

## 長距離ランニング中の動作変容に関わるモデルの検討

### はじめに

長距離ランニング中のエネルギー供給系は継時的に減少し、それに応じてストライドやピッチが変動してランニングスキルが変容する。

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。マラソン競技について、有吉（1994）は、男子で優勝した谷口浩美選手のピッチやストライドの変動幅が他の選手に比べて比較的大きいこと、4位のフルク選手はピッチが190（歩/分）で極めて安定しており、ストライドでスピードの変化に対応しており相関係数も0.919と極めて高いこと。また、女子3位入賞の山下佐知子選手は、40Km以降ストライドを明らかに短縮させピッチを上昇させてスピード低下を防いでいたことを指摘した。

山崎は、このような疾走動作の変容は、単なる疲労の進行だけではなくエネルギー供給系の減少に適応してランニングスキルを変容させ、その時点その時点での最も効率的なランニングスピードを維持しようとする一種の「適応制御」ではないかと考え、この長距離ランニング中のランニングスキルの変容について検討を行ってきた（2011、2013、2014）。

本研究では、実際の長距離レース中のランニング動作の変容について、この仮説を検討するとともに、エネルギー供給系とスキル系の連関モデルについて、旧東欧圏の運動習熟の概念のひとつである「ダイナミック・ステレオタイプ」と「コオーディネーション」についての再検討を目指すものである。

### スプリントランニング研究の到達点

1991年陸上競技世界選手権の短距離走に関するバイオメカニクスの分析は、1980年代後半から指摘されていた「日本のスプリント概念」に大きなインパクトを与えた。

特にカール・ルイスとリロイ・バレルを中心とした動作解析では、日本選手と比較して膝関節や足関節の使い方に大きな違いがあることが指摘された。伊藤（2005）は、キック時の膝関節と足関節の動きについて、世界の一流選手は最高疾走速度と最大伸展速度に負の相関（関節を伸ばさないほうが速い）がみられること、速度を決定する股関節伸展速度には違いがないこと、から従来日本で理解され指導されてきた内容が異なっていたことを指摘した。そして、未来のキック動作として「離地時に膝関節をさらに屈曲する」可能性を示唆した（図1）。

小林（2001）は、膝をやや屈曲して接地するルイス型の「膝屈曲着地型」に対して、1999年に9秒79の世界新記録を出したモーリス・グリーン選手が、着地時のブレーキを少なくした「膝伸展着地型」を行っていることを指摘し、100m日本記録（10秒00）保持者の伊

東浩司選手も同様の走法に改善し成功したことを指摘した。ちなみに、かつて末續慎吾選手は片脚が「グリーン型」動作であったが他脚は未だ「ルイス型」動作であったことが報告されている。

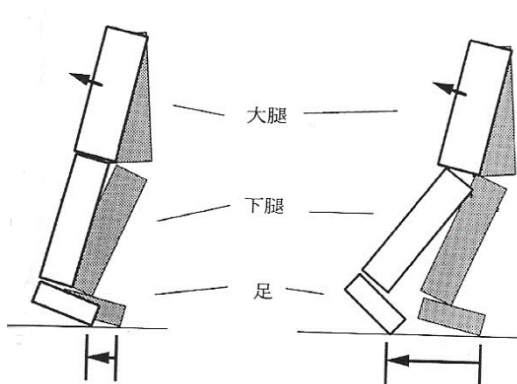


図1 膝関節伸展と股関節伸展との関連

左：膝関節の屈曲-伸展動作が股関節全体の動きを相殺し、股関節伸展速度が脚全体の後方スイング速度に効率的に伝達されない（伊藤ら、1994年）

また、小林は、中長距離走であっても、短距離走と同様のスプリント・トレーニングマシンを利用することでパフォーマンスが劇的に改善されることを指摘し、自然にスピードの出る走フォームを無理なく持続することによって、短距離走以上に大きな成果が出る可能性を指摘する。

両足義足で「ブレードランナー」と呼ばれるオスカー・ピストリウス選手の疾走動作について、健康者では直線疾走時の床反力の利用効率が60%であるのに比べピストリウス選手は実に90%に達していることが推定されている（NHK・進化する義足、2008年放映）。このことは、計らずも足関節や膝関節を使用しないことが運動効率に貢献（スタートダッシュやコーナーリングでは当然不利となる）することを意味している。これは小学生のスプリント・ドリルの効果を検討した山崎と石山の研究でも同様であった。

膝関節や足関節をある程度固定して走る疾走動作は、短距離疾走でも長距離走でも同様に重要なランニングスキルであり「バネ係数の変容」と表現されている。短距離走のバネ係数は疾走速度が非常に高いことから長距離走に比較して「硬いバネ」といわれ、パウエル選手やボルト選手の大腿の腱は非常に硬いことが知られている（NHK・ミラクルボディ、2008、2012放映）。

故に、短距離疾走（スタートダッシュ以降の等速～減速区間）では、接地の瞬間には関節をある程度固定したブレーキの少ない接地動作で、最適ストライドでハイピッチを維持することが原則となる。これは長距離走であっても同様のことと考えられ、山崎は、10000mレース後半に疾走速度と膝関節伸展速度に短距離疾走と同様の「負相関」がみられる例を報告した。

## トレーニングの改善

このようなランニング技術に関する新しい知見は、スプリントトレーニングにどのような変革をもたらしたのであろうか。小林は「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その効果を報告している。

膝関節や足関節をある程度固定し高いピッチを維持して走るスプリントランニングスキ

ルを実現するために、マシンを用いないいくつかのドリルが考えられ実践されている。

桐生祥秀選手の所属した京都洛南高校のトレーニングドリルは、ミニハードル（高さ 10 cm 程度のもの）を 1~2m 間隔に並べて「接地の体感」を重視したドリルで、伊東の指摘する「乗りこみ動作（踏み出した脚にすばやく上体を乗せる）」を重視したものである。その他、力の伝わり方を実感するメディシンボール投げも取り入れられていて、3Kg のボールで 10m のバックネット越えが高校トップアスリートの条件とされている。女子の福島千里選手は「フレキシブルハードル」というバーの中央が可動式の器具を用いて、やはり「足さばき」を重視したトレーニングが紹介されている。

山懸亮太選手はマーカーやコーンを用いたトレーニングを行い、やはり動きを重視しつつ何回も何回も反復している映像が放送された（NHK・走りを究める、2013 放映）。

総じてこれらのトップクラスの選手のトレーニングは、正確な動きを模索しながらトレーニングの原理に従ってメニューを組み立てている。

また、100m レースの序盤と中盤と終盤では三つのエネルギー供給系のレベル（モード）が変動する（後述の 3×3 システム）。当然それに合わせて動き（ランニングスキル）を変容させていかないと破綻をきたす。9 秒 58 のボルトの世界新記録の時も 70m 以降は速度低下を起しており、この区間でのスキルは、**加速のためではなく秒速 12m を超える疾走速度を維持することが求められる**。当然終盤のエネルギーモードの変容した状態での疾走トレーニングが必要であることから、かつて朝原宜治選手は、二時間練習の最後に 200m 疾走後、1 分 30 秒間隔をあけて 100m を走るようなトレーニングメニューを実施した（NHK・燃え尽きるまで走るんだ、2008 放映）。

## パフォーマンスを決めるもの

かつて猪飼（1973）は、 $P=C \times f E (M)$  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。

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-PC<sub>r</sub>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**。

このことから、山崎は、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 2）から図 3 のように修正した（2004）。

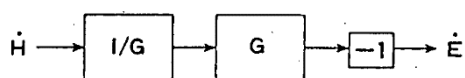


図 2 前庭動眼反射の回路図（伊藤、1992）

$$\begin{array}{cccc}
 \text{プロトタイプ} & [A] & \Rightarrow & [B] & \Rightarrow & [C] & \Rightarrow & [D] \\
 \text{(大脳皮質運動野)} & \times & & \times & & \times & & \times \\
 \text{逆動特性学習} & \begin{pmatrix} -1/a_1 \\ -1/a_2 \\ -1/a_3 \\ \vdots \\ -1/a_N \end{pmatrix} & & \begin{pmatrix} -1/b_1 \\ -1/b_2 \\ -1/b_3 \\ \vdots \\ -1/b_N \end{pmatrix} & & \begin{pmatrix} -1/c_1 \\ -1/c_2 \\ -1/c_3 \\ \vdots \\ -1/c_N \end{pmatrix} & & \begin{pmatrix} -1/d_1 \\ -1/d_2 \\ -1/d_3 \\ \vdots \\ -1/d_N \end{pmatrix} \\
 \text{(小脳外側部)} & & & & & & & 
 \end{array}$$

図3 ダイナミック・ステレオタイプのマトリクスモデル (2004)

図4は、Brooksによる運動情報の流れであり、大脳皮質運動野での動作のプロトタイプ（ランニング等）に対して小脳外側部が逆動特性学習を行い動作の円滑な遂行を実現することを意味している。

川人（1988）は、随意運動学習の階層制御モデルについて、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注部（内側小脳）でフィードバックとしての「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（フィードフォワード系）「運動系の逆システム」が形成されるという階層モデル（図5）を示した。

順システムの形成では、末梢からの運動の結果  $x$  と運動領からの運動司令  $u$  のコピーを受け取り、 $x$  と  $u$  の比較が行われる。これに対して逆システムでは、望ましい運動軌道と運動司令  $u$  のトルクを同時にモニターはするが、実際の運動パターンのフィードバックは必要としない（前向き制御？）と指摘する。

つまり、小脳外側部の逆動特性学習は、運動のプロトタイプのすばやい制御を可能とし、運動習熟のダイナミック・ステレオタイプ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。

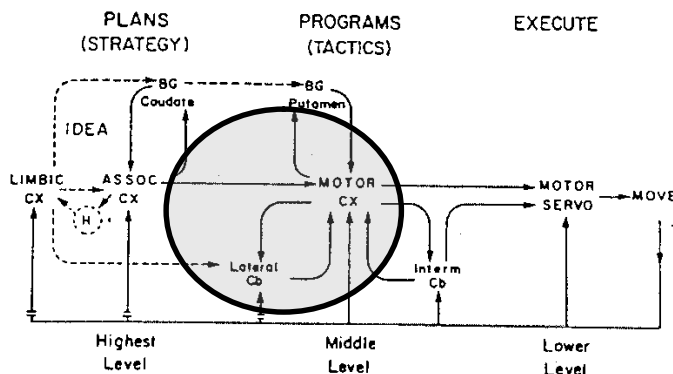


図4 Brooksによる運動情報の流れのシェーマ (1986年)

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

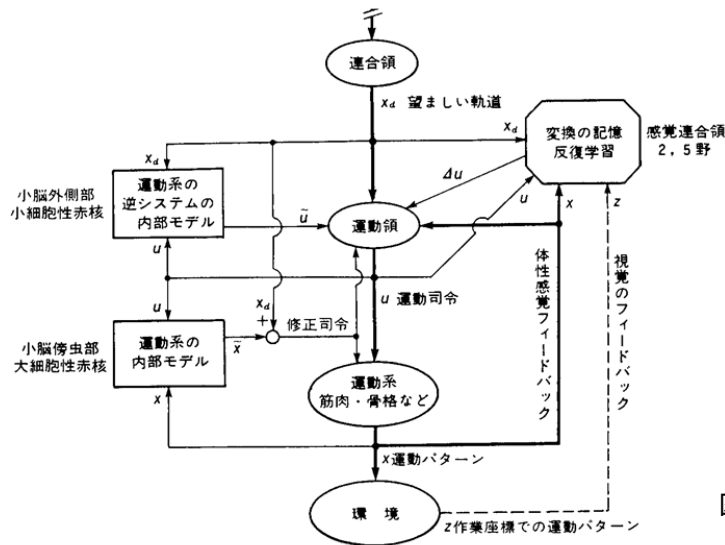


図5 運動学習の階層制御モデル (川人、1988年)

### エネルギー供給系と「乳酸シャトル」そして筋の3×3システム

これに対して、動作の継続実施を支えるエネルギー供給系は、図6の Motor Serve に関与する筋線維活動（上位中枢からの動作を実現する筋収縮の指令を受ける）を支え、運動強度や継続時間、テンポ等を変動させ運動の継続的实施を可能とする。

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。

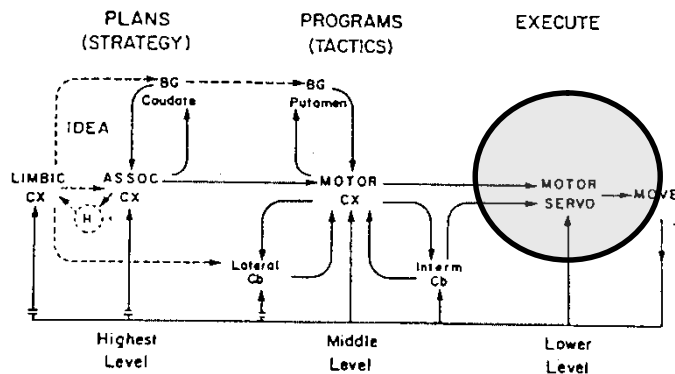


図6 エネルギー供給系の関与

山崎（2014）はまた、定本ら（1987）の筋線維組成と基質や代謝のデータ（図7）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8）」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、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、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9）となる。

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)	タイプIIb(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7 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

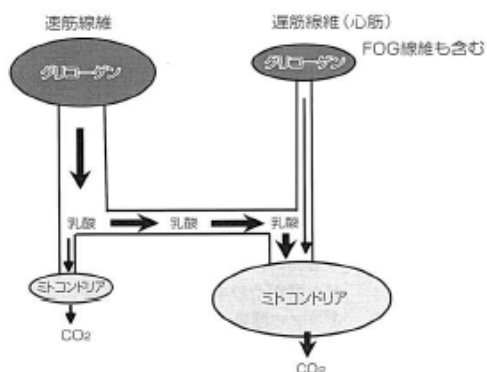


図8 乳酸シャトルの概念(八田、2009)

		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	○	◎	◎
	解糖系	△	◎	●
	有酸素系	◎	○	△

定本ら(1987年)の図を山崎が改変

<—肘関節—>

伸筋側(上腕二頭筋)

エネルギーをつくり出すシステム

		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	○	◎	◎
	解糖系	△	◎	●
	有酸素系	◎	○	△

定本ら(1987年)の図を山崎が改変

屈筋側(上腕三頭筋)

図9 マルチレイアによる3×3システムのシェーマ(2015年)

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線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」の大殿筋や内側・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 II b）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 II a は両者？）のではないかと仮説を示した。

森谷（2001）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と。

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 タンパク質がつくられない）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く 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。

## パフォーマンスのマトリクスモデル

このように、動作の習熟とエネルギー供給系との関係は、きわめて複雑であることから、山崎（2011）は、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×Gly + S3×Mtc + b) についての新たなマトリクスモデルを示した (図 10)。

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

図 10 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)

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」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、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している。

では、実際のレース中にはどのような変容がみられるのであろうか。

### 実際の 10000m レース中の疾走動作の変容

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 以降にラストスパートが行われて順位が決定される展開が多い。

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している。

山崎 (2015) は、これらの仮説に関連して、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 (2013、2014、2015)。

本研究では、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 地点では見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 名に見られた (表 1)。4 名中 2 名は 2000m 地点でも負相関がみられ、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 地点で正相関の見られた 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。

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)

### 10000mレース中の各変数の推移

	2000m			4800m			8800m		
	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(R<sup>2</sup>)の範囲 (\*は負相関)  
0.64~(◎)、0.25~0.63(○)、0.16~0.24(△)、0.15以下(×)

#### 各パラメーターが意味するもの

疾走速度との相関分析の各パラメーターは、何を意味しているのだろうか。

図 11~16 は、疾走速度(m/s)と関係する、1)ストライド(m)、2)ピッチ(Step/s)、3)膝関節伸展速度(deg/s)、の典型的データを示している。

図 11 は、Sub.A の 4800m地点での疾走速度の 47%(決定係数 R<sup>2</sup>=0.47:相関係数 0.67)がストライドと負相関があり、図 12 のように疾走速度の 80%がピッチによって決定されていることを示している。つまり、Sub.A は、ストライドが最も長い選手でありながら「ピッチ型」で疾走速度を維持していることを意味する。図 13 は、Sub.D の 8800m地点での疾走速度の 100%(決定係数 R<sup>2</sup>=1.00)がストライドで決定されていることを示し、Sub.A よりもストライドは短いものの「ストライド型」で疾走速度を維持していることを意味している。

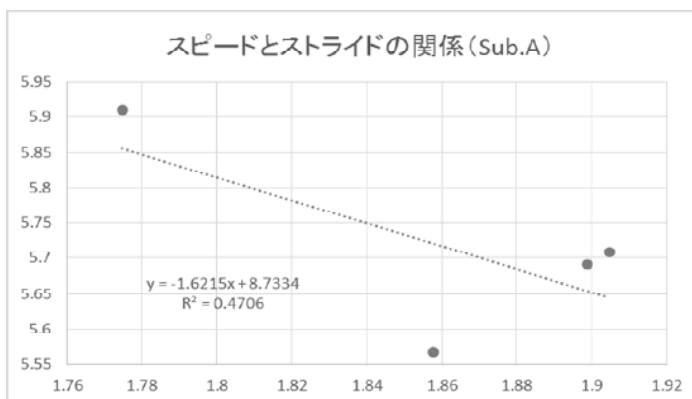


図 11  
4800m地点での疾走速度とストライドの回帰分析結果 (Sub.A)

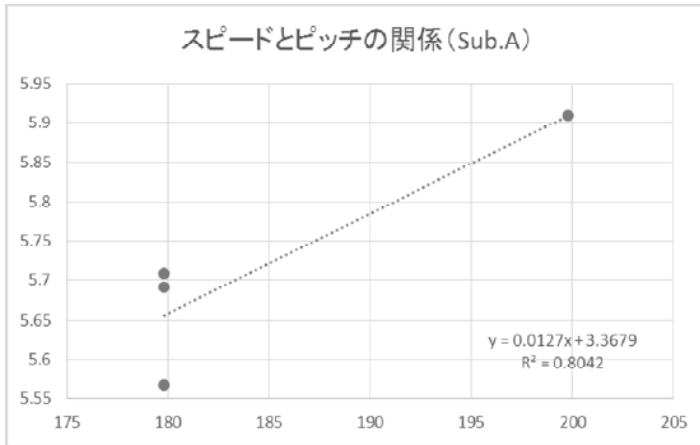


図 12  
4800m地点での疾走速度とピッチの回帰分析結果(Sub.A)  
疾走速度とストライドは「負相関」でありこちらは「正相関」が得られ「ピッチ型」と考えられる

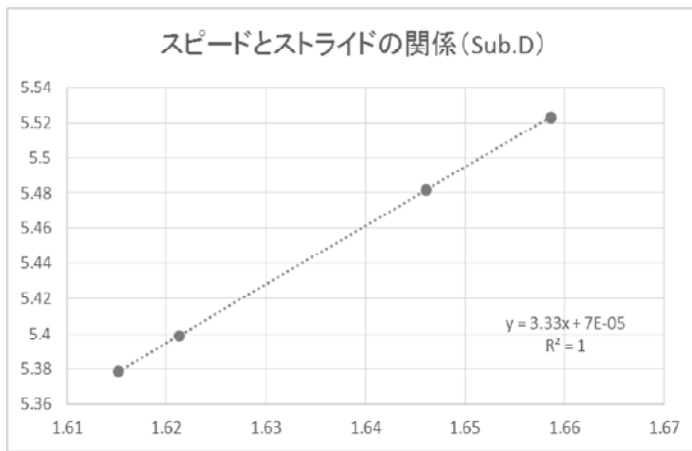


図 13  
8800m地点での疾走速度とストライドの回帰分析結果(Sub.D)  
ストライドは Sub.A より短いが高相関係数は高い「ストライド型」と考えられる

図 14 と図 15 は相反するデータであり、図 14 の Sub.D は、疾走速度の 48%が膝関節の伸展と関連しており、図 13 と関連して、膝関節伸展でストライドを伸ばして疾走速度を維持していることがうかがえる。これに対して、図 15 の Sub.F は、疾走速度の 73%が膝関節伸展速度を少なくすることで維持されている(屈曲-伸展動作をしないほうが疾走速度が高い)ことを示しており、伊藤の指摘する短距離スプリントと同様の傾向を示している(図 1)。

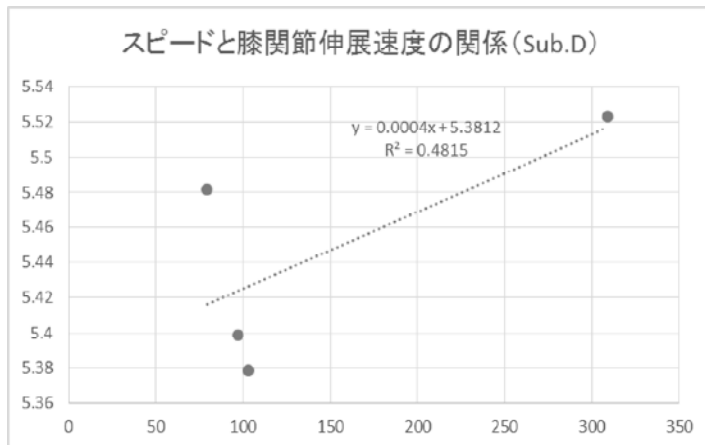


図 14  
8800m 地点での疾走速度と膝関節伸展速度の回帰分析結果(Sub.D)  
図 13 の疾走速度とストライドとの高い相関との関連が考えられる

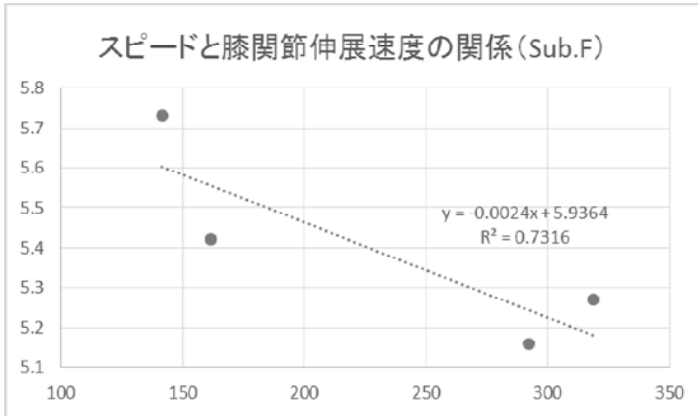


図 15  
8800m 地点での疾走速度と膝関節伸展速度の回帰分析結果 (Sub.F)  
短距離スプリント走と同様の「負相関」がみられる

図 10 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 に見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」しているものと推察される。

2012 年ロンドン五輪前に、NHK スペシャルで前マラソン世界記録保持者のパトリック・マカウの測定結果が放映された。マカウは、世界記録ペースでのキロ 2 分 55 秒で走行していても血中乳酸濃度が 3.2 ミリモル、2 分 52 秒でも 3.6 ミリモルまでしか上昇しないデータが示された。通常、4 ミリモル濃度を超えると筋のミトコンドリアでの乳酸処理能力が上限に達して運動遂行が困難になることが指摘されており、日本選手は同等の速度ではいずれも 4.8 ミリモルまで上昇している。

そして、その省エネ走法を支えているのが接地ブレーキの少ない「フォアフット着地」であることが指摘された。足関節の屈曲－伸展動作は、膝関節と同様に短距離スプリント動作において股関節の後方伸展速度と脚全体の後方スイング速度を阻害することが指摘されている。山崎 (2011) は、股関節－膝関節－足関節とランニング動作に関わり「ストライド型」と「ピッチ型」の両者が存在し、長距離レース後半では、足関節と膝関節をやや固定したピッチ型を選択する可能性を指摘した (図 16)。

	股関節		膝関節			足関節		
	伸展	屈曲	伸展	屈曲	固定	伸展	屈曲	固定
大腰筋		◎						
大腿四頭筋		○	○		○			
ハムストリングス	◎			○	○			
腓腹筋						○		○
前脛骨筋							○	○

	股関節		膝関節			足関節		
	伸展	屈曲	伸展	屈曲	固定	伸展	屈曲	固定
大腰筋		◎						
大腿四頭筋		○	○		◎			
ハムストリングス	◎			○	◎			
腓腹筋						○		◎
前脛骨筋							○	◎

図 16 単純化した各関節筋群の活動の様相 (上: 前半ストライド型、下: 後半ピッチ型)  
(山崎、2011)

## コーディネーションとの関連

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年）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17）との関連を指摘している。しかし、このシステムは、「動作の発現と制御」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）。

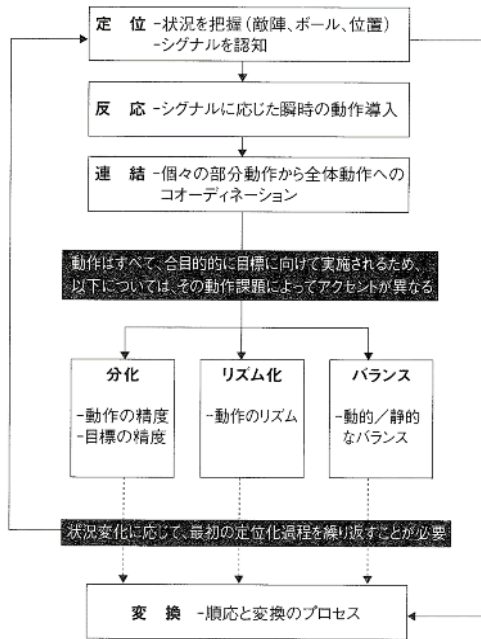


図 17 ハルトマンによるコーディネーション能力の作用順序（2009年）

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。

## 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年）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18）。

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。

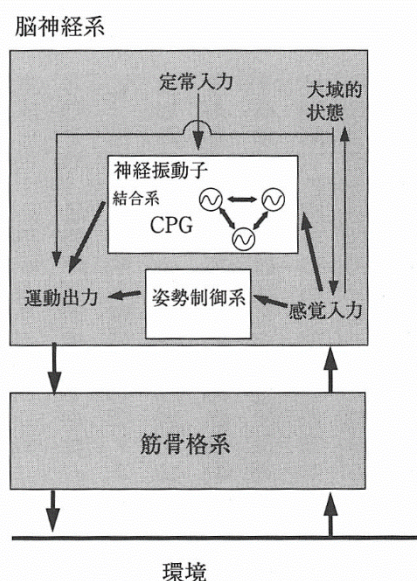


図 18 ヒトの歩行モデル（多賀、2002 年）

多賀は、有名なシック、セパーリン、オルロフスキーの「除脳ネコ歩行モデル」（1966 年）について、中脳歩行誘発野の刺激と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。

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、いわば身体の変換を意味する」「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。

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る。

運動学習の三段階論は、さまざまな研究者によって指摘されている。マイネル（1980、1981）は、運動系における学習の位相について、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（1964）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 年）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）』をたらす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（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）」は運動習熟に対応したダイナミック・ステレオタイプの形成に対応するものと考えられることができる。

## おわりに

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。

合目的的に運動を遂行する身体システムの複雑さは、課題遂行のための単一システムではなく複数のシステムに重みづけを変えながら破たんをきたさないように適切に対応しているように思われ、「知覚し変容し行動する身体」を実現している。

長距離ランニングは、一見単純そうには見えるものの、実際には極めて複雑なメカニズムを内蔵させて遂行されているものと思われる。

今後、この複雑さの解明のためには、動作解析だけではなく、様々な運動生理学的指標や生理心理学的指標を含めた総括的、俯瞰的な検討が求められてゆくのではないだろうか。

改めて、Turvey と Kugler (1984) が示した象徴的な図について、もしもこの課題が複数回反復され総体的な結果が求められるとしたら「その時点その時点でどれを選択するのが妥当であるのか？」を考えてゆく必要があるものと思われる。

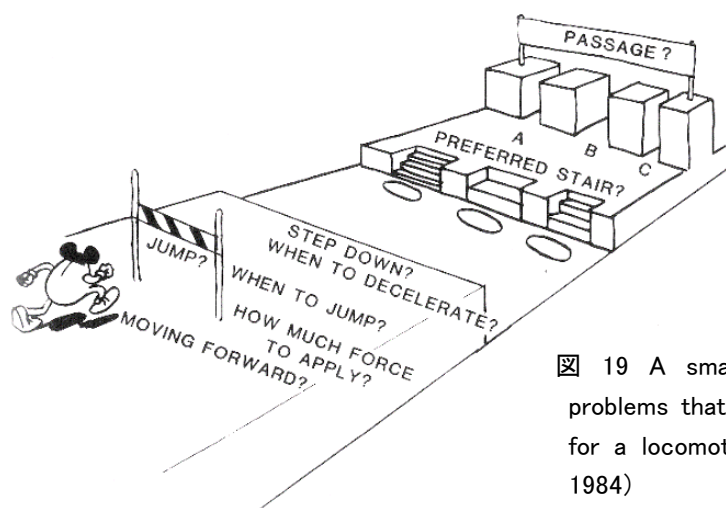


図 19 A small sample of the meaningful problems that the surrounding layout poses for a locomoting animal.(Turvey & Kugler: 1984)

## <参考文献>

- 1) M.T.Turvey,P.N.Kugler,AN ECOLOGICAL APPROACH TO PERCEPTION AND ACTION,(In H.T.A.Whiting Ed. "Human Motor ActionBernstein Reassessed") ,NORTH-HOLLAND,1984,pp.375
- 2) 有吉正博、マラソンにおけるスピード、ピッチおよびストライドについて (In 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、1994年、pp.112-120
- 3) 猪飼道夫、身体運動の生理学、杏林書院、1975年、pp.375
- 4) 井尻正二、科学論、築地書館、1966年、pp.2-103
- 5) 伊藤章・齋藤昌久・佐川和則・加藤謙一・森田正利・小木曾和幸、世界一流スプリンターの技術分析 (In 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、1994年、pp.31-49
- 6) 伊藤章、陸上競技・短距離、体育の科学 第55巻第12号、杏林書院、2005年、pp.947-952
- 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) 江刺幸政、科学的なスポーツ技術とコーチ学の確立、第1回全国体育・スポーツ総合研究会報告集、1970年、pp.20-21
- 9) NHK スペシャル取材班、42.195Kmの科学 マラソン「つま先着地」VS「かかと着地」、角川書店、2013年、pp.76-129
- 10) D.エプスタイン：川又政治訳、スポーツ遺伝子は勝者を決めるのかーアスリートの科学ー、早川書房、2014年、pp.116-140、pp.193-212
- 11) N.G.オゾーリン、A.O.ロマノフ：岡本正巳訳、スポーツマン教科書、ベースボール・マガジン社、1966年、pp.119-120
- 12) 川人光男、運動軌道の形成 (In 伊藤・佐伯編「認識し行動する脳」)、東京大学出版会、1988年、pp.150-181
- 13) 小林寛道、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、2001年、pp.16-32
- 14) 櫻井芳雄、脳と機械をつないでみたら、岩波書店、2013年、pp.80-100
- 15) 定本朋子・宮下充正、骨格筋線維にみられる運動の効果、臨床成人病 17巻5号、1987年、pp.811-817
- 16) 芝田伸午、人間性と人格の理論、青木書店、1961年、pp.37-51
- 17) 善家 賢、金メダル遺伝子を探せ！、角川書店、2010年、pp.57-101
- 18) 多賀巖太郎、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
- 19) 野崎大地、筋骨格系の冗長性1、体育の科学 第64巻11号、2014年、pp.793-797
- 20) 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
- 21) 八田秀雄、乳酸と運動生理・生化学、市村出版、2009年、pp.60-77
- 22) 福永哲夫、人間にとって巧みな動作とは：「動きと効率の側面から」ーローイング運動の場合ー、日本体育学会第36回大会号、1985年、p.47
- 23) 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
- 24) K.マイネル：金子明友訳、スポーツ運動学、大修館書店、1981年、pp.374-419
- 25) K.マイネル：萩原仁・綿引勝美訳、動作学、新体育社、1980年、pp.263-311
- 26) 松尾彰文・杉田正明・阿江通良・小林寛道・岡田英孝、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 (In 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、1994年、pp.92-111

- 27) 森谷敏夫、筋線維の動員特性と動作のテンポ、*体育の科学* 第 45 卷 1 号、1995 年、pp.18-24
- 28) 山崎 健、スポーツの認識と習熟 (In 伊藤・出原・上野編「スポーツの自由と現代」、青木書店、1986 年、pp.299-311)
- 29) 山崎 健、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 卷 1 号、1993 年、pp.14-19
- 30) 山崎 健、スポーツ技術の研究は何に貢献するのか (In 中村敏雄編「スポーツのルール・技術・記録」、創文企画、1993 年、pp.165-190)
- 31) 山崎 健・石山和人、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 卷、1998 年、pp.44-51
- 32) 山崎 健・斎藤麻里子、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 卷、2002 年、pp.21-29
- 33) 山崎 健、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、2011 年、pp.54-60
- 34) 山崎 健、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 卷 1 号、2011 年、pp.55-56
- 35) 山崎 健、筋肉はどうやって動くの、*スポーツのひろば* No.451、2011 年、pp.10-15
- 36) 山崎 健、運動処方とトレーニング (In 山地・大築・田中編「スポーツ・運動生理学概説」、明和出版、2011 年、pp.180-181)
- 37) 山崎 健、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、2013 年、pp.26-29
- 38) 山崎 健、時よとまれ君は美しい、*たのしい体育・スポーツ* 第 276 号、2013 年、pp.12-15
- 39) 山崎 健、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、2014 年、pp.24-29
- 40) 山崎 健、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 卷 1 号、2015 年、pp.78-79
- 41) 山崎 健、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 卷 1 号、2015 年、(印刷中)
- 42) 和田正信、筋線維の種類と収縮特性 (In 山地・大築・田中編「スポーツ・運動生理学概説」、明和出版、2011 年、pp.67-68)

#### <参考資料>

- 1) 運動生理学の研究から見えてくる身体システムの複雑さ、*スポーツ社会学研究* (2015)、第 23 卷 1 号、(印刷中)
- 2) 10000m レース中のランニング動作の変容に関するモデルの検討、*ランニング学研究* (2015)、第 26 卷 1 号、pp.78-79
- 3) エネルギー生産系と運動習熟の連関、*現代スポーツ研究* (2011)、第 12 号、pp.54-60
- 4) 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* (2011)、第 23 卷 1 号、pp.55-56
- 5) 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* (2014)、第 283 号、pp.24-29
- 6) 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* (2013)、第 270 号、pp.26-29