

運動学習研究の課題

— 運動学習理論の変遷と理論モデルの考え方 —

愛知教育大学 筒井 清次郎

An Issue in Motor Learning Studies: Changes in Motor Learning Theories and an Idea of Theoretical Model

Seiji Tsutsui Aichi University of Education

Abstract

Changes of motor learning theories and hypotheses, which were classical learning theories, schema theory, practice variability hypothesis, contextual interference effect, and coordination learning, were reviewed and motor learning studies were classified into three stages after an unsatisfactory feeling with motor learning theories was suggested. Three stages of motor learning were parameter learning, in which learners only need to acquire a set of most suitable parameters adjusted into already acquired motor program, program learning, in which learners have to acquire a new motor program in order to perform a task, and coordination learning, in which learners have to acquire both decreases of variability in parameters and compensatory relationship between the parameters. Further, the necessity to examine adaptive control process in motor learning was suggested. Finally the meaning that human beings acquire new motor skills was describes from their desire for optimal complication according to author private perspective, in which both intellectual curiosity and perceived competence were regarded as important.

Key words: motor learning, parameter learning, program learning, coordination learning, adaptive control

1. 運動学習理論に対する不満足感

運動学習とは、熟練したパフォーマンス能力に比較的永続的な変化を導く練習や経験に関連した一連の過程である(シュミット, 1994)。この運動学習を説明する理論としては、運動学習分野の教科書の多く(e.g., Schmidt & Lee, T.D., 1999)が、Adams (1971)の閉回路理論(closed-loop theory)と、閉回路理論を発展させたSchmidt (1975)のスキーマ理論(schema theory)を主たるものとしてあげている。これら2つの理論は、人間の脳機能をコンピューターの情報処理過程から類推した情報处理的アプローチに基づくものであり、主として実験室で行われた直線的位置決め課題を用いた知見が基礎になっている。しかし、この直線的位置決め課題に関連する要因は限定されており、このような運動において得られた知見を、非常に多くの複雑な要因を含む運動にまで適用することには違和感が残る。実際に、アクションリスト(e.g., Newell & McDonald, 1992)は、情報处理的アプローチから得られた知見を用いて、巧みな協応動作を説明するには問題があることを指摘している。

この違和感は、東(1982)が述べている教育学の研究者が心理学における知見に対して感じる違和感と共通するものではないだろうか。東は、教育学の研究者が感じるいらだちの原因を、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、問題の本質が保持されていなくても、もとの問題を科学的に解いたように振る舞い、問題をすり替えていることによると考えている。たとえば、非常に洞察が困難な問題状況では、試行錯誤による学習が多いが、問題解決の能力を育てようとする教育場面では、試行錯誤的な学習にはしらないで、組織的に方略をたてて課題を習得することが重要となることが多い。このような点から、特定の状況における知見を、普遍的な知見として扱おうとすることには慎重でなければならない。

運動学習においても同様のことがあてはまる。たとえば、制御すべき自由度が一つの動作

の学習と関連する2つ以上の自由度を制御する動作の学習では、必要とされるものが異なってくる(ジョルダン・ローゼンバウム, 1989)。キネマティックなレベルで考えても、自由度が一つの動作の学習は同一軌道の正確な再生が最終目標になるのに対し、2つ以上の自由度を持つ動作の学習においては、各関節の同一軌道の正確な再生に留まらず、関節間の協応というレベルまで学習に含まれる。身体内部のノイズや揺らぎ、及び、環境の変動性を考慮すれば各関節が同一軌道で運動を遂行することはめったになく、特定の関節における誤差を相互補正できるような関節間の協応関係こそがむしろ運動学習にとって重要であると考えられる(Kudo et al., 印刷中)。したがって、自由度が一つの動作の研究結果の知見をもって、2つ以上の自由度を持つ動作の運動学習を論じようとするには、問題のすり替えになってしまう。なお、ここでいう自由度とは、同時に制御しなければならない独立した可動な身体部位数を意味しており、一つの可動部位において多次元の運動が可能な場合でも一つの自由度として取り扱われている(Schmidt & Lee, T. D., 1999)。

このような視点で見ると、これまで運動学習というテーマで扱われてきた研究には、様々な問題が含まれており、それらを一括して説明しようとするには無理があるように思われる。これまでの運動学習研究を、含まれている問題に応じて分類する必要が感じられる。そこで、2節では、運動学習を説明してきた理論・仮説とその問題点の変遷を振り返り、3節では、課題に含まれる問題に応じて運動学習の内容を分類する理論モデルを提示する。そして、4節において、その理論モデルに新たに加えられるべき問題を提示する。なお、最後の5節においては、人間が運動を学習していくことの意味について私見を論じる。

2. 運動学習理論・仮説の変遷

古典的学習理論

運動学習の成立は、当初、連合説(e.g., Hull, 1942)と認知説(e.g., Tolman, 1932)で説明さ

れていた。連合説とは、ある場面のなかで試行錯誤的に行われた行動の中から、快や満足をもたらす行動のみが強化され、場面と行動が結合されていくことによって運動学習が成立していくというものである。誉められた運動のみが繰り返されるようになるという考えである。しかし、この考えでは、学習者の認知や思考といった中枢プロセスがほとんど無視されている。したがって、連合説では、運動における予測などの中枢プロセスの働きについては説明できない。これに対して、認知説とは、目的に応じた手段と、その手段がもたらす結果との関係についての見通しが成立することによって運動学習が成立していくというものである。したがって、認知説では、連合説で説明できなかった予測については説明できる。ただ、この考えによれば、いかに身体を動かすべきかの見通しが立てば、そのように身体を動かせることになる。しかし、運動学習においては、いかに身体を動かすべきかの見通しが立ったとしても、そのように身体を動かすことができないという現象がよく見られる。認知説ではこの現象を説明することはできない。

スキーマ理論

1970年代になると、人間の脳の働きをコンピュータが情報を処理するプロセスから類推した情報処理アプローチによって運動学習が説明されるようになった。その代表が、Adams (1971) の閉回路理論と、閉回路理論を発展させた Schmidt (1975) のスキーマ理論である。スキーマ理論とは、運動を繰り返していくうちに、力量やタイミングなどの調整されたパラメーターと遂行結果との関数関係が成立していく、目標とする運動に応じてふさわしいパラメーターが選択できるようになるという考えである。例を挙げて説明しよう。野球のボールを上手から投げることができる人は、10m先にいる人に対しても、20m先にいる人にも同じように投げ分けることができる。その際の投動作のパターンはほとんど同じで、違っているのは調整される力量である。遠くに投げる時には、近

くに投げる時よりも、より大きな力量に調整され、その結果、素早い投動作パターンが遂行されることが多い。このように目標通りに動作を正確に遂行するためには、調整される力量等と実際の遂行結果を正確に関係づけることが重要になってくる。この関数関係のことを、運動スキーマ (motor schema) と言う。一度この運動スキーマが成立すれば、この運動スキーマに基づいて、その動作パターンに、最適と思われるように力量等を調整し、目標とする運動結果を産出することができるようになる。この共通した動作パターンのことを一般運動プログラム (generalized motor program) と言い、力量のように一般運動プログラムにおいて調整されるものをパラメーター (parameters) と言う。Schmidt (1975) は、運動学習とは、一般運動プログラムにおいて調整されるパラメーターと運動結果の関数関係を確立していくことであると考えた。この考えが、スキーマ理論である。運動が遂行されると、身体的位置やボールの重さといった初期条件 (initial conditions)、調整されたパラメーター、運動結果 (movement outcome)、運動時の感覚情報 (sensory consequences) という4つの情報が貯蔵される。これらの情報に基づいて、パラメーターと運動結果の関数関係である再生スキーマ (recall schema)、感覚情報と運動結果の関数関係である再認スキーマ (recognition schema) が形成される。再生スキーマによって運動が生成され、再認スキーマによって運動が期待通り行われたか評価される。それでは、この関数関係である運動スキーマは、どのように発達するのであろうか。Schmidt (1975) は、運動スキーマの発達は、練習の量と多様性に基づくとしている。すなわち、パラメーターが調整された回数が多いほど、また、多様なパラメーター調整がされるほど、運動スキーマが発達するということである。この考えに基づけば、同じ試行回数であれば、多様なパラメーター調整を経験した方が、より優れた学習効果をもたらすことが仮定される。この考えは、多様性練習効果仮説 (practice variability hypothesis) と呼ばれ、この仮説を検証

するために多くの実験が行われた。この多様性練習効果に関する代表的な検証実験を次のセクションでレビューする。

多様性練習効果

多様性練習の効果が一定期間後も保持されているかを、Shea and Kohl (1990, 1991) は、目標力量を発揮する握力課題を用いて、基準のみ (criterion group) 群と基準+多様性群 (criterion+variable group) を比較している。基準のみ群は、目標力量のみを200試行遂行し、基準+多様性群は、目標力量を100試行と、その前後の4種類の力量を25試行ずつ、合計200試行遂行した。習得段階においては、異なる力量を発揮した基準+多様性群が、同じ力量の発揮を繰り返した基準のみ群よりも有意に誤差が大きかった。しかし、翌日の保持テストをみると、習得段階と全く逆に、基準+多様性群が、基準のみ群よりも有意に誤差が少なかった。このことから、一時的なパフォーマンスの向上ではなく、持続的な学習効果を考える場合には多様性練習の方が優れていることが明らかにされた。

また、多様性練習の効果が、遂行した運動パターンと類似した異なる運動パターンにもあてはまるかを、McCracken and Stelmach (1977) は、目標とされた時間でバリアを倒していくバリアノックダウン課題を用いて検討している。一定練習群は、15cm, 35cm, 60cm, 65cmのいずれかの運動距離を300試行遂行した。多様性練習群は、その4つの運動距離を各75試行ずつ、合計300試行遂行した。習得段階においては、一定練習群が有意に多様性練習群よりも誤差が少なかった。転移テストとしては、50cmの運動距離を学習直後と学習終了2日後に2回行った。その結果、2回の転移テストとも、多様性練習群が有意に一定練習群よりも誤差が少なかった。このことから、基準周辺の多様な運動パターンを遂行することが、練習では行わなかった運動パターンの遂行も促進したことが示された。

文脈干渉効果

スキーマ理論は、一般運動プログラムにおい

て調整されるパラメーター（力量やタイミングや系列など）と運動結果の関数関係を確立していく、パラメーター学習を説明する理論であり、パラメーター学習においては多様な練習をするとう有効であるという多様性練習効果が述べられている。ただ、実際の運動において一つの技能のみを習得すれば良いということは少なく、複数の技能の習得が求められることの方が多い。したがって、一つの一般運動プログラムにおいて調整されるパラメーターの学習だけではなく、複数の一般運動プログラムをいかに学習させるかについても研究する必要がある。複数の一般運動プログラムの学習をより効率的にするためにはどのようなスケジュールが良いかという点に焦点を当てて研究したのが、文脈干渉効果 (contextual interference effect) に関する研究である。Battig (1972) の言語記憶研究における理論的解釈を参考にして、運動学習の領域に文脈干渉効果を持ち込んだのは、Shea and Morgan (1979) である。Shea and Morganは、3つの異なるパターンの木製バリアをできるだけ早くかつ正確にノックダウンさせる課題を、2つの異なるスケジュールで練習させ、その効果を比較した。1つめのスケジュールは、ブロック練習といい、1つ目の課題の練習を全て遂行した後に、2つ目の課題の練習を全て遂行し、その後3つ目の課題の練習を全て遂行するというように同じ課題の練習を一度にまとめて行うスケジュールである。もう一つのスケジュールは、ランダム練習といい、同一課題が連続しないように、また、各課題の試行数が等しくなるようにする以外は、全くランダムな順序で複数の課題を遂行するスケジュールである。文脈干渉効果の検証実験ではこの極端な二つのスケジュールが比較されることが一般的である。学習期間のパフォーマンスはランダムな試行順序で練習した方よりもブロック化された試行順序で練習する方が優れていた。しかし、10分後と10日後の保持テストを用いてこの2つのスケジュールの学習効果を比較すると、ランダム練習が、ブロック練習よりも優れていた。文脈干渉効果と呼ばれるこの発見は、習得期間

中の高いパフォーマンスが保持テストの低さにつながるといふパラドックスのためもあるが、発表以後も研究者の関心を集めている (Shea & Morgan, 1979; for a review, see Magill & Hall, 1990)。

文脈干渉効果の説明仮説

この文脈干渉効果が生じる理由は何であろうか。この点について、忘却再構成仮説 (forgetting and reconstruction hypothesis) と、精緻化仮説 (elaborative and distinctive processing hypothesis) の2つの仮説が述べられている。

忘却再構成仮説とは、Lee, T.D. and Magill (1983) が提唱したもので、長い再生間隔で反復された運動の記憶は短い間隔で反復される運動の記憶よりも長く保持されることを示した spacing effect の研究 (e.g., Lee, T.D. and Weeks, 1987) に基づいている。ブロック練習においては、同じ課題を繰り返すことが多いので、前試行において構成されたアクションプランがワーキングメモリーにまだ残っている。しかし、ランダム練習においては、課題が異なるために次試行において新たなアクションプランを再構成する必要がある。したがって、ブロック練習において前の試行の遂行方法を覚えておくことは、習得中のパフォーマンスを向上させるが、持続的な学習効果を高める処理を促進しないことになる。これに対して、ランダム練習においては、逆に習得中のパフォーマンスは低下するものの、持続的な学習効果を高める処理を促進するために、保持や転移においては効果的である。すなわち、短期的な忘却をもたらす試行間の活動が持続的な学習効果を高めると考えられている。

これに対して、精緻化仮説とは、Sheaら (Shea and Morgan, 1979; Shea and Zimny, 1983, 1988) が提唱したもので、ランダム練習の被験者が課題間の質的な違いをよく理解しているのに対し、ブロック練習の被験者はあまり考えず自動的に遂行する傾向が強かったという内省報告 (Shea and Zimny, 1983) に基づいている。ランダム練習は次試行で異なる課題を遂行する

ために、常に前試行と異なる準備と評価のプロセスが必要であり、被験者により入念な処理を強いるのに対し、ブロック練習は同じ課題を繰り返すために、課題間の対照機会はほとんど必要なく、被験者に入念な処理を要求しない。したがって、ランダム練習の方が、ブロック練習よりも各課題の表象がより記憶されやすい。

パラメーター学習とプログラム学習

Magill and Hall (1990) は、これらの文脈干渉効果に関する研究をレビューして、文脈干渉効果は異なる運動プログラム間においてのみ生じる現象であり、同じ運動プログラム内においては生じないという仮説を導いた。すなわち、同じ運動プログラムにおけるパラメーターを学習する場合には、スキーマ理論の提唱する多様性仮説が当てはまり、異なるプログラムを学習するには、文脈干渉効果が当てはまることになる。このMagill and Hall (1990) の仮説は、多くの研究 (Lee, T. D., Wulf, and Schmidt, 1992; Wulf, 1992; Wulf and Lee, T. D., 1993) で支持されてきたが、最近、同じ運動プログラム内においても文脈干渉効果が生じることが報告されている (Shea, Kohl, and Indermill, 1990; Young, Cohen, and Husak, 1993; Sekiya et al., 1994)。

Sekiya et al., (1994) は、決められた時間間隔でタッピングさせる課題を用いて、同じ運動プログラム内のパラメーター学習においても文脈干渉効果が生じるかを検討している。運動プログラムの要因とパラメーターの要因を分離するために、相対的時間と全体時間を組み合わせた群を設定し、相対的タイミング (各セグメントにおける運動時間の比) も全体の運動時間 (各セグメントに要した運動時間の総和) も異なる3パターンを学習させた。その結果、運動プログラムの正確性とパラメーター修正の正確性の両方を反映する全体タイミング (各セグメントにおける目標と実際の運動時間の差の総和) とパラメーター修正の正確性を反映する全体運動時間において文脈干渉効果が生じたが、運動プログラムの正確性を反映する相対的タイミング (各セグメントにおける目標と実際の運動時間

の比の差)において文脈干渉効果は生じなかった。このことから Sekiya et al. は、この文脈干渉効果は運動プログラム間で生じたのではなく、パラメーター修正間で生じたと結論づけ、同じ運動プログラム内のパラメーター学習では文脈干渉効果は生じないという Magill and Hall (1990) の仮説を否定した。

また、筒井・杉原 (1986) は、転がってくるボールをフィールドホッケーのスティックを用いて目標とするゲートに向かって打ち返すという課題を用いて多様性練習効果の有効性を検討しているが、目標となるゲートによって打ち返す角度の差が大きく、野球において打球の方向を左右に打ち分ける場合に動きが異なるのと同様に、両端のゲートに打ち返すには、異なる動きを必要としていた。結果として、多様性練習の有効性が確認され、異なる動き、すなわち、異なる運動プログラム間においても多様性効果が生じる可能性が示唆された。

Sekiya et al., (1994) が、パラメーター学習においても文脈干渉効果が生じることを示し、筒井・杉原 (1986) が、異なる運動プログラム間においても多様性効果が生じる可能性を示唆しているように、パラメーター学習においては多様性練習効果が生じ、プログラム学習においては文脈干渉効果が生じるといった、明確な1対1関係ではないように思われる。そもそも、パラメーター学習的要素とプログラム学習的要素それぞれが占める割合は異なっているものの、運動課題の多くは、両方の学習的要素を含んでおり、運動課題の分類は相対的なものにすぎないと考えられる。したがって、ある課題の習得が、パラメーター学習かプログラム学習かといった二分法自体が意味をなさないのかもしれない。むしろ、その両者のバランスがどの程度かという観点から、運動学習を考える必要があるものと思われる。

協応動作学習

運動技能学習を説明する理論としては、スキーマ理論などの情報処理アプローチが主流であるが、そのスキーマ理論は、一般運動プログ

ラムにおけるパラメーターを調整するパラメーター学習を説明するもので、一般運動プログラムの学習については触れていない。さらに、スキーマ理論を含めた情報処理的アプローチにおいては、一つの自由度を制御することで遂行できる運動の習得をもって、一般運動プログラムの学習を論じようとすることがある。これに対して、運動には互いに関連する複数の自由度を協応させることが必要な課題も含まれていることから、運動学習の知見を普遍的なものにするためには、互いに関連する複数の自由度を協応させることが必要な運動(協応動作)を課題として用いるべきであるとアクション理論家(たとえば、Newell and McDonald, 1992) は主張している。

Newell and McDonald (1992) は、文脈干渉効果に関する研究で用いられた実験を例に挙げて、2つの問題を指摘している。第1の問題は、用いられた運動課題が、以前に獲得された協応動作の調整を必要とする課題であり、新しい協応動作の獲得を必要とする課題ではないという点である。たとえば、できるだけ目標時間に合わせて指定された順に木製バリアをロックダウンさせる課題 (e.g., Lee, T. D. and Magill, 1983) において、被験者は、指定された順に木製バリアをロックダウンさせる3つの異なる運動パターンを学習前に既に遂行できていた。すなわち、習得されるべき運動要素は、3つの異なる運動パターンをできるだけ目標時間に一致するように時間調整することであった。それゆえ、学習者は、その課題について真の初心者でも、熟練者でもなかった。したがって、そのような研究から得られた結果を、単純に実際の運動課題に適用できると考えるのは危険なことであると指摘している。

第2の問題は、新しい協応動作が学習される研究においても、学習効果が運動の最終結果のみに焦点を当てており、運動遂行中の身体部位の動かし方についてはあまり検討してこなかった点である。たとえば、ボール投げ動作の上達度を検討する際に、被験者が投げた投距離のみを尺度としてきたが、投げる際の身体の使い方、

たとえばむち動作ができていたか、すなわち、肩、肘、手首の順に身体の前に出てきたかとか、肩、肘、手首の順に最大速度が産出され、手首の最大速度が最も大きかったかという点を検討してこなかった。学習効果は、単に運動結果のみに反映されるのではなく、運動パターンの変容にも反映されるはずであることから、身体部位の位置や動かし方についても検討していく必要があると考えられる。そのためには、身体部位の位置や時間を分析する kinematic な分析や、身体部位が発揮している速度や加速度を分析する kinetic な分析が必要と考えられる。たとえば、バドミントンのサーブ (e.g., Goode & Magill, 1986; Wrisberg & Liu, 1991), 射撃 (Boyce & Del Rey, 1990), そして、野球の打撃 (Hall, Domingues & Cavazos, 1994) における文脈干渉効果の研究において、運動結果の変容が、必ずしも協応パターンの変容を反映していない可能性があるにも関わらず、運動の最終結果における変容についてのみ調べており、ランダム練習が運動協応パターンの変容に有効であるかどうかは明確に示されていない (but see McNevin, 1995)。

協応動作課題の学習を扱ったアクション理論家の代表的な研究としては、Vereijken et al. (1992) が行ったスキーマのパラレルターン習熟過程の分析があげられる。その課題は、中央が少し膨らんでいて左右が 2m くらいある金属レール上を、スケートボード状のものに乗り左右に往復運動するものであり、できるだけ大きな左右運動をすることが要求された。運動結果の尺度としては、運動の大きさと運動の周波数が用いられ、運動遂行中の身体部位の動きの尺度としては、股、膝、及び、足首の関節の運動角度が用いられた。学習初期においては、学習者は、股、膝、及び、足首の関節の運動角度を制限することによって、小さい動きを高い頻度で示していた。左右の運動を遂行するために、学習者は下肢や体幹の運動範囲をできるだけ固定するようにしていた。この局面は、「自由度の凍結」と呼ばれている。学習後期になると、関節の可動範囲がかなり大きくなり、学習者は

大きな動きを相対的に低い頻度で示すようになった。この大きな左右運動は、下肢や体幹をより流動的に動かすことによってもたされた。この局面は、「自由度の解放」と呼ばれている。このように、互いに関連する複数の自由度を協応させる協応動作課題の学習には、自由度の凍結と解放という2つの局面が含まれる。これに対し、従来の情報処理的アプローチの典型的な実験で用いられているような少数の自由度を制御することによって遂行できる単純な運動（位置決め、リーチングなど）の習得には、特定の自由度を凍結することによって運動が正確にかつ安定するため、自由度を解放する局面が含まれにくい。したがって、運動学習の知見をより普遍的なものにするためには、自由度の凍結と解放の両者を含んでいる協応動作課題を用いることも必要と思われる。また、運動パフォーマンスの分析に留まらず動作の変容を分析する必要がある。

以上のような運動学習理論・仮説の変遷を振り返ると、研究結果の集積とともに、運動学習に含まれる問題が拡大されてきていることが明らかである。たとえば、パラメーターの調整を取り扱った問題 (e.g., Shea and Kohl, 1990, 1991) から、協応動作の相互補正関係を取り扱った問題 (e.g., Vereijken et al., 1992) へと推移してきている。これら2つの問題は、共に運動学習の一面を検討しているものの、前者はパラメーターの安定が最終目的であるのに対し、後者は、パラメーターの安定に加えて、パラメーター間の相互補正までが最終目的に含まれる。このように、各研究が取り扱った運動学習は、扱われている問題にしたがって、いくつかの階層に分類されて論議されるべきであろう。そこで、次節では、今までの運動学習研究を3つの階層に分類し、運動学習の階層性を考慮に入れた理論モデルを提示する。

3. 運動学習の階層性

運動学習における階層は、明確に区別されるものではなく相対的なものであり、また、ある運動の習得に複数の階層の運動学習が必要とさ

れることも多い。しかし、これまでの問題をここでは便宜的に3つの階層に分けて考えてみる。

1) **パラメーター学習**… 遂行の正確性に問題はあるものの、学習初期において既に動きのパターンそのものは獲得されており、力やタイミングなどのパラメーターのみを調整することによって目標とする動きを習得できる。この段階では、同じ動作の再現性が高いことが重視され、関節の自由度を凍結することによって、目標が達成されることも多い。情報处理的アプローチにおいて今まで行われてきた研究の多く (e.g., Shea and Kohl, 1990, 1991) が、主としてパラメーター学習を対象とすることが多かったことは前節で論じた通りである。

2) **プログラム学習**… 学習初期には、目標とする運動を遂行するための動作パターンが獲得されておらず、どのように動かせば良いかわからない。したがって、既に獲得している類似のプログラムに変更を加えることによって新たなプログラムを作成し目標とする動きを習得できる。

新たな運動プログラムの獲得を検討した研究例としては、両手の位相をずらすことを課題として文脈干渉効果を検討した Tsutsui et al. (1998) の研究や、習得のための効果的な手がかりを検討した塚本ら (1999) の研究が上げられる。

3) **協応動作学習**… 目標とする円滑な運動が、特定のプログラムに特定のパラメーターを調整することのみによっては達成できず、パラメーター間を相互補正的に協応させることによって達成できる。したがって、パラメーターの1つがたとえずれても、他のパラメーターを調整し、最終的には同じような結果を産出できることが必要とされる。このことは、身体内部や環境からの外乱に対しても柔軟に適応することを可能とする。また、複数の組み合わせによっても同じような運動結果を産出できるため、可能な組み合わせの中から動きの省力化を求め、最もエネルギー効率の良いパラメーターの組み合わせを無意識に選択するようになる。

パラメーター間の相互補正を示した研究としては、前述の Vereijken e al. (1992) の他に、卓球のドライブのスイング開始時と打球時の変動を扱った Bootsma & Van Wieringen (1990) の研究が有名である。高度な運動技能を習得している一流卓球選手は、インパクト時間は非常に低い標準偏差を示していたが、その動作時間や動作開始時間の変動は大きかった。また、動作開始時間が早いとスイング動作が遅くなり、動作開始が遅いとスイング動作が速くなるという動作開始時間と動作速度に負の相関が見られた。このことは、同じ動作が再現されたというよりもむしろ、運動開始後動作の柔軟な補正が行われたことを示している。また、一流走り幅跳び選手の助走の変動を分析した Lee, D. N. et al. (1982) の研究においても、踏切直前における位置の変動は非常に小さいものの、その数歩前の変動は非常に大きかったことが報告されている。このことから、Lee, D. N. et al. は、一流走り幅跳び選手の踏切位置の再現性が高いのは、助走そのものの再現性が高いのではなく、助走の最終局面での高い調整力によると結論づけている。さらに、ボールの投射距離の再現性の向上を kinematic に分析した Kudo et al. (印刷中) の研究においても、協応指数という説明ツールの提示とともに、パラメーター間の相互補正関係が示唆されている。投射距離を決定する3つのパラメーター (リリース時の速度、角度、高さ) の中でも、投射距離の再現性の向上に最も影響していたのは、速度パラメーターの安定であったが、3つのパラメーターの安定性のみでは説明できない投射距離の再現性の向上がみられたことが報告されている。このことから、Kudo et al. は、投射距離の再現性の向上には、パラメーターの安定に加えて、パラメーター間の相互補正も貢献していると考えた。

4. 適応制御獲得プロセス解明の必要性

3節で分類された問題は、いずれも目標とする動きが遂行前に決定されていたが、動作遂行中に目標とする動作が決定・変更される運動もある。そのような運動においては、動作遂行中

に適宜対応することが要求される。動作の自動化が進むと、このように遂行中に状況や目標が変化しても、柔軟に対応できるようになる（萩原仁，1975）。このことは適応制御と呼ばれている。適応制御の例として、一見ごく少数の自由度によって制御されているような動作であっても、何らかの外乱が加わった際には、速やかに新奇な自由度が参入して動作の再組織化を図るという現象が上げられる。たとえば、Kudo and Ohtsuki (1999) は、指定された位置までの素早い肘関節伸展運動を開始させる信号を提示した後、約50%の確率で動作停止信号を提示し、被験者には素早く伸展動作を停止するように求めた。その結果、被験者は、一定時間で動作の停止が可能であったが、その際の筋活動を検討すると、動作停止信号の提示タイミングに応じて主動筋及び拮抗筋の賦活及び抑制方略が独立して変容していた。このことは、素早い動作停止を行うための筋活動が、より多数の制御変数によって生じていたことを示唆している。また、この外乱を克服して適応制御が獲得される際のメカニズムについては、除脳ネコを用いて、生理学的にも研究されている（たとえば、柳原・伊藤，1999）。柳原・伊藤は、歩行運動の適応制御には、小脳の神経回路内に生じるシナプス可塑性が重要な役割を果たしている可能性を示唆している。

それでは、人間の運動技能における適応制御はどのように獲得されていくのであろうか。子ども達の動きを見ていると適応制御の学習らしきものが行われていることがある。バスケットボールのシュートを練習している子ども達は、シュートが入るようになると、相手が前に居なくてもフェイクを入れてシュートを打ったり、わざと、ドリブルで一回転した後でシュートを打ったりと外乱を想定し、その外乱を克服する能力を習得しようとしているように思われる。

しかし、このような適応制御の習得過程を扱った心理学的研究はほとんどみられない。今までの運動学習研究の多くがパラメーター学習課題の習得を扱っていたと思われる。従来、新しい動きが達成され、その動きが安定してくる

ことは、さらなる再現性の向上が期待できず、天井効果に達したとみなされ、学習の終了を意味してきた。しかし、動きが安定した後の変動を見ることによって初めて、適応制御の獲得プロセスを検討できるのかもしれない。サッカーなどのスポーツ選手にとって、基本的技能の正確性を向上させることは不可欠なことではあるが、それだけでは一流といわれる領域には達することが出来ない。基礎的技能を身につけた後に、気象条件や対戦相手などの外乱が生じたときにも、その外乱を克服して正確な運動を遂行することが要求される。そのように考えると、安定性を確保するまでの段階のみを検討しているのは、運動学習の重要な部分を忘れていているように思われる。技能が安定した後の過剰学習の段階を観ることによって、初めて適応制御の習得過程が探れるのではないだろうか。

5. 運動学習を支える知的好奇心と有能感

最後に、人間が運動を学習していく意味について、最適な複雑性に対する欲求と有能感 (competence) という考えに基づいた私見を述べる。

子ども達が新しい状況を作り出そうとする動きは、基本的なスキルの安定性が確保される前には、ほとんど出現しない。運動スキルの自動化がある程度達成されたときに、ようやく出現するようである。このことは、Deci (1975) が指摘するように、人間が最適な複雑性に対する欲求を持っているためと思われる。子ども達は、運動スキルそのものに適度な複雑性を感じている間は新しい状況を導入しようとせず、運動スキルをある程度獲得でき複雑性が低下すると比較的克服が容易な状況を導入しているように思われる。さらに、それを克服できると、より克服が困難な状況を導入していくというプロセスを繰り返していくように思われる。

一般に、人間は、自分および自分を取り巻く世界について整合的に理解したいという基本的欲求を持っている存在である（稲垣，1982）。そのために、ある情報が処理されてその情報における新奇性の水準が低下すると、知的好奇心

が喚起され、さらなる情報を求めていく。このようにして情報の最適化を維持していると考えられる。このことは、運動技能の学習においても当てはまると考えられる。人間は、自分の身体および自分を取り巻く状況を制御したいという欲求を持っている。したがって、ある運動課題が習得されると、より質の高い技能の獲得を求める。たとえば、サッカーゴールをめがけてシュートをしている子ども達の様子を見てみると、シュートの成功確率が高くなると、シュートする距離を伸ばしたり、角度を変えたり、カーブをかけるなどの球種を代えたりして、より多様な、あるいは、より質の高いシュートを打つようになる。こうして、運動における知的な好奇心を満たしていると考えられる。この適度の複雑性を求める行動を繰り返すことによって、人間は能力を拡張していくのであろう。

また、この学習過程を通して、成功確率の低かった運動技能を、高い確率で遂行できるようになることは、やればできるという学習者の有能感を高めることにもなる。この有能感を感じたいという人間が持っている基本的欲求(White, 1959)も、新たな運動技能の獲得を促進すると考えられる。

このように、知的な好奇心や有能感に支えられて、運動を学習していくことが、人間としての基本的欲求を満たすことに繋がるのではないだろうか。

謝辞

本稿は、平成12年度東京都立大学博士論文の一部を加筆修正したものであり、平成10-12年度文部省科学研究費補助金基盤研究(C)、および、平成10年度水野財団研究助成の適用を受けて行われた。また、本稿を書くにあたり貴重な示唆を戴いた広島大学の調枝孝治先生、及び、草稿に対し貴重なコメントを戴いた東京都立大学の今中国泰先生と、東京大学の工藤和俊先生に感謝いたします。最後に、執筆の機会を与えて下さったスポーツ心理学研究編集委員長、伊藤政展先生ならびに編集委員の皆様へ感謝いたします。

引用文献

東 洋 1982 教育との関連で見た認知心理学 東

- 洋・大山 正(監修)波多野誼余夫(編)認知心理学講座4 学習と発達 東京大学出版会 Pp.1-10.
- Adams, J. A. 1971 A closed-loop theory of motor learning. *Journal of Motor Behavior*, 3, 111-150.
- Battig, W. F. 1972 Intratask interference as a source of facilitation in transfer and retention. In R. F. Thompson & J.F. Voss (Eds.), *Topics in learning and performance*. New York: Academic Press. Pp.131-159.
- 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, 21-29.
- デシ E. L. 安藤延男・石田梅男(訳) 1980 内発的動機づけ—実験社会心理学的アプローチ— 誠信書房 (Deci, E. L. 1975 *Intrinsic Motivation*, Plenum Press, New York.)
- 萩原 仁 1975 運動学習の階層構造と知覚—運動行動のシステム化 萩原 仁・調枝孝治(編)人間の知覚—運動行動 不昧堂出版 Pp.172-205.
- Hull, C. L. 1943 *Principles of behavior*. New York: Appleton-Century-Crofts.
- 稲垣佳世子 1982 認知への動機づけ 東洋・大山 正(監修)波多野誼余夫(編)認知心理学講座4 学習と発達 東京大学出版会 Pp.95-132.
- ジョルダン M. I.・ローゼンバウム D. A. 1991 宇野洋二・佐々木正人(訳) 行為 ポズナー M. I. 佐伯胖・土屋 俊(監訳) 認知科学の基礎4 脳科学の接点 産業図書 Pp.197-245 (Posner, M. I. (eds.), 1989 *Foundations of cognitive science*. MIT Press, Massachusetts.)
- Kudo, K., & Ohtsuki, T. 1998 Functional modification of agonist-antagonist electromyographic activity for rapid movement inhibition *Experimental Brain Research*, 122, 23-30.
- Kudo, K., Tsutsui, S., Ishikura, T., Ito, T., & Yamamoto, Y. (in press) Compensational coordination of release parameters in ball-throwing movements. *Journal of Motor Behavior*.
- Lee, D. N., Lishman, J. R., & Thomson, J. A. 1982 Regulation of gait in long jumping. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 8, 448-459.
- Lee, T. D., & Magill, R. A. 1983 The locus of contextual interference in motor-skill acquisition. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, 9, 730-746.
- Lee, T. D., & Weeks, D. J. 1987 The beneficial influence of forgetting on short-term retention of movement information. *Human Movement Science*, 6, 233-245.
- Lee, T. D., Wulf, G., & Schmidt, R. A. 1992 Contextual interference in motor learning: Dissociated effects due to the nature of task variations. *The Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 44, 627-644.
- Magill, R. A., & Hall, K. G. 1990 A review of the contextual interference effect in motor skill acquisition. *Human Movement Science*, 9, 241-289.

- McCracken, H. D., & Stelmach, G. E. 1977 A test of the schema theory of discrete motor learning. *Journal of Motor Behavior*, **9**, 193-201.
- McNevin, N. H. 1995 *Variability of practice in motor skill acquisition: A task dynamics perspective*. Unpublished doctoral dissertation, Louisiana State University, Baton Rouge.
- Newell, K. M., & McDonald, P. V. 1992 Practice: A search for task solutions. In American Academy of Physical Education, *Enhancing human Performance in sport: New concepts and developments* (The Academy papers, No.25, pp.51-59). Champaign, IL: Human Kinetics.
- Schmidt, R. A. 1975 A schema theory of discrete motor skill learning. *Psychological Review*, **82**, 225-260.
- Schmidt, R. A., & Lee, T. D. 1999 *Motor control and learning: A behavioral emphasis*. Champaign, IL: Human Kinetics.
- シュミット R. A. 調枝孝治ほか(訳) 1994 運動学習とパフォーマンス —理論から実践へ— 大修館書店 (Schmidt, R. A. 1991 *Motor Learning and Performance: From Principles to Practice*. Human Kinetic Publishers: Champaign, Illinois.)
- Sekiya, H., Magill, R. A., Sidaway, B., & Anderson, D. I. 1994 The contextual interference effect for skill variations from the same and different generalized motor programs. *Research Quarterly for Exercise and Sport*, **65**, 330-338.
- Shea, C. H., & Kohl, R.M. 1990 Specificity and variability of practice. *Research Quarterly for Exercise and Sport*, **61**, 169-177.
- Shea, C. H., & Kohl, R. M. 1991 Composition of practice: Influence on the retention of motor skills. *Research Quarterly for Exercise and Sport*, **62**, 187-195.
- Shea, C.H., Kohl, R., & Indermill, C. 1990 Contextual interference: Contributions of practice. *Acta Psychologica*, **73**, 145-157.
- Shea, J. B., & Morgan, R. L. 1979 Contextual interference effects on the acquisition, retention, and transfer of a motor skill. *Journal of Experimental Psychology: Human Learning and Memory*, **5**, 179-187.
- Shea, J. B., & Zimny, S. T. 1983 Context effects in memory and learning Movement information. In R.A. Magill (Ed.), *Memory and control of action*, Amsterdam: Elsevier. Pp.345-366.
- Shea, J. B., & Zimny, S. T. 1988 Knowledge incorporation in motor representation. In O.G. Meijer & K. Roth (Eds.), *Complex movement behaviour: The motor-action controversy*. Amsterdam: Elsevier. Pp.289-314.
- Tolman, E. C. 1932 *Purposive behavior of animals and men*. New York: Century.
- 塚本茂博・筒井清次郎・広瀬 徹 1999 新しい協応動作習得のためのストラテジー 体育学研究 **44**, 274-284.
- 筒井清次郎 2000 *Effective learning strategies and schedule for acquiring new patterns of bimanual coordination* 東京都立大学博士論文
- Tsutsui, S., Hirose, T., & Okuda, S. 2000 Effects of both model skill levels and learning schedules in observational learning on acquiring new bimanual relative-phasing pattern. *Journal of Sport, & Exercise Psychology*, **22**, S107-S108.
- Tsutsui, S., Lee, T. D., & Hodges, N.J. 1998 Contextual interference in learning new patterns of bimanual coordination. *Journal of Motor Behavior*, **30**, 151-157.
- 筒井清次郎・杉原 隆 1986 運動学習における練習の多様性効果に関する研究 体育学研究 **30**, 263-271.
- Vereijken, B., Whiting, H. T. A., & Beek, W. J. 1992 A dynamical systems approach to skill acquisition. *The Quarterly Journal of Experimental Psychology*, **45**, 323-344.
- White, R. W. 1959 Motivation reconsidered: The concept of competence, *Psychological review*, **66**, 297-333.
- Wulf, G. 1992 Reducing knowledge of results can produce context effects in movements of the same class. *Journal of Motor Behavior*, **22**, 71-84.
- Wulf, G., & Lee, T. D. 1993 Contextual interference in movements of the same class: Differential effects on program and parameter learning. *Journal of Motor Behavior*, **25**, 254-263.
- 柳原大・伊藤 聡 1999 歩行運動の適応制御と小脳生物物理 **39**, 165-171.
- Young, D. E., Cohen, M. J., & Husak, W. S. 1993 Contextual interference and motor skill acquisition: On the processes that influence retention. *Human Movement Science*, **12**, 577-600.