

生命進化を顔で見る

—「顔の科学」と「歯の科学」—

西原 克成

東京大学医学部口腔外科 講師



著者略歴

にしはら かつなり
西原 克成

昭和46年東京大学大学院(医)修了。同年学位受領(医博)。現在、東京大学医学部口腔外科講師、科学技術庁無機材研客員研究官、順天堂大学形成外科、北海道大学歯学部、九州大学歯学部大学院、広島大学工学部大学院、岐阜大学工学部非常勤講師を歴任。

顎顔面バイオメカニクス学会理事、日本バイオマテリアル学会評議員、日本口腔インプラント学会評議員、日本人工臓器学会員、日本機械学会員。

第32回日本人工臓器学会にて、人工骨髄造血巢の誘導の研究でオリジナル賞1位受賞。

[研究分野]口腔科臨床医学、バイオメカニクス、免疫工学、実験進化学手法により人工骨髄、人工肝臓、人工脾臓の開発に従事。

[著書]生物は重力が進化させた(講談社ブルーバックス)、顔の科学(日本教文社)、呼吸健康術(法研)、赤ちゃんはいつ「人間」になるのか(クレスト社)、健康は「呼吸」で決まる(実業之日本社)

1. 脊椎動物の誕生と顔のはじまり

脊椎動物の進化が重力をはじめとする力学作用に対する生命体の生体力学作用によって生ずることを種々の事例や実験進化学手法によってこれまで検証してきた。脊椎動物の生命を代表する複合器官が顔である。本稿では生命進化を顔で研究した成果について述べる。動物の骨格の形態は同じ遺伝形質のまま体の使い方、つまり骨格に内的外的に作用する力学刺激で力学の作用する時間とともに少しずつ変化する。哺乳類の顔面頭蓋の中で力学機能体として最も特殊で難しい器官が歯である。

現代医学・生命科学のみならずサイエンス全般にわたり、大きな盲点がある。重力をはじめとする力学作用と粒子性を帯びた波動の電磁波などのエネルギーを質量のない物質として扱っていないのである。携帯電話や電子機器でペースメーカーや飛行機の計器が変調することを、世界中の物理学者も工学者も予想することができなかった。文明国で日常に飛び交うおびただしい電磁波で、最近では伝書鳩のレースで、帰還できなくなっている鳩が急に増えてきても、関連の学者ですらその原因に思い至らないという。生命科学の統一理論というのは、医学や生命科学に質量のないエネルギーを正当に導入するだけのことである。それにより一気に低迷していた脊椎動物3つの謎が解明される。

エネルギーには重力(質量のある物質に備わった引力)をはじめとする力学刺激(質量のある物体の空間移動で生ずるエネルギー)と温熱・光・電磁波の2種類がある。宇宙を構成する時間と空間と質量のある物質と2種類のエネルギーは、すべて対等(等

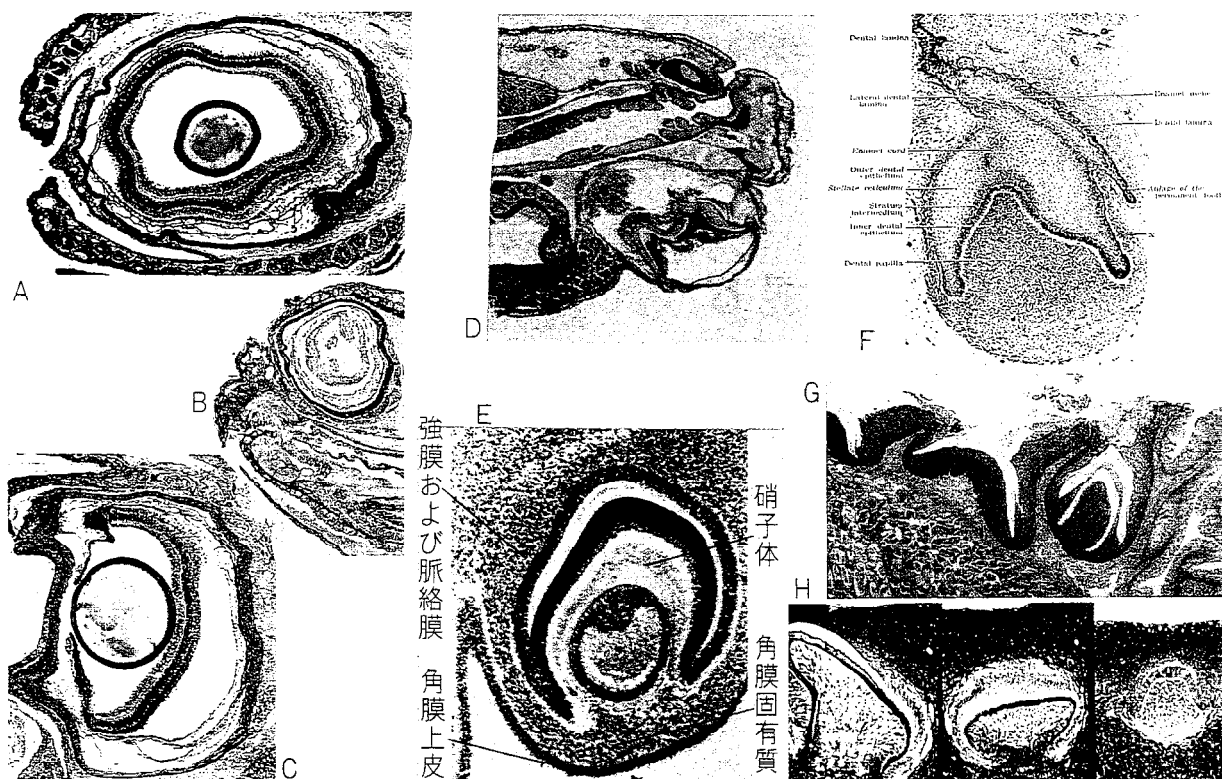
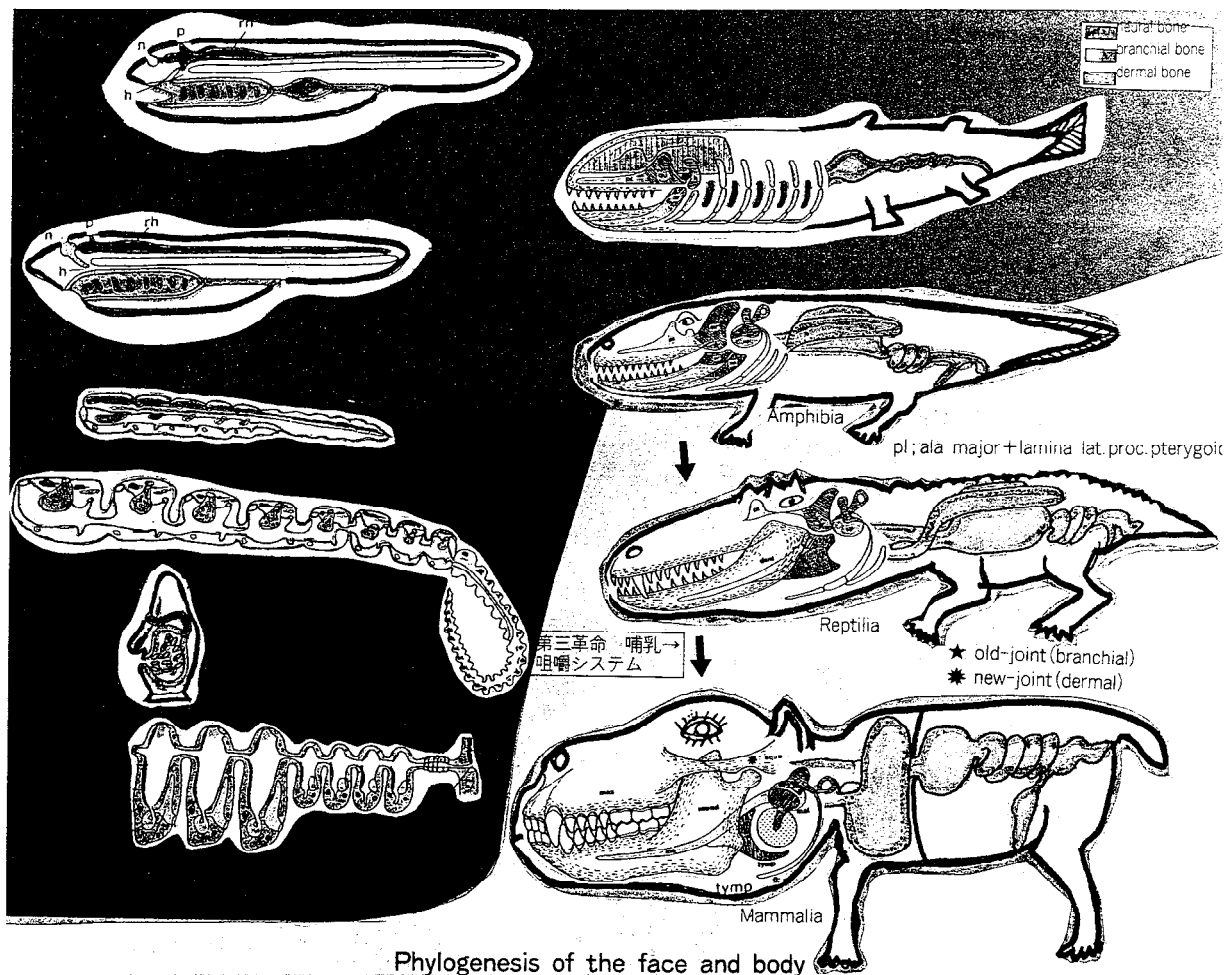


図 1 A・B・C アカハライモリの眼の組織標本写真
 D ゼノプス（アフリカツメガエル）の眼を上下逆にした標本写真
 E ヒトの胎児の眼の組織標本写真（ロンドン大学）
 F ヒトの胎児の歯胚（Orban）
 G 無顎類（ヤツメウナギ）の軟骨歯の組織標本
 H ゼノプスの皮膚をドチザメに移植して生じた皮膚歯（楯鱗）のキメラ

価)であるというのが Einstein の Simple Theory である。生命体は、宇宙現象のすべてが包括された有機体の半開放系の中で有機的にこれら 5 種類の構成要素（クイントエッセンス）が互いに作用しあって、エネルギー代謝すなわちエネルギーの変換により、質量のある物質を温熱、光、電流、電磁波、力学機能に変換しながら有機体自体のリモデリングを営むシステムである。図 1 に示すのはヒトの眼の胚（胎生期の眼）とサンショウウオの眼の組織標本とヒトの歯胚（胎生期の歯）とヤツメウナギの軟骨歯の組織標本写真である。眼も歯も外胚葉上皮と間葉組織が上皮間葉相互作用のもとに作る感覚器官である。眼は光波に対応し、

歯は力学作用に対応する。2つのエネルギーはクイントエッセンスでは性質を全く異にするが、生命体の対応は全く同じである。ただし、構造が逆転しているのは、眼は外から来る光を受容して電流に変換する構造となっているのに対し、歯は食物を砕く力学作用を一旦負担して歯が vehicle となって、力学刺激を生体の論理の流体力学に変換して生体組織に翻訳するシステムであるからなのである。

従来、顔面頭蓋の発生の源は考察されることが少なく、大雑把にホヤが幼形進化して顔ができたと考えられていたが、原索類は体節動物ではないから、脊椎動物の成立は、原初の革命が原索類からナメクジウオ



Phylogenesis of the face and body

図 2a 脊椎動物の顔と体の系統発生の革命期 (進化の革命期)

ホヤの第一体節が頭蓋となる。体のパーツはすべてムカシホヤの時代に存在した器官が変容したものである。

を経て無顎類が成立するまでと書き改めなければならぬ。前々号の脊椎の成立で述べたように、単体節のサルパが遺伝子重複を重ねて、腸管のつながった60個体が1つの鎖サルパとして独立して頭進運動を始めると体節動物の脊椎動物が成立する。この脊椎動物の原型では、口から餌とともに入る海水の酸素は7から10個のサルパの鰓で吸収され、その後のサルパの鰓は、酸素がなくなるため用不用の法則で閉鎖し、腸管はもっぱら餌の消化を始める。餌が腸管内を時間とともに移動すると消化されて吸収され、老廃が腸に排出され残渣とともに腸管の端の肛門から排除される。肛門以後の

腸管は通過する物がないから消退する。こうして、鰓腸と消化管と尾が分化する。鼻と眼と耳衡器は脳神経の飛び出したものであるが、これは第1体節のホヤのものである(図2a)。とすると顔の原器はやはりホヤに帰せられることになる。1つずつのサルパの個体にはそれぞれ脳があるが、第2体節以後の鰓腸部では、鼻・眼・耳衡器を失い、時間の作用でこれらの脳がまとまって鰓脳を形成する。これが延髄となる。消化管部の脳は鰓の機能を失い腸管のみとなると、これが脊髄神経となる。前々回に頭蓋骨が椎骨の特殊化したものであることを述べたが、実際には逆に椎骨が第1体節を

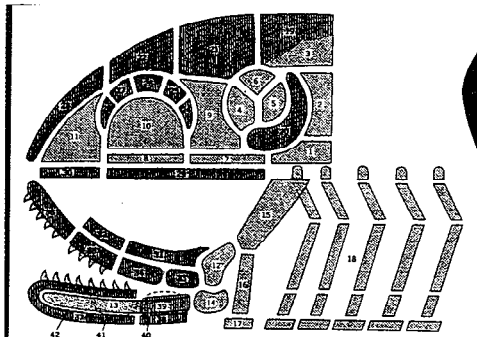
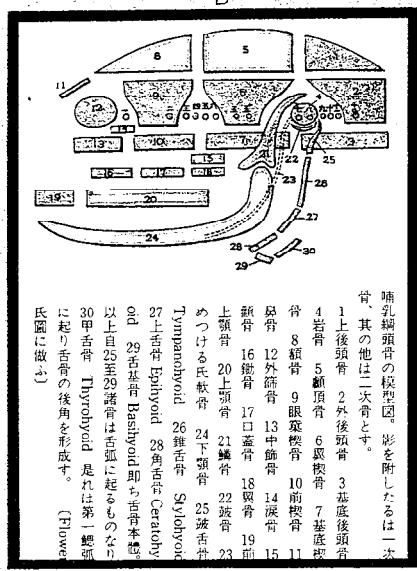
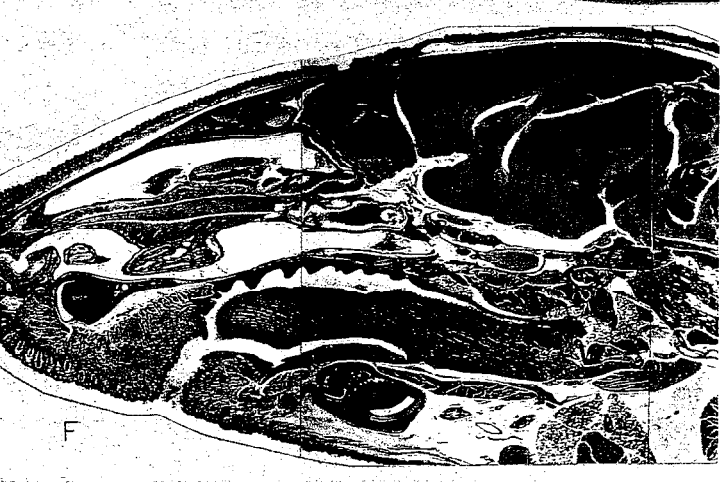


Figure 12-12. General plan of the vertebrate skull. Dermal bones, lined; replacement bones, heavy stipple; cartilage, light stipple. The numbers correspond to those in Table 12-1. Except for the omission of the opercular series, the relations shown are such as prevail in a bony fish. In tetrapods, particularly reptiles and mammals, the bones of the upper jaw are affixed to the floor and sides of the neurocranium, more or less obscuring the primary cranial bones. (Based on a similar figure by Rand.)

図 2b ㊶原始脊椎動物, ㊷哺乳類との基本構造

右上から㊸サメの稚魚(軟骨魚類), ㊹ムツゴロウ(硬骨魚類), ㊺アカハライモリ(両生類), ㊻ラット(哺乳類)

複雑な原始型がシンプルな高等型に変化する要因は力学作用で、機能対応による効率化である。出発点では遺伝形質は同じで、種が分離すると後追いついて遺伝子が突然変異でわずかに変化する(分子進化)。



哺乳綱頭骨の概略図。影を附したるは一本骨、其の他は二次骨とす。

1 上後頭骨 2 外後頭骨 3 基底後頭骨
4 岩骨 5 顛頂骨 6 翼楔骨 7 基底楔骨
8 額骨 9 眼窩楔骨 10 前楔骨 11 鼻骨
12 外篩骨 13 中篩骨 14 淚骨 15 額骨
16 嗅骨 17 上蓋骨 18 側骨 19 前上額骨
20 上額骨 21 槌骨 22 鼓骨 23 鋤骨
24 下額骨 25 鼓舌骨
26 錘舌骨
27 上舌骨 Epihyoid 28 角舌骨 Ceratohyal
29 舌骨 Basihyaloid 即ち舌骨本體
以上自25至28諸骨は舌弧に起るものなり
30 甲舌骨 Hyothyoid 是れは第一鰓頭に起り舌骨の後角を形成す。(Flower氏圖に倣し)

形成するホヤの頭蓋に相当する scaffold の特殊化したものである(図 2 a)。「腸は考える」といわれるが、体節からなる腸は、サメではラセン腸としてその名残を示すが、腸の考える部分の脳は体節が後部に存在するために嗅・視・平衡と鰓の脳を失い、腸の分泌や血管運動のみが用不用の法則で残ったものである。脊椎動物の進化には、原初の革命(体節性の無顎類の誕生)、第 1 革命(歯と顎の成立した棘魚類の誕生)、第 2 革命の上陸(肺と骨髓造血の成立による両生類、硬骨魚類、哺乳類型爬虫類、爬虫類・鳥類の誕生)と第 3 革命の哺乳類の誕生の 4 つのステージがある(図 2 a)。これを顔に着目して実際の標本で軟骨魚類から哺乳類までを比較したのが図 2 b である。この過程でコラーゲンの脊索が軟骨を経てアパタイトの硬骨となり、軟骨性の皮歯(楯鱗)がアパタイト化しさらに硬蛋白のウロコと毛髪に変化するほかは、新しい器官は何一つ獲得されていない。原始型の軟骨魚類とそれ以外の動物のパーツの遺伝形質は、大元では共通している。腸管内臓器官はすべて腔腸動物のヒドラの時代から細胞として散在するものが器官として統合されるだけである(藤田恒夫)。

従来の進化論では時間の作用と空間の作用、2つのエネルギーの作用を見落として、ただ質量のある物質が、抽象的な時間を生殖による遺伝子を通して、淘汰圧なる訳のわからない力で突然変異と自然選択のシステムで進化が起こると考えられていた。淘汰圧など存在するはずがない。脊椎動物の進化は時間の作用と、空間移動の重力の作用と質量のある物質作用と熱波・光波・電磁波・放射線等のエネルギーの 5 つの作用の複合で、同じ遺伝形質のまま形が 1 代の

うちに変化し、これが代を隔てて少しずつ蓄積することである。哺乳類の頭蓋骨を例に挙げると、遺伝形質のパーツはすべてこの宗族で共通していることが解剖学的な比較によりわかる。食物が大略一定しているのが哺乳類の特徴の 1 つである。これを動物の食性というが、食性が変化して一定になった時が亜種の分離のはじまりである。食物の力学的物性に従って頭蓋の形と歯の形が力学対応して決まる。食物が変化してそれが一定化すると時間経過とともに歯と顔の形が力学対応して少しずつ変化してくる(図 3 a)。これを哺乳類の適応放散と呼ぶ。この時体の遺伝形質は同じものから出発している。ヒトの分化は食虫類から出発し、よく咀嚼する食べ方によって口裂が狭まり火の使用により、かじり取る機能から咀嚼へ移り、頬が発達してやがて口裂がなくなる(図 3 b)。図 3 c にヒトとサルとサルの矢状断の解剖写真を示す。

生命現象では時間の作用と温熱の作用はことのほか重要である。哺乳類は、37°C の恒温でリモデリング等の遺伝子の発現の時間が一定になっている。この時間には、重力作用も影響する。体温が数度下がると遺伝子発現の時間が大きく変調する。0°C に近づくと遺伝子発現は止まり生命体の時間も止まる。Einstein は光を仲立ちとして時間と空間が相対的關係にあることを明らかにしたが、生命体を扱わなかったから統計的量子論の欠陥を克服することができなかった。実は彼は時間と温度が深く相関することを見落としたのである。絶対零度では時間が止まる。極低温で超伝導現象が起こるが、電子の単位時間に金属内を走る速度が温度の関数で決まっているから、常温で極低温の現象を観察していると電子の秒速が

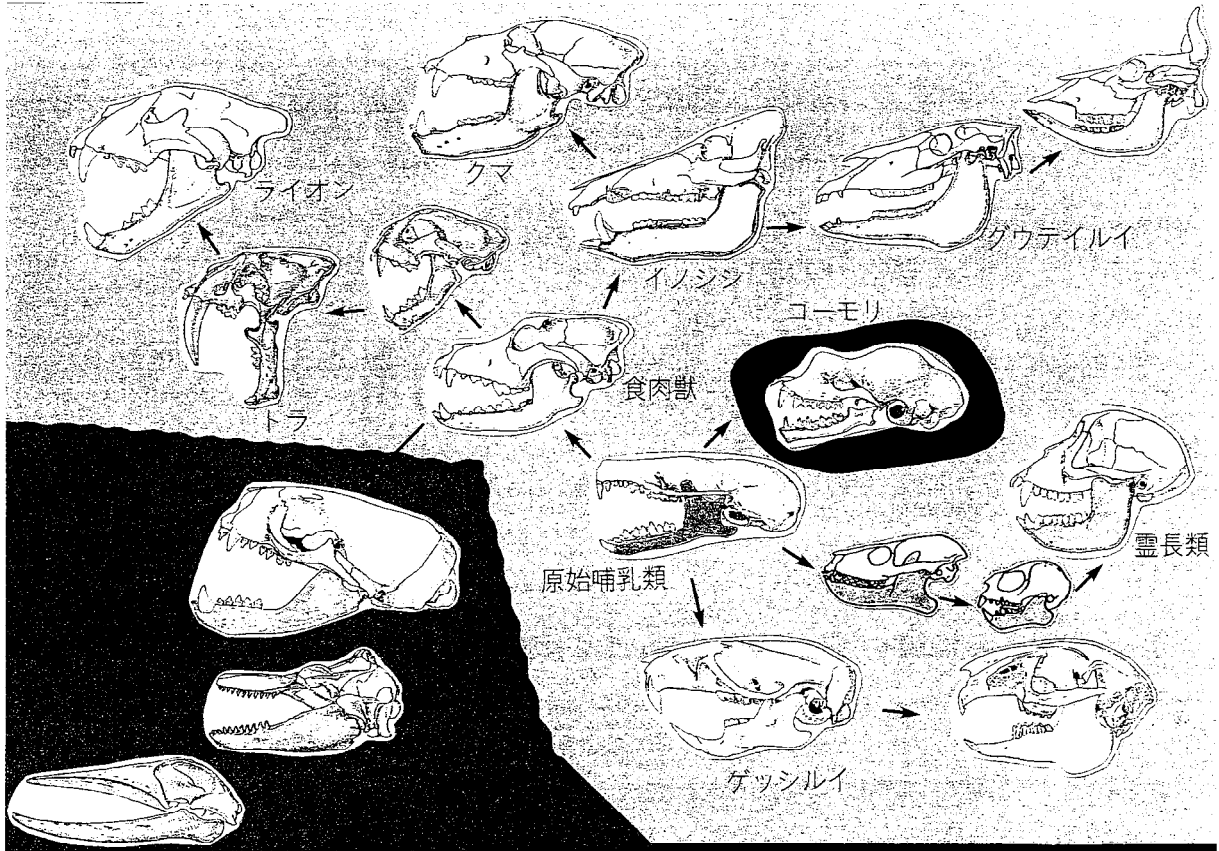


図 3 a 哺乳類の食性に対応した頭蓋と歯の分化—遺伝形質は同じで形が食物の性質と食べ方によって決まる。

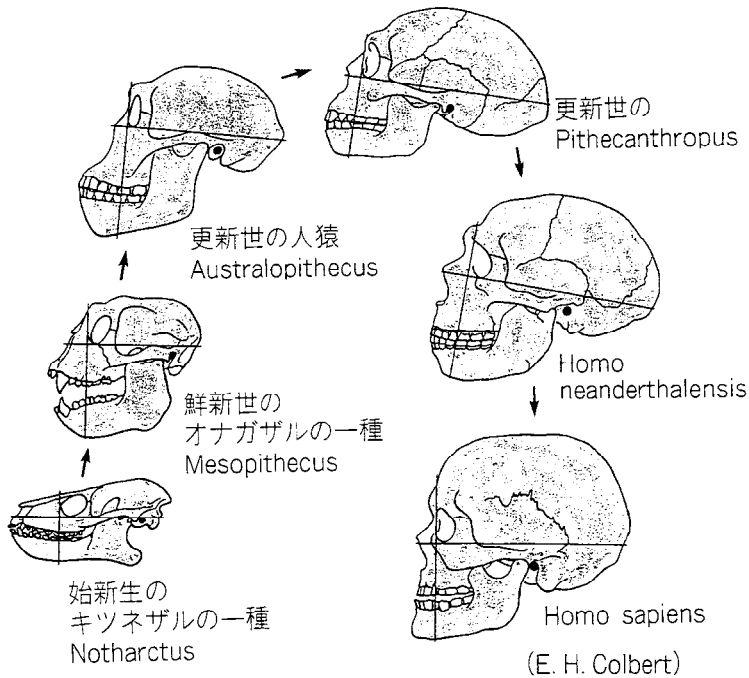


図 3 b 霊長類の歯と頭蓋の食物に対応した変化
 同じ遺伝形質のまま、咀嚼と生活姿勢と火を用いた調理法の発明でヒトの形は急激に変化する。



図 3c ヒトと猿(日本猿)の矢状断の比類サルはヒトに比べて極端に舌が大きく咽頭部が短くて、気管と鼻腔が繋がっている。ヒトでは発語のため咽喉部が異常に長くなる。

光速に近く見えるのである。つまり時間も空間も質量のある物質もその反応速度もすべてはエネルギーと切っても切れない関係にあるのが宇宙の構成要素クイントエッセンスなのである。この観点から脊椎動物の生命現象を再度詳しく観察すれば、この宗族の3つの謎、進化の法則性、免疫システムと骨髄造血の発生は、もうすでに解明されていることがわかる。

2. 顔と口と歯

脊椎動物は腸管を運ぶ担体 (vehicle) であることを先に述べたが、腸管の望むところから従って嗅器・視器・聴器が水先案内をして食物と生殖の場を求めるのがこの宗族である。第1体節の腸管は食物の入り口の口腔であるから、顔の原器の本質は口である。口腔には脊椎動物のはじまりの無顎類のステージから軟骨性の歯がある(図4)。この歯は元来がホヤ肌にあった軟骨性の楯鱗

を原器とし、外胚葉系の間葉に由来する。これが太古の無顎類の軟骨皮歯と軟骨歯に受け継がれ、さらに棘魚類に引き継がれてアパタイト化する。この直系がサメである(図4B)。先に述べたように、眼と歯は機能こそ異なるが、質量のないエネルギーに対応した感覚器官に由来するものである。生命体にとっては、一定の波長の光(電磁波)と一定の強さの力学刺激は等価なのである。光のない洞窟で生活するサンショウウオや魚類(メクラウナギ、メクラウオ)は一定の時間の経過後に眼の遺伝子形質をもったまま、用不用の法則に従って視力を失うが(図5)、アリクイのように一生涯にわたり一度も歯を使うことのない食性の動物は、歯に対応するはずの力が作用しないと一定の時間の経過後に歯の遺伝子を持ったまま歯を失う。したがって現生の鳥類にも歯の遺伝子は保存されている(ニワトリの歯—グールド)。

捕食器・咀嚼器の効果器官である歯の生物学的特性については、従来等閑視されていたが、咀嚼機能を考える際に、歯の器官特性の解明は必須のことといえる。器官の本質を知ろうと思ったらその由来をたずねよというのがGoetheの形態学のあり方である。歯の源を原始脊椎動物に辿るとサメの楯鱗の皮歯にたどり着く(図4B)。しかしこの楯鱗は無顎類では消失し、軟骨性の皮歯に相当するものが鰓軟骨骨格の scaffold に由来する顎弓軟骨に存在する(図4A)。ホヤの軟骨性の楯鱗は無顎類の軟骨歯に受け継がれるが、現生のこの宗族の皮歯はすべて消失し、軟骨成分に近い多糖類が皮歯に分布している。従来は皮歯の原器はアスピディンであるといわれていたが、太古の時代にムカシホヤから体節化した無顎類で

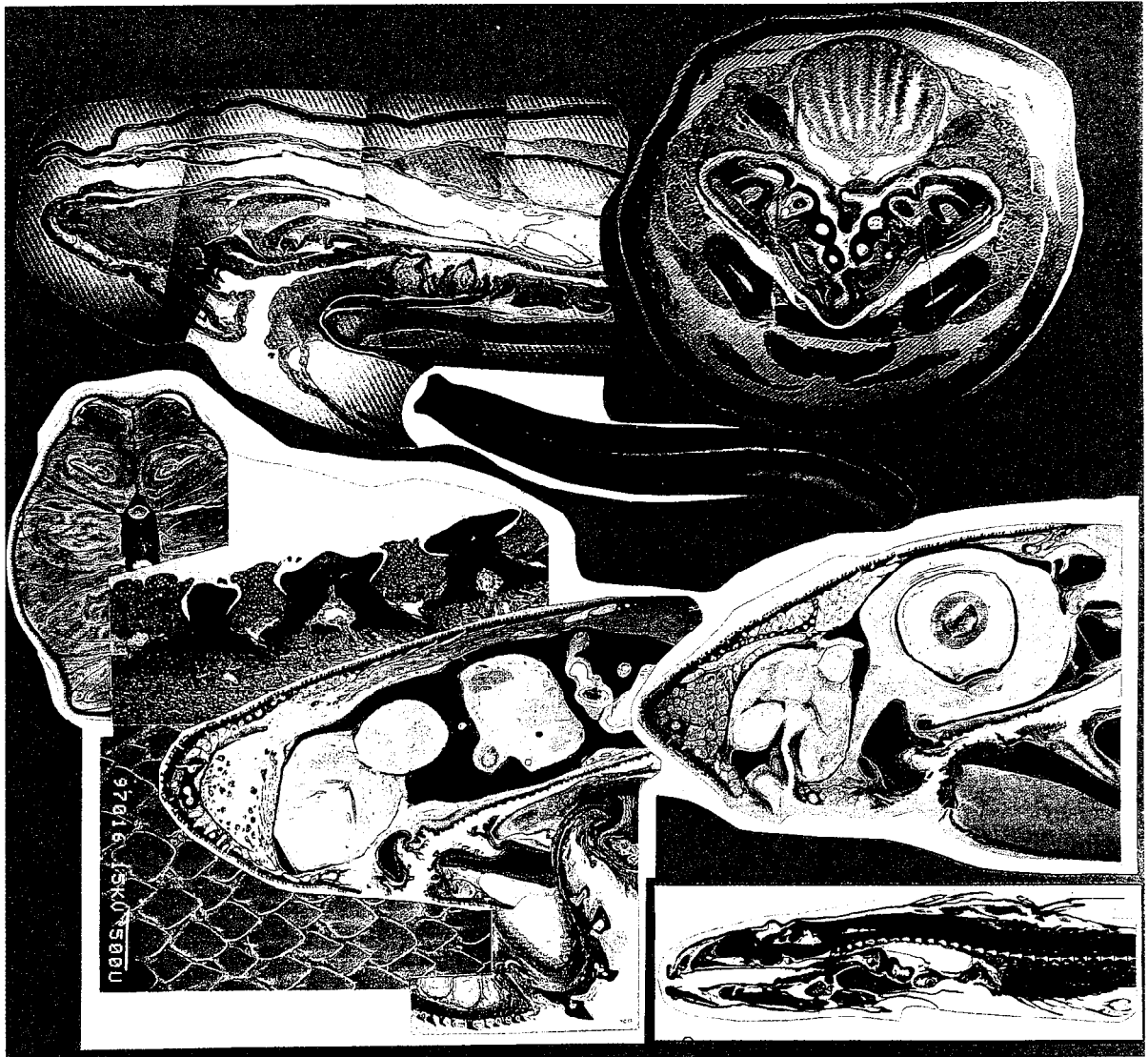


図 4 A 無顎類ヌタウナギの頭部の矢状断（左）と横断の切片
軟骨歯と軟骨の鰓弓と嗅器が見える
B サメの頭部の矢状断2つ（同じ個体）と皮歯（楯鱗）と歯，および胴の背部の横断面図。
C 硬骨魚類
腸管と並行してデボン紀に肺となった鰓の袋が鰓となっている

は軟骨性の楯鱗があったはずで、これが活動的になった段階でアパタイト化してアスピディンとなったと考えられる。したがって最初の体節動物が鎖サルパから誕生して無顎類ができた段階では皮膚にムカシホヤと同様の三錘歯形の軟骨の楯鱗が存在したはずである。軟骨はヌタウナギの多糖類から成る皮膚と同様に化石として残り難いので今まで見過ごしていたのである。ホヤの

体節化による無顎類の誕生とホヤ肌の軟骨性の楯鱗の存在により、脊椎動物の源に関するこれまでのミッシングリンクはほぼ完全に解消した。

歯と骨の原器は、皮歯の原器、アスピディンといわれる複合体で5億年前に無顎類の甲皮を覆っていた。食物の摂取という生体力学刺激に対応してアスピディンの一部が口の周囲に発達して、歯を形成し同時に



図5 メキシコメクラウオは視力を失っているが眼が組織標本に歴然と存在する

顎が鰓弓から分離した。著明な力学刺激のない部位にはアスピディンは発達しないから、肛門に歯のある脊椎動物は存在しない。アスピディンは象牙質と骨組織との複合体で、破れると組織が流出して硬組織を修復することが、化石の研究から知られている。したがって皮膚の原器でもあり、生命体を守る鋭敏な感覚器官と考えられる。甲皮のアスピディンの多くは、鋭敏な感覚機能を失い楯鱗、鱗、毛髪、羽毛などに変容するが、口腔で発達した三叉神経領域に分布するアスピディンは、三叉神経の感覚受容器の歯として鋭敏な感覚機能を残したまま摂食器官に変容したのである。歯は5億年前の形状をほぼそのまま人類に伝えている数少ない遺産であり(Halstead)、眼とほとんど同じ程度の極めて鋭敏な感覚器官である。歯の本質的機能の1つは、個体を守る鎧に付属した鋭敏な感覚器官であり、侵襲が甲皮に及ぶと生命を脅かす損傷として直ちに修復されたのである。人間においても、歯

は3 μ mを識別することができ、象牙質に侵襲が及ぶと生命を脅かすほどの恐怖心を伴った、名状しがたい痛みを呼び起こす。これは、太古の生命の中心に位置する内臓系の三叉神経の感覚受容器の持つ生命記憶に由来する。歯は、従来我々が考えていたよりも遙かに重要な器官として、多くの脊椎動物において発生学的に位置づけられている。

高等な生命体の咀嚼器へと進化した歯は、Cuvierがいうように生命に最も本質的器官なのである。極めて特異な器官であるため、歯に関する学問は約200年前から数十年前までは、当代一流の学者によって競って研究された分野であり、古生物学、系統発生学、比較形態学、動物分類学、解剖学、人類学、遺伝学などの方面で膨大な学問的蓄積のある分野である。

歯の原形は、脊椎動物の出発点においてアスピディンとしてすでに骨組織との複合器官を形成していたが、これは今日のサメ

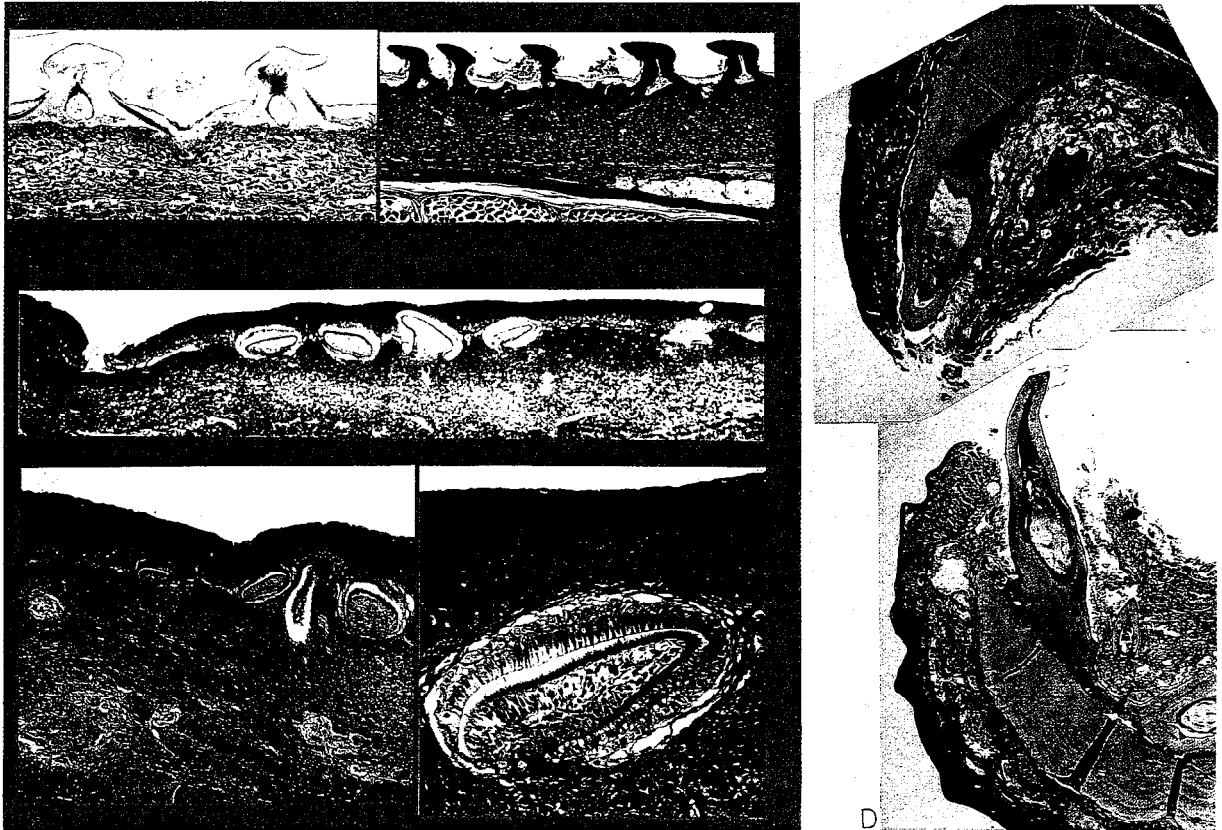


図6 A サメの皮歯（楯鱗）は部位によって形がちがう。
 B・C セノプスの皮をサメの皮膚を除いたところへ移植するとセツプス（アフリカツメガエル）とサメのキメラの楯鱗が形成される。
 D アカハライモリの歯と顎骨
 骨性癒着様式の歯は必ず折れるので、次の歯が準備されている。つまり多生歯性の歯である。

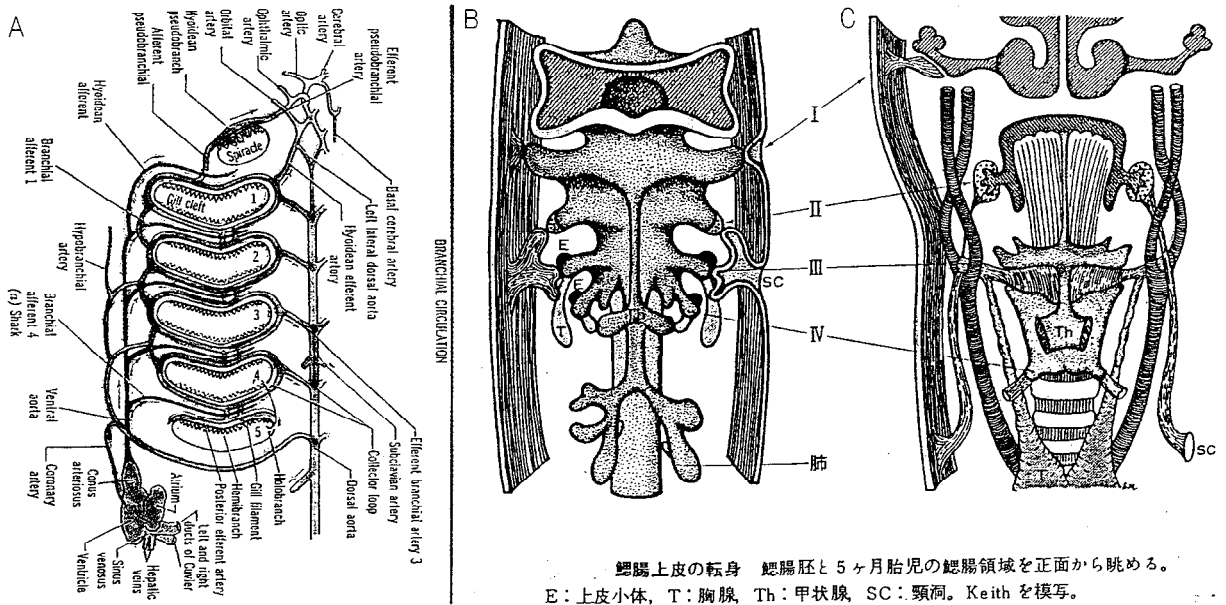
の皮歯と車軸歯に受けつがれている。サメの楯鱗の骨は結合組織と線維結合している（図6A）。直接骨と接合していたアスピデン歯は、両生類・爬虫類（図6B）化石爬虫類（恐竜）に引きつがれ、哺乳類型爬虫類を経て約1億年を要して靱帯結合の哺乳類の歯に進化する（図2a）。現生の哺乳動物の歯根はサメと同様に、すべて線維骨であるセメント質で覆われている（Weidenreich）が、5億年の進化を経た動物の歯においても、原初の姿が様式を変えて保たれている。この変化で、線維骨のセメント質の外層に靱帯関節が獲得されたということである。顔の成立は、鰓器の水から空気への交換への

対応によって完成する。ここにサメの鰓の血管系とヒトの鰓器の個体発生の図を比較して示す（図7）。

顔の中で力学機能体として最も難しい器官である歯の器官特性を明らかにしないことには顔の変形の法則性が把握しにくい。歯の学問の歴史を辿り、この学問に基づいて歯の代替え器官の開発によりモデル実験を通して以下「歯とはなにか？」を解明する実験について述べる。

3.1 歯の学問の歴史

哺乳類の歯は、形態学的に極めて特殊な器官として、前世紀の中葉から解剖学者・



鰓腸上皮の転身 鰓腸胚と5ヶ月胎児の鰓腸領域を正面から眺める。
E: 上皮小体, T: 胸腺, Th: 甲状腺, SC: 頸洞。Keithを模写。

図7 A サメの鰓の血管系 (比較のため縦にしてある)
B ヒトの鰓部の個体発生の図
C Bの模式図の断面のシェーマ (三木成夫)

動物学者の注目を集め、当代一流の学者が競って研究した。

古生物学では化石の歯と骨を中心として研究されたが、骨と歯は、偶然脊椎動物と哺乳類を定義する器官だったのである。リンネ以後哺乳類の分類と進化は、歯を中心として研究された。なかでも人類進化は歯の形態学が最も重要な研究手段であった。哺乳類を定義する器官の歯と、脊椎動物の定義臓器の骨の本質を究明すれば、当然脊椎動物の謎も哺乳動物の謎も同時に究明される。

19世紀後半からは、アメリカ学派のマーシュ、コープ、オズボーン、パッカー、シン普森、バトラー等の進化学を究明した学者は、ほとんどが歯と頭蓋骨の研究にたずさわった。これらの研究以前には、ヨーロッパの当代一流の動物学者と解剖学者が歯の研究にたずさわって、歯の形態学的研究が進められた。これらの学問の流れを受けて口腔科医である著者が、脊椎動物3つの

謎 (進化学・免疫系・骨髓造血の発生) の解明に取り組んだのである。

ゲーテの創始した形態学の本義は、「生物の器官・部位への命名と生物の形態変容の法則性の解明」であるから、進化の究明の学問ということである。ゲーテは、比較形態学と進化学の概念を導入して、ヒトの胎児にも他の哺乳類と同様に顎間骨 (Zwischenkiefer) の存在することを発見している。

哺乳類の歯は、食性に対応して歯冠と歯根の形が決まるという特性がある。これは骨の持つ機能適応形態の Wolff の法則と同様の経験的法則ということができる。歯根も歯冠も力学対応して形を変えるシステムを骨と同様に持っていることを意味するが、この特性は骨性癒着の歯すなわち両生類・爬虫類の歯にはない。最適形状システムには歯周靭帯が必須なのである。爬虫類の歯は一般に同形歯・多生歯で骨性癒着する。歯と骨とはヤング率とポアソン比が異なる

ため、反復荷重下や温熱刺激下で癒着部が破断し抜け落ちると、待機していた歯がすぐに萌出する(図6B)。現代世界中の歯科と整形外科で行われているインプラントは、まさにこの爬虫類の歯のシステムである。現代工学理論では、ヤング率・ポワソン比の互いに異なる剛体を剛のシステムで接合することを誤りとして一切排除している。エネルギーを受けると分子の収縮率の違いで理論破壊強度の3倍を想定しても壊れることが明らかとなっているためである。金属性のインプラントが折れにくいために、ヤング率とポワソン比の違いから、その周囲骨が力学刺激によって滝壺状に破壊される。ヤング率を見つけた Young はニュートン直後の英国の臨床医であるが、生体工学だけに現代工学理論が欠落しているのはどういうことであろうか？

18世紀の半ばにリンネは開業医を続けるかわら動植物の分類を研究し、二名法により分類学を完成させた。混乱していた動物学において、脊椎動物を独立させ、その中で哺乳類を分離独立させた。この分類の基準が歯であった。「長ずると咀嚼を行う器官に変容する哺乳のシステムを持つ脊椎動物」が、哺乳類であるから、咀嚼を行う歯すなわち釘植歯と単一の顎関節を持つ顎が哺乳類の定義器官である。咀嚼という物を砕いて食べる食べ方が、何とこの宗族を規定する唯一の行動様式なのである。それで咀嚼の対象となる食物の物性と咀嚼の仕方によって亜種が分離し、歯と頭蓋の形が変わるのである(図3)。有胎盤のサメや恒温性の大型恐竜の存在を思い起こせば、哺乳類の特徴的仕組みは咀嚼にしかないことがわかる。この臼磨と引き裂きの磨砕型の食べ方によって骨性癒着の歯が靭帯結合に進

化するのに1億年を要した。萌出途上に力学エネルギーが加われば、骨性癒着が起こらず、結果としてヤング率の異なる2つの剛体の間に主応力線を変換する関節が自然に間葉細胞から力学刺激で誘導される。これが歯周靭帯の線維関節である。物を砕いて食べない限り、エネルギー代謝の革命的向上は起こり得ないのである。

3.2 歯の学問の多様性

歯の学問とそれに携わった学者は大別して次の6種類に分類される。

これら6種の歯の学問は形態学と機能学に2分されるが、従来は形態系、機能系ともに生体力学の導入がされていなかったために、この6種類がばらばらになっていた。以下、分類にしたがって簡単に解説する。

a. 歯の構造と組成・歯の組織学・歯の個体発生学：レチウス、トームス、ヘルトヴィヒ、マイヤー、ノイエス、オーバンらによって研究された。

哺乳類の歯は、組織学的には極めて複雑で精緻にできている。歯の組織学は、19世紀にヨーロッパで究められ、発生学は米国で今世紀に究められた。すでに有名な分厚い本がいく冊も出版されている。物質文明の全盛の米国で花開いたのが、歯の形態による進化学である。生命体としての歯と文明の産物とを比べると、「ニューヨークの摩天楼の栄華といえども、ひとひらの歯の構造には及ばない」ほどの微細で精巧な構造の階層性を有するのが歯であり、その器官の個体発生の過程のシステムも複雑を極めて

b. 歯の比較形態学と系統発生学：リンネ、キュビエ、ヤング、マソン、マーシュ、パッカードらによって研究された。

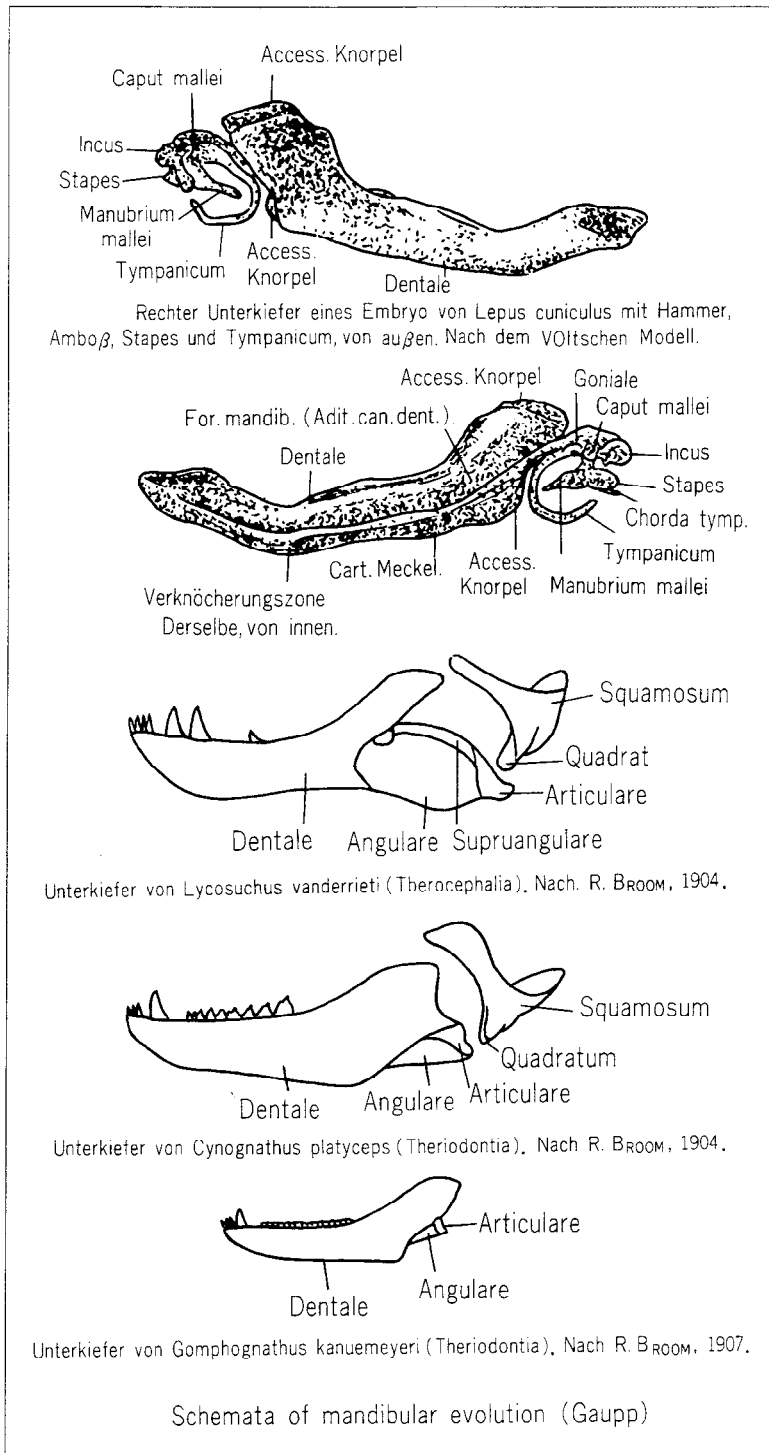


図 8 ガウプの図

歯の比較形態学は、進化のステージの違いを歯の原器と歯で追うことができるので、歯と顎の形が力学対応する特殊器官として化石で競って研究された分野である。ヘッケルが否定されていた今世紀において、脊

椎動物の原初の革命から第1革命の棘魚類の誕生に至る過程がミッシングリンクとなっていたが、ホヤ肌および無顎類の歯のマイクロアナライザーによる軟骨の検証により、原初の革命が事実として検証された。

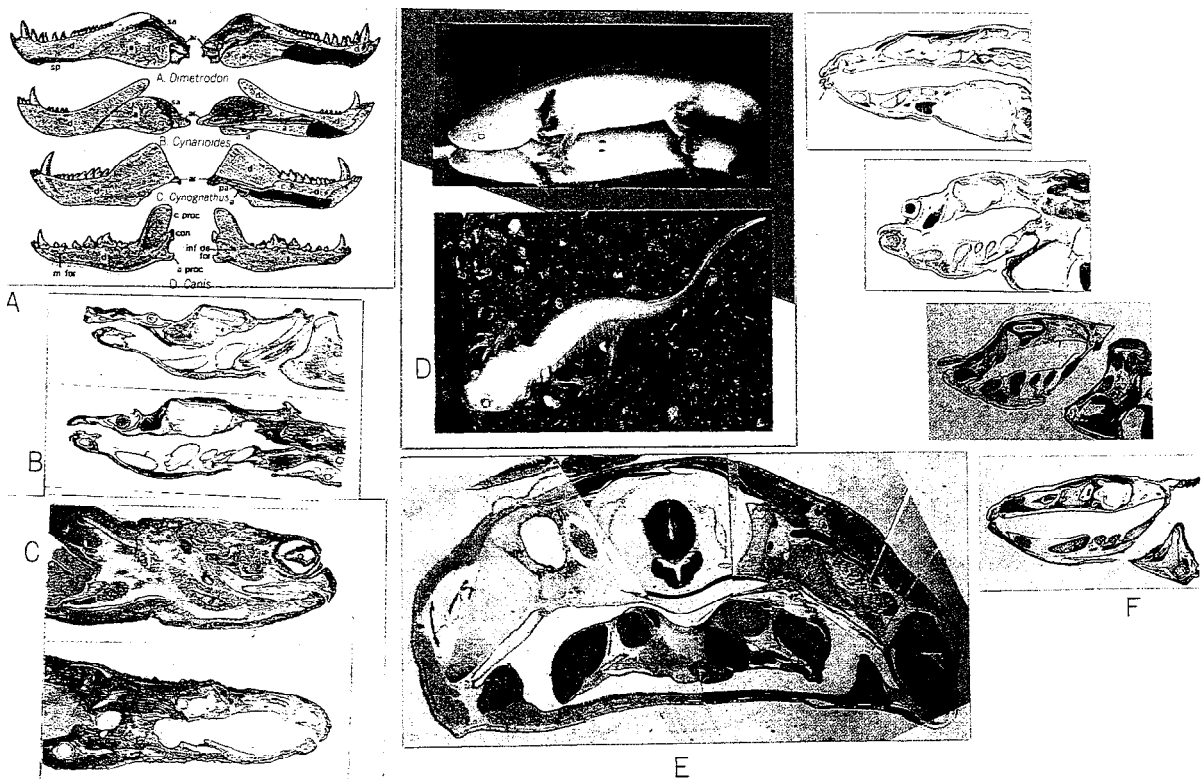
c. 咀嚼器官の分化に関する学問：ライヒェルトとガウプによる研究がある。

ガウプは比較形態学により下顎を構成する多数の関節骨が聴覚伝音系の骨格と歯骨のみからなる下顎に分離することを検証した(図8)。これも咀嚼型の顎運動が原動力である。鰓弓由来の下顎骨と聴覚伝音骨格の1億年に及ぶ分離劇も、ネオテニータイプのメキシコサンショウオを上陸させることにより5ヵ月間に起こる外鰓の退縮と融

合の過程として観察が可能であることを筆者が示した(図9)。これも咀嚼型の顎の運動に対する骨と歯の力学対応による変化である。

d. 歯の進化学における形態分化機構に関する学問：キュッケンタール、ポルク、コープ、オスボーン、ジオルジー、マメリーらによって研究された。

進化学における歯の形態分化ではキュッケンタールの観念論ともいえる癒合説、ポ



- 図9 A 哺乳類型爬虫類の顎のシンプル化 多数の下顎を構成する骨が融合し縮小してついに歯骨のみの哺乳類の下顎が形成される。
 B ミドリサンショウウオの頭部の矢状断の切片標本の図。
 C アカハライモリの頭部の矢状断の切片標本 (= 個体) 鼻が気道として機能していないことがわかる。
 D アホオートルの陸上げ。
 E 陸上げで鰓弓骨が図2bBのように融合する。
 F 陸に上がった時の頭蓋の切片。

両生類は爬虫類の卵生期が孵化後陸に上がるまで続くことができる。アホオートルは水が無くなることが引き金となって爬虫類型になる。この時の個体発生の頭蓋の変化は1億年の上陸時の系統発生の過程で見られる骨の融合が観察される (A)。

ルクの集合説があるが現在は根拠を失っている。個体発生の過程で歯が癒合したり集合して形成される事実がないからである。最も有力な分化説としてコープ・オズボーンが樹立し、グレゴリーが発展させた三結節説 (Theory of trituberculism) がある。これは、古生物学的に化石動物の示す歯が、次第に年代を追って単純な形から複雑化していく状態を観察して考案された。哺乳類の複雑な歯の形は1本の単円錐形歯の分化によってできるというものである。歯の個体発生と系統発生の対比からも当然のことといえよう。

三結節説(コープ 1883, オズボーン 1888)において、オズボーンが哺乳類の臼歯の咬頭の複雑化を原始哺乳類の化石から古生物学的に解明して、その発生の順序に従い各咬頭の命名を行った。この名称は今日なお、人ならびに哺乳類の歯に広く用いられる。しかし上顎臼歯の三結節説の発生様式は今では誤っていると考えられるようになっているが、この説があまりにも有名であり、その咬頭の呼び方は半ば固有名詞化してしまっているので、三結節説に反論を唱える学者でもその命名法に従っている(藤田恒太郎)。ヘッケル (1896) が生物発生原

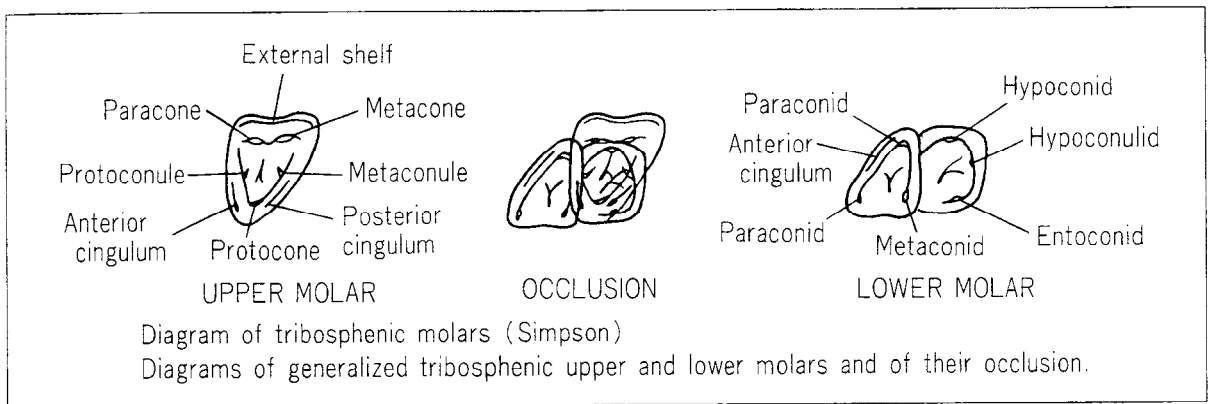


図 10 シンプソンのトリボスフェニック型の臼歯

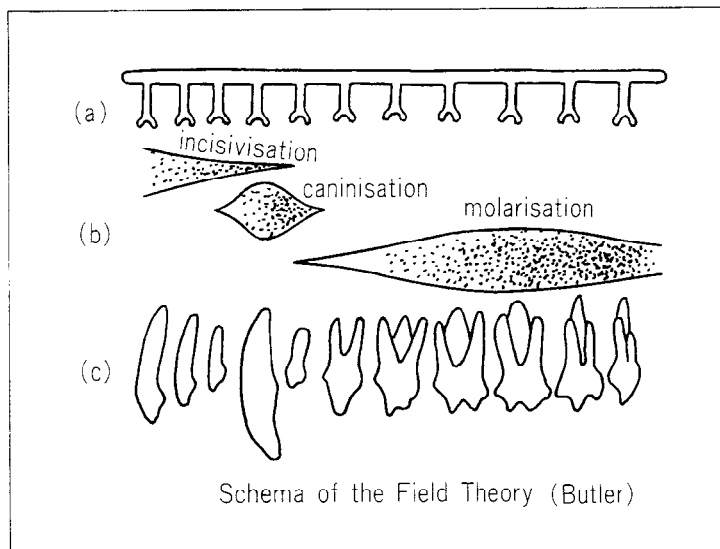


図 11 バトラーの場の理論

則を発表して個体発生が綜族発生を再演するという概念がこの学説の成立の上に大きな役割を果たしている。

e. **歯と顎骨の相関性**：バトラーとシンプソンの提唱した学説が有名である。

シンプソンの切断磨砕型三結節説 (Triboosphenic tritubercular form) について、三結節説では triconodont (三錐歯) から tritubercular teeth (三結節歯) に進化し、さらに、哺乳類の歯は食物を咬み切ることができる結節切断型 (tuberculosectorial) になるとしているが、シンプソン (1936) はこれに修正を加えて、原始哺乳類は最初から咬み切り、すりつぶしのできる切断磨砕型 (tribosphenic tritubercular form) であったというのである (図 10)。シンプソンの学説はその後多くの学者により支持されている。

バトラーの場の理論 (図 11) とは、哺乳類の顎骨には切歯、犬歯、臼歯の3種の歯の形を形成する場があるとするものである。切歯の歯胚を臼歯部に移植すると臼歯になり、臼歯胚を犬歯部に移植すると犬歯に変形する。シンプソンとバトラーの理論はともに単一の下顎骨が単一の関節によって蝶番運動する時に生ずる顎の主応力線の走行と、歯の受ける力線の走行から生体力学的に解明されるものである。

f. **人類進化学**：ワイデンライヒ、ブラック、ロビンソンらが研究で業績を挙げた。

人類進化の過程は歯で研究するのが最も有効で正確である。ブラックとワイデンライヒの北京原人やロビンソンのアウストラロピテクスに関する研究も歯で進められている。今日でも人類の進化史は歯で研究されている。

歯と咀嚼器官の学問が衰退する理由の1

つは、これらが難解な学問であり、極めて複雑なためである。また生体力学が導入されなかったため、歯と顎の形態と顎システムの変容の相関性と因果ならびに法則性が皆目わからなかったためである。

3.3 歯の学問の生体力学による統合と復活

従来これらの学問はばらばらに扱われており、このように6種類に分類されたことがなかった。これらを統合する理論がなかったのである。この難解な歯の学問を著者はルーのバイオメカニクスを導入することにより統合した。これらの学問は、従来すべて形態学者か動物学者、古生物学者や進化学者の専門とするところであり、dentistry が主導的に関与する余地がなかった。また従来の医学・生物系の生命科学には、基礎的科学として生体力学 (バイオメカニクス) が真の意味で導入されていなかった。バイオメカニクスを現代医学に本格的に導入しないかぎり複雑で難解な歯の学問を統合することはおろか、人体という有機物質からなる生命機械に対して、内的外的に作用するエネルギーの偏りで発症する機能性の疾患 (骨格の変形症と免疫病) を有効に治療することは、困難といえよう。

生体力学で歯の学問の6種類を統合すると、脊椎動物の進化の究明の学問が「歯の科学」によって達成される。哺乳類の「形態変容の法則性の解明」を歯を用いて行えるのである。これまでも歯と骨を用いて哺乳類と人類の進化が研究されたが、この極め付きに難解な学問を進めたコープやオズボーン等のアメリカ学派の学者は、ラマルク学説を踏襲したためにネオ・ラマルキストと称された。しかし、ラマルク学説をラ

マルキズムと称するのは正しくない。主義で進化は起こり得ないからである。コープは「力動的進化」を想定し、感覚と意識を同一視し、これが動物器官の使用努力を起こさせるとした。使用努力と意識の関連性に目的論思考の残渣を見ることができる。これを生体力学的に行動様式が形態を決定する「力学対応進化学」として考えていけば、今の米国の進化学の低迷はなかったはずである。

つい最近までラマルク学説は分子生物学的な理論背景が見あたらなかったために顧みられなかったが、著者がバイオメカニクスを導入し「用不用の法則」がエネルギー(力学刺激)の伝達によって成立する生命の情報システムによることを検証してこれを解明した。歯の学問の復活には脊椎動物進化の謎の解明、つまり150年間この世を惑わせた曲学の巨魁ダーウィニズムの正しい学問による淘汰が必要であった。

4.1 「歯とは何か？」の人工歯根 モデルによる解明

生命体が地球上で運動する時の生体力学作用を分析すると、運動そのものは一般力学の摂理に従うが、この時の生体内の動きでは、身体運動に伴う骨格の主応力線方向の作用以外はすべて液性の流動すなわち流体力学の摂理が作用する。生体外では一般の力学が作用し、生体内ではこの外界の力学作用がすべて流体力学に変換されるのである。体表に存在する楯鱗や歯や皮膚が外界の力学作用を、生体内の流体力学に変換する中立ちの器官として働く。

哺乳類の歯だけが食性と一致した形態を何故とるかが解明されれば、この宗族の「形態変容の法則性の解明」が達成される。一

方、脊椎動物の定義が骨と軟骨であるから、この器官の形の変容の法則性が明らかとなれば、脊椎動物の3つの謎といわれる進化の法則と免疫システムおよび骨髄造血の発生が解明される。脊椎動物の3つの謎は、骨と歯の形の変化する法則性つまりリモデリングと進化の起こる機序を解明すれば、自然に解けるはずである。その手だてには2通りある。1つは、系統発生学と個体発生学により「歯と骨とは何か？」を解明することであり、すでにこれまでに述べてきた。もう1つが力学機能体としての歯の器官特性の解明である。歯と骨を構成する基幹となる物質を合成し、これを用いてモデル研究を行い、生体力学によりこれらの器官の本質を究明する手法である。すなわち進化の過程で発生する歯と骨の高次機能組織を、合成したアパタイトを用いて生体力学刺激を負荷して誘導することにより、高次機能の発生する機序を解明するモデル研究の手法である。歯と骨は、ともに骨格系の支持機械臓器である。この臓器のモデル研究とは、現在世界中で行われている骨性癒着型のインプラントを研究することではない。ヤング率とポワソン比の異なる人工骨(人工歯根・人工関節)と骨組織とが永続的にリモデリングを維持しながら機能できるシステムを考案することである。歯は骨とちがって小さいので、多くの企業が歯の代替えとしてデンタルインプラントの開発に取り組んだが、ことごとく失敗した。これは、歯が小さい割に釘のように大きな一方向性の偏った力が加わるから、本物の釘植関節を作らない限り、上手く機能できないためである。

著者の開発した Trilateral Research 手法を応用した実験進化学研究で、高等脊椎

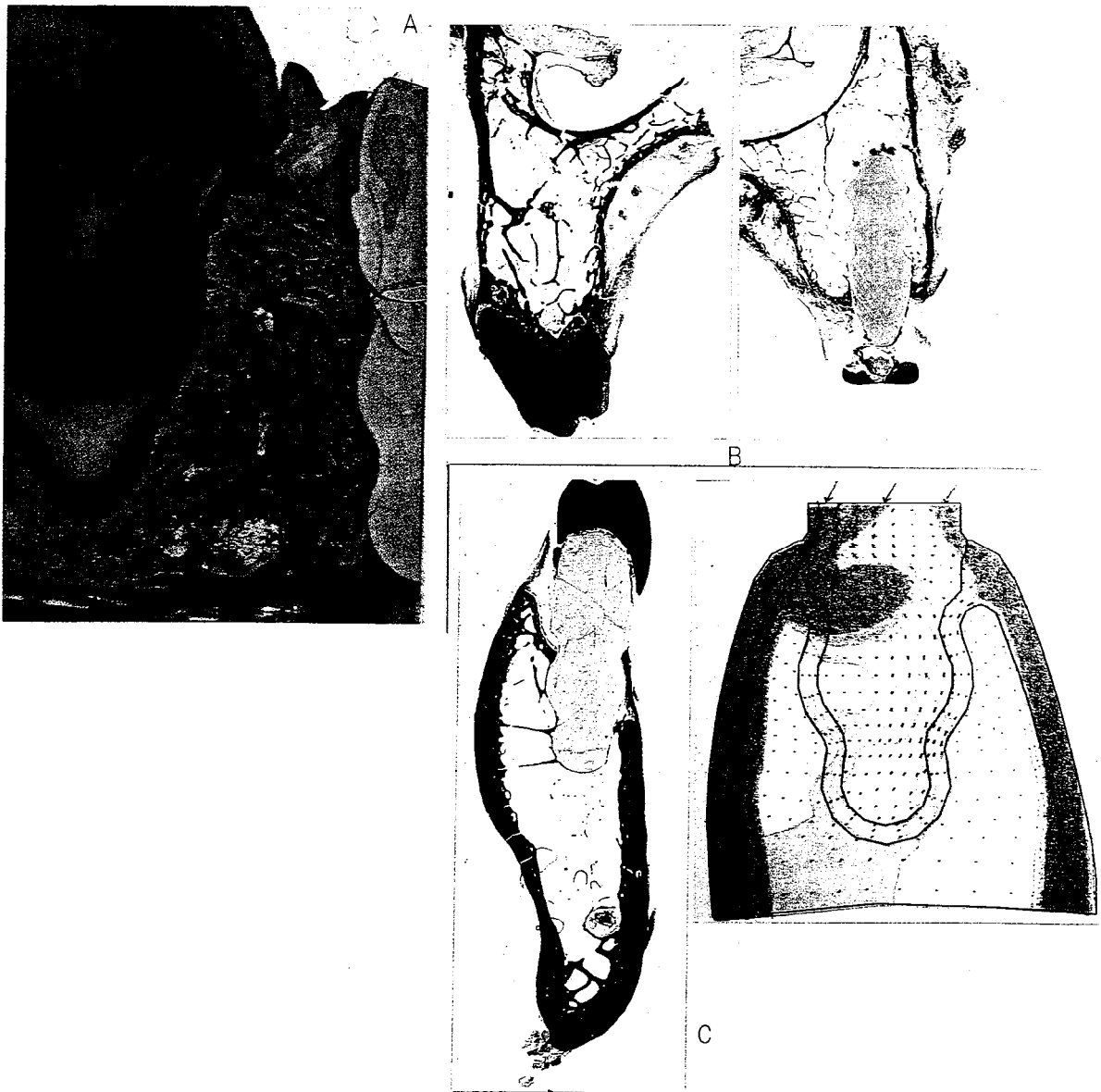


図 12 A 成犬に植立して安静（ソフトフードにて）にした人工歯根（4 M）
 左が天然の大白歯，右がアパタイト人工歯根，骨性癒着歯は哺乳類でも，安静にすれば極めて容易に作ることができる。
 B 成猿（日本猿）に植立後ブリッチで力が加わらないように覆うと完全な骨癒着型の人工歯根ができるが，歯根周囲のAに見られるような骨は消失し 20 μm ほどの厚さになる．左のコントロールと比べて周囲骨も萎縮する．力学刺激が加わらないと骨は消失する．
 C 安静にして骨性癒着が成立した後に金属の冠をかぶせて噛むようにすると，みごとに非感染性に骨が消失する．これは力学刺激による破壊的リモデリングによる，FEA（有限要素解析）の図の応力集中部と骨破壊の組織図が一致し，骨髓腔内のミーゼス相当応力の等高線図と骨梁の形成図が一致している．

動物の特徴である脊椎部の人工骨髓造血巢の誘導により「骨とは何か？」を解明したことをすでに述べたが，これと同様の手法

により人工の釘植歯の歯根にセメント質を，生体力学刺激により誘導することに世界に先駆けて成功した．これを有限要素法によ

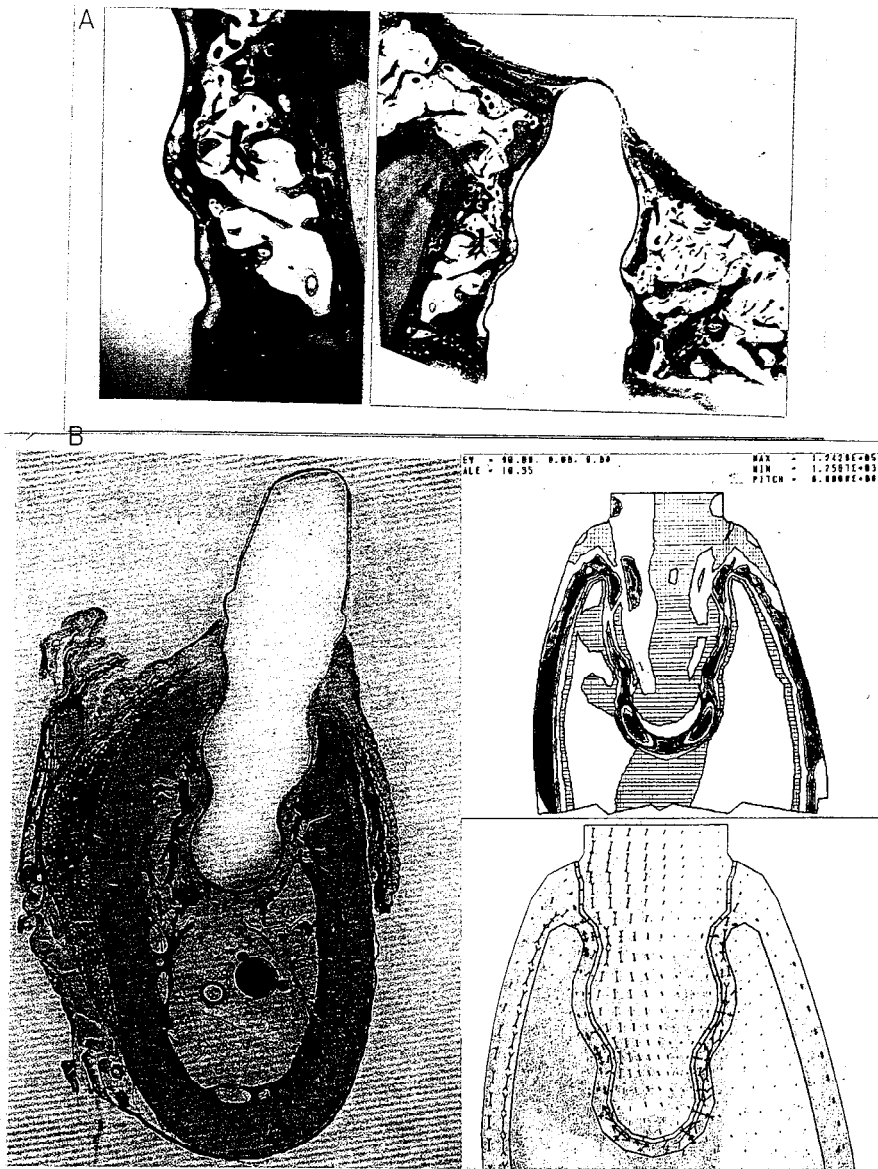


図 13 A ジルコニア人工歯根を成犬に植立後 8カ月経過時の人工歯根周囲組織の非脱灰標本。天然歯根と全く同様の固有歯槽骨と歯周靭帯の形成が認められ、完全に線維結合が成立している。(左は右の拡大図)
 B ジルコニア人工歯根植立後 3カ月の下顎臼歯部の標本 (成犬)
 遠隔部にみごとな骨の形成が認められる(左)。この図を FEA で分析したのが右で適度な応力分布の領域に骨の新生が認められる(上、荷重 45°)。主応力線図とミーゼスの相当応力分布図を重ねた図(荷重 75°)主応力線は歯根のカーブによって直交する二成分に分離する。これは実際には液性の流動の方向を表わす。

り力学的に数理解析することにより応力分布と造骨の関係が明らかとなり、さらに骨髓造血の研究で解明された生体内の力学作用が流体力学に変換され、これが流動電位に翻訳され、局所の間葉細胞の遺伝子の引

き金を引くことが明らかとなった。ここに漸く歯とは何かが解明され、冒頭で述べたように、光と力学作用が生命体にとっては等価であることが明らかとなった(図 1)。

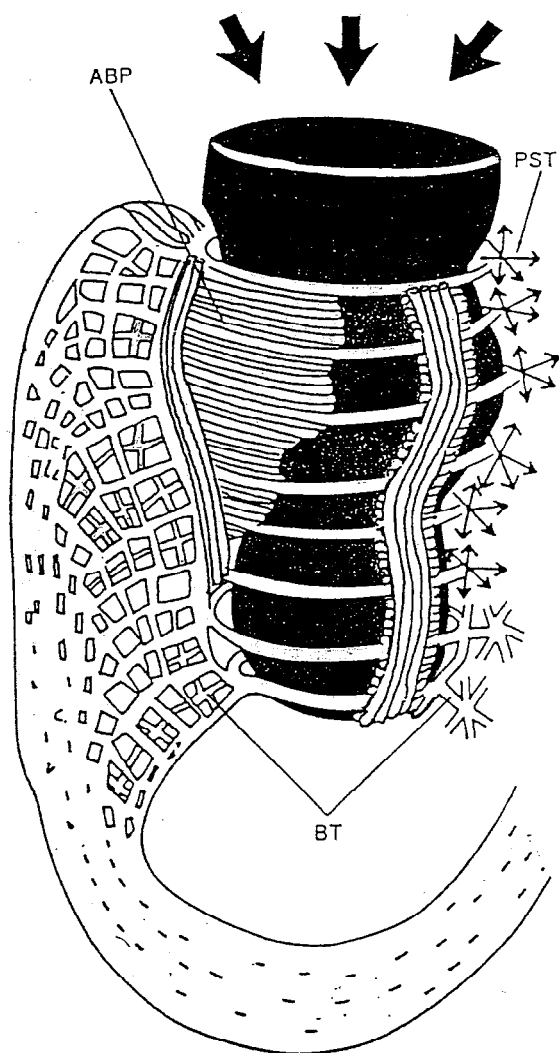


図 14 靱帯結合型人工歯根の機能下の応力線の流れ。歯に加わる力はすべて液性の流動に変換される。主応力線は直交する三成分より成るから、この三方向に流体力学が作用する。結果として固有歯槽骨で一担負担された力はすべて最終的には顎骨の皮質骨部で負担されることになる。

4.2 進化の謎の究明と人工臓器の開発

Trilateral Research 手法とは、形態学と機能系の分子生物学とリモデリングの分子遺伝学を生体力学により統合した実験手法である。何故人工骨髄と人工歯根が実験進化学の対象となるかといえ、脊椎動物の第2革命で獲得される最大のシステムが

骨髄造血系であり、第3革命で獲得されるシステムの代表が咀嚼系の釘植歯だからである。ともに生体力学によって新システムが誘導されることは、系統発生学をエネルギーの視点から分析すれば明らかである。実験進化学手法はこれを系統発生の各ステージの動物に応用し、進化の過程で新たに形成される高次機能器官を生体力学刺激によって間葉細胞の遺伝子の引き金を引くことにより異種性にまた、異所性に誘導する手法で、やはり著者により世界に先駆けて開発された方法である。

釘植歯の形状効果を研究する目的で哺乳動物（イヌとサル）に植立した標本に基づいて有限要素解析を行った。人工歯根の組織切片標本とその応力解析図を示す。骨性癒着様式（図 12）と、同形で靱帯結合様式（図 13）を示す。ともに標本の構造と数値計算値がぴったりと一致している。

釘植歯の成立を経時的生体力学的に分析にすると、咀嚼による揺すぶり運動でセメント芽細胞が誘導され、次いで、セメント質と線維関節とが誘導されることが明らかとなった。したがって手術後やや低めの咬合で、軟らかな物を咀嚼し嚥下を正しく行えば、セメント質の誘導は容易に可能である。同型の骨性癒着歯の標本は植立後安静に保てば、容易に成犬でも成猿でも作ることができる。骨性癒着の人工歯根歯と釘植の人工歯根との比較を行った結果、「歯とは何か？」が以下のように解明された。

a) 哺乳動物の歯は咀嚼力の担体 (vehicle) であり、咀嚼運動で負荷される multiple force は歯冠と歯根の形状と物性に依存して受容されるとともに、歯の界面で流体力学に変換され、生体に向けて液性流動として伝えられる。

b) 歯周靱帯は、主応力線の変換システムである。主応力線は電磁波と同様に直交する3成分よりなる。これを立体に翻訳すると図14になる。また歯周靱帯に分布する微小血管群の内径の総和が歯の振動の幅であり、衝撃を吸収する弾性体として機能する。つまり歯は、歯冠に加わる咀嚼・咬合力を歯周靱帯で変換しすべての力学刺激を流体力学に翻訳して生体内に伝える。主応力線は流体としてほぼ直交する3方向に流れると流路に沿って流動電位が流れ、ここに造血と共軛した造骨が起こる。こうして固有歯槽骨と皮質骨が形成される(図13)。歯は咬合力を負担する担体(vehicle system)であり、歯に加わる力を顎骨の皮質骨に分散するシステムとして理解される。

c) 系統発生学の所見から、歯は生命を防衛するための眼に匹敵するほど極めて鋭敏な感覚器官アスピディンの機能を保持したまま、咀嚼の効果器官に変容した特殊器官である。

歯は極めて鋭敏な感覚器官であるから、無茶な歯の治療では寿命が縮まることを認識する必要がある。古生物学や系統発生学の知見による経験則と、人工歯根をモデルとして有限要素解析を行った研究結果などを総合すると、哺乳動物の歯は生命を守る甲皮から派生し、エネルギー同化の器官に変容した特殊器官であり、応力を分散する最適形状システムを持ち、咀嚼力というmultiple forceを歯冠と歯根の形状と物性により、歯が一旦負担し歯周靱帯で主応力線を変換して顎骨に分散し、顎骨の皮質骨で負担させるvehicleシステムである(図14)。歯周靱帯が主応力線の変換システムとして機能するとともに、栄養を担当する脈

管系が靱帯組織と協同して衝撃を吸収する弾性体として機能する。

これにより顎骨にもWolffの法則を適用することが可能となった。最適形状システムを持つ顎骨は本来遺伝的にはMonson球面に一致した咬合平面と放物線を示す歯列弓を持ち、円滑な咀嚼サイクルを演ずる機械として設計されているが、この同じ骨組織の持つ最適形状システムにより機能の長期的偏りで、偏った運動に適合した形に変形する。骨が機能に従ってremodelingするためである。機能的偏りが長期に及ぶと変形も進み、ついには円滑な咀嚼サイクルの遂行に支障を来す。一方、歯も最適形状システムを持つが、remodelingのシステムはほとんど持たない。つまり歯は遺伝学的な時間の長さで最適形状をとる器官なのである。歯は植立する部位により機能が異なるため、この最適形状システムに従って歯冠と歯根の形状が部位により異なるのである。骨も歯も遺伝的に、それぞれの種の一般的機能に適合した最適形態をとる器官であるが、骨はそれ自体で機能適応形態をとるので、遺伝的に規制された形状から、二次的に機能的外力で変形する。

歯のvehicleシステムと、歯周組織の脈管構造および人間の顎骨と歯根の形態とを考えると、歯は長期に作用する側方力を支える機構を持ち合わせていないことが解かる。歯列矯正術では、わずかに20gから70gの持続性の側方力で歯を動かすことができる。この程度の力で歯根膜の毛細血管の流れが止まると、固有歯槽骨の改造がはじまるためである。歯と骨の生体力学的特性が把握されると、歯列不正、歯周疾患、顎・顔面の変形症、顎関節症、習慣性顎関節脱臼などの発症が生体力学要因によることが

解明される。これにより顔面頭蓋の消化器部分の最重要器官の骨格の特性が解明され、これを身体全体の骨格器官に敷衍すると免疫病と身体の変形症という機能性の疾患の予防法と治療法を開拓することが可能とな

った。

本論文は、文部省科学研究費の以下の助成によるものをまとめたものである。

文 献

- 1) 「人工骨髄の開発に関する研究」平成3～5年度，試験研究（B）（1）03557107．報告書
 - 2) 「骨の形態的機能適応現象のメカニズムの解明—骨の生体力学とピエゾ電性の統合研究—」平成5年度，重点領域研究（1）05221102．報告書
 - 3) 「骨の形態的機能適応現象のメカニズムの解明—骨の生体力学と生体電流ならびに生理活性物質の関連性—」平成6年度，重点領域研究（1）06213102．報告書
 - 4) 「コラーゲンを複合した天然型のヒドロキシアパタイト焼結体の人工骨の開発」平成6～8年度，基盤研究（B）（1）06558119．報告書
 - 5) 「顎顔面形態の環境因子による変形の解析と矯正訓練実施後の形態的变化の予測法の開発」平成6～8年度，一般研究（B）06455008．報告書
 - 6) 「人工骨髄の開発と実用化—ハイブリッド型免疫器官・人工骨髄造血巣誘導系の実用開発—」平成7～9年度，基盤研究（A）（1）07309003．報告書
 - 7) 「新しい進化学理論の実験による探索—脊椎動物の力学対応進化学の実験系の確立—」平成8～9年，重点領域（1）創発システム08233102．報告書
 - 8) 「人工骨髄の開発・実用化と免疫学の新概念確立に関する研究」平成9～12年度文部省科研費，基盤研究（A）（1）09309003．
-