

令和2年度高性能汎用計算機高度利用事業
「富岳」成果創出加速プログラム
「宇宙の構造形成と進化から
惑星表層環境変動までの統一的描像の構築」
成果報告書

令和3年5月28日
国立大学法人神戸大学

牧野淳一郎

目次

1. 補助事業の目的	1
2. 令和2年度（報告年度）の実施内容	1
2-1. 当該年度（令和2年度）の事業実施計画	1
2-2. 実施内容（成果）	5
(1) 研究総括、並列計算コード開発	5
(2) サブ課題A 総括、高密度星団におけるコンパクト連星の力学的形成過程の解明	5
(3) サブ課題A・ダークマターの密度揺らぎからはじまる宇宙の天体形成	6
(4) サブ課題A・ニュートリノの大規模構造形成への力学的影響の解明	7
(5) サブ課題A・恒星スケールを分解した銀河形成シミュレーションによる銀河形成過程の研究	8
(6) サブ課題B 統括、銀河系内での分子雲と分子雲コアの形成および原始惑星系円盤の非理想磁気 流体計算	10
(7) サブ課題B・銀河系内での分子雲と分子雲コアの形成および原始惑星系円盤の非理想磁気流体 計算	10
(8) サブ課題B・原始惑星系円盤中での微惑星の集積と惑星形成	10
(9) サブ課題B・原始惑星系円盤の乱流中でのダスト成長	11
(10) サブ課題C 総括、ブラックホール降着円盤およびジェット的一般相対論的輻射磁気流体計算 .	14
(11) サブ課題C・ブラックホール降着円盤およびジェットの非相対論的磁気流体力学計算	18
(12) サブ課題C・ニュートリノ輻射輸送の第一原理計算による3次元超新星爆発メカニズムの解明	20
(13) サブ課題D 統括、太陽黒点の構造と太陽面爆発の関係の研究及びフレア発生予測研究	22
(14) サブ課題D・岩石惑星表層大気シミュレーション	22
(15) サブ課題D・岩石惑星内部シミュレーション	23
(16) サブ課題D・ガス惑星大気シミュレーション	24
2-3. 活動（研究会の活動等）	25
2-4. 実施体制	30
別添1 学会等発表実績	32

補助事業の名称

「富岳」成果創出加速プログラム

「宇宙の構造形成と進化から惑星表層環境変動までの統一的描像の構築」

1. 補助事業の目的

宇宙の始まりであるビッグバンから、膨張宇宙における重力不安定による構造形成、それに伴って起こる銀河形成、銀河の中での星形成、星形成に伴う惑星形成、形成後の惑星の進化、惑星表層環境の形成、さらには太陽活動とその太陽圏、地球への影響といった、宇宙における階層的な構造の形成と進化についての全体的・統一的な理解を、複数の階層にまたがって「富岳」を駆使した世界最高規模のシミュレーションと最新の観測成果を組み合わせることで構築する。本課題では、対象ごとに4つのサブ課題に分けて、サブ課題A「大規模数値計算と大型観測データのシナジーによる宇宙の進化史の解明」では宇宙の大規模構造から銀河・星団形成、サブ課題B「星形成と惑星形成をつなぐ統一的描像の構築」では星形成から惑星形成、サブ課題C「ブラックホールと超新星爆発における高エネルギー天体現象の解明」では星形成・銀河形成に重要な役割をもつブラックホールとその周りの降着円盤や超新星爆発等の高エネルギー現象、サブ課題D「太陽活動と惑星環境変動の解明」では惑星の内部および表層環境の動態・太陽恒星活動とその惑星環境への影響までを取り扱う。

2. 令和2年度（報告年度）の実施内容

2-1. 当該年度（令和2年度）の事業実施計画

(1) 研究総括、並列計算コード開発：牧野 淳一郎（神戸大学）

本課題全体を総括し、以下(2)～(16)に挙げる計算宇宙惑星科学分野の研究課題に取り組む。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。また、本課題に参加する研究機関と連携して、複数の研究テーマで共通する並列計算コード開発を進める。

(2) サブ課題A 総括、高密度星団におけるコンパクト連星の力学的形成過程の解明：藤井 通子（東京大学）

サブ課題A「大規模数値計算と大型観測データのシナジーによる宇宙の進化史の解明」全体を統括する。散開星団や球状星団のような高密度星団におけるコンパクト連星の形成過程の解明を目的とする。令和2年度は重力N体シミュレーションコードNBODY6を用いた散開星団のシミュレーションを行い、また独自に開発しているツリーアルゴリズムを用いた重力N体シミュレーションコードP3T-DENEbの実証実験を行う。

(3) サブ課題A・ダークマターの密度揺らぎからはじまる宇宙の天体形成：石山 智明（千葉大学）
初代星からはじまる宇宙全スケールの階層的構造形成史を世界ではじめて再現し、大規模天体模擬カタ

ログを生成・公開することを目的とする。令和2年度は超並列宇宙論的N体シミュレーションコードGreeMの「富岳」向けチューニングを行う。

(4) サブ課題A・ニュートリノの大規模構造形成への力学的影響の解明：吉川 耕司（筑波大学）
ニュートリノが宇宙大規模構造に及ぼす力学的影響を数値シミュレーションによって正確に予言し、将来の観測からニュートリノの質量や質量階層に対する知見を得る際の理論的な予想を与えることを目的とする。令和2年度はニュートリノのダイナミクスを解くVlasovシミュレーションコードの「富岳」向け最適化を行う。

(5) サブ課題A・恒星スケールを分解した銀河形成シミュレーションによる銀河形成過程の研究：斎藤貴之（神戸大学）、岡本 崇（北海道大学）
従来の1000倍の粒子数によって世界で初めて個々の星にまで分解した銀河シミュレーションを実施し、天の川銀河の形成過程や銀河の多様性の起源の解明を目的とする。令和2年度は銀河形成シミュレーションコードASURA-FDPSの「富岳」向け最適化を行う。

(6) サブ課題B 統括、銀河系内での分子雲と分子雲コアの形成および原始惑星系円盤の非理想磁気流体計算：富田 賢吾（東北大学）
サブ課題B「星形成と惑星形成をつなぐ統一的描像の構築」全体を統括する。数100 pcの計算領域において0.1 pcスケールの分子雲コアを分解できる高い空間解像度でマルチスケールの物理現象を一貫して再現した銀河円盤内の分子雲コア形成シミュレーションによって、分子雲・星形成過程を明らかにすることを目的とする。また、高解像度かつ大域的な磁気流体シミュレーションによって、現実的な原始惑星系円盤の構造を明らかにすることを目的とする。令和2年度は磁気流体シミュレーションコードAthena++の「富岳」向け最適化を行い、さらにダストを考慮した非理想磁気流体効果の実装と最適化を行う。

(7) サブ課題B・銀河系内での分子雲と分子雲コアの形成および原始惑星系円盤の非理想磁気流体計算：岩崎 一成（国立天文台）
数100 pcの計算領域において0.1 pcスケールの分子雲コアを分解できる高い空間解像度でマルチスケールの物理現象を一貫して再現した銀河円盤内の分子雲コア形成シミュレーションによって、分子雲・星形成過程を明らかにすることを目的とする。また、高解像度かつ大域的な磁気流体シミュレーションによって、現実的な原始惑星系円盤の構造を明らかにすることを目的とする。令和2年度は低解像度での分子雲・分子雲コア形成シミュレーションのテスト計算を行い、翌年度以降に実施する本計算のためのモデルパラメータ(磁場強度やダスト粒子のサイズなど)を決定する。

(8) サブ課題B・原始惑星系円盤中での微惑星の集積と惑星形成：井田 茂（東京工業大学）、小久保 英一郎（国立天文台）
高い分解能をもつ大域的な惑星集積計算によって太陽系形成過程を再現し、太陽系を含めた系外惑星系の多様性を説明できる一般的な惑星系形成のシナリオの構築を目的とする。令和2年度は惑星系形成シミュレーションコードGPLUMの「富岳」向け最適化を行い、さらに原始惑星系ガス円盤との重力相互作用

による惑星軌道移動の効果を実装する。

(9) サブ課題 B・原始惑星系円盤の乱流中でのダスト成長：石原 卓（岡山大学）

ナビエ・ストークス方程式を直接解く乱流の大規模数値計算によって原始惑星系円盤の乱流中のダスト成長についての精密なモデルの構築を目的とする。令和 2 年度は高レイノルズ数乱流中の粒子追跡コードおよび乱流中の粒子の衝突付着成長シミュレーションコードの「富岳」向け改良と最適化を行う。

(10) サブ課題 C 総括、ブラックホール降着円盤およびジェット的一般相対論的輻射磁気流体計算：大須賀 健（筑波大学）

サブ課題 C「ブラックホールと超新星爆発における高エネルギー天体現象の解明」全体を統括する。降着円盤内部での磁気回転不安定や降着円盤内外での輻射場を正確に扱うために十分な高い分解能を有する一般相対論的輻射磁気流体力学シミュレーションによってブラックホール降着円盤の構造とエネルギー変換機構、相対論的ジェットの生成機構を明らかにすることを目的とする。令和 2 年度は高光度降着円盤の 2 次元シミュレーションを行う。また、イベントホライズンテレスコープ等によって詳細観測が行われている銀河系中心のブラックホール SgrA*および楕円銀河 M87 中心のブラックホールについて、電波から X 線にわたる多波長でのブラックホールシャドウの理論的なイメージ計算を行う。

(11) サブ課題 C・ブラックホール降着円盤およびジェットの非相対論的磁気流体力学計算：松元 亮治（千葉大学）

降着円盤の大局的 3 次元磁気流体力学シミュレーションによってブラックホールの成長過程と周囲の星や銀河の進化に与える影響を解明することを目的とする。またプラズマ粒子シミュレーションによってブラックホール周囲で生じる高エネルギー現象のメカニズムの解明を目的とする。令和 2 年度は中程度の解像度（方位角方向の解像度 256-512）による低光度降着円盤のシミュレーションおよびエディントン光度程度の降着円盤のシミュレーションを行う。また、プラズマ粒子計算のための PIC コードの「富岳」向け最適化を行う。

(12) サブ課題 C・ニュートリノ輻射輸送の第一原理計算による 3 次元超新星爆発メカニズムの解明：山田 章一（早稲田大学）、滝脇 知也（国立天文台）、住吉 光介（沼津工業高等専門学校）

ニュートリノ輻射輸送を厳密に解くボルツマン輻射流体コードを用いた 3 次元空間計算により重力崩壊型超新星の爆発機構の解明を目的とする。令和 2 年度はボルツマン輻射流体コードを用いた第一原理計算の「富岳」向け最適化および低解像度 3 次元計算の試行を行い、流体不安定性やニュートリノ輻射輸送などの現象が正しく追跡できているかの確認を行う。また、ニュートリノ輻射輸送を厳密に解くには計算コストがかかるため、空間高解像度計算、長時間計算、親星の多様性の影響などの系統的調査には近似計算コード 3DnSNe を併用する。令和 2 年度は 3DnSNe の「富岳」向け最適化を行う。

(13) サブ課題 D 統括、太陽黒点の構造と太陽面爆発の関係の研究及びフレア発生予測研究：草野 完也（名古屋大学）、堀田 英之（千葉大学）

サブ課題 D「太陽活動と惑星環境変動の解明」全体を統括する。世界最高分解能の太陽対流層全体の第一

原理シミュレーションと、太陽コロナや惑星間空間までを結合した太陽・太陽圏包括モデルの構築によって、太陽黒点形成、太陽周期活動、太陽フレア爆発、さらに太陽圏全体のつながりの解明を目的とする。令和2年度は太陽活動周期計算コード AMaTeRAS による太陽ダイナモ全球計算から大規模磁場生成過程をつなげるスキームを検討するとともに、太陽表面黒点形成計算コード R2D2 による黒点形成実験を行う。

(14) サブ課題D・岩石惑星表層大気シミュレーション：林 祥介（神戸大学）

探査機で観測されている雲構造を完全に再現した高解像度全球気象シミュレーションによって火星や金星の大気現象を理解することを目的とする。令和2年度は萌芽的課題で実施した火星大気計算を季節ごとに実施するとともに、金星大気計算の実現可能性を確認する。

(15) サブ課題D・岩石惑星内部シミュレーション：小河 正基（東京大学）

マントル対流の3次元数値シミュレーションによって火成活動とプレート・テクトニクスを再現し、岩石惑星内部のダイナミクスを理解することを目的とする。令和2年度は萌芽的課題で得られたプレート・テクトニクスの予備的なモデルを詳しく分析するとともに、月を想定した小さなコアを持つ球殻マントルにおける熱対流シミュレーションを行う。

(16) サブ課題D・ガス惑星大気シミュレーション：竹広 真一（京都大学）

世界初の全球計算に基づいた高解像度長時間積分によるガス惑星大気の大気対流数値シミュレーションによって、ガス惑星大気の縞状構造の成因の解明を目的とする。令和2年度は萌芽的課題で構築した非弾性回転球殻ガス惑星大気モデルを用いて全球領域での高解像度長時間積分を実行し、全層熱的不安定な設定での対流による渦運動と帯状流の生成維持の様子を調べる。

2-2. 実施内容（成果）

（1）研究総括、並列計算コード開発：牧野 淳一郎（神戸大学）

本課題全体を総括し、以下（2）～（16）に挙げる計算宇宙惑星科学分野の研究課題に取り組んだ。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・調整にあたった。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、学会特別セッションや研究会等での外部有識者との議論なども活かして、プロジェクトの推進を行った。プロジェクトで得られた成果についてはウェブページの作成、シンポジウムの開催など積極的に公表し、今後の展開に役立てた。また、本課題に参加する研究機関と連携して、複数の研究テーマで共通する並列計算コード開発を進めた。活動の詳細は、2-3. 活動（研究会の活動等）に報告する。

（2）サブ課題 A 総括、高密度星団におけるコンパクト連星の力学的形成過程の解明：藤井 通子（東京大学）、谷川 衝（東京大学）

高密度星団は、散開星団、球状星団、銀河中心星団など、多数の恒星が狭い領域に密集した天体である。このような天体では、恒星同士の近接遭遇が頻繁に起こり、まれにコンパクト連星が力学的に形成される。コンパクト連星とは2つのブラックホールや中性子星からなる連星のことである。我々は球状星団における連星ブラックホールの力学的形成について研究し、その結果を Wang, Fujii & Tanikawa (2021, MNRAS accepted) として発表した。その内容について以下に述べる。

恒星の密集していない星団外の領域では、恒星は重い恒星ほど少なく生まれる傾向がある。誕生したばかりの恒星の質量の分布を初期質量関数 (Initial Mass Function, IMF) というが、このような傾向を持った IMF は top-light IMF と呼ばれている。一方、星団の IMF はよくわかっていない。星団の観測から、星団は、多くの重い恒星が生まれやすい top-heavy IMF を持っていたのではないかとこの可能性が指摘されている。我々はこの IMF の違いが連星ブラックホールの力学的形成とそれらの合体率にどのような影響を与えるかを、重力 N 体シミュレーションを用いて調べた。数値計算コードには PeTar (Wang et al. 2020, MNRAS, 497, 536) を用いた。計算の前には、top-heavy IMF を持った球状星団ほど、多くの連星ブラックホールが形成され、多くの連星ブラックホールが合体すると予想していた。これは top-heavy IMF を持った球状星団ほど多くのブラックホールを生み出すからである。しかし、結果はそうならず、top-heavy IMF を持った球状星団では、多くの連星ブラックホールが形成されるが、それらの合体率はむしろ小さくなった。これは力学的に形成される連星ブラックホールの連星距離が top-heavy IMF の球状星団ほど大きくなり、重力波放出のタイムスケールが長くなるからである。この結果は、top-heavy IMF を持った球状星団ほど、多くの連星ブラックホールが合体するというこれまでの予想 (Weatherford et al. 2021, ApJL, 907, L25) を覆す結果であるため、非常に重要な結果である。

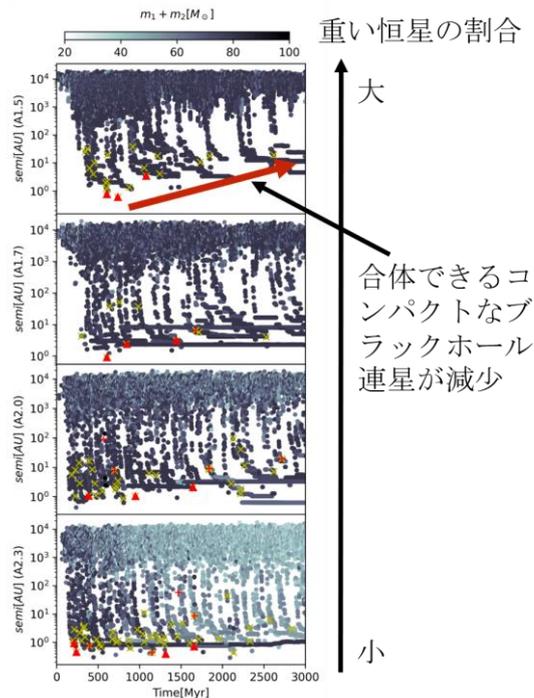


図 1 : 球状星団中で形成したブラックホール連星の軌道長半径の時間進化。黄色の×印、赤色の▲印は合体した時間を示す。上のパネルほど、top-heavy IMF を持つ星団。一番上のパネルでは、時間と共に合体できるブラックホール連星が減少する。

また、独自に開発しているツリーアルゴリズムを用いた重力 N 体シミュレーションコード P3T-DENEb の実証実験を行った。今年度は短時間の積分について、正しく計算できていることを確認した。今後、長時間の積分についても検証を行う必要がある。

(3) サブ課題 A・ダークマターの密度揺らぎからはじまる宇宙の天体形成：石山 智明（千葉大学）

2020 年度は超並列宇宙論的 N 体シミュレーションコード GreeM の「富岳」向けチューニングを行った。重力相互作用カーネル部は、組み込み関数を用いた手動 SIMD 化によるチューニングで大きな効果が得られ、コアあたり「京」の 6 倍高速に相互作用を計算できている。一部テーブル参照を行っており、ピークの浮動小数点演算性能に対する実行効率での単純な比較はできないが、「京」と「富岳」の性能差を考慮すると、ほぼ同等の効率で計算できている。テスト計算では全系である 158976 ノードまで良好なウィークスケーリング効率が得られた (図 2)。また全系では 1 秒あたり約 1.45 兆粒子の更新の実現を確認し、これは我々の知る限り世界最高性能である。

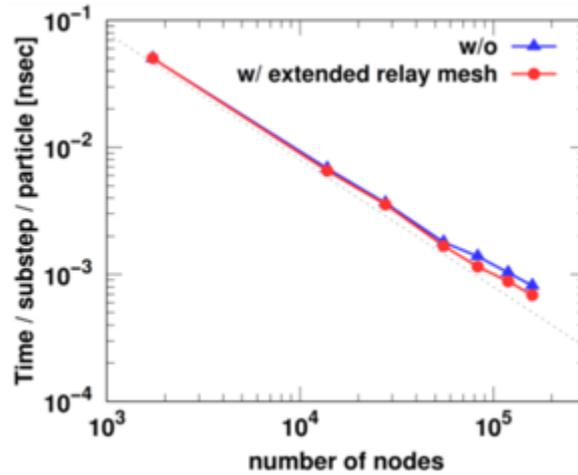


図 2: 富岳でのウィークスケーリング

(大規模な全対全通信を加速する Extended relay mesh 法の有無の結果を比較)

また 2021 年度以降に行われる本計算の解析のための準備を進めた。構造検出コードを最適化し、超高分解能宇宙論的シミュレーションのボックス全体にわたるハローカタログ、およびハロー合体形成史を作成できるようにした。そして既存の 2 兆粒子の大規模シミュレーションを活用し、高赤方偏移から現在までのカタログを整備し、データの二次利用を可能にした。そしてその上で準解析的モデルを適用し、銀河や活動銀河核形成の模擬カタログを構築するパイプラインの準備を進めた。応用として、低輝度矮小楕円体銀河から銀河団スケールにわたって、ハローの中心集中度の進化を精度良く表現するモデルを構築した。

(4) サブ課題 A・ニュートリノの大規模構造形成への力学的影響の解明：吉川 耕司（筑波大学）

富岳における大規模数値シミュレーションに向けた最適化として、CDM のダイナミクスで用いる重力多体相互作用と、ニュートリノのダイナミクスを扱う Vlasov シミュレーションの A64FX プロセッサの SIMD 拡張命令 (SVE 命令) を用いた実装を行った。その結果、Vlasov シミュレーションのカーネル部分において当初の予想を上回る約 15% の理論ピーク性能に対する実行性能比を達成した。また、富岳のほぼ全システムを用いた数値シミュレーションにおいても当初予定していた通り、80% を超える並列化効率を達成した。この最適化したコードを用いて様々なニュートリノ質量に対する宇宙大規模構造形成シミュレーションを多数の realization についてこれまでにない高解像度で実行することができた。

(5) サブ課題 A・恒星スケールを分解した銀河形成シミュレーションによる銀河形成過程の研究：
斎藤 貴之（神戸大学）、岡本 崇（北海道大学）

銀河の形成と進化には、超新星爆発に代表されるフィードバックが重要な役割を果たす。しかし、従来の銀河形成シミュレーションでは、質量分解能が恒星質量より遙かに大きいため、シミュレーション中の星粒子は恒星の集団として表されており、このようなモデルの元ではフィードバックに不定性が大きく、モデルパラメータに結果が強く依存することが知られている。本研究では、銀河形成シミュレーションで恒星スケールを直接分解したシミュレーションを行い、フィードバックの効果を第一原理的に取り込み、より精密で不定性の少ない銀河形成シミュレーションの実現を目指す。

2020 年度は、特に従来の研究を 2-3 桁上回る大粒子シミュレーション-天の川銀河サイズの銀河で銀河全体に 10^{11} 粒子-を実現するためのシミュレーションコード ASURA-FDPS の開発及びチューニングを集中的に行った。ASURA-FDPS は、京コンピュータで開発されてきた粒子系シミュレーションフレームワーク Framework for Developing Particle Simulator (FDPS) に、銀河形成シミュレーションコード ASURA の物理モデルを乗せたものである。宇宙論的な周期境界シミュレーション実現のために、Particle Mesh Multipole Method (PMMM) を実装した。計算中最も重たい重力および流体相互作用には、Particle-particle Interaction Kernel Generator (PIKG) を用いて自動生成した富岳最適化カーネルを用いている。シミュレーション中最も短い時間刻み幅を必要とするのは超新星爆発領域である。ASURA-FDPS では、ハミルトニアン分割により、超新星爆発影響領域を切り出し、短い時間刻み幅で孤立系として時間積分する。このとき、超新星爆発の影響を受ける孤立領域を効率よく見つけるために、深層学習を応用した。

2020 年度 3 月に、富岳大規模実行に申請し、1/2 システム及び全系を用いたパフォーマンス評価を行った。まず、現状の ASURA-FDPS のカーネル単体性能は、図 3, 4 にあるとおり、重力相互作用は 30-36Gflops、流体相互作用は 22-32Gflops で、それぞれピーク性能の 24-28%及び 17-25%に相当する。1k ノードからフルシステム相当の 149k ノードまでの、重力及び流体相互作用の 1 ステップにかかる計算（粒子数は各 MPI プロセスあたりダークマター粒子及びガス粒子それぞれ 2^{22} 個、宇宙初期に対応するような一様場に微少な揺らぎが乗っている分布）を元に求めた weak scaling 性能は、図 5 に示すように良い weak scaling 性能を持つことが分かる。149k ノードの時にやや性能の劣化があるが、このステップの時にはロードバランスを取るまで時間積分できなかったからであり、もう 2 秒程度性能改善が予想される。なお、全系 (149 ノード) を用いたときは 31Pflops を記録した。図 6 は strong scaling で、ここから 1MPI プロセスあたり 400 万粒子程度を持つような計算であれば十分性能を発揮できるということが分かる。各ステップでランダムにピックアップした領域を超新星領域に見立てて切り出し、より細かい時間刻みで積分をしている。この計算量は十分小さいため、全体への影響は見られない。これらの結果をまとめて、ゴードンベル賞にエントリーした。

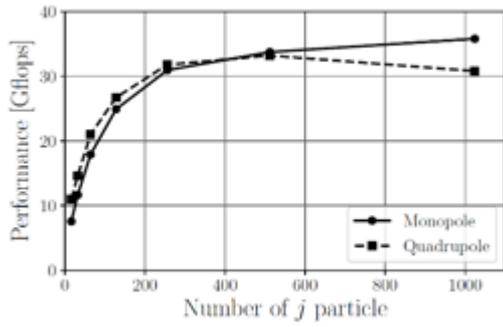


図3:PIKG で生成した重力相互作用カーネルの富岳上での性能。横軸は j 粒子数、縦軸は Gflops。 i 粒子は 1024 粒子に固定。単極子および四重極モーメントの評価を行った。

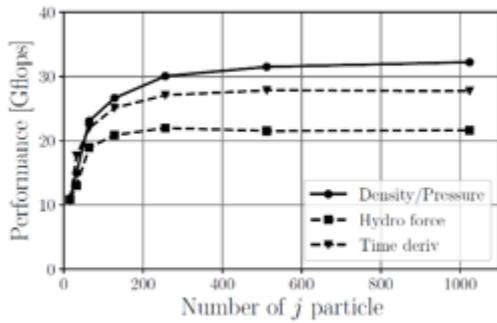


図4:PIKG で生成した流体相互作用カーネルの富岳上での性能。横軸は j 粒子数で縦軸は Gflops。 i 粒子数は 256 に固定している。密度計算、圧力勾配による力、時間微分項の計算カーネルを出している。

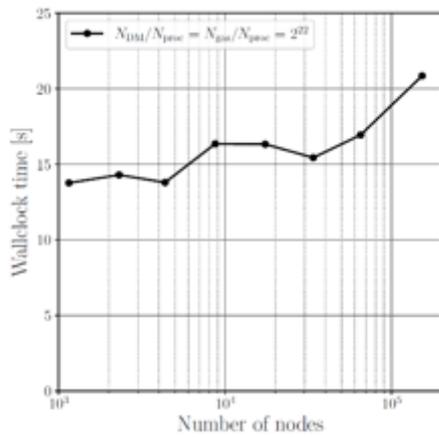


図5:Weak scaling の結果。149k ノードでは 10^{12} 粒子以上の系の重力流体力学の相互作用計算を行っている。

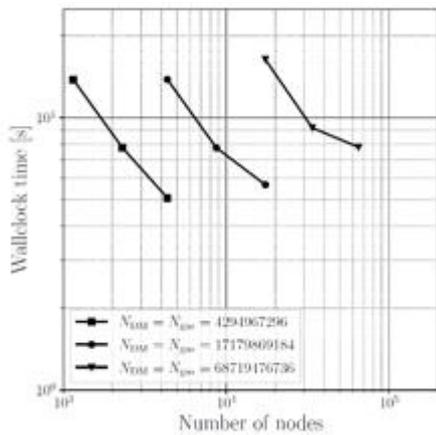


図6:Strong scaling の結果。一ノードあたりの粒子数を標準のケースから、1/2 および 1/4

(6) サブ課題 B 統括、銀河系内での分子雲と分子雲コアの形成および原始惑星系円盤の非理想磁気流体計算：富田 賢吾（東北大学）

令和 2 年度は磁気流体シミュレーションコード Athena++ の「富岳」向け最適化を行った。Athena++ で使用している磁気流体ソルバ HLLD 法は多数の変数を同時に使用するためレジスタ数の少ない A64FX とは相性が悪いが、それでも Intel 系のプロセッサと同程度の性能を実現することに成功した。

一方で「富岳」のコンパイラ (HH-18520) 及び MPI (HH-19349) のバグ、HDF5 ライブラリの不具合 (HH-19179) の報告を行い、「富岳」の実運用に向けた整備に貢献した。7) とともにバグ等により利用できなかった計算資源は課題内で再配分し利用した。

(7) サブ課題 B・銀河系内での分子雲と分子雲コアの形成および原始惑星系円盤の非理想磁気流体計算：岩崎 一成（国立天文台）

令和 2 年度は低解像度での分子雲・分子雲コア形成シミュレーションのテスト計算を開始し、「富岳」のコンパイラ (HH-18520) 及び MPI (HH-19349) のバグ、HDF5 ライブラリの不具合 (HH-19179) の報告を行い、「富岳」の実運用に向けた整備に貢献した。本計算のためのモデルパラメータを決定することを予定していたが、この不具合により十分な計算を行うことができなかったため、次年度に持ち越して実施する。

銀河系内での星形成および原始惑星系円盤内でのダスト粒子の挙動をシミュレーションするため、Athena++ の粒子モジュールの拡張を前倒して行った。一様格子ではテストも含めて概ね正常に動作しているが、Mesh refinement と共に用いるとレベル境界付近で精度が顕著に低下する課題が明らかになった。

(8) サブ課題 B・原始惑星系円盤中での微惑星の集積と惑星形成：井田 茂（東京工業大学）、小久保 英一郎（国立天文台）

惑星系形成をシミュレーションするため、富岳用の惑星集積計算 (N 体シミュレーション) コードと惑星衝突計算 (SPH シミュレーション) コードの開発を行った。

粒子系並列演算ライブラリ FDPS を用いた富岳用の惑星集積計算コード GPLUM の開発を行った。GPLUM の基礎部分は完成し、微惑星系の質量分布や重力緩和の再現性のテストを行った。GPLUM は、富岳においては、使用するノード数を大きくすると MPI 通信に要する時間が大きくなり (図 7、灰色の線がツリーに関する MPI 通信)、並列化効率が落ちる問題があるが、これは未解決である。微惑星系の粒子数による質量分布や重力緩和の依存性を調査した。また、原始惑星と原始惑星系ガス円盤との重力相互作用による惑星軌道移動の効果について調査し、多様な惑星とガス円盤に適用可能な統一的な相互作用の公式を導出し、実装方法をまとめた。

惑星集積コード GPLUM に実装する惑星衝突モデルの構築と検証にも必要となり、富岳上で大規模実行可能な Smoothed Particle Hydrodynamics (SPH) 法の惑星衝突計算コードの開発を追加して行った。まず、A64FX 上で行われる流体粒子の相互作用計算の部分に関して、SVE intrinsic 関数を用いて効率的に実行できるようにした。この力の計算に関しては、intrinsic 関数を用いない場合に比べておおよそ

6-7 倍程度の加速が得られた。また、これと平行して、通信性能の測定も行った。図 8 は現在プロセス間の粒子データの交換に用いている MPI Alltoall 及び Alltoallv の性能であるが、1 GB/s 程度の速度しかでていないことがわかった。

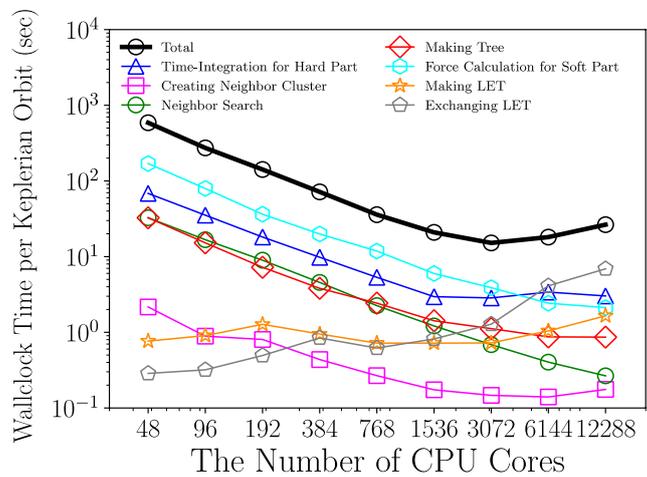


図 7: 富岳における GPLUM 内各計算時間のコア数依存性。

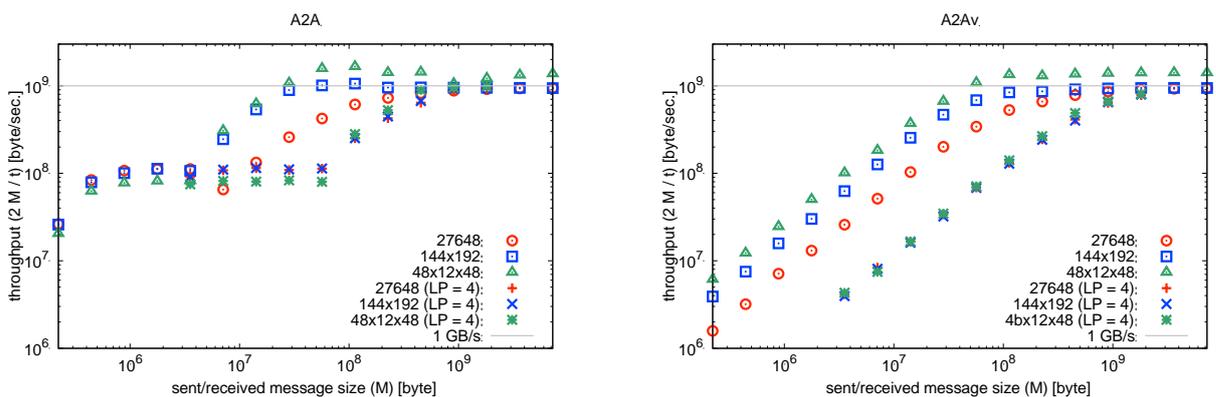


図 8: 富岳における Alltoall/Alltoallv のスループットのデータサイズ依存性。

(9) サブ課題 B・原始惑星系円盤の乱流中でのダスト成長：石原 卓（岡山大学）

本課題では、ナビエ・ストークス方程式を直接解く乱流の大規模直接数値計算によって原始惑星系円盤の乱流中のダスト成長についての精密なモデルの構築を目的としている。令和 2 年度は高レイノルズ数乱流中の粒子追跡コードおよび乱流中の粒子の衝突付着成長シミュレーションコードの「富岳」向け改良と最適化を行った。渦の組織構造が観察される高レイノルズ数乱流（格子点数 4096^3 , $Re \sim 36500$ ）の直接数値計算において、慣性の異なるダスト粒子を各 512^3 個ずつ追跡したデータを解析した結果、渦の大規模な組織構造（剪断層）の付近に慣性の大きい粒子が層状に集中する領域があること、および、層状に集中した粒子の速度は比較的大きいものの向きが揃っているため相対速度は比較的小さいことなどがわかった（図 9 参照）。以上より、高レイノルズ数乱流中の慣性粒子の運動の解析によって、原始惑星系円盤

中のダスト成長（衝突・付着）についての重要な知見が得られる手応えを感じる事ができたが、一方で追跡粒子の数が計算の物理領域の広さに比べて少なすぎるため、追跡粒子数を増加して結果の信頼性を上げることが必要であることも明らかとなった。そのため、これまでに開発してきたコードにおいて、粒子の通し番号を 4 バイト整数から 8 バイト整数に変更し、それに関連する部分の改良、および、膨大な粒子を効率的に追跡するために必要なノード数とスレッド数の最適化を行った。以上の結果、最終的に富岳にて慣性の異なるダスト粒子を各 1024^3 個以上ずつ追跡できるようになった。

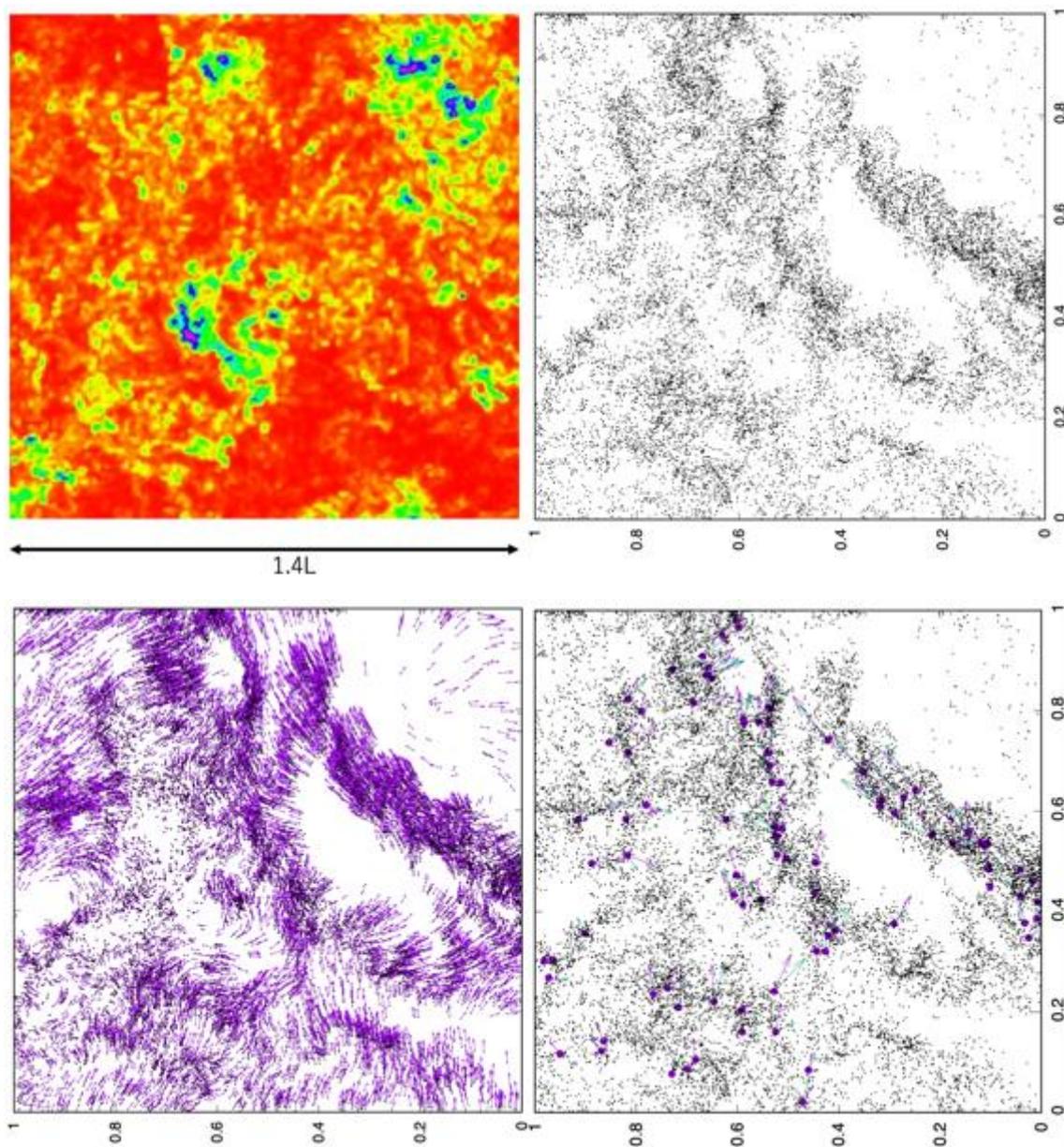


図 9：(左上) 高レイノルズ数乱流の直接数値計算(格子点数: 4096^3 , $Re=36500$)で得られた、ある断面(サイズ $1.4L \times 1.4L$)上の渦度の大きさの分布(ここで L は積分長). 右上に渦度集中領域が確認できる。(右上) 同一断面上に分布する慣性粒子(終端速度が最小渦の時間スケールの 10 倍の粒子)。渦度集中領域を取り囲む薄い層状に粒子が分布している。(左下) 層状に分布する粒子の速度の向きが揃っていることが確認できる。(右下) 粒子の衝突位置における粒子速度. 層状領域で衝突する粒子の相対速度が

それほど大きくないことが確認できる。

(10) サブ課題 C 総括、ブラックホール降着円盤およびジェット的一般相対論的輻射磁気流体計算：大須賀 健（筑波大学）

本年度は UWABAMI を用いて中性子星及びブラックホールへの超臨界降着シミュレーションを行った。これらコンパクト天体を取り巻く降着円盤は、ガスが降着することで重力エネルギーを解放して活動性を維持しており、とりわけ X 線源のような非常に明るく輝く天体は、大量のガスが降着する超臨界降着状態にあると考えられる。しかし観測される X 線源がその中心に中性子星を持つのか、またはブラックホールを持つのか、さらにブラックホールの場合、その回転速度はどの程度なのか、を観測的に調べることは難しい。そこで本年度は一般相対論的輻射磁気流体コードを用い、中性子星及びブラックホールへの超臨界降着現象を幅広いパラメータ範囲で行った。

中性子星においては中性子星磁場強度とガス降着量をパラメータとして計算を行った。その結果、円盤によるガス降着は中性子星磁場によってせき止められて磁気圏を形成するが、磁気圏の大きさは磁場強度が大きいほど、また降着するガスが少ないほど大きくなることを示した。これらの結果は Takahashi & Ohsuga (2017) で発表された解析的な研究と定量的に一致する。噴出流に着目すると、中性子星降着円盤の場合、円盤から噴出する噴出流と、中性子星にガスが降り積もって星表面に形成される降着柱を起源とする噴出流が存在することがわかった。降着柱から形成される噴出流は、円盤からの噴出流よりも小さい角運動量を持つため、噴出角度はより小さくなることがわかった。これらの結果は噴出流の開口角や、角運動量から中心天体の起源に迫る事ができる可能性をひめている。

ブラックホールにおいてはブラックホールの回転速度をパラメータとして計算を行った。超臨界降着では円盤からの大量の放射によって噴出流が形成されるが、ブラックホールが回転している場合、磁場を通したブラックホールの回転エネルギーの引き抜きが起こり、磁気優勢な噴出流が形成される。本計算ではブラックホールの回転強度を表すスピンパラメータが 0.75 程度では輻射優勢であったが、磁気的な噴出流の強度はスピンパラメータに強く依存しているため、より高速回転している場合には磁気優勢な噴出流が期待される。また、中性子星への超臨界降着では比較的大量のガスが噴出流を形成するが、ブラックホールでは輻射や磁場が噴出流を担っており、噴出流の組成から中心天体を同定できる可能性があることがわかった。

これらの研究に加えて UWABAMI コードをアップグレードし、2温度一般相対論的磁気流体コードを構築した。これまでの UWABAMI コードでは電子温度とイオン温度は等しいという仮定していた。この仮定は超臨界降着のようなガス密度の高い円盤では成り立つが、イベントホライズンテレスコープの観測で脚光を浴びた M87 の中心に存在するような低降着率状態にあるブラックホール降着円盤では成り立たない。電子温度とイオン温度の差異は、スペクトルに直結するため、電子温度を決定することは観測との直接比較のための最重要課題である。そこで本年度は2温度一般相対論的磁気流体コードを構築し、2次元軸対称のブラックホール降着円盤のシミュレーションを行った。

その結果、円盤内におけるイオン温度は最大で $\sim 10^{11}\text{K}$ になるが、電子温度はそれよりも一桁程度低い。一方で円盤上空では電子温度がイオン温度よりも高くなる傾向にあることがわかった。これは円盤上空ではガスのエネルギーに比べて磁気エネルギーが優勢であり（図 10 左）、乱流による効率的なイオン加熱が抑制されるためである（図 10 右）。また、電子温度はブラックホールの回転速度にも依存しており、回転速度が速いほどより高温になる傾向が見られた。これはブラックホールの回転エネルギーが磁気的な噴出流となって上空へと伝わっていることを示しており、高速回転するブラックホールほど、よりハードなスペクトルになることを示唆している。

ブラックホール近傍の輻射場を正確に解くために開発してきた、輻射輸送方程式を解く一般相対論的輻射磁気流体コード INAZUMA を富岳へ実装し、チューニング及びブラックホール降着流の2次元計算を実施した。初期トーラスの最大密度を変えることで様々な質量降着率のシミュレーションを実施し、近似解法である M1 法を用いて輻射輸送を解いた結果と比較した。

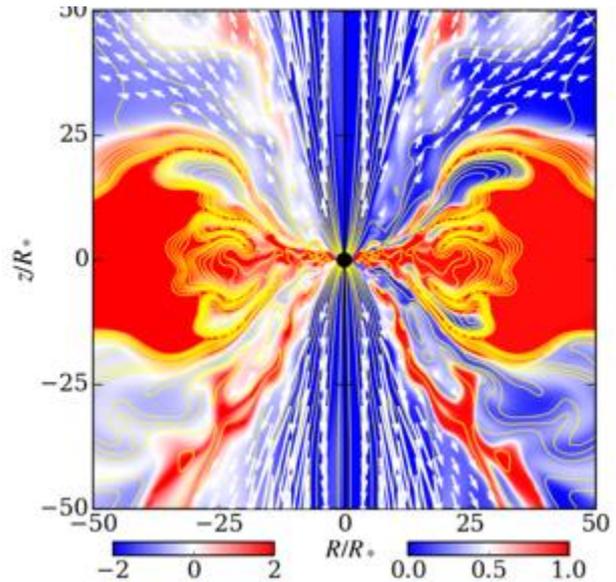


図 10. ブラックホール降着円盤の2温度一般相対論的磁気流体計算。左は磁気エネルギーに対するガスのエネルギー。右はイオンと電子の加熱率を示している。青いところほど磁気エネルギーが優勢であり（左）、イオン加熱よりも電子の加熱が働いている（右）ことを示している。

図 11 (上) は INAZUMA による計算結果、図 11 (下) は M1 法による計算結果の 1 例である。図の左側は密度分布、右側は輻射エネルギー密度分布を表しており、スキーム間の違いは大局的に見るとほとんどない。矢印は速度ベクトルであり、水色で示されているようにアウトフローが形成されている様子が見て取れる。密度分布や速度分布にはほとんど違いがないため、アウトフローによる質量放出率や運動エネルギー放出率にスキーム間の違いは現れなかった。

輻射場については光学的に薄い回転軸付近で違いが現れた。これは M1 法では光学的に薄い領域で輻射の非物理的な衝突が起きてしまうが、INAZUMA では輻射の非物理的な衝突を抑制できているためである。しかし、質量降着率に対する放射光度の依存性については各計算法で大きな差は現れなかった。これは輻射場の違いは数倍程度であるのに対して、放射光度の時間変動は 1 桁程度となっており、計算法の違いより十分大きいためであると考えられる。以上から計算法の違いは磁気流体や放射光度などへの影響は大きくはないが、光学的に薄い領域の輻射場の分布については輻射輸送方程式を解くことで従来の近似解法より正確に解けることを示すことができた。

また、Event Horizon Telescope (EHT) による近傍の巨大ブラックホール極近傍領域の電波画像の観測が可能となった。しかし電波イメージだけでは、ブラックホールの重要パラメータであり相対論的ジェット駆動機構の本質を担うと考えられているブラックホール・スピンの値に制限を与えることが難しい。ブラックホール・スピンに制限を与えかつ降着流や発見後 100 年ものあいだ謎となっている相対論的ジェットの駆動機構に迫るためには、電波イメージに加え、多波長の理論イメージおよびスペクトルと観測データを比較することが一つの有効な手段と考えられる。

これまで我々が開発してきた多波長の一般相対論的輻射輸送コード RAIKOU(来光)では、熱的電子による様々な放射過程を考慮し、電波から MeV ガンマ線までの計算が可能であった。しかし、EHT の主タ

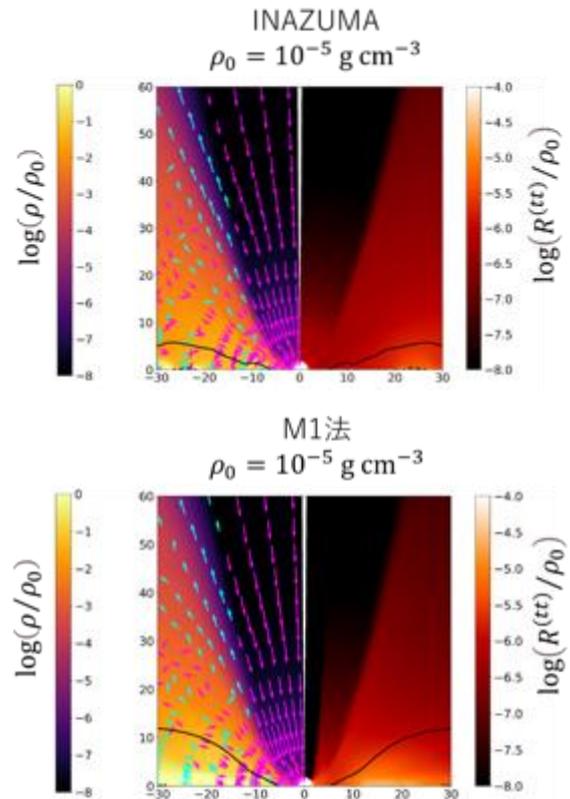


図 11. 一般相対論的輻射磁気流体力学計算コード INAZUMA (上) と M1 法 (下) による計算結果の比較

ターゲットである M87* や Sgr A* からは MeV ガンマ線より更に 6 桁以上も高エネルギーの TeV ガンマ線観測が報告されており、非熱的電子による逆コンプトン散乱を考慮する必要がある。また電波放射においても非熱的電子によるシンクロトロン放射過程の重要性が指摘されている。そこで本年度は RAIKOU コードに非熱的電子によるシンクロトロン放射・吸収および逆コンプトン散乱の計算モジュールを実装し、電波から TeV ガンマ線までの 16 桁以上にわたる多波長スペクトル計算を可能にした (図 12)。これまで海外グループにおいても TeV ガンマ線を含む一般相対論的輻射輸送計算は報告されておらず、ブラックホール近傍での加速電子を考慮した世界最先端の計算が可能となった (Kawashima & Ohsuga + in prep. 2021 年 5 月投稿予定。論文中の計算では 2020 年度の富岳の計算リソースも利用した)。なお 2021 年 4 月に出版された EHT の多波長同時観測論文では、今回開発した RAIKOU コードの機能の一部を用いて簡単な放射モデルを仮定し、電波から TeV ガンマ線までの多波長計算を実施することで論文の理論解釈を行った (EHT MWL Science Working Group 2021 ApJL)。

さらに、相対論的ジェットの駆動機構を解明する上で、ブラックホール近傍の磁場構造を明らかにすることはブラックホール・スピンと並び最重要課題と考えられている。シンクロトロン過程やファラデー効果によって発生する偏光はブラックホール近傍の磁場構造に関する情報を運ぶ。そこで、我々はシンクロトロン放射・吸収、ファラデー回転、ファラデー変換を考慮して偏光(ストークスパラメータ I, Q, U, V)を計算する一般相対論的輻射輸送コードを開発し、M87* や Sgr A* における偏光イメージを計算した (Tsunetoe et al. 2020, 2021)。その結果、これまであまり着目されていなかった円偏光がブラックホール近傍の磁場構造を強く反映させていることを発見した (図 13)。

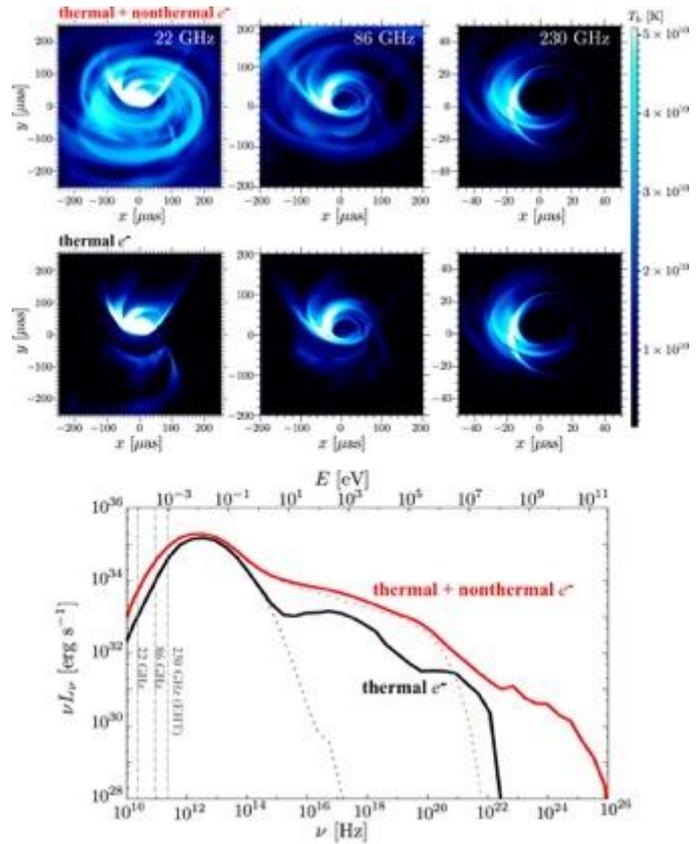


図 12 RAIKOU で計算した Sgr A* の降着流・ジェットの電波イメージ(上・中)と多波長スペクトル(下)。UWABAMI で計算した一般相対論的磁気流体場データを用いた。非熱的電子効果で電波イメージサイズは大きくなり、X 線・ガンマ線は 1 桁以上明るくなることを示した。(Kawashima & Ohsuga + in prep.)

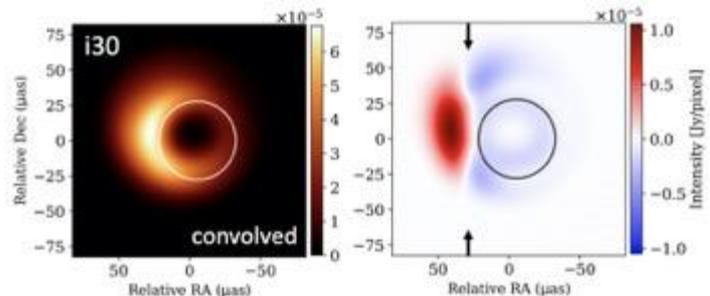


図 13 偏光を考慮した一般相対論的輻射輸送コードで計算した放射強度(左) および円偏光成分(右)。トロイダル磁場による円偏光の符号反転がイメージに現れ、ブラックホール近傍の磁場構造を探る新しい手法となることを発見した (Tsunetoe et al. 2021.)

加えて、コンプトン散乱を考慮した 6 次元(空間 3 次元+運動量空間 3 次元)一般相対論的 Boltzmann 方程式を解く輻射輸送コードを開発し、ブラックホールの超臨界降着流の輻射場を計算した。この計算では一般相対論的輻射磁気流体コード UWABAMI により計算された流体場を用いて、ポストプロセス計算により輻射場を求めた。ガスが熱制動放射などにより輻射が発生し、それらがコンプトン散乱や吸収などをされながら準定常的な状態に落ち着く。そして、観測スペクトルは円盤を真上から見たときはスペクトルがよりハードに、真横から見たときはよりソフトなものとして観測されることがわかった(図 14)。この結果は超臨界降着天体である超高光度 X 線源などに見られるスペクトルの特徴を一部再現している。また、観測スペクトルは軸から 30° 以内にあるファンネル領域(funnel, 円盤回転軸付近にある高温, 低密度, 高速なアウトフロー領域)をどれだけ見通しているかということに強く依存していることがわかった(図 15)。さらに、フレア現象を模擬した計算では 20keV 以上のスペクトルが大きく変動するという結果が得られた。これは超高光度 X 線源などの超臨界降着天体における時間変動に伴うファンネル領域の物理場の変動への示唆を与えるものである。

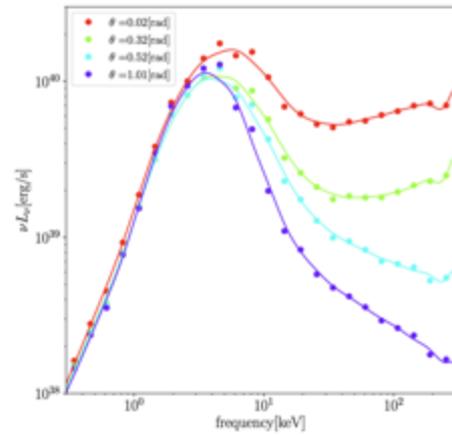


図 14 観測スペクトルの観測角度依存性。線色の違いは観測角度の違いである。

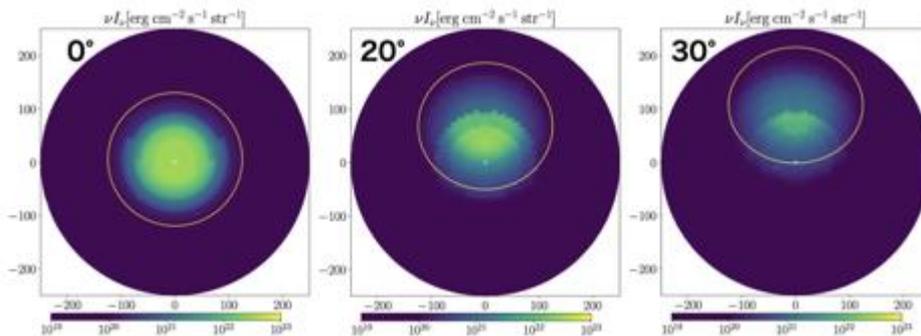


図 15 10, 20, 30° から観測した 100keV 放射のイメージ。黄線はファンネル領域の外縁。ファンネル領域からのみ高エネルギー光子が放射されていることがわかる。違いは観測角度の違いである。

(11) サブ課題 C・ブラックホール降着円盤およびジェットの前相対論的磁気流体力学計算：松元亮治(千葉大学)

1. ブラックホール降着流の大局的 3 次元磁気流体・輻射磁気流体シミュレーション

高次精度の 3 次元磁気流体コード CANS+ を用いて、低光度ブラックホール降着流の円筒座標系 3 次元磁気流体シミュレーションを実施した。高次精度コードを適用することによって初めて明らかになった渦状構造について、方位角方向の解像度が 256-512 メッシュの場合のシミュレーション結果を解析した結果、渦状腕に沿って磁場が引き延ばされ、エントロピーが高まっていること、渦状腕に沿って質量降着が生じていることなどが示された。これらの結果は、渦状腕中で磁気エネルギーが散逸していること、磁気回転不安定性によって駆動される磁気乱流に加えて、渦状の磁場構造が角運動量輸送に寄与していることを示唆している。より高解像度の計算を実施するため、CANS+ を「富岳」に実装した。性能解析の結果、レジスタ不足等がボトルネックになっていることが判明した。

1 次モーメント (M1) 法に基づく輻射磁気流体コード CANS+R を用いてエディントン降着率の 10% 程度のブラックホール降着流の 3 次元輻射磁気流体シミュレーションを国立天文台の XC50 を用いて実施した結果を解析した。中心天体が 10^7 太陽質量のブラックホールの場合について $(N_r, N_\phi, N_z) = (592, 32, 704)$ メッシュを用いて実施した計算結果を図 16 に示す。ブラックホール近傍の高温降着流 (RIAF) の外側に 10^7 K 程度の温度の軟 X 線放射領域が形成され、この領域が輻射圧優勢になると動径振動が励起されて数日程度の周期の光度変動を示すことが示された。これらの結果は、広輝線が観測されない 2 型セイファート銀河と広輝線が観測される 1 型セイファート銀河の間を遷移する Changing Look AGN と呼ばれる活動銀河の増光時に観測される軟 X 線超過と短時間変動を説明することができる (Igarashi et al. 2020)。この計算にコンプトン散乱の効果を組み込んだシミュレーションコードを開発した。

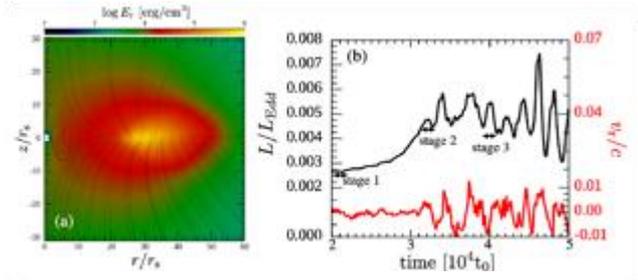


図 16: CANS+R を用いた 3 次元輻射磁気流体シミュレーションから得られた (a) 輻射エネルギー密度の rz 面分布。実線は輻射の流線。(b) 時間変動。時間の単位は $t_0=100s$ 。黒い実線は鉛直方向遠方から観測した光度変化。単位はエディントン光度。赤線は動径速度。

2. 銀河中心ブラックホールの活動が銀河に及ぼす影響の 3 次元磁気流体シミュレーション

ブラックホールの活動が星間ガス・銀河間ガスに及ぼす影響を調べるため、CANS+をイオン温度と電子温度の違いを考慮した 2 温度磁気流体に拡張したコードを用いて、初期ジェット半径の 1000 倍までのスケールのジェット伝播を追う高空間分解能数値実験を実施することを目指している。令和 2 年度は 2 温度 CANS+コードの富岳への実装とジェット伝播のテスト計算を実施した。富岳の 3072 ノードを用いて 14 万並列で行ったジェット伝播の数値実験結果を図 17 に示す。メッシュ数は $(1248, 1248, 2880)$ とした。星間ガスが圧縮されて形成された衝撃波、ジェット末端衝撃波面を

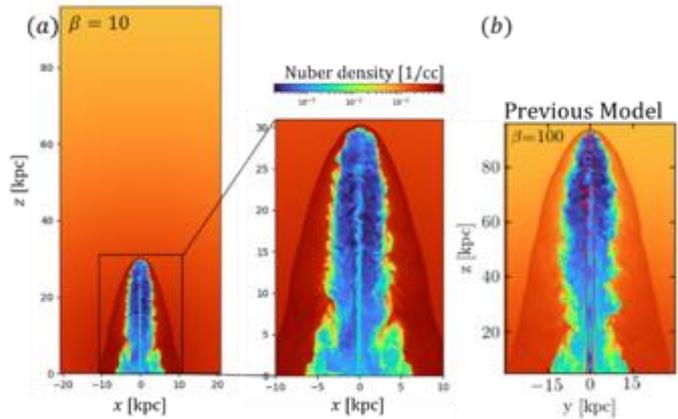


図 17. (a) 富岳を用いて実施中のジェット伝播数値実験結果。ジェット断面における数密度の分布を示す。(b) 我々が以前に実施したより狭い計算領域でのジェット伝播計算結果。

通って加熱されたプラズマによって形成されるコクーン等が捉えられている。計算の結果、コクーン内ではイオン温度が電子温度よりも高い状態が維持されること、この高温プラズマの膨張によって密度が低下し、X 線では暗いキャビティを形成することなどが示されている。

3. プラズマ粒子シミュレーション

ブラックホール周辺やジェットにおける宇宙線加速 (特にイオン) を明らかにするためには系の長時間発展を追う必要があり、富岳では多数の計算コアを使った強スケーリング計算により長時間発展を現実的な計算時間の範囲内で追うことを目標にしている。令和 2 年度は、自己重力系 N 体計算で実績のある

recursive multi-section 法 (Ishiyama et al. 2009) を採用した独自のロードバランサーを実装した PIC シミュレーションコードの開発と富岳における最適化を進めた。昨年度作成したコードを用いて富岳でテスト計算を行ったところ、数千並列の規模まで拡張した場合に計算が異常終了することが確認されたため、その原因の特定と対処を行った。加えて、これまで MPI_ALLGATHERV の集団通信を使った電磁場情報の交換を、MPI_ISEND/RECV を使った双方向通信で実現できるようにアップデートを行った。これにより通信データ量が削減され、MPI 通信に関わる計算コストの削減に成功した。

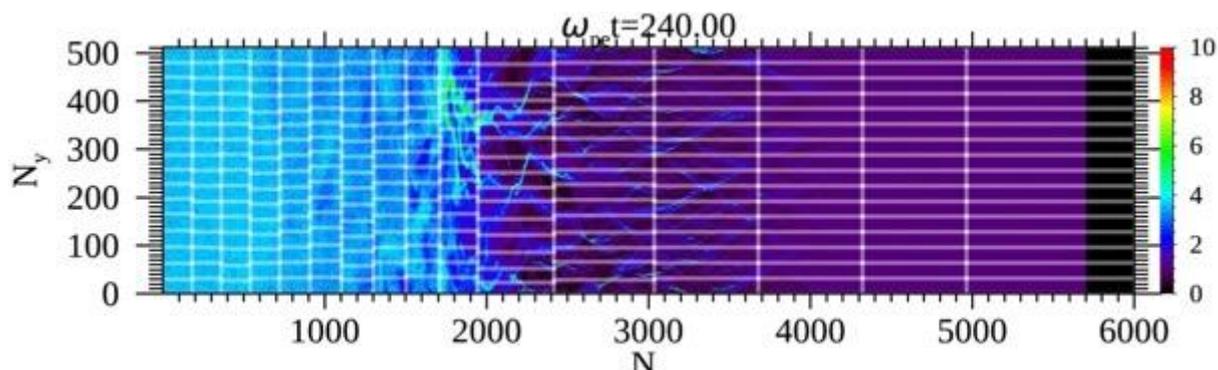


図 18 : ロードバランサー実装 PIC コードによる相対論的衝撃波シミュレーション。色は上流パラメタで規格化した個数密度を表す。白い線で区切られた領域は MPI プロセスが担当する領域で、ロードバランスを取るよう衝撃波の時間発展と共に変化する。

(12) サブ課題 C・ニュートリノ輻射輸送の第一原理計算による 3 次元超新星爆発メカニズムの解明 : 山田 章一 (早稲田大学)、滝脇 知也 (国立天文台)、住吉 光介 (沼津工業高等専門学校)

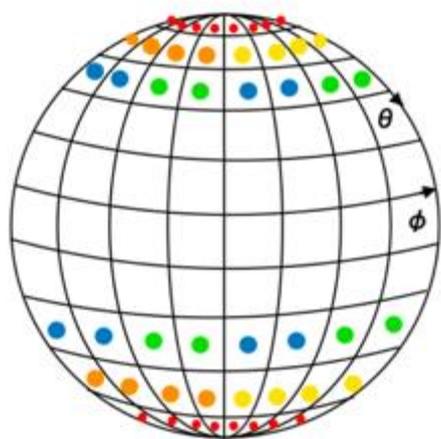


図 19. 空間メッシュと粗視平均化

令和 2 年度はボルツマン輻射流体コードを用いた第一原理計算の「富岳」向け最適化および低解像度 3 次元計算の試行を行い、流体不安定性やニュートリノ輻射輸送などの現象が正しく追跡できているかの確認を行った。当初は計算途中で原因不明のハングアップが発生する状況が長らく続いたが、全てシステム側の問題であったことが判明し、現在では他システムと同様に安定して計算が走ることを確認している。ボルツマンハイドロコードでは球座標系の計算格子を用いて計算を行なっているが、その特徴として座標特異点である軸付近の格子解像度が高く、その他の領域では粗くなっている。そのため、物理的あるいは数値的な不安定性が軸付近でのみ成長する現象が見られることがある。

そこで、球座標系の軸付近で流体の物理量の保存量を平均化することで、軸付近での格子解像度を低くする粗視平均化を行っている。ボルツマンハイドロコードでは、図 19 に示すように座標軸から 1 点目で ϕ 軸方向の 8 メッシュ、2 点目で 4 メッシュ、3 点目で 2 メッシュを粗視平均化している。今年度のテスト計算で、半径 12km 以下で課していた粗視平均化の範囲を、さらに 30km 程度まで拡張する必要があることがわかった(図 20)。

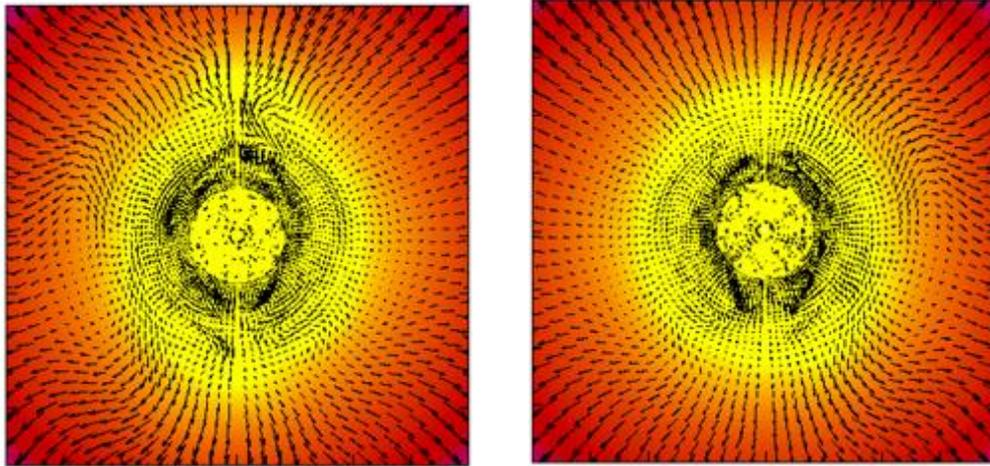


図 20 バウンス後 $t=24\text{ms}$ における電子ニュートリノの電子数密度分布（カラーコンター）とフラックスベクトル場（矢印）。図の一片は 80km である。左図については 12km まで、右図については 30km まで粗視平均化を行なっている。

<超新星爆発の長時間流体計算>

長時間計算用のコード 3DnSNe は京で実行された状態に比べて以下のように変更されている。(1) 詳細なニュートリノの反応を多数のフレーバーを考慮して計算できるように進化させた(Takiwaki+2014, Kotake+2018)。(2) 一般相対論的な効果も現象論的に取り入れられ、現実的な計算が可能になってきた (e.g. Sasaki+2020, Zaizen+2021, Sotani+2020)。(3) また R2 年度は大きな進展として MHD の計算が可能になった(Matsumoto+2020)。本コードは球座標を用いているため、一般論として極付近の細かいグリッドが決める小さいタイムステップで全体の計算を行わなければならない問題がある。(4) R2 年度ではその問題に対処するため、 $d \cos \theta$ が一定になるようにし、補間のやり方を修正した。また、空間の補間精度をあげることもより細かい構造を解像することに貢献する。(5) 5 次精度の空間、3 次精度の時間スキームを実装した。図 21 は上記の (1) から (5) を全て取り入れた MHD 計算であり、温度の指標であるエントロピーをカラーで表示している。20 太陽質量の親星のなかで強い対流が発達し、その対流がニュートリノ加熱の効率を上げ、全体が爆発に至っている。

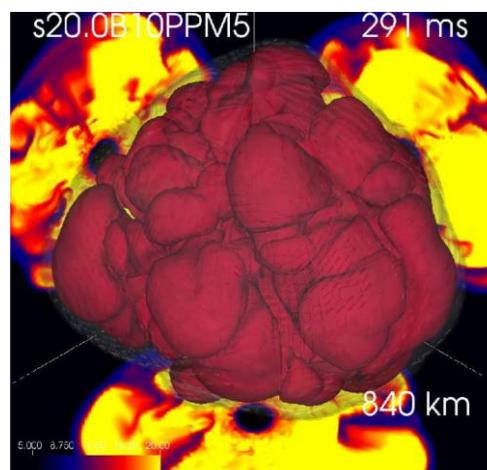


図 21 : (1) - (5) を全て取り入れた MHD 計算（カラーは温度の指標であるエントロピー）

(13) サブ課題D 統括、太陽黒点の構造と太陽面爆発の関係の研究及びフレア発生予測研究：草野完也（名古屋大学）、堀田 英之（千葉大学）

世界最高分解能の太陽対流層全体の第一原理シミュレーションと、太陽コロナや惑星間空間までを結合した太陽・太陽圏包括モデルの構築によって、太陽黒点形成、太陽周期活動、太陽フレア爆発、さらに太陽圏全体のつながりの解明を目的とした研究を進めた。令和2年度は太陽活動周期計算コード AMaTeRAS による太陽ダイナモ全球計算から大規模磁場生成過程をつなげるスキームを検討するとともに、太陽表面黒点形成計算コード R2D2 による黒点形成実験を行なった(Hotta & Toriumi, 2020, MNRAS として出版)。さらにその結果を太陽フレア予測モデル、太陽活動領域モデルと結合するための実験を行った。また、太陽全球を取り扱うための AMaTeRAS コードと局所領域を正確に計算するための R2D2 コードをマージして、新しくどちらの計算も行えるコードとして R2D2 コードとした。また、富岳における最適化を実行し、実効性能で理論ピーク性能の10%程度を達成した。通信についても整備を行い利用できる27000ノード程度までは99%を超える並列化効率を達成した。また、富岳におけるプロダクトランを実行した。これまでにない高解像度で太陽全球の数値計算を行い、これまで謎であった太陽差動回転の形成機構を明らかにした。これは現代太陽物理学の最大の謎である「熱対流の難問」の一部を解くことができたことになる。さらに、太陽面磁場データから巨大フレアの発生をその位置まで正確に予測するスキームを開発し、Science 誌に論文を出版した。

(14) サブ課題D・岩石惑星表層大気シミュレーション：林 祥介（神戸大学）

令和2年度は、火星に関しては、萌芽的課題で実現した非静力学の力学コア SCALE-GM の火星設定による高解像度計算に対し、季節設定を変更し複数の季節での計算を実行し、系の振舞の変化を調べた。その結果、夏と冬の後半に大気中のダスト量が多くなる傾向が見られた。ただし、これはアルベド一定で地形のない単純化した地表面、およびダスト分布が放射加熱冷却に影響を与えない放射不活性な設定であることに注意したい。放射活性な場合の計算には、観測との比較を通じたダスト巻き上げパラメタリゼーションのチューニングが必要であり、そのためには、現実的な地形モデルの導入が必要となる。一方、鉛直対流によるダストの鉛直輸送の効果を調べるために、一定量のダストを大気最下層に配置した実験も行った。これにより、日中発達する鉛直対流によって、ダストは上空8 km 程度まで巻き上げられ、夜になり鉛直対流が沈静化した後も大気中に残ることが分かった。また、同実験を様々な水平解像度で行ったところ、上空に輸送されるダスト量は、水平解像度が高いほど多かった。すなわち、ダストの鉛直輸送に関して、鉛直対流の役割は顕著であり、ダストストームを精確に表現するには、鉛直対流の精確な表現が求められることが確認された。

金星に関しては、SCALE-GM の金星化開発に着手した。まずは、惑星や大気の諸定数を金星の値に変更し、静力学の全球金星大気モデルとして実績のある AFES-Venus の簡略な太陽放射加熱・赤外放射冷却過程を導入した。そして、電波掩蔽観測によって存在が示唆される高度55 km 付近の「低安定度層」を導入した設定で、計算を試みた。結果、水平格子間隔 dx が約210 km 鉛直層数が60層（2 km 間隔）から、 $dx = 52$ km 鉛直120層（1 km 間隔）までの設定で、安定して計算することに成功した。 $dx = 52$ km は、AFES-Venus で惑星規模筋状構造を再現した解像度(T159)に匹敵する解像度であり、SCALE-GM でも同様の筋状構造が現れることが確認できた（図22）。

また本年度は、「富岳」を利用し、SCALE-GMの「富岳」上での実性能を計測した。その結果、同MPI並列数比で「京」よりも約10倍の実行速度が出ることが分かった。これは、当初の予想よりも2.5倍程度速く、コンパイラの高高度化による恩恵だと考えられる。

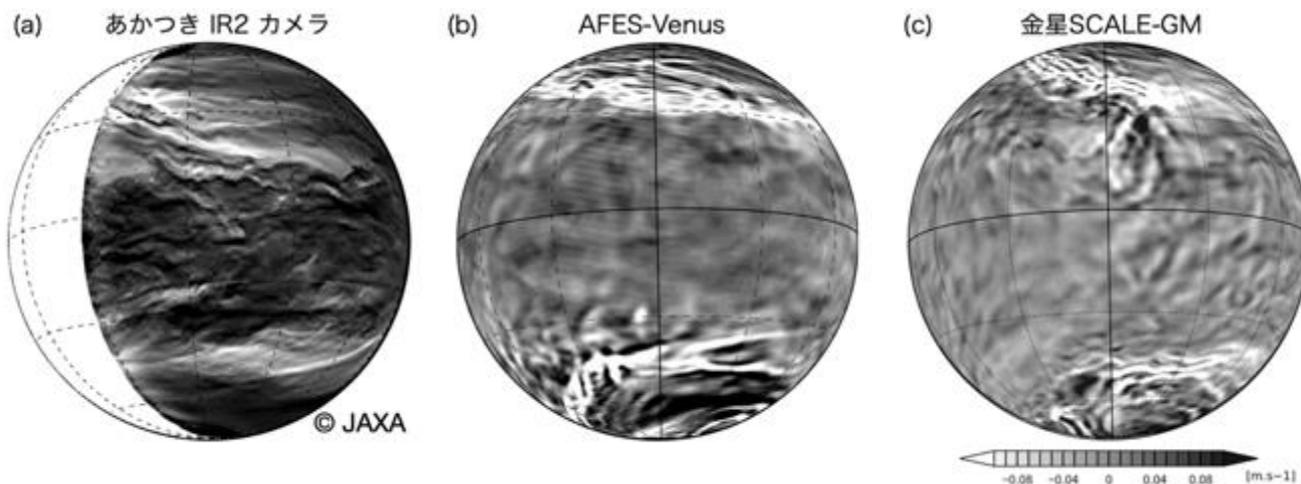


図 22. (a) 「あかつき」IR2 カメラによる波長 $2.26 \mu\text{m}$ の赤外画像。地表付近の高温大気の赤外放射を捉えており、影絵のように、下層雲が薄い領域が明るく、濃い領域が暗く示されている。(b) 静力学モデル「AFES-Venus」で計算された鉛直風速場 (高度 60 km)。(c) 非静力学モデル「金星 SCALE-GM」で計算された鉛直風速場 (高度 65 km)。

(15) サブ課題D・岩石惑星内部シミュレーション：小河 正基 (東京大学)

令和2年度は、月の3次元球殻マントル対流の数値シミュレーションと萌芽的課題で行った計算で再現された地球のプレート運動の詳しい検討を行った。

まず、内部が一様に加熱されたマントルの線形安定性解析を行い、この条件下では、月のマントル対流はたとえ起きたとしても無視できる程度の弱いものであることを確かめた。その上で、現実の月の嵐の大洋から雨の海にかけての地域 (Procellarum KREEP Terrane または PKT) に見られるような放射性元素が濃集した地域が駆動するマントル対流の数値シミュレーションを実行した (図 23)。その結果、この場合でも対流は非常に弱く、その速度は 0.1 mm/year 程度であることを確かめた。このことは、月の内部進化にとっては、マントル対流より、マグマの生成・移動が重要であることを意味している。

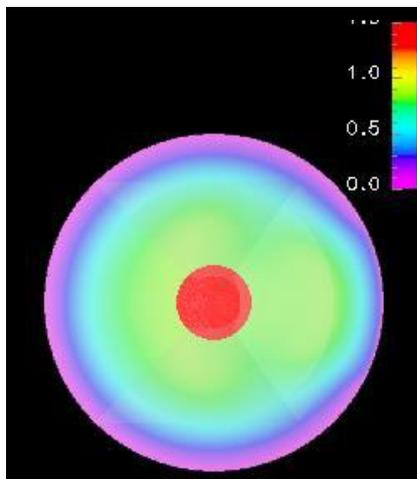


図 23. 月の 3 次元球殻マントルにおける対流の数値シミュレーション。色は時刻 45 億年（現在）での鉛直断面に沿っての温度分布を表す。中心の赤い部分はコア。図の右側の高温領域に、Procellarum KREEP Terrane を模して放射性元素に富む領域が存在すると仮定している。

次にプレート運動については、まずリソスフェア内の圧力分布を求め、沈み込み帯に沿って圧力が低いこと、計算されたプレート運動は剛体の板として振る舞うプレートがこの低圧部に吸い込まれる形で起こっていることを確かめた（図 24）。このことは現実のプレートがスラブの引っ張りで起こっているということに対応するものである。さらに、海嶺下のアセノスフェアではプレート方向の対流速度がプレートより速いことを確かめた。この結果は、最近、海洋研究開発機構で行われた地震探査から明らかになった海嶺下のマントル対流の流れ場の様子と整合的である。

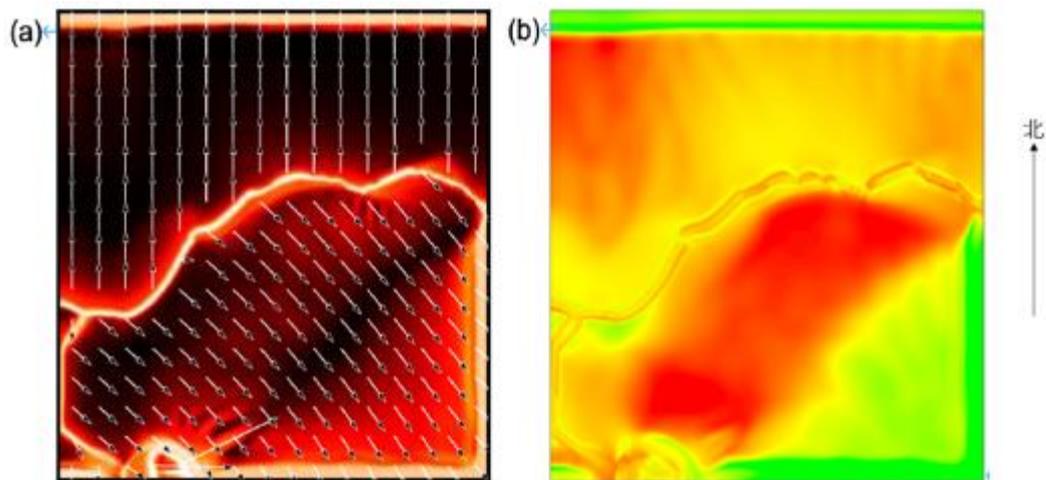


図 24. 3 次元矩形領域におけるプレート運動を伴うマントル対流の数値モデルを上から見た図。(a) 地表面に沿っての対流の速度（矢印）と粘性率（色）の分布。明るい色ほど低粘性であることを示す。低粘性の海嶺から剛体の板としてのプレートの運動が発散している様子がわかる。(b) 地表面に沿っての圧力分布。海嶺の北側（南側）のプレートは矩形領域の北の辺（南東の角）の帯状の低圧領域に向かって吸い込まれるように動いている様子がわかる。

(16) サブ課題 D・ガス惑星大気シミュレーション：竹広 真一（京都大学）

令和 2 年度は、萌芽的課題で構築した回転球殻ガス惑星大気モデルを用いて全球領域での高解像度長時間積分を実行し、全層熱的不安定な設定での対流による渦運動と帯状流の生成維持の様子を調べた。特に波動と対流の生成伝播消滅に影響すると考えられる超粘性の強さを様々に変更して、中高緯度の帯状流の生成の様子を観察した。解像度は経度、緯度、動径格子点数をそれぞれ 1024、512、64、球殻の内外半径比を 0.85 に選び、自転に対する粘性の比を表す無次元数であるエクマン数が 3×10^{-6} 、熱拡散に対する粘性の比を表すプラントル数が 0.1 の場合について、惑星が約 10000 回転する時間に渡って積分を行った。その結果、超粘性の強度を変更しても、長時間積分後には赤道に 1 本、各半球高緯度に 1 本ずつの計 3 本の順行ジェットしか生成されず、ガス惑星表面にみられるような多数本のジェット流からなる状態とは異なるものとなった（図 25）。全球計算との比較のために、先行研究で行われている 1/8 セクター

領域において同様の計算を行ったところ、最終的に生成される帯状流の傾向は変わらず、やはり全球3本の順行ジェットしか形成されなかった。また、超粘性が弱い場合の中高緯度の順行帯状流の発達過程を観察すると、順行ジェットが接円筒の内側付近から励起され、高緯度側へ伝播しつつ振幅が大きくなる様子がみられた。このことから中高緯度の順行帯状流が低緯度側の熱対流により生成される渦運動により生成維持されていることが予想される。

今後は木星・土星の縞状帯状流を説明するために、より広範囲のパラメータにおける長時間積分を実行し中高緯度の縞状構造が形成されるレジームを探索する必要がある。

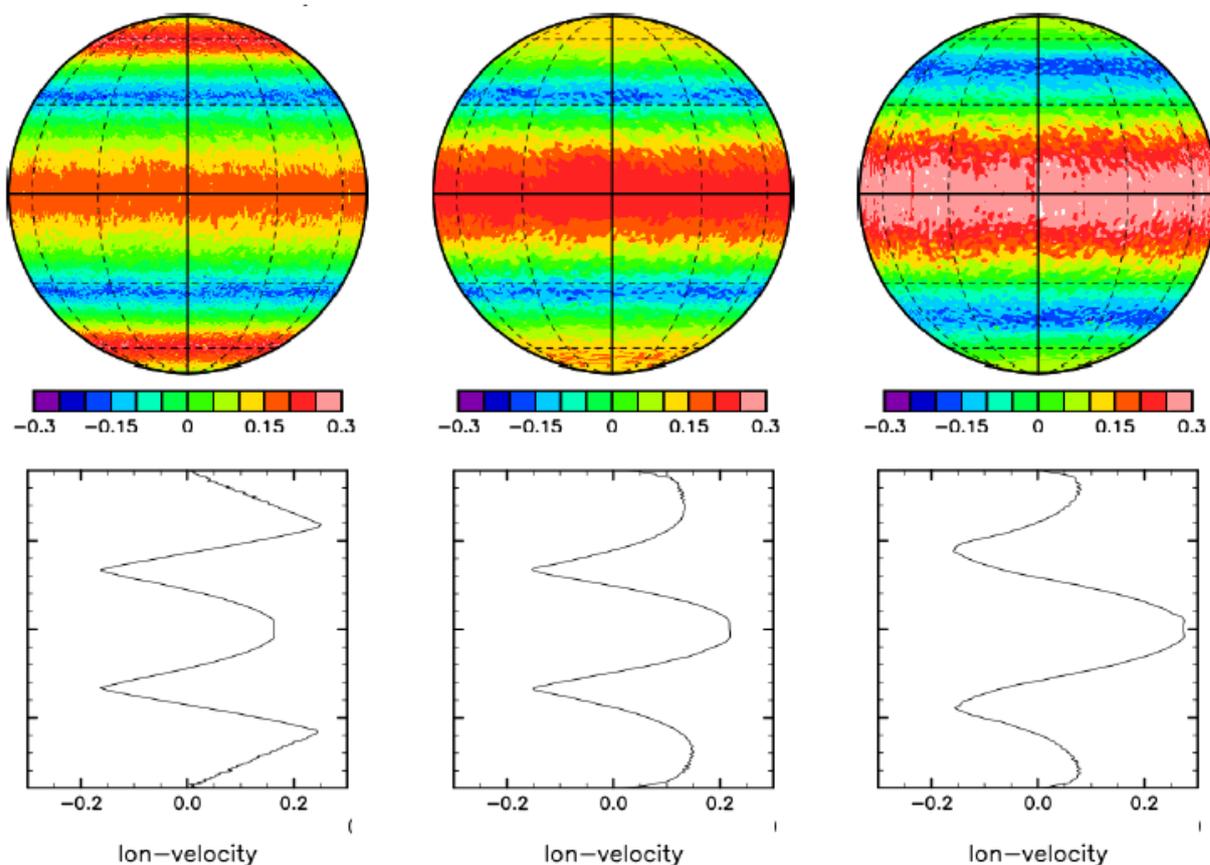


図 25: 回転球殻ガス惑星大気モデルの長時間積分後の東西流分布 (上段) と平均東西流の緯度分布 (下段)。左から順に超粘性の散逸係数を 10^{-4} 、 10^{-2} 、1 とした場合。

2-3. 活動 (研究会の活動等)

領域①「人類の普遍的課題への挑戦と未来開拓」の「シミュレーションで探る基礎科学：素粒子の基本法則から元素の生成まで」および本課題「宇宙の構造形成と進化から惑星表層環境変動までの統一的描像の構築」は、計算基礎科学連携拠点として協力し、素粒子・原子核・宇宙・惑星物理分野の計算科学をリードする存在として、さまざまな科学的成果を創出するとともに、計算科学推進体制の構築や分野振興活動を行った。

課題内では、プロジェクトマネージャーが課題代表者のもとで行われる運営委員会 (4/14、8/24、およびメール) などの会議を開催するとともに、サブ課題やテーマ責任者を通じて情報収集、課題内のメーリン

グリストを通じて情報交換している。特に、富岳共用前評価環境で得られた知見の共有などを目的として計算資源利用に関する課題内ワークショップを2回開催(6/5、10/27)し、進捗状況の確認と情報交換を行った。

課題外では、各種メディアをウォッチし、学会や研究者グループ等のメーリングリストに登録して情報収集を行っている。このような課題内外の情報収集を行うとともに、2課題に所属する素粒子・原子核・宇宙・惑星の4分野にわたる研究者が交流して情報交換する場を設けるためセミナーや研究会を開催した。また、研究内容と成果を広報して国民の理解を得ることは、領域①としては特に重要で、動画を含む定期的な記事配信などホームページを通じた成果の公表、イベント等での一般普及活動などを計画していたが、新型コロナウイルスの影響でイベント等での一般普及活動などは実施できなかった。

<研究会、セミナー等>

研究会やセミナーは研究を進めるうえで重要な役割を果たす。特に研究分野の最新の動向を知るのみならず、自身の研究との関係性や今後の発展を考えるため、研究手法の異なる理論や実験・観測の研究者と協力してサイエンスを進めていくためにも必要不可欠なものである。昨年度は新型コロナウイルスの影響でセミナーや研究会の開催数が減り、またそのすべてがオンラインによる開催となった。重点課題⑨から引き続き行われている HPC-Phys 勉強会は計算科学を軸に各分野の交流が活発に行われており、参加者からも好評を得ており前年度に比べて開催数も増えている。セミナーと研究会は今年度7件が実施され総参加者は計624名であった。

●第7回 HPC-Phys 勉強会

参加者：36名

日時：令和2年6月17日

場所：オンライン開催

主催：計算基礎科学連携拠点 (JICFuS)

概要：物理に軸足を置きつつ数値計算を活発に行っている研究者が集まり、計算の技術的な側面を議論する集まりの7回目。伝統的な HPC の話題で勉強会を開いた。

●第8回 HPC-Phys 勉強会

参加者：33名

日時：令和2年9月24日

場所：オンライン開催

共催：計算基礎科学連携拠点 (JICFuS)、理研計算科学研究センター (R-CCS)

概要：物理に軸足を置きつつ数値計算を活発に行っている研究者が集まり、計算の技術的な側面を議論する集まりの8回目。富岳4冠達成の功績に関わる、HPL-AI用とGraph500用のプログラム作成に関する講演を行った。

●研究会「星の錬金術から銀河考古学へ」

参加者：209名

日時：令和2年10月26日～30日

場所：オンライン開催

主催：国立天文台

後援：理研 RIBF 理論研究推進会議、計算基礎科学連携拠点 (JICFuS)

概要：元素合成に関する r プロセスを中心に銀河の化学進化をテーマとした研究会。

●第9回 HPC-Phys 勉強会

参加者：50名

日時：令和2年12月3日

場所：オンライン開催

主催：計算基礎科学連携拠点 (JICFuS)

共催：理研計算科学研究センター (R-CCS)

概要：物理に軸足を置きつつ数値計算を活発に行っている研究者が集まり、計算の技術的な側面を議論する集まりの9回目。富岳開発に関する講演を行った。

●「富岳で加速する素粒子・原子核・宇宙・惑星」シンポジウム

参加者：126名

日時：令和3年1月28日,29日

場所：オンライン開催

主催：計算基礎科学連携拠点、「富岳」成果創出加速プログラム「シミュレーションで探る基礎科学：素粒子の基本法則から元素の生成まで」・「宇宙の構造形成と進化から惑星表層環境変動までの統一的描像の構築」

概要：「富岳」での成果創出を目指して、各課題によるこれまでの研究の進捗とこれからの展望が発表された。

●第10回 HPC-Phys 勉強会

参加者：55名

日時：令和3年2月4日

場所：オンライン開催

主催：計算基礎科学連携拠点 (JICFuS)

共催：理研計算科学研究センター (R-CCS)

概要：物理に軸足を置きつつ数値計算を活発に行っている研究者が集まり、計算の技術的な側面を議論する集まりの10回目。GPUに関する講演を行った。

●CfCA 流体学校

参加者：115名

日時：令和3年3月10日～3月12日, 3月22日～3月23日

場所：オンライン開催

主催：国立天文台・天文シミュレーションプロジェクト

後援：「富岳」成果創出加速プログラム「宇宙の構造形成と進化から惑星表層環境変動までの統一的描像の構築」、「シミュレーションで探る基礎科学：素粒子の基本法則から元素の生成まで」

概要：基礎編と応用編の2つの日程で開催された。数値流体の基礎や磁気流体力学についてのスクール。

<研究成果の情報発信>

課題で得られた研究成果の普及、社会への情報発信は、計算基礎科学連携拠点（JICFuS）として、領域①「シミュレーションで探る基礎科学：素粒子の基本法則から元素の生成まで」および「宇宙の構造形成と進化から惑星表層環境変動までの統一的描像の構築」が協力し、これまでの JICFuS 広報コンセプトを継続して行っている。

●ウェブサイトの制作・更新管理

領域①「宇宙の構造形成と進化から惑星表層環境変動までの統一的描像の構築」のウェブサイト（日・英）を制作し、2021年3月から公開している。

計算基礎科学連携拠点（JICFuS） <http://www.jicfus.jp/jp/>

領域①「宇宙の構造形成と進化から惑星表層環境変動までの統一的描像の構築」

https://jicfus.jp/fugaku_ap/jp/

●メディア対応

1) プレスリリースおよびニュースリリース

- ・超巨大ブラックホールから吹く「風」の再現に成功

発表日：令和2年11月19日情報解禁

発表主宰者：京都大学

- ・宇宙を飛び交うニュートリノの動きを明らかに

発表日：令和2年12月1日情報解禁

発表主催者：筑波大学, 京都大学, 東京大学

- ・宇宙の大規模構造の複雑な統計パターンを高速予言する人工知能（AI）ツールを開発

発表日：令和3年4月14日情報解禁

発表主催者：国立天文台, 東京大学, 宇宙線研究所, 工学院大学, 広島大学,

総合研究大学院大学, 茨城大学, 山口大学, 計算基礎科学連携拠点

メディア掲載：朝日新聞(4/14), 47NEWS(4/15), 岩手日報(4/15), News Collect(4/15), ライブドアニュース(4/15), Entertainment Post(4/15), Goo ニュース(4/15), 三菱電機 読む宇宙旅行(4/23)

●リーフレット

A3 判変形四つ折り。2か国語（日・英）で製作し、各種イベントで配布予定。令和2年度は新型コロナウイルスの影響で各種イベントが中止となったため、日本語のみ制作しオンラインにて公開となった。

<個別活動、特記事項>

活動として、各サブ課題の個別活動や特記事項を以下に報告する。

（6）サブ課題 B 統括、銀河系内での分子雲と分子雲コアの形成および原始惑星系円盤の非理想磁気流体計算：富田 賢吾（東北大学）

本プログラム後援の下、国立天文台天文シミュレーションプロジェクトにおいて Athena++コードを用いた数値流体力学シミュレーションスクールを2021年3月10日-12日及び22日-23日の日程で開催し、約60人の参加者を得た。富田はスクールの企画と講義・実習の講師を務めた。

（7）サブ課題 B・銀河系内での分子雲と分子雲コアの形成および原始惑星系円盤の非理想磁気流体計算：岩崎 一成（国立天文台）

上記（6）のシミュレーションスクールの開催にあたり、岩崎は世話人を務め実習を担当した。

2-4. 実施体制

実施項目	実施場所	担当責任者
(1) 研究総括、並列計算コード開発	神戸市灘区六甲台町1-1 国立大学法人神戸大学	牧野 淳一郎 大学院理学研究科 教授
(2) サブ課題 A 総括、高密度星団におけるコンパクト連星の力学的形成過程の解明	文京区本郷7-3-1 国立大学法人東京大学	藤井 通子 大学院理学系研究科 准教授
(3) サブ課題 A・ダークマターの密度揺らぎからはじまる宇宙の天体形成	千葉市稲毛区弥生町1-33 国立大学法人千葉大学	石山 智明 統合情報センター 准教授
(4) サブ課題 A・ニュートリノの大規模構造形成への力学的影響の解明	つくば市天王台1-1-1 国立大学法人筑波大学	吉川 耕司 計算科学研究センター 講師
(5) サブ課題 A・恒星スケールを分解した銀河形成シミュレーションによる銀河形成課程の研究	神戸市灘区六甲台町1-1 国立大学法人神戸大学	斎藤 貴之 大学院理学研究科 准教授
	札幌市北区北10条西8丁目 国立大学法人北海道大学	岡本 崇 大学院理学研究院 講師
(6) サブ課題 B 総括、銀河系内での分子雲と分子雲コアの形成および原始惑星系円盤の非理想磁気流体計算	仙台市青葉区荒巻字青葉6-3 国立大学法人東北大学	富田 賢吾 大学院理学研究科 准教授
(7) サブ課題 B・銀河系内での分子雲と分子雲コアの形成および原始惑星系円盤の非理想磁気流体計算	三鷹市大沢2-21-1 大学共同利用機関法人自然科学研究機構国立天文台	岩崎 一成 天文シミュレーションプロジェクト 助教
(8) サブ課題 B・原始惑星系円盤中での微惑星の集積と惑星形成	目黒区大岡山2-12-1-IE7-301 国立大学法人東京工業大学	井田 茂 地球生命研究所 教授
	三鷹市大沢2-21-1 大学共同利用機関法人自然科学研究機構国立天文台	小久保 英一郎 天文シミュレーションプロジェクト 教授
(9) サブ課題 B・原始惑星系円盤の乱流中でのダスト成長	岡山市北区津島中3-1-1 国立大学法人岡山大学	石原 卓 環境生命科学研究科 教授

(10) サブ課題 C 総括、ブラックホール降着円盤およびジェット的一般相対論的輻射磁気流体計算	つくば市天王台 1-1-1 国立大学法人筑波大学	大須賀 健 計算科学研究センター 教授
(11) サブ課題 C・ブラックホール降着円盤およびジェットの非相対論的磁気流体力学計算	千葉市稲毛区弥生町 1-33 国立大学法人千葉大学	松元 亮治 大学院理学研究院 教授
(12) サブ課題 C・ニュートリノ輻射輸送の第一原理計算による 3次元超新星爆発メカニズムの解明	新宿区大久保 3-4-1 学校法人早稲田大学	山田 章一 理工学術院 教授
	三鷹市大沢 2-21-1 大学共同利用機関法人自然科学研究機構国立天文台	滝脇 知也 科学研究部 助教
	沼津市大岡 3600 独立行政法人国立高等専門学校機構沼津工業高等専門学校	住吉 光介 教養科 教授
(13) サブ課題 D 統括、太陽黒点の構造と太陽面爆発の関係の研究及びフレア発生予測研究	名古屋市千種区不老町 国立大学法人名古屋大学	草野 完也 宇宙地球環境研究所 所長・教授
	千葉市稲毛区弥生町 1-33 国立大学法人千葉大学	堀田 英之 大学院理学研究院 特任助教
(14) サブ課題 D・岩石惑星表層大気シミュレーション	神戸市灘区六甲台町 1-1 国立大学法人神戸大学	林 祥介 大学院理学研究科 教授
(15) サブ課題 D・岩石惑星内部シミュレーション	目黒区駒場 3-8-1 国立大学法人東京大学	小河 正基 大学院総合文化研究科 准教授
(16) サブ課題 D・ガス惑星大気シミュレーション	京都市左京区北白川追分町 国立大学法人京都大学	竹広 真一 数理解析研究所 准教授

別添1 学会等発表実績

(2) サブ課題A 総括、高密度星団におけるコンパクト連星の力学的形成過程の解明：藤井 通子（東京大学）

1. Ataru Tanikawa, "Pop. III binary evolution to form GW190521: effects of single star evolution", Genesis: Group A Winter Camp 2021, Feb. 7 2021 (online)
2. Long Wang, "Impact of initial mass functions on the dynamical channel of gravitational wave sources", Genesis: Group A Winter Camp 2021, Feb. 7 2021 (online)
3. Ataru Tanikawa, "Merging binary black holes in dense star clusters and in Pop. III environments", Genesis: The Fourth Annual Area Symposium Online, Feb. 24 2021 (online)
4. Long Wang "The 3 million simulations of globular clusters using Fugaku computer", 日本天文学会 2021 年春季年会, Mar. 16 2021, オンライン
5. Michiko Fujii, "銀河系中心での IMBH の検出可能性", JASMINE Consortium Meeting 2020, Nov. 2020 (online)
6. Michiko Fujii, "星団形成シミュレーションコード「ASURA+BRIDGE」", 日本天文学会 2020 年秋季年会, Sep. 2020, (online)
7. Michiko Fujii, "ASURA+BRIDGE を用いた星団形成シミュレーション", 新学術領域「星惑星形成」2020 年度大研究会, Sep.-Oct. 2020, (online)
8. Michiko Fujii, "Toward simulations of globular cluster formation", 日本天文学会 2021 年春季年会, Mar. 16 2021, (online)
9. 熊本淳, "散開星団起源連星ブラックホールの有効スピンパラメータ分布", 日本天文学会 2021 年春季年会, Mar. 18 2021, オンライン開催
10. Jun Kumamoto, "Spin distribution of binary black Holes formed in open clusters", Challenges and Innovations in Computational Astrophysics II, Nov. 22 2020, online
11. 熊本淳, "散開星団での連星ブラックホール形成とスピン分布", 初代星・初代銀河研究会 2020, Nov. 17 2020, オンライン開催
12. 熊本淳, "散開星団で形成される連星ブラックホールのスピン", 日本天文学会 2020 年秋季年会, Sep. 10 2020, オンライン開催

(3) サブ課題A・ダークマターの密度揺らぎからはじまる宇宙の天体形成：石山 智明（千葉大学）

1. Ishiyama Tomoaki, Prada Francisco, Klypin Anatoly, the Uchuu collaboration, "The Uchuu simulations: Data release 1 and Dark Matter Halo Concentrations", 観測的宇宙論ワークショップ,
2. Ishiyama Tomoaki, "大規模宇宙論的 N 体シミュレーション", 富岳計算宇宙惑星・計算資源利用に関する課題内ワークショップ
3. Ishiyama Tomoaki, Prada Francisco, Klypin Anatoly, the Uchuu collaboration, "The Uchuu

simulations: Data release 1”, 日本天文学会 2020 秋季年会

4. Ishiyama Tomoaki, Prada Francisco, Klypin Anatoly, the Uchuu collaboration, “First data release of the Uchuu simulations”, 第 33 回理論懇シンポジウム
5. Ishiyama Tomoaki, Prada Francisco, Klypin Anatoly, the Uchuu collaboration, “First data release of the Uchuu simulations”, Galaxy Evolution Workshop
6. Ishiyama Tomoaki, “ダークマターと宇宙の構造形成進化”, 2020 年度第 2 回計算科学フォーラム
7. 大木平, “富岳時代の準解析的銀河・AGN 形成モデル”, 日本天文学会 2021 春季年会,
8. 大木平, “AGN クラスタリングで探る超巨大ブラックホール成長史”, 日本天文学会 2020 秋季年会
9. 大木平, “超大規模シミュレーションを用いた準解析的銀河・AGN 形成モデル”, 第 33 回理論懇シンポジウム
10. 大木平, “超大規模宇宙論的 N 体シミュレーションを用いた準解析的 AGN 形成モデル”, 令和 2 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
11. Oogi Taira, “The recent updates of the New Numerical Galaxy Catalog (nu²GC)”, Galaxy Evolution Workshop 2020
12. Oogi Taira, “Semi-analytic modeling of AGNs: auto-correlation function and halo occupation”, SUPERMASSIVE BLACK HOLES

(4) サブ課題 A・ニュートリノの大規模構造形成への力学的影響の解明：吉川 耕司（筑波大学）

1. “富岳による宇宙論的ニュートリノの Vlasov シミュレーション”、
吉川耕司、日本天文学会 2021 年 春季年会（オンライン開催）、2021 年 3 月 16 日
2. “富岳におけるニュートリノの Vlasov-Poisson シミュレーション”
吉川耕司、富岳計算宇宙惑星・計算資源利用に関する課題内ワークショップ(オンライン開催)、
2020 年 6 月 5 日
3. “Vlasov-Poisson Simulation of Cosmological Neutrinos on FUGAKU”
吉川耕司、「富岳で加速する素粒子・原子核・宇宙・惑星」シンポジウム（オンライン開催）、2021
年 1 月 29 日
4. “Vlasov-Poisson Simulation of Cosmological Relic Neutrinos on FUGAKU”
吉川耕司、HPCI フォーラム（オンライン開催）、2021 年 3 月 9 日
5. “Solving Kinematics of Cosmological Neutrinos in the 6D Phase Space on FUGAKU” ,
吉川 耕司、12th symposium on Discovery, Fusion, Creation of New Knowledge by
Multidisciplinary Computational Sciences, 2020 年 10 月 6 日）（オンライン開催）
6. “Cosmological Vlasov-Poisson Simulations of Structure Formation with Relic Neutrinos:
Nonlinear Clustering and the Neutrino Mass” ,
Yoshikawa, Tanaka, Yoshida & Saito, The Astrophysical Journal 904 (2), 159

(5) サブ課題 A・恒星スケールを分解した銀河形成シミュレーションによる銀河形成過程の研究：
斎藤 貴之（神戸大学）、岡本 崇（北海道大学）

1. ASURA-FDPS による銀河形成シミュレーション：富岳向けチューニングの現状，斎藤貴之，行方大輔，野村昂太郎，岩澤全規，平居悠，岡本崇，牧野淳一郎，日本天文学会 2021 年春季年会 2021 年 3 月 16 日
2. Star-by-star simulations of galaxy formation on Fugaku, 斎藤貴之，岩澤全規，牧野淳一郎，行方大輔，平居悠，野村昂太郎，坪内美幸，JpGU 2020 年 7 月 14 日

(6) サブ課題 B 統括、銀河系内での分子雲と分子雲コアの形成および原始惑星系円盤の非理想磁気流体計算：富田 賢吾（東北大学）

1. 富田賢吾，“AMR フレームワーク Athena++ の設計と今後の展望”，日本天文学会 2021 年春季年会 Z311a, 2021 年 3 月 16 日

(7) サブ課題 B・銀河系内での分子雲と分子雲コアの形成および原始惑星系円盤の非理想磁気流体計算：岩崎 一成（国立天文台）

1. 岩崎一成，富田賢吾，高棹真介，奥住聡，鈴木建，“原始惑星系円盤における赤道面非対称な磁場構造の形成”，日本天文学会 2020 年秋季年会 P217a, 2020 年 9 月 10 日
2. 岩崎一成，富田賢吾，“分子雲形成シミュレーションで探る重力的に束縛された高密度クランプの統計的性質”，日本天文学会 2021 年春季年会 Z312a, 2021 年 3 月 16 日
3. 岩崎一成 “分子雲形成に伴う多相流体ダイナミクス” 国立天文台研究集会（サブ）ミリ波単一鏡の革新で挑む，天文学の未解決問題，2021 年 3 月 29 日

(8) サブ課題 B・原始惑星系円盤中での微惑星の集積と惑星形成：井田 茂（東京工業大学）、小久保 英一郎（国立天文台）

査読論文

1. Nakajima, A., Ida, S., Ishigaki, Y. 2020., Orbital evolution of Saturn's satellites due to the interaction between the moons and the massive rings, *Astronomy & Astrophysics* 640, id.L15 (6pp) 10.1051/0004-6361/202038743

学会発表

1. 石城陽太，小南淳子，牧野淳一郎，藤本正樹，P3T 法を用いた惑星系形成の N 体計算コード GPLUM の開発，日本地球惑星科学連合大会(オンライン, 2020.7) (ポスター)
2. 石城陽太，兵頭龍樹，牧野淳一郎，藤本正樹，N 体計算コード GPLUM の開発：惑星系形成の展望，日本惑星科学会秋季講演会(オンライン, 2020.11) (ポスター)
3. 石城陽太，小久保英一郎，牧野淳一郎，藤本正樹，惑星系 N 体計算コード GPLUM の開発，日本天文

学会春季年会(オンライン, 2021.3)

4. 柴田雄, 小久保英一郎, 牧野淳一郎, 石城陽太, 現実的な合体条件下での岩石微惑星の集積, 日本天文学会春季年会(オンライン, 2021.3)

(9) サブ課題 B・原始惑星系円盤の乱流中でのダスト成長: 石原 卓 (岡山大学)

論文

1. Elsinga Gerrit E., Ishihara Takashi, Hunt Julian C. R., Extreme dissipation and intermittency in turbulence at very high Reynolds numbers, *Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 476, 20200591 (2020) 10.1098/rspa.2020.0591

学会発表

1. 白石 啓貴, 櫻井 幹記, 石原 卓, 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 2, 日本流体力学会 年会 2020 (2020)
2. 森中宏樹, 石原 卓, 稲津 将, 台風に伴う気象現象と流れ構造の関係のデータ解析, 日本流体力学会 年会 2020 (2020)
3. 櫻井 幹記, 石原 卓, 乱流中の多重スケール流れ構造と粒子衝突統計の関係についての数値解析, 日本流体力学会 年会 2020 (2020)
4. 浅井 瑞貴, 石原 卓, 乱流中の慣性粒子の衝突過程に対する重力の影響の DNS データ解析, 第 34 回数値流体力学シンポジウム, (2020)
5. 石原 卓, 高レイノルズ数乱流中の微粒子運動のデータ科学, 工学と数学の接点を求めて 大阪大学 MDS モデリング部門主催 流体工学・データサイエンスセッション, (2020)
6. 石原 卓, 高レイノルズ数乱流のデータ科学プラットフォームの構築, JHPCN: 学際大規模情報基盤 共同利用・共同研究拠点 第 12 回シンポジウム (2020)
7. 石原 卓, 森中宏樹, 奥住 聡, 梅村雅之, 原始惑星系円盤の高レイノルズ数乱流中でのダスト成長, 日本天文学会 2021 年春季年会 (2021)

(10) サブ課題 C 総括、ブラックホール降着円盤およびジェット的一般相対論的輻射磁気流体計算: 大須賀 健 (筑波大学)

論文

1. Ryota Tomaru, Chris Done, Ken Ohsuga, Hirokazu Odaka, and Tadayuki Takahashi. “The thermal radiative wind in low-mass X-ray binary H1743-322 - II. Iron line predictions from Monte Carlo radiation transfer”. *MNRAS* 494.3 (Apr. 2020), pp. 3413-3421.
2. Taichi Igarashi, Yoshiaki Kato, Hiroyuki R. Takahashi, Ken Ohsuga, Yosuke Matsumoto, et al. “Radiation Magnetohydrodynamic Simulations of Sub-Eddington Accretion Flows in AGNs: Origin of Soft X-Ray Excess and Rapid Time Variabilities”. *ApJ* 902.2, 103 (Oct. 2020), p. 103
3. Mariko Nomura, Ken Ohsuga, and Chris Done. “Line-driven disc wind in near-Eddington active

- galactic nuclei: decrease of mass accretion rate due to powerful outflow”. MNRAS 494.3 (Apr. 2020), pp. 3616–3626.
4. Ryota Tomaru, Chris Done, Ken Ohsuga, Hirokazu Odaka, and Tadayuki Takahashi. “The thermalradiative wind in the neutron star low-mass X-ray binary GX 13 + 1”. MNRAS 497.4 (Aug. 2020), pp. 4970–4980.
 5. Yuh Tsunetoe, Shin Mineshige, Ken Ohsuga, Tomohisa Kawashima, and Kazunori Akiyama. “Polarization imaging of M 87 jets by general relativistic radiative transfer calculation based on GRMHD simulations”. PASJ 72.2, 32 (Apr. 2020), p. 32
 6. Akihiro Inoue, Ken Ohsuga, and Tomohisa Kawashima. “Pulsed fraction of super-critical column accretion flows on to neutron stars: Modeling of ultraluminous X-ray pulsars”. PASJ 72.2, 34 (Apr. 2020), p. 34.
 7. Misaki Mizumoto, Mariko Nomura, Chris Done, Ken Ohsuga, and Hirokazu Odaka. “UV line-driven disc wind as the origin of UltraFast Outflows in AGN”. MNRAS 503.1 (May 2021), pp. 1442–1458
 8. Jin Matsumoto, Tomoya Takiwaki, Kei Kotake, Yuta Asahina, and Hiroyuki R. Takahashi. “2D numerical study for magnetic field dependence of neutrino-driven core-collapse supernova models”. MNRAS 499, 3, (Dec. 2020), pp.4174-4194
 9. Yuta Asahina, Hiroyuki R Takahashi, and Ken Ohsuga. “A Numerical Scheme for General Relativistic Radiation Magnetohydrodynamics Based on Solving a Grid-based Boltzmann Equation”. ApJ 901.2 (Sept. 2020), p. 96.
 10. Tomohisa Kawashima, Kenji Toma, Motoki Kino, Kazunori Akiyama, Masanori Nakamura, and Moriyama, Kotaro. “A Jet-bases Emission Model of the EHT2017 Image of M87*”. ApJ 909.2 (Mar. 2021), id.168, 6pp
 11. Avery E. Broderick et al. (incl. Tomohisa Kawashima) “THEMIS: A Parameter Estimation Framework for the Event Horizon Telescope”. ApJ 897.2 (Jul. 2020), id.139
 12. Roman Gold et al. (incl. Tomohisa Kawashima in the primary author list) “Verification of Radiative Transfer Schemes for the EHT”. ApJ 897.2 (Jul. 2020), id.148
 13. Jae-Young Kim et al. (incl. Tomohisa Kawashima) “Event Horizon Telescope imaging of the archetypal blazar 3C 279 at an extreme 20 microarcsecond resolution”. A&A 640 (Aug. 2020), id.A69, 21pp
 14. Maciek Wielgus et al. (incl. Tomohisa Kawashima) “Monitoring the Morphology of M87* in 2009–2017 with the Event Horizon Telescope”. ApJ 901.1 (Sep. 2020), id.67, 28pp
 15. Dimitrios Psaltis et al. (incl. Tomohisa Kawashima) “Gravitational Test beyond the First Post-Newtonian Order with the Shadow of the M87 Black Hole”. PRL 125.14 (Oct. 2020), id.141104
 16. Event Horizon Telescope Collaboration (incl. Tomohisa Kawashima) “First M87 Event Horizon Telescope Results. VII. Polarization of the Ring”. ApJL 910.1 (Mar. 2021), id.L12, 48 pp
 17. Event Horizon Telescope Collaboration (incl. Tomohisa Kawashima) “First M87 Event Horizon

Telescope Results. VIII. Magnetic Field Structure near The Event Horizon”. ApJL 910.1 (Mar. 2021), id.L13, 43 pp

18. Ciriaco Goddi et al. (incl. Tomohisa Kawashima) “Polarimetric Properties of Event Horizon Telescope Targets from ALMA”. ApJL 910.1 (Mar. 2021), id.L14, 54 pp

発表 (国際会議招待講演)

1. K. Ohsuga. “Numerical simulations of super-critical accretion flows and accretion columns”. European Astronomical Society Annual Meeting 2020 (virtual meeting, June 29–July 3, 2020).
2. Hiroyuki R. Takahashi, “Relativistic radiation magnetohydrodynamic simulations of accretion disks”, Black Hole Astrophysics with VLBI: Multi-Wavelength and Multi-Messenger Era (virtual meeting, January 18-20, 2021)

発表 (国際会議一般講演/ポスター講演)

1. A. Inoue, K. Ohsuga, and T. Kawashima. “Pulsed fraction of super-critical column accretion flows on to neutron stars: Modeling of ultraluminous X-ray pulsars”. European Astronomical Society Annual Meeting 2020 (virtual meeting, June 29–July 3, 2020).
2. Y. Asahina, H. R. Takahashi, and K. Ohsuga. “GR-RMHD simulations of black hole accretion flows”. 12th symposium on Discovery, Fusion, Creation of New Knowledge by Multidisciplinary Computational Sciences (virtual meeting, Oct. 6, 2020).
3. Y. Asahina, H. R. Takahashi, and K. Ohsuga. “GRRMHD simulations of black hole accretion flows solving Boltzmann equation”. Black Hole Astrophysics with VLBI: Multi-Wavelength and Multi-Messenger Era (virtual meeting, Jan. 18–20, 2021)
4. T. Kawashima, K. Ohsuga, and H.R. Takahashi. “A general-relativistic, multi-wavelength study of accretion flows and relativistic jets”. Black Hole Astrophysics with VLBI: Multi-Wavelength and Multi-Messenger Era (virtual meeting, January 18-20, 2021)
5. T. Kawashima, K. Toma, M. Kino, K. Akiyama, M. Nakamura, and K. Moriyama. “A possible appearance of M87 jet bases with future EHT observations”. Science at the Horizon: The Next-Generation EHT2020 (virtual meeting, February 22–26, 2021).
6. A. Utsumi, K. Ohsuga, H.R. Takahashi, and Y. Asahina. “General relativistic radiation magnetohydrodynamics simulations of super-critical accretion disks around Kerr black holes”. Black Hole Astrophysics with VLBI: Multi-Wavelength and Multi-Messenger Era (Online, Jan. 18–20, 2021).
7. T. Igarashi, Y. Kato, H. R. Takahashi, K. Ohsuga, Y. Matsumoto, et al. “Radiation magnetohydrodynamic simulations of black hole accretion flows during hard-to-soft state transitions”. Black Hole Astrophysics with VLBI: Multi-Wavelength and Multi-Messenger Era (Online, Jan. 18–20, 2021).
8. M. Nomura, K. Omukai, and K. Ohsuga. “Radiation hydrodynamic simulations of line-driven disk winds: Metallicity dependence and SMBH growth”. Black Hole Astrophysics with VLBI:

Multi- Wavelength and Multi-Messenger Era (Online, Jan. 18–20, 2021).

9. M. Takahashi, K. Ohsuga, R. Takahashi, T. Ogawa, and M. Umemura. “Development of general relativistic radiative transfer code based on ray-tracing”. Black Hole Astrophysics with VLBI: Multi- Wavelength and Multi-Messenger Era (Online, Jan. 18–20, 2021).
10. A. Inoue, K. Ohsuga, H. R. Takahashi, and Y. Asahina. “General relativistic radiation-MHD simulations of supercritical accretion flows and outflows around magnetized neutron stars”. Black Hole Astrophysics with VLBI: Multi-Wavelength and Multi-Messenger Era (Online, Jan. 18–20, 2021).

発表（国内会議招待講演）

1. 川島朋尚. “ブラックホール時空構造と降着流・噴出流ダイナミクス：次世代 EHT および電波から X 線・ γ 線までの多波長研究へ”. 日本天文学会秋季年会(弘前大学, オンライン開催).
2. 川島朋尚. “Event Horizon Telescope 時代のブラックホール天文学： 輻射輸送・磁気流体・プラズマ微視的過程研究の現状と将来展望”. 第 37 回プラズマ・核融合学会年会(愛媛大学, オンライン開催).
3. 川島朋尚. “EHT 時代のブラックホール天文学：多波長輻射輸送計算を中心に”. 令和 2 年度 国立天文台 CfCA ユーザーズミーティング (国立天文台, オンライン開催)

発表（国内会議一般講演/ポスター講演）

1. 内海碧人, 大須賀健, 高橋博之, and 朝比奈雄太. “一般相対論的輻射磁気流体力学シミュレーションによるカー・ブラックホール周りの超臨界降着流の研究”. 日本天文学会秋季年会(弘前大学, オンライン開催).
2. 朝比奈雄太, 高橋博之, and 大須賀健. “輻射輸送方程式を解く一般相対論的輻射磁気流体コード INAZUMA によるブラックホール降着流計算”. 第 33 回 理論懇シンポジウム(オンライン開催).
3. 朝比奈雄太, 高橋博之, and 大須賀健. “一般相対論的輻射磁気流体コード INAZUMA を用いたブラックホール降着流シミュレーション”. CfCA ユーザーミーティング(オンライン開催).
4. 朝比奈雄太, 高橋博之, and 大須賀健. “GR-RMHD コード INAZUMA によるブラックホール降着流シミュレーション”. ブラックホール降着流ミニ研究報告会(オンライン開催).
5. 朝比奈雄太, 高橋博之, and 大須賀健. “一般相対論的輻射磁気流体コード INAZUMA によるブラックホール降着流シミュレーション”. 多波長・時間軸天文学の時代の FORCE～広帯域 X 線で迫るコンパクト天体の世界～(オンライン開催).
6. 朝比奈雄太, 高橋博之, and 大須賀健. “輻射輸送方程式を解く GR-RMHD コード INAZUMA によるブラックホール降着流シミュレーション”. 日本天文学会 2021 年春季年会(オンライン開催).
7. 朝比奈雄太, 高橋博之, and 大須賀健. “ブラックホール降着流の一般相対論的輻射磁気流体計算：質量降着率依存性”. 日本天文学会秋季年会(弘前大学, オンライン開催).
8. 小川拓未, 大須賀健, 牧野芳弘, and 嶺重慎. “Study of Comptonized X-ray Spectra of Super-Eddington Accretor with Boltzmann Radiation Transport”. 第 33 回理論懇シンポジウム (ポスタ

一、オンライン開催)

9. 小川拓未, 大須賀健, and 嶺重慎. “一般相対論的ボルツマン輻射輸送による X 線フレアの研究”. 「富岳で加速する素粒子・原子核・宇宙・惑星」シンポジウム (オンライン開催)
10. 小川拓未, 大須賀健, and 嶺重慎. “一般相対論的ボルツマン輻射輸送による超臨界降着流の輻射スペクトル計算”. 第 4 回 FORCE 研究会 (オンライン開催)
11. 小川拓未, 大須賀健, and 嶺重慎. “一般相対論的ボルツマン輻射輸送による超臨界降着流の輻射スペクトル計算”. 日本天文学会春季年会 (オンライン開催)
12. 井上壮大, 大須賀健, □橋博之, and 朝□奈雄太. “超臨界中性子星降着流の降着率依存性および磁場強度依存性の研究”. 日本天文学会秋季年会 (弘前大学, オンライン開催, Sept. 8–10, 2020).
13. 内海碧人, 大須賀健, □橋博之, and 朝□奈雄太. “一般相対論的輻射磁気流体力学シミュレーションによるカー・ブラックホール周りの超臨界降着流の研究”. 日本天文学会秋季年会 (弘前大学, オンライン開催, Sept. 8–10, 2020).
14. 水本岬希, 野村真理子, Chris Done, 大須賀健, and 小□裕和. “XRISM observations of a UV line driven disc wind in AGN”. 日本天文学会秋季年会 (弘前大学, オンライン開催, Sept. 8–10, 2020).
15. 恒任優, 嶺重慎, 大須賀健, 川島朋尚, and 秋山和徳. “輻射輸送シミュレーションの新地平 EHT 偏波イメージ予測で探る磁場構造”. 日本天文学会秋季年会 (弘前大学, オンライン開催, Sept. 8–10, 2020).
16. 尾形絵梨花, 大須賀健, and 矢島秀伸. “Super-Eddington 天体に対する dusty-gas の Hoyle-Lyttleton 降着過程”. 日本天文学会秋季年会 (弘前大学, オンライン開催, Sept. 8–10, 2020).
17. 内海碧人, 大須賀健, □橋博之, and 朝□奈雄太. “カー・ブラックホールをもつ超臨界降着円盤の一般相対論的輻射磁気流体力学シミュレーション”. 天体形成研究会 2020 (筑波大学, Online, Nov. 6–7, 2020).
18. 武者野拓也, 大須賀健, 矢島秀伸, and 小川拓未. “ライマンアルファ光子の輻射圧を考慮した輻射流体力学シミュレーションに向けて”. 天体形成研究会 2020 (筑波大学, Online, Nov. 6–7, 2020).
19. □橋幹弥, 大須賀健, □橋芳太, 梅村雅之, and 小川拓未. “ブラックホール周囲の測地線に基づく一般相対論的輻射輸送コードの開発”. 天体形成研究会 2020 (筑波大学, Online, Nov. 6–7, 2020).
20. 井上壮大, 大須賀健, □橋博之, and 朝□奈雄太. “超臨界中性子星降着流の一般相対論的輻射磁気流体力学シミュレーション”. 天体形成研究会 2020 (筑波大学, Online, Nov. 6–7, 2020).
21. 尾形絵梨花, 大須賀健, and 矢島秀伸. “Super-Eddington 天体に対する dusty-gas の Hoyle-Lyttleton 降着過程”. 天体形成研究会 2020 (筑波大学, Online, Nov. 6–7, 2020).
22. □橋幹弥, 大須賀健, □橋芳太, 梅村雅之, and 小川拓未. “Ray-tracing 法に基づく一般相対論的

- 輻射輸送コードの開発”. 第 33 回理論懇シンポジウム(オンライン, Dec. 23–25, 2020).
23. 井上壮大, 大須賀健, □橋博之, and 朝□奈雄太. “超臨界中性子星降着流の一般相対論的輻射磁気流体力学シミュレーション~アウトフローの磁気圏半径依存性について~”. 第 33 回理論懇シンポジウム(オンライン, Dec. 23–25, 2020).
 24. 武者野拓也, 大須賀健, 矢島秀伸, and 小川拓未. “Ly α 光子の輻射圧を考慮したガス降着シミュレーションに向けて”. 第 33 回理論懇シンポジウム(オンライン, Dec. 23–25, 2020)
 25. 尾形絵梨花, 大須賀健, and 矢島秀伸. “dusty-gas 中で浮遊するブラックホールの成長過程の解明に向けて”. 「富岳で加速する素粒子・原子核・宇宙・惑星」シンポジウム(オンライン, Jan. 28–29, 2021).
 26. 井上壮大, 大須賀健, □橋博之, and 朝□奈雄太. “一般相対論的輻射磁気流体力学計算による ULX パルサーの構造の解明;アウトフローの構造と起源について”. 多波長・時間軸天文学の時代の FORCE ~広帯域 X 線で迫るコンパクト天体の世界~(オンライン, Mar. 4–5, 2021).
 27. 内海碧人, 大須賀健, □橋博之, and 朝□奈雄太. “一般相対論的輻射磁気流体シミュレーションによる超臨界降着円盤のブラックホールスピン依存性の研究”. 多波長・時間軸天文学の時代の FORCE ~広帯域 X 線で迫るコンパクト天体の世界~(オンライン, Mar. 4–5, 2021).
 28. □橋幹弥, 大須賀健, □橋芳太, 小川拓未, and 梅村雅之. “Ray-tracing 法に基づく、空間 3 次元一般相対論的輻射輸送コードの開発”. 日本天文学会 2021 年春季年会(オンライン, Mar. 16–19, 2021).
 29. 内海碧人, 大須賀健, □橋博之, and 朝□奈雄太. “一般相対論的輻射磁気流体計算を用いたカー・ブラックホールへの超臨界降着の研究”. 日本天文学会 2021 年春季年会(オンライン, Mar. 16–19, 2021).
 30. 井上壮大, 大須賀健, □橋博之, and 朝□奈雄太. “超臨界磁化中性子星降着流のアウトフロー;構造と起源の磁気圏半径依存性について”. 日本天文学会 2021 年春季年会(オンライン, Mar. 16–19, 2021).
 31. 尾形絵梨花, 大須賀健, and 矢島秀伸. “Super-Eddington 天体に対する dusty-gas の Hoyle-Lyttleton 降着:角度依存性と定常構造”. 日本天文学会 2021 年春季年会(オンライン, Mar. 16–19, 2021).
 32. 五十嵐太一, 松元亮治, 加藤成晃, □橋博之, 松本洋介, et al. “AGN における準周期的な短時間変動の 3 次元大局的輻射磁気流体シミュレーション”. 日本天文学会 2021 年春季年会(オンライン, Mar. 16–19, 2021).
 33. 内海碧人, 大須賀健, □橋博之, and 朝□奈雄太. “General relativistic radiation

magnetohydrodynamics simulations of super-critical accretion disks around kerr black holes”. CfCA ユーザーズミーティング(オンライン, Jan. 19–20, 2021).

34. 内海碧人, 大須賀健, 高橋博之, and 朝口奈雄太. “一般相対論的輻射磁気流体力学シミュレーションによる超臨界降着円盤のブラックホールスピン依存性の研究”. 第 33 回理論懇シンポジウム(オンライン, Dec. 23–25, 2020).
35. 尾形絵梨花, 大須賀健, and 矢島秀伸. “Super-Eddington 天体に対する dusty-gas の Hoyle-Lyttleton 降着過程”. 第 33 回理論懇シンポジウム(オンライン, Dec. 23–25, 2020).

(11) サブ課題 C・ブラックホール降着円盤およびジェットの新相対論的磁気流体力学計算: 松元亮治 (千葉大学)

1. 「富岳」における高エネルギー粒子加速研究と PIC シミュレーション, 松本洋介, 日本天文学会 2021 年春季年会, 2021 年 3 月 16 日~3 月 19 日
2. AGN における準周期的な短時間変動の 3 次元大局的輻射磁気流体シミュレーション, 五十嵐太一, 松元亮治, 加藤成晃, 高橋博之, 松本洋介, 大須賀健, 日本天文学会 2021 年春季年会, 2021 年 3 月 16 日~3 月 19 日
3. CANS+による AGN ジェット伝搬の高空間分解能 MHD 数値実験, 大村匠 町田真美 松本洋介, 日本天文学会 2021 年春季年会, 2021 年 3 月 16 日~3 月 19 日
4. 大型計算機施設を用いた宇宙線研究: 電子加速からイオン加速の時代へ, 松本洋介, 日本物理学会 第 76 回年次大会(2021 年), 2021 年 3 月 12 日~3 月 15 日
5. Radiation Magnetohydrodynamic Simulations of Black Hole Accretion Flows in Bright Hard State, Taichi Igarashi, Yoshiaki Kato, Hiroyuki Takahashi, Ken Ohsuga, Yosuke Matsumoto, Ryoji Matsumoto, 43rd COSPAR Scientific Assembly 2021, 2021 年 1 月 28 日~2 月 4 日
6. Radiation magnetohydrodynamic simulations of black hole accretion flows during hard-to-soft state transitions, Taichi Igarashi, Yoshiaki Kato, Hiroyuki R. Takahashi, Ken Ohsuga, Yosuke Matsumoto, Ryoji Matsumoto, Black Hole Astrophysics with VLBI: Multi-Wavelength and Multi-Messenger Era, 2021 年 1 月 18 日~1 月 20 日
7. Two-temperature MHD simulations of extragalactic jets, Black hole astrophysics with VLBI: Multi-Wavelength and Multi-Messenger Era, Takumi Ohmura, Mami Machida, 2021 年 1 月 18 日~1 月 20 日
8. Performance measurements of particle-in-cell code with adaptive load balancing, 松本洋介, 日本地球電磁気・地球惑星圏学会講演会 (2020 年 SGEPPS 秋学会), 2020 年 11 月 1 日~11 月 4 日
9. Radiation Magnetohydrodynamic Simulations of Time Variabilities of Changing Look Active Galactic Nuclei, Taichi Igarashi, Y. Kato, H.R. Takahashi, K. Ohsuga, R. Matsumoto, AAPPSS-DPP 2020, 4th Asia Pacific Conference on Plasma Physics, 2020 年 10 月 26 日~10 月 31 日

10. Changing Look AGNにおける軟X線放射領域の輻射磁気流体シミュレーション, 五十嵐太一、松元亮治、加藤成晃、高橋博之、松本洋介、大須賀健, 日本天文学会 2020 年秋季年会, 2020 年 9 月 8 日～9 月 10 日
11. An adaptive load balancing method for particle-in-cell simulations, 松本洋介, 日本地球惑星科学連合 (JpGU) 2020 年大会, 2020 年 7 月 12 日～7 月 16 日

(12) サブ課題 C・ニュートリノ輻射輸送の第一原理計算による 3 次元超新星爆発メカニズムの解明: 山田 章一 (早稲田大学)、滝脇 知也 (国立天文台)、住吉 光介 (沼津工業高等専門学校) 学会等における口頭・ポスター発表

1. ボルツマンハイドロコードによる重力崩壊型超新星計算の進捗状況と今後の計画 (口頭), 岩上わかな, 大川博督, 長倉洋樹, 原田了, 古澤峻, 松古栄夫, 住吉光介, 山田章一, 「富岳で加速する素粒子・原子核・宇宙・惑星」シンポジウム, 2021/01/29, 国内
2. 三次元空間における重力崩壊型超新星のボルツマン方程式によるニュートリノ輻射流体計算 (口頭), 岩上わかな, 大川博督, 長倉洋樹, 原田了, 古澤峻, 松古栄夫, 住吉光介, 山田章一, 天文学会年会 2021 年春季年会, 2020/03/16, 国内
3. 重力崩壊型超新星のボルツマン方程式による空間三次元のニュートリノ輻射流体計算 (ポスター), 岩上わかな, 大川博督, 長倉洋樹, 原田了, 古澤峻, 松古栄夫, 住吉光介, 山田章一, 新学術「地下宇宙」領域研究会, 2020/06/02, 国内
4. 重力崩壊型超新星のボルツマン方程式によるニュートリノ輻射流体計算 (口頭), 岩上わかな, 大川博督, 長倉洋樹, 原田了, 古澤峻, 松古栄夫, 住吉光介, 山田章一, 第 7 回超新星ニュートリノ研究会, 2020/01/07, 国内
5. 一般相対論的ボルツマン輻射流体計算による原始中性子星冷却 (口頭), 赤穂龍一郎、原田了、長倉洋樹、住吉光介、岩上わかな、大川博督、古澤峻、松古 栄夫、山田章一, 日本天文学会 2021 年春季大会, 2020/03/16, 国内
6. 多次元一般相対論的ボルツマンニュートリノ輸送コード開発 (口頭), 赤穂龍一郎、原田了、長倉洋樹、住吉光介、岩上わかな、大川博督、古澤峻、松古 栄夫、山田章一, 第 7 回超新星ニュートリノ研究会, 2021/01/07, 国内
7. Recent progress of neutrino transfer and equation of state (口頭), K. Sumiyoshi, PHAROS WG1+WG2 Workshop: neutron star equation of state and transport properties, 2021/02/26, 国外 (リモート参加)
8. 重力崩壊型超新星爆発の数値シミュレーションによる研究 (口頭), 住吉光介, 日本物理学会 2020 年秋季大会 (シンポジウム依頼講演), 2020/09/15, 国内
9. 連星中性子星合体後の高密度天体におけるニュートリノ輻射輸送の性質 (口頭), 住吉光介、藤林翔、関口雄一郎、柴田大, 日本物理学会第 76 回年次大会, 2021/03/15, 国内
10. Progress of the Boltzmann-radiation-hydrodynamics Simulations for Core-collapse Supernovae (C02 theory report) (口頭), A. Harada, The Fourth Annual Area Symposium Online, 2021/2/22, 24, 国際

11. Core-collapse Supernova Simulations with the Boltzmann-neutrino transport using the SN method (口頭), A. Harada, CHALLENGES AND INNOVATIONS IN COMPUTATIONAL ASTROPHYSICS - II (ChaICA - II), 2020/11/18-21, 国際
12. SN 法を用いたボルツマン輻射流体コードによる高速回転星の重力崩壊シミュレーション (口頭), 原田了, 日本天文学会 2021 年春季年会, 2021/3/16-19, 国内
13. Core-collapse simulations of rapidly rotating progenitors by Boltzmann-radiation-hydrodynamics code (ポスター), A. Harada, Black Hole Astrophysics with VLBI: Multi-Wavelength and Multi-Messenger Era, 2021/1/18-20, 国際
14. 高速回転星重力崩壊のボルツマン-ニュートリノ輻射流体シミュレーション (ポスター), 原田了, 新学術「地下宇宙」第7回超新星ニュートリノ研究会, 2021/1/7-8, 国内
15. ボルツマン輻射流体コードによる高速回転星の重力崩壊シミュレーション (ポスター), 原田了, 「ニュートリノで拓く素粒子と宇宙」研究会 2020, 2020/12/21-22, 国内
16. Boltzmann-radiation-hydrodynamics simulations of the core collapse of rapidly rotating stars (ポスター), 原田了, 第33回 理論懇シンポジウム「理論天文学・宇宙物理学のブレイクスルー」, 2020/12/23-25, 国内
17. 高速回転星重力崩壊のボルツマン輻射流体シミュレーション (ポスター), 原田了, 高エネルギー宇宙物理学研究会 2020, 2020/12/14&17, 国内
18. Tomoya Takiwaki, "Summary report from C01", GW genesis, online, 2/22-24
19. 滝脇知也, "超新星爆発の3次元シミュレーションの現状と展望", 「富岳で加速する素粒子・原子核・宇宙・惑星」シンポジウム, online, 1/28-29
20. 滝脇知也, "科学者とは?超新星爆発って?", 中野区立桃花小学校, 12/19
21. Tomoya Takiwaki, "Physics and Astrophysics of Core-collapse Supernovae", Division of Science + CfCA workshop 2020, online, 12/14
22. 滝脇知也, "超新星爆発における輸送現象", 第37回プラズマ核融合学会年会, オンライン, 12/02
23. 滝脇知也, "Historical review on the theory of core-collapse supernovae", Supernova workshop 2020, オンライン, 11/18-19
24. 滝脇知也, "サブ課題C:ブラックホールと超新星爆発 長時間計算班の科学的目標", 富岳計算宇宙惑星・計算資源利用に関する課題内ワークショップ (第2回), オンライン, 10/27

学会誌・雑誌等における論文掲載

1. The Boltzmann-radiation-hydrodynamics Simulations of Core-collapse Supernovae with Different Equations of State: The Role of Nuclear Composition and the Behavior of Neutrinos, Akira Harada, Hiroki Nagakura, Wakana Iwakami, Hirotada Okawa, Shun Furusawa, Kohsuke Sumiyoshi, Hideo Matsufuru, and Shoichi Yamada, The Astrophysical Journal, 902, 150, 2020/10/23, 国外
2. Simulations of the Early Postbounce Phase of Core-collapse Supernovae in Three-dimensional Space with Full Boltzmann Neutrino Transport, Wakana Iwakami, Hirotada Okawa, Hiroki Nagakura, Akira Harada, Shun Furusawa, Kohsuke Sumiyoshi, Hideo Matsufuru, and Shoichi

Yamada, The Astrophysical Journal, 903, 82, 2020/11/04, 国外

3. Multidimensional Boltzmann Neutrino Transport Code in Full General Relativity for Core-collapse Simulations, Ryuichiro Akaho, Akira Harada, Hiroki Nagakura, Kohsuke Sumiyoshi, Wakana Iwakami, Hirotada Okawa, Shun Furusawa, Hideo Matsufuru, and Shoichi Yamada, The Astrophysical Journal, 909, 210, 2021/03/19, 国外

(13) サブ課題D 統括、太陽黒点の構造と太陽面爆発の関係の研究及びフレア発生予測研究：草野完也 (名古屋大学)、堀田 英之 (千葉大学)

1. 草野 完也, A Challenge to Physics-based Prediction of Giant Solar Flares, the 1st SCOSTEP/PRESTO online seminar (招待講演), 2020.5.26
2. 堀田英之 太陽ダイナモ問題解決に向けて, 第50回天文・天体物理若手夏の学校(招待講演), 2020.8.26
3. 堀田英之 富岳を用いた太陽シミュレーションの最新結果と展望, 「富岳で加速する素粒子・原子核・宇宙・惑星」シンポジウム, 2021.1.29
4. 堀田英之 富岳を用いた太陽内部・表面研究の最新成果と展望, 太陽地球圏環境予測のためのモデル研究の展望 (招待講演) 2021.3.26
5. 草野 完也, 不安定性理論に基づく太陽フレアの予測と発生機構の解明,, 日本天文学会 2020 年秋季年会,, 2020.09.08
6. 草野完也, 電磁流体力学不安定性理論に基づく太陽フレア予測,, , 日本物理学会 2020 年秋季大会,, 2020.9.11
7. 草野完也, A challenge to the physics-based prediction of giant solar flares,, 4th Asia-Pacific Conference on Plasma Physics, 招待講演,, 2020.10.30
8. 草野完也, A challenge to physics-based prediction of large solar flares and solar eruptions, The 29th International Toki Conference on Plasma and Fusion Research, 招待講演, 2020/10/30
9. 堀田英之 富岳で実現する太陽の超大規模シミュレーション, 日本天文学会 2021 春季年会, 2021.3.17, 招待講演
10. 堀田英之 差動回転の自転速度・解像度への依存性の調査, 日本天文学会 2021 春季年会, 2021.3.18
11. 堀田英之 輻射磁気流体シミュレーションを用いた黒点超強力磁場生成機構の研究, 日本天文学会 2020 年秋季年会, 2020.9.20
12. 堀田英之 輻射磁気流体計算を用い太陽黒点の非常に強い磁場の研究, 日本流体力学会年会, 2020.9.8
13. 堀田英之 A calculation for the formation of sunspots in an unprecedentedly deep domain, 日本地球惑星科学連合大会, 2020.7.13

(14) サブ課題D・岩石惑星表層大気シミュレーション：林 祥介 (神戸大学)

学会発表

1. 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「全球非静力学火星大気大循環モデルによるダスト巻き上げ輸送計算」JpGU-AGU Joint Meeting 2020: Virtual, 令和2年7月14日, オンライン (DFS)
2. 樫村博基, 八代尚, 西澤誠也, 富田浩文, 小郷原一智, 黒田剛史, 中島健介, 石渡正樹, 高橋芳幸, 林祥介「全球非静力学火星大気大循環モデルによる鉛直対流とダスト巻き上げ輸送の計算」日本惑星科学会 2020 年秋季講演会, 令和2年11月13日, オンライン (口頭)
3. 樫村博基, 八代尚, 西澤誠也, 富田浩文, 高木征弘, 杉本憲彦, 小郷原一智, 黒田剛史, 中島健介, 石渡正樹, 高橋芳幸, 林祥介「全球非静力学金星大気モデルの開発」金星大気の観測・シミュレーション・データ同化に関する研究会, 令和3年3月10日, オンライン (口頭)
4. 樫村博基, 八代尚, 西澤誠也, 富田浩文, 小郷原一智, 黒田剛史, 中島健介, 石渡正樹, 高橋芳幸, 林祥介「火星大気大循環の全球非静力学高解像度シミュレーションに向けて」日本天文学会 2021 年春季年会, 令和3年3月17日, オンライン (口頭)

(15) サブ課題D・岩石惑星内部シミュレーション：小河 正基 (東京大学)

学会発表

1. Mana Tsuchida and Masanori Kameyama: Numerical experiments on stagnation and avalanche of subducting slabs: Important roles of trench migration and its temporal change, JpGU-AGU Joint Meeting 2020: Virtual, 令和2年7月12日~16日, オンライン (iPoster)
2. 亀山真典, 小河正基, 宮腰剛広, 柳澤孝寿「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・スーパー地球を例にして~」JpGU-AGU Joint Meeting 2020: Virtual, 令和2年7月14日, オンライン (DFS)
3. 宮腰剛広, 亀山真典, 小河正基, 「マントル対流とプレートのダイナミクス」第2回海洋科学の未来と減災科学シンポジウム, 令和2年8月19日, 香川大学幸町キャンパス (香川県高松市) [招待講演]
4. 亀山真典「惑星内部対流計算でのチューニング問題点 (仮)」富岳計算宇宙惑星・計算資源利用に関する課題内ワークショップ, 令和2年10月27日, オンライン (口頭)
5. 土田真愛, 亀山真典「2次元円環状モデルを用いたスラブ沈み込みに伴う上盤プレート挙動とマントル内の流れに関する数値シミュレーション」日本地震学会 2020 年度秋季大会, 令和2年10月30日, オンライン (ポスター)
6. 荷見拓生, 小河正基, 亀山真典「三次元球殻プログラムによる月内部マントルの対流安定性についての計算実験」日本惑星科学会 2020 年度秋季講演会, 令和2年11月13日, オンライン (口頭)
7. 亀山真典「擬似圧縮法を用いた三次元球殻マントルにおける対流の数値シミュレーション: 月への応用」 「富岳で加速する素粒子・原子核・宇宙・惑星」シンポジウム, 令和3年1月28日, オンライン (口頭)
8. 亀山真典, 宮腰剛広, 柳澤孝寿, 小河正基「マントル対流の数値モデリング: 月から地球まで、さらにスーパー地球まで」日本天文学会 2021 年春季年会, 令和3年3月17日, オンライン (口頭)

(16) サブ課題D・ガス惑星大気シミュレーション：竹広 真一（京都大学）

学会発表

1. 佐々木洋平，竹広真一，石岡圭一，榎本剛「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」JpGU-AGU Joint Meeting 2020，令和2年7月14日（DFS）
2. 佐々木洋平，竹広真一，石岡圭一，榎本剛，中島健介，林祥介「回転球殻熱対流により引き起こされる表面縞状構造の生成と消滅」2020年日本流体力学会年会，令和2年9月20日，オンライン（口頭）
3. 竹広真一，石岡圭一，佐々木洋平，榎本剛「高解像度ガス惑星大気シミュレーションに向けた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」日本天文学会2021年春季年会，令和3年3月17日，オンライン（口頭）