

## 平成24年度 学際大規模情報基盤共同利用・共同研究拠点公募型共同研究

研究課題名：次世代ジオスペースシミュレーション拠点の構築

所属機関長：名古屋大学太陽地球環境研究所・所長・松見 豊

所属機関・部局名：名古屋大学・太陽地球環境研究所 ジオスペース研究センター

研究課題代表(利用責任)者：荻野 瀧樹

### 連絡責任者情報

所属機関・部局名：名古屋大学・太陽地球環境研究所 ジオスペース研究センター

氏名：梅田 隆行

共同研究を希望する大学：東京大学 名古屋大学 九州大学

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、超大規模情報システム関連研究分野

共同研究に必要な研究資源（計算機）：東京：FX10、名古屋：FX1/HX600/M9000、九州：RX200/次期システム

### 研究計画全体の概要

#### 1) 研究目的

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の非線形現象を解明し、宇宙環境変動の因果関係を理解すると共に、数値宇宙天気予報に適用することである。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マイクロスケール現象（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非線形現象を解明するために、グローバル現象を扱うMHD/流体モデル、マイ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。特に、千以上の CPU を用いた超並列計算において、どのアーキテクチャにおいても 10%以上（できれば 20%以上）の実効効率を達成した「次世代の」ジオスペースシミュレーション手法の構築を目標とする。そして、大規模シミュレーションからスペースプラズマの未解決の研究課題（異常輸送、粒子加速・加熱、領域間結合、スケール間結合など）の解明に繋げようとするものである。

## 2) 研究の意義

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、国際協同研究プロジェクトである「第二期 宇宙天気・宇宙気候研究（通称：CAWSES-II）」（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、数値予測の基礎的技術の確立することにある。また、2014年打ち上げ予定の次世代太陽観測衛星 Solar-C、2015年打ち上げ予定の内部磁気圏観測小型衛星 ERG 及び、2020年以降打ち上げ予定の次世代磁気圏観測衛星 SCOPE において、本研究は中心的な役割を果たす。そのために、京コンピュータを含む超並列計算機において、MHD/流体、運動論（粒子/ブラソフ）及び、イオンを運動論、電子を流体として扱うハイブリッドモデル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で高い実効効率を達成するための超並列計算技術の確立及び、時空間スケールの異なる方程式系を結合させるマルチスケールシミュレーション技術の確立という2つの目標がある。

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いる。しかしこれまでのベクトル型 CPU による並列計算機とは異なり、スカラ型 CPU で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。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あまり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。特に重要なことは、使用可能な最大の CPU 数で、さらにメモリをフルに使った条件まで含めて実証実験を行って確信を得ることである。様々な CPU (Opteron, Xeon, SPARC64VII など) 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) 必要性

本プロジェクトにおいて数千以上の並列計算に慣れ親しんで実績を積んでおくことは、エクサスケールスーパーコンピュータ時代において必要不可欠となる。また、国際協同研究プロジェクト CAUSES-II、2014 年打ち上げ予定の次世代太陽観測衛星 Solar-C、2015 年打ち上げ予定の内部磁気圏観測小型衛星 ERG 及び、2020 年以降打ち上げ予定の次世代磁気圏観測衛星 SCOPE をはじめとする太陽地球惑星系科学ミッションにおいて、本研究は中心的な役割を果たす。また、大規模シミュレーションデータを効率よく解析するためには、高速ネットワークと広域ファイルシステムの利用が必要なので、情報基盤センターと協力して引き続き利活用を促進する。

### 4) 研究計画

#### ①大規模磁気流体力学 (MHD) シミュレーション

強い固有磁場を持つ惑星のグローバルな磁気圏構造とダイナミクスに注目した 3 次元 MHD シミュレーションを行う。本研究課題では特に土星磁気圏に注目し、Cassini 探査機が観測したプラズマ渦構造と Hubble 宇宙望遠鏡が撮影したオーロラ発光の関連性について調べる。2008 年 2 月に Cassini が太陽風を観測し、Hubble が土星のオーロラを撮像する同時観測イベントがあったが、その際観測された時間分解の高い太陽風データを入力とし、これまでに行ったものよりもさらに大規模なシミュレーションを進める。更に、複雑なシミュレーション結果の 3 次元磁気圏構造とそこで生起する境界層の物理を理解するために、VRML (Virtual Reality Modeling Language) を用いた 3 次元可視化法を継続的に開発適用する (深沢・荻野)。

#### ②大規模ブラソフシミュレーション

速度分布関数の時間発展を解き進めるブラソフコードは、粒子コードに比べて数値ノイズが少なく、また並列計算におけるスケラビリティが高い。一方で、実空間 2~3 次元及び速度空間 2~3 次元を扱うため、超並列計算が必須であり、多次元シミュレーションに成功しているのは世界的にも本グループのみである。本研究課題では、太陽風と弱い磁場を持った小天体との相互作用について研究を行い、小天体の夜側に現れるウェイク (低密度領域) への太陽風イオンの侵入過程について調べ、かぐや衛星の観測結果と比較する (梅田・伊藤)。

#### ③無衝突衝撃波の粒子シミュレーション

衝撃波遷移領域で生じる電子スケールのマイクロ不安定性に対するパラメータ依存性を明らかにし、マイクロ不安定性が衝撃波マクロ構造に与える影響を調べる (梅田)。

5) これまでの研究成果 (最後に研究成果をリストアップする欄がありますので、それらと関連つけて記入してください。)

・本研究グループで開発した 3 次元 MHD コード及び 5 次元ブラソフコードは、本プロジ

エクトによって性能評価を行ったシステム上で実行性能(1024 並列で 10%以上)を得ている。(Fukazawa et al. SC2011; Umeda et al. SC2011; Fukazawa et al. IJHPC in press)

- ・大規模な計算により高精度の土星磁気圏シミュレーションを行った結果、プラズマ渦構造が今までに見られなかった場所で生成されることが分かった。更に、その渦構造は特徴的な斑点状の土星オーロラ発光に関係していることが明らかになった。(Fukazawa et al. JGR in press)

- ・従来よりも大きな計算領域を用いた衝撃波の第一原理粒子シミュレーションにより、電子スケールから流体スケールまでを含めた結果、イオンスケールの衝撃波面の波打ちが衝撃波遷移領域における電子加速と電子スケールのマイクロ不安定性に大きな影響を与えていることを明らかにした。(Saito & Umeda ApJ 2011; Umeda et al. JGR in press)

- ・誘電性の非磁化天体の反恒星側（夜側）に現れるウェイクの構造が、天体への電荷の帯電とイオンの運動論効果によって非対称な構造になることを明らかにした。(Umeda EPS in press)

6) 計算資源を利用する場合は施設利用計画（スーパーコンピュータの利用を計画されている場合は、利用を想定するCPU数、メモリ量、計算時間、および、必要なディスク容量などについて研究計画と関連づけて記入してください。また、大規模な計算結果、観測データ等の処理が必要となる場合、一回の出力で生じるファイル数及びファイルサイズ（個々のファイル、および合計サイズ）、出力頻度、それに対する方策について簡単にご説明ください。その他の設備の利用を計画されている場合も、研究計画と関連づけて記入してください。）

①MHD シミュレーションでは、格子点数  $2048 \times 2048 \times 2048$  を用いたシミュレーションを行う。これまでの実績より、HX600/FX1 を 1024 コア使用した場合は約 7 カ月の経過時間が必要である。

②ブラソフシミュレーションでは格子点数  $640 \times 320 \times 40 \times 40 \times 40$ （約 1TB）および  $500 \times 1500 \times 100 \times 100$ （約 600GB）を用いたシミュレーションを行う。これまでの実績より、HX600/FX1 を 1024 コア使用した場合は約 3 カ月の経過時間が必要である。

③PIC シミュレーションでは、格子点数  $8000 \times 1500$ ・粒子数約 1 兆個を用いたシミュレーションを行う。これまでの実績より、HX600 を 16 コア使用した場合は約 6 カ月の経過時間が必要である。

一回の出力で生じるファイル数及びファイルサイズは、1-8 ファイル(約 250MB)/コアであり、合計約 256GB 程度となる。出力頻度は数 10 分に 1 回程度である。また、ジョブの終了時に、バックアップ用としてコアごとに約 1GB（合計約 1TB）のデータも書きだす。更に、シミュレーションデータの保管とポスト処理に情報基盤センター群の RENKEI-PoP や NICT のサイエンスクラウド (OneSpaceNet) プロジェクトで整備された IT 基盤である

高速ネットワークと広域ファイルシステム（Gfarm）の利活用を計る。

7) 共同研究の推進にあたって構成拠点において研究グループや研究者の協力が必要な項目があれば具体的にご説明ください。

異なるアーキテクチャでコンスタントに高い実効性能を得ることは容易ではないため、それぞれの機関においてチューニング経験の豊富な方である、片桐（東大）、石井・荻野（名大）、高見（九大）の諸先生に、シングルコアの実効性能を下げることなくスループットを向上させ、スレッドチューニングを行う技術開発の支援をお願いしたい。特に、東京大学と九州大学のシステムはシステムが更新されるため、利用可能な最大ノード数での性能評価にご協力いただきたい。

#### 8) その他の事項

平成 20-21 年度の東京大学情報基盤センター公募型プロジェクト、平成 22 年度の東京大学情報基盤センター512 ノードサービス、平成 21-22 年度の九州大学情報基盤研究開発センター先端的計算科学研究プロジェクト及び、平成 21-23 年度の学際大規模情報基盤共同利用・共同研究拠点公募型共同研究に採択された。東京大学の HA8000、東京工業大学の TSUBAME、名古屋大学の FX1・HX600 及び、九州大学の SR16000・RX200 のベンチマークテストを行い、MHD コード及びブラソフコードにおいてスケーラブルな性能を得ており、どのシステムにおいても 10%以上の実効効率を達成している。

#### 共同研究体制

研究課題代表者、および、副代表者（最低 1 名）

氏 名 所属機関・部局名 役割・担当分野等

代表者 荻野 瀧樹 名古屋大学・太陽地球環境研究所ジオスペース研究センター

副代表者 深沢 圭一郎 九州大学・情報基盤研究開発センター

#### 共同研究者リスト

梅田 隆行 名古屋大学・太陽地球環境研究所 ジオスペース研究センター

伊藤 陽介 名古屋大学・太陽地球環境研究所 ジオスペース研究センター

高見 利也 九州大学・情報基盤研究開発センター

石井 克哉 名古屋大学・情報基盤センター

荻野 正雄 名古屋大学・情報基盤センター

片桐 孝洋 東京大学・情報基盤センター

村田 健史 情報通信研究機構 電磁波計測研究センター 宇宙環境計測グループ