

【2】研究計画 適宜概念図を用いるなどして、わかりやすく記入してください。様式の変更・追加は不可です。**(1) 研究の概要及び研究の位置づけ** 本項目は1頁に収めてください。

- ・まず、研究課題名及び研究の概要を500字程度で記入してください。
- ・続けて、特別研究員として取り組む研究の位置づけについて、当該分野の状況や課題等の背景、並びに本研究計画の着想に至った経緯も含めて記入してください。

研究課題名：銀河形成におけるコード非依存なフィードバック物理の構築と理解

【研究の概要】

あとで記述。

【当該分野の状況】

銀河の形成と進化は、重力やガスの流れ、星形成、エネルギー注入など、多様な物理過程が複雑に絡み合って進行する現象である。特に、活動銀河核 (AGN) からのエネルギー放出は、大質量銀河において星形成を抑制し、周囲のガス (とくに銀河周辺ガス: CGM) を加熱・希薄化させるなど、構造形成の過程において決定的な役割を果たすことが知られている (Fabian 2012; Weinberger et al. 2017)。一方で、低質量銀河においては、主に超新星 (SN) 爆発によるエネルギー注入や周囲環境からの影響によって、星形成の効率や継続性が大きく左右される。このような AGN や SN からの影響を一般に「フィードバック」と呼ばれており、銀河の質量や構造、化学的性質を決定づける鍵となっている。近年では、複数の大規模宇宙論的シミュレーションを通じて、星形成率や銀河質量関係 (SHMR)、ガスの分布や温度構造といった観測指標との比較が行われてきた。しかし、いずれのモデルにおいても、フィードバックの効果を組み込んだ銀河の形成過程が再現されつつあるが、依然として質量スケールや赤方偏移によって予測精度に大きな差が残されており、いまだ完璧なフィードバックモデルは存在しない。また、同じ物理モデルを用いても、流体解法や粒子処理のアルゴリズムによって結果が異なることが知られている。これは、実際の物理の違いではなく、計算手法そのものの違いによって結果が左右されてしまうという、再現性の面で重大な問題をはらんでいる。(Scannapieco et al. 2012; Hopkins 2015)。

【当該分野の解決すべき課題】

本分野が現在直面している課題は

- (1): AGN/SN フィードバックの形式、注入タイミングや位置、降着率のスケーリング則などがコード間で大きく異なり、星形成率やガス分布に与える影響を明確に評価することが難しい。また、観測との整合を優先して物理的根拠に乏しいパラメータ調整がなされる例も多く、予測力と解釈性の両立が求められている。
- (2): SPH や AMR、moving mesh といった異なる手法に起因する数値的特性が、同じ物理モデルを使っても異なる結果を生み出す要因となっており、コード非依存的な物理モデルの設計と検証が必要とされる。
- (3): 高質量では AGN、低質量では SN が支配的となる一方、フィードバックが強すぎても弱すぎても観測と整合しないという問題がある。今後は、こうしたスケール依存性を踏まえた、より柔軟で物理的整合性の高いモデルの構築が重要である。

【本研究計画の着想に至った経緯】

これまで GADGET4-Osaka コードを用いた CROCODILE シミュレーションの解析を通じて、AGN フィードバックが大質量銀河の星形成抑制やガス加熱の影響を調査してきた。一方で、既存モデルでは特に高質量側での観測との再現性に乖離が生じることを明らかにした (Nishihama et al. 2025 in prep.)。また、同シミュレーションにおける低質量側では超新星フィードバックの強弱によって星形成が不安定となるなど、質量スケールに応じたモデル最適化の必要性を実感した。その過程で、数値コードによる物理表現の差異がシミュレーション結果に与える影響の大きさ、コード依存性の問題にも強く意識が向けるようになった。こうした問題意識のもと、CROCODILE の知見と AGORA の基盤を接続する絶好の機会であると判断し、本研究計画の着想に至った。

【2】研究計画（続き） 適宜概念図を用いるなどして、わかりやすく記入してください。様式の変更・追加は不可です。

(2) 研究目的・内容等 本項目は2頁に収めてください。

- ① 特別研究員として取り組む研究計画における研究目的、研究方法、研究内容について記入してください。
 - ② どのような計画で、何を、どこまで明らかにしようとするのか、特別研究員奨励費の応募区分（下記（※）参照）に応じて、年次計画を示し、具体的に記入してください。研究計画が想定通り進まなかった場合の対応方法があれば、あわせて記入してください。
 - ③ 研究の特色・独創的な点（先行研究等との比較、本研究の完成時に予想されるインパクト、将来の見通し等）にも触れて記入してください。
 - ④ 研究計画が所属研究室としての研究活動の一部と位置づけられる場合は申請者が担当する部分を明らかにしてください。
 - ⑤ 研究計画の期間中に受入研究機関と異なる研究機関（外国の研究機関等を含む。）において研究に従事することも計画している場合は、具体的に記入してください。
- （※）特別研究員奨励費の研究期間が3年の場合の応募総額は（A区分）が240万円以下、（B区分）が240万円超450万円以下（DC1のみ）。2年の場合は（A区分）が160万円以下、（B区分）が160万円超300万円以下。1年の場合は（A区分）が80万円以下、（B区分）が80万円超150万円以下。（B区分については研究計画に必要の場合のみ記入）

① 研究目的、研究方法、研究内容

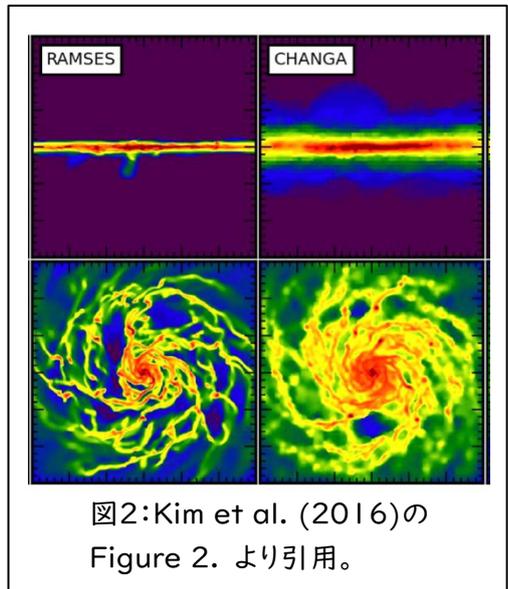
【研究目的】

サブグリッド物理の不確実性、コード依存性、スケール依存的なフィードバック効果といった課題解決の第一歩として、既存コード(GADGET4-Osaka)に搭載されているフィードバックモデルを新コード(AREPO)上で解析・検証し、より高質量側での再現に優れたフィードバックモデルの構築を図ることを本研究の目的とする。

【研究方法・内容】

これまで申請者は、GADGET4-Osaka コードを用いた宇宙論的シミュレーション「CROCODILE」の解析を通じて、銀河形成におけるフィードバック物理の理解に取り組んできた。特に、AGN フィードバックが大質量銀河における星形成の抑制および CGM 加熱に果たす役割に注目し、フィードバックの有無・強度が銀河の構造進化やブラックホール成長に与える影響を定量的に評価した。その結果、現在 CROCODILE に実装されている熱的 AGN フィードバックモデルは、高質量ハローでは銀河の星形成を抑制する点や CGM 形成について、ある程度成功している一方で、SHMR や星形成史などのいくつかの観測的統計量との間に乖離が残ることが明らかとなった (Nishihama et al. 2025, in prep.)。また、SN フィードバックによって主に制御される低質量銀河においても、星形成の再活性化やメタルリッチアウトフローの描写において、依然として過剰・過少の両極端が発生しうる状況であり、現行モデルは完璧とは言えない。

こうした課題をふまえ今後の研究では、CROCODILE で培った物理モデルの信頼性をさらに高めるため、別コードで同様の検証を行う。図2に示すように同一初期条件、同一モデルであっても計算コードが異なるだけで、現れる物理も異なる。そこで計算コードによる性質なのか、物理的なものなのかを分けて考えるために、同様に検証することは非常に重要である。そこで、より高精度な流体描写が可能な AREPO コードへと主な計算基盤を移行する。AREPO は moving mesh 方式を採用しており、GADGET4-Osaka の SPH 系に比べてガス混合・衝撃波・エネルギー注入の描写に優れ、特にフィードバックが複雑に作用する低密度領域 (CGM、IGM) において物理的に整合性のある進化を再現しやすい (Springel 2010)。このような理由から、AREPO を採用する。



項目 1: AREPO コードと GADGET4-Osaka コードの物理的・数値的な検証・比較を行い、CROCODILE に実装されているフィードバックモデルを、段階的に AREPO へ実装していく。

これにより、物理モデルを同一に保った上で、GADGET4 と AREPO という異なる流体解法における銀河形成過程の差異を定量的に評価し、コード非依存な物理モデル構築の足がかりとする。

現在 CROCODILE では、熱的 AGN フィードバック (thermal-only) が採用されているが、近年の研究 (e.g., Weinberger et al. 2017; Nelson et al. 2019) では、降着率や環境密度に応じて kinetic/thermal モードを切り替える 2 段階型のフィードバックが、SHMR や CGM 構造の観測との整合性を高める上で有効であることが示され

ている。このアプローチを導入することで、特に高質量ハローにおけるフィードバックの持続性や安定性を改善できると期待される。しかしながら、こうした2段階モデルでも未だ十分とは言いがたく、たとえば Nelson et al. (2019) や Hu et al. (2023) においては、フィードバックモードの切り替え閾値の選定やエネルギー蓄積方式が、星形成やブラックホール成長の非物理的振る舞いに繋がる可能性が指摘されている。観測・理論的示唆 (Merloni & Heinz 2008; Thomas et al. 2010) を踏まえて、これらの課題を踏まえ、3段階型のフィードバックの導入を行う。

STEP2: AGN フィードバックにおいて2段階型のフィードバックを導入し、quasarモード(thermal)、radioモード(kinetic)、およびそれらが混在する中間モードの3段階に分けたフィードバック様式へと拡張する。

また、銀河の構造進化、星形成履歴、ガス分布などの物理量を、既存コード(GADGET4-Osaka)と比較することで、基礎物理の再現性と数値挙動の安定性を検証する。これは AREPO が AGORA Paper II に正式参加していないという背景 (Roca-Fàbrega et al. 2024) を補完する意味でも重要なステップとなる。

本研究では、すでに A. Genina 氏および V. Springel 氏との協力のもと、AREPO のコード提供を受け、簡易的なテスト計算を行っている段階である。

② 研究の特色・独創的な点

[研究の特色]

本研究の特色は、数値宇宙論的シミュレーションにおける物理モデルの信頼性とコード依存性の問題という二つの根本課題に同時に取り組む点にある。GADGET4-Osaka ベースの CROCODILE で開発された金属量・赤方偏移依存の top-heavy IMF および機械的+熱的フィードバックモデルは、特に低質量銀河スケールにおいて高いスケラビリティと観測整合性を示しており、これを異なる流体スキームを採用する AREPO コード上で再現・検証するという試みは、先行研究に例を見ない挑戦である。

さらに本研究は、AGORA プロジェクトが提供する共通初期条件・解析パイプライン (Kim et al. 2014, 2016) を活用し、AREPO がこれまで参加してこなかった isolated disk galaxy テスト (Paper II) から CosmoRun、将来的には矮小銀河へと段階的に展開する構成を採っており、物理と数値の両面から再現性を高めるための系統的アプローチとしても特色を持つ。

[独創的な点]

独創的な点は、CROCODILE の高精度なフィードバック物理を AREPO へ段階的に導入し、質量スケールを問わず適用可能なサブグリッド物理モデルを構築するという構想にある。AREPO が高質量銀河には比較的安定して対応できる一方、矮小銀河スケールでは星形成が不安定になるなどの課題を抱えている点に着目し (Roca-Fàbrega et al. 2021, 2024)、その改善策として CROCODILE モデルの応用可能性を探る点は、本研究ならではの独自性である。さらに、GADGET と AREPO という異なるコード上で同一物理モデルの整合性を検証することにより、コード非依存性を備えた「次世代の汎用銀河進化モデル」への足がかりを築く点においても、学術的意義が大きいといえる。

④ 申請者が担当する部分・外部研究機関との連携

本研究において、GADGET4-Osaka/AREPO のコードの開発・改良、シミュレーションの実行、結果の解析から論文執筆まで、計画全般を申請者が担当する。

AREPO に関しては、Max Planck Institute for Astrophysics の A. Genina 氏、V. Springel 氏と連携しており、AGORA 対応ブランチを用いた初歩的なテスト計算も既に実施済みである。今後、技術的な調整や議論のために現地訪問も視野に入れている。また、CROCODILE の共同研究者である浙江大学の Y. Oku 氏とも密に連携し、フィードバック物理の汎用化に向けたモデル設計やパラメータ検証を進めていく。これらの国際的連携を通じて、信頼性の高いフィードバックモデルの構築を目指す。

【3】 人権の保護及び法令等の遵守への対応 本項目は1頁に収めてください。様式の変更・追加は不可です。

- ・本欄には、「【2】研究計画」を遂行するにあたって、相手方の同意・協力を必要とする研究、個人情報の取り扱いの配慮を必要とする研究、生命倫理・安全対策に対する取組を必要とする研究や安全保障貿易管理を必要とする研究など指針・法令等（国際共同研究を行う国・地域の指針・法令等を含む）に基づく手続が必要な研究が含まれている場合、講じる対策と措置を記入してください。
- ・例えば、個人情報を伴うアンケート調査・インタビュー調査・行動調査（個人履歴・映像を含む）、国内外の文化遺産の調査等、提供を受けた試料の使用、侵襲性を伴う研究、インフォームド・コンセントが必要な研究、ヒト遺伝子解析研究、遺伝子組換え実験、動物実験、機微技術に関わる研究など、研究機関内外の情報委員会や倫理委員会等における承認手続が必要となる調査・研究・実験などが対象となりますので手続の状況も具体的に記入してください。
- ・なお、該当しない場合には、その旨記入してください。

本研究は該当しない。

【4】研究遂行力の自己分析 本項目は2頁に収めてください。様式の変更・追加は不可です。

・日本学術振興会特別研究員制度は、我が国の学術研究の将来を担う創造性に富んだ研究者の養成・確保に資することを目的としています。この目的に鑑み、これまで携わった研究活動における経験などを踏まえ、研究遂行力について分析してください。

【課題整理と発想転換による問題解決能力】

申請者の研究遂行力の根幹には、複雑な課題を的確に整理し、本質を捉えたうえで、柔軟な発想により解決策を導き出す能力がある。特に学際的なテーマにおいては、複数分野の視点から問題を捉え直すことで、従来のアプローチでは見落とされがちな新たな切り口を発見することができる。例えば、学部2・3年次に参加した ANCO-project では、成層圏放射線観測とリアルタイム画像転送という二つの異なる目的が併存し、限られた搭載質量・電力の制約下で大胆な発想により LoRa 規格の可能性を示した(業績4, 12)。このとき、自身は通信技術についての知識が決定的に不足していると感じ、その分野に習熟している同期と協力して実装を果たした。これは 自身の能力を過信すること無く、課題を整理し、問題解決のための最適解を導き、それを実行したことにあると確信している。問題を共有し、コミュニケーションを通じ、得手不得手を補いながら行うことで困難な課題でも解決可能であることを学んだ。

本研究は数値宇宙論的シミュレーションにおいて「フィードバック物理の信頼性と汎用性をいかに担保するか」という、銀河形成・進化の分野で長年にわたって本質的に未解決であり続けてきた問題であり、研究過程では多数の困難が存在することが予想される。申請者はこの未解決問題に対して、他の誰よりも真摯に、そして粘り強く挑み続ける覚悟を持ち、必ずや実現可能な技術と理論のかたちに昇華させると確信している。

【高度な数値計算技術】

申請者は、学部時代から自主的に計算科学を学び、数値シミュレーションやデータ解析に必要なスキルを独自に習得してきた。その成果は、理学部学生向けに Python 講義を依頼されたこと(業績3)にも現れている。講義では潮汐力による気圧変化や高速フーリエ変換を題材とし、Python を用いたデータ処理・可視化の技術を体系的に伝えるとともに、自らの理解をさらに深めた。またこのとき申請者に依頼されたのは教育的観点からも受講生の関心を引き出す構成に工夫を凝らし、研究者として必要不可欠な「伝える力」を備えていると判断されたからと確信している。

また、成層圏におけるリアルタイム画像通信システムの構築(業績4, 13)では、LoRa 通信規格を活用した新たなアルゴリズムの開発・実装を行い、限られた帯域幅や環境ノイズといった技術的課題を乗り越える中で高い計算力を発揮した。これらの経験は、理論と実装の双方を兼ね備えた計算技術を育む基盤となり、並列計算、効率的なアルゴリズム設計、デバッグ・最適化技術といった応用的スキルにも繋がっており、宇宙論的流体シミュレーションの開発・解析でも大いに発揮している。

また、オープンソースプロジェクトへの参加を通じて、世界中の開発者と協働し、実践的な開発力とコードリーディング能力も培っている。研究の枠を越えた実装技術の深化は、今後の多様な応用にも資するものである。

【幅広い分野の専門知識・それを支える好奇心と行動力】

申請者は、理学や工学といった分野の枠を超えて、多岐にわたるテーマに強い興味を持ち、積極的に活動してきた。学部時代から複数のプロジェクト(業績2, 4, 13)に参加し、それぞれの分野で成果を上げてきたことは、その行動力の証左である。特に、好奇心を原動力とした迅速なアクションと、未知の分野に対しても臆せず飛び込む姿勢は、私の研究活動の原動力となっている。また、国際的な研究会にも積極的に参加し(業績8, 9, 11)、国内外の研究者と議論を重ねる中で、異なる立場や視点を理解し協働する姿勢を培ってきた。たとえば、著名な研究者である V. Springel との直接的な対話を通じて、研究の方向性を共有し、AREPO コードの使用許可を得た経験は、単なる研究者間の連携に留まらず、国際的な信頼関係構築の一端を担う重要な機会であった。また、自身の研究室には多くの外国人学生が在籍しており、国籍や文化的背景を問わず円滑にコミュニケーションを取る中で、多様な価値観に基づいた研究協働のスキルも自然と身につけている。さらに、自身の得手不得手を客観的に把握したうえで、他者との協働により弱点を補い合う柔軟なチーム運営能力も持ち合わせている。実際に複数のプロジェクトでは、メンバーの技術的・人的特性を活かしたタスク分担を提案し、円滑な遂行に貢献してきた(業績2, 4, 7)。

【研究業績一覧】

業績1: 2021年10月に埼玉大学より(団体プロジェクトとして)学生表彰を授与された

業績2: 足立恭果, 石崎大貴, 佐藤正騎, 須田亮介, 清本拓人, 西濱大将, 他10名

「オゾンと放射線の関わりを解き明かす—ANCO-project」大気球シンポジウム, 相模原, 2022年11月(口頭発

表、査読なし)

- 業績3: 2023年2月、計算科学に関する自身の知識と技術が評価され、講義「理学部学生にとっても役立つ『Python 講座』」を担当。潮汐力が気圧に与える影響を題材に、Python を用いたデータ解析と可視化の授業を実施。
- 業績4: 清本拓人, 大場翔吾, 西濱大将, 他 24 名
「成層圏における放射線量の測定と無線通信による画像のリアルタイム転送～ ANCO-project ～」大気球シンポジウム, 相模原, 2023年11月(口頭発表、査読なし)
- 業績5: 西濱大将, 奥裕理, 長峯健太郎, 豊内大輔
「銀河系中心におけるバブル構造の形成機構: 宇宙論的シミュレーションに基づく AGN フィードバックの解明」第 54 回天文・天体物理若手夏の学校, 三重, 2024年7月(ポスター発表、査読なし)
- 業績6: Daisuke Nishihama, Yuri Oku, Kentaro Nagamine, Daisuke Toyouchi
「Cosmological simulations reveal the effects of AGN feedback on bubble formation and chemical contamination」Galaxy-IGM Workshop, Hirosaki University, 2024年8月(口頭発表、査読なし)
- 業績7: 百々大貴, 前地祐記, 安齋俊晟, 粕田祥大, 永濱宏幸, 野見山裕也, 三宅咲緩, 柳沢夢生人, 荒川晴哉, 大井ヒカル, 大熊双葉, 奥沢太一, 加藤佑都, 金井美里, 河嶋奏, 久保かりん, 佐々木隼颯, 中野秀徳, 溝渕航太郎, 星光太郎, 林桃萌, 浜西克典, 利穂美咲希, 村松旺典, 吉田宣開, 宮崎剛, 西濱大将, 原田藍生
「成層圏での放射線検出とジンバル機構の実証—soffione-project—」大気球シンポジウム, 相模原, 2024年11月(口頭発表、査読なし)
- 業績8: Daisuke Nishihama, Yuri Oku, Julia Aizpún, Yuto Kuwayama, Kentaro Nagamine, Daisuke Toyouchi
「Influence of Thermal AGN feedback on Galaxy Evolution in CROCODILE Simulation」国際研究会
「Elucidating the Material Circulation in the Early Universe」, 東京大学, 2025年3月(口頭発表、査読なし)
- 業績9: Daisuke Nishihama, Yuri Oku, Julia Aizpún, Yuto Kuwayama, Kentaro Nagamine, Daisuke Toyouchi
「Influence of Thermal AGN feedback on Galaxy Evolution in CROCODILE Simulation」SPR+ILR joint workshop, Tokyo, 2025年3月(口頭発表、査読なし)
- 業績10: 西濱大将, 奥裕理, 長峯健太郎, 豊内大輔
「宇宙論流体シミュレーション CROCODILE による熱的 AGN フィードバックの銀河進化への影響」日本天文学会 2025年春季年会, 水戸, 2025年3月(口頭発表、査読なし)
- 業績11: Daisuke Nishihama, Yuri Oku, Julia Aizpún, Yuto Kuwayama, Kentaro Nagamine, Daisuke Toyouchi
「Influence of Thermal AGN feedback on Galaxy Evolution in CROCODILE Simulation + AREPO pre-result」the International Workshop on Galaxy Formation + AGORA in Asia 2025, Osaka, 2025年5月予定(口頭発表、査読なし)
- 業績12: Daisuke Nishihama, Yuri Oku, Julia Aizpún, Yuto Kuwayama, Kentaro Nagamine, Daisuke Toyouchi
「Influence of Thermal AGN feedback on Galaxy Evolution in CROCODILE Simulation」
※ PASJ に 2025 年投稿予定
- 業績13: Daisuke Nishihama, Kotaro Hoshi, Yu Ebisawa, Shogo Oba, Masaki Sato, Ryuichi Hodoshima
「ANCO-project: Transferring images in real-time via LoRa wireless communication in the Stratosphere」
※ ISTS に 2025 年投稿予定