

10-MD03

## 次世代ジオスペースシミュレーション拠点の構築

荻野竜樹 (名古屋大学)

概要：太陽から地球に至るジオスペース環境において生起する様々なプラズマ・大気非線形現象を、東京大学の HA8000、名古屋大学の FX1 と HX600、九州大学の SR16000 を用いた大規模シミュレーションにより解明することを目的とする。超高解像度の磁気圏グローバル MHD シミュレーションにより従来の解像度では再現できなかった境界層渦を再現すると共に、大規模粒子シミュレーションにより KH 不安定性の渦構造や無衝突衝撃波の波面構造に対して電子スケールの不安定性が寄与していることを明らかにした。更に、AMR 法を適用した超並列電磁粒子コードを世界に先駆けて開発すると共に、超並列ブラソフコードを様々なスカラ型 CPU に対してチューニングを行い、どのシステムにおいても実効効率 10%以上を達成した。

### 1. 研究の目的と意義

太陽から地球に至るジオスペース環境の変動を理解することは、人類の活動が宇宙へと拡大しつつある今日、極めて重要な課題である。本研究の大きな目的は、ジオスペースで生起するプラズマと大気の大規模非線形現象を解明し、宇宙環境変造の因果関係を理解するとともに、数値宇宙天気予報の基礎的技術を確立することである。人類の活動に影響を与えるジオスペースの変動現象としては、突発的な磁気嵐やオーロラの爆発現象、放射線高エネルギー粒子生成、高エネルギー粒子線による人工衛星の誤作動、電離圏擾乱による電波通信障害などが挙げられる。これらの現象は、電磁気圏プラズマのグローバルな対流循環、メソスケールでの物質の突発的な異常輸送（例えば境界層で生起する渦乱流や磁場構造再形成）及び、電子・イオンが粒子として振舞うミクロスケール現象（粒子加速や加熱）が複雑に結びついており、マルチスケール結合過程である。これらの広範囲な時空間の大規模非線形現象を解明するために、グローバル現象を扱う MHD (Magnetohydrodynamics) / 流体モデル、ミクロ現象を扱う運動論（粒子 / ブラソフ）モデル及び、両者の中間（メソ）スケール現象を扱う流体 + 運動論のハイブリッドモデルを統合した大規模マルチスケールシミュレーションが不可欠である。本研究は、ジオスペース研究分

野の大規模シミュレーション研究者と計算機科学と情報関係研究者が連携して、これらのコードを最新のスーパーコンピュータの能力を最大限に活用できるように並列化・最適化するとともに、大規模シミュレーション環境の構築と利活用を意図した共同研究拠点を形成することを目的とする。

名古屋大学太陽地球環境研究所は、太陽から地球に至るジオスペース環境の変動を研究する全国共同利用研究施設であり、ジオスペース環境変動の地上観測及びスーパーコンピュータによるジオスペース大気・プラズマ変動の計算機シミュレーションを、国内外の共同利用研究者とともに推進している。当研究所を中心機関として、太陽地球系科学国際協同研究プロジェクトである「宇宙天気・宇宙気候研究（通称：CAWSES）」の一期目（2004-2008）に続いて二期目（CAWSES-II (Climate And Weather of the Sun-Earth System - II) Towards Solar Maximum : 2009-2013) が実施されている。本研究の1つの意義は、宇宙天気・宇宙気候変動の物理を解明し、数値予測へ適用するための基礎的技術を確立することにある。そのために、MHD / 流体・運動論（粒子 / ブラソフ）・ハイブリッドという全く異なる方程式系および数値解法を持つシミュレーションコードを、次世代スーパーコンピュータを含む超並列計算機にお

いて、どのアーキテクチャにおいても高い実効効率（10%以上、できれば20%以上）を達成するための超並列計算技術の構築を目標とする。

## 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・名古屋大学・九州大学

### (2) 共同研究分野

超大規模数値計算系応用分野・超大容量ネットワーク技術分野・大規模情報システム関連研究分野

### (3) 当公募型共同研究ならではの事項など

近年のスーパーコンピュータは、スカラ型CPUによるクラスター型超並列計算機が主流となっており、これまでのベクトル型CPUによる並列計算機のように高い実効性能を達成することが容易ではなく、また並列数が格段に上がったために高い並列効率を達成することが容易ではないという2つの問題が生じた。特に大規模シミュレーションでは分散型スーパーコンピュータの使用が必要不可欠であるため、領域分割法などの様な並列化手法を用いるのがよいのか、Flat MPI (Message Passing Interface)とHybrid (MPI+自動並列)のどちらがよいのか、CPUコア数が千個以上ではどうか、そしてその理由は明確に理解できるのかなど多くの解明すべき問題がある。CPUアーキテクチャに

よりチューニングの手法が異なるため、これまで地球シミュレータなどのベクトル型CPUにおいて高い実効効率を誇っていたコードが、スカラ型CPUにおいては実効性能が低い例は少なくない。また並列化の問題に関しては、千個以上のCPUコアを用いた計算を実行できる環境が日本に数多く存在しないために、どのシステムにおいても並列化のスケラビリティが保障されるコードの開発が困難となっている。様々なCPU (x86, SPARC, POWER) 環境において千コア以上の並列度におけるベンチマークテストを行い、共通のチューニング手法・共通の並列化手法を見出すことが、様々なスーパーコンピュータシステムを使うことのできる学際大規模共同研究の大きな意義であると言える。

## 3. 研究成果の詳細

今年度は以下の4課題を実施した。

### ① ジオスペースの大規模流体シミュレーション

磁気圏グローバルMHDシミュレーションにおける空間解像度の不足が指摘されているため、本研究では高精細化された土星磁気圏のMHDシミュレーションを行った。GSM (geocentric solar magnetospheric coordinates) と呼ばれる直交座標系を用いており、太陽方向をx軸の正、夕方向をy軸の正、北向きをz軸の正にとっている。x軸の正

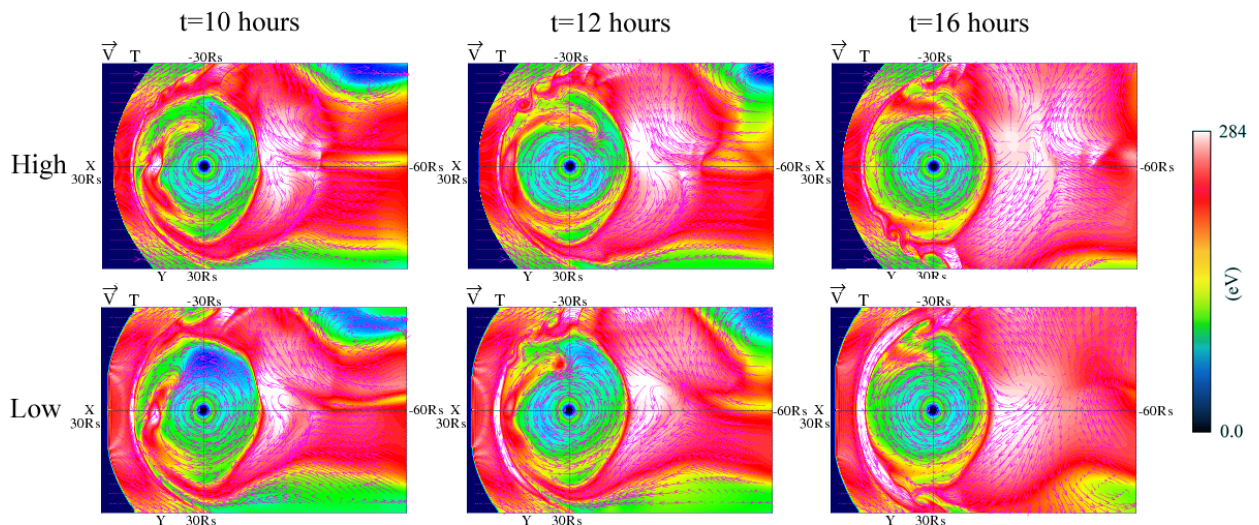


Fig. 1 高解像度3次元グローバルMHDシミュレーションで得られた土星磁気圏の赤道面(xy平面)におけるプラズマ温度、流れ。上図が今回のシミュレーション結果、下図が従来の解像度での結果。

の方向から太陽風を流し続ける。また今回の計算では  $xy$  平面に対して対称を仮定しており、計算領域は  $-60R_S \leq x \leq 120R_S$ 、 $-60R_S \leq y \leq 60R_S$ 、 $0 \leq z \leq 60R_S$  の直方体となる。ここで  $R_S$  は土星半径であり、 $60,400 \text{ km}$  である。格子間隔を今までのシミュレーションから  $1/3$  の  $\Delta x = \Delta y = \Delta z = 0.1R_S$  の均一格子としたので、シミュレーション空間の格子数は  $(n_x, n_y, n_z) = (1800, 1200, 600)$  となる。

Fig. 1 は、土星磁気圏におけるプラズマの温度を色で、プラズマの動きを矢印で示している。それぞれ  $t = 10, 12, 16$  時間における赤道面 ( $xy$  面) 上の結果を示しており、上図が高解像度 ( $0.1 R_S$ ) の計算結果、下図が従来の解像度 ( $0.3 R_S$ ) での結果である。図の中心から少し左側にある黒い点が土星である。図の左側から超音速の太陽風が吹いてきており、土星の固有磁場に衝突することで、衝撃波面が形成され、その波面との間に磁気圏の境目である磁気圏界面が形成される。

プラズマの動きを見ると、土星の高速自転に引きずられて、プラズマが周辺で共回転しているこ

とがわかる。この共回転プラズマが  $-y$  方向では、太陽風と逆向きのため、速度シアが大きく、波が立ち、渦構造が生成されやすい。また土星磁気圏の衛星観測により、シミュレーション結果と同じ場所 ( $-y$  方向) で渦構造が見つまっている。一方で、 $+y$  方向では共回転の向きと太陽風の向きが同じため、渦が起きないと言われているが、Fig.1 の  $t = 16$  時間における右側 (白い領域) からに向かってプラズマが動いている様子が高解像度、低解像度の結果からもわかる。これは尾部磁気リコネクションに伴うプラズマの流れであり、この流れが  $+y$  方向に侵入すると太陽風の向きと反対方向となり、速度シアが生まれる。この速度シアは  $-y$  方向と比べて小さく、更に KH (Kelvin-Helmholtz) 不安定性は数値的粘性効果により解像度に大きく依存するため、低解像度では再現できていなかったと考えられる。

### ③宇宙プラズマ中の乱流渦のシミュレーション

ケルビン-ヘルムホルツ (KH) 不安定の電磁粒子シミュレーションを行い、KH 不安定の非線形

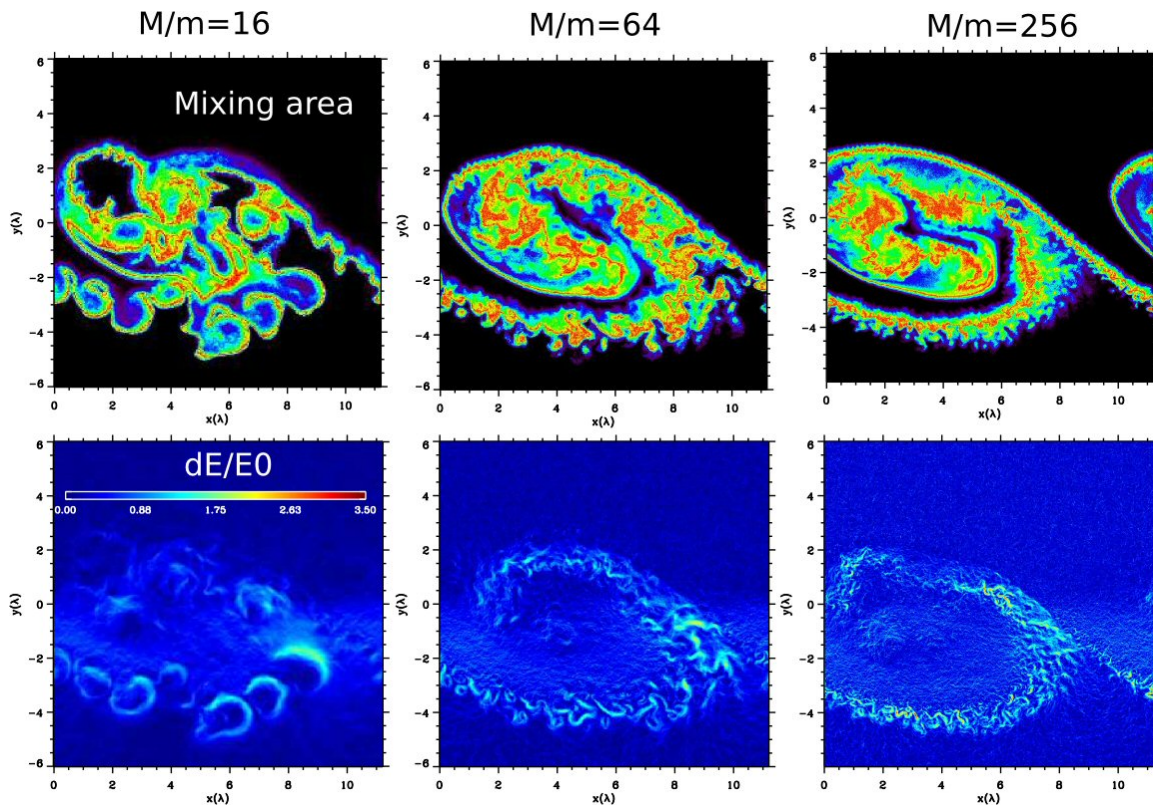


Fig. 2 異なるイオン-電子質量比 ( $M/m$ ) を用いたケルビン-ヘルムホルツ不安定の2次元電磁粒子シミュレーション結果。(上図) 2つのシア層の混合率と (下図) 励起した電場。

発展による無衝突プラズマの混合過程を調べた。本研究では、プラズマ運動論を記述するイオン-電子質量比 ( $M/m$ ) と電子プラズマ振動数-電子ジャイロ振動数比 ( $\omega_{pe}/\Omega_{ge}$ ) について着目し、これまでの計算規模では不可能であった、広いパラメータ範囲 ( $16 < M/m < 256, 4 < \omega_{pe}/\Omega_{ge} < 16$ ) での計算を行い、これらのパラメータに対する散逸プロセスの依存性について調べた(図2)。その結果、電子ジャイロ半径程度のスケールを持つ不安定性が KH 不安定によって2次的に励起され、流体スケールの渦構造と分離するには質量比が少なくとも 100 程度必要であることがわかった。また、2次の不安定性による乱流強度は質量比の 1.3 乗、振動数比の 2.4 乗に比例することがわかり、現実の質量比 ( $M/m=1837$ ) や、高い振動数比の領域(例えば、地球磁気圏では $\sim 100$ ) では、現在の計算結果から予想されるよりもはるかに強いものとなることが、パラメータ依存性により示唆された。

④無衝突衝撃波の粒子シミュレーション

無衝突斜め衝撃波における衝撃波面の揺らぎによる電子スケールの波動励起と電子加速について、2次元電磁粒子シミュレーションを行った。その結果、イオンスケールの衝撃波面の振動によって磁力線方向に広い波数スペクトル帯を持つプラズマ波動が励起し、それが電子を磁力線方向に散乱することが明らかとなった。

⑤各コードのチューニング

MPI と OpenMP のハイブリッド並列による超並列適合細分化格子-電磁粒子 (AMR-PIC: Adaptive mesh refinement · particle-in-cell) コードを完成させ、並列化率 99.8%を実現した。従来の PIC コードでは MPI によるプロセス並列によって高効率を得ることが困難であったが、本研究では、電荷保存法と新たに開発した適合ブロック法を用いることによって、高い並列化率を達成した(図3)。

また、5次元超並列電磁ブラソフコードを Opteron プロセッサ、SPARC64 VII プロセッサ及び、POWER6 プロセッサに対してチューニングを行い、HA8000 · 1024 コアで実効効率 14.5%、並列化効率

83%、HX600 · 1024 コアで実効効率 15.5%、並列化効率 89%、FX1 · 1024 コアで実効効率 13.9%、並列化効率 98%、SR16000 · 128 コアで実効効率 10.5%、並列化効率 96%を達成した(図4)。

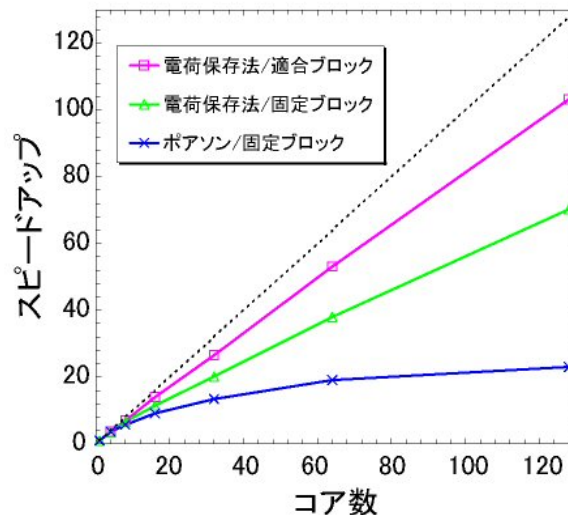


Fig. 3 Fujitsu FX1 で計測した超並列適合細分化格子-電磁粒子 (AMR-PIC) コードのスケラビリティ。

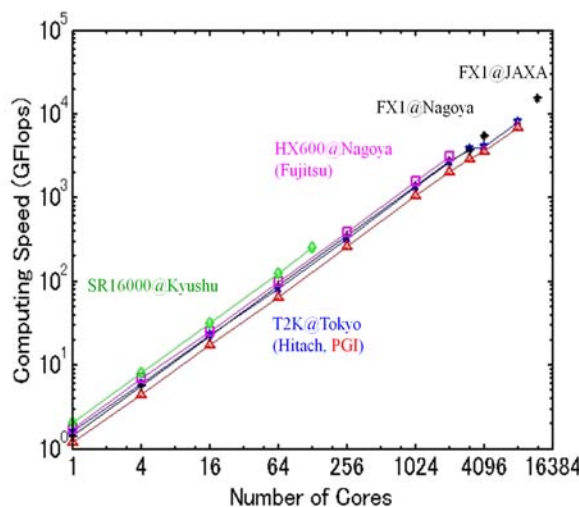


Fig. 4 様々なスカラ型超並列計算機を用いた5次元超並列電磁ブラソフコードの性能評価。1024 コア以下のデータは本プロジェクトにより取得。

4. これまでの進捗状況と今後の展望

①ジオスペースの大規模流体シミュレーション

土星磁気圏の衛星観測では、朝側磁気圏界面でのみ渦構造が見つかった。磁気圏構造は IMF の向きにより大きく形を変え、IMF は時間とともにその向きと強度を変える。そのため観測では、

ある太陽風入力での全体的な土星磁気圏の様子はわからず、探査機がいる“その場”の情報だけである。一方、計算機シミュレーションではある太陽風条件下での3次元磁気圏構造がわかるため、高精細化された磁気圏グローバルシミュレーションによって再現された夕側の渦構造も観測に先立った結果である可能性がある。ただし大規模な計算のため、入力パラメータ（太陽風の条件）を変更することはまだ行えておらず、IMFの方向を反転させた計算を今後行う。

#### ②磁気リコネクションの粒子シミュレーション

高性能な超並列 AMR-PIC コードの開発に成功した。今後は、このコードを用いて磁気リコネクションの大規模な3次元シミュレーションを実施する。

#### ③宇宙プラズマ中の乱流渦のシミュレーション

これまでの計算結果から、KH不安定非線形発展によって生じるプラズマ乱流強度は、ミクロスケールを記述する質量比、電子プラズマ振動数・ジャイロ振動数比に対して強く依存することが明らかになった。今後は、これら乱流場によるプラズマ輸送について定量化を行い、その質量比、振動数比に対する依存性を明らかにする。また、局所的に励起される強い乱流電場によるプラズマの加速メカニズムについての有無を明らかにする予定である。

#### ④無衝突衝撃波の粒子シミュレーション

現在は共有メモリ型のスレッド並列コードを用いて、衝撃波面におけるイオンスケールの変動までとらえることに成功している。今後、より広範囲なパラメータを扱える大規模な計算を目指し、領域分割コードの開発を進めていく。

#### ⑤各コードのチューニング

これまで、MHDコードでは実効効率15-20%、並列化効率80%以上、粒子コードでは並列化効率約80%、ブラソフコードでは、実効効率10-15%、並列化効率80%以上の高効率並列計算を実現することができたといえる。しかし、CPUコア数が千個を大きく超える場合のテストは今後の課題である。今後それらの課題に対して大規模シミュレ

ーション研究者と計算機科学と情報関係研究者が連携・協力してさらにチューニングを進める。

### 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）
  - ✓ Walker, R. J., K. Fukazawa, T. Ogino, and D. Morozoff, A Simulation Study of Kelvin-Helmholtz Waves at Saturn's Magnetopause, *Journal of Geophysical Research*, in press, 2010.
  - ✓ Umeda, T., T. Kimura, K. Togano, K. Fukazawa, Y. Matsumoto, T. Miyoshi, N. Terada, T. K. M. Nakamura, and T. Ogino, Vlasov simulation on the interaction between solar wind and a dielectric body, 投稿中
  - ✓ Saito, S., and T. Umeda, Suppression of reflected electrons in rippled structure at a quasi-perpendicular shock: Full particle-in-cell simulation, 投稿中
- (2) 国際会議プロシーディングス
  - 該当なし
- (3) 国際会議発表
  - ✓ Fukazawa, K., T. Ogino, R. J. Walker, and K. Yumoto, "Formation of vortices on the Kronian magnetosphere with the high temporal and spatial resolution for MHD simulation", 2010 AGU Fall Meeting, San Francisco, USA, December 2010
  - ✓ Matsumoto, Y., and K. Seki, Effects of plasma kinetic parameters on broad mixing layer formation by the Kelvin-Helmholtz instability, 2010 AGU Fall Meeting, San Francisco, USA, December 2010
  - ✓ Fujimoto, K., Dissipation mechanism in 3D magnetic reconnection, 2010 US-Japan Workshop on Magnetic Reconnection, Nara, Japan, December 2010 (Invited)
  - ✓ Fukazawa, K., T. Umeda, T. Ogino, K. Yumoto, and K. T. Murata, Performance measurements of magneto-hydro-dynamic simulation using various types of supercomputer, *International Conference*

- for High Performance Computing, Networking, Storage and Analysis (SC) 2010*, New Orleans, USA, November 2010
- ✓ Umeda, T., K. Fukazawa, Y. Nariyuki, Y. Matsumoto, and T. K. M. Nakamura, Highly scalable full electromagnetic Vlasov solver for cross-scale coupling in space plasma, *International Conference for High Performance Computing, Networking, Storage and Analysis (SC) 2010*, New Orleans, USA, November 2010
  - ✓ Umeda, T., Effect of ion cyclotron motion on the structure of wakes, *5th Alfvén Conference on Plasma Interaction with Non-magnetized Planets/Moons and its Influence on Planetary Evolution*, Sapporo, Japan, October 2010
  - ✓ Matsumoto, Y., and K. Seki, Formation of a broad turbulent layer by forward and inverse energy cascades of the Kelvin-Helmholtz instability, *Cluster 10th anniversary workshop*, Corfu, Greece, September 2010 (Invited)
  - ✓ Fukazawa, K., T. Umeda, T. Ogino, R. J. Walker, and K. Yumoto, MHD simulation of the planetary magnetospheres by using various scalar type supercomputer systems, *38th COSPAR Scientific Assembly*, Bremen, Germany, July 2010
  - ✓ Ogino T., Y. Furutake, T. Umeda, and K. Fukazawa, Three-Dimensional MHD Simulation of Interaction between the Solar Wind and Magnetosphere of Hot-Jupiter, *5th Alfvén Conference on Plasma Interaction with Non-magnetized Planets/Moons and its Influence on Planetary Evolution*, Sapporo, Japan, October 2010
  - ✓ Ogino, T., K. Ito, Magnetic Reconnection in the Plasma Sheet for Southward Turning from Northward IMF, *2010 AGU Fall Meeting*, San Francisco, USA, December 2010
  - ✓ Ogino, T., K. Ito, Magnetic Reconnection in the Plasma Sheet for southward turning from Northward IMF, *US-Japan Workshop on Magnetic Reconnection, MR2010*, Nara, Japan, December 2010
- (4) 国内会議発表
- ✓ 深沢圭一郎、荻野瀧樹、Raymond J. Walker、湯元清文、Formation of vortices on the Kronian magnetosphere with the high resolution simulation, 第128回地球電磁気・地球惑星圏学会, 沖縄県市町村自治会館, 2010年11月
  - ✓ 松本 洋介, 寺田 直樹, 三好 隆博, 深沢 圭一郎, 梅田 隆行, 荻野 竜樹, 関 華奈子, 地球磁気圏グローバルMHDシミュレーションモデルの比較研究, 第128回地球電磁気・地球惑星圏学会, 沖縄県市町村自治会館, 2010年11月
  - ✓ 梅田 隆行, ウェイク形成に対するイオンジャイロ運動の効果, 第128回地球電磁気・地球惑星圏学会, 沖縄県市町村自治会館, 2010年11月
  - ✓ 藤本桂三, Massively parallel computing of electromagnetic particle-in-cell model using adaptive mesh and adaptive block: Part I, 第128回地球電磁気・地球惑星圏学会, 沖縄県市町村自治会館, 2010年11月
  - ✓ 藤本桂三, Massively parallel computing of electromagnetic particle-in-cell model using adaptive mesh and adaptive block: Part II, 第128回地球電磁気・地球惑星圏学会, 沖縄県市町村自治会館, 2010年11月
  - ✓ Ogino T., Y. Furutake, T. Umeda, and K. Fukazawa, Three-Dimensional MHD Simulation of Interaction between the Solar Wind and Magnetosphere of Hot-Jupiter, 第128回地球電磁気・地球惑星圏学会, 沖縄県市町村自治会館, 2010年11月
  - ✓ 藤井良一, 荻野竜樹, 堀智昭, 河野貴久, 海老原祐輔, CAWSES-II と宇宙気候の研究, 第128回地球電磁気・地球惑星圏学会, 沖縄県市町村自治会館, 2010年11月
- (5) その他 (特許, プレス発表, 著書等)  
該当なし