

令和5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6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5年度（報告年度）の実施内容	- 2 -
2-1. 当該年度（令和5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）	- 23 -
2-4. 実施体制	- 26 -

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 5 年度（報告年度）の実施内容

2-1. 当該年度（令和 5 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 5 年度は超新星の発生位置を推定する AI モデル、および光やニュートリノの分布を推定する AI モデルを構築する。また銀河観測から銀河の性質までをも導出するため、模擬銀河カタログを機械学習する。

(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 5 年度は標準的な宇宙論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 5 年度は観測的な制限を満たすニュートリノ質量に対する宇宙大規模構造形成の数値シミュレーションを行い、ニュートリノ航跡の影響が宇宙大規模構造形成に及ぼす影響を調査する。

(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 5 年度は 10^{11} 粒子を用いて表現した暗黒物質、ガス、星からなるモデル銀河のシミュレーションを行い、AI をつかった推論モデルの調整を行う。

(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 5 年度は磁気流体不安定性や超新星爆発による乱流駆動により、銀河系ガス円盤が準定常状態に達するまでの磁気流体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)を考慮した大域的な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 5 年度は非理想磁気流体効果の中で比較的振る舞いがよく理解されているオーム散逸と両極性拡散を考慮した原始惑星系円盤の大局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 5 年度は大領域計算と新モデル計算を実施する。

(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 5 年度は高レイノルズ数乱流 DNS (格子点数 4096^3) 中のダスト粒子の衝突付着成長シミュレーションを実施する。これまでに構築した粒子データを活用したデータ駆動型計算によるダスト成長のシナリオを構築する。

(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）

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5年度は機械学習によって構築されたモデルを用いた高光度降着円盤の高精度な3次元シミュレーションを実施する。中程度解像度(方位角方向解像度 256-512)による低高度降着円盤のシミュレーションを実施する。非相対論的衝撃波の長時間計算による宇宙線電子加速、イオンの初期加速、数値チェレンコフ不安定をフィルタリングするための学習データ作成とニューラルネットワーク学習を行う。UWABAMI および CANS+のデータを用いたトータル 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。

(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5年度はニュートリノ輻射輸送の第一原理計算に基づいた無回転の親星の多スナップショットの計算結果からエディントンテンソルの学習を行う。磁場自転の弱い親星の高解像度磁気流体計算を行う。量子運動的ニュートリノ輸送シミュレーションを行う。

(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5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) = (0.8, 8.1, 1.35), (0.8, 8.0, 2.0) 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5年度は太陽型星について、自転角速度のパラメタを変えたシミュレーションを実施する。磁気活動星の高い太陽型星の恒星風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、大気やマンツルの動態について理解することを目的とする。令和5年度は、火星・金星大気について高解像度計算(1火星日、1金星日)を実施し、表現された鉛直対流の様態を観察分類して教師データを作成し、機械学習の応用を試行する(自動分類AIを開発する等)。

マントル対流について、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する。月を想定した 3 次元球殻形状領域のシミュレーションモデルに、火成活動の効果を追加する等。

ガス惑星大気について、全層熱的不安定な設定並びに上部安定成層が存在する設定での長期間積分を継続しつつ、AI によるデータ解析を試行する（小規模対流の構造、対流による渦運動と帯状流の生成維持等）。

(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、「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）でも多くの実績があり、ゴードンベル賞のファイナリストに選出された宇宙ニュートリノの数値シミュレーション（令和 3 年）や星団形成のシミュレーション（令和 4 年 6 月）など、最近 3 年で計 10 件行っている。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計画である。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、講師を派遣している。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している。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計画である。

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（2-3 参照）、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、「成果創出加速」基礎科学合同シンポジウム（令和 5 年 12 月 18-20 日@筑波大学東京キャンパス）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 5 年度は超新星の発生位置を推定する AI モデル、および光やニュートリノの分布を推定する AI モデルを構築した。また銀河観測から銀河の性質までも導出するため、模擬銀河カタログを機械学習した。詳しくは(3-1)～(6-2)に記載の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)

標準的な宇宙論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った。さらに、近年、異なる観測データの解析から推定される宇宙初期密度揺らぎの振幅が観測間で不一致を示しており、振幅が構造形成に与える影響を従来よりも高い精度で評価する緊急性が増していたため、振幅の大きさを標準の 80%にしたシミュレーションも行った。それを宇宙ボイド構造のサイズ分布を記述する理論モデルのキャリブレーションに用い、モデルと観測を比較して宇宙論パラメータの推定を行った。次に、令和 6 年度以降に行う予定の宇宙論的ダークマター構造形成シミュレーションの準備として、比較的小規模なシミュレーションを多数行い、特に初期条件生成のアルゴリズムおよび初期条件の赤方偏移が、最終的に得られるハロー質量関数に与える影響を調べた。結果、広く用いられている 2 次の摂動理論に基づいたアルゴリズムに比べ、3 次を採用し初期赤方偏移を小さくすると、ハロー質量関数の収束性が大きく改善することがわかった。

また宇宙論的構造形成シミュレーションデータからハローを検出するソフトウェアを大規模並列化した。広く使われている公開ソフトウェアは、富岳のような数千ノード規模以上の環境では効率が良くなく、通信の実装の問題で動作しないという問題もあった。我々は当該分野でもっとも広く用いられている公開コード、Rockstar (Behroozi+2013) を採用し、ソケットライブラリで実装されていた通信部分を全て MPI 通信に変更した。さらに、OpenMP を用いたハイブリッド並列も実装した。その結果、富岳の 1 万ノード以上の環境でハロー検出を実行できるようになっただけでなく、ロードバランスや実行時間もオリジナル版より改善した (図 3-1-1)。論文投稿およびコード公開の準備を進めている。

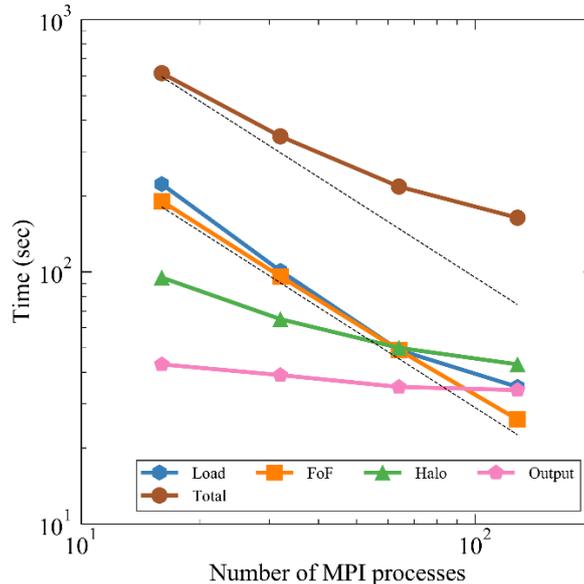


図 3-1-1: ハロー検出ソフトウェアの並列性能。富岳上で 1024^3 粒子を用いたテスト計算の結果である。Load は粒子データの読み込み、FoF はハローグループの検出、Halo はグループから個別のハロー検出、Output はデータの出力を表す。

(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)

ニュートリノ成分を Vlasov シミュレーションで数値シミュレーションした場合と従来の N 体シミュレーションを用いた場合の詳細な比較を行い、ニュートリノの質量が軽い場合には N 体シミュレーションよりも Vlasov シミュレーションの方が同じ計算資源に対して優れた結果を与えることを示した(図 3-2-1)。また、ダークマターハローの背後に作るニュートリノ航跡が N 体シミュレーションでは過小評価されている可能性を見出し、ニュートリノ航跡の宇宙大規模構造形成に対する影響が N 体シミュレーションで得られた結果よりも実際には大きい可能性があることを示している。また、ニュートリノがマヨラナ粒子(粒子と反粒子が同一の素粒子)の場合とディラック粒子(粒子と反粒子が異なる素粒子)の場合に、宇宙論的なニュートリノが宇宙大規模構造形成に及ぼす影響を調べるための数値シミュレーションを行った。今後、この解析を行う。

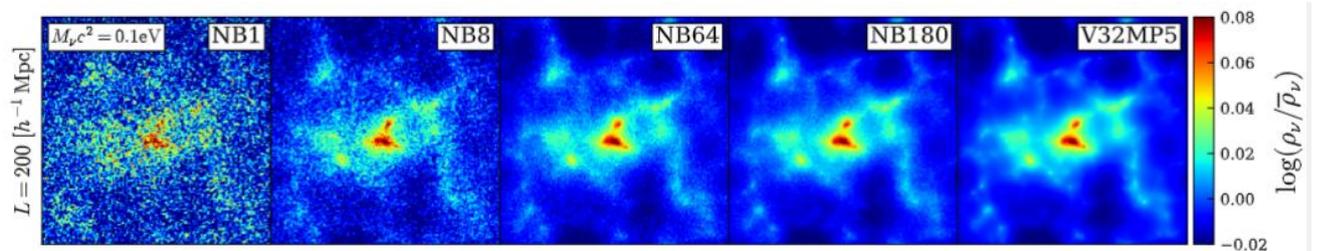


図 3-2-1: ニュートリノを Vlasov シミュレーションで計算した結果(一番右のパネル)と N 体シミュレーションを用いて計算した結果(粒子数の少ない順に NB1、NB8、NB64、NB180)の比較。粒子数が少ない場合はショットノイズの影響が大きいことが分かる。

(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)

超新星爆発後の周囲の星間ガスの空間分布、温度分布、速度分布を予測する機械学習モデルの開発・パラメータの調整を行った。本研究で開発した機械学習モデルは、低分解能のシミュレーションの結果と比べ、より高分解能のシミュレーションの結果に近い予測ができる(図 3-3-1 左の列, 3-3-2)。空間分布の予測に関しては、査読付き論文にまとめて出版済み、またプレスリリースを行った(AI が描く超新星爆発の広がり—深層学習を用いた超新星爆発シミュレーションの高速再現技術—、発表日：令和 5 年 10 月 23 日)。

また、ダークマター、星、ガスから成る天の川銀河サイズの安定した銀河モデル(初期条件)を構築することに成功した。大規模シミュレーションを行うためには、各ノードで初期条件を生成する必要があるため、そのための実装を行い、「富岳」で最大約 1 万 2 千ノードを用い、およそ 10^{11} 粒子を用いた計算を実行した。

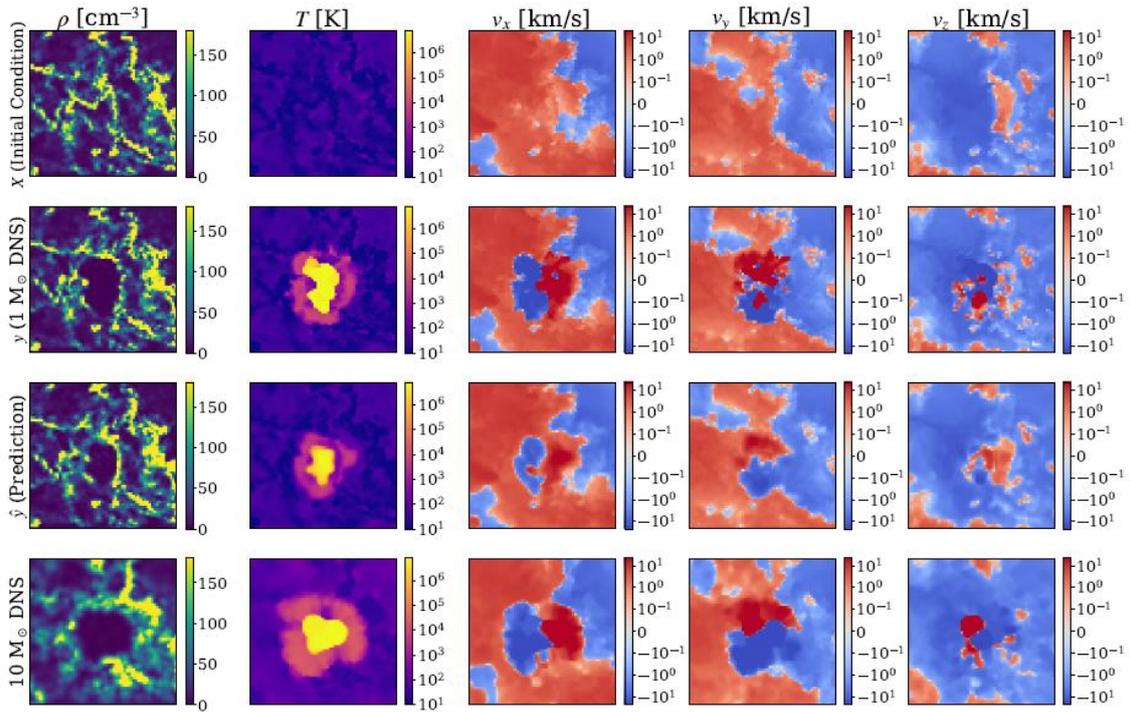
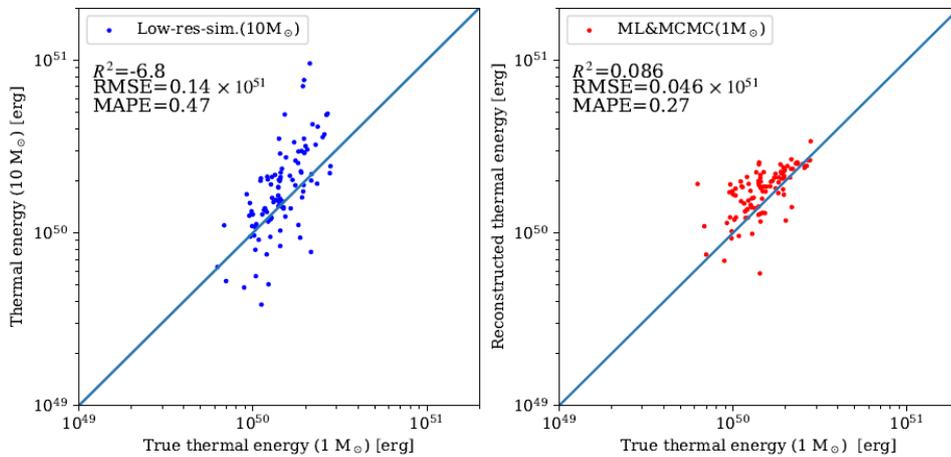


図 3-3-1: 超新星爆発後の周囲のガスの時間進化について、シミュレーション結果と機械学習による予測の比較。上段から、初期条件、高分解能のシミュレーションの結果、機械学習による予測、低分解能のシミュレーションの結果。左から、ガスの密度分布、温度分布、速度分布 (x, y, z 方向)。



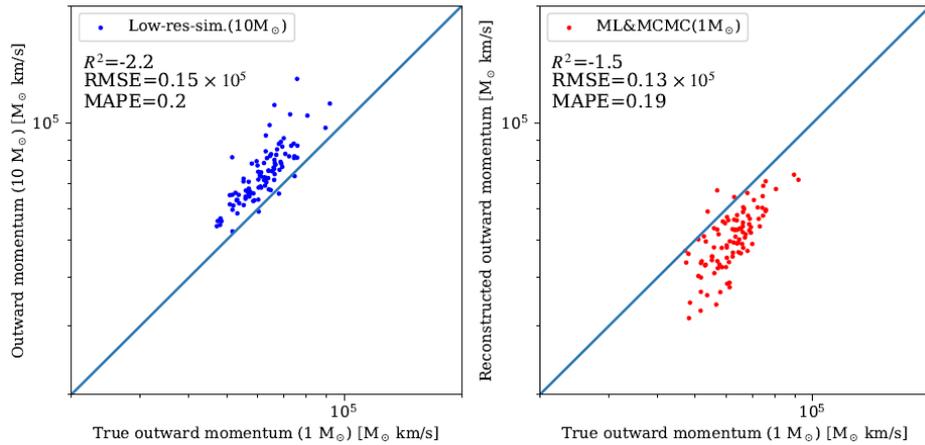


図 3-3-2: 高分解能のシミュレーションと低分解能のシミュレーションの比較 (左) と高分解能のシミュレーションと機械学習による予測の比較 (右)。点は、個々の計算を示す。青い線は、完全に一致する場合を示す。上段は領域全体の熱エネルギーについて、下段は領域全体の運動量について。

(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 5 年度は、「銀河円盤の 3 次元磁気流体シミュレーション」と「恒星多体系による渦状腕形成・進化のテスト計算」をおこなった。以下にその内容を述べる。

「銀河円盤の 3 次元磁気流体シミュレーション」様々な初期縦磁場強度における銀河円盤シミュレーションを準定常状態に到達するまでおこなった。初期磁場強度が μG に匹敵するほど強い場合、銀河円盤のガスのスケールハイトが増幅された磁場により大きくなり、観測値と不整合となることがわかった。これは銀河円盤の初期縦磁場強度が非常に小さかったことを意味する。さらに、より現実的な超新星爆発によるフィードバックを取り入れるために、超新星爆発を起こす前の大質量星の運動を追跡するための試験粒子を新たに実装した。

「恒星多体系による渦状腕形成・進化のテスト計算」星粒子の重力場を動的に解くために、Athena++ に Particle-Mesh (PM) 法を用いた粒子多体系コードを実装した。解像度の異なる格子を多段に配置した場合、異なる解像度の格子の境界近傍において恒星粒子に自己力が働くという問題があった。粒子質量を格子に分配する手法の改良および PM 法のレベル境界の精度の向上をおこなった。その結果自己力の大きさを約 10 分の 1 にすることに成功した。(図 4-1-1) は、銀河円盤の恒星多体系テスト計算のスナップショット (恒星面密度の初期値からの差) であり、ツリー法と整合的な結果が得られている。上記の銀河円盤の 3 次元磁気流体シミュレーションに組み込む準備が整った。

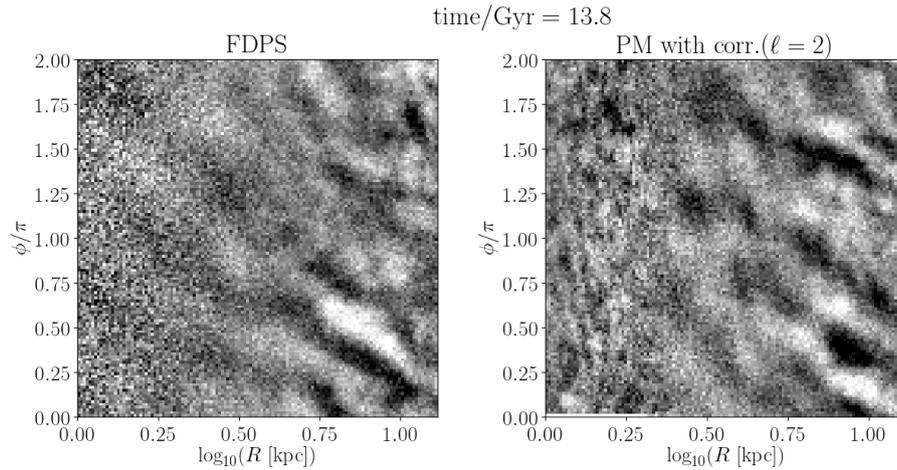


図 4-1-1: 10^7 体の恒星粒子を使った銀河円盤シミュレーションのテスト計算の結果。色は星面密度の方位角平均からの差を表す。左図がツリー法を用いた(FDPS, Iwasawa et al. 2016)で、右図が PM 法 (Athena++)を用いた結果。右斜め下に傾いた筋状の構造が渦状腕に対応する。 $\log_{10}(R[\text{kpc}]) < 0.25$ の構造で見られるツリー法と Particle-Mesh 法の結果の違いは、PM 法の分解能の影響と考えている。

(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 5 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うため、ホール効果の実装について再検討をおこなった。先行研究では数値拡散が大き目に入る数値流束を導入することで、ホール効果が引き起こす数値不安定性を抑制していたが、空間精度を先行研究よりさらに向上させても、円盤の磁束輸送に大きな影響を与えることがわかった。そこで、数値流束は変更せずに誘導方程式に hyper-resistivity を導入して不安定性を抑制する手法を開発した。様々なテスト計算をおこない、先行研究では定まっていなかった最適な hyper-resistivity の係数を提案した。原始惑星系円盤の大域シミュレーションは完了していないが、その途中経過を示した図(赤道面の縦磁場の分布)を以下に示す(図 4-2-1)。ホール効果を考慮しない場合(中図)、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ることが「富岳」を用いた我々の研究(Iwasaki et al. 2024 in press)により明らかになっていた。ホール効果を考慮したシミュレーション(右図と左図)では、初期縦磁場の方向によって磁束進化が二分化するものの、遷移層自体は形成されることがわかった。しかし遷移層の詳細な構造はホール効果によって大きく変わることがわかった。現在継続してシミュレーションを実行中である。本年度はホール効果の計算手法の改良に注力したため、今後熱進化モデルを組み込んでより現実的な計算を行う。

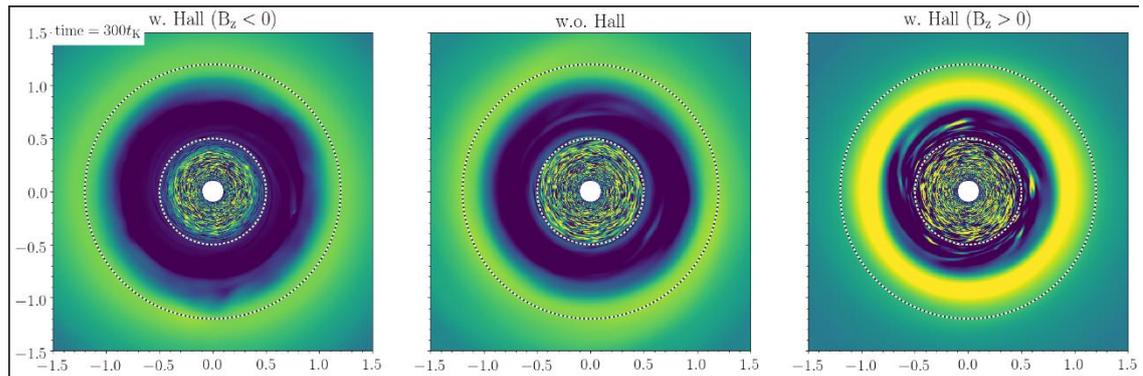


図 4-2-1：円盤赤道面の縦磁場分布。ホール効果を考慮しないシミュレーション(中図, Iwasaki et al. in press)とホール効果を考慮したシミュレーション(左図：円盤角運動量と初期縦磁場が反平行な場合, 右図：円盤角運動量と初期縦磁場が平行な場合)を示す。

(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 1) PDM (微惑星駆動惑星移動) の体系的なシミュレーション、2) 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。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り、理論や微惑星の自己重力をいれない簡単なモデルでは予測されていたものである。今回、我々は、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、微惑星の質量と原始惑星の質量を体系的に変えた多数のシミュレーションを「富岳」と我々の開発したコード GPLUM を使って行った。

結果の一部を(図 4-3-1)に示す。それぞれのパネルは原始惑星の軌道長半径の進化を、時間の関数として示す。ある質量比で多数のシミュレーションを初期の微惑星分布の乱数を変えて行い、その結果と、5000 年後の原始惑星の位置の分布、それをガウシアン 2 つでフィットした結果を示す。左上から右へ、それから左下から右下へと原始惑星と微惑星の質量比が大きくなる。

質量比が大きいシミュレーション(右下)では、外側に移動するものと内側に移動するものが明確に分かれる一方、非常に質量比が小さいケースでも、最終位置の分散は大きい。PDM の効果自体は存在する、ということがわかった。従来の研究では質量比が 100 程度以上(この図では下の 3 パネル)でなければ PDM はおこらないとされていたが、これを否定する結果であり、惑星形成過程では普遍的に PDM が起こることを示唆するものである。

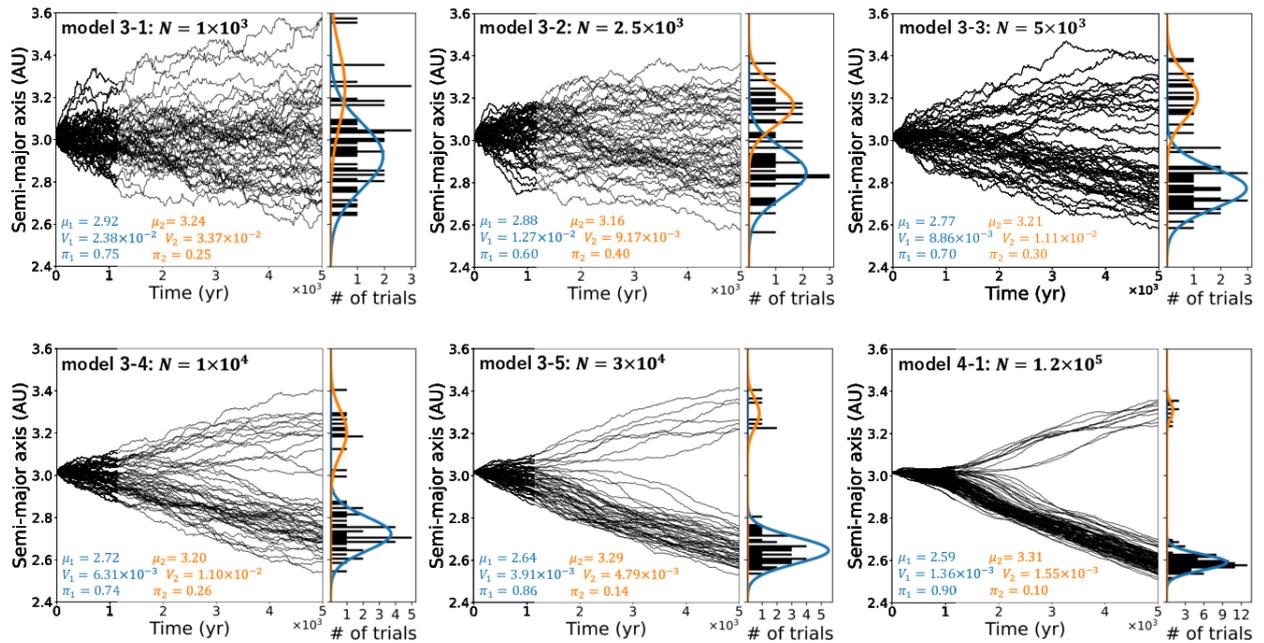


図 4-3-1: PDM による原始惑星の軌道長半径の進化。左上から右下にむけて、面密度は一定で微惑星の粒子を増やしている。それぞれのパラメータで複数のランを行い、5000 年後の軌道長半径の分布と、ガウシアン 2 つによるフィットも示す。

(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ことを目的とした研究を推進した。令和 5 年度は使用可能な計算資源を考慮し [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、膨大な数のダスト粒子 (2048^3 個ずつ 8 種類) の追跡シミュレーションと [2] 乱流 DNS (格子点数 2048^3) 中のダスト粒子の衝突付着成長シミュレーションを実施した。これまでに [1] の計算で構築した粒子データを活用したデータ駆動型の統計解析計算によって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] の計算で実際に付着成長した粒子の数が加速的に増加することを確認し、ダスト成長のシナリオ (高レイノルズ数乱流中で衝突付着成長した粒子は互いに低速衝突が可能な低エンストロフィ領域 (図 4-4-1 参照) で寡占的に成長する傾向があり、衝突破壊問題を回避しうる) を構築した。

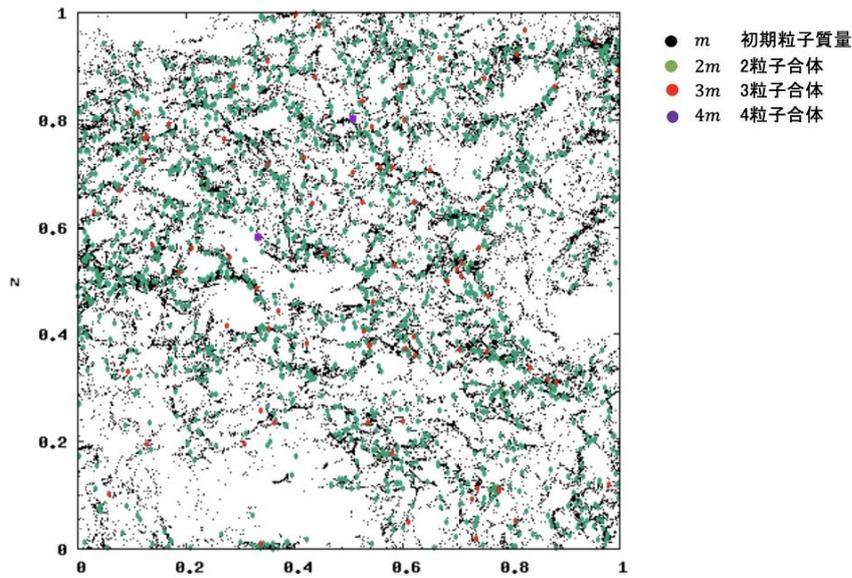


図 4-4-1：乱流 DNS (格子点数 2048^3) を用いたダスト粒子の衝突付着成長シミュレーション (追跡粒子数 1024^3 個) における付着合体粒子の空間分布の例 (計算領域の $1/4$ 領域における薄いスライス面上で可視化)。 $2m$, $3m$, $4m$ の各々2粒子合体, 3粒子合体, 4粒子合体の粒子が渦の密集領域 (図中で粒子密度が小さい領域) を避けた、その周りの層状の薄い領域に高密度に分布している様子が観察できる。

(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. 相対論的衝撃波における電磁放射、2. 太陽圏終端衝撃波におけるイオン観測、3. 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、4. 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. の相対論的衝撃波からの電磁波放射では、世界で初めてイオン・電子系における3次元PICシミュレーションを実施し、得られた衝撃波面の電磁波の偏光特性を明らかにした。その結果、宇宙最大の電波爆発現象である高速電波バーストの観測特徴を再現することに成功し、得られた成果はPhysical Review Letters誌に掲載された。(図5-1-1)

2. 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。

「富岳」を用いることでイオンスケールの長時間計算が可能になり、世界で初めてPICシミュレーションでイオン加速を示すことができた。本成果を投稿し、現在査読中である。

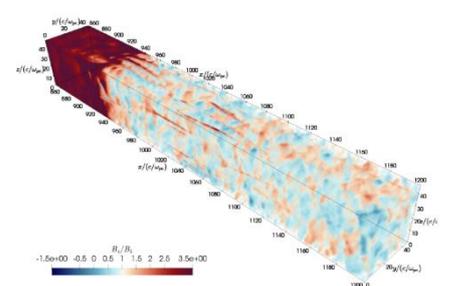


図 5-1-1: 相対論的衝撃波からの電磁波放射。色は磁場の変動成分の大きさを表す

3. の磁気リコネクションの研究では (図 5-1-2)、磁場を非相対論的から相対論的な強度まで変化させ、それぞれのパラメタ領域におけるイオン、電子加速の違いを系統的に明らかにした。その結果、非相対論的領域ではイオンが優位に加速される一方、相対論的磁場強度の状況下ではイオン・電子共にエネルギー等分配まで効率的に電子が加速されることが明らかになった。「富岳」を用いることでこれまでになく大きなシステムサイズの下でのイオン加速を議論することが可能になった。本成果は現在論文投稿に向けて準備中である。

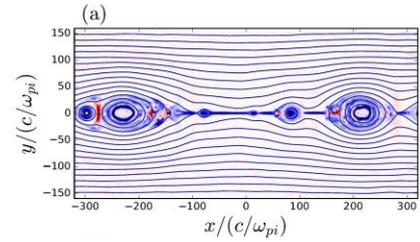


図 5-1-2: 電流密度と磁力線で表した磁気リコネクションの大規模発展

4. PIC シミュレーションによって学習データを準備することで、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。当初はニューラルネットワークによる学習と実装を検討したが、ニューラルネットワークの実装による新たな数値コストが無視できないことが判明し、別のアルゴリズムを検討した結果、記号回帰 (Symbolic regression) モデルの導入を進めている。

一般相対論輻射磁気流体コード UWABAMI による降着円盤

輻射場のエディントンテンソルを推定する機械学習モデルを構築し、一般相対論的輻射磁気流体コードに実装して高光度降着円盤のテスト計算を行った。結果を 2024 年日本天文学会春季年会で報告した。そして、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、降着円盤の回転軸方向に光速の 30%以上の速度を持つジェットが形成された (図 5-1-3 左: 黄緑色が降着円盤、オレンジ色がジェットを表す)。さらにジェットの噴出方向や輻射エネルギーの放出方向も降着円盤と共に歳差運動していることを明らかにした。(図 5-1-3 右) は降着円盤の回転軸の歳差角 (黒線)、ジェットの噴出方向の歳差角 (青線)、輻射エネルギーの放出方向の歳差角 (赤線) の時間進化を表しており、約 90 度歳差運動していることがわかる。本成果を *Astrophysical Journal* に投稿した。

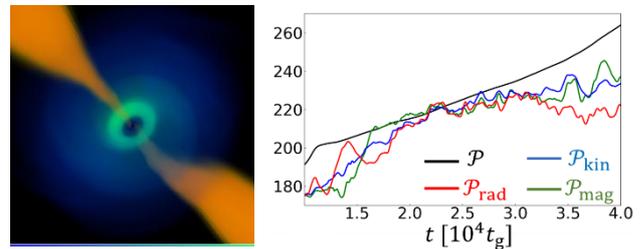


図 5-1-3:(左) 降着円盤(黄緑色)とジェット(オレンジ色)の分布、(右) 歳差角の時間進化

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 コードや CANS+コードで得られたデルで、100を超えるスナップショットの電波イメージを計算した。歳差運動が観測されたことを受け、RAIKOUでの歳差運動モデルを優先的に解析した。多波長スペクトル計算も実施した。その結果、今回のモデル設定では電波イメージおよび光度曲線は重力半径(およそブラックホール半径)を光が横切る時間の 10^4 倍程度の時間スケールで周期的な変動を示した(図5-1-4)。このことはシミュレーション結果を用いた自己相関関数による光度曲線の時間変動解析も実施することで定量的に確かめている。また、多波長スペクトルの時間変動も計算し、X線およびガンマ線でより強く1桁程度の変動を示すことが明らかになった。時折、X線増光が強く現れており、ブラックホールの自転が引き起こす歳差運動との関連性について調査を進めている。

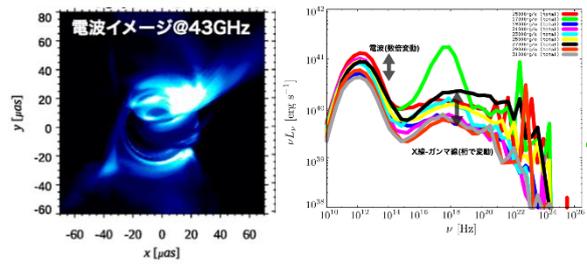


図 5-1-4 : (左) 電波イメージ、(右) 多波長スペクトル時間変動

非相対論的輻射磁気流体コード CANS+R

中程度解像度(方位角方向解像度 256-512)での比較的低光度な降着円盤のシミュレーションを非相対論的輻射磁気流体コード CANS+R を用いて実施した。弱いポロイダル磁場に貫かれた回転平衡にあるトーラスを初期条件とした。磁気回転不安定性による磁気乱流が発達した結果、非軸対称な構造を持つ降着流が形成された(図5-1-5左)。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。さらに、降着率の動径分布は $r \sim 20r_s$ の領域で一定になっており(図5-1-5右)、長時間計算の結果準定常な降着流が形成された。今後は、形成された降着流内部で降着率が上昇した場合の数値計算を実施し、X線連星や活動銀河核で観測されるスペクトル状態遷移の過程を調べ、高解像度化により発達した非軸対称構造が与える結果について考察する。

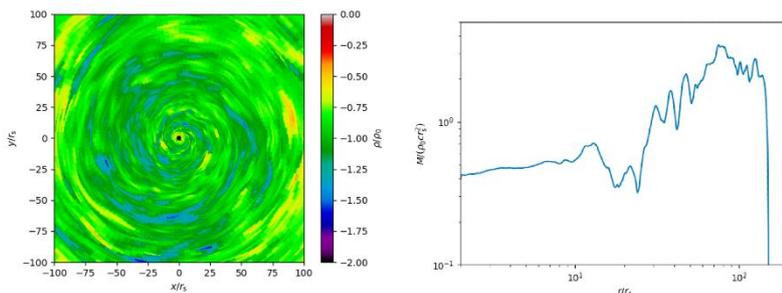


図 5-1-5 : 赤道面における密度分布(左)と降着率の動径分布(右)

(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

ボルツマン輻射流体コードによる超新星シミュレーションを教師データとし、AIによって輻射輸送のクロージャー関係式を構成するサロゲートモデルの開発を進めた。輻射輸送はモーメント法による近似がよく用いられるが、そこで仮定される慣習的なクロージャー関係式は精度が保証されていないため、より

厳密な計算を再現する形で関係式を構築するのが目的である。AI としては決定木回帰モデルを発展させた Light Gradient Boosting Machine (LightGBM) を利用し、先行して行っていた深層ニューラルネットワークを使ったモデルより高精度かつ汎化性能の高い関係式が得られた (図 5-2-1)。今後はより数値計算に実装しやすい形で AI を実装・訓練し、シミュレーションへの応用を進める予定である。

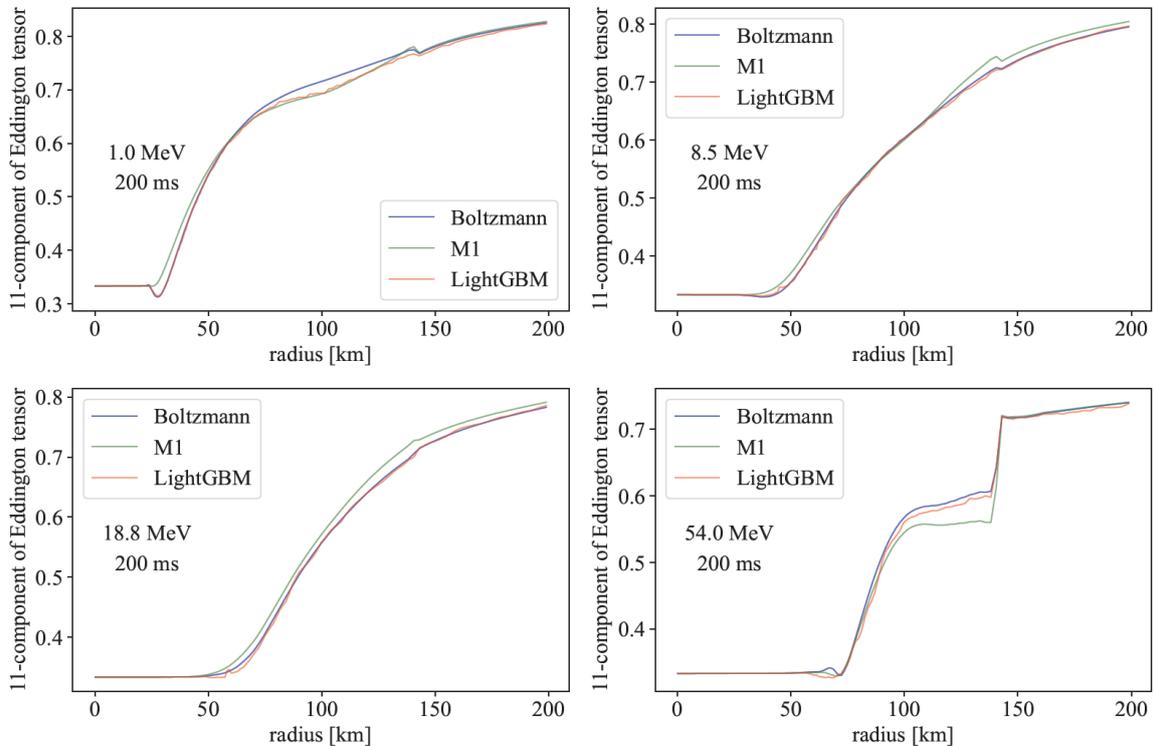


図 5-2-1 : バウンス後 300 ms のデータを再現するように訓練した AI モデルで、バウンス後 200 ms のデータを出力した結果。エディントンテンソルのフラックス方向成分の動径分布を書いており、青、緑、赤の線はそれぞれ正答、慣習的な関係式の結果、今回の AI モデルの結果に対応する。4 枚の図はそれぞれ違ったニュートリノエネルギーでの動径分布を表す。緑の慣習的モデルより赤の AI モデルのほうが青の正答をよく再現できている。

高解像度磁気流体計算 3DnSNe

強磁場、弱自転モデルについて 3次元計算を実行した (Matsumoto et al. 2023)。弱く自転があることにより効率的に、 α ダイナモが働き、磁場が増幅され、超新星爆発を助けることを世界で初めて指摘した。(図 5-2-2) は衝撃波と磁力線の強さを色で表したもの。乱流により衝撃波背面で強い磁場ができていことが分かる。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。関連して強い磁場がある場合に特異に起こるニュートリノ振動についても計算した (Sasaki, H et al. 2023)。超新星背面での乱流現象をより現象論的に 1次元計算に導入する手法を提案した (Sasaki S. and

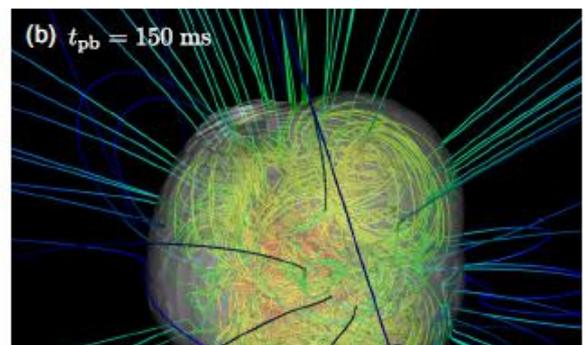


図 5-2-2 : 超新星爆発の爆発波面のスナップショット。磁場の形状を磁力線でその強さを色で表している。弱自転があることにより、極めて強い磁場ができてい。

Takiwaki 2023)。100MeV 程度の質量をもつ Axion 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. 2023)。

量子運動論的ニュートリノ輸送シミュレーション GRQKNT

球対称超新星爆発モデルを採用し、量子運動論的ニュートリノ輸送のグローバル計算を行った。(図 5-2-3) はニュートリノ加熱効率における古典的輸送計算との比較を示している。本シミュレーションにより、ニュートリノフレーバー変換によって超新星コア内のニュートリノ冷却効率が上がり、一方で加熱率が低下することが判明し、ニュートリノフレーバー変換が超新星爆発メカニズムに影響を与えることを示した。

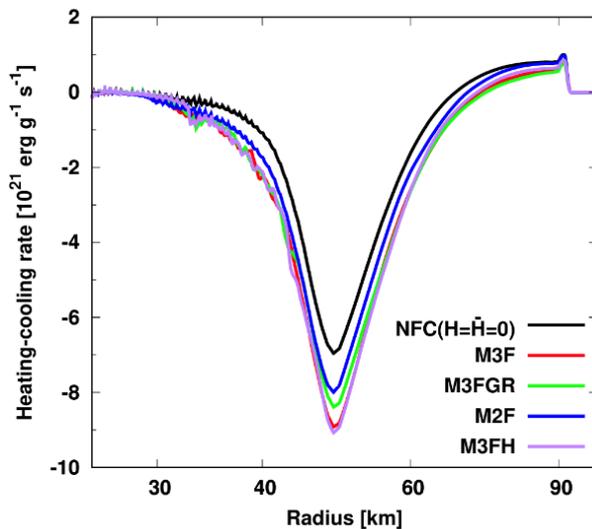


図 5-2-3 : ニュートリノ冷却及び加熱率の動径分布。黒線（その他の色線）が古典的（量子運動論的）ニュートリノ輸送シミュレーションの結果。本結果は、ニュートリノフレーバー変換が爆発メカニズムに影響を与える事を示している。

(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)

令和 5 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) = (0.8, 8.1, 2) と (0.3, 5.4, 1.35) の 1 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。1 秒以上の長時間計算の場合、ブラックホール特異点が z 方向への移動が無視できないこと、およびブラックホール磁気圏の強磁場領域の数値的取り扱いの問題が起こることが新たに発覚したため、その対応策を開発するために、低速回転モデル(0.3, 5.4, 1.35)の計算を行った。以下では、中性子星が重く、ブラックホールが高速回転モデル(0.8, 8.1, 2)の解析について述べる。

本モデルは、中性子星が重くコンパクトであるため、潮汐破壊があまり顕著に起こらず、合体時に潮汐力によって動的に放出される物質は 10^{-4} 太陽質量以下であった。合体後に形成されるディスクの質量は 10^{-2} 太陽質量程度であり、ディスクの形成後、1 秒程度のタイムスケールでディスク内部に駆動される磁気回転不安定性によって乱流が引き起こされ、それに伴って実効的な粘性が生じる。粘性加熱によって放出される物質は 10^{-3} 太陽質量程度であった。磁気回転不安定性による乱流は、さらにダイナモを駆動し、平均トロイダル磁場の周期的な生成(周期的な極性の反転)と、生成トロイダル磁場のブラックホール回転軸方向への浮上が確認された(図 5-3-1)。また、浮上してきた磁場がブラックホールに刺さることで、ブラックホールの回転によるさらなる増幅が起こり、回転軸に沿って磁場優勢な磁気圏が形成されるこ

とが確認された(図 5-3-2)。その後、逆の極性を持つ磁場がディスクから浮上ってきて磁気圏を壊したため、高強度のポインティングフラックスの駆動は起こらなかった。ディスク内部での磁場生成は乱流を含む確率的な現象であるためにそれに起因する磁気圏の進化について断定的なことを議論するのは難しいが、合体後に形成されるディスクが 0.01 太陽質量と比較的軽量な場合でも、磁気圏が壊されなければブラックホール回転軸方向に磁気駆動のアウトフローが出る可能性が考えられる。

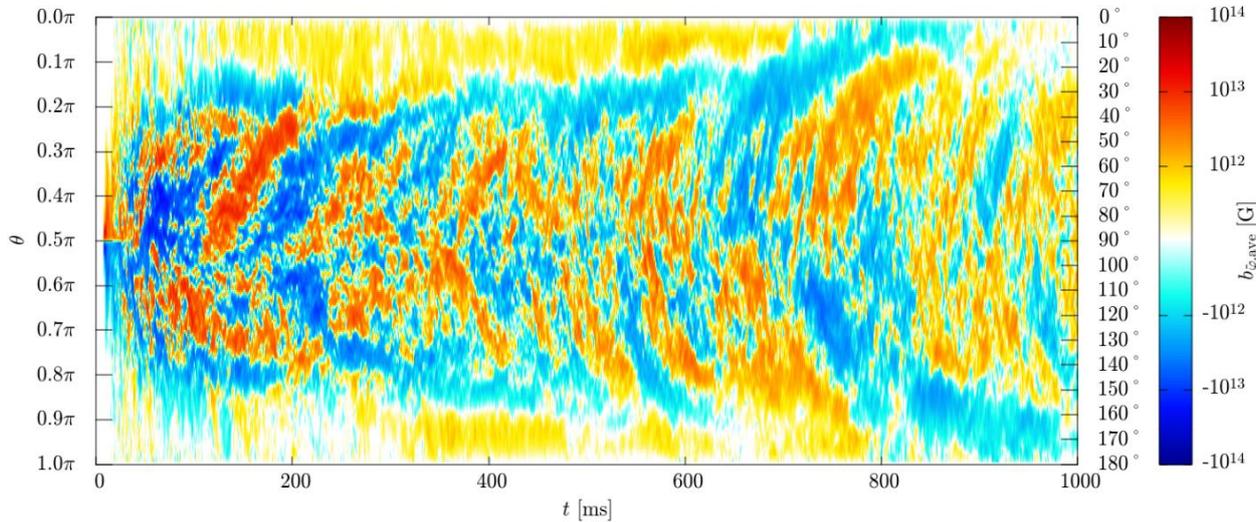


図 5-3-1: ブラックホールを中心とした半径 100km の球上で評価した、平均トロイダル磁場のバタフライダイアグラム。ディスク内部 (90 度の赤道面付近) で周期的に逆極性の磁場が生成されていること、生成された磁場が極 (0 度、180 度) 方向に浮上していることが確認される。また、浮上した磁場が極付近の磁場極性を反転させていることも確認される。

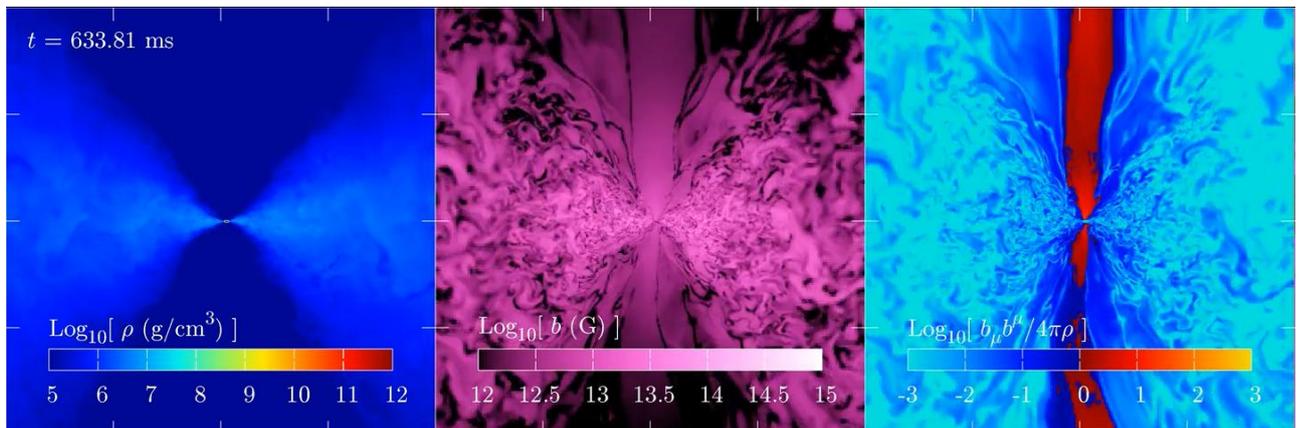


図 5-3-2: 400km スケールの xz 平面スナップショット。ブラックホールは中心に位置しており、その回転軸は z 方向 (縦軸方向)。左からそれぞれ静止質量密度、磁場強度、磁化パラメータ。磁化パラメータを見ると磁場優勢な領域の形成が確認される。

(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)

輻射磁気流体コード R2D2 (Radiation and RSST for Deep Dynamics)

恒星内部を探る R2D2 シミュレーションについては、令和 5 年度に太陽型星の調査を実施した。太陽の

自転に対して2, 3, 5倍のシミュレーションをいずれも世界最大の解像度である54億点で恒星内部を分解している。現在でも多くの計算は1億点程度で恒星が分解されているため、「富岳」でしかできないような大規模な計算である。

特に、5倍の自転速度で実施した研究では、恒星内部を覆うような大規模な磁場が生成された(図6-1-1)。今後、解析を続けていく。また、令和6年度に実施予定の恒星表面シミュレーションのための準備を完了した。恒星表面シミュレーションのためには、星の進化モデルを解いた上で適切な初期条件を準備する必要がある。そのためのワークフローを設定し、適切な準備を行なった。計画通り令和6年度には巨大黒点のシミュレーションを実行する予定である。

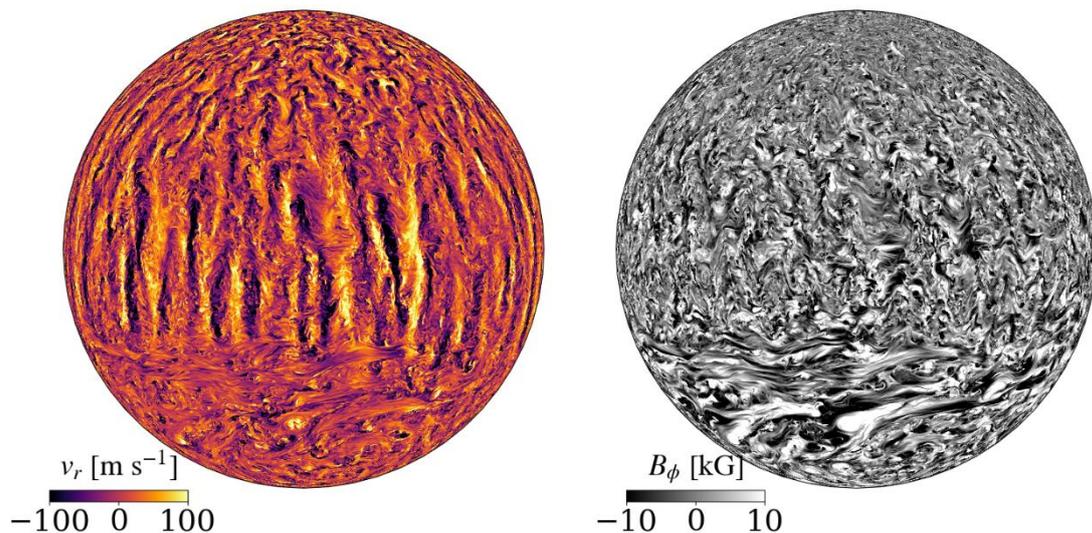


図6-1-1:太陽の5倍自転の全球シミュレーション結果。左は鉛直速度、右は経度方向磁場である。恒星対流層中部での値を示している。

輻射磁気流体コードRAMENS (RAdiative Magnetohydrodynamics Extensive Numerical Solver)

RAMENSを用いた恒星風シミュレーションでは、令和5年度に自転速度が異なる太陽型星を調査した。恒星の自転速度と惑星間空間磁場強度の観測的な経験則を仮定し、コリオリ力の影響を調べるため極域と赤道域での計算を実施した。1ケースについて1000万点程度の格子点数で、数百万ステップ程度の時間積分を行った。このような計算は単体でも世界で我々以外には行われておらず、自転速度に対する依存性調査まで実現したのは「富岳」でこそその成果である。得られた恒星風速度は自転速度に関して強い依存性を持ち(図6-1-2)、今後より詳しい調査を進めていく。

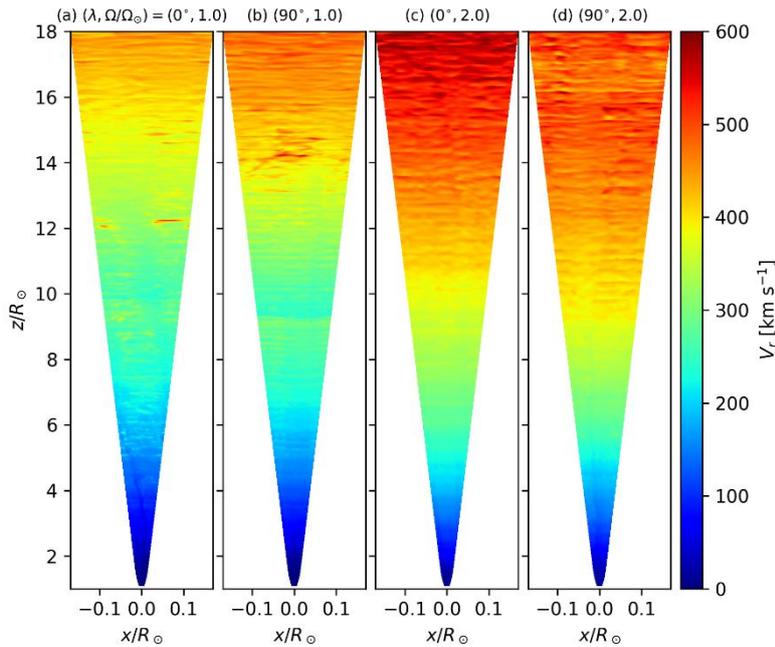


図 6-1-2: 太陽の 1 倍 (パネル a, b)、2 倍 (パネル c, d) の自転速度を持つ恒星風のシミュレーション結果。極域 (パネル a, c) と赤道域 (パネル b, d) でそれぞれ計算を実施した。カラーは恒星風速度のスライス [km/s]。

(6-2) サブ課題 D-2: 惑星環境のダイナミクス: 檜村 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。これに対して、畳み込みニューラルネットワークによる機械学習を用いて、ある高度の鉛直風データから鉛直対流の分別を試行した。初期の試行として、全体を 16×16 格子の小領域に分割し、領域の静的安定度の平均値から鉛直風が対流によるものか否かのラベル付けをして教師データとし (図 6-2-1a)、学習を行った。学習後のモデルは、対流の領域を概ね推定できた (図 6-2-1b)。試行錯誤の結果、学習モデルの正答率を向上させるためには、一般的な画像分類における技術 (オーバーサンプリング等) が有用であることが見出された。

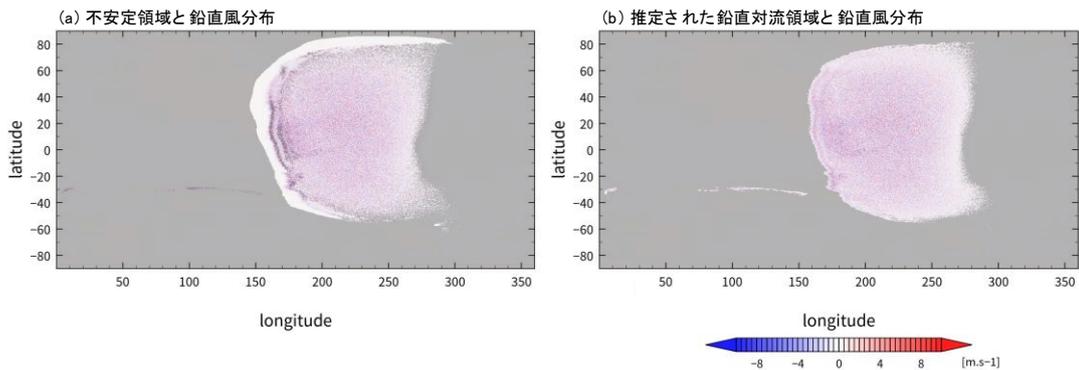


図 6-2-1: 火星大気高解像度計算による鉛直風分布 (色) と機械学習の結果。(a) の白抜き領域は温度場から計算した静的不安定な領域を表し、(b) の白抜き領域は学習モデルを使って推定した鉛直対流の領域を表す。

マントル対流について、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ーの値を十分大

きくことであるが、従来から行ってきた準備的計算の積み重ねにより、本年度は遂に「プレートらしい」対流様式の発現が期待できる値にまで引き上げた計算を開始することができた。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（図 6-2-2a）や、海嶺で細く海溝で太いプレート境界構造（図 6-2-2b）など、地球のプレート運動と調和的な特徴が再現されていることも確認できた。

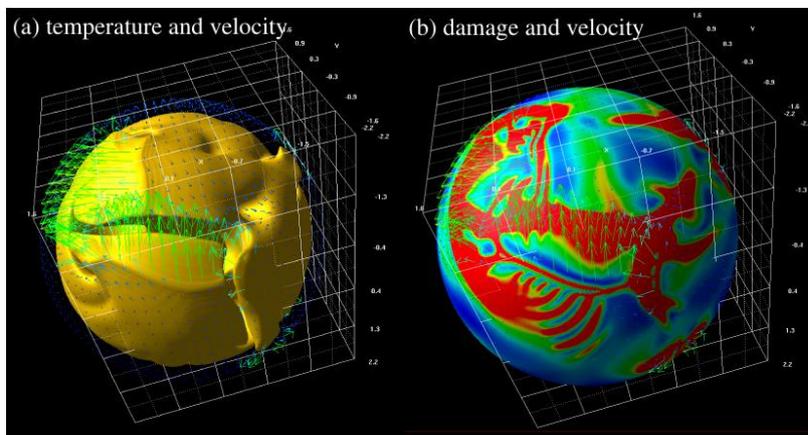


図 6-2-2: 応力履歴依存レオロジーをもつ高粘性流体の 3 次元球殻内熱対流シミュレーションの一例。(a) 球殻の最上部における流速（矢印）と高温の等値面の分布。(b) 流速（矢印）とダメージ（色）の分布。緑から赤色が過去に高い応力を受けて強く破壊された部分、青色は破壊されていない部分を示す。

また、マンテル対流に関して当初計画を超えた活動として、液相マグマの生成と移動の効果をもつ固相マンテルの対流に取り込んだ 3 次元（部分）球殻モデルを新たに構築し、月のマンテルのもつ「分厚くてまるい」形状を模したモデル領域における火成活動を伴うマンテル対流の数値シミュレーションに着手した。予備的な計算の結果、月初期においてマグマが深部から上昇し、多くの玄武岩質成分を上部マンテルに抽出することが分かった（図 6-2-3）。また、マグマが地表面付近まで上昇した時代は、月全体におけるマグマ量が（マグマオーシャン以降で）最も多い時期であり、マグマ生成による体積膨張が月全球で起こることも分かった。

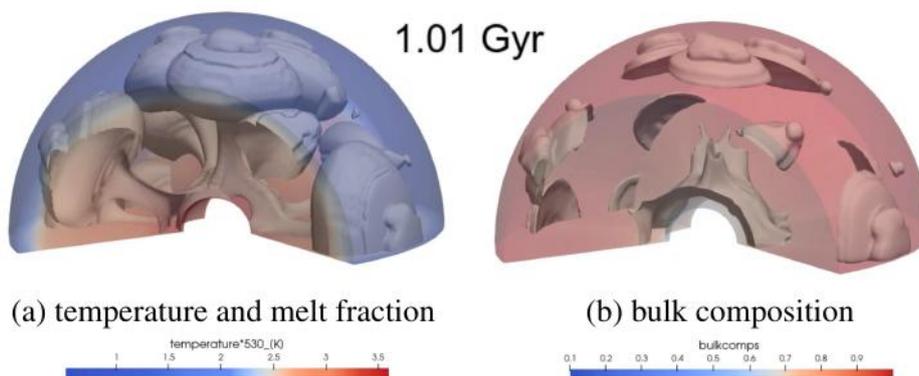


図 6-2-3: 火成活動を伴うマンテル対流の 3 次元シミュレーションにより、月内部のマグマ上昇とそれに伴う玄武岩（マグマ的物質）の移動を追跡した例。(a) 月内部の温度分布（色）と液相の体積分率が 1%となる位置（等値面）の分布。(b) 月内部の岩石組成（かんらん石成分の割合）の分布。赤色はかんらん岩質のマンテルを表しており、等値面は玄武岩質のマグマの流入により、かんらん石成分が 90%を

下回る位置を表す。

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全層熱的不安定な設定ならびに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 15000 惑星回転時間を超えて 24000 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 6-2-4）。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。

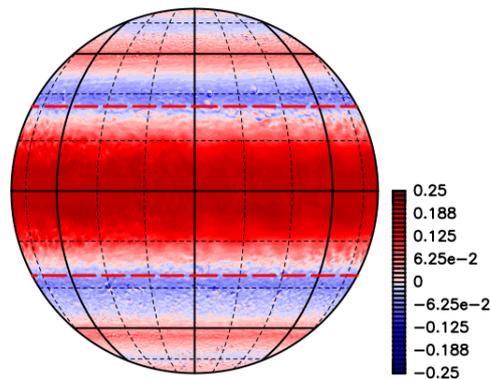


図 6-2-4：ガス惑星大気計算の 24000 回転時間経過後の惑星表面帯状風分布。赤が西風、青が東風、赤破線が内側境界の接円筒緯度を表している。風速は回転角速度と球殻の厚さで無次元化されている。

(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 5 年度は 6 件のプレスリリースおよびウェブリリースを行った。また、普及活動の一環として「月」をテーマにした特別サイエンス講座を広島国泰寺高校にて開催し、二次元円環マンテル対流モデルを用いて行った月内部進化の研究成果が、大学院生と高校生のアウトリーチ活動にて紹介された（令和 5 年 10 月 14 日）。「富岳」成果創出加速プログラムに新たに採択された基礎科学にかかわる 4 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、定期的で開催される 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（4/25, 5/23, 6/29, 7/24, 9/26, 10/19, 11/28, 12/22, 1/30, 2/22, 3/22）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7回（5/23, 6/21, 7/25, 9/25, 10/27, 12/12, 2/16）開催した。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・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 2023 年大会

セッション M-GI30 「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5年5月26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も見える。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。

●Workshop: Astro AI with Fugaku

参加者：29名

日時：令和5年9月11日, 12日

場所：筑波大学 東京キャンパス+オンライン開催

主催：「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」、
「シミュレーションと AI で解き明かす太陽地球環境変動」、「次世代宇宙論サーベイ群のための多波長宇宙論的シミュレーション」

概要：「富岳」成果創出加速プログラムの三つの宇宙・地球関連プロジェクトの合同開催。大規模構造、銀河形成、恒星進化、惑星など幅広いテーマについて、シミュレーションと機械学習を用いた研究成果を共有し、これらの分野における将来の AI 応用についても議論した。

●「成果創出加速」基礎科学合同シンポジウム

参加者：75 名

日時：令和 5 年 12 月 18 日 - 20 日

場所：筑波大学 東京キャンパス+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」

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：令和 5 年度から「富岳」成果創出加速プログラムに新たに採択された基礎科学にかかわる 4 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。

●Workshop: AI-driven discovery in physics and astrophysics

参加者：約 140 名

日時：令和 6 年 1 月 22 日 - 26 日

場所：東京大学 Kavli IPMU

主催：東京大学 Kavli IPMU、Simons Foundation

協賛：「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」、東京大学 DLX Design Lab

概要：物理学・天体物理学において、AI/ML ならではの発見をする方法を探ることを目的として開催した。

●日本天文学会 2024 年春季年会

企画セッション Z2. 「機械学習による天文学」

日時：令和 6 年 3 月 11 日, 12 日

場所：東京大学 本郷キャンパス+オンライン開催

概要：機械学習を活用している、もしくは利用を計画している研究者が最新の成果や情報を持ち寄ることで、機械学習による新たな天文学を醸成することを目的に開催した。

<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」のウェブサイトを作成し、令和 5 年 4 月から公開している。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>

●普及活動

・「月」をテーマにした特別サイエンス講座

日時：令和 5 年 10 月 14 日

場所：広島国泰寺高校

概要：二次元円環マントル対流モデルを用いて行った月内部進化の研究成果が、大学院生と高校生のアウトリーチ活動にて紹介された。

<https://www.kokutaiji-h.hiroshima-c.ed.jp/zen-club-detail.php?id=193>

●プレスリリースおよびウェブリリース

・M87 巨大ブラックホールを取り巻く降着円盤とジェットの詳細撮影に初めて成功

発表日：令和 5 年 4 月 27 日情報解禁

発表主宰者：国立天文台、八戸工業高等専門学校、総合研究大学院大学、東京大学 宇宙線研究所、新潟大学、工学院大学、大阪公立大学、他海外機関

・太陽フレアを熱対流が駆動するメカニズム ～スーパーコンピュータ 富岳・アテルイ II により解明～

発表日：令和 5 年 6 月 23 日

発表主宰者：宇宙科学研究所、名古屋大学 宇宙地球環境研究所

・従来とは異なる手法で宇宙の物質の総量を測定 ～銀河団を構成する銀河を利用して実現～

発表日：令和 5 年 9 月 14 日情報解禁

発表主宰者：千葉大学

・歳差運動する M87 ジェットの噴出口ー巨大ブラックホールの「自転」を示す新たな証拠ー

発表日：令和 5 年 9 月 28 日情報解禁

発表主宰者：自然科学研究機構 国立天文台、茨城大学、大阪公立大学、工学院大学、駒澤大学、総合研究大学院大学、筑波大学、東京大学 宇宙線研究所、東洋大学、山口大学

・AI が描く超新星爆発の広がりー深層学習を用いた超新星爆発シミュレーションの高速再現技術ー

発表日：令和 5 年 10 月 23 日情報解禁

発表主宰者：東京大学、東北大学、神戸大学

・「富岳」で高速電波バーストの再現に成功—宇宙最大の電波爆発の起源に迫る—

発表日：令和6年2月2日

発表主宰者：京都大学、千葉大学、東京大学、九州大学

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	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

粒子の衝突付着成長シミュレーション		
(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説明	千葉県稲毛区弥生町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
(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	Long-term gravitational wave asteroseismology of supernovae: From core collapse to 20 seconds postbounce	Mori, Masamitsu; Suwa, Yudai; Takiwaki, Tomoya	Physical Review D	April 2023
2	The Athena++ Adaptive Mesh Refinement Framework: Multigrid Solvers for Self-gravity	Kengo Tomida, James M. Stone	The Astrophysical Journal Supplement Series	May 2023
3	The Athena++ Adaptive Mesh Refinement Framework: Multigrid Solvers for Self-gravity	Kengo Tomida, James M. Stone	The Astrophysical Journal Supplement Series	May 2023
4	Novel Approach to Forecasting Photospheric Emergence of Active Regions	S. S. A. Silva, M. Lennard, G. Verth, I. Ballai, E. L. Rempel, J. Warnecke, H. Iijima, H. Hotta, S.-H. Park, A. C. Donea, K. Kusano, and V. Fedun	The Astrophysical Journal	May 2023
5	RAIKOU (来光): A General Relativistic, Multiwavelength Radiative Transfer Code	Tomohisa Kawashima, Ken Ohsuga, Hiroyuki R. Takahashi	Astrophysica Journal	June 2023
6	Turbulent convection as a significant hidden provider of magnetic helicity in solar eruptions	Toriumi, Shin; Hotta, Hideyuki; Kusano, Kany	Scientific Report	June 2023
7	Scale-dependent analysis of angular momentum flux in high-resolution magnetohydrodynamic simulations for solar differential rotation	Mori, K.; Hotta, H	Monthly Notices of the Royal Astronomical Society	July 2023
8	A Comprehensive Simulation of Solar Wind Formation from the Solar Interior: Significant Cross-field Energy Transport by Interchange	Iijima, Haruhisa; Matsumoto, Takuma; Hotta, Hideyuki; Imada, Shinsuke	The Astrophysical Journal Letters	July 2023

	Reconnection near the Sun			
9	Dark Matter Halo Properties of the Galactic Dwarf Satellites: Implication for Chemo-dynamical Evolution of the Satellites and a Challenge to Lambda Cold Dark Matter	Kohei Hayashi, Yutaka Hirai, Masashi Chiba, Tomoaki Ishiyama	The Astrophysical Journal	August 2023
10	The volcanic and radial expansion/contraction history of the Moon simulated by numerical models of magmatism in the convective mantle	Ken'yo U, Masanori Kameyama, Masaki Ogawa	Journal of Geophysical Research: Planets	August, 2023
11	Multimessenger signals of heavy axionlike particles in core-collapse supernovae: Two-dimensional simulations	Mori, Kanji; Takiwaki, Tomoya ; Kotake, Kei ; Horiuchi, Shunsaku	Physical Review D,	September 2023
12	Observing Supernova Neutrino Light Curves with Super-Kamiokande. IV. Development of SPECIAL BLEND: A New Public Analysis Code for Supernova Neutrinos	Harada, Akira; Suwa, Yudai; Harada, Masayuki; Koshio, Yusuke; Mori, Masamitsu; Nakanishi, Fumi; Nakazato, Ken'ichiro; Sumiyoshi, Kohsuke; Wendell, Roger A.	The Astrophysical Journal	September 2023
13	3D-Spatiotemporal Forecasting the Expansion of Supernova Shells Using Deep Learning toward High-Resolution Galaxy Simulations	Keiya Hirashima, Kana Moriwaki, Michiko S. Fujii, Yutaka Hirai, Takayuki R. Saitoh, Junichiro Makino	Monthly Notices of the Royal Astronomical Society	September 2023
14	Solar horizontal flow evaluation using neural network and numerical simulations with snapshot data	Masaki, Hiroyuki; Hotta, Hideyuki; Katsukawa, Yukio; Ishikawa, Ryohtaroh T.	Publications of the Astronomical Society of Japan	September 2023
15	The volcanic and radial expansion/contraction history of the Moon simulated by numerical models of magmatism in the convective mantle	Ken'yo U, Masanori Kameyama, Masaki Ogawa	Journal of Geophysical Research: Planets	September 2023

16	Precessing jet nozzle connecting to a spinning black hole in M87	Cui et al. (total 79 authors including Tomohisa Kawashima, Ken Ohsuga, and Hiroyuki R. Takahashi)	Nature	September, 2023
17	Surrogate Modeling for Computationally Expensive Simulations of Supernovae in High-Resolution Galaxy Simulations	Keiya Hirashima, Kana Moriwaki, Michiko S. Fujii, Yutaka Hirai, Takayuki R. Saitoh, Junichiro Makino, Shirley Ho	NeurIPS2023-AI4Science Poster	October 2023
18	N-body simulation of planetary formation through pebble accretion in a radially structured protoplanetary disk	Jinno, Tenri ; Saitoh, Takayuki R. ; Ishigaki, Yota ; Makino, Junichiro	Publications of the Astronomical Society of Japan	October 2023
19	Formation of first star clusters under the supersonic gas flow - I. Morphology of the massive metal-free gas cloud	Shingo Hirano, Youcheng Shen, Sho Nishijima, Yusuke Sakai, Hideyuki Umeda	Monthly Notices of the Royal Astronomical Society	November 2023
20	Uchuu-nu2GC galaxies and AGN: Cosmic variance forecasts of high-redshift AGN for JWST, Euclid, and LSST	Taira Oogi, Tomoaki Ishiyama et al.	Monthly Notices of the Royal Astronomical Society	November 2023
21	Intermittency across Reynolds numbers—the influence of large-scale shear layers on the scaling of the enstrophy and dissipation in homogenous isotropic turbulence	GE Elsinga, Takashi Ishihara, JCR Hunt	Journal of Fluid Mechanics	November, 2023
22	Spin-flavor precession of Dirac neutrinos in dense matter and its potential in core-collapse supernovae	Sasaki, Hirokazu; Takiwaki, Tomoya; Balantekin, A. Baha	Physical Review D	November 2023
23	Basic characteristics of neutrino flavor conversions in the postshock regions of core-collapse supernova	Nagakura, Hiroki; Zaizen, Masamichi	Physical Review D	December 2023
24	Dynamics of Large-Scale Solar Flows	Hotta Hideyuki, Bekki Yuto, Gizon Laurent, Noraz Quentin, Rast, Mark	Space Science Reviews	December 2023

25	Linearly-polarized Coherent Emission from Relativistic Magnetized Ion-electron Shocks	Masanori Iwamoto, Yosuke Matsumoto, Takanobu Amano, Shuichi Matsukiyo, and Masahiro Hoshino,	Phys. Rev. Lett.,	January 2024
26	Neutrino-driven massive stellar explosions in 3D fostered by magnetic fields via turbulent α -effect	Matsumoto, Jin; Takiwaki, Tomoya; Kotake, Kei	Monthly Notices of the Royal Astronomical Society	February 2024

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	GR-RMHD Simulations of Super-Eddington Flows, invited oral talk	K. Ohsuga, Y. Asahina, A. Utsumi, A. Inoue (University of Tsukuba), H.R.Takahashi (Komazawa University)	New Frontiers in GRMHD Simulations of Accreting Black Holes (オンライン)	April 3-6, 2023
2	Three factors cause the infall velocity deceleration in the accreting envelopes around the protostar, oral talk	Shingo Hirano (The University of Tokyo), Yuri Aikawa (The University of Tokyo), Masahiro N. Machida (Kyushu University)	Protostars and Planets VII (Kyoto, Japan)	April 10-15, 2023
3	The Athena++ Adaptive Mesh Refinement Framework: Multigrid Solvers for Self-gravity, poster	Kengo Tomida (Tohoku University) James M. Stone (Institute for Advanced Study)	Protostars and Planets VII (Kyoto, Japan)	April 10-15, 2023
4	Chemo-dynamical evolution of the Milky Way, invited oral talk	Yutaka Hirai (University of Notre Dame/Tohoku University)	MODEST-23 JM (OIST, Okinawa, Japan)	April 17-19, 2023
5	Simulation of galaxy formation using GRAPEs, oral talk	斎藤貴之(神戸大学)	Modest-23 JM (OIST, Okinawa, Japan)	April 17-19 2023
6	The History of the Milky Way, invited oral talk	Yutaka Hirai (University of Notre Dame/Tohoku University)	Kalamazoo Astronomical Society General Meeting (Kalamazoo, USA)	May 5, 2023
7	The Athena++ Adaptive Mesh Refinement Framework: Multigrid	Kengo Tomida (Tohoku University), James M.	The 2nd Athena++ Workshop (Flatiron	May 8-12, 2023

	Solvers for Self-gravity, oral talk	Stone (Institute for Advanced Study)	Institute, NY, USA)	
8	Development of Particle-Mesh Method for Self-gravity in Athena++, oral talk	岩崎一成 (国立天文台)	Athena++ Workshop 2023 (Center for Computational Astrophysics, Flatiron Institute, NY, USA)	May 8-12, 2023
9	Forecasting the expansion of SN shells toward high resolution galaxy simulations, oral talk	平島敬也 (東京大学)	Cosmic Connections: A ML X Astrophysics Symposium (Flatiron Institute, NY, USA)	May 22-24, 2023
10	Long-time integration of anelastic thermal convection in a rapidly rotating spherical shell, poster	Youhei SASAKI(Hokkaido Information University), Shin-ichi Takehiro(Kyoto University), Keiichi Ishioka(Kyoto University), Takeshi Enomoto(Kyoto University), Kensuke Nakajima(Kyushu University), Yoshi-Yuki Hayashi(Kobe University)	Japan Geoscience Union Meeting 2023 (Makuhari Messe)	May 25, 2023
11	A large-scale dynamo and its application to electromagnetic signals in binary neutron star mergers , invited oral talk	Kenta Kiuchi (AEI)	Ready, set go! Preparing for the O4 LOGO-VIRGO-KAGRA observing run (フンボルト大学、ベルリン)	May 2023
12	Flux emergence simulation from the base of the convection zone to the photosphere, oral talk	堀田英之 (名古屋大学)	Flux Emergence Workshop (Bellonio Cultural Center, Fira Santorini, Greece)	June 6, 2023
13	Vortical structures in high Reynolds number turbulence - clues from DNS results, invited oral talk	Takashi Ishihara (Okayama University)	ERCOFTAC Symposium “Multiphysics critical flow dynamics involving moving/ deformable structures with design applications”	June 7-9, 2023

			(ENSEEIH, Toulouse, France)	
14	Accelerating SN simulations using deep learning toward star-by-star galaxy simulations, oral talk	平島敬也 (東京大学)	CCA Lunch Talks (Flatiron Institute, NY, USA)	June 22, 2023
15	Radiation MHD simulations of super-/near-Eddington accretion flows and outflows, invited oral talk	Ken Ohsuga (University of Tsukuba)	Astrophysical Black Holes: A Rapidly Moving Field (Jun 23–26, 2023)	Jun 23-26, 2023
16	Numerical modeling of non-equilibrium neutrino radiation field by solving quantum kinetic equation, invited oral talk	Hiroki Nagakura (NAOJ)	Astronom 2023 (Pasadena, California, USA)	June 25-30, 2023
17	Isolated star formation - what (we think) we know and what we need to know, invited oral talk	Kengo Tomida (Tohoku University)	The Physics of Star Formation (Lyon, France)	June 26-30, 2023
18	Exponential Amplification of the Magnetic Field in the Primordial Starforming Cloud, invited oral talk	Shingo Hirano (The University of Tokyo), Masahiro N. Machida (Kyushu University), Shantanu Basu (University of Western Ontario)	Astronom 2023 (Pasadena, California, USA)	June 26-30, 2023
19	Numerical Relativity in multimessenger era , invited oral talk	Kenta Kiuchi (AEI)	IGCA2023 (慶州、韓国)	July 2023
20	Numerical Hydrodynamics , invited oral talk	Kenta Kiuchi (AEI)	ICTS-Summer school on Gravitational-Wave Astronomy (バンガロール、インド)	July 2023
21	Global and asymptotic features of fast neutrino-flavor conversion in supernova and binary neutron star merger, invited oral talk	Hiroki Nagakura (NAOJ)	INT PROGRAM INT-23-2 Astrophysical neutrinos and the origin of the elements (Washington State University, Seattle, Washington, USA)	July 17-August 11, 2023
22	Radiation Magnetohydrodynamics	Ken Ohsuga (University of Tsukuba)	34th IUPAP Conference on	August 4-8, 2023

	Simulations of Black Hole Accretion Flows and Outflows, invited oral talk		Computational Physics (Kobe International Conference Center, Kobe, Japan)	
23	Plasma first-principle simulations for elucidating high-energy astrophysical phenomena in the exascale computing era, invited oral talk	Yosuke Matsumoto (Chiba University)	34th IUPAP Conference on Computational Physics (Kobe International Conference Center, Kobe, Japan)	Aug. 7, 2023
24	Numerical simulation of turbulence and magnetic field in the Sun, invited oral talk	堀田英之 (名古屋大学)	34th IUPAP Conference on Computational Physics (Kobe International Conference Center, Kobe, Japan)	August 8, 2023
25	Chemical Evolution of Galaxies in the Local Group, invited oral talk	Yutaka Hirai (University of Notre Dame/Tohoku University)	The 1st IReNA-Ukakuren Joint Workshop (NAOJ)	August 28-September 1, 2023
26	Core-collapse supernovae - 3D MHD simulations and multi-messenger signals, oral talk	中村航 (福岡大学)	The 1st IReNA-Ukakuren Joint Workshop (NAOJ)	August 28-September 1, 2023
27	DNS data analysis of the velocity-gradient tensor in high Reynolds number isotropic turbulence, oral talk	Takashi Ishihara, Masashi Miyamoto (Okayama University), Yukio Kaneda (Nagoya University)	18th European Turbulence Conference (Valencia, Spain)	September 4-8, 2023
28	Machine learning estimation of the Eddington tensor for the simulation of accretion disks around black holes, oral talk	朝比奈雄太 (筑波大学)	Astro AI with Fugaku workshop (University of Tsukuba, Tokyo Campus, Japan)	September 11-12, 2023
29	Neutrino kinetics in core-collapse supernova, invited oral talk	Hiroki Nagakura (NAOJ)	Microphysics In Computational Relativistic Astrophysics (MICRA) 2023 (Trento, Italy)	September 11-15, 2023
30	Nuclear equation-of-state and Nuclei in Core-Collapse Supernovae, invited oral talk	Shun Furusawa (Kanto Gakuin University)	NuSym23, XIth International Symposium on Nuclear Symmetry	September 18-22, 2023

			Energy (ドイツ・重イオン研究所 GSI)	
31	MHD models for Star Formation, invited oral talk	Kengo Tomida (Tohoku University)	Core2Disk III (Universite Paris Saclay, Orsay, France)	September 25-29, 2023
32	Numerical Relativity: Solving Einstein's equations on super-computers, poster	Yuichiro Sekiguchi (Toho University)	The 4 th Japanese-American-German Frontiers of Science Symposium (Dresden, Germany)	October 5-8, 2023
33	Systematic 3D MHD simulations of core-collapse supernova and implications for multi-messenger signals, oral talk	中村航 (福岡大学)	The 2nd workshop on anisotropies in core-collapse supernova explosions (IEMEST, Palermo)	October 23-26, 2023
34	革新的画像解析技術を用いた広域宇宙撮像データ分析 ipi-ダイキンシンポジウム, invited oral talk	吉田直紀 (東京大学)	ipi-ダイキンシンポジウム (東京大学本郷キャンパス)	October 25, 2023
35	Vlasov-Poisson Simulation of Self-gravitating Systems, invited oral talk	Kohji Yoshikawa (University of Tsukuba)	The 14th RESCEU symposium: "From Large to Small Structures in the Universe" (Koshiba Hall, Univ. of Tokyo, Japan)	October 30 - November 2, 2023
36	Putting the Universe in a computer, invited oral talk	吉田直紀 (東京大学)	The 14th RESCEU symposium: "From Large to Small Structures in the Universe" (Koshiba Hall, Univ. of Tokyo, Japan)	October 31, 2024
37	Numerical relativity simulation on supercomputer, poster	Yuichiro Sekiguchi (Toho University)	the 4th JAGFOS symposium (ドレスデン、ドイツ)	October, 2023
38	Surrogate modeling for supernova feedback in galaxy simulations, poster	平島敬也 (東京大学)	The 8th US-Japan Science Forum in Boston (在ボストン日本国総領事館)	November 4, 2023
39	Numerical simulation of turbulence and magnetic field in the Sun, invited oral talk	堀田英之 (名古屋大学)	ChaICA V (オンライン)	November 8, 2023

40	Simulating Cosmic Structure Formation, invited oral talk	吉田直紀 (東京大学)	International Symposium on Cosmology and Particle Astrophysics (Chinese University of Hong Kong)	November 12, 2023
41	Global Radiation Magnetohydrodynamic Simulations of Precessing Disk around a Spinning Black Hole, invited oral talk	朝比奈雄太 (筑波大学)	7th Asia-Pacific Conference on Plasma Physics (AAPPS-DPP) (Port Messe Nagoya, Nagoya, Japan)	November 12-17, 2023
42	Vlasov simulation in 6-dimensional phase space for cosmological neutrinos and its application to astrophysical plasma, invited oral talk	Kohji Yoshikawa (University of Tsukuba)	7th Asia-Pacific Conference on Plasma Physics (AAPPS-DPP) (Port Messe Nagoya, Nagoya, Japan)	November 12-17, 2023
43	Band structure formation in rotating systems, invited oral talk	Shin-ichi Takehiro (Kyoto University)	7th Asia-Pacific Conference on Plasma Physics (AAPPS-DPP) (Port Messe Nagoya, Nagoya, Japan)	November 16, 2023
44	Simulations of galaxy formation with SMBHs, invited oral talk	Takashi Okamoto (Hokkaido University)	HSC-AGN collaboration meeting 2023 (Ehime University, Japan)	November 14-16, 2023
45	Neutrino and nuclear physics in core-collapse supernovae, invited oral talk	Kohsuke Sumiyoshi (National Institute of Technology, Numazu College)	KiPAS International Workshop Program "From particle physics to supernovae and early Universe" (Yanagi-campus in Keio University, Japan)	November 22, 2023
46	Collective neutrino flavor oscillation in supernovae, invited oral talk	Hiroki Nagakura (NAOJ)	KiPAS International Workshop Program "From particle physics to	November 22-24, 2023

			supernovae and early Universe” (Yanagi-campus in Keio University, Japan)	
47	Theoretical Approach to Supernova Observation and Explosion Model, poster	Akira Harada (RIKEN)	Joint RIKEN/N3AS Workshop on Multi-Messenger Astrophysics (Hawaii, the US)	November 26, 2023
48	Numerical modeling of neutrino quantum kinetics in high energy astrophysical phenomena, invited oral talk	Hiroki Nagakura (NAOJ)	The 32nd Texas Symposium on Relativistic Astrophysics (Shanghai, China)	December 11-15, 2023
49	Numerical simulations of super-Eddington accretion flows, invited oral talk	Ken Osuga (University of Tsukuba)	The 32nd Texas Symposium on Relativistic Astrophysics (Shanghai, China)	December 11-15, 2023
50	Surrogate Modeling for Computationally Expensive Simulations of Supernovae in High-Resolution Galaxy Simulations, poster	平島敬也 (東京大学)	NeurIPS 2023 Workshop AI for Science (New Orleans, USA)	December 15-16, 2023
51	Systematic 3D MHD simulations of core-collapse supernova and multi-messenger signals, oral talk	中村航 (福岡大学)	Transients Down Under 2024 (Swinburne University of Technology, Melbourne)	January 29-February 2, 2024
52	Chemo-dynamical evolution of satellites around a Milky Way-like galaxy, oral talk	Yutaka Hirai (Tohoku University/University of Notre Dame)	Dark Matter in the Universe: The Present and Future of Galactic Archaeology and Near-field Cosmology (Matsushima, Japan)	March 1-3, 2024
53	The Boltzmann neutrino radiation hydrodynamic simulation of a core-collapse supernova in the three-dimensional space, poster	Wakana Iwakami (Tokyo University of Science)	Unraveling the History of the Universe and Matter Evolution with Underground Physics	March 4-6, 2024

			(UGAP2024) (Aobayama campus, Tohoku University, Japan)	
54	Subaru PFS Mock Observations of Satellites in a Cosmological Zoom-in Simulation, oral talk	Yutaka Hirai (Tohoku University/University of Notre Dame)	Formation and Evolution of the Galaxies with Subaru PFS: Satellite workshop (Mitaka, Japan)	March 9-10, 2024
55	Volcanism of the Moon Localized by Regional Internal Heating in the Convecting Mantle Inferred from Numerical Modeling, poster	K. Uh (The University of Tokyo), M. Kameyama(Ehime University), G. Nishiyama, T. Miyagoshi(JAMSTEC), and M. Ogawa	55th Lunar and Science Conference (The Woodlands, Texas)	March 10-17, 2024
56	Global non-hydrostatic simulation of the Venus atmosphere, oral talk	Kashimura, H. (Kobe University)	Workshop on Venus and other related atmospheres (Kobe/Online)	March 25-29, 2024