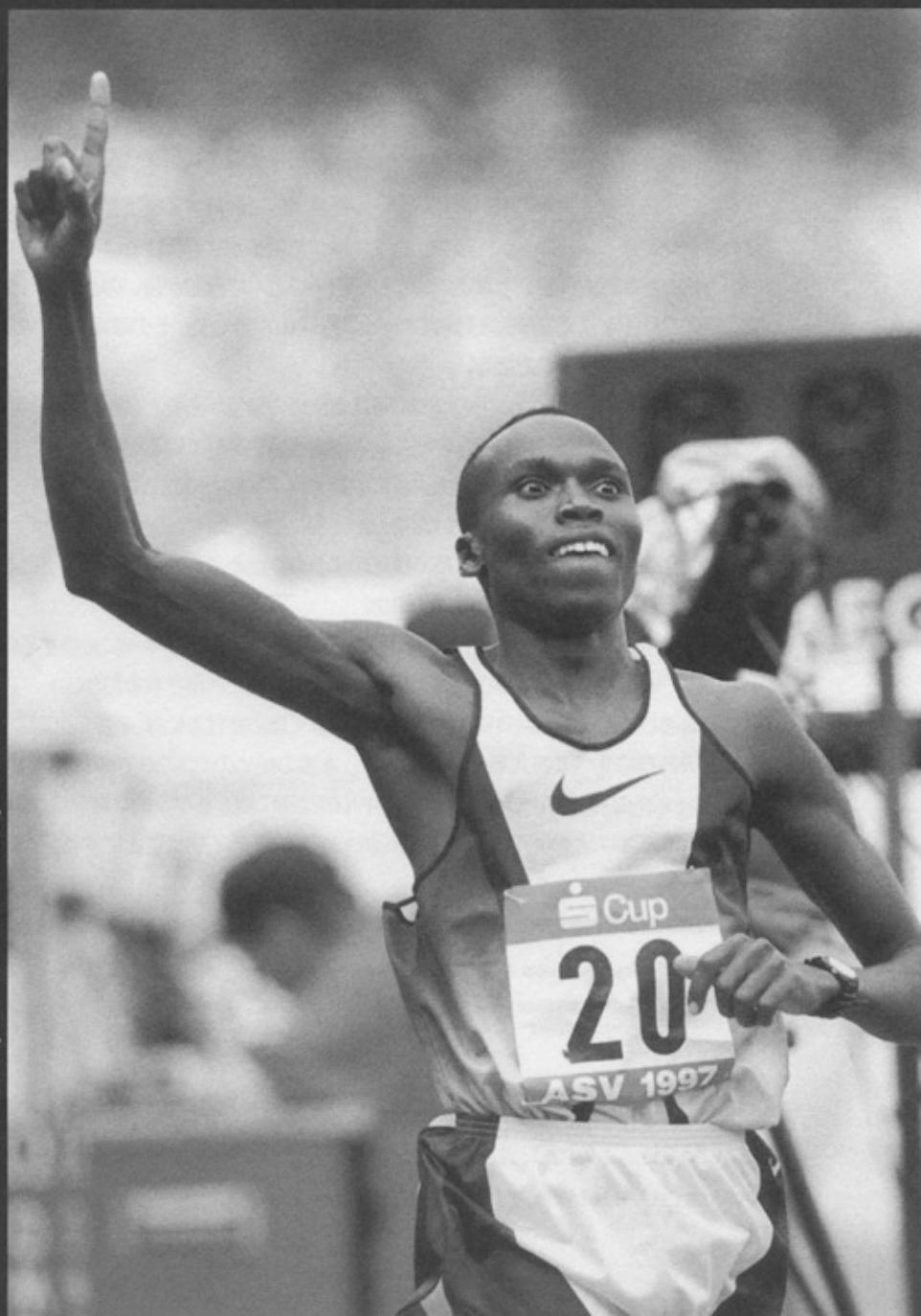


## ランニングの バイオメカニクス



● 男子800mで1分41秒11の世界記録を有するデンマークのW.キプケテール。写真は、1997年8月24日、ケルンで開催されたIAAFグランプリで世界記録をマークしたときのもの(APF=時事)。女子800mの世界記録保持者はチェコスロバキアのJ.クラトフヴィロワ。1分53秒28の世界記録は1983年7月26日、ミュンヘンで樹立された。●

生活には必ず動作が伴う。ウォーキングやランニングはその動作の形態のひとつであるが、それらは繰り返し練習することで変わりうる複雑な運動スキルであり、我われにとっては最も馴染みが深い。特にランニングは、スタートラインからゴールまでの移動能力を容易にテストできることから、人類最古のスポーツとも考えられている。「より速く、より高く、より強く(Citius, Altius, Fortius)」はオリンピックのモットーであるが、古代ギリシャから現在に至るまで、より速く、そしてより長く走るという動作は常に人びとの注目を集めてきた。

どうすれば速く、そして長く走れるのだろうか。これを知ることも、我われ人類の古来からの欲求である。才能ある選手はしばしばこの欲求を強く持ち、その情熱は抑えられないほど大きい場合もある。ランニングは、神経と筋によって成り立つスキルである。それはバイオメカニクスの原理に忠実に従い、代謝エネルギーに支えられている。また、ランニングは練習によって完成すると言われる。確かに、トレーニングと呼ばれる練習を数ヶ月行うことで、効率の悪い運動パターンを経済的に改善することができ、速いスピードや持久力を身につけることができる。しかし、完璧を目指すには、ただ練習するだけでは不十分である。いかにして練習するかということが本質的に重要となる。つまり、選手はどんな練習が良いのかという情報を知り、それにしたがって合理的な計画を立てて練習を行わなければならない。そして、その練習によってもたらされる結果こそが、さらなる改善を約束するのである。

ランニングの能力改善には以下の疑問に答えるための情報が必要となる。

- ランニング時に、神経系と筋・骨格系はどのように協調しているのか。
- 個人のランニングスタイルをどのように改善すれば競技力は向上するのか。
- ランニングに伴うケガの防止策はあるのか。
- 筋力強化のトレーニングの間、筋ではどのような変化が生じているのか。その変化は神経系にだけ生じるのか、それとも心臓管系にも生じるのか。
- 運動にエネルギーは必要だが、いかにして多くの燃料をエネルギーに変換するのか。また、いかにしてエネルギーは蓄えられ、変換され、そして活動筋に効率的に利用されるのか。
- 年間を通じて受ける運動負荷に対して体をうまく適応させるには、科学的知識をどう実践に適用するのか。

これらの問題にすべて答えるのは難しいが、本書の始めの4つの章で我われは敢えてそれに挑戦している。第1章では一般的な動作およびランニングスキルの改善に関する基本的な概念についていくつか確認しながら、ランニングに必要なバイオメカニクスの原理のいくつかをみていくことにする。

# 1 | ランニングのバイオメカニクス

キネシオロジーは解剖学、生理学、物理学のそれぞれの原理に基づき、人間の身体運動を理解するための総合

的学問である。我われの関心は、その学問の力を借りて、おもにランニングの動作パターンを理解することにある。ランニングという身体運動を成り立たせているそれぞれの機構は、バイオメカニクスや生理学の原理に忠実に従って働く。したがって、その原理を理解することで、技術的に優れたランナーへの道が開けるのである。ランニングは身体運動の基礎であり、またそれは人生のかなり早期に身につけるべきスキルでもある。トレーニングをしながらそのスキルを改善できれば、パフォーマンスは向上する。特に高校から大学、そして大学卒業後にいたるまでは、体力の向上を図りながらパフォーマンスの能力を高めていく必要がある。

## 1. 動作にかかわる用語と概念

### 1—動作・動作パターン・スキル

我われは動作(movement)を身体各部位の働きによる身体の位置変化と定義する。動作パターン(movement pattern)とは特定の時間と空間で行われる、一連の動作をさす。したがって、ランニングは特別に組み立てられた動作パターンといえる。動作パターンという用語の代わりに、身体運動(motor activity)、あるいは運動パターン(motor pattern)という用語が使われるときもある。運動スキル(motor skill)とは、決められた課題を達成するための、シンプルで合理的な一連の動作としてとらえられる。筋の働きの結果生じるパフォーマンスは、筋力(strength)、持久力(endurance)、スピード(speed)の3つの要素に求められるが、どのような運動スキルを獲得するにも、その3つの要素が関わってくる。さらに、そこに調整力(coordination)が加わることで、これら3つが相互に結びつき、初めてなめらかな動作パターンが現われる(Henatsch and Langer, 1985)。

基本的な運動スキルは、身体運動をより高度で複雑なものに発達させるのに不可欠であり、また、基本的な運動パターンは、基本的なスキルの発揮に欠かせない。例えば、数歩でも歩き始めた幼い子どもは、すでにランニングのための基本的な運動パターンを習得しているが、その運動パターンは時間をかけて何度も繰り返すことによって著しく改善され、発達していく。同じように若い選手がじっくりと練

習を行えば、基本的な「ランニング」の運動パターンが洗練され、「ランニング」能力が確実に発達する。このように運動スキルは学習されるものなのである。生まれながらに持ち合わせている反応の数々は、成長とともに、様々な刺激が引き金となって、組み合わせや順番を変えながらも少しずつ変化していく。これは、長い間繰り返された神経系への入力が再認識され、それに神経系がうまく適応した結果でもある。例えば、400mトラックを1周75秒のペースで、30秒の休憩をはさんで6回走るとしよう。その際、初心者のランナーではふつう1周のラップにつき少なくとも2、3秒の誤差が生じる。しかし、多くの経験を積むことによって、天候が悪くとも、疲労があろうとも、200~800mの距離ならほんの少しの誤差で走れる独自のベース感覚を持つようになるのである。

スポーツスキルとは、ある特定のスポーツに適合するように洗練されたスキルを意味する。単に「走る」という行為は基本的なスキルのひとつではあるが、競技のためのランニングはスポーツスキルでもある。ランニングのフォームやスタイルは、その運動パターンから受ける視覚的印象と関連が深い。視覚的印象が滑らかで効率良いものなら、少なくともスキルのレベルは高いと評価できる。最後に、パフォーマンスとは、ある特定の身体運動を行うことであり、スポーツパフォーマンスとは、そのスポーツにおいて規定された運動が、意図的に最高の運動パターンで表現されたものといえる。

## 2 能力：abilityとcapacity

あらゆる文化活動(運動競技、芸術、文学など)において、同じ訓練やトレーニングを施しても結果として現われる能力(ability)の水準は人によって異なる。訓練やトレーニングを始める時点で、すでに学習の能力(capacity、許容量)が異なっていたのであろうか。このように、同じ“能力”でもabilityとcapacityには違いがある。abilityはトレーニングの結果現われる能力を意味し、客観的に観察や測定ができる。abilityは常にトレーニングのたまものであり、その高さはどれだけトレーニングを行ったかに強く影響される。いっぽう、capacityの能力は事前の準備状態を意味し、客観的に観察や測定ができない。一般的な運動におけるcapacity(運動能力)は、一般的な知能と同様に誰にでも授けられている。よく言われる“生得的能力(inherent ability)”というフレーズは、実はcapacityの“能力”を意味している。

新しい運動パターンを発達させる脳の能力(capacity)にはほとんど限界はない。新しく入力される知覚情報を脳が受け、それを認知すると、古い

情報と統合され、次第により効果的な運動ができるようになる。我われはイメージのなかで動作を創ることができるように、トレーニングによってイメージ通りに動作を改善することもできる。もし動作パターンをうまく改善したいならば、正しいトレーニングをする以外に道はない。それぞれのスポーツに最適なトレーニングプログラムを最も高い強度で遂行できた選手こそが、最高のパフォーマンスを獲得できる。成功への重要なカギは、望む結果を導けるようなトレーニングをどれだけ正しく行うことができるかということである。そして、中長距離走のカギは、持久力とスピードである。

人間のスキルの獲得は、肉体的能力(ability)だけでなく、明確な目的意識を持つことによって初めてなされるということを強調しておきたい。強くなる選手は、ある種目に代表される過去の選手、例えば短距離走におけるオリンピックメダリストであるオーエンス選手(Jesse Owens)などの素晴らしいを知り、「いつか自分もオリンピックに出場したい」といった強い憧れを抱く。このような憧れこそが選手の動機づけや高い目標設定の基盤となるのである。

## 2. 動作におけるスキルの発達

スポーツスキルのレベル向上には、トレーニングと本人の持ち合わせている技術的側面が大きく影響する。人間の身体は自己最適化機構のしくみを持っており、課題とする動作に対して徐々に効率を高めながら適応していく。このしくみのおかげで、さらに高い課題を目指すことができ、やがてその新たな課題にも適応できるようになる。ところで、身体面のパフォーマンスのピークは肉体の適応が限界に達したときに現われるが、最高のパフォーマンスは、トレーニングが適切に行われ、身体的・精神的に優れた能力(ability)がバランスよく発揮されたときに現われる。トレーニングにより、細胞内での生化学

的および生理学的適応が生まれ、スキルの向上により、動作パターンの効率改善が現れてくる。具体的には、ランニングスタイルの改善として現れてくるのである。

熟練した選手がエネルギー消費を最小限にしてより質の高いパフォーマンスを発揮するときには、次のような5つの特徴が観察される。

- (1) バランス(平衡感覚)と調整力が向上し、それによって姿勢維持への負担が減る。
- (2) 無駄な動作や力んだ動作がなくなる。
- (3) 必要な動作が適切な速さで、適当な方向に行われるようになり、運動エネルギーの損失が

最小限に抑えられるようになる。

- (4) その動作に最も必要とされる筋がより効果的に使われ、主働筋\*、拮抗筋\*、共同筋\*が合理的に協調して働く。それにより、動作の開始に必要なエネルギーと抵抗を小さくしながら、動作の終了や方向転換に必要な力を最小限にできる。
- (5) ゆっくりとコントロールされた動作が、弾道的ストローク(ballistic stroke)\*に次第に置き換わっていく。

5つの特徴について補足説明をしよう。例えば、タッピング(何かをたたく動作)やランニングなどの動作における速さは、それに関わる身体部位の動作の周期に左右される。すなわち、各身体部位を協調させて、うまく“共振\*”させる必要がある。特にランニングのような左右交互に行われる動作は、基本的に弾道的ストロークの連続である。1つの動作は筋張力の発生の瞬間から始まり、動作における身体のある部分が加速を終えた後は、その部分は慣性\*で動き続ける。動作パターンを学習している最中は、ストロークの速度は不安定で遅く、力みが生じて全体的にぎこちない。しかし、スキルが獲得されるにつれて動作の速度は速くなり、さらに動作全体に及んでいた筋活動が洗練され、必要な動作部分に正確な方向と適度な加速が加えられるようになる。

もし手足の最適な共振周期が乱れると、より多くのエネルギーが必要となるため、動作は非効率なものとなる。ランニングでは手足の動作を合わせる、すなわち共振させる必要があるため、ストライド頻度(ピッチ)には限界があり、その分いくらかランニング速度は制限される。しかし、いったん最適な共振周期を身につければ、あとはストライドを伸ばすことでスピードを増加させることができる(これは適切な強化トレーニングの継続により達成できる)。速く走るための2つの基本的な要因が「ストライド長」と「ストライド周期」であるのはこの理由による。

2人のランナーを例にとり比較してみよう。同じ身長、脚長の2人のランナーがそれぞれの最大のパフォーマンスに対してある一定の割合で走るとき、より強く、パワフルなエリートレベルのランナーのほうがストライドは数cm長い。ストライドが長い場合、共振によって大腿がより速いスピードで前方へと移動する。その結果、移動範囲の増大に適応できるように、主働筋にはより強い張力の発揮が求められ、また拮抗筋には同程度の弛緩が要求されるようになる。

すなわち、足が前方に振り出されるとき、大腿四頭筋\*が主働筋であるとすると、ハムストリング\*は拮抗筋となる。このハムストリングに柔軟性が欠けないと、ランニング強度が高い場合には合理的なストライドの維持ができなくなる。もしくは大腿四頭筋が過大な筋力を出しすぎると、ハムストリングを無理に伸展させることにより、ケガにつながる可能性がある。最適な筋力、筋長、関節可動範囲などの相互関係を理解することは、速く走るためにだけでなく、ケガの回避にも役立つことになる。このように、ランニングを中心としたトレーニング計画に加えて(第5章参照)、体力的側面、いわゆるトータルボディコンディショニングを向上させる計画が必要である(第6章参照)。

\*主働筋：動きを生むために働くおもな筋群のこと。

\*拮抗筋：主働筋が働くとき、反対の動きをしたり、弛緩したり、その運動に関係する関節を安定化させたりする筋群のこと。

\*共同筋：主要な動きを助ける筋群のこと。

\*弾道的ストローク：腕や脚の振り子運動における1回の振幅、すなわち、踏み切りから着地までの1歩の動作のこと。

\*共振：動作が相互に連動し、かつ、連続しているとき、ある動作を強調しそぎたり、周期(速度)が変化すると、全体の動作がうまくいかなくなる。協調した動きをすることをいう。

\*慣性：運動の三法則(ニュートンの法則)のうちの第一法則のこと。物体には慣性があり、外力が作用しないと静止状態を続けるか、一直線上を一样に動き続ける。走り出すとなかなか止まれないし、方向も変えにくい。そうした抵抗が慣性である。

\*大腿四頭筋：大腿直筋、外側広筋、内側広筋の4頭を起始とし、膝蓋骨などに停止する筋群のこと。膝関節の伸展に働く。

\*ハムストリング：大腿の後面に位置する筋のこと。大腿二頭筋の長頭、半腱様筋と半膜様筋を含む。

### 3. 動作と脳のかかわり

動作(movement)と姿勢(posture)をまったく異なる現象とみなす考えがある。すなわち、動作は時間の経過にともなう身体の位置変化を示すものだが、姿勢は身体の位置が固定された状態を示すものだからである。これに対して、著名な神経科医であるDerek Denny-Brownは、動作というものを単に「ある姿勢の連続体」と考えることを提案した。図1-1における3人の800mランナーの写真は、左から右へ、ランニングサイクルの中間支持、フォロースルー、振り降ろしの各局面をそれぞれ示している。ここで我われが特に关心を持つのは、そのような非常に素早い姿勢変化の連続であるランニングにおいて、中枢神経系のどの機構が関わっているのかを理解することである。コーチや選手がそこまで知る必要があるのかと批判する人もいるかもしれないが、我われはそうは思わない。そのような理解をして初めて、オーバートレーニングの原因やその管理につ

いて確かな判断ができるようになり、個々のランニングスタイルを変えるという試みもうまいくくなるからである。

脳と脊髄は1つのチームとして働きながら、効率良い機能的な動作の習得を可能にしている。我われの意志の座として知られる大脳皮質は、脳の動作に関わる領域のなかの一つにすぎない。また、脳と脊髄における他の多くの領域も動作に関わっており、大脳皮質と相互に作用して働いている(図1-2)。こうした脳内プロセスを完全に理解するには大学で解剖学と神経生理学の知識を学ぶ必要があるが、それほど大げさに考えなくてもよい。ここでは、重要ないくつかの概念を簡単に議論するだけで、ランニングが組織化された運動形態としてどう習得されるかを十分理解するべきである。

脳幹網様体<sup>\*</sup>は、脳の最も古い部位であり、姿勢の維持に必要な3つの重要な役割を担う。



図1-1●ランニングサイクルの3つの局面  
左からセバスチャン・コー（イギリス）、  
スティーブ・クラム（イギリス）、リシャード・オストロフスキ（ポーランド）。  
コーの右足は中間支持、クラムの左足はフォロースルー、オストロフスキの左足は振り降ろし局面をそれぞれ示している。

- 重力に拮抗する支持動作
- 空間における方向感覚
- バランス（平衡感覚）

知覚系路からのいくつかの入力がこの役割を遂行させる手助けをする。例えば、視覚系は空間における視覚的な方向づけを可能にする。内耳にある前庭は加速・減速といった連続する変化や重心位置についての情報を我われに教える。筋筋錐はすべての筋線維に分布しており、動的、静的な筋の伸び縮み変化を検知する。ゴルジ腱器官は骨格筋の緊張状態や張力を検知する。これらの様々な受容器は総称して固有受容器と呼ばれている。固有受容器は空間における自身の身体の位置を感じし、そこから得られるすべての情報は脊髄の神経を経由して脳幹網様体へと送られる。

小脳はもうひとつの古い原始脳であり、意識化→

無意識化→反射といった動作の洗練化の段階を通じて、入力される情報の処理を行うコンピューターのような働きをする。さらに大脳皮質および脳幹網様体と作用しながら、一連の動作を行うための意識的な指令が、適切な姿勢を維持しつつできるだけ効率よく調整されるように働いている。

動作を開始するシグナルは、大脳皮質の下に位置する領域、特に大脳辺縁系および視床下部から発せられる（この領域では動くための動機づけや運動の企画などが形成される）。その刺激によって大脳皮質の連合野が活性化され、そこから動作パターンをつくり出すためのシグナルが発生する。そのシグナルが小脳へ伝わることによって、弾道的ストロークやきわめて正確な動作パターンができるようになる。いっぽう、大脳皮質連合野<sup>\*</sup>から大脳皮質直下に位置する大脳基底核<sup>\*</sup>へ伝わったシグナルは動

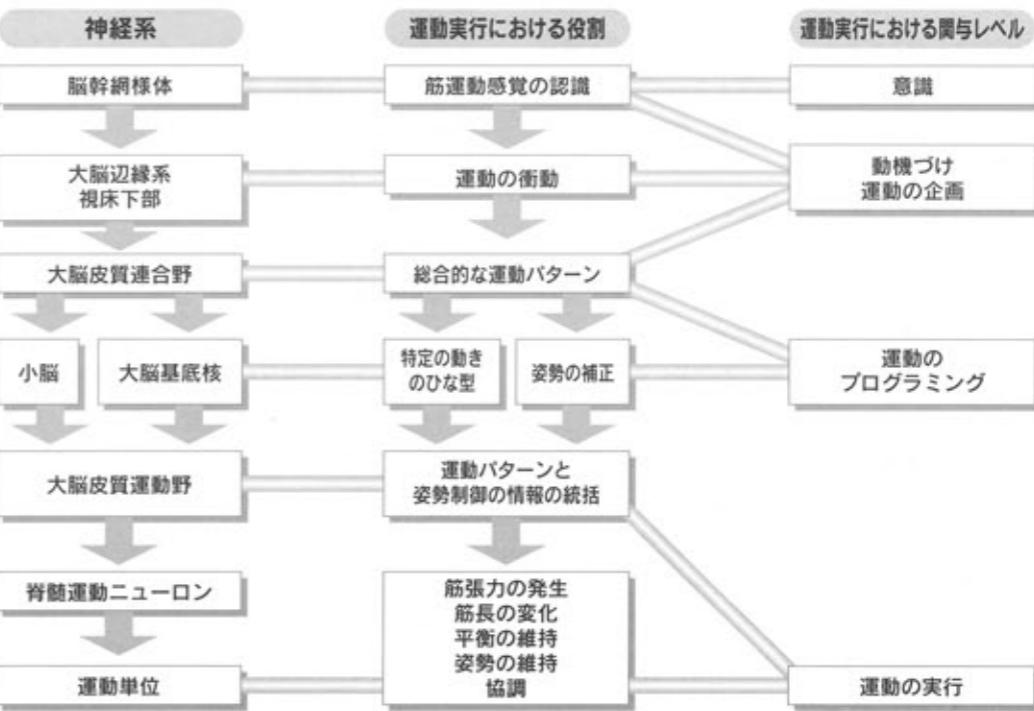


図1-2●随意運動に関わる神経機構と情報処理過程

作のひな型を創り、動作の開始時の姿勢の補正を行う。また、基底核と小脳は、そこで統合された動作パターンのシグナルを大脳皮質の運動野へ送り返す。その後シグナルは大脳皮質から下降し、脊髄を経て動作や姿勢の維持に関わる様々な筋へと送られる。

動作の開始や姿勢の変化は固有受容器(関節、皮膚、筋から脳に情報を伝える)の働きによりきわめて精緻に検知される。戻ってきた情報は、効率良く、効果的に動作を行うために脳がどれだけ意識的な指令を出さなければならないかを判断するのに役立たれる。図1-2はそうした自発的な動作を実行する

種々の器官の情報処理過程の概略を示したものである。

\*脳幹網様体：脳幹(中脳、橋、延髄)の中心部に位置し間脳(視床下部)まで続く。その働きは、例えばノルアドレナリンやセロトニンなどを介して上位の脳(大脳、辺縁系)を刺激し覚醒レベルを保持したり、下位の脊髄、運動神経などに働き、姿勢維持(筋緊張)などを保持する働きなども担う。

\*大脳皮質連合野：通常の意味での感覚または運動の領域ではなく、高次の感覚情報処理、異なる種類の感覚情報統合、感覚運動統合に関与すると考えられる大脳皮質の広い領域を示す包括名称。

\*大脳基底核：尾状核、レンズ核とその周辺の黒質など(まとめて黒質線状体などと言う)をさす。動作の協調などに重要な役割を果たす。パーキンソン病ではこの部位が退行する。

#### 4. トレーニングを通してのスキルの獲得

スポーツの成績は、競技会やタイムトライアルなどの1回のパフォーマンスで実力を発揮できる素質、およびスキルのレベルによって決まる。日頃の動機づけはもちろんあるが、特にトレーニングや練習を辛抱強く継続することが重要となってくる。どのような努力を積み重ねるにしても、少なくとも以下のことは確認すべきである。

- (1) その競技に見合った素質を持ち合わせているかどうか。
- (2) 絶えず努力してトレーニングするための動機づけや環境に恵まれているかどうか。
- (3) 習得したスキルを実践で効果的に発揮できるかどうか。

自ら見たり考えたりするだけではスキルを獲得するのは難しい。芸術(arts)と同様にスポーツにおいても、成功の裏には長年にわたるコンディショニングと練習がある。栄光を手にしたチャンピオンは誰であろうと、徹底的にトレーニングに取り組んでいたことは周知のことであろう。厳密に統合された動作の流れを繰り返し練習し続けることで、平均的な運動パターンが、より高いレベルの調整力を備えながら、洗練され、より正確になっていく。

運動学習の究極の目標は、ほとんど意識を介入させずに動きを正確に行えるようになることである。繰り返し練習することで、複雑なスキルでも意識せず自動的にできるようになり、そのうえミスも減ってくる。どんな素早い動作でも、その実現には筋の緊張と弛緩が正しい順序でいかにタイミングよく行われるかが重要な意味を持つ。

人によって動作の流れを脳に記憶する能力は異なるが、姿勢のバランスを保つ動作パターンを生み出す複雑な神経回路のなかで、個々の潜在能力を発達させるには多くの時間を要する。しかし、動作パターンがいったん学習されると、動作そのものよりもスキルの発揮に関連した事柄に焦点が移る。例えばボウリング選手は、ボールを投げること自体よりも、構えてからピンへ集中することを教えられる。また、テニスプレーヤーは、ラケットや自分の腕を意識するよりも、リターンやサーブのボールに集中するように教えられる。

ランニングは複雑な技術志向の運動ではないので、技術よりも体力的側面の比重が大きい。しかしながら、ランニングのパフォーマンス向上のために意識すべき有効なスキルのヒントは数多くある。例

えば、レースにおいてランナーは、ランニング速度や力の発揮レベルに応じて、自分に適したストライド長、ストライド頻度(歩数)、呼吸数を無意識のうちに選んでいるが、そのことで意識を他の側面に向けることができるようになる。すなわち、自分の力の発揮レベルを計算してみたり、周りのランナーの呼吸パターンや表情を比較してみたり、レースポジションに関する戦術を練ったりすることができるよ

うになるのである。

ところで、このように自動的に選んでいるストライド長とストライド頻度の組み合わせは、常にエネルギー効率の点からみても最適なものなのだろうか？この答えを得るは、ランニングに関するバイオメカニクスの基礎、およびその応用について理解する必要がある。

## 2 | ランニングという動作の特徴

### 1. ランニング時の衝撃

優れた中長距離ランナーは、トレーニングにより着実に成績が向上し、ケガなどによる中断もほとんどない。より多くのトレーニングを積み重ねることによって体力は向上し、より良いパフォーマンス能力が約束される。しかし、トレーニングにも限度がある。何よりも重要なのは、トレーニングにおける自己の限界を見極めるということである。

より高い適応を目指すための過剰なトレーニングは、選手に障害をもたらすのに十分なダメージを脚と足に与える。これから示す例はその問題の大きさを示している。

片方の足が地面を蹴り、再び同じその足が地面を蹴るまでの1つのランニングサイクルと定義する(Mann, 1982)。すなわち、1つのランニングサイクルは、両足のそれぞれ1つずつのストライドを合わせた、2つのストライドから構成される。サイクルの代わりにストライド、ストライドの代わりにステップを使う研究者もいるので(Cavanagh and Kram,

1990)，それらは同義と考え、1サイクルは2つのストライド、2つのステップ、2回の着地とする。ストライド長を5フィート(1.52m)とし、6分30秒/マイルのペースで走ったとき、それぞれの着地足には体重の2倍の衝撃がかかると仮定する。その条件で、体重59kgの男性ランナーが10マイル(16.09km)のランニングを行うと、片足は5,293回着地し、その足への衝撃の総量は624.6トンにもなることが以下の計算からわかる。

$$10\text{マイル} = 16.09\text{km}$$

$$16,090(\text{m}) \div 1.52(\text{m}/\text{歩}) \div 2 = 5,293\text{歩}$$

[数式1-1]

$$2 \times 59(\text{kg}/\text{歩}) \times 5,293(\text{歩}) = 624,574\text{kg}$$

[数式1-2]

ランニング速度が増すにつれて、ストライド長は長くなり、単位距離当たりの着地回数は減少する。しかし、足への衝撃力は体重の4倍にもなる。

### 3. 動作と脳のかかわり

動作(movement)と姿勢(posture)をまったく異なる現象とみなす考えがある。すなわち、動作は時間の経過にともなう身体の位置変化を示すものだが、姿勢は身体の位置が固定された状態を示すものだからである。これに対して、著名な神経科医であるDerek Denny-Brownは、動作というものを単に「ある姿勢の連続体」と考えることを提案した。図1-1における3人の800mランナーの写真は、左から右へ、ランニングサイクルの中間支持、フォロースルー、振り降ろしの各局面をそれぞれ示している。ここで我われが特に关心を持つのは、そのような非常に素早い姿勢変化の連続であるランニングにおいて、中枢神経系のどの機構が関わっているのかを理解することである。コーチや選手がそこまで知る必要があるのかと批判する人もいるかもしれないが、我われはそうは思わない。そのような理解をして初めて、オーバートレーニングの原因やその管理につ

いて確かな判断ができるようになり、個々のランニングスタイルを変えるという試みもうまいくくなるからである。

脳と脊髄は1つのチームとして働きながら、効率良い機能的な動作の習得を可能にしている。我われの意志の座として知られる大脳皮質は、脳の動作に関わる領域のなかの一つにすぎない。また、脳と脊髄における他の多くの領域も動作に関わっており、大脳皮質と相互に作用して働いている(図1-2)。こうした脳内プロセスを完全に理解するには大学で解剖学と神経生理学の知識を学ぶ必要があるが、それほど大げさに考えなくてもよい。ここでは、重要ないくつかの概念を簡単に議論するだけで、ランニングが組織化された運動形態としてどう習得されるかを十分理解するべきである。

脳幹網様体<sup>\*</sup>は、脳の最も古い部位であり、姿勢の維持に必要な3つの重要な役割を担う。



図1-1●ランニングサイクルの3つの局面  
左からセバスチャン・コー（イギリス）、  
スティーブ・クラム（イギリス）、リシャード・オストロフスキ（ポーランド）。  
コーの右足は中間支持、クラムの左足はフォロースルー、オストロフスキの左足は振り降ろし局面をそれぞれ示している。

- 重力に拮抗する支持動作
- 空間における方向感覚
- バランス（平衡感覚）

知覚系路からのいくつかの入力がこの役割を遂行させる手助けをする。例えば、視覚系は空間における視覚的な方向づけを可能にする。内耳にある前庭は加速・減速といった連続する変化や重心位置についての情報を我われに教える。筋筋錐はすべての筋線維に分布しており、動的、静的な筋の伸び縮み変化を検知する。ゴルジ腱器官は骨格筋の緊張状態や張力を検知する。これらの様々な受容器は総称して固有受容器と呼ばれている。固有受容器は空間における自身の身体の位置を感じし、そこから得られるすべての情報は脊髄の神経を経由して脳幹網様体へと送られる。

小脳はもうひとつの古い原始脳であり、意識化→

無意識化→反射といった動作の洗練化の段階を通じて、入力される情報の処理を行うコンピューターのような働きをする。さらに大脳皮質および脳幹網様体と作用しながら、一連の動作を行うための意識的な指令が、適切な姿勢を維持しつつできるだけ効率よく調整されるように働いている。

動作を開始するシグナルは、大脳皮質の下に位置する領域、特に大脳辺縁系および視床下部から発せられる（この領域では動くための動機づけや運動の企画などが形成される）。その刺激によって大脳皮質の連合野が活性化され、そこから動作パターンをつくり出すためのシグナルが発生する。そのシグナルが小脳へ伝わることによって、弾道的ストロークやきわめて正確な動作パターンができるようになる。いっぽう、大脳皮質連合野<sup>\*</sup>から大脳皮質直下に位置する大脳基底核<sup>\*</sup>へ伝わったシグナルは動

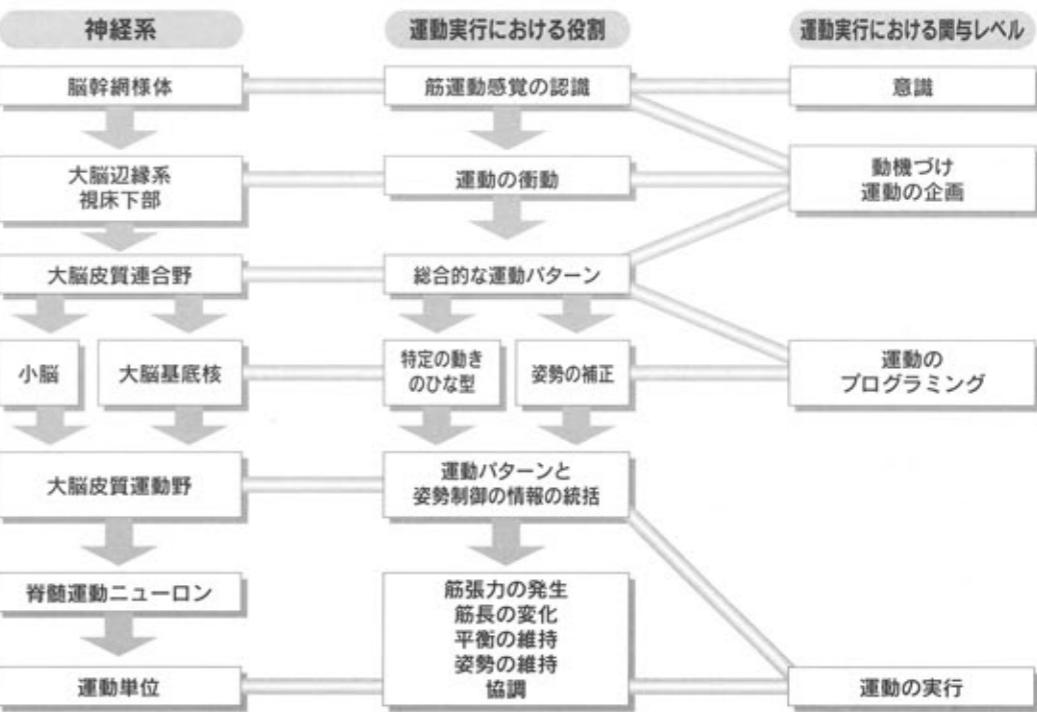


図1-2●随意運動に関わる神経機構と情報処理過程

作のひな型を創り、動作の開始時の姿勢の補正を行う。また、基底核と小脳は、そこで統合された動作パターンのシグナルを大脳皮質の運動野へ送り返す。その後シグナルは大脳皮質から下降し、脊髄を経て動作や姿勢の維持に関わる様々な筋へと送られる。

動作の開始や姿勢の変化は固有受容器(関節、皮膚、筋から脳に情報を伝える)の働きによりきわめて精緻に検知される。戻ってきた情報は、効率良く、効果的に動作を行うために脳がどれだけ意識的な指令を出さなければならないかを判断するのに役立たれる。図1-2はそうした自発的な動作を実行する

種々の器官の情報処理過程の概略を示したものである。

\*脳幹網様体：脳幹(中脳、橋、延髄)の中心部に位置し間脳(視床下部)まで続く。その働きは、例えばノルアドレナリンやセロトニンなどを介して上位の脳(大脳、辺縁系)を刺激し覚醒レベルを保持したり、下位の脊髄、運動神経などに働き、姿勢維持(筋緊張)などを保持する働きなども担う。

\*大脳皮質連合野：通常の意味での感覚または運動の領域ではなく、高次の感覚情報処理、異なる種類の感覚情報統合、感覚運動統合に関与すると考えられる大脳皮質の広い領域を示す包括名称。

\*大脳基底核：尾状核、レンズ核とその周辺の黒質など(まとめて黒質線状体などと言う)をさす。動作の協調などに重要な役割を果たす。パーキンソン病ではこの部位が退行する。

#### 4. トレーニングを通してのスキルの獲得

スポーツの成績は、競技会やタイムトライアルなどの1回のパフォーマンスで実力を発揮できる素質、およびスキルのレベルによって決まる。日頃の動機づけはもちろんあるが、特にトレーニングや練習を辛抱強く継続することが重要となってくる。どのような努力を積み重ねるにしても、少なくとも以下のことは確認すべきである。

- (1) その競技に見合った素質を持ち合わせているかどうか。
- (2) 絶えず努力してトレーニングするための動機づけや環境に恵まれているかどうか。
- (3) 習得したスキルを実践で効果的に発揮できるかどうか。

自ら見たり考えたりするだけではスキルを獲得するのは難しい。芸術(arts)と同様にスポーツにおいても、成功の裏には長年にわたるコンディショニングと練習がある。栄光を手にしたチャンピオンは誰であろうと、徹底的にトレーニングに取り組んでいたことは周知のことであろう。厳密に統合された動作の流れを繰り返し練習し続けることで、平均的な運動パターンが、より高いレベルの調整力を備えながら、洗練され、より正確になっていく。

運動学習の究極の目標は、ほとんど意識を介入させずに動きを正確に行えるようになることである。繰り返し練習することで、複雑なスキルでも意識せず自動的にできるようになり、そのうえミスも減ってくる。どんな素早い動作でも、その実現には筋の緊張と弛緩が正しい順序でいかにタイミングよく行われるかが重要な意味を持つ。

人によって動作の流れを脳に記憶する能力は異なるが、姿勢のバランスを保つ動作パターンを生み出す複雑な神経回路のなかで、個々の潜在能力を発達させるには多くの時間を要する。しかし、動作パターンがいったん学習されると、動作そのものよりもスキルの発揮に関連した事柄に焦点が移る。例えばボウリング選手は、ボールを投げること自体よりも、構えてからピンへ集中することを教えられる。また、テニスプレーヤーは、ラケットや自分の腕を意識するよりも、リターンやサーブのボールに集中するように教えられる。

ランニングは複雑な技術志向の運動ではないので、技術よりも体力的側面の比重が大きい。しかしながら、ランニングのパフォーマンス向上のために意識すべき有効なスキルのヒントは数多くある。例

えば、レースにおいてランナーは、ランニング速度や力の発揮レベルに応じて、自分に適したストライド長、ストライド頻度(歩数)、呼吸数を無意識のうちに選んでいるが、そのことで意識を他の側面に向けることができるようになる。すなわち、自分の力の発揮レベルを計算してみたり、周りのランナーの呼吸パターンや表情を比較してみたり、レースポジションに関する戦術を練ったりすることができるよ

うになるのである。

ところで、このように自動的に選んでいるストライド長とストライド頻度の組み合わせは、常にエネルギー効率の点からみても最適なものなのだろうか？この答えを得るは、ランニングに関するバイオメカニクスの基礎、およびその応用について理解する必要がある。

## 2 | ランニングという動作の特徴

### 1. ランニング時の衝撃

優れた中長距離ランナーは、トレーニングにより着実に成績が向上し、ケガなどによる中断もほとんどない。より多くのトレーニングを積み重ねることによって体力は向上し、より良いパフォーマンス能力が約束される。しかし、トレーニングにも限度がある。何よりも重要なのは、トレーニングにおける自己の限界を見極めるということである。

より高い適応を目指すための過剰なトレーニングは、選手に障害をもたらすのに十分なダメージを脚と足に与える。これから示す例はその問題の大きさを示している。

片方の足が地面を蹴り、再び同じその足が地面を蹴るまでの1つのランニングサイクルと定義する(Mann, 1982)。すなわち、1つのランニングサイクルは、両足のそれぞれ1つずつのストライドを合わせた、2つのストライドから構成される。サイクルの代わりにストライド、ストライドの代わりにステップを使う研究者もいるので(Cavanagh and Kram,

1990)，それらは同義と考え、1サイクルは2つのストライド、2つのステップ、2回の着地とする。ストライド長を5フィート(1.52m)とし、6分30秒/マイルのペースで走ったとき、それぞれの着地足には体重の2倍の衝撃がかかると仮定する。その条件で、体重59kgの男性ランナーが10マイル(16.09km)のランニングを行うと、片足は5,293回着地し、その足への衝撃の総量は624.6トンにもなることが以下の計算からわかる。

$$10\text{マイル} = 16.09\text{km}$$

$$16,090(\text{m}) \div 1.52(\text{m}/\text{歩}) \div 2 = 5,293\text{歩}$$

[数式1-1]

$$2 \times 59(\text{kg}/\text{歩}) \times 5,293(\text{歩}) = 624,574\text{kg}$$

[数式1-2]

ランニング速度が増すにつれて、ストライド長は長くなり、単位距離当たりの着地回数は減少する。しかし、足への衝撃力は体重の4倍にもなる。