

H7 ヒューマンダイナミクス—人間工学—

生命形態の基本設計図と人体の構造欠陥

Comparative Morphology Phylogeny Basement Construction of Vertebrates and Structural Defects of Human Body

西原 克成 (東大医学部口腔外科)

Katsunari NISHIHARA

Department of Oral Surgery, Faculty of Medicine, University of Tokyo
7-3-1 Hongo, Bunkyo-ku, Tokyo 113

Establishment of basic construction of the vertebrates was carried out during neoteny (larval form evolution) of the hemichordata, which integrated the respiration, nutrients, and excretion system into only one tube of the gut. Through evolution of the vertebrate, mammals evolved after four kinds of vertebrate-revolution. These evolutionary phenomena can be seen as revolutionary transformation of morphology in biomechanic responses to environmental changes. Through these evolutionary transitions, various kinds of concerns develop between morphology and the function of organs in the human body from the standpoint of basement construction of the vertebrates. Especially, through human evolution, the skull, masticatory apparatus, airway, and respiratory-, skeletal-, and genital-systems have some kinds of functional-morphological problems after human-specific behaviors in cultural life. Therefore, for health promotion in human life, various kinds of concerns to the human body are required in relation, between morphology and function.

Key Words: Neoteny, Morphology, Function, Evolution, Biomechanics

1. 脊椎動物の基本体制

人体を工学的視点から見てその構造と機能と形態の関係を観察すると、生体力学的に種々の不合理な欠陥構造のあることが分かる。この点を正しく理解するには先ず、脊椎動物の原型とその変容すなわち進化の筋道を辿ることが近道である。本研究は工学的に人体を理解する目的で脊椎動物の進化の過程を系統発生学・個体発生学の観点から生体力学的に観察し、人体の構造欠陥について検討を加えたものである。

生命体を形成する基本的高分子物質は、単細胞生物のバクテリアからカビ、藻類、植物、高等動物に至るまで共通している。しかし、多細胞生物から高等生物を一まとめにした一群の生物は、実に多彩な形をしているのは何故であろうか？高等生命体には、基本設計図はあるのであろうか？進化における生命形態の変容の原動力は何なのであろうか？生命を扱う学問分野で最初に起こる疑問が形と機能に関するものであろう。近代科学において動物界・植物界を含めて高等生命体に基本となる原型のあることに最初に気付いたのは、形態学Morphologieという学問領域を確立した詩人Goetheである。彼は形態学を、形態変容の法則性を解明することを究極の目的とする学問体系と定義し、骨学を通して人類に至る脊椎動物の原型を模索し、やがて植物の形態学を通して生命のすべてに共通する形態の原型を探求した。人間の身体も、「太古の原型を出発点として生命形態が作られてから、刻一刻と変身を遂げてついに今日の姿に到達した」(Goethe)という、後にHaeckelによって宗族発生学と呼ばれるようになる「形の変容の原理」の探求を生涯のテーマとしていたのである。この時代にフランスにはLamarckとCuvierがおり、Goetheと同様に今日生命科学と呼ばれる学問分野の確立に偉大な足跡を残した。Lamarckは無脊椎動物の研究を通して当時の博物学からBiologie (1802: Lamarck & G. Treviranus) を独立

させ、生物の原型が外的要因や習性により変化するという進化の概念を提唱した。これはGoetheの原型の変容の形態学をより生体力学的要因論の下に、より明確に科学的に具体化したものとみられる。一方Cuvierは脊椎動物の比較解剖学の原理を若干27歳で確立し、器官の従属の原理と相関の原理を提唱し(1795)、後年に古生物学の体系を確立したが、ナポレオンの庇護の下で生命不変説を唱え、Lamarckの進化の概念の任教に努めた。

地球上には、様々な生物が存在するが、すべてに共通している基本的高分子物質には、遺伝子を構成する核酸とタンパク質を構成するアミノ酸がある。形態に関連する骨格系物質には種々の物があるが、これが異なるから各宗族における基本形態(設計図)と変容の様態が異なるものと考えられる。この地球上には大略5種類の骨格を持った生物がいる。植物のセルロース系、珪藻の珪酸系、貝類(軟体動物)や珊瑚類の炭酸カルシウム系、昆虫やエビ・クモなどのキチン系、脊椎動物のコラーゲン・リン酸アパタイト系である。これらのうち生体力学刺激に対して有効な対応システムを持つ骨格系には、キチン系とアパタイト系がある。

骨格を持たない腔腸動物や翼鯉類などは、機能に従って比較的自由に形態を変えることができる。キチン系骨格を持つことになった無脊椎動物は、カニや昆虫という高度な社会生活を行う生物に進化することができたが、外骨格であるため、脱皮というリモデリングのシステムに限界があり、大型化することができなかったのである。コラーゲン・アパタイト系の脊椎動物の内骨格は、反復性の外力に対してリモデリングにより形を変化させることができる。これにより脊椎動物のみが、機能と共軛した形態を持つことができた。また、環境の許す限り無制限に巨大化することができ、夥しく多様な種族に適応放散することができた。

日本機械学会 (No.940-59(H)) シンポジウム講演論文集
('94-11-10~12, 川崎, (ジョイント・シンポジウム)シンポジウム:ヒューマン・ダイナミクス)

このようにして地球が繁茂した時期には巨大な恐竜が出現したが、その間隙をぬって、夜間のみ生活を許された動物群が密かに、より敏捷で代謝効率のよい体制に自己改造を進めていた。これがやがて哺乳類へと発展し、さらに厳しい氷河期の環境を生き抜いて今日の哺乳類の時代を迎えることになる。

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った脊索動物」であるから、骨組織が脊椎動物を決める特徴的物質であることがわかる。従って、骨の特質を究明すれば脊椎動物の進化の謎の一端が解明されると考えられる。Fig. 1に脊椎動物の基本体制(A)と二つの相すなわち食の相と性の相(B)を示す¹⁾。骨は水酸アパタイトによる石灰化した結合組織であると言われているから、コラーゲンがアパタイトと同様に脊椎動物を特徴づける重要な物質とみられる。骨組織の原型は、象牙質と骨の癒合したアスピディンと呼ばれる太古の魚類の甲冑を形成した甲皮に由来する。このアスピディンは太古の海に過剰に存在したカルシウムの排泄のシステムで、海水に不足していたリン酸の貯蔵庫としての機能を持つと考えられている⁴⁾。

形態学の出発点となったのはGoetheの骨学であったが、形態学を深く研究してゆくと進化の謎が明らかとなるのかもしれない。脊椎動物の進化の出発点は、皮膚呼吸を行っていた翼鯉類から原索動物のムカシホヤの腸管内への鰓孔の取り込みと、アパタイト骨格の獲得に始まる。従ってムカシホヤの幼生に我々の祖先の原型をみる事ができる(Fig. 2)¹⁾。

動物は植物のように環境から独自でエネルギーを合成することができないため、食物を求めて動き廻ることを最大の特徴としている。形態の進化は、生命体の体の使い方つまり動き方の特性に従って形態が変化するという経験的法則性が存在する。つまり行動様式が形態を規定するのである。反復性の行動様式は、多くの場合機能としてみることができ、機能に従って形が変化する³⁾。これが環境の変化に依存して形態の進化が起こるゆえんである。環境変化とはバイオメカニクスの変化と同義である。

脊椎動物の原始形は、呼吸と栄養という吸収系を単一の腸管で行うシステムの獲得にはじまる。このシステムの維持には硬組織の脊索を必要とした。この硬組織にコラーゲン・アパタイト複合体の骨を使ったことが、脊椎動物の適応放散を可能にしたのである。ことにアパタイトは生命活動に必須のCaイオンとエネルギー代謝に必須のリン酸より成ることが重要な意味を持つと考えられる。

生命現象は、環境因子の取り込みと分解によるエネルギーの利用で自己存続を試みる現象系であるから、生命体は本来環境に依存した無目的の存在と言える。確実なことは、栄養となる物質と酸素を取り込み、これを分解利用するに相応しい形態と各種の機能を持ち、多くは骨格を所有し、遺伝子と蛋白質を私的に所有するための時間的空間的な場を占有しなければ存続し得ないということである。

従ってすべての生体反応は、環境因子(化学的、光学的反応を含む)への生体力学に対する反応とみることができ、生命の形態は、この環境因子への生体力学反応の機能対応としての形態が、その存続に有効か不利かで将来の不確実な環境因子の

影響下に発展するか、細々と生き続けるか、あるいは消滅するかが予定される。

2. 免疫の基本設計図と生体力学による変容

酸素とエネルギー源の栄養物の吸収を一本の腸管にまとめたことは、生命体の栄養システムの確立すなわち形態と機能の調和を意味しているのである。なんとすれば、栄養システムの完成は必然的に免疫系と生殖系の形態と機能の調和に結び付くからである。それまでの生物においてもまた無脊椎動物においても、呼吸は皮膚で行われていた。

鰓呼吸に伴って免疫システムが成立することになるが、これは腸管栄養系の確立に伴う栄養の取り込み(同化作用)に際して、自己の生命に有用な物と有害な物への生命体としての対応の必然的な誘導と考えられる。これが白血球(防衛)と赤血球(栄養の運搬)であるから、免疫のシステムは造血システムと表裏一体の関係にあることがわかる。この観点からすると腸管系が免疫・栄養系と同義といえるから、これから派生した器官もすべて免疫器官に関連すると考えられる(Fig. 3)。胃腸・肝臓・脾臓・膵臓、甲状腺、副甲状腺、肺臓、脳下垂体、咽頭部扁桃リンパ輪(Waldyer ring)がこれである(Fig. 3, 4)。

一方、泌尿系(腎)は栄養系のうち異化作用を担当し、血液の中から老廃物を抽出し排出する中胚葉系のシステムである。また、生殖系も栄養系の一つの様式であり、次代の遺伝子という生命に最も本質的な栄養系を排出するシステムであるから、originとしては中胚葉系の造血系と極めて近縁のものである。古来から奇しくも「血のつながり」と言われているが、血液(造血・泌尿系)と生殖(遺伝系)とは切っても切れない関係にある。

これらはともに中胚葉系の排出のシステムであるから、脊椎動物では同じ排出器官を用いて泌尿と生殖が行われる。これはこの宗族の出発点となったムカシホヤの段階で作られた設計図によるものである。これらのことから生殖・内分泌系のシステムもすべて免疫系と深い関連性を持つのである。今日の医学の世界でも、漸く免疫系が中枢神経系・内分泌系と密接不可分の関係を持つことが強調されるようになってきている。

ここで哺乳動物の骨髄造血・免疫システムに注目する必要がある。骨髄造血はムカシホヤのプログラムにはないものである。なぜ骨髄腔という、およそ腸管栄養系と関係のない器官に栄養系装置の造血系と免疫系が発生したのであろうか?そもそも太古の魚類には骨性の内骨格がなかったのである。すべての内骨格は軟骨でできており、骨組織はあるにはあったが象牙質と骨の複合体のアスピディンとして甲冑を形成していたのである。

デボン紀の地球環境の激変期には、水中に安閑としていらなくなった太古の魚類の多くが、遠巡の末に上陸を敢行せざるをえなかった。脊椎動物の第二革命と言われる上陸劇がこれである。一億年の長きにわたり多くの海が浅くなり、また汽水となり、洪水と干ばつを繰り返したためである。この宗族発生の大略の過程は遺伝子に生命記憶として記録され、個体発生の過程で再現される。人間では受胎後32日から35日の3日間に胎内で幻のごとく、象徴的にこの一億年の歴史の面影が再現される¹⁾。

ここでHaeckelの「個体発生は系統発生の短い反復である」と言う有名な生物発生原則(反復説)(1866)を思い起こす必要がある。「反復」としてHaeckelの造った用語はRecapitulationすなわち頭部の再現を意味するのであるが、この説では、後に明らかとなった幼形進化がうまく説明できなかったために、やがてもて囃されなくなり、反復説は今世紀には殆ど顧みられなくなった。しかし、約100年後に故三木成夫教授が動物の原型とその変容の観点から、身体全体の各器官について、詳細に個体発生と系統発生とを比較し、系統発生の過程が個体発生において脈管系に至るまで、極めて短期間に遺伝現象として象徴的に再現されることを検証した。今日では幼形進化も遺伝学的に容易に説明することができるようになってきている。

この系統発生学でみられる上陸劇を生体力学的に観察してみよう。水中で浮力に相殺されていた甲冑を持った重い生物の体重が、上陸という脊椎動物の第二革命に際して、内骨格の軟骨に作用して、軟骨を作っていた間葉系の細胞が骨組織を誘導したのである。

アスピディンの甲冑で体表を覆っていた間葉系由来の骨組織は、水中の力学刺激で誘導されたと考えられるが、軟骨の内骨格に力学刺激が及ぶ地上では、この部の間葉細胞は生体力学作用を受けると骨組織に分化する。骨は、反復的に作用する主応力線に従って骨柱を形成する性質を有するから、必然的に腔洞が形成される。これが骨髄腔である。

この腔洞に脾臓・肝臓から栄養系の造血・免疫巣が移住してきたのである(Fig. 2)。実際には、骨組織と同様に骨髄腔に存在する間葉系細胞から造血細胞が誘導されるのである。つまりコラーゲンチャンバーの脾臓より、コラーゲン・アパタイト複合体のチャンバーの骨髄腔の方が造血に必要な静脈性の流れを有効に提供したのである。間葉系細胞の持つ遺伝子の発現の要因が生体力学因子であることがこれでわかる。

つまり当初のムカシホヤの設計図が、革命的な環境の変化という生体力学要因により、大改造を余儀なくされたのである。そしてこの一連の生体力学的対応様式が、遺伝現象に取り込まれているのである。この段階で我々は、脊椎動物のコラーゲン・アパタイト系骨格の持つ物性が、進化に果たす役割の重要性にはじめて気付くことになる。

3. 呼吸系の基本設計図と人体の構造欠陥

造血系の移動より重大な体制の変化が、上陸という脊椎動物の進化史の第二革命によって起こっているが、これが言うまでもなく鰓呼吸(エラ孔による呼吸)から肺呼吸への変換である(Fig. 7)。ここで太古の魚類のシステムを引き継ぐサメに代表される軟骨魚類と、タイやヒラメに代表される硬骨魚類について注目する必要がある。

硬骨魚類はその名の示すごとく内骨格が骨でできており、骨髄造血を行っている。脾臓も独立しており、腎臓の代謝も軟骨魚類とは異なるからサメのようにアンモニア臭くない。硬骨魚類が食用に適しているのはこのためである。その上、肺が退化してきた浮袋(鰻)を腸管の一部にもっているのである(Fig. 7)。これでわかるように、硬骨魚類はデボン紀に一度上陸して陸上の

生活を経験し、重力を体験してから再び海や湖に回帰したかなり高等な脊椎動物なのである。

この過渡期の生物としてアマゾン流域に生息する肺魚や様々な空気呼吸を行う魚類の存在が知られている。脊椎動物は、腸管呼吸を一つの特徴としており、肺は腸管粘膜に由来する。従って肺が一大免疫器官なのであるが、このことは今日医学的には殆ど認識されていない。

呼吸は内臓系の仕事であるから、鰓呼吸のように平滑筋で律動的に遂行されなければ、生命体にとって好ましくない。心臓は鰓呼吸運動によって動かされた脈管の発展したものと考えられるから、命に最も基本的で原始的な運動が太古の生物の呼吸運動であったと考えられる。

脊椎動物の上陸は、この呼吸運動を間に合わせの体壁系横紋筋で代行させることとなった。鰓器は水中では有効であったが、空気に対しては機能できなかったから、陸に上がった動物は咽頭粘膜で呼吸を行い、時間をかけて鰓囊の腸粘膜で酸素を吸収した結果腸管が袋状に発展しやがて肺が開発された。この時に鰓腸の平滑筋を鰓弓部に置き忘れたのである。実際には生命体の各器官には意志はないから、忘れたわけではなくて、平滑筋と一体となって発展してきた腸管の機能が、袋状の腸管と別の機能を持つ筋肉群に分離したのである。

腸管粘膜は元来、気体も液体も吸収できる器官である。ドジョウが腸呼吸をすることはよく知られている。呼吸を皮膚から腸管に取り込んだ最初のムカシホヤのように、この上陸劇では鰓囊を胸腔に引きずり込んだのである。これも実際には形成された咽頭蓋が力学的に安定した胸腔に必然的に収まったものとみられる。これにより、鰓弓のあった咽喉部がくびれて顎が形成され、漸く頭蓋・顔面が体幹から独立した(Fig. 6, 7)。

人間の頭蓋・顔面は、最初のムカシホヤでは、生命そのものと言える鰓孔をもった口であったが、進化して頭部、頸部、胸腔、尾部の四つに分化した。顔面頭蓋が内臓系と体壁系の合体した唯一の部分であることがこれで分かる。つまり顔面は、口を中心とした命の本体であったものが、生命を代表する器官に進化したものとみることができる。

それでは鰓の部分に置き忘れた鰓弓の呼吸内臓筋は一体何になったのであろうか?これが哺乳動物、特に人間でよく発達している表情や発語、咀嚼・嚥下を司る横紋筋群を中心とする各器官に変容したのである(Fig. 8)。つまり陸生動物は、呼吸がすべて横紋筋で賄われているので、原初の生命体としてのプログラムから大きく逸脱しており、これが生命体にとっての最大の欠陥となっている。体壁系の筋肉は、脳の運動システムであるから、生涯にわたる自律的運動を担当するには適していない。他の体壁系筋肉運動や頭脳作業においては、往々にして呼吸筋が抑制的影響を受ける。つまり息を詰めることになる。また、睡眠中にも横紋筋は著明な抑制を受けるので、よく呼吸が止まることがある(Fig. 6, 7)。呼吸系が人体における構造欠陥と見られるゆえんがここにある。

既に動物が陸に上がってから三億年以上経過しているが、未だに呼吸に必要な平滑筋は獲得されていない。進化は時間軸に沿った一方方向性のもので、環境を含めたあらゆる物理化学的影

響や変化に対する生体力学的対応の集積にすぎないものである。従って、鰓弓の平滑筋が自律的運動を失えば横紋筋になることはあっても、呼吸を担当する横紋筋からは何億年待っていても平滑筋が誘導されることはありえない。また、平滑筋となるような突然変異などが生ずる可能性もない。これが脊椎動物の進化様式であり、つまりは遺伝様式であろう。

ここで脊椎動物の遺伝現象がにわかに問題となるのである。これまでに見てきたように脊椎動物に限れば、生命体の形態は機能と共軛しながら力学対応に従って、なめらかに進化しており、突然変異で認められる断絶のある形態・機能の変異は、奇形や代謝性の疾患以外には認められない。変異とは、この文字が示すように脊椎動物においては常に正常からの逸脱であり、形態と機能の劣化につながる。形態と機能の調和を伴った高次化は、突然変異で獲得されるのではなく力学対応の集積つまり古い言語で言えば獲得形質の遺伝によるように見える⁹⁾。

単なる力学対応で生ずる骨髓造血から呼吸系の変遷に伴う脈管系の一大変革劇に至る、数百数千の連続する発生過程の改変が、すべて系統発生から個体発生に及ぶ一連の遺伝現象に取り込まれているのである(Fig. 2, 3, 5-7)。これに対して呼吸を担当することとなった横紋筋が平滑筋に変容するという、ただ一つの変異すら三億年の間に生じていないのである。これは一体何を意味するのであろうか？曲がりなりに横紋筋で機能できれば、生体力学的には神経系のリズムのある刺激誘発システムを維持すればそれ以外の構造の開発はもはや起こらない。つまりは進化の原動力は生体力学的要因であり、形態の変容は機能の変化に対する単なる対応なのであろう¹⁰⁾。人間の気道系を例に取れば、哺乳動物は一般に鼻腔と気管が喉頭で連続しており、呼吸という内臓系の仕事が常に維持されるように保証されている。ヒトの乳児においても猿と同様に連続性が保たれている。しかし言語を習得す過程でこの連続性が失われ、食物の道と空気の道が咽喉部で交叉するようになる。つまり咽喉部の構造が発語・発声という人類特有の行動習慣に対して、生体力学対応の結果生じた人類特有の構造欠陥と見られるのである。従って口呼吸習癖は人類特有のものといえる。この生体力学対応ももとより遺伝現象に取り込まれているのである^{9, 10)}。

ある環境で眼を必要としなくなったり、歯を必要としなくなった動物は、それらの遺伝子を保持したままその器官の機能を失ったり、器官そのものを失うが、それが確実に遺伝するのである。これは価値観のある用語を用いれば喪失形質と呼ぶことができる。喪失形質は遺伝するが、生体機構の主要部はすべて遺伝子の発現による形態・機能の表現と考えられるから、これは機能を失うことによるメッセンジャーRNA以下の遺伝子発現の廃用とみられる。従ってDNAを保持したまま機能に共軛した形態が失われるが、これが必ず遺伝するのである。喪失形質と獲得形質は、生命体にとっては等価である。これらの用語は人間中心主義の目的論的な価値観と一体となっているものである。このような用語を用いて生命科学を論ずる限り、生命現象を力学的世界観の中で科学的に解明することは困難であろう。個体にとってもはや不用となったものを捨てる喪失形質こそ、生命体にとっては進化であり、獲得した新たな形質なのである。つまりこれ

らの形質変化は単なる生体力学対応の集積の結果の様式の違いにすぎないと言うことができる。これらの形質の集積現象は、現在の我々の大脳、顔面の形態、咽頭部の構造や歯、盲腸や生殖器、生殖腺、骨盤の形態や乳腺などにおいても進行している。

突然変異のみで、自然選択されるにしては、余りにもコラーゲン・パタイト系骨格の力学対応の単純な方向性に一致し過ぎているように思われる。我々には脊椎動物の基本体制をよく理解し、それから逸脱している部分の弱点をよく知り、健康の維持と増進のための対応を考える必要がある。

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 - 根源現象とメタモルフォーゼ。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) Halsteas LB, 田隅本生 監訳：脊椎動物の進化様式。第1版、法政大学出版局、東京、pp.46,61, 1984。
- 5) Wolff, J: Ueber die innere Architektur der Knochen und ihre Bedeutung für die Frage vom Knochenwachstum. Archiv für pathologische Anatomie und Physiologie und für klinische Medizin, Virchows Archiv 50:389-453, 1870。
- 6) 西原克成：骨格系器官の進化と代替生体材料の医学応用 - 系統発生学に学ぶ形態学的機能適応システム -。生体材料, 11(5): 31-40, 1993。
- 7) 西原克成：系統発生学とバイオメカニクス - 脊椎動物の進化の生体力学 -。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。
- 8) 西原克成：顎口腔の器官特性とバイオメカニクス - 顎口腔疾患の診断と治療のための新しいパラダイムの導入について -。日口診誌, 6(2): 326-341, 1993。

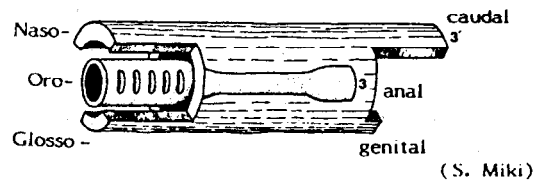


Fig. 1-A Basic System of Vertebrate "Outer et Inner Tube"

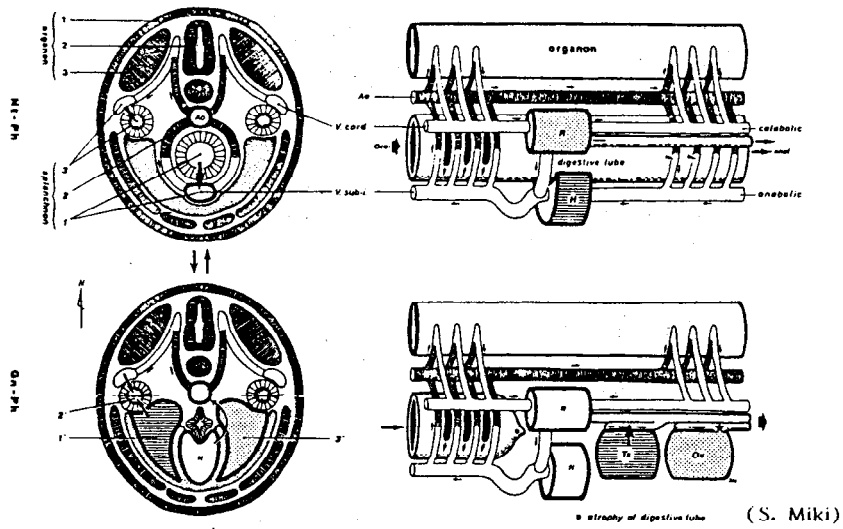


Fig. 1-B Animal and Vegetable System (Nutritive-Generative Phase)

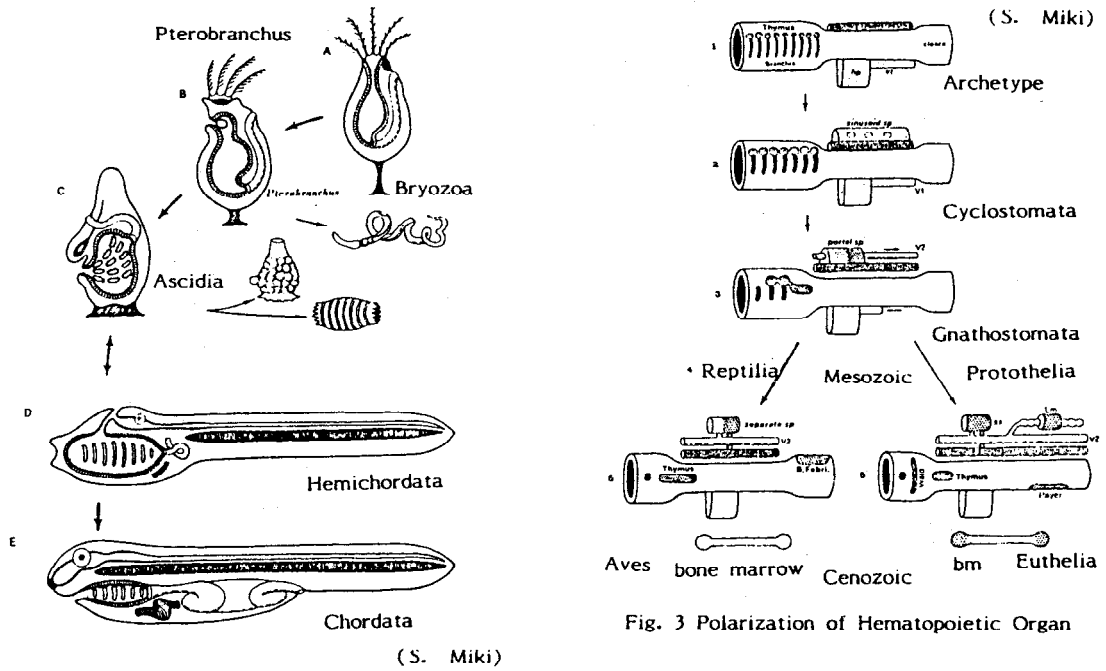


Fig. 2 Origin of Vertebrates

Fig. 3 Polarization of Hematopoietic Organ

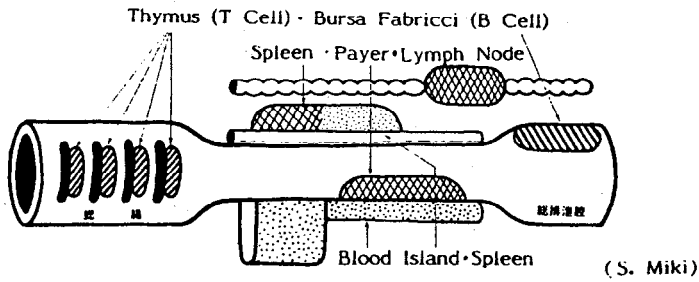


Fig. 4 Myelotic and Lymphatic System

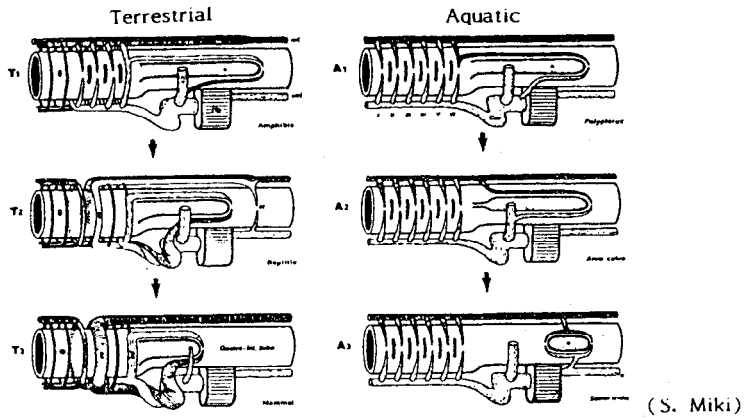


Fig. 5 Divergent Evolution of Archaic Lung—Genesis of Air-bladder

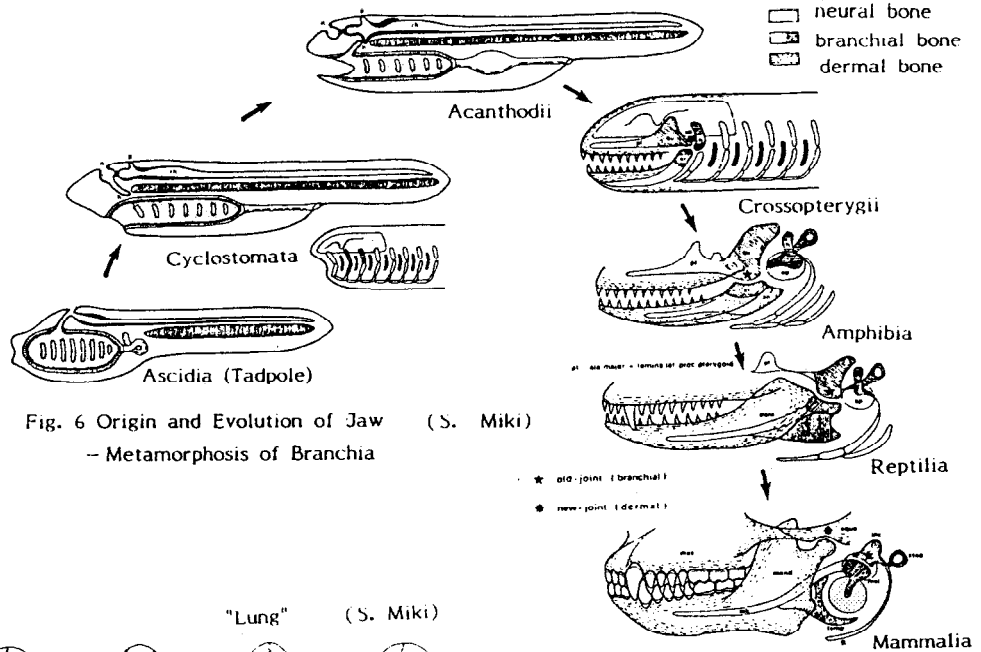


Fig. 6 Origin and Evolution of Jaw (S. Miki) — Metamorphosis of Branchia

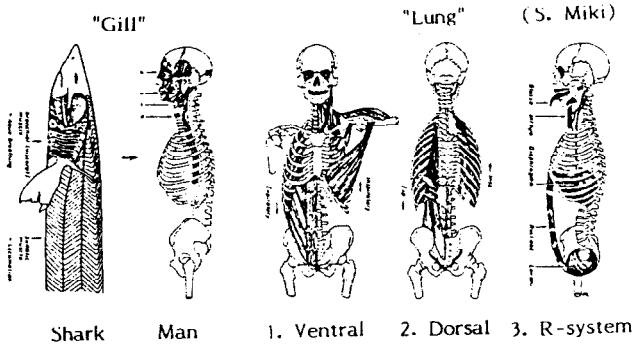


Fig. 7 Breathing Muscles—Aquatic and Terrestrial

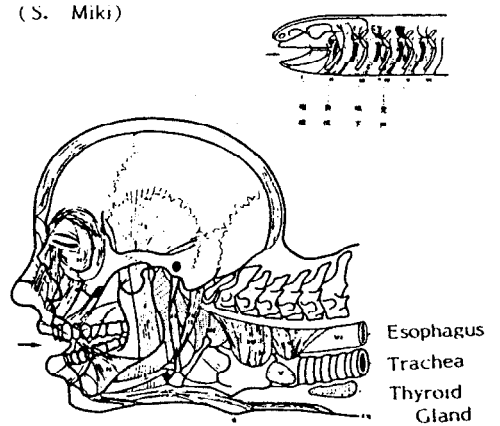


Fig. 8 Metamorphosis of Branchial Muscle