

コンピューターシミュレーションによる化石動物の生体力学的運動復元

山崎 信寿*

はじめに

筆者の属する機械工学分野の研究と技術は、究極的には「ある機能を実現する人工物を設計・製造する」ことを目的とする。このため、自然の設計・製造物である生物には古くから大きな興味を持たれてきた。この工学からの生物へのアプローチには大きく三つの流れがある。第一は、例えば高速の潜水艦を作るためにイルカの研究を行なうような、作るべき人工物が先にあるニーズ先行型の研究である。第二も作るべき人工物が先にある点では第一のアプローチと同様であるが、人工臓器や義肢のように、機能的あるいは形態的にできるだけ生物を模倣するようにしなければならない条件先行型の研究である。第三は、前二者とは異なって物作りから離れ、工学の方法論を使ってとにかく生物を調べてみようとするシーズ先行型の研究である。本稿のテーマはこの第三のアプローチに属するが、その方法論は新しい手術手技の開発や運動障害の回復予測などを目的として第二の分野にも応用できるものである。

さて、材料もエネルギー源も製造手段も人工物とは全く異なる生物に対して工学の方法論が適用できるのは、自然界の諸法則が等しく生物にも作用していることによる。本稿では、化石骨格という形態学的情報から移動という運動学的情報を取り出すための、力学の観点からのモデル解析手法を示す。これは、人工生命や仮想進化の発想につながる最新のコンピューターシミュレーション技術である。

なお、このような学際領域の研究では、当然のことながらそれを行う研究者に知識・技能の偏りが存在する。したがって、工学側が新たな手法やそれに基づく結果・解釈を示し、それに対して生物学側が工学側にフィードバックをかけるという循環が、研究の健全かつ効率的な発展に不可欠であろう。本誌がそのような目的に適した場になることを期待したい。

力学から見た動物の運動

動物の体重は40%以上が筋の重量で占められており、姿勢維持と運動に多大のエネルギーが費やされていることが推察される。したがって、化石動物の運動復元には骨格の復元のみならず筋復元が必要である。しかしながら、体を動かすのは筋力などの内力のみではなく、力を抜いて倒れるのも、飛び降りるのも運動であることに注意しなければならない。このように、運動には内力によるものと外力によるものがある。そして歩行のような日常的移動動作では内力の作用は外力による運動を補助または制御する脇役的存在であることが分かってきた(山崎, 1992)。

ここで言う外力とは、他人に押されるような力ではなく、地上のすべてのものに等しく働く重力のことである。その重要性は、自分の体重と同じ荷物を持ち運ぶことを想像すれば理解することができる。この例からも明らかのように、重力の作用の第一は体を押しつぶそうとする重量をもたらすことである。そしてこの力は質量に比例するために、同一材料でできている生物の場合は体が大きいほど支配的な要因となる。

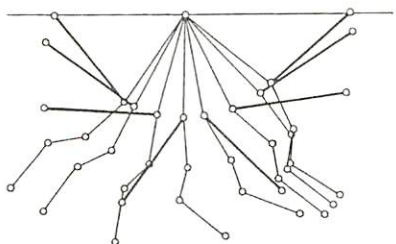
しかし、重力の作用はこのような強度上の問題に限られるわけではない。一例としてテナガザルのブラキエーション(腕渡り)を考える。テナガザルの運動を単純化すれば、上部を支点とした一本の棒の振れに近似できる。すなわち振り子(正確には重りと糸からなる物理振子と区別して剛体振子という)である。振り子はその質量分布と重力で決まる固有の周期で動くとき、その振動の維持にエネルギーを必要としない。図1は、テナガザルの体形を左右の上肢と体幹および大腿と下腿に分割し、それぞれを振り子として片手を放した後の重力による運動を計算したものである。これより、現生テナガザルの身体プロポーションはむしろ重力を積極的に使って移動効率を高めていることが分かる(Yamazaki, 1990)。

この周期運動の生成原理は歩行における脚の動きから、それに伴う首や尻尾の動きまで、運動様式の基本

的な決定要因になっている。実際、ヒトの体を操り人形のようにいくつかの節に分割してばねでつなぎ、空中に吊して手足を振れば、腰と胸も回転して歩行に類似した全身運動が起こることが確かめられている。(山崎, 1987)。また、さらに関節に過度の屈伸を抑制するばね(靭帯などの受動軟部組織に相当する)をとりつけば、地面に置いて姿勢を維持することもできる。このばねも純粋な弾性要素であれば1周期の運動によってエネルギーを消費しない。そしてほんの少しの筋張力があれば、図2に示すように、その体形本来の振動様式によって歩くこともできる(Aoki & Yamazaki, 1996)。このように、動物は重力に耐えるだけではなく、それを積極的に利用して省エネ型の運動を達成しているのである。

このような重力の作用に基づく周期運動は、絶対的な質量の大きさとその分布に依存するために、大きな動物ほど影響が大きい。ここに、恐竜のような大型絶滅動物の運動復元を行う手がかりを得ることができる。

a.



b.

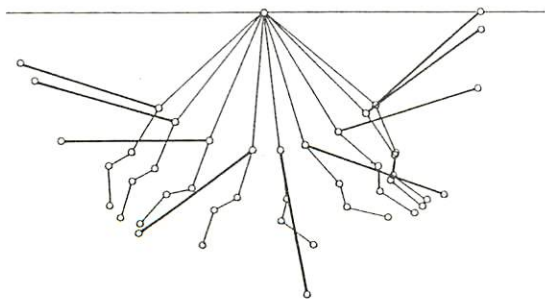


図1 重力を利用したテナガザルのブラキエーション。
a. 現生テナガザルのプロポジション。
b. 上下肢長比を大きくした場合。

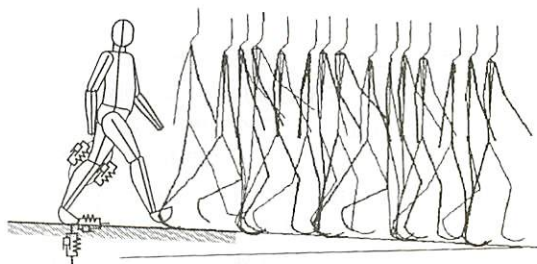


図2 受動要素モデルによる歩行様式。
受動要素モデルによる重力を利用した斜面歩行関節のばねと重力によって斜面を歩行する。

二足恐竜の運動復元

重力を仲立ちとした運動復元を行なうには、体積的に妥当な形態復元を行って体形の質量分布を知ることが必要になる。ここでは、二足肉食恐竜ティラノサウルスの復元骨格と復元模型を基に、表面の凹凸をならして図3に示すような楕円錐と楕円錐台に近似し、14節の幾何近似モデルを作成した。口腔や肺などの身体内部の空隙はワニなどの現生動物の比率を参考にして補正した。もちろん、三次元計測機などを使って精密な形態計測を行なうこともできるが、最終的には数節の剛体リンクに置き換えて計算するために、最初からこのような近似を行なっても結果に大差はない。なお、ヒトについて同じ方法で推定してみると意外と誤差は小さいことが分かる。空隙修正後のティラノサウルスの復元体重は9.7トンであった(富田, ヒサ, 山崎, 1995)

このようにして区分した身体各節を再び関節で連結すれば、全体は剛体リンクモデルとなり、各節の力の釣合式とモーメントの釣合式からなる連立微分方程式

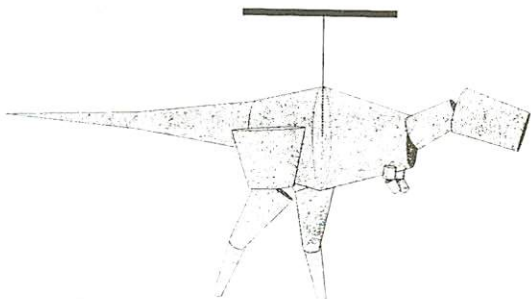


図3 ティラノサウルスの体形モデル。
各部を楕円錐台に近似し、質量分布を計算する。

で全身運動を記述することができる。この時、歩行中の姿勢を維持するために、頭部から尾部までの体幹節は仰角を一定に保って鉛直軸回りにのみ回転するものとした。また、直進歩行のみを考慮して脚は側方には振れないものとした。さらに、各関節には靭帯などによる弾性および粘性抵抗が作用し、過伸展の防止や中立位置への復帰がなされるものとする。

このようなモデルの体幹姿勢を適当に定め、腰関節が一定高さになるように空中に支持し、前述のヒトのモデルの場合と同様に脚を振れば、脚の振動は胴体に伝わり、それが頭や尾を動かして全身の動きになるはずである。ただし、実際には前述の様々な仮定を全て方程式で表し、数値計算によって各部の動きを計算する。このように、実物のある側面を表すモデルを用いてコンピュータ上で解析する方法をコンピュータシミュレーションという。この方法では一度モデルを作ってしまうと、後は式のパラメータや計算条件を変更するだけで容易に様々な姿勢や形態の動物を作ることができ、それぞれの歩行の様子を知ることができる(山崎, 1990)。

図4はいわゆるゴジラ型の体幹垂直型の歩容と、最近の復元姿勢に多い体幹水平型の歩容の計算結果を示したものである。ゴジラ型では頭や尾の動揺が大きく、歩幅も小さくなって極めて遅く、不安定な歩行になることが分かる。一方、体幹水平型では姿勢は安定し、歩幅が大きく、歩行速度も大きい。これは水平姿勢では垂直軸回りの慣性モーメントが大きくなるため、ティラノサウルスでは垂直型に比較し、重心を通る垂直軸回りの慣性モーメントは3.9倍にもなる。慣性モーメントの効果はフィギアスケートのスピン動作でよく観察することができ、両手を体軸に近づければ回転速度は上がり、両手を広げればゆっくりになる。すなわち、体幹水平型はフィギアスケートにおけるスピンで両手を広げた状態に相当し、強大な後肢の運動による体幹への反動によって生じる、体幹を垂直軸回りに回転させようとするモーメントを受け止め、体幹の動揺を小さくできるのである(山崎, 1993)。

ただし、体幹水平型では体幹部分の重心位置が股関節より前方になり、姿勢の維持には大きな股関節伸展モーメントが必要になる。したがって静止時には、少し体を起こし、首を後傾させて重心を股関節位置に近付けていたと考えられる。なお、重心が股関節の真上に来るのは、尾を引きずらないとして 70° 近くまで体を起こした姿勢になるが、推定される股関節の可動域からは、このような姿勢は取り得なかったものと思われる。

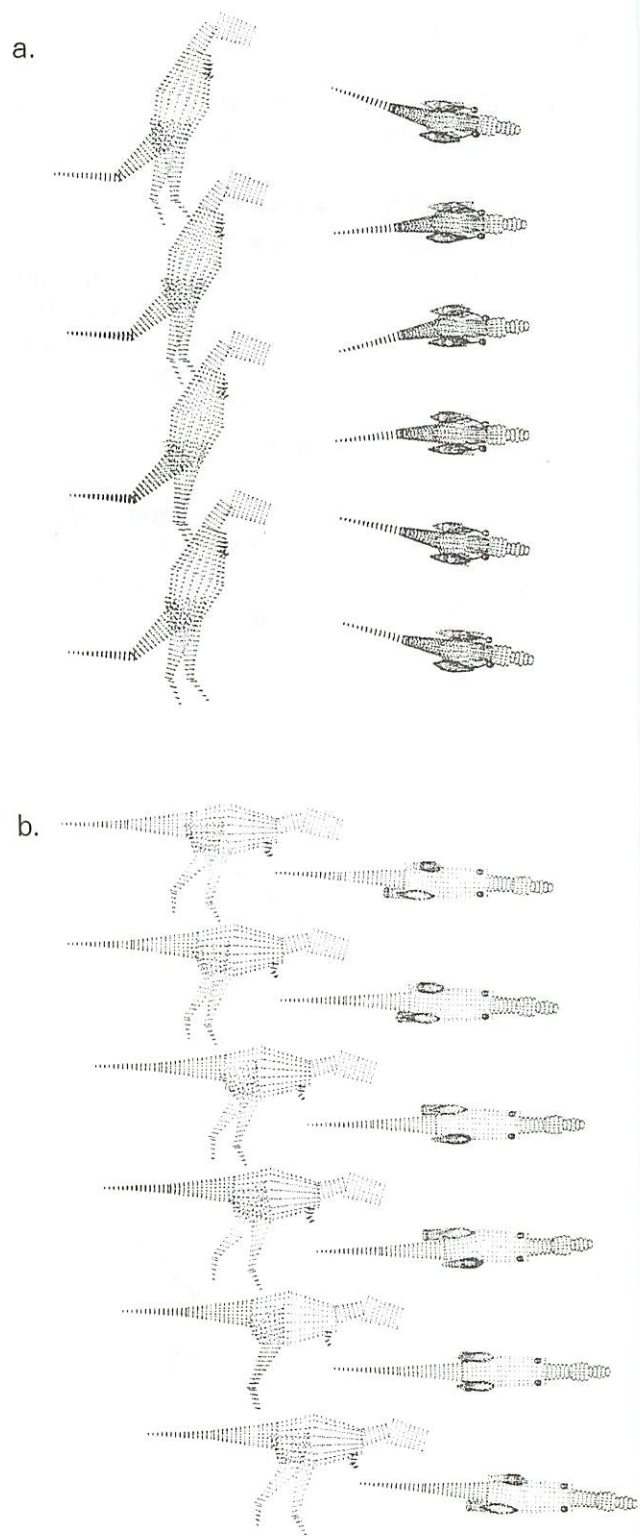


図4 ティラノサウルスの姿勢による歩容の違い。
a. 垂直型, b. 水平型
進行変位は足の動きに合わせてある。
頭部の安定性や速度に違いがある。

このように、姿勢維持に多大のエネルギーを使うとすれば、なぜ重心が股関節位置にあるように進化しなかったのであろうか。これはティラノサウルスの活動性を推定する重要な手がかりの一つである。動物でも車でも、重心位置が地面より高く、かつ地面に力を加えて加速する場合には、重心に加わる後向きの慣性力が体幹(車体)を起き上がらせる方向のモーメントを発生させる。このモーメントを打ち消すには、重心を後肢(後輪)より前方に出して体重による逆方向のモーメントを作用させなければならない。実際、馬などの高速4足獣では、静止時の重心位置は股関節と肩関節間距離の肩寄りおよそ60%位置にあり、さらに加速時には頭頸部を前方に突き出して重心を前に移動させる。図5に示すようにティラノサウルスの首を垂直から水平に変えれば、重心はおおよそ7.5cm前方に移動し、このとき出し得る最大加速度は0.124G(Gは重力加速度)程度であったと概算できる。したがって、多くの動物と同じように3歩(約4秒)で定常速度に達したとすれば、時速18kmで走行できたことになる。もちろん、このためには推進に十分な筋が発達していなければならないが、逆に、筋が発達していても、重心が前になれば急激な加速はできないのである。このように、動物の重心位置はその動物の加速性能を決定するために、形態復元したティラノサウルスの重心位置が妥当であるなら、ティラノサウルスは敏捷かつマラソンランナー並の速度で走れたことになる。

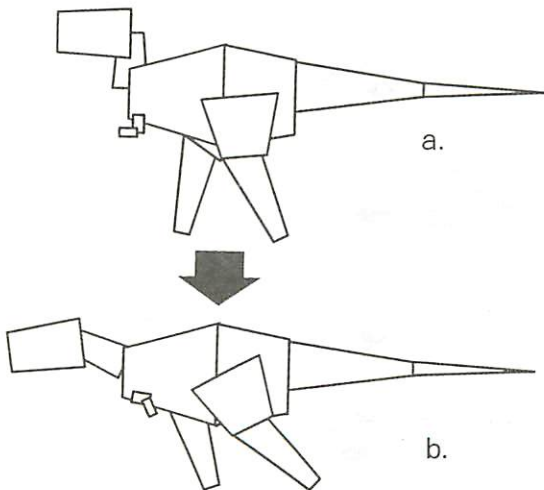


図5 ティラノサウルスの歩行時と加速時姿勢。

a. 歩行時, b. 走行時

走行時には頭頸部を水平にして重心を前方に移動し、体幹の起きあがりを防ぐ。

一方、歩行速度は歩行周期が分かれば足跡化石の歩幅から推定することができる。この歩行周期は、最もエネルギー消費量が小さくなる脚の自然な振動周期で決まるはずである。体幹を水平にしたときのティラノサウルスの後肢の振動周期は約3秒であった。ただし、この周期は脚を比較的伸展させて振ったときの値であるために、実際の歩行周期としては足が地面について体重を支えている立脚期に相当する。二足動物の立脚期は歩行周期の60%程度であるから、振動の片道時間が周期の60%に相当するとして、ティラノサウルスの歩行周期は2.57秒と推定される。

歩幅については、ティラノサウルスの連続した足跡化石が発見されていないために、形態の類似する二足肉食恐竜のアロサウルスの足跡化石から歩幅を求め、脚長を代表する大腿骨の長さ比でティラノサウルスの歩幅(2.29m)を推定した。以上より、ティラノサウルスの歩行速度は時速6.4kmとなった。これは哺乳類の歩行速度範囲でも上位に入っていることを示している。また、アロサウルスの足跡化石では左右の足の開き(歩隔:進行方向に垂直な左右の足の距離)が、ヒトと同じで、一直線上を歩くように足をついていることが分かる。この歩き方では重心の左右動が少なく、左右方向の安定にかかわる筋負担を減少させることができる反面、自転車同様、ある程度の速度が無いとこえって不安定になる。おそらくは、ティラノサウルスもこのような歩隔で歩いていたと考えられ、ヒト並のスタスタ歩きを行った動物として復元すべきであることが分かる。

四足恐竜の運動復元

図6はティラノサウルスの場合と同様にして復元した12mもの長さの首を持つマメンチサウルス(推定体重32.6t)の歩容を示したものである(富田, ヒサ, 山崎, 1995)。首を左右にわずかに振った堂々とした歩き方をしていることが分かる。ただし、この図の脚を動かす順序は、実際とは異なる可能性が高い。ゾウのように大型の陸上動物では、大別して常に3本の足で体を支えている「歩行」と、同時に2本の足しか着かない「トロット」を行なうことができる。マメンチサウルスのような巨大な竜脚類がどのような歩行を行なったかの手がかりの一つは、足を地面にめり込ませないために必要な足裏の接地面積の大きさである。同じように首が長いブrontサウルスの足跡化石から類推すれば、マメンチサウルスの足裏面積はその推定体重に比較して小さく、荷重を分散させ得る3点支持歩行を行っていたと考えられる。

また、重心が後脚の側にあるサルなどでは前足から踏み出し、ウマなどの重心が前肢の側にある一般の動

物では後足から踏み出すことが知られている（林，山崎，1976）。マメンチサウルスの重心位置は後肢の近くにあるために，その歩行の様子はサル型の足の運びであったと思われる。このような足運びでのマメンチサウルスの歩行周期は3.9秒となる。また，プロントサウルスの足跡化石から推定した歩幅に大腿長比を掛けてマメンチサウルスの歩幅に換算すれば，2.72mとなる。したがって，歩行速度は時速2.5km程度になり，極めてゆっくり歩いていたと考えられる。

しかし，この超低速歩行はマメンチサウルスの生態をも想像させる十分理にかなったものである。すなわち，体の重い動物は，速度を変えたり方向を変えたりすることに非常に大きなエネルギーを必要とするために，できるだけ一定速度で直線的に歩く方が効率的である。一方，巨大な体を維持するには大量の食物が必要であり，食べ続けることが，もう一つの要求となる。この歩き続けることと食べ続けることの両者の解決策がマメンチサウルスの前方に伸びた極端に長い首であろう。マメンチサウルスの主食は高さ3～4mの植物の葉であったと考えられているために，長い首は直線的にゆっくり歩き続ける胴体につけられた，広範囲の食物を得るための巧妙な収穫機であったと考えられる。

化石人類の運動復元

重力への適応を仮定した運動の復元手法は我々人類のサイズにも適用することができる。一例として図7は「ルーシー」の愛称で有名なおよそ350万年前のアウストラロピテクスアファレンシスの重力モデルによる歩行復元結果を示したものである（山崎，1992）。この時代の足跡化石によって，アウストラロピテクスはすでに二足歩行を行っていたことが分かっているが，体幹が直立していたかどうかは議論の分かれるところであった。重力モデルでの計算結果によれば，前傾姿勢よりも反り身の姿勢の方が歩行速度が大きく，頭部の動揺は少ない（Yamazaki，1992）。したがって，馬場（1992）が指摘するように，骨盤はやや前傾したまま腰部を反り返らせ，頭部を骨盤の上方で支えていた可能性がある。

では，さらに時代を遡ると，どのような歩行がなされていたのであろうか。残念ながら，もはや重力は簡単にはその答えを教えてくれない。すなわち，そもそも体形と運動の適応的關係は，その運動が日常的に行なわれることで成り立っている。したがって，例えば二足歩行の起源をさかのぼり，それが他の様々な運動と同程度の重要性になってしまえば，もはや化石骨格に二足歩行の証拠を見いだすことはできない（Yama

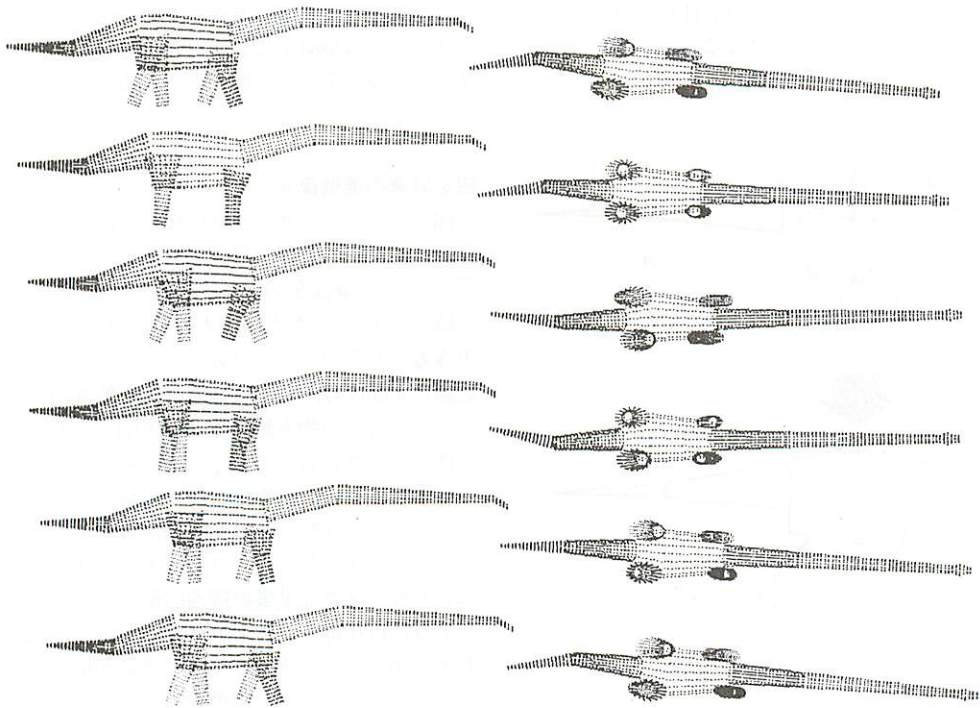
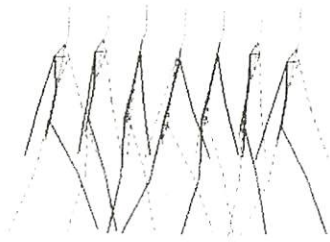
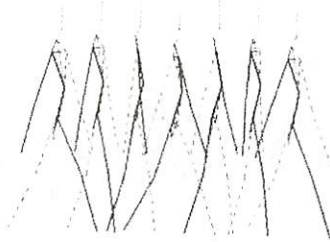


図6 重力モデルによるマメンチサウルスの歩行復元。
首をゆっくり振っての超低速歩行。巧妙な収穫機。



a.



b.

図7 重力モデルによるアウストラロピテクスの歩行復元。
a. 前傾型, b. 反り身型
体を反らせた姿勢の方が歩行速度が大きく、動揺も少ない。

zaki, et al. 1983). このことは個体発達についても同様であり、成長をさかのぼって幼児の段階に至れば、幼児は決して歩行に熟達しているわけではなく、実際、その体形は成体とは大きく異なる。(山崎, 1989).

また、第二の問題は人の祖先も幼児も現代成人よりかなり小さいことである。すでに述べたように、重力の効果は質量、すなわち身体サイズの3乗に比例するが、それを支える骨の強度は断面積でしか増加しない。したがって、体が小さくなれば骨は細く、軽くなって重力の支配から解放され、より自由な運動が可能になる。

まさにこの復元困難な対象が、1993年8月、日本・シリア合同調査隊によって発掘された(Akazawa, et al., 1995)。この死海地溝帯北端のデデリエ洞窟に横たわる全身骨格は、推定年齢2歳のネアンデルタール人幼児であった。2歳という年齢は、現代人而言えば独立歩行を獲得して急速に歩行に習熟する最も過渡的な年齢である。このような時期では筋の活動を無視することはできず、したがって、その筋を制御する神経系も無視することはできない。要するにこの場合の運動復元には骨格・筋・神経のすべてが必要になるのである。

神経筋骨格モデルによる運動復元

神経で制御する運動と云えば、ロボットの最適制御を想像しがちである。しかしながら我々の身体運動は、各部の軌道の細部を計算して発生しているわけではなく、自然に、自律的に行なわれていると考えられる。このような自律的運動を発生させる方法の一つとして、神経の発振と身体固有振動とを協調させて歩行を行なわせるモデル解析手法が提案されている(Taga, et al., 1991)。ここではこの方法を利用し、主要な身体構造を図8のようにモデル化した(Yamazaki et al., 1996)。神経筋骨格モデルの数値計算量は重力モデルに比較してはるかに大きいために、身体構造はできるだけ簡略化してある。すなわち、肘の屈伸が小さい上肢は一つの節にし、体幹は頭胸部と腰臀部に分け、下肢は大腿、下腿、足部の3節からなるものとした。また、下肢には屈伸運動に関わる主要な9筋群が付くものとし、上肢には肩関節の屈伸に2筋群、腰の回旋にも2筋群の合計24筋群をモデル化した。各筋は力発生要素と弾性および粘性要素をもち、生理的な張力・収縮特性を模擬し、その運動に必要なエネルギー消費量も計算することができる。

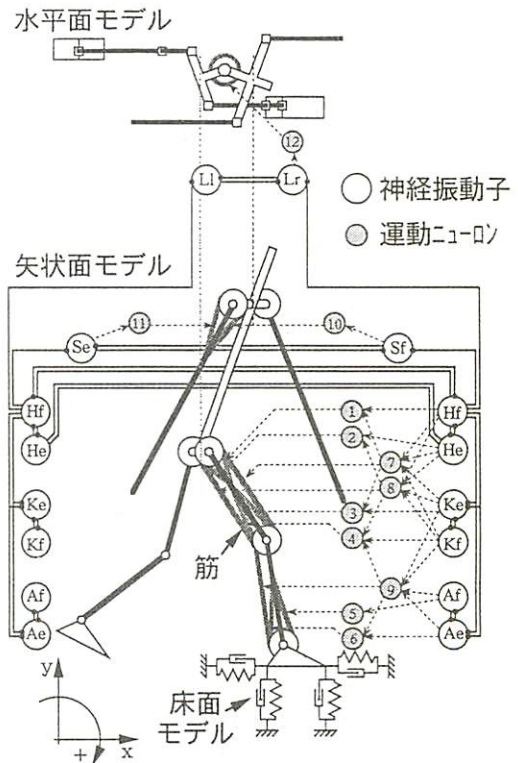


図8 二足歩行の神経筋骨格モデル。
煩雑になるので右側のみを示す。筋骨格系の振子的運動と神経系の発振が協調して自律的に歩行運動を生成する。

これらの筋群を制御する神経系には神経振動子によるリズム発生回路を用いた。神経振動子は各関節の屈伸命令に相当するリズムを発生させる。また運動ニューロンは神経振動子の信号や他の運動ニューロンの興奮状態、関節角度や足部の接地状態等の感覚フィードバック信号を総合し、各筋の活動量を出力する。一方、重力モデルと同様に筋骨格系はその質量分布による固有の動き易さを持つために、その振動周期と神経系との相互引き込み現象によって安定した歩行を生成することができる。ただし、このような身体力学系と神経系の協調は自然に獲得されるものではなく、神経系モデルに含まれる多数の係数の微妙な調整を必要とする。従来、この調整は試行錯誤的にシミュレーションを繰り返すことで行なわれていたが、ここでは最適化手法の一つである遺伝的アルゴリズムを用い、歩行を可能にする係数値の自動探索を行なった。

遺伝的アルゴリズムとは、その名の通り生物の進化過程を模倣して様々な可能性を試みる計算処理手順である。具体的には探索が必要な変数群を記号列（遺伝子に相当）で表し、これに基づいて少しずつ異なるモデル（個体に相当）を作り、ある評価基準によってモデルの選別（淘汰に相当）を行なう。さらに、選別されたモデルの記号列を交叉（交配に相当）とランダム変化（突然変異に相当）させ、新たなモデルを生成する。この過程（世代に相当）を繰り返すことによりある評価基準を最適化する係数値群を得る。なお、ここでのランダム変化は局所解に収束することを防ぐ効果がある。

図9に同年代の現代人幼児体形を参考にして化石骨格に肉付けし、質量分布を算出したネアンデルタール人幼児の歩行復元結果を示す（山崎，1995）。実際の計算は一度に50種類の神経回路網モデルを作り、歩行不能および筋疲労度の大きいモデルを排除し、これを200回程度繰り返して安定な歩行を達成した。この計算には5台のワークステーションを並列に用いて20時間を要した。獲得された歩き方は現代人幼児の歩行変異の範囲内にあり、歩幅、歩行速度も現代人幼児とほぼ一致する。ネアンデルタール幼児は現代人幼児よりも上肢が長く、骨格は頑丈で細部の寸法・形状に若干の違いが見られるが、その歩行はもはや現代人幼児と変わらなかったと思われる。

モデル解析手法では、身体プロポーションを変更することによって様々な体形の動物にも対応できるように、本手法は今後他の化石骨格についても適用することができよう。また、この神経筋骨格モデルの体形を運動に適應させるメカニズムを与えれば、体形と運動の両方を変化（進化）させることもできる。この体形を変えるメカニズムとしては筋負荷に対する筋の発達

や骨の強化、各節の伸展傾向に対する関節可動域の拡大、節長のゆらぎなどが考えられる。さらに、適應を加速させるには、これらの獲得形質を前述の遺伝的アルゴリズムの遺伝子列に加えればよい。このような発想で、コンピュータ内で体形と運動を適應的に変化させることを「仮想進化」と呼び、すでにチンパンジーの初期体形からヒト的直立二足歩行に至る進化過程も再現されている。（山崎，1996）。

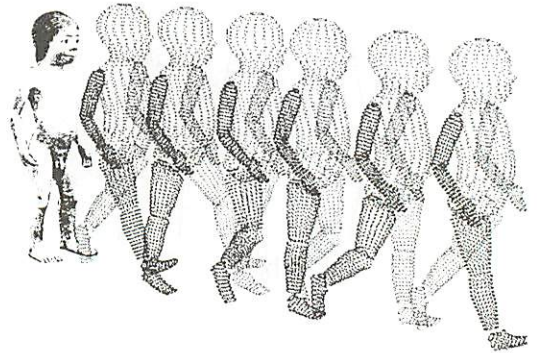


図9 ネアンデルタール人幼児の歩行復元。
同年代の現代人幼児の歩行とほぼ一致する。

運動復元学の展望

本稿で紹介した運動の復元手法は全身のプロポーションの力学的調和性に注目したものであった。これに対して、個々の骨形状の特徴から筋の付着位置や筋張力の大きさを推定する、部分形態に注目する方法も考えられる。この方法はむしろ復元の伝統的方法であるが、モデル解析では骨の力学的適應を仮定して、逆にその形態に至った力の作用を推定するところに特徴がある。一般に骨の表面形態と内部構造は遺伝的・空間的・力学的制約の基に形成される。その具体的なメカニズムは必ずしも明らかではないが、最小材料最大強度説など、いくつかの仮説の基に、適当な初期形状からある荷重条件下での適應形状に変形収束させる自立分散的方法も提案されている（伊能，藤原，梅谷，1993）。

骨格形状から力の作用を推定するためには、第一にその適應原理を知ることが必要になる。このための準備としては、すでに図10に示す全身156筋の筋モデルを持つ筋骨格モデルが開発されており、これに運動学的データを与えれば、その運動に必要な筋張力やその結果生じる骨関節への負荷を計算できるようになっている（長谷，山崎，1995）。また、図11に示すように、医用断層画像によって筋形状やその空間的制約条件についての詳細かつ高精度のデータも得られるようになって

ており（山崎ほか，1994），少なくともヒトについては実際の様々な運動における骨への負荷状態の推定が可能な段階にある。したがって，それらの負荷状態における骨の応力や歪分布等を算出すれば，骨がどのような力に，どのようなメカニズムで適応するように形成されているかを知ることができよう。

この適応原理を知れば，同様に医用断層画像などを



図10 全身筋骨格モデル。

運動データを入力することにより156筋の張力と骨関節に加わる力，およびエネルギー消費量を計算することができる。

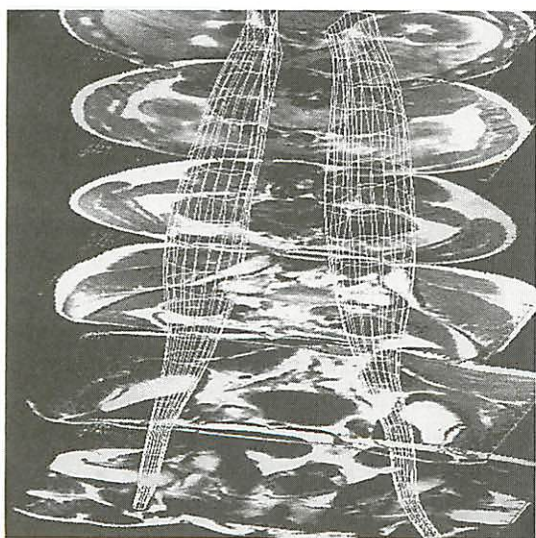


図11 医用多段階層画像から抽出した筋形状例。

腰部のMR画像と自動抽出した大腰筋形状の3次元形状。

使って内部構造を含む化石骨格形状を計測し，有限要素法と最適化手法などを組み合わせてその形状に至った作用力を推定することができよう。一般に筋の付着位置と作用方向は化石骨からもほぼ特定できるために，推定された力の大きさから，姿勢や運動をより正確に復元できるようになるはずである。このような企てには，様々な動物の筋骨格モデルを作成してデータを蓄積する必要があるが，コンピュータ内で化石骨格を組み立て，筋などの軟部組織復元を行ない，姿勢や運動を復元するという一連の操作の実現に向けて，今後さらに様々なコンピュータ技術が応用できるようになるものと思われる。

おわりに

コンピュータシミュレーションによる化石動物の運動復元手法の現状を示した。ここでの復元の基本は，数式化や最適化などの計算処理にあるのではなく，形態と運動を支配する原理を探索することにある。その一つが重力がもたらすリズムであり，他の一つが神経回路が発生するリズムである。本稿で示したシミュレーションモデルは，パラメータを変えれば様々な動物に適応することができる。

このような仮想動物をコンピュータ内に住まわせることが可能になったのは，第一にコンピュータハードの進歩によるところが大きいですが，このハードを基にしてニューラルネットや遺伝的アルゴリズムなどの様々なアイデアが生まれてきたというソフト面での発展も大きい。しかし，これらも所詮は道具に過ぎず，研究の進展は昔も今も本質を見抜く力と際限のない好奇心であることに変わりはない。生物の巧みさは，仮想の世界で模擬しようとするときさらにはっきり思い知らされる。

要するに，この分野には，何とかできそうなものからほとんど空想のような話しまで，手つかずの膨大な課題が残されている。これを絶望と見るか，学際的ロマンを秘めた新天地と見るか？ 本稿がこの分野への一歩を踏み出す仲間作りのきっかけとなれば幸いである。

文 献

- Akazawa, T., Muhsen, S., Dodo, O. and Mizoguchi, Y. (1995) Neanderthal infant burial : *Nature*, 377, 585-586.
- Aoki, K. and Yamazaki, N. (1996 in press) A study of gravitational adaptation of human body proportion by passive walking model. In : Abstract of 10th Conference of the European Society of Biomechanics.

- 馬場悠男 (1992) 骨格構造から推測されるヒト直立二足姿勢の進化. 科研費総合A「ホミノイド(ヒト上科)における二足歩行能の起源と進化」成果報告書, 7 - 15.
- 長谷和徳・山崎信寿 (1995) 汎用3次元筋骨格モデルの開発. 日本機械学会論文集, 61 (591-C), 295 - 300.
- 林喜男・山崎信寿 (1976) 静的安定を条件とした4足歩行の計算機シミュレーション. 計測自動制御学会論文集, 12(2), 186 - 190.
- 伊能教夫・藤原宏・梅谷陽二 (1993) 骨の適応機能に学んだ3次元構造形態の生成法. 計測自動制御学会論文集, 29(10), 1221 - 1226.
- Taga, G., Yamaguchi, Y. and Shimizu, H. (1991) Self-organized control of bipedal locomotion by neural oscillators in unpredictable environment. *Biological Cybernetics*, 65, 147 - 159.
- 富田幸光・ヒサクニヒコ・山崎信寿 (1995) これが恐竜だ. 新潮社, pp. 100 - 125.
- Yamazaki, N., Ishida, H., Okada, M., Kimura, T. and Kondo, S. (1983) Biomechanical evaluation of evolutionary models for prehabituational bipedalism. *Annales des Sciences Naturelles, Zoologie, Paris*, 13e serie, 5, 159 - 168.
- 山崎信寿 (1987) ヒトの体形と歩行運動. *バイオメカニズム*, 7, 287 - 294.
- 山崎信寿 (1989) 加齢による体形および姿勢変化と歩容変化との力学的関係. *Japanese Journal of Sports Sciences*, 8 (3), 142 - 147.
- Yamazaki, N. (1990) The effects of gravity on the interrelationship between body proportions and brachiation in the gibbon. *Human Evolution*, 5 (6), 543 - 558.
- 山崎信寿 (1990) 二足恐竜の正しい歩き方. *バイオメカニズム*, 10, 85 - 95.
- Yamazaki, N. (1992) Biomechanical interrelationship among body proportions, posture, and bipedal walking. *In: Topics in Primatology*, 3, University of Tokyo Press, pp. 243 - 257.
- 山崎信寿 (1992) 身体運動の力学的原理. システム/制御/情報, 36(12), 784 - 789.
- 山崎信寿 (1992) 初期人類歩行姿勢の生体力学的検討. 科研費総合A「ホミノイド(ヒト上科)における二足歩行能の起源と進化」成果報告書, 17 - 22.
- 山崎信寿 (1993) 恐竜の歩行. 小島郁生編, 恐竜学, 東京大学出版会, pp. 99 - 142.
- 山崎信寿・能登谷義明・中村俊康・持丸正明 (1994) 解剖学的基礎知識を利用したMR画像からの生体組織自動抽出. 計測自動制御学会論文集, 30(11), 1280 - 1286.
- 山崎信寿 (1995) デデリエ・ネアンデルタールの歩行復元, ネアンデルタールの復活, 東京大学総合研究資料館パンフレット, 28 - 31.
- 山崎信寿 (1996) 仮想人類. 数理科学, 394, 14 - 20.
- Yamazaki, N., Hase, K., Ogihara, N. and Hayamizu, N. (1996 in press) Biomechanical analysis of the development of human bipedal walking by a neuromusculo-skeletal model. *Folia Primatologica*.

Abstract

Some biomechanical principals were presented for the restoration of fossil animals. The most important restriction in terrestrial animals is gravitational force acting on the body construction and its movement. The gravitational force produces not only compression force but also pendulum motion of each body segment. Therefore, when the body motion harmonizes with the natural oscillation of body segments, the motion results in the least energy consumption. According to the principle of motion, bipedal and quadrupedal walking of dinosaurs were restored by using a computer simulation technique.

Body motion is also controlled by musculoskeletal system. As an example of this type of restoration, *Neanderthal's* walking was simulated by using a neuro-musculo-skeletal model and genetic algorithm. The model is constructed of two-dimensional ten rigid links with twenty-six muscles and eighteen neural oscillators. Bipedal locomotion was generated by a mutual entrainment between the neural oscillators model with nineteen segments and one hundred and fifty-six muscles has been developed in order to calculate the internal loads on bones from measured kinesiological data.

Restoration of motion should done by inter-faculty cooperation.