

# Chapter 1

## 第1章

---

### 生理人類学を学ぶに あたって



# 1.0 生理人類学を学ぶにあたって

この本の目的は、ヒトを理解することであり、そこから生活環境にあるさまざまな問題を見いだしたり、その問題の解決にせまるヒントを得る素養を身に付けることである。本章では、生理人類学を学ぶにあたって、まず生理人類学という学問の歴史を紹介するとともに、この学問の基本的考え方や意義について理解する。

人を理解するには、医学、生物学、スポーツ科学、生活科学などの諸分野があるが、進化・適応の視点から生活する生身の人間を理解する学問は人類学をおいて他に存在しない。ヒトの理解にあたって進化・適応の視点を持つ利点は、ヒトの人たる所以である生物学的オリジナリティを理解できることであり、そのオリジナリティと環境との関係からさまざまな問題点の検出やその対策へのアプローチが容易になることである。

そのために進化・適応について、それらの基本的な考え方を理解する。進化については、そのプロセスや結果的に生じるさまざまな形質との関わりで遺伝学の基本を学ぶ。また適応については、長期の世代交代の中で生じる集団適応と、一世代の中で遭遇するさまざまな環境に対して生じる個体適応にわけて、それらの基本を学ぶ。第1章は、その後の章を理解するための導入的位置づけである。

最後に、この本では、“人”や“身体”的表記について使い分けている。基本的に生物学的な存在としては“ヒト”，“カラダ”とし、文物としての存在は“ひと”，“からだ”と表記している。また“人”，“人間”，“体”，“身体”については、生物と文物を分けきれない場合の表現である。

# 1.1 生理人類学とは

## □キーワード

日本人類学会、日本生理人類学会、時実利彦、佐藤方彦、バイオトロニクス、ヒトの適応能力、予測適応

### 1.1.1 生理人類学とは

私たちは人間についてどれだけのことを知っているだろうか。例えば小学校、中学校、高等学校ではいろいろなことを学んできたが、人間については人文科学、社会科学、自然科学の分野を通して生活の諸活動や歴史、文化、またカラダの構造や働きなどを教えてくれた。しかし、ヒトの生物学的な特徴や進化の歴史、また一般生活における人の行動や生物学的な諸反応を教えてくれるのは、やっと大学に入ってからである。しかも数多くある科目の中でも、ごく少数の「人類学」やその関連科目に遭遇できたもののみである。近頃、熱中症になる人が増えたのはなぜか。日中の眠気に悩まされたり、逆に夜は眠れなくなるのはなぜか。最近の子どもは親の世代より運動能力が落ちてきたのはどうしてか。あるいは、サマータイムの導入は人々にどんな影響を及ぼすのか、など重要な問題でありながら課題視せずに流してしまっていないだろうか。恐らく、人類学や生理人類学を学んでおけば、このような問題を意識化して、然るべき対応を考える人々が増えるはずである。

確かに大学に入ってからは、他にもヒトの生物学的な側面を教えてくれる学問分野はある。医学、生物学、スポーツ科学、生活科学などが該当する。しかし、例えば医学の狙いは治療・予防であり、生物学は生命の根源という大テーマに向かう。またスポーツ科学は各種競技の記録への挑戦である。そういう意味では、生活科学は日常の衣食住や家族関係などについて生身の生活や環境との関わりを教えてくれるが、残念ながら人類学的要素は少ない。このように、ヒトや人を対象とする学問でもその分野によって追求するテーマが異なるた

め、人類そのものを科学する人類学の存在は大きい。

さて、日本の人類学はいつ頃から始まったのか。その歴史は古い。1884年、東京帝国大学の若干21歳の学生だった坪井正五郎（つぼい しょうごろう：1836-1913）が、わずか10名ほどを発起人として立ち上げたのが「じんるいがくのとも」であった。これが現在の日本人類学会の母体組織となる。世界で最も古いパリ人類学会から遅れることわずか25年のことであった。そもそも日本には『常陸国風土記（713年）』という古い書物に既に貝塚の記載があるなど、人類学が芽生える土壤は古くからあったといえる。

学会の発足時、坪井は「ゆくゆくは古今内外を問わずすべて人類に関する自然の理を明らかにする考え方から広き名をもって漸進を期する」として「人類学会」と名付けた。当時、人類学という言葉自体が存在してなかつたことを考えれば、感慨深い名称である。現在では、**日本人類学会（The Anthropological Society of Nippon）**は130年を超える歴史を有し、ここから考古学会、民族学会、民俗学会、文化人類学会、靈長類学会、生理人類学会と多くの分野が独り立ちした。

**日本生理人類学会（Japan Society of Physiological Anthropology）**の組織的母体のスタートは1979年になるが、「生理人類学」という分野が始まったのは1939年、東京帝国大学理学部の人類学科を主宰した長谷部言人（はせべ ことんど：1882-1969）のときである。そして生理人理学の授業を最初に担当したのが、当時同大学付属医学専門部の時実利彦（ときざね としひこ：1909-1973）であった。後年、人類学科の学生だった佐藤方彦（さとう まさひこ：1932-）は時実に師事し、以来日本の生理人類学研究を先導していくことになる。

生理人類学という学問は、現代に生きる私たち自身、あるいは近未来に生きる私たちの子孫のための人類学である。700万年におよぶ人類史の中で、長い長い狩猟採集時代から農耕社会へ移行したのは、その地質学的時間軸からすると、ついこの間のことである。特に直近の産業革命以降は科学技術を大いに発達させ、高度な文明を創り出し、人類は生物史上例を見ない繁栄を誇ってい

る。しかし、生物は環境に適応できたものだけが生き残ってきたという事実がある。人類が生物学的に適応したのは、人類史の大半を占める狩猟採集時代の環境と考えられる。まさに一瞬にして現れた現代の科学技術文明下の環境に適応できているかどうか、その具体的な根拠は乏しい。従って、現代の繁栄を人類学の立場から維持していくには、ヒトの生物学的な特性を真に解明、理解し、科学技術をこれと矛盾しない方向へ発展させる必要がある。坪井の「ゆくゆくは人類に関する自然の理を明らかにする」という考えは、まさに生理人類学の基本路線に繋がる。生理人類学に関わる研究者の専門領域は、公衆衛生学、脳科学、認知科学、生物学、遺伝学、栄養学、建築学、生活科学、環境科学、スポーツ科学、労働科学など全て挙げきれないほどの多岐に渡っている。人類を科学するには、あらゆる分野の専門家が総がかりで取り組まねばならない。さらに生理人類学は、ヒトの生物学的特徴を明らかにする基礎研究のみでなく、ヒトが人として生活する環境との関係性にもおよび、そこから具体的な環境改善に貢献するための応用研究も必要としている。

### 1.1.2 生理人類学研究の基礎と応用

生理人類学の基礎的研究は1950年代に始まる。時実に大きな影響を受けた生理人類学の研究者は、この時代から活動が活発になる。特にここでは筋電図 (electromyography : EMG) の登場により、歩行や作業時の種々の動作に關わる骨格筋の同定やその機能的差異を検討し、生活のさまざまな場面における筋疲労の評価研究へと進む。そのような成果は全身的身体作業能力 (physical work capacity) の研究へと繋がっていった。1970年代から80年代にかけて特筆すべきは、人工気候室 (biotron) の導入である。これは部屋の温度、湿度、気流、照度、気圧などの物理的環境要因を個々に調節して任意の人工環境を造成するもので、人工環境調節装置とも呼ばれる。その目的は、造成された種々の人工環境にヒトを曝露し、その間の行動や生理反応を測定、観察することで、環境への生物学的な適応能を研究することである。このような研究手法はバイオトロニクス (biotronics) と呼ばれた。これによって、例えば熱帯地方、寒帯地

方、あるいは海底の高圧下や高地の低圧・低酸素下を想定した人工環境を造成し、そこでの体温調節反応や酸素運搬機能の諸能力を検討する。そしてさまざまな物理的環境におけるヒトの適応能力（**human adaptability**）に関する研究が展開された。

以上のように、活動筋の同定、筋疲労の評価、作業能力と形態との関係、バイオトロニクスによる温熱・気圧・光などの生体への影響へと個々の研究の蓄積は常に次のステップの基礎をなしてきた。1980年代以降のもうひとつの特徴は、従来の暑熱や最大作業のような厳しいストレス下の研究から精神作業のようなそれまでとは質の異なるストレスを評価する研究に代わっていったことである。労働環境の多くが屋外からオフィスのような屋内へ移行し、空調完備の心地良い部屋でコンピュータを用いた創造性を求める作業に対応する必要があった。生活全般において環境が快適に便利になったことが反映されている。この時代から社会では“快適性”や“感性”などのキーワードが注目され、これらの科学的な解釈や客観的な評価が追求されることになる。いずれにしても、これまでの一連の研究は、現代生活の各場面におけるヒトの適応能の研究に集約された。

このような状況の中で、これまでに蓄積された研究資料を生活の現場に応用し、技術文明に支えられた現代の人工環境を適応能の観点から問い直す気運が高まってきた。ここにきて生理人類学的研究は、人間らしい真に健康で快適な生活環境の創成を目指す新しい段階に差し掛かった。一方で社会では、急速な技術進展に伴う生活環境の変化が、果たして人間にとって良いものかどうかへの関心が高まってきた。従って企業もそれまでのように単に製品を造り販売するだけでなく、人間の健康や使いやすさなどへの配慮を客観的な資料で示す必要性に迫られてきた。すなわち、生理人類学者にとっても社会にとっても、人間にとってどのような生活環境が好ましいのか、早急に取り組むべき課題があるという共通の認識がでてきたのである。このようにして、1990年代以降は社会的ニーズに対応する生理人類学の研究態度がでてくる。従って、これまでのような実験室実験や野外調査だけではなく、実際の生活環境をつくりだしてい

る企業その他の団体、機関との研究交流が必要になった。その結果、企業や諸機関との多くの共同研究が始まり、実験的に得られた人間側の資料を反映した製品や空間の開発が進むことになった。

### 1.1.3 生理人類学のコンセプト

改めて生理人類学とは何か考えてみよう。生理人類学とは、生身の人間を対象にヒトの生物学的な特徴を時間軸と空間軸から見い出し、その特徴に則って生活のあり方（ソフト）や環境（ハード）を見直すことで、現代と近未来の人類福祉に貢献する科学といえる。それでは、時間軸と空間軸からどのようにヒトの特徴を見い出し、そこから課題を見つけるのであろうか。例を挙げて概観する。

#### (1) 時間軸からのアプローチ

ここでいう時間軸とは、700万年というヒトの適応史である。この時間軸の99%以上は狩猟採集の時代であったことに注目する。例えばこの間、人が得る毎日の食糧の保証はなかった。そういう環境で生き残るには、いかに空腹に耐え、いかに効率的に栄養素を補給できるかが重要であった。そこでカラダに必須の栄養素に対しては強い嗜好性が働くようになる。私たちのカラダに必要な糖、塩分、タンパク質には、それぞれ甘味、塩味、旨味という味覚との対応ができる、強い嗜好性のもとで積極的にこれらの栄養素を取り込んでいる。高カロリーの脂肪については、フレーバーとしての嗅覚も併せて働き、さらに取り込みを促している。一方酸味、苦味により腐敗や毒性のものを避け、また空腹を多く経験することで、余分な栄養を脂肪として高効率に蓄える仕組みも身につけた。ところが、現代は飽食の時代である。これが時間軸上瞬時にあらわれたので、食糧不足に備えた味の嗜好性はそのまま残ることになる。従って、甘いもの塩辛いものをどんどん取り込むこととなり、やがては糖尿病や高血圧としてカラダは悲鳴を上げる。こういったことがヒトの適応のための生物学的特徴を踏まえた現代の課題と見なされる。私たちのカラダは空腹には耐えても満

腹に耐える適応はない。

これに関連して近年、特に日本人の女性では妊娠中のダイエットが流行っている。気になるお腹の出っぱりを抑え、小さな赤ちゃんで出産を楽にしようとでもいうのだろうか。お腹の赤ちゃんは、お母さんのへその緒を通してのみ外界の栄養事情を予測できる。先の適応上の経緯を考えると、妊娠中にダイエットをすれば赤ちゃんは外界の食糧不足に備える。へその緒から得られる限られた栄養でも生きていけるように血糖値を維持しようとする仕組みができてくる。このように胎児が外界を予測して、事前に適応上の備えをすることを**予測適応 (predictive adaptation)** という。赤ちゃんが生まれ出た後、そこが飽食の環境であったなら、その赤ちゃんの成人後には糖尿病や循環系障害などのさまざまな医学上の問題が生じやすいことが分かってきた。これもヒトの適応的特徴からみた現代の課題である。

ヒトの生物学的特徴は、直立二足という独自の姿勢に適応したことによって多くが形成された。そのおかげで長距離追跡が可能となり狩猟の成功率を高めたが、現代では1日の多くを座る姿勢で暮らしている。このため腰痛が非常に多くなった。直立を可能とするために生じた脊柱のS字状のカーブのうち、腰椎の前湾部分が椅子によりフラットになることで腰部椎間板に持続的な負荷がかかることが原因のひとつとされている。座ることは楽である、とは必ずしもいえない。

このように時間軸からみたとき、生き残るために獲得したヒトの適応上の資質は現代では逆に作用することが多い。ここに現代の課題として注目すべきことが多々見い出されることになる。

## (2) 空間軸からのアプローチ

空間軸とは地球上におけるさまざまな物理的、文化的、また生態学的条件を持つ地域（空間）の広がりであり、経度、緯度、高度の3次元の軸を持つ。それぞれの地域住人は、その地の気候・風土や食や振舞いなどの生活文化、また病気などさまざまな環境条件に適応している。

生態学的に、寒い地方に棲む動物は暑い地方に棲む同種あるいは近縁の動物に比べ大きく、首や尾といった体幹からの出っぱりが小さい。前者はベルグマンの、後者はアレンの生態学的法則と呼ばれる。マレーグマよりホッキョクグマが大きいのはベルグマンの法則 (Bergmann's rule)、アリゾナのうさぎより極地のうさぎの耳が小さいのはアレンの法則 (Allen's rule) である。体が大きいほど、出っぱりが小さいほど体の単位体積当たりの表面積が小さくなり、寒い環境では体温を保持しやすくなる。人間にも概してこの法則は当てはまる。一般に、北欧の人は地中海地方の人より大きかったり、アフリカの人より日本人の手足が短いのはその例といわれる。また生理的にも、体温調節能力は熱帯地方の人は暑さに優れ、寒帯地方の人は寒さに優れている。

生物には誕生地の環境にいち早く適応して生き残りのチャンスを広げる仕組みが備わっている。先の予測適応もそうである。例えば、赤ちゃんは数百万の汗腺を持って生まれ出るが、このうち何割が実際に汗を分泌できる能動汗腺になるかは、生後の気候条件に依存する。例えば、フィリピン人は日本人より多くの能動汗腺数を持つ。この差は生後 2、3 年のうちに形成される。従って日本人がフィリピンに行って子どもを産み育てると現地の人と同じ水準の能動汗腺数を持つが、成人後の日本人がフィリピンに何年滞在しようとも現地の人との差は縮まらない。しかし、フィリピン人の赤ちゃんが現地で快適な空調のもとで 2、3 年育つと、恐らく日本人と同じ水準になるかもしれない。ここにも現代文明の課題が潜む。

さらに文明は、人をいとも簡単に飛行機で移動させる。アフリカの人が北欧に住めば、寒さに対しては体温保持に不利になり、また少ない日照量に対しては骨の形成に不利になる。骨形成に必要なビタミン D の合成は日光の紫外線を必要とするが、表皮の多量のメラニン色素が邪魔をすることになる。概して、東西に移動すれば時差ボケの問題が起き、南北に移動すれば温度差による体温調節や日照量の問題が起きやすくなる。今後、宇宙への移動が一般化されると、重力の影響や明暗周期の違いによるサーカディアンリズム（概日リズム）の問題が深刻となるだろう。

ヒトのカタチや機能の特徴には生き残るための適応上の必然性があり、それらは時間軸、空間軸の両面から形成されている。これらの特徴にそぐわない行動や環境があれば、それらを見直す必要がある。すなわち、どこが“そぐわない”のかを見い出すのが課題発見であり、それらをどのように“見直す”かが課題解決といえる。これが本書のコンセプトである。

## 引用・参考文献

- 1) 寺田和夫：日本の人類学，角川文庫，1981.
- 2) 安河内朗：日本生理人類学の動向－第一報：日本生理人類学会を振り返って，日本生理人類学会誌，16:59-60, 2011.
- 3) 安河内朗：日本生理人類学の動向－第二報：環境適応研究の今後の取り組みへの試案，日本生理人類学会誌，16:103-114, 2013.

---

## 1.2 遺伝と進化

---

### □キーワード

進化、遺伝、ゲノム、多型、負の自然選択、正の自然選択、遺伝的浮動

### 1.2.1 はじめに

ヒト (*Homo sapiens*) は、直立二足歩行、カラダの大きさに比して巨大な脳、複雑な言語の使用など、他の動物にはないユニークな特徴を数多く持っている。また、ヒト同士を比べてみても、皮膚や体毛の色、顔貌、体格など、さまざまな形質が大きな多様性を示す。ヒトの生物学的特徴やその多様性は、数百万年に渡る進化の過程で形成されてきたものであり、ヒトを理解するためには、まずその進化について学ぶ必要がある。“進化” (evolution) という語は、テレビやゲームなどさまざまなメディアに登場するが、学術的な定義とはかけ離れた文脈で使用されていることが多い。進化とは、生物の集団が持つ形質が

世代を経るごとに変化していく現象のことである。この“世代を経るごとの集団の変化”を担ってきたものこそ、私たちが持つゲノムである。従って、ヒトの進化の過程とその結果形成されてきた形質の多様性をより深く理解するには、遺伝学についての基礎知識が不可欠である。本項では、ヒトの種内における形質多様性に特に着目して、進化遺伝学の基礎について概説する。

### 1.2.2 ヒトのゲノムとその多様性

ヒトを含め、真核生物の遺伝情報は細胞の核内に存在する高分子核酸であるデオキシリボ核酸 (deoxyribonucleic acid : DNA) によって担われている。核内のDNAは、ヒストン (histone) と呼ばれる塩基性のタンパク質に巻き付いてクロマチン (chromatin) という複合体を形成している。遺伝情報の総体はゲノム (genome) と呼ばれており、ヒトゲノムはおよそ30億塩基対のDNAに相当する。この30億塩基対は、22本の常染色体 (autosome), 1本のX染色体 (X-chromosome), および1本のY染色体 (Y-chromosome) という24本の単位に分かれている。ヒトゲノム中にはおよそ2万個の遺伝子が存在すると見積もられているが、タンパク質情報をコードしている領域はゲノム全体の1～2%程度に過ぎない。残りの大部分は、インtron, 繰り返し配列, 転移因子, タンパク質はコードしていないが他の遺伝子の発現量を調節する機能のあるRNA遺伝子などで構成されている。

個人間で塩基配列の相違を示すゲノムの箇所を多型 (polymorphism あるいは variation) と呼ぶ。多型には、よく知られた一塩基多型 (single nucleotide polymorphism : SNP) の他、挿入・欠失多型、コピー数多型など、さまざまな塩基配列のタイプが存在する。世界各地のヒト集団から収集されたおよそ2,500人の全ゲノム塩基配列を解読した結果、ヒト集団中には少なくとも8千8百万箇所にのぼる多型が存在することが明らかになっている<sup>1)</sup>。それぞれの多型で確認できる塩基配列の要素をアレル (allele) と呼び、各個人が持つアレルの組み合わせを遺伝型 (genotype) と呼ぶ。例えば、図1.1にあるようなAとGのアレルを持つ常染色体上の一塩基多型では、ヒト個体はAA, AG,

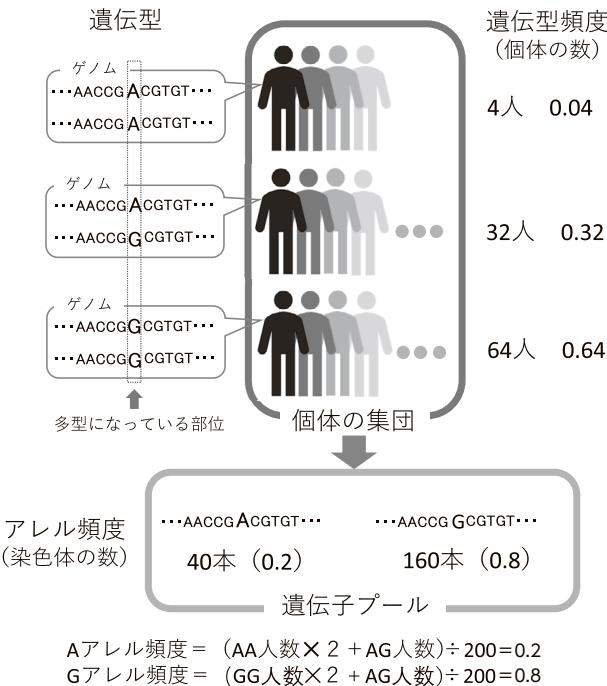


図1.1 ゲノム上の多型の遺伝型とアレル

GG の 3 つの遺伝型のいずれかを持つことになる。なお、2 つの相同染色体に同じアレルを持つ状態をホモ接合といい、それぞれに異なるアレルを持つ状態をヘテロ接合という。集団中における遺伝型およびアレルの存在比率は、多型によってまちまちである。各遺伝型の個体数から遺伝型頻度を計算することができ、遺伝型頻度の情報があればアレル頻度も計算することができる（図1.1）。先の一塩基多型を100人のヒトで調査して、AA, AG, および GG の各遺伝型の人数が 4 人, 32 人, および 64 人だったとする。遺伝型頻度は、調査した人数における各遺伝型の割合であり、それぞれ 0.04, 0.32, および 0.64 となる。この100人の集団中では、この多型部位を持つ染色体が200本存在することになる。ホモ接合の個体はそれぞれのアレルを 2 本有し、ヘテロ接合の個体は 1 本ずつを有するので、この200本の染色体での A アレルの数は  $4 \times 2 + 32 =$

40となる（図1.1）。また、2つのアレルがある多型では、図1.1のAアレルのように頻度の低い方のアレルを特にマイナーアレルと呼ぶ。マイナーアレル頻度がより低い多型ほど、稀な多型（rare variation）であり、0.5に近づくほどありふれた多型（common variation）ということになる。

### 1.2.3 ハーディー・ワインベルグの法則

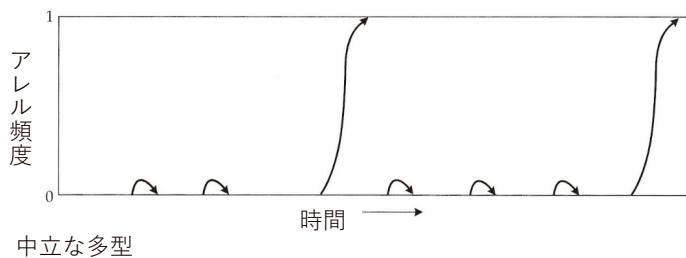
個体数が無限の生物の集団（実際には存在しないが）を考えてみる。この集団で、ある多型のAAとAGとGGの各遺伝型が1:8:16の割合で存在しているとすると、AアレルとGアレルの頻度は、Aが0.2、Gが0.8となる。この集団の全ての個体がランダムに交配して、やはり無限大の個体数がある次の世代を作ると、子世代でのアレル頻度は親世代のそれと同じになるはずである。ハーディー・ワインベルグの法則（Hardy-Weinberg's law）は、新たな突然変異が起きない、自然選択が起きない、集団のサイズが無限大で常に一定である、他の集団との交流がない、などの条件を満たした生物集団では、世代が変わってもアレル頻度が変化しない、という法則である。ハーディー・ワインベルグの法則に厳密に当てはまる集団では、遺伝子プールは世代が経過しても変化しないので、進化が起きないことになる。従って、この成立条件を乱す要因こそ、生物の遺伝子プールに変化を与え、進化の原動力となっているといえる。なお、ハーディー・ワインベルグの法則が成立している生物集団では、アレル頻度の積から遺伝型頻度を推定することができる。先のAとGのアレルの例では、AAが $0.2 \times 0.2$ 、AGが $2 \times 0.2 \times 0.8$ 、GGが $0.8 \times 0.8$ で与えられる（図1.1）。ヒトも厳密にはハーディー・ワインベルグの法則の成立条件を満たしてはいるが、アレル頻度から推定した遺伝型頻度の予測値は、実際のヒト集団での遺伝型頻度と良く合っていることが知られている。

### 1.2.4 突然変異・自然選択・遺伝的浮動

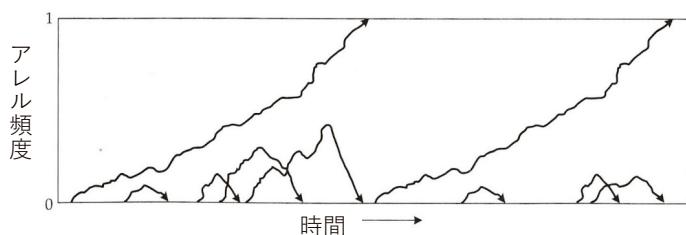
多型を集団中に供給しているのは、配偶子形成の際に起きるDNAの突然変異（mutation）<sup>\*1)</sup>である。アイスランド人のトリオ78組の全ゲノム配列を解読

した研究から、新生児はおよそ70個の新しい多型を持って生まれてくることが報告されている<sup>2)</sup>。これらの新しく生まれた多型は、最初は集団の中で1コピー（ただ1人がヘテロ接合になっている状態）しか存在しないが、世代が経過するにつれてその頻度が変化していく。新たに生まれたアレルが遺伝子の機能に大きな変化をもたらす場合、そのアレルを持つ個体は、そうでない個体よりも子孫を残す確率が低くなることがある。そのようなアレルは、**負の自然選択 (negative natural selection)** によって速やかに集団から失われる。一方、遺伝子の機能に大きな変化をもたらすアレルは、稀に個体の生存や繁殖にとって有利に働くことがある。その場合、このアレルを持つ個体はそうでない個体よりも多くの子孫を残すことができるので、そのアレルは世代を経るごとに速やかに集団中に広まっていくことになる。このような過程を**正の自然選択 (positive natural selection)** と呼ぶ。

自然選択を受けた多型



中立な多型

図1.2 自然選択を受けた多型と中立な多型の頻度変化<sup>11)</sup>

\* 1) mutation (変異) という語は、稀な多型（一般にマイナーアレル頻度が1%未満のもの）と同義で使用されることがある。

選択（positive natural selection）と呼ぶ。

正の自然選択は、有利なアレルを集団の中に蓄積してゆき、形質の変化を引き起こすので、まさに、“生物の集団が持つ形質が世代を経るごとに変化していく現象”の原動力そのもののように思える。しかし、突然変異によって新たに生まれてきた多型のほとんどは、遺伝型間で個体の生存や繁殖の成功率に大きな違いを示さないので、強い自然選択の対象とはならない。このような進化的に中立に近い多型では、配偶子を抽出する確率の機会的浮動によって、世代を経るごとにアレル頻度が変化していく。遺伝的浮動（genetic drift）として知られているこの現象は、ハーディー・ワインベルグの法則の成立条件である“集団のサイズが無限大で常に一定である”に実際の生物の集団が当てはまらないために起きる。中立な多型は、自然選択が作用する多型に比べてアレル頻度の変化が緩慢なので、集団中で固定（全ての個体がいずれかのホモ接合となる）されていないものが多くなる（図1.2）。木村資生（きむら もとお：1924-1994）が提唱した分化進化の中立説では、遺伝的浮動こそ生物の進化の主な原動力として考えられている。遺伝的浮動は個体数が少ない集団ほど強く働き、世代ごとのアレル頻度の変化幅を大きくする。一般に、ある集団がサイズの縮小を経験すると、遺伝的浮動の効果によってゲノム全体の多様性が低下することが分かっている。この現象はびん首効果（bottleneck effect）として知られており、特にアフリカ以外の大陸のヒト集団は、過去10～2万年前の間に強いびん首効果を経験したことが明らかになっている<sup>3)</sup>。さらに、サイズが小さい集団では、先に述べた負の自然選択が効果的に働く、多少有害な突然変異であっても取り除かれることなく蓄積する確率が増える。ヒトは類人猿に比べて、その進化の過程で集団サイズが小さい期間がより長かったことが示唆されている<sup>4)</sup>。脳の巨大化のようなヒトに特徴的な形質の出現には、正の自然選択だけではなく、小さな集団サイズとそれに伴う負の自然選択の緩和が大きな役割を果たしていると考えられている。

### 1.2.5 現代人の形質多様性と進化

DNAマイクロアレイ技術や次世代シークエンシング技術の急速な発達により、世界各地のヒト集団における多型のレパートリーとその頻度情報が包括的に調査できるようになった。その結果、ゲノム全域を走査して、中立進化から逸脱しているような多型が多く存在する領域を同定することができるようになった。これにより、現代人の間で認められる遺伝形質の多様性の一部は、過去に作用した正の自然選択によって生み出されたことが明らかになっている(図1.3)。この中でも、乳糖耐性は特に多くの研究から自然選択の関与が支持されている形質である。ヒトやウシなど多くの真獣類の乳汁中には、ラクトースという二糖が含まれている。ラクトースは小腸粘膜上皮細胞が発現するラクターゼという酵素の働きによって、グルコースとガラクトースへと分解され、体内へと吸収される。ラクターゼは乳児期には強く発現しているが、思春期以降は発現量が低下するので、成人が大量の生の牛乳を摂取すると、ラクトースが栄養として分解・吸収されることなく大腸へと到達する。大腸へ到達したラ

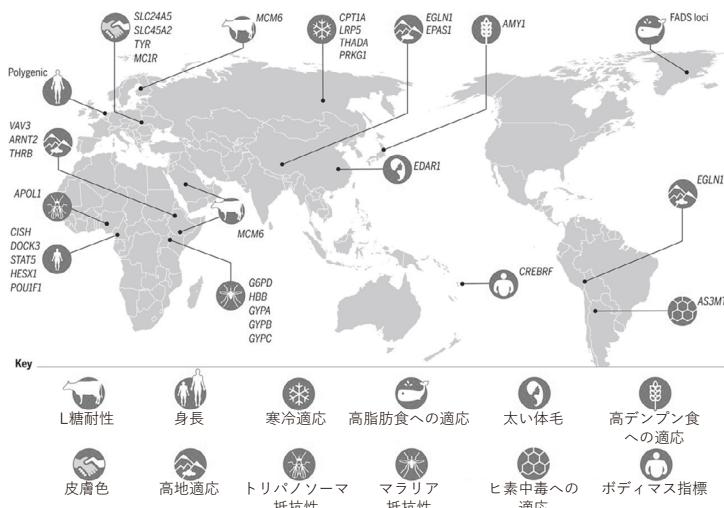


図1.3 自然選択で多様化したヒトの形質と遺伝子<sup>12)</sup>

クトースは、腸管内の浸透圧やpHなどに変化を与えることにより、下痢などの不快な症状を引き起こす。このような性質を乳糖不耐性（lactose intolerance）と呼ぶ。離乳後の個体が乳糖不耐性となるのは真獣類では一般的であり、母親が次の子どもの出産・育児にエネルギーを傾けるという意味で適応的な現象といえる。ところが、ヨーロッパ、中東、アフリカの一部の地域では、成人しても乳糖を分解できる体質である乳糖耐性（lactose tolerance）を持ち合わせたヒトの頻度が高い。乳糖耐性の頻度が高いヒト集団は、歴史的に牧畜を生業としてきた集団が多く、成人でも生乳を栄養源として利用できることが、適応上極めて重要であったと考えられる。乳糖不耐性と乳糖耐性は、ラクターゼ遺伝子（*LCT*）の上流域に存在するエンハンサーに生じた多型の遺伝型で決定されている。*LCT-13910C/T*として知られるこの多型は、Cアレルが祖先型で、Tアレルのヘテロ接合あるいはホモ接合の個体が乳糖耐性となる。Tアレルでは、この多型周辺の塩基配列にOct-1という転写因子タンパク質が結合しやすくなっている、これが成人でも*LCT*の転写を活発化している原因となっていると考えられている。Tアレルはヨーロッパを中心とした地域に限局して存在しており、東アジアのような乳糖耐性の頻度が極めて低い地域では認められない。コンピュータシミュレーションから、Tアレルはおよそ7500年前の中央ヨーロッパで出現し、強力な正の自然選択によって牧畜を生業としてきた集団の間に広がった可能性が報告されている<sup>5)</sup>。また、興味深いことに、東アフリカの遊牧集団における乳糖耐性は、-13910C/Tのごく近傍に存在する別の多型が原因となっている。この多型は、東アフリカの集団でのみ高頻度で認められ、ヨーロッパ人では確認されていない。これは、ヨーロッパと東アフリカで独立して乳糖耐性が出現したことを意味しており、ヒトにおける収束進化（convergent evolution）の一例だと考えられている<sup>6)</sup>。

正の自然選択は、新たに生じた多型が個体の生存や繁殖に有利に働く場合に作用する。ただし、そのような条件がいつまでも続くとは限らない。祖先集団では有利だったアレルが、現代的な生活ではかえって個体の健康に悪影響を与えることもある。過去と現在の環境のミスマッチによって深刻化していると考え

られている現代人の健康問題のひとつが肥満である。現代人の易肥満性を進化的に説明した有名な仮説が、James V. Neel (1915–2000) が提唱した儉約遺伝子仮説 (thrifty gene hypothesis) である。ヒトは永らく食料供給が不安定な狩猟・採集生活を送っており、食糧が入手できた機会にできるだけたくさん食べて、エネルギーを脂肪として蓄積できる体質に寄与する儉約的な遺伝型を持つ個体が生存上有利であったと考えることができる。このような儉約的な遺伝型が現代人に受け継がれ、食糧が容易に入手でき運動の必要が乏しい現代社会での肥満の原因となっているとする仮説である。儉約遺伝子仮説の妥当性については、これを批判する意見も多いが、最近、有望な儉約遺伝子が報告された。CREBRF という遺伝子のタンパク質コード領域に存在するある多型には、サモア人をはじめとしたポリネシアの人々でのみ高頻度で認められるアレルが存在している。このアレルを保有しているサモア人は、そうでないサモア人に比べて大きいボディマス指標を持つ傾向があり、さらにこのアレルがサモア人の祖先系列で正の自然選択を受けた証拠も見つかっている。サモアをはじめとしたポリネシア地域の人々はオーストロネシア語族集団に属しており、およそ4千年前の台湾周辺にその起源を持つ。彼らは高度な航海術を駆使して紀元前900年頃にはポリネシアに進出している。現在のポリネシア人は世界中で最も肥満者の多い集団であるが、これは、彼らの生活習慣が欧米化したことに加えて、航海による長距離拡散の過程で、儉約的な遺伝型を獲得したことが原因である可能性が指摘されていた。CREBRF 遺伝子の発見は儉約遺伝子が存在することの証拠のひとつといえよう<sup>7)</sup>。

### 1.2.6 エピジェネティクスの可能性

ここまでで、ヒトの形質の多様化に果たした正の自然選択の役割について実際の例を挙げて説明した。しかし、正の自然選択はしばしば起こる現象ではない上、有利な形質が集団中に広まっていくには数千年から数万年の年月が必要である。にもかかわらず、ヒトがアフリカを出発して新たな環境に進出したのはたかだか数万年前の出来事であり、太平洋地域に至っては数千年前に到達し

たに過ぎない。既に述べたように、今日のヒトに見られる形質の多様性が、正の自然選択のみによって形成されたとは考え難い。また、各個人が持つゲノムの情報は生涯変化することはないので、生理人類学で重要視される馴化などの現象を説明することができない。遺伝学を中心に概説した本項の締めくくりに、形質の多様性や可塑性の基盤を明らかにする周辺研究分野であるエピジェネティクス (epigenetics) を紹介したい。エピジェネティクスは、DNA の塩基配列の変化を伴わない遺伝現象、あるいはDNA やヒストンタンパク質の化学修飾による遺伝子発現の変化に関する研究分野である。エピジェネティクスの基盤となる修飾メカニズムには、DNA メチル化とヒストンタンパク質の修飾がある。DNA メチル化は主にゲノム中のシトシンとグアニンが並んだ配列 (CpG 配列) のシトシン残基に起きる。CpG 配列はゲノム中で不均一に分布しており、遺伝子の転写調節領域に特に密集して存在していることが知られている。盛んに転写されている遺伝子のプロモーター周辺では、CpG 配列のメチル化の程度は低いが、メチル化の亢進がクロマチン構造の凝集を招き、転写因子などのタンパク質のDNAへの結合が妨げられる。ヒストンタンパク質の修飾もクロマチン構造を変化させることにより、遺伝子の転写を制御している。生理人類学におけるエピジェネティクス研究は緒についたばかりであるが、いくつかの興味深い報告がある。Parveen Bhatti らは、65名の日中交替勤務者と59名の夜間交替勤務者で白血球由来DNAのゲノムワイドなDNAメチル化パターンを比較し、免疫系の遺伝子群で特にDNAメチル化レベルの差が大きいことを報告している<sup>8)</sup>。Johathan Cedernaes らは、15名の健常な被検者で一晩の不眠によって組織特異的なメチル化レベルの変化が起きることを明らかにしている<sup>9)</sup>。Cedernaes らの研究は、一晩の不眠という比較的短い刺激であってもエピジェネティクス状態の変化がもたらされることを示唆しており、非常に興味深い。また、DNA メチル化部位の中には、子の体細胞でのメチル化パターンが親の体細胞でのDNA メチル化パターンを受け継いでいるようにみえるmeta-stable epiallele 領域が存在する。Peter Kühnen らはエネルギー代謝制御に重要な役割を果たすプロオピオメラノコルチン遺伝子周辺のCpG 群がme-

ta-stable epiallele となっており、子の体細胞での DNA メチル化レベルが、父親の体細胞での DNA メチル化量と強く相関することを報告している。さらに、子の体細胞での DNA メチル化レベルは、受胎時の母体における S-アデノシルホモシスティンなどの one-carbon metabolites 量とも相関することを報告している<sup>10)</sup>。これは、エピジェネティック修飾が世代を超えて継承されるうることを示唆しており、ヒトの形質の急速な進化を説明しうる機構のひとつとして大変興味深い。

## 引用・参考文献

- 1) The 1000 Genomes Project Consortium: A global reference for human genetic variation. *Nature*, 526:68-74, 2015.
- 2) Kong A, Frigge ML, Masson G, Besenbacher S, Sulem P, Magnusson G, Gudjonsson SA, Sigurdsson A, Jonasdottir A, Jonasdottir A, Wong WS, Sigurdsson G, Walters GB, Steinberg S, Helgason H, Thorleifsson G, Gudbjartsson DF, Helgason A, Magnusson OT, Thorsteinsdottir U, Stefansson K.: Rate of *de novo* mutations and the importance of father's age to disease risk, *Nature*, 488:471-475, 2012.
- 3) Schiffels S, Durbin R.: Inferring human population size and separation history from multiple genome sequences, *Nat Genet*, 46:919-925, 2014.
- 4) Prado-Martinez J, Sudmant PH, Kidd JM, Li H, Kelley JL, Lorente-Galdos B, Veeramah KR, Woerner AE, O'Connor TD, Santpere G et al.: Great ape genetic diversity and population history, *Nature*, 499:471-475, 2013.
- 5) Itan Y, Powell A, Beaumont MA, Burger J, Thomas MG.: The origins of lactase persistence in Europe, *PLoS Comput Biol*, 5:e1000491, 2009.
- 6) Tishkoff SA, Reed FA, Ranciaro A, Voight BF, Babbitt CC, Silverman JS, Powell K, Mortensen HM, Hirbo JB, Osman M, et al.: Convergent adaptation of human lactase persistence in Africa and Europe, *Nat Genet*, 39:31-40, 2007.
- 7) Minster RL, Hawley NL, Su CT, Sun G, Kershaw EE, Cheng H, Buhule OD, Lin J, Reupena MS, Viali S, et al.: A thrifty variant in CREBRF strongly influences body mass index in Samoans, *Nat Genet*, 48:1049-1054, 2016.
- 8) Bhatti P, Zhang Y, Song X, Makar KW, Sather CL, Kelsey KT, Houseman EA, Wang P.: Nightshift work and genome-wide DNA methylation, *Chronobiol Int*, 32:103-112, 2015.

- 9) Cedernaes J, Schönke M, Westholm JO, Mi J, Chibalin A, Voisin S, Osler M, Vogel H, Hörmaeus K, Dickson SL, Lind SB, Bergquist J, Schiöth HB, Zierath JR, Benedict C: Acute sleep loss results in tissue-specific alterations in genome-wide DNA methylation state and metabolic fuel utilization in humans, *Sci Adv*, 4:eaar 8590, 2018.
- 10) Kühnen P, Handke D, Waterland RA, Hennig BJ, Silver M, Fulford AJ, Dominguez-Salas P, Moore SE, Prentice AM, Spranger J, Hinney A, Hebebrand J, Heppner FL, Walzer L, Grötzinger C, Gromoll J, Wiegand S, Grüters A, Krude H: Interindividual Variation in DNA Methylation at a Putative POMC Metastable Epiallele Is Associated with Obesity, *Cell Metab*, 24:502-509, 2016.
- 11) Graur D, Li: *FUNDAMENTALS OF MOLECULAR EVOLUTION* Second edition, Sinauer Associates, Inc., p. 56. 2000.

---

## 1.3 環境適応とその多様性

---

□キーワード

集団適応, 個体適応, 遺伝子発現, 直立姿勢, 腰痛, 直立耐性, エピジェネティクス, 飼育, 全身的協調, 発達適応

### 1.3.1 適応とは

生物の多様性の背景には、さまざまな進化の中から適応できたものののみが生存できるという過程がある。従って適応の前に進化の理解が必要である。進化とは、一言でいえば、生物個体群の形質（形態や機能や行動などの性質や特徴）が世代交代を経る中で変化していく現象である。その変化は前節で説明の通り遺伝的な変化に基づく。そういう遺伝的変化は基本的にランダムに生じるので、それに付随して生じるさまざまな形質を持つ生物の中から生息環境に馴染んだものが生き残る。ここで“馴染む”とは生存できて子孫を残すことであり、これが適応の基本的考え方である。従って、適応するためには、まず生存能力が必須であり、その上で繁殖能力が必要となる。さらにこれら二者を効果的に実現するための行動や諸機能の効率的応答性やストレスへの耐性も重要な

評価の対象となる。

生理人類学では、適応を2つにわけて定義する。ひとつは長い世代交代の中で生じる遺伝的適応あるいは集団適応であり、ひとつは一世代の中で生じる個体適応である。

### 1.3.2 集団適応

もしある個体の遺伝的変異によって生じた形質的特徴がその個体群の中で生存と繁殖に有利であれば、その特徴的な形質を反映する遺伝子の頻度は集団内でより高くなり、高い適応度を示す。これを集団適応（population adaptation）もしくは遺伝的適応という。これは Charles Robert Darwin (1809-1882) のいう自然選択（自然淘汰）である。自然選択される形質は環境の条件が変われば異なる。広い世界にはさまざまな環境があり、従ってそれぞれの環境に求められる有利な形質は異なることから多様な生物があらわれることになる。

ヒト集団内に見られる代表的な自然選択の例として、鎌状赤血球がある。これは正常な赤血球より酸素運搬に不利となり、この鎌状赤血球遺伝子をホモ接合体で持つものは生存が難しい。しかしへテロで持つものは特にマラリアが蔓延する地域ではこの遺伝子の非保有者より生存に有利とされる。マラリア原虫は赤血球内で増殖するが、鎌状化した赤血球ではマラリアに耐性を持つためである。

高い適応度を示す自然選択に対して、中には生じた遺伝的変異が適応度にあまり影響しないものもある。この場合、この遺伝的変異による形質はランダムに現れるが、選択の網にかかるわけではない。これは遺伝的浮動と呼ばれる。血液型もその一例である。基本的に A, B, O, AB の4型があるが、いずれも生存率や繁殖率とは独立している。しかしこの4型の分布は地域によって異なる。アメリカ先住民では圧倒的にO型が多い。これはびん首効果と呼ばれている。最初のアメリカ先住民が氷期のベーリング海峡を横断したとき、この集団の血液型分布が祖集団の分布を反映せず、偶然に高いO型の頻度を持っていたため、これが遺伝的浮動を促進したと考えられている。

### (1) 集団適応の課題

人類が適応してきた環境は現在の環境ではないことに、生理人類学では注目している。集団適応は長い世代交代を経て生じている。ホモ・サピエンス・サピエンスとしては約20万年、さらにヒト属のホモ・ハビリスからすると約240万年という時間のスケールがあるが、その中で大半を占めているのは狩猟採集の時代である。従って私たちの祖先は、厳しい環境に有利に生存・繁殖できるように適応してきたはずである。にもかかわらず現在は全く異なる環境をつくりあげてしまっている。そこにはホモ・サピエンス・サピエンスが高い知能を獲得したために自ら勝手に都合のいいように環境を変えたという皮肉がある。この適応した過去の環境と現在の環境とのギャップがどの程度現代のヒトの適応性に影響しているのか、客観的な資料は不十分であり、生理人類学がここに注目する理由がある。このような視点が置き去りにされ、人間の欲望のままに技術革新がますます勝手に進んでいる現状を危惧している。過去と現在の環境のギャップによる遺伝子頻度への影響は不明であるが、懸念される課題が多く埋没しているのは確かである。

#### (a) 直立姿勢への適応と課題

他の生物には見られないヒトの主たるアイデンティティは直立姿勢である。この直立を実現したことが、長距離歩行、脳の拡大、発話、手の身体移動からの解放とそれによる運搬や道具の作成、口裂の狭小化など多くのヒトの人たる特徴が生み出された。この直立姿勢を可能にするひとつの要因に脊柱の S 字の湾曲がある。現代の文明化された環境では、狩猟採集時代のような長距離歩行は求められず、座りがちな生活になっている。

##### 1) 椅子とヒールの課題

椅子に座ると脊柱の S 字のうち腰部の前湾が消失してフラットになる（図 1.4 A B）。座ると骨盤が後ろへ回転するのが原因（図 1.4 C）であるが、図 1.4（椅座位）のように腰部前湾の消失は、湾曲時（立位）の椎間板の厚みのある部分を上下から圧迫することになり、椎間板に不均一な負荷をかける。さらに腰部には上半身の自重も加わり、結果的に直立時の 1.5 倍の負荷がかか

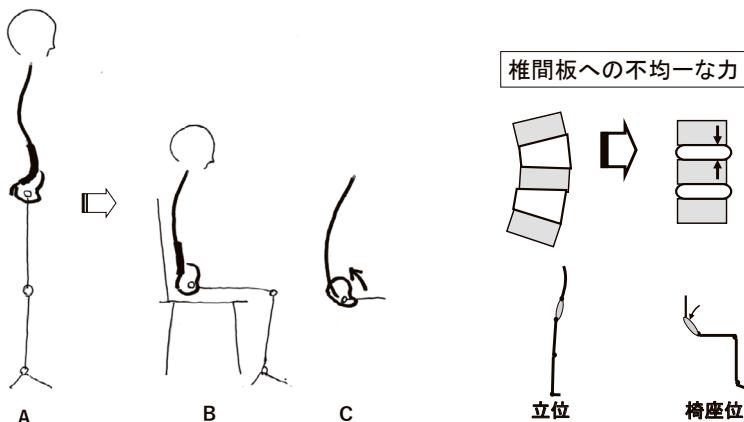


図1.4 椅座位における腰部前湾の消失と腰部椎間板への不均一な力

る。現在のオフィスワークのように長時間椅子姿勢が長期間継続されると椎間板ヘルニアのような**腰痛**を引き起こす可能性が高くなる。そもそもヒトは座る姿勢に適応していない。たとえ“疲れないオフィスチェア”と名売ったイスでも、長時間の椅子は避けるべきである。ただ個人差がある。それは腰部湾曲を消失させる骨盤の回転度の個人差である。この回転は大腿部の前面と後面の二関節性筋（この場合、起始と停止が股関節と膝関節をまたぐ筋）の張力バランスに基づく。座ると立位時より大腿部後面の筋張力が前面の筋より強くなるため骨盤は後方へ回転する。筋の長さや柔軟性に個人差があれば、この骨盤の回転にも個人差が生じる。一般に柔軟性の高いものは同じ椅子姿勢でも回転の度合いが小さくなることが考えられ、従ってストレッチなどで日頃から柔軟性を高めておくことを勧める。また柔軟性とは別に、座面を高くしたり、下肢を座面下の空間に潜り込ませると大腿後面の筋が緩み、これが骨盤の回転を小さくするので、腰部への負担も減る。

女性のハイヒールは、椅子とは逆に腰部湾曲を強くすることが腰痛の原因といわれている。これは大腿部前面の筋緊張がより強くなり骨盤が前方へ回転するためで、従ってヒールが高いほど腰部への負担は増える。これも大脚前面筋

の柔軟性が高いものほどヒール着用時の腰部負担は減る。個人によって、あるいは日常の活動様式によって腰痛の許容限界となるヒール高が異なることになる。

## 2) 直立耐性の課題

立位では、下方から心臓に戻る血液は重力に逆らうことになる。従って寝た姿勢から立位になると心拍数が増え、また下半身の末梢血管が収縮して血液を上方へ押し上げようとする。カラダには、このように血圧を一定に維持する血圧調節が反射的に働く仕組みが備わっている。この調節能力を起立性調節耐性もしくは直立耐性 (**orthostatic tolerance**) という。この調節がうまく行かないと起立性低血圧（貧血）になり、立ちくらみやめまいが生じる。

宇宙ステーションの微小重力下に滞在し、地球に帰還するとすぐには立ち上がることができない。それは宇宙滞在中に地上の 1 G に適応していた血圧調節能力が微小重力下では低下し、その状態で地上に帰還すると貧血を引き起こすためである。ここまで極端でなくとも、通常座りがちな生活の人では、血圧調節能力、すなわち直立耐性が低下する傾向にある。我々の研究では、日頃座りがちな被験者群に12週間の有酸素トレーニングを実施すると直立耐性の改善がみられた<sup>1)</sup>。貧血になりやすい人は、ある程度の運動を試みることを勧める。

移動型の狩猟採集生活から定住型の農耕生活に入ると、骨にかかるストレス減少から骨密度は大きく低下したことが化石標本から知られている。しかしそれでも、現代人に比べればまだ高い値だったという。ゲームに夢中になり、外で走り回る子どもたちの減少が気にかかる。直立と二足歩行は私たちヒトの基本的機能である。

### 1.3.3 個体適応

個体適応 (individual adaptation) とは一世代における環境への適応のことである。ここでいう適応は、集団適応のように過去から現代までの時間軸の中で生じる個体群の遺伝子変化を背景とするものではない。個体内の同じ塩基配列の中で生じる遺伝子発現 (**gene expression**) 制御を通して、行動や諸機能の応

表1.1 個体適応の評価<sup>2)</sup>

## 評価に重要な項目

ストレスに対する応答性が、以下の項目において有益、もしくは潜在的に有益であること

- 
- 繁殖上の有益性、繁殖後の生存性
  - 健康 --- 罹病率、死亡率、病気への抵抗性
  - 栄養 --- 必要な栄養条件、摂取条件、効率性
  - 神経系 --- 感覚、運動、神経機能
  - 成長と発達 --- 身体と精神の向上率と達成度
  - 抵抗性と交叉耐性 --- 全体的なストレスへの抵抗性
  - 身体能力 --- 身体的運動性、運動の巧妙性
  - 感情機能 --- 幸福度、耐性、性的資質
  - 知的能力 --- 学習能力、表現能力
- 

答性やストレス耐性を向上させるものについて総じてここでは個体適応という。アメリカの人類学者 Richard B. Mazess によると対象となる適応の評価項目は、おおよそ表1.1のようになる<sup>2)</sup>。個体適応には、誕生から死に至るまでの時間軸があり、この軸に沿って生活環境も変わり、個体適応の態様も変わってくる。いずれにしても個体適応では、基本的に個体内で固定された DNA と環境との相互作用の中で遺伝子のオン・オフや遺伝子発現制御の有り様が関わり、それによって変化する形質が注目される。このように DNA そのものの変化によらない遺伝子発現を制御・伝達するシステム、およびそれらによって生じる表現型の変化を研究する学問をエピジェネティクス (epigenetics) という。生理人類学における個体適応では、このエピジェネティクスな考え方を背景として研究する。

## (1) 一生における個体適応

## (a) 胎児の個体適応

胎児にとっての環境は母親の子宮である。言い換えると、母親の行動が胎児の環境に影響を与え、胎児の遺伝子発現制御に作用する。近年、日本における

の出生時体重の減少が指摘されている。妊娠中の食事制限が原因のひとつといわれる。胎児への栄養供給不足は出生後の食環境が十分でないという刺激となり、胎児は将来を見越してインスリンに対する抵抗性を上げようとする。つまり、低栄養で血糖値が下がるのを防ぐためにインスリンの分泌量を減じたり、その効き目を鈍くして、脳へのエネルギー配分を優先しつつ限られた栄養環境下でも生きていけるような仕組みができる。このように、誕生後の将来環境を見越して事前に適応状態を備えることを予測適応という。生後、実際に食糧不足の環境であれば出生時の低体重は適応的といえる。しかし誕生後が飽食の環境であれば、予測とのミスマッチが生じる。このような乳児が成長したときはII型糖尿病やがんなどの疾患を招きやすいことが、第二次世界大戦後のオランダの子どもたちの研究から指摘されている<sup>3)</sup>。

母親の生活リズムも重要である。ヒトの概日リズム（3.2を参照）を規定する視交叉上核（suprachiasmatic nucleus:SCN）が機能し始めるのは約32週齢の胎児のときである。この胎児の概日リズムは母親の概日リズムに同期する。もし母親が朝寝坊で夜遅くまで活動する夜型であれば、胎児もこれに同期する。母親は食事や睡眠といった生活の行動全般において幼い赤ちゃんを健全に守る責任がある。

秋に生まれるハタネズミの赤ちゃんは寒い冬に備えて厚い毛皮を持ち、春に生まれるときは薄い毛皮を持って生まれる。日照時間の季節変化を示す母ネズミのメラトニン分泌パターンが有用な予測適応の刺激となるらしい。野生動物の予測適応にはミスマッチがない。

#### (b) 成長・発達期の個体適応

生きる上で厳しい環境であればあるほど、予測適応だけでなく、誕生後の成長過程でも、居住地の環境ストレスをより効果的に軽減する備えを繁殖可能期までに形成しておくことが重要である。

代表的な例として、高地住民の残気量の増大が挙げられる。残気量とは、息を吐ききってもなお残る肺の残量である。肺胞から血液へ酸素が拡散（移動）する上で残気量が大きいことは有利と考えられている。南米ボリビアのラパス

(La Paz) は3,750 m の高地である。ここに住み着いている住人の残気量は平地住民より大きいことが知られている<sup>4)</sup>。平地住民が成長後に同じ高地に来て長期滞在してもこの差は縮まらない。しかし成長・発達期以前に高地に滞在して成長を続けると高地住民と同様の大きな残気量を示す。このような適応を**発達適応 (developmental adaptation)** という。恐らく高地における発達適応には、残気量だけでなく、ヘモグロビンの酸素との親和性や解離性、毛細血管網の密度など酸素運搬能に関わる一連の刺激一応答性を高める仕組みも備わる。ここにも遺伝子発現が絡むエピジェネティックスな適応が注目されている。

汗の研究で世界的に有名な久野寧（くの やす：1882-1977）によると、誕生時の汗腺数は約200万から500万の範囲であるが、実際に汗を分泌する機能を持つ能動汗腺の数は全汗腺数の20～60%という。この能動汗腺数はフィリピン人であれば約280万、日本人であれば約230万を示す。日本人の成人がフィリピンで長期滞在してもこの差は不変であるが、フィリピンで誕生し育つ日本人の赤ちゃんは現地のフィリピン人の水準になる。能動汗腺の数は生後2年から3年の間に決定される。つまり、民族に関係なく誕生後生育する地域の温熱条件にいち早く適応できるような仕組みが形成される。これも発達適応的でありかつ非可塑的な現象といえる。

予測適応や発達適応は繁殖年齢に達する前にいち早く生育地の環境に適応し種の保存を図る合理的な仕組みといえるが、人間にとっては必ずしもそうはいかない。生後2、3年で決定される能動汗腺数の場合、エアコンの快適な部屋で育つ赤ちゃんは、たとえフィリピン人でも数は小さくなるだろう。将来どこで影響するかわからないが、暑熱耐性の減退が危惧される。

### (c) 成人期の個体適応

成人期では、予測適応や発達適応のような特徴的な適応の仕組みはないが、成長・発達過程も含めて、さまざまな環境ストレスに対して恒常性を維持したり耐性を高める柔軟で可塑的な刺激一応答性の制御が行われている。ここでは、実験資料が豊富な温熱に対する成人期の馴化の知見や課題について紹介する。生理人類学における馴化とは、暗順応などの比較的短時間で生じる順応と

は区別し、長時間かけて環境ストレスを補償するような刺激一応答性の変化についている。また実験的に特定のストレス要因を変化させて生じる馴化（acclimation）と、季節変化や地域の実環境に存在するもろもろのストレス要因の総体に対して生じる馴化（acclimatization）とを区別している。

地球にはさまざまな気候や地理的環境があり、それぞれに求められる適応方法も異なる。

### 1) 刺激一応答性における評価

個体適応を検討するときは、刺激一応答性をどのように評価するかが重要である。刺激一応答性には刺激入力があり、それに対する遺伝子発現レベルの反応から神経系・内分泌系の伝達系を経由して、例えば心拍数や血圧が上がるなどの応答（反応）に至る。ここで刺激入力が温度であれば、血管調節や発汗などの複数の反応が生じ、これらが体温の恒常性を維持するために協調的に制御される。このような恒常性維持のための諸機能の協調的な働きを**全身的協関（whole body coordination）**反応という。

### 2) 体温調節の全身的協関反応

体温調節反応の基本は、からだから熱が失われる放熱とからだの内部で生じる産熱のバランスで、両者が等しいときには体温は一定に維持される（図1.5）。寒いときは断熱性を高めて放熱を抑制し、それでも不足のときは震えなどで産熱を高める。暑いときは放熱を促進する。断熱性は皮膚表層を走る血管の収縮（放熱抑制）と拡張（放熱促進）で調節され、産熱は既存の貯熱に代謝調節された熱が加わる。また暑いときは発汗によってさらに放熱は促進される。このように体温調節における刺激一応答性の概要については、皮膚血管調節、代謝、発汗などの諸反応が協調的に働くことによって全身的協関反応が達せられる。

### 3) 全身的協関反応の多様性

体温調節における諸反応の全身的協関反応は、経常的に曝される温熱を中心とした環境条件によって異なる。北米のイヌイットの人たちは、寒冷下では積極的に熱産生を高めて体温を維持しようとする。これは狩猟による動物性の脂

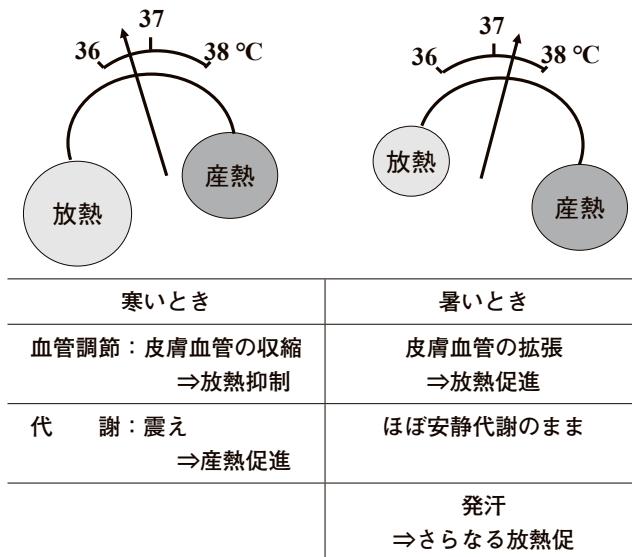


図1.5 体温調節の基本的考え方

肪やタンパク質の高摂取が可能な環境が影響している。一方アンデス高地寒冷下に居住するケチャ族は、十分な栄養環境ではないため、ある程度深部体温の低下を許容しつつエネルギー消費を節約するように適応している。これは同じ寒冷環境への適応でも、温熱以外の環境条件の違いが適応方法の多様性を形成する例である。

暑熱環境下では、一般的に発汗開始時間が遅い方が暑熱への高い耐性を示す。温暖な地域に居住する日本人に比べると熱帯地方のマレーシア人の方が発汗開始は遅い。しかし同じマレーシア人でも日本に長期滞在すると、発汗開始時間が早まり日本人の値に近くなる<sup>5)</sup>。このように、暑熱適応したものでも、温暖な条件に長期曝されると新たな温熱環境に適応しようとして可逆的に変化する。体温調節に見られる温熱適応には、血管調節、代謝、発汗のそれぞれにも種々の要素が関わり、また体温を維持する水準や発汗開始に至る体温が異なるなど複雑な協同の系を示し、これらの反応様式の違いを種々の角度から検討す