

【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：銀河進化シミュレーションの信頼向上に向けた数値手法と物理モデルの分離検証

【研究の概要】

銀河がどのように形成・進化してきたのかという問いは、宇宙の構造と歴史を理解するうえで中心的なテーマである。近年、JWSTによる高赤方偏移銀河の観測をはじめ、これまでにない高精度なデータが次々と得られつつある。こうした観測成果に理論を接続するためには、物理的に妥当で信頼性の高い宇宙論的流体シミュレーションが不可欠である。しかし、**同じ天体の進化を再現しようとしても、使用する数値コード（解法の違い）によって得られる結果が大きく異なる場合があり、その差が物理モデルに由来するのか、数値手法に由来するのかが判然としないという根本的な課題がある。**

本研究では、SPH法を用いたGADGET4コードと、移動メッシュ法を用いるAREPOコードを用い、同一の物理条件・初期条件下で銀河形成シミュレーションを実行し、その差異を系統的に比較する。加えて、大阪大学が開発した銀河進化モデルを搭載したCROCODILEをAREPOにも適用し、観測との整合性を評価し、**物理モデルの妥当性と数値コードの信頼性を両立させたシミュレーション基盤の確立を目指す。**

【当該分野の状況】

銀河進化の理論研究は、これまで宇宙論的シミュレーションの急速な発展とともに進められてきた。現代では、星形成、ガス流入・流出、AGN活動、金属拡散など、多様な物理過程を扱えるサブグリッドモデルが多数開発され、それらを組み込んだ大規模シミュレーションが主流となっている。一方で、**それぞれのシミュレーションが独自の初期条件、数値解法、解析手法を用いていたため、得られる結果を一貫して比較・検証することが難しいという問題も浮き彫りとなった。**これを受けて発足したのが、**AGORAプロジェクト**である。このプロジェクトでは、初期条件・物理モデル・解析法を共通化した上で複数コードを比較し、「**数値コードの違いによって結果がどう変わるのか**」を明らかにしようという国際的な取り組みが行われている。

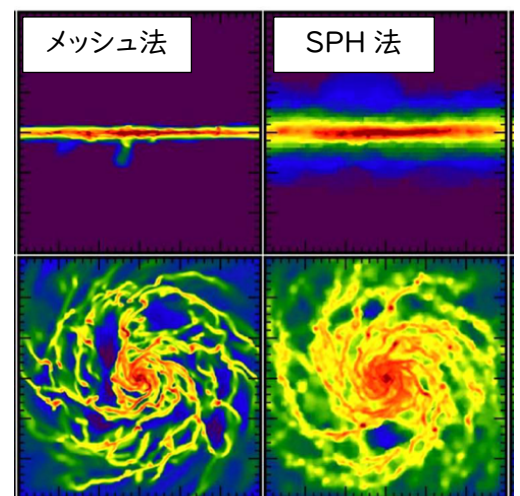


図1：数値コードによって物理が異なる図
[Kim et al. (2016)のFigure 2. より引用]

【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. 観測と合わない原因がモデルの誤りか、コード固有の現象か判別できないこと。
2. SPH法GADGET4では急峻な密度勾配や乱流の表現精度が低く、特定現象の再現が不十分。
3. 移動メッシュ法AREPOは有望であるが、AGORAでの系統的な比較評価が未完了。
4. JWSTが大質量星優勢・低金属環境を正確に再現するには、物理モデルと数値手法双方の検証が必須。

【本研究計画の着想に至った経緯】

申請者は、CROCODILEを用いて、大質量銀河における星形成史や星・ハロー質量関係(SHMR)を検証した。その結果、従来の半解析的モデル(Behroozi et al. 2013)と比較して、星形成抑制が不十分となる傾向が確認された。しかし同時に、これが物理モデルの問題なのか、数値コード(SPH法)の表現限界に起因するのか判断できないという課題にも直面した。ちょうどその頃、申請者は国際比較プロジェクトAGORAに参画し、数値コード間の比較という視点に触れたことで、「コードの違いと物理モデルの違いを切り分ける」という本研究の着想に至った。**現在、AREPOコード提供者であるV. Springel氏およびA. Genina氏と連携し、実際にテスト解析も開始している。**

【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。

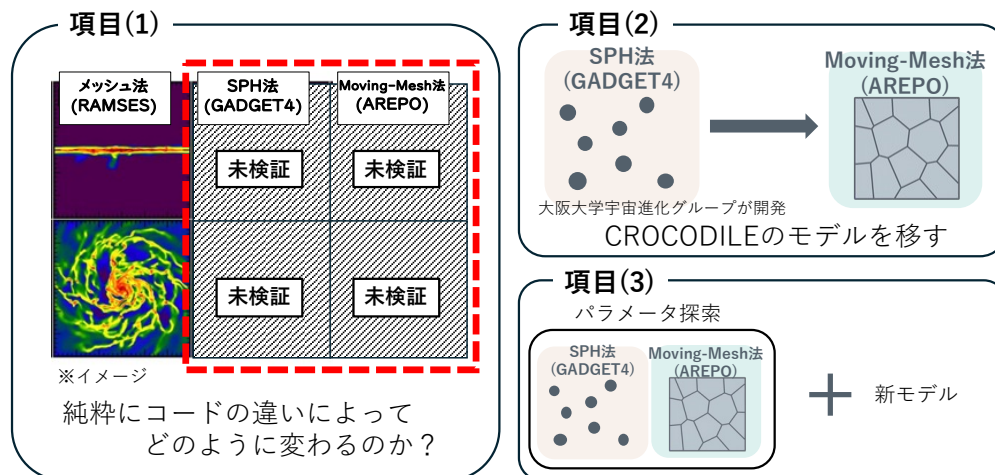
- ① 特別研究員として取り組む研究計画における研究目的、研究方法、研究内容について記入してください。
 - ② どのような計画で、何を、どこまで明らかにしようとするのか、特別研究員奨励費の応募区分（下記※）参照）に応じて、年次計画を示し、具体的に記入してください。研究計画が想定通り進まなかった場合の対応方法があれば、あわせて記入してください。
 - ③ 研究の特色・独創的な点（先行研究等との比較、本研究の完成時に予想されるインパクト、将来の見通し等）にも触れて記入してください。
 - ④ 研究計画が所属研究室としての研究活動の一部と位置づけられる場合は申請者が担当する部分を明らかにしてください。
 - 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な場合のみ記入）

① 研究目的、研究方法、研究内容

【研究目的】

銀河進化モデルの信頼性を高めるためには、物理モデルの妥当性だけでなく、それを再現する数値コードの影響を明確に把握することが不可欠である。本研究の目的は、異なる数値手法（SPH法とMoving-Mesh法）を比較することで、数値的な効果と物理的な現象を切り分け、観測と理論をつなぐシミュレーション基盤を確立することである。

【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：計算コードの影響をその他のコードを含めてGADGET4とAREPOの検証を行う

項目2：CROCODILEに搭載されているモデルをAREPOコードに移す

項目3：GADGET4/AREPOにて適切なパラメータ探索を行い、新モデルの導入を行う。

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

【項目1：採用前～1年目前半】

移動メッシュ法を用いるAREPOは、従来SPH法ベースのGADGETシリーズが抱える密度不連続面や流体追従性の課題を克服する次世代コードとして注目されている。しかし、AGORAプロジェクトにおいては

GADGET4およびAREPOの検証は不十分のままである。

本研究では、AGORAプロジェクトの一環として、共通初期条件・物理モデル・解析手法を適用し、**GADGET4とAREPOを同一環境下で同時に走らせ、数値的差異を可視化・定量化**する。具体的には、Kim et al. (2014, 2016) が示した比較例に続き、GADGET4とAREPO両者の密度分布、ショック構造、ガス流出、星形成効率などを統一指標で評価する予定である。

またすでにA. Genina氏やV. Springel氏との共同研究体制を構築し、非公開AREPOコードによる初歩的なテスト計算は完了している。**今後は必要に応じて開発者との現地技術協議（海外訪問）を実施すること**で、1年目前半までにGADGET4とAREPOの包括的な数値検証結果を得ることを目指す。

[項目2：1年目後半～2年目]

CROCODILE は、JWST などの最新観測を反映した大質量星優勢の IMF や金属依存の星形成率、AGN フィードバックを搭載しており、従来モデルを超えて初期宇宙の銀河形成をリアルに再現可能である (Oku & Nagamine 2024)。しかし、申請者の解析では、半経験的モデル／アブンダンス・マッチングを用いた先行研究 (Behroozi et al. 2013; Wechsler & Hearin 2019) と比較した際、**大質量銀河における星質量・ハロー質量比 (SHMR) や星形成史から、星形成抑制が不十分である可能性が示唆された** (Nishihama et al. 2025, in prep.)。本計画では、この CROCODILE モデルを AREPO に実装し、GADGET4 との結果比較を通じて数値手法由来の差異を抽出するとともに、物理モデルの妥当性を再評価する。

[項目3：3年目]

AREPO に移植した CROCODILE のモデルと GADGET4 結果の両方を用い、フィードバック強度、星形成効率、金属拡散係数など主要パラメータを幅広く変化させた一連のシミュレーションを実行する。

CROCODILE では大質量銀河における星形成抑制が先行研究 (Behroozi et al. 2013) に比べ、不十分となる傾向が確認された。そこで近年の研究 (e.g., Weinberger et al. 2017; Nelson et al. 2019) で大質量銀河において、星形成質量関数や星形成史や星・ハロー質量関係 (SHMR) において一定の成果を出しているモデルを導入・議論し、さらなる改良を行う予定である。

本研究の実行には、大型並列計算機 SQUID (大阪大学) を使用する。SQUID の汎用 CPU ノードは合計 1,520 台で構成されており、各ノードは 2 ソケット×38 コアとメモリ 256 GB を備えている。この CPU ノード群だけで約 8.871 PFLOPS の演算能力と約 389 TB のメモリ容量があることになる。実際に CROCODILE (GADGET4) を MPI ランク 4,096 で 64 ノード使用して実行したところ、ジョブ全体のメモリ使用量は約 12 TB にとどまり、1 ノードあたりに換算すると約 192 GB であった。これは各ノードの 256 GB に対して約 64 GB の余裕があることを意味し、CPU コア数 (全コア約 115,520) に対しても 4,096 ランクはわずか 3.5% ほどの利用率である。したがって、**SQUID にて宇宙論的シミュレーション CROCODILE などを十分なメモリ・コアリソースを持って余裕をもって実行できる。**

③ 研究の特色・独創的な点

[研究の特色]

- 物理モデルの妥当性を論じる前提として、数値コードの影響を評価することは必須でありながら、**従来体系的に扱われてこなかった「SPH 法と Moving-Mesh 法がもたらす結果の差異」**を、AGORA の共通基準下で徹底的に比較・評価し、その他のコードとの比較・評価を可能にする。
- JWST 観測に基づく大質量星優勢 IMF、金属依存星形成率、AGN フィードバックを組み込んだ CROCODILE モデルを GADGET4 と AREPO 双方に展開し、その物理再現性を直接検証する。

[独創的な点]

- 国際的に広く採用されている AREPO コードと、大阪大学発の CROCODILE モデルを、同一研究者が一貫して扱える体制を構築。**大規模かつ国際的な AGORA プロジェクトに参加し、それを通じ両者を融合させた比較研究を行うことで、新たな解析基盤づくりに貢献する。**
- 数値手法の特性を切り分けたうえで、最適化されたサブグリッド物理モデルを構築する。

④ 申請者が担当する部分

本研究において、GADGET4/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。

【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)。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)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っており、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)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, 伊勢, 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, 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, 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)