

スポーツ科学研究所第16回オンラインシンポジウム

パフォーマンスとトレーニングのリアリティを探る

エネルギー供給系と運動習熟の「連関(Linkage)」

山崎 健(新潟大学名誉教授)

はじめに

2014年11月にスポーツ科学研究所が発足し、この間のシンポジウムは主に人文社会科学系のテーマを中心に扱ってきた。今回は「トレーニングのリアリティを探る」をテーマにトレーニング科学からの自然科学的なアプローチを試みることとなる。

2016年3月には「スポーツ科学研究とアスリートサポート」というテーマで、国立スポーツ科学研究所(JISS)の川原貴先生と徳島大学の荒木秀夫先生によるシンポジウムが開催された。実はスポーツ科学研究所の前身である「現代スポーツ研究会」では、2004年に「トレーニングのリアリティを探る」というテーマで阪南大学の須佐徹太郎先生と山崎が報告を行い、2007年に「トレーニングは『何を』トレーニングするのか」というテーマで立命館大学の里見潤先生と山崎が、2009年に「トレーニングは『何を』トレーニングするのか(2)」で、里見潤先生と荒木秀夫先生と山崎が、2011年に「トレーニングは『何を』トレーニングするのか(3)」で再び里見潤先生と山崎が問題提起を行ってきた。

本来スポーツトレーニングの実施はパフォーマンスの向上を目指すものであり、パフォーマンスの向上はスポーツ本来の持つ「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。しかし、パフォーマンス改善とトレーニング方法との関係は極めて複雑かつ個別的・限定的であり「多様な解釈」が成立する。最近問題視されている「暴力」「ハラスメント」「精神主義」といった「不適切なスポーツ指導」が根絶されない背景には、この個別性・限定性が未だ十分に解明されていないこととも関連しているものと思われる。特に「運動スキル適応性(経済性)」の高い選手であれば、例え「問題の多いトレーニングメニュー」であってもそれなりのパフォーマンス改善が行われる(当然より適合性の高いトレーニングメニューであれば更なる改善可能性が高いのでその意味では選手の発達・向上の「権利侵害」とも見做される)。

本シンポジウムではパフォーマンス改善に関わる「個別的 content」と「一般的 content」の関係性を検討することにより「トレーニングのリアリティ」にアプローチすることを目的とする。

パフォーマンスを決めるもの

かつて日本の運動生理学の権威・猪飼道夫先生(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。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。

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

図1 パフォーマンスのマトリクスモデル
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

「一般的運動能力」と「専門的運動能力」

スポーツ活動は個別具体的条件下で実施される。250 Km 自転車ロードレース選手も 42 Km フルマラソン選手も高い持久的能力（最大酸素摂取量）を有しているが、どのようなトレーニング方法によって形成されたのかは個別的（乗車トレーニングかランニングか）と考えられ、「結果として」高い持久的能力が形成され、その測定方法も「自転車エルゴメーター」を用いるのか「トレッドミルランニング」を用いるのかで実際のレース場面での評価は異なってくる（実はランニングベルトとロードランニングではデータが異なることも指摘されている）。更にゲーム状況が複雑に変化するボールゲームでのランニング能力は極めて複雑であり「ボールを保持してのランニング」「ボールを保持しないディフェンスやオフェンスでのランニング」などはポジションによっても多様であり、ゲーム継続時間やランニング速度や頻度などそのトレーニング方法は多様である（須佐徹太郎、連載・サッカーのトレーニングに関する考え方、スポーツ科学研究所通信 第18・19号、2022年）。

3つのエネルギー供給系と3種類の筋線維

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（図2）を示した。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（継続時間や運動強度）」という性格を持つ。しかしこのモデルは単一の筋（例えば大腿二頭筋）を想定したものであり、実際の動作の発現には複数の筋が関与することから速筋・遅筋比の異なる筋が協働して運動方向（運動スキル）を決定している。野崎（2014）は、個々の筋収縮の「解剖学的収縮方向」に対して複数の筋が共同する場合の「運動学的収縮方向」の存在を指摘している。

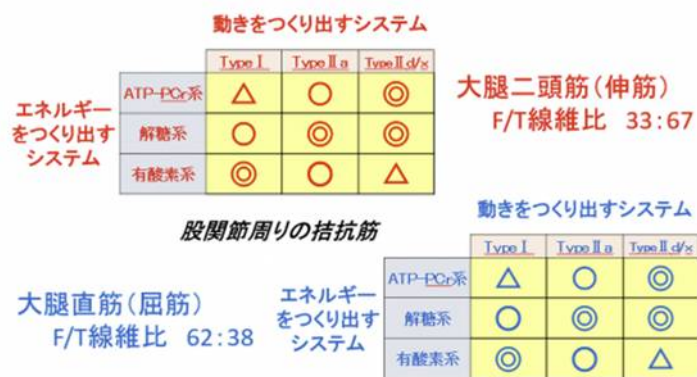


図2 筋の3×3システム

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

速筋遅筋比の異なる拮抗筋が、運動経過に伴い重みづけを変えながら最適なモードに「適応」する(山崎、2015)

疲労発現に関わる「中枢性抑制」とその「脱抑制」

矢部(1973)は、筋活動中の心理的限界と生理的限界について電気刺激による収縮と随意収縮と「掛け声効果」の結果(図3)を比較し「意志の集中」の効果を指摘する。

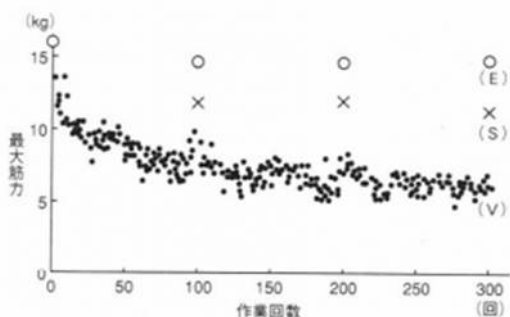


図3 生理的限界と心理的限界

電気刺激では収縮力低下していないが意志による収縮力は低下し、自発的掛声により収縮力がある程度回復する

図4-7 筋活動中の心理的限界と生理的限界(猪飼・矢部、1971年)

- (E): 電気刺激による最大筋力
- ×(S): 自発的な掛け声とともに発揮した意志による最大筋力
- (V): 意志による最大筋力

図4

セーチェノフの「積極的休息」の例
左腕(LA)の10分の労作後右腕(RA)
5分の活動により左腕の労作レベルが
上昇している

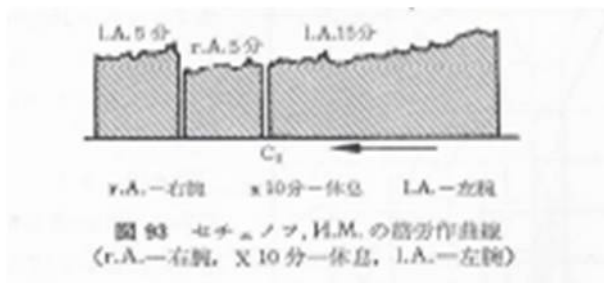


図4 セーチェノフ、H.M.の筋労作曲線 (r.A.-右腕、x 10分-休息、l.A.-左腕)

クレストフニコフ(1978)は、セーチェノフの「積極的休息(図4)」について“長い単調な運動は中枢神経系に疲労の増大をもたらし、運動感覚は失われる。運動を交替したり、諸運動の相互関係をよくみて、正しい一貫性のある運動を選択することにより、大脳皮質にお

ける運動能力の高い水準を確保することができる。”と指摘する。

永田（1983）は、筋疲労に関わって筋電図の平均スペクトル解析（MPF）を行うと、個別の筋により異なるが速筋系筋線維の活動は 80～100Hz の高速連続収縮であるの対し遅筋系筋線維の活動は 30～40Hz の低速連続収縮であることを指摘した。山崎らは筋疲労の進行は速筋系筋線維活動の抑制であり、MPF が低周波帯域に移行するが「アイシング」や「ストレッチング」を行うと MPF が高周波数帯域に移行することを指摘し「中枢性抑制の脱抑制」の可能性を指摘した（未発表データ）。このことはセーチェノフの積極的休息と同様のメカニズムによる現象と考えることができ、「3×3 システム」の“PCr 系×Type II b”のマトリクスが最も中枢性抑制を受けやすいため運動スキルを切り替えて“解糖系×Type II a”に主要な役割を移動させ、その間に脱抑制を誘発するという戦略をとる可能性が考えられる。つまり運動経過の進捗に伴いエネルギー供給系は変動することから“運動スキルの「解」は一つではない”という結論となる。

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効率的な運動遂行が困難となる。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。

瞬時の動作切り替えのメカニズムは何か？

運動実施に応じて個人が適切な動きを作り出すシステムは「運動スキル」とも表現され、状況変化に柔軟に対応するシステムは「運動習熟」として旧東欧圏では「ダイナミック・ステレオタイプ」と表現され「定型化（ステレオタイプ）」とは異なるメカニズムが想定される。

山崎（2007）は、ダイナミック・ステレオタイプのモデル（図 5）を提示し、大脳皮質運動野での動作のプロトタイプが伊藤（1992）の指摘する「小脳の補正機能（逆道徳性学習）」と関連して適切に対応しているモデルを示した。

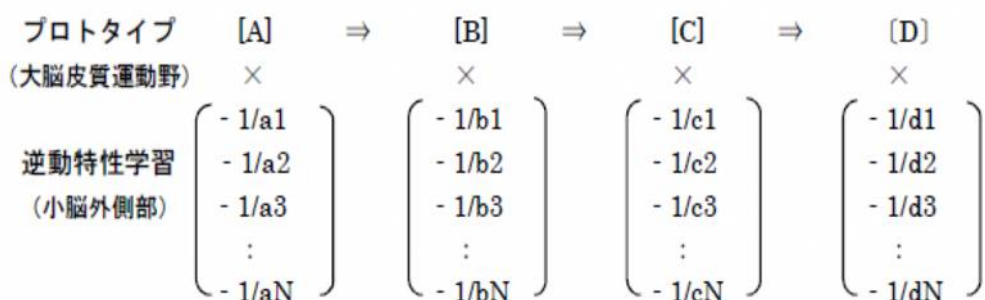


図 5 ダイナミック・ステレオタイプのモデル

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)

しかし「何が」この適切な補正を引き起こしているのかは未だに明確ではなかった。木村 (2000) は、「予測報酬誤差」が少ないことにより大脳基底核が習慣的行動を「運動の連鎖」として導き出すことを指摘し「黒質線条体ドーパミン系」が報酬系（強化学習）として適切な補正の「生起」を支えていることを示唆している。つまり他のすべての補正系を強力に抑制し“-1/a1 ⇒ -1/b2 ⇒ -1/c3 ⇒ -1/d2”という適切な補正系のみを脱抑制するという特別な役割を大脳基底核が担っているものと考えられ、桜井 (2020) は、大脳基底核は発生的には古い組織ではあるがヒトでは大脳皮質とともに異様に発達していることを指摘している。

巧みさを「生起」させるものは何か？

ベルンシュタイン (2003) は、心理物理学的能力として「力強さ」「スピード」「持久力」そして「巧みさ」を指摘し、身体の「膨大な自由度」と運動制御の「困難性」について系統発生性を反映した「運動構築の水準」を示した (A:緊張のレベル、B:筋-関節のレベル、C:空間のレベル、D:行為のレベル)。

運動経過の進捗に伴い環境は変動する。Turvey ら (1984) は、図 6 のシェーマから行動する主体に対する「Ecological Approach」の概念を示した。これは佐々木 (1994) の指摘する「エコロジカル・リアリズム」と「アフォーダンス」とも関連する。

環境変動への巧みさを生起させるものは、視覚情報、身体情報（加速度や平衡感覚、複合的筋感覚）、筋出力低下や速度低下などから「提供される情報（アフォーダンス？）」が運動経過の予測と修正（無意識的？）を実現するものと考えられ、この際「予測誤差信号」が「褒賞系（ドーパミン作動性）」として強化学習を誘導するものと思われる。

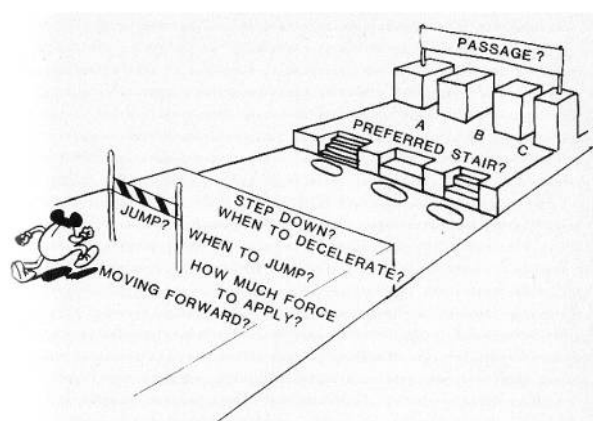


図 6 主体と環境変動への対応
状況に応じて「登れる階段」は「登れない階段」になり、「抜けられる」ゴールは「抜けられない」ゴールとなり、「主体」の状況（移動速度や身体のブレなど）に応じて対応が決定される
(Turvey と Kugler, 1984)

佐々木 (1994) は、ブーツマの卓球選手の高速スマッシュの分析から結果の正確性ととも
にスマッシュの最終局面でのボールの視覚情報からの微妙な修正による制御のデータを示
し、柏野 (2022) は桑田真澄選手の外角低めへの 30 球の正確な投球について頭の位置やボ
ールのリリースポイントが 14 センチもずれていることを指摘している。つまり結果の正確
性を実現するため運動経過（動作）は冗長性を持っており、このことが「巧みさ」を生起さ

せるメカニズムを支えているものと考えられる。

トレーニングのプロセスでのリアリティ

運動経過の進捗によりエネルギー供給系は変容する。運動の反復実施に伴い筋収縮速度の低下や血中乳酸値の上昇が起こりいわゆる「疲労感」を引き起こすが、その状況下でも運動を効率的に遂行することが求められ、適切なスキル変容を実現しなければ運動経過に「破綻」をきたす。長距離ランニングでは「ランニング効率（エコノミー）」が求められるが現実的には「レース速度での経済性」なのであって 10000m とフルマラソン、100Km ウルトラマラソンでは「個々の速度に対応したランニング効率」とそれを実現するスキル発揮が求められる。

田畑（2022）は、高強度短時間インターバルトレーニング（HIIT）について、最大酸素摂取量の 170% 強度の運動を 20 秒間継続し 10 秒間の休息を挟んで 6～8 セット週 2 回程度繰り返すプロトコルにより「最大酸素摂取量」と「最大酸素借（無酸素能力）」の両者が改善される可能性を指摘している。この際重要なのは 20 秒間の運動強度と「運動形態」をどのように設定するのかであり、おそらく自転車競技選手とスケート選手、水泳選手とランナーとは異なる負荷方法が考えられ、田畑もスポーツ種目別の方法を提示している。

2021 年東京五輪陸上競技 100m でイタリア人初の金メダリストとなったジェイコブスは、自動車でけん引される「盾」内部（空気抵抗が減少する）でスプリントを行い時速 49Km を記録したトレーニング方法が放映された（NHK, 陸上短距離革命～イタリア金メダルの秘密を探る～、2022 年放映）。従来は機械的にロープでけん引する「トゥー・トレーニング」が行われていたが腰部にロープを固定するため動作が不自然になることが指摘されていた。

最近話題のトレーニング方法

ボイル（2007）は、ファンクショナルトレーニングについて、“自動車であれば馬力を高めるといよりも、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” “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” と指摘する。ボッシュ（2020）は、ストレングストレーニングとコーディネーションの関係について、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。そして“ストレングスエクササイズからスポーツ動作への転移は、動作の外形を考えることだけではなく感覚機能の要素が同じであること” “身体は、制御能力を効率的にしようとするので、多くの状況で使用できる動作パターンを学ぼうとする。逆に一つの状況でしか使うことのできない動作パターンは、興味深いものではないし、学習が困難になる” と指摘している。

故に「要素還元主義的方法」では個別限定的な条件下でのパフォーマンス（継続時間やテンポ変動の）が対象となるためトレーニング条件の多様化をどうレイアウトしていくのか

が問われている。

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によって「連関 (Linkage)」や「調和 (Harmony)」という概念が実現される。「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。このことから実際のトレーニング場面を想定すれば、疲労の進行に適応させた運動スキルの獲得や発揮もトレーニングの「リアリティ」を高めるために極めて重要なものと思われる。

トレーニング実施の「個別性」と形成される身体能力の「普遍性」

図7はこれまで述べてきた「3×3 マルティレイアシステム」と「ダイナミック・ステレオタイプ」と「パフォーマンス」との関連を示したものである (山崎、2019)。

運動習熟の形成は、個別具体的運動スキルの多様な経験の反復により小脳外側部の補正パターンが多様化し、大脳基底核が関与して瞬時に適切な「動きを作り出すシステム」を発現する。一方個別の条件下での運動遂行の継続を実現する「エネルギーを作り出すシステム」も継続時間の短い「PCr系」や主要な「解糖系」と経時的な減少が少ないが出力レベルの小さい「有酸素系」の3つのシステムを「動きを作り出すシステム」とどう連携させてトレーニングを構築してゆくのかが求められている。

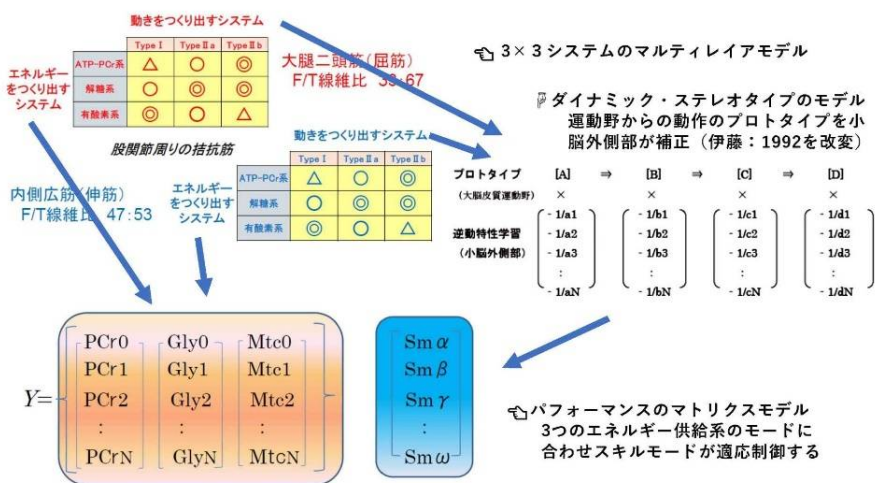


図7 3つの概念の関連(動きを作り出すシステムとエネルギーを作り出すシステム)

運動開始直後のエネルギーレベルは高い（PC0とGly0）が運動の継続的实施に伴いエネルギー供給系が変容（PC2とGly2）する。この際、高強度運動実施モードから中強度運動実施モードに変容させる適応制御が求められる。同一のエネルギー供給系と動作系から構成される運動を継続実施している場合にはいわゆる「中枢性抑制」が発生する可能性が考えられ、意図的に異なる動作モードに切り替えて対応するトレーニングの実施が「破綻」をきたさないパフォーマンスの改善が求められている。

すなわちトレーニングは「個別的」条件下で実施され結果として「普遍的」運動能力として形成されてゆくものと考えられその意味でも妥当性の高い「運動スキルの獲得」が先行するものと思われる。

トレーニング改善のためのサポート体制

2021年の東京五輪・パラリンピック選手の活躍をサポートしたものが国立スポーツ科学センター（JISS）やナショナルトレーニングセンターを戦略的に統合する「ハイパフォーマンススポーツセンター」であったことはよく知られている。また、過去に開催されたロンドンやリオやソチやピョンチャンの五輪大会では数億円の経費をかけた「マルチサポートハウス」が設置され選手サポートを支えていたことも知られている。

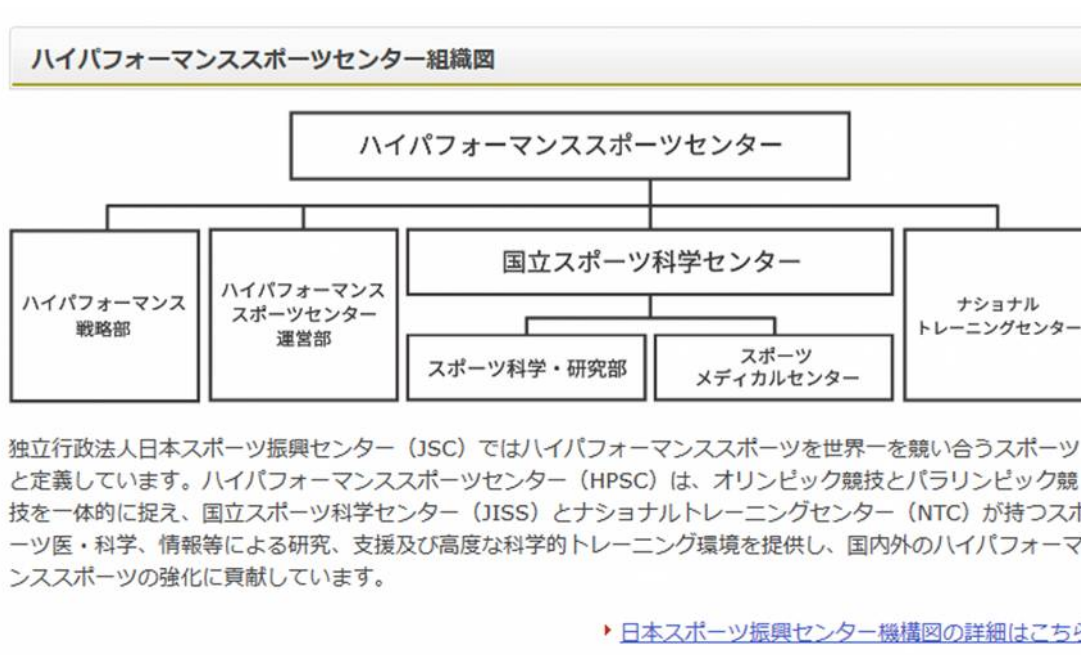


図8 ハイパフォーマンススポーツセンター（選手の合宿や食事も全面的にサポートする）

しかし「ナショナルチーム」や有力な「実業団」などに所属する選手やチームでなければこのような充実したサポートを受けることは困難である。具体的に考えても、①アスリート本人やチーム、②コーチと練習パートナー&チーム、③ゲームアナリスト、④マネージャー（モノ&ヒト&カネ）、⑤トレーナー（メンタル&フィジカル&メディカル）、⑥栄養士&調

理師（朝食～夕食、補食管理）、⑦練習環境&食事環境&生活環境、⑧スポンサーとサポーター、でありすべて財政的根拠が無ければ高度な競技活動の継続は困難であり、選手個人が幾つかのスポンサー契約を獲得して活動を継続しているケースもある。

最近では市民スポーツのレベルであっても、組織的系統的ではないものの「動作解析」「ゲーム解析」「VR空間によるイメージトレーニング」「オンライン栄養管理ソフトウェア」などを利用することも可能となっているがその効果的活用のためには「アドバイザー」や「トレーナー」などの存在が必要となってくる。その意味で新日本スポーツ連盟、全国ランニングセンター、全国勤労者スキー協議会所属のクラブ組織が様々な情報発信を進めてゆく役割が期待されている。

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・大山下圭吾訳(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. 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
7. 柏野牧夫(2022)、あとは体が解いてくれる(伊藤亜紗編、体はゆく)、65-105
8. クレストフニコフ:ソビエトスポーツ科学研究会訳(1978)、筋活動とトレーニング時の積極的休息(スポーツの生理学)、不昧堂、197-215
9. 永田 晟(1983)、筋電図のパワースペクトル波形(からだ・運動の科学)、朝倉書店、44-47
10. 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
11. 櫻井武(2020)、中枢神経系の情報処理と機能(脳神経科学がわかる、好きになる)、羊土社、145-192
12. 佐々木正人、エコロジカル・リアリズム/共鳴・同調の原理(アフォーダンス-新しい認知の理論)、岩波書店、53-66、83-100
13. 田畑 泉(2022)、世界標準の科学的トレーニング、講談社、17-98
14. 丹治 順(1999)、脳と運動、共立出版、107-117
15. 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
16. 矢部京之介(1973)、心理的限界と生理的限界(猪飼道夫編 身体運動の生理学)、杏林書院、80-84
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 (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
19. 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
20. 山崎 健 (2015)、運動生理学の研究から見える身体運動システムの複雑さ、スポーツ社会学研究 第 23 卷 1 号、35-46
21. 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
22. 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