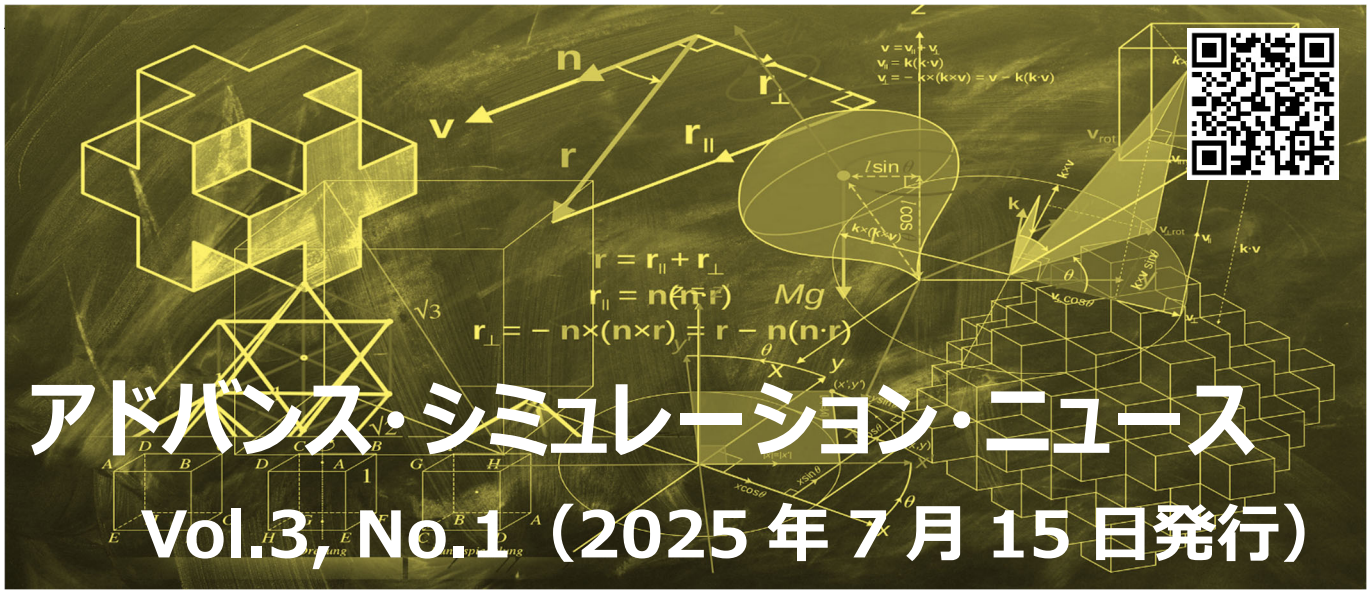


アドバンス・シミュレーション・ニュース

Vol.3, No.1（2025 年 7 月 15 日発行）

第 1 回アドバンス・シミュレーション・セミナー2025 開催報告

名古屋大学　宇宙地球環境研究所

教授　堀田　英之　様

「太陽内部の磁気乱流シミュレーション」

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：2025 年 5 月 30 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

太陽内部は、乱流的な熱対流と、その乱流によって形成されている磁場で占められている。この乱流と磁場が、太陽内部で観測される大きなスケールの流れ場や 11 年周期などを司っていると考えられている。太陽の大きなサイズと小さな粘性率から、レイノルズ数は極めて大きくなっており、「高解像度」のシミュレーションをすることが、上記のような現象を理解することに本質的に重要と考えられている。本セミナーでは、京や富岳で実施してきている太陽内部のシミュレーションについて、特に大規模シミュレーションをしたからこそ解決した問題の最新の成果を報告する。

本稿は、2025 年 5 月 30 日に開催した「アドバンス・シミュレーション・セミナー2025」において、堀田 英之 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. 太陽物理学の謎と 11 年周期への挑戦

私たちの最も身近な恒星である太陽には、現代科学をもってしても解明されていない大きな謎が多く存在する。名古屋大学宇宙地球環境研究所の堀田先生は、スーパーコンピュータを用いた大規模シミュレーションを駆使し、これらの謎、特に太陽の活動が約 11 年周期で変動する「11 年周期問題」の解明に取り組んでいる。太陽物理学には、大きく分けて 3 つの未解決問題が存在する。1 つ目は、太陽表面で起こる大規模な爆発現象「太陽フレア」。2 つ目は、太陽表面の温度が約 6000 度であるのに対し、上空の太陽大気であるコロナが 100 万度以上にも達する「コロナ加熱問題」。そして 3 つ目が、本研究の主題である「11 年周期問題」である。

太陽の黒点の数は、約 400 年にわたる観測の歴史の中で、ほぼ一貫して約 11 年の周期で増減を繰り返してきた。黒点は非常に強い磁場を持っており、11 年周期は太陽全球の磁気活動の周期であると考えら

れている。なぜ太陽の活動にこのような規則的な周期が生まれるのか、その根本的なメカニズムは未だにわかっておらず、太陽物理学における最難関 の問題とされている。

この 11 年周期の謎を解く鍵は、太陽の内部に存在するプラズマの流れ、すなわち「熱対流」を正確に理解することにある。太陽内部の磁場は、このプラズマの流れによって生成・維持されているため、流れの振る舞いを解明することが、磁場の周期性を理解する上で不可欠である。堀田先生の研究は、この太陽内部の現象を大規模なシミュレーションによって再現し、11 年周期の謎に迫ることを目指している。

1.2. 太陽内部シミュレーションの長所と短所

太陽内部のシミュレーションには、他の天文学分野のシミュレーションにはない、特有の「良い点」と「難しい点」が存在する。最大の長所は、計算に必要な物理法則や入力パラメータに不確定な要素がほとんどないことである。まず、シミュレーションで解くべき方程式は、プラズマの振る舞いを記述する「磁気流体方程式(MHD 方程式)」として確立されている。また、計算の初期条件となる太陽内部の密度や温度、圧力といったパラメータも、「日震学」という太陽表面の振動を観測する学問によって、極めて精緻に決定されている。理論モデルと観測の差は 0.1%程度に収まっており、入力パラメータの任意性がないため、「もし正しい計算を実行できれば、正しい結果が得られるはずだ」という強い確信を持って研究を進めることが可能である。

一方で、シミュレーションを実行する上では極めて大きな困難が伴う。最も大きな壁は、流れの複雑さを示す指標である「レイノルズ数」が 10 の 14 乗という天文学的な値になることである。これは、流れが極めて高度な乱流状態にあることを意味し、エネルギーを持つ渦の大きさが、太陽全体のスケール(数十万 km)からわずか 1cm という微小なスケールまで、非常に広範囲に及ぶことを指す。この全てを計算することは、現存する、また将来登場すると考えられるいかなるスーパーコンピュータでも不可能である。

さらに、太陽の表面と対流層の底では密度が 100 万倍も異なるため、流れの時間スケールも数分から数十日と大きく異なる。このような広範なスケールを同時に扱うことは計算上、非常に困難である。これらの課題は、太陽シミュレーションが直面する本質的な難しさとなっている。

1.3. 研究者を悩ませる「熱対流の難問」

太陽内部シミュレーションは、そのパラメータがほぼ確定した 2000 年頃から世界中で盛んに行われるようになった。しかし、研究が進むにつれて、シミュレーション結果と実際の太陽観測との間に、看過できない深刻な矛盾が生じていることが明らかになった。これが「熱対流の難問(Convective Conundrum)」と呼ばれる問題である。この難問は、主に 2 つの側面から指摘されている。

1 つ目は「差動回転」の問題である。実際の太陽は、赤道域が極域よりも速く自転する「差動回転」をしている。この回転は熱対流によって維持されていると考えられているため、シミュレーションでも再現されるべきである。しかし、2000 年代のシミュレーションでは、スーパーコンピュータの性能が向上し、より高解像度な計算を行うほど、結果は実際の太陽とは真逆の「赤道が遅く、極が速く回る」という、似ても似つかないものになってしまった。

2 つ目は「熱対流の速度」の問題である。シミュレーションが予測する深部の熱対流速度と、観測(日震学)から見積もられる速度には大きな隔たりがあり、大きなスケールの熱対流においては、シミュレーションの方が 3 桁ほど大きなエネルギーになってしまうことがわかった。これは、味噌汁の対流の速さを数十倍 も間違えて計算するようなものであり、物理モデルのどこかに根本的な欠陥があることが示唆される。ただし、熱対流のスケールとエネルギーの関係は、シミュレーション、日震学ともに妥当性は十分に確認されていないことに注意する必要がある。

入力パラメータはほぼ完璧にわかっているはずなのに、計算すればするほど現実からかけ離れていく。この不可解な状況は、太陽シミュレーション研究を十数年にわたって停滞させる「闇」となり、その解決が強く求められていた。

1.4. 「富岳」によるブレークスルー

この「熱対流の難問」という大きな壁を打ち破るきっかけとなったのが、スーパーコンピュータ「京」、そしてその後継機である「富岳」の登場である。堀田先生のグループは、これらの超大規模な計算機資源を最大限に活用するため、従来の手法とは異なるアプローチを取った。従来のシミュレーションで広く使われていた「アネラスティック近似(非弾性近似)」という手法は、音速を無限大と仮定することで、計算コストを抑える利点がある一方で、陰解法により全対通信が必要となるため、大規模な並列計算には不向きで、性能を出しにくいという欠点があった。そこで、堀田先生の研究グループでは、逆に計算コストのかかる音波の伝播も解きつつ、実効的な音速を人工的に抑制すること(結果として、大きな時間刻みを取ることができる)で計算のコストを抑える独自の手法「音速抑制法」を開発した。この手法は、陽解法であるため局所通信のみとなり、富岳のような大規模並列コンピュータとの相性が非常に良く、高い並列性能を達成することが可能となった。

さらに、富岳の性能を限界まで引き出すためのコードのチューニングにも多大な労力が費やされた。富岳は計算能力こそ高いものの、そのアーキテクチャは複雑で、単純にプログラムを移植しただけでは性能が出ない。キャッシュメモリの特性やレジスタの制約などを深く理解し、ループの分割や演算順序の入れ替えといった、普段はやらないような地道な最適化を無数に試みている。その結果、富岳の理論性能の約 10%という、この分野では極めて高い実行性能を達成するコードを完成させた。

この強力な計算手法とコードを武器に、従来のシミュレーションの数百倍にも及ぶ 54 億格子点という超大規模計算を富岳で実行した結果、ついにブレークスルーが訪れた。計算を進めていくと、それまで再現できなかった「赤道が速く、極が遅く回る」という、実際の太陽と酷似した差動回転の構造が自発的に現れたのである。これは、「熱対流の難問」の 1 つが、計算の解像度を飛躍的に向上させること

で解決可能であることを示す画期的な成果であった。

1.5. 富岳の先へ、今後の研究と将来の展望

富岳による超大規模シミュレーションの成功は、太陽シミュレーション研究の流れを大きく変えた。十数年間「絶対に間違っている」とされてきた状況から、「もしかしたら合っているのかもしれない」という、検証可能な段階へと初めて移行できたのである。もう 1 つの難問であった「熱対流の速度」についても、シミュレーションの高解像度化と観測見積もりの見直し により、両者の差は 2 桁程度まで縮まってきており、解決の兆しが見え始めている。

しかし、まだ全ての謎が解けたわけではない。現在の計算でも、解像度を上げると結果が変化してしまうため、どの計算結果が最終的な答えなのかはまだ確信できていない。真のゴールは、解像度を上げても結果が変わらない「数値的収束」(大規模な流れや磁場が解像度に依存しない状態) を達成し、観測と完全に一致する結果を得ることである。

今後の課題は、富岳、そして次世代の「富岳 Next」を用いて、さらなる高解像度計算に挑むことである。ただし、単純に解像度を 2 倍にするだけでも計算量は 16 倍になるため、計算資源の力だけに頼るのではなく、頭を使った新しいアプローチが不可欠である。例えば、太陽全体を大まかに計算する全球シミュレーションと、特定の領域を極めて詳細に計算する局所シミュレーションを組み合わせ、異なるスケールの現象を繋ぎ合わせる手法の開発などが考えられている。

また、太陽内部のゆっくりとした流れと、太陽表面の数分単位の激しい現象を同時に解き明かし、内部の磁場がどのようにして表面に現れ、黒点を形成するのかを直接シミュレーションすることも、究極の目標の一つである。こうした研究の先に、太陽物理学最大の謎である「11 年周期」の完全解明という壮大なゴールが見えてくる。富岳が切り拓いた道をさらに前進させ、太陽の謎に挑む挑戦はこれからも続く。

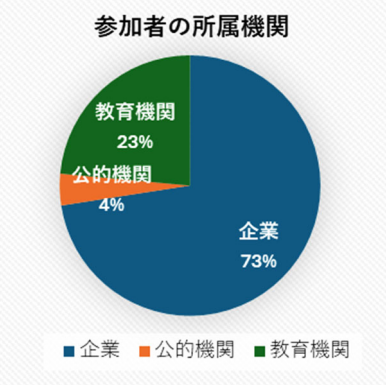
1.6. 聴講における感想（アドバンスソフト）

堀田先生には、シミュレーション研究者・技術者にとっての夢でもあるスーパーコンピュータを使い倒す超大規模数値シミュレーションを駆使することで、太陽内部の熱対流の難問である差動回転の謎が解き明かされる様をダイナミックに講演していただきました。個人的には、差動回転がどうして再現できるようになったのか、その物理を理解したいと思いました。例えば、回転系においては回転軸方向に一様な運動が卓越するという いわゆるテイラープラウドマンの定理がどうして破れるのかなど興味深いです。いつか解説論文を読んでみようと思います。

【ご経歴】
2009 年 東京大学。2014 年 東京大学大学院理学系研究科修了。2015 年 千葉大学大学院理学研究院特任助教（テニュアトラック）。2020 年 同准教授。2023 年 名古屋大学宇宙地球環境研究所教授。

【ご研究内容】
太陽や恒星の乱流とそれによる磁場生成、活動周期などを大規模シミュレーションにより研究している。

参加者のご意見



申込者は 81 名、当日の参加者（視聴者）（社外）は 51 名でした。参加者（視聴者）の内訳は、企業が 37 名、公的機関が 2 名、教育機関が 12 名でした。主な業種は、「大学/教育機関」、「電機/精密機器/IT 機器」、「材料/素材」でした。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 8.3 と大変に高評価をいただいており、感想では、「業務と違う分野のセミナーでしたが、先生の説明が分かりやすく、何が問題で、どう前進しているのか、などがよくわかりました。富岳の特性による制約も興味深く聞くことができました。」、「難しい内容でしたが、講演者の堀田様のパワーが感じられ、大変面白い講演でした。」、「スケーラビリティのこれだけ違う現象を解けるようにされたという点が非常に興味深く印象的でした。」等のコメントを多くいただきました。

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。

2024 年度に開催したセミナーの各記事を一つにまとめて、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。

2025 年度の開催日程

アドバンス・シミュレーション・セミナー
2025 の開催要領
https://www.advancesoft.jp/seminar/33224/

No.	日程 受付状況	内容	テーマ
第 1 回	5 月 30 日（金） 終了	「太陽内部の磁気乱流シミュレーション」 名古屋大学　宇宙地球環境研究所 教授　堀田 英之　様	磁気流体力学 ・HPC
第 2 回	6 月 13 日（金） 終了	「流体乱流における同期現象とデータ駆動型手法」 東京理科大学　理学部　第一部　応用数学科 准教授　犬伏 正信　様	データ同化、 機械学習
第 3 回	7 月 18 日（金） 受付中 お申込みはこちら	「火災・爆発災害のリスク低減への燃焼研究の応用」 東京理科大学　創域理工学研究科　国際火災科学専攻 教授　土橋 律　様	火災・爆発 災害現象
第 4 回	8 月 1 日（金） 受付中 お申込みはこちら	「AI 新時代を切り拓く政府の次世代 HPC 戦略の展望」 文部科学省　研究振興局　参事官（情報担当）付 計算科学技術推進室　室長　栗原 潔　様	政府の 科学技術政策
第 5 回	9 月 12 日（金） 受付準備中	「量子技術を応用した次世代流体解析基盤の確立に向けて」 九州大学　工学研究院　航空宇宙工学部門 准教授　久谷 雄一　様	流体理工学, 量子演算
第 6 回	10 月 17 日（金） 受付準備中	「(準備中)」 東京理科大学　創域理工学研究科　国際火災科学専攻 教授　桑名 一徳　様	調整中
第 7 回	11 月 14 日（金） 受付準備中	「(準備中)」 東京科学大学 情報理工学院 情報工学系 准教授　大上 雅史　様	調整中

※詳細につきましては後日改めてご連絡させていただきます。

【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
TEL：03-6826-3971　FAX：03-5283-6580　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/

Copyright © 2025 AdvanceSoft Corporation. All right reserved.