

jh220017

## 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。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 を用いて開発を進めている。2022 年度は、地球磁気圏-人工衛星帯電結合系連成計算を高度化することで、過去に発生した大規模磁気圏じょう乱に伴う高レベルの人工衛星帯電の詳細過程を再現した。また全く種類の異なる独立した物理プログラムを非同期に同時実行することを踏まえ、両者の計算負荷の均衡点を探った。その結果、磁気圏シミュレーションの 200,000~400,000 格子点分の時間更新処理と、同じ時間分だけ衛星電位を数値積分するコストが互いに均衡している事実を見出した。これは両者に対する最適な計算資源配分を考える上で、有用な情報である。

### 1. 共同研究に関する情報

#### (1) 共同利用・共同研究を実施している拠点名

北海道大学 情報基盤センター  
 京都大学 学術情報メディアセンター  
 九州大学 情報基盤研究開発センター

#### (2) 課題分野

大規模計算科学課題分野

#### (3) 共同研究分野

超大規模数値計算系応用分野

#### (4) 参加研究者の役割分担

三宅・砂田・ 釜江・白井 (神戸大学)	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
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
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
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)	宇宙プラズマ現象の理論的アプローチ

### 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。例えば「マクロ・ミクロ間の片方向の情報伝達」や、「ミ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。本研究では「緩やかな連成プラズマシミュレーション」を、独自に開発したコード間連成フレームワーク CoToCoA を活用することで柔軟かつ省コストに実装し、その有効性を探求する。

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。

今年度は **CoToCoA** フレームワークに基づき開発を進めている地球磁気圏 MHD-人工衛星帯電連成モデルに将来の宇宙天気予報応用に必須の機能を実装することで、数値予測技術の高度化を実施した。具体的には MHD モデル内に移動する複数の人工衛星を追跡し、各位置座標での磁気圏プラズママクロパラメータをオフロードする機能を実装した。また人工衛星帯電計算内のプラズマ電流モデルを拡張し、二次電子放出など実用上必須の物理過程を考慮した計算方式を確立した。これらの取り組みの結果、過去の磁気圏じょう乱イベントを再現した MHD 計算に基づき、衛星の障害につながりうる kV オーダーの深い負帯電を本フレームワークで数値的に再現することに成功した。

### 3. 当拠点の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り、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する意義は大きい。

### 4. 前年度までに得られた研究成果の概要

連成シミュレーションを構築する際に都合対象となる複数の物理計算モデルに関して、各プログラムの独立性を可能な限り維持しつつ、モデル間のデータ交換や制御を高効率に行うためのコード間結合フレームワーク **CoToCoA** を開発し、公開した。各々の物理計算モデル（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、全体を一つの **MPI** 並列プログラムとして複数モデル間の協調動作を実現する。**CoToCoA** フレームワークにおいては、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いている。計算要求を発行する側の並列プログラムを **Requester**、要求を受け取る側の並列プログラムを **Worker** と称している。またコンダクタプログラムは **Coupler** と呼ばれ、**Requester** や **Worker** とは独立のサブコミュニケータを構成している。

**CoToCoA** フレームワークを用いた連成計算のターゲットアプリとして、地球磁気圏変動と人工衛星帯電現象の結合系の連成シミュレーションに着目した。2021 年度は、結合物理システムとして検証済みの当該現象に対して、**CoToCoA** を実用した実装を行い、非同期のコード間連携と適切な物理データ受け渡しが可能であることを示した。

### 5. 今年度の研究成果の詳細

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の需要が高まっている。宇宙天気予報システムの一機能として人工衛星障害の予測を行うためには、ダイナミックに変動する地球磁気圏環境を再現し、かつ各時刻に対して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。本研究では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方法論を確立する。

磁気圏 MHD 計算は、太陽から磁場を伴って超音速で吹き出す太陽風プラズマと地球の固有磁場の相互作用過程を磁気流体方程式に基づき模擬する。これにより、地球磁気圏内のプラズマのマクロ物理量の時間変動を得ることができる。一方、人工衛星は周囲のプラズマ荷電粒子の衝突により電気を帯びるが、単位時間当たりの帯電量は衛星周辺プラズマの密度・温度パラメータによって大まかに特徴づけることができる。そこで本連成解析では磁気圏 MHD 計算で求まる各時刻のマクロプラズマパラメータを、帯電計算側が随時参照することで、磁気圏環境変動と連動した人工衛星帯電予測を実現する。両者の特徴空間スケールは大きく異なる。MHD はスケールフリーな方程式系であり、空間解像度にある程度の任意性があるが、磁気圏全体を包含する関係上、格子幅は地球半径と数千 km のオーダーとなる。一方、人工衛星は m~数 10 m のサイズとなる。

2022 年度は、磁気圏-衛星帯電数値予測の実用化に向けた取り組みを推し進めた。その高度化の具体的な取り組みは、第 6 節で議論する。本節では、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、

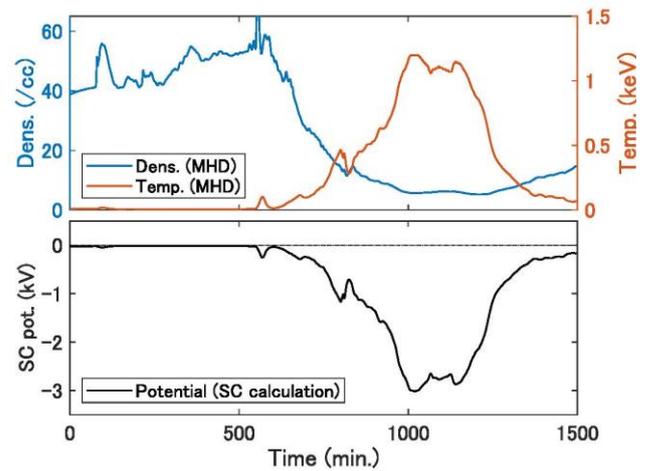


図 1 光電子放出・二次電子放出効果を除いた連成モデルの簡易検証結果. 上段は MHD シミュレーションから得られたプラズマ密度および温度, 下段は衛星電位を示す.

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 Galaxy15 衛星の障害発生が報告されている。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。MHD 計算から得られたプラズマ密度と圧力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ができないため、電子とイオンは同一温度であると仮定した。

実装した連成シミュレーションの動作検証のため、数値実験を行った。実験に使用した計算機は、JHPCN で提供される九州大学 ITO システム A の最大 64 ノード分である。まず帯電素過程の妥当性を確認するため、磁気圏プラズマ電子とイオンの電流項のみを考慮し、ITO-A を 32 ノード用いて簡易解析を実施した。このとき Requester、Coupler、Worker のそれぞれに割り当てられた MPI プロセス数はそれぞれ 512、1、1 である。磁気圏 MHD シミュレーションは  $600 \times 400 \times 400 \sim 10^8$  格

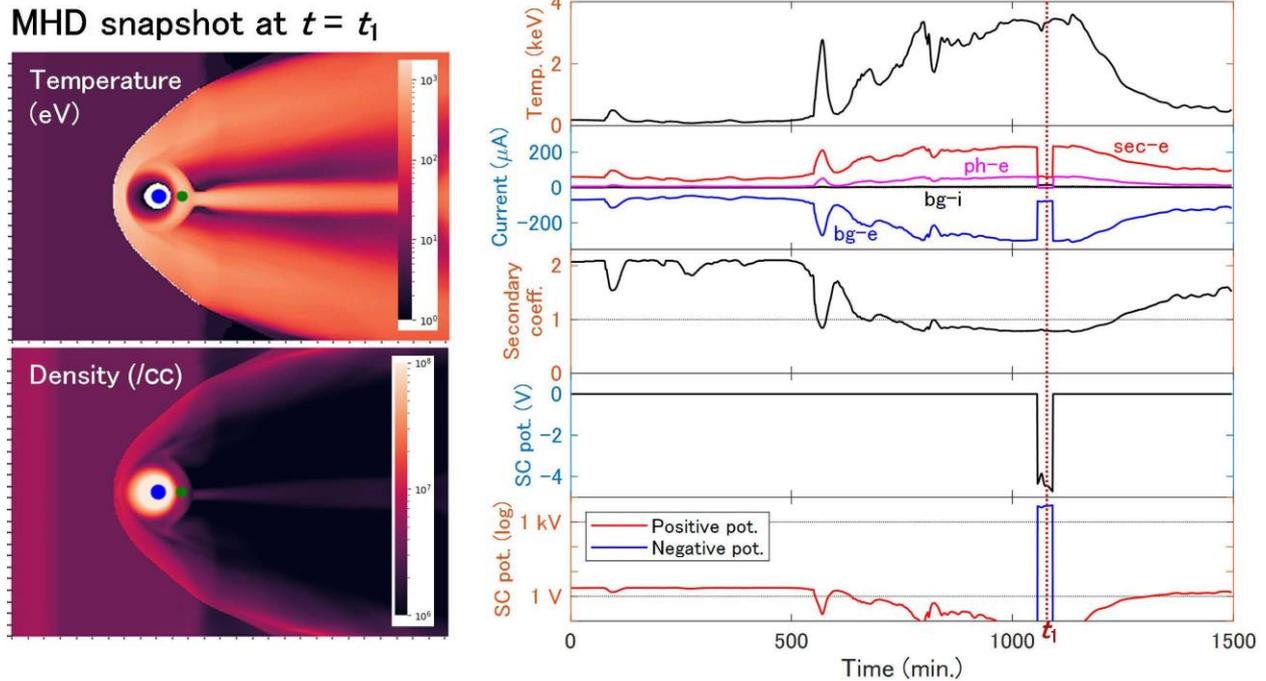


図2 光電子・二次電子放出効果を考慮した数値結果. 左図は、 $t=t_1$ における MHD 計算温度・密度のスナップショットを示す. 図中の青丸は地球、緑点は静止軌道上の人工衛星位置（時刻とともに移動する）を示している. 右図は、衛星帯電モデルにより算出された衛星電位の時系列結果を示す. 右図上段から2番目のプロットにおける bg-e、bg-i、sec-e、ph-e は、それぞれ磁気圏プラズマ電子・イオン、二次電子、光電子の電流を表す. 右図最下部は、衛星電位の絶対値を対数スケールで示したもので、赤線の継続時間が正、青線の継続時間が負の電位値に対応している.

子点からなる 3 次元空間を使用している. 図 1 に簡易解析の結果を示す. 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た.

実際には、光電子放出や二次電子放出など、より多くの種類の電流成分が帯電過程

に参与し、現象はより複雑である. このような現実的な状況での解析を図 2 に示し、個々の電流値と 2 次電子放出係数を表示する. 電流の大きさと二次電子放出係数は、宇宙船の電位だけでなく、周囲のプラズマの温度にも依存する. 放出分を含む全電流が MHD シミュレーションによるプラズマの状態に依存する. 注目すべきは、1024～1060 min. の時間帯に見られる宇宙機ポテンシャルの急激な低下である. これは、軌道上の衛星が太陽から見て地球の裏側（蝕）に入り、光電子放出が停止する時間である. 一般に、光電子放出束（衛星を正帯電させる原因）は、プラズマ入射電子束よりも大きいため、蝕の外では衛星電位は数 V 程度正に帯電する. 一方、蝕の間は、逆にプラズマ入射電子束が支配的となり、

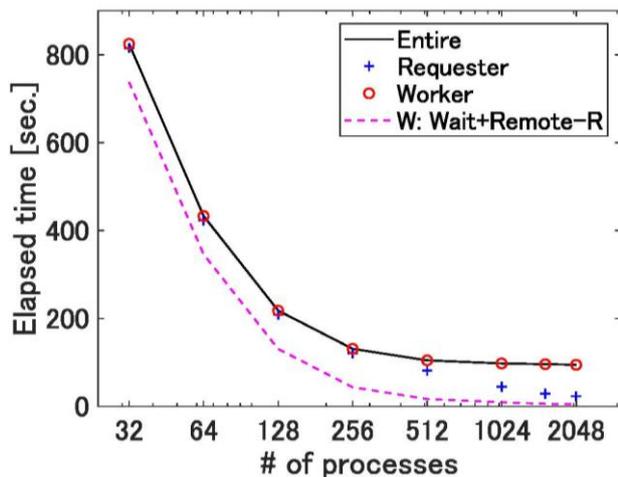


図3 地球磁気圏ダイナミクスと衛星帯電現象の連成解析の計算所要時間. ピンクの破線は、WorkerプログラムのRMAによる「待機」と「読み込み」に要する時間を示す。

衛星電位は深い負電位に低下する。このような急激な電位変化は、実際の衛星運用の健全性を損なう可能性がある点で注意すべき結果である。日蝕時に実際に起こる衛星電位低下は、宇宙プラズマ温度や二次電子放出係数に大きく依存する。物理ベースのMHD計算から得られた環境パラメータに基づいて衛星電位を評価できることは、将来の帯電予測プラットフォームを構築する上で大きな前進となる。

次に磁気圏MHDシミュレーションと衛星帯電解析の計算負荷の特性を把握するため、Requester（磁気圏MHD計算）、Worker（衛星帯電計算）、および連成解析全体、それぞれの解析所要時間の測定を行った。このとき領域分割法に基づく並列化実装が施されている磁気圏MHD計算に関しては、問題規模を一定に保ったまま割り当てプロセス数を32～2048の間で変更し（強スケーリング測定）、それぞれのケースについて時間測定を行った。

図3に時間計測結果を示す。Requesterへの割り当て計算資源量が32～512プロセスの範囲では連成解析全体の所要時間は使用プロセス数増加とともに低減する。

特に32～256プロセスでは、RequesterとWorkerの解析所要時間はほぼ一致している。本連成解析モデルの設計仕様上、衛星帯電解析となるWorkerは、必要なプラズマ物理量データがMHD計算側で生成されるまで、衛星帯電計算処理を進めずにRequester側へのリモートメモリアccessを継続する。Workerの所要時間はこの待ち時間を含んだものとなっており、この間のWorkerの処理速度はRequesterのそれに律速される。実際に32プロセス実行時に、Workerの処理に占めるリモートメモリアccess及び必要な物理量データの有無の確認に要する時間の割合は89.4%であった。図3において、Requesterと待機時間を含めたWorker実行所要時間が一致していることは、実質的に衛星帯電解析の数値演算が磁気圏MHDのそれを下回っていると考えられる。

Requesterへの割り当て計算資源量が512～2048プロセスとなる領域では、RequesterとWorkerの解析所要時間に乖離が生じている。Requesterとなる磁気圏MHD計算では、領域分割数の増加に伴い1小領域内の演算量が低下するため、境界通信コストの比率が増大する1024プロセス程度までは解析所要時間が短縮される。

一方、衛星帯電計算の数値演算処理時間は不変であるため、256プロセス以下で顕著となっていたリモートメモリアccess所要時間が最小化された後(2048プロセス実行には、3.5%であった)は、解析所要時間に変化は生じない。実験結果より、本研究で用いた物理解析および使用計算機条件においては、共通のシミュレーション対象時間に関して、MHDシミュレーションの200,000～400,000格子点分の演算時間と、衛星帯電計算の数値積分時間が互いに均衡していることが判明した。これは両者に対する最適な計算資源配分を考える上

で、有益な情報である。

## 6. 進捗状況の自己評価と今後の展望

下記では、課題申請時に設定した計画に対する進捗度とその内容を記載する。なお各小項目の内、**青文字の部分は年度前半**、**赤文字は年度後半**に主に実施した内容である。

### (1) MHD-人工衛星帯電連成シミュレーションの高度化（申請書内：研究計画項目 1）

#### A. 衛星軌道を考慮した磁気圏環境情報オフロード機能の実装：進捗 100%（完了）

現実の衛星の軌道運動を反映した帯電評価を可能にするため、計算空間内を時々刻々移動する参照点上の磁気圏環境情報オフロード機能を新たに実装した。具体的な開発要素としては、連続的な値を取りうる衛星位置座標における圧力・密度情報を離散格子上でデータから算出するための形状関数の導入と、領域分割型並列実装 MHD コードにおいてデータオフロード元 MPI プロセスの変動に対応したデータ通信方式の実装である。

後者に関しては、MHD コード側の各プロセスで衛星個数に対応した物理情報バッファを 3 次元空間配列とは別途に用意し、片方向通信のウィンドウオブジェクトを割り当てるアプローチを採用した。MHD と帯電計算双方で衛星軌道情報を共有しておき、衛星を包含する小領域を担当する MHD 側 MPI プロセスが圧力・密度情報をバッファにパッキングすると同時に、帯電計算側は該当プロセスに対してリモートメモリアクセスを非同期に実行することで、帯電時間発展計算に必要な物理情報を随時取得する。この方式に基づき、多数の人工衛星が実際に運用されている静止軌道上の帯電解析を実証的に実施し、その妥当性を確認した。この成果は第 7 節の[1-3]において公表済みである。

#### B. 衛星帯電応答時間スケールを考慮した帯電評価アルゴリズム検討：進捗 100%（完了）

衛星帯電応答時間は磁気圏環境変動時間

に比べて十分に短いため、連成計算では MHD 計算の 1 時間刻み幅の間に多数回の帯電時間更新を実施する。このとき両者の時間刻み幅の比率はプラズマ密度条件に大きく依存する。これは衛星帯電応答時間が高密度プラズマ条件では非常に短くなるためである。現状では帯電計算側に帯電応答時間見積もりに基づく可変時間刻み幅を採用することにより安定的な計算を実現しているが、MHD と帯電計算の計算コスト比率が状況に応じて変動するため、負荷不均衡への対応が難しい。

この課題を解決するための施策として、帯電応答時間が極端に短くなる高密度プラズマ条件下で、通常時とは異なる帯電評価アルゴリズムを採用するアプローチを提案した。具体的には、通常時には衛星電位時間発展に関する常微分方程式を解くのに対して、高密度条件下ではプラズマ電流の総和が 0 となる浮遊（平衡）電位の求解にソルバーを切り替える。前者は衛星電位の過渡応答を考慮するが、後者は定常状態のみに着目することに対応する。

上記の動的な帯電ソルバー切り替えの妥当性を検証し、幅広いプラズマ環境条件下で安定的な帯電解析が行えることを確認した。また新方式により、MHD と帯電解析の時間刻み幅の比率に上限が規定され、帯電解析を MHD 計算時間内に隠蔽する計算資源の割り当てがより容易に行えるようになった。

#### C. 磁気圏 MHD/衛星帯電モデルの計算負荷特性の調査と最適化検討：進捗 80%

本課題で開発する計算フレームワークは、内容の全く異なる独立のプログラム同士をプロセス間通信により非同期に連携する内容である。このようなケースにおいては、結合対象となるプログラム群の演算量は、それぞれ全く異なることが通例であるため、各プログラムに配分する計算資源の割り当て方を最適化することで、お互いの実行時間を均

衡化する必要がある。この前段階として、一方のプログラムの一定単位の演算コストが、他方のどの程度の演算コストと均衡するかを調査する必要がある。2022 年度はこの問題意識に基づき、帯電計算側の計算資源を固定する一方、MHD 計算側に割り当てる計算資源  $N_{p,mhd}$  を変化させて計算性能を調査した。その結果は第 5 節で示した通りであり、 $N_{p,mhd}=256\sim 512$  付近に、MHD と帯電計算の処理時間均衡点の存在が確かめられた。この結果から、共通の解析対象時間に対して、200,000~400,000 格子点分の MHD 演算時間と、衛星帯電計算の数値積分時間が均衡していることが導き出される。

上記の知見に基づき、資源割り当ての最適化を実施するためには、結合対象となる双方のプログラムが柔軟な並列資源の割り付けに対応している必要がある。現状では、衛星帯電計算側の演算処理は並列計算に対応しておらず、この点の解決が今後の課題である。

(2) **コード間結合フレームワークを用いた In-situ 可視化基盤技術開発：進捗 70%** (申請書内：研究計画項目 2)

コード間結合フレームワーク CoToCoA の応用技術として、In-situ 可視化基盤技術を開発した。In-situ 可視化は、シミュレーションの計算進行中に、それまでに得られた計算結果を可視化することで進捗状況を確認する技術である。今回、CoToCoA を利用することで、シミュレーションや可視化のプログラムに対する若干の変更のみで実現可能であることを確認した。

今回開発した In-situ 可視化基盤技術の概要をエラー! 参照元が見つかりません。に示す。この中で、まずバックエンド計算ノード群で動作する Requester でシミュレーションを実行し、フロントエンドノードで動作する Worker が CoToCoA の read ルーチンにより計算結果を Requester のメモリから読みだして、PC で動作する可視化

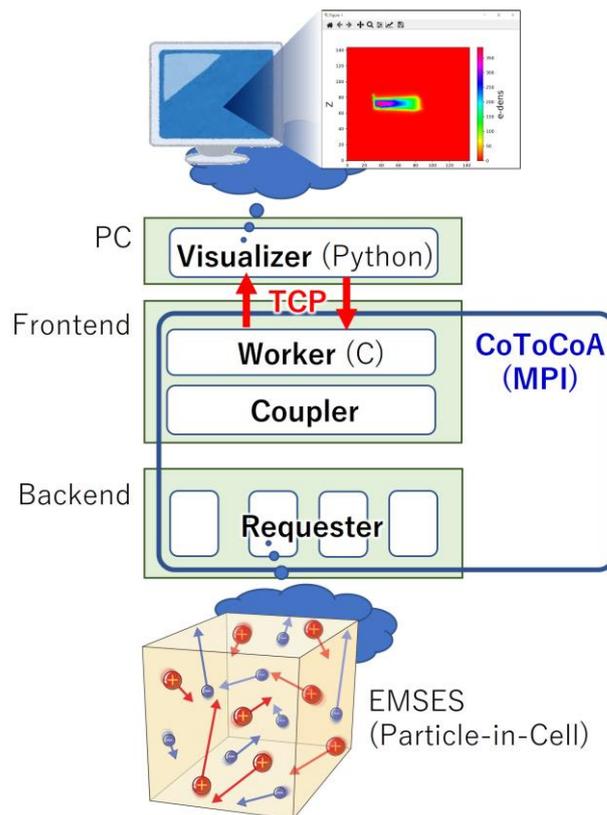


図 4 CoToCoA と TCP 通信を利用して構築した In-situ 可視化基盤の構成図。

プログラムに渡す。なお、可視化プログラムと Worker の間の通信には TCP を用いている。

今回開発した基盤技術の動作検証を、九州大学のスーパーコンピュータ ITO で実施した。手順は、まず ITO のフロントエンドノードをあらかじめ確保して PC との間で SSH トネリングを確立する。その後、このフロントエンドノード上の Worker と Coupler、バックエンド上の Requester を MPMD 起動するジョブスクリプトにより CoToCoA プログラム群のジョブを投入する。ジョブの実行が開始されると、PC で可視化プログラムを起動し、Worker と TCP 接続を確立する。これにより、Requester のシミュレーション結果を PC の Visualizer で In-situ 可視化できることを確認した。

(3) **進捗状況の総括と今後の展望**

2022 年度の主な進展は、CoToCoA フレー

ムワークに基づき構築した地球磁気圏－人工衛星帯電連成モデルに、数値予測技術として重要な機能拡充を施すことで、実際の磁気圏じょう乱時の高レベル衛星帯電現象の再現を実現できたことにある。また結合対象の一方のプログラムの遅延による、他方のプログラム待機時間を最小化するために今後必要な、演算コスト特性の基礎データを収集した。

また課題申請時に設定していた「コード間結合フレームワークの in-situ 可視化応用」についても、CoToCoA と TCP 通信モジュール、および計算環境として九州大学フロント／バックエンドノードを併用することで、計算実行中の可視化データオフロードの基盤技術を確立した。実際の可視化方式に関しては、2次元のコンター図など、基本的な機能に限定されている。

これらを勘案し、**今年度の全体の達成状況は 90%と自己評価する。**

今後は人工衛星帯電計算部分の並列計算技法の開発を速やかに進めるとともに、より複雑な電氣的構成を有する人工衛星も解析対象範囲とできるよう、磁気圏環境－衛星帯電連成解析の機能性の拡充を進めていく。また双方向の物理情報の交換や、3者以上の物理素過程間の結合が必要となる、より複雑な連成物理対象に対して、CoToCoA フレームワークを軸とした実装事例を増やすことで、連成研究の基盤的知識を蓄積する。

## 7. 研究業績

### (1) 学術論文 (査読あり)

該当なし

### (2) 国際会議プロシーディングス (査読あり)

[1] Y. Miyake, Y. Sunada, Y. Tanaka, K. Nakazawa, T. Nanri, K. Fukazawa, and Y. Katoh, 'Implementation of Coupled Numerical Analysis of Magnetospheric Dynamics and Spacecraft Charging

Phenomena via Code-To-Code Adapter (CoToCoA) Framework', Proc. International Conference on Computational Science (ICCS) 2023, accepted for publication.

### (3) 国際会議発表 (査読なし)

[2] Y. Miyake, K. Nakazawa, Y. Sunada, K. Fukazawa, T. Nanri, and Y. Katoh, Development of the Space-Weather-Aware Satellite Charging Analysis Platform Based on the Numerical Code Coupling Framework, AGU Fall Meeting 2022, December, 2022.

### (4) 国内会議発表 (査読なし)

[3] 三宅洋平、中澤和也、砂田洋平、南里豪志、深沢圭一郎、加藤雄人、コード結合フレームワーク CoToCoA による磁気圏 MHD－人工衛星帯電連成シミュレーションの実現、研究報告ハイパフォーマンスコンピューティング (HPC)、2022-HPC-185(23)、pp. 1-8、2022.

[4] 砂田洋平、三宅洋平、中澤和也、深沢圭一郎、南里豪志、加藤雄人、コード間結合フレームワークを用いた人工衛星帯電解析の技術基盤開発、地球電磁気・地球惑星圏学会第 152 回総会・講演会、2022 年 11 月.

[5] 砂田洋平、田中唯逸、三宅洋平、深沢圭一郎、南里豪志、加藤雄人、磁気圏環境変動を考慮した人工衛星帯電解析手法の開発、2023 年度 RISH 電波科学計算機実験(KDK) シンポジウム、2023 年 3 月.

### (5) 公開したライブラリなど

[6] T. Nanri, Y. Katoh, K. Fukazawa, Y. Miyake, K. Nakazawa, J. Zhou, and Y. Sunada, CoToCoA (Code-To-Code Adapter), version 1.2.3, <https://doi.org/10.5281/zenodo.5775280>

### (6) その他 (特許、プレスリリース、著書等)

該当なし