

裸眼立体視によるリアルタイム宇宙天気シミュレーターの3次元可視化システム

A 3D Visualization System for Real-Time Space Weather Simulator with a Glassless Stereoscope

田 光江 桑原匠史 小川智也 田中高史 イゴール ゴンチャレンコ
天羽宏嘉

DEN Mitsue, KUWABARA Takuhito, OGAWA Tomoya, TANAKA Takashi,
Igor Goncharenko, and AMO Hiroyoshi

要旨

裸眼立体視が可能なリアルタイム宇宙天気シミュレーターの3次元可視化システムを開発した。シミュレーターグループでは、宇宙天気シミュレーターの一つとして地球磁気圏のリアルタイム3次元シミュレーターを2003年11月より稼働を始めており、以来宇宙天気予報をはじめ、研究や衛星運用など様々な目的に活用されている。シミュレーションは3次元で行われているが、Web上での公開ということもあり、可視化は2次元平面内でなされてきた。しかし実空間は3次元であり、擾乱に至る複雑な現象は、2次元平面内で理解するには限界がある。また平面内に限ることで膨大な情報量を落としていることになる。そこで3次元データの解析をリアルタイムで、さらに視線方向の深さの情報も活用できるように、装置不要の裸眼立体視によるリアルタイム宇宙天気シミュレーター3次元可視化システムを開発したので、報告する。

A three dimensional (3D) visualization system with a glassless stereoscope was developed for the real-time numerical simulator of interplanetary space-magnetosphere-ionosphere coupling system, adopting the 3D magneto-hydrodynamical (MHD) simulation code. The Earth magnetosphere simulator numerically reproduces the global response of the magnetosphere and ionosphere at real-time by the usage of real-time solar wind measurements obtained by the ACE spacecraft. Since November 2003, the simulator is capable of visualizing on the Web two-dimensional (2D) images of the global magnetosphere, updating every minute the images with one-hour forecast. The following 3D graphical techniques were implemented for standard and glassless stereo displays to visualize the simulated scalar and vector fields in 3D: volume and iso-surface rendering, rendering of colored slices and streamlines. A special fast interpolation method mapping the simulated data onto uniform rectilinear grids commonly utilized in computer graphics was developed for 3D monitoring of the simulated data in on-line mode.

[キーワード]

裸眼立体視, 3次元可視化, リアルタイム処理, 宇宙天気シミュレーター
Glassless stereoscopic visualization, Three-dimensional visualization, Real-time processing,
Space weather simulator

1 まえがき

太陽フレアやコロナ質量放出など太陽現象の発生が、地球上や地球周辺的环境に影響を及ぼすこ

とが知られており、この影響を最小限に止めるために宇宙天気予報プロジェクトが情報通信研究機構(NICT)で推進されている。宇宙物理学の進展と昨今の大型計算機の日覚ましい発展により、予

報の手法として物理に基づいた数値シミュレーションモデルが活用されるようになってきた。NICTでは世界で初めて、ACE 衛星の太陽風のリアルタイムデータを入力にした3次元シミュレーションによるリアルタイム地球磁気圏シミュレーターを開発し、2003年11月より運用を始めている。約1時間後の地球磁気圏の状態をWeb (<http://www2.nict.go.jp/dk/c232/realtime/>) 上で表示し^[1]、宇宙天気予報に役立てている。システム詳細は^[2]に譲るが、変動する太陽風のデータを上流の境界条件として1分間隔で読み込み、理想磁気流体(MHD)方程式を実時間とほぼ同時間のスケールで3次元で解くことにより、グローバルな地球磁気圏の太陽風に対するダイナミカルな呼応を、時々刻々と見事に再現している。

このリアルタイム地球磁気圏シミュレーターは画期的な試みであるが、可視化が2次元平面(太陽-地球方向を含む子午面)内に限られているため、3次元シミュレーションの持つ情報がほとんど活用されていない。一般に地球磁気圏内で発生する擾乱現象は一平面内に限られることはなく、実空間である3次元現象であることを考えると、3次元データすべてを解析に用いる必要があり、そのためにはリアルタイム処理が可能な3次元の可視化システムが必要となる。

3次元データの可視化は高速処理が可能な比較的大型の計算機を用いても処理が重いことが多

い。ここで我々が3次元可視化システムに求めた機能は、1:リアルタイム処理、2:立体視、3:手軽さ、である。1はデータ転送の所要時間はネットワークで決まっているため、データ前処理部分と可視化を高速にすることが必要となる。2は3次元可視化においても更に視線方向に深さの情報を求めた結果であるが、これは次の3とも、また次のセクションで述べるが、1のリアルタイム処理とも大きく相反する要素を求めることになった。3の手軽さとは、ソフト、ハード両面で研究者が可視化環境を構築しやすいことを意味している。この点から、立体視は大仰な又は高価な装置ではなく、通常のPCレベルで可能な裸眼立体視の手法を採用することとした。またソフトウェアも、自由に配布が可能なフリーソフトウェアOpenGLをベースにしたライブラリとそれに適応したビューアーを新たに構築することとした。以下のセクションで1、2、3を満たす、裸眼立体視によるリアルタイム3次元可視化システムの詳細について述べる。

2 システム構成

図1は全体のシステム構成図である。NICTにあるスーパーコンピューターが常時地球磁気圏の3次元シミュレーションを行っているが、その結果をWeb用の可視化データと共に、3次元可視

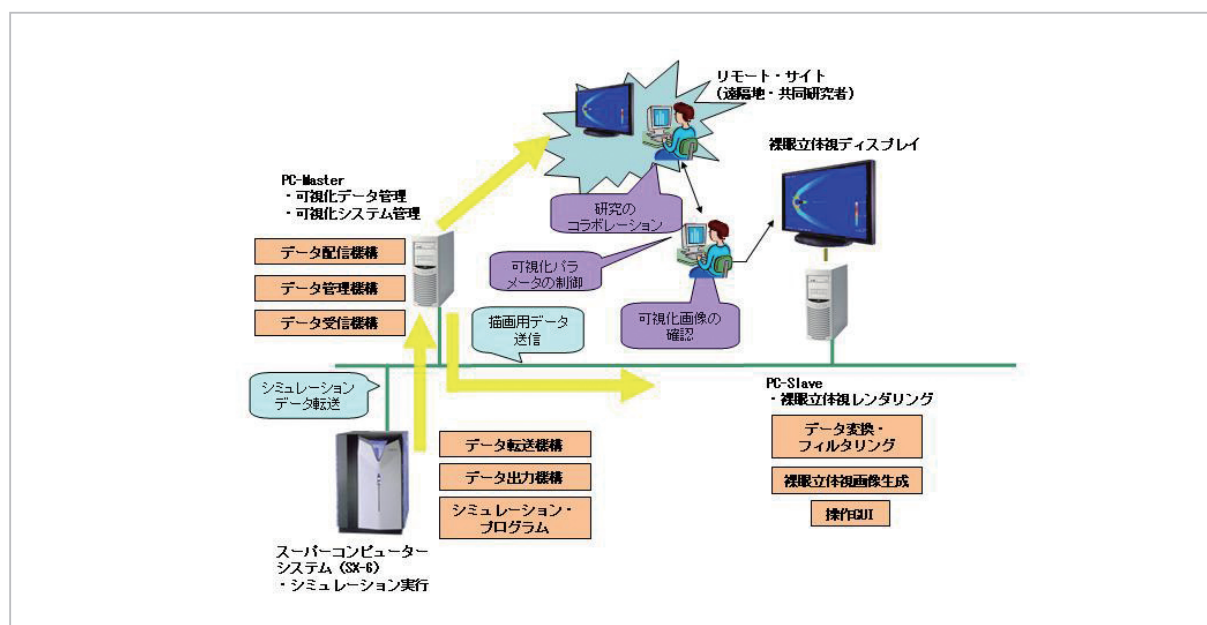


図1 リアルタイム3次元可視化システム構成

化用にシミュレーションデータを出力し、PC-Masterへ転送する。このPC-Masterではデータを受信し、シミュレーションデータと可視化に必要なライブラリとビューアーの管理を行っている。ユーザはPC-Slaveを用意し、必要なソフトウェアをPC-Masterよりダウンロードすることにより可視化環境を構築できる。シミュレーションデータはWeb上で公開されている2次元可視化画像と同様に約1分ごとに出力されている。

データの選択肢には目的別にモードがOn-line, Off-lineの2種類用意されている。前者は自動的に最新のデータをリアルタイムにダウンロードし、最新の画像が描画されるモードである。視点や図種、可視化パラメータの変更はPC-Slaveで可能で、On-lineモードにおいても直前のパラメータの変更が最新データで有効となる。後者はPC-Masterで用意されているデータベースの中から、興味のあるデータを自らがダウンロードして解析に用いることを想定したモードである。時系列データを選択した場合、ユーザが設定した可視化パラメータにより最終的に動画を作成することも可能である。このOn-line, Off-lineモードの選択肢と、後述の立体視と標準描画の切り換えがこのシステムの大きな特徴と言える。

2.1 裸眼立体視

ここで述べる可視化ライブラリとビューアーは通常のディスプレイでも正常に表示できるが、対応する機種 of ディスプレイがあれば、眼鏡などの装置を必要としない、いわゆる裸眼立体視が可能である。裸眼立体にも手法が幾つかあるが、ここではパララックスバリア法を採用した。立体視を行うには1視点の場合、右目、左目用に異なる二つの画像が必要である。それらの画像を分離するために、これまでは例えば偏光眼鏡やシャッター付き装置を用いていたが、この手法は、ディスプレイの前にスリットがあるバリアを置き、そのスリットで右、左目用画像を分岐させるものである。短所としては、バリアがあるために画像が暗くなること、一画面を複数のフレームに分けるので通常の場合1フレーム当たりの解像度が下がること、また右左用の画像がそれぞれに入る視点に限られていることがあげられる。我々は、これらの問題を解決している次の2機種を採用した。一つ

は個人解析用に1視点のノート型PCで、 1024×384 のピクセル数を持つ2枚の画像(標準ディスプレイ時 1024×768 ピクセル)が必要であるが、電気信号により先に述べたバリアをON/OFFが可能であり、通常のディスプレイとしても使用できる。また、複数の研究者が同時に見ることができ機種として、7視点22インチディスプレイと制御用PCを採択した。これには1枚 1646×800 ピクセルの画像が7枚必要となり、一枚当たりの解像度は通常のディスプレイと大きくは変わらない(ディスプレイ全体では、 3840×2400 ピクセル)。

2.2 3D-gridding

シミュレーション結果が描画されるまでには、主にデータ転送、前処理(3D-griddingとスムージング)、可視化の3段階に分けられる。シミュレーションデータは約1分ごとに更新されるため、これら一連の処理は1分以内に行われる必要がある。データ転送はネットワークに依存し、また可視化も適当な質と図種を決めると、最低の所要時間が決まる。さらには立体視を可能にするため、同じタイムステップで1視点で2枚、7視点で7枚の画像が必要になる。そこで我々は前処理部分の3D-griddingで高速化を図った。

MHDシミュレーションコードは、地球磁気圏の構造に合わせた変形球座標を用いており、必要な部分に高解像度のメッシュ数を配置しているために構造格子ではあるが、格子間隔は非一様である[2]。前処理とはこのシミュレーションデータを一様なカーテシアン座標に物理量(ここではプラズマ圧力 $p(i, j, k)$ ($i=1-40, j=1-58, k=1-56$)と磁場 $B(i, j, k)$)をマッピングして、 $p(x, y, z)$ と $B(x, y, z)$ を求めることである。しかし $x(i, j, k)$, $y(i, j, k)$, $z(i, j, k)$ が不規則に分布していることから、sortingなどの方法を用いるとこの部分でかなり時間を消費することが予想される。そこで我々はlook-up tableを用いてあらかじめ座標の対応をつけ、tri-linear interpolation filterを用いて物理量のマッピングを行うことにより、前処理部分の高速化を可能にした[3]。表1に、可視化用カーテシアン格子数とマッピングに要する時間、look-up tableのメモリを記す。

表1 可視化用格子数とマッピング所要時間

3D mapping time

from Tanaka's grid -> to uniform rectilinear grid,
CPU Intel Pentium 4, 3GHz, 1GB RAM
Interpolator: tri-linear filter with look-up-table

Output grid size	Whole grid mapping time	Look-up-table size in memory
64 ³	0.017 sec	3.1 MB
100 ³	0.065 sec	11.7 MB
128 ³	0.15 sec	24.5 MB
150 ³	0.22 sec	39.5 MB
200 ³	0.55 sec	93.7 MB
256 ³	1.2 sec	196.6 MB

3 GHz の CPU 性能を持つ PC を使用した場合であるが、256³ の高解像度でもマッピングには 1.2 秒の所要時間で処理できることが分かる。また標準的な描画範囲として、 $x = [-15, 40] R_e$, $y = [-40, 40] R_e$, $z = [-45, 40] R_e$, (ここで中心位置 $x = y = z = 0$ は地球、 x は太陽-地球方向、 z はこれに直交する南北方向、 y は x , z に直交する方向、 R_e は地球半径) に対応した look-up table を備えている。Off-line モードでは任意の描画範囲に対して look-up table を作成することが可能である。

2.3 ソフトウェア構造と図種内容

図 2 はソフトウェア構造を表しており、赤線で囲まれた箇所がコア部分である。最下段には基本的な可視化用言語 OpenGL があり、そのライブラリである VTK 4.2[4] でプログラミングを行っている。シミュレーションデータフィルタリングレ

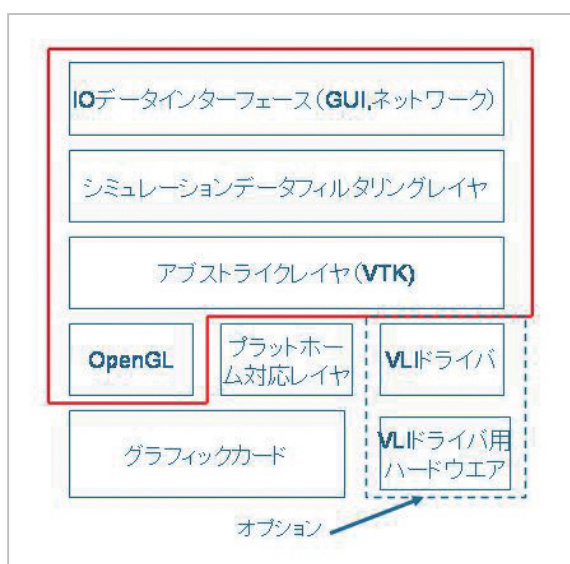


図2 ソフトウェア構造

イヤは先に述べた前処理部分である。最上段の IO データインターフェースは、データの読み込み、保存、送信(PC-Master のみ)、ユーザインターフェース(GUI、ビューアー)を含む。プラットフォーム対応レイヤは、裸眼立体視対応ディスプレイに適應させるためのハードウェア依存部分であり、例えば装置が必要な偏光方式やシャッター方式の立体視もこの部分の改正だけで対応させることができる。グラフィックカードは可視化処理をより高速にするため、また点線部分はより高品質のレンダリングを行うためのオプションであり、後から付加することができる。OpenGL と VTK はフリーソフトウェアであり、これらを用いたプログラムや赤線部分のその他のプログラムは本研究のために開発されたため、コア部分については自由に配布が可能になっている。

可視化可能な図種について述べる。通常の圧力や密度などのスカラー場と磁場や速度などのベクトル場を扱うことができる。スカラー場については、ray-casting 法と texturing 法による volume rendering, ray-casting 法と marching-cube 法による iso-surface rendering, x-y, y-z, z-x 平面の color slices とそのコンビネーションがあげられる。一般的に ray-casting の方が高い質の可視化ができるが、その分時間を要する。またスムージングは高速 3D Gaussian filter を用いている。3次元ベクトル場は、磁力線や流線とそこにスカラー場のカラーコンターをマッピングすることができる。さらに図の説明やカラーバー、タイムスタンプ、描画範囲を表す境界領域を記すことができる。図 3 は、プラズマ圧力の volume rendering とそのカラーコンターをマッピングした磁力線、また x-z 面の color slice を描画したものである。

先に述べたように、これらは On-line/Off-line モードでの切り換えにより、リアルタイム可視化と任意のデータの解析ができ、Off-line モードではダウンロードした時系列データを元に可視化した結果を動画にすることが可能である。また 1 視点ディスプレイでは stereo モードの切り換えにより裸眼立体視と標準ディスプレイの両方で見るることができる。

最後に全体の処理時間の見積りを行う。シミュレーションデータは 2 MByte でスーパーコンピ

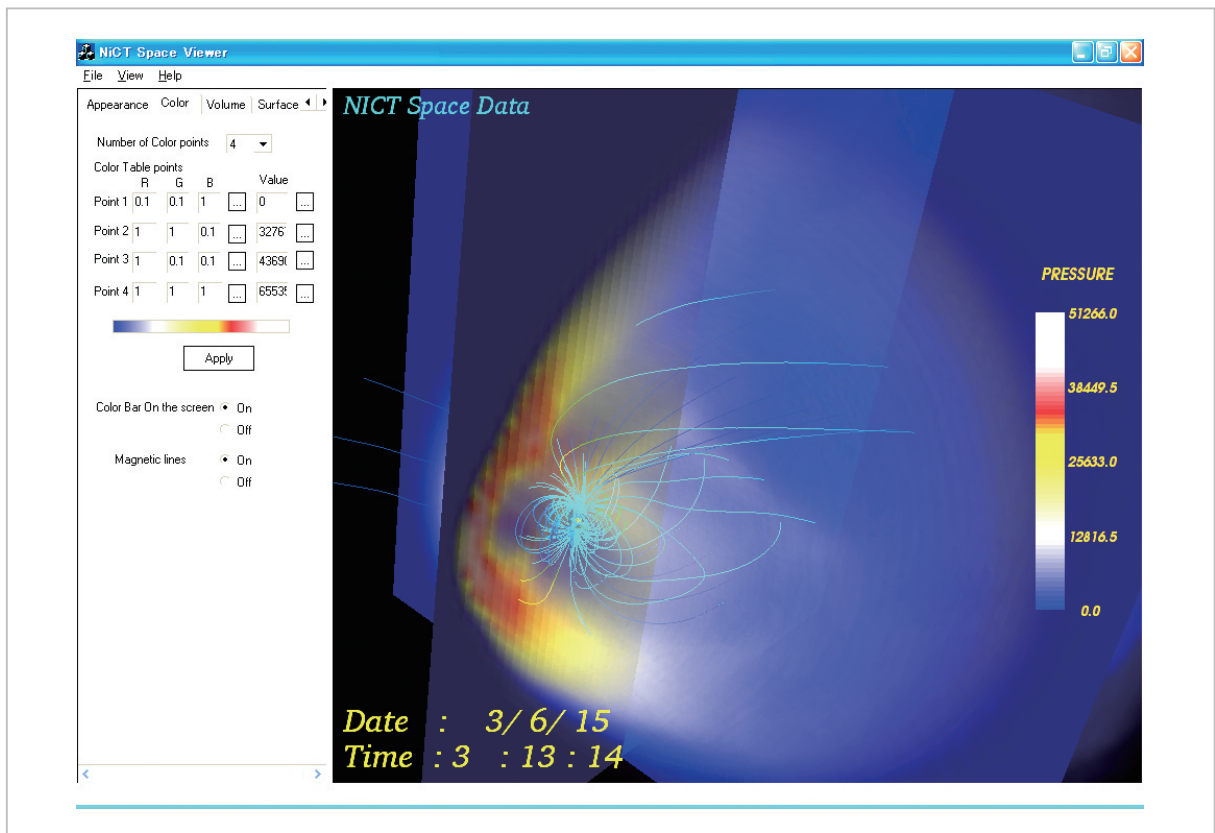


図3 地球磁気圏のプラズマ圧力と磁力線の3次元可視化結果

ユーザーから PC-Master への転送時間は数秒以内、PC-Master から PC-Slave へは通常のネットワークでオーバーヘッドを考慮しても 10 秒程度と見積もれる。データ前処理部分は 256^3 でも 1.2 秒程度なので、データ転送と前処理で、およそ 15 秒程度と見積もれる。可視化を 45 秒以内、7 視点の場合は 1 フレーム 6 秒以内に収めれば、全体で 1 分以内に可視化処理が可能になる。品質との trade-off になるが、可視化格子数が 64^3 で代表的な texturing による volume rendering と磁力線の重ねた描画で、リアルタイム処理が可能になることを確認している。

3 むすび

我々は、裸眼立体視によるリアルタイム宇宙天気シミュレーターの 3 次元可視化システムを開発

した。リアルタイム処理が必要なため、3D-gridding というデータマッピングに look-up table を採用する方法で高速化を図り、レンダリング手法によるが、1 分ごとのデータ更新に対応するシステムを構築して、ほぼバーチャルな 3 次元地球磁気圏がリアルタイムで立体で再現することが可能になった。

また、我々が開発したソフトウェアは自由配布が可能であり、多くのシミュレーション研究者が自由にダウンロードすることにより研究に役立てられると期待できる。

本研究は、NICT において 2004-2005 年に行われた。本研究について、適切な研究開発環境を与えていただいた NICT 増子治信首席研究員と電磁波計測部門熊谷博部門長、また激励頂いたシミュレーターグループの小原隆博グループリーダーに感謝する。

参考文献

- 1 M. Den, T. Tanaka, S. Fujita, T. Obara, H. Shimazu, H. Amo, Y. Hayashi, E. Nakano, Y. Seo, K. Suehiro, H. Takahara, and T. Takei, "Real-Time Earth Magnetosphere Simulator with 3-Dimensional MHD Code", Space Weather Journal, in press.
- 2 M. Den, T. Kuwabara, T. Ogawa, T. Tanaka, I. Goncharenko, and H. Amo, "A Glassless Stereoscopic Visualization System for 3D MHD Real-Time Earth's Magnetosphere Simulator", Journal of Plasma Physics, in press.
- 3 T. Tanaka, "Finite volume TVD scheme on an unstructured grid system for three-dimensional MHD simulation of inhomogeneous systems including strong background potential fields", Journal of computational Research, Vol.111, pp. 381-389, 1994.
- 4 W. Shroeder, K. Martin, and Lorensen, "The Visualization Toolkit", Third Edition. Publ. Pearson Education Inc., 2002.

でん みつえ
田 光江

核融合科学研究所教授(元電磁波計測部門シミュレーターグループ主任研究員) 理学博士
宇宙物理

くわぼらたくひと
桑原匠史

アドバンスソフト株式会社技術第1部研究員(元電磁波計測部門シミュレーターグループ技術員) 博士(理学)
磁気流体力学数値実験



おがわともや
小川智也

電磁波計測部門シミュレーターグループ専攻研究員 博士(理学)
惑星間空間シミュレーション

たなかたかし
田中高史

九州大学教授(元電磁波計測部門シミュレーターグループリーダー) 理学博士
地球物理



イゴール ゴンチャレンコ

株式会社スリーディー研究部門リーダー 理学博士
バーチャルリアリティ、3D CG、ロボット工学

あもひろよし
天羽宏嘉

株式会社日本電気主任 学術博士
プラズマ物理