

【総説】

運動習熟とダイナミック・ステレオタイプの再考

—エネルギー供給系と運動習熟の連関—

Reconsideration of Skilled Movement and Dynamic Stereotype

—Linkage between Energy Supply System and Skilled Movement—

山崎 健 (新潟大学教育学部) Ken YAMAZAKI (Faculty of Education, Niigata University)

はじめに

陸上競技のトレーニングにおいてエネルギー供給系とスキル系の関係の改善を図ることはパフォーマンス向上にとって重要な課題であることは論を待たない。

かつて猪飼 (1973) は、 $P=C \cdot J E (M)$ との回帰式を示し、パフォーマンス (P) が、サイバネティックス (C) の制御系と総体としての化学的エネルギー系 (E) 及び意欲 (M) によって決定される概念を提示した。

尾縣 (2004) は、スポーツ技術と身体能力に関わって「しかし、「砲丸が力強く押せない」「後半で腰が落ちてしまう」ことの主たる原因は、体力レベルが低いことであり、動きだけを意識しても修正できないことが多いのである」と指摘し、技術と体力の関係を踏まえた指導の在り方を提言した。綿引 (1990) は、「コーディネーション」という旧東独の概念から、テクニクトレーニングと筋力トレーニングを結びつける重要性を指摘した。

小林 (2001) は、「動作認知型トレーニング」という概念で、脚部の動きをシミュレートしたスプリント型や跳躍踏切型のトレーニングマシン、自転車型スプリントパワートレーニングマシンなどを作成し、短距離から中長距離までの種目で記録改善の効果を報告している。

本研究では、トレーニングのプロセスにおける重要な課題である「エネルギー供給系」と「スキル系」の関係について、運動習熟の概念の一つである「ダイナミック・ステレオタイプ (動的常同性)」のモデルからその関係性を検討しようとするものである。

運動習熟の概念

運動習熟の概念は、旧東欧圏におけるスポーツ・トレーニング理論において、I.P.パブロフの条件反射学説を基本として展開されてきた。

パブロフ自身が、1932年の第10回国際心理学会講演において「動的なステレオタイプ」の概念を發展させ、「強い神経系の型」を持つ動物の実験において、複雑な刺激に対する協調的で平衡のとれた内部過程の系列が、無条件反射と条件反射との相互作用の結果として形成されることを指摘している。ここでパブロフは、固定された古いステレオタイプが新しいステレオタイプにその位置を譲る過程での困難さと神経症の発症になどについても言及している。コーガン (1963) は、刺激の動的ステレオタイプについて「刺激のステレオタイプとは、空間的、時間的に一定の順序で配置され、いつでもその順序で繰り返される刺激の集合をいう」として「刺激のステレオタイプの分析と総合の結果、これらによって引き起こされる反射の恒久的なステレオタイプができあがる」として「ステレオタイプは状況の若干の変動に関わりなく、適当に反応することを可能にする」として「動的ステレオタイプ」について言及している。

オゾーリンら (1966) は、運動習性の形成について、伸展反射や緊張反射などの無条件運動反射をバックとした条件運動反射であり、運動習性形成の法則はパブロフの条件反射の法則に従うとしている。そして、その条件刺激が視覚、触覚、聴覚、空間、時間、固有 (受容) 感覚から構成されること、また、パブロフが定義した高次神経活動の「強弱」「均衡性」「易動性」からなる4つの型の学説と、感覚的な第1信号系と言語的な第2信号系の関係に

についても指摘し、「基本的な運動習性の自動化が高い水準に達し、運動のダイナミック・ステレオタイプを完璧に再現し」「高度の自動化と意識的な運動の調整の融合が、スポーツ技術完成のために必要である」としている。

シュモリンスキー (1982) は、旧東独における運動習熟にかかわる「技術の形成」について、パプロフ理論とともにマイネルによる運動学習の位相について、1. 粗協調, 2. 精協調, 3. 安定化と定着化, の3つの位相の存在を指摘し「自動化された運動は、それに対して意識が関与することなく行われる」「それにより競技者は、注意を特定の運動のポイント、例えば、跳躍練習の場合なら、踏切に向けることができるようになる」としている。

運動学習の三段階論について、マイネル (1980, 1981) は、1) 位相A: 粗形態における基礎経過の獲得, 運動の「粗協調」, 2) 位相B: 修正, 洗練, 分化, 運動の「精協調」, 3) 位相C: 定着と変化条件への対応, 運動の「安定化」の三段階を指摘し、オゾーリン (1966) は同様に「全習 - 分習 - 全習」の三段階を指摘する。芝田 (1961) は、認識過程の三段階について、1) 混沌性の段階: 現象, あるいは状況の全体について混沌たる表彰を持つ, 2) 分析の段階: 現象, あるいは状況を個々の部分にわけ, そのエレメントの性質を反映する, 3) 総合の段階: 個々の部分の相互連関を反映し, そこから全体を作り上げる, とする。山崎 (1986) は、この第二段階における「主観的困惑」の発生について、「認識の分化と意識化の進行に対応して『個々の修正』が可能となること。この『初期的融合による配列の結合』を保証してきたキャラクターユニットの崩壊は、一方ではマイネルの指摘するように該当する部分の『言語語的』意識化と伝達が可能となり運動系の学習が進展したことを意味するが、他方では獲得されるべき対象の『主要な単位』からの『個々の要素の遊離』による運動遂行の障害の発現を意味するものであり、この『矛盾した性格』の存在は、一種の『主観的困惑 (今迄できていたものができなくなる)』をたらしめるものであると指摘した。

運動習熟とダイナミック・ステレオタイプの概

念は、日本で邦訳されている旧ソ連の文献 (ヤコブレフ:1966, プーニ:1967, クレストフニコフ:1978) でも同様の見解をとっており、条件反射学のパプロフ理論を基礎として、旧東欧圏のスポーツ・トレーニング理論の動作系の学習理論を中心として形成されてきたものと考えられることができる。

ベルンシュタインの「運動構築の水準」

ベルンシュタイン (1940年代後半に書かれた「デクステリティ」の邦訳は2003年) は、系統発生性を反映した「運動構築の水準」という概念から動物から人間に至るまでの巧みな運動の実現について論じている。運動構築の水準は、一見同様の「円を描く」動作であっても、緊張のレベルA, 筋-関節リンク (シナジー) のレベルB, 空間のレベルC1 / C2, 行為のレベルD, と区分し、ワイズマンは、「例えば水準Aはきわめて早くピアノの鍵を叩く、すなわち一分間に6-8回の頻度でまったく同一の楽譜あるいは音階を繰り返して弾き、たびたび指先と前膊を小さな円状 (あるいはだ円状) に動かす。水準Bは体操や舞踊運動の遂行順序に従って、空中に手で円を描くことができる。水準C, 人は、紙に描かれた円あるいは消去された円にそって、鉛筆でなぞることができる (水準Cの1), あるいは目の前にある円を模写することができる (水準Cの2)。水準D, 人は針で縫う、結び目をほどくなどの手の円運動をすることができる。水準E, 人は幾何学の定理を証明するに際して、黒板に証明のための図の一部分としての円を描くことができる。これらすべては、あるいはより大きな、あるいはより小さな類似した円運動であるが、列挙した全ての例において…その構築の水準は本質的に相異なっている。」と解説している。ベルンシュタインの「運動協応」の概念は、冗長な自由度を持つ身体運動の制御に「背景レベルと背景調整」といういわばレディメイドともいえる「制御を組織化し感覚調整の助けを借りて実現する」潜在的システムの存在を示した画期的な概念である。

しかしベルンシュタインは、旧ソ連圏では「修正主義」との批判を受けている。クレストフニコフ (1951: 邦訳1978) は、「ベルンシュタイン教

授は、生力学的研究に基づき、運動構造の学説の構成を試みた。彼はその著書で、概念論的および機械論的な認識の上に立って、パブロフの唯物論的学説を批判し、高く評価しなかった。ベルンシュタインの説によると、運動習熟の形成は複雑な条件反射によらないものとされていた（下線は山崎）。さらに彼は、協応という概念により“高次の”内容を認めて、協応の概念と反射の概念とを対立させた。ベルンシュタインは協応に対しては特殊器官“大脳の協応系（運動構築基準）”が存在するとしているが、これは基本的に正しくない。現代の生理学的考察によるとどんな反射も多かれ少なかれ複雑な協応にほかならない。協応性とは、中枢神経系のあらゆる部分の基本的な機能である。ベルンシュタインが取り上げた“運動構築基準”は中枢神経系を機械的に区分するものである。すなわち一定の基準を決め、これに対応するこの運動習熟の形成を図ることは、全く思弁的なやり方である。この運動構造に関するベルンシュタインの学説は反動的なものである。この考えは有害であり、運動習熟に関する我々の理解を何十年も後退させるものである。」「協応及び筋の出力の度合いによって様々な難度を持つ運動の習熟は、すべての学習及びトレーニングの過程に関する正しい方法論的立場から、初めて正しく説明することができる。運動習熟の形成およびその完成を図る場合には、主な教育学上の原理を守ることに大きな意義がある。この原理とは、1) 意識性および積極性、2) 系統性、3) 明快性、4) 直観性、5) 緻密性である。」と批判している。ところがこの本が1956年に東独で出版された独訳版ではこの記述は削除のされており、同じ東

欧圏とはいえ複雑な事情が垣間見えて興味深い。ベルンシュタインの「The coordination and regulation of movement」は1967年に英国で出版され、「Bewegungsphysiologie」（若干構成が異なる）は東独で1975年に出版された。

ベルンシュタイン（1967）は、運動の協応と調整において、個々の筋群が個々の上位の遠心性中枢から神経支配を受けていること、またこの上位の遠心性中枢について、chainとcombという概念を示した（図1）。旧ソ連圏とは異なり欧米でのベルンシュタインの評価はきわめて高く、複雑な動作系において特定の筋群が協同して働くとする「シナジー」の概念は現在の動作の複雑系解析のトレンドでもある。

アフォーダンスと運動の自己組織： スレイビングとシナジェティック

1984年に出版された“HUMAN MOTOR ACTION Bernstein Reassessed”は、H.T.A. Whitingの編集により、1934年から1962年にかけて発表されたN.A. Bernsteinの6つの論文について、現代の著名な研究者たちがそれぞれに2編ずつ最新の知見から再評価を行った大変に興味ある文献である。このBernsteinの4番目の論文である“SOME EMERGENCY PROBLEMS OF THE REGULATION OF MOTOR ACTS (1957)”についての再評価が、M.T. TurveyとP.N. Kuglerの論文“AN ECOLOGICAL APPROACH TO PERCEPTION AND ACTION”である。この文献中の以下の図2が「ギブソンのアフォーダンス」をよく説明する。

認知心理学の生態学的アプローチのなかで、佐々木（1994）はソムリエや聴香師などの「わ

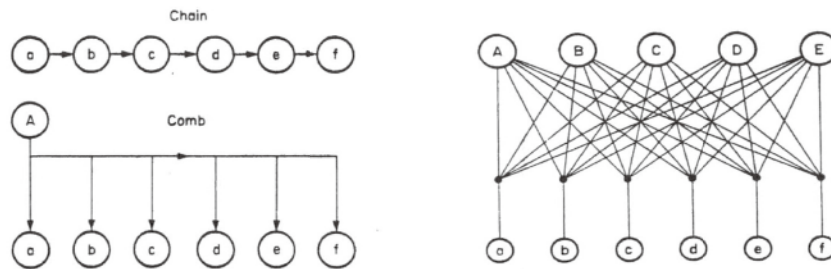


図1 6つの筋が5つの上位遠心中枢から神経支配を受けている（左）
「鎖」と「櫛」の概念（右）は「筋シナジー」の根拠とされる（Bernstein, 1967）

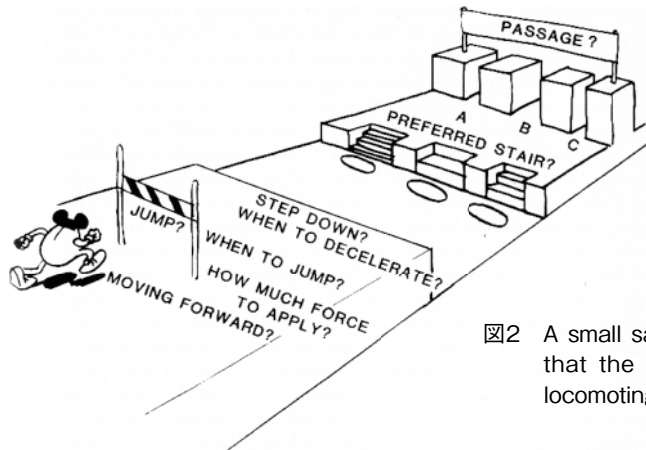


図2 A small sample of the meaningful problems that the surrounding layout poses for a locomoting animal (Turvey & Kugler : 1984)

ぎ」に関わっての「知覚システムの束」の重要性を指摘する。そして、初期の認知科学の「情報処理モデル」(刺激が頭の中で加工された結果としての情報)に對置するギブソンの「生態学的認識論」(周囲にある環境に情報《持続・面の配置と変化・面の変化》を「探索する」こと)を示し、「生態学的価値」としての身体にとっての「意味」や「価値」,「する抜けられるすき間」「上れる段」「つかめる距離」としての「アフォーダンス」の概念を紹介している(Turveyらの図を参照)。そして、上位からの制御プログラムによる「古典的な運動制御モデル」に対して「このモデルは現在でも、運動の制御を考えるわれわれの常識の一部である。しかし、このモデルはやっかいな問題を抱えている。」とし、「ベルンシュタイン問題(膨大な自由度の制御と動作の文脈依存性)」を示し、さらに「瞬間的な運動の制御」(100ミリ秒以下で「反応時間」よりも短い)における知覚情報 - 運動処理プロセスの例として、Bootsmaによる卓球のスマッシュ時における「調整」の例を紹介した。多賀(2002)は、「神経系=制御系, 身体=被制御系, 環境=外乱」という『従来の定式』に対して、システムの要素を足し合わせてもシステム全体の性質の決まらない「非線形性」という概念からアプローチし、「自己組織としての非線形振動子の引き込み現象」としての歩行の神経-筋骨格系モデルを示した。そして、最も遅い系に引き込まれるスレイビングという概念に対して、シナジェティックという、システムを構成する多数の要素が相互作用により全体としての秩序を生み出す協力現象(下線は山崎)の概念を示し、環境の

不確実性に対する「グローバルエンタインメント(大域的引き込み)」による「脳と環境の強結合」の可能性を指摘した。そして、有名なShikとOrlovskyらの徐脳ネコでの歩行実験で、電気刺激強度上昇と移動速度増大でウォークからトロット、ギャロップへの四肢歩行位相の変化が、外的環境との相互作用の中で、環境からの情報にも柔軟に応答して決定されることを引用し、計算論的脳科学の内部モデルは「運動遂行のメカニズム」は説明しても「運動の生起」を説明してはいないとした。

つまり、複雑な条件変動にも対応する運動の自動化について、ダイナミック・ステレオタイプの概念だけでは、上位からの強固な運動司令と小脳外側部での補正、末梢での外乱への対応(モーター・サーボ: 図5)についてしか説明できず、神経系と身体系と環境系という複雑な座標系での運動システムを説明するのは不十分であるという指摘である。

ダイナミック・ステレオタイプのモデル化

山崎(1986)は、旧東欧圏のスポーツ科学の概念である「ダイナミック・ステレオタイプ: 力動的常同性」について、条件変動に応じて無意識的に動作系を選択して適切に対応する運動習熟のモデルを示した(1986)。その後、伊藤(1992)の「動作の熟練は、制御対象の動特性Gに対し小脳が $-1/G$ の逆動特性補正(学習)を行うことによって実現される」との理論(図3)から図4のように修正した(2004)。

川人(1988)は、随意運動学習の階層制御モデ

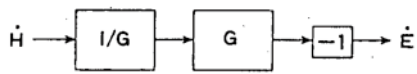


図3 前庭動眼反射の回路図 (伊藤, 1992)

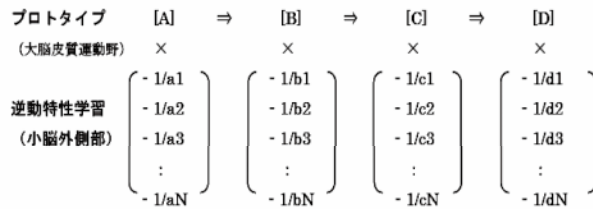


図4 ダイナミック・ステレオタイプのマトリクスモデル (2004)

ルについて、連合領から運動領に身体座標であらわされた望ましい運動軌道を送り、運動領で各筋肉が発生すべき張力（トルク）が計算され、脊髄運動ニューロンから運動系に送られると指摘する。そして、筋や骨格などの運動系が環境系と相互作用しながら運動パターンを実現するとし、この際、学習初期では小脳傍虫部(内側小脳)で遅いフィードバック系としての「運動系の順システム」が形成され、その後運動学習の進捗により小脳外側部(外側小脳)で結果のフィードバックを受けない速いフィードフォワード系としての「運動系の逆システム」が形成されるという階層モデルを示した。Brooks (1986) の運動情報の流れのシェーマ (図5) に示す通り、小脳内側部での順システム形成や小脳外側部の逆システム形成は、運動学習における動作のプロトタイプのすばやい制御を可能とし、運動習熟を実現するうえでのきわめて重要な概念であると考えることができる。

パフォーマンスを決めるもの

猪飼の、 $P=C \cdot J E (M)$ との回帰式について、山崎 (1986) は、 $P= s1 \times r1 + s2 \times r2 + s3 \times r3 + \dots + sN \times rN$ という重回帰式を示し、ハイパワー系 (ATP-PC r 系) やミドルパワー系 (解糖系)、ローパワー系 (有酸素系) などから構成されるエネルギー供給系 (r) が、それぞれに応じたスキル (s) と密接に関連してパフォーマンスを決定するモデルを提示した。しかし、この3つのエネルギー供給系は運動の継続の実施によって個別に変動 (減少) することから、全く同一の運動スキルに依存しては運動システムに破綻を招き、最適なパフォーマンス発揮は実現できないことを指摘 (2015) した。つまり、運動の高次な自動化は、環境系の外乱への対応だけではなく、身体状況の変化 (エネルギー供給系の減少など) にも対応して総体としての運動経過に破綻をきたさないためにも必要なものなのではないか。

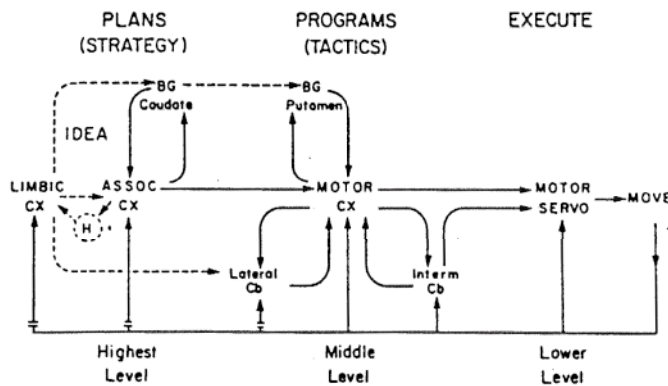


図5 Brooksによる運動情報の流れのシェーマ (1986)

BG Caudate : 大脳基底核・尾状核 BG Putamen : 被核 LIMBIC CX : 辺縁皮質
 ACCOC CX : 連合皮質 MOTOR CX : 運動皮質 MOTOR SERVO : 動作サーボ
 Lateral Cb : 外側小脳 Interm Cb : 内側小脳 H : 海馬

筋線維タイプ	速筋線維		遅筋線維	
	タイプI(SO)	タイプIIa(FOG)	タイプIIb(FG)	
筋線維タイプ				
ミオシンATPアーゼ活性	●		●	
代謝酵素				
解糖系酵素	●	●	●	●
酸化系酵素	●	●	●	●
代謝基質				
グリコーゲン	●	●	●	●
中性脂肪	●	●	●	●
毛細血管密度	●	●	●	●

図6 筋線維の代謝 (定本ら, 1987)
○内の色合いが濃いほど, 各項目の活性や濃度が高い

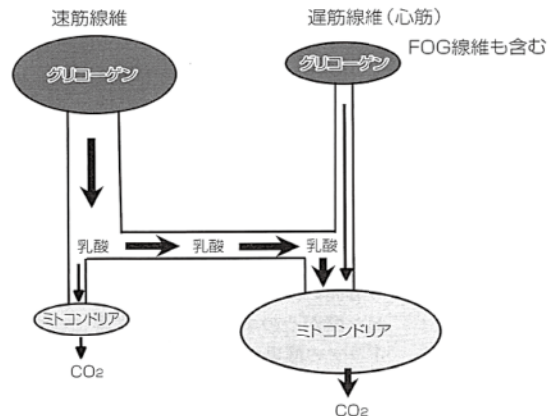


図7 乳酸シャトルの概念 (八田, 2009)

山崎 (1993) は, ランニングスキル改善に関わり, 速筋系線維がエネルギー供給系だけではなく動作改善にも重要な役割を果たすことを指摘した。また, 定本ら (1987) の筋線維組成と基質や代謝のデータ (図6) から, 筋が「エネルギーをつくり出すシステム」と「動きをつくり出すシステム」とから構成される「3×3システム」のモデルを示した。これは, 八田 (2009) の「乳酸シャトル (図7)」の概念とも関連するものである。

しかし, この概念は単一の筋 (例えば肘関節を屈曲する上腕二頭筋) における「3×3システム」の9個のマトリクスを, 運動の進捗にあわせて「重み付け」を変えながら対応している可能性を示しているのであって, 総体的な概念ではない。例え

ば単純な肘関節の屈曲伸展であっても2種類の「3×3システム」が協応するモデルとなることを示唆する。当然, 拮抗 (伸展) 筋である上腕三頭筋にも「3×3システム」は存在し, さらに上腕の運動に参加する多くの筋群も「3×3システム」で重層的に参画する。それは, 大きさ (貢献度) を変えながらマルチレイア的に重なり, 上肢の運動に関与するイメージ (図8) となる。

野崎 (2014) は「筋活動の冗長性」について, 股関節と膝関節をまたぐ「二関節性」の大腿直筋の収縮方向を決定する至適方位 (preferred direction: PD) のベクトルに関連して, 股関節や膝関節だけに関与する「単関節性」の大殿筋や内側・外側広筋が, 連動して活動する際に

		動きをつくり出すシステム			
		Type I	Type II a	Type II b	
エネルギーをつくり出すシステム	ATP-PCr系	○	◎	◎	上腕二頭筋 (屈筋側)
	解糖系	△	◎	●	
	有酸素系	◎	○	△	

		動きをつくり出すシステム			
		Type I	Type II a	Type II b	
エネルギーをつくり出すシステム	ATP-PCr系	○	◎	◎	上腕三頭筋 (伸筋側)
	解糖系	△	◎	●	
	有酸素系	◎	○	△	

図8 マルチレイアによる3×3システムのシェーマ (2015年)

は、本来の固有の運動方向（mechanical pulling direction：MD）とは異なる方向（PD）のベクトルを発揮することを指摘した。

山崎（2015）は、3種類の筋線維は同一筋を構成し、解剖学的な起始と停止は同一であり、協働して張力を発揮していることから、速筋系筋線維は主要な張力を発揮するとともに「動作の方向決定（スキル発揮）」にも重要な役割を果たし、遅筋系筋線維はミトコンドリアシステムを駆動した乳酸シャトルでエネルギー生産を図るとともに「補完的張力」を発揮して運動遂行に貢献する可能性を指摘した。

このことは、われわれの身体の骨格-筋システムは、上肢や下肢の運動一つであっても、大変複雑かつ巧妙に働いており、動作の習熟とエネルギー供給系との関係はきわめて緊密かつ複雑であることを示している。

実際の長距離レース中の動作変容

10000mのレースでは、終盤まではトップグループを形成してほぼ同一速度で疾走し、9000m以降にラストパートが行われて順位が決定される展開が多い。

1991年東京世界選手権での男子10000m決勝について、松尾ら（1994）は、1・2位のタヌイとチェリモについて、疾走速度は前半の6.0～6.3m/s

sから後半5.7～6.0m/sへ低下し、タヌイのピッチはほぼ3.3step/sで一定で、ストライドは1.90mから1.77mへ減少し、チェリモはスピード低下にともないピッチが3.3step/sから3.1step/s、ストライドが1.91mから1.82mへと減少したこと。女子10000m優勝のマッコルガンは、ほぼ5.1m/s～5.5m/sのイーブンペースで走り、ピッチはほぼ3.0step/sで、曲走路ではストライドが1.78m、直走路では1.75mであり走り方を変えていることを報告している。

山崎（2014, 2015）は、実際の10000mレース中の前半（2000m）、中半（4800m）、後半（8800m）の疾走速度とストライド、疾走速度とピッチ、疾走速度と膝関節伸展速度の相関分析を行い、ほぼ同一速度であっても中半からスピードとピッチの相関が高くなり、後半には短距離疾走と同様の疾走速度と膝関節伸展速度に負相関（伊藤：2005）の例がみられたことを報告した。

2000m地点では、ほぼ秒速5.6～5.8mで推移し、疾走速度との相関分析では一定の傾向は得られていない。4800m地点では、ほぼ全員に疾走速度とピッチ（step/min）に高い相関がみられた。8800m地点でもピッチとの相関が高いが、興味深いことに4800m地点ではみられなかった疾走速度と膝関節伸展速度との負相関が4名にみられた（表1）。4名中2名は2000m地点でも負相関がみ

表1 10000mレース中の疾走速度と各因子との決定係数の変容（2014年）
疾走速度（Speed）とストライド長（Strd）、ピッチ（Pitch）、膝関節進展速度（KnEx）との相関関係（決定係数：R²）

	2000 m			4800 m			8800 m		
	Strd& Speed	Pitch& Speed	KnEx& Speed	Strd& Speed	Pitch& Speed	KnEx& Speed	Strd& Speed	Pitch& Speed	KnEx& Speed
Sub.A	○*	◎	○	○*	◎	×	×	◎	×
Sub.B	◎	×	×	△	◎	◎	◎	◎	◎*
Sub.C	×	○	×	×	○	×	×	◎	○*
Sub.D	○*	○	○*	×	◎	×	×	◎	◎*
Sub.E	◎	△	◎*	△	◎	△	◎	×	○
Sub.F	△	◎	×	○	◎	×	○	◎	○
Sub.G	◎*	◎	○*	×	◎	◎	×	◎	◎*
Sub.H	○*	×	×	×	△	△	○	◎	×

決定係数（R²）の範囲 ～0.64（◎） 0.63～0.25（○） 0.24～0.16（△） *は負相関

られ、他の1名は2000m地点での負相関が8800m地点では正相関になっていた。また、8800m地点で正相関のみられた2名は、速度とストライドの相関が高く、このことは膝関節の伸展によりストライドを伸ばしてスピードを維持していることが推察される。

山崎 (2011) は、このような疾走動作の変容と関連して、1986年に示したスキル系とエネルギー系の重回帰式モデル ($P=S1 \times PCr + S2 \times Gly + S3 \times Mtc + b$) についての新たなマトリクスモデルを示した (図9)。

第1項マトリクス内の [PCr] はATP-PCr系の、[Gly] は解糖系の、[Mtc] は有酸素系のある時点での供給レベル (1 ~ N) を示し、第2項はエネルギー供給系の総体的レベルに対応した動作系内の適切な「スキルのモード」を示す。

長距離レース後半では、ATP-PCr系や解糖系の供給レベルが低下 (PCr2やGly3のレベルへ) する。これに対して、有酸素系 (Mtc) はあまり変動しないが、総体としてのエネルギー供給系の様相 (モード) は異なってくる。このモデルは、エネルギー供給系のモード変容に対応し、ランニングスキルを「キック力を軽減したハイピッチランニング」等に切り替え ($Sm \alpha$ から $Sm \beta$ へ: ピッチやストライド、関節バネ係数などのその時点その時点での最適値への切り替え)、ペースを維持して後半も適切に対応する可能性を示唆している。図9のマトリクスモデルに示すように、長距離レースの進捗によりエネルギー供給系は継時的に減少し、それに対応したランニングスキルの変容が必要とされる。表1にみられた各地点でのパラメーターの変容は、このことを反映していると考えることができ、その時点での最適なランニングスキルに「適応制御」していることが示唆される。

$$Y = \begin{bmatrix} PCr0 \\ PCr1 \\ PCr2 \\ \vdots \\ PCrN \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Gly0 \\ Gly1 \\ Gly2 \\ \vdots \\ GlyN \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Mtc0 \\ Mtc1 \\ Mtc2 \\ \vdots \\ MtcN \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Sm \alpha \\ Sm \beta \\ Sm \gamma \\ \vdots \\ Sm \omega \end{bmatrix}$$

図9 エネルギー系とスキル系のマトリクスモデル (山崎,2011を改変)

エネルギー供給系と運動習熟との連関

もしも運動が、上位中枢からの司令だけではなく身体と環境との不断の相互作用 (トップダウンとボトムアップの反復) によってシナジェティックに決定されているとすれば、エネルギー供給系と運動習熟が、それぞれの状況に対応して適応し高度に組織化された運動遂行状態を生み出すこととなる。

多賀は、歩行パターンとエネルギー消費の関係について、運動パターンがエネルギー最小の原理に基づいて生成されること、歩行や走行パターンの選択が起こるときはエネルギー効率がより良いほうのパターンを選択すること、多様な運動パターンの生成は、脳神経と身体との相互作用の結果として自己組織的に生ずる可能性を指摘する。多賀の指摘する「スレイビング (系全体の振る舞いは遅い変化をする変数だけで決まる)」は運動学習の第二段階に、「シナジェティック (多数の要素が相互作用を通じて全体としての秩序を生み出す協力現象)」は第三段階の運動習熟の形成に対応するものと考えられることができる。

運動習熟の形成は、それぞれがエネルギー供給系のモードと密接に関連してパフォーマンスに破綻をきたさないために動作系を変容させる。例えば、Pcr1とGly1とMtc0であれば最も効率的なものは $Sm \beta$ であり、Pcr3とGly3とMtc1であれば $Sm \gamma$ で最も効率的になるように「連関 (Linkage)」を変化させ「調和 (Harmony)」させているのではないか。

運動の継時的実施に伴いエネルギー供給系が変容し、それに応じてランニングスキルも変容する。ある時点で最も効率的であった動作系は、別の時点では他の動作系に変容させることが求められる。そのエネルギー供給系との「連関 (Linkage)」を実現してゆくのが本来の意味での運動習熟であると考えられる。

柿木と八田 (2015) は、自転車ロードレース中の至適ペダリング頻度 (ケイデンス) は、ペダリングパワーとの関連を考慮すると乳酸性作業閾値に収斂するのではないかと仮説を示した。森谷 (1995) は、自転車ペダリング運動時のデータから、

最大酸素摂取量の70%の同一の運動でも、ペダルの回転数を1分80回にすると最大筋力の11%出力ですむのに対し、1分40回では17%に達し、回転数の多い方が相対的に動員される筋群が交代できる可能性があることを指摘する。このことは、1分80回転のペダリングはトルクが小さいため発揮張力のやや低い筋線維群も動員される（補完的張力の発揮）のに対し、40回転では特定の速筋線維群に限定されるため、いわば「登り坂でのギアチェンジ」に類似した「戦略」が求められ、「乳酸シャトル」を効率的に利用して遅筋系筋線維での乳酸の分解とエネルギー再利用の可能性を示唆している。

おわりに

福永（2015）は、現代のスポーツ科学研究が、自然・人文・社会科学を基盤として発展してきたことと比較して、スポーツパフォーマンスを科学的に分析・統合する実践的研究はほとんど行われて来なかったことを指摘し、体育学における「スポーツ実践研究」の可能性を問うた。

陸上競技の試合やトレーニングの場面では、エネルギー供給系は継時的に減少して供給モードが変容する。この際その供給モードと運動スキルを「連関」させ「調和」させて適応制御するプロセスは、パフォーマンスを破綻なく遂行するためにきわめて重要である。

従来、「巧みさ」や「コーディネーション」のトレーニングは、神経系のトレーニングであるから「心身ともフレッシュな状況での実施が好ましい（2009）」と考えられているが果たしてそうであろうか。10秒間での100m走であっても2時間以上を要するフルマラソンであっても、継続される運動経過はエネルギー供給系の減少と関連した運動スキルの変容を要求する。

八田（2014）は、エネルギー供給システムから考えても「純然たる無酸素系の運動」は現実には存在せず、たとえ100m走であってもスタートから有酸素系のエネルギー生産機構が働いていることを指摘する。

3種類の筋線維と3種類のエネルギー生産機構からなる「3×3システム」が複数の筋群に存在し、屈筋群と伸筋群では速筋線維と遅筋線維の構成比

率もエネルギー供給システムも異なる。この複雑なシステムを巧みに統合しているものは、中枢からの「制御系」と制御対象の「身体系」及び外乱として作用する「環境系」のトップダウンとボトムアップの相互作用の反復（トレーニング）の中で「シナジェティック」に決定されるエネルギー供給系と運動習熟の「連関」と「調和」であると考えられる。

特定の段階でのエネルギー供給系の「モード」に依存しない運動スキルは存在せず、またある段階で求められる運動スキルはエネルギー供給性の「特定のモード」を要求する。

トレーニングのリアリティは、継続される運動経過のそれぞれの段階でのエネルギー供給系のモードと運動スキルのモードとの「連関」と「調和」の視点から計画・実践されることによって初めて実現される重要な課題ではないかと考えることができる。

本研究は、科学研究費助成事業（学術研究助成基金・課題番号24500732：H24～26及び課題番号15K01554：H27～29）の一部で行われた。

文献

- Bernstein,N.(1967) Co-ordination and Localization Problem, The coordination and regulation of movement,PERGANON PRESS,15-59.
- Bernstein,N.A.(1975) Bewegungsphysiologie, JOHANN AMBROSIUS BARTH,1975.
- Bernstein, N.A. : Latash, M.L.,Turvey,M.T.(1996) On Dexterity and Its Development ,Lawrence Erlbaum Association, 115-170.
- ベルンシュタイン, N.A.:工藤俊和訳 (2003) 動作構築のレベル (ディクステリティー~巧みさの発達~), 金子書房, 132-203.
- 福永哲夫 (2015) 体育学における「スポーツ実践研究」のすすめ, 日本体育学会第66回大会大会号, 21.
- ハルトマン, C.:ライブチヒスポーツ科学交流協会誌 (2009) コーディネーション理論, コーチングクリニック, 23巻4号, 48-52.
- ハルトマン,C.・豊田太郎 (2009) コーディネーショントレーニング実技1, コーチングクリニック, 第23巻5号, 45-51.
- 八田秀雄 (2009) 乳酸と運動生理・生化学, 市村出版, 60-77.
- 八田秀雄 (2015) 新版 乳酸を生かしたトレーニング, 講談社, 90-110.
- 猪飼道夫 (1975) 身体運動の生理学, 杏林書院, 336.
- 井尻正二 (1966) 科学論, 築地書館, 2-103.
- 伊藤 章, 齋藤昌久, 佐川和則, 加藤謙一, 森田正利, 小木曾和幸 (1994) 世界一流スプリンターの技術分析 (日本陸連強化本部バイオメカニクス研究班, 世界一流陸上競技者の技術), ベースボール・マガジン社, 31-49.

- 伊藤 章 (2005) 陸上競技・短距離, 体育の科学, 第55巻12号, 杏林書院, 947-952.
- 伊藤正男 (1992) 熟練の脳内メカニズム, 体力科学, 第41巻1号, 1-7.
- 柿木克之, 八田秀雄 (2015) 自転車競技の現場における技術としての選手強化支援手法開発の試み, 日本運動生理学会抄録集, 48.
- 川人光男 (1988) 運動軌道の形成 (伊藤・佐伯編 認識し行動する脳), 東京大学出版会, 150-181.
- 川人光男 (1996) 脳の計算理論, 産業図書, 235-301.
- コーガン, A.B.: 川村浩訳 (1963) 脳の分析-総合活動 (脳生理学の基礎), 岩波書店, 207-234.
- 小林寛道 (2001) ランニングパフォーマンスを高めるスポーツ動作の創造, 杏林書院, 16-32.
- クレストフニコフ, A.N.: ソビエトスポーツ科学研究会訳 (1978) スポーツの生理学, 222-232.
- マイネル, K.: 金子明友訳 (1981) 運動系の学習 (マイネルスポート運動学), 大修館書店, 361-424.
- マイネル, K.: 萩原 仁, 綿引勝美訳 (1980) 動作学, 新体育社, 263-311.
- 松尾彰文, 杉田正明, 阿江通良, 小林寛道, 岡田英孝 (1994) 中長距離決勝におけるスピード, ピッチおよびストライドについて (佐々木・小林・阿江編 世界一流陸上競技者の技術), ベースボール・マガジン社, 92-111.
- 森谷敏夫 (1995) 筋繊維の動員特性と動作のテンポ, 体育の科学, 第45巻1号, 18-24.
- 野崎大地 (2014) 筋骨格系の冗長性1, 体育の科学, 第64巻11号, 793-797.
- オゾーリン, N.G., ロマノフ, A.O.: 岡本正巳訳 (1966) スポーツマン教科書, ベースボール・マガジン社, 244-269.
- 尾縣 貢 (2004) スポーツ技術と身体能力, 体育の科学, 第24巻2号, 104-107.
- バプロフ, I.P. 脳高位部の動的なステレオタイプ (H.N.コシトヤンツ編: 東大ソビエト医学研究会訳 バプロフ選集下巻), 合同出版, 411-416.
- プーニ, A.Z.: 藤田 厚, 山本斌訳 運動習熟の形成過程の一般的特徴 (実践スポーツ心理), 28-34.
- 定本朋子, 宮下充正 (1987) 骨格筋繊維にみられる運動の効果, 臨床成人病, 17巻5号, 811-817.
- 佐々木正人 (1994) アフォーダンス-新しい認知の理論-, 岩波書店, 83-89.
- シュモリンスキー, G.: 成田十次郎, 岡岡康雄訳 (1982) 技術の形成 (ドイツ民主共和国の陸上競技教程), ベースボール・マガジン社, 106-110.
- 芝田伸午 (1961) 人間性と人格の理論, 青木書店, 37-51.
- 多賀巖太郎 (2002) 脳と身体の動的デザイン-運動・知覚の非線形力学と発達-, 金子書房, 1-90.
- Turvey, M.T., Kugler, P.N. (1984) AN ECOLOGICAL APPROACH TO PERCEPTION AND ACTION (Whiting, H.T.A. Ed Human Motor Action Bernstein Reassessed), NORTH-HOLLAND, 375.
- ワイズマン, N.B.: 茂木俊彦訳 (1978) ちえ遅れの子の運動機能と脳, ミネルヴァ出版, 25-48.
- 綿引勝美 (1990) コーディネーションのトレーニング 東ドイツスポーツの強さの秘密, 新体育社, 10-30.
- ヤコブレフ, H.H., コロブコフ, A.B., ヤナシス, C.B.: 貝出繁之訳 (1960) 運動熟練の意義 (ソ連スポーツ・トレーニングの理論と方法), 85-126.
- 山崎 健 (1983) 人間の随意運動の二つの成分について, 新潟大学教育学部紀要・人文社会科学編 第25巻2号, 581-590.
- 山崎 健 (1986) スポーツの認識と習熟 (伊藤, 出原, 上野編 スポーツの自由と現代), 青木書店, 299-311.
- 山崎 健 (1993) ランニングスキル改善と歩数計測の意義, ランニング学研究 第4巻1号, 14-19.
- 山崎 健 (1993) スポーツ技術の研究は何に貢献するのか (中村敏雄編 スポーツのルール・技術・記録), 創文企画, 165-190.
- 山崎 健, 石山和人 (1998) トレーニングによる小学生の疾走動作の変容, 日本陸上競技連盟・陸上競技紀要, 第11巻, 44-51.
- 山崎 健, 斎藤麻里子 (2002) 一過性のドリルによるスプリントパフォーマンスの変容, 日本陸上競技連盟・陸上競技紀要, 第15巻, 21-29.
- 山崎 健 (2004) 身体運動研究の動向-アフォーダンスと運動の自己組織化-, 運動文化研究, 第20巻, 1-4.
- 山崎 健 (2011) エネルギー供給系と運動習熟の連関, 現代スポーツ研究, 第12号, 54-60.
- 山崎 健 (2011) ランニングパフォーマンスを決定するマトリクスモデルの検討, ランニング学研究, 第23巻1号, 55-56.
- 山崎 健 (2011) 運動処方とトレーニング (山地・大築・田中編 スポーツ・運動生理学概説), 明和出版, 180-181.
- 山崎 健 (2015) 10000m レース中のランニング動作変容に関するモデルの検討, ランニング学研究, 第26巻1号, 78-79.
- 山崎 健 (2015) 運動生理学の研究から見えてくる身体運動システムの複雑さ, スポーツ社会学研究, 第23巻1号, 35-46.
- 山崎 健 (2015) 長距離ランニング中の動作変容に関わるモデルの検討, 平成24-26年学術研究助成基金報告書, 1-16.
- 山崎 健 (2015) 10000m レース中の後半に見られたランニング動作の変容, ランニング学研究, 第27巻1号, 66-67.