共同研究

PCクラスターで実現するスケーラブルなバーチャルリアリティ機の開発

宇佐見義之*　北岡正敏**　吉田賢二**

Scalable Virtual Reality by PC cluster

Yoshiyuki USAMI*　Masatoshi KITAOKA**　Kenji Yoshida**,

1. はじめに

民生機の安価なPCを並列につなげて複数の画面からなるバーチャルリアリティ機を製作することが本研究のテーマである。例えばCAVEに代表されるような複数の面からなる立体視が可能なバーチャルリアリティを得ようとした場合、一昔前はシリコングラフィクス製の数億円もする高価なスーパーグラフィックコンピューターを購入すれば、高解像度で高速なCG映像を得ることができ、そうでない場合は諦めるしかなかった。しかしながら、近年はパーソナルコンピューター(PC)が発達し、数十万円のPCで15年前の数億円もするスーパーコンピューターと同じような性能を得ることができるようになってきた。驚異的な技術の進展である。民生機として収支の合う出荷台数の目処がつけば数万円の価格帯で高速なグラッフィックボードが開発されるようになり、特にPC上でのゲームを実行する要求から3D描画、ことにOpenGL, DirectXというコードでリアルタイムに3次元の描画を高速に行えるようになってきた。

ところがこれらの機械では、PCのAGPバスという共通規格を利用するせいもあって、SGI機のようなグラッフィックに特化したバンド幅を利用し、高解像度の映像を得ることは困難である。民生機の要求ではNTSC(TV)の解像度があれば充分で、それ以上の超精密な映像を得る必要が無いことが大きな理由である。ところでバーチャルリアリティや、立体映像、また展示用の大型画面では、超高解像度の映像を使う必要が生じてくる。シリコングラフィクスの高価なスーパーグラッフィックコンピューターでは、グラッフィックに特殊化した大きなバンド幅のバスを、専用のハードウエアとして装備しているので、繋ぎ目の無い4面シームレスな大きな画素の映像を得ることができるようになっている。

このように大きな画素数の出力を民生機のPCで得られたら良い、というのが普通の考え方で、PCでクラスター組み1台以上の性能を得る方向の進展が近年は定着してきた。PCクラスターの利用には、グラフィックの部分を利用する並列レンダリングとCPUの部分を利用する計算用PCクラスターがある。これらの考え方は、2004年の現在ではすでに目新しいものではなくなり、実用化が既になされ、利点と欠点がかなり明らかになっている。計算PCクラスターについて言えば、その利点の第一は並列に演算ができることで、並列に計算を行うようなプログラムでは能力を発揮する。逆に欠点はPC間のデータ転送の問題にあり、PCクラスターの考えではここに最大の欠点が存在する。通常はギガビット・イーサを使ってPC間を連結するが、CPUの演算に比べてデータ転送量は極めて遅い。

またデータ転送の遅さ以上に汎用性を無くしているのが、並列計算のプログラムのコーディングの問題である。PCクラススターがPCを連結させて並列に計算ができると言っても通常のアプリケーション・プログラムでは並列演算はできない。特殊なコードを挿入して自作で並列用のプログラムを書かなければならないところに、爆発的な普及とはならずに、比較的狭い特殊なニッチで利用されている原因が存在する。このように汎用性は無いものの、特殊化した目的で実用化に達した一つの究極の形が海洋研究開発機構の地球シミュレーターである。**図1**のように2千個からなるプロセッサーを結合して科学計算に使われ、理想的な

*助教授、物理学教室
Associate Professor, Institute of Physics
*教授、経営工学科
Professor, Dept of Industrial Engineering and Management
*助手、経営工学科
Research Associate, Dept of Industrial Engineering and Management

計算状態では当分世界最高速の計算機の位置を占め続けると予想されている。

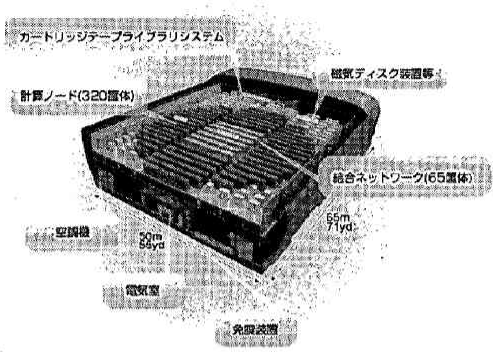

図1 海洋研究開発機構のアースシミュレーター。2千個からなるプロセッサーからなる並列計算機。

このように演算の並列化については極限まで性能を追及したハードウエアが建造されたが、画像の並列描画に関しては、未だ発展の途上にあり、本研究において一例として取り組んだように、実験開発の余地が存在する。

並列に描画する為には映像コーデックの仕様に合わせ、時間同期を取る為にタイムコードを映像ファイルから取り出し、ネットワーク経由でマスターのPCにタイムコード情報を送り、マスターPC側で同期の制御をかける必要がある。この操作を実現する為に、本研究においては、Miller Puchettが作成したフリーウエアであるリアルタイムオブジェクト構築環境Pure dataをベースに開発した。

2. 並列コンピューターによる描画システム

Pure Data (PD)はリアルタイムにマルチメディア情報をコントロールする環境を作成するプラットフォームである。PDではパソコンの上で、リアルタイムにデジタル情報を大きな自由度でコントロールする為のプラットフォームが用意されており、そのうちの一つがネットワークを経由した同期機能である。このPDだけでは、音楽信号の処理しかできないが、Mark Danksによって開発されたFramesteinという、リアルタイム3D描画のためのフリーのオブジェクト集を組み込むことにより描画についての機能を追加することができる。プログラムの内部ではPdからOpen-GLを操作して3D描画を実現している。このPureDataとFremesteinを組み合わせて作成した、ムービー同期上映ソフトウエアの実行画面を**図2**に掲げる。

作成方法としては、まずPureDataに画像処理オブジェクトであるFramesteinを組み込む(図2左下)。PureData上ではグラフィカルなユーザーインターフェースによりオブジェクトを配置でき、更にFramesteinのオブジェクトにムービーオブジェクトをリンクさせると、処理体系の中に組み入れることができる。図2右上はPureDataのオブジェクト上でセレクタを作り、入力番号によって登録した番号のムービーファイルを再生させるようにした様子である。これらはオブジェクトとして画面上で扱うことができ、リンクを線として張れば、それぞれのオブジェクトを順に実行することができる。我々は、このようにしてPCクラスターによる並列描画システムのソフトウエアをまず作り上げ、次にそれぞれのムービーファイルを実行し、画面数が3及び4の並列描画PCクラスターを作成した。

実際のシステムを作るには、これだけではユーザーの操作性が悪いので、マスターコンピューターの中にHTML/Flushでメニューを作り、そこから信号を受け取ってPureDataが処理をするようにした(**図3**)。

図3の中央に配置されたのがマスターコンピューターでありPureData, FrameStein, 及びHTML/Flushによるコントロールパネルが配置してある。この操作により、後方上部に配置された大型モニターに連結されたPC4台が同期のとれたムービー再生を行う。大型のモニターは52インチのプロ

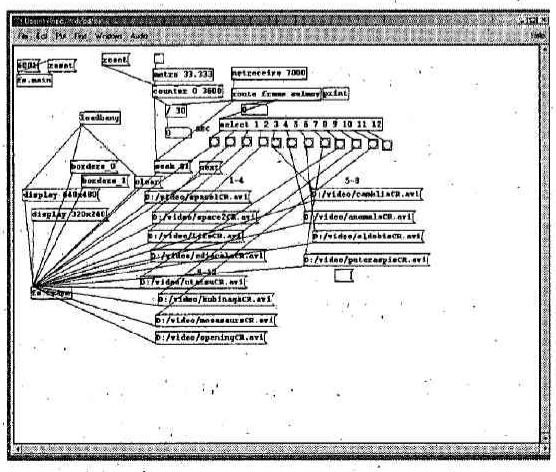

図2 オブジェクト型リアルタイム音声映像作成ソフトPureDataのプログラミング画面。

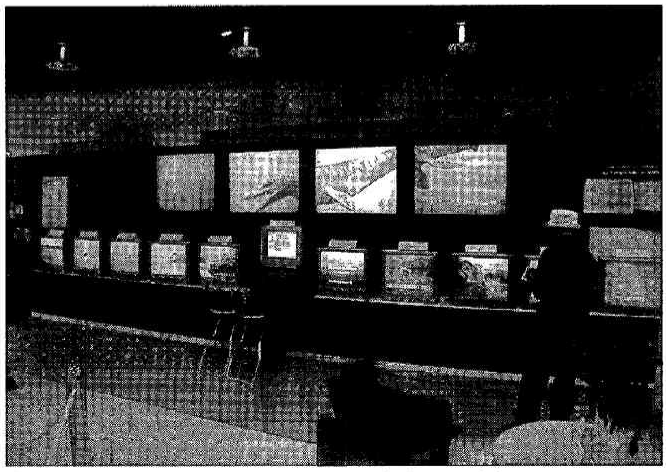

図3 並列PCによる同期表示システム (東京駅丸の内ビルディングにおける研究紹介、2002.10).

図4 科学技術振興機構の事業紹介としての研究紹介（2004.10.10 松山市）。

ジェクションモニターを使用している。前方下部に配置されたのは25インチのTVで、これらは同期の取れた映像ではなく、一台一台が独立の映像となっている。観客はこれら、独立の映像を見た上で、それらの中から1つの映像を選択すると、大きな同期のとれた映像を鑑賞することができる仕組みになっている。**図4**には、DVD3台の同期運転によるマルチスクリーンによる研究紹介の例を示す。

3. 並列コンピューターによるバーチャルリアリティシステム

前節で報告した事例は、予め作成してあったムービーを複数のPCで同期をとって上映するシステムであった。次に、この節では予めレンダリングしてある映像ではなく、リアルタイムに3次元の映像を生成するバーチャルリアリティ機の開発の報告をする。バーチャルリアリティの装置としては、従来はSGI社のスーパーグラフィックコンピューターONYXを利用したCAVEというシステムが代表的なものとして著名であったがこれは大変高価なものであった。一方PCの能力が上昇したことから複数台のPCを使うことにより、複数面からなるバーチャルリアリティを作成する試みがなされ、商業的にも何例が販売がなされるようになってきた。これらは例えばメディア教育開発センターや海洋研究開発機構などに導入されている。ところがこれらは、専用のソフトウエアとして完成され、販売されているものであり、様々な状況に対応してソフトウエアを改変していくことが難しいシステムとなっている。

一方、Web上で3次元のオブジェクトを表示する技術が近年普及し始めており、これらは容易にソフトウエアを開発し更に無料でPublishingできるようなシステムとなってきた。これらは総称してWeb3Dと呼ばれ、序々に広く使われるようになってきている。そこで我々はこの汎用性が高いWeb3Dの技術を使って複数面から構成されるバーチャルリアリティシステムを開発することにした。

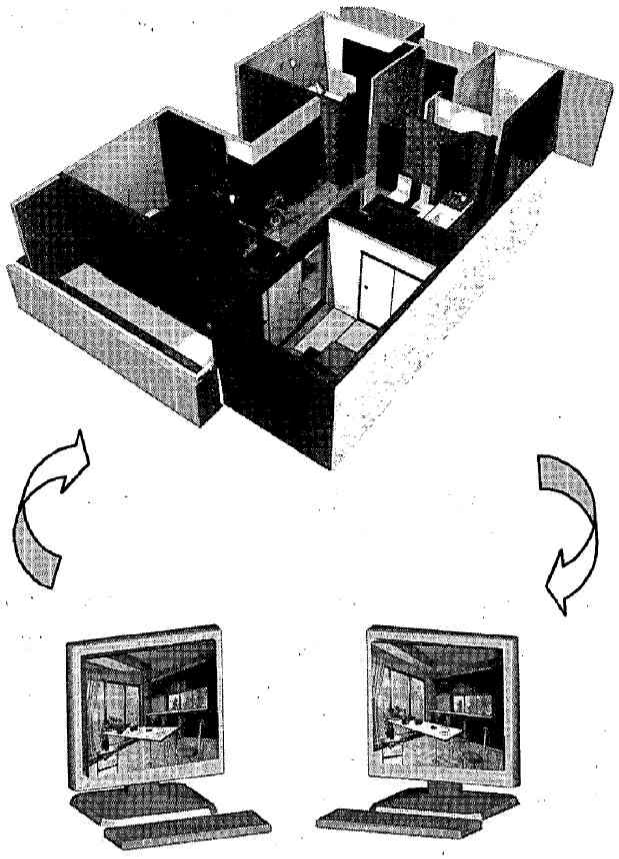

図5 Web3D上で稼動するバーチャルリアリティシステムのコンテンツ。市場での需要が多い題材として住宅を取り上げた。Shockwave3Dで作られているので、バーチャルリアリティのコンテンツを専用機上だけではなく、そのままインターネットで閲覧することができる。

何種類からあるWeb3D技術の中で我々が採用したのはMacromedia社のShockwave3Dである。ShockwaveはWebのプラグインとして非常に普及率が高く、Shockwave3Dはこの技術からスムーズに入ることのできる3次元技術であることを採用した第一の理由とした。また、他の理由としては、VRの作成として既存の3次元ソフトを利用でき、そこからデータを出して、Directorというソフトウエアでバーチャルリアリティの土台を作りWebとしてPublishできることができるからである。もう一つの理由はこのDirector上ではGUIに加えてLINGOというスクリプト言語が利用でき、自由度の高いVRシーンを創造することができるからである。

VR環境と内容の作成の工程はまず3次元のアニメーションソフトである3dsmaxで3次元のオブジェクトを作成する。VRの例として我々は市場価値の高い建築のVRを想定し、マンションの室内を閲覧できるシステムと、また仮想の博物館を見学できるシステムを作った。これらの3次元のオブジェクトは3dsmaxで作成した（**図5－8**）。

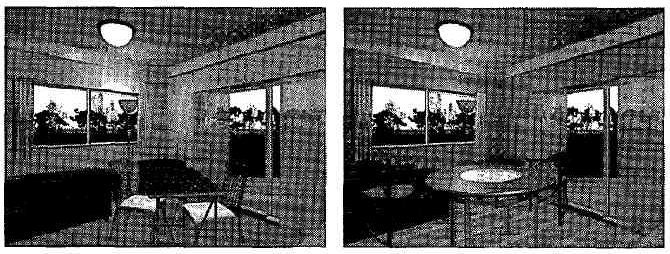

図6 Web3D上で構築されており、リアルタイムにテーブルや椅子、カーテンなどの素材を変更することができる。

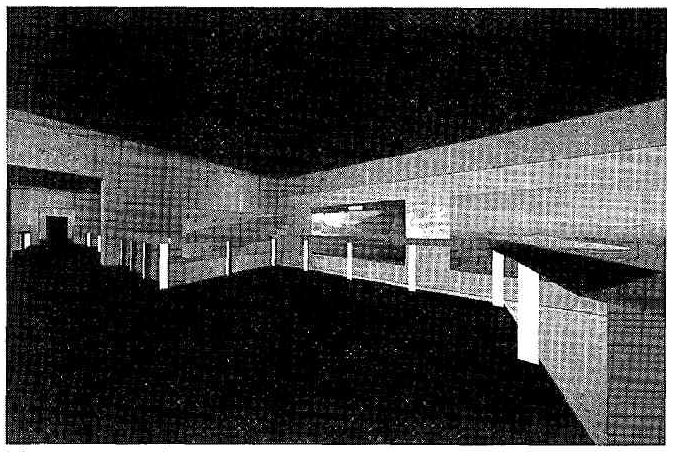

図7 Web3Dで構築したバーチャル博物館。地球の歴史をバーチャルな博物館を回覧して体験することができる。www.museum.fm上に既に公開してあり、サイトでは2万人の閲覧者を数えている。

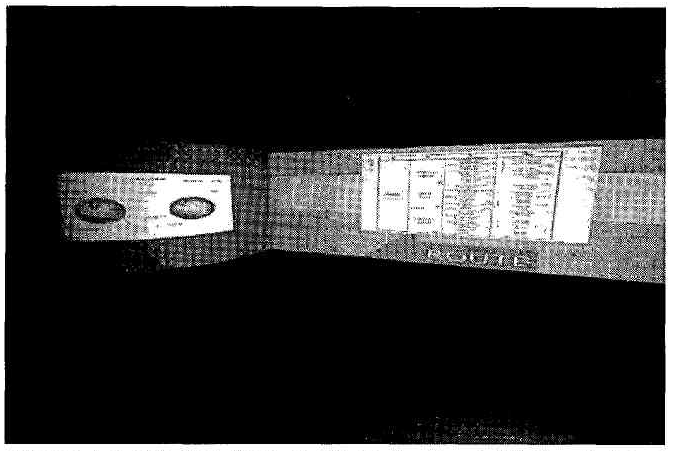

図8 Webからでも見学ができる3次元バーチャル博物館。先カンブリア代、古生代、中生代の生命の進化を見ることができる。

現在ではこのようなWeb3Dを利用した3Dシステムは序々に増えてきたが、本研究では、これらをWeb3Dだけではなく、バーチャルリアリティにも使えるように拡張したのが特徴である。バーチャルリアリティはリアルタイム性に加えて、立体視を実現させるものであるが、本研究ではShockwave 3Dを作成するプラットフォームであるDirector上で立体視を可能とさせるメカニズムを組み込むことにした。立体視は、左と右の両眼視差から得られるもので、時間差を利用したものや、赤青のフィルターを利用したものがあるが、本研究では偏光フィルターを利用した仕組みを用いた。すなわち

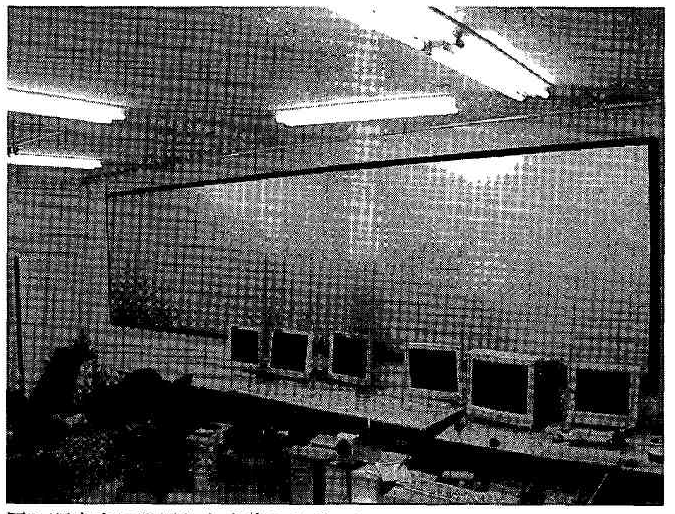

図9 研究室に設置した立体スクリーン

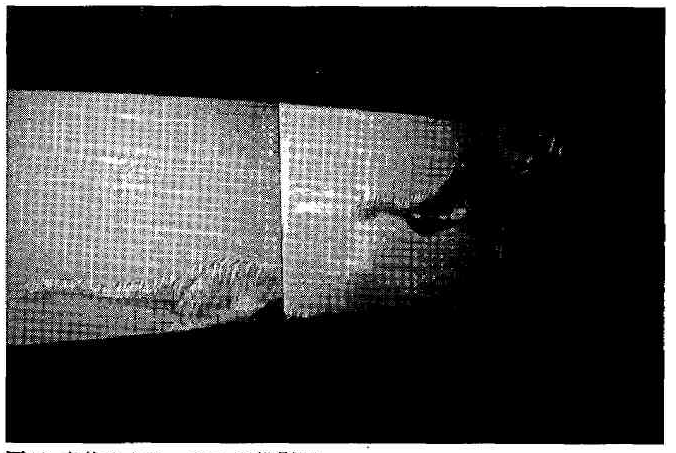

図10 立体スクリーンへの投影図

Director上でカメラを2つ用意しこれらの角度と距離を変え2つの視差のある映像が得られるようにする。この出力を縦・横異なる偏光フィルターをつけた2つのプロジェクターから出力し、偏光を保持するスクリーンに投影することでバーチャルリアリティのシステムとする。研究室にはTV3台分のマルチスクリーンの大きさに6つのプロジェクターを利用した立体映写装置を作り上映のテストを行っている(**図9**、**図10**)。

4. PCクラスターによるシミュレーション計算及びレンダリング

バーチャルリアリティ以外でも、PCクラスターは数値シミュレーションのハードウエアとしてコストパフォーマンスが高く、このPCクラスター上で数値シミュレーション並びに、画像のレンダリングも行ったのでこの部分の報告も行う。

研究のアウトラインは古代の生物の遊泳について流体力学の計算を行い、まずその動きを分析する。この計算の過程で流体力学の計算を行ったが、流体の計算には大きな計算機の能力が必要であり、この段階でPCクラスターの利

用を行った。次にその動きを反映させたCGを作成したが、この段階でもレンダリングに長い時間がかかるのでPCクラスターの利用によって分散レンダリングを行った。

4.1　流体の計算

流体力学の計算については、越塚が開発した粒子法による計算を行った[1]。一般に流体中を物体が変形しながら、その変形により推進力を得て移動するような流体の計算はあまり行われない。通常は固定座標系で流速場を計算するが、このような計算の方法は物体が変形しながら流体中を動くような場合の分析には向いていない。一方、粒子法は流体のかたまりを粒子で代表させ、その軌跡を追うことにより流体の動きを求める方法である。この方法により、物体と流体の相互作用は非常に良い状態で記述され、実験との比較において数々の素晴らしい一致が得られつつある。超塚が開発した粒子法の計算方法のアルゴリズムを**図11、12**に示した。

粒子法を使って、流体中の生物の運動を解析する計算は全て2次元でおこなった。まず、固定の境界を図13　黒枠のように用意しその中に水の運動を模倣する粒子を入れる。重力があるとし、容器の上部には固定境界は置かずに自由境界とする。対象とする生物として古生代カンブリア紀中期に生存した最大の捕食者アノマロカリスを考え、その11対の大きなヒレをモデル化した。考え方としてはメインの胴体が別にあるとして、その11対の大きなヒレが可動部分とする。2次元のシミュレーション空間の中ではそのヒレを11個の直線線分としてモデル化される。それら11個のヒレは水平方向には自由に動くと仮定し、垂直方向には周期関数で動くと仮定する。そしてこれらの動かし方を変え最適な運動の様式を求めることにする。また、ヒレの構造を変え、最適な生物の形態がどのようなものかを探ることにする。

流体の計算は圧力の項を求めるルーチンを陰解法で解く必要があり計算する時間が長くなる。この粒子法では、この反復計算の部分を共役勾配法を用いて解き、更に収束を速める為に不完全コレスキー分解という方法を用いている。不完全コレスキー分解とは対称行列の場合のLU分解であるUU　(これをコレスキー分解と呼ぶ)において、分解元の行列の0の成分の位置に同じく0成分を代入して近似するものである(よって不完全コレスキー分解と呼ぶ)。このようにすると、陰解法の時間がかかる反復計算において、短い時間で良い収束解を得ることが可能となる。それにしても粒子数の2乗のマトリクスを反復計算し、収束解を得るには大変な時間がかかる。よって、PCクラスターの利用により計算時間の短縮化が図られる場合が多くなるが、ネットワーク経由で1つの粒子法の計算を分散処理しても、トラッフィックの増大によって必ずしも計算時間がノード数(計算機の数)に比例して短縮するわけでは決していない。粒子法の場合、分散処理に関する分析も詳しくなされており、データの共有による時間からノードの数が5－7位で短縮率が上限に達し、それ以上増やしてもあまり効率が上がらないことが調べられている。また、ネットワーク型の粒子法のコーディングは複雑になることから、本研究では単純

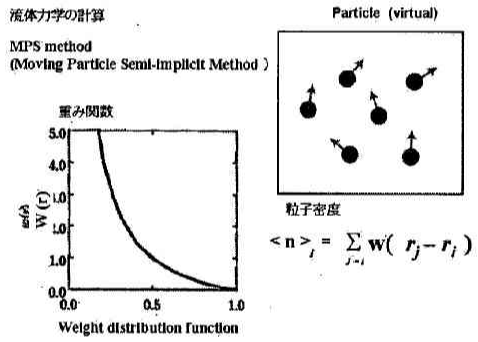

図11 粒子法の考え方。仮想的な粒子の運動を追跡する。この粒子はある量の水を表現する。粒子の相互作用として距離分の1の重み関数を採用する。

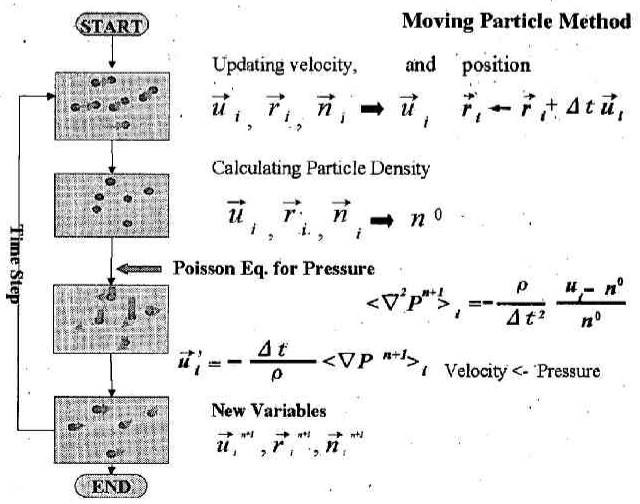

図12 越塚が開発した粒子法のアルゴリズム。Navier-Stokesの方程式と等価な形になるようにしてあり、実験との一致が多数報告されている。

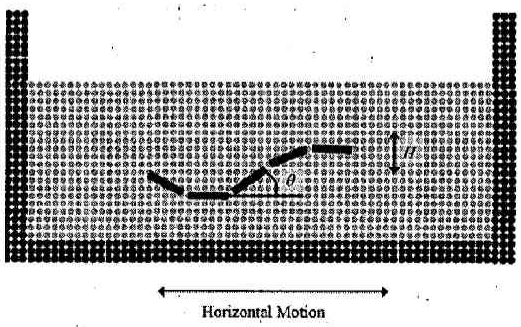

図13 流体中の生物の動きの計算における境界条件

に複数のPCを用意し、違う条件の計算を複数パラレルに行うことにより、多数のサンプリングの流体計算結果を得ることにした。粒子数を1万弱にしていくと、1回の計算が1日かかるようになってくるので、多数の計算を行って結果を分析する必要がある本研究のような場合には大変有意義な利用方法であると言える。また、このような考え方によるPCクラスターの利用は、スピングラスの研究でも利用されている。

4.2 計算結果

生物の進化に関連して、生物の体の構造と運動について、まず背景として、これまでどのようなことがわかっていたかというと、流体の効果を入れないで静止座標系に対する運動速度の逆の力を受ける抵抗モデルがこれまで扱われていた。これはシムズの研究にはじまり、人工生命と呼ばれる分野で扱われていた方法である[2]。筆者の一人もこれまで、このような手法でアノマロカリスを模した生物体の運動について調べてきた[3,4]。その結果、全体のヒレを同じ位相で動かす場合が最も速く前進することができることがわかった。このことは、後から考えてみると当然の結果で、周りの環境の相関が無い以上、1つ1つのヒレによって前進し、そのようなヒレが等しく配置されればそれだけ前進し易くなるわけである。このようなモードは、例えば全体のヒレが一度に上下に動くには1方向に大きな力がかかるとして、合力の低減という観点から効率はあまり高くないとすることも可能である。しかし、色々と条件を変えて計算した結果、全体のヒレをスムーズに波打たせるように動かすのではなく、見た目として逆の方向に波打たせるようにするやり方も効率良く前進することができることがわかった。これは、1つ1つのヒレによって前進し、かつ全体として分散しているのだが、周囲の環境の相関が無い為に、ヒレ同士の位相はかなり自由にとっても全体の速度は変わらないからである。今回の粒子法による計算では、このような非相関モデルでの不自然な結果がどのように流体の効果の取り入れによって変わるかを調べることが大きな目標であった。

流体の効果を入れた計算をして見ると、全体のヒレを同位相で動かす場合は、前進するという目的からすると流体を非効率に掻き乱すだけでほとんど前進しないことがわかった。また、全体のヒレを逆位相で動かすやり方については前進しないどころか、逆の方向に動くことがわかった。これは、流体による推力が一個一個のヒレによる動きよりも大きな構造として流体を押し出す方が推力になるからである(**図14**)。

このような結果は、これまで人工生命の分野で扱われてきたローカルなモデルでは流体中の運動をほとんど正確に推測できない、という結果につながる。一方、これまでの物理化学の研究では、ローカルなモデルにおいても、流体の計算を行うこと無しに有効的に流体の相関を取り入れる方法論があり、このようなやり方で計算時間を要する流体の計算をすることなく、本質的な運動を取り出すことが可能かも知れない。特に、3次元での運動になると、ローカルなモデルと流体の計算を行うのとでは計算量に莫大な差が出るので、3次元での運動の記述にこれらの手法はより有効なように推測される。

周りの環境を入れた結果は極めて常識的なものである。すなわち、図15にあるように全体のヒレを波打たせるように

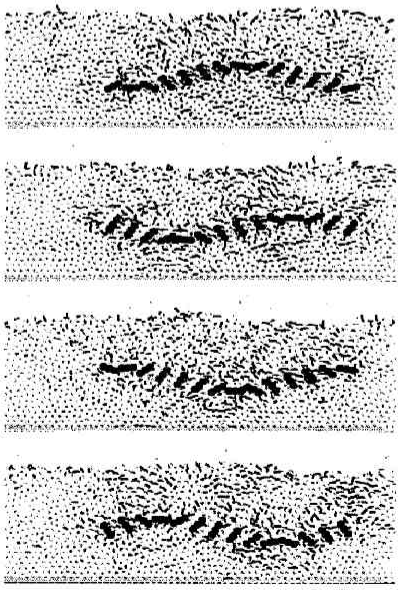

図14 流体を入れた計算では人工生命のモデルと逆の左へ進む結果が得られた。流体の大きな動きが推進に重要であることを示す。

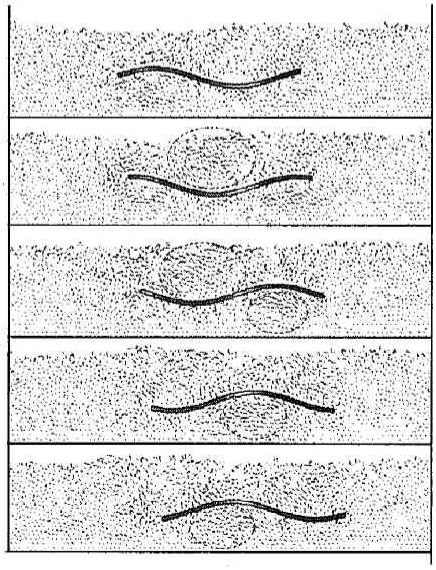

図15 アノマロカリスのヒレは１１対の離散化した構造として与えたが、最終的にはあたかもつながった１つのヒレであるような運動となった。

動かすやり方が最も効率良く前進することができる。

図15中の破線楕円で描いた部分が、生物の周りに生じた部分的な流れである。このように屈曲した部分と同程度の体積（シミュレーションでは2次元なので面積）の流体が後方に押しやられ、その反作用で生物全体が前方に運動する様子が見てとれる。この遊泳の仕方が、効率（速度/エネルギー）の最も良い運動であるという結果を得た[5-7]

4.3 アノマロカリスの形の進化

形を決めて運動の様式を探る研究は前節である程度の見通しがたった。そこで本研究において更に探求したいことは、形の進化である。研究の方法論的にも、決まった形の生物の運動様式を探る研究はこれまでにも数例あったが、形を変化させて、「最適な形」を探る研究は存在しなかった。そこで、本研究では、アノマロカリスの「ヒレ」が原始的なものから序々に発達し、形の進化が進むなかで運動形態がどのように変わるかを調べた。

ところで、アノマロカリスは節足動物に分類され、化石の記録だけを辿っても、どのような生物が祖先なのかは一切不明である。しかしながら、理論的にアノマロカリスの形の進化を考えてみると原始的なものから、①ヒレの数が序々に増えた、②ヒレの長さが長くなった、③ヒレの幅が広くなった、という3通りの変形の道筋を通って化石にみるようなアノマロカリスに達した可能性が挙げられる。節足動物である点を考慮すると、これらのうちで最も可能性が高い道筋は③である。そこで、我々の計算においてヒレの幅を序々に増やしながら遊泳の様子がどう変化するかを計算した。遊泳の速度自体はヒレの幅を広げることにより単調に増加することが予想できるので、ここで、周りの流体のエネルギーを計算することにより遊泳効率を比較することにしてみる。流体のエネルギーは、粒子法の計算における粒子の運動エネルギーの総和とした。そして、(遊泳の速度)/(エネルギー)を遊泳の効率とし、ヒレの幅が広くなるに従ってこの遊泳効率を求めた。その結果、**図16**のような結果が得られた。図16によると、幅が6cmまでは効率は変わらずに一定値を保つ。この間、速度は単調に増加している。そして、ヒレの幅が7cmとなり全てのヒレが連続した形態になった途端遊泳効率が高くなることがわかった。

アノマロカリスの形態で言うと、祖先的なヒレの発達していないアノマロカリスは、ヒレの幅を広げるに従い速度が速くなるが、その過程で遊泳効率は決して良くはならない。しかし、ヒレが連続的になった途端、遊泳効率が高い生物の形となったことがわかる。

アノマロカリスの全体像がわかったのは20年ほど前のことであるが、それ以来、世界中からアノマロカリスの触手の部分の化石の発見が報告され、アノマロカリスが決して珍しい生物ではなくカンブリア紀中期を代表する大型の生物であることがわかってきた。時に最近中国のチェンジャン地方から保存状態の良い化石が発見され、一口にアノマロカリスと言っても様々なアノマロカリスが存在したことがわかっている。ここで特徴的なことは、進化の道筋として祖先型の原始的なアノマロカリスから連続的に形を進化させてきたのではなく、現在知られているアノマロカリスのおおよその体型はほぼ同じで、ちょっとした形のバリエーションを持った様々なアノマロカリスが化石として発見されることである。

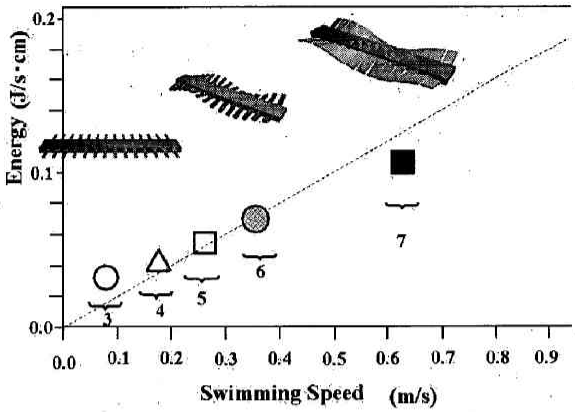

図16 アノマロカリスの形態の進化と遊泳能力。数字はヒレの幅を示し（cm）、7(cm)となると連続したヒレの構造を持つ様になる。3-6(cm)の間では序々に遊泳能力が高くなるが、連続した構造となった途端飛躍的に遊泳能力が高くなることがわかった。

進化の道筋としては、効率（遊泳速度/エネルギー）が平坦な部分では進化の道筋は細く、いわば過渡的な状態であると言える。そしてヒレが連続的な状態となった形態になると遊泳の効率はそれまでに比べ一気に高くなった。このような構造はアノマロカリスにとって「良い」状態であり、大きくはこのようなボディのプランを保ったまま様々なバリエーションを生み出したと考えられる。

このような傾向はいわば、「進化のパターン」と言うことができるように思われる。すなわち生物の進化の道筋は細いもので、不安定なものであり、それ故その道筋を化石として残すことはほとんど無い。しかし一度能力の高い構造に達すると安定状態となり、類似の形態で様々なバリエーションを残しすなわち生物として多様な種を残す。そしてそれらのみが化石として残り我々が検証することが可能となるのである。このような意味で、化石として残ることの少ない中間状態の進化過程の形態について議論する方法論として、従来までの化石だけに頼った考え方から、コンピューターの中に仮想的に中間状態を生成し、その性質について議論する本研究のような立場は抜本的に新しい立場と捕らえることができる。それゆえこれまでの化石だけにたよっていた議論を別な角度から眺め、新たな考え方を導入することができるようになったと言える。

数理的な方法論で言うと、最適な状態を探る理論として最適化理論というものがある。これは決まった空間の中で評価関数のポテンシャル面を考え、そのポテンシャル面上で評価値の最小または準最小値を探索する理論である。これを求める方法として組織的に最小値を探索する方法があるが、一方ポテンシャル面が広く、かつ形状が複雑な場合、乱数を導入したstochasticな方法で近似的に準最適解を探索する方法がある。このような考え方は最適化という発想から言って、形の進化の議論にも援用することができるのではないかとこれまでぼんやりと考えられてきた。

本研究で明らかにしたことは、ある部分で3次元の体の構造の変形に対応して最適な構造というものが物理学的に予め決まっていることを明らかにした。このような意味で生物の形の進化は決して一回限りの偶然によって起こるものではなく、物理学として決められた必然性があるものであることがわかる。また、空間のボリュームとポテンシャルが決まっている上での従来の最適化の考えと、空間が拡大しポテンシャルの形が決まっていない形の進化の相違は、形の進化では安定解に状態が達するとその周辺で更にポテンシャル面が細分化することである。しかしこの細分化はグローバルな形を崩すことなく起こる、という描像で捉えることができる。

生物進化に関連する分野として、人工生命の研究が提唱されてから「創発的」という概念が提唱され、この概念は今でも多くの研究者により追求されている分野である。あまり確実な基礎を持った概念では無いので正確に表現するのは難しいが、創発的とは予めきまったシナリオに従って執着地点に向かうのではなく、将来何が起きるかわからない偶然に支配されたダイナミクスのなかで、偶然にある新規な状態に達しそれまでと異なった秩序を持った安定な状態に達する、という考え方である。

現在も多くの研究者に取り組まれているこの創発的という概念であるが、以上の議論から形の進化に関しては、この考え方は当てはまらず、創発的に進化するのではなくて、物理学の原理で決まった安定状態に必然的に収束していくことがわかった。

4.4 大画面で体験する生物の進化

本研究ではこのような理論に基づいて古代の生態系を電子空間に再現するプロジェクトに取り組んでいる。このプロジェクトでは、本章で報告した動きを入れて、古代の生物をCGでまず再現する。そして、これらのCGのレンダリングにPCクラスターを利用した。図17にあるように画素数の大きなCG画像とその編集には大きな計算機資源が必要である。その計算力としてPCクラスターを用い、分散レンダリングをしている。そしてこれらの大画面CGは4台のプロジェクターにより同期的に映し出され、全体として大きな画面の上にCGで再現された古代の生物達が映し出されるようなシステムを作った。これらの成果はホームページhttp://www.museum.fmに公開され、また年に数回一般向けの講演を行っている(**図17**)。

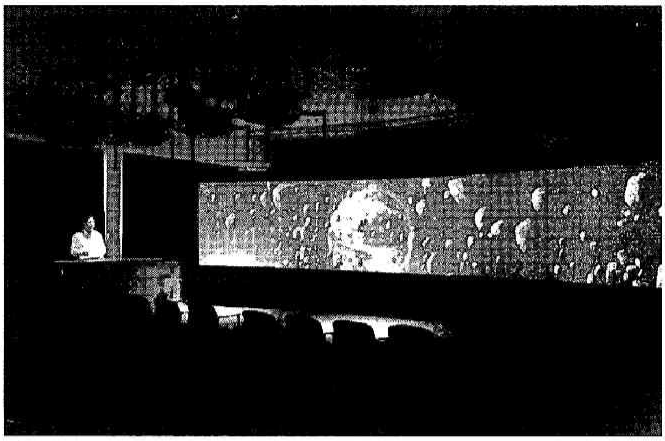

図17 マルチスクリーンに古代の地球環境を映し出している様子。

文献

[1] S. Koshizuka, H. Tamako and Y. Oka, "A Particle Method for Incompressible Viscous Flow with Fluid Fragmentation," Comput. Fluid Dynamics J. 4, (1995)pp29-46.

[2] K. Sims: Evolving 3D Morphology and Behavior by Competition,Aritificial Life IV, MIT Press (1995)28-39.

[3] Y.Usami, S.Hirano, S.Inaba and M.Kitaoka., "Reconstruction of Extinct Animals in the Computer", "Artificial Life VI, Chiris Adami et al.(eds.) MIT Press(1998)173.

[4] Usami Y., "Reconstruction of Extinct Animals in the Comuter II", Trans.M.R.S.J (2001) 28.461-464.

[5] Y.Usami, K.Kamono, K.Kawamura, "How Anomalocaris Swam in the Cambrian Sea; A Theoretical Study Based on Hydrodynamics" in Morphogeneis and Pattern Fomation in Biological Systems, (T Sekimura et. al. eds.), Springer (2003)369-377.

[6] 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」、関村利朗編、裳華房, 2003年).

[7] 宇佐見義之、北岡正敏、吉田賢二、"古代の生態系を電子空間に再現する"、The Journal of Three Dimensional Images, 24(2004)54-63