

《小特集》

身体運動の生成と発達のデザイン原理

多 賀 厳太郎*

ABSTRACT First, a nonlinear dynamical model of the neuro-musculo-skeletal system that generates human gaits is presented. A series of computer simulations demonstrates that an adaptive gait is generated by dynamic interaction of entrainment among a model neural system composed of neural oscillators, the musculo-skeletal system and the environment. Secondly a four stage model of the development of locomotion is proposed. The result of computer simulation suggests a general principle for the development; the stability of movement is initially established by freezing the number of degrees of freedom and then the complexity of movement increases by increasing the number of independent degrees of freedom.

1. はじめに

人間の身体運動をシミュレーションする試みが近年増えている。身体を剛体系とみなし、その力学モデルをたてれば、身体運動をシミュレーションすることは、原理的には問題はないはずである。19世紀末に *Muybridge* によって行われた連続写真による運動計測の先駆的な仕事以来、運動計測技術も着実な進歩を遂げ、最近では3次元計測が比較的容易に行えるようになった。また、神経科学の分野でも、脳神経系が身体運動の制御をどのように行っているかについての知見も蓄積されつつある。しかし、身体運動の設計原理に深く立ち入ったとき、身体運動は非常に深遠な問題をなげかける。特に、運動の主体性は、昔から多くの哲学者を悩ましてきた問題であった。身体というものに焦点を当てると、その存在様式には二つの性格があることが浮かび上がる。つまり、身体は自己の運動を決定する主体的なシステムの一部であると同時に、ある環境の中で物理的な法則にしたがって動く客体的なシステムの一部であるという両義性を持っている。もちろん後者の問題をシミュレーションで解くことは直接的であるが、前者の問題を含めた枠組みでなければ身体運動を真に理解したことにはならないだろう。

ここでは、第一に、脳神経系、身体、環境という便宜的な境界を一度取り払って考えるということを議論

する。つまり脳神経系＝制御系、身体＝被制御系、環境＝不確定な外乱、という古典的な制御の概念を壊したときに、どういう枠組みで運動の生成を理解できるのかということを考える。このことは、「設計的場所論」¹⁾の問題とも関連すると思われる。そこで、このようなアプローチの例として、人間の歩行運動のシミュレーションを紹介する。第二に、運動の発達の問題を議論する。生体システムは、進化や個体発生などの歴史性を持ったシステムであり、この点を抜きにしては生体システムの設計論を考えられない。発達過程では、運動もそれを生成するシステムも劇的に変化していく様子を目のあたりにできる。ここでは、運動の発達に関する興味深い現象を紹介し、そのメカニズムを考えてみる。

2. 身体運動の生成

これまで、生体の運動制御の研究は、その時代の実験手法の進歩に応じて発展してきたが、制御に関する概念は、常に観念論的立場と経験論的立場の間を揺れ動いてきた。つまり、脳神経系が生得的に運動を作る能力を持っているという考え方と、環境から得た情報が経験を通じて運動を形作るという考え方である。

神経生理学が誕生して間もない時代には、特定の感覚刺激に対する特定の運動が脊髄レベルのメカニズムで生じることが明らかになり、下位神経系における反射の概念が確立した。しかし、反射がどのように運動の生成に寄与するかについては、対立した概念が提案された。例えば、*Sherrington* は上位の脳神経系が反射を制御することで、脳神経系が運動の秩序を与えると

A Design Principle for Generation and Development of Body Movement. By *Gentaro Taga* (Dept. of Pure and Applied Sciences, Univ. of Tokyo).

*東京大学大学院総合文化研究科関連基礎科学系

主張する一方、*Pavlov* は環境からの入力が入力が反射を通じて連合することで運動の秩序を与えると主張した²⁾。

その後、反射のように感覚入力によって運動が生じるだけでなく、神経系に運動そのものを生み出すメカニズムがあるにちがいないと考えた人々が現われた。*von Holst* は歩行などのリズム運動を作るための振動子が神経系に存在すると考えた。また、*Bernstein* は身体の数多くの自由度を協調させるメカニズムが神経系にあると予測した³⁾。現在では、これらの予想が正しいことが確かめられている。例えば、脊椎動物の場合、脊髄に歩行などのリズム運動をつかさどる神経回路網が存在することが知られており、セントラルパターンジェネレーター (CPG) と呼ばれている⁴⁾。CPG は自律的にリズム活動を行う神経振動子から構成され、多数の神経振動子が相互作用することで、協調した四肢の運動を作り出している。しかし、人間はもちろん動物の場合でも、その神経回路網の詳細な構造はまだわかっていないので、現在でもさかんに研究がなされている。

CPG の実体ははっきりしてきたとはいえ、依然として運動生成の本質は明らかではない。つまり、CPG を核として運動系全体のメカニズムを考えると、随意的な運動生成や環境との相互作用のメカニズムという問題があらためて浮かび上がる。そこで、筆者らは神経振動子から構成される神経系、身体および環境をすべて力学系としてモデル化し、そこで歩行運動が生成される原理を探った。その結果、神経系、身体、環境がリズムの引き込みを通じて、システム全体が協調的にふるまうことで安定な歩行運動が生成されることを発見した⁵⁾。以下でこのモデルを簡単に紹介しよう。

3. 歩行運動の神経筋骨格系モデル

モデルは、神経系を記述する力学系と身体と環境を記述する力学系の二つの力学系から構成される。図1にその概略を示す。身体は8セグメントの剛体リンクとしてモデル化され、20個の筋肉が力をだしていると仮定している。床とは粘弾性の相互作用を行うと仮定する。身体(筋骨格系)は運動方程式として記述される。神経系は歩行運動の基本的なリズムパターンを生成するリズム生成系(RG)、上体や立脚の姿勢を制御する姿勢制御系(PC)、視覚情報をもとに基本的な運動を修飾する一過的運動生成系(DM)から構成される。RGは2変数の微分方程式で記述されるニューロンユニットが、2個、抑制性の結合でつながってで

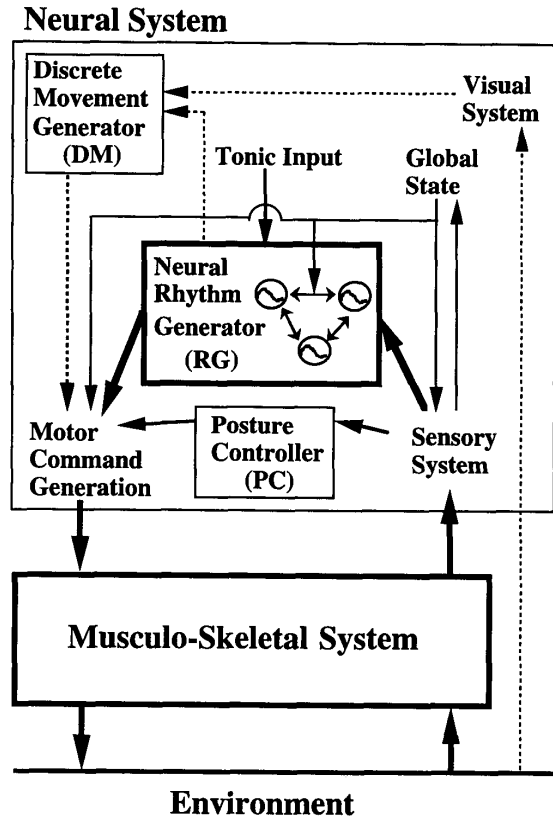


図1 歩行運動の神経筋骨格系モデル

きた神経振動子から構成される。7個の神経振動子が、剛体リンクの7個の関節の筋トルクを生成する。PCは歩行の位相に応じて関節のインピーダンスの調節を行う。関節角度や床反力などの感覚情報はRGやPCに送られ、視覚情報はDMに送られる。

このモデルのシミュレーションを行った結果、歩行運動は身体と神経系の位相空間での安定なリミットサイクルとして現われることが明らかになった⁶⁾。ここでは、神経系で作られたリズムが、身体運動のリズムや環境との相互作用のリズムと相互引き込みを起こすことで運動の動的安定性が生じている。我々はこのようなメカニズムをグローバルエントレインメントと呼んでいる⁵⁾。このモデルは、実際の人間の歩行中の運動軌道・床反力・筋電面(EMG)などの計測データを定性的に再現することができる⁶⁾。また、歩行中の一過的な外乱やゆるやかな坂道などの環境の変化に応じて、自律的に歩行運動を生成してリアルタイムの適応が可能である⁷⁾。1変数の制御パラメーターで歩行の速度や周期を自律的に制御することもできる⁷⁾。このような運動は脳神経系が完全に規定しているわけでもないし、*Gibson*⁸⁾以来の生態学的心理学が主張する

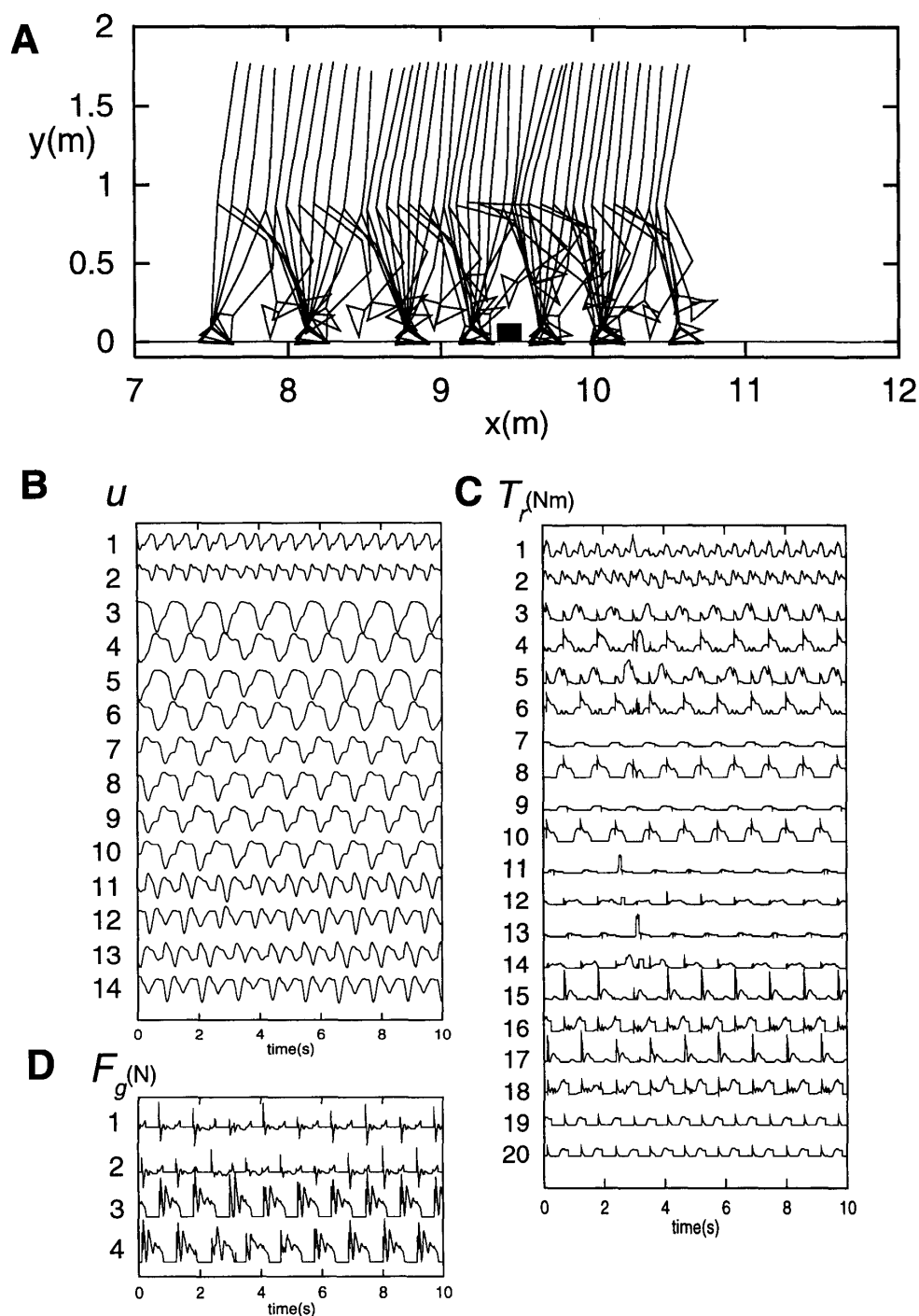


図2 歩行運動のシミュレーション. 障害物回避時の歩行. (A)スティックピクチャー. (B)神経活動. (C)筋トルク. (D)床反力.

ように運動系が環境に埋め込まれているわけでもない。運動の生成は神経系・身体・環境のダイナミクスが構造的にコヒーレンスを持つことによって実現されるのである。歩行中に障害物が現われたときには、このコヒーレントな状態は破れてしまう。このときは視

覚系の情報から得られる環境の状態と神経系内部の状態とをDMによって統合し、適切な運動の修正を行う⁹⁾。つまり、制御の戦略はシステムの内と外との関係性によって文節化されるのである。図2には、障害物回避のシミュレーションの一例を示す。この例で

は、障害物に近づく前に歩幅を調節した後、両脚で障害物をまたいで歩き続ける。そのときの、神経活動、筋トルク、床反力も同時に示してある。

このように、歩行運動の生成のメカニズムとそのリアルタイムの適応性に関しては、神経生理学などの知見をもとにモデルを構築しシミュレーションを行えば、システムのデザイン原理の必要条件をおさえることができる。しかし、生体のような複雑な系では、生体とモデルとを一対一に対応させることは原理的に不可能なため、モデルのデザインの細部の構造はモデルの制作者（つまり筆者）に依存してしまう。これを解決する一つの方法は、生体自身が生体をデザインする発達の過程を理解することである。そこで、以下では運動の発達の問題を議論する。

4. 発達の理論

発達の理論にこれまで最も大きな影響を及ぼしてきたのは、やはり *Piaget* である¹⁰⁾。彼は子供の発達過程に関する膨大な観察や実験を行ったが、主体と環境との関係の発達を適応性という観点から捉え、その機能を支えるシステムの構造の単位を「シエマ」と呼び、感覚運動から認知までの段階的な発達がシエマの調節と同化の繰り返しによって説明できるとする体系を築いた。彼は生まれたばかりの子供では、自己と環境との間には区別がなくいわば主客未分状態であり、物理的な境界が便宜的に二つのシステムを分けていると考えた。そして、生得的に持っている反射シエマを行使して環境と相互作用する過程で、環境を同化し適応的なシステムとしての自己を拡大する一方、反射シエマの調節を通じて自己内部の構造を複雑にしていこうと考えた。これによって主体客体の二元論の問題を発達論的に解決しようとした。

最近、新生児の持つ能力が *Piaget* の時代に考えられていたよりもずっと高いことがわかりつつあり、生理学的なメカニズムの知見にしても *Sherrington* の時代の反射の概念と様変わりしているため、いろいろな意味で *Piaget* の体系は攻撃されつつある。しかし、現在の発達観は本質的な意味で *Piaget* のそれを乗り越えてはいないように筆者には思える。*Changeux* は「ニューロン人間」¹¹⁾の中で、*Edelman* は「ニューラルダーウィニズム」¹²⁾の中でそれぞれ発達の問題を論じている。彼らは、脳神経系の構造の発達過程に着目し、ニューロンやシナプスがはじめ過剰に作られるが、その後、細胞死やシナプス除去が積極的に起こるという現象から、発達をランダムな状態の生成と選択ということで理解

しようとした。しかし、このメカニズムだけでは、システムの自由度は減る一方ということになってしまいう。最近、*Quartz* と *Sejnowski*¹³⁾はこうしたセレクショニズムの欠点をつき、システムの自由度を増やしていくような構成主義的アプローチを主張しているが、まだ具体性のあるアイディアはないようである。また、*Thelen* と *Smith*¹⁴⁾は発達のダイナミカルな性質に着目し、非線形動力学の概念を発達に適用しようとしている。そこでは、*Haken* の自己組織の理論¹⁵⁾がそのまま使われており、運動パターンの変化などの問題を自己組織の観点から追及してきた *Kelso*¹⁶⁾らとほぼ同一の立場をとっている。筆者のこれまでの研究も、これらと非常に近い問題意識から出発しているが、セレクショニズムや構成主義の問題を解決する手段は自己組織理論の枠組みの内側にはないと考えている。

そこで、次の章では運動の発達に焦点をしばり、力学系としてシステムを捉える場合、自由度を増やすことでシステムの複雑さや多様性を増加させる方向に発達がすすむように見える現象と、冗長な自由度を削減する方向に発達がすすむように見える現象を一つずつ取り上げ、発達の原理について考察してみたい。

5. 身体運動の発達

5.1 歩行運動の発達

新生児・乳児の運動機能は、首すわり、寝返り、お座りなどのように、ほぼ一定の順序をたどって発達する。*Gesell*¹⁷⁾らは新生児・乳児の運動の発達の徹底的な観察により、随意的な運動が頭から足の方へ、また、体幹から末梢の方へと進み、独立して制御できる自由度が増えていくという原則にまとめあげた。この原則がどこまで成り立つのかは今だに興味深い問題である。

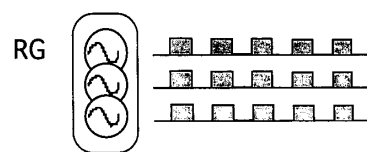
運動発達の中で最も大きな出来事の一つは、歩けるようになることである。独立二足歩行の獲得までには、生後約1年という長い期間を要するが、この間にシステムにどのような変化が起きているのだろうか。新生児は、脇を支えて足を床に着けると、原始歩行と呼ばれる運動を行う¹⁸⁾。これは、あたかも歩いているかのように、左右の足を交互に上げ下げする動作である。ところが生後数か月たつと、原始歩行はあまり見られなくなる。そして、左右交互の足踏み運動は、1年後に「本当の」歩行運動として再び現われる。この現象に関しては様々な議論がなされているが、新生児期の原始反射の多くは正常な発達の過程で見られなくなるというのが通説となっている。例えば、モロー反

射, 非対称性緊張性頸反射, バビンスキー反射などの原始反射は新生児・乳児の一定期間の間は見られるが, 正常な発達では消失し, もし, 原始反射が残っている場合には発達異常の可能性が高いとされている。また, 手を口にもって行って指しゃぶりする動作や, 視覚性の腕のリーチングなどのより高度な運動も, 新生児期に見られたものが一度消失し, あらためて現われるという現象が報告されている。このようなことから, 人間は秩序だった運動を生成するかなり複雑な神経回路網を持って生まれるが, それが何らかの変化を起こすことで発達が進んでいくという一般的なメカニズムの存在が予想される。

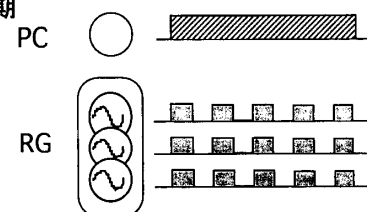
では, 歩行の発達に再び焦点を当ててみよう。原始歩行はなぜ消失するのだろうか。原始歩行と独立二足歩行は別のメカニズムで生成されるのだろうか? ここでは三つの点に着目する。まず明らかなのは, 原始歩行のときには姿勢制御のメカニズムが全くはたっていないということである。独立二足歩行は直立姿勢の制御が十分に発達した後にはじめて可能になる。第二に, 原始歩行や独立歩行直後(約12ヵ月)のときの筋活動(EMG)と成人歩行のEMGとを比較すると著しい違いがある。原始歩行のときは, 左右の足の筋肉は交代性の活動を行うが, 同じ足のなかの異なる関節の筋肉や伸筋と屈筋はほぼ同じ位相のリズム活動を行っている。独立歩行直後の筋活動は原始歩行のときのそれと比べるとあまり劇的な変化はみられない。これに対して, 成人では異なる筋肉はそれぞれが歩行周期の異なる位相で活動する。つまり, すべてが同調している単純なリズムのパターンから, 筋肉ごとに様々な位相関係を持った複雑なリズムのパターンへとという変化が発達の過程で起きているのである。第三に, 原始歩行と独立歩行は, 運動が自己の意図によって生じているかどうかという点で, 質的に異なるものであるといえる。意図というものをどう定義すればよいのかは, たいへん難しい問題であるが, 発達過程でシステムが意図をどのように獲得するのか, あるいはシステムははじめから意図を持っているのかという問題を考える上で大変興味深い。

上で述べた少なくとも最初の二つの点に関して, 著者はシステムの自由度のフリージングと自由度の増加という概念が重要なのではないかと考え, 乳児が独立歩行を獲得する過程を再現するシミュレーションを行っている。新生児から成人に至るまでの発達に, 図3のような4段階の変化が起こるというストーリーを立てた。まず, 新生児は生得的にリズム生成系(RG)

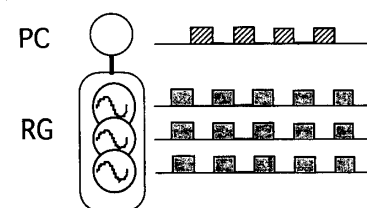
原始歩行期



姿勢制御発達期



独立歩行開始期



成人歩行

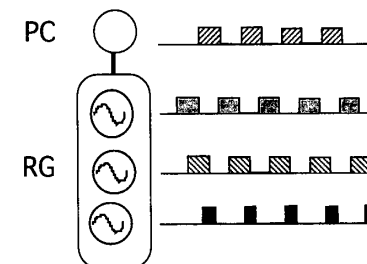


図3 歩行の発達過程モデル

を持って生まれ, これによって原始歩行が誘発される。RGは左右対称な構造を持つが, 片脚については, hip, knee, ankleの3個の神経振動子からなる。この3個の神経振動子は完全に同調している。したがって, 実質的には1個の神経振動子で片脚の運動を生成していることになる。第二段階では, 姿勢制御系(PC)が発達してくる。PCは拮抗筋を同時に活動させることで関節の自由度をフリーズする。この働きは拮抗筋を交互に活動させるRGの働きと矛盾するので, この時期には足踏みが見られなくなる。しかし, PCによるフリージングによって静的なバランスの安定性が得られ, 直立動作が可能になってくる。第三段階では, PCとRGとの間に相互作用が起こり, PCによるフリージングから次第に開放されることで, 独立歩行が可能になる。さらに, 第四段階にはRGの3個の神経振動子が独立した位相で振動するようにな

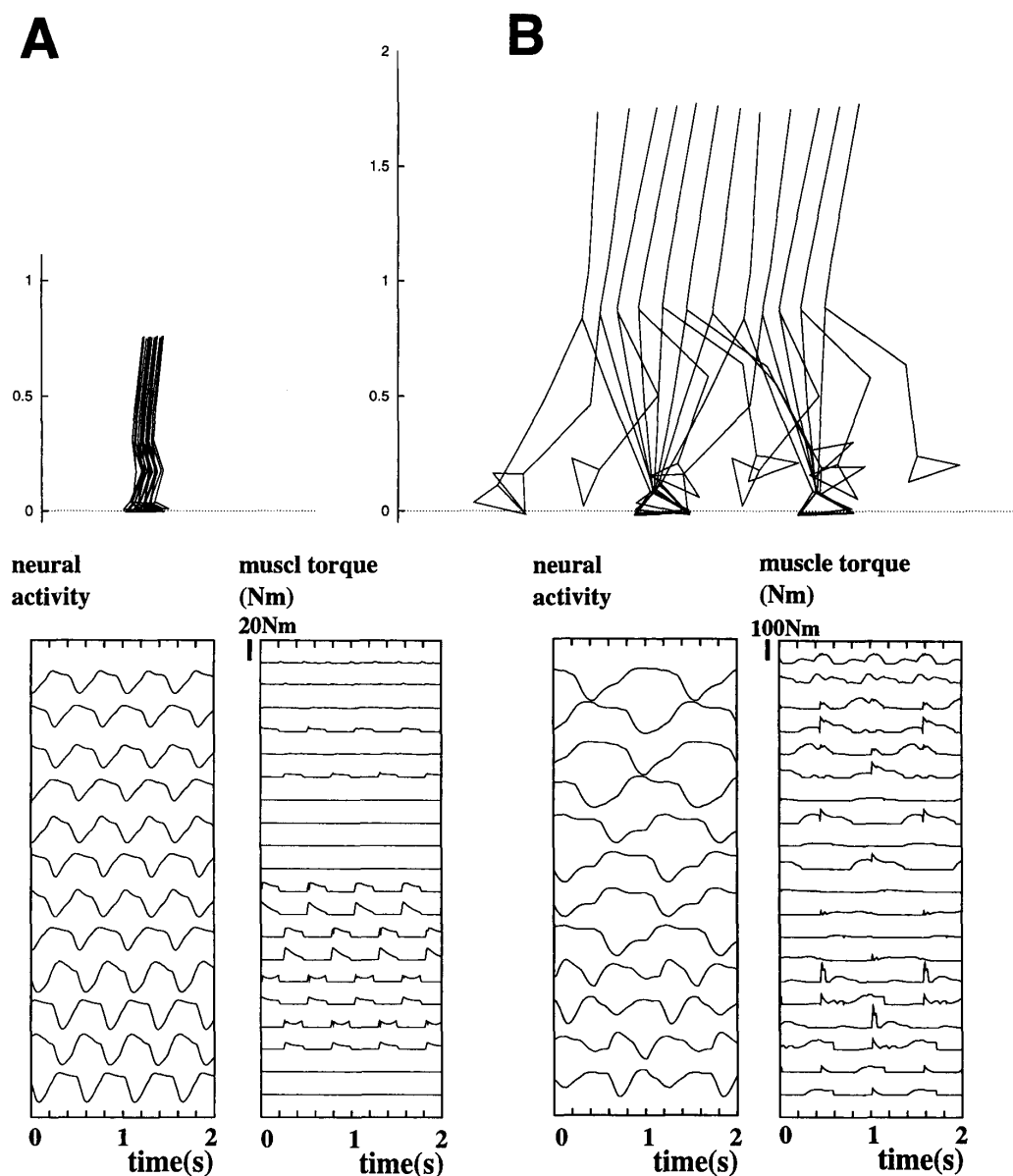


図4 乳児歩行と成人歩行のシミュレーション。(A)独立歩行開始期の乳児の歩行のスティックピクチャー，神経活動，筋トルク。(B)成人歩行のスティックピクチャー，神経活動，筋トルク。

り，成人型の歩行が完成する．一度，成人型の歩行が獲得されれば，成長にともなって身体のパラメーターが大きく変化しても，歩行運動のリミットサイクルの構造安定性が保たれることはすでにわかっている¹⁹⁾．

図4は，第三段階の独立歩行開始期と第四段階の成人歩行のシミュレーションの結果の比較である．図4Aの運動は，まずPCによって直立が可能になった後，少しずつRGとPCとの相互作用を変化させていくことで得られたものである．神経活動と筋トルクを図4AとBとで比較すると，明らかに成人歩行のほうが独立な自由度が多いことがわかる．以上のモデルの

シミュレーションから，自由度のフリージングによる安定化と自由度の増加による複雑化が歩行の発達過程で重要な役割を果たしていることが示唆される．今後，実際の現象と照らし合わせながら，このモデルの妥当性をさらに検証する必要がある．

5.2 新生児の general movement

歩行を例に挙げて，発達がシステムの自由度の増加をとめないながら，単純な秩序状態から複雑な秩序状態へと進行するのではないかという仮説を述べた．しかし，冗長性のあるシステムの場合，無秩序状態から秩序状態へという自由度の圧縮過程が存在しても良い

ように思える。これは、自由度のフリージングとは異なるメカニズムであることを注意したい。フリージングのメカニズムは、システムの自由度の数に適切な制限を加えることで、無秩序状態が起らないように制御する。これに対して、自由度の圧縮は、はじめ多様な状態が生成されるのを許し、あとから適切な状態を選んで自由度の数を減らすというものである。

そこで、新生児の運動に関する興味深い現象を紹介する。先にも述べたように、新生児には様々な刺激に応じて数多くの反射運動がみられるが、明らかに刺激を与えない場合には、非常に特徴的な自発運動を行う。この運動は数十秒から数分にわたり、四肢や体幹など全身を一見ランダムに動かすものであり、general movement (GM) と呼ばれている²⁰⁾。GMは胎生8週ごろにすでに始まり、年齢に応じてだんだんと変化し、随意的な運動が発達すると見られなくなる。GMには、特定の運動パターンへと帰着させることが容易ではないような複雑さと動きの滑らかさという二つの特徴がある。最近、GMを脳障害の判定に利用できるのではないかと報告がなされている。例えば、GMでステレオタイプの単純な動作しか起こらない場合や、動きに滑らかさがなければ脳障害が疑われる。

このように、発達の初期段階ではGMのような非常に複雑な運動を生成し、発達が進むにつれて秩序だった運動へと変化していく。発達初期のGMは、システムの状態が多様な状態空間の中を遍歴するような、ある種のカオス²¹⁾を連想させる。そして、多様な状態から適切な状態を選択することで発達が進行するように見える。ただ、現時点では、GMは医師が目で見えて判断したもので、その特徴づけ自体はまだ確立したものではない。したがって、発達においてGMが果たす役割については予測の域を超えない。しかし、多様な自発運動がすでに胎児から存在することは、原始反射を中心として研究されてきた発達過程の概念に変更を迫る可能性を秘めている。そのためには、まず、GMの三次元計測を行い、その実体を明らかにする必要がある。

6. おわりに

身体運動生成の問題を力学系の視点から眺めてきた。歩行運動のシミュレーションから、脳神経系・身体・環境のダイナミクスがコヒーレントになることで運動が自己組織されることがわかった。さらに、運動の発達の問題を取り上げたが、本論文では結論を出す

ことを差し控えておく。というのは、歩行の発達とGMの二つの例は力学系の立場からすれば一見矛盾しているようにみえるからである。歩行の発達過程では、単純な秩序から複雑な秩序へと系の状態が変化し、いわば自由度が増大するのに対して、GMの変化では、はじめの複雑な無秩序状態から適切な状態を選択するという、いわば自由度の減少がおこっているように見える。しかし、実際の生体内では自由度の増大と減少とが同時に進行し、そのことによって運動の多様性と安定性が獲得されていくのではないかと予想される。さらに、何が自由度を選択し、発達の方向性を決定しているのかということを考えると、自己の意図という問題に突き当たるように思われる。そのことは、単に身体運動の発達という問題をこえて、知性の発達の問題へとつながっている。筆者は、これらの問題に対して突破口となるアイディアを探るために、実験、理論、シミュレーションを通して、発達の設計論に迫りたいと考えている。

参 考 文 献

- 1) 清水 博：生命と場所、NTT出版（1992）
- 2) M. Jeannerod: Le cerveau-machine (M. ジャンスロー：大脳機械論、白楊社) (1983)
- 3) N. Bernstein: The coordination and regulation of movements, Pergamon Press (1966)
- 4) S. Grillner: Neurobiological bases of rhythmic motor acts in vertebrates, *Science*, **228**, 143/149 (1985).
- 5) G. Taga, Y. Yamaguchi & H. Shimizu: Self-organized control of bipedal locomotion in unpredictable environment, *Biol. Cybern.*, **65**, 147/159 (1991)
- 6) G. Taga: A model of the neuro-musculo-skeletal system for human locomotion. I emergence of basic gait, *Biol., Cybern.*, **73**, 97/111 (1995)
- 7) G. Taga: A model of the neuro-musculo-skeletal system for human locomotion. II Real-time adaptability under various constraints, *Biol. Cybern.*, **73**, 113/121 (1995)
- 8) J. J. Gibson: The ecological approach to visual perception (ギブソン：生態学的視覚論、サイエンス社) (1979)
- 9) G. Taga: A model of the neuro-musculo-skeletal system for anticipatory adjustment of human locomotion during obstacle avoidance, submitted (1996)
- 10) J. Piaget: La naissance de l'intelligence chez l'enfant. 2nd ed. (J. ピアジェ：知能の誕生、ミネルヴァ書房) (1948)
- 11) J. P. Changeux: L'homme neuronal (J. P. シャンジュール：ニューロン人間、みすず書房) (1983)
- 12) G. M. Edelman: Neural darwinism, Oxford Univ. Press (1989)
- 13) S. R. Quartz & T. J. Sejnowski: The neural basis of cognitive development: A constructivist manifesto, *Behav. Brain Sci.* in press (1996)
- 14) E. Thelen & L. B. Smith: A dynamic systems approach to

- the development of cognition and action, MIT Press (1994)
- 15) H. Haken: Synergetics An introduction, Springer (1976)
 - 16) J. A. S. Kelso: Dynamic patterns, the self-organization of brain and behavior, MIT Press (1995)
 - 17) A. Gesell, H. Thompson & C. S. Amatruda: Infant behavior, its genesis and growth, (小児の発達と行動, 福村出版) (1934)
 - 18) M. B. McGraw: Neuromuscular development of the human infant as exemplified in the achievement of erect locomotion, J. Pediat, **17**, 747/771 (1940)
 - 19) G. Taga: Does the neural system control human bipedal locomotion by preprogramming or by self-organization? Comments Theor. Biol., in press (1997)
 - 20) H. F. R. Prechtl, Qualitative changes of spontaneous movements in fetus and preturm infant are a marker of neurological dysfunction, Early Hum. Dev., **23**, 151/158 (1990)
 - 21) 金子邦彦, 津田一郎: 複雑系のカオスのシナリオ, 朝倉書店 (1996)
-