

戦略的創造研究推進事業 CREST  
研究領域「マルチスケール・マルチフィジックス現象  
の統合シミュレーション」  
研究課題「惑星間航行システム開発に向けた  
マルチスケール粒子シミュレーション」

## 研究終了報告書

研究期間 平成19年10月～平成25年3月

研究代表者：臼井 英之  
(神戸大学大学院システム情報学研究科，  
教授)

## § 1 研究実施の概要

### (1) 実施概要

惑星間宇宙航行システムとして宇宙航空研究開発機構 (JAXA) で提案されている磁気プラズマセイル (MPS) では、衛星搭載コイル電流により人工ダイポール磁場を形成し、それをプラズマ噴射によって広範囲に展開させて太陽風プラズマを受け止めることにより推力を得る。本研究では、MPS における小型ダイポール磁場と太陽風の相互作用およびそれによって衛星が得る推力を定量的に評価するためにプラズマ粒子モデルシミュレーション解析を行うとともに、局所的に空間分解能を上げるために適合格子細分化法 (AMR) を用いたマルチスケール粒子シミュレーション手法の新規開発を行った。

MPS が用いるダイポール磁場の規模は太陽風イオン慣性長より小さいため、プラズマを電磁流体近似したモデルでは不十分であり、磁場についての旋回運動などプラズマ運動論効果を考慮した解析が必要である。また、太陽風と磁場構造の相互作用という広範囲な現象が局所的に存在する衛星に対して与える推力の評価を高精度に行う上で、マルチスケール性の考慮も重要である。そこで本研究では、神戸大チームがプラズマ運動論効果とマルチスケール性を同時に取り入れた新しいプラズマ粒子シミュレーションを手法の開発を行い、同時に MPS と太陽風プラズマの相互作用の粒子モデルシミュレーションも担当する。また JAXA チームでは、地上チャンバー実験および数値シミュレーションを用いて MPS を宇宙推進システムとして工学的観点から評価した。本研究ではこのような役割分担の元、神戸大チームと JAXA チームが密に協力し連絡しあいながら研究を推進した。

先ず MPS の工学的解析を担当した JAXA チームでは、粒子モデルシミュレーションおよび定常解析手法とした開発した Flux-Tube 法 (イオン粒子、電子流体) を用いた解析により、衛星搭載コイル電流による磁場帆と太陽風プラズマの相互作用によって発生する推力値を磁場帆スケールが数 100m ~ 数 100km の広範囲領域において初めて定量的に取得した。磁場構造が電子スケールに近づくと、プラズマの有限ラーマ半径効果により推力は低下し、その値は人工磁場をつくる磁気モーメントに比例することも明らかにした。また、イオン慣性長スケールの磁場帆の場合についても推力値の定式化も行った。また、JAXA 地上実験に関しては、チャンバー内の残留中性粒子の影響を考慮した粒子シミュレーションによる評価を行い、両者の一致を得た。MPS 推力増加のためには衛星起源の磁場帆を出来るだけ拡大する必要があり、衛星からのプラズマ噴射による磁場帆展開およびそれによる推力増加に関する粒子シミュレーションを実施した。磁場帆スケールにもよるが、プラズマ噴射による磁場帆拡大が確認され、プラズマ噴射なしの場合に比べて数倍から 10 倍程度の推力増加が確認できた。これらのシミュレーション解析結果は、JAXA での小型 MPS システム開発において重要な基礎データとなる。

一方、神戸チームでは、磁場帆と太陽風の相互作用に関してプラズマ物理的観点から粒子シミュレーション解析を精力的に行った。特に電子も粒子として扱う全粒子モデルシミュレーションを用いて磁場帆構造がイオン慣性長スケールから電子スケールに至るメソスケールにおける小型磁気圏形成現象に着目した。メソスケールでは、磁場帆による電子応答が重要であり、電子とイオンの運動差によって生じる局所的な分極電場によりイオンは影響を受ける。形成された電子スケール磁気圏の境界層構造やそこでの電流は電子が大きな役割を果たすことを初めて明らかにした。マルチスケール粒子シミュレーションによってより詳細な構造やプロセスを明らかにする必要がある。

また神戸チームでは、適合格子細分化法 (AMR) を導入したマルチスケールプラズマ粒子シミュレーションコード PARMER を新規に開発し、細かい格子幅をもつ階層を生成させることにより局所的に高い空間解像度を持つ効率的なシミュレーションを可能とした。京コンピュータを用いた評価では、PARMER はコアカーネルの単体性能として 14% まで確認されており、負荷が高い粒子処理部分ルーチンを分割することでより高いピーク性能比が得られる可能性を明らかにした。またプロセス並列においては、動的領域分割法 (DDD) を開発しそれを用いてプロセス間の負荷バランス維持も実現した。DDD を用いて大規模プロセス並列による高速演算を進める。

### (2) 顕著な成果

#### 1. プラズマ粒子シミュレーションによる小型磁気セイル推力取得

概要: 太陽風プラズマの有限ラーマ半径効果を考慮して、電子スケールからイオン慣性長程度(数 100m~数 1000km)の小型人工ダイポール磁場構造をもつ磁気セイルの発生推力をプラズマ粒子シミュレーションにより定量的に求めたとともに、イオン慣性長程度の磁気帆の場合に推力定式化も行った。(e.g. 原著論文[16, 18, 32, 34])

## 2. 小型磁場構造と太陽風の相互作用における太陽風電子の役割に関する定量的解明

概要: イオン慣性長から電子スケールに至るメソスケールの大きさを持つダイポール磁場構造と太陽風プラズマの相互作用では電子の磁場応答が非常に重要であり、イオンとの運動差によって生じる局所的な分極電場によりイオンは影響を受ける。磁気圏境界層構造や電流構造は電子ダイナミクスが重要な役割を果たすことを初めて明らかにした。(e.g. 原著論文[30, 33])

## 3. 適合格子細分化法(AMR)を用いたマルチスケールプラズマ粒子シミュレーション手法開発

概要: 細かい格子幅をもつ階層を生成させることにより局所的に高い空間解像度が得られる粒子シミュレーションを可能とする AMR 粒子シミュレーションコード PARMER を開発し、プロセス並列において動的領域分割法(DDD)によるプロセス間の負荷バランス維持を実現した。(e.g. 原著論文[17, 20, 21])

## § 2. 研究構想

### (1) 当初の研究構想

本研究では、従来の等間隔格子によるプラズマ粒子シミュレーションからの脱却を目指し、適合格子細分化法(AMR)を用いた粒子シミュレーションへの導入を目指す。研究対象としては次世代惑星間航行システムの一つとして検討が行われている磁気プラズマセイル(MPS)に着目し、その原理検証、推力性能評価を、プラズマ粒子シミュレーションを用いて行う。本研究では、2つの研究班を設置する。1つはマルチスケール粒子シミュレーション開発班、もう1つは、MPSシミュレーション解析班とする。

#### <マルチスケールシミュレーション開発班>:

非一様間隔格子の利用により、局所的に高い空間分解能を実現し、ミクロな現象をマクロなシミュレーション空間内で再現できる。空間的にダイナミックに変化するミクロ現象がある場合は適合格子細分化法(AMR)が有効であるため、まずは数値流体で用られる AMR 手法を十分検討し、その特性について理解を深める。次に、AMR 法へのプラズマ粒子導入を検討、開始する。開発されたプロトタイプコードはシミュレーション解析班と共有しそこで MPS 関連モデルを用いてテストラン、その性能評価を行う。

#### <シミュレーション解析班課題>:

MPS における人工ダイポール磁場構造と太陽風の相互作用というマクロ的な現象が衛星システムという局在するミクロな物体である衛星に与える推力を定量的に評価する目的で、イオンを粒子、電子を流体として扱うハイブリッドモデルシミュレーションを大規模に行う。解析課題としては、(1) 衛星からのプラズマ放出によるダイポール磁場展開プロセス、(2) その結果として生じる太陽風-人工小型磁気圏の電磁学的相互作用、(3) MPS システムにおける推力性能評価、が挙げられるが、それぞれ相互に関連しており、特に(3)の総合評価としての推力推定はマルチスケール粒子シミュレーションの実行が必要である。また、JAXA において人工磁気圏とプラズマ流の相互作用やプラズマ噴射による磁場展開に関する地上チャンバー実験が行われており、本シミュレーション解析班ではこれらの地上実験に対応した数値シミュレーションを行い、地上実験データとシミュレーション結果との比較検討を行うことにより小型磁気圏形成の定量的理解を深めるとともに MPS 推力評価の精度を上げる。

### (2) 新たに追加・修正など変更した研究構想

中間評価の「今後の研究にむけて」項目では、AMR を使った粒子シミュレーションでないと再現

できないプラズマ現象の詳細解析の実行と、AMR プラズマシミュレーションコードの超大規模並列化チューニングの2点が指摘された。開発したPARMERコードの並列化チューニングに関しては、京コンピュータを用いた単体性能評価で理論性能の約14%が得られており、負荷が高い粒子処理部分ルーチンを分割することでより高いピーク性能比が得られる可能性を明らかにした。また、プロセス並列においては領域分割法を用いるが、各小領域における粒子計算負荷が不均一になるため、プロセス間の負荷不均衡が生じ並列性能低下をもたらす可能性が新たに分かった。これを解消することは、京コンピュータなどの超並列スーパーコンピュータを用いた大規模計算には必須であるため、本プロジェクトにおいてその対応を新たに加えた。第4章で詳細を述べるが、領域分割の際、各プロセスの負荷がほぼ等しくなるように小領域境界を自動的に切りなおす、動的領域分割法(DDD)を開発しそれを用いてプロセス間の負荷バランス維持も実現した。現在、動的領域分割によるプロセス並列コードの調整、動作確認を行っており、並列時の通信等によるオーバーヘッドの割合について調査している。

PARMERを用いたマルチスケールシミュレーションに関しては、2次元スレッド並列版を用いて現在、小型磁場構造とプラズマ流の相互作用の解析を開始している。PARMER自体の動作確認は既に終了しており、現在、計算精度の検証を進めつつある。同時に、小規模ダイポール磁場とプラズマ流の相互作用を対象にしたPARMERシミュレーションも実施しており、細密格子層を生成するための条件をプラズマ密度や磁場強度とすることにより、プラズマ相互作用においてより詳細な粒子ダイナミクスの再現および解析が可能であることを確認している。

### §3 研究実施体制

#### (1)「神戸大学」グループ

##### ① 研究参加者

氏名	所属	役職	参加時期
臼井 英之	神戸大学大学院システム情報学研究科	教授	H19.10～
沼波 政倫	核融合科学研究所	助教	H20.4～ (H21.4より核融合科学研究所に助教として着任)
中村 雅夫	大阪府立大学大学院工学研究科	准教授	H19.10～
三宅 洋平	神戸大学大学院システム情報学研究科	特命助教	H23.4～
松本 正晴	神戸大学大学院システム情報学研究科	特命助教	H21.4～ (H23.10よりJAXAから転入)
森高 外征雄	神戸大学大学院システム情報学研究科	特命助教	H21.4～H23.8 (H23.8.31に離脱(大阪大に研究員として転任))
松井 竜樹	神戸大学大学院システム情報学研究科	特命助教	H22.6～H23.8 (H23.8.31に離脱(米国に戻る))
八木 耀平	神戸大学大学院システム情報学研究科	大学院生(M2)	H23.4～
永良 彰英	神戸大学大学院システム情報学研究科	大学院生(M1)	H24.4～
佐藤 裕徳	大阪府立大学大学院工学研究科 航空宇宙海洋系専攻	大学院生	H19.10～H21.3 (就職のため離脱)
中村 総一郎	大阪府立大学大学院工学研究科 航空宇宙海洋系専攻	大学院生(M1)	H25.1～

② 研究項目

- マルチスケール粒子シミュレーションコード開発
- MPS 小型磁気圏-太陽風相互作用に関するプラズマ粒子シミュレーション

(2)「JAXA」グループ

① 研究参加者

氏名	所属	役職	参加時期
篠原 育	(独)宇宙航空研究開発機構 宇宙科学研究本部	准教授	H19.10～
船木 一幸	(独)宇宙航空研究開発機構 宇宙科学研究本部	准教授	H19.10～
山川 宏	京都大学 生存圏研究所	教授	H19.10～ (H22.4よりJAXAグループに編入)
梶村 好宏	明石工業高等専門学校	講師	H19.10～ (京都大からH22.4より ISAS/JAXAに転任. H24.1より 明石高専講師に着任)
上田 裕子	(独)宇宙航空研究開発機構 宇宙科学研究本部	招聘研究員	H20.4～H22.3 (離脱)
秋田 大輔	(独)宇宙航空研究開発機構 宇宙科学研究本部	招聘研究員	H20.4～H21.3 (東工大・助教に着任)
窪田 健一	東京工業大学大学院総合理工学 研究科創造エネルギー専攻	大学院生	H19.10～H22.3 (就職のため離脱)
藤本 智也	静岡大学大学院工学研究科機 械工学専攻	大学院生	H19.10～H21.3 (就職のため離脱)
山本 直樹	静岡大学大学院工学研究科機 械工学専攻	大学院生	H21.4～H23.3 (就職のため離脱)
西田 浩之	東京農工大大学院工学府	准教授	H19.10～
上野 一磨	宇宙航空研究開発機構 宇宙 科学研究所	プロジェクト 研究員	H23.4～
綾部 友洋	東海大学大学院工学研究科航 空宇宙学専攻	大学院生	H20.4～H21.3 (就職のため離脱)
佐藤 博紀	総合研究大学院大学物理科学 研究科宇宙科学専攻	大学院生	H20.4～
大塩 裕哉	総合研究大学院大学物理科学 研究科宇宙科学専攻	大学院生	H20.4～
藪田 志保	総合研究大学院大学物理科学 研究科宇宙科学専攻	大学院生	H22.4～H24.3 (退学のため離脱)
芦田 康将	京都大学 生存圏研究所	大学院生	H22.4～
大津 広敬	龍谷大学理工学研究科	准教授	H22.4～
有田 光	東京農工大大学院工学府	大学院生	H22.4～
長崎 陽	京都大学大学院 工学研究科 電気工学専攻	大学院生	H24.10～
山村 治人	静岡大学 大学院 工学研究 科 機械工学専攻	大学院生	H24.10～

② 研究項目

- MPS 関連の地上チャンバー実験
- MPS 人工磁場展開に関するプラズマ粒子シミュレーション
- MPS 推力評価に関するプラズマ粒子シミュレーション

## § 4 研究実施内容及び成果

### 4. 1 マルチスケール粒子シミュレーション手法(AMR-PIC)開発(神戸大学グループ)

#### (1)研究実施内容及び成果

##### 1. 実施方法

平成 21 年度より研究拠点を神戸大学に移し、神戸大学グループと JAXA グループが密な連携の元に研究を推進した。神戸大学グループは主としてマルチスケール粒子シミュレーション手法開発と小型磁場構造-太陽風相互作用シミュレーション解析を担当し、JAXA グループは工学的な観点からの MPS 解析を担当した。複数の専任研究員および大学院生を中心に研究を進めた。研究進捗会は TV 会議で 2 週間に一度の割合で行い、全体会議は 3 ヶ月に一度の割合で開催し、研究進捗の確認、今後の方針などについて議論を密に行った。計算機資源は、京都大学生存圏研究所の KDK 共同利用スーパーコンピュータ、JAXA/ISAS、核融合科学研究所の共同利用スーパーコンピュータ、および開発用 LINUX マシンを計算規模に応じて使い分けた。

本サブテーマは、新規マルチスケール粒子シミュレーションコード開発がメインである。開発期間中、担当研究員の異動が複数あったため、開発ノウハウの引き継ぎが必ずしもスムーズに行われず多少混乱もあったが、開発に携わった元研究員らのサポートや大学院生の協力もあり、開発を継続することができた。

##### 2. 実施内容・成果

適合格子細分化法(Adaptive Mesh Refinement: AMR)を導入したプラズマ粒子シミュレーションコード PARMER の新規開発およびその並列化を行った。

通常の粒子シミュレーション(PIC: Particle-In-Cell 法)では、空間格子間隔はプラズマ特性長であるデバイ長程度に制限されるため、シミュレーションシステム内の最小デバイ長を基準にしてシステム全体の空間格子幅を一律に用いる必要がある。このため、空間的に非一様な現象をシステム内で扱う場合、膨大な数の格子点数とそれに伴う粒子数が必要となる。しかし、実際には計算機資源の制約があるため、シミュレーションで扱える空間領域はごく限られたものにならざるを得ない。そこで我々は、数値流体で近年用いられている適合格子細分化法(AMR 法)をオイラー場である電磁場に適用し、そこにラグランジュ的プラズマ粒子を従来の PIC 法を用いて導入する試みを行った。AMR 法では、シミュレーション内に生起する現象の空間的特性長を各格子点においてモニターし、最適な空間分解能をもつ格子システムを局所階層的かつ動的に導入する。AMR 法を PIC 法に実装するため、FTT(Fully Threaded Tree)構造と呼ばれる階層格子構造を用いる。これは図 4-1-1 に示すように、各格子に対して、細分化された際に生成される子格子、自身の元となっていた親格子、隣り合う隣接格子など、階層レベル間の情報を持たせることで階層構造を実現するものである。また、図 4-1-2 の左パネルに示すように、本 PARMER コードでは各格子は Oct と呼ぶ構造体変数で定義され、Oct は各格子内の電磁界情報、粒子情報、隣接する Oct と関連付けるためのポインタ変数、および各種フラグ変数を保持している。すなわち、Oct は格子内の情報をカプセル化した状態で保持し、隣接 Oct 同士は FTT 構造に基づきポインタによって有機的に接続されている。この様子を図 4-1-2 の右パネルに模式的に示す。各 Oct をポインタで関連付けることにより、従来の座標グリッドに基づく配列格子に比べて、動的な格子細分化・粗視化に対して非常に柔軟に対応することができる。同時に各格子にはその格子領域に存在する粒子情報(位置や速度)も持たせるため、各格子階層で閉じた形で粒子運動計算が可能になる。

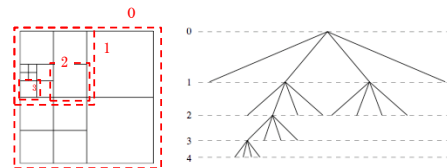


図 4-1-1: FTT 階層格子構造の概念図

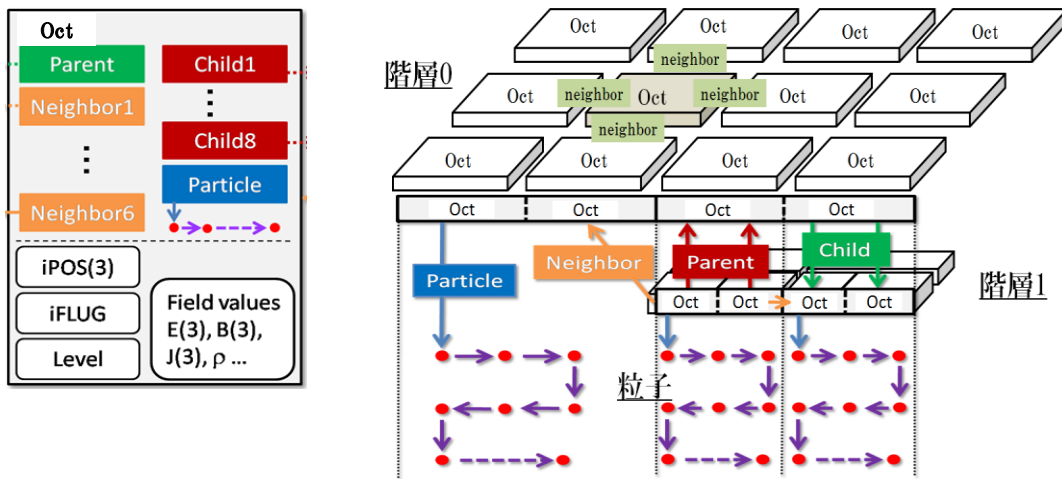


図 4-1-2: 格子情報がカプセル化された構造体変数 Oct の概念図(左パネル)と FTT 階層格子構造に基づく Oct 間のポインタ接続の様子(右パネル). 矢印はポインタを表す. Oct 内の粒子は小さな赤い丸で示され, ポインタを用いて順序づけられている.

PARMER コードの 2 次元, 3 次元モデルを作成し, テストシミュレーションによる評価を行った. 図 4-1-3 に球状プラズマの膨張現象に対する PARMER 計算例を示す. 初期に中央に置かれた高密度プラズマが時間的に膨張していくに伴い粒子密度が変化中, ある一定の粒子密度を条件として各格子には適時, 細分化格子が生成・消滅され, 境界値以上の密度領域では高い解像度を維持しながら粒子計算が実行されることを確認した. 図中の(a)では中央の高密度領域に細分化階層が作られ, 時間経過とともにプラズマが拡散するにつれその領域が拡大する様子が(b), (c)で確認出来る. また(d)では密度が低くなった領域で細分化格子階層の消滅も確認出来る. 図 4-1-4 に中央に置かれたダイポール磁場と左から流れるプラズマ流の相互作用に関する 3 次元テストシミュレーション結果を示す. プラズマ密度および磁場密度がある閾値より大きくなると, 背景の黄色い格子群の半分の格子幅をもつ赤い格子群が局所的に自動的に生成されるように設定した. 背景の 2 倍の空間分解能をもつ赤い格子点がダイポール磁場中央そしてその周辺に生成されていることが図からわかる.

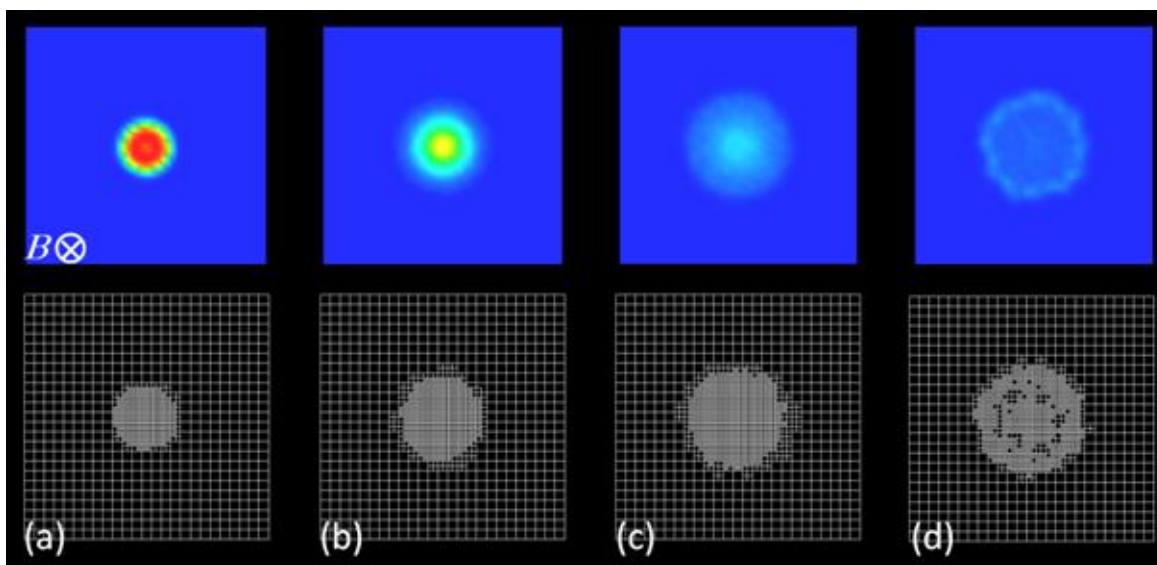


図 4-1-3: PARMER による細分化レベルが 2 階層までの適合細分化格子生成を伴った粒子シミュレーション計算例. 一様磁場中の球状プラズマ雲の膨張に従って電子密度が変化中(上段), その変化に応じ細分化格子が生成・消滅を繰り返す(下段), 粒子計算が実行されていく.

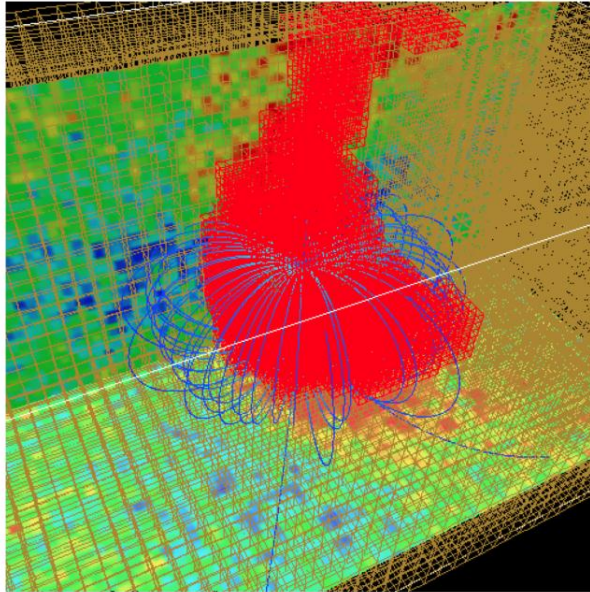


図 4-1-4: ダイポール磁場(青線)とプラズマ流(左から右に流れる)の相互作用によって起きる小型磁気圏と強磁場及び高密度領域に生成された細分化格子(赤). コンター図はある 2 次元平面でのプラズマ密度の大きさを表す.

また、親階層と子階層の接続や更なる深い階層生成を考慮すると、7Oct 単位での階層生成が最も効率がよいことを明らかにした。これらの手法を実装し、問題なく動的に複数の階層を生成・消滅させシミュレーションが動作することを確認した。これにより具体的なモデルを用いたマルチスケール粒子シミュレーションの実行環境が整った。PARMER を用いた具体的な事例については、4-2 節で述べる。今後、PARMER の計算精度の関係する点として、格子階層間での電磁波成分のスムーズな接続についてより精度の高い手法を導入する必要がある、現在検討を行っている。

また、シミュレーションの大規模高速化に向けて並列化手法の開発も行った。プロセス並列を行うためには、全シミュレーション領域を分割して小領域を各プロセスに割り当てる空間領域分割法が一般的である。しかし、粒子モデルの場合、均一的な空間領域分割法では各ノード領域に存在する粒子数が時間的に変動するため、プロセス間の負荷バランスが時間的に崩れていく。これでは並列演算性能が劣化し、全体のパフォーマンスが低下する。そこで我々は、プロセス間負荷バランス維持のため、数値流体分野で近年よく利用されている Morton 順序法を用いて親階層の全 Oct を順序付けし、この列を基に各プロセスに動的に割り当てる Oct 群を決める方法を開発した。粒子シミュレーションでは粒子運動計算に大半の計算時間が割かれるため、格子数の均等化のみでは負荷分散性能の低下を抑えるには不十分である。そこで、粒子数や細分化階層レベルに依る計算量の増大分を、一種の重みとして加味した「修正 Morton 順序法」を新たに考案し、新しい動的並列領域分割法(Dynamic Domain Decomposition: DDD)を開発し PARMER に実装した。格子階層がある場合、同期をとるため親階層に対してそこでの時間ステップは小さくなり、その分、粒子を解き進めるループ数は多くなる。この点も修正 Morton 順序法の重みづけに考慮した。図 4-1-5 に DDD 適応時のプロセス間負荷バランスを示す。左図は、粒子分布の非一様にも関わらず均一的な領域分割を用いた場合であり、各プロセスに割り当てられた粒子数の大小により粒子ループ数すなわち粒子計算負荷に大きなばらつきが見られる。一方 DDD 適応時には、修正 Morton 順序法で重みを付けられた Oct 列を粒子負荷がそれぞれ均等になるように切り分け、それぞれを各プロセスに割り当てるため、右図にあるように粒子負荷はプロセス間でほぼ均一となる。これによってプロセス間の同期が得られ高速並列演算が可能となる。



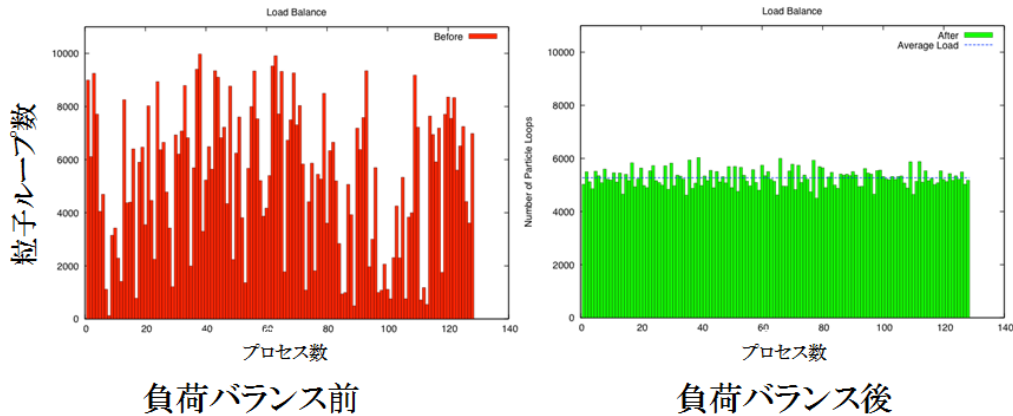


図 4-1-5: 動的領域分割法(DDD)によるプロセス間負荷バランス維持の様子

現在, DDD を用いた PARMER テストシミュレーションを実施し, その性能評価を行っている. DDD の性能評価の為に図 4-1-6 に示したモデルを用いたテストシミュレーションを行った. 立方体のシミュレーション空間を用意し, 各 Oct に電子 50 個イオン 50 個を空間全体に均様に置く. 初期状態では分割された小領域は立方体である. この一様プラズマに加え粒子クラスタを 4 か所に導入する. 粒子密度が高い範囲には階層 Lv1 が形成されている. 4 つの粒子クラスタはそれぞれシミュレーション空間中心へ向かう速度を持ち, 時間経過とともに粒子クラスタが移動する. 粒子クラスタが集中する領域では計算負荷が増大し, シミュレーション空間全体の負荷バランスが崩れる. このモデルを使用して, DDD の動作評価を行うために, 512 プロセス並列シミュレーションを実施し, 粒子ループ数の時間変化を調べた. 図 4-1-7 および図 4-1-8 はそれぞれ DDD を使用しない場合, する場合に相当する. グラフの赤の線および青の線はそれぞれこのモデルを計算するプロセスの中での最小および最大の粒子ループ数である. 緑の線は平均粒子ループ数を示す. 図 4-1-7 に示されるように, DDD を使用しない場合では移動する 4 つの粒子クラスタがシミュレーション空間中央に集中し約 230step 付近で 1 プロセスに対する計算負荷が増大する. この時, 最大粒子ループ数は平均粒子ループ数の約 3 倍となる. 図 4-1-8 に DDD を用いた場合についての粒子ループ数変化を示す. この場合, 最大粒子ループ数と最小粒子ループ数の平均粒子ループ数との値の差が一定値以上になると DDD が実行される. シミュレーションの進行によって粒子クラスタが集中し, 粒子密度が一定以上を超えると DDD が実行され各プロセスが担当する領域の形状はそのステップでの粒子分布に対して負荷バランスが取れる形に変化する. 今回の結果は DDD 実行によって最大粒子ループ数も最小粒子ループ数も平均粒子ループ数に近づく方向に変化する様子が確認できた.

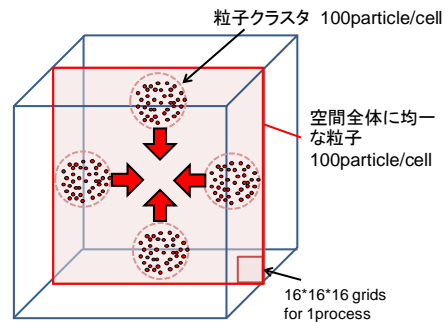


図 4-1-6: DDD 評価のためのシミュレーションモデル

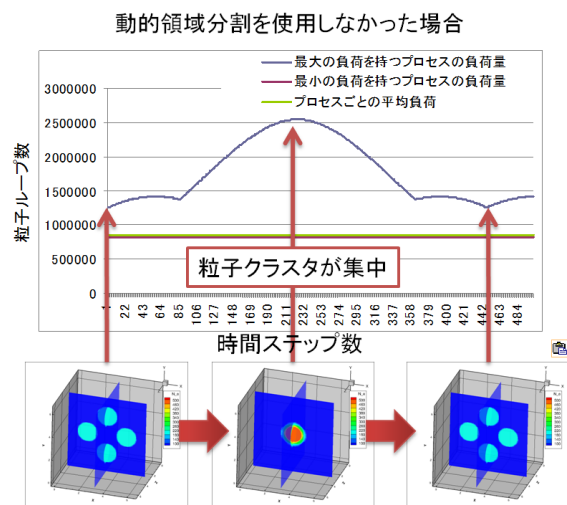


図 4-1-7: 512 プロセスを用いたテストシミュレーションにおける粒子ループ数の時間変化(DDD なし)

今回実装した DDD ルーチンによって実際にどれだけ計算時間が短縮されたかについて述べる。4 つの場合について負荷不均衡なモデルを計算する。共通のパラメータは、プロセス並列数は 4096, 1 プロセス当たりの初期の Oct 数は  $16 \times 16 \times 16$ ,  $dt=0.025$ ,  $dx=0.05$  である。本評価は京コンピュータを用いてシミュレーションを行った。図 4-1-9 は 4 つのモデルを実行したときのコストプロファイルである。図から without DDD に比べて every timesteps は計算時間を約 30% 削減できている。3 つ目のモデルと 4 つ目のモデルのコストを見ると、粒子計算と MPI 関連コストは理想値に近くなっている。これは、本モデルを用いたシミュレーションにおいて、プロセス間での粒子計算時間不均一や MPI 関連ルーチン利用時の不必要な同期待ち発生等が殆どないためと考えられる。このことから DDD の目的である負荷バランスの維持による計算時間の短縮はほぼ理想的に十分行えていると考えている。DDD 実行時には、「修正 Morton 順序」に基づく Oct のプロセスへの再配置を行う必要があり、各プロセスの負荷状況把握、プロセス間での Oct 情報の転送などメインループ以外でのオーバーヘッドが生じる。このため DDD を毎時間ステップ実行することは現実的ではなく、ある程度プロセス間負荷バランスが崩れた場合に DDD を適応するのが有効である。

現在、PARMER の単体性能評価およびプロセス併設より詳細な特性取得を行っており、スレッド並列とプロセス並列を合わせたハイブリッド並列における性能も今後評価する必要がある。

### 3. 成果の位置づけ

宇宙プラズマの粒子シミュレーションでは、膨大な数のラグランジュ変数粒子の情報を電流として各格子点に配分するため、高速演算の理由から規則性をもった等間隔格子が従来用いられてきた。しかし、空間点に非一様な現象のシミュレーションを行う際にも等間隔格子を用いる必要があり、格子配列を必要以上に多く使うため無駄が多い。本研究で精力的に開発を進めてきた AMR に PIC 粒子法を融合させるマルチスケールプラズマ粒子シミュレーション手法の確立により、空間格子を階層化し、局所的に空間分解能を動的に上げた粒子シミュレーションが可能となるとともに計算機資源の節約と演算の高速化が期待できる。これは、従来のプラズマ粒子シミュレーションのブレイクスルーとなるものであり、その基盤確立は数値手法の観点からみて非常にインパクトがある。また、動的領域分割法(DDD)の実装により、京コンピュータのような大規模分散型スパコンを用いたプロセス並列演算にも対応できるようにした点は本研究成果の特徴の一つである。マルチスケール対応粒子法の基盤性且つ普遍性を考えると、その開発とそれを用いた大規模プラズマ粒子シミュレーション解析を実施する本研究成果はインパクトが大きいと考える。

動的領域分割を使用した場合

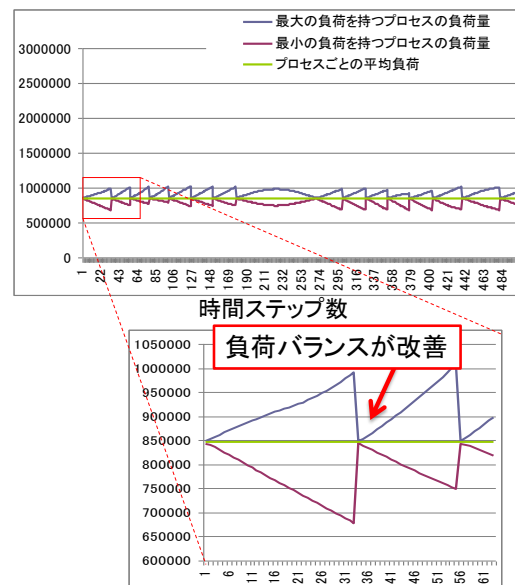


図 4-1-8: 512 プロセスを用いたテストシミュレーションにおける粒子ループ数の時間変化(DDD あり)

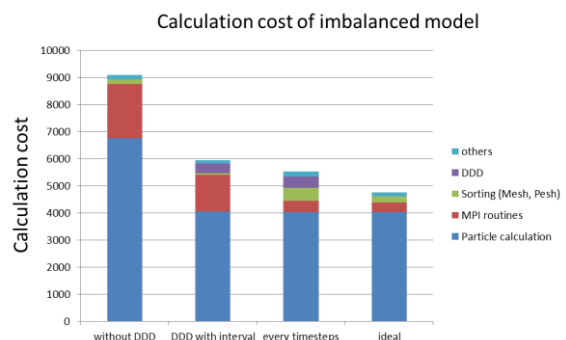


図 4-1-9: 各場合における計算コスト

#### 4. 類似研究との比較

流体シミュレーション分野では、過去 20 年にわたり空間格子を非一様に構成することにより、局所的に空間分解能を高くする手法が開発、実用化してきた。動的な適応格子法である AMR 法が汎用化され、NASA の paramesh のようにそのモジュールライブラリー公開によりユーザーへの便宜を図っているところもある。粒子法への応用に関しては、米国では、AMR と粒子法を融合したイオンビーム加速実験に関連した数値シミュレーションが開始されている。これは、ポアソン方程式を解き静電界に限定したものである。これに対して本研究では、MPS のように電磁的相互作用モデルにも対応させるため、各階層システムにおいてマックスウェル方程式を解き進め電磁界更新を行う。このモデルの採用により、静電的のみならず電磁的な物理現象にも対応できるようになり、より一般性を持った形でマルチスケールシミュレーションが可能となる。また近年、欧米でも電磁場対応の AMR 粒子法開発が進められているが、本研究で採用している動的領域分割法を用いた負荷バランス均一化による大規模プロセス並列計算はない。今後の京コンピュータ利用も視野に入れた場合、DDD 利用による大規模並列演算手法の確立およびその実用化は非常に重要であると考えられる。なお、国内では藤本氏（現在国立天文台研究員）により AMR-PIC コードの開発とそれによる磁力線再結合問題の解析が精力的に行われている。既にそれを用いた成果が出ており、AMR 粒子法の有効性が示されている。格子階層間領域での電磁界の取り扱いや大規模プロセス並列化等において共通の問題意識もあり、情報交換していきたい。

#### (2)研究成果の今後期待される展開

上述したように AMR を用いた本 PARMER コードの特徴的な点は、各空間格子が構造体変数 Oct として定義されており、Fully Threaded Tree(FTT)構造により各 Oct の空間配置はポインタによって接続されていることである。また各 Oct 内に存在する粒子もポインタで管理されており、データ管理方式は従来の整合配列ベースのプログラムとは全く違う。現在、PARMER の基本部は並列化アルゴリズムの実装も含めてほぼ完成しており、今後、それらの性能検証、および理化学研究所の協力の元での並列チューニングに力点を置く。現在、理化学研究所次世代スーパーコンピュータ開発実施本部の支援の元で「京」を用いた性能評価及びチューニングを行っている。解析の結果、PARMER 中で多用しているポインタ利用の階層格子管理が並列化に大きな影響を与えないことが明らかになった。並列演算におけるポインタを用いた配列管理の有効性を示すものであり、FTT による格子配列管理の他分野への応用が期待できる。また、京コンピュータにおいて PARMER はコアカーネルの単体性能として 14%まで確認されている。更なるチューニングによってより高い性能が得られる可能性が示唆されており大変興味深い。

一般に粒子シミュレーションは領域内の粒子移動が多く、プロセス並列に際しては、MPI 通信量の増大、ノード間負荷バランス不均衡が生じる可能性が高く、効率的な高プロセス並列化は容易ではない。本研究において、プロセス並列版 PARMER に動的領域分割(DDD)を実装することにより、動的かつ局所的な空間格子階層生成・消滅の際のプロセス間負荷バランス維持を実現し、ペタスケール計算環境でも高効率並列演算が可能であることを示したい。本研究では、引き続き理化学研究所の協力を得て、PARMER コードの大規模プロセス並列時における DDD の動作確認及びその利点を定量的に示していく。

本研究では、プラズマ現象解析において高精度・高分解能解析を可能にするために、階層型非一様格子システムに PIC 粒子法を融合させるというチャレンジングな試みに取り組んだ。この開発によって、プラズマ粒子シミュレーションにおける等間隔格子システム利用という制限から開放し、次世代のプラズマ粒子シミュレーションの実現を目指す。すなわち、戦略目標である「次世代高精度・高分解能シミュレーション技術の開発」の趣旨に合致する。また、マルチスケール対応粒子法は基盤的数値手法であり、様々な革新的宇宙航行システムの検証に役立つだけでなく、プラズマプロセスや核融合分野におけるプラズマ粒子シミュレーション研究に対してもブレイクスルーをもたらすことは確実である。本 CREST プロジェクト終了後は、PARMER 開発で培われたマルチスケール粒子法とその並列化のノウハウを他の研究分野の大規模シミュレーション手法へ応用してみたい。具体的な応用分野は今後検討を行う。

## 4. 2 MPS 解析 (JAXA グループ)

### (1) 研究実施内容及び成果

#### 1. 実施方法

JAXA で実施された MPS の基礎プロセスに関する真空チャンバー実験に対して、それをモデルとした粒子シミュレーションを実施し、小型磁気圏形成、プラズマ流との相互作用による推力評価の観点から、地上実験結果とシミュレーション結果の比較を行った。また、地上実験では設定できない MPS モデルに関して粒子シミュレーションを実行し、磁場帆の展開手法検討や MPS 推力評価を実施した。これらの内容は、神戸グループと TV 会議により定期的に情報交換を行い、議論を進めた。

#### 2. 実施内容及び成果

今後の惑星探査計画に先立ち、現在、高効率な宇宙航行用の推進システム開発に日欧米がしのぎを削っている。次世代の惑星間宇宙航行システムの一つとして提案されている磁気プラズマセイル(MPS)は、宇宙機の周辺に人工的なダイポール磁場による小規模磁気圏を作り、それをプラズマ噴射にて広範囲に展開させて太陽風を受け止めて推力を得る。図 4-2-1 に概念図を示す。JAXA グループでは、MPS の工学的観点からの解析を進めており、プラズマ流と小型ダイポール磁場の相互作用に関する地上実験および数値解析により、主として MPS 推力評価に関する解析、検討を行った。

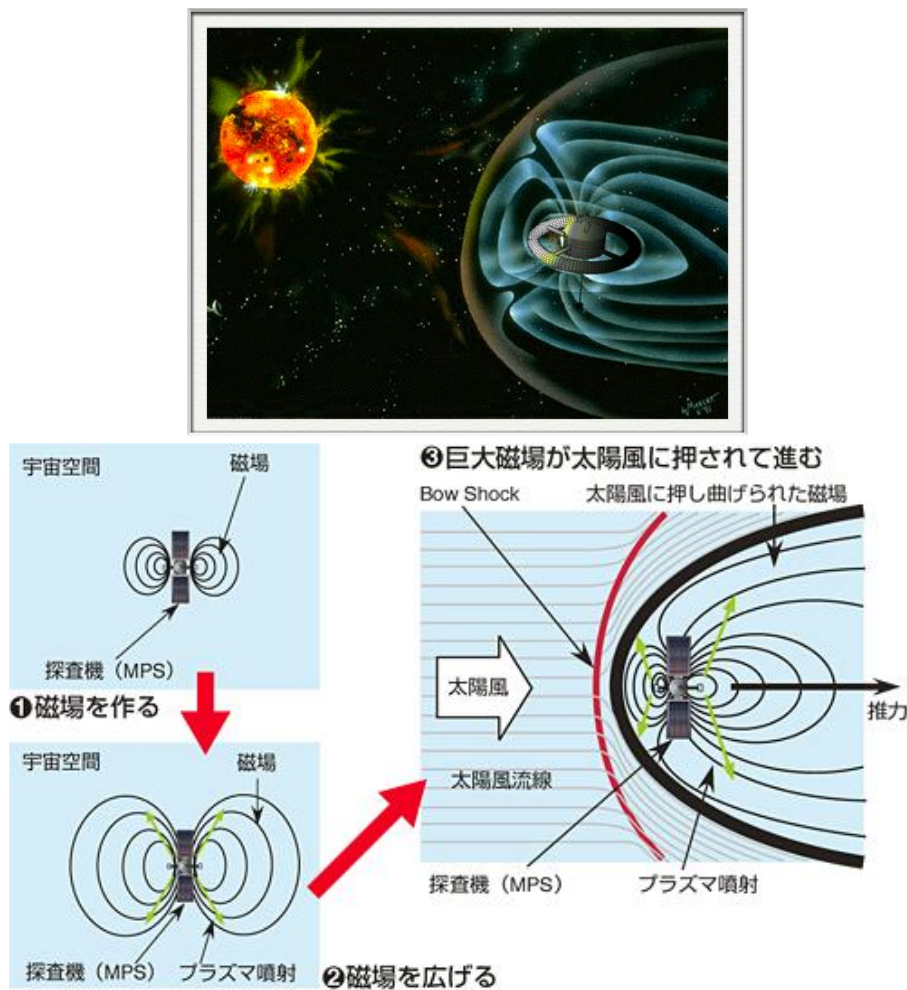


図 4-2-1: MPS 概念図. 衛星起源の小型ダイポール磁場と太陽風プラズマの相互作用により推力を得る。

### [小型ダイポール磁気圏形成に関する地上実験との比較解析]

小型 MPS システムと高速イオン流の電磁学的相互作用に関する JAXA 真空チャンバー実験に対応したハイブリッド粒子シミュレーションにより、プラズマ流-磁気圏相互作用に関する解析を行った。図 4-2-2 に地上チャンバー実験およびシミュレーションで得られた密度図を示す。 $z=0$  の位置に置かれた電流コイルによって形成されたダイポール磁場構造が、左( $-z$  方向)からのプラズマ流により圧縮され磁気圏境界層を形成することが確認できる。図中の白の点線曲線は、境界層の大まかな位置を示しており、磁気圏形成という点では定性的にはシミュレーション結果と実験値は合っている。磁気圏形状についての定量的な評価を行うため、図 4-2-2 下図の黒矢印上の磁束密度分布について、実験における測定結果とシミュレーション解析結果を比較した。しかし、シミュレーション結果が大きく実験値から乖離する結果となった。実験結果の詳細検討を行った結果、真空チャンバー中に残留する中性粒子とイオン流の衝突効果が実験値に影響する可能性が示唆された。地上実験では、太陽風を模擬するためのプラズマ生成装置の電離度が 30%程度と低く、プラズマ中に存在する中性粒子が推力へ与える影響を無視することができない。そこで、ハイブリッド粒子シミュレーションに中性粒子-イオン衝突に関するモンテカルロモデルを導入し、改めてシミュレーションを行った。プラズマ流が作用する以前の磁場と作用後の磁場の比をプロットした分布を図 4-2-3 に示すが、平均的には両者の一致が確認できる。また、その比が1になる地点を磁気圏サイズ  $L$  と定義し、図 4-2-2 で示した磁気圏境界層の位置 ( $z=-0.12\text{m}$ ) とよく一致している。さらに、プラズマ流のエネルギーとコイル磁場のエネルギーのつりあいの関係から算出された位置(図 4-2-3 中の点線)ともほぼ一致しており解析結果の妥当性が示される。つまり、チャンバー実験値はプラズマ衝突効果の影響を受けていることが明らかになった。

実際の宇宙は無衝突プラズマ空間であり、その環境での MPS 推力を評価するためには、チャンバー実験値から中性粒子とイオン流の衝突効果を除去する必要がある。しかし、実験では中性粒子の影響を除去することは非常に困難であり、今回、プラズマ粒子シミュレーションを行うことにより中性粒子とイオン流の衝突効果を除去した状況で MPS の推力評価を実施が可能であること示せたことは、大きな利点である。本成果の科学的、技術的インパクトについては、本成果をまとめた論

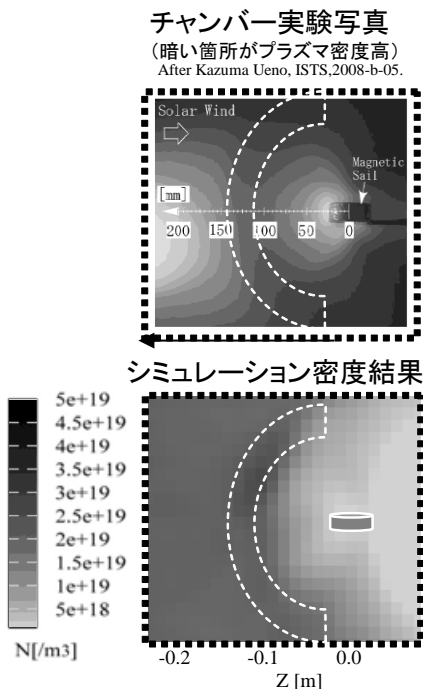


図 4-2-2: 小型ダイポール磁場( $z=0$  にコイル)とプラズマ流(左が上流)との相互作用。側面から見た密度図。上はチャンバー実験、下はシミュレーション。

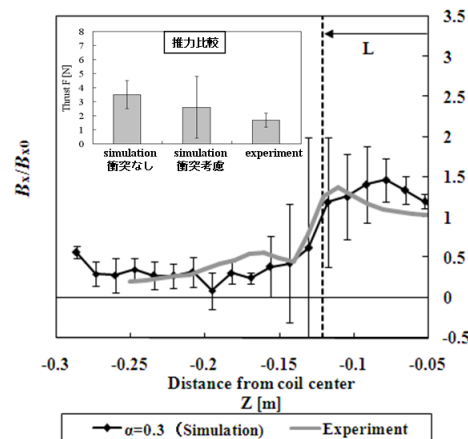


図 4-2-3: 磁束密度分布(黒:シミュレーション, 灰色:実験)と推力比較結果

文が第 53 回宇宙科学技術連合講演会(平成 20 年 11 月)の優秀論文賞を得たことから、非常に高いと評価できる。

### [MPS 推力推定]

磁気セイル(プラズマ噴射を伴わない MPS)の推力推定は、先行研究として既にイオンダイナミクスを考慮した形で藤田らのハイブリッド粒子シミュレーション研究がある。これによると、人工磁場構造の大きさがイオンジャイロ半径より小さくなる領域において明らかに電磁流体(MHD)モデルによる推力推定値よりも低くなる結果が得られている。

本研究では、先行研究の延長上に位置付ける形で、磁場構造がイオンスケールから電子スケールにわたる場合について、磁気セイルの推力評価を行った。具体的には、衛星搭載コイル起源のダイポール磁場構造と太陽風プラズマの相互作用によって形成される小型の人工磁気圏(数 100m~数 100km)の構造及び、発生推力について、イオン・電子をともに粒子として扱う Full-PIC シミュレーションおよび、定常解析手法とした開発した Flux-Tube 法(イオン粒子, 電子流体)を用いた解析を行い、図 4-2-4 のような幅広い解析範囲での磁気セイル推力特性を初めて明らかにした。先行研究で明らかにされていた MHD 近似が適応できる比較的大型のダイポール磁場を用いた場合の推力に比べて、イオンスケール以下の小型ダイポール磁場をもつ磁気セイルではプラズマ粒子の有限ラーマ半径効果によりその推力は低下し、ダイポール磁場の磁気モーメントに比例するような推力特性を示すことがわかった。図の左下の青色の複数の点が全粒子シミュレーションによって得られた推力値である。電子スケールの時な構造に近づくとも推力の低下の度合いが大きくなること図より明らかである。

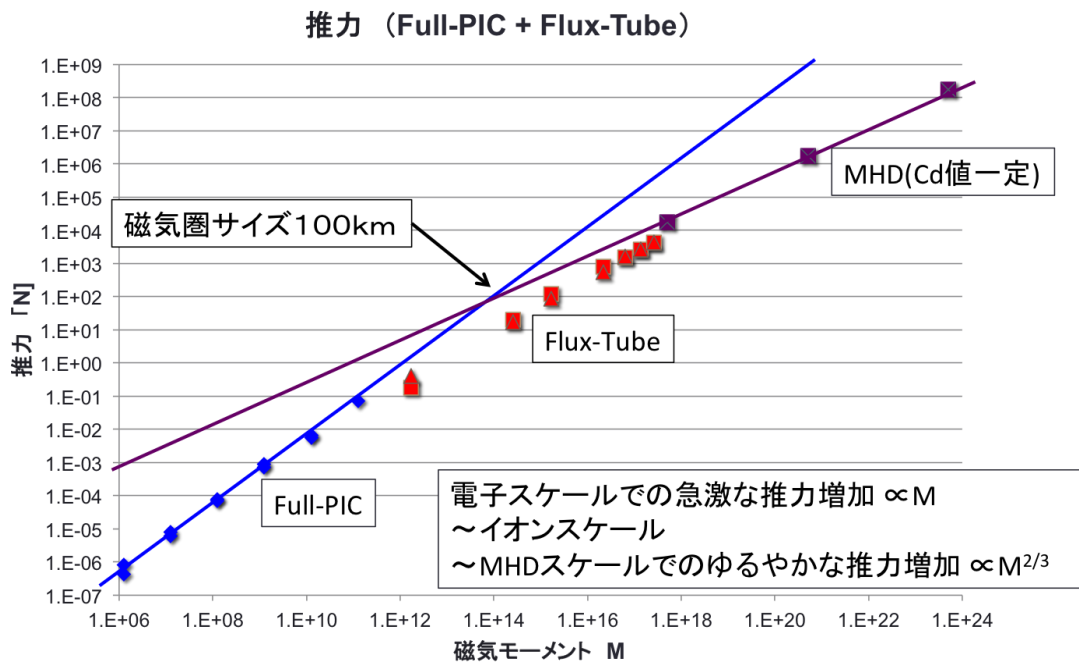


図 4-2-4: 磁気セイル設計パラメータ(磁気モーメント)と推力の関係  
 $M \sim 10^8$  は小型実証機,  $M > 10^{10}$  は深宇宙・系外探査の場合の小型ダイポール磁場を想定

### [プラズマ噴射による磁場帆展開]

衛星搭載超伝導コイルを用いて形成された人工ダイポール磁場と太陽風との相互作用によって十分な推力を得るためには、ダイポール磁場を拡大し太陽風との相互作用領域を広げる必要がある。上の議論において、衛星起源の磁気モーメントを増やす、すなわち磁場帆を作る電流を増やせば推力も増大することが分かった。しかし衛星搭載コイルのみによる電流量の増加は難しい。これを補うために、衛星からのプラズマ噴射で衛星周りにプラズマ電流を流すことが提案された。

これまでの解析結果から、噴射プラズマを磁気圏展開に用いた場合の推力増分は、噴射プラズマ自体を推進力として用いる場合の推力に対し、約 1.1 倍にとどまることが明らかとなった。そこで、プラズマの速度を熱速度程度に低減させて放出し、これを衛星起源ダイポール磁場領域に捕捉させて磁場勾配および磁場曲率ドリフトによる環状電流を形成する手法が提案された。この手法は、オリジナルダイポール磁場中に人工的なプラズマ環状電流の形成を新たに行い、それにより全体的な磁気モーメントを増やすというアイデアである。

この手法による MPS の推力増加量を定量的に評価するため、まずは 3 次元ハイブリッド粒子モデルを用いた解析を行った。衛星起源のダイポール磁場の磁気モーメントは z 方向にある。図 4-2-5 は、原点から熱速度プラズマを噴出した場合のプラズマの流線および紙面垂直方向の噴出プラズマの速度コンター(イオン電流に相当)を示している。解析結果から、噴出した熱速度プラズマが磁場に捕捉され、図 4-2-5 の +x 領域には紙面上向きを正としてプラス、-x 領域にはマイナスの電流が誘起されていることが確認でき、3 次元的には環状電流が形成されている。その環状電流による磁気モーメントの増加、つまり磁気帆の広がりにより、本モデルでは、衛星での推力は噴出前後で 10 倍となった。すなわち、噴射プラズマを磁気圏展開に用いた場合の推力増分は、噴射プラズマ自体を推進力として用いる場合の推力に対し、約 10 倍となった。

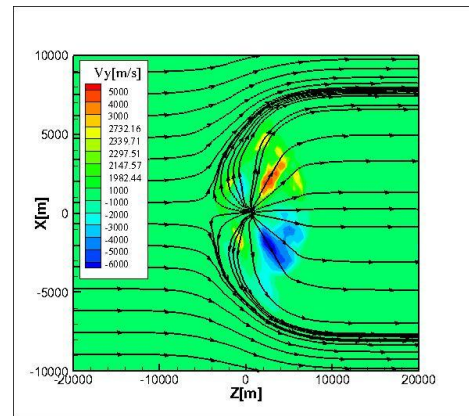


図 4-2-5: 磁気プラズマセイル(宇宙機)が作る磁場にさえぎられる太陽風プラズマの流れ場. コンター図は等方向噴出プラズマの速度  $V_y$  (紙面に垂直)を示す。

衛星から放出された熱速度プラズマが誘起する環状電流は、放出プラズマの密度や温度、流量に支配される。磁場帆の拡大に寄与する環状電流の最適解を求めるために、2 次元軸対称のイオン One-Component Plasma (OCP) 解析ツールを開発し評価を行った。OCP モデルは、静磁場中のプラズマ粒子の運動を PIC 法で解き、環状電流が定常となった時点で電流による磁場を計算し、オリジナル磁場に加算する。その後、更新された磁場中のプラズマ粒子群の運動を環状電流が定常となるまで解析し、再び磁場を更新、これらを繰り返す、定常状態を評価する手法である。図 4-2-6(a)に解析モデル図を示す。パネル(b)に本研究に用いている OCP モデルの定式化を示す。また、環状電流形成に関わるダイポール磁場中の粒子の運動についてパネル(b)の①～③に示す。

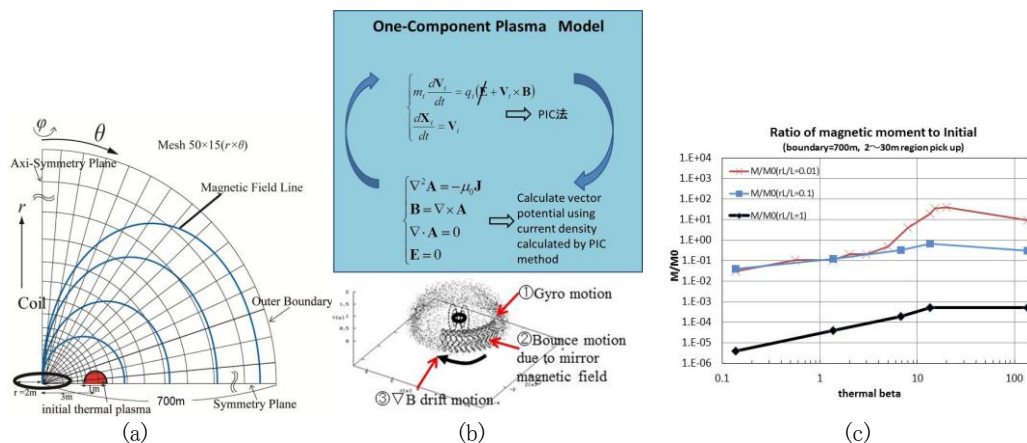


図 4-2-6 (a) 解析モデル図, (b) OCP Model 概要(上図)とリングカレントを形成する粒子運動(下図: 中心にコイルと磁力線を示し, 周囲の黒点はイオン粒子を示す), (c) OCP Model を用いた解析結果(横軸に  $\beta$  値, 縦軸にコイルの磁気モーメントに対するリングカレントの磁気モーメントの比を示す)

パネル(c)に示した解析結果は、初期プラズマの熱的  $\beta$  値(密度、温度、磁場強度に依存する無次元パラメータ)、および初期プラズマ位置でのイオン Gyro 半径/磁場代表長比(磁場強度、温度に依存する無次元パラメータ)をパラメータとし、リングカレントが作る磁気モーメントを評価した図である。初期磁場が作る磁気モーメントに対し、リングカレントによって磁気モーメントがどの程度形成されるのかを評価指標(縦軸)としてまとめている。赤線で示したイオン Gyro 半径/代表長比=0.01、熱的  $\beta$  値=10 のケースで最大 20 倍の磁気モーメントが形成されることが分かった。これまでに実施した MPS 推力解析の結果を用いると、イオン慣性長スケールにおける MPS 推力は磁気モーメントの値に比例することが分かっており、推力値も 20 倍に増加することが期待される。今後、OCP モデルによって得ることができた最適化パラメータを用いて 3 次元ハイブリッドモデルによる MPS 解析を実施し、推力の定量的評価を実施する計画である。また、さらなる推力増加を目指したアイデアとして、噴出プラズマを加熱しリングカレントを増大させる手法を取り入れることを考えており、外部からのエネルギー付与(高周波加熱等)による加熱手法の検討を実施したいと考えている。また、惑星間磁場(IMF)が、推力や姿勢安定に及ぼす影響を評価するための解析も計画し、MPS 宇宙機的设计、ミッション提案へのフィードバックを行う。

また、より小型の電子スケールのダイポール磁場構造の場合についても 2 次元全粒子モデルシミュレーションにより検討を行った。図 4-2-7 にプラズマ噴射がある場合およびプラズマ噴射がない場合のイオン密度分布を  $x=0$  の線の上半分および下半分にそれぞれコンターで示す。原点を衛星位置とする。プラズマ噴射がない場合のダイポール磁場の規模は約 900m(図 4-2-7 の下半分)であるのに対して、衛星からプラズマ噴射を行うことによって、磁気圏サイズが 2700m と 3 倍に拡大した(図 4-2-7 の上半分)。またプラズマ噴射によって衛星が得る推力は約 5 倍に増加した。この電子スケールダイポール磁場における磁場構造拡大のパラメータスタディは今後の課題であり、放出するプラズマの熱速度や密度を変化させて磁場構造拡大を最大にする最適パラメータを探る必要がある。現在、3 次元シミュレーションを精力的に行い、推力評価を行っている。

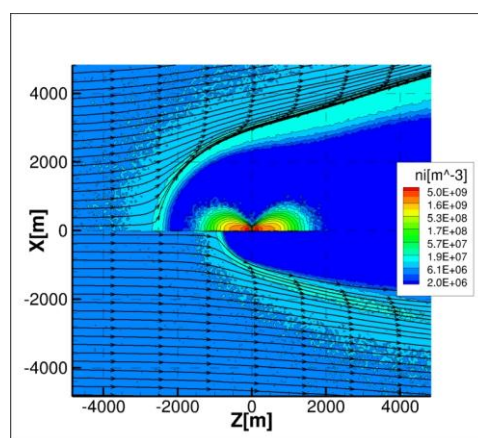


図 4-2-7:全粒子シミュレーションによる電子スケールの MPS シミュレーション.  $x>0$  の領域は衛星からのプラズマ噴射ありの場合.  $x<0$  の領域はプラズマ噴射なしの場合に相当。

以上のように、プラズマ粒子シミュレーション解析により、衛星起源の磁場帆展開およびそれによる MPS 推力増加の評価がイオン慣性長スケールから電子スケールに至る広範囲なパラメータ領域で可能になった。また、衛星起源のダイポール磁場構造の内部にプラズマを噴射することにより、追加的に磁気モーメントを増やせる可能性をすることができた。これは、磁気帆の拡大を意味するものであり、これにより MPS の推力増大が可能であると考えられる。今後、惑星間空間磁場(IMF)が、MPS の推力や姿勢安定に及ぼす影響を評価するための解析も計画し、MPS 宇宙機的设计、ミッション提案へのフィードバックを行いたい。

### 3. 成果の位置づけ

本研究成果に基づき、今後、数十キロオーダーの電子スケールの小規模磁場帆と太陽風プラズマの電磁学的相互作用により発生する推力や、宇宙機からの局所的プラズマ噴射による人工ダイポール磁場に広範囲展開プロセスなど、MPS システムに関連したマルチスケール現象の定量理解が進めば、MPS 設計に際して非常に重要な基礎データとなることは間違いない。この点で技術的インパクトは大きい。

特に、太陽風プラズマの有限ラーマ半径効果が無視できないような小規模の磁場帆のケースについて具体的な推力値を粒子モデルシミュレーションにより初めて求めることができたことは本研究の大きな成果である。また、衛星からのプラズマ噴射による人工ダイポール磁場の拡大に関しては、



地上実験においてその評価が困難であるため、本研究で行われた粒子シミュレーション解析は非常に意義深い。特に、衛星搭載コイルによる磁気モーメントに加えて、噴射プラズマとオリジナルダイポール磁場の相互作用によって得られる環状電流起源の追加的な磁気モーメントにより、磁場帆の全体的な拡大およびそれに伴う MPS 推力の増加に関して得られた知見は非常に重要であると考えられる。本サブテーマ研究で得られた推力値が宇宙推進システムとして実用上、十分なものであるかどうかについては JAXA 側の検討にゆだねるが、いずれにしても、推力値の増加に寄与するパラメータの抽出やその具体的な評価について粒子モデルシミュレーションの結果が有益であることを示せたことは有意義であり、引き続き JAXA 側と密に連携を取りたい。

#### 4. 類似研究との比較

MPS は 2000 年に米国の Winglee 博士によって提案された。この概念が注目される理由は、電気推進と同等の高い推進剤の消費効率が得られ、同時に、1桁大きい推力を得ることができるという解析結果が得られたためである。しかし、この解析結果はプラズマの粒子的・運動論的效果を十分に考慮したものではなく、定量的な推力の評価は実際に行われていない。この点を明らかにするために、JAXA を中心に地上実験、数値シミュレーション解析の両面から MPS システム検討が進められてきた。国外でも MPS に関するシミュレーション研究例はあるが、プラズマの粒子性を十分に考慮した結果は未だ出されていない。本研究は、粒子シミュレーションによってプラズマ運動論的效果を考慮することにより、イオンの有限ラーマ効果が MPS の推進原理や性能に与える影響をより定量的に理解し、実際のシステム設計に役立つ基礎データを取得する点でこれまでの MPS 研究とは一線を画す。

#### (2)研究成果の今後期待される展開

衛星起源のダイポール磁場構造が太陽風プラズマの特性長よりも小さい場合について、粒子モデルシミュレーションにより具体的に推力を示すことができたことは大きな成果である。しかし、現状では必ずしも十分な推力値とは言えない。推力増大を図るには、衛星起源の磁場帆を大きく展開し太陽風プラズマと接する面を大きく必要があり、本研究において、衛星からのプラズマ噴射により人工的にプラズマの環状電流を磁場帆領域内に形成することにより、等価的に磁気モーメントを増やすことに成功した。今後、この環状電流による磁気モーメント増加のメカニズムを粒子シミュレーションにより解明し、衛星から放出するプラズマの密度、温度などのパラメータについて具体的な最適値をシミュレーションによって得ることが期待される。また、拡大された磁場帆を用いた場合の推力増加の評価を進め、MPS 宇宙機的设计、ミッション提案へのフィードバックを行いたい。

### 4.3 小型ダイポール磁場構造と太陽風相互作用解析(神戸大学グループ, JAXA グループ)

#### (1)研究実施内容及び成果

##### 1. 実施方法

本サブテーマは、MPS 衛星起源の小型ダイポール磁場構造と太陽風プラズマの相互作用について、形成される磁気圏境界で生起するプラズマ現象に特に着目したものであり、粒子シミュレーションによってプラズマ物理的観点からの詳細解析に重点を置いた。主なシミュレーション解析は従来の一様格子を用いた粒子モデルで行ったが、4.1 で述べられた PARMER コードを用いた多階層粒子シミュレーションを実行することにより、非定常で複雑なプラズマ現象が生じる磁気圏境界層領域の高分解能解析も進行中である。また MPS 衛星起源の小型ダイポール磁場構造をモデルとしている点で、前節 4.2 の MPS 推力評価に関する研究テーマと密接な関連を持つ。本サブテーマでは、主として神戸大学グループが全粒子シミュレーションによる解析を担当したが、JAXA グループの MPS 工学シミュレーション班とも密に情報交換し、磁気帆と太陽プラズマ流との相互作用に関して工学物理学の両面から議論し互いの理解を深めた。

##### 2. 実施内容・成果

前節 4.2 でも述べたように、衛星搭載コイルによる小規模なダイポール磁場構造を用いる MPS の場合、電子のサイクロトロン運動などプラズマの運動論的效果を考慮する必要がある。すなわち、

MPS や磁気セイルと太陽風の相互作用を考える場合、太陽風プラズマの電磁流体近似モデル (MHD モデル) は不十分であり、プラズマの粒子性やその運動論効果を考慮した粒子シミュレーションを実行する必要がある。

MPS では、人工ダイポール磁場により太陽風プラズマをどの程度遮ることができるかが非常に重要になる。イオンを粒子、電子を流体として扱うハイブリッド粒子シミュレーションによって得られたイオン分布図を図 4-3-1 に示す。パネル(a)には、太陽風イオンのサイクロトロン運動の効果が顕著になる特性長 (慣性長) 約 100km に対して、ダイポール磁場圧力と太陽風プラズマ圧力の釣り合い点と衛星位置の距離が約 800km である場合におけるイオン分布図を示す。図中の青色矢印は各格子点での磁場ベクトルを示す。この空間スケールでは、磁気圏に対するイオンのサイクロトロン運動効果は相対的に小さくなり、プラズマは電磁流体的な振る舞いで近似出来る。このスケールの場合、プラズマは磁場に「凍りついている」とみなせるため、太陽風がダイポール場の存在により大きく影響を受け、いわゆる磁気圏が形成されその尾部で低密度領域が形成される。一方、パネル(b)に小規模ダイポール場におけるイオン密度分布を示すが、パネル(a)と違ってプラズマ流の変化が殆ど見られない。このスケールではプラズマの有限ラーマ半径効果が相対的に大きくなりプラズマの磁場凍り付きが見えにくくなるとともにダイポール場との相互作用は小さくなる。その結果、磁気圏形成も見えにくくなり、衛星の推力も減少する。この傾向は既に前節 4.2 で述べた通りである。

このように、太陽風イオンの慣性長よりも大きなサイズをもつ大規模ダイポール磁場を用いる場合には太陽風との相互作用が大きくなるが、実際の MPS では人工ダイポール磁場を数 100km 規模まで拡大できるかどうかは今のところ不明である。キロメートル前後の小型ダイポール場を用いる場合、直接的には太陽風イオンがダイポール場から大きく影響を受けるとは考えにくい。そこで電子も粒子として扱う全粒子シミュレーションによって、小型ダイポール場とプラズマ流の相互作用、特に磁気圏形成について解析を行った。

まずは、小型ダイポール磁場構造が太陽風イオンのラーマ半径と同程度またはそれより小さい場合に着目し、高速プラズマ流との相互作用に関する 2 次元全粒子シミュレーションを行った。その結果、電子を流体として扱うハイブリッド粒子シミュレーションでは見えなかった電子スケールの磁気圏が形成されることが初めて明らかとなった。特徴としては、イオンラーマ半径が大きいにも関わらず、イオン運動を含めた太陽風の動圧とダイポール磁場圧が釣り合う点を中心にダイポール磁場が圧縮される点、および、その磁場圧縮領域で電子による境界層電流が流れその領域の厚さは電子のラーマ半径程度である点、が挙げられる。ただし、惑星間空間磁場 (IMF) との影響により、前面では衝撃波構造に似た擾乱領域の生成、また、磁力線リコネクションによるダイポール磁場の

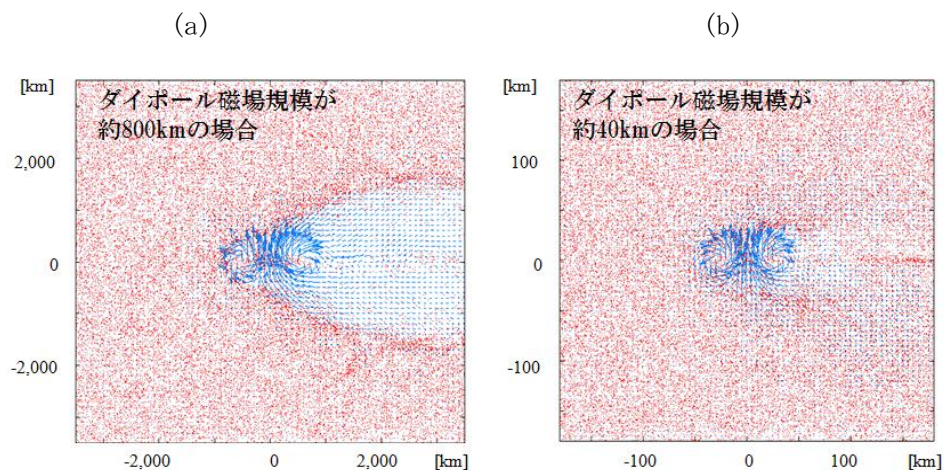


図 4-3-1: ハイブリッド粒子シミュレーションによる人工ダイポール場と太陽風を擬似した高速プラズマ流との相互作用。磁場は各格子点におけるベクトル表示。プラズマ粒子は赤点。パネル(a), (b)には、それぞれダイポール磁場圧力と太陽風プラズマ圧力が釣り合う点と衛星位置からの距離 (図ではダイポール磁場規模としてそれぞれ 800km, 40km としている) が太陽風中のイオン慣性長 (約 100km) に対して十分大きい場合と小さい場合を示す。

構造的変化, それに伴う太陽風プラズマの流入, また後方では低密度領域の形成とそれに伴う電磁場擾乱などが確認された. 以下にシミュレーション結果を示しながらそれぞれについて説明する.

まず, 電子スケール磁気圏形成に関するシミュレーション解析例を図 4-3-2 に示す. 衛星搭載コイルによって形成するダイポール磁場の規模はイオンスケールより十分小さく電子スケールよりやや大きいメソスケールのもを仮定する. 左右のパネルにそれぞれプラズマ密度および紙面に垂直な電流密度をコンター図で示す. 従来のハイブリッド粒子シミュレーションではこのサイズの磁場構造について太陽風プラズマ流との相互作用の解析は困難である. しかし, 全粒子シミュレーション結果では, 図 4-3-2 の左パネルに鮮明に示されているように電子スケールの磁気圏が形成されていることが分かる. また, 磁気圏前面およびプラズマ流下流の境界層において磁場に垂直な電流が強いことも右パネルからわかる. この境界層電流は, 元々のダイポール磁場がプラズマ流によってゆがめられているために生じているものである. 左側から流れるプラズマ流と磁場の構造変化の詳細を見るために  $y=0$  の軸上での  $B_y$  の値の空間変化を図 4-3-3 に示す. ケース(A)~(C)は衛星搭載コイル電流の強さを変えた場合に相当し, 最も電流が強いのはケース(C)である. プラズマ

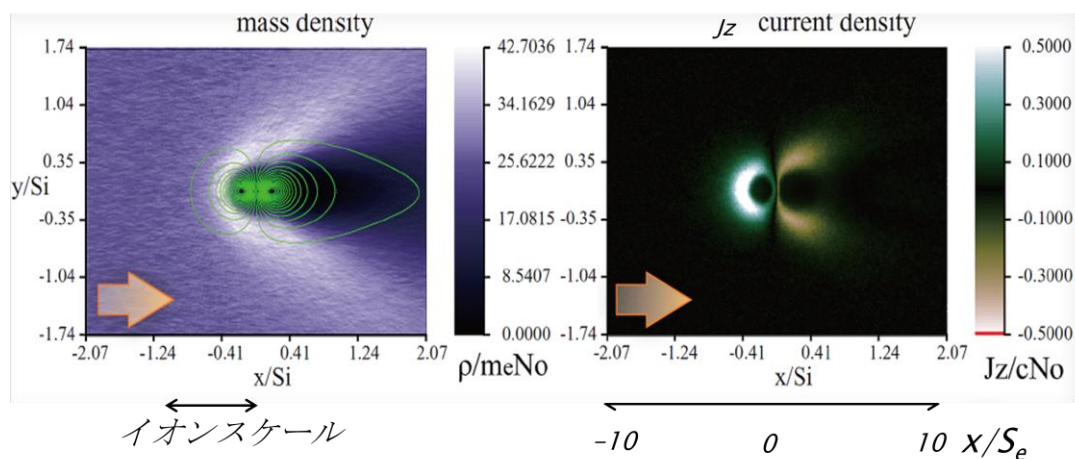


図 4-3-2: 密度分布(左)と磁場に垂直な電流分布(右)のコンター図. イオンスケール(イオン慣性長)よりも小さい領域で電子スケールの磁気圏が形成.

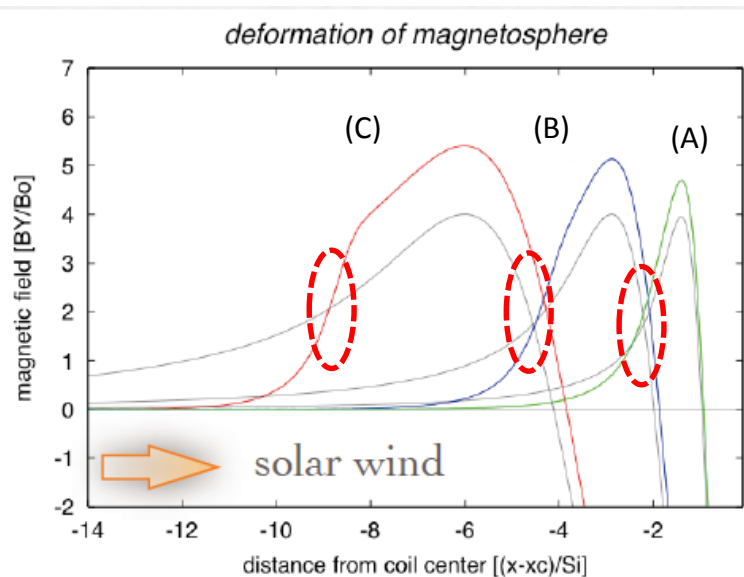


図 4-3-3: 図 4-3-2 における  $y=0$  上での  $B_y$  変化. ケース(A)から(C)は, 衛星搭載コイル電流の強さを変化させた時のダイポール磁場の大きさの違い.

流のパラメータは共通である。また、グレー色の線はプラズマ流の影響を受ける前の  $B_y$  の様子であり、緑、青、赤の線はそれぞれ、ケース(A), (B), (C)の場合においてプラズマ流によって圧縮された後の  $B_y$  構造を示す。それぞれ赤色の破線の楕円で囲んだ付近が最も  $B_y$  の空間変化が大きい領域であり、プラズマ流圧力とダイポール磁場の圧力がバランスする点付近に相当する。着目すべきは、イオンの運動論効果を考慮すべき今回のケースにおいても、磁場の空間変化が最も強く見られる場所は、プラズマとダイポール磁場の間の電磁流体的なバランス点とほぼ等しい、という点である。イオンダイナミクスのみを考えると、そのラーマ半径や慣性長はこの領域より十分大きいのでこの MHD 的なバランス点での磁場圧縮は考えにくい。しかし、電子ダイナミクスを考慮すると様子が違ってくる。図では示さないが、磁場の空間変化幅およびそこでの垂直電流層の幅は、ほぼその領域での電子のジャイロ半径程度である。これらのことを模式的に示したものを図 4-3-4 に示す。

図 4-3-4 のパネル(a)に示すようにイオン特性長より磁場構造が小さい場合、イオン流は有限ラーマ半径効果により、その磁場構造をすり抜けようとする。しかし、実際はパネル(b)に示すように、サイクロトロン半径が小さい電子はこの小型ダイポール磁場からの影響を強く受け、MHD 的なバランス点で電子は急激に減速する。そのためその領域では電子とイオンの間でダイナミクスの差異が生じる。これによって局所的に電荷分離が生じ、その結果強い静電場が発生する。この電場により、すり抜けようとするイオンを静電的な力で引き留めようとする。すなわち、イオンも弱い磁力線によって間接的に影響を受けることになる。同時に、磁気圏前面の MHD 的なバランス点では、電子のジャイロ半径程度の厚みの磁場圧縮領域(そこでは磁場に垂直な電子電流が流れる)が形成される。この現象は、メソスケールのダイポール磁場構造の場合、より顕著に見えたと考えられる。

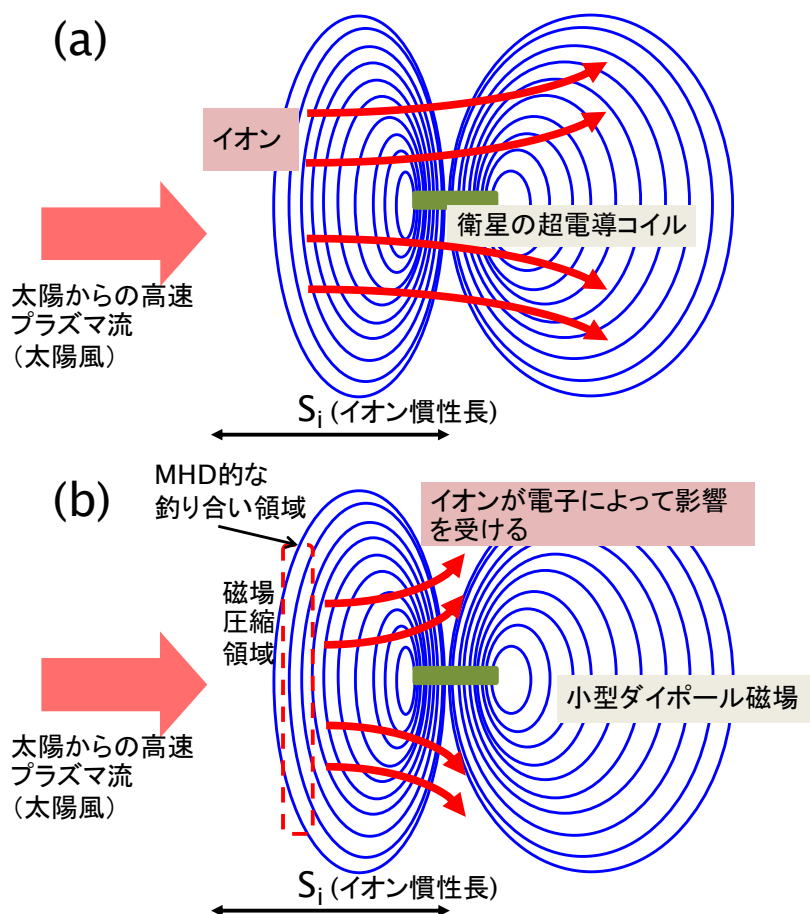


図 4-3-4: 小規模ダイポール場とプラズマ流の相互作用に関する概念図. (a) イオンのみ考慮の場合. (b) 電子ダイナミクスを考慮しイオンの間で電荷分離が生じる場合.

一方、惑星間磁場(IMF)を考慮すると、磁気圏形成の様子がまた変化する。ダイポール磁場構造の大きさがイオン特性長と同等程度の場合のシミュレーション結果を図 4-3-5 に示す。太陽風プラズマは超アルフベン速度で流れるので、地球磁場との相互作用の場合、磁気圏前面のイオン慣性長程度の領域においてバウショックという衝撃波領域が形成されることはよく知られている。一方、今回のように、磁場構造の大きさがイオン慣性長程度もしくはそれ以下の場合、地球磁気圏前面で見られるような衝撃波構造が明確に見られるかどうかは不明であるが、図に示されるように、少なくとも衝撃波のような密度の変動領域が前面に形成されている。図では示していないが、より小

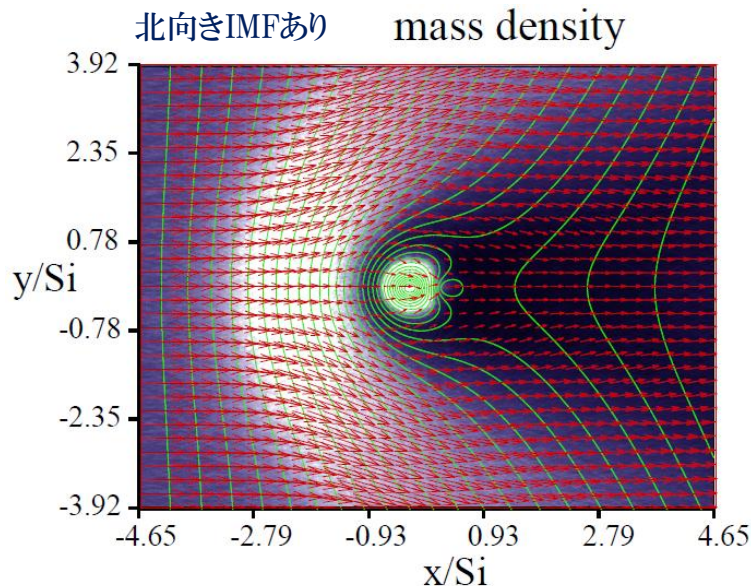


図 4-3-5: 惑星間空間磁場 (y 方向) を伴うプラズマ流が左側からある場合のプラズマ密度コンター図。緑線は磁力線。

規模のダイポール磁場構造の場合、磁気圏前面ではなく、尾部領域にこの変動領域がシフトする傾向を確認している。イオン慣性長よりも短いスケールにおいて衝撃波的な現象がどのような形で見えるのかについては、引き続き解析を進める予定である。一方、本 2 次元シミュレーションにおいては、磁気圏尾部側での磁力線再結合により IMF がダイポール磁場と一部繋がり、それが磁気圏前面に積み重なることにより、ダイポール場の前面では磁場密度の増大と太陽風プラズマの流入、閉じ込めが磁気圏前面に見られる。しかし、3 次元モデルを考えると、磁力線再結合領域およびそこから太陽風プラズマの磁気圏への流入は限定されたものになり、また、2 次元モデルとは違って流入プラズマの拡散も可能であるため、ダイポール磁場と IMF プラズマ流の相互作用の描像は今回の 2 次元モデルとは大きく違ってくる予想される。この点について今後詳細解析を行いたい。

3 次元モデル解析としては、イオンスケールの磁場構造をもつダイポールのケースについてはハイブリッド粒子シミュレーションモデルを用いて行った。IMF が北向きの場合、図 4-3-6 に示されるような太陽風とダイポール磁場の相互作用により小型磁気圏の形成が見られた。磁気圏の構造は地球磁気圏のそれと似通った構造に見える。しかし、図 4-3-7 に示した 2 枚の図のように磁力線を描画すると、太陽風と小型磁気圏の相互作用により、磁気圏境界を流れる太陽風の磁力線に

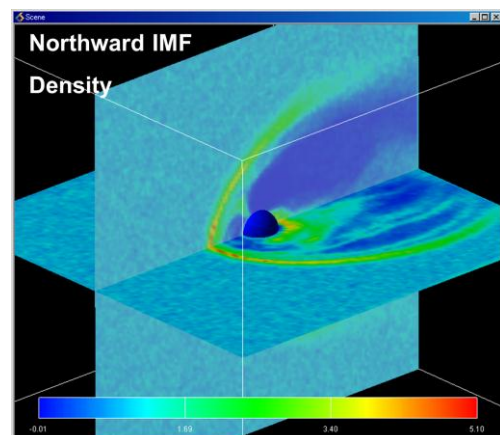


図 4-3-6: ハイブリッド粒子モデルを用いた 3 次元シミュレーション結果。イオン密度のコンター図。

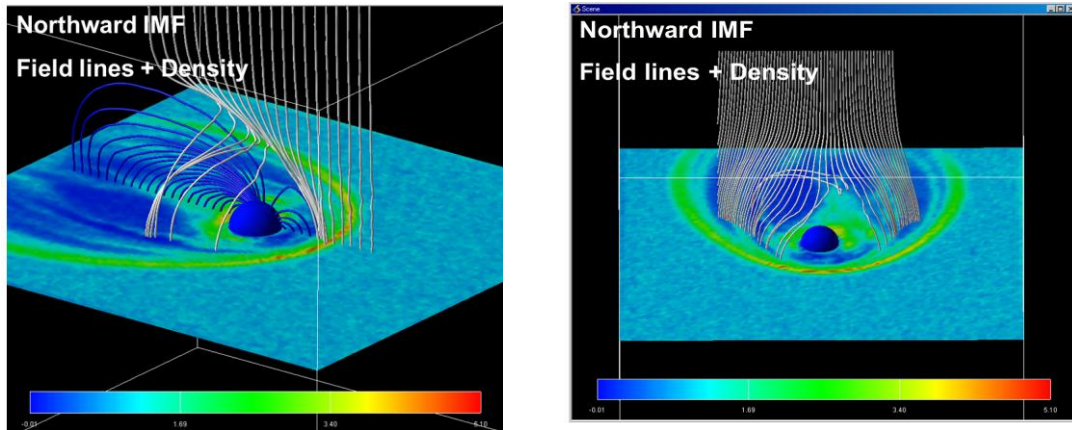


図4-3-7: 北向きIMFの場合の小型磁気圏と太陽風の相互作用に関するハイブリッド粒子シミュレーション結果. コンターは密度図. 青色および灰色の線はそれぞれ, 衛星起源ダイポールの磁力線およびIMFを示す. 非対称な磁気圏形成が見られる.

は左右非対称が発生することがわかる. これは, 磁気圏境界領域のイオンの運動論効果によりできるプラズマ流の非対称に起因する. 一方, 図では示さないが, IMFが南向きの場合, 北向きの場合に対して, 磁気圏境界のプラズマ密度が上昇する領域にむらが見られる. 磁力線と重ねて描画すると, 磁気圏昼側境界で磁力線がらせん構造になっている領域とプラズマ密度が上昇している領域が一致する. これは, 磁気圏昼側境界で, 複数の磁力線のつなぎ変わり(磁力線再結合)が発生し, プラズマの塊(プラズモイド)が発生したことを示している. このように IMF を考慮すると, 小型磁気圏形成に様々な影響が出てくるのが明らかになり, 今後も引き続きイオンスケールではハイブリッド粒子モデル, そしてイオンスケールから電子スケールの間のメソスケールでは全粒子モデルを用いたシミュレーションを実行し, より詳細な解析を行う.

上述したシミュレーションでは従来の一様格子モデルを用いたが, 広範囲にわたる太陽風-人工ダイポール磁場間の相互作用が数 m サイズの衛星に与える推力を計算機シミュレーションで評価する場合, 等間隔格子システムを用いる従来のプラズマシミュレーションでは膨大な空間格子数が必要となり, 計算機資源利用の観点から非常に効率が悪い. MPS の推力評価には, 局所的に空間分解能を動的に上げて粒子シミュレーションが行える PARMER コード利用が不可欠である. 前節 4.1 に述べた PARMER コードの 2 次元版を用いて, 現在小型磁気磁場とプラズマ流の相互作用に関するシミュレーション解析を進めている.

図 4-3-8 にイオン特性長より小規模なダイポール磁場構造とプラズマ流との相互作用に関する PARMER シミュレーションによって得られた電子数密度分布を示す. 太陽風プラズマは計算領域左端から流入するとともに, 計算領域中央に位置する衛星搭載コイル電流によって衛星中心に小型ダイポール磁場が形成されている. 前述したように, イオン特性長よりも磁場構造が小さい場合でも, 流入する太陽風プラズマはダイポール磁場と相互作用することにより磁気圏が形成され, 太陽風上流側では弓型に高数密度領域が形成されるとともに, 太陽風下流側では電子数密度が低い Wake 領域が形成していることがわかる.

図 4-3-8 の下パネルには, 電子数密度分布に格子点と磁力線分布を加えたものを示す. 本計算では 2 次元固定領域分割によるプロセス並列化を施しており, 正四角形の領域にプロセスを分割している(図中プロセス境界). 本ケースの場合, 16 プロセス×32 スレッドの合計 512 プロセスを用いた. 一方で, 本計算では AMR 機能によって異なる解像度を持つ格子が空間上で非一様に生成・消滅され, 同図中には 3 種類の異なる格子幅を持つ格子階層が存在していることがわかる. 本シミュレーションでは, 各場所においてプラズマ特性長であるデバイ長(電子数密度のルートに反比例)と電子のジャイロ半径(磁場密度に反比例)をモニターし, どちらか一方がある空間スケールよりも小さくなればその領域において格子細分化階層を生成する. 細かい格子領域(赤い領域)では太陽風上流側のベースとなる格子(緑色の領域)の半分の格子幅を持っており, また, 粗い格子

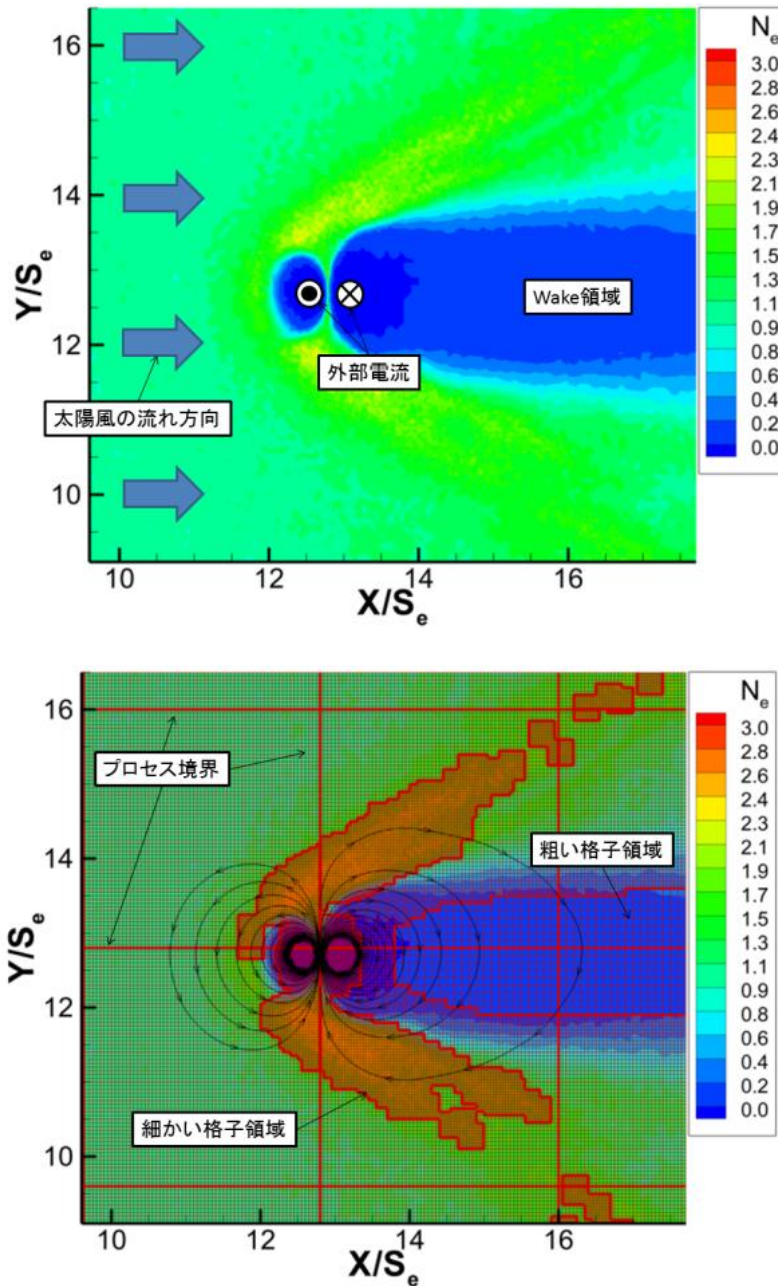


図 4-3-8: 太陽風の電子数密度(左)と磁力線分布(左)と電子数密度変動によって生成・消滅される細分化格子の様子(右). 上は初期段階, 下は定常状態の様子.

領域(青い領域)ではベースとなる格子の 2 倍の格子幅を持っている. このような適合細分化法を粒子シミュレーションに応用することにより, 計算資源の有効利用, 演算の大幅な短縮が可能となるとともに, 同一シミュレーション領域内でイオンと電子の間の運動論的カップリング現象を再現できる可能性を示すことができた.

#### [小型ダイポール磁場構造のプラズマビーム噴射による展開プロセス]

衛星周辺に形成された人工磁気圏と太陽風との相互作用によって十分な推力を得るためには, 磁気圏のサイズとして太陽風におけるイオン慣性長( $\sim 100\text{km}$ )程度以上が必要であると考えられている. MPSでは, 図 4-3-1 の概念図に示すように, 衛星からプラズマ噴射を行うことでこの磁場構造を拡大(磁気インフレーション)させ, イオン慣性長程度の磁気圏を形成することが検討されている.

4.2 節に示したように、JAXA グループでも磁場構造拡大に関する粒子シミュレーションを工学的観点から実施したが、我々神戸大グループでは、むしろ噴射プラズマによる磁場拡大の物理プロセスに着目した解析を実施した。モデルとしては、衛星起源のダイポール磁場に衛星から垂直にプラズマビームを噴射する場合を想定し、ビームをパラメータとして変化させた場合、どのような現象が生じるかに着目した。本解析では電子スケールのマイクロな現象を対象とし、また磁場変動における電子ダイナミクスの役割を明確にするため、電子およびイオン両方を粒子として取り扱う全粒子モデルシミュレーション手法を用いている。

図 4-3-9 は、シミュレーションで得られた噴射電子密度(左)と噴射イオン密度(右)を磁力線(緑)と共に表している。イオン慣性長より十分小さいスケールの磁気圏において、電子慣性およびイオン慣性の差が、両者の空間分布に違いとして表れている(図中の長さは太陽風中でのイオン慣性長  $S_i$  で規格化している)。左パネルに示されているように、噴射電子は衛星起源磁場に捕捉された形で、ダイポール磁場構造内部に留まっている。一方、右パネルに示されたように、イオンビームは電子とは違って慣性が大きいため磁力線を横切って分布している。このような電子とイオンのダイナミクスの違いが、ローカルの磁場構造変化にどのような影響を与えるかについて詳細解析を行った。具体的には、プラズマ噴射のエネルギー ( $\beta > 1$  または  $\beta < 1$ , 但し  $\beta$  はプラズマベータ値(プラ

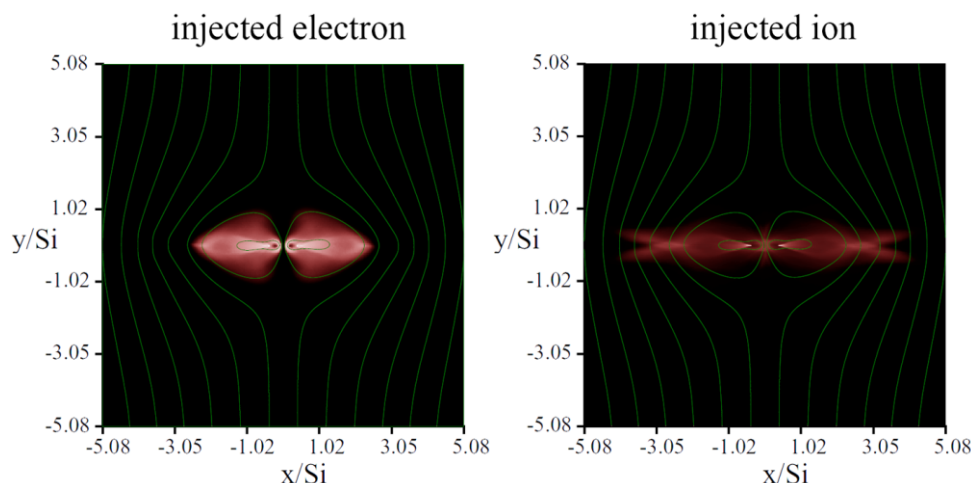


図 4-3-9: 中央の衛星位置から磁場に垂直方向に噴射した電子密度(左)とイオン密度(右). 磁力線は緑色. イオン慣性長より十分小さいスケールの磁気圏のケース.

ズマ運動エネルギーと局所磁場エネルギーの比))と初期磁気圏サイズ  $L$  ( $L/\rho > 1$  または  $L/\rho < 1$ , 但し  $\rho$  はイオンジャイロ半径)を組み合わせたパラメータを変化させて 2 次元全粒子シミュレーションを行った。得られたイオン分布図を図 4-3-10 に示す。左パネルに示されるように、噴射速度が低い場合は噴射プラズマが噴射点近傍で磁力線に捕捉されるため、大きな磁場構造拡大には至らない。また中央パネルに示されるように噴射速度が十分大きい場合、噴射イオンのラーマ半径が磁場構造サイズよりも大きくなり、ダイポール磁場構造の外部に出てしまう。この場合、背景プラズ

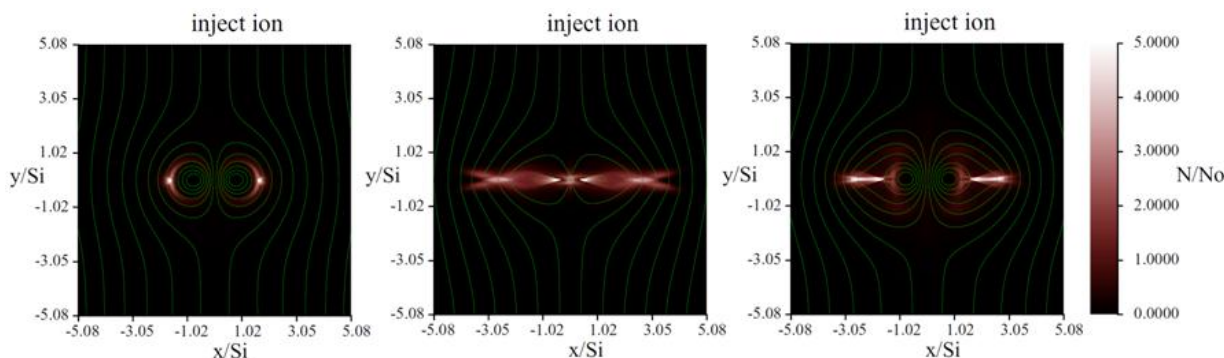


図 4-3-10: 噴射イオン密度と磁力線(緑線)  
(左) 低速噴射+大型磁気圏 (中) 高速噴射+小型磁気圏 (右) 高速噴射+大型磁気圏



マの電子によって噴射イオンが中和されるため、噴射プラズマとダイポール磁場との間に生じるべき電荷分離が生じなくなり、噴射イオンはダイポール磁場の影響範囲から抜ける。この場合も、ダイポール磁場構造は噴射プラズマ分布より小さくなる。噴射ビームとダイポール磁場の相互作用が効率よく効き、磁場の展開が最も効果的になるのは、右パネルに示すように、背景プラズマが排除された強磁場構造の中で噴射プラズマが遠方まで到達する場合である。言い換えれば、噴射イオンのラーマ半径が衛星からダイポール磁場領域と背景プラズマ領域の境界までの距離程度になる場合がダイポール磁場拡大には適していると言える。

### 3. 成果の位置づけ

太陽風プラズマの特性長であるイオンの慣性長(約 100km)やラーマ半径と同等もしくはそれより小さい規模のダイポール磁場構造と太陽風との相互作用についての研究例は少ない。本研究において、小規模ダイポール相互作用に関するプラズマ物理的観点からの粒子シミュレーションを開始し、特に小型磁気圏における電子ダイナミクスの役割についての詳細解析から新しい知見が得られたことはプラズマ物理分野において大きな成果である。また、MPSの推力評価など工学的解析を進めるうえでも、その基礎となる小型ダイポール磁場と太陽風の相互作用においてみられる様々なプラズマ物理現象の定量的理解およびそのメカニズムの把握は非常に重要である。本サブテーマ研究で得られた知見は、弱い固有磁場をもつ水星等、他の衛星や惑星と太陽風との相互作用において生起する様々なプラズマ物理現象の理解に大いに役立つと思われる。また「かぐや衛星」によって観測された月面上での磁気異常と太陽風の相互作用、それに関連する月面数十 km 上空で観測されたプラズマや電磁界擾乱に関する定量的理解においても、本サブテーマ研究で行われた全粒子シミュレーション成果が役立つ。

### 4. 類似研究との比較

これまで、地球磁気圏と太陽風との相互作用については電磁流体近似(MHD)アプローチにより数多くの研究がなされてきた。地球磁気圏の規模が太陽風のイオン特性長(慣性長など)と比較して非常に大きいため、磁気圏形成に関する解析においては電子のみならずイオンについても流体的な取り扱いで十分であった。磁気圏形成に伴う様々なプラズマ現象、例えば磁気圏前面の衝撃波や惑星間空間磁場と地球磁場との間で生じる磁力線再結合、についてはイオンを粒子として扱うハイブリッド粒子シミュレーションを用いた研究が盛んに行われており、近年になりやっと電子も粒子として扱う全粒子シミュレーション研究が実施されるようになってきた。それぞれの現象における電子ダイナミクスの役割や重要性についての定量的な解析も進められている。また計算機資源の増大により3次元空間モデルのシミュレーションも行われるようになってきた。

本研究では、対象とするダイポール磁場構造が太陽風プラズマの特性長よりも小さいため、地球磁気圏形成に関する研究でこれまでに得られてきた知見がどの程度適応できるのか不明であった。地球磁気圏形成の場合、イオンダイナミクスが非常に重要な役割を果たすが、今回取り扱う電子スケールの磁場構造の場合、基本的にイオン慣性長やラーマ半径よりもその規模が小さいため、イオン応答はほとんどないと予想されていた。しかし、今回のシミュレーション結果により、電子が局所磁場に応答するため、それによって電子イオン間で電荷分離が生じ、結果として静電力によりイオンも大きく影響を受けることが明らかになった。この現象は、地球磁気圏の場合でもミクロ的に生じていると考えられるが、ダイポール磁場の規模がイオン慣性長と電子ラーマ半径の間のメソスケールにおいて特にクローズアップされ、電子スケール磁気圏形成には重要な役割を果たすものと考えられる。

今後、月面磁気異常や水星等の弱磁場惑星と太陽風の相互作用に関する研究が盛んに行われるようになると予想されるが、現時点では、小規模磁場構造と太陽風プラズマの相互作用について宇宙プラズマ物理の観点から詳しく研究された先行研究は少なく、その意味で本研究はその先駆的な位置づけとなる。

### (2)研究成果の今後期待される展開

上述したように、小型磁場構想と太陽風プラズマの相互作用には局所磁場と電子ダイナミクスの

関係および電子-イオン相互作用が重要な役割を果たす。ダイポール磁場の場合、磁場強度は空間的に大きく変化するため、それに伴う電子のジャイロ運動も場所によって大きく違う。磁場強度が大きい点では電子のジャイロ半径は小さくなりこれを正しく再現するにはシミュレーションにおいて高い空間解像度が要求される。また電子-イオン間の相互作用についてもその質量比が約 1000 であるためマルチスケール的な取り扱いが必要である。従来の一様格子を用いた粒子シミュレーションの場合、高い空間解像度とマルチスケール性を同時に満たすモデル構築は計算機資源の制限から非常に困難であり、個々の現象を取り出して個別のシミュレーション解析を行うに留まらざるを得なかった。しかし、これでは個々の現象プロセスは理解できてもそれらの相互作用が正しく評価できず、マクロ-マイクロ間結合によって左右される統合的な現象にはマルチスケール対応が必須となる。

これに対応するために、本研究では 4-1 節に述べたように適合格子細分化法(AMR)を用いたプラズマ粒子シミュレーション手法 PARMER の開発を進めており、既にその実用を開始している。現在、2 次元版 PARMER を用いて小型ダイポール磁場と太陽風の相互作用に関連したマルチスケールプラズマ現象の詳細解析を進めており、局所磁場と電子ダイナミクスの関係および電子-イオンカップリングの精度を可能な限り上げ 3 次元モデルの利用も視野に入れ引き続き取り組みたい。特に磁気圏境界層領域におけるプラズマ非定常現象に着目し、従来の粒子モデルシミュレーションでは再現不可能なプラズマ素過程の解明およびそれが与える磁気圏形成への影響の定量的理解を目指す。課題の一つとして、磁気圏形成における電磁擾乱的な現象の詳細解析がある。太陽風はプラズマ特性速度であるアルフベン速度よりも大きな速度で太陽から噴き出されているため、地球のみならず MPS 衛星に対しても無衝突衝撃波の形成が考えられる。地球磁気圏の場合、磁気圏前面にバウショックと呼ばれる衝撃波構造が形成されることは観測やシミュレーション結果から明らかであるが、この構造の厚さはイオン慣性長で特徴づけられる。しかし本研究で扱うメソスケールや電子スケールの領域では、衝撃波構造を特徴づけるイオン慣性長よりもダイポール磁場構造が小さいため、無衝突衝撃波現象がどのような形で現れるのかは明らかでない。図 4-3-5 に示したようにイオンスケールに近いダイポール磁場構造の場合、衝撃波的な擾乱が磁気圏前面に見えることは確認したが、マグネットポーズとの区別も明確ではない。また、より小さいダイポール磁場構造の場合、磁気圏前面の衝撃波構造は見られず、むしろ磁気圏尾部側に電磁擾乱的な磁場の変動として見られることもシミュレーションの初期結果として得られている。今後、このような現象についての詳細解析を進め、その形成メカニズムおよび磁気圏サイズへの依存性などについて解明したい。また、太陽風磁場と人工ダイポール磁場との間で磁力線再結合も生じるが、ダイポール磁場規模の大小によって磁力線再結合の発生場所やそれによるオリジナルダイポール磁場構造への影響がどのように違うかという点も非常に興味深い。もし磁力線再結合によって人工ダイポール磁場が 3 次元的に大きくゆがめられるのであれば、MPS 推力推定においても大きな影響を及ぼす。この点は非常に重要な点と思われる。これらの解析を高精度な粒子シミュレーションで行うには、4-1 節で述べた PARMER コードを最大限に利用することが望まれる。そのためにも、PARMER コードのプロセス並列版を速やかに完了させ、京コンピュータを用いた並列性能評価およびチューニングを早期に完了させたい。

## § 5 成果発表等

(1)原著論文発表 (国内(和文)誌 9 件、国際(欧文)誌 33 件)

- [1] 梶村好宏, 篠原大介, 野田賢治, 中島秀紀, 計算機実験による磁気プラズマセイルの性能評価, 九州大学総理工報告第 29 巻 4 号, 369-373 頁, 2008 年.
- [2] Sasaki, I. Funaki, H. Yamakawa, H. Usui and H. Kojima, Numerical Analysis of Magnetic Sail Spacecraft, 26th International Symposium on Rarefied Gas Dynamics, AIP Conference Proceedings, Vol. 1084, 2009, pp.784-792.
- [3] Y. Minami, I. Funaki, H. Yamakawa, T. Nakamura, H. Nishida, D. Sasaki, H. Yonekura, H. Kojima and Y. Ueda, Thrust Characteristics of Magnetic Sail Spacecraft Using Superconducting Coils, 26th International Symposium on Rarefied Gas Dynamics, AIP Conference Proceedings, Vol. 1084, 2009, pp.

- 721-727.
- [4] I. Funaki, K. Ueno, Y. Oshio, T. Ayabe, H. Horisawa and H. Yamakawa, Laboratory Facility for Simulating Solar Wind Sails, 26th International Symposium on Rarefied Gas Dynamics, AIP Conference Proceedings, Vol. 1084, 2009, pp. 754-759.
  - [5] K. Ueno, T. Kimura, T. Ayabe, I. Funaki, H. Yamakawa and H. Horisawa, Thrust Measurement of Pure Magnetic Sail, TRANSACTIONS OF THE JAPAN SOCIETY FOR AERONAUTICAL AND SPACE SCIENCES, SPACE TECHNOLOGY JAPAN, Vol. 7, No. ists26, pp. Pb\_65-Pb\_69, 2009.
  - [6] H. Ueda, M. Okada, H. Usui, T. Muranaka, I. Shinohara, Estimation of Auroral Environment by Electrostatic Full-particle Simulations Modeling of REIMEI Satellite Observations, JSASS On-Line Journal Space Technology Japan, Vol.7, No. ists26, pp. Pr\_2\_13-Pr\_2\_18, 2009.
  - [7] 梶村好宏, 船木一幸, 西田浩之, 臼井英之, 篠原育, 山川宏, 中島秀紀, プラズマ噴射による磁気圏拡大現象におけるイオン粒子効果の定量評価, 日本航空宇宙学会論文誌, Vol.57, No.666, pp.287-294, 2009.
  - [8] K. Ueno, I. Funaki, T. Kimura, H. Horisawa and H. Yamakawa, Thrust Measurement of Pure Magnetic Sail using the Parallelogram-pendulum Method, Journal of Propulsion and Power, Vol. 25, No. 2, pp. 536-539, 2009.
  - [9] H. Usui, Y. Kajimura, M. Nunami, I. Funaki, I. Shinohara, H. Yamakawa, M. Nakamura, D. Akita and H. O. Ueda, Multi-Scale Plasma Particle Simulation for the Development of Interplanetary Flight System, Journal of Plasma and Fusion Research Series, Vol. 8, 2009, pp. 1569-1573.
  - [10] I. Funaki and H. Yamakawa, Research Status of Sail Propulsion using the Solar Wind, EPR-P3-204, Journal of Plasma and Fusion Research Series, Vol. 8, 2009, pp. 1580-1584.
  - [11] Y. Kajimura, Hideyuki Usui, Masanori Nunami, Ikkoh Funaki, Iku Shinohara and Hideki Nakashima, Numerical Study of Inflation of a Dipolar Magnetic Field in Space by Plasma Jet Injection, Journal of Plasma and Fusion Research Series, Vol. 8, 2009, pp. 1616-1621.
  - [12] H. Nishida, I. Funaki, Y. Intatani and K. Kusano, MHD Flow Field and Momentum Transfer Process of Magneto-Plasma Sail, EPR-P3-203, Journal of Plasma and Fusion Research Series, Vol. 8, 2009, pp. 1574-1579.
  - [13] M. Nunami and K. Nishihara, "Numerical Analysis of Laser Produced Plasma Expansion with Large Ion Larmor Radius via 3D PIC Simulation", Journal of Plasma and Fusion Research Series, Vol. 8, 2009, pp. 815-818.
  - [14] K. Ueno, I. Funaki, Imaging of Plasma Flow Around Magnetoplasma Sail in Laboratory Experiment, EPR-P3-206, Journal of Plasma and Fusion Research Series, Vol. 8, 2009, pp. 1585-1589.
  - [15] Y. Kajimura, H. Usui, I. Funaki, I. Shinohara and H. Yamakawa, Numerical Study of an Inflation of a Dipolar Magnetic Field by Plasma Jet Injection in Magneto Plasma Sail. ADVANCES IN APPLIED PLASMA SCIENCE, Vol.7, 2009, pp. 103-106.
  - [16] Y. Kajimura, H.Usui, I. Funaki, K.Ueno, M. Nunami, I. Shinohara, M. Nakamura, H. Yamakawa, Hybrid Particle-in-cell Simulations of Magnetic Sail in Laboratory Experiment, Journal of Propulsion and Power, Vol. 26, No. 1, January-February, 2010, pp. 159-166.
  - [17] T. Moritaka, M. Nunami, H. Usui, "Development of Full Particle-In-Cell Simulation Code with Adaptive Mesh Refinement Technique", Journal of Plasma and Fusion Research Series, vol. 9, pp.586-591, 2010.
  - [18] Toseo Moritaka, Hideyuki Usui, Masanori Nunami, Yoshihiro Kajimura Masao Nakamura and Masaharu Matsumoto, "Full particle-in-cell simulation study

- on magnetic inflation around a magneto plasma sail”, IEEE Transactions on Plasma Science, vol. 38, pp. 2219-2228, 2010.
- [19] Yoshihiro KAJIMURA, Kazuma UENO, Ikkoh FUNAKI, Hideyuki USUI, Masanori NUNAMI, Iku SHINOHARA, Masao NAKAMURA and Hiroshi YAMAKAWA, ”3D Hybrid Simulation of Pure Magnetic Sail Including Ion-Neutral Collision Effect in Laboratory”, Transaction of Japan Society for Aeronautical and Space Sciences Aerospace Technology Japan, Vol. 8, No. ists27, pp. Pb\_19-Pb\_25, 2010.
- [20] T. Fujimoto, H. Otsu, I. Funaki and Y. Yamagiwa, MHD Analysis of the Magnetic Diffusion Effect on Magneto Plasma Sail, Transactions of the Japan Society for Aeronautical and Space Sciences, Vol.53, No.180, 2010, pp. 84-90.
- [21] Tatsuki Matsui, Hideyuki Usui, Toseo Moritaka, Masanori Nunami, "MPI Parallelization of PIC Simulation with Adaptive Mesh Refinement," pdp, pp. 277-281, 2011 19th International Euromicro Conference on Parallel, Distributed and Network-Based Processing, 2011.
- [22] Hideyuki Usui, Masanori Nunami, Toseo Moritaka, Tatsuki Matsui, Yohei Yagi, A Multi-Scale Electromagnetic Particle Code with Adaptive Mesh Refinement and Its Parallelization, International Conference on Computational Science, June-1-3, 2011, published in Procedia Computer Science 4 (2011) 2337–2343.
- [23] Toseo MORITAKA, Masanori NUNAMI, Hideyuki USUI and Tatsuki MATSUI, “Full PIC simulation on solar wind interaction with a small scale magnetosphere by using uniform and nested grid systems”, Journal of Plasma and Fusion Research Special Issue, Vol. 6, 2401101, 2011.
- [24] Yoshihiro Kajimura, Hideki Nakashima, “Verification of Hybrid Particle-in-Cell Simulation Model for Advanced Plasma Propulsions: Magneto Plasma Sail and Magnetic Nozzle for Laser Fusion Rocket”, Journal of Space Technology and Science, Vol. 25, No. 2, 2011, pp. 34-54.
- [25] Yoshihiro Kajimura, Ikkoh Funaki, Hiroyuki Nishida, Hideyuki Usui, Iku Shinohara, Hiroshi Yamakawa, Hideki Nakashima, “Quantitative Evaluation of Ion Kinetic Effect in Magnetic Field Inflation by Injection of Plasma Jet”, Transactions of the Japan Society for Aeronautical and Space Sciences, Vol. 54, No.184, 2011, pp. 90-97.
- [26] 芦田康将, 船木一幸, 山川宏, 梶村好宏, 小嶋浩嗣, “磁気セイル推力解析のための簡易モデルの検討”, 日本航空宇宙学会論文集, Vol.59, No.688, 2011, pp.126-131.
- [27] 上野一磨, 大塩裕哉, 船木一幸, 山川宏, 堀澤秀之, “磁気セイルの推力特性に関する実験研究”, 日本航空宇宙学会論文集, Vol.59, No.692, 2011, pp.229-235.
- [28] 大塩裕哉, 上野一磨, 船木一幸, “準定常 MPD アークジェットプルームの非定常特性”, 日本航空宇宙学会論文集, Vol.59, 2011, pp.70-75.
- [29] 船木一幸, 山川宏, 太陽風宇宙帆船と磁気プラズマセイルの研究, 日本航空宇宙学会誌, Vol.59, 2011, pp.342-348.
- [30] Daisuke Akita, Hiroko Ueda, Iku Shinohara, Ikkoh Funaki and Hideyuki Usui, “Magnetic Inflation of Magnetic Plasma Sail by One Component Plasma Simulation”, Transactions of the Japan Society for Aeronautical and Space Sciences, Aerospace Technology Japan, Vol. 8, (2011) pp. Pb\_109-Pb\_114.
- [31] Hiroyuki Nishida, Ikkoh Funaki, Yoshifumi Inatani and Kanya Kusano, “Discussion on Momentum Transfer Process of a Magneto-Plasma Sail”, Journal of Propulsion and Power, Vol. 27, No. 5, 2011, pp. 1149-1153.
- [32] Moritaka Toseo, Kajimura Yoshihiro, Hideyuki Usui, Masaharu Matsumoto, Tatsuki Matsui and Iku Shinohara, “Momentum transfer processes of solar wind plasmas in a kinetic scale artificial magnetosphere”, Physics of Plasmas 19, 032111, 2012.
- [33] 松本正晴, 梶村好宏, 白井英之, 船木一幸, 篠原育, “惑星間磁場を考慮した磁気セイル

- ルの2次元Hybrid-PICシミュレーション”, 日本航空宇宙学会論文集, Vol.60, 2012, No. 1, pp.31-39.
- [34] 西田浩之, 船木一幸, 太陽風を利用した推進システムの推力特性に関する電磁流体シミュレーション, 日本航空宇宙学会誌, Vol.60, 2012, pp.65-71.
- [35] Yoshihiro Kajimura, Ikkoh Funaki, Masaharu Matsumoto, Iku Shinohara, Hideyuki Usui, Kazuma Ueno, Yuya Ooshio, Hiroshi Yamakawa, “3D Hybrid Simulation of Pure Magnetic Sail on Ion Inertial Scale in Laboratory”, TRANSACTIONS OF THE JAPAN SOCIETY FOR AERONAUTICAL AND SPACE SCIENCES, AEROSPACE TECHNOLOGY JAPAN, Vol. 10 (2012) No. ists28 (ISTS Special Issue: Selected papers from the 28th International Symposium on Space Technology and Science) p. Pb\_51-Pb\_57.
- [36] Masaharu MATSUMOTO, Yoshihiro KAJIMURA, Hideyuki USUI, Ikkoh FUNAKI and Iku SINOHARA, “Two-Dimensional Hybrid Particle-In-Cell Simulation of Solar Wind Plasma Flow around Magnetic Sail”, TRANSACTIONS OF THE JAPAN SOCIETY FOR AERONAUTICAL AND SPACE SCIENCES, AEROSPACE TECHNOLOGY JAPAN, Vol. 10 (2012) No. ists28 (ISTS Special Issue: Selected papers from the 28th International Symposium on Space Technology and Science) p. Pb\_43-Pb\_50.
- [37] Yoshihiro Kajimura, Ikkoh Funaki, Masaharu Matsumoto, Iku Shinohara, Hideyuki Usui, Hiroshi Yamakawa, “Thrust and Attitude Evaluation of a Magnetic Sail by 3D Hybrid PIC Code”, Journal of Propulsion and Power, Vol. 28, No. 3, May-June, 2012, pp. 652-663.
- [38] Ashida, Y., Funaki, I., Yamakawa, H., Kajimura, Y. and Kojima, H., Thrust Evaluation of a Magnetic Sail by Flux-Tube Model, JOURNAL OF PROPULSION AND POWER, Vol. 28, No. 3, May-June 2012, pp. 642-651.
- [39] Masaharu Matsumoto, Yoshihiro Kajimura, Hideyuki Usui, Ikkoh Funaki, Iku Shinohara, “Application of a total variation diminishing scheme to electromagnetic hybrid particle-in-cell plasma simulation”, Computer Physics Communications, Vol.183, Issue.10, pp. 2027-2034, 2012.
- [40] K. Ueno, Y. Oshio, I. Funaki, H. Horisawa and H. Yamakawa, Thrust Measurement of Magnetic Sail for Various Tilt Angles, Transactions of the Japan Society for Aeronautical and Space Sciences, Aerospace Technology Japan, Vol.10, 2012, pp. Tb\_13-Tb\_16.
- [41] Y. Oshio, K. Ueno and I. Funaki, Plume Characteristics of a Quasi-steady Magnetplasmadynamic Arcjet, IEEE Transactions on Plasma Science, Vol.40, No. 12, 2012, pp. 3520-3527.
- [42] 長崎陽, 中村武恒, 船木一幸, 芦田康将, 山川宏, 伝導冷却マグネットを指向したビスマスならびにイットリウム系高温超電導テープ導体の伝熱特性, 低温工学, Vol.47, No.10, 2012, pp.597-604.

(2)その他の著作物(総説、書籍など)

- [1] 臼井英之, 沼波政倫, マルチスケール粒子シミュレーション手法の開発と宇宙機-宇宙プラズマ相互作用への応用, プラズマ核融合学会誌, Vol.85, No. 9, 2009, pp.589-592.
- [2] 臼井英之, 「惑星間航行システム開発に向けたマルチスケール粒子シミュレーション」, 応用物理, 第80巻, 第7号, p.0602-0605 (2011).
- [3] 臼井英之, 日本計算工学会誌「計算工学」惑星間航行システム開発に向けたマルチスケール粒子シミュレーション, Vol.16, No.3, 2011.
- [4] 松本正晴, 梶村好宏, 船木一幸, 篠原育, プラズマセイル評価用ハイブリッド粒子シミュレーションスキームの開発, 宇宙航空研究開発機構研究開発資料, JAXA-RM-11-019, 2012.

(3)国際学会発表及び主要な国内学会発表

① 招待講演 (国内会議 6 件、国際会議 6 件)

- [1] 白井英之(京都大学), 惑星間航行システム開発に向けたマルチスケール粒子シミュレーション, 地球電磁気・地球惑星圏学会(SGEPSS)秋学会, 仙台市戦災復興記念館, 2008年10月9日-12日.
- [2] 沼波政倫(京都大学), マルチスケール・プラズマ粒子コードの開発と惑星間航行システム解析への応用, 平成20年度名古屋大学太陽地球環境研究所研究集会「ペタスケールコンピューティング検討会」&「太陽地球/惑星系統合型モデル・シミュレータ構築に向けた研究集会」, 海洋研究開発機構 横浜研究所, 2008年8月6-8日.
- [3] Hideyuki Usui (and Toseo Moritaka), "Plasma Particle Simulation on Interactions Between an Artificial Small Magnetosphere and the Solar Wind", 2nd international symposium on radio systems and space plasma, August 25-27, 2010, Sofia, Bulgaria.
- [4] 白井英之, 先端宇宙推進開発に向けたプラズマ粒子シミュレーション研究, Plasma conference 2011, (「宇宙利用のためのプラズマ工学とプラズマ物理学の相互作用」シンポジウム, 招待講演, パネリスト)金沢, 2011年11月22日-25日, 石川県立音楽堂.
- [5] 白井英之, 適合格子細分化法を用いた PIC シミュレーション, STE シミュレーション研究会: プラズママルチスケールシミュレーションの現状と展望(平成 23 年度名古屋大学太陽地球環境研究所研究集会), 広島大学東千田キャンパス, 平成 24 年 3 月 1 日.
- [6] Hideyuki Usui, T. Moritaka and JST/CREST multi-scale PIC simulation team, Full PIC simulation on solar wind interaction with a small-scale artificial magnetosphere, ISSS-10, July 24-Aug.1, Banff, Canada, 2011.
- [7] Hideyuki Usui, A multi-scale electromagnetic particle code with adaptive mesh refinement and its parallelization, JIFT Workshop 2011 "The Next Stage in the Progress of Simulation Science in Plasma Physics", NIFS, Toki, Dec. 2-3, 2011.
- [8] Hideyuki Usui and JST/CREST project team on Multi-scale particle simulation, Plasma Particle Simulation toward the Development of Advanced Space Propulsion, The 7th EU-Japan Joing Symposium on Plasma Processing, Nara, Todaiji Culture center, January, 16-18, 2012.
- [9] Masao Nakamura, Hybrid Simulations for an Ion Scale Magnetosphere, AOGS-AGU (WPGM) Joint Assembly, Resort World Convention Centre, Singapore, 13-17 August, 2012.
- [10] 白井英之, 適合格子細分化法を用いた PIC シミュレーション, STE シミュレーション研究会: プラズママルチスケールシミュレーションの現状と展望(平成 23 年度名古屋大学太陽地球環境研究所研究集会), 広島大学東千田キャンパス, 平成 24 年 3 月 1 日.
- [11] 白井英之, 適合格子細分化法を用いた粒子コードの開発と並列化, プラズマシミュレータシンポジウム 2012, 核融合科学研究所, 平成 24 年 9 月 12 日.
- [12] H. Usui, Parallelized Adaptive Mesh Refinement Particle-In-Cell Scheme with Dynamics Domain Decomposition, JIFT 2012, "Innovative methods in Plasma Particle Simulations", Providence, U.S., Nov. 2-3, 2012.

② 口頭発表 (国内会議 120 件、国際会議 62 件)

(国内会議)

- [1] 綾部友洋(東海大学), 上野一磨, 木村俊之, 船木一幸, 堀澤秀之, 山川宏, 準定常MPDアークジェットを用いた磁気プラズマセイルの実験室実験, 第40回流体力学講会, 1D11, 東北大学, 仙台, 2008年6月12-13日.
- [2] 藤本智也(静岡大学), 大津広敬, 船木一幸, 山極芳樹, 磁気プラズマセイル周りに形成される流れ場の電磁流体解析, 第40回流体力学講会, 2A2, 東北大学, 仙台, 2008年6月12-13日.

- [3] 山川宏, 船木一幸 (JAXA), 超電導コイルを利用した宇宙機推進システムー磁気プラズマセイルー, 2008 年度 第 1 回超電導応用研究会シンポジウム, JAXA 宇宙科学研究本部, 相模原, 2008 年 7 月 10 日.
- [4] 中村雅夫 (大阪府立大学), ミニ磁気圏ハイブリッド計算法の開発, STE 研究所研究集会「ペタスケールコンピューティング検討会」「太陽地球/惑星系統合型モデル・シミュレータ構築に向けた研究集会」, 地球シミュレーターセンター, 2008 年 8 月 7 日.
- [5] 沼波政倫 (京都大学), 臼井英之, 梶村好宏, 篠原育, 適合格子細分化法を用いた高効率・高分解能な電磁粒子コード開発, 日本物理学会 2008 年秋季大会, 岩手大学, 2008 年 9 月 20-23 日.
- [6] 梶村好宏 (京都大学), 臼井英之, 沼波政倫, 篠原育, 船木一幸, 山川宏, 太陽風から電磁気学的推力を得る磁気プラズマセイルの実現に向けた数値解析, 地球電磁気・地球惑星圏学会 (2008 年秋学会), 仙台市戦災復興記念館, 2008 年 10 月 9-12 日.
- [7] 中村雅夫 (大阪府立大学), Interaction between solar wind and mini-magnetosphere of dipolar magnetized objects, 地球電磁気・地球惑星圏学会 (SGEPSS) 秋学会, 仙台市戦災復興記念館, 2008 年 10 月 9 日-12 日.
- [8] 沼波政倫 (京都大学), 臼井英之, 梶村好宏, 篠原育, AMR 法を用いたマルチスケール電磁粒子コードの開発と応用, 「多階層シミュレーションと磁気リコネクションへの応用」ワークショップ, 安保ホール (名古屋), 2008 年 11 月 6 日.
- [9] 梶村好宏 (京都大学), 臼井英之, 篠原育, 船木一幸, 沼波政倫, 中村雅夫, 山川宏, 秋田大輔, 地上実験と数値解析との比較を通じて予測した磁気セイルの推進性能, 第 52 回宇宙科学技術連合講演会, 兵庫県立淡路夢舞台国際会議場, 2008 年 11 月 5 日-7 日.
- [10] 藤本智也 (静岡大学), 大津広敬, 船木一幸, 山極芳樹, 磁気プラズマセイルのプラズマ流における非理想電磁流体効果の数値解析, 1G06, 第 52 回宇宙科学技術連合講演会, 淡路夢舞台国際会議場, 淡路島, 2008 年 11 月 5-7 日.
- [11] 佐々木大祐 (京都大学), 船木一幸, 山川宏, 藤本智也, 小嶋浩嗣, 磁気プラズマセイル宇宙機の推力に関する数値解析, 1G03, 第 52 回宇宙科学技術連合講演会, 淡路夢舞台国際会議場, 淡路島, 2008 年 11 月 5-7 日.
- [12] 梶村好宏 (京都大学), 上野一磨, 船木一幸, 臼井英之, 沼波政倫, 篠原育, 山川宏, マグセイル推力測定実験とハイブリッド粒子モデルによる数値解析の比較, 宇宙輸送シンポジウム, 宇宙航空研究開発機構, 2009 年 1 月 19, 20 日.
- [13] 梶村好宏 (京都大学), 臼井英之, 沼波政倫, 山川宏, 船木一幸, 篠原育, 中村雅夫, イオン粒子シミュレーションを用いた磁気セイル宇宙機の推力評価, 第 1 回宇宙環境・利用シンポジウム・第 2 回宇宙ユニットシンポジウム, 京都大学生存圏研究所, 2009 年 3 月 2 日.
- [14] 梶村好宏 (京都大学), 船木一幸, 臼井英之, 篠原育, 沼波政倫, 中村雅夫, 山川宏, 秋田大輔, 磁気プラズマセイルで用いられるプラズマ噴射による磁気圏展開の数値解析, 第 49 回航空原動機・宇宙推進講演会, ロワジールホテル長崎, 2009 年 3 月 5 日, 6 日.
- [15] 船木一幸 (JAXA), 藤本智也, 大津広敬, 西田浩之, 山極芳樹, 磁気プラズマセイルの電磁プラズマシミュレーション, 平成 20 年度衝撃波シンポジウム, 17-C-2-4, 名古屋大学, 2009 年 3 月 17 日~19 日.
- [16] 沼波政倫 (核融合科学研究所), 臼井英之, 梶村好宏, 篠原育, 超並列環境に向けたマルチスケール粒子コードの開発, 日本物理学会 第 64 回年次大会, 立教大学, 2009 年 3 月 27 日.
- [17] 西田浩之 (東京農工大学), 船木一幸, 稲谷芳文, 草野完也, 太陽風を利用した推進システムの電磁流体解析, 日本物理学会 第 64 回年次大会, 立教大学, 2009 年 3 月 28 日.
- [18] 臼井英之 (京都大学), 惑星間航行システム開発に向けたマルチスケール粒子シミュレ

- ーション, 日本物理学会 第 64 回年次大会, 立教大学, 2009 年 3 月 30 日.
- [19] 梶村好宏 (京都大学), 上野一磨, 船木一幸, 篠原育, 臼井英之, 沼波政倫, 中村雅夫, 山川宏, 3 次元ハイブリッドコードを用いた磁気セイル地上実験の数値解析, 日本航空宇宙学会第 40 期 通常総会及び講演会 (年会), 調布, 2009 年 4 月 9-10 日.
- [20] 臼井英之 (神戸大学), 梶村好宏, 沼波政倫, 篠原育, 秋田大輔, 船木一幸, 中村雅夫, 山川宏, 上田裕子, 衛星からのプラズマ噴射による小型人工磁気圏の展開プロセス, 日本地球惑星科学連合 2009 年大会, 幕張メッセ 国際会議場, 2009 年 5 月 16 日-21 日.
- [21] 上田裕子 (JAXA), 村中崇信, 篠原育, 臼井英之, 宇宙機環境プラズマ解析への Nested Grid の適用検討, 1A01, 第 53 回宇宙科学技術連合講演会, 京都大学, 2009 年 9 月 9 日.
- [22] 梶村好宏 (京都大学), 臼井英之, 船木一幸, 篠原育, 沼波政倫, 中村雅夫, 山川宏, 磁気プラズマセイルで用いられるプラズマ噴射による磁気圏拡大の 3 次元ハイブリッド粒子シミュレーション, 第 53 回宇宙科学技術連合講演会, 京都大学, 2009 年 9 月 9 日-11 日.
- [23] 大塩裕哉 (総研大), 上野一磨, 船木一幸, 磁気セイルの磁気圏変動の実験的研究, 第 53 回宇宙科学技術連合講演会, 1K08, 京都大学, 2009 年 9 月 9-11 日.
- [24] 上野一磨 (総研大), 船木一幸, 大塩裕哉, 堀澤秀之, 山川宏, 磁気セイル推力の実験的評価, 第 53 回宇宙科学技術連合講演会, 2L06, 京都大学, 2009 年 9 月 9-11 日.
- [25] 西田浩之 (東京農工大), 永井涼, 船木一幸, 惑星間磁場が磁気セイルの推力に与える影響についての定性的評価, 第 53 回宇宙科学技術連合講演会, 2L08, 京都大学, 2009 年 9 月 9-11 日.
- [26] 沼波政倫 (核融合科学研究所), 適合格子細分化法を用いたマルチスケール・プラズマ粒子シミュレーション, 自然科学研究機構 重力多体系とプラズマ系におけるシミュレーション研究会, 国立天文台, 2009 年 9 月 11 日.
- [27] 中村雅夫 (大阪府立大学), Interaction between solar wind and mini-magnetosphere of dipolar magnetized objects, 第 126 回 地球電磁気・地球惑星圏学会 (SGEPSS), 金沢大学, 2009 年 9 月 27 日-30 日.
- [28] 臼井英之 (神戸大学), JST-CREST マルチスケール粒子シミュレーションチーム, 小型人工磁気圏と衛星噴射プラズマおよび太陽風の相互作用, 第 126 回 地球電磁気・地球惑星圏学会 (SGEPSS), 金沢大学, 2009 年 9 月 27 日-30 日.
- [29] 芦田康将 (京都大学), 山川宏, 船木一幸, 小嶋浩嗣, 磁気セイル推力モデルの構築, 第 46 回日本航空宇宙学会関西・中部支部合同秋期大会, A-1, 京都, 2009 年 11 月 27 日.
- [30] 小山友一 (京都大学), 山川宏, 船木一幸, 小嶋浩嗣, 中村武恒, 太陽風変動下の磁気セイル推力制御を可能にする超伝導電流制御系の設計, 第 46 回日本航空宇宙学会関西・中部支部合同秋期大会, A-2, 京都, 2009 年 11 月 27 日.
- [31] 向井祐利 (京都大学), 山川宏, 船木一幸, 中村武恒, 小嶋浩嗣, 超伝導コイルを用いた磁気セイル推進システムの地上での推力測定実験に関する検討, 第 46 回日本航空宇宙学会関西・中部支部合同秋期大会, A-3, 京都, 2009 年 11 月 27 日.
- [32] 梶村好宏 (京都大学), 臼井英之, 船木一幸, 篠原育, 山川宏, 磁気プラズマセイル開発に向けた数値シミュレーション, 第 2 回宇宙環境利用シンポジウム (第 133 回生存圏シンポジウム), 京都大学, 2009 年 12 月 4 日.
- [33] 船木一幸 (ISAS/JAXA), 山川宏, 杉田寛之, 中村武恒, 石村康生, 磁気プラズマセイル宇宙機の検討 (その 1), 宇宙航行の力学シンポジウム, 相模原, 2009 年 12 月 10-11 日.
- [34] 西田浩之 (東京農工大), 船木一幸, 稲谷芳文, 電磁流体解析による磁気プラズマセイルの性能予測, 宇宙航行の力学シンポジウム, 相模原, 2009 年 12 月 10-11 日.
- [35] 臼井英之 (神戸大), 篠原育, 船木一幸, 山川宏, 梶村好宏, 沼波政倫, 中村雅夫,



- 西田浩之, 松本正晴, 上田裕子, 森高外征雄, 磁気プラズマセイルのプラズマ粒子シミュレーション解析, 宇宙航行の力学シンポジウム, 相模原, 2009年12月10-11日.
- [36] 船木一幸 (ISAS/JAXA), 山川宏, 杉田寛之, 中村武恒, 石村康生, 西田浩之, 梶村好宏, 大津広敬, 山本直樹, 山極芳樹, 篠原育, 小嶋浩嗣, 臼井英之, 沼波政倫, 藤田和央, 松本正晴, 窪田健一, 小川博之, 坪井伸幸, 上野一磨, 大塩裕哉, 堀澤秀之, 向井祐利, 小山友一, 芦田康将, 中村雅夫, プラズマセイル飛翔実験機の研究, 第10回宇宙科学シンポジウム, P2-89, 相模原, 2010年1月7-8日.
- [37] 梶村好宏(京都大学), 臼井英之, 船木一幸, 篠原育, 山川宏, 3次元ハイブリッド粒子モデルによる磁気プラズマセイルの推力評価, 宇宙輸送シンポジウム, STEP-2009-42, 宇宙航空研究開発機構(相模原), 2010年1月14-15日.
- [38] 山本直樹(静岡大学), 船木一幸, 山極芳樹, 大津広敬, 惑星間磁場を考慮した磁気プラズマセイルの電磁流体解析, 平成21年度宇宙輸送シンポジウム, STEP-2009-43, 相模原, 2010年1月14-15日.
- [39] 大塩裕哉(総研大), 上野一磨, 船木一幸, 磁気セイル実験におけるイオンスケール磁気圏の動的現象, 平成21年度宇宙輸送シンポジウム, STEP-2009-45, 相模原, 2010年1月14-15日.
- [40] 上野一磨(総研大), 大塩裕哉, 船木一幸, 堀澤秀之, 山川宏, 惑星間磁場を考慮した磁気セイルの模擬実験, 平成21年度宇宙輸送シンポジウム, STEP-2009-46, 相模原, 2010年1月14-15日.
- [41] 船木一幸 (ISAS/JAXA), 宇宙機用プラズマ推進の現状と今後の展望, 第13回若手科学者によるプラズマ研究会, 那珂, 2010年3月11日.
- [42] 上野一磨(総研大), 大塩裕哉, 船木一幸, スペースサイエンスチャンバーを利用した磁気プラズマセイル実験, スペースプラズマ研究会, 相模原, 2010年3月11-12日.
- [43] 船木一幸(ISAS/JAXA), 山川宏, 深宇宙を進む超伝導帆船・磁気プラズマセイル, 第57回応用物理学関係連合講演会, 17p-ZM-7, 平塚, 2010年3月17-20日.
- [44] 大塩裕哉(総研大), 上野一磨, 船木一幸, 磁気セイル地上実験における磁気セイルの磁気圏変動の研究, 衝撃波シンポジウム, 18-P-09, 埼玉大, 2010年3月17-19日.
- [45] 梶村好宏(京都大学), イオンスケールにおけるMPS/Magsailの推力特性, MPSシンポジウム, 龍谷大学, 2010年3月30日-31日.
- [46] 西田浩之(東京農工大), MPS-MHD シミュレーション, MPS シンポジウム, 龍谷大学, 2010年3月30日-31日.
- [47] 上野一磨(総研大), MPS 実験のオーバービューについて, MPS シンポジウム, 龍谷大学, 2010年3月30日-31日.
- [48] 窪田健一 (ISAS/JAXA), MPD スラスタに関する電磁流体シミュレーション, MPS シンポジウム, 龍谷大学, 2010年3月30日-31日.
- [49] 船木一幸 (ISAS/JAXA), MPS-WG の現状, MPS シンポジウム, 龍谷大学, 2010年3月30日-31日.
- [50] 山川宏(京都大学), MPS システム・ミッション検討, MPS シンポジウム, 龍谷大学, 2010年3月30日-31日.
- [51] 船木一幸 (ISAS/JAXA), MPS 搭載用コイル検討, MPS シンポジウム, 龍谷大学, 2010年3月30日-31日.
- [52] 臼井英之(神戸大), CREST/JST 研究プロジェクトの概要, MPS シンポジウム, 龍谷大学, 2010年3月30日-31日.
- [53] 沼波政倫(核融合研), AMR/PIC コードの概要, MPS シンポジウム, 龍谷大学, 2010年3月30日-31日.
- [54] 森高外征雄(神戸大), full-PIC コードによるMPSシミュレーション, MPS シンポジウム, 龍谷大学, 2010年3月30日-31日.
- [55] 上田裕子 (ISAS/JAXA), 高並列化PIC対応Poisson Solverの検討, MPS シンポジウム, 龍谷大学, 2010年3月30日-31日.

- [56] 山本直樹(静岡大), MPS の MHD シミュレーションと IMF 効果, MPS シンポジウム, 龍谷大学, 2010 年 3 月 30 日-31 日.
- [57] 大塩裕哉(総研大), Pure MagSail 実験, MPS シンポジウム, 龍谷大学, 2010 年 3 月 30 日-31 日.
- [58] 上野一磨(総研大), IMF 実験/ISAS 新チャンバーの紹介と今後の計画, MPS シンポジウム, 龍谷大学, 2010 年 3 月 30 日-31 日.
- [59] 森高外征雄(神戸大), “磁気プラズマセイルにおける人工磁気圏展開と太陽風相互作用”, 日本地球惑星科学連合 2010 年大会, 平成 22 年 5 月 23-28 日, 幕張メッセ国際会議場.
- [60] 大塩裕哉(総研大), “惑星間磁場を印加した磁気セイルの磁気圏変動の動的現象”, 流体力学講演会, 平成 22 年 6 月 24-25 日, 米子コンベンションセンター BiG SHiP.
- [61] 臼井英之(神戸大), “人工小型磁気圏と太陽風の相互作用に関するプラズマ粒子シミュレーション”, 第 7 回宇宙環境シンポジウム, 平成 22 年 10 月 19, 20 日, 東京国際フォーラム.
- [62] 臼井英之(神戸大), “小型磁気圏と太陽風の相互作用に関する粒子シミュレーション”, 第 128 回地球電磁気・地球惑星圏学会秋学会, 平成 22 年 10 月 31 日-11 月 3 日, 沖縄県市町村自治会館.
- [63] 小山友一(京都大), “磁気セイル推力制御のための超伝導コイル励磁用電源系の設計”, 第 54 回宇宙科学技術連合講演会, 平成 22 年 11 月 17 日~19 日, 静岡県コンベンションアーツセンター「グランシップ」.
- [64] 上野一磨(総研大), “イオンスケール磁気プラズマセイルの推力予測実験”, 第 54 回宇宙科学技術連合講演会, 平成 22 年 11 月 17 日~19 日, 静岡県コンベンションアーツセンター「グランシップ」.
- [65] 梶村好宏 (ISAS/JAXA), “磁気ノズルを用いた推進機の性能向上に向けた粒子シミュレーション”, 第 54 回宇宙科学技術連合講演会, 平成 22 年 11 月 17 日~19 日, 静岡県コンベンションアーツセンター「グランシップ」.
- [66] 大塩裕哉(総研大), “準定常 MPD アークジェットプルームの非定常特性”, 第 54 回宇宙科学技術連合講演会, 平成 22 年 11 月 17 日~19 日, 静岡県コンベンションアーツセンター「グランシップ」.
- [67] 松本正晴 (ISAS/JAXA), “磁気プラズマセイルの開発に向けたハイブリッド粒子シミュレーション”, 第 54 回宇宙科学技術連合講演会, 平成 22 年 11 月 17 日~19 日, 静岡県コンベンションアーツセンター「グランシップ」.
- [68] 臼井英之(神戸大), マルチスケール粒子シミュレーション CREST プロジェクト (JST/CREST), 先端宇宙推進開発へのプラズマシミュレーション利用, 第 54 回宇宙科学技術連合講演会, “平成 22 年 11 月 17 日~19 日, 静岡県コンベンションアーツセンター「グランシップ」.
- [69] 臼井英之(神戸大), “「惑星間航行システム開発に向けたマルチスケール粒子シミュレーション」”, 独立行政法人 科学技術振興機構 JST-CREST「マルチスケール・マルチフィジクス現象の統合シミュレーション」研究領域平成 22 年度公開シンポジウム, 平成 22 年 11 月 26 日, 東洋大学.
- [70] 梶村好宏 (ISAS/JAXA), “輸送シンポイオン慣性長スケールにおける磁気セイルの推力特性に関する 3 次元ハイブリッド粒子シミュレーション”, H22 年度 宇宙輸送シンポジウム, 平成 23 年 1 月 20 日~21 日, 宇宙航空研究開発機構, 宇宙科学研究所.
- [71] 大塩裕哉(総研大), “磁気セイル磁気圏における電流分布計測”, H22 年度 宇宙輸送シンポジウム, 平成 23 年 1 月 20 日~21 日, 宇宙航空研究開発機構, 宇宙科学研究所.
- [72] 梶村好宏 (ISAS/JAXA), “ダイポール磁場中のリングカレント生成に関する 3 次元ハイブリッド粒子シミュレーション”, 第 51 回 航空原動機・宇宙推進講演会, 平成 23 年 3 月 3 日~4 日, 広島 YMCA ホール.

- [73] 芦田康将(京都大学), “粒子シミュレーションによる磁気セイルの推力解析”, 第 51 回航空原動機・宇宙推進講演会, 平成 23 年 3 月 3 日～4 日, 広島 YMCA ホール.
- [74] 大塩裕哉(総研大), “準定常 MPD アークジェットの下流領域のブルーム特性”, 第 51 回航空原動機・宇宙推進講演会, 平成 23 年 3 月 3 日～4 日, 広島 YMCA ホール.
- [75] 佐藤博紀(総研大), “水素 MPD スラスタ内部の流れ場に関する数値解析的研究”, 第 51 回航空原動機・宇宙推進講演会, 平成 23 年 3 月 3 日～4 日, 広島 YMCA ホール.
- [76] 中村雅夫(大阪府大), “ハイブリッド法を用いたミニ磁気圏シミュレーション”, 第 168 回生存圏シンポジウム- RISH 電波科学計算機実験(KDK)シンポジウム, 平成 23 年 3 月 7-8 日, 京都大学宇治キャンパス.
- [77] 臼井英之(神戸大学), 小型ダイポール磁場と太陽風の相互作用に関する粒子シミュレーション, 日本地球惑星科学連合 2012 年大会, 2012 年 5 月 20 日(日)～25 日(金), 幕張メッセ国際会議場.
- [78] 船木一幸(ISAS/JAXA), 宇宙航行用電気推進機・先端推進機の研究開発動向, 第19回筑波大学宇宙開発工学学域セミナー, 2011 年 6 月 17 日, 筑波大.
- [79] 船木一幸(ISAS/JAXA), 電磁プラズマ力学アークジェットの研究開発と高密度プラズマ風洞への応用, プラズマ応用研究会, 2011 年 7 月, 長岡技術科学大学.
- [80] 船木一幸(ISAS/JAXA), 宇宙機用電気推進技術とその宇宙探査への応用, 日本機械学会中国四国支部特別講演会, 2011 年 10 月 25 日, 徳島大.
- [81] 船木一幸(ISAS/JAXA), 太陽風宇宙帆船と磁気プラズマセイルの研究, 数学促進講演会, 2011 年 10 月 27 日, 龍谷大.
- [82] 松本正晴(ISAS/JAXA), 磁気プラズマセイル評価に向けた Hybrid-PIC プラズマシミュレーションコードの開発, FTE-11-021, 新エネルギー・環境研究会, 2011 年 8 月, 東京.
- [83] 中村雅夫(大阪府立大学), ミニ磁気圏シミュレーションのための背景コールドイオン流体ハイブリッドコード, 太陽地球惑星系科学シミュレーション・モデリング技法勉強会, 九州大学情報基盤研究開発センター, 2011 年 9 月 15-16 日.
- [84] 臼井英之(神戸大学), 小型ダイポール磁場構造と太陽風の相互作用に関する粒子シミュレーション, 第8回宇宙環境シンポジウム, 東京ビックサイト 102 会議室(会議棟 1 F), 平成 23 年 10 月 18 日, 19 日.
- [85] 船木一幸(ISAS/JAXA), 次世代の宇宙推進技術の研究, つくば宇宙フロンティアフォーラム, 2011 年 10 月 29 日, 筑波大.
- [86] 臼井英之(神戸大学), 小型ダイポール磁場構造と太陽風の相互作用に関する粒子シミュレーション, 地球電磁気・地球惑星圏学会 第130回総会及び講演会, 2011 年 11 月 3 日(木)～11 月 6 日(日), 神戸大学 六甲台第2キャンパス.
- [87] 芦田康将(京都大学), 全粒子シミュレーションによる磁気プラズマセイルの推力解析, 地球電磁気・地球惑星圏学会第 130 回総会及び講演会, B011-12, 2011 年 11 月, 神戸.
- [88] 中村雅夫(大阪府立大学), 3D hybrid simulation of the mini-magnetosphere, 地球電磁気・地球惑星圏学会, 神戸大学六甲台キャンパス, 2011 年 11 月 3-6 日.
- [89] 西田浩之(農工大), 先進的無電極プラズマロケットエンジンの研究, Plasma Conference 2011, 24E09, 2011 年 11 月, 金沢.
- [90] 梶村好宏(ISAS/JAXA), 磁気プラズマセイルへの応用に向けたダイポール磁場中のリングカレント生成による磁気圏拡大評価, 第 55 回宇宙科学技術連合講演会, 1K01, 2011 年 11 月-12 月, 松山.
- [91] 松本正晴(神戸大), 磁気セイルの推力・トルク特性に関する 2 次元 Hybrid-PIC シミュレーション, 第 55 回宇宙科学技術連合講演会, 1K02, 2011 年 11 月-12 月, 松山.
- [92] 上野一磨(ISAS/JAXA), イオンスケール磁気セイルの推力特性評価実験, 第 55 回宇宙科学技術連合講演会, 1K03, 2011 年 11 月-12 月, 松山.
- [93] 森高外征雄(神戸大学), 小型磁気圏-太陽風相互作用に関するマルチスケール粒子

- シミュレーション, Plasma conference 2011, 金沢, 2011年11月22日-25日, 石川県立音楽堂.
- [94] 芦田康将(京都大学), 全粒子シミュレーションによる磁気プラズマセイル推力解析, 宇宙輸送シンポジウム, STEP-2011-010, 2012年1月, 相模原.
- [95] 上野一磨(ISAS/JAXA), 磁気プラズマセイル地上実験での推力計測, 宇宙輸送シンポジウム, STEP-2011-009, 2012年1月, 相模原.
- [96] 中村雅夫(大阪府立大学), イオンスケール磁気圏のハイブリッドシミュレーション, 平成23年度名古屋大学太陽地球環境研究所研究集会「STE シミュレーション研究会: プラズママルチスケールシミュレーションの現状と展望」, 広島大学東千田キャンパス, 2012年3月1-3日.
- [97] 中村雅夫(大阪府立大学), イオンスケールのミニ磁気圏構造, 日本天文学会2012年春季年会, 龍谷大学深草キャンパス, 2012年3月19-22日.
- [98] 中村雅夫(大阪府立大学), 太陽風とミニ磁気圏の相互作用, 日本地球惑星科学連合2012年大会(2012年5月, 幕張).
- [99] 芦田康将, 山川宏, 船木一幸, 臼井英之, 梶村好宏, 磁気プラズマセイル開発に向けたプラズマ粒子シミュレーションコードの高速化, 第44回流体力学講演会/ANSS 2012, 2C17, 富山, 7月, 2012.
- [100] 大塩裕哉, 上野一磨, 船木一幸, 大口径プラズマ流生成のための3台同時駆動準定常MPDアークジェットの開発, 第44回流体力学講演会/航空宇宙数値シミュレーション技術シンポジウム2012, 1D01, 2012年7月5-6日, 富山.
- [101] 梶村好宏, 船木一幸, 篠原育, 松本正晴, 臼井英之, 芦田康将, 山川宏, ダイポール磁場中へのプラズマ放出によるプラズマセイルの磁気帆拡大, 第56回宇宙科学技術連合講演会, 3J14, 2012年11月, 別府.
- [102] 芦田康将, 山川宏, 船木一幸, 梶村好宏, 3次元プラズマ全粒子シミュレーションによる磁気プラズマセイルの推力, 第56回宇宙科学技術連合講演会, 3J15, 2012年11月, 別府.
- [103] 上野一磨, 大塩裕哉, 船木一幸, 山川宏, 実験室モデルを用いた磁気セイルに生じるトルクの計測, 第56回宇宙科学技術連合講演会, 3J16, 2012年11月, 別府.
- [104] 山村治人, 船木一幸, 西田浩之, 山極芳樹, リングカレントを利用した磁気プラズマセイルの3次元電磁流体解析, 平成24年度宇宙輸送シンポジウム, STEP-2012-013, 2013年1月, 相模原.
- [105] 上野一磨, 大塩裕哉, 堀江優之, 船木一幸, 山川宏, 磁気プラズマセイルスケールモデルの推力評価実験, 平成24年度宇宙輸送シンポジウム, STEP-2012-014, 2013年1月, 相模原.
- [106] 船木一幸, 梶村好宏, 芦田康将, 西田浩之, 山村治人, 山極芳樹, 大塩裕哉, 上野一磨, 篠原育, 堀江優之, 山川宏, プラズマセイルの数値シミュレーションならびに実験室シミュレーション, 宇宙科学シンポジウム, P2-142, 2013年1月7-8日, 相模原.
- [107] 上野一磨, 大塩裕哉, 堀江優之, 船木一幸, 磁気プラズマセイルおよび磁気セイルの実験室実験, スペースプラズマ研究会, 2013年2月26-27日, 相模原.
- [108] 梶村好宏, 船木一幸, 篠原育, 上野一磨, 臼井英之, 山川宏, 3次元ハイブリッド粒子モデルおよび地上実験による磁気セイルの推力評価, 第53回航空原動機・宇宙推進講演会, JSASS-2013-0076, 2013年3月4-5日, 倉敷.
- [109] 船木一幸, 山川宏, 太陽風帆の研究, 第53回航空原動機・宇宙推進講演会, JSASS-2013-0069, 2013年3月4-5日, 倉敷.
- [110] 芦田康将, 山川宏, 船木一幸, 梶村好宏, 小型磁気セイルの推力特性の数値解析と推力増加に向けた検討, 第53回航空原動機・宇宙推進講演会, JSASS-2013-0068, 2013年3月4-5日, 倉敷.
- [111] 大塩裕哉, 上野一磨, 船木一幸, 地上実験での磁気プラズマセイルの推力計測試験, JSASS-2013-0077, 2013年3月4-5日, 倉敷.

- [112] 上野一磨, 船木一幸, 大塩裕哉, 山川宏, 磁気セイルに発生するトルクの実験的評価, 第53回航空原動機・宇宙推進講演会, JSASS-2013-0078, 2013年3月4-5日, 倉敷.
- [113] 有田光, 西田浩之, 船木一幸, 噴射プラズマが磁気プラズマセイルの推力特性に与える影響の電磁流体解析, 第53回航空原動機・宇宙推進講演会, JSASS-2013-0079, 2013年3月4-5日, 倉敷.
- [114] 松本正晴(神戸大), 臼井英之, 沼波政倫, 中村雅夫, 篠原育, 小型磁気圏の2次元 AMR-PIC シミュレーション, プラズマシミュレータシンポジウム, 2012, 2012年9月11日~12日, 核融合科学研究所.
- [115] 松本正晴(神戸大), 臼井英之, 沼波政倫, 中村雅夫, 篠原育, 太陽風-小型ダイポール磁場の相互作用に関する2次元 AMR-PIC シミュレーション, 地球電磁気・地球惑星圏学会第132回総会及び講演会, 2012年10月20日~10月23日, 札幌コンベンションセンター.
- [116] 中村雅夫(大阪府立大学), Hybrid Simulations for an Ion Scale Magnetosphere, 第132回 地球電磁気・地球惑星圏学会, 札幌コンベンションセンター, 2012年10月20日-23日.
- [117] 中村雅夫(大阪府立大学), イオンスケールミニ磁気圏のバウショックと境界領域の構造, 第222回生存圏シンポジウム 平成24年度 RISH 電波科学計算機実験(KDK)シンポジウム, 京都大学 宇治キャンパス 木質ホール3階, 平成25年3月7日-8日.
- [118] 中村雅夫(大阪府立大学), イオンスケールミニ磁気圏のハイブリッドシミュレーション, 平成24年度 名古屋大学太陽地球環境研究所 研究集会「STE シミュレーション研究会&STP シミュレーション・モデリング技法勉強会」, 名古屋大学野依記念学術交流会館, 平成25年3月21日-23日.
- [119] 芦田康将(京都大学), 磁気プラズマセイル宇宙機開発のための3次元プラズマ粒子シミュレーションによる推力特性の解明 (hp120084), 平成24年度「京」を中核とする HPCI システム利用研究課題中間報告会, 東京, 2013年3月.
- [120] 臼井英之, 八木耀平, 松本正晴, 永良彰英, 沼波政倫, JST/CREST マルチスケール粒子シミュレーションチーム格子細分化法を用いた粒子シミュレーションの動的負荷バランス手法, プラズマ宇宙物理」3学会合同セッション, 日本物理学会, 2013年3月.

(国際会議)

- [1] K. Ueno (Sokendai), T. Kimura, T. Ayabe, I. Funaki, H. Yamakawa and H. Horisawa, Thrust Measurement of Pure Magnetic Sail, 26th International Symposium on Space Technology and Science, Hamamatsu, 2008-b-05, June 1-8, 2008.
- [2] T. Fujimoto (Shizuoka Univ.), Numerical Study of the Magnetic Diffusion Effects in Magneto Plasma Sail, 26th International Symposium on Space Technology and Science, Hamamatsu, 2008-s-26, June 1-8, 2008.
- [3] T. Ayabe (Tokai Univ.), Evaluation of Magnetic Field Inflation in the Laboratory Model of Magnetoplasma Sail, 26th International Symposium on Space Technology and Science, Hamamatsu, 2008-s-25, June 1-8, 2008.
- [4] H. Ueda (JAXA), M. Okada, H. Usui, T. Muranaka, I. Shinohara, Estimation of Auroral Environment by Electrostatic Full-particle Simulations Modeling of REIMEI Satellite Observations, 26th International Symposium on Space Technology and Science, 2008-r-2-11, Hamamatsu, Japan, June 2008.
- [5] I. Funaki (JAXA), K. Ueno, Y. Oshio, T. Ayabe, H. Horisawa and H. Yamakawa, Laboratory Facility for Simulating Solar Wind Sails, 26th International Symposium on Rarefied Gas Dynamics, Kyoto University Clock Tower Centennial Hall, July 21-25, 2008.
- [6] Y. Minami (Kyoto Univ.), I. Funaki, H. Yamakawa (Kyoto Univ.), T. Nakamura, H. Nishida, D. Sasaki, H. Yonekura, H. Kojima and Y. Ueda, Thrust

- Characteristics of Magnetic Sail Spacecraft Using Superconducting Coils, 26th International Symposium on Rarefied Gas Dynamics, Kyoto University Clock Tower Centennial Hall, July 21-25, 2008.
- [7] K. Ueno (Sokendai), I. Funaki, T. Kimura, T. Ayabe, H. Yamakawa and H. Horisawa., Laboratory Simulation of Magnetoplasma Sail, AIAA-2008-4820, 44th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit, Hartford, July 21-23, 2008.
- [8] K. Kubota (Tokyo Inst. Tech.), I. Funaki and Y. Okuno, Flowfield Analysis in an MPD Thruster with Applied Magnetic Field, AIAA-2008-4636, 44th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference and Exhibit, Hartford, July 21-32, 2008.
- [9] Sasaki, D. (Kyoto Univ.), Funaki, I., Yamakawa, H., Usui, H. and Kojima, H., Thrust Production Mechanism of Magnetic Sail Spacecraft with Superconducting Coils, The 59th International Astronautical Congress, Glasgow, UK, September 29-October 3, 2008.
- [10] Masanori Nunami (Kyoto Univ.), Hideyuki Usui, Yoshihiro Kajimura, Iku Shinohara, Electromagnetic particle simulation with adaptive mesh refinement technique for analysis of multi-scale phenomena, Dallas, USA, November 17-21, 2008.
- [11] T. Fujimoto (Shizuoka Univ.), H. Otsu, I. Funaki, Y. Yamagiwa, Non- Ideal MHD Effect in the Flow Field of Magneto Plasma Sail, AIAA-2009-250, 47th AIAA Aerospace Sciences Meeting, Orlando World Center Marriott, Florida, USA., Jan. 5-8, 2009.
- [12] Y. Kajiumra (Kyoto Univ.), K. Ueno, I. Funaki, H. Usui, M. Nunami, I. Shinohara, M. Namakura, H. Yamakawa, 3D Hybrid Simulation of Pure Magnetic Sail including Ion-Neutral Collision Effect in Laboratory, ISTS Paper 2009-b-40, The 27th International Symposium on Space Technology and Science, Tsukuba, Japan, July 5 - 12, 2009.
- [13] T. Muranaka (JAXA), H. O. Ueda, H. Usui, S. Hosoda, I. Shinohara, Modification of a three-dimensional electrostatic Particle-In-Cell code Adopting a Nestedgrid, 27th International Symposium on Space Technology and Science, 2009-b-06, Tsukuba, Japan, July 2009.
- [14] K. Ueno (The Graduate Univ. for Advanced Studies), T. Ayabe, Y. Oshio, I. Funaki, H. Horisawa, H. Yamakawa, Characterization of Magnetoplasma Sail in Laboratory, ISTS Paper 2009-b-42, The 27th International Symposium on Space Technology and Science, Tsukuba, Japan, July 5 - 12, 2009.
- [15] Yuya Oshio (Sokendai), Ikkoh Funaki, Kazuma Ueno, Tomohiro Ayabe, The Dynamic Behaviour of a Magnetic Sail in Laboratory, 27th International Symposium on Space Technology and Science, 2009-b-39, Tsukuba, July 5-10, 2009.
- [16] I. Funaki (JAXA), K. Ueno and Y. Oshio, T. Ayabe, H. Horisawa, H. Yamakawa, Laboratory Facility for Simulating Magnetoplasma Sail, 45th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit, AIAA 2009-5451, Aug. 5, 2008.
- [17] Y. Kajiumra (Kyoto Univ.), H. Usui, I. Funaki, I. Shinohara, H. Yamakawa, Numerical Study of an Inflation of a Dipolar Magnetic Field by Plasma Jet Injection in Magneto Plasma Sail, The 7th International Symposium on Applied Plasma Science, Hamburg, Germany, August 31-September 4, 2009.
- [18] K. Kubota (JAXA), I. Funaki and Y. Okuno, Numerical Study on Energy Conversion Processes in Applied-Field Magnetoplasma Thrusters, 17th International Conference on MHD Energy Conversion, 4-2, Shonan, Sept 14-17, 2009.
- [19] H. Sato (Sokendai), K. Kubota and I. Funaki, Numerical Simulation of a

- Self-Field Magnetoplasmdynamic Thruster with Hydrogen Propellant, 17th International Conference on MHD Energy Conversion, 4-5, Shonan, Sept 14-17, 2009.
- [20] I. Funaki (JAXA) and H. Yamakawa, Magnetoplasma Sail : New Spacecraft Propulsion using the Solar Wind, 17th International Conference on MHD Energy Conversion, K2-1, Shonan, Sept 14-17, 2009.
- [21] H. Usui (Kobe Univ.), M. Nunami, Y. Kajimura, T. Moritaka, I. Shinohara, M. Nakamura, H. O. Ueda, M. Matsumoto, I. Funaki and H. Yamakawa, Plasma Particle Simulation for the Development of Interplanetary Flight System, International Conference on Numerical Simulations of Plasma, Lisbon, Oct. 6-9, 2009.
- [22] I. Funaki (JAXA), H. Yamakawa, Research Status of Magnetoplasma Sail, IEPC-2009-03, 31st International Electric Propulsion Conference, Ann Arbor, Sept. 20-24, 2009.
- [23] K. Kubota (JAXA), I. Funaki and Y. Okuno, Numerical Analyses on Plasma Acceleration Processes in Applied-Field Magnetoplasmdynamic Thrusters, IEPC-2009-227, 31st International Electric Propulsion Conference, Ann Arbor, Sept. 20-24, 2009.
- [24] Yuya Oshio (Sokendai), Kazuma Ueno, Ikkoh Funaki, Fluctuation of magnetosphere in scale-model experiment of magnetic sail, IEPC-2009-09, 31st International Electric Propulsion Conference, Ann Arbor, Sept. 20-24, 2009.
- [25] K. Ueno (Sokendai), I. Funaki, Y. Oshio, H. Horisawa, H. Yamakawa, Thrust Characteristics of Pure Magnetic Sail in Laboratory Experiment, IEPC-2009-11, 31st International Electric Propulsion Conference, Ann Arbor, Sept. 20-24, 2009.
- [26] M. Nunami (NIFS), Plasma Particle Simulation with Adaptive Mesh Refinement Technique for Multi-scale Phenomena, US-Japan JIFT Workshop 2009 "Advanced Simulation Methods in Plasma Physics", Toki, Dec. 14-16, 2009.
- [27] I. Funaki, K. Ueno, Y. Oshio, H. Horisawa, H. Yamakawa, Plasma Wind Tunnel for Plasma Sail Experiments, AJCPP2010-135, Miyazaki, Mar. 4-6, 2010.
- [28] Yoshihiro Kajimura (ISAS/JAXA), "Thrust Evaluation of Magneto Plasma Sail by Using Three-Dimensional Hybrid PIC Code", 46th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference, 25-28 July 2010, Nashville, Tennessee, USA.
- [29] Ikkoh Funaki (ISAS/JAXA), "Experimental and Numerical Investigations on the Thrust Production Process of Magnetoplasma Sail", 46th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference, 25-28 July 2010, Nashville, Tennessee, USA.
- [30] M. S. Nakamura (Osaka Prefecture Univ.), "A 3D HYBRID CODE FOR MINI-MAGNETOSPHERE SIMULATION", 2010 Asia-Pacific Radio Science Conference, September 22-26, 2010, Toyama International Conference Center.
- [31] T. Moritaka (Kobe Univ.), "SOLAR WIND INTERACTION WITH A SMALL SCALE ARTIFICIAL MAGNETOSPHERE FOR MAGNETO-PLASMA SAIL", 2010 Asia-Pacific Radio Science Conference, September 22-26, 2010, Toyama International Conference Center.
- [32] Yuri Mukai (Kyoto Univ.), "Ground Thrust Measurement System for Superconducting Magnetic Sail Spacecraft", 61st International Astronautical Congress, 27th September, 1st October, 2010, Prague, Czech Republic.
- [33] Tomokazu Koyama (Kyoto Univ.), "Thrust control system for magnetic sail spacecraft under variable solar wind environment", 61st International Astronautical Congress, 27th September, 1st October, 2010, Prague, Czech Republic.
- [34] Hiroyuki Nishida (Tokyo University of Agriculture and Technology),

- “Aerodynamic Characteristics of Magnetic Sail in Magnetized Solar Wind”, 61st International Astronautical Congress, 27th September 1st October, 2010, Prague, Czech Republic.
- [35] T. Matsui (Kobe Univ.), “MPI parallelization of full PIC simulation code with Adaptive Mesh Refinement”, 52nd Annual Meeting of the APS Division of Plasma Physics, November 12-13, 2010, Hyatt Regency Chicago.
- [36] H. Usui (Kobe Univ.), “Development of a multi-scale PIC code using AMR and its MPI parallelization. (part I)”, JIFT2010 (Workshop on development of simulation science in plasma physics), November. 12-13, 2010, Hyatt Regency Chicago.
- [37] T. Moritaka (Kobe Univ.), “Development of a multi-scale PIC code using AMR and its MPI parallelization. (part I)”, JIFT2010 (Workshop on development of simulation science in plasma physics), November 12-13, 2010, Hyatt Regency Chicago.
- [38] T. Matsui (Kobe Univ.), “Development of a multi-scale PIC code using AMR and its MPI parallelization. (part II)”, JIFT2010 (Workshop on development of simulation science in plasma physics), November 12-13, 2010, Hyatt Regency Chicago.
- [39] T. Matsui (Kobe Univ.), “MPI parallelization of full PIC simulation code with Adaptive Mesh Refinement”, 20th International Toki Conference, December 7-10, 2010, Ceratopia Toki.
- [40] Naoki, Yamamoto (Sizuoka Univ.), “Magnetohydrodynamic Numerical Analysis of Magnetic Plasma Sail Including the Effect of Interplanetary Magnetic Field”, 49th AIAA Aerospace Sciences Meeting including the New Horizons Forum and Aerospace Exposition, 4 - 7 Jan 2011, Orlando World Center Marriott, Orlando, Florida.
- [41] Yoshihiro Kajimura (ISAS/JAXA), “3D Hybrid Simulation of Pure Magnetic Sail in the Ion Inertial Scale in Laboratory.” 28th International Symposium on Space Technology and Science, (ISTS), 2011-b-55, 2011, Okinawa, Japan.
- [42] Ashida Yasumasa (Kyoto University), “Numerical Model for Pure Magnetic Sail”, 28th International Symposium on Space Technology and Science, 2011-b-53, Okinawa, June, 2011.
- [43] Masaharu Matsumoto (Kobe University), “Two-Dimensional Hybrid PIC Simulation on the Performance of a Magnetic Sail”, 28th International Symposium on Space Technology and Science, 2011-b-54, Okinawa, June, 2011.
- [44] Kazuma Ueno (ISAS/JAXA), “Thrust Measurement of Magnetic Sail for Various Tilt Angles”, 28th International Symposium on Space Technology and Science, 2011-b-56, Okinawa, June, 2011.
- [45] Yasumasa Ashida (Kyoto University), “Two-Dimensional Particle-In-Cell Simulation of Magnetic Sails”, 32nd International Electric Propulsion Conference, IEPC-2011-180, Wiesbaden, Germany, Sept. 2011.
- [46] Yuya Oshio (Sokendai), “Experimental Investigation of Magnetoplasma Sail: Magnetosphere Inflation by Equatorial Ring Current”, 32nd International Electric Propulsion Conference, IEPC-2011-186, Wiesbaden, Germany, Sept. 2011.
- [47] Kazuma Ueno (ISAS/JAXA), “Thrust Characteristics of Pure Magnetic Sail for Various Attack Angles in Laboratory Experiment”, 32nd International Electric Propulsion Conference, IEPC-2011-296, Wiesbaden, Germany, Sept. 2011.
- [48] Yuya Oshio (Sokendai), “The Dynamic Behavior of Magnetic Sails in Laboratory”, 47th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit, San Diego, California, July-Aug. 2011.
- [49] Yuya Oshio (Sokendai), “Plume Characteristics of a Quasi-steady Magnetoplasmadynamic Arcjet”, 42nd AIAA Plasmadynamics and Lasers



- Conference in conjunction with the 18th International Conference on MHD Energy Conversion (ICMHD), Hawaii, June 2011.
- [50] Ikkoh Funaki (ISAS/JAXA), "Numerical Plasma Simulation of Magnetic Sails", Asian Joint Conference on Propulsion and Power, March 1-4, 2012, Xi'an, China.
  - [51] Hideyuki Usui (Kobe Univ.), Full Particle-In-Cell simulation study on the solar wind interactions with a small-scale artificial magnetic dipole, AOGS-WPGM Joing Assembly, August 13-17, Shingapore.
  - [52] Y. Nagasaki (Kyoto Univ.), T. Nakamura, I. Funaki, Y. Ashida, H. Kojima and H. Yamakawa, Conceptual design of conduction-cooled superconducting magnets for space application, Applied Superconductivity Conference 2012, Oregon, USA, 1LA-07, Oct. 7-12, 2012.
  - [53] Y. Nagasaki (Kyoto Univ.), T. Nakamura, I. Funaki, Y. Ashida, H. Kojima and H. Yamakawa, Numerical investigation on conduction-cooled superconducting magnets in space, 63rd International Astronautical Congress, Naples, Italy, C.2.4.20, Oct. 1-5, 2012.
  - [54] Y. Ashida (Kyoto Univ.), I. Funaki, H. Yamakawa and Y. Kajimura, Two- and Three-dimensional Particle-In-Cell simulation of Magneto Plasma Sail, 63rd International Astronautical Congress, Naples, Italy, IAC-12-D4.8.11, Nov, 2012.
  - [55] I. Funaki (JAXA/ISAS), Y. Kajimura, Y. Ashida, H. Nishida, Y. Oshio, I. Shinohara, H. Yamakawa, The Use of Dipole Plasma Equilibrium for Magnetic Sail Spacecraft, The Joint Conference of the International Conference on Open Magnetic Systems for Plasma Confinement (OS) and the International Workshop on Plasma Material Interaction Facilities for Fusion (PMIF), O-15, Aug. 27-31, Tsukuba, Japan, 2012.
  - [56] I. Funaki (JAXA/ISAS), Y. Kajimura, H. Nishida, Y. Ashida, H. Yamakawa, I. Shinohara and Y. Yamagiwa, Progress in Magnetohydrodynamic and Particle Simulations of Magnetoplasma Sail, AIAA-2012-4300, 48th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit, Atlanta, 2012.
  - [57] Yoh Nagasaki (Kyoto Univ.), Taketsune Nakamura, Ikkoh Funaki, Yasumasa Ashida, Hirotosugu Kojima and Hiroshi Yamakawa, Cooling Characteristics Of Conduction-Cooled Hts Coil Aiming at Magnetic Sail for Space Mission, 24th International Cryogenic Engineering Conference-International Cryogenic Materials Conference 2012, 17B-OR4-01, Fukuoka, Japan, May 14-18, 2012.
  - [58] Masaharu Matsumoto (Kobe Univ.), Hideyuki Usui, Masanori Nunami, Masao Nakamura and Iku Shinohara, AMR-PIC Simulation on Solar Wind Interaction with Kinetic Scale Magnetosphere, JSST2012 International Conference on Simulation Technology, Kobe University, Kobe, Sep. 27-28, 2012.
  - [59] H. Usui (Kobe Univ), A. Hashimoto and Y. Miyake, Full PIC Simulation of Ion Beam Neutralization, JSST 2012, International Conference on Simulation Technology, Sep. 27-28, 2012. Kobe, Japan.
  - [60] Yohei Yagi (Kobe Univ), Hideyuki Usui, Masanori Nunami, Parallelized Plasma Particle Simulation with Dynamic Domain Decomposition, JSST 2012, International Conference on Simulation Technology, Sep. 27-28, 2012. Kobe, Japan.
  - [61] A.Nagara, M. Nunami, H. Usui and M. Matsumoto, Development of a Block-Structured AMR Module, JSST 2012, International Conference on Simulation Technology, Sep. 27-28, 2012. Kobe, Japan.
  - [62] M. Nunami, H. Miura, A. Nagara, M. Matsumoto, H. Usui, R. Goto, Implementation of AMR Technique into Parallelized Plasma Codes and Its Effectiveness, JSST 2012, International Conference on Simulation Technology, Sep. 27-28, 2012. Kobe, Japan.

③ ポスター発表 (国内会議 39 件、国際会議 25 件)  
(国内会議)

- [1] 沼波政倫(京都大学), 臼井英之, 梶村好宏, 篠原育, 適合格子細分化法を用いた超並列マルチスケール・プラズマ粒子コードの開発, 丸の内マイプラザホール(東京), 2008 年 9 月 16-17 日.
- [2] 沼波政倫(京都大学), 臼井英之, 梶村好宏, 篠原育, AMR 法によるマルチスケール粒子コードの開発とその応用, プラズマ・核融合学会 第 25 回年会, 栃木県総合文化センター, 2008 年 12 月 2-5 日.
- [3] 船木一幸 (JAXA), 山川宏, 篠原育, 西田浩之, 梶村好宏, 大津広敬, 藤本智也, 山極芳樹, 小嶋浩嗣, 中村武恒, 臼井英之, 沼波政倫, 杉田寛之, 藤田和央, 秋田大輔, 小川博之, 坪井伸幸, 上野一磨, 佐藤博紀, 大塩裕哉, 綾部友洋, 堀澤秀之, 佐々木大祐, 窪田健一, プラズマセイルWGの活動, 宇宙科学シンポジウム, JAXA 宇宙科学研究本部, 相模原, 2009 年 1 月 6 日-7 日.
- [4] 梶村好宏(京都大学), 臼井英之, 沼波政倫, 船木一幸, 篠原育, 中村雅夫, 山川宏, 磁気プラズマセイルの性能評価に向けたハイブリッド粒子シミュレーション, 平成 20 年度 RISH 電波科学計算機実験(KDK)シンポジウム, 京都大学生存圏研究所, 2009 年 3 月 16 日-17 日.
- [5] 中村雅夫(大阪府立大学), ミニ磁気圏計算のためのハイブリッドコード開発, 平成 20 年度 RISH 電波科学計算機実験(KDK)シンポジウム, 京都大学生存圏研究所, 2009 年 3 月 16 日-17 日.
- [6] 中村雅夫(大阪府立大学), 3D hybrid simulation of interaction between the solar wind and a mini-magnetosphere of magnetized objects, 日本地球惑星科学連合 2009 年大会, 幕張メッセ 国際会議場, 2009 年 5 月 16 日-21 日.
- [7] 中村雅夫(大阪府立大学), 3D hybrid code for mini-magnetosphere simulation, 磁気圏・電離圏シンポジウム“ERG, SCOPE and Beyond”, JAXA 宇宙科学研究所, 2009 年 11 月 2 日-5 日.
- [8] 梶村好宏 (京都大学), ハイブリッド粒子シミュレーションを用いた磁気プラズマセイルの推力評価, 平成 21 年度第 141 回生存圏シンポジウム- RISH 電波科学計算機実験(KDK)シンポジウム -, 京都大学, 2010 年 3 月 8 日-9 日.
- [9] 芦田 康将(京都大学), 磁気セイル推力推定のための解析モデルに関する研究, 平成 21 年度第 141 回生存圏シンポジウム- RISH 電波科学計算機実験(KDK)シンポジウム -, 京都大学, 2010 年 3 月 8 日-9 日.
- [10] 中村雅夫(大阪府立大学), 3 次元ハイブリッド法を用いたミニ磁気圏シミュレーション, 平成 21 年度第 141 回生存圏シンポジウム- RISH 電波科学計算機実験(KDK)シンポジウム -, 京都大学, 2010 年 3 月 8 日-9 日.
- [11] 森高外征雄(神戸大学), 全粒子シミュレーションによる磁気インフレーションプロセスの研究, 平成 21 年度第 141 回生存圏シンポジウム- RISH 電波科学計算機実験(KDK)シンポジウム -, 京都大学, 2010 年 3 月 8 日-9 日.
- [12] 中村雅夫(大阪府大), “太陽風-ミニ磁気圏相互作用シミュレーションのための 3 次元ハイブリッドコード”, 日本地球惑星科学連合 2010 年大会, 平成 22 年 5 月 23-28 日, 幕張メッセ国際会議場.
- [13] 梶村好宏 (ISAS/JAXA), “太陽風から電磁気学的推力を得る磁気プラズマセイルの推力評価”, 第 11 回光量子科学研究シンポジウム, 2010 年 6 月 24-25 日, 関西光科学研究所.
- [14] 森高外征雄(神戸大), マルチスケールプラズマ粒子シミュレーションにおける階層間接続”, 第4回シミュレーション科学シンポジウム, 平成 22 年 9 月 14 日, 15 日, 核融合科学研究所.
- [15] 芦田康将(京都大), “磁気セイル推力推定のための解析モデルに関する研究”, 第 54 回宇宙科学技術連合講演会, 平成 22 年 11 月 17 日~19 日, 静岡県コンベンションアール

- ツセンター「グランシップ」.
- [16] 向井祐利(京都大), “超伝導コイルを用いた磁気セイルの推力解析”, 第 54 回宇宙科学技術連合講演会, 平成 22 年 11 月 17 日～19 日, 静岡県コンベンションアーツセンター「グランシップ」.
  - [17] 山本直樹(静岡大), “惑星間磁場を考慮した磁気プラズマセイルの電磁流体解析”, 第 54 回宇宙科学技術連合講演会, 平成 22 年 11 月 17 日～19 日, 静岡県コンベンションアーツセンター「グランシップ」.
  - [18] 梶村好宏(ISAS/JAXA), “3 次元ハイブリッド粒子シミュレーションによるプラズマセイルの推進性能評価”, 第 11 回宇宙科学シンポジウム, 2011 年 1 月 5-7 日, 宇宙科学研究所.
  - [19] 船木一幸(ISAS/JAXA), “プラズマセイル飛翔実験機の研究と実験室シミュレーション”, 第 11 回宇宙科学シンポジウム, 2011 年 1 月 5-7 日, 宇宙科学研究所.
  - [20] 梶村好宏(ISAS/JAXA), “数値シミュレーションを用いた磁気プラズマセイルの推力評価”, 第 168 回生存圏シンポジウム- RISH 電波科学計算機実験(KDK)シンポジウム, 平成 23 年 3 月 7-8 日, 京都大学宇治キャンパス.
  - [21] 森高外征雄(神戸大学), “磁気セイルにおける小型磁気圏-太陽風相互作用”, 第 168 回生存圏シンポジウム- RISH 電波科学計算機実験(KDK)シンポジウム, 平成 23 年 3 月 7-8 日, 京都大学宇治キャンパス.
  - [22] 八木耀平(神戸大学), “動的領域分割を用いたプラズマ電磁粒子コードのプロセス並列手法の開発”, 第 168 回生存圏シンポジウム- RISH 電波科学計算機実験(KDK)シンポジウム, 平成 23 年 3 月 7-8 日, 京都大学宇治キャンパス.
  - [23] 芦田康将(神戸大学), “粒子シミュレーションによる磁気セイルの推力検討”, 第 168 回生存圏シンポジウム- RISH 電波科学計算機実験(KDK)シンポジウム, 平成 23 年 3 月 7-8 日, 京都大学宇治キャンパス.
  - [24] 森高外征雄(神戸大), “次世代宇宙推進システムの開発に向けた適合格子細分化プラズマ粒子シミュレーション”, 次世代スーパーコンピューティング・シンポジウム 2010, 2011 年 1 月 17 日, ニチイ学館 神戸ポートアイランドセンター.
  - [25] 松本正晴, 梶村好宏, 臼井英之, 船木一幸, 篠原 育, 磁気セイル周りの太陽風プラズマ挙動に関する 2 次元 Hybrid-PIC シミュレーション, P-EM26-P12, 日本地球惑星科学連合 2011 年大会, 2011 年 5 月.
  - [26] 梶村好宏(ISAS/JAXA), 磁気プラズマセイルへの応用に向けたコイル磁場中のリングカレント生成による磁気圏拡大評価, Plasma Conference 2011, 22P046-P, 2011 年 11 月, Kanazawa, Japan.
  - [27] 梶村好宏(ISAS/JAXA), 数値シミュレーションを用いた磁気プラズマセイルの推力評価, 平成 23 年度 RISH 電波科学計算機実験(KDK)シンポジウム, 平成 24 年 2 月 21-22 日, 京都大学宇治キャンパス.
  - [28] 中村雅夫(大阪府立大), ミニ磁気圏のハイブリッドシミュレーション, 平成 23 年度 RISH 電波科学計算機実験(KDK)シンポジウム, 平成 24 年 2 月 21-22 日, 京都大学宇治キャンパス.
  - [29] 芦田康将(京都大学), 粒子シミュレーションによる磁気セイル宇宙機の推力特性に関する研究, 平成 23 年度 RISH 電波科学計算機実験(KDK)シンポジウム, 平成 24 年 2 月 21-22 日, 京都大学宇治キャンパス.
  - [30] 松本正晴(神戸大学), 2 次元 Hybrid-PIC シミュレーションによる磁気セイルの推進特性, 平成 23 年度 RISH 電波科学計算機実験(KDK)シンポジウム, 平成 24 年 2 月 21-22 日, 京都大学宇治キャンパス.
  - [31] 八木耀平(神戸大学), 適合格子細分化法を用いたプラズマ粒子シミュレーションコードのプロセス並列手法に関する研究, 第 196 回生存圏シンポジウム, 平成 23 年度 RISH 電波科学計算機実験(KDK)シンポジウム, 平成 24 年 2 月 21 日(火), 22 日(水), 京都大学 宇治キャンパス 木質ホール 3 階.

- [32] 森高外征雄(神戸大学), 磁気プラズマセイル開発に向けた全粒子シミュレーション, 第196回生存圏シンポジウム, 平成23年度 RISH 電波科学計算機実験(KDK)シンポジウム, 平成24年2月21日(火), 22日(水), 京都大学 宇治キャンパス 木質ホール3階.
- [33] 梶村好宏(明石高専), One-Component-Plasma Modelを用いたダイポール磁場中のプラズマ閉じ込めに関する研究, 第9回核融合エネルギー連合講演会, 28A-130P, 平成24年6月28-29日, 神戸国際会議場.
- [34] 長崎陽, 中村武恒, 船木一幸, 芦田康将, 山川宏, 高温超伝導コイルを利用した磁気セイル宇宙機に関する研究, 第56回宇宙科学技術連合講演会, 別府国際コンベンションセンター, P40, 2012年11月, 別府市. 【第56回宇宙科学技術連合講演会学生優秀発表賞】
- [35] 船木一幸, 梶村好宏, 芦田康将, 西田浩之, 山村治人, 山極芳樹, 大塩裕哉, 上野一磨, 篠原育, 堀江優之, 山川宏, プラズマセイルの数値シミュレーションならびに実験室シミュレーション, 宇宙科学シンポジウム, P2-142, 2013年1月7-8日, 相模原.
- [36] 臼井英之, 八木耀平, 松本正晴(神戸大学), 沼波政倫(核融合科学研究所), 適合格子細分化プラズマ粒子シミュレーションにおける動的負荷バランス手法の開発, 2013年ハイパフォーマンスコンピューティングと計算科学シンポジウム, 東京工業大学, 2013年1月.
- [37] 芦田康将(京都大学), 粒子シミュレーションによる磁気プラズマセイルの推力解析, 平成24年度 RISH 電波科学計算機実験シンポジウム, 京都, 2013年3月.
- [38] 松本正晴, 臼井英之, 小型ダイポール磁場と太陽風の相互作用に関するAMR-PICシミュレーション, 平成24年度 RISH 電波科学計算機実験シンポジウム, 京都, 2013年3月.
- [39] 八木耀平, 臼井英之, 適合格子細分化プラズマ粒子シミュレーションコードの高効率並列化手法に関する研究, 平成24年度 RISH 電波科学計算機実験シンポジウム, 京都, 2013年3月.

(国際会議)

- [1] H. Sato (Sokendai), T. Fujino, K. Kubota, I. Funaki and H. Yamakawa, Design Analysis of Magnetoplasma Sail Propulsion System, 26th International Symposium on Space Technology and Science, Hamamatsu, 2008-b-57p, June 1-6, 2008.
- [2] D. Sasaki (Kyoto Univ.), I. Funaki, H. Yamakawa, H. Usui and H. Kojima, Numerical Analysis of Magnetic Sail Spacecraft, 26th International Symposium on Rarefied Gas Dynamics, Kyoto University Clock Tower Centennial Hall, July 21-25, 2008.
- [3] Yoshihiro Kajimura (Kyoto Univ.), Hideyuki USUI, Masanori NUNAMI, Ikkoh FUNAKI, Iku SHINOHARA, Hideki NAKASHIMA, "Numerical Study of Inflation of a Dipolar Magnetic Field in Space by Plasma Jet Injection", 14th International Congress on Plasma Physics, Fukuoka, 2008.9.7-12.
- [4] H. USUI (Kyoto Univ.), Multi-Scale Plasma Particle Simulation for the Development of Interplanetary Flight System, 14th International Congress on Plasma Physics 2008, Hakata, Fukuoka, Japan, 2008.9.7-12.
- [5] H. Nishida (Tokyo Univ.), I. Funaki, Y. Intatani and K. Kusano, MHD Flow Field and Momentum Transfer Process of Magneto-Plasma Sail, EPR-P3-203, International Congress on Plasma Physics 2008, Fukuoka, Sept. 8-12, 2008.
- [6] I. Funaki (JAXA) and H. Yamakawa, Research Status of Sail Propulsion using the Solar Wind, EPR-P3-204, International Congress on Plasma Physics 2008, Fukuoka, Sept. 8-12, 2008.
- [7] K. Ueno (Sokendai), I. Funaki, Imaging of Plasma Flow Around Magnetoplasma Sail in Laboratory Experiment, EPR-P3-206, International Congress on Plasma Physics 2008, Fukuoka, Sept. 8-12, 2008.

- [8] M. Nunami (Kyoto Univ.), K. Nishihara, Numerical Analysis of Laser Produced Plasma Expansion with Large Ion Larmor Radius via 3D PIC Simulation, 14th International Congress on Plasma Physics, Fukuoka, Japan, September 8-12, 2008.
- [9] M. Nunami (NIFS), H. Usui, Y. Kajimura, T. Moritaka and I. Shinohara, A multi-scale electromagnetic particle code with adaptive mesh refinement and its parallelization, 21st International Conference on Numerical Simulation of Plasmas 2009, Lisbon, Oct. 6-9, 2009.
- [10] T. Moritaka, H. Usui, M. Nunami, Y. Kajimura, M. Nakamura and M. Matsumoto, Full Particle-in-cell Simulation Study on Magnetic Inflation around a Magneto Plasma Sail, 21st International Conference on Numerical Simulation of Plasmas 2009, Lisbon, Oct. 6-9, 2009.
- [11] T. Moritaka, M. Nunami and H. Usui, Development of a full particle-in-cell simulation code with adaptive mesh refinement technique, The 7th General Scientific Assembly of the Asia Plasma and Fusion Association and the Asia-Pacific Plasma Theory Conference, Oct. 27-30, 2009.
- [12] M. Nakamura (Osaka Prefec. Univ.), Interaction between solar wind and mini-magnetosphere of magnetized objects, American Geophysical Union Fall Meeting 2009, San Francisco, Nov. 14-18, 2009.
- [13] T. Moritaka (Kobe Univ.), "Full particle-in-cell simulation study on solar wind interaction with a small scale magnetosphere", 52nd Annual Meeting of the APS Division of Plasma Physics, November 8-12, 2010, Hyatt Regency Chicago.
- [14] T. Moritaka (Kobe Univ.), "Full particle-in-cell simulation study on solar wind interaction with a small scale artificial magnetosphere", 20th International Toki Conference, December 7-10, 2010, Ceratopia Toki.
- [15] T. Moritaka, H. Usui, I. Shinohara, Y. Kajimura and M. Matsumoto, "Electromagnetic interaction between the solar wind and a kinetic scale artificial magnetosphere", IPELS2011, Whistler, Canada, July 2011
- [16] Y. Yagi (Kobe Univ.), H. Usui, M. Nunami, T. Moritaka and T. Matsui, Parallelization of plasma particle simulation with dynamic domain decomposition, ISSS-10, July 24-Aug. 1, Banff, Canada, 2011.
- [17] Masaharu Matsumoto (ISAS/JAXA), "Modification of Electromagnetic Hybrid Particle-In-Cell Plasma Simulation Model for Robustness Improvement", 22nd International Conference on Numerical Simulations of Plasmas, 7-9 Sep 2011, Long Branch, NJ, USA.
- [18] Tatsuki Matsui (Kobe University), Dynamic Domain Decomposition for 3D PIC simulation with Adaptive Mesh Refinement, International conference on numerical simulations of plasmas (ICNSP 2011), September 7-9, 2011, Long Branch, New Jersey, USA.
- [19] Usui Hideyuki (Kobe Univ.), Dynamic Domain Decomposition for 3D PIC simulation with Adaptive Mesh Refinement, International Toki Conference (ITC 2011), Toki, NIFS, November 28-December 1, 2011.
- [20] Yohei Yagi (Kobe University, Japan), Masaharu Matsumoto, Masanori Nunami and Hideyuki Usui, Parallelized Adaptive Mesh Refinement Particle-In-Cell Scheme with Dynamic Domain Decomposition, 10th International Meeting on High-Performance Computing for Computational Science (VECPAR 2012), Kobe, Japan, July 17-20, 2012.
- [21] I. Funaki, Y. Kajimura, H. Nishida, Y. Ashida, K. Ueno, Y. Oshio, I. Shinohara and H. Yamakawa, Spacecraft Propulsion using the Solar Wind: Numerical Simulation and Experimental Simulation in Laboratory, 22nd International Toki Conference, P4-36, Toki, Nov. 2012.
- [22] Y. Kajimura, I. Funaki, I. Shinohara, H. Usui, M. Matsumoto, H. Yamakawa, Numerical Simulation of Dipolar Magnetic Field Inflation by Equatorial

- Ring-current, 22nd International Toki Conference, P4-6, Toki, Nov. 2012.
- [23] K. Ueno, Y. Oshio, I. Funaki, H. Yamakawa, Experimental Simulation of Magnetoplasma Sail for Thrust Measurement, The Joint Conference of the International Conference on Open Magnetic Systems for Plasma Confinement (OS) and the International Workshop on Plasma Material Interaction Facilities for Fusion (PMIF), P-58, Aug. 27-31, Tsukuba, Japan, 2012.
- [24] Masaharu Matsumoto (Kobe Univ.), Hideyuki Usui, Masanori Nunami, Masao Nakamura and Iku Shinohara, Two-Dimensional AMR-PIC Simulation on Solar Wind Interaction with Mini-Magnetosphere, Conference on Computational Physics 2012, The Nichii Gakkan Conference Center, Kobe, Oct. 14-18, 2012.
- [25] Masaharu Matsumoto (Kobe Univ.), Hideyuki Usui, Masanori Nunami, Masao Nakamura and Iku Shinohara, 2D AMR-PIC Plasma Simulation for Mini-Magnetosphere of Magnetized Objects, 22nd International Toki Conference, Ceratopia Toki, Toki, Nov. 19-22, 2012.

(4)知財出願

- ①国内出願 (0 件)
- ②海外出願 (0 件)
- ③その他の知的財産権  
なし

(5)受賞・報道等

①受賞

1. 梶村好宏(京都大学), 第 52 回宇宙科学技術連合講演会若手奨励賞, 2008 年 11 月 5 日-7 日開催.
2. 梶村好宏(京都大学), 日本航空宇宙学会第 40 期 通常総会及び講演会(年会) 若手優秀講演賞, 2009 年 4 月 9-10 日開催.
3. 芦田康将(京都大学), 磁気セイル推力推定のための解析モデルに関する研究, 第 54 回宇宙科学技術連合講演会, 平成 22 年 11 月 17 日~19 日, 学生優秀賞(銀賞).
4. 山本直樹(静岡大学), “惑星間磁場を考慮した磁気プラズマセイルの電磁流体解析”, 第 54 回宇宙科学技術連合講演会, 平成 22 年 11 月 17 日~19 日, 学生優秀賞(銀賞).
5. 芦田康将(京都大学), “粒子シミュレーションによる磁気セイルの推力解析”, 第 51 回航空原動機・宇宙推進講演会, 平成 23 年 3 月 3 日~4 日, 学生優秀講演賞.
6. 松本正晴 (ISAS/JAXA), 電気学会優秀論文発表賞 (IEEJ Excellent Presentation Award), 2012 年 2 月 9 日, 論文名「磁気プラズマセイル評価に向けた Hybrid-PIC プラズマシミュレーションコードの開発」, FTE-11-021, 電気学会 新エネルギー・環境研究会, 東京.
7. 長崎陽(京都大学), 第 56 回宇宙科学技術連合講演会学生優秀発表賞, 2012 年11月, 論文名「高温超伝導コイルを利用した磁気セイル宇宙機に関する研究」, 第 56 回宇宙科学技術連合講演会, 別府国際コンベンションセンター, P40, 大分.

②マスコミ(新聞・TV等)報道

なし

③その他

なし

(6)成果展開事例

①実用化に向けての展開

なし

## ②社会還元的な展開活動

現在, 特にないが, 今後, プラズマ関連分野のシミュレーション研究に役立てたい。

## § 6 研究期間中の活動

特になし。

## § 7 結び

プロジェクトを採択いただいて実際に開始してからほぼ5年経とうとしているが, 進捗は概ね良好で達成度は80%という感触をもっている。プロジェクト期間中, 研究員の入れ替わりが結構あり, その間のプログラム開発の引き継ぎやノウハウの伝授, 研究成果の学術雑誌への投稿等が必ずしもスムーズではなかったのもその分を差し引いた。

プロジェクトの大きな柱の一つである, 適合格子細分化法(AMR)を用いた粒子シミュレーションコードの開発は, 延べ6名の研究員および大学院生が携わった。結果として, 非常に高機能なマルチスケール粒子シミュレーションプログラム PARMER の開発とその並列化が実現したが, その道のりは決して平坦ではなかった。複数の研究員が分担して開発という時期もあったが, 大部分は, ある一人の研究員が基礎を開発し, それを次に雇用された別の研究員が引き継ぎ, また次の研究員が改良を加える, という時系列上での開発を進めざるを得なかった。結果としてプログラム開発に当たった研究員は前研究員の作成したプログラムを1から解読する(もちろんマニュアル的な資料はあったが)ことから始めざるを得なく, 各研究員は非常に苦勞したようだし, プログラム開発という観点から見ると決して効率のよいやり方ではなかったと感じる。この点は, 他のプロジェクトでも同様のことが起こっているのではないかと想像するが, プロジェクトにおけるソフトウェア開発の難しさを実感した次第である。

この種のプロジェクトは代表者のリーダーシップとともに, 実働である雇用ポスト研究員の力量に大きく依存すると感じている。代表者はともかく, 研究員の活躍がプロジェクト推進の主力となったことは間違いないし, プログラム開発のみならず研究成果も出せたと感じている。プロジェクト参加メンバー間の人間関係も良好であり, 互いに協調性, 信頼性をもってプロジェクト研究に参加し, 取り組んで頂けたことは非常に良かったと感じている。ただ, プロジェクト研究員というある意味不安定な立場に置かれた研究員が, 次のより安定なポストを常に探し求めていることは確かだし, それを咎めたり止めたりするのは筋違いであることを考えると, 研究員は結果として短期的な雇用にならざるを得ないという意識を初めに持つべきだったと若干反省している。実際に, 5年間続けて研究員として在籍した方はいない。ある研究員は別分野に就職し, ある方は関連の研究機関に就職し, 引き続き研究参加者としてをお手伝いいただいている。むしろ, 本プロジェクトをきっかけに, 雇用期間中であるにしても, 研究員がより安定した次のポストを得ることできたことは, プロジェクト推進の立場からは大きな痛手ではあるが, 個人的には非常に喜ばしいことであり, 広い意味での人材育成という側面もプロジェクトにはあるのではないかと, という気すらしている。

今後の展開としては, 開発されたマルチスケール粒子法を MPS 開発や宇宙プラズマ解析のみならず, 別の研究分野への応用ができればと考えている。開発された PARMER コードでは, 空間格子点で定義された環境変数(今回は電磁界成分)の上に, 自由に動き回ることで膨大な数の粒子が存在し, それらと環境変数とが互いにやり取りしながら全体の時間空間発展を解き進めることが出来る。環境変数とその上の存在する粒子に別の物理量をそれぞれ持たせることができれば, プラズマ科学分野以外のシミュレーションにも応用できるのではないかと考えている。この点においても, 今後の展開という観点から見ると, マルチスケール粒子法の開発は意義深いと感じている。PARMER は京コンピュータに向けた大規模プロセス並列にも対応できるように開発を進めており, 大規模場モデルにも対応できると思われる。どのような分野に応用できるか検討を進めたい。

今回のプロジェクトのフレームワークでは, PARMER の動的領域分割を用いた大規模プロセス並列演算の実施とその性能評価が残されており, 今年度末までには結果を出したい。今後の PARMER 利用そして開発のために, ユーザー観点および開発者観点からの電子マニュアルを整備しつつある。DDD を含めた並列化手法についての資料もこれに加えてマニュアルを完成させた。また, 並行して PARMER を用いた MPS の全系シミュレーションを行い, 工学的な観点からは推

力評価の精度向上, 理学的な観点からは小型磁気圏境界層物理の高分解能解析に着目して研究を進めたい.