

令和4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5年5月30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	- 2 -
2. 令和4年度（報告年度）の実施内容	- 3 -
2-1. 当該年度（令和4年度）の事業実施計画	- 3 -
2-2. 実施内容（成果）	- 7 -
2-3. 活動（研究会の活動等）	- 25 -
2-4. 実施体制	- 29 -

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现象の解明」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4年度（報告年度）の実施内容

2-1. 当該年度（令和4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4年度は独自に開発した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及びPeTarを用いた世界最大規模の300万体を用いた球状星団進化シミュレーションを令和3年度に引き続き行い、球状星団中でのコンパクト連星の形成率を明らかにする。

(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)

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った。令和3年度は粒子数2兆、ボックスサイズ50Mpc/hを採用した世界最大規模の宇宙論的N体シミュレーションを宇宙初期から赤方偏移10まで進めた。令和4年度は天体模擬カタログを構築し観測との詳細な比較を行う。

(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4年度は、これまでに得られた数値シミュレーションデータを用いて、将来の銀河赤方偏移探査や中性水素21cm線の観測からニュートリノ質量やその質量階層の測定精度や検出可能性を定量的に調査する。

(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4年度は令和3年度までに実装したバリオン物理モデルを用いて「富岳」上で銀河形成シミュレーションを行う。

(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。令和 3 年度までに「富岳」向けに最適化を行った Athena++コードを用いた大域的な非理想磁気流体シミュレーションにより、現実的な原始惑星系円盤の構造を調べる。令和 4 年度は特に令和 3 年度までに選定したモデルについて更なる高分解能計算を行い、乱流の分布や角運動量輸送過程の研究を行う。また (7) の分子雲の計算について協力・補佐する。

(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計算：岩崎 一成(国立天文台)

銀河内での分子雲・星形成過程を調べるため、前年度「富岳」向けの最適化を行った Athena++コードを用いて、銀河内における分子雲の形成から分子雲コアの内部構造までを解像する高解像度マルチスケールシミュレーションを行い、分子雲の形成過程から第一原理的に分子雲コアの質量、回転や磁場強度の分布等を調べ、星形成の初期条件について統計的な研究を行う。また (6) の原始惑星系円盤の計算について協力・補佐する。

(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 4 年度は、惑星系形成シミュレーションコード GPLUM を用いて、原始惑星系円盤中での微惑星集積の大域計算(太陽系外側)、高分解能計算(太陽系内側)を行う。また、惑星衝突シミュレーションコードを用いて自転入り巨大衝突の研究を行う。さらに高密度惑星環における密度波形成の大規模シミュレーションを行う。

(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を活用して、原始惑星系円盤の乱流中のダスト成長のシナリオ構築のための大規模数値実験を実施する。令和 4 年度は「富岳」を用いた高レイノルズ数乱流の大規模数値計算でこれまでに構築した高レイノルズ数乱流中を運動する粒子の位置・速度データベースの解析を進めるほか、開発を進めている乱流中の粒子の衝突付着成長シミュレーションコードを用いて大規模な数値実験を行い、信頼性の高い粒子の衝突付着成長のデータベースを構築する。

(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)

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现象の解明」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、相対論的ジェット生成機構を明らかにすることを目的とする。令和4年度は高光度降着円盤の大局的な計算を行う。また、強磁場の影響とブラックホールスピンの効果についての検証も行う。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巨大ブラックホールについて、輻射スペクトルと撮像イメージ、偏波分布、およびそれらの時間変動の計算を行う。

(1 1) 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4年度は「富岳」を用いて高解像度（方位角方向の解像度512以上）によるエディントン光度以下の降着円盤のシミュレーションと宇宙線を考慮したジェット伝播シミュレーションを行う。また、相対論的衝撃波の3次元計算プラズマ粒子計算を行い、衝撃波からの高強度電磁波放射と高速電波バーストとの関連を明らかにすることに加え、高マッハ数衝撃波の長時間計算を行うことで、宇宙線電子生成問題に決着をつける。

(1 2) 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4年度ではボルツマン輻射流体コードを用いた第一原理計算で衝撃波の広がりを行い、爆発の可否を探るまでの時間発展計算を実行する。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、長時間計算、空間高解像度計算、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4年度ではメッシュ構造を工夫し、MHD計算ができるようにアップデートされた3DnSNeで普通解像度による長時間計算を1モデル行う。

(1 3) 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。令和4年度では、世界で初めての太陽対流層の底から表面までを包括した数値シミュレーションを実施し、令和3年度に実施した表面付近の黒点形成計算の妥当性の検証を行う。また、これまでに実施した太陽全球シミュレーションを恒星へと拡張し、自転と差動回転、磁場の関係を明らかにする。また、これらの計算に対して日震学・星震学的解析を実施することで、観測と比較し、数値シミュレーションの妥当性を検証する。

(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対流構造を十分に表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4年度は、前年度に火星地形の導入開発を行った火星 SCALE-GM を「富岳」上で実行し、地形効果を取り入れた高解像度の全球火星大気計算を実現する。また、金星大気に関しては、金星 SCALE-GM の安定度分布を変更し、雲層対流を陽に表現した高解像度計算を実施する。

(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4年度は2次元モデルを用いて明らかにしたプレート・テクトニクスが起こる条件を参考に、これまでに得られたプレート・テクトニクスの予備的な3次元モデルを球殻へ拡張し、期待された条件のもとでプレート・テクトニクスが発現することを確認するとともに、月を想定した小さなコアを持つ(部分)球殻マントルにおけるマグマの生成・移動を伴う対流の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4年度は令和2年度に「富岳」へ導入し、令和3年度に「富岳」システム用のチューニングを行っ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引き続き実行する。特に上層安定成層を伴う設定での計算に取り組み、ガス惑星大気に見られる縞状構造が深部対流によって生成されているのか、あるいは上層安定成層内部の流体運動に起因するのかを探る。

2-2. 実施内容（成果）

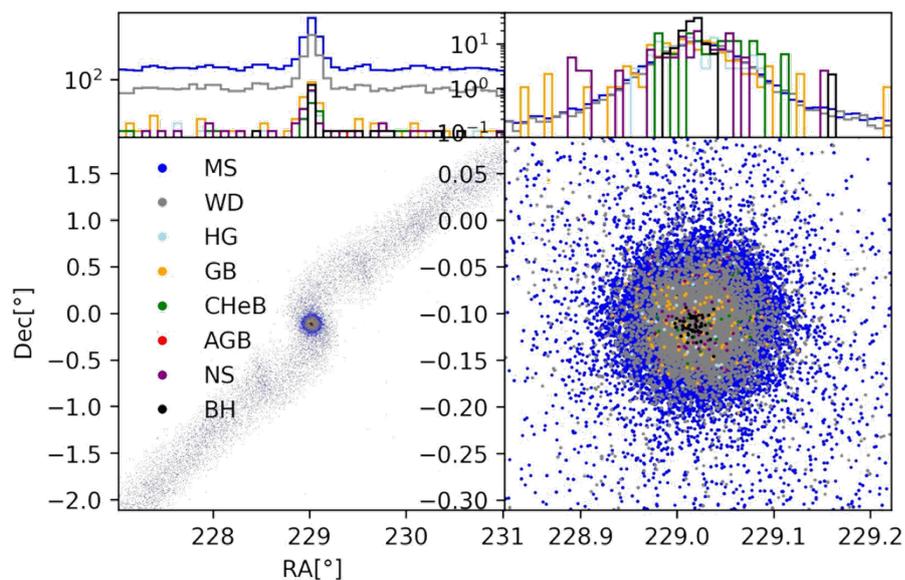
(1) 研究総括、並列計算コード開発：牧野 淳一郎(神戸大学)

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、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記事の作成、「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4年12月12-13日@神戸大学統合研究拠点コンベンションホールおよびオンライン)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の開発を進めた。

(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)

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し、独自に開発した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及びPeTarを用いた世界最大規模の300万体を用いた球状星団進化シミュレーションを行い、初期条件における緩和時間(系が力学的に進化する時間スケール)程度の1億年弱まで計算を終了した。また、10万程度モデルを用いて、初期の連星の割合を変えたシミュレーションを行い、低質量の初期連星の割合がブラックホール連星の合体頻度に与える影響は小さいことを示した。

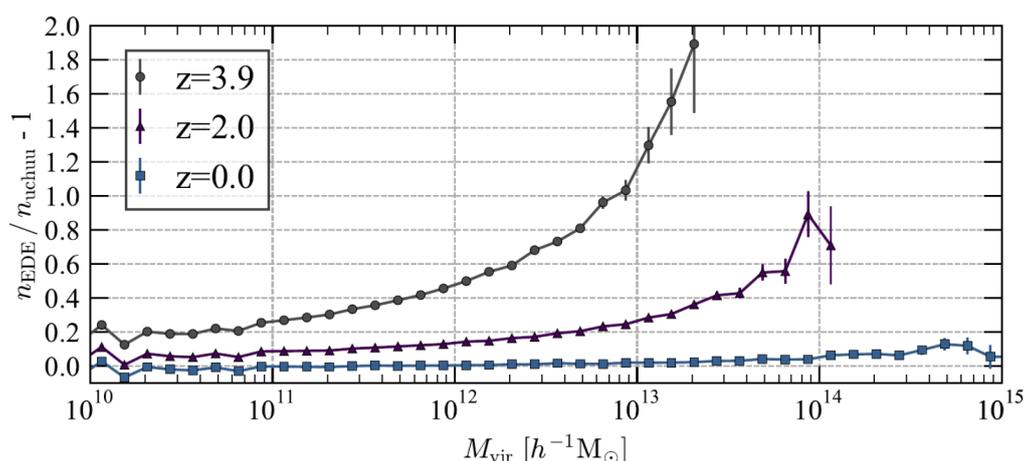
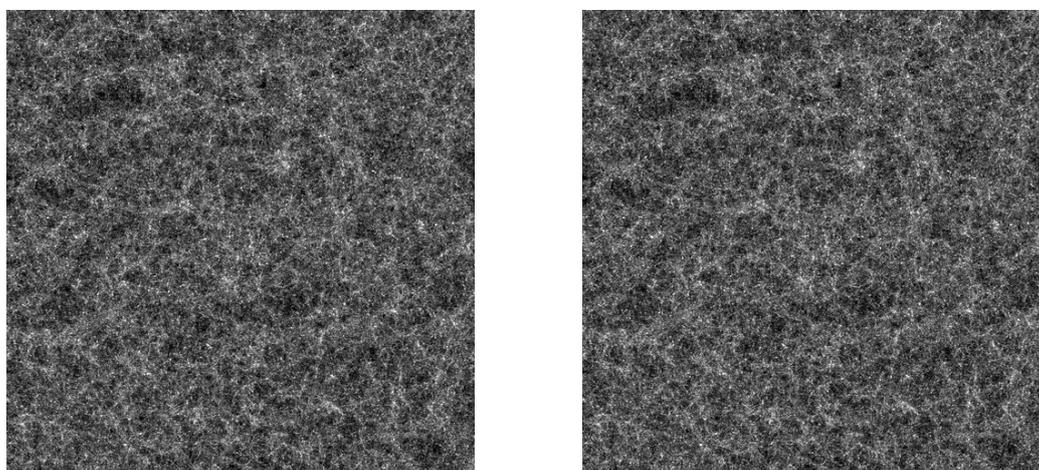


図：銀河内で潮汐破壊されていく星団。各色は星の種類を示す。星団の力学的進化の結果、ブラックホール(BH)のような重い星が中心に集中している。

(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)

2021年度までにチューニングしたコードを用いて、粒子数2兆個、ボックスサイズ50 Mpc/hの宇宙論的N体シミュレーションを進めた。令和3年度末までに赤方偏移10まで進め、令和4年度中にさらに6.4まで進めた。ダークマター粒子質量は7500太陽質量程度であり初代星が形成すると考えられるミニハローを十分分解できる。ハロー合体形成史のカタログ化を進めている。

これまで構築した模擬カタログをさらに発展させるために、宇宙論モデルが異なる3つのシミュレーションを追加で実行した(下図)。粒子数262億個、ボックスサイズ1.0 Gpc/hを採用し、初期条件として同じシード値を用いている。そのためcosmic varianceの効果を除外し、純粋に宇宙論モデルの違いによる構造形成、および天体の統計的性質を議論できる。既に模擬カタログの構築が完了しており、結果を複数の論文としてまとめている。初期成果の論文を投稿中で、投稿と同時に一部の模擬カタログを公開した。

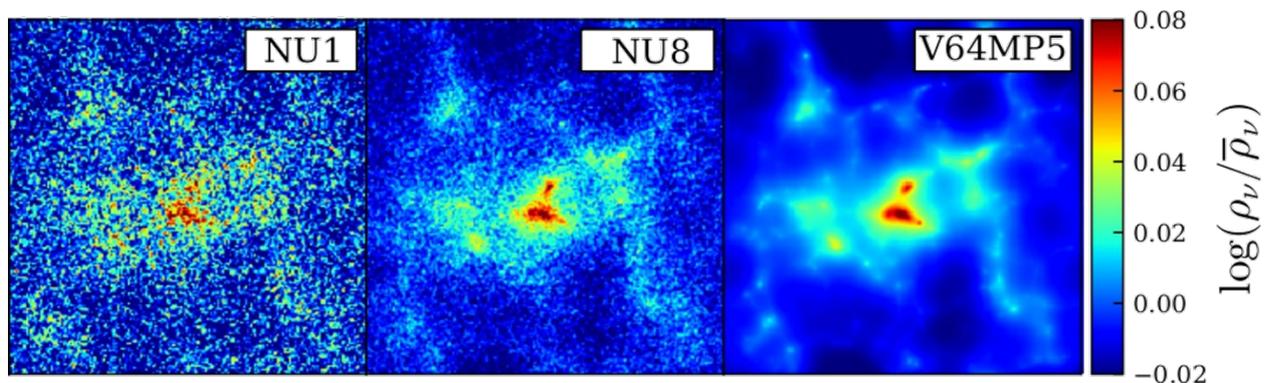


図：(左上)標準的な構造形成モデルに基づいたシミュレーションによるダークマター分布；(右上)early dark energy モデルに基づいたシミュレーションによるダークマター分布。見た目では区別が難しいが、統計的解析によって違いを確認できる。(下)はその一例でハロー質量あたりのハローの個数の相対的差異を表し、横軸はハロー質量、 z は赤方偏移である(論文準備中)。

シミュレーションでは相互作用重力計算を高速に実行するツリー法を採用している。「富岳」のようなメニーコアプロセッサ上で高いスレッド並列性能を発揮する、新しいツリー構造の構築アルゴリズムを開発した。従来手法に比べ、ツリー構造の構築にかかる時間が数倍短縮された。これにより、マルチスレッド環境でも、相互作用計算に対して比較的短い時間でツリー構造を構築できるようになった。結果を論文としてまとめている。また、「富岳」上で最適化されたスレッド並列ソートアルゴリズムを開発した。さまざまな性質の入力に対し安定して高い速度性能および並列化性能を示した。結果をまとめた論文が Journal of Information Processing 誌に受理された。

(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)

宇宙論的ニュートリノの宇宙大規模構造形成におけるダイナミクスを調べる数値シミュレーションの手法として我々が開発してきた Vlasov シミュレーションと、従来の N 体シミュレーションによるシミュレーション結果を計算機資源量も含めて詳細に比較し、ニュートリノの速度場や速度分散などのニュートリノの分布関数の速度モーメントについては、Vlasov シミュレーションの方が計算機資源の面でもシミュレーション結果の面においても精度の良い結果を与えることが分かった。また、ニュートリノの 3 つの質量固有値が異なる場合にその質量階層の違いが宇宙大規模構造形成に与える影響を、複数のニュートリノの分布関数を取り扱うことによって数値シミュレーションし、特に銀河団スケールの比較的質量の大きなダークマターハローの数密度に質量階層の違いが大きく反映されることを見出した。



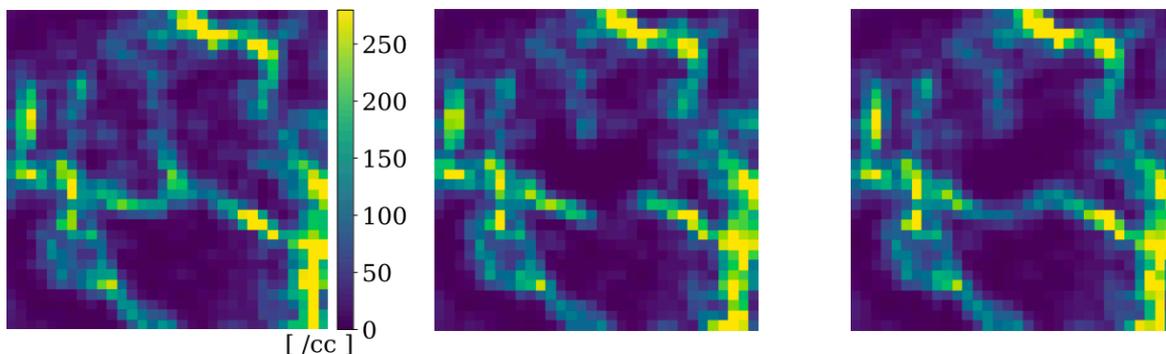
図：過去の研究で典型的に使われてきた粒子数で計算した N 体シミュレーションによるニュートリノの密度分布（左と中央のパネル）と Vlasov シミュレーションで計算されたニュートリノの密度分布（右のパネル）。N 体シミュレーションによる結果はショットノイズが多く含まれていることが分かる。

(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：

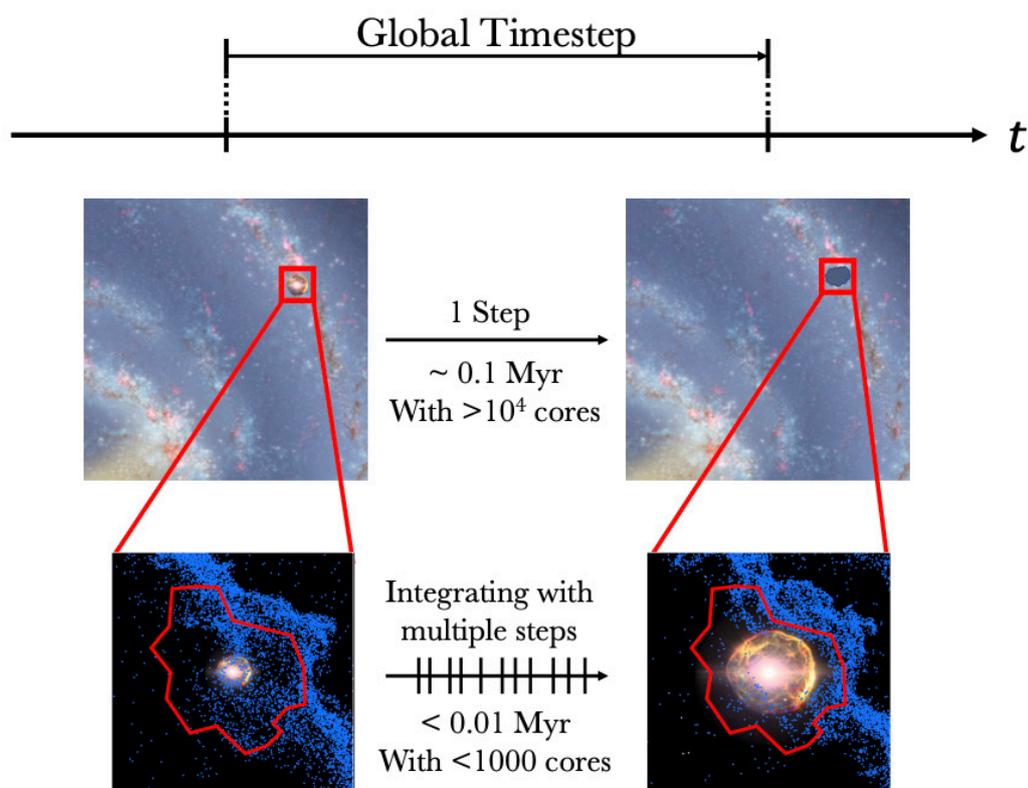
斎藤 貴之(神戸大学)、岡本 崇(北海道大学)

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した。令和 4 年度は令和 3 年度までに実装したバリオン物理モデルを用いて「富岳」上で銀河形成シミュレーションを行った。最高分解能の初期条件は暗黒物質質量 390Msun、バリオン質量 72Msun で、この初期条件を用いてシミ

シミュレーション安定化のための調整に取り組んだ。また、時間刻み幅の短い領域の推定抽出に機械学習の結果を用いるためのモデルを構築した。このモデルに基づき「富岳」上で高速に推論を行うためのエンジンを Morpho, Inc. に依頼し開発した。この機械学習モデルをシミュレーションコードの統合に取り組んだ。



図：ディープラーニングモデルを用いて超新星爆発後の密度分布を予測した例。各パネルの一边は60pc。カラーマップは密度分布を示す。(左)は超新星爆発直前の初期状態、図の中心に位置する超新星爆発から10万年後までの(中央)はSPHシミュレーションの結果、(右)はディープラーニングモデルを用いて予測した結果。

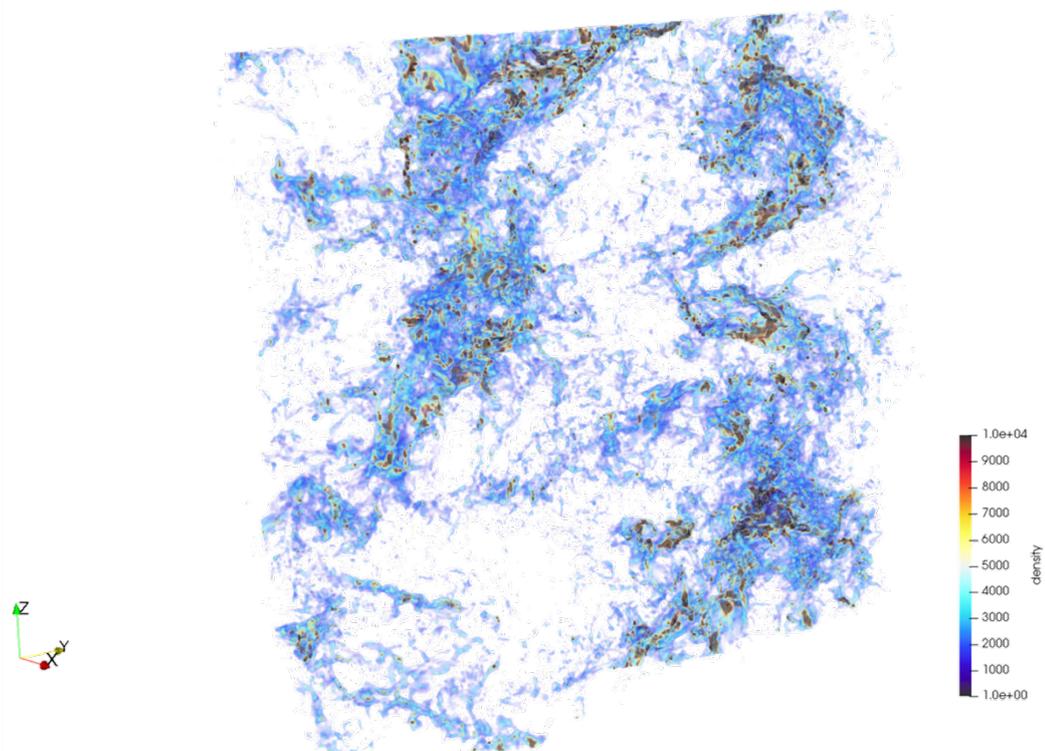


図：孤立進化できる領域を深層学習モデル(3D-MIM)によって推定。上側は大局的シミュレーション、下側は孤立進化部分のシミュレーションの図。

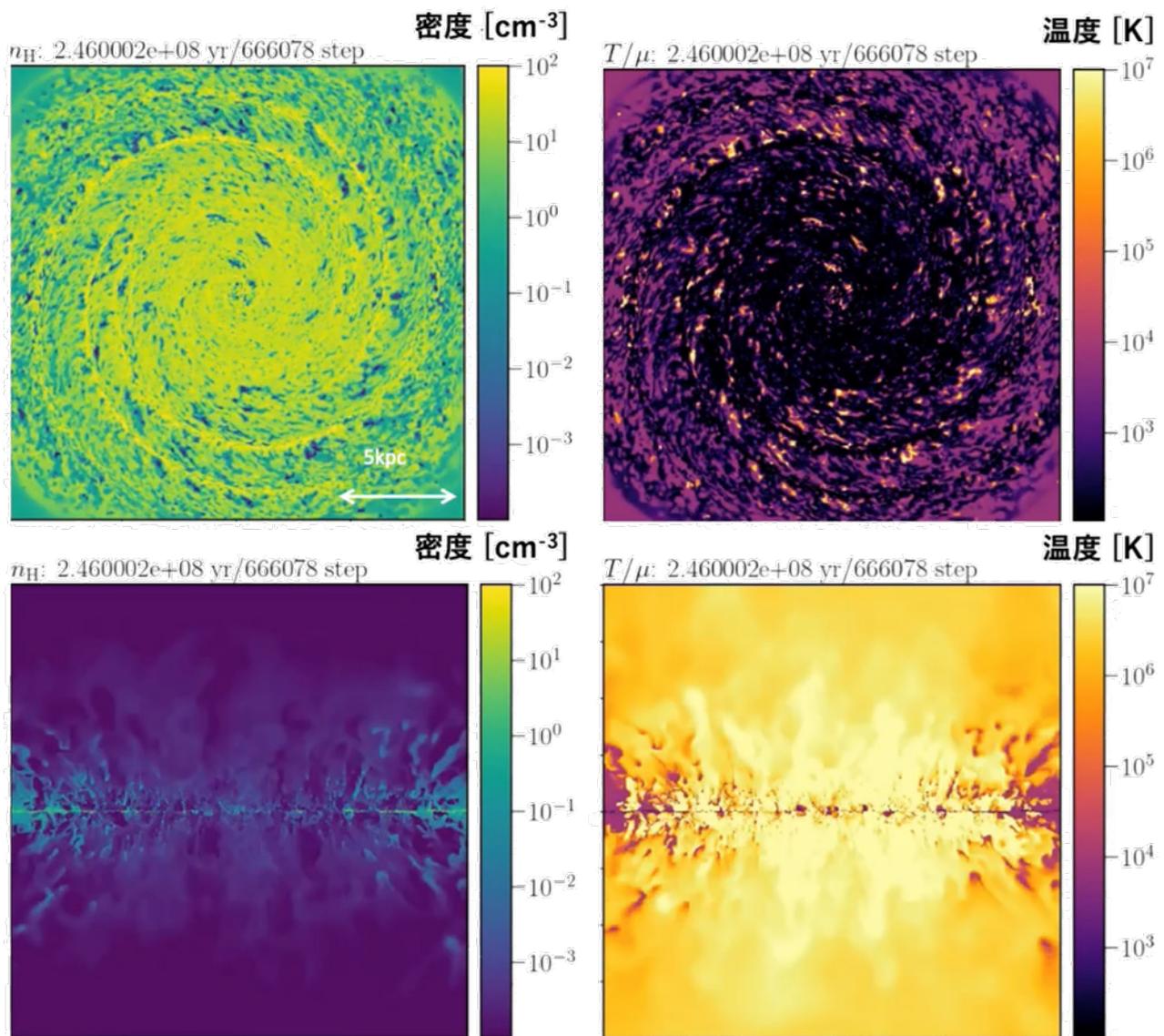
(6) サブ課題B 統括、銀河系内での分子雲と分子雲コアの形成および原始惑星系円盤の非理想磁気流体計算：富田 賢吾(東北大学)

今年度は原始惑星系円盤の内縁近傍の、角運動量輸送メカニズムが大きく空間的に変動する 0.1 au から 10 au までの広域の大域シミュレーションを、昨年度より 2 倍の解像度で実施した。「富岳」への最適化を行った Athena++ を用いた。昨年度実施した低解像度シミュレーションと定性的に同じ結果を高解像度シミュレーションでも得ることができた。具体的な成果としては、乱流が発達する円盤最内縁領域と、乱流が抑制される円盤外側領域の間での、角運動量輸送がほぼ完全に起こらない遷移領域の発見が挙げられる。乱流が発達する最内縁領域には、定量的な分解能依存性(例えば、速度分散は高解像度シミュレーションの方が 1.5 倍程度高い)が見られたが、それらは円盤を局所的に切り取った先行研究のシミュレーションで解明されていた分解能依存性で説明できる。さらに我々はダスト量(ガス質量に対するダスト質量の割合)を変えたシミュレーションを実施し、星間媒質のダスト量と同じ場合は磁場が内側に、星間媒質のダスト量より 2 桁少ない場合は磁場が外側に輸送されることを明らかにした。磁場は円盤の角運動量輸送を担うため、磁場進化が円盤進化を決定づけるにもかかわらず、これまで磁場進化はほとんどわかっていなかった。我々の研究成果は、惑星形成と密接にかかわるダスト進化によって、磁場進化が大きく変わる可能性を示唆する。

上記のシミュレーションは 3 つの非理想磁気流体効果のうち、オーム抵抗と両極性拡散の 2 つのみを考慮していた。本課題では、最後の非理想磁気流体効果であるホール効果の計算手法について開発を行った。差分された方程式の線形解析を行い、数値的安定性を担保しつつ、高精度な数値解を求める手法を開発した。



図：衝突流中での分子雲形成のシミュレーション。衝撃波後面で乱流が発生し、自己重力の作用で高密度のフィラメント状の構造が形成されている。



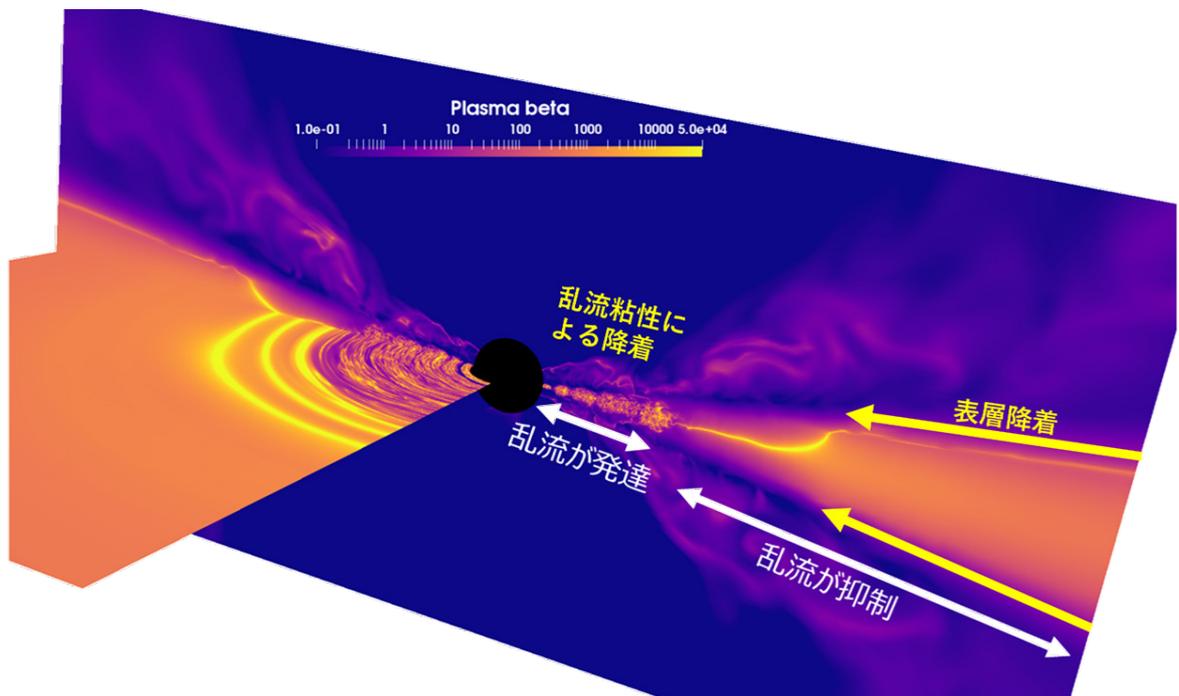
図：銀河スケールの分子雲形成シミュレーションのテスト計算。銀河渦状腕などの大局的構造を考慮しつつ高解像度のシミュレーションが可能になった。

(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計算：岩崎 一成(国立天文台)

銀河円盤を20 pcスケールで切り取った局所分子雲形成・進化シミュレーションを、化学反応と熱進化・外部紫外線の光子追跡・自己重力・磁場を考慮して実施した。その結果、分子雲の平均的な性質、例えば乱流エネルギーと磁気エネルギーの比は、分子雲形成環境に強く依存する一方で、星形成の場である高密度クランプの統計的性質は、分子雲形成環境に依存せずに、普遍的な性質をもつことを明らかにした。具体的には、熱的エネルギー・乱流エネルギー・磁気エネルギー・重力エネルギーがほぼ等分配になるように進化する。高密度クランプの各種エネルギーについての解析的表式を得た。得られた研究成果はThe Astrophysical Journalに査読付き学術論文(Iwasaki and Tomida 2022)として発表した。

天の川銀河全体を含む高解像度分子雲形成シミュレーションを、超新星爆発によるフィードバックと銀河渦状腕ポテンシャルを考慮し、Athena++を「富岳」に最適化して実施した。今年度実施したのはテスト計算であるが、銀河円盤全体(数10 kpc)から分子雲内部を改造する分解能(パーセクスケール)を達成し、銀河渦状腕が駆動するガス集積による分子雲形成、超新星爆発による銀河スケールのアウトフローの駆動など先行的な結果を得た。

銀河渦状腕生成・消滅を銀河大域円盤シミュレーションに取り入れるために、Athena++の粒子多体系モジュールの開発を行った。大きなダイナミックレンジを効率的に解くために、解像度が必要な領域に段階的に細かい格子を配置する格子分割法を用いた場合に、粒子が自己力を受けてしまうという問題があったが、アルゴリズムの改良により自己力を10分の1程度にすることに成功した。今後さらに改良を進め、一般に公開する予定である。

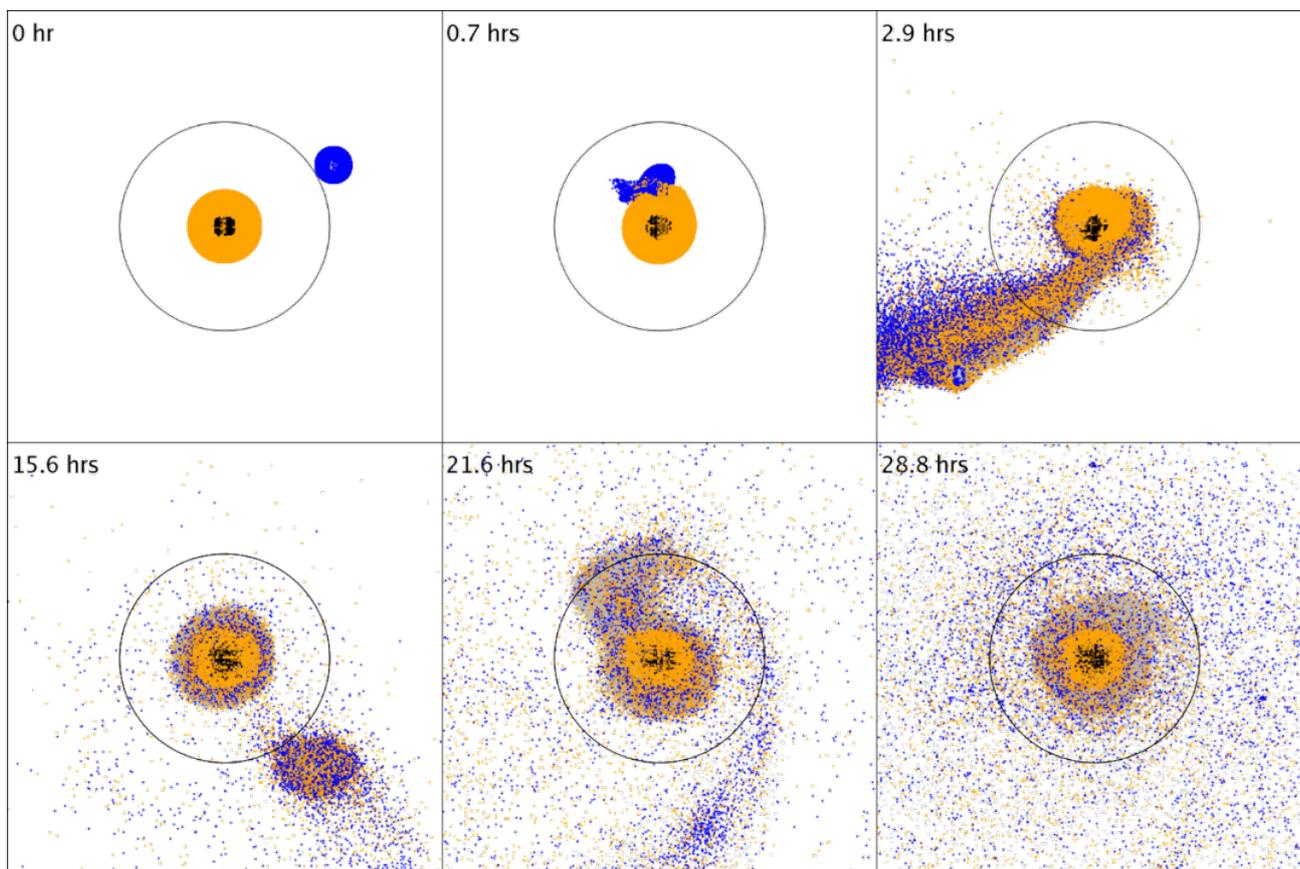


図：原始惑星系円盤の大局的非理想磁気流体シミュレーション。非理想磁気流体効果により、乱流が卓越した領域と乱流が抑制されて表面降着が起こる領域、そしてその中間的領域に分離した構造となっている。

(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した。令和4年度は、惑星系形成シミュレーションコード GPLUM を用いて、原始惑星系円盤中での微惑星集積の大域計算(太陽系外側)、高分解能計算(太陽系内側)を行った。また、惑星衝突シミュレーションコードを用いて自転入り巨大衝突の研究を行った。さらに高密度惑星環における密度波形成の大規模多体シミュレーションを行った。具体的には、現実的な合体条件を用いた高分解能惑星集積計算では、原始惑星の寡占的成長(質量分布の二極化)がより顕著化することが示された。また、原始惑星どうしの巨大

衝突結果の計算アルゴリズム、粒子解像度、状態方程式依存性を明らかにした。さらに惑星環においては、衛星によって励起される密度波が伝搬できない領域があることをシミュレーションによって確認した。

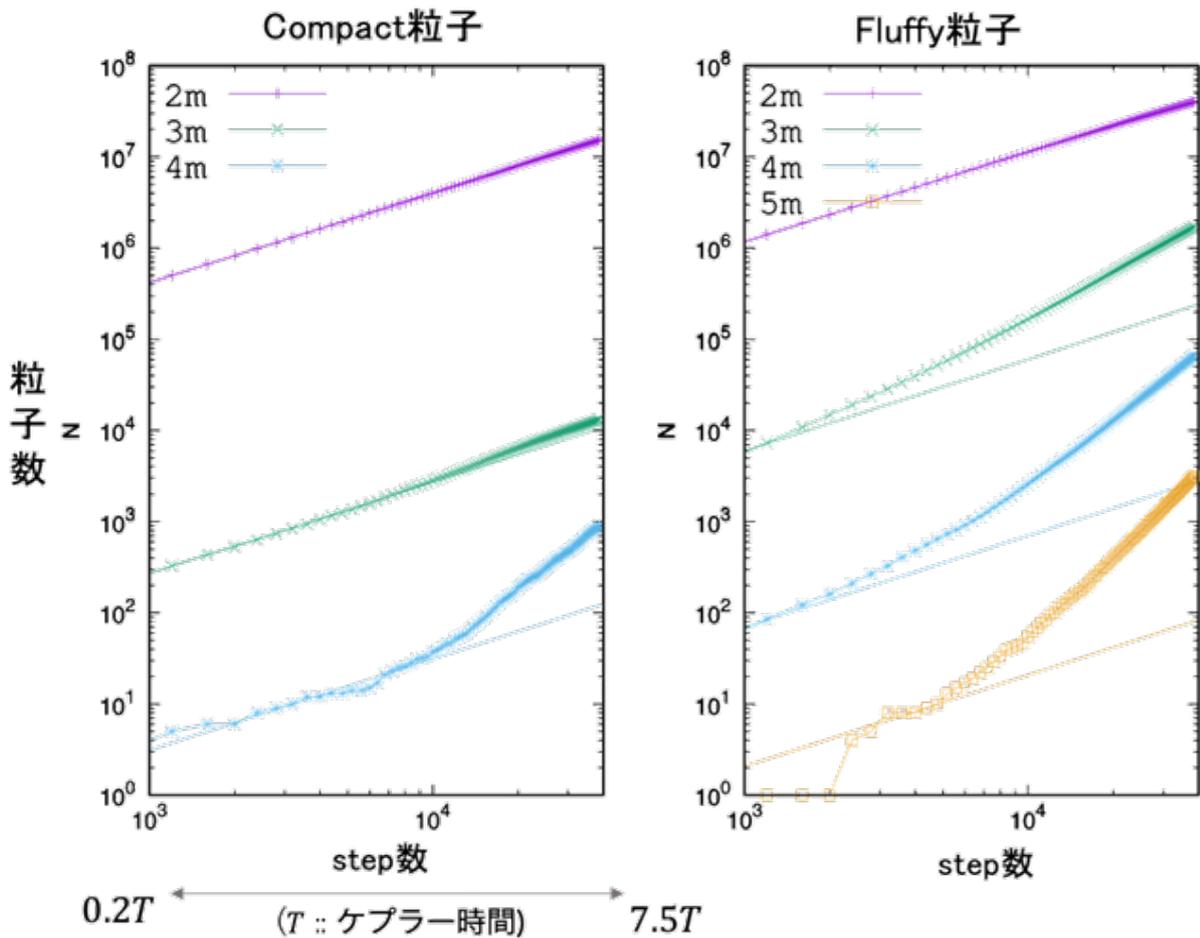


図：Density-Independent SPH 法による巨大衝突シミュレーション(左上から右下へ時間進化)。粒子数は 300 万で、状態方程式は M-ANEOS を使用している。火星サイズの原始惑星の地球への斜め衝突によって地球周りに月の母体となる円盤が形成されている。

(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(DNS)を活用して、原始惑星系円盤の乱流中のダスト成長のシナリオ構築のための大規模数値実験を実施した。令和4年度は「富岳」を用いた高レイノルズ数乱流の大規模数値計算でこれまでに構築した高レイノルズ数乱流中を運動する粒子の位置・速度データベースの解析を進めた。その結果、乱流による粒子のクラスタリングで渦度の小さい領域で限界付着速度のある粒子の衝突付着率が上がることが確認できた。また、開発を進めている乱流中の粒子の衝突付着成長シミュレーションコードを用いて大規模な数値実験を行い、信頼性の高い粒子の衝突付着成長のデータベースを構築した。具体的には、限界付着速度が 1m/s の Compact 粒子と限界付着速度が同一サイズ粒子同士では 6m/s、異なるサイズ粒子同士では 8m/s となる Fluffy 粒子の場合の数値積分を長時間 (7T:ここで $T = L/U$ 、 L は積分長、 U は乱流変動速度の大きさ) 行い、 $U = 110 \text{ m/s}$ の乱流中で衝突付着成長する粒子の位置と速度のデータベースを構築した。そして、構築した粒子データの解析により、強い乱流状態であっても、エンストロフィ

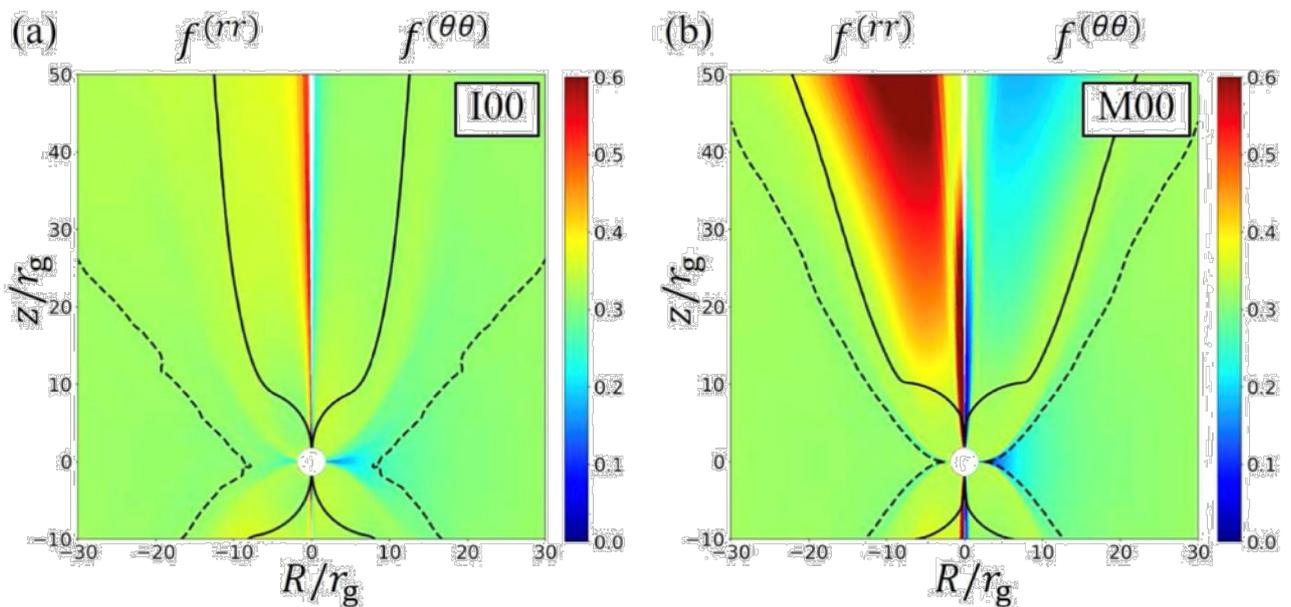
一が小さい領域で質量の大きな粒子が加速的に形成されうること示す結果を得た (図参照)。その他、一連の乱流 DNS データの解析により、レイノルズ数が高い乱流ほど極端に強い流体変形が起きる一方、流体変形の弱い領域の体積の割合が増加していく傾向にあることを確認した。また、乱流中の粒子の乱流拡散は粒子の存在する領域の平均エネルギー散逸率によって特徴づけられることを示す結果を得た。また、圧縮性乱流場の直接数値計算により、速度のソレノイダル成分のエネルギースペクトルおよびエネルギー散逸率はマッハ数や外力における圧縮成分比の値に依存せず、非圧縮性乱流の結果とよく一致すること、および、エネルギースペクトルおよびエネルギー散逸率の圧縮成分はマッハ数や外力における圧縮成分比の値に強く依存することを確認した。



図：乱流 DNS (格子点数 20483) を用いたダスト粒子の衝突付着成長シミュレーション (追跡粒子数 10243 個) における付着合体粒子の数の時間変化。2m, 3m, 4m, 5m は各々 2 粒子合体, 3 粒子合体, 4 粒子合体, 5 粒子合体の粒子数。実線は step 数に比例した増加を示す。合体粒子数が多いほど粒子数の成長率が高くなることを示している。また、乱流強度 110 m/s に対して限界付着速度が小さい Compact 粒子においても合体粒子数が増えると加速度的に粒子数の増える傾向があることがわかる。

(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)

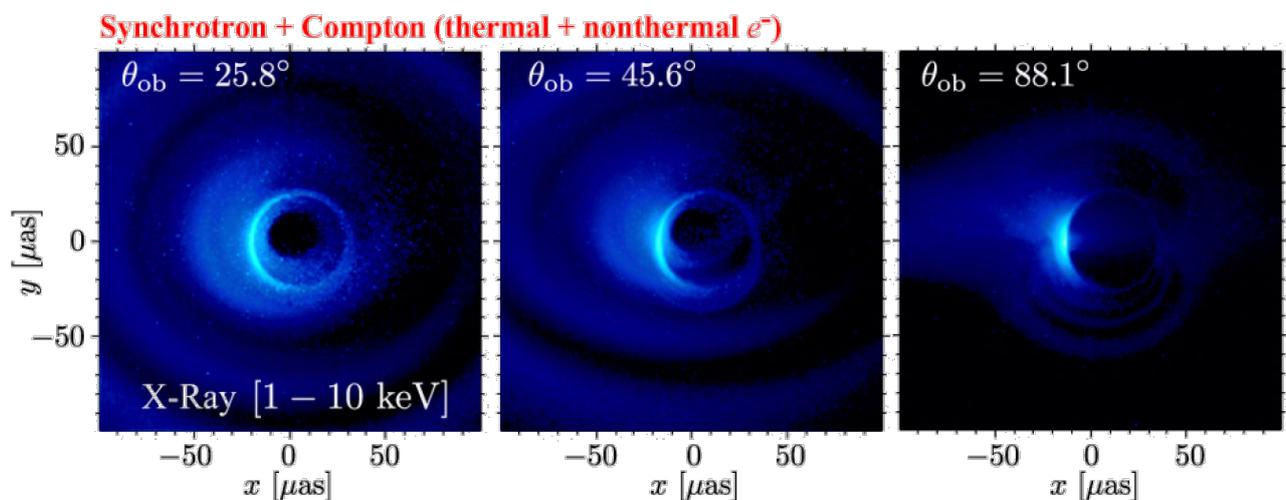
輻射場をボルツマン方程式に基づいて計算する新コード INAZUMA と、過去に行われていた近似的な計算法 (M1-closure 法) でそれぞれブラックホール降着円盤のシミュレーションを実施し、生成された輻射場の比較を行った。下図は輻射場の非等方性の指標であるエディントンテンソルである。回転軸付近を見ると、INAZUMA の結果 (a) は全体的に緑色であるのに対し、M1 法の結果 (b) は赤い領域が広がっている。これは、M1 法を用いると鉛直方向 (紙面では縦方向) に進む光子の割合が多いことを示している。これは近似法による人工的な光子の流れである。INAZUMA は正確に輻射場を解くため、輻射場が比較的等方 (緑) になっている。空間 3 次元の計算を行っても同様の結果が得られている。つまり、降着円盤周囲の輻射場を正確に解くためには、ボルツマン方程式に基づいて輻射場を計算する必要があることがわかった。また、近似法との誤差を定量的に評価することもできた。なお、INAZUMA の計算量は、近似法の約 10 倍であり、スーパーコンピュータ「富岳」でこそ実現できた結果である。



図：輻射場の非等方性の指標であるエディントンテンソルの空間分布。(a) INAZUMA の結果、(b) M1-closure 法の結果。原点にブラックホールが位置し、赤道面 ($z=0$ 面) の周囲に降着円盤がある。円盤上空、特に、回転軸 (z 軸) 付近で結果が異なる。

また、一般相対論的多波長輻射輸送計算コード”RAIKOU”の開発および改良を行った。非熱的電子によるシンクロトロン放射・吸収およびコンプトン・逆コンプトン散乱の効果を実装し、電波からガンマ線までの約 20 桁におよぶ周波数帯域の多波長輻射輸送計算が可能になった。シンクロトロン放射を種とする逆コンプトン散乱による X 線帯域でのブラックホールシャドウを世界で初めて示すことに成功した (下図参照)。X 線によるブラックホールシャドウも、見込み角が小さいほど円形に近く (左パネル)、見込み角が大きくなるに従って非対称になる (右パネル) という、電波帯と類似の特徴が現れることがわかった。なお、このコードの解説論文が *Astrophysical Journal* に受理

されている。また、歳差運動を伴うブラックホール降着流・噴出流の電波イメージおよび多波長スペクトルの時間変動計算を実施し、電波イメージにおいてブラックホール半径を光が横切る時間のおよそ1万倍の時間スケールでジェットが歳差することがわかった。この時間スケールは Event Horizon Telescope (EHT) でブラックホールシャドウが観測された M87 のジェットの歳差運動スケールと一致し、M87 でブラックホールスピンの駆動する歳差運動が起きている可能性を示した。さらに歳差を伴う降着流の多波長スペクトルの時間変動を世界で初めて計算し、X線の増光が起こることを示した。RAIKOU コードでは1モデルあたり約1兆個以上の光子を発生させて曲がった時空中の光子の軌道とコンプトン散乱を追跡する必要があり、散乱の際にも電子についてもエネルギーが約7桁もの広範囲に及び冪関数で数が減少する極少数の高エネルギー電子をサンプリングする必要がある。このように計算量は膨大であり、「富岳」での大規模計算が重要であった。

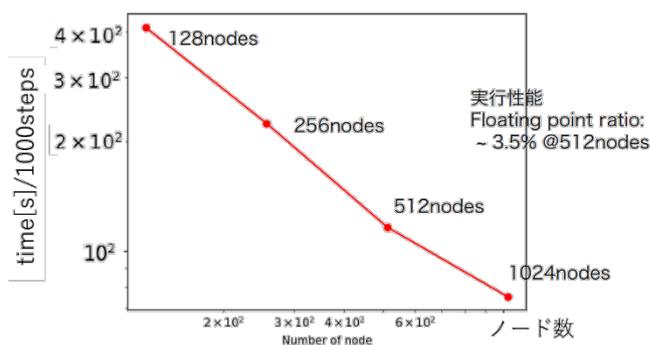


図：X線でのブラックホールシャドウ。見込み角は25.8度（左）、45.6度（中央）、88.1度（右）である。

(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非相対論的磁気流体力学計算：松元亮治(千葉大学)

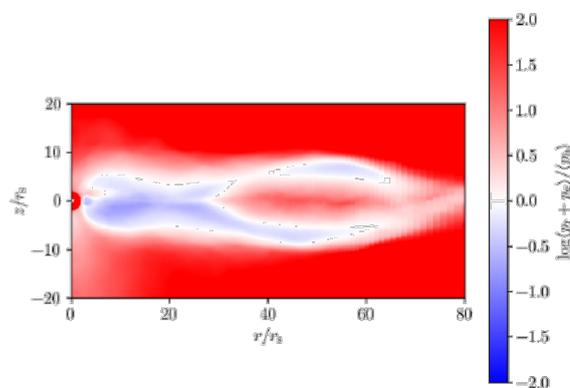
リーマンソルバとしてHLLD法、セル境界値の計算に空間5次精度のMP5法を採用した円筒座標系3次元磁気流体コードCANS+を用いてエディントン光度以下のブラックホール降着流の時間発展を計算した。一般相対論的效果は擬ニュートンポテンシャルで近似した。解像度依存性を調べるために、動径方向と鉛直方向のメッシュ数を $(N_r, N_z) = (774, 774)$ で固定し、方位角方向128と256グリッドのモデルの長時間計算を行った。令和3年度までに終了した計算時間内では、解像度に依存して、多数の渦状腕が形成されていたが、更に長時間の計算をしたところ、渦状腕が合体して1、2本になることがわかった。合体した渦状腕は、ガス密度・磁場強度が高く、高い質量降着と時間変動の起源になることがわかった。

降着率がエディントン降着率の10%以上の場合の計算を行うため、高精度磁気流体コード CANS+に、輻射輸送方程式の0次、1次モーメント式を解くモジュールを加えた輻射磁気流体コード CANS+R を「富岳」向きにチューニングし、3.5%（輻射を無視した場合は7.2%）の実行効率を得た。 $(N_r, N_\phi, N_z) = (768, 256, 768)$ 格子点を用いた場合のストロングスケーリングの並列性能を右図に示す。



図：輻射磁気流体コード CANS+R の並列性能。

輻射磁気流体コード CANS+R を用いて実施した増光時の活動銀河中心核降着流の低解像度（方位角方向32メッシュ）の輻射磁気流体シミュレーション結果を右図に示す。カラーは（ガス圧+輻射圧）/磁気圧をあらわす。ブラックホール近傍では硬X線を放射する高温降着流、遠方には輻射圧優勢で紫外線放射が卓越する領域、その中間に磁気圧優勢でコンプトン冷却された軟X線放射領域が形成された。この領域が、明るい活動銀河中心核で観測される軟X線放射の起源であると考えられる。「富岳」を用いて、より高解像度の計算を行うことが今後の課題である。



図：増光時の活動銀河中心核降着流の低解像度輻射磁気流体シミュレーション結果（五十嵐太一博士論文、計算は国立天文台のXC50を用いて実施）。カラーは（ガス圧+輻射圧）/磁気圧。長さの単位はシュバルツシルト半径。

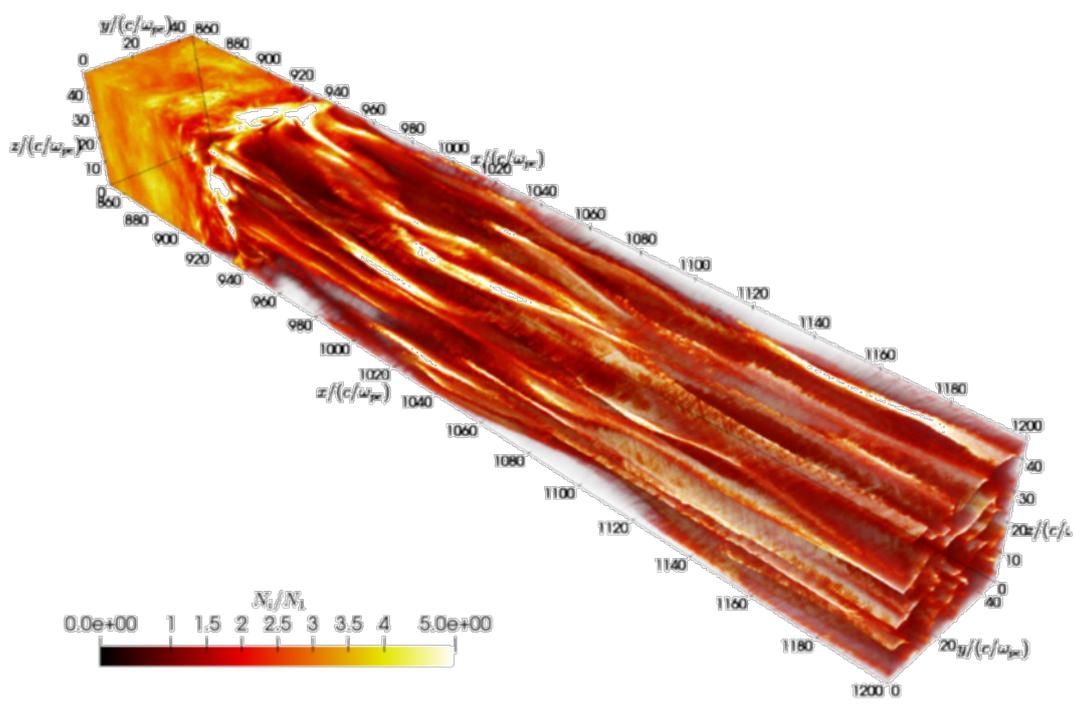
活動銀河中心核ジェット伝播については、電子温度とイオン温度の違いを考慮した3次元の2温度MHDシミュレーションを行った。テスト粒子の軌跡を同時に解くことで、非熱的な電子の伝播の状況も同時に調べている。その結果、多くの電子はジェット軸上の斜め衝撃波でエネルギーを散逸するが、一部の電子は観測可能領域まで伝搬できることを示した。

プラズマ粒子計算では、相対論的衝撃波の3次元計算を13000ノード利用して行った。上流の磁化強度を変えて2ケース計算を行い、衝撃波面におけるシンクロトロンメーザー不安定、電磁波放射強度とイオン・電子カップリングの関係を世界で初めて3次元で示すことができた。下図に令和3年度よりも計算労域を広げて実施した3次元PIC計算結果を示す。上流の磁気エネルギー強度が上流運動エネルギーの10-50%のケースでは、放射される電磁波強度が上流運動エネルギーの0.3%にも達することがわかり、また、直線偏光度、偏光角の時間変動を定量的に示すことができた。得られた電磁波特性は、宇宙の突発現象で知られる高速電波バーストの観測的特徴をよく説明することがわかった。相対論的衝撃波が高速電波バーストの起源であるという内容の論文を投稿している。

粒子の非均一化によるワークロードの崩れを動的に均衡化するためのコードを開発し、2次元高マッハ数衝撃波の計算に応用した。ロードバランサーを実装することで衝撃波の長時間発展を追うことが可能になった。斜め衝撃波では、電子の事前加速・加熱が起き、衝撃波面で鏡面反射すること

で、相対論的電子ビームが生成されることが明らかになった。反射電子はそのまま上流へと伝搬し、わずかにエネルギーを失いながら上流電子を加熱することが明らかになった。

また、異なる磁化強度の条件の下、ワイベル不安定の2次元プラズマシミュレーションを行った。その結果、電子のみが磁化した状態のワイベル不安定は、これまでとは全く違う飽和過程をたどることを発見した。特に、非線形段階において磁気リコネクションを誘発し、電子加熱に寄与することを明らかにした。超新星残骸衝撃波のパラメタはこの特定の磁化条件を満たすことから、銀河宇宙線電子加速を理解するうえで重要なプロセスであることを理論・シミュレーションで明らかにした。本成果も論文として投稿し、リバイス中である。



図：3次元 PIC シミュレーションによる相対論的衝撃波の密度構造

(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

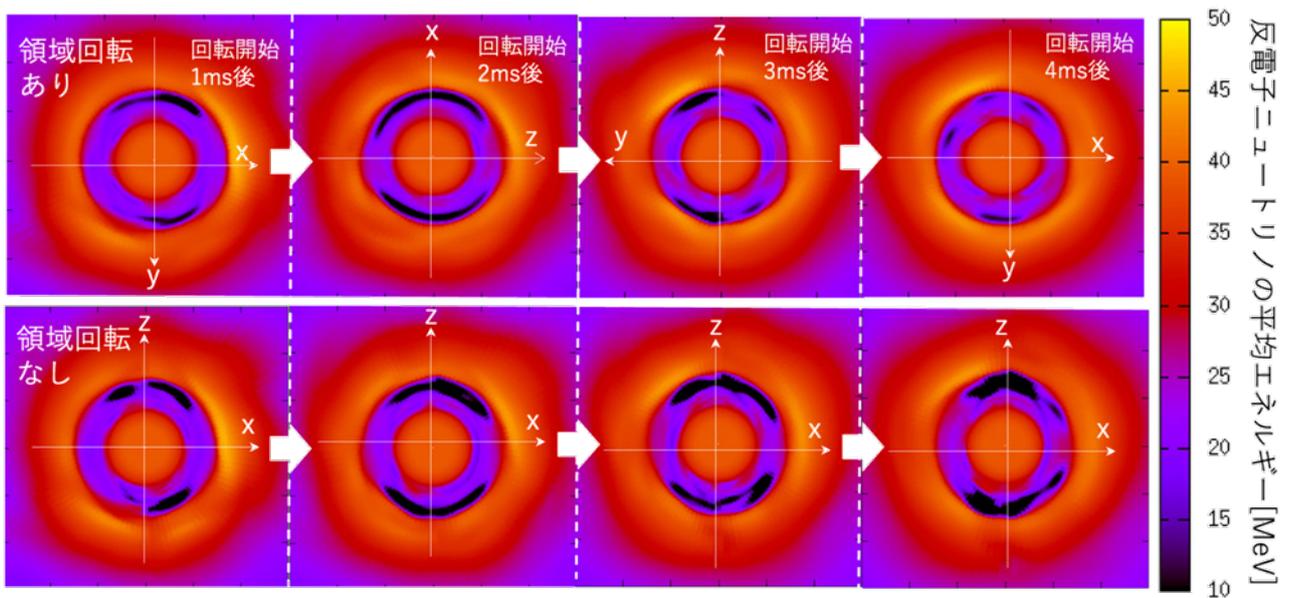
明：山田 章一(早稲田大学)、滝脇 知也(国立天文台)、住吉 光介(沼津工業高等専門学校)

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した。令和4年度ではボルツマン輻射流体コードを用いた第一原理計算で衝撃波の広がりを行い、計算領域を200 kmから5000 kmに拡張して60 ms程度まで時間発展計算を実行した。その過程で生じた数値不安定性の成長を回避するため、定期的に計算領域を回転させて球座標格子の軸にあたる領域をずらしながら計算する手法を新たに開発し、適用した。

計算領域ごと空間的に回転させるために、まず各物理量のx軸周りの90度回転に関する定式化を行った。スカラー量に関しては空間の位置の回転のみを考えれば良いが、ベクトル量に関してはベクトル成分の回転も必要になる。ニュートリノ分布関数については空間の回転と運動量空間の回転の両方を考慮する。いずれの場合でも、計算領域回転後に物理量を内挿することで、もともとの球

座標格子上的の点の値を決定する必要がある。内挿法については逆距離加重平均法を適用した。また、x 軸周りだけでなく z 軸周りの 90 度回転も取り入れて、極座標系の特異点に一致する z 軸付近の領域を y 軸方向にも x 軸方向にも移動できるように調整した。一連の各物理量の回転処理については、アウトプットデータを用いてポストプロセスで領域全体を回転させたデータを作成して計算を再開する方法をとることにした。

下図に新たに開発した手法のテスト計算結果を示す。上側 4 枚の図が 1 ms 経過するごとに領域を回転させた計算結果であり、図に描かれた白い軸が計算上の軸を表している。下側 4 枚の図は、比較のため計算領域を回転していないモデルで上側の図と同じ時刻に対応する結果を示している。数値不安定は反電子ニュートリノが $0(10^{-6})$ から $0(10^{-1})$ に急上昇する領域で見られる（下図の紫のドーナツ状の領域）。数値不安定が発生している領域では、星の内側に向かって放出される低エネルギーのニュートリノ成分が増加するのが特徴であり、平均エネルギーが局所的に下がる傾向がある（下図の黒い領域）。領域を回転させない 3 次元計算では数値不安定が発生している黒い領域が z 軸付近で広がっていくのに対し（下図下側）、空間領域を 1 ms ごとに回転させていくモデルでは黒い領域が徐々に消滅していく効果があることがわかった（下図上側）。



図：数値不安定を抑えるために領域全体を回転させる新しい手法のテスト計算結果。カラープロットは平均エネルギー [MeV] の空間分布。上側の図が領域を回転させたモデルで、白い軸が計算格子の軸の方向を示している。左から右へ 1ms 経過するごとに軸が変わっており、数値不安定が成長している黒い領域が時間の経過と共に減少していることがわかる。下側の図は、領域を回転させていないモデルであり、軸付近で数値不安定が成長している。

超新星爆発の長時間班は研究成果として 6 本の論文をまとめた。Matsumoto et al. (2022) は「富岳」で行っている計算の準備であり、磁場を使った超新星爆発メカニズムの研究の先駆的な論文である。この研究の高解像度版シミュレーションが「富岳」を用いて進められている。また Yoko et al. (2022) は高解像度の乱流の効果を理論的に解析し、現象論的な輸送係数に落とし込むもので、本

研究と関連が深い。また Mori et al. (2023) は 1 次元の長時間計算であり、長時間計算の文脈において準備的な研究となる。Takahashi et al. (2023) は超新星計算の初期条件に関する論文であり、「富岳」で用いられているコードと同様なコードを用いた解析も行われている。Mori et al. (2022) は本研究分野の新しい潮流である Axion を用いたシミュレーション研究である。Nagakura et al. (2023) はニュートリノ振動の計算をスモールスケールからラージスケールまで繋げるための処方箋を提案しており、本分野において重要な結果になることが期待される。

(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)



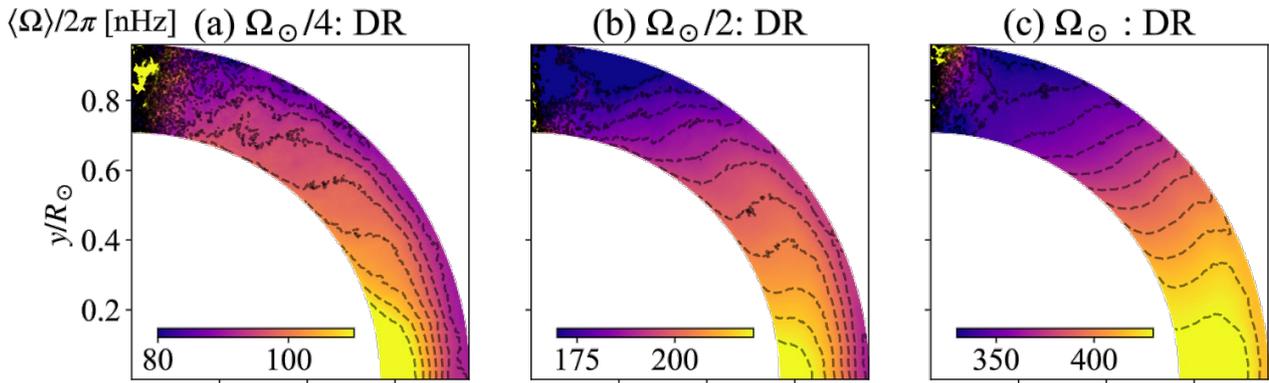
図：80 億点を費やした太陽対流層の様子。灰色で示されているのは、太陽表面の輻射強度、赤色は規格化されたエントロピーである。対流層の底に黒点の元となる磁場を設置してある。

本サブ課題では、1. 対流層の底を出発した磁束が太陽表面で黒点を生成する過程を包括した数値シミュレーション 2. これまでにない超高解像度での太陽よりも自転速度の遅い恒星の差動回転のシミュレーションを実施した。

太陽の表面に現れる黒点は、太陽の対流層の底で生成された磁場が起源だと考えられているが、対流層の底から表面までの磁束浮上を包括して取り扱ったシミュレーションは未だ達成されていなかった。対流層の底と太陽表面で時間・空間スケールが大きく異なること・対流層の底で磁束管が細いことがシミュレーションを難しくしている。

本研究では、これまでにない 80 億点を越える格子点を用いることでこの困難を克服した (左図)。現状では、「富岳」でしか達成できない高解像度計算である。その結果、長い過程においても磁場が散逸することなく、太陽表面に黒点を形成するよう再現することができた。また、太陽表面で黒点对が非対称性を持って出現することが知られている。浮上時にコリオリ力が働くことにより、磁場形状が非対称性を持ち、磁束管内部の流れ場が変わることが原因であることが明らかになった。

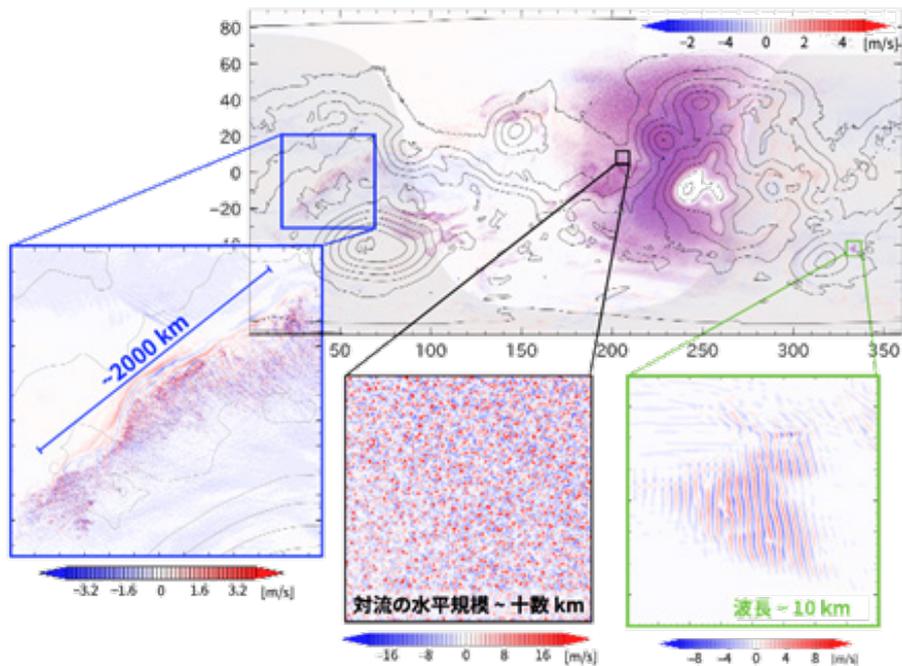
一方、恒星全球を解くシミュレーションによって、差動回転を決定する物理過程を調べた。これまでは、太陽よりも自転の遅い恒星においては、赤道よりも極が速い反太陽型差動回転が形成されると考えられていた。しかし、今回「富岳」を用いて 54 億点でシミュレーションをしたところいずれの場合も太陽型の差動回転を示すことがわかった (下図)。超高解像度を達成したことで、磁場が強くなり、磁場による角運動量輸送が活発化したことが原因と結論づけた。



図：世界最大のシミュレーションによって明らかになった恒星の差動回転の分布。角速度を示している。左から太陽自転の 1/4 倍、1/2 倍、太陽自転の場合の差動回転を示している。

(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)

火星大気については、地形を導入したうえで水平 900 m 格子の高解像度で全球計算を実施し、観測されている雲対流構造と同じ水平数 km スケールの鉛直対流を全球的に表現することに成功した (下図)。鉛直対流は地方時午後の領域で発達し、16 時頃に最大発達となった。鉛直対流が表現されたことに伴い、鉛直対流にともなう km スケールの循環が加わり、地表面風速は静穏時に比べて 2 倍から 3 倍程度の大きさになった。これは鉛直対流がダストの巻き上げに対して大きな役割を果たすことを示唆している。また夜の領域では、波面差し渡し数千 km に及ぶ重力波とその後面に現れる微細な鉛直流の構造や、局所的に卓越する波長 10 km 程度の重力波など様々な現象が見出された。

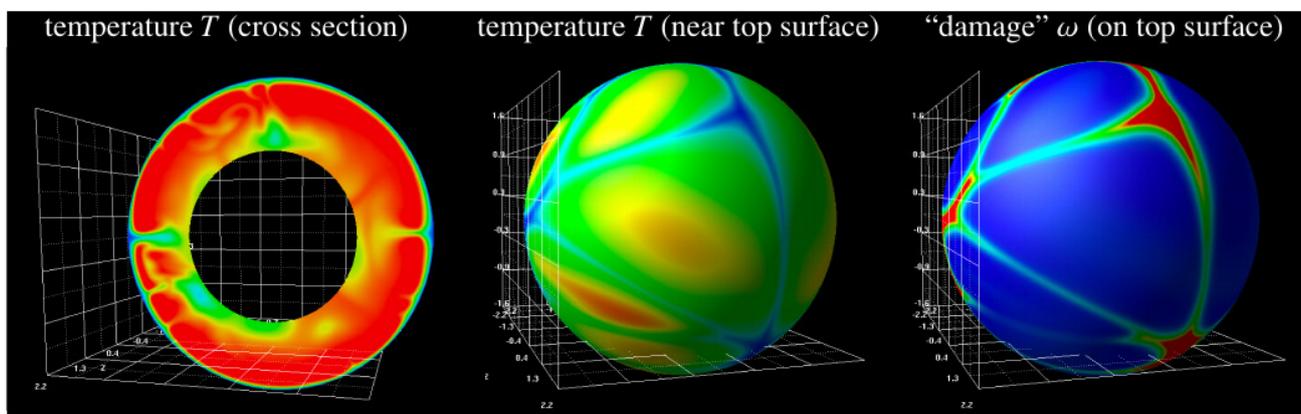


図：火星大気高解像度シミュレーションで表現された、モデル高度 15km の鉛直流分布 (色)。陰影は夜の領域、等値線はモデル地形の等高線を表す。昼間の午後の領域で無数の鉛直対流が見られるほか、夜の領域でも大小様々な構造が表現されている。

金星大気については、雲層内部の高度 55-60 km の層を静的不安定な場に緩和することで鉛直対流が生成発達する強制を加えて、水平 26 km 格子の解像度で全球計算を実施した。その結果、雲頂高度付近での太陽加熱がない夜側の領域で、鉛直対流が生じることを確認した。対流による鉛直流速の分布は夜面で均一ではなく、地方時 22 時から 2 時にかけては赤道付近で、2 時から 6 時にかけては緯度 20 度から 50 度付近で、強くなることが示唆された。しかし、金星大気循環の最大の特徴であるスーパーローテーションに関しては、その風速は著しく減速される結果となった。減速に至る力学的構造の理解には未だ至っていないが、その説明はスーパーローテーションの再現・維持に関して理解を深める契機となりうる結果である。

(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)

プレートテクトニクス(リソスフェアの破壊)を表現する 3 次元球殻マントル対流計算の端緒として固くて大きいリソスフェアと柔らかくて薄いプレート境界を同時に表現する 3 次元球殻マントル対流計算を実現した。モデル化の鍵の 1 つは、粘性率をその瞬間の温度(・圧力)だけでなく過去の応力履歴にも依存させたことにある。このシミュレーションにより、地表面に発達した低温の固いリソスフェアが直線状の細いプレート境界によって分断される様子が明瞭に再現できた(下図)。さらに、過去に形成されたプレート境界の「記憶」をモデル流体に持たせたことによって、地質学的な時間スケール(数億年~数十億年)にわたって安定的に運動する剛体プレートを 3 次元球面上で再現することに世界で初めて成功した。



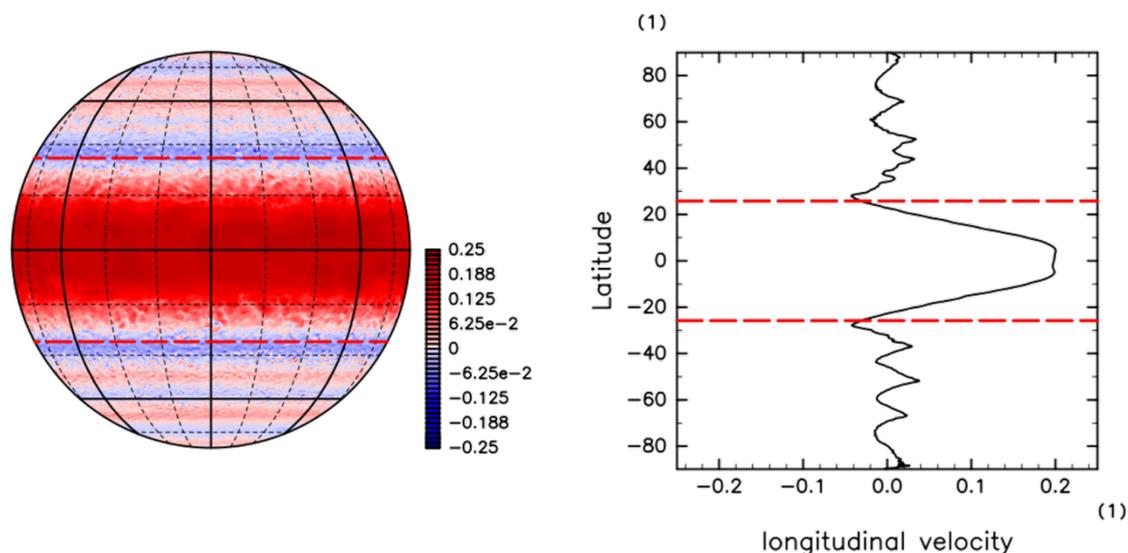
図：固体岩石のもつ特異なレオロジー(流動特性)を取り入れた 3 次元球殻熱対流シミュレーションの一例。温度分布の鉛直断面と表面での分布、および過去に受けた「ダメージ」の度合いの表面での分布を示している。「プレート」を模した低温の沈み込みが起こるとともに、沈み込みの位置で大きな「ダメージ」が発生している。

これと並行して、月を想定した小さなコアを持つ 2 次元半円環マントルにおけるマグマの生成・移動を伴う対流のシミュレーションを行った。岩石の部分融解によってマグマが生成されると天体全体の体積が膨張する効果および生成されたマグマが移動することによって熱や放射性元素が輸送される効果が、月の内部の長期的な進化に大きく影響することが示された。とりわけ、深部マント

ルで生成されたマグマの上昇とそれによる溶融領域の拡大が、初期の月の全球的な体積膨張とその後の収縮、およびマグマの噴出頻度の時間変化の双方とも調和的な月の進化の過程が再現できた。

(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年度に「富岳」へ導入し、令和3年度に「富岳」システム用のチューニングを行い計算着手に至った非弾性回転球殻ガス惑星大気モデルによる全球領域での高解像度長時間積分を推進し、最終目標としている 15000 惑星回転時間の半分程度まで時間積分を達成することができた（下図）。並行して先行研究との比較のため、経度方向に4回対称性を仮定した数値実験も行った。どちらの場合も時間積分開始から比較的短時間の 1000 惑星回転時間程度で、ガス惑星大気の特徴である複数の縞状ジェットと赤道の強い西風が惑星表面に生成されるが、その後に中高緯度の縞状ジェットが融合していく傾向が観察された。この傾向は、ガス惑星大気にみられる縞状構造が深部対流によって生成維持される、という当該分野の大きな仮説に否定的な結果をもたらす可能性があり、今後さらに時間積分を継続し、縞状ジェットが完全に消滅するか否かを慎重に吟味していく必要がある。



図：非弾性回転球殻ガス惑星大気モデルによる全球領域での高解像度長時間積分による約 8,000 惑星回転時間後の惑星表面での東西風と平均帯状風の緯度分布

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」の本課題「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」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（4/5, 6/30, 9/12, 11/22, 1/13, 3/17）などの会議を開催するとともに、サブ課題代表を通じて情報収集、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」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1回開催（6/28）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、定期的な記事配信などウェブ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。

<セミナー、研究会等>

セミナーや研究会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。本年度も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は少なく、オンラインによる開催も多かった。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と同じく開催された。セミナーと研究会等は本年度 5 件が実施され総参加者は計 283 名であった。

●日本地球惑星科学連合 2022 年大会

セッション M-GI33 「計算科学が拓く宇宙の構造形成・進化から惑星表層環境変動まで」

日時：令和 4 年 5 月 23 日

場所：ハイブリッド（現地＋オンライン）開催

スコープ：惑星形成・進化・表層環境の多様性の解明と理解に、また宇宙における構造形成、進化の理解に計算機シミュレーションは大きな役割を果たしてきた。しかしながら、近年においては、計算機の能力の進歩は続いているにもかかわらず、そのことが必ずしも直接にシミュレーションでできることの改善につながっていない面もある。90 年代初頭に比べて計算機は 6 桁性能向上しているが、我々が行っているシミュレーションは量的にも質的にもそれに見合ったものにはなっていないように見え

る。本企画セッションでは、これら計算能力の向上をいかにして惑星科学の量的・質的な発展につなげるか、ということテーマに、惑星形成・進化、惑星内部と表層の構造と進化、それらの多様性について、「富岳」成果創出加速プログラム「計算宇宙惑星」での成果も例に、理論、観測、および数値計算手法についての発表を募り、計算惑星科学の将来計画についての総合的な議論の場とする。惑星科学に限らず、地球科学・宇宙科学のあらゆる分野からの分野横断的な参加を期待する。

●第15回 HPC-Phys 勉強会

参加者：26名

日時：令和4年7月1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15回目。銀河形成のシミュレーションと「富岳」のコデザインに関する勉強会を開いた。

●第16回 HPC-Phys 勉強会

参加者：31名

日時：令和4年9月16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16回目。スパコンのハードウェアの今後の動向についての解説と2026年-2031年に行いたい研究課題と必要な計算資源についての紹介が行われた。

●「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：161名

日時：令和4年12月12日,13日

場所：神戸大学統合研究拠点コンベンションホール及びオンライン開催

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」

共催：高エネルギー加速器研究機構・素粒子原子核研究所・理論センター、神戸大学惑星科学研究センター

後援：一般財団法人高度情報科学技術研究機構

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17回 HPC-Phys 勉強会

参加者：33名

日時：令和4年12月14日

場所：オンライン・オンサイト（理化学研究所計算科学研究センター（神戸））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17回目。プロファイラーに関する講演を行った。

●第18回 HPC-Phys 勉強会

参加者：32名

日時：令和5年2月8日

場所：オンライン・オンサイト（神戸大学理学研究科附属惑星科学研究センター）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）、神戸大学理学研究科附属惑星科学研究センター

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18回目。ベンダー（インテル社）によるプロファイラの紹介を行った。

<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、令和3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

・天の川銀河中心のブラックホールの撮影に初めて成功

発表日：令和4年5月12日情報解禁

発表主宰者：国立天文台、東京工業大学、計算基礎科学連携拠点、工学院大学、情報・システム研究機構統計数理研究所、総合研究大学院大学、東京大学宇宙線研究所、東京大学大学院理学系研究科、新潟大学

メディア掲載：NHK ニュース (5/13) , 時事通信 (5/12) , 沖縄タイムス (5/12) , nippon.com (5/13) , 朝日新聞デジタル (5/12) , FNN プライムオンライン (5/13) , 新潟日報 (5/12) , 日刊スポーツ (5/12)

・新しい高精度シミュレーションが明らかにした星団形成の現場

発表日：令和4年6月8日情報解禁

発表主宰者：東京大学大学院理学系研究科、神戸大学、国立天文台

・貴金属に富んだ星々は100億歳

発表日：令和4年11月14日

発表主宰者：東北大学大学院理学研究科、国立天文台、計算基礎科学連携拠点、神戸大学

メディア掲載：マイナビニュース (11/17) , NEWS SALT(11/25), sorae(12/1)

●ウェブマガジン「月刊 JICFuS」「月刊 JICFuS ムービー」製作

若手研究者を中心にインタビュー記事「月刊 JICFuS」を掲載。本年度はオンラインによる取材1件と対面による取材1件による紹介記事2本(第48号、第50号)の制作を行った。さらに動画による紹介「月刊 JICFuS ムービー」を、理化学研究所・神戸大学協力の撮影による1本(51号)の制作を行った。

【月刊 JICFuS】

・第48号「将来、宇宙誕生の謎に迫るため 今、銀河における分子雲形成過程をつぶさに追う」(令和4年12月14日)京都大学 杉村和幸 特定助教

・第50号「星の形成の謎にシミュレーションで迫る」(令和5年2月7日)千葉大学総合情報センター 青山尚平 特任研究員

【月刊 JICFuS ムービー】

・第51号「火星の大気シミュレーションと「富岳」」(令和4年12月5日)神戸大学 惑星科学研究センター 樫村博基 講師

●リーフレット

各種イベントで配布を予定し、A3判変形四つ折り。2か国語(日・英)で製作。本年度も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、オンラインによる公開を行っている。

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 准教授
(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	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 教授
(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	千葉県稲毛区弥生町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 天文シミュレーションプロジェクト 准教授
	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 国立大学法人東海国立大学機構 名古屋大学	草野 完也 宇宙地球環境研究所 所長・教授
	千葉県稲毛区弥生町1-33 国立大学法人千葉大学	堀田 英之 大学院理学研究院 准教授
(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)

論文

1. Fujii, M. S., Hattori, K., Wang, L., Hirai, Y., Kumamoto, J., Shimajiri, Y., Saitoh, T. R., “SIRIUS Project-V. Formation of off-centre ionized bubbles associated with Orion Nebula Cluster”, 2022, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 514, 1, pp.43-54, DOI:10.1093/mnras/stac808
2. Fujii, M. S., Wang, L., Hirai, Y., Shimajiri, Y., Kumamoto, J., Saitoh, T., “SIRIUS Project. IV. The formation history of the Orion Nebula Cluster driven by clump mergers”, 2022, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 514, 2, pp.2513-2526, DOI:10.1093/mnras/stac1496
3. Wang, L., Tanikawa, A., Fujii, M. S., “Gravitational wave of intermediate-mass black holes in Population III star clusters”, 2022, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, Volume 515, Issue 4, pp.5106-5120, DOI:10.1093/mnras/stac2043
4. Wang, L., Tanikawa, A., Fujii, M. S., “The impact of primordial binary on the dynamical evolution of intermediate massive star clusters”, 2022, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 509, 4, pp.4713-4722, DOI:10.1093/mnras/stab3255
5. Fujii, M. S., Wang, L., Saitoh, T. R., Hirai, Y., Shimajiri, Y., “Formation process of the Orion Nebula Cluster”, 2023, the International Astronomical Union, 362, pp.258-261, DOI:10.1017/s1743921322001508

学会発表

1. Tanikawa, A., “Population III binary black holes: filling the pair instability mass gap”, AAPPs-DPP2022 6th Asia Pacific Conference on Plasma Physics, Online, 2022/10(invited)
2. Fujii, M. S., “Star-by-star simulations of star-cluster formation”, The 9th East Asian Numerical Astrophysics Meeting (EANAM9), Okinawa, Japan, 2022/9(invited)
3. Tanikawa, A., “Population III binary black holes and pair instability supernovae”, The 15th Asia Pacific Physics Conference, Online, 2022/8(invited)
4. 藤井通子, “星一つ一つを再現した星団形成シミュレーション”, 第35回理論懇シンポジウム「理論天文学・宇宙物理学の広がり：さらなる発展に向けて」, 福島市市民講座, コラッセふくしま, 2022/12(招待講演)
5. 谷川衝, “連星ブラックホール形成過程の理論研究”, 初代星・初代銀河研究会 2022, 徳島大学, 2022/11(招待講演)

6. 藤井通子, “「富岳」を用いた球状星団シミュレーション”, 「「富岳」で加速する素粒子・原子核・宇宙・惑星」シンポジウム, 神戸大学統合研究拠点コンベンションホール及びオンライン, 2022/12

出版

1. 斎藤貴之, 藤井通子, 「科学」 2022年6月号 計算で作る宇宙, 銀河形成、星・星団形成ページ岩波書店, ASIN : B0B1F39VRB, <https://www.iwanami.co.jp/book/b607396.html>

プレスリリース

1. 藤井通子, “新しい高精度シミュレーションが明らかにした星団形成の現場”, 2022/6/8, <https://www.s.u-tokyo.ac.jp/ja/press/2022/7926/>

(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) 論文

1. Gkogkou, A., Ishiyama, T., et al., “CONCERTO: Simulating the CO, [CII], and [CI] line emission of galaxies in a ~ 117 square degree field and the impact of field-to-field variance”, *Astronomy & Astrophysics*, 670, id. A16, 22pp, 2023
2. Aung, H., Nagai, D., Klypin, A., Behroozi, P., Abdullah, M. H., Ishiyama, T., Prada, F., Pérez, E., López Cacheiro, J., Ruedas, J., “The Uchuu-UniverseMachine dataset: Galaxies in and around Clusters”, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 519, pp. 1648–1656, 2023
3. Moliné, Á., Sánchez-Conde, M. A., Aguirre-Santaella, A., Ishiyama, T., Prada, F., Cora, S. A., Croton, D., Jullo, E., Metcalf, R. B., Oogi, T., Ruedas, J., “ Λ CDM halo substructure properties revealed with high-resolution and large-volume cosmological simulations”, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 518, pp. 157–173, 2023
4. Hiroshima, N., Ando, S., Ishiyama, T., “Semi-analytical frameworks for subhaloes from the smallest to the largest scale”, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 517, pp. 2728–2737, 2022

学会発表

1. Shohei Aoyama, Shohei Saga, Kentaro Nagamine, Tomoaki Ishiyama, “Cosmological galaxy formation simulation with the impact of primordial magnetic fields”, The 9th East Asian Numerical Astrophysics Meeting, 2022/9
2. Tomoaki Ishiyama, Uchuu collaboration, “The Uchuu simulations: Data Release 1 and 2”, The 9th East Asian Numerical Astrophysics Meeting, 2022/9
3. Tomoyuki Tokuue, Tomoaki Ishiyama, “Optimization of the tree algorithm on the supercomputer Fugaku”, The 9th East Asian Numerical Astrophysics Meeting, 2022/9

4. 青山尚平, 嵯峨承平, 長峯健太郎, 石山智明 “原始磁場を考慮した宇宙論的銀河形成シミュレーション”, 第11回観測的宇宙論ワークショップ, 2022/12
5. 石山智明, Uchuu collaboration, “The second data release (DR2) of the Uchuu simulations: mock catalogs”, 第11回観測的宇宙論ワークショップ, 2022/12
6. 青山尚平, 嵯峨承平, 長峯健太郎, 石山智明 “原始磁場を考慮した宇宙論的銀河形成シミュレーション”, 第35回理論懇シンポジウム, 2022/12
7. 石山智明, Uchuu collaboration, “The second data release (DR2) of the Uchuu simulations: 銀河カタログ”, 日本天文学会 2023 年春季年会, 2023/3

(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) 学会発表

1. 田中賢, 吉川耕司, 吉田直紀, 齋藤俊, “宇宙論的 Vlasov シミュレーションで探るニュートリノの性質: N-body シミュレーションとの比較”, 日本天文学会 2022 年秋季年会, 2022 年 9 月 15 日 (新潟大学)
2. 吉川耕司, “宇宙論的構造形成シミュレーションの SIMD 命令による高速化”, 「富岳」成果創出加速プログラム研究交流会「富岳百景」, 2023 年 3 月 7 日 (オンライン)

(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: 齋藤 貴之(神戸大学)、岡本 崇(北海道大学) 論文 (査読あり)

1. Fujii, M. S., Hattori, K., Wang, L., Hirai, Y., Kumamoto, J., Shimajiri, Y., Saitoh, T. R., “SIRIUS Project - V. Formation of off-centre ionized bubbles associated with Orion Nebula Cluster”, 2022, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 514, 1, pp 43-54, DOI:10.1093/mnras/stac808
2. Fujii, M. S., Wang, L., Hirai, Y., Shimajiri, Y., Kumamoto, J., Saitoh, T., “SIRIUS Project. IV. The formation history of the Orion Nebula Cluster driven by clump mergers”, 2022, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 514, 2, pp. 2513-2526, 10.1093/mnras/stac1496
3. Asano, T., Fujii, M. S., Baba, J., Bédorf, J., Sellentin, Ele., Portegies, Z, Simon., “Impact of bar resonances in the velocity-space distribution of the solar neighbourhood stars in a self-consistent N-body Galactic disc simulation”, 2022, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 514, 1, pp.460-469, 10.1093/mnras/stac1379
4. Hirai, Y., C Beers, T.C., Chiba, M., Aoki, W., Shank, D., Saitoh, T.R., Okamoto, T., Makino, J., “Origin of highly r-process-enhanced stars in a cosmological zoom-in simulation of a Milky Way-like galaxy”, 2022, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 517, 4, pp 4856-4874, DOI:10.1093/mnras/stac2489

論文 (査読なし)

5. Fujii, M. S., Wang, L., Saitoh, T. R., Hirai, Y., Shimajiri, Y., Formation process of the Orion Nebula Cluster, 2023, the International Astronomical Union, 362, pp. 258-261, DOI: 10.1017/S1743921322001508
6. Hirashima, K., Moriwaki, K., Fujii, M. S., Hirai, Y., Saitoh, T.R., Makino, J., Predicting the Expansion of Supernova Shells Using Deep Learning toward Highly Resolved Galaxy Simulations, 2023, the International Astronomical Union, Volume 362, pp. 209-214, DOI: 10.1017/S1743921322001739
7. Hirashima, K., Moriwaki, K., Fujii, M. S., Hirai, Y., Saitoh, T.R., Makino, J., Predicting the Expansion of Supernova Shells for High-Resolution Galaxy Simulations Using Deep Learning, 2022, Journal of Physics: Conference Series, Volume 2207, Issue 1, id.012050, 6 pp., DOI: 10.1088/1742-6596/2207/1/012050

出版

1. 斎藤貴之, 藤井通子, 「科学」 2022年6月号 計算で作る宇宙, 銀河形成、星・星団形成ページ岩波書店, ASIN : B0B1F39VRB, <https://www.iwanami.co.jp/book/b607396.html>

学会発表

1. Hirai, Y., Beers, T.C., Chiba, M., Aoki, W., Shank, D., Saitoh, T.R., Okamoto, T., Makino, J., “Origin of highly r-process-enhanced stars in simulations of Milky Way-like galaxies”, 2022 JINA-CEE Frontiers in Nuclear Astrophysics, 2022/5
2. 斎藤貴之, 岩澤全規, 平居悠, 細野七月, 野村昴太郎, 坪内美幸, 牧野淳一郎, 岡本崇, 藤井通子, 平島敬也, “富岳向け銀河形成シミュレーションコード ASURA-FDPS の現状”, JpGU 2022, 2022/5
3. Hirai, Y., Beers, T.C., Chiba, M., Aoki, W., Shank, D., Saitoh, T. R., Okamoto, T., Makino, J., “Origin of highly r-process-enhanced stars in cosmological zoom-in simulations of Milky Way-like galaxies”, The 240th Meeting of the American Astronomical Society, 2022/6
4. Hirai, Y., Numerical models of the r-process, RR Lyrae Stars, “Galactic Structure and Chemistry”, Pasadena, USA, 2022/6(invited)
5. 斎藤貴之, “銀河形成 シミュレーション”, 第15回 High Performance Computing Physics (HPC-Phys) 勉強会, 2022/7(招待講演)
6. 平居悠, “Origin of r-process elements and the Milky Way formation”, 宇核連—RCNP 研究会「宇宙核物理の展開」, 2022/7(招待講演)
7. 斎藤貴之, “銀河の形成と進化”, 神戸大学理学部 サイエンスセミナー 2022, 2022/7
8. 藤井通子, “スーパーコンピュータが描き出すオリオン大星雲ができるまで”, 「とらのもん宇宙塾」港区立みなと科学館プラネタリウムホール, 2022/10

9. Yutaka Hirai, Y., Michiko Fujii, M.S., Saitoh, T.R., Long Wang, “SIRIUS Project: Star-by-Star Simulations of Star Clusters and Galaxies”, The 241st Meeting of the American Astronomical Society, 2023/1
10. 平居悠, “Formation of highly r-process-enhanced stars in a cosmological zoom-in simulation of a Milky Way-like galaxy”, 2022年度国立天文台 CfCA ユーザーズミーティング, 2023/1

プレスリリース

1. 藤井通子, “新しい高精度シミュレーションが明らかにした星団形成の現場”, 2022/6/8, <https://www.s.u-tokyo.ac.jp/ja/press/2022/7926/>
2. 平居悠, “貴金属に富んだ星々は100億歳 世界最高解像度天の川銀河シミュレーションに成功”, 2022/11/14, <https://www.sci.tohoku.ac.jp/news/20221114-12355.html>

- (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)

論文

1. Takasao, S., Tomida, K., Iwasaki, K., Suzuki, T. K., “Three-dimensional Simulations of Magnetospheric Accretion in a T Tauri Star: Accretion and Wind Structures Just Around the Star”, The Astrophysical Journal, 2022.12, Vol.941 (1):73

学会発表

1. Kazunari Iwasaki, Kengo Tomida, Shinsuke Takasao, Satoshi Okuzumi, Takeru K. Suzuki, “Global Non-ideal MHD Simulations of Protoplanetary Disks”, IRCC-AFP Meeting 2022, 国立天文台三鷹キャンパス, 2022/10/24-28
2. 岩崎一成、富田賢吾、高棹真介、鈴木建、 “非理想磁気流体シミュレーションによる原始惑星系円盤大局構造の解明” 「「富岳」で加速する素粒子・原子核・宇宙・惑星」シンポジウム, 神戸大学統合研究拠点コンベンションホール, 2022/12/12-13

- (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計算：岩崎 一成 (国立天文台)

論文

1. Kazunari Iwasaki and Kengo Tomida, “Universal Properties of Dense Clumps in Magnetized Molecular Clouds Formed through Shock Compression of Two-phase Atomic Gases”, The Astrophysics Journal, Volume 934, Issue 2, article id. 174

学会発表

1. Kazunari Iwasaki and Kengo Tomida, “Universal Properties of Dense Clumps in Magnetized Molecular Clouds”, Protostars and Planets VII, Kyoto International Conference Center, Japan, 2023/4/10-15

(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）

学会発表

1. 石城陽太，小久保英一郎，藤本正樹，牧野淳一郎，“N 体計算コード GPLUM の開発：高解像度微惑星集積計算による展望”，日本地球惑星科学連合大会，千葉，2022/5
2. 細野七月，小久保英一郎，“原始地球の自転が巨大衝突の数値計算に与える影響”，日本地球惑星科学連合大会，千葉，2022/5
3. 細野七月，小久保英一郎，“巨大衝突の数値計算の手法及び状態方程式への依存性”，日本惑星科学会秋季講演会，茨城，2022/9

(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）

学会発表

1. 石原卓，森中宏樹，“On the role of high Reynolds number turbulence in the dust coagulation process in a protoplanetary disk”，日本地球惑星科学連合 日本地球惑星科学連合 2022 年大会，2022/5/23
2. 河原昌平，梅村雅之，石原卓，“原始惑星系円盤における乱流とダスト成長”，日本天文学会 2022 年秋季年会，2022/9/13
3. 宮本 理史，石原 卓，“乱流中の速度勾配テンソルのレイノルズ数依存性についての DNS データ解析”，日本流体力学会 年会 2022，2022/9/28
4. 浦 覚斗，石原 卓，“高レイノルズ数乱流中の 2 粒子拡散 の Lagrange 速度相関のデータ解析”，日本流体力学会 年会 2022，2022/9/28
5. 元塚 博貴，櫻井 幹記，石原 卓，“一様等方性圧縮等温乱流の直接数値シミュレーション”，日本流体力学会 年会 2022，2022/9/28
6. 徳増晃平，浦 覚斗，石原 卓，“高レイノルズ数乱流中の慣性粒子の集中と拡散”，日本流体力学会 中四国・九州支部 第 30 回講演会，2022/11/26
7. 河原昌平，梅村雅之，石原卓，“原始惑星系円盤における乱流とダスト成長”，天体形成研究会 2022，2022/11/5
8. 河原昌平，梅村雅之，石原卓，“原始惑星系円盤における乱流中のダスト成長”，日本天文学会 2023 年春季年会，2023/3/13

(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. Asahina, Y., Ohsuga, K., “General Relativistic Radiation Magnetohydrodynamics Simulations of Black Hole Accretion Disks: Comparison of Methods Based on Variable Eddington Tensor and Based on M1 Closure”, *The Astrophysical Journal*, 2022.4, Vol.929 (1):93
2. Botella, I., Mineshige, S., Kitaki, T., Ohsuga, K., Kawashima, T., “Structure of the super-Eddington outflow and its impact on the cosmological scale”, *Publications of the Astronomical Society of Japan*, 2022.4, Vol.74 (2), p.384-397
3. Kazunori Akiyama et al. (388 authors incl. Tomohisa Kawashima), “First Sagittarius A* Event Horizon Telescope Results. I. The Shadow of the Supermassive Black Hole in the Center of the Milky Way”, *The Astrophysical Journal Letters*, 2022.5, 930:L12
4. Kazunori Akiyama et al. (336 authors incl. Tomohisa Kawashima), “First Sagittarius A* Event Horizon Telescope Results. II. EHT and Multiwavelength Observations, Data Processing, and Calibration”, *The Astrophysical Journal Letters*, 2022.5, 930:L13
5. Kazunori Akiyama et al. (270 authors incl. Tomohisa Kawashima), “First Sagittarius A* Event Horizon Telescope Results. III. Imaging of the Galactic Center Supermassive Black Hole”, *The Astrophysical Journal Letters*, 2022.5, 930:L14
6. Kazunori Akiyama et al. (269 authors incl. Tomohisa Kawashima), “First Sagittarius A* Event Horizon Telescope Results. IV. Variability, Morphology, and Black Hole Mass”, *The Astrophysical Journal Letters*, 2022.5, 930:L15
7. Kazunori Akiyama et al. (274 authors incl. Tomohisa Kawashima), “First Sagittarius A* Event Horizon Telescope Results. V. Testing Astrophysical Models of the Galactic Center Black Hole”, *The Astrophysical Journal Letters*, 2022.5, 930:L16
8. Kazunori Akiyama et al. (270 authors incl. Tomohisa Kawashima), “First Sagittarius A* Event Horizon Telescope Results. VI. Testing the Black Hole Metric”, *The Astrophysical Journal Letters*, 2022.5, 930:L17
9. Tsunetoe, Y., Mineshige, S., Kawashima, T., Ohsuga, K., Akiyama, K., Takahashi, H. R., “Investigating the Disk-Jet Structure in M87 through Flux Separation in the Linear and Circular Polarization Images”, *The Astrophysical Journal*, 2022.5, Vol.931 (1):25
10. Avery E. Broderick et al. (267 authors incl. Tomohisa Kawashima), “Characterizing and Mitigating Intraday Variability: Reconstructing Source Structure in Accreting Black Holes with mm-VLBI”, *The Astrophysical Journal*, 2022.5, Vol.930 (2):L21
11. Boris Georgiev et al. (269 authors incl. Tomohisa Kawashima), “A Universal Power-law Prescription for Variability from Synthetic Images of Black Hole Accretion Flows”, *The Astrophysical Journal*, 2022.5, Vol.930 (2):L20
12. Utsumi, A., Ohsuga, K., Takahashi, H. R., Asahina, Y., “Component of Energy Flow from Supercritical Accretion Disks Around Rotating Stellar Mass Black Holes”, *The Astrophysical Journal*, 2022.8, Vol.935 (1):26

13. Yoshioka, S., Mineshige, S., Ohsuga, K., Kawashima, T., Kitaki, T., “Large-scale outflow structure and radiation properties of super-Eddington flow: Dependence on the accretion rates”, Publications of the Astronomical Society of Japan, 2022.12, Vol.74 (6), p.1378-1395
14. Takahashi, M. M., Ohsuga, K., Takahashi, R., Ogawa, T., Umemura, M., Asahina, Y., “3D photon conserving code for time-dependent general relativistic radiative transfer: CARTOON”, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 2022.12, Vol.517 (3), p.3711-3722
15. Svetlana Jorstad et al. (270 authors incl. Tomohisa Kawashima), “The Event Horizon Telescope Image of the Quasar NRA0 530”, 2023.2, Vol.943 (2):170

学会発表

1. Y. Tsunetoe, S. Mineshige, T. Kawashima, K. Ohsuga, K. Akiyama, H. R. Takahashi, “The Jet-Disk Structure in M87: Flux Separation in the Linear and Circular Polarization Image”, Assembling the ngEHT, Granada, 2022/6
2. Y. Tsunetoe, S. Mineshige, T. Kawashima, K. Ohsuga, K. Akiyama, H. R. Takahashi, “Investigation of the Jet-Disk Structure in M87: Flux Separation in the Linear and Circular Polarization Images”, European Astronomical Society Annual Meeting 2022, Valencia, 2022/6
3. T. Igarashi, Y. Kato, H. R. Takahashi, K. Ohsuga, Y. Matsumoto, R. Matsumoto, “Radiation Magnetohydrodynamic Simulations of sub-Eddington accretion flows in AGN”, COSPAR 2022-44th Scientific Assembly, Athens, 2022/7
4. R. Matsumoto, T. Igarashi, H. R. Takahashi, K. Ohsuga, Y. Matsumoto, “Global Three-dimensional Radiation Magnetohydrodynamic Simulations of Changing Look Active Galactic Nuclei”, 33rd IUPAP Conference on Computational Physics (CCP2022), Athens, 2022/8
5. R. Matsumoto, T. Igarashi, Y. Kato, H. R. Takahashi, K. Ohsuga, Y. Matsumoto, “Enhanced Activity of Black Hole Accretion Flows during Hard-to-Soft State Transition”, IAU General Assembly 2022, Busan, 2022/8
6. 大須賀健, 高橋博之, 川島朋尚, 野村真理子, 北木孝明, 水本岬希, 嶺重慎, 朝比奈雄太, 小川拓未, 荻原大樹, 井上壮大, 内海碧人, 高橋幹弥, 尾形絵梨花, 武者野拓也, 都丸亮太, “ブラックホール降着円盤およびガス噴出流の理論～これまでの進展と今後の課題～”, Galaxy-IGM workshop 2022, 釧路/オンライン, 2022/8
7. 尾形絵梨花, 大須賀健, 福島肇, 矢島秀伸, “Dusty-gas 中を浮遊する中質量ブラックホールの降着成長過程: ダストの昇華と非等方輻射の影響”, Galaxy-IGM workshop 2022, 釧路/オンライン, 2022/8

8. 武者野拓也, 小川拓未, 大須賀健, 矢島秀伸, 大向一行, “超臨界ブラックホール降着流におけるライマンアルファ輝線の輻射力の計算”, Galaxy-IGM workshop 2022, 釧路/オンライン, 2022/8
9. T. Kawashima, K. Asano, K. Ohsuga, H. R. Takahashi, “Images, Radiation and Neutrino Spectra of Black Hole Accretion Flows Computed by GRRT Code RAIKOU”, The 15th Asia Pacific Physics Conference (APPC15), Online, 2022/8
10. 高橋芳太, 梅村雅之, 大須賀健, 朝比奈雄太, 竹田麟太郎, 高橋幹弥, 川中宣太, “相対論的流体中から放出された光子の多重散乱効果”, 日本天文学会秋季年会, 新潟大学/オンライン, 2022/9
11. 五十嵐太一, 高橋博之, 大須賀健, 松本洋介, 松元 亮治, “コンプトン冷却されたブラックホール降着流の輻射磁気流体シミュレーション”, 日本天文学会秋季年会, 新潟大学/オンライン, 2022/9
12. 芳岡尚悟, 嶺重慎, 大須賀健, 川島朋尚, 北木孝明, “超臨界降着流からのアウトフロー; 運動学的光度の質量降着率依存性とその起源”, 日本天文学会秋季年会, 新潟大学/オンライン, 2022/9
13. 川島朋尚, 大須賀健, 高橋博之, “将来の X 線干渉計観測に向けた X 線ブラックホールシャドウ予測”, 日本天文学会秋季年会, 新潟大学/オンライン, 2022/9
14. 恒任優, 嶺重慎, 川島朋尚, 大須賀健, 秋山和徳, 高橋博之, “銀河系中心 Sgr A* の偏光画像から探る磁場構造、および活動銀河核ジェット駆動機構解明へのシナジー”, 日本天文学会秋季年会, 新潟大学/オンライン, 2022/9
15. 内海碧人, 大須賀健, 高橋博之, 朝比奈雄太, “カー・ブラックホール周りの超臨界降着円盤からのエネルギー解放: 超高光度 X 線源との比較”, 日本天文学会秋季年会, 新潟大学/オンライン, 2022/9
16. 竹田麟太郎, 大須賀健, 高橋芳太, 梅村雅之, “相対論的流体中から放出された光子の多重散乱効果: 数値計算によるアプローチ”, 日本天文学会秋季年会, 新潟大学/オンライン, 2022/9
17. 尾形絵梨花, 大須賀健, 福島肇, 矢島秀伸, “3次元輻射流体計算で探る Dusty-gas 中を浮遊する中質量ブラックホールの降着成長過程; ダストの昇華と非等方輻射の影響”, 日本天文学会秋季年会, 新潟大学/オンライン, 2022/9
18. 朝比奈雄太, 大須賀健, “回転軸が傾いた降着円盤の一般相対論的輻射磁気流体シミュレーション”, 日本天文学会秋季年会, 新潟大学/オンライン, 2022/9
19. 人見拓也, 川島朋尚, 荻原大樹, 高橋博之, 大須賀健, “歳差運動するブラックホール降着円盤の観測的性質の解明”, 日本天文学会秋季年会, 新潟大学/オンライン, 2022/9
20. 井上壮大, 大須賀健, 高橋博之, 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超高光度 X 線パルサーのスピンアップレート”, 日本天文学会秋季年会, 新潟大学/オンライン, 2022/9
21. 竹林晃大, 大須賀健, 川島朋尚, “コンプトン散乱を考慮した偏光 X 線の輻射輸送計算コードの開発”, 日本天文学会秋季年会, 新潟大学/オンライン, 2022/9

22. 大野翔大, 大須賀健, 高橋博之, 朝比奈雄太, 内海碧人, “一般相対論的輻射磁気流体シミュレーションによる降着円盤の最内縁構造の調査”, 日本天文学会秋季年会, 新潟大学/オンライン, 2022/9
23. 武者野拓也, 小川拓未, 大須賀健, 矢島秀伸, 大向一行, “超臨界降着流におけるライマンアルファ輝線の輻射力: 2光子放射の効果”, 日本天文学会秋季年会, 新潟大学/オンライン, 2022/9
24. 小川拓未, 朝比奈雄太, 大須賀健, 高橋博之, 川島朋尚, “ボルツマン輻射輸送によるコンプトン冷却を考慮した輻射非効率降着流の電子温度計算”, 日本天文学会秋季年会, 新潟大学/オンライン, 2022/9
25. 島田悠愛, 大須賀健, 高橋博之, 朝比奈雄太, “突発的超臨界降着現象における輻射性衝撃波の研究”, 日本天文学会秋季年会, 新潟大学/オンライン, 2022/9
26. M. Nomura, K. Ohsuga, Chris Done, Kazuyuki Omukai, M. Mizumoto, H. Odaka, “Radiation hydrodynamics simulations of AGN winds: comparison with observations and impact on SMBH growth”, The 9th East Asian Numerical Astrophysics Meeting (EANAM9), Tenbusu Naha, Okinawa, 2022/9
27. T. Mushano, T. Ogawa, K. Ohsuga, H. Yajima, K. Omukai, “Impacts of Lyman-alpha radiation force on the super-Eddington accretion flow onto massive black holes”, The 9th East Asian Numerical Astrophysics Meeting (EANAM9), Tenbusu Naha, Okinawa, 2022/9
28. A. Utsumi, K. Ohsuga, H. R. Takahashi, Y. Asahina, “General relativistic radiation-MHD simulations of supercritical accretion around rotating black holes”, The 9th East Asian Numerical Astrophysics Meeting (EANAM9), Tenbusu Naha, Okinawa, 2022/9
29. A. Inoue, K. Ohsuga, H. R. Takahashi, Y. Asahina, “General relativistic radiation-MHD simulations of super-Eddington accretion flows and powerful outflows around neutron stars with dipole magnetic fields”, The 9th East Asian Numerical Astrophysics Meeting (EANAM9), Tenbusu Naha, Okinawa, 2022/9
30. E. Ogata, K. Ohsuga, H. Fukushima, H. Yajima, “Formation of Supermassive Black Holes through Gas Accretion on Moving Black Holes”, The 9th East Asian Numerical Astrophysics Meeting (EANAM9), Tenbusu Naha, Okinawa, 2022/9
31. M. Takahashi, K. Ohsuga, R. Takahashi, T. Ogawa, M. Umemura, Y. Asahina, “Development of Novel General Relativistic Radiative Transfer Code; CARTOON”, The 9th East Asian Numerical Astrophysics Meeting (EANAM9), Tenbusu Naha, Okinawa, 2022/9
32. T. Kawashima, K. Ohsuga, H. R. Takahashi, K. Asano, “Computations of images, photon and neutrino spectra using a general relativistic radiative transfer code RAIKOU”, The 9th East Asian Numerical Astrophysics Meeting (EANAM9), Tenbusu Naha, Okinawa, 2022/9

33. 川島朋尚, 大須賀健, 高橋博之, “ブラックホール降着流の観測的特徴: 一般相対論的磁気流体シミュレーション・データに基づく一般相対論的輻射輸送計算”, 日本流体力学会年会, 京都大学, 2022/9
34. T. Kawashima, K. Ohsuga, H. R. Takahashi, “Images and Spectra of Black hole Accretion Flows Computed by GRRT Code RAIKOU”, 6th Asia Pacific Conference on Plasma Physics (AAPPs-DPP 2022), Online, 2022/10
35. K. Ohsuga, “Structure Formation in the Universe using Radiation Transfer and Radiation Hydrodynamics Simulations”, The 30th Anniversary Symposium of the Center for Computational Sciences, at the University of Tsukuba, Epochal Tsukuba International Congress Center, Tsukuba, 2022/10
36. 人見拓也, 川島朋尚, 荻原大樹, 高橋博之, 大須賀健, “一般相対論的輻射輸送計算による歳差運動する低光度降着円盤の輻射スペクトルの特性”, 天体形成研究会, 筑波大学/オンライン, 2022/11
37. 大野翔大, 大須賀健, 高橋博之, 朝比奈雄太, 内海碧人, “一般相対論的輻射磁気流体シミュレーションによる降着円盤の最内縁付近の調査”, 天体形成研究会, 筑波大学/オンライン, 2022/11
38. 朝比奈雄太, 大須賀健, 高橋博之, 内海碧人, 井上壮大, 高橋幹弥, “輻射磁気流体力学計算によるブラックホール近傍のプラズマ降着流・噴出流のダイナミクス”, 第152回地球電磁気・地球惑星圏学会 総会・講演会, 相模原市立産業会館/神奈川, 2022/11
39. 植松正揮, 大須賀健, 福島肇, “ラインフォース駆動型円盤風の噴出によるブラックホール降着円盤の時間変化の研究”, 天体形成研究会 2022, 筑波大学/オンライン, 2022/11
40. 黒田裕太郎, 大須賀健, “Line Force 駆動型円盤風の解明に向けた1次元流体計算”, 天体形成研究会 2022, 筑波大学/オンライン, 2022/11
41. 上野航介, 大須賀健, “機械学習によるエディントンテンソルの推測に向けて”, 天体形成研究会 2022, 筑波大学/オンライン, 2022/11
42. 尾形絵梨花, 大須賀健, 福島肇, 矢島秀伸, “Dusty-gas 中を浮遊する種ブラックホールの降着成長過程; ダスト昇華と非等方輻射場の影響”, 初代星・初代銀河研究会 2022, 徳島大学/オンライン, 2022/11
43. 井上壮大, 大須賀健, 高橋博之, 朝比奈雄太, “磁化中性子星への超臨界降着流およびアウトフローの一般相対論的輻射磁気流体力学計算”, 高エネルギー現象で探る宇宙の多様性 II, ICRR, 2022/11
44. 高橋幹弥, 大須賀健, 高橋芳太, 小川拓未, 梅村雅之, 朝比奈雄太, “光子数保存を保証する空間3次元一般相対論的輻射輸送コードの開発”, 高エネルギー現象で探る宇宙の多様性 II, ICRR, 2022/11
45. Y. Tsunetoe, S. Mineshige, T. Kawashima, K. Ohsuga, K. Akiyama, H. R. Takahashi, “Investigating Jet-Disk Structure through Linear and Circular Polarization Images”, IAU symposium375-the Multimessenger Chakra of Blazar Jets, Kathmandu, 2022/12

46. 大須賀健, “BH 降着円盤シミュレーションの現状と今後”, 「「富岳」で加速する素粒子・原子核・宇宙・惑星」シンポジウム, 神戸大学/オンライン, 2022/12
47. 尾形絵梨花, 大須賀健, 福島肇, 矢島秀伸, “Dusty-gas 中を漂う中質量ブラックホールへのガス降着過程: 非等方輻射とダスト昇華の効果”, 第 35 回理論懇シンポジウム, コラッセふくしま/オンライン, 2022/12
48. 島田悠愛, 大須賀健, 高橋博之, 朝比奈雄太, “突発的超臨界降着現象における降着衝撃波の研究”, 第 35 回理論懇シンポジウム, コラッセふくしま/オンライン, 2022/12
49. 内海碧人, 大須賀健, 高橋博之, 朝比奈雄太, “カー・ブラックホール周りの超臨界降着円盤からのエネルギー解放: 超高光度 X 線源との比較”, 第 35 回理論懇シンポジウム, コラッセふくしま/オンライン, 2022/12
50. 高橋幹弥, 大須賀健, 高橋芳太, 小川拓未, 梅村雅之, 朝比奈雄太, “光子数保存を保証する空間 3 次元一般相対論的輻射輸送コードの開発”, 第 35 回理論懇シンポジウム, コラッセふくしま/オンライン, 2022/12
51. 竹林晃大, 大須賀健, 川島朋尚, “コンプトン散乱を考慮した偏光 X 線の輻射輸送計算コードの開発”, 第 35 回理論懇シンポジウム, コラッセふくしま/オンライン, 2022/12
52. 井上壮大, 大須賀健, 高橋博之, 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超高光度 X 線パルサーのスピンアップレート”, 第 35 回理論懇シンポジウム, コラッセふくしま/オンライン, 2022/12
53. 朝比奈雄太, 大須賀健, “歳差運動する超臨界降着円盤の一般相対論的輻射磁気流体計算”, 第 35 回理論懇シンポジウム, コラッセふくしま/オンライン, 2022/12
54. 恒任優, 嶺重慎, 川島朋尚, 大須賀健, 秋山和徳, 高橋博之, “直線偏光・円偏光画像から探る、超大質量ブラックホールの円盤ージェット構造”, 第 35 回理論懇シンポジウム, コラッセふくしま/オンライン, 2022/12
55. 五十嵐太一, 高橋博之, 大須賀健, 松本洋介, 松元 亮治, “活動銀河核における軟 X 線放射領域の輻射磁気流体シミュレーション”, 第 35 回理論懇シンポジウム, コラッセふくしま/オンライン, 2022/12
56. 小川拓未, 朝比奈雄太, 大須賀健, 高橋博之, 川島朋尚, “ボルツマン輻射輸送によるコンプトン冷却を考慮した輻射非効率降着流の電子温度計算”, 第 35 回理論懇シンポジウム, コラッセふくしま/オンライン, 2022/12
57. A. Inoue, K. Ohsuga, H. R. Takahashi, Y. Asahina, “General relativistic magneto-hydrodynamic simulations of super-Eddington accretion flows and powerful outflows around neutron stars with dipole magnetic fields”, Magnetism & Accretion, Cape Town, 2023/1
58. 尾形絵梨花, 大須賀健, 福島肇, 矢島秀伸, “Bondi-Hoyle-Lyttleton 機構による種ブラックホールの成長過程: 輻射場の非等方性とダスト昇華の影響”, CFCA ユーザーズミーティング, 国立天文台/オンライン, 2023/1

59. 井上壮大, 大須賀健, 高橋博之, 朝比奈雄太, “磁化中性子星への超臨界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”, CFA ユーザーズミーティング, 国立天文台/オンライン, 2023/1
60. 朝比奈雄太, 大須賀健, “大局的な降着円盤計算に向けた Adaptive Time Stepping 法の実装”, CFA ユーザーズミーティング, 国立天文台/オンライン, 2023/1
61. A. Inoue, K. Ohsuga, H. R. Takahashi, Y. Asahina, “General relativistic radiation-MHD simulations of super-Eddington accretion flows onto neutron stars: spin-up rate of ULX pulsars”, Black hole astrophysics with VLBI 2023, Online/NAOJ, 2023/2
62. M. Takahashi, K. Ohsuga, T. Kawashima, “Time variation of the crescent shaped shadow and the measurement of the black hole spin in M87”, Black hole astrophysics with VLBI 2023, Online/NAOJ, 2023/2
63. T. Kawashima, T. Hitomi, K. Ohsuga, H. R. Takahashi, “Lense-Thirring precession of accretion flows and relativistic jets”, Black hole astrophysics with VLBI 2023, Online/NAOJ, 2023/2
64. Y. Tsunetoe, S. Mineshige, T. Kawashima, K. Ohsuga, K. Akiyama, H. R. Takahashi, “Polarized Radiative Transfer: Linking the Images and Magnetic Fields around Black Holes”, Black hole astrophysics with VLBI 2023, Online/NAOJ, 2023/2
65. 尾形絵梨花, 大須賀健, 福島肇, 矢島秀伸, “Dusty-gas 中を浮遊する種ブラックホール降着円盤への降着過程:ダスト昇華と非等方輻射場の影響”, ブラックホールジェット・降着円盤・円盤風研究会 2023, 東北大学/オンライン, 2023/3
66. 大野翔大, 大須賀健, 高橋博之, 朝比奈雄太, 内海碧人, “一般相対論的輻射磁気流体力学計算による亜臨界降着円盤の内縁構造とブラックホールスピンの研究”, ブラックホールジェット・降着円盤・円盤風研究会 2023, 東北大学/オンライン, 2023/3
67. 内海碧人, 大須賀健, 高橋博之, 朝比奈雄太, “カー・ブラックホール周りにおける Magnetically Arrested Supercritical Disk の一般相対論的輻射磁気流体シミュレーション”, ブラックホールジェット・降着円盤・円盤風研究会 2023, 東北大学/オンライン, 2023/3
68. 井上壮大, 大須賀健, 高橋博之, 朝比奈雄太, “磁化した中性子星への超臨界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”, ブラックホールジェット・降着円盤・円盤風研究会 2023, 東北大学/オンライン, 2023/3
69. 竹林晃大, 大須賀健, 川島朋尚, “コンプトン散乱を考慮した偏光 X 線の輻射輸送計算コードの開発”, ブラックホールジェット・降着円盤・円盤風研究会 2023, 東北大学/オンライン, 2023/3
70. 島田悠愛, 大須賀健, 高橋博之, 朝比奈雄太, “突発的超臨界降着現象における降着衝撃波の研究”, ブラックホールジェット・降着円盤・円盤風研究会 2023, 東北大学/オンライン, 2023/3

71. 芳岡尚悟, 嶺重慎, 大須賀健, 川島朋尚, 北木孝明, “大局的輻射流体計算で探る、超臨界降着流のアウトフローと運動学的光度”, ブラックホールジェット・降着円盤・円盤風研究会 2023, 東北大学/オンライン, 2023/3
72. 川島朋尚, 大須賀健, 高橋博之, “Lense-Thirring 歳差を伴う降着流・相対論的ジェットの多波長放射特性”, ブラックホールジェット・降着円盤・円盤風研究会 2023, 東北大学/オンライン, 2023/3
73. 都丸亮太, Chris Done, 高橋忠幸, 小高裕和, 大須賀健, 野村真理子, Junjie Mao, 谷本敦, “X線連星における熱・放射駆動型円盤風”, ブラックホールジェット・降着円盤・円盤風研究会 2023, 東北大学/オンライン, 2023/3
74. 五十嵐太一, 高橋博之, 大須賀健, 松本洋介, 松元亮治, “Changing Look AGN における軟 X線放射領域の輻射磁気流体モデル”, ブラックホールジェット・降着円盤・円盤風研究会 2023, 東北大学/オンライン, 2023/3
75. 高橋幹弥, 大須賀健, 川島朋尚, “M87 における三日月状シャドウの時間変動とブラックホールスピンの測定”, ブラックホールジェット・降着円盤・円盤風研究会 2023, 東北大学/オンライン, 2023/3
76. 朝比奈雄太, 大須賀健, “歳差運動する超臨界降着円盤の一般相対論的輻射磁気流体シミュレーション”, ブラックホールジェット・降着円盤・円盤風研究会 2023, 東北大学/オンライン, 2023/3
77. 高橋幹弥, 大須賀健, 川島朋尚, “M87 における三日月状シャドウの時間変動とブラックホールスピンの測定”, 日本天文学会春季年会, 立教大学/オンライン, 2023/3
78. 内海碧人, 大須賀健, 高橋博之, 朝比奈雄太, “カー・ブラックホール周りにおける Magnetically Arrested Supercritical Disk の一般相対論的輻射磁気流体シミュレーション”, 日本天文学会春季年会, 立教大学/オンライン, 2023/3
79. 大野翔大, 大須賀健, 高橋博之, 朝比奈雄太, 内海碧人, “一般相対論的輻射磁気流体力学計算による亜臨界降着円盤の内縁構造とブラックホールスピンの研究”, 日本天文学会春季年会, 立教大学/オンライン, 2023/3
80. 尾形絵梨花, 大須賀健, 福島肇, 矢島秀伸, “Dusty-gas 内を漂う種ブラックホールの Bondi-Hoyle-Lyttleton 降着: 円盤 shadow 角依存性”, 日本天文学会春季年会, 立教大学/オンライン, 2023/3
81. 島田悠愛, 大須賀健, 高橋博之, 朝比奈雄太, “突発的超臨界降着流の一般相対論的輻射磁気流体計算: 降着構造と衝撃波について”, 日本天文学会春季年会, 立教大学/オンライン, 2023/3
82. 竹林晃大, 大須賀健, 川島朋尚, “コンプトン散乱を考慮した偏光 X線の輻射輸送計算コードの開発 II”, 日本天文学会春季年会, 立教大学/オンライン, 2023/3
83. 野村真理子, 大須賀健, “超臨界降着流から噴出するラインフォース駆動型円盤風”, 日本天文学会春季年会, 立教大学/オンライン, 2023/3
84. 芳岡尚悟, 嶺重慎, 大須賀健, 川島朋尚, 北木孝明, “大質量ブラックホールへの超臨界降着流と大局的アウトフロー構造”, 日本天文学会春季年会, 立教大学/オンライン, 2023/3

85. 朝比奈雄太, 大須賀健, “歳差運動する超臨界降着円盤の光度変動”, 日本天文学会春季年会, 立教大学/オンライン, 2023/3
86. 井上壮大, 大須賀健, 高橋博之, 朝比奈雄太, “四重極子磁場を有する中性子星への超臨界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”, 日本天文学会春季年会, 立教大学/オンライン, 2023/3
87. 恒任優, 嶺重慎, 川島朋尚, 大須賀健, 秋山和徳, 高橋博之, “偏光画像で探るブラックホール付近の円盤-ジェット構造”, ブラックホール降着流ミニワークショップ, 千葉大学/オンライン, 2023/3

(1 1) 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)

学会発表

1. 町田真美, 大村匠, “富岳を用いた AGN ジェット伝搬の 2 温度磁気流体シミュレーション”, 先駆的科学研究に関するフォーラム 2022, 2022 年 4 月 25 日, 九州大学
2. Ryoji Matsumoto, “Magnetic Reconnection in Black Hole Accretion Disks”, MR2022, May 16-20 2022, Monterey, USA (invited)
3. Taichi Igarashi, Yoshiaki Kato, Hiroyuki Takahashi, Ken Ohsuga, Yosuke Matsumoto, Ryoji Matsumoto, “Radiation Magnetohydrodynamic Simulations of sub-Eddington accretion flows in AGN”, 44th COSPAR Scientific Assembly, July 16-24 2022, online
4. Takumi Ohmura, James Chibueze, Haruka Sakemi, Mami Machida, Hiroki Akamatsu, Takuya Akahori, Hiroyuki Nakanishi, Viral Parekh, Ruby van Rooyen, Tsutomu Takeuchi, “The interaction between an radio jet and an intra-cluster magnetic field seen by MeerKAT” 44th COSPAR Scientific Assembly, July 16-24 2022, online
5. Takumi Ohmura, Mami Machida, Hiroki Akamatsu, “The X-ray property of the forward shock in magnetohydrodynamic simulation of active galactic nucleus jets”, IAUGA2022, Aug. 2-11, 2022, Korea & online
6. Takumi Ohmura, Mami Machida, “Non-thermal emission from head-tail galaxy in three dimensional magnetohydrodynamic simulations” IAUGA2022, Aug. 2-11, 2022, Korea & online
7. Yosuke Matsumoto, Takanobu Amano, Masanori Iwamoto, “PIC simulations for elucidating cosmic-ray accelerations in the exascale computing era”, The International Conference on Numerical Simulation of Plasmas (ICNSP), Aug. 30 - Sept. 2, 2022, online, (invited)
8. Ryoji Matsumoto, “Magnetohydrodynamic Simulations of Astrophysical Jets and Accretion Disks”, PEU2022, Sept. 6-8 2022, Kyoto, Japan (招待講演)
9. 五十嵐太一, 高橋博之, 大須賀健, 松本洋介, 松元亮治, “コンプトン冷却されたブラックホール降着流の輻射磁気流体シミュレーション”, 日本天文学会 2022 年秋季年会, 2022 年 9 月 13 日-15 日, 新潟大学

10. 町田真美, 川島朋尚, 工藤祐己, 松本洋介, 松元亮治, “ブラックホール降着流中に生じる磁気渦状腕形成機構の解明”, 日本天文学会 2022 年秋季年会, 2022 年 9 月 13 日-15 日, 新潟大学
11. Taichi Igarashi, Hiroyuki Takahashi, Ken Ohsuga, Yosuke Matsumoto, Ryoji Matsumoto, “Global Radiation MHD Simulations of the Formation of Soft X-ray Emitting Region in Changing Look AGN”, EANAM9, Sep. 26 - 30, 2022, Okinawa
12. Takumi Ohmura, Katsuaki Asano, Kosuke Nishiwaki, Haruka Sakemi, Mami Machida, “Non-thermal emissions of a head-tail galaxy in 3D MHD simulation”, EANAM9, Sep. 26 - 30, 2022, Okinawa
13. M. Iwamoto, T. Amano, Y. Matsumoto, S. Matsukiyo, M. Hoshino, “Coherent Emission from 3D Relativistic Shocks”, 6th Asia-Pacific Conference on Plasma Physics, AAPPS-DPP 2022, Oct.9-14 2022, Remote e-conference (invited)
14. Takumi Ohmura, Mami Machida, Hiroki Akamatsu, “Two-temperature magnetohydrodynamics simulation of jets in galaxy cluster - The X-ray property of the forward shocks -” AAPPS-DPP2022, Oct 9-14, 2022, online
15. 松本洋介, “エクサ計算時代に向けた PIC コード開発と天体衝撃波シミュレーションへの応用”, 日本地球電磁気・地球惑星圏学会講演会, 2022 年 11 月 4 日-7 日, 相模原
16. 町田真美, “磁気流体数値計算結果を用いた渦状銀河の観測的可視化” 天の川銀河研究会 2022, 2022 年 11 月 7 日-8 日, 鹿児島大学, オンライン
17. 五十嵐太一, 高橋博之, 大須賀健, 松本洋介, 松元亮治, “活動銀河核における軟 X 線放射領域の輻射磁気流体シミュレーション”, 理論懇シンポジウム, 2022 年 12 月 21 日-23 日, コラッセ福島
18. 五十嵐太一, “Changing Look AGN の軟 X 線放射領域の輻射磁気流体モデル”, 2022 年度国立天文台 CfCA ユーザーズミーティング, 2023 年 1 月 26 日-27 日, 国立天文台
19. 五十嵐太一, 高橋博之, 大須賀健, 松本洋介, 松元亮治, “Changing Look AGN における軟 X 線放射領域の輻射磁気流体モデル”, ブラックホールジェット・降着円盤・円盤風研究会 2023, 2023 年 3 月 1 日-2 日, 東北大学
20. 大村匠, 浅野勝晃, 西脇公祐, 酒見はる香, 町田真美, “Wide angle tailed 電波銀河からの非熱的放射”, 日本天文学会 2023 年春季年会, 2023 年 3 月 13 日-16 日, 立教大学

(1 2) 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)
論文

1. Wakana Iwakami, Akira Harada, Hiroki Nagakura, Ryuichiro Akaho, Hirotada Okawa, Shun Furusawa, Hideo Matsufuru, Kohsuke Sumiyoshi, Shoichi Yamada, “Principal-Axis Analysis of the Eddington Tensor for the Early Post-Bounce Phase of Rotational Core-Collapse Supernovae”, The Astrophysical Journal, 933 (2022):91, 2022/7/6

2. Ryuichiro Akaho, Akira Harada, Hiroki Nagakura, Wakana Iwakami, Hirotada Okawa, Shun Furusawa, Hideo Matsufuru, Kohsuke Sumiyoshi, Shoichi Yamada, “Protoneutron Star Convection Simulated with a New General Relativistic Boltzmann Neutrino Radiation Hydrodynamics Code” , The Astrophysical Journal, 944 (2023):60, 2023/2/13
3. Shun Furusawa, Hiroki Nagakura, “Nuclei in core-collapse supernovae engine” , Progress in Particle and Nuclear Physics, 129 (2023):104018, 2023/3/16
4. Yokoi, N.; Masada, Y.; Takiwaki, T., “Modelling stellar convective transport with plumes - I. Non-equilibrium turbulence effect in double-averaging formulation”, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, Volume 516, Issue 2, pp.2718-2735, 2022/10/1
5. Matsumoto, J.; Asahina, Y.; Takiwaki, T.; Kotake, K. ; Takahashi, H. R., “Magnetic support for neutrino-driven explosion of 3D non-rotating core-collapse supernova models”, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, Volume 516, Issue 2, pp.1752-1767, 2022/10/1
6. Mori, Kanji; Moriya, Takashi J.; Takiwaki, Tomoya; Kotake, Kei; Horiuchi, Shunsaku; Blinnikov, Sergei I., “Light Curves and Event Rates of Axion Instability Supernovae”, The Astrophysical Journal, Volume 943, Issue 1, id.12, 6 pp., 2023/1/1
7. Takahashi, Koh; Takiwaki, Tomoya; Yoshida, Takashi, “Monotonicity of the Cores of Massive Stars”, The Astrophysical Journal, Volume 945, Issue 1, id.19, 24 pp., 2023/3/1
8. Nagakura, Hiroki; Zaizen, Masamichi, “Connecting small-scale to large-scale structures of fast neutrino-flavor conversion”, Physical Review D, Volume 107, Issue 6, article id.063033, 2023/3/1
9. Mori, Masamitsu; Suwa, Yudai; Takiwaki, Tomoya, “Long-term gravitational wave asteroseismology of supernovae: From core collapse to 20 seconds postbounce”, Physical Review D, Volume 107, Issue 8, article id.083015, 2023/4/1
10. Suwa, Y., Harada, A., Harada, M., Koshio, Y., Mori, M., Nakanishi, F., Nakazato, K., Sumiyoshi, K., Wendell, R. A., “Observing Supernova Neutrino Light Curves with Super-Kamiokande. III. Extraction of Mass and Radius of Neutron Stars from Synthetic Data” , The Astrophysical Journal, 2022.7, Vol.934 (1), 15
11. Ekanger, N., Horiuchi, S., Kotake, K., Sumiyoshi, K., “Impact of late-time neutrino emission on the diffuse supernova neutrino background” , Physical Review D, 2022.8, Vol.106, 043026
12. Nakamura, K., Takiwaki, T., Kotake, K., “Three-dimensional simulation of a core-collapse supernova for a binary star progenitor of SN 1987A” , Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 2022.8, Vol.514 (3), p.3941-3952
13. Sumiyoshi, K., Furusawa, S., Nagakura, H., Harada, A., Togashi, H., Nakazato, K., Suzuki, H., “Effects of nuclear matter and composition in core-collapse supernovae

and long-term proto-neutron star cooling”, Progress of Theoretical and Experimental Physics, 2023.1, Vol.2023 (1), 013E02

学会発表

1. Wakana Iwakami, “A Simulation of Core-collapse Supernovae in Three-dimensional Space with Full Boltzmann Neutrino Transport on the Supercomputer FUGAKU”, Unraveling the History of the Universe and Matter Evolution with Underground Physics (UGAP2022), 2022/6/14 (poster)
2. 岩上わかかな, “重力崩壊型超新星の三次元数値計算の現状,” 「「富岳」で加速する素粒子・原子核・宇宙・惑星」シンポジウム, 2022/12/15 (口頭)
3. Ryuichiro Akaho, “Core-collapse Supernova Simulation with Boltzmann Neutrino Transport”, Unraveling the History of the Universe and Matter Evolution with Underground Physics (UGAP2022), 2022/6/14
4. 赤穂龍一郎, “冷え切った原始中性子星への降着によるニュートリノ放射とその観測可能性”, RCNP 研究会「低エネルギー核物理と高エネルギー天文学で読み解く中性子星」, 2022/8/5
5. 赤穂龍一郎, “冷え切った原始中性子星への降着によるニュートリノ放射とその観測可能性”, 日本天文学会 2022 秋季大会, 2022/9/13
6. 赤穂龍一郎, “ボルツマン輻射輸送計算で探る超新星爆発”, 第三回地下宇宙若手研究会, 2022/11/23
7. 赤穂龍一郎, “超新星のボルツマン輻射輸送計算におけるニュートリノ集団振動の系統的解析”, 第九回超新星ニュートリノ研究会, 2023/3/3
8. 原田了, “超新星ダイナミクスとニュートリノ運動量分布”, 重力波天文学時代における超新星研究, 2022/10/18
9. 原田了, “星の重力崩壊計算のための一般相対論的ボルツマン輻射流体コードの開発”, 日本天文学会 2022 年秋季年会, 2022/9/14
10. Akira Harada, “Rotation-induced collective neutrino oscillation in a core-collapse supernova”, NEUTRINO 2022 XXX International Conference on Neutrino Physics and Astrophysics, 2022/5/30-2022/6/3
11. Kohsuke Sumiyoshi, “Progress of supernova simulations with Boltzmann neutrino transport: C02 theory”, Symposium on Gravitational wave physics and astronomy: Genesis, 2022/4/25-29
12. 住吉光介, “状態方程式テーブルでの原子核組成の違いによる超新星・原始中性子星への影響”, 日本物理学会 2022 年秋季大会, 2022/9/6-8
13. 住吉光介, “超新星における状態方程式の影響と残された課題”, 研究会「重力波天文学時代における超新星研究」, 2022/10/18-21
14. 住吉光介, “連星中性子星合体後の長期進化におけるニュートリノ輻射輸送”, 日本物理学会 2023 年春季大会, 2023/3/22-25

15. 住吉光介, “状態方程式データテーブルの経歴”, 研究会「中性子星・超新星におけるニュートリノ・原子核物理」, 2023/3/27-28
16. 古澤峻, “超新星爆発中心の原子核”, 重力波天文学時代における超新星研究, 2022/10/19
17. 古澤峻, “原始中性子星と中性子星クラストの状態方程式”, 日本物理学会, 2023/3/25

(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)

論文

1. Shimizu, K., Shoda, M., Suzuki, T. K., “Role of Longitudinal Waves in Alfvén-wave-driven Solar Wind”, *The Astrophysical Journal*, 2022.5, Vol.931 (1):37
2. Hotta, H., Kusano, K., Shimada, R., “Generation of Solar-like Differential Rotation”, *The Astrophysical Journal*, 2022.7, Vol.933 (2):199
3. Shimada, R., Hotta, H. Yokoyama, T., “Mean-field Analysis on Large-scale Magnetic Fields at High Reynolds Numbers”, *The Astrophysical Journal*, 2022.8, Vol.935 (1):55
4. Washinoue, H., Shoda, M., Suzuki, T. K., “The Effect of the Chromospheric Temperature on Coronal Heating”, *The Astrophysical Journal*, 2022.10, Vol.938 (2):126
5. Kaneko, T., Hotta, H., Toriumi, S., Kusano, K., “Impact of subsurface convective flows on the formation of sunspot magnetic field and energy build-up”, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 2022.12, Vol.517 (2), p.2775-2786
6. Mori, K., Hotta, H., “Investigation of the dependence of angular momentum transport on spatial scales for construction of differential rotation”, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 2023.2, Vol.519 (2), p.3091-3097
7. Hasegawa, Y., Suzuki, T. K., Tanaka, H., Kobayashi, H., Wada, K., “Collisional Growth and Fragmentation of Dust Aggregates. II. Mass Distribution of Icy Fragments”, *The Astrophysical Journal*, 2023.2, Vol.944 (1):38
8. Tokuno, T., Suzuki, T. K., Shoda, M., “Transition of latitudinal differential rotation as a possible cause of weakened magnetic braking of solar-type stars”, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 2023.3, Vol.520 (1), p.418-436

学会発表

1. Hideyuki Hotta, “Current and next-generation simulations in solar physics”, *The 5th ISEE Symposium, Nagoya, Japan*, 2022/11/16
2. Hideyuki Hotta, “Solar interior dynamics: Convection and Magnetic field”, *APPC15, Online*, 2022/8/25
3. Hideyuki Hotta, “Solar differential rotation reproduced with high resolution magnetohydrodynamic simulations”, *ICNSP2022, Online*, 2022/9/1

4. Hideyuki Hotta, “Generation of the solar magnetic field”, IAU GA 372: The Era of Multi-Messenger Solar Physics, Online, 2022/8/2
5. Hideyuki Hotta, “Future prospects”, ISSI workshop, Switzerland, 2022/6/17
6. Kanya Kusano, “Integrated simulation study on the formation of flare productive regions and the onset of solar flares”, COSPAR, Online, 2022/7/21
7. 堀田英之, “対流層の底を出発した磁束の光球での黒点形成”, 太陽地球圏環境予測のためのモデル研究の展望, オンライン, 2023/3/24
8. 堀田英之, “対流層の底から光球までの浮上磁場シミュレーション:黒点对の非対称性生成の要因について”, 日本天文学会春季年会, 立教大学, 2023/3/14
9. 堀田英之, “極域ミッション検討進捗報告”, 太陽研連シンポジウム, 名古屋, 2023/2/21
10. 堀田英之, “太陽極域ミッションの紹介:目指すサイエンス”, 太陽系 GDI シンポジウム, オンライン, 2022/12/5
11. 堀田英之, “大規模シミュレーションで解明した「反太陽型の差動回転は存在しない」可能性”, 日本天文学会秋季年会, 新潟大学 オンラインで講演, 2022/9/15
12. 堀田英之, “太陽業界と HPC の関わりについて”, 太陽研連将来計画シンポジウム, オンライン, 2022/8/17
13. 堀田英之, “極域ミッション(Solar-D)で目指すサイエンスと今後の太陽内部数値計算”, 太陽研連将来計画シンポジウム, オンライン, 2022/8/17
14. 堀田英之, “超高解像度計算による太陽の表面勾配層、表面極向き子午面流、赤道加速の再現”, 日本地球惑星科学連合大会, 幕張メッセ, 2022/5/23
15. 草野完也, “太陽面爆発現象の包括的な理解と予測”, 第 35 回 理論懇シンポジウム, コロッセふくしま, 2022/12/22
16. 八田良樹, “輻射磁気流体計算を用いた音波の二点間伝播時間測定への観測ケーデンスの影響評価”, 日本天文学会春季年会, 立教大学, 2023/3/13
17. 八田良樹, “星震学的解析を用いた太陽型星全球熱対流計算の検証”, 日本天文学会秋季年会, 新潟大学, 2022/9/15

(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・研究会発表

1. 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の開発:地形あり計算”, 日本地球惑星科学連合 2022 年大会, 千葉+オンライン, 2022 年 5-6 月
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, “火星大気の全球非静力学高解像度計算”, 日本惑星科学会 2022 年秋季講演会, 茨城+オンライン, 2022 年 9 月
3. 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, “火星大気の全球非静力学高解像度計算”, 日本気象学会 2022 年度秋季大会, 北海道+オンライン, 2022 年 10 月

4. 檜村博基, 杉本憲彦, 高木征弘, 林祥介, “自転軸の傾きを入れた金星大気循環シミュレーション”, 地球電磁気・地球惑星圏学会 第152回講演会, 神奈川+オンライン, 2022年11月
5. 森脇大智, 村橋究理基, 石渡正樹, 檜村博基, 高橋芳幸, 林祥介, 杉山耕一朗, “大規模惑星大気数値シミュレーションデータの可視化ツールの開発 -共有機能の実装- “2022年度宇宙科学情報解析シンポジウム, 神奈川+オンライン, 2023年2月
6. 檜村博基, 杉本憲彦, 高木征弘, 林祥介, “自転軸の傾きを入れた金星大気循環シミュレーション”, 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, 兵庫+オンライン, 2023年3月

広報・普及活動

1. 檜村博基, “火星の大気シミュレーションと「富岳」”, 月刊 JICFuS ムービー, 2022年12月
2. 檜村博基, 「惑星天気予報：金星は今日も曇り、火星は砂嵐でしょう。」 神戸大学理学部模擬授業, 兵庫, 2023年1月

(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)

論文

1. Masanori Kameyama, “Numerical experiments on thermal convection of highly compressible fluids with variable viscosity and thermal conductivity in two-dimensional cylindrical geometry: Implications for mantle convection of super-Earths”, *Geophysical Journal International*, 231, 1457-1469, 2022.
10.1093/gji/ggac259

学会・研究会発表

1. Kenyo U, Masanori Kameyama, and Masaki Ogawa, “A Two-Dimensional Annular Model of the Lunar Mantle Evolution Caused by Convection, Magma Generation and Migration”, American Geophysical Union 2022 Fall Meeting, 2022年12月14日, シカゴ (アメリカ合衆国)
2. 宮腰剛広, 亀山真典, 小河正基, 「プレートテクトニクスの再現に向けて：応力履歴依存粘性を導入したマントル対流モデルの3次元球殻版への拡張」, 「「富岳」で加速する素粒子・原子核・宇宙・惑星」シンポジウム, 2022年12月13日, 神戸大学+オンライン
3. 于賢洋, 亀山真典, 小河正基, 「マグマの生成・移動を伴う2次元円環マントル対流による月の進化モデル」, 日本惑星科学会 2022年秋季講演会, 2022年9月20日, 茨城県水戸市+オンライン [優秀発表賞 受賞]
4. 亀山真典, 「見えない地球の中を『見る』-固体地球惑星物理学でできること-」, 愛媛大学理学部公開講座～かけがえのない地球の未来を創るために～, 2022年7月10日, 愛媛大学南加記念ホール+オンライン

5. 柳澤孝寿, 亀山真典, 小河正基, 「非ニュートン性を組み込んだ高粘性流体による熱対流のモデリング」, 日本地球惑星科学連合 2022 年大会, 2022 年 5 月 31 日, オンライン・ポスター

広報・普及活動

1. 亀山真典, “見えない地球の中を「見る」-固体地球惑星物理学でできること-“, 愛媛大学理学部公開講座～かけがえのない地球の未来を創るために～, 愛媛+オンライン, 2022 年 7 月

(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)

論文

1. Ryono, K., Ishioka, K., “New numerical methods for calculating statistical equilibria of two-dimensional turbulent flows, strictly based on the Miller-Robert-Sommeria theory”, Fluid Dynamics Research, 2022.10, Vol.54 (5):055505

学会・研究会発表

1. 佐々木洋平, 石岡圭一, 竹広真一, 榎本剛, “高速球面調和関数変換ライブラリの開発-木星型惑星大気の高解像長時間積分シミュレーションを目指して-“, 日本地球惑星科学連合 2022 年大会, 千葉+オンライン, 2022 年 5-6 月
2. 佐々木洋平, 竹広真一, 石岡圭一, 榎本剛, 中島健介, 林祥介, “高速回転球殻内の熱対流により引き起こされる表面縞状構造への超粘性の影響”, 2022 年日本流体力学会年会, 京都, 2022 年 9 月
3. Takehiro, S., Y. Sasaki, K. Ishioka, T. Enomoto, K. Nakajima, Y.-Y. Hayashi, “Zonal banded jets generated by thermal convection in rapidly rotating spherical shells” 6th Asia-Pacific Conference on Plasma Physics (AAPPS-DPP), オンライン, 2022 年 10 月
4. Takehiro, S., Y. Sasaki, K. Ishioka, T. Enomoto, K. Nakajima, Y.-Y. Hayashi, “Zonal flows and banded structures generated by thermal convection in rapidly rotating thin spherical shells”, RIMS Satellite Seminar: Mathematical modelling of turbulent flows in astrophysical and geophysical phenomena, 京都, 2023 年 3 月