

《研究動向》

トレーニングにおけるエネルギー供給系と運動習熟の「連関」を考える

山崎 健(新潟大学名誉教授)

はじめに

かつて猪飼(1973)は、 $p=C \int (E)M$ との式を示し、スポーツパフォーマンスが C:サイバネティクスとしての動作系と $\int (E)$:総体としてのエネルギー供給系に M:意欲がかかわり決定されるモデルを示した。まさに「心技体」の一体化を示しているがその「実体」は明確にはなっていない。山崎(2011)は、パフォーマンスのマトリクスモデル(図 1)を示し、三つのエネルギー供給系のモードに対応してスキル系が適応制御する可能性を指摘した。

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

図 1

PCr はハイパワー系、Gly は解糖系、Mtc は有酸素系で、0~N はそれぞれの供給レベルを表す
Sm はスキルモードで、エネルギー供給系の状況に対応して適応制御する

これは、運動経過の進捗に伴うエネルギー供給系の「モード変容(疲労現象の発現のみにとどまらない)」に応じて「破綻」をきたさないために動作系を変容させる可能性を示唆している。

Turvey と Kugler(1984)は、主体の身体状況と環境条件に対応して選択すべき「運動行為」が変容するとの象徴的なシエーマ(図 2)を示している。

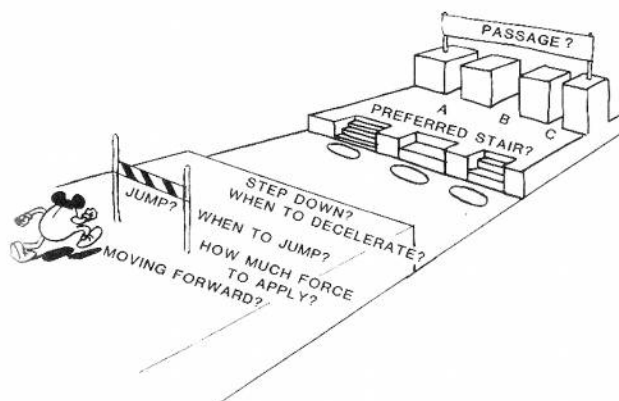


図 2

状況に応じて「登れる階段」は「登れない階段」になり、「抜けられる」か「抜けられない」ゴールかは「主体」の状況(移動速度や身体のブレなど)に応じて決定される

従来この概念は、生態学的心理学での「アフォーダンス」に関わる視覚的な「見え」の概念を示すものとされてきたが、もしもこの課題が 1 回限りではなく 10 数回反復されると仮定すれば「主体の状況」に応じて運動行為を変容させなければ運動経過に破綻をきたすものと考えられる。

トレーニングのプロセスでは、運動経過の進捗に応じてエネルギー供給系が変容するのであ

れば「それぞれの時点」でのエネルギー供給モードに適応した身体運動様式の発現が求められ、そのことがトレーニングの「リアリティ」を実現することとなる。

動作系の柔軟性や多様性に関する「コーディネーション」という概念について、運動経過に柔軟に対応して運動様式を変容させるものと規定している。しかし、適切な変容を「生起させるものは何か」についてはあまり論じられてこなかったように思われる。

3つのエネルギー供給系と3種類の筋線維

身体運動を実現するものは筋-骨格系の収縮によって実現される「運動スキル」であり、その持続的発現を支えるものが「エネルギー供給系」である。

山崎(2015)は、3種類の筋線維と3つのエネルギー供給系から構成される筋の機能モデルを示した(図3)。3種類の筋線維は上位中枢からの運動司令に対応して動きの性質を決定する「動きをつくり出すシステム(発揮される運動スキルの遅速や強弱)」として機能し、3つのエネルギー供給系はその運動遂行を支える「エネルギーをつくり出すシステム」という性格を持つ。

速筋系であるType II aとType II bは大きな張力を発揮するが持続時間は短く、遅筋系であるType Iは発揮する張力は少ないものの収縮可能時間は長いとされる。また、ATP-PCr系は発揮するエネルギーは大きく、解糖系は主要なスピード持久力を支え、有酸素系は出力レベルが小さいものの持続的にエネルギーを供給している。

動きをつくり出すシステムは上位中枢からの支配を受けているがエネルギー供給系が枯渇すれば運動を継続することが不可能となる。このことから刻々と変容するエネルギー供給系の「モード」に応じて運動スキルを変容させていくことが求められる。

		動きをつくり出すシステム		
		Type I	Type II a	Type II d/x
エネルギーをつくり出すシステム	ATP-PCr系	△	○	◎
	解糖系	○	◎	◎
	有酸素系	◎	○	△

定本ら(1987年)の図を山崎が改変

図3

Type Iは遅筋系、Type II aは速筋系、Type II d/x(b)も速筋系で、大きな質量をもつ身体分節を瞬間的に的確な方向に動かし運動スキルを支える

この3種類の筋線維の中でType II bは、短時間で大きな張力を発揮できることから関節周りの骨格(四肢)の運動方向を瞬時に適切な方向に誘導して運動スキルを支えているものと考えることができる。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、運動して活動する際には、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(2019)は、関節周りの拮抗筋や協働筋から構成される「マルチレイアシステム(図 4)」の可能性を指摘し、エネルギー供給系のモードと「連関」して運動スキルを変容させるモデルを示した。

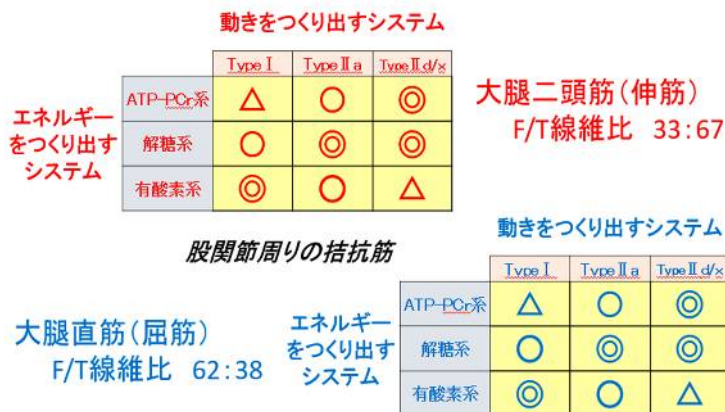


図 4 マルチレイアシステム
速筋:遅筋比の異なる拮抗筋が、運動経過の進捗に伴い、重みづけを変えながら最適なモードに「適応」して支える

運動習熟のモデル

身体は多数の分節(セグメント)で構成されているため「全く同一の運動経過」を実現することは困難である。ベルンシュタイン(2003)は「冗長な自由度をどのように克服するのか?」という問題提起から「巧みさ(ディクステリティ)」という概念を示し、系統発生性を反映した「動作構築のレベル」という概念から「緊張」「筋-関節リンク」「空間」「行為」の階層構造を示した(この概念は旧ソ連では「機械論的」と批判されていた)。

運動経過の進捗に対応して連続して運動スキルを変容させるメカニズムはまた「運動習熟(proficiency:skilled movement)」という概念で説明される。

プーニ(1967)は、「運動表象」の筋・運動感覚と視覚表象と言語表象との関連から「自動化に関する運動習熟の様々な段階では、習得された動作なるものは無意識的な動作には変化しないで、別の形で意識されるものである」との特殊な意識状態であることを指摘する。

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補正して適切に対応する運動習熟のモデルを示した。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」との理論から図 5 のように修正した(2007)。

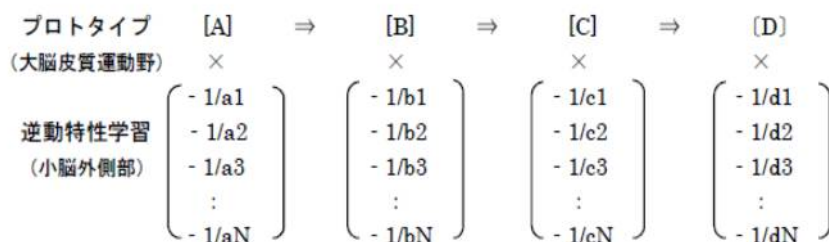


図5 ダイナミック・ステレオタイプモデル

例えば、A:テクバック、B:フォアワードスイング、C:インパクト、D:フォロースルーの動作について、小脳外側部が逆動特性学習で補正する(反復により補正幅が拡大する)

更に、例えば図5の小脳での $[-1/a1] \sim [-1/b2] \sim [-1/c3] \sim [-1/d3]$ という運動経過で運動野プロトタイプの連続的補正(別条件下でも同様に他の連続的補正も瞬時に選択される)を行うメカニズムは一体「どこ」が選択しているのだろうか?

丹治(1999)は、大脳皮質から多くの入力を受ける大脳基底核の線条体の機能は、細胞一個当たり 1 万個のシナプス入力を受けているが容易に興奮信号を発生しないことから、多数の入力情報のなかから特定の意味のある情報を取り出す仕組みとしての「脱抑制系」と「抑制強化系」の両者がブレーキ制御をコントロールすることを指摘する。松波(1986)は、大脳基底核は、大脳皮質から多くの入力を受け、そのほとんどをダムのように「止めて」いて、必要な時にある回路(最善の動作)のみをリリースしているのではないかと指摘し、木村(2000)は、大脳基底核の線条体に投射するドーパミン作動性ニューロンが「報酬の予測誤差信号」を担い、個々の動作ではなく「運動連鎖」を引き起こす可能性を示唆している。

スポーツパフォーマンス改善のリアリティ

図6は、「筋の3×3マルチレイアシステム」と「運動習熟」と「パフォーマンス」のモデルを示したものである(山崎、2019)。

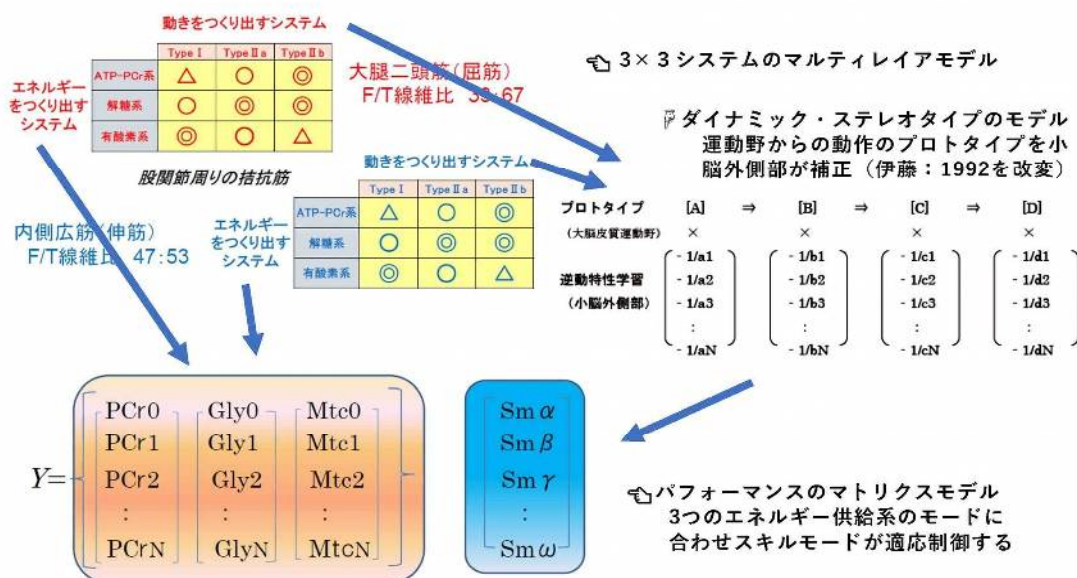


図6 「3×3マルチレイアモデル」と「ダイナミックステレオタイプ」と「パフォーマンスのマトリクスモデル」の関係

スポーツ活動としての「熟練した身体運動」の継時的実現は、単なる動作発現にとどまらず長時間にわたるスポーツ活動において、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。

山崎(2015)は、エネルギー供給系と運動習熟のそれぞれの状況に適切に対応した「連関(Linkage)」という概念を示し、そのマトリクスモデルを示した(図1)。運動初期には各エネルギー供給系は減少していないため最高のスキルモード($Sm\alpha$)で対応しているが、終盤エネルギー供給系が減少してくると他のスキルモードに切り替えて対応する。

「ある時点」では効率的なスキルモードであっても、エネルギー供給系が変容(様相の変化)すれば「ミスマッチ」を生じ運動経過に破綻をきたす。このため運動経過に破綻をきたさないために「適応制御」が必要となりこれが「コーディネーション」や「巧みさ(デクステリティ)」を「生起」させる要因であり、パフォーマンスを改善するトレーニング課題はエネルギー供給系の様相に合わせて適切な運動スキルを変容させることが求められる。従来のスキル系のトレーニングではエネルギー供給系の変容(疲労感の進行)を考慮しては行われておらず、神経系にかかわる機能として「フレッシュな状態」での実行が好ましいと考えられていた。しかし、実際の運動場面を想定すれば、疲労の進行に適応させた運動スキルの発揮もトレーニングの「リアリティ」を高めるためには必要なものと思われる。

「巧みさ」を実現するシステムは、運動経過が脳皮質運動野や小脳、大脳基底核や視床などが関わってトレーニングの反復の中で再編され、そのなかで人類史的に形成されてきた「緊急事態」に対応するいわゆる「直感システム」が形成されてきているようにも考えられる。適切な運動経過の選択と実行は、「予測誤差への報酬系」として結果的に「強化学習」されるのではないだろうか。

しかし「パフォーマンス改善」と「トレーニング効果」との関係は極めて複雑かつ個別的・限定的でありその実体はある意味では「多様な解釈が成立」する。このことが根拠の薄い「精神主義」や「非科学的トレーニング」と批判されている内容であってもそれらにある程度の「効果」を与えてしまうこととなる。そのような好ましからぬ実践に結果として何らかの根拠を与えてしまう背景には、この「個別性」「限定性」が未だ十分に解明されていないことにその要因があるものと考えられる。

ただ、最近の科学的な分析とその解釈によるトレーニング科学の発展には著しいものがあり、障がい者も含めたトップアスリートのトレーニングへの貢献実績が報告されている。またリハビリテーションからのトレーニング方法への貢献も、解剖生理学的運動機能に対応した様々な「トレーニングメソッド」が提案されてきている。

スポーツトレーニングの新たな展開は？

最近注目されている「ファンクショナルトレーニング」について、ボイル(2007)は、個別の筋の収縮ではなく、ひと纏まりの筋-関節から構成される全身運動を基本とする方法で、スタビ

リティボールやラダーを用いたトレーニングを例示しており、自体重を負荷として競技で必要とする体勢などスポーツの特異性を理解した上での様々なプログラムを紹介している。ボッシュ(2020)の「コンテクスチュアルトレーニング(原題: Strength Training and Coordination)」では、個々の要素による「還元主義」ではなく、スポーツにおける運動学的な「複雑系(文脈性を含む)」を前提とし、ストレングスエクササイズからスポーツ動作への転移での運動感覚の同一性を指摘する。小林(2013)は、動作の質を高める「認知動作型 QOM トレーニング」による動作を学習するトレーニングマシンについて「スプリントトレーニングマシン」「アニマルウォーキングマシン」「車軸移動式パワーバイク」などを用いたトレーニングの有効性を示唆している。

これらのいずれの方法も、個々の筋や限定的・要素還元的な動作ではなく、多関節をまたぐ全身的で一連の動作を課題としている点が特徴であり、基本は自体重を負荷とした「全身運動」とその動作範囲内でのバーベル負荷やトレーニング機器等を用いて行うプログラムである。スポーツ動作の特異性やそれによる過度で偏った身体の負担の軽減と改善をはかるという意味での理学療法士(PT)などのリハビリテーションとも通ずるものと思われ、ボイルは「自動車であれば馬力を高めるというよりも、燃費を改善するという考え方でトレーニングをとらえてみる」とし「トレーニングが理にかなっていることが重要であり、よってコーチは選手にとって理にかなったトレーニングを作成しなくてはならない」と指摘している。

おわりに

スポーツ活動において、パフォーマンスの安定化やその改善を目指すことは、そのスポーツの持つ固有の「楽しさ」「達成感」「充実感」「幸福感」といった肯定的な感情の醸成に貢献する。故にそのために行われるトレーニングの理論と方法は、「全体性と個別性」、「計画性と漸進性」、「感覚性と意識性」といった諸原則によって構成された「トレーニング効果」を保証することが求められ、長期間にわたる実践と実証の繰り返しが行われている。

トレーニングのリアリティの解明とパフォーマンスの向上にはアスリートやコーチの高い目的意識と情熱を持った取り組みと研究者のサポート体制との連携が求められている。しかし、2021年の東京五輪・パラリンピックに向け国立スポーツ科学センターとナショナルトレーニングセンターなどが統合された「ハイパフォーマンスサポートセンター」の活動に象徴されているように、財政的問題をも含めてまだオリンピックやパラリンピックのアスリートサポートに限定されている。

この意味で、多くの市民スポーツの愛好者の多様な要求に、どのような組織と内容で答えていくのかはいまだ不透明であり、新日本スポーツ連盟や附属スポーツ科学研究所に求められる課題ではあるもののいまだ十分には対応しきれていないのが現実ではないのだろうか

参考文献:

1. ベルンシュタイン.N.A.:工藤俊和訳(2003)、ディクスティリティ~巧みさの発達~,金子書房、132-203
2. M.ボイル:中村千秋訳(2007)、ファンクショナルトレーニング、大修館書店、1-6
3. F.ボッシュ:谷川聡・大山卞圭吾訳(2020)、コンテクスチュアルトレーニング~運動学習・運動制御理論に基づくトレーニングとリハビリテーション~,大修館書店、7-51
4. 猪飼道夫(1973)、スキルの生理(猪飼道夫編著:身体運動の生理学)、杏林書院、334-354
5. 木村 實(2000)、大脳基底核(西野・柳原編:運動の神経科学)、NAP、50-60
6. 小林寛道(2013)、健康寿命を延ばす認知動作型 QOM トレーニング、大修館書店、132-149
7. 松波謙一(1986)、運動と脳、紀伊国屋書店、182-192
8. 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
9. プーニ、A.Z.:藤田厚・山本斌訳(1967)、実践スポーツ心理、28-34
- 10.丹治 順(1999)、脳と運動、共立出版、107-117
11. 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
- 12.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
- 13.山崎 健(2007)、トレーニングは「何を」トレーニングするのか?、現代スポーツ研究 第 8 号、2-5
- 14.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
- 15.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
- 16.山崎 健(2015)、運動習熟とダイナミック・ステレオタイプの再考、陸上競技研究 第 103 号、2-11
- 17.山崎 健(2019)、エネルギー供給系と運動習熟の連関(シンポジウム:ランニングパフォーマンスを決めるもの)、第 31 回ランニング学会大会号、10