

11-NA06

MHD ダイナモシミュレーションとその可視化

陰山 聡 (神戸大学)

概要 天体磁場の起源である磁気流体ダイナモ機構の理解を目指した計算機シミュレーションとその出力データを効果的に可視化する方法について研究を進めた。今年度後半では、没入型バーチャルリアリティ装置を利用した 3 次元データの可視化手法の開発とバーチャルリアリティ空間の内部に没入しながら可視化アプリケーションを切り替えることを可能にするアプリケーションランチャの開発を行った。また、インヤン格子に基づくダイナモシミュレーションコードに、マルチグリッド法を使った楕円型方程式のソルバを組み込み、そのテストを行った。

1. 研究の目的と意義

地球やその他の惑星、太陽など、多くの天体はそれぞれ固有の磁場を持つ。これら天体磁場は、それぞれの天体内部にある電気伝導性の流体（液体金属やプラズマ）が対流運動し、その対流の運動エネルギーを磁場のエネルギーに変換することで生成・維持されている。電気伝導性の流体は磁気流体力学（Magnetohydrodynamics）によって記述され、その基本方程式は MHD 方程式と呼ばれる。MHD 流体が対流をエネルギー源として自分自身で発電し、磁場を生み出すこの物理機構は MHD ダイナモと呼ばれる。MHD ダイナモを理解するために、MHD 方程式を数値的に解く MHD シミュレーションが有力な研究手段となっている。

地球磁場は一種の磁気シールドとして宇宙から来る高エネルギー荷電粒子から地表の生物を守っている。また太陽風という高速プラズマ流や、太陽からときおり放射される高エネルギー粒子から地球の大気を守るといった役割も果たしている。このように地球磁気は、地球環境にとって重要な役割を果たしているが、未来永劫安定した存在ではなく、短い時間スケールでは数年から数十年で、数十万年のスケールで見れば南北の地磁気極性が反転するほどの大規模な時間変動を持つことがわかっている。従って、地球磁場の詳しい生成機構を理解することは、地球環境の長期的な変動予測にとって必要不可欠である。また、太陽の磁場も MHD ダイナモ機構を通じて太陽内部の対流運動に

よって生成されており、その磁場が太陽表面に湧き上がり、太陽フレアなどの大規模な爆発現象を引き起こす結果、高エネルギー粒子の放出などによって文明社会に直接的な影響を与えている。従って太陽磁場の起源解明も、よく知られた太陽の 11 年（22 年）周期の謎を解くという純粋に科学的興味に加えて、社会的な重要性が高い。

我々はこれまで主に地球磁場の生成機構を理解するための MHD シミュレーションを地球シミュレータを用いて行ってきた。大規模な並列シミュレーションの結果、コイル状電流や帯状流など、新しい MHD 構造の発見に成功した。これらの構造をさらに深く理解するためには、シミュレーションモデルの改良と最適化が必要である。

本研究のような大規模 3 次元 MHD シミュレーションでは、磁場と流れ場という二つのベクトル場と、その相互作用を同時に可視化・解析する必要があるため、通常の可視化方法では不十分である。そこで、バーチャルリアリティ技術を応用した 3 次元的な可視化技術など、新しい可視化技術の開発を進めることも本研究の目的である。

中間報告では、MHD コードの最適化に関して報告したので、今回の報告では、それ以外の部分に重点を置いて報告する。

2. 当拠点公募型共同研究として実施した意義

(1) 共同研究を実施した大学名

東京大学

(2) 共同研究分野

超大規模数値計算系応用分野

(3) 当公募型共同研究ならではの事項など
共同研究者として東京大学情報基盤センターの片桐孝洋博士に入っただき、コードのチューニングに関する様々なアドバイスをいただくことができた。チューニングの専門家に、初歩的なことから遠慮無く尋ねることが出来たのは大変ありがたいことであった。

3. 研究成果の詳細と当初計画の達成状況

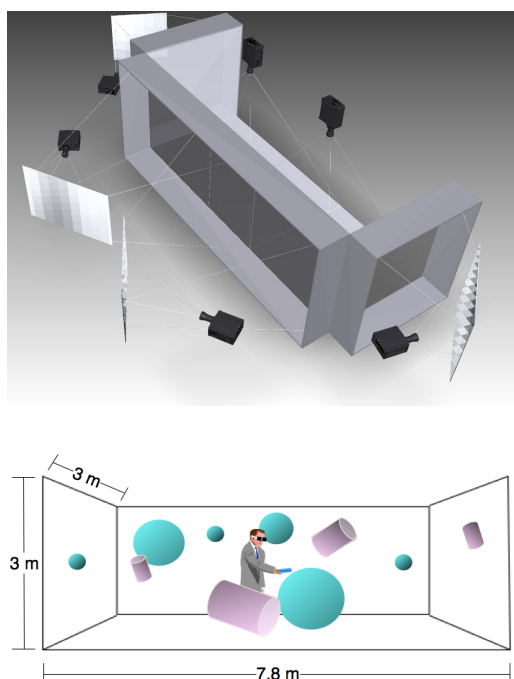


Fig. 1: 神戸大学統合研究拠点に導入された没入型バーチャルリアリティ装置『 π -CAVE』の構造とサイズ。

(1) 研究成果の詳細について

没入型（あるいは CAVE 型）と呼ばれる方式のバーチャルリアリティ（VR）技術は、大規模な計算機シミュレーションデータの出力結果を効果的に解析するための手段として大きな期待が持たれている。

我々は、没入型 VR 装置を用いた VR 可視化ツールの開発を 10 年以上続けており、その多くを VFIVE という名前のソフトウェアに集約してきた。また、

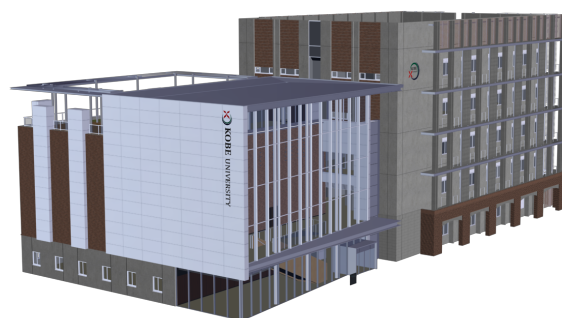


Fig. 2: CAVE 空間中でのアプリケーションランチャ Multiverse におけるデスクトップ環境。実在する建物の CAD データを取り込み、仮想 3 次元空間をつくる。ユーザは自由にこの空間を歩き回ることができる。任意の場所でワンドのボタンを押すと仮想タッチパネルが目の前に現れる。

最近では VFIVE のフレームワークに収まらない、新しい種類の CAVE 用可視化プログラムも積極的に開発している。

このような複数の CAVE 用可視化アプリケーションを組み合わせ、駆使することで、MHD ダイナモシミュレーションの計算結果に潜む物理を抽出することが本研究の目的であるが、その前に、CAVE 空間の中に立つユーザが、複数の VR 可視化アプリケーションを次々と任意の順番で切り替えて利用する環境を整備する必要があった。

なお、本研究には H23 年 6 月末に、神戸大学統合研究拠点に導入された大型 CAVE 装置 π -CAVE を用いた。 π -CAVE は 4 面のスクリーンから構成される直方体型形状をもつ (Fig. 1)。正面と床面のスクリーンサイズは 3m×7.8m、左右の側面は 3m×3m である。約 1 万ルーメンの輝度を持つ 6 台のステ

レオプロジェクターによって映像が投影される。トラッキングシステムは光学式の無線方式であり、コントローラとして複数のボタンとジョイスティックをもつワンドを一台用いる。

通常の CAVE では、複数のプログラムを切り替えて表示するには、毎回、CAVE の部屋の外にある計算機から（現在表示している）プログラムを終了させ、次の CAVE プログラムを立ち上げる操作を行う必要があり、不便である。この点を改良するために、Multiverse（マルチバース）と名付けた一種のアプリケーションランチャを開発した。Multiverse を立ち上げると、ユーザは CAVE の VR 空間中に没入しながら 3 次元のかつ対話的にアプリケーションを切り替えることができる。また、切り替えられて表示される複数の VR 可視化アプリケーションの見た目と操作感（ルックアンドフィール）は統一するようにした。従って Multiverse は一種のソフトウェア環境とも言える。

Multiverse プログラム開始時に、体験者は実在する建物や周囲の景観などをオブジェクトデータとしてとりこんだ VR 世界に浮かんでいる (Fig. 2)。Multiverse プログラムでは、この VR 世界を『World』と呼んでいる。World には、 π -CAVE の実物大模型も存在する。手元のコントローラ（ワンド）のジョイスティックを操作するか、あるいは、単に進行方向に手を伸ばすことで、World 空間の体験者は好きな方向に「飛んで」移動することができる。

ボタンの一つを押すと目の前にタッチパネルが現れ、そのパネルをワンドで触ることで、メニューが選択される。アプリケーションの切り替えもこの VR タッチパネルを通じて行う。それぞれの可視化アプリケーションのコンテンツは (3 次元空間中に浮かぶ) 2 次元の動画で知ることができる。特定の可視化アプリケーションを選択すると、その瞬間に World 空間から対応する VR 可視化アプリケーションの世界に移動する。われわれはこの仮想世界を『Universe』と呼んでいる。

Multiverse に組み込んだ可視化アプリケーションの一つに VFIVE がある。VFIVE は我々が開発した CAVE 装置用の可視化ソフトであり、現在では無

償でソースコードを配布している。VFIVE は VR 空間中でスカラー場とベクトル場の対話的可視化を行うための汎用ソフトなので、様々なデータに使えるが、我々が一番活用しているのは MHD シミュレーションデータの可視化である。ここでは



Fig. 3: Multiverse 環境に取り込んだ VFIVE アプリケーションによる地磁気 MHD ダイナモシミュレーションの可視化のスナップショット。青い曲線は双極子型の磁力線を示す。3 次元的な磁針（コンパス）が複数分布し、その内の一つは常に手元にある。CAVE の室内を移動すると、手元の磁場の変化と共にコンパスの向きが変わる。

Multiverse に組み込んだ VFIVE による MHD ダイナモシミュレーションデータの可視化例について述べる。

Multiverse 環境の中で VFIVE による地磁気 MHD ダイナモシミュレーションデータの可視化アプリケーションを立ち上げると、Fig. 3 のようにまずはシミュレーション領域外部（地球外部）に視点が設定されて 3 次元データが表示される。手を伸ばして地球コア内部（シミュレーション領域内部）に入り込むと、VFIVE の対話的可視化解析が可能となる。

今年度新たに開発し、VFIVE に組み込んだ可視化機能として、流れに凍り付いた磁力線の可視化手法、TubeAdvecter がある。TubeAdvecter の基本的な機能と目的については前回の中間報告書で報告したので、ここではその後加えた改良についてまとめる。

TubeAdvecter では、理想 MHD 流体を仮定し、い

いわゆるキネマティックダイナモ近似に基づいて、流れ場に完全に“凍り付いた”磁力線の運動を 3 次元的に表示した。初期条件（初期の磁力線）を指定するには、ワンドを持った手を CAVE の VR 空間中で動かせばよい。これにより、自由な 3 次元

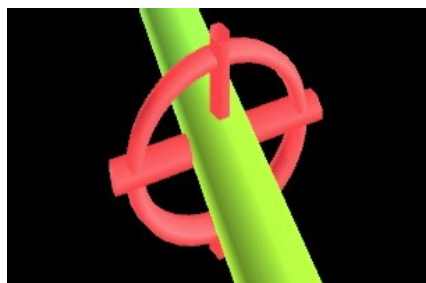


Fig. 4: 新たに開発した wTubeAdvector の拡大図。流れに凍り付いた磁力線（緑色）の周囲に wheel という物体を分布させる。Wheel のリングは時間的に半径が変化する。それは磁力線に垂直な方向の流れ成分を表す。4 本のスポークは回転する。それは磁力線周囲の回転成分を可視化している。

曲線形状を指定することができる。TubeAdvector による磁力線の運動と変形を見ることで、磁力線の引き延ばされる場所（それは即ち磁場の増幅される場所）を詳しく知ることができた。

ただし、正確に言えば、TubeAdvector では、磁力線が引き延ばされる場所の候補についてわかるだけで、実際にそこで磁力線の引き延ばしが起きているかどうかは不明であった。それは TubeAdvector で実装している可視化手法が本質的に磁力線の垂直方向の流れ成分を可視化するもので、磁力線に沿った方向の流れ成分については何も提示していないということに起因する。

そこで今年度の後半では、TubeAdvector の持つこの欠点を克服した新しい可視化ツールの開発を行った。この新しい可視化ツール wTubeAdvector では、磁力線に垂直な方向の流れ成分を可視化するために wheel と名付けた小さな物体を磁力線に沿って複数分布させた (Fig. 4)。

一本の wheel はリングと 4 本のスポークから構成される。リングの半径は時間的に変化する。その変化がその点における磁力線に垂直な速度成分

（正確には、磁力線に垂直な成分だけをとった 2 次元的発散の値）を示す。リングが縮みつつある部分は、周囲の流体が磁力線に向かって流れ込んでいることを示す、というわけである。

4 本のスポークはリングの面上にあり、常に互いに直交している。その相対的な位置は不変だが全体が磁力線を中心として回転する。その回転の速さと向きは、その位置における流れの渦度（の磁力線に平行な成分）を可視化している。つまり、磁力線を（タオルを絞るように）螺旋型に捻る流れ成分が周囲に存在すれば、スポークはその向きに回転するので、3 次元空間中でみると直感的に磁力線周囲の流れ構造を可視化することができる。

また、wheel 自体も磁力線の上を移動する。磁力線に沿って滑るように移動する wheel の移動速度が、その位置における流体の移動速度を可視化している。

このように wheel という比較的単純な構造を付加することで、流れ場に凍り付いた磁力線上（およびその周囲の）局所的な流れの情報を効果的に可視化することに成功した (Fig. 5)。

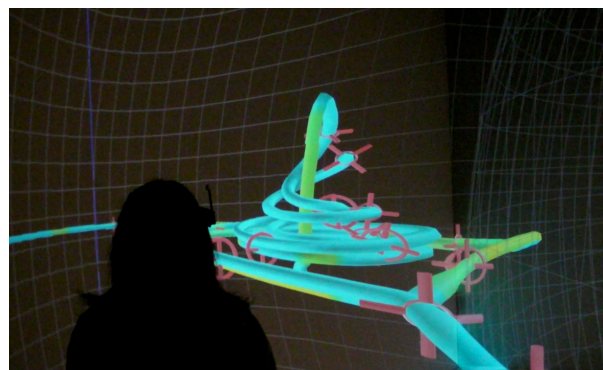


Fig. 5: wTubeAdvector を用いて MHD ダイナモシミュレーションデータを可視化している様子の一例。螺旋型の渦に磁力線が巻き取られ、引き延ばされている様子を 3 次元的に観察することが可能となった。

次に、インヤン格子に基づいた MHD コードへのマルチグリッド法の組み込みについて報告する。

マルチグリッド法を組み込む目的は二つある。一つは音波（磁気音波）モードに起因する CFL 条

件を緩和することで長時間積分を可能にすること、もう一つは計算領域外部の磁場を真空磁場として扱うことである。

現在の我々の MHD ダイナモコードでは基礎方程式として圧縮性 MHD 方程式を採用し、それを陽解法で解いている。圧縮性モデルを採用しているのは、MHD ダイナモ物理として圧縮性の効果を重視しているというわけではなく、むしろ逆で、音速に比べて流速が十分遅ければ（即ちマッハ数が十分小さければ）圧縮性の効果が物理的には無視できるであろうという流体力学的には当然のことを仮定している。圧縮性モデルでは音波モードを解かなければいけないが、（全てが局所的なおかげで）領域分割によって並列化が単純で効率的になるというメリットの方が大きい。これまでこの方法で数千から 1 万程度の並列数の MHD ダイナモシミュレーションを行ってきた。

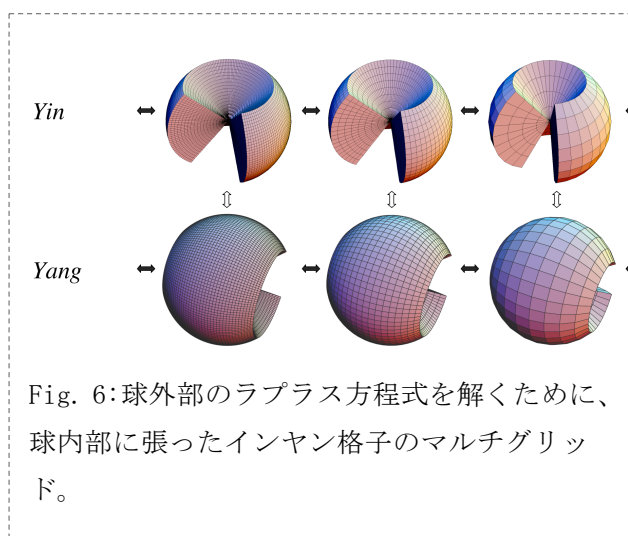


Fig. 6: 球外部のラプラス方程式を解くために、球内部に張ったインヤン格子のマルチグリッド。

しかしながら地球ダイナモや太陽ダイナモの様々な問題を解決するにあたり、これまで以上に長時間の積分を進める必要性が高まってきた。また、圧縮モデルにおける様々な無次元量の定義が（他のほとんどのモデルで採用されている）非圧縮モデルにおける無次元量の定義と違っている場合が多く、一つだけならまだしも複数のパラメータを同時に比較することが（その比較の意味を正しく解釈することが）難しくなってきたという事情もある。回転球殻領域内での MHD ダイナモシミュレーションモデルにおいて音波モードを落とす

方法としては Boussinesq モデル、anelastic モデル、低マッハ数近似モデル等があるが、いずれのモデルにおいても各時間ステップにおいて球殻領域内で楕円型の方程式を解く必要がある。インヤン格子上でのマルチグリッド法ソルバを開発する一つの目的がこれである。

もう一つの目的は、外部真空磁場モデルの取り込みである。現在のシミュレーションモデルでは、シミュレーション領域の境界面（球面）上で磁場が常に垂直になるという境界条件を採用しているが、これを改良するには、外部の磁場が真空磁場として、その磁場に滑らかに接続するというモデルに変更する必要がある。真空磁場はポテンシャル磁場であるので、球の外側領域でポテンシャル問題（ラプラス方程式）を解く必要がある。球の外側は MHD ソルバの対象外であるが、後に述べる方法によってやはりインヤン格子上のマルチグリッド法で解く。

上に述べた二つの理由から我々はインヤン格子上の MHD シミュレーションコードにマルチグリッド法を用いた楕円型方程式のソルバを組み込むことにした。今年度は、単位球（半径 1 の球）の外側領域でのポテンシャル問題を解くソルバの開発に注力した。以下それについて簡単にまとめる。

球座標 (r, θ, ϕ) をとる。 $r > 1$ で定義された関数 $f(r, \theta, \phi)$ がラプラス方程式の解であるとし、無限遠で $f=0$ とする。これが境界条件の一つになる。もう一つの境界条件として $r=1$ でのノイマン条件を与える。

$\zeta = 1/r$ という座標変換をするとこの問題は半径 1 の球 ($0 \leq \zeta \leq 1$) における楕円型方程式の問題になる。境界条件は $\zeta=1$ におけるノイマン条件と、もう一つは $f(\zeta=0, \theta, \phi)=0$ である。別の座標変換を採用すれば、変換後の方程式がやはりラプラス方程式になるが、数値計算上はメリットがないので、今は単純なこの変換を採用する。

次に球内部にインヤン格子を張る。普通、3 次元のインヤン格子手法では、二つの球面に挟まれた球殻領域に格子を張るが、ここでは、原点 $r=0$

までびっしりと格子を張る。原点近傍には格子が密集しているが、これは何の問題も起こさない。あとは通常のマルチグリッド法の手続きに従うだけである (Fig. 6)。いまのところまだ緩和にはヤコビ法、補間は線形という最も基本的な方法であるが、今後より高度化していく予定である。

Fig. 7 は、今回開発したインヤンマルチグリッド法による (球外部領域の) テスト計算の一例である。この場合は、テストとしてボイジャーによる観測から決めた境界条件を適用した。図中の曲線は磁力線ではなく、3 次元的に分布した磁気ポテンシャルのある断面上の分布である。

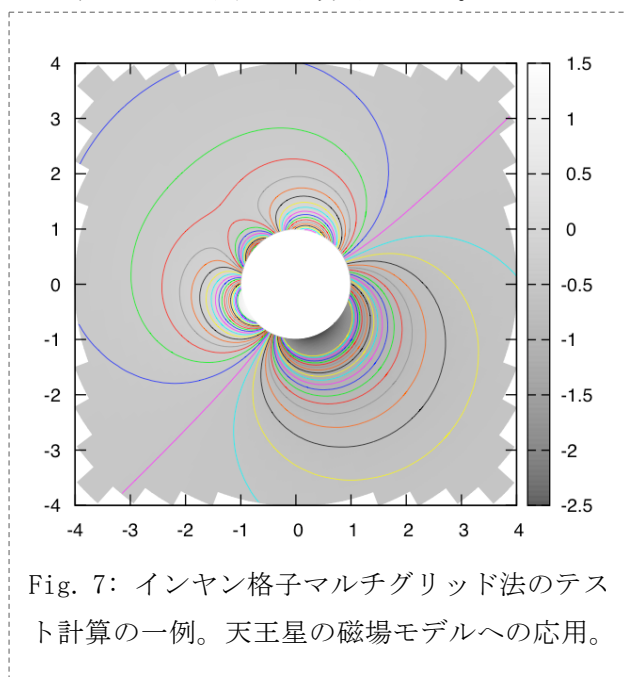


Fig. 7: インヤン格子マルチグリッド法のテスト計算の一例。天王星の磁場モデルへの応用。

(2) 当初計画の達成状況について

H23 年度の申請書に書いた計画では以下の 3 つの項目について研究を進めると記していた: (a) コードの最適化、(b) マルチグリッド法の組み込み、(c) 可視化手法の開発。

このうち (a) については中間報告書で述べたとおり、一定の成果を挙げたと考えている。しかし、まだ満足 of いくほどの性能が得られていないので、引き続き最適化を進める。(b) と (c) については、本報告書で述べたとおり、当初の計画以上の成果が得られたと考えている。

4. 今後の展望

今年度の研究により、MHD コードへのマルチグリッド法の組み込みに目処が立ったので、この方向でさらに開発を進める予定である。まずは、インヤン格子を用いた高速楕円型方程式ソルバの完成度を高める。そしてそれに基づいてシミュレーションモデルを根本的に変更する。具体的には音波モードの除去と真空磁場モデルの組み込みである。

可視化については平成 23 年度に π -CAVE という強力な 3 次元可視化装置が導入され、さらにその π -CAVE 装置を十分に活用するためのアプリケーション環境 Multiverse を完成させることができた。今後は、Multiverse の上で様々な可視化ツールを開発し、大規模シミュレーションが可能となったらその出力データをいつでも自由に解析できるような 3 次元的・対話的・没入的な可視化環境を整備していきたい。

5. 研究成果リスト

(1) 学術論文 (投稿中のものは「投稿中」と明記)

- Scientific Visualization of Plasma Simulation Results and Device Data in Virtual-Reality Space, H. Ohtani et al., IEEE Transactions on Plasma Science, 39, 2472-2473, 2011
- Integrated Visualization of Simulation Results and Experimental Devices in Virtual-Reality Space, H. Ohtani et al., plasma Fusion Res., 6, 240627-1-4, 2011
- Virtual Reality Visualization of Frozen-in Vector Fields, Kaori Murata and Akira Kageyama, Plasma Fusion Res., 6, 2406023-1-5, 2011
- VR Juggler による 3 次元可視化, 目野大輔、陰山 聡, スーパーコンピューティングニュース, vol.13, 34-45, 2011
- Formation of sheet plumes, current coils, and helical magnetic fields in a spherical magnetohydrodynamics, Takehiro Miyagoshi, et al., Phys.

- Plasmas, vol.18, 072901-1-10, 2011
- スーパーコンピュータとバーチャルリアリティで探る地磁気の起源, 陰山 聡, 計算力学講演会 論文集, 2011
 - 没入型 VR システム π -CAVE とアプリケーションランチャーの開発, 山浦優気、他、第 16 回日本バーチャルリアリティ学会大会論文集, 69-72, 2011
 - R. Horiuchi, et al., “Effective resistivity model for collisionless driven reconnection and its role in a multi-hierarchy system”, submitted to Comput. Sci. Disc., (2012).
 - Y. Masada, “Impact of MHD turbulence on thermal wind balance in the Sun”, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society Letters, Vol. 411, Issue 1, pp. L26-L30
 - J. Matsumoto, Y. Masada, E. Asano, and K. Shibata, “Special Relativistic Magnetohydrodynamic Simulation of a Two-component Outflow Powered by Magnetic Explosion on Compact Stars”, The Astrophysical Journal, Volume 733, Issue 1, article id. 18 (2011)
 - H.R. Takahashi and Y. Masada, “Stability of MRI-turbulent Accretion Disks”, The Astrophysical Journal, Volume 727, Issue 2, article id. 106 (2011)
 - H.R. Takahashi, T. Kudoh, Y. Masada, and J. Matsumoto, “Scaling Law of Relativistic Sweet-Parker-type Magnetic Reconnection”, The Astrophysical Journal Letters, Volume 739, Issue 2, article id. L53 (2011)
 - J. Matsumoto, Y. Masada, and K. Shibata, “Effect of Interacting Rarefaction Waves on Relativistically Hot Jets”, Accepted for publication in ApJ
- (2012arXiv1204.5697M)
- K. Kotak, T. Takiwaki, Y. Suwa, W. I. Nakano, S. Kawagoe, Y. Masada, S. Fujimoto, “Multimessengers from core-collapse supernovae: multidimensionality as a key to bridge theory and observation”, accepted by Advances in Astronomy (2012arXiv1204.2330K).
- (2) 国際会議プロシーディングス
- Immersive Visualization in π -CAVE, Akira Kageyama et al., Proc. Intern. Symposium on Disaster Simulation & Structural Safety in the Next Generation, 39, 287-289, 2011
 - Application Launcher for CAVEs, Akira Kageyama et al., Proc. Intern. Conf. on Modeling and Simulation Technology, 286-290, 2011
 - J. Matsumoto, Y. Masada, E. Asano and K. Shiabta, “Special relativistic magneto-hydrodynamic simulation of two-component outflow powered by magnetic explosion on compact stars”, Advances in Plasma Astrophysics, Proceedings of the International Astronomical Union, IAU Symposium, Volume 274, p. 220-223
- (3) 国際会議発表
- Akira Kageyama, Virtual Reality Visualization of Geophysical Data, Intern. Union Geodesy & Geophys (IUGG), Invited Talk, 2011
 - Akira Kageyama, Immersive Visualization in CAVE, ISSS-10 (The 10th International School/Symposium for Space Simulations), Invited Talk,

2011

- Akira Kageyama, Application Framework for Immersive Virtual Reality Visualizations, International Conference on Numerical Simulation of Plasmas (ICNSP), 2011
- Akira Kageyama, Application Launcher for CAVEs, International Conference on Modeling and Simulation Technology (JSST 2011), 2011
- Akira Kageyama, Our recent trials of visualization of flows, waves, and fields, International workshop on scientific visualization, Kyoto, 2011
- Akira Kageyama, Immersive Visualization in π -CAVE, Intern. Symposium on Disaster Simulation & Structural Safety in the Next Generation (DS'11), 2011

(4) 国内会議発表

- 陰山 聡, スーパーコンピュータとバーチャルリアリティで探る地磁気の起源, 計算力学講演会, 2011
- 陰山 聡, バーチャルリアリティ可視化ツールの開発と統合, 日本地球惑星科学連合 2011 年度連合大会, 2011
- 陰山 聡, 神戸大学統合研究拠点の可視化装置『 π -CAVE』, 神戸大学統合研究拠点設置記念・システム情報学研究科 1 周年合同シンポジウム
- 陰山 聡, 没入型バーチャルリアリティ装置による シミュレーションデータの可視化, 第 39 回可視化情報シンポジウム
- 陰山 聡, 地磁気シミュレーションと バーチャルリアリティ可視化, SS 研 HPC フォーラム 2011, 招待講演
- 陰山 聡, スーパーコンピュータによる 計算機シミュレーションのバーチャルリアリティ可視化, 第 21 回インテリジェ

ント・システム・シンポジウム (FAN 2011), 特別講演

- 陰山 聡, スーパーコンピュータとバーチャルリアリティで探る地磁気の起源, 日本機械学会 第 24 回計算力学講演会 (CMD2011), 特別講演, 2011
- 陰山 聡, スーパーコンピュータで挑む地磁気の謎, 地球電磁気・地球惑星圏学会 (SGEPSS) 2011 年公開イベント, 招待講演, 2011
- 陰山 聡, MHD シミュレーションと可視化, Plasma Conference 2011 (PLASMA2011), 招待講演, 2011
- 陰山 聡, 地震津波波動伝播の二つの可視化手法: VR 没入可視化と監視カメラ法, HPCI 戦略プログラム 地震津波災害軽減課題 ワークショップ, 2011
- 陰山 聡, スーパーコンピュータとバーチャルリアリティによる地磁気研究, 平成 23 年度 実験・実習技術研究会 招待講演 (特別講演), 2011
- 政田洋平, 太陽の差動回転と乱流, 天文学を中心とした理工学での乱流研究会 (招待講演), 東京大学生産技術研究所, 2011
- 政田洋平, 若い太陽の表面磁場構造と太陽磁場の進化史, 太陽の磁氣的活動と生命の誕生 -Faint Young Sun Paradox 研究会- (招待講演), 国立天文台, 2011

(5) その他 (特許, プレス発表, 著書等)

- プラズマ数値計算, 陰山 聡, 第 50 回プラズマ若手夏の学校 テキスト, 2011
- パリティ 2011 年 12 月号, 政田洋平, かに星雲からの強力なガンマ線フレア