな実験室でセッションの間立っていた．視覚刺激と聴覚刺激は被験者の前約 1 m のところにおいてあるカラーモニタ (Mitsubishi HC39PEX) に提示した．左右の足の反応は，被験者が 20 cm 後方のフロアーに埋め込まれたマイクロスイッチを踏むことによって 1 ms 単位で測定した．刺激提示，反応の記録，他のコンピュータへのトリガーはコンピュータ (NEC PC98VX) で行った．

被験者の下肢に 2 つのゴニオメータ (Penny & Giles M110) を取りつけ，矢状面に対する股関節と膝関節の屈曲角度を測定した．ゴニオメータからの信号は 1 kHz でサンプリングし，別のコンピュータ (Epson PC-286LS) でデジタル信号に変換した．

体幹の回旋動作を記録するため，被験者の腰に取りつけられた木製の棒の 4 箇所 LED (light-emitting diode) を取りつけた．LED の動きは LED コントロールユニットとコン

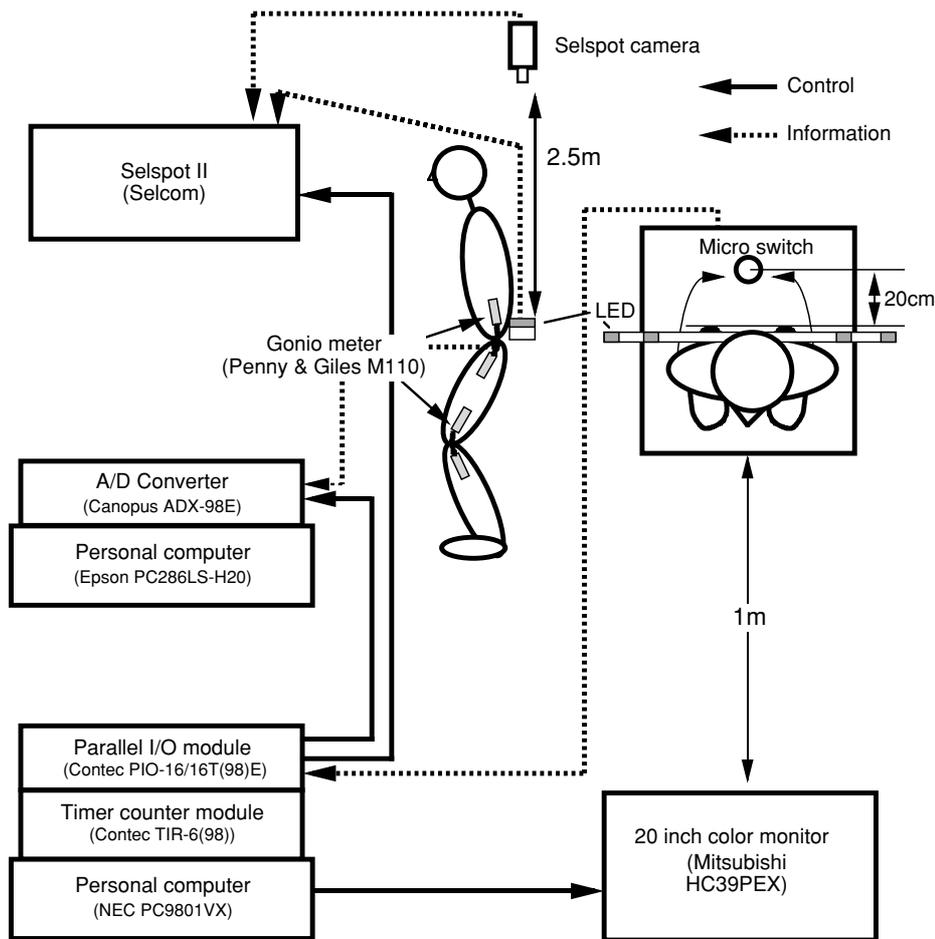


図 3.7: 体幹回旋動作反応時間の測定状況

コンピュータ (NOVA) で制御された赤外線カメラ Selspot II (Selcom) で記録した。カメラは LED の上約 2.5 m のところに設置した。LED コントロールユニットは、LED の位置変化をデジタル信号に変換する役割であった。サンプリングは 312.5 Hz で行った。Selspot II によるデータの誤差は 6 mm 以下であった。そして位置データは 22.3 Hz の 2 次の Butterworth 型フィルタにより平滑化した。また動作開始は回旋の角速度が 0.02 deg/s を超えた時点とした。全体の実験状況を図 3.7 に示した。

手続き

被験者は、肩幅程度の間隔で描かれた足形マークのところに立って、準備姿勢を取った。立位の準備姿勢は、股・膝関節を伸展させる条件 (STAND 条件)、股・膝関節を少し屈曲

させる条件 (LIGHT 条件), 股・膝関節を深く屈曲させる条件 (DEEP 条件), もっとも心地よくそして効果的だと感じるように自由に構える条件 (FREE 条件) の 4 種類であった。姿勢の 4 条件の試行順序は被験者間でカウンターバランスをとり, 1 つの条件で左右への回旋動作方向と, どちらにも回旋しないキャッチトライアル (左右への回旋動作を被験者が予測しないようにするため中央に刺激提示) の 3 種類の刺激を 15 試行ずつ, 計 45 試行を 1 セットとしてランダムな順序で連続して行った。各々の準備姿勢条件で練習を行った後実験に入った。被験者は 2 s の予告刺激の間に決められた準備姿勢をとった。予告刺激と開始刺激の時間間隔は, 予告刺激後, 0.75, 1, 1.25 s の 3 つの条件が同じ確率でランダムになるようにした。被験者には, 開始刺激の提示後, 求められる方向にできるだけ早く回旋動作を開始し, 後ろにあるマイクロスイッチを踏むこと, あるいは画面中央に刺激が出た場合には何も動かないことを教示した。各試行ごとに, 足でスイッチを踏むまでの時間をフィードバックとして与えた。また各準備姿勢条件間には 5 分の休憩が与えられ, 椅子に座って休息した。

データ処理

反応時間を刺激提示から腰の回旋が始まるまでの時間 (hip latency : HL), 腰の回旋が始まった時間からマイクロスイッチを踏むまでの時間 (movement time : MT) と刺激提示からマイクロスイッチを踏むまでの HL と MT を合計した時間 (reaction time : RT) の 3 つに分けて分析した。被験者のブロック平均から ± 3 SD 外れた試行に関しては分析から除外した。また, 膝・股関節の屈曲については, 開始刺激が出る前の 2 s 間の平均値を求め, 準備姿勢における膝・股関節の屈曲角度とした。

統計的有意性に関しては, 全ての検定について有意水準を 5% とし, それぞれの有意水準を示した。また, 5% 以上を有意ではないとして n.s. (no significant) と表記した。以後本論文における統計的有意性については同様とした。

表 3.1: 各条件における膝関節と股関節の平均屈曲角度と標準偏差

Condition		STAND	LIGHT	DEEP	FREE
Knee joint angle	<i>M</i>	0.70	16.23	34.68	16.43
	<i>SD</i>	(1.342)	(5.472)	(9.674)	(7.692)
Hip joint angle	<i>M</i>	0.92	10.87	34.10	19.87
	<i>SD</i>	(2.661)	(5.269)	(14.205)	(14.198)

単位は deg で , () 内は標準偏差を示す .

3.3.3 結果

準備姿勢

被験者の準備姿勢には明確な制限が与えられなかったため , 準備姿勢における膝関節と股関節の屈曲角度にはわずかな違いが見られた . 表 3.1 には被験者全体の平均角度と標準偏差が示してある . これらのデータについて繰り返しのある分散分析の結果 , 準備姿勢における条件の主効果が膝関節・股関節ともに認められた (膝関節 ; $F(3, 33) = 66.15, p < .001$, 股関節 ; $F(3, 33) = 30.90, p < .001$) . 膝関節は DEEP 条件が 34.68 deg ともっとも深く屈曲しており ($F(1, 33) = 54.45, p < .001, F(1, 33) = 53.28, p < .001, F(1, 33) = 198.26, p < .001$, DEEP 条件と LIGHT, FREE, STAND 条件とをそれぞれ対比) , LIGHT 条件と FREE 条件の方が STAND 条件よりも深く屈曲していた ($F(1, 33) = 44.91, p < .001, F(1, 33) = 45.99, p < .001$, LIGHT と STAND 条件 , FREE と STAND 条件をそれぞれ対比) . LIGHT 条件と FREE 条件の間には有意な差は認められなかった .

股関節は DEEP 条件がもっとも深く屈曲しており ($F(1, 33) = 41.99, p < .001, F(1, 33) = 15.76, p < .001, F(1, 33) = 85.69, p < .001$, DEEP 条件と LIGHT, FREE, STAND 条件とをそれぞれ対比) , FREE 条件の方が LIGHT 条件と STAND 条件よりも深く屈曲していた ($F(1, 33) = 6.30, p < .05, F(1, 33) = 45.99, p < .001$, FREE 条件と LIGHT, STAND 条件をそれぞれ対比) . LIGHT 条件と STAND 条件との間にも有意な差が認められた ($F(1, 33) = 44.91, p < .001$) . 股関節にのみ , LIGHT 条件と FREE 条件の間に有意な差が認められ , 4 つの準備姿勢における条件では , 異なった準備姿勢を取っていたものと考えられる .

表 3.2: 各条件における HL, MT, RT の平均と標準偏差

Condition		STAND	LIGHT	DEEP	FREE
HL	<i>M</i>	283.3	281.5	291.0	288.2
	<i>SD</i>	(50.06)	(47.10)	(40.13)	(39.34)
MT	<i>M</i>	420.3	379.7	378.8	341.6
	<i>SD</i>	(84.45)	(90.22)	(77.99)	(86.22)
RT	<i>M</i>	703.6	661.2	669.7	629.9
	<i>SD</i>	(86.25)	(86.75)	(69.55)	(81.32)

単位は ms で , () 内は標準偏差を示す .

回旋動作反応時間

各準備姿勢条件における HL, MT, RT の平均と標準偏差を示したのが表 3.2 である . それぞれの従属変数について , 回旋方向 (左 / 右) × 準備姿勢条件 (STAND / LIGHT / DEEP / FREE) の被験者内で繰り返しのある分散分析を行った .

分散分析の結果 , HL においてはいずれの主効果も交互作用も有意でなく , 回旋方向や準備姿勢が腰の回旋が始まるまでの時間に差が認められないことを示すものであった . また , MT , RT について姿勢条件の主効果のみが有意であり (それぞれ $F(3, 33) = 13.18, p < .001, F(3, 33) = 20.37, p < .001$) , 各準備姿勢条件の平均値を比較した結果 , FREE 条件が有意に短い MT, RT を示し (MT; $F(3, 33) = 39.48, p < .001, F(3, 33) = 9.28, p < .01, F(3, 33) = 8.70, p < .01, RT; F(3, 33) = 60.36, p < .001, F(3, 33) = 11.34, p < .001, F(3, 33) = 17.79, p < .001$, それぞれ STAND, LIGHT, DEEP 条件と対比) , そして STAND 条件が LIGHT, DEEP 条件よりも有意に長い MT, RT を示した (MT; $F(3, 33) = 10.48, p < .01, F(3, 33) = 11.12, p < .01, RT; F(3, 33) = 19.38, p < .001, F(3, 33) = 12.61, p < .01$, それぞれ LIGHT, DEEP 条件と対比) . LIGHT 条件と DEEP 条件の間に有意な差は認められなかった .

各準備姿勢条件における平均と標準偏差を示したものが図 3.8 である . この結果から , 両側性回旋動作に左右差は認められず , 準備姿勢を変えることによって下肢の動作時間の短縮が認められ , 結果として反応時間が短くなることが示唆された .

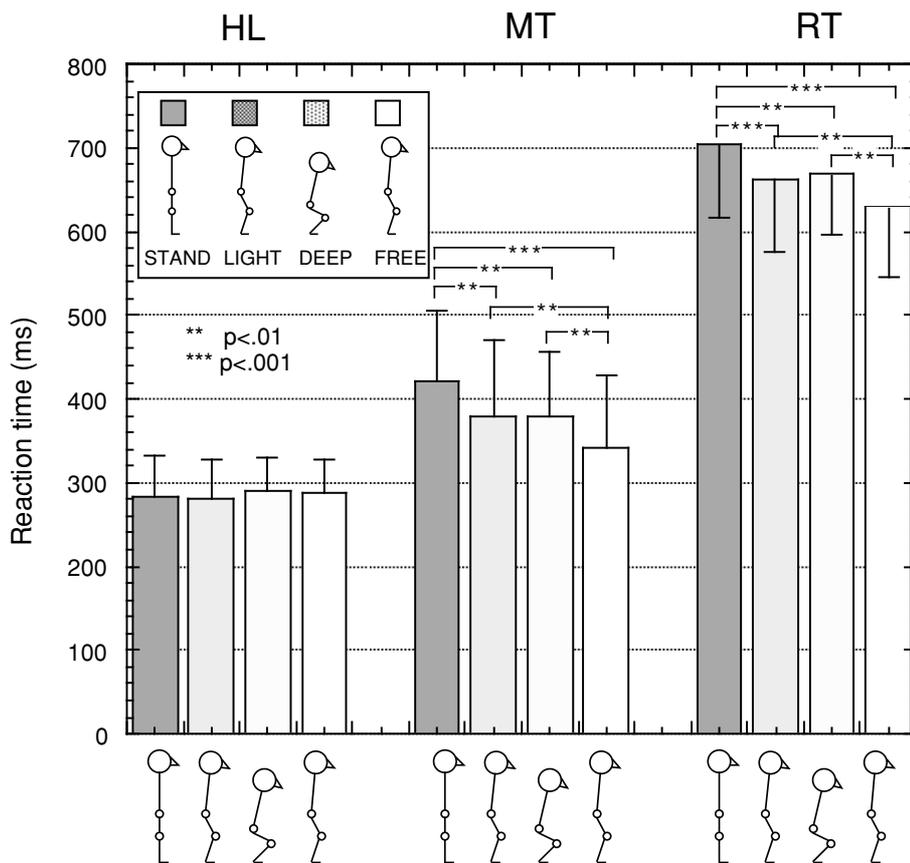


図 3.8: 各条件における HL, MT, RT の平均と標準偏差

最適屈曲角度

準備姿勢としての股・膝関節の最適屈曲角度を求めるために、被験者ごとに屈曲角度とそれぞれの従属変数について、2次の回帰曲線への当てはめを行った。この分析の仮説は、被験者ごとに屈曲角度とそれぞれの従属変数について、最適屈曲角度があるであろう、すなわちU字型の曲線に当てはまるであろうというものである。そして回帰分析の結果が有意なものに関しては極小点を求め、そこを最適屈曲角度とした。

その結果、被験者12名の内、股関節とRTでは9名が、また膝関節とRTでは10名の被験者において有意な2次回帰が認められたため、それぞれの最適屈曲角度を求めた。そしてその平均は股関節が $23.3 \pm 8.8 \text{ deg}$ 、膝関節は $24.8 \pm 6.1 \text{ deg}$ であった。つまり、 25 deg 程度の股・膝関節の屈曲を準備姿勢として取ったときに、もっとも反応時間が短縮すると考えられる。しかし計算で得られたこの最適屈曲角度は、「もっとも心地よくそして効果的だと感じるように自由に構える」というFREE条件において被験者が実際に行った屈曲角度とは必ずしも一致していない。したがって、準備姿勢を学習することによって、両側性回旋動作の反応時間を短縮する可能性もある。

3.3.4 考察

本研究では運動技能において重要な動作である体幹の回旋動作の反応時間と準備姿勢との関連を検討した。その結果、HLにおける準備姿勢の違いは認められなかったが、RTとMTは準備姿勢によって有意に異なった。すなわち、 25 deg 程度の股・膝関節の屈曲準備姿勢が最も動作時間の短縮につながり、結果として反応時間全体の短縮にもつながっているということである。

膝関節の屈曲と重心位置を扱った準備姿勢 (Cotten & Denning, 1970; Slater-Hammel, 1953) やスタンスを扱った準備姿勢 (Loockerman, 1973) と動作の反応時間の関係については、古くから研究されてきている。しかしながら、その機序については明らかではない。

事前の筋活動が反応時間、特に筋放電開始潜時 (premotor time : PMT) を早めることはいくつかの研究で示されている。Schmidt and Stull (1970) は Clarke (1968) の実験を追試する形で、3種類の力でグリップを握っている状態から光と音刺激によって全力で握る

までの PMT と筋放電開始から動作開始までの時間 (motor reaction time : MRT) を測定した。その結果、予備緊張によって PMT が短縮し、MRT が長くなることを示し、Henry and Rogers (1960) の記憶ドラム理論 (memory drum theory) に基づき解釈している。つまり予備緊張によって反応プログラムの一部が先取りされていることになるので PMT が短縮するとしている。

これは遠心性運動指令に言及したものであるが、求心性フィードバックを反応時間短縮の要因であることを示唆している研究もある。Furubayashi and Kasai (1990) は肘の屈曲動作における前腕の開始位置が PMT と MRT に及ぼす影響を検討し、屈曲時における PMT の短縮は動員される筋の数だけでなく、筋のタイミングも影響していることを明らかにし、求心性入力が PMT 短縮に及ぼす影響を示唆している。

本実験の結果では RT、MT にのみ準備姿勢の影響が認められ、HL はいずれの条件でも違いが認められなかったことから、必ずしもこうした解釈がなりたつとはいえない。今回の実験では、PMT を測定していないので、求心性フィードバックが反応時間の短縮に及ぼす影響については言及できない。

一般にいわれる準備姿勢や構えの効用から今回の実験結果を考えると、股関節の屈曲により、腸骨大腿靭帯の緊張による股関節外旋の制限が除かれ、関節可動域が大きくなり、結果として下肢の機械的な動作時間の短縮に結びついたといえる。つまり、体幹の回旋のような大きな動作においては、神経系の準備よりもメカニカルな動作効率が、反応時間に対してより大きな影響を与えられと考えられる。また、準備姿勢の変化に伴う足底圧の前後方向への変化、重心の位置の移動や足関節の屈曲の要因も加味して、分析する必要がある。

全被験者をまとめて分析した結果では、体幹の回旋方向の反応時間における左右差は有意ではなかったが、FREE 条件について被験者ごとに見ると、HL では 1 名の被験者は右への回旋反応時間の有意な減少を示し、他の 2 名は左への反応時間の有意な減少を示した。また RT では 3 名の被験者が右への回旋反応時間の有意な減少を示した。この結果は、体幹の回旋方向に左右差が生ずる可能性があり、学習やトレーニングによって回旋動作の速い側と遅い側が獲得される可能性を示唆している。素早い体幹の回旋のために膝関節・股関節の屈曲という準備姿勢が重要であると同様に、側性の問題も現実のスポーツ場面

では、重要な意味を持つものと思われる。

3.4 まとめ

本章では、単離散運動としての打球動作の運動制御について、運動の協応構造と局面構造を明らかにすることを目的とした。

まず一般的な初心者の学習過程を映像分析によって検討した結果、学習によって変化するのは主動作の局面ではなく、導入動作の局面であることが明らかになった。これは、準備局面・主要局面・終末局面という運動局面の連続性から準備局面の重要性が裏づけられるだけでなく、運動における構えといえる準備姿勢の重要性を支持する結果といえる。このことは、打球動作の運動制御を検討する上で、姿勢制御も含めた運動の協応構造と局面構造の問題が重要な要因となることを支持するものであった。

そこでこの結果に基づき、実際に準備姿勢がその後の動作に及ぼす影響について、運動技能では重要な導入動作となる体幹の回旋動作の反応時間から検討を加えた。その結果、準備姿勢、特に下肢の屈曲姿勢がその後の体幹の回旋動作反応時間に影響を及ぼすことが明らかにされた。このことは単に神経系の促通によるだけではなく、解剖学的な関節可動域の増加によるものと考えられた。

以上の結果から、打球動作の運動制御を考える上で、少なくとも2つの考慮すべき点が指摘できる。

一つは、運動の局面構造と呼ばれる動作全体の時間的構造である。単関節運動を中心にすすめられてきた計算論的アプローチでは、主動作のみを考慮してきた。しかしながら、実際には主動作に影響を及ぼすのは導入動作であり、またこの導入動作に影響を及ぼすのはその準備姿勢である。しかも、ここでの準備姿勢や導入動作は単に動作の開始点や通過点ではなく、それぞれが合目的的な主動作に必要な運動の生成過程であり、不可逆的な時間的構造を有している。

もう一つの点は、この時間的構造を身体各部位がそれぞれ保持し、なおかつ協働的に動いている、すなわち運動の協応構造をも有している点である。

これらを図示したのが図 3.9 である。環境が一定で離散運動である打球動作の運動制御

では、主要局面での上肢の運動制御だけを問題にするのではなく、準備局面での導入動作や姿勢制御も含めた運動制御を検討しなければいけない。いいかえれば、計算論的アプローチにおいて主動作の運動プログラムだけを考えるのではなく、準備姿勢や導入動作といった局面構造も含めた運動プログラムに拡張する必要がある。さらに協応構造も考慮しなければならず、身体各部位それぞれの運動プログラムと運動プログラム相互の時間的・空間的協調関係が問題になる。

指導場面では「バックスイングを早く」とか「腰を落として構える」という指導者のアドバイスを頻繁に聞く。これは、それぞれ準備局面の時間構造、準備姿勢に対するアドバイスである。つまり、準備姿勢や準備局面、姿勢制御という要因が主要局面の運動制御に重要な役割を果たしていることを指導者は経験的に知っていて、打球動作の指導を行っている。こうした運動の協応構造と局面構造が、打球動作の運動制御に重要であることが実験的にも検証されたことになる。「遅れないように、力を込めて打つ」ためには、早く体幹を回旋させて準備することが必要で、必然的に「構え」を学習するのである。

次章では、構えた状態から環境の多様性に対応する、すなわち準備姿勢は同一で、環境の変化に対応するために主動作を切り替える複離散打球動作について検討を加える。

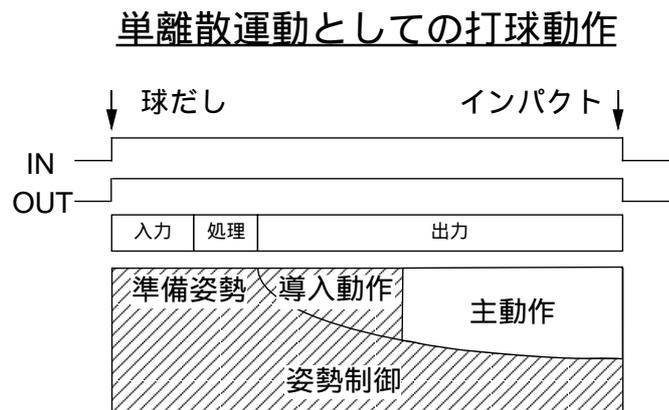
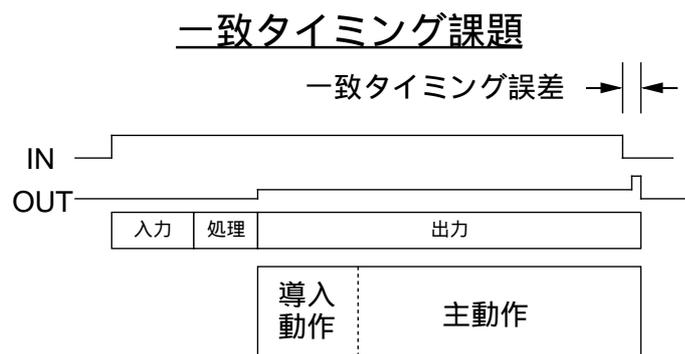


図 3.9: 従来的一致タイミング課題と単離散打球動作 (第 3 章) の運動制御の比較

第4章

複離散打球動作の運動制御

4.1 はじめに

前章では、打球動作の運動制御を検討する上で、姿勢制御も含めた運動の協応構造と局面構造の問題が重要であることを指摘した。そこで本章では運動の協応構造と局面構造を持つ打球動作において、環境の多様性が加わった場合、すなわち複離散運動としての打球動作の運動制御について、運動の協応構造や局面構造への影響を検討する。

本来打球動作は、予測できない環境の変化に対応して合目的な運動を行っている。しかしながら、従来の打球動作に関する研究、特に一致タイミング研究においては一定の移動指標に対する一致見越し反応によって検討を加えてきている（例えば工藤（1986）を参照）。Bernstein（1996）は、巧みさ（dexterity）を「いかなる外的状況に対しても解決できる運動を見出す能力、つまり直面した運動問題を以下の条件を満たしてすべて解決する能力である」とした。そしてその条件とは、「第一に適切で正確であること、第二に意思決定においても結果の達成においても素早いこと、第三に融通がきいて、効率的、合理的であること、そして最後に機転が利いていて、予見的に資源を有効に活用していること」と定義している。

そこで本章では、時間的制約の中で2つの打球動作を選択的に切り替えながら一致タイミング反応を行う課題を設定し、環境との相互作用を行う場合の打球動作の運動制御を検討することを目的とする。この実験結果は既に山本（1994）で発表されているものに基づく。さらに、環境の多様性が増した場合として様々なコースに投げられたボールに対する打球動作の運動制御において、運動の協応構造と局面構造がどのような影響をうけるのかを3次元動作分析によって明らかにする。この結果は山本・池上・桜井（1997）で報告さ

れているものである。これらを通して、環境の多様性が増した場合の打球動作の複雑さへの影響を、運動の協応構造と局面構造から検討する。

4.2 選択的一致タイミング課題の運動制御

4.2.1 目的

スポーツ場面での巧みな運動というものは、時間的・空間的・力量的要素がうまくかみあった時になされた動作のことを指すものと考えられる。しかし、運動場面でのエラーを観察すると、時間的要素は正確であっても、力量的要素が誤っていたために起こったと考えられるエラーもあるし、時間的要素は正確であったが、空間的要素に若干のエラーが生じたと考えられる場合などがある。即ち、ある時点で最適な力量の発揮をある空間的正確性をもって実行することが要求されるのがスポーツにおける技能の特徴といえよう。したがって、運動学習として扱うべき動作にはこうした要素が含まれていることが望ましい。しかしながら、従来の運動学習に関する研究では、これらの要素のうち一つの要素だけを抽出して検討を加えたものがほとんどである。

このなかで時間的要素を抽出したものとして、移動指標にタイミングを合わせて行う動作としての一致タイミング動作があげられる。従来から一致タイミング動作に関する実験は数多くなされてきた(1.4.2項参照)。それらは、移動指標の速度や方向とタイミング誤差との関係を一致タイミング点の予測との関係で見たもの(Isaacs, 1990; Payne, 1987, 1988)や、運動学習の立場から動作の種類とタイミング誤差との関係を見たもの(工藤, 1984, 1987; Wrisberg & Ragsdale, 1979)などがほとんどである。これらの研究では、装置や動作の種類は異なるが移動指標が動き出す前にあらかじめ実験者によって動作が決められており、被験者にも知らされているという点ではほぼ同じ方法である。したがって、その実験課題は、動作遂行のための運動プログラムは移動指標が動き出す前に作成され、今だと思ふ時刻にそのプログラムの実行開始ボタンを押す(運動指令を出す)ものであり、その押す時期を問題にしていると考えられる。つまり、時間的要素の予測動作、あるいは時間認知を扱ったものであり、そのために移動指標の移動速度や方向が条件として組込まれている。いいかえれば、視覚情報処理といった視覚刺激の入力から処理までの過

程に注目したものともいえ、反応の質に関してはほとんど考慮していない。

こうした中で、一致タイミング課題と呼べる課題を用いて反応のエラーを質的に分類して検討を加えようとする試みは卓球のストロークや捕球動作の研究を中心にいくつかなされている (Bootsma & van Wieringen, 1990; Diggles et al., 1987; Fischman & Schneider, 1985) . Populin, Rose, and Heath (1990) は、捕球動作についての反応動作の指標として、ボールを掴むエラー (時間的な要素と考えられる) と位置のエラー (空間的な要素と考えられる) に分類している。その中で、ボールの飛来中に捕球した後投げ返す方向を示す視覚刺激を提示し、どちらの要素がより影響を受けるかを検討している。その結果、初心者のエラーは空間的なエラーが多いとしている。ただこれらの研究の多くは、Gibson (1979) の生態学的視覚理論の影響を受けているものが多く、刺激と反応の連鎖を強調するのが目的とされているようである。

小山・伊藤・吉井・山本 (1990) は一致タイミング課題における時間的要素と力量的要素について、二重課題法を用いて反応動作への影響を検討した。その結果、力量発揮の選択刺激の提示が遅れた場合には、小さな力の発揮、あるいは調整が困難になることを示し、情報処理心理学的観点から時間的要素と力量的要素の処理特性について考察を加えた。

そこで本研究では、二種類の空間的動作を選択的に反応する一致タイミング課題に二重課題法を適用して、そのパフォーマンスを空間的要素と時間的要素から分析することにより、その処理特性を検討することを目的とした。つまり、従来のタイミング課題は反応様式が一定であり、移動指標が動き出す前に反応すべき動作が被験者に知らされていたが、本研究では、移動指標が動き出した後に、反応すべき二種類の動作のうちどちらを用いるかという情報 (選択反応の手がかり刺激) を提示し、一致タイミング課題を行うというものである。その際の時間誤差 (タイミングエラー) と空間誤差 (スペーシングエラー) から、その処理過程に検討を加えようとするものである。

また本研究では、テニスのボレー動作を課題とした。二重課題法を適用した選択的一致タイミング課題を用いたため、図 4.1 に示すような二段階の手続きを踏んだ。すなわち、予備実験では、本研究で対象としたテニスのボレー動作をシミュレートした実験室課題における動作時間および反応時間を測定し、その結果に基づいて決められた実験条件によって選択的一致タイミング課題を行ったものである。

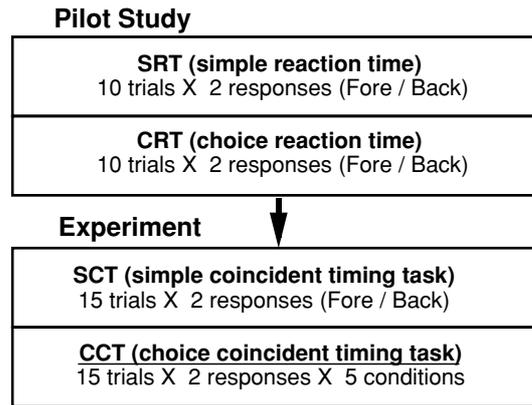


図 4.1: 実験の構成

4.2.2 予備実験

目的

ここではテニスにおけるボレー動作について一致タイミング反応を要求しない，単純反応時間 (simple reaction time : SRT) と選択反応時間 (choice reaction time : CRT) を求め，これらの動作時間と反応時間から選択的一致タイミング課題での選択反応の手がかり刺激の最適な提示時期条件 (これを以下では選択刺激提示条件と呼ぶ) を設定することが目的であった。

方法

被験者 テニス競技歴 1 年以上の女子大学テニス部員 15 名を対象とした。

実験課題および装置 図 4.2 は，本実験で用いた実験装置とその配置を示したものである。被験者には，ディスプレイ上の右に提示された刺激に対しては右側に吊してあるスポンジボールをフォアハンドボレーで，また左に提示された刺激に対しては，左側に吊してあるスポンジボールをバックハンドボレーでできるだけ早くボレーすることを要求した。同時に，ラケットのスイートスポットで正確にボレーすることも要求した。反応時間の測定は，ラケットに取り付けた加速度計 (Kyowa AS-20B) によって，サンプリング周波数 1 kHz で行なった。刺激の提示や反応時間の測定等は 2 台のコンピュータにより制御した。

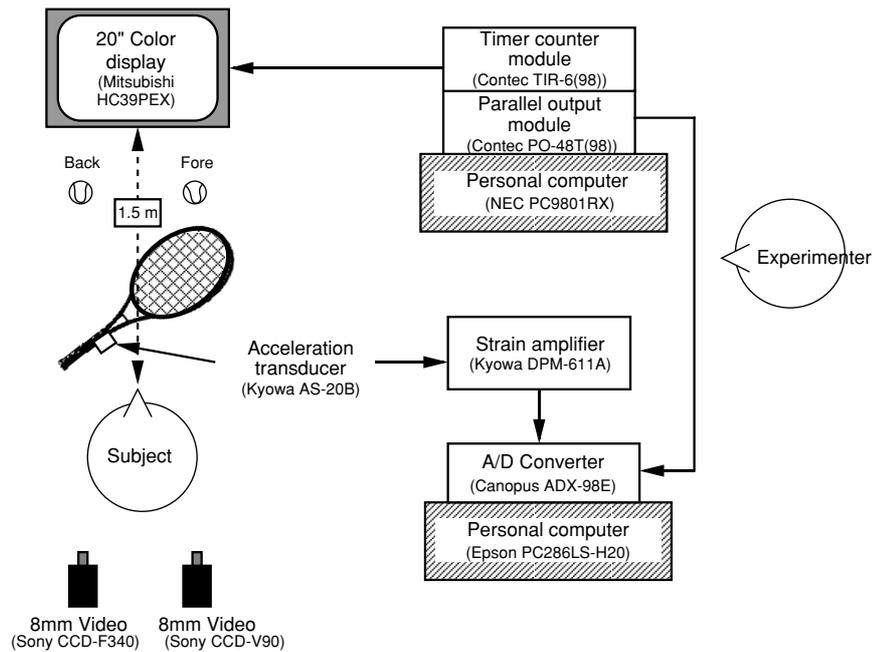


図 4.2: 実験装置とその設定

手続き まずフォアハンドとバックハンドのボレー動作について 10 回ずつ練習試行を行い、その後単純反応時間の測定をフォアハンド・バックハンド 10 回ずつ行った。続いて選択反応時間の測定をフォアハンド・バックハンドあわせて 20 回、ランダムな順序で行った。練習試行と単純反応時間におけるフォアハンドとバックハンドの測定順序は被験者間でカウンターバランスをとった。また、単純反応時間、選択反応時間の両課題において、実際の刺激提示の前に予備刺激を提示し、その刺激間隔は 200, 300, 400, 500, 600 ms の 5 種類をランダム順に操作した。

従属変数 ここでは時間的要素だけを問題にしたため、刺激提示からラケットの振り出しまでを反応時間 (reaction time : RT) とし、また振り出しからインパクトまでを動作時間 (movement time : MT) とした。これらは加速度計の記録から分析した。

結果と考察

RT と MT のそれぞれに関して、選択刺激数とフォアハンドかバックハンドかという反応動作について両方とも繰り返しのある 2 要因分散分析を行なった結果、RT において単純

表 4.1: テニスのボレー動作課題の各条件における RT と MT の平均と標準偏差

従属変数	条件	フォアハンド		バックハンド		平均	
		<i>M</i>	<i>SD</i>	<i>M</i>	<i>SD</i>	<i>M</i>	<i>SD</i>
RT	SRT	210.2	56.41	187.6	38.91	198.9	48.98
	CRT	256.2	62.24	244.5	67.16	250.3	63.90
	平均	233.2	62.88	216.1	61.21		
MT	SRT	596.3	96.59	597.1	92.80	596.7	93.07
	CRT	611.2	64.99	621.3	93.89	616.3	79.51
	平均	603.7	81.25	609.2	92.55		

単位は ms

反応であったか選択反応であったかという選択刺激数の主効果が 0.1 %水準で認められた ($F(1, 14) = 19.059, p < .001$)。それぞれの平均と標準偏差を示したものが表 4.1 で、図に示したものが図 4.3 である。また、表 4.2 には RT の、表 4.3 には MT の分散分析の結果を示した。

これはフォアハンドとバックハンドの平均 RT が単純反応時 (選択刺激数が 1) に 198.9 ms で、選択反応時 (選択刺激数が 2) に 250.3 ms と約 50 ms 選択反応時の方が長い RT を示した。これは、従来の単純反応と選択反応における選択肢の数と反応時間の遅れに関する研究とほぼ同じような結果であった (Leonard, 1959)。

また、RT においてはフォアハンドかバックハンドかという反応動作についても 5 %水準で主効果が認められた ($F(1, 14) = 5.208, p < .05$)。これは、フォアハンドの平均 RT が 233.2 ms で、バックハンドの平均 RT が 216.1 ms とバックハンドの方が短い値を示した。これはテニスの熟練者がどちらかというバックハンドを主体に待球姿勢をとっているためであると考えられる。

MT については、いずれの主効果も交互作用も認められなかった。つまり、選択刺激数や反応動作にかかわらずその動作時間が一定であったことを示すものであった。

以上テニスのボレー動作における単純・選択反応時間から、選択刺激数が 2 の場合の RT, MT はそれぞれ約 250 ms と約 620 ms であることが明らかになった。そこで、選択

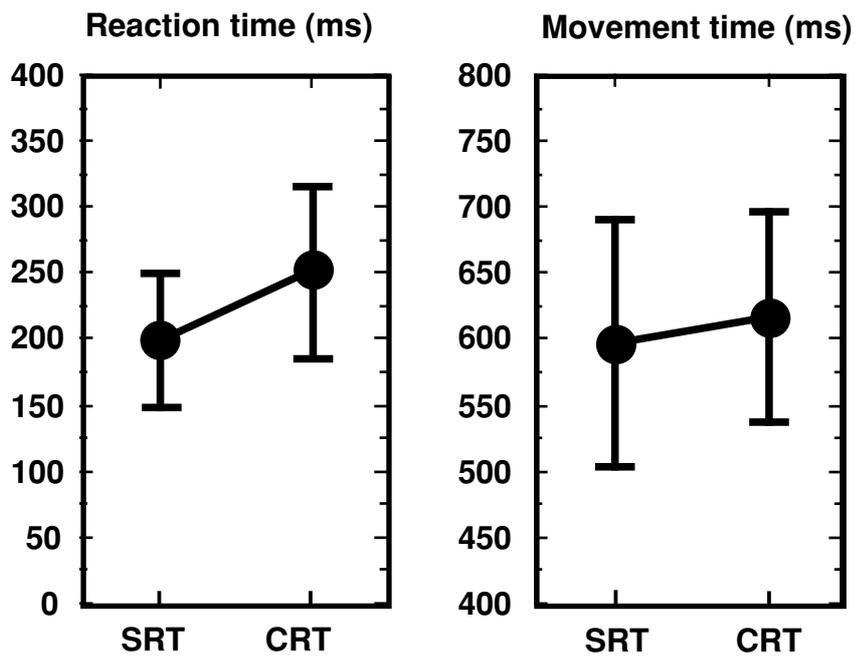


図 4.3: テニスのボレー動作課題の各条件における RT と MT の平均と標準偏差

表 4.2: テニスのボレー動作における RT に関する分散分析表

要因	自由度	平方和	平均平方	F 値
被験者 (A)	14	124067.719	8861.980	
Simple/Choice(B)	1	39721.974	39721.974	19.056***
(A)×(B)	14	29182.156	2084.440	
フォア/バック (C)	1	4389.571	4389.571	5.208*
(A)×(C)	14	11799.669	842.834	
(B)×(C)	1	446.083	446.083	< 1
(A)×(B)×(C)	14	18093.467	1292.391	

* $p < .05$, *** $p < .001$

表 4.3: テニスのボレー動作における MT に関する分散分析表

要因	自由度	平方和	平均平方	F 値
被験者 (A)	14	323401.770	23100.126	
Simple/Choice(B)	1	5766.713	5766.713	1.201
(A)×(B)	14	67239.237	4802.803	
フォア/バック (C)	1	448.704	448.704	< 1
(A)×(C)	14	25337.715	1809.837	
(B)×(C)	1	328.911	328.911	< 1
(A)×(B)×(C)	14	17751.985	1267.999	

的一致タイミング課題における選択反応の手がかり刺激の提示時期を，一致タイミング点の前 870，780，690，600，510 ms の 5 条件とすることにした．最も早い選択刺激提示条件である一致タイミング点前 870 ms は，選択反応に要する RT と MT の合計，すなわち今回の実験課題における選択反応にかかる総時間となるように設定した．したがってそれ以外の条件は，刺激提示からの選択反応動作では遅延反応が生ずる条件である．さらに，600，510 ms の両条件は，動作時間以下になるように設定した．

4.2.3 方法

被験者

実験 4.2.2 と同一の被験者 15 名を被験者とした．

実験課題および装置

実験課題は実験 4.2.2 とほぼ同じであるが，図 4.4 に示すように，左右へ提示される刺激がディスプレイの上から下へ移動し，その移動中に左右どちらかに曲がるようになっており，一番下に来たときにタイミングを合わせてそのどちらかのサイドのボレー動作を行うことを要求した．一致タイミング点は刺激が動き始めてから 870 ms のところになるよ

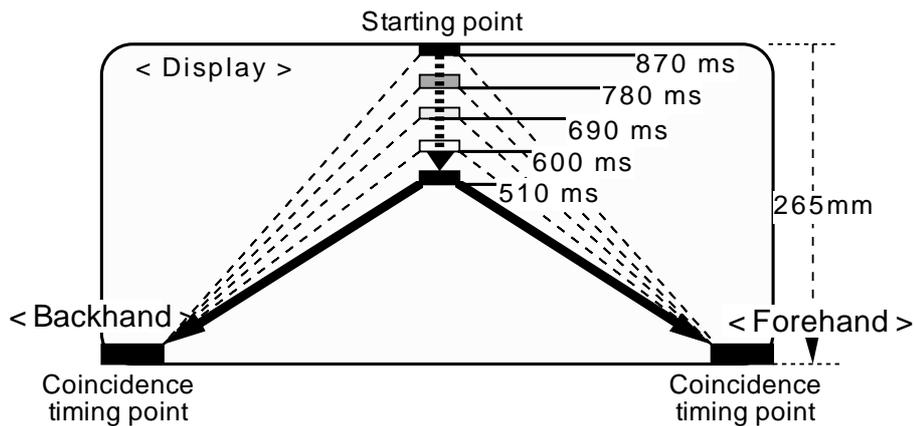


図 4.4: 選択的一致タイミング課題の提示刺激の模式図

う設定した．左右どちらに刺激が提示されるかは以下の選択刺激提示条件とともにランダムにした．また，練習試行では予めどちらの反応動作を行なうかは被験者に告げており，刺激が移動し始めるとすぐにどちらかのサイドに曲がるように設定した．実験装置の設定は実験 4.2.2 と同様であった．

手続き

まず練習試行としてフォアハンド・バックハンドのボレー動作について 15 回ずつ行った．これは通常的一致タイミング課題に相当するもので，本研究では SCT (simple coincident timing task) と呼んだ．その後実験 4.2.2 で得られた結果を基に設定した 5 種類の選択刺激提示条件 (タイミング点前 870, 780, 690, 600, 510 ms) をランダムに 3 試行ずつ，フォアハンドとバックハンドの両方において行った．したがってテスト試行は合計 30 試行であった．このテスト試行を CCT (choice coincident timing task) と呼んだ．練習試行におけるフォアハンドとバックハンドの試行順序は被験者間でカウンターバランスをとった．

従属変数

タイミングエラーに関しては，設定した一致タイミング点と加速度計の波形から求めたインパクトとの時間差を求めた．これからタイミングにおける恒常誤差 (constant error : CE)，絶対誤差 (absolute error : AE)，変動誤差 (variable error : VE) を算出した．また，

実験 1 と同様に RT と MT も求めた。ただしここでの RT は選択刺激提示からの RT とし、探査反応時間 (probe reaction time : PRT) とした。通常 PRT は、二重課題における二次課題 (probe) に対する反応時間を指す。つまり、主課題として視覚追従動作課題遂行中に、聴覚刺激で与えられた二次課題に対するキー押しなどの反応時間を表わすのに用いられている。しかし本研究では選択刺激が提示されてからの反応時間を、通常の単純反応時間や選択反応時間と比較する意味からも従属変数としたため、この時間を PRT と呼ぶこととした (通常の意味における PRT に関しては Abernethy (1988) や Heuer and Wing (1984) などを参照)。

また、スペーシングエラーに関してはビデオカメラにより試行を後方から撮影し、ラケット中心部からのずれを X 軸、Y 軸から求め、距離として算出し、AE, VE を求め、従属変数とした。

4.2.4 結果と考察

SCT におけるタイミングエラーとスペーシングエラー

SCT におけるタイミングエラーとスペーシングエラーについて、それぞれ CE, AE, VE と AE, VE について 5 試行ごとに分析した結果、タイミングエラーについてのみ学習効果が認められた。そこで、表 4.4 に最後の 5 試行の平均値と標準偏差について示した。この値は、次の CCT におけるタイミングエラーとスペーシングエラーの基準となると考えられるものである。

CCT におけるスペーシングエラー

CCT におけるスペーシングエラーの平均と標準偏差について、選択刺激提示条件と反応動作について示したのが表 4.5 である。スペーシングエラーに関する AE, VE について選択刺激提示条件 (5) × 反応動作 (2) の両方とも繰り返しのある 2 要因分散分析を行ったところ、いずれの指標においても有意な主効果や交互作用は認められなかった。これは、選択刺激提示条件が反応の空間的正確性に影響を及ぼさなかったことを示すものであり、運動プログラムの観点からいえば、いずれの選択刺激提示条件においても同じ運動プログ

表 4.4: SCT における両エラーの平均と標準偏差

従属変数	フォアハンド		バックハンド	
	<i>M</i>	<i>SD</i>	<i>M</i>	<i>SD</i>
タイミング CE (ms)	46.9	34.97	33.5	24.66
タイミング AE (ms)	60.3	22.79	54.6	13.13
タイミング VE (ms)	42.1	12.23	49.8	14.17
スペーシング AE (strings)	4.6	1.30	5.2	2.01
スペーシング VE (strings)	1.8	0.66	1.6	0.72

表 4.5: CCT におけるスペーシングエラーの平均と標準偏差

選択刺激提示時期		AE		VE	
		<i>M</i>	<i>SD</i>	<i>M</i>	<i>SD</i>
870 ms	フォアハンド	4.8	1.78	1.0	0.38
	バックハンド	5.5	2.44	1.2	0.64
780 ms	フォアハンド	5.1	1.44	1.5	0.74
	バックハンド	5.2	1.93	1.2	0.70
690 ms	フォアハンド	4.9	1.59	1.5	0.92
	バックハンド	5.4	2.43	1.4	0.83
600 ms	フォアハンド	5.0	1.92	1.3	0.80
	バックハンド	5.8	1.80	1.2	0.70
510 ms	フォアハンド	4.9	1.64	1.2	0.98
	バックハンド	5.6	1.77	1.1	0.39

表 4.6: CCT におけるタイミングエラーの CE に関する分散分析表

要因	自由度	平方和	平均平方	F 値
被験者 (A)	14	621010.055	44357.861	
フォア/バック (B)	1	5334.202	5334.202	1.145
(A)×(B)	14	65238.715	4659.908	
選択刺激提示時期 (C)	4	279111.209	69777.802	49.829***
(A)×(C)	56	78419.559	1400.349	
(B)×(C)	4	2183.991	545.998	< 1
(A)×(B)×(C)	56	61009.837	1089.461	

*** $p < .001$

ラムが実行されたことを表わすものである。つまり、ある目標となる空間的位置に対するフォアハンドボレーとバックハンドボレーという2つの運動プログラムをあらかじめ用意しておき、そのいずれか片方を選択的に実行したものと見える。したがって、少なくともこうした2つの運動プログラムが、あるメモリバッファ内にあらかじめセットされるという前処理をとるような処理様式であったといえる。

CCT におけるタイミングエラー

CCT におけるタイミングエラーに関して CE, AE, VE について選択刺激提示条件 (5) × 反応動作 (2) の両方とも繰り返しのある 2 要因分散分析を行ったところ、CE と AE について選択刺激提示条件の主効果のみ認められた (CE ; $F(4, 56) = 49.829, p < .001$, AE ; $F(4, 56) = 29.191, p < .001$)。この分散分析表がそれぞれ表 4.6, 表 4.7 である。これは、選択刺激提示が一致タイミング点に近くなるほど遅延反応が顕著になること、つまり、どちら側のボレーを行うかという情報提示が遅くなるにつれて、タイミングエラーが大きくなることを示している。

ここまでの SCT と CCT におけるタイミングエラーとスペーシングエラーについて AE の平均と標準偏差を図示したのが図 4.5 である。選択刺激提示条件はタイミングエラーにのみ影響を及ぼした。タイミングエラーに影響したのは、選択刺激提示条件を選択反応に

表 4.7: CCT におけるタイミングエラーの AE に関する分散分析表

要因	自由度	平方和	平均平方	F 値
被験者 (A)	14	396148.982	28296.356	
フォア/バック (B)	1	456.928	456.928	< 1
(A)×(B)	14	43088.710	3077.765	
選択刺激提示時期 (C)	4	182688.798	45672.199	29.191***
(A)×(C)	56	87616.128	1564.574	
(B)×(C)	4	2359.758	589.939	< 1
(A)×(B)×(C)	56	36089.864	644.462	

*** $p < .001$

かかる総時間以下にまで設定したため、当然の結果ともいえる。そこで、各選択刺激提示条件のタイミングエラーの質について次に検討する。

CCT におけるタイミングエラーの質的検討

タイミングエラーの質を検討するために、各反応動作について選択刺激が提示されてからの反応時間 (PRT) と動作時間 (MT) について、選択刺激提示条件 (5) × 反応動作 (2) の両方とも繰り返しのある 2 要因分散分析を行ったところ、PRT において、選択刺激提示条件の主効果のみが認められた ($F(4, 56) = 48.542, p < .001$)。これは、図 4.6 に示すとおり、選択刺激提示時期が遅くなるにつれて、選択刺激提示から反応開始までの時間が短くなっていることを示している。特徴的なことは、選択刺激提示条件が一致タイミング点前 690, 600, 510 ms の 3 条件においては 100 ms 以下の値を示していることである。これは、聴覚刺激に対する単純反応時間よりも短いものであり、実際には選択刺激が提示される以前に何らかの動作を開始していたこと、もう少し明確にいうと動作を実行するための何らかの処理を開始していたことを示すものである。

これに対して、MT の分析では選択刺激提示条件による違いは認められず、図 4.6 に示すとおり、いずれの選択刺激提示条件においてもほぼ一定の MT を示した。これは、スペーシングエラーの分析において選択刺激提示条件による空間的正確性が違いが認めら

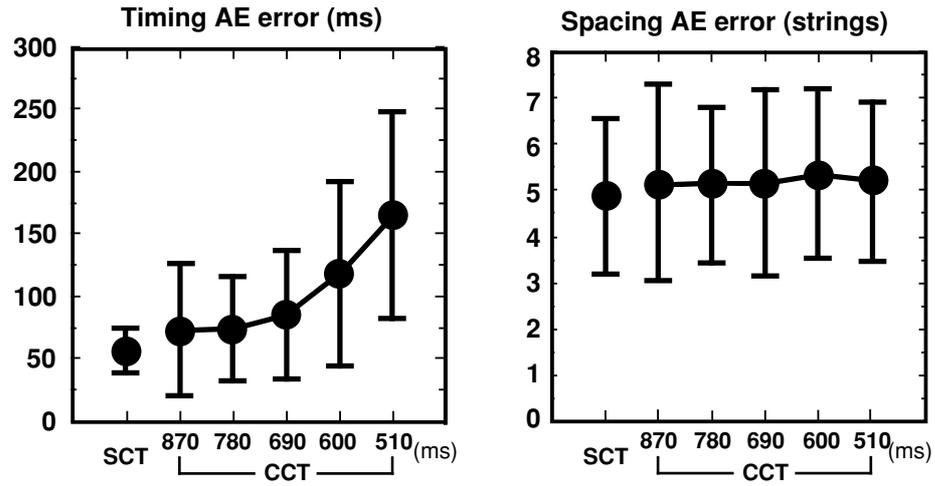


図 4.5: タイミングエラーとスペーシングエラーの絶対誤差の平均と標準偏差

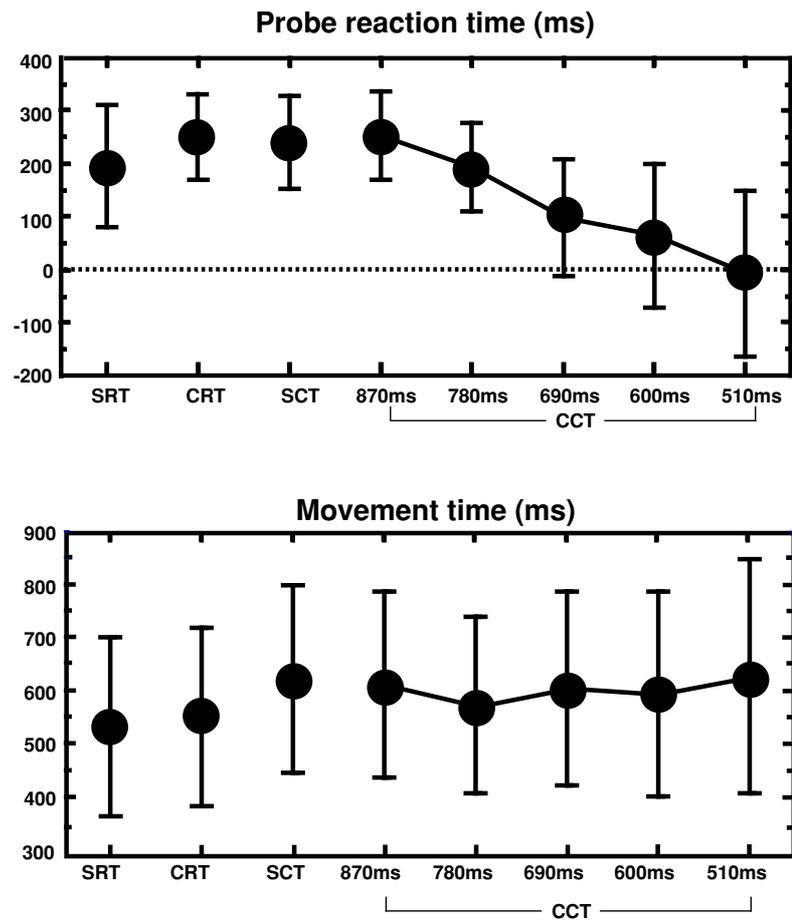


図 4.6: 各条件における PRT と MT の平均と標準偏差

れなかったことから、同じ運動プログラムが実行された結果と考えられる。

4.2.5 考察

テニスのボレー動作において、選択的反応が要求される一致タイミング課題を設定し、この選択刺激の提示時期を操作することにより、一致タイミング課題における時間的要素と空間的要素の処理について検討を加えた。その結果、空間的要素の処理には選択刺激の提示時期は影響を与えず、結果としてスペーシングエラーには差が認められなかった。しかし、時間的要素には影響を及ぼし、タイミングエラーにおいて選択刺激の提示時期の遅れが、遅延反応を引き起こした。これらのことから一般的に考えると、事前に用意した2つの運動プログラムを選択的に実行した結果、その選択反応の手がかり刺激の提示が遅延した分、一致タイミング動作が遅延したといえる。しかしながら、PRTの結果と考えあわせた場合には、若干の不都合が生ずる。

すなわち、両実験での課題が選択反応を要求する課題であることから、一般には反応選択にかかる時間が必要であると考えられる。しかしながら、動作時間はいずれの条件でも違いが認められず、PRTのみが短縮されていたのである。情報処理心理学的な考え(Schmidt, 1988)に沿うと、被験者には選択刺激提示後に刺激同定・反応選択といった処理が要求されたはずであり、もし選択反応にかかわる処理が独立して系列的に行われているとするならば、PRTの短縮はありえないことになる。にもかかわらず、本実験では690, 600, 510 ms条件で、PRTが100 ms以下の値を示していた。したがって、選択刺激提示に対する処理は独立して系列的に行われていたのではなく、一致タイミング動作(この場合ではボレー動作)と並列して処理されていた可能性がある。つまり、一致タイミング動作の遂行中の処理、いかえれば移動指標の速度の認知や自分の動作時間の見積りと一致タイミング点までの残り時間の比較等の処理と、選択刺激提示に対する選択反応の処理が並列分散処理(parallel distributed processing)されていたと考えられる。

ただ、一致タイミング課題の場合には、すべての移動指標の動きが動作遂行に必要であるかという点ではなく、一致タイミング点直前の移動指標の動きよりも移動の前半部の動きが一致タイミング動作には重要であるといった報告(Payne & Michael, 1990)や、移動指標の見える時間(viewing time)は100 msと150 msの間にパフォーマンスへの影響

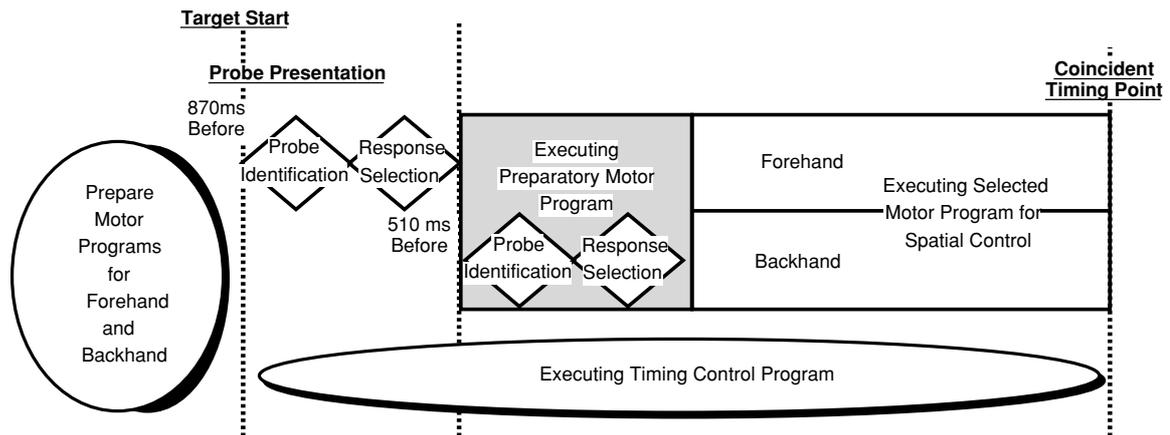


図 4.7: 選択的一致タイミング課題における 2 つの異なる処理過程のモデル。図中央の導入動作の運動プログラムが 870 ms 条件の場合には系列処理が可能であるが、510 ms 条件の場合には刺激同定・反応選択と並列分散処理されたと考えられる。

の違いがみられるといった結果 (Whiting et al., 1970) もある。したがって、完全に並列分散処理されていたと考えるべきか、あるいは時分割処理 (time - sharing processing) されていたのかは明らかではない。

さらに、すべての選択刺激提示条件においてスペーシングエラーが同じであったことから、この空間調整にかかわる処理も一致タイミング動作の時間調整に関わる処理や選択反応にかかわる処理とは独立して処理されていたと考えられる。

以上のことをまとめると、図 4.7 に示すような、本研究における選択的一致タイミング課題の処理過程モデルを提示できる。一致タイミング点前 870 ms 条件の場合も 510 ms 条件の場合にも主動作自体の運動プログラムは作業記憶あるいはメモリーバッファ内に入れられていたとみなされる。そして 870 ms 条件の場合には、250 ms 程度の PRT の間に選択刺激提示に対する刺激同定・反応選択を行い、時間調整を行いながら運動プログラムを実行させたと考えられる。これに対し 510 ms 条件の場合では、PRT が 100 ms 以下であることから、時間調整を行いながら運動プログラムを走らせつつ、選択刺激提示の刺激同定・反応選択を行っているはずである。また、この刺激同定・反応選択が終わるまではどちらの運動プログラムを用いるかはわからないため、どちらの運動プログラムにも対応できる準備的な運動プログラム (ボレーの導入動作) を実行していると推測できる。しかし

ながら，今回の実験では打具（ラケット）の動きからのみ運動を分析したので，こうした準備姿勢などの導入動作を検討できず，この並列分散処理されている段階の行動レベルの特徴は見出せなかった．今後さらに，姿勢制御を含めた導入動作の検討が必要である．

またモデルとしては，一つの運動プログラムを仮定するのではなく，空間的な調整を行うモジュール，タイミング点に動作を一致させようとする時間調整にかかわるモジュール，そして視覚刺激を検出し，判断していくような選択刺激処理にかかわるモジュールなど，複数のモジュールを仮定したほうが説明しやすいと考えられるが，それらを情報処理心理学的に解釈していくのか，生態学的にそれぞれのモジュールが協調的に働いていると解釈していく（Arbib, 1989; Whiting et al., 1992）のかは今後の課題である．

4.3 環境の多様性が打球動作の運動制御に及ぼす影響

4.3.1 目的

4.2 節で検討してきたように，一致タイミング課題において 2 種類の移動指標を選択的に提示し，かつその提示時期を操作することによって空間的な正確性には影響を及ぼさないが，時間的には選択刺激提示時期の遅延により時間誤差も増え遅延反応を示すが，その誤差は一般的な選択反応時間よりははるかに短いことが明らかになった．この結果は，打球動作開始後に主動作に先立つ導入動作と，並列的に視覚刺激が処理されていることを示唆するものであった．

しかしながら，こうした処理がどのような動作となって表われているのか，いいかえれば運動の協応構造と局面構造に及ぼす影響については明らかにならなかった．また，実際の日常場面やスポーツ場面を考えたとき，空間的には正確であっても時間的に遅延反応を示すならば，その結果（パフォーマンス）は満足のいくものではないであろう．すなわち，時間的な遅延が予測できる場合には空間的な調整を行うはずである．しかし実験室で行う実験設定では，視覚刺激は移動しても打つ対象物は固定されたものであった．これは生態学的妥当性 (Davids, 1988) の問題ともいえる．

そこで本研究では，同じ準備姿勢から異なる入力，すなわち環境の多様性に対応している打球動作として野球のバッティングを取り上げる．テニスなどにおける離散打球動作

では移動を伴うため，打球動作としては空間的な調整を行わないことが可能である．つまり，移動することによって空間的な調整を行わず，同じ打点で打球することが可能である．しかしながら，野球のバッティングでは移動はほとんどできないため，環境の多様性に対応するためには，運動の協応構造で空間的な調整をせざるを得ないものと思われる．これが野球のバッティング動作を用いる理由である．

平野 (1984) は，野球のバッティングに関して，投球コースによってインパクト直前のバットの打撃中心の速度が異なり，インサイドの方がアウトサイドのボールに対するよりも速度が速いことを指摘している．そしてこの速度の違いは腕の使い方の違いに起因するとしている．McIntyre and Pfautsch (1982) は，いわゆる引っ張るバッティング（右打者が左方向へ打つ）と流すバッティング（右打者が右方向へ打つ）について，頭上からの2次元撮影による動作分析の結果，インサイドとアウトサイドでは動作時間（スイング時間）やバット速度が異なるとし，それは左の肘関節と手関節のインパクト時の角度の違いによるとしている．つまり，これらの観察結果が明らかにするところは，インサイド打撃とアウトサイド打撃という環境からの多様性へ対応する打球動作では，実際には空間的なインパクト位置が異なることを示唆しており，時間的要素だけでなく，空間的要素の調整も可能である．ところが，実験室で打撃対象物が固定され，インパクトの空間的要素が制約されている場合には，時間的要素のみが変更可能な状況に被験者がおかれているという点で生態学的妥当性に欠けるとと思われる．

さらに，平野 (1984) や McIntyre and Pfautsch (1982) では上肢の動きが観察の中心となっていたが，Hay (1978) は野球のバッティングの動作分析から，優秀なバッターは腰，肩，腕，そして最後に手首を使ってバットを操作していることを指摘している．すなわち，実際の打球動作では，下肢をも含めた身体全体の系列的な動きの協応が不可欠である．こうした身体全体の協応に関して Bernstein (1996) は，巧みさ (dexterity) を，最も低次の緊張のレベル (level of tone) から，筋 - 骨格系の結合レベル (level of muscular-articular links)，空間のレベル (level of space)，そして最も高次の行為のレベル (level of action) の4つのレベルに分けて考察している．そして例えば空間のレベルはその下の筋 - 骨格系のレベルによって支えられているという階層構造によって制御されていると考えた．したがって，バッティング動作においても単に上肢によるバット操作だけを観察するのではな

く、下肢を含めた全身の協応構造と局面構造を観察することによって環境の多様性に対する複雑な打球動作の運動制御が明らかになると考えられる。

そこで本研究では、環境の多様性を増すために毎回異なる入力、すなわち実際の投手の投球に対して、結果として合目的な正確な打球動作を生み出している運動の協応構造と局面構造を検討することを目的とした。そのために、ここでは野球のバッティング動作が速い動作であるため、ハイスピードカメラによる3次元動作分析方法(池上ら, 1991)を用いた。

4.3.2 方法

被験者

大学野球部に所属する年齢は20歳から22歳までの3名の選手が被験者として実験に参加した。この3名はいずれもレギュラーとして試合に常時出場する選手で、熟練者であると判断されたものであった。3名の被験者はすべて右打ちの選手であった。

手続き

投手は右投げで、インサイド(内角)とアウトサイド(外角)を狙ってランダムに投げてもらい、打者にはインサイドは左方向に、アウトサイドは右方向に投球コースに逆らわないバッティングを要求した。本実験では打者となる被験者が投球コースを予測しないことが重要な条件であったため、各投球コースは乱数表によって決定し、被験者には投球コースは知らせなかった。また右打者のインサイドは左方向へ、そしてアウトサイドは右方向へ打ち返すことが良いバッターの特徴であるとされていること(Alston & Weiskopf, 1972)から、被験者には、ボールの投球コースに合わせた打球方向を指示した。各投球コースに対して5試行ずつヒット性の当たりが出るまで実験を継続した。ここでのヒット性の当たりとは、指示された区域へ飛ぶ速いゴロ、ラインドライブ、しっかりと当たったフライであった。投球コースと打球の判定は、審判員の位置から他の野球部員2名が行い記録用紙に記録した。

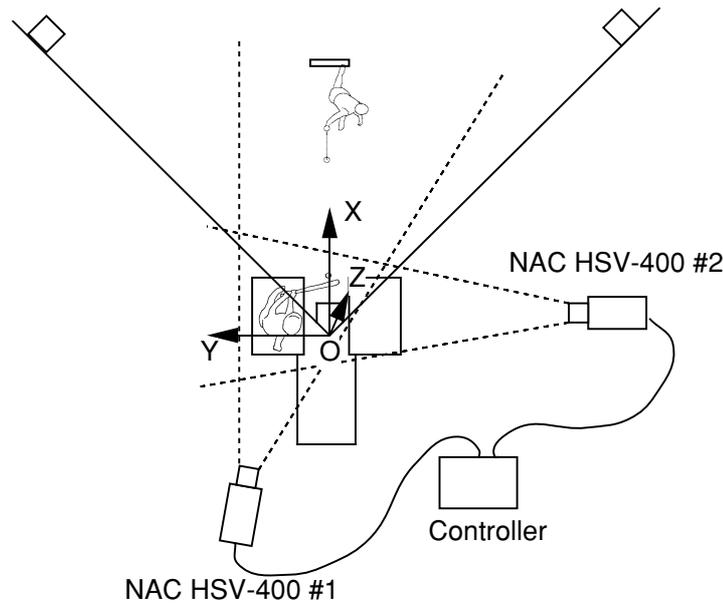


図 4.8: 撮影状況の模式図

撮影手続き

被験者の関節中心にはデータ解析時に解剖学的位置が明確になるようにテープを巻いた。撮影は、2次元映像から3次元座標を再構成するDLT法 (Adbel-Aziz & Karara, 1971; 池上, 1983; Nigg & Cole, 1994) を用いて野球場で行った。このバッティング動作を2台のハイスピードカメラ (NAC HSV-400) を同期させて200 Hzで撮影した。そしてバッティング動作が行われる空間を囲むように14点のコントロールポイントを置き撮影した。3次元座標への再構成による平均誤差は4.9 mmであった。右手直角座標系を用いて、本塁の先端を原点とし、Z軸は鉛直方向に、X軸は本塁から投手板に向かう水平方向に、Y軸は他の2軸と直交するように1塁から3塁を結ぶ方向とした。また、ボールや打具の速い動きを鮮明な画像にするために、 $1/250$ sのシャッタースピードで撮影した。撮影状況は図4.8に示すとおりである。

それぞれのバッティング動作を撮影した2つの映像はVTR (Panasonic AG-7355) によって再生し、パーソナルコンピュータ (Sharp X-68000) でデジタル化を行った。バッティング動作については、ボールがリリースされたフレームから打者のバットがボールに当たった後10フレームまでをデジタル化した。各フレームでは、ボール、バットの打撃中心、頭

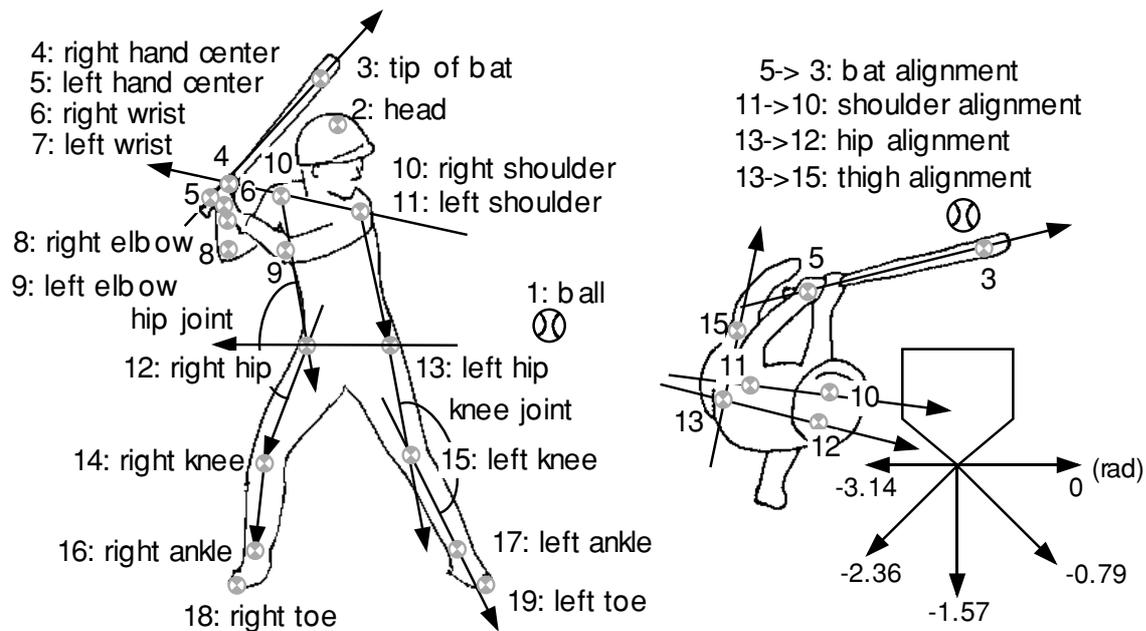


図 4.9: デジタイズした点と角度の定義

頂，両手の中心，手関節，肘関節，肩関節，股関節，膝関節，足関節，爪先の 19 点をデジタイズした．デジタイズしたデータをワークステーション (SUN SS5) に転送し，2 台のカメラのデータを同期させて 3 次元座標に再構成した．計算に先立ち，デジタイズによる測定誤差を除去するため、遮断周波数 20Hz の 2 次の Butterworth 型フィルタを用いて座標データを平滑化した．

データ分析

デジタイズした 19 点とセグメントおよび関節角度の定義は図 4.9 に示すとおりである．関節角度は平滑化されたデータを用いて計算した．膝関節角度は，股関節から膝関節へ向かうベクトルである大腿の長軸と膝関節から足関節へ向かうベクトルである下腿の長軸の成す角度とした．股関節角度も同様に，肩関節から股関節へ向かうベクトルと股関節から膝関節へ向かうベクトルの成す角度とした．

肩のセグメントの角度（肩の向き）は，左肩から右肩へ向かうベクトルと Y 軸の逆方向のベクトルの成す角度とした．腰の向きについても同様に定義した．バットの角度は，左手の中心からバットの打撃中心へ向かうベクトルと Y 軸方向と逆向きのベクトルの成

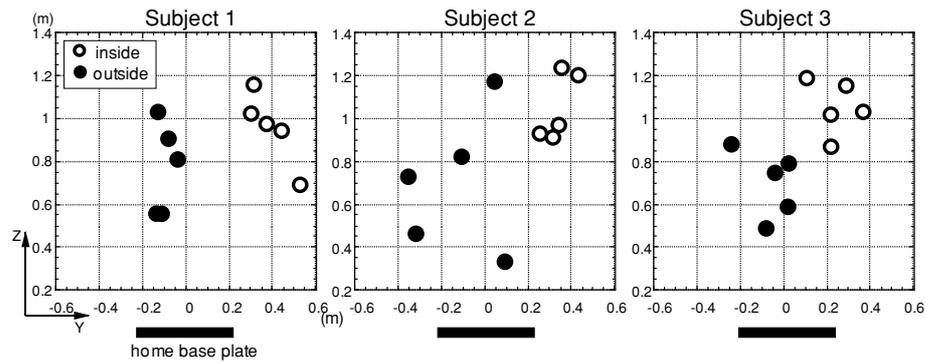


図 4.10: 投球ボールの位置

す角度とした．左大腿の向きは，左股関節から左膝関節へ向かうベクトルと Y 軸方向と逆方向のベクトルの成す角度とした．

水平面内でのバットの振り始めは，バットの角速度が負から正に変わった時点とした．そして動作時間 (movement time : MT) をこのバットの振り始めからボールと接触するまでの時間とした．バットが振り始められるとそのグリップはボールの方向へ向かい，バットの角速度は一時減少し，ボールとの接触直前に急激に角速度が増加する．これがダウンスイングと呼ばれる局面である (Hay, 1978; Messier & Owen, 1985)．そこで，このボールとの接触直前のダウンスイングの開始を，角加速度が最後に負から正に変わった時点とした．そしてこのダウンスイング開始からボールとの接触までの時間をダウンスイング動作時間 (downswing movement time : DMT) とした．本実験における動作時間 (MT) は従来スイング時間と呼ばれるものに相当するが，ここではダウンスイング動作時間と区別するため特に動作時間とした．

4.3.3 結果

投球ボールの位置

図 4.10 は，ヒット性の当たりになったボールが投げられたコースを示している．

ヒット性の当たりが出た時に投げられたボールの Y 軸方向の平均位置は，インサイドの場合が $0.32 \pm 0.10 \text{ m}$ で，アウトサイドの場合が $-0.10 \pm 0.13 \text{ m}$ であった．対応のある t 検定の結果，両サイドの Y 軸方向の位置は有意に異なっていた ($t(28) = 9.87, p < .001$)．ま

た，ボールがリリースされてから，ホームプレートの1 m 手前までの平均速度はインサイドの場合が $30.7 \pm 1.04 \text{ m/s}$ で，アウトサイドの場合が $31.0 \pm 0.78 \text{ m/s}$ であった．対応のある t 検定の結果，両サイドの速度には有意な違いは認められなかった ($t(28) = 1.06, n.s.$)．これらの結果から，投球されたボールの速度は両サイドとも変らなかったが，その Y 軸方向の位置だけが異なっていたといえる．したがって，時間的要素は同じであるが空間的要素が異なる入力に対応したのが今回のバッティング動作であったといえる．

バットスイングの時間的特徴

表 4.8 は，各被験者の 5 試行ずつのバットスイングの時間的特徴について平均と標準偏差を示したものである．

3 人の内 2 人の被験者は，インサイドに対応したバッティング動作の平均 MT が，アウトサイドに対応したバッティング動作の平均 MT よりも長かった．また，DMT においては，両サイドによる違いは認められなかったが，全ての被験者において最大角速度はインサイド打撃の方がアウトサイド打撃よりも大きな値を示した．被験者 1 については，MT において両サイドの違いは認められなかったが，最大角速度はインサイド打撃の方が有意に大きな値を示した．これは，インサイドに対応したバッティング動作の場合に，他の被験者と比較してボールと接触するまでのバットの軌跡が長いことによると考えられる（図 4.11 参照）．

これまでの研究 (Breen, 1967; 平野・宮下, 1983; Race, 1961) では本実験での MT に相当するスイング時間は約 200 ms とされており，本実験でもほぼ同じ値を示した．本実験ではインサイド打撃に相当する左方向へ打った場合の方がアウトサイド打撃に相当する右方向へ打った場合よりも動作時間が長く，バット先端の速度も速いことを示した．左右方向へ打ち分ける時のバッティング動作を検討した McIntyre and Pfautsch (1982) の報告は，絶対値は異なるものの，その特徴は類似している．彼らは 2 次元で分析しており，バットの振り始めの定義が明確でない．またバット先端の線速度を求めており，本実験で求めた角速度とは異なるため，実際の時間では異なる値が得られたものと思われる．しかしながらここで重要なことは，ダウンスイングの時間に関しては両サイドで違いが見られないのに対して，最大角速度はインサイドの場合がアウトサイドの場合よりも大きいことで

表 4.8: 各被験者のコース別のバットスイングの時間的特徴

	Subject 1			
	Inside		Outside	
	<i>M</i>	<i>SD</i>	<i>M</i>	<i>SD</i>
Movement Time (ms)	218	9.3	215	15.2
Downswing Movement Time (ms)	47	5.1	45	7.1
Peak Angular Velocity (rad/s)	54.1	7.62	40.8	4.41*
	Subject 2			
	Inside		Outside	
	<i>M</i>	<i>SD</i>	<i>M</i>	<i>SD</i>
Movement Time (ms)	243	12.9	220	12.3 **
Downswing Movement Time (ms)	58	21.6	62	5.1
Peak Angular Velocity (rad/s)	56.0	3.41	47.9	7.18*
	Subject 3			
	Inside		Outside	
	<i>M</i>	<i>SD</i>	<i>M</i>	<i>SD</i>
Movement Time (ms)	250	11.0	227	6.8 *
Downswing Movement Time (ms)	39	10.7	43	9.3
Peak Angular Velocity (rad/s)	49.9	9.41	40.6	5.47*

* $p < .05$, ** $p < .01$

ある。

各被験者のそれぞれのコースにおける動作時間のばらつき（標準偏差）は、他の研究（Bootsma & van Wieringen, 1990; Wollstein & Abernethy, 1988）と比べても小さい方である。したがって、この結果はインサイドあるいはアウトサイドのいずれかのコースに投げられたボールに対しては、コースごとには同じような力で動作を行っているが、コースが異なれば異なる力を発揮していることを示唆するものである。これは、コースに応じて異なる打球方向を指示した課題の制約条件によるものかもしれない。したがって、コースによって、あるいは打球方向の意図によって2種類の異なるバッティング動作を遂行していたと考えられる。

投球ボールに対するバット先端の調整

異なる位置に投げられたボールに対して、被験者がどのようにしてバットの先端を調整して打撃を行っていたのかを検討するために、上と横からバット先端の軌跡を描いたのが図 4.11 である。この図から明らかなように、バットの先端は水平方向にも垂直方向にも連続的にボールと接触するまで調整されている。

この結果は、バットスイングの時間的特徴の結果が示すように、それぞれのサイドへ投げ分けられたボールに対しては同じ時間的特徴でバッティング動作を行っていたにも拘わらず、バット先端の空間的な動きは同じサイドでも異なる軌跡を描くことを示している。そしてさらに興味深い点は、ボールが投げられてから少なくとも 400 ms 程度、逆にいえばボールとの接触の 100 ms 前まではほとんど同じ軌道を描いている点である。これはバットスイングの時間的特徴の結果と考え合わせると、ボールが投げられる前からインサイドかアウトサイドかどちらかのバッティング動作を選択して始めていたのではない。少なくともボールが投げられた後に、バッティング動作の前半部分を開始しながら、ボールの軌跡に対応して異なるバッティング動作を行っていることになる。ダウンスイング動作に入るまでは、共通のスイング動作で、そのスイング動作中に投球ボールのコースを並列分散処理で判断して、異なるダウンスイング動作（インサイドとアウトサイド）を選択して実行していたものと考えられる。そしてさらに、各ボールコースに対応するように連続的にボールと接触するまで調整されていたのである。

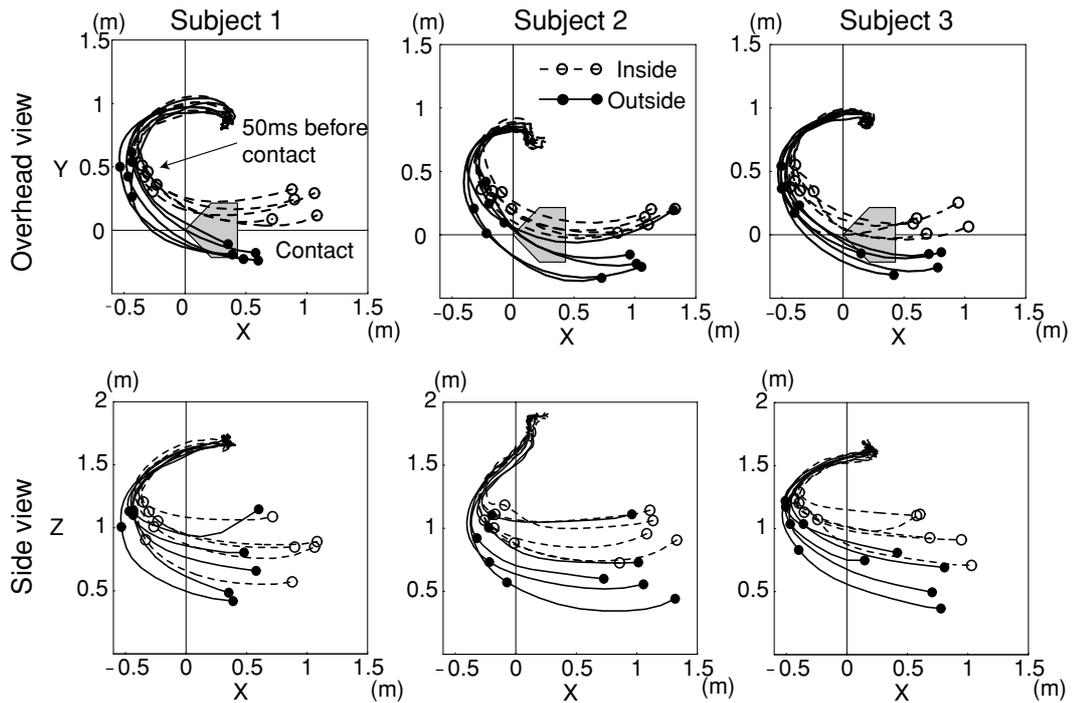


図 4.11: バットヘッドの軌跡

運動の協応構造と姿勢制御

バットスイングの柔軟な調整を支えていると考えられる全身の協応動作について、左膝、左大腿、腰、肩、バットについて時系列的に検討した。図 4.12 はそれぞれの角度の各被験者のインサイドとアウトサイドの両サイドを合わせた 10 試行の標準偏差を時間軸に沿って描いたものである。ボールとバットの接触時を基準として加算し、標準偏差を求めた。標準偏差は一致タイミング誤差では変動誤差に相当するもので、標準偏差が大きいことは試行間の変動が大きいことを示し、逆に標準偏差が小さいことは試行間の変動が少ないことを示す。したがってこの標準偏差の変動は、試行間の調整の度合いを示すものと考えられる (Knudson, 1990; 大道, 1984; 大道・宮下, 1983)。

被験者 3 が最も顕著であり、ボールとの接触前に変動の大きな部分が 2ヶ所見られる。まず始めは左大腿と左膝関節の変動の増加が見られる。次いで、腰の向きの変動が増加し、腰の変動が減少してからボールとの接触の約 120 ms 前に肩とバットの向きの変動が増加し始め、この増加はボールとの接触約 50 ms から急激になり接触まで続いている。他の被験者もほぼ同様な時間的変化を示している。これらの結果は Hay (1978) の主張を支

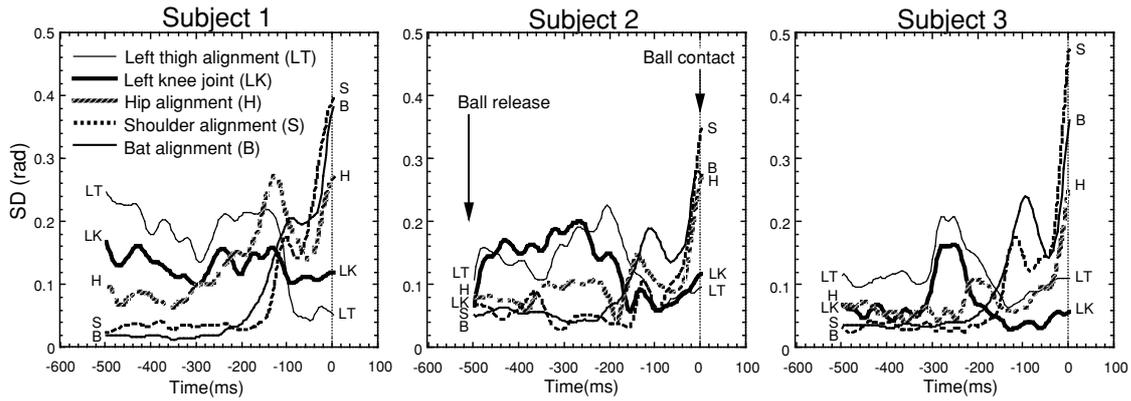


図 4.12: 身体各部位の 10 試行の標準偏差の時間的变化

持するものであり，下肢の調整から始まり，腰，肩，上肢，そしてバットの操作へと時間的な階層性を持って制御されている．つまり，下肢の安定が時間的に先立ち，その後その安定性に基づいて，上肢およびバットの調整がボールとの接触まで続けられるという，協応構造を示している．いいかえれば，おおまかな姿勢制御を行った後，上体の協応構造の調整が行われるということである．

4.3.4 考察

本研究では，実際の投手が投げ分けたコースに対するバッティング動作を，3次元動作分析によって運動の協応構造と局面構造を検討した．

その結果，バットの振り始めからボールとの接触までの動作時間に関しては，3名の被験者の内2名の被験者がボールのコースによって異なった．しかしながら，ダウンスイングの時間については全被験者で両サイドとも違いが認められなかった．Wollstein and Abernethy (1988)は，スカッシュの試合場面でいかなるコースのボールに対しても不変なダウンスイングの時間構造を指摘しており，今回の野球のバッティング動作においても，異なる投球コースに対するバッティング動作間の不変な時間構造は認められた．これは局面構造は環境の多様性によっても影響を受けないことを示唆するものである．

しかし最大角速度については，全ての被験者でインサイドのボールに対応する場合の方がアウトサイドのボールに対応するよりも大きな値を示した．このことは，時間構造は同

じでも、ボールのコースによって2種類の異なるバッティング動作を行っていたと考えられる。また、バット先端の軌跡の分析によって、空間的に連続的なバット先端の調整が行われていることが明らかになった。そしてこのバット先端の調整が、下肢から始まり腰、肩、バットという運動の協応構造が時間的な階層性を持って制御されていた。

ここで重要なことは、環境の多様性と相互作用する打球動作においては、合目的であるがゆえに多様な運動が観察されるということである。しかしながら、運動の局面構造は環境の多様性には影響を受けず、協応構造の時間的階層性が複雑に見える多様な運動を産出していたことである。ただし、これらの打球動作は離散運動であり、準備姿勢がほぼ同じ状態であったことは図 4.11 から明らかである。同じ初期状態から運動を開始し、環境の多様性に協応構造の変化で対応したという結果である。したがってここでいう多様な運動とは、運動の協応構造あるいは打球動作遂行中の姿勢制御に関わることであって、打具先端(バットヘッド)の軌跡が多様であることは自明である。逆に、ボールとの接触直前まで下肢の屈曲など姿勢制御に関する動きの多様性が観察されたことに意義がある。

4.4 まとめ

本章では、運動の協応構造と局面構造を持つ打球動作において、環境の多様性が加わった場合の、運動の協応構造や局面構造への影響を検討した。

まず、時間的制約の中で2つの打球動作を選択的に切り替えながら一致タイミング反応を行う課題を設定し、環境との相互作用を行う場合の打球動作の運動制御を検討した。その結果、環境の多様性に対応するために、動作開始後の連続性をもった動作のなかで環境からの入力処理され、動作の変更がなされていることが明らかになった。これは、単一の処理過程の切り替えによるよりは、複数の処理モジュールの重層性を示唆するものである。

さらに、環境の多様性が増した場合として様々なコースに投げられたボールに対する打球動作の運動制御において、運動の協応構造と局面構造がどのような影響をうけるのかを3次元動作分析によって検討した。その結果、環境の多様性と相互作用する打球動作においては、合目的であるがゆえに多様な運動が観察されるということである。しかしなが

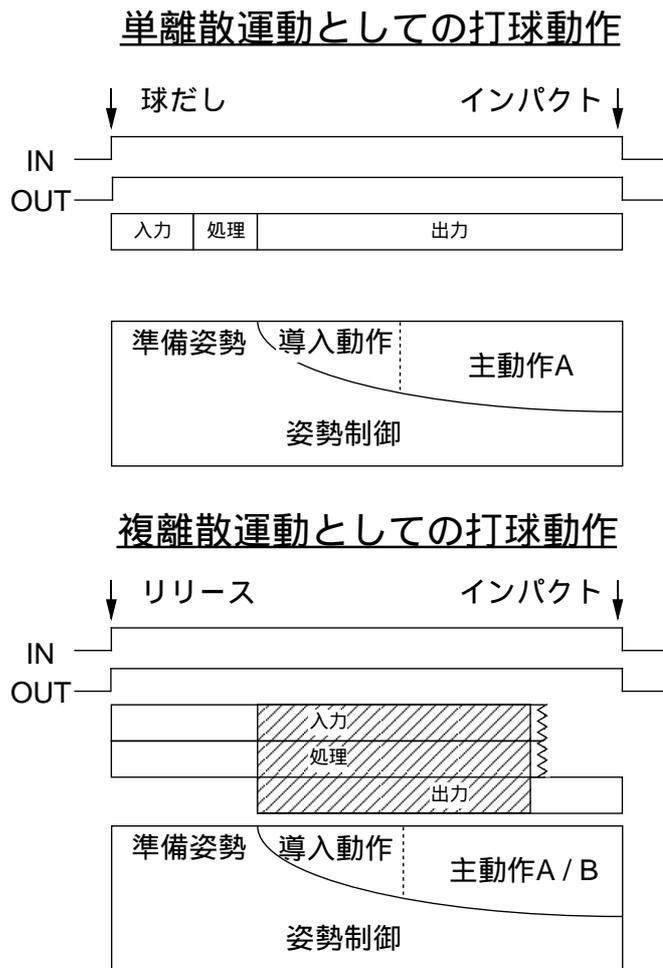


図 4.13: 単離散打球動作 (第 3 章) と複離散打球動作 (第 4 章) の運動制御の比較

ら、運動の局面構造は環境の多様性には影響を受けず、協応構造の時間的階層性が複雑に見える多様な運動を産出していたことである。さらに、連続的な姿勢制御がこの運動の協応構造に影響を及ぼしていることが明らかになった。すなわち、環境の多様性に対応し、合目的な運動を行うためには、姿勢制御を含めた協応構造の変化によって対応していると考えられ、計算論的にいえば、入力処理を行いながら出力している状態といえよう。これを図示したのが図 4.13 である。

第 3 章では、単離散運動の打球動作における運動制御において、運動の協応構造と局面構造の重要性が明らかになり、準備姿勢や打球動作遂行中の姿勢制御の検討が重要であることが分った。さらに、本章では環境の多様性がいわゆる系列的な処理ではなく並列的な処理を引き出すことが示唆された。これは、運動の先取りともいうもので、準備局面に主

要局面の一部をあらかじめ取り込んだように見えるのである。特に時間的制約が厳しい場合には導入動作を開始し、主動作の一部までも開始したうえで、姿勢制御も含めた協応構造の変化で対応していたといえる。

このことは環境の多様性には運動の先取りで対応し、かつ姿勢制御を含めた協応構造を変化させることによって合目的な運動を実現しているといえる。環境の変化を止まらたまらずと待ち続けるのではなく、時間的に遅れないように、とりあえず動き出しておいて、動きながら考えて環境に柔軟に対処しようということである。そこで次章では、環境の連続性を加味し、同一運動類型内の運動が繰り返し連続する連続打球動作と、異なる運動類型に属する運動を切り替えながら繰り返す複合打球動作の運動制御を検討する。いいかえれば、どのようにして動き続けながら環境の変化に対応しているのかを考える。

第3章と本章で扱ってきた課題は離散運動であり、準備姿勢は同一で、いわゆる「用意、ドン」で始めることができる運動であった。その離散打球動作の運動制御は、実験室での一致タイミング課題と異なり、主動作の運動プログラムとその開始時期だけを問題にするのでは不十分であることを指摘した。つまり、離散運動としての打球動作の運動制御は、局面構造という運動プログラムの時系列結合と、協応構造という運動プログラムの空間的協調を記述しなければならない。さらにそれらの並列分散処理を考える必要がある。しかしながら現時点では、この問題に対する有効な計算論的アプローチはない。そこで、従来連続運動における協応構造の変化を検討するために用いられてきたダイナミカルシステムアプローチを、次章での連続・複合打球動作の運動制御に援用する。

第5章

連続・複合打球動作の運動制御

5.1 はじめに

前章までの運動課題は、離散運動としての打球動作であった。つまり、初期条件（準備姿勢）を同一にすることが可能な状態から、一つの、あるいは多様な入力に対して、離散的に運動出力（1回のストローク動作やバッティング動作）を行うものであった。したがって、多様な入力に対する多様な出力も、初期動作は揺らぎがなく動作開始後のみに揺らぎが見られた。しかしながら、こうした離散運動は連続運動に内包されると考えられる。さらに、4.2節の課題以外は同種の運動で、いわゆる同一運動類型 (Schmidt, 1991) に属する打球動作の中での多様な運動であった。したがって、本章では環境の連続性と多様性を加味し、同一運動類型の運動を繰り返す連続運動と、異なる運動類型に属する運動を繰り返す複合運動の運動制御を検討する。

まず、環境の連続性と多様性に対応した、連続運動と複合運動としての打球動作の運動制御を運動の協応構造と局面構造から検討する。さらに、環境との連続性の時間的制約が厳しくなると身体運動の複雑さが増すと考えられることから、より時間的制約が厳しい場合の連続運動と複合運動としての打球動作の運動制御を検討する。これらを通して、複雑に見える身体運動の構造を明らかにしようとするものである。ここでは同一運動類型内、あるいは異なる運動類型間の連続運動を扱うために、従来、周期的な連続運動における協応構造の変化を検討してきたダイナミカルシステムアプローチに依拠するが、これまでのダイナミカルシステムモデルでは急激な外部変化は扱えない(1.4.3項参照)。そこで本章では、環境からの時間的入力の変化を考慮した非線形ダイナミカルシステムモデル(付録参照)を適用して、連続運動と複合運動の運動制御を検討する。

5.2 複合運動によって生ずる複雑さ

5.2.1 目的

離散運動としての打球動作は、プログラム制御を前提とする計算論的アプローチとダイナミカルシステムアプローチを視野に入れた連続制御モデルの双方から検討が加えられている。しかしながら、計算論的アプローチでは環境の多様性を加味した運動課題の場合にも、運動の協応構造や局面構造には言及しない。つまり、複離散運動ではあるが運動の協応構造の検討はなされていない。また連続制御モデルでは上肢などの運動の協応構造については検討されているが環境は一定である。つまり、単離散運動としての打球動作である。しかしながら、現実の運動が複雑に見えるのは環境の連続性と多様性に起因する。したがって、同一運動類型の運動を繰り返す連続運動と2つ以上の異なる運動類型に属する運動を繰り返す複合運動における運動制御を問題にしなければ、身体運動の複雑さは解明できない。

そこで、本節では連続運動と複合運動としての打球動作の運動制御を検討する。離散運動の場合には、準備姿勢は同一であったが、連続あるいは複合運動の場合には必ずしも同一になるとは限らない。しかしながら、打球動作という時間的制約のある合目的運動の場合には、主要局面を先取りしてまでも目的を達成しようと働く。したがって、環境の連続性が加味された場合には、これまで検討してこなかった打球後の終末局面も重要な意味を持って来るものと考えられる。さらに、環境の多様性が加味されるとさらに複雑な局面構造になるものと思われる。ここでは、テニスのラリーにおいて、練習でフォアハンドを繰り返し打つ場合と、試合でどちらに来るか分からないボールに対してフォアハンドとバックハンドを使い分けながら繰り返し打つ場合に相当する運動制御を検討する。なおここでの実験結果は既に発表された山本 (1999b)、山本・郷原 (1999)、山本・郷原・原 (1998) に基づくものである。

5.2.2 方法

被験者

被験者はテニス経験のある成人男子3名であった。実験時のターゲットテニスによる評価表に基づく技能評定の結果では、被験者1が8級(上級)、被験者2が12級(中級)、被験者3が13級(中級)であった。なお、このターゲットテニスによる評価法は、日本プロテニス協会(JPTA)独自のテニス技能のランク認定制度で、本来はグランドストローク、ネットプレイ、サービスの合計得点で認定される方法である。本研究では、グランドストロークについてのみ適用した。

実験設定

実験状況は図5.1に示すように設定した。ボールマシン(Tennis Tutor M2)を回転台の上に乗せ、平均速度14 m/sでボールを発射した。ボールマシンの向きはセンターマークの両横1 m、ベースラインの内側2 mに接する長さ1 m、幅0.4 mの区域のフォアハンド側もしくはバックハンド側にワンバウンドするように変えた。被験者のパフォーマンスを得点化するため、サービスラインとベースラインで囲まれる範囲は、センターマークとサービスラインとサイドラインの交点を結ぶ線で3つに分割し、両サイドが10点、内側が7点とした。またサービスラインからネット寄りに2.13 mまでの範囲を5点、それよりもネットに近い範囲を3点、それ以外は0点とした。

実験は複数のカメラで撮影した2次元映像から3次元座標に変換するDLT法(Adbel-Aziz & Karara, 1971; 池上, 1983)によって記録した。電氣的に同期された3台のカメラを用いて60 Hzで撮影し、打球動作の範囲を取り囲む10点のコントロールポイントを撮影した。カメラは、動作速度の速い部分の画像を鮮明にするために1/250 sのシャッタースピードを用いた。ボールマシンのボール出口にはセンサ制御部(Omron S3D2-CK)に接続した光電センサ(Omron E3V3-T61)を取り付け、ボール発射時点を特定するために用いた。ボール発射時の信号によってタイムカウンタをリセットし、その時刻を打球動作と同時に写し込んだ。3次元座標は、Z軸を鉛直方向に、X軸を打球方向でサイドラインと平行に、Y軸は他の2軸と直交しコートの外側に向くように設定した。DLT法による計

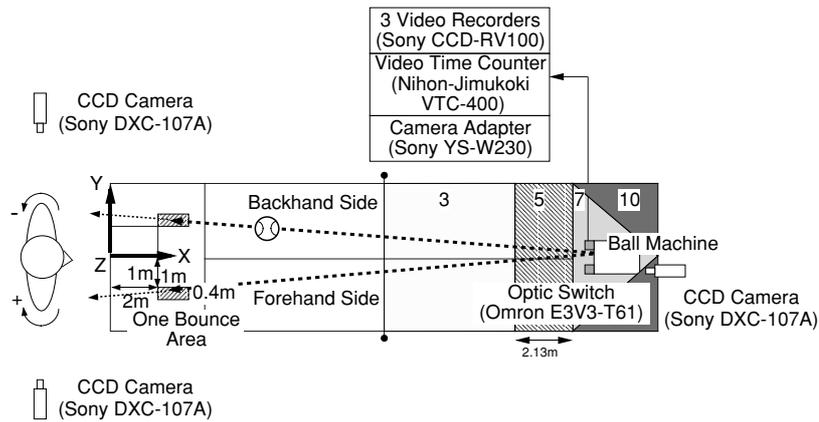


図 5.1: 実験状況の模式図

測誤差は、10 点のコントロールポイントでの平均と標準偏差が、X 軸方向、Y 軸方向、Z 軸方向それぞれ、 $0.1 \pm 0.7 \text{ cm}$ 、 $-0.1 \pm 1.2 \text{ cm}$ 、 $-0.2 \pm 0.7 \text{ cm}$ であった。

手続き

被験者の肩関節と股関節には、分析の際に関節位置が明確になるようにマーカーを貼った。ボールは 2.12 s 間隔（約 28 球/分）で発射した。被験者にはボールマシンから発射されるボールコースに合わせてフォアハンドかバックハンドのどちらかのストロークで、できるだけ高得点を獲得するように打つことを要求した。実際の発射間隔とボールの軌跡に慣れるための練習を行った後、フォアハンドの 60 球連続打球を行い、その後バックハンドの 60 球連続打球を行った。これらの 2 つが、連続運動である周期入力条件であった。その後、フォアハンド側とバックハンド側にランダムに発射される 60 球連続打球を行い、これを複合運動である切り替え入力条件とした。これらの各条件間には十分な休息を設けた。2 つの実験条件は、入力の連続性は同じであるが、周期入力条件では多様性がなく、切り替え入力条件には多様性があるところが異なっている。

データ分析

それぞれのカメラで撮影したビデオテープから、各条件最初の 10 試行を除いた 50 試行について、両肩関節と両股関節の中心の 4 点の座標を 2 次元ビデオ動作解析装置 (OKK

Motion Grabber) を用いて, 1 秒間に 60 コマずつデジタイズした. デジタイズしたデータは DLT 法により 3 次元座標に変換した後, 遮断周波数 3 Hz の 2 次の Butterworth 型フィルタで平滑化し, 肩と腰の向きを求めた. 肩と腰の向きは, 左肩から右肩, 左腰から右腰を結ぶベクトルを X-Y 平面に投影したものと Y 軸と逆方向のベクトルの成す角度とし, ボールマシンの方向を 0 rad とし, 時計回りを正, 反時計回りを負とし, それぞれ肩, 腰の向きとして分析した.

5.2.3 結果

運動の協応構造

図 5.2 は, 連続運動としての周期入力条件における肩と腰の角度変化の一部を表したものである. また, 図 5.3 は, 複合運動としての切り替え入力条件における肩と腰の角度変化の一部を表したものである. 矢印はボールマシンからのボール発射時点を示している. ボール発射時点は, 次の打球に対する準備姿勢期と考えられ, この準備姿勢の重要性は第 3 章で指摘したとおりである. また, 連続して移動しながらの打球動作であるので, ここでは, 姿勢制御も含めた協応構造を検討するために肩と腰の向き, すなわち体幹の回旋と捻りを表す変数を採用した.

ボール発射時点から次のボール発射時点までを 1 周期として, 横軸には肩の向き (x_1) をとり, 縦軸には腰の向き (x_2) をとり表示したものが, 図 5.4 である. この図の円筒を 1 周する 1 本の軌道がそれぞれ 1 回のストロークの状態を表す. 図中グレーの面がボール発射時点を表す. 左図が周期入力条件で, 右図が切り替え入力条件のものである. この図は, N 次元空間 (R^N) と 1 周期時間を円周 (S^1) とする超円筒状態空間 M と呼ばれるもので, 従来の非線形力学における離散力学系の状態空間を連続力学系に拡張したものである (Gohara & Okuyama, 1999a).

周期入力条件では, フォアハンドとバックハンドのそれぞれの入力に対応して, 異なる 2 つの安定した打球動作軌道を描いている. これは安定した運動の協応構造で打球動作を繰り返していることを示している. こうした安定した軌道は, 外部入力によって励起されたアトラクタ (引き込まれる状態) という意味で, 励起アトラクタと呼ばれている (郷原,

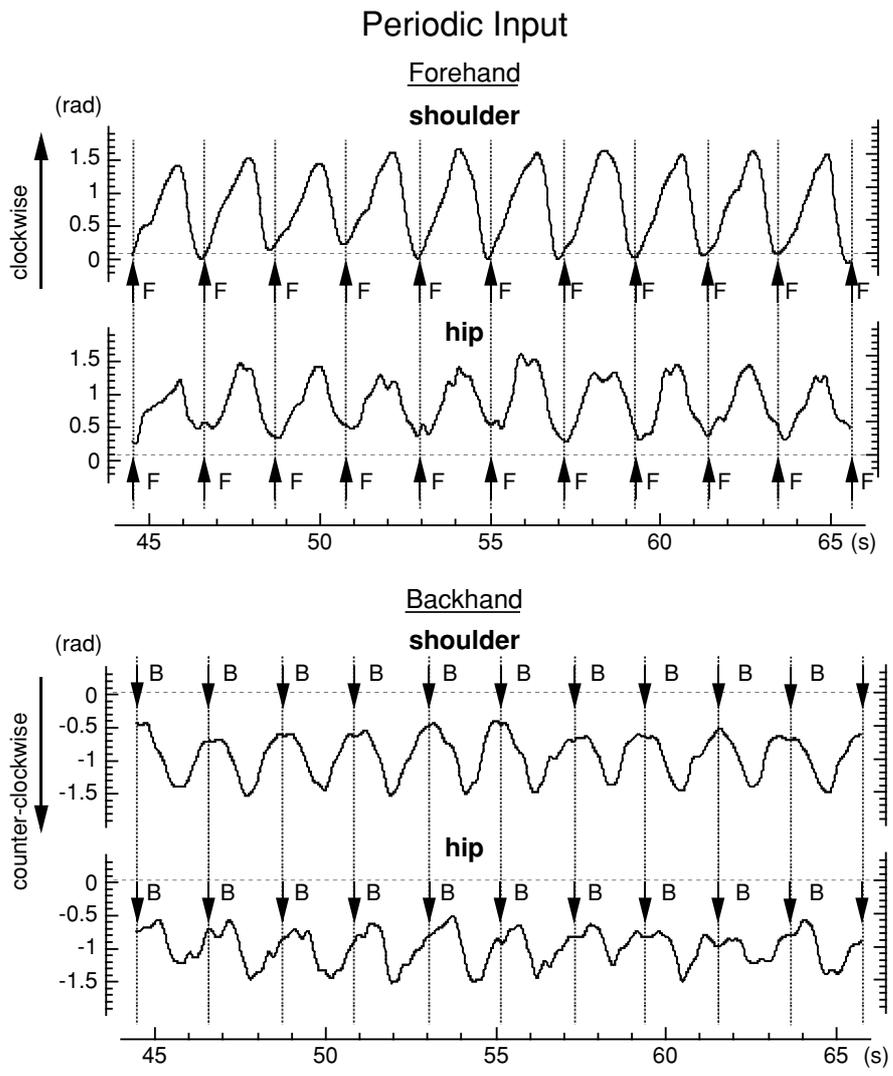


図 5.2: 周期入力条件における肩と腰の角度変化の例

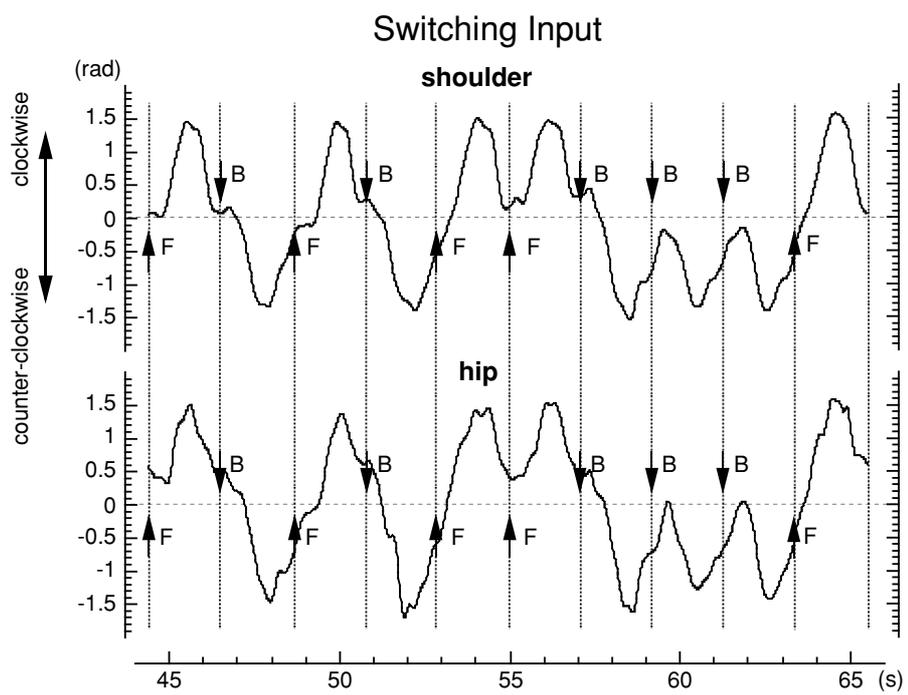


図 5.3: 切り替え入力条件における肩と腰の角度変化の例

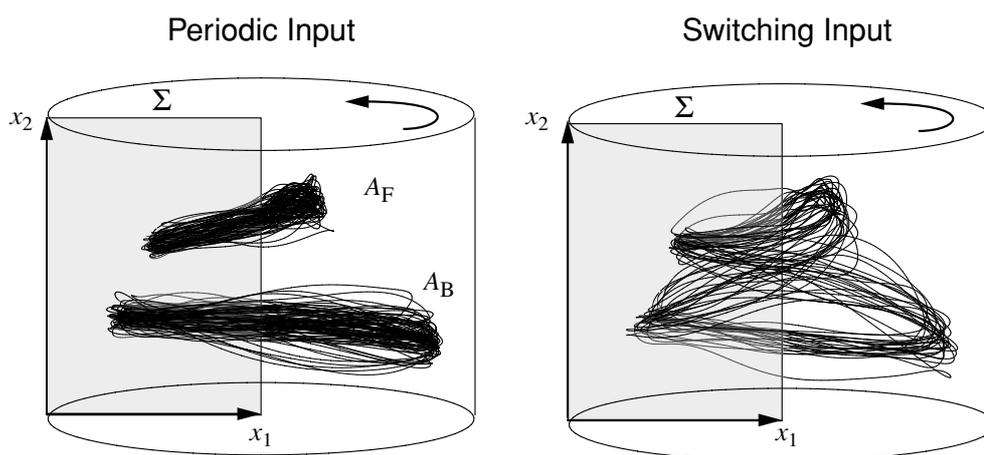


図 5.4: 各条件での超円筒状態空間 \mathcal{M}

1995; 高木・郷原, 1995) . 同じ動作を周期的に繰り返し行くと, 身体システムがある一定の状態に収束するということである . 一方, 切り替え入力条件においては, 周期入力条件で見られるこれら 2 つの励起アトラクタを基本としながらも, 2 つの励起アトラクタ間を遷移している様子を見ることができる .

この点についてさらに詳細に検討するために, ボール発射時点から次の発射時点までを時間展開して示したのが図 5.5 と図 5.6 である . 各図にはおおまかな打球動作が分かるように図を貼り付けてある . 図 5.5 の上段はフォアハンドの周期入力に対応した軌道であり, 下段はバックハンドの周期入力に対応したものである . ここでもそれぞれの軌道がほぼ一つの束になって見える .

図 5.6 の一番上の図が切り替え入力条件のものである . これを, 切り替え入力条件の中のフォアハンド入力とバックハンド入力に分けて示したのがそれぞれ中央の図と最下段の図である . ここで, フォアハンド入力とバックハンド入力のそれぞれにおいて, 異なる初期状態から出発して, 次のボール発射時点では同じようなところへ行き着く 2 つずつの軌道の束が見える . つまり, 前の入力が今の入力と同じ場合と異なる場合の 2 つである . これは, 打球動作が少なくとも一つ前の入力に依存していることを示すもので, 入力の連続性と多様性によって, 明らかに異なる協応構造を示していることになる .

このことは, 連続運動と複合運動では運動の協応構造が異なることを意味している . 複合運動の場合には, 環境からの同じ入力に対応するために同じフォアハンドを打つ場合でも, バックハンドを打った後にフォアハンドを打つ場合と, フォアハンドを打った後にフォアハンドを打つ場合では, 動作開始の準備姿勢が異なるために, 異なる運動の協応構造が要求されているのである . しかしながら, 当然ボールを打ち返すという合目的な課題は達成されている .

では, 連続運動の場合と複合運動の場合では打ち終わった時点 (次のボール発射時点) での姿勢は異なるのであろうか . 次のボール発射時点での準備姿勢を次に検討する .

準備姿勢

次のボール発射時点 (図 5.5, 5.6 での $\theta = 2\pi$ の時点) での肩と腰の向きを全被験者について示したものが, 図 5.7 である . 非線形力学ではポアンカレ断面 Σ と呼ばれ, 連続力

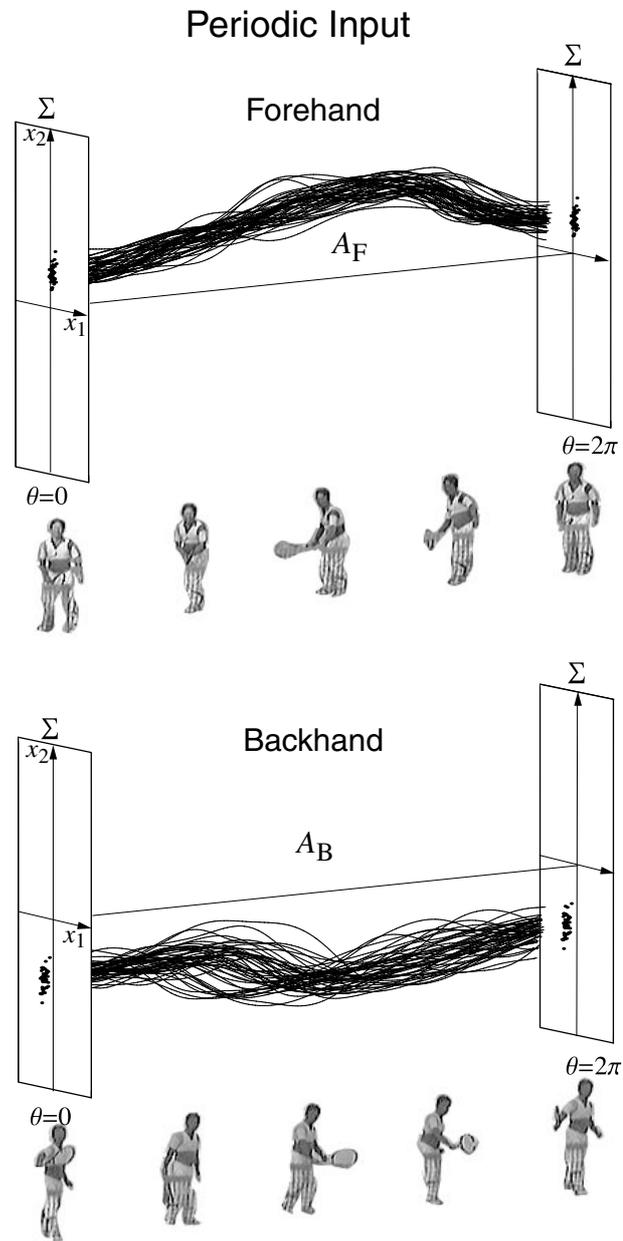


図 5.5: 周期入力条件での状態空間の時間展開図

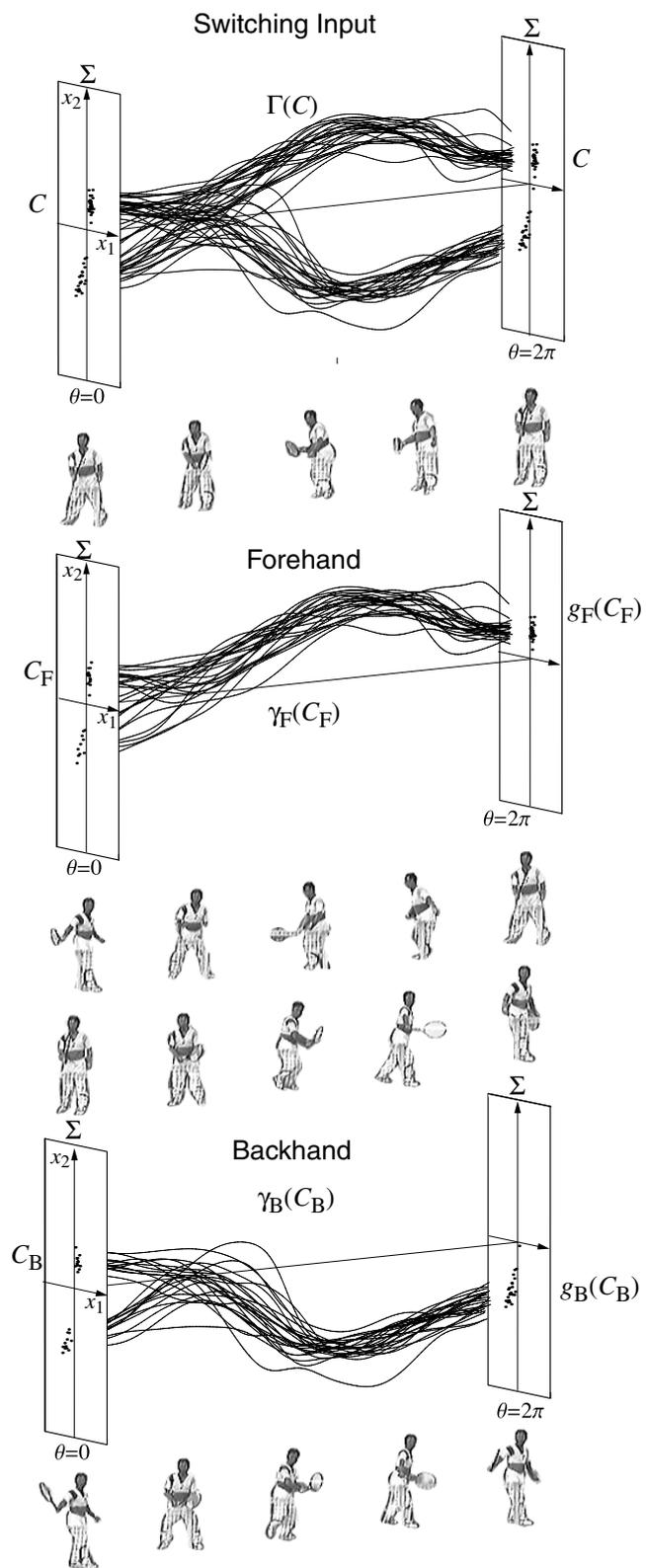


図 5.6: 切り替え入力条件での状態空間の時間展開図

学系の円筒空間の接断面での写像であり次元を一つ減らすことができ、離散力学系の状態空間である。これは、打ち終わって次のボール発射時点での姿勢を表しており、どちらも 0 rad (図中の x 軸と y 軸の交点) はボールマシンに肩と腰ともに正対している状態を示し、この交点から離れれば離れるほど肩および腰がまだボールマシンと正対する角度まで戻りきっていない状態を示している。上段には周期入力条件の、下段には切り替え入力条件における肩と腰の向きが示してある。塗りつぶした上向き三角がフォアハンド入力、白抜きの下向き三角がバックハンド入力に対応する。ここでも1回のストロークを軌道で表したときに見られたように、周期入力に対してそれぞれの入力に対応した点の集合が見える。また、切り替え入力条件においても周期入力条件とほぼ同じ位置に、入力に対応した異なる2つの集合が見られる。

これは、連続運動であっても複合運動であっても次のボール発射時点での姿勢には違いがないということである。しかしながら、フォアハンドを打ち終わったときとバックハンドを打ち終わったときでは明らかにその姿勢は異なる。つまり、打球動作の終末局面では連続運動でも複合運動でも違いがないが、この時点を実際の打球動作の準備局面の始まりと考えるならば、次の打球動作の開始は全く異なったところから始るといえる。同じフォアハンドを打つので、前が同一運動タイプのフォアハンドか、異なる運動タイプのバックハンドかによって、その動作開始の準備姿勢が2種類あるにも拘わらず、結果的には同じ合目的的なフォアハンドの打球動作を遂行していることを示している。

さらに、特徴的なのは、技能レベルを反映していると考えられる点である。すなわち、今回の被験者の中では被験者1が最も技能レベルが高く、次いで被験者2、最も低いのが被験者3であった。切り替え入力条件を見ると、技能レベルが高いほど2つの集合が近くに位置し、被験者1では一部重なり合っているのが、被験者2では隣接し、被験者3では明らかに分離している。異なる入力に機械的に対応するためには、同一の状態(姿勢)から開始するのがもっとも正確であると考えられる。すなわち、離散運動と同じ準備姿勢の確保である。テニスの構えでも、サーブに対するときの構えはいつもほぼ同じであるのと同じ原理である。初心者の中には最初からフォアハンドで構えていて、たまたまバックハンドにボールが来たために準備局面の導入動作が遅れ、パフォーマンスに影響するのはしばしば観察されることである。したがって、次のボール発射時点での準備姿勢は、被験

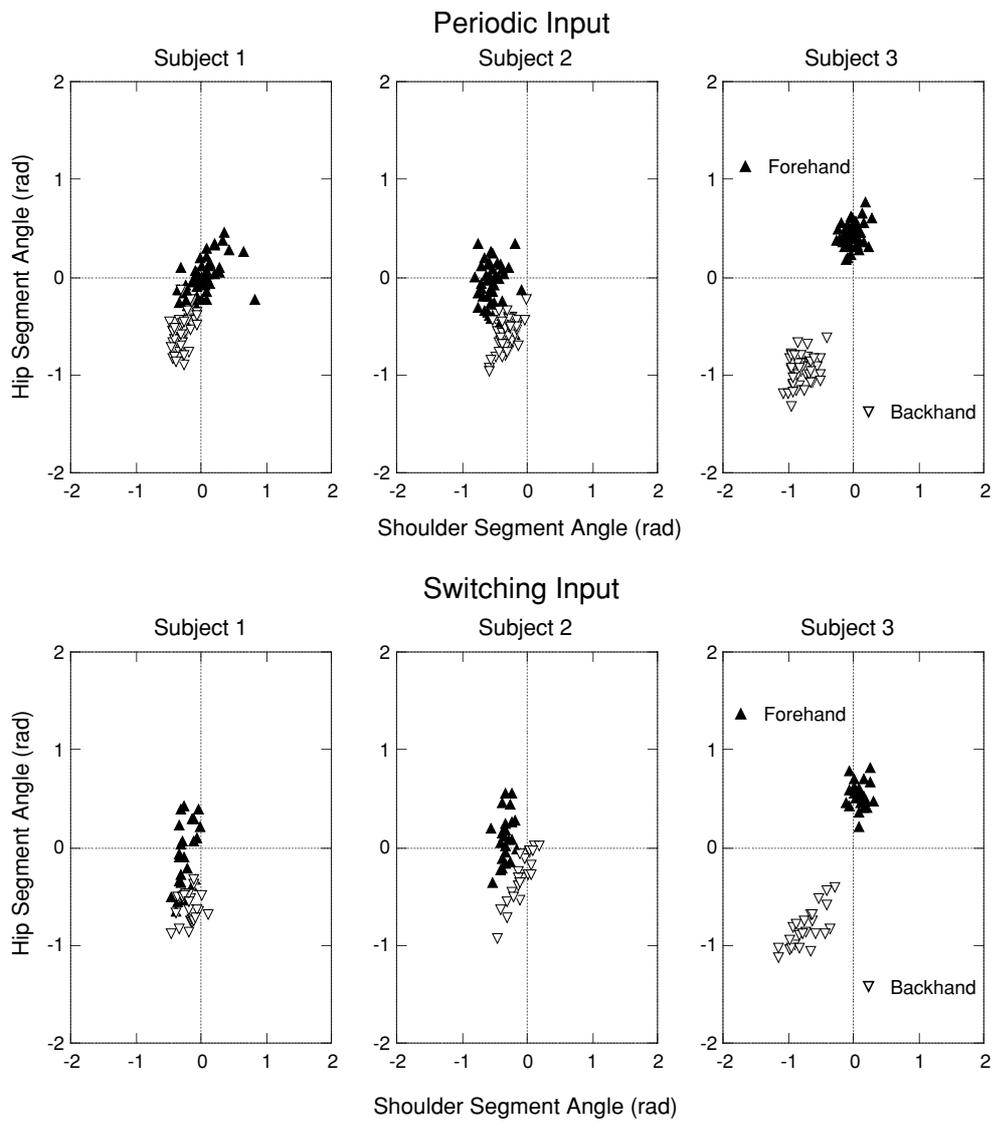


図 5.7: 各条件における次のボール発射時点での肩と腰の向き (ポアンカレ断面 Σ)

者の技能レベルを反映した結果といえる。技能レベルが高いほど，打ち終わってから次の準備姿勢に移るのが早いということである。

5.2.4 考察

複合運動によって生ずると考えられた運動の複雑さを検討するために，同一運動種類の運動を繰り返す連続運動と2つ以上の異なる運動類型に属する運動を繰り返す複合運動についてその協応構造と局面構造を検討した。

その結果，連続運動と複合運動では明らかに異なる運動の協応構造が見られた。この違いは，複合運動における動作開始の準備姿勢の違いによるものであった。すなわち，一つ前の運動の終末局面に依存して，この場合だと2つの異なる姿勢から同じ目的を達成する動きが生じたことによる。つまり，同じフォアハンドを打つという場合でも，バックハンドを打った後にフォアハンドを打つ場合と，フォアハンドを打った後にフォアハンドを打つ場合では，動作開始の準備姿勢が異なるために，異なる運動の協応構造が要求され，連続運動では見られない新たな運動が観察できたといえる。つまり，連続運動ではフォアハンドとバックハンドという2種類の運動パターンであるが，複合運動になるとフォアハンドで2種類，バックハンドで2種類の計4種類の運動パターンが，フォアハンドとバックハンドへの送球という2種類の入力に対応してみられたということである。これが複合運動によって生ずる複雑に見える身体運動であると考えられる。これを模式的に表わしたのが，図5.8である。

連続運動，すなわち同一運動類型内の運動を周期的に繰り返していると，あるいは環境の連続性はあっても多様性がない場合には，身体運動は安定した運動に収束していく。しかしながら，複合運動，すなわち異なる運動種類の運動を連続すると，あるいは環境の連続性とともにも多様性が加わると，身体運動は新たな運動パターンを作り出していく。これは，Meinel (1960) の指摘した終末局面と準備局面の局面融合によるものである。次のボール発射時点での姿勢は，連続運動でも複合運動でも違いは見られなかった。すなわち終末局面は同じであった。にもかかわらず，次のボールが前のボールコースと異なり，異なる運動を要求される場合と，前のボールと同じボールコースで同じ運動が要求される場合ではそこでの準備局面は当然異なるので，終末局面から次の準備局面に向かう運動の

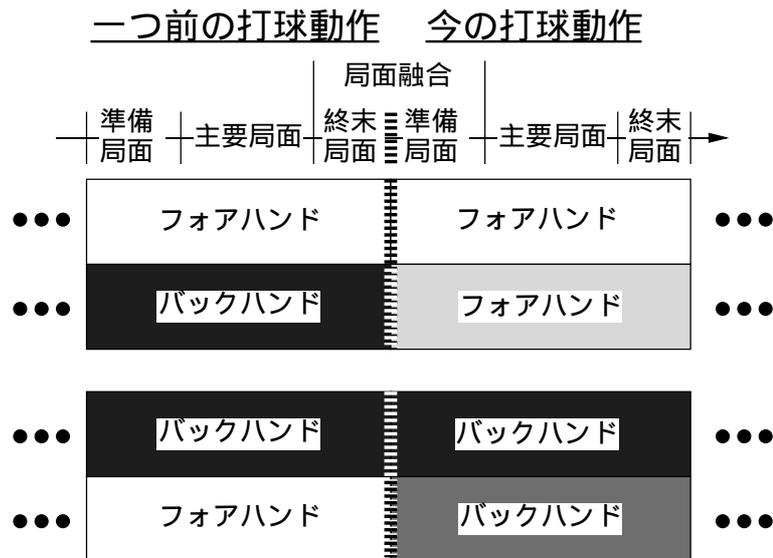


図 5.8: 複合運動における局面融合による 4 種類の運動パターン

相が異なるのである。これが、離散運動であれば、終末局面から同じ準備姿勢を経て新たな準備局面に向かえばよい。しかしながら、環境の連続性がある場合にはこの同じ準備姿勢をとる時間的余裕がないということである。そして、この同じ準備姿勢をとる時間的余裕がない場合に新たな運動パターンが生まれ、その運動の協応構造が異なるために複雑に見えるということである。

そこで次節では、さらに時間的制約が厳しい場合の連続運動と複合運動における運動制御を検討し、どのような身体運動の複雑さが見られるかを考察する。

5.3 身体運動の複雑さの構造

5.3.1 目的

前節では、環境の連続性と多様性によって連続運動と複合運動では明らかに異なる運動の協応構造が見られた。この違いは、複合運動における動作開始の準備姿勢の違いによるものであった。これは、複合運動によって準備姿勢を省略した終末局面と準備局面の局面融合が生じ複雑に見える運動、すなわち新たな運動パターンが見られると考えられた。そこで本節では、さらに時間的制約が厳しい場合の連続運動と複合運動における運動制

御を検討し，どのような身体運動の複雑さが生ずるかを検討する．本節は既に発表した Yamamoto and Gohara (2000a) に基づいている．

身体運動の複雑さは環境の連続性と多様性によって決定されると考えられるので，時間的制約という連続性の問題と入力系列という環境の多様性を操作することによって，ランダムな複雑さになるのか，それとも何らかの規則的な複雑さになるのかを検討する．そのために前節の実験条件よりも時間的制約を厳しくすることと，多様性に3次の系列効果を組み込む．

5.3.2 方法

被験者

被験者は10年以上テニス経験のある30才から40才までの成人男子5名であった．被験者はすべて右利きであった．

実験設定

実験状況は図5.9に示すように設定した．ボールマシン (Tennis Tutor M2) はサーブラインの中央に設置した高さ50 cmの回転台の上に置き，平均速度14 m/sでボールを発射した．ボールマシンの向きはセンターマークの両横1 m，ベースラインの内側2 mに接する長さ1 m，幅0.4 mの区域のフォアハンド側もしくはバックハンド側にワンバウンドするように変えた．被験者のパフォーマンスを得点化するため，相手側コートはベースラインから1.37 mごとに5つの区域に分割し，ベースラインからネットに向けてそれぞれ5点，4点，3点，2点，1点とした (Hebert et al., 1996; Hewitt, 1966) ．

実験データは複数のカメラで撮影した2次元映像から3次元座標に変換するDLT法 (Adbel-Aziz & Karara, 1971; 池上, 1983) によって記録した．電氣的に同期された2台のカメラを用いて60 Hzで撮影し，打球動作の範囲を取り囲む12点のコントロールポイントを撮影した．カメラは，動作速度の速い部分の画像を鮮明にするために1/250 sのシャッタースピードを用いた．3次元座標は，右手座標系でZ軸を鉛直方向に，X軸を打球方向でサイドラインと平行に，Y軸は他の2軸と直交しコートの外側に向くように設定した．

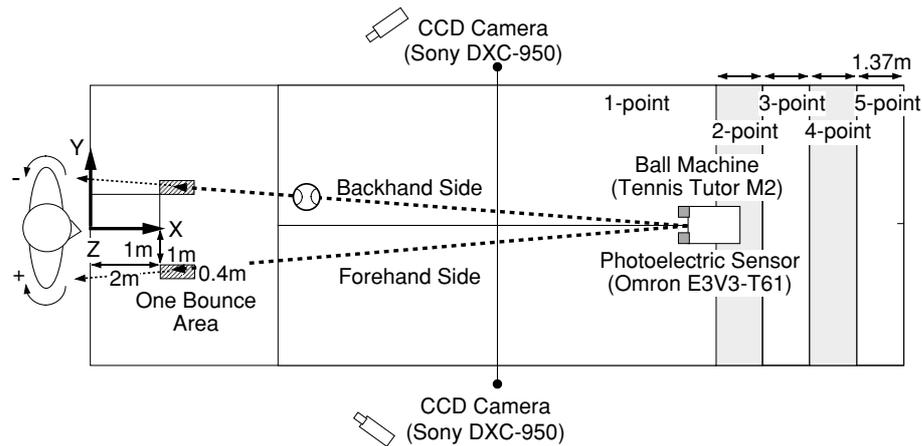


図 5.9: 実験状況の模式図

DLT 法による計測誤差は，12 点のコントロールポイントでの平均と標準偏差が，X 軸方向，Y 軸方向，Z 軸方向それぞれ， $1.4 \pm 4.2 \text{ mm}$ ， $0.2 \pm 3.0 \text{ mm}$ ， $2.8 \pm 4.5 \text{ mm}$ であった．ボールマシンのボール出口にはセンサ制御部 (Omron S3D2-CK) に接続した光電センサ (Omron E3V3-T61) を取りつけ，ボール発射時点を特定するために用いた．ボール発射時の信号によってタイムカウンタをリセットし，その時刻を打球動作と同時に写し込んだ．

手続き

被験者の肩関節と股関節には，分析の際に関節位置が明確になるようにマーカーを貼った．ボールは，1.67 s 間隔 (36 球/分) で発射した．被験者にはボールマシンから発射されるボールコースに合わせてフォアハンドかバックハンドのどちらかのストロークで打ち返すよう要求した．また，被験者にはパフォーマンスの得点方法を説明し，できるだけ高得点を獲得するように打つことを教示した．

十分なウォーミングアップと実際のボールの発射間隔と軌跡に慣れるための練習を行った後，各 35 試行の 6 ブロックを十分なブロック間の休息を取りながら行った．この練習および休憩時間は被験者の判断に任せた．第 1 ブロックはフォアハンド側への送球で，第 2 ブロックはバックハンド側への送球であった．これらの 2 つのブロックが周期入力条件に相当するものであった．その後の 4 ブロックの 140 試行が切り替え入力条件で，フォアハンド側への送球とバックハンド側への送球が同数になるようにした．ここで被験者ごと

に別々に 3 次の系列効果を考慮した。つまり、現在の入力を n とすると、一つ前の入力は $n - 1$ 、二つ前の入力は $n - 2$ と表され、 $(n - 2) \rightarrow (n - 1) \rightarrow (n)$ という系列が考えられる。ここでフォアハンド側を F、バックハンド側を B とすると、 $F_{(n-2)} \rightarrow F_{(n-1)} \rightarrow F_{(n)}$ (これを FFF と略す)、FFB、FBF、FBB、BBB、BBF、BFB、BFF と表わされ、この 8 種類の入力系列の数が同数になるようにした。被験者のパフォーマンスについては別のカメラで撮影し、それに基づきパフォーマンス得点を決定した。

データ分析

それぞれのカメラで撮影されたビデオテープから、両肩関節と両股関節の中心の 4 点の座標を 2 次元ビデオ動作解析装置 (OKK Motion Grabber) を用いて、1 秒間に 60 コマずつデジタル化した。デジタル化したデータをワークステーション (SUN SS5) に転送し、2 台のカメラのデータを同期させ 3 次元座標に再構成した。高周波成分は遮断周波数 3Hz の 2 次の Butterworth 型フィルタで平滑化し除去した。遮断周波数は元データと平滑後のデータの残差の平均平方に基づいて決定した (Jackson, 1979; Winter, 1990)。

肩の向きは、左肩から右肩を結ぶベクトルを X-Y 平面に投影したものと Y 軸と逆方向のベクトルの成す角度とし、ボールマシンの方向を 0 rad とし、時計回りを正、反時計回りを負とした。腰の向きについても同様にして求めた。一般に限られた変数についてしか測定は行うことができないので、ここでは全体の状態の一部として肩と腰の向きに注目した。その理由は以下のとおりである。手足の指先を極限として遠い距離にある部分を、相対的に身体遠位、そして体幹を極限にそれに近い部分を身体近位と呼ぶ (大道, 1993)。ここで肩と腰という身体近位を選んだのは、体幹の回旋動作がテニスのストローク動作において重要な要素であること、また体幹の動きの制御が四肢の制御の前提となり、望ましい運動協応には不可欠であるためである (Bernstein, 1996, p. 120)。さらに、近位動作のノイズはラケットや手などの遠位動作のノイズよりも映像分析の際に少ないためである。ここでは、運動によって生ずる揺らぎとノイズを弁別する必要があるため、測定誤差を極力減少し、測定の正確性を求めた。

入力については、1 周期をボール発射時点から次のボール発射時点までとし、これはボールマシンに取りつけられた光電センサによって測定した。

表 5.1: 条件ごとのパフォーマンスの平均得点と標準偏差

Subject	Periodic Input						Switching Input					
	Forehand		Backhand		Sum		Forehand		Backhand		Sum	
	<i>M</i>	<i>SD</i>	<i>M</i>	<i>SD</i>	<i>M</i>	<i>SD</i>	<i>M</i>	<i>SD</i>	<i>M</i>	<i>SD</i>	<i>M</i>	<i>SD</i>
1	2.1	1.65	2.5	1.50	2.3	1.58	2.6	1.56	2.9	1.66	2.7	1.61
2	2.3	1.60	2.7	0.93	2.5	1.32	2.4	1.37	2.9	1.29	2.7	1.35
3	2.7	1.62	2.5	1.34	2.6	1.48	2.3	1.89	2.8	1.90	2.6	1.90
4	2.3	1.74	2.4	1.94	2.3	1.83	2.3	1.75	2.4	1.80	2.4	1.77
5	1.9	1.70	2.0	1.60	1.9	1.64	2.2	1.75	2.1	1.92	2.2	1.83

5.3.3 結果

パフォーマンス

表 5.1 は、各実験条件におけるパフォーマンスの平均得点と標準偏差を示したものである。ストロークの種類と実験条件の 2 要因分散分析の結果、すべての被験者においてストロークの種類および実験条件の主効果は認められず、交互作用も有意ではなかった。切り替え入力条件におけるフォアハンドとバックハンドの平均得点は、被験者 1 から 5 の順に 2.7, 2.7, 2.6, 2.4, 2.2 であった。

周期入力条件

周期入力条件における被験者 4 の肩と腰の向きの変化について例示したのが図 5.10 の上段である。左上がフォアハンドの、右上がバックハンドの周期入力条件のもので、各ブロックの 10 s から 30 s までの 20 秒間を示してある。三角はフォアハンド入力の開始を示し、逆三角はバックハンド入力の開始を示す。また実線は肩の向きの変化を、点線は腰の向きの変化を示している。

図 5.10 の下段は、どちらかのストロークを連続して打った場合に、ボール発射時点から次のボール発射時点までを 1 周期として、横軸には肩の向き (x_1) をとり、縦軸には腰の向き (x_2) をとり表示したものである。円筒を 1 周する 1 本の軌道が、1 回のストロークの状態を表している。これは、超円筒状態空間 (以下円筒空間と略す) と呼ばれるもので、

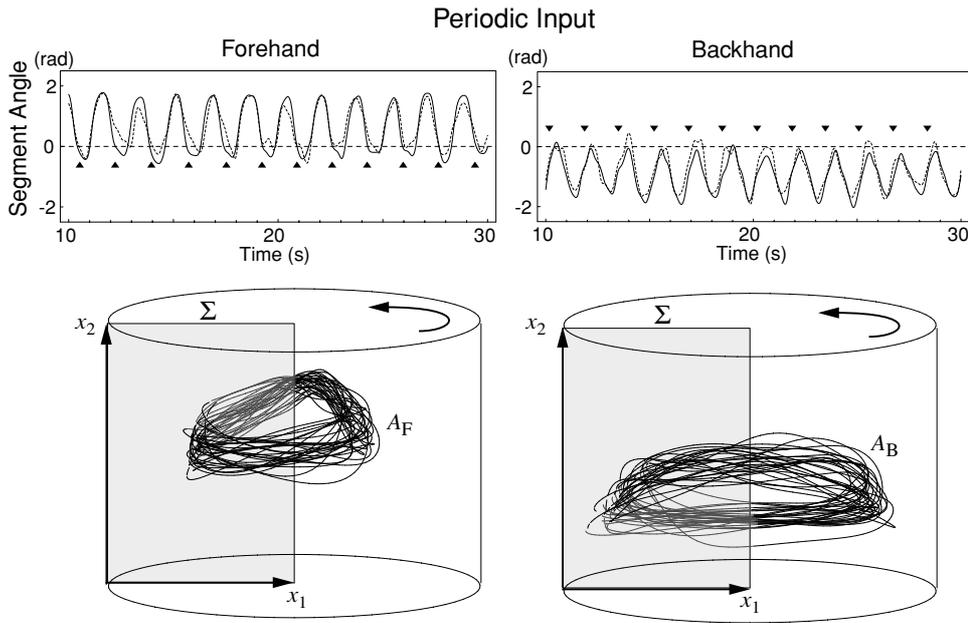


図 5.10: 周期入力条件における肩・腰の角度変化と円筒空間

従来の非平衡非線形力学における離散力学系の状態空間を連続力学系に拡張したものである (Gohara & Okuyama, 1999a) . ひとつかたまりの入力, ここではフォアハンドあるいはバックハンドへの送球に対応して, 限られた時間内に入力に対応して出力されている状態を示している. フォアハンドあるいはバックハンドそれぞれのボールに対応してほぼ一定の軌道 (A_F, A_B) を描いているのが分かる. これがその選手の基本パターン, 打ち方ということになる. つまり, 同じ動作を繰り返す場合にはほぼ同じ動きに引き込まれているのである. ここでは送球のコースに対応して励起されるアトラクタという意味で励起アトラクタと呼ばれている.

この点についてさらに詳細に観察するために, ボール発射時点から次のボール発射時点までを時間展開して示したのが図 5.11 である. 上段がフォアハンド入力に対応するもので, 下段がバックハンド入力に対応するものである. この図から状態空間の軌道がフォアハンドとバックハンドという入力によって明らかに異なることが理解できる.

さらに, 次のボール発射時点での肩と腰の向き (ポアンカレ断面) を全被験者について検討したのが図 5.14 の上段である. この図からも 2 つの入力に対応して肩と腰の向きという姿勢が明らかに異なることが確認できる. 被験者ごとに, 肩と腰の角度を 2 変数

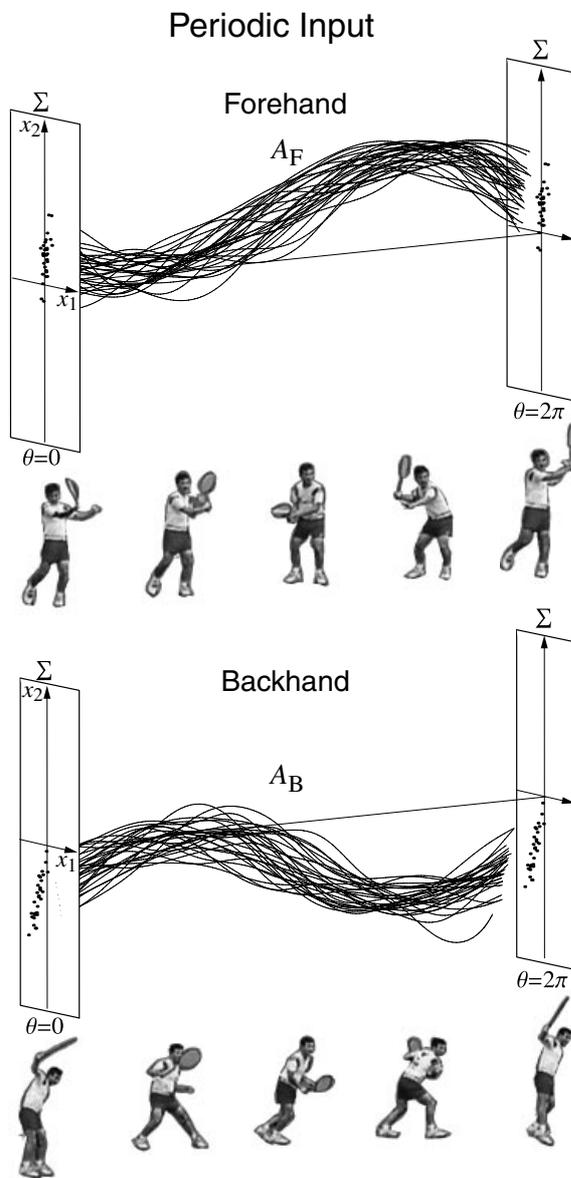


図 5.11: 周期入力条件における円筒空間の時間展開図

とする多変量平均値の等質性の検定のために，入力条件における一要因多変量分散分析 (multivariate analysis of variance : MANOVA) を行った結果，すべての被験者において次のボール発射時点でフォアハンドとバックハンドの有意な差が認められた．表 5.2 には周期入力条件における次のボール発射時点での肩と腰の 2 変数の平均と標準偏差，Wilks' Λ ， F 値を示した．Wilks' Λ は 2 変数以上の平均ベクトルの差を検定する統計量で，1 変数の平均値の差を検定する Student の t に相当するものである．

連続運動である周期入力条件におけるこれらの結果は，環境の連続性，すなわち時間的制約が厳しくなった場合でも，2 つの入力パターンに対して安定した運動を繰り返していることを示している．このことは円筒空間で表される 1 回ごとの軌道で表される運動の協応構造も，次のボール発射時点の姿勢についても同様である．

切り替え入力条件

複合運動である切り替え入力条件における被験者 4 の肩と腰の向きの変化について例示したのが図 5.12 の上段である．三角はフォアハンド入力の開始を示し，逆三角はバックハンド入力の開始を示す．また実線は肩の向きの変化を，点線は腰の向きの変化を示している．円筒空間における出力パターンを示したのが図 5.12 の中段である．さらに図 5.12 の下段には切り替え入力条件におけるフォアハンド入力とバックハンド入力をそれぞれ分けて示してある．これを見るとバックハンドからフォアハンドへ，あるいはフォアハンドからバックハンドへと切り替わっている軌道を見ることができる．ここで，被験者 4 を例として用いたのは，被験者 4 が次のボール発射時点で肩と腰の向きが最も広い分布を示したからであるが，次のボール発射時点の肩と腰の向きの分布の特徴は図 5.14, 5.16 に示すように被験者全員同じである．

ボール発射時点から次のボール発射時点までを時間展開したものが図 5.13 である．上段が全てをまとめたもの，中段がその中でフォアハンドだけを取り出したもの，下段がバックハンドだけを取り出したものである．これを見ると，同じフォアハンドへボールが送球された場合でもそれを打ち返すのに少なくとも 2 つの異なる軌道を描いていることが分かる．これはその前の送球がバックハンドかフォアハンドかという違いによるものである．すなわち，前の送球によって異なる動きでボールを打っていることになる．ボール発

表 5.2: 周期入力条件における次のボール発射時点の肩と腰の角度

	Forehand		Backhand		Λ	$F(2, 60)$
	M	SD	M	SD		
Subject 1						
Shoulder	0.065	0.233	-0.869	0.315	0.21	108.3***
Hip	0.340	0.324	-0.777	0.295		
Subject 2						
Shoulder	0.091	0.144	-1.238	0.186	0.05	540.1***
Hip	0.215	0.186	-1.362	0.240		
Subject 3						
Shoulder	0.221	0.265	-1.122	0.213	0.09	274.4***
Hip	0.474	0.383	-1.116	0.170		
Subject 4						
Shoulder	0.056	0.229	-1.148	0.374	0.18	122.6***
Hip	0.421	0.330	-0.908	0.350		
Subject 5						
Shoulder	0.109	0.232	-1.204	0.161	0.04	739.1***
Hip	0.512	0.204	-1.192	0.140		

Wilks' Λ と F 値以外の肩と腰の角度は全て rad で表わしてある。

*** $p < .001$.

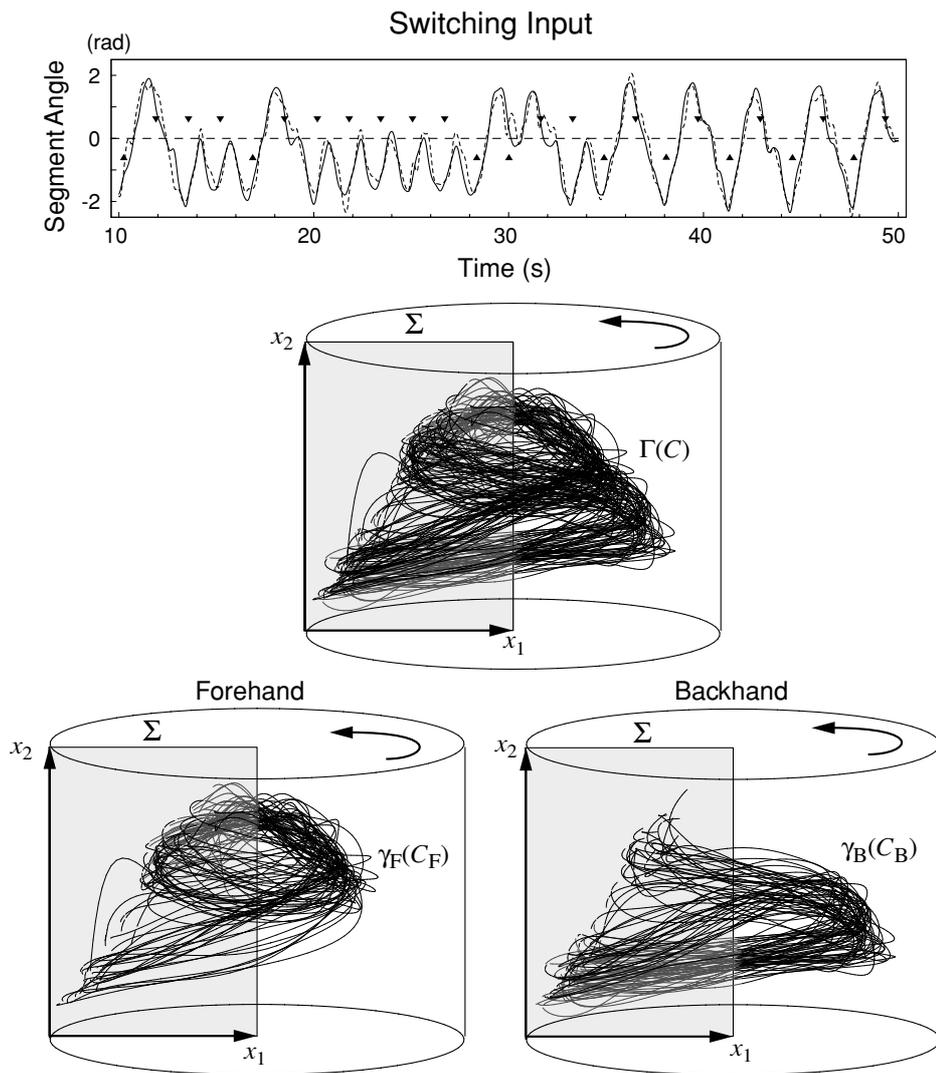


図 5.12: 切り替え入力条件における肩・腰の角度変化と円筒空間

射時点での状態は異なるが，図 5.10 で見たアトラクタに引き込まれるようにして，限られた時間内にその軌道に収束しようとしているのである．さらに，同じ送球を打ち返す場合よりもその軌道のばらつきが大きいことが分かる．

この軌道のばらつきを詳しく検討するために，打ち終って次のボール発射時点での状態を，5 名について示したのが図 5.14 の中段である．下段は，各被験者の平均と標準偏差をもとにして描いた等確率楕円である．

周期入力条件の結果である図 5.14 の上段と比べると，切り替え入力条件の場合の方が広がりをもって散らばっていることが分かる．そして今打ち終ったばかりの状態が，その前の送球の影響も受けて異なる状態になっていることが分かる．つまり，一つ前の送球と

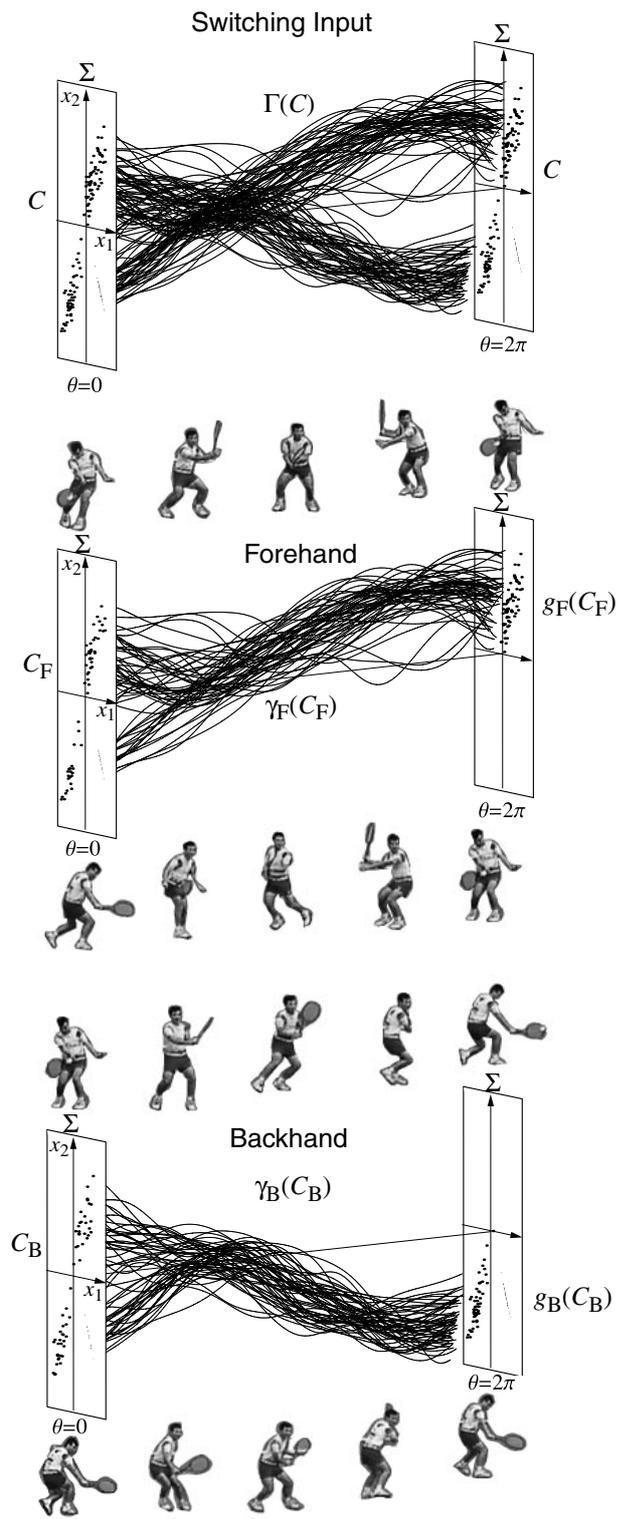


図 5.13: 切り替え入力条件における円筒空間の時間展開図

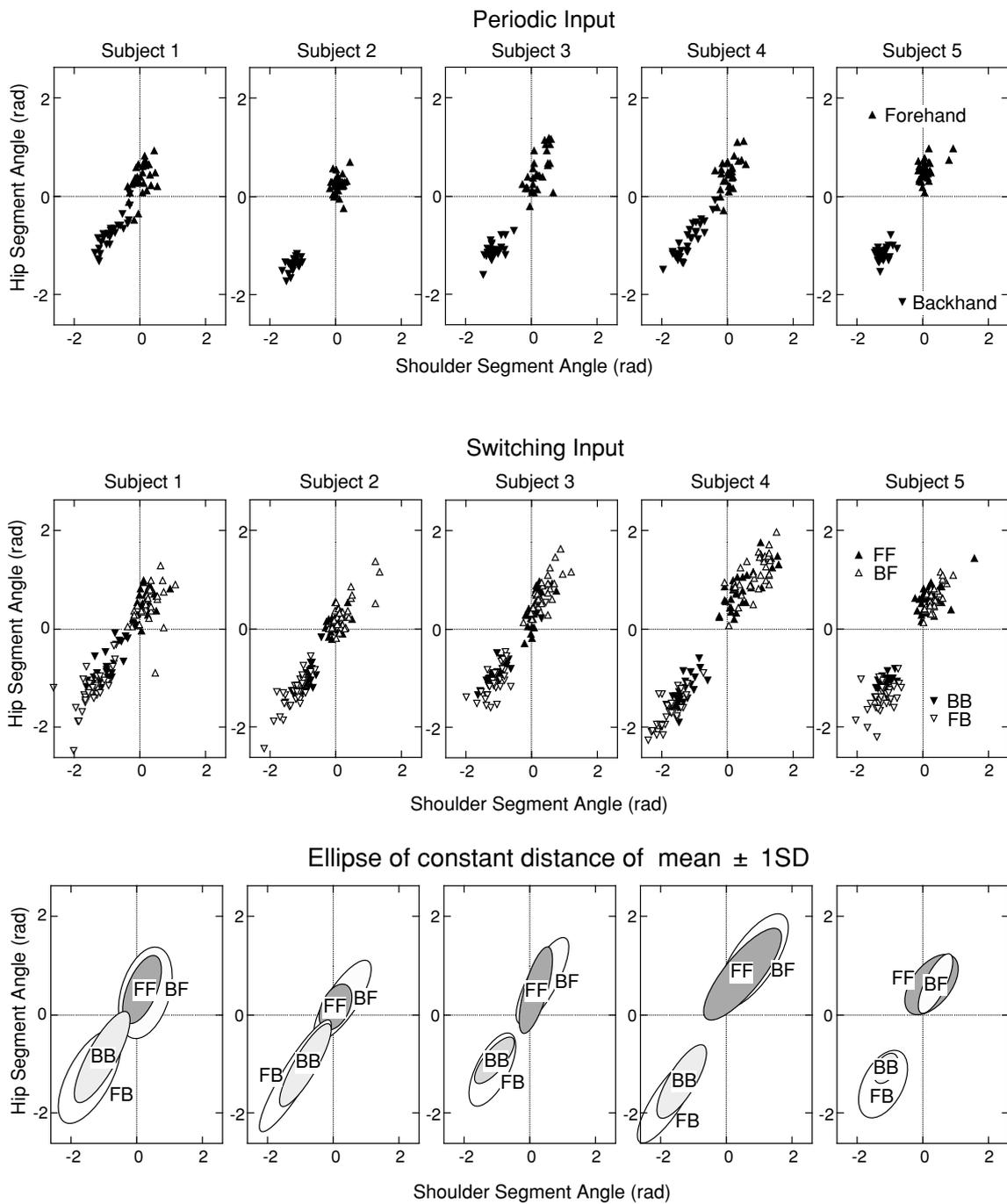


図 5.14: 各条件における次のボール発射時点での肩と腰の向き (ポアンカレ断面 Σ)

表 5.3: 切り替え入力条件における次のボール発射時点での肩と腰の角度 (フォアハンド)

Trial n	Forehand					
	Forehand		Backhand		Λ	$F(2, 60)$
	M	SD	M	SD		
Subject 1						
Shoulder	0.167	0.245	0.255	0.332	0.94	1.79
Hip	0.545	0.313	0.469	0.412		
Subject 2						
Shoulder	0.065	0.199	0.280	0.365	0.88	3.90*
Hip	0.139	0.191	0.288	0.345		
Subject 3						
Shoulder	0.159	0.210	0.383	0.331	0.85	4.99**
Hip	0.474	0.364	0.705	0.372		
Subject 4						
Shoulder	0.523	0.512	0.830	0.446	0.89	3.64*
Hip	0.837	0.397	1.090	0.409		
Subject 5						
Shoulder	0.243	0.341	0.383	0.209	0.93	2.21
Hip	0.607	0.260	0.631	0.258		

Wilks' Λ と F 値以外の肩と腰の角度は全て rad で表わしてある。

* $p < .05$. ** $p < .01$.

今の送球が同じ場合 (FF または BB) よりも , 一つ前の送球が今の送球と異なる場合 (BF または FB) の方が外側に分布している . この図では外側に分布するほど , 打ち終って次の送球が始まったときに肩や腰がボールに対して角度がある , すなわちボールに正対していないことを示す . つまり , 同じフォアハンド , あるいはバックハンドを打ち終わったあとの状態が同じではなく , その前の打球動作の影響を受けているということである .

表 5.3, 5.4 には , 入力の 2 次の系列効果について次のボール発射時点での肩と腰の角度の平均と標準偏差とフォアハンド入力とバックハンド入力のそれぞれについての Wilks' Λ , F 値を示した . 多変量平均値の等質性の検定のため一要因の MANOVA を行った結果 ,

表 5.4: 切り替え入力条件における次のボール発射時点での肩と腰の角度 (バックハンド)

Trial n	Backhand					
Trial n - 1	Forehand		Backhand		Λ	$F(2, 60)$
	M	SD	M	SD		
Subject 1						
Shoulder	-1.060	0.352	-1.453	0.404	0.76	9.10**
Hip	-0.885	0.420	-1.272	0.401		
Subject 2						
Shoulder	-0.905	0.221	-1.211	0.351	0.78	8.78**
Hip	-1.057	0.261	-1.298	0.370		
Subject 3						
Shoulder	-1.015	0.363	-1.227	0.556	0.85	4.98**
Hip	-0.886	0.288	-1.187	0.428		
Subject 4						
Shoulder	-1.380	0.308	-1.777	0.383	0.74	9.98**
Hip	-1.375	0.317	-1.720	0.359		
Subject 5						
Shoulder	-1.138	0.164	-1.207	0.323	0.66	15.58**
Hip	-1.104	0.124	-1.423	0.301		

Wilks' Λ と F 値以外の肩と腰の角度は全て rad で表わしてある .

** $p < .01$.

10 ケースの内 8 ケースまでが 2 次の有意な系列効果が見られた。これは、この分布がランダムな誤差によるものではなく、入力系列に依存して 4 つのクラスタ(集合)に分かれていることを示すものである。いいかえれば、送球されるボールに対応して懸命に遅れずに正確に返球しようとする動きがランダムにばらついているのではなく、送球の履歴を保って規則的に 4 種類にばらついているのである。

この点についてさらに詳細に検討を加えるために、被験者 4 の肩と腰の平均軌道を図 5.13 に対応させて描いたものが図 5.15 である。ここでもボール発射時点で 4 つのクラスタが観察できる。この 4 つのクラスタは前後 2 回のボール発射時点を結ぶことによって円筒空間では 8 つのクラスタの軌道ができることを示すものである。ボール発射時点の 4 つのクラスタの偏差とそのクラスタ間の軌道を被験者全員について模式的に表したものが図 5.16 である。

ここで、4 つのクラスタが同じ順序、すなわち図の上から BF, FF, BB, FB の順序に並んでいる特徴的な配置をみることができる。この配置はフラクタル(fractal)な集合である回転のあるカントール集合(Cantor set)の時間発展と一致する。フラクタルとは自己相似性(self-similarity)をもつ構造、すなわち図形の部分が全図形の縮小された像になっている構造のことである。カントール集合は最も単純なフラクタル図形の一つであるが、線分を 3 等分し、真中の 3 分の 1 を取り除き、残っている線分についてこの操作を繰り返すことによってできる図形である。図 5.17 に示したのが回転のあるカントール集合の時間発展である。2 つのアトラクタを基準にするだけで、あとは入力系列によって異なる状態に次々に遷移することを示したものである。例えば、最初の入力がフォアハンドなら、横軸(x_τ)の x_0 から出発して g_F に交わる場所に対応するのが次の状態を示す縦軸($x_{\tau+1}$)の x_1 となる。次の入力もフォアハンドならば、前の状態(x_1)に対応する場所を現在の状態(x_τ)として、そこから出発して g_F に交わる場所に対応するのが x_2 となる。バックハンドなら同じところから出発して g_B に交わる場所を見ていけばよい。これを繰り返すことによって、こういった階層構造ができるかが理解できる。この図右の左から 2 番目の配置(x_2)と実験結果(図 5.16)が一致している。

つまり、環境の連続性である時間的制約が厳しくなり、かつ環境の多様性があり、2 つの異なる打球動作(ここではフォアハンドとバックハンド)を繰り返し連続する場合に観

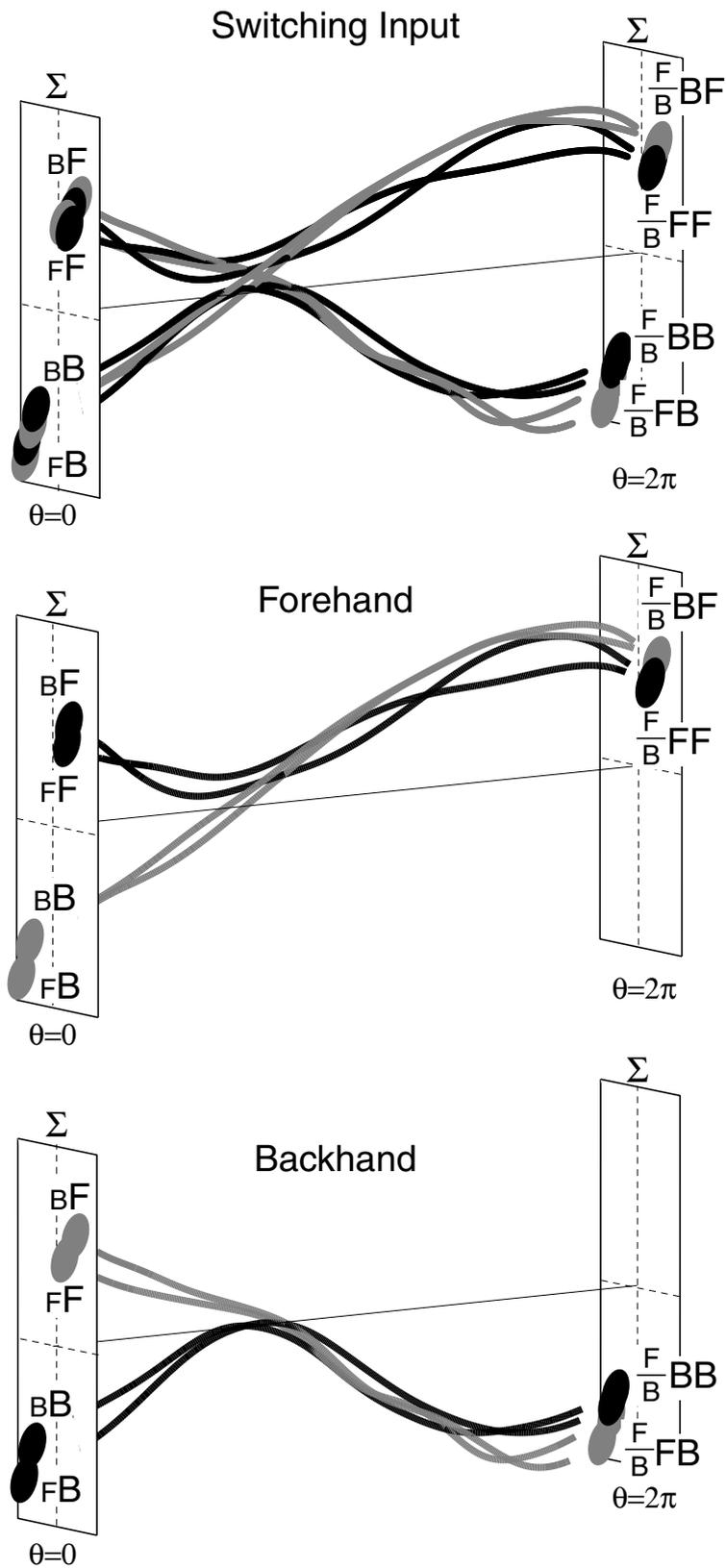


図 5.15: 2つの励起アトラクタ間の遷移の平均軌道

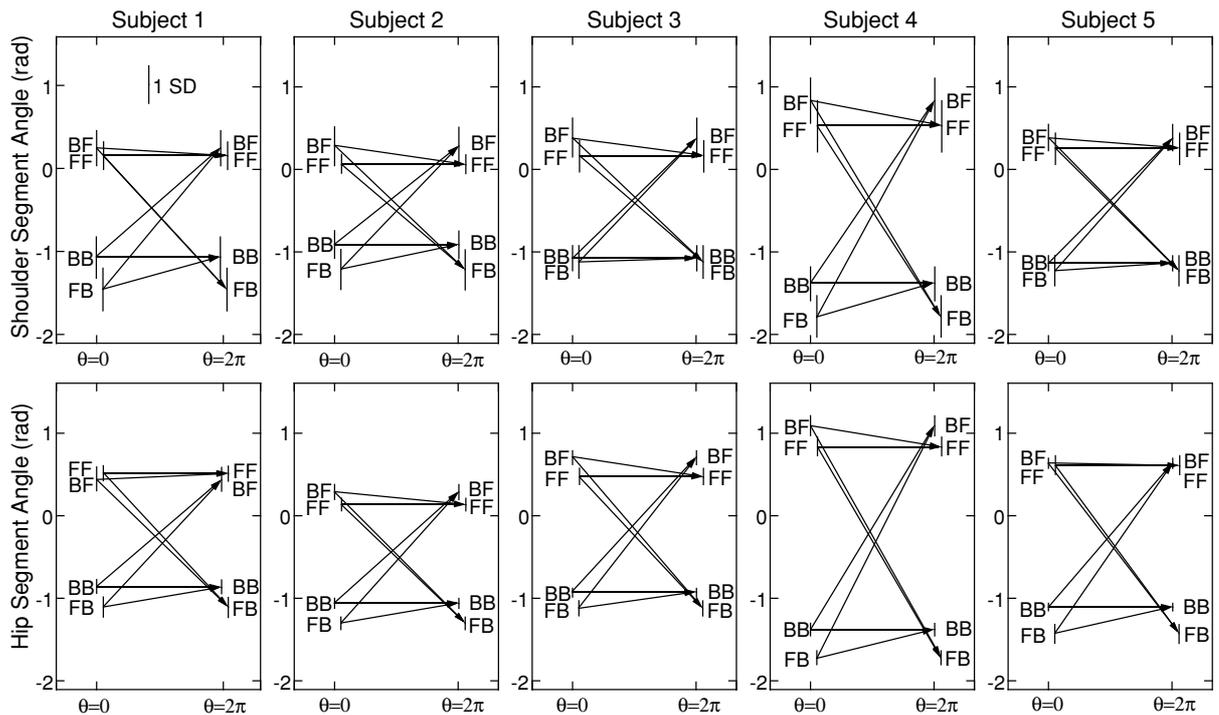


図 5.16: ボール発射時点での 4 つのクラスタを結ぶ 8 つの軌道

察された身体運動の複雑さは、ランダムな複雑さではなく、ここで見てきたような回転のあるカントール集合というフラクタルな構造を有する単純な規則と合致したのである。さらに、少なくとも 2 つ前までの環境からの入力履歴に基づいて、図 5.18 に示すような階層構造を成しているということである。

被験者が前のボールの送球コースを意識、あるいは意識的に記憶して、今のボールを打ち終えたときの姿勢を取ることは考えられない。しかしながら、フォアハンド フォアハンドと打ち終えたときの姿勢と、バックハンド フォアハンドと打ち終えたときの姿勢が、同じフォアハンドを打ち終わったにもかかわらず規則的に異なるということである。この現象は、通常の観察だけでは明らかにならず、まさに複雑に見える身体運動なのである。しかもその複雑さがランダムではなく、環境との相互作用の結果として簡単な規則から生じた動きであるといえる。ダイナミカルシステムモデルによって身体運動の複雑さを記述できたことは、環境の多様性と連続性によって身体運動が環境の一部となることによって、自然の力学法則が身体運動にも適用できることを示すものである。身体運動が環境と相互作用するということは、身体運動も環境の中に埋め込まれるといえる。

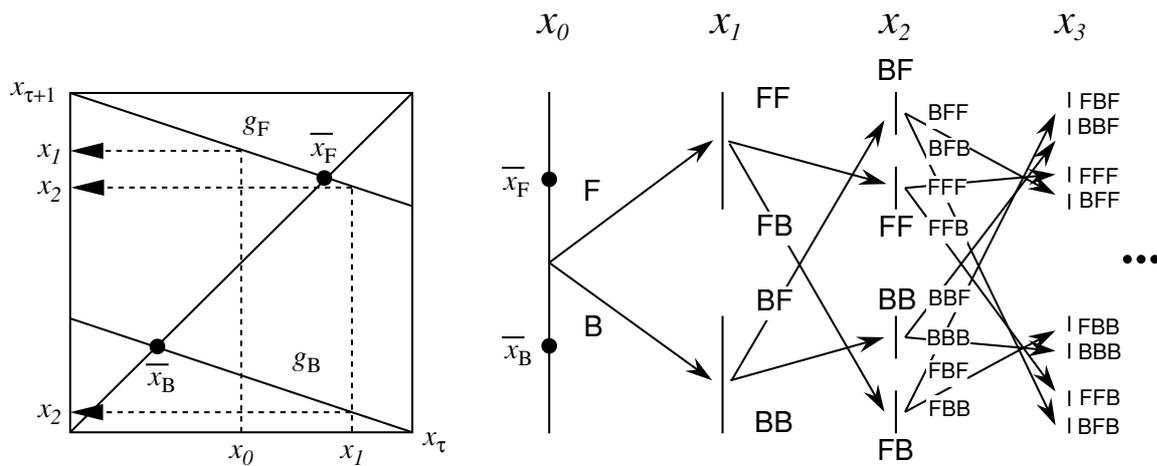


図 5.17: 回転のあるコントロール集合の時間発展．2つのアトラクタを基準に，入力系列によって異なる状態に遷移していく様子を表したもので，フラクタルな構造を持つ．これが今回のフォアハンドとバックハンドという2つの打球動作の複合運動のボール発射時点での姿勢のばらつきと一致する．

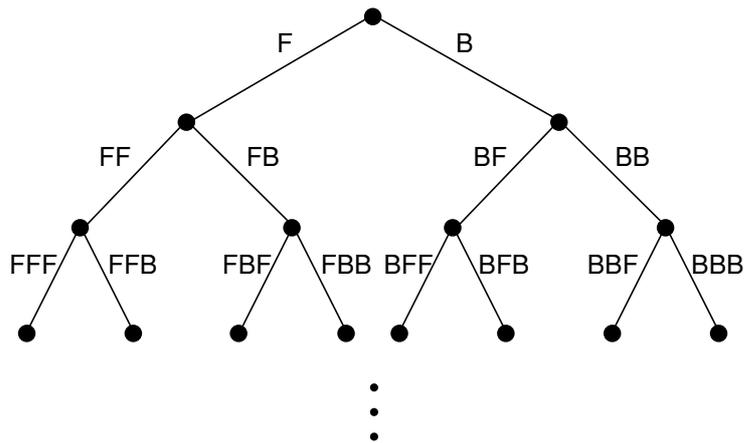


図 5.18: 軌道の樹状構造

5.3.4 考察

本節では、前節よりもさらに時間的制約が厳しい場合の連続運動と複合運動における運動制御について、どのような身体運動の複雑さが生ずるかを検討した。そのために前節の実験条件よりも時間的制約を厳しくすることと、多様性に3次の系列効果を組み込んだ。

その結果、連続運動としての周期入力条件においては、安定した運動の協応構造と局面構造がみられた。そして、複合運動としての切り替え入力条件においては、環境の多様性の入力系列が、運動の協応構造と局面構造に規則的なばらつきを生じさせることが明らかになった。身体運動が複雑に見えたとしても、それは身体というシステムが環境との相互作用によって規則的に振舞った結果表わされたものなのである。

しかも、この規則的なばらつきが、連続運動で見られた安定した運動に基づいていることは、身体運動の複雑さを考える上で重要なことである。つまり、安定した運動を基に、環境との相互作用があって新たな運動が生ずるからである。いいかえれば、複雑に見える動きを生成するためには安定した運動(パターン)が必要になってくるということである。

運動の局面構造から考えれば、今回のような時間的制約が厳しい環境の連続性に対応するには、終末局面と準備局面が融合した局面融合が生ずるといえる。したがって、離散運動では重要であった準備姿勢という運動の相が消失し、終末局面と準備局面の融合による中間局面と主要局面とに2分節化しているといえる。しかもこの局面融合が場当たりの融合の仕方ではなく、規則的な融合パターンが身体システムと環境との相互作用の中で作り出されているといえる。そして環境の多様性は2種類(フォアハンドとバックハンドへの送球)しかないが、運動パターンはその多様性の履歴(連続性)に依存して8種類生じたのである。したがって、複雑に見えるが巧みな運動を獲得するためにはこうした局面融合に着目し、身体システムと環境との相互作用の中で獲得することが可能ではないかと考えられる。

この方法は、Bernstein (1996) が巧みさの問題の中で扱っている、外部入力 of 急激な変化に対応する運動の問題を解決するための有効なアプローチになるものと考えられる。つまり、離散運動の場合には準備姿勢は一定で、毎回同じ状態から運動を開始する。これは正確な運動の遂行には確実な方法であるが、必ずしも効率的合理的ではない。外部入力の変化が急激で、時間的制約が厳しい場合には、毎回同じ準備姿勢をとる時間的余裕がな

く、2つの運動を連続して、すなわち終末局面と準備局面を融合して中間局面とすることによって、より効率的合理的でスムーズな運動の組み合わせが可能となる。その連続した動きが複雑に見え、巧みに見えるが、その連続の仕方、局面融合の仕方に単純な法則がみられたのである。したがって、逆にその法則を用いることによって局面融合が生じ、結果として巧みに見える動きが獲得されるものと考えられる。

5.4 まとめ

前章までの運動課題は、離散運動としての打球動作であった。つまり、初期条件（準備姿勢）を同一にすることが可能な状態から、一つの、あるいは多様な入力に、離散的に運動出力（1回のストローク動作やバッティング動作）を行うものであった。したがって、多様な入力に対する多様な出力も、初期動作は揺らぎがなく、動作開始後のみに揺らぎが見られた。しかしながらこうした離散運動は、連続運動に内包されると考えられる。さらに、4.2節の課題以外は同種の運動で、いわゆる同一運動類型 (Schmidt, 1991) に属する打球動作の中での多様な運動であった。したがって、本章では、環境の連続性と多様性を加味し、同一運動類型の運動を繰り返す連続運動と異なる運動類型に属する運動を連続する複合運動へと複雑さを増した場合の運動制御を、時間的に変化する外部入力を考慮した非線形ダイナミカルシステムモデルに基づき検討した。

その結果、環境の連続性と多様性を加味した場合の複合運動によって、複雑に見える運動の協応構造と局面構造が生ずることが明らかにされた。しかもこの複雑さは、同一運動類型内の運動を繰り返す連続運動による安定した運動の協応構造と局面構造を基礎に、環境との相互作用によって回転のあるコントロール集合というフラクタルな構造を持って規則的に生ずることが確認できた。これが複合運動における運動制御である。

また、環境の連続性によって生ずる局面構造は離散運動の場合の局面構造と異なり、準備姿勢の運動相が消失し、前の運動の終末局面と次の運動の準備局面が融合して中間局面となり、いわゆる3分節の運動から2分節の運動となった。これを模式的に表したのが図5.19である。次章では、連続・複合運動としての打球動作の運動制御の検討から得られたこの運動の局面構造の変化を手がかりに、打球動作獲得の具体的方略を検討する。

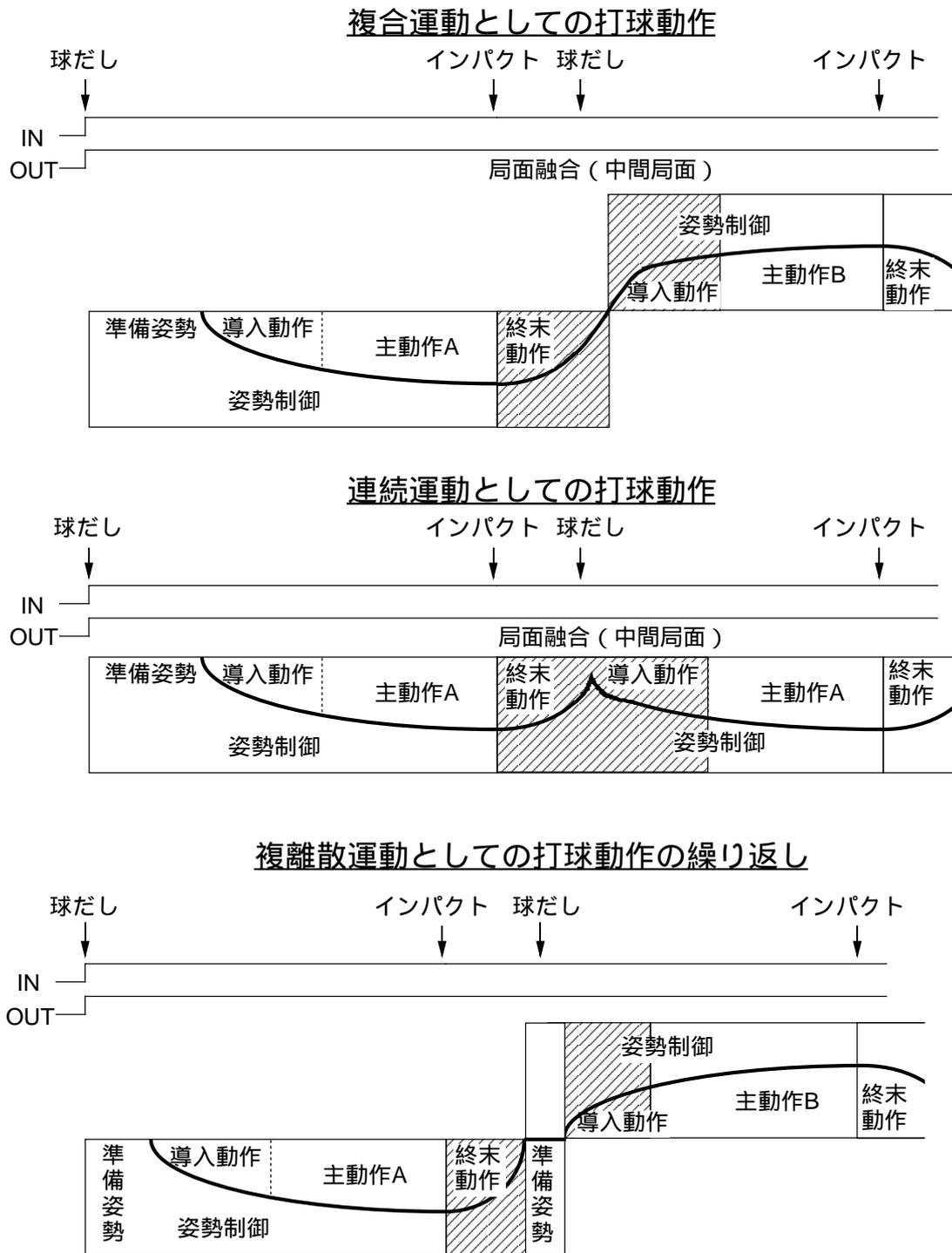


図 5.19: 連続・複合打球動作 (第 5 章) と複離散打球動作 (第 4 章) の運動制御の比較

第6章

打球動作の複合運動学習

6.1 はじめに

ここまで、身体運動の複雑さを検討するために、単離散運動、複離散運動と連続・複合運動としての打球動作の運動制御を検討してきた。その結果、同一運動類型内の運動を繰り返す連続運動では、安定した運動の協応構造と局面構造が見られた。さらに身体システムが環境の多様性と相互作用することによって、この安定した運動を基に、新たな運動が回転のあるカントール集合というフラクタルな構造を持って規則的に生ずることが確認できた。これが複雑に見える身体運動の構造である。

しかしながら、単離散運動の運動制御においては、運動の協応構造と局面構造から準備姿勢と準備局面の重要性が指摘された。実際、多くの指導場面では、学習者はこの単離散運動に分類されるような運動を行っている。しかしながら、連続運動になるとこの運動の協応構造と局面構造は一変する。特に準備姿勢の運動相は消失するのである。

そこで本章では、連続・複合運動としての打球動作の運動制御を検討することによって得られた、この運動の局面構造の変化を手がかりに、打球動作獲得の具体的方略を検討する。つまり、複合打球動作の運動制御理論に基づき、新たな複合運動学習を考える。そのためにまず、環境の連続性と多様性がパフォーマンスに及ぼす影響を検討し、打球動作獲得に向けての新たな練習方略を考え、そして最後にその練習方略に基づいて初心者における打球動作獲得の学習を検討する。

6.2 複合運動による練習効果の可能性

6.2.1 目的

第5章で見てきたとおり，複雑に見える打球動作は身体システムと環境との連続的な相互作用と多様性によって，新たな運動が規則的に生まれることが指摘できた．これは，実際に学習者が獲得し得る打球動作は，一定の型にはまった正確な動作ではなく，ある基本運動パターンとそれに基づいて環境からの入力によって創り出される新たな運動パターンであるということである．

本節では，第5章の結果を基にして，打球動作の獲得に向けて，新しい方法を探ろうとするものである．すなわち，従来の打球動作に関連する学習理論は1.4節で検討した，計算論的アプローチである運動プログラムを核とした運動制御理論に基づいている．そして運動指導との問題については1.5.3項で整理したが，計算論的アプローチに基づいて誤差のない正確な動作の獲得を目指していたといえる．Schmidt (1988, 1991) のスキーマ理論からは変動性練習仮説 (practice variability hypothesis) という方法が提示されているが，これは般化運動プログラムに基づく同一運動類型内の運動の学習を対象としたもので，異なる運動類型の運動には当てはまらない (Bortoli et al., 1992; French et al., 1990; Hebert et al., 1996) ．つまり，フォアハンドならばフォアハンドの練習にある変動を持たせることによって，フォアハンドという般化運動プログラム (generalized motor program) とスキーマの精緻化が図られるとするものである．

しかしながら，実際の運動場面では多くの異なる運動類型に属する運動を，環境からの要請にしたがい使い分けなければならない．これが，Bernstein (1996) のいう巧みさであり，実際に現場で必要とされる運動技能であると考えられる．Schmidt の言葉で表現するならば，異なる運動類型に属する多様な運動を連続的に切り替えること，すなわち異なる運動類型の複合こそが運動技能の獲得には重要であるといえる．

そこで本節では，5.2節と5.3節で実験条件として設定した周期入力条件と切り替え入力条件という環境の多様性がパフォーマンスに与える影響を検討する．このことによって，運動技能，特にテニスのストロークのような打球動作の獲得にあたって，どのような練習方法がより望ましいのかを考察する．この結果は既に報告された Yamamoto and Gohara

(2000b)に基づくものである。

6.2.2 方法

被験者・実験設定・測定条件 データは5.2節と5.3節で得られた結果を基に再分析した。したがって、被験者・実験設定・測定条件に関してはそれと同様である。

両実験での実験設定における違いは、入力間隔であった。5.2節の実験では28球/分の間隔で入力を与えたのに対し、5.3節の実験では36球/分の入力間隔であった。また、本節では練習方法を意図して、前節での周期入力条件を連続運動条件と呼び、切り替え入力条件を複合運動条件と呼ぶことにする。

ただし、被験者は3名で、5.3節の被験者5名のうち、5.2節にも参加した被験者3名について分析した。

データ分析 パフォーマンスについては、実験ごとに最高可能得点に対する実際の得点のパーセントとした。これは、二つの実験におけるパフォーマンスの評価方法が異なるためである。

また、それぞれの実験で得られた肩と腰の向きを2変数として、次のボール発射時点での状態(姿勢)を分析した。特に、フォアハンドとバックハンドのそれぞれの入力に対する肩と腰の角度の平均を求め、2つの異なる入力に対する姿勢の差異とパフォーマンスの関連を検討した。

6.2.3 結果および考察

図6.1は、両実験に参加した3名の被験者の各測定条件における次のボール発射時点での、肩と腰の角度を示したものである。1回の打球が終わって次の打球のためのボール発射時点での姿勢を表すものである。肩と腰の向きはボールマシンと正対した角度を 0 rad と定義しているため、図の中心から離れるほど肩や腰の向きがボールマシンとは正対していないこと、すなわち準備姿勢であるボールマシンとの正対姿勢に戻りきっていないことを示す。

この図から連続運動条件よりは複合運動条件の方が、また入力間隔が短い方が、原点からの距離が遠くばらつきも大きいことがわかる。これは、次のボール発射時点で、姿勢が離散運動における準備姿勢に戻っていないことを示すものである。いいかえれば、次の入力に対する準備が不十分であるといえる。

そこで、パフォーマンスとの関連を見るために示した図 6.2 は、各被験者のパフォーマンスとフォアハンドとバックハンドそれぞれの入力に対する条件ごとの肩と腰の角度の平均距離の差をプロットしたものである。ここで肩と腰の角度の平均距離の差が小さいことは、フォアハンドとバックハンドを打ち終えた後の姿勢が近いことを示し、逆に差が大きいことは、フォアハンドとバックハンドを打ち終えた後の姿勢が大きく異なることを表わす。この図から、入力間隔が長い方(・)がパフォーマンスが良いことがわかる。これは打球間隔が長い方が時間的余裕が生ずるためどちらの入力後にもほぼ同じ状態に戻ることができることを示している。すなわち、次の入力に対しての準備が整いやすい、離散運動における準備姿勢に近いと考えられる。逆に入力間隔が短い場合(・)には、平均距離の差が大きく、それぞれの入力によって異なる状態に戻っており、次の入力への準備が不十分であると考えられ、それがパフォーマンスに影響したものである。

ここで注目すべきは、どちらの入力周期においても連続運動条件(・)よりも複合運動条件(・)の方が3名の被験者ともパフォーマンスが高いことである。つまり、フォアハンドあるいはバックハンドを繰り返し打球するよりも、ランダムに切り替えながら打球したときの方がパフォーマンスが高くなっているということである。

これは直感的には同じ運動(打ち方)を繰り返す方が簡単であり、パフォーマンスも高くなることが期待されるが、実際には逆の結果である。このことについて以下で考察を加える。

まずここで観察しているのは、肩と腰の向き、すなわち体幹の回旋運動である。そして、図 6.2 の横軸は次のボール発射時点であり、時間軸は含まれていない。しかしながら、この図は離散力学系の状態空間から得られたものであり、時間軸を含む連続した運動の一部を取り出したものであることから、この図は体幹の回旋運動の一部を身体運動の振り舞いとして示しているのである。すなわち、図 6.1 において原点から広がっているということは、元の準備姿勢に戻ろうと体幹が回旋をしている途中の状態であるということである。

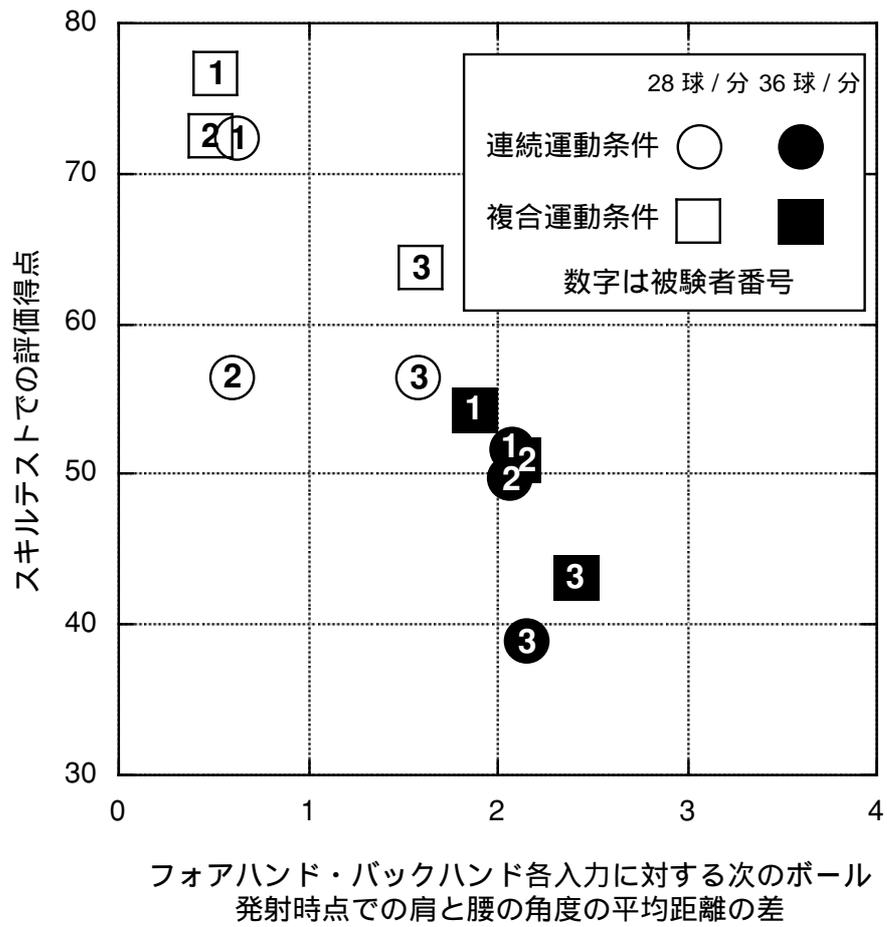


図 6.2: スキルテストの評価と 2 つの入力に対する肩と腰の角度の平均距離の差の散布図

したがって、パフォーマンスに影響を与えていると考えられるのは、体幹の角運動量、いかえれば回旋運動の慣性である。すなわち、フォアハンドの終末局面であるフォロースルーでは肩と腰は、ボールに対して正対よりも回旋しているのが普通である。しかし、図からはまだ正対の位置まで回旋していない場合もある。つまりまだその方向（反時計回り）に体幹は回旋しているのである。この回旋方向はバックハンドのバックスイングの動作方向と一致する。逆にバックハンドのフォロースルーの回旋方向（時計回り）はフォアハンドのバックスイングの回旋方向である。運動学的にいうならば、フォアハンドストロークの終末局面はバックハンドストロークの準備局面とその動作方向が一致するということである。

一方、同じフォアハンドを繰り返す場合には、終末局面から次の準備局面への移行は動作（回旋）方向の切り替えが必要になる。つまり反時計回りに回旋していた体幹を、時計回りの回旋に切り替えなければ準備局面にならない。そのためには、回旋運動の慣性を止め、新たに逆方向の回旋運動を起こさなければならないのである。このように回旋運動を伴う場合ではその回旋方向を連続する方が回旋の運動量を利用した自然な運動であると考えられる点である。したがって、連続運動条件の方がより簡単な条件設定であるように見えるにも拘わらず、複合運動条件の方がパフォーマンスが高くなったものと考えられる。

これは初心者がバックスイングでの肩の回旋が少なかったり、バックスイングのタイミングが遅れることを考え合わせる（3.2節）と、静止状態から新たに回旋を始める、あるいは運動の終末局面（フォロースルー）の回旋方向を切り替えるよりは、既にある回旋運動の慣性を利用するほうがはるかに楽に回旋できるのである。これは身体に働く物理則を利用することであり、まさに Bernstein (1967) が筋力以外の力の有効利用が協応構造獲得には重要であると指摘したことである。

従来の運動プログラムに基づく運動制御理論では、同一運動類型内の運動の繰り返しが運動プログラムの精緻化につながり、運動プログラムが獲得されると考えられてきた。確かに同一運動類型内の運動しがなく、離散運動の場合には離散運動の繰り返しでも良いかもしれないが、実際の運動では単一の離散運動だけで成り立っている身体運動の方が特殊であろう。したがって、異なる運動類型を持つ運動技能の獲得に関しては、運動類型間の切り替えが運動技能の獲得には重要であることが示唆された。しかも協応構造の獲得に回

旋運動の慣性などの身体に働く物理則が利用できることを強く示唆している。実際の様々な環境からの要請にしたいが、それに適した運動を行わなければならない状況を考えれば、終末局面と準備局面を融合させるような複合運動を入れた練習方法が運動技能の獲得には有効であると思われる。

6.3 複合打球動作がパフォーマンスに及ぼす影響

6.3.1 目的

運動指導場面においては、主動作の直前に主動作と逆方向に関節が回旋運動することによって、筋の弾性エネルギーを利用する反動動作が強調されてきた。しかしこれは離散運動として、準備姿勢から主要局面に入るのではなく、その間に準備局面を設け、その導入動作としての反動動作の意義を指摘するものである。しかしながら、前節(6.2節)で示唆されたのは、異なる運動タイプの終末局面と次の運動の準備局面との融合が運動技能の獲得に有効と考えられることである。すなわち終末動作が反動動作としてではなく、導入動作そのものとなりうるということが重要な指摘であった。

これは、2つの異なる運動類型に属する打球動作の終末局面と準備局面が、身体に働く物理則に従うように局面融合する条件を整えることによって、パフォーマンスの向上が期待できることを示唆する。こうした2つの異なる運動類型に属する打球動作が連続することによって生ずる、終末局面と準備局面の融合した複合運動である打球動作をここでは複合打球動作と呼ぶ。この複合打球動作が単一の運動類型内の打球動作の繰り返しに比べて、パフォーマンスにどのような影響を及ぼすかを検討することが本節での目的である。本節では、体幹の回旋運動の慣性を利用したフォアハンドとバックハンドのグランドストロークにおける複合打球動作を検討する。これは、前節で示唆された身体に働く物理則に従う局面融合を利用した複合打球動作の学習方略検討のための、パフォーマンスにおける確認である。

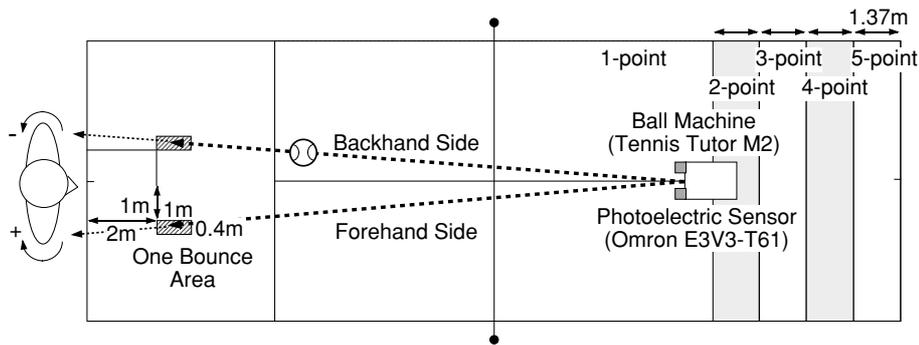


図 6.3: 実験状況の模式図

6.3.2 方法

被験者

N大学のスポーツ実技・テニスの授業を1学期間(半年, 90分の授業を13回)受講した男子学生37名を被験者とした。

実験設定

実験状況は図6.3に示すように5.3節と同じで, パフォーマンスの得点方法も同じである。ただし, 3次元動作分析は行わないためカメラの配置はない。ボールの発射間隔(入力間隔)は, 1.88 s (32球/分)であった。

実験条件は連続運動条件と複合運動条件の2条件とした。連続運動条件では, フォアハンドあるいはバックハンドでのグランドストロークという同一運動類型内の打球動作を繰り返すことを求め, 複合運動条件では, フォアハンドとバックハンドという異なる運動類型に属する打球動作を交互に繰り返すことを求めた。したがって, 連続運動条件では, 終末局面から次の準備局面への移行には体幹の回旋方向の切り替えが必要であるが, 複合運動条件では, 終末局面と次の準備局面の体幹の回旋方向は一致しており, 回旋運動の慣性を利用することが可能となる。第5章の複合運動においてはランダムあるいは3次の系列を持つ多様性であったが, ここでは必ず交互にフォアハンドとバックハンドという2つの異なる運動類型に属する打球動作を繰り返すようにした。

表 6.1: 条件ごとのパフォーマンスの平均得点と標準偏差

Condition	Continuous		Complex		<i>t</i>
	<i>M</i>	<i>SD</i>	<i>M</i>	<i>SD</i>	
Forehand	29.6	9.80	33.6	8.55	-2.077*
Backhand	30.4	10.37	30.9	10.38	-0.288

* $p < .05$

手続き

被験者には、ボールマシンから発射されるボールコースに合わせてフォアハンドかバックハンドのどちらかのストロークで打ち返すよう教示した。また、被験者にはパフォーマンスの得点方法を説明し、できるだけ高得点を獲得するように打つことを求めた。

十分なウォーミングアップと実際のボールの発射間隔と軌跡に慣れるための練習を行った後、20 試行の 2 ブロックと 40 試行の 1 ブロックの計 3 ブロックを十分なブロック間の休息を取りながら行った。この練習および休憩時間は被験者の判断に任せた。第 1 ブロックはフォアハンド側への連続送球で、第 2 ブロックはバックハンド側への連続送球であった。これらの 2 つのブロックが連続運動条件に相当するものであった。最後の 1 ブロックが複合運動条件で、フォアハンドとバックハンドに交互に送球した。被験者のパフォーマンスについてはカメラで撮影し、それに基づきパフォーマンス得点を決めた。

6.3.3 結果

条件ごとのフォアハンドとバックハンドのパフォーマンスの平均と標準偏差を示したのが表 6.1 である。また、全被験者の連続運動条件のパフォーマンスと複合運動条件のパフォーマンスの関係を、フォアハンドとバックハンドとに分けて示したのが図 6.4 である。横軸が連続運動条件のパフォーマンスで、縦軸が複合運動条件でのパフォーマンスである。図中の斜線よりも左上に位置するのは、複合運動条件の方がパフォーマンスが良いことを示し、逆に右下に位置する場合は連続運動条件の方がすぐれていることを示す。

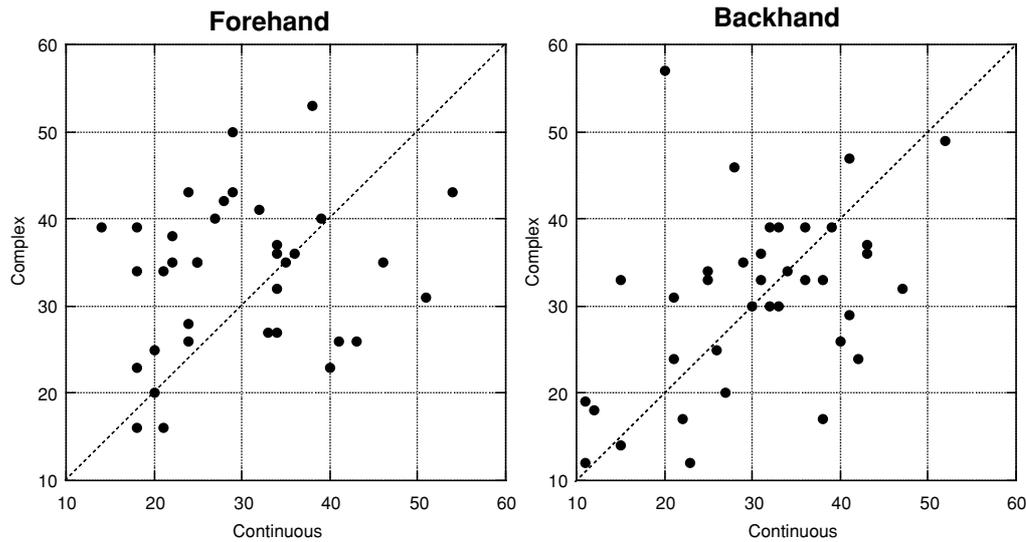


図 6.4: 連続運動条件と複合運動条件とのパフォーマンスの比較

対応のある t 検定の結果，フォアハンドにおいては複合運動条件のパフォーマンスの方が有意に高かった ($t(36) = -2.077, p < .05$) . バックハンドにおいては両条件間に有意な違いは見られなかった ($t(36) = -0.288, n.s.$) . これは，複合運動条件が少なくともパフォーマンスの低下を導くことはなく，逆にフォアハンドの場合にはパフォーマンスが向上していたことを示す .

6.3.4 考察

2つの異なる運動類型に属する打球動作が連続することによって生ずる終末局面と準備局面の融合した複合打球動作と，単一の運動類型に属する打球動作の繰り返しがパフォーマンスに及ぼす影響を検討した結果，複合打球動作でもパフォーマンスの低下は認められず，逆にフォアハンドにおいてはパフォーマンスの有意な向上が認められた . これは，従来多くの運動技能学習において単一の運動類型内の動作を反復練習することによってその技能獲得の効率を上げようとしてきたことに対して，必ずしもその方法が正しかったとはいえないという問題提起ができる結果といえよう .

つまり，運動プログラムを前提としたスキーマ理論から導き出された同一運動類型内の変動性練習仮説 (practice variability hypothesis) とは明らかに異なる文脈で，姿勢制御も

含めた複数の異なる全身協応運動の獲得には、ダイナミックな身体の使い方が鍵になると考えられる。すなわち、運動によって生ずるエネルギーを、次の運動へ有効利用することが可能であり、こうした動きが「流れるような」動きを作り出しているといえよう。

例えば、手だけの狭い空間内の運動であれば、その質量と速度が小さいために運動方向の切り替えによる運動エネルギーの損失は小さい。いいかえれば、運動の効率をさほど考えなくても異なる運動類型の運動に切り替えることができる。しかしながら、走っている場合に運動方向を逆方向へ切り替えるには非常に大きなエネルギーが必要となる。これは走ることによって得られる運動エネルギーが大きいためである。今回の運動課題である打球動作でも、体幹の回旋という大きな運動エネルギーを生ずる運動であるがために、次の運動へ移行するときに運動方向を全く逆方向へ切り替えることは効率が良くない。これが本実験での連続運動条件に相当する。逆に複合運動条件では、前の運動によって生ずる体幹の回旋による運動エネルギーを、そのまま次の運動に利用することができたものと考えられる。

また、終末局面と準備局面の局面融合は、運動の先取りとも関連し、熟練者の自動化された運動技能の特徴であるとされてきた。松永ら(松永・笠井・多和・鯛谷・小野・塚越, 1966; 松永・笠井・多和・江田・鯛谷・小野・太田・池田・梶野, 1967; 松永・笠井・多和・江田・鯛谷・太田・柳原・池田・小野・大北, 1968)や調枝(1972)は、捕球動作から投球動作へという局面融合について実験的に研究している。しかしながら、ここでの局面融合は、より大きな構造を持つ行為の一部、すなわち捕球動作は早く的に当てるための投球動作の導入動作として扱われている。いいかえれば、ボールを捕球して投げるという二つの異なる運動の意味が、ボールをパスするというより大きな一つの意味を持つための局面融合である。したがって、技能の階層性ではより高次の技能であり、熟練することは意味を持つまとまりが大きくなることであると捉えられてきた。一方、本研究で主張する局面融合は、連続するそれぞれの運動はそれぞれが意味を持ち、融合して一つの意味を持つものではなく、どちらかが導入動作になるというものではない。

身体に働く物理則を利用し局面融合が生ずることにより、それぞれの運動が効率的合理的な身体の動きになるというのがここでの指摘である。したがって、初心者や初級者が2つの異なる運動類型に属する打球動作を学習する場合に、こうした物理則を利用した運動

の局面融合を強調した学習方法が，それぞれの運動において効率的合理的な身体の動きを獲得するのに有効であると考えられる．そこで次節ではこの点について検討する．

6.4 複合運動学習の検討

6.4.1 目的

前節までのところで，中級者においては単一の運動を繰り返す連続運動条件よりも2つの異なる運動を連続する複合運動条件の方がパフォーマンスが高いことが(6.2節)，またこのことは初級者においても同様であることが示された(6.3節)．そしてこれらの結果は，前の打球動作の終末局面と次の打球動作の準備局面の運動方向の一致によって，運動の局面融合が生じ，体幹の回旋エネルギーの有効利用の結果であると推察された．したがって，初心者が異なる運動類型に属する複数の打球動作を学習する際にも，この運動の局面融合を利用した複合運動条件での学習が有効であると考えられる．そこで，本節ではこうした運動の局面融合を積極的に利用する複合運動条件による学習方法と，従来から行われてきている同一運動類型内の連続運動条件による学習方法を初心者にも適用することによって，複合運動学習の有効性を検討する．

初心者の打球動作は体幹の回旋範囲が小さく，Wickstrom (1975) がサイドアームの打球動作の発達段階として示した3つの段階のうち，上肢が主として使われる上肢優位性 (arm domination) を示す最初の段階とも一致することは既に3.2節で見てきたとおりである．しかもその体幹の回旋動作の獲得が困難であることも指摘されている(山本・竹之内, 1996)．しかしながら，これはここでいう連続運動条件による学習方法によるものであって，一つの運動プログラムの反復練習による精緻化という従来の運動制御理論に基づいており，複合運動条件による学習効果の検討は全くなされていない．これまでの本論文での実験結果からは，複合運動条件による学習方法では，体幹の回旋エネルギーを有効に利用することによって，運動の局面融合が生じ，体幹の回旋範囲の増加というより望ましい動作の獲得が期待される．つまり，複合運動条件下での学習は，複合運動条件下での保持においてはもとより，連続運動条件下での保持においても望ましい動作が発揮されることが考えられる．これは，計算論的アプローチに基づく同一運動類型内の運動の反復練習による運

動プログラムの精緻化とは異なり，ダイナミカルシステムアプローチに基づく環境の連続性と多様性に対応する学習方法の提案である．

6.4.2 方法

被験者

これまでにテニス経験のない大学生女子 5 名を被験者とした．ただし，高校時に体育の選択授業としてテニスを受講したものが 3 名（被験者 1, 2, 4），バドミントンの運動部経験者が 2 名（被験者 1, 5）含まれていた．そのためこれらの経験を考慮し，複合運動条件 3 名（被験者 1, 2, 3）と連続運動条件 2 名（被験者 4, 5）に振り分けた．

学習条件と手続き

テニスのグランドストロークの学習方法として，連続運動条件と複合運動条件の 2 群を設けた．連続運動条件 (continuous training group) は，従来の初心者の学習過程で用いられている，フォアハンドあるいはバックハンドストロークを繰り返す連続運動を行うものである．また，複合運動条件 (complex training group) はフォアハンドとバックハンドストロークを交互に繰り返す複合運動を行うものである．連続運動条件では，同一の運動類型に属する打球動作の反復練習で，終末局面と次の準備局面は異なる運動方向である．一方，複合運動条件は，異なる運動類型に属する打球動作の連続で，終末局面と次の準備局面の運動方向は同一で，体幹の回旋エネルギーを有効に利用した局面融合が起こりやすい環境を与える．

具体的な学習方法は表 6.2 に示すとおりである．5 日間連続して，被験者ごとに約 1 時間ずつテニスコートで学習を行わせた．1 日目（初日）と 5 日目（最終日）にボールマシンから発射されるボールによるフォアハンドとバックハンドストロークそれぞれの連続運動条件下でビデオによる撮影を行い，それぞれを事前テスト，事後テストとして動作分析を行い，学習効果を検討した．

1 日目の学習方法と内容は両群とも同じであった．その後 2 日目から 5 日目までの学習方法を操作した．両群とも動作に関する言語的指示はなく，学習方法のみが異なった．両

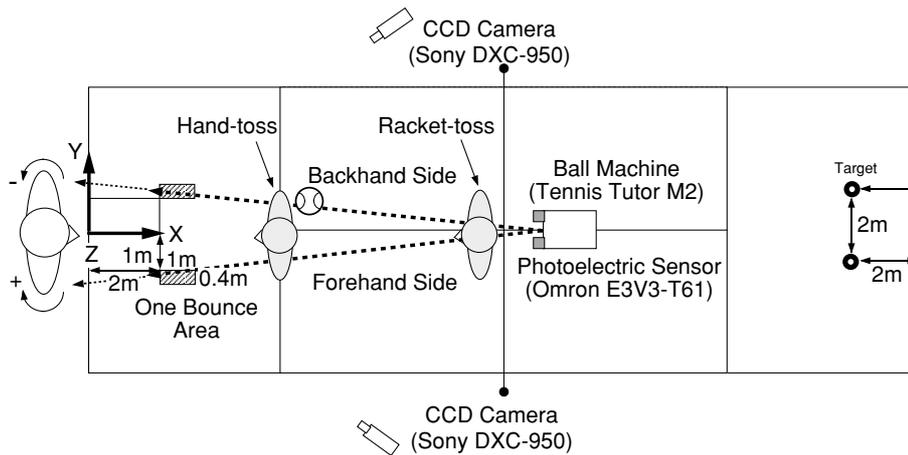


図 6.5: 実験条件および撮影状況

群の被験者の毎日の打球数は同じになるように設定し，1日目が180球，2日目が300球，3日目と4日目が400球，5日目が240球の合計1520球（フォアハンド・バックハンドそれぞれ760球ずつ）であった．両条件の手投げトスは，被験者の立っているコートのサーブライン上から，1分間に約45球から約50球の間隔で出し，ラケットトスは同じく被験者が立っているコートのネット際から，1分間に約32球から約38球の間隔で出した．これは被験者の動きに合わせて，打てる範囲内でできるだけ短い間隔でボールを出すようにしたため，必ずしも全ての被験者に毎回同じ時間間隔でボールを出したわけではない．また手投げトスの平均速度は約4 m/sで，ラケットトスの平均速度は約7 m/sであった．

なお，実験終了後の翌週に各被験者に対してフォローアップのための指導を，言語的指示も加えて1時間ずつ行った．

動作分析の手続き

撮影状況は図6.5に示すように設定した．ボールマシン (Tennis Tutor M2) を回転台の上に乗せ，平均速度7 m/sで，2.14 s 間隔（28 球/分）で発射した．ボールマシンの向きはセンターマークの両横1 m，ベースラインの内側2 mに接する長さ1 m，幅0.4 mの区域の，フォアハンド側もしくはバックハンド側にワンバウンドするように変えた．また，被験者は初心者であることから，パフォーマンスの測定は行わなかったが，相手コートのセンターマークの両横1 m，ベースラインの内側2 mにカラーコーンを立て目標とした．

表 6.2: 連続運動条件と複合運動条件の学習内容と方法

練習日	連続運動条件	複合運動条件
1 日目	<ul style="list-style-type: none"> ● グリップ説明・ボールつき上下 ● 実験者とショートストロークフォアハンド バックハンド交互に 50 球 ● ボールマシンからフォアハンド連続 20 球 とバックハンド連続 20 球 × 2 セット ● ボールマシンからのフォアハンド連続 20 球とバックハンド連続 20 球(撮影) ● 手投げトスからフォアハンドとバックハン ド複合 50 球 	同 左
2 日目	<ul style="list-style-type: none"> ● 手投げトスからフォアハンド連続 25 球と バックハンド連続 25 球 × 4 セット(200 球) ● ラケットトスからフォアハンド連続 25 球と バックハンド連続 25 球 × 2 セット(100 球) 	<ul style="list-style-type: none"> ● 手投げトスからフォアハンドとバックハン ド複合 20 球 × 10 セット(200 球) ● ラケットトスからフォアハンドとバックハ ンド複合 20 球 × 5 セット(100 球)
3 日目	<ul style="list-style-type: none"> ● 手投げトスからフォアハンド連続 25 球と バックハンド連続 25 球 × 4 セット(200 球) ● ラケットトスからフォアハンド連続 25 球と バックハンド連続 25 球 × 4 セット(200 球) 	<ul style="list-style-type: none"> ● 手投げトスからフォアハンドとバックハン ド複合 20 球 × 10 セット(200 球) ● ラケットトスからフォアハンドとバックハ ンド複合 20 球 × 10 セット(200 球)
4 日目	3 日目と同じ	3 日目と同じ
5 日目	<ul style="list-style-type: none"> ● 手投げトスからフォアハンド連続 25 球と バックハンド連続 25 球 × 2 セット(100 球) ● ラケットトスからフォアハンド連続 25 球と バックハンド連続 25 球 × 2 セット(100 球) ● ボールマシンからのフォアハンド連続 20 球とバックハンド連続 20 球(撮影) 	<ul style="list-style-type: none"> ● 手投げトスからフォアハンドとバックハン ド複合 20 球 × 5 セット(100 球) ● ラケットトスからフォアハンドとバックハ ンド複合 20 球 × 10 セット(100 球) ● ボールマシンからのフォアハンド連続 20 球とバックハンド連続 20 球(撮影)

実験状況は複数のカメラで撮影した2次元映像から3次元座標に変換するDLT法 (Adbel-Aziz & Karara, 1971; 池上, 1983) によって記録した。2台のカメラを同期させ、ボールマシンのボール出口に取りつけた光電スイッチ (Omron E3V3-T61) によってタイムカウンターをリセットしながら、60 Hz で打球動作を映し込んだ。これはボール発射時点を特定するためのものであった。動作速度の速い部分の画像を鮮明にするために1/250 sのシャッター速度を用いた。3次元座標は、Z軸を鉛直方向に、X軸を打球方向でサイドラインと平行に、Y軸は他の2軸と直交しコートの外側に向くように設定した。DLT法による計測誤差は、事前テスト時の16点のコントロールポイントでの平均と標準偏差が、X軸方向、Y軸方向、Z軸方向それぞれ、 $-1.4 \pm 6.6 \text{ cm}$ 、 $-1.1 \pm 2.6 \text{ cm}$ 、 $-0.3 \pm 4.8 \text{ cm}$ であった。また、事後テスト時の10点のコントロールポイントでの平均と標準偏差が、X軸方向、Y軸方向、Z軸方向それぞれ、 $-0.1 \pm 0.8 \text{ cm}$ 、 $-0.1 \pm 0.2 \text{ cm}$ 、 $-1.3 \pm 1.3 \text{ cm}$ であった。

データ分析

それぞれのカメラで撮影されたビデオテープから、事前テストについてはフォアハンド・バックハンドとも20試行の中で連続している10試行分について、また事後テストについては3試行目から15試行分について、両肩関節と両股関節の中心の4点の座標を二次元ビデオ動作解析装置 (OKK Motion Grabber) を用いて、1秒間に60コマずつデジタル化した。事前テスト時の分析を10試行分としたのは、撮影状況により両肩関節と両腰関節の全てが撮影された連続試行が5名の被験者を通して、10試行分ずつしかなかったためである。デジタル化したデータはDLT法により3次元座標に変換した後、遮断周波数3 Hzの2次のButterworth型フィルタで平滑化し、肩と腰の向きを求めた。肩と腰の向きは、左肩から右肩、左腰から右腰を結ぶベクトルをX-Y平面に投影したものとY軸と逆方向のベクトルの成す角度とし、Y軸と逆方向を0 radとし、時計回りを正、反時計回りを負とし、それぞれ肩、腰の向きとして分析した。

表 6.3: 事前, 事後テストにおける肩と腰の回旋最小角度, 回旋最大角度とその範囲

		Forehand Shoulder								
		pre-test			post-test					
		Min.	Max.	Range	Min.	Max.	Range			
Complex	Subj. 1	0.46	1.14	0.68	-0.08	**	1.07	1.16	**	
	Subj. 2	0.31	1.18	0.87	-0.27	**	1.24	1.51	**	
	Subj. 3	0.52	1.53	1.01	-0.48	**	1.42	*	**	
Continuous	Subj. 4	-0.33	1.06	1.38	0.02	**	1.41	**	1.39	
	Subj. 5	-0.33	1.26	1.59	-0.06	**	1.51	**	1.58	
		Forehand Hip								
		pre-test			post-test					
		Min.	Max.	Range	Min.	Max.	Range			
Complex	Subj. 1	0.24	1.10	0.85	-0.21	**	1.21	1.42	**	
	Subj. 2	0.51	1.55	1.04	-0.18	**	1.38	*	**	
	Subj. 3	0.46	1.72	1.27	-0.27	**	1.53	**	**	
Continuous	Subj. 4	-0.63	1.20	1.84	-0.07	**	1.35		1.42	
	Subj. 5	-0.24	1.32	1.56	0.11	**	1.61	*	1.49	
		Backhand Shoulder								
		pre-test			post-test					
		Min.	Max.	Range	Min.	Max.	Range			
Complex	Subj. 1	-1.62	-0.02	1.60	-1.67		0.30	**	1.97	*
	Subj. 2	-1.56	-0.43	1.12	-1.69	*	0.10	**	1.80	**
	Subj. 3	-1.30	-0.16	1.14	-1.62	**	0.17	**	1.79	**
Continuous	Subj. 4	-1.45	-0.19	1.27	-1.63	**	0.05	**	1.68	**
	Subj. 5	-1.68	0.03	1.71	-1.93	**	-0.24	**	1.69	
		Backhand Hip								
		pre-test			post-test					
		Min.	Max.	Range	Min.	Max.	Range			
Complex	Subj. 1	-1.43	-0.29	1.14	-1.63	**	0.00		1.64	*
	Subj. 2	-1.47	-0.67	0.80	-1.52		0.16	**	1.68	**
	Subj. 3	-1.24	0.18	1.41	-1.48	*	0.11		1.59	
Continuous	Subj. 4	-1.22	-0.19	1.03	-1.46	**	-0.37	*	1.09	
	Subj. 5	-1.28	0.07	1.35	-1.80	**	-0.16		1.64	*

値は全て rad で表わしてある . * $p < .05$, ** $p < .01$

6.4.3 結果

各被験者の事前テストと事後テストにおける肩と腰の回旋角度について，フォアハンド・バックハンド別に，最小角度と最大角度，その回旋範囲を示したのが表 6.3 である．事後テストの欄には，事前テストで分析した 10 試行分に合わせて，対応のある t 検定を行った結果も載せてある．表 6.3 では rad 表示しているが，以下の文中および図中では直感的に理解しやすいと思われる deg 表示にしている．

まず，体幹の回旋範囲を学習前後で比較したものが図 6.6 である．フォアハンドでは，連続運動条件の被験者の事前テストでの回旋範囲は肩においても腰においても複合運動条件の被験者よりも大きかった．しかし，事後テストでは，複合運動条件の被験者が全て回旋範囲が増加しているのに対して，連続運動条件では変わらないか低下していた．しかしこれは，ほぼ $90\ deg$ の回旋範囲に収束していると考えられ，連続運動条件のフォアハンドにおける回旋範囲は学習前から大きく，複合運動条件の方が学習によって変化したものと考えられる．一方，バックハンドでは，連続運動条件も複合運動条件もほとんどが回旋範囲の増加を示していた．したがって，体幹の回旋範囲の大きさについては，複合運動条件だけでなく連続運動条件においても学習効果があったと考えられる．

次に，フォアハンド・バックハンドそれぞれの終末局面における肩と腰の向きについて見たのが図 6.7 である．これは前の打球動作の終末局面でどの程度ボールマシンと正対しているのかを見るためである． $0\ deg$ のところでフォアハンドとバックハンドの回旋範囲の重なり合いが見られるということは，フォアハンド・バックハンドともにその終末局面で，肩あるいは腰がボールマシンと正対していることを示し，逆に重なり合いがない場合には十分正対する角度まで肩あるいは腰が回旋していないことを示す．

これを見ると，複合運動条件では事前テストにおいてはほとんど $0\ deg$ を超えていない．すなわち，どちらの終末局面でも肩および腰がボールマシンと正対するところまで体幹が回旋していない．一方，連続運動条件の被験者 4 ではバックハンドはボールマシンと正対するところまで体幹が回旋していないが，フォアハンドの終末局面ではボールマシンとの正対角度 ($0\ deg$) よりも体幹が回旋しており，結果として，フォアハンドとバックハンドの終末局面での重なりは見られる．唯一被験者 5 のみが，フォアハンド・バックハンドともに終末局面で $0\ deg$ を超え，重なり合いが見られる．つまり，事前テストにおいては，

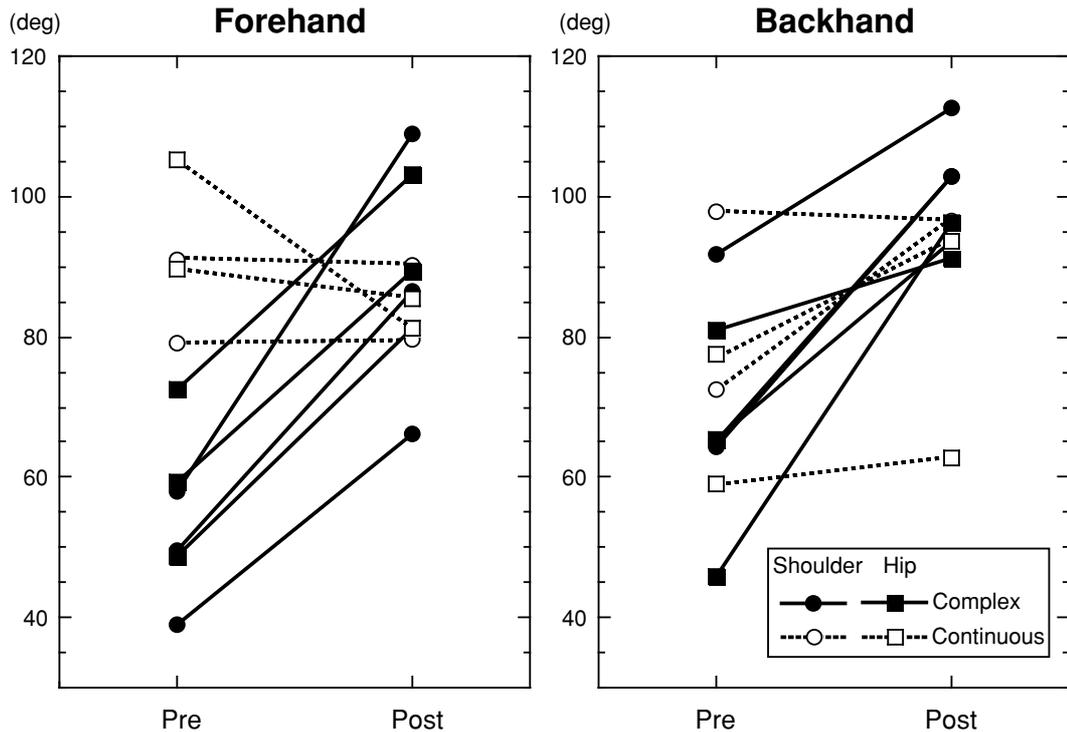


図 6.6: 肩と腰の回旋範囲の平均の学習前後での比較

被験者 5 のみが両ストロークとも終末局面で、ボールマシンと正対以上の角度まで体幹が回旋しており、それ以外の被験者は正対するまで体幹が回旋していなかった。

逆に事後テストでは、複合運動条件の全被験者がフォアハンド・バックハンドともに終末局面においてボールマシンとの正対角度よりも体幹が回旋しており、重なりが見られる。一方、連続運動条件では、被験者 5 に事前テストで見られた重なりが消失しており、被験者 4 においてもフォアハンドの回旋が減少したことにより、肩のみで重なりが見られている。これは、回旋範囲があまり変化していないことと考え合わせると、回旋範囲の中心が変化したものと考えられる。

そこで、肩および腰がどの範囲で回旋していたのかを見るために、各被験者の最小角度と最大角度と回旋角度範囲の平均を X-Y 平面上に表したものが図 6.8 である。上段が肩の回旋範囲で、下段が腰の回旋範囲である。内側の円弧が事前テストのもので、外側の円弧が事後テストのものである。X 方向がボールマシンの方向（打球方向）で、Y 軸上が 0 deg で、ボールマシンと正対している状態である。したがって、 0 deg を超えている場合には Y 軸よりも上に円弧の端がきている。おおまかにいえば、フォアハンドに関し

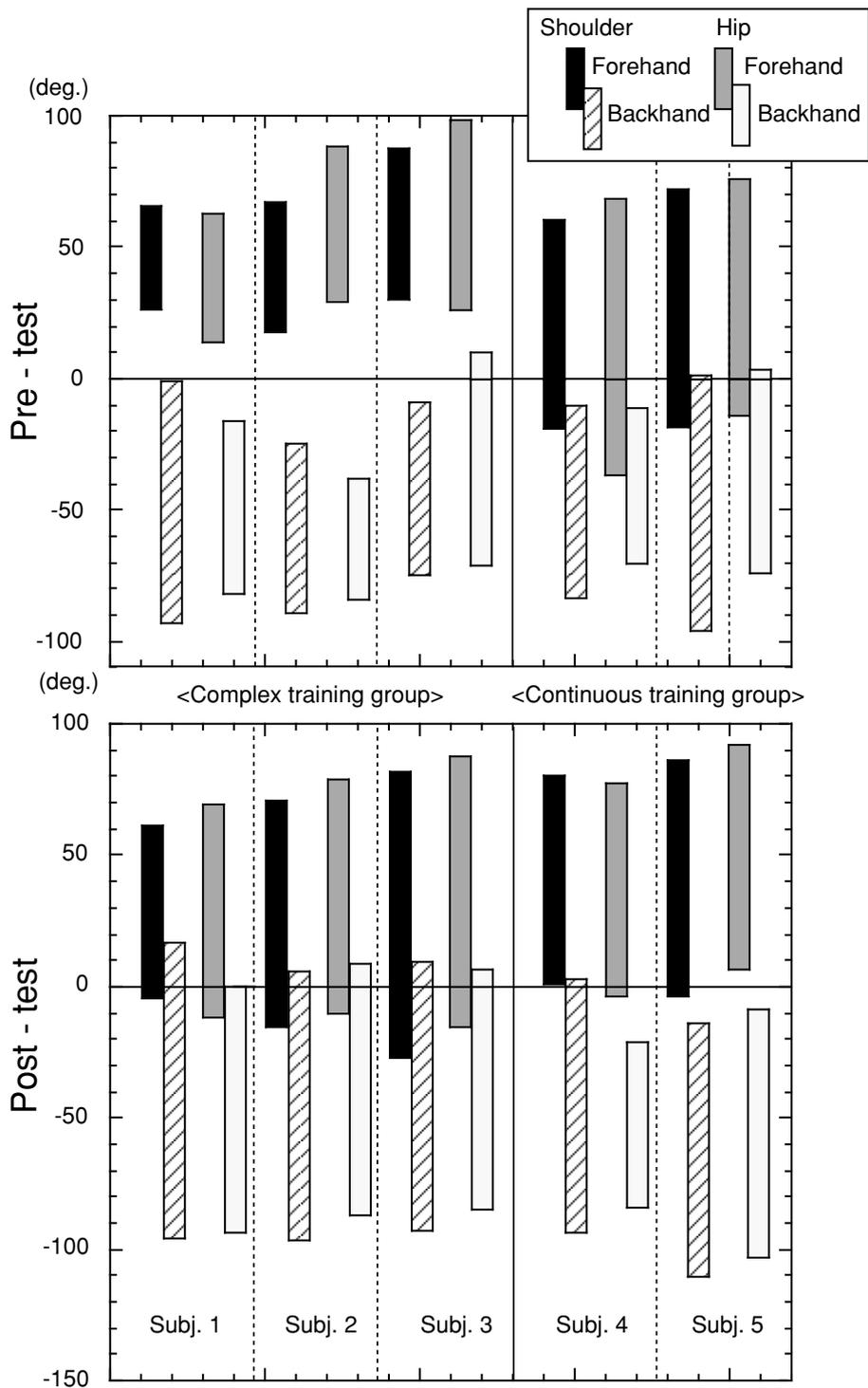


図 6.7: 両ストロークの肩と腰の回旋範囲の重なり具合の比較

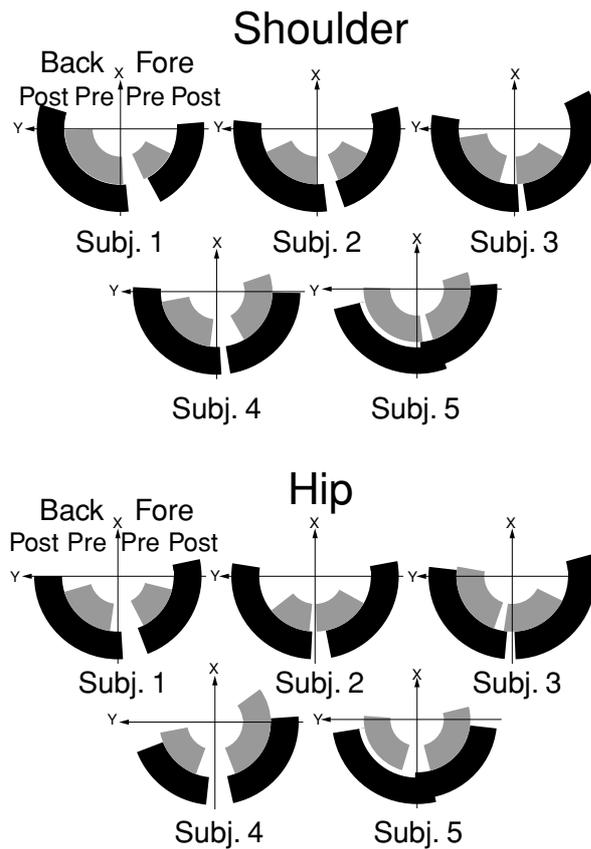


図 6.8: 学習前後における肩と腰の回旋範囲の X-Y 平面への投影図

ては被験者の右肩の、バックハンドに関しては左肩の回旋範囲を表わしているといえる。また、体幹の回旋範囲の中心の変化を表したのが図 6.9 である。どちらも絶対値が大きい方がよりバックスイング方向へ回旋範囲の中心があることを示している。

これらの図から明らかなのは、複合運動条件では、回旋範囲の中心が 0 deg に近づくとともに回旋範囲も増大している。しかしながら連続運動条件では回旋範囲が増大した場合でも回旋範囲の中心が 0 deg から離れていることが分かる。すなわち、連続運動条件では体幹の回旋の大きさは学習前後であまり変化がないが、いわゆるバックスイング、いいかえれば準備局面が大きくなった状態といえる。逆に複合運動条件では、体幹の回旋も増大し、いわゆるフォロースルー、いいかえれば終末局面が大きくなった状態といえる。しかも、そのフォロースルーの大きさは、連続運動条件よりも大きいということである。

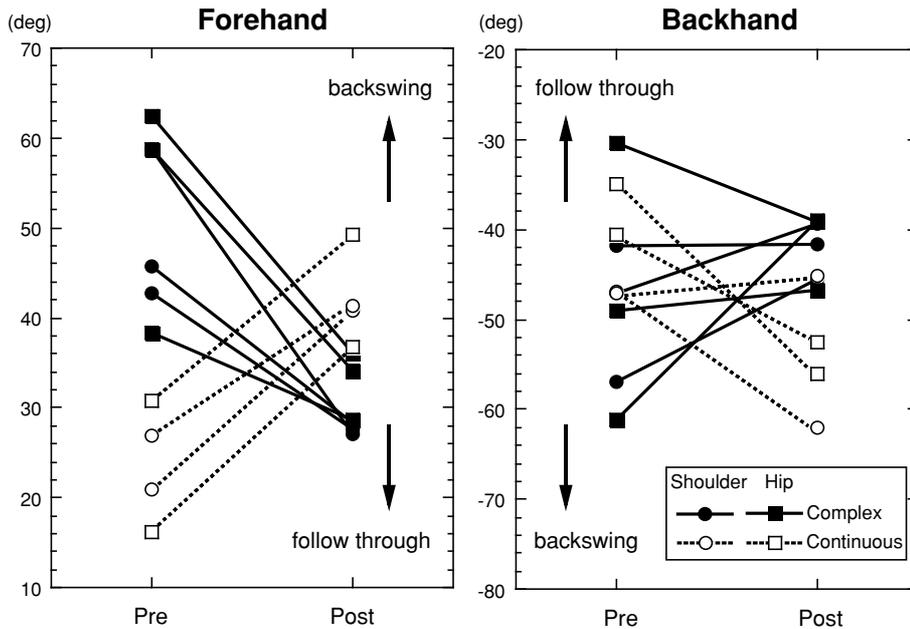


図 6.9: 両ストロークの肩と腰の回旋範囲の中心の変化

6.4.4 考察

複合運動条件による学習方法の有効性を検討するために、同一運動種類の運動を繰り返して練習する連続運動条件と2つの異なる運動種類の運動を交互に繰り返す複合運動条件による学習方法を、初心者の学習過程に適用した。

その結果、連続運動条件では、体幹の回旋範囲には大きな変化が見られず、回旋範囲の中心がフォアハンドもバックハンドも準備局面であるバックスイング方向へ変化していた。一方、複合運動条件では、体幹の回旋範囲の増大とともに回旋範囲の中心が終末局面であるフォロースルーの方向に変化していた。すなわち、連続運動条件では、環境からの要請に多様性がないため、準備局面だけが強調されフォアハンドとバックハンドの体幹の回旋動作がそれぞれ別の動作として分離していったといえる。逆に複合運動条件では、環境の多様性に対応するために、終末局面が強調されることによって2つの異なる運動が融合する形で体幹の回旋動作が増大したものと考えられる。つまり、複合運動条件では、その学習方法の中で前の動作の終末局面と次の動作の準備局面が一致するような方法で練習が行われてきた。したがって、練習の中ではフォアハンドからバックハンド、あるいはバックハンドからフォアハンドという運動の局面融合が生ずるような条件が設定された

のである。こうして練習で獲得された局面融合が、同一の運動類型内の運動を繰り返す連続運動条件下でのテスト試行においてもその学習効果を保持したものと見える。つまり、複合運動条件下で獲得した動作は、環境の多様性がない単一の運動条件下でのフォアハンドあるいはバックハンドストロークにおいても、いわゆる「大きな動作」を保持し、しかもその大きな動作は次の動作につながりやすい動作であったといえる。

今回の学習では、言語的な教示を一切与えず、練習方法だけを操作したにもかかわらず、動作は自然とその練習方法に合致するように獲得されたといえる。いいかえれば、環境の連続性と多様性に対応するように打球動作が獲得されると考えられる。つまり、同一運動類型内の運動の繰り返しは、その運動プログラムの精緻化には効果的であろう。しかしながら、今回の結果からは、体幹の回旋範囲の中心がバックスイング方向へ変化し、他の運動類型に属する運動とのつながりにおいては全く逆の効果であった。一方、異なる運動類型間の運動を交互に繰り返すことは、異なる運動類型間のつながりを獲得するのに効果的であったばかりでなく、単一の運動の獲得にも効果的であった。したがって、様々な打球動作の組み合わせが要求されるような運動技能の獲得には、運動の局面融合を意図した複合運動条件下での学習方法が効果的であり、その効果は同一運動類型内の運動を繰り返す連続運動条件下での学習効果をも含有するものであるといえよう。

テニスのグランドストロークの場合には、ボールはどこに飛んでくるか分からない。したがって、フォアサイドに来てもバックサイドに飛んできて素早く対応するためには、ネットに正対して構えることは重要なことであり、実際に技能レベルが高くなると打球後の構えは素早くなる。初心者への指導の際にも「早く構えろ」ということはよく言われることである。今回の複合運動条件下では、こうした言語的指示がなくても練習方法によって最適な打球後の構えが獲得されることを示している。あるいは、初心者においてはバックスイングが大きすぎて、逆にフォロースルーで腰が回らないといった問題が生ずる(中嶋, 1989)が、この問題の矯正にも複合運動学習は有効であろう。

6.5 まとめ

本章では、連続・複合運動としての打球動作の運動制御の検討から得られた、運動の局面構造の変化を手がかりに、打球動作獲得の具体的方略について検討を加えた。まず、環境の連続性と多様性がパフォーマンスに及ぼす影響を検討することによって、打球動作獲得に向けての新たな練習方略の示唆を得ることを目的とし、そこで得られた示唆に基づき新たな学習方法の有効性の検証を行った。

第5章での実験結果の再分析によって、どちらの入力周期においても連続運動条件よりも複合運動条件の方が3名の被験者ともパフォーマンスが高いことが明らかになった。つまり、フォアハンドあるいはバックハンドを繰り返し打球するよりも、ランダムに切り替えながら打球したときの方がパフォーマンスが高くなっているということである。この結果は、異なる運動タイプの終末局面における体幹の回旋運動の運動量を次の運動の準備局面での導入動作として利用できるという局面融合によるものと考えられた。

そこで次に、2つの異なる運動タイプに属する打球動作が交互に連続することによって生ずる終末局面と準備局面の融合した複合打球動作が、同一の運動タイプ内の打球動作の繰り返しに比べて、パフォーマンスにどのような影響を及ぼすかを検討した。その結果、複合打球動作でもパフォーマンスの低下は認められず、逆にフォアハンドにおいてはパフォーマンスの有意な向上が認められた。

さらに初心者の学習過程において、このような運動の局面融合を利用した複合運動条件での学習方法と、従来の同一運動タイプ内の運動を繰り返す連続運動条件による学習方法との比較検討をした。その結果、複合運動条件での学習方法が連続運動条件での学習方法よりも打球動作の獲得には効果的であることが示された。

これらのことから、従来多くの運動技能学習において単一の運動タイプ内の動作を反復練習することによってその技能獲得の効率を上げようとしてきたことに対して、新たな学習方略が提案できたものと考えられる。すなわち、複数の異なる運動タイプに属する運動を、環境からの要請に応じて切り替えて使い分けなければならない運動技能の獲得においては、異なる運動の局面融合を考慮し、練習環境の連続性と多様性を操作することによって、複雑に見える運動パターンを獲得することができるものと考えられる。その背景には、複雑に見える身体運動に、実は比較的単純な原理・法則が存在することが非線形ダイナミカル

システムによって明らかになったことが挙げられる(第5章)。そしてその法則は、局面融合と呼ばれる現象として身体に働く物理則に合致した自然な動きを引き出すものである。つまり、環境を操作することによって、その与えられた環境に適応するために身体が生来的にもっている運動学習法を自然に利用する結果である。運動プログラムの精緻化のために、同一運動類型内の運動を反復練習することは、その他の運動類型に属する運動との分化につながり、複数の運動類型からなるより大きな行為としての運動を行う際には、あらためてその運動の組み合わせ方を学習しなければならない。しかしながら、運動指導において、ここで取り上げた体幹の回旋運動の慣性の利用など、物理則を利用することによって、初心者においても効率的合理的な複雑に見える運動が自然と可能となる。これは従来の計算論的アプローチに基づく運動学習とは異なり、非線形ダイナミカルシステムアプローチに基づく運動学習の有効性を示すものであると考えられる。

第7章

総括

7.1 はじめに

本論文では、単純な離散運動から複雑に見える複合運動へとその運動制御を検討していくことによって、複雑に見える複合打球動作の学習方略を提案することを目的とした。そのために、運動の協応構造と局面構造、さらには環境との相互作用を含む運動課題として打球動作を対象とし、環境の連続性と多様性を操作することによって段階的にその運動制御について検討し、打球動作の複合運動学習について検討を加えてきた。ここでは、それぞれの実験的検討について総括をするとともに、これらの実験結果から、実践の場である運動指導に対しての示唆についてまとめる。

中村 (1992) は、理論と実践において以下のように述べている。「実践とは、各人が身を以てする決断と選択をとおして、隠された現実の諸相をひきだすことなのである。そのことによって、理論が現実からの挑戦を受け鍛えられ、飛躍するのである。実践が理論の源泉であるというのは、そのような意味で考えられるべきなのである。(p. 70)」

つまり、本論文で得られた実験結果を総括し、現実世界の問題に結びつけ運動指導現場への応用を図ることは、運動制御と学習に関する理論の今後の研究方向を示唆することにもなる。

7.2 本論文の要約

本論文では、運動の協応構造と局面構造、さらには環境との相互作用を含む運動課題として打球動作を対象とし、環境の連続性と多様性を操作することによってその運動制御と

学習について検討を加えてきた。本研究の目的の1から4については、それぞれ第3章、第4章、第5章、第6章において検討を加えたので各章のまとめをして、本研究の目的と対応づける。

まず、第3章では、単離散運動としての打球動作の運動制御について、運動の協応構造と局面構造を明らかにすることを目的とし、初心者の学習過程を映像分析によって検討した結果、学習によって変化するのは主動作の局面ではなく、導入動作の局面であることが明らかになった。これは、運動局面における準備局面の重要性が裏づけられるだけでなく、運動における構えといえる準備姿勢の重要性を支持する結果であった。このことは、打球動作の運動制御では、姿勢制御も含めた運動の協応構造と局面構造の問題が重要な要因となることを示唆している(3.2節)。さらに、実際に準備姿勢がその後の動作に及ぼす影響について、運動技能では重要な導入動作となる体幹の回旋動作の反応時間から検討を加えた結果、準備姿勢、特に下肢の屈曲姿勢がその後の体幹の回旋動作反応時間に影響を及ぼすことが明らかにされた。このことは単に神経系の促通によるだけではなく、解剖学的な関節可動域の増加によるものと考えられる(3.3節)。

これらの結果は、環境が一定で離散運動である打球動作の運動制御では、主要局面での上肢の運動制御だけを問題にするのではなく、準備局面での導入動作や姿勢制御も含めて運動制御を検討しなければいけないことを示すものであった。

次に第4章では、複離散運動として打球動作の運動制御について、環境の多様性が加わった場合の、運動の協応構造や局面構造への影響を検討した。まず、時間的制約の中で2つの打球動作を選択的に切り替えながら一致タイミング反応を行う課題を設定し、環境との相互作用を行う場合の打球動作の運動制御を検討した。その結果、環境の多様性に対応するために、動作開始後の連続性をもった動作のなかで環境からの入力処理され、動作の変更がなされていることが明らかになった。これは、単一の処理過程の切り替えによるよりは、複数の処理モジュールの重層性を示唆している(4.2節)。さらに、環境の多様性が増した場合として様々なコースに投げられたボールに対する打球動作の運動制御において、運動の協応構造と局面構造がどのような影響を受けるのかを3次元動作分析によって検討した。その結果、環境の多様性と相互作用する打球動作においては、合目的的であるがゆえに多様な運動が観察されるということである。しかしながら、離散運動の局面構

造は環境の多様性には影響を受けず，協応構造の時間的階層性が複雑に見える多様な運動を産出していたことである．さらに，連続的な姿勢制御がこの運動の協応構造に影響を及ぼしていることが明らかになった(4.3節)．

これらの結果は，環境の多様性に対応し，合目的な運動を行うためには，姿勢制御を含めた協応構造の変化によって対応していると考えられ，計算論的にいえば，入力処理を行いながら出力している状態といえ，運動学的には主要局面の先取りが行われていることが示された．

第5章では，環境の連続性と多様性をさらに拡張し，連続・複合運動としての打球動作の運動制御を検討した．すなわち，同一運動類型の運動を繰り返す連続運動と，異なる運動類型に属する運動を連続する複雑さを増した複合運動の運動制御を検討した．その結果，環境の連続性と多様性を加味した場合の複合運動によって，複雑に見える運動の協応構造と局面構造が生ずることが明らかにされた(5.2節)．しかもこの複雑さは，同一運動類型内の運動を繰り返す連続運動による安定した運動の協応構造と局面構造を基礎に，身体システムと環境との相互作用によって規則的に生ずることが確認できた(5.3節)．

これらの結果は，環境の連続性によって生ずる局面構造が離散運動の場合の局面構造と異なり，準備姿勢の運動相が消失し，前の運動の終末局面と次の運動の準備局面が融合して中間局面となり，いわゆる3分節の運動から2分節の運動となることを示していた．

ここまで，身体運動の複雑さを検討するために，単離散運動，複離散運動と連続・複合運動としての打球動作の運動制御を検討してきた．そして，同一運動類型内の運動を繰り返す連続運動では，安定した運動の協応構造と局面構造が見られた．さらに環境の多様性と相互作用することによって，この安定した運動を基に，新たな運動が回転のあるコントロール集合というフラクタルな構造をもって規則的に生ずることが確認できた．これが複雑に見える身体運動の基本構造である．

これらの知見に基づき第6章では，運動の局面構造の変化を手がかりに，環境の連続性と多様性がパフォーマンスに及ぼす影響を検討することによって，打球動作獲得に向けての新たな練習方略の示唆を得ることを目的とし，そこで得られた示唆に基づき新たな学習方法の有効性を検討した．第5章での実験結果を再分析した結果，同一運動類型内の打球動作を繰り返すよりも，異なる運動類型に属する打球動作を切り替えながら行ったほうが

パフォーマンスが高くなることが明らかになった。これは、異なる運動類型間において前の運動の終末局面における体幹の回旋運動の運動量を、次の運動の準備局面での導入動作として利用できるという身体に働く物理則に従う局面融合が生じたことによるものと考えられる(6.2節)。次に、2つの異なる運動類型に属する打球動作が交互に連続することによって生ずる、終末局面と準備局面の融合した複合打球動作がパフォーマンスに及ぼす影響を、単一の運動類型内の打球動作の連続打球動作と比較した結果、複合打球動作でもパフォーマンスの低下は認められず、逆にフォアハンドにおいてはパフォーマンスの有意な向上が認められた(6.3節)。

さらに、初心者の学習過程において、身体に働く物理則に従う運動の局面融合を利用した複合運動条件での学習方法と、従来の同一運動類型内の運動を繰り返す連続運動条件による学習方法との比較検討をした。その結果、複合運動条件での学習方法が連続運動条件での学習方法よりも打球動作の獲得には効果的であることが示された。さらに複合運動条件での学習効果が、単一の運動を行う連続運動条件下で確認されたことは、単一の運動を反復練習するよりも複合運動を学習する方が望ましいことを示すものであった(6.4節)。

これらのことから、従来多くの運動技能学習において単一の運動類型内の動作を反復練習することによってその技能獲得の効率を上げようとしてきたことに対して、新たな学習方略が提案できた。すなわち、複数の異なる運動類型に属する運動を、環境からの要請に応じて切り替えて使い分けなければならない運動技能の獲得においては、身体に働く物理則に従う異なる運動の局面融合を利用し、練習環境の連続性と多様性を操作することによって、複雑に見える運動パターンを獲得することが容易になると考えられる。

以上の結果を総括すると、複雑に見える身体運動は、運動の協応構造と局面構造、さらには環境との相互作用をその構成要素とし、環境との相互作用が連続性をもち、なおかつ環境からの要請が多様である場合に、規則的に生ずるものであると考えられる。そしてこの規則性を学習に生かすことによって、複雑に見える身体運動の獲得が可能になる。

この身体運動の複雑さと環境の連続性と多様性によって生ずる打球動作の運動制御の階層性を図示したものが図7.1である。打球動作に関する運動制御における従来の研究では、一致タイミング課題における「プログラム制御」あるいは運動の協応動作課題における「運動の自己組織化」として考えることができる。しかしながら、実際の打球動作を一

つのまとまりのある運動（単離散運動）として観察すると，そこでは，準備姿勢や姿勢制御を含めた運動の協応構造と局面構造が浮き彫りにされてくる．運動技能の指導場面でいわれる「構え」の問題である．これが「構えからの連続制御」である．次に，環境からの要請が多様になり身体システムとの相互作用が生まれ，異なる運動類型に属する運動の切り替えを行う（複離散運動）場合には，環境からの情報の処理が連続的に要求され，「運動の先取り」といった現象が現れる．これが「並列分散処理による連続制御」である．さらに，時間的制約が厳しい環境の連続性に対応する同一運動類型内の運動の繰り返し（連続運動）においては，終末局面と導入局面が融合した局面融合が生じ，中間局面と主要局面に2分節化する．これが「局面融合による連続運動制御」である．またさらに環境の変化（多様性）が連続することによって，異なる運動類型に属する運動の切り替えも連続的となり（複合運動），結果として「運動の先取り」によって「構え」が一定ではなくなり，終末局面と準備局面が効率良く局面融合するという局面構造の変化が表れる．これが複雑に見えるが流れるような動きとして見える．しかしその複雑さは，ランダムではなく規則性があり，環境の多様性・連続性と身体システムとの相互作用によって決まる複雑さである．これが「身体に働く物理則に従う局面融合による複合運動制御」といえる．したがって，環境の連続性と多様性を操作することによる物理則を利用した複合運動を学習することによって，複雑に見える流れるような動きが獲得されるだけでなく，単一の打球動作の獲得にも有効である．

従来の計算論的アプローチでは，この単離散運動から複離散運動へ，そして連続運動に拡張して，最終的に複合運動を獲得するという学習方略であった．これは身体運動は複雑なので，複雑な技能を分解して単純な技能から複雑な技能へという学習方略であったといえる．しかしながら，身体運動の複雑さは，環境の連続性と多様性によって規則的に生み出されることが明らかになり，複雑に見える複合運動から学習することによって，初心者においても流れるような動きは獲得され，さらに連続運動，複離散運動，単離散運動で要求される，安定した運動パターンや運動の「先取り」「構え」などが，複合運動学習によって獲得されるということである．つまり，身体に働く物理則に合致する効率的な局面融合が生ずる複合運動を利用できるように，環境の連続性と多様性を操作し，環境をデザインすることが，複雑に見える身体運動の学習には効果的であるといえる．

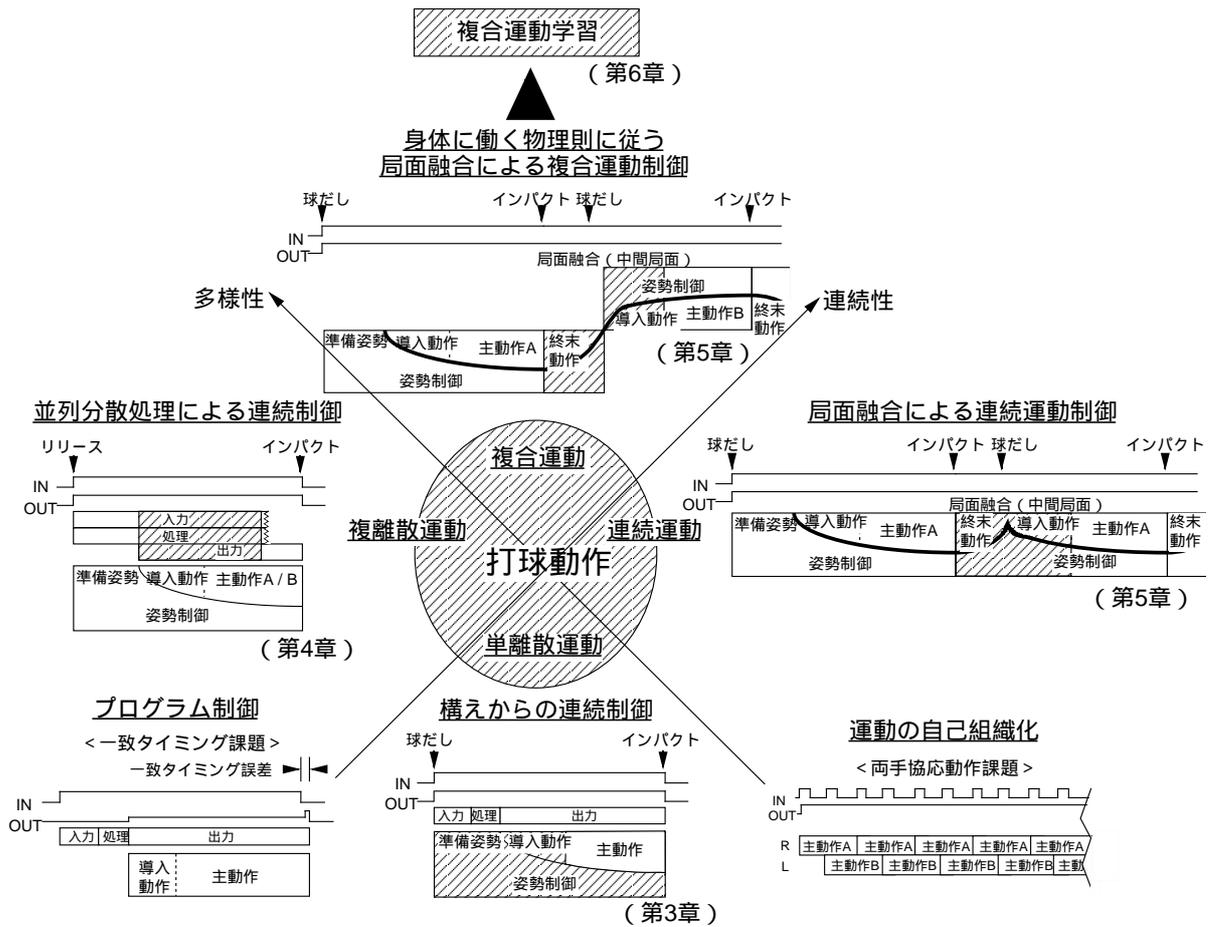


図 7.1: 身体運動の複雑さと環境の連続性と多様性によって生ずる打球動作の運動制御の階層性

7.3 運動指導への示唆

運動の指導や学習場面においては、様々な工夫や指導方法が実践の場で行われている。Thorndike (1927) の「効果の法則」や Skinner (1938) のオペラント条件づけに基づく賞罰による強化 (reinforcement) や、Bandura (1971) の社会的学習理論に基づくモデリング (模倣) など多くの理論に基づく方法が実践の場で用いられている。これらの理論の多くは行動の獲得に関するものであり、なぜそうした行動が獲得されるかという疑問には答えられるが、どのようにしてその行動を獲得していくかという疑問には答えられない (Ingvaldsen & Whiting, 1997)。また運動学習理論として Adams (1971) の閉回路理論や Schmidt (1975) のスキーマ理論に基づくフィードバックの方法は、今日のマルチメディア化・情報化社会にあって様々な媒体を利用して練習の効率化に用いられている。しかしながら、その理論を構築してきた運動課題は部分に分解した単純化・縮小化された運動であり、日常生活での運動やスポーツ場面での運動技能を全体として捉えたものではないため、正確な結果を得るためには正確な運動の繰り返しが必要であると考えられてきたものである。

確かに機械の動きは正確である。同じ動きを繰り返し、同じ結果をもたらす。それ故に工業化社会では貴重な戦力となるが、ここにおいての環境は一定に保たれる。人間の身体運動でも正確さが要求される。しかしそこでの正確性は、環境の変化に対応しながら合目的な運動を行い目的を達成するという意味での正確性である。例えば、一人の選手が同じボールを打つ場合にも、そのフォームは幾種類もある。ましてや各選手の解剖学的な構造 (例えば身長など) や機能 (例えば筋力など) によって、それぞれの選手のフォームは異なって当然である。要は連続的な環境の変化に対応して、選手がボールを正確に打つために身体をどのように動かしているのかということ、すなわち「身体の捌き」が問題となる。これまでは有効な力の発揮の仕方、つまり理想的なフォームを問題とする場合が多かったように思われる。しかしながら、実際の日常生活やスポーツ場面ではどのような動きをしたかが問題ではなく、その動きによって目的が達成できたかが問題になる。

さらにこの合目的な運動には、時間的制約が付きまとう。いくら、正確な動きをしても、それが時間的に間に合わなければ意味を失うのである。ホームランが打てる理想のフォームでバットスイングをしても、ほんの少し時間的タイミングがずれるとホームラン

にはならず、フォームは正確であっても結果は正確とはいえないのである。こうした時間的制約も含めた環境の変化に対応して、正確な結果を出すための身体の捌きに目を向けなければならない。こうした多様あるいは複雑に見えるが、合目的な運動の獲得が、運動の指導や学習場面では問題となる。

本研究の実験結果をもとにこの問題に示唆できることの第1点は、1つのまとまりのある運動は、そのまとまりのまま獲得する方が望ましいということである。いいかえれば、全体を部分に分割するのではなく、全体として獲得するのである。これは古くからいわれている全習法 (whole method) と分習法 (part method) という課題の分割とは異なる。例えば、3.3 節の結果のように、ある目的が明確になれば、その準備姿勢は自ずと決定されるということである。つまり、1回の打球動作を例にとれば、いくら「構え」を強調してもその構えを必要としない環境（例えば実際にボールを打たない）では、その「構え」は意味を失うのである。また、4.3 節のように、どこにボールが来るかがあらかじめ分からない環境においては、どのようなボールにでも対応できるように構えが一定になる。したがって、合目的な運動の最小単位は分割できないということである。運動技能の指導において、この合目的な運動の最小単位は何であるかを検討することは重要であると思われる。

第2点としては、異なる運動を連続することによって新たな運動が生まれることである。第5章で見てきたように、異なる運動を切り替えながら連続することによって一つの運動の終末局面と次の運動の準備局面が融合し、新たな運動になる。こうした現象は、多くの運動技能において観察される。しかしながら、新しい運動パターンは、与えられる環境の連続性（時間的制約）と多様性（系列）によってある規則をもって生ずるということである。極端に時間的制約が緩い場合には新たな運動パターンは生成されない。一つの運動が終わるたびに、離散運動と同様に準備姿勢が2つの運動の間に挿入されるからである。少し時間的制約が厳しくなると、この準備姿勢は消失し、局面融合が生じ、さらに時間的制約が厳しくなることによってこの融合した中間局面に新たな運動パターンが規則的に表れるのである。これは学習者が意図的に作り出すものではなく、身体と環境との相互作用によって「自然に」作りだされるものであることが特徴である。つまりこれが身体の捌きが見られた状況であろう！「身体の捌き」は意図的に学習するものではなく、身体と環境との

相互作用の中から生まれるものである。しかも 6.4 節で示したように複合運動によって獲得された身体の捌きは、離散運動の場合にも保持されるのである。

以上の 2 点は、従来から局面融合、あるいは運動の先取りとして取り上げられてきた問題と重複する部分もある。すなわち、Meinel (1960) が例示している体操競技や、松永ら (松永ら, 1966, 1967, 1968) や調枝 (1972) が行った捕球動作から投球動作へという局面融合について研究である。これらは全て、第 1 点目の主張、すなわち合目的的な運動の最小単位についてであり、そこに第 2 点として述べた時間的制約条件が加味されたものとして考えることができる。つまり、捕から投への局面融合は「ボールを捕ってできるだけ早く目標に向かって投げる」という時間的制約の中での合目的性に起因する。ここでは 2 つの動作が、1 つの目的を達成するために最終的には 1 つの動作となり、その運動パターンは 1 つに収束する。しかしながら、本研究での主張点は、それぞれの運動がそれぞれに異なる目的を持っていることであり、異なる運動の連続が環境の多様性との相互作用によって、規則的に局面融合し、新しい運動パターンが現れるのである。その背景には、身体システムの物理的制約条件が存在する。

そこで第 3 点として、この局面融合の積極的活用のためには、身体システムの物理的制約条件の利用が考えられる点である。すなわち、第 6 章で示したような、テニスのストローク動作では、体幹の回旋運動がボールを打つための大きなエネルギー源となる。したがって、この体幹の回旋運動の運動量を利用することによって、フォアハンドからバックハンドへ、あるいは逆にバックハンドからフォアハンドへといった異なる運動の局面融合が物理的制約において機能的に働く。つまり、静止した状態から体幹の回旋運動を開始するのではなく、前の運動によって生じた体幹の回旋運動の慣性を次の運動に利用するのである。それによってこの局面融合はさらにスムーズで流れるような動きとなるのである。このような局面融合可能な運動の組み合わせを指導者は考えるべきであろう。それによって、意図的に行っていた導入動作は、特別な意図なしでも自然と可能になる。さらに、強調していた準備姿勢における「構え」はその中間局面の中に消失し、特に強調しなくともそうした姿勢制御ができていたのである。

以上の点を踏まえ、運動の指導・学習場面で重要なことは、学習者も含めた環境のデザインを考えることであろう。環境のデザインとは、学習者と相互作用する環境を変更する

ことによって、学習者の可能性を引き出すことである。ある環境と学習者の関係をデザインできれば、例えば6.4節のようにフォアハンドとバックハンドを交互に連続して、時間的制約を加えながら学習者に打たせるような環境をデザインすれば、学習者の身体システムは物理則にしたがって自然に、まさに振り子のように運動を繰り返すことができる。準備局面における反動動作、例えばジャンプ前の沈み込み動作やテニスのストロークにおけるバックスイングなどはその主要局面に及ぼす重要性が従来から指摘されてきた。しかしここで問題にしているのは、前の動作の終末局面と次の動作の準備局面の連続性の利用であり、反動動作と異なるのは複数の異なる動作が連続する点とその動作方向である。動作方向に関していえば、反動動作が次の主動作と逆方向に運動するのに対し、この終末局面から次の準備局面の運動は同一方向の運動である。さらに、反動動作は学習者が意図的に行うものであるのに対して、ここでの局面融合による複合動作は、学習者が意図しなくとも結果的にこの反動動作までをも作り出してしまうのである。そして、この学習効果は運動が連続しない場合にも、すなわち離散運動としても保持される運動パターンとなるのである。したがって、異なる連続する運動と運動のインターフェイスをデザインすることである。

運動技能が相対的に小さな筋力しか必要のない日常動作と異なるのは、運動によって得られる運動量が大きいことである。したがって、その運動量の利用によって獲得すべき運動の準備局面にスムーズに入れるような運動課題を考えることがより有効になろう。テニスのストロークを例にとると、バックハンドのできない初心者にもフォアハンドからバックハンドという練習を入れてみる必要がある。また、テニスのサービス後の構えがとれない初心者に対して、サービス後にすぐにバックハンドストロークを打たせるような練習をすると、サービスの終末局面とバックハンドストロークの準備局面が局面融合すると考えられる。そして結果的にサービスの終末局面が大きくなり、次の構えがとれることが期待される。ここに、複合打球動作の練習を導入し、時間的制約を厳しくすることによって身体システムの物理的制約を利用し、身体の捌きを獲得させる環境を提案したい。

本研究の限界と今後の課題についてまとめておく。本研究では複雑な身体運動の運動制御とその学習を検討するために、環境の連続性と多様性が操作可能な打球動作に限定して実験を重ねてきた。したがって、ここでの結論の一般化には注意が必要である。特に複合

運動学習に関しては、テニスのフォアハンドストロークとバックハンドストロークについて実証したのみである。これが本研究の到達点であり、限界である。したがって、身体システムに働く物理則に従う局面融合を利用した複合運動学習が、他の運動技能の学習に適用できるか否かを検討することが今後の課題となる。そのためには、実践の場における運動技能の詳細な観察が必要である！理論が現実からの挑戦を受け鍛えられ、飛躍する」ための第一歩は踏み出したばかりである。

人間の動きは、あるいは生体システムといっても良いかもしれないが、我々の想像以上に環境の変化に対して柔軟な対応が可能であろう。それはこれまでの人類の進化や生物の系統発生の歴史からも明らかである。すべてが予測可能な世界では柔軟な対応は生まれてこない。なぜならその必要がないからである。そして一見安定している閉鎖的な環境の中では我々が成長できないことは、経験的にも理解できよう。しかしながら、実際の現実世界においては、すべてが予測可能ではないがために、当然ながらすべてが制御可能でもない。ただ、新たな環境、予測不可能な環境と出会った時にもその環境に対応することは可能なのである。これが新たな環境との相互作用の中での動きの可能性であり、巧みさ (dexterity : Bernstein, 1996) あるいは知能 (Brooks, 1991) と呼ばれるものであろう。こうした可能性を拓げるためには予測が容易な安定した状況に安住せず、予測が困難な不安定な状況に身を置くことである。正確性を目標とする従来の運動制御理論に基づく統制されすぎた練習状況は、新たな動きの可能性を奪い取ってしまうに違いない。つまり、従来の正確な動きの伝達・指導を目的とした「運動の指導・教授」ではなく、人間の可能性を拓く「環境のデザイン」こそが、運動指導場面には重要であることが強く示唆された。いくら不安定な環境に置かれても、そこで完全に崩壊せずに新たな秩序を作り上げるのが我々の身体運動である。

付 録

非線形ダイナミカルシステムの理論的枠組み

ここでは、第5章で援用した環境の連続性と多様性に対応する複雑な身体運動を検討するための力学系の理論を解説し付録とする。これは従来運動の協応構造を分析してきたダイナミカルシステム(力学系)が、時間的な入力あるいは環境からの要求の急激な変化に対応した運動を説明できないためである。その問題を解決するために時間的に変化する外部入力を考慮した Gohara and Okuyama (1999a) の理論を適用する。この理論では、外部入力を連続した有限時間間隔の基本パターンの集合と定義し、その入力集合に対して、連続力学系集合および離散力学系集合を導入して、有限時間間隔内の入出力変換を扱うことができる。

自励系のダイナミカルシステム

従来のダイナミカルシステムのモデルについては、1.4.3 項でレビューしたが、多様な入力の変化を考慮していないといえる(山本(2000)を参照)。もちろん制御パラメータと呼ばれる入力で、システムの状態は徐々に変わっていくのであるが、その入力はある一定の緩やかな変化をするのである。すなわち、水に加える熱は一定でも時間が経てば、液体から気体への相転移(phase transition)現象が観察される。また、馬の走る速度が少しずつ増す、すなわち加速度が一定であれば、馬の歩容は常足なみあし(walk)から速足はやあし(trot)へ、そして駈足かけあし(gallop)へと相転移を起こすのである(図A.1参照)(Hoyt & Taylor, 1981)。ここでは、環境からの入力が一定と言え、その結果システムの状態変化はシステムの状態によってのみ決まるといえる。これを式にすると、

$$\dot{x} = f(x) \tag{A.1}$$

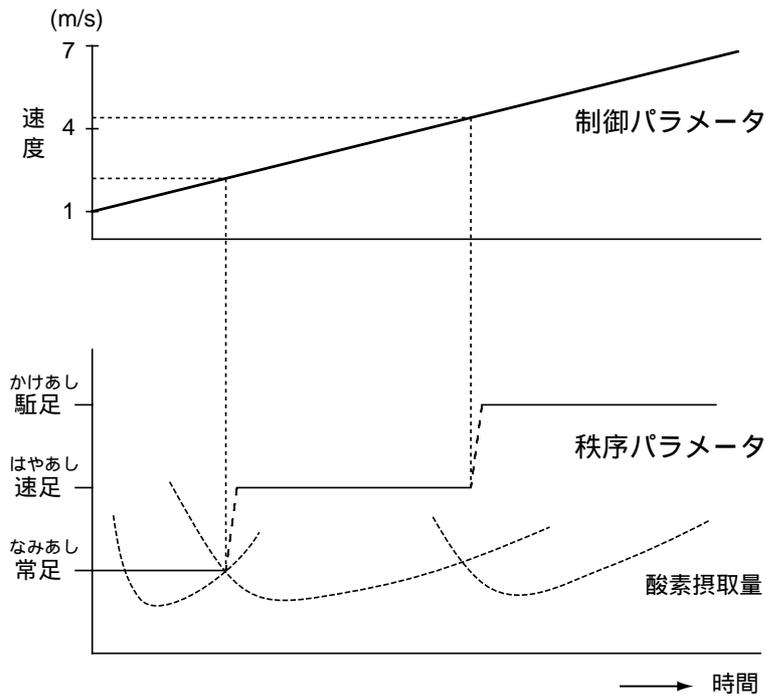


図 A.1: 馬の走る速度と常足，速足，駢足への相転移とそれに伴う酸素摂取量の違い．上段の図では走る速度が直線的に増加しているが，それに伴い下段の図の実線が走り方の非連続的な急激な変化を示している．また，点線の曲線がそれぞれの走り方における速度の変化に伴う酸素摂取量の増減を示している．(Hoyt & Taylor (1981) に基づいて作成)

となる．ここで， x と f はそれぞれ状態とベクトル場を表し， $\dot{x} = dx/dt$ は状態 x の時間変化である．ベクトル場 f は状態 x のみの関数で表される．こうしたシステムを以下のダイナミカルシステムとの区別を強調するために自励系のシステム (autonomous system) と呼ぶ．本論文で問題としている打球動作，特に連続して異なる打球動作が要求されるような状況においては，ある時間間隔で異なる入力が入力システムに入り，その入力に適応した運動出力が次の入力までの時間内に出力されることが要求される．そのためにはある時間間隔の入力に依存しながら，システムの状態が次々と切り替わることを考えなければならない．この時間的に変化する外部入力を考慮した非線形ダイナミクスの理論を以下では説明する．

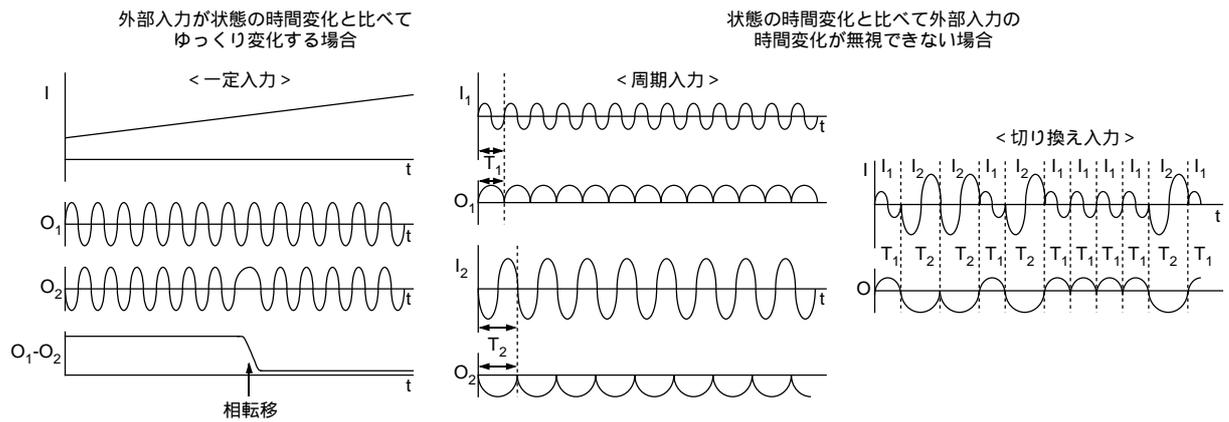


図 A.2: 従来のモデルと Gohara & Okuyama (1999) のモデルの入出力変化の相違を概念的に表した模式図．左側の従来のモデルでは入力是一定入力であると考えられ，ある時点で相転移が起きる．右側の拡張されたモデルでは入力と出力が同じ時間間隔で，周期的に繰り返されたり，あるいは複数の入力が切り替わり，それに応じて出力も切り替わる．

励起アトラクタ

自励系は他のシステムと独立しているが，非自励系 (non-autonomous system) は他のシステムに依存している．特に時間的に変化する外部入力 $I(t)$ に依存するシステムは，システムの入力依存性を陽 (explicit) に取り込み，以下の常微分方程式で定義される．

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

$$x, I \in R^N.$$

ここで， x と f はそれぞれ状態とベクトル場を表し，状態 x とベクトル場 f の状態空間が N 次元ユークリッド空間 R^N の開集合とすることを表わす．式 (A.1) と異なるのは，ベクトル場 f が状態 x のみならず，外部入力 $I(t)$ によっても影響を受ける点である．外部入力 $I(t)$ が状態 x の時間変化と比べてゆっくり変化する場合には，入力是一定値と見なすことができ，式 (A.1) で示すのと同等になり，分岐パラメータ (bifurcation parameter) となる．これが従来の自己組織化のモデルである自励系のダイナミカルシステム (Haken et al., 1985; Schöner et al., 1986) に相当する．ベクトル場は変化せず一定なため，小さな入力の変化は外乱 (perturbation) として扱われ，外乱が与えられてから安定に戻るまでの

緩和時間 (relaxation time) や相転移前の安定性の乱れとしての臨界減速 (critical slowing down) などによってシステムの安定性が検討されてきた (Kelso, Scholz, & Schöner, 1986; Kelso et al., 1988; Schöner et al., 1986; Schöner & Kelso, 1988a) . 図 A.2 には , 外部入力の時間変化が状態 x の変化に比べ緩やかな場合 (従来のダイナミカルシステムモデル) と無視できない場合 (時間的に変化する外部入力を考慮した拡張されたモデル) を概念的に示してある .

周期入力

状態 x の時間変化と比べて , 入力 $I(t)$ の時間変化が無視できない場合には , ベクトル場が時間的に変化するを考慮しなければならない . 外部入力が周期 T で変化する場合 , すなわち ,

$$I(t) = I(t + T)$$

を考える . ここで T は入力の周期時間である . ベクトル場も同様に周期時間 T で変化する . すなわち ,

$$f(t) = f(t + T)$$

となる . これは外部入力 $I(t)$ の周期時間 T に対応してベクトル場も変化するを表す .

ここで , 時間的に変化する状態 x とベクトル場 f を表すために , 外部入力の $I(t)$ の周期時間 T で円を 1 周するように , 角度変数 $\theta = (2\pi/T)t \bmod 2\pi$ として , 新しい状態変数 $y = (x, \theta)$ を導入すると ,

$$\dot{y} = f_I(y) \tag{A.3}$$

$$y \in R^N \times S^1$$

となり , ベクトル場 f_I は超円筒状態空間と呼ばれる多様体 (manifold) $\mathcal{M}: R^N \times S^1$ の上で定義される . つまり , S^1 は角度変数 θ に対応した円周を表わし , 局所的にユークリッド空間の構造をもつ集合 , いいかえれば R^N に埋め込まれた m 次元局面である多様体 \mathcal{M} が円周を含むため , これを超円筒状態空間 (以下 , 円筒空間とする) と呼ぶ . これが連続力学系 D_c (continuous dynamical system) としての表現である .

そして離散力学系 D_d (discrete dynamical system) については, 円筒空間 \mathcal{M} において, 周期時間 T で軌道が横切るポアンカレ断面を,

$$\Sigma = \{(x, \theta) \in R^N \times S^1 \mid \theta = 2\pi\}$$

とすることによって, システムの挙動は $\theta = 0$ の初期状態から出発し, $\theta = 2\pi$ で再びポアンカレ断面を横切るまでの円筒空間内を周期時間 T で1周する軌道として理解できる. ポアンカレ断面 Σ 上では, 状態 x_τ から周期 T 後の状態 $x_{\tau+1}$ への変換が写像として定義でき,

$$x_{\tau+1} = g_I(x_\tau) \quad (\text{A.4})$$

$$x_\tau \in R^N$$

となる. ここで, g_I は反復関数 (iterated function) である. ポアンカレ断面は接断面での写像をとることで次元を一つ減らすことができるので用いられる.

以上のことから, 周期入力 I は, 多様体 \mathcal{M} とベクトル場 f によって定義される連続力学系 D_c と多様体 Σ と反復関数 g_I によって定義される離散力学系 D_d に対応することになる.

切り替え入力

切り替え入力について考えるために, 各々の入力を, 時間に関する周期関数の1周期分として, 入力集合 $\{I_l\}_{l=1}^L$ を導入する. つまり, 1周期分ずつ異なる様々な入力の集合を考える. すると, それぞれ周期入力の場合と同様な考察によってこの入力集合に対応した2つの力学系の集合が存在する. 一つは連続力学系であり,

$$\{D_c\} = (\mathcal{M}, \{f_l\}) \quad (\text{A.5})$$

として表される. ここで $\{f_l\}$ は円筒空間 \mathcal{M} 上のベクトル場の集合である. もうひとつは, 離散力学系の集合で,

$$\{D_d\} = (\Sigma, \{g_l\}) \quad (\text{A.6})$$

として表される. ここで, $\{g_l\}$ は複数の入力に対応する $\theta = 2\pi$ における状態空間である大域的ポアンカレ断面 Σ 上での反復関数の集合である. 大域的 (global) ポアンカレ断面

とは、個々の構成要素間の局所的な (local) なポアンカレ断面ではなく、ここでは入力集合全体に対するポアンカレ断面を指す。以上のように、入力集合 $\{I_l\}_{l=1}^L$ に対応して連続力学系集合 $\{D_{cl}\}$ 、離散力学系集合 $\{D_{dl}\}$ が存在する。すなわち、模式的表現をすると、

$$\{I_l\} \rightarrow \{D_{cl}\} \rightarrow \{D_{dl}\} \quad (\text{A.7})$$

となる。これによって、同じ入力を繰り返す周期入力における非線形ダイナミクスを、複数の異なる入力連続して切り替わりながらシステムに入る切り替え入力についても同様の考察ができることを意味する。

一般に、エネルギーが時間経過につれて減少するような散逸的 (dissipative) な連続力学系では、十分な時間が経つと特定の軌跡や点に落ち着くアトラクタを持つ。アトラクタは以下のような不変集合、

$$A = \{\phi \mid \lim_{t \rightarrow \infty} \phi(\theta(t), x_0), x_0 \in B \subset \mathcal{M}\}$$

として定義できる。ここで B はアトラクタ A に収束する初期状態 x_0 の集合であり、ベイスン (basin) と呼ばれる。円筒空間 \mathcal{M} では、 $t = 0$ ($\theta = 0$) の初期状態 x_0 から始まる解 ϕ は t が無限大になってアトラクタ A に収束する。連続力学系のアトラクタ A に対応する離散力学系においても同様にポアンカレ断面でアトラクタが定義できる。アトラクタにはポイント、リミットサイクルやトーラス、カオスなどがある。これらは人間の運動においても確かめられている (Kay, 1988; Mitra et al., 1997; Yamada, 1995)。

ある入力繰り返しシステムに入力される周期入力の場合には、軌道、即ち

$$\gamma(x_0) = \bigcup_{0 \leq t} \phi(\theta(t), x_0)$$

は、アトラクタに収束する。有限時間の入力の場合でも無限時間の周期入力に対応したアトラクタを考えることができる。外部入力に励起されたアトラクタであることを強調するために、Gohara and Okuyama (1999a) はこのアトラクタを励起アトラクタ (excited attractor) と呼んでいる。

フラクタル遷移

次に，入力が切り替わる場合の力学系を考える．前の入力が現在の入力と同じ場合には，軌道は同じ励起アトラクタに再び向かう．前の入力が現在の入力と異なる場合には，軌道は方向を変え，前の入力に対応した軌道から離れ，現在の入力に対応した励起アトラクタに向かう．この過程が続くと，軌道は励起アトラクタ間を遷移する軌道となり，円筒空間上で励起アトラクタの周りに広がる．

ポアンカレ断面での反復関数の集合 $\{g_l\}$ に注目すると，Hutchinson (1981) はポアンカレ断面に限らず，反復関数の集合 $\{h_l\}$ が縮小条件 (contraction property) を満たす場合には以下の方程式を満たす唯一不変な集合 C が存在することを示した．

$$C = \bigcup_{l=1}^L h_l(C). \quad (\text{A.8})$$

ここで

$$\bigcup_{l=1}^L h_l(C) = h_1(C) \cup h_2(C) \cup \dots \cup h_L(C)$$

かつ，

$$h_l(C) = \bigcup_{x \in C} h_l(x)$$

である．このような不変集合 C は多くの場合フラクタル (fractal) である．

さらに，Barnsley (1993) は集合 $\{h_l\}$ を反復関数システム (iterated function system: IFS) と呼び，全ての反復関数が縮小的であるとき，IFS によって構成される集合 $\{x_n\}_{n=0}^{\infty}$ は，式 (A.8) で定義される不変集合 C に収束することを明らかにしている．Gohara and Okuyama (1999a) は，これを連続力学系に拡張し，ポアンカレ写像が非縮小的な場合についても成り立つことを示している．

また入力集合 I_l に対応する軌道の集合 $\Gamma(C)$ は各入力 I_l に対する軌道集合 $\gamma_l(C)$ の和となることを示した．

$$\begin{aligned} \Gamma(C) &= \bigcup_{l=1}^L \gamma_l(C) \\ &= \gamma_1(C) \cup \gamma_2(C) \cup \dots \cup \gamma_L(C). \end{aligned} \quad (\text{A.9})$$

$\gamma_l(C)$ はアトラクタ A_l へ遷移する軌道の集合であることを意味する．したがって，全ての軌道は励起アトラクタ間の遷移を表すものと考えられる．このことを，時間的に変化する

る入力によって励起された散逸系の力学系を強調するために、励起アトラクタ間のフラクタル遷移 (fractal transition) と呼んだ。図 A.3 はこの励起アトラクタ間の遷移を示したものである。

このモデルは連続力学系に基づき連続時間を扱っていることと、有限時間内の複数の入出力の切り替えを扱っていることが特徴であり、従来の非線形ダイナミクスから拡張された点である。これは換言すれば、入出力の連続性と多様性を同時に扱うことができるダイナミカルシステムモデルといえる。そこで本論文で問題にしている打球動作、特に連続して異なる打球動作が必要とされるような人間の運動の生成に関して、これを援用するものである。

本論文は自らの経験に基づき、従来の理論を念頭に置き、それに依拠するところから出発した。しかしながら、自らの経験を通して見た現象を理論では説明できないことの方が多い。いわゆる科学的研究の多くは現象を詳細に観察したデータの蓄積によって理論を構築していく。が、その現象の観察に、既に理論という既存の枠組みがあることも事実である。計算論的アプローチとダイナミカルシステムアプローチの間で模索しているときにこのモデルと遭遇した。しかし、結果的には、そこで行った実験は、現段階では限りなく現実に近い実験設定となった。これは当然の帰結かもしれない。

最終的には、身体に働く物理則と環境との相互作用によって新たな運動パターンが創発するという結末であった。これは我々人間の身体運動がやはり環境の一部である、あるいは埋め込まれているという、そしてそこには Newton 力学の原理も息づいている。つまり、我々人間だけが高等で特別な存在ではなく、いわゆる物質として存在しているともいえる。35 億年の地球の歴史から見れば当然の結論かもしれない。人間だけに通用する理論は真理ではなく、すべての物質や生命に適用できる理論こそが真理かもしれない。だとすると、我々の心とは何か。身体動作と心理動作とが等価であるならば我々の心についても物理則が適用可能なのだろうか。

我々人類は地球の、いや宇宙の原理に支配される単なる物質と等価なのだろうか。もし多少なりとも違いがあるとするならば、それはきっとその原理を探求しようとするのと、探求によって得られた知を使うことかもしれない。

なおこのモデルについての概説は郷原 (1996) が、励起アトラクタについては郷原 (1995)、

高木・郷原 (1995) , フラクタル遷移については奥山・郷原 (1998), 佐藤・郷原 (1997) が参考になる . さらに , 揺らぎとノイズについては Gohara and Okuyama (1999b) が分かりやすい .

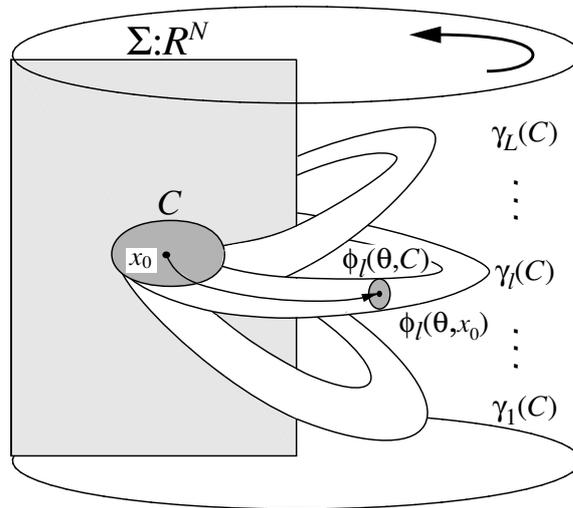


図 A.3: 超円筒状態空間 \mathcal{M} における解と軌道 . $\phi_l(\theta, x_0)$ と $\phi_l(\theta, C)$ は , 角度変数 θ において , 大域的ポアンカレ断面 Σ 上の初期状態 x_0 と初期状態集合 C から始まる各入力 I_l に対応するそれぞれの解 ϕ を表わす . 各入力に対応する軌道の集合が $\gamma_1(C), \dots, \gamma_l(C), \dots, \gamma_L(C)$. である . 大域的ポアンカレ断面 Σ は平面 R^2 として描いてあるが , 実際には N 次元状態空間 R^N である .

文献

- Abbs, J. H., Gracco, V., & Cole, K. J. (1984). Control of multimovement coordination: Sensorimotor mechanisms in speech motor programming. *Journal of Motor Behavior*, **16** (2), 195–231.
- Abernethy, B. (1988). Dual-task methodology and motor skills research: Some applications and methodological constraints. *Journal of Human Movement Studies*, **14**, 101–132.
- Adams, J. A. (1971). A closed-loop theory of motor learning. *Journal of Motor Behavior*, **3** (2), 111–149.
- Adams, J. A. (1990). The changing face of motor learning. *Human Movement Science*, **9**, 209–220.
- Adbel-Aziz, Y. I., & Karara, H. M. (1971). Direct linear transformation from comparator coordinates into object space coordinates in close-range photogrammetry. *Proceedings ASP/UI Symposium on Close-Range Photogrammetry*, 1–18. Falls Church, VA.
- Alderson, G. J. K., Sully, D. J., & Sully, H. G. (1974). An operational analysis of a one-handed catching task using high speed photography. *Journal of Motor Behavior*, **6** (4), 217–226.
- Alston, W., & Weiskopf, D. (1972). *The complete baseball handbook: Strategies and techniques for winning*. Boston: Allyn and Bacon.
- Anderson, D. I., & Sidaway, B. (1994). Coordination changes associated with practice of a soccer kick. *Research Quarterly for Exercise and Sport*, **65** (2), 93–99.
- Arbib, M. A. (1984). Visuomotor coordination: From neural nets to schema theory. In O. G. Selfridge, E. L. Rissland, & M. A. Arbib (Eds.), *Adaptive control of ill-defined systems*, 207–225. New York: Plenum Press.
- Arbib, M. A. (1985). Schemas for the temporal organization of behavior. *Human Neurobiology*, **4**, 63–72.
- Arbib, M. A. (1989). *The Metaphorical brain 2*. New York: John Wiley & Sons. (金子隆芳 訳 (1992). ニューラルネットと脳理論. 東京: サイエンス社.)
- 東洋 (1982). 教育との関連で見た認知心理学. 波多野 誼余夫 (編), 認知心理学講座 4 学習と発達, 1–13. 東京: 東京大学出版会.
- Baldissera, F., Cavallari, P., & Civaschi, P. (1982). Preferential coupling between voluntary movements of ipsilateral limbs. *Neuroscience Letters*, **34**, 95–100.
- Bandura, A. (1971). *Social learning theory*. Morristown, N. J.: General Learning. (原野 広太郎・福島 脩美 共訳 (1974). 人間行動の形成と自己制御 - 新しい社会的学習理論 -. 東京: 金子書房.)
- Barnsley, M. F. (1993). *Fractals everywhere* (2nd edition). San Diego, CA: Academic 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., & van Santvoord, A. A. M. (1992). Learning the cascade juggle: A dynamical system analysis. *Journal of Motor Behavior*, **24** (1), 85–94.
- Bernstein, N. A. (1967). *The co-ordination and regulation of movements*. London: Pergamon Press.
- Bernstein, N. A. (1996). On dexterity and its development. In M. L. Latash, & M. T. Turvey (Eds.), *Dexterity and its development*, 3–244. Mahwah, NJ: Lawrence Erlbaum Associates.
- Bizzi, E., Accornero, N., Chapple, W., & Hogan, N. (1984). Posture control and trajectory formation during arm movement. *Journal of Neuroscience*, **4** (11), 2738–2744.
- Bizzi, E., Polit, A., & Morasso, P. (1976). Mechanism underlying achievement of final head position. *Journal of Neurophysiology*, **39** (2), 435–444.
- Bootsma, R. J., Fayt, V., Zaal, F. T. J. M., & Laurent, M. (1997). On the information-based regulation of movement: What Wann (1996) may want to consider. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, **23** (4), 1282–1289.

- Bootsma, R. J., Houbiers, M. H. J., Whiting, H. T. A., & van Wieringen, P. C. W. (1991). Acquiring an attacking forehand drive: The effects of static and dynamic environmental conditions. *Research Quarterly for Exercise and Sport*, **62** (3), 276–284.
- Bootsma, R. J., & Peper, C. L. E. (1992). Predictive visual information sources for the regulation of action with special emphasis on catching and hitting. In L. Proteau, & D. Elliot (Eds.), *Vision and motor control*, 285–314. Amsterdam: Elsevier Science Publisher.
- Bootsma, R. J., & van Wieringen, P. C. W. (1990). Timing an attacking forehand drive in table tennis. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, **16** (1), 21–29.
- Bortoli, L., Robazza, C., Durigon, V., & Carra, C. (1992). Effects of contextual interference on learning technical sports skills. *Perceptual and Motor Skills*, **75**, 555–562.
- Breen, J. L. (1967). What makes a good hitter. *Journal of Health, Physical Education and Recreation*, **38**, 36–39.
- Brooks, R. A. (1991). Intelligence without representation. *Artificial Intelligence*, **47**, 139–159. (柴田 正良訳：表象なしの知能 (1990). 現代思想. **18** 85–105.)
- Bryan, W. L., & Harter, N. (1897). Studies in the psychology and psychology of the telegraphic language. *Psychological Review*, **4**, 27–53.
- Bryan, W. L., & Harter, N. (1899). Studies on the telegraphic language: The acquisition of a hierarchy of habits. *Psychological Review*, **6** (4), 345–375.
- Byblow, W. D., Chua, R., & Goodman, D. (1995). Asymmetries in coupling dynamics of perception and action. *Journal of Motor Behavior*, **27** (2), 123–137.
- 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. *Journal of Motor Behavior*, **27** (3), 211–224.
- 調枝 孝治 (1972). タイミングの心理. 東京: 不昧堂出版.
- Clarke, D. H. (1968). Effect of preliminary muscular tension on reaction latency. *Research Quarterly*, **39** (1), 60–66.
- Corbetta, D., & Thelen, E. (1996). The developmental origins of bimanual coordination: A dynamical perspective. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, **22** (2), 502–522.
- Cotten, D. J., & Denning, D. (1970). Comparison of reaction-movement times from four variations of the upright stance. *Research Quarterly*, **41** (2), 196–199.
- Davids, K. (1988). Ecological validity in understanding sport performance: Some problems of definition. *Quest*, **40**, 126–136.
- Diggles, V. A., Grabiner, M. D., & Garhammer, J. (1987). Skill level and effector visual feedback in ball catching. *Perceptual and Motor Skills*, **64**, 987–993.
- Dorfman, P. W. (1977). Timing and anticipation: A developmental perspective. *Journal of Motor Behavior*, **9** (1), 67–79.
- Eddington, A. S. (1928). *The nature of the physical world*. Cambridge: University Press. (寮 佐吉 訳 (1931). 物的世界の本质. 東京: 岩波書店.)
- Fagard, J., & Pez , A. (1997). Age changes in interlimb coupling and the development of bimanual coordination. *Journal of Motor Behavior*, **29** (3), 199–208.
- Fel'dman, A. G. (1966). Functional tuning of the nervous system with control of movement or maintenance of a steady posture. III. Mechanographic analysis of the execution by man of the simplest motor tasks. *Biofizika*, **11** (4), 766–775.
- Fischman, M. G., & Schneider, T. (1985). Skill level, vision, and proprioception in simple one-hand catching. *Journal of Motor Behavior*, **17** (2), 219–229.
- Fitzpatrick, P., Schmidt, R. C., & Carello, C. (1996a). Dynamical patterns in clapping behavior. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, **22** (3), 707–724.

- Fitzpatrick, P., Schmidt, R. C., & Lockman, J. J. (1996b). Dynamic patterns in the development of clapping. *Child Development*, **67**, 2691–2708.
- Flash, T., & Hogan, N. (1985). The coordination of arm movements: An experimentally confirmed mathematical model. *Journal of Neuroscience*, **5** (7), 1688–1703.
- Fontaine, R. J., Lee, T. D., & Swinnen, S. P. (1997). Learning a new bimanual coordination pattern: Reciprocal influences of intrinsic and to-be-learned patterns. *Canadian Journal of Experimental Psychology*, **51** (1), 1–9.
- Franks, I. M., Weicker, D., & 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** (1), 91–105.
- French, K. E., Rink, J. E., & Werner, P. H. (1990). Effects of contextual interference on retention of three volleyball skills. *Perceptual and Motor Skills*, **71**, 179–186.
- Fuchs, A., Kelso, J. A. S., & Haken, H. (1992). Phase transitions in the human brain: Spatial mode dynamics. *International Journal of Bifurcation and Chaos*, **2** (4), 917–939.
- Furubayashi, T., & Kasai, T. (1990). Influence of initial forearm position on premotor times (PMTs) of the biceps brachii during an elbow flexion task. *Human Movement Science*, **9**, 583–598.
- Gibson, J. J. (1966). *The senses considered as perceptual systems*. Boston: Houghton Mifflin.
- 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.)
- 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 - 励起アトラクタモデル - . 電子情報通信学会技術研究報告, **NC94-153**, 299–306.
- 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., & Okuyama, A. (1999a). Dynamical systems excited by temporal inputs: Fractal transition between excited attractors. *Fractals*, **7** (2), 205–220.
- Gohara, K., & Okuyama, A. (1999b). Fractal transition: Hierarchical structure and noise effect. *Fractals*, **7** (3), 313–326.
- Goode, S., & Magill, R. A. (1986). Contextual interference effects in learning three badminton serves. *Research Quarterly for Exercise and Sport*, **57** (4), 308–314.
- Haken, H. (1983). *Advanced synergetics: Instability hierarchies of self-organizing systems and devices*. Berlin: Springer. (斎藤 信彦・小森 尚志・長島 知正 共訳 (1986). シナジェティクスの基礎 - 不安定性の階層システムとデバイスの自己組織化. 東京: 東海大学出版会.)
- Haken, H., Kelso, J. A. S., & Bunz, H. (1985). A theoretical model of phase transitions in human hand movements. *Biological Cybernetics*, **51** (5), 347–356.
- Hall, K. G., Domingues, D. A., & Cavazos, R. (1994). Contextual interference effects with skilled baseball players. *Perceptual and Motor Skills*, **78**, 835–841.
- 橋田 浩一 (1994). 認知科学における論争. 安西 祐一郎・市川 伸一・外山 敬介・川人 光男・橋田 浩一 (編), 岩波講座認知科学 2 脳と心のモデル, 149–180. 東京: 岩波書店.
- Hay, J. G. (1978). *Baseball*. Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall.
- Haywood, K. M. (1977). Eye movements during coincidence-anticipation performance. *Journal of Motor Behavior*, **9** (4), 313–318.
- Hebert, E. P., Landin, D., & Solmon, M. A. (1996). Practice schedule effects on the performance and learning of low- and high-skilled students: An applied study. *Research Quarterly for Exercise and Sport*, **67** (1), 52–58.
- Henry, F. M., & Rogers, D. E. (1960). Increased response latency for complicated movements and a "memory drum" theory of neuromotor reaction. *Research Quarterly*, **31** (3), 448–458.

- Heuer, H., & Wing, A. M. (1984). During two things at once: Process limitations and interactions. In M. M. Smyth, & A. M. Wing (Eds.), *The psychology of human movement*, 183–214. London: Academic Press.
- Hewitt, J. E. (1966). Hewitt's tennis achievement test. *Research Quarterly*, **37** (2), 231–240.
- 平野 裕一 (1984). バットによる打動作. *Japanese Journal of Sports Science*, **3** (3), 199–208.
- 平野 裕一 (1992). 打つ科学. 東京: 大修館書店.
- 平野 裕一・宮下 充正 (1983). 野球の打撃の基本動作に関する研究. 日本バイオメカニクス学会編 (編), *身体運動の科学 V*, 260–267. 東京: 杏林書院.
- 堀田 朋基・宮本 浩哉・山地 啓司・北村 潔和 (1988). バレーボールのスパイクにおける上肢の動作の定量解析. *Japanese Journal of Sports Science*, **7** (4), 256–262.
- Howorth, B. (1946). Dynamic posture. *Journal of American Medical Association*, **131** (17), 1398–1404.
- Hoyt, D. F., & Taylor, C. R. (1981). Gait and the energetics of locomotion in horses. *Nature*, **292**, 239–240.
- Hutchinson, J. E. (1981). Fractals and self similarity. *Indiana University Mathematics Journal*, **30**, 713–747.
- Iberall, A. (1970). Periodic phenomena in organisms seen as non-linear systems. *Theoria to theory*, **4**, 40–53.
- 池上 康男 (1983). 写真撮影による運動の 3 次元解析法. *Japanese Journal of Sports Science*, **2** (3), 163–170.
- 池上 康男・桜井 伸二・矢部 京之助 (1991). DLT 法. *Japanese Journal of Sports Science*, **10**, 191–195.
- 池内 了 (1996). 岩波科学ライブラリー 38 転回の時代に - 科学の今を考える -. 東京: 岩波書店.
- Ingvaldsen, R. P., & Whiting, H. T. A. (1997). Modern views on motor skill learning are not 'representative'! *Human Movement Science*, **16**, 705–732.
- Isaacs, L. D. (1983). Coincidence-anticipation in simple catching. *Journal of Human Movement Studies*, **9**, 195–201.
- Isaacs, L. D. (1990). Effects of angle of approach on coincidence-anticipation timing within a two target display. *Journal of Human Movement Studies*, **19**, 171–179.
- 伊藤 宏司・伊藤 正美 (1991). 生体とロボットにおける運動制御. 東京: 社団法人 計測自動制御学会.
- Ito, M. (1970). Neurophysiological aspects of the cerebellar motor control system. *International Journal of Neurology*, **7**, 162–176.
- Jackson, K. M. (1979). Fitting of mathematical functions to biomechanical data. *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, **BME-26** (2), 122–124.
- Jeka, J. J., Kelso, J. A. S., & Kiemel, T. (1993). Spontaneous transitions and symmetry: Pattern dynamics in human four-limb coordination. *Human Movement Science*, **12**, 627–651.
- Jirsa, V. K., Friedrich, R., Haken, H., & Kelso, J. A. S. (1994). A theoretical model of phase transitions in the human brain. *Biological Cybernetics*, **71**, 27–35.
- Johansson, G. (1973). Visual perception of biological motion and a model for its analysis. *Perception and Psychophysics*, **43** (2), 201–211.
- Judge, S. J., & Bradford, C. M. (1989). Adaptation to telestereoscopic viewing measured by one-handed ball-catching performance. *Perception*, **17**, 783–802.
- 笠井 達哉 (1981). 下肢肢位変化による反応時間と H 波の変動性. *体育学研究*, **26** (2), 129–135.
- 川人 光男 (1996). 脳の計算理論. 東京: 産業図書.
- Kay, B. A. (1988). The dimensionality of movement trajectories and the degrees of freedom problem: A tutorial. *Human Movement Science*, **7**, 343–364.

- Kelso, J. A. S. (1981). On the oscillatory basis of movement. *Bulletin of the Psychonomic Society*, Vol. 18, p. 63.
- Kelso, J. A. S. (1984). Phase transitions and critical behavior in human bimanual coordination. *American Journal of Physiology*, **246**, R1000–R1004.
- Kelso, J. A. S., Bressler, S. L., Buchanan, S., DeGuzman, G. C., Ding, M., Fuchs, A., & Holroyd, T. (1991). Cooperative and critical phenomena in the human brain revealed by multiple SQUIDS. In D. W. Duke, & W. S. Pitchard (Eds.), *Proceedings of the conference on measuring chaos in the human brain*, 97–112. Singapore: World Scientific.
- Kelso, J. A. S., Bressler, S. L., DeGuzman, S. B. G. C., Ding, M., Fuchs, A., & Holroyd, T. (1992). A phase transition in human brain and behavior. *Physics Letters A*, **169**, 134–144.
- Kelso, J. A. S., DelColle, J. D., & Schöner, G. (1990). Action-perception as a pattern formation process. In M. Jeannerod (Ed.), *Attention and performance XIII*, 139–169. Hillsdale, NJ: Erlbaum.
- Kelso, J. A. S., Scholz, J. P., & Schöner, G. (1986). Nonequilibrium phase transitions in coordinated biological motion: Critical fluctuations. *Physics Letter A*, **118** (6), 279–284.
- Kelso, J. A. S., Scholz, J. P., & Schöner, G. (1988). Dynamics governs switching among patterns of coordination in biological movement. *Physics Letters A*, **134** (1), 8–12.
- Knudson, D. V. (1990). Intrasubject variability of upper extremity angular kinematics in the tennis forehand drive. *International Journal of Sport Biomechanics*, **6**, 415–421.
- 小山 哲・伊藤 友記・吉井 泉・山本 裕二 (1990). 力量調整を伴うタイミング動作の分析. 中京大学体育学論叢, **32** (1), 1–9.
- 工藤 孝幾 (1984). タイミングの遅延反応に関する分析. 体育学研究, **29** (3), 195–205.
- 工藤 孝幾 (1986). タイミング. 麓 信義・工藤 孝幾・伊藤 政展, *運動行動の心理学*, 143–146. 東京: 高文堂出版社.
- 工藤 孝幾 (1987). バッティング動作におけるタイミングの分析. 体育学研究, **31** (4), 285–292.
- Kugler, P. N. (1986). A morphological perspective on the origin and evolution of movement patterns. In M. G. Wade, & H. T. A. Whiting (Eds.), *Motor development in children: Aspects of coordination and control*, 459–525. Dordrecht, The Netherlands: Martinus Nijhoff.
- 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. Raquin (Eds.), *Tutorials in motor behavior*, 3–47. Amsterdam: North-Holland.
- Kugler, P. N., & Turvey, M. T. (1987). *Information, natural law, and self-assembly of rhythmic movement*. Hillsdale, NJ: Lawrence Erlbaum Associates.
- Kugler, P. N., & Turvey, M. T. (1988). Self-organization, flow fields, and information. *Human Movement Science*, **7**, 97–129.
- Lacquaniti, F., & Maioli, C. (1989). Adaptation to suppression of visual information during catching. *Journal of Neuroscience*, **9** (1), 149–159.
- Lashley, K. S. (1917). The accuracy of movement in the absence of excitation from the moving organ. *American Journal of Physiology*, **43**, 169–194.
- Lashley, K. S. (1951). The problem of serial order in behavior. In L. A. Jeffress (Ed.), *Cerebral mechanisms in behavior: The Hixon symposium*, 112–136. New York: Wiley.
- Lee, D. N. (1976). A theory of visual control of braking based on information about time-to-collision. *Perception*, **5**, 437–459.
- Lee, D. N., & Lishman, J. R. (1975). Visual proprioceptive control of stance. *Journal of Human Movement Studies*, **1**, 87–95.
- Lee, D. N., & Reddish, P. E. (1981). Plummeting gannets: A paradigm of ecological optics. *Nature*, **293**, 293–294.

- Lee, W. A. (1980). Anticipatory control of postural and task muscles during rapid arm flexion. *Journal of Motor Behavior*, **12** (3), 185–196.
- Leonard, J. A. (1959). Tactual choice reaction: I. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, **11**, 76–83.
- Logan, F. A., & Wagner, A. R. (1965). *Reward and punishment*. Boston: Allyn and Bacon. (富田 達彦 訳 (1975). 報酬と罰 - 動機づけの学習心理学 - . 東京 : 清水弘文堂.)
- Loockerman, W. D. (1973). A comparison of the open and closed foot stance for reaction and movement times. *Journal of Motor Behavior*, **5** (1), 57–63.
- MacKenzie, C. L. (1992). Constraints, phases and sensorimotor processing in prehension. In G. E. Stelmach, & J. Requin (Eds.), *Tutorials in motor behavior II*, 371–398. Amsterdam: Elsevier Science Publishers B. V.
- Marteniuk, R. G. (1992). Issues in goal directed motor learning: Feedforward control, motor equivalence, specificity, and artificial neural networks. In G. E. Stelmach, & J. Requin (Eds.), *Tutorials in motor behavior II*, 101–124. Amsterdam: Elsevier Science Publishers B. V.
- Marteniuk, R. G., MacKenzie, C. L., Jeannerod, M., Athenes, S., & Dugas, C. (1987). Constraints on human arm movement trajectories. *Canadian Journal of Psychology*, **41** (3), 365–378.
- Marteniuk, R. G., MacKenzie, C. L., & Leavitt, J. L. (1990). The inadequacies of a straight physical account of motor control. In H. T. A. Whiting, O. G. Meijer, & P. C. W. van Wieringen (Eds.), *The natural-physical approach to movement control*, 95–115. Amsterdam: VU University Press.
- 松永 尚久・笠井 恵雄・多和 健雄・鯛谷 隆・小野 桂一・塚越 克巳 (1966). 投球動作に関する分析的研究 (第 2 報) - ソフトボールの内野手による - . 体育学研究, **11** (1), 209.
- 松永 尚久・笠井 恵雄・多和 健雄・江田 昌祐・鯛谷 隆・小野 桂市・太田 裕造・池田 武芳・梶野 克之 (1967). 投球動作に関する分析的研究 (3) - 内野手の習熟過程 - . 体育学研究, **11** (5), 147.
- 松永 尚久・笠井 恵雄・多和 健雄・江田 昌祐・鯛谷 隆・太田 裕造・柳原 英児・池田 武芳・小野 桂市・大北 文生 (1968). 投球動作に関する分析的研究 (4) - 内野手の習熟過程について - . 体育学研究, **12** (5), 142.
- Matsuo, T., & Kasai, T. (1994). Timing strategy of baseball-batting. *Journal of Human Movement Studies*, **27**, 253–269.
- McIntyre, D. R., & Pfautsch, E. W. (1982). A kinematic analysis of the baseball batting swings involved in opposite-field and same-field hitting. *Research Quarterly for Exercise and Sport*, **53** (3), 206–213.
- McLeod, P., & 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** (3), 531–543.
- Meijer, O. G., & Roth, K. (Eds.) (1988). *Complex movement behaviour: 'The' motor-action controversy*. Amsterdam: Elsevier Science Publishers B.V.
- Meinel, K. (1960). *Bewegungslehre*. Berlin: Volk und Wissen Volkseigener. (金子 明友 訳 (1981). スポーツ運動学. 東京 : 大修館書店.)
- Messier, S. P., & Owen, M. (1985). The mechanics of batting: Analysis of ground reaction forces and selected lower extremity kinematics. *Research Quarterly for Exercise and Sport*, **56** (2), 138–143.
- Michaels, C. F., & Oudejans, R. R. D. (1992). The optics and actions of catching fly balls: Zeroing out optical acceleration. *Ecological Psychology*, **4** (4), 199–222.
- Mitra, S., Amazeen, P. G., & Turvey, M. T. (1998). Intermediate motor learning as decreasing active (dynamical) degrees of freedom. *Human Movement Science*, **17**, 17–65.
- Mitra, S., Riley, M. A., & Turvey, M. T. (1997). Chaos in human rhythmic movement. *Journal of Motor Behavior*, **29** (3), 195–198.

- Mottet, D., & Bootsma, R. J. (1999). The dynamics of goal-directed rhythmical aiming. *Biological Cybernetics*, **80**, 235–245.
- 室増男 (1983). ラケットスイング時の床反力と筋電図の解析. *Japanese Journal of Sports Science*, **2**(4), 260–268.
- 長島弘幸・馬場良和 (1992). カオス入門 - 現象の解析と数理 -. 東京: 培風館.
- 永田晟・室増男・北本拓 (1983). バッティングスポーツの運動比較 - 身体各部位のスイング軌跡. 日本バイオメカニクス学会編 (編), 身体運動の科学 IV スポーツのバイオメカニクス, 133–146. 東京: 杏林書院.
- 中嶋康博 (1989). VIP のテニス・ドック. 東京: テニスジャーナル.
- 中村隆一・斎藤宏 (1974). 促通肢位と反応時間 - 下肢について -. 総合リハビリテーション, **2**(7,8), 583–587.
- 中村隆一・斎藤宏 (1992). 基礎運動学 第4版. 東京: 医歯薬出版.
- 中村雄二郎 (1992). 臨床の知とは何か. 東京: 岩波新書.
- 奈良雅之・笠井達哉 (1991). 運動開始前の前腕位および手関節角度の違いが肘屈曲動作の反応時間に及ぼす影響. 体育学研究, **35**, 349–358.
- Newell, K. M. (1985). Coordination, control and skill. In D. Goodman, R. B. Wilberg, & I. M. Franks (Eds.), *Differing perspectives in motor learning, memory, and control*, 295–317. Amsterdam: Elsevier Science Publishers B. V.
- Newell, K. M., Hoshizaki, L. E. F., Carlton, M. J., & Halbert, J. A. (1979). Movement time and velocity as determinants of movement timing accuracy. *Journal of Motor Behavior*, **11**(1), 49–58.
- Nigg, B. M., & Cole, G. K. (1994). Optical methods. In B. M. Nigg, & W. Herzog (Eds.), *Biomechanics of the musculo-skeletal system*, 254–286. Chichester, England: John Wiley & Sons.
- 大道等 (1984). テニスラケットの機械的反応とストローク動作. *Japanese Journal of Sports Science*, **3**(3), 209–220.
- 大道等 (1993). テニスストロークの身体近位・遠位動作. *Japanese Journal of Sports Science*, **12**(6), 364–371.
- 大道等・宮下充正 (1983). テニスストロークにおける四肢関節運動の再現性と技術水準. 日本バイオメカニクス学会編 (編), 身体運動の科学 V, 268–274. 東京: 杏林書院.
- 大築立志 (1988). 「たくみ」の科学. 東京: 朝倉書店.
- 奥山新・郷原一寿 (1998). 複数の外力に励起された Duffing 振動子系におけるアトラクタ間遷移. 電子情報通信学会技術研究報告, NLP97-136, NC97-88, 1–8.
- 大須理英子 (1995). 腕の随意運動を実現するメカニズム. 心理学評論, **38**(3), 368–395.
- Payne, V. G. (1986). The effects of stimulus runway length on coincidence anticipation timing performance. *Journal of Human Movement Studies*, **12**, 289–295.
- Payne, V. G. (1987). Effects of angle of stimulus approach on coincidence-anticipation timing performance. *Journal of Human Movement Studies*, **13**, 383–390.
- 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.
- Payne, V. G., & 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.
- Peper, L., Bootsma, R. J., Mestre, D. R., & 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**(3), 591–612.

- Populin, L., Rose, D. J., & Heath, K. (1990). The role of attention in one-handed catching. *Journal of Motor Behavior*, **22** (1), 149–158.
- Prigogine, I., & Nicolis, G. (1971). Biological order, structure and stabilities. *Quarterly Reviews of Biophysics*, **4** (2 & 3), 107–148.
- Race, D. E. (1961). A cinematographic and mechanical analysis of the external movements involved in hitting a baseball effectively. *Research Quarterly*, **32** (2), 394–404.
- Runeson, S., & Frykholm, G. (1983). Kinematic specification of dynamics as an informational basis for person-and-action perception: Expectation, gender recognition, and deceptive intention. *Journal of Experimental Psychology: General*, **112** (4), 585–615.
- 佐藤省三・郷原一寿 (1997). リカレントネットワークにおけるフラクタル遷移の実験的検証. 電子情報通信学会技術研究報告, NLP-96-140 (NC96-94), 123–130.
- Savelsbergh, G. J. P., Whiting, H. T. A., & Bootsma, R. J. (1991). Grasping tau. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, **17** (2), 315–322.
- Savelsbergh, G. J. P., Whiting, H. T. A., Burden, A. M., & 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.
- Schmidt, R. A. (1969). Movement time as a determiner of timing accuracy. *Journal of Experimental Psychology*, **79**, 43–47.
- Schmidt, R. A. (1975). A schema theory of discrete motor skill learning. *Psychological Review*, **82** (4), 225–260.
- Schmidt, R. A. (1988). *Motor control and learning*. Champaign, IL: Human Kinetics.
- Schmidt, R. A. (1991). *Motor learning and performance: From principles to practice*. Champaign, IL: Human Kinetics. (調枝 孝治 監訳 (1994). 運動学習とパフォーマンス. 東京: 大修館書店.)
- Schmidt, R. A., & Stull, G. A. (1970). Premotor and motor reaction time as a function of preliminary muscular tension. *Journal of Motor Behavior*, **2** (2), 96–110.
- Schmidt, R. C., Carello, C., & 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** (2), 227–247.
- Schöner, G. (1989). Learning and recall in a dynamic theory of coordination patterns. *Biological Cybernetics*, **62**, 39–54.
- Schöner, G. (1990). A dynamical theory of coordination of discrete movement. *Biological Cybernetics*, **63**, 257–270.
- Schöner, G., Haken, H., & Kelso, J. A. S. (1986). A stochastic theory of phase transitions in human hand movement. *Biological Cybernetics*, **53**, 247–257.
- Schöner, G., & Kelso, J. A. S. (1988a). Dynamic pattern generation in behavioral and neural systems. *Science*, **39**, 1513–1520.
- Schöner, G., & Kelso, J. A. S. (1988b). A dynamic pattern theory of behavioral change. *Journal of Theoretical Biology*, **135**, 501–524.
- Schöner, G., & Kelso, J. A. S. (1988c). A synergetic theory of environmentally-specified and learned patterns of movement coordination. *Biological Cybernetics*, **58**, 71–80.
- Sharp, R. H., & Whiting, H. T. A. (1974). Exposure and occluded duration effects in a ball-catching skill. *Journal of Motor Behavior*, **6** (3), 139–147.
- Sharp, R. H., & Whiting, H. T. A. (1975). Information-processing and eye movement behavior in a ball catching skill. *Journal of Human Movement Studies*, **1**, 124–131.
- Skinner, B. F. (1938). *The behavior of organisms: An experimental analysis*. New York: Appleton-Century-Crofts.
- Slater-Hammel, A. T. (1953). Initial body position and total body reaction time. *Research Quarterly*, **24** (1), 91–96.

- Smyth, M. M., & Marriott, A. M. (1982). Vision and proprioception in simple catching. *Journal of Motor Behavior*, **14** (2), 143–152.
- Swinnen, S. P., Walter, C. B., Lee, T. D., & Serrien, D. J. (1993). Acquiring bimanual skills: Contrasting forms of information feedback for interlimb decoupling. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, **19** (6), 1328–1344.
- Taga, G. (1994). Emergence of bipedal locomotion through entrainment among the neuro-musculo-skeletal system and the environment. *Physica D*, **75**, 190–208.
- 高木 秀彦・郷原 一寿 (1995). 励起アトラクタの実験的検証. 電子情報通信学会技術研究報告, **NC94-154**, 307–314.
- Thorndike, E. L. (1911). *Animal intelligence : Experimental studies*. New York: Macmillan.
- Thorndike, E. L. (1927). The law of effect. *American Journal of Psychology*, **39**, 212–222.
- 友末 亮三・瀬戸 宰・宮下 充正 (1982). テニスにおけるラケットの動きとボールの速度. *Japanese Journal of Sports Science*, **1** (1), 73–75.
- Turvey, M. T., Rosenblum, L. D., Schmidt, R. C., & Kugler, P. N. (1986). Fluctuations and phase symmetry in coordinated rhythmic movements. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, **12** (4), 564–583.
- Tyldesley, D. A., & Whiting, H. T. A. (1975). Operational timing. *Journal of Human Movement Studies*, **1**, 172–177.
- Uno, Y., Kawato, M., & Suzuki, R. (1989). Formation and control of optimal trajectory in human multijoint arm movement: Minimum torque-change model. *Biological Cybernetics*, **61**, 89–101.
- Vereijken, B., Emmerik, R. E. A. V., Bongardt, R., Beek, W. J., & Newell, K. M. (1997). Changing coordinative structures in complex skill acquisition. *Human Movement Science*, **16**, 823–844.
- Vereijken, B., Whiting, H. T. A., & Beek, W. J. (1992). A dynamical systems approach to skill acquisition. *The Quarterly Journal of Experimental Psychology*, **45A** (2), 323–344.
- Wallenstein, G. V., Kelso, J. A. S., & Bressler, S. L. (1995). Phase transitions in spatiotemporal patterns of brain activity and behavior. *Physica D*, **84**, 626–634.
- Whiting, H. T. A., Alderson, G. J. K., & Sanderson, F. H. (1973). Critical time intervals for viewing and individual differences in performance of a ball catching task. *International Journal of Sport Psychology*, **4**, 155–164.
- Whiting, H. T. A., Gill, E. B., & Stephenson, J. M. (1970). Critical time intervals for taking flight information in ball-catching task. *Ergonomics*, **13** (2), 265–272.
- Whiting, H. T. A., & Sharp, R. H. (1974). Visual occlusion factors in a discrete ball-catching task. *Journal of Motor Behavior*, **6** (1), 11–16.
- Whiting, H. T. A., & Vereijken, B. (1993). The acquisition of coordination in skill learning. *International Journal of Sport Psychology*, **24**, 343–357.
- Whiting, H. T. A., Vogt, S., & Vereijken, B. (1992). Human skill and motor control: Some aspects of the motor control - motor learning relation. In J. J. Summers (Ed.), *Approaches to the study of motor control and learning*, 81–111. Amsterdam: Elsevier Science Publishers.
- Wickstrom, R. L. (1975). Developmental kinesiology: Maturation of basic motor patterns. In J. H. Wilmore, & J. F. Keog (Eds.), *Exercise and sports science review*, Vol. 3, 163–192. New York: Academic Press.
- Wiener, N. (1961). *Cybernetics or control and communication in the animal and the machine* (2nd. edition). Cambridge, MA: MIT Press. (池原 止戈夫・彌永 昌吉・室賀 三郎・戸田 巖 共訳 (1962). 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.).
- Wimmers, R. H., Beek, P. J., & van Wieringen, P. C. W. (1992). Phase transitions in rhythmic tracking movements: A case of unilateral coupling. *Human Movement Science*, **11**, 217–226.

- Winter, D. A. (1990). *Biomechanics and motor control of human movement*. New York: John Wiley & Sons.
- Wollstein, J. R., & Abernethy, B. (1988). Timing structure in squash strokes: Further evidence for the operational timing. *Journal of Human Movement Studies*, **15** (1), 61–79.
- Woollacott, M. H., Bonnet, M., & Yabe, K. (1984). Preparatory process for anticipatory postural adjustments: Modulation of leg muscles reflex pathways during preparation for arm movements in standing man. *Experimental Brain Research*, **55**, 263–271.
- Wrisberg, C. A. (1991). A field test of the effect of contextual variety during skill acquisition. *Journal of Teaching in Physical Education*, **11**, 21–30.
- Wrisberg, C. A., & Liu, Z. (1991). The effects of contextual interference variety on the practice, retention, and transfer of an applied motor skill. *Research Quarterly for Exercise and Sport*, **62** (4), 406–412.
- Wrisberg, C. A., & Mead, B. J. (1981). Anticipation of coincidence in children: A test of schema theory. *Perceptual and Motor Skills*, **52**, 599–606.
- Wrisberg, C. A., & Mead, B. J. (1983). Developing coincident timing skill in children: A comparison of training methods. *Research Quarterly for Exercise and Sport*, **54** (1), 67–74.
- Wrisberg, C. A., Paul, J. H., & Ragsdale, M. R. (1979). Subject gender, knowledge of results, and receptor anticipation. *Research Quarterly*, **50** (4), 699–708.
- Wrisberg, C. A., & 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** (2), 159–166.
- Yamada, N. (1995). Nature of variability in rhythmical movement. *Human Movement Science*, **14**, 371–384.
- 山本 裕二 (1994). テニスのボレー動作におけるタイミングエラーとスペーシングエラーの分析. 総合保健体育科学, **17** (1), 41–50.
- 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** (3), 87–98.
- Yamamoto, Y. (1996). The relation between preparatory stance and trunk rotation movements. *Human Movement Science*, **15** (6), 899–908.
- 山本 裕二 (1997). 打動作の制御と学習 - 運動学習研究のこれから - . バイオメカニクス研究, **1** (3), 265–268.
- 山本 裕二 (1999a). 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. 総合保健体育科学, **22** (1), 1–12.
- 山本 裕二 (1999b). 打球動作学習で何が獲得されるか - 計算論とダイナミカルシステムの立場から - . 東海保健体育科学, **21**, 15–30.
- 山本 裕二 (2000). Kelso の dynamic pattern への行程. 総合保健体育科学, **23** (1), 13–17.
- 山本 裕二・竹之内 隆志 (1996). テニスの技能学習で初心者には何がなぜ難しいのか? - 自己評価チェックリストからの検討 - . スポーツ心理学研究, **23** (1), 7–15.
- 山本 裕二・池上 康男・桜井 伸二 (1997). 打動作における柔軟さと固さ - 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, 188–189.
- 山本 裕二・郷原 一寿 (1999). 巧みな動き - 入出力の連続性と多様性 - . 認知科学, **6** (3), 332–345.
- Yamamoto, Y., & Gohara, K. (2000a). Continuous hitting movement modeled from the perspective of dynamical systems with temporal input. *Human Movement Science*, **19** (3), 341–371.
- Yamamoto, Y., & Gohara, K. (2000b). Nonlinear dynamics of a continuous hitting action: Input frequency and hierarchical structure of output. In B. Vereijken, A. van der Meer, R. van der Weel, & N. S. Kaye (Eds.), *Advances in perception-action research, Proceedings of Sixth European Workshop on Ecological Psychology*, 71–74.
- 山本 裕二・郷原 一寿・原 伸行 (1998). 2つの入力パターンに対応した運動パターンをどのようにして切り換えるのか? 3D映像, **12** (3), 71–76.

- 吉永良正 (1996). 「複雑系」とは何か. 東京: 講談社現代新書.
- 吉澤正尹・熊本水頼 (1983). テニス・グランド・ストロークの動作学的ならびに筋電図学的研究. *Japanese Journal of Sports Science*, **2**, 394–400.
- Zanone, P. G., & Kelso, J. A. S. (1992a). Evolution of behavioral attractors with learning: Nonequilibrium phase transitions. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, **18** (2), 403–421.
- Zanone, P. G., & Kelso, J. A. S. (1992b). Learning and transfer as dynamical paradigms for behavioral change. In G. E. Stelmach, & J. Requin (Eds.), *Tutorials in motor behavior II*, 563–582. Amsterdam: Elsevier Science Publishers.
- Zanone, P. G., & Kelso, J. A. S. (1994). The coordination dynamics of learning: Theoretical structure and experimental agenda. In S. Swinnen, H. Heuer, J. Massion, & P. Casaer (Eds.), *Interlimb coordination: Neural, dynamical and cognitive constraints*, 461–490. New York: Academic Press.
- Zanone, P. G., & Kelso, J. A. S. (1997). Coordination dynamics of learning and transfer: Collective and component levels. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, **23** (5), 1454–1480.

付記

本論文に関する主要学術論文は以下のとおりである。

第1章

山本裕二 (1997). 打動作の制御と学習 - 運動学習研究のこれから - . バイオメカニクス研究, 1 (3), 265–268.

第3章

Yamamoto Y. (1996). The relation between preparatory stance and trunk rotation movement. *Human Movement Science*, 15, 899–908.

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 (3), 87–98.

第5章

Yamamoto, Y. & Gohara, K. (2000). Continuous hitting movement modeled from the perspective of dynamical systems with temporal input. *Human Movement Science*, 19, 341–371.

山本裕二・郷原一寿・原伸行 (1998). 2つの入力パターンに対応した運動パターンをどのようにして切り換えるのか? 3D映像, 12 (3), 71–76.

山本裕二・郷原一寿 (1999). 巧みな動き - 入出力の連続性と多様性 - . 認知科学, 6 (3), 332–345.

山本裕二 (1999). 打球動作で何が獲得されるか - 計算論とダイナミカルシステムの立場から - . 東海保健体育科学, 21 15–30.

謝 辞

本論文は多くの人達に支えられてようやく完成した。

本論文に関して、吉田茂先生には終始丁寧に読んでいただき、的確な示唆をいただいた。佐藤臣彦先生、阿江通良先生の力添えによって、本論文が少しでもわかりやすく読みやすい文章になったであろう。また中込四郎先生には、論文の入口と出口は誰にでも理解できるようにという貴重な示唆をいただいた。

本論文での実験は現在所属する名古屋大学総合保健体育科学センターでの仕事であり、全スタッフに支えていただいた。現在のセンター長である矢部京之助先生をはじめ、池上康男先生と桜井伸二先生には、3次元動作分析に関して、実験も含めて全てを教わった。竹之内隆志先生には、幾度となく予備実験につきあっていただいた。

本論文で援用したダイナミカルシステムモデルを提唱している北海道大学工学研究科の郷原一寿先生と、関連研究会を主宰している名古屋大学人間情報学研究科・認知情報論講座の斎藤洋典先生に感謝の意を表したい。

また、本論文における実験のほとんどは、運動学習研究会で多くの示唆をいただきまってきたものである。

昨年、2ヶ月間ノルウェーとフランスを文部省短期在外研究員として訪れる機会を得た。この間に議論させていただいた、John Whitingをはじめ全ての人達との議論が論文の完成に拍車をかけた。

これら全ての方々にあらためて感謝したい。

最後に、本論文での実験に参加してくれた被験者の人達にも、お礼を述べたい。人類の代表として貴重なデータを提供していただいた。そしてその貴重なデータを、まるで遺跡の発掘作業のように、気の遠くなるようなビデオのデジタイズ作業を根気よくやっていただいた、児玉洋子さんと佐野幸奈さんの存在が本論文を支えている。あらためて感謝したい。

複雑さに挑むダイナミカルシステム理論は，現実からの挑戦をこれからも受け続けていくであろう．これまで支えてきていただいた人達のためにも，さらに「動きの知」の構築に向け謙虚に現象を見て，動き続けていきたい．

2001年3月

山本 裕二