解説

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 =[†]

宇佐見 義之* 宇田 敦子* 平野 砂峰旅*

1. 数理生物学と古生物学+人工現実感で 独創的実験を試みる

本研究は、カンブリア紀の生態系を仮想空間の中に再現する、ということを第一の目標に掲げる。そしてその中身は数理生物学と古生物学、シミュレーション物理と人工現実感といった既存の分野の融合であり、かつ最終的には科学・美術ミュージアムに展示可能な作品としての制作を目指す。以下に本プロジェクトの内容を紹介する。

2. 複雑な世界が始まるまで； エディアカラ生物群

まずはじめに、何故カンブリア紀の生物の復元を行うかについて述べる。その為に地球上の初期生命の進化について概観する(図1)。[宇佐見1998]

地球は46億年前に形成され、生命が誕生したのは地球環境が安定した40億年前からすぐ後のことらしいことが判りつつある。生命の痕跡化石は発掘の度に昔に遡りつつあり現在では生命の起源は38億年前ほどということになっている。それから約30億年間生命は単細胞生物として単純な生命形態を保っていた。この辺の生命の初期進化は極めて緩慢なものであり、ほとんど進化しなかったと言っても過言ではない状態だった。

この時代の地球環境、特に酸素濃度と、生命の存在様式は不明な点が多いが、多細胞生物が出現

したのは約10億年前くらいと見積もられている。10億年前から6億年前迄の間は多細胞生物の化石と、それらが掘ったと思われる生痕化石がまれに見出される時代が続く。そして約5億8千万年前、生命は数cm以下の多細胞生物から飛躍して数十センチから1メートルほどの大きさの生物を作り出した。これらは発見地のオーストラリア北部の丘陵地帯にちなんで、エディアカラ生物群(英語ではEldiacaran)といわれている。[McMenamin 1998]

エディアカラ生物群の存在様式は現代の生命様式からするとかなり変わっていて、厚さ数ミリ、大きさ1m弱の葉っぱのような生物が全世界の海を埋め尽くしていたと考えられている。これらは植物でもなく、運動器官もないことから、光合成の共生バクテリアから養分を貰って生活していたのでは、という説もある。エディアカラ生物群はこれら葉っぱのような存在様式の中でもそれなりの多様性を生じさせたことが知られている。

エディアカラ生物群の生態の考察から、地球上の生命の存在様式として(食う一食われる)の関係が無く、全ての存在が平和に共存していた時代があったと考えられるようになった。このような状態をさして、エディアカラの園と呼ばれることもある。エディアカラ生物群の化石と復原図を図2に挙げるが3回対称や5回対称性を持つ、生活様式が不明な奇妙な生物が存在したことが知られている。筆者は、生命が複雑性を持つ前の段階では、数学的に単純な(対称性を持つ)体の構造を発生させたのではないかと、という仮説を持っている。

[†] Digital Lostworld Project; World of 500 million years ago

Yoshiyuki USAMI, Atsuko UDA and Saburo HIRANO

* 神奈川大学工学部物理学教室、科学技術振興事業団
Institute of Physics, Kanagawa Univ., and PRESTO

3. 複雑な世界の始まり； カンブリア紀の爆発的進化

このように世界の海に繁栄したエディアカラ生物群は2-3千万年の間繁栄し、ほとんどが絶滅した。絶滅の原因は不明である。絶滅には一般に大陸棚の大きさ、平均水温等が関係すると考えられているが当時の地球環境はほとんど明らかになっていない。名古屋大学などから始まった「全地球史解読計画」等の地球科学研究によりなんらかの知見がもたらされれば、生命の初期進化についての理解が進むであろう。

エディアカラ生物群が消滅した後、数ミリの断片的な化石が発見される時代が3千万年ほど続く。これらの時期の生命形態は一切不明であり、これらはまとめてSSF (Small Shelly Fossil) と呼ばれたりする。古生物学の調査による解明が待たれる。これらSSFグループとの関連は明らかではないが、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マウンテン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館長C.ウオルコットが発見したことで有名となった[Gould 1990]。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。グリーンランドから出土する化石はバージェス頁岩のグループとは若干異なるとの興味ある報告もなされている(図3)。[モリス 1997]

このようにカンブリア紀においてはバージェス頁岩動物群に代表される多種多様な生物が、約2千万年という地質的にはごく短い時間に一度に出現した。それに先立つ33億年の間の生命の進化が極めてゆっくりであったことを考えるとこのことは非常に不思議な現象といわなければならない。この現象はカンブリアの爆発的進化と呼ばれ、生

物進化の理論上最大の謎とされ、現在多くの研究者がこの問題に取り組んでいる。

4. カンブリア紀の生物群の電子的再現

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我々のグループは進めている。この作業は現在のところ次のように行っている。

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によって再現し、現代に蘇らせる。理論計算の枠組みとして遊泳運動の再現の内容を以下に紹介する。

4-1 遊泳運動の再現

三次元の仮想生物に対する力学計算は簡単な流体モデルを採用する。まず図4のように直方体で仮想生物のモデルを作り、その本体に対して各ヒレが動くとする[Sims 1994][Terzopoulos 1994][Usami 1998 a,b][Ventrella 1998]。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。

$$\begin{aligned}\alpha &= a_1^1 \cos(\omega_1^1 t + \delta_1^1) \\ &\quad + a_2^1 \cos\left(\frac{1}{2} \omega_2^1 t + \delta_2^1\right) \\ \beta &= a_1^2 \cos(\omega_1^2 t + \delta_1^2) \\ &\quad + a_2^2 \cos\left(\frac{1}{2} \omega_2^2 t + \delta_2^2\right) \\ \gamma &= a_1^3 \cos(\omega_1^3 t + \delta_1^3) \\ &\quad + a_2^3 \cos\left(\frac{1}{2} \omega_2^3 t + \delta_2^3\right)\end{aligned}\quad (1)$$

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

図1 生命38億年の歴史

図2 エディアカラ生物群[McMenamin 1998]

図3 バージェス頁岩動物群の化石
[Morris 1994][Briggs 1994][NHK 1994]から

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 $A_1, A_2, A_3, \dots$ とする。計算は以下の手順で行う(図5)。

- 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が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。

4-2 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3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なった。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

図4 仮想生物の座標系

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6)。

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7に示した。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7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6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7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。

この結果は実際の生物の進化の断面を理論的に解明する手段を切り開いたという意味で、大変有意義な結果といえるだろう。

4-4 歩行運動

遊泳運動と合わせて、水底を歩行する生物の運動形態についても同様の計算を行った。計算を単純化する為、仮想生物は体全体が並進・回転するものとし、各関節の動きに従ってどのような運動

形態が現れるか、生物体の形態と運動の関係を調べた[Usami 1999]。

その結果1次元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。このように、遊泳・歩行の運動を形態を明らかにした後、化石から3次元的に復元した古代生物に計算結果を当てはめることにより、古代の生態系をコンピューター中に再現する作業に取り組んでいる。

5. 古代の生物を仮想空間の中へ蘇らせる インタラクティブシステム ーデジタル・ロストワールド計画ー

本研究においてはこの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作業を行っており、この作業全体を「デジタル・ロストワールド計画」と呼んでいる。

デジタル・ロストワールド計画においては古代の生態を数理生態学の研究に則った形で推測し、グラフィック・コンピューターの中にまず再現する。次にこれらの仮想[絶滅生物]を現代に存在する私達と仮想空間を通じて共存する空間を作ること为目标としている。

我々は古代の生態系を再現するインタラクティブなメディア空間を実現すべくデジタルスタジオを構築中であり(図8-11)、次にそのハードウェアを中心に紹介する。

図12にデジタルスタジオの構成図を示す。コンピュータの利用としては、主にWindowsNTでCGの制作、SGIのOCTANE、O2でリアルタイムの3DCG、Macintoshで音響合成及びシンセサイザーの制御を行なっている。それぞれのマシンは、10,100 BaseTのイーサネットに接続されている。OCTANEで作成されたりリアルタイムのCGはビデオプロジェクターでスクリーンに映しだされ、シンセサイザー等で合成された音はYAMAHA O2R デジタルミキサーを介して4chで再生される。またインタラクティブシステムを構成するための入力デバイスである、センサー系については、人の動きを感知する焦電センサー、12チャンネルの光センサーの他、YAMAHA

MIBURI による簡易モーションキャプチャー等が現在 MIDI あるいは RS 232 C でコンピュータに入力できるようになっている。

デジタルスタジオを実現するための開発環境としては Puckett らが開発した PureData を採用している [puckett 1999]。その理由として以下の点が挙げられる。

1. グラフィックプログラミングが可能で、
2. さらにプログラムを実行させながらプログラミング可能である。
3. 音響信号処理と 3 DCG が同時に扱える。MIDI, RS 232 C 等を通じての外部デバイスとの接続が容易である。
4. TCP/IP を通じての分散コンピューティングが可能である。
5. ソースコードが全て公開されている。

PureData への新規オブジェクトの追加は、プログラム本体の中に含めてしまう方法と外部オブジェクトという形態で起動時にライブラリーをリンクする方法があり、GEM はライブラリーを追加することによって Pd に OpenGL による 3 DCG の機能を実現している。現在、アノマロカリス様の生物の実装は進化的計算で得られた動きもあわせて、GEM のライブラリーを拡張する形で行われている。これは、当初のアノマロカリスの行動能可視化プログラムが OpenGL を用いて C 言語で記述されているため同じ OpenGL を用いたライブラリーにオブジェクトを付加する方がお互いのプログラムの資源を共有できるからである。このようにすることで、例えばアノマロカリスの動きの制御を音声で行っていたものを、MIDI でおこなうようにしたり、テキストチャマッピングの素材を既存静止画像から動画像に変更したりといったことが再コンパイルすることなくオブジェクトの接続変更や追加だけで容易に可能になる。つまり MAX の外部オブジェクトのように 3 DCG のプログラミングが可能である。アノマロカリスを例にとってオブジェクト作成のフローを紹介する。まず、進化アルゴリズムで得られた形態を基に 3 DCG ソフトである LightWave 3 D でモデリ

ングを行う。このときに、可動部分であるヒレなどは別のオブジェクトは分けて保存する必要がある。次にこのモデリングされたコードを PolyTrans というソフトウェアで OpenGL の C ソースコードに変換する。このソースコードと進化的計算で得られた動きのプログラムを組み合わせる。最後にこのプログラムを PureData 上のオブジェクト用に書き変える。PureData のオブジェクトとしてアノマロカリスは、そのテキストチャータや色、光源、視点などの設定は PureData 上でインタラクティブに行うことができ、さらにセンサー等の外部デバイスによるコントロールも同様に可能になる。

6. 今後の計画

本プロジェクトが科技団さがけ 21 の研究としてスタートして、約 1 年半が経過した。研究経過を総括すると、理論、CG 化、全体のシステム構築ともに順調といえる。CG 化についてはアーティストの宇田がスタッフに加わり目下カンブリア紀の生物達を日に日に電子空間中に再現する作業を進めている。これまでの作業で 10 種ほどを再現した。制作ペースは約 3 日で 1 種となっており、1 ヶ月で 10 種、1 年で 100 種ほどの生物を再現できるペースとなっている。

CG 制作のペースに比して動きを決めるプログラムはルーチンワークではないので、進行は漸進的である。体の部分の動き、生物同士の動き、捕食―被捕食、群れ、更に、無脊椎動物、水流など、盛り込むべき要素は非常に多い、これら物理シミュレーションの知識を総動員した総合仮想空間をあと 2 年弱のうちにどう要約するかは簡単な課題ではない。

更に全体のシステムについては仮想生物間のインタラクションとさらに人間とのインタラクション、また水槽という現実の空間をミックスする作業を行わなければならない。それぞれの部分を繋ぐ重要な部分のプログラム開発は峠を越している、全体をインテグレートする作業が残っている。

図5 パラメーターを決定する進化アルゴリズム

図9 古代生物の復元の様子

図6 アノマロカリスの遊泳形態

図10 仮想現実システム

図7 パラメーターの進化

図11 仮想現実システム

実写とCGを合成したものを投影し、人間の動きに反応させる。

5つの目と大きなノズルを持つ絶滅生物オパビニアを化石写真から3次元的に復元し、理論の計算結果を導入する。

図8

水中写真と合成し、古代環境を再現する

図12 スタジオの機器構成

図14 カンブリア紀の生物10種を電子空間の中に再現した様子。一部実写が使われている [Steene 1998].

コンピューターパワーの問題として、再現した生物が増えるにつれ、高性能のグラフィックワークステーションである OCTANE でさえ現在では荷重超過になりつつある。将来的には ONYX 2 などスーパーグラフィックマシンの利用が不可欠となるので、当研究室以外の施設の利用を考えなければならない。

このようにして完成されたシステムは古代の世界を電子的に現代に再現したメディアインスタレーション作品として科学・美術博物館などへ常設されるような配慮も同時に考慮している。

図13 スタジオの現在の制作状況

参 考 文 献

- [Briggs 1994] Briggs, D.E.G, Erwin, D.H. and Col-
liner, F.J., The fossils of the Burgess Shale,
Smithonian Institution Press.
- [Gould 1990] Gould S.J, Wonderful Life, Century
Hutchinson.
- [McMenamin 1998] McMenamin M.A., The Garden
of Ediacara, Columbia University Press.
- [Morris 1994] Morris, S.C. Fossiles of the Burgess
Shale, Canada Miscellaneous Report.
- [Puckett 1999] Puchette and Danks M. [http://
man104nfs.ucsd.edu/mpuckett/ software. html](http://man104nfs.ucsd.edu/mpuckett/software.html).
- [Sims 1994] Sims, K. Evolving 3D Morphology and
Behavior by Competition, Artificial Life IV,
MIT Press, Pages 24-39.
- [Steene 1998], Steene R. Coral Seas, New Hol-
land Publishers.
- [Terzopoulos 1994] Artificial Fishes with Autono-
mous Locomotion, Perception, Behavior, and
Learning in a Simulated World, MIT Press,
Pages 17-28.
- [Usami 1998a] Usami Y. Reconstruction of Extinct
Animals in the Computer, Artificial Life VI,
MIT Press. Pages 173-177.
- [Usami 1998b] Usami Y. et.al. Regeneration of
Extinct Animals in Computer, submitted to the
proceedings of COMPLEX SYSTEMS, NECSI
(1998).
- [Usami 1999] Usami Y. Morphology and Behavior
of Organism at the Early Stage of Evolution; A
Computational Study, Submitted to J. of Phys.
Soc. Jpn.
- [Ventrella 1998] Ventrella J, Artificial Life VI,
MIT Press. Pages 178-186.
- [宇佐見1997] 宇佐見義之、生物進化における多様性の
起源と複雑系、宇宙誌と生命誌、御茶ノ水書房
- [モリス 1997] カンブリア紀の怪物たち、サイモン・モ
リス、講談社現代新書

(1999年6月14日 受付)

[問い合わせ先]

〒221

横浜市神奈川区六角橋3-27-1

神奈川大学工学部

宇佐見 義之

TEL : 045-413-9771

FAX : 045-413-9771

E-mail : usami@phsul.phsc.kanagawa-u.ac.jp

著 者 紹 介

宇佐見 義之 (うさみ よしゆき)

神奈川大学工学部物理学教室

1987年慶応義塾大学理工学研究科化学
専攻修士課程卒業。1990年東京工業大学
理学研究科応用物理学専攻博士卒業。理
学博士。1990年神奈川大学工学部物理学
教室助手。1997年より科学技術振興事業
団「さきがけ21」研究員兼任。専門は最適
化問題の統計物理学と数理生物学。日本
物理学会、数理生物学懇談会、日本人工知
能学会、各会員。現在は本文にあるよう
に、古生物学、数理生物学、物理学、人工
現実感という既存の分野を有機的に結合
することにより、過去の生態系を現代に
再現するという目標にチャレンジしてい
る。

宇田 敦子 (うだ あつこ)

科学技術事業団宇佐見研究室所属

1996年 多摩美術大学デザイン学科立
体デザイン専攻インテリアデザイン専修
卒業。1999年岐阜県立国際情報科学芸術
アカデミーマルチメディアスタジオ科卒
業1999年4月イメージフォーラムフェス
ティバル大賞受賞、ぴあフィルムフェス
ティバルノミネート。専門は映像制作、
CG制作。

平野 砂峰旅 (ひらの さぶろ)

科学技術振興事業団宇佐見研究室

1988年 九州芸術工科大学大学院情報
伝達専攻修了(芸術工学修士)。1988年ヤ
マハ株式会社音響システム事業部。1994
年株式会社アイアンドアイマルチメディ
ア事業部。1997年神奈川大学研究員1997
年より宇佐見研究室において、デジタル
ロストワールド計画のインタラクティブ
システムの研究に従事するとともにコン
ピュータ音楽の作曲、サウンドを核とし
たメディアアート作品の制作、マルチメ
ディア教育(京都精華大学、早稲田大学、
聖心女子大学)を行う。1993年 FISEA93
(Fourth International Symposium on
Electronic Art)入選、1996年A LIFE V
出品、1997年 ICMC97(International
Computer MusicConference)入選、1999
年Columbia Univ. Interactive Arts
Festival99招待日本サウンドスケープ協
会(メディア委員長)、情報処理学会(音楽
情報科学研究会連絡委員)会員。