

## シンポジウム報告

トレーニングは「何を」トレーニングするのか (Part3)

# エネルギー供給系と運動習熟の連関

Linkage between energy supply system and motor skills

山崎 健 (新潟大学)

### 1. はじめに

現代スポーツ研究会でのトレーニングにかかわるワークショップやシンポジウムは過去3回開催された。2004年9月(奈良)のワークショップ「トレーニングのリアリティを探る」では、山崎が「トレーニングの現実性と抽象性」、須佐徹太郎氏(阪南大学)が「サッカーのトレーニング法を考える」との問題提起を行った。その中で山崎は、「トレーニングは『個別具体的条件』の中で実施されパフォーマンスは『抽象的な運動能力』として形成されるのではないか」として「運動習熟のエネルギー生産系からの再検討」の必要性を指摘した。

2006年9月(京都)でのシンポジウム「トレーニングは『何を』トレーニングするのか?」では、山崎が問題提起を行い、里見潤氏(立命館大学)が「出力系のトレーニングを考える」とのテーマでドイツのスポーツ医学とトレーニング科学での問題意識「高強度トレーニング」についての報告を行った。

2008年9月(名古屋)でのシンポジウム「トレーニングは『何を』トレーニングするのか? (2)」では、懸案であった動作制御にかかわる研究の到達段階について、荒木秀夫氏(徳島大学)に「コーディネーショントレーニングとトレイナビリティ」と題した報告を受けた。荒木氏は、「コーディネーショントレーニングが、はたして『何を』獲得しようとするのかといった問題を『トレイナビリティ』の課題との関連から取り上げ」その課題が「『動きを創る』ことと『トレイナビリティを高める』こととの両者の関連による『感覚・運動・言語要因の関係性の制御』である」

との問題提起を受けた。里見潤氏(立命館大学)からは、特にボート競技にかかわって「有酸素系トレーニングに関する方法論はかなり高いレベルまで確立されてきているが、無酸素系能力の向上も含めた高強度トレーニングの方法論に関してまだ少なからぬ問題が残されている」として「抗筋疲労能力」という新たな概念が提起された。

本報告では、山崎の「運動習熟のエネルギー生産系からの再検討」という問題意識と運動習熟における「ダイナミック・ステレオタイプ」の概念についての25年来の研究との融合についての問題提起を行う。

### 2. パフォーマンスを決定するもの：エネルギー供給系と制御系

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

山崎は、この概念について、 $P = s_1 \times r_1 + s_2 \times r_2 + s_3 \times r_3 + \dots + s_N \times r_N$  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的实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、最適なパフォーマンス発揮は実現できない。

### 3. ダイナミック・ステレオタイプの概念とその神経機構

このことから、山崎は1986年、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1)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。

以上の点から、エネルギー供給系とスキル系との関連をはかりながらトレーニングを実施することが重要であり、綿引は、「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。

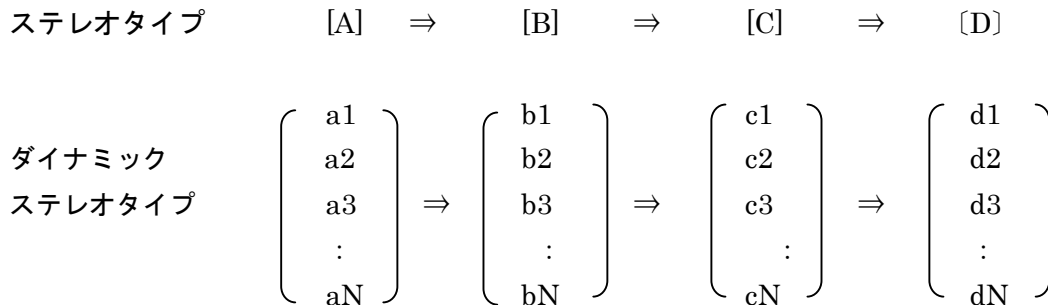


図1 ダイナミック・ステレオタイプのマトリクスモデル(山崎:1986年)

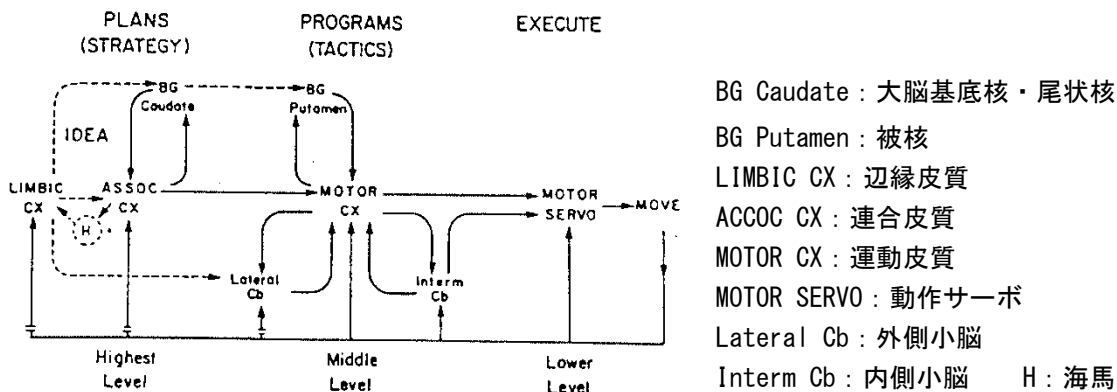


図2 随意運動における運動情報の流れ(Brooks, V. B., 1986)

しかし、このモデルはあくまでも「抽象的なブラックボックス」であって神経生理学的な実体は明確にはできなかった。

吉田(1983年)は、ネコを用いた実験の結果から運動の最終的なパターン(プログラム)は大

脳皮質運動野にあると考えられるが、その企画や意図(プランニング)は連合皮質、小脳外側部、大脳基底核に関連しているとの考え方を示している。

図2は、Brooks(1986年)による運動情報の

流れのモデルを示す。ここで、運動に関する動作のプログラム（プロトタイプ）は大脳皮質運動野にあり小脳外側部と小脳内側部及び大脳基底核（被核）と密接な関連を持っており中位（Middle Level）と規定されている。その上位（Highest Level）には、連合皮質や辺縁皮質が海馬（記憶に関連）や大脳基底核（尾状核）と関連して「考え」やプランニングを行っていると言われる。

その後、伊藤（1992年）の前庭動眼反射における小脳の機能について「制御対象である眼球や眼筋などの動特性  $G$  に対して、制御装置としての小脳片葉が  $1/G$  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、このモデルを図4のように修正した。



図3 前庭動眼反射の回路図（伊藤：1992年）

そして、このモデルは、2004年浜松での本研究会のミニシンポジウム『運動科学』は『分析科学』への反論か『経験主義』への反論か』において、山崎が検討した多賀（2002年）の「歩行における脳と環境との強結合」の概念（図5）からさらに「身体系」と「環境系」をも含む修正が必要となった。

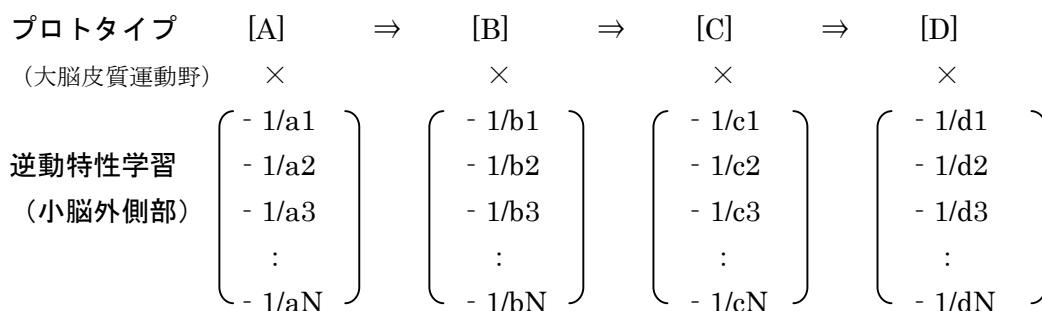


図4 ダイナミック・ステレオタイプの新マトリクスモデル（山崎 健：2004年）

多賀は、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。これは、速い変化系と遅い変化系が同時進行するときに、系全体の振る舞いが遅い変化をする変数だけで決まる「スレイビング」に相対する概念であり、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年）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

オークからギャロップに変化する例を引用し、外的環境の変動が上位の運動パターンを変化させる可能性を示した。

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＝非制御系、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。

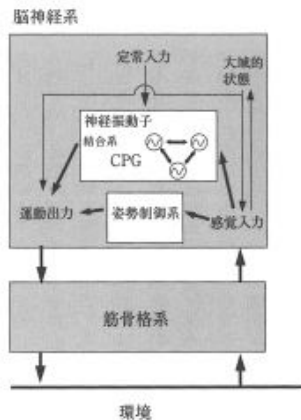


図5 ヒト歩行モデル (多賀：2002年)

図6は、TurveyとKuglerの“認知と行動にかかわる生態学的アプローチ”を象徴する「飛び越えられる障害」「登れる階段」「くぐり抜けられる隙間」のシェーマである。

もしもこの課題が、1度限りの実行ではなく数回反復されるとすれば、出力系のレベル低下(「疲労」とは別概念と考える)に対応して、どの選択肢が「その場面では有効なのか？」が問われ運動スキルの変容が求められる。

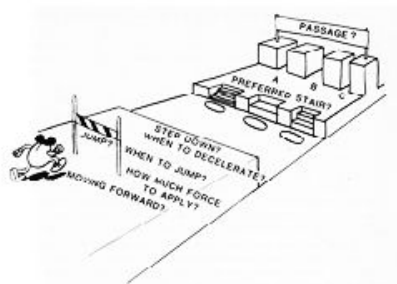


図6 認知と行動にかかわるシェーマ (M.T.Turvey, P.N.Kugler,1984)

#### 4. エネルギー供給系と運動習熟の連関

しかし、これらのダイナミック・ステレオタイプのマトリクスモデルは、あくまでも動作の習熟にかかわるものであってエネルギー供給系との関係は依然明確とはならない。そこで、1986年のパフォーマンスの重回帰式モデルとの関連から新たなモデルを示した(図7・8)。個別のトレ

ーニングの実践では、図7のようにその時点その時点でのエネルギー供給レベルに応じて適切なスキルを選択していると考えられる。

ここで、運動スキルは「プロトタイプとして共通項」であるとするれば数学的な「因数分解」により図8のように考えることができる。

$$Y = [PCrN] \times [SkN] + [GlyN] \times [SkN] + [MtcN] \times [SkN] + b$$

(bは残差：ただし心理面から解糖系ヘグリコーゲン動員がある?)

図7 トレーニングのプロセスでのエネルギー供給系とスキルの対応、[N]はその時点でのエネルギーレベルの変数でスキルも個別に対応してトレーニングが行われる

$$P = \left\{ \begin{matrix} \begin{pmatrix} CPr1 \\ CPr2 \\ CPr3 \\ \vdots \\ CPrN \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} Gly1 \\ Gly2 \\ Gly3 \\ \vdots \\ GlyN \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} Mtc1 \\ Mtc2 \\ Mtc3 \\ \vdots \\ MtcN \end{pmatrix} \right\} \times \begin{pmatrix} Sm \alpha \\ Sm \beta \\ Sm \gamma \\ \vdots \\ Sm \omega \end{pmatrix} + b$$

図8 エネルギー系とスキル系のマトリクスモデル (山崎：2011年)

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 ( $\alpha \sim \omega$ )」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、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。

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しょうか? 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。

## 5. 運動習熟の三段階

トレーニングのプロセスが、神経系 - 身体系 - 環境系の相互作用としてのトップダウンとボトムアップの反復から実現されるとすれば、運動習熟の概念とはどのように関連するのであろうか。

マイネルは「運動系における学習の位相」という観点から三つの特徴的な位相あるいは発展段階として次の三段階を区分する。

**位相 A** : 粗形態における基礎経過の獲得 / 運動の粗協調

**位相 B** : 修正、洗練、分化 / 運動の精協調

**位相 C** : 定着と変化条件への適応 / 運動の安定化

プーニは、クレストフニコフの定義に基づき、またオゾーリンは「全習 - 分習 - 全習」という過

程からそれぞれ三段階に分類している。

山崎 (1986 年) は、この第二段階において「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る。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。

この点で、多賀の指摘する「スレイビング原理 (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)」は運動習熟の形成に対応するものとも考えることもできる。

## 6. 筋組成とエネルギー供給系

図8の「スキルモード複合体の独立」を運動習熟の形成と規定すれば、その時点でエネルギー供給系も自立するのではないか?

宮下は、定本らの個別の筋に速筋系 (FG と FOG) と遅筋系 (SO) が存在し、かつそれぞれの筋線維が3つのエネルギー供給系に対応する代謝機構を持つとのデータ (図9) から、各筋線維はそれぞれの活動特性に見合った代謝の特性を有していると指摘している。また、拮抗筋であれ協働筋であれ、筋により速筋系筋線維と遅筋系筋線維の比率が異なることもよく知られている。

八田 (2006 年) の指摘する「速筋系で生じた乳酸」が「遅筋系の豊富なミトコンドリアによってエネルギーとして再利用される」という「乳酸シャトル」の概念 (図10) は、速筋系内筋線維 (FG 及び FOG) 間や速筋系筋線維と遅筋系筋線維間での出力パターンの変容に伴うエネルギー

筋線維タイプ	速筋線維		
	タイプ(SO)	タイプIa(FOG)	タイプIb(FG)
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 9 筋線維の代謝（定本ら 1987 年：色合いが濃いほど各項目の活性や濃度が高い）

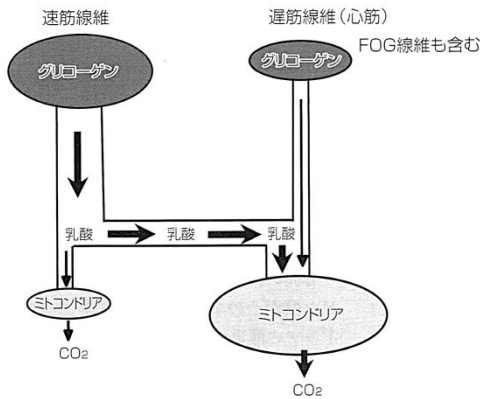


図 10 乳酸シャトルの概念（八田：2009 年）

供給系内でのダイナミクスを示唆する。

森谷（2001）は、Takahashiの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。

山崎ら（山崎と松永：未発表、2009年）は、同一仕事量（Watts）で1分間60回転と90回転の自転車ペダリング運動を比較し、心拍数や自覚的運動強度（RPE）がほぼ同一であるにもかかわらず、90回転時の血中乳酸濃度が高い（参加する筋線維が多い？）との興味あるデータも得られている。

身体運動が筋線維の収縮によって実現されている以上、習熟した動作はそれぞれの筋線維群の

関連した活動（基本的運動スキルの組み合わせ？）によって実現され、また複数の動作モードを必要とする。

## 7. 複数のシステムの並列準備とその変容

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（スキルの組み合わせ）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ことが示唆される。

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。今後、ライプチヒ学派のハルトマン（2009年）の指摘する「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 11）との関連の検討も求められる。

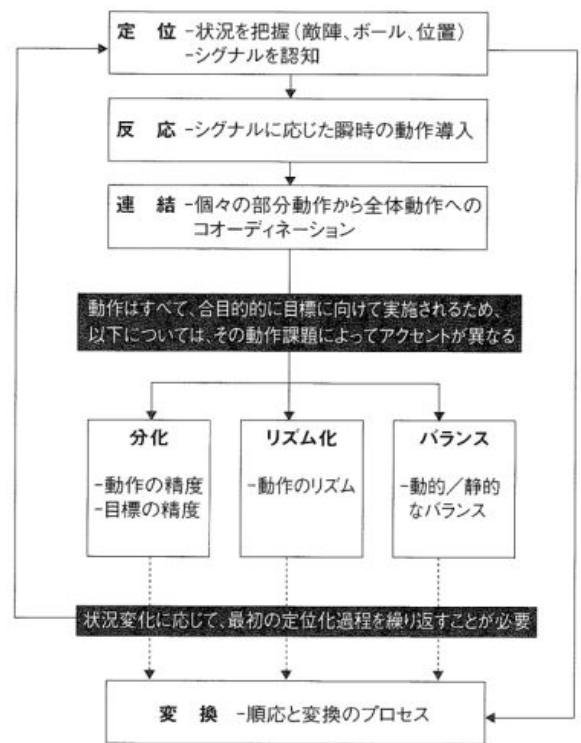


図 11 ハルトマンによるコーディネーション能力の作用順序（2009 年）

しかし、これら7つの概念がどのような神経機構に基づき、「何」がエネルギー供給系とスキルモード複合体の変容を実現し、何を「引金（トリガー）」として知覚し変容する身体運動を実現するのかがはまだ明らかになっていない。

エネルギー供給系とスキル系の両者が運動習熟の形成により一定の秩序のもとに関連している場合は“Co-relation（関連）”ではなく生物学的な“Linkage（連関）”という表現が相当するのではないか？

その意味で、細胞内ミトコンドリアのレベルから身体運動のパフォーマンス変容のレベルまでの壮大な重層的階層構造の中で、それぞれの階層と階層をつなぐ「環」の検討が永遠の課題として残されているのではないだろうか。

#### <文献>

- 1) 荒木秀夫、コーディネーショントレーニングとトレイナビリティ、現代スポーツ研究 第10号、2009年、pp.26-28
- 2) N.A.ベルンシュタイン：工藤俊和訳、ディクステイリティ～巧みさの発達～、金子書房、2003年、pp.3-23
- 3) Brooks,V.B. The Neural Basis of Motor Control, Oxford University Press,1986, pp.18-35
- 4) C.ハルトマン：ライプチヒスポーツ科学交流協会訳、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、2009年、pp.48-52
- 5) 八田秀雄、乳酸と運動生理・生化学、市村出版、2009年、pp.60-77
- 6) 猪飼道夫、身体運動の生理学、杏林書院、1975年 pp.334-354
- 7) 伊藤正男、熟練の脳内メカニズム、体力科学、Vol.41(1)、1992年、pp.1-7
- 8) A・N・クレストフニコフ：ソビエトスポーツ科学研究会訳、スポーツの生理学、不昧堂、1978年、pp.225-228
- 9) K・マイネル：金子明友訳、スポーツ運動学、大修館、1981年、pp.375
- 10) 宮下充正、トレーニングの科学的基礎、ブックハウス HD、2002年、pp.47
- 11) 森谷敏夫、運動時の循環調節メカニズム研究の現状と課題、加賀谷・中村編・運動と循環、NAP、2001年、pp.160-165
- 12) N・G・オゾーリン：岡本・酒井訳、ソ連のスポーツトレーニング、ベースボールマガジン社、1965年、pp.43
- 13) A・ツェ・プーニ：藤田・山本訳、実践スポーツ心理、不昧堂、1967年、pp.81-91
- 14) 里見潤、ドイツで出会った二人のスポーツ科学者、現代スポーツ研究 第8号、2007年、pp.6-14
- 15) 里見潤、トレーニングは「何」をトレーニングするのか - 出力系のトレーニング -、現代スポーツ研究 第10号、2009年、pp.19-25
- 16) 多賀徹太郎、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、2002年、pp.1-37
- 17) M.T.Turvey, P.N.Kugler : AN ECOLOGICAL APPROACH TO PERCEPTION AND ACTION, H.T.A.Whiting ed. “HUMAN MOTOR ACTION BERNSTEIN REASSESSED”, NORTH-HOLLAND,1984,pp.374-377
- 18) 綿引勝美、コーディネーションのトレーニング、新体育社、1990年、pp.10-30
- 19) 山崎 健、スポーツの認識と習熟、伊藤高弘・出原泰明・上野卓郎編「スポーツの自由と現代(下)」、青木書店、1986年、pp.299-313
- 20) 山崎 健、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、2007年、pp.2-5
- 21) 山崎 健、トレーニングとパフォーマンス、山地啓司・大築立志・田中宏暁編「スポーツ・運動生理学概説」、明和書店、2011年、pp.180-182
- 22) 吉田充男（1983）、随意運動における大脳基底核の役割（伊藤正男編：脳と運動）、平凡社、1983年、pp.315-329