

第8回アドバンス・シミュレーション・セミナー2025 開催報告

早稲田大学 理工学術院 先進理工学研究科

共同原子力専攻 教授 山路 哲史 様

「原子力から考える汎用解析コードの役割と可能性」

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11月28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

総合理工学である原子力に用いられる汎用解析コードは様々な分野を横断する共通課題を専門家同士が互いに認識する共通言語の役割を果たしており、今後、その役割は益々大きくなると期待される。本発表では、原子力に多用される数値流体力学や有限要素法を例に紹介する。また、原子力の歴史でも最大級の事故となった福島第一原子力発電所事故の理解や対策に必要な課題の中には私達の日常と共通するものがあることを紹介する（例：お風呂のお湯の温度成層化、飛沫感染対策）。原子力の課題は、多分野への応用展開が期待される新しい先進的な解析手法（例：粒子法）の開発やその高度化をもたらしている。



本稿は、2025年11月28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、山路 哲史 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

山路先生の講演内容は、原子力システムの研究を起点とし、その知見を応用して汎用解析コードの役割と可能性を広範な工学・自然科学分野にわたって考察するものであった。山路先生は、普段は原子炉の設計、熱流動、および事故シミュレーションに取り組んでいるが、本日はその専門分野を超えて、沸騰、構造力学、エアロゾル挙動、溶融物挙動解析といった共通の工学課題におけるシミュレーション技術の貢献に焦点を当てた。

この考察の背景には、高度な解析技術が特定の専門領域に留まらず、工学全体に共通する課題解決の鍵を握るという認識がある。解析技術への期待は、以下の二点に例示される。一つは、評価の不確かさを低減し、リスクを増大させることなくシステムの性能を

向上させること。もう一つは、破損限界そのものを引き上げる新しい材料の開発に寄与し、システムの定格パフォーマンスを向上させることである。

1.1. 原子力システムと汎用解析技術への期待

原子力発電所の主要な構造物は、原子炉を封じ込め原子力発電所の放射能放出に対する主要なバリアには、原子炉を封じ込める圧力容器と圧力容器を収納している格納容器等がある。圧力容器内の燃料集合体は高圧の冷却水によって冷却されている。原子炉設計の基本原則は、異常事態時でも炉心損傷に至らせないことであり、その設計要求の一つが、冷却水が熱しすぎることで生じる沸騰遷移 (Departure from Nucleate Boiling: DNB) を回避することである。DNB は、燃料棒表面が蒸気膜で覆われることにより熱伝達率が急激に低下し、燃料温度が許容限界を超えて急上昇する現象である。

沸騰遷移の限界評価は安全設計の根幹をなすが、実機規模での実験的な検証は困難を伴う。具体的には、実機の燃料集合体一つを模擬する加熱実験に必要な電力は、概算で電気自動車を東京からインドのバンガロールまで走行させるのに匹敵するほどの莫大な量となる。そのため、設計者は、限定的な実験データに基づき、評価の不確かさを見積もり、その分を安全裕度として確保する必要がある。シミュレーション技術の進歩は、この不確かさを定量的に低減し、リスクを上げることなくシステムの性能、すなわち定格出力等を向上させることに貢献する。不確かさが低減すれば、安全性の向上に寄与していない無駄な安全裕度を削減できるためである。これは原子力に限らず、ボイラーや熱交換器など、あらゆる熱流動システム設計における共通の課題であり、数値流体力学 (CFD) などの汎用解析コードが定量的なリスク管理と性能向上に重要な役割を担う。なお、山路先生が取り組む超臨界圧軽水炉システムの研究は、水の臨界点を越えた超臨界水を作動流体として利用する先進的な原子炉であり、従来の軽水炉とは冷却材の熱物性が大きく異なる。このシステムにおいても、冷却材の正確な熱伝達率の予測とその不確かさの低減が、設計上の重要課題の一つとして位置づけられている。

1.2. 新材料開発と構造解析の役割

二つ目の解析技術への期待は、システムの破損限界そのものを引き上げることによる性能向上、すなわち新しい材料の健全性評価である。原子炉の燃料棒では、運転中に内部の燃料ペレットが核分裂生成物の蓄積や熱膨張により膨張し、外側の燃料被覆管と接触して応力が働く。この応力とひずみが過大になると被覆管は破損に至るため、その破損限界の正確な予測と向上が求められる。

2011 年の福島事故の教訓から、従来のジルコニウム合金被覆管が高温蒸気と反応して水素を発生しやすいという弱点を克服するため、事故耐性燃料 (ATF) の開発が世界的に進められている。その主要な候補の一つが、高温での耐酸化性に優れたセラミック系材料 (例: SiC/SiC 複合材) を用いた被覆管である。しかし、セラミック系材料は、金属材料と比較して粘りがない (脆い) という特性を持つため、ペレットとの接触による局所的な応力が働いた際の破損挙動の評価が大きな課題となる。この脆性材料の健全性評

価のためには、有限要素法 (FEM) を用いた構造力学に基づく弾塑性変形・クリープ変形解析が不可欠となる。特に、脆性材料の破損を模擬する方法として、応力が設定された破損限界に達した要素のヤング率を仮想的に小さくすることで剛性を喪失させ、破損を表現するモデルが開発されている。この処理により、応力は健全な隣接要素に再分配され、破損の影響を評価できる。新しい材料の熱的、機械的特性を正確にモデル化し、その破損限界を定量的に評価することは、高性能な ATF を実用化するための核心的な課題であり、汎用解析コードの適用範囲を広げている。

1.3. 過酷事故とエアロゾル・可燃性ガス対策

原子炉の状態が悪化し、福島第一原発で発生したような過酷事故 (シビアアクシデント) に至った場合、炉心損傷に伴うエアロゾル放出と可燃性ガス (水素) 発生への対応が重要課題となる。このような極限的な状況を実験で検証することは極めて困難なため、シミュレーションの役割は一層大きくなる。炉心から放出される放射性エアロゾルは、公衆の被ばくリスクになるだけでなく、崩壊熱による発熱性を持つため、格納容器への熱負荷源となり得る。エアロゾルは水蒸気などの流れに乗って移動するが、加えて、重力沈降、ブラウン拡散、熱泳動といった現象の複雑な相互作用に支配される。原子力分野では古くからエアロゾル挙動のシミュレーションが行われてきたが、近年は新型コロナウイルス禍における飛沫・エアロゾル解析 (富岳利用) など、公衆衛生や換気システム設計の分野でも同様の CFD 解析が注目を集め、汎用的な知見が共有されている。また、過酷事故時に燃料被覆管が高温の水あるいは水蒸気と反応することで水素ガスが発生する。水素は非凝縮性ガスであるため、格納容器内の圧力を上昇させ、建屋内に漏れ出すと空気中の酸素と混合し、水素爆発のリスクが生じる。福島第一原発 3 号機の事故の事例では、水素と水蒸気は主として建屋の最上階に漏れ出したが最初の水素爆発は建屋の最上階より低い階で発生した可能性が指摘されている。これは、炉内から漏れた水蒸気が建屋内の下部で比較的多く凝縮し、相対的にその空間の水素と酸素の濃度割合が上がり、爆発しやすい雰囲気 (可燃限界) になった解析結果例からも指摘されている。このような複雑な流動・混合現象の解明には、CFD を用いた解析が不可欠であり、過酷事故対策としての水素再結合装置やフィルター付きベントシステムなどの安全対策設計にも有用である。

1.4. 熱流動解析の難題と計算効率化

福島第一原発事故の解析では、格納容器内の圧力変動について、実機で測定されたデータと計算結果が合わない問題が生じており、その要因の一つが、圧力抑制プール内の温度成層化であると指摘されている。これは、プール水の表面層が高温となり、内部は低温に維持されているという状態であり、シミュレーションがこれを正確に模擬できないと圧力を低く評価してしまう。CFD シミュレーションにおいて、流体内部における微小な密度差に基づく自然対流や複雑な熱移行を正確に解くことは、依然として非常に難しい課題であり、汎用 CFD コードの高度化が求められる分野である。

山路先生の専門分野の一つである燃料溶融物やデブリの挙動解析は、過酷事故の進展評価において極めて重要である。燃料が溶融・落下し、再固化する現象を解析するためには、粒子法の一つである Moving Particle Semi-implicit (MPS) 法が用いられる。MPS 法は、非圧縮性流体の流れを計算点(粒子)の相互作用として扱うラグランジュ法であり、液体の飛散や複雑な界面変化の追跡に特長を持つ。溶融物解析で特に難しいのは、流動(液体)と凝固(固体)が混在する状態のモデル化である。MPS 法で凝固を粘性の増大で模擬する場合、厳密な非圧縮性と完全な凝固が同時には達成できないため、両者の実用的な両立が課題である。この課題解決のため、山路先生らは以下の手法により効率化を図っている。

① 1. アルゴリズムの改良：実用的な計算タイムステップで必要十分な流動計算精度(非圧縮性)が得られる範囲で凝固による流動の完全停止を優先したアルゴリズムの開発。

② 計算コストの削減：●流動の寄与が小さい時間帯に流動計算をスキップする。●流動しない(固化した)粒子の一部の計算をスキップする。

1.5. 汎用解析コードの役割と展望

汎用解析コード(CFD、FEM など)は、特定の専門分野に留まらず、工学・科学全般に共通する課題を扱うための共通言語としての役割を果たしている。原子力研究で培われた、極限的な熱流動、構造、物質挙動の解析技術は、沸騰の不確かさ低減、新材料の破損限界評価、エアロゾル拡散予測、複雑な多相流(溶融・凝固)モデル化といった課題解決に貢献している。これらの課題は、分野は異なれども、その本質において共通する熱・物質移動、流体力学、構造力学の法則に支配されている。今後、さらなる解析精度の向上と、非線形・多相・多物理現象の効率的なシミュレーション技術の開発が進むことで、汎用解析コードは、専門分野を超えた研究者・技術者間の知識共有と、新たな技術開発の一助となるであろう。

1.6. 聴講における感想(アドバンスソフト)

原子力の分野では、実物を使った実験が難しいため、古くからコンピューターシミュレーションが広く用いられてきた。しかし、例えば福島第一原発で発生した過酷事故では、原発の構造の複雑さに加えて多くの個別現象が錯綜して事象が進展したこともあり、そのシミュレーションには一定の不確かさが依然として存在する。実は、この不確かさの要因の一つが、我々の日常生活の感覚で理解できる温度成層化(すなわちお風呂のお湯が上の方では温かく、下の方はまだ冷たい、という現象)の解析の不確かさに起因していることなど、生活感覚に基づいて分かりやすく解説していただいた。このように個別現象を取り上げると、実は原子力以外の分野でも見ることのできる現象と極めて類似している点が多い。今回のご講演では、山路先生のご専門である原子炉設計や熱流動、事故時挙動の解明などについてご紹介いただくとともに、原子力で使われている解析コードが他の分野においても広く適用できる機能を有していることを分かりやすく説明していただいた。今後、原子力で使われているソフトウェアが原子力以外の分野でも広く活用されるようになることを期待している。

【ご経歴・ご研究内容】

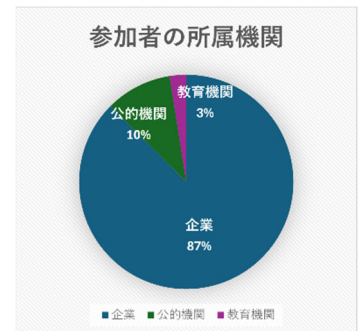
2006年に 東京大学大学院修了、博士(工学)。2006年 から 2011年 まで 日本原子力研究開発機構・研究員。2011年 から 2014年 まで OECD Nuclear Energy Agency 職員(Nuclear Scientist)。2014年 から 早稲田大学 共同原子力専攻 講師、准教授を経て教授(現職)。

専門分野は、原子炉設計工学、原子炉物理学、原子炉の安全、計算工学。

参加者のご意見

申込者は 64 名、当日の参加者(視聴者)(社外)は 40 名でした。

参加者(視聴者)の内訳は、企業が 35 名、公的機関が 4 名、教育機関が 1 名でした。主な業種は、「エネルギー(電力・ガス・石油・原子力)」、「自動車/自動車部品」、「材料/素材」、主な職種は、「研究/開発」でした。



セミナー後のアンケートは、28 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 7.2 と高評価でした。また、「汎用解析コードの適用事例を聴くことができて良かった」「原子力分野における最新研究動向と数値解析技術の適用事例に関する知識が深まりました」等のご感想をいただきました。

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。



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) 終了	「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) 終了	「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) 終了	「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) 終了	「火災・爆発現象のモデリングおよび早期異常検知」 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	火災科学、 燃焼理論
第 7 回	11 月 7 日 (金) 終了	「AI とシミュレーションが駆動する創薬分子設計」 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	AI 創薬
第 8 回	11 月 28 日 (金) 終了	「原子力から考える汎用解析コードの役割と可能性」 早稲田大学 理工学術院 先進理工学研究科 共同原子力専攻 教授 山路 哲史 様	総合理工学
第 9 回	12 月 19 日 (金) 終了	「『計算・データ・学習』融合と富岳 NEXT, その先にあるもの」 東京大学 情報基盤センター スーパーコンピューティング部門 教授 中島 研吾 様	計算科学・ 計算機科学
第 10 回	2026 年 1 月 23 日 (金) お申込みはこちら 	「地層処分の安全評価におけるシミュレーションの活用と展望」 原子力発電環境整備機構 技術部 性能評価技術グループ グループマネージャー 石田 圭輔 様	地層処分

【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/>