令和元年度 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）

令和元年度
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

令和 2 年 5 月 29 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令和元年度「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．令和元年度（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」 6
４－２－２．サブ課題 B「惑星内部・表層のダイナミクスと進化」 10
４－２－３．サブ課題 C「太陽活動による地球環境変動の解明」 17
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」 24
４－３．活動（研究会等） 30
４－４．実施体制 31

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）

<table>
<tr><td rowspan="8">代表機関</td><td colspan="2">機関名</td><td colspan="4">国立大学法人神戸大学</td></tr>
<tr><td colspan="2">所在地</td><td colspan="4">〒657-8501　兵庫県神戸市灘区六甲台町１番１号</td></tr>
<tr><td rowspan="3">課題責任者</td><td>ふりがな
氏　　名</td><td>まきの　じゅんいちろう
牧野　淳一郎</td><td>生年月日</td><td colspan="2">西暦 1963 年 1 月 6 日（57 歳）
※2020 年 4 月 1 日現在</td></tr>
<tr><td>所属部署名</td><td colspan="2">理学研究科</td><td>役職</td><td>教授</td></tr>
<tr><td>連絡先</td><td colspan="4">Tel.　078-599-6730　　Fax.　078-599-6735
E-mail　jmakino@people.kobe-u.ac.jp</td></tr>
<tr><td rowspan="3">事務連絡担当者</td><td>ふりがな
氏　　名</td><td colspan="2">うすい　ふみひこ
臼井　文彦</td><td colspan="2"></td></tr>
<tr><td>所属部署名</td><td colspan="2">惑星科学研究センター</td><td>役職</td><td>特命助教</td></tr>
<tr><td>連絡先</td><td colspan="4">Tel.　078-599-6730　　Fax.　078-599-6735
E-mail　usui@cps-jp.org</td></tr>
</table>

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．令和元年度（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」

令和元年度（2019年度）は、本格実施フェーズ最終年度として、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、「京」および既存の計算資源を用いて、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 計算科学研究センターと共同で実施する。また、ポスト「京」の利活用による成果創出に向けた知見の獲得や計算手法の確立を図る。

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。

・ ポスト「京」で目指す原始惑星系円盤から惑星への過程における具体的科学目標を設定し、これまでに開発した最適化コードに加えて新たなコード開発を進めるのと平行して、本格的な大域的重力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。
・ 磁気流体シミュレーションコードAthena++を用いて高解像度大域的非理想磁気流体シミュレーションを行い、原始惑星系円盤内の乱流の分布と性質を明らかにする。
・ FDPS を用いて開発した P³T 法の大域的 N 体シミュレーションコードの最適化、追加機能の実装および検証をさらに進める。

② サブ課題B「惑星内部・表層のダイナミクスと進化」

令和元年度（2019年度）は、本格実施フェーズ最終年度として、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、「京」および既存の計算資源を用いて、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実施する。また、ポスト「京」の利活用による成果創出に向けた知見の獲得や計算手法の確立を図る。

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。

・ 三つのテーマ「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」間のより一層の情報共有を図り、それぞれのモデル（岩石惑星モデル、ガス惑星モデル、惑星大気モデル）で必要となる基礎ルーチンの開発および最適化を進め、「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、放射・地表面過程を含む火星大気モデルによる「京」上での高解像度試験計算の解析を進めるとともに、全球ダストストームの数値計算の実現を目指す。
・ 現実の月のマントルの幾何形状を想定して、三次元球殻またはその一部における火成活動·マントル対流結合系のモデリングを継続する。地球などで見られるパルス的な火山活動のシミュレーションを行う。プレートテクトニクスの三次元モデルを用いたシミュレーションをさらに進める。
・ 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、より現実的な高精度高解像度計算を行なう非弾性回転球殻対流スペクトルモデルにスペクトル変換ライブラリを導入し、メニーコアマシンでの計算チェックおよび計算速度の追究を行う。

③ サブ課題C「太陽活動による地球環境変動の解明」

令和元年度（2019年度）は、本格実施フェーズ最終年度として、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、「京」および既存の計算資源を用いて、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実施する。また、ポスト「京」の利活用による成果創出に向けた知見の獲得や計算手法の確立を図る。

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。

・ スーパーコンピュータを使った太陽フレアの予測可能性を定量的に検証する。太陽活動領域と太陽コロナを結合した多階層格子モデルを用いて、太陽フレアの発生からコロナ質量放出の形成までを再現する。超高精度磁気圏モデルと衛星環境モデルの連成計算実験を進め、宇宙環境変動が衛星帯電に与える影響の評価を行うモデルの開発を進める。
・ 「京」、FX100、Oakforest-PACSなどを使って、太陽対流層から光球までを包括した熱対流計算をさまざまな磁場の初期条件について行い、観測可能な太陽表面での黒点構造と太陽深部の磁場構造を関係付ける。

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」

令和元年度（2019年度）は、本格実施フェーズ最終年度として、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、「京」および既存の計算資源を用いて、分担機

関の国立大学法人筑波大学、国立大学法人岡山大学と共同で実施する。また、ポスト「京」の利活用による成果創出に向けた知見の獲得や計算手法の確立を図る。

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。

- 「京」、Oakforest-PACSを用いて、星間空間のキラル有機分子合成過程の第一原理分子動力学計算ならびに円偏光波の吸収に対する円二色性の計算を実施する。また、原始太陽系円盤において有機分子の鏡像異性体過剰を引き起こす円偏光波が、星間ダスト粒子による光子散乱によって生成される可能性について調べる。
- 原始太陽系におけるダスト成長過程の解明に向け、「京」と名古屋大学FX100を活用し、原始惑星系円盤乱流場中のダスト粒子の衝突付着成長シミュレーションを推し進める。高レイノルズ数圧縮性乱流が粒子の付着成長過程に及ぼす影響を明らかにするため、シミュレーションの大規模化を進めるとともに、コードのさらなる高速化を実施する。

また、分担機関と連携し、再委託によって、以下の⑤～⑮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」での惑星集積シミュレーションの成果を踏まえて、ポスト「京」で目指す原始惑星系円盤から惑星への過程における具体的科学目標を設定し、これまでに開発した最適化コードに加えて新たなコード開発を進めるのと平行して、本格的な大域的重力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、最適化されたコードの公開も行う。

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)

前年度に引き続き本研究計画の一環として開発している公開磁気流体シミュレーションコードAthena++を用いて高解像度大域的非理想磁気流体シミュレーションを行い、原始惑星系円盤内の乱流の分布と性質を明らかにする。特にこれまでの研究で見えてきたリング状構造の形成やデッドゾーン境界付近での質量流束などに着目して詳細な解析を行う。さらにALMAやすばる望遠鏡を用いた原始惑星系円盤の最新の観測結果との比較を行う。

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 計算科学研究センター)

FDPS(Framework for Developing Particle Simulator)を用いて開発してきたP^3T法(Particle-particle Particle-tree)の大域的N体シミュレーションコードの最適化と追加機能の実装および検証を国立大学法人東京工業大学と協力して、さらに進める。

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「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」間のより一層の情報共有を図り、それぞれのモデル（岩石惑星モデル、ガス惑星モデル、惑星大気モデル）で必要となる基礎ルーチンの開発および最適化を進め、「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、昨年度までに開発した放射・地表面過程を含む火星大気モデルによる「京」上での高解像度試験計算の解析を進めるとともに、必要となる地球型惑星の気象・気候に対する理解を進展させる。これらを元に火星大気モデルの検証と開発改良を進め、全球ダストストームの数値計算の実現を目指す。

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)

現実の月のマントルの幾何形状を想定して、三次元球殻またはその一部における火成活動･マントル対流結合系のモデリングを継続する。さらにこのモデルを用いて、地球などで見られるパルス的な火山活動のシミュレーションを行う。これと同時に、平成29年度に完成したプレートテクトニクスの三次元モデルを用いたシミュレーションをさらに進める。

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、より現実的な高精度高解像度計算を行なう非弾性回転球殻熱対流スペクトルモデルに、昨年度までに開発したスペクトル変換ライブラリを導入し、メニーコアマシンでの計算チェックおよび計算速度の追求を行う。

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）

これまでに開発した3次元電磁流体力学安定性解析モデルを使い、大量の衛星観測データを処理することで、スーパーコンピュータを使った太陽フレアの予測可能性を定量的に検証する。太陽活動領域と太陽コロナを結合した多階層格子モデルを用いて、太陽フレアの発生からコロナ質量放出の形成までを再現する。超高精度磁気圏モデルと衛星環境モデルの連成計算実験を進め、宇宙環境変動が衛星帯電に与える影響の評価を行うモデルの開発を進める。

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」、FX100、Oakforest-PACSなど使用可能な資源を使って、太陽対流層から光球までを包括した熱対流計算をさまざまな磁場の初期条件について行い、観測可能な太陽表面での黒点構造と太陽深部の磁場構造を関係付ける。

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」、Oakforest-PACSを用いて、星間空間のキラル有機分子合成過程の第一原理分子動力学計算ならびに円偏光波の吸収に対する円二色性の計算を実施する。また、原始太陽系円盤において有機分子の鏡像異性体過剰を引き起こす円偏光波が、星間ダスト粒子による光子散乱によって生成される可能性について調べる。この目的のため、T-matrix法を用いて非球形ダスト粒子散乱による円偏光率を考慮した円偏光輻射輸送計算コードを開発する。

⑭原始太陽系におけるダスト成長過程の研究

（再委託先：国立大学法人岡山大学）

原始太陽系におけるダスト成長過程の解明に向け、「京」と名古屋大学FX100を活用し、これまでに開発したコードを用いて、原始惑星系円盤乱流場中のダスト粒子の衝突付着成長シミュレーションを推し進める。また、高レイノルズ数圧縮性乱流が粒子の付着成長過程に及ぼす影響を明らかにするため、シミュレーションの大規模化を進めるとともに、コードのさらなる高速化を実施する。

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」＝「富岳」を想定した計算コード・基礎ルーチンの開発、科学目標の詳細化・大規模計算の実施を進めてきた。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開発を推進した。

令和元年度において、サブ課題 A「惑星の起源の解明」では、「富岳」で目指す原始惑星系円盤から惑星への過程における具体的科学目標を設定し、これまでに開発した最適化コードに加えて新たなコード開発を進めるのと平行して、本格的な大域的重力 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した。また、磁気流体シミュレーションコード Athena++を用いて高解像度大域的非理想磁気流体シミュレーションを行い、原始惑星系円盤内の乱流の分布と性質を明らかにした。さらに、大規模並列粒子シミュレーションコード開発フレームワーク FDPS を用いて開発した P^3T 法の大域的 N 体シミュレーションコードの最適化、追加機能の実装および検証を行った。サブ課題 B「惑星内部・表層のダイナミクスと進化」では、三つのテーマ「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」間の情報共有を図り、それぞれのモデル（岩石惑星モデル、ガス惑星モデル、惑星大気モデル） で必要となる基礎ルーチンの開発および最適化を進め、「京」やメニーコアマシンでの計算チェック、大規模計算の実装実験、計算速度の追求を行った。サブ課題 C「太陽活動による地球環境変動の解明」では、「京」やその他の計算資源を活用して、太陽対流層から光球までを包括した熱対流計算をさまざまな磁場の初期条件について行い、観測可能な太陽表面での黒点構造と太陽深部の磁場構造を関係付けた。また、スーパーコンピュータを使った太陽フレアの予測可能性を定量的に検証した。太陽活動領域と太陽コロナを結合した多階層格子モデルを用いて、太陽フレアの発生からコロナ質量放出の形成までを再現した。超高精度磁気圏モデルと衛星環境モデルの連成計算実験を進め、宇宙環境変動が衛星帯電に与える影響の評価を行うモデルの開発を進めた。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、「京」などを用いて、星間空間のキラル有機分子合成過程の第一原理分子動力学計算ならびに円偏光波の吸収に対する円二色性の計算を行った。原始太陽系円盤において有機分子の鏡像異性体過剰を引き起こす円偏光波が、星間ダスト粒子による光子散乱によって生成される可能性について調べた。さらに、原始太陽系におけるダスト成長過程の解明に向け、「京」などを活用し、原始惑星系円盤乱流場中のダスト粒子の衝突付着成長シミュレーションを行った。高レイノルズ数圧縮性乱流が粒子の付着成長過程に及ぼす影響を明らかにするため、シミュレーションの大規模化を進めるとともに、コードのさらなる高速化を実施した。

サブ課題間の連携のために、本課題では公開シンポジウム「「京」から「富岳」へ：大規模シミュレーションが拓く惑星科学の未来」（令和元年 9 月・東京大学）、2019 年度 先端融合研究環（統合研究領域）シンポジウム「最新科学で迫る月と地球の起源」（令和元年 10 月）、公開シンポジウム（令和 2 年 3 月・オンライン）などを開催し、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隔月で開催した。技術的課題に関しては理研 R-CCS 他と連携・意見交換をしながら、「富岳」向けのアプリケーションの開発・最適化を進めた。新型コロナウイルス感染拡大の影響から実体での会議開催が困難であったが、かねてより神戸大学惑星科学研究センターを中心に導入していたテレビ会議やウェブ会議システムを積極的に活用し、大きな負担もなく遠隔会議を行い、本課題における研究開発を遂行した。

４－２－１．サブ課題 A「惑星の起源の解明」

令和元年度（2019 年度）において、サブ課題 A ではこれまでに開発した最適化コードに加えて新たなコード開発を進めるのと平行して、本格的な大域的重力 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し、さらに磁気流体シミュレーションコード Athena++を用いて高解像度大域的非理想磁気流体シミュレーションを行い、原始惑星系円盤内の乱流の分布と性質を明らかにした(４－１．実施計画①⑤⑥⑦に対応)。

（1）大域的惑星集積シミュレーション

東京工業大学では、大粒子の微惑星集積シミュレーションを目指したコード開発を理研 R-CCS と共同で行った。開発したコード GPLUM (Global PLanetary simUlation code with Mass dependent cut-off; Ishigaki, Kominami, Makino, Fujimoto, in preparation)は、４次エルミート法とツリー法を組み合わせ、粒子毎にツリー法を適用する範囲を決めることで高速化をはかった。本年度は、惑星と円盤との重力相互作用によって引き起こされるタイプ１惑星軌道移動の効果を実装した大領域での微惑星集積シミュレーションのテストランと平行して、土星のリングからの氷衛星形成モデルについてのプロダクトランを行った。このモデルでは、過去に重いリングが形成され、リング粒子がロッシュ限界の外側に拡散することで、粒子が自己重力で固まって衛星になり、リングの相互作用で次々と離れていくというモデルで、近年の土星探査機カッシーニの観測データによって支持されているモデルである［Ida (2019, Science) など参照］。このシミュレーションでは、リングを 10 万体の粒子で表し、リング粒子はお互いの非弾性衝突と重力相互作用で微細な密度波構造を作り（図１）、その密度波構造を持ったリングが衛星と重力相互作用をして、数本の渦状腕を作り、そのことでリングの角運動量が衛星に運ばれて、氷衛星の軌道が急速に離れていく。この軌道拡大の速さを考えると、現在の衛星の軌道分布を実現できる可能性があることがわかった。本成果は論文として国際誌に投稿する予定である (Nakajima, Ida, Ishigaki, in preparation)。

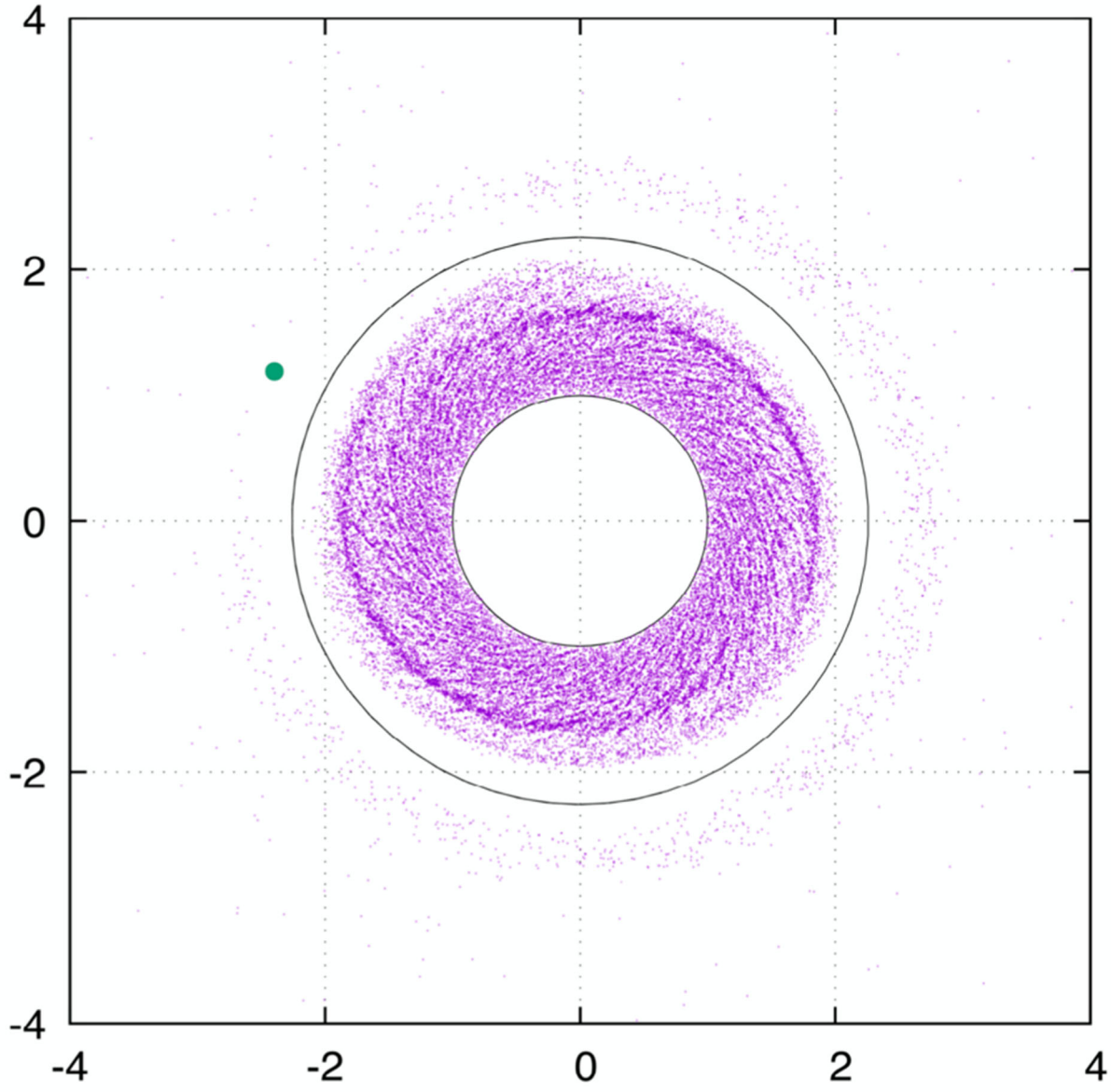


図１：土星リングと衛星の重力相互作用（Nakajima, Ida, Ishigaki, in preparation)。内側の半径１の円は土星表面、外側の円はロッシュ限界で、リングはその間に分布する紫の点。衛星は左上の緑の点。リングは 10 万体の粒子で表され、お互いの非弾性衝突と重力相互作用で微細な密度波構造を作る。また、衛星との重力相互作用で２本の渦状腕が作られる。

（２）星形成・原始惑星系円盤の大規模シミュレーション

大阪大学では、昨年度に引き続き、磁気流体シミュレーションコードAthena++原始惑星系円盤の大域的非理想磁気流体シミュレーションを行い、磁気回転不安定性によって駆動される乱流の性質について調べた。特にオーム散逸及び両極性拡散の作用により乱流が抑制されるデッドゾーンと磁気回転不安定性による乱流が卓越する領域の境界であるデッドゾーン境界付近の構造に着目し、降着率の非一様性によってリングやギャップ等の構造が形成されることを示した。その後の惑星の母天体となる微惑星はリングにトラップされて集積が促進される可能性があるため、このような構造はその後の惑星形成過程に重要な役割を果たすと考えられる。

また、円盤の内縁における原始星と原始惑星系円盤との相互作用の研究も進め、円盤磁場がリコネクションを起こすことで大規模なフレア現象を起こすことを示した。原始星が大規模なフレアを起こすことはX線による観測などから知られていたものの、その機構は単純な太陽フレアのスケールアップで説明することは困難であったが、我々はこの問題に対し新しい機構を提案した(Takasao et al. 2019; 図２)。

平行してAthena++コードの拡張も進め、星形成や円盤の分裂の計算に有用なAdaptive Mesh Refinement上でのMultigrid法を用いた自己重力ソルバを開発した。このソルバを元として輻射輸送計算への拡張を進めていく予定である。

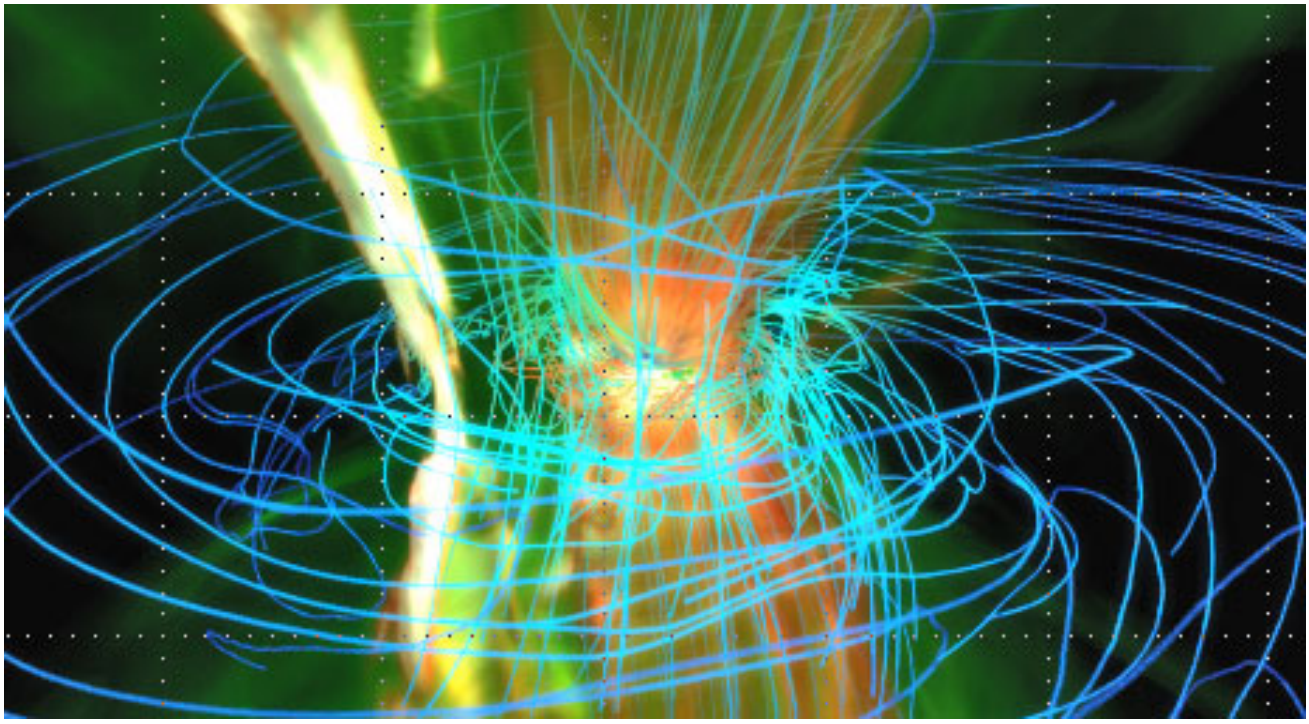


図２：磁気リコネクションによる原始星フレアの発生機構の解明(Takasao et al. 2019)。可視化映像の制作はヴェイサエンターテイメント株式会社・武田隆顕氏による。円盤磁場のリコネクションにより加速された高温ガス（白色）が放出される様子。青い線は磁力線を表す。

４－２－２．サブ課題 B「惑星内部・表層のダイナミクスと進化」

令和元年度（2019 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」それぞれのモデル（岩石惑星モデル、ガス惑星モデル、惑星大気モデル）で必要となる基礎ルーチンの開発および最適化を進め、「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)「岩石惑星の火成活動〜マントル対流系の三次元球殻モデリング」

岩石惑星内部研究では、(1) 月を想定した小さなコアをもつ球殻マントル中の熱対流、(2) 三次元矩形領域におけるプレート・テクトニクス、(3) 三次元部分球殻マントルにおける火成活動（すなわち対流の湧昇域でのマグマの生成と重力分離）および (4) 断熱圧縮の効果が顕著なスーパー地球でのマントル対流の４つのテーマで数値シミュレーションを遂行した。

月はコアが小さいため、マントル対流は球殻という幾何形状の影響を強く受ける。筆者らはすでにこのような対流の予備的解析を行っていたが（Yanagisawa et al., 2016）、この研究を発展させ、対流による熱輸送の結果マントルはどのような熱史を辿るのかを究明することを目的とするシミュレーションを開始し、観測される月の歴史と整合的なマントル進化のモデルを「富岳」を用いて構築できるという見通しを得た。

次に、地球の大きな特徴であるプレート・テクトニクスが自発的に発生するマントル熱対流のモデルの構築に成功した。地球のリソスフェアは、大きな応力を受けると破壊しプレート境界が生成される。一旦生成されると、このプレート境界は応力が破壊強度以下に下がっても存続し続ける。このマントル物質の力学的状態の応力履歴依存性を三次元マントル対流モデルに組み込むことにより、図３に示すように、剛体のように振る舞う岩石の板の対流運動としてのプレート運動を再現した（Miyagoshi et al., Earth Planet & Space, 投稿中）。

さらに、図４に示すように火成活動・マントル対流結合系の数値シミュレーションを実行した。筆者らは二次元モデルを用いた研究から、火星サイズより大きな惑星ではマントル湧昇流と火成活動の間にポジティブ・フィードバックが働き、実際に観測されるようなパルス的な大規模火成活動が起こることを予想してきたが、この研究を三次元部分球殻モデルに拡張した。

また、地球よりサイズの大きなスーパー地球では、断熱圧縮の効果によりマントル対流は地球からの外挿により得られる予想より弱く、また惑星形成直後のマントルの熱的初期状態がその後の数十億年にわたるマントル対流の歴史を支配するという結果を得た（Miyagoshi et al., 2017, 2018）。

以上の数値シミュレーションは、亀山らが開発した擬似圧縮法を用いて実行したが、特にプレート・テクトニクスや火成活動のシミュレーションにおいては、通常のマントル対流のシミュレーションより格段に高い精度が要求されることが数値コード開発の過程で判明し、この要求を満たすべく数値計算法の改良を行なった。

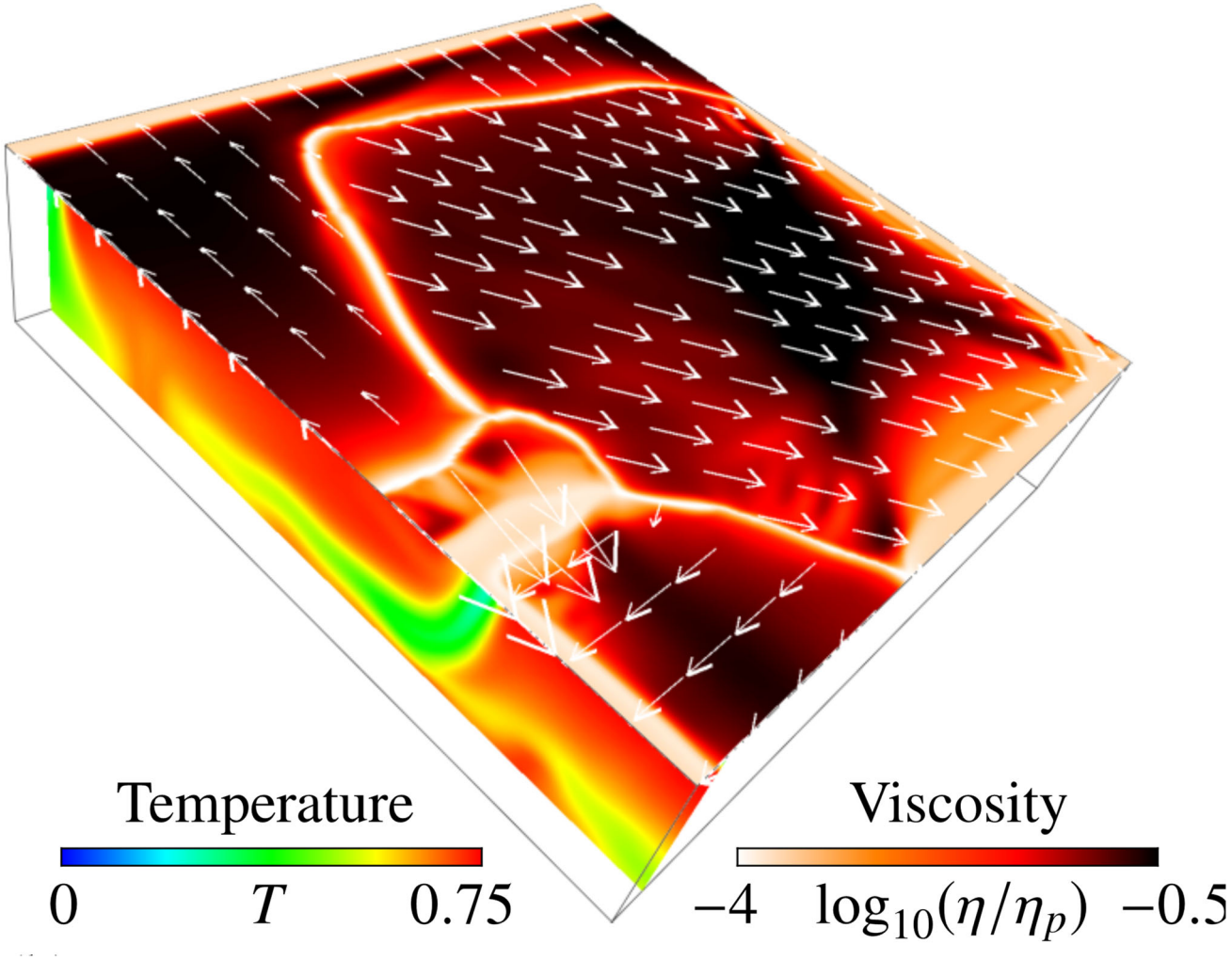


図３：プレート・テクトニクスを含む熱対流の数値モデル。矩形領域の上面の色は流体の粘性率の分布を表す。暗い色で示された高粘性領域が明るい色で示された幅の狭い低粘性のプレート境界域により区切られ矢印で示されたように剛体運動している様子が見える。側面の色は、基準となる温度コントラスト（ここでは 1500℃を採用）を単位として測った温度分布を表す。プレートの収束域で冷たいマントル物質が沈み込んでいる様子が見える。

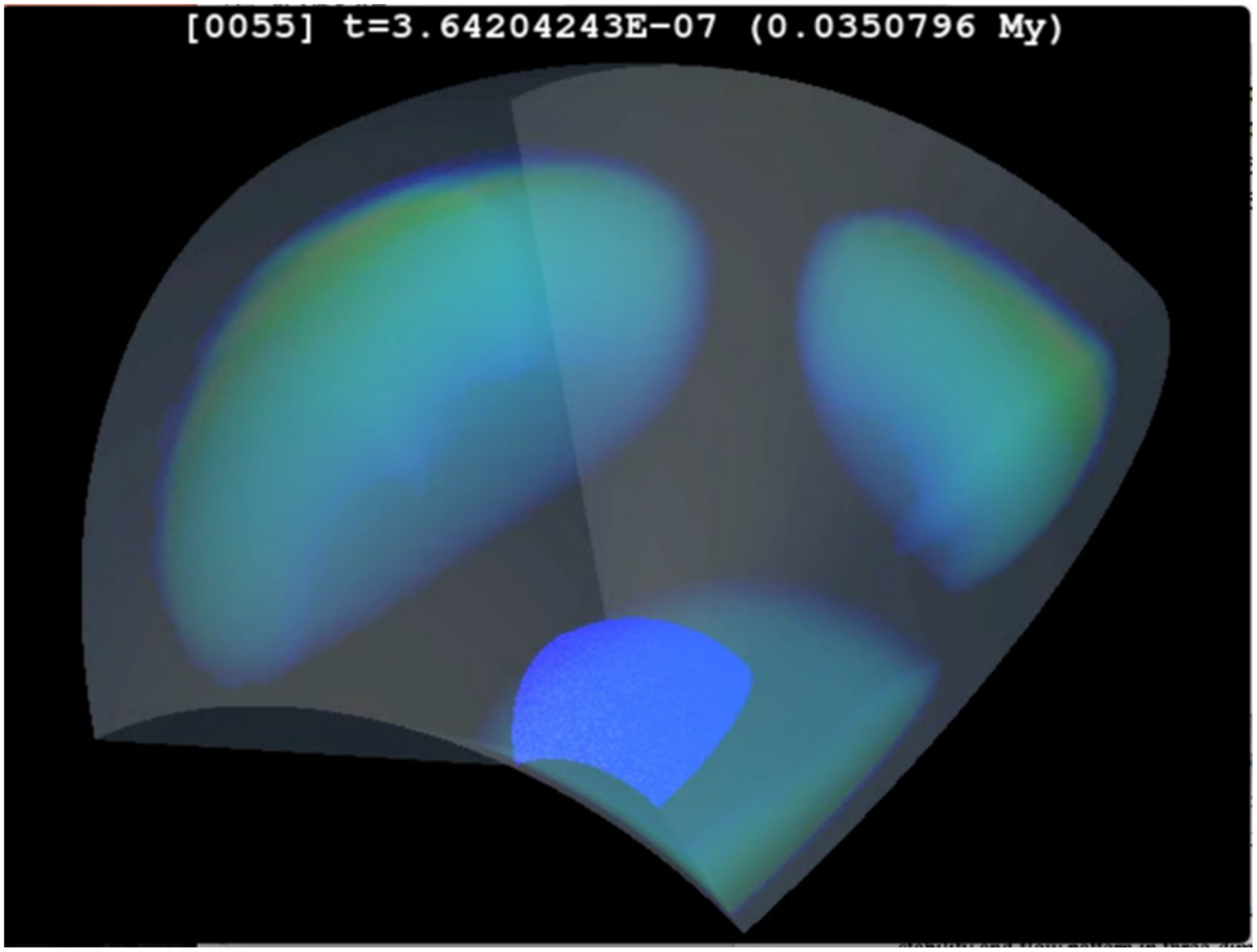


図４：三次元部分球殻マントルにおける火成活動・マントル対流結合系の数値モデル。淡い色の付いている領域はマグマの分布を表しており、マントル湧昇流によりマグマが生成されている様子がわかる。このマグマは浸透流という形で上方に移動しやがて地表面に噴出して火山活動を起こす。下の濃い青の部分はコア・マントル境界。図の上の数字が示すように数万年の短い時間スケールでマグマが生成されている様子がわかる。

(ii)「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」

ガス惑星研究では、平成 30 年度までに開発してきた高解像度長時間積分を行うためのスペクトル変換ライブラリをガス惑星大気モデルに導入し、その性能を評価した。深さ方向の密度成層を考慮した非弾性系モデルを構築し、開発してきたスペクトル変換ライブラリ「ISPACK3」「spml」および「地球シミュレータ（ES）用 spml」を用いて大規模並列化を行った。緯度方向に加えて動径方向にも MPI 並列化を行うことが可能となり、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。この実装には、動径微分と境界条件適用のために、動径方向に分割した変数を毎ステップ統合して処理する必要があったが、そのために必要なプロセス間通信時間はスペクトル計算に要する時間に比べて無視できる程度であったため、高い並列化効率を維持することができている。

図５はそのベンチマーク計算（Jones et al., 2011）を地球シミュレータと Intel Xeon CPU（京大スーパーコンピュータ システム B）で行い、その計算時間を示したものである。地球シミュレータの場合、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 並列数でも計算速度を減少させることができるようになっていることがわかる。Intel Xeon システムでも同様の傾向がみられ、MPI 並列効率の良さと動径方向並列の効果が見てとれる。

今後は、開発したスペクトル変換ライブラリとガス惑星大気モデルを「富岳」にてチューニングを行うことで、大規模並列計算による長時間積分への展望が開けると期待される。

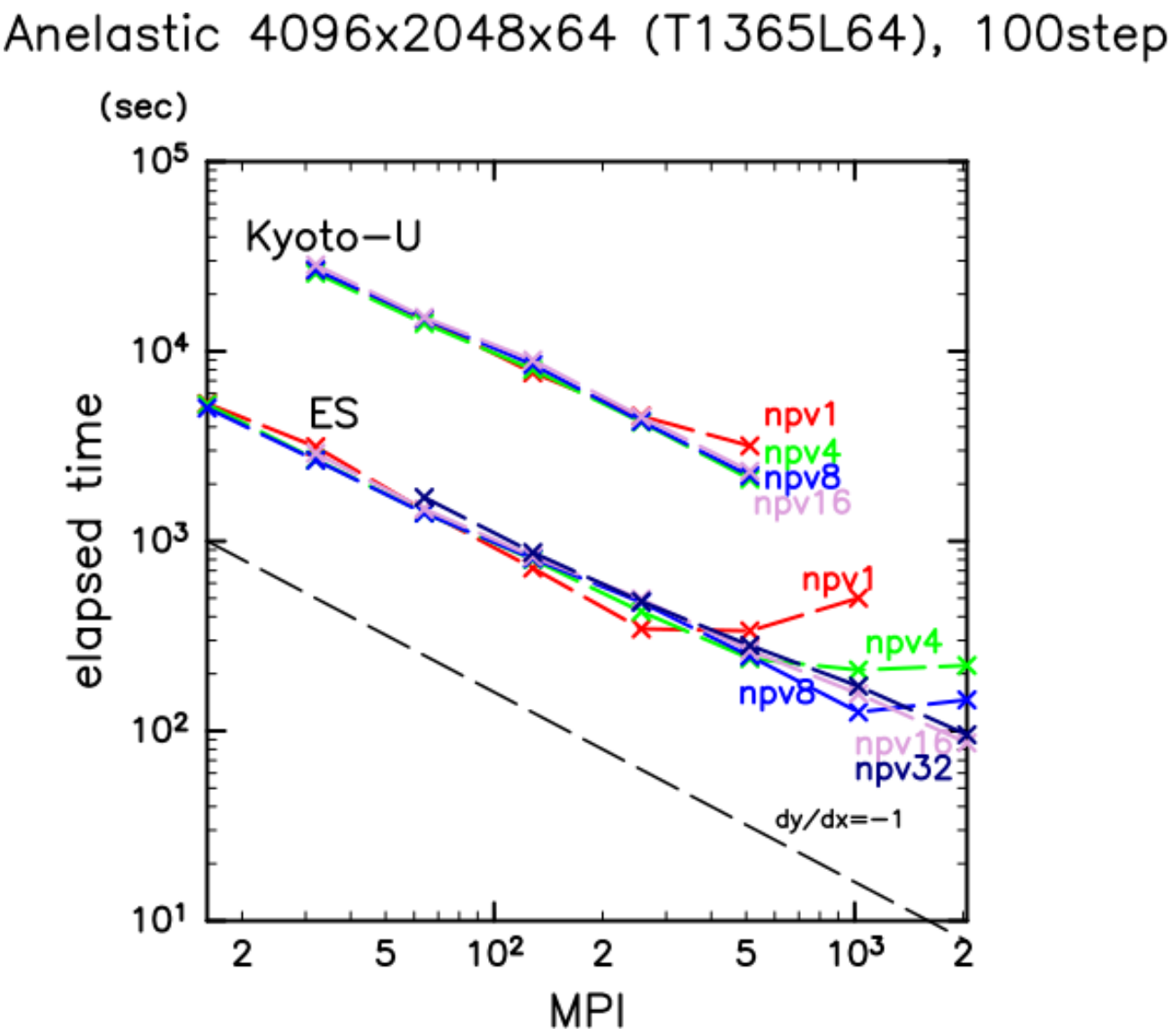


図５：開発したガス惑星大気モデルのベンチマーク計算（Jones et al. 2011）の計算時間比較。解像度は経度、緯度、動径方向にそれぞれ 4096、2048、64 点。MPI 並列数に対して、100 ステップにかかる経過時間をプロットしている。ES：地球シミュレータにおいて ES 用スペクトル変換ルーチンと ES 用 spml を用いて 4 スレッド並列計算した場合。Kyoto-U：京都大学スーパーコンピュータ システム B（Haswell Xeon E5-2699v3）において ISPACK3 と spml を用いて 1 スレッド並列計算した場合。npv は動径方向並列数を表す。

(iii)「地球型惑星の気象・気候～火星全球ダストストーム」

惑星大気研究では、「京」や「富岳」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」に、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、火星大気の物理過程ルーチンを移植する形で、火星大気の全球非静力学モデル開発を進めている。令和元年度は、前年度までに開発した火星放射や土壌モデルを含む火星版 SCALE-GM を用いて、「京」、Oakforest-PACS 並びに九州大学スーパーコンピュータシステム ITO サブシステム A において大規模高解像度計算の実効性能を確認した。水平格子点数が約 4200 万点（格子点間隔 dx = 約 1.9 km)、鉛直 36 層、時間刻み幅 dt = 1.5 秒の設定で、1.5 時間分計算するために、「京」2560 ノードを用いて約 22 時間、Oakforest-PACS 80 ノードを用いて約 31 時間、九大 ITO サブシステム A 72 ノードを用いて約 36 時間をそれぞれ要することが分かった。

前年度までに実施した様々な水平解像度での火星大気三次元計算は、地表面アルベドを 0.5 に設定していたため太陽光による地表面加熱が、現実火星よりも小さくなっていた。本年度は地表面アルベドを現実的な値 0.2 に設定した三次元計算を実施した。計算の結果、アルベド 0.5 の場合に比べてアルベド 0.2 の場合には、鉛直対流はより強くなり、dx = 30 km 程度の解像度でもモデル内で鉛直対流が形成されることが分かった。一方で、解像度に依存して表現される鉛直対流の水平スケールが小さくなるという傾向や、鉛直対流の水平スケール自体はアルベド 0.5 の場合と変わらなかった。すなわち、観測から示唆される水平 5-10 km 程度の大きさの鉛直対流を表現するためには、水平格子間隔が 1 km 以下の計算が必要だということが改めて示唆される結果となった。

また本年度は、火星版 SCALE-GM にダストの巻き上げや重力沈降のモジュールを導入し、モデル内でダストの巻き上げ・輸送・沈降過程を表現できるようにした。ここで巻き上げ過程は、地表風応力が閾値（0.03 Pa）を超えた場合に，応力の 3 乗に比例する形でダストが大気中に流入するようにパラメタリゼーションされている。輸送および沈降過程はセミラグランジュ法により計算される。図６は dx = 60 から 15 km の場合のダスト混合比の平均子午面分布と平均ダスト巻き上げ率を示している。ただし、ここではダスト分布に応じた放射加熱は計算せず、放射に対しては水平一様なダスト分布を仮定して加熱を計算している。図６より、解像度が高いほど、より多くのダストが巻き上がり、またより上空にまで広がっていることが分かる。これは、ダスト過程の計算において、鉛直対流を精確に表現することの重要性を示唆している。また、dx = 60 km の計算ではあるものの、1 火星年を通した計算を実施した。結果、夏から秋にかけて及び冬から春にかけての季節にダスト巻き上げ量が多くなり、大気中のダスト量も多くなった。ただし、これはダスト分布が放射加熱にフィードバックせず、地形のない設定での結果であることに注意せねばならない。より現実的な設定で計算するためには、地形を導入し、ダストの巻き上げパラメタリゼーションに含まれる閾値や係数を、水平解像度に応じて調整した上で、ダスト分布に応じた放射加熱を計算する必要がある。今後は、「富岳」成果創出加速プログラムにおいて、これらの課題に取り組む予定である。

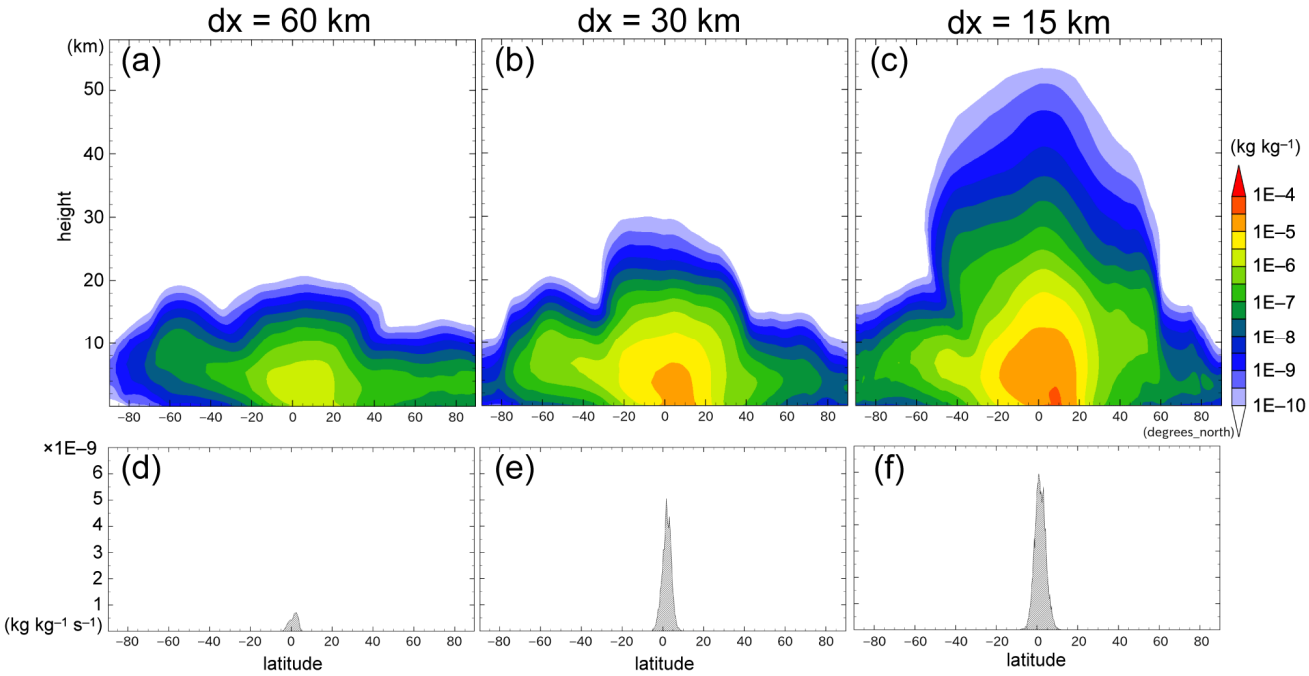


図 6 ：火星大気計算における(a)–(c)ダスト混合比の子午面分布と(d)–(f)ダスト巻き上げ率の緯度分布の解像度依存性。ともに東西平均および時間平均（北半球春分から 26 日目から 5 日間）をとっている。水平格子点間隔 dx は(a),(d)60 km、(b),(e)30 km、(c),(f)15 km である。

４－２－３．サブ課題Ｃ「太陽活動による地球環境変動の解明」

令和元年度（2019 年度）において、サブ課題 C では太陽フレアとその地球環境影響のシミュレーションを行うことで太陽フレアの予測可能性を定量的に検証し、太陽対流層の超大規模・長時間シミュレーションをさまざまな磁場の初期条件について行い、観測可能な太陽表面での黒点構造と太陽深部の磁場構造を関係付けた(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

前年度に引き続き、開発した R2D2 (Radiation and RSST for Deep Dynamics)を用いて黒点形成のシミュレーションを実行した。前年度までに実行した計算では、単純な磁束管では出現する二つの黒点間の距離が広くなり過ぎてしまうことがわかっていた。太陽観測で得られるものと同等の状況を達成するためには、太陽内部には、トーラス上の磁束管が必要だと結論づけていた。前年度は太陽表面から 20 Mm 程度の位置に初期磁束管をおいていたが、今年度には太陽表面から 35 Mm とより深い領域を初期位置とする磁束管を用いて計算を行ったところ、現実の太陽を比較しうる黒点形成を実現することができた。この計算について、解析を進め以下のことを明らかにした。

(1) 磁束管の上昇運動は、磁気浮力と高いエントロピーの二つの効果によって駆動されているが、後者が支配的である。また、上昇速度は熱対流の典型的な上昇速度よりも少し速い。
(2) 磁束管の上昇速度は太陽表面から 18 Mm の位置で 250 m/s ほどとなっていた。これは、Birch et al., 2016 で提案された制約(<150 m/s)よりも大きな値になっている。Birch et al., 2016 では、計算領域が 10 Mm ほどの小さい計算領域を用いて、この制約を得ていたが、本研究では太陽対流層全体を含んだ 200 Mm の計算領域を用意したために Birch et al., 2016 ではあった境界条件を排除できたことが原因であると結論づけられた。
(3) 黒点形成する磁束管は初期に下降流で占められているが、黒点形成する過程でその中心部が上昇流で占められるようになる。これは、Zhao & Kosovichev, 2003 の観測結果と調和的である。Chen et al., 2017 では、この流れが再現できていなかったが、これも前研究では計算領域が狭かったために、境界条件の影響を受けていたことが問題だと考えられる。
(4) 黒点形成の主なメカニズムは、黒点領域へと吹き込む大規模な流れと、乱流の相関効果であると結論づけた。
(5) 黒点に伴う低温領域は少なくとも太陽表面から 40 Mm まで続いている。

以上の結論の多くが、黒点形成を理解するためには、R2D2 でしか達成できないような広い計算領域をとることの重要性を示唆している。この結果は Monthly Notices of Royal Astronomical Society に投稿し、Hotta & Iijima, 2020 として 2020 年 4 月に出版された。

一方で、「富岳」完成後に行う計算のために取り組んだのが、計算途中での計算領域変化・解像度変化のプロシージャの開発である。「富岳」では、対流層深部の超高解像度の計算を実行し、その結果を太陽表面を含めた計算に取り入れることで、太陽内部の磁場生成から黒点形成までを一貫して追うことを目的としている。そこで、計算の途中で計算領域変化・解像度変化する必要がある。大規模計算機での実行

性能を落とさないために、このプロシージャはポストプロセスとして行うことにした。R2D2 は Fortran で書かれたコードであるが、このコードの中で MPI I/O を用いてデータ出力を行い、結果を Python で読み込む。Python 上で領域や解像度変換を行い、再度 MPI I/O で読み込める形で出力。大規模計算機で続きの計算を実行するという手続きをとった。データの取扱の容易さから Python を用いて領域・解像度変換を行なっているが、元のコードは Fortran で書かれており、高速に目的を達成することができる。

この手法を用いて計算した結果を図７に示す。放射強度を表したものだが、二つの黒点の距離が非常に近くなっており、いわゆるデルタ型黒点が形成されている。このデルタ型黒点形成のためには、R2D2 でしか達成できないような深い計算領域をとる必要があることがわかっている(Toriumi & Hotta, 2019)。一方で、このような深い計算領域を取って、長い計算時間をとりつつ、高い解像度を維持することが困難を伴うので、今年度開発した解像度変換のプロシージャを用いた。図７に示すように、デルタ黒点に伴う非常に微細な構造も捉えることができるようになっている。

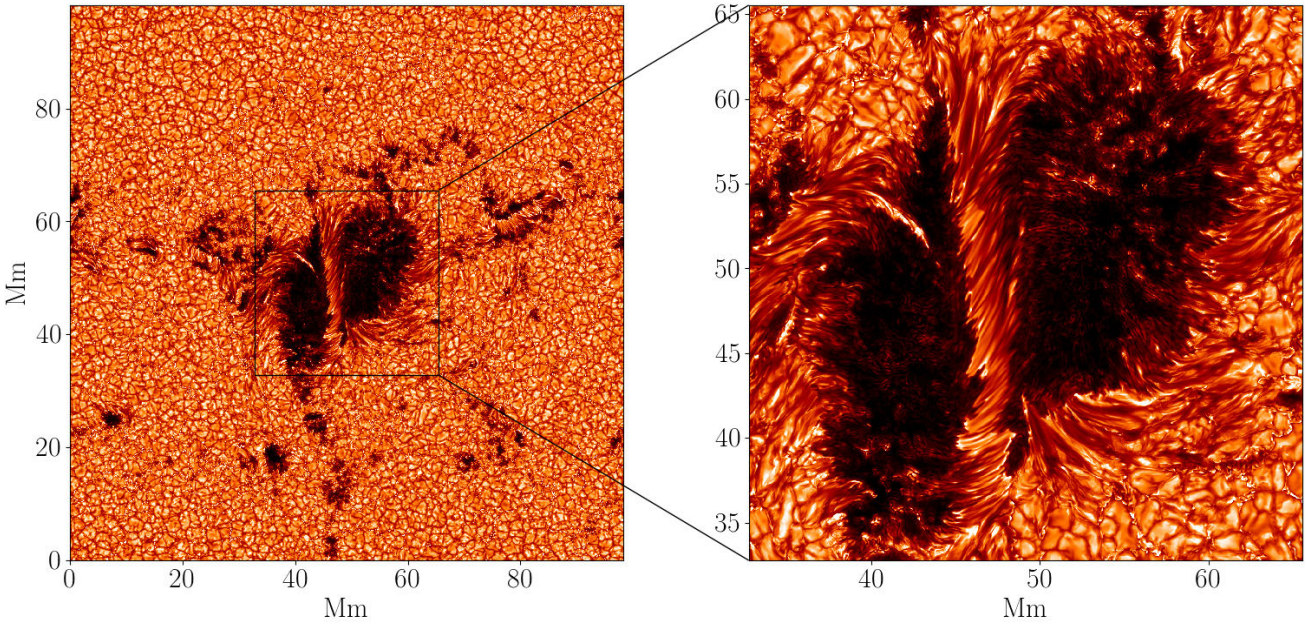


図 7：高解像度のデルタ黒点形成シミュレーションの結果。観測時に得られると考えられる輻射強度を表した。

（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

太陽フレアの発生機構から、螺旋状にねじられた磁力線群の集まりである「磁気フラックスロープ」の形成・放出過程、さらには「コロナ質量放出(CME)」の発生機構までを探るため、多層格子法を実装した磁気流体力学（MHD）計算コードの開発に取り組んできた。元となる計算コードはすでに星形成問題で既に実績のある SFUMATO（Self-gravitational Fluid-dynamics Utilizing Mesh Adaptive Technique with Oct-tree; Matsumoto 2007）を改造することで、太陽コロナ問題へと応用した。本年は開発してきたコードを用いて、太陽活動領域 12673 が 2017 年 9 月に引き起こした X2.2、X9.3 フレアの再現に取り組み、磁気フラックスロープが 1 太陽半径程度まで上昇する様子を追いかけることでどのように CME が形成されていくのかを考察した。図８(a)は太陽表面の磁場の鉛直成分を表しており、これは黒点群に相当する。この磁場をシミュレーションの境界条件として与える。白が正極で黒が負極を表しており、黒い線で囲まれたブロックは、計算格子のブロックを表しており(1 ブロックの中に 8×8 の格子点が含まれている)、磁場強度の強い箇所に格子点を集中させた。初期条件は非線形フォースフリー磁場と呼ばれる太陽表面の磁場 3 成分から外挿された 3 次元磁場を用いた。境界条件に与える磁場はフレアの 30 分前に取得されており、自由エネルギーが十分に蓄積された 3 次元磁場が外挿される。

結果を図８(b)に示す。磁場勾配の強い局所的な領域で発生する磁気リコネクションがトリガーとなり、最終的には図８(b)にあるような巨大な磁気フラックスロープが放出する様子が再現された。磁気フラックスロープの下部には縦に伸びた強い電流構造「電流シート」が形成されており、ここでフレアリコネクションが発生している。フラックスロープの磁束はまだ増加傾向にあり、CME に成長するまでにさらに″強い″フラックスロープが形成されていくであろうことが予想される。また、フラックスロープの軌道は周囲の磁場に強く影響するので、正確な CME の再現、さらには予測にはさらに大きな計算領域での計算が必要となる。

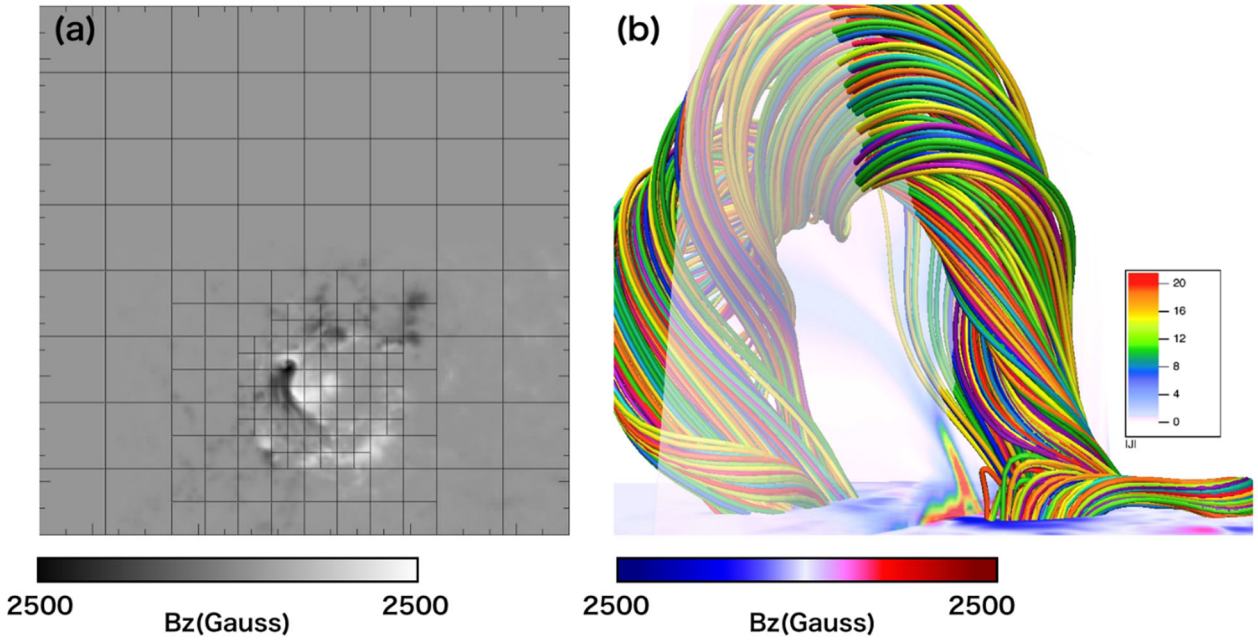


図８：(a) 太陽観測衛星「Solar Dynamics Observatory」より得られた太陽活動領域 12673 の鉛直成分の磁場構造。白と黒は正極と負極をそれぞれ表している。黒い線で囲まれた四角は計算ブロックを表しており、1 ブロックに 8×8 の格子点が含まれている。(b) 上空へと放出していく磁気フラックスロープを表している。断面の色は電流の強さを表している。

（3）地球磁気圏と人工衛星環境のシミュレーション

本サブグループの研究開発目標は太陽面爆発に伴って生じるじょう乱が、地球磁気圏構造と高エネルギー粒子環境、ひいては人工衛星周辺環境の如何なるじょう乱につながるかを、定量的に評価する数値フレームワークを構築することである。とりわけ地球電磁気環境変動の詳細な物理描像と、人工衛星システムという社会インフラとの間の関わりを、経験則に頼らず物理法則に基づいて評価するため、

1. 地球磁気圏グローバル MHD シミュレーション
2. 地球磁気圏高エネルギー粒子環境のミクロ物理プロセス PIC シミュレーション
3. 人工衛星近傍電磁気環境じょう乱の PIC シミュレーション

を組み合わせた「MHD・PIC 連成シミュレーションモデル」を構築し、次世代スーパーコンピュータに高効率に実装することを目指して開発に取り組んだ。今年度の取り組みとして、コード間結合ライブラリ CoToCoA（Code-To-Code Adapter）を開発して公開した（https://github.com/tnanri/cotocoa）。CoToCoA ライブラリを利用して MHD・PIC 連成シミュレーションモデルを実装し、九州大学のスーパーコンピュータシステム約 1000 ノードを利用して、性能評価を行った。磁気圏 MHD シミュレーションの結果から磁力線を計算し、PIC シミュレーションに繋げるためにかかる通信部分の時間を評価した。並列数によって利用する総グリッドサイズが変化しない strong scaling では、400×400×400 の 3 次元グリッドを利用し、並列プロセス数当たりの計算量が一定の weak scaling では 100×100×100/プロセスのグリッドを使い評価している。図 9 に性能測定結果を載せる。図中の sampling は計算時間であり、その他は CoToCoA の関数の実行時間となる。各関数の詳細は省くが、基本的には各関数は 0.1 秒以下（req_poll のみ 1 秒以下）の実行時間であり、プロダクトランでは sampling 時間が 100 倍以上になることを考えると、元の計算に 1%の影響を与えない程度であり、利用することによる計算性能低下は防げている。また、register はプロセス数が増えるほど登録する数が増えるため時間がかかっていく関数だが、1000 並列程度では 0.1 秒以下であり、エクサスケールでも大きな値にならないと想定される。また、weak scaling ではその他の CoToCoA 関数はスケーリングしており、並列性も悪くないと評価できる。

さらに、人工衛星近傍電磁気環境じょう乱の PIC シミュレーションについては、MHD・PIC 連成シミュレーションモデルとの結合計算に向けて、PIC シミュレーションコードとポスト処理プログラムの結合を CoToCoA 実装のインスタンスとして実装し、独立に開発されたプログラム間で任意のタイミングで所望のデータ転送が可能であることを確認した。具体的には、テスト粒子計算に基づく速度分布関数ソルバを、上述の全粒子コードと連成させることにより、衛星周辺に生起するプラズマじょう乱現象の各時刻における準定常速度分布関数を取得することが可能となった。1283 立方格子を用いた 3 次元計算において、「全粒子モデル 1 ステップあたりの計算時間」、「テスト粒子計算が完了するまでの時間」、「1 回の CoToCoA 通信にかかる時間」の比を測定したところ、1:370:0.92 であった。この測定結果から、テスト粒子計算の頻度を、全粒子モデル計算における 400 ステップに 1 回以下とした場合（このときの処理時間の比は 400:370:0.92 となる）には、テスト粒子モデルによる速度分布計算時間は衛星プラズマ環境計算時間に隠蔽され、全体の計算を律速しないことがわかる。またその際に CoToCoA 通信コストは無視できるほど小さいことがわかった。この基礎データを元に、利用可能な計算資源を結合対象の各プログラムに適切に分配することにより、計算能力の有効活用が可能になると考えられる。

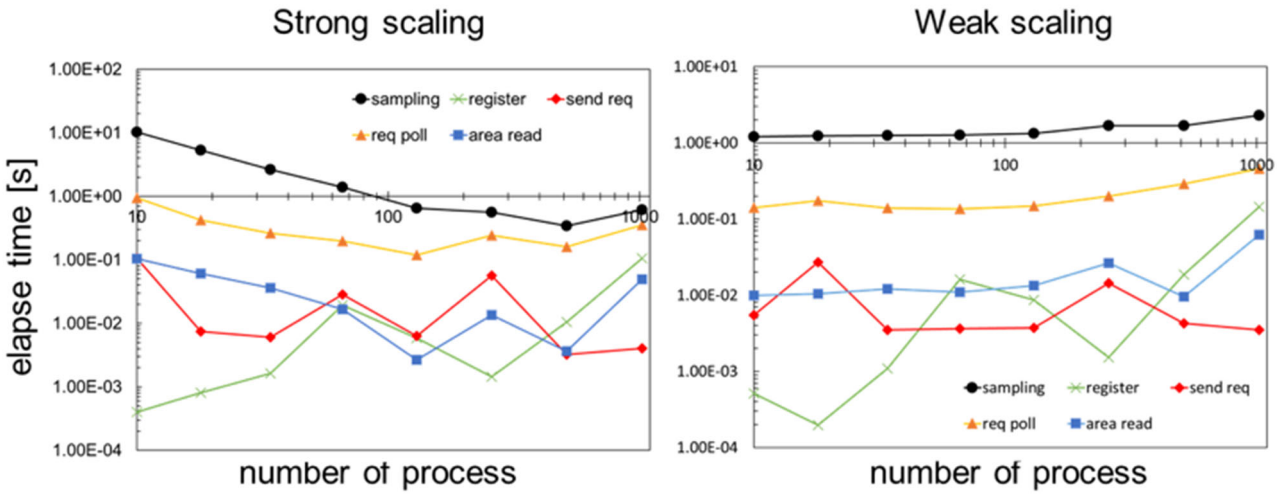


図９：MHD・PIC 連成シミュレーションモデルの性能評価結果

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」

令和元年度（2019 年度）において、サブ課題 D では星間空間のキラル有機分子の鏡像異性体過剰を引き起こす円偏光波生成の研究の計算を実施し，また原始太陽系におけるダスト成長過程の解明に向け，原始惑星系円盤乱流場中のダスト粒子のシミュレーションを行った(４－１．実施計画④⑬⑭に対応)。

（1）星間空間のキラル有機分子の鏡像異性体過剰を引き起こす円偏光波生成の研究

星形成領域におけるダスト粒子光散乱による円偏光波生成過程について明らかにするため，「ストークスパラメータを含むモンテカルロ輻射輸送コードの開発」を行い，以下の３つの成果を得た。これによって，星形成領域で観測されている高円偏光波の生成機構についての理解が大きく進むとともに，アミノ酸のホモキラリティ生成を誘発する紫外線波長領域にも円偏光波が存在することを明らかにした。

(1-a) ストークスパラメータを含むモンテカルロ輻射輸送コードの開発

扁球ダスト粒子による散乱過程を取り扱うために，散乱過程ごとに散乱行列(4×4 行列)の全ての成分に起因するストークスパラメータの変化を計算する。扁球ダスト粒子では，ダスト短軸方向と光子進行方向によって散乱行列の値も変わるため，各散乱角にテーブルを容易する。これらを考慮したモンテカルロ輻射輸送計算コードを開発した。また，光散乱だけではなく光子吸収および熱放射の効果も含むコードの開発を行った。

(1-b) 星形成領域における円偏光度の最大値とダストサイズの関係について

近赤外線観測によると，円偏光度は最大 20%に達し，光源となる星質量と相関があることが知られている。これが実現する条件を明らかにするため，開発したコードを用いて星形成領域について輻射輸送計算を行った。今回は光源の周囲に光学的厚みが１となるようにダストシェルを配置し，単一ダストサイズ(0.1,0.3,1.0 μm)および MRN 分布（ Mathis, Rumpl, Nordsieck 1977 モデルによる星間ダストのサイズ分布）の場合について調べた。図１０に示すように，円偏光度について観測で見られる四重極構造を再現することに成功した。小サイズダスト(0.1,0.3 μm)，MRN 分布の場合には円偏光度は 10%にも到達しないことがわかった。一方，1.0 μm の単一ダストの場合には円偏光度は 40％まで到達し，高円偏光波が生成されていることがわかった。このことから，より質量が大きい星の周囲ではダスト成長が促進され，ミクロサイズのダストが支配的な環境が実現され，結果として高円偏光度で観測されている可能性を提唱した。

(1-c) 星形成領域に紫外線波長における円偏光波の存在可能性について

紫外線における円偏光波は，円二色性によりアミノ酸の鏡像異性体過剰を誘発する。一方，宇宙空間では近赤外線波長の円偏光波しか観測されておらず，紫外線波長で存在するかは謎であった。今回は，(1-b)と同様の設定で，ダストサイズが MRN 分布の場合に紫外線(121.6 nm)と近赤外線(2.14 μm)波長について計算を行い，両波長での円偏光度について調べた。図１１に両波長における円偏光度のダストシェルでの分布をしめす。この場合赤外線波長では，円偏光度は 3%程度であるのに対し紫外線波長では最大 30%に達することがわかった。このため，赤外線波長で円偏光波が存在する領域では，紫外線波長についてもより強い円偏光波が存在することを明らかにした。

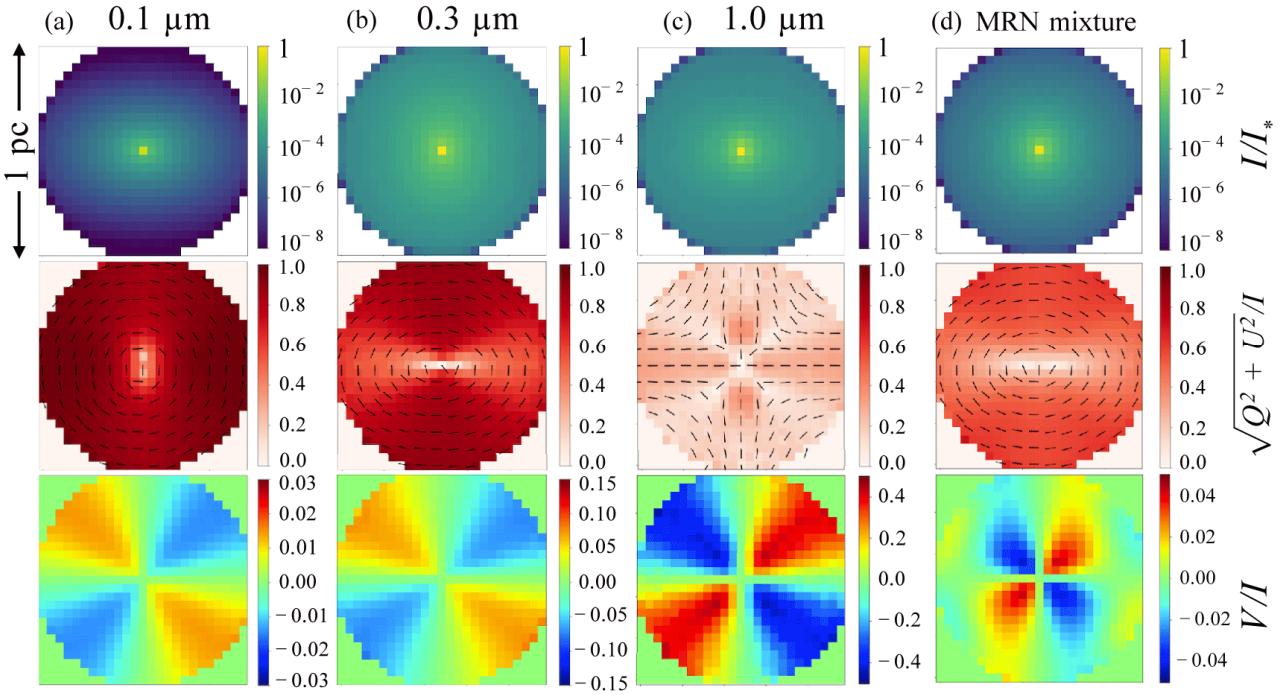


図１０：単一ダストサイズ(0.1, 0.3, 1.0 μm)および MRN 分布のダストにおける，輝度(上図)と線偏光度(中図)，円偏光度(下図)。1.0 μm と MRN 分布の場合は小ダストサイズの場合と円偏光度分布の符号が入れ替わる。

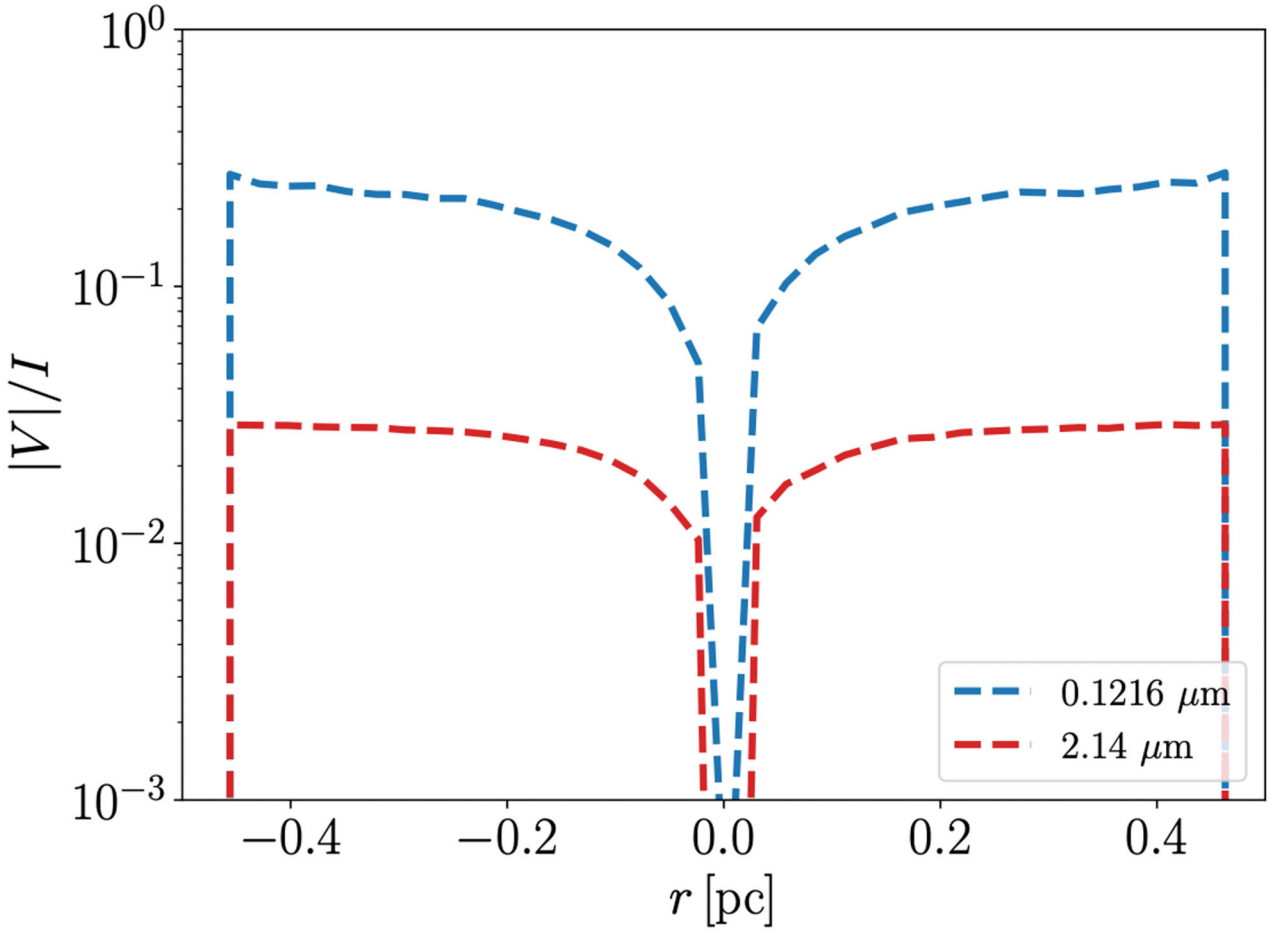


図１１：ダストシェルの 45 度方向における円偏光度分布の半径依存性。青線、赤線はそれぞれ紫外線(121.6 nm)と近赤外線(2.14 μm)波長の場合を示す。

（２）原始太陽系におけるダスト成長過程の研究

原始太陽系円盤の最小質量モデルに従えば，円盤内の乱流の局所平均マッハ数は，0.01 から 0.32 の範囲になる。局所平均マッハ数が，1 より十分に小さいことから，これまで原始太陽系円盤の流体計算は，非圧縮を仮定して行われることが多かった。しかし，これまでの計算はほとんどがオイラー方程式を扱うものであり，ナビエ・ストークス方程式を解いた場合に，圧縮性の効果がどのように現れるかは明らかにされてこなかった。我々は，ナビエ・ストークス方程式の直接数値計算を行い，非圧縮性及び圧縮性乱流場の違いがレイノルズ数にどのように依存するかを明らかにし，この中での慣性粒子の振る舞いを調べることで，非圧縮性及び圧縮性乱流場中のダストの衝突付着の比較を行った。

(2-a) 非圧縮性及び圧縮性乱流場のレイノルズ数依存性

圧縮性乱流の直接数値計算における外力項の取り扱い方の見直しを行い，乱流場の圧縮性の強さをより細かく制御することが可能になった。これによって，圧縮性乱流場の統計的な準定常性を向上させることが可能となり，信頼性の高い結果による比較が実現した。これを用いて，右表に示すようなモデルで，非圧縮性乱流場と圧縮性乱流場との比較を行った。モデル名で，I は非圧縮性流体計算，C は圧縮性流体計算，1 次元方向のメッシュ数，平均マッハ数(*Ma*)を表す。また，圧縮性散逸と solenoidal 散逸の小さなものを「w」，大きなものを「s」，圧縮性散逸がないものを「n」としている。図１２（上段）に，計算の結果得られた速度 divergence 分布関数のレイノルズ数(*Re*)依存性を示す。平均マッハ数(*Ma*)が大きくなるにつれて，速度 divergence の裾野が広がることは予想通りであるが，レイノルズ数(*Re*)が大きくなっても裾野は広がっていく。これにより，図１２（下段）に見る通り，局所マッハ数(*Ma*)が１を超える弱い衝撃波領域が現れる。このことは，慣性が小さい粒子の衝突付着の統計がわずかに影響を受けること，及び，慣性の大きい粒子においても衝突速度分布がわずかに変化し，付着率が若干高まることが明らかとなった。

Run	N^3	Re
I256	256^3	933
C256-0.1n		931
C256-0.1w		1047
C256-0.3w		957
C256-0.3s		1062
I512	512^3	2256
C512-0.1w		2375
C512-0.3w		2859
C512-0.3s		2775
I1024	1024^3	6428
C1024-0.3s		5685

(2-b) 非圧縮性及び圧縮性乱流場中のダストの衝突付着の比較

図１３に，非圧縮性及び圧縮性乱流場中に置かれたダスト粒子の衝突付着確率の結果を示す。この結果は，衝突付着確率はレイノルズ数および圧縮性に依存し，レイノルズ数が大きくなると衝突付着確率が小さくなること，圧縮性の影響を受けて衝突付着確率が若干大きくなることを示す。よって，これまで行われてきた非圧縮の取り扱いは，ダスト粒子の衝突付着確率については概ね妥当だと結論される。ただし，弱い衝撃波領域が現れる場合には，慣性が小さい粒子の衝突付着の統計がわずかに影響を受けること，及び，慣性の大きい粒子においても衝突速度分布がわずかに変化し，付着率が若干高まることが明らかとなった。

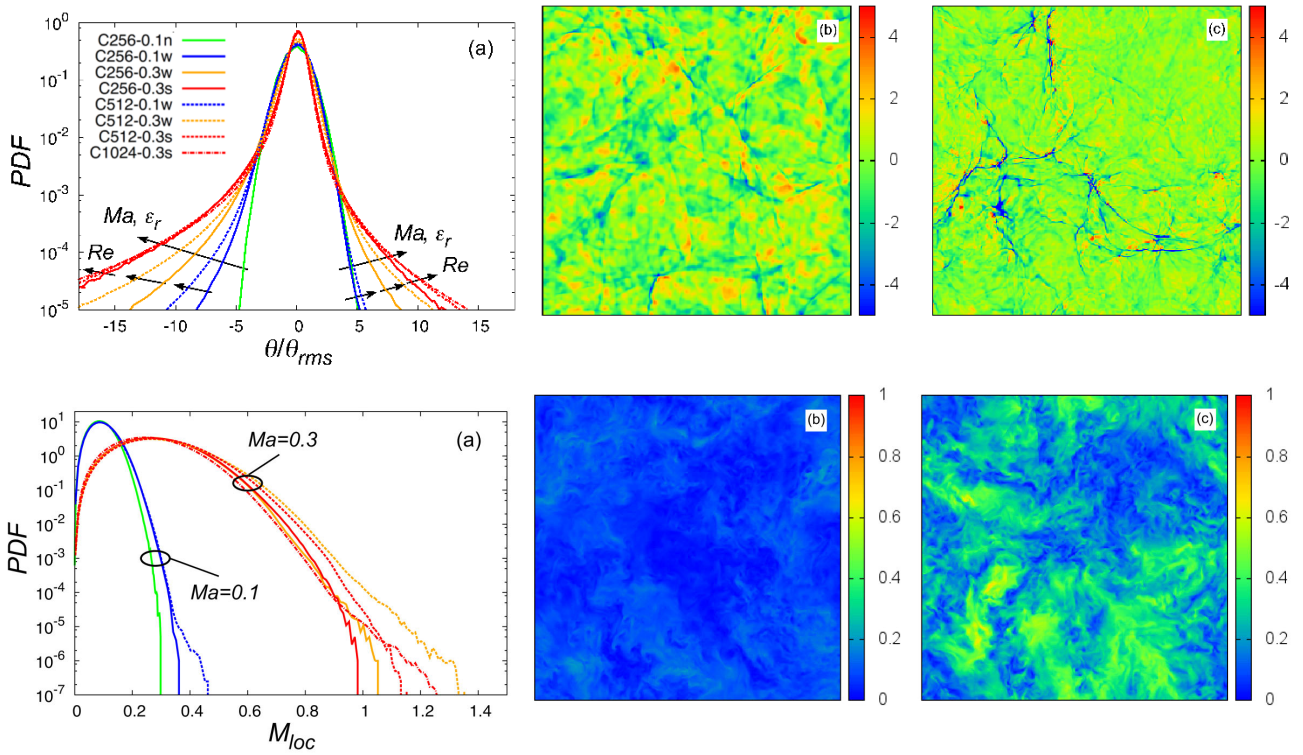


図１２：上段(a)は速度 divergence 分布関数のレイノルズ数(*Re*)依存性と平均マッハ数(*Ma*)依存性。上段(b)はモデル C512-0.1w，(c)はモデル C512-0.3s の密度分布。下段(a)は局所マッハ数(M_{loc})の分布関数の *Re* および *Ma* 依存性。下段(b)はモデル C512-0.1w，(c)はモデル C512-0.3s の局所マッハ数空間分布。

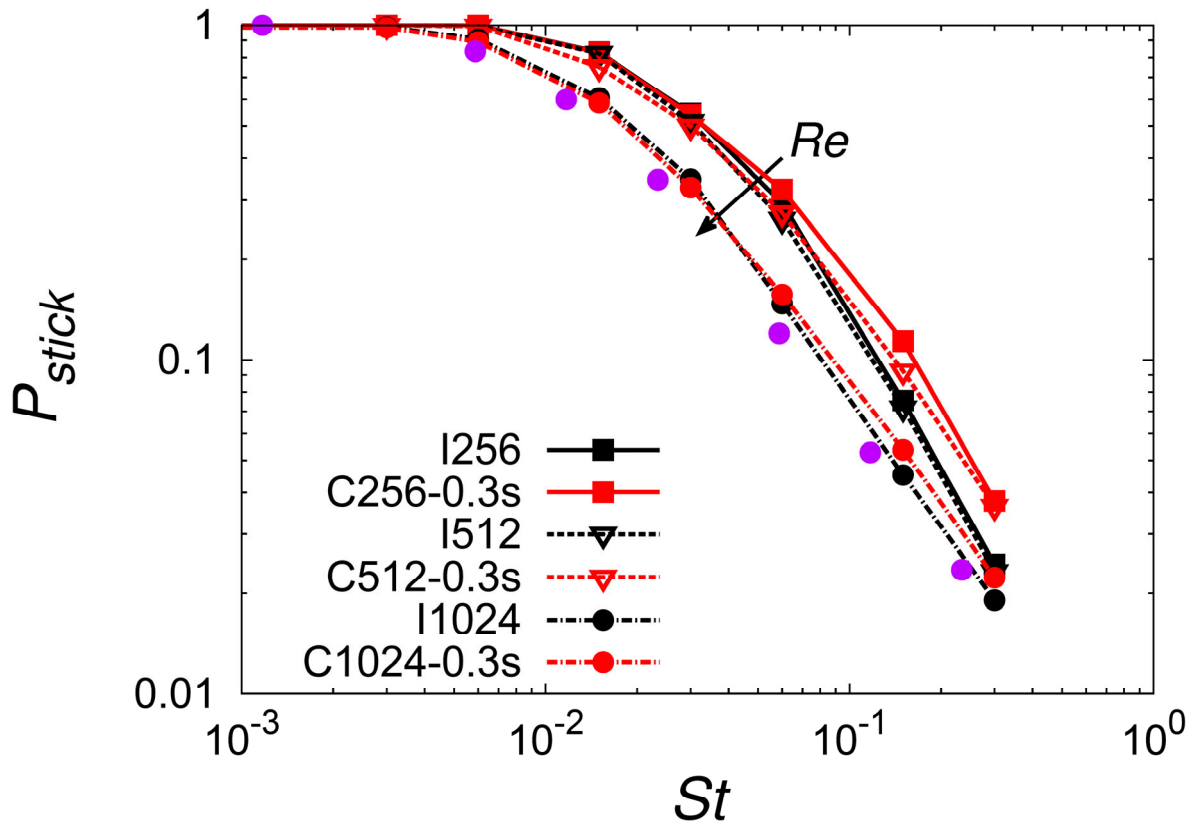


図１３：圧縮性乱流場中のダスト粒子付着確率のレイノルズ数依存性と非圧縮性乱流場中のダスト粒子付着確率との比較。

４－３．活動（研究会等）

開催行事

日時/場所	活動名	参加者
令和元年 5 月 28 日 幕張メッセ	JpGU-AGU Joint Meeting 2019 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：5 件 ポスター発表：8 件
令和元年 8 月 6 日 神戸大学 惑星科学研究センター	FDPS 講習会　初級	出席者：18 名
令和元年 8 月 31 日 ～9 月 3 日 休暇村 支笏湖	夏の GFD セミナー	出席者：28 名
令和元年 9 月 12 日 東京大学駒場キャンパス 21 KOMCEE West レクチャーホール	公開シンポジウム「京」から「富岳」へ：大規模シミュレーションが拓く惑星科学の未来	出席者：30 名 TV 会議参加者：1 名
令和元年 10 月 15 日 神戸大学先端融合研究環統合研究拠点 コンベンションホール	2019 年度 先端融合研究環(統合研究領域)シンポジウム「最新科学で迫る月と地球の起源」	出席者：22 名 TV 会議参加者：1 名
令和 2 年 3 月 9 日 TV 会議および Zoom	ポスト「京」萌芽的課題・計算惑星 第 4 回 公開シンポジウム※	出席者：37 名

※当初は神戸市内の会議室を予定していたが、新型コロナウイルス感染拡大の状況を踏まえて、遠隔参加の形態に変更して開催した。

運営委員会

日時	会合名	参加人数
令和元年 4 月 25 日	第 13 回運営委員会	12 名
令和元年 6 月 7 日	第 14 回運営委員会	13 名
令和元年 7 月 31 日	第 15 回運営委員会	12 名
令和元年 11 月 1 日	第 16 回運営委員会	11 名
令和 2 年 1 月 31 日	第 17 回運営委員会	10 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	計算科学研究センター 粒子系シミュレータ研究チーム 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 教授 梅村 雅之
⑭原始太陽系におけるダスト成長過程の研究	国立大学法人岡山大学	大学院環境生命科学研究科 環境科学専攻人間生態学講座 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２１

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
Study on the predictability of imminent giant solar flares based on the analysis of triggered instability（口頭）	Kanya Kusano	Austria Center Vienna (EGU2019)	2019年4月9日	国外
Application of spherical helix nodes to a shallow-water model using radial basis functions（口頭）	Takeshi Enomoto	The Agora Hydro-Québec, Montréal, Canada (PDEs on the sphere 2019)	2019年5月1日	国外
全球非静力学火星大気循環モデルの開発と高解像度計算（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	国立オリンピック記念青少年総合センター（日本気象学会2019年度春季大会）	2019年5月17日	国内
Formation and Early Evolution of Protoplanetary Disks(口頭、招待)	Kengo Tomida	International Space Science Institute, Switzerland (Workshop on Star Formation)	2019年5月23日	国外
原始惑星系円盤の降着が駆動する原始星フレア(ポスター)	高棹真介、富田賢吾、岩崎一成、鈴木建	幕張メッセ国際会議場（日本地球惑星科学連合 2019年大会）	2019年5月28日	国内
Magnetohydrodynamic Simulation of an Erupting Magnetic Flux Rope on February 13 2009:Journey to Coronal Mass Ejection(ポスター)	井上 諭	幕張メッセ国際会議場（日本地球惑星科学連合 2019年大会）	2019年5月28日	国内
Study on the predictability of imminent giant solar flares based on the	草野完也	幕張メッセ国際会議場（日本地球惑星科学連合 2019年大会）	2019年5月27日	国内

theory of double-arc instability（口頭）				
太陽地球圏環境変動の原因としての太陽活動のシミュレーション研究（口頭）	草野完也	幕張メッセ国際会議場（日本地球惑星科学連合 2019 年大会）	2019 年 5 月 28 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、（口頭、招待）	宮腰剛広・亀山真典・小河正基	幕張メッセ国際会議場（日本地球惑星科学連合 2019 年大会）	2019 年 5 月 26 日	国内
Tectonic plates in 3D-numerical models of mantle convection with stress-history-dependent viscosity、（口頭）	宮腰剛広・亀山真典・小河正基	幕張メッセ国際会議場（日本地球惑星科学連合 2019 年大会）	2019 年 5 月 26 日	国内
地球型惑星のサイズと火成活動の型：マントル・ダイナミクスモデルからの予測（口頭）	小河正基	幕張メッセ国際会議場（日本地球惑星科学連合 2019 年大会）	2019 年 5 月 27 日	国内
金星マントルの二段階進化モデルと地球への応用（口頭）	小河正基	幕張メッセ国際会議場（日本地球惑星科学連合 2019 年大会）	2019 年 5 月 27 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: 岩石惑星マントルの熱化学進化の解明に向けた取組み（ポスター）	亀山真典、小河正基、宮腰剛広、柳澤孝寿	幕張メッセ国際会議場（日本地球惑星科学連合 2019 年大会）	2019 年 5 月 28 日	国内
高速回転する球殻内の非弾性熱対流により引き起こされる表面帯状流（ポスター）	佐々木洋平, 竹広真一、石岡圭一、榎本剛	幕張メッセ国際会議場（日本地球惑星科学連合 2019 年大会）	2019 年 5 月 28 日	国内
全球非静力学火星大気循環モデルの開発と高解像度計算（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	幕張メッセ国際会議場（日本地球惑星科学連合 2019 年大会）	2019 年 5 月 28 日	国内
原始惑星系円盤乱流場中の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、梅村雅之	幕張メッセ国際会議場（日本地球惑星科学連合 2019 年大会）	2019 年 5 月 28 日	国内
Effect of the compressibility of turbulent flows on dust particle collision statistics in a	櫻井幹記、古谷眸、小林直樹、石原卓、岡本直也、白石賢二、梅村雅之	幕張メッセ国際会議場（日本地球惑星科学連合 2019 年大会）	2019 年 5 月 28 日	国内

protoplanetary disk（ポスター）				
A two-stage evolution model Venus’s mantle and its implications for the Earth（口頭）	M. Ogawa	ヒルトンニセコビレッジ(International Venus Conference 2019/The 74th Fujihara Seminar)	2019年5月31日	国内
Planetary-scale streak structure reproduced in high-resolution simulations of the Venus atmosphere with a low-stability layer（口頭）	樫村博基、杉本憲彦、高木征弘、松田佳久、大淵済、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	ヒルトンニセコビレッジ(International Venus Conference 2019/The 74th Fujihara Seminar)	2019年6月1日	国内
Toward the physics-based prediction of solar storm(口頭、招待)	Kusano K	Boyana Residence Hotel,Sofia,Bulgaria (VarSITI Closing Symposium)	2019年6月10日	国外
乱流中の微粒子の衝突についての数値シミュレーション（口頭）	石原卓、白石啓貴、櫻井幹記、梅村雅之	山口大学（第23回日本流体力学会 中四国・九州支部講演会）	2019年6月10日	国内
Formation and Early Evolution of Circumstellar Disks,（口頭、招待）	K. Tomida	The Vouleftikon,Nafplio, Greece (Zooming in on Star Formation)	2019年6月11日	国外
乱流中の慣性粒子分布における自己相似構造の抽出（口頭）	櫻井幹記、 石原卓	北海道大学（第65回理論応用力学講演会・第22回土木学会応用力学シンポジウム）	2019年6月30日	国内
Solar deep convection zone to surface（口頭、招待）	Hideyuki Hotta	Canton Orford, Quebec, Canada (Space Climate 7)	2019年7月8日	国外
金星大気大循環の数値シミュレーション（口頭、招待講演）	樫村博基	京都大学（京都大学数理解析研究所 共同研究（公開型）「宇宙惑星ジェットの数理」）	2019年7月29日	国内
Development of Coupling Framework for Macro and Micro Scale Simulations	Keiichiro FUKAZAWA	Suntec Singapore Convention & Exhibition Centre	2019年7月30日	国外

of the Magnetosphere(ポスター)		(AOGS 16th Annual Meeting)		
Solar and stellar dynamo (口頭)	Hideyuki Hotta	名古屋大学(EASW9)	2019年8月1日	国内
原始星への降着に関する3次元磁気流体シミュレーション (口頭)	高棹真介、富田賢吾、岩崎一成、鈴木建	日間賀島サービスセンター (愛知) 星・惑星形成再検討会	2019年8月9日	国内
An MHD Modeling of Initiation and Dynamics of the X9.3 flare Observed in AR12673 (口頭)	井上 諭	東京大学 (Hinode-13/IPELS 2019)	2019年9月4日	国内
Predictability of Solar Flares Based on Satellite Observations and Magnetohydrodynamic Instability Models (口頭)	草野完也	東京大学 (Hinode-13/IPELS 2019)	2019年9月5日	国内
Solar dynamo: achievements and perspective (口頭)	Hideyuki Hotta	東京大学 (Hinode-13/IPELS 2019)	2019年9月5日	国内
原始惑星系円盤乱流中のダスト粒子の衝突付着シミュレーション (口頭)	石原卓、濱端航平、櫻井幹記、梅村雅之	東京大学 (公開シンポジウム「京」から「富岳」へ：大規模シミュレーションが拓く惑星科学の未来)	2019年9月9日	国内
宇宙空間の有機分子生成から見る生命起源 (口頭)	梅村雅之、栢沼愛、中村帆南, 古家健次、重田育照、庄司光男、佐藤皓允	東京大学 (公開シンポジウム「京」から「富岳」へ：大規模シミュレーションが拓く惑星科学の未来)	2019年9月9日	国内
「富岳」で計算できる惑星系形成理論 (口頭)	小南 淳子	東京大学 (公開シンポジウム「京」から「富岳」へ：大規模シミュレーションが拓く惑星科学の未来)	2019年9月9日	国内
原始惑星系円盤大域シミュレーション：デッドゾーン境界(口頭)	岩崎一成、富田賢吾、高棹真介、奥住聡、鈴木建	東京大学 (公開シンポジウム「京」から「富岳」へ：大規模シミュレーションが拓く惑星科学の未来)	2019年9月9日	国内
太陽対流層計算(口頭)	堀田英之	東京大学 (公開シンポジウム「京」から「富岳」へ：大規模	2019年9月9日	国内

		シミュレーションが拓く惑星科学の未来)		
太陽嵐からコロナ質量放出に至る太陽嵐の田スケールシミュレーション(口頭)	井上 諭	東京大学(公開シンポジウム「京」から「富岳」へ:大規模シミュレーションが拓く惑星科学の未来)	2019年9月9日	国内
ジオスペース・マクロダイナミクスからミクロスケールへの連成シミュレーションフレームワーク開発(口頭)	深沢 圭一郎	東京大学(公開シンポジウム「京」から「富岳」へ:大規模シミュレーションが拓く惑星科学の未来)	2019年9月9日	国内
マントル対流の数値モデリング:月・プレートテクトニクス・スーパー地球を例として(口頭)	小河正基、亀山真典	東京大学(公開シンポジウム「京」から「富岳」へ:大規模シミュレーションが拓く惑星科学の未来)	2019年9月10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、佐々木洋平、石岡圭一、榎本剛	東京大学(公開シンポジウム「京」から「富岳」へ:大規模シミュレーションが拓く惑星科学の未来)	2019年9月10日	国内
火星大気の全球高解像度シミュレーションに向けたモデル開発(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	東京大学(公開シンポジウム「京」から「富岳」へ:大規模シミュレーションが拓く惑星科学の未来)	2019年9月10日	国内
磁気圏を持つ中心星への降着に関する3次元磁気流体シミュレーション, 口頭	高棹真介、富田賢吾、岩崎一成、鈴木建	熊本大学(日本天文学会2019年秋季年会)	2019年9月11日	国内
分子雲形成シミュレーション:自己重力の効果(口頭)	岩崎一成、富田賢吾、井上剛志、犬塚修一郎	熊本大学(日本天文学会2019年秋季年会)	2019年9月13日	国内
スーパー地球のマントル対流シミュレーション(口頭)	亀山真典、宮腰剛広、柳澤孝寿、小河正基	電気通信大学(日本流体力学会 年会2019)	2019年9月15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筋状構造(口頭)	樫村博基、杉本憲彦、高木征弘、松田佳久、大淵済、榎本剛、中島健介、石渡正樹、佐藤	電気通信大学(日本流体力学会 年会2019)	2019年9月15日	国内

	隆雄、はしもとじょーじ、佐藤毅彦、高橋芳幸、林祥介			
非静力学全球火星大気循環モデルの開発と高解像度計算（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	電気通信大学（日本流体力学会 年会2019）	2019年9月15日	国内
対流層深部からの浮上磁場（口頭）	堀田英之	電気通信大学（日本流体力学会 年会2019）	2019年9月15日	国内
STEプラズマシミュレーションの課題と展望(口頭)	草野完也	広島大学（STEシミュレーション研究会 - 計算プラズマ物理の新潮流）	2019年9月24日	国内
太陽フレアを発生させる磁場構造とそのダイナミクス（口頭）	井上 諭	国立極地研究所(サブストームトリガー機構のトポロジー研究会)	2019年9月27日	国内
数値モテルに於ける月と火星の初期進化の比較（口頭）	小河正基、柳澤孝寿	京都産業大学（日本惑星科学会 2019年秋季講演会）	2019年10月7日	国内
非静力学全球火星大気循環モデルの開発と高解像度計算（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	京都産業大学（日本惑星科学会 2019年秋季講演会）	2019年10月9日	国内
Global Non-ideal Magnetohydrodynamic Simulations of Protoplanetary Disks（ポスター）	K. Tomida, K. Iwasaki, S. Takasao, S. Okuzumi, S. Mori, T. K. Suzuki	筑波大学（CCS International Symposium 2019）	2019年10月15日	国内
Computational science of dust coagulation in compressible turbulence (ポスター)	Yoshiki Sakurai, Takashi Ishihara, Masayuki Umemura	筑波大学（CCS International Symposium 2019）	2019年10月15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:岩石惑星マントルの熱化学進化の解明に向けた取組み（口頭）	亀山真典、小河正基、宮腰剛広、柳澤孝寿	神戸大学（2019年度先端融合研究環（統合研究領域）シンポジウム最新科学で迫る地球の起源・月の起源）	2019年10月15日	国内

星形成領域におけるダスト粒子の光散乱による円偏光生成について（口頭）	福島肇	筑波大学（天体形成研究会 2019）	2019 年 10 月 19 日	国内
Clustering and collision statistics of dust particles in weakly compressible turbulence in protoplanetary disks (ポスター)	Yoshiki Sakurai, Takashi Ishihara, Hitomi Furuya, Masayuki Umemura, Kenji Shiraishi	東京国際交流館プラザ平成(In the Spirit of Lyot, Tokyo)	2019 年 10 月 21-25 日	国内
太陽地球圏環境予測プロジェクト（PSTEP）宇宙天気の理解と予測の相乗的発展を目指して（口頭）	草野完也	熊本市国際交流会館（地球電磁気・地球惑星圏学会第 146 回総会及び講演会）	2019 年 10 月 23 日	国内
非静力学全球火星大気循環モデルの開発と高解像度計算（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	熊本市国際交流会館（第 146 回地球電磁気・地球惑星圏学会総会および講演会）	2019 年 10 月 24 日	国内
Development of cross-reference framework for macro- and micro-scale simulations of the magnetosphere（ポスター）	深沢圭一郎	熊本市国際交流会館（地球電磁気・地球惑星圏学会第 146 回総会及び講演会）	2019 年 10 月 24 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(続報)（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	福岡国際会議場（日本気象学会 2019 年度秋季大会）	2019 年 10 月 28 日	国内
球面螺旋節点を用いた 2 次元セミ・ラグランジュ移流スキーム（口頭）	榎本剛	福岡国際会議場（日本気象学会 2019 年度秋季大会）	2019 年 10 月 28 日	国内
Collision Statistics of Dust Particles in Compressible Turbulence, International Conference on Flow Dynamics（口頭）	Yoshiki Sakurai, Takashi Ishihara, Hitomi Furuya, Masayuki Umemura, Kenji Shiraishi	仙台国際センター（International Conference on Flow Dynamics）	2019 年 11 月 6 日	国内
Prediction of Space Weather(口頭、招待)	草野完也	Harvard-Smithsonian Center for Astrophysics, Boston USA (Forum of U.S.-Japan	2019 年 11 月 15 日	国外

		Alliance in a New Space Age: Back to the Moon)		
Numerical Investigation of the Accretion Process onto Protostars (口頭、招待)	高棹真介、富田賢吾、岩崎一成、鈴木建	Borneo Convention Centre Kuching, Malaysia (14th Asia-Pacific Physics Conference)	2019年11月20日	国外
非静力学全球大気モデルにおけるQBO的周期振動の時間刻み幅依存性 (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	三重大学 (第21回非静力学モデルに関するワークショップ)	2019年11月22日	国内
Global Non-ideal MHD Simulations of Protoplanetary Disks: Dead Zone Boundaries (ポスター)	K. Iwasaki, K. Tomida, S. Takasao, S. Okuzumi, T. K. Suzuki	国立天文台 (三鷹), (Planet Formation Workshop 2019)	2019年11月25-28日	国内
Three-dimensional MHD Simulations of Accretion onto Magnetized Stars(口頭)	高棹真介、富田賢吾、岩崎一成、鈴木建	国立天文台 (三鷹), (Planet Formation Workshop 2019)	2019年11月26日	国内
乱流中の慣性粒子の衝突・付着現象理解のための数値解析 (口頭)	白石啓貴、櫻井幹記、石原卓	北海道大学 (第33回数値流体力学シンポジウム	2019年11月28日	国内
The brief summary of PSTEP activities & Physics-based prediction of giant solar flares and CMEs(口頭)	草野完也	Korea Astronomy and Space Science Institute, Daejeon,Korea (Korea Japan Space Weather Workshop 2019)	2019年11月28日	国外
Physics-Based Prediction of Imminent Giant Solar Flares and CMEs(口頭、招待)	草野完也	京都大学 (Astrophysical and Solar MHD Workshop at RIMS)	2019年12月6日	国内
A numerical model of mantle evolution caused by magmatism and mantle convection: Implication for the surface environment of Mars (ポスター)	M. Ogawa	San Francisco, USA (American Geophysical Union Fall meeting 2019)	2019年12月9日	国外
International Actions of the Project for Solar-Terrestrial Environment	Kanya Kusano	San Francisco, USA (American	2019年12月10-11日	国外

Prediction (PSTEP) in Japan(ポスター、招待)		Geophysical Union Fall Meeting 2019)		
Physics-Based Prediction of Imminent Giant Solar Flares(口頭)	Kanya Kusano	San Francisco, USA (American Geophysical Union Fall Meeting 2019)	2019年12月11日	国外
Simulations of Electrostatic Structure near Spacecraft in a Weakly-Magnetized Plasma (ポスター)	Yohei Miyake	San Francisco, USA (American Geophysical Union Fall Meeting 2019)	2019年12月12日	国外
Orbital and tidal evolution of Saturn's moons due to the interaction between the moons and massive Saturn's ring (ポスター)	A. Nakajima & S. Ida	San Francisco, USA (American Geophysical Union Fall Meeting 2019)	2019年12月13日	国外
星形成領域の円偏光生成に関する輻射輸送計算(口頭)	福島肇	国立天文台（三鷹），(ABC若手分野連星WS)	2019年12月14日	国内
太陽内部熱対流と磁場の数値シミュレーション（口頭)	堀田英之	京都大学 (QUCS2019)	2019年12月16日	国内
太陽対流層・コロナ・太陽圏結合モデルに向けて（口頭)	堀田英之	名古屋大学（PSTEPモデル研究会) ISEE・PSTEP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4回)	2019年12月26日	国内
物理モデルに基づくフレア発生予測とその発展について（口頭)	草野完也	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4回)	2019年12月26-27日	国内
太陽フレアからコロナ質量放出に至る太陽嵐の多階層シミュレーションの展望（口頭)	井上 諭	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4回)	2019年12月26-27日	国内
原始星の磁気圏降着に関する3次元磁気流体シミュレーション（ポスター)	高棹真介、富田賢吾、岩崎一成、鈴木建	国立天文台（三鷹），(第32回理論懇シンポジウム)	2019年12月25-27日	国内
星形成領域における円偏光波生成に関する輻射輸送シミュレーション（ポスター)	福島肇、矢島秀伸、梅村雅之	国立天文台（三鷹），(第32回理論懇シンポジウム	2019年12月25-27日	国内

Multigrid gravity solver on AMR for Athena++（ポスター）	富田賢吾	国立天文台（三鷹），（令和元年度 国立天文台 天文シミュレーションプロジェクト ユーザーズミーティング）	2020年1月20-21日	国内
磁気圏降着を受ける原始星の３次元磁気流体シミュレーション（口頭）	高棹真介、富田賢吾、岩崎一成、鈴木建	国立天文台（三鷹），（令和元年度 国立天文台 天文シミュレーションプロジェクト ユーザーズミーティング）	2020年1月21日	国内
Solar convection and dynamo action,(口頭)	Hideyuki Hotta	Center for Space Science, Abu Dhabi, UAE(Future Directions in Solar, Stellar and Planetary Physics)	2020年1月23日	国外
Did AR12673 Possibily Produce a Large Solar Eruption Before 6th 2017?（ポスター）	井上 諭	名古屋大学（PSTEP-4 & ISEE-2 International Symposium)	2020年1月28-30日	国内
Physics-Based Prediction of Imminent Giant Solar Flares（口頭）	草野完也	名古屋大学（PSTEP-4 & ISEE-2 International Symposium)	2020年1月29日	国内
A data-constrained Magnetohydrodynamic Modeling of Solar Eruptions(口頭)	井上 諭	Chandrashekhar Auditorium, IUCAA, Pune,India(5th Asia Pasfhic Solar Physics Meeting)	2020年2月5日	国外
Application of Cross-Reference Framework CoToCoA to Global and Local Simulations of Planetary Magnetospheres（ポスター）	深沢圭一郎	東北大学（The 21st Symposium on Planetary Science 2020)	2020年2月17-19日	国内
Recent Activities of Solid Body-Plasma Interaction Simulations（ポスター）	三宅洋平	東北大学（The 21st Symposium on Planetary Science 2020)	2020年2月17-19日	国内
太陽と他の星の磁気活動を比較：原始星フレア、恒星コロナ(口頭、招待)	高棹真介	国立天文台（三鷹），（太陽研究者連絡会）	2020年2月17-18日	国内
The formation of molecular clouds by compression of two-phase atomic gases(口頭)	K. Iwasaki, K. Tomida, T. Inoue, S.-i. Inutsuka	ICISE conference center, Quy Nhon, Vietnam(16th Rencontres du	2020年2月18日	国外

		Vietnum, Magnetic Field in the Universe 7)		
星間円偏光波の生成と生体アミノ酸キラリティー問題(口頭)	梅村雅之、福島肇、矢島秀伸,	神戸大学/オンライン（ポスト「京」萌芽的課題・計算惑星 第4回 公開シンポジウム)	2020年3月9日	国内
原始惑星系円盤乱流中のダスト成長（口頭)	石原卓、白石啓貴、櫻井幹記、濱端航平、梅村雅之	神戸大学/オンライン（ポスト「京」萌芽的課題・計算惑星 第4回 公開シンポジウム)	2020年3月9日	国内
マントル対流の数値モデリング:月・火星・プレートテクトニクスを例として(口頭)	小河正基	神戸大学/オンライン（ポスト「京」萌芽的課題・計算惑星 第4回 公開シンポジウム)	2020年3月9日	国内
火星大気の全球高解像度シミュレーションに向けたモデル開発(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/オンライン（ポスト「京」萌芽的課題・計算惑星 第4回 公開シンポジウム)	2020年3月9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、佐々木洋平、石岡圭一、榎本剛	神戸大学/オンライン（ポスト「京」萌芽的課題・計算惑星 第4回 公開シンポジウム)	2020年3月9日	国内
恒星スケールを直接分解する"次世代"銀河形成シミュレーション(口頭)	斎藤貴之	神戸大学/オンライン（ポスト「京」萌芽的課題・計算惑星 第4回 公開シンポジウム)	2020年3月9日	国内
富岳で狙うBH周辺構造とジェット形成(口頭)	大須賀健	神戸大学/オンライン（ポスト「京」萌芽的課題・計算惑星 第4回 公開シンポジウム)	2020年3月9日	国内
原始惑星系円盤内側領域の大域的非理想磁気流体シミュレーション(口頭)	高棹真介、富田賢吾、岩崎一成、鈴木建	神戸大学/オンライン（ポスト「京」萌芽的課題・計算惑星 第4回 公開シンポジウム)	2020年3月9日	国内
P3T法を用いた惑星系形成N体計算コードGPLUMの開発(口頭)	石城陽太、井田茂	神戸大学/オンライン（ポスト「京」萌芽的課題・計算惑星 第	2020年3月9日	国内

		4回 公開シンポジウム)		
大規模N体計算を用いた土星リングと衛星の相互作用による衛星軌道進化(口頭)	中嶋彩乃、井田茂、石城陽太	神戸大学/オンライン（ポスト「京」萌芽的課題・計算惑星 第4回 公開シンポジウム)	2020年3月9日	国内
R2D2を用いた黒点形成計算(口頭)	堀田英之	神戸大学/オンライン（ポスト「京」萌芽的課題・計算惑星 第4回 公開シンポジウム)	2020年3月9日	国内
太陽黒点形成からフレアまでの統一シミュレーションの展望(口頭)	金子岳史	神戸大学/オンライン（ポスト「京」萌芽的課題・計算惑星 第4回 公開シンポジウム)	2020年3月9日	国内
SPICAで探る分子雲の多相構造(口頭)	岩崎一成	筑波大学/WEB（日本天文学会2020年春季年会)	2020年3月(WEB掲載)	国内
原始惑星系円盤内側領域のデッドゾーン境界近傍におけるガスダイナミクス(口頭)	岩崎一成、富田賢吾、高棹真介、奥住聡、鈴木建	筑波大学/WEB（日本天文学会2020年春季年会)	2020年3月(WEB掲載)	国内
磁気圏降着を受ける原始星のスピンダウンについて(口頭)	高棹真介、富田賢吾、岩崎一成、鈴木建	筑波大学/WEB（日本天文学会2020年春季年会)	2020年3月(WEB掲載)	国内
星形成領域における円偏光波に関する輻射輸送シミュレーション(口頭)	福島肇, 矢島秀伸、梅村雅之	筑波大学/WEB（日本天文学会2020年春季年会)	2020年3月(WEB掲載)	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
Terrestrial magma ocean origin of the Moon	Hosono, Natsuki; Karato, Shun-ichiro; Makino, Junichiro; Saitoh, Takayuki R.	Nature Geoscience, Volume 12, Issue 6, p.418-423	2019年4月	国外
Giant Protostellar Flares: Accretion-driven Accumulation and Reconnection-driven Ejection of Magnetic Flux in Protostars	S. Takasao, K. Tomida, K. Iwasaki, T. K. Suzuki	The Astrophysical Journal Letters, Volume 878, Issue 1, article id. L10, 7 pp.	2019年6月	国外

A Comparison of Flare Forecasting Methods. II. Benchmarks, Metrics, and Performance Results for Operational Solar Flare Forecasting Systems	Leka, K. D.; Park, Sung-Hong; Kusano, Kanya; et al.	The Astrophysical Journal Supplement Series, Volume 243, Issue 2, article id. 36, 15 pp.	2019年8月	国外
A Comparison of Flare Forecasting Methods. III. Systematic Behaviors of Operational Solar Flare Forecasting Systems	Leka, K. D.; Park, Sung-Hong; Kusano, Kanya; et al.	The Astrophysical Journal, Volume 881, Issue 2, article id. 101, 13 pp.	2019年8月	国外
Effect of Morphological Asymmetry between Leading and Following Sunspots on the Prediction of Solar Cycle Activity	H. Iijima, H. Hotta	The Astrophysical Journal, Volume 883, Issue 1, article id. 24, 11 pp.	2019年9月	国外
Supergranular turbulence in the quiet Sun: Lagrangian coherent structures	Chian, Abraham C. -L.; Silva, Suzana S. A.; Rempel, Erico L.; Gošić; , Milan; Bellot Rubio, Luis R.; Kusano, Kanya; Miranda, Rodrigo A.; Requerey, Iker S.	Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, Volume 488, Issue 3, p.3076-3088	2019年9月	国外
宇宙機近傍プラズマ現象の数値シミュレーション	三宅洋平、臼井英之、桐山武士、白川遼、田川雅人	混相流, Volume 33, Issue 3, pp.258-266	2019年9月	国内
Magmatic differentiation and convective stirring of the mantle in early planets - 2: effects of the properties of mantle materials	M. Ogawa	Geophysical Journal International, Volume 220, Issue 2, pp 1409-1420,	2019年11月	国外
Spontaneous Generation of δ-sunspots in Convective Magnetohydrodynamic Simulation of Magnetic Flux Emergence	S. Toriumi, H. Hotta	The Astrophysical Journal Letters, Volume 886, Issue 1, article id. L21, 7 pp.	2019年11月	国外
Application of Cross-Reference Framework CoToCoA to Macro- and Micro-Scale Simulations	Fukazawa, K., Y. Katoh, T. Nanri and Y. Miyake	2019 Seventh International Symposium on Computing and	2019年11月	国内

of Planetary Magnetospheres		Networking Workshops (CANDARW), Nagasaki, Japan, 2019, pp. 121-124. doi: 10.1109/CANDARW.2019.00029		
Onset Mechanism of M6.5 Solar Flare Observed in Active Region 12371	Kang, Jihye; Inoue, Satoshi; Kusano, Kanya; Park, Sung-Hong; Moon, Yong-Jae	The Astrophysical Journal, Volume 887, Issue 2, article id. 263, 8 pp.	2019年12月	国外
A Comparison of Flare Forecasting Methods. IV. Evaluating Consecutive-day Forecasting Patterns	Park, Sung-Hong; Leka, K. D.; Kusano, Kanya; et al.	The Astrophysical Journal, Volume 890, Issue 2, id.124	2020年2月	国外
Serial Flaring in an Active Region: Exploring Why Only One Flare Is Eruptive	Woods, Magnus M.; Inoue, Satoshi; Harra, Louise K.; Matthews, Sarah A.; Kusano, Kanya	The Astrophysical Journal, Volume 890, Issue 1, id.84	2020年2月	国外
Electron Wing-Like Structures Formed at a Negatively Charged Spacecraft Moving in a Magnetized Plasma	Miyake, Y., W.J. Miloch, S. Kjus, H.L. Pecseli	Journal of Geophysical Research: Space Physics, Volume 125, Issue 2, e2019JA027379	2020年2月	国外
A slow-down time-transformed symplectic integrator for solving the few-body problem	Long Wang, Keigo Nitadori, Junichiro Makino	Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, Volume 493, Issue 3, ,pp 3398-3411,	2020年2月	国外
INO: Interplanetary network of optical lattice clocks	Toshikazu Ebisuzaki, Hidetoshi Katori, Junichiro Makino, Atsushi Noda, Hisaaki Shinkai, Toru Tamagawa	International Journal of Modern Physics DVol. 29, No. 04, 1940002	2020年2月	国外
Are long-term N-body simulations reliable?	David M Hernandez, Sam Hadden, Junichiro Makino	Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, Volume	2020年2月	国外

		493, Issue 2, pp 1913-1925,		
Accelerated FDPS: Algorithms to use accelerators with FDPS	Masaki Iwasawa, Daisuke Namekata, Keigo Nitadori, Kentaro Nomura, Long Wang, Miyuki Tsubouchi, Junichiro Makino	Publications of the Astronomical Society of Japan, Volume 72, Issue 1,	2020年2月	国外
Compartive Study of Data-driven Solar Coronal Magnetic Field Models Using a Flux Emergence Simulation as a Ground-truth Data Set	Toriumi,S.,Takasao,S.,Cheung,M.,Jiang,C.,Guo,Y.,Hayashi,K.,Inoue,S.	The Astrophysical Journal, Volume 890, Issue 2	2020年2月	国外
一様等方性乱流中の粗視化された高渦度領域周りの慣性粒子の分布と運動	櫻井幹記、白石啓貴、石原卓	土木学会論文集A2（応用力学）2019年 75 巻 2 号 I_509-I_518	2020年2月	国内
A Magnetohydrodynamic Relaxation Method for Non-force-free Magnetic Field in Magnetohydrostatic Equilibrium	Miyoshi, Takahiro; Kusano, Kanya; Inoue, Satoshi	The Astrophysical Journal Supplement Series, Volume 247, Issue 1, id.6	2020年3月	国外
圧縮性流体直接数値シミュレーションにおけるコンパクト差分法の並列解法の高速化	杉浦幸哉、横川三津夫、櫻井幹記, 石原卓	研究報告ハイパフォーマンスコンピューティング（HPC）2020-HPC-173,18号,pp1-8	2020年3月	国内
On rising magnetic flux tube and formation of sunspots in a deep domain	H. Hotta, H. Iijima	Monthly Notices of Royal Astronomical Society	2020年4月(2020年3月アクセプト)	国外
How waves and turbulence maintain the super-rotation of Venus' atmosphere	Takeshi Horinouchi, Yoshi-Yuki Hayashi, Shigeto Watanabe, Manabu Yamada, Atsushi Yamazaki, Toru Kouyama, Makoto Taguchi, Tetsuya Fukuhara, Masahiro Takagi,	Science Vol. 368, Issue 6489, pp. 405-409	2020年4月(2020年3月アクセプト)	国外

	Kazunori Ogohara, Shin-ya Murakami, Javier Peralta, Sanjay S. Limaye, Takeshi Imamura, Masato Nakamura, Takao M. Sato, Takehiko Satoh			

別添２

「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

令和元年 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

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

第 7 版　令和元年 5 月 31 日
平成 31 年度の「京」、「京」以外の計算資源量を更新し緑字で記載（P. 10）
別紙の平成 31 年度の所要経費、計算資源量を更新し緑字で記載

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」でなければできないこと 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」でなければできないこと 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」でなければできないこと 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」でなければできないこと 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きており、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、黒点の自発的形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の謎に迫る。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」「たんぽぽ計画」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）	（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 （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。	（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。 （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。	（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。 （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。	（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。 （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。

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）	（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。 （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。	（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。 （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。	（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。 （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。	（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。 （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。

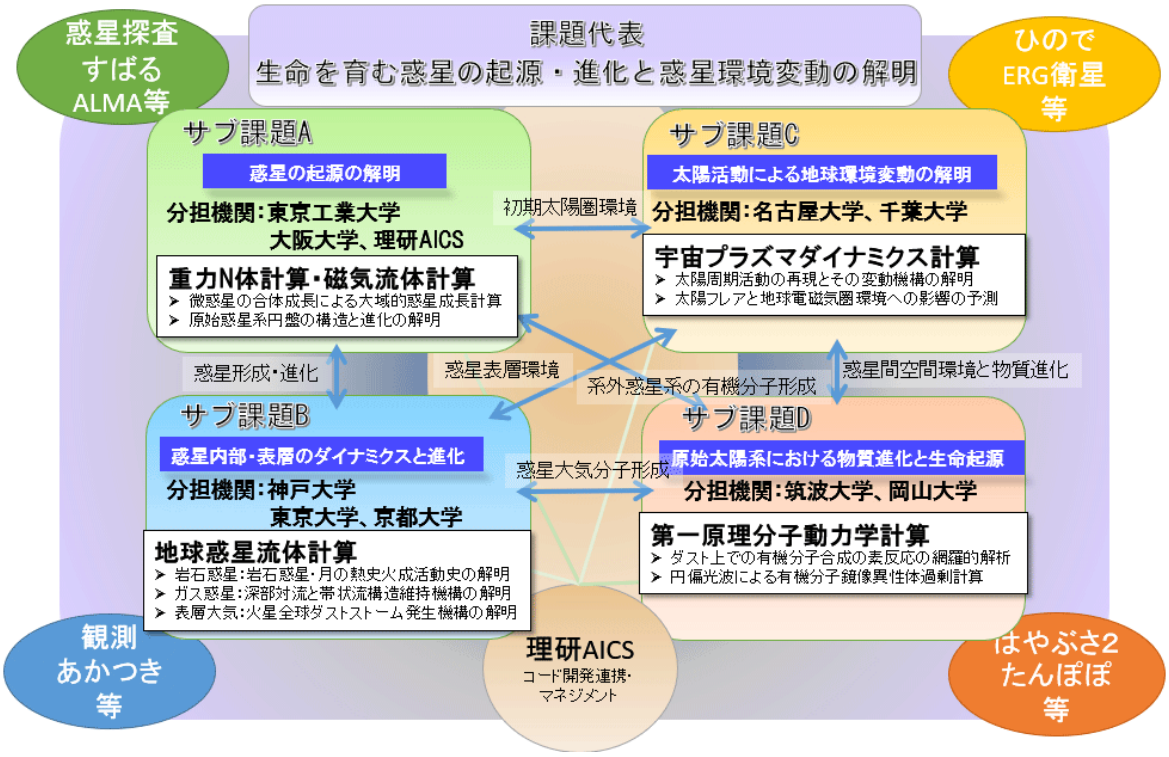
サブ課題C 太陽活動による地球環境変動の解明（名古屋大学・草野完也）	（目標） 太陽対流層、太陽活動領域、磁気圏、衛星環境モデルの開発と初期データ整備 （実施内容） 「京」を使って太陽対流層モデルの計算を行うと共に、フレアモデル・磁気圏モデル・衛星環境モデルの開発を行い、初期データを整備する。	（目標） 太陽対流層、太陽活動領域、磁気圏、衛星環境モデルの初期実験 （実施内容） 「京」を使って太陽対流層モデルの計算を継続すると共に、太陽周期変動の機構を探ると共に、フレア・磁気圏・衛星環境の初期実験を実施する。	（目標） 太陽対流層、太陽活動領域、磁気圏、衛星環境モデルの計算とポスト「京」モデル開発 （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。	（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 （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。

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）	（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。 （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。	（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。 （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。	（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。 （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。	（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。 （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。

（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	1, 426, 874

「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	1, 282, 104

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 年以来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 と共同して行い、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、惑星材料物質量も異なり、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ー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、整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：

観測と整合的な、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整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：

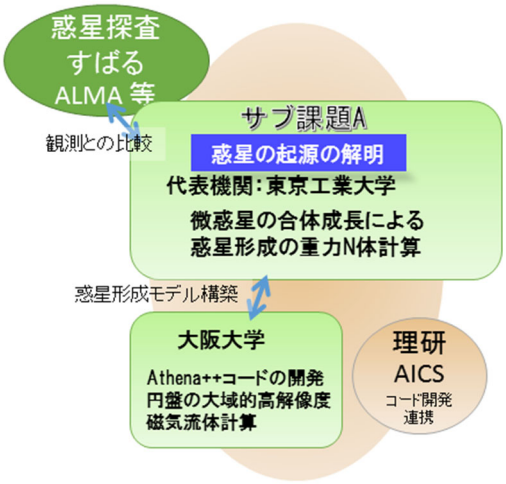
2020 年代中盤完成予定の地上超大型望遠鏡 TMT、E-ELT による、系外惑星系のハビタブル・ゾーンに存在する地球型惑星の大気観測や生命存在を示すバイオマーカーの観測の議論へつなげる。

（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求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る。

（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：

超高次球面調和函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、高い並立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：

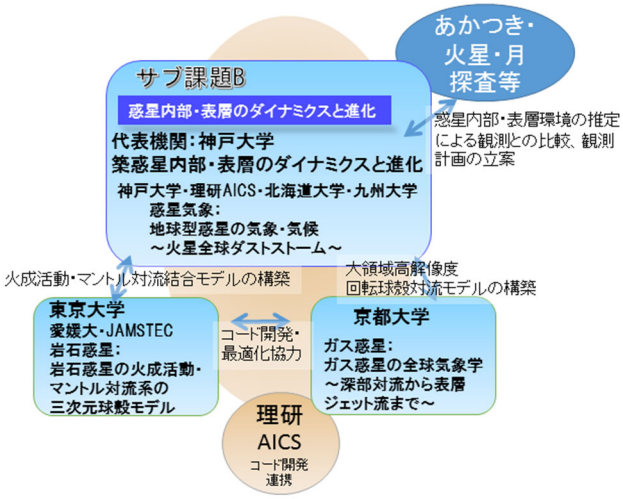
モデルを順次拡張し、「あかつき」探査との対峙が期待される金星大気の対流解像全球循環計算を目指すとともに、太陽系あるいは太陽系外の地球型惑星大気の対流と大循環の多様性に迫る高解像度計算を実現する。

（４）「京」でできていること、ポスト「京」でなければできないこと

「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つつ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ったが、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ミ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形成過程を再現する。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」でなければできないこと

（「京」でできていること）

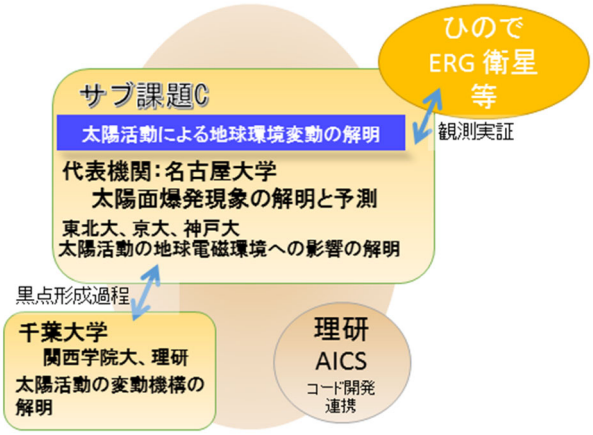
現在の世界最高解像度である 256×768×1536 という計算を 50 年程度実行し、不安定な周期活動を再現している（Hotta et al. 2016, Science）。また、より高解像度の 4.3×10^{12}(=4096×32000×32000)の格子点数を用いた全ノード計算を極短時間おこない、世界最高に近い理論ピーク性能比（24%）を達成している。

（ポスト「京」でなければできないこと）

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、パスツール以来 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ッ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ッ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。

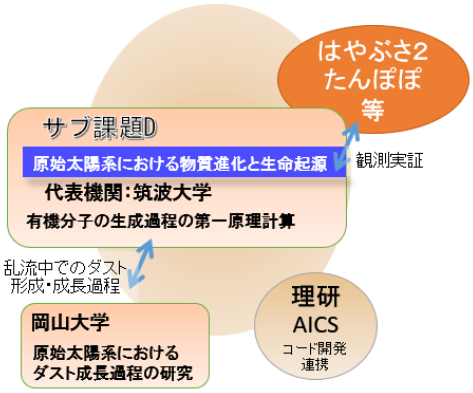
（４）「京」でできていること、ポスト「京」でなければできないこと

「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ッ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 ㎞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・マントル対流、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。マントル対流では、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、超高次球面調和函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ヴィエ・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	木星型惑星表層縞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求				
（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取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：

解適合格子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 256×768×1536 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 4.3×10^{12}(=4096×32000×32000)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。

有機分子形成ついては、現在の遷移状態探査計算から、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）	分担機関（サブ課題責任者）
	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）	分担機関（サブ課題責任者）
	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