

jh200019-NAH

マルチスケール宇宙プラズマ連成シミュレーションの研究

三宅 洋平 (神戸大学)

概要

異なる時空間スケールや素過程をターゲットとする複数のシミュレーションモデルをプロセス間通信により協調動作させることで、マルチスケール/マルチフィジックスの宇宙プラズマ連成シミュレーションを実現する。今年度はこの目的のために開発したコード結合フレームワーク CoToCoA の動作検証を実施するとともに、具体的な物理計算モデルとして地球磁気圏変動と人工衛星帯電現象の結合系の事例について、連成計算に向けた結合モデルの設計と検証を実施した。

1. 共同研究に関する情報

(1) 共同研究を実施した拠点名

神戸大学・九州大学・京都大学・東北大学・名古屋大学・北海道大学の複数の研究者が参加する共同研究であり、京都大学および北海道大学の大規模計算資源を利用する。

(2) 共同研究分野

超大規模数値計算系応用分野

(3) 参加研究者の役割分担

三宅洋平 (神戸大学)	研究統括、宇宙プラズマ連成モデルコード開発と応用
南里豪志 (九州大学)	連成フレームワーク CoToCoA の開発
中島浩 (京都大学)	高効率プラズマ粒子計算手法の検討
加藤雄人 (東北大学)	メソスケールプラズマシミュレーションモデルの開発
深沢圭一郎 (京都大学)	グローバルプラズマシミュレーションモデルの開発
岩下武史 (北海道大学)	大規模連立 1 次方程式並列求解手法の検討
大村善治 (京都大学)	プラズマ波動粒子相互作用の理論的アプローチ
臼井英之 (神戸大学)	月磁気異常・太陽風相互作用のシミュレーション解析
中澤和也 (神戸大学)	宇宙プラズマ連成シミュレーションの実装・実行・評価

表 1: 研究の役割分担

2. 研究の目的と意義

本研究の目的は、異なる時空間スケールや素過程をターゲットとする複数のシミュレーションモデルをプロセス間通信により協調動作させることで、マルチスケール/マルチフィジックスの宇宙プラズマシミュレーションを実現することである。過去に研究が行われてきたマクロ-マイクロ連結階層シミュレーションのように、マクロ計算プログラム内部にマイクロ計算部を完全に埋め込む実装方式では、解析ターゲットの現象に特化した（汎用性を欠く）コード実装が避けられず、開発・維持コストが非常に高いことが課題であった。本研究では、例えば「マクロ・マイクロ間の片方向の情報伝達」や、「マイクロ計算解析開始をトリガーする判断基準をマクロ計算から抽出する」、といった緩やかなコード間連携を実現することをターゲットとする。これを柔軟かつ省コストに実現するためのコード間結合フレームワーク CoToCoA を構築し、それを宇宙プラズマ分野の連成シミュレーションに適用することを目的とする。

本共同研究で開発を進めている CoToCoA は、MPMD (Multiple Program Multiple Data) モデルに基づくコード間結合フレームワークである。本フレームワークにおいて、結合対象の各コードは、全プロセス空間を分割した部分プロセス空間 (サブコミュニケー

タ) 内で従前通りの計算を進めつつ、必要に応じて他のコードとの情報のやりとりを行う。またプロセス空間内に、コード間情報伝達の管理、同期、排他制御を担う Coupler プロセスを含める。これにより、結合対象コードのプログラム修正、および実行性能への影響を最小化する。

2019 年度までに課題代表者らが実施してきた「超並列宇宙プラズマシミュレーションの研究」において、当該分野で幅広く用いられている粒子-格子ハイブリッド型シミュレーションの高効率並列実装法の探求を行ってきた。今年度は、④継続元の JHPCN 課題において個別に開発・チューニングされてきたシミュレーションコードを CoToCoA フレームワークにより連携動作可能であることを確認するとともに、⑤次世代の宇宙天気予報システムの構築に向け、意義が大きいと認められる「宇宙環境変動＋人工衛星帯電現象の連成解析」の基盤となる数値技術を確立することを念頭に置いて研究開発を推進した。

3. 当拠点公募型研究として実施した意義

部分プロセス空間内で独立に動作する複数のコードが高効率かつ正しく情報伝達を行うには、メモリー貫性に配慮した上でリモートメモリアクセス方式に基づいた並列プログラムを記述する必要がある、計算機科学分野の知識と経験が必要である。一方で、CoToCoA のような、連成フレームワークを設計する上では、実際の連成アプリケーションでやり取りが発生するデータの種別やサイズ、頻度に応じて仕様を策定する必要があり、ソフトウェア設計者と利用者間のコデザインが必要である。また個別のシミュレーションコードの効率化作業においても、両分野の協働が極めて有効であることは、申請者のこれまでの JHPCN 課題の成果が示してきたとおりである。このように本課題は、計算科学と計算機科学分野の緊密な連携が必要不

可欠な研究テーマであり、拠点公募型共同研究として実施した意義は大きい。

4. 前年度までに得られた研究成果の概要

継続元の JHPCN 課題では、本課題で結合対象となる個別の計算コードの高効率実装に取り組んできた。これらの成果は計算科学・計算機科学分野の連携によって創出されてきたものである。以下にその概略を記述する。プラズマ粒子 PIC シミュレーションに関して、プロセス間の負荷不均衡を回避できる革新的な領域分割型 MPI 並列化手法 OhHelp が開発され、優れた分散メモリ並列効率を得ることが可能となった。これに続いてメニーコアアーキテクチャにおける PIC 計算で想定される技術的課題と、それらに対する個別的解決法を提案した。

応用分野においては、全粒子モデルプラズマ計算コード EMSES を用いた 3 次元シミュレーション解析により、近年月探査衛星で発見された縦孔地形周辺の帯電ダスト環境を明らかにした。また、放射線帯の高エネルギー電子生成に重要な役割を果たすコーラス放射の発生過程を再現する計算機実験を実施し、コーラス放射の波動特性が背景磁場強度の空間構造に応じて大きく変化することを明らかにした。さらに強磁場プラズマ中では、人工衛星などの固体表面で発生した乱れが、長距離に渡って波及することを初めて数値シミュレーションにより突き止めた。

MPMD モデルに基づく連成計算フレームワークのアイデアに基づき、フレームワークの中核部分を構成する連成モジュールの開発を実施した。当該成果が今年度の課題実施に引き継がれている。

5. 今年度の研究成果の詳細

宇宙空間に存在する人工衛星は、周囲に満ちているプラズマとの接触などの影響で帯電する。この帯電現象が衛星障害や、科学衛星

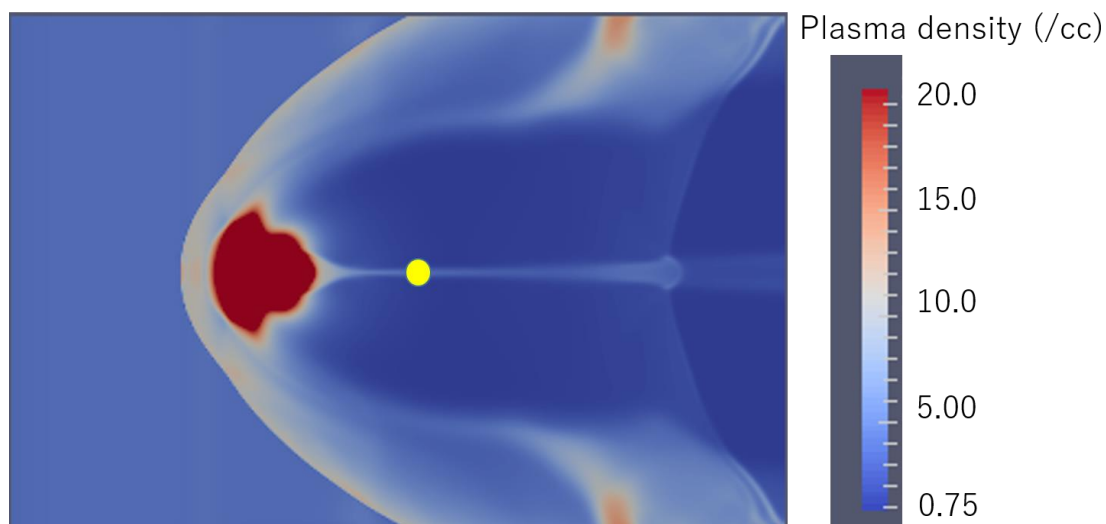


図1 衛星周辺地球磁気圏グローバル MHD シミュレーションから抽出されたプラズマ密度分布のスナップショット。本検証では黄色の点の位置に固定した単一の人工衛星の帯電計算を実施する。今後、CoToCoA 連成計算フレームワークに提案帯電解析を当てはめることで、地球磁気圏変動シミュレーションを実施しつつ、その中を移動する衛星群の複数同時帯電計算を実現させる構想である（2021 年度以降の課題）。

観測へ悪影響を引き起こすことは良く知られている。人工衛星帯電現象の定量評価のため、プラズマ粒子計算手法を用いた数値シミュレーション解析が活用されている。しかし、多数のプラズマ粒子の運動を計算する当該手法の計算コストの高さ故に、実行できるシミュレーションは長時間の現象解析を行うことが困難であり、宇宙天気現象に伴って時々刻々と変動する環境パラメータを反映した帯電解析は困難であった。本研究では、太陽活動度に応じてダイナミックに変化する宇宙環境を考慮しつつ、従来に比べて長時間の衛星電位計算に対応可能な数値手法を提案する。

提案手法の構成とその開発状況は6節の③項に述べることとし、本項ではその妥当性と有用性の検証のために実施した解析結果を詳述する。太陽フレア噴火由来のコロナ質量放出による地磁気サブストームが発生した2010年4月5日の地球磁気圏環境に、仮想的な人工衛星が曝されたことを想定し、その衛星の帯電現象を解析した。なおこのサブス

トーム発生時には、米国の Galaxy15 衛星が実際に障害を起こしていることが報告されている[Ferguson et al., 2011]。今回は事前に当該イベントを再現したMHDシミュレーションから得られたプラズマ圧力と密度のデータを元に衛星帯電計算を実施した。図1にMHD計算で得られた、ある時刻での磁気圏周辺のプラズマ密度分布を示す。本検証では簡単のため、計算対象とする人工衛星は図中に黄色で示す位置に固定されているものと仮定し、時間変動するプラズマパラメータに対して衛星電位の時間発展を計算する。MHD計算から得られたプラズマ圧力と密度のデータを元にプラズマ温度を算出し、帯電計算の入力値とする。衛星帯電計算には電子とイオンそれぞれの温度情報が必要となるが、MHD計算ではイオンと電子を分離することは原理上できないため、電子とイオンの温度は同一の値であると仮定している点に注意が必要である。

図2に本検証実験の計算結果を示す。上段から順にMHD計算から算出したプラズマ密

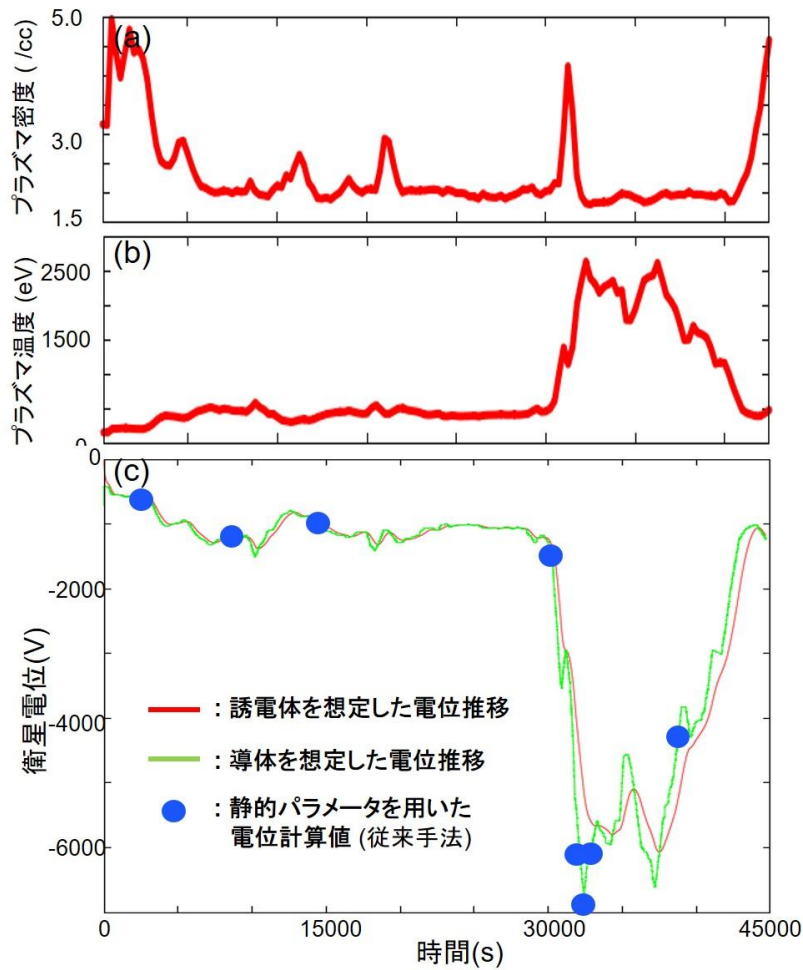


図2 提案フレームワークを用いた人工衛星帯電計算の検証。(a) MHD 計算から得られたプラズマ密度。(b) MHD 計算から得られたプラズマ温度。(c) プラズマ環境変動を考慮した人工衛星電位予測結果。

度と電子温度、最下段が本フレームワークを用いた衛星電位計算結果を示す。それぞれの物理量の時間発展を比較すると、衛星電位は電子温度との逆相関が認められる。一般に、電子とイオンからなる2成分プラズマ中に物体を配置すると、熱速度の大きい電子電流が支配的となるため、物体は電子温度程度に負に帯電することで周辺の電子の一部を排斥し、イオンとの電流平衡を成立させるようにふるまう。本検証計算で得られた衛星電位の時間変化もこのような基本的性質を反映した結果となっている。

図2(c)において、青のデータ点で表される電位は、その時刻でのプラズマ条件を静的パラメータとして入力した従来型のプラズマ

粒子シミュレーションで計算した定常電位の値である。衛星が導体で構成されていると想定した場合の提案フレームワークによる電位計算値は定常電位とほぼ一致している。これは導体で構成された衛星の静電容量から求まる帯電時定数が、環境パラメータの時間変動スケールに対して十分に短いため、衛星電位が環境変動に対して瞬時に応答できているためと解釈できる。これに対して、衛星表面が誘電体で被覆されていることを想定した電位計算値は、環境変動に対して時間遅れを持つ。誘電体の静電容量は導体に比べ大きく、その帯電時定数は大きい。これにより、衛星電位が環境変動に追従できず、時間遅れを持つような結果が得られたと考えら

れる。

以上の検証計算により、衛星の構成要素毎のプラズマ環境変動に対する電位応答差の評価に対し、提案フレームワークが有効であることを示した。過去の人工衛星障害の事例のほとんどは、衛星構体内の部分帯電が引き金となっているため、衛星部材毎に環境変動に対する電位変動を予測できることは重要である。現実には、導体部と誘電体部は互いに接着された構造となっており、互いの電位差を緩和する効果を示す導電電流の考慮は必須である。現状ではモデル化されていないこれらの物理要素を提案フレームワークに追加していく作業が必要となる。将来的には提案手法とグローバル磁気圏シミュレーションや衛星観測データの組み合わせにより、宇宙天気イベントに対する衛星障害発生リスクを定量的に評価可能になることが期待される。

6. 今年度の進捗状況と今後の展望

①複数の並列プラズマシミュレーションコードによる結合計算の実証

申請者らが過去の JHPCN 課題で開発した並列シミュレーションコードを活用した連成実証実験に向け、下記検討を行った。

連成フレームワークの開発と公開：本研究では、結合対象の複数のシミュレーションモデルに関して、プログラムとしての独立性を可能な限り維持しつつ、連成計算を達成することを重視している。各々のシミュレーションモデル（並列プログラム）に対して MPI プロセスの部分集合から構成されるサブコミュニケータを割り当てるとともに、それらを監視し、必要に応じて制御するコンダクタプログラムも動作させることで、複数モデル間の協調動作を実現する。一方のモデルが自身の計算処理の進捗に応じて、他方のモデルに計算要求を発行する動作モデルに基づき、ポーリングなどの必要な機能を備えたコード

間結合フレームワーク CoToCoA を開発し、一般公開を開始した。

異種プラズマシミュレーション間およびポスト処理計算とのコード間結合検証：ターゲットアプリのうち、MHD とハイブリッド PIC 連成シミュレーションテストモデルを実装し、性能評価を行った。磁気圏 MHD シミュレーションの結果から磁力線を計算し、ハイブリッド PIC シミュレーションに繋げるためにかかる通信部分の時間を評価した。今年度は結合対象のコードが扱うデータサイズに対するスケーリングを測定し、検証を実施した。その結果を図 3 に示す。図中の **sampling** は計算時間であり、その他は CoToCoA 関数の実行時間となる。CoToCoA 関数の中でも大きな処理時間を占めるポーリング処理に着目しても、計算時間 (**sampling**) の 1/10 程度の時間に抑えられており、データサイズによらず CoToCoA フレームワークを有効に利用できることが確認された。

次に衛星プラズマ環境全粒子シミュレーションコードとプラズマ粒子速度分布関数ソルバを CoToCoA により結合し、全粒子コード側が適時、他方のプログラムにプラズマ粒子速度分布計算の要求と、必要なデータを他方のプログラムに送信する。京都大学 Cray XC40 システムを用い、 128^3 立方格子の 3 次元検証計算において、「全粒子モデル 1 ステップあたりの計算時間」、「テスト粒子計算が完了するまでの時間」、「1 回の CoToCoA 通信にかかる時間」の比を測定したところ、1:370:0.92 であった。測定結果より、テスト粒子計算の頻度を、全粒子モデル計算における 400 ステップに一回以下とした場合には、テスト粒子モデルによる速度分布計算時間は衛星プラズマ環境計算時間に隠蔽され、全体の計算を律速しないことがわかる。またその際に CoToCoA 通信コストは無視できるほど小さいことがわかった。

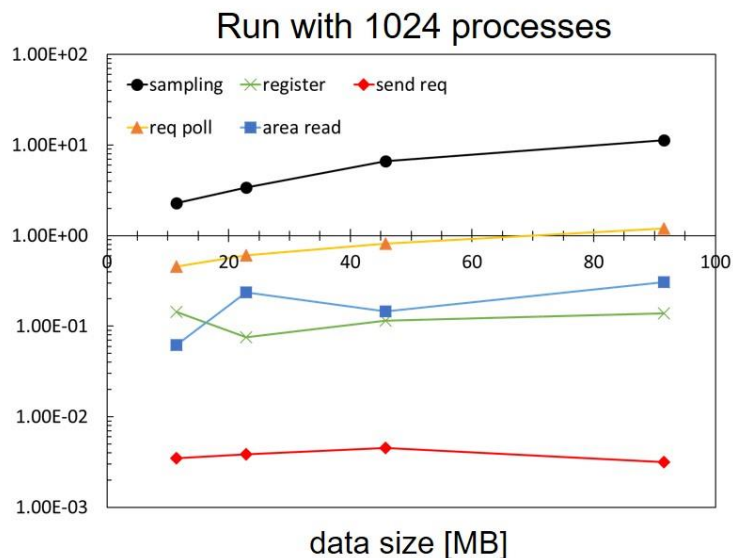


図3 MHD-ハイブリッド PIC 連成計算のデータスケーリング性能評価.

以上により、独立したシミュレーションコードを MPI により複数同時に起動可能であること、プロセス間通信によりコード間で必要な情報のやり取りを実施可能であること、その際の通信オーバーヘッドが物理計算を大きく律速しないこと、が確認された。

②メニーコア型クラスタ向け高効率プラズマ計算手法の開発と性能モデリング

連成シミュレーションにおいて、結合対象の各コードに適切な計算資源の割り振りを行うためには、問題に応じたコードの要求資源と計算性能を定量的に把握しておく必要がある。最終的に性能に関するモデルを構築することを目的として、詳細な計算性能測定を実施した。特にノード数に対する集団通信オーバーヘッドの増加率が、ノード内のプロセス数 P とスレッド数 T の様々な配分方式 ($P \times T = \text{コア数}$ は固定とする) に大きく依存するという知見を得た。

③宇宙環境変動を反映した人工衛星帯電評価システムの確立に向けた取り組み

社会インフラに影響を及ぼす宇宙環境の変動現象をリアルタイムにモニターし、予測

する宇宙天気予報システムのニーズが高まっている。当該システムに人工衛星帯電予測機能を備えるためには、時々刻々と変化する地球磁気圏環境を再現し、かつ得られた環境下での衛星帯電評価を実施する必要がある。従来はこれらは時空間スケールの異なるシミュレーションモデルで独立に研究されてきた。そこで連成計算の考え方にに基づき、地球磁気圏環境変動と衛星帯電現象の2種の計算を有機的に結合する仕組みを提案する。

提案手法の基本設計は以下の通りである。準備段階として多数回のプラズマ粒子シミュレーションを実施し、様々な宇宙環境パラメータに対応した衛星の電流電圧特性データベースを作成しておく。地球磁気圏グローバルシミュレーションの実行中に抽出した宇宙プラズマの圧力・密度の時系列データを入力とし、蓄積された電流電圧特性データベースを参照して、衛星電位の時間発展方程式を数値積分する。これにより変動する宇宙環境中に置かれた人工衛星の電位応答を評価する。連成の枠組みとしては、地球磁気圏グローバルシミュレーションと(複数の)衛星の電位時間発展計算の結合モデルとなる。

提案手法の特徴は以下のとおりである。ま

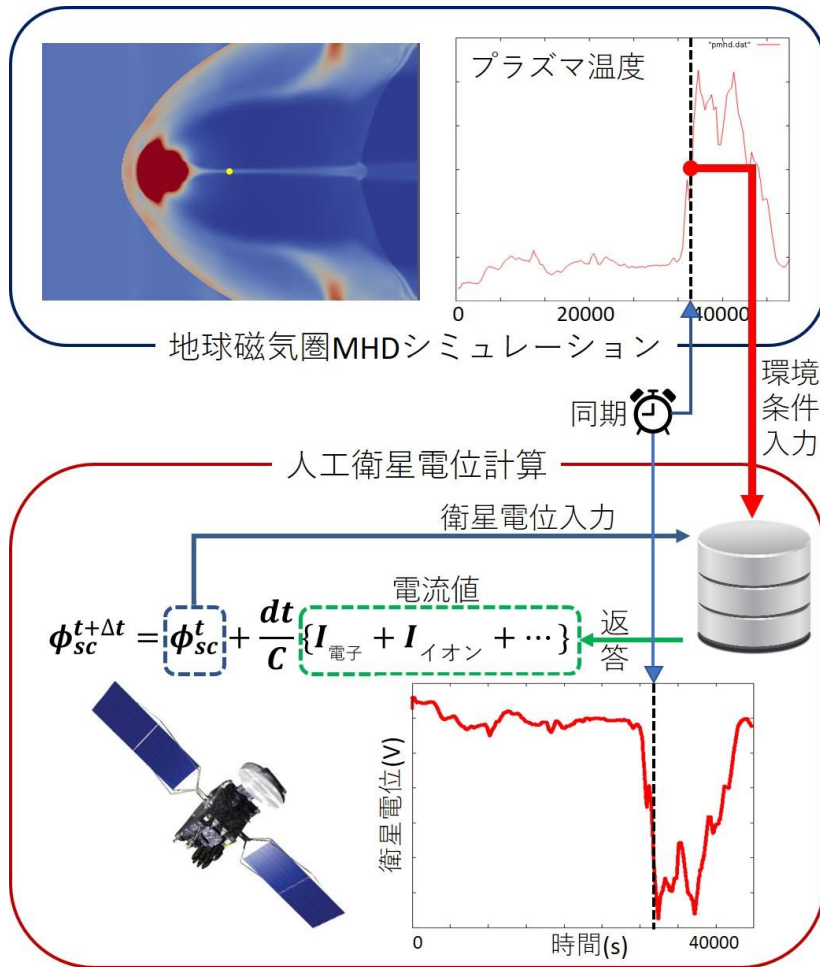


図4 磁気圏環境変動－衛星帯電評価フレームワークの構成。

ず電流電圧特性データベースを作成するプラズマ粒子シミュレーションでは衛星電位を制御パラメータとして取り扱う。これにより、従来の衛星電位を未知数とするシミュレーション解析に比べて、短時間で衛星流入電流の定常解を得ることが可能である。次に衛星電位時間発展計算においては、衛星に飛来する多数個のプラズマ粒子の軌道計算ではなく、データベース化された衛星流入電流を用いて衛星電位の時間発展を解く。その計算コストはプラズマ粒子シミュレーションに比べて非常に低く、複数の衛星について磁気圏環境が変動していく中での電位変化を長時間にわたって追うことが可能である。設計した磁気圏環境変動－衛星帯電評価フレームワークの構成を図4に示す。

2020 年度は設計した手法が物理モデルと

して妥当かどうかの検証を実施した。具体的には地球磁気圏グローバルシミュレーションと衛星電位時間発展計算の間で情報を受け渡しに最適な物理データフォーマットを策定し、磁気圏計算側のデータ出力、衛星電位計算側のデータ入力インターフェースそれぞれに整備した。この際に衛星電位計算に必要な物理情報の全てが、必ずしも磁気圏計算から直接出力されるわけではないため、欠けている情報はモデルを用いて適宜類推する必要がある。続いて磁気圏計算を独立で実行して必要なファイルにデータを出力し、そのファイルからデータを入力することにより衛星電位計算を実施した。すなわちCoToCoAフレームワークによる連成計算ではなく、ファイル経由での順次実行による衛星電位評価である。その計算結果は5節に述

べたとおりであり、変動する宇宙環境下での帯電計算が実現可能であることを示した。

以上により、提案した枠組みにより磁気圏環境変動と衛星帯電の連携解析が可能であることが示された。次年度以降、CoToCoA フレームワークに基づく、連成計算モデルへ発展させていく計画である。

○当初目標の達成状況と今後の展望

課題申請時に計画として挙げた①プラズマコードによる連成計算の実証、と②高効率プラズマ計算手法の性能モデリング、のうち、特に前者で進展が得られた。①については、課題申請時は単一の課題項目として記述したが、実際には①a. 異種コード間のデータ転送機構の検証と、②b. やり取りされる情報に基づき統合的な計算を実施するための物理モデル化、という異なる階層の小課題に分かれることを、年度途中に見出したことは大きな気づきであった。今年度はその双方の観点において今後につながりうる知見を獲得した。これにより、次年度は磁気圏環境－衛星帯電の具体的な物理結合系に対して、連成計算モデルの確立とその動作検証を実施できる見込みである。以上の進捗よりおよそ 75%の達成状況と自己評価する。

7. 研究業績一覧

1. 学術論文（査読あり）

- [1] Zhang, Z.(+), R.T. Desai(+), Y. Miyake, H. Usui, O. Shebanits, Particle-in-Cell, Simulations, of the Cassini Spacecraft's Interaction with Saturn's Ionosphere during the Grand Finale, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 504, pp.964-973, 2021. (国際共著論文)

2. 国際会議プロシーディングス（査読あり）

該当なし

3. 国際会議発表（査読なし）

- [2] Fukazawa, K., Y. Katoh, T. Nanri, and Y. Miyake, Development of Cross-Reference Framework CoToCoA and Application to Macro- and Micro-scale Simulations in the Space Plasma, AGU Fall Meeting, Online, December, 2020.

4. 国内会議発表（査読なし）

- [3] 三宅洋平, 粒子モデルプラズマ運動論シミュレーションの高効率計算技法, プラズマシミュレータシンポジウム, オンライン, 2020. (招待講演)
- [4] 川口慧士, 三宅洋平, 深沢圭一郎, 白井英之, 宇宙環境の時間変動を考慮した人工衛星帯電数値解析手法の開発, 第 148 回地球電磁気・地球惑星圏学会総会および講演会, オンライン, 2020.
- [5] 三宅洋平, W.J. Miloch, S.H. Kjus, H.L. Pecseli, 弱磁化宇宙プラズマ中の固体物体周辺の静電構造に関する粒子シミュレーション, 第 148 回地球電磁気・地球惑星圏学会総会および講演会, オンライン, 2020.

- [6] 加藤雄人, 深沢圭一郎, 南里豪志, 三宅洋平, 中澤和也, Code-To-Code Adapter (CoToCoA) ライブラリによる惑星電磁圏連成計算研究の現状と展望, 2020 年度 ISEE 研究集会「太陽地球圏環境予測のためのモデル研究の展望」, オンライン, 2021.

5. 公開したライブラリなど

- [7] Nanri, T., コード間結合ライブラリ CoToCoA, https://github.com/tnanri/co_tocoa.

6. その他（特許, プレスリリース, 著書等）

該当なし