

記念講演会要旨

生命における物理法則

国立大阪病院 古 川 俊 之

(平成 2 年 11 月 2 日, 統計数理研究所 講堂)

1. 分子機械として見た生物 —— 序言として

生物学と工学は離れた距離にあったというべきであろう。しかし生物学と工学は相互に恩恵を受けており、とくに工学が生物から学んだものは多い。何故かという、自然は無限に近い資源と時間をかけて、壮大な無駄をいとわずに人間の及びもつかない大規模な試行錯誤を続けてきた。自然の側のただひとつの引け目は、素材の種類が限られていることだけである。しかし、材料の制約を見ただけで、人間なら目標達成は不可能と判断したに違いない自然の成功例がいくつもある。水とゼラチンだけで視覚器官を設計することなど、工学的センスでは思いもよらない発想である。

「機械は人間の自画像である」という名言がある。神はみずからに似せて人間を作り、人間はみずからに似せて機械を作ったのである。生物を機械になぞらえて研究をすることは、デカルト以来の近世の科学のパラダイムであった。生物が熱力学の法則に従う事実の証明に始まり、20 世紀後半には、生気論の最後の砦であった遺伝機構までが DNA という物質の上に書かれた暗号であることが解明された。まさしく機械論的生命観の圧倒的な勝利であった。

ここでは堅い機械論的世界観を主張するのではなく、生物のすばらしい仕組みや働きについて、なるべく面白く解説することとした。いわば物理学的な思考法に親近感を持って生物学や医学の基礎を学び、しかも認識世界を広めることに楽しみを覚えるようなストーリーを展開してみたい。

2. 感覚器官の設計

2.1 感覚受容器の受け取る情報量

感覚器官の中でもっとも精緻なシステムは、先にも述べた視覚器官の眼であろう。また聴覚器官は早期警戒システムとして設計されたようで、事実野生動物は敵の接近を聴覚か嗅覚によって検知している。視覚は遠距離でも情報を受け取る利点こそあれ、実際の危険に対する情報は聴覚程度の距離で充分のようである。

さてこれらの感覚受容器の受け取る情報量は、視覚で約 10^6 ビット/秒、聴覚で 10^4 ビット/秒、触覚が 100 ビット/秒といわれている。これはそれぞれの情報の分解能を考えても容易に理解できる。視覚の空間分解能はおよそ 10^6 ビットであるし、可聴域の上限はだいたい 10^4 Hz である。解剖学の知識と照らし合わせると、眼球網膜の視細胞の数は 1 眼で 10^6 個とされ、視神経束の神経繊維の数も 10^6 本程度である。聴覚器の感覚細胞数はおおむね 10^4 個であり、聴覚神経束の神経繊維の数は 7,000~9,000 本と記載されている。これから当然考えられることは、生物の受け取る情報は原データに関する限り有線通信と同じく、センサーと脳の一次情報処理機構

とは1対1で対応しているようである。

奇しくも中国の古語に「百聞は一見に如かず」というのがあるが、視覚の情報量は聴覚のちょうど100倍なのである。それでは脳の情報処理能力はと調べると、楽観的な推定でもようやく100ビット/秒、実際には50~60ビット/秒とされている。一方で生物の脳の記憶容量はかなり巨大であり、こんなに低速の情報処理速度とバランスがとれない。人間が夢を見るのは巨大な記憶容量の内容を睡眠中にプレイバックして、不要な記憶を消去する過程ではないかという仮説があるが、考えようによっては高速のデータ読み込み速度と巨大な記憶容量に対し、極度に小さなレジスターメモリーの計算機を設計したとしたら、人間の脳のように思い違いやど忘れを起こしたり、あるいは夢を見ることがあるのかもしれない。コンピュータが情報化時代の寵児である限り、このような馬鹿げた設計のコンピュータを作る計画はあり得まいが、機械と生物の相違を研究する立場からは面白いヒントであると考えられる。

2.2 代数で説明可能な瞳孔の設計思想 (古川 (1990))

夜行性の動物が暗夜で優れた視覚を発揮するには、明るいレンズと高感度の感光物質が必要である。ツバイのような原猿は巨大な口径のレンズを持つが、その他の動物では絞り機構を全開にする工夫をしている。猫族の瞳孔は縦のスリット状で暗所で散瞳するのに有利な形状である。同じ設計方針はワニ、トカゲなどの爬虫類も採用している。しかし縦のスリット状の瞳孔が閉じていると、猫族の性質についての人間の偏見のためか、陰険な印象を与える。ワニに至っては凶暴な感じである。ついでにメフィストフェレスも猫族の瞳孔であるが、ドラキュラも夜行性なら同じ設計であろう。意外なことに、コアラも夜行性であって縦形スリットの瞳孔を持つが、紅彩自体が黒に近い濃い褐色であるので、つぶらな大きな瞳の動物に見え、愛敬者として人気を集めている。

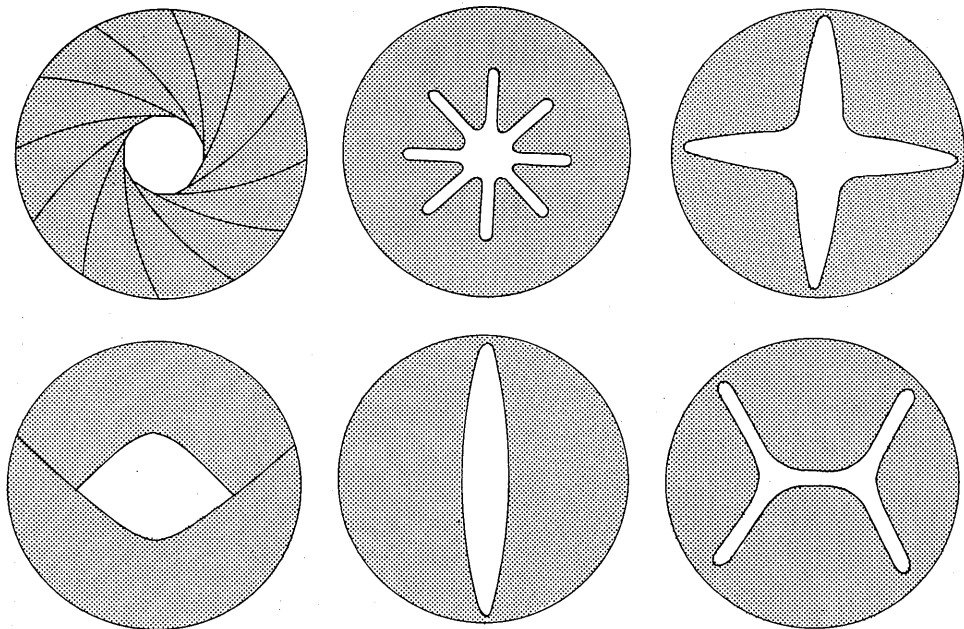


図1. 瞳孔と絞りの設計: 左上は普通のカメラの絞り, 左下は自動露出型のムービーカメラの絞り, 中下は猫族や爬虫類が採用した瞳孔, 中上, 右上は瞳孔辺縁長一定条件を満たす絞りのさまざまなデザイン, 右下が瞳孔辺縁長一定としてある種の生物が採用した瞳孔。

夜行性の草食動物も明るいレンズが必要であるが、事実暗所で大きく散瞳するのに有利な特異な設計の瞳孔である。ヤギ、ヒツジ、キリンなどでは、瞳孔は横長の矩形状で、暗所で調べると真円に散瞳している。これまた意外にも海棲軟体動物のタコやイカも、体長方向を軸とすれば横長の矩形の瞳孔である。より原始的な軟体動物のオウムガイは、まったく違った異様な形状の瞳孔を持っている。

そこで素直な代数で機械的な絞りの構造を調べるために、いろいろな瞳孔形状ごとに散瞳時と縮瞳時の瞳孔辺縁長の歪みを推定した。スリット型瞳孔がうまく設計されている場合は100%散瞳から0%、つまり絞り切りまで可能である。その場合要求される歪みの大きさは、完全縮瞳時の虹彩の瞳孔辺縁長が、 $\pi/2$ つまり1.57倍に伸展できれば完全散瞳になる。もちろん自然が利用できる材料には、性質の限界があるから、少なくとも猫では瞳孔径いっぱいの100%の散瞳は起こらないようである。ところが矩形の瞳孔は上手に設計すると、全縮瞳時の虹彩の瞳孔辺縁長は不変のまま完全散瞳ができる。真円の瞳孔ではこのような融通性はなく、スリット型瞳孔と同じく $\pi/2$ 倍の伸展率では、瞳孔面積で $\pi^2/4$ つまり10:4程度の変化にとどまる(図1, 2参照)。

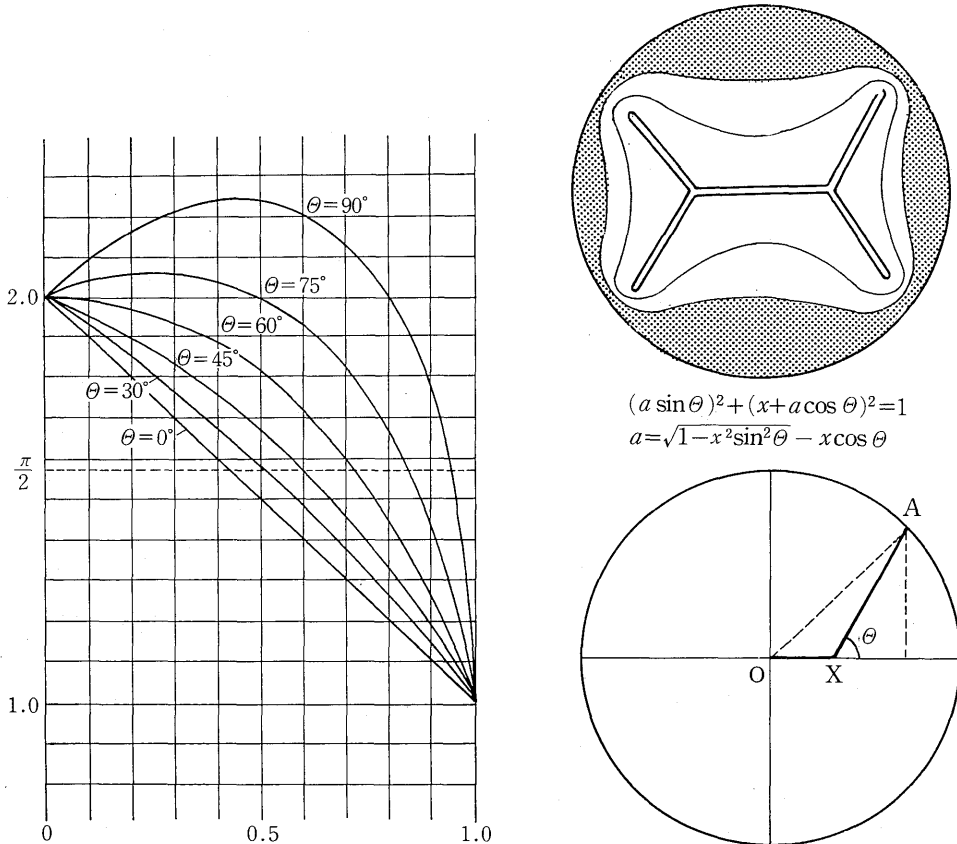


図2. 変形四放射型瞳孔の辺縁長と角度：単位円を想定しその赤道上の点Xから円周上の点Aを結ぶ線分XAの長さをaとし、線分XAと赤道のなす角度を θ とする。線分OXと線分XAの和 $(x+a)$ は瞳孔辺縁長に相当する。 $x=0.7$ 、 $\theta=60^\circ$ の条件で瞳孔辺縁長は一定のまま、完全絞り込み可能な瞳孔が設計できる。

もっとも真円の絞りは光学特性上からは好ましい。したがって高い空間分解能を要する鳥類は、真円の瞳孔を選択した。そのため夜行性のフクロウ類は、明るい昼間に瞳孔を絞り切ることができずに、他の鳥から襲撃されることがある。有袋類のオポッサムも、夜間に照明を当てると縮瞳ができないために、目が眩んで竦みあがってしまう。反対に縮瞳率のよい動物は、昼間は多少歪んだ映像を見ているのかもしれない。

2.3 感光材料と増感システムのアナロジー

視覚器官の設計には、エンジニアリングの立場から不思議な構造が見られる。視細胞には桿状細胞と円錐細胞がある。前者は高感度のモノクロームセンサーで、後者は低感度のカラーセンサーである。ヒトを除く大多数の動物が色覚を欠いているのは、夜行性の必要から高感度の桿状細胞で感光系を設計したためであろう。またヒトが白黒写真で事物を認識できるのは、夜間には桿状細胞でモノクロの世界を見ているためと思われる。

増感システムが生物の眼にあるか否か、あまり議論を聞かない。しかし視細胞があたかもパラボリアンテナの受信部のように、外方の光源に向かず反対に内方の鞏膜側に向かっている。これは工学的には奇妙な設計で、鞏膜側の光反射率が極めて高いというだけでは説明にならない。おそらく鞏膜側に生物発光の機序による増感システムがあると想像される。一方、桿状細胞の超微細構造を見ると、細胞膜が重積した積層構造がある。これも想像を逞しくすると、電子的な増感システムではないかと疑われる。生化学的な増感システムでも構わないが、その場合もエネルギー論の立場からは、電子シャワーを発生させる生物機構に見える (Kahle et al. (1984)). こうした学際的なヒントからの研究に期待したい (図3参照)。

2.4 焦点調節機構の設計

二枚貝などの原始的な光センサーを除くと、動物の視覚器官は精巧なカメラである。そのうち焦点調節機構は、哺乳類ではレンズの曲率を変化させる可変焦点レンズであるが、硬骨魚類とイカやタコなどの軟体動物では、進化の道が隔たっているにもかかわらず、レンズと網膜の距離を変える方式である。このため人間のように長生きすると、レンズの経年変化による硬化のために、焦点調節が不可能な固定焦点カメラ、すなわち老眼になる。この点では造物主の設計選択が誤っていたように思える。ところが鳥類と爬虫類の眼の焦点調節は、哺乳類のようにレンズの曲率を変えると同時に、角膜の曲率までも変化させる。これは水鳥が水中の餌を捕獲する場合にいちじるしく有利で、空中から餌を補足して水中に飛び込むとたちまち10ディオプリーの屈折率の変化が起こるが、その際に一瞬に焦点を合わせるにはレンズ自体とともに防護フィルターの角膜の曲率も変えるのがよい。そ

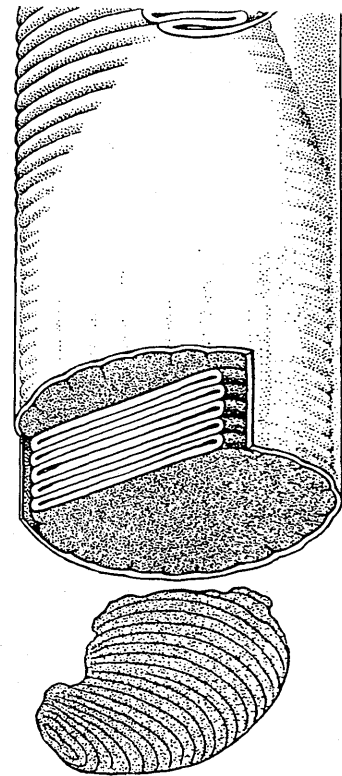


図3. 桿状細胞の外節 (Kahle et al. (1984) より引用改変): 桿状細胞の外節は光の受容部分である。ここでは細胞膜が畳み込まれて作られた円盤の積層構造が見られ、おそらく生化学的な連鎖反応を介して光増幅を営んでいると想像できる。

こから想像を巡らせれば、すべての鳥類と爬虫類は進化の道が別れた太古の時代には、水陸両用の生活様式であったと思われる（古川（1987））。

水中から水面近くの昆虫を狙う鉄砲魚は、水中用と空中用の二重焦点レンズを持っているというが、畜産学の領域では馬の眼が上半分は高速走行に有利な遠視レンズ、下半分が餌の草を認識するのに便利な近距離用のレンズになっているそうである。

こうした造化の妙を人工的に再現するには、可変焦点レンズを用いた眼鏡を作ることである。多くの自動焦点カメラが作られているが、眼鏡のサイズで同じようなものを作るのは容易でない。2枚のプラスチック膜の間にシリコン油を注入し曲率を変える方式は、変形要素法でのシミュレーションでほぼ真球面と見なすことができ、試作品の着用実験でも予想通り無限遠から約25 cmの明視距離まで使用できた。しかし重量が大きくて常用することは不可能であった。アメリカでは2種の液晶を混合した素材で、負荷電圧を変えて結晶軸の相対交差角を操作し、屈折率を制御する方法が特許を得ているが、光透過性が低く実用化していない。

3. 生物の設計に見られる使い捨て思想

生物は定期点検や内部状態の計測を予測した設計ではない。この点は明らかに人工の機械やシステムと異なるので、臨床検査といわれる生体計測には、本来は破壊検査に属するような手法が少なくない。また重要な臨床検査であるのに、脳波や心電図は生物の使っている絶縁材料の性能が低いために、漏れ電流を信号として不完全な計測を行なっている。いわば人間を含めて生物は、すべて不完全な存在であるということができる。これは生命を卑しめるものでは毛頭ない。むしろ極度に限られた材料を使って精妙な生命体を設計した自然の手腕には、ほとほと敬服するのみである。

ただ材料の制約とは無関係に生命の設計には「使い捨て思想」のようなものが感じられるのも事実である。まず点検や内部の観測が不可能であるというのは、メンテナンス・フリーともいえるが、一回限りの生にはそれ以上の補修は不要という考えの現われともいえる。また変態をする動物では、オタマジャクシの尾の細胞は死んで分解される。そしていったんアミノ酸や脂肪酸などの原材料まで分解されてから、新たに作られる四肢のどこかに再利用される。工学的な発想なら細胞のような複雑な機構をせっかく作ったら、少しの手直して転用を図るであろうが、生物は部品のネジとか板金程度まで分解するのではなく、アルミニウムやシリコンといったレベルまで分解しないと気が済まないようである。

使い捨て思想の現われには、ひとつの奇妙な事実がある。それは多細胞生物の細胞がそれぞれ異なる寿命を持っていることである。たとえば人間の消化管の粘膜上皮細胞はわずか3日程度の寿命である。血小板は10日、赤血球は120日、リンパ球は約1年、ところが脳細胞は人の寿命とほぼ同じ間生きている。つまり多細胞生物では全体のためにある種の細胞が短命を強いられている。それにもかかわらず、もっとも短い寿命の腸管粘膜上皮細胞の核は、ひとつの個体発生に必要な遺伝情報をすべて所有している。その証拠に両生類などでの実験では、受精卵の核を抜き取って、その代わりに腸管粘膜上皮細胞から採取した核物質を注入すると完全な個体が発生する。3日しか生きない細胞にこれだけ膨大な情報を記録した青写真を渡すのは無駄のようであるが、おそらくその方が寿命に応じて多種類の青写真を用意するより効率的なのであろう。これも使い捨てならでは発想と考えられる。癌は短寿命の細胞が、この青写真にかけられた「解読禁止」の命令を外して、遺伝情報に示された通りの本来の寿命を享受しようと反乱を起こしたものと想像することもできる（古川（1987））。

4. 移動機械として見た生物

動物は動物であるというのは、分かり切ったことのようにである。英語やドイツ語ではアニマルであるが、語源はラテン語のアニマに由来し、これは生命とか靈魂という意味である。したがって西欧文明では、植物には生命や価値を認めていないと想像され、東洋で植物にも「いのち」があると考えているのと対蹠的である。それに対し漢語の動物はまさしく「動く存在」であって、動物の特性をよくとらえている。

4.1 筋肉エンジンの重量比

動物が移動のためにいかに苦心したかは、エンジンの設計を調べれば分かる。魚は食料として馴染が深いのが、おおむね身体全体が食べられる筋肉である。カツオ70%、ヒメマス63%、サケ60%などと、遠洋を回遊したり、高速遊泳が可能な魚は体重に占める筋肉の割合が極度に大きい。つまりこれらの魚は移動機械として設計されたのに違いない。磯や海底に常住する魚は、カレイやヒラメが46%、ホウボウ40%、タイ30%という具合に、移動のためのエンジンの重量比が少なくなる。不思議なのはイカで、ジェット推進という効率のよくない移動方式をとっている故か、筋肉は体重の70%にも及ぶ。貝類は重いカルシウム製の貝殻を装着しているのだから、たかだか20%程度が筋肉である。

さて陸上動物はと見ると、牛では約43%が食用に適した肉である。内臓は30%、骨が10%である。馬も全く同じく、筋肉は体重の43%である。魚に比べると、陸上で重力をもろに受けて動かねばならないのに、相対的に少ない筋肉エンジンで間に合っているのは、筐体ごと骨格の設計がうまくできているためと思われる。

万物の長い人間は、知能だけは他を遥かに凌駕しているが、筋肉エンジンの重量の体重に占める比率は、成人で25~45%と牛馬とあまり差がない。ただし新生児では22%と少なく、頭だけが非常に大きいから、本来知能動物としての進化という見方では、新生児が一番進んでいるのかもしれない。

ちなみに人間の作った移動機械の大傑作である自動車を見ると、乗用車では車両重量が0.8~1.4トン程度に対してエンジン重量は90~130kg、比率にして11~12%である。この比率はトラックやダンプカーでも変わらないが、バスでは9.9~7.5%と車体重量が相対的に大きい。反対にトラクターでは15~17%とエンジンが相対的に重くなる。10トン積載のダンプカーや農耕トラクターでは、エンジン自体も超重量級になって1トンを越えるものがある。それでも重量比は20%以下であるから、移動するという目的からすると生物よりも余程効率よく作られている。航空機はライト兄弟の頃で32.8%、ジェット旅客機ではわずかに1.54%である。

4.2 動物の燃費・安全走行速度・制動能など (古川 (1987))

動物が1kcalのエネルギーでどれだけの距離を移動できるか、いわゆる燃費を調べてみる。1kcalの熱量で自重1kgを移動する距離は、人間(歩行)1.3km、イヌ0.7km、ニワトリ0.2kmに対し、自動車1.2km、飛行機1.7kmである。人間の二足歩行がイヌの四足歩行より半分のエネルギー消費で済むのは、走行抵抗がちょうど2分の1になると考えるとはなはだ都合よく説明できる。ニワトリは人間と違って、二足歩行といっても飛行のための強力な大胸筋を支持する必要上、胸郭がモノコック構造になっているので歩行時のバランスをとるのに脊椎をツイストできない。やむを得ず頭を前後に揺すってバランスをとるので、エネルギー効率が低下する。

動物の出す最高走行速度も歩行形態に関係する。チータは地上で最高走行速度記録保持者であるが、他にも羚羊やウサギの類でチータに次ぐスピード保持者がある。しかしダチョウは速

く走るように見えても、人間をわずかに上回る程度である。これは2輪駆動車と4輪駆動車のブレーキの差と似ており、走行抵抗が大きいほど安全に高速走行ができるのであろう。

人間が知能を発達させ、世界を支配するに至ったのは巨大な脳を持ったからであるという。それには直立姿勢が重い脳を安定して支持する姿勢であったこと、前肢が自由に動かせる結果、それをコントロールする脳の運動領野が肥大したことなどが貢献したといわれているが、もうひとつ見逃されてきたのは、二足歩行を選択したことで移動のためのエネルギー消費が半減し、後述するようにエネルギー浪費型の脳を養えるようになったことである。

飛行は大層エネルギーを浪費すると信じられがちであるが、それならば地球上で鳥類がこれほど繁栄するはずはない。移動に要するエネルギー消費は、時間当りにすると大きいかもしれないが移動距離当りではエネルギー節約型である。そのため餌や飲料水の過不足に応じて、即刻移動可能な鳥類は生存をつづけることができた。これらの長所は鳥が主として皮下脂肪を燃料として飛ぶために、体重のわずか5%を消費すれば750 kmを無着陸で飛行できるという観察と一致する。ちなみに初期のジェット機はアンカレッジ-ロンドン間約7,000 kmを飛行すると、離陸時の約半分の重量になって到着した。つまり自重の約50%を燃焼して7,000 kmを飛んだのであるから、鳥の場合の計算の10倍と見なすと符合する。空力学の法則を利用して飛行するものは、動物でも機械でも同じ物理法則に支配されていることがよく分かる。

4.3 ラジエータの設計 (古川 (1987))

エンジンの設計者によると放熱器の設計は忘れてならない重要事項であるという。巷間には生半可なバイオエンジニアリングの知識が氾濫して、いまに砂漠で水のない環境で育つ植物ができるとか、人類の工業活動が排泄するCO₂を同化してしまう藻類が作り出せるといった議論が無責任に横行しているが、炭素固定に伴う負のエントロピーを熱として放出するには水の気化潜熱以上に効率の高い方法はないし、炭素固定のための藻の成長が多大な肥料を必要とすることは無視されている。放熱器の設計は宇宙船地球号全体としてもエンジニアに課せられた最大で最終の宿題のようである。

チータは地上最高走行速度を出せるが、生物エンジンを限度まで運転する報いで大量の熱が発生する。それに拮抗する機構としてチータの頸動脈は枝分かれして、脳から還流する静脈網とからみあった特別な構造を形成している。昔の動物学者はその理由が分からぬままにこの構造に奇網とか怪網と命名しているが、今日のエンジニアリングの知識で見るとこれは熱交換機構である。ただ生物の作った熱交換器は効率が低く、そのためチータは数百メートルしか疾走できず、その後は発生した熱の放散のために20分程度は休息して激しい呼吸をするという。

鳥は時間当りにすると大量のエネルギーを燃焼するから放熱は大問題である。もしヒトやイヌのように水分の気化潜熱で熱を放散しようとするれば、冷却水の補給が必要となって長距離の無着陸飛行は不可能である。陸上生物でも象の巨大な耳朵は空冷式放熱器で、ウサギの耳も同様と考えられている。鳥類は体内にある気嚢が放熱器と過給器の役割を果たしているようである (Bretz and Schmidt-Nielsen (1971))。鳥類は人間と違って高空を飛ぶのに特別に酸素補給装置を必要としない。実験気象室で観察されたところでは、日頃高空を飛ばないカナリアでも、ラットが失神しやがて死に至るような数千メートルの低い気圧に耐えて餌を取る。これは鳥類の肺が高効率ボイラーのような細管状の副気管支が縦走する構造で、空気は一方方向のみ流れる特別な仕組みであり、血流は気流と対流するためにガス交換効率が高いことが理由である。もうひとつ副気管支に一方方向の気流が流れるためには、新鮮な吸気は肺を素通りして後部気嚢に流入し、排気は前部気嚢に移動する。呼気時には新鮮な空気は後部気嚢から肺に移行し、前部気嚢中の排気は気管を通過して排泄される。前部気嚢は飛行のためのメインエンジン

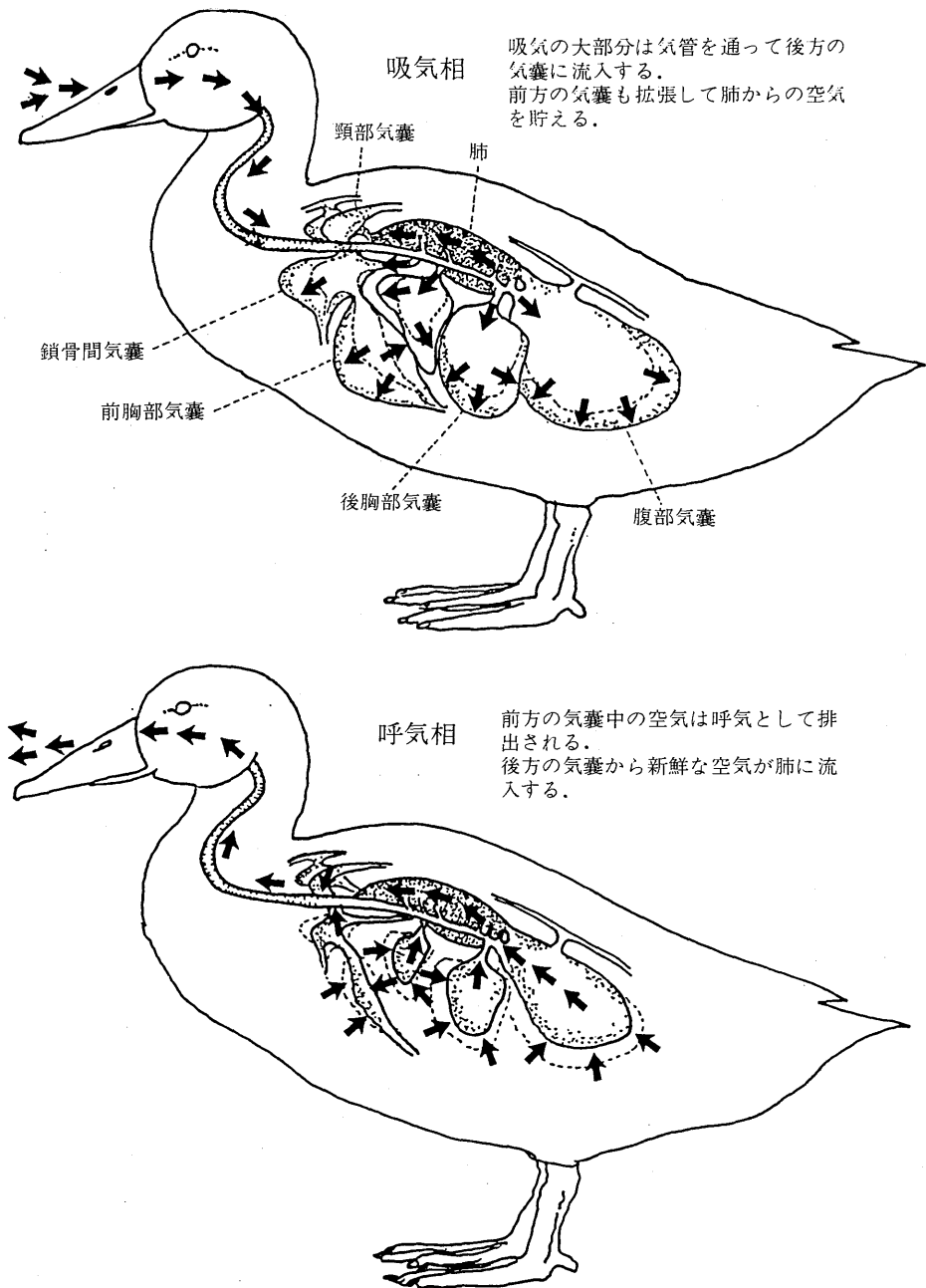


図4. 鳥類の呼吸器系.

である大胸筋の周囲にあるから、ついでに熱を排泄するようである。そのため鳥類は空冷式のラジエータを装備したと考えることができる(図4参照)。

5. 生物の設計は不変か

生物の形も機能もすべて遺伝子の命令によって決められているというとな納得する人が多い。しかし遺伝子はどこまで些細な部分にまで決定権を行使しているか、まだ充分分かっていない。生物の形が環境によって左右されることは、昔から人間が気付いていた。たとえば魚類の推進機構である尾鰭は、生活様式を明確に反映していることが認められる。うちわ型の尾鰭は相対速度0の状態から流体を動かすのに適しているから、底魚は例外なくうちわ型の尾鰭である。それに対し遠洋を高速で遊泳する魚は、高速の流体に対して推力を発生させる必要上、後退角が大きくアスペクト比の大きな形の尾鰭を持ち、あたかもジェット機の主翼のような形となる(東(1986))。

5.1 構造変形法による生物形態の説明

大腿骨には上外側に大転子という突起がある。解剖学者は単に強力な筋肉の付着場所と考えていた模様であるが、逆L型の梁構造に負荷をかけ、応力歪みの大きな部位に材料を配分するという設計方針で、コンピュータシミュレーションを行なうと、見事に大転子に似た突起が出現する(梅谷(1987))。そればかりか材料を有限として、歪みの大きな場所に歪みの少ない場所から材料を移動するプログラムでは、大腿骨の骨髓腔に相当する空洞部分ができる(梅谷(1987))(図5, 6参照)。

心臓の心室壁は一樣の厚さでなく、パスカルの原理に反するように心尖部の筋肉厚は薄い。これも空洞を持つ回転楕円体の応力歪みを計算すると、心尖部で歪みが小さくなり材料の厚さは相対的に薄くて済むと説明できる。そもそも心臓の起源にしても、血管の一部が肥大して圧力を発生するようになると、円筒の長軸方向の歪みが大きいために血管が伸び、次に湾曲し、その部位に渦が発生し、やがて壁が肥大し、いつの時点かでねじれて心臓になったと考えられる。

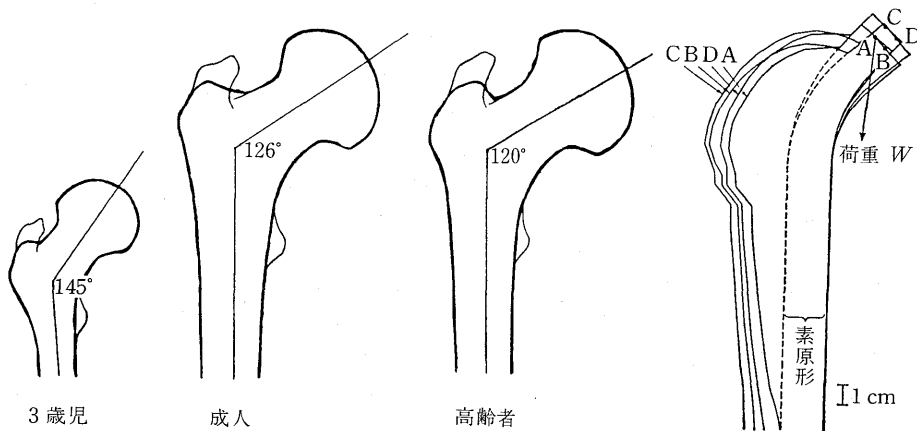


図5. 大腿骨の形状と逆L梁の荷重に対する成長変形(梅谷(1987)より引用改変): 大腿骨の大転子といわれる突起は大臀筋の付着部としてできたものではないと仮定し、等断面の曲がり梁に加わる外力に応じて材料を配分するプログラムを組むと、結果として曲がり部分に大転子に酷似した隆起部が生じる。左3組の図には対照として、幼児、成人、高齢者の大腿骨の大転子の形状を示した。

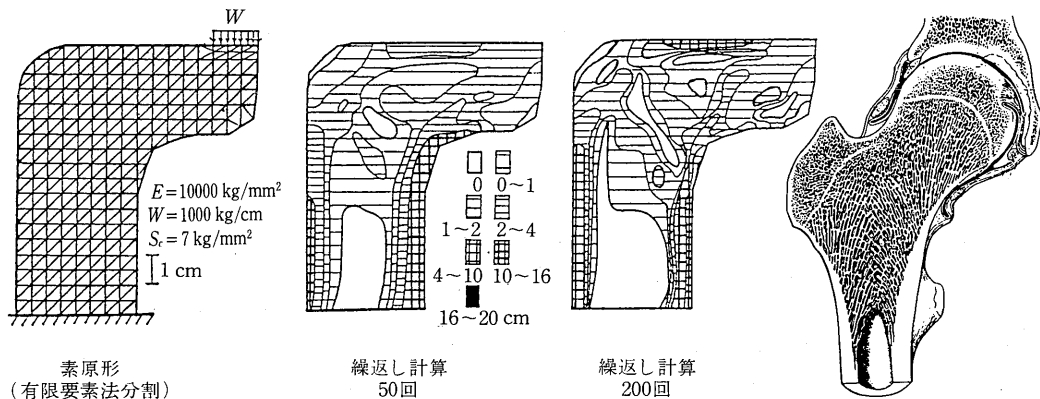


図6. 等価剛性変化による肉厚成長と大腿骨頭部の構造(梅谷(1987)より引用改変): 高速道路の橋脚に似た素原形に最大応力に応じて、一定の材料を有効に再配分するプログラムで、繰返し計算が進むと空洞部が生じてあたかも大腿骨(図右端)のような構造を呈する。

このような見方からも、生物の形や働きは物理環境にかなりの部分を支配されているはずである。それをすべて遺伝子のせいにするのは、研究の流行の影響であり時代のもたらした偏りである。

5.2 人間は考えるマシン

ホモ・サピエンスは直立姿勢を取ることによって、大きな重い脳を支持できるようになったといわれている。世界の各地で重量物を運搬するのに、頭のとっぺんにクッションを敷いて、その上に荷物を載せて巧みにバランスをとって歩く人々の姿が見られる。この姿勢だと脊柱に垂直方向の力がかかって、大きな荷重に耐えられるからである。しかしそれだけで脳が大きくなるはずはない。ヒグマでもプレイリードッグでも、好んで直立姿勢を取るが脳は種属に定められた大きさより増加する気配はない。直立の結果、ヒトだけ脳が大きくなった過程を推定するには、まずヒトの祖先が平爪型の指を持っていたことを考慮する必要がある。鉤爪型の指は敵を引っ掻くとか、獲物を引き裂くといった単純な工具的な機能では優れている。平爪型の指は非力であったために、石や木ぎれを道具として操作する必要に迫られ、その精緻な制御のために脳の運動中枢がまず拡張され、入力と指示との誤差信号をフィードバックするための脳領域も大きくなったのであろう。

これに加えていままでも指摘されなかった要因がもうひとつある。それは脳が大飯食いの居候であるという事実である。ヒトの脳は体重の2パーセントしかない小さな臓器である。それにもかかわらず消費エネルギーは、成人の脳で1日400 kcalにも達する。生きていくための必要カロリーが、最低2,000 kcal程度であるから、実に20%を食っていることになる。ヒトが直立姿勢を取った副産物のひとつは、移動つまり歩行のためのエネルギー消費が、四足動物に比べ半分になったことである。これは主婦が買い出しなどに使う手押し車が、乳母車のような四輪車ではなく、二輪車であることを考えれば当然で、走行抵抗が半分になる。多分ここで生じたゆとりで、贅沢な浪費家の脳を養えるようになったのである。もし最新の電子制御の自動車が、エレクトロニクス装置の電力消費が燃料費の20%になったら一大事である。やはり人間は「考える」特権を与えられた幸運な動物に違いない。

もうひとつ脳のエネルギー消費の特徴を挙げると、ほとんどブドウ糖の燃焼だけに依存する点である。心臓は一瞬の休みもなく働く根気のよい臓器であるが、エネルギー源は脂肪酸を

使っており、いわば重油を燃やして馬力が出るディーゼルエンジンである。これに対し脳は立ち上がりの迅速なハイオクタンのガソリンエンジンに譬えることができる。脳が要求する1日400 kcalは、100gのブドウ糖に相当するから、かなりの甘党である。不思議なことに燃料がガソリンのようなブドウ糖なのに、脳も心臓と同じく一刻の休みもなくエネルギーを要求する。勉強していても眠っていても、エネルギー需要はあまり変わらない。これは揮発性のメモリーを持つコンピュータが、情報の維持のために不断に電流を流すのと同じように、生物の脳の記憶機構の弱点を暗示している。脳の血流遮断で記憶喪失が起こることも、同じ理由であろう。

6. 機械論的生命観と生理学の使命

そもそも生理学は形態学と不可分の立場から出発しており、いずれも機械論的な思想が基本であった。ところが生化学の予想を越える進歩に流されて、生理学を標榜しても実は生化学の研究をしている講座のほうが少なくない。このような偏向はどんな領域にも見られ、たとえばスポーツ医学も生理学の一翼として早くから発足しながら、マンパワーの面でも研究費の面でもなお不満足な状態にある。一方では人口高齢化時代を目前に、健康維持促進とスポーツの関係に科学的な解明の必要が強調されているが、当面そうした社会の要望に応えるには専門研究者の数が不足している。

研究にも流行がある。人工心臓研究のパイオニアのひとりである阿久津哲造博士は、みずからの研究の跡を振り返って、新しいアイデアやテーマが発表される度に右顧左眄しても報われることはなく、研究の果実を手にするのは常に先頭を走る研究者であると喝破している。つまるところ流行を追うより独創性が何より重要であるとの教訓である。

しかし生理学の本来のパラダイムであった機械論的生命観は、たとえば基礎の視覚生理学や臨床の眼科学では遵守されているようである。ただし同じ立場にあるはずの心臓・循環器学には、機械論的なアプローチを捨てる研究者が少なくない。こうした傾向は研究の流行に眼を奪われる若い研究者が、貧困な想像力の故に生理学的な世界を理解できないためであるが、既成の生理学研究者も生理学本来の面白さを知らしめる努力不足ではないかと思う。本来生理学は代数程度の理論でも理解できる素直な性質である。自分自身が非線形数学やモンテカルロ法を導入しながら口にするのもおかしいが、むやみに数学モデルの好きな研究者には対象の素直な性質が眼に入らないために、難解な理論を持ち出している嫌いもある。ここでは言及する紙面がないが、いまやマイクロマシンの構想は機械の生物化を夢でなくしつつある。生物も機械も形のないソフトウェアも、すべて物理世界の法則に従ってのみ存在し得る宿命から逃れられない。先端科学技術世界の住人は、機械はどンドン生物化への進化の道を歩み、生物ができることはすべて機械にもできるという信念を育てなければならない時期にあると信じる。

参 考 文 献

- 東 昭 (1986). 『生物・その素晴らしい動き』(未来の生物科学シリーズ⑧), 共立出版, 東京.
- Bretz, W.L. and Schmidt-Nielsen, K. (1971). Bird respiration: flow patterns in the duck lung, *J. Exp. Biol.*, **54**, 103-118.
- 古川俊之 (1987). 『機械仕掛けのホモサピエンス』, 潮出版, 東京.
- 古川俊之 (1990). 動物の瞳孔はいかに設計されたか, サンデーゼミナール, 13 May.
- Kahle, W., Leonhardt, H. and Platzer, W. (1984). 『解剖学アトラス』(訳・越智淳三), 第三分冊, 文光堂, 東京.
- 梅谷陽一 (1987). 骨の形態の最適性(生物に学ぶバイオメカニズム)(バイオメカニズム学会 編), 工業調査会.