

絶滅した生物の生態をコンピューターを用いて再現する

「形とはたらき」領域 宇佐見 義之

[目的]

本研究は数理学的研究を基盤におき、簡約化した形の流体力学、力学と進化アルゴリズムを用いて、生物の基本的な体のデザインに対応する運動を計算した。そのうちのいくつかを特に絶滅した生物にあてはめて、これらの生態を数理的に再現する試みを行った。また数理的運動に基づく古代生物の生態を電子空間に再現し仮想現実システムを構築することに取り組んだ。

[背景]

カンブリア紀の爆発的進化

5億3千万年前の地層から一気に三葉虫類をはじめとした多様な化石が世界各地から出土する。これらの化石で一番有名なものはカナダロッキー山脈の頂上付近に位置するバージェス頁岩（頁岩とは厚さ3mほどの薄い地層）から出土するバージェス頁岩動物群である。この化石は1909年当時のスミソニアン博物館長C. ウォルコットが発見したことで有名となった。現在では中国の南部からも同種の化石が発見され、また英ケンブリッジのS. C. モリスらによってグリーンランドからも発見されている。これらは現在存在する生物以上に形の基本デザインの上で広い構造をもっていたと考えられている（図1）。

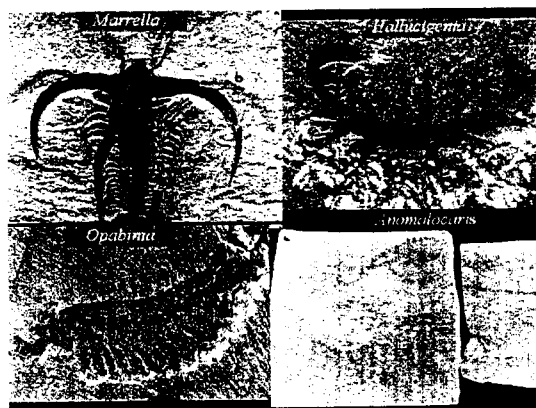


図1 カンブリア紀の生物群

[研究方法と成果]

(1) カンブリア紀の生物群の生態の電子的再現

これら5億年前に存在した古代の生物群を電子空間の中に再現する作業を次のように行った。

まず化石に残された写真から古代の生物の形をコンピューターの中で3次元的に再構築する。この3次元の生物はそれぞれ可動部分に別れており、それぞれの部分は水中を遊泳するものは簡単な流体力学の計算を、水底を歩行するものは簡単な力学の計算を行いそれぞれの動作を決定する。これらの計算結果のもとにカンブリア紀の生物をCGによって再現する作業を行った。

仮想生物のモデルは、その本体に対して各ヒレが動くとする [Usami 1998, 2000] (図2)。各ヒレはx、y、z軸に対して回転し、その角度を α 、 β 、 γ とし、それぞれの角度は以下のような時間に関するフーリエ展開のような形で動くものとする (Eq.(1))。

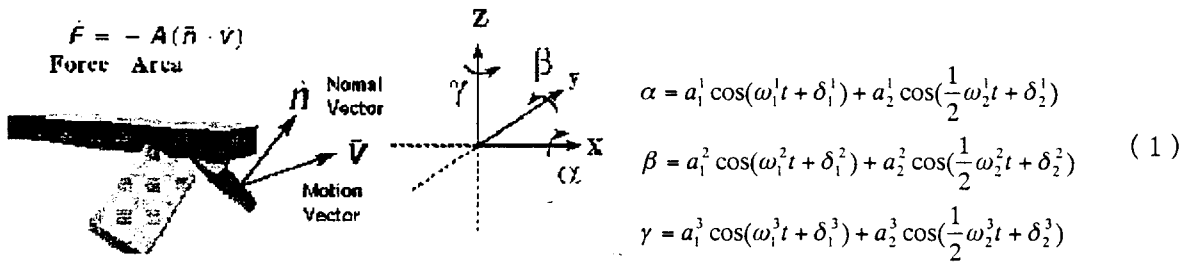


図2 仮想生命体の座標系

そしてここにあらわれた、運動を決定する係数を次に述べる進化アルゴリズムで決定した。進化アルゴリズムを採用したのは、近似最適解が得られることと、様々な準最適解が得られることが知られているからである。

進化アルゴリズムにおいて、まず全てのパラメータ群をまとめてAと表記し、異なるパラメータ群を表すのにそれぞれをA1、A2、A3……とする。計算は以下の手順で行う (図3)。

- 0 本研究の進化アルゴリズムにおいては初期条件として各係数をある範囲内でランダムに生成させ、そのような係数の組を12コ用意する。
- 1 次に各係数から出現する運動を評価し、前進能力の高い順に並べる。
- 2 前進能力の高い組を3つとり、
- 3 その3つのパラメーターを融合した組3つを作る。遺伝的アルゴリズムにおいて

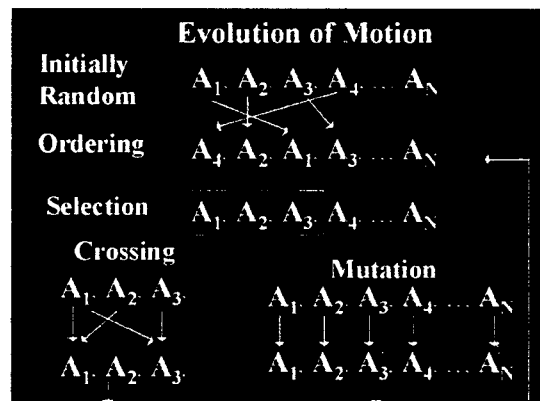


図3 パラメーターを決定する進化アルゴリズム

はビット列の交換がこの操作に対応するが、本研究においては2つの親の係数を足して2で割る平均値を子供の係数とした。また交差の他に9つの個体を一部のパラメーターの突然変異により作る。

以上の手順において1「能力の評価」と2「淘汰」及び3「係数の変異」を繰り返すことにより前進能力の高い変数の組を生成させることを試みた。本研究においては以上の計算を初期条件を変えて更に、20回行った。

(2) アノマロカリスの遊泳形態

前記理論的基盤の上に計算を行ったところ、14対のヒレを体側に持つアノマロカリス（図1右下）の行動に関して興味深い知見を得た。アノマロカリスのモデルとしては、各ヒレが位相差 q で動くものと仮定した上でこの q を前述の計算手法に組み込んで行動の予測を行った。また上下、左右の方向でヒレ全体がかかる力が一定値以下という制限をつけた。これは筋力に上限があるという制約に対応する。

前進能力が高いという淘汰圧のもと、前記の進化計算を行うと、結果的に全体のヒレを滑らかに波打たせて、「エイ」のように遊泳する行動が最も遊泳能力の高い結果となった(図4)。

(3) 進化のメカニズム

異なった初期値から出発したパラメーター群が進化アルゴリズムによって、どのように遊泳能力を改善させるかについて図5に示した。

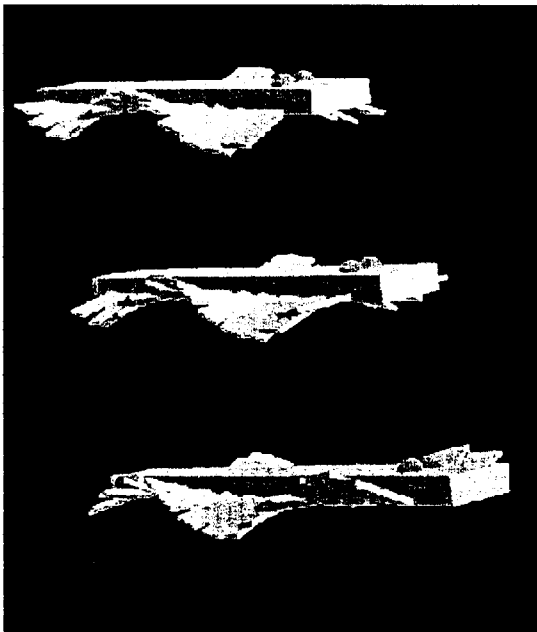


図4 アノマロカリスの遊泳形態

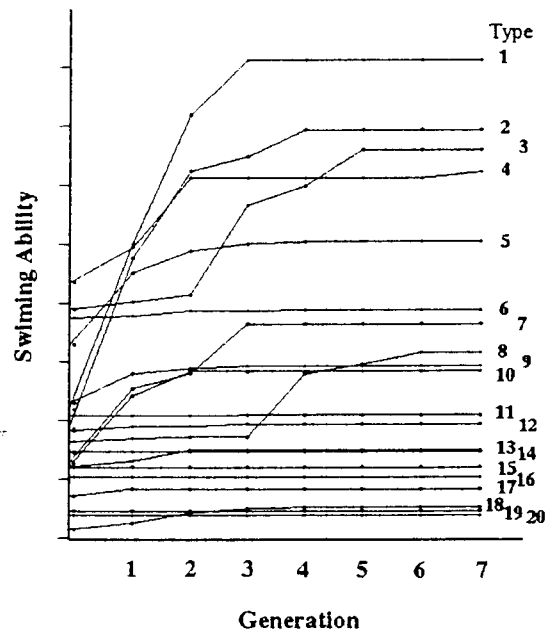


図5 パラメーターの進化

初期値は12個のエージェントを1グループと考え、その12個体で交差・変異を行っている。そしてこれらのグループを20組計算し、各グループ内の最も運動性能の良い個体の速度を進化世代に対してプロットした。(すなわち図5には20組の進化プロファイルが記してある。各組に対して12の交配される個体が存在する。)

計算においては初期条件の違いから様々な異なった運動形態が発生することが判った。図4に示したものはこの中で最も速度の速いものである。これ以外にも様々な異なった運動形態が存在し、それぞれは速度という評価関数の局所安定点に対応していると考えられる。

また図5から、進化の過程では、「初期状態に近い前期過程では進化は急速に起こり、後期では行動パターンは固定される」ことが見て取れる。これは進化が、多変数関数のうちの局所的変異の積み重ねで駆動されるからである。一度最適化されると、変数の局所的変異では全体を変えることはできない。

(4) 形の生成と運動能力

前述のパラメーターの進化のような様相が、形の進化のレベルで、理論的にどのように語れるか、ということが次の段階で重要な問題となろう。しかしながら、現在のような取り組みのレベルでさえ3次元の形を表現する数学的空間というものは直接扱うには非常に難しい問題である。本来ならばバージェス頁岩動物群に見られるような複雑な生物の形態を自動的に生成させて、それらの能力評価をしてゆければ理想的であるが、これは将来的にもなかなか難しい。

そこで、表現空間を限定することによって、扱える問題まで引き寄せることを考える。これまでと同様、生物はブロックの組み合わせとして表現する。ルール0を基本エレメントを

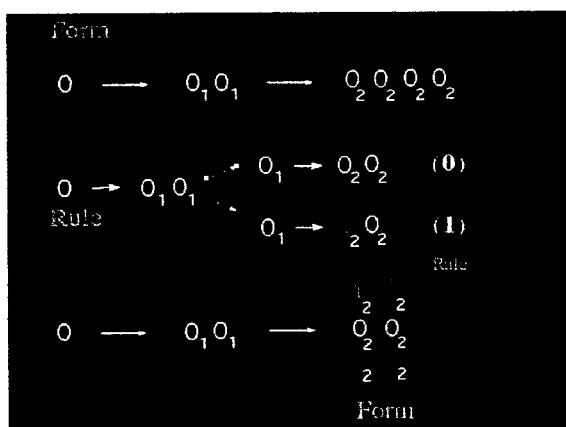


図6 0を2分割、1を枝分岐とするルールシステム

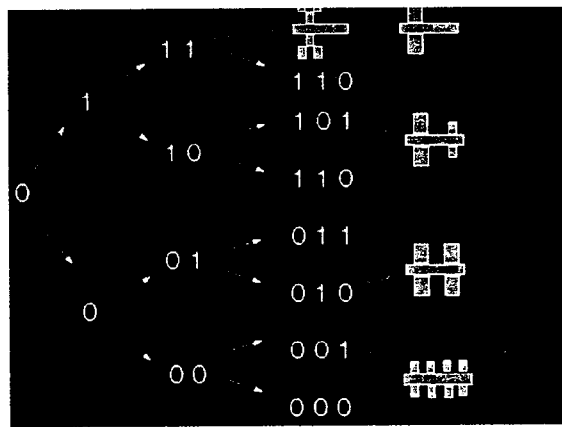


図7 このルールシステムの分岐図と生成される

長軸方向へ2分割するものとし、ルール1を長軸へ対して直角に枝を生成させるルールシステムを考える。この基本ルールを図6に、そしてその分岐構造と生成生物を図7に示した。

ここで、長軸から分岐して、更に分岐する樹木様の形態は長軸からの分岐のみとして計算の簡略化を行った(図7上)。

このような可能性全てについて前進速度を計算した結果を図8にまとめた。

その結果、このルールシステムの枠組みの範囲内では、000001となるようなルール、すなわちアノマロカリス様の生物が最も推進能力が高いという結果が得られた。1つの結果として、このようなグループの中ではアノマロカリス様の生物が推進能力が高く、この高い能力が当時アノマロカリスを最大の捕食者とさせる一因となったのではないかと、いう考えを持つことができる。

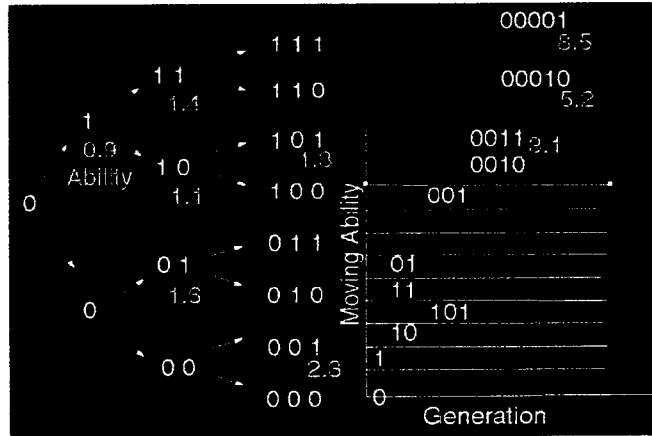


図8 分岐図に対応する能力表(右)。000001となるような生物が最も推進能力が高いという結果が得られた。

(5) 形態の進化と能力の飛躍的増大

前節では長軸方向から枝を出した部分で運動する生物グループについて論じた。ここでは次に長軸方向をベンドさせて移動する生物群の形態の変化と能力の関係について調べる。こ

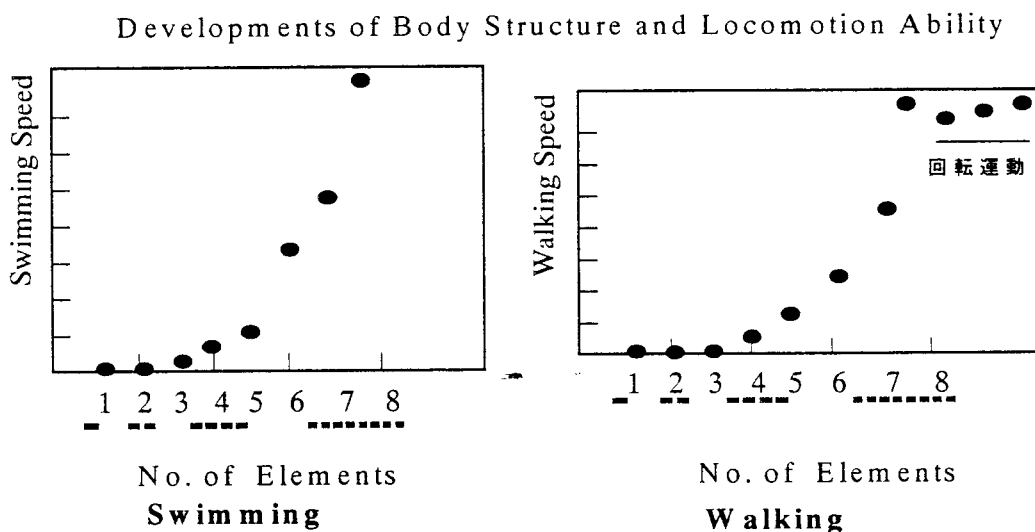


図9 形態の進化と飛躍的能力の増大

ここでは、同種の計算により、生命の初期進化を想定して、1次元の生物が体長を長くした際にどのような運動を発現させるか調べた。1次元生物の長さは要素（ブロック）の積み重ねで表現する。その結果1次元の生物では要素の数が増えるに従って運動能力が飛躍的に向上することがわかった（図9）。また歩行運動について特徴的なこととして、あるところで回転運動という新たな運動形態が出現することがわかった。

生物の進化においては、形態が急激に変わる時があり、これらの間隙はしばしばミッシングリンクと呼ばれ痕跡がほとんど残らないという事象が観測される（図10）。

我々の計算に照らしていうと、ある方向の進化は飛躍的能力の増大をもたらすので、そこでは進化が加速されるのではないかと考えられる。そしてこのような部分の進化は進化速度が速く、痕跡がほとんど残らないという結果につながるのではないか。

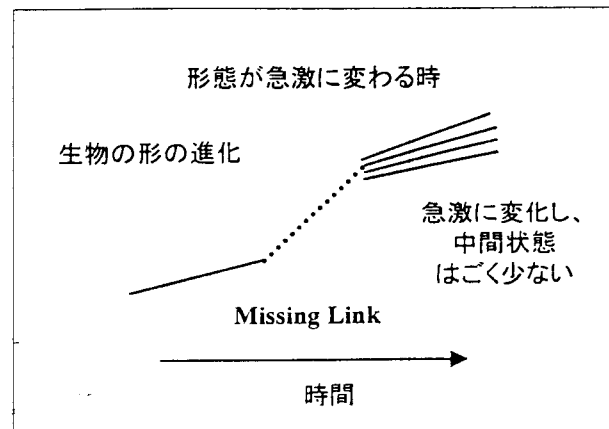


図10 進化におけるミッシングリンクの存在

(6) カンブリア紀の爆発的進化

生物の形はカンブリア紀の始めに爆発的に進化し、多様性をもたらした。この現象が何故起こったか、についてはわかっていない。

「生物の形態と運動」について考える時、例えば、競争が極端に少ない深海中層の現生の生物を見ると対称性のない驚くほど自由な形態の生物を多く観察できる。これに比べてバージェス頁岩動物群の捕食者の多くは対称性が高く、運動に対して高度に組織化された体型をしている。

このことは他との相互作用が大きな圧力となり、バージェス頁岩動物群の時点ですでに形を決める際に運動に対して効率的であるもののみが許容されたことを物語っているように思われる。このことは生物進化、特に進化上の形態形成の研究において、運動能力の面からの考察が重要であることを示唆している。ここで、例えば（能力の変化）／（形態の変化）のような量を計算して、このような量が大きくなったところで「進化上の飛躍」が起こるのではないか、というのが我々の考えである。

(7) 古代の世界を再現する Virtual Reality システム

本研究においてはこれまで述べてきたような理論的考察にもとづき、古代の生物を仮想空間の中に蘇らせる Virtual Reality World の構築を進めた。VR の描画は SGI の OCTANE で行っている。インタラクティビティについては O2 で音声のモニターを取り込み、これを TCP/IP で OCTANE におくり仮想生物が反応するようにしている。視覚情報の入力には Macintosh 上の市販ソフトで簡単な信号の選別を行い MIDI 経由で O2 へ転送するシステムを構築中である。これまでに、白亜紀の魚竜エラスモサウルスが生息する世界とカンブリア紀の生物群の世界を再現し、VR システムとして現在運転中である。

ここで特筆すべき事項は、VR システムを構築する際に1つか2つのディスプレイ画面の領域を分割し、3つか4つのスクリーンへ投影する方式を新たに考案して運転していることである(図11)。

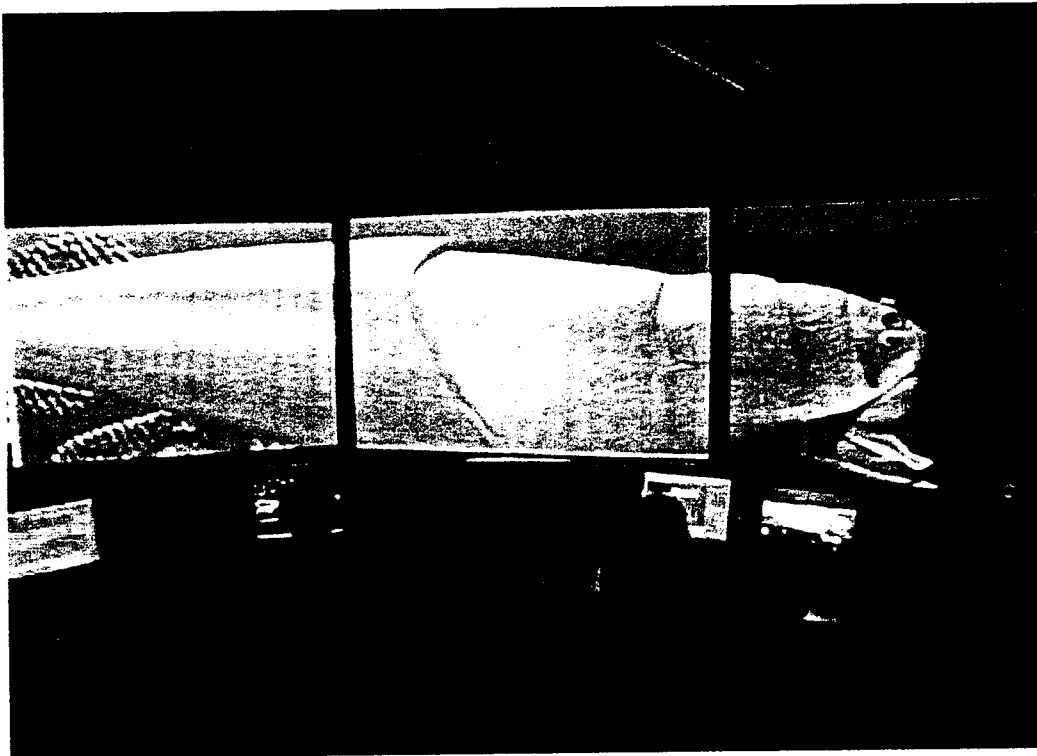


図11 画面分割方式により1つの画像を複数のプロジェクターで投影した様子。投影されている画像は、デボン紀に絶滅したダンクレオステウスを実物大に映写したもの。

現在研究用の VR 装置としては米国で開発された CAVE システムを2億円程度で輸入する場合があるが、本原理によれば性能は若干低下するものの、スーパーグラフィックコンピューターを導入することなしに10分の1程のコストで多面スクリーンの VR 装置を作ることが可能となる。

この方式は現在特許出願中であり、産学協同の事業として2000年から商品化へ向けて国産の低価格 VR 装置の開発を実施する計画である。具体的目標として、販売価格5百万円程度の VR 装置の開発を目指し、市場規模27兆円、GDP の11%を占める住宅関連産業へ本技術を応用することを考えている。

[今後の発展]

本研究の将来は主要な年代の世界については VR 化を行い参加者が古代世界に入り込むシステムを作ること为目标としている。また他の部分では科学的考証に基づいて CG を作り、古代の地球の様子を視覚化することにする (図12)。CG 作成は LightWave3D と 3D studioMAX で行う。MAX はオブジェクトの動作を数式でコントロールできるので、前のセクションで行った理論研究の成果を古代生物の生態系の動きに適用している。MAX はボリューム系のレンダリング効果で水、大気等をリアルに表現でき、ここでは CG の仕上がりに多大な貢献をした。

これらの質感を飛躍的に向上させるボリュームレンダリングをリアルタイムで実施するハードウェアは現在急速に開発が進められているので少し後にはリアルタイムでこれらのボリューム効果を得ることが可能となる筈である。このようなリアルタイムのボリュームレンダリ

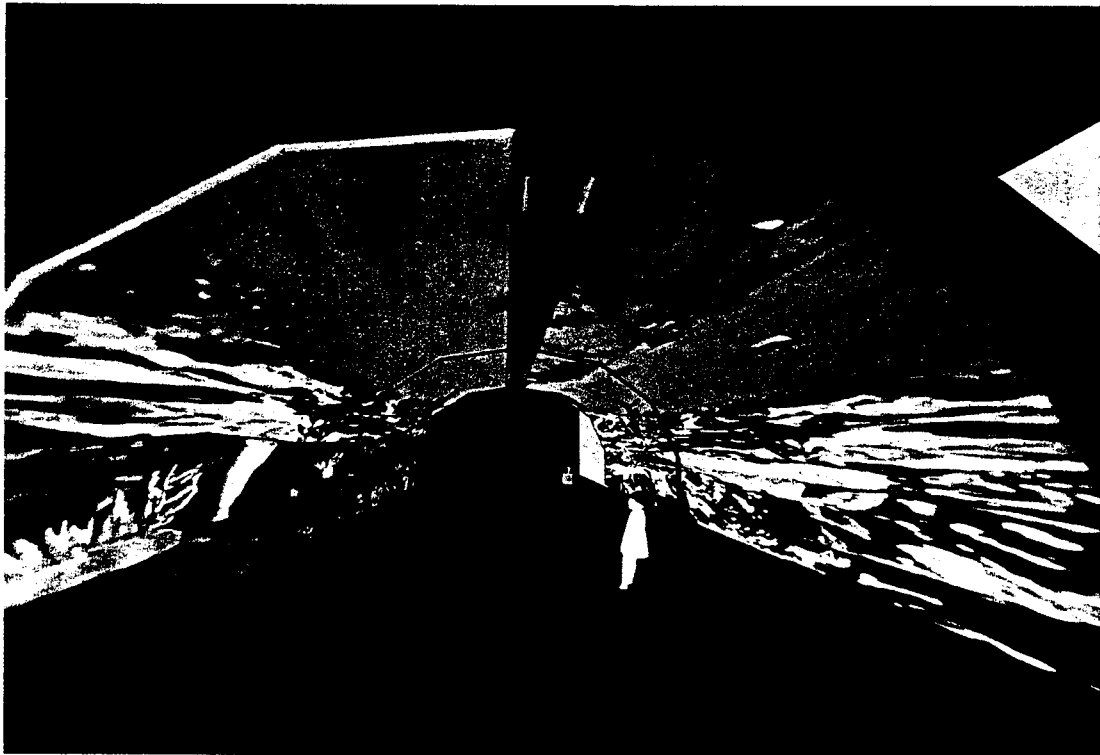


図12 CG で構築した仮想空間古代生物館



図13 今回のさきがけ研究により神奈川大学内に構築したデジタルスタジオ。
将来的には、過去の地球の好きな時代へトラベルする装置を作成することを究極
目標としている。

グを用いて、水流、水面、霧、雨、大気などを作成し、CGではなくインタラクティブシステムとして古代世界を現出させる装置を開発する予定である。そして本研究の究極目標は、地球の過去の世界をVR化し、これらを時間・空間的に縦横にトラベルできる装置を建造することにある(図13)。

インターネット自然史博物館； 46億年海洋生命の物語

これらのCGムービー、VRを駆使して、46億年に渡る地球の歴史を、特に海洋の生命に焦点を当てて再現し、インターネット上に公開する作業を現在進めている。これはインターネット上に3次元の仮想現実博物館を作り、見学者はこの建物の中を自由に歩き回り、地球の歴史をムービーや化石発掘の現場写真、学芸員・研究者のインタビューなどを通して体験することができるというものである(図14-18)。この目的の為、現在各素材を収集し、またなるべく多くの研究者に参加して頂いて、地球の歴史を体験できるようなFreeのインターネット自然史博物館の構築の作業を進めているところである。

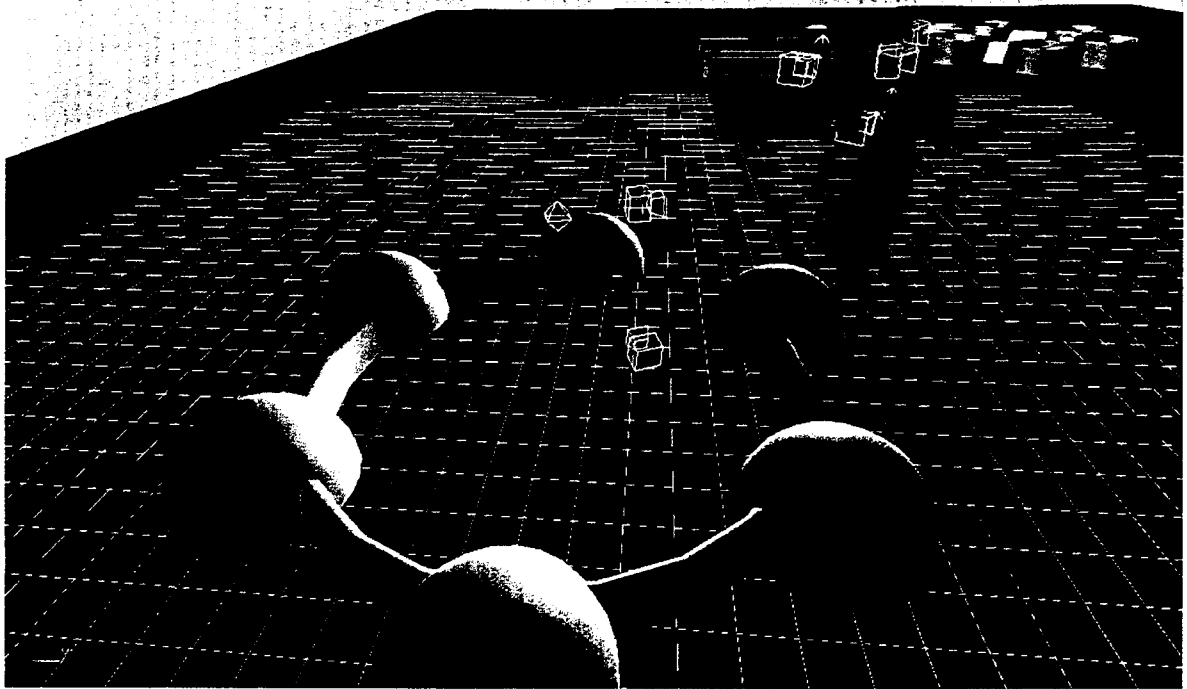


図14 インターネット上に構築中の自然史博物館。見学者は建物の中を自由に歩き回り、地球の歴史を体験することができる。

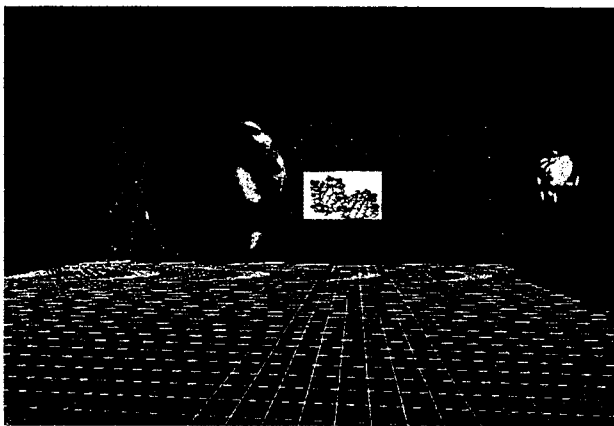


図15 インターネット自然史博物館内の様子。(生命誕生)。



図16 インターネット自然史博物館内の様子(中生代の大型海生は虫類)。

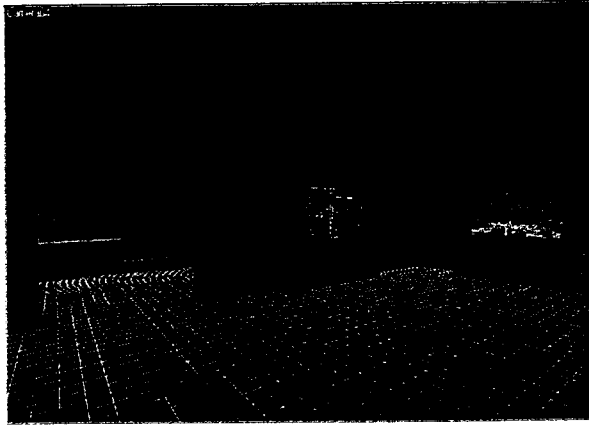


図17 インターネット自然史博物館内の様子
(見学者は館内を自由に移動しながら地球の歴史を概観することができる)。

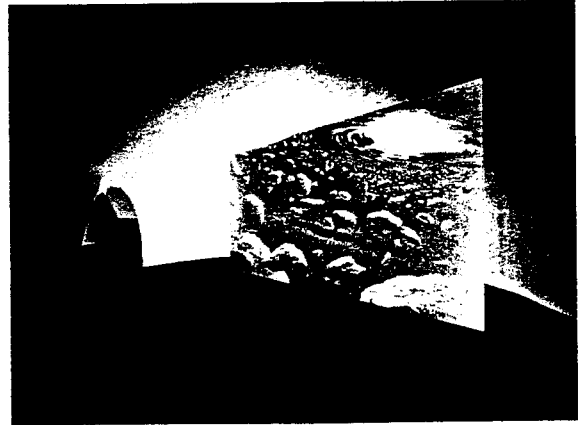


図18 インターネット自然史博物館内の様子
(太陽系の形成)。

論 文

Usami Y. et.al. "Reconstruction of Extinct Animals in the Computer", Artificial Life VI, (MIT Press 1998). Pages 173-177.

Usami Y et.al.. "Digital Lost-World Project". SICE (2000).

解 説

宇佐見義之他、"デジタルロストワールド計画=5億年前の生態系を再現する"、日本フェジイ学会誌11(1999)545.

宇佐見義之他、"デジタルロストワールド;古代の生態系をコンピューターで再現する"、関西連合情報学会シンポジウム原稿集(2000).

宇佐見義之、"古代の生態系をCGで再現する"、(「生物の形の多様性と進化」、裳華房、印刷中。

特 許

宇佐見義之、JST、"画面分割による仮想現実システム"、(2000-44516)