

令和3年度高性能汎用計算機高度利用事業  
「富岳」成果創出加速プログラム  
「宇宙の構造形成と進化から  
惑星表層環境変動までの統一的描像の構築」  
成果報告書

令和4年5月30日  
国立大学法人神戸大学

牧野淳一郎

## 目次

1. 補助事業の目的 .....	- 2 -
2. 令和3年度（報告年度）の実施内容 .....	- 3 -
2-1. 当該年度（令和3年度）の事業実施計画 .....	- 3 -
2-2. 実施内容（成果） .....	- 7 -
2-3. 活動（研究会の活動等） .....	- 26 -
2-4. 実施体制 .....	- 31 -

## 補助事業の名称

「富岳」成果創出加速プログラム

「宇宙の構造形成と進化から惑星表層環境変動までの統一的描像の構築」

### 1. 補助事業の目的

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

## 2. 令和3年度（報告年度）の実施内容

### 2-1. 当該年度（令和3年度）の事業実施計画

(1) 研究総括、並列計算コード開発：牧野 淳一郎（神戸大学）

本課題全体を総括し、以下(2)～(16)に挙げる計算宇宙惑星科学分野の研究課題に取り組む。プロジェクト全体の連携を密としつつ円滑に運営していくため、運営委員会や研究連絡会の開催等、参画各機関の連携・調整にあたる。特に、プロジェクト全体の進捗状況を確認しつつ計画の合理化を検討し、必要に応じて調査あるいは外部有識者を招聘して意見を聞くなど、プロジェクトの推進に資する。プロジェクトで得られた成果については積極的に公表し、今後の展開に資する。また、本課題に参加する研究機関と連携して、複数の研究テーマで共通する並列計算コード開発を進める。

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

サブ課題 A 「大規模数値計算と大型観測データのシナジーによる宇宙の進化史の解明」全体を統括する。散開星団や球状星団のような高密度星団におけるコンパクト連星の形成過程の解明を目的とする。令和3年度は独自に開発したツリーアルゴリズムを用いた重力 N 体シミュレーションコード P3T-DENEb 及び PeTar を用いて、世界最大規模の 300 万体を用いた球状星団進化シミュレーションを行う。

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

初代星からはじまる宇宙全スケールの階層的構造形成史を世界ではじめて再現し、大規模天体模擬カタログを生成・公開することを目的とする。令和2年度は超並列宇宙論的 N 体シミュレーションコード GreenM の「富岳」向けチューニングを行った。令和3年度はそれを用いて、世界最大規模の宇宙論的シミュレーションを行う。

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

ニュートリノが宇宙大規模構造に及ぼす力学的影響を数値シミュレーションによって正確に予言し、将来の観測からニュートリノの質量や質量階層に対する知見を得る際の理論的な予想を与えることを目的とする。令和3年度はニュートリノの3つの質量固有値が互いに異なる場合の質量階層の違いが宇宙大規模構造形成に及ぼす影響を調べる数値シミュレーションを行う。

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

従来の 1000 倍の粒子数によって世界で初めて個々の星にまで分解した銀河シミュレーションを実施し、天の川銀河の形成過程や銀河の多様性の起源の解明を目的とする。令和3年度は昨年度チューニングを行った ASURA-FDPS を用いて富岳上で銀河形成シミュレーションを行う。

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

体計算：富田 賢吾（東北大学）

サブ課題 B「星形成と惑星形成をつなぐ統一的描像の構築」全体を統括する。前年度までに富岳向けに最適化を行った Athena++コードを用いて現実的な非理想磁気流体効果を含む高解像度かつ大域的な磁気流体シミュレーションを行い、現実的な原始惑星系円盤の乱流の分布や角運動量輸送過程について調べる。また（7）の分子雲の計算について協力・補佐する。

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

銀河内での分子雲・星形成過程を調べるため、前年度に継続して数 100pc の計算領域において 0.1pc スケールの分子雲コアを分解できる高解像度・マルチスケールの分子雲コア形成シミュレーションを行う。また（6）の原始惑星系円盤の計算について協力・補佐する。

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

高い分解能をもつ大域的な惑星集積計算によって太陽系形成過程を再現し、太陽系を含めた系外惑星系の多様性を説明できる一般的な惑星系形成のシナリオの構築を目的とする。令和 3 年度は、惑星系形成シミュレーションコード GPLUM を用いて、原始惑星系円盤中での微惑星集積、周惑星系円盤での衛星形成の研究を行う。また、惑星衝突シミュレーションコードを用いて巨大衝突の研究を行う。

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

ナビエ・ストークス方程式を直接解く乱流の大規模数値計算を活用して、原始惑星系円盤の乱流中のダスト成長のシナリオ構築のための大規模数値実験を実施する。令和 3 年度は高レイノルズ数乱流中の多数粒子追跡の大規模数値計算を富岳を用いて実施し、高レイノルズ数乱流とその中を運動する粒子のデータベースを構築するほか、乱流中の粒子の衝突付着成長シミュレーションコードの改良と最適化を行い、粒子の衝突付着成長のデータベースも構築する。

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

サブ課題 C「ブラックホールと超新星爆発における高エネルギー天体現象の解明」全体を統括する。降着円盤内部での磁気回転不安定や降着円盤内外での輻射場を正確に扱うために十分な高い分解能を有する一般相対論的輻射磁気流体力学シミュレーションによってブラックホール降着円盤の構造とエネルギー変換機構、相対論的ジェットの生成機構を明らかにすることを目的とする。令和 3 年度は高光度降着円盤の 3 次元シミュレーションを行う。また、ブラックホールスピンの効果について検証する。イベントホライズンテレスコープ等によって詳細観測が行われている巨大ブラックホールについて、ブラックホールシャドウおよび偏光電波の理論的なイメージ計算を行う。

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

降着円盤の大局的 3 次元磁気流体力学シミュレーションによってブラックホールの成長過程と周囲の星や銀河の進化に与える影響を解明することを目的とする。またプラズマ粒子シミュレーションによってブラックホール周囲で生じる高エネルギー現象のメカニズムの解明を目的とする。令和 3 年度は「富岳」を用いて中程度の解像度（方位角方向の解像度 256-512）によるエディントン光度以下の降着円盤のシミュレーションと高解像度のジェット伝播シミュレーションを行う。また、プラズマ粒子計算のための PIC コードを「富岳」に実装して粒子加速シミュレーションを実施する。

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

ニュートリノ輻射輸送を厳密に解くボルツマン輻射流体コードを用いた 3 次元空間計算により重力崩壊型超新星の爆発機構の解明を目的とする。令和 3 年度では計算領域の範囲を半径 200km から 5000km に拡張し、ボルツマン輻射流体コードを用いた第一原理計算を 100ms 前後まで実行することを目的とする。また、ニュートリノ輻射輸送を厳密に解くには計算コストがかかるため、長時間計算、空間高解像度計算、親星の多様性の影響などの系統的調査には近似計算コード 3DnSNe を併用する。令和 3 年度では 3DnSNe で普通解像度による長時間計算を 1 モデル行う。

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

サブ課題 D「太陽活動と惑星環境変動の解明」全体を統括する。令和 3 年度では引き続き R2D2 コードの富岳でのチューニングを行うとともに、世界最大の太陽ダイナモ全球計算を行うことにより現実的な太陽内部の乱流状況を確認する。また、領域を制限した太陽表面の黒点形成シミュレーションのパラメタサーベイをおこなうことにより太陽内部の大規模な熱対流と形成される黒点の関連づけをおこなう。さらに、形成された黒点磁場を境界条件とした太陽コロナシミュレーションによって、黒点形成と太陽フレア爆発の関係を探る。

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

探査機で観測されている雲構造を完全に再現した高解像度全球気象シミュレーションによって火星や金星の大気現象を理解することを目的とする。令和 3 年度は、火星化した SCALE-GM を富岳上で実行し、水平格子間隔 900 m の全球火星大気計算を実現する。また、静力学の金星大気モデルとして実績ある金星 AFES の放射加熱分布を SCALE-GM に導入して金星化し、全球金星大気計算を実施する。

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

マントル対流の 3 次元数値シミュレーションによって火成活動とプレート・テクトニクスを再現し、岩石惑星内部のダイナミクスを理解することを目的とする。令和 3 年度は二次元モデルを用いて明らかにしたプレート・テクトニクスが起こる条件を参考に、これまでに得られたプレート・テクトニクスの予備的な三次元モデルを球殻へ拡張し、期待された条件のもとでプレート・テクトニクスが発現することを確認するとともに、月を想定した小さなコアを持つ球殻マントルにおけるマグマの生成・移動を伴う対流の

シミュレーションを行う。

(16) サブ課題D・ガス惑星大気シミュレーション：竹広 真一（京都大学）

世界初の全球計算に基づいた高解像度長時間積分によるガス惑星大気の対流数値シミュレーションによって、ガス惑星大気の縞状構造の成因の解明を目的とする。令和3年度は令和2年度に富岳へ導入した非弾性回転球殻ガス惑星大気モデルを用いて全球領域での高解像度長時間積分を引き続き実行しつつ、上層安定成層を伴う設定での対流計算を開始する。

## 2-2. 実施内容（成果）

### （1）研究総括、並列計算コード開発：牧野 淳一郎（神戸大学）

本課題全体を総括し、以下（2）～（16）に挙げる計算宇宙惑星科学分野の研究課題に取り組んだ。プロジェクト全体の連携を密としつつ円滑に運営していくため、運営委員会や課題内ワークショップの開催等、参画各機関の連携や計算資源配分等の調整にあたった。特に、プロジェクト全体の進捗状況を確認しつつ計画の合理化を検討し、学会特別セッションや研究会等での外部有識者との議論なども活かして、プロジェクトの推進を行った。プロジェクトで得られた成果についてはウェブページでの研究紹介記事やプレスリリースなど随時情報発信、一般に紹介するためのシンポジウムの開催など積極的に公表し、今後の展開に役立てた。また、本課題に参加する研究機関と連携して、複数の研究テーマで共通する並列計算コード開発を進めた。具体的には、いくつかの粒子法並列シミュレーションコードで使われている並列コード開発フレームワーク FDPS の実装を改善し、富岳での実行効率と動作の安定性を改善した。活動の詳細は、2-3. 活動（研究会の活動等）に報告する。

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

高密度星団は、散開星団、球状星団、銀河中心星団など、多数の恒星が狭い領域に密集した天体である。このような天体では、恒星同士の近接遭遇が頻繁に起こり、まれにコンパクト連星が力学的に形成される。コンパクト連星とは2つのブラックホールや中性子星からなる連星のことである。我々は球状星団における連星ブラックホールの力学的形成について研究している。今年度は、予定されていた300万体を用いた球状星団進化シミュレーションと、様々な星団の初期パラメータを用いた球状星団進化シミュレーションを行った。300万体を用いたシミュレーションは現在、計算途中である。より小規模な球状星団進化シミュレーションの結果を Wang, Fujii & Tanikawa (2021, MNRAS, 504, 5778) や Wang, Tanikawa, & Fujii (2022, MNRAS, 509, 4713) として発表した。以下では特に後者の内容について述べる。

恒星のうちおよそ半分は連星として生まれることが知られている。これは星団中の恒星についても同様である。しかし、球状星団の進化を重力N体シミュレーションで追跡する上で、この連星の存在は非常に厄介である。なぜなら、球状星団の力学時間がおおよそ100万年である一方、連星の軌道周期は1日以下ということもありえて、ダイナミックレンジが非常に大きいからである。従って、単純に連星の数を少なくするだけでも、重力N体シミュレーションの計算量は激減する。我々は、球状星団中で形成される連星ブラックホールの性質が、ブラックホールや中性子星を作らない中小質量星からなる連星の数に依存するのかどうかについて、重力N体シミュレーションコード PeTar (Wang et al. 2020, MNRAS, 497, 536) を用いて調べた。その結果、連星ブラックホールの性質は、中小質量星の連星の多寡に依存しないことが明らかとなった。これは、今後、連星ブラックホールの性質を調べるだけであれば、計算量に大きな影響を与える中小質量星の連星を取り扱う必要のないことを意味する。今後の効率的な重力N体シミュレーションのために、非常に重要な知見となった。

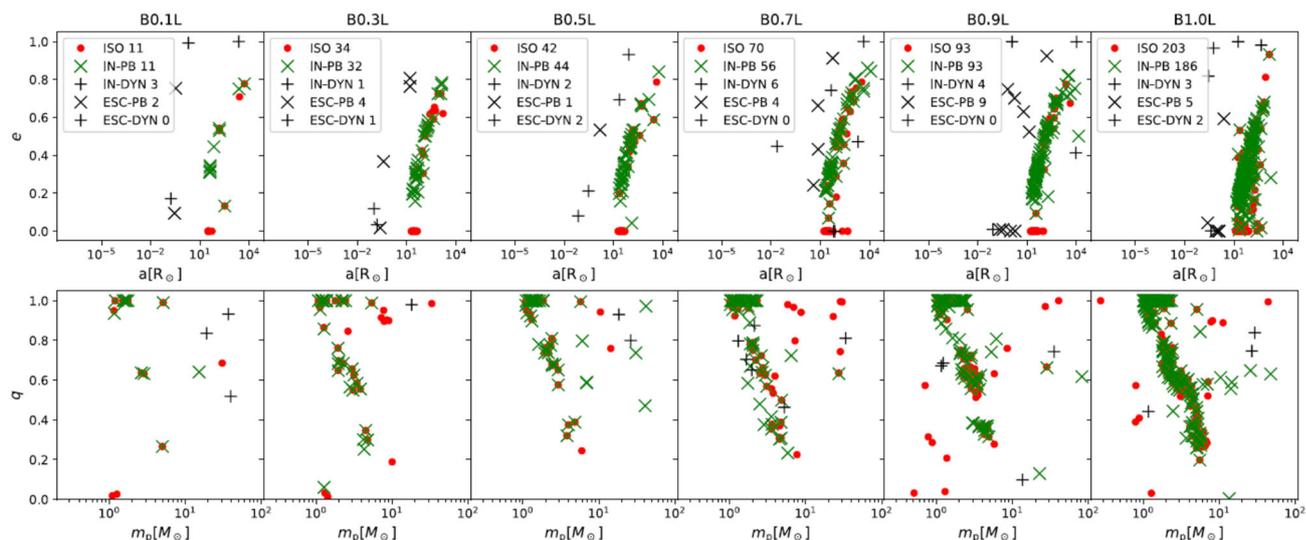


図1：シミュレーションで得られた重力波を放出して合体する連星ブラックホールの軌道長半径と離心率（上段）、重い方のブラックホールの質量と質量比（下段）の分布。左から右へ、連星の割合が10%から100%へと高くなる。合体するブラックホール連星の数は初期の大質量星連星の割合に伴い増加するが、合体する連星ブラックホールが持つ軌道要素や質量比（連星ブラックホールの性質）は変わらない。Wang, Tanikawa, & Fujii (2022, MNRAS, 509, 4713) Fig. 6 より。

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

2021 年度までにチューニングした宇宙論的 N 体シミュレーションコードの詳細をまとめた論文が高性能計算に関する国際会議、HPC Asia 2022 にて出版され、最優秀論文の最終候補に選出された。

開発したコードを用いて、粒子数 2 兆、ボックスサイズ 50Mpc/h の宇宙論的 N 体シミュレーションを宇宙初期から赤方偏移 10 まで進めた。ダークマター粒子質量は 7,500 太陽質量程度であり初代星が形成すると考えられるミニハローを十分分解できる。ハロー合体形成史のカタログ化を進めている。

またハロー合体形成史から銀河や活動銀河核の模擬天体カタログを構築するために必要なパイプラインの準備を進めた。そして既存の 2 兆粒子の大規模シミュレーション（ダークマター粒子質量 4.8e8 太陽質量）を活用し、高赤方偏移から現在までのカタログを構築した。2022 年度前半のデータ公開を目指し準備を進めている。カタログの応用として、高赤方偏移に存在する活動銀河核の光度関数の宇宙論的分散が、観測領域のサイズにどのように依存するかを調べた。特に観測領域のサイズが小さい場合、分散は活動銀河核の光度にほとんど依存しない。活動銀河核が存在する典型的なダークマターハロー質量が、光度に対する単調増加関数ではないからである。また明るい活動銀河核ほどレア天体であるため、宇宙論的分散よりポアソンが支配的である。さらに JWST、Euclid、LSST などといった将来の大規模サーベイで観測される活動銀河核の期待値とその分散を予測した。

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

昨年度来、継続して行ってきた富岳における我々の数値シミュレーションコードの最適化の結果、富

岳の全システムを用いてダークマター粒子数 3300 億個、Vlasov シミュレーションのメッシュ数 400 兆個の数値シミュレーションを行い、中国の Tianhe-2 スーパーコンピュータで行われた世界最大規模の宇宙大規模構造におけるニュートリノの N 体シミュレーションと同等の数値シミュレーションをショットノイズが無い状態で約 10 倍高速に完了することに成功した。この成果をまとめた論文は 2021 年の ACM Gordon-Bell Prize の finalist に選ばれた。

また、N 体シミュレーションと Vlasov シミュレーションによるニュートリノの数値シミュレーションを計算精度・計算コストなどを総合的に比較し、宇宙大規模構造の密度揺らぎのパワースペクトルだけであれば現行の N 体シミュレーションでもパーセントレベルで正しい結果を与えるが、ニュートリノのパワースペクトル・ニュートリノ航跡などのニュートリノそのものの物理状態を研究するための数値シミュレーションとしては Vlasov シミュレーションが計算精度・計算コストの両面で優れていることを示した。

更に、ニュートリノの質量固有値の縮退が解けている場合のニュートリノの質量階層の違いが宇宙大規模構造形成に及ぼす影響を、ニュートリノの分布関数を質量の大小によって二つに分けた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によって密度揺らぎのパワースペクトルに 1 パーセント程度の違いが現れることや、ダークマターハローの質量関数の銀河団スケールの質量領域に大きな差異が現れることを発見した。

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

恒星スケールを分解する銀河形成シミュレーションのための物理モデルの導入と、それを用いた銀河形成シミュレーションを行っている。本研究では、従来の星粒子を恒星集団として扱う single stellar population (SSP) 近似を超えて、個別の恒星を作りそれらの進化を銀河形成と合わせて解く。全ての質量スケールの恒星を分解すると計算が不可能になるため、銀河形成へのインパクトが大きい II 型超新星爆発を起こす大質量星を個別の恒星とし、それ以下の質量の星には SSP 近似を施すライブラリを開発しコードに組み込んだ。ASURA-FDPS ではハミルトニアン分割によって短時間で進化する領域を孤立領域として小ノードで全体計算と独立かつ並列に計算するモデルを実装している。この短時間で進化する領域は超新星爆発により発達するが、これはローカル環境に強く依存する。全体計算とマージさせるタイミングまで孤立系として計算するため、十分広い領域を取ってくる必要があるが、広すぎると計算効率を落としてしまう。そこで、超新星爆発によって発達する孤立領域を効率的に抽出するために深層学習を用いた専用のライブラリを開発した。通常深層学習がよく用いられる画像解析では 2 次元だが、我々のシミュレーションは 3 次元計算なので、3 次元に拡張したモデルである 3D memory-in-memory network を開発した。機械学習プラットフォーム TensorFlow を利用し、Python によりモデル構築・学習を行った。学習には GPU を利用した。学習済みネットワークは C++ 向けに変換され、C++ により CPU 上で推論を行うような実装になっている。富岳上で実際試験を行ったところ、推論にかかる時間が手元の Linux マシン (AMD Ryzen 9 3950X 3.5GHz/16 コア 32 スレッド) を使った場合に比べ、富岳 1 ノードでは 6 倍程度遅く実用にはならない。チューニングをおこなっているがそれと並列して、ARM コアで推論を高速に行える別なライブラリの利用を検討している。したがって、現在はまだハミルトニアン分割を

使わない形でシミュレーションを行っている。

2021年3月に行った大規模実行の結果をもとに論文を作成しゴードンベル賞にエントリーしたが、残念ながら最終選考には残らなかった。

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

富岳で Athena++コードによる大規模計算を実現するために、MHD 計算部に uTofu と OpenMP のハイブリッド並列化を実装した。これにより従来困難であった 4,000 ノード以上の計算が可能となり、8 ノードから 16,384 ノードで 93%という優れた弱スケーラビリティを実現した。また他の最適化と合わせて全域で Flat MPI の計算よりも 10%程度性能が向上した。現在分子雲計算に用いる自己重力部の uTofu 化を進めている。

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

分子雲形成の研究では、分子雲コアを分解する高分解能自己重力入り磁気流体シミュレーションを行った。衝突流による圧縮で形成された分子雲中の磁場について、低密度領域では密度に対して磁場は一定だが、高密度領域では重力が働き密度の 1/2 乗に比例して磁場が強くなるという関係を見出した。これは定性的にはゼーマン効果による磁場の観測と整合的な結果である。また、分子雲の重力・熱・磁場・乱流エネルギーの間にスケーリング関係が成立していることを見出した。これらの結果は論文にまとめ投稿済みである。

また原始惑星系円盤の研究では、前年度に継続して円盤全体の大局的な 3次元非理想磁気流体シミュレーションを行った。特に今年度は円盤を貫く磁束の輸送と星への降着に着目した研究を行った。その結果、ダストのサイズ分布や円盤の鉛直方向の非理想磁気流体効果の分布によって、磁束は内側にも外側にも輸送されうるという結果を得た。また今後の拡張のため非理想磁気流体効果の一種であるホール効果について、数値解法の安定性について検討した上で時間 3次精度の新たな手法を実装した。この手法については現在テストを進めている。

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

惑星集積： 惑星集積コード GPLUM を用いて大規模惑星系 N 体シミュレーションを行い、惑星形成の暴走成長段階、寡占成長段階を大域的に理解することを目指している。令和 3 年度は、富岳上での計算コードの高速化と安定化、そして基礎的な惑星系 N 体シミュレーションを行った。特に、シミュレーションを高解像度化(最大 1000 万粒子)したことによる微惑星の質量分布や成長速度への影響について調査した。これによって、微惑星の成長速度は、シミュレーションの解像度にはそれほど影響を受けないことが分かった。微惑星の質量分布への影響については現在解析中である。また、現実的な衝突合体モ

デルに基づいたN体シミュレーションも行っており、衝突モデルの影響についても検証中である。

惑星衝突：令和3年度は、SPH法を用いて巨大衝突の数値計算を行った。具体的には、原始地球に自転を与え、そこに火星程度のサイズを持つ原始惑星が衝突した際に、衝突後どのような円盤ができるかに関して、100万粒子を用いた数値計算をして調べた。現在、数値計算の結果はほぼ出揃っており、結果の解析中である。また、富岳上での集団通信の性能についても調べた。具体的には、MPI Bcastを用いた集団通信の性能に関して調べた。結果、この集団通信の性能は、プロセスのトポロジーに強い影響を受ける事がわかった。現在、このプロセストポロジーに影響を受けないBcastのアルゴリズムを提唱し、実装及びテストを行っている。

惑星環：本研究の目的は富岳上で大規模N体シミュレーションを行い、土星の環における密度波の発生と伝播のメカニズム、そしてそれに伴うカッシーニ間隙形成の検証を行うことである。令和3年度はコード開発と検証、及び予備の数値実験を行った。これまでの研究では、次元を2次元にしたり流体として扱うなど近似的な手法によるシミュレーションが行われてきた。本研究では初めて自己重力及び粒子間の非弾性衝突を考慮した3次元N体シミュレーションによって衛星との共鳴相互作用による密度波の発生と伝播の再現を行うことができた。現在、理論で予言されている密度波に起因するカッシーニ間隙形成の検証を行っている。

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

ナビエ・ストークス方程式を直接解く乱流の大規模数値計算を活用して、原始惑星系円盤の乱流中のダスト成長のシナリオ構築のための大規模数値実験を実施した。令和3年度は富岳を用いて高レイノルズ数乱流中の多数粒子追跡の大規模数値計算を実施し、高レイノルズ数乱流とその中を運動する粒子のデータベースを構築したほか、乱流中の粒子の衝突付着成長シミュレーションコードの改良と最適化を行い、粒子の衝突付着成長のデータベースも構築した。

具体的には、(1) 格子点数2048の3乗、レイノルズ数 $Re=16100$ の乱流DNS中で慣性の大きさ（流体への追従性）の異なるダスト粒子8種類を各々1024の3乗個ずつ追跡する予備的な数値実験を行なった後、(2) 格子点数4096の3乗の高レイノルズ数（ $Re=36500$ ）の乱流DNS中で慣性の大きさの異なるダスト粒子を各々2048の3乗個ずつ追跡する数値実験を行なった。得られたダスト粒子の運動データベースを解析し、得られる粒子の統計量に対して粒子数が及ぼす影響を調べたのち、慣性の大きい粒子の運動と高レイノルズ数乱流特有の強い渦組織構造との関係を調べた。

その結果、予備的な数値実験 (1) により、(i) 粒子の濃度分布については考えるスケールの領域に対して少なくとも平均 8 個以上の粒子数がないと信頼性の高い結果が得られないこと、(ii) 領域のサイズに応じて最も高濃度になるダスト粒子の慣性の大きさが異なること、また、(iii) そのダスト粒子の慣性の大きさはそのスケールにおいて動径分布関数の最大を与えるダスト粒子の慣性の大きさと一致すること、さらに、(iv) 慣性の大きい粒子ほど高濃度を実現するのに時間を要する傾向があることが分かった。高レイノルズ数乱流における数値実験 (2) により、(v) 高レイノルズ数乱流特有の強い渦の組織構造は慣性の大きいダスト粒子のボイド領域を形成し、その隣接した周辺に粒子の密集領域を生成すること (図 1 参照)、(vi) その密集領域では粒子の衝突が促進されるがその領域における衝突の多くは限界

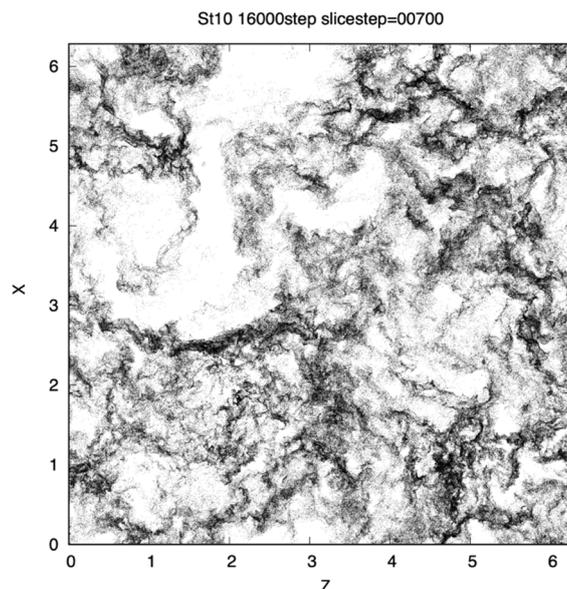


図 2 : 格子点数 2048 の 3 乗、 $Re=16100$  の乱流 DNS 中で追跡して得られた慣性の大きい ( $St=10$ ) 粒子の分布。粒子の高濃度領域が強い渦構造の周囲に形成され衝突が促進されるが、その領域においては粒子の相対速度が比較的高く、限界付着速度以下の衝突が困難であることが示唆された。

付着速度以上になる傾向が強いこと、および、(vii) 慣性の大きいダスト粒子が限界付着速度以下で多く衝突付着しうる領域はエンストロフィー (渦度の 2 乗平均) が小さい非アクティブな領域でかつ粒子の多く集まる領域であることがわかった。

また、乱流中の粒子の衝突付着成長シミュレーションコードについては、従来コードでは衝突する粒子の情報の全てを 1 プロセスに集めて処理していたため扱える粒子数に限界があったが、改良の結果、情報を 1 プロセスに集中させなくても、衝突付着成長する粒子対の決定がユニークに行えるようになり、扱える粒子数を飛躍的に増大できるようになった。改良したコードを用いて、予備的な数値実験と動作確認をし、乱流中の粒子の衝突付着成長の大規模なシミュレーションの準備を完了することができた。

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

本年度は、一般相対論的輻射磁気流体コード、UWABAMI を用いた超臨界ブラックホール降着流の2次元軸対称計算を実施し、エネルギー変換効率やアウトフローの生成率のブラックホールスピン依存性を調査した。その結果、ブラックホールがスピンしていない場合よりも、スピンしている場合の方が効率的にエネルギーを解放することがわかった。特に、電磁場のエネルギーの解放率が、ブラックホールスピンに強く依存することが明らかになった(図3参照)。これは、Blandford-Znajek 効果 (BZ 効果) により、ブラックホールの回転エネルギーが引き抜かれている可能性を示唆するものである。

また、ブラックホール表面と外側境界の境界条件の改善や強磁場領域での閾値を導入することでUWABAMI コードの計算の安定化に成功した。これにより1タイムステップ当たりの時間刻みを大きくとることができるようになり、計算速度を従来の数倍以上に向上することができ、低コストでの長時間計算が可能となった。現在UWABAMI コードを用いたブラックホールの回転軸と降着円盤の回転軸が一致しない3次元計算を進めている。図4は密度分布の断面図を表している。

UWABAMI においてはより現実的かつ、観測との直接比較を行うべく、電子温度を解く2温度一般相対論的磁気流体コードへの拡張を行った。UWABAMI を含む従来の一般相対論的磁気流体コードでは電子の状態を得ることはできない。しかし観測される光は電子から放射されており、そのスペクトルは電子の温度によって決まる。したがってシミュレーションと観測を直接比較するためには電子温度を決定することが必須である。

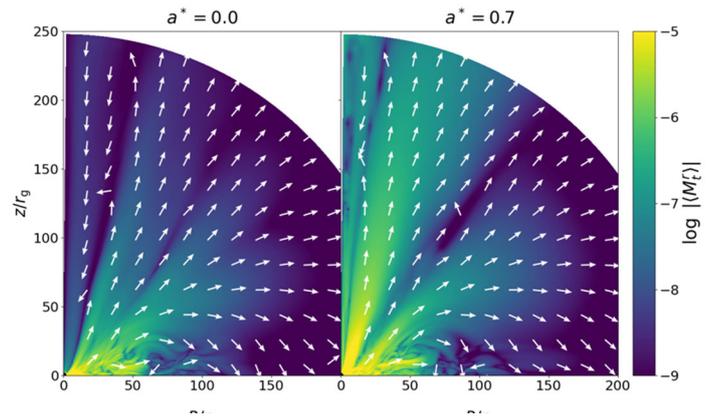


図3: 一般相対論的輻射磁気流体力学シミュレーションによって得られたポインティングフラックスの強度分布(カラーコントア)と方向(矢印)。ブラックホールがスピンしていない場合(左)と比べ、スピンしている方(右)のポインティングフラックスが強いことがわかる(Utsumi et al. submitted の一部を抜粋)

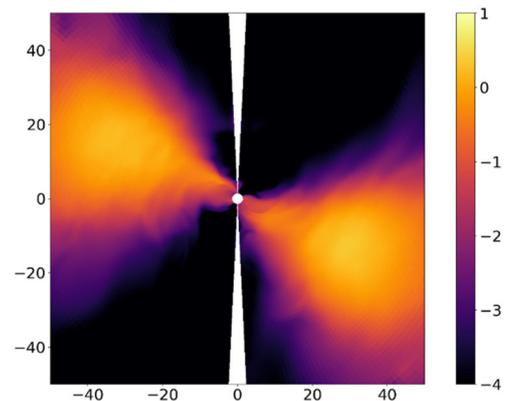


図4: UWABAMI によるブラックホールの回転軸と降着円盤の回転軸が一致しない3次元計算結果の密度分布。

本年度はこの2温度一般相対論的輻射磁気流体コードの実装を行い、テスト計算を行った(図5)。円盤内は電子温度とイオン温度はほぼ一致しているが、円盤上空では効率的な電子加熱が起きることがわかった。これは円盤上空では磁場が強く、イオンの粘性加熱率よりも電子の粘性加熱率が上回るためである。どの程度電子の方が効率的に加熱されるかはプラズマ物理で決まるが、それを決定する確固たるモデルは未だに存在しない。逆に言えば、本研究は数値シミュレーションと観測を繋ぎ、ブラックホール周りの状態、ブラックホール時空に制限を与えることができるだけでなく、その結果から高エネルギープラズマ物理のモデルに制限を与えることができるという意味でも重要であるため、今後さらに詳細な研究を進めていく計画である。

前年度富岳に実装したブラックホール近傍の輻射場を正確に解くことのできる、輻射輸送方程式を解く一般相対論的磁気流体力学コード INAZUMA を用いて様々な質量降着率のブラックホール降着流2次元計算を実施した。その結果を輻射輸送の近似解法である M1 法を用いた結果と比較した。大局的に見ると密度分布や速度分布にはスキーム間の違いはほとんど現れず、アウトフローによる質量放出率や運動エネルギー放出率はほとんど同程度となることが分かった。しかし、光学的に薄い回転軸付近で輻射場の違いを確認することができた。図6はエディントンテンソルの  $rr$  成分の質量降着率依存性を表している。エディントンテンソルは領域ごとに平均値としており、赤色が回転軸付近の領域、緑色が円盤風領域、青色が降着流領域の結果を表している。円盤風領域と降着流領域は光学的に厚いためスキーム間の違いはほとんど現れないが、回転軸付近の領域は光学的に薄いため違いが現れている。M1 法では輻射の非物理的な衝突によって輻射の向きが動径方向に揃えられるため INAZUMA の結果よりエディントンテンソルの  $rr$  成分が大きくなっている。輻射流束にも違いが現れるが時間変動より小さいため、放射光度の質量降着率依存性には大きな違いは見られなかった。以上から INAZUMA を用いることで光学的に薄い領域の輻射場の分布を従来の近似解法より正確に解けることを示すことができた。これらの結果をまとめた論文が The Astrophysical Journal から出版された。

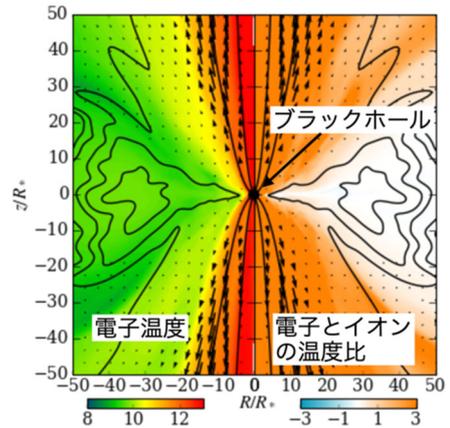


図5: 2温度一般相対論的磁気流体コードによるブラックホールへのガス降着のテスト計算。

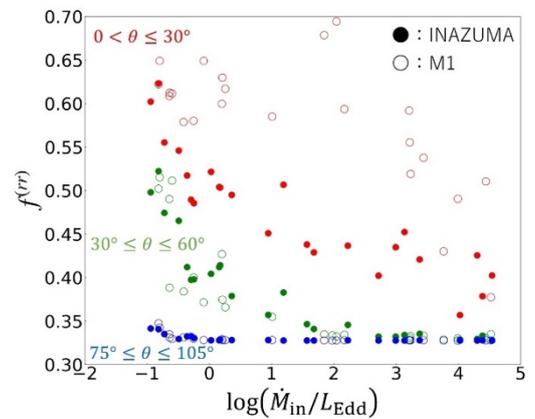


図6: エディントンテンソルの  $rr$  成分の質量降着率依存性。赤色が回転軸付近、緑色が円盤風領域、青色が降着流領域を表している。

また、一般相対論的輻射輸送計算コード、CARTOON を新たに開発した。CARTOON では、測地線に沿って輻射輸送方程式を解くことで、数値拡散が抑制され、光の波面を高精度で追跡することが可能である。点源から放射された光が散乱されながらブラックホールの周囲を伝搬する様子を再現したテスト計算の結果が図7で、波面の位置が解析解（緑線）と一致することがわかる。本コードを、INAZUMA に実装することで、さらなる精度の向上が期待される。

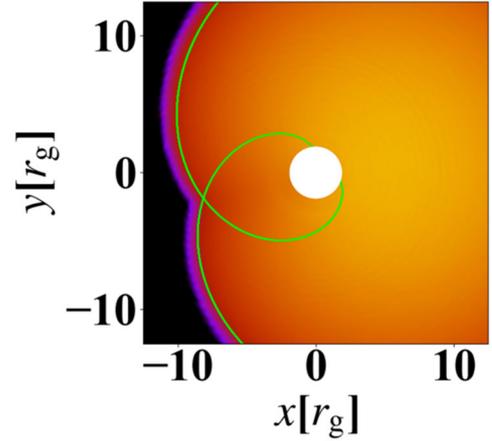


図7：一般相対論的輻射輸送コード、CARTOON による輻射の伝搬のテスト計算 (Takahashi et al. in prep. の一部を抜粋)

理論シミュレーションで得られた降着流や相対論的ジェットを「実際に観測したらどのように見えるのか」を明らかにするため、電波からガンマ線までの多波長の一般相対論的輻射輸送コードRAIKOUを開発し、シミュレーションで得られた降着流およびジェットの理論イメージや輻射スペクトル計算を実施した。今年度はコード論文を執筆および投稿した (Kawashima et al. submitted to ApJS)。さらにこのRAIKOUコードを適用してブラックホールスピンの駆動された歳差運動を伴う降着流とジェットの電波イメージおよび輻射スペクトルの時間変動計算を実施した。歳差運動は近年のM87ジェットの電波観測からも示唆されており、ブラックホールスピンの制限を与える重要な物理現象といえる。なお、歳差運動する降着流とジェットの物理量空間分布と時間発展はUWABAMIを用いて一般相対論的磁気流体シミュレーションを実施することで得た。その結果、降着流とジェットはM87ブラックホールの重力半径を光が横切る時間の1万倍程度の時間スケールで歳差運動を起こし、上記の電波観測と統合的な結果が得られた (図8)。電波からガンマ線までの多波長スペクトル計算も世界で初めて実施し、X線の増光等が得られその結果を現在解析中である。

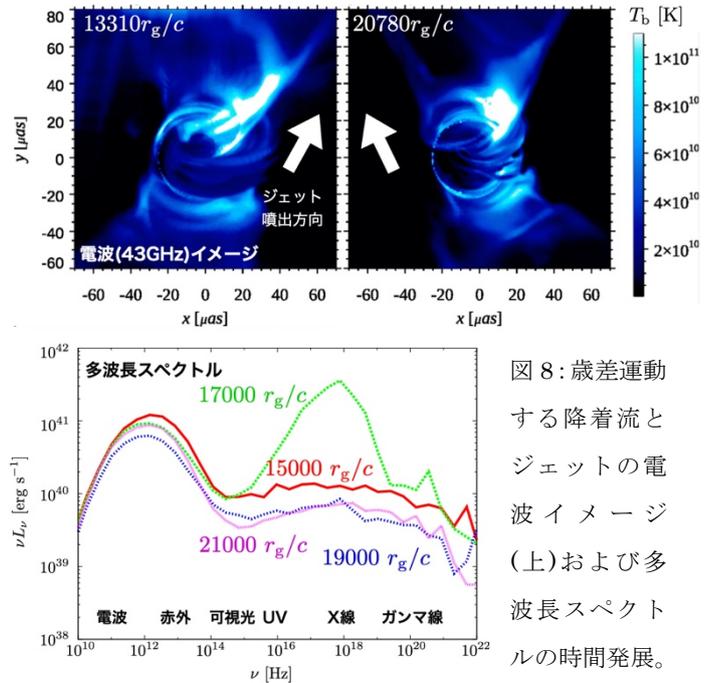


図8：歳差運動する降着流とジェットの電波イメージ (上) および多波長スペクトルの時間発展。

さらに相対論的ジェットの駆動機構の最有力候補である、磁力線を介してブラックホール自転エネルギーの引き抜き (Blandford-Znajek 機構) の検証を目指して、偏光を考慮した一般相対論的輻射輸送計算を実施した。今年度はまず降着流とジェットの偏光マップの基本的な特性を明らかにすべく、(歳差運動を含まない)ブラックホール近傍の降着流とジェットの直線偏光および円偏光マップを計算した。その結果、直線偏光ピークが我々に迫るジェット側に、円偏光ピークがブラックホール近傍に現れ、両者の位置は分離することがわかった (図9)。この分離の度合いは電子温度モデルに依存するため、電子温度に関する不定性に迫り、今後偏光イメージから物理量の抽出を行うさいの電子温度モデルの不定性

を取り除ける可能性がある(Tsunetoe et al. accoected by ApJ)。

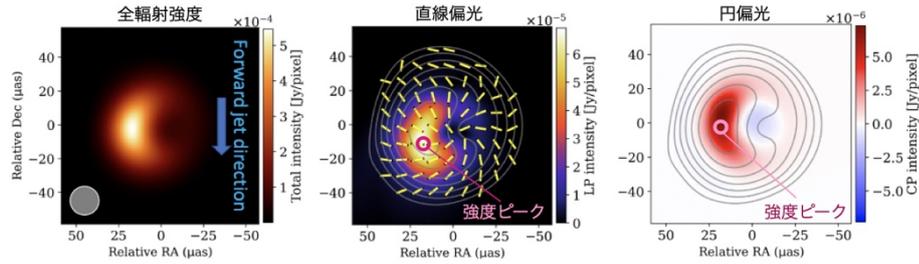


図 9：偏光マップ(左：全輻射強度，中：直線偏光，右：円偏光)。直線偏光は円偏光に比べ、強度ピーク的位置が観測者側ジェット（下方向）に現れる(Tsunetoe et al. 2022)

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

高次精度磁気流体コード CANS+を富岳に適するようにチューニングした。具体的には、計算コストの 8 割強を占める空間 5 次精度補間ルーチン (MP5) に対して、ループ分割を行い最適化した。ループ分割することで SIMD 化に成功し、SIMD 化効率が著しく上昇した。その結果として実行効率 7.2 パーセントとなり、チューニング前と比べ 3 倍弱の加速に成功した。

ブラックホール降着円盤に関する研究では、エディントン光度にくらべて低い光度の高温降着流の中程度の解像度の数値計算を行った。動径方向、鉛直方向の分解能はシュバルツシルト半径の 0.05 倍に固定し、方位角方向の解像度を 64 分割から 1024 分割まで 5 モデルの計算を行った。この結果、方位角方向の分解能を高めると鉛直面内の乱流渦のスケール長が短くなることが示された。これらの結果を、日本物理学会第 77 回年次大会 シンポジウム「プラズマサイエンスの新展開」などで発表した。

1 次モーメント (M1) 法に基づく輻射磁気流体コード CANS+R にコンプトン冷却の効果を組み込んだコードを用いて、 $10^7$  太陽質量のブラックホールへの降着率がエディントン降着率の 10%程度の場合のシミュレーションを実施し、ブラックホール近傍の高温降着流の外側にコンプトン冷却された  $10^6$ - $10^7$ K の軟 X 線放射領域が形成されること、降着率増加とともにこの領域が磁気圧優勢から輻射圧優勢に変化することが示された。方位角方向の解像度を高めた計算を行うため、輻射モジュールの富岳向きのチューニングを進めた。

電波ジェット伝播に関する研究では、高解像度の磁気流体計算と同時に非熱的な電子と陽子の進化を記述するフォッカープランク方程式を解く数値コードを開発した。その結果、観測されるジェットの電波スペクトルと電波フラックスの空間変化を再現するためには、少なくとも注入したジェットの運動エネルギーの 10 パーセントを宇宙線に分配する必要があることが示された。

プラズマ粒子計算では、PIC シミュレーションコードの富岳における最適化を行った。京で実行効率が 15%程度あったコードは、そのままでは実行効率が 2%程度しか出ないことが判明した。RIST 高度化支援のサポートを得て、ホットスポットのループ分割などを行うことで、実行効率 6%まで向上させることに成功した。コードの最適化を行ったうえで、相対論的衝撃波の 3 次元 PIC シミュレーションを実施

した。計算規模は、 $40,000 \times 920 \times 920$  格子点、粒子数が約 1 兆個で、13,225 ノードを用いて計算した。その結果、世界で初めてイオン・電子系での相対論的衝撃波の 3 次元構造を明らかにすることに成功した。図 10 に電子密度の 3 次元分布を示す。上流の wake 構造で加速された電子が衝撃波下流で高強度の電磁波放射を励起し、それが光モードとして上流に伝搬する様子が得られた。このような相対論的衝撃波からの高強度電磁波放射は、近年着目を浴びている電波帯域での突発的現象である高速電波バースト (Fast Radio Burst, FRB) の発生機構として、この現象を説明可能であることが示唆され、電波観測で得られている強度、偏光度合などの特徴を再現できていることが明らかになった。詳細な解析を進めており、論文として成果を公表する準備中である。

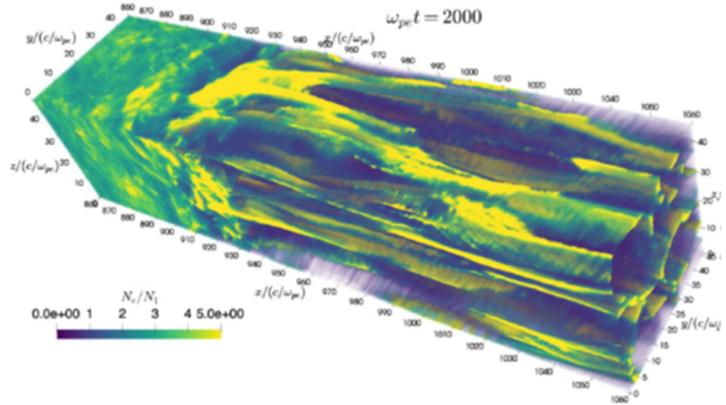


図 10: イオン・電子系で計算した相対論的衝撃波の 3 次元構造。カラーは電子密度を示す。

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

令和 3 年度では、はじめに昨年度に引き続いて粗視平均化に関するパラメータの検証を行った。ボルツマンハイドロコードでは球座標系の計算格子を用いて計算を行なっているが、その特徴として座標特異点である軸付近の格子解像度が高く、その他の領域では粗くなっている。そのため、物理的あるいは数値的な不安定性が軸付近でのみ成長する現象が見られることがある。そこで、球座標系の軸付近で流体の物理量の保存量を平均化することで、軸付近での格子解像度を低くする粗視平均化を行っている。令和 2 年度の段階では、半径 30km 以下の範囲で、座標軸から 1 点目で  $\phi$  軸方向の 8 メッシュ、2 点目で 4 メッシュ、3 点目で 2 メッシュを粗視平均化して計算を行っていた (図 11 左上)。しかし、それでも軸付近の不安定性の成長を抑えることができないことが判明した (図 11 左下)。そのため令和 3 年度では、座標軸から 1-2 点目で  $\phi$  軸方向の 8 メッシュ、3-4 点目で 4 メッシュ、5-6 点目で 2 メッシュを粗視平均化し (図 11 右上)、不安定性の成長を抑制した (図 11 右下)。

次に、半径 200km までの計算領域について重力崩壊型超新星の計算を 20ms から 50ms まで行った (図 12 左)。そして、計算領域の範囲を半径 200km から 5000km に拡張した。その際に 200km から 5000km の流体とニュートリノの物理量については、200km での境界条件に利用していた球対称一次元計算の結果を利用した。計算開始前に流体を止めてニュートリノの時間発展だけを 2ms ほど解き、200km 付近に生じた物理量の不連続を均してから、流体とニュートリノ両方の時間発展計算を開始した。しばらく計算を進めて問題が発生しないことを確認した (図 12 右)。

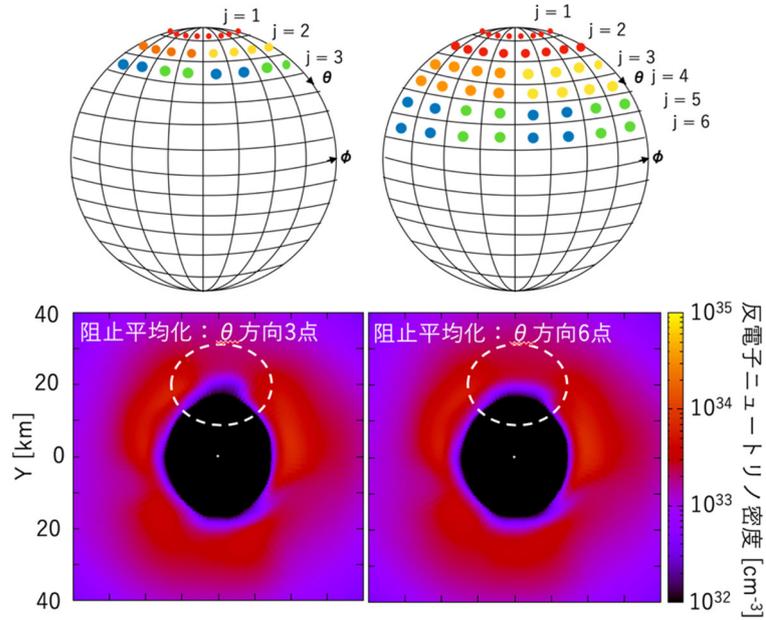


図 11：空間メッシュ上での粗視平均化（上）とそれを利用した場合の反電子ニュートリノ密度分布の結果（下）、令和 2 年度（左）と令和 3 年度（右）を比較

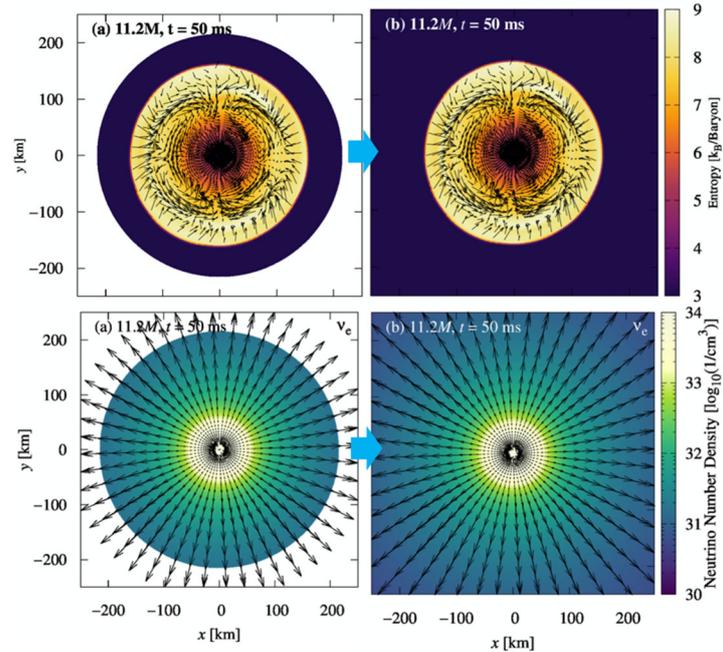


図 12：エントロピー／速度ベクトル（上）と電子ニュートリノの数密度分布/フラックスファクターベクトル（下），計算領域 200km の図（左）と 5000km に拡張したときの図（右）

超新星爆発の長時間班は研究成果として 6 本の論文をまとめた。Takiwaki et al. 2021 は京コンピューターを使った前回の成果(Takiwaki et al. 2016)の直接のアップデートである。重力ポテンシャルの取り扱い、ニュートリノ輻射輸送のレベル、ニュートリノ反応の種類が更新され、より現実的な計算ができた。一般相対論的效果を模擬した重力ポテンシャルを用いたので、降着衝撃波不安定性が生じた。また、高速自転しているモデルで見られる回転不安定性はこれまで現象論的に low-T/W 不安定性と呼ば

れて来たが、その物理的な発生機構が Rossby 波不安定性であると特定した。これのフル一般相対性理論版として Shibagaki et al. 2021 も出版した。こうした自転で増幅される中性子星の磁場も興味深い研究対象である。Masada et al. 2021 では世界に先駆けて中性子星の 3 次元磁気流体シミュレーションを行った。超新星の爆発メカニズムを観測的に検証するのに重要なニュートリノと重力波の観測予言も行われた。このニュートリノの観測予言を精密にするためにはニュートリノ振動の効果を考えないといけない。そこでこれまでの計算モデルを使って新しいニュートリノ振動の効果を見積もった (Sasaki and Takiwaki 2021)。さらに重力波の周波数から中性子星に質量と半径のパラメータを推定するため、Sotani et al. 2021 でそれらを結ぶ経験的式を提案した。最後にダークマターの有力な候補であるアクシオンの粒子は超新星爆発内部のような温度が高い環境で多く作られ、結果としてそのパラメータを強く制限することができる。超新星爆発でのアクシオン生成に先立ち大質量星でのアクシオン生成を議論した (Mori et al. 2021)。

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

この課題では、1. 大規模太陽内部シミュレーション、2. 広いパラメータの黒点形成シミュレーション、3. 領域包括的太陽風シミュレーションを実施した。2020 年度に実施した世界最大の 54 億点 350 万時間ステップの数値シミュレーションの結果をまとめ Nature Astronomy より 2021 年 9 月に出版した。プレスリリースも実施し、多くの新聞で報道された。また、数値シミュレーションの結果の詳細な解析結果をまとめた結果を論文としてまとめて投稿した。さらには、より高解像度の状況下での乱流状況を確認するために 129 億点 1200 万時間ステップの計算を実施した。

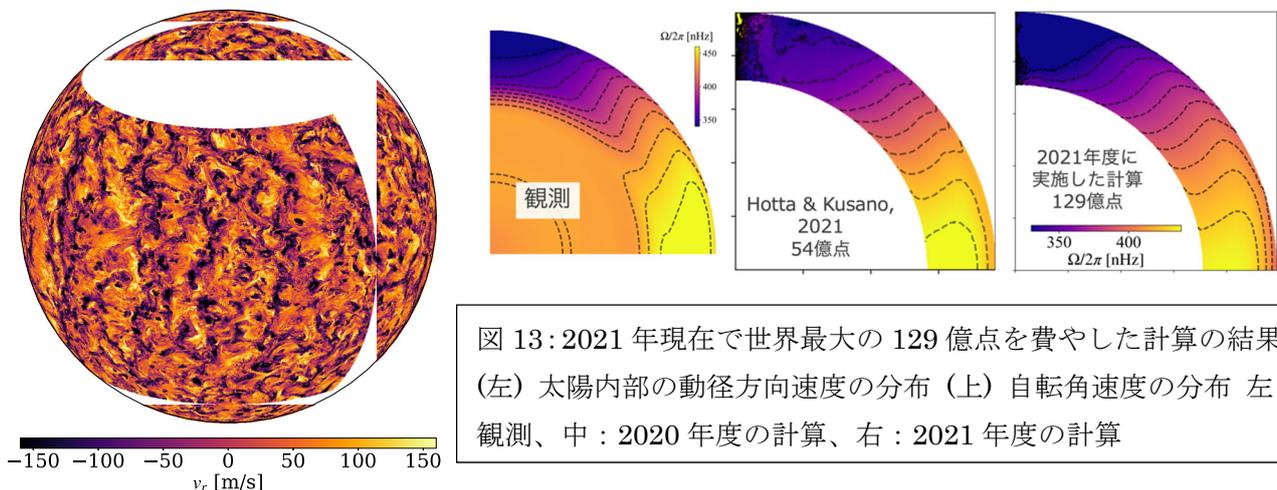


図 13: 2021 年現在で世界最大の 129 億点を費やした計算の結果。(左) 太陽内部の動径方向速度の分布 (上) 自転角速度の分布 左: 観測、中: 2020 年度の計算、右: 2021 年度の計算

その結果を図 13 に示す。Hotta & Kusano, 2021, Nature Astronomy では初めて赤道が早く自転する差動回転を再現することができたが、太陽表面近くの層は観測との大きな違いがあった。129 億点をつぎ込んだ 2021 年度の計算では、太陽表面付近領域も取り込んだことにより、より実際の太陽の自転分布に近い構造を得ることができた。

また、黒点形成についての広いパラメータ調査を実施した。黒点形成の計算は、計算負荷が大きくこれまでには一つのパラメータの計算を詳しく調べることが行われていたが、富岳の計算能力を使うことで、100程度のケースについて網羅的に太陽内部の熱対流と表面の黒点形成の関係を調べることがで

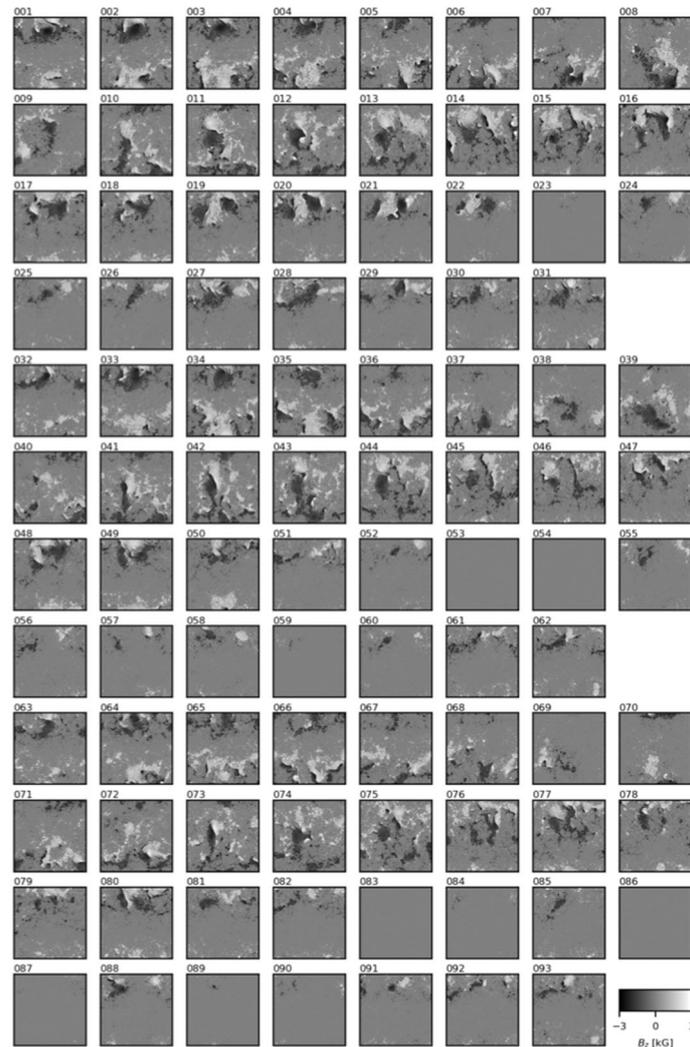


図 14: 93 例のパラメータについて網羅的に黒点形成計算を行なった結果。観測した時に得られる磁場分布を示した。一つのパネルが一つの計算に対応する。

きた。その結果、フレア爆発を起こすような太陽内部の大規模流れの存在を明らかにすることができた。今後のフレア予測研究に資すると考えられる。この結果も論文として投稿済みである。

さらには、光球-コロナ-太陽風を含んだ包括計算にも成功した。これまでの太陽風計算では、太陽の上空大気であるコロナに下部境界が置かれていたために、太陽風を駆動する光球からの直接の影響を評価することができていなかった。光球-コロナ-太陽風を含んだ領域連結計算は計算負荷が大きくこれまででは、実行不可能であったが、新しく開発した数値計算コードと富岳の能力によって実施可能となった。その結果を下図に示す。光球と接続することによって光球の小スケール磁場が太陽風に与える影響を明

らかにすることができた。

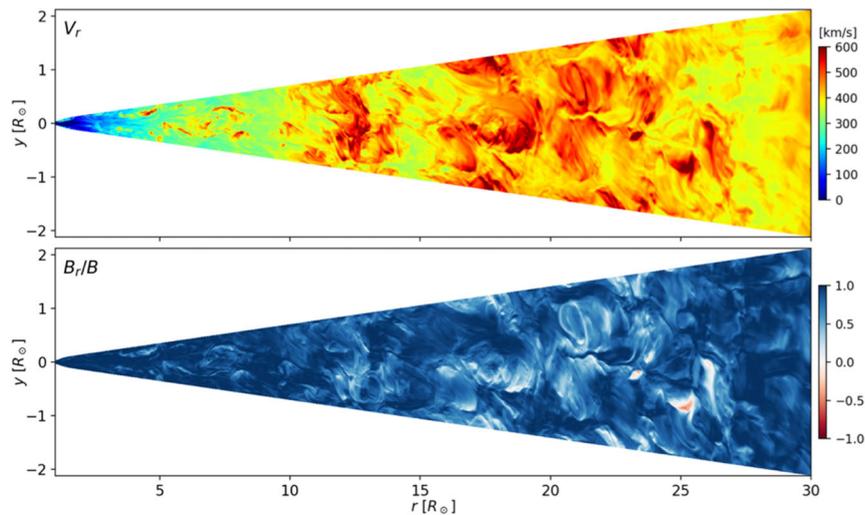


図 15： 領域連結計算により実現した太陽風の様子。

上：動径方向速度、下：動径方向磁場。左が太陽表面、右側に惑星間空間が広がっている。

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

令和 3 年度、火星に関しては、前年度までに開発してきた非静力学全球火星大気モデル「火星 SCALE-GM」に地形を導入するための開発・検討と高解像度計算を行った。まず、地形を導入するために、鉛直座標を地形に沿った座標系 (terrain-following coordinate) に変更した。モデルに入力する標高データは、NASA の Mars Global Surveyor/Mars Orbiter Laser Altimeter の観測による高解像度データをモデルの解像度に合わせて滑らかにしたものを使用した。中程度の水平解像度 (格子点間隔  $\Delta x = 15$  km) で、試計算したところ計算不安定が発生することが判明した。地球に比べて、火星地形は勾配が大きいことと火星大気が希薄であることから強い斜面風が発達し、地表付近の速度や温度の鉛直変化率が大きくなり計算精度が大幅に低下することが原因として考えられた。そこで、水平速度と温度に対して 4 階微分の鉛直高階粘性を導入することで、地表付近の大きな鉛直変化率を抑制することを試みた。試計算の結果、鉛直高階粘性を導入は機能し、鉛直対流を陽に表現したまま地形入り計算を安定化させられることが分かった (図 16)。これによって高解像度の試計算を継続することが可能となり、 $\Delta x = 15$  km の計算結果を初期値として、 $\Delta x = 1.9$  km の計算を実施、さらに、その結果を初期値として、本課題の目標である  $\Delta x = 900$  m の計算を試みた。計算安定性の確保のためには、より高解像度になるほどより強い鉛直高階粘性が必要とされた。今後は、 $\Delta x = 900$  m の計算を進め、再現された鉛直対流の構造を確認し、運動構造の解析と鉛直高階粘性の物理的モデルとしての正当性の考察を進める予定である。

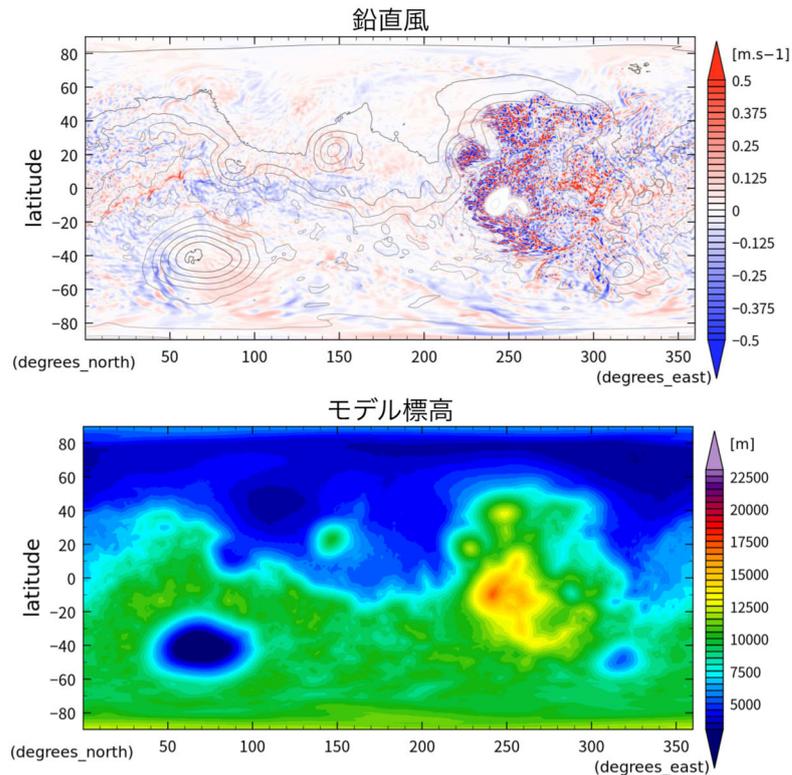


図 16: 地形入りの火星 SCALE-GM で計算された、鉛直風分布 (上) と導入した地形のモデル標高 (下)。鉛直風分布は、北半球の春分から 30 日後の瞬間場でモデル標高 15 km の水平分布である。計算安定のために、4 階の鉛直高階粘性を導入している。水平格子点間隔は約 15 km、鉛直層数は 100 層 (層間隔 250 m) である。

金星に関しては、前年度から開発に着手した「金星 SCALE-GM」の高解像度計算の試行と太陽加熱の日周期変化成分の導入を行った。平均太陽加熱 (日周期変化成分がない) 設定の計算は、前年度は  $\Delta x = 52$  km の中程度の解像度まで実施していたが、今年度は  $\Delta x = 26$  km から 6.5 km までの高解像度計算を実現することができた。 $\Delta x = 26$  km の計算は、 $\Delta x = 52$  km の場合と同様に、鉛直風分布において、惑星規模筋状構造が顕著に表現されていた。ところが、 $\Delta x = 13$  km や 6.5 km の場合には、筋状構造よりも細かな構造が表現され、目立つようになった。この構造変化の数値的正当性の検証や物理的解釈はこれからの課題である。また、 $\Delta x \leq 26$  km の高解像度計算では、平均東西風速分布に 2 種類の準平衡状態が見られた。一方は南北両半球にほぼ赤道対称に中緯度ジェットが存在する状態であり、他方は片半球の中緯度ジェットが弱い南北非対称な状態である。金星大気南北半球の非対称性は、地上望遠鏡の観測でも示唆されており、金星大気構造や長期変動を理解する上での重要なカギとなるかもしれない。太陽加熱の日周期変化成分の導入にあたっては、まず任意の公転軌道を設定できるように SCALE-GM を改修した。その後、日周期変化成分を含む計算を低解像度で試行した。その結果、赤道にジェット中心をもつ平均東西風速分布が得られ、従来型の静力学金星大気大循環モデル「AFES-Venus」の振る舞いと整合的であることが確認できた。日変化を許容する系での南北対称性や筋状構造の解像度依存性を調べることは今後の課題である。

(15) サブ課題D・岩石惑星内部シミュレーション：小河 正基（東京大学）

令和3年度の成果は、シミュレーションプログラムの高速化、プレート運動のシミュレーション、そして月における火成活動を伴うマントル対流のシミュレーションに大別される。

まず、シミュレーションプログラムの高速化に関して、マントル対流の流れ場を表わす高粘性かつ非圧縮(あるいは非弾性)流体のストークス流を多重格子法で解く際の最粗格子レベルのソルバに用いるアルゴリズムの改良を試みた。具体的には、擬似圧縮性法と局所時間刻み法に基づく反復解法 (ACuTE) から、変数分離に基づく直接解法に置き換えた。この新しい解法では、水平面内の粗い解像度での求解にあたって、登場する微分演算子の固有値・固有ベクトルを数値的に構築し、それらを用いたスペクトル展開を行っている。3次元箱型モデルを用いてテスト計算を行った結果、新しい解法を用いることで最粗格子レベルで得られる数値解の正確さが向上し、それによって多重格子法全体の収束性もが向上し、ひいては全格子レベルでの計算時間の減少にも寄与する可能性が見出された。来年度は、インヤン格子を用いた球殻モデルにもこの方法を適用し、プログラム全体の高速化に取り組む。

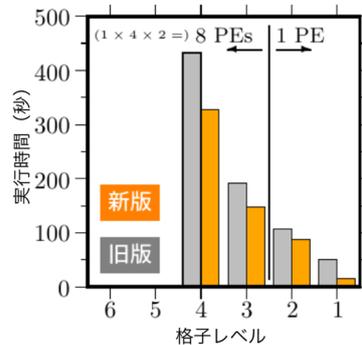


図 17: 3次元箱型モデルの緩和計算に要する時間の解法 (灰: 旧版、橙: 新版) と格子レベル (横軸) による違い。格子点数は、レベル1が $24 \times 24 \times 12$ 、レベル2が $48 \times 48 \times 24$ 、レベル3が $96 \times 96 \times 48$ 、レベル4が $192 \times 192 \times 96$ である。格子レベル2以下は1プロセス、レベル3以上は8プロセス並列で実行している。

プレート運動のシミュレーションに関しては、前年度までの箱型モデルでの成果を発展させ、富岳で3次元球殻における計算を開始した。具体的には、粘性率はその温度・圧力依存性のため空間的に最大7桁変化する球殻マントルにおける熱対流を、座標系特有の問題から生じる球殻モデルでの困難さを克服しつつ、現実的な空間分解能 (メッシュ数  $256 \times 256 \times 768 \times 2$ ) のもとで計算した。この計算に費やした計算資源は、約4000万年の時間積分で5000ノード時間であった。また、これらの計算を通して、最終的なプレート運動を伴うマントル対流のシミュレーションに必要とされる初期条件を設定した。本年度の経験から、最終的な球殻でのプレート運動を伴うマントル対流のシミュレーションに必要とされる計算資源は、40億年程度の計算を目標とすると150万ノード時間程度と見積もられる (箱型モデルでの計算の経験から、プレート運動を考慮した場合はプレート境界の形成により、考慮しない場合と比較して著しく計算時間が増大する事が分かっており、ここでは3倍として見積もった)。来年度はこの見積もりにもとづいて、最終的なプロダクトランを遂行していく予定である。

月における火成活動を伴うマントル対流のシミュレーションに関しては、前年度に引き続き 3 次元矩形領域における火成活動を伴うマントル対流の数値シミュレーションを実行するとともに、月の球殻マントルにおけるマグマの生成・移動の数値シミュレーションを実行した。得られたマグマの生成・移動史は月の海の火山活動史と整合的であり、マグマ生成により生じるマントルの体積変化は月の膨張収縮史を定量的に説明するものであった。さらに、マントル対流を伴う（部分）球殻マントルにおける火成活動のシミュレーションは、技術的には実行可能なことを確認した。来年度は、最終的なマントル対流と火成活動の双方を含む月の（部分）球殻マントル進化モデルの計算に取り組む。

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

令和 3 年度は、まずモデルの中核である球面調和関数変換ライブラリ ISPACK3 の富岳（A64FX 系 CPU）へのさらなる最適化を行った。これまでの ISPACK3 は正変換が逆変換よりも低速であった。これを改善するために、まずは Intel 系 CPU 向けの最適化と同様に、ライブラリ最下層のサブルーチンをアセンブリで SIMD 命令を直接記述し最適化を試みた。しかし、A64FX は Intel CPU に比べて命令のレイテンシが大きくレジスタが少ないために、アセンブリを直接記述しての最適化は難易度が高いことが分かった。一方、Fortran により SIMD 命令を意識した形で記述することで、A64FX のコンパイラに SIMD 命令を用いつつレイテンシを隠蔽した実行バイナリを作成させることに成功した。その結果、ピーク性能の 4 割程度の速度で正逆変換計算を行えるようになった。

開発した変換ライブラリの性能を示すために、世界最大自由度の球面調和関数変換計算を富岳にて実行した。球面調和関数の最大全波数が  $2^{18} - 1 = 262143$  の場合がこれまでの最大自由度計算であった。これに対して、富岳の 1024 ノードを使用し、MPI 並列数 1024、スレッド並列数 48 にて、最大全波数  $2^{19} - 1 = 524287$  の正逆変換を実行し、約 1300 TFlops（ピーク性能の約 43%）で計算を行うことができた。

図 18 は富岳と同じ系列の CPU を搭載している名古屋大学スーパーコンピュータ「不老」におけるハイブリッド並列による ISPACK3 のベンチマーク結果である。正逆変換ともに並列化による計算速度の加速が十分に行われている。図 19 は富岳において、層方向への並列化も含めたハイブリッド計算のベンチマークである。1 層球面上の並列化だけでは用いるコア数を増加させると計算速度が頭打ちになる状況を、さらに層方向に並列化を施すことによって解消できることが示されている。

この成果を踏まえて、非弾性回転球殻ガス惑星大気モデルに球面調和関数変換ライブラリを導入し、高解像度長時間積分を引き続き実行しつつ、上層が安定成層した設定での対流計算を開始した。初期の対流発達時に数値不安定が発生したため、時間積分ステップを短くし、さらに粘性散逸パラメータをターゲット計算よりも強めにする措置をとった。そのため、まだ統計的平衡状態に達する結果が得られていない。来年度に引き続き計算を続行していく予定である。

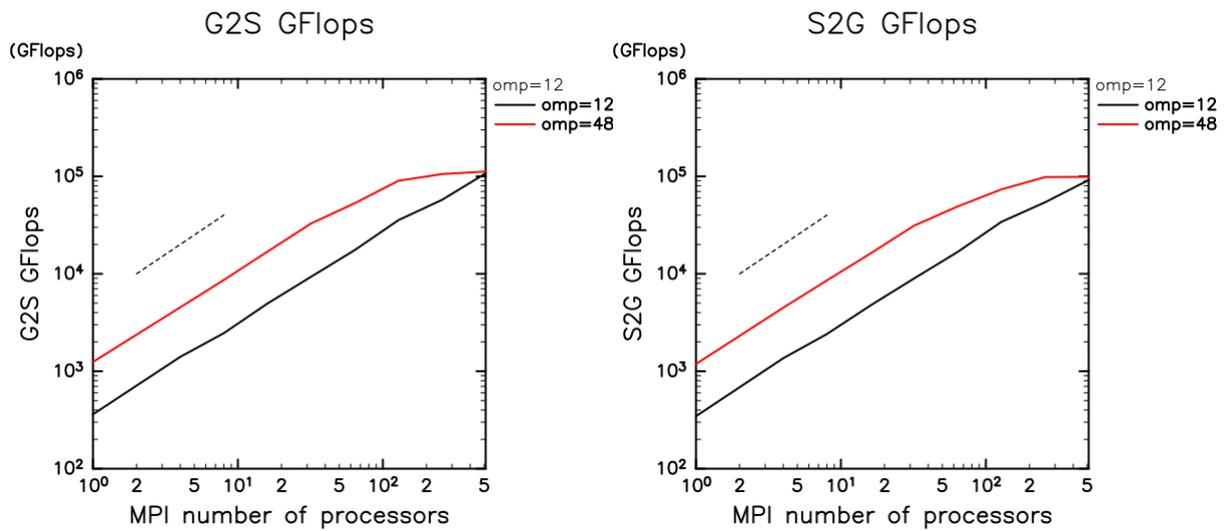


図 18: 球面調和関数変換のベンチマーク計算による単層並列時のストロングスケーリング性能。左が正変換、右が逆変換の結果を表す。切断波数は 16883、経度×緯度格子点数は 32768×16384 点である。不老 (A64FX) にて計算した。スレッド並列数は 12 (黒実線) と 48 (赤実線) である。黒点線は傾き 1 を表す。

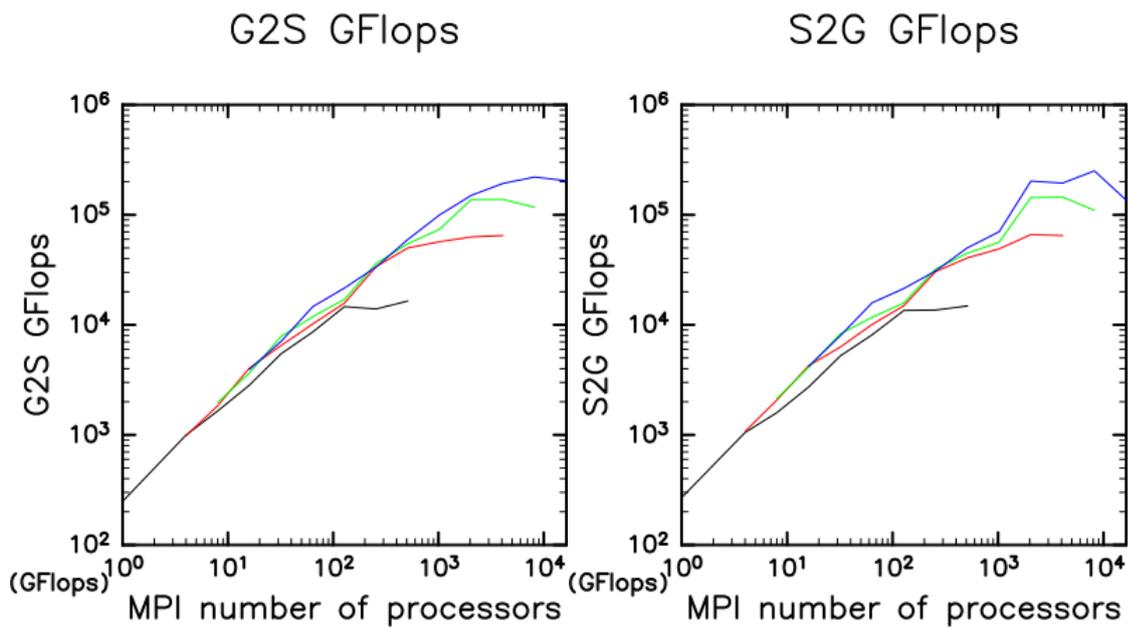


図 19: 球面調和関数変換のベンチマーク計算による多層並列時のストロングスケーリング性能。左が正変換、右が逆変換の結果を表す。切断波数は 4095、経度×緯度格子点数は 8192×4096、鉛直層数は 16 である。富岳 (A64FX) にて計算した。層方向の並列数は 1 (黒)、4 (赤)、8 (緑)、16 (青) である。スレッド並列数は 12 である。

## 2-3. 活動（研究会の活動等）

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

課題内では、プロジェクトマネージャーが課題代表者のもとで行われる運営委員会（6/21, 9/10, 10/26, 12/14, 2/22）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、富岳で得られた知見の共有などを目的として計算資源利用に関する課題内ワークショップを2回開催（8/5, 10/26）し、進捗状況の確認と情報交換を行った。

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

### <セミナー、研究会等>

セミナーや研究会は研究を進めるうえで重要な役割を果たす。特に研究分野の最新の動向を知るのみならず、自身の研究との関係性や今後の発展を考えるため、研究手法の異なる理論や実験・観測の研究者と協力してサイエンスを進めていくためにも必要不可欠なものである。本年度も新型コロナウイルスの影響でセミナーや研究会の開催数は少なく、オンラインによる開催によるものがすべてであった。重点課題⑨から引き続き行われている HPC・Phys 勉強会は計算科学を軸に各分野の交流が活発に行われており、参加者からも好評を得ており前年度に比べて開催数も増えている。セミナーと研究会等は本年度 7 件が実施され総参加者は計 429 名であった。

### ●日本地球惑星科学連合 2021 年大会

セッション M-GI3 「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3年6月4日

場所：オンライン開催

概要：富岳成果創出加速プログラム「計算宇宙惑星」もスタートした現在、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、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。

●第11回 HPC-Phys 勉強会

参加者：113名

日時：令和3年6月10日,11日

場所：オンライン開催

主催：計算基礎科学連携拠点 (JICFuS)

共催：理研計算科学研究センター (R-CCS)

概要：物理に軸足を置きつつ数値計算を活発に行っている研究者が集まり、計算の技術的な側面を議論する集まりの11回目。量子計算をテーマとした勉強会を開いた。

●第12回 HPC-Phys 勉強会

参加者：35名

日時：令和3年8月26日

場所：オンライン開催

主催：計算基礎科学連携拠点 (JICFuS)

共催：理研計算科学研究センター (R-CCS)

概要：物理に軸足を置きつつ数値計算を活発に行っている研究者が集まり、計算の技術的な側面を議論する集まりの12回目。「富岳」で用いる演算ライブラリとコードのチューニングに関する講演を2つ行った。

●第13回 HPC-Phys 勉強会

参加者：34名

日時：令和3年11月25日

場所：オンライン開催

主催：計算基礎科学連携拠点 (JICFuS)

共催：理研計算科学研究センター (R-CCS)

概要：物理に軸足を置きつつ数値計算を活発に行っている研究者が集まり、計算の技術的な側面を議論する集まりの13回目。「富岳」で用いられるJITコンパイラに関する講演を行った。

●「富岳で加速する素粒子・原子核・宇宙・惑星」シンポジウム

参加者：119名

日時：令和4年1月17日,18日

場所：オンライン開催

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

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

### ●第14回 HPC-Phys 勉強会

参加者：57名

日時：令和4年2月4日

場所：オンライン開催

主催：計算基礎科学連携拠点（JICFuS）

共催：理研計算科学研究センター（R-CCS）

概要：物理に軸足を置きつつ数値計算を活発に行っている研究者が集まり、計算の技術的な側面を議論する集まりの14回目。チュートリアル講演を含む形で2名の講演を行った。

### ●CfCA 流体学校

参加者：基礎編34名、応用編37名、計71名

日時：令和4年3月8日～3月10日、3月22日～3月23日

場所：オンライン開催

主催：国立天文台・天文シミュレーションプロジェクト

後援：「富岳」成果創出加速プログラム「宇宙の構造形成と進化から惑星表層環境変動までの統一的描像の構築」「計算基礎科学連携拠点」

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

### <研究成果の情報発信>

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

### ●ウェブサイトの制作・更新管理

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

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

領域①「宇宙の構造形成と進化から惑星表層環境変動までの統一的描像の構築」

[https://jicfus.jp/fugaku\\_ap/jp/](https://jicfus.jp/fugaku_ap/jp/)

### ●メディア対応

1) プレスリリースおよびニュースリリース

・多波長同時観測でさぐる M87 巨大ブラックホールの活動性と周辺構造

発表日：令和3年4月14日情報解禁

発表主宰者：国立天文台、東京大学 宇宙線研究所、工学院大学、広島大学、総合研究大学院大学、茨城

大学、山口大学、計算基礎科学連携拠点

・世界最大規模の”模擬宇宙”を公開

発表日：令和3年9月10日情報解禁

発表主宰者：国立天文台、千葉大学

メディア掲載：ITmedia NEWS (9/10), TechCrunch Japan(9/13)

・スーパーコンピュータ「富岳」で太陽の自転の謎、解ける

発表日：令和3年9月14日情報解禁

発表主宰者：千葉大学、名古屋大学

メディア掲載：excite ニュース (9/14)

・天の川銀河中心の巨大ブラックホール天体「いて座A\*」の構造

発表日：令和4年2月22日情報解禁

発表主宰者：工学院大学、国立天文台

メディア掲載：BIGLOBE ニュース(2/24)

●ウェブマガジン「月刊 JICFuS」「月刊 JICFuS ムービー」製作

若手研究者を中心にインタビュー記事「月刊 JICFuS」を掲載。本年度はオンライン取材による紹介記事44号～45号の2本を制作した。

#### 【月刊 JICFuS】

・第44号「将来の宇宙天気予報につながるフレア発生型太陽黒点の形成メカニズムの解明」（令和4年2月14日）名古屋大学 宇宙地球環境研究所 金子岳史 特任助教

・第45号「より緻密なシミュレーションでブラックホールの謎にせまる」（令和4年3月1日）筑波大学 計算科学研究センター 小川 拓未 研究員

●リーフレット

A3判変形四つ折り。2か国語（日・英）で製作し、各種イベントで配布予定。本年度も新型コロナウイルスの影響で各種イベントが中止となったため、前年度に引き続き英語版を製作しオンラインにて公開を行った。

<個別活動、特記事項>

活動として、各サブ課題の個別活動や特記事項を以下に報告する。

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

国際会議におけるSOC/LOCを務めた。

- ・ IAU Symposium 362 “The predictive power of computational astrophysics as a discovery tool ” , Live Zoom, 2021/11(SOC/LOC)
- ・ IAU CBI ChaICA-III2021, Live Zoom, 2021/6(SOC/LOC)

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

Athena++コードを用いた流体シミュレーションについてのスーパーコンピュータによる実習を含む流体学校を国立天文台天文シミュレーションプロジェクトにて開催し、3月8日-10日の基本編は34人、3月22日-23日の応用編は37人の参加者を得た。富田は流体学校の企画と講義・実習の講師を務めた。

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

上記（6）の流体学校の開催にあたり、岩崎は世話人を務め実習を担当した。

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

“ブラックホールジェット・降着円盤・円盤風研究会 2022” オンライン, 2022年1月24-25日

“Black Hole Astrophysics with VLBI 2022” 宇宙線研究所/オンライン, 2022年2月7-9日

## 2-4. 実施体制

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

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

## 別添 1 学会等発表実績

(1) 研究総括、並列計算コード開発：牧野 淳一郎（神戸大学）

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

### 査読論文

1. Fujii, M. S., Saitoh, T. R., Hirai, Y., Wang, L., SIRIUS Project. III. Star-by-star simulations of star cluster formation using a direct N-body integrator with stellar feedback, 2021, Publications of the Astronomical Society of Japan, 73, 4, pp.1074-1099, DOI:10.1093/pasj/psab061
2. Fujii, M. S., Saitoh, T. R., Wang, L., Hirai, Y. SIRIUS project II: a new tree-direct hybrid code for smoothed particle hydrodynamics/N-body simulations of star clusters, 2021, Publications of the Astronomical Society of Japan, 73, 4, pp1057-1073, DOI: 10.1093/pasj/psab037
3. Wang, L., Tanikawa, A., Fujii, M. S., The impact of primordial binary on the dynamical evolution of intermediate massive star clusters, 2022, MNRAS, 509, 4, pp.4713-4722, DOI:10.1093/mnras/stab3255
4. Arimoto, M., Asada, H., Cherry, M. L., Fujii, M. S., et.al., Gravitational Wave Physics and Astronomy in the nascent era, 2021, 89pages, Prog. Theor. Exp. Phys., DOI: 10.1093/ptep/ptab042
5. Wang, L., Fujii, M. S., Tanikawa, A., Impact of initial mass functions on the dynamical channel of gravitational wave sources, 2021, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 504, 4, pp5778-5787, DOI: 10.1093/mnras/stab1157
6. Shikauchi, M., Tanikawa, A., Kawanaka, N., Detectability of black hole binaries with Gaia: dependence on binary evolution models, 2022, The Astrophysical Journal, 928, 13

### 学会等発表

1. Fujii, M. S., Binary Black Hole Mergers Originated from Star Clusters, Workshop on "Nuclear burning in massive stars", YITP, Kyoto University + Monash University, online, 2021/7, 国際, 招待
2. 藤井通子, シミュレーションで見る宇宙, The World of Mathematical Physics II, 東京大学カブリ IPMU, 2021/11 (オンライン), 国内, 招待
3. 谷川衝, Binary black hole mergers, J-Gem Kick-off workshop, zoom, 2021/7, 国内, 招待
4. Fujii, M. S., Dynamical structures of the Milky-Way disk, National Astronomical Observatory of Japan, zoom, 2021/7, 国内, 招待
5. Tanikawa, A., Population III binary population synthesis, International Teeminar, zoom, 2021/6, 国内, 招待

6. Tanikawa, A., Theoretical study of the origins of merging binary black holes, Tohoku University, zoom, 2021/6

学会等発表

1. 藤井通子, Formation of the Orion Nebula Cluster, 日本天文学会 2021 年秋季年会, オンライン開催, 2021/9
2. 谷川衝, 全金属量の孤立連星から形成される連星ブラックホールの性質の数値研究, 理論懇シンポジウム, オンライン, 2021/12

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

1. Ishiyama, T., Yoshikawa, K., Tanikawa, A., “High Performance Gravitational N-body Simulations on Supercomputer Fugaku”, International Conference on High Performance Computing in Asia-Pacific Region, pp. 10-17, 2022
2. Ebisu, T., Ishiyama, T., Hayashi, K., “Constraining self-interacting dark matter with dwarf spheroidal galaxies and high-resolution cosmological N -body simulations”, Physical Review D, 105, id. 023016, 2022
3. Shirasaki, M., Ishiyama, T., Ando, S., “Virial Halo Mass Function in the Planck Cosmology”, The Astrophysical Journal, 922, id.89, 2021
4. Ishiyama, T., Prada, F., Klypin, A. A., Sinha, M., Metcalf, R. B., Jullo, E., Altieri, B., Cora, S. A., Croton, D., de la Torre, S., Millán-Calero, D. E., Oogi, T., Ruedas, J., Vega-Martínez, C. A., “The Uchuu simulations: Data Release 1 and dark matter halo concentrations”, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 506, pp. 4210-4231, 2021

学会、研究会発表

1. Ishiyama Tomoaki, Yoshikawa Kohji, Tanikawa Ataru, High Performance Gravitational N-body Simulations on Supercomputer Fugaku, HPCAsia 2022
2. Ishiyama Tomoaki, 富岳による宇宙論的構造形成シミュレーション, 「富岳で加速する素粒子・原子核・宇宙・惑星」シンポジウム
3. Ishiyama Tomoaki, 宇宙構造形成の大規模 N 体シミュレーション: 京、富岳、その先へ, 第 15 回アクセラレーション技術発表討論会「富岳による高度科学技術計算」
4. 大木平、石山智明、Prada Francisco、Croton Darren、Sinha Manodeep、Cora Sofia A、Uchuu collaboration、 $\nu$ 2GC collaboration, Uchuu simulation と準解析的モデルで探る AGN 光度関数の field variance, 日本天文学会 2022 年春季年会
5. Oogi T., Ishiyama T., Prada F., Croton D., Sinha M., Cora S. A., Uchuu collaboration,  $\nu$ 2GC collaboration, Cosmic variance forecasts of high redshift AGNs with Uchuu- $\nu$ 2GC, Galaxy formation Workshop 2021
6. 大木平、石山智明、長島雅裕、川口俊宏、岡本崇、榎基宏、白方光、小倉和幸、 $\nu$ 2GC collaboration、

Uchuu collaboration, 準解析的モデルを用いた銀河合体による AGN の形成と進化, 埋もれた AGN の宇宙論的進化

7. Oogi T., Ishiyama T., Nagashima M., Kawaguchi T., Okamoto T., Enoki M., Shirakata H., Ogura K.,  $\nu$ 2GC collaboration, Formation of high-redshift AGNs from the  $\nu$ 2GC semi-analytic model, East-Asia AGN Workshop 2021
8. 大木平、石山智明、長島雅裕、川口俊宏、岡本崇、榎基宏、白方光、小倉和幸、 $\nu$ 2GC collaboration, Uchuu simulation と準解析的モデルで探る高赤方偏移クエーサー形成, 日本天文学会 2021 年秋季年会
9. 大木平、白方光、長島雅裕、西道啓博、川口俊宏、岡本崇、石山智明、榎基宏、 $\nu$ 2GC collaboration, 富岳時代の準解析的銀河・AGN 形成モデル, 日本地球惑星科学連合 2021 年大会

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

1. 吉川耕司、「富岳における無衝突自己重力系の Vlasov シミュレーション」 {電子情報通信学会 第 15 回アクセラレーション技術発表討論会「富岳による高度科学技術計算」(2021 年 9 月 2 日：オンライン) (招待講演)}
2. 吉川耕司、「富岳による宇宙論的ニュートリノの Vlasov シミュレーション」 第 4 回 HPCI コンソーシアムシンポジウム (2021 年 10 月 28 日：オンライン) (基調講演)
3. Kohji Yoshikawa, “A 400 trillion-grid Vlasov simulation on Fugaku supercomputer: large-scale distribution of cosmic relic neutrinos in a six-dimensional phase space”, SC21:the International Conference for High Performance Computing, Networking, Storage and Analysis (November 17, 2021：オンライン)
4. 吉川耕司、「富岳における宇宙論的ニュートリノの Vlasov シミュレーション」、第 14 回 HPC-phys 勉強会 (2022 年 2 月 4 日：オンライン)
5. 吉川耕司、「宇宙大規模構造におけるニュートリノのダイナミクス」、JICFuS 「富岳で加速する素粒子・原子核・宇宙・惑星」シンポジウム (2022 年 1 月 17 日：オンライン)
6. Kohji Yoshikawa, “Vlasov Simulation of Cosmic Relic Neutrinos in the Large-scale Structure on Supercomputer Fugaku”, 2022 CCS-EPCC workshop (March 30, 2022:オンライン)
7. Kohji Yoshikawa, “Vlasov Simulation of Cosmological Relic Neutrinos on Supercomputer Fugaku”, 2022 LBNL/CSA - Tsukuba/CCS Collaboration Meeting (March 23, 2022:オンライン)

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

査読論文

1. SIRIUS project. III. Star-by-star simulations of star cluster formation using a direct N-body integrator with stellar feedback, Fujii, M. S., Saitoh, T. R., Hirai, Y., Wang,

- L., PASJ, 73, 1074-1099, (2021)
2. SIRIUS project. II. A new tree-direct hybrid code for smoothed particle hydrodynamics/N-body simulations of star clusters, Fujii, M. S., Saitoh, T. R., Wang, L., Hirai, Y., PASJ, 73, 1057-1073, (2021)
  3. SIRIUS project. I. Star formation models for star-by-star simulations of star clusters and galaxy formation, Hirai, Y., Fujii, M. S., Saitoh, T. R., PASJ, 73, 1036-1056, (2021)
  4. Testing the effect of resolution on gravitational fragmentation with Lagrangian hydrodynamic schemes, Yamamoto, Y., Okamoto, T., Saitoh, T. R., MNRAS, 504, 3986-3995, (2021)

学会発表等

1. 齋藤貴之、行方大輔、岩澤全規、平居悠、細野七月、野村昴太郎、坪内美幸、牧野淳一郎、岡本崇、藤井通子、平島敬也「次世代銀河形成シミュレーションへ向けて」、第15回アクセラレーション技術発表討論会「富岳による高度科学技術計算」 2021年9月2日 - 2021年9月2日 オンライン 招待
2. 齋藤貴之、「銀河衝突、爆発的星形成、星団形成」、様々なスケールの衝突流による誘発的星形成～大質量星から超大質量星団まで～ 2021年7月7日 - 2021年7月9日 オンライン 招待
3. Hirashima, K., Moriwaki, K., Fujii, M. S., Hirai, Y., Saitoh, T., Makino, J., Predicting the expansion of supernova shell for high-resolution galaxy simulations using deep learning, IAUS 362: Predictive Power of Computational Astrophysics as a Discovery Tool, Live Zoom, 2021/11
4. Hirashima, K., Moriwaki, K., Fujii, M. S., Saitoh, T., Makino, J., Predicting the expansion of supernova shell for high-resolution galaxy simulations using deep learning, XXXII IUPAP Conference on Computational Physics, Live Zoom, 2021/7
5. Hirashima, K., Moriwaki, K., Fujii, M. S., Saitoh, T., Makino, J., Predicting the expansion of supernova shell for high-resolution galaxy simulations using deep learning, IAU CB1 ChaICA-III2021, Live Zoom, 2021/6

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

学会等発表

1. 富田賢吾, “Athena++による大規模宇宙磁気流体シミュレーション”, 「富岳」成果創出加速プログラム研究交流会, 2022年3月14日

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

学会等発表

1. 岩崎一成, 富田賢吾, 高棹真介, 奥住聡, 鈴木建, “原始惑星系円盤における磁束輸送過程”, 日本天文学会 2022 年春季年会 P212b, 2022 年 3 月 2 日
2. 岩崎一成, 富田賢吾, “分子雲形成・進化シミュレーション: 高密度クランプの重力不安定条件”, 日本天文学会 2022 年春季年会 P107a, 2022 年 3 月 3 日
3. 岩崎一成, 富田賢吾, 高棹真介, 奥住聡, 鈴木建, “非理想磁気流体シミュレーションによる原始惑星系円盤構造の解明”, 新学術領域「新しい星形成理論によるパラダイムシフト」大研究会, 2022 年 3 月 16 日

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

学会等発表

1. 石城陽太, 小久保英一郎, 牧野淳一郎, 藤本正樹, 惑星系 N 体計算コード GPLUM の開発, 日本地球惑星科学連合大会(オンライン, 2021.6)
2. 石城陽太, 小久保英一郎, 兵頭龍樹, 藤本正樹, 牧野淳一郎, N 体計算コード GPLUM の開発: 高解像度微惑星集積計算による展望, 日本惑星科学会秋季講演会(オンライン, 2020.9)
3. 細野七月, 小久保英一郎, 富岳で行う天体衝突の SPH 計算, 日本地球惑星科学連合 2021 年大会, 2021 年 6 月 4 日
4. 細野七月, 小久保英一郎, 巨大衝突の数値計算結果に原始地球の自転が与える影響, 日本天文学会 2022 年春季年会 2022 年 3 月 4 日
5. 細野七月, スーパーコンピュータ富岳上での MPI 集団通信性能の評価, 第 182 回ハイパフォーマンスコンピューティング研究発表会 2021 年 12 月 7 日
6. 細野七月, Parallel performance of FDPS and Athena++ on Fugaku, The 4th R-CCS International symposium 2022 年 2 月 7 日

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

査読論文

1. Y Sakurai, T Ishihara, H Furuya, M Umemura, K Shiraishi, Effects of the compressibility of turbulence on the dust coagulation process in protoplanetary disks, The Astrophysical Journal 911 (2), 140 (2021)
2. GE Elsinga, T Ishihara, JCR Hunt, Non-local dispersion and the reassessment of Richardson's  $t^3$ -scaling law, Journal of Fluid Mechanics 932, A17 (2022)

学会等発表

1. 石原 卓, 宇宙物理における乱流現象解明のための計算科学 ー原始惑星系円盤乱流中のダスト成長ー, 2021 GFD オンラインセミナー (第 6 回)(招待講演) (2021)
2. 岡 省吾, 石原 卓, 乱流中の慣性粒子の分布の位相的データ解析, 日本応用数理学会 2021 年度

年会 (2021)

3. 元塚 博貴, 石原 卓, 乱流中の微細渦構造周りの慣性粒子の運動の数値解析, 日本流体力学会 年会 2021 (2021)
4. 森中 宏樹, 石原 卓, 高レイノルズ数乱流中の慣性粒子の運動の直接数値シミュレーション, 日本流体力学会 年会 2021 (2021)
5. 宮本 理史, 石原 卓, 金田行雄, 乱流の慣性小領域の渦構造についての DNS データ解析, 日本流体力学会 年会 2021 (2021)
6. 浦 覚斗, 石原 卓, 高レイノルズ数乱流中の流体粒子と慣性粒子の拡散過程の DNS データ解析, 日本流体力学会 年会 2021 (2021)
7. 櫻井 幹記, 石原 卓, 横川 三津夫, 一様等方性圧縮性乱流の直接数値シミュレーション, 第 35 回数値流体力学シンポジウム (2021)
8. 浅井 瑞貴, 櫻井 幹記, 石原 卓, 乱流中で鉛直重力の働く慣性粒子の衝突過程の DNS データ解析, 第 35 回数値流体力学シンポジウム (2021)
9. Takashi Ishihara, DNS data analysis of the collision processes of inertial particles in high Reynolds number turbulence, 4th International Workshop on Cloud Turbulence(招待講演)(国際学会) (2022)

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

査読論文

1. Nomura, Mariko; Omukai, Kazuyuki; Ohsuga, Ken “Radiation hydrodynamics simulations of line-driven AGN disc winds: metallicity dependence and black hole growth” 2021, MNRAS, 507, 904
2. Ogata, Erika; Ohsuga, Ken; Yajima, Hidenobu “Hoyle-Lyttleton accretion on to black hole accretion disks with super-Eddington luminosity for dusty gas” 2021, PASJ, 73, 929
3. Tsunetoe, Yuh; Mineshige, Shin; Ohsuga, Ken; Kawashima, Tomohisa; Akiyama, Kazunori “Polarization images of accretion flow around supermassive black holes: Imprints of toroidal field structure” 2021, PASJ, 73, 912
4. Ogawa, Takumi; Ohsuga, Ken; Makino, Yoshihiro; Mineshige, Shin “Variability of Comptonized X-ray spectra of a super-Eddington accretor: Approach using Boltzmann radiation transport” 2021, PASJ, 73, 701
5. Mizumoto, Misaki; Nomura, Mariko; Done, Chris; Ohsuga, Ken; Odaka, Hirokazu “UV line-driven disc wind as the origin of UltraFast Outflows in AGN” 2021, MNRAS, 503, 1442
6. Kitaki, Takaaki; Mineshige, Shin; Ohsuga, Ken; Kawashima, Tomohisa “The origins and impact of outflow from super-Eddington flow” 2021, PASJ, 73, 450
7. Kawashima, Tomohisa; Ishiguro, Seiji; Moritaka, Toseo; Horiuchi, Ritoku; Tomisaka,

- Kohji “Mushroom-instability-driven Magnetic Reconnections in Collisionless Relativistic Jets” 2022, ApJ, 928, 62
8. Cho, Ilje; Zhao, Guang-Yao; Kawashima, Tomohisa et al. (66 authors) “The Intrinsic Structure of Sagittarius A\* at 1.3 cm and 7 mm” 2022, ApJ, 926, 108
  9. Satopathy, Kaushik et al. (238 authors incl. Kawashima, Tomohisa) “The Variability of the Black Hole Image in M87 at the Dynamical Timescale” 2022, ApJ, 925, 13
  10. Janssen, Michael et al. (268 authors incl. Kawashima, Tomohisa) “Event Horizon Telescope observations of the jet launching and collimation in Centaurus A” 2021, Nature Astronomy, 5, 1017
  11. Kocherlakota, Prashant et al. (237 authors incl. Kawashima, Tomohisa) “Constraints on black-hole charges with the 2017 EHT observations of M87\*” PhRvD, 103, 104047
  12. Narayan, Ramesh; et al. (240 authors incl. Kawashima, Tomohisa) “The Polarized Image of a Synchrotron-emitting Ring of Gas Orbiting a Black Hole” 2021, ApJ, 912, 35
  13. EHT MWL Science Working Group et al. (745 authors incl. Kawashima Tomohisa as one of the primary authors) “Broadband Multi-wavelength Properties of M87 during the 2017 Event Horizon Telescope Campaign” 2021, ApJL, 911, 11

学会等発表

1. K. Ohsuga; A. Inoue; A. Utsumi; T. Ogawa; Y. Asahina; H.R.Takahashi; T. Kawashima; M. Nomura; M. Mizumoto; R. Tomaru; C. Done “Numerical Simulations of Accretion Flows and Outflows around Black Holes/Neutron Stars” European Astronomical Annual Meeting SS3 :Black holes under the magnifying glass of XRISM and Athena, online, 06/28 - 07/02, 2021, 国際, 招待
2. H. R. Takahashi, “General Relativistic Radiation Magnetohydrodynamic Simulations of Accretion Flows onto a Black Hole or a Neutron Star” , AAPPS-DPP2021, Fukuoka, online, 9/26-10/1, 2021, 国際, 招待
3. Y. Tsunetoe, S. Mineshige, K. Ohsuga, T. Kawashima, K. Akiyama “Linear and Circular Polarization Images around Black Holes: Imprints of the Jet-driving Magnetic Fields” Polarized Radiation near Supermassive Black Holes, online, May 10-13, 2021, 国際
4. Y. Tsunetoe, S. Mineshige, K. Ohsuga, T. Kawashima, K. Akiyama “Linear and Circular Polarization Images near Black Holes: Imprints of the Magnetic Fields Structure” online, July 5-10, 2021, 国際
5. M. Mizumoto, M. Nomura, K. Ohsuga, C. Done, H. Odaka “UV line driven wind simulation and UFOs” Online/Durham Univ. September 6-9, 2021, 国際
6. M. Nomura, K. Ohuga, C. Done, K. Omukai “Radiation hydrodynamics simulations of line-driven disk wind” Online/Durham Univ. September 6-9, 2021 , 国際
7. K. Ohsuga, A. Inoue, A. Utsumi, H.R.Takahashi, T. Kawashima, S. Mineshige, K. Kitaki “Numerical simulations of disk wind around black holes” Online/Durham Univ. September 6-9, 2021 , 国際

8. Q. B. Arnau, C. Done, C. Lacy, M. Nomura, K. Ohsuga “Line-driving winds: dependence on black hole properties” Online/Durham Univ. September 6-9, 2021 , 国際
9. M. Takahashi, K. Ohsuga, R. Takahashi, T. Ogawa, M. Umemura “Development of time dependent general relativistic radiative transfer code: CARTOON” From Vision to Instrument: Designing the Next-Generation EHT to Transform Black Hole Science, online, November 1-5, 2021, 国際
10. A. Utsumi, K. Ohsuga, H.R. Takahashi, Y. Asahina “Black hole spin dependence of supercritical accretion disks via general relativistic radiative magnetohydrodynamic simulations” Black Hole Astrophysics with VLBI 2022, Online/ICRR, February 7-9, 2022, 国際
11. Y. Tsunetoe, S. Mineshige, T. Kawashima, K. Ohsuga, K. Akiyama, H.R. Takahashi “Linear and Circular Polarization Images and the Jet-Disk Structure in M87” Black Hole Astrophysics with VLBI 2022, Online/ICRR, February 7-9, 2022, 国際
12. T. Ogiwara, T. Kawashima, K. Ohsuga “Constructing synthetic images of general relativistic magnetohydrodynamic models for AGN jets by applying the general relativistic radiative transfer code RAIKOU” Black Hole Astrophysics with VLBI 2022, Online/ICRR, February 7-9, 2022, 国際
13. T. Kawashima, K. Ohsuga, H.R. Takahashi, T. Hitomi “Time dependent and multi-wavelength radiative properties of accretion flows and relativistic jets” Black Hole Astrophysics with VLBI 2022, Online/ICRR, February 7-9, 2022, 国際
1. I.B.Lasaga, S. Mineshige, K. Ohsuga, T. Kawashima, T. Kitaki “Study on the outflow impact of SMBH seed at high-z through radiation hydrodynamic (RHD) simulations” Black Hole Astrophysics with VLBI 2022, Online/ICRR, February 7-9, 2022, 国際
2. 高橋博之, 大須賀健, 川島朋尚, 朝比奈雄太, 内海 碧人, 井上 壮大 “超臨界降着流の一般相対論的輻射磁気流体シミュレーション” W50/SS433 研究会 オンライン 2021年05月18日, 招待
3. 大須賀健, 高橋博之, 川島朋尚, 野村真理子, 嶺重慎, 朝比奈雄太, 内海碧人 “ブラックホール降着流・噴出流の研究～これまでの成果と今後の課題～” 高エネルギー現象で探る宇宙の多様性 I, 東大宇宙線研/オンライン, 2021年10月18-19日, 招待
4. 高橋博之, 大須賀健, 川島朋尚, 朝比奈雄太, 内海碧人, 井上壮大 “ブラックホール降着円盤の数値シミュレーション; 研究の今後と発展” ブラックホールジェット・降着円盤・円盤風研究会 2022, オンライン, 2022年1月24-25日, 招待
5. 川島朋尚, 秋山和徳, 大須賀健, 紀基樹, 高橋博之, 當真賢二, 中村雅徳, 森山小太郎, EHT Collaboration “一般相対論的輻射輸送計算で探るブラックホール降着流・ジェットの観測的特徴”, 超巨大ブラックホール研究会, オンライン, 2021年12月27-28日, 招待
6. 川島朋尚, 秋山和徳, 大須賀健, 紀基樹, 高橋博之, 當真賢二, 中村雅徳, 森山小太郎, EHT Collaboration “ブラックホール近傍のプラズマ降着流・噴出流のダイナミクスと観測的特徴”, 「自然科学における階層と全体」シンポジウム, 国立天文台/オンライン, 2022年1月6-7日, 招待

7. 大村匠, 町田真美, 松本洋介, 大須賀健, 松元亮治 “CANS+によるジェット伝播の高空間分解能二温度磁気流体数値シミュレーション” Japan Geoscience Union Meeting 2021 オンライン 2021-05-31/2021-06-05
8. 大須賀健 “BH 降着円盤とジェットと円盤風” 多重 AGN サイエンスワークショップ オンライン 2021-07-30
9. 井上壮大, 大須賀健, 高橋博之, 朝比奈雄太, 川島朋尚 “磁化中性子星への超臨界降着流によるアウトフロー ; 駆動機構とその温度について” 中性子星研究会 オンライン 2021-08-10/2021-08-12
10. 川島朋尚, 大須賀健, 高橋博之 “厳密な時間依存型の多波長・一般相対論的輻射輸送計算で探るブラックホールシャドウおよびスペクトルの時間変動” 日本天文学会秋季年会 オンライン 2021-09-13/2021-09-15
11. 五十嵐太一, 松元亮治, 加藤成晃, 高橋博之, 松本洋介, 大須賀健 “巨大ブラックホール降着流の輻射磁気流体シミュレーション: 熱不安定性による軟 X 線放射領域の振動” 日本天文学会秋季年会 オンライン 2021-09-13/2021-09-15
12. 芳岡尚悟, 嶺重慎, Ignacio Botella Lasaga, 大須賀健, 川島朋尚, 北木孝明 “大局的輻射流体計算による超臨界降着流からのアウトフローの構造解明” 日本天文学会秋季年会 オンライン 2021-09-13/2021-09-15
  - I. B. Lasaga, T. Kitaki, S. Mineshige, K. Ohsuga, T. Kawashima “Study on the outflow impact of SMBH seed at high-z through radiation hydrodynamic (RHD) simulations” 日本天文学会秋季年会 オンライン 2021-09-13/2021-09-15
13. 高橋幹弥, 大須賀健, 高橋芳太, 小川拓未, 梅村雅之 “測地線に沿った時間依存型一般相対論的輻射輸送コードの開発” 日本天文学会秋季年会 オンライン 2021-09-13/2021-09-15
14. 尾形絵梨花, 大須賀健, 矢島秀伸, 福島肇 “Super-Eddington 天体に対する dusty-gas の Hoyle-Lyttleton 降着 : 円盤面の傾きによる非軸対称性について” 日本天文学会秋季年会 オンライン 2021-09-13/2021-09-15
15. 武者野拓也, 小川拓未, 大須賀健, 矢島秀伸, 大向一行 “超臨界ブラックホール降着流におけるライマンアルファ輝線の輻射力の計算” 日本天文学会秋季年会 オンライン 2021-09-13/2021-09-15
16. 小川拓未, 朝比奈雄太, 大須賀健, 高橋博之 “Boltzmann 法によるカー・ブラックホール近傍の輻射輸送” 日本天文学会秋季年会 オンライン 2021-09-13/2021-09-15
17. 井上壮大, 大須賀健, 高橋博之, 朝比奈雄太 “磁化中性子星への超臨界降着流によるアウトフロー ; 駆動機構とその温度について” 日本天文学会秋季年会 オンライン 2021-09-13/2021-09-15
18. 五十嵐太一, 加藤成晃, 高橋博之, 大須賀健, 松本洋介, 松元亮治 “活動銀河中心核における軟 X 線放射領域振動の輻射磁気流体数値実験” 日本流体力学会年会 オンライン 2021-09-21/2021-09-23
19. 尾形絵梨花, 大須賀健, 矢島秀伸, 福島肇 “Super-Eddington 天体に対する dusty-gas での Hoyle-Lyttleton 降着” 天体形成研究会 2021 オンライン 2021-10-22/2021-10-23

20. 武者野拓也, 小川拓未, 大須賀健, 矢島秀伸, 大向一行 “超臨界ブラックホール降着流におけるライマンアルファ輝線の輻射力の計算” 天体形成研究会 2021 オンライン 2021-10-22/2021-10-23
21. 高橋幹弥, 大須賀健, 高橋芳太, 小川拓未, 梅村雅之, 朝比奈雄太 “測地線に沿った空間3次元一般相対論的輻射輸送コードの開発” 第34回理論懇シンポジウム オンライン 2021-12-22/2021-12-24
22. 内海碧人, 大須賀健, 高橋博之, 朝比奈雄太 “一般相対論的輻射磁気流体力学シミュレーションで探る超臨界降着円盤” 第34回理論懇シンポジウム オンライン 2021-12-22/2021-12-24
23. 尾形絵梨花, 大須賀健, 矢島秀伸, 福島肇 “Dusty-gas 内を浮遊するブラックホールへのガス降着過程; 超エディントン円盤の傾きと非軸対称構造” 第34回理論懇シンポジウム オンライン 2021-12-22/2021-12-24
24. 朝比奈雄太, 高橋博之, 大須賀健 “GR-RMHD コード INAZUMA によるブラックホール降着円盤シミュレーション: スピン依存性” 第34回理論懇シンポジウム オンライン 2021-12-22/2021-12-24
25. 荻原大樹, 川島朋尚, 大須賀健 “Constructing synthetic images of GRMHD models for AGN jets by applying the general relativistic radiative transfer code RAIKOU” 第34回理論懇シンポジウム オンライン 2021-12-22/2021-12-24
26. 野村真理子, 大須賀健, C. Done, 大向一行 “銀河中心核でのアウトフロー: ブラックホール進化への影響” 超巨大ブラックホール研究会: その実態・影響・起源の全貌解明に向けて オンライン 2021-12-27/2021-12-27
27. 大須賀健 “Overview: ブラックホール降着・噴出流の研究目的と計画” 超巨大ブラックホール研究会: その実態・影響・起源の全貌解明に向けて オンライン 2021-12-27/2021-12-27
28. 川島朋尚, 秋山和徳, 大須賀健, 紀基樹, 高橋博之, 當真賢二, 中村雅徳, 森山小太郎 “一般相対論的輻射輸送計算で探るブラックホール降着流・ジェットの見測的特徴: 現状と今後の展望” 超巨大ブラックホール研究会: その実態・影響・起源の全貌解明に向けて オンライン 2021-12-27/2021-12-27
29. 内海碧人, 大須賀健, 高橋博之, 朝比奈雄太 “一般相対論的輻射磁気流体計算を用いたカー・ブラックホール周りの超臨界降着流の研究” 令和3年度 国立天文台 CfCA ユーザーズミーティング オンライン 2022-1-18/2022-1-19
30. 内海碧人, 大須賀健, 高橋博之, 朝比奈雄太 “一般相対論的輻射磁気流体力学シミュレーションで探る超臨界降着円盤のブラックホールスピン依存性” ブラックホールジェット・降着円盤・円盤風研究会 2022 オンライン 2022-1-24/2022-1-25
31. 尾形絵梨花, 大須賀健, 福島肇, 矢島秀伸 “Dusty-gas 内を浮遊するブラックホール降着円盤への Bondi-Hoyle-Lyttleton 降着過程” ブラックホールジェット・降着円盤・円盤風研究会 2022 オンライン 2022-1-24/2022-1-25
32. 武者野拓也, 小川拓未, 大須賀健, 矢島秀伸, 大向一行 “ブラックホール超臨界降着流中の Ly $\alpha$  輻射力の計算” ブラックホールジェット・降着円盤・円盤風研究会 2022 オンライン 2022-1-24/2022-1-25

33. 朝比奈雄太, 高橋博之, 大須賀健 “輻射輸送方程式を解く一般相対論的輻射磁気流体コード INAZUMA によるブラックホール降着流計算” ブラックホールジェット・降着円盤・円盤風研究会 2022 オンライン 2022-1-24/2022-1-25
34. 井上壮大, 大須賀健, 高橋博之, 朝比奈雄太 “磁化中性子星への超臨界降着流によるアウトフローについて” ブラックホールジェット・降着円盤・円盤風研究会 2022 オンライン 2022-1-24/2022-1-25
35. 川島朋久, 大須賀健, 高橋博之, 人見拓也 “ブラックホール降着流・相対論的ジェットの多波長輻射特性と時間変動 ブラックホールジェット・降着円盤・円盤風研究会 2022 オンライン 2022-1-24/2022-1-25
36. 恒任優, 嶺重真, 川島朋尚, 大須賀健, 秋山和徳, 高橋博之 “ブラックホール付近の偏光画像から探る、活動銀河核 M87 におけるジェットー円盤構造” ブラックホールジェット・降着円盤・円盤風研究会 2022 オンライン 2022-1-24/2022-1-25
37. 芳岡尚悟, 嶺重真, 大須賀健, 川島朋尚, 北木孝明 “超臨界降着流からの大局的アウトフロー構造と輻射特性” ブラックホールジェット・降着円盤・円盤風研究会 2022 オンライン 2022-1-24/2022-1-25
38. 五十嵐太一, 高橋博之, 加藤成晃, 大須賀健, 松本洋介, 松元亮治 “サブエディントン降着する活動銀河核の輻射磁気流体シミュレーション” ブラックホールジェット・降着円盤・円盤風研究会 2022 オンライン 2022-1-24/2022-1-25
39. 内海碧人, 大須賀健, 高橋博之, 朝比奈雄太 “一般相対論的輻射磁気流体計算で探る、カー・ブラックホール周りの超臨界降着円盤” 日本天文学会春季年会 オンライン 2022-03-02/2022-03-05
40. 尾形絵梨花, 大須賀健, 福島肇, 矢島秀伸 “3次元輻射流体力学計算で探るブラックホール降着円盤への Bondi-Hoyle-Lyttleton 過程” 日本天文学会春季年会 オンライン 2022-03-02/2022-03-05
41. 芳岡尚悟, 嶺重慎, 大須賀健, 川島朋尚, 北木孝明 “超臨界降着流からのアウトフローの特性” 日本天文学会春季年会 オンライン 2022-03-02/2022-03-05
42. 高橋芳太, 梅村雅之, 大須賀健, 朝比奈雄太 “相対論的流体中での因果律を保った光子多重散乱効果” 日本天文学会春季年会 オンライン 2022-03-02/2022-03-05
43. 五十嵐太一, 松元亮治, 加藤成晃, 高橋博之, 松本洋介, 大須賀健 “逆コンプトン散乱による冷却を考慮したセイファート銀河における軟 X 線放射領域の輻射磁気流体シミュレーション” 日本天文学会春季年会 オンライン 2022-03-02/2022-03-05
44. 荻原大樹, 川島朋尚, 大須賀健 “Constructing synthetic images of GRMHD models for AGN jets by applying the general relativistic radiative transfer code RAIKOU” 日本天文学会春季年会 オンライン 2022-03-02/2022-03-05
45. 川島朋尚, 大須賀健, 高橋博之, 人見拓也 “歳差運動するブラックホール降着流と相対論的ジェットの放射特性” 日本天文学会春季年会 オンライン 2022-03-02/2022-03-05
46. 恒任優, 嶺重慎, 川島朋尚, 大須賀健, 秋山和徳, 高橋博之 “直線偏光・円偏光画像から探る、活動銀河核 M87 のジェットー円盤構造” 日本天文学会春季年会 オンライン 2022-03-02/2022-

03-05

47. 小川拓未, 朝比奈雄太, 大須賀健, 高橋博之, 川島朋尚 “Boltzmann 輻射輸送による Compton 冷却を考慮した RIAF 円盤の電子温度計算” 日本天文学会春季年会 オンライン 2022-03-02/2022-03-05
48. 内海碧人, 大須賀健, 高橋博之, 朝比奈雄太 “一般相対論的輻射磁気流体力学シミュレーションで探る超臨界降着円盤のブラックホールスピン依存性 2 ブラックホール磁気圏研究会 2022 大阪市立大/オンライン 2022-03-08/2022-03-10
49. 高橋幹弥, 大須賀健, 高橋芳太, 小川拓未, 梅村雅之, 朝比奈雄太 “測地線に沿った一般相対論的輻射輸送コードの開発と適用” ブラックホール磁気圏研究会 2022 大阪市立大/オンライン 2022-03-08/2022-03-10
50. 高橋芳太, 梅村雅之, 大須賀健, 朝比奈雄太 “相対論的流体中での因果律を保った光子多重散乱効果” ブラックホール磁気圏研究会 2023 大阪市立大/オンライン 2022-03-08/2022-03-10
51. 川島朋尚, 大須賀健, 高橋博之, 人見拓也, 浅野勝晃 “巨大ブラックホール降着流・噴出流の一般相対論的輻射および高エネルギーニュートリノ輸送計算” ブラックホール降着流ミニ研究報告会 千葉大学/オンライン 2022-03-28
52. 五十嵐太一, 松元亮治, 加藤成晃, 高橋博之, 松本洋介, 大須賀健 “コンプトン冷却を考慮した活動銀河中心核降着流の輻射磁気流体シミュレーション” ブラックホール降着流ミニ研究報告会 千葉大学/オンライン 2022-03-28
53. 川島朋尚, 浅野勝晃 “3次元一般相対論的磁気流体降着流からの高エネルギー・ニュートリノ放射” 日本天文学会春季年会 オンライン 2022-03-02/2022-03-05
54. 川島朋尚, 浅野勝晃, 大須賀健, 高橋博之 “一般相対論的磁気流体場における多波長輻射・ニュートリノ輸送計算” 高エネルギー宇宙物理学研究会 2021, オンライン 2021-11-24/2021-11-26
55. 川島朋尚, 浅野勝晃, 大須賀健, 高橋博之 “多波長・マルチメッセンジャー・ブラックホール天文学: ブラックホールシャドウから高エネルギーニュートリノまで” 高エネルギー現象で探る宇宙の多様性 I, 東京大学宇宙線研究所 2021-10-18/2021-10-19

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

査読論文

1. Particle Acceleration by Pickup Process Upstream of Relativistic Shocks, Masanori Iwamoto, Takanobu Amano, Yosuke Matsumoto, Shuichi Matsukiyo, Masahiro Hoshino, The Astrophysical Journal, 924, 108 (14pp), DOI: 10.3847/1538-4357/ac38aa, 2022 年 1 月
2. Electron Acceleration at Rippled Low-mach-number Shocks in High-beta Collisionless Cosmic Plasmas, Oleh Kobzar, Jacek Niemiec, Takanobu Amano, Masahiro Hoshino, Shuichi Matsukiyo, Yosuke Matsumoto, and Martin Pohl, The Astrophysical Journal, 919, 97 (12pp), DOI: 10.3847/1538-4357/ac1107, 2021 年 10 月

3. Mildly relativistic magnetized shocks in electron-ion plasmas - II. Particle acceleration and heating, Arianna Ligorini, Jacek Niemiec, Oleh Kobzar, Masanori Iwamoto, Artem Bohdan, Martin Pohl, Yosuke Matsumoto, Takanobu Amano, Shuichi Matsukiyo, Masahiro Hoshino, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 502, pp.5065-5074, DOI: 10.1093/mnras/stab220, 2021年4月

学会等発表

1. 宇宙線電子注入問題とシミュレーション・室内実験研究の最先端, 松本洋介, 実験室・宇宙プラズマにおける波動励起と粒子加速・加熱, 名古屋大学 ISEE 研究集会, オンライン, 2022年03月24日
2. 逆コンプトン散乱による冷却を考慮したセイファート銀河における軟 X 線放射領域の輻射磁気流体シミュレーション, 五十嵐太一, 松元亮治, 加藤成晃, 高橋博之, 松本洋介, 大須賀健, 日本天文学会 2022 年春季年会, 2022年3月2日~3月5日
3. サブエディントン降着する活動銀河核の輻射磁気流体シミュレーション, 五十嵐太一, 高橋博之, 加藤成晃, 大須賀健, 松本洋介, 松元亮治, ブラックホールジェット・降着円盤・円盤風研究会, 筑波大学, 2022年1月24日~1月25日
4. エクサスケール PIC シミュレーションで目指す天体現象の解明, 松本洋介, 2021(令和3)年度国立天文台 CfCA ユーザーズミーティング, 2022年1月18日~1月19日(招待講演)
5. 活動銀河核の輻射磁気流体シミュレーション, 五十嵐太一, 高橋博之, 大須賀健, 加藤成晃, 松本洋介, 松元亮治, 2021(令和3)年度国立天文台 CfCA ユーザーズミーティング, 2022年1月18日~1月19日
6. 大規模 PIC シミュレーションによる衝撃波粒子加速, 松本洋介, 「富岳で加速する素粒子・原子核・宇宙・惑星」シンポジウム, 2022年1月17日~1月18日
7. 宇宙線電子進化を考慮した折れ曲がりジェットの磁気流体シミュレーション, 大村匠, 浅野勝晃, 第34回理論懇シンポジウム, 2021年12月22日~12月24日
8. Head-tail 電波銀河での宇宙線再加速の可能性, 大村匠, 浅野勝晃, 高エネルギー宇宙物理学研究会 2021, 2021年11月24日~11月26日
9. Global MHD Simulations of Black Hole Accretion Flows, Ryoji Matsumoto, First International Conference on Computational Science & Data Analytics, 2021年11月21日~11月24日(招待講演)
10. Plasma first-principle simulations for elucidating particle accelerations in the exascale computing era, Yosuke Matsumoto, The 30th International Toki Conference on Plasma and Fusion Research, 2021年11月16日~11月19日(招待講演)
11. Stochastic Electron Acceleration in High-Mach-Number Collision-less Shocks, Yosuke Matsumoto, 63rd Annual Meeting of the APS Division of Plasma Physics, 2021年11月8日~11月12日
12. Radiation Magnetohydrodynamic Simulations of Soft X-ray Emitting Regions in Active Galactic Nuclei, Taichi Igarashi, Yoshiaki Kato, Hiroyuki R. Takahashi, Ken Ohsuga, Yosuke Matsumoto, Ryoji Matsumoto, IAU Symposium 362, The Predictive Power of

Computational Astrophysics, 2021年11月8日～11月12日

13. Development of a versatile PIC simulation code for plasma astrophysics, 松本洋介, 天野孝伸, 岩本昌倫, 日本地球電磁気・地球惑星圏学会講演会, 2021年11月3日
14. 磁気回転不安定性による降着円盤乱流の飽和条件の解明, 町田真美, 松元亮治, 第8回HPCIシステム利用研究課題 成果報告会, 2021年10月28日～10月29日
15. 非熱的粒子を考慮した磁気流体シミュレーション, 大村匠, 浅野勝晃, 高エネルギー現象で探る宇宙の多様性 I, 2021年10月18日～10月19日
16. Development of a PIC simulation code for elucidating cosmic-ray accelerations in the exa-scale computing era, Yosuke Matsumoto, 5th Asia Pacific Conference on Plasma Physics, Remote e-conference, 2021年9月26日～10月1日 (招待講演)
17. Oscillations of the Soft X-ray Emitting Region of AGN Accretion Disks, Taichi Igarashi, Yoshiaki Kato, Hiroyuki R. Takahashi, Ken Ohsuga, Yosuke Matsumoto, Ryoji Matsumoto, AAPPs-DPP2021 as on-line Conference, 2021年9月26日～10月1日
18. 活動銀河中心核における軟X線放射領域振動の輻射磁気流体数値実験, 五十嵐 太一, 加藤成晃, 高橋博之, 大須賀健, 松本洋介, 松元亮治, 日本流体力学会 年会 2021, 2021年9月21日～9月23日
19. 巨大ブラックホール降着流の輻射磁気流体シミュレーション: 熱不安定性による軟X線放射領域の振動, 五十嵐太一, 松元亮治, 加藤成晃, 高橋博之, 松本洋介, 大須賀健, 日本天文学会 2021年秋季年会, 2021年9月13日～9月15日
20. Global Three-Dimensional Radiation Magnetohydrodynamic Simulations of State Transitions in Black Hole Accretion Flows, Ryoji Matsumoto, Taichi Igarashi, Yoshiaki Kato, Hiroyuki, R. Takahashi, Ken Ohsuga, Yosuke Matsumoto, XXXII IUPAP Conference on Computational Physics (CCP2021), 2021年8月1日～8月5日
21. GEO-X ミッションに向けた磁気圏グローバルMHDシミュレーションモデルの開発, 松本洋介, 三好由純, 日本地球惑星科学連合 2021年大会, 2021年5月30日～6月3日
22. CANS+によるジェット伝搬の高空間分解能二温度磁気流体数値シミュレーション, 大村匠, 町田真美, 松本洋介, 大須賀健, 松元亮治, 日本地球惑星科学連合 2021年大会, 2021年5月30日～6月3日

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

査読論文

1. Stability of the protoneutron stars toward black hole formation, H. Sotani and K. Sumiyoshi, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society 507 (2021) 2766-2776, 2021/08/10
2. Observing supernova neutrino light curves with Super-Kamiokande: II. impact of nuclear equation of state, K. Nakazato, F. Nakanishi, M. Harada, Y. Koshio, Y. Suwa, K. Sumiyoshi,

- A. Harada, M. Mori, and R. A. Wendell, *Astrophysical Journal* 925 (2022) 98 (16 pages), 2022/01/20
3. Equation of state and neutrino transfer in supernovae and neutron stars, K. Sumiyoshi, *European Physical Journal A* 57 (2021) 331 (12 pages), 2021/12/15
  4. Deep Learning of the Eddington Tensor in the Core-collapse Supernova Simulation, A. Harada, S. Nishikawa, and S. Yamada, *The Astrophysical Journal*, 925, 117 (2022) (12 pages), 2022/1/31
  5. Prospects of fast flavor neutrino conversion in rotating core-collapse supernovae, A. Harada and H. Nagakura, *The Astrophysical Journal*, 924, 109 (2022) (6 pages), 2022/1/18
  6. Electron In-Medium Effects on Electron Captures of Neutron-Rich Nuclei in Stellar Core Collapse, Masaki Kato, Shun Furusawa, Katsuhiko Suzuki, *Journal of the Physical Society of Japan* 90(10) (2021) (2 pages), 2021/10/25
  7. Mori, K., Takiwaki, T., & Kotake, K., "Presupernova ultralight axionlike particles", *Physical Review D*, 105, 023020 (2022)
  8. Masada, Y., Takiwaki, T., & Kotake, K., "Convection and Dynamo in Newly Born Neutron Stars", *The Astrophysical Journal*, 924, 75 (2022)
  9. Sotani, H., Takiwaki, T., & Togashi, H., "Universal relation for supernova gravitational waves", *Physical Review D*, 104, 123009 (2021)
  10. Takiwaki, T., Kotake, K., & Foglizzo, T., "Insights into non-axisymmetric instabilities in three-dimensional rotating supernova models with neutrino and gravitational-wave signatures", *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 508, 966 (2021)
  11. Sasaki, H., & Takiwaki, T., "Neutrino-antineutrino oscillations induced by strong magnetic fields in dense matter", *Physical Review D*, 104, 023018 (2021)
  12. Shibagaki, S., Kuroda, T., Kotake, K., & Takiwaki, T., "Characteristic time variability of gravitational-wave and neutrino signals from three-dimensional simulations of non-rotating and rapidly rotating stellar core collapse", *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 502, 3066 (2021)

#### 学会等発表

1. 重力崩壊型超新星のボルツマン方程式によるニュートリノ輻射流体計算 (ポスター), 岩上わかな, 新学術「地下宇宙」2021年領域研究会, 2021/05/20, 国内
2. Core-Collapse Supernovae Simulations by Boltzmann-Hydro Code (口頭), 岩上わかな, Japan Geoscience Union Meeting 2021, 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, 2021/06/04, 国内
3. Dirac-Brueckner-Hartree-Fock 計算に基づいた状態方程式テーブルによる超新星および原始中性子星の数値シミュレーション (口頭), 住吉光介, 日本物理学会第 77 回年次大会, 2022/03/15, 国内
4. (my personal) Assessment of the Current Status of CCSN Research and Challenges Ahead (口頭), 山田章一, 第 34 回理論懇シンポジウム「挑戦的アイデアで広げる宇宙物理の可能

- 性」, 2021/12/22, 国内
5. Fast neutrino flavor conversions informed by multi-dimensional CCSN simulations (口頭), 長倉洋樹, INT Workshop INT-21-79W "New Directions in Neutrino Flavor Evolution in Astrophysical Systems", 2021/9/20-24, 国外
  6. Possible collective neutrino oscillation induced by rotation in a core-collapse supernova simulation with the Boltzmann neutrino transport (口頭), 原田了, INT Electronic Workshop 21-79W New Directions in Neutrino Flavor Evolution in Astrophysical Systems, 2021/9/20-24, 国外
  7. Influences of Nuclear EOS on Core-collapse Supernova Simulations by the Boltzmann-radiation-hydrodynamics (口頭), 原田了, Probe into core-collapse SuperNovae via Gravitational-Wave and neutrino signals (SNeGWv2021), 2021/12/1-2, 国内
  8. 富岳における3次元重力崩壊型超新星計算の進捗状況(口頭), 原田了, 「富岳で加速する素粒子・原子核・宇宙・惑星」シンポジウム, 2022/1/17-18, 国内
  9. 超新星爆発における回転誘起型ニュートリノ集団振動(口頭), 原田了, 第8回超新星ニュートリノ研究会, 2022/1/6-7, 国内
  10. 超新星爆発におけるニュートリノ集団振動(口頭), 原田了, 高エネルギー現象で探る宇宙の多様性 I, 2021/10/18-19, 国内
  11. ボルツマン輻射流体計算で探る超新星爆発における原子核組成の影響(口頭), 原田了, 日本天文学会 2021 年秋季年会, 2021/9/13-15, 国内
  12. ボルツマン輻射流体シミュレーションで探る超新星爆発での核物質状態方程式の役割(口頭), 原田了, ～中性子星の観測と理論～研究活性化ワークショップ 2021, 2021/8/10-12, 国内
  13. Nuclei in Core-Collapse Supernovae (口頭), 古澤峻, Network for Neutrinos, Nuclear Astrophysics, and Symmetries (N3AS), 2022/3/29, 国外
  14. ボルツマンニュートリノ輻射流体コードによる原始中性子星冷却計算及び今後のコード開発の展望(口頭), 赤穂龍一郎, 新学術「地下宇宙」第8回超新星ニュートリノ研究会, 2022/1/6-7, 国内

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

査読論文

1. H. Hotta, K. Kusano, Solar differential rotation reproduced with high-resolution simulation, *Nature Astronomy*, 5, 2021, 1100-1102, 10.1038/s41550-021-01459-0
2. Hiroko Miyahara, Fuyuki Tokanai, Toru Moriya, Mirei Takeyama, Hirohisa Sakurai, Motonari Ohyama, Kazuho Horiuchi, Hideyuki Hotta, Recurrent Large-Scale Solar Proton Events Before the Onset of the Wolf Grand Solar Minimum, 49, 2022, 2021GL097201, 10.1029/2021GL097201
3. Kanya Kusano et al., PSTEP: project for solar-terrestrial environment prediction, *Earth*,

- Planets and Space, 73, 2021, 159, 10.1186/s40623-021-01486-1
4. K. Takahata, H. Hotta, Y. Iida, T. Oba, Relationship between magnetic field properties and statistical flow using numerical simulation and magnetic feature tracking on solar photosphere, Monthly Notices of Royal Astronomical Society, 503, 2021, 3610-3616, 10.1093/mnras/stab710
  5. H. Iijima and S. Imada, A new broadening technique of the numerically unresolved solar transition region and its effect on the spectroscopic synthesis using coronal approximation, The Astrophysical Journal, 917, 2021, 65, 10.3847/1538-4357/ac07a5
  6. Y. Wang, H. Iijima, and T. Yokoyama, Fast magnetic wave could heat the solar low-beta chromosphere, The Astrophysical Journal Letters, 916, 2021, L10, 10.3847/2041-8213/ac10c7
  7. shii, M., "Space weather benchmarks on Japanese society", Earth, Planets and Space, vol. 73, no. 1, 2021. doi:10.1186/s40623-021-01420-5.
  8. Lin, P. H., Kusano, K., and Leka, K. D., "Eruptivity in Solar Flares: The Challenges of Magnetic Flux Ropes", The Astrophysical Journal, vol. 913, no. 2, 2021. doi:10.3847/1538-4357/abf3c1.
  9. Park, S.-H., Leka, K. D., and Kusano, K., "Magnetic Helicity Flux across Solar Active Region Photospheres. II. Association of Hemispheric Sign Preference with Flaring Activity during Solar Cycle 24", The Astrophysical Journal, vol. 911, no. 2, 2021. doi:10.3847/1538-4357/abea13.
  10. Washinoue, H. & Suzuki, T. K., "Coronal properties of low-mass Population III stars and the radiative feedback in the early universe", Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, Vol. 506, Issue 1, pp.1284-1294, 2021, DOI: 10.1093/mnras/stab1809

#### 学会等発表

1. H. Hotta, Numerical simulation of solar convection zone and magnetic field, The 30<sup>th</sup> International Toki Conference, 2021, 招待講演, 国際学会
2. H. Hotta, High resolution simulation of solar convection zone in Fugaku, AAPPs-DPP2021, 招待講演, 国際学会
3. H. Hotta, Radiation Magnetohydrodynamics Simulations of Sunspot Formation with Influence of Deep Thermal Convection, AOGS, 2021, 国際学会
4. H. Hotta, Successful reproduction of solar differential rotation in high-resolution calculation, AAS Solar Physics Division, 2021, 国際学会
5. H. Hotta, Correct reproduction of solar differential rotation in high-resolution simulation with Fugaku, 日本地球惑星科学連合大会, 2021, 招待講演
6. 堀田英之, 草野完也, 赤道加速・表面勾配層・極向き子午面還流を再現した大規模数値シミュレーション, 日本天文学会, 2021
7. 堀田英之, 太陽内部・ダイナモ計算の現状と今後, 「富岳で加速する素粒子・原子核・宇宙・惑

- 星」シンポジウム, 2021, 招待講演
8. 堀田英之, 富岳を用いた太陽対流層高解像度計算, 数値流体シンポジウム, 2021, 招待講演
  9. 堀田英之, Solar/Stellar dynamo, 2021年度 国立天文台の将来シンポジウム ~波長を超えて将来計画を考える~, 2021, 招待講演
  10. 堀田英之, 草野完也, 畠田遼太, 赤道加速を達成した超高解像度計算の解析結果, 日本天文学会, 2021
  11. 堀田英之, 鳥海森, Formation of super-strong magnetic field in a delta type sunspots pair in radiation magnetohydrodynamic simulations, 日本地球惑星科学連合大会, 2021
  12. 飯島陽久, 松本琢磨, 堀田英之, 今田晋亮, 対流層から太陽風までの包括的3次元輻射磁気流体シミュレーション, 2021年度太陽研連シンポジウム, 2022
  13. 飯島陽久, 松本琢磨, 堀田英之, 今田晋亮, 磁場形成・波動励起からコロナ加熱・太陽風加速までを追う包括的太陽大気モデル, 「富岳で加速する素粒子・原子核・宇宙・惑星」シンポジウム, 2022
  14. 飯島陽久, 太陽大気の輻射磁気流体モデルにおける現状と課題, 2021年度 ISEE 研究集会「太陽地球圏環境予測のためのモデル研究の展望」, 2022 (招待講演)
  15. 飯島陽久, 松本琢磨, 堀田英之, 今田晋亮, 対流層からコロナ・太陽風までの包括的3次元輻射磁気流体シミュレーション, 日本天文学会 2022年春季年会, 2022
  16. 飯島陽久, 松本琢磨, 堀田英之, 今田晋亮, 太陽対流層からコロナ・太陽風までを含んだ3次元輻射磁気流体シミュレーション, CfCA User 's Meeting, 2022
  17. 金子岳史, 草野完也, 堀田英之, 鳥海森, 太陽内部対流が黒点形成・進化へ与える影響, 日本天文学会 2021
  18. 金子岳史, 堀田英之, 草野完也, 黒点形成・進化に伴う太陽フレアの磁気流体シミュレーション, 日本地球惑星科学連合大会 2021
  19. Kanya Kusano, The onset mechanism and a physics-based prediction of large solar flares, The virtual DPG-Tagung (DPG Meeting) of the Matter and Cosmos Section (SMuK), 2021.8.30-9.3 2021.8.30, invited
  20. Kanya Kusano, Onset mechanism and a physics-based prediction of large solar flares and coronal mass ejections, 17<sup>th</sup> European Space Weather Week, 2021.10.25-10.29 2021.10.26, oral
  21. Kanya Kusano, Onset mechanism and a physics-based prediction of large solar flares, AGU Fall Meeting 2021, 2021.12.13-17 2021.12.14, oral
  22. Kanya Kusano, Physics-based prediction of large solar flares, 15<sup>TH</sup> QUADRENNIAL SOLAR-TERRESTRIAL PHYSICS SYMPOSIUM (STP-15), 2022.2.21-25 2022.2.23, invited
  23. Suzuki, T. K., Shimizu, K., Shoda, M., "Roles of  $\delta v_{\parallel,0}$  in Alfvénic wave-driven solar wind" Invited Talk at "Growth of Small Scales in the Corona and Solar Wind 2021(Online Lorentz center Workshop)" June 14-18, 2021, Lorentz Center, Leiden, Neitherland
  24. 畠田遼太, 堀田英之, 横山央明, 高磁気レイノルズ数での大規模磁場の成因に関する解析, 日本

天文学会 2021 秋

25. 鳶田遼太、堀田英之、横山央明、高磁気レイノルズ数での大規模磁場誘導と極性反転に関する解析、日本天文学会 2022 春

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

学会等発表

1. 櫻村 博基, 八代 尚, 西澤 誠也, 富田 浩文, 高木 征弘, 杉本 憲彦, 小郷原 一智, 黒田 剛史, 中島 健介, 石渡 正樹, 高橋 芳幸, 林 祥介. 全球非静力学金星大気モデルの開発：簡易金星計算. 日本地球惑星科学連合 2021 年大会, オンライン, 2021 年 6 月.
2. 櫻村 博基, 八代 尚, 西澤 誠也, 富田 浩文, 小郷原 一智, 黒田 剛史, 中島 健介, 石渡 正樹, 高橋 芳幸, 林 祥介. 全球非静力学火星大気大循環モデルの開発：地形あり計算. 日本惑星学会 2021 年秋季講演会, オンライン, 2021 年 9 月.
3. 櫻村 博基, 八代 尚, 西澤 誠也, 富田 浩文, 高木 征弘, 杉本 憲彦, 小郷原 一智, 黒田 剛史, 中島 健介, 石渡 正樹, 高橋 芳幸, 林 祥介. 全球非静力学金星大気モデルの開発. 日本流体力学会 年会 2021, オンライン, 2021 年 9 月.
4. 櫻村 博基, 八代 尚, 西澤 誠也, 富田 浩文, 高木 征弘, 杉本 憲彦, 小郷原 一智, 黒田 剛史, 中島 健介, 石渡 正樹, 高橋 芳幸, 林 祥介. 全球非静力学金星大気モデルの開発：簡易金星計算. 地球電磁気・地球惑星圏学会 第 150 回講演会, オンライン, 2021 年 10 月.
5. 櫻村 博基, 八代 尚, 西澤 誠也, 富田 浩文, 小郷原 一智, 黒田 剛史, 中島 健介, 石渡 正樹, 高橋 芳幸, 林 祥介. 全球非静力学火星大気大循環モデルの開発：地形あり計算. 日本気象学会 2021 年度秋季大会, 三重+オンライン, 2021 年 12 月.
6. 櫻村 博基, 八代 尚, 西澤 誠也, 富田 浩文, 小郷原 一智, 黒田 剛史, 中島 健介, 石渡 正樹, 高橋 芳幸, 林 祥介. 全球非静力学火星大気計算：地域性・季節性の解析. 「富岳で加速する素粒子・原子核・宇宙・惑星」シンポジウム, オンライン, 2022 年 1 月.

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

査読論文

1. Kameyama, M. (2021) Linear analysis on the onset of thermal convection of highly compressible fluids with variable viscosity and thermal conductivity in spherical geometry: Implications for the mantle convection of super-Earths, Earth, Planets and Space, 73, 167, 2021. <https://doi.org/10.1186/s40623-021-01499-w>
2. U, K., H. Hasumi, and M. Ogawa (2022) Effects of magma-generation and migration on the expansion and contraction history of the Moon. Earth Planets Space, in press. <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-1278795/v1>

学会等発表

1. 于 賢洋, 荷見 拓生, 小河 正基. 月の熱進化に及ぼすマグママイグレーションと放射性元素輸

- 送の影響. 日本地球惑星科学連合 2021 年大会, オンライン, 2021 年 6 月.
2. 荷見 拓生, 亀山 真典, 小河 正基. 三次元球殻モデルによる月内部マンツルの対流安定性についての数値実験. 日本地球惑星科学連合 2021 年大会, オンライン, 2021 年 6 月.
  3. 亀山 真典, 強い圧縮性を考慮したスーパー地球マンツル内熱対流の 2 次元数値シミュレーション. 日本地球惑星科学連合 2021 年大会, オンライン, 2021 年 6 月.
  4. 柳澤 孝寿, 亀山 真典, 小河 正基. 対流する固体のマンツルにおけるマグマの生成・移動・集中・再固結の三次元モデリング. 日本地球惑星科学連合 2021 年大会, オンライン, 2021 年 6 月.
  5. 于 賢洋, 荷見 拓生, 小河 正基. 月の熱進化に及ぼすマグママイグレーションと放射性元素輸送の影響. 日本惑星科学会 2021 年秋季講演会, オンライン, 2021 年 9 月.
  6. Miyagoshi, T., M. Kameyama, and M. Ogawa, Numerical studies of mantle convection in super-Earths, 国立天文台科学研究部惑星セミナー, オンライン, 2021 年 9 月.
  7. 亀山 真典, 惑星内部対流計算でのチューニング問題点, 富岳計算宇宙惑星・計算資源利用に関する課題内ワークショップ, オンライン, 2021 年 10 月.
  8. U, K., M. Ogawa, and H. Hasumi. The thermal history of the Moon caused by transport of heat and heat producing elements by migrating magma. AGU Fall Meeting 2021, オンライン, 2021 年 12 月.
  9. 于 賢洋, 荷見 拓生, 小河 正基. マグマが駆動する月の進化. 第 23 回惑星圏研究会, オンライン, 2022 年 2 月.

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

学会等発表

1. Enomoto, T. and K. Ogasawara. Semi-Lagrangian advection models for quasi-uniform nodes on the sphere. EGU General Assembly 2021, オンライン, 2021 年 4 月.
2. 佐々木 洋平, 竹広 真一, 石岡 圭一, 榎本 剛, 中島 健介, 林 祥介. 回転球殻熱対流により引き起こされる表面縞状構造への超粘性の影響. 日本地球惑星科学連合 2021 年大会, オンライン, 2021 年 6 月.
3. 佐々木 洋平, 竹広 真一, 石岡 圭一, 榎本 剛, 中島 健介, 林 祥介. 高速回転球殻内の熱対流により引き起こされる高緯度順行ジェット of the generation. 日本流体力学会 年会 2021, オンライン, 2021 年 9 月.
4. 小笠原 宏司, 榎本 剛. 計算量を削減したガウス型 RBF 浅水波モデルの性能評価実験. 京都大学防災研究所一般研究集会 2021K-05「変容する気候系における気象・気候災害の予測とその発現過程の理解」(研究代表者 山崎哲), オンライン, 2021 年 11 月.
5. 佐々木 洋平, 竹広 真一, 石岡 圭一, 榎本 剛, 中島 健介, 林 祥介. 高速回転球殻内の熱対流により生成される高緯度順行ジェット. 日本気象学会 2021 年度秋季大会, 三重+オンライン, 2021 年 12 月.
6. 小笠原 宏司, 榎本 剛. 疎行列解法を用いた RBF 浅水波モデル. 日本気象学会 2021 年度秋季大会, オンライン, 2021 年 12 月.

7. 小笠原 宏司, 榎本 剛. 計算量を削減した RBF 浅水波モデルの性能評価. 令和 3 年度京都大学防災研究所研究発表講演会, オンライン, 2022 年 2 月.