



アドバンス・シミュレーション・ニュース

Vol.4, No.3 (2026 年 9 月 18 日発行)

第 3 回アドバンス・シミュレーション・セミナー2026 開催報告

東京大学 大学院理学系研究科 天文学専攻

教授 藤井 通子 様

「天の川銀河を星一つ一つまで再現したシミュレーション」

アドバンス・シミュレーション・ニュースは、アドバンスソフト株式会社が 2021 年度から、我が国における計算科学技術の振興を目的として、幅広い分野の最先端研究を対象として開催している「アドバンス・シミュレーション・セミナー」の開催報告と今後の開催予定をご案内するサービスです。

本セミナーで紹介される多種多様な最先端研究をきっかけに、企業の研究開発を担う技術者の方が新たな視点を持つこと、最先端研究を産業に応用する起点となること、長期的には計算科学シミュレーション分野の裾野が広がること等を期待しています。

開催概要

- 日時：2026 年 7 月 17 日（金）14:00～15:30
- 開催方法：オンラインセミナー（Zoom にて開催）
- 主催：アドバンスソフト株式会社 出版事業部
- 講演概要

夜空に輝く天の川は、円盤銀河と呼ばれる円盤状に集まる星々です。太陽もその中の星の一つであり、我々は天の川銀河の円盤の中にいるため、常に円盤を横からしか見ることができません。

しかし、様々な観測から、天の川銀河には、渦巻状の腕や、超新星爆発によって作られたバブル、円盤上方に吹き上げられる高温のガスなど、豊かな構造が知られています。数値シミュレーションによって、天の川銀河を丸ごと再現することで、これらの現象の関係を明らかにしていくことができます。そのために、「富岳」や GPU スパコン、AI を用いて、世界最大規模のシミュレーションを行う取り組みについてお話しします。



本稿は、2026 年 7 月 17 日に開催した「アドバンス・シミュレーション・セミナー2026」において、藤井 通子 様にご講演いただいた内容をアドバンスソフトがまとめたものです。

ご講演内容

1. 講演内容

1.1. 天の川銀河の構造とシミュレーション

天文学における最先端の研究手法の一つが、スーパーコンピュータを用いた大規模数値シミュレーションである。私たちが暮らす天の川銀河は、宇宙に無数に存在する銀河の一つであり、中心に棒状構造と巨大ブラックホールを持ち、そこから渦巻き状の腕が伸びる棒渦巻き銀河に分類される。太陽系は中心から約 2 万 6000 光年離れた円盤内部に位置している。夜空に見える帯状の天の川は、この薄い円盤を内部から横向きに観察しているために生じる現象である。

天の川銀河の主要な構成要素は、目に見える「星」、主に水素からなる「星間ガス」、そして広大な重力源として銀河を取り囲む「ダークマター」の 3 つである。質量において最も支配的なのはダークマターであり、銀河円盤の約 100 倍もの質量を有している。

銀河全体は常に回転運動を行っており、太陽の位

置では秒速約 200 キロメートルという猛スピードで銀河中心の周りを周回している。しかし、銀河のスケールがあまりにも巨大であるため、1 周するには数億年という果てしない時間がかかる。人間の一生や歴史の尺度に比べて動きが極めて緩やかであり、夜空の銀河の形が短期間で変化するのを直接観測することは不可能である。そこで、コンピュータの中に天の川銀河の物理モデルを構築し、時間を進めて進化過程や運動を追跡する数値シミュレーションが不可欠となる。観測で得られる写真は宇宙進化における特定のスナップショットに過ぎないが、シミュレーションを実行することで、過去から現在、そして未来に至る銀河のダイナミクスを連続的に理解することが可能となる。

1.2. 粒子法による天体計算の基礎

天体シミュレーションの手法は、空間を格子状に分割して計算するグリッド法と、天体やガスを粒子の集まりとして表現する粒子法に大別される。本研究で用いられているのは粒子法である。この手法では、個々の星を 1 つの粒子として扱うほか、ダークマターや星間ガスも粒子の集合としてモデル化する。特に星間ガスの流体力学的挙動には、汎用性の高い SPH 法が採用される。

粒子法における時間発展の原理はシンプルである。各粒子が持つ情報は、質量・位置・速度の 3 つである。各タイムステップにおいて、万有引力の法則に基づき粒子間に働く重力を計算し、加速度を算出して微小時間後の速度と位置を更新する。この処理を何度も繰り返すことで、粒子系全体の運動を描き出す。

しかし、この裏には膨大な計算コストが存在する。2 粒子間の重力計算は 1 ペアで済むが、3 粒子で 3 ペア、4 粒子で 6 ペアとなり、計算コストは粒子数 N の 2 乗 ($O(N^2)$) で増加する。天の川銀河の円盤部だけでも約 1,000 億 (10^{11}) 個の星が存在するため、一粒子ずつ計算するには莫大な処理能力が必要となる。この課題を解決するため、1,000CPU コア以上を束ねる大規模スパコンや、近年の主流である GPU クラスタを活用した並列計算が不可欠となる。GPU を用いた天文計算は 2000 年代前半から進められており、2014 年には当時の最高峰 GPU クラスタ「タイタン」を用いたモデルが、ハイパフォーマンス・コンピューティング分野の最高権威であるゴードン・ベル賞のファイナリストに選出されるなど、着実な技術的進化を遂げてきた。

1.3. 大規模並列計算における課題

スパコンを用いて星を一つ一つ再現するレベルのシミュレーションを実行する際、大きな難所となるのが広大なマルチスケール性である。

天の川銀河を対象とする計算では、空間的にも時間的にも極めて大きな桁数のギャップが存在する。空間スケールでは、銀河全体を包むダークマターハローの直径が約 100 万 (10^6) 光年であるのに対し、星の誕生や超新星爆発の波及といった局所的現象のスケールは数十から数百光年程度であり、5 桁以上の開きがある。時間スケールにおいても、銀河全体の回転周期である数億年に対し、超新星爆発が周囲へ及

ぶ時間は数百年から数千年程度であり、5 桁から 6 桁もの格差が存在する。

このようなマルチスケール現象を多数の計算ノード（「富岳」は約 16 万ノード、米「フロンティア」は 3 万 GPU 以上）で並列計算する際には、深刻なボトルネックが生じる。

第一に空間不均一性とロードバランスの悪化である。計算領域を分割する際、星やガスが集中する銀河円盤中心部では領域を細かく分割する必要がある。一方、上空の領域はダークマターのみが存在し、流体計算が不要となる。これによりノードごとの負荷の偏りが著しくなる。また、重力は全粒子間で作用する長距離力であるため、全ノード間での通信が頻繁に生じる。

第二に時間刻みのボトルネックである。全体としては緩やかに変化する銀河の中で、一箇所で超新星爆発が発生すると、その局所領域だけは破綻を防ぐために非常に短い時間刻みで進めなければならない。システム全体の計算が最も短い時間刻みを要求する領域に引きずられ、他の膨大な計算ノードが待ち状態となり、並列効率が劇的に低下する。

1.4. AI・機械学習を用いた計算高速化

超新星爆発に伴う局所的かつ短時間刻みの計算という課題を克服するため、AI・機械学習を活用したサロゲートモデルの導入が進められている。

従来のシミュレーションでは、解像度以下の微小スケールの現象に対してサブグリッドモデルを用いて処理してきた。しかし、超新星爆発によるガスの加熱やシェルの膨張を直接数値積分で解こうとすると、全体の時間刻みが極端に小さくなり並列計算の非効率化を招く。そこで、爆発後の膨張プロセスを AI の予測で置き換え、短時間のステップをスキップさせる手法が考案された。

手順としては、まず条件を変えた超新星爆発の小規模シミュレーションを約 300 パターン実行する。この計算結果を三次元格子データに変換し、三次元画像予測に適した深層学習モデル「U-Net」に学習させる。入力として爆発前のガス密度・温度・速度分布を与え、10 万年後の状態を瞬時に予測させる。

サロゲートモデルの評価では、正解データとの整合性を検証するだけでなく、予測誤差にバイアスがないかを厳密に確認する。系統的な偏りがあると、銀河全体に適用した際にエラーが累積して結果を歪めてしまう。ランダムなばらつきにとどまれば、銀河各地で発生する超新星爆発の影響は全体として平均化され、大域的な銀河進化に悪影響を与えない。

この AI モデルを巨大な粒子法シミュレーションに組み込むことで、爆発発生時に該当データを AI 用プロセスへ回して 10 万年後の状態を一気に予測・更新し、通常の時間刻みを数百年から 2,000 年程度へと拡大することに成功した。

1.5. スパコンの活用と天文学の将来展望

サロゲートモデルと高度な並列計算アルゴリズムの融合により、スーパーコンピュータ「富岳」の全系を用いた大規模パフォーマンス実証実験が行われた。従来の大規模シミュレーションにおける粒子数は

10^8 から 10^9 個程度が限界であったが、富岳のフル活用により、天の川銀河の実数に匹敵する 10^{11} (1,000 億) 粒子規模の超極大計算が達成された。実行速度は 1 ステップあたり 10 秒を切り、計算上の見積もりとして約 2 ヶ月の連続実行で銀河が 1 周する 10 億年分の進化を計算できる領域に到達した。

重力計算にはオープンソースの汎用ライブラリ「FDPS」などが活用されている。また、近年の性能向上を牽引する GPU への対応も不可欠である。日本には GPU を用いた重力計算の長い歴史があり、現在は東京大学・筑波大学の GPU クラスタや欧州の「ジュピター」、米国の「オーロラ」といった世界最高峰のマシンで動作性能の測定が進められている。

計算技術の飛躍的進化がもたらす最大の成果は、モデルと実際の観測データとのダイレクトな比較が可能になる点にある。Gaia 衛星などの精密観測は、天の川銀河に存在する無数の星の位置や運動速度をかつてない精度で明らかにしている。星一つ一つを粒子レベルで再現したシミュレーションが実現すれば、観測データや、超新星爆発によるバブル構造、渦巻き腕の動的な挙動を直接照らし合わせることができる。

星が誕生し、内部で重元素を合成し、超新星爆発によって物質を還元し、次世代の星や生命の材料となっていく物質循環の歴史。スパコンと AI の融合によって描き出される天の川銀河の姿は、宇宙における人類の成り立ちを解き明かす鍵となる。

1.6. 聴講における感想（アドバンスソフト）

普段、我々が目にする宇宙は静的であるが、実際の宇宙は静的なものではなく、想像を絶するほどダイナミックに活動している。そのメカニズムを明らかにするために、天文学ではシミュレーションと観測の両輪で研究が進められてきた。

藤井先生には、天の川銀河を星一つ一つまで再現する最先端の大規模 N 体／流体計算について、分かりやすく解説していただいた。 10^{11} オーダーという超大規模で時空間スケールが何桁も異なるマルチスケールの計算に対して、どのような計算上の工夫がなされているのかよく理解することができた。特に AI・機械学習を用いるアプローチは他の分野にも応用可能であると感じた。

本セミナーの開催は七夕の翌週であったが、天の川で最も明るい銀河中心（いて座の方向）が夜間に見えるのは春から秋（特に 5 月から 9 月が観測のベストシーズンとされている）頃である。最新のシミュレーションが明らかにした「天の川銀河」の活動的な描像を想像しながら、観測してみたいだろうか。

【ご経歴】

2010 年 東京大学 大学院理学系研究科 博士課程修了。鹿児島大学、オランダ・ライデン大学 日本学術振興会 特別研究員、国立天文台 特任助教を経て、2016 年より東京大学 大学院理学系研究科 准教授。2026 年より、同 教授。

【ご研究内容】

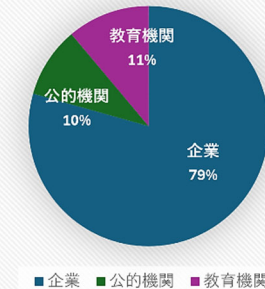
星団や銀河といった重力によって多数の星が集まる系（重力多体系）の数値シミュレーションを専門とする。「富岳」成果創出加速プログラムにも参加。

参加者のご意見

申込者は 90 名、当日の参加者（視聴者）（社外）は 63 名でした。

参加者（視聴者）の内訳は、企業が 50 名、公的機関が 6 名、教育機関が 7 名でした。主な業種は、「材料/素材」、「電機/精密機器/IT 機器」、「官公庁/公的機関」、でした。主な職種は、「研究/開発」、主な職種は、「研究/開発」でした。セミナー後のアンケートは、38 名からご回答いただきました。満足度の平均値は 10 点満点中 7.87 と高評価をいただいております、全体としてセミナーの満足度は高く、実務への参考になったというポジティブな意見が多くを占めました。

参加者の所属機関



公開資料

ご講演の YouTube 動画は、右の QR コードからご覧いただくことができます。



ご講演の資料は、右の QR コードの「資料をダウンロードする」からログイン後、ダウンロードすることができます。ログインアカウントをお持ちでない方は、「資料をダウンロードする」から新規メンバー登録後、ログインしてダウンロードすることができます。



右の QR コードから過去のアドバンス・シミュレーション・セミナーの YouTube 動画をご覧いただくことができます。



2025 年度に開催したセミナーの各記事の一つにまとめて、24 ページの冊子として発行いたしました。全 10 回分の記事を一度にご覧いただけますので、ぜひお手元にてご一読いただけますと幸いです。



2026 年度の開催日程

アドバンス・シミュレーション・セミナー

2026 の開催要領

<https://www.advancesoft.jp/seminar/41339/>

No.	日程 受付状況	内容	テーマ
第 1 回	4 月 17 日 (金) 終了	「HPC 構造解析と AI で試作レスは可能となるのか？」 東京大学 大学院新領域創成科学研究科 人間環境学専攻 教授 奥田 洋司 様	構造解析、AI
第 2 回	5 月 22 日 (金) 終了	「半導体デバイスのマルチスケールシミュレーション」 東京大学 大学院工学系研究科 機械工学専攻 教授 泉 聡志 様	シミュレーション 技術
第 3 回	7 月 17 日 (金) 終了	「天の川銀河を星一つ一つまで再現したシミュレーション」 東京大学 大学院理学系研究科 天文学専攻 教授 藤井 通子 様	大規模 N 体 ／流体計算
第 4 回	8 月 28 日 (金) 終了	「第一原理計算と古典溶液理論の融合で挑む電気化学界面」 筑波大学 計算科学研究センター 量子物性研究部門 教授 大谷 実 様	第一原理計算 ・電気化学
第 5 回	9 月 18 日 (金) 終了	「数値計算・機械学習を活用した 触媒システム開発の課題と展望」 北見工業大学 工学部 機械電気系 地球環境工学科 エネルギー総合工学コース 准教授 植西 徹 様	実験と計算の融合
第 6 回	10 月 23 日 (金) 受付中	「AI とシミュレーションが拓く シングルセル・空間オミクス創薬」 東京科学大学 総合研究院 難治疾患研究所 計算システム生物学分野 教授 島村 徹平 様	AI オミクス創薬
第 7 回	11 月 6 日 (金) 受付中	「グローバル河川洪水シミュレーションは どう実現し、進歩したか？」 東京大学 生産技術研究所 准教授 山崎 大 様	全球河川シミュ レーション
第 8 回	12 月 4 日 (金) 受付準備中	「(未定)」 東北大学 流体科学研究所 流動創成研究部門 准教授 焼野 藍子 様	流体・AI (仮)
第 9 回	12 月 18 日 (金) 受付準備中	「(未定)」 株式会社 理論創薬研究所 代表取締役 吉森 篤史 様 (兼務) 東京理科大学 薬学部 客員教授 (兼務) 静岡県立大学 薬学部 客員教授	AI、創薬 (仮)
第 10 回	2027 年 1 月 15 日 (金) 受付準備中	「領域気象化学モデルによる 大気エアロゾルの数値シミュレーション」 気象庁 気象研究所 全球大気海洋研究部 主任研究官 梶野 瑞王 様	気象学・大気化学

【お問い合わせ先】

アドバンスソフト株式会社 出版事業部

〒101-0062 東京都千代田区神田駿河台四丁目 3 番地 新お茶の水ビルディング 17 階西

E-mail : office@advancesoft.jp <https://www.advancesoft.jp/>

当社では随時人材の募集も行っております。

<https://www.advancesoft.jp/recruit/>