

アドバンス・シミュレーション ・セミナー2023 開催報告

2026年4月発行

<https://doi.org/10.69290/j.001218>

アドバンスソフト株式会社は、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する「アドバンス・シミュレーション・セミナー 2023」を開催いたしました。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おります。

・第01回	海洋研究開発機構 堀 宗朗 教授 「防災・インフラ分野でのシミュレーションへの期待と課題」	2
・第02回	広島大学 角南 英夫 名誉教授 「半導体デバイスの歴史と展望」	4
・第03回	大阪大学 後藤 晋 教授 「複雑流動現象の数値シミュレーション」	7
	University of California, Los Angeles 平 邦彦 教授 「機械学習による流体解析の拡張」	9
・第04回	東京工業大学 青木 尊之 教授 「GPU スパコンによる混相流シミュレーション・流体構造連成のシミュレーション」	11
・第05回	東京大学大学院 笠原 直人 教授 「原子力安全に必要な計算科学技術への期待」	13
・第06回	東京工業大学 笹原 和俊 准教授 「フェイクニュースと生成AI」	15
・第07回	産業技術総合研究所 川畑 史郎 様 「量子コンピュータと量子アニーリングマシン：基礎から最先端まで」	17
・第08回	青山学院大学 林 光一 名誉教授 「爆轟から見える CAE の方向性」	19
・第09回	産業技術総合研究所 中村 良介 様 「都市のデジタルツイン」	21
・第10回	筑波大学 岡田 晋 教授 「計算物質科学による 2.5 次元物質科学研究：原子層物質複合構造体と外場」	23
・AS セミナー2023 まとめ		25
・YouTube 動画&セミナー資料 QR コード一覧		26

資料の二次配布・抜粋利用を固く禁じます。



アドバンスソフト 出版事業部

第1回アドバンス・シミュレーション・セミナー2023

国立研究開発法人 海洋研究開発機構 付加価値情報創生部門

部門長 堀 宗朗 様

「防災・インフラ分野でのシミュレーションへの期待と課題」

開催概要

○講演概要

国土交通省データプラットフォーム等を利用する、防災・維持管理用の都市のデジタルツインの開発と利用の検討が進められている。この中では、より効果的な対策・政策の立案に資する、都市全体の解析モデルを使った自然災害や構造物の劣化の予測シミュレーションが重要な課題である。

本講演では、都市のデジタルツインの現状を概説し、開発に関わる研究プロジェクトを紹介した後、都市のデジタルツインが実現する予測シミュレーションの期待と課題について説明する。

ご講演内容

1. 講演内容

1.1 内容

- ①HPC を利用した統合地震シミュレーション
- ②地震応答解析のための並列有限要素法
- ③防災・インフラ用の都市のデジタルツインの自動構築。

1.2 HPC を利用した統合地震シミュレーション

統合地震シミュレーションは高性能計算を使い、理学シミュレーション、工学シミュレーションおよび社会科学シミュレーションを連成することにより、統合的な地震の災害・被害・対応予測をおこなうシステムである。理学と工学のシミュレーションの基盤となる並列有限要素法は2018年ゴードン・ベル賞ファイナリストに選出される等、本分野では優れた成果を上げている。

理学シミュレーションの一つ、DEM 断層形成シミュレーションでは、動的負荷分散技術の高度化により超多数粒子による地盤解析に成功し、砂箱実験ではほぼ現実と同数の砂の挙動を再現した。

工学シミュレーションの一つ、MScPhy (粒子系固体・流体数値解析手法) により高解像度の津波シミュレーションを可能とし、福島原子力発電所の津波浸水も用いて再現した。

3次元地形データと2次元格子データを用いて、津波シミュレーション用都市モデルの自動構築も可能とした。地震と津波のシミュレーションをおこない、神戸港を対象としたシミュレーションでは防潮堤の効果を評価することができ、同シミュレーショ

ン結果は市議会でも用いられ、堤防の必要性が認められた。

社会科学シミュレーションの一つは MAS (Multi-Agent System) であり、さまざまな属性を持つエージェント群が都市内の複雑な経路を避難する状況を数値解析するもので、高いスケーラビリティを実現した。交通シミュレーションは、地震シミュレーションと建物シミュレーションの結果、推定される損傷された道路ネットワークを対象に、交通需要と交通流の2つのシミュレーションを組み合わせている。経済シミュレーションでは、様々な被害シナリオに対して Bellman 方程式を解き、経済被害がどの程度発生するか見積ることができる。また、マルチエージェント型の経済シミュレーションも開発しており、上述の MAS により日本全国の 1:1 スケール (1 億エージェント, 1 億人+400 万企業) が可能となった。

上記の工学・理学・社会科学のシミュレーションを直列で連成させることが統合シミュレーションである。直列の連成では先に実施したシミュレーションの出力が次のシミュレーションの入力になるが、出力データがそのまま入力データとしては使えず、データ変換が必要となる。例えば構造物地震応答シミュレーションと交通シミュレーションを連成させるためには、建物の被害データを道路ネットワークの閉塞データに変換する必要がある。

統合地震シミュレーションを首都直下地震に適用したところ、想定された地震では、首都圏の交通網に冗長性があるため交通流の混雑度が極端にひどくなることはない計算結果が得られた。一方、南海トラフ地震に適用したところ、発災後の交通需要の変化の影響もあり、交通の混雑度が高くなった。さらに、経済活動シミュレーションでは、大阪府の中心よりも大阪府以外の関西地域の方が、復旧が早い結果となった。

1.3 地震応答解析のための並列有限要素法

構造物や表層地盤を主な対象とした地震応答解析のために、並列有限要素法 FrontISTR を基に e-FrontISTR を研究開発している。高速ソルバー DDDM (Deflated Domain Decomposition Method) を組み込んだ結果、地震応答解析の計算速度とスケーラビリティが向上し、実用に十分な性能が得られている。e-FrontISTR には、建設分野の主要材料であるコンクリートと地盤のテンソル構成則が実装されている。この結果、鉄筋コンクリート構造部材の動的実験の結果を高い精度で再現することができている。また、国内最大の振動台である E-DEFENCE を使

った大規模な地盤動の実験に対しても、高い精度での再現に成功している。

原子力発電所建屋に対して、構造物と地盤の3次元モデルを構築し、e-FrontISTRを適用した。この3次元モデルの自由度は100万を越え、実用に使われる解析モデルとして規模と詳細度は極めて高い。実地震動を受けた応答の再現や構造物の浮き上がり現象の予測も可能としている。

e-FrontISTRを表層地盤に適用し、地表地震断層の再現・予測を試みている。長さや深さがおよそ10km程度の表層地盤を対象とした解析モデルが構築されている。この解析モデルの自由度は1,000万を越え、並列計算が必須である。この解析モデルには存在が確認されている主断層や副断層が設置されている。この解析モデルにe-FrontISTRと観測結果から推定された地震動を入力したところ、実際に観測された副断層を起因とする地表地震断層を再現することに一定の成功をみた。この分野では重要事項である地盤の材料等の不確定性に関しても、e-FrontISTRを適用した数値解析は可能である。

1.4 防災・インフラ用の都市のデジタルツインの自動構築

防災・インフラ用の都市のデジタルツインは、国土交通省が進めるi-Constructionや建設DXを背景としている。都市のデジタルツインの目的は、防災・維持管理に関わる都市全体の挙動を科学的に予測することである。このような予測が防災・維持管理の施策をより効率的・効果的にする。そこで、蓄積が進む都市のインフラデータを利用し、都市のデジタルツインを自動構築・更新し、さらに様々な先端解析プログラムを適用する将来予測のシミュレーションを実現することが望まれている。

都市のデジタルツインの自動構築のポイントは、互換性が完全ではないインフラデータを様々な形式のデータに柔軟かつ容易に自動変換することである。インフラデータ自動変換のためのプログラムDPP(Data Processing Platform)を研究開発している。DPPの自動変換の出力の一つが3次元可視化モデルである。都市全体の高度な3次元可視化が自動化される。さらに、自動変換を先端解析プログラムの入力ファイルに自動変換することも研究されている。例えばFEMの場合、特定のインフラデータから形状と材料情報の入力ファイルが自動作成できることが実証されている。

現在、DPPを適用し、RC橋梁の可視化・解析モデルの作成、NATMトンネルの可視化モデル等の作成が実施されてきた。DPPの有効性等を実証する結果である。さらに、地盤工学分野においてもボーリングデータをはじめ、DEM(Digital Elevation Map)等のデータをDPPは自動処理できるようになっている。インフラデータが準備された地盤に対し、可視化・解析モデルを自動構築し、地盤の地震応答解析や

液状化解析が容易に実行できるようになっている。さらなるDPPの拡張によって、河川と港湾分野でも関連インフラデータの自動変換も可能としている。

2. 聴講における感想(アドバンスソフト)

本セミナーでは防災、インフラ分野に対して、最先端の学問、技術を統合し、実用性を確認したシミュレーションシステムの構築の内容となっている。特に蓄積された都市のデジタル情報を利用した都市のデジタルツインの自動構築、さらにDPPの開発により、都市の解析モデルの自動作成を可能とした。これは今日の複雑な社会システムに対するリスクの把握、安全対策の検討および都市計画にシミュレーションが非常に大きな役割を果たすことを示しており、なおかつ社会的貢献度をあげたものと考えられる。達成のための様々なデータの自動変換技術とノウハウ、計算高速化技術は、複雑化が進む都市機構に対して重要な技術要素になると思われる。



【ご経歴】

1984年 東京大学 工学部 土木工学科 卒業
 1987年 カリフォルニア大学 サンディエゴ校
 応用力学・基礎工学科 博士課程修了
 2001年 東京大学 地震研究所 教授
 2012年 理化学研究所 計算科学研究機構
 総合防災・減災研究ユニットリーダー
 2019年 海洋研究開発機構 付加価値情報創生部門
 部門長

【ご研究内容】

専門は計算地震工学、応用力学、統合地震シミュレーションと地震応答解析のため並列有限要素法の研究開発。

第2回アドバンス・シミュレーション・セミナー2023

IEEE LIFE FELLOW 広島大学 名誉教授 角南 英夫 様

「半導体デバイスの歴史と展望」

開催概要

○講演概要

第二次世界大戦の終戦後まもなく 1948 年に固体による増幅素子の発明としてトランジスタが発表された。この素子は当時の電子機器を構成していた真空管を徐々に置き換え始め、特に 1970 年代初頭に発売された集積回路としての汎用プロセッサ、メモリ、撮像素子はその後著しい発展を遂げ、あらゆる電子機器を高性能化させ続けている。この「産業の米」とも称される半導体デバイス発展の原動力は素子の微細化でもたらされる高集積化・大規模化である。一方、高電圧・大電力を制御するパワー素子の用途も拡大し続けている。それと同時に、素子の最適化と性能予測を行うシミュレーションの重要性も増している。本セミナーはそれらのトレンドを俯瞰し、将来を展望する。

ご講演内容

1. 講演内容

1.1 時代の背景

「人」の社会を動かしているのは「人」自身ではあるが、その道具として IT (Information Technology) : 情報技術の発展が目覚ましい。中でも AI (Artificial Intelligence) : 人工知能の適用は人間の思考により近い結果を提供している。身近な例としては、インターネット環境の充実、スマートフォンの多機能化があげられよう。これらのソフトウェア面を支えるのはハードウェアとしての半導体デバイスである。とくに素子の微細化を伴った高集積化デバイス(集積回路)であり、主にプロセッサとメモリがそれに相当する。AI といえども、プロセッサとそれを動かす OS / アプリケーションソフトの作業に外ならない。

他方、地球温暖化の弊害が声高に叫ばれるようになり、国際的な SDGs (Sustainable Development Goals) のかけ声の下、様々な取り組みが始まっている。化石燃料を使わずに自然のエネルギーで電力を生み出し、その電力で自動車を動かす EV 化は世界的に大きな取り組みの一つである。この電力を制御するのはパワー半導体であり、より高電圧、より大電力へのトレンドを生み出している。未だ集積回路が Si に限定されているのに比べると、パワー半導体では SiC、GaN など、より高温、高電圧に強い材料が使われ始めた。集積回路とは異なる方向へトレンドを伸ばしている。

1.2 半導体の基本

半導体デバイスを作成するためには極めて高純度な Si を精製する必要がある。半導体グレードの純度は 11N (イレブンナイン) と呼ばれ、99.999999999% の純度が求められる。つまり、1011 個の Si 原子に対して 1 個の不純物原子しか許容することができない。11N の超絶性の例として、例えば、100m x 100m x

10m の巨大なプール (105 トンあるいは 105 m³) に角砂糖 1 個 (約 3g) 含まれるだけで純度不足に陥ることになる。

主要な半導体デバイスは MOS トランジスタであり、金属 (Metal)、酸化膜 (Oxide)、半導体 (Semiconductor) で構成されている。つまり、地球の地殻上層部に存在する元素の中で最も量が多い上位 3 元素 (クラーク数 1 位: 酸素 49.5%、2 位: シリコン 25.8%、3 位アルミニウム 7.56%) で半導体デバイスを作成することができるということになる。この点からも、半導体デバイスは大変恵まれたデバイスであることが分かる。

1.3 コンピュータ

半導体を最も有効に使っているのはコンピュータである。現在のほぼ全てのデジタルコンピュータはノイマン型コンピュータである。ノイマン型コンピュータは主にプロセッサとメモリで構成されている。また、メモリにプログラムとデータを内蔵して (プログラム内蔵方式)、プログラム命令を順番に読み取って処理が実行される (逐次処理)。従って、プロセッサとメモリが最も重要な半導体デバイスとすることができる。

現在のスーパーコンピュータの性能ランキングでは 1 位は米オークリッジ国立研究所と HPE の「Frontier」であり、1102PFLOPS の演算速度を誇る (FLOPS は 1 秒間に処理できる浮動小数演算の回数を表す指標)。2 位は理化学研究所と富士通の「富岳」(442PFLOPS) である。「富岳」によるマスク着用時と非着用時のときの咳の飛沫シミュレーションは記憶に新しい。

1.4 マイクロプロセッサ

1971 年に最初の汎用プロセッサ Intel4004 が発表された。このプロセッサでは、2025 個のトランジスタ、加工寸法は 10 ミクロンノード、クロック周波数は 500kHz だった。一方、2000 年に発表されたプロセッサ Intel Pentium IV Willamette では、4200 万個のトランジスタ、加工寸法は 180nm ノード、クロック周波数は 1.3-3.8GHz であり、最初の汎用プロセッサと比べて、それぞれ 21000 倍 (トランジスタ数)、1/55 (加工寸法)、2600-7600 倍 (クロック周波数) となっている。

2015 年の時点で、その 20 年前に予想された以下のテクノロジーをほぼ実現している状況である。

- ・三次元バーチャルリアリティシステム
- ・顔認証による認証、セキュリティシステム
- ・瞬時動物体認識による自動運行システム
- ・人間に近い動作・判断をする知能ロボット
- ・仮想現実を駆使した教育システム

これはまさに連綿と続けられている半導体デバイスの技術進展の賜物であると言える。この半導体技術の成長について、フェアチャイルドの創始者の一人ゴードン・ムーアは、1965 年に集積回路あたりの部品数が毎年 2 倍になると予測し、この成長率は少なくともあと 10 年は続くと予測した。1975 年には、

次の10年を見据えて2年ごとに2倍になるという予測に修正した。彼の予測は1975年以降も維持され、それ以来「法則」として知られるようになった。

1.5 メモリ

メモリデバイスは記憶する物理量によってさまざまなデバイスが提案されている。例えば、電荷(DRAM、EPROM、EEPROM)、電位(SRAM)、強誘電体分極(FeRAM)、磁気(MRAM)、相変化(PRAM/PCM)、抵抗(ReRAM)、スピン(SPRAM)などがある。この中で、電荷を制御するタイプのメモリであるDRAMとEEPROM(フラッシュメモリ)が最も経済的規模の大きなメモリである。

最初のDRAMは1970年に発表されたインテルのi1103である(1KビットDRAM)。このDRAMの1メモリセルは3つのトランジスタと1つのキャパシタで構成されていた(4Kビットからは1トランジスタ+1キャパシタ)。最初の1Kビットから15年後には1000倍の1MビットDRAMが開発され、さらにその15年後にはさらに1000倍の1Gビットが開発されている。一方、最小加工寸法を見てみると、1970年の1KビットDRAMは12ミクロンだったものが、15年後の1Mビットでは1/10(約1.2ミクロン)になり、さらにその15年後の1Gビットではさらに1/10(約120nm)になっている。これに伴いDRAM製品のチップサイズは縮小し、かつ製品単価も下がり続けている。

これまでのDRAM市場の動向としては、インテルの1KビットDRAMから16Mビットまでは1世代ごとにトップシェアを獲得した企業が入り替わる状況で激しい競争を繰り広げていた。この間、日立、NEC、東芝など日本の企業が躍進していた時代である。16MビットDRAMでサムスンがトップシェアを取ってから、今日までサムスンがトップを取り続けている。一方、日本企業は、1985年頃に80%のシェアを取ってから、衰退の一途を辿っている。今日では、DRAM市場はサムスン(韓国)、SK hynix(韓国)、Micron(米国)の3社のみが生き残っている状況である。

電氣的消去・書き込み可能なROMとしてEEPROMがある。フラッシュメモリでは絶縁膜のトンネル現象を介して浮遊ゲートあるいはSi₃N₄膜に電子を蓄積する。しかし、現実には書き込み回数の制限が生じることから、確率的には絶縁膜を破壊しているといえる。従って、フラッシュメモリは常時書き込みをするような用途には向いていない。フラッシュメモリの規模を拡大する方法の一つとして、多値レベルセル(MLC: Multi-level Cell)がある。一つのセルに複数のしきい電圧を設定する方法であるが、動作マージンは狭くなるので、SLC(Single-level Cell)に比べて信頼性は低下する。その他のメモリ規模拡大策として、二次元フラッシュメモリを三次元化する方法がある。

1.6 微細加工・集積化技術

集積回路の製造には、回路設計、マスク作成、基板作成、製造工程、実装工程などがある。それぞれ不可欠な工程だが本講演では半導体デバイスを作成する製造工程について述べる。前述のように今日まで素子の微細化が行われてきたが、これは世代ごとに提案された微細加工とそれに伴う構造・材料の技術革新の成果である。微細加工の胆となるのが、リソグラ

フィの露光装置(ステッパー、スキャナーなどとも呼ばれる)である。露光装置は用いる光の波長によって加工寸法が決まる。従って、これまで露光装置では光源の短波長化が行われて半導体デバイスの寸法サイズを縮小してきた。一方、短波長化だけではデバイスの加工寸法縮小要求を満たせなくなってきてからは、さまざまな技術が取り入れられてきた。例えば、超解像技術、超解像技術+液浸技術、位相シフト、極端紫外線(EUV: Extreme Ultra Violet)の利用などが挙げられる。中でも、現在7nm以下の最小加工を実現するEUV露光装置はオランダASMLのみが開発している状況である。最先端の加工精度を誇るEUV露光装置の大きさと価格は驚異的なものとなる。特に価格は250億円以上と推定され、半導体デバイスを製造する企業にとっては膨大な投資額となる。

1.7 パワーデバイス

電気製品の発展と共にパワートランジスタの用途が多様化してきた。これまではSiをベースとした様々なデバイス構造(Si DMOS、Si Super-Junction MOS、Si IGBTなど)が提案され、Siパワーデバイスが実用化されてきたが、SiCやGaNを用いることによって、高性能なパワーデバイスを作成することができる。これは、物性上バンドギャップが大きいいため、絶縁破壊電圧が高くなり、高電圧を扱うデバイスでの利用に向いているからである。高温においてもドーピング密度に比べて真性キャリア密度が十分に小さく、pn接合が問題なく動作する。つまり、高温動作を求める用途に適しており、パワー半導体としてとても魅力的な存在になっている。

既にSiCやGaNでは、300~500°Cという高温での動作が確認されている。しかし従来のSiパワーデバイスでは200°Cを超える温度での動作を想定していないので、高温動作に向く半導体パッケージの技術的な蓄積が遅れている。このため、SiCやGaNといえども、当面は200~250°C程度の接合温度で利用している。

このためSiCやGaNの特長が十分活かされていない。しかし、例えばハイブリッド車では、Si IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor)を冷却するための専用冷却水系(60°C)が必要で、SiCパワー半導体で200°Cの接合温度が達成されれば、エンジン用冷却水系(120°C)と共用できる。それにより冷却装置1系統分(ポンプやラジエータなど)が不要となる。これによりコスト削減と車体軽量化が同時に実現できる。

1.8 MEMS

半導体製造技術は、MEMS (Micro Electro Mechanical Systems)にも利用されている。MEMSとは「微小な電気機械システム」という意味の英語の略称で、半導体のシリコン基板、ガラス基板、有機材料などに機械要素部品のセンサ・アクチュエータ・電子回路などをひとまとめにしたマイクロレベル構造を持つデバイスを指す。日本では「マイクロマシン」と呼ばれることもあり、MEMS機器の大きさは、一般的には全長がmm単位で、その部品はμm単位という極小の世界である。MEMSは小型化、省電力化、高機能化、低コスト化が必要な機器には欠かせないデバイスといえよう。世の中には半導体が至る所に利用されている。MEMSも同様に、あらゆる製品の中に存在している。例えば、加速度センサーにMEMS

技術が使われていて、車体制御などで自動車に多用されている。その他に、DMD (Digital Micromirror Device)を取り上げる。このDMDでは何百万個の微小ミラーアレイを個別に駆動制御することにより超小型プロジェクタとして利用することができる。

1.9 今後の展望

今後も、あくまで微細化、高集積化のトレンドは技術が飽和するまでは続くと考えられる。では最小チャネル長の限界はどこか、5nm、4nm、3nmか。Siを置き換える半導体材料は何か。また、現在の最先端微細加工はEUV技術であるが、その後はどうなるであろうか。等倍X線、あるいは電子線などの技術を使うことによってさらに微細な加工をすることができるか、スループットやコスト面で、実用化することができるかが決まる。1970年に集積回路が出現してから50年以上の年月が経つが、いよいよ最後の壁に直面しつつあるというのが現状と思われる。

今年官民挙げての最先端集積回路の開発・製造を目指したラピダスが発足した。ロジックを中心とした最先端集積回路(おもにプロセッサ、マイコン)では、日本は少なくとも数世代遅れており、自力でそのギャップを埋めることはできないと思われた。そこでラピダスは起死回生の手段として2nmまでメドをつけたIBMの技術の提供を受けることになった。提携内容の詳細や提供額は発表されていないが相当なものになるであろう。

IBMは研究開発では世界の最先端を走っているグループのひとつであるが、製造規模や製造コストの面では課題があり、2015年に製造を放棄している。そのため、開発技術の有償提供は研究開発費の回収という意味でも、また世界に冠たるIBM計算機の要であるCPUのサプライチェーンの分散という意味でも望ましいと考えたのではないだろうか。

現在でも半導体装置と半導体材料では日本企業は強い。半導体装置メーカーとして、アプライドマテリアル(米)、ASML(蘭)、ラムリサーチ(米)、東京エレクトロン(日)、KLA(米)がトップ4としてシェアを分け合っている。日本の半導体材料メーカーは特に強い。半導体材料として、シリコンウェハ、フォトレジスト、フォトマスク、スラリー、スパッタターゲット、高純度ガス、化学薬品などがあるが、世界の7-8割のシェアを日本の材料メーカーが持っている。このような状況の中で、国内の半導体メーカーと強い連携が生まれることによって、よい相乗効果が得られることを期待している。

TCADを活用することにより、デバイス特性の理解を深め、最適な構造を探索できる。これによって、試作規模の大幅な削減と開発期間の短縮が実現できる。また、既存製造技術では実現するのが困難な複雑な構造を机上で実現し、性能解析を行う。たとえば、Si、SiC、GaNのパワーデバイスの複雑な構造をシミュレートし最適な構造を得る。さらには、新規半導体基板を用いた新規デバイスの性能予測を行う。これにより、新たな市場を開拓できる可能性が生じる。

1.10 終わりに

事実上1970年から始まった集積回路の革新は、規模や処理能力、さらにはコストの面でも1億倍に達する向上をもたらした。しかしその向上分は、肉眼の認識限界に達した動画像の精細度、より人間の思考に近づくAIの出現、ストレスのない超高速通信手段

の充実などに費やされ、それほどの恩恵を感じていないのは贅沢としかいいようがない。

そしてデバイスの寸法が原子十個分の大きさに近づき、否応なく物理限界が見え始めた。また、コスト面からもDRAMに代表される大規模化は1Gビットから鈍化し始めている。

今後10年間にブレークスルーは出現するであろうか。出現するとすればそれはシリコンの延長上にあるのかどうか、とても興味深い。

2. 聴講における感想(アドバンスソフト)

本講演では、1947年の最初のトランジスタの発明、1970年の1KビットDRAMの開発のところからご説明頂き、その後、半導体技術の進展に伴い15年ごとにチップあたりの素子数は1000倍になり、素子寸法は1/10になり、半導体デバイスは高集積化の一途を辿ってきたことをお示し頂いた。この高集積化の間、世代ごとに様々な技術革新があったこと、世界の半導体企業間で熾烈な覇権争いが繰り広げられたこと、また、その間に半導体技術に関わるホットなテクノロジーが世の中を賑わせてきたこと、など多方面からお話し頂いた。

将来展望の内容では、官民挙げて発足した最先端集積回路の開発・製造を目指すラピダスのお話と、日本の半導体装置メーカーと半導体材料メーカーは現在でも大きな存在感を持っているというお話があった。この2つの内容は、当時世界トップのシェアを誇っていた日本の半導体産業を、再び盛り上げるための希望であり、今後の動向を見守っていきたい。



【ご経歴・ご研究内容】

1969年 東北大学 工学部 電子工学専攻 修士課程修了。

1969~98年 日立製作所勤務。

1973~74年 米国スタンフォード大学 客員研究員。

1980年 東北大学より工学博士授与。

1998年 広島大学 ナノデバイス・システム研究センター 教授。

2007年 広島大学 名誉教授。

2016年 IEEE Life Fellow。

その他の詳細・研究内容については、ホームページを参照してください。

<http://www.sunaccc/>

第3回アドバンス・シミュレーション・セミナー2023

大阪大学 基礎工学研究科 機能創成専攻 教授 後藤 晋 様

「複雑流動現象の数値シミュレーション」

開催概要

○講演概要

本セミナーでは「複雑流動現象」の数値シミュレーション研究の最前線を紹介する。ここで、流れが複雑になる要因はふたつに大別される。ひとつは、水や空気のように通常の流体であるにもかかわらず、流れの非線形性に起因して乱流（カオス）になる場合である。もうひとつは、混相流に代表されるように、流体自身が複雑な場合である。前者に関しては、スーパーコンピュータの能力の劇的な向上により、大規模数値シミュレーションによる乱流現象の解明が急速に進んでいる。一方、後者に関しては、優れた数値手法による混相流の数値シミュレーション研究の進展が著しい。

本セミナーでは、それぞれの事例をいくつか示す。

ご講演内容

1. 講演内容

1.1 複雑流動現象

後藤先生は複雑な流れの現象に関する研究をされている。複雑な流れが生じる理由としては、空気や水のように流体が単純でも流れが乱流のように流れが複雑になる場合と、混相流や非ニュートン流体のように流体自体が単純でない場合とがある。乱流に関しては、スーパーコンピュータの性能向上により直接シミュレーションが可能になり、一方で、複雑な混相流体のシミュレーション手法も急速に進展してきている。本講演ではこの二つの事例について講演いただいた。

1.1.1 乱流

乱流の重要な考え方の一つとして相似則がある。これはシミュレーション上で非常に重要な法則であり、境界条件を特徴づける流速と長さを用いて無次元化して表現できる。例えば円柱後流では、流れの特徴長さとして特徴速度を定義し、それを基準にして質量保存則と運動方程式を書き直す。このようにすることで、レイノルズ数という無次元の支配パラメータが現れ、乱流が維持される条件を考えることができる。

さらにもう一つの相似則として、乱流の小さなスケールの運動は境界条件によらずに普遍的な性質を持っているということである。この理論は1941年にコロモルフによって提案され、乱流の小さなスケールの統計は流体の動粘性係数とエネルギー散逸率によって決まると予言された。この概念は乱流モデル

の基礎となり、特に動粘性係数とエネルギー散逸率だけで乱流の状態が決まることは非常に強力な相似則である。乱流のモデリングでは、乱流の種類に関係なく小さなスケールの運動をモデル化する手法が広く使われてきた。これにより乱流の種類によらず小さなスケールの運動はモデル化でき、最近ではスーパーコンピュータの性能向上により直接シミュレーションがモデルなしで可能になってきている。モデルの精度向上が課題とされながらも、直接シミュレーションベースの手法がますます可能性を広げている。

1.1.2 複雑流体

複雑流動現象のもう一つの例は、流れではなく流体そのものが複雑な場合についてである。例えば、異なる物質が混在している場合や、空気と水のように異なる相が存在する場合などが該当する。こうした複雑な場合でもシミュレーションが可能になってきており、乱流モデルや数値シミュレーションの手法が進化している。

また、興味深い現象として、非ニュートン流体の流れがある。一般に、空気や水などのニュートン流体は粘性応力が速度勾配の一次関数で表現できる流体であるが、例えばマヨネーズや高分子溶液、粒子や気泡が分散した液体など、複雑な物質の流れではニュートン流体の単純なモデルが適用できない場合がある。こうした流体のモデリングには、埋め込み境界法や多相流モデルなどのアプローチが発展しており、研究が進められている。

1.2 乱流の数値シミュレーション

1.2.1 乱流の基礎事項

① エネルギースペクトル

エネルギースペクトルとは、エネルギーのスケール分布を定量化する概念であり、乱流のスペクトルは広がった形を持つことが特徴とされる。エネルギースペクトルを通じて、乱流の大きさやエネルギーを把握することができる。また、乱流のスペクトルは3分の5乗則に従い、乱流の普遍的な自己相似性を反映している。

② 渦力学

渦力学は流体の運動を表すための概念であり、速度のローテーションである渦度の増幅に関連する。特に、渦度の支配方程式から、渦は渦度の方向に速度勾配が存在し引き伸ばしがある場合に強くなるということが直ちに示される。例えば乱流は渦の集合と考えることができるが、この重要なポイントを覚えておけばその力学を容易に理解できることがある。

③ エネルギーカスケード

エネルギーカスケードとは、乱流の維持メカニズム

の一つであり、外力からエネルギーが大きな渦に注入され、それが小さな渦を作り出すプロセスである。カスケードによってエネルギーが順次、より小さいスケールへと渡されることで、大きなスケールでの情報が失われ、小さなスケールの統計が普遍的になるとされる。また、コルモゴロフの相似則でエネルギー散逸率が重要な物理量である根拠も与える。

1.2.2 事例1 周期箱乱流

ここでは、周期箱乱流という壁のない三方向周期性を持つ乱流を考える。人工外力を加えることで乱流が維持され、エネルギーカスケードが起こることが直接シミュレーションにより示された。シミュレーション方法は、高速フーリエ変換を用いたフーリエスペクトル法である。また、フーリエバンドパスフィルタを用いて渦をスケールごとに分析することで、乱流の階層的な組織構造が可視化できる。さらに、エネルギーカスケードによって渦が形成される様子がよくわかる。

1.2.3 事例2 円柱後流

円柱の周りに適切な計算領域を設定し、周期境界条件と一様流入条件と対流流出条件を設けた計算を実施した。有限差分法とSMAC法を使用してシミュレーションが行われ、ガウスフィルターを使用してスケール分解を行うと、ローラー渦やリム渦など、異なるスケールの渦が相互作用して乱流が維持される様子が明らかになった。スケール分解によって乱流の特性が明確になり、周期箱乱流と共通の性質を持つことが示された。このようなメカニズムが普遍的に乱流の形成に関与していることがよくわかる。

1.2.4 事例3 乱流境界層

壁の存在によって乱流境界層は、上の周期箱乱流や円柱後流よりも、その維持機構がやや複雑になるが、ここでも、スケール分解によって乱流の特性が明確になることが示された。また、スパコンの性能の向上により、乱流のシミュレーションが容易になり、データからさまざまな洞察が得られるようになった。これにより、乱流の維持機構や物理描像がより理解されるようになった。

1.3 混相流の数値シミュレーション

1.3.1 事例1 混相流 (固体+気体)

ここでの混相流は、乱流の中に固体分子を分散させると乱流が抑制される現象であり、この現象をシミュレーションで再現できることが示された。混相流のシミュレーションには数多くのパラメータが存在し、スーパーコンピュータを利用することで効率的な計算が可能となる。シミュレーション結果により、乱流の低減には小さく、かつ重い粒子が重要であることが明らかになった。混相流のメカニズムやパラメータの評価により、より正確なシミュレーションが可能になったことが示された。

1.3.2 事例2 混相流 (液体+気体)

実験装置を使用して、容器に液体が部分充填され

ている場合に、回転遠心力によって容器の回転軸とは垂直な方向に軸をもつ渦が発生する現象が観察された。この現象をシミュレーションで再現するために、気液界面をVOF関数とレベルセット関数を併用して捉えることでシミュレーションを行った。この方法により、シミュレーション結果と実験結果がよく一致した。数値計算法にはまだ改善の余地があるが、定量的な結果が得られており、自由界面のシミュレーションに有用であることが示された。

複雑流体のシミュレーションは実験に比べて優位であり、埋め込み境界法、VOF法あるいはレベルセット法などを使用することであらゆる場面でシミュレーションが可能になりつつある。シミュレーションはパラメータの自由な設定が可能であり、実験に比べて今後その役割がさらに大きくなることが予想される。

2. まとめ

複雑流動現象の解析には、まず、レイノルズ数や流体の構成といった複雑性の原因の把握が重要である。幸いなことに、スパコンの性能の向上に伴って、種々の複雑流動現象のシミュレーションに挑戦可能な世界が訪れている。さらに、混相流や非ニュートン流に関する数値シミュレーション方法自体も年々進化している。CFD解析においてもその結果分析こそが重要であり、背後に隠されている物理をよく理解することで一見複雑な現象自体も理解できる可能性がある。今後5年から10年で複雑流動現象の理解も劇的に進むことが期待される。



【ご経歴】

1994年 京都大学理学部卒、1999年 博士(理学、総合研究大学院大学)、核融合科学研究所助手、京都大学助教、岡山大学准教授などを経て、2015年より現職。2021年よりJST さきがけ「複雑な流動・輸送現象の解明・予測・制御に向けた新しい流体科学」研究総括。

【ご研究内容】

専門分野は、流体工学。乱流などの複雑流動現象の物理の解明とその工学応用を目指している。

第3回アドバンス・シミュレーション・セミナー2023

University of California, Los Angeles (UCLA) 教授 平 邦彦 様
「機械学習による流体解析の拡張」

開催概要

○講演概要

地球温暖化による気候変化や流体システムの複雑化により流体機械や輸送機器を非定常な状況で運用せざるを得ないことが増えている。そのため非定常流れを解析することが必要であるが、その際に得られる膨大なデータから現象を理解することが求められる。このような解析を手作業で行うことには限界があり、機械学習・データ科学を駆使し新たな解析手法の開発および従来の解析手法の拡張が急務となっている。

本講演では剥離流や乱流などの例を取り上げながら、機械学習を用いた流れの解析、モデル化、状態推定や制御を考える。また問題点や今後の期待についても議論する。

ご講演内容

1. 講演内容

1.1 非線形機械学習を用いた流体解析

平先生には、時々刻々発達する流れを、機械学習技術を用いて分析する手法について講演いただいた。

流れ場のデータ解析としては、POD 解析や DMD 解析といった手法がある。POD 解析では、特徴量を抽出することで流れ場を復元することが可能である。また、機械学習や深層学習の手法をもちいてもデータの特徴を抽出し、ベクトルとして表現することが可能である。成分解析や次元削減の応用としても活用されている。

対象となる現象が非線形の場合、そのデータの特徴量をどのように抽出するかが問題であるが、そこにニューラルネットワーク技術を用いることが注目されている。ニューラルネットワークでは入力と出力の関係を学習し最適化することで重みを求める。ニューラルネットワークの手法は問題によって異なり、乱流解析に適用するにはいくつかの選択肢がある。

平先生の研究室で行った事例として、超解像 (Super Resolution) の事例を紹介いただいた。ここでは、粗い画像から元のデータを復元することを目指している。流体の専門家たちは、このような粗いデータを見ても流れの特徴や渦の位置を視覚的に把握し予測することができるが、それをデータを使って求めることは一般的に難しい。そこで、機械学習の一手法であるニューラルネットワークを使用して、低

解像度の画像から流れ場を復元することを試みる。円柱周りの流れのデータを元に復元した結果、比較的簡単に正確な流れ場が得られることがわかる。この方法は一般的な畳み込みニューラルネットワークでは難しい場合もあるが、ネットワークの構造を適切に選ぶことで乱流の特性を捉えることができる。このような手法を適用することで、乱流の元の高解像度データを求めることができる。

実験では、低解像度の画像から高解像度の流れ場を復元する事例が示された。中程度の解像度 (16×16) の場合、ニューラルネットワークを使用すると非常に良好な結果が得られる。一方、低解像度 (8×8) でも 15% の誤差があるが、粗い情報であっても渦の中心や構造が正確に復元されることがわかる。さらに (4×4) の超低解像度であっても 43% 程度で渦の構造を復元できた。この結果から、流れ場を正確に復元するためには、乱流の特性を理解し、ネットワークの構造を適切に設計することが重要であり、数学的特性を取り入れることや最適化問題において方程式を満たすような重みを見つけることも有効であることが示唆された。例えば、元の流れ場が楕円型方程式の数学構造を持っている場合は、ニューラルネットワークも楕円型に適した手法を用いたり、物理の方程式を付加した PINN などを用いると精度が上がるということがわかってきた。

1.2 激しい天候における航空機運航への応用

航空機の運行において、大気の流れや変動する状況の影響が問題となっている。特に小型航空機では乱流の影響を受けやすく、安全な運行が困難な状況が生じる。例えば平均流れに対して突風の影響が大きい状況である。過去にはこのような激しい天候では飛行機を飛ばしてはいけない条件であったが、最近はこのような状況下でも安全に飛行することが求められる。対象としては、迎角を持った翼に対して主流速度の数倍の影響を持った渦がぶつかったときの流れとした。まず線形手法である POD を用いて主成分を取り出して流れ場に戻してみるとほとんど再現できないことが分かった。一方非線形手法であるニューラルネットワークにおいて、オートエンコーダー・デコーダー技術を用いることで流れ場の特性や数学的特性を理解し、データから 3 つの成分を抽出することが可能となった。ここでは揚力を再現することを最適化の中に組み込むことによってこの流れの重要な成分を取り出すことに成功した。また単一の渦だけでなく、複数の渦がぶつかった場合にも流れ場を再現できることが分かった。これにより、揚力の捉え方や流れ場の変動など、航空機の運行に関

連する重要な情報を得ることが確認できた。オートエンコーダーを用いた流れ場解析手法を用いることで、航空機の安全性向上や都市部や山間部での物資輸送やドローンの運用などの課題解決に有益な情報を得ることが期待できる。ちなみに流れ場全体の情報を持っていないと構築できないというわけではなく、翼の周りに置いた有限個のセンサーの情報から流れ場を再現することも可能である。

2. まとめ

非線形機械学習を用いることで、流れの特徴を抽出することが可能になった。人間が目で見える程度の流れ場を把握できるような場合には、これら手法を用いて流れ場の特徴やパラメータを抽出し、情報を圧縮することによって流れ場を復元することができる。特にニューラルネットワークを用いた非線形手法は流れ場の特性を捉えることができるため、航空機の運行や乱流の制御に応用が期待される。さらに、オートエンコーダーやモード解析などの手法を用いることで、流れ場の復元や特徴量の抽出が可能であり、実験データやセンサー情報を活用することでリアルタイムな解析や制御が行える。これらの手法の進展により、より高度な流体解析が可能となり、航空機や工業製品の性能向上に貢献することが期待される。

3. 聴講における感想（アドバンスソフト）

○乱流に関して、学生時代や会社で勉強し、普遍域は理解した積りでしたが、渦方程式導入の意義や伸長までは知りませんでした。それがカスケードにつながるものが、渦の可視化から理解することができ大変有意義でした。後藤先生ありがとうございました。

○後藤先生のご講演は、力学の視点に立った乱流の基礎理論のご説明が非常に分かりやすく乱流への理解がいつそう深まり、自分野の流体现象理解を深めてゆくモチベーションが高まりました。

平先生のご講演は、流体の AI 適用の具体的成功事例を分かりやすくご説明いただき、AI 適用に向けたモチベーションが高まりました。

○乱流流れの基本的な解説からご説明頂き、また渦度をスケール分解し可視化分析しているのが非常に興味深かったです。また機械学習を用いた乱流流れの予測も高精度に可能で、少ない特徴量で表現可能というのが勉強になりました。

○後藤先生のご講演では、本質的な流れを知るにはポスト処理が大変重要であることを認識しました。単に渦度の絵を見てはは何もわかりませんね。平先生のご講演では、基本的な翼周りとは言え、複雑な流れが3変数に集約できてしまえることに本当に驚きました。今回も目から鱗が落ちるようなご講演、ありがとうございました。



【ご経歴】

2002年 テネシー大学 工学部 航空宇宙工学科および理学部数学科卒業。2008年 カリフォルニア工科大学 理工学部機械工学専攻 博士課程修了。2008～10年 プリンストン大学工学部機械航空宇宙工学科 博士研究員。2010～11年 本田技術研究所勤務。2011～18年 フロリダ州立大学工学部機械工学科 Assistant Professor, Associate Professor (17～)。2018年～現在 UCLA 工学部機械航空宇宙工学科 Associate Professor, Professor (21～)

【ご研究内容】

専門は、計算流体力学、非定常空気力学、流れ制御、データ科学。

アドバンスソフト株式会社は、2021年以降、計算科学分野・シミュレーション分野の裾野を広げ、日本の計算科学振興の一助となるべく、「アドバンス・シミュレーション・セミナー」シリーズを開催しています。本セミナーは、コンピュータシミュレーションの各分野でご研究・ご活躍されている先生方を中心に講演をいただき、オンラインでのセミナーです。弊社の収益事業とは一線を画した『文化活動』と位置付けており、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開催して参りました。

大変ご好評をいただいております、2021年の開始から延べ1,370名の方にご参加いただき、大いに貢献できたのではないかと自負しております。この成果を受け、2023年も引き続き、全10回のセミナーを開催いたしました。

第4回アドバンス・シミュレーション・セミナー2023

東京工業大学 学術国際情報センター 教授 青木 尊之 様

「GPU スパコンによる混相流シミュレーション・流体構造連成のシミュレーション」

開催概要

○講演概要

混相流は数値解析が難しい流れとしてよく知られている。ものづくり分野では複雑形状の物体が激しく移動するため、気体と液体の密度の違いから気液界面がせん断流れとなる。界面での密度と運動量プロファイルを整合せ、運動量が保存するように解く必要がある。さらに、8分木データ構造の適合細分化格子 (AMR) 法を用い、気液界面と物体近傍に高解像度格子を効率的に配置している。また、流体構造問題も AMR 法と Cumulant 型格子ボルツマン法を用いて解いている。これらを GPU スパコンに実装するために、空間重点曲線を用いた動的負荷分散を行っている。本講演では、多数の動画とともにさまざまな応用事例を紹介する。

ご講演内容

1. 講演内容

1.1 はじめに

我々の研究室では、混相流のシミュレーションを高精度かつ高速に大規模で計算するための研究開発を進めている。また、移動物体を含めた流体構造連成や、最近話題になった野球ボールの空力解析の研究にも取り組んでいる。計算手法は、非圧縮性流体に対して弱圧縮性解法を適用している。ソルバーは2種類あり、NS 方程式のソルバーと格子ボルツマン法のソルバーであり、メッシュを動的に割り当てる AMR 法も採用している。また、GPU で計算するために CUDA でプログラミングしている点も我々の大きな特徴である。

1.2 気液二相流のシミュレーション手法

代表的な気液二相流のベンチマーク問題であるダムブレイク問題の計算では、気体と液体が激しく入り混じることで気泡が出来たり、液滴が飛んだりする。我々も他の多くの研究と同じく、1 流体のナビエ・ストークス (NS) 方程式に加えて、気液界面の識別関数を用いている。しかし、非圧縮性流体計算は大規模になるとメッシュ数だけが問題でなく、流路が複雑な場合や移動物体があると圧力のポアソン方程式 (線形ソルバー) の収束性が非常に悪くなってしまふ。そこで、陽解法の弱圧縮性流体計算手法を開発した。圧縮性での NS 方程式を解き、ポアソン方程式の代わりに等温過程あるいは低マッハ数近似から導出される圧力の時間発展方程式を解く。これは、十分に非圧縮性流体と見なせる範囲であれば僅かな圧縮は許容するという手法である。

気液界面の識別手法は、THINC/WLIC 法や PLIC-VOF 法、界面を自律的に記述できる保存型 Allen-Cahn 方程式に基づいた Phase Field 法を使用し、その時々の問題に応じて使い分けている。また、運動量を保存する計算手法を導入していて、気液界面で密度と運動量の空間プロファイルを整合せせる必要が

ある。壁が遠方に設置されているダムブレイク問題では、先端で数値的な Kelvin-Helmholtz 不安定を起こすことなく計算できた。また、民間企業との共同研究で、矩形流路内に溜まった凝縮水に対して、空気を流入させることで排出させる問題では、保存型で解くと流路内の水が残り実験と近い結果になる。気体と液体の密度が大きく異なるため、気液界面ではしばしばせん断流れになり、運動量保存型で気液二相流では解くことが必要となる例も多い。

1.3 より高解像度・高効率計算を目指して

弱圧縮性計算手法のソルバーを開発したことで大規模計算が可能になったが、計算を高速に行うために、演算性能が高い GPU コンピューティングにも取り組んでいる。CFD では、演算性能が高いだけではダメで、メモリ帯域が広いことも大切である。BF 値 = メモリ帯域 / 演算性能でみると GPU の BF 値は低くピーク性能に対して実行性能が出し難いと思われるかもしれないが、GPU は演算性能が高いので、実際の計算速度は CPU よりも圧倒的に速くなる。GPU の特徴は 1 チップ内に非常に多くの演算コアがあり、2024 年 4 月に稼働開始する東京工業大学 学術国際情報センターの Tsubame4.0 には NVIDIA H100 が 960 個搭載される。1 つの H100 に約 18000 個のコアがあり、1GPU を使う場合でも並列計算を意識する必要がある。

いくら速いプロセッサを使っても、均一格子で計算すると実問題では総格子数が非現実的になり殆ど役に立たない。そこで、必要なところに高解像度 (細かい) 格子を動的に割り当てる AMR 法を採用している。GPU の場合には、自分でメモリプールを用意し、細分化と粗大化に対してシステム側に頻繁な動的メモリ確保をさせない必要がある。また、大規模計算では複数 GPU や複数ノードを使うことが必須であり、計算負荷をバランスするように動的に計算領域を分割する必要があり、我々はモートン曲線やヒルベルト曲線、ペアノ曲線などといった空間充填曲線を用いている。その分割方法は、端から計算格子を数えながらメッシュを一筆書きでなめ、均等な格子数になるように空間充填曲線を分割する手法である。AMR 法の場合はどうしても領域間の通信のオーバーヘッドが大きくなるが、陽解法なので隣接領域との通信が必要な格子と内部の格子を分けて解き、内部の格子を計算している時間に領域間通信を行う通信と計算のオーバーラップ手法で通信をできる限り隠蔽している。

もう 1 つ大きな課題として、移動境界をどう扱うかという問題がある。我々は FAVOR 法をベースに Dual Contouring 法という手法を使って格子の中の物体の占有率を精度よく求めている。さらに物体が移動することにより流体率が小さい格子が発生するが、流体の体積が保存されるように隣接格子と合体させるセルマージング法を用いている。これらの手法は計算の安定性にも大きく貢献している。

次は表面張力が重要になる流れに対する計算例である。液膜が非常に薄く 100 ミクロン以下になるシャボン玉の計算では、AMR 法を使うと液膜の近傍だ

けを細かい格子で計算することができる。2つの球の間に液架橋があって、その状態で片方の球を落下させるシミュレーションでは、液架橋が変化する様子が実験結果と非常によく一致している。この応用として、水分を含んだ粉体の容器に振動を加えて液架橋ネットワークが変化する計算ができたり、流動特性の評価で使われる一軸せん断試験の計算ができる。

さらに、接触角や表面張力が重要となる事例として、アメンボの水面走行を計算した。AMR法で水と接するアメンボの脚の近傍に高解像格子を割り当てることで非常に高効率に計算することができる。2本の中脚を手漕ぎボートのオールのように使って泳ぐが、推進のメカニズムは抗力の反作用ではなく、水面の歪みによる毛細管力であることが分かった。

1.4 格子ボルツマン法による流体・移動物体・流体構造連成のシミュレーション

格子ボルツマン法は、粒子の速度分布関数を格子上で時間発展させる弱圧縮性流体計算手法である。従来はSRT (Single Relaxation Time)と言われる衝突項の計算が行われていたが、最近の研究の発展によりCumulant衝突項を用いることにより、計算精度と安定性が飛躍的に向上している。我々もCumulant衝突項を用いた格子ボルツマン法を用いている。一方、格子ボルツマン法は流体の密度変化の計算を得意としないため、気液二相流に対しては、気相の流れを解かず自由界面を含む液相の流れのみを計算する。また、格子ボルツマン法のメリットとして、2次精度のInterpolated Bounce Back法を用いることができ、速度ベクトルが27方向あるため、任意形状の物体の境界条件を精度よく満足することができる。

事例として、水槽実験との比較で16m水槽内にボールを8本置いたケースと18本置いたケースで、流木を模擬した木片を流した実験とシミュレーションの比較を行った。ボールが8本のときは、木片が全てボールをすり抜けて下流側に流れてしまうが、18本のボールでは約半数が補足されることが分かり、補足された木片の角度も水槽実験と非常によく一致している。別の事例としては、空力によるアクリルの薄板の変形の実験との比較も行っている。慣性力と弾性力の比であるコーシー数を変えてシミュレーションすると、流速が速くなるのに従って変形モードが遷移する実験結果を再現することができている。

1.5 野球ボールの空力解析と変化球の軌道シミュレーション

球が受ける抗力は、レイノルズ数が $2 \times 10^5 \sim 5 \times 10^5$ の辺りでドラッグクライシスと言われる抗力係数が急激に減少するところがあることはよく知られている。抗力が急激に減少するのは、剥離点の位置が下流側に移動するため、乱流境界層になるためである。野球ボールの軌道の変化を解析するために、メジャーリーグの公式試合球の実物を3Dスキャンし、AMR法でボールの表面近傍と後流に高解像度格子を配置し、総格子数が約10億の空力解析を行った。一番細かい格子幅は約50ミクロンで境界層を解像している。まず、バックスピンのツーシームとフォーシームを比較すると、球速と回転数は同じでも縫い目が違うだけでボールに働く揚力が全く違うことが分かる。高さ0.9mmの縫い目も解像する高解像度の非定常シミュレーションにより、ツーシームの場合には1回転の中で縫い目の位置がある角度の

範囲で負のマグナス力が働いていることが分かった。さらにメジャーリーグの大谷翔平投手のスプリットをツーシームのバックスピンだとしてシミュレーションしてみたが、落差を再現できない。そこで改めてボールの回転をよく調べてみると、バックスピンではなくジャイロ回転していることが分かり、ジャイロ回転により横に曲がる力と落ちる力が周期的に変化して相殺することが分かった。さらに富岳を用いて、スリーパーの計算も行い、バッター方向の回転軸が50度~60度傾くと余り落ちずにスライドするスリーパーの特徴を再現することができた。縫い目の効果によりマグナス効果とは異なるメカニズムでボールに揚力がかかることを明らかにした。

2. 聴講における感想 (アドバンスソフト)

青木先生には、様々な混相流、移動物体、流体構造連成のシミュレーション事例について魅力的な動画を多数用いてご講演いただいた。野球ボールの空力解析など身近な事例もあり、流体解析が専門でない方にも興味を持っていただける内容だったと思う。大規模な非圧縮性流体のシミュレーションを高速化するための工夫(弱圧縮性流体計算手法の導入による陽解法化)やGPUで計算するためのメモリ管理の方法、様々な数値的(非物理的)な不安定性の問題への対処など専門的な話も伺えることができて大変勉強になった。超高並列の流体シミュレーションでは太陽の対流層の計算においても、連続の式を工夫して音速を抑制する手法があり、他の分野(マントル対流)にも適用されており、個人的には陰解法から陽解法への流れを感じている。野球ボールの空力解析については、On GPUで高速に計算できるようになれば、例えば、F1で空力解析を用いてマシンの開発するように大リーグの各チームが野球ボールの空力解析から新しい変化球を生み出すような時代も来るかもしれないと思った。



【ご経歴】

1983年 東京工業大学・理学部・応用物理学科卒業。
2001年から同大学・学術国際情報センター教授。
2011年 ACM ゴードンベル賞、2012年 文部科学大臣表彰、2022年 東京都功労者表彰。

【ご研究内容】

GPU スパコンを用いた高性能計算アプリケーションおよび混相流の大規模シミュレーション研究に従事。科学研究費補助金・基盤研究(S)を研究代表者として、2回連続で採択・実施。最近では野球ボールの空力解析も実施

第5回アドバンス・シミュレーション・セミナー2023

東京大学大学院 工学系研究科 原子力国際専攻 教授 笠原 直人 様
「原子力安全に必要となる計算科学技術への期待」

開催概要

○講演概要

設計とは想定した事象に対する備えであり、我が国の原子力発電所は、事故を起こさないことに細心の注意を払ってきた。福島第一原子力発電所事故を教訓として、想定を超える事象に対して事故が起こった後の、影響緩和やレジリエンスの重要性が認識されるようになった。こうした対策には、事故や破損から安全性能喪失までに至る進展挙動の予測が前提になる。設計用の破損以前までの保守的解析法では不十分であり、非線形挙動をベストエスティメートする必要が出てくる。実験による再現は規模や安全性の面から制限が大きく、実機予測は計算科学が必要となる。大学での関連研究の紹介と共に将来への期待を述べる。

ご講演内容

1. 講演内容

1.1 はじめに

アドバンス・シミュレーション・セミナー2023の第5回では東京大学大学院工学系研究科原子力国際専攻の笠原先生より、「原子力安全に必要となる計算科学技術への期待」というタイトルでご講演いただいた。ご講演は、事故から学んだ原子力安全、及び、次世代革新炉の開発に関する話題から始まった。その後、原子力安全のニーズと、それに応えるための大学での研究例として原子力プラントにおける受動安全構造の紹介があった。最後にこれらを踏まえた計算科学への期待をお話になった。ここではそのご講演の内容を紹介する。

1.2 事故から学んだ原子力安全

ご講演は、我々人類が経験した3つの大きな原子力発電所事故を教訓として、原子力安全に対する考え方がどのように変化して来たかというお話で始まった。

スリーマイルアイランド原子力発電所事故では、設計上の問題というよりは保守点検の不備や運転員の不適切な対応が原因で事故が発生した。その結果、固有の安全性に裏付けされ、先端技術でバックアップされた安全性の大切さを再認識するとともに、運転安全を含めて安全性を議論することが重要であることが認識された。

チェルノブイリ原子力発電所事故では、原子炉の構造に設計上の問題点があったこと、運転員が運転規則を違反したこと、運転にあたっての組織的な問題があったことなど、安全性に対しての文化が欠如していたことが浮き彫りになった。

福島第一原子力発電所事故については、地震発生直後に原子炉を停止させることには成功したものの、その後の津波の襲来によって全電源を喪失し、崩壊熱(残留熱)の除去や核分裂生成物の閉じ込めに失敗した経緯が詳しく述べられた。その結果から、従来の

設計想定事象に加え、設計想定を超える事象に対する対策も重視し、全体のリスクを合理的に低減する方法を考え続ける必要があると気づくこととなった。

1.3 次世代革新炉の開発

一方で、カーボンニュートラルという点からの環境への影響の緩和や、ロシアとウクライナの戦争で顕在化した経済面やエネルギー供給の安全保障と言った問題から次世代革新炉への期待が高まっていることが紹介された。革新炉の一つである高速炉ではこれまでの軽水炉では燃料として利用できなかったウラン238をプルトニウムに変換しエネルギー源として利用することができる。これにより利用可能な資源の量が何十倍にもなり、長期のエネルギー安全保障が実現可能である。また、使用済燃料を再処理して再利用可能な物質を取り出す核燃料サイクルと組み合わせることで、放射性廃棄物の環境への負荷も大幅に減らすことができる。その他にも、高温ガス炉や熔融塩炉、小型軽水炉/革新炉などの開発が進められており、アメリカ、イギリス、カナダでは大型予算が組まれている。日本でも原子力イノベーションの創出に向けて、Nuclear Energy × Innovation Promotion (NEXIP)と呼ばれる支援プログラムが進められている。

1.4 原子力安全のニーズ

このような背景から、原子力発電所の安全性を高める方法として、設計想定事象(Design Basis Events; DBE)と設計想定を超える事象(Beyond Design Basis Events; BDBE)の全体を通してリスクを評価すること、リスクを許容レベル以下に抑制することを目指すようになった。つまり、DBEに対して事故の発生や機器単体の破損を防止するという従来の考え方に加えて、BDBEに対しては可搬設備や緊急時対策などのシステム面で事故発生後の影響緩和を計画し、外部からのエネルギーや操作を必要としない受動安全機能を備えた新しい設備を利用するようになってきている。これらに加え、BDBE発生時に破損が生じても破損影響の拡大を自動的に抑制できる機器構造を考えることもできるのではと述べられた。

また、非国家集団やテロリストなどの脅威からの対策である核セキュリティにおいても原子力安全と同様に、異常発生後の影響緩和を図る考え方を取ることができるだろうと述べられた。このときに重要となるのがプラントの異常を早期に検知し識別することである。これにはプラント内に設置されたセンサーからの大量のデータを学習させたAIに正常な状態と異常な状態とを判断させるアイデアが有効と考えられる。それにより、その後の脅威を遅延させて影響を緩和し対抗策を取ることが可能とする。核セキュリティにおいても想定外の脅威に対する対策を立てることは難しいが、強化学習などの最新技術を用いて机上訓練をできる限り行い、人とハードを最適に組み合わせた対応案を導き出す手法が有効になるだろうと紹介された。

1.5 大学研究の紹介

その後は、構造強度という視点から BDBE に対する原子力安全へ貢献できる可能性として、大学での研究成果をご紹介いただいた。システム安全と組み合わせるレジリエンス(回復力)を高めるという考え方から、その一部が破損しても全体としては破局的な壊れ方を起こさない、もしくは、破局に至るまでの時間を非常に長くできる機器構造が望まれる。このような受動安全構造について、原子力以外の産業分野からヒントを得ながらご研究をされている。

研究成果の一つ目では、高速炉のような高温であることを特徴とする原子炉で、冷却機能の喪失により超高温状態に陥り材料が軟化した際に、変形により荷重が再配分され破断を防止する受動安全構造が紹介された。具体的には原子炉容器が自重等で変形して下部鏡が床などへ接触することで胴部の荷重が解放され破断を防止するものである。このアイデアが実現できるのは、下部鏡が床接触により座屈しても直ぐには破壊しない場合であり、それを検証するための球殻に対する座屈試験が紹介された。試験により、荷重が座屈強度に達しても飛び移り座屈が生じて、変形してもすぐには破壊しないことがわかった。これらの実験結果に対して、非弾性材料構成式と有限要素解析コードを組み合わせた構造解析を実施し、マルチリニア移動硬化則に基づいた構成式を用いることで実験結果を非常によく再現できることが示された。

研究成果の二つ目として、地震荷重に対して受動安全性が生じる構造に関する実験と有限要素解析の結果を述べられた。これは構造が一部破損することによって、まずは剛構造から柔構造へと飛び移り、その後破損が進展しても、荷重に対する応答が遅れるために力が伝わりにくくなり、破断が受動的に抑制されるという考え方に基づくご研究である。実験は薄肉円筒試験体に対して水平方向へ振動荷重を加えることで行われた。ある程度の荷重を加えると円筒上部で座屈が生じ、条件によっては亀裂が発生することもあったが、座屈後挙動は安定しており崩壊に至ることはなかった。また、加振させている振動台と円筒試験体との間は座屈後に位相遅れが生じた。実験の様子は動画でも紹介された。有限要素解析の結果は応答絶対加速度や座屈後の形状などの点で実験を良く模擬できており、座屈後にエネルギーの入力がおこりにくくなったことが安定性の要因であることも確かめられた。過大地震発生時に生じる座屈後の安定性と亀裂の発生を評価するためには、容器全体の座屈後の応答だけでなく、局所的なひずみを予測できるかどうかも重要になるが、後者に対して粗いメッシュの動的全体モデルと細かいメッシュの静的局部モデルを組み合わせた解析法も紹介された。

最後に、核セキュリティ対策の強化に対して、通常の操作に見せかけた攻撃を行う内部脅威者を画像 AI と言語 AI の技術を融合させて検知するシステムや、安全とセキュリティの両者を統合したリアルタイム最適対応システムの研究を精力的に進めていることをお話された。

1.6 計算科学への期待

ご講演のまとめとして、原子力安全に対する計算科学への期待をお話された。最も重要なのは、設計想定事象に対しては従来どおり破損の防止を念頭にお

くべきであるが、設計想定を超える事象に対しては事故の影響を緩和することへと思想を転換する必要があることだと改めて述べられた。それには、設計と同様の保守的な予測や評価をやめ、現実的な破損の規模や影響度、破損度挙動を正確に把握することから始める必要があり、実現象を高精度に予測できる解析技術とその検証法が鍵になると述べられた。一方で、想定を超える事象まで含めたリスク評価や核セキュリティ対策に対しては、膨大なパラメータ解析を高速に実行する必要があり、AI や DX 技術の活用が期待されると述べられた。

2. 聴講における感想 (アドバンスソフト)

原子力発電所の安全性において、機器単体や設備集合などは破損してはならないというような従来の思想から転換して、部分的には破損しても、破局的な事故には拡大しないようなシステム構築を行っていくことが現実的であり重要であるというお考えが強く伝わってきたご講演だった。そしてその実現のためには精度の高い解析技術を確認することや、多様な条件下のプラント挙動を高速に予測できる DX 技術を活用することが必要であり、我々計算科学に携わる者への使命だと感じられた。また、従来からの思想を転換する機会として他産業と交流し、そこでの事例を学ぶのがよいだろうとのご指摘は大いに参考となった。



【ご経歴・研究内容】

1984年東京大学大学院修士課程修了後、
動力炉・核燃料開発事業団入社、
高速増殖炉の構造設計評価法の研究開発に従事。
「もんじゅ」Na 漏洩事故時には原因究明に関わる。
1999年よりフランス原子力庁客員研究員。
2008年に日本原子力研究開発機構から東京大学に移籍。福島第一原子力発電所事故時には専攻長として対策を支援。
2022年より日本機械学会発電用設備規格委員長。

第6回アドバンス・シミュレーション・セミナー2023

東京工業大学 環境・社会理工学院 准教授 笹原 和俊 様

「フェイクニュースと生成 AI」

開催概要

○講演概要

この講演では、生成 AI によってさらに進化する事が予想されるフェイクニュースやディープフェイクの問題について焦点を当てる。ChatGPT や Stable Diffusion などの生成 AI の急速な技術的発展、情報の真偽を判断するための戦略や、デジタルプラットフォーム上で情報の拡散を防ぐ技術的対策についても説明する。その上で、これら複雑な問題に対する対策を立てるためにはビッグデータの活用が必要不可欠であり、それによって得られた結果をもとに、社会シミュレーションを用いて具体的な対策を模索することの重要性についても触れる。最後に、デジタル社会における生成 AI の可能性と課題について議論する。

ご講演内容

1. 講演内容

1.1 研究の動機

笹原先生は、2016年のJST さきがけプロジェクトで、社会課題を解決するための新しい技術を世の中に実装するというテーマの中でフェイクニュースという課題に出会った。

専門の「計算社会科学」は、デジタル時代の新しい社会科学である。社会現象を高い解像度で読み取り、現象の仕組みを理解し、社会課題を解決していくという、ゴールを重要視した社会科学である。

古くからデマを流布することにより相手よりも優位に立とうとするような行為は行われてきた。2016年には、トランプ大統領誕生に関係した不確実なニュースがまん延した。この時期、フェイクニュースやフェイク画像は瞬く間に広がるのに対して、それがデマであるという訂正情報は拡散しないということが起こっていた。このような情報拡散の仕組みを科学的に考えることが、研究の動機である。

1.2 フェイクニュースとはどのような問題か

新型コロナの状況下で、インフォデミックと呼ばれる状況が発生した。インフォデミックとは、確かな情報と不確かな情報が混在する SN 比の悪い状況のことである。このような状況では、「間違っただけの意思決定」や「不安や恐怖の増幅」、「差別を助長」など社会的な問題が生じる。

コロナ渦のインフォデミックの例として、「5G の電波がコロナウイルスを運んでくる」という誤った情報が拡散した。一部の影響力が大きい人（スーパースプレッダー）の拡散力の源であった。このような人

物を早く特定して、食い止めることが重要になる。最近では、ゼレンスキー大統領が「武器を置いて投降しなさい」と話すフェイク動画が拡散された。この動画は、よく見ると目の瞬きに違和感があった。これは目をつぶっている画像データの不足のために発生していると考えられる。

1.3 エコーチェンバーとフィルターバブル

エコーチェンバーとは、同じ意見を持つ人々が集まり、自分たちの意見を強化しあうことで、多様な視点に触れることができなくなる現象のことである。人間は、似た人と集まる習性がある。これを「ホモフィリー（同類性）による選択的接触」という。

2020年頃、米大統領選挙の時期の X (旧 twitter) への投稿を解析したところ、バイデン派とトランプ派のそれぞれは、仲間同士ではリツイートしあうが、異なるイデオロギーの人とは距離を取っていて関わりが少ない、ということがわかった。同様に、コロナ禍のワクチンに関する報道のツイート拡散を解析すると、ワクチン派、反ワクチン派、ニュートラル・メディア、右派、左派の5つのクラスターに分類することができた。その中でも、反ワクチン派が最も毒性の高い言葉を発していた。また、フォロワーが多い人ほど毒性の高いリプライを受け取りやすい傾向があった。

エコーチェンバーが生じるような条件を検討するために、SNS を模した意見形成モデルを作成し、進歩的と保守的のような意見の二極化がどのように発生するかについて、社会シミュレーションを行った。初期は周りに多様な意見が存在するが、時間が経つと意見の分極化が生じ、更に時間が経過すると同じ意見の人同士でコミュニティを形成する現象が再現できた。SNS のような社会的影響を強く受け、フォロワー、アンフォロワーが気軽にできる世界では、容易にエコーチェンバーに陥ることを示している。

フィルターバブルは、インターネット上の情報が、個々のユーザの関心や過去の検索履歴、閲覧履歴などに基づいて選択的に表示される状況のことである。自分の価値観に合った情報ばかりに触れることで、偏った認識や固定概念を持つことを助長する。

フィルターバブルは、アルゴリズムによって起こる選択的接触である。ある実験では、YouTube Kids を使い、推薦された子供向け動画を3回ほど推薦に従い閲覧すると、おすすめ欄がそればかりになることが示された。この状態を「ラビットホールに落ちる」と称する。ランダム視聴ではそのような傾向がないため、YouTube 上のフィルターバブルの強さがわかる。

情報環境は、エコーチェンバー（あなたが誰とつながるか）とフィルターバブル（あなたが何を見たか）で常にフィードバックループが回っている。その結果が「どんなコンテンツが好きか」、「どんなコンテン

ツが表示されるか」、「それによりどんな影響を受けるか」というループに影響を与えている。それらに、ソーシャルメディア上の SNS ビジネスやインターネット効果、承認欲求、お金などが、複雑に絡み合っている。エコーチェンバーやフィルターバブルを理解するために、これらの要素を科学的に厳密に測定しなければならないが、それが難しいため、まだまだクリアになっていない。

1.4 ディープフェイクと生成 AI

ディープフェイクとは、ディープラーニング(深層学習)とフェイク(偽物)を組み合わせた造語である。広義では、AI によって合成・生成されたメディアやその技術を指す。狭義では、人を騙す目的で本物そっくり合成された偽メディアをいうこともある。

2022 年の革命的な出来事は、「プロンプト」と呼ばれる「言葉による指示」で画像を生成することができるようになったことである。GAN 等は、コンピュータやプログラムの知識が必要で、一般の人にとってハードルが高かったが、プロンプトにより誰にでも簡単にできるようになった。画像生成 AI による精度の高いディープフェイクは悪用される可能性があるため、社会問題化している。

生成 AI である ChatGPT は、大規模言語モデル(LLM) の一種で、ユーザーインターフェイスが自然言語であるという特徴を持っており、人が好むような返答をするように強化学習されている。大規模言語モデルは、人間による集合知である Web 上の大規模なデータを学習しているという点が優れている。一方で、悪用の例として、ChatGPT で生成した文章をツイートするボット同士でコミュニティを形成し、例えば暗号資産等に対するウソの話題で盛り上がり、広め合うことで、あたかもその話題が本当であるかのように思わせるということが可能である。

ディープフェイクによるたくさんの偽物が氾濫すると、本物と偽物の区別がつかなくなる「情報の死」の世界になる。そのような環境では、偽物の中に本物が含まれていても、それが偽物であるとウソをつくことができるようになる。生成 AI の発達により、偽物で情報生態系が汚染されてしまい、真偽を見分けることすらあきらめてしまう状況(=インフォカリプス)に陥るリスクがすでに存在している。生成 AI が生成した情報や人間と共創した情報が溢れるようになると、極論として思考の糧が全て AI 由来になることで、みんな同じような考え方になり、科学や科学技術の多様性が失われてしまうことが懸念される。

1.5 高度化するフェイクに対抗する

高度化するフェイクに対抗するため、プラットフォームに関する様々な検討が行われている。

笹原先生は、国立情報学研究所の越前先生を代表とした、CREST「信頼される AI システム(2020 年度採択課題プロジェクト)」の「インフォデミックを克服するソーシャル情報基盤技術」に参加している。越前先生のグループでは、ディープフェイクを始めとしたフェイクメディアを検出したり、無毒化した

りするための技術を開発している。笹原先生のグループでは、そのような技術をソーシャルシステムの中で活かし、人々が間違った方向に誘導されないよう、またフェイクニュースが拡散しないようにするための研究を行っている。

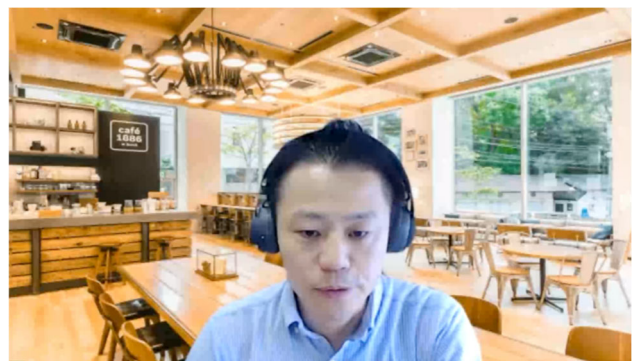
情報生態系は、発信者、受信者、媒介者(メディア)のどれが暴走しても壊れてしまう。生成 AI の技術も使いながら、それを見抜く技術、それを活かす技術をプラットフォームに埋め込んで、より健全で、よりロバストで、よりサステナブルになるような研究を目指している。

1.6 参考文献

- [1] 笹原和俊、『ディープフェイクの衝撃』(PHP 新書)
- [2] 笹原和俊、『フェイクニュースを科学する』(DOJIN 文庫)

2. 聴講における感想(アドバンスソフト)

プロンプトにより誰でもフェイク画像を生成できる生成 AI と、簡単にフォロー・アンフォローができる SNS の組み合わせで、容易に人を騙し、エコーチェンバーに陥らせることが可能であるということが驚きであった。現代社会では、何かを考えると、ネットワーク上の情報が判断基準になっているケースが多いと考える。フィルターバブルによる偏向が発生したり、ウソや間違いが含まれていたりするかもしれないという意識が必要であると再認識した。笹原先生の情報生態系を健全に発展させるための取り組みに期待します。



【ご経歴】

2005 年 東京大学大学院 総合文化研究科修了。博士(学術)。名古屋大学大学院 情報学研究科助教・講師を経て、現在、東京工業大学環境・社会理工学院 准教授。国立情報学研究所 客員准教授。

【ご研究内容】

専門は、計算社会科学。主著に『フェイクニュースを科学する』(化学同人)、『ディープフェイクの衝撃』(PHP 研究所)がある。

第7回アドバンス・シミュレーション・セミナー2023

国立研究開発法人 産業技術総合研究所 新原理コンピューティング研究センター
副研究センター長 川畑 史郎 様

「量子コンピュータと量子アニーリングマシン：基礎から最先端まで」

開催概要

○講演概要

近年、量子コンピュータと量子アニーリングマシンに対して大きな注目が集められるようになってきた。量子コンピュータを用いると、機械学習、量子化学計算などの問題を従来コンピュータよりも高速に解くことが可能となる。そのため、世界的大企業が量子コンピュータハードとソフトの開発を行っている。

一方、組合せ最適化問題専用コンピュータである「量子アニーリングマシン」も近未来に社会実装可能な量子ハードウェアとして注目を集めている。

そこで、本講演においては、これらのハードウェアの最新研究開発動向について紹介する。また、計算科学・計算工学への応用についても講演を行う。

ご講演内容

1. 講演内容

1.1 量子を用いた新原理コンピュータ

量子力学原理に基づくコンピュータには、量子コンピュータと量子アニーリングマシンの二つがある。これらは同じものと誤解されることもあるが、全く別物である。量子コンピュータはどんな問題でも解ける汎用のコンピュータで、特定の問題を高速に計算可能という点で注目されている。量子アニーリングマシンは組合せ最適化問題専用のコンピュータである。

1.2 量子コンピュータ入門

量子コンピュータとは情報処理に量子力学現象を利用したコンピュータのことで、厳密な定義では量子チューリングマシンと等価なコンピュータのことである。量子アニーリングマシンはこの定義を満たさない。

量子力学とは電子や原子核などミクロな粒子を記述する物理理論で、ミクロな世界はシュレディンガー方程式によって記述される。ミクロの世界では、トンネル効果、重ね合わせの原理、量子絡み合いといった不可思議な現象が発現する。40年前にこれらの現象をコンピュータのリソースとして情報処理に利用することを考えたのが、天才物理学者ファインマンだ。

重ね合わせの原理とは、量子力学的粒子が異なる状態を同時に取りうるということである。状態はシュレディンガー方程式の解として表現され、シュレディンガー方程式は線形のため、解候補の重ね合わせが方程式の解となることに対応している。

普通のデジタルコンピュータが0あるいは1の値をとる古典ビットを使うのに対し、量子コンピュータは0と1の重ね合わせの量子ビットを使う。量子コンピュータとデジタルコンピュータの違いはこの点

だけである。量子ビットの作り方の例としては、電子や原子核のスピンの上向きと下向きの重ね合わせなどがある。他の方法で実装されている量子コンピュータも開発されている。

量子コンピュータでは重ね合わせ原理を利用した並列計算が可能である。1つの量子ビットでは古典1ビットの重ね合わせ(2個)の状態を同時に格納できる。N個の量子ビットでは 2^N 個の重ね合わせを表すことができ、これを入力とした量子並列計算ができる。古典コンピュータではそのうちの1つの状態しか格納できない。

しかしながら、量子コンピュータはどんな問題でも高速に解けるわけではなく、指数関数的高速性(量子加速)が保証されているのは数多ある数学的問題のうちわずかに100個程度である。ただし、この100個の問題には、素因数分解、機械学習、量子科学計算、金融、量子多体系シミュレーション、連立方程式などが含まれ、人工知能、創薬、運輸、新材料開発、金融、計算工学などの分野で大いに役立つことが期待されている。

量子化学計算で解くべきシュレディンガー方程式は、量子コンピュータでは高速計算できて、創薬、触媒、新材料開発などがキラーアプリになると期待されている。機械学習では、古典データの量子機械学習のアルゴリズムが開発されていて、人工知能がキラーアプリになると期待されている。ただし、古典データをどのように効率的に波動関数に埋め込むかという問題(QRAM問題)があり、そこはまだ解決していない。量子多体系のシミュレーションも量子コンピュータで高速計算できることが知られている。

計算工学の分野では、HHL (Harrow-Hassidim-Lloyd) アルゴリズムが注目されている。これは疎な線形連立1次方程式を解くための量子アルゴリズムで、指数加速的に高速に解くことができる。これは汎用性が高く、流体力学、制御工学、弾性体力学、熱工学、電磁波工学、プラズマ工学など疎行列を解く問題に帰着される分野すべてに応用することができる。ただし、HHL アルゴリズムは誤り耐性汎用量子コンピュータが必要である。また、量子機械学習と同様、QRAM問題がある。

意外な分野としては金融での応用も注目されている。量子コンピュータのHHL アルゴリズムがポートフォリオ最適化に、振幅推定アルゴリズムがオプション取引に適用できることが知られていて、高速取引などがキラーアプリになると考えられている。

1.3 量子コンピュータ最新動向

超伝導を用いた量子コンピュータでは、近年量子ビット数が指数関数的に増大している。2022年IBMが433量子ビットの量子コンピュータを開発した。100万量子ビットに到達すると、誤り耐性汎用量子コンピュータが実用化する。現在のペースで増えていくと2035年頃に到達することが期待されるが、ハードウェアの実装面では1000量子ビットの壁、10000量子ビットの壁が存在し、まだ解決方法は見つかっていない。日本では理化学研究所と富士通が

53量子ビットの国産量子コンピュータを開発している。世界ではアメリカと中国が激しく競争している。

超伝導以外に原子、光、イオン、半導体 CMOSなどを量子ビットとして利用する量子コンピュータの開発も行われている。超伝導量子コンピュータのハードウェア実装には最先端のエレクトロニクス技術が使われている。半導体の3次元実装、マイクロ波信号処理 LSI、低温動作 CMOS、素子ばらつき評価、大型希釈冷凍機、フレキシブル高密度ケーブルなどが技術トレンドである。

超伝導量子ビットとは、超伝導体から構成される電気回路で、トランズモン（非線形 LC 共振回路）が使われている。トランズモンの非線形インダクタンスに超伝導体のジョセフソン接合が使われている。回路は1mm平方の大きさで実装され、これら先端エレクトロニクス技術を活用して集積化する。

量子コンピュータ実機へのアクセスは、Microsoft の Azure Quantum、Amazon Braket などクラウドサービスとして提供されている。実証実験のレベルであるが、化学、自動車、電力、金融などの領域で活用されている。日本においても、理研、東大、NTT、阪大、NICT、産総研、東工大、富士通、日立、NECなどが国産量子コンピュータの開発を行っている。

1.4 量子アニーリングマシン入門

量子アニーリングとは、東京工業大学の西森先生、デンソー及び産総研の門脇さんが1998年に提唱した組合せ最適化問題を解くための計算処理である。組合せ最適化問題は、例えば巡回セールスマン問題やカーナビの最短経路問題、半導体の配線問題、従業員のシフト計画など様々な場面に現れる。

量子アニーリングにおいては、組合せ最適化問題をイジングモデルの最低エネルギー状態探索問題に対応付けることが必要である。これはお互いに相互作用する磁石の配置で決まるエネルギー関数を最小化する問題である。これも組合せ最適化問題の一種であり、NP 困難問題である。元の最適化問題の情報は、エネルギー関数の係数の情報に埋め込まれる。

イジングモデルを解くには、熱揺らぎを徐々に減らすシミュレーテッドアニーリングでエネルギーの低いところを探す方法がこれまで用いられてきたが、量子アニーリングでは、すべての解の重ね合わせを考えて量子揺らぎを徐々に減らすことで、エネルギーの低いところを探している。どちらが優れているかは問題に応じて異なる。

D-Wave Systems はスピンに超伝導磁束量子ビットを用いてイジングモデルをハードウェア化した。超伝導では電気抵抗が0なので電流が永久に流れ続ける性質を用いている。時計（反時計）回りの永久電流がビットの0（1）に対応する。

1.5 量子アニーリングマシン最新動向

量子アニーリングマシンは、2011年に D-Wave Systems により既に商用化されている。現在5600量子ビットの商品 D-Wave Advantage が販売されている。D-Wave Systems 以外では MIT (25量子ビット)、産総研 (32量子ビット)、NEC (8量子ビット) で超伝導量子アニーリングマシンの開発が行われている。産総研は日本初の国産量子アニーリングマシン AQUA を開発し、NEC は量子パラメトロン方式で高い量子コヒーレンス性能を持っている。量子アニーリングマシン実機に対するクラウドサービスが

Fixstars によって提供されている。このクラウドサービスを用いることで、D-Wave Systems 量子アニーリングマシンだけでなく、国内ベンダーが提供する各種古典的アニーリングマシン（日立、NEC、富士通、東芝）、IBM 量子コンピュータ、商用数値最適化ソフト Gurobi、量子コンピュータ回路シミュレータ Qulacs を使って組合せ最適化問題を解くことが可能となる。

組合せ最適化問題は様々な産業分野において重要な例がいくつもある。有名な例としてフォルクスワーゲンが、北京のタクシーが街の中心部から空港に行く際、渋滞を防ぎながら最短時間で到着するルート、D-Wave Systems の量子アニーリングマシンを使って数秒で導き出した例が知られている。三井住友銀行では従業員のシフト計画に量子アニーリングマシンを使って、実務で使いやすい解を得ることができている。

しかしながら、量子アニーリングが古典アニーリングや古典アルゴリズムより高速になるという理論的な証明はなく、ノーフリーランチ定理が成り立つのではと考えている研究者は多い。実際に D-Wave Systems の量子アニーリングマシンを使ったベンチマーキングにおいても、古典コンピュータより早くなるケースもあれば遅くなるケースもある。特に、高速化されると期待される例として、量子スピン系、スピングラスなどの物性系のシミュレーションが最近注目を集めている。

2. 聴講における感想（アドバンスソフト）

量子コンピュータについて、その定義、現在の状況、抱えている課題、今後の展望について、正しく理解するために必要な情報が網羅されている貴重な講演であった。計算機を利用する立場としては、実用的な量子コンピュータ、量子アニーリングマシンの出現を心待ちにしている。同時に課題となる要素技術については、現在のシミュレーション技術で我々も微力ながら解決のために貢献し、この分野がさらに発展することを期待したい。



【ご経歴】

1998年 大阪市立大学 工学研究科 博士課程修了（工学博士）。1998年 通産省 電子技術総合研究所 研究員。2001年 産業技術総合研究所 研究員。現在 同副研究センター長。その間、2018年より、光・量子飛躍フラッグシッププログラム Q-LEAP SPD。2019年より、量子 ICT フォーラム理事。2020年より、ムーンショット型研究開発事業 目標6アドバイザー。

【ご研究内容】

研究分野は、量子コンピュータ、量子情報処理、物性物理。

第8回アドバンス・シミュレーション・セミナー2023

青山学院大学 理工学部 名誉教授 林 光一 様

「爆轟から見える CAE の方向性」

開催概要

○講演概要

CAE (Computer Aided Engineering) は、コンピュータが発明されて、開発、改良と発展がなされてきたことによって確立されてきた工学である。しかし、当然のことながら、CAE はコンピュータの発展だけで確立された工学ではないことは理解されていると考える。そこで、これからの CAE に対して、さらにどのような考え方が、そしてその実践が必要であるかを、40 年に渡る爆轟研究ならびにそれに関連する基礎を基にして、CAE、特に数値解析の工学ならびに産業との関連についてお話ししたい。

ご講演内容

1. 講演内容

1.1 爆轟について

1.1.1 火炎、爆燃、爆轟

火炎の構造は色々ありますが、層流火炎と乱流火炎に分類されます。爆燃は Fast Flame のことを指し、音速以下で伝播する燃焼現象です。高速火炎すなわちデフラグレーションは衝撃波と反応領域が離れていますが、それに対して爆轟 (Detonation) は音速よりも速い速度で伝播する燃焼であり、衝撃波と反応領域がくっついている構造をしています。これらの火炎は燃焼波により伝播するものですが、爆発 (Explosions) は爆源以外に火炎が自力で伝播することは無く、衝撃波が伝播します。

1.1.2 爆燃から爆轟への遷移

爆轟に関しては、火炎 (Flame) から爆燃 (Deflagration, Fast Flame) を経て爆轟へ遷移する現象が知られています。火炎の進行方向の前方へ火炎面から音波に近い圧縮波が生成・伝播し、先行する圧縮波を追いかける火炎面から発生した圧縮波は先行する圧縮波に追いつき圧縮波は徐々に強さが増加し、火炎面に先行する圧縮波達はある時点で衝撃波に移行し爆轟波になります。レーザーを使用した可視化による爆轟への遷移の現象については、古くは 1966 年の Oppenheim らの実験が知られています。この実験によれば、爆轟への遷移は 4 つのパターンに分類され、それぞれ (a) 火炎と先行する衝撃波の間の壁際で着火し爆轟となる場合、(b) 火炎の先端付近で着火し爆轟となる場合、(c) 先行衝撃波の先端付近で着火し爆轟となる場合、(d) 接触不連面が着火し爆轟となる場合です。

1.1.3 実験とシミュレーション

爆轟の研究は実験研究からスタートしましたが、1978 年に名古屋大学の滝 & 藤原で 2 次元デトネーション伝播が数値的に初めて示されました。当時の計算機性能は現代の PC に及ばない計算速度と容量であったため、空間時間の精度が十分ではありませんでした。数値計算機の性能が増大し、数値計算による爆轟の研究が実験的研究を追い越し始めていますが、精度の面から数値計算には大型計算機が必要です。また、実験も新しい測定法の出現で新発見がある

でしょう。

1.2 爆轟から見える CAE

1.2.1 爆轟の解析

1980 年代後半から TVD スキーム (Total Variation Diminishing scheme) の手法が爆轟解析に用いられるようになりました。この手法は、流束制限関数を用いることにより安定性と精度を両立した手法です。空間精度は 2 次精度になりますが、衝撃波の近くでは分布が丸められます。最近の計算では OpenFOAM などのフリーで使えるコードを使って計算することもポピュラーになってきており、OpenFOAM を使った研究は Journal でもアクセプトされ始めています。爆轟の計算で難しいのは、火炎のような低速な流れから爆轟のような超音速の流れを同時に解かなくてはならない点です。

1.2.2 化学反応

火炎や爆轟を扱う際には化学反応を計算する必要があります。これに関連して着火遅れ時間の計算が含まれ、詳細反応機構として水素/酸素・空気では 40~50 もの素反応を扱います。計算時間の観点から簡略反応機構として 18~23 の素反応を扱うものもあり、化学反応モデルとして有名なものは UT-JAXA モデルや Stanford モデルで、圧力依存を精度良く計算できることが知られています。炭化水素/酸素・空気に関しては詳細反応では 100~数千素反応を扱う必要がありますが、簡略反応機構としては 1~10 反応を扱うものもあります。反応機構を扱う際に重要な点は、①自分で責任を持つこと、②温度だけではなく圧力への依存性も確認しておくこと、③反応機構が温度と圧力に関する適用範囲内であることを確認しておくこと、が挙げられます。

1.2.3 DDT シミュレーション

火炎から爆轟への遷移 (DDT) を計算するにあたってのポイントは、以下の事柄が挙げられます。①火炎・爆燃・爆轟の違った条件が同じ画面で非定常・不均一に起こる、②陽解法と陰解法の混合計算、③均一格子 (計算時間がかかる)、不均一格子 (計算時間の短縮と現象の精度向上)、④数値流束の構成法として AUSM-DV などを用い、時間積分は LU-ADI や LU-SGS などの陰解法があり、陽解法としては 3 段ルンゲ・クッタがある、⑤AUSM-DV の他に HLLC 系があり、比較の余地がある、⑥データテーブル参照の計算時間の短縮 (AI 活用)、⑦CPU と GPU の使用などです。

1.2.4 CAE に対する爆轟解析

CAE という観点からは、すべての物理量が重要であるという考え方は非現実的です。サイエンスという観点から何が重要なパラメータであるかを知って、物理量を中心に問題を解決することは意味があります。そこで、一つの方法としては、A という問題に対して C という物理量がどのように対応するかを調べるために $\partial C / \partial A$ または $\partial (\ln C) / \partial (\ln A)$ を計算して感度解析を実施し、A に対する C の感度を確認しておく、などが挙げられます。

例えば水素/空気混合気中で、A は爆轟波面のセル構造のサイズであり、C は数値計算で用いられる計算格子のサイズとし、これらの関係を直接数値計算の可視化図から考察すると、計算格子幅を $10 \mu\text{m}$ 未満にしないと物理現象とは異なることがわかります

(Tsuboi&Hayashi, 2007)。

1.2.5 直接計算とモデリング

1つめの解析例は、直接計算との比較検討はこれからですが、ロシアのクルチャトフ研究所で実施された測定部長さ 35m の実験を対象とした爆轟遷移の計算です。形状モデリングを精緻に計算モデリングとして組み込むことや、着火位置を正確にしないと計算結果を正しく得ることが出来ないと分かっています。2つめは回転デトネーションエンジン (Rotating Detonation Engine, RDE) についてです。ガスタービンエンジンの燃焼室のところに回転デトネーションを利用するものです。実験的な研究が進んでおり、数値計算での再現も最近取り組みが始まっているところです。RDE は、爆轟という危険な現象に対してそのエネルギーをポジティブにとらえ、推進力にしようという考えです。デトネーションによるサイクルがこれまでのブレイトンサイクルより 20% 効率が良いハンフリーサイクルであることから、デトネーションを推力にするという新しい概念の推進機を開発することが目的です。現状では RDE の対象としてロケットモーターとタービンエンジンに应用することが考えられており、酸化剤として酸素を使う場合はロケットで、空気を使う場合はタービンエンジンと考えています。3つめとしては気液二相のデトネーションです。二相の回転デトネーションに関する問題は、液相燃料と空気による回転デトネーションが、ある条件でデトネーションが消失してしまうことが挙げられ、その理由を数値計算で明らかにしたものです。4つめは、非常に複雑な形状をその内部に持つ密閉容器内の爆轟の伝播解析です。

1.3 これからの CAE

1.3.1 パラメータスタディの有効性

CAE におけるパラメータスタディについて説明します。つまり、計算に用いられる物理量の重要性が分かり、重要な物理量をどのように扱えば良いかがはっきりします。パラメータをどのように決定するかについては具体的に述べると、①格子依存性、②時間刻み幅に対する依存性、③クーラン数への依存性、等々です。

1.3.2 理想的なシミュレーションと数値モデル

時が経つにつれて新しい数値積分モデルが発表され、それは常に調べる必要があります。例えば、対流項の扱いは TVD スキームから AUSM-DV や HLLC 系を用いるようになってきており、時間積分は旧来のルンゲ・クッタスキームから 3 次精度 TVD ルンゲ・クッタ法が使われるようになってきました。これらは爆轟計算の場合ではありますが、計算対象が変わった場合には積分法も変わり、どの手法が良いかは常に調べる必要があります、妥協すべきではありません。例えば、化学反応モデルは広い温度と圧力範囲に有効なモデルを選択することと、短縮モデルを用いる場合には 1 ステップ反応モデルではなく、少なくとも 2 ステップ以上の反応モデルを用いる必要があります。

1.3.3 コードの有効性

Impact factor の高い Journal は、現状では市販コードにより計算された論文は掲載しない傾向にあり、上述した内容をあまり考慮されていないコードが多いことが理由です。爆轟の解析については、OpenFOAM による数値計算が掲載されるようになってきました。理由は、①自分でコードを修正でき、質問を Internet で発信すれば世界中から回答が得られる、②高 Impact factor の Journal でもアクセプト

されるようになってきた、③コードは世界中の使用者によって常に改良されている、④コードの使用料が無い、ことが挙げられます。市販コードが有効になるためには、①何でも計算できるのも良いが、問題に特化した極めつけの小さいコードを開発する、②コードを市販する会社がコードの問題を解決するのではなく、愛好会みたいなものを作り、その中で解決するシステムを作る、③愛好会には、販売したコードの収益の幾ばくかを投入する、④このシステムは International とする、などが挙げられます。

1.3.4 数値解析コードの作成にあたって

数値解析コードを作成にあたり、今後は AI の活用があるのではないかと考えられます。また、データの可視化などするプログラムも単純化する必要があり、大型計算機を使用する場合には更なる大型の計算を行うことから終わりのない問題となっています。

1.3.5 コードの妥当性と実験のバリデーション

CAE は複雑な形状や大きな形状の内容を要求しますが、このような事情からコード validation も厄介です。他の論文を沢山読む必要があります、ここにも AI が関わっているのではないかと考えられます。コードの妥当性のチェックの仕方は、最終的に得られた解析結果が実験を説明しているかどうかをチェックすることで出来ます。これらの問題をきちんと調べておけば、その市販コードと制作会社を信用することが出来ます。

1.6 聴講における感想 (アドバンスソフト)

解析対象は爆轟と複雑な現象ではあるが、正しい現象理解や、モデルの選定であるといった CAE の基本を愚直に守ることで、精度の良い高い解析ができるという所に納得感があり、また共感できました。



【ご経歴】

1972 年 早稲田大学理工学部機械工学科卒業。1974 年 名古屋大学 航空工学専攻 (ME)。1977 年 カリフォルニア大学 バークレイ校 機械工学専攻 (MS)。1980 年 コロラド大学 ボルダー校 機械工学専攻 (Ph.D.)。1980 年 プリンストン大学 機械航空宇宙工学科 助手。1982 年～1995 年 名古屋大学 工学部 航空工学科 (助手、講師、助教授)。1995 年 青山学院大学 機械工学科 教授。1984 年 朝日学術奨励賞 (二相デトネーション)。1997 年 Wctaw Cybulski メダル (爆発)。2017 年 A.K. Oppenheim Award (爆轟数値シミュレーション)。

【ご研究内容】

専門は、航空宇宙、燃焼、安全などの実験と数値解析による研究。

第9回アドバンス・シミュレーション・セミナー2023

国立研究開発法人 産業技術総合研究所 人工知能研究センター

総括研究主幹 中村 良介 様

「都市のデジタルツイン」

開催概要

○講演概要

デジタルツインは、現実空間に存在する物体（モノ）と、その時間的な変化（コト）をサイバー空間にコピーすることで構築される現実の鏡像です。初期のデジタルツインは、主に工場内などの限られた人工空間のみを対象としていましたが、いまやそのカバレッジは道路や建物といった人間の生活空間に拡大しています。また、都市域ではインフラなどが埋設されている地下空間のマネジメントにも活用が検討されています。

本講演では都市を主な対象としつつ、デジタルツインが世界をどのように網羅していくのか、そして人間と自律機械の関係をどのように変容させていくかについて議論します。

ご講演内容

1. 講演内容

1.1 研究の意義

外れない未来予測は人口統計だけである。今後はさらに高齢化が進行し、2050年には日本の人口は1億人を切り、半分以上が65歳以上で就業人口が減少する。労働力をロボットで代替していく必要性が出てくる。

今も工場ではロボットが働いている。工場のように完全に制御された環境ではロボットは有能で、高速に働くことができる。一方で、自動運転がなかなか実用化しないのはなぜか。その答えとしてフレーム問題と呼ばれるものがある。機械は設定された枠組みの中ではうまく動くことができるが、予想外のことが起こればうまく動かない。機械を人間の代わりに働かせるためには、機械を賢くするアプローチと、制御された環境を広げるアプローチの2つがある。本研究センターでは、ほとんどが前者の方向性を取っているが、我々の研究室では後者の方向性をとっている。

産総研があるお台場に行くためのモノレールのゆりかもめは完全に制御された環境なので、自動運転ができています。一方、山手線や自動車が自動運転できないのは、環境が制御できておらず可能性がたくさんあって予測できないからである。

金出武雄先生（カーネギーメロン大学、産総研名誉フェロー）は、次のように述べている。

『データが明示的に表現できている世界の中に限定されればAIは人間よりも良いスコアを出せる。だが現実世界は必ずしもそうではない。システムを設計するとき想定した世界よりも、実際の世界は常に大きい。それには対応が難しい。だが、地球の中だけで考えればいいのであれば、考えなければいけない世界は「たかだか地球くらい」ということになる。』

1.2 地球を僕の手の上に

金出先生の言葉を現実のものにする、すなわち地球をどこでも工場と同じくらい制御された空間にすればよい。

例として、お台場の領域で、上空からの3次元モデルと地面の3次元モデル、建物中の3次元モデルをシームレスにつなげるモデルを作ってコンピュータの中で再現することができた。上空からのデータはすべてを網羅できるが、地上の近くの樹木のデータなどは正確ではない。地上からのデータは道路の付近の詳細なものを取ることができる。座標系を合わせて統合することで両者のメリットを享受でき、デジタルツインが実現できる。これを世界全体に広げられれば、自律移動体による自動運転ができるのではないか。

今後の高齢化社会では、スマホで呼び出して目的地に着いたら勝手に帰っていくようなモビリティサービスのようなものが必要になってくる。これら人流や物流を自律的に自動運転するための基盤がデジタルツインである。

1.3 サイバーとフィジカルのリンク

エサイバー空間で構築したデジタルツインの情報に対し、現実の（フィジカル）世界は常に更新される。

自律移動体はサイバー空間から情報をもって自動運転を行い、フィジカル空間の情報を更新してサイバー空間に返す。このフィードバックサイクルを回していく。

作業の複雑さ、環境の複雑さの2軸で分類すると、環境も単純で作業も単純であるものの例として、ルンバやゆりかもめなどが実用化されている。環境が単純で作業が複雑なものの例としては、工場のロボット、原発の修理ロボットなどが挙げられる。環境が複雑になっていくと難易度が上がっていくが、今後は対応していかななくてはならない。自動建機や森林ロボットは作業も環境も複雑で、最も難易度が高い。

複雑な環境で自律ロボットが移動する例として、商業施設における自律車いすの例を紹介する。3次元地図（点群データ）とLIDAR搭載センサを使って自己位置を決定し、自律移動することができる。センシングで元の地図にはない看板ができてきているなどの新しい情報をサイバー空間にフィードバックする。

これは3次元の点群情報とセンシングだけで判断しているのでGPSは必要がない。この方法は地下空間にも拡張できる。

1.4 都市を超えたデジタルツイン

国土すべてをデジタルツインで網羅するためには、7割を占める森林のデジタルツインを作る必要があり、つくばの森林総研と共同研究を進めている。森林は環境も要求される作業も複雑であり、森林でデジタルツインを作ることができれば、他の環境でもできると考えられる。

森林で使われる機械には、伐木、造材と集積までを行うハーベスタ、積み込み、集材と巻き立てまで行う

フォワーダ等がある。これらを自律式にするための研究が行われている。デジタルツインの点群モデルを用いた林道での自動運転をするための実証実験を行った。森のデジタルツインを作るには、UAV/LIDAR 観測を使うが、地上付近での情報は不足している。地上 LIDAR データでは樹木の特長も把握できる。両者を統合することで精度のよい森林デジタルツインが構築できる。NeRF というアルゴリズムをつかえばスマホを使って数分で地上付近の 3D モデルが構築できる。

また、和歌山県紀伊風土記の丘の実証実験の例を紹介する。これは古墳をたくさん含むような領域である。UAV/LIDAR で測定し、複数回パルスを当てて地面に当たった情報を取ると、現実では難しいような、樹木や建物を除去して地面を抽出することもできる。これで新たな古墳（文化財）の発見につなげることができる。

もう一つの例として、八王子の森林のデジタルツインデータを紹介する。東京都が公開している点群データから樹木の個体抽出を行うことができ、木が何本生えているかの推定を行うことができる。統計的な推定で 210 億本の樹木があると考えられる。日本全国のオープン点群データが網羅されてそれを活用すれば日本全国の樹木の個体抽出も可能になる。

1.5 地球から宇宙へ

JAXA の小惑星探査機「はやぶさ 2」のプロジェクトにも、デジタルツインが活用されている。「はやぶさ 2」は小惑星「リュウグウ」から石のサンプルを採取するのが目的である。「リュウグウ」まで光の速度でも 17 分かかるため、遠隔操作するのは難しいので、自律で動くようにする。そのために事前にシミュレーションするためデジタル「リュウグウ」を計算機の中に構築した。いろいろな場合を想定し、数十万通りのシミュレーションを実施した。その結果、目標から 1m 以内のところの石を取ってくることに成功した。

「はやぶさ 1」では、自律移動ができず遠隔操作をしていたため機体が損傷し、地球に帰還する際に燃え尽きてしまったが、「はやぶさ 2」は再び別の小惑星に旅立っていった。

1.6 デジタルツインを実現する計算機

柏の産総研にはデジタルツインを計算する世界最大級の AI 専用計算機 ABCI がある。日本で 2 番目に早い計算機であり、40 ペタバイトのストレージを持っている。人工衛星、船舶、航空機から放送されている GPS の情報、自律移動体からのローカルな人の動きの情報、これらを統一的にあらゆるスケールで、リアルタイムでデータを蓄積していく。

都市の避難シミュレーションでは上下移動もあるので 2 次元シミュレーションでは無意味であるが、建物データや地下空間のデータで 3 次元のシミュレーションをすることができる。シミュレーションの結果として避難の際にどこにボトルネックがあるかわかる。

1.7 サイバーとフィジカルの融合

すでにデジタルツインの情報があればカメラだけで現実空間の情報を取り込むことができる。これを用いて監視カメラだけでリアルな情報をサイバー空間上に表示することができる。また、デジタルツインの中では過去のデータをヴァーチャルに再現して、

リアルと重ねて表示することもできる。

スマホの地図を見ながら移動する場合、サイバーとフィジカルを一致させるのが難しいが、将来はリアルの中にサイバーの情報を重ねて見るができるようになる。

1.8 デジタルツインの役割

Society5.0 はデジタルツインのことを指しているとも考えることもできる。サイバー空間にフィジカル空間のコピーを作り、データを AI で処理して意味づけをすることができる。

地図は意味づけされた情報の 2 次元表現であるが、IoT でリアルタイム更新され、AI で意味づけされた 3 次元モデルができればそれがデジタルツインである。デジタルツインのターゲットは工場のように制御された空間から一般環境まで拡張していく。最初のターゲットは都市域（人間がコントロールできている空間）、屋外、屋内、地下生活空間で、さらに農地、森林、海洋へ広げていく。さらにロボットが行動する範囲として、太陽系まで範囲を広げたデジタルツインを作っていく。データが膨大になり、AI で解析するようになる。

デジタルツインを活用したシミュレーションは見栄えのよいものから物理現象をターゲットにしていくようになり、初期条件、境界条件の入力源となっていく。

2. 聴講における感想（アドバンスソフト）

将来の自律機械を実現するため、機械を賢くするだけでなく、制御できる環境を広げていくというアプローチの先にデジタルツインがある、という考え方に感銘を覚えました。都市、農地、宇宙などの事例をご紹介いただき、現在の技術到達点と将来像を理解することができました。われわれはデジタルツインを活用したシミュレーションを社会に提供できるよう、進めていきたいと考えています。



【ご経歴・ご研究内容】

1996 年 神戸大学 理学博士

2000 年～2005 年 宇宙開発事業団（現宇宙航空研究開発機構）にて地球観測衛星みどり、月探査機かぐや、小惑星探査機はやぶさに搭載された可視カメラ／赤外線分光装置の開発に従事

2005 年からは産業技術総合研究所にて、AI による衛星ビッグデータ解析やデジタルツイン構築に関する研究を行っている。

第10回アドバンス・シミュレーション・セミナー2023

筑波大学 数理物質系 教授 岡田 晋 様

「計算物質科学による 2.5 次元物質科学研究

：原子層物質複合構造体と外場」

開催概要

○講演概要

原子層物質は多様な複合構造／高次構造を構築することが可能です。特に、弱い面間相互作用を介した積層複合構造では、これまでの原子間の化学結合基礎をおいた物質科学では見ることのできない、全く新しい現象の発現がみられます。このような、原子層物質からなる複合構造体は、近年、「2.5 次元物質」として注目されています。

本講演では、計算物質科学の観点から、2.5 次元物質科学のコンセプトの説明と、0.5 次元が誘起する種々のユニークな物性現象について紹介する予定です。

ご講演内容

1. 講演内容

1.1 2.5 次元物質科学とは何か？

2.5 次元物質科学とは、いろいろな2次元物質を集め、重ねたり、捻ったり(ツイスト積層)、隙間を利用(層間化合物)したりすることによって、2次元物質を使った新しい物質科学を展開していこうという試みであると定義されていた。

2次元物質は、面内では非常に強固な結合を持っている一方で、面間は van der Waals 力という非常に弱い相互作用を持っている。このことから、2次元物質の組み合わせや重ねる角度を人為的に制御可能で、革新的な物質合成法であり、多種多様な性質を持つ物質の合成が可能となる。

つまり、1+1 が2にならない、2次元物質と2次元物質の組み合わせから、それぞれの性質の足し合わせでは説明できない特異な性質が現れる物質系の科学である。なお、このプロジェクトは文部科学省科学研究費助成事業・学術変革領域(A)「2.5 次元物質科学：社会変革に向けた物質科学のパラダイムシフト」の支援を受けて行われている。

1.2 研究例の紹介

1.2.1 2層グラフェンおよび2層遷移金属カルコゲナイト

2層グラフェンを例にして、同じ2次元物質の重ね方によって、電子状態が異なっていることが紹介された。また、電場の印加や電子の注入に対する応答の違いも示された。同じ2次元物質の重ね合わせであるにもかかわらず、層間の相互作用が弱いため、重ね方や捻り方は無限に存在することによる興味

深い現象が見られることが示された。

次に、2層遷移金属カルコゲナイトを例にしたシミュレーションについて紹介された。2層グラファイトとの違いは、重なり方だけでなく、重ねる物質の組み合わせも選択できるようになる(2層 MoS₂ や2層 WS₂、あるいは MoS₂+WS₂ など)ことである。また、遷移金属カルコゲナイトには、合成は難しいが、構造上の特徴から表裏で原子種が異なる(ヤヌス構造の)層状物質(例えば Se-W-S)を合成することが考えられる。このような物質では、重ね方の自由度がさらに増えることになる。例えば、同じ AB 積層でも Se-W-S/Se-W-S、Se-W-S/S-We-Se、S-W-Se/Se-W-S などが増えることになる。これらの違いによっても、2層膜の電子物性に多様性が生じる。

重ね合わせの自由度が無限にあることから、全てのパターンを合成することは困難であり、また合成そのものが困難な物質もシミュレーションの対象として扱われている。シミュレーションによりユニークな特徴を持った2次元物質の組み合わせや重ね方を見つけることにより、新たな性能を持った物質設計が可能であることが示された。

聴講者から、「ツイスト積層で色々興味深い電子物性が現れる原因は、層間の相互作用の制御で説明できるのか？」という質問があり、「ツイスト積層させることによって現れる長周期構造によるバンドの畳み込みと畳まれたバンド間の相互作用によるもので、モアレの周期が長くなることで、多数のバンドが畳み込まれていくことによる効果であると理解できる」と回答されました。

1.2.2 最薄グラファイト層間化合物の物質設計と物性解明

重ねられた2次元物質では、その層間にナノ物質(分子やクラスターなど)を挿入することができる。カリウム原子や C₆₀などをグラファイトの層間に挿入したグラファイト層間化合物は有名であり、過去に多くの研究がなされてきた。講演では、極性を持ったカゴ状炭化水素分子のスマネンやコラニユレンを2層グラフェン間に挿入した例が紹介された。挿入した分子の極性(双極子モーメント)の向きに起因する電荷の再分布が起こることが示された。また、挿入した分子の双極子モーメントの大きさに依存して、電荷の移動量を制御できることが示された。さらに、制御は難しいが、極性を持つ挿入分子を配向させる(領域ごとに分子の極性を揃えて挿入する)ことによる面内ヘテロ構造を作成することで、グラフェンの層内に p-n 境界を作り込むことができる例をシミュレーションによって示された。

聴講者から、「層間に分子などを挿入したときに起

この電子物性の変化は、層間の相互作用の変化で説明できるのか？」という質問があり、「様々な可能性があり、グラファイトにK原子をインターカレーとしたときは、K原子の価電子が全てグラフェンに移動したことに起因している。今回の講演の例では、分子の極性がグラフェンのDiracコーンをシフトさせているために起こっていると考えている。」と回答されました。また追加で、「原子や分子を挿入させる系では、単純な電荷移動から軌道混成を伴う相互作用の変化まで、挿入させる物質と挿入位置をコントロールすることで多様な世界が期待できるのではないか」とコメントされました。

1.2.3 WS₂/MoS₂の面内ヘテロ構造

格子定数の近い層状物質(グラフェンとh-BNやWS₂とMoS₂など)は、うまく制御すれば面内でヘテロ構造を持った層状物質を合成できる。そのような面内ヘテロ構造を持つ2次元物質を重ねた2層膜物質が考えられる。具体例として、WS₂とMoS₂からなる原子層膜の2層膜が紹介された。この2層膜は、WS₂/WS₂、WS₂/MoS₂、MoS₂/WS₂、MoS₂/MoS₂のように4種類の重ね合わせの可能性があるが、それぞれの重なり方で異なる電子状態となる。これにより、面内ヘテロ構造を持つ2次元物質の重ね方やキャリア(電子やホール)注入を制御することで0次元系から2次元系まで電子系を制御できることが示された。

1.4 半導体 GaN や Ga₂O₃ の結晶成長と欠陥に関する解析例

GaN(窒化ガリウム)やGa₂O₃(酸化ガリウム)は、SiCに並ぶ次世代のパワー半導体材料として注目されており、その結晶成長と欠陥制御に関する研究が盛んに行われている。Ga₂O₃結晶は透明であり、熱伝導率の異方性が結晶成長に影響を与える。透明性が高い場合、ヒーターパワーを高くする必要があり、Ga₂O₃結晶の成長には、通常、イリジウム製の坩堝が用いられるが、高価なため、コールドクルーシブル法による代替が検討されている。結晶成長方向によって転位密度が異なり、最適な成長方向の選択が重要である。応力と欠陥の制御が非常に重要であり、ウェハーに加工する際に割れてしまうことがある。Ga₂O₃は単斜晶という複雑な結晶構造を持つ。

1.5 理論・シミュレーションの醍醐味

1+1が2にならない、すなわち原子層複合構造系の電子物性は、構成要素の単純な代数和を超える非常に多様な性質を示す。この多様性は、原子層間の相互作用が弱いために、2個の原子層物質を選んでもその重ね方が無限にあることに起因している。ただ、合成することに非常に困難さを伴うことを承知しながら、理論・シミュレーションの醍醐味として、こんな物質ができるかもしれないということを提案することは有意義である。

2. 聴講における感想(アドバンスソフト)

2次元物質の重ね合わせにより得られる原子層複合材料の多種・多様な電子物性は、とても興味深いものでした。1+1が2にならない、重ね合わせた2次元複合材料の電子物性が2次元物質の電子物性の単純な重ね合わせではないことを2.5次元と表現されていたが、0.5では表せない無限の可能性があると非常に興味深いことであった。

研究のスタンスとしては、応用を意識せず、興味がある現象などを理論・シミュレーションを用いて、物質設計から物性解明を行われていた。ただ、合成が困難であることは認識しながら、出口(応用や実現可能性)を完全に度外視しているわけではないことも理解できた。自分が興味あることを対象にしながら、周りの実験や合成している研究者・技術者とのコミュニケーションが大事であることを示していただいたことは役立つアドバイスであった。



【ご経歴】

1998年 東京工業大学大学院 理工学研究科修了
「博士(理学)」
1998年 筑波大学 物質工学系 助教
2001年 筑波大学 物理学系 講師
2014年 筑波大学 数理物質系 教授

【ご研究内容】

量子論に立脚した計算物質科学の手法を用いた、フラーレンやカーボン名のチューブ等のナノスケール物質の物性解明と物質設計。

アドバンス・シミュレーション・セミナー2023を終えて

アドバンスソフト株式会社 セミナー事務局

1. はじめに

「アドバンス・シミュレーション・セミナー」は、わが国の科学技術のさらなる振興と産業界への応用を加速させるべく、2021年度より継続して主催している公開セミナーです。2023年度においてもその基本的な趣旨を堅持し、年間を通じて全10回のセミナーをオンライン形式で実施いたしました。

本セミナーの最大の目的は、大学や公的研究機関における最先端の計算科学・シミュレーション研究の成果を、広く社会全体に共有することにあります。これにより、日夜現場で課題に直面する技術者や研究者が新たな着想を得る契機を提供し、アカデミアの研究と産業界の実践的なニーズを高度な次元で接続する場を創出することを目指しています。長期的には、計算科学を基盤としたわが国の科学技術分野の裾野を広げ、国際的な競争力を維持・発展させていくことが、弊社の願いでもあります。

2. 2023年度のセミナーを振り返って

2.1. 実施内容と多様なテーマ

2023年度に開催された10回の講演は、いずれも現代の科学技術が抱える重要課題を正面から捉えたものでした。取り上げられたテーマは、防災・インフラのシミュレーション、次世代半導体デバイスの展望、GPUスパコンを用いた流体構造連成解析、そしてエネルギーの根幹を成す原子力安全といった、従来からの重厚な物理シミュレーション分野を確固たる軸として据えました。合わせて、急速な社会変化を象徴するトピックである「生成AIとフェイクニュース」や「量子コンピュータ・量子アニーリング」、さらには「都市のデジタルツイン」や「ナノスケールの計算物質科学」に至るまで、極めて広範な領域を網羅いたしました。そこでは、企業の研究開発者と最前線の研究者との間で、理論の妥当性から実務への適用可能性に至るまで、極めて活発かつ建設的な意見交換が展開されました。

2.2. 産学連携の架け橋としての意義

国内外のトップクラスの研究者が培ってきた知見を直接共有できる本セミナーは、参加した技術者にとって、従来の解析の枠組みや自社の専門領域に固執しない、マクロな視点を得る貴重な機会となりました。抽象度の高い高度な理論と、具体的かつ実用的なシミュレーション技術を密接に結びつける「知の

架け橋」としての役割を、2023年度も十分に果たすことができたと自負しております。こうした交流は、単なる知識の伝達に留まらず、新たなイノベーションを誘発する触媒としての価値を感じています。

2. 3 参加者層の広がりとお次世代の育成

本セミナーの特筆すべき点は、参加者層の多様性と、その背景にある真摯な学習意欲にあります。登壇者が専門とする特定の学術領域のみならず、電機、自動車、エネルギー、建築、医薬といった、わが国の基幹産業を担う多くの企業研究者の参加が目立ちました。ここでは「アカデミアによる一方的な講義」ではなく、産業界の現場が抱える切実な課題を解決するために、最先端の知の活用方法、能動的な「産学連携」の姿勢が色濃く反映されていました。また、次世代を担う若手の大学院生やポスドク研究員の姿も多く、彼らにとって産業界の第一線と触れ合う有益な学びの場となったことは、将来の科学技術人材の育成という観点からも大きな収穫であったと感じています。

3. まとめと今後の展望

2023年度的全プログラムを通じて、最先端の計算科学はもはや単なる学術的探求の域に留まるものではなく、都市のレジリエンス向上、新材料の創出、さらには国家的なエネルギー安全保障といった、社会の根幹を支える核心的技術であることが再確認されました。

今後の課題は、これら最先端の研究成果をいかに迅速かつ実用的に、企業の製品開発や意思決定プロセスへと「社会実装」していくかにあります。特に、昨今劇的な進化を遂げている生成AIや量子技術と、弊社が長年培ってきた物理シミュレーション技術をいかに融合させ、解析の精度と効率を次元の異なるレベルへと飛躍させるかが、次世代の計算科学における鍵となるでしょう。

弊社はこれからも、産学連携のハブとしての機能を強化し、複雑化する社会課題を解決するための技術普及と、計算科学のさらなる裾野拡大に邁進してまいります。

(アドバンスソフト株式会社 代表取締役社長)

<p>第1回 アーカイブ動画</p> 	<p>第1回 セミナー資料</p> 	<p>第2回 アーカイブ動画</p> 	<p>第2回 セミナー資料</p> 
<p>第3回 アーカイブ動画</p> <p>アーカイブ動画は 非公開です</p>	<p>第3回 セミナー資料</p> <p>セミナー資料は 非公開です</p>	<p>第4回 アーカイブ動画</p> 	<p>第4回 セミナー資料</p> 
<p>第5回 アーカイブ動画</p> 	<p>第5回 セミナー資料</p> 	<p>第6回 アーカイブ動画</p> 	<p>第6回 セミナー資料</p> 
<p>第7回 アーカイブ動画</p> <p>アーカイブ動画は 非公開です</p>	<p>第7回 セミナー資料</p> <p>セミナー資料は 非公開です</p>	<p>第8回 アーカイブ動画</p> 	<p>第8回 セミナー資料</p> 
<p>第9回 アーカイブ動画</p> <p>アーカイブ動画は 非公開です</p>	<p>第9回 セミナー資料</p> <p>セミナー資料は 非公開です</p>	<p>第10回 アーカイブ動画</p> <p>アーカイブ動画は 非公開です</p>	<p>第10回 セミナー資料</p> <p>セミナー資料は 非公開です</p>

※ アーカイブ動画・セミナー資料は、先生のご許可をいただいたもののみ公開しております。

技術情報誌『アドバンスシミュレーション』のご案内

技術情報誌「アドバンスシミュレーション」は、アドバンスソフト株式会社の技術力を広く理解してもらおうと同時に、わが国のシミュレーション技術の発展、普及を目的として創刊したものです。(すべて無料)

アドバンスソフト株式会社の長は、広範な産業分野の大規模な実用的応用ソフトウェアを開発する技術力であり、また、このようなソフトウェアを用いた解析、コンサルティング技術にあります。一言でいえばどのようなシミュレーションにも対応できる総合力にあります。技術情報誌「アドバンスシミュレーション」はこのような長を生かし幅広い情報を提供しております。多少とも、皆さまの参考になれば幸いです。

バックナンバー：<https://www.advancesoft.jp/support/magazine/>

Vol.3 (2010.11)	第一原理計算シミュレータ Advance/PHASE	Vol.4 (2010.11)	構造解析ソフトウェア Advance/FrontSTR
Vol.5 (2010.11)	材料設計統合システム Advance/Material Design System/ 2次電池 CAD システム Advance/Battery Design System/ 3次元デバイスシミュレータ Advance/DESSERT	Vol.6 (2010.12)	建物内の火災安全・防災のためのシミュレータ Advance/EVE SAYFA
Vol.7 (2011.4)	管路系流体解析シミュレーション	Vol.8 (2011.7)	構造解析ソフトウェア Advance/FrontSTR
Vol.9 (2011.10)	材料設計統合システム Advance/Material Design System/2次電池 CAD システム Advance/Battery Design System	Vol.10 (2011.12)	原子力安全解析
Vol.11 (2012.4)	Made in Japan の計算科学技術ソフトウェアの開発	Vol.12 (2012.6)	アドバンスソフト株式会社 設立 10 周年記念
Vol.13 (2012.10)	気液二相流解析ソフトウェア Advance/FrontFlowMP	Vol.14 (2013.1)	第一原理計算ソフトウェア Advance/PHASE
Vol.15 (2013.5)	音響解析ソフトウェア Advance/FrontNoise	Vol.16 (2013.8)	爆燃、爆轟の解析に関する最新動向
Vol.17 (2013.12)	流体解析ソフトウェア Advance/FrontFlow/red	Vol.18 (2014.1)	産業界と管路系流体解析技術
Vol.19 (2014.10)	原子力安全解析	Vol.20 (2014.12)	アドバンスソフト株式会社が製造販売するソフトウェア パッケージ
Vol.21 (2015.9)	Made in Japan の LSI デバイス設計 CAD システム Advance/TCAD	Vol.22 (2016.6)	未来を拓くスーパーコンピューティング
Vol.23 (2016.12)	アドバンスソフトからサービスを提供するソフトウェア	Vol.24 (2017.7)	管路系流体解析技術の高度化
Vol.25 (2018.1)	アドバンスソフトにおける研究開発	Vol.26 (2018.7)	数値解析のフロンティア
Vol.27 (2019.12)	防災シミュレーション	Vol.28 (2020.9)	特集 1 ; PRA、特集 2 ; AI
Vol.29 (2022.4)	原子力安全解析	Vol.30 (2023.7)	流体解析
Vol.31 (2024.7)	計算科学の裾野を広げる	Vol.32 (2025.7)	シミュレーションと先端技術の融合

「アドバンス・シミュレーション・セミナー 2024 開催報告」のご案内

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しております。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。

ダウンロード URL：https://www.advancesoft.jp/download/28simlib_seminar_report2024_all/



- 第01回 東京大学 姫野 武洋 教授 「自由表面流の予測と管理」
- 第02回 東京工業大学 秋山 泰 教授 「バイオ・計算科学」
- 第03回 慶應義塾大学 松尾 亜紀子 教授 「航空宇宙エンジン」
- 第04回 お茶の水女子大学 伊藤 貴之 教授 「可視化・AI」
- 第05回 東京大学 高田 孝 教授 「原子力・リスク評価」
- 第06回 神戸大学 牧野 淳一郎 特命教授 「HPC・AI」
- 第07回 千葉工業大学 森川 泰成 元教授 「建築・都市の新たな環境デザイン」
- 第08回 九州大学 井上 弘士 主幹教授 「計算機アーキテクチャ」
- 第09回 東京科学大学 浅野 浩志 特任教授 「エネルギーシステム、GX」
- 第10回 東北大学 柿本 浩一 特任教授 「材料科学・AI」
- アドバンス・シミュレーション・セミナー 2024 を終えて
- YouTube 動画&セミナー資料 QR コード一覧

全10回 無料・オンライン開催

アドバンス・シミュレーション

開催日程 ・ セミナー 2026

アドバンスソフト株式会社は、2021年以降、計算科学分野・シミュレーション分野の裾野を広げ、日本の計算科学振興の一助となるべく、「アドバンス・シミュレーション・セミナー」シリーズを開催しています。本セミナーは、コンピューターシミュレーションの各分野でご研究・ご活躍されている先生方を中心に講演をいただき、オンラインでのセミナーです。弊社の収益事業とは一線を画した『文化活動』と位置付けており、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開催して参りました。大変ご好評をいただいております。2021年の開始から延べ5,133名の方にご参加いただき、大いに貢献できたのではないかと自負しております。この成果を受け、2026年も引き続き、全10回のセミナーを開催いたします。

2026年4月～開催中

No.	開催日	講師の先生方	テーマ
第1回	4月17日(金) 14:00~15:30	「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) 14:00~15:30	「流体乱流における同期現象とデータ駆動型手法」 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) 14:00~15:30	「(講演タイトル未定)」 東京大学 大学院理学系研究科 天文学専攻 准教授 藤井 通子 様	天体物理学・AI(仮)
第4回	8月28日(金) 14:00~15:30	「(講演タイトル未定)」 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(仮)
第5回	9月18日(金) 14:00~15:30	「(講演タイトル未定)」 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	燃料電池(仮)

※ ご講演概要や日程等の詳細につきましては、ホームページや「概要版パンフレット」に随時掲載していく予定です。

※ 掲載のタイミング等については、営業担当者までご連絡いただくか、弊社ホームページを参照してください。

※プログラムは変更となる可能性があります。

アドバンス・シミュレーション・セミナー2026
お申し込みは右のQRコードからご利用いただけます。

QRコードを読み込む →



アドバンスソフト株式会社 セミナー事務局

〒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

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

seminar2023_20260409