

令和6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
「シミュレーションとAIの融合で解明する
宇宙の構造と進化」
成果報告書

令和7年5月30日
国立大学法人筑波大学

大須賀 健

目次

1. 補助事業の目的	- 2 -
2. 令和6年度（報告年度）の実施内容	- 2 -
2-1. 当該年度（令和6年度）の事業実施計画	- 2 -
2-2. 実施内容（成果）	- 5 -
2-3. 活動（研究会の活動等）	- 24 -
2-4. 実施体制	- 27 -

補助事業の名称

「富岳」成果創出加速プログラム

「シミュレーションと AI の融合で解明する宇宙の構造と進化」

体系的番号： JPMXP1020230406

1. 補助事業の目的

世界最高規模のシミュレーションと AI の融合により、宇宙大規模構造から銀河、星、惑星、ブラックホールまで、宇宙の多階層構造形成を統一的に解明し、ビッグバンから現在に至る宇宙の進化の全容を解き明かす。

2. 令和 6 年度（報告年度）の実施内容

2-1. 当該年度（令和 6 年度）の事業実施計画

(1) 研究総括：大須賀 健（筑波大学）

本課題全体を総括し、以下(2)～(6-2)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。

(2) AI 班：AI を用いた宇宙・天文シミュレーションの新基軸の開拓：森脇 可奈（東京大学）

シミュレーションの効率化・高速化、およびシミュレーションを用いて観測から物理量を導出するためのニューラルネットワークの構築を各サブ課題と協働で推進する。令和 6 年度は乱流場や恒星の形成・進化を扱う AI モデルを構築する。またブラックホール降着円盤およびジェットの高エネルギー放射の模擬電波観測、太陽の黒点を含む太陽の模擬観測の結果を機械学習し、観測量から物理量を推定するテストを実施する。

(3-1) サブ課題 A-1: 高精度構造形成シミュレーションと観測との協働による宇宙天体形成史の統一的解明：石山 智明（千葉大学）

大規模高精度な宇宙論的ダークマター構造形成シミュレーションを行い、近未来の大規模天体サーベイ観測に匹敵する空間体積における銀河など天体の形成を、宇宙初期に形成する初代銀河の段階から世界ではじめて追う。令和 6 年度はシミュレーションを継続し、ポストプロセスで銀河形成をモデリングし天体模擬カタログを生成する。また早期ダークエネルギーモデルに基づいたダークマター構造形成シミュレーションを行う。

(3-2)サブ課題 A-2:Vlasov シミュレーションによる宇宙大規模構造形成へのニュートリノの力学的影響:
吉川 耕司(筑波大学)

Vlasov シミュレーションを用いて、質量を持つニュートリノの力学的影響を正確に考慮した宇宙大規模構造形成の数値シミュレーションを実行し、将来の大規模銀河サーベイ観測を用いたニュートリノ質量推定や、質量階層の決定、宇宙ニュートリノ検出実験によるニュートリノの物理的性質の解明に向けた理論的な予言を与える。令和 6 年度はニュートリノの質量固有値の縮退が解けている場合に、複数のニュートリノの分布関数の時間発展を解く数値シミュレーションを行い、ニュートリノの質量階層の違いが宇宙大規模構造に及ぼす影響を定量的に評価する。

(3-3)サブ課題 A-3: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:藤井
通子(東京大学)

従来の最大分解能の銀河形成シミュレーションより 2 桁程度高い分解能をもつ銀河形成シミュレーションを達成し、銀河の多様性の起源の研究をおこなう。令和 6 年度は暗黒物質、バリオン 10^{11} 粒子を用いた銀河形成シミュレーションに取り組み、銀河形成特有のパラメータ調整を行う。

(4-1)サブ課題 B-1:銀河円盤スケールの分子雲・星形成過程の高解像度磁気流体シミュレーション:富田
賢吾(東北大学)

ローカル計算並みの高解像度で銀河円盤全体をカバーする大局的な 3 次元磁気流体シミュレーションを実施し、分子雲の形成過程を解明する。令和 6 年度は令和 5 年度の計算結果として得られた準定常状態を初期条件とした、ガスの自己重力を考慮した銀河スケールの分子雲形成シミュレーションを行う。

(4-2)サブ課題 B-2: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:岩崎 一成(国立天文台)
熱進化モデル・すべての非理想磁気流体効果(オーム散逸とホール効果・両極性拡散)を考慮した大域的
非理想磁気流体シミュレーションを実施し、太陽型星周りの現実的な原始惑星系円盤構造を明らかにする。
令和 6 年度はホール効果を含めた全ての非理想磁気流体効果を考慮した原始惑星系円盤の大域的シミュ
レーションを実行する。

(4-3)サブ課題 B-3:原始惑星系円盤中での固体惑星形成:牧野 淳一郎(神戸大学)

GPLUM コードを用いた 100 万粒子以上のシミュレーションを様々な初期条件や原始惑星系円盤の設定に
ついて行い、惑星形成過程の多様性に迫る。令和 6 年度は大領域計算、新モデル計算を実施すると共に、
結果を取りまとめ論文とする。

(4-4)サブ課題 B-4:原始惑星系円盤の乱流中のダスト粒子の衝突付着成長シミュレーション:石原 卓(岡
山大学)

乱流の大規模直接数値計算を活用したダスト粒子の衝突付着シミュレーションとこれまでに構築したデ
ータに基づくデータ駆動型計算を併用することにより、ダスト成長の新しいシナリオを提案し、その定量的
な検証を行う。令和 6 年度はダスト成長のシナリオの検証のための大規模数値実験を実施する。ダス
ト粒子の衝突付着成長シミュレーションのデータを活用した成長粒子の追跡調査を行う。

(5-1)サブ課題 C-1:大規模数値流体シミュレーションおよび模擬観測、プラズマ粒子計算によるブラックホール降着円盤およびジェットの解明：松本 洋介（千葉大学）

一般相対論的輻射磁気流体力学シミュレーション、非相対論的(輻射)磁気流体力学シミュレーション、粒子加速のプラズマ粒子計算、多波長イメージ及びスペクトルの一般相対論的輻射輸送計算、および機械学習により、ブラックホールが引き起こす高エネルギー現象および超巨大ブラックホールの成長シナリオを解明する。令和6年度は機械学習によって構築するモデルの精度を向上させるための変動エディントン因子法を用いた高精度で高解像度なシミュレーションを実施する。低高度降着円盤およびエディントン光度程度の高解像度(方位角方向解像度 512-1024)のシミュレーションを行う。宇宙線電子加速機構およびイオン初期加速機構を解明する。ニューラルネットワークフィルタリングを PIC コードへ実装し、相対論的衝撃波の長時間発展を調べる。前年度と異なるモデルトータル 10 モデルについて各 100 スナップショットの電波イメージを計算する。機械学習によりブラックホールスピンや相対論的ジェットの磁場形状についての情報の抽出を行う。

(5-2)サブ課題 C-2:超新星爆発メカニズムを支配するニュートリノ輻射輸送と乱流現象の解明：滝脇 知也（国立天文台）

ニュートリノ輻射輸送の第一原理計算に基づいた超新星シミュレーション、超高解像度の磁気流体計算、量子力学の基礎方程式に基づく運動論的ニュートリノ輸送計算を行い、重力崩壊型超新星の爆発機構を明らかにする。令和6年度は質量や自転を変えた様々な親星モデルに対してニュートリノ輻射輸送の第一原理計算に基づいた計算結果からエディントンテンソルの学習を行う。強い磁場の親星の高解像度磁気流体計算を行う。量子運動論的ニュートリノ輸送シミュレーションの結果を AI に学習させ、モデルを構築する。

(5-3)サブ課題 C-3:数値相対論ニュートリノ輻射磁気流体シミュレーションによるブラックホール-中性子星合体：関口 雄一郎（東邦大学）

数値相対論ニュートリノ輻射磁気流体シミュレーションを行ない、ブラックホール-中性子星合体のダイナミクスと長時間進化を解明する。令和6年度は NR-RMHD コードを用いて、(無次元化されたブラックホールスピン, ブラックホール質量, 中性子星質量) = (0.5, 5.4, 1.35), (0.1, 5.4, 1.35) の 2 モデルの計算を実行する。

(6-1)サブ課題 D-1:恒星活動の多様性：堀田 英之(名古屋大学)

大規模数値シミュレーションを用いて、恒星活動星の多様性の起源を理解することを目的とする(ダイナモの自転角速度依存性、巨大黒点の発展、コロナ・恒星風のダイナミクス等)。令和6年度は太陽よりも質量の小さい恒星について自転角速度のパラメータを変えたシミュレーションを実施する。太陽型星についてスーパー黒点の時間発展を追うシミュレーションの初期計算を行う。R2D2 の黒点形成計算を境界条件にしたフレア・コロナ質量放出シミュレーションを実施する。

(6-2)サブ課題 D-2:惑星環境のダイナミクス：樫村 博基（神戸大学）

惑星全球の高解像度シミュレーションおよび機械学習等を用いたデータ解析により、大気やマン托ルの

動態について理解することを目的とする。令和 6 年度は、火星・金星大気について高解像度計算を実施し、得られたデータと 1 年目のデータとの比較から地形の影響を抽出し、鉛直対流に対する地形影響の教師データを作成、自動分類 AI を強化する。地形あり計算の出力データ全体を自動分類 AI で解析し、鉛直対流の全体像に迫る。マントル対流について、プレートの破壊強度やその下のマントルの粘性率を様々に変化させ、プレートテクトニクスが起こるための条件を解明する。火成活動を組み込んだマントル対流シミュレーションにより、月の内部を想定したマグマの発生・移動のシミュレーションを実施する。ガス惑星大気について、これまでの「富岳」成果創出加速課題で行った上層に安定成層が存在する設定での計算を引き続き行い、より長時間後の漸近的状态を追求する。並行して AI によるデータ解析を通じて小規模対流の構造を抽出し、対流による渦運動と帯状流の生成維持の様子を調べ、全層熱的不安定な場合との違いを議論する。

(7) プロジェクトの総合的推進（成果発表・広報普及・アウトリーチ）

研究内容と成果を広報して国民の理解を得ることについて、本課題として重視していきたい。このため、研究成果を積極的にプレスリリースして国民に伝えていく。プレスリリースに関しては、令和 5 年度でも多くの実績があり 1 年間で計 6 件行った。毎年、成果報告会を行うとともに、これまで行ってきた動画を含む定期的な動画配信やイベント等での普及活動も継続する。また、ユーザの拡大も重要視している。そのため、FDPS 初級講習会（毎年開催）を開催し、また、国立天文台シミュレーションプロジェクト主催の講習会である流体学校（毎年開催）を後援し、講師を派遣する。素粒子原子核課題と連携し計算科学を軸に他分野の交流として HPC-Phys 勉強会の開催にも協力する。今後もこれまで以上に積極的アウトリーチおよび新規ユーザの開拓、人材育成に力を入れる。

2-2. 実施内容（成果）

(1) 研究総括：大須賀 健（筑波大学）

本課題全体を総括し、以下(2)～(6-2)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本課題ウェブサイトに掲載し、「富岳成果創出加速プログラム」基礎科学合同シンポジウム 2024（令和 7 年 1 月 8-10 日@アーバンネット神田カンファレンス）を開催するなどして積極的に公表し、今後の展開に役立てた。

(2) AI 班：AI を用いた宇宙・天文シミュレーションの新基軸の開拓：森脇 可奈（東京大学）

シミュレーションの効率化・高速化、およびシミュレーションを用いて観測から物理量を導出するためのニューラルネットワークの構築を各サブ課題と協働で推進した。令和 6 年度は銀河内の超新星爆発の広がりや高エネルギー天体における光やニュートリノの分布にかかる数値計算を代理する AI モデルを構築した。シミュレーションによって得られる模擬観測データを機械学習し、将来得られる観測データから銀河の性質までをも導出する手法を構築した。詳しくは各サブサブ課題の実施内容（成果）を参

照。

(3-1) サブ課題 A-1: 高精度構造形成シミュレーションと観測との協働による宇宙天体形成史の統一的
解明：石山 智明(千葉大学)

宇宙において銀河は大域的には網目状に分布し、その統計的性質から宇宙論パラメータを制限できる。その一方、網目構造に囲まれた銀河が存在しない領域はボイド構造と呼ばれ(図 3-1-1)、これも宇宙論パラメータを制限するための重要な情報である。

本研究では、令和 5 年度までに構築した模擬カタログに加え、新たに宇宙初期密度揺らぎの振幅が小さいシミュレーションを「富岳」上で行いカタログを構築した。それらを組み合わせ、ボイドのサイズ分布を表現する理論的枠組みを較正した結果、宇宙論パラメータを実空間では 1 シグマ、赤方偏移空間では 2 シグマ以内の精度で復元できることを明らかにした。それを Sloan Digital Sky Survey Data Release 7 の銀河カタログに適用して得られた宇宙論パラメータの制限値を、弱重力レンズによるものと組み合わせた結果、プランク衛星による宇宙論パラメータの制限値を概ね復元できた。特に宇宙初期密度揺らぎの振幅と物質の総量の 2 パラメータに対しては、弱重力レンズのみを用いた制限値の不定性を 2~3 倍抑制できる。これはボイドと重力レンズそれぞれの周辺事後分布がおおよそ直交するからである(Fernandez-Garcia, Betancort-Rijo, Prada, Ishiyama, Klypin, Ereza, 2025)。

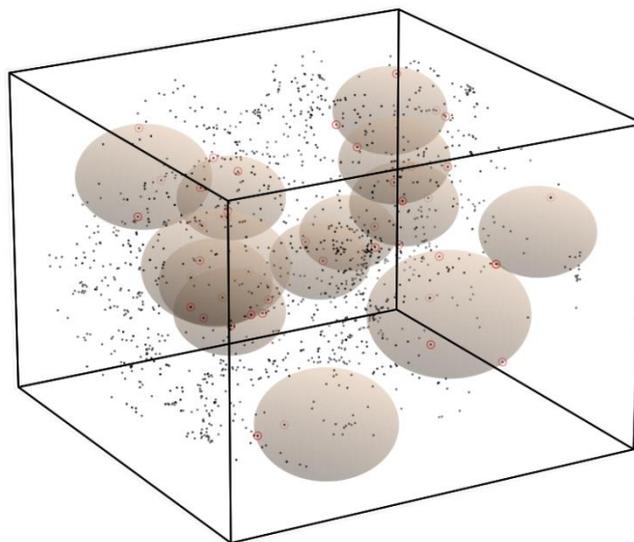


図 3-1-1: シミュレーションデータ上で検出された銀河とボイド構造。黒点は銀河を表し、楕円はボイドを表す。赤い円はボイド表面に分布する銀河を表す。

(3-2) サブ課題 A-2: Vlasov シミュレーションによる宇宙大規模構造形成へのニュートリノの力学的
影響：吉川 耕司(筑波大学)

現在のニュートリノの質量に対する宇宙大規模構造の観測からの制限は、3 世代の質量固有値の和が 0.1eV よりも小さい可能性が高いことを示しているが、それは 3 世代の質量固有値が互いに異なる可能性があること、その場合ニュートリノの質量固有値は「順階層」と「逆階層」と呼ばれる 2 通りの質量固有値の大小関係があることが知られている。特に、質量固有値の大小関係はニュートリノの素粒子論

的な性質を知るうえで重要であるが未だに実験的に不明のままである。一方、これまでの宇宙大規模構造におけるニュートリノの数値シミュレーションでは「全ての質量固有値がほぼ同じ」という質量固有値の和が 0.1eV よりも優位に大きい場合にしか成り立たない設定で行われてきた。本年度の研究では、将来の宇宙大規模構造の観測計画や地上の宇宙論的ニュートリノ検出実験計画と数値シミュレーションの比較の為に、このニュートリノ質量固有値の違いを正しく取り入れた宇宙論的なニュートリノの数値シミュレーションを実施した。その結果、「順階層」と「逆階層」では大まかな密度場や速度場はおおよそ一致するが、小さいスケール特にダークマターハローの中心付近で密度場や速度場に違いが現れることが分かった。また、ダークマターハローの質量分布や宇宙大規模構造の密度揺らぎのパワースペクトルにも小さいながらも観測可能な違いを及ぼす可能性があることが分かった。

また、本年度は数値シミュレーション領域の一部分だけを Vlasov シミュレーションで行いその他の領域は計算コストの小さな N 体シミュレーションで行うためのコード開発を行った。これにより、シミュレーション領域の一部分ではあるがこれよりもはるかに高い空間分解能で Vlasov シミュレーションを行うための準備が整った。

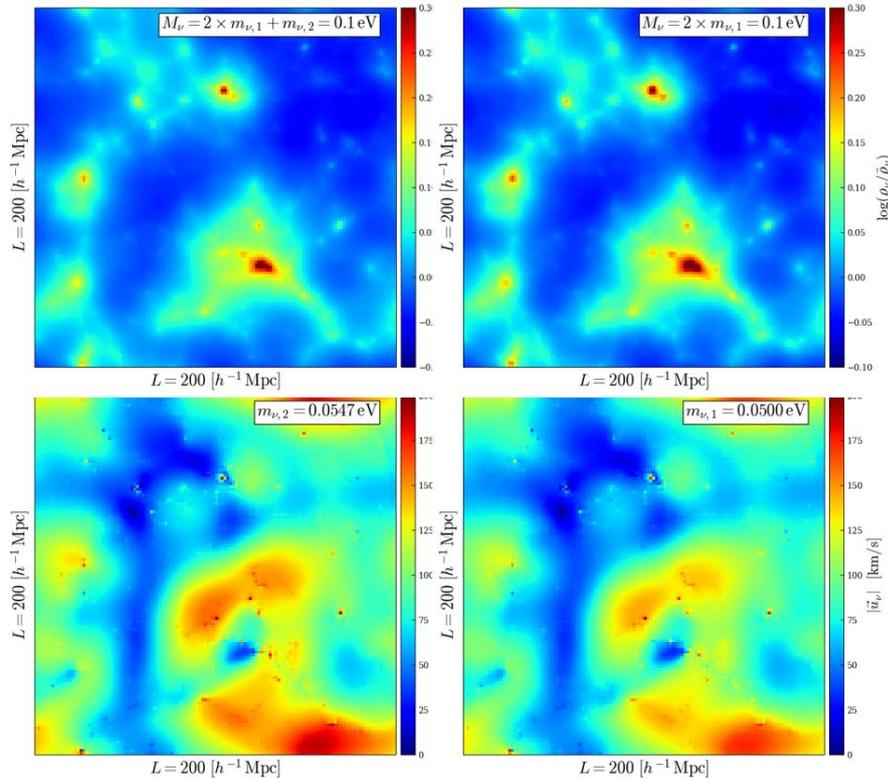


図 3-2-1: ニュートリノ質量階層の違いによる宇宙大規模構造におけるニュートリノの密度場（上段）・速度場（下段）の比較。左側が順階層、右側が逆階層の場合の結果を表している。

(3-3) サブ課題 A-3: 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 :

藤井 通子 (東京大学)

これまでに開発を行ってきた AI を組み込んだ新しいシミュレーションコード「ASURA-FDPS」を用い、従来の最大分解能の銀河形成シミュレーションより 2 桁程度高い分解能をもつシミュレーションを達成し、バリオン・ダークマター共に 10^{11} 粒子を用いた天の川銀河シミュレーションを「富岳」全系 (148, 896

ノード)を用いて実行した。また、1/10 規模、1/100 規模の銀河進化シミュレーションを長時間行い、銀河形成特有のパラメータ調整を行った。図 3-3-1 は、2025 年 2 月の「富岳」全系実行で計測したストロングおよびウィークスケーリングの結果である。最大粒子数は、星 4.9×10^{10} 、ガス 7.2×10^{10} 、ダークマター 1.8×10^{11} である。これまでの同種のシミュレーションでは 10^9 以下であったのと比べ、100 倍以上多くの粒子を使用した。もっとも計算コストが大きい重力計算では非常によくスケールしている。一方、ノード全体での通信を必要とする部分は、ノード数が大きくなると実行時間全体に占める割合が高くなり、ボトルネックとなる。

図 3-3-2 は、AI を組み込んだ新しいシミュレーションコードを用いて行った銀河シミュレーションと従来の手法で計算した結果との比較である。銀河円盤内の密度や温度の頻度分布、銀河円盤内の星形成率、ハロー領域のガス質量等を比較し、従来のシミュレーションと変わらない結果が得られることを確認した。

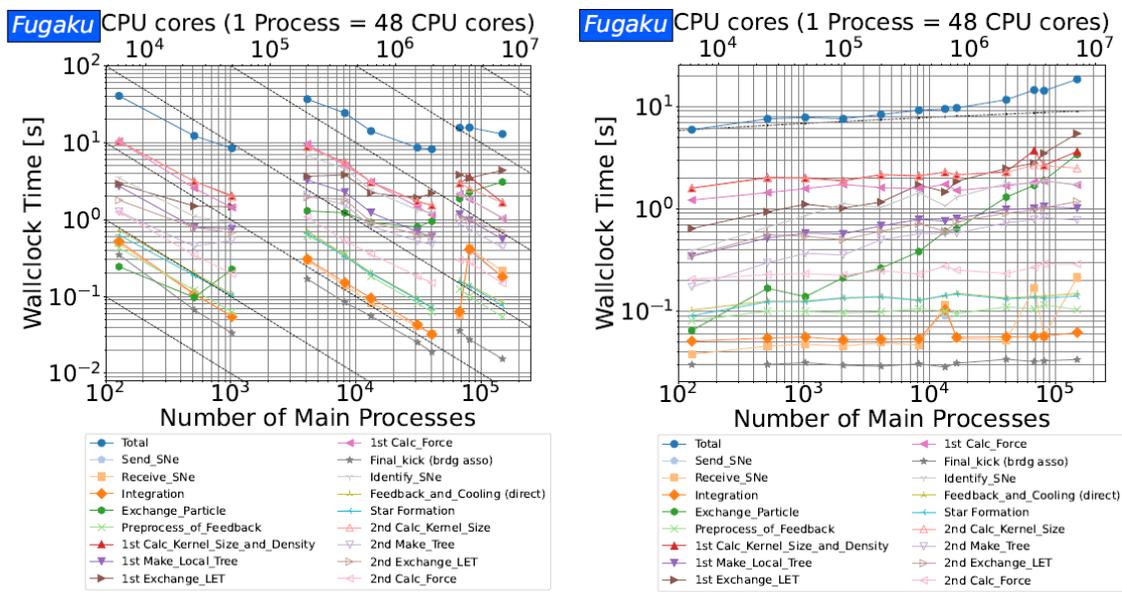


図 3-3-1: 「富岳」を用いて得られた「ASURA-FDPS」のストロングスケーリング (左) とウィークスケーリング (右)。

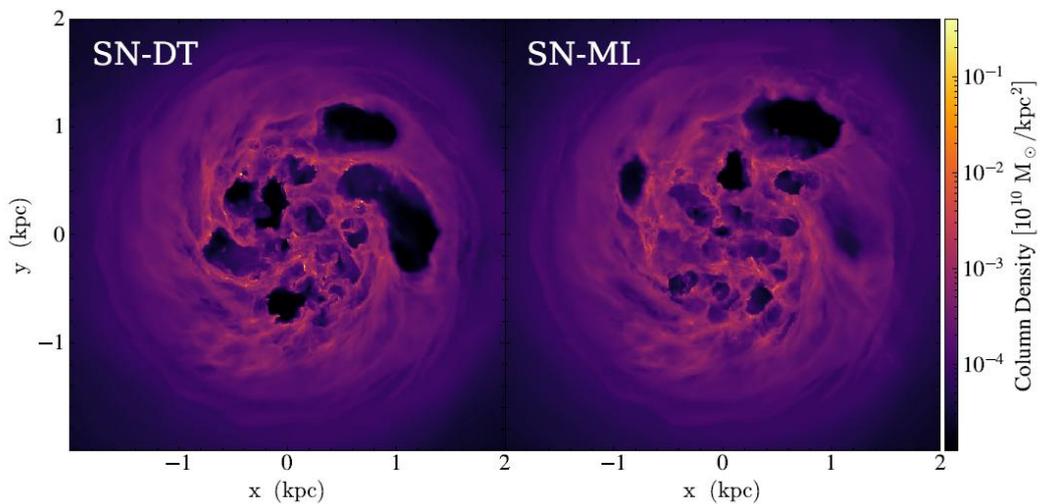


図 3-3-2: 従来の手法で行った銀河進化シミュレーションの銀河円盤のガスの密度分布 (左) と本研究

で開発した AI を組み込んだ新しい手法で得られた結果（右）

(4-1) サブ課題 B-1: 銀河円盤スケールの分子雲・星形成過程の高解像度磁気流体シミュレーション:

富田 賢吾 (東北大学)

令和 6 年度は、主に「銀河円盤の 3 次元磁気流体シミュレーション」と「大質量星粒子モジュールの開発とテスト計算」をおこなった。

「銀河円盤の 3 次元磁気流体シミュレーション」では、様々な初期縦磁場強度での銀河円盤シミュレーションにより磁場構造と円盤構造の長時間発展を調べた。それにより、初期に薄い円盤が長期的な磁場増幅によって徐々に膨らむ場合があることを発見した。さらに、異なる解像度での比較計算をおこない、シミュレーション結果の詳細な解析と組み合わせることで、大局的な磁場構造と乱流的な磁場構造の相互作用によって先に述べた磁場増幅の効率が決まることを明らかにした。この結果により、天の川銀河のような系での磁場の進化や円盤構造への影響の理解を進めることができた。図 4-1-1 は、低解像度で乱流的磁場が弱く長時間の磁場増幅による円盤膨張が起こっている場合と、高解像度で乱流的磁場が強く円盤膨張が起こっていない場合の円盤断面の磁束密度分布を表している。

「大質量星粒子モジュールの開発とテスト計算」では、銀河の現実的な時間発展をシミュレーションするため、前年度までに Athena++ に実装されていた粒子モジュールを拡張し、超新星を起こすような 8 太陽質量以上の大質量星について、ガスからの星形成、星の軌道進化、寿命を迎えた際の超新星フィードバックを記述可能なモジュールを開発した。大質量星の形成は銀河形成シミュレーションで広く利用されている自由落下時間とガス密度に基づくモデルにより記述し、軌道進化は Athena++ の粒子モジュールの機能を利用して記述し、超新星爆発の影響は周囲のセルにエネルギーと運動量を付与することで記述する。テスト計算では、主に孤立した乱流的な分子雲において複数の大質量星が形成して超新星爆発する過程の計算をおこない、先述の銀河円盤の 3 次元磁気流体シミュレーションに大質量星粒子モジュールを組み込むための準備が整っていることを確認した。

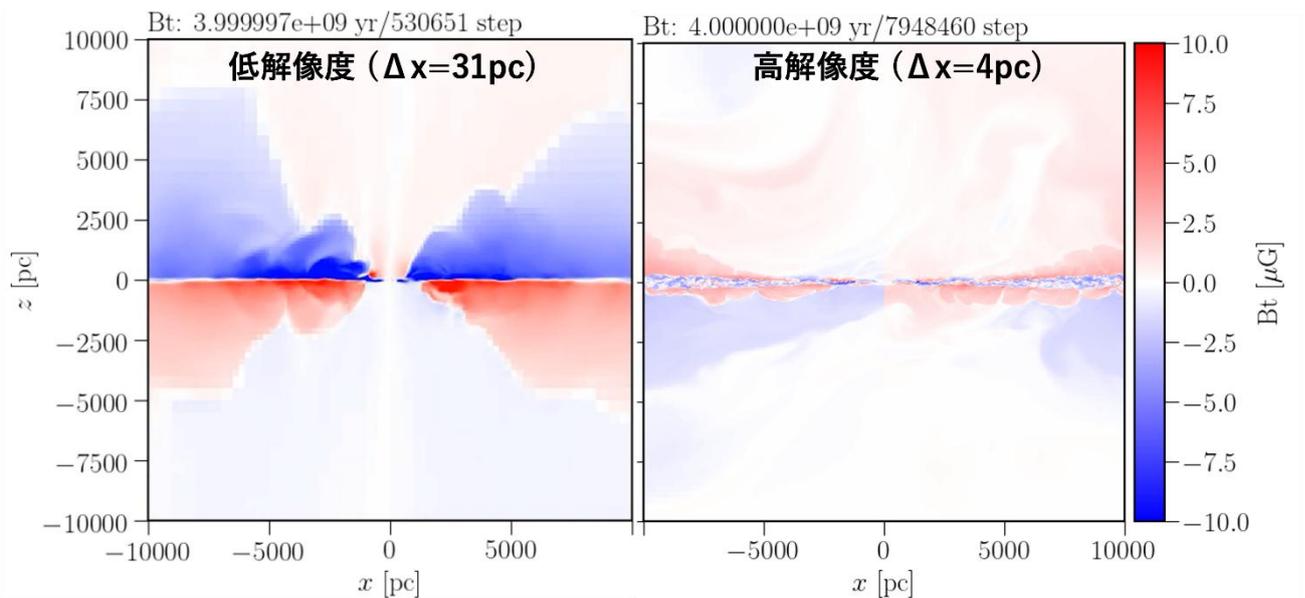


図 4-1-1 : 銀河円盤の 3 次元磁気流体シミュレーション得られた円周方向の磁束密度分布。低解像度の

計算では小スケールの乱流を分解できないが、高分解能計算では円盤内の乱流が分解され、定性的に異なる構造が得られた。

(4-2) サブ課題 B-2: 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: 岩崎 一成 (国立天文台)

令和 6 年度は、全ての磁気流体非理想効果(オーム散逸・ホール効果・両極性拡散)を考慮した原始惑星系円盤の大域シミュレーションをおこなった。その過程で、ホール効果の実装方法を検討し、従来用いられてきた手法よりも高精度な手法を開発し、査読付き学術論文として出版した(Iwasaki and Tomida 2025)。ホール効果を考慮しない場合、「富岳」を用いた我々の研究(Iwasaki et al. 2024)において、縦磁場がほぼ 0 になる遷移層が内側の活性領域の外に形成され、遷移層を介した円盤外側から内側への質量輸送がおこらないことが明らかとなっていた。ホール効果を考慮すると、円盤の角運動量の方向と大局的な縦磁場方向が平行な場合(平行モデル)と反平行な場合(反平行モデル)で、異なる円盤進化を駆動することが先行研究において知られており、本計算でも両モデルの結果に大きな違いがあることを確認した。初期進化では円盤内でガス降着がおこった。平行モデルではホール効果によって遷移層が縮小し、円盤外側から円盤内側への質量輸送が起こることがわかった。反平行モデルではホール効果によって遷移層が拡大し、ホール無しモデルと同様に外側円盤から内側円盤への質量輸送が起こらない。一方、両モデルにおいて、円盤内で起こっていた降着流が円盤上空に浮上することがわかった。この降着流の浮上メカニズムは、平行モデルと反平行モデルで異なる。これまで円盤内で起こると考えられていたガス降着が、円盤上空で起こる可能性を示唆しており、ガス中でのダスト進化を扱う惑星形成理論に大きなインパクトを与えると期待される。

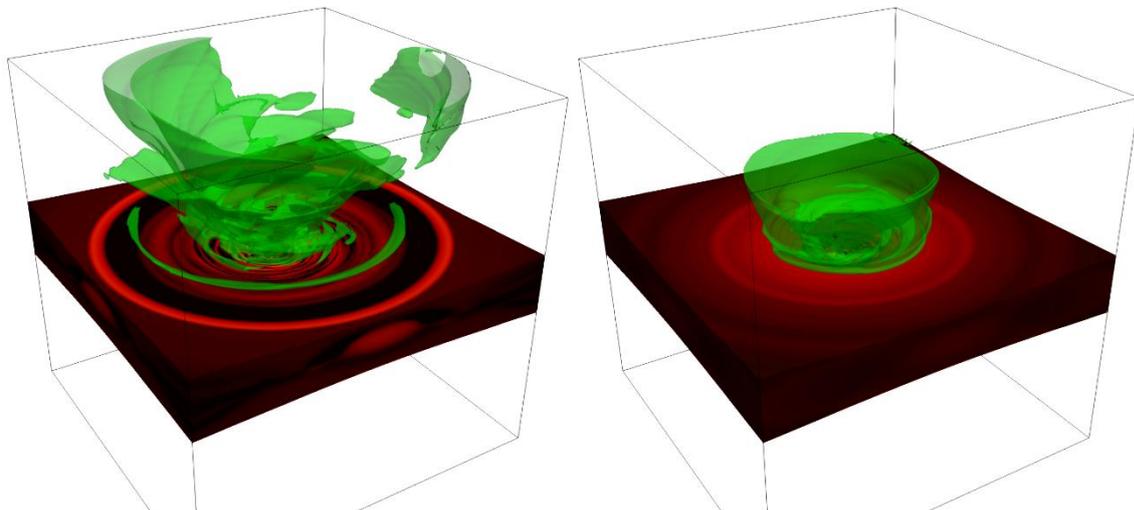


図 4-2-1: 円盤角運動量方向と大局的な縦磁場方向が平行なモデル(左)と反平行なモデル(右)の結果。色マップは縦磁場強度を表す。ホール効果の働きにより、両モデルで磁場強度分布に大きな違いがあることが分かる。緑の等高線は円盤片側の上空で起こる大局的な降着流を表す。

(4-3) サブ課題 B-3: 原始惑星系円盤中での固体惑星形成: 牧野 淳一郎 (神戸大学)

今年度は、「富岳」を用いて大領域の惑星形成過程の直接シミュレーションを進めた。微惑星駆動惑

星移動 (PDM) とは、原始惑星がある程度の質量差のある多数の微惑星の中にあるとき、重力相互作用が非対称になるため一度外側または内側への移動を始めるとそのまま動き始めるという現象である。前年度は、標準的なべき乗分布をもつ微惑星円盤に単一の原始惑星を置くシミュレーションで、PDM の発生する条件の確認をおこなった。その結果、従来は原始惑星と微惑星の質量比が 100 程度以上でなければ PDM はおこらないとされていたが、そうではなく、PDM 自体は起こるがその方向がランダムに変化し、その変化率が質量比に依存することがわかった。この結果は、PDM がある程度成長した微惑星や原始惑星の半径方向の拡散や急速な移動を引き起こす可能性を示唆する。この結果をうけて、「富岳」で初めて可能になった 100 万近くの粒子数での、標準的な林モデル円盤 (ダスト密度は標準の 4 倍) からの惑星形成計算をおこなった。

結果を図 4-3-1 に示す。初期の円盤は 2-20AU に配置した。左、中央のパネルは粒子数 35 万、右は 70 万であり、積分時間は図にあるように 120 万年である。最終状態でもっとも成長していた 30 個の天体の軌道長半径の変化をプロットした。

どの場合でも、4AU 程度より内側で形成された天体のうちいくつかは、円盤のカットオフ半径である 20AU 近くまで移動していることがわかる。また、それ以外の天体も、初期に 2-4AU で形成されたものが、1-7AU 程度まで広がっている。

非常に遠くまで移動するものは、多くの場合に 1 つではなく、2 つないし 3 つがクラスターを作って移動する。一方、そこまで移動しないが、分布が広がっているものは、天体間の間隔がほぼヒル半径の 5 倍を維持し、天体が成長するに従って間隔を広げていることがわかった。

このどちらのタイプの移動も、「その場」で惑星ができるとして従来の惑星形成理論では考慮されていなかったものであり、太陽系の惑星、系外惑星の両方について、形成過程の理解を大きく変える必要があることが明らかになった。

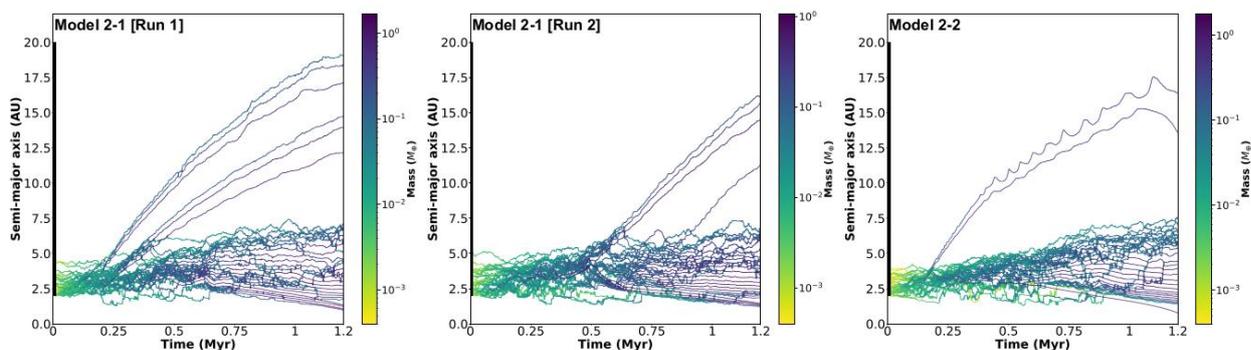


図 4-3-1: 形成された原始惑星の半径方向の移動。左 2 枚は 35 万粒子、右は 70 万粒子の計算。横軸は時間、縦軸は軌道長半径、色は質量を表す。

(4-4) サブ課題 B-4: 原始惑星系円盤の乱流中のダスト粒子の衝突付着成長シミュレーション: 石原 卓 (岡山大学)

乱流の直接数値計算 (DNS) を活用した大規模計算 [1] 高レイノルズ数乱流 DNS (格子点数 4096^3) 中の慣性 (流体への追従性) の異なるダスト粒子 (2048³ 個ずつ 8 種類) の追跡シミュレーション、および [2] 乱流 DNS (格子点数 2048³) 中のダスト粒子 1024³ 個の衝突付着成長シミュレーションを用いて、乱流中の

ダスト成長の新しいシナリオを提案し、その定量的な検証を行うことを目的とした研究を推進した。これまでに[1]慣性の大きい粒子が乱流中のエンストロフィが小さくて粒子の密集する領域で低速衝突すること、および[2]乱流中で付着成長した粒子の数が加速的に増加すること等の結果を得ている。令和6年度の数値実験では衝突付着成長した粒子が弱い剪断領域に集積する傾向があることが判明した(図4-4-1参照)。これより乱流中のダスト成長のシナリオとして、高レイノルズ数乱流中で衝突付着成長するダスト粒子はエンストロフィが小さい弱い剪断領域に集積する傾向があり、そのような領域で低速衝突を繰り返して寡占的に成長することで衝突破壊問題を回避しうる可能性が示唆された。

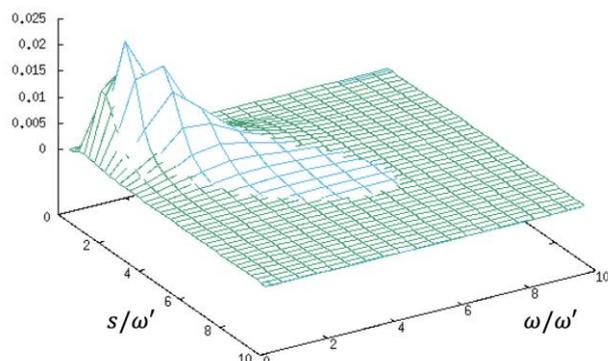


図 4-4-1：乱流 DNS (格子点数 2048^3) を用いたダスト粒子の衝突付着成長シミュレーション (追跡粒子数 1024^3 個) によって得られた二粒子合体の粒子の位置における規格化したストレイン s と渦度の大きさ ω の結合確率密度関数 (青) を乱流場全域の結果 (緑) と比較したもの。二粒子合体の粒子は s と ω の大きさがそれほど大きくなく、 $s \approx \omega$ となるような弱い剪断領域に集積する傾向があることがわかる。

(5-1) サブ課題 C-1: 大規模数値流体シミュレーションおよび模擬観測、プラズマ粒子計算によるブラックホール降着円盤およびジェットの解明：松本 洋介 (千葉大学)

高エネルギー粒子加速

Particle-in-Cell (PIC) 法によるプラズマ粒子加速について、特に、1. 太陽圏終端衝撃波におけるイオン加速、2. 非相対論～相対論的磁気リコネクションによるイオン・電子加速、3. 数値チェレンコフ不安定を抑制するフィルタ関数の機械学習についての研究を行った。

1. の太陽圏における終端衝撃波をモデル化した、イオン・電子・ピックアップイオンの3成分系プラズマの計算を行い、斜め衝撃波におけるピックアップイオンの反射と上流における波動励起、その結果としてのピックアップイオンの非熱的粒子加速の機構を明らかにした。上流大振幅波動が衝撃波面において静電ポテンシャルを増幅させ、その効果によってイオンが効率的に上流へ反射されることが明らかになった。本成果は *Astrophysical Journal Letters* 誌に掲載され、プレスリリースを行った。(図 5-1-1)

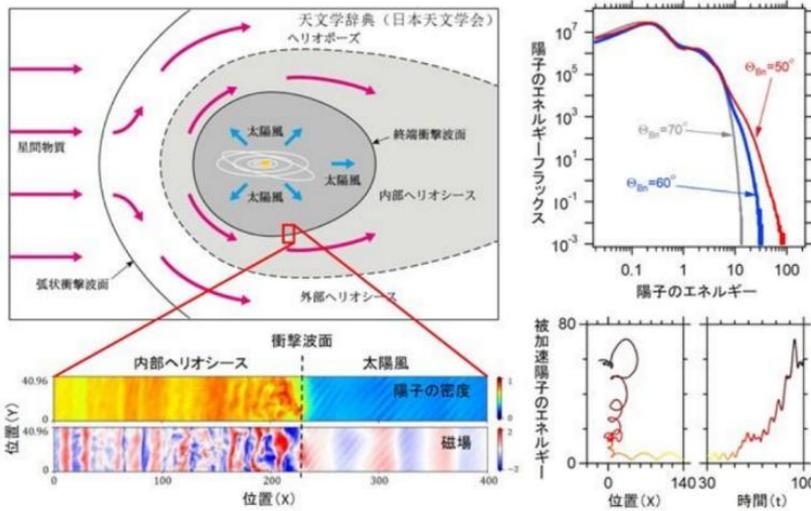


図 5-1-1: 太陽圏の概要 (左上) と衝撃波構造 (左下)、下流におけるエネルギースペクトル (右上) と近傍の粒子軌道 (右下)。プレスリリースより抜粋。

2. 磁気リコネクションは磁場エネルギーをプラズマの運動エネルギー、加熱、非熱的粒子加速へと変換する天体物理学における基礎的なプラズマ過程である。本研究では、特に電子・イオンからなるプラズマにおけるこのエネルギー分配のメカニズムを解明するため、大規模PICシミュレーションを実施した。非相対論的から超相対論的な幅広い初期プラズマ条件下でのシミュレーション結果を解析した結果、プラズマ温度が粒子の静止質量エネルギーに近づくにつれて非熱的粒子加速の効率が顕著に増加すること、また温度領域によって電子とイオンへのエネルギー分配の様相が大きく異なることを明らかにした。これらの結果は、様々な天体における磁気リコネクション現象に伴うプラズマ加熱や高エネルギー粒子生成の理解に重要な示唆を与える。現在、これらの成果を論文としてまとめており、今後は3次元シミュレーションへと研究を拡張していく予定である。

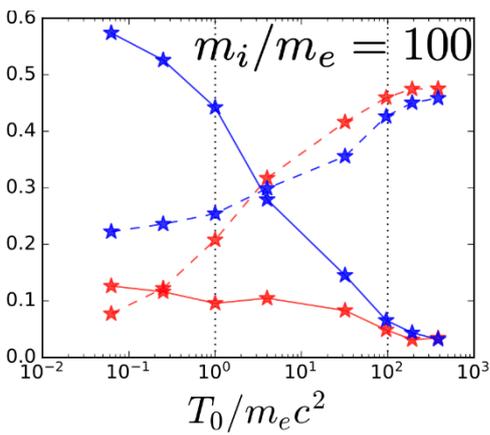


図 5-1-2: 磁気リコネクションによる粒子の熱的 (実線)・非熱的 (破線) エネルギー分配の初期温度に対する依存性をイオン (青)、電子 (赤) について示したものの。縦の点線は各粒子種の静止エネルギーを示す (左側の縦線が電子)。

3. 数値チェレンコフ不安定を抑制する新たな数値フィルタリングの手法の検討を行った。機械学習の手法の一つである記号回帰 (Symbolic regression) を採用するに当たって、利用できる各ライブラリの性能評価を行い、活発に開発が行われ導入が容易な PySR ライブラリ (arXiv:2305.01582) の導入を行った。まずは簡単な学習データからデータの関係式を記述する方程式の予測を行い、その有効性を確認した。

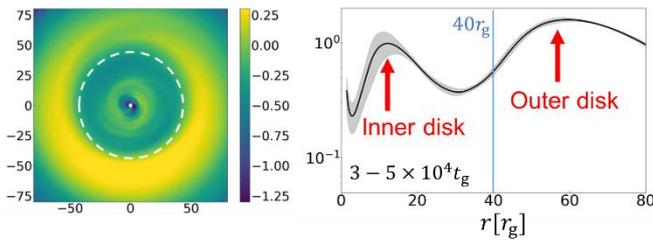


図 5-1-3: (左図) 円盤面の平均密度、(右図) 平均密度の半径依存性。

プレスリリースを行った。本年度はさらにトラスの半径依存性について調べ、トラス半径が大きい場合は、内側に Inner disk が形成されることを明らかにした。図 5-1-3 の左図は円盤面の平均密度、右図は平均密度の半径依存性を表しており、2つの密度ピークが表れていることがわかる。今後はさらなる半径依存性の調査及び Inner disk が光度やジェットに及ぼす影響の調査を進めていく予定である。

一般相対論的輻射磁気流体コード UWABAMI

一般相対論的輻射磁気流体コード UWABAMI を用いた 3 次元の長時間計算を実施し、歳差運動する高光度降着円盤についての研究を行った。降着円盤とブラックホールの自転軸のずれによる一般相対論効果により降着円盤は歳差運動し、ジェットの噴出方向や輻射エネルギーの放出方向が降着円盤と共に歳差運動していることを明らかにした。本成果は *Astrophysical Journal* で掲載され、

一般相対論的多波長輻射輸送コード RAIKOU による輻射スペクトルおよびイメージ計算

RAIKOU コードを用いて電波から超高エネルギー・ガンマ線までの多波長スペクトル計算を実施し、イベント・ホライズン・テレスコープ (EHT) を中心とした超大質量ブラックホール M87 の多波長同時観測データの Official Paper における理論モデリングを行った。その結果、超高エネルギー・ガンマ線は電波放射から少なくともブラックホール半径の数 10 倍程度離れた位置における粒子加速が原因である可能性を指摘した。本成果は *Astronomy & Astrophysics* に掲載され、プレスリリースを行った (図 5-1-4)。

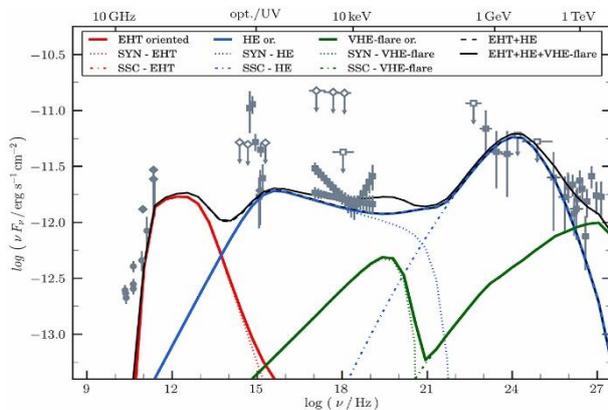


図 5-1-4: M87 の多波長スペクトルの観測データ点と、RAIKOU で計算したマルチ・ゾーンの理論スペクトル (赤、青、緑の線、色毎に放射領域は異なる)。EHT MWL Science Working Group (2024)。

また、M87 における相対論的ジェット内部構造の準解析的な一般相対論的磁気流体データを用いて、電波イメージ計算を実施した。その結果、ジェットの中に多重リング画像が現れる可能性があることを示し、その成果は *Astrophysical Journal* に掲載された。さらに、歳差運動を伴う降着流とジェットの詳細な時間変動スペクトルとイメージ計算に向けて、RAIKOU コードの高速化も実施し、約 30 倍の高速化に成功した。これにより、次年度以降の計算の準備が整った。

非相対論的輻射磁気流体コード CANS+R

非相対論的輻射磁気流体コード CANS+R を用い、スペクトル状態遷移を起こすブラックホール周囲の降着流シミュレーションを実施した。今年度は、初期に弱いトロイダル磁場に貫かれた回転平衡にあるトラスを初期条件としたシミュレーションを実施した。磁気回転不安定性による磁気乱流が発達し角運

動が外側へと輸送され、下図に示すような降着流が形成された。また、この時に非軸対称な腕状の構造を持つ降着流が形成された（図 5-1-5 右図）。また高解像度化の結果、より細かい乱流構造が形成された。このシミュレーションでは、降着率が低く光学的に薄い状態を仮定したシミュレーションで X 線連星や活動銀河核で観測されるハード X 線が卓越した状態に対応する。今後はこの結果を初期条件として降着率が上昇した場合のシミュレーションを実施し、X 線連星や活動銀河核で観測されるハード X 線が卓越する状態からソフト X 線が卓越する状態への遷移過程のシミュレーションを実施し、この状態の時に観測される短時間変動の再現し物理過程を調査していく。

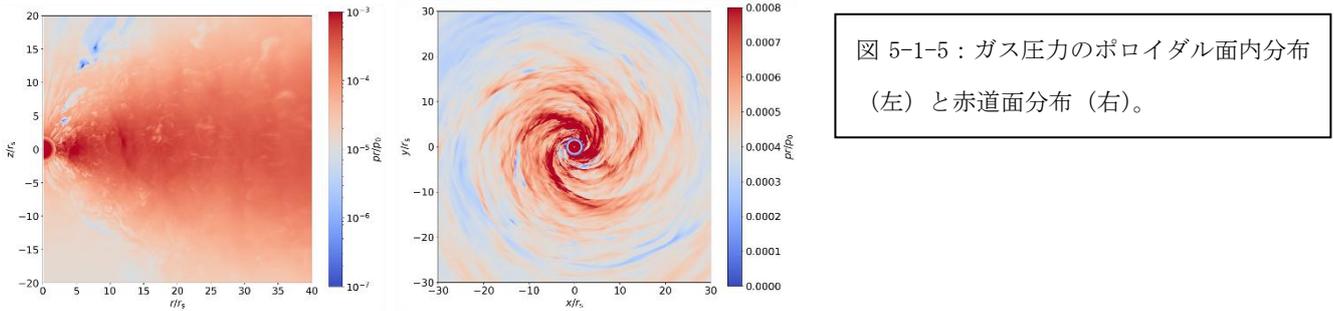


図 5-1-5：ガス圧力のポロイダル面内分布（左）と赤道面分布（右）。

(5-2) サブ課題 C-2: 超新星爆発メカニズムを支配するニュートリノ輻射輸送と乱流現象の解明：滝脇知也（国立天文台）

3次元第一原理的ニュートリノ輻射輸送シミュレーション

昨年度に引き続き、ボルツマン輻射流体コードを用いた超新星のシミュレーション結果を教師データとし、AI を活用して輻射輸送におけるクロージャー関係式のサロゲートモデルの開発を進めた。重力崩壊型超新星のニュートリノ輻射輸送計算ではモーメント法による近似が一般的に用いられるが、この手法で仮定される従来のクロージャー関係式は、必ずしも高い精度が保証されていない。そこで、本研究ではより厳密な計算結果を再現する形で関係式を構築することを目指した。AI モデルとしては、決定木回帰を基盤とする Light Gradient Boosting Machine (LightGBM) だけではなく LSTM (Long Short-Term Memory)+GAN (Generative Adversarial Networks) を採用し、これまでに用いていた深層ニューラルネットワークに比べて、より高精度かつ優れた汎化性能を示す関係式を得ることができた。さらに、三次元データを使ったエディントンテンソルの計算も開始した。今後も、実装性に優れた AI モデルの構築と訓練を進めていく予定である。

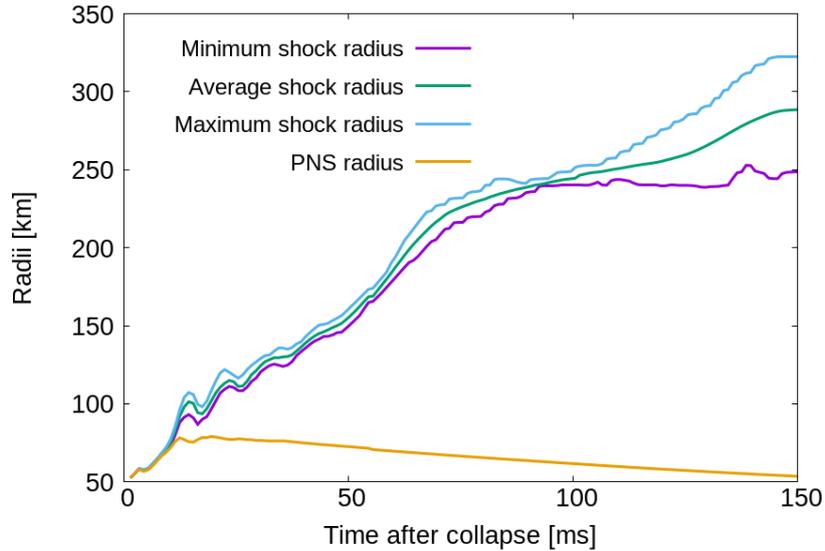


図 5-2-1 : 3D 計算における平均衝撃波半径 (緑)、最小衝撃波半径 (紫)、最大衝撃波半径 (青)、原始中性子星半径 (黄) の時間発展

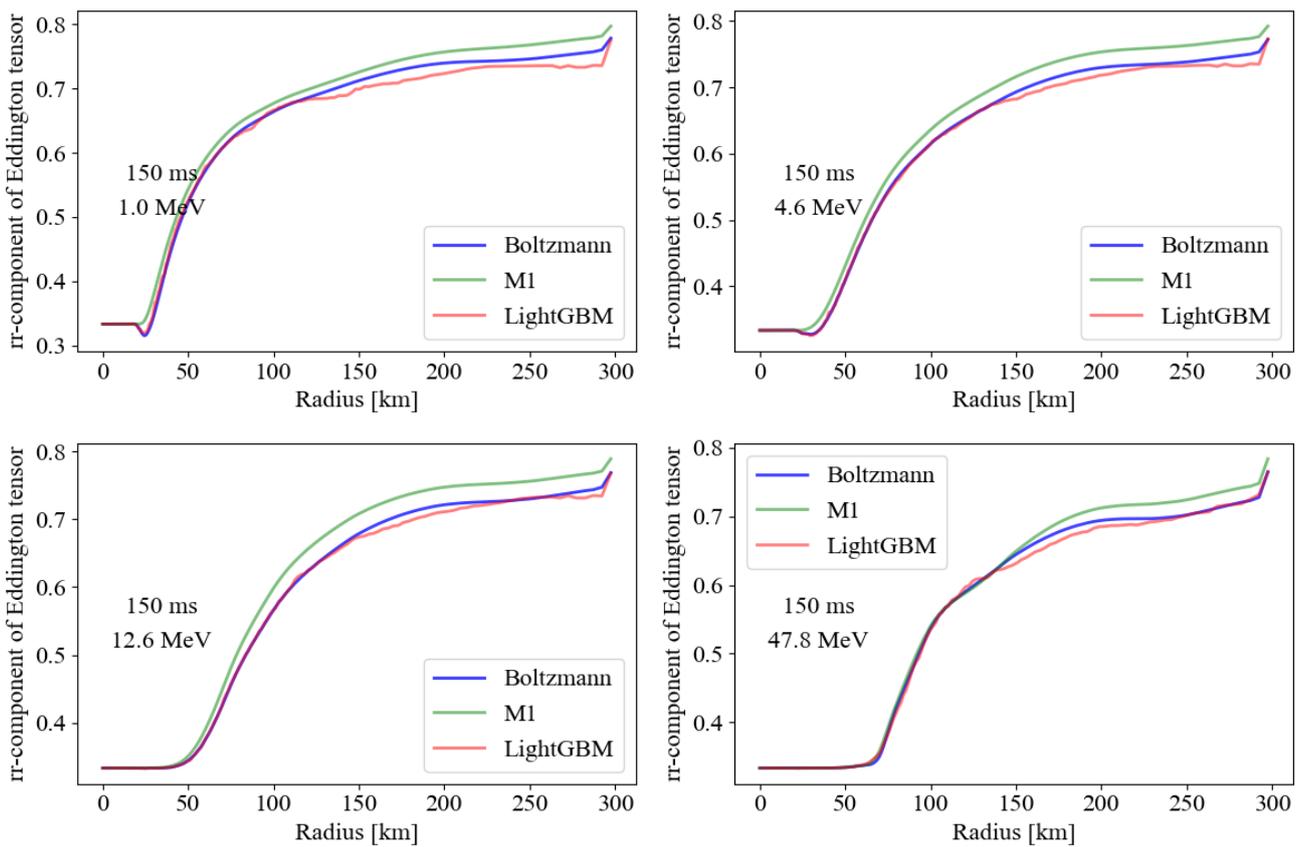


図 5-2-2 : 3D 計算でバウンス後 110 ms の $\theta=0^\circ$ のデータを再現するように訓練した AI モデルで、バウンス後 150 ms のデータを出力した結果。エディントンテンソルの径方向成分の動径分布を書いており、青、緑、赤の線はそれぞれ正答、慣習的な関係式の結果、今回の AI モデルの結果に対応する。4 枚の図はそれぞれ違ったニュートリノエネルギーでの動径分布を表す。緑の慣習的モデルより赤の AI モデルのほうが青の正答をよく再現できている。

高解像度磁気流体計算 3DnSNe

弱磁場で無自転の鉄コアから3次元シミュレーションを実行し、親星の質量が違う16モデルに対して、爆発の強さ、自転、磁場の発展を調べた(Nakamura et al. 2025)。図5-2-3にその様子をしめしている。爆発後に残される中性子星の質量と自転速度が観測されているものと極めて近いものになることを確認した。本シミュレーションの高解像度シミュレーションを今後進めていく。また、これまでシミュレーションに取り入れられていなかったニュートリノ振動の効果を現象論的に取り入れることで爆発エネルギーが観測値に近づくことを世界で初めて3次元シミュレーションを用いて示した(Mori et al. 2025)。より強磁場、強自転のモデルでも計算し、ニュートリノの放出からくる低周波数重力波の振幅を見積もった(Shibagaki et al. 2024)。こうした超新星は初期宇宙、低金属量を持つ銀河で起こると考えられてきたが、星が連星で生まれてきて、互いに質量を交換し連星の軌道を星の角運動量に交換するプロセスを考慮すると、我々の銀河や近傍の銀河でもこうした超新星爆発が稀に起こりうることを示した(Kinugawa et al. 2024)。100MeV程度の質量をもつsterileニュートリノが超新星爆発を駆動するモデルについても研究を進めた(Mori et al. 2024)。

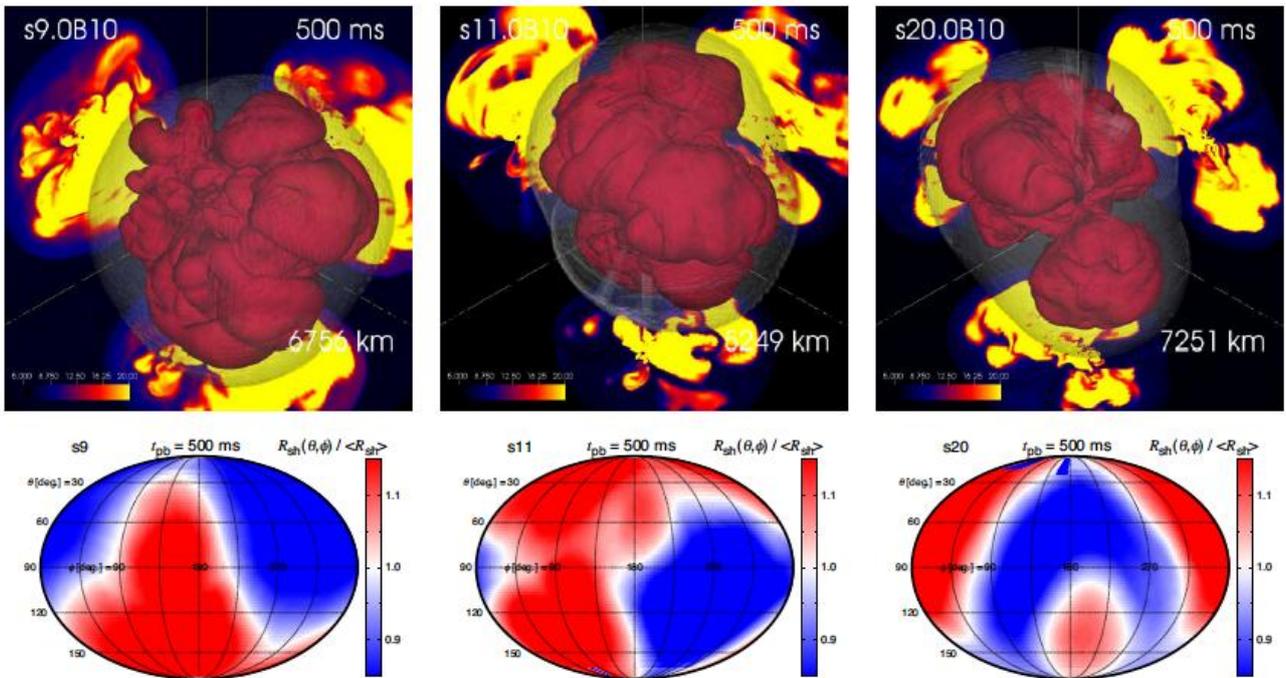


図 5-2-3 : Nakamura et al. 2025 で計算された3つのモデルのエン트로ピープロファイル(上)と衝撃波半径の角度依存性 Mollweide projection したもの(下)。

量子運動論的ニュートリノ輸送シミュレーション GRQKNT

昨年度までの量子運動論的ニュートリノ輸送計算の結果をもとにして、ローカルにニュートリノの振動の効果を取り入れることができる現象論的なモデルを作った。その記述を用いて中性子星まわりでグローバルな Boltzmann ニュートリノ輻射輸送を行った。結果、中性子星まわりでの陽子、中性子比の偏りがある場合、ニュートリノ振動が誘起され、ニュートリノが運び去る運動量が非球対称的になることがわかった。この結果は、最終的に観測されている中性子星のキックと呼ばれる固有運動の新しい生成メカニ

ズムとなる(Nagakura and Sumiyoshi 2024)。

(5-3)サブ課題 C-3:数値相対論ニュートリノ輻射磁気流体シミュレーションによるブラックホール - 中性子星合体：関口 雄一郎 (東邦大学)

令和 6 年度の課題では、(無次元化されたブラックホールスピン, ブラックホール質量, 中性子星質量) = (0.5, 5.4, 1.35), (0.1, 5.4, 1.35) のブラックホール中性子星連星に対して 1.5 秒以上の長時間数値相対論ニュートリノ輻射磁気流体シミュレーションを行った。また前年度計算したブラックホールスピン 0.3 のモデルに対しての解析を行った。ブラックホールスピン 0.3 のモデルは、従来のブラックホール中性子星連星に比べてブラックホールスピンが小さく、 10^{-2} 太陽質量の降着円盤や 10^{-3} 太陽質量の動的な物質放出が見られたモデルであり、また、重力波の観測から示唆されるブラックホールのスピンと整合的なモデルとなっている。

降着円盤内部では磁気回転不安定性が引き起こされ磁場増幅が起こると同時にダイナモが駆動され大域的なラジアル磁場の周期的な生成 (周期的な極性の反転) が確認された。ブラックホールの中心から半径 80km で評価されたこの周期は 0.06 秒であり、アルファ・オメガダイナモ理論から推定される周期と無矛盾であることから、アルファ・オメガダイナモが駆動されたと考えられる (図 5-3-1 参照)。生成された大域的なポロイダル磁場がブラックホール回転軸付近に供給されることで磁気圏が形成され、最大光度 10^{49} erg/s 程度のポインティングフラックスが合体後 0.5 秒から駆動された。本結果は論文投稿に向けて準備中である。

また、本年度はブラックホール中性子星連星合体と合体後に形成される磁気圏を長時間に渡りより正確に時間進化させるための計算手法とアプリケーションの確立にも注力した。ブラックホール中性子星連星合体は連星中性子星合に比べて質量の非対称性が大きく合体後のブラックホールが大きな速度を持ち計算領域外に動いてしまうことがあるが、適切なゲージを選ぶことで漸近平坦性を保ちながらブラックホール速度を落とす手法を実装した。加えて、磁気圏内の処方箋を改良し人工的なエネルギーの注入を抑えながらも安定的に計算を進めることを可能にした。

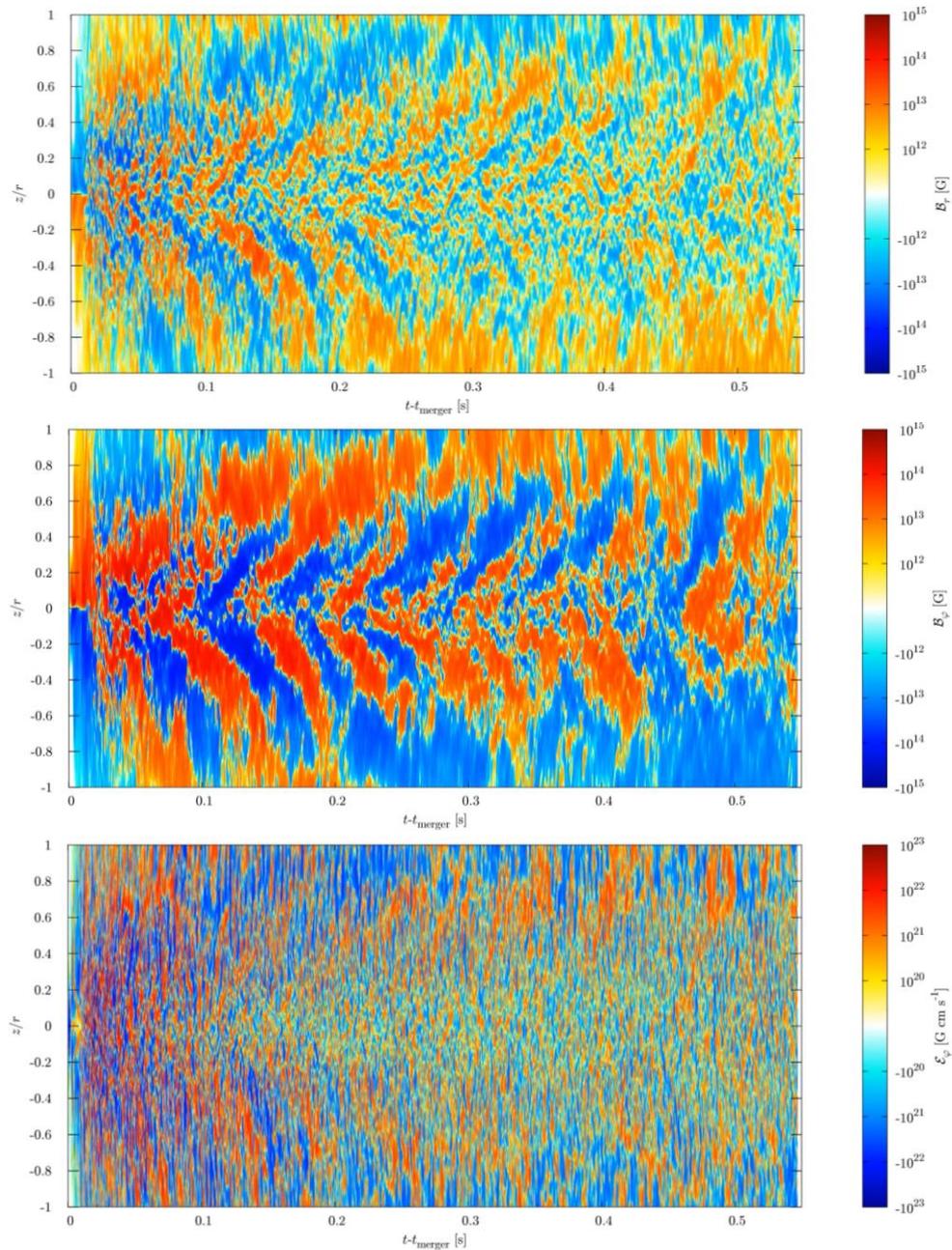


図 5-3-1: ブラックホールを中心とした半径 80km の円筒表面上で評価した、平均ラジアル磁場、平均トロイダル磁場、トロイダル起電力のバタフライダイアグラム。平均トロイダル磁場とトロイダル起電力には反相関 ($z > 0$) または相関 ($z < 0$) が見られておりアルファ・オメガダイナモが働いていると考えられる。

(6-1) サブ課題 D-1: 恒星活動の多様性 : 堀田 英之 (名古屋大学)

恒星内部を探る R2D2 シミュレーションについては、令和 6 年度に低質量太陽型星の調査を実施した。これまでは、太陽成層でのシミュレーションを実施していたが、令和 5 年に開発システムを用いて低質量に拡張した。特に太陽の 60% の質量の恒星について 1 億点程度で、太陽の自転に対して 0.5, 1 倍のシミュレーションを実施した。来年度以降に「富岳」でのみ可能な大規模シミュレーションを実施する準備が

整った。

また、低質量について、超巨大黒点のシミュレーションを実施した。太陽質量、0.6 太陽質量、0.3 太陽質量について現在の太陽では観測されないような巨大黒点のシミュレーションを 25 億点程度の格子点を用いて実施した。図 6-1-1 に特に 0.6 太陽質量の場合での超巨大黒点のシミュレーション結果を示す。これは「富岳」でしか実行できない計算である。すでに観測的な示唆がある巨大黒点の実際のダイナミクスに迫ることができる重要な結果である。また、RAMENS では、黒点があるような状況での太陽風のシミュレーションを実施した。

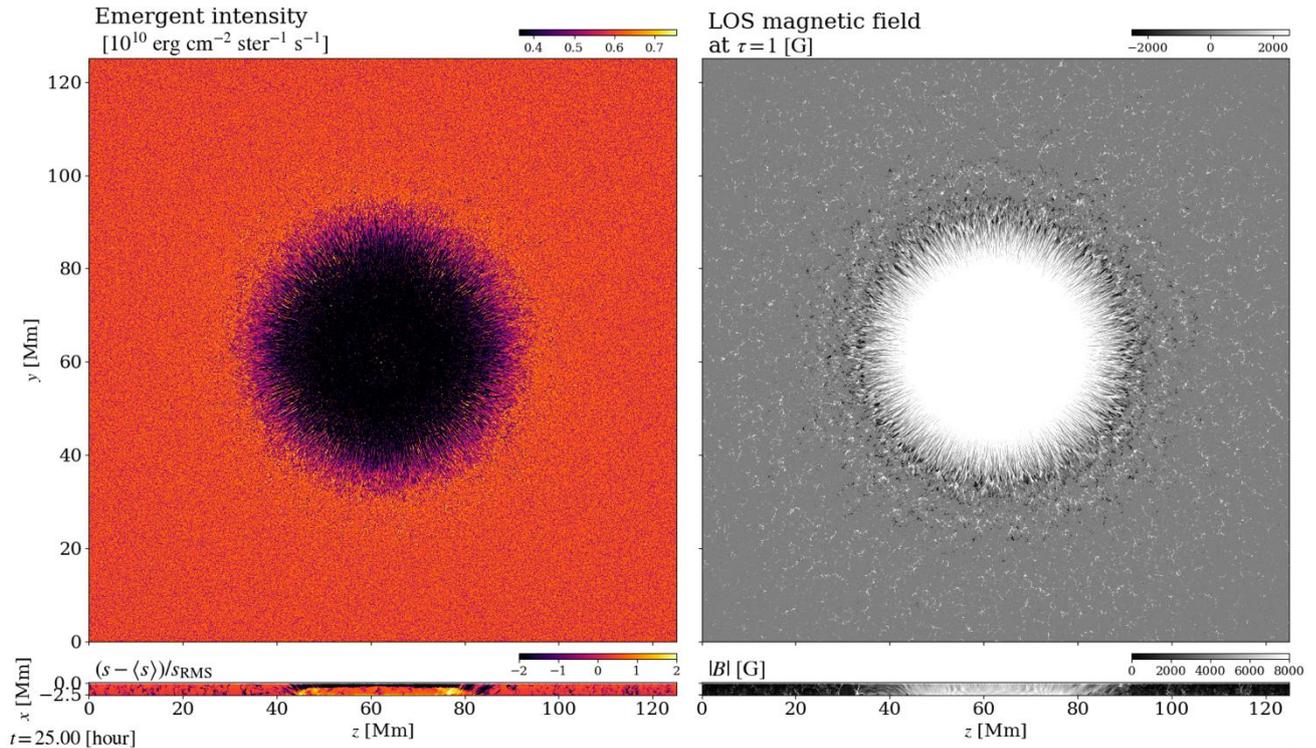


図 6-1-1: 超巨大恒星黒点のシミュレーション結果。(左上) 輻射強度、(右上) 光学的厚さが 1 (観測できる面) の面での磁場強度、(左下) エントロピー構造の鉛直スライス、(右下) 磁場強度の鉛直スライス

(6-2) サブ課題 D-2: 惑星環境のダイナミクス : 樫村 博基 (神戸大学)

岩石惑星表層大気について、火星および金星条件で全球非静力学高解像度計算を実施して、それぞれ地表付近および雲層高度での鉛直対流が表現されたシミュレーションデータを生成した。畳み込みニューラルネットワークによる機械学習をこのデータに適用し、鉛直風データから鉛直対流の解析を試行した。本年度は火星の鉛直対流群の形態 (水玉状・縞状) に着目した分類を可能にする学習モデルを構築し、それぞれの形態の対流の全球分布を調べた (図 6-2-1)。その結果、鉛直対流領域の中心部では水玉状分布が、周縁部では縞状分布が卓越することが明らかになった。また、地形を含むシミュレーションのデータにも同学習モデルを適用して形態分布の違いを調べたところ、地形がある場合にも同様の特徴が見られるが、地形の影響により周縁部でも水玉状分布が卓越しうることが見出された (図 6-2-2)。

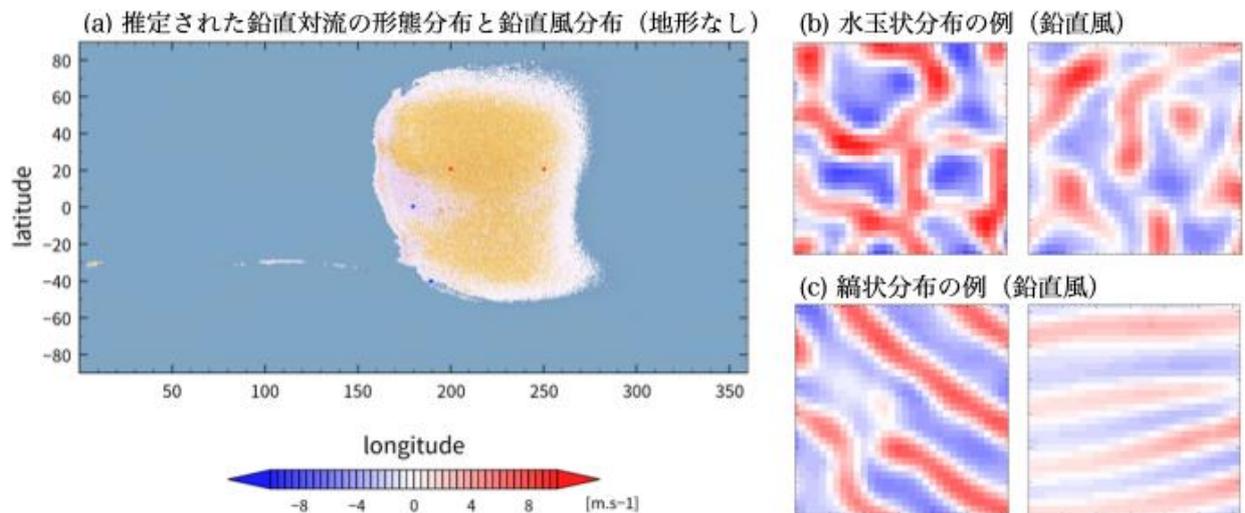


図 6-2-1: (a) 火星大気高解像度計算（地形なし）で得られた高度 1 km の鉛直風分布（赤/青）と機械学習モデルによる鉛直対流の形態分類の結果。黄色の領域が水玉状分布、白抜き領域が縞状分布、藍色の領域が鉛直対流なしと推定された領域を表す。(b) 水玉状分布領域の鉛直風分布の例 [(a) の赤点の地点]。(c) 縞状分布領域の鉛直風分布の例 [(a) の青点の地点]。

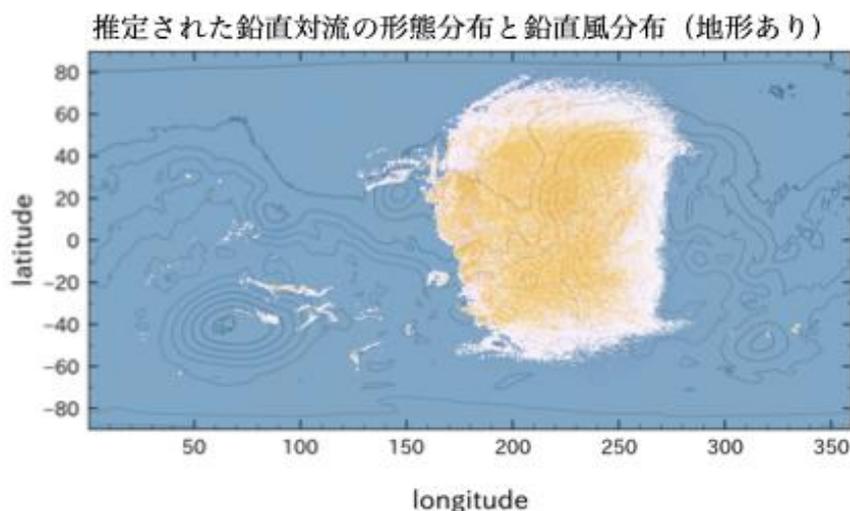


図 6-2-2: 図 6-2-1a と同様。ただし、地形ありの計算で地上高 1 km の分布について。地形なしの結果で学習したモデルを用いて推定している。等値線はモデル内の等高線を表す。

マントル対流については、まず応力履歴依存レオロジーの強さを調整した 3 次元シミュレーションを行い、それによって生じる低温の表面部分の挙動の変化を解析した。このシミュレーションで重要となるのは、低温の表面付近で「無傷」の部分と「壊れた」部分との粘性率の比を表わすパラメータの値を十分大きくとることである。プレートの破壊強度やマントルの粘性率を様々に変化させることにより、プレート運動が実現する条件に到達させることができ、数億年以上の安定な計算が可能となった。表面部分の流れ構造を解析したところ、低温の硬い板の剛体的な運動や、隣接する板の間の狭い領域に破壊が集中するなど、プレートテクトニクスの特徴が再現されていることも確認できた。

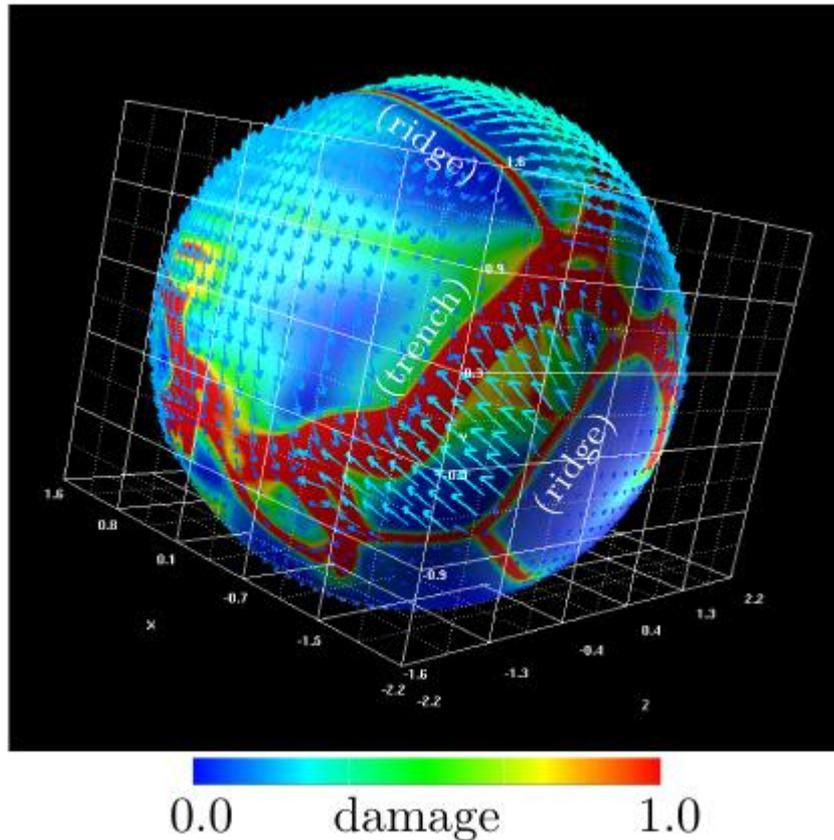


図 6-2-3: 応力履歴依存粘性を取り入れたマンテル対流モデルにより再現されたプレート運動の計算結果の一例。図の例では 2 か所に海嶺 (ridge) が存在しており、海嶺からプレートが拡大する領域の運動が見えている。矢印の向きと長さは地表面での流れの向きと大きさを表している。各々のプレートの内部では矢印の向きと大きさがほぼ揃っており、地球のプレートのような剛体的運動が再現されている。色はプレートの破壊の程度を示しており、赤い部分が強く破壊を受けていることを表している。プレートの破壊がプレート境界のみに集中するという特徴がよく再現されている。また、海嶺の単純な構造に比較して、海溝 (trench) では複雑で広がった構造が顕著であり、地球に見られるプレート運動の特徴と整合的な結果が得られている。

本研究は月内部のマンテル対流シミュレーションも実施した。月は地球に最も近い天体ゆえに観測結果が豊富にあり、その上、水や大気の風化などを受けずに太古の状態を保持している。ゆえに、月内部進化のシミュレーションと観測結果を比べることで地球-月系の初期の状況を理解することが可能となる。本研究では、対流するマンテル内でマグマが生成・移動する物理過程を忠実に取り入れた 3 次元シミュレーションを初めて実現し、過去 46 億年にわたる月の火山活動や膨張・収縮の歴史の精密な追跡を可能にした。

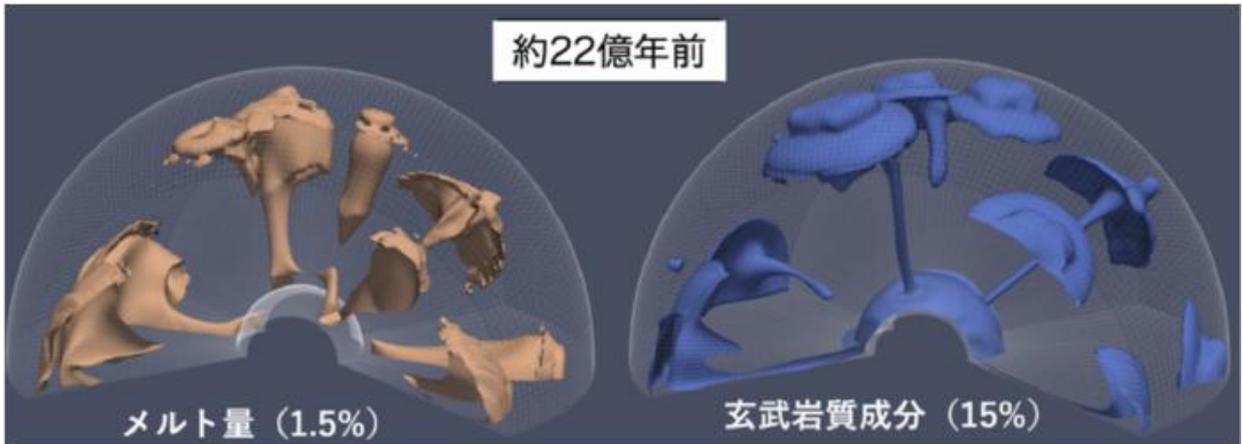


図 6-2-4: 火成活動を伴うマンテル対流の 3 次元シミュレーションにより、月内部のマグマ上昇とそれに伴う玄武岩（マグマ的物質）の移動を追跡した例。現在から約 22 億年前の月の内部における (a) 液相マグマの分布と (b) 岩石組成の分布。(a) ではマグマの体積分率が 1.5%以上の部分、(b) ではマグマ的組成をもつ玄武岩質成分の割合が 15%以上の部分が、等値面で囲われた領域でそれぞれ示されている。

ガス惑星大気について、非弾性回転球殻モデルを用いて全球領域での上部安定成層が存在する設定での高解像度長時間積分を継続し、当初目標としていた 15,000 惑星回転時間を超えて 32,000 回転時間積分を達成した。時間積分開始から速やかに生成される複数の中高緯度綫状ジェットは、長時間の経過とともに融合し、その数は減少していく。しかし、本年度の計算時間内ではまだ融合の途中であり、2 本の西風ジェットが各半球中高緯度に存在している（図 6-2-5）。非弾性近似系ではブシネスク近似系に比べて融合の速度が遅いことが初めて見出された。

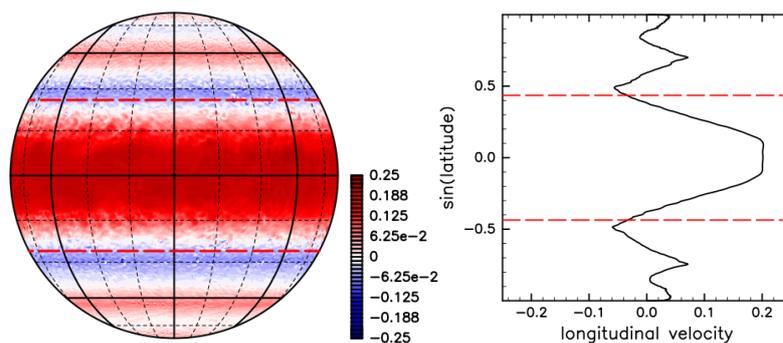


図 6-2-5 : ガス惑星大気計算の 32,000 回転時間経過後の (左) 惑星表面東西風と (右) 平均帯状風分布。赤が西風、青が東風、赤破線が内側境界の接円筒緯度を表している。風速は回転角速度と球殻の厚さで無次元化されている。

(7) プロジェクトの総合的推進（成果発表・広報普及・アウトリーチ）

研究内容と成果を広報して国民の理解を得るために、研究成果のプレスリリースを積極的に行った。2-3. 活動（研究会の活動等）の＜研究成果の情報発信＞の項目に詳細を記載している通り、令和 6 年度は 4 件ものプレスリリースを行った。「富岳」成果創出加速プログラムに採択された基礎科学にか

かわる5つの研究課題の合同によりシンポジウムを開催するとともに、定期的開催されるAI班のミーティングは参加者をAI班メンバーに限定せず本課題参加者以外にも広く周知し、成果や情報を共有するように努めた。また、ユーザの拡大も重要視しているため、FDPS初級講習会(毎年開催)を開催し、また、国立天文台シミュレーションプロジェクト主催の講習会である流体学校を後援し、講師を派遣した。素粒子原子核課題と連携し計算科学を軸に他分野の交流としてHPC-Phys勉強会の開催にも協力した。

2-3. 活動(研究会の活動等)

課題内では、課題代表者が運営委員会(4/30, 5/30, 6/24, 7/29, 8/29, 9/30, 10/29, 11/21, 12/19, 1/28, 2/25, 3/28)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、各サブ課題よりシミュレーションへのAIの導入を担当するメンバーを集めてAI班を設置し、AIの導入事例の紹介等、情報交換および検討を行うためのミーティングを計6回(4/25, 6/27, 7/25, 10/24, 11/28, 1/23)開催した。今年度は何度か外部有識者を招いて講演していただいた。また、本ミーティングへの参加はAI班メンバーに限らず、課題参加者以外にも広く周知した。

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、「富岳」成果創出加速プログラムの研究課題のうち、素粒子から宇宙、物性・量子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シンポジウムを開催した。また、研究内容と成果を広報して国民の理解を得るために、本課題のウェブサイトを作成し、研究会の開催情報やプレスリリースの情報等を公開している。

<研究会、シンポジウム等>

研究会やシンポジウム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。

●日本地球惑星科学連合2024年大会

セッションM-GI29「計算科学が拓く宇宙惑星地球科学」

日時：令和6年5月29日

場所：幕張メッセ+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、太陽・恒星のダイナミクス、また宇宙における構造形成、進化の解明と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、この30年間で計算機の演算能力は7桁向上しているにもかかわらず、そのことが必ずしも直接的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がある。本企画セッションでは、「富岳」コンピュータに至り、さらにはポスト「富岳」コンピュータ等を実現しようという今日、これら演算能力の向上をいかにして宇宙惑星地球科学の量的・質的な発展につなげるか、ということテーマに、理論、観測、および数値計算手法やAIの活用等についての発表を募り、計算宇宙惑星地球科学の方向性と将来計画についての総

合的な議論の場とする。宇宙惑星地球科学に限らず、地球惑星科学連合のあらゆる分野からの分野横断的な参加があった。

●AstroAI Asian Network (A³ Net) summer school

参加者：約 60 名

日時：令和 6 年 9 月 2 日 - 6 日

場所：大阪大学 中之島センター

主催：東京大学 Kavli IPMU、大阪大学、名古屋大学

概要：理論的な講義、実践的な演習、共同プロジェクトを行い、AI/ML 技術の最新の進歩と、複雑な天体物理学的問題の解決への応用を探求することを目的に開催された。

●名大 ISEE 研究集会「情報科学技術との融合による太陽圏物理学の新展開」

参加者：約 50 名

日時：令和 6 年 9 月 9 日 - 10 日

場所：名古屋大学 東山キャンパス

主催・共催：名古屋大学 宇宙地球環境研究所、「富岳」成果創出加速プログラム：シミュレーションと AI で解き明かす太陽地球環境変動、「富岳」成果創出加速プログラム：シミュレーションと AI の融合で解明する宇宙の構造と進化

概要：天文・地球科学分野などにおける太陽圏物理学周辺分野での融合状況を中心に共有する共同研究会を行った。太陽圏物理学と情報科学の融合状況を俯瞰することで、太陽・太陽圏研究と情報科学における新しい融合の方向性を模索した。

●「富岳成果創出加速プログラム」基礎科学合同シンポジウム 2024

参加者：81 名

日時：令和 7 年 1 月 8 日 - 10 日

場所：アーバンネット神田カンファレンス

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せまる基礎科学：量子新時代へのアプローチ」・「シミュレーションと AI の融合で解明する宇宙の構造と進化」・「超大規模格子 QCD による新物理探索と次世代計算に向けた AI 技術開発」・「シミュレーションと AI で解き明かす太陽地球環境変動」・「量子凝縮系のための AI 数値分光学で挑む量子纏れ構造の解明」

共催：筑波大学・計算科学研究センター、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

概要：「富岳」成果創出加速プログラムにおいて基礎科学にかかわる 5 つの研究課題の合同によりシンポジウムを開催し、素粒子から宇宙、物性・量子にわたる幅広い分野においてスーパーコンピュータ「富岳」を活用した研究がどのように進めるか議論を行った。

●WTK/CPS 大気境界層乱流ミニ研究会

参加者：約 50 名

日時：令和7年1月21日

場所：神戸大学 惑星科学研究センター（CPS） & オンライン

主催：神戸大学 惑星科学研究センター（CPS）

共催：「富岳」成果創出加速プログラム「シミュレーションとAIの融合で解明する宇宙の構造と進化」

概要：地球大気での境界層の扱い方について、その理論から高解像度計算を念頭に置いたモデル化と実装の取り組みまで、その現状と問題点を紹介頂き議論を行った。

<研究成果の情報発信>

●ウェブサイトの制作・更新管理

本課題「シミュレーションとAIの融合で解明する宇宙の構造と進化」のウェブサイトを制作し、公開している。研究会やシンポジウムの開催案内をはじめ、研究成果等を随時情報発信している。

<https://www2.ccs.tsukuba.ac.jp/aiuniverse/index.html>

●プレスリリース

- ・最先端のシミュレーションによって明らかになった中間質量ブラックホール形成過程

発表日：令和6年5月31日

発表主宰者：東京大学大学院理学系研究科、福井県立大学情報センター

- ・太陽圏の果てで宇宙線はどのように作られるのか

スーパーコンピュータ「富岳」による世界最高精度の計算で再現

発表日：令和6年7月29日

発表主宰者：九州大学、千葉大学

- ・ブラックホールの自転による超高光度円盤の歳差運動を世界で初めて実証

発表日：令和6年9月20日

発表主宰者：筑波大学

- ・M87のジェットから強力なガンマ線フレアを検出～EHTと多波長観測が捉えた巨大ブラックホールの活動期～

発表日：令和6年12月13日

発表主宰者：名古屋市立大学、自然科学研究機構 国立天文台 水沢 VLBI 観測所、工学院大学、東京大学、東京科学大学、自然科学研究機構 国立天文台 天文シミュレーションプロジェクト、茨城大学、大阪公立大学

2-4. 実施体制

業務項目	担当機関	担当責任者
(1) 研究総括	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
(2) AI 班: AI を用いた宇宙・天文シミュレーションの新基軸の開拓	文京区本郷7-3-1 国立大学法人東京大学	森脇 可奈 理学系研究科 助教
(3-1) サブ課題 A-1: 高精度構造形成シミュレーションと観測との協働による宇宙天体形成史の統一的解明	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 情報戦略機構 准教授
(3-2) サブ課題 A-2: Vlasov シミュレーションによる宇宙大規模構造形成へのニュートリノの力学的影響	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
(3-3) サブ課題 A-3: 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	文京区本郷7-3-1 国立大学法人東京大学	藤井 通子 理学系研究科 准教授
(4-1) サブ課題 B-1: 銀河円盤スケールの分子雲・星形成過程の高解像度磁気流体シミュレーション	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 理学研究科 准教授
(4-2) サブ課題 B-2: 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	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
(4-3) サブ課題 B-3: 原始惑星系円盤中での固体惑星形成	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 理学研究科 特命教授
(4-4) サブ課題 B-4: 原始惑星系円盤の乱流中のダスト粒子の衝突付着成長シミュレーション	岡山市北区津島中1-1-1 国立大学法人岡山大学	石原 卓 学術研究院環境生命科学学域教授
(5-1) サブ課題 C-1: 大規模数値流体シミュレーションおよび模擬観測、プラズマ粒子計算によるブラックホール	千葉市稲毛区弥生町1-33 国立大学法人千葉大学	松本 洋介 国際高等研究基幹 准教授

降着円盤およびジェットの説明		
(5-2) サブ課題C-2:超新星爆発メカニズムを支配するニュートリノ輻射輸送と乱流現象の説明	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
(5-3) サブ課題C-3:数値相対論ニュートリノ輻射磁気流体シミュレーションによるブラックホール-中性子星合体	船橋市三山2-2-1 学校法人東邦大学	関口 雄一郎 理学部 准教授
(6-1) サブ課題D-1:恒星活動の多様性	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	堀田 英之 宇宙地球環境研究所 教授
(6-2) サブ課題D-2:惑星環境のダイナミクス	神戸市灘区六甲台町1-1 国立大学法人神戸大学	檜村 博基 理学研究科 講師
(7) プロジェクトの総合的推進	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

別添 1 学会等発表実績

1. 学会誌・雑誌等における論文掲載

No	掲載した論文（発表題目）	発表者氏名	発表した場所（学会誌・雑誌名等）	発表した時期
1	Neutron star kick driven by asymmetric fast-neutrino flavor conversion	Nagakura, Hiroki search by orcid ; Sumiyoshi, Kohsuke	Physical Review D, Volume 109, Issue 10, article id.103017	May 2024
2	A Relativistic Formula for the Multiple Scattering of Photons	Takahashi, Rohta et al.	The Astrophysical Journal Letters, Volume 967, Issue 1, id.L10, 5 pp.	May 2024
3	Do Dry GCMs Generate QBO-like Oscillation?	Fujita, S. and K. Ishioka	Journal of the Meteorological Society of Japan, 102(5), 485–506, https://doi.org/10.2151/jmsj.2024-026	May 2024
4	An Extended Closure Relation by LightGBM for Neutrino Radiation Transport in Core-collapse Supernovae	Takahashi, S., Harada, A., Shoichi, Y.	ApJ (accepted), arXiv:2409.02719	May 2024
5	The UCHUU-GLAM BOSS and eBOSS LRG lightcones: exploring clustering and covariance errors	Ereza, J. et al (incl. Ishiyama, T.)	Monthly Notices of the Royal Astronomical Society	June 2024
6	Universality in supernova gravitational waves with protoneutron star properties	Sotani, Hajime; Müller, Bernhard ; Takiwaki, Tomoya	Physical Review D, Volume 109, Issue 12, article id.123021	June 2024
7	Asymptotic profiles of mean zonal flows generated by thermal convection of Boussinesq fluid in a rapidly rotating thin spherical shell	Takehiro, S., Sasaki, Y., Ishioka, K., Enomoto, T., Nakajima, K., Hayashi, Y.-Y.	Icarus, 420, 116154 https://doi.org/10.1016/j.icarus.2024.116154	June 2024
8	Radio Images inside Highly Magnetized Jet Funnels Based on Semianalytic GRMHD Models	Taiki Ogihara, Tomohisa Kawashima, and Ken Ohsuga	Astrophysical Journal, 969, 22, doi:10.3847/1538- 4357/ad429a	June 2024
9	Chemo-dynamical Evolution of Simulated	Hirai, Y., Kirby, E. N., Chiba, M., Hayashi, K., Anguiano, B., Saitoh, T.	The Astrophysical Journal	August 2024

	Satellites for a Milky Way-like Galaxy	R., Ishigaki, M. N., Beers, T. C.		
10	Injection Process of Pickup Ion Acceleration at an Oblique Heliospheric Termination Shock	Matsukiyo, Shuichi; Matsumoto, Yosuke	The Astrophysical Journal Letters, Volume 970, Issue 2, id.L37, 6 pp.	August 2024
11	Dynamics near the inner dead-zone edges in a protoplanetary disk	Iwasaki, Tomida, Takasao, Okuzumi, Suzuki	Publications of the Astronomical Society of Japan	August 2024
12	Survey of non-thermal electrons around supermassive black holes through polarization flips	Yuh Tsunetoe, Tomohisa Kawashima, Ken Ohsuga, & Shin Mineshige	Publications of the Astronomical Society of Japan, 76, 1211, doi:10.1093/pasj/psae083	September 2024
13	The Well: a Large-Scale Collection of Diverse Physics Simulations for Machine Learning	Ohana, R. et. al (incl. Hirashima, K.)	the 38th conference on Neural Information Processing Systems (NeurIPS) Datasets and Benchmarks Track(機械学習の国際会議の proceedings、査読あり)	September 2024
14	General Relativistic Radiation Magnetohydrodynamics Simulations of Precessing Tilted Super-Eddington Disks	Asahina, Yuta; Ohsuga, Ken	The Astrophysical Journal, Volume 973, Issue 1, id.45, 9 pp.	September 2024
15	Inversion for Inferring Solar Meridional Circulation: The Case with Constraints on Angular Momentum Transport inside the Sun	Hatta, Yoshiki; Hotta, Hideyuki; Sekii, Takashi	The Astrophysical Journal, Volume 972, Issue 1, id.79, 16 pp.	September 2024
16	First High-Resolution Galaxy Simulations Accelerated by a 3D Surrogate Model for Supernovae	Hirashima, K., Moriwaki, K, Fujii, M. S., Hirai, Y., Saitoh, T. R., Makino, J., Steinwandel, U. P., Ho, S.	Machine Learning and the Physical Sciences workshop at the 38th conference on Neural Information Processing Systems (NeurIPS), (機械学習の国際会議の	October 2024

			proceedings、査読あり)	
17	Systematic Local Simulations of Fast Neutrino Flavor Conversions with Scattering Effects	Azari, Milad Delfan; Sasaki, Hirokazu ; Takiwaki, Tomoya; Okawa, Hirotsada	Progress of Theoretical and Experimental Physics, Volume 2024, Issue 10, id.103E01, 24 pp.	October 2024
18	Mapping the Distribution of the Magnetic Field Strength along the NGC 315 Jet	Kino, Motoki et al.	The Astrophysical Journal, Volume 973, Issue 2, id.100, 12 pp.	October 2024
19	Self-consistent N-body simulation of planetesimal-driven migration. I. The trajectories of single planets in the uniform background	Jinno, Tenri, Saitoh, Takayuki R., Funato, Yoko, Makino, Junichiro	Publications of the Astronomical Society of Japan	November 2024
20	Convective Magnetic Flux Emergence Simulations from the Deep Solar Interior to the Photosphere: Comprehensive Study of Flux Tube Twist	Toriumi, Shin; Hotta, Hideyuki; Kusano, Kanya	The Astrophysical Journal, Volume 975, Issue 2, id.209, 14 pp.	November 2024
21	Quasi-steady transitions in confined convection	Yanagisawa, T., S. Takano, D. Noto, M. Kameyama, and Y. Tasaka	Journal of Fluid Mechanics, 1000, A44 https://doi.org/10.1017/jfm.2024.1043	December 2024
22	Detection of solar internal flows with numerical simulation and machine learning	Hiroyuki Masaki, Hideyuki Hotta	Publications of the Astronomical Society of Japan, Volume 76, Issue 6, pp.L33-L38	December 2024
23	Broadband multi-wavelength properties of M87 during the 2018 EHT campaign including a very high energy flaring episode	EHT MWL Science Working Group (Algaba, J. C., et al. incl. Kawashima, T.)	Astronomy & Astrophysics, 692, A140, doi:10.1051/0004-6361/202450497	December 2024
24	Three-dimensional magnetohydrodynamic simulations of core-collapse supernovae - I. Hydrodynamic evolution	Nakamura, Ko search by orcid ; Takiwaki, Tomoya search by orcid ; Matsumoto, Jin search by orcid ; Kotake, Kei	Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, Volume 536, Issue 1, pp.280-294	January 2025

	and protoneutron star properties			
25	SIRIUS: Identifying Metal-poor Stars Enriched by a Single Supernova in a Dwarf Galaxy Cosmological Zoom-in Simulation Resolving Individual Massive Stars	Hirai, Y., Saitoh, T. R., Fujii, M. S., Kaneko, K., Beers, T. C.	The Astrophysical Journal Letters, Volume 980, Issue 2, id. L25, 6pp.	February 2025
26	Baryon Pasting the Uchuu Light-cone Simulation	Lau Erwin T.; Nagai, Daisuke; Farahi, Arya; Ishiyama, Tomoaki; Miyatake, Hironao; Osato, Ken; Shirasaki, Masato	The Astrophysical Journal, Volume 980, Issue 1, id.122, 14 pp	February 2025
27	Spin-down of Solar-mass Protostars in Magnetospheric Accretion Paradigm	Shinsuke Takasao, Masanobu Kunitomo, Takeru K. Suzuki, Kazunari Iwasaki, Kengo Tomida	The Astrophysical Journal, Volume 980, Issue 1, id.111, 17 pp.	February 2025
28	2-D numerical experiments of thermal convection of highly viscous fluids under strong adiabatic compression: implications on mantle convection of super-Earths with various sizes	Masanori Kameyama	Earth Planets Space 77, 13 https://doi.org/10.1186/s40623-025-02134-8	February 2025
29	Constraining cosmological parameters using void statistics from the SDSS survey	Fernandez-Garcia, Elena ; Betancort-Rijo, Juan E. ; Prada, Francisco ; Ishiyama, Tomoaki ; Klypin, Anatoly ; Ereza, Julia	Astronomy & Astrophysics, Volume 695, id.A19, 20 pp	March 2025
30	Plasma Instability Evolution and Particle Heating in the Foot Region of Perpendicular Shocks in Young Supernova Remnants	King Fai Farley Law, Shinsuke Fujioka, and Yutaka Ohira	Astrophysical Journal, 982, doi:10.3847/1538-4357/adb629	March 2025

2. 国際会議・シンポジウムにおける口頭・ポスター発表

No.	発表した成果（発表題目、口頭・ポスター発表の別）	発表者氏名（所属機関）	発表した場所（学会名等）	発表した時期
1	Numerical modeling of the compact binary merger in the multimessenger era (invited, oral)	Kenta Kiuchi (Max Planck Institute) et al.	GRAV24	April 2024
2	富岳成果創出加速プログラム「シミュレーションとAIの融合で解明する宇宙の構造と進化」の成果と今後（口頭）	大須賀 健（筑波大学）	幕張メッセ（日本地球惑星科学連合大会2024）	May 2024
3	火成活動を考慮した3次元部分球殻マントル対流モデルによる月の内部進化（口頭）【学生優秀発表賞受賞】	于 賢洋（東京大学）	幕張メッセ（日本地球惑星科学連合大会2024）	May 2024
4	スーパーコンピュータ「富岳」にて計算する火成活動-マントル対流結合系の数値シミュレーション（ポスター）	于 賢洋（東京大学）	幕張メッセ（日本地球惑星科学連合大会2024）	May 2024
5	顕著なシアニング性を示す流体による熱対流（ポスター）	柳澤 孝寿（海洋研究開発機構）	幕張メッセ（日本地球惑星科学連合大会2024）	May 2024
6	応力履歴依存粘性による3次元球殻マントル対流モデルでのプレート運動（ポスター）	宮腰 剛広（海洋研究開発機構）	幕張メッセ（日本地球惑星科学連合大会2024）	May 2024
7	高速回転する球殻内の非弾性熱対流の長時間積分（口頭）	佐々木 洋平（北海道情報大学）	幕張メッセ（日本地球惑星科学連合大会2024）	May 2024
8	Dust growth simulation using direct numerical simulation of turbulence（口頭）	石原 卓（岡山大学） 河原 昌平, 梅村 雅之（筑波大学）	幕張メッセ（日本地球惑星科学連合大会2024）	May 2024
9	Galaxy Formation Simulations and Galactic Archaeology in JWST and ELTs Era (oral)	Yutaka Hirai (University of Notre Dame/Tohoku University)	Tohoku University(ELT Science in Light of JWST)	June 2024
10	The Uchuu simulations data set: large-scale structures and galaxies (oral)	Ishiyama, T. (Chiba University)	Osaka University (LSS QUEST 2024)	June 2024

11	Numerical Simulations of super-Eddington flows around BHs and magnetized NSs (invited, oral)	Ken Ohsuga (University of Tsukuba)	Bern, Switzerland (Accretion Disks: The First 50 Years)	June 2024
12	Radiative Magnetohydrodynamic Simulations for Solar Surface Dynamics (invited, oral)	堀田 英之(名古屋大学)	韓国(AOGS)	June 2024
13	Black Hole Spacetime and Properties of Accretion Flows and Jets Probed by Black Hole Explorer — Science Cases Proposed by BHEX Japan Team — (poster)	Tomohisa Kawashima (ICRR, The University of Tokyo)	Pacifico Yokohama (SPIE Astronomical Telescopes + Instrumentation)	June 2024
14	Horizon Scale Science with BHEX I (invited, oral)	Tomohisa Kawashima (ICRR, The University of Tokyo)	NAOJ (Black Hole Explorer Japan Workshop)	June 2024
15	Surrogate Modeling for Supernova Feedback toward Star-by-Star Simulations of Milky-Way-sized Galaxies (oral)	Keiya Hirashima (The University of Tokyo)	Sicily, Italy(The 2nd edition of the International Conference on Machine Learning for Astrophysics)	July 2024
16	Flow and magnetic field in the solar convection zone (invited, oral)	堀田 英之(名古屋大学)	フランス (ASTRONUM)	July 2024
17	Surrogate Modeling for Supernova Feedback toward Star-by-Star Simulations of Milky-Way-sized Galaxies (oral)	Keiya Hirashima (The University of Tokyo)	Cape Town, South Africa(XXXII IAU General Assembly 2024)	August 2024
18	Merger remnants (invited, oral)	Kenta Kiuchi (Max Planck Institute) et al.	Mergers and Stellar Explosions	August 2024
19	A large-scale dynamo in binary neutron star mergers (invited, oral)	Kenta Kiuchi (Max Planck Institute) et al.	High-energy plasma phenomena in astrophysics	September 2024
20	Simulations Resolving Individual Stars (SIRIUS) Project: Toward Understanding the Origins of Carbon (oral)	Hirai, Y. (University of Notre Dame/Tohoku University)	NAOJ (Astrophysical Origins of Carbon)	September 2024

21	火成活動とマントル対流による月内部進化の3次元部分球殻モデル（口頭）	于 賢洋（東京大学）	日本惑星科学会 2024 年度秋季講演会	September 2024
22	薄い回転球殻内の非弾性熱対流により引き起こされる平均帯状流と木星型惑星大気の表面縞状構造（口頭）	佐々木 洋平（北海道情報大学）	2024 年日本流体力学学会年会	September 2024
23	高速回転する薄い球殻内のブシネスク流体の熱対流によって生成される平均帯状流の漸近分布（口頭）	竹広 真一（京都大学）	2024 年日本流体力学学会年会	September 2024
24	高速回転球殻内の非弾性熱対流と木星型惑星大気 の表面帯状構造（ポスター）	佐々木 洋平（北海道情報大学）	日本惑星科学会 2024 秋季講演会	September 2024
25	Disappearance of surface banded structure produced by thermal convection in a rapidly rotating thin spherical shell (poster)	Shin-ichi Takehiro (Kyoto University)	Geophysical and Astrophysical Fluids and Dynamos Meeting, University of Leeds, UK	September 2024
26	金星大気のグローバル非静力学計算（口頭）	樫村 博基（神戸大学）	九州大学（日本惑星科学会 2024 年秋季講演会）	September 2024
27	連星中性子星合体後の中心天体におけるニュートリノ輻射輸送とその応用（口頭）	住吉光介（沼津高専）， 長倉洋樹，藤林翔，関口雄一郎，柴田大	北海道大学（日本物理学会第 79 回年次大会）	September 2024
28	Neutrino quantum kinetics in core-collapse supernova and compact object mergers (invited, oral)	Hiroki Nagakura（国立天文台）	Otranto, Italy（Neutrino Oscillation Workshop）	September 2024
29	Generative models for large-scale structures (invited, oral)	Kana Moriwaki (University of Tokyo)	Pisa, Italy (Physics in the AI Era)	September 2024
30	Estimating EoR parameters with deep learning (oral)	Kana Moriwaki (University of Tokyo)	University of Tokyo (Hongo 21cm workshop)	October 2024
31	Next-generation simulations of galaxy formation: coupling surrogate models with conventional simulations (invited, oral)	Fujii, M. S. (The University of Tokyo)	Epochal Tsukuba International Congress Center (CCS International Symposium 2024)	October 2024

32	Progress and open questions in core-collapse supernova theory(invited, oral)	Hiroki Nagakura (国立天文台)	YITP, Kyoto, Japan (CSQCD2024)	October 2024
33	高速回転球殻内の非弾性熱対流と木星型惑星大気の表面帯状構造 (口頭)	佐々木 洋平 (北海道情報大学)	つくば国際会議場 (日本気象学会 2024 年度秋季大会)	November 2024
34	金星大気の全球非静力学計算：鉛直対流の影響 (口頭)	樫村 博基 (神戸大学)	つくば国際会議場 (日本気象学会 2024 年度秋季大会)	November 2024
35	金星大気の全球非静力学計算：鉛直対流の影響 (口頭)	樫村 博基 (神戸大学)	国立極地研究所・統計数理研究所 (地球電磁気・地球惑星圏学会 2024 年秋季年会)	November 2024
36	Multi-Wavelength Radiation Properties of Black Hole Accretion Flows and Relativistic Jets (invited, oral)	Tomohisa Kawashima (ICRR, The University of Tokyo)	Grand Swiss-Bel Hotel, Malacca, Malaysia (AAPPS-DPP 2024)	November 2024
37	Oligarchic growth of protoplanets in a planetesimal ring (oral)	Kambara, Y. (U. Tokyo), Kokubo, E. (NAOJ)	Rogue Worlds 2024	December 2024
38	First High-Resolution Galaxy Simulations Accelerated by a 3D Surrogate Model for Supernovae (poster)	Hirashima, K. (The University of Tokyo)	Vancouver, BC, Canada (Machine Learning and the Physical Sciences workshop at the 38th conference on Neural Information Processing Systems)	December 2024
39	Jet from binary neutron star merger with prompt black hole formation	Kota Hayashi (Max Planck Institute) et al.	CoCoNuT Meeting 2024	December 2024
40	Direct numerical modeling of binary neutron star mergers (invited, oral)	Kenta Kiuchi (Max Planck Institute) et al.	Nucleosynthesis of Heavy elements r-process	January 2025
41	Open issues in numerical modeling of core-collapse supernova (invited, oral)	Hiroki Nagakura (国立天文台)	Riken, Saitama, Japan (Theories of Astrophysical Big Bangs 2025)	February 2025
42	Machine Learning Approaches in Supernovae (invited, oral)	Harada, A. (茨城高専)	Fukuoka, Japan (Breaking New Ground in	February 2025

			Supernova Physics 2025)	
43	事象の地平面スケールにおける降着流と相対論的ジェットの特徴： Black Hole Explorer ミッションに向けて（招待講演）	川島 朋尚（東京大学宇宙線研究所）	名古屋市立大学（ブラックホールジェット・降着円盤・円盤風研究会 2025）	March 2025
44	連星中性子星合体におけるブラックホール形成とジェット（口頭）	関口雄一郎（東邦大学）	名古屋市立大学（ブラックホールジェット・降着円盤・円盤風研究会 2025）	March 2025
45	Observational Appearance of Accretion Flows, Jets, and Coronae in Strong Gravity (invited, oral)	川島 朋尚（東京大学宇宙線研究所）	大阪大学中之島センター（ALMA Workshop 2024）	March 2025
46	ボルツマン輻射流体計算による空間三次元重力崩壊型超新星計算の進展（口頭）	岩上わかな（早稲田大学），赤穂龍一郎，原田了，長倉洋樹，大川博督，古澤峻，松古栄夫，住吉光介，山田章一	水戸市民会館（日本天文学会 2025 年春季年会）	March 2025