

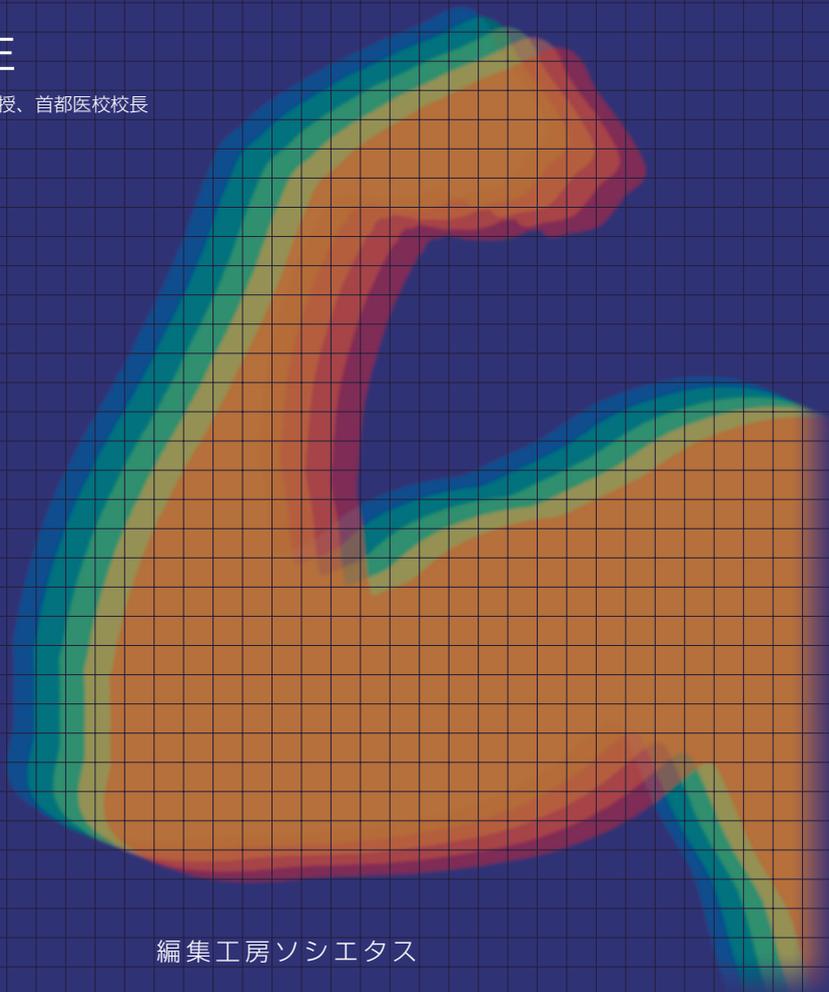
～身体運動研究者と指導者のための～

新しい視点からの トレーニング科学

The New Paradigm of Exercise Science

宮下充正

東京大学名誉教授、首都医校校長



編集工房ソシエタス

～身体運動研究者と指導者のための～

新しい視点からの トレーニング科学

The New Paradigm of Exercise Science

はじめに

日本学術会議は、教育の質向上のための土台として、各学術分野の学びに関するコア（理念や固有の特性等）を明文化する分野別参照基準策定を進めている。ここでは、工学は自然法則の探求にかかわる自然科学（認識科学）、その法則を用いて人間や社会に有用な機能を引き出す設計にかかわる科学（設計科学）から構成されている学問であると述べられている（北村、土屋、2013）。

体育やスポーツにかかわる身体運動科学（Exercise Science）では、どうなるのか。古典的生理学に加えて、新しい生化学、分子生物学、遺伝学が明らかにした筋肉のはたらきを中心に、トレーニング科学は再構築されるべきである。そして、トレーニング科学が生かされる主たる分野は、体育とスポーツである。

わが国についてみれば、体育、スポーツを対象としている研究者の数は数千人いると推定される。さらに、現場で指導に当たる人びとの数は数十万人いるだろう。身体運動の研究と指導に当たる多くの人たちが、体育やスポーツの分野へ新しく加わるだろう学生たちに対して、何をどのように教育すべきなのか。さらに、体育学・スポーツ科学に携わる中堅以上の人たちが、自らの目標を見失わないでどのように研究を進めていくべきなのか。体育学、スポーツ科学の分野、特にトレーニング科学において、何らかの指針を立てるべき時期であると思う。

月刊誌「文芸春秋」（2014年5月号）に“立花隆遺伝子革命連続対

談”が特集されていた。冒頭で対談の相手湯島誠（東京大学名誉教授）は、次のように述べている。「2000年代に入って遺伝子研究が急速に進歩して、さまざまな分野で応用されるようになりました。犯罪捜査でDNA鑑定が行われることはいまや常識ですし、病気には遺伝子が深く関わっていることがわかっていましたから、文系理系にかかわらず大学生なら知っておく必要があると考えたわけです」と、数年前に東京大学の教養課程で、文系のコースの学生に対しても「生命科学」の教科書を作ったという。それに対して立花隆は、次のように答えている。「そうですね。もっと早くから大学教養課程の中核にDNAを入れておくべきでした。アメリカの大学では、以前から文系理系関係なく必須にしているうえ、教師も学習させられている。・・・中略・・・いまは国家公務員試験で必須科目にしてもいいのではないかと思います。」

体育、スポーツの中核である身体運動とDNAとは、深くかかわっている。したがって、教養課程ばかりではなく、専門課程でも教育されるべき課題であることは間違いない。そのための創始となればと願って、本書をまとめた。

目次

身体運動研究者と指導者のための新しい視点からのトレーニング科学

はじめに 2

序章

体育学とスポーツ科学をどうとらえるか 6

1. 学問の進歩と研究成果の整理 6
2. 生物の階層構造 8
3. 身体運動科学の目的 10
4. 体育学とスポーツ科学 12

1章

運動科学とジェネティクス (genetics) 15

1. 身体運動科学の最近の動向 15
2. 個人差はどうして現れるのか 17
3. 誤解されやすい遺伝子のはたらき 19
4. 老化と筋力にかかわる遺伝子型 22
5. 運動能力と遺伝子型 26
6. 遺伝子型に人種、民族間の違いがあるのか? 30
7. 今後の課題 35

2章

老化から見た筋肉のはたらき 37

1. 骨格筋のタンパク質合成と分解 37
2. 高齢者の筋力の回復 46
3. サルコペニアの予防 56



3章

骨格筋線維の新しい分類 67

1. タイプI、タイプIIa、タイプIIx筋線維 67
2. 筋活動によって分泌されるマイオカイン 77
3. サーカディアンリズムと筋活動 87

4章

改めて筋持久力を考える 97

1. ミトコンドリアを知る 97
2. 筋持久カトレーニングとディ・トレーニング 105
3. ビート根 (Beetroot) は持久能力を高める 113

終章

エピジェネティクスをどう取り入れるのか 118

1. エピジェネティクス (epigenetics) 118
2. 遺伝情報が環境によって変わる 119
3. エピジェネティクスに作用するタンパク質群 121
4. エピジェネティクスと思われる最近の研究 122

まとめ 130

引用文献 132

序章

体育学とスポーツ科学を どうとらえるか

1. 学問の進歩と研究成果の整理

生物学は、分子生物学と呼ばれるようになったという人がいる。現在は、生命現象を分子レベルで研究するのが主流となったからであろう。このように各専門分野では研究の流れが変わっていく過程で、積み重ねられてきた膨大な研究成果は、整理され新しく学ぶ人たちの教科書は改訂されてきた。言い換えれば、過去に蓄積されてきた研究成果をすべて知ろうとしては、研究者となろうとする人は、新しい研究をスタートするまでに、相当の時間を費やさなければならない。だから、教科書の内容は、主要な流れを中心に改訂されていくのは当然のことである。

体育やスポーツにかかわる研究分野は、広い範囲に及ばざるを得ない。範囲が広いということは、それぞれの分野が隣接する主要な学問分野の流れに遅れないように、新しい研究を実施していく必要に迫られる。たとえば、運動不足の人たちに運動を勧めるとき、“行動変容”という言葉が使われ出したのは古い話ではない。この言葉を使って、対象や方法を変えて運動介入をしたときの研究成果が報告されるようになったのである。

他方で、“最大酸素摂取量”という言葉は、今でも使われている。しかし、それはその意味することを理解してもらうためであって、実際に最大酸素摂取量の測定を行う研究室は、日本ではほとんどなくなってしまった。極端に言えば、最大酸素摂取量の測定を受けたことがなく、自分の最大酸素摂取量の値を知らない人が解説しているのである（写真序—1 トレッドミルテスト）。取って代わるように、分子生物学の発展とともに分子レベルで身体運動を研究する人が増加している。しかし、それらの研究成果が体育やスポーツの教科書で紹介されるのは、今のところ少ない。

新しい知見を得るといことは、研究者や運動指導者として要求されることはいうまでもない。しかし、体育やスポーツの分野の研究者や指導者が、オリジナルな研究成果をあげることは困難なことである。とい



写真序—1 全身持久力（最大酸素摂取量）の測定（スピードと斜度をバテるまで上げていく）

うのも、体育やスポーツの分野での主要な課題である成長期にある子どもを対象とした運動指導は、これまでの研究成果を基盤にして多くの方法が試行され確立されているからである。

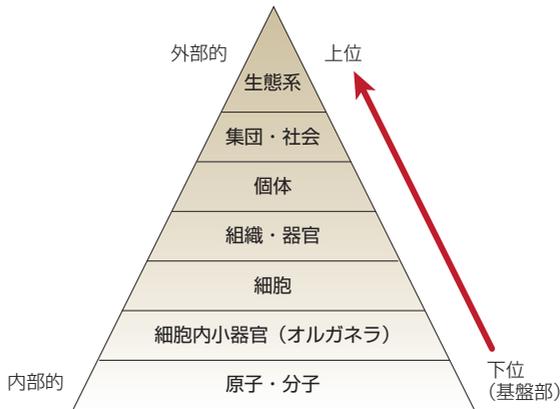
ただし、運動環境の劣化から運動する子どもの割合が減少している現状では、そういった子どもに運動の実践を促すよういかに誘導するかが新しい課題となっている。他方、省力化、高齢化といった社会の変化に応じて、中年齢層に見られる生活習慣病予防のためとか、高年齢層に見られるサルコペニア（sarcopenia）予防のためとか、対象が広がったことによって運動指導のあり方が変わり、新しい研究が行われ成果があげられてきたのは周知のことである。

2. 生物の階層構造

永田（2008）は、「生物の個体はそれぞれヒエラルキー（階層性）を持っている」と述べている。そして、「生体の中で何が起こっているのか、ひとつずつメカニズムをときほぐしていくためには、このヒエラルキー構造を押さえておくことが重要である」としている。その最小単位は、学問分野で異なるが細胞生物学では“分子”である。その上が、オルガネラ（細胞小器官）、核とオルガネラを備えたものが“細胞”である。この細胞が集まったものを“組織”という。この組織の上位概念が“器官”であり、そして組織、器官が集まってひとつの生体、“個体”を作っていると説明している（図序-1）。

個	体	
器	官	…………… 心臓、肝臓、腎臓など、根、茎、葉、花など
組	織	…………… 結合組織、上皮組織、神経組織など
細	胞	…………… 血液細胞、神経細胞、筋肉細胞、生殖細胞など
オルガネラ		…………… ミトコンドリア、小胞体、ゴルジ体など
分	子	…………… タンパク質、核酸、脂質、ATP など

図序-1 生体の階層構造 (永田, 2008)



図序-2 生命の階層性と高度化 (太田, 2013)

ところで、太田 (2013) も、同じように生物の特徴の1つとして“階層性”を上げていて、ミクロな部分は原子、分子で、その上にオルガネラ、細胞、組織、器官、個体としている。そして、新しくその上に集団・社会生態系を置いて徐々にスケールが大きくなると述べている (図序-2)。

この階層の一番基盤部にあるものが、上位の階層を背後で支配してい

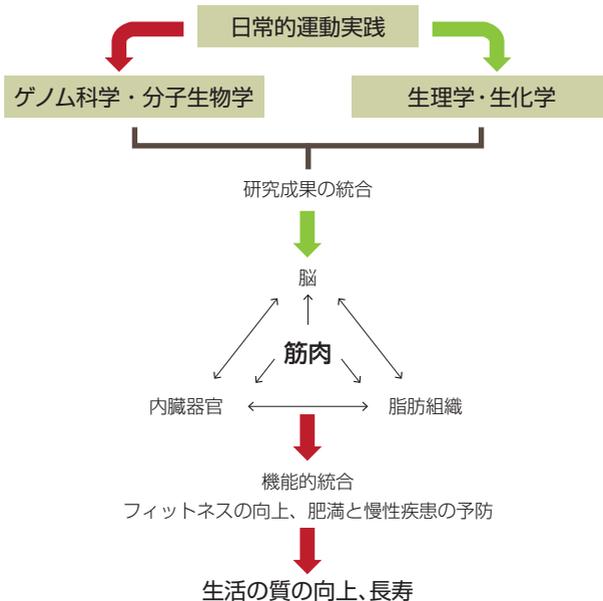
る。しかし、「生物の外見や個性、特質を決めているのはより上位の階層になる」としている。つまり、「基礎階層は DNA やタンパク質など生命の普遍的な物質的基礎、上位階層は主として生命と環境の相互作用を含み、生命の多元性やダイナミクスなどを支配している」と説明している。

生命の本質が情報であるという考えからすれば、DNA に書き込まれた情報が、もっとも基盤の階層に位置し、基盤部の細胞集団が一定の機能を持つ組織や臓器を作り上げ、脳神経系というさらなる高次な情報処理機関ができ上がっている。「脳を持つ個体が集団をなして社会を作り、その中で言語や文化を生みだし、子孫に DNA 以外の情報を伝えることができるようになった」と太田は、階層性を拡大して説明しているのである。

3. 身体運動科学の目的

ところで、そのメカニズムはすべて明らかにされていないが、身体運動は人の健康保持に貢献している。たとえば、「メタボリックシンドロームや 2 型糖尿病、あるいは、他の運動不足によってもたらされる慢性疾患の予防につながる」と Schiaffino と Reggiani (2011) は述べている。

このような骨格筋の活動と健康の保持とを結びつける考え方は、Baldwin と Haddad (2010) が [図序-3](#) にまとめている。筋肉の活動に対する生理・生化学と並行して、ゲノム科学・分子生物学の研究がさら



図序-3 身体運動科学は、平行する2つの基礎科学によって明らかにされた成果を基にして、筋肉を中心とした体内諸器官の機能を統合して、フィットネス向上、肥満と慢性疾患の予防に役立つことが期待される (Baldwin と Haddad, 2010 の図一部改変)

に進み、筋肉を中心として、脳、臓器、脂肪細胞間の機能的統合が明らかにされる。それらの研究成果によって、フィットネスの向上、肥満や慢性疾患の防止の方策が構築され、人間の生活の質（QOL）の向上に役立つというのである。

Baldwin と Haddad (2010) の図から、身体運動科学 (Exercise Science) の新しいパラダイムが見えてきたように思える。

身体運動科学は、次の2つの科学から成り立っている。

①筋収縮（身体運動）がどのような機序で発現するのか、その結果もた

らされるからだはどのように変化するのかを研究することを目的とする科学（自然科学）

- ②多くの人間が生涯にわたって健康を保ち、長寿を全うできるような方策を提供するという目的として遂行される科学（社会科学）

4. 体育学とスポーツ科学

身体運動科学を中核として存在するスポーツ科学や体育学は実用の学問である。体育やスポーツに関して、太田（2013）の提唱している生物の階層構造を当てはめてみると、一代限りの遺伝子による情報の伝達によって作り上げられる、分子、細胞、組織、器官、個体という階層と、遺伝子によらない世代を超える文化の伝達によって組み立てられる、家庭、地域、国家、地球という階層とである（図序-4）。

前者については、遺伝子型の違いがもたらす個人差、民族差、人種差



図序-4 体育とスポーツの階層構造と関連する科学分野

が存在するが、階層が上位に上がるにつれて、体格、肌の色などの差が明らかとなってくる。

後者については、文化の違いがもたらす言語や習慣の差は明らかであるが、最近のグローバル化によって上位から下位に向かって個人間、民族間、人種間で相互に理解し合える方向に進んでいるように見える。

前者の各階層レベルでは、次のような問題が現代的課題として存在すると指摘できる。分子の結合と分解、細胞の生と死、組織の強靭さと損傷、器官の健全なはたらきと不具合、個体の成長と老化である。それらに対しては、生理・生化学とゲノム科学・分子生物学に加えて、バイオメカニクスの分野での研究成果を踏まえて、個々の人間の筋力の増強、持久性の向上、そして、運動競技種目でのパフォーマンスの改善に有効な運動方法を提供することを目的とする自然科学的アプローチである（[図序-5](#)）。

後者の各階層レベルでは、次のような問題が運動やスポーツにかかわる現代的課題として存在するとして指摘できる。家庭に見られる核家族化とシングルマザーの増加、地域における運動施設と介護施設の不足、国家の少子高齢化と医療費・介護費の高負担、地球規模での人口増加、高齢化、そしてオリンピックなどの国際スポーツ大会の肥大化などである。それらに対しては、政治学、経済学、社会学などでの研究成果を踏まえて、自然科学

個体：成長と老化、健康と罹病

器官：健全なはたらきと不具合

組織：強靭さと損傷

細胞：生と死

分子：結合と分解

<自然科学的研究によるアプローチ>

[図序-5](#) 遺伝子による情報の一代限りの伝達

によって構築された運動方法を多くの人間の健康保持と長寿に寄与することを目的とする社会科学的アプローチである（図序-6）。

地球：人口の増加、貧富の格差増大

国家：医療費・介護費の高負担、少子高齢化

地域：都市化、所得格差の拡大、避難場所の確保

家庭：核家族化、独居老人の増加、老々介護

<社会科学研究によるアプローチ>

図序-6 遺伝子によらない文化の世代を超える伝達

注 言葉の使い分け

①身体運動科学と運動科学：英語の Motion と Exercise は、運動と訳される。Motion は、からだの動きを意味することもあるが、“運動の法則”、“地球の運動”のように物理学的に使われることが多い。他方、Exercise は、“運動不足”、“ピアノの練習”のようにからだを動かすことを意味する。そこで、からだを動かすことを対象とするのが明らかな場合は“運動科学”と使い、物理学的な分野での運動科学と混同されやすい場合は、“身体運動科学”と使い分ける。

②体育（学）とスポーツ（科学）：健康・体力の保持増進を目的とした運動（体育の内容）とその指導法を探求するのは“体育学”、勝敗や記録を競うことを目的とした運動（スポーツ競技）とその指導法を探求するのは“スポーツ科学”とする。国民体育大会がスポーツ競技で構成されているように、混同して使われることが多い。

③トレーニング科学：体力と技術を向上させるために計画的にからだを鍛える運動（トレーニング・プログラム）を追求するのを“トレーニング科学”とする。

1章

運動科学とジェネティクス (genetics)

1. 身体運動科学の最近の動向

「運動科学における研究：われわれはどこにいるのか、そして、ここからどこへ向かうのか」といった興味深い表題の論文が掲載された。日本の運動科学にたずさわる研究者も気になるところであろう。

この論文の筆者の一人 Baldwin は 2000 年に、ほぼ同じ表題で 21 世紀における運動科学の展望をまとめている。そして、今回 (2010) は Haddad と 2 人で、その後の最近 10 年間の“運動 (exercise)”にかかわる論文に目を通し運動科学の将来を展望している。

その冒頭の部分で、「Pubmed」という医学生物学文献データベースによって検索し、“exercise”という文字が見られた論文の総数は、過去 10 年間で 82,826 編であったこと、そのうちジェネティクス (genetics) にかかわるのが 3,836 編、プロテオミクス (proteomics) にかかわるのが 45 編、ゲノミクス (genomics) にかかわるのが 155 編、エピジェネティクス (epigenetics) にかかわるのが 22 編、シグナル伝達経路 (signaling pathways) にかかわるのが 326 編と紹介している。

注 ジェネティクス；生殖系列を通して世代から世代へと受け継がれる情報の伝達、プロテオミクス；生命現象を担っているタンパク質の組織的・系統的解析、ゲノミクス；特定の生物のゲノム構造研究、エピジェネティクス；DNA塩基配列の変化をとまわず、細胞分裂を経て伝達する遺伝子機能の変化（ジェネティクスと異なり一代限り）、シグナル伝達経路；機械的、化学的刺激が及ぼす細胞内のタンパク質などの反応過程の経路

ちなみに、運動のテーマと関連して使われている他の言葉によって分けると次のようになっていたという。肥満 7,357 編、糖尿病 6,312 編、寿命 254 編、筋肉 18,562 編、骨 4,038 編、代謝 24,033 編、神経 4,505 編、内分泌 6,954 編、脳 2,644 編、循環 3,426 編、免疫 1,281 編、呼吸 5,734 編、血液 126 編。したがって、運動科学と関連する課題は非常に幅広く、きわめて多くの領域の研究者によって研究が遂行されていると述べている。

Baldwin と Haddad は、運動にかかわっているいろいろな分野に触れているが、ここでは彼らが冒頭で述べている遺伝子機能について、最近の論文も参考にしながら紹介したい。

体育学、スポーツ科学の分野において、運動と遺伝子とのかかわりについての最新の知見を知ることが必須であること、さらには、これからは運動科学の研究者、運動指導者自身も研究する必要があるのではないかと、筆者は考えるからである。

2. 個人差はどうして現れるのか

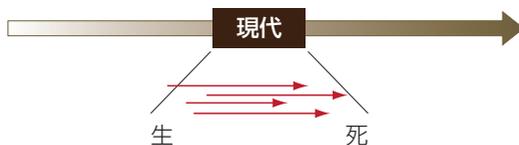
(1) 塩基配列に見られる個人差

生物の特徴（形質）が子どもへと受け継がれていくことを遺伝という。その主役をはたすのが、遺伝子（gene：ジーン）である。人類の長い歴史と未来は、ヒトの遺伝子を受け継ぎ、受け渡すというくり返しで成り立っている。そして、現代という一つの時期に限ってみれば、親からの遺伝子を受け継ぎ“生まれ”、子どもに遺伝子を渡して“死ぬ”という一生を送る人たちで構成されている（図 1-1）。

人間の場合およそ 2 万 2,000 個と推定されている遺伝子は、DNA（デオキシリボ核酸）という物質からできている。そして、核酸はヌクレオチドという分子で、リン酸、糖、塩基が結合したものであり、鎖状にたくさんつながっている。鎖は 2 本がより合っていて、その構造が“二重らせん”と呼ばれるのは、理科（生物）の授業で学び知っているだろう。

対になった塩基は、A・T・G・C と省略されるアデニンとチミン、グ

人類の歴史：ヒトは遺伝子を受け継ぎ、引き継いでいく



人間の一生：父と母の遺伝子を受け継ぎ、子へ伝える

図 1-1 遺伝子の流れ

アニンとシトシンの4種類から成っていて、一本にあるAともう一本にあるT、同じようにGとCとが引き寄せ合って安定した形をとっている。

塩基が30億個からなりその並び方が明らかにされたが、1,000個に1個の割合で個人差があることがわかっている。荻原(2002)は、次のように説明している。「30億を1000で割ると300万、つまりおよそ300万個のヌクレオチドが一人一人異なっている計算になります。」

この個人差が、薬に対する感受性(効くか効かないか、副作用があるかないか、など)、あるいは、ある病気にかかりやすいかどうかの違いとなってくる。だから、医療面では、個人にあった(テーラーメイドの)治療を実施するうえで、遺伝子情報が役立つようになった(荻原、2002)。このような事実から考えても、近いうちに運動やスポーツにおいても、遺伝子を考慮した指導が求められるようになるだろう。

(2) 遺伝子型の個人差

遺伝子は、22本の常染色体と1本の性染色体の“遺伝子座”に順序よく並んでいる。染色体の同じ位置にある形と大きさの同じ、父からと母からの遺伝子の組み合わせを“遺伝子型”と呼ぶ。この組み合わせは、偶然によって変わるので、兄弟、姉妹、二卵性双生児の間でも、はっきりした違いが出てくるのである。両親から受け継いだ2つの遺伝子は、ヌクレオチドの配列が少しずつ異なり、“対立遺伝子”という。

2個の対立遺伝子(たとえばAとa)がある遺伝子座では、3種の遺伝子型(AA、Aa、aa)が出現する。もしこのような遺伝子座が100あ

れば、3の100乗という莫大な異なった遺伝子型の組み合わせが存在すると計算される。言い換えれば、人それぞれの遺伝子型の違いが、異なった個性をもたらすといえるのである。

たとえば、11染色体q13、14にある遺伝子ACTN3は、筋線維のタイプIIに関連するとされている。その遺伝子型はRR、RX、XXであり、RはXに比べスプリント/パワー系の運動パフォーマンスに優れているという形質が現れやすいタイプで、優性とされている。逆に見れば、Xは劣性ということになる。

また、別の遺伝子である17染色体q23にある遺伝子ACE（アンジオテンシン変換酵素）では、対立遺伝子Dは瞬発性の、対立遺伝子Iは持久性の、それぞれ形質を表現しやすいタイプである。そして、ACの遺伝子型DDは短時間の高強度の運動に関係があり、ACの遺伝子型IIは持久性の改善に向いているという（Brayら、2009）。

3. 誤解されやすい遺伝子のはたらき

2010年2月中のわずか10日の間に、“運動の健康効果遺伝子により差”、“老化遺伝子確認”、“遺伝子研究 生活習慣病に道”、“五輪選手のDNAは特別か”といった記事が、「朝日新聞」というひとつの新聞に掲載された。また、週刊現代（53巻7号2011年）が「他人に聞けない一遺伝の秘密」を特集した。

コーチ、健康運動指導士、理学療法士などの運動指導者も、遺伝子に

ついてある程度理解を深めておいたほうがよいだろう。

次に週刊誌に掲載された内容を紹介し、批判してみよう。

1部「“遺伝子”を調べれば、たいていのことが分かる」では、病気と遺伝子について、特にがんに関係する遺伝子は2365個見つかっていて、ある種の乳がんは遺伝子BRCA、ある種の大腸がんは遺伝子APC、それぞれの異常が関係すると紹介している。これら特定のがんは、それぞれの遺伝子に異常があるかどうかを調べれば、発症の危険を予知できるという。

しかし、原因遺伝子がはっきりしている病気は、遺伝子を調べれば将来発症するかどうか分かるが、他の多くの病気の予知や治療にかかわる遺伝子のはたらきについては“まだまだわからないことが多い”というべきであろう。

2部「親の“才能”はどこまで遺伝するか」では、特定の遺伝子を取り上げず、何組かの親子の類似性を紹介し、最後に「いくら親から才能を受け継いでも、開花させることはなく、平凡な一生を送る人は少なくない。その才能を磨き続けた人のみが、“天才”と呼ばれる資格を持つのである」と、本人の努力の重要性を強調している。

3部「勉強しなくてもできる子」「勉強してもできない子」でも、同じように特定の遺伝子を取り上げず、有名私立学校の卒業生の例を紹介し、「勉強しなくてもできる子」はいない、ということだった。当たり前ではあるが、(有名私学の)開成の生徒も(有名私学の)灘の生徒も、みんなしっかり努力していた」と、ここでも本人の努力の重要性を強調している。

以上、2部、3部では、親の形質が子へ遺伝するという従来から遺伝の説明を繰り返しているだけで、遺伝子を特定しての話ではなかった。

4部「“身体能力・運動神経”はここまで遺伝する」では、具体的に遺伝子 ACE と遺伝子 ACTN3 の例を挙げている。ACE については、次のように書かれている。「8000m 級の山に無酸素で登頂できる人は、ほぼ必ず、“持久力の遺伝子”といわれるアンジオテンシン変換酵素（通称 ACE）という遺伝子を持っているんです。この“持久力の遺伝子”があれば、持久力は鍛えれば鍛えるだけ上がっていくものです。しかし、この遺伝子を持っていない人は運動しても持久力は上がりません。」この記述について、取材された人が直接調べた結果に基づいているとは思われないが、遺伝子 ACE が持久力に関連することはすでにいくつかの研究報告が存在する。

他方、ACTN3 については、「筋持久力に働くサッカー向きの遅筋繊維と、短距離向きの速筋繊維の筋肉の割合は、遺伝によって決まることがほぼ分かっている」と書いた後、次のように専門家の説明を続けている。「11 番染色体にある ACTN3（アクチニンスリー）遺伝子が筋肉の質に関係しているとして、注目を集めています。R 型と X 型という 2 つの型の組み合わせによって、スプリンター向きか長距離選手向きかが決まると言われています。」（「繊維」は原文のママ）

ところで、“サッカー向きの遅筋繊維と短距離向きの速筋繊維”という前段の記述は、明らかに間違っていて、ディフェンスを振り切って走り抜け左サイドからセンタリングを的確に決める日本代表の長友佑都選手を例に挙げるまでもなく、優れたサッカー選手は速筋線維が多いこと

が必要不可欠な条件なのである。

以上のように、週刊誌に特集された内容は、遺伝子とはいいながら、具体的には病気についてがんの2つの原因遺伝子と、運動能力について関連するとみなされる2つの遺伝子を紹介しているにすぎず、これからの研究成果を待たなければ、まだまだ“遺伝子を調べればたいていのことが分かる”とはいえないだろう。

4. 老化と筋力にかかわる遺伝子型

(1) 日本人高齢女性に見られる筋肉の太さと遺伝子型

遺伝子 ACTN3 が筋力、筋パワー、あるいは、運動パフォーマンスと関係することは、前に紹介した以外にも、これまでいくつか報告されている。そこで、ACTN3 は、加齢にともなって筋肉が細くなっていくのにも関連しているのではないかと、Zempo ら (2010) は、日本人高齢 (平均 64.1 歳) 女性 (109 名) を対象にして、遺伝子型と大腿の筋肉の太さ (横断面積) との関係を検討した。

ACTN3 の遺伝子型によって分類された人たちの割合は、表 1-1 に示した。筋肉の太さは量的形質であり、前に述べたように環境も影響してくる。そこで、Zempo らは、高齢女性の日常生活での身体運動量や食物摂取量などを調べていて、それらについては遺伝子型で分類された人たちの間で差は見られなかったという。そして、大腿の筋肉は、XX 型が細く (69.1cm^2)、RR 型 (75.2cm^2) が太いという結果を得ている。

このような結果から、Zempo らは、ACTN3 遺伝子型は高齢者の筋肉の太さに影響を与えるものであり、加齢にともなっていかに筋肉の太さを保持するかを目的とした遺伝子研究が重要であると結論づけている。

(2) スペインの超高齢者に見られる遺伝子型

筋力が著しく低下する 90 歳代の高齢者について、運動能力に関連する遺伝子 ACTN3 と ACE が、Bustamanta-ARa ら (2010) によって調べられ報告された。高齢者は筋力が低下し、介助を必要とする人の割合が増加するので、遺伝子型と筋力、移動運動能力との関連を明らかにしておこうというのが研究の目的であった。

対象者は、スペイン人で平均年齢 92 歳 (90 ~ 97 歳) の 41 名 (女性 33 名、男性 8 名) で、年齢相応に運動が遂行でき、認知症、心臓病などに問題がない人たちであった。

筋力は上肢の静的握力と下肢の動的膝伸展力、移動運動能力は 8m 歩行と 4 段の階段上り時間であった。ACTN3 の遺伝子型の割合は表 1-2

表 1-1 日本高齢女性における ACTN3 遺伝子の人数と割合 (Zempo ら, 2010)

対象者	RR	RX	XX
日本人高齢女性	19 (17.4%)	63 (57.8%)	27 (24.8%)

表 1-2 スペインの超高齢者女性 ACTN3 遺伝子型の人数と割合 (Bustamante-Ara ら, 2010)

対象者	RR	RX	XX
スペインの超高齢者	13 (31.7%)	19 (46.3%)	9 (21.9%)

に示す通りであった。

スプリント／パワー系に優れているとされる ACTN3 の R 型、RX 型と劣るとされる XX 型の筋力や移動運動能力には、有意な差が見られなかった。また ACE の持久力に優るとされる II 型と ID 型（26 名）と劣るとされる DD 型（15 名）の間にも有意な違いが見られなかった。

Bustamante-Ara らは、この理由の 1 つとして、加齢が引き起こしたサルコペニアが、遺伝子 ACTN3 の発現させるタイプ II 線維へ大きく影響しているからとしている。また、運動能力に対する関連があるとされている遺伝子 ACE の作用は、若いときに比べ筋量の減少した老齢期では、失われていると推察している。そして、この研究でのサンプル数は少ないこともあって断言できないが、筋力に対する遺伝子の影響は加齢とともに減少していくとしている。

(3) ブラジルの高齢女性に見られる遺伝子型と筋力

老化は、除脂肪体重、特に骨格筋の連続的減少、そして、付随して筋力の低下をもたらす。Rosenberg（1988）は、この過程をサルコペニアと呼び、健康・体力の望ましくない影響を高齢者にもたらすと述べている。しかし、高齢になっても、レジスタンス・トレーニングによって筋量と筋力が増加するという効果は広く知られている。

このようなエクササイズがもたらす一般的な適応、特に骨格筋のレジスタンス・トレーニングへの適応は、遺伝的な要因によって決定されているといわれている。しかし、実際のところ、筋肉に関する特定の遺伝子や遺伝子型と表現型との関連については、すべて明らかにされていない

表 1-3 遺伝子型と膝伸展ピークトルク (Limaら, 2011)

遺伝子					
ACE			ACTN3		
遺伝子型	割合	PT	遺伝子型	割合	PT
DD	30.1%	95.4Nm	RR	33.3%	94.7Nm
ID	47.5%	94.6Nm	RX	50.8%	96.6Nm
II	22.4%	93.3Nm	XX	15.9%	96.3Nm

PT : 膝伸展ピークトルク

いのが現状で、ほんのわずかな遺伝子について研究されそれらの結果は必ずしも一致してないのである。

そこで、Limaら(2011)は、ブラジルの高齢女性(平均年齢66.7歳)234名を対象として、ACEとACTN3の遺伝子型を調べ、筋力とレジスタンス・トレーニングの効果を検証した。

2つの遺伝子型の分布割合と、アイソキティックな膝伸展時のピークトルクとを表1-3にまとめた。遺伝子ACEのII型とACTN3のXX型を有する人の割合がもっとも少ないが、ピークトルクの値をみると、2種類の遺伝子の遺伝子型の違いによる差異は認められなかった。言い換えれば、トレーニング前の高齢女性の遺伝子型は、筋力に影響していないという結果であった(表1-3)。

そして、234名の対象者の中から79名が、6種類のレジスタンス・トレーニングに参加し、すべてのプログラムを消化した。トレーニング期間は24週間で、週3日の頻度で行われた。負荷は6種類の種目ごとに1RMの測定値に基づいて、最初の4週間は60%1RMで12回反復、次の4週間は70%1RMで10回反復、最後の16週間は80%1RMで8

表 1-4 遺伝子型のレジスタンス・トレーニング効果の比較 (Limaら, 2011)

ACE遺伝子型	DD	ID	II
人数	22名	35名	22名
トレーニング前のPT	92.6Nm	87.0Nm	94.6Nm
トレーニング後のPT	106.7Nm	99.2Nm	107.1Nm

PT：膝伸展ピークトルク

回反復した。

その結果、トレーニング前のピークトルクには、遺伝子型の違いによる差異は見られなかった。また、24週間のレジスタンス・トレーニングによってピークトルクは有意に増加した。しかし、その増加の程度には、遺伝子型間で相違は認められなかった(表 1-4)。

以上のような結果から、Limaら(2011)は、遺伝子ACEとACTN3は筋力や筋力のトレーニング効果に重要な役割を果たしているとはいえないとしている。もちろん、対象者の人数が少ないこと、ブラジル人には混血が多いこと、年齢が高いこと、女性に限ってのことなどから、最終的な結論は下せないとしている。

5. 運動能力と遺伝子型

(1) ギリシャの少年の短距離走成績と遺伝子型

Moranら(2007)は、507名のギリシャの子ども(男子)の遺伝子型を調べ分類して、40mスプリント走時間を比較した。その結果、平

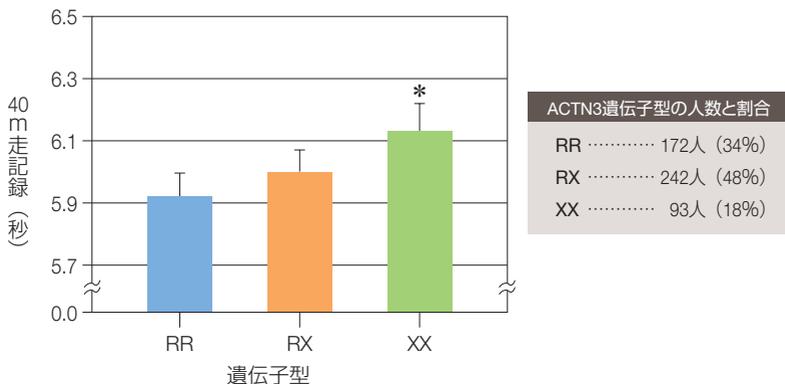


図 1-2 ギリシャの男子に見られた遺伝子 (ACTN3) 型と 40m 走時間
(Moranら, 2007 の図一部改変)

均してみると XX 型の子どもの走時間は、RR 型や RX 型の子どもに比べ明らかに長かった (成績が悪かった) ことが示された (図 1-2)。このように、遺伝子型の違いが身体運動の成績に影響することが報告された。

(2) ジャマイカ人とアメリカ黒人の短距離走種目選手の遺伝子型

2008 年の北京オリンピックの 100m 走、200m 走種目の男女で、それまでのオリンピックでは見られない偏った成績が残った。それは、スプリント男女 2 種目の計 12 個のメダルのうち、7 個をジャマイカの選手が獲得、残り 5 個のうち 4 個のメダルをアメリカの黒人選手が獲得するという結果であった。

そこで、Scott ら (2010) は、ジャマイカの短距離、投てき、跳躍選手 (男女 116 名) とアメリカの黒人短距離、投てき、跳躍選手 (男女 114 名) と、対照となるふつうのジャマイカ人 (男女 311 名)、アメリカの黒人 (男

表 1-5 ACTN3 遺伝子型の人数と割合 (Scottら, 2010)

対象者		RR	RX	XX
ジャマイカ人	ふつうの人	232 (75%)	73 (23%)	6 (2%)
	エリート選手	86 (75%)	25 (22%)	3 (2%)
アメリカの黒人	ふつうの人	126 (66%)	57 (30%)	7 (4%)
	エリート選手	79 (70%)	32 (32%)	2 (2%)

PT：膝伸展ピークトルク

女 191 名) について、ACTN3 の遺伝子型を調べ、比較した (表 1-5)。

このように、ジャマイカのエリート選手も、アメリカの黒人エリート選手も、RR 型が 75%、70% と多く、対照的に XX 型は 2% と極端に少ない。すなわち、スプリント/パワー系の運動パフォーマンスに対して劣性であるとみなされている XX 型が少なく、優性である RR 型と RX 型が多かったという。

対照としたふつうのジャマイカ人もアメリカの黒人も同じような割合を示しているし、わずかではあるが XX 型であってもエリート選手になっている人がいる。このことから Scott らは、短距離走で好成績をおさめる上で、ACTN3 遺伝子は決定的な要因ではないと結論づけている。

さらに、この研究では、遺伝子 (ACE) についても同時に調べているが、これについても、遺伝子型の違いが決定的な要因ではないとしている。

このような結論が出された背景として、筆者は、次のように考えている。一般に遺伝される形質は、質的形質と量的形質とがある。質的形質は遺伝子の表現型がはっきり (一対一で) 現れるが、量的形質はいくつかの遺伝子がかかわっていて、しかも環境も影響する。だから、短距離

走で優秀な成績をおさめる形質は、1個や2個の遺伝子ではなくて複数の遺伝子が、しかも、トレーニングを実践できるかどうかといった環境が影響しているので、現在のところ遺伝子型という視点からはっきりとした結論がだせないのである。

(3) 日本人陸上競技選手の遺伝子型

Mikami ら (2014) は、日本の陸上競技選手とふつうの人を対象として複数の研究室が実施した ACTN3 遺伝子型の分析結果をまとめて報告した。陸上競技選手は男女含めて、スプリント/パワー系種目の選手 134 名と持久性種目の選手 165 名であった。対照としたふつうの人は、男女合計 649 名であった。

スプリント/パワー系の選手のうち ACTN3 遺伝子型 RR と RX を加えた人数は 134 名中 111 名 (82.8%) であり、ふつうの人の人数は 649 名中 478 名 (73.7%) に比べ優位に多かった。ところが、持久性種目の選手では 165 名中 126 名 (76.4%) とふつうの人と有意な差は見られなかった。

また、スプリンター種目の男子選手について 100m 走の自己最高記録を比べてみると、RR + RX 型 (平均 10.42 秒) に対して XX 型 (平均 10.64 秒) は有意に悪かったという (図 1-3 左)。他方、400m 走の自己最高記録では、前者 47.02 秒と後者 47.56 秒と有意な差は見られなかった (図 1-3 右)。結論として、ACTN3 遺伝子型は、短距離走種目の成績に影響を及ぼすとしている。

しかし、先に紹介したジャマイカ人やアメリカ黒人スプリンターに

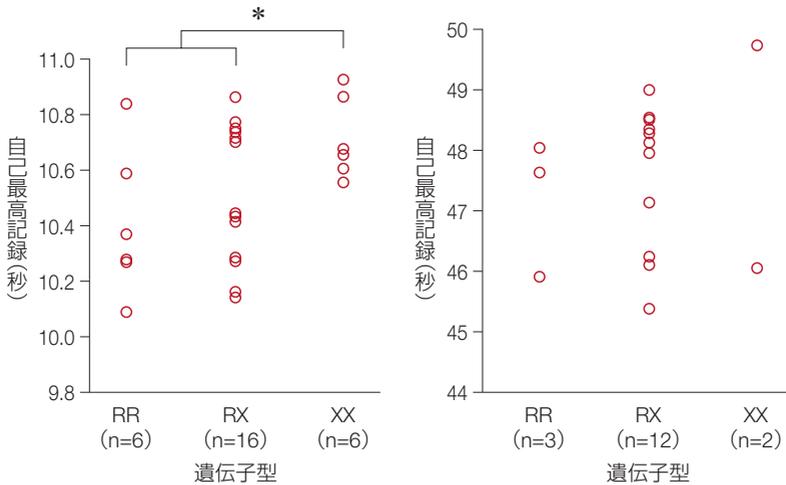


図 1-3 100 m走記録（左）と 400 m走記録（右）と ACTN3 遺伝子型別の比較
(Mikami ら, 2014 の図一部改変)

ついでの結果と同じように、ACTN3 の遺伝子型だけがパフォーマンスを規定するものではないといえる。また、日本のふつうの人 649 名の ACTN3 の遺伝子型の分布が、RR 型 20.3%、XX 型 26.3% という値は、すでに報告された日本の高齢女性の値 (Zenpo ら、2010) とほぼ同じで、他の人種、民族の平均値と比べ、RR 型は少なく、XX 型が多い傾向にあることがわかる。

6. 遺伝子型に人種、民族間の違いがあるのか？

ここで紹介した遺伝子型の割合には、ギリシャ人、ジャマイカ人、ア

表 1-6 人種、民族別の ACTN3 の遺伝子型

	RR型	RX型	XX型
ジャマイカ人	75%	23%	2%
アメリカの黒人	66%	30%	4%
ブラジルの高齢女性	33%	51%	16%
ギリシャの少年	34%	48%	18%
スペインの超高齢者	32%	46%	22%
台湾の女性	31%	46%	23%
日本の高齢女性	17%	58%	25%
日本の男性	22.3%	53.3%	24.5%
日本の女性	19.6%	53.3%	27.1%

アメリカの黒人、ブラジル人、スペイン人、台湾人、日本人の間で、統計的にははっきり断定できないが、少しずつ違いが見られた（表 1-6）。

ところで、筋線維にはタイプ I とタイプ II があり、双生児を対象とした測定結果（図 1-4）からその組み合わせ（筋線維組成）は遺伝的に決められていると推測されている（Komi ら、1977）。また、別に筋線維組成は、正規分布する（図 1-5、次頁）と報告されている（Saltin ら、1977）。

前に、量的形質は複数の遺伝子がかかわると、説明した。そして、“多因子遺伝モデル”（戸田、2005）によれば、たくさんの遺伝子型がかかわる形質、たとえば、運動能力は正規分布する。言い換えれば、優れた、あるいは、劣った運動能力を有する人の割合はわずかで、ほとんどの人は 50% ぐらいとなる。

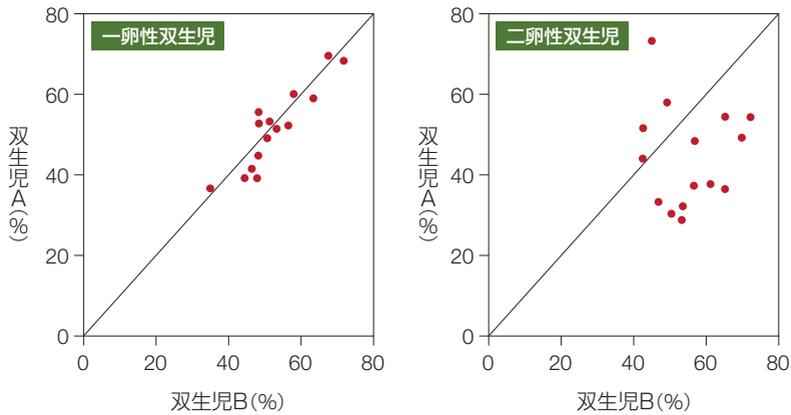


図 1-4 双生児に見られる筋線維組成の違い (Komi ら, 1977 の図一部改変)

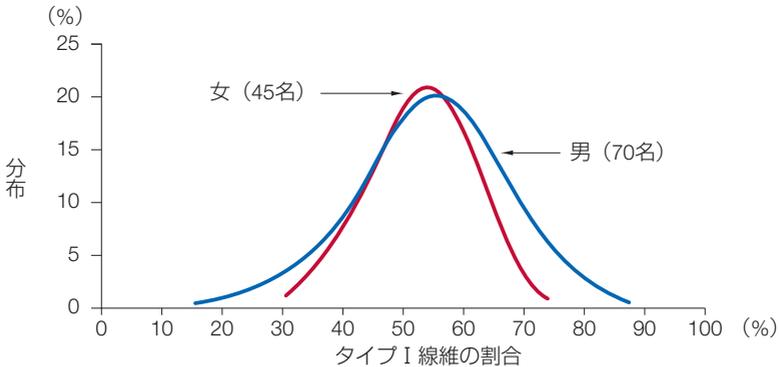


図 1-5 筋線維タイプの個人差 (Saltin ら, 1977 の図一部改変)

このことに関して、ラットの持久性能力を研究した結果を見ると、最初対象となったラットの持久走距離は正規分布する (Britton と Koch、2001)。そして、持久性に優れたラット雄雌 2 匹ずつと、劣った雄雌 2 匹ずつとをそれぞれ交配させて (選択交配)、それぞれの子ども (2 代目)

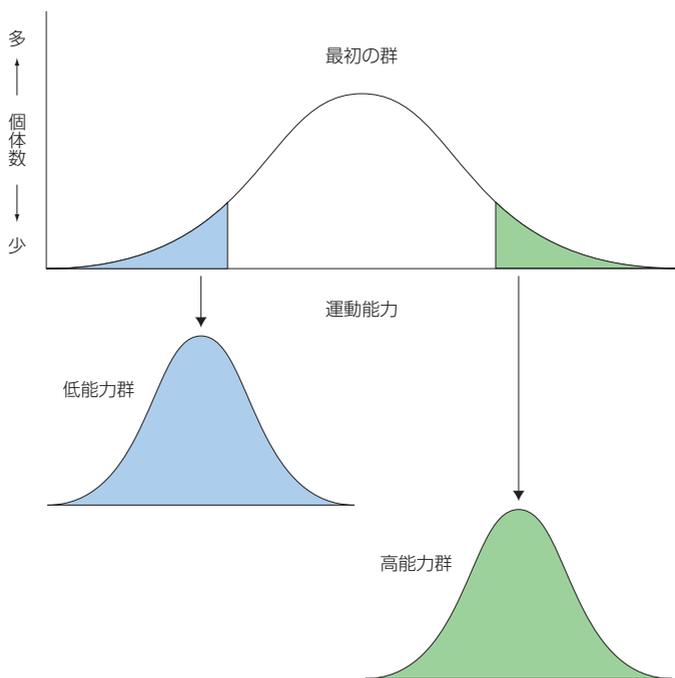


図 1-6 選択交配法によるラットの走行能力 (Britton と Koch, 2001 の図一部改変)

の持久性をみると、やはり正規分布することがわかった (図 1-6)。その後、同じような選択交配を 3 回続けていくと、4 代目のラットの持久能力の平均値では、70%近い差が見られるようになった (図 1-7)。

この実験結果から、優性あるいは劣性の遺伝子を持つ親を選択し交配させていけば、優性なあるいは劣性な遺伝子型を持つ子孫が誕生することが期待される。人間の場合、人為的な選択交配はできない。そして、「遺伝子型は連続性を持たない。これに反して、遺伝子そのものは自己増殖作用を通して子へ伝えられるので、集団の中における各遺伝子の割合は

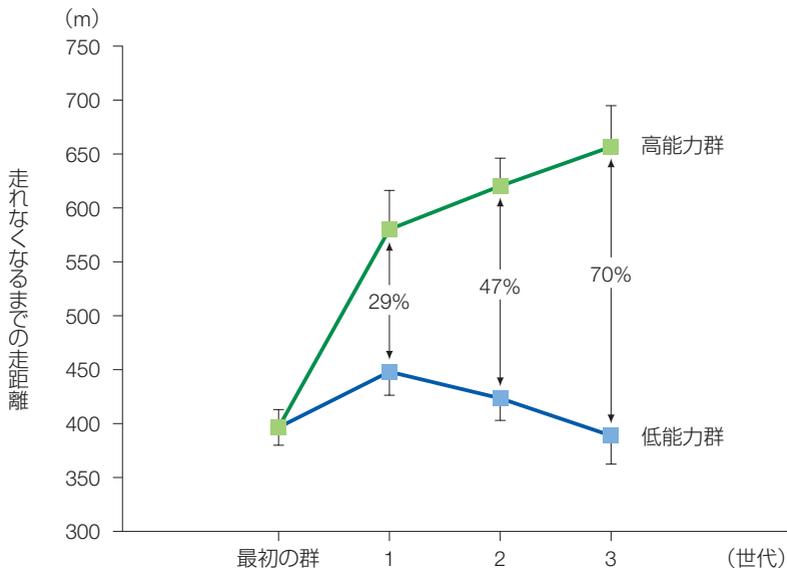


図 1-7 選択交配3世代目の走能力の比較 (Britton と Koch, 2001 の図一部改変)

時と共に比較的ゆるやかにしか変化しない」といわれる(木村、1975)が、人種や民族の長い歴史の過程で、生活環境の違いが結果的に選択交配をもたらし、遺伝子型の分布に偏りが生じたとする推測は可能であろう。

昔からいわれてきた「農耕民族である日本人は、狩猟民族に比べれば、すばやい行動能力では劣る」という可能性が浮かび上がってくる。というのも、ジャマイカ人やアメリカの黒人に見られる ACTN3 の遺伝子の RR 型が 70 ~ 75% であるのに対して、日本人の 17 ~ 22% という大きな違いがあったという測定結果は、そのことを物語っているように思えるからである。

100m 走で 10 秒を切った選手は黒人で 100 名を超えているというの

に、日本人は2013年現在切れていないでいる。これは、優れたスプリント走選手を生み出す遺伝子型を有する、あるいは、タイプII線維をたくさん有する人口の割合が、日本人の場合は少ない、言い換えれば、母集団が少ないため、誕生するのが難しいのではないかと推定される。

7. 今後の課題

遺伝子型についてこれまで紹介した文献は、数人の専門家が査読し一定の水準以上であると評価されたものであり、得られた結果は信用できる。しかしながら、依然としてはっきりしないのである。

Hall (2010) は、「ヒトゲノム解読が終われば医療の革命が起きると言われた。だが、今のところ医療に直結する成果はほとんどない。何か間違っていたのだろうか?」と書いている。

生命に直結する医療の分野でさえ、今のところ遺伝子研究の成果は応用され得ないでいる。だから、生命に直接かかわらないスポーツや日常生活での身体活動の分野で、遺伝子研究の役立つ道が開かれていないのは当然かもしれない。しかし、速くしかも安く遺伝子を解読できる新しい技術が開発されていけば、現在よりもたくさんの研究成果が生まれ、解決への道が開かれると期待できるだろう。

その過程では、「遺伝子を調べれば〇〇〇がわかる」といった結論を安易に下さずに、発表された研究成果を読み取って、「遺伝子」が競技力や運動能力とどのようなかわっているのかの理解を深めていくべきで

はないか、と思う。

他方、身体運動のパフォーマンスと健康・体力とにかかわる最新の遺伝子マップが、アメリカスポーツ医学会によってまとめられている。その中で Bray ら（2009）は、現在のところ報告された研究でのサンプル数は少なく、はっきりとしたエビデンスは見当たらないとしている。また、他の多くの遺伝子については、身体運動や健康にかかわっているかどうかの研究がなされていないと指摘している。

他方、運動習慣が心臓病、2型糖尿病、肥満症などの慢性病の危険を軽減するということは明らかにされているが、活動的な生活習慣がもたらす効果と特定な遺伝子との相互作用については、あまり研究されていないと述べている。同様に、運動不足の生活習慣がもたらす危険を乗り越える、あるいは、防ぐのにかかわる遺伝子についてもわかっていないという。今後は、世界の多くの研究者が成果を交換し合い、協力して研究を遂行していくことが重要であると結んでいる。

日本においても遺伝子研究が盛んに行われているが、身体運動、健康・体力に関係する遺伝子がどんなものか、専門家によって運動指導者にわかりやすく解説されることが期待される。