

令和 2 年 6 月 11 日現在

機関番号：11301
研究種目：挑戦的研究（萌芽）
研究期間：2017～2019
課題番号：17K18798
研究課題名（和文）スケーラブル通信ライブラリを用いた次世代惑星電磁圏連成計算技術の創出

研究課題名（英文）Development of the Cross-Reference Simulation Framework by Scalable Communication Library for the Study of Planetary Sciences

研究代表者
加藤 雄人（Kato, Yuto）
東北大学・理学研究科・教授

研究者番号：60378982
交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 4,900,000円

研究成果の概要（和文）：本研究は、複数のシミュレーションコードを動的に結合する次世代の惑星電磁圏計算技術を創出して、マルチスケール・マルチフィジックスの「強」連成計算を実現することを目的として実施された。次世代連成計算フレームワーク「Code-To-Code Adapter (CoToCoA)」を開発して公開した。CoToCoAライブラリを用いることにより、連成計算の技術的ハードルを下げて、異種コードの動的な結合を容易に実現できる環境を構築することが可能となった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

従来の計算機実験では、異なるシミュレーションコードを繋げて連成計算を行う上で、計算機リソースの制約もさることながら、支配方程式が異なり現象の時間・空間スケールも多様な複数のシミュレーションコードを連結するために必要な工程数の多さと人的リソースの制約が大きな困難となっていた。本課題で開発されたCoToCoAライブラリは、この本質的な困難を克服できる可能性を有するものであり、大きな発展性を秘めている。新たなコード結合のアイデア創出にも繋がり惑星圏科学にブレークスルーをもたらし得る、独創的な成果となった。

研究成果の概要（英文）：We developed Code-To-Code Adapter (CoToCoA) library for cross-reference simulations of wave-particle interactions in planetary magnetospheres. The cross-reference simulation is a simulation model combining multiple simulation codes, while the codes employed in the model are developed individually by a different set of basic equations. The design concept of the CoToCoA library is to realize the communication among the codes in the cross-reference simulation with keeping necessary modification of the original code minimum, which enables us to carry out 'strong' cross-reference simulations; the data exchange among simulation codes is conducted by direct memory access, instead of file output as has been used in conventional 'weak' cross-reference simulations.

研究分野：宇宙空間プラズマ物理学

キーワード：ハイパフォーマンス・コンピューティング 惑星圏科学 超高層物理学 計算物理

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

計算機シミュレーションは惑星電磁圏の時間・空間変動を定量的に明らかにする強力な研究手段である。本研究の代表者・分担者らは、異なる時間・空間スケールの現象を解き進める複数のシミュレーションコードを用いて、現象間の相互作用を究明する「連成計算」を実施してきた。一方、個々の計算は独立に行われ、ファイルに出力された計算結果を参照して初期条件に反映させる「“弱”連成計算」であり、現象間の動的な結合を扱うまでには至っていなかった。計算規模の問題は次世代計算機環境の活用で一定の解決が見込まれるが、複数コードの動的な結合には新たな連成計算手法の発明が必要とされた。

2. 研究の目的

計算機科学分野で新たに提案されたスケーラブル通信ライブラリ Advanced Communication Primitives (ACP) に着想を得て、複数のシミュレーションコードを動的に結合する次世代の惑星電磁圏計算技術を創出して、マルチスケール・マルチフィジックスの「“強”連成計算」を実現することを目的として本研究は実施された。

コード間通信ライブラリを独自に開発して、連成計算を構成する各コードの通信インターフェースを機能強化して「コンダクタ・アプリ」として導入、研究代表者らが開発してきたコード群を動的に結合させ「強連成計算」のフレームワークを創出する。実証実験により新手法の性能を評価して、近未来に実現が見込まれる超高並列計算機環境を最大限に活用したマクロ・メソ・ミクロ現象間の結合過程を明らかにする次世代シミュレーション研究への道筋をつけることをねらった。

3. 研究の方法

本研究は【1】強連成計算に向けたマクロ・メソ・ミクロ計算コードの最適化、【2】スケーラブル通信ライブラリ ACP を用いた「コンダクタ・アプリ」の開発、の2つの課題を中心に進められた。【2】に関しては ACP に加えて、汎用性を重視して MPI を用いたライブラリの検討を並行して行なった。

マクロ計算コードとしては惑星磁気圏と太陽風との相互作用を解く磁気流体力学コードを用いる。メソ計算コードとしては、磁気子午面をシミュレーション空間に設定し、磁気圏内でのプラズマ波動の伝搬を解く電子流体コードを用いる。ミクロ計算コードには、磁気赤道周辺でのプラズマ粒子とプラズマ波動との相互作用を解き進める電子ハイブリッドコードを用いる。いずれのコードも、個別の計算で複数の学術論文が出版されている、実績あるコードである。本課題ではこれらのコードを独自に開発したコード間通信ライブラリで組み合わせ、計算を実施しつつ相互の結果を参照する強連成計算の実現を目的として研究開発を進めた。

4. 研究成果

本研究による各年度の取り組みと成果については以下の通りである。

平成 29 年度 (2017 年度)

課題【1】に関して、マクロ・メソ・ミクロ計算コードを用いた強連成計算に向けた取り組みを行った。

- (1) コード間通信に各コードで必要となる情報のデータサイズと想定される通信頻度の整理
- (2) 通信に必要なモジュール箇所を取り出しての最適化作業
- (3) コード間通信に用いる Advanced Communication Primitives (ACP) ライブラリについて、各コードに導入が必要な関数の選択とインターフェースの設計
- (4) 各コードの通信モジュール部分への ACP ライブラリ関数の導入とコード開発

課題【2】に関してはコンダクタ・アプリに必要な機能と開発項目の検討を開始した。通信モジュールの設計と、各コードの入出力情報を管理する機能の実装に向けて、開発項目を整理した。

平成 30 年度 (2018 年度)

課題【1】に関して、前年度に引き続きマクロ・メソ・ミクロ計算コードを用いた強連成計算に向けた取り組みを行った。

- (1) コード間通信で必要となるデータ形式の検討と通信モジュールへの実装
- (2) コード間通信に用いる ACP ライブラリ関数の通信モジュールへの実装
- (3) 同等のコード間通信機能を MPI で実現した場合の計算コスト差の見積もりと評価
- (4) メソ・ミクロ計算コードを用いた強連成計算でのベンチマーク

課題【2】に関してはコンダクタ・アプリを MPMD (Multiple Program Multiple Data) を実現するフレームワークとして設計を行い、プロトタイプを構築した。

令和元年度 (2019 年度)

課題【1】に関しては以下の取り組みを行った。

- (1) コード間通信で必要となるデータ形式の検討と通信モジュールへの実装
- (2) コード間通信に用いる CoToCoA ライブラリ関数の通信モジュールへの実装
- (3) 計算コストに占めるコード間通信の割合と並列化効率への影響評価

(4) メソ・マイクロ計算コードを用いた強連成計算でのベンチマーク

課題【2】について、コード間結合ライブラリ CoToCoA (Code-To-Code Adapter) を開発して公開した (<https://github.com/tnanri/cotocoa>)。

本研究課題による成果の第一として、コード結合にかかる開発工程を最小化して連成計算のハードルを下げる次世代連成計算フレームワーク「CoToCoA」の開発に成功したことが挙げられる(図1)。CoToCoA ライブラリを実装した強連成計算コードを用いて、九州大学のスーパーコンピュータシステム約1000ノードを利用して行った性能評価の結果からは、ライブラリの実装による計算性能の低下は各コード単体での計算時間の1%以下と限定的であることが示され、大規模並列環境においても高い演算性能を有する連成計算コードの開発に目処をつけることができた。

CoToCoA ライブラリを用いること

により、連成計算の技術的ハードルを下げて、異種コードの動的な結合を容易に実現できる環境を構築することが可能となった。従来の計算機実験では、異なるシミュレーションコードを繋げて連成計算を行う上で、計算機リソースの制約もさることながら、支配方程式が異なり現象の時間・空間スケールも多様な複数のシミュレーションコードを連結するために必要な工程数の多さと人的リソースの制約が大きな困難となっていた。本課題で開発された CoToCoA ライブラリは、この本質的な困難を克服できる可能性を有するものであり、大きな発展性を秘めている。新たなコード結合のアイデア創出にも繋がり惑星圏科学にブレークスルーをもたらし得る、独創的な成果となった。

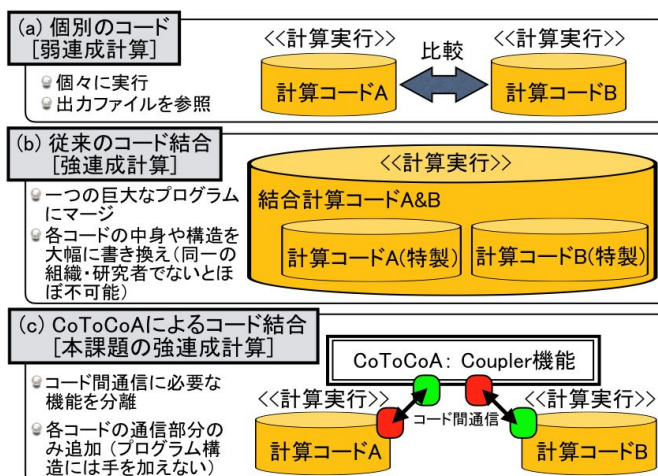


図1 : CoToCoA の概要と特徴

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計6件（うち査読付論文 6件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Fukazawa, K., T. Soga, T. Umeda, T. Nanri	4. 巻 32
2. 論文標題 Performance Evaluation and Optimization of MagnetoHydroDynamic Simulation for Planetary Magnetosphere with Xeon Phi KNL	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Advances in Parallel Computing	6. 最初と最後の頁 178-187
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.3233/978-1-61499-843-3-178	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Katoh, Y., H. Kojima, M. Hikishima, T. Takashima, K. Asamura, Y. Miyoshi, Y. Kasahara, S. Kasahara, T. Mitani, N. Higashio, A. Matsuoka, M. Ozaki, S. Yagitani, S. Yokota, S. Matsuda, M. Kitahara, and I. Shinohara	4. 巻 70
2. 論文標題 Software-type Wave-Particle Interaction Analyzer on board the Arase satellite	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Earth Planets Space	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1186/s40623-017-0771-7	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -
1. 著者名 Katoh, Y., Y. Omura, Y. Miyake, H. Usui, and H. Nakashima	4. 巻 123
2. 論文標題 Dependence of generation of whistler-mode chorus emissions on the temperature anisotropy and density of energetic electrons in the Earth's inner magnetosphere	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 J. Geophys. Res. Space Physics	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1002/2017JA024801	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Hirai, K., Y. Katoh, N. Terada, and S. Kawai	4. 巻 853
2. 論文標題 Study of the Transition from MRI to Magnetic Turbulence via Parasitic Instability by a High-Order MHD Simulation Code	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Astrophys. J.	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.3847/1538-4357/aaa5b2	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Fukazawa Keiichiro, Katoh Yuto, Nanri Takeshi, Miyake Yohei	4. 巻 19264460
2. 論文標題 Application of Cross-Reference Framework CoToCoA to Macro- and Micro-Scale Simulations of Planetary Magnetospheres	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 2019 Seventh International Symposium on Computing and Networking Workshops (CANDARW)	6. 最初と最後の頁 121-124
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/CANDARW.2019.00029	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Kitahara M., Katoh Y.	4. 巻 124
2. 論文標題 Anomalous Trapping of Low Pitch Angle Electrons by Coherent Whistler Mode Waves	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of Geophysical Research: Space Physics	6. 最初と最後の頁 5568 ~ 5583
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1029/2019JA026493	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計30件 (うち招待講演 8件 / うち国際学会 21件)

1. 発表者名 Katoh, Y., K. Fukazawa, T. Nanri, and Y. Miyake
2. 発表標題 Cross-reference simulations by scalable communication library for the study of wave-particle interactions in planetary magnetospheres
3. 学会等名 Conference on Magnetospheres of the Outer Planets 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Kath, Y.
2. 発表標題 Theory and computer simulations on whistler-mode chorus emissions and related wave-particle interactions in planetary magnetospheres
3. 学会等名 2019 URSI-Japan Radio Science Meeting (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1 . 発表者名 Katoh, Y. and Y. Omura
2 . 発表標題 Simulation study of the whistler-mode chorus generation in the Earth's inner magnetosphere
3 . 学会等名 3rd Asia-Pacific Conference on Plasma Physics (招待講演) (国際学会)
4 . 発表年 2019年

1 . 発表者名 Katoh, Y., K. Fukazawa, T. Nanri, and Y. Miyake
2 . 発表標題 Cross-reference simulations by scalable communication library for the study of wave-particle interactions in planetary magnetospheres
3 . 学会等名 Asia Oceania Geosciences Society (AOGS) 16th Annual Meeting (国際学会)
4 . 発表年 2019年

1 . 発表者名 Katoh, Y. and L. Chen
2 . 発表標題 Modulation of the whistler-mode chorus generation by ULF waves in the inner magnetosphere
3 . 学会等名 American Geophysical Union Fall Meeting (国際学会)
4 . 発表年 2019年

1 . 発表者名 Katoh, Y., K. Fukazawa, T. Nanri, Y. Miyake
2 . 発表標題 Cross-Reference Simulation by Code-To-Code Adapter (CoToCoA) Library for the Study of Planetary Magnetospheres
3 . 学会等名 High Performance Computing in Asia-Pacific Region (HPC Asia 2020) (国際学会)
4 . 発表年 2020年

1. 発表者名 Fukazawa, K., Y. Katoh, T. Nanri, Y. Miyake
2. 発表標題 Development of Coupling Framework for Macro and Micro Scale Simulations of the Magnetosphere
3. 学会等名 AOGS 16th Annual Meeting (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Fukazawa, K., Y. Katoh, T. Nanri, Y. Miyake
2. 発表標題 Development of cross-reference numerical simulation framework: macro- and micro-scale simulations of the magnetosphere
3. 学会等名 Conference on Magnetospheres of the Outer Planets 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 深沢圭一郎、加藤雄人、三宅洋平、南里豪志
2. 発表標題 Development of cross-reference framework for macro- and micro-scale simulations of the magnetosphere
3. 学会等名 地球電磁気・地球惑星圏学会 第146回総会及び講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 深沢圭一郎
2. 発表標題 ジオスペース・マクロダイナミクスからミクロスケールへの連成シミュレーションフレームワーク開発
3. 学会等名 公開シンポジウム 「京」から「富岳」へ：大規模シミュレーションが拓く惑星科学の未来
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Katoh, Y., K. Fukazawa, T. Nanri, and Y. Miyake
2. 発表標題 Cross-reference simulations by scalable communication library for the study of wave-particle interactions in planetary magnetospheres
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合2019年大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Katoh, Y., L. Chen
2. 発表標題 ULF wave modulation of the whistler-mode chorus generation in the inner magnetosphere
3. 学会等名 地球電磁気・地球惑星圏学会 第146回総会及び講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Nishida, Y., Y. Katoh, H. Matsui, M. Matsushima, and A. Kumamoto,
2. 発表標題 The Rayleigh number required to sustain geodynamo with various inner core radii
3. 学会等名 Study of the Earth's Deep Interior 2018 (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Kath, Y.
2. 発表標題 Periodicity and spatial scale of wave-particle interactions in the magnetosphere
3. 学会等名 ISSI Workshop on Auroral Physics (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Katoh, Y., Y. Omura, Y. Miyake, H. Usui, and H. Nakashima
2. 発表標題 Electron hybrid simulations of the nonlinear processes of whistler-mode chorus generation in the Earth's inner magnetosphere
3. 学会等名 13th International School/Symposium for Space Simulations (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Katoh, Y., Y. Omura, Y. Miyake, H. Usui, and H. Nakashima
2. 発表標題 Nonlinear processes of whistler-mode chorus generation in the Earth's inner magnetosphere
3. 学会等名 American Geophysical Union Fall Meeting (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Katoh, Y. and L. Chen
2. 発表標題 Study of the modulation of whistler-mode chorus generation by ULF waves
3. 学会等名 Asia Oceania Geosciences Society (AOGS) 15th Annual Meeting (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 三宅洋平, 桐山武士, 加藤雄人, 白井英之
2. 発表標題 Numerical Simulation of Spacecraft Charging Processes in Time-varying Plasma Environment
3. 学会等名 2nd URSI Atlantic Radio Science Meeting (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 三宅洋平, 桐山武士, 加藤雄人, 白井英之
2. 発表標題 Numerical Simulation of Spacecraft Charging Processes in Time-varying Plasma Environment
3. 学会等名 15th Spacecraft Charging Technology Conference
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 加藤 雄人, 深沢 圭一郎, 南里 豪志
2. 発表標題 Cross-reference simulations by scalable communication library for the study of wave-particle interactions in magnetospheres
3. 学会等名 第144回地球電磁気・地球惑星圏学会講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Katoh, Y., K. Fukazawa, T. Nanri,
2. 発表標題 Cross-reference simulations by scalable communication library for the study of wave-particle interactions in planetary magnetospheres
3. 学会等名 The 20th Symposium on Planetary Sciences (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Katoh, Y.
2. 発表標題 Rapid acceleration of energetic electrons in the process of whistler-mode chorus generation in planetary magnetospheres
3. 学会等名 Max-Planck/Princeton Center for Plasma Physics (MPPC) workshop (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Katoh, Y.
2. 発表標題 Rapid acceleration of relativistic electrons through wave-particle interactions in planetary magnetospheres
3. 学会等名 Toyama International Symposium on "Physics at the Cosmic Frontier" (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 深沢圭一郎, 木村智樹, 土屋史紀, 村上豪, 埜千尋, 北元, 村田健史
2. 発表標題 観測と協調したグローバル木星磁気圏MHDシミュレーションのデータベース開発
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合2018年大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Fukazawa, K., T. Kimura, F. Tsuchiya, G. Murakami, H. Kita, C. Tao, K. T. Murata
2. 発表標題 Open Numerical Simulation Data of Planetary Magnetosphere
3. 学会等名 AGU Fall Meeting 2018 (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Katoh, Y. and Y. Omura
2. 発表標題 Simulation study of the nonlinear processes of whistler-mode chorus generation in the Earth's inner magnetosphere
3. 学会等名 AGU Chapman Conference on Particle Dynamics in the Earth's Radiation Belts (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1 . 発表者名 Katoh, Y. and Y. Omura
2 . 発表標題 Electron hybrid simulation of the whistler-mode chorus generation in the Earth's inner magnetosphere
3 . 学会等名 The 8th biennial VERSIM Workshop (招待講演) (国際学会)
4 . 発表年 2018年

1 . 発表者名 Nanri, T.
2 . 発表標題 Proposal of Interface for Runtime Memory Manipulation of Applications via PGAS-based Communication Library
3 . 学会等名 Workshop on PGAS programming models: Experiences and Implementations (招待講演) (国際学会)
4 . 発表年 2018年

1 . 発表者名 Fukazawa, K., Y. Katoh, Y. Miyake, and T. Nanri
2 . 発表標題 Simulation Development of Planetary Magnetosphere toward Exascale Computing Era
3 . 学会等名 Symposium on Planetary Science 2018
4 . 発表年 2018年

1 . 発表者名 深沢圭一郎、加藤雄人、木村智樹、土屋史紀、村上豪、北元、埜千尋、村田健史
2 . 発表標題 Global MHD simulation of Jovian magnetosphere for observations and micro scale simulations
3 . 学会等名 地球電磁気・地球惑星圏学会 第142回総会及び講演会
4 . 発表年 2017年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

コード間結合ライブラリCoToCoA(Code-To-Code Adapter)公開ページ
<https://github.com/tnanri/cotocoa>

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	深沢 圭一郎 (Fukazawa Keiichiro) (50377868)	京都大学・学術情報メディアセンター・准教授 (14301)	
研究分担者	南里 豪志 (Nanri Takeshi) (70284578)	九州大学・情報基盤研究開発センター・准教授 (17102)	
連携研究者	三宅 洋平 (Miyake Yohei) (50547396)	神戸大学・大学院システム情報学研究科・准教授 (14501)	