

## 移動運動の系統発生と個体発生

新潟大学・山崎 健

### (1) はじめに

7月11日付の新聞各紙は、アフリカ中部チャドから「700万年前の猿人化石発見」を報じた。これまでは、アフリカ東部大地溝帯周辺で発見された約600万年前の「オロリン・ツゲネンシス」(ケニア)と約550万年前の「アルディピテクス・ラミダス・カダバ」(エチオピア)が最古の猿人化石とされていたが、「サヘラントロプス・チャデンシス」と名づけられた初期猿人の化石発見は、遺伝子分析での人類とチンパンジーが500万年前に枝分かれしたとされる時期的な問題に加え、地理的な問題(アフリカ大地溝帯の約2500km西側であること・後述)を含め大きな出来事となった。

### (2) ヒトへの進化

伊藤(1966)は、ヒトへの進化に関わる移動方法の革新として、二つの「運動革命」の仮説を支持した。当時は200万年前とされる「ホモ・ハビリス」論争もあったが、山中(1989)は、その後の相次ぐヒトの化石の発見から、人類史は現在では400~500万年とされていると指摘するが、上記の発見で更にその時代が検討されることになるかもしれない。

NHKスペシャル「生命・第8集 ヒトがサルと別れた日」では、500万年前のアフリカの地殻変動による「大地溝帯形成」が、東側の熱帯雨林の消失と草原化による食糧事情の悪化を招き、直立二足歩行にいたる(強いる)決定的な出来事であったとしている。

中生代白亜紀(約6500万年前)の食虫目(ブルガトリウス)の樹上進出から、約1800万年前のアフリカ熱帯雨林で四足移動するプロコンスルが誕生し、樹上生活を送ることに対応した「第一次運動革命」は、その後のアウストラロピテクスが誕生する段階まで1000年以上続き、腕歩行(Brachiatio)と脊柱の直線化、肩関節の変化、把握する手掌、歩行と中殿筋の作用

が類似した「垂直木登り」等々が直立二足歩行に移行する際の準備となったとしている。

そして、大地溝帯形成による環境の激変が、約400万年前の、有名な「ルーシー」と名づけられた二足歩行のアウストラロピテクス・アファレンシス(アファール猿人)を誕生させ、脳は450ccでチンパンジーと同程度であるが直立二足歩行を行い、まさに人類への「第一歩」を踏み出したとしている。そして、大地溝帯西側の熱帯雨林に残っていたプロコンスルは、現在のチンパンジーとなり直立二足歩行には至らなかったとする。(その意味で、今回の大地溝帯西側での最古の猿人化石の発見は波紋を投げかける。)

更に200万年後に誕生したアウストラロピテクス・ロブストゥス(ロブストゥス猿人)は、脳の重さは500cc程度であるが、石器の製作を行っており、それは、拇指の発達による対置性(精密把握)が可能としたとしている。しかし、木村(1989)は、石器の見つかっていないアファール猿人も拇指対置性はヒトに近いとしているがその一方歯は類人猿に近いと指摘し、歯は漸進的にロコモーションに遅れて進化してきたと指摘する。

そして、160万年前とされる現代人とはほぼ同様の直立二足歩行をするホモ・エレクトゥス(脳重量900cc)にいたる。

小原(1985)は、ヒヒ以外の類人猿はみな森林にすらすらに対し、草原に進出したサルが、アウストラロピテクスとなって完全に形質として定着した直立二足歩行に至ったとしており、直立の理由を、道具の使用や視野の拡大、相手への威嚇等として「立って道具をもったアウストラロピテクス」と指摘している。

ヒト化へのプロセスは、以上のように未だ不確定な部分は多くあるものの、基本的には「第二の運動革命」により、直立から歩行へといたる移動運動を獲得していったものと考えられる。

### (3) ヒトの移動運動

ヒトの移動運動は、基本的運動形態として、歩、走、跳、匍匐(Crawl)、這(Creep)、泳等々に分類されるが、それはサルをも含めた他の動物とは著しく異なっている。

木村(1985)は、アウストラロピテクスをヒトの仲間とする点について、第1に直立二足姿勢が可能な骨格構造(上体が鉛直に立ち、股・膝関節が180度伸びていること)であったことを指摘する。また、骨盤の広がった形状も内臓を垂直に支え強大な大殿筋がつくことを意味し、大腿骨やそれとつながる脛骨が真直ぐで膝関節が接近し、足関節とは水平につながり直立に対応していることを指摘する。(NHKビデオでのニューヨーク州立大のサスマンらの研究グループは、アファール猿人はホモ・エレクトゥスに比べやや「前かがみ」であったとしている。)

ヒトではサルに比べて、殿部、大腿前面、下腿後面の筋量が多く、重心が頭と脊柱との関節を通り、胴を二分し、股関節と膝関節を抜け足首の前方で足の縦アーチの中央へと落ちることを指摘する。このことは、頭、胴、大腿は下方にある関節の上に安定して乗っており、直立を保つのに筋力とエネルギーをほとんど必要としないこと、そして、全体重を支えている足部が、縦のアーチにより足底の踵と中足骨前方の二箇所及び拇指と小指の横アーチで支え、脊柱のS字カーブとあいまって動的な弾力的姿勢保持に役立っているとしている。(筆者は、この「弾力的姿勢保持」は、運動エネルギーの再利用による効率に大きな意味を持ち、歩行から走行への変化の重要な因子と考えている。)

そして、ヒトの歩行を「ストライド歩行」と定義し、股関節が常に180度に近く、接床期中期からキック後の遊脚期の途中まで「過伸展状態」を示し、膝関節も接床期の大部分にわたって180度を保ち、足関節は接床期後期(離地時)に強い底屈し、大きな歩幅で体が大きく前に押し出され、筋活動では交互に働いて休止時間が長く。活動電位も小さいため、エネルギー消費と疲労

が少なく、持続性のある歩行が可能となるとしている。

また、歩行の速度が増すとキックの極値は踵と拇指ボール部の二相性で大きくなり、走り出したときの下方分力は大きな1つの極値を持ち、瞬間的に1回でけり出していると指摘する。

#### (4) 走運動の発生

ヒトの移動運動としての「走」の発生は、おそらく「逃避」や「狩猟」といった場面での「移動速度」を高める必要性から発生したものと思われる。逃避はあくまで短時間の「速度優先」であるが、小林(1990)は、汗腺の発達した体温調節能の高いヒトでは、長い時間獲物を追い続け「効率よく走る」という長距離ランナーとしての能力も発達したのではないかとしている。

小林は、走運動における「弾性エネルギー」の利用にかかわり、着地相における脚伸展筋の伸張性収縮が弾性エネルギーを蓄え、引き続いておきる短縮性収縮期に再利用され、仕事量を増すと同時に、エネルギー消費を節約するメカニズムを指摘した。そして、ランニング効率は走速度の違いによって異なり、長距離走の速度では効率が高く、スプリントでは効率が低くなることに関わって、金子らの「長距離選手は速度が6m/S以下のところで効率がよく、短距離選手は速度が7m/S以上のところで効率が高い」というデータを引用し、筋の特質による効率の違いの可能性を指摘した。

香原(1986)は、動物の移動方法は、馬に代表される「蹄(ひづめ)行」から犬や猫での「趾(指の腹)行」の段階を経て、人類独自の「蹠(つちふまず)行」という移動方法を生み出してきたとし、人間は安定した直立二足歩行を行うため足底をベッタリとつけるのに対し、蹄行や趾行はスピードを得るため膝関節と足関節(踵と足指のつけね)にバネをもち、足をおろしても反撥力がある。この点で「蹠行は原始的で特殊化しない歩行法」であり「走る時は人間も趾行になる」ものの、スピードの点では蹄行や趾行へ移行した大部分の哺乳類に

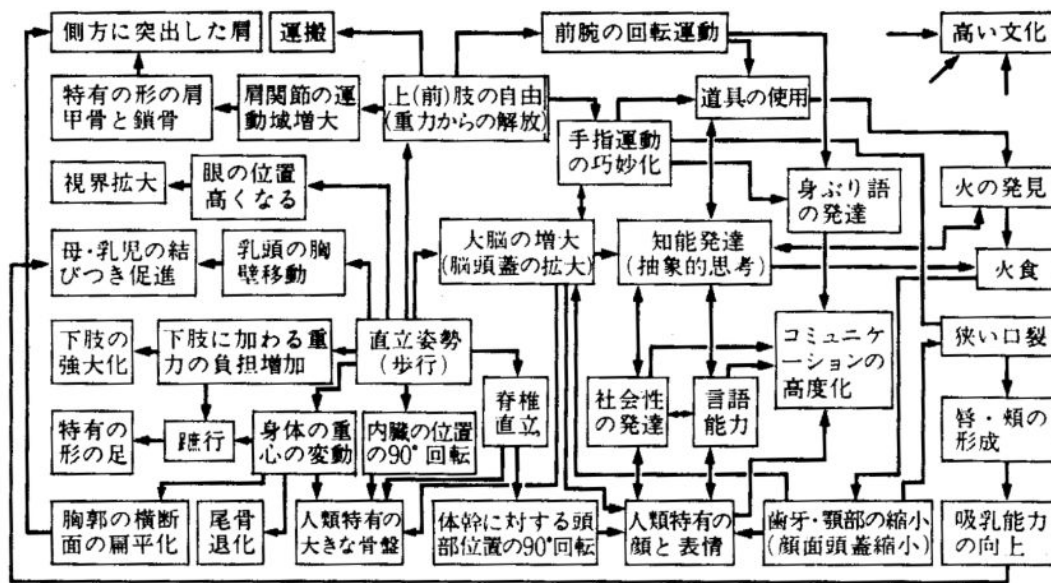


図1-9 直立姿勢と他の人類特徴との関連

取り残されてしまったと指摘している。

筆者は、この「蹠行を基本とした解剖学的構造での趾行」という矛盾を解決するものが足弓(アーチ)の存在であり、伸張性収縮による弾性要素を利用しての、足弓-足関節-膝関節-股関節という各部位を合理的に用いる「運動パターンの発生」ではないかと考えている。(人類の最高疾走速度は秒速約12mで7秒程度持続しかなりのレベルにあると考えられる。)

(5) 走の個体発生

人類学的なヒトの移動運動が、動的で弾力的姿勢保持を前提とした「直立二足歩行」であるということは、個体発生過程(乳児～老人)においても「歩行」運動の完成が先行する。そして、移動運動のバリエーションとして弾性エネルギー利用による効率の高い「移動速度を求める走行」や「移動距離や高さを求める跳躍」が発生した(する)と考えられる。

松浦(1982)は、運動パターンの発達について1.5才位で「いそぎ足」が可能となり、2~3才ぐらいから「走(両足が空中にある)」の発生がみられ、4.5~5才位でほぼ上手に走れるようになるが「一定区間の競争という社会的関係」の形成は困難で

あると指摘する。

そして、幼児期は諸能力の発生(芽生え)の時期で運動パターンのレパートリーの急速な拡大が見られるとしている。そして、8~9才で大人の可能な基本的パターンとその協応性が獲得され、これに対してその質的な向上は未発達であると指摘している。また、この時期の筋肉は「緊張(持続)的」傾向が強く、体重が軽いという特徴ともあいまって運動によってはあまり心拍数が上昇しない。また、走の切り換えも円滑ではなく35m中の最初と最後の5mのデータはあまり相関がなく、タイムも10~11才児に比較して再現性が悪い(そのつどタイムが異なる)こと。男女差はこの時期から現れ、運動の調整や協調、リズム性の能力は女子が優れているのに対し運動の速さや力強さは男子が優れていることを指摘する。

また、児童期~青年期については、50m走と100m走のタイムの男女差比較において、50mでは6~8才で女子が走力に優れているのに対し、100mでは全年齢を通じて男子が優れ、女子では15才以降走力の減少を示すという興味深い結果が報告されている。これは「短距離とは何メートルか?」を考えるうえで大きな意味をもつデータである。

深代(1990)は5~12才での2ヶ月間の走幅跳の練習効果について、6~8才以降の練習効果が大きいことに加え小学校高学年で男女差が見られることを報告し、その原因を女子の運動経験の減少に求めている。

宮下(1985)は、走る動作の習熟過程について、2才以降は走る動作は年齢とともに急速に洗練され、6~7才ころまでにそのフォームが成人の様式にかなり近づくとし、「スピード」「ストライド」「ピッチ」の関係から、くり返しのリズムは比較的低位年齢で決定され、10才以降の移動スピードの向上は骨格系の増大とそれを動かす筋肉の強化が大きな要因となることを指摘した。武藤(1985)は、発達段階との対応から、小学校期は「動きづくり」を重点とし、中学校期にかけては「スタミナづくり」を、また高校期には筋力づくりを行うプログラムを提起した。

このことは「運動パターンの獲得」と「一定の区間を速く走る」とは異なった意識構造をもつ概念であると考えられ、「速く走る方法を獲得すること」と「速く走る」とは直結しない。(幼児では「趾行」に近い方法で極めて速く移動する例がみられる。)故に「何故走り始めるのか?」という点については、その意識が「手段の獲得(対象としての動きの模倣)」にあるのか「目的の遂行(対象の追跡あるいは追い越し)」にあるのか、そして現象としては同時に進行しても「年齢に応じた走り方の獲得」と「年齢に応じた目標の達成」とは厳密に区別されるべきではないかと考える。

#### (6) トレーニングの影響

発達によって疾走動作が変化することはよく知られているが、トレーニングの影響はどのようなのであろうか?

伊藤(1989)は、6年間にわたる50m疾走の縦断的研究を行い、疾走タイムは男女とも毎年有意に短縮を示し、大転子を基準とした足先の動きの範囲も水平・垂直方向ともに増加したが、下位群にいた男女児童は以後の5年間で上位群には入れなかったと報告している。

宮丸ら(1990)は、小学3年生と6年生に日曜以外の毎日20分、6週間にわたるスプリントトレーニングを実施させ、50m走のタイムが有意に短縮し、これは主として歩幅の増大によるものであること、脚筋のパワーや立ち幅とびにも改善が見られたことを報告している。

山崎ら(1998)は、小学生7名に4週間にわたり10回のドリルを実施させ、ピッチ、ストライド、疾走スピード、疾走動作を分析した。そして、①短期間のトレーニングにより疾走タイムが短縮し、これはピッチの増加と適度なストライドの維持により実現されていること。②トレーニング以前は、疾走スピードとピッチにのみ相関がみられたが、トレーニング後はスピードとストライドにも相関がみられ、スピードとピッチ、ストライドの関係が改善されたと考えられること。③10秒間もも上げ(ステッピング)はピッチの改善に、ミニハードルによるマーク走は、適度なストライドの維持によりスピードを増加させるドリルとして有効なものと思われること。さらに、1年経過後の縦断的検討では、④一過性のトレーニングよりもその後の発育・発達の影響が大きいこと。⑤1年後の疾走動作の変容では、主としてストライドの増加によってスピードが決定されたこと。⑥支持脚の股関節伸展速度と後方スウィング速度に加え、反対脚のもも上げ速度もスピードに影響を与えていることが示唆され、相反性のスキップドリルの実施も有効なものと思われることなどを報告した。

また、山崎ら(2002)は、陸上競技選手を対象として、複数のインターバルを設定しハードル走のように4歩1組で走るミニハードルドリルの効果を検討し、①短距離選手、長距離選手とも50m走のタイムが向上したこと。20m以降のピッチ、ストライド、スピードを分析すると、②短距離選手のドリル実施では、ピッチと疾走スピードの向上がみられたのに対して、長距離選手ではピッチの向上がみられたが、ストライドは短縮したこと。③「膝関節角度」「膝関

節伸展速度」とも減少し、股関節伸展速度や脚全体の後方スウィング速度を、効率的に疾走スピードに変換することに対応した変化とも考えられること。⑤「股関節角度」も減少し、体幹の延長線上に近い位置に接地し、ブレーキの少ないキック動作に対応している可能性が考えられること。⑥4歩ドリルの実施は、スプリントパフォーマンスの改善に有効なドリルと考えられ、その背景には「最適ストライドの維持とハイピッチスプリント」という課題に対する「最適値制御システム」の存在が考えられる。⑦短距離選手は、日常的にスプリントトレーニングを行っていることから、この「最適値制御システム」をある程度獲得しておりドリル実施で大きな改善がみられたことを報告した。

山崎らのデータは、短期間もしくは一過性のスプリントドリルが疾走スピードの向上と動作改善をもたらす可能性を示唆しており、長期的トレーニングの効果とは若干異なる傾向がみられ、いわば「ソフトウェア的な適応可能性」を示している。ソフトウェア的適応は動作の質の向上をもたらし、それを効率的に支えるために長期的には出力系の改善をもたらすものと考えられる。

これらの発達段階の特徴を考えると、少なくとも幼児期～児童期と児童期～青年期との課題は異なっており、前者では筋の性質が持続的であることともあいまって、走の運動パターンやリズム性の獲得が先行し、後者ではその洗練とともに走運動の力強さや持続性（運動の振幅の増大）が求められることとなる。

#### (7) 大胆な仮説

筆者(1993)は、ランニングスキルの改善に関わって、スキルの発揮という観点から考えれば、瞬発系とされるFT系筋線維は細かな神経支配を受けており技術的要因に大きく関与しているが、持久性のST系筋線維は「抗疲労性」は強いもののあまり細かな神経支配は受けていないこと。「省エネ走法」と表現される上下動の少ないランニングスキルは、機械的効率を高め総エネ

ルギーの消費を抑制しグリコーゲンを温存するとともに、衝撃吸収にも使用されるFT系線維の疲労を防ぎ、効率的スキル自体を支えるFT系線維の機能水準を維持するという2重の意味があることを指摘した。

歩行の効率は弾性エネルギーを利用できないため10%程度と推定されているが、時速15～20Kmのランニングの効率は、研究者によって異なるものの40～50%程度と推定されている。金子(1991)は、競歩のトップクラス(10Kmを40分前後)の効率は29%という驚異的な値を示し、競歩歩行での弾性エネルギー利用の可能性を示唆した。そして、小林の指摘するように、長距離走では効率がよいがスプリントでは効率が悪いこと、また短距離選手と長距離選手とでは筋の特質に関連して効率に差がみられることなどから、おそらくは各自に最適な効率が複数存在しているのではないかと大胆な仮説を考えている。

その一つは、ATP-CP系といわれる瞬発系に対応した7秒間程度で最も高い疾走速度が得られるもの。もう一つはスピード持久力である解糖系に対応して一定時間継続し、最もエネルギー効率のよいものではないか。そして、前者は「スプリント的効率」、後者は「長距離ランナー的効率」に対応しているのではないか。また、筋肉量が低下してスプリントが困難になった中高年にジョギングが好まれること、持久型と瞬発型とで夫々自分に合った種目を選択していることなどとの関連も考えられると思うがいかがであろうか。

直立二足歩行がヒトの基本的移動運動であり、移動速度や移動距離、高さを求めて「走」や「跳」が発生したことは推論ができる。しかし、人間の文化的行為として何故「走」や「跳」にこだわるのかを考えると、弾性エネルギー利用による運動効率の最適化（おそらくは高効率での運動遂行の快感をとまなうと考えられる）は、大変に魅力のある仮説として現在私の頭を離れない。

【参考文献】

- ・ 伊藤 宏、小学生短距離疾走能力の縦断的研究、東海保健体育科学第9巻 (1987)
- ・ 伊藤嘉昭、人類の起源、紀伊国屋書店 (1966)
- ・ NHKスペシャル、「生命」第8集 ヒトがサルと別れた日、NHKビデオ
- ・ 小原秀雄、人[ヒト]に成る、大月書店 (1985)
- ・ 金子敬二、競歩におけるトップアスリートの技術、体育の科学第41巻4号 (1991)
- ・ 木村 賛、ヒトはいかに進化したか、サイエンス社 (1980)
- ・ 木村 賛、二足で立ち上がったヒト (江原昭善編「サルはどこまで人間か」)、小学館 (1989)
- ・ 香原志勢、身体の履歴書、NHK (1986)
- ・ 小林寛道、走る科学、大修館書店 (1990)
- ・ 深代千之、跳ぶ科学、大修館書店 (1990)
- ・ 松浦義行、体力の発達、朝倉書店 (1982)
- ・ 宮下充正、スキルの科学、大修館 (1985)
- ・ 宮丸凱史・加藤謙一、成長にともなう疾走能力の発達、体育の科学第40巻10号、杏林書院 (1990)
- ・ 武藤芳照、子どもの成長とスポーツのしかた、築地書館 (1985)
- ・ 山崎 健、走運動の発達 - その系統発生と個体発生 - 、たのしい体育・スポーツ第16巻、ベースボールマガジン社 (1987)
- ・ 山崎 健、スポーツ技術の研究は何に貢献するのか (中村敏雄編「スポーツのルール・技術・記録」)、創文企画 (1993)
- ・ 山崎 健、ランニングスキルの改善と歩数計測の意義、ランニング学研究第4巻 (1993)
- ・ 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、陸上競技紀要第11巻 (1998)
- ・ 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、陸上競技紀要第15巻 (2002)
- ・ 山中一郎、遺物から探る最古のヒト (江原昭善編「サルはどこまで人間か」)、小学館 (1989)