

【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：●●●●●

【研究の概要】

あとで記述。

【当該分野の状況】

銀河形成・進化の理論研究において、宇宙論的シミュレーションは、物理過程の相互作用を包括的に再現し、観測との整合性を定量的に評価するための不可欠な手法である。特に、活動銀河核 (AGN) からのフィードバックは、大質量銀河や銀河団における星形成抑制、CGM の加熱、冷却流の遮断といったスケールで、構造形成を制御する鍵となる物理過程とされている (Fabian 2012; Weinberger et al.

2017)。一方で、低質量銀河においても、超新星 (SN) フィードバックや環境効果が支配的な役割を果たすことが示されており、こうした銀河では、星形成が極端にエピソード的になりやすく、バリオン保持率のばらつきや金属拡散の非一様性が顕著である (Governato et al. 2010; Tollet et al. 2016)。近年では、IllustrisTNG、EAGLE、SIMBA、FIRE、NIHAO、Horizon といった大規模シミュレーション群が観測データとの比較を通じて、フィードバックモデルの妥当性検証を進めているが、依然として 質量スケールや時代 (赤方偏移) による再現性に課題が残されている。

このような背景のもと、シミュレーション結果の信頼性と再現性を高めるために、用いる 数値コードの違いや物理モデルの自由度が結果に与える影響を分離し、コード横断的な基盤の上で統一的な物理モデルを構築する必要がある。その一環として、AGORA プロジェクト (Kim et al. 2014) は、共通の初期条件、サブグリッドモデル、解析パイプラインのもとで、複数コード (GADGET, AREPO, RAMSES, GIZMO, ENZO など) によるシミュレーションを比較する枠組みを整備し、理想化円盤銀河 (Paper II)、宇宙論的ズームイン (Paper III・IV)、衛星銀河 (Paper V)、今後予定される矮小銀河といったスケール横断的検証を通じて、物理モデルの精緻化と数値的不確かさの低減を目指している。

【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)サブグリッドモデルの自由度による予測の不確実性、(2)数値コード特有の実装差による物理解釈のばらつき、(3)質量スケールに応じた最適なフィードバックモデルの構築である。

- (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。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。AREPO コードについては isolated disk galaxy テストを経ずに宇宙論的ズームインに投入されており、信頼性の観点からは基礎検証が十分とは言えない。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、CROCODILEを含む他のフィードバックモデルを AREPO コード上で検証し、**より最適な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]

以下の3つの項目に従って研究を実施する。

項目1：金属量・赤方偏移依存の星形成初期質量関数や機械的・熱的2成分型スーパーバブルSNフィードバックおよび熱的AGNフィードバックモデル（Oku & Nagamine 2024）を導入済みのCROCODILEシミュレーションが与える高質量銀河への影響を解析する。（Nishihama et al. 2025 in prep.）

すでに項目1はほぼ完了段階にある。

今後、申請者はV. Springelらが開発したAREPOコードへの移行を進める計画である。AREPOはmoving-mesh方式を採用しており、ラグランジュ的な質量追跡とオイラー的な解像力の両立を実現する。これにより、衝撃やガス混合、ガスの出入りといった現象に対して物理的により忠実な描写が可能となり、AGNフィードバックによるバリオン循環の定量的評価に適している。しかしながら、現時点でAREPOはAGORAの理想化されたisolated disk galaxyテスト（Paper II）を経ておらず、これまでCosmoRun（Paper III/IV）からの直接的な参加が行われてきた。そのため、AGNフィードバックのような高度な物理モデルを搭載する前提として、基本的な銀河進化モデルの妥当性や数値精度についての検証が不十分であるという懸念がある。そのため**項目2**は、以下の通り設定する。

項目2：A. Genina氏およびV. Springel氏と連携し、AGORAプロジェクトの理想化円盤銀河シミュレーション（Paper II）においてAREPOコードの動作検証と基礎的物理挙動の再現性評価を共同で行う。

項目1, 2によって、SN/AGNフィードバックが銀河進化に及ぼす影響の物理的理解と、数値コードによる表現の差異が結果に与える影響の両面から、現在のシミュレーションが抱える不確実性を明確に切り分けることが可能になる。特に、GADGETとAREPOという異なる数値スキームにおいて、同一の初期条件下で銀河構造や星形成活動がどのように再現されるかを比較・検証することで、サブグリッドモデルの物理的妥当性とコード非依存性に関する重要な知見が得られると期待され、質量スケールを問わず安定して機能するスケーラブルなフィードバックモデルの構築が可能になる。そこで項目3については以下の通りである。

項目3：CROCODILEへの

また本研究では大型並列計算機 SQUID(大阪大学)を使用する。

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

[AREPOの円盤銀河再現性の評価：採用前～1年目前半]

AGORAプロジェクト（Kim et al. 2014, 2016）の理想化円盤銀河シミュレーション（Paper II）を用い、AREPOコードの物理挙動と再現性の評価を進める。AGORA Paper IIではMilky Way(MW)スケールの円盤銀河を対象に、星形成・フィードバックの有無による進化の違いや、コード間での星形成率・ISM構造・回転曲線などの比較が行わ

れている。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 AGORA ブランチの提供を受け、簡易的なテスト計算を行っている段階である。今後は Paper II の条件に則った本格的な再現実験を実施する予定である。また、同条件での GADGET4-Osaka コードによる再計算も行い、解析パイプラインを統一することで、数値スキームの違いが物理量に与える影響を丁寧に評価する。

[低質量銀河におけるモデル改善：1年目後半～3年目]

AREPO に現在搭載されている熱的フィードバックモデルは Milky Way スケールに最適化されており、低質量銀河や高解像度ズームインでは過剰な加熱や星形成の抑制が生じやすい (Roca-Fàbrega et al. 2021)。さらに、現行モデルは高質量銀河には一定の整合性を示す一方、矮小銀河スケールではガスの早期喪失など、モデルの破綻が懸念される (Roca-Fàbrega et al. 2024)。一方、CROCODILE では金属量・赤方偏移依存の top-heavy IMF と機械的+熱的 SN フィードバックにより、低質量銀河でも星形成率や質量-金属量関係を観測と良好に一致させており、高いスケラビリティと安定性を示している (Oku & Nagamine 2024)。こうした CROCODILE の物理モデルを AREPO へ段階的に導入していき、その影響を解析しさらに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し、導入する。

③ 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