

平成 29 年度 文部科学省

ポスト「京」で重点的に取り組むべき社会的・科学的課題に関する
アプリケーション開発・研究開発（萌芽的課題）

平成 29 年度

「太陽系外惑星（第二の地球）の誕生と太陽系内惑星環境変動の
解明（生命を育む惑星の起源・進化と惑星環境変動の解明）」

成果報告書

平成 30 年 5 月 31 日

国立大学法人神戸大学

理学研究科 教授 牧野 淳一郎

本報告書は、文部科学省の科学技術試験研究委託事業による委託業務として、国立大学法人神戸大学が実施した平成29年度「太陽系外惑星（第二の地球）の誕生と太陽系内惑星環境変動の解明（生命を育む惑星の起源・進化と惑星環境変動の解明）」の成果を取りまとめたものです。

目次

1. 委託業務の題目	1
2. 実施機関（代表機関）	1
3. 委託業務の目的	1
4. 平成 29 年度（報告年度）の実施内容	1
4-1. 実施計画	1
4-2. 実施内容（成果）	5
4-2-1. サブ課題 A 「惑星の起源の解明」	5
4-2-2. サブ課題 B 「惑星内部・表層のダイナミクスと進化」	11
4-2-3. サブ課題 C 「太陽活動による地球環境変動の解明」	18
4-2-4. サブ課題 D 「原始太陽系における物質進化と生命起源の探究」	27
4-3. 活動（研究会等）	32
4-4. 実施体制	33
別添 1 学会等発表実績	
別添 2 実施計画	

1. 委託業務の題目

「太陽系外惑星（第二の地球）の誕生と太陽系内惑星環境変動の解明（生命を育む惑星の起源・進化と惑星環境変動の解明）」

2. 実施機関（代表機関）

代表 機 関	機関名	国立大学法人神戸大学			
	所在地	〒657-8501 兵庫県神戸市灘区六甲台町1番1号			
	課題 責任者	ふりがな	まきの じゅんいちろう	生年	西暦 1963年1月6日（55歳）
		氏名	牧野 淳一郎	月日	※2018年4月1日現在
		所属部署名	理学研究科	役職	教授
		連絡先	Tel. 078-599-6730 Fax. 078-599-6735 E-mail jmakino@people.kobe-u.ac.jp		
	事務 連絡 担当者	ふりがな	うすい ふみひこ		
		氏名	臼井 文彦		
		所属部署名	惑星科学研究センター	役職	特命助教
		連絡先	Tel. 078-599-6730 Fax. 078-599-6735 E-mail usui@cps-jp.org		

3. 委託業務の目的

地球がどのように生まれ、どのようにして生命を育む惑星に進化したか、さらには現在及び将来の地球・太陽・太陽系の進化が人類社会にどのような影響を及ぼしうるかを解明するため、惑星科学・地球科学・宇宙化学/宇宙生物学分野のシミュレーション研究者が結集し、太陽のような星とそれが持つ惑星系の起源から形成された惑星の構造の進化、大気や表面の水圏の形成・進化、太陽活動の変化やその惑星表層への影響といった、実験では実現不可能な現象を大規模計算によるシミュレーションを使って研究し、国内外で進められている様々な観測・探査プロジェクトと連携して、惑星の起源・進化と惑星環境変動の解明を目指す。このため、国立大学法人神戸大学を中核機関として、分担機関である国立大学法人東京工業大学、国立大学法人大阪大学、国立研究開発法人理化学研究所、国立大学法人東京大学、国立大学法人京都大学、国立大学法人名古屋大学、国立大学法人千葉大学、国立大学法人筑波大学と連携し、研究開発を推進する。

4. 平成29年度（報告年度）の実施内容

4-1. 実施計画

①サブ課題A「惑星の起源の解明」

平成29年度は、調査研究・準備研究フェーズとして、以下に示す本萌芽の課題に関するアプリケーション開発・研究開発について、開発計画（研究開発内容、目標・期待される成果、実施体制、必要計算資源、工程表、所要経費等）の詳細の策定を分担機関の国立大学法人東京工業大学、国立大学法人大阪大学、国立研究開発法人理化学研究所 計算科学研究機構と共同で継続す

る。また、策定した開発計画の実現可能性を調査するとともに、本格実施フェーズに向けた準備（実施体制構築の着手、研究等）を進める。

並列計算コード開発を進め、惑星集積シミュレーション、星形成・原始惑星系円盤の大規模シミュレーションを行うことを目標として以下を実施する。

- ・ 「京」で目指す惑星集積過程における具体的科学目標を設定した上で、開発した最適化されたコードにより、試験的なシミュレーションを開始する。
- ・ 原始惑星系円盤の形成及び進化の大規模磁気流体シミュレーションを行う。原始惑星系円盤の各領域における非理想MHD効果の働きと磁気回転不安定性などによって励起される乱流、及び円盤から駆動されるアウトフローの性質を調べる。
- ・ P³T法にFDPSを適用させた大域的N体シミュレーションの開発・最適化を進める。

②サブ課題B「惑星内部・表層のダイナミクスと進化」

平成29年度は、調査研究・準備研究フェーズとして、以下に示す本萌芽的課題に関するアプリケーション開発・研究開発について、開発計画（研究開発内容、目標・期待される成果、実施体制、必要計算資源、工程表、所要経費等）の詳細の策定を分担機関の国立大学法人東京大学、国立大学法人京都大学と共同で継続する。また、策定した開発計画の実現可能性を調査するとともに、本格実施フェーズに向けた準備（実施体制構築の着手、研究等）を進める。

岩石惑星・衛星の火成活動・マントル対流、ガス惑星表層と深部の循環、火星全球ダストストームを対象とした球面・球殻形状での高解像度数値計算を行うことを目標として以下を実施する。

- ・ 「地球型惑星の気象・気候～火星全球ダストストーム」「岩石惑星の火成活動～マントル対流系の三次元球殻モデリング」「ガス惑星の全球気象学～深部対流から表層ジェット流まで」という三つの球対流研究テーマ間の情報共有を図り、それぞれのモデルで必要となる基礎ルーチンの開発を進め、「京」上での大規模計算の実装実験を実施する。「地球型惑星の気象・気候～火星全球ダストストーム」に関しては、「京」上での火星大気設定での力学計算を実現し、順次火星物理過程を改良導入する。
- ・ 火成活動（マグマの生成と移動）とマントル対流のカップリングおよびテクトニックプレートのより現実的な3次元シミュレーションを実行する。
- ・ 固相マントルの対流運動シミュレーションプログラムを「京」に導入し、そのベンチマークを行う。より現実的なシミュレーションを目的としたプログラムの開発を行う。
- ・ ガス惑星大気の流れと相互作用する渦をシミュレートするための、高精度高解像度計算を行なうスペクトル法のライブラリをメニーコアマシンに導入し、新たな計算スキームを開発することにより、ライブラリの並列化効率および計算速度の追及・実証を行う。

③サブ課題C「太陽活動による地球環境変動の解明」

平成29年度は、調査研究・準備研究フェーズとして、以下に示す本萌芽的課題に関するアプリケーション開発・研究開発について、開発計画（研究開発内容、目標・期待される成果、実施体制、必要計算資源、工程表、所要経費等）の詳細の策定を分担機関の国立大学法人名古屋大学、国立大学法人千葉大学と共同で継続する。また、策定した開発計画の実現可能性を調査するとともに、本格実施フェーズに向けた準備（実施体制構築の着手、研究等）を進める。

太陽フレアとその地球環境影響のシミュレーションの開発、太陽対流層の超大規模・長時間シミュレーションを行うことを目標として以下を実施する。

- ・ 太陽活動領域、太陽風、磁気圏、衛星環境モデルの初期実験を継続する。太陽フレアの発生とその地球環境影響を探るために必要な新たなシミュレーションモデルの開発要素を明確化する。
- ・ 太陽対流層を包括した磁気流体計算を実施する。より高解像度の状況を理解するために領域を制限した計算を行う。

④サブ課題D「原始太陽系における物質進化と生命起源の探究」

平成29年度は、調査研究・準備研究フェーズとして、以下に示す本萌芽的課題に関するアプリケーション開発・研究開発について、開発計画（研究開発内容、目標・期待される成果、実施体

制、必要計算資源、工程表、所要経費等)の詳細の策定を分担機関の国立大学法人筑波大学、国立大学法人名古屋大学と共同で継続する。また、策定した開発計画の実現可能性を調査するとともに、本格実施フェーズに向けた準備(実施体制構築の着手、研究等)を進める。

星間有機分子生成の大規模な第一原理分子動力学計算を行うことを目標として以下を実施する。

- ・ 大規模な第一原理分子動力学計算に向けたコード整備と予備計算を行う。ダスト形成過程の計算を実行し、ダスト上の有機分子合成の解析を進める。ダスト上での有機分子合成の素反応の網羅的解析に向けた基底状態量子化学計算を行う。
- ・ 原始惑星系円盤中のダスト粒子の衝突付着成長シミュレーションのためのコード開発を進める。予備計算とデータ解析を行い、大規模な第一原理数値シミュレーションにおける具体的な問題設定を行う。

また、分担機関と連携し、再委託によって、以下の⑤～⑩の研究開発に取り組む。

⑤サブ課題A全体の統括および惑星集積シミュレーション

(再委託先：国立大学法人東京工業大学)

「京」での惑星集積N体シミュレーションの成果を踏まえて、「京」で目指す惑星集積過程における具体的な科学目標を設定した上で、開発した最適化されたコードにより、試験的なシミュレーションを開始する。

⑥星形成・原始惑星系円盤の大規模シミュレーション

(再委託先：国立大学法人大阪大学)

サブ課題Aの一環として、惑星形成の初期条件・境界条件となる原始惑星系円盤の形成及び進化の大規模磁気流体シミュレーションを行う。前年度に開発したAthena++コードを用い、非理想MHD効果のうちオーム散逸と双極性拡散を取り入れた大域的磁気流体シミュレーションにより、原始惑星系円盤の各領域における非理想MHD効果の働きと磁気回転不安定性などによって励起される乱流、及び円盤から駆動されるアウトフローの性質を調べる。

⑦並列計算コード開発、サブ課題間連携推進

(再委託先：国立研究開発法人理化学研究所 計算科学研究機構)

P³T法(Particle-particle Particle-tree)にFDPS(Framework for Developing Particle Simulator)を適用させた高精度の大域的N体シミュレーションの開発・最適化を国立大学法人東京工業大学と協力して進める。

⑧サブ課題B全体および「地球型惑星の気象・気候～火星全球ダストストーム」の統括推進

当該サブ課題を構成する三つの球対流研究テーマ「地球型惑星の気象・気候～火星全球ダストストーム」、「岩石惑星の火成活動～マントル対流系の三次元球殻モデリング」、「ガス惑星の全球気象学～深部対流から表層ジェット流まで」間の情報共有を図り、それぞれのモデル(岩石惑星モデル、惑星大気モデル、ガス惑星モデル)で必要となる基礎ルーチンの開発を進め、「京」上での大規模計算の実装実験を実施する。特に「地球型惑星の気象・気候～火星全球ダストストーム」に関しては、「京」上での火星大気設定での力学計算を実現し、順次火星物理過程を改良導入して、その火星気象計算を行う。

⑨岩石惑星の火成活動～マントル対流系の三次元球殻モデリング統括推進

(再委託先：国立大学法人東京大学)

平成28年度に開発した対流運動シミュレーションプログラムを用いて、火成活動(マグマの生成と移動)とマントル対流のカップリングおよびテクトニックプレートのより現実的な3次元シミュレーションを実行する。特に実際の地球で見られる、洪水玄武岩生成などのパルス的な大規模火成活動や安定したプレート運動を再現するためのシミュレーションを行う。

⑩ガス惑星の全球気象学～深部対流から表層ジェット流までの統括推進

(再委託先：国立大学法人京都大学)

ガス惑星大気の流れと相互作用する渦をシミュレートするための、高精度高解像度計算を行なうスペクトル法のライブラリをメニーコアマシンに導入し、新たな計算スキームを開発することにより、ライブラリの並列化効率および計算速度の追及・実証を行う。

⑪サブ課題C全体の統括および太陽フレアとその地球環境影響のシミュレーションの開発

(再委託先：国立大学法人名古屋大学)

「京」及び名古屋大学「FX100」を使って、太陽活動領域、太陽風、磁気圏、衛星環境モデルの初期実験を継続する。その計算結果の解析から、太陽フレアの発生とその地球環境影響を探るために必要な新たなシミュレーションモデルの開発要素を明確化する。

⑫太陽対流層の超大規模・長時間シミュレーション

(再委託先：国立大学法人千葉大学)

「京」及び名古屋大学「FX100」を使って、太陽対流層を包括した磁気流体計算を実施するとともに、より高解像度の状況を理解するために領域を制限した計算を行う。

⑬サブ課題D全体の統括および星間有機分子生成の大規模な第一原理分子動力学計算の実施

(再委託先：国立大学法人筑波大学)

「京」とCOMA, Oakforest-PACSを用いた大規模な第一原理分子動力学計算に向けたコード整備と予備計算を行う。また、ダスト形成過程の計算を実行し、ダスト上の有機分子合成の解析を進める。ダスト上での有機分子合成の素反応の網羅的解析に向けて、「京」とCOMA, Oakforest-PACSを用いた基底状態量子化学計算を行う。

⑭原始太陽系におけるダスト成長過程の研究

(再委託先：国立大学法人名古屋大学)

原始太陽系におけるダスト成長過程の解明に向け、「京」とCOMA, Oakforest-PACS及び名古屋大学「FX100」を用いて、原始惑星系円盤中のダスト粒子の衝突付着成長シミュレーションのためのコード開発を進める。予備計算とデータ解析を行い、大規模な第一原理数値シミュレーションにおける具体的な問題設定を行う。

⑮プロジェクトの総合的推進

プロジェクト全体の連携を密としつつ円滑に運営していくため、運営委員会や研究連絡会の開催等、参画各機関の連携・調整にあたる。特に、プロジェクト全体の進捗状況を確認しつつ計画の合理化を検討し、必要に応じて調査あるいは外部有識者を招聘して意見を聞くなど、プロジェクトの推進に資する。プロジェクトで得られた成果については積極的に公表し、今後の展開に資する。

4-2. 実施内容（成果）

本課題では、惑星の起源・進化と惑星環境変動の解明を目的として、ポスト「京」を想定した計算コード・基礎ルーチンの開発および科学目標の詳細化を進めている。本提案はサブ課題 A-D からなり、サイエンスと問題解決の手法の両面で相互に協力しながら研究を推進している。

平成 29 年度において、サブ課題 A「惑星の起源の解明」では、並列計算コード開発を進め、惑星集積および星形成・原始惑星系円盤の大規模シミュレーションの開発・最適化および準備的計算を行った。サブ課題 B「惑星内部・表層のダイナミクスと進化」では、球対流の高解像度数値計算を行うことを目標として、岩石惑星モデル・惑星大気モデル・ガス惑星モデルの各テーマ間の情報共有を図り、それぞれのモデルで必要となる基礎ルーチンの開発を進め、「京」上での大規模計算の実装実験を実施した。サブ課題 C「太陽活動による地球環境変動の解明」では、太陽対流層の全球対流シミュレーションの開発および超大規模・長時間シミュレーションへ向けた準備、太陽表面磁場の観測データを用いた太陽面爆発現象の再現、地球磁気圏のグローバルシミュレーションの高速化のための並列化手法の開発等を行った。サブ課題 D「原始太陽系における物質進化と生命起源の探究」では、星間有機分子生成の大規模な第一原理分子動力学計算に向けたコード整備と予備計算、原始惑星系円盤中のダスト粒子の衝突付着成長シミュレーションのためのコード開発・効率化を行った。

サブ課題間の連携のために、本課題ではアプリケーション開発状況共有ワークショップ（平成 29 年 8 月）、公開シンポジウム（平成 30 年 3 月）、重点課題 9「宇宙の基本法則と進化の解明」サブ課題 C「大規模数値計算と広域宇宙観測データの融合による宇宙進化の解明」との共催での天体形成シミュレーション研究会（平成 29 年 6 月）などを開催し、達成すべきサイエンスの内容や技術的課題を共有・議論した。研究推進の体制構築や進捗状況確認のために、構成員 16 名からなる課題運営委員会を定期的に開催している。技術的課題に関しては理研 AICS 他と連携・意見交換をしながら、ポスト「京」向けのアプリケーションの開発・最適化を進めている。

4-2-1. サブ課題 A「惑星の起源の解明」

平成 29 年度において、サブ課題 A では並列計算コード開発を進め、惑星集積および星形成・原始惑星系円盤の大規模シミュレーションの開発・最適化および準備的計算を行った（4-1. 実施計画①⑤⑥⑦に対応）。

(1) 惑星集積の N 体シミュレーション

東京工業大学では、惑星集積の N 体シミュレーションのために理化学研究所と共同で開発した最適化されたコード「Kninja」により、試験的なシミュレーションを開始した。衝突破壊モデルを実装し、ガス円盤内での惑星の移動を検証した。実装したモデルは、破片のサイズと破片の数をパラメータとした簡易モデルで、今後、結果のモデル依存性は検証していく。

破片を細かくしていった場合、微惑星・破片との相互作用による惑星の外側移動の効果が、円盤ガスとの相互作用による内側移動をしのぐことがわかった。粒子数は初期には 6 万で、10 万年計算後では破壊の効果により 10 万體になっていた。さらに粒子数を増加させた計算を実行するために P³T 法に FDPS を適用させた大域的 N 体シミュレーションの開発・最適化を進めた。コードには完全衝突合体と衝突破壊による破片生成の関数も加えた。図 1 では 4 コアで計算した場合の計算誤差の

時間進化を示す。数千年の計算でも十分な精度が保たれていることがわかる。今後、ノード数を多くした計算を実行し、今まで100万粒子程度しか計算できなかったところを1億粒子まで引き上げ、計算を実行する。

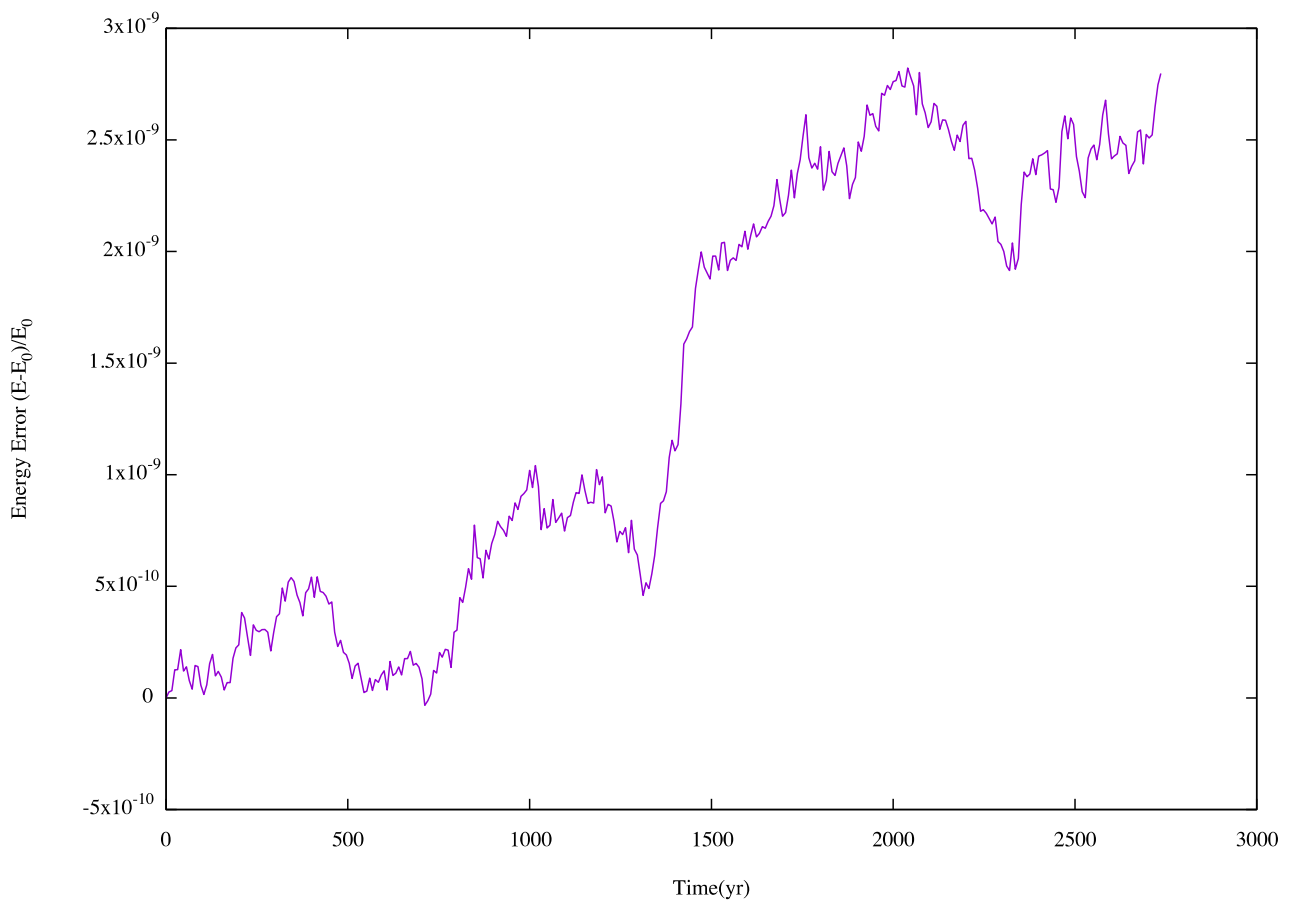


図 1 : 惑星集積の N 体シミュレーションにおける計算誤差の時間進化。

(2) 原始惑星系円盤の形成及び進化の磁気流体シミュレーション

大阪大学では、汎用磁気流体コード「Athena++」に Full-Multigrid 法に基づくポアソンソルバを実装し、一様格子上で数千並列以上の大規模計算でも磁気流体部と比べ数分の 1 で計算できる非常に高い性能と良好なスケーラビリティを達成した。このソルバは将来輻射輸送や粘性拡散などに応用するために汎用的に設計している。

Xeon Phi を搭載した Oakforest-PACS において超大規模並列計算のテストを行い、理想 MHD で 1 ノードから 2048 ノード (524288 スレッド) で単精度 90%、倍精度 83%以上の高い並列化効率を得た (図 2)。公開したコードは Web サイトにて公開している。

- ・ 英語 : <https://princetonuniversity.github.io/athena/>
- ・ 日本語 : <http://vega.ess.sci.osaka-u.ac.jp/~tomida/athena/index.html>

更にコードの普及とユーザーの教育のために、国立天文台天文シミュレーションプロジェクトおよびポスト「京」重点課題 9 の協力を得て流体学校 (Athena++で学ぶ流体力学) を開催し (平成 30 年 2 月 13 日~16 日)、約 25 人の参加者を得た。

原始惑星系円盤の形成・進化シミュレーションに関しては、その初期条件を構築し、本格実施フェーズで行う長時間大規模計算に向けた準備的計算を行った。磁気回転不安定性による乱流の駆動や、非理想 MHD 効果によるその抑制 (デッドゾーン) などが再現できている (図 3)。

さらに、星・円盤形成過程の初期条件となる分子雲形成の磁気流体シミュレーションを行い、衝撃波圧縮と磁力線の方向によって駆動される乱流や形成される分子雲の量などを系統的に調べた。Planck 衛星による磁力線の向きと分子雲の観測と整合的な結果を得た。現在これに自己重力を導入した計算を進めている。今後、構築された原始惑星系円盤モデルを使って、本格的な稼働を始めたチリの大型電波干渉計 ALMA による円盤観測データの解釈を進める。

(3) 並列計算コード開発

理研 AICS では、惑星形成シミュレーションコードのベースになるフレームワーク FDPS の最適化を進めた。具体的には、ポスト京で想定されるような、非常にノード数が多く、ノード内のコア数も多いシステムで FDPS がスケールし、高い実行効率が維持できるためのアルゴリズムの実装、性能評価を進めた。

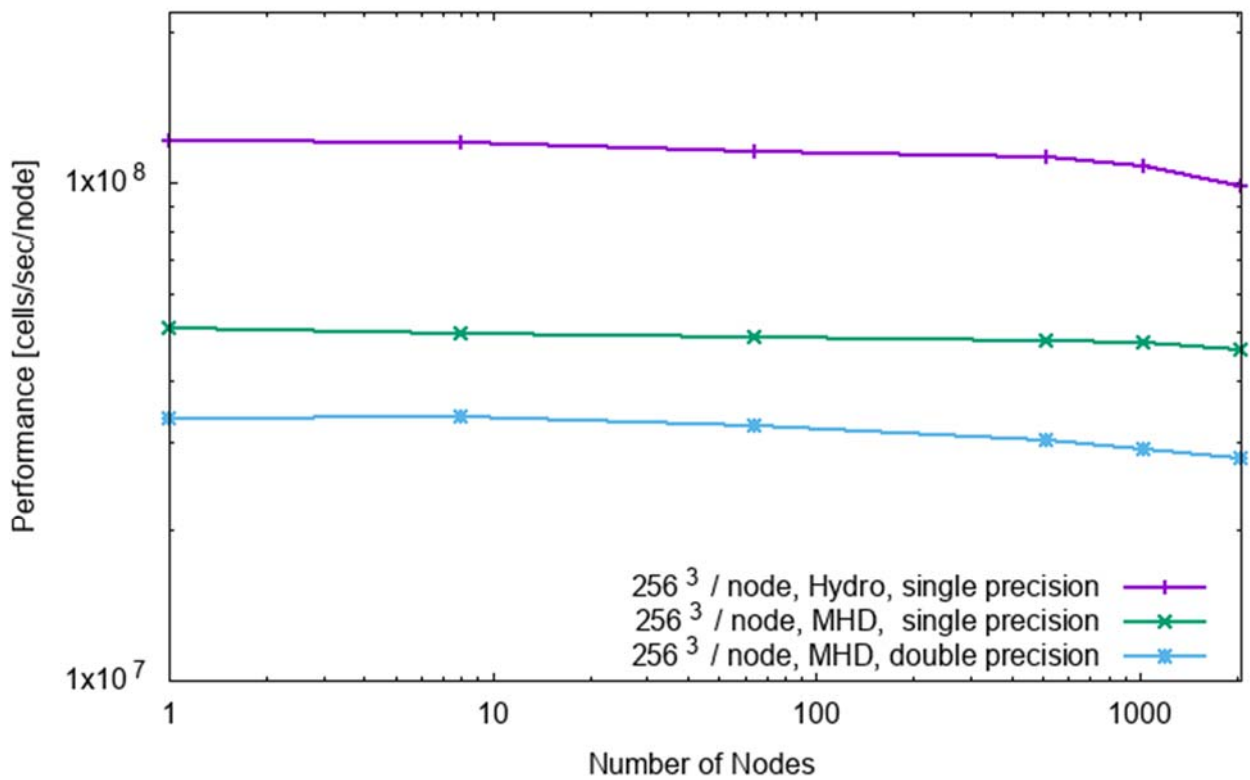


図 2 : Oakforest-PACS で測定した Athena++コードの理想 MHD 部の性能。52 万スレッド以上まで高い並列化効率が得られており、次世代計算機による大規模計算に適用できる性能を実証した。

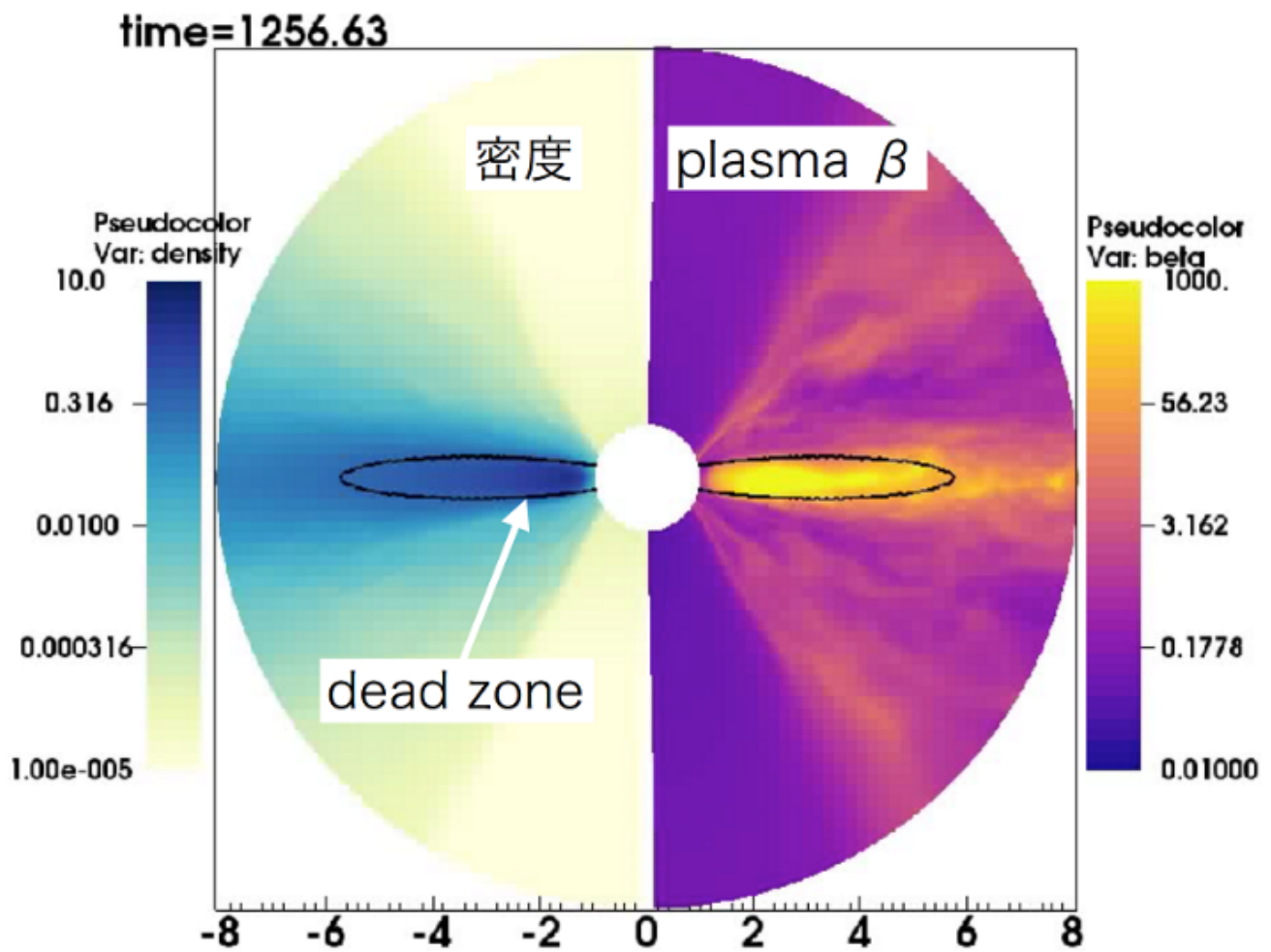


図3：原始惑星系円盤の非理想磁気流体シミュレーション。黒線で囲まれたデッドゾーン内は非理想MHD効果が強く、磁場が散逸してプラズマ β が上昇し、乱流も抑制されている。

4-2-2. サブ課題B「惑星内部・表層のダイナミクスと進化」

平成 29 年度において、サブ課題 B では「岩石惑星の火成活動～マントル対流系の三次元球殻モデリング」「ガス惑星の全球気象学～深部対流から表層ジェット流まで」「地球型惑星の気象・気候～火星全球ダストストーム」という 3 つの球対流の高解像度数値計算を行うことを目標として、研究テーマ間の情報共有を図り、それぞれのモデルで必要となる基礎ルーチンの開発を進め、「京」上での大規模計算の実装実験を実施した(4-1. 実施計画②⑧⑨⑩に対応)。

(i) 岩石惑星「岩石惑星の火成活動～マントル対流系の三次元球殻モデリング」

対流しつつある三次元部分球殻マントルと火成活動(マグマの生成と移動)のカップリングと、三次元矩形領域におけるテクトニックプレートを含むマントル対流の、シミュレーション用の数値コードの開発に成功した。以下にこれらのコードを用いて得られた計算結果の例を示す。

開発した三次元部分球殻マントルにおける火成活動モデルのプログラムによって計算した例を図 4 に示す。計算に用いたメッシュ数は深さ方向 64、水平方向 64×64(緯度 90 度×経度 90 度分)で、Core i7 の 8 コアを用いて実行した場合の計算時間は時間刻み 1 ステップあたり約 120 秒であった。数値コードの本体はテクトニックプレートのシミュレーションに用いたものと共通のため、大規模並列化を伴う「京」や「地球シミュレータ」への移植は問題なく行える。これにより、月の内部進化の三次元部分球殻モデルのシミュレーションへの展望が開けた。図 5 は、開発した三次元矩形領域に於けるテクトニックプレートモデルの計算結果の一例である。(a) 高温部の等値面・側面温度分布・表面ダメージ分布を、(b) 表面におけるプレートが受けたダメージの分布を真上から見たもの、(c) 同じく表面における粘性率分布を真上から見たものをそれぞれ表している。ダメージの大きなプレート境界を境に、各タイル上のプレートが剛体のように動いている様子が見える。局所的には大きな粘性率コントラスト(場所によっては 1000 倍程度)が生じる部分ができるが、問題なく計算を進める事が出来ている。用いたメッシュ数は 512×512×128 で計算時間は時間刻み 1 ステップあたり「京」上で約 10 秒(1024 ノード使用時)、「地球シミュレータ」上で約 24 秒(128 ノード使用時)であった。これにより平成 30 年度に実行する予定であるプレートテクトニクスの三次元シミュレーションへの展望が開けた。

(ii) ガス惑星「ガス惑星の全球気象学～深部対流から表層ジェット流まで」

ガス惑星大気シミュレーション計算の高解像度長時間積分を行うためにスペクトル変換ライブラリの改良を行った。Intel Xeon 向けのチューニングとして、SIMD 命令の活用とキャッシュを利用したアセンブリコーディングを行い、Haswell 系 Xeon CPU に対してピーク性能に近い計算速度を出すことに成功した。一方、緯度方向に加えて動径方向にも MPI 並列化を行う実装テストを「地球シミュレータ」(NEC SX-ACE) 上にて行い、これまで緯度方向格子点数によって制限されていた並列処理の限界を伸ばすことに成功した。さらに、深さ方向の密度成層を考慮した非弾性球殻対流モデルを開発し、改良したスペクトル変換ライブラリを用いて大規模並列化を行った。

図 6 は、開発した非弾性球殻対流モデルのベンチマーク計算の計算時間を示したものである。従来の、動径方向に MPI 並列をしない場合(NPV = 1)では、256 並列までは計算時間がほぼ並列数に比例して減少していくが、それ以上の並列数では計算時間が減少しなくなり、並列化による加速の限界となっていた。これに対して、動径方向並列数(NPV)を 4、8、16、32 と増加させるに連れて、よ

り大きな MPI 並列数でも計算時間を減少させることができるようになっている。

今後は Xeon 系メニーコアシステムあるいは「京」でのスペクトルライブラリにも、「地球シミュレータ」で開発した動径方向並列化の技術を導入し、SIMD 命令とアセンブリコーディングと組み合わせて高速化を図る。これにより、ガス惑星大気シミュレーションの高解像度長時間積分を、大規模並列計算により遂行できる展望が開けるだろう。

(iii) 惑星大気「地球型惑星の気象・気候～火星全球ダストストーム」

本研究テーマでは、「京」などの大規模計算機上での並列計算に適した正二十面体準一様格子に基づく非静力学全球大気モデル (SCALE-GM) を改良して惑星大気設定に拡張することを目指し、開発を進めてきた。惑星大気設定への拡張に必要な物理過程ルーチンは、神戸大学・北海道大学・京都大学において開発してきた汎惑星大気静力学スペクトルモデル (DCPAM) から順次移植する形で、開発を進めている。

まず理想化した火星大気設定での力学計算 (Mischna & Wilson, 2006) を実施し、SCALE-GM が火星大気設定でも問題なく動作することを確認した。また、火星版 SCALE-GM の計算結果が、DCPAM の計算結果とおおよそ一致することも確認した。次に、SCALE-GM に DCPAM の火星大気放射過程 (太陽入射計算、短波・長波の放射伝達計算、近赤外線吸収による加熱計算) のルーチンを移植した。SCALE-GM と DCPAM で、鉛直一次元設定で放射加熱冷却による大気温度分布を計算したところ、両モデルの計算結果に差異が見られた (図 7 の青線と黒線)。検討の結果、これは両モデルの気圧の違い、すなわち SCALE-GM は非静力学的な気圧であるが DCPAM は静力学的な気圧、によるものであることが分かった。また、SCALE-GM においても静力学的な気圧を求めて放射計算に利用することで、DCPAM とほぼ同じ結果 (図 7 赤線) が得られることが確認された。

上述の火星版 SCALE-GM の開発と並行して、平成 28 年度に実施した地球大気力学基礎実験 (Held & Suarez, 1994) の高高度拡張計算の結果から見いだされた、赤道上空東西平均東西風の振動現象 (QBO 的振動) について調査を行った。結果、数値モデル内の水平拡散係数や時間刻み幅の大きさに依存して、QBO 的振動の有無や周期が変わることが分かった。水平拡散項に対する依存性は、QBO 的振動の駆動源である大気重力波の鉛直伝播の観点から解釈可能である。すなわち、拡散項が大きいほど、大気重力波による東西運動量の鉛直輸送量が少なく、振動周期が長くなる、ということである (図 8)。一方で、数値積分の時間刻み幅に対する QBO 的振動の依存性は単純ではなく、引き続きの調査・考察が必要である。

さらに本テーマでは、今後 SCALE-GM を金星大気へ拡張することを見据え、また我が国の金星探査機「あかつき」の探査結果を活用してモデルの開発改良を進めるため、「地球シミュレータ」に最適化された静力学スペクトルモデル (AFES) を用いた金星大気力学の数値実験を、「地球シミュレータ」で実行可能なレベルでの高解像度計算を実施している。平成 29 年度は「あかつき」によって発見された、金星大気の高緯度から低緯度にかけて雲の薄い領域が斜めに延びる惑星規模のストリーク構造を、シミュレーションで再現することに成功した。そして、シミュレーションデータを詳細に解析することで、このストリーク構造の形成メカニズムは、傾圧不安定と波数 1 の赤道ロスビー波の位相の南北方向の傾きによって説明できることを示した。

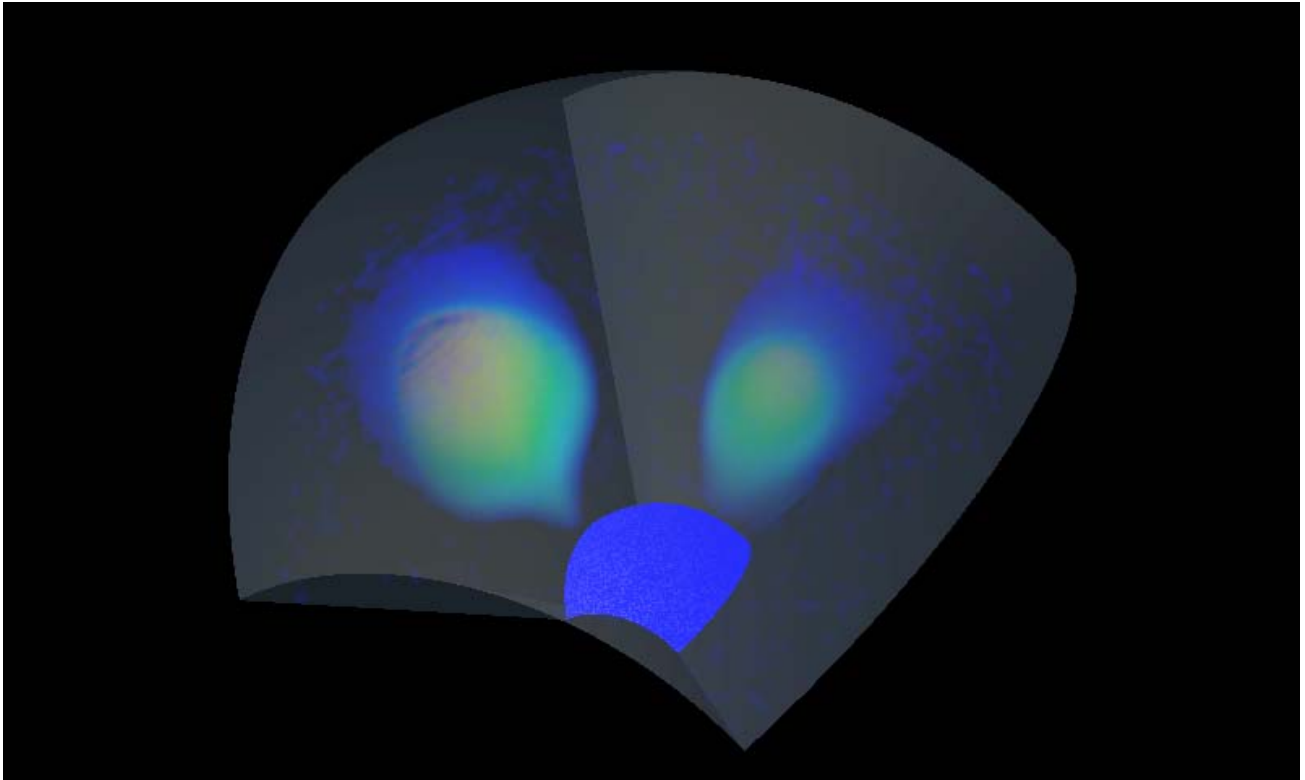


図4：月を模した三次元部分球殻マントルにおける火成活動モデリングの一例。固相マントル対流の上昇域の中で起こる部分溶融によって生じた液相マグマの分布を色で示しており、暖色ほど多くのマグマが発生していることを意味する。灰色は計算に用いた部分球殻領域であり、下部の青い面は計算領域の底面を表す。

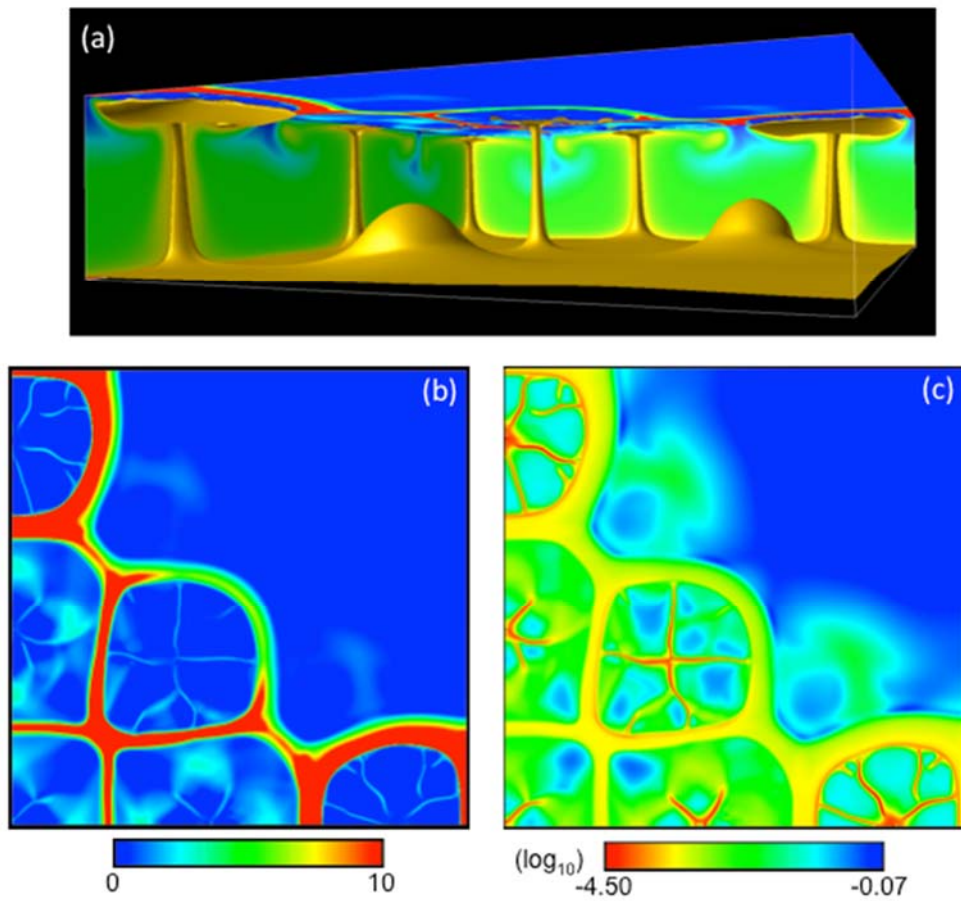


図5：応力履歴依存粘性率を考慮したマンテル対流の数値シミュレーション結果の一例。
 (a) 温度等値面（黄色）、温度分布（側面）、ダメージ分布（上面）。
 (b) 惑星表面でのプレートが受けたダメージ分布。
 (c) 惑星表面での粘性率分布。

Anelastic 4096x2048x64 (T1365L64), 100step

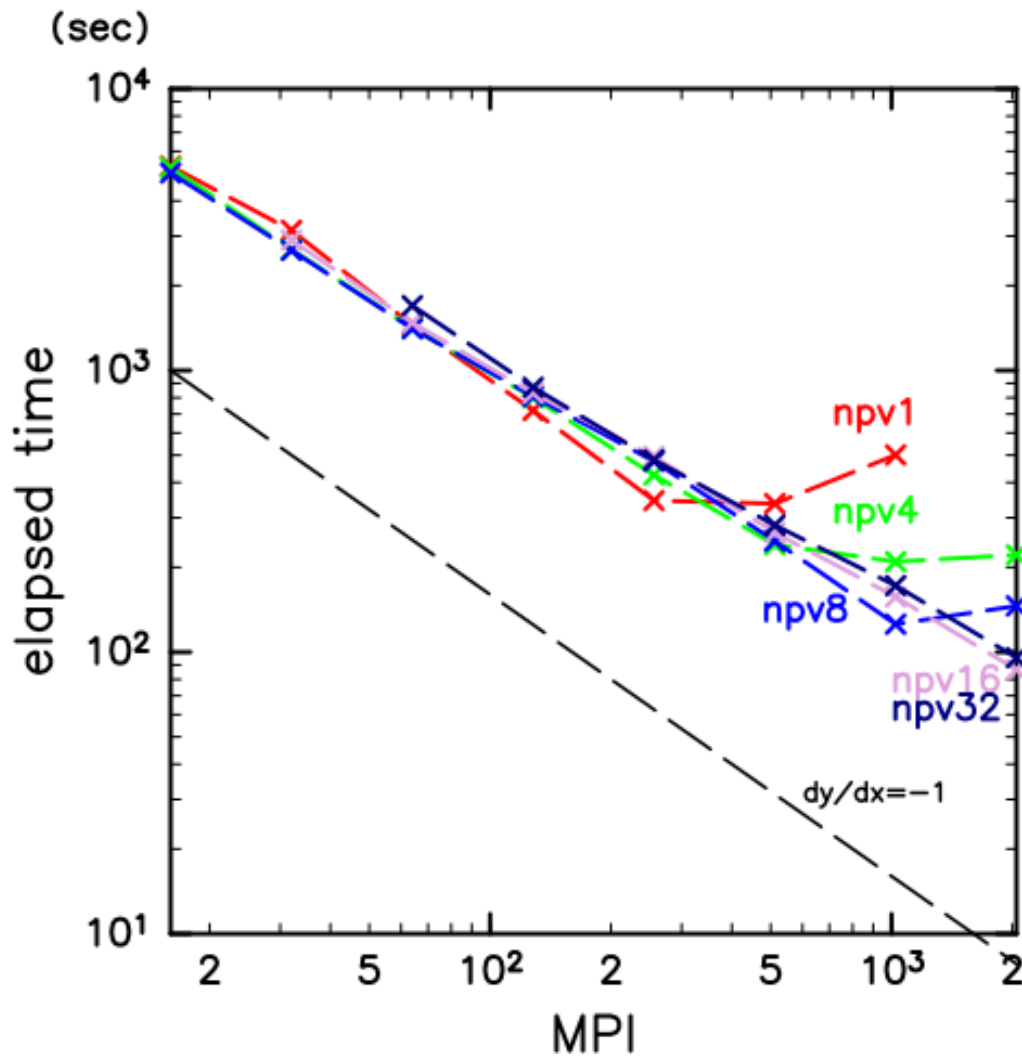


図6：非弾性球殻対流モデルのベンチマークによる計算速度。解像度は経度×緯度×動径格子点数 = 4096×2048×64。OpenMP 並列 4 スレッドの「地球シミュレータ」による計算。横軸が MPI 並列数、縦軸が時間積分を 100 ステップ進めるのに要した実時間（秒）。図中の NPV は動径方向の並列数を示している。

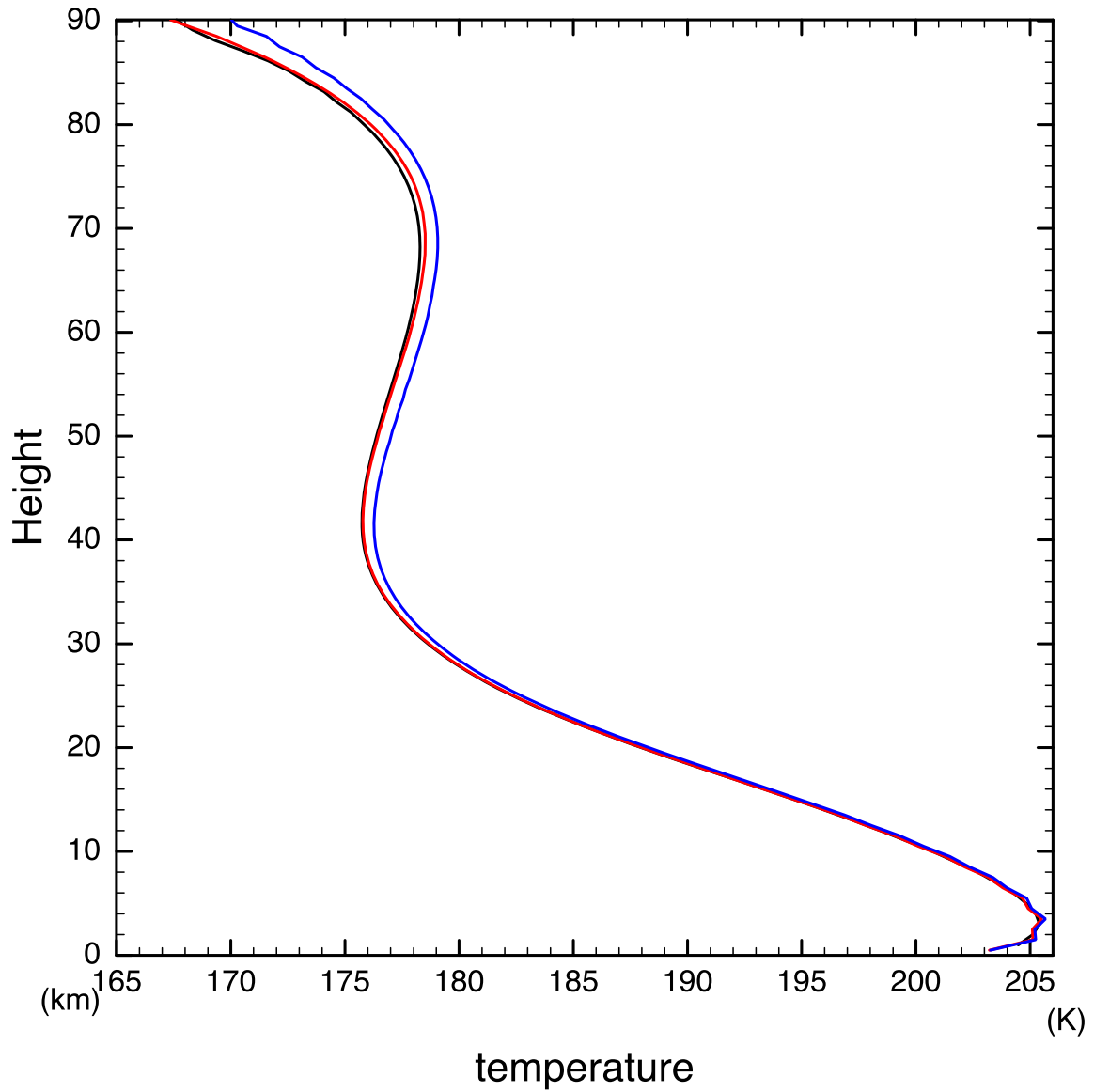


図 7 : 火星大気放射鉛直一次元計算で得られた温度分布。黒が DCPAM を、青が非静力学的気圧を用いた SCALE-GM、赤が静力学的気圧を用いた SCALE-GM の結果を表す。200 K の等温大気を初期状態とし、地表温度を 200 K に固定し、日周期を排した設定で、太陽直下点（赤道上）での 50 日後の鉛直温度分布。

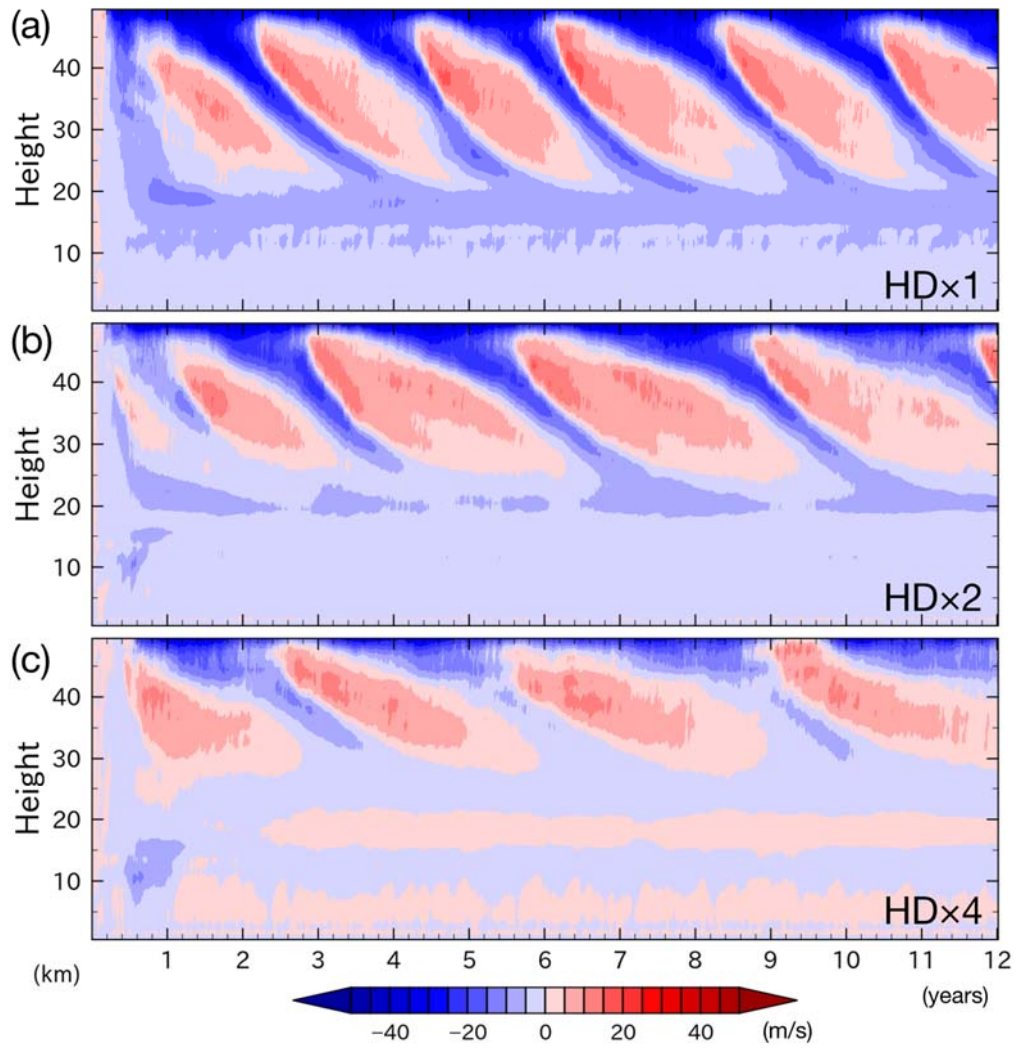


図8：SCALE-GMを用いた地球大気力学基礎実験の高高度拡張計算で得られた赤道上空東西平均東西風の時間発展。水平拡散係数の大きさが(a)1倍、(b)2倍、(c)4倍と大きくなるに従って、平均東西風の振動周期が長くなっている。

4-2-3. サブ課題C「太陽活動による地球環境変動の解明」

平成 29 年度において、サブ課題 C では太陽表面と輻射輸送の効果も含む太陽対流層の全球対流シミュレーションを開発し、ポスト「京」における本格的な太陽ダイナモシミュレーションの準備を整えた。太陽表面磁場の観測データを用いて太陽フレアなどの太陽面爆発現象を再現することにより、その発現メカニズムの理解と発生予測に大きく貢献した。地球磁気圏のグローバルシミュレーションの高速化のための並列化手法の開発と宇宙プラズマにおける現実のパラメータによる波動粒子相互作用シミュレーションと波動のある場合の人工衛星の帯電シミュレーションを進め、そのための高性能並列化計算アルゴリズムの開発を進めた(4-1. 実施計画③⑪⑫に対応)。

(1) 太陽対流層のシミュレーション

長時間(30 年程度)を追う太陽全球の磁場生成数値計算としては、これまででもっとも多い格子点数(球座標に直して $256 \times 1024 \times 2048$)での計算を実行した。次の段落に示す太陽表面も取り入れた計算とは違い、表面を取り除き領域を制限することによって、長時間・高解像度の計算が可能になっている。高解像度化によって、磁場が非常に強くなり、乱流の磁場エネルギーが運動エネルギーの 10 倍程度になる状況を実現した。これはこれまでに考えられていた速度場が支配的な太陽対流層観を大きく変えるものである。また、低緯度に集中して大規模磁場が生成される様子が再現できた(図 9)。実際に太陽でも緯度 30 度程度までのみ黒点が発生し、蝶形図を形作っているが、その成因に迫る成果である。大規模な磁束が低緯度に集中する要因は高緯度に移動した磁束が不安定化し、乱流によって破壊されるからと考えられている。詳細な要因は今後の数値計算データの解析により明らかにする。

また、対流層の底から表面までの包括した計算を実施するための数値計算コードを開発した。実際には、太陽表面を取り扱うために輻射輸送、状態方程式の取り扱いを整備した。輻射は局所的な問題ではないが、ポスト「京」で実行するために、なるべく通信を抑えたアルゴリズムを開発した。これまでの光球のみの極小領域を取り扱った数値計算結果と比較し、今回開発したアルゴリズムが妥当であることを確認した。この開発した数値計算コードを用いて、世界で初めて太陽の対流層の底から表面までの一貫した数値計算を実施した(図 10)。これまでの研究では、太陽表面を取り入れると太陽深部の熱対流が大きく影響を受けると予想していたが、実際にそのような計算を実行すると太陽深部は太陽表面の影響をほとんど受けないことがわかった。解像度を保つために本計算は水平方向に領域を制限しておこなっているが、深部のみの球殻全てを包括した計算とも比較を行っており、深部熱対流を調査する上では十分な水平領域が確保できていることが確認できている。対流層深部から太陽表面までの黒点生成過程を追うための準備は整った。

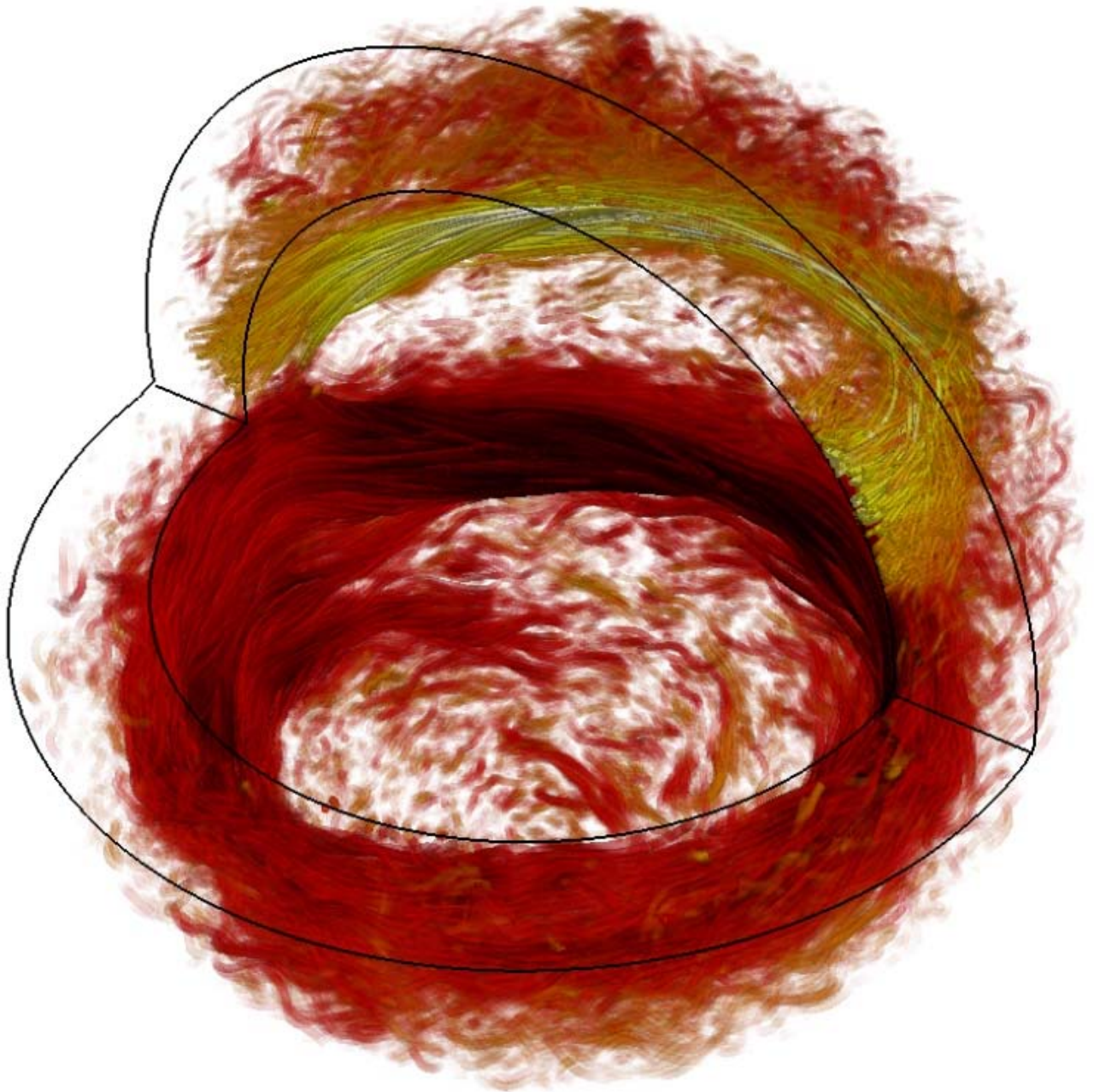


図9：全球高解像度計算により生成された大規模磁場。線は磁力線を表し、色が経度方向の磁場強度を表す。太陽全球円周 440 万 km を示してある。図 10 とは違い領域を制限し、太陽表面付近は取り入れていない。

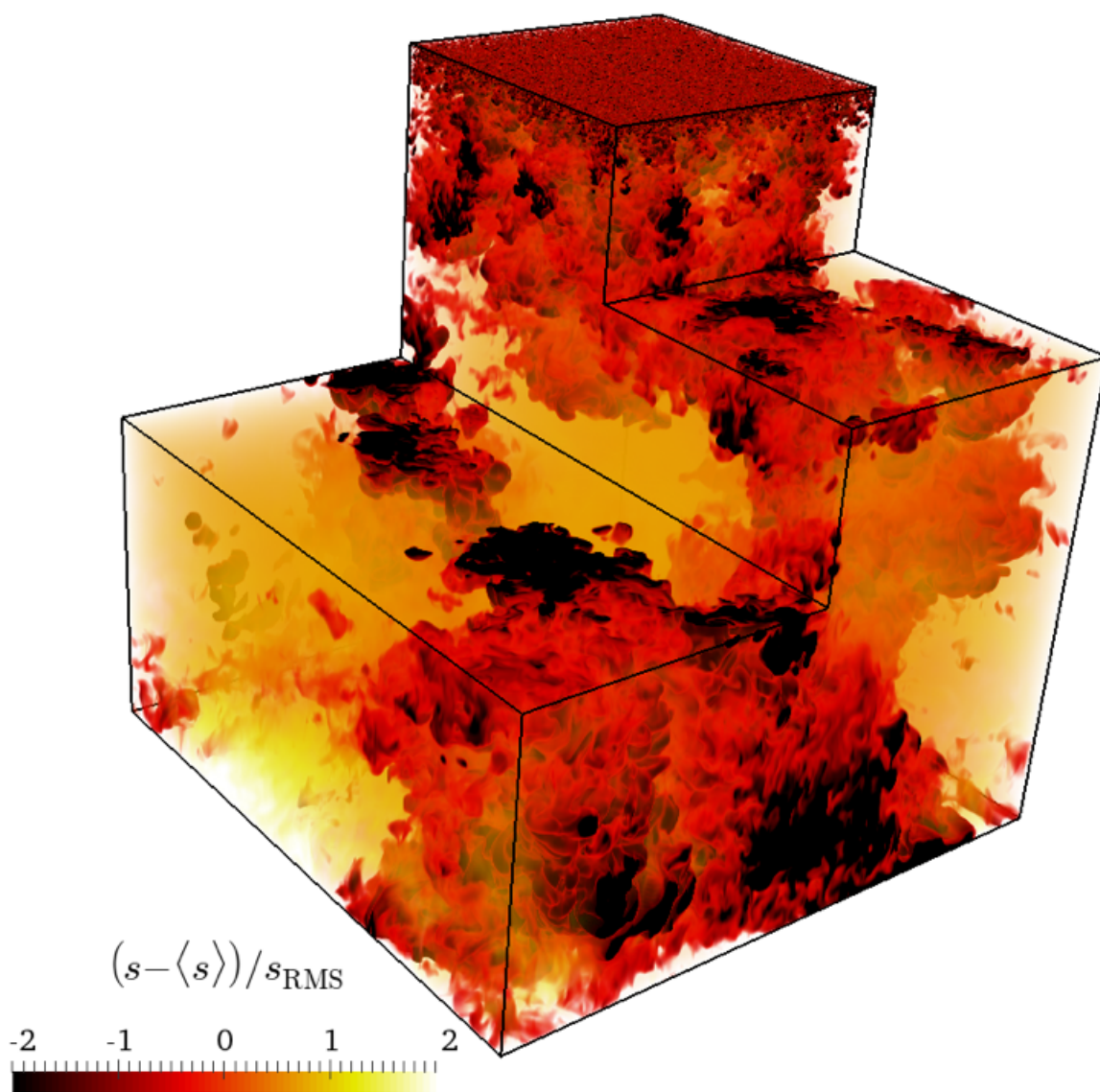


図 10 : 太陽対流層を包括した計算により実現した階層的熱対流の様子。それぞれの高さの典型的な値で規格化したエントロピーを表してある。空間スケールはそれぞれの方向に 20 万 km をとってある。

(2) 太陽面爆発（フレア、コロナ質量放出）の発生機構と予測に関するシミュレーション

太陽黒点磁場のエネルギーを駆動源とした太陽フレア爆発は地球環境や社会インフラに影響と被害をもたらす場合がある。そのため、その発生機構を解明すると共に、正確な発生予測を実現することは重要である。我々は衛星観測によってもたらされた太陽表面磁場から電磁流体の平衡条件に基づいて数値的に再現された3次元太陽コロナ磁場に様々な擾乱を加えることで、如何なる場合に太陽コロナ磁場が不安定化してフレアが発生するかをシミュレーションによって調べた。その結果、磁場のねじれ (magnetic twist) の比較的大きな領域に特定の幾何学的条件を満たす磁場の乱れが加えられた場合に、フレア爆発が発生することを確認した (図 11)。また、その爆発の原因となる不安定性 (ダブルアーク不安定性) を数値的に特定すると共に、その不安定性の臨界パラメータ κ を見出した。さらに、 κ パラメータが実際のフレア発生予測に利用可能であることを検証するため、異なる 200 活動領域の 3 次元コロナ磁場の数値計算を実施し、3 次元コロナ磁場データベースを構築した。

太陽表面の磁場の擾乱が大規模な爆発を引き起こす過程を精密に理解するため、多層格子法を用いた太陽面爆発のシミュレーションを開発した。太陽面爆発は、活動領域の局所的な領域に現れるプラズマや磁場の擾乱が重要な担い手になると観測からも示唆されており、それらを正確に捉えるため、活動領域の中心に細かい解像度を割り当て、活動領域から遠ざかるにつれて荒くなるような格子点配置を設定した (図 12(a))。この図のように、活動領域の中心に細かい格子を配置することで、太陽表面爆発のエネルギー源として考えられているねじれた磁力線の塊「磁気フラックスチューブ」も高解像度で分解できる。図 12(b) に計算結果を示す。2015 年に出現した太陽活動領域 NOAA Active Region 12371 で観測された磁場の噴出現象を、本計算コードで再現した。今後は、領域をさらに拡大することで、噴出した磁場を長い時間追跡し、コロナ質量放出への成長過程を明らかにする。また、太陽コロナ底部をさらに細かく分解することで、噴出にともなって形成される電流シートのダイナミクスも明らかにする。

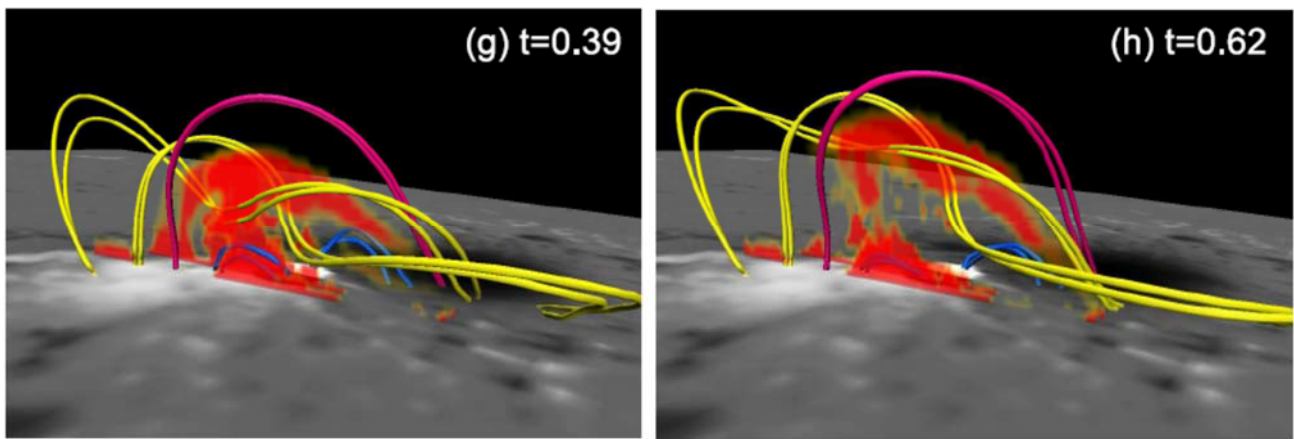


図 11 : ひので衛星による太陽面観測データに基づく太陽フレア爆発のデータ駆動型シミュレーション。太陽活動領域の磁力線が太陽表面の変化によって不安定化し、上昇する過程。黄色線は磁気再結合により不安定化した磁力線。ピンクと青は不安定化領域の周辺にある磁力線である。赤色の領域は不安定化の原因となる電流密度の高い領域を示す。各右上の数字は規格化された計算開始からの時間(t)を表す。

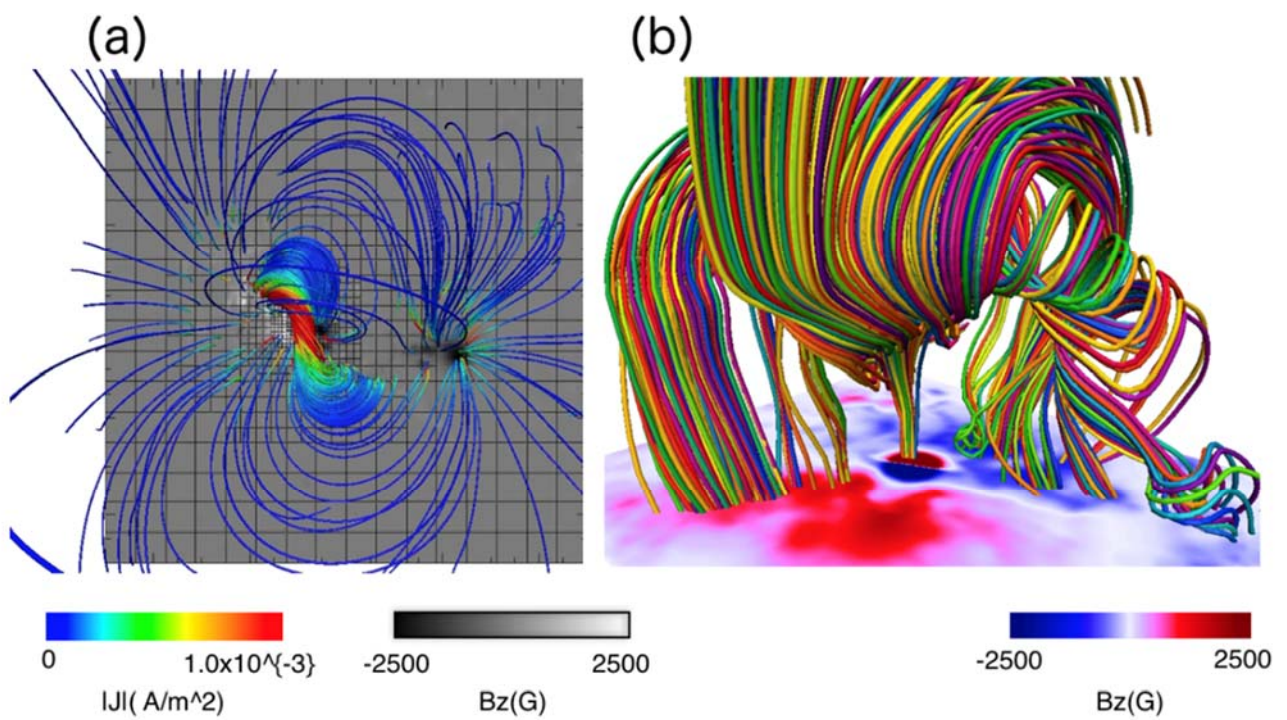


図 12 :

(a) 計算で用いた初期条件。線が磁力線を表しており、色は電流の値である。背景は視線方向の磁場成分を表している。

(b) 噴出する磁場構造。線は磁力線で、背景は視線方向の磁場成分である。

(3) 地球磁気圏と人工衛星環境のシミュレーション

地球磁気圏の太陽風の変化による複雑な変動過程を詳細に調べるため、ポスト「京」による大規模並列計算を高い並列化効率で行うための通信スレッド(Halo スレッド)を導入したグローバル電磁流体シミュレーションの実験を行い、高並列環境においても、並列化効率を高く維持できることを確認し(図 13)、大規模並列計算の準備を整えた。さらに、こうした大規模並列計算モデルを用いて、10 億~100 億個のプラズマ粒子と電磁場の時間発展を解くミクروسケール粒子シミュレーションに入力し、1 秒以下の時間スケールで変動する非線形波動(コーラス放射)の発生と相対論的電子加速を再現する流体・粒子混成計算を実現した。それによって、現実のパラメータで磁気圏内の放射線帯電子の加速に重要な役割りを果たすコーラス放射の発生をシミュレーションで再現した。高エネルギー電子の数密度と温度異方性がコーラス放射の発生過程に及ぼす影響について着目したサーベイ計算を、広範なパラメータ範囲で実施して、コーラス放射の発生条件に関わる閾値の存在を明らかにした(図 14)。さらに、プラズマ波動の励起により変動する電磁環境における衛星帯電のシミュレーションを実施することで、実際の衛星に障害を与える時間変動宇宙環境の理解に貢献した。また、複雑な実際の衛星の帯電計算を、ポスト「京」を用いて実現するため、高効率分散メモリ並列とワイド SIMD 演算器の有効活用を同時に実現する高性能並列化計算アルゴリズムの開発を進めた。

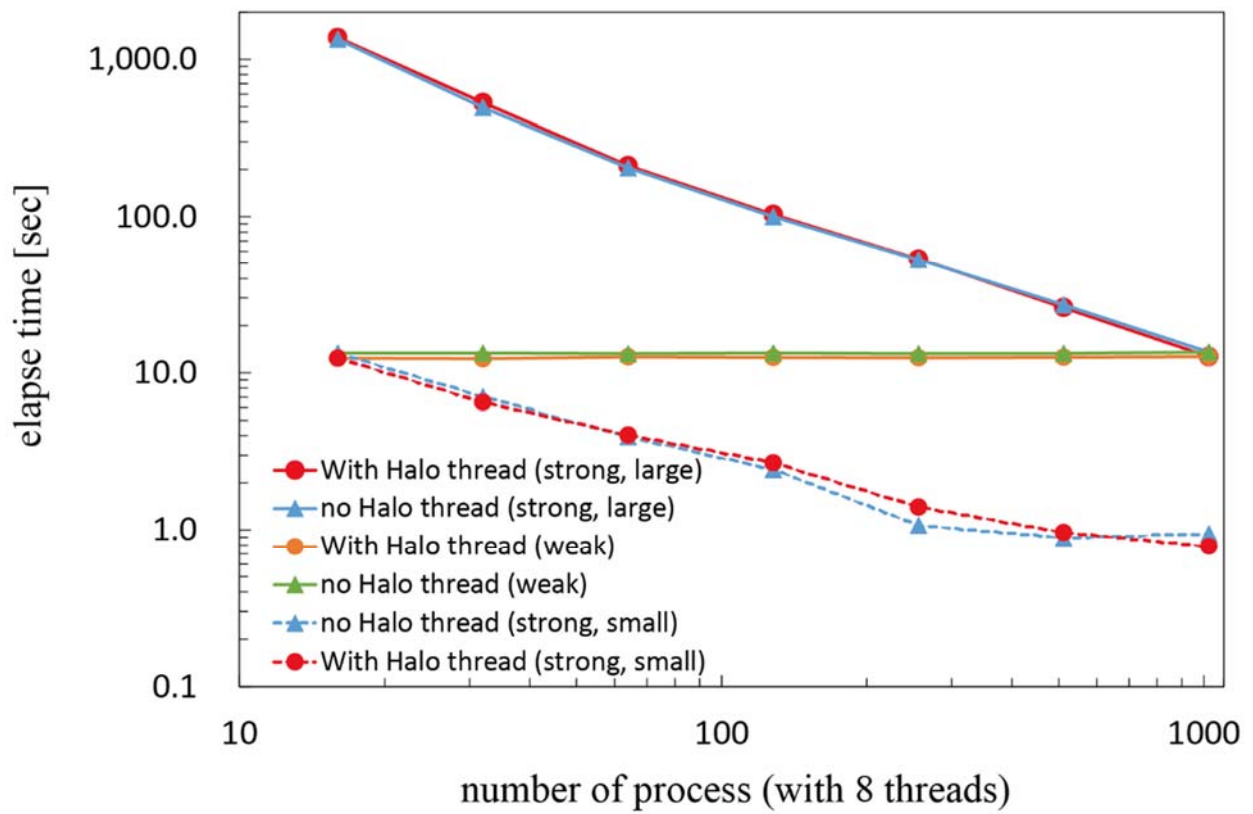


図 13 : FX10 における Halo スレッドを導入した電磁流体シミュレーションの weak/strong scaling での計算性能。

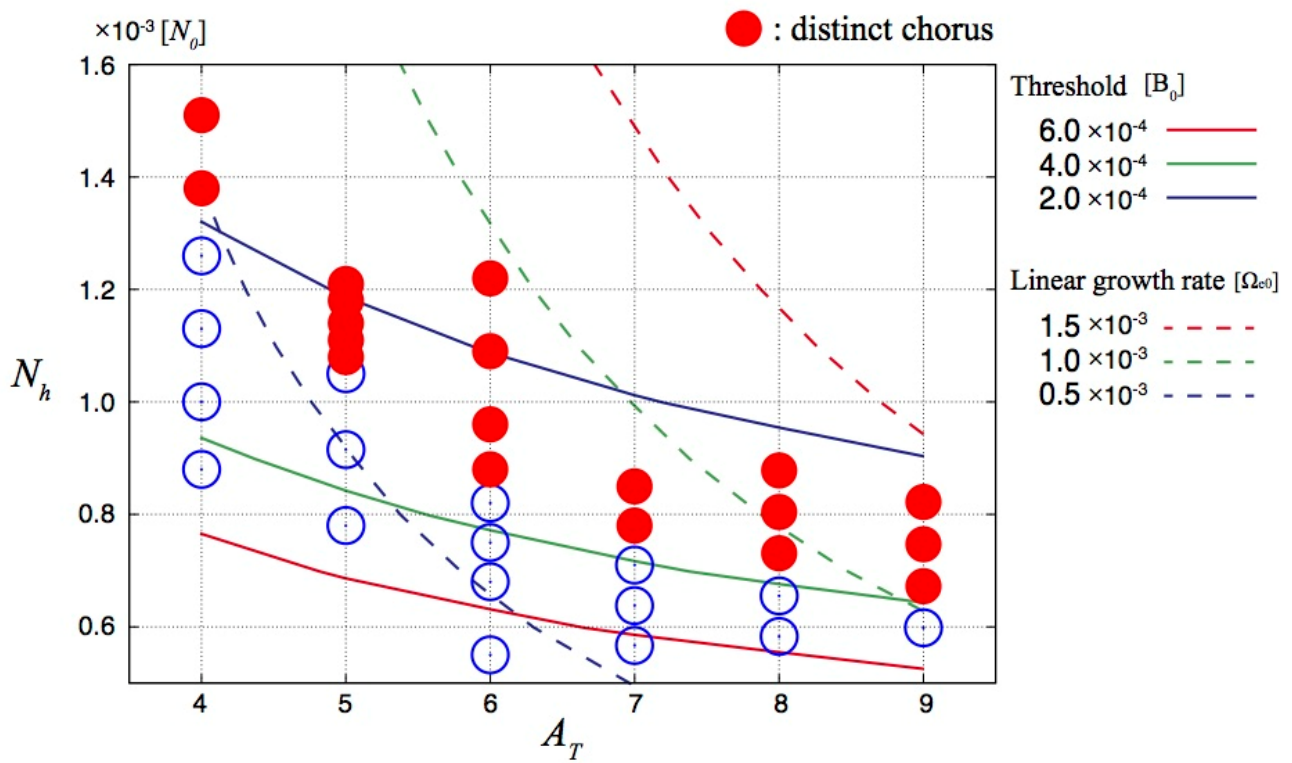


図 14 : コーラス放射の発生条件に関するサーベイ計算のサマリー。コーラス放射の発生した条件を赤丸、明瞭なコーラス放射の発生が確認できなかった条件を白丸で示す。非線形理論に基づくコーラス放射の閾値、線形理論に基づくコーラス放射の原因と考えられる不安定性の成長率をそれぞれ実線と破線で示している。縦軸 N_h は高エネルギー電子の密度、横軸 A_T は温度の異方性を示すパラメータである。

4-2-4. サブ課題D「原始太陽系における物質進化と生命起源の探究」

平成 29 年度において、サブ課題 D では星間有機分子生成の大規模な第一原理分子動力学計算に向けたコード整備と予備計算、特にアミノ酸生成経路、有機分子の光解離反応、ダスト表面上でのラジカル反応についての解析を行った。また、原始惑星系円盤中のダスト粒子の衝突付着成長シミュレーションのためのコード開発・効率化を行った(4-1. 実施計画④⑬⑭に対応)。

(I) 星間有機分子生成の大規模な第一原理分子動力学計算

・ 非ラジカル反応によるアミノ酸生成経路の解析

地球外環境下でのアミノ酸生成は様々な反応経路が提唱されているが、我々は、アミノアセトニトリルからヒダントインが生成し(Bücherer-Bergs 反応)、ヒダントインが加水分解されてグリシンが生成する反応経路を、密度汎関数法(DFT)を用いて解析した。アミノアセトニトリルは星間雲で観測されており、また、ヒダントインも隕石から検出されているなど、ともに宇宙化学において重要な有機分子である(図 15)。各反応ステップの反応障壁を計算して反応機構の詳細を明らかにし、触媒となる水分子の重要性を示した。しかし、反応障壁が高いことから、この反応が起こり得る環境として、隕石中など高温環境が考えられる。本研究の成果は *Chem. Phys. Lett.* に発表した(Kayanuma et al. 2017)。

・ ラジカル反応によるアミノ酸生成経路の解析

グリシンが生成する別の機構として、星間分子である CH_3OH 、 HCN 、 NH_3 のラジカル反応による生成経路が提案されている。その中から、 $\text{NH} + \text{CH}_2\text{COOH}$ 、 $\text{NH}_2\text{CH}_2 + \text{COOH}$ 、 $\text{NH}_2\text{CH}_2\text{CO} + \text{OH}$ の 3 つの反応経路について DFT 法を用いて解析した。その結果、反応障壁が低い(≤ 7.75 kJ/mol) 2 つの反応経路を明らかにし、星間空間のように低温環境においてもグリシン生成が起こり得ることを示した。本研究の成果を *Mol. Astrophys.* に発表した(Sato et al. 2018)。

・ 有機分子の光解離反応によるラジカル生成機構の解析

宇宙環境下においてラジカルが生成する主な反応機構の一つに、紫外線による光解離反応がある。本研究では、星間空間において重要な有機分子の一つであるメタノール(CH_3OH)の気相中での光解離反応の機構を明らかにするため、時間依存 DFT(TD-DFT)により、励起状態ダイナミクスシミュレーションを行った。実験的に、水素原子が解離する場合(図 16)、気相中では、C-H 結合の解離よりも O-H 結合の解離の方が起こり易いことが報告されているが、その理由として電子励起状態が重要であることを示した。本サブ課題で実施したダイナミクスシミュレーション及び結合解離に伴うエネルギー変化の解析から、電子励起状態においては O-H 結合が解離しやすい一方、電子基底状態においては C-H 結合の方が解離しやすいことが示された。すなわち、実験で観測されている分岐比は、電子励起状態において解離が起こる割合が多いと考えることで説明できることが明らかになった。

・ ダスト表面上でのラジカル反応の解析

ダスト表面上でのラジカル反応により生成した分子が気相中に放出される機構に関して chemical desorption が提案されている。この機構を解析する為、シンプルな表面モデルとし

てグラフェンを用い、HCO と H から CO + H₂ または CH₂O が生成する反応について Car-Parrinello dynamics シミュレーションを行った(図 17)。これには CPMD という材料研究の大規模シミュレーションに用いられているプログラムを利用した。その結果、表面に化学吸着している CHO が H 原子と反応する場合、CO + H₂ または CHOH が生成するという結果が得られた。この反応で CO + H₂ が生成する場合、CO は速やかにダスト表面から解離することが示された。

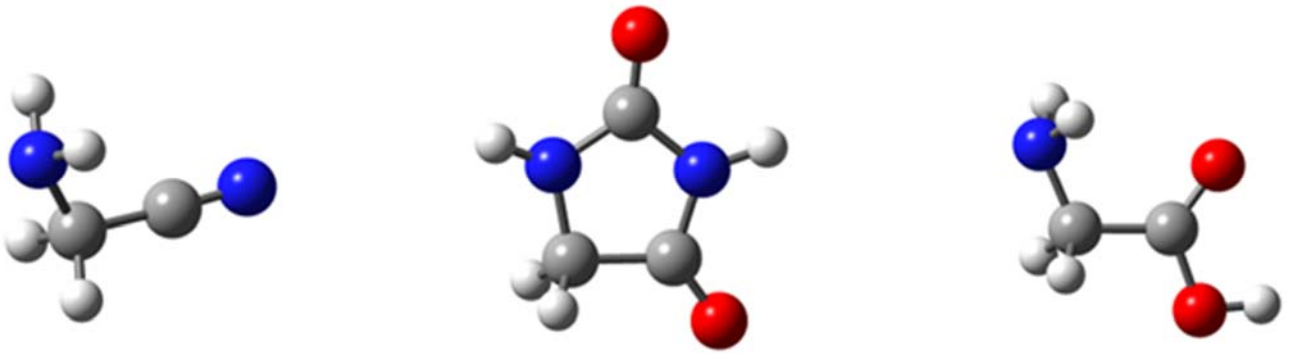


図 15 : アミノアセトニトリル、ヒダントイン、グリシンの構造。

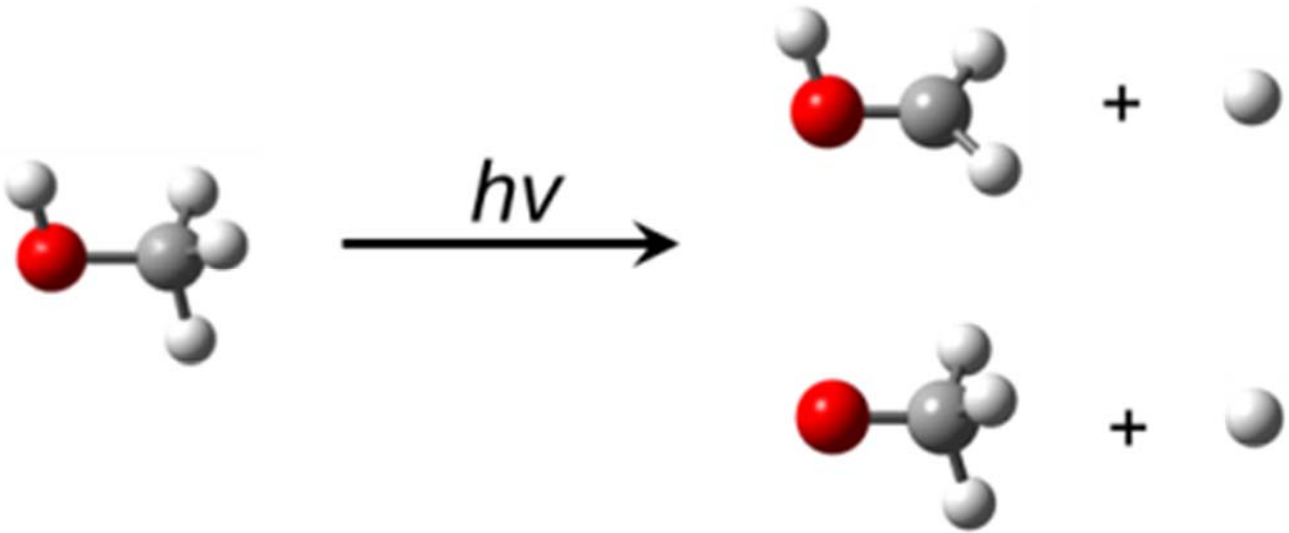


図 16 : 光照射によるメタノールからの水素原子の解離反応。

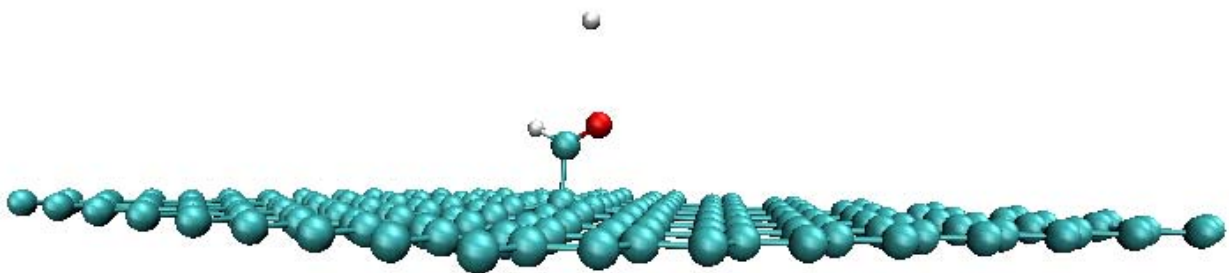


図 17 : グラフェン表面における CH₀ と H の反応。

(II) 原始惑星系円盤中の微惑星形成過程解明のための数値シミュレーション

- ・ 非圧縮ナビエ・ストークス方程式の直接数値計算 (DNS) を用いてダスト粒子の運動を追跡し、ダスト粒子の衝突付着成長過程を理解するためのデータ解析を実施した。微惑星形成過程において未解決である衝突破壊問題にターゲットを絞り、慣性の大きい岩石ダスト粒子が原始惑星系円盤のガス乱流の影響(乱流によるダスト粒子のクラスタリング; 図 18 参照) を受けどのように衝突付着しうるのか、衝突速度、衝突頻度、付着確率等の統計、および、それらのレイノルズ数(乱流の非線形性の強さ) 依存性を数値シミュレーションによって調べた。その結果、粒子の制動時間(摩擦抵抗によって終端速度に達するまでの時間)が乱流中の慣性小領域の渦の時間スケールのオーダーにおいて、慣性の大きい岩石ダスト粒子の衝突付着確率は従来の理論に基づくものより高いことを明らかにした。なお、エネルギー保有渦の時間スケールを T としたとき、最小渦の時間スケールは $\tau_\eta \sim T/Re^{1/2}$ で与えられ、慣性領域の渦の時間スケール t_{IR} は $T \gg t_{IR} \gg \tau_\eta$ である。また、ダスト粒子の慣性が大きいほど衝突付着に関する統計のレイノルズ数依存性が弱いことを明らかにし、原始惑星系円盤の現実的な高レイノルズ数乱流中のダスト粒子の衝突付着成長の定量的な議論を可能にした (Ishihara et al. ApJ 854:81, 2018)。
- ・ 圧縮性乱流の高精度・高解像度な差分に基づく直接数値シミュレーションコードを開発し、計算結果のマッハ数(圧縮性の強さ) 依存性を調べた。その結果、マッハ数が小さいときの結果(乱流場の統計と粒子の統計) が非圧縮性乱流の結果と無矛盾であることを確認し、マッハ数が小さいときは、場の密度揺らぎや速度の発散等に顕著な変化があっても慣性の大きい粒子の衝突統計に大きな変化が生じないことを明らかにした。
- ・ 粒子の付着成長シミュレーションのコード開発を行い、そのコードの高効率化を行った。その結果、格子点数 2048^3 の非圧縮性乱流 DNS 中で 512^3 個の岩石ダスト粒子の付着成長シミュレーションを実現した。得られたデータの解析により、乱流強度が強く粒子の限界付着速度が小さい(衝突破壊しやすい) 状況においても、大きく付着成長する粒子が存在することを明らかにした。

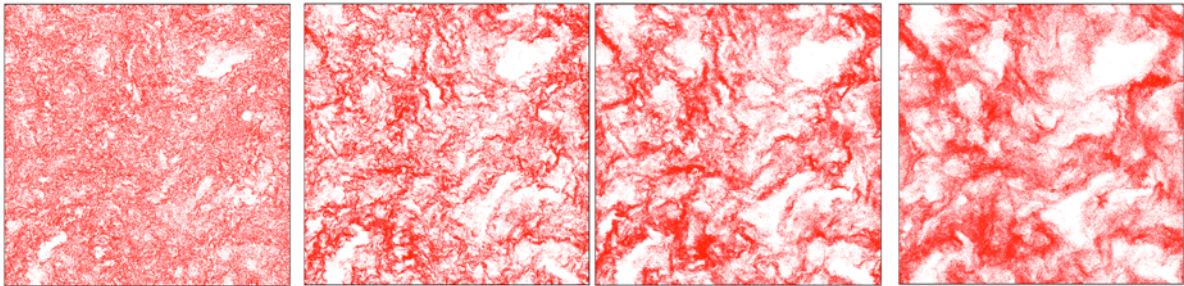


図 18 : 乱流の直接数値計算 (格子点数 : 20483, レイノルズ数 : 16100) によって得られた慣性粒子 (左から $St=0.01, 0.06, 0.12, 0.24$) のクラスタリング。 St はストークス数 (粒子の制動時間をエネルギー保有渦のタイムスケールで規格化したもの)。図は St の異なる粒子 (赤) の同一スライス面内における分布を示している。慣性粒子は St の値に応じてサイズの異なる渦から排出され、特徴的な長さスケールの異なるクラスタリングを形成することが分かる。

4-3. 活動（研究会等）

開催行事

日時/場所	活動名	参加者
平成 29 年 5 月 22 日 幕張メッセ	JpGU-AGU Joint Meeting 2017 での企画セッション「計算科学による惑星形成・進化・環境変動研究の新展開」	口頭発表：11 件 ポスター発表：4 件
平成 29 年 6 月 26 日 名古屋大学 情報基盤センター	重点課題 9 サブ課題 C と共同の ポスト「京」時代の天体形成シミュレーション研究会	出席者：21 名 TV 会議参加者：2 名
平成 29 年 8 月 12 日 神戸大学 惑星科学研究センター	ポスト「京」萌芽的課題・計算惑星 アプリケーション開発状況共有ワークショップ	出席者：9 名 TV 会議参加者：9 名
平成 29 年 12 月 3 日～5 日 神戸大学統合研究拠点 コンベンションホール	第 13 回最新の天文学の普及をめざすワークショップ「シミュレーション天文学」共催	出席者：46 名 課題からの講演者：3 名
平成 29 年 12 月 20 日 神戸大学 惑星科学研究センター	ポスト「京」萌芽的課題・計算惑星 調査研究・準備研究フェーズ成果報告会	出席者：6 名 TV 会議参加者：17 名
平成 30 年 3 月 9 日 神戸大学 惑星科学研究センター	CPS/WTK 惑星大気放射計算ミニワークショップ共催	出席者：16 名 TV 会議参加者：3 名
平成 30 年 3 月 26 日 神戸大学統合研究拠点 コンベンションホール	ポスト「京」萌芽的課題・計算惑星 第 2 回公開シンポジウム	出席者：24 名 TV 会議参加者：1 名
平成 30 年 3 月 28 日～29 日 神戸大学 惑星科学研究センター	CPS/WTK Mini-Workshop on Planetary Atmospheres II 共催	出席者：18 名 TV 会議参加者：2 名

運営委員会

日時	会合名	参加人数
平成 29 年 4 月 24 日	第 4 回運営委員会	14 名
平成 29 年 6 月 22 日	第 5 回運営委員会	13 名
平成 29 年 9 月 4 日	第 6 回運営委員会	14 名
平成 29 年 12 月 20 日	第 7 回運営委員会	14 名
平成 30 年 2 月 2 日	第 8 回運営委員会	9 名

4-4. 実施体制

業 務 項 目	担 当 機 関	担 当 責 任 者
①サブ課題A「惑星の起源の解明」	国立大学法人神戸大学	理学研究科教授 牧野 淳一郎
②サブ課題B「惑星内部・表層のダイナミクスと進化」	国立大学法人神戸大学	理学研究科教授 牧野 淳一郎
③サブ課題C「太陽活動による地球環境変動の解明」	国立大学法人神戸大学	理学研究科教授 牧野 淳一郎
④サブ課題D「原始太陽系における物質進化と生命起源の探究」	国立大学法人神戸大学	理学研究科教授 牧野 淳一郎
⑤サブ課題A全体の統括および惑星集積シミュレーション	国立大学法人東京工業大学	地球生命研究所 教授 井田 茂
⑥星形成・原始惑星系円盤の大規模シミュレーション	国立大学法人大阪大学	理学研究科 助教 富田 賢吾
⑦並列計算コード開発、サブ課題間連携推進	国立研究開発法人理化学研究所	計算科学研究機構FS2020プロジェクト コードデザイン推進チーム チームリーダー 牧野 淳一郎
⑧サブ課題B全体および「地球型惑星の気象・気候～火星全球ダストストーム」の統括推進	国立大学法人神戸大学	理学研究科 教授 林 祥介
⑨岩石惑星の火成活動～マントル対流系の三次元球殻モデリング統括推進	国立大学法人東京大学	総合文化研究科 准教授 小河 正基
⑩ガス惑星の全球気象学～深部対流から表層ジェット流までの統括推進	国立大学法人京都大学	数理解析研究所 准教授 竹広 真一

⑪サブ課題C全体の統括および太陽フレアとその地球環境影響のシミュレーションの開発	国立大学法人名古屋大学	宇宙地球環境研究所 教授 草野 完也
⑫太陽対流層の超大規模・長時間シミュレーション	国立大学法人千葉大学	理学研究院 特任助教 堀田 英之
⑬サブ課題D全体の統括および星間有機分子生成の大規模な第一原理分子動力学計算の実施	国立大学法人筑波大学	計算科学研究センター センター長 梅村 雅之
⑭原始太陽系におけるダスト成長過程の研究	国立大学法人名古屋大学	工学研究科 招へい教員（客員教授） 石原 卓
⑮プロジェクトの総合的推進	国立大学法人神戸大学	理学研究科教授 牧野 淳一郎

様式第 2 1

学会等発表実績

委託業務題目：「太陽系外惑星（第二の地球）の誕生と太陽系内惑星環境変動の解明
（生命を育む惑星の起源・進化と惑星環境変動の解明）」

機関名： 国立大学法人神戸大学

1. 学会等における口頭・ポスター発表

発表した成果（発表題目、口頭・ポスター発表の別）	発表者氏名	発表した場所（学会等名）	発表した時期	国内・外の別
Electron-hybrid and MHD cross-reference simulations of whistler-mode chorus in planetary magnetospheres (口頭)	Yuto Katoh, Keiichiro Fukazawa, and Manabu Yagi	Austria Center Vienna, AUSTRIA (EGU General Assembly 2017)	2017年4月27日	国外
Planetary-scale streak structures produced in a high-resolution simulation of Venus atmosphere (口頭、招待)	Kashimura, H., N. Sugimoto, M. Takagi, Y. Matsuda, W. Ohfuchi, T. Enomoto, K. Nakajima, M. Ishiwatari, T. M. Sato, G. L. Hashimoto, T. Satoh, Y. O. Takahashi, and Y.-Y. Hayashi	幕張メッセ (JpGU-AGU Joint Meeting 2017 - 日本地球惑星科学連合)	2017年5月20日	国内
ポスト「京」萌芽的課題「生命を育む惑星の起源・進化と環境変動の解明」の現況 (口頭)	牧野 淳一郎	幕張メッセ (JpGU-AGU Joint Meeting 2017 - 日本地球惑星科学連合)	2017年5月22日	国内
「衝突破壊プロセスを入れたN体計算における原始惑星の動径方向移動」 (口頭)	小南 淳子、台坂 博、牧野 淳一郎、藤本 正樹	幕張メッセ (JpGU-AGU Joint Meeting 2017 - 日本地球惑星科学連合)	2017年5月22日	国内
粘性率の応力履歴依存性を持つ流体の熱対流によるプレートテクトニクスの3次元シミュレーション (口頭)	宮腰 剛広、小河 正基、亀山 真典	幕張メッセ (JpGU-AGU Joint Meeting 2017 - 日本地球惑星科学連合)	2017年5月22日	国内
火成活動を伴うマントル対流シミュレーションの試み：モデル形状の効果はいかほどか (口頭)	亀山 真典、小河 正基	幕張メッセ (JpGU-AGU Joint Meeting 2017 - 日本地球惑星科学連合)	2017年5月22日	国内
対流する固体マントル中での軽い液相の分離様式 (口頭)	柳澤 孝寿、亀山 真典、小河 正基	幕張メッセ (JpGU-AGU Joint Meeting 2017 - 日本地球惑星科学連合)	2017年5月22日	国内
惑星大気シミュレーションの高解像度化に向けて：理想化実験におけるQBO的周期振動のモデル依存性 (口頭)	樫村 博基、八代 尚、西澤 誠也、富田 浩文、中島 健介、石渡 正樹、高橋 芳幸、林 祥介	幕張メッセ (JpGU-AGU Joint Meeting 2017 - 日本地球惑星科学連合)	2017年5月22日	国内
Study of flare prediction based on the critical condition of eruptive instability in the solar corona (口頭)	草野 完也、伊集 朝哉	幕張メッセ (JpGU-AGU Joint Meeting 2017 - 日本地球惑星科学連合)	2017年5月23日	国内
スーパーアースのマントル対流シミュレーション：惑星サイズ依存性 (口頭)	宮腰 剛広、亀山 真典、小河 正基	幕張メッセ (JpGU-AGU Joint Meeting 2017 - 日本地球惑星科学連合)	2017年5月25日	国内

Studies of Flare Prediction Based on the Magnetohydrodynamic Simulation and the Nonlinear Force-free Field Modeling of Solar Activity (口頭)	Kanya Kusano	The Bell Harbor Conference Center, Seattle, WA, USA (Hinode-11/IRIS-8 Science Meeting)	2017年5月30日	国外
マントル対流と地学現象 (口頭)	亀山 真典	名古屋大学 (流れと澱みを語る会)	2017年6月3日	国内
Role of near-surface layer in global dynamo (口頭)	H. Hotta	Eötvös University, Budapest, HUNGARY (Flux Emergence Workshop)	2017年6月12日	国外
Athena++による磁気流体シミュレーション (口頭)	富田 賢吾、岩崎一成、高棹 真介、奥住 聡、James M. Stone	名古屋大学 (ポスト「京」時代の天体形成シミュレーション研究会)	2017年6月26日	国内
大規模データの解析案：インヤン格子の場合を例として (口頭)	堀田 英之	名古屋大学 (ポスト「京」時代の天体形成シミュレーション研究会)	2017年6月26日	国内
Studies of flare prediction in PSTEP: Toward the physics-based prediction (口頭)	Kanya Kusano	Observatoire de Paris, Meudon, FRANCE (FLARECAST Science workshop)	2017年6月27日	国外
HaloスレッドとHalo関数を用いたMHDシミュレーションの高効率並列化 (口頭、査読有)	深沢 圭一郎、森江善之、曾我 武史、高見 利也、南里 豪志	神戸大学 (2017年ハイパフォーマンスコンピューティングと計算科学シンポジウム)	2017年6月28日	国内
超並列宇宙プラズマ粒子シミュレーションの研究 (口頭)	三宅 洋平	東京大学 (JHPCN学際大規模情報基盤共同利用・共同研究拠点第9回シンポジウム)	2017年7月14日	国内
“Theoretical study on the photodissociation of methanol in the interstellar medium” (ポスター)	M. Kayanuma, M. Shoji, Y. Aikawa, M. Umemura, Y. Shigeta	Strasbourg Convention + Exhibition Centre, Strasbourg, FRANCE (The 28th International Conference on Photochemistry)	2017年7月17日	国外
Development of High Resolution Jovian Magnetospheric Simulation (ポスター)	Keiichiro FUKAZAWA, Yuto KATOH	Suntec Singapore Convention & Exhibition Centre, SINGAPORE (The 14th AOGS Annual Meeting)	2017年8月8日	国外
Nonlinear Dynamics of an Eruptive Flux Tube (口頭)	井上 諭	Suntec Singapore Convention & Exhibition Centre, SINGAPORE (The 14th AOGS Annual Meeting)	2017年8月9日	国外
Electron-hybrid and MHD cross-reference simulations of whistler-mode chorus in the inner magnetosphere of Earth, Jupiter and Mercury (口頭・招待)	Yuto KATOH, Keiichiro FUKAZAWA, Manabu YAGI	Suntec Singapore Convention & Exhibition Centre, SINGAPORE (The 14th AOGS Annual Meeting)	2017年8月10日	国外
円盤進化・惑星形成研究の現状 (口頭)	井田 茂	神戸大学 (ポスト「京」萌芽的課題・計算惑星アプリケーション開発状況共有ワークショップ)	2017年8月12日	国内
「大規模N体計算で惑星を作る：サブ課題A惑星形成のこれまでとこれから」 (口頭)	小南 淳子	神戸大学 (ポスト「京」萌芽的課題・計算惑星アプリケーション開発状況共有ワークショップ)	2017年8月12日	国内
Athena++の開発状況について (口頭)	富田 賢吾	神戸大学 (ポスト「京」萌芽的課題・計算惑星アプリケーション開発状況共有ワークショップ)	2017年8月12日	国内

惑星内部ダイナミクスの3次元モデリング (口頭)	小河 正基、亀山 真典、柳澤 剛広、宮腰 孝寿	神戸大学 (ポスト「京」萌芽的課題・計算惑星アプリケーション開発状況共有ワークショップ)	2017年8月12日	国内
岩石惑星のマントル対流3次元シミュレーションに関するあれ (現状) やこれ (課題) や (口頭)	亀山 真典	神戸大学 (ポスト「京」萌芽的課題・計算惑星アプリケーション開発状況共有ワークショップ)	2017年8月12日	国内
三次元球面/球殻対流計算の科学: 惑星内部・ガス惑星・惑星大気へで実践 (口頭)	樫村 博基、八代 尚、西澤 誠也、富田 浩文、中島 健介、石渡 正樹、高橋 芳幸、林 祥介	神戸大学 (ポスト「京」萌芽的課題・計算惑星アプリケーション開発状況共有ワークショップ)	2017年8月12日	国内
三次元球面/球殻対流計算モデルの構築: 現状と課題 (口頭)	竹広 真一、石岡 圭一、佐々木 洋平、榎本 剛	神戸大学 (ポスト「京」萌芽的課題・計算惑星アプリケーション開発状況共有ワークショップ)	2017年8月12日	国内
ポスト京で太陽全体を取り扱うための取り組み (口頭)	堀田 英之	神戸大学 (ポスト「京」萌芽的課題・計算惑星アプリケーション開発状況共有ワークショップ)	2017年8月12日	国内
地球磁気圏・衛星環境の超並列シミュレーションに向けた高性能プラズマ計算コードの開発 (口頭)	三宅 洋平	神戸大学 (ポスト「京」萌芽的課題・計算惑星アプリケーション開発状況共有ワークショップ)	2017年8月12日	国内
原始惑星系円盤乱流とダスト成長 (口頭)	梅村 雅之	神戸大学 (ポスト「京」萌芽的課題・計算惑星アプリケーション開発状況共有ワークショップ)	2017年8月12日	国内
第一原理計算による星間分子の反応機構の解明 (口頭)	栢沼 愛	神戸大学 (ポスト「京」萌芽的課題・計算惑星アプリケーション開発状況共有ワークショップ)	2017年8月12日	国内
Numerical Modeling of Spacecraft Potential Modulations due to Time-Varying Plasma Wave Fields (口頭)	Yohei Miyake, Takeshi Kiriyama, Yuto Katoh, Hideyuki Usui	The Montreal Convention Center, Montreal, CANADA (32nd URSI General Assembly and Scientific Symposium)	2017年8月26日	国外
Integrated Modeling Studies in the Project for Solar-Terrestrial Environment Prediction (口頭)	Kanya Kusano	The Cape Town International Convention Centre, Cape Town, SOUTH AFRICA (IAPSO-IAMAS-IAGA Joint Assembly)	2017年8月29日	国外
太陽と音速抑制法と大規模計算 (口頭)	堀田 英之	千葉大学 (磁気流体プラズマで探る高エネルギー天体現象研究会)	2017年8月30日	国内
太陽のオーバーシュート層での小スケールダイナモについて (口頭)	堀田 英之	東京理科大学 (流体力学会年会2017)	2017年8月31日	国内
乱流中の微細渦構造と慣性粒子クラスタリングの関心のDNSデータ解析 (口頭)	櫻井 幹記、小林 直樹、石原 卓	東京理科大学 (流体力学会年会2017)	2017年9月1日	国内
Space-Earth Environmental Research as an Interdisciplinary Science (口頭)	草野 完也	京都大学 (The 8th International Symposium of Advanced Energy Science ~ Interdisciplinary Approach to Zero-Emission Energy~)	2017年9月5日	国内
惑星形成シミュレーションの現状と将来(招待、口頭)	牧野 淳一郎	神戸大学 (STEシミュレーション研究会 -太陽地球惑星複合システムのシミュレーション研究-)	2017年9月6日	国内

時間変動電場存在下でのプラズマ中 固体表面帯電現象の数値モデリング (口頭)	三宅 洋平、 桐山 武士、 加藤 雄 人、 臼井 英之	神戸大学 (STEシミュレーショ ン研究会 -太陽地球惑星複合シ ステムのシミュレーション研究 -)	2017年9月7日	国内
太陽磁気フラックスチューブの3次元 構造・安定性その非線形ダイナミク ス (口頭)	井上 諭	神戸大学 (STEシミュレーショ ン研究会 -太陽地球惑星複合シ ステムのシミュレーション研究 -)	2017年9月7日	国内
金星大気循環の高解像度シミュレ ーション (口頭)	櫻村 博基	神戸大学 (STEシミュレーショ ン研究会 -太陽地球惑星複合シ ステムのシミュレーション研究 -)	2017年9月7日	国内
メニーコア型スーパーコンピュータ 向け高効率Particle-in-Cell計算手 法の開発 (口頭)	三宅 洋平、 寸村 良樹、 木倉 佳 祐、 中島 浩	神戸大学 (STEシミュレーショ ン研究会 -太陽地球惑星複合シ ステムのシミュレーション研究 -)	2017年9月8日	国内
惑星磁気圏におけるホイッスラー モード・コーラス放射発生過程につ いての計算機実験 (口頭)	加藤 雄人	自然科学研究機構核融合科学研 究所 (プラズマシミュレータ シンポジウム2017)	2017年9月8日	国内
衝撃波圧縮による分子雲形成条件 (口頭)	岩崎 一成、 富田 賢吾、 井上 剛志、 犬塚 修一郎	北海道大学 (日本天文学会2017 年秋季年会)	2017年9月12日	国内
テイラープラウドマン状態を破る磁 場の役割 (口頭)	堀田 英之	北海道大学 (日本天文学会2017 年秋季年会)	2017年9月12日	国内
Performance Evaluation and Optimization of Magnetohydrodynamic Simulation for Planetary Magnetosphere with Xeon Phi KNL (口頭、査読有)	Keiichiro Fukazawa, Takeshi Soga, Takayuki Umeda, Takeshi Nanri	Savoia Hotel Regency, Bologna, ITALY (Parallel Computing Conference 2017)	2017年9月12日	国外
原始惑星系円盤乱流場中のダスト粒 子運動 : 非圧縮性乱流と圧縮性乱 流の比較 (口頭)	櫻井幹記、 古谷 眸、 小林直樹、 岡本直也、 石原 卓、 白石賢二、 梅村雅之	北海道大学 (日本天文学会 2017年秋季年会)	2017年9月13日	国内
乱流の直接数値計算を用いた原始惑 星系円盤中の岩石ダストの衝突付着 成長シミュレーション (口頭)	濱端 航平、 石原 卓、 白石 賢二、 梅村 雅之	北海道大学 (日本天文学会 2017年秋季年会)	2017年9月13日	国内
金星大気循環の高解像度シミュレ ーション (口頭)	櫻村 博基	理化学研究所計算科学研究機構 (The 120th AICS Cafe)	2017年9月13日	国内
Magmatic redistribution of heat producing elements and the thermochemical evolution of the lunar mantle (口頭)	Ogawa, Masaki	早稲田大学 (SELENE Symposium 2017)	2017年9月14日	国内
Understanding and Predicting the Onset of Solar Eruptions (口頭)	Kanya Kusano	Chengdu, CHINA (1st Asia- Pacific Conference on Plasma Physics)	2017年9月19日	国外
“Reaction mechanisms of iron- containing proteins elucidated using QM/MM calculations” (招 待、口頭)	M. Shoji, S. Yamasaki, M. Kayanuma, Y. Shigeta	熊本大学 (The 55th Annual Meeting of the Biophysical Society of Japan)	2017年9月19日	国内

Planetary-scale streak structures produced in a high-resolution simulation of Venus atmosphere (口頭)	Kashimura, H., N. Sugimoto, M. Takagi, Y. Matsuda, W. Ohfuchi, T. Enomoto, K. Nakajima, M. Ishiwatari, T. M. Sato, G. L. Hashimoto, T. Satoh, Y. O. Takahashi, and Y.-Y. Hayashi	Radisson Blu Hotel Latvija, Riga, LATVIA (European Planetary Science Congress 2017)	2017年9月19日	国外
「星間空間におけるアミノ酸生成と光不斉化についての量子化学的探究」(招待講演、口頭)	庄司 光男	筑波大学(天体形成論～過去・現在・未来～)	2017年9月21日	国内
High resolution calculations of solar dynamo (口頭)	堀田 英之	The Alfrid Krupp Institute for Advanced Study, Greifswald, GERMANY (MPPC Meeting 19th)	2017年9月22日	国外
高速回転する薄い球殻内の熱対流により生成される表層縞帯状構造の消滅(ポスター)	佐々木 洋平、竹広 真一、石岡 圭一、中島 健介、石渡 正樹、林 祥介	大阪大学(惑星科学会2017年秋季講演会)	2017年9月27日～29日	国内
地球型惑星最初期進化の惑星サイズ依存性(口頭)	小河 正基	大阪大学(惑星科学会2017年秋季講演会)	2017年9月29日	国内
高解像度金星大気シミュレーションで再現された惑星規模のストリーク構造(口頭)	櫻村 博基、杉本 憲彦、高木 征弘、松田 佳久、大淵 濟、榎本 剛、中島 健介、石渡 正樹、佐藤 隆雄、はしもと じょーじ、佐藤 毅彦、高橋 芳幸、林 祥介	大阪大学(惑星科学会2017年秋季講演会)	2017年9月29日	国内
原始惑星系円盤乱流中の微惑星成長過程の数値シミュレーション(ポスター)	石原 卓	計算科学研究センター25周年記念シンポジウム「計算科学の発展と将来」	2017年10月11日	国内
Model dependence of a QBO-like oscillation in a dry dynamical core experiment (口頭)	Kashimura, H., H. Yashiro, S. Nishizawa, H. Tomita, K. Nakajima, M. Ishiwatari, Y. O. Takahashi, and Y.-Y. Hayashi	京都大学(Joint SPARC Dynamics & Observations Workshop—QBOi, FISAPS & SATIO-TCS)	2017年10月13日	国内
Global MHD simulation of Jovian magnetosphere for observations and micro scale simulations (ポスター)	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	京都大学宇治キャンパス(地球電磁気・地球惑星圏学会 第142回総会及び講演会)	2017年10月16日	国内

Disappearance of surface banded structure produced by thermal convection in a rapidly rotating thin spherical shell (ポスター)	Takehiro, S., Y. Sasaki, K. Ishioka, K. Nakajima, M. Ishiwatari, and Y.-Y. Hayashi	Utah Valley Convention Center, Provo, UT, USA (The 49th Annual Division for Planetary Sciences Meeting)	2017年10月16日	国外
極域プラズマ観測衛星周辺の非対称電位構造に関する粒子シミュレーション (口頭)	三宅 洋平, Miloch Wojciech J., Pecseli Hans	京都大学宇治キャンパス (地球電磁気・地球惑星圏学会 第142回総会及び講演会)	2017年10月17日	国内
“An Enhanced Sampling Method for Searching Conformational Changes of Proteins and Supramolecules” (招待講演、口頭)	Yasuteru Shigeta	WorldHotel Grand Jiaying Hunan Hotel, Hunan, CHINA (22nd International Workshop on Quantum Systems in Chemistry, Physics and Biology)	2017年10月17日	国外
高速回転する薄い球殻内の熱対流により生成される表層縞帯状構造の消滅 (口頭)	佐々木 洋平、竹広 真一、石岡 圭一、中島 健介、石渡 正樹、林 祥介	京都大学 (第142回地球電磁気・地球惑星圏学会総会・講演会)	2017年10月18日	国内
宇宙環境変動を考慮した衛星帯電シミュレーション研究の現状と展望 (口頭)	三宅 洋平	京都大学 (地球電磁気・地球惑星圏学会 第142回総会及び講演会)	2017年10月19日	国内
Surface Hopping Simulation on the Photodissociation of Methanol (ポスター)	M. Kayanuma, M. Shoji, Y. Aikawa, M. Umemura, Y. Shigeta	つくば国際会議場 (CPMD2017 Workshop)	2017年10月19日	国内
高解像度金星大気シミュレーションで再現された惑星規模のストリーク構造 (口頭)	櫻村 博基、杉本憲彦、高木 征弘、松田 佳久、大淵 濟、榎本剛、中島 健介、石渡 正樹、佐藤隆雄、はしもとじょーじ、佐藤毅彦、高橋 芳幸、林 祥介	京都大学 (第142回地球電磁気・地球惑星圏学会総会・講演会)	2017年10月19日	国内
二相HIガスの圧縮による分子雲形成過程 (口頭)	岩崎一成、富田賢吾、井上剛志、犬塚修一郎	国立天文台三鷹 (ALMA Workshop 2017 “Star formation with ALMA: Evolution from dense cores to protostars”)	2017年10月26日	国内
太陽対流層の乱流と大規模流れ (口頭)	堀田 英之	北海道大学 (日本気象学会2017年度秋季大会)	2017年10月30日	国内
高解像度金星大気シミュレーションで再現された惑星規模のストリーク構造 (口頭)	櫻村 博基、杉本憲彦、高木 征弘、松田 佳久、大淵 濟、榎本剛、中島 健介、石渡 正樹、佐藤隆雄、はしもとじょーじ、佐藤毅彦、高橋 芳幸、林 祥介	北海道大学 (日本気象学会2017年度秋季大会)	2017年10月30日	国内
高速回転する薄い球殻内の熱対流により生成される表層縞帯状構造の消滅 (口頭)	佐々木 洋平、竹広 真一、石岡 圭一、中島 健介、石渡 正樹、林 祥介	北海道大学 (日本気象学会2017年度秋季大会)	2017年10月30日	国内

RBFを用いた球面螺旋節点上の浅水波モデル (口頭)	榎本 剛	北海道大学 (日本気象学会2017年度秋季大会)	2017年10月30日	国内
乾燥大気理想化実験におけるQBO的周期振動のモデル依存性 (口頭)	櫻村 博基、八代尚、西澤 誠也、富田 浩文、中島健介、石渡 正樹、高橋 芳幸、林 祥介	北海道大学 (日本気象学会2017年度秋季大会)	2017年11月2日	国内
太陽対流層の底から表面までの一貫した数値計算 (ポスター)	堀田 英之	コクヨホール (第4回「京」を中核とするHPCIシステム利用研究課題 成果報告会)	2017年11月2日	国内
Studies for the prediction of solar flares and CMEs in ISEE and PSTEP (口頭)	草野 完也	名古屋大学 (Korea-Japan Space Weather Workshop 2017)	2017年11月6日	国内
Recent development of solar dynamo model (口頭)	堀田 英之	京都大学 (The 4th Asia-Pacific Solar Physics Meeting)	2017年11月8日	国内
Project for Solar-Terrestrial Environment Prediction (PSTEP) (口頭)	草野 完也	京都大学 (The 4th Asia-Pacific Solar Physics Meeting)	2017年11月9日	国内
原始惑星系円盤の形成と初期進化 (口頭)	富田 賢吾	筑波大学 (宇宙生命計算科学連携拠点第3回ワークショップ)	2017年11月20日	国内
「星間分子の円偏光吸収特性から探るアミノ酸ホモキラリティ起源」、口頭	北澤 優也	筑波大学 (宇宙生命計算科学連携拠点第3回ワークショップ)	2017年11月20日	国内
「メタノールの光解離反応に対する第一原理シミュレーション」 (口頭)	栢沼 愛	筑波大学 (宇宙生命計算科学連携拠点第3回ワークショップ)	2017年11月20日	国内
球面螺旋を用いた浅水波モデル (口頭)	榎本 剛	京都大学防災研究所 (「様々な結合過程がもたらす異常気象の実態とそのメカニズム」に関する研究集会)	2017年11月20日	国内
Athena++による大規模宇宙磁気流体シミュレーション (口頭)	富田 賢吾、James M. Stone	姫路商工会議所 (Plasma 2017 シンポジウム)	2017年11月21日	国内
太陽磁気乱流シミュレーションの新展開 (口頭)	堀田 英之	姫路商工会議所 (Plasma 2017 シンポジウム)	2017年11月21日	国内
Development of Full-Multigrid Gravity Solver for Athena++ (口頭)	富田 賢吾	国立天文台三鷹 (CfCAユーザーズミーティング2017)	2017年11月29日	国内
二相中性水素原子ガスの圧縮による分子雲形成過程 (口頭)	岩崎 一成・富田 賢吾・井上 剛志・犬塚 修一郎	国立天文台三鷹 (CfCAユーザーズミーティング2017)	2017年11月29日	国内
距離基底函数を用いた球面螺旋節点上の浅水波モデル (口頭)	榎本 剛	富山大学 (第19回非静力学モデルに関するワークショップ)	2017年11月29日	国内
How can 3D convection model contribute to solar cycle prediction? (口頭)	堀田英之	名古屋大学 (Solar cycle 25 Prediction Workshop)	2017年11月30日	国内
シミュレーションで明らかにされつつある惑星形成過程 (口頭)	小南 淳子	神戸大学 (最新の天文学の普及を目指すワークショップ)	2017年12月1日	国内

A New Approach to Modeling Jupiter's Magnetosphere (ポスター)	Keiichiro Fukazawa, Yuto Katoh, Raymond J Walker, Tomoki Kimura, Fuminori Tsuchiya, Go Murakami, Hajime Kita, Chihiro Tao, Ken Takeshi Murata	New Orleans Ernest N Morial Convention Center, New Orleans, LA, USA (AGU Fall Meeting 2017)	2017年12月13日	国外
Effects of Electrostatic Environment on Charged Particle Transport near Lunar Holes (口頭)	Yohei Miyake, Masaki N. Nishino	New Orleans Ernest N Morial Convention Center, New Orleans, LA, USA (AGU Fall Meeting 2017)	2017年12月14日	国外
Study of Solar Flare Prediction Based on the Critical Condition of Double-Arc Instability (ポスター)	Kanya Kusano, Johan Muhamad, Naoyuki Ishiguro, Tomoya Iju, Yuki Asahi, Yuta Mizuno	New Orleans Ernest N Morial Convention Center, New Orleans, LA, USA (AGU Fall Meeting 2017)	2017年12月14日	国外
Evolution of the earliest mantle caused by the magmatism-mantle upwelling feedback: Implications for the Moon and the Earth (口頭)	Masaki Ogawa	New Orleans Ernest N Morial Convention Center, New Orleans, LA, USA (AGU Fall Meeting 2017)	2017年12月15日	国外
大規模惑星集積N体計算：これまでの成果と今後の展開 (口頭)	小南 淳子	神戸大学ポスト「京」萌芽的課題・計算惑星調査研究・準備研究フェーズ成果報告会)	2017年12月20日	国内
Athena++による自己重力磁気流体シミュレーション (口頭)	富田 賢吾	神戸大学ポスト「京」萌芽的課題・計算惑星調査研究・準備研究フェーズ成果報告会)	2017年12月20日	国内
SCALE-GMによる火星大気シミュレーションに向けて：進捗と課題 (口頭)	櫻村 博基	神戸大学ポスト「京」萌芽的課題・計算惑星調査研究・準備研究フェーズ成果報告会)	2017年12月20日	国内
火成活動とプレートテクトニクスの三次元モデリング：できた (口頭)	亀山 真典	神戸大学ポスト「京」萌芽的課題・計算惑星調査研究・準備研究フェーズ成果報告会)	2017年12月20日	国内
高解像度ガス惑星大気シミュレーションに向けて：スペクトル変換ライブラリ開発の進捗と課題 (口頭)	竹広 真一	神戸大学ポスト「京」萌芽的課題・計算惑星調査研究・準備研究フェーズ成果報告会)	2017年12月20日	国内
太陽対流層・太陽ダイナモ (口頭)	堀田 英之	神戸大学ポスト「京」萌芽的課題・計算惑星調査研究・準備研究フェーズ成果報告会)	2017年12月20日	国内
太陽嵐・磁気リコネクション (口頭)	井上 諭	神戸大学ポスト「京」萌芽的課題・計算惑星調査研究・準備研究フェーズ成果報告会)	2017年12月20日	国内
地球磁気圏 (口頭)	深沢 圭一郎	神戸大学ポスト「京」萌芽的課題・計算惑星調査研究・準備研究フェーズ成果報告会)	2017年12月20日	国内
第一原理計算による星間分子の反応機構 (口頭)	栢沼 愛	神戸大学ポスト「京」萌芽的課題・計算惑星調査研究・準備研究フェーズ成果報告会)	2017年12月20日	国内
原始惑星系円盤乱流とダスト成長 (口頭)	石原 卓、濱端航平、櫻井幹記、梅村雅之	神戸大学 (ポスト「京」萌芽的課題・計算惑星 調査研究・準備研究フェーズ成果報告会)	2017年12月20日	国内
太陽内部熱対流・ダイナモの最新理論 (口頭)	堀田 英之	東京大学 (第30回理論懇シンポジウム)	2017年12月27日	国内

「星間空間アミノ酸合成中間体のキラリティーに関する理論解析」(口頭)	重田 育照	京都大学(第5回キラル研究会)	2018年2月17日	国内
EUVST時代のコロナ磁場モデリングと系の不安定性評価(口頭)	井上 諭	京都大学(太陽研連シンポジウム「太陽研究の将来展望」)	2018年2月21日	国内
Predictability of the onset of solar eruptions(口頭)	草野 完也	京都大学(太陽研連シンポジウム「太陽研究の将来展望」)	2018年2月19日	国内
“Theoretical study on the alanine formation in interstellar space and the origin of homochirality”(ポスター)	Y. Kitazawa, M. Umemura, M. Shoji, M. Kayanuma, Y. Shigeta	University of Florida, Florida, FL, USA (59th Sanibel Symposium)	2018年2月21日	国外
距離基底函数を用いた球面螺旋浅水波モデル(口頭)	榎本 剛	京都大学防災研究所(平成29年度京都大学防災研究所研究発表講演会)	2018年2月21日	国内
活動領域12673の電磁流体力学モデリング(口頭)	井上 諭、Sung-Hong、Park	名古屋大学(PSTEP・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」第2回)	2018年2月26日	国内
太陽内部熱対流と磁場生成のシミュレーション	堀田英之	東京大学(第2回計算科学フォーラム)	2018年2月26日	国内
ダブルアーク不安定性の臨界条件に基づく太陽フレア予測の試みについて(口頭)	草野 完也、Johan Muhamad、石黒 直行、伊集 朝哉、井上 諭、伴場 由美	名古屋大学(PSTEP・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」第2回)	2018年2月26日	国内
プラズマ環境時間変動を考慮した衛星帯電モデリングに関する考察(ポスター)	三宅 洋平	名古屋大学(PSTEP・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」第2回)	2018年2月27日	国内
Simulation Development of Planetary Magnetosphere toward Exascale Computing Era(ポスター)	K. Fukazawa, Y. Kato, Y. Miyake and T. Nanri	東北大学(Symposium on Planetary Science 2018)	2018年2月27日	国内
スーパー地球のマントル対流シミュレーション:物性変化と断熱圧縮との相互作用の重要性(ポスター)	亀山 真典、山本真由美、木下 美布由、中村 早貴、村田 昌也	愛媛大学(第5回愛媛大学先進超高压科学研究拠点(PRIUS)シンポジウム)	2018年2月27日	国内
Simulation study of the nonlinear processes of whistler-mode chorus generation in the Earth's inner magnetosphere(口頭、招待)	Yuto Katoh	The Quinta da Marinha, Cascais, PORTUGAL (AGU Chapman Conference on Particle Dynamics in the Earth's Radiation Belts)	2018年3月6日	国外
Motion of inertial particles in high-Reynolds-number turbulence, 口頭(招待)	Takashi Ishihara, Naoki Kobayashi, Kei Enohata, Masayuki Umemura, Kenji Shiraishi	名古屋工業大学(NITech Lectures on Turbulence and Cloud)	2018年3月8日	国内
Solar Convection Simulation with Reduced Speed of Sound Technique(口頭)	堀田英之	早稲田大学(SIAM conference on Parallel Processing for Scientific Computing)	2018年3月10日	国内
Simulation Studies on Mantle Dynamics of Terrestrial Planets: Theoretical Backgrounds, Tools and Outcrops(口頭)	亀山 真典	早稲田大学(18th SIAM Conference on Parallel Processing for Scientific Computing)	2018年3月10日	国外

新規分子構造探索アルゴリズム (GLAS法) の提案 (口頭)	庄司 光男、常盤 恭樹、山崎 笙太郎、栢沼 愛、重田 育照	東京大学 (第7回日本生物物理学会関東支部会)	2018年3月13日	国内
星形成シミュレーションのこれまでとこれから (研究奨励賞受賞記念講演) (口頭)	富田 賢吾	千葉大学 (日本天文学会2018年春季年会)	2018年3月15日	国内
「衝突破壊プロセスを入れたN体計算における原始惑星の動径方向移動」 (口頭)	小南 淳子	千葉大学 (日本天文学会2018年春季年会)	2018年3月15日	国内
Development of Full-Multigrid Gravity Solver for Athena++ (口頭)	富田 賢吾、岩崎 一成、James M. Stone	千葉大学 (日本天文学会2018年春季年会)	2018年3月16日	国内
分子雲形成時に駆動される磁気乱流の性質、口頭	岩崎 一成、富田 賢吾、井上 剛志、犬塚 修一郎	千葉大学 (日本天文学会2018年春季年会)	2018年3月16日	国内
対流層の底から光球までを包括した三次元熱対流計算	堀田 英之	千葉大学 (日本天文学会2018年春季年会)	2018年3月16日	国内
月探査へのコメント (口頭)	小河 正基	神戸大学 (第3回 月火星着陸探査シンポジウム)	2018年3月16日	国内
Numerical simulation of solar global convection (口頭、招待)	堀田英之	東京大学 (Astero-seismology and its impact on other branches of astronomy)	2018年3月19日	国内
太陽フレアの開始機構 (口頭)	草野 完也	名古屋大学 (磁気圏ダイナミクス研究会)	2018年3月19日	国内
Predictability of the onset of solar eruptions (口頭)	草野 完也	名古屋大学 (Fundamental Aspects of Geophysical Turbulence III)	2018年3月21日	国内
Electron hybrid simulation of the whistler-mode chorus generation in the Earth's inner magnetosphere (口頭)	Yuto Katoh	Polar Geophysical Institute, Murmansk, RUSSIA (The 8th biennial VERSIM Workshop)	2018年3月22日	国外
Effective MHD Simulation of Global Planetary Magnetosphere with Various Supercomputer Systems (口頭)	深沢 圭一郎	東北大学 (27th Workshop on Sustained Simulation Performance)	2018年3月23日	国内
「大規模惑星集積N体計算の現状と今後」 (口頭)	小南 淳子	神戸大学 (ポスト「京」萌芽的課題・計算惑星 第二回公開シンポジウム)	2018年3月26日	国内
ポスト京時代の太陽対流層計算 (口頭)	堀田 英之	神戸大学 (ポスト「京」萌芽的課題・計算惑星 第二回公開シンポジウム)	2018年3月26日	国内
太陽面爆発現象とその影響の理解と予測に向けたシミュレーション研究 (口頭)	草野 完也	神戸大学 (ポスト「京」萌芽的課題・計算惑星 第二回公開シンポジウム)	2018年3月26日	国内
原始惑星系円盤の大域的な構造と進化の理解に向けて (口頭)	高棹 真介	神戸大学 (ポスト「京」萌芽的課題・計算惑星 第二回公開シンポジウム)	2018年3月26日	国内
星間空間における有機分子の生成・分解反応の第一原理計算 (口頭)	栢沼 愛	神戸大学 (ポスト「京」萌芽的課題・計算惑星 第二回公開シンポジウム)	2018年3月26日	国内
火星版SCALE-GMの開発: 高解像度非静力学火星大気シミュレーションに向けて (口頭)	櫻村 博基	神戸大学 (ポスト「京」萌芽的課題・計算惑星 第二回公開シンポジウム)	2018年3月26日	国内
火成活動とプレートテクトニクスの3次元モデリング: 岩石惑星マンツルの熱化学進化の解明に向けて (口頭)	亀山 真典	神戸大学 (ポスト「京」萌芽的課題・計算惑星 第二回公開シンポジウム)	2018年3月26日	国内

スペクトル変換ライブラリと回転球殻非弾性対流モデルの開発：高解像度ガス惑星大気シミュレーションに向けて（口頭）	竹広 真一	神戸大学（ポスト「京」萌芽的課題・計算惑星 第二回公開シンポジウム）	2018年3月26日	国内
微惑星形成過程解明のための乱流中ダストの衝突付着成長シミュレーション（口頭）	石原 卓、濱端 航平、櫻井 幹記、日比野 真彦、久野 僚介、梅村 雅之	神戸大学（ポスト「京」萌芽的課題・計算惑星 第2回 公開シンポジウム）	2018年3月26日	国内
Development of a general circulation model for (shallow) planetary atmospheres, DCPAM（口頭）	Yoshiyuki O. Takahashi	神戸大学（CPS/WTK Mini-Workshop on Planetary Atmospheres II）	2018年3月28日	国内
Modeling of streak structure observed by Akatsuki（口頭）	Kashimura, H.	神戸大学（CPS/WTK Mini-Workshop on Planetary Atmospheres II）	2018年3月29日	国内

2. 学会誌・雑誌等における論文掲載

掲載した論文（発表題目）	発表者氏名	発表した場所（学会誌・雑誌等名）	発表した時期	国内・外の別
Triggering Process of the X1.0 Three-ribbon Flare in the Great Active Region NOAA 12192	Bamba, Y., Inoue, S., Kusano, K., & Shiota, D.	The Astrophysical Journal, Vol. 838, No. 2, pp134-149	2017年4月	国外
Study on Precursor Activity of the X1.6 Flare in the Great AR 12192 with SDO, IRIS, and Hinode	Bamba, Y., Lee, K.-S., Imada, S., Kusano, K.	The Astrophysical Journal, Vol. 840, No. 2, pp116-128	2017年5月	国外
Magnetohydrodynamic Simulations for Studying Solar Flare Trigger Mechanism	Muhamad, J., Kusano, K., Inoue, S., & Shiota, D.	The Astrophysical Journal, Vol 842, No. 2, pp86-96	2017年6月	国外
Non-Potential Field Formation in X-Shaped Quadrupole Magnetic Field Configuration	Kawabata, Y., Inoue, S., and Shimizu, T.	The Astrophysical Journal, Vol. 842, No. 2, pp106-120	2017年6月	国外
多相星間媒質の磁気流体力学	岩崎一成	日本流体力学学会学会誌「ながれ」 Vol 36, No3, pp199-204	2017年6月	国内
Solar overshoot region and small-scale dynamo with realistic energy flux	H. Hotta	The Astrophysical Journal, Vol. 843, No. 1, pp52-63	2017年7月	国外
Double Arc Instability in the Solar Corona	Ishiguro, N., Kusano, K.	The Astrophysical Journal, Vol. 843, No. 2, pp101-108	2017年7月	国外
Large Scale Manycore-Aware PIC Simulation with Efficient Particle Binning	Nakashima, H., Y. Summura, K. Kikura, and Y. Miyake	Proc. IEEE International Parallel & Distributed Processing Symposium, Year 2017, pp202-212	2017年7月	国外
Numerical Simulations of a Sounding Rocket in Ionospheric Plasma: Effects of Magnetic Field on the Wake Formation and Rocket Potential	Darian, D, S. Marholm, J. J. P. Paulsson, Y. Miyake, H. Usui, M. Mortensen, and W. J. Miloch	J. Geophys. Res. Space Physics, Vol122, No. 9, pp9603-9621	2017年8月	国外
Spatial inhomogeneity of kinetic and magnetic dissipations in thermal convection	H. Hotta	The Astrophysical Journal, Vol. 845, No. 2, pp164-171	2017年8月	国外

Taylor problem and onset of plasmoid instability in the Hall-magnetohydrodynamics	Vekstein, G. and Kusano, K.	Physics of Plasmas, Vol. 24, No.10, id102116	2017年9月	国外
The effects of magmatic redistribution of heat producing elements on the lunar mantle evolution inferred from numerical models that start from various initial states	Ogawa, M.	Planet. Space Sci., Vol.151, pp43-55	2017年10月	国外
Improvement of solar-cycle prediction: Plateau of solar axial dipole moment	Iijima, H. ; Hotta, H. ; Imada, S. ; Kusano, K. ; Shiota, D.	Astronomy & Astrophysics, Vol.607, No.L2, pp1-4	2017年11月	国外
A theoretical study of the formation of glycine via hydantoin intermediate in outer space environment	M. Kayanuma, K. Kidachi, M. Shoji, Y. Komatsu, A. Sato, Y. Shigeta, Y. Aikawa, M. Umemura	Chem. Phys. Lett. 687, pp. 178-183	2017年11月	国外
Supercontinent cycle and thermochemical structure in the mantle: Inference from two-dimensional numerical simulations of mantle convection	Kameyama, M. and A. Harada	Geosciences, Vol.274, pp23-36	2017年12月	国外
Numerical experiments on thermal convection of highly compressible fluids with variable viscosity and thermal conductivity: Implications for mantle convection of super-Earths	Kameyama, M. and M. Yamamoto	Phys. Earth Planet. Inter, Vol.274, pp23-36	2018年1月	国外
Formation and Dynamics of a Solar Eruptive Flux Tube	Inoue, Satoshi, Kanya Kusano, Jörg Büchner, and Jan Skála	Nature Communications, Vol.9, id174	2018年1月	国外
Dependence of generation of whistler-mode chorus emissions on the temperature anisotropy and density of energetic electrons in the Earth's inner magnetosphere	Katoh, Y., Y. Omura, Y. Miyake, H. Usui, and H. Nakashima	J. Geophys. Res. Space Physics, Vol.123, No. 2, pp1165-1177	2018年1月	国外
Response of Jupiter's Aurora to Plasma Mass Loading Rate Monitored by the Hisaki Satellite During Volcanic Eruptions at Io	Kimura, T., Y. Hiraki, C. Tao, F. Tsuchiya, P. A. Delamere, K. Yoshioka, G. Murakami, A. Yamazaki, H. Kita, S. V. Badman, K. Fukazawa, I. Yoshikawa, M. Fujimoto	J. Geophys. Res. Space Physics, Vol.123, No.3, pp1885-1899	2018年2月	国外

Dust Coagulation Regulated by Turbulent Clustering in Protoplanetary Disks	Takashi Ishihara, Naoki Kobayashi, Kei Enohata, Masayuki Umemura, and Kenji Shiraishi	The Astrophysical Journal, Vol. 854, No.2, pp. 1-16	2018年2月	国外
A New Recurrence Formula for Efficient Computation of Spherical Harmonic Transform.	Ishioka, K.	Journal of the Meteorological Society of Japan, Vol. 96, No.2, pp241-249	2018年3月	国内
球面螺旋を用いた浅水波モデル	榎本 剛	平成29年度「異常気象と長期変動」研究集会報告, pp1-5	2018年3月	国内
Evaluation of Applicability of a Flare Trigger Model Based on a Comparison of Geometric Structures	Bamba, Yumi, and Kanya Kusano	The Astrophysical Journal, Vol.856, Issue 1, article id 43-53	2018年3月	国外
First-principle study of the formation of glycine-producing radicals from common interstellar species	A. Sato, Y. Kitazawa, T. Ochi, M.o Shoji, Y. Komatsu, M. Kayanuma, Y. Aikawa, M. Umemura, Y. Shigeta	Mol. Astrophys, Vol. 10, pp 11-19	2018年3月	国外

「太陽系外惑星(第二の地球)の誕生と太陽系内惑星環境変動の解明
(生命を育む惑星の起源・進化と惑星環境変動の解明)」

実施計画

平成30年3月26日
国立大学法人神戸大学
理学研究科 教授 牧野 淳一郎

更新履歴

第1版 平成28年11月30日

第2版 平成28年12月16日

「目標・期待される成果」について加筆

第3版 平成29年5月29日

必要計算資源量の記載を修正

第4版 平成29年12月22日

中間評価結果を踏まえて内容を更新（「4. 中間評価における指摘事項への対応状況」を加筆）

必要計算資源量の記載を修正

第4a版 平成30年1月22日

第4版における更新・加筆箇所を赤字で記載

第5版 平成30年2月2日

平成30年度の「京」の計算資源量の記載を修正（P. 10）

サブ課題Dの分担機関に岡山大学を追加（P. 10、19、21）

第5版における更新・加筆箇所は青字で記載

第6版 平成30年3月26日

別紙の平成30年度の所要経費を修正し青字で記載

目次

1. 実施概要	1
(1) 目的・意義	1
(2) 研究開発内容	1
(3) 目標・期待される成果	2
(4) 周辺領域への波及効果、課題全体における計算科学やシミュレーションの位置づけ	3
(5) 年次計画	5
(6) 実施体制	10
(7) 必要計算資源	10
2. 研究開発内容詳細	11
2-1. サブ課題A. 「惑星の起源の解明」	11
(1) 目的・意義	11
(2) 実施内容	11
(3) 目標・期待される成果	11
(4) 「京」でできていること、ポスト「京」でなければならないこと	12
(5) 実施体制	13
2-2. サブ課題B. 「惑星内部・表層のダイナミクスと進化」	13
(1) 目的・意義	13
(2) 実施内容	13
(3) 目標・期待される成果	14
(4) 「京」でできていること、ポスト「京」でなければならないこと	15
(5) 実施体制	16
2-3. サブ課題C. 「太陽活動による地球環境変動の解明」	16
(1) 目的・意義	16
(2) 実施内容	17
(3) 目標・期待される成果	17
(4) 「京」でできていること、ポスト「京」でなければならないこと	18
(5) 実施体制	18
2-4. サブ課題D. 「原始太陽系における物質進化と生命起源の探究」	19
(1) 目的・意義	19
(2) 実施内容	19
(3) 目標・期待される成果	19
(4) 「京」でできていること、ポスト「京」でなければならないこと	20
(5) 実施体制	20
3. 採択時の留意事項への対応状況	22
3-1. ポスト京利用に向けて、計算の大規模化等の利用準備の具体的なシナリオを明確にすること	22

3-2. 必要に応じて、計算機、アプリケーションの専門家の参画を検討すること	23
3-3. 重点課題9「宇宙の基本法則と進化の解明」との役割分担を明確にすること	23
4. 中間評価における指摘事項への対応状況	24
4-1. 目標の明確化について	24
4-2. 成果発表について	27
4-3. ポスト「京」での具体的な目標について	28
4-4. サブ課題間の連携等について	31

1. 実施概要

地球がどのように生まれ、どのようにして生命を育む惑星に進化したか、さらには現在及び将来の地球・太陽・太陽系の進化が人類社会にどのような影響を及ぼしうるかを解明するため、惑星科学・地球科学・宇宙化学/宇宙生物学分野のシミュレーション研究者が結集し、太陽のような星とそれが持つ惑星系の起源から形成された惑星の構造の進化、大気や表面の水圏の形成・進化、太陽活動の変化やその惑星表層への影響といった、実験では実現不可能な現象を大規模計算によるシミュレーションを使って研究し、国内外で進められている様々な観測・探査プロジェクトと連携して、惑星の起源・進化と惑星環境変動の解明を目指す。

(1) 目的・意義

計算機の性能向上を生かし、惑星科学研究ではまだ部分的なものにとどまっている大規模シミュレーションによる理解を推進し、国内外で進められている様々な観測・探査プロジェクトと連携して、惑星の起源・進化と惑星環境変動の解明を目指す。

本提案は、ポスト「京」の計算能力を生かした大規模シミュレーションと、近年急速に発展した星形成過程、惑星形成過程、系外惑星の観測、また太陽系内探査の成果を統合することで、惑星の起源・進化と惑星環境変動の解明することを目標とするものである。星形成・惑星形成過程の研究は我が国が大きな貢献をしている ALMA 望遠鏡の重要目標であり、系外惑星研究もすばる望遠鏡他国内・国外の観測施設で多くの研究者が取り組んでいる。さらに太陽系内探査は JAXA において「あかつき」・「はやぶさ 2」を始めとして多くの計画が実行中・準備中である。これらの観測や探査から得られる詳細なデータは、しかし、多くの場合進化のプロセスの一瞬を切り出したものであり、進化プロセスの全貌を理解することは理論やシミュレーションによって観測・探査の結果を再現することで初めて可能になる。また、観測や探査の結果は詳細かつ複雑なものとなっており、大規模・高精度な数値シミュレーションによって初めてその理解が可能になる。本提案は、このように、国内外で進められている様々な観測・探査プロジェクトと連携し、宇宙科学・惑星科学の重要課題の解決に貢献することで、我が国の科学的課題の解決に貢献し、国際的地位の向上に貢献する。

また、本提案は単に既存・進行中の探査計画と連携するだけでなく、将来の我が国の惑星探査計画が依って立つ土台となるという点で国家的見地から意義の高いものである。従来の惑星探査は欧米の主導のもとに行われてきた。このような状況を打開し、科学的価値の高い惑星探査を行うためには、惑星内部進化に対する独自の統一的視点を確立することが必須である。本提案はそのような独創的な視点を確立するためのものである。

太陽周期活動とその変動機構はガリレオ以来の近代天文学の歴史的課題である。太陽対流層の複雑な乱流を再現することがこれまで困難であったため、その謎を解くことができなかった。しかし、「京」を駆使した我々の研究 (Hotta et al. 2016, Science 参照) によって、ポスト「京」の計算能力を駆使すれば、この歴史的難問を初めて解くことが可能であることが強く示されている。さらに、太陽活動は地球環境変動や様々な社会インフラに大きな影響を与えることが指摘されており、その活動を予測することは科学的理解のみならず社会と経済に大きな貢献をするものである。

(2) 研究開発内容

惑星科学・地球科学・宇宙化学/宇宙生物学分野のシミュレーション研究者が結集し、惑星系の起源、

惑星の構造、大気や表面の水圏の進化、太陽活動の変化やその惑星表層への影響といった、実験では実現不可能な現象の大規模数値シミュレーションによる研究を可能にする計算アルゴリズム・計算コードを開発する。開発した計算コードを使い、ポスト「京」による大規模シミュレーションを実施し、惑星の起源・進化と惑星環境変動を解明する。

(3) 目標・期待される成果

目標：

星形成・原始惑星系円盤形成から微惑星、原始惑星、最終的な惑星形成にいたるまでの過程を融合した大規模計算を行い、太陽系の探査や系外惑星、星周円盤の観測データと比較することで、惑星の形成過程を明らかにする。様々なサイズの地球型惑星の内部進化と表層進化を統一的に理解する事を最終目的とし、地球型惑星の気候、内部進化、ガス惑星の内部進化を明らかにする。太陽磁場の起源である太陽対流圏の第一原理的シミュレーションにより黒点、太陽活動の長期変動の起源を明らかにし、さらに磁場からの太陽フレア、太陽風、その惑星間空間での伝搬、地球磁気圏との相互作用までを多階層シミュレーションにより統一的に明らかにする。惑星間ダスト上の分子生成の量子化学計算により、太陽系における物質進化を探求する。

アウトプット成果

・平成 29 年度終了時：

大域的な惑星形成計算を現在の 2 桁上の 1 億粒子で実現する。火成活動、ガス惑星、惑星大気の高解像計算を試行、実現する。太陽対流層・表面連結計算を実行し、大規模黒点の出現の再現、フレア再現シミュレーションの初期データとなるデータベースを構築する。氷ダスト上の網羅的解析を行い、ダスト表面反応の影響、温度などの環境効果、紫外線や宇宙線などの強い外場の影響の解明、また、原始惑星系円盤乱流中のダストの成長過程を非圧縮流体計算により探求する。

・本格実施フェーズ終了時：

現在の 3 桁上の 10 億粒子での惑星形成の多体計算を実現し、星間ダストから惑星までの集積過程を統一的に計算可能にする。火星大気全球高解像度計算、月の熱史・火成活動史の計算、ガス惑星の高分解能の計算を可能にする。太陽対流圏の磁場形成過程を再現すると共に、太陽フレアの発生条件となる磁場構造を明らかにし、地球磁気圏環境の変動のシミュレーションを可能にする。励起状態量子化学計算の大規模並列化・チューニングを行い、ポスト京での大規模計算を可能にする。

・ポスト「京」運用開始 5 年後：

1-10 億粒子規模の惑星形成の数値シミュレーションを多数実行し、惑星形成モデルを構築し、観測されている系外惑星系の多様性の起源を明らかにする。大規模計算から火星の全球ダストストーム発生の謎に迫り、月の熱史・火成活動史への予言、ガス惑星の帯状流形成モデルの提案を行う。太陽表面を含んだ太陽対流層の計算を行い、黒点の自発的生成過程を明らかにする。磁気嵐における人工衛星の帯電過程を衛星の形状や表面素材の影響を正確に取り入れて再現する。原始太陽系における有機分子生成の第一原理計算を世界に先駆けて実現する。

アウトカム成果

・ポスト「京」運用開始5年後：

円盤と系外惑星の観測データを整合的に説明する一般的惑星形成モデルを完成させる。月の熱史・火成活動史を予言し、更なる探査計画を提案する。ガス惑星の深部循環と表層循環とを統合した帯状流形成モデルの可能性を提案する。小規模対流、ダストデビルから大循環に至る火星大気運動を表現し、全球ダストストーム発生之谜に迫る。黒点の起源に迫り、太陽周期に関する知見を得る。観測データに基づくフレアの再現を行い、その発生予測に貢献する。磁気嵐における衛星帯電の原因を明らかにする。宇宙における分子進化予測手法を確立し、また、原始太陽系におけるダスト成長と有機分子生成過程の関係を明らかにする。

・ポスト「京」運用開始10年後：

地上超大型望遠鏡による、系外惑星系のハビタブル・ゾーンに存在する地球型惑星の大気観測や生命存在を示すバイオマーカー観測の議論に繋げる。地球型惑星の進化計算やガス惑星の構造進化計算に迫る。地球型惑星大気の大気対流と大循環の多様性に迫る高解像度計算を実現する。太陽活動の予測可能性を高める。太陽フレアの発生とその影響としての衛星帯電を動的に予測する。今後 ALMA 望遠鏡等により直接検出される可能性のある、系外惑星系の有機分子生成過程・太陽系以外での生命の発生の可能性を探究する。

(4) 周辺領域への波及効果、課題全体における計算科学やシミュレーションの位置づけ

惑星科学、特に観測は飛躍的に進歩した。観測からの膨大なデータを整合的に解釈・理解するためには、第一原理からの信頼できる理論シミュレーションが必須となっている。一方、従来の惑星形成過程・星形成過程のシミュレーションは、あるシナリオからその一部を切り出すもので、現実の惑星の多様性を理解するには不足だった。ポスト「京」が可能にする大規模計算は、特定のシナリオによらない惑星形成・進化シミュレーションを実現し、観測の理解に大きく貢献する。また、惑星大気への理解にも大きく貢献する。太陽活動の理解については、「京」を使って太陽の対流圏の全球高解像度計算に世界に先駆けて成功し、国際的にも注目される成果をあげている。是非ともこの成果を発展させ、観測プロジェクトと連携し、太陽活動の変動の理解につなげていく必要がある。アストロバイオロジーに対して、理論的理解の枠組みを与えるため、本課題では、ダストの表面上での有機分子反応の第一原理計算から、有機分子の起源に迫る。

世界を先導する科学的ブレークスルーとして期待できる成果には、以下があげられる。

- 世界に先駆けて星形成から惑星形成にいたる過程の、シミュレーションにベースをおいた、確実な理解を構築することで、観測・探査の結果と合わせ、惑星の起源・多様性の統一的な理解につながる
- 地球を含む惑星の形成後の内部構造の進化を大規模な3次元計算に基づいて初めて明らかにすることで、惑星進化の一般理論を構築する。さらに、大気の大気構造・運動についても明らかにする
- 世界に先駆けて太陽活動の、黒点の11年周期の変動を含む長期変動のメカニズムを解明し、さ

らに太陽フレアの発生メカニズムを解明し、その地球までの伝搬のシミュレーションを行う

- 原始惑星円盤内のダスト上での物質の化学進化を大規模な量子化学計算に基づいて初めて明らかにし、生命の起源を含む有機分子の形成過程を解明する

科学的ブレークスルーを生み出す上で、観測研究者との連携が重要になる。本課題を通じて、サブ課題ごとに以下のような連携体制構築を計画している。

- サブ課題Aにおいては、系外惑星探査の様々なプロジェクトと共同していく。サブ課題Aの拠点である東工大 ELSI はそのような連携のハブとなっており、そのネットワークを通して連携していく。
- サブ課題Bにおいては、JAXA の探査プロジェクトとの連携を進めていく。サブ課題Bの拠点である 神戸大 CPS は JAXA との連携協定のもと惑星探査について密接な協力関係にあり、それを通じた連携を進める。
- サブ課題Cにおいては、最高精度で太陽表面を観測できる「ひので」衛星、打ち上げが予定されている地球放射線帯を最も精密に測定する ERG 衛星などの精密データに基づくデータ駆動型シミュレーションを、ポスト「京」を利用することにより初めて実現し、太陽活動の影響予測を実現する。
- サブ課題D においては、「はやぶさ2」「たんぼぼ計画」等と連携していく。
- また、課題全体としては、理研 AICS のフラッグシップ 2020 プロジェクト及び研究部門と密接な連携をとり、アプリケーションの開発を推測していく。

各サブ課題において、「京」の能力を大幅に超える計算能力を必要としている。サブ課題Aにおいては、「京」で可能になった数十万粒子から自由度を3桁以上飛躍的に引き上げることを計画しており、これはアルゴリズムの改善とポスト「京」の計算能力をあわせて初めて可能になる。サブ課題Bでは、理研 AICS で開発されている気候シミュレーションコード NICAM を利用し、高い効率での大規模計算を実現する。サブ課題Cでは、亜音速流に対して従来使われてきた非圧縮近似ではなく、音速抑制法による陽解法を実現したことで、「京」で従来の最大規模の計算を格子点数で2桁以上上回り、実行効率でも24%と高い効率を実現した。ポスト「京」でもさらにアルゴリズムの改良を進め、高い効率を実現する。サブ課題Dでも、同様に計算も効率化をはかる。

(5) 年次計画

課題全体	中間目標 (平成29年度)	本課題に関するアプリケーション開発・研究について、開発計画 (研究開発内容、目標・期待される成果、実施体制、必要計算資源、工程表、所要経費等) の詳細の策定を再委託先の各サブ課題代表機関・分担機関と共同で行う。また、策定した開発計画の実現可能性を調査するとともに、実施体制構築の着手・研究等を進める。課題全体の連携を密にし、これによってサイエンスと問題解決の手法の両面で相互に協力しながら研究を推進する。理研 AICS とも連携し、ポスト「京」向けのアプリケーションの開発・最適化を行う。
	最終目標 (平成31年度)	調査研究・準備研究フェーズで策定した研究開発計画に基づいて、惑星科学・地球科学・宇宙化学/宇宙生物学分野において大規模数値シミュレーションによる研究を可能にする計算アルゴリズム・計算コードを開発する。開発した計算コードを使い、ポスト「京」による大規模シミュレーションを実施し、惑星の起源・進化と惑星環境変動の解明へ向けた研究を行う。プロジェクトで得られた成果については積極的に公表し、今後の展開に資する。

サブ課題名 (分担機関・責任者)	調査研究・準備研究フェーズ		本格実施フェーズ	
	平成28年度	平成29年度	平成30年度	平成31年度
サブ課題A 惑星の起源の解明 (東京工業大学・井田茂)	<p>(目標) 観測データを精査しながら、星・惑星形成過程の現状を理解し、研究計画策定する</p> <p>(実施内容) 研究体制構築をすすめ、京での成果を踏まえて、ポスト「京」で目指す、具体的科学目標を設定する。</p>	<p>(目標) 星・惑星形成の高速シミュレーションコードを開発し、最適化を進める。</p> <p>(実施内容) 重力N体計算コード、非理想磁気流体コードの開発を進める。また、「京」を用いて、コードの最適化を進める。</p>	<p>(目標) 高精度の星形成シミュレーションと大粒子数の惑星形成シミュレーションコードを実施する。</p> <p>(実施内容) 大域的重力N体シミュレーションおよび非理想磁気流体シミュレーションを実行する。また、観測データとの比較検討を始める。</p>	<p>(目標) 星形成過程と同時進行させながら、星間ダストから惑星までの集積過程を統一的に計算し、観測されている系外惑星系の多様性の起源を明らかにする。</p> <p>(実施内容) 大域的重力N体シミュレーションおよび非理想磁気流体シミュレーションを実行する。また、観測データとの比較検討を進行する。</p>

<p>サブ課題B 惑星内部・表層のダイナミクスと進化（神戸大学・林祥介）</p>	<p>(目標) 球殻領域での高分解能大規模流体計算の可能性を検討し、岩石惑星モデル、惑星大気モデル、ガス惑星モデルの実装計画を策定し、「京」上での試験計算を実現する。</p> <p>(実施内容) マントルモデルおよび大気モデル改良開発と必要となる基礎ルーチンの開発。実装実験に検証と最適化検討。</p>	<p>(目標) 岩石惑星モデル、惑星大気モデル、ガス惑星モデルについて、それぞれ必要となる基礎ルーチンの開発ならびに「京」上での大規模計算の実装実験を実施する。</p> <p>(実施内容) マントル対流モデルへの火成活動の導入。大気大循環モデルにおける現実火星状態の再現性検証。球面調和関数ルーチンの最適化。</p>	<p>(目標) 岩石惑星モデル、惑星大気モデル、ガス惑星モデルについて、それぞれの科学的目標を狙える計算の実現を目指す。</p> <p>(実施内容) マントルおよび大気に関する高解像度実験の実現。月のマントル進化モデルの確立。火星全球ダストストーム発生条件の理解。</p>	<p>(目標) 岩石惑星モデル、惑星大気モデル、ガス惑星モデルについて、それぞれの大規模高解像度計算を実現し、科学的成果を獲得する。</p> <p>(実施内容) 月形成過程への制約の解明。木星型惑星表層縞状ジェット流の成因を解明。より広い惑星パラメーターへの計算対象拡張。</p>
--	---	--	--	--

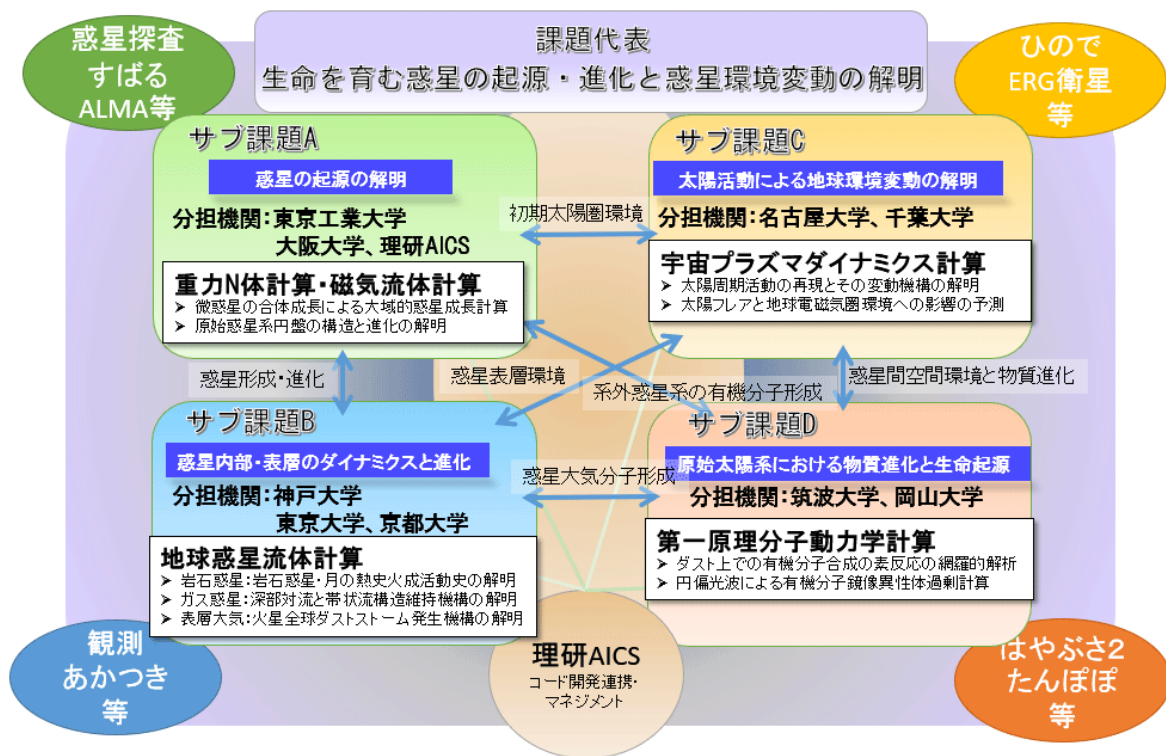
<p>サブ課題C 太陽活動による地球環境変動の解明 (名古屋大学・草野完也)</p>	<p>(目標) 太陽対流層、太陽活動領域、磁気圏、衛星環境モデルの開発と初期データ整備</p> <p>(実施内容) 「京」を使って太陽対流層モデルの計算を行うと共に、フレアモデル・磁気圏モデル・衛星環境モデルの開発を行い、初期データを整備する。</p>	<p>(目標) 太陽対流層、太陽活動領域、磁気圏、衛星環境モデルの初期実験</p> <p>(実施内容) 「京」を使って太陽対流層モデルの計算を継続すると共に、太陽周期変動の機構を探ると共に、フレア・磁気圏・衛星環境の初期実験を実施する。</p>	<p>(目標) 太陽対流層、太陽活動領域、磁気圏、衛星環境モデルの計算とポスト「京」モデル開発</p> <p>(実施内容) 太陽黒点形成の実験コードを開発すると共に、フレア再現・超高精度磁気圏モデル実験・衛星環境モデルの計算を行う。</p>	<p>(目標) 太陽対流層、太陽活動領域、磁気圏、衛星環境ポスト「京」モデルによる予測可能性の検討</p> <p>(実施内容) 太陽黒点形成の実験を行うと共に、フレア再現・超高精度磁気圏モデル実験・衛星環境モデルの計算結果の解析を行い、目的を達成する。</p>
--	--	--	--	--

<p>サブ課題D 原始太陽系における物質進化と生命起源の探究 (筑波大学・梅村雅之)</p>	<p>(目標) 量子力学・分子力学混合法 (QM/MM法) および励起状態分子動力学計算 (Surface Hopping) 法コードをメニーコア・アーキテクチャに最適化する。</p> <p>(実施内容) 「京」とCOMAを用いた計算に基づき、大規模な第一原理分子動力学計算に向けた研究計画を策定し、実施体制を構築する。</p>	<p>(目標) ダスト形成過程の計算を実行し、ダスト上の有機分子合成の解析により、星間空間での反応過程を理論的に明らかにし、反応ネットワークを構築する。</p> <p>(実施内容) 「京」とCOMAを用いて、基底状態量子化学計算により、ダスト上での有機分子合成の素反応の網羅的解析を行う。</p>	<p>(目標) アミノ酸および考え得るアミノ酸前駆体に関して、円二色性の量子力学計算を行い、鏡像異性体過剰を引き起こす反応経路を明らかにする。</p> <p>(実施内容) ポストT2Kを用いて、円偏光波による有機分子鏡像異性体過剰の大規模な第一原理分子動力学計算を行う。</p>	<p>(目標) ダスト形成過程の大規模計算を実行し、ダスト成長過程と有機分子形成過程ならびに鏡像異性体過剰の反応経路を整合的に明らかにする。</p> <p>(実施内容) ポストT2Kを用いた計算をまとめ、これに基づき、ポスト「京」での大規模な第一原理分子動力学計算の計画を策定する。</p>
--	--	--	---	---

(6) 実施体制

本提案は、サブ課題A-Dからなる。これらがサイエンスと問題解決の手法の両面で相互に協力しながら研究を進めていく。このため、課題全体の定期的な会合、研究連絡会等を設け、密に連携していく。また、AICS とも連携し、ポスト「京」 向けのアプリケーションの開発・最適化を進めていく。

サブ課題Aでは、星形成計算から原始惑星系円盤までを阪大、原始惑星系円盤からの惑星形成を東工大が担当し、東工大 ELSI を中心に系外惑星の観測プロジェクトと連携していく。サブ課題Bでは地球型惑星気候を神戸大、ガス惑星を京大、固体惑星進化を東大が担当、神戸大 CPS を中心にあかつき等観測プロジェクトと連携する。サブ課題Cでは太陽対流層の計算を千葉大、表層・フレアを名大が担当し、ひので等観測プロジェクトと連携する。サブ課題Dは星間有機分子生成の大規模な第一原理分子動力学計算を筑波大、乱流中のダスト成長過程を岡山大が担当し、「はやぶさ2」等と連携する。



(7) 必要計算資源

「京」の計算資源量

(単位：ノード時間/年)

H28 年度	H29 年度	H30 年度	H31 年度
4, 323, 188	3, 027, 150	3, 632, 580	18, 750, 000

「京」以外の計算資源量

(単位：ノード時間/年)

H28 年度	H29 年度	H30 年度	H31 年度
580, 000	1, 630, 000	4, 340, 960	4, 621, 280

2. 研究開発内容詳細

2-1. サブ課題A. 「惑星の起源の解明」

(1) 目的・意義

1995年以來の系外惑星の観測の急速な進展により、太陽系外の惑星系は多様な姿をしていることがわかり、ケプラー宇宙望遠鏡などによる近年の観測結果は、太陽型星の半数には、星近傍に地球型惑星が存在していることを示している。惑星系の多様性は、初期状態である原始惑星系円盤の力学的・熱的構造に多様性があり、円盤との重力相互作用による惑星軌道移動など、大域的な過程が惑星形成において重要な役割をはたしていることを示す。また、地球型惑星の遍在性から、惑星表面に海が存在し得る軌道範囲（ハビタブル・ゾーン）に地球質量程度の惑星「第二の地球」が多数存在することは確実である。今後「第二の地球」の観測が進むことは確実で、2020年代中盤完成予定の地上超大型望遠鏡 TMT、E-ELT は「第二の地球」の大気観測を行う予定で、生命存在を示すバイオマーカーの観測も期待されている。

本研究では、力学、輻射輸送、磁気流体を組み合わせて、原始惑星系円盤の構造と進化およびそこでの惑星形成の大域的な大規模シミュレーションのコード開発と実行を行い、一般的な惑星系の統一的な形成理論を構築し、「第二の地球」がどのような確率で存在し、またその惑星にどのような多様性が存在するのかを予測することを目的とする。

(2) 実施内容

東京工業大学では、微惑星の衝突合体による惑星形成の1億以上の粒子を用いた大域的N体シミュレーションの開発・最適化を理研 AICS と共同で行い、多数のシミュレーションを実行する。単なる粒子の合体成長だけではなく、円盤ガスの惑星への集積による木星型惑星の形成や、円盤との重力相互作用による惑星軌道移動をモデル化して入れる。木星型惑星の重力は惑星系全体に及び、軌道移動は十分に速いので、惑星系全体を計算領域とした大域的計算を行う。円盤条件が異なれば、惑星材料物質も異なり、形成される惑星の配置が変わる。特に微惑星集積で形成される固体惑星がある閾値を越えると、大量のガスが流入して、質量が数十倍の木星型惑星が形成され、惑星系の姿が大きく変わる。さらに、惑星軌道移動は円盤の熱的・力学的状態に大きく左右される。

大阪大学では、非理想 MHD 効果や円盤ガスの電離度の進化まで考慮した、円盤の大域的高解像度シミュレーションのコード開発を行い、多数のシミュレーションを行うことで、円盤の初期パラメータと時間進化を制約して東京工業大学の計算と連携する。

さらに東京工業大学では、衝突での破片生成を入れたN体シミュレーションを行なう。ダスト生成は円盤ガスの電離度を変え、円盤の構造や進化に影響する。大阪大学と連携して、統合的な惑星形成と円盤進化のモデルを構築する。

(3) 目標・期待される成果

アウトプット成果

・平成29年度終了時：

構築された原始惑星系円盤モデルを使って、本格的な稼働を始めたチリの大型電波干渉計 ALMA による円盤観測データを解釈する。大域的な惑星形成計算を現在の2桁上の1億粒子で実現する。

・ **本格実施フェーズ終了時：**

構築された原始惑星系円盤モデルを使って、大型電波干渉計 ALMA による円盤観測データを使って円盤モデルを較正し、この円盤モデルのあり得るパラメーター範囲のもとに、大域的な惑星形成計算を現在の 3 桁上の 10 億粒子で実現する。

・ **ポスト「京」運用開始 5 年後：**

観測と統合的な、星間雲からの原始惑星系円盤の形成進化の一般的モデルを構築する。大域的な惑星形成計算を多数実行し、一般的な惑星形成モデルを構築し、観測されている系外惑星系の多様性の起源を明らかにする。

アウトカム成果

・ **ポスト「京」運用開始 5 年後：**

進展が続く系外惑星の観測データのもとに惑星形成モデルを較正し、円盤モデルへのフィードバックをかけながら、円盤と系外惑星の観測データを統合的に説明する一般的惑星形成モデルを完成させる。

・ **ポスト「京」運用開始 10 年後：**

2020 年代中盤完成予定の地上超大型望遠鏡 TMT、E-ELT による、系外惑星系のハビタブル・ゾーンに存在する地球型惑星の大気観測や生命存在を示すバイオマーカーの観測の議論へつなげる。

(4) 「京」でできていること、ポスト「京」でなければできないこと

「京」では、惑星形成多体計算向けコード Kninja を開発し、世界初の 1000 ノードを超える惑星形成多体計算に成功、30 万粒子程度までの計算を可能にし、前例のなかった大域計算を行うことができた。ポスト「京」では、アルゴリズムの改良も行うことでこの 1000 倍程度、数億粒子の計算での大域惑星形成過程を世界で初めて明らかにする。星形成の計算コードは「京」での大規模利用の実績はまだないが、天文台の Cray XC30 等の大規模並列計算機でよいスケーラビリティを示す Athena++ コードを米国と共同で課題実施者が開発しており、ポスト「京」での 10 億格子点・1 億時間ステップ程度の計算を行う計画である。これは 1 モデルで「京」で 1 週間程度の計算となり、多数行うことは「京」では不可能だが、ポスト「京」では現時点的な資源量で実行可能である。これにより、原始惑星円盤の構造と進化を明らかにする。

(5) 実施体制

星形成過程と同時進行させながら、星間ダストから惑星までの集積過程を統一的に計算可能にすることがサブ課題Aの目標である。星形成計算から原始惑星系円盤までの部分のシミュレーションは阪大を中心に推進し、原始惑星系円盤内での惑星形成のシミュレーションは東工大を中心に推進する。相互に原始惑星系円盤を接点として情報交換を行い、統一的なモデルを構築する。コード開発においては、理研 AICS と共同する。統一モデルを使って、東工大 ELSI を中心にして、ALMA による原始惑星系円盤の観測やすばるによる系外惑星の観測プロジェクトと連携していく。



2-2. サブ課題B. 「惑星内部・表層のダイナミクスと進化」

(1) 目的・意義

太陽系探査の蓄積、惑星形成論の進展、物質科学・地質学的知見の集積により、地球・月・惑星等の形成進化の解明が期待され、一方、天文学的観測の発展が実現した数多の太陽系外惑星の発見は惑星の可能な多様性の掌握を要請しつつある。これらの期待や要請に、連続体力学に基づく数値シミュレーションを対峙させることは科学的課題として重要であると同時に、探査と天文観測の企画立案において不可欠であり、それを担える体制の構築と人材の育成は我が国では喫緊の課題である。

本サブ課題では、惑星内部と表層の力学シミュレーションの実現を目指し、そこで必須である超高速大規模計算機の活用を試行する。球面・球殻での地球惑星流体計算をキーに技術連携可能な研究者を分野横断的に組織し、宇宙地球科学で専門分化した知見の再結集を要する惑星進化・多様性シミュレーション分野を確立し、探査・観測の基盤となすことを目指す。

(2) 実施内容

(i) 岩石惑星として地球型（岩石）惑星の火成活動・マントル対流系の三次元球殻モデル、(ii) ガス惑星として木星型（ガス）惑星の全球気象学～深部対流から表層ジェット流まで、(iii) 惑星大気として地球型惑星の気象・気候～火星全球ダストストームをテーマに選び、数値的表現能力を探索しその理解を得ることを通じて、超高速大規模計算の可能性を探索。

(i) 岩石惑星：

マグマの生成移動モデルを開発しマントル対流モデル ACuTEMan に実装する。Yin-Yang 分割を適用して高効率の球殻領域計算を実現する。矩形領域でマグマモデル化を検証した後、球殻領域で月の

マントル進化計算を行う。さらに、リソスフェア破壊・プレート境界生成モデルを開発導入して、火星やプレートテクトニクスが生じている地球等に適用する。

(ii) ガス惑星：

超高次球面調和関数変換のための新たな計算スキームを開発、並列化効率向上の可能性を追及・実証する。これを汎用化し SPMODEL に実装、全球超高分解能回転球殻熱対流モデルを構築、ガス惑星の深層・表層同時計算を実現して、縞状風構造の解明を目指す。

(iii) 惑星大気：

「京」で経験を積み重ねてきた二十面体非静力学大気力学コア (SCALE 力学コア) を基に、別途構築してきた火星大気物理過程を導入することにより、高い並列化効率が期待できる非静力学全球火星大気モデルを構築し、熱対流とそれに伴う渦生成を陽に表現する全球高解像度計算を実現する。

(3) 目標・期待される成果

アウトプット成果

・平成 29 年度終了時：

(i) 岩石惑星：

火成活動のモデル化の完成、マントル対流計算モデルの 3 次元化とそこへの火成活動モデルの実装、これを用いた高解像計算の試行。

(ii) ガス惑星：

球面調和関数変換ルーチンの開発と高解像度化にともなう性能試験の実施、その球殻対流モデルへの実装と高解像計算の試行。

(iii) 惑星大気：

SCALE-GM での表面重力、大気圧等の火星化を、「京」での試行計算を実施し、順次実現、必要な改良を施し、火星環境を念頭においた流体環境での力学的高解像度計算を実現。

・本格実施フェーズ終了時：

(i) 岩石惑星：

動径方向 120 層の高解像度計算で、火成活動を陽にとりこんだ月の 3 次元球殻領域マントル対流計算を行う。

(ii) ガス惑星：

全球超高分解像度球殻計算を実現し、ガス惑星全体を水平解像度 0.2 度、鉛直 128 層で表現する全球計算を行なう。

(iii) 惑星大気：

火星の放射、ダスト循環を設計導入し火星大気化を完了する。全球を水平解像度 800m、鉛直 200 層で表現する全球計算を行う。

・ポスト「京」運用開始 5 年後：

(i) 岩石惑星：

火星活動を陽に取り込んだ 3 次元球殻領域マントル対流計算モデルの 45 億年間 (月の全歴史) 積分

を実現、さらに、惑星サイズを変えるパラメーター計算を実現する。

(ii) ガス惑星：

10 万惑星日以上の高解像度全球ガス惑星計算を実現し、自転角速度等の依存性をしらべるパラメーター計算に着手する。

(iii) 惑星大気：

高解像度火星大気の 60 火星日間（約 1/12 火星年）以上の積分を実施する。

アウトカム成果

・ポスト「京」運用開始 5 年後：

(i) 岩石惑星：

唯一 40 億年前の状態を保存する重力天体である月の熱史・火成活動史を予言し、探査データによりモデルを検証、更なる探査計画を提案する。

(ii) ガス惑星：

小規模不安定から渦へのエネルギー注入を陽に表現すると同時に、深部循環と表層循環とを統合した帯状流形成モデルの可能性を世界で初めて提案する。

(iii) 惑星大気：

小規模対流、ダストデビルから大循環に至る火星大気運動を表現し、多様なダスト現象の観測との比較検証を経て全球ダストストーム発生の謎に迫る。

・ポスト「京」運用開始 10 年後：

(i) 岩石惑星：

プレートテクトニクス表現の実現により、大型の惑星（地球、系外地球型惑星）の進化計算に迫る。

(ii) ガス惑星：

放射過程ならびに物質過程を導入し、太陽系あるいは太陽系外のガス惑星の構造進化の議論に資する計算を実現する。

(iii) 惑星大気：

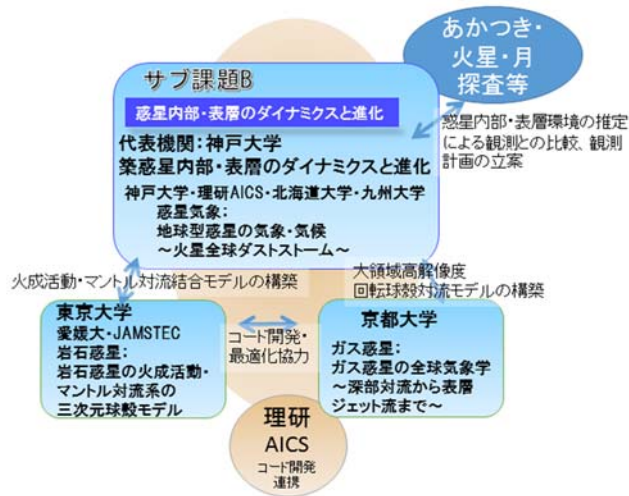
モデルを順次拡張し、「あかつき」探査との対峙が期待される金星大気の対流解像全球循環計算を目指すとともに、太陽系あるいは太陽系外の地球型惑星大気の対流と大循環の多様性に迫る高解像度計算を実現する。

(4) 「京」でできていること、ポスト「京」でなければならないこと

「京」での実績はないが、「地球シミュレータ」での計算では大きな困難に遭遇した。(i) 岩石惑星では火成活動が短い時間刻みを要求し計算は 2 次元に限定された。(ii) ガス惑星では極めて長時間の計算が必須であるため解像度が限定された。(iii) 惑星大気では静力学モデルの限界に直面した。ポスト「京」により、(i) では 3 次元計算が、(ii) では微細対流と全球的構造を両立する超高解像度長時間計算が、また、(iii) では、「京」での理研 AICS チームの世界最先端の地球大気非静力学全球大循環計算を土台に非静力学計算がそれぞれ可能となる。

(5) 実施体制

サブ課題全体として大規模高解像度球殻流体計算に関するノウハウを共有しつつ、岩石惑星計算は東京大学が、惑星大気計算は神戸大学が、ガス惑星計算は京都大学が、それぞれ中心になって設計と開発、実装実験を進める。「京」上の大規模計算に関するノウハウは、地球大気計算において豊富な経験を持つ理研 AICS グループがこれを提供し、サブ課題Bの各モデルの設計改良開発の指南役となる。岩石惑星に関しては、東京大学が火成活動モデルや大規模並列設計を、愛媛大学が実装を、JAMSTEC が実装実験を主に担当して進める。惑星大気に関しては、神戸大学が火星大気を初期計算目標に理研 AICS の SCALE-GM を基に力学的な計算可能性を探り、順次、放射過程ならびに物質輸送過程の導入をすすめて計算パラメーターの拡張を実現する。北海道大学と九州大学はそこで必要となる物理過程の検討と開発を担う。ガス惑星に関しては、京都大学が大規模並列計算におけるスペクトル法の可能性の探求に着手し、その実装性能試験を経て、大規模計算に着手する。



2-3. サブ課題C. 「太陽活動による地球環境変動の解明」

(1) 目的・意義

ガリレオ以来 400 年以上にわたる太陽黒点の観測により、太陽黒点数は約 11 年の周期（太陽周期）で変動することが知られている。黒点近傍ではその磁場のエネルギーによりしばしばフレアやコロナ質量放出といった爆発現象が起きる。こうした太陽面爆発は、地球磁気圏や人工衛星、電力・通信網などに多大な影響を与えることがある。また、黒点数の長期変化は気候変動の原因の一つになるとも考えられている。このため、この太陽周期の機構を解明し、今後の太陽活動とその影響を予測することは将来の地球環境の変動予測と社会インフラの保全のために重要な課題である。同時に、太陽活動の理解は、広く恒星や宇宙プラズマの理解に繋がると共に、地上では実験できない非線形プラズマダイナミクスの実証的な理解にも通じる。

そのような動機に基づき、本研究では歴史的な課題でもある太陽周期の機構を解明すると共に、太陽フレアの発生条件を明らかにすることを目的とする。さらに、フレアに伴う宇宙環境の変動と人工衛星への影響を精密なシミュレーションを通して再現し、将来起きると考えられる巨大な太陽面爆発の社会影響の軽減に貢献することを目指す。

(2) 実施内容

千葉大学では、太陽対流層における熱対流と電磁流体ダイナモについて微細な対流から大規模構造の再生まで包括的に実現する計算をおこなう。従来の手法では対流層の一部しか扱うことができなかつたが、独自に開発した音速抑制法を使うことにより初めて太陽対流層全てを計算することができる。また、このスキームはノード間通信が少なく、「京」の全ノードを高効率で使った実績がある。本研究ではポスト「京」での高速計算を目指し、計算機科学の専門家の協力によって、コード自動生成・自動最適化の手法も駆使して高効率のコードを開発する。

名古屋大学では太陽表面に現れた黒点磁場が不安定化しフレア爆発を引き起こす条件を計算から探る。これまでの研究によって、大きなスケールの磁場のねじれと、小さなスケールの磁場の相互作用がフレア発生に重要であることが示唆されている。これを実証するため、世界最高精度で太陽表面を観測できる我が国の太陽観測衛星「ひので」で観測された精密磁場データを用いた実データ・シミュレーションを行うことにより、フレア爆発の発生条件を探り、その予測精度の向上に貢献する。また、協力機関（東北大学、神戸大学、京都大学）と協力し、太陽面爆発に伴う地球磁気圏の擾乱を電磁流体力学とプラズマ運動論の両面から再現することで、マクロスケールの変動が人工衛星周辺のマイクロスケールの環境、特に宇宙機の運用に大きな影響を与える衛星帯電にどのような影響を与えるかについて計算を通して明らかにする。

(3) 目標・期待される成果

アウトプット成果

・平成 29 年度終了時：

太陽対流層全球から領域を区切った高解像度の計算を実行し、小スケールの乱流効果により、太陽物理学最大の謎である蝶形図の成因に迫る。領域・時間を制限しているが、世界初の対流層・表面連結計算を実行し、大規模黒点の出現を再現する。過去にフレアが発生した 300 領域の 3 次元平衡磁場を衛星観測に基づいたシミュレーションによって再現し、フレア再現シミュレーションの初期データとなるデータベースを構築する。

・本格実施フェーズ終了時：

黒点形成の源となる磁場形成過程を再現すると共に、太陽フレアの再現シミュレーションから、フレア発生条件となる磁場構造を明らかにする。地球磁気圏環境の変動とその中での高エネルギー粒子の生成・消滅を再現する。

・ポスト「京」運用開始 5 年後：

これまで不可能だった黒点の自発的生成過程を再現する。フレアにおいて重要な役割を果たす磁気リコネクションの内部構造と粒子加速を再現する。磁気嵐における人工衛星の帯電過程を衛星の形状や表面素材の影響を正確に取り入れて再現する。

アウトカム成果

・ポスト「京」運用開始 5 年後：

400年間の謎であった黒点の起源に迫り、太陽周期の物理メカニズムに関する知見を得る。現実の観測データに基づくフレアの再現を行い、その発生予測に貢献する。磁気嵐における衛星帯電の原因を明らかにする。

・ポスト「京」運用開始10年後：

数周期にわたる太陽活動の計算を行い、太陽活動の予測可能性を高める。太陽フレアの発生とその影響としての衛星帯電を動的に予測する。

(4) 「京」でできていること、ポスト「京」でなければならないこと

(「京」でできていること)

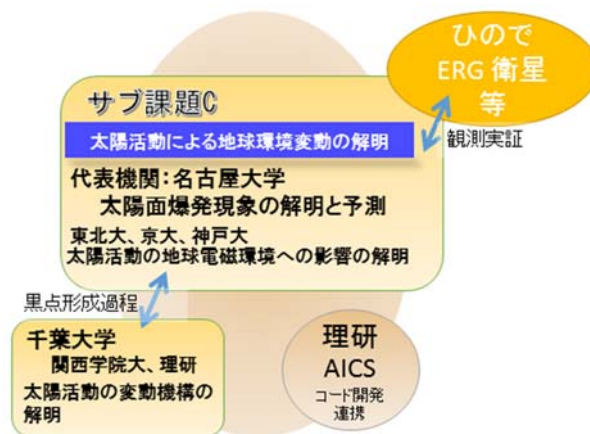
現在の世界最高解像度である $256 \times 768 \times 1536$ という計算を50年程度実行し、不安定な周期活動を再現している (Hotta et al. 2016, Science)。また、より高解像度の 4.3×10^{12} ($=4096 \times 32000 \times 32000$) の格子点数を用いた全ノード計算を極短時間おこない、世界最高に近い理論ピーク性能比 (24%) を達成している。

(ポスト「京」でなければならないこと)

ポスト京では、表面における黒点生成までを扱うことができる。フレア爆発において人工的な抵抗を導入せずに、微細構造と大規模構造を同時に解くことができる。衛星の誘電膜部分の衛星帯電を正確に計算することができる。

(5) 実施体制

太陽対流層における熱対流と磁場を微細な対流から大規模構造の再生までを包括的に実現する計算を千葉大学が担当する。この計算結果の解析を関西学院大学が、また超並列計算コードの開発を理研が支援する。一方、名古屋大学では太陽表面に現れた黒点磁場が不安定化しフレア爆発を引き起こす条件を計算から探り、フレア爆発の予測精度の向上に貢献する。また、協力機関である京都大学では太陽面爆発に伴う地球磁気圏の擾乱を精密な電磁流体シミュレーションで再現する。さらに、同じく協力機関である神戸大学では、磁気嵐の際に現れる高エネルギー粒子加速と衛星近傍の電磁場変動を再現し、人工衛星の帯電予測を行う。なお、本研究は JAXA 宇宙科学研究所の「ひので」衛星プロジェクト、文部科学省新学術領域研究「太陽地球圏環境予測」とも協力して実施される。



2-4. サブ課題D. 「原始太陽系における物質進化と生命起源の探究」

(1) 目的・意義

地球上の生命の起源はいまだに明らかにされていないが、1953年の Miller の実験によりアミノ酸などの有機物が単純な物質から無生物的に合成されることが示され、生命の起源は原始地球での化学進化であるとする説が有力視されてきた。しかしながら、1969年オーストラリアに落下した Murchison 隕石からアミノ酸が検出され、生命は宇宙から飛来した物質を起源と考える「宇宙起源説」が浮上した。さらに Murchison 隕石以外の炭素質コンドライトからもアミノ酸が検出され、2009年には NASA の探査機スターダストにより彗星の塵からアミノ酸の一つであるグリシンが見つかった。2010年には、1200~1300 K の高温環境を経験した Almahata sitta 隕石からアミノ酸が検出され、非常に高温の小惑星が冷える過程で生じる反応でアミノ酸が生成される可能性のあることがわかった。アミノ酸は、実験室で生成すると、左巻き (L型) と右巻き (D型) が同量生成される。しかし、地球上の生命はほとんど L 型のアミノ酸しか使っていない。これは、鏡像異性体過剰と呼ばれ、パストゥール以来 150 年以上の謎になっている。1997 年になって Murchison 隕石のアミノ酸を詳しく調べたところ、鏡像異性体過剰が発見された。これによって、アミノ酸の鏡像異性体過剰が宇宙空間で起こり隕石を通じて地球に運ばれ、これを元にして生命が誕生したという可能性が注目されている。本サブ課題では、原始太陽系における有機分子の生成過程と鏡像異性体過剰の発生過程を大規模な量子化学第一原理計算によって探究する。

(2) 実施内容

本サブ課題では、基底状態量子化学計算を用いて惑星間ダスト、特に氷ダスト上での有機分子合成の素反応の網羅的解析を行う。その計算によって得られた速度定数などの物理量を用いて、気層や表面での反応速度方程式を第一原理に基づき解くことで、宇宙空間における有機分子進化過程を明らかにする。具体的には、量子化学計算を用いた数百からなる素反応の安定構造・遷移状態構造の解析、および Born-Oppenheimer 近似に依らない量子力学効果を入れた *ab initio* 分子動力学である励起状態分子動力学計算 (Surface Hopping) 法を用いて、有機分子の励起状態遷移量子ダイナミクスをシミュレーションする。また、近年の実験で円偏光波を当てるとアミノ酸の鏡像異性体過剰が引き起こされることが分かってきた。さらに、星形成領域で円偏光波が実際に観測されている。従って、原始惑星系の近くで大質量星が誕生したとすれば、太陽系内でアミノ酸の鏡像異性体過剰が引き起こされた可能性がある。宇宙空間で円偏光波による鏡像異性体過剰を計算するために大規模な励起状態分子動力学計算を実施する。また、原始惑星系円盤内におけるダスト形成・成長過程の解明に向けて、乱流中のダスト粒子の衝突付着成長シミュレーションを行う。

(3) 目標・期待される成果

アウトプット成果

・平成 29 年度終了時：

励起状態量子化学計算を用いて氷ダスト上での有機分子合成および分解の素反応の網羅的解析を行うことで、ダスト表面反応の影響、温度などの環境効果、紫外線や宇宙線などの強い外場の影響を

解明する。また、原始惑星系円盤乱流中のダストの成長過程を非圧縮流体計算により探究する。

・ **本格実施フェーズ終了時：**

励起状態分子動力学計算法を用いて、有機分子の励起状態遷移量子ダイナミクスについての大規模な励起状態分子動力学計算を実施し、宇宙空間の円偏光波による鏡像異性体過剰を明らかにする。また、原始惑星系円盤乱流中の微惑星形成過程を圧縮流体計算により探究する。

・ **ポスト「京」運用開始5年後：**

原始太陽系における有機分子生成の第一原理計算を世界に先駆けて実現することで、ダストから微惑星、微惑星から惑星が誕生する過程で、どのように物質が進化し、有機分子が生まれたかを明らかにする。そして、第一原理計算結果と ALMA 望遠鏡等による現在の惑星間空間に残された有機分子の検出や、「はやぶさ2」や「たんぽぽ計画」等による太陽系始原物質のデータとの突合せから、太陽系における生命の起源の解明に迫る。

アウトカム成果

・ **ポスト「京」運用開始5年後：**

励起状態分子動力学法を用いて真空中・氷ダスト上での有機分子合成および分解の実時間シミュレーションを実行し、様々な環境における反応分岐比の定量的計算を行い、宇宙における分子進化予測手法を確立する。また、原始太陽系におけるダスト成長と有機分子生成過程の関係を明らかにする。

・ **ポスト「京」運用開始10年後：**

これを太陽系外惑星系での異なる環境下での有機分子生成過程の研究に発展させることで、太陽系以外での生命の発生の可能性を探究することができる。太陽系外惑星系の有機分子は、今後 ALMA 望遠鏡等により直接検出される可能性がある。

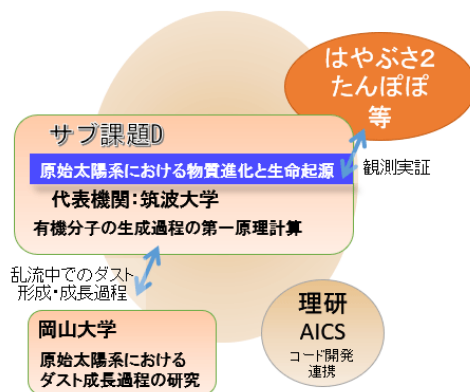
(4) 「京」でできていること、ポスト「京」でなければならないこと

「京」では、高度最適化により、ナノ物質の10万原子第一原理計算を実施、大規模並列計算で高い実効効率を実現し、第一原理計算（密度汎関数法）により、真空中における有機分子の最安定構造を計算した。また、その他の計算機資源で、時間依存密度汎関数法計算により、円偏光波吸収による円偏光二色性とアミノ酸の光励起による崩壊・改変反応の過程を解析している。さらに、惑星間空間のアミン酸前駆体からアミノ酸への生成過程に対し、反応物及び中間体の生成エネルギーから安定性と反応のエネルギー障壁を評価した。ポスト「京」では、惑星間空間物質の化学進化に関してさらに多くの素反応の解析や、量子分子動力学の計算が可能になり、これによって原始太陽系環境下でのアミノ酸生成過程とL体-D体分離過程の励起状態第一原理シミュレーションを実現することが可能となる。

(5) 実施体制

筑波大の重田、相川、古家、および特任助教は、量子力学・分子力学混合法（QM/MM法）を用いて、ダスト上のアミノ酸・核酸の基底状態並びに励起状態を計算し、合成・分解の素反応を解析する。

筑波大の梅村、重田、庄司は、励起状態分子動力学計算法（Surface Hopping 法）を用いてアミノ酸の励起状態遷移量子ダイナミクスをシミュレーションし、鏡像異性体過剰プロセスを解析する。これらは、「はやぶさ2」や「ロゼッタ」等の観測結果と比較する。筑波大の梅村、道越、[岡山大](#)の石原は、[乱流物理を考慮した](#)ダスト成長の大規模計算を実施する。



3. 採択時の留意事項への対応状況

3-1. ポスト京利用に向けて、計算の大規模化等の利用準備の具体的なシナリオを明確にすること

サブ課題A. 「惑星の起源の解明」

- 現在「京」で利用している Kninja と、天文台等で利用している Athena について、ポスト「京」を想定したチューニング、並列化効率の向上を行う。
- Kninja については、現在利用している直接計算独立時間刻み法を我々が開発したツリー法と直接計算法のハイブリッド法に置き換えるための開発をおこなっており、ほぼ完成している。これにより、これまで数十万粒子であった計算規模をポスト「京」では1億粒子程度まで飛躍的に拡大させる。

サブ課題B. 「惑星内部・表層のダイナミクスと進化」

- 岩石惑星：マグマの生成移動モデルを開発しマントル対流モデル ACuTEMan に実装する。コードの中核部分に関しては、これまで技術的蓄積のある地球シミュレータ上にて大規模並列計算における効率向上の検討を進める。これを基礎データとして、「京」、ポスト「京」でのメモリー構造等を考慮した並列プログラムの設計と実装に着手し、改良をすすめる。
- ガス惑星：超高次球面調和函数変換のための新たな計算スキームの開発と並列化効率向上の可能性の追及・実証は、これまでの技術蓄積のある地球シミュレータならびに京都大学情報基盤センター等の計算機にて進める。これを基礎データとして、「京」、ポスト「京」でのメモリー構造等を考慮した並列プログラムの設計と実装に着手し、改良をすすめる。
- 惑星大気：地球大気を対象に「京」で経験を積み重ねてきた SCALE-GM を基に、鉛直計算領域の高度 100 km 程度への拡張と、大気成分・大気質量・太陽定数・惑星半径等の火星化を「京」上にてすすめる。大規模並列計算のアルゴリズムは地球大気を対象とした現有の経験がそのまま活用できると期待されるが、強い熱対流を表現することならびに地表面から高高度に至る鉛直計算領域をカバーするのに必要とされる計算資源量は未知であり、数値実験を重ねて、その計算可能性を探る。

サブ課題C. 「太陽活動による地球環境変動の解明」

- 太陽対流層アプリケーション AMaTeRAS について、ポスト京を想定したチューニングを現開発者と計算科学研究者の協力により実行し、並列化効率・浮動小数点演算効率の向上を目指す。特に自動チューニングの手法を発展させ、効率的・革新的な性能向上を目指す。
- AMaTeRAS では音速抑制法により京全ノードまで、太陽対流層計算について並列化効率を保つことが可能になっており、ポスト京の規模まで並列化効率を保つことが予想される。今後は、表面の黒点発生現象を解くときに必要不可欠である輻射輸送を取り入れる。ポスト京の規模でも効率が落ちないように、輸送方程式の形式解を用いる手法を現在実装中である。
- 地球磁気圏環境の MHD および粒子モデルプラズマシミュレーションに関して、ポスト京で採用される ARM アーキテクチャプロセッサの重要な性能源泉と考えられる高 bitSIMD ベクトル演算機構を最大限に活用するため、演算ループを高効率にベクトル化する技術、メモリアクセスや制御フローの不規則性を排除する技術を探求する。これとメニーコア並列化技術と合わせ、ポスト京に対応した高性能アプリケーションを開発する。

サブ課題D.「原始太陽系における物質進化と生命起源の探究」

- 現在「京」で利用している RSCPMD について、ポスト「京」を想定したチューニング、並列化効率の向上を行う。
- RSCPMD については、励起状態の日断熱ダイナミクスのための開発をおこなっている。これにより、これまで基底状態の解析にのみ適応可能であった計算規模を、ポスト「京」では励起状態感遷移まで取り扱うことが可能となる。

3-2. 必要に応じて、計算機、アプリケーションの専門家の参画を検討すること

現在、理研 AICS の粒子系シミュレータグループとの連携の他、フラッグシッププロジェクトとも意見交換しながら開発を進めている。

3-3. 重点課題9「宇宙の基本法則と進化の解明」との役割分担を明確にすること

重点課題9では銀河形成より下の階層の構造形成・進化は扱わないのに対して、萌芽的課題では銀河形成から惑星形成までを扱うので、切り分けはできている。

4. 中間評価における指摘事項への対応状況

4-1. 目標の明確化について

指摘事項：

課題全体として達成すべき成果を明確にするとともに、その成果実現に向けた定量的・定性的な目標（年間目標及び最終目標）を明確にすること。その際、目標、成果の国際的な先進性を明確にすることおよび、各サブ課題の進捗等を鑑み、選択と集中による効率的な計画を検討すること。特にサブ課題 D について進捗を明確にするよう留意すること。

対応：

●本課題の達成すべき目標

太陽のような星とそれが持つ惑星系の起源、その惑星系で生命を育む惑星がどのように進化したか、惑星の構造の進化および大気や表面の水圏の形成・進化、太陽活動の変化やその惑星表層への影響といった、惑星科学・地球科学・宇宙化学/宇宙生物学分野にまたがる個別のプロセスを探求することによって、惑星形成から生命進化までを統一的に理解することへつなげるのが本課題の究極の目的である。これに向けて、各サブ課題では以下を目標として研究開発を進める。

サブ課題A. 「惑星の起源の解明」

原始惑星系円盤の電離状態を正確に記述した上で非理想 MHD 効果を全て考慮した円盤の大域的進化計算を実現し、その条件のもとに大域的な惑星形成の多体計算を現在の 2 桁上の 1 億粒子以上で実現し、星間ダストから惑星までの集積過程を統一的に計算可能にすることを目標とする。これによって、円盤と系外惑星の観測データを整合的に説明する一般的惑星形成モデルの構築、さらには系外惑星系のハビタブル・ゾーンに存在する地球型惑星の大気観測や生命存在を示すバイオマーカー観測の議論につなげる。

サブ課題B. 「惑星内部・表層のダイナミクスと進化」

様々な惑星の内部・表層の進化の統一的理解に寄与すべく、岩石惑星の火成活動・マンテル対流、ガス惑星の球殻熱対流、地球型惑星とくに火星の大気循環の高解像計算を実現する。マンテル対流では、開発中のプレートテクトニクスの 3 次元モデルを完成させ、これまでに開発した 3 次元火成活動モデルと合体させることで実現する。それを月の熱史・火成活動史の解明に適用する。惑星大気では、正二十面体準一様格子の非静力学全球大気モデルの火星大気版を開発し全球高解像度計算を実現する。火星の小規模対流、ダストデビルから大循環に至る火星大気運動を陽に表現した計算を実施し、全球ダストストーム発生の謎に迫る。ガス惑星大気では、超高次球面調和関数変換の並列高速計算ライブラリを新たに開発し、回転球殻熱対流モデルに導入する。それによる高解像度の数値実験を行い、ガス惑星の帯状流の成因を探る。

サブ課題C. 「太陽活動による地球環境変動の解明」

太陽磁場の起源である太陽対流層の第一原理的シミュレーションにより黒点、太陽活動の長期変動の起源を明らかにすると共に、太陽磁場から太陽フレア、太陽風とコロナ質量放出が地球電磁気圏

に与える影響を多階層シミュレーションにより統一的に明らかにする。さらに、太陽観測衛星、地球観測衛星等のデータと融合した解析により太陽地球惑星圏環境の短期・長期変動予測を行う。このため、太陽対流層の底から表面までを一貫して解く計算を世界で初めて実行する。さらに、太陽表面から太陽コロナ全体を含んだ太陽面爆発の大規模シミュレーションを開発する。一方、地球磁気圏の変動と人工衛星へのその影響を評価・予測するマルチスケール・シミュレーションの開発のために、省メモリかつ数百万並列環境に対応可能なスケーラブル通信ライブラリを、MHD・PICモデル間の情報受け渡しに適用し、高効率な地球磁気圏-人工衛星環境連成シミュレーションを実現する。

サブ課題D. 「原始太陽系における物質進化と生命起源の探究」

基底状態量子化学計算を用いて惑星間ダスト、特に氷ダスト上での有機分子合成の素反応の網羅的解析を行う。その計算によって得られた速度定数などの物理量を用いて、気層や表面での反応速度方程式を第一原理に基づき解くことで、宇宙空間における有機分子進化過程を明らかにする。さらに、宇宙空間で円偏光波によるアミノ酸の鏡像異性体過剰を計算するために大規模な励起状態分子動力学計算を実施する。また、原始惑星系円盤乱流中のダストの濃集・衝突・合体の成長過程をナビエ・ストークス方程式の直接数値計算に基づいてシミュレートし、微惑星形成過程を明らかにする。

年間目標は下記の図の通りとする。

サブ課題及び小項目	平成28年度	平成29年度	平成30年度	平成31年度
(1) サブ課題A 惑星の起源の解明				
(1-1) サブ課題A全体の統括および惑星集積シミュレーション	惑星集積シミュレーションコードの開発	大域的重力N体シミュレーションの実行	大域的重力N体シミュレーションの実行・観測データとの比較検討	
(1-2) 星形成・原始惑星系円盤の大規模シミュレーション	磁気流体シミュレーションコードの開発	非理想磁気流体シミュレーションの実行	非理想磁気流体シミュレーションの実行・観測データとの比較検討	
(1-3) 並列計算コード開発、サブ課題間連携推進	大域的N体シミュレーションの開発	「京」を用いたコードの最適化		
(2) サブ課題B 惑星内部・表層のダイナミクスと進化				
(2-1) サブ課題B全体および「地球型惑星の気象・気候～火星全球ダストストーム」の統括推進	大気モデル改良開発と必要となる基礎ルーチンの開発	大気大循環モデルにおける現実火星状態の再現性検証	火星全球高解像度実験・全球ダストストーム発生条件の理解	より広い惑星パラメータへの計算対象拡張
(2-2) 岩石惑星の火成活動～マントル対流系の三次元球殻モデリング統括推進	マントルモデル改良開発と必要となる基礎ルーチンの開発	マントル対流モデルへの火成活動の導入	マントルに関する高解像度実験・月のマントル進化モデルの確立	月形成過程への制約の検討
(2-3) ガス惑星の全球気象学～深部対流から表層ジェット流までの統括推進	ガス惑星モデル改良開発と必要となる基礎ルーチンの開発	球面調和関数ルーチンの最適化	ガス惑星に関する高解像度実験	木星型惑星表層積状ジェット流の成因の検討
(3) サブ課題C 太陽活動による地球環境変動の解明				
(3-1) サブ課題C全体の統括および太陽フレアとその地球環境影響のシミュレーションの開発	フレアモデル・磁気圏モデル・衛星環境モデルの開発	フレア・磁気圏・衛星環境の初期実験	フレア再現・超高精度磁気圏モデル実験・衛星環境モデルの開発・計算	フレア再現・超高精度磁気圏モデル実験・衛星環境モデルの計算結果の解析
(3-2) 太陽対流層の超大規模・長時間シミュレーション	太陽対流層モデルの計算		太陽黒点形成の実験コードの開発・太陽周期変動の機構の検討	太陽黒点形成の実験
(4) サブ課題D 原始太陽系における物質進化と生命起源の探究				
(4-1) サブ課題D全体の統括および星間有機分子生成の大規模な第一原理分子動力学計算の実施	第一原理分子動力学計算に向けた研究計画の策定	ダスト上での有機分子合成の素反応の網羅的解析	ポストT2Kによる大規模な第一原理分子動力学計算	ポスト「京」での大規模な第一原理分子動力学計算の計画策定

●独創性・先進性について

サブ課題A. 「惑星の起源の解明」

惑星集積シミュレーション：

微惑星の段階からの直接フル N 体計算で衝突破壊や原始惑星系円盤からのガス抵抗の効果をとり入れた計算コードは他にない。これらの効果を考慮しないと、原始惑星の暴走成長段階で異なる結果が得られてしまうため、本課題におけるフル N 体計算の必要性が強く示唆される。

原始惑星系円盤の磁気回転流体シミュレーション：

多様な物理過程と高い性能を両立する最先端の宇宙物理学向け磁気流体シミュレーションコードである Athena++を用いている。これによって、現時点で最も現実的な物理過程を含む高解像度計算を行うことができる。

サブ課題B. 「惑星内部・表層のダイナミクスと進化」

マントル対流：

対流しつつあるマントルにおけるマグマの生成・移動のシミュレーションに成功した例は他にない。また、プレートテクトニクスのモデリングにおいては、「強いプレートのレジーム」を目指した例も他にはなく、プレートテクトニクスの物理的メカニズムを正しく再現する独創的な研究である。

惑星大気：

解像度 1km 以下の計算は、数 km スケールの乾燥対流も陽に表すことができるもので、先駆的である。金星、地球、火星、系外惑星も含めた地球型惑星大気の対流と大循環の多様性に包括的に迫るための計算基盤の構築を目指すところが野心的かつ独創的である。

ガス惑星大気：

全球計算に基づいたガス惑星の縞状構造成因の解明を目指している点が新規的かつ独創的である。

サブ課題C. 「太陽活動による地球環境変動の解明」

太陽対流層モデル：

音速抑制法の採用により分解能の点で他国に比べて圧倒的優位性を持っている。黒点生成現場を捉えるという目的においても、密度比 600 以上と他国のコードより幅広い値を取ることができている。

磁気圏・衛星環境モデル：

プラズマ粒子シミュレーションにおける分散メモリ並列・共有メモリ並列・SIMD ベクトル化の最適化を進めているが、このような試みは世界的にもほとんど例がない。これと大規模電磁環境を再現する MHD シミュレーションの現実的な連成は過去に例が無く、先進的である。

太陽フレアモデル：

観測磁場データを取り入れた太陽フレア計算は過去にも実施されているが、本課題では現実的な磁場モデル(非線形フォースフリー磁場)導出に成功し、シミュレーションに採用している。これと電磁流体シミュレーションと組み合わせた研究は世界的にも稀で、非常に独創的かつ優位的であるといえる。

サブ課題D. 「原始太陽系における物質進化と生命起源の探究」

有機分子形成・ダスト成長：

原始太陽系円盤内の有機分子形成の研究は、これまで古典的な反応方程式を解くものであったが、本研究では、QM/MM(Quantum Mechanics/Molecular Mechanics)法や CPMD(Car Parrinello Molecular Dynamics)法などの量子分子動力学計算によって探究するものであり、これまでに例のない研究である。原始太陽系円盤乱流によるダスト成長の計算は、これまで実現していない高精度(高レイノルズ数)の計算であり、ダスト成長過程を直接入れた計算も世界初である。

サブ課題 D は、第一原理分子動力学法を宇宙物理に応用することで、原始太陽系円盤内の有機分子形成を解明することを目的としている。これには、前段階として基礎となるべき物理素過程を理論的に理解することが必須である。本課題において、アミノ酸形成の反応機構を理論的に解明し、触媒水分子の効果が重要であることを示した(Kayanuma et al. 2017)。このような基礎研究に基づいて反応ネットワークの構築を進めており、その上でダスト形成過程の大規模計算を実行する。調査研究・準備研究フェーズとしては、現時点での進捗は当初の予定通りである。

4-2. 成果発表について

指摘事項：

計算科学技術分野における研究開発の論文数、学会発表数は、事業の成果を議論する上で1つの指標となりうるため、分野の特性、体制を考慮の上、論文、学会発表を通じて十分に成果を発信するような計画とすること。

対応：

査読論文への投稿については、惑星科学全般では Icarus、サブ課題 A、C、D では Astrophysical Journal や Monthly Notices of the Royal Astronomical Society、サブ課題 B では Journal of Meteorological Society of Japan や Journal of Atmospheric Sciences、Journal of Geophysical Research、Physics of the Earth and Planetary Interiors、Geophysical and Astrophysical Fluid Dynamics、Journal of Fluid Mechanics など、サブ課題 C では Physics of Plasmas を検討中である。科学分野全般に対するインパクトが強い成果も期待されるため、これらは Nature、Science への論文投稿も視野に入れる。これらは本課題参加者がこれまでに多くの論文出版の経験のある学術誌であり、本課題における成果発表として適切であると考えられる。

国内の学会(日本天文学会、日本惑星科学会、日本気象学会、日本地球惑星科学連合大会、等)ではサブ課題ごとに定期的に講演を行っており、また国内・国外を問わず開催される国際会議にも積極的に参加・講演してきている。これらは継続的に行い、成果発表のさらなる充実を図る。

4-3. ポスト「京」での具体的な目標について

指摘事項：

予備計算などを通じて、サイエンス、エンジニアリング的な目標を明確にすること。その目標に対して、ポスト「京」でいつまでに何をどこまで明らかにすることを目指すのかを明確にすること。その時点でポスト「京」で初めてできる画期的な利活用について具体的に説明すること。

対応：

サブ課題A. 「惑星の起源の解明」

惑星集積シミュレーション：

動系方向により広範囲(例えば、太陽系で言えば、地球型惑星から木星、土星の軌道までを含む0.5-10天文単位)のシミュレーションを行い、数天文単位以遠では氷物質が凝縮することで固体量が増える効果(アイスラインの効果)も取り入れる。微惑星の成長と衝突破壊、全ての天体に円盤ガスからのガス抵抗や円盤との重力相互作用によるタイプ1惑星移動の効果も働くようにし、木星や土星のような巨大ガス惑星のコアの形成について、微惑星段階からのグローバルなシミュレーションによって明らかにする。ガス抵抗は微惑星や衝突破片の動径方向への移動、タイプ1惑星移動は原始惑星の動径方向への移動を引き起こすので、グローバルなシミュレーションが必須である。コアへの原始惑星円盤ガスの流入の効果も入れ、様々な円盤初期条件のもとでのシミュレーションを行うことによって、現在、発見されている系外惑星系の多様性の起源の問題、ハビタブル・ゾーンにおける地球型惑星の形成確率、そのような地球型惑星への水の輸送プロセスなどを明らかにすることで、今後、生命居住可能な表層環境を持つ惑星(ハビタブル惑星)の形成確率、多様性の問題に迫る。

原始惑星系円盤の磁気回転流体シミュレーション：

Athena++を用いた原始惑星系円盤のシミュレーションは順調に進展しており、今後も自己重力等の新たな物理過程の開発と並行して研究を進める。ALMAによって原始惑星系円盤の構造は明らかになってきており、その観測データとの比較検討も積極的に行いたい。また、原始惑星系円盤は惑星系の初期状態であり、このシミュレーションの結果は順次、惑星集積シミュレーションにとりいれていく。

ポスト「京」の利活用：

「京」では、惑星形成多体計算向けコード **Kninja** を開発し、世界初の1000ノードを超える惑星形成多体計算に成功、30万粒子程度までの計算を可能にし、前例のなかった大域計算を行うことができた。ポスト「京」では、アルゴリズムの改良も行うことでこの1000倍程度、数億粒子の計算での大域惑星形成過程を世界で初めて明らかにする。

星形成の計算コードは「京」での大規模利用の実績はまだないが、天文台の Cray XC30 等の大規模並列計算機でよいスケーラビリティを示す Athena++コードを米国と共同で課題実施者が開発しており、ポスト「京」での 10 億格子点・1 億時間ステップ程度の計算を行う計画である。これは 1 モデルで「京」で 1 週間程度の計算となり、多数行うことは「京」では不可能だが、ポスト「京」では現時点的な資源量で実行可能である。これにより、多様な原始惑星円盤の構造と進化を明らかにする。

サブ課題 B. 「惑星内部・表層のダイナミクスと進化」

マントル対流：

マグマの三次元空間での生成・移動のシミュレーションは順調に進んでおり、現在矩形領域での計算用に書かれているコードを実際のマントルの幾何学的形状である球殻領域での計算にも適用できるように改良する。さらにこのコードで用いられている疑似圧縮法の改良に取り組み、地球のダイナミクスを理解する上で重要なプレートを数値的に再現する事を目指す。

惑星大気：

SCALE-GM の火星化開発は順調に進捗しており、このまま継続する。QBO 的振動として顕在化した数値解の数値解法依存性は、当初計画には含まれない課題ではあるが、惑星大気計算の根幹に関わる重要な問題であるため、火星化開発と平行して、その詳細を探求していく。また、火星 SCALE-GM が完成し、これまでにない高解像度計算が可能となれば、火星気象学の進展が大いに期待される。SCALE-GM の火星化が完了した後は、金星大気への対応を進める。これにより、現在「地球シミュレータ」で実現している解像度よりもさらに高い解像度が実現でき、金星大気循環において重要と考えられている雲層内の熱対流と、大気大循環を同時に計算できるようになり、金星気象学のさらなる発展に資する。

ガス惑星大気：

球面調和関数ルーチンの開発を、「京」および、長い SIMD を持つ点でアーキテクチャがより類似している最新のメニーコアプロセッサ上で行っている。この開発されるルーチンはポスト「京」に限らず一般的なメニーコアマシン上でも高性能を発揮するものである。

ポスト「京」の利活用：

サブ課題 B に関連する課題は、「地球シミュレータ」での計算では大きな困難を経験した。(i) 岩石惑星では火成活動が短い時間刻みを要求し計算は 2 次元に限定された。(ii) ガス惑星では極めて長時間の計算が必須であるため解像度が限定された。(iii) 惑星大気では静力学モデルの限界に直面した。ポスト「京」により、(i) では 3 次元計算が、(ii) では微細対流と全球的構造を両立する超高解像度長時間計算が、また、(iii) では「京」での理研 AICS チームの世界最先端の地球大気非静力学全球大循環計算を土台に非静力学計算がそれぞれ可能となる。

サブ課題 C. 「太陽活動による地球環境変動の解明」

太陽対流層モデル：

高解像度化・大規模化した計算を開始するための準備は順調に進行している。今後は太陽表面層を取り入れるための準備に取り掛かる。太陽表面層を取り入れることで、フレアモデルグループとも協力が可能になる。

磁気圏・衛星環境モデル：

プラズマ粒子シミュレーションの超並列高効率計算に関しては、アーキテクチャ階層毎に多岐に渡る開発項目があるが、現状それらは着実に進行している。計算モデルについては、磁気圏グローバル環境シミュレーションの計算結果を衛星環境シミュレーションに反映することで、より現実性の高い衛星帯電予測が可能になる。

太陽フレアモデル：

解適合格法を実装した電磁流体計算コードを用いての大規模数値計算を実施することで、太陽フレアからコロナ質量放出までの一連のプロセスを再現し、その物理過程を理解する。現在、手元の計算機において低解像度のテスト問題を実施しており、その後は大規模計算機に移行し高解像度計算を実施する。

ポスト「京」の利活用：

太陽対流層に関して現在の世界最高解像度である $256 \times 768 \times 1536$ という計算を 50 年程度実行し、不安定な周期活動を再現している。また、より高解像度の $4.3 \times 10^{12} (=4096 \times 32000 \times 32000)$ の格子点数を用いた全ノード計算を極短時間おこない、世界最高に近い理論ピーク性能比を達成している。ポスト「京」では、表面における黒点生成までを扱うことができる。フレア爆発において人工的な抵抗を導入せずに、微細構造と大規模構造を同時に解くことができる。衛星の誘電膜部分の衛星帯電を正確に計算することができる。

サブ課題D. 「原始太陽系における物質進化と生命起源の探究」

有機分子形成・ダスト成長：

当初計画の原始太陽系円盤内の有機分子形成に加えて、大規模乱流中のダスト成長の研究を追加した。これは最終的にダスト上での有機分子形成と有機分子間力によるダスト付着成長過程で結びつくものである。この研究は、雨成長の物理モデルとして気象分野への波及効果が期待できる。

ポスト「京」の利活用：

「京」では、高度最適化により、ナノ物質の 10 万原子第一原理計算を実施、大規模並列計算で高い実効効率を実現し、第一原理計算（密度汎関数法）により、真空中における有機分子の最安定構造を計算した。また、その他の計算機資源で、時間依存密度汎関数法計算により、円偏光波吸収による円偏光二色性とアミノ酸の光励起による崩壊・改変反応の過程を解析している。さらに、惑星間空間のアミン酸前駆体からアミノ酸への生成過程に対し、反応物及び中間体の生成

エネルギーから安定性と反応のエネルギー障壁を評価した。ポスト「京」では、惑星間空間物質の化学進化に関してさらに多くの素反応の解析や、量子分子動力学の計算が可能になり、これによって原始太陽系環境下でのアミノ酸生成過程と L 体-D 体分離過程の励起状態第一原理シミュレーションを実現することが可能となる。

有機分子形成については、現在の遷移状態探索計算から、大規模な第一原理分子動力学計算に移行していく。乱流中のダスト成長の研究では、これまでのレイノルズ数千の計算をさらに大規模化し、レイノルズ数万の計算を実施する。

4-4. サブ課題間の連携等について

指摘事項：

幅広いサブ課題の間の積極的な連携を通して発生する相乗効果や、太陽フレアや宇宙天気等、インパクトのあるテーマを活用したアピールの計画を検討すること。

対応：

本課題では、惑星形成から生命進化までを統一的に理解することを目的としている。ただし、これらを 1 つの「まるごと」計算で理解できる段階にはないため、本格研究フェーズへ進むに当たっては、サブ課題 A で形成された惑星がサブ課題 B での惑星進化計算と結合し、サブ課題 C での太陽活動の変動を踏まえつつも、並行してサブ課題 D での分子進化計算に関連づけることを計画している。すでにサイエンスの面では、月の火成活動やマントル対流の計算結果について、地球-月系の形成進化過程との関連性について議論を始めつつある(サブ課題 A・B)。また、乱流中のダスト成長の研究は原始惑星系円盤の構造と進化に深く関係しており、さらにダスト成長は **pebble accretion** や微惑星形成過程を考える上で必須の研究課題でありサブ課題間の連携が重要となる(サブ課題 A・D)。コード開発や方法論については、メニーコアにおける球面調和関数展開の高速計算について密接な議論を行っており(サブ課題 A・B)、球座標の AMR(Adaptive Mesh Refinement)法などの計算コードや技術的な知見の共有を進めている(サブ課題 A・C)。

太陽フレア現象は、地球で発生する地震と異なり、爆発の駆動エネルギーを担う太陽の磁場の詳細観測データが得られているため、発生の有無は事前に予測ができるようになってきた。サブ課題 C では、これをさらに進め、磁場構造の解析からフレアの規模までも正確に予測することを目指している。実際、平成 29 年 9 月 6 日に発生した X クラスの大規模な太陽フレアで見られた磁場構造は、シミュレーション結果ときわめてよい一致を示していた。本課題では、これに加えて、太陽観測衛星、地球観測衛星等のデータと融合した解析により太陽地球惑星圏環境の短期・長期変動予測を行うことで、人工衛星・航空機・通信・電力などに対する太陽活動の社会影響を軽減するための技術開発も目的としている。これは科学的観点だけでなく、社会的課題としてもインパクトが大きいテーマであり、研究成果を積極的に社会還元する努力は継続する。

本課題は、ALMA やすばる望遠鏡といった地上観測、金星探査機「あかつき」、太陽観測衛星「ひので」、小惑星探査機「はやぶさ 2」、国際宇宙ステーションきぼう実験棟における「たんぽぽ計画」など、既存・進行中の観測・探査計画と深く連携するが、それに留まらず、将来の我が国の太陽系探査計画が依って立つ土台となるという点で国家的見地からの意義も高い。従来の太陽系探査は欧米

の主導のもとに行われてきたが、このような状況を打開し、科学的価値の高い探査を行うためには、惑星内部進化に対する独自の統一的視点を確立することが必須である。本課題はそのような独創的な視点を確立するためのものと位置づける。

(別紙1) 実施機関一覧

	実施機関	備考
	神戸大学 (牧野 淳一郎)	代表機関 (課題責任者)
サブ課題A	東京工業大学 地球生命研究所 (井田 茂)	分担機関 (サブ課題責任者)
	大阪大学 理学研究科	分担機関
	理化学研究所 計算科学研究機構	分担機関
	東北大学	協力機関
	名古屋大学	協力機関
	一関高等専門学校	協力機関
	サブ課題B	神戸大学 理学研究科 (林 祥介)
東京大学 大学院総合文化研究科		分担機関
京都大学 数理解析研究所		分担機関
愛媛大学 地球深部ダイナミクス研究センター		協力機関
JAMSTEC 地球深部ダイナミクス研究分野		協力機関
京都大学 学際融合教育研究推進センター		協力機関
京都大学 理学研究科		協力機関
京都大学 防災研究所		協力機関
理化学研究所 計算科学研究機構		協力機関
北海道大学 理学研究院		協力機関
九州大学 理学研究院		協力機関
サブ課題C		名古屋大学 宇宙地球環境研究所 (草野 完也)
	千葉大学 大学院理学研究科	分担機関
	関西学院大学	協力機関
	京都大学 学術情報メディアセンター	協力機関
	神戸大学	協力機関
	東北大学	協力機関
	理化学研究所 計算科学研究機構	協力機関
サブ課題D	筑波大学 計算科学研究センター (梅村 雅之)	分担機関 (サブ課題責任者)
	岡山大学大学院環境生命科学研究科	分担機関

(別紙2) 所要経費

1. ベース目標における所要経費

1- (1) 全体計画

(単位：千円)

費目種別		調査研究・準備研究		本格実施		
大項目	中項目	H28年度	H29年度	H30年度	H31年度	
設備備品費		9,587				旧区分
試作品費		0				
人件費		16,865				
業務実施費	消耗品費	3,464				
	国内旅費	4,796				
	外国旅費	7,819				
	会議開催費	110				
	雑役務費	242				
	電子計算機諸費	2,204				
	その他	35				
間接経費		13,791				
物品費	設備備品費		6,912	1,236	3,000	新区分
	消耗品費		2,273	1,800	1,830	
人件費・謝金	人件費		34,823	41,276	35,076	
	謝金		0	192	0	
旅費	旅費		15,812	14,865	15,143	
その他	外注費(雑役務費)		3,455	5,300	6,000	
	印刷製本費		15	340	488	
	会議費		102	200	1,435	
	通信運搬費		48	0	12	
	光熱水料		0	0	0	
	その他(諸経費)		1,946	640	0	
	消費税相当額		4,084	3,876	2,915	
間接経費			20,842	20,918	19,771	
合計		58,913	90,312	90,643	85,670	

1- (2) 機関ごと

(単位：千円)

機関名(代表者)		代表機関：神戸大学 (牧野 淳一郎)				
費目種別		調査研究・準備研究		本格実施		
大項目	中項目	H28年度	H29年度	H30年度	H31年度	
設備備品費		0				旧区分
試作品費		0				
人件費		3825				
業務実施費	消耗品費	334				
	国内旅費	282				
	外国旅費	0				
	会議開催費	110				
	雑役務費	0				
	電子計算機諸費	0				
	その他	24				
間接経費		1,372				
物品費	設備備品費		0	0	0	新区分
	消耗品費		49	0	0	
人件費・謝金	人件費		6,567	8,257	5,732	
	謝金		0	0	0	
旅費	旅費		394	701	780	
その他	外注費(雑役務費)		676	0	0	
	印刷製本費		0	0	0	
	会議費		102	200	1,435	
	通信運搬費		0	0	0	
	光熱水料		0	0	0	
	その他(諸経費)		4	35	0	
	消費税相当額		1,104	619	468	
間接経費			2,669	2,943	2,524	
合計		5,947	11,565	12,755	10,939	

(単位：千円)

機関名（代表者）		東京工業大学（井田 茂）				
費目種別		調査研究・準備研究		本格実施		
大項目	中項目	H28年度	H29年度	H30年度	H31年度	
設備備品費		682				旧区分
試作品費		0				
人件費		4,529				
業務 実施費	消耗品費	0				
	国内旅費	448				
	外国旅費	2,155				
	会議開催費	0				
	雑役務費	0				
	電子計算機諸費	0				
その他		0				
間接経費		2,344				
物品費	設備備品費		483	104	0	新区分
	消耗品費		0	0	0	
人件費・ 謝金	人件費		6,918	6,940	6,481	
	謝金		0	0	0	
旅費	旅費		1,947	2,846	2,661	
その他	外注費(雑役務費)		0	0	0	
	印刷製本費		0	0	0	
	会議費		0	0	0	
	通信運搬費		0	0	0	
	光熱水料		0	0	0	
	その他(諸経費)		0	12	0	
	消費税相当額		689	724	657	
間接経費			3,010	3,188	2,940	
合計		10,158	13,047	13,814	12,739	49,758

（単位：千円）

機関名（代表者）		大阪大学（富田 賢吾）				
費目種別		調査研究・準備研究		本格実施		
大項目	中項目	H28年度	H29年度	H30年度	H31年度	
設備備品費		488				旧区分
試作品費		0				
人件費		0				
業務 実施費	消耗品費	0				
	国内旅費	121				
	外国旅費	396				
	会議開催費	0				
	雑役務費	0				
	電子計算機諸費	144				
その他		0				
間接経費		600				
物品費	設備備品費		468	0	0	新区分
	消耗品費		20	72	0	
人件費・ 謝金	人件費		2,324	3,680	2,777	
	謝金		0	0	0	
旅費	旅費		1,772	1,109	1,717	
その他	外注費(雑役務費)		51	0	0	
	印刷製本費		0	0	0	
	会議費		0	0	0	
	通信運搬費		0	0	0	
	光熱水料		0	0	0	
	その他(諸経費)		6	0	0	
	消費税相当額		296	365	305	
間接経費			1,481	1,568	1,440	
合計		1,749	6,418	6,794	6,239	21,200

(単位：千円)

機関名 (代表者)		理化学研究所計算科学研究機構 (牧野淳一郎)				
費目種別		調査研究・準備研究		本格実施		
大項目	中項目	H28年度	H29年度	H30年度	H31年度	
設備備品費		0				
試作品費		0				
人件費		0				
業務 実施費	消耗品費	251				
	国内旅費	127				
	外国旅費	319				
	会議開催費	0				
	雑役務費	60				
	電子計算機諸費	0				
	その他	0				
間接経費		227				
物品費	設備備品費		0	0	0	
	消耗品費		36	374	380	
人件費・ 謝金	人件費		0	0	0	
	謝金		0	0	0	
旅費	旅費		554	789	769	
その他	外注費(雑役務費)		183	0	0	
	印刷製本費		0	0	0	
	会議費		0	0	0	
	通信運搬費		0	0	0	
	光熱水料		0	0	0	
	その他(諸経費)		29	0	0	
	消費税相当額		14	15	20	
間接経費			245	353	351	
合計		984	1,061	1,531	1,520	5,096

(単位：千円)

機関名 (代表者)		神戸大学 (林祥介)				
費目種別		調査研究・準備研究		本格実施		
大項目	中項目	H28年度	H29年度	H30年度	H31年度	
設備備品費		4,280				
試作品費		0				
人件費		2,968				
業務 実施費	消耗品費	752				
	国内旅費	1,638				
	外国旅費	276				
	会議開催費	0				
	雑役務費	15				
	電子計算機諸費	0				
	その他	11				
間接経費		2,982				
物品費	設備備品費		1,355	0	0	
	消耗品費		572	383	500	
人件費・ 謝金	人件費		6,965	7,726	7,350	
	謝金		0	0	0	
旅費	旅費		3,860	2,089	2,424	
その他	外注費(雑役務費)		0	350	300	
	印刷製本費		0	0	488	
	会議費		0	0	0	
	通信運搬費		1	0	12	
	光熱水料		0	0	0	
	その他(諸経費)		145	214	0	
	消費税相当額		607	634	226	
間接経費			4,052	3,419	3,390	
合計		12,922	17,557	14,815	14,690	59,984

(単位：千円)

機関名 (代表者)		東京大学 (小河 正基)				
費目種別		調査研究・準備研究		本格実施		
大項目	中項目	H28年度	H29年度	H30年度	H31年度	
設備備品費		0				旧区分
試作品費		0				
人件費		0				
業務 実施費	消耗品費	294				
	国内旅費	506				
	外国旅費	0				
	会議開催費	0				
	雑役務費	0				
	電子計算機諸費	0				
その他		0				
間接経費		240				
物品費	設備備品費		429	332	0	新区分
	消耗品費		164	29	400	
人件費・ 謝金	人件費		0	0	0	
	謝金		0	192	0	
旅費	旅費		764	1,497	1,265	
その他	外注費(雑役務費)		388	150	0	
	印刷製本費		0	0	0	
	会議費		0	0	0	
	通信運搬費		0	0	0	
	光熱水料		0	0	0	
	その他(諸経費)		0	93	0	
	消費税相当額		0	51	35	
間接経費			524	703	510	
合計		1,040	2,269	3,047	2,210	8,566

(単位：千円)

機関名 (代表者)		京都大学 (竹広 真一)				
費目種別		調査研究・準備研究		本格実施		
大項目	中項目	H28年度	H29年度	H30年度	H31年度	
設備備品費		0				旧区分
試作品費		0				
人件費		0				
業務 実施費	消耗品費	0				
	国内旅費	375				
	外国旅費	0				
	会議開催費	0				
	雑役務費	24				
	電子計算機諸費	0				
その他		0				
間接経費		119				
物品費	設備備品費		0	0	0	新区分
	消耗品費		0	29	200	
人件費・ 謝金	人件費		0	0	0	
	謝金		0	0	0	
旅費	旅費		1,056	642	965	
その他	外注費(雑役務費)		0	500	0	
	印刷製本費		0	0	0	
	会議費		0	0	0	
	通信運搬費		0	0	0	
	光熱水料		0	0	0	
	その他(諸経費)		108	63	0	
	消費税相当額		34	34	35	
間接経費			359	380	360	
合計		518	1,557	1,648	1,560	5,283

(単位：千円)

機関名（代表者）		名古屋大学（草野 完也）				
費目種別		調査研究・準備研究		本格実施		
大項目	中項目	H28年度	H29年度	H30年度	H31年度	
設備備品費		3,156				旧区分
試作品費		0				
人件費		2,828				
業務 実施費	消耗品費	762				
	国内旅費	505				
	外国旅費	256				
	会議開催費	0				
	雑役務費	0				
	電子計算機諸費	2,060				
その他		0				
間接経費		2,870				
物品費	設備備品費		1,899	800	1,500	新区分
	消耗品費		1,153	145	0	
人件費・ 謝金	人件費		5,765	6,681	6,481	
	謝金		0	0	0	
旅費	旅費		1,606	1,148	769	
その他	外注費(雑役務費)		1,120	2,000	3,700	
	印刷製本費		15	340	0	
	会議費		0	0	0	
	通信運搬費		15	0	0	
	光熱水料		0	0	0	
	その他(諸経費)		1,194	51	0	
消費税相当額			588	567	539	
間接経費			4,007	3,520	3,897	
合計		12,437	17,362	15,252	16,886	61,937

（単位：千円）

機関名（代表者）		千葉大学（堀田 英之）				
費目種別		調査研究・準備研究		本格実施		
大項目	中項目	H28年度	H29年度	H30年度	H31年度	
設備備品費		0				旧区分
試作品費		0				
人件費		0				
業務 実施費	消耗品費	317				
	国内旅費	190				
	外国旅費	0				
	会議開催費	0				
	雑役務費	3				
	電子計算機諸費	0				
その他		0				
間接経費		153				
物品費	設備備品費		0	0	0	新区分
	消耗品費		279	349	350	
人件費・ 謝金	人件費		0	0	0	
	謝金		0	0	0	
旅費	旅費		457	403	413	
その他	外注費(雑役務費)		0	0	0	
	印刷製本費		0	0	0	
	会議費		0	0	0	
	通信運搬費		0	0	0	
	光熱水料		0	0	0	
	その他(諸経費)		46	88	0	
消費税相当額			20	25	17	
間接経費			241	260	234	
合計		663	1,043	1,125	1,014	3,845

(単位：千円)

機関名 (代表者)		筑波大学 (梅村 雅之)				
費目種別		調査研究・準備研究		本格実施		
大項目	中項目	H28年度	H29年度	H30年度	H31年度	
設備備品費		981				旧区分
試作品費		0				
人件費		2,715				
業務 実施費	消耗品費	754				
	国内旅費	604				
	外国旅費	4,417				
	会議開催費	0				
	雑役務費	140				
	電子計算機諸費	0				
その他		0				
間接経費		2,884				
物品費	設備備品費		2,278	0	1,500	新区分
	消耗品費		0	372	0	
人件費・ 謝金	人件費		5,907	6,790	6,255	
	謝金		0	0	0	
旅費	旅費		2,749	3,199	2,423	
その他	外注費(雑役務費)		37	1,700	1,000	
	印刷製本費		0	0	0	
	会議費		0	0	0	
	通信運搬費		31	0	0	
	光熱水料		0	0	0	
	その他(諸経費)		372	0	0	
	消費税相当額		703	717	571	
間接経費			3,624	3,834	3,525	
合計		12,495	15,701	16,612	15,274	60,082

(単位：千円)

機関名 (代表者)		名古屋大学 (石原卓)	岡山大学 (石原卓)			
費目種別		調査研究・準備研究		本格実施		
大項目	中項目	H28年度	H29年度	H30年度	H31年度	
設備備品費						旧区分
試作品費						
人件費						
業務 実施費	消耗品費					
	国内旅費					
	外国旅費					
	会議開催費					
	雑役務費					
	電子計算機諸費					
その他						
間接経費						
物品費	設備備品費		0	0	0	新区分
	消耗品費		0	47	0	
人件費・ 謝金	人件費		377	1,202	0	
	謝金		0	0	0	
旅費	旅費		653	442	957	
その他	外注費(雑役務費)		1,000	600	1,000	
	印刷製本費		0	0	0	
	会議費		0	0	0	
	通信運搬費		1	0	0	
	光熱水料		0	0	0	
	その他(諸経費)		42	84	0	
	消費税相当額		29	125	42	
間接経費			630	750	600	
合計		0	2,732	3,250	2,599	8,581

1-(3) サブ課題ごと

(単位：千円)

	大項目	調査研究・準備研究		本格実施		計
		H28年度	H29年度	H30年度	H31年度	
全体取り まとめ	設備備品費	9,587				旧区分
	試作品費	0				
	人件費	16,865				
	業務実施費	18,670				
	間接経費	13,791				
	物品費		9,185	3,036	4,830	新区分
	人件費・謝金		34,823	41,468	35,076	
	旅費		15,812	14,865	15,143	
	その他		9,650	10,356	10,850	
	間接経費		20,842	20,918	19,771	
小計	58,913	90,312	90,643	85,670	325,538	
サブ課題 A	設備備品費	1,170				旧区分
	試作品費	0				
	人件費	4,529				
	業務実施費	4,021				
	間接経費	3,171				
	物品費		1,007	550	380	新区分
	人件費・謝金		9,242	10,620	9,258	
	旅費		4,273	4,744	5,147	
	その他		1,268	1,116	982	
	間接経費		4,736	5,109	4,731	
小計	12,891	20,526	22,139	20,498	76,054	
サブ課題 B	設備備品費	4,280				旧区分
	試作品費	0				
	人件費	6,793				
	業務実施費	4,641				
	間接経費	4,713				
	物品費		2,569	773	1,100	新区分
	人件費・謝金		13,532	16,175	13,082	
	旅費		6,074	4,929	5,434	
	その他		3,169	2,943	2,999	
	間接経費		7,604	7,445	6,784	
小計	20,427	32,948	32,265	29,399	115,039	
サブ課題 C	設備備品費	3,156				旧区分
	試作品費	0				
	人件費	2,828				
	業務実施費	4,093				
	間接経費	3,023				
	物品費		3,331	1,294	1,850	新区分
	人件費・謝金		5,765	6,681	6,481	
	旅費		2,063	1,551	1,182	
	その他		2,998	3,071	4,256	
	間接経費		4,248	3,780	4,131	
小計	13,100	18,405	16,377	17,900	65,782	
サブ課題 D	設備備品費	981				旧区分
	試作品費	0				
	人件費	2,715				
	業務実施費	5,915				
	間接経費	2,884				
	物品費		2,278	419	1,500	新区分
	人件費・謝金		6,284	7,992	6,255	
	旅費		3,402	3,641	3,380	
	その他		2,215	3,226	2,613	
	間接経費		4,254	4,584	4,125	
小計	12,495	18,433	19,862	17,873	68,663	
合計		58,913	90,312	90,643	85,670	325,538

各項目の金額は千円単位（千円未満は切り捨て）とし、原則として消費税込みで記載してください。

(別紙3) 「京」の計算資源量

1. 目標

(単位：ノード時間/年)

	H28年度	H29年度	H30年度	H31年度
サブ課題A	1,809,813	633,590	760,308	2,250,000
惑星集積		422,393	506,871	1,500,000
原始惑星系円盤		211,197	253,437	750,000
サブ課題B	204,041	633,590	760,308	10,250,000
岩石惑星		56,319	14,837	200,000
ガス惑星		14,080	3,710	50,000
惑星大気		563,191	741,761	10,000,000
サブ課題C	2,309,334	1,379,816	1,655,779	4,900,000
太陽対流層		1,126,382	1,351,656	4,000,000
磁気リコネクション		168,957	202,749	600,000
地球磁気圏		84,479	101,374	300,000
サブ課題D	0	380,154	456,185	1,350,000
量子化学計算		154,878	185,854	550,000
ダスト計算		225,276	270,331	800,000
合計	4,323,188	3,027,150	3,632,580	18,750,000

(別紙4) 「京」以外の計算資源量

1. 目標

(単位: ノード時間/年)

	H28年度	H29年度	H30年度	H31年度	計算資源機関名
サブ課題A	150,000	150,000	200,000	200,000	宇宙航空研究開発機構 スーパーコンピュータ・システム (JSS2)
惑星集積	100,000	100,000	150,000	150,000	
原始惑星系円盤	50,000	50,000	50,000	50,000	
サブ課題B	0	350,000	2,650,000	2,650,000	京都大学情報環境機構 スーパーコンピュータシステム (Cray XC-40) 海洋研究開発機構 地球シミュレータ (NEC SX-ACE)
岩石惑星	0	100,000	600,000	600,000	
ガス惑星	0	200,000	2,000,000	2,000,000	
惑星大気	0	50,000	50,000	50,000	
サブ課題C	430,000	430,000	650,000	650,000	名古屋大学情報基盤センター スーパーコンピュータシステム (FX100) 海洋研究開発機構 地球シミュレータ (NEC SX-ACE)
太陽対流層	300,000	300,000	500,000	500,000	
磁気リコネクション	100,000	100,000	100,000	100,000	
地球磁気圏	30,000	30,000	50,000	50,000	
サブ課題D	0	700,000	840,960	1,121,280	筑波大学計算科学研究センター 計算機システム (HA-PACS/TCA (PACS-VIII), COMA (PACS-IX)) 最先端共同HPC基盤施設 計算機システム (Oakforest-PACS)
量子化学計算	0	300,000	420,480	560,640	
ダスト計算	0	400,000	420,480	560,640	
合計	580,000	1,630,000	4,340,960	4,621,280	