

2. 地球シミュレータの応用

“仮想地球”の可視化とその表現

大量データ可視化における問題

シミュレーション科学において、可視化はシミュレーションと自動車の両輪に喩えられるほどに重要な手段であることはいうまでもない。しかし、もし大規模シミュレーションによって、出力されるデータが想像を絶するほど膨大になるとどうなるか？ 大規模シミュレーションを走らせることができたとしても、データが大きすぎて可視化ができず、何も新しい知見を得ることができなかった、というのでは話にならない。しかし、地球シミュレータを用いたシミュレーション結果を解析する時には、それがいつ起こっても不思議ではないほどインバランスな状況が生じている。

一例として、地球シミュレータ用超高解像度全球大気大循環シミュレーション・コード AFES の場合を挙げてみる。AFES は水平解像度約 0.1 度（赤道付近で約 10km）、鉛直方向には地表面から高度約 50km 程度にまで達する全球の大気の状態を計算することが可能である。具体的には、経度方向に 3,840、緯度方向に 1,920、鉛直 96 層のグリッドで計算を行っている。この時、たとえば水蒸気のような 1 変数のデータ 1 スナップショット分のサイズは、 $3,840 \times 1,920 \times 96 \times 4\text{Byte}(\text{float}) = \text{約 } 2.6\text{GB}$ に相当する。1 変数、1 スナップショットごとにこのようなサイズになるので、いくつもの変数やスナップショットをとれば、すぐに TB のオーダーに達してしまう。

このような大量データを可視化するためには、数 GB 以上のデータ・ハンドリングに対応した可視化ソフトウェアが必要である。しかし、単純に数 GB 以上のデータの読み込みが可能である、というだけでは（特に 3 次元可視化においては）まだ実用的とはいえない。等値面生成やボリューム・レンダリングのような、参照領域全体のデータの各々について空間的な位置関係を評価する処理は、データ・サイズの増大に伴って急激に重くなり、可視化ソフトウェアの対話的な操作を困難にする。しかし、図種や見る角度の変更を頻繁に行う必要があるデー

 海洋科学技術センター 地球シミュレータセンター
荒木 文明
arakif@jamstec.go.jp

タ解析やシミュレーション・コードのデバッグにおいては、可視化ソフトウェアの対話性の欠如は深刻な問題である。故に、解析やデバッグの作業効率をできるだけ損なわないように可視化ソフトウェアが設計されていることもまた重要である。

ならば、大量データの可視化にも地球シミュレータを用いたらどうか？ シミュレーション・コードに画像生成機能を実装しておけば、容易に可視化が可能になるのでは？ もちろん、地球シミュレータを用いた可視化は解決法の1つではあるかもしれない。しかし、それはあくまでユーザが少数に限られている場合であり、地球シミュレータ運用上の例外を認める措置がとられた場合の話である。現在、34プロジェクト、約700名の研究者が地球シミュレータの利用にかかわっており、稼働率は常時高く、シミュレーション以外でこれ以上負荷をかけることは望ましくない。また、地球シミュレータで可視化をする場合、シミュレーションと同様にバッチ処理的に画像データを生成し、すべてが終了した後に確認することになる。したがって、図種や視線方向はあらかじめ決め打ちで設定しておかなければならず、対話性に欠ける。このような理由から、現在、地球シミュレータの利用は原則としてシミュレーションにのみ利用され、可視化は、地球シミュレータからデータが出力された後に、地球シミュレータ本体以外で行うことになっている。

他方、現在地球シミュレータセンターにある可視化環境は、(後述のBRAVEを除いて)一般的なグラフィック・ワークステーションやPCクラスタが数台あるだけである。大量データを地球シミュレータのユーザ・ディスクや大量データ処理システム(MDPS)から、グラフィック・ワークステーションのディスクへ長い時間をかけて転送しなければならないことも、研究の効率を下げ一因になる。

研究および開発への取組み

このような膨大なデータを目前にして、高性能な可視化装置を大量に導入して力業で可視化するというスタイルは、予算的に早急の対応は難しい。その代わりに、現在すでにあるハードウェア資源を最大限有効活用しながら、データ処理用ソフトウェア開発や高速な描画を可能にするアルゴリズムを探索し、そしてそれらを統合した効率的な可視化環境を構築していく方が現実的であり、現在または将来的にも地球シミュレータを利用する多くの人にとって役に立つと考えられる。

このような背景をもとに、高度計算表現法研究グルー

プでは、現在次の3つのテーマ：

- ① DHS (データ・ハンドリング・システム) の開発
- ② 高速可視化アルゴリズム
- ③ VFIVE 機能拡充

に重点を置いて研究および開発を進めている。

数百GB～数TBにもおよぶデータ全体をまるごと可視化ソフトウェアに読み込ませて可視化することが困難であるのは自明である。可視化の前に、まず膨大なデータの中からデータ解析に必要な部分だけを上手に切り出せるシステムが必要である。①はそのような効率的なデータ切り出しのためのツール体系の開発である。DHSは、切り出し元のデータ・ファイルの指定、必要なパラメータの入力、切り出し後の部分データの格納先指定をするためのユーザ・インタフェースとして、対話的かつエラー検出機能を備えたブラウザを備えている。このブラウザを用いてユーザが種々の指定を行うことで、DHSは地球シミュレータでデータ処理を行うためのジョブスクリプトを自動作成する。そのスクリプトを通常のジョブと同じように地球シミュレータに投入すれば、データ処理が実行される。このDHSの実現によって、数百個以上のデータ・ファイルからのデータ切り出しでも、ユーザの負担は数分程度、ほぼ対話的なブラウザ上で作業するだけで済む。

DHSで必要な部分データだけ切り出すことができたとしても、そのサイズは一般的な可視化用ソフトウェアに読み込ませるにはまだ大きすぎる。②は数GB程度のデータでも機敏に動作する可視化ソフトウェア開発のためのテーマであり、米国テキサス大学計算可視化センター(CCV/ICES/UT)と共同で研究を進めている。特に、可視化においては負荷の大きい等値面処理の高速化を現在の第1の目標にしている。等値面生成処理では、参照している領域のすべてのデータを評価、曲面を構成するために必要な頂点座標と法線方向を算出し、レンダリングを行う。それ故、元のデータが大きくなれば、計算とレンダリングの両面で大きな負荷がかかることになる。これらに対処するため、注目している領域以外を粗くして負荷を軽減、並列レンダリング、また計算サーバ、レンダリング・サーバとの通信を行い、データ入力後からレンダリングまでの全体的な高速化を図っている¹⁾。さらに、それ以外の可視化機能の高速化も順次進め、大量のデータを効率よく可視化するソフトウェア開発につなげていく。

③については、次章の内容とあわせて後述する。

VR 可視化装置・BRAVE

超高解像度の大規模シミュレーションが可能になるということは、データ・サイズが膨大になるというだけでなく、ある現象の高度に複雑なメカニズムや構造を示す情報も同時にデータの中に多量に含まれるようになることを意味する。したがって、可視化が高速に行えたとしても、得られた画像から一目瞭然で内容の把握をすることが困難なこともある。初めからターゲットが明瞭ならば、データから必要な情報だけをデータ・マイニングなどを用いて抽出し、不必要な情報はあらかじめ削除するのも効果的であろう。しかし、新たな可視化の方法論を模索することも重要なステップと思われる。たとえば、研究者自ら直接データの仮想世界に潜り込んで、時には内側から展望し、時には外側から俯瞰するように、研究者自らの動作と連動してあらゆる角度から自由に観察することができれば、相互に絡み合い隠れている情報や新たな知見を見出すには好都合である。

このような発想のもとに、平成 14 年度に我々はバーチャル・リアリティ（VR）可視化装置・BRAVE を導入した。BRAVE は Booth for Resolving Aspects of Virtual Earth の略で、地球シミュレータの中に生み出された“仮想地球”を立体画像によって再現し、自然現象のあらゆる側面を解明するための部屋、という意味が込められている。

BRAVE は、いわゆる CAVE システム^{☆1}と呼ばれる没入型表示装置である。画像の生成には SGI Onyx3800 Infinite Reality 4 を採用。8 プロセッサ、主記憶 16GB および 1TB のストレージ・ディスクで構成。表示部分は図-1 のように 1 辺が 3m の正方形スクリーン 3 枚（正面および左右側面）と床面の計 4 面を立方体状に組んだ構造で、4 台のプロジェクタを用いて各面に画像を表示させる。正面、両側面および床面がユーザの視野全域を覆うため、ユーザは高い没入感が得られる。立体視については時分割方式を採用。これは両眼視差を考慮した右目および左目用の 2 種類の画像を高速に切り替えてスクリーンに投影し、画像切り替えと同期して液晶シャッターを左右交互に開閉する専用眼鏡で 2 種類の画像を分離することで、立体視を可能にするものである。同期信号の送受信には赤外線が用いられている。

さらに、あらゆる角度からの自由な観察と立体画像への直接的な操作を可能にするため、磁気を用いた位置方向検出を同時に行っている。ブース内には磁界を発生さ

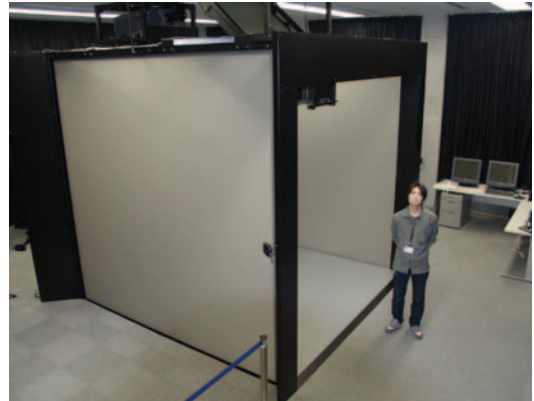


図-1 VR 可視化装置・BRAVE

せており、専用眼鏡とコントローラには磁気センサが取り付けられている。磁気センサによって、頭部とコントローラを持つ手のそれぞれの位置と方向をリアルタイムに捕捉し、その情報をフィードバックさせることで、ユーザの動作に合わせて逐次最適化された画像を表示することができる。こうして、ユーザには画像がただ立体に見えているだけでなく、そこに実体があるかのような感覚で、立体画像を見たり手を加えたりすることができる。

装置と同様、BRAVE 上で動作する可視化ソフトウェアに盛り込むべきアイディアも、複雑なシミュレーション・データから新たな知見を引き出すのに重要である。通常のデスクトップ環境で用いられる可視化ソフトウェアを単に BRAVE に移植しただけでは、その機能を十分に発揮することはできない。BRAVE は単なる立体画像表示装置ではなく、立体画像を直接手で触るようなユーザの能動的な動作を反映させる。したがって、可視化ソフトウェアもまた、VR の思想に基づいて、ユーザの動作に対応可能な設計がなされていることが重要である。

このような観点から設計されている可視化ソフトウェアの 1 つとして VFIVE がある³⁾。VFIVE は、複雑な 3 次元ベクトル場を 3 次元のまま解析することを目的に陰山によって制作されたソフトウェアで、VR 空間内に現れる 3 次元メニューによって、等値面、ベクトル場、流線など、さまざまな可視化機能を利用することができる（図-2）。ユーザが調べたいと思う場所へ歩いて行って、調べたい部分に手を伸ばし、さまざまな道具を使いながら、首を覗かせて見たいところを見る、という人間の日常的動作にかなった設計になっている。

前章③のテーマでは、この VFIVE を大量データの読

^{☆1} CAVE システムは 1992 年にイリノイ大学で開発された²⁾。産業用 3 次元モデリング、教育、VR 研究など多分野で広く利用されている。シミュレーション科学の分野での導入は、国内では BRAVE の他に核融合科学研究所の CompeXcope が挙げられる。



図-2 VFIVEによる固体地球シミュレーションの可視化



図-3 日本科学未来館・GeoCosmosを用いた展示風景

み込みと表示に対応させ、さらに多様な可視化機能の追加、表現方法の検討、そしてパラメータやスクリプトの書き換えに伴う数値・文字入力を BRAVE のブース内で可能にするためのユーザ・インターフェースの改良など、総合的な機能拡充を進めている。BRAVE はユーザの動作を常に反映させて画像を逐次書き換えるため、データの増大に伴う描画の遅延時間の増加が、デスクトップ環境よりも深刻に影響する。特に等値面のような膨大な数のポリゴンを使用する図種では、人間の動きに画像がついてこられなくなり、没入感が損なわれてしまう。ここで、前章②での研究の進展がこの問題を解決する鍵になると考えている。

一般展示

高度計算表現法研究グループのもう1つの側面として、地球シミュレータを用いて得られた成果について、一般向けに表現方法を工夫し、展示用コンテンツを制作している。地球シミュレータを用いて得られた科学的研究成果は、一部の研究者だけのものではなく、広く世界に発信され、一般の多くの人々にも享受されることが理想である。しかし、論文や専門誌における専門家にしか理解し得ない記述表現では、一般の人々にとってはハードルが高いであろう。社会への貢献の一助として、地球シミュレータ本体の中に生み出された“仮想地球”を、直感的に分かりやすい画像を通じて発信していくことも、我々の重要な使命と位置づけている。

図-3は、2003年6月19日に日本科学未来館において行われた地球シミュレータ・シンポジウムにおける展示風景である。この展示は、シンポジウムの昼休みを利用して、480名以上のシンポジウム参加者を前に、日



図-4 展示用ムービーの1コマ

本科学未来館内に設置された直径6.5mの球状ディスプレイ・GeoCosmosを用いて行われた。展示内容は、全球大気大循環シミュレーション（AFES）による降水量、全球海洋大循環シミュレーション（OFES）による全球海面温度（図-3はこれを色づけしている）および海流速度分布、そして海洋・海水結合シミュレーション（OIFES）による極域での海水分布のそれぞれについて変化の様子が分かるアニメーションである。ただし、GeoCosmosの形状を考慮し、降水量や海面温度など全球1層のみで表現が可能なもの限定している。これは日本科学未来館スタッフの協力の下に実現した。なお、このアニメーションは現在、海洋科学技術センター横浜研究所・地球情報館内に設置されている半球ドーム・スクリーンでの常設展示物として公開されている。

図-4は2003年6月30日～7月10日に札幌で開催された国際測地学・地球物理学連合（IUGG）総会における地球シミュレータセンターの成果物として、シミュレーション結果を基に制作した3次元CGムービーの1コマである。白い模様は降水量を表している。日本の南西および南東沖に台風による降水がみられる。可視化ソフトウェアから画像生成後、CG用ソフトウェアを用

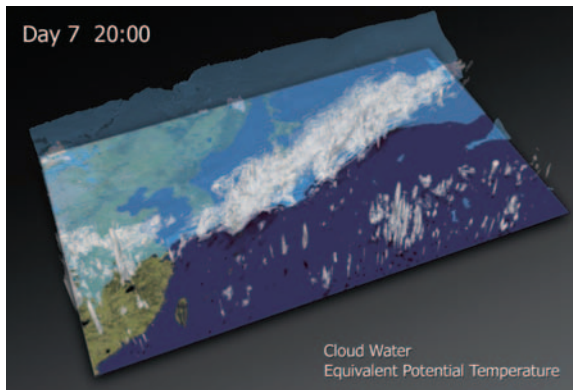


図-5 AFES による6月の気候の可視化

いて形状を加工し、ストーリー仕立てでムービー化している。これは総会期間中、会場に設置された海洋科学技術センターのブースにおいて展示された。

図-5は、AFESを用いた日本付近で見られる梅雨前線の3次元可視化を行ったものである。図中、半透明の水色の曲面は、相当温位^{☆2}が急激に変化するときの値を1つ選び等値面で表したもので、冷たく乾いた空気と暖かく湿った空気がぶつかり合う境界面、すなわち前線帯の指標として描いている。そして、この面を境に冷たく乾いた空気と暖かく湿った空気が拮抗して梅雨が停滞し、暖かい空気が境界面に沿って上昇し雲を形成、そして雨を降らすという、我々が常識として知り日常の中で体験もしている梅雨の様子が再現された⁴⁾。これを前述のBRAVEで表示すれば、自らの目の前で前線にそって雲が形成され、頭上へ向かって成長し、東の空へ流れていく様子を観察することができる。

この可視化の元になった研究は榎本らの梅雨前線シミュレーション⁵⁾によるもので、梅雨前線は日本から中国にかけて見られる局地的な現象ではなく、西アジアまで続く地球規模の気候現象として、その性質等を明らかにしている。しかし、一般の人々の日常経験的な感覚からすれば、そもそも梅雨とはどういうものか理解を深めた上ではじめて、このような先進的な研究やシミュレーションをすることの意義が理解しやすくなるのではないだろうか。データの中には、そのシミュレーションを行う際にターゲットとした、研究者が興味を持つ情報以外にも、他の人からみれば有用な情報がまだ豊富に含まれている。我々は一般の人々にも内容を把握しやすい可視化をするという試みの1つとして、(改めてシミュ

レーションおよびデータ解析を必要としたが)画像・アニメーションの作成を行った。なお、この画像も前述のIUGG総会における一般展示用ムービーに使用されている。

今後の課題と展望

大量データの可視化については、上述の研究開発だけではなく、各研究プロジェクトに協力し、それぞれ個別に可視化作業も行っている。今後は複雑性シミュレーション・プロジェクトと連携し、独自の可視化用ソフトウェア開発も含めた可視化がターゲットになるであろう。また、ソフトウェア開発以外にも、高性能なグラフィック・ハードウェアの充実を図ることも必要である。ソフトウェア、ハードウェアの両面で、効率のよい可視化環境を実現させていきたい。

他方、シミュレーションの可視化結果の画像は、いくら解像度が上がって現実に近い状況が再現できたとしても、そのままでは専門家ではない一般の人々にとって必ずしも理解しやすいものではないかもしれない。目で見て直感的にも分かりやすくするためには、現実世界に即した、あるいは現実世界と対応づくような表現や伝え方の工夫も必要である。そのためには、リアリスティックな着色を施す画像の加工や、迫力のあるアニメーション表現も含まれてくるだろう。しかし、リアルさを追求しすぎるあまり、誤解を招く表現や、元のデータそのものを改ざんしてはならない。CGアートに凝るのではなく、あくまでシミュレーションの意義を分かりやすく伝えることが目的である。こうした表現のためには経験の蓄積および試行錯誤が今後も重要と考えている。

参考文献

- 1) Bajaj, C., Pascucci, V., Thompson, D. and Zhang, X. Y.: Parallel Accelerated Isocontouring for Out-Of-Core Visualization, In Proceedings of IEEE Parallel Visualization and Graphics Symposium, pp.97-104, San Francisco, CA (Oct. 24-29, 1999).
- 2) Cruz-Neira, C., Sandin, D. J. and DeFanti, T. A.: Surrounded-Screen Projection-Based Virtual Reality: The Design and Implementation of the CAVE, ACM SIGGRAPH 93, pp.135-142 (1993).
- 3) Kageyama, A., Tamura, Y. and Sato, T.: Visualization of Vector Field by Virtual Reality, Progress of Theoretical Physics Supplement, No.138 (2000).
- 4) Yoshioka, M. K., Araki, F., Uehara, H., Enomoto, T. and Igarashi, A.: 3-D Structure of Baiu Front around Japan Simulated by Ultra High Resolution Atmospheric General Circulation Model on the Earth Simulator, in Journal of Visualization, Vol.6, No.4, 327 (2003).
- 5) Enomoto, T., Ohfuchi, W. and Ninomiya, K.: Simulation of the Baiu/Meiyu Frontal Zone Using a Global 10-km Mesh Atmospheric Model, The 2nd Workshop on Regional Climate Modeling for Monsoon System, Yokohama, Japan (Mar. 2003).

(平成15年12月5日受付)

☆2 ある特定の圧力を基準に断熱過程の下で与えられる乾燥空気の温度を温位という。相当温位は飽和湿潤空気についての温位に相当する量として定義され、偽断熱過程の下で与えられる。

