

■特集：スポーツ・身体と科学技術のサイエンス・カフェ

## 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

---

山崎 健<sup>1)</sup>

### 抄 録

身体運動における骨格-筋システムの複雑さの解明には、研究の多様化と重層化とが必要である。従来は、運動司令を出す脳-神経系と指令を実行する骨格-筋系及び運動遂行時に外乱を引き起こす環境系のトップダウンシステムのみが注目されてきた。現在では、環境系から身体系と神経系へのボトムアップインフォメーションの反復により系全体を再構築する可能性が指摘されている。

本研究では、この問題について、三種類の筋線維と三つのエネルギー供給系が $3 \times 3$ のマトリクスシステムによりエネルギー系の変動に適切に対応してスキル系を変容させ適応しているとの仮説を、実際の長距離レース中の疾走動作の変容を対象として検討した。よくトレーニングされたランナーは、レースの進捗に対応してランニングスキルを変えており、これはある意味での適応制御と考えることができる。

しかし、このような複雑なシステムの総体を、実証的に検討することは困難も多く、多くの知見を俯瞰的に統合する研究戦略と研究システムの構築が求められる。

キーワード：適応制御、 $3 \times 3$ システム、ダイナミック・ステレオタイプ

---

1) 新潟大学教育学部

■ Japan Journal of Sport Sociology 23-1 (2015)

## **Complexity of the Human Motor Action System: from the Viewpoint of Motor Physiology**

---

YAMAZAKI Ken<sup>1)</sup>

### **Abstract**

In order to study the complexity of the skeleton-muscle system in human motor action, diversification and stratification are very important. Traditionally, the top-down exercise command system from the brain nervous system to the skeletal muscle system in environment is regarded as important. Recently, however, the possibility of rebuilding the entire system by iterative bottom-up information of the skeleton muscle system to the brain nervous system has begun to be seen as important.

In this study I try to examine my hypothesis of the “3x3 system”, (three muscle fiber types by three energy supply types) which plays its part in transforming the appropriate motor skills in response to the reduction of the energy supply system.

To consider this hypothesis, I analyze the transformation of running skills during an actual long-distance race. Well trained runners altered their running skills as a result of the adaptation of the human movement system in progress.

However, the totality of such complex systems is difficult to examine empirically. Probably, a bird's-eye view integrate research strategy is necessary for the construction of the research system.

**Key words: adaptative regulation, 3×3 system, dynamic stereotype**

---

1) Niigata University, Faculty of Education

## はじめに

2012年ロンドンパラリンピックにおいて、陸上男子200m決勝は、大方の予想に反して20歳のブラジルの新人・オリベイラ選手が、予選で21秒30の驚異的世界新記録を出した南アのピストリウス選手をおさえて21秒45で優勝した。問題はこのレース後の「オリベイラ選手の義足は長すぎる」とのピストリウス選手のコメントが論議を呼んだ。

インターネット上では「100mを数歩で行ける義足!」「リオ五輪100m決勝はボルト以外全員義足!」などという何の根拠もない非科学的な書き込みも数多くなされた。

確かに、これは義足のスプリンターにかかわる問題ではあるものの、スポーツにおける用器具や補助具、ドーピングをも含むサプリメントの使用などと同じく「スポーツに関わる人間の身体の一義性」の問題でもある。

山崎 [2013] は、身体障がい者の陸上競技における義足の使用について、“また、「義足のバネ」が有利ではないかとの意見も聞かれるが、外部からの動力を用いていないので「バネを撓ませる力」は自分の筋の動きから生み出される力である。棒高跳のポールは、硬さ（体重ポンド表示）が異なっており、硬いポールを用いれば高く跳べるがそれを曲げるためには助走スピードと踏切技術が必要であり、やり投の槍にも同様の硬さ（飛距離表示）が設定されている。つまり、自己の能力を超えた硬さは利用できないのであって、健常者と同じ疾走動作を行っている限り、硬さや長さが有利に働くとはいえ難い。必要以上に長ければ、それを動かすパワーが必要でピッチは当然低下しスタートでは絶対的に不利である”と指摘した。確かに、高性能のカーボンファイバー製の義足が開発されなければ、両足義足の選手が400mを45秒台で走りオリンピックや世界選手権に出場するということは想像もできなかったが、トップクラスの

記録を達成しているのは、ピストリウス選手の400m（2011年の世界ランク22位）に限られている。

身体障がい者のアルペンチェアスキーで、2014年ソチパラリンピックに向けた日本企業の共同開発によるチェアスキーの完成が、男子アルペンスキーの快進撃を支えた。金メダリストの森井大輝は、「マシンは僕たちの足。“人馬一体”じゃないと、すべてがかみあわない。今回は完璧なものができあがった。不安もなくレースに臨める」とのコメントを残した〔朝日新聞デジタル；2014年3月8日〕。

筑波大学の山海嘉之教授のサイボーグ型ロボットが、身体に困難を抱える人々に大きな可能性を提供したことも「人に役立つロボットを作る」という信念があって初めて実現したものである。このサイボーグ型ロボットは、ヒトの脳-神経系や筋からの制御信号を利用して機械的に増幅された動作を実現する「パワーアシスト」の側面を持ち、災害現場や介護現場での活用が期待される一方、米国防総省高等研究計画庁（DARPA）が大きな関心を寄せ研究支援をプロポーズしたことも知られている。日本では2014年10月に「超人スポーツ委員会」が、個々人の身体能力差のない誰でもが「人機一体」となれる新たなスポーツを創造するとの設立趣意をもって発足した。

しかし「人機一体」とはそれほど容易なものなのだろうか。

櫻井 [2013] は、脳と機械を直接つないで制御するBrain-Machine-Interface (BMI) の人間への適応に関して、「(21世紀初頭の) BMIは研究の初期段階に入ったばかりであり、実用化が近いとはとても思えなかった」とコメントする。そして「意図」という情報がニューロン集団のどのような活動に表れているのかの実体も不明であり、その解明こそが現在の神経科学の最大のテーマの一つであることを指摘する。また、双方向性BMIの重要性について、「真に高性能のBMIとは、脳で機械をうまく操作でき

ると同時に、機械から脳に感覚フィードバックを与える双方向性のBMIでなければならない」として「身体の代わりに機械を制御することであり、いわば身体の交換を意味する」「身体が変われば脳も変わる」ことから脳と身体（交換された身体：山崎）は一体となって働いていることを示唆する。

### 遺伝子検査と運動生理化学

2010年2月、バンクーバー五輪開会に合わせNHKで「金メダル遺伝子を探せ！」が放映され、スポーツ適性に関わる遺伝子検査がクローズアップされた[善家, 2010]。現在では、スポーツビジネスとして遺伝子分析キットでの検査サービスも行われている。一例では、筋収縮に際しての速筋線維の構造を強めるとされるACTN3遺伝子のタイプ、血管の収縮に関連するとされるACEタンパク遺伝子のタイプ、有酸素的能力に関係するとされるミトコンドリアに関わるPGC-1 $\alpha$ 遺伝子(PPARGC1A)から、それぞれを3つのタイプに分け、3<sup>3</sup> = 27タイプに分類するサービスが行なわれている。

しかし、明確な「金メダル遺伝子」は特定されておらず、その遺伝子が「ない」と金メダルが取れないかもしれないが、種目によっては「なくとも」メダリストになる可能性も排除できない。エプスタイン[2014]は「ACTN3遺伝子によって予測できるのは、2016年のリオデジャネイロオリンピックで、100m決勝に出られないのは誰かという程度のことだろう。」と指摘する。

そもそもこれらの遺伝子に関わる内容は、病理的な遺伝子異状の解析の必要性から生まれたものである。筋線維組成に関与するとされるACTN3遺伝子におけるTT(XX)型は、 $\alpha$ アクチニン3タンパク質の欠如により「筋ジストロフィー」との関連が指摘されるが、発病するタイプと健康なタイプ(持久的運動に有利とのデータもある)に分かれるとされている。高

血圧症(ACE遺伝子)や肥満(UCP遺伝子)、アルツハイマー症(ApoE遺伝子)や肥大型心筋症(HCM遺伝子変異)などさまざま病気との関連の検討は、病気発症の予防と治療に多くの貢献を果たしている。

運動能力に関連した遺伝子とともに、運動に対する順応度やフィットネス効果に関わる遺伝子の存在も指摘されている。エプスタインは“HERITAGE(健康、リスクファクター、運動、トレーニングおよび遺伝子)プロジェクト”の結果を引用し、週3回5ヶ月間のトレーニングによる最大酸素摂取量の増加が0%(全体の人数構成の15%)から100%の広範囲にわたること(50%以上劇的に増加する人数構成も15%)を報告した。

遺伝子検査は、通常口腔粘膜から得られるDNA解析で、いわば細胞レベルでの特徴を生理化学のレベルから推定するものであるが、ある能力に関与する遺伝子が特定されにくいことからそれらの「組み合わせ」により解析精度を上げようとする試みもなされている。善家は、東京都健康長寿医療センター研究室田中雅嗣氏が10種類の遺伝子を「機能」「表現型」「タイプ」の視点から22点満点で評価し、北京五輪銅メダリストの朝原宣治選手の検査結果を示したことを紹介している。

このなかで、朝原選手のNR3C1遺伝子(ジャンプ力を決定する因子)が、走幅跳で8m13の記録を持つにもかかわらず「ジャンプ力がないCC型」と判定されたことに対し、「確かに、僕は、垂直とびは、全然だめなんです。そういうジャンプ力のことなのかもしれませんね」との大変に印象的なコメントを残している。

これは、一体何を意味するのであろうか。

実は跳躍動作に関しては、上方への走高跳(背面跳)において、膝関節を固定した「起こし回転型」と、膝関節をやや屈曲―伸展する「垂直跳型」の2種類のジャンプ動作が混在していることが知られている。2007年8月、大阪での世界陸上競技選手権・男子走高跳で、バハマ

の元バスケットボールプレイヤーのD・トーマス選手が、第一人者のスウェーデンのS・ホルム選手を「常識破りの跳躍方法（バスケットボールのダンクシュートと似た垂直跳型）」で打ち負かし金メダルを獲得した。身体障がい者の走高跳では、元ハンドボールプレイヤーの鈴木徹選手が「健足側」で世界2人目の2m00を跳躍し、走幅跳ではロンドンパラリンピックで、独・レーム選手が「義足側」で踏み切り7m35で優勝している。つまり跳躍動作は、筋線維の「生理化学から決定される収縮要件」だけで決定されるほど「単純」ではないことを意味している。

### ヒトの骨格-筋システムの複雑さ

筋線維には、張力は低いが持続性のある「遅筋系線維」と高張力であるが持続性のない「速筋系線維」とがあり、更に速筋系線維は高張力の「速筋タイプ IIb」とやや張力には劣るが持続性のある「速筋タイプ IIa」が存在し、それら3種類の存在比率は筋により異なるものの「混在」している。また、筋線維の再収縮のためのエネルギーシステムは、最も生産性の高い「クレアチンリン酸系」とグリコーゲンを分解する「解糖系」、そしてミトコンドリアにより有酸素的にエネルギーを生産する「有酸素系」であり、いわば「バッテリー」と「ガソリンエンジン」と「ソーラーパネル」のハイブリッドシステムとなっている。

山崎 [2011] は、定本ら [1987] の3種類の筋線維の代謝のシェーマと八田[2003]の「乳酸シャトル」の概念から、3種類の筋線維と3種類のエネルギー生産系が、エネルギー供給系の状況（減少）に応じて動員される筋線維のタイプを変えて対応するという「3×3システム」の仮説を提起した。これは、われわれの生体システムが、いわば「パワードライブモード」と「エコドライブモード」を効率的に切り替えながら破綻をきたさないように運動を継続する可能性

動きをつくり出すシステム

	Type I	Type IIa	Type IIb
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	◎	○	△

図1 3つの筋線維群と3つのエネルギー供給系による3×3システム（定本ら [1987] の図を山崎が改変、2014）

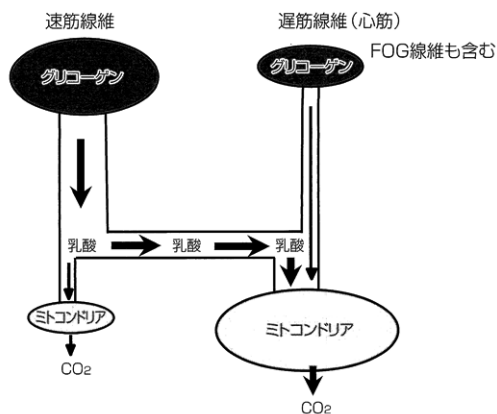


図2 乳酸シャトルの概念 [八田, 2009]

を示唆するものである。

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、総合的な概念ではない。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、更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、図1が大きさ（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となる。

和田 [2011] は、動作部位や動作方向に関わり筋の速筋線維と遅筋線維の比率が異なることを報告している。これは、肘関節において、伸展に関与する上腕三頭筋では投・打などのすばやい動きに関わる速筋線維の割合が高く、屈曲に関与する上腕二頭筋では前腕や物体の保持

などに関わる遅筋系繊維の割合が高いことを意味している。

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」の大股筋や内側・外側広筋が、連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。

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いることを意味する。

山崎 [2011] は、この速筋系線維と遅筋系線維の動作時の役割について、いずれの筋線維も「同一筋」を構成し、解剖学的な起始と停止は同じであることから、速筋系線維 (タイプ IIb) は主要な張力発揮とともに「スキルを構成する運動方向」を決定し、遅筋系線維 (タイプ I) は「補完的張力」を発揮するとともに豊富なミトコンドリアの働きにより乳酸をエネルギーに変換するシステムとして協働している (速筋系線維タイプ IIa は両者?) ののではないかとの仮説を示した。

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」に類似した戦略が必要になることを意味しているのではないか。

ケニアのカレンジン族とエチオピアのオロモ族の長距離ランナーが世界を席巻していること

は周知の事実である。善家は、ピツラディスとノースの共同研究について、ACTN3 遺伝子が持久的運動に有利とされる TT 型 ( $\alpha$  アクチニン 3 タンパク質がつかられない) が、ケニアの長距離ランナーはジャマイカ人スプリンターと同様に極か 1% しか存在せず、瞬発型 (CC 型) が 75%、CT 型が 24% であり、エチオピア人ランナーも TT 型が 8% であったことを紹介している。両研究者とも「詳細は不明であるが“驚異的ラストスパート”が必要なためではないか?」とコメントしている。

「3×3 システム」の概念からも、これらのランナーの長距離ランニングに有利とされるプロポーション (脚が長く膝下が細い) とそこから生み出される時速 20km をはるかに超える速度での効率的ランニングスキル維持のため、巧みに動くことにも大きく関与する速筋系筋線維に関連した  $\alpha$  アクチニン 3 タンパク質が何らかの関与している可能性は否定できない。つまり「持久性 (長時間運動を続けること)」と「持久力 (一定の距離をできる限り速く走ること)」とは似て非なる概念ではないかと考えられる。

### パフォーマンスと運動習熟

かつて運動生理学の権威・猪飼道夫 [1973] は、 $P = C \times [E (M)]$  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 (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。

山崎 [1986] は、この概念について、 $P = r_1 \times s_1 + r_2 \times s_2 + r_3 \times s_3 + \dots + r_N \times s_N$  という重回帰式を示し、ハイパワー系 (ATP-PCr 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)

$$\begin{array}{ccccccc}
 \text{プロトタイプ} & [A] & \Rightarrow & [B] & \Rightarrow & [C] & \Rightarrow & [D] \\
 (\text{大脳皮質運動野}) & \times & & \times & & \times & & \times \\
 \text{逆動特性学習} & \begin{pmatrix} -1/a1 \\ -1/a2 \\ -1/a3 \\ \vdots \\ -1/aN \end{pmatrix} & & \begin{pmatrix} -1/b1 \\ -1/b2 \\ -1/b3 \\ \vdots \\ -1/bN \end{pmatrix} & & \begin{pmatrix} -1/c1 \\ -1/c2 \\ -1/c3 \\ \vdots \\ -1/cN \end{pmatrix} & & \begin{pmatrix} -1/d1 \\ -1/d2 \\ -1/d3 \\ \vdots \\ -1/dN \end{pmatrix} \\
 (\text{小脳外側部}) & & & & & & & 
 \end{array}$$

図3 ダイナミック・ステレオタイプのマトリクスモデル [山崎, 2004]

することから、全く同一の運動スキルに依存しては、最適なパフォーマンス発揮は実現できない。このことから、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」についてのモデル(図3)を示し、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形成について論じた。

投動作であれば、テイクバック [A] → フォアワードスイング [B] → リリース [C] → フォロースルー [D]、という一連の動作系において、例えば疲労等によりテイクバック (a1) からフォアワードスイングへの移行時に「外乱」が生じたとしても、「無意識的な修正 (b2)」により適切なリリース (c1) からフォロースルー (d1) を実現することが可能となる。ステレオタイプではこの「外乱への対応幅」がないために運動経過に破綻をきたす可能性がある。このモデルは、伊藤 [1992] の熟練の脳内メカニズムに関する「小脳での逆動特性学習モデル」を基に、運動野での動作のプロトタイプに対して小脳外側部で補正をかける新マトリクスモデルに改変した(図3:2004年)。

しかし、このモデルはあくまでも動作の習熟に関わるものであって、実際の運動場面でのエ

$$Y = \left[ \begin{array}{c} \text{PCr0} \\ \text{PCr1} \\ \text{PCr2} \\ \vdots \\ \text{PCrN} \end{array} \right] \left[ \begin{array}{c} \text{Gly0} \\ \text{Gly1} \\ \text{Gly2} \\ \vdots \\ \text{GlyN} \end{array} \right] \left[ \begin{array}{c} \text{Mtc0} \\ \text{Mtc1} \\ \text{Mtc2} \\ \vdots \\ \text{MtcN} \end{array} \right] \left[ \begin{array}{c} \text{Sm}\alpha \\ \text{Sm}\beta \\ \text{Sm}\gamma \\ \vdots \\ \text{Sm}\omega \end{array} \right]$$

図4 エネルギー供給系とスキル系の連関モデル [山崎, 2011 を改変]

ネルギー供給系との関連は明らかではない。山崎 [2011] は、更にエネルギー供給系とスキル系との連関モデル(図4)を示した。

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レベルに対応したダイナミック・ステレオタイプ内の適切な「スキルモード (α ~ ω)」を示す。

例えば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、自転車のペダリング運動と同様に、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 (Smα から Smβ へ: ピッチや関節バネ係数などの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する。

### 長距離ランニング中の疾走動作の変容

かのベルンシュタインは、著書『デクステリティ〜巧みさの発達〜』の中で「彼は巧みに10000メートルを走り抜きました！」などという文中での巧みさや巧みという単語は誤用されている」と述べているが果たしてそうであろうか？ 例えどのような単純な運動であれ、その発現にはスキルと戦略が関与しているのではないか。

山崎 [2014] は、全日本大学駅伝に出場した大学生ランナーの 10000m レース中の動作解析を行い、前半 2000m と後半 4800m 及び後半 8800m 地点において、疾走速度と関係のある①ストライド (Stride & Speed)、②ピッチ (Pitch & Speed)、③膝関節伸展速度 (KnEx & Speed.) との相関分析を行なった。

前半 2000m では特定の傾向がみられないが後半 4800m では速度とピッチとの相関が有意に高まり、後半 8800m では全員に速度とピッチの高い相関がみられた。また、8800m 地点では、半数のランナーに、伊藤 [2005] の指摘する短距離スプリント走と同様の速度と膝関節伸展速度の「負相関」がみられる (膝関節を固定気味に走るほうが速い) という興味ある結果が得られた (表 1)。これは 4800m 地点ではみられなかった現象であり、後半にランニングスキル (モード) を変容させたものと推察される。つまり、あるレベル以上の長距離ランナーは、レースの進捗に合わせてエネルギー供給系とスキル系の「連関 (Linkage)」を計って疾走動作を変容させているものと考えられ、これはおそらく 100m や 200m であっても同様のことと思われる。この点で、運動習熟を伴う身体運動の発現に際しては、「単一システム (スキル) の準備」ではなく「重みづけの異なる複数のシステムの並列的準備」での対応をしてい

る可能性が示唆される。

エネルギー供給系とスキル系をつなぐものが「コーディネーション」であるとの可能性も浮上する。ライプチヒ学派のハルトマン [2009] は、「定位能力」「反応能力」「連結能力」「分化能力」「リズム化能力」「バランス能力」「変換能力」といったカテゴリー (図 5) との関連を指摘している。しかし、このシステムは、「動

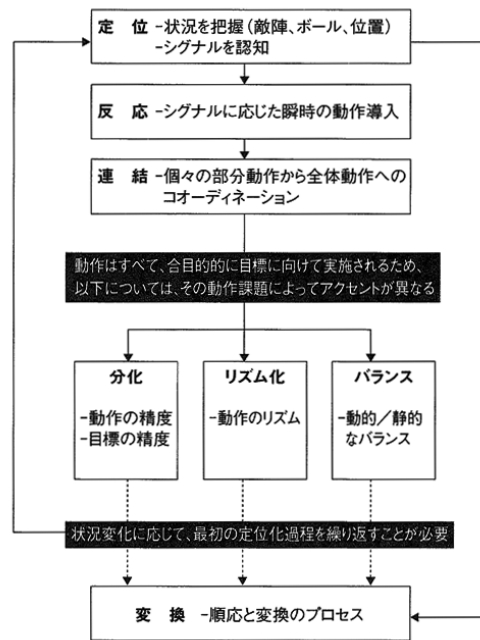


図 5 ハルトマンによるコーディネーション能力の作用順序 (2009 年)

表 1 1000 m レース中の疾走速度と各因子の決定係数の変容 (KnEx は膝関節伸展速度)

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



作の発現と制御」に関わるもので「エネルギー供給系」は入っていない（スキル系の変容モデル）。

このエネルギー系の変容にあわせてスキル系を変容させるメカニズムが本来の「コーディネーション」ではないのか、「変えなければ破たんする」という強制力があってはじめてコーディネーションが必要とされる（「構造」ではなく「生起」の問題）。「状況に応じて柔軟に対応できる」ことをコーディネーションと規定するならば、状況の変化とはエネルギー供給系の変容に対するスキル系の適応ということになり、適切に対応した時にエネルギー供給系とスキル系の運動効率が一定の関係に入り込み「最適値制御（その時点での適当な運動遂行）」が実現するとの可能性は否定できない。

では、エネルギー供給系の減少に対応してパフォーマンスを破綻させないためにスキル系を変容させることを可能にしている「センサー」は一体何なのであろうか。少なくとも、エネルギー供給系では解糖系のレベル変動に関わる「血中乳酸濃度の知覚」が、スキル系では筋や腱などの固有受容器等の情報により構成される「運動効率の知覚」も関わってくるものと思われる。まさに「意図」と「身体」は「情報」を介して双方向性の一体である。

### 身体運動のシステム再考

これらから推定される人間の身体運動のパフォーマンスの複雑さは、継時的に反復される身体運動での「階層性（hierarchy）」とその適応戦略に関わる問題である。

多賀 [2002] は、運動の自己組織に関連して、歩行モデルの非線形振動子の引き込み現象において、システムを構成する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の理論として「シナジェティック」という概念を示した（図6）。

これは、速い変化系と遅い変化系が同時進行

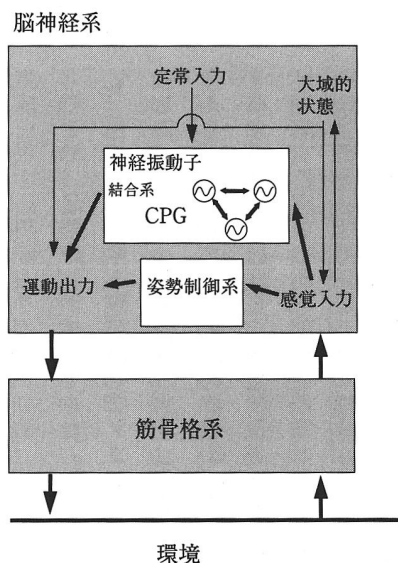


図6 ヒトの歩行モデル [多賀, 2002]

するときに、系全体の振る舞いが遅い変化をする変数だけで決まる「スレイピング」に相對する概念であり、新たな秩序の生成が上位中枢からの司令だけでは成立せずに環境との相互作用で新たな自己組織を行うという点で画期的な考え方である。有名なシックとオルロフスキーの「除脳ネコ歩行モデル」[1966]についても、流れベルトの速度増加が、左右脚の位相転換により、突然ウォークからギャロップに変化する例を引用し、「ウォーク⇒ギャロップ」と「ギャロップ⇒ウォーク」の臨界速度が異なることから、外的環境の変動が骨格筋系を介して上位の運動パターンと連携して変化する可能性を示した。

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、高度に組織化された運動遂行状態を生み出すこととなり、神経系＝制御系、身体＝被制御系、環境＝外乱という定式の見直しが求められると指摘する。

このことは、図4のマトリクスにさらに身体と環境のマトリクスが加わる極めて壮大な時

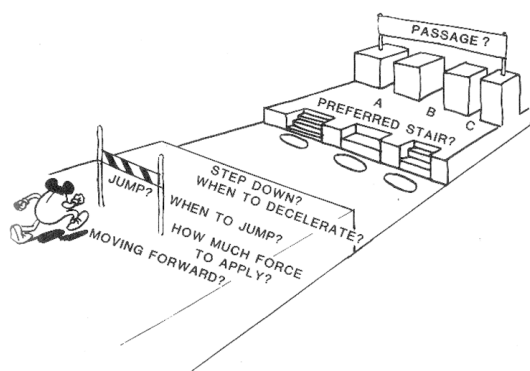


図 7 A small sample of the meaningful problems that the surrounding layout poses for a locomoting animal. [Turvey & Kugler: 1984]

空間の座標の中で人間の運動習熟は構成され、かつ実現されていることとなる。

生態学的心理学で知られる Turvey と Kugler [1984] は、「登れる階段」「すり抜けられる隙間」といった環境の中で動き回る知覚者が得る「刺激の変化」と「意味や価値」（いわゆる affordance）のシェーマを示した（図 7）。もしもこのシェーマが、1 回限りではなく複数回繰り返され、そのトータルタイムで順位が決定されると仮定したらどうであろうか。

### スポーツ科学研究の発展

かつて福永 [1985] は、ボートのローイング運動を例に、① muscle performance、② motor performance、③ sports performance へと至るエネルギー利用の側面からの階層性を示し、江刺 [1970] は、①生理学的運動形態、②個人運動的運動形態、③対人運動的運動形態、④集団運動的運動形態という視点から各階層における主要な論理の違い⇨個性・特殊性の存在を指摘した。

これは身体運動の「階層性 (hierarchy)」と適応戦略に関わる問題であり、山崎 [1993] は、“膝関節を中心とした屈曲一伸展筋力の分析の論理だけでは身体全身の動的出力特性は分析できず、身体全体の出力特性の分析の論理だ

けではパフォーマンスは分析できない。まして、対人的状況下での「フェイント」や集団的状況下での「フォーメーション」等の分析は不可能であろう。”として、井尻 (1966) の「体験的」→「記載的」→「分類的」→「論理的」→「理論的」→「実験的」→「条件的」へと至る七つの研究方法論について、“この点で、現在のスポーツ科学研究はコンピュータ等のハイテク機器を駆使した「厳密な記載と分類」「身体運動の論理（メカニズム）の蓄積」を行なっている段階にいるのではないだろうか。最近では牽引等を用いて「速く走らせる研究（⇨実験的研究?）」も報告されるようになったが、「遅い人間を速くさせた形成的研究（⇨条件的研究?）」は大変に少ない。つまり、基礎から応用に至る研究方法と対象の階層構造を想定したとき、その中に明らかな「欠けた階層（missing hierarchy）⇨研究対象・研究方法・研究組織・研究者の不在」が存在するのではないだろうか？”と指摘した。

「隔靴搔痒」と表現されたスポーツの自然科学的研究成果とスポーツ現場からの要求との「ギャップ」は、2001 年の国立スポーツ科学センター (JISS) と 2004 年のナショナルトレーニングセンター (NTC) の誕生により徐々になくなりつつあるように見受けられる。これは、一方では、競技団体側での「スポーツ科学の導入が競技力向上に必須である」との「内的及び外的要求」の増大およびそれを実現する財政的裏づけの実現、他方、研究者側では、研究体制の整備（応用的研究の評価システムの確立）と研究対象及び解析精度の飛躍的向上と関連している。

1980 年代までは、大腿四頭筋の速筋線維と遅筋線維の「構成比」により選手の適正を「瞬発系」か「持久系」か、と判定するようなラフな方法が行なわれていた。しかし、現在では、前述のように詳細な遺伝子解析結果と選手の動きの特性との関連の検討もなされ、個人に応じたトレーニングや医療の提供の可能性ができて

ている。

2001年に国立科学スポーツセンター（JISS）が、2008年にナショナルトレーニングセンター（NTC）が設立され、オリンピックや世界選手権での医科学的サポートの重要性が指摘されたのは、2004年の「史上最高」とされたアテネ五輪での成功例が評価された2008年北京五輪からとされている。

今回のソチ五輪で日本チームの活躍を支えたものが4億8000万円をかけた現地のマルチサポートハウス（ロンドン五輪では5億4000万円）であることはよく知られており、これはスポーツ医学によるサポートを支援する「国民的理解」と「財政的裏づけ」があって初めて実現したものである（ちなみにパラリンピック選手は対象外で、2016年リオパラリンピックでの実現が検討されている）。

### 羅針盤のない旅行者

人間の身体運動を実現する身体システムが極めて複雑なことは論を待たない。

iPS細胞に代表される遺伝子（分子）レベルの研究の厳密さは、前述の運動能力に関わる遺伝子研究でも同様である。山中伸弥教授らのグループは、iPS細胞の研究において、数多くの遺伝子候補を「一つ一つ除外して行く」という画期的発想から4つの遺伝子の関与を証明した

速筋線維でのACTN3遺伝子による $\alpha$ アクチニン3タンパク質の有無が、人間の身体運動のパフォーマンスにどのような影響を与えているのかは定かではない。が、それが無ければオリンピックの100m決勝に残れない可能性はきわめて高いと指摘される。

病理学的研究では、ある遺伝子の有無が疾患の発症と関連することが指摘されている。 $\alpha$ アクチニン3タンパク質が欠落しても筋ジストロフィーを発症せず持久的運動の遂行に有利とされることは、農耕の発生に関わる人類の進化

プロセスと関連しているのではないかとの仮説も検討されているが、現在の科学技術の段階では未だ推測の域をでない。

研究内容と戦略の極度の細分化と厳密化はまた、「不可知論」への誘惑（自らの研究対象への厳密性の確保とそれに関わる上下の階層との不確かな関連性の排除）をも内存させている。

STAP細胞に関わるこの間の経緯は、科学技術研究の業績主義、成果主義がもたらす光と影の象徴的出来事である。若手研究者は、研究システムの中での限定された特定分野のいわば「請け負い」で業績を挙げる。櫻井[2013]は、「有名な研究室にいたときは多くの論文に名を連ね」「そこから出た途端、何も成果を出せなくなる研究者も多い」と指摘する。

「羅針盤のない旅行者」はフランスの作家C. モルガンの良心的知識人のあり方を問うた秀作である。細分化し厳密化し、広域化し重層化してゆく研究領域の中で、自らの研究方向を指し示す「羅針盤」は何処にあるのだろうか。

多賀[2002]は、運動の自己組織に関連して、システムを構成する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」について、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の理論として「シナジェティック」という概念を示した（よく引用される例は、蛍の集団での発光点滅の同期化）。これは、速い変化系と遅い変化系が同時進行するとき、系全体の振る舞いが遅い変化をする変数だけで決まる「スレイビング」に相対する概念である。ダイナミック・ステレオタイプとしての運動習熟の形成もおそらくこのことと同等のことと思われる。

かつては、「入力」と「出力」との関係から“ブラックボックス”という概念で現象を説明する手法がとられた。しかし「現象」は何とか説明はできるもののその実体はまさに「暗箱の中」にあり依然として「不可知論」の域を出ないことも指摘された。

現在は、身体システムを構成する「脳・神経

系」や「筋一骨格系」の構造や機能が徐々に解明されてきている。システムの要素の配置やその振る舞いととの関係から何とか「設計図」に迫ろうとする可能性も生まれてきているが“未だ道半ば”の感は否めない。しかし、個々の要素(階層)の振る舞いが上下の階層間の振る舞いに影響を受けて決定されていることが明らかになってきている現在、系全体を俯瞰的にレビューする研究者や研究分野横断的な組織(プロジェクト)の重要性も認識されまた検討し実践されてきている。

その意味で“キャプテン・ジャック・スパローのコンパス”は他人には無用の長物ではないのだろうか。

#### 【文献】

- 1) N. A. ベルンシュタイン：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，3-23.
- 2) 江刺幸政，1970，「科学的なスポーツ技術とコーチ等の確立」，『第1回全国体育・スポーツ総合研究集会報告集』，20-21.
- 3) D. エプスタイン：川又政治訳，2014，『スポーツ遺伝子は勝者を決めるのか—アスリートの科学—』，早川書房，116-140，193-212.
- 4) 福永哲夫，1985，「人間にとって巧みな動作とは：「動きと効率の側面から」—ローイング運動の場合—」，『日本体育学会第36回大会号』，47.
- 5) C. ハルトマン：ライブチヒスポーツ科学交流協会訳，2009，「コオ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.
- 6) 八田秀雄，2009，『乳酸と運動生理・生化学』，市村出版，60-77.
- 7) 井尻正二，1966，『科学論』，築地書館，2-103.
- 8) 伊藤章，2005，「陸上競技・短距離」，『体育の科学』第55巻第12号，杏林書院，947-952.
- 9) 伊藤正男，1992，「熟練の脳内メカニズム」，『体力科学』Vol.41(1)，1-7.
- 10) 森谷敏夫，1995，「筋線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.
- 11) 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.
- 12) 櫻井芳雄，2013，『脳と機械をつないでみたら』，岩波書店，80-100.
- 13) 定本朋子・宮下充正，1987，「骨格筋線維にみられる運動の効果」，『臨床成人病』17巻5号，811-817.
- 14) 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，1-37.
- 15) M. T. Turvey, P. N. Kugler, AN ECOLOGICAL APPROACH TO PERCEPTION AND ACTION, (In H.T.A. Whiting Ed. "Human Motor Action Bernstein Reassessed"), 1984, NORTH-HOLLAND, 375
- 16) 和田正信，2011，「筋線維の種類と収縮特性」，山地・大築・田中編『スポーツ・運動生理学概説』，明和出版，67-68.
- 17) 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.
- 18) 山崎健，1993，「スポーツ技術の研究は何に貢献するの」，中村敏雄編『スポーツのルール・技術・記録』，創文企画，165-190.
- 19) 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.
- 20) 山崎健，2011，「筋肉はどうやって動くの」，『スポーツのひろば』No.451，10-15.
- 21) 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.
- 22) 山崎健，2013，「人間の可能性～パラリンピックとスポーツ科学」，『たのしい体育・スポーツ』第270号，26-29.
- 23) 山崎健，2014，「陸上競技の記録は何によって決まってきたのか」，『たのしい体育・スポーツ』第283号，24-29.
- 24) 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.
- 25) 善家賢，2010，『金メダル遺伝子を探せ!』，角川書店，57-101.