

1-22 スポーツにおける呼吸・気道系と免疫系の関連

Correlation Between Respiration-Airway System and Immune System

正 西原 克成 (東大医学部口腔外科)

Katsunari NISHIHARA
Faculty of Medicine, University of Tokyo
7-3-1 Hongo, Bunkyo-ku, Tokyo 113

Correlation between respiration and immune system was studied from the standpoint of bioengineering. Not only respiration by the lung but cytological or tissue respiration has great concern with immune system. The lung itself is one of the largest immune organ and the airway also has essential immune system. Mankind has human specific defect in airway. During sports training, health-injuring biomechanical responses often occur in the human body. Especially, concerning mechanical supportive organs, e.g., the bone, articular, and muscle, or the airway and respiratory system, correct training curriculum has to be established considering organ-specific properties in biomechanics. Human body constructions have vast kinds of structural defects due to resulting changes of biomechanics through human-specific functional development or life style through self-domestication in cultural life. From the standpoint of comparative morphology, phylogeny, and ontogeny, evolutionary changes can be understood as biomechanical responses, which evoke morphological changes conjugated with functions, which have no marked objective at all. All locomotive apparatus in vertebrates have a functional adaptation system of morphology with repeating movements biomechanically. Responsive changes to biological stresses often evoke shape and functional changes which are not always resulting in health promotion.

Key Words: Biomechanics, Functional Adaptation, Evolutional change, Self-domestication

1. はじめに

本研究はスポーツという身体の力学的訓練に際して、健康を障害することを防止するために、特に呼吸および気道系と免疫系との関連について身体構造を生体力学と系統発生学の視点から再点検することを目的としている。人体構造は、自己家畜化現象(Self Domestication)の進行する中で人類特有の特殊な機能の開発や生活習慣による生体力学対応の結果、今日種々の構造的欠陥を生じている。

系統発生学にみられる形態の変化すなわち進化とは環境変化への生体力学的対応によって生ずる、無目的の機能に共軌した変形として把握される。脊椎動物の基本体制は、呼吸・栄養系-排泄系を1本の腸管にまとめた半索類の幼形進化に始まる。脊椎動物の進化においては、大略4種類の革命劇を経て哺乳類が誕生しているが、これは外界の変化や生活様式の変遷に対する脳・筋肉・骨格系の形態から、脳・呼吸-消化吸収排泄系の機能に及ぶ生体力学的対応の結果生じたものと見られる。つまりコラーゲン-アパタイト骨格系が力学刺激に対して有効に応力を分散するoptimization systemを持つと考えられる。これは、「行動様式が脊椎動物の形態を規定する」という形態学における動かしがたい経験則や「哺乳類の歯はその食性に対応した形態を示す」とか「歯はその使命にふさわしい形態を示す」という経験的法則性の中に如実に示されている。一方、人類の誕生に至る哺乳動物の進化においては、生命の基本設計図に照らして形態と機能に種々の不均衡が生じている。何故このように不均衡が生じたかといえば、生物は行動様式に従って、場当たりに力学対応して形を変えてきたからである。ここで、生物学の中に早急に力学的世界観を導入する必要がある

ある(林紘三郎)。従来の生物発展の中心思想の「適者生存」というアリストテレスの目的論を、19世紀のユートピア思想で粉飾した宗教的視点を離れて、人間の価値観を交えない冷徹な科学の目で生物界を見れば、これは「生存できたから勝手に人間が適者だと誤解したにすぎない」ことが分かる。ヒトの作る機械と同様に高等生命体は使い方に従って使いやすいように形を変え、それが長期に続くと次代に伝えられるのである。従って生命体は初めから終わりまで目的も目標も持たない(Goethe)。ただ内的要因と外的要因により用不用の法則に従って形を変化させるのみで(Lamarck)、これらに対応しきれなくなると滅亡(死亡)するのみの、至って単純な反応系とみられる。

この観点から我々の体を見直せば、人類の行動様式の特性的に従って今日では頭蓋、咀嚼筋、気道系、呼吸系、骨格系、生殖系などに形態面・機能面で欠陥を生じるに至っていることが分かる。従って健康保持のためには種々の配慮を必要とする。脊椎動物の運動器はすべて反復性の機能に対する対応の結果として形態を運動に適合させる機構を持つ。しかしながら生体の力学刺激への対応では、必ずしも健康の増進につながるとは限らない形態や機能の変化を引き起こす。スポーツの訓練においても、しばしば健康を障害する力学対応を生ずることがある。ことに骨格系臓器の骨や関節、筋肉および呼吸気道系器官の特性を考慮して、正しい訓練法を確立する必要がある。人体の構造は、進化の過程で脊椎動物の本来あるべき基本体制から大きくずれてきているのであるが、ことに、人類特有の自己家畜化現

象の進行するなかで、特殊な生活様式を続けた結果様々な構造欠陥を持つに至っている。

スポーツは全身を巧みに使って技を競う競技であるから、そのトレーニングに際しては全身の仕掛け、仕組みを良く把握しておく必要があり、また身体にそなわっている構造欠陥や骨格系臓器の生体力学的特性を熟知しておくことは必須といえる。脊椎動物の運動器は反復性の長期にわたる運動に対して、これを何らかの形で記憶するシステムを有すると考えられるから、これらの構造欠陥や臓器特性を良く把握せずにスポーツ訓練を続ければ生体力学対応の結果、健康の増進とは逆に健康の障害を引き起こす恐れすらある。

2. 生命の形態学と思考研究

本研究の目的のためにスポーツと関係の深い骨組織、呼吸・気道系については系統発生学と工学的生体力学的観点から検討を加えた。生体を機械構造体として工学的視点から観察すると、生命の営みの場の中心が間葉系に存在することが分かる。生殖細胞と造血細胞はともに栄養系細胞として間葉に由来し、ともに当然遺伝子の組み換えが行われる。造血系は免疫系の中軸を担うが、これらは一括して細胞レベルの消化とそれに連なる一連の反応系と考えられる。すなわち栄養の運搬と内呼吸とそれに連なる代謝や栄養物の変換と貯蔵などの一連の反応様態があり、その結果として炭酸ガスと余った栄養の一樣態である遺伝物質すなわち生殖細胞が生成される。生物界の名門の脊椎動物においては、この一連の体内での反応系の取り込みと排出は一本の腸管で行われる。この宗族の最大の特徴がアパタイト骨格であり、同時に腸管呼吸である。そして我が宗族（哺乳類、両生類、硬骨魚類、爬虫類、鳥類）では前述の生体内の主要な過程のgeneratorが骨髓腔に存在する。スポーツでは骨格系に過重な負担がかかるため、骨髓腔の本来の機能をよく把握しておかなければスポーツによる障害を避けることができない。

generatorとしての骨髓腔の重要性を理解すれば、脊椎動物がなぜ骨格系故に大発展して今日の地球上を制覇することができたかが自明のこととなる。従来、ヒドロキシアパタイトを工学的に評価する試みが殆どされたことがなかったのであるが、このものは遺伝子の代謝、生成に必須のリン酸と生物活性に不可欠のカルシウムイオンより成る。また、細胞呼吸とそれに共転するエネルギー代謝に必須の核酸物質に材料としてリン酸を供給する。骨髓腔内では、間葉細胞から日々多量の白血球と赤血球が生成されるが、この日常的な一連の生合成の過程には、当然多量の核酸と蛋白質の供給が定常的に必要であることは言うまでもない。脊椎動物には、この命そのものと言える細胞レベルの消化、吸収、運搬、細胞増殖の中軸が骨髓腔をgeneratorとして行われているのである。従って成長期の若年者においては、無理な力を加えた後には、充分なる骨休めが必要である。

脊椎動物の上陸に伴って、内骨格の軟骨の骨化が生ずるが、骨髓腔が形成されるとここに造血系が間葉系の肝・脾臓から移動してきた。つまり空気呼吸とともに骨髓腔に栄養、免疫、細胞呼吸、エネルギー代謝系のgeneratorが移動したのである。骨髓腔内は呼吸と切っても切れない関係にあることがこれで分かる。

一方気道の問題として、Waldeyer環（扁桃リンパ輪）と骨髄組織との深い相関性が、系統発生学から知られる。鰓孔に存在していた白血球造血系（胸腺）と鰓腸粘膜は、扁桃輪、甲状腺、副甲状腺および胸腺と肺に変容しているが、肝臓・脾臓から骨髓腔に造血系を移した後さらに機能を分化させ、骨端関節頭に二次リンパ造血の場を移動している。扁桃炎が関節炎と深い関連を有するのはこのためである。口呼吸を常習とするスポーツ選手が、滑膜性の関節に障害を生じやすいのはこの理由による。

スポーツで問題となる人間工学的弱点の一つは骨を中心とした骨格系の生体力学的特性にあり、他方には呼吸筋肉系と呼吸気道系の問題がある。スポーツには骨折は付きものであるが、競技中の

事故以外に生ずる生体力学的骨折は、骨の特性を把握した訓練法により回避することが可能と考えられる。骨の生体力学的特性として、一定以上の強さを持つ反復性の負荷で生ずる主応力線の走行に従って、骨柱の配列を変化させる特性がある。骨の皮質骨と海綿骨はこの同じ骨柱によって形成されているから、従って皮質骨と海綿骨とは本来同質で主応力線の分布密度が異なるために形状が異なるということになる（Bennighoff、藤田恒太郎）。スケートや短距離競技などで反復性に同じ走行訓練を過度に続けると骨折を起こすのはこのためである。これを防止するためには異なる方向に主応力線が発生するようにtrainingの一部を変更する必要がある。過度の訓練は当然関節頭の外傷性損傷を生ずるので、この点も配慮が必要となる。若年期にある長管骨骨髓腔と、骨端部関節頭の骨髓にはそれぞれ骨髓造血系と二次リンパ造血系が存在する（哺乳類のみ）から成長期には過度の訓練を避け、運動後も充分なる休養が必要である。これらの臓器は、本来内臓系の細胞レベルの消化（腸管外消化）を行う免疫系の臓器であるから、この配慮を怠ると免疫系疾患などにつながる恐れがある。

呼吸筋の問題について述べると、呼吸という内臓系の仕事は本来脊椎動物の基本体制においては、鰓弓内臓筋（平滑筋）により遂行され、心臓の搏出運動を鰓器が統御していたと考えられる。水中の鰓呼吸から空中の肺呼吸への進化の過程で、これらの鰓弓筋は平滑筋機能を失い咀嚼、表情、嚥下（一部、平滑筋）、発声を担当する横紋筋に変容するとともに、肺呼吸筋は体壁系の腹直筋、胸筋、広背筋、横隔膜で代行されることとなった。これらの筋群は体壁系動物系の運動筋であり、脳の本来の主要効果器官であるから、運動時や精神活動時にはしばしば呼吸運動が抑制されることとなる。また、咀嚼運動は元来鰓呼吸筋運動に由来した生命活動の最も根源的な機能であり、系統発生の初期から存在していたもので、体壁系呼吸運動とは運動性がある。咀嚼運動の左右差は必ず椎骨の側弯を連鎖するのはこのためである。また逆に側弯が顔面形態の左右差を生ずることもあるが、ともに運動のために生ずる変化である。

呼吸に伴う気道の問題は、スポーツによる口呼吸習癖の発生である。一般に口で呼吸することが可能なのは哺乳類では人類のみである（藤田恒太郎、養老孟司）。これは言語を習得する過程で、生体力学対応により鼻腔と連続していた喉頭が肛側へ後退し、発声しやすくなったためである。鼻咽腔・口峡・咽頭部には鰓器に由来する一次リンパ造血系の扁桃組織（Waldeyer輪）があるが、これは摂食と呼吸で侵入してくる有害微生物や高分子物質に対する細胞レベルの消化器官と考えられる。すなわち口腔咽頭部から扁桃組織内を通して吸収された物質が、生体内で白血球により消化を受けると解される。この器官を有効に機能させるには、鼻腔呼吸が必須である。不用意なスポーツ訓練では往々にして口呼吸習癖をもたらす。これは、激しい運動に伴う呼吸の亢進で、鼻腔呼吸では間に合わないために、気道としてより広い口腔を直接使うようになるほか、水泳のように鼻腔呼吸が不可能なスポーツもある。これが長期に及ぶと常習的口呼吸を生じ、口蓋扁桃の乾燥と感染を併発し、多くは免疫系疾患を継発する。これは扁桃の長期的慢性感染が、鰓器由来の気官群（甲状腺、副甲状腺、胸腺、肺臓）と鰓器に関連性の深い臓器（腎臓）や、鰓器のリンパ造血系と同系の造血器（長管骨骨端部、関節頭二次リンパ造血系）に不顕性に影響を及ぼすためと考えられる。

生体を構成する各種の臓器は、互いに相関性をもって運動を行う。相関を持たずに機能する臓器は存在しない（Cuvier）。この関連性を理解するには系統発生学に学ぶこ

とが最も確実である。スポーツの訓練においても、以上述べたように造血系から免疫系に至るまで筋肉系、骨格系の運動が影響を及ぼす。これらの点を充分考慮して、スポーツ訓練が、身体の健康の増進につながる程度のカリキュラムを組むべきである。人体を工学的に再度検討し、構造欠陥をよく把握し、生体力学的に合理的トレーニングを実施することが肝要であろう。

3. 栄養・免疫・内呼吸系とgeneratorとしての骨髄腔(アパタイトチャンパー)の意義

本研究は、系統発生学・個体発生学を生体力学の観点から解釈し、これを応用することにより脊椎動物としてのわれわれの身体器官のありかたを工学的観点から把握し、健康の増進に応用することを目的とするものである。人類を頂点とする動物界の名門脊椎動物の定義は「骨化の程度は異なるが、骨性の脊柱を持つ脊索動物」であるから、骨組織がこの宗族を他から識別する本質的に重要な物質と言える。骨はコラーゲンとヒドロキシアパタイトからなる「石灰化した結合組織である」であるが、今日ではこの物質が、わが宗族の進化の主役を演じたと考えられている(Halstead)。定義に則った原初の生物すなわち脊椎動物の原型は、鰓腸(エラ呼吸を行う腸管)が完成しそれに連なる内臓消化管による呼吸・消化・排出の一連の系が一本の腸管にまとめられた半索類に求められる。この体制を維持する過程で脊索が発達し、やがてこの脊索が化骨する。骨はコラーゲンとアパタイトの複合体であるが、生体力学対応としてのリモデリングシステムを持ち、またアパタイトは生物に必須のカルシウムイオンとエネルギー代謝に必須のリン酸系の複合体からなる。これらの理由から、骨組織の獲得により、この宗族の発展が約束されたと考えられることである。

この基本体制は植物機能として腸管系、動物機能として体壁筋肉系に大別される。腸管系を、酸素を含めた物質の呼吸・吸収系・排出系とみると、腸管内消化により粘膜から体内に入り、赤血球・白血球による細胞レベルの腸管外体内消化を経て運搬・代謝され、代謝産物が間葉上皮系から排出される。この細胞レベルの消化管外体内消化を工学的視点から見るといわゆる免疫系とみることができる。腸管内消化に続く栄養の吸収・代謝・運搬系には赤血球が対応し、抗原、細菌、ウィルス、毒物、異種蛋白等には白血球が対応し、脂肪の吸収にはリンパ系が対応する。感染や外傷などで体内に消化管を介さずに入ってくる異種物質には、赤血球、白血球、リンパ球が対応し消化を試みる。一般にみられる細胞浸潤がそれである。つまり、免疫を生体力学的立場から工学的に捉えると、腸管外の細胞レベルの消化という機能様態として理解される。従って従来の一貫性を欠いた免疫の場としての細網内皮系の概念と、各種の免疫関連の臓器とが統合され単純な生体の対応システムとして理解されるようになる。また同じ幹細胞から分化する赤血球と白血球が免疫機能(細胞内消化)として等価の役割を担当していることがこれにより理解される。この免疫系の最も主要部を担当する造血系と脂肪系が進化の過程で鰓呼吸から空気呼吸への変換に伴って一大変革を遂げ、腸管の肝臓・脾臓系から骨髄腔へと移動しているが、これが水中生活から陸上生活への転換に伴う軟骨の重力対応による化骨すなわち生体力学要因によると考えられる。つまり、本来植物系内臓機能として腸管に付属し、腸管内消化とそれに連続する細胞レベルの消化を担当する中軸的臓器が脾臓(植物系)から骨髄腔(動物系・体壁系)へとその住み家を移動しているのである。

鰓腸呼吸系から肺呼吸への変換では、鰓器の腸管上皮から肺臓(内胚葉上皮)が形成されたのであるが、この鰓器は機能体である鰓弓筋(平滑筋)を伴わずに肺を形成した。従って、生命に本質的に重要な酸素の取り込み装置の植物系器官の呼吸器肺臓は、植物系筋肉の平滑筋を欠いており、代わって動物性の体壁系筋肉で呼吸運動を代行させるようになっている。ここでも動・植物系の二つに別れていた一方の内臓植物系の最重要臓器の基本体制が

崩れてたのである。これに伴って鰓孔に存在した胸腺(一次リンパ造血系)も扁桃リンパ輪、胸腺および長管骨骨端関節部等へ変化したり移動したりした。以上植物系臓器の吸収・消化系について述べたが、一方排出系もまた腸管栄養系の重要な機能を構成する。これは栄養が吸収された後の時間軸に沿った変容の過程として理解されるが、排出の系には二種類ある。一つは細胞代謝物つまり異化作用による老廃物の排出であり、主として血液(血球と血漿)が担当し、もう一方は余った栄養分すなわち次代を担う遺伝物質である。血球と生殖細胞はともに同系の間葉組織に由来すると考えられ、従って脊椎動物では消化・吸収・排出の過程は基本的には一本の腸管で行われる。排出の過程は、呼吸・吸収・消化の終末過程であるから、泌尿も生殖もともに当然免疫系の一翼を構成する。

泌尿・排出系は太古の生物では鰓器に存在した前腎が行っていたが、進化するにつれて中腎、後腎へと移動した。食物と空気というエネルギー源の取り込み口が頭進するのに対して代謝産物と余剰の栄養系の遺伝物質が肛進し、双極を形成するのは、脊椎動物が常に頭部を先にして進み、腸管吸収系が時間軸と一致した管として形成されていることによる生体力学対応と考えられる。代謝産物と生殖細胞の形成を、時間軸を含めて模式的に見ると、これらの物質はともに口側から栄養として取り込まれた食物が、前進移動する体壁チャンパーの生体の内において、腸管腔の口-肛軸に沿って肛進しつつ充分な吸収、代謝、同化の過程を経て後に形成される物質である。従って、個体存続の時間的経過と進化の過程でこれら排泄系産物(泌尿・生殖系)の形成も器官形成もともに肛側に移動する。こうして脊椎動物の基本体制は生体力学的要因の下に様々に変容を遂げ原初の姿から大きく逸脱する。これらの変化を大局的に眺めると、脊椎動物の体制の変遷は鰓腸を中心とした腸管系の機能と、骨格系アパタイト臓器間の生体力学的相互作用が中心的役割を果たすものとして把握される。以上、人体構造を構成する各器官とそれらの相互作用を生体力学と系統発生の観点から考察した。以上述べた事項を考察したうえで、スポーツを通して健康の維持・開発・強化を図ることが肝要である。

参考文献

- 1) 三木成夫: 生命形態の自然誌。うぶすな書院、東京、1991。
- 2) 三木成夫: 生命形態学序説 ー根源形象とメタモルフォーゼー。うぶすな書院、東京、1993。
- 3) 三木成夫: 胎児の世界。中央公論社、東京、1983。
- 4) 西原克成: 系統発生学とバイオメカニクス ー脊椎動物の進化の生体力学ー。日本機械学会(No. 940-5) 第3回バイオエンジニアリングシンポジウム講演論文集、p. 84, 1994。
- 5) 西原克成: 口呼吸習癖と人類特有の疾患。日口診誌、1994。印刷中
- 6) 西原克成: ヒューマンダイナミックスー人間工学ー生命形態の基本設計図と人体の構造欠陥。スポーツ工学シンポジウム1994、シンポジウム: ヒューマンダイナミックス、1994。印刷中
- 7) 西原克成: スポーツとバイオメカニクスとヘルスポーション。スポーツ工学シンポジウム1994、シンポジウム: ヒューマンダイナミックス、1994。印刷中