

jh230042

## 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（神戸大学大学院システム情報学研究科）

### 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。2023 年度は、グローバル地球磁気圏環境－人工衛星帯電現象を結合した連成モデル計算における計算資源配分の適正化と計算高効率化を目指し、衛星帯電計算の並列化実装の検討を複数の側面から実施した。具体的には、複数筐体要素を有する衛星電位系を定式化することで未知数を多重化することで並列性を創出した。さらに、当方策のみでは並列度が不十分な点に対応すべく、衛星帯電計算の時間方向並列化の検討を開始し、時間方向分割時に生じる不整合の修正手法に関して基本実装を完了した。また CoToCoA フレームワークを用いた In-situ 可視化機能を磁気圏－衛星帯電解析に対応させた。

### 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

京都大学 学術情報メディアセンター  
大阪大学 サイバーメディアセンター  
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 (HPCI 資源利用課題のみ)

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・臼井\*1: 宇宙プラズマ連成モデルの設計・応用  
田中・酒谷\*1: 宇宙プラズマ連成モデルコードの開発  
釜江・川村\*1: 連成対象数値計算プログラムの最適化  
南里豪志\*2: 連成フレームワーク CoToCoA の開発  
深沢圭一郎\*3: 磁気圏 MHD シミュレーション開発  
加藤雄人\*4: メソスケールプラズマモデルの開発  
周靖得\*3: 連成計算向け高効率データバッファリング

### 機構の開発

\*1. 神戸大, \*2. 九州大, \*3. 京都大, \*4. 東北大

### 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。

2023 年度は、磁気圏－衛星帯電連成解析における各モデルに対する計算資源配分最適化を目的として、帯電計算並列実装に取り組む。具体的には帯電計算の持つ以下の二つの並列性活用を検討する。①独立電位を有する衛星筐体用に基づく並列性、および②衛星電位発展の時間方向並列性、である。これに加えてコード間結合フレームワークにおける時間方向バッファリングと In-situ 可視化の開発を進め、CoToCoA の機能拡張を行う。

### 3. 当拠点の公募型共同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

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。

磁気圏－衛星帯電連成計算解析における結合対象数値モデルの現状の並列実装は下記の通りである。磁気圏グローバル MHD モデルは、計算対象とする 3 次元空間の領域分割に基づき、並列実装が完了している。過去の最大 72,000 並列度まで並列性能評価実験において良好なスケーラビリティが実証されている。帯電計算モデルは、未知数の個数が独立電位を持つ人工衛星筐体要素の数となっており、空間方向の離散化が原理上用いられていない。従って解析対象の衛星要素が単一の場合は、未知数は 1 個となり、現状は逐次実装となっている。

### 5. 今年度の研究成果の詳細

異種のモデルを連係動作させる連成計算においては、両モデルの進行度が可能な限り乖離しないように与えられた計算資源の配分を行う必要があり、そのために結合対象の

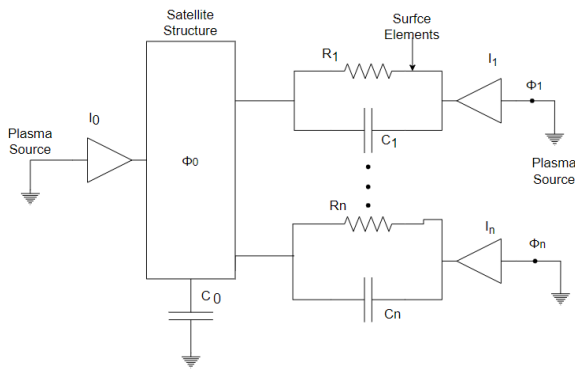


図1 衛星構体とその表面上に貼付された誘電体  
 筐体要素（カバーガラス等）の電氣的結合  
 を表現する等価電気回路.

双方がそれぞれ並列実行に対応していることは重要である。

2023 年度は帯電モデルの並列実装に向けた取り組みとして、①複数筐体要素を持つ衛星電位系を定式化し、未知数の多重化を推進、②衛星電位発展演算の時間方向並列化に向けた検討、を進めた。本節では①による研究成果について報告する。

衛星が独立電位を有する複数筐体要素から構成される場合、個々の電位の時間発展を表す常微分方程式を複数用意することとなる。ここで独立とは、それぞれの電位が異なる値をとれることを意味するが、実際には一方の電位が他方の筐体要素の電位値に影響を及ぼすことや、要素間の電位差に応じた電荷のやり取り（電流）が発生することから、互いの電位値は互いに結合していることに注意が必要である。

このような帯電実装の意義は並列化の観点に限定されるものではなく、実際的な人工衛星の帯電予測を行う点でも重要である。我々は衛星の構体に対して異なる電位を有する2枚の太陽電池パネルカバーガラスを有する導体系を想定した。各筐体要素の間の電氣的結合は図1のような回路を想定した。電位の基準、すなわち電氣的な接地点は宇宙空間の遠方に設定されている。衛星構体は一般に宇宙空間とは電氣的に切り離されており

（浮遊電位）、回路上は静電容量  $C_0$  で接続されている形で表現される。またカバーガラスは衛星構体と容量  $C_n$  と抵抗  $R_n$  の並列回路で接続されているものとモデル化するのが妥当である。各筐体要素に対して、外部からプラズマ電流が共有される。これは  $I_n$  という電流源で表現される。図1の等価回路では、衛星構体に接続される筐体要素を一般の  $N$  個としているが、本研究においては  $N = 2$  とすることで、衛星構体2枚の太陽電池パネルカバーガラスの電氣的結合関係を記述している。

上述の回路系に基づき、下記に示す計3本の連立常微分方程式が構成される。

$$\begin{cases} \frac{d\phi_0}{dt} = \frac{I_0(\phi_0) + I_1(\phi_1) + I_2(\phi_2)}{C_0} & \text{①} \\ \frac{d(\phi_1 - \phi_0)}{dt} = \frac{I_1(\phi_1) - \frac{\phi_1 - \phi_0}{R_1}}{C_1} & \text{②} \\ \frac{d(\phi_2 - \phi_0)}{dt} = \frac{I_2(\phi_2) - \frac{\phi_2 - \phi_0}{R_2}}{C_2} & \text{③} \end{cases}$$

ここで、 $\phi_0$ : 衛星構体の表面電位、 $\phi_1, \phi_2$ : 太陽電池カバーガラスの（平均）表面電位、 $C_0$ : 衛星構体の宇宙に対する静電容量、 $C_1, C_2$ : 太陽電池パドルの衛星構体に対する静電容量、 $I_0$ : 衛星構体への電流、 $I_1, I_2$ : 太陽電池パドルへの電流、 $R_1, R_2$ : 太陽電池パドルの抵抗値である。

衛星各部への電流  $I_n$  ( $n = 0, 1, 2$ ) は以下のように表される。

$$I_n = \sum_s I_s(\phi_n, n_{MHD}, T_{MHD})$$

ここで添え字  $s$  はプラズマ電流を構成する粒子種であり、地球磁気圏環境で支配的な成分となる  $e$ : 背景プラズマ電子、 $i$ : 背景プラズマイオン、 $ph$ : 光電子、 $sec$ : 二次電子、 $bk$ : 後方散乱電子を考慮している。この中で背景プラズマ電子とイオンの密度  $n_{MHD}$  や温度  $T_{MHD}$  は、衛星周囲のプラズマ環境に依存しており、本連成解析ではこれらの物理パラメタ値をグローバル磁気圏MHDシミュレ

### MHD snapshot at $t = t_1$

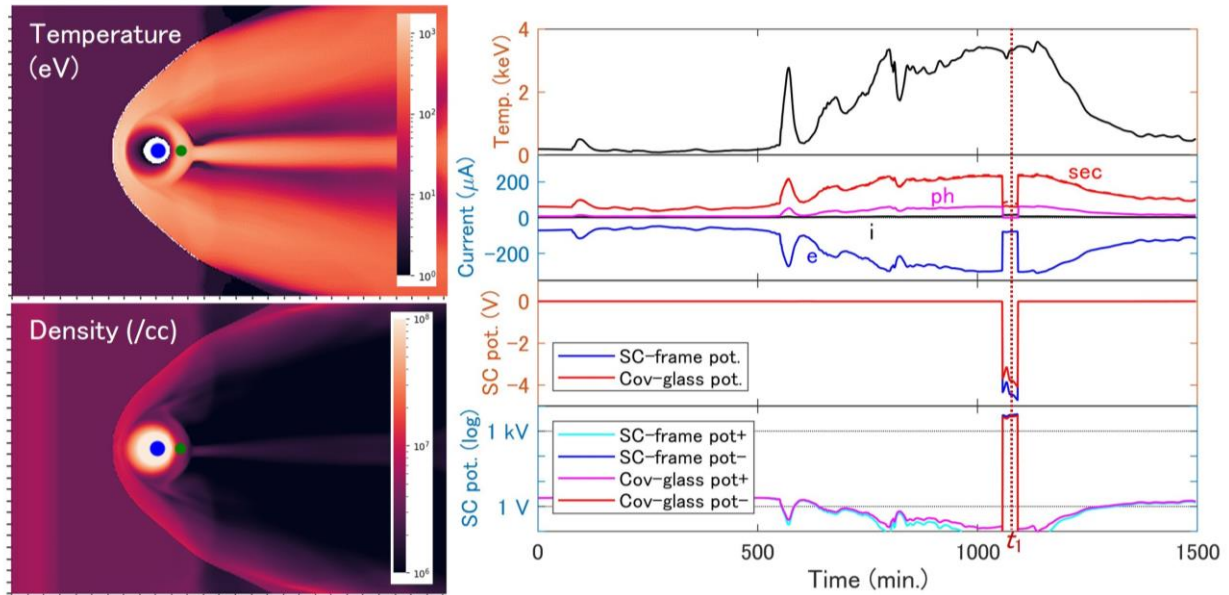


図2 複数の筐体要素を考慮した磁気圏－人工衛星帯電連成解析結果. 左図は、 $t = t_1$ における MHD 計算温度・密度のスナップショットを示す. 図中の青丸は地球、緑点は静止軌道上の人工衛星位置（時刻とともに移動する）を示している. 右図は、衛星帯電モデルにより算出された衛星電位の時系列結果（上から3、4段目）を示す. 右図上段から2段目のプロットにおける e、i、sec、ph は、それぞれ磁気圏プラズマ電子・イオン、二次電子、光電子の電流を表す. 右図最下部は、衛星電位の絶対値を対数スケールで示したもので、衛星構体とカバーガラス、およびそれぞれの電位値が正の時間帯と負の時間帯を異なる色の線で表現している.

ーション側から取得して、衛星帯電側に反映させている。

当方程式系をルンゲクッタ法により数値積分するプログラムを開発し、CoToCoAにより磁気圏MHDシミュレーションと連成させ、動作検証を実施した。宇宙プラズマ環境としては大規模な地磁気サブストームが発生し、米国 Galaxy15 衛星の障害発生が報告された2010年4月5日の地球磁気圏環境を想定した（2022年度のJHPCN課題で対象とした日時と共通）。当該環境に Galaxy15とは異なる仮想的な人工衛星が曝されたことを想定し、帯電現象を解析した。2022年度の報告内容と同様に、宇宙プラズマの電子とイオンは同一温度であると仮定した。

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 および京都大学 Camphor システムである。CoToCoA フ

レームワークにおける 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。

得られた結果を図2に示す。サブストームの発生に伴い、解析開始時点より500min.以降の時刻にプラズマ温度の顕著な上昇がみられる。また1100min.時点付近では、軌道上の衛星が太陽から見て地球の裏側（蝕）に入り、光電子放出が停止している。衛星電位は各粒子種の電流の総和が0になるように変化する傾向があるが、日照時に衛星を数V程度の正電位に支えていた光電子放出電流が地球の蝕では停止することに対応し、衛星は高レベルの負帯電を経験することになる。このとき、サブストーム由来の高温電子の温度が衛星電位の決定因子となる。

衛星構体の導電性コーティングと太陽電池のカバーガラスでは、一般的に二次電子放

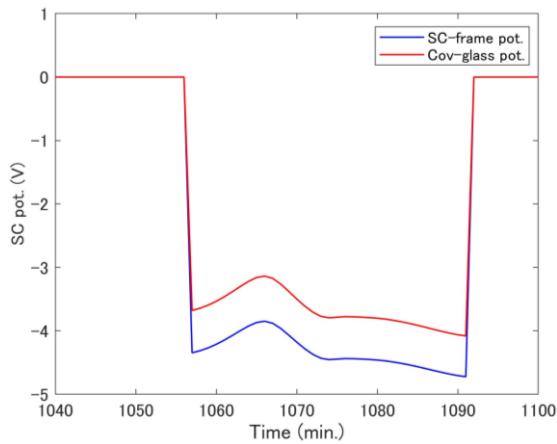


図3 蝕に対応する時間帯の衛星電位推移。

出係数が異なり、これが両者間の帯電もしくは電位の差につながる。図3は地球の蝕に対応する1100 min.前後の衛星構体とカバーガラスの電位推移を拡大表示したものである。

30分ほど継続する蝕の時間帯を通して、衛星構体部が3~4.5 kV程度の負電位に帯電しているのに対し、カバーガラス部ではそれに対して600~700 V程度高い電位値で推移していることがわかる。またこの電位差は日照時には0.1 V程度と小さいが、地球の蝕に入った時間帯に急激に増大することも確認された。

このような衛星筐体間の電位差は衛星帯電研究領域では逆電位勾配と呼ばれ、構体表面と誘電体カバーガラスの物性値の違いから二次電子放出係数に差が生まれるためであると説明されている。一般にこの逆電位勾配が800 Vを超過すると、太陽電池（もしくはそれらを接続するインターコネクタ）とカバーガラス、プラズマ空間が隣接する「トリプルジャンクション」と呼ばれる領域で、電界放出による放電が発生することが報告されている【趙ら, J. Plasma Fusion Res., 2015 など】。本解析ではその初期放電開始閾値に近い電位差がサブストームと蝕の組み合わせで急激に発達することを、変動磁気圏環境下で再現することに成功した。

本解析は、太陽フレアとそれに伴うサブス

トームを生じた過去の1イベントに特化した再現数値実験であり、複数の筐体要素を持つ衛星のモデルに関しても現実の機体を大幅に簡略化したトイモデルによる動作検証といふべきものである。今後、現実の衛星に即したモデルを構築し、上流の宇宙環境シミュレーションと連成結合する形で本解析モデルを活用することで、様々な宇宙環境条件における衛星帯電の再現実験や、リアルタイムの衛星帯電評価が可能になると期待される。

計算効率の観点からは、多重化された未知数の個数（本テスト解析では3）に応じて衛星帯電計算側の並列性が拡張される形となり、より多数の筐体要素を有する実際的な解析モデルでは衛星帯電側に複数プロセスを割り付けできる可能性がある。これまで連成解析の律速要素となっていた衛星帯電計算の計算速度が向上すれば、MHD計算側にもより多くの計算資源を割り付けて、連成解析全体の性能の底上げを図ることが可能である。この点に関する検証は2024年度の継続課題において、実証評価を進める計画である。

## 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. 複数筐体要素および可変時間刻み幅に対応した衛星帯電計算の実装:進捗 100%(完了)

衛星が独立電位を有する複数筐体要素から構成される状況を想定し、個々の電位の時間発展を記述する連立常微分方程式を構築した。この際、筐体要素間の電気的結合関係を記述するために Massaro ら [Proc. SCTC, 1977] が実施した検討を基礎とする等価電気回路モデルを想定し、式①~③に示した連立方程式を導出した。構築した連立常微分方

程式を4段4次のルンゲクッタ法により数値積分するプログラムを実装した。

数値計算上の留意点としては、筐体要素毎に異なる値を持つ静電容量  $C_n$  の値により、帯電の緩和時間が大きく異なる点である。また当該緩和時間は、周囲のプラズマ密度  $n_{MHD}$  にも大きく依存する。このことは、数値積分の時間刻み幅を緩和時間の変化に合わせてアダプティブに調整する必要があることを示す。

そこで本研究では、特定のプラズマ環境（密度と温度）が与えられたときの、式①～③中の電流  $I_n$  を時間  $t$  について1次の項までテイラー展開することで、各時刻の環境パラメタに応じた帯電時定数  $\tau$  を評価した。この時定数評価は、帯電解析時間更新10～100回に一度の頻度で実施する。得られた帯電時定数  $\tau$  より1桁または2桁小さい値を衛星電位変化の解像に十分な刻み幅と見なし、動的に適用することで安定的な時間積分を実現した。

## B. Parareal 法に基づく時間方向並列化の原理検証：進捗 100%（完了）

時間発展計算である帯電計算の時間方向並列化の検討を開始した。計算科学分野では空間分割のみでは並列性が不足する問題の高並列化を目指して、同様の研究が行われており、その中でも2000年初頭にLionらが提案したParareal法が広く活用されている。

Parareal法の基本コンセプトは本来依存性を持つ時間発展を複数区分に分割し、同時並行で演算を行ない、そこで生じる時間区分間の不整合を反復計算により減少させ、収束させる方法論である。この収束性が全体の性能を左右するが、求解する問題の性質により収束性が異なることが知られている。上半期は、Parareal実装経験を積むことと、今後帯電計算の収束特性との比較対象を得ることを目的として、1次元の拡散方程式に対するParareal実装を行った。結果として、①

Parareal法に基づく並列計算で適切な精度で演算が行えること、②元の逐次計算からParareal実装を導入する際に顕著なオーバーヘッドが加わること、③Parareal実装コードを用いた16プロセス並列度までの測定で良好なスケーラビリティが得られること、を確認した。

## C. Parareal 法に基づく衛星帯電計算の時間方向並列化の基礎実装：進捗 60%

年度前半に実施した基本原理検証に基づき、単一の筐体要素からなる衛星帯電計算に時間方向並列化実装を行った。本実装においては、連成結合されるMHD磁気圏シミュレーション側の1時間刻み幅に対して、 $10^4 \sim 10^6$ といった多数回の衛星電位時間更新が対応することを考慮し、MHDの単一刻み幅の時間内の衛星帯電計算に対して時間方向並列化を適用した（これにより、磁気圏MHD計算に時間方向並列化を適用する必要性は回避される）。このとき、衛星帯電計算は刻み幅が細かく並列化の対象となる厳密時間積分と、刻み幅を広くとる代わりに逐次計算を実施する粗視化時間積分を交互に反復しながら実施することで、時間方向分割による不整合を修正する。

粗視化／厳密時間刻み幅の比を5としたときの、不整合修正の様子を図4に示す。反復を重ねるごとに不整合が修正され、最終的に全時間を逐次計算で処理した場合と同等の結果が得られることを確認した。これにより基本的なParareal実装にに基づく衛星帯電計算の時間方向並列化を完了した。

現状における課題は、反復による不整合の修正スピードが拡散方程式への適用時よりも遅く、概ね並列数に近い反復回数が必要となっている点である。原理上、反復回数が並列数に比べて十分に小さくしなければ、時間方向並列化による恩恵は享受できないため、この点の克服が重要な検討項目となる。

## (2) CoToCoA と TCP 通信を活用した磁気圏一帯

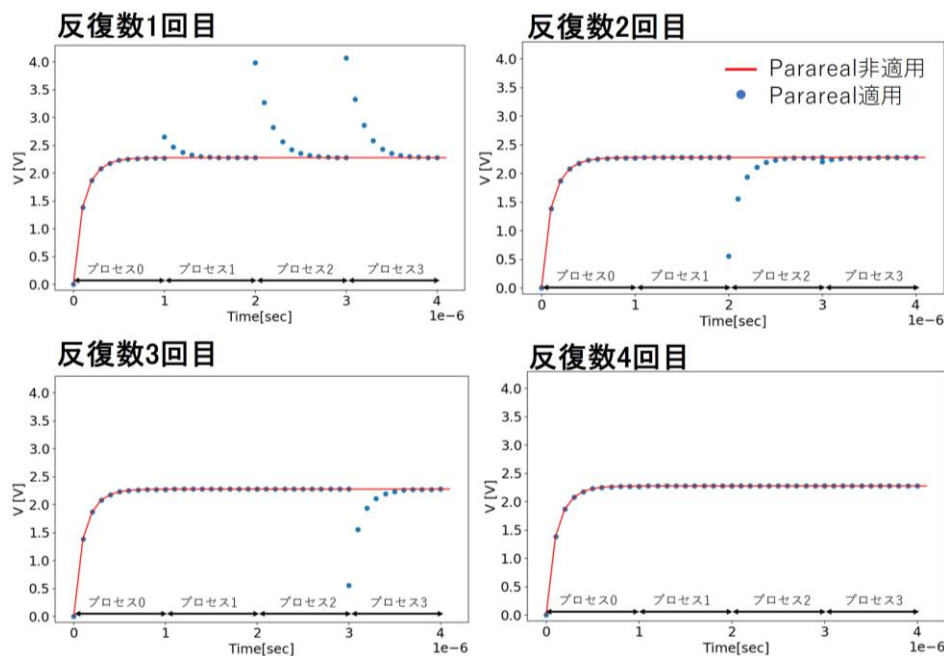


図 4 Parareal 法に基づく衛星電位計算時間方向並列化における反復計算に伴う不整合修正。

**電計算 In-situ 可視化技術開発：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 の応用技術として開発している In-situ 可視化手法を磁気圏－衛星帯電連成計算に適用した。将来的に本連成解析技術を宇宙天気予報システムの一要素機能として社会実装することを想定すると、計算途上の結果を随時可視化画像により確認する技術が重要である。

In-situ 可視化は、2022 年度の課題実施で構築した CoToCoA と TCP 通信を活用した方式に必要な変更を適用して実装を行った。主な変更点は以下のとおりである。前年度の実装においては、可視化用データの集計と TCP 通信を担う Worker プロセスを九州大学 ITO システムのフロントエンドを配置することで、Worker から外部の可視化用端末（とその上で動作する Visualizer）に直接 TCP 通信を実施していた。本年度はこれを変更し、CoToCoA フレームワークで包摂される全てのプロセスをバックエンドノードに配置し、TCP 通信を ITO システムのログインノードで起動

した Visualizer に対して行う方式に変更した。Visualizer (Python で実装されている) は、ログインノード上で可視化画像を生成し、X Window システムを活用し、外部 PC 端末上に随時可視化画像を表示する。これにより、フロントエンドノードのような特別な運用がなされているノードを活用することなく、In-situ 可視化が可能となった。また今年度の実装方式により、九州大学だけでなく京都大学スーパーコンピュータ資源においても同方式で In-situ 可視化を行うことを可能とした。

**(3) 進捗状況の総括と今後の展望**

2023 年度の主な進展は、CoToCoA を活用した地球磁気圏－人工衛星帯電連成モデルにおいて、年度当初に並列化対応がなされていなかった衛星帯電モデルに対して、①未知数の多重化と②時間方向並列化、の 2 側面から並列性を創出することに目途を立てたことである。特に①の観点は、計算効率の観点のみならず、実際的な衛星帯電解析を可能にする進展であり、将来の宇宙天気予報やナウキャストにつながる成果である。時間方向並列化に関しては、課題メンバ外の有識者の助

言も得つつ、当該技術の中で比較的広く普及している Parareal 法の基本原理を衛星帯電計算に適用し、本来依存性を有する時間発展を小時間区間に分割・並列実行することによる不整合を修正する機能を実装した。一方、修正が十分に管理するまでの反復数が既往研究で対象とされた物理計算モデルに比べて多いことが課題となっている。衛星電位の時間発展が基本的に平衡化の過程であることから、粗視化積分によって初期の時間発展の情報を後方の時間区間へ伝達する仕組みが有効に機能していないことが原因と分析している。時間区間の間の修正式の再検討などにより、この点の解決を指向していく。

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 通信モジュールを活用することで、磁気圏-衛星帯電連成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。

これらを勘案し、**今年度の全体の達成状況は 80%と自己評価する。**

今後は人工衛星帯電計算の時間方向並列計算技法の改良を進めることで、課題メンバーが扱う特定のアプリケーションのみならず、Parareal 法の数値特性についても知見を蓄積していくことを目指す。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する、新たな CoToCoA 適用事例に取り組む。具体的には、惑星上層の希薄中性大気流出過程を明らかにするための DSMC シミュレーションと電離大気の連成モデルの開発に着手していく。

## 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', Computational Science - ICCS 2023. Lecture Notes in Computer Science, 14074, 438-452, 2023.

### (3) 国際会議発表 (査読なし)

[2] K. Fukazawa, Y. Katoh, and T. Nanri, Time Evolution of Three-dimensional Vortex Configuration and Sponge-like Nature in the Jovian Magnetosphere with the High Spatial Resolution MHD Simulation, AGU Annual Meeting, Dec. 2023.

### (4) 国内会議発表 (査読なし)

[3] 田中唯逸、三宅洋平、南里豪志、深沢圭一郎、加藤雄人、人工衛星帯電シミュレーションの時間方向並列化の基礎検討、STE シミュレーション研究会、2023 年 12 月.

[4] 三宅洋平、砂田洋平、田中唯逸、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に基づく宇宙環境変動-衛星帯電現象連成解析プラットフォームの開発、地球電磁気・地球惑星圏学会第 154 回総会・講演会 2023 年 9 月.

[5] 深沢圭一郎、超並列計算環境におけるコード結合フレームワーク CoToCoA を用いた宇宙プラズマ連成計算シミュレーションの計算・電力性能評価、先駆的科学計算フォーラム 2023、2023 年 5 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