

jh210047-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 の性能評価関連の機能を拡充するとともに、具体的な物理計算モデルとして地球磁気圏環境-人工衛星帯電結合系の連成計算モデルの開発を推進する。主な成果として、磁気圏環境変動に依存せずに衛星帯電計算負荷を一定値如何に抑える計算方式を考案したことで、連成対象コード間負荷バランスの極端な悪化を回避する道筋を見出した。

1. 共同研究に関する情報

(1) 共同研究を実施した拠点名

北海道大学 京都大学 九州大学

(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・砂田洋平 (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

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、具体的な連成モデルアプリケー

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

ションとして、グローバル MHD 計算に基づく磁気圏変動パラメータを直接反映した、人工衛星帯電予測シミュレーションが実現可能性を示すことを主要目標とする。これに関連して、衛星帯電の原因となるプラズマ荷電粒子環境に関する磁気圏マルチスケール物理の連成計算モデルも構築する。

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

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。2020 年度は実際に連成並列プログラムとして構築する前段階として、当該結合系が物理モデルとして妥当か否かについて CoToCoA を用いずに検証を行った。その結果、磁気圏環境変動の影響を反映した衛星帯電評価が可能であることを確認した。

5. 今年度の研究成果の詳細

(1) 磁気圏環境と人工衛星帯電の連成シミュレーション解析

コード間連成フレームワーク CoToCoA を実用したアプリケーションとして、グローバル MHD 計算に基づく磁気圏変動パラメータを直接反映した、人工衛星帯電予測シミュレーションの技術開発に取り組んでいる。その背景には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需要の高まりがある。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、当課題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

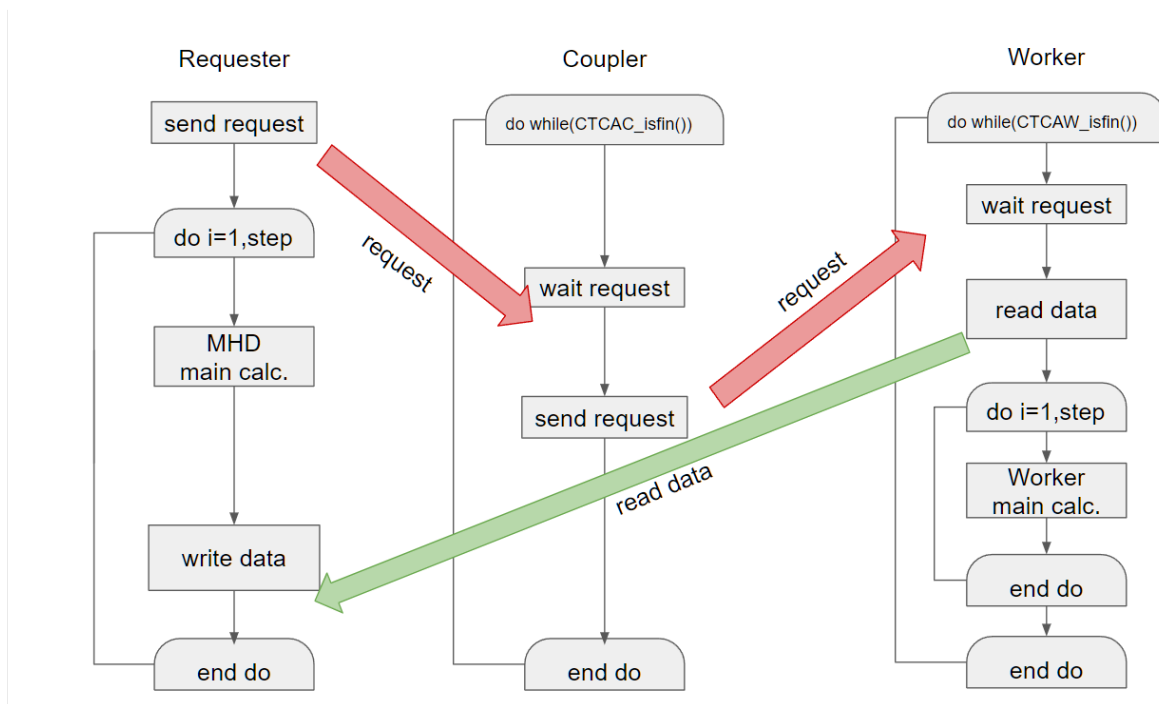


図1 磁気圏環境変動－衛星帯電連成解析における Requester、Coupler、Worker の挙動。

れてきた。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。

基本構成は以下の通りである。数時間～1日の期間の地球磁気圏のプラズマ環境変動を、グローバル並列MHDシミュレーションにより解き進める。このとき、計算空間中のある位置座標に人工衛星が存在することを想定し、その座標におけるプラズマ圧力と密度の情報をオフロードする。その情報をCoToCoAのCouplerプロセスが人工衛星電位計算プログラムに伝達することで、時間的に変動するプラズマ環境データを入力とした衛星帯電計算を実施するものである。

この基本コンセプトが衛星帯電予測に有効であることは2021年度に実証済みである。2022年度はCoToCoAを用いたグローバルMHDと人工衛星帯電の連成計算モデルの実装を実施した。具体的にはグローバルMHDプログラムをCoToCoAフレームワークにおけるRequesterに、衛星帯電プログラムをWorkerに割り当て、MHD計算で得られた人

工衛星位置における地球磁気圏環境データ（密度と圧力）をWorker側がリモートアクセスする構成とする。簡単のため、①人工衛星位置はMHD計算空間中の固定点（現状では2点）とする、②衛星電位計算は瞬時毎の定常値を求める簡易計算モデルとする、という条件を課している。

連成計算モデルの制御フローの概略を図1に示す。RequesterはMHDの物理計算開始前にCoToCoAのsendreq呼び出し、Couplerを経由して帯電計算を起動する。またこのときにWorkerとの片方向通信のためのWindowオブジェクトを専用のCoToCoA API関数により生成する。以降、RequesterはMHD物理計算の1サイクル毎に人工衛星位置に対応する座標のプラズマ圧力・密度データをWindowオブジェクトとして登録したバッファに格納する。衛星帯電計算を担うWorkerは、Requesterのsendreqによって起動した後は、片方向通信によりMHD側のメモリ領域にアクセスし、MHD計算進行状況をモニターする。MHD計算側で新たなプラズマ圧力・密度データが生成され、バッフ

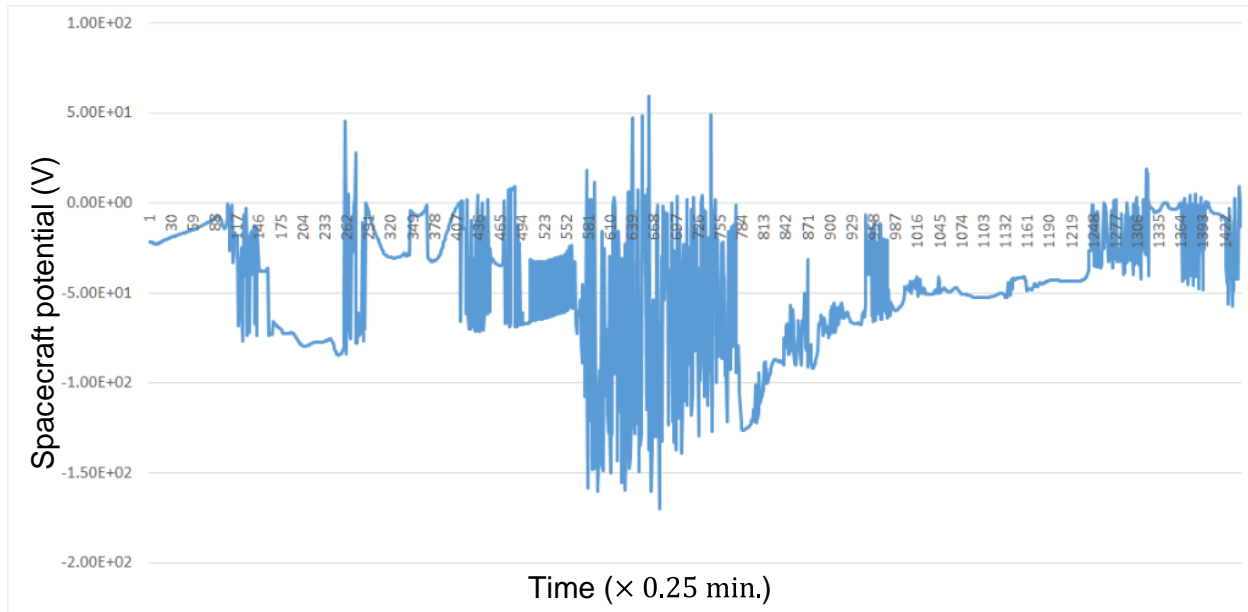


図2 CoToCoA フレームワークを用いた人工衛星帯電計算の検証。

アに格納されたことが確認されれば、Worker は取得された環境データに基づき衛星電位の時間発展を解き進めていく。これまでに MHD 計算に最大 1024 プロセス、対象とする人工衛星一機につき 1 プロセス、CoToCoA の Coupler に 1 プロセス、の計算資源割り当てによるテスト実行を実施し、磁気圏環境変動を反映した衛星帯電計算の動作検証を完了した (図 2)。

上述の連成計算モデルにおいては、Requester による MHD 計算と、Worker による衛星帯電計算が同時進行する。このような異種の計算がほぼ同じ処理時間で進行する場合に、計算資源を最も有効に活用することができる。ここで問題となるのは、双方の計算で用いられる時間刻み幅の観点である。一般に MHD 計算における時間刻み幅は数分であるにも関わらず、人工衛星帯電計算のそれは数 μsec . と短く、また安定性を損なわずに帯電計算を継続するために必要な時間刻み幅はプラズマ環境条件により、数桁の範囲で変動する。これまでの取り組みにおいて、MHD で計算されたプラズマ環境変動に応じた適切な時間刻み幅を設定するために、衛星帯電時定数の概念を導入し、物理的な指標に

基づく可変時間刻み幅の機能を導入した。

帯電計算の時間刻み幅は、Requester と Worker 間の負荷バランスの観点にも大きな影響を与える。プラズマ環境変動に応じて帯電計算時間刻み幅を変更すると、MHD 計算と衛星帯電計算の間の計算負荷の比率が変化するためである。現状の連成計算フレームワークでは、Requester と Worker のそれぞれに割り当てられる MPI プロセス数は起動時に決定されるため、上記のような計算途中の負荷バランス変動に対応することは困難である。

そこで本連成計算モデルでは次のような方針で当該問題に対処することとした。①基本方針として、衛星帯電計算の処理時間は同時並行で行われる MHD 計算の処理時間内に隠蔽されるよう対処することとする (「MHD 処理時間 > 衛星帯電処理時間」であることは許容する)、②衛星帯電計算の時間刻み幅が $1 \mu\text{sec}$. オーダーであるときに、MHD と衛星帯電の処理時間が均衡するように MPI プロセス数の配分を決定する、③衛星帯電計算の時間刻み幅が $1 \mu\text{sec}$. を大きく下回るプラズマ環境条件となった場合は、衛星電位の計算アルゴリズムを変更し、衛星帯電計算の増大を

回避する。ここで③の計算アルゴリズム変更においては、衛星電位モデルを時間発展方程式から電流平衡方程式に変更することで対応した。後者のモデルでは、プラズマ環境変動の履歴が考慮されないが、③が適用される状況においては衛星電位緩和時間が環境変動に対して十分短いという点を考慮すれば、計算された衛星電位に関して十分な精度が担保されると想定される。この工夫により、MHD 計算で取得されるプラズマ環境の計算結果に依らず、Requester と Worker 間の負荷バランスを一定の基準内に維持することが可能となった。

(2) 磁気圏マルチスケール物理現象の連成シミュレーション

磁気圏環境による人工衛星システムへの干渉に加え、磁気圏内で生起する自然現象も本質的にマルチスケール性を有しており、様々な空間・時間スケールで起こる素過程の相互作用によって物理システムが形成されている。例えば衛星帯電の原因となる荷電粒子の集団は、磁気圏内に生起する様々な電磁波動と相互作用することで、そのエネルギー分布を大きく変化させる。当現象を磁気圏上の湾曲した磁力線上で高忠実に再現するため、プラズマ波動励起・伝搬過程を解く Meso モデルとプラズマ波動・粒子相互作用過程を解く Micro モデルを互いに連成させることを試みた。

Meso 計算には電子流体コードを使用する。電磁波の伝搬過程を調べるため、磁気赤道上に細長い 2 次元シミュレーション空間を割り当て、電磁場 6 成分と電子電流 3 成分、および電子密度を時間ステップごとに更新している。Meso コード自体も MPI による並列化実装がなされている。領域分割に基づくフラット MPI 方式で、128~256 の並列度を実現している。Micro コードは電子ハイブリッド法に基づき、磁気圏の磁力線に沿った数十億

➤ Requester (Micro コード)

```
call CTCAR_init()
call CTCAR_regarea_real8 (data, size, areaid)
! Initialization
...
do ii = 1, istep
... calculation of Micro code ...
if (myrank == 0) then
    call CTCAR_sendreq_withreal8()
end if
end do
! Finalization
call CTCAR_finalize()
```

➤ Coupler

```
call CTCAC_init_detail()
call CTCAC_regarea_real8 (areaid)
! Initialization
do while (.true.)
    call CTCAC_pollreq_withreal8(reqinfo)
    if (CTCAC_isfin()) exit
    call CTCAC_enqreq_withreal8 (reqinfo, prognum, param, 1,
subdata, subsize)
end do
! Finalization
call CTCAC_finalize()
```

➤ Worker (Meso コード)

```
call CTCAC_init_detail()
call CTCAC_regarea_real8 (areaid)
! Initialization
do while (.true.)
    call CTCAC_pollreq_withreal8(reqinfo)
    if (CTCAC_isfin()) exit
    call CTCAC_enqreq_withreal8 (reqinfo, prognum, param, 1,
subdata, subsize)
end do
! Finalization
call CTCAC_finalize()
```

図 3 磁気圏波動励起－波動粒子相互作用連成解析のスケルトンコード。

個の電子の運動を解くものである。空間 1 次元のシミュレーション空間を 16384 の格子点で離散化し、各格子点に Meso コードと同様の 10 成分の物理量を定義している。Micro コードではこれに加えて、膨大な数の電子の運動状態を解き進める。電子電流については個々の電子運動に伴って発生する電流要素を近接グリッドに配分することによって求めている。Micro コードについても MPI による並列化がなされており、128-256 並列度の計算が可能となっている。Micro コードは波の発生過程と電子エネルギー分布変化を自己無撞着に解くことができるが、空間スケールの制限によりそれ単独では磁気圏全体

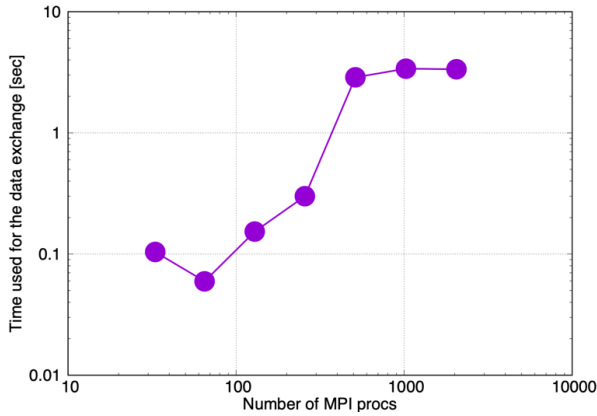


図 4 波動励起－波動粒子相互作用連成計算におけるコード間データ通信関連時間。

を計算することはできない。ここでは Meso コードとの連成計算により当該問題を回避し、磁力線上のプラズマ波動励起と波動粒子相互作用を同時に解くことを目指す。

本連成モデルでは、Micro コードを CoToCoA フレームワークにおける Requester に、Meso コードを Worker に割り当て、Requester から Worker に波動励起領域の電磁場データを一方向通信しながら計算を実施する。CoToCoA フレームワークにおける Coupler は、Requester と Worker の制御を担当する。ここで Requester と Worker にはそれぞれ複数の MPI プロセスが割り当てられ、サブコミュニケータを構成する。図 1 に構築した連成プログラムのスケルトンを示す。赤字で記述された箇所が複数コードの制御とコード間データ転送を担う処理に該当する。

コード間データ転送は sendreq、pollreq、enqreq の 3 種の API によって実現されている。Requester サブコミュニケータ内のプロセス 0 は、データ交換のタイミングで CTCAR_sendreq_withreal8 を起動する。これは Micro コードにおいて、物理計算 1 サイクル分が終了した時点に対応している。Coupler は、Requester による sendreq 呼び出しを待ち続けている間、CTCAC_pollreq_withreal8 を実行し続ける。Requester による sendreq 呼び出しを検知すると

CTCAC_enqreq_withreal8 を起動し、Meso 計算の開始を促す。同様に Worker は定期的な CTCAW_pollreq_withreal8 呼び出しにより、Coupler による enqreq 実行を待機している。Coupler による enqreq 実行を検知すると Worker サブコミュニケータ内のプロセス 0 が電磁場データを受信し、Worker サブコミュニケータ内でそのデータを放送した後に、Meso 計算を開始する。CTCAW_complete は Meso コードの物理計算 1 サイクル分を終えた時点で呼び出され、Worker が次の物理サイクルの計算を行う準備ができたことを Coupler プログラムに通知している。

設計した連成計算モデルに関して並列効率を評価するため、九州大学 ITO スーパーコンピュータシステムを用いたベンチマークを行った。当評価実験は総プロセス数 33～2049 の範囲で、弱スケール指標に基づき実施した。具体的には Coupler に単一の MPI プロセスを割り当て、残りの MPI プロセスは Micro (Requester) コードと Meso (Worker) コードに均等に配分する。Meso コードでは、プロセスあたり $40,960 \times 4$ グリッドが割り当てることとする。このプロセス毎の空間サイズは実用時に通常使用される値となっており、このとき交換される電磁場のデータサイズは 786 kB となる。Meso と Micro 双方の計算サイクルを 50 回実行し、コード間通信に関連する時間をそれぞれ評価した。

測定結果の概要を図 4 に示す。図 4a は総経過時間に対するコード間通信時間の割合を示す。コード間通信関連時間には、

- (1) Requester から Coupler へのデータ転送
- (2) Coupler から Worker へのデータ転送
- (3) Worker サブコミュニケータ内のデータ放送時間

が含まれる。1000 プロセスまでは並列度の上昇とともに通信関連時間が増大しているが、(3)のデータ放送時間が Worker サブコミ

ユニケータ内のプロセス数増加とともに増大するためと考えられる。33 プロセス実行時より 65 プロセス実行時の方が通信関連時間が短くなっている点に関しては、使用したスパコンシステムのノード構成（36 コア/ノード）との関連によるものと想定されるが、さらなる調査が必要である。プロセス数の増加とともにデータ通信関連の経過時間は増加するものの、そのコストは全経過時間の 1% 未満であることが確認された。以上により、本来の目的である物理連成計算の実行を大きく妨げない程度のオーバーヘッドに抑えつつ、異種コード間の連成シミュレーションを効率的に実施可能であることを実証した。

6. 今年度の進捗状況と今後の展望

(1) コード間連成フレームワーク CoToCoA パッケージへの性能評価機能実装

CoToCoA フレームワークの機能拡充の一環として、性能評価およびオーバーヘッド測定のためのルーチンの開発を主に 年度上半期 に実施した。単独の並列計算コードの場合と比較して、連成シミュレーションにおけるオーバーヘッド評価指標は自明ではない。連成を行う異種コードがそれぞれ実施する処理内容は全く異なるのが通常であるため、オーバーヘッドの多くの割合をポーリングによる待ち時間が占める。また一般に並列プロセス間は異なる内部時間状態を有しているため、通信時間を直接計測するのは困難である。そこで CoToCoA フレームワークで実施される連成計算の処理手順を精査した上で、直接時間計測が可能な部分 M を抽出し、全体の処理時間 T から M を差し引いた時間 R が何の処理に対応するかを再解釈した上で、ベンチマークルーチンを構築した。これにより CoToCoA による連成計算実施によるオーバーヘッドと、その中に占める大まかな合計通信時間を評価することが可能となった。年度下半期には、開発したルーチンを「5(2)磁気

圏マルチスケール物理現象の連成シミュレーション」に実際に適用し、作成した一連の機能が有効に活用できることを示した。

(2) 磁気圏環境および人工衛星帯電の連成物理シミュレーションの技術開発

コード間連成フレームワーク CoToCoA を実用したアプリケーションとして、磁気圏環境-衛星帯電結合系 (5(1)節)、および磁気圏マルチスケール物理現象の連成モデリング (5(2)節) を推進した。

磁気圏環境-衛星帯電結合系の物理モデルとしての妥当性は前年度までに実証済みであり、年度上半期は CoToCoA を用いた MPI 並列プログラムとしての連成計算実装を進めた。動作原理検証用のテストモデルとして、①人工衛星位置は MHD 計算空間中の固定点（現状では 2 点）とする、②衛星電位計算は瞬時毎の平衡値を求める（以降「平衡電位モデル」と記述）、という簡易条件のもとで、想定通りの磁気圏環境-衛星帯電連成解析の実現を達成した。年度下半期には、衛星電位計算について電位値の過渡応答を考慮したフル規格の計算モデル（以降「過渡応答モデル」と記述）への置き換えを実施した。その過程で時間刻み幅の可変パラメータ化への対応と、帯電時定数のしきい値で「平衡電位モデル」と「過渡応答モデル」を適切切り替える新計算方式を提案するに至った（詳細は 5(1)節参照）。一方、新計算方式の開発と実証を優先したため、年度内の実施を予定していた「MHD 計算空間中の人工衛星位置を多点とする」、「衛星の軌道に合わせて、MHD 計算から環境データを抽出する位置座標を時間的に可変とする」改良については未対応であり、次年度課題として持ち越された。

磁気圏マルチスケール物理現象の連成計算はこれまでの技術開発の蓄積に基づき、連成モデルとしての性能評価を実施し、その成果を査読付き国際会議論文として発表した (年度下半期)。

(3) プラズマシミュレーションとデータ科学的手法の融合可能性の探求

大規模シミュレーションから得られたデータのポスト処理に機械学習の手法を活用することで、従来の解析では見落とされていた知識の獲得を試みた。多数個かつ多様性を有する粒子軌道データを機械学習により分類することで、特定の電磁場構造に起因する粒子軌道の特徴を抽出する試みを主に年度上半期に実施した。これまでに複雑な磁場配位中の旋回・ドリフト・蛇行運動をおおよそ 80% の正答率で自動分類できることを確認している。

(4) 進捗状況の総括と今後の展望

今年度の主な進展は、磁気圏 MHD 計算との間の負荷不均衡を一定のレベルに抑制する衛星帯電計算方式を考案したことで、課題申請書の主課題に設定していた「磁気圏環境および人工衛星帯電の連成物理シミュレーション」実現の道筋をつけた点にある。またこれに付随して、CoToCoA の機能拡充にも取り組んだ。一方で、衛星帯電予測ツールの実用化に向けたいくつかの開発要素については、未達成となった。これらを勘案し、**今年度の達成状況は 80% と自己評価する。**

今後は今年度に未達成の項目についての技術開発を速やかに進めるとともに、解析事例の数を増やすことで磁気圏環境－衛星帯電連成解析の実用性を示していく。また現時点では部分的な実施にとどまっている、計算資源量に対するスケーラビリティの観点を詳細に評価していく計画である。

7. 研究業績一覧

(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] Katoh, Y., K. Fukazawa, T. Nanri, and Y. Miyake, Cross-Reference Simulation by

Code-To-Code Adapter (CoToCoA) Library for the Study of Multi-Scale Physics in Planetary Magnetospheres, Proc. 8th International Workshop on Large-scale HPC Application Modernization (LHAM), 2021.

[2] Miyake, Y., J. Takagi, and N. Kaya, Simulation Study on Radio Wave Scattering by Small Objects covered with a Charged Particle Layer, Proc. 33rd International Symposium on Space Technology and Science (ISTS), 2022.

(3) 国際会議発表 (査読なし)

[3] Miyake, Y., A Decade of Effort in HPC toward Realistic Scale Spacecraft-Environment Interaction Simulations, 8th International Workshop on Large-scale HPC Application Modernization (LHAM), Keynote Talk, 2021.

[4] Nanri, T., Y. Katoh, K. Fukazawa, Y. Miyake, and K. Nakazawa, CoToCoA: A Communication-Efficient Framework for Coupling Programs, HPCAsia2022, 2022.

(4) 国内会議発表 (査読なし)

[5] 深沢圭一郎, 加藤雄人, 三宅洋平, 南里豪志, STP 数値計算コードにおける連成計算フレームワーク CoToCoA の実装, STE シミュレーション研究会「太陽系シミュレーション研究の新展開」, 2021.

[6] 深沢圭一郎, 加藤雄人, 南里豪志, Application of CoToCoA to MHD and micro-scale simulations of the magnetosphere, 地球電磁気・地球惑星圏学会第 150 回総会及び講演会, 2021.

[7] Miyake, Y., H. Nakashima, K. Kikura, Y. Sunmura, T. Saeki, and H. Tamarushima, A Decade of Effort in HPC toward Efficient Plasma Particle Simulations, 核融合科学研究所一般共同研究「先端的コンピュータ技術の利活用」シミュレーション技法に関する研究会, 2022.

[8] 加藤雄人, 深沢圭一郎, 南里豪志, 三宅洋平, Code-To-Code Adapter (CoToCoA) ライブラリの開発と惑星電磁圏連成計算研究について, 核融合科学研究所一般共同研究「先端のコンピュータ技術の利活用」シミュレーション技法に関する研究会, 2022.

(5) 公開したライブラリなど

[9] Nanri, T., Y. Katoh, K. Fukazawa, Y. Miyake, K. Nakazawa, J. Zhou, and Y. Sunada, CoToCoA (Code-To-Code Adapter). doi://10.5281/zenodo.5655840.

(6) その他(特許, プレスリリース, 著書等)
該当なし