

# アドバンス・シミュレーション ・セミナー2024 開催報告

2025年5月発行

<https://doi.org/10.69290/j.001164>

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 2024」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 東京大学 姫野 武洋 教授 「自由表面流の予測と管理」	2
・第02回 東京工業大学 秋山 泰 教授 「バイオ・計算科学」	4
・第03回 慶應義塾大学 松尾 亜紀子 教授 「航空宇宙エンジン」	6
・第04回 お茶の水女子大学 伊藤 貴之 教授 「可視化・AI」	8
・第05回 東京大学 高田 孝 教授 「原子力・リスク評価」	10
・第06回 神戸大学 牧野 淳一郎 特命教授 「HPC・AI」	12
・第07回 千葉工業大学 森川 泰成 元教授 「建築・都市の新たな風環境デザイン」	14
・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」	16
・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」	18
・第10回 東北大学 柿本 浩一 特任教授 「材料科学・AI」	20
・アドバンス・シミュレーション・セミナー2024 を終えて	22
・YouTube 動画&セミナー資料QR コード一覧	23

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2024 開催報告

## 東京大学大学院 工学系研究科 航空宇宙工学専攻 教授 姫野 武洋 様

### 「ロケットと宇宙機に関係するいろいろな自由表面流」

## 開催概要

### ○講演概要

液体ロケットや人工衛星の推進システムなど、地上とは異なる加速度環境で液体を利用する場面が増えつつあります。しかし、このような環境では、貯蔵容器内の液体を望ましい位置に保持し、外部へ搬送するなど、液体を思い通りに操るのがとても難しくなります。これらの技術課題を解決するためには、地上では再現が困難な熱流動現象に関する知見の獲得と蓄積が不可欠であり、理論と実験を補完する手段として数値シミュレーション技術の確立が期待されています。

本講演では、宇宙機に関係した気液二相流を中心に、実験と数値シミュレーションを組み合わせた研究内容を紹介します。

## 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2024の第1回では東京大学大学院工学系研究科航空宇宙工学専攻・教授の姫野先生より、「ロケットと宇宙機に関するいろいろな自由表面流」というタイトルでご講演いただきました。ご講演は、自由表面流のシミュレーション技術および実験結果をシミュレーション精度向上に活用している例を中心とした研究のご紹介を頂いた。ここではそのご講演の内容を紹介する。

#### 1.2. 自由表面流とは何か

自由表面流は液体と気体が混在する流れで、拘束されずに自由に動く界面を含む流れを指します。身近な例として、海洋の波や蛇口から流れる水、噴水などが挙げられます。ロケットや航空機のタンク内の液体の動きもこの範疇に含まれます。とても身近であるが、形を説明したり予測するのはとても難しい。東京大学ではJAXA(国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構)と協力して、航空宇宙推進機関内部の自由表面流の熱流動を予測できる知見と技術の獲得に努めている。

#### 1.3. 液体の動きの予測

自由表面流のシミュレーションの詳細説明のまえに、どのような課題があるかを説明いただいた。まず外力がある状況での液体の動きの予測の難しさを説明いただいた。具体的にはロケットを対象として、ロケットの構造、その中に存在する液体推進薬タンク、

スロッシングといわれる液体揺動について動画を踏まえて説明いただいた。ロケット飛行中の姿勢や加速度が変わる中で推進薬の界面がさまざまに形状を変える。タンクの推進薬排出口に気体が吸い込まれないことはロケットの正常作動のための重要なファクターであることなどをわかりやすく説明いただいた。

次に重力の影響として、地上では重力が流体の挙動に大きく影響するが、宇宙空間では重力がほとんどないため、表面張力が支配的になり、微小重力状態での液体の挙動の予測が、ロケットの推進薬供給や姿勢制御において重要であることについて、動画を交えてわかりやすく説明いただいた。落下塔実験を用いて微小重力状態を短時間再現し、液体の動きを観察することが行われており、液体の動きは表面張力と重力の相対的な大きさによって様子が大きく変わることを説明いただいた。

ロケットの飛行中の各段階において、重力がどのように変化し、その結果ロケット内部の液体がどのような形状になるかシミュレーション結果を踏まえて紹介いただき、実際シミュレーションを使うと内部の様子が理解しやすくなることを紹介いただいた。

また表面張力の支配的な状況について実験とシミュレーションを比較して紹介いただき、表面張力の特徴を利用して液体を望ましい場所に存在するようコントロールすることも可能であることを紹介いただいた。

#### 1.4. シミュレーション技術の重要性

次に沸騰を伴う液体シミュレーションについて説明いただいた。1G、0.1G、0.001G、0.0001Gと重力を減少させていったときの沸騰シミュレーションを示し、重力が減少すると発生した気泡が浮力で上昇せず加熱面付近に滞在する。沸騰で生じた気泡は浮力で上昇するという地上では当たり前にあるプロセスが微小重力では起こらない可能性がある。ただしこのような微小重力での沸騰試験は地上では再現が極めて難しい。このような実験ができない現象はシミュレーションを用いることが重要になることを説明いただいた。

例えば、ロケットの推進薬タンク内の液体の動きをシミュレーションすることで、スロッシングの影響を予測し、適切な設計を行うことができる。また、火星探査機の着地シミュレーションでは、探査機が着地する際の液体の動きを予測し、転倒リスクを評価することができる。

#### 1.5. 実験とシミュレーションの統合

実験と数値シミュレーションを組み合わせることで、より現実的な環境下での液体の動きを予測し、設計に反映させることができる。例えば、タンクの揺さ

ぶり実験を行い、そのデータを基に数値シミュレーションを行うことで、シミュレーションモデルの精度を検証し、必要な改良を加えていく。

また、落下塔を使用して微小重力環境を再現し、タンク内の液体の動きを観察する実験も行っている。これにより、微小重力環境下での液体の動きを詳細に観察し、そのデータを基に数値シミュレーションを行うことができる。

以下のような実験が紹介された。

### 1.5.1. タンクの揺さぶり実験

アクリル製の透明なタンクを横方向に揺さぶり、タンク内の液体の動きを観察する実験。この実験では、タンクの揺れに応じて液体がどのように動くかを詳細に記録し、数値シミュレーションと比較されていることを紹介いただいた。

### 1.5.2. 落下塔実験

微小重力環境を再現するために、高さ 50 メートルの落下塔を使用し、タンク内の液体の動きを観察する実験である。この実験では、タンク内の液体が微小重力環境でどのように振る舞うかを観察し、そのデータを基に数値シミュレーションを行っていることを紹介いただいた。

### 1.5.3. 火星探査機の着地シミュレーション

火星探査機が着地する際の液体の動きを予測するための実験である。探査機が着地した瞬間にタンク内の液体がどのように動くかを観察し、転倒リスクを評価されていることを紹介いただいた。この実験は、実際の探査機の設計において重要なデータの提供が可能となる。

## 1.6. 数値シミュレーションの活用

実際に数値シミュレーションを活用することにより、以下のような利点があることを紹介いただいた。

### 1.6.1. 設計の最適化

シミュレーションにより、タンク内の液体の動きを詳細に予測し、最適な設計を導き出すことができる。これにより、実験の回数を減らし、開発コストを削減することができる。

### 1.6.2. 試運転の代替

微小重力環境や過酷な条件下での試運転が難しい場合、数値シミュレーションが試運転の代替として機能する。これにより、実際の運用前に問題を予測し、対策を講じることが可能となる。

### 1.6.3. リスクの低減

シミュレーションを用いることで、リスクの高い実験を避け、安全性を確保しながら開発を進めることができる。例えば、ロケットの推進薬タンク内での液体の動きをシミュレーションすることで、推進薬供給の安定性を確保するための設計が可能となる。

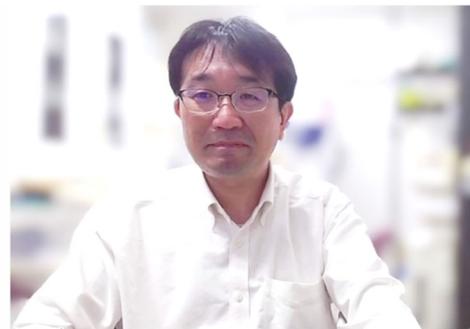
## 1.7. 今後の展望

数値シミュレーションを活用することで、試運転が難しい現象を予測し、設計や開発に役立てることが期待できる。特に、将来的な垂直離着陸型ロケットや、宇宙での推進薬補給システムの開発において、微小重力環境での液体の動きの予測が重要となる。

例えば、火星探査機の着地シミュレーションでは、着地時の衝撃や液体の動きを予測し、転倒リスクを評価することが重要である。このようなシミュレーションは、実際の探査機の設計や運用において不可欠なデータを提供し、ミッションの成功確率を高めるために重要である。

## 1.8. 聴講における感想（アドバンスソフト）

無重力状態では地上で慣れ親しんだ振る舞いと全く異なる挙動を示すことが、実験動画やシミュレーションを通じてわかりやすく説明いただき大変勉強になった。実験を通じてシミュレーションの精度検証を繰り返しており、品質向上に参考となる箇所がたくさんあった。これは液体シミュレーションに限らず、CAE ソフトウェアを開発する者、設計に利用する人など多くの人に役立つアドバイスであった。



### 【ご経歴】

1996年 東京大学 工学部 航空宇宙工学科卒業  
 2001年 東京大学大学院 工学系研究科  
 航空宇宙工学専攻 博士課程修了  
 2000年 日本学術振興会 特別研究員 (DC2)  
 2001年 宇宙開発事業団 特別研究員  
 2003年 宇宙航空研究開発機構  
 プロジェクト研究員  
 2004年 東京大学大学院 工学系研究科  
 航空宇宙工学専攻 講師  
 2006年 東京大学大学院 工学系研究科  
 航空宇宙工学専攻 准教授  
 2021年 東京大学大学院 工学系研究科  
 航空宇宙工学専攻 教授

### 【ご研究内容】

航空宇宙推進系の内部熱流動、自由表面流数値解法の研究に従事。

## 第2回アドバンス・シミュレーション・セミナー2024

東京工業大学 情報理工学院 情報工学系 教授 秋山 泰 様  
「ペプチド創薬を加速する分子動力学シミュレーションと深層学習」

## 開催概要

## ○講演概要

ペプチド創薬は、従来型の低分子創薬と生体高分子を用いる抗体創薬との中間に位置するモダリティとして注目され、標的特異性の高い薬剤を比較的安価に製造可能であるなど優れた利点を持つ。一方、細胞膜透過性の低さなど特性上の課題が残されており、それらを設計時に予測する手法が待望されている。我々は二次元 REMD/REST 法を導入した分子動力学シミュレーション (約 200 レプリカ × 500 ナノ秒程度) による膜透過性予測法を開発した。また文献や特許からの網羅的データ収集とデータ拡張の併用により、深層学習モデルの開発も進めてきた。

本講演では、両者のアプローチの得失などを紹介する。

## ご講演内容

## 1. 講演内容

## 1.1. ペプチド創薬への期待と課題

現在、我々の健康を守る医薬品を開発する創薬のコストが上昇しているという問題があります。これは、従来のアプローチでは新しい創薬が難しくなっていることを示しています。従来の創薬では、低分子と呼ばれるものが中心でした。しかし、これらの低分子の薬は、従来型の標的が枯渇しつつあることに加えて、大きなタンパク質とタンパク質の間に割って入り、それを阻害するといった新たな標的への対応は難しいなどの問題があります。一方で、抗体医薬もよく知られていますが、製造コストが非常に高いという問題があります。

そこで注目されているのが、ペプチド創薬です。ペプチドは、低分子と抗体の中間の領域に位置し、分子量の観点から中分子と呼ばれる仲間です。ペプチド創薬の特徴として、分子が大きくて設計に自由度があるため、今まで扱いにくかった標的もターゲットとすることができ、しかも特異的に作用できます。製造コストも工場で作れるため、抗体に比べて安価になると期待されています。

ペプチド創薬が発展した理由の一つは、特殊環状ペプチドの利用です。環状ペプチドは、体内に入れたときに分解が遅くなるため安定性が上がります。また、人工的に変異を加えた特殊アミノ酸を扱うことで機能や安定性をさらに向上できます。これらの特性により、特殊環状ペプチドは、創薬の新たな骨組みとして期待されています。しかし、未解決の課題があります。その一が体内持続性と呼ばれる性質で、もう一つが細胞膜透過性です。これらの課題を解決する

ためには、新しいアプローチが必要となります。

## 1.1.1. 課題1：体内持続性を予測せよ

特殊環状ペプチドの体内持続性、具体的には体内持続性に一番直結するような値である血漿タンパク質結合率 (PPB) の値を予測するための新たな手法を開発しました。低分子については、PPB の予測法が存在し、実験を行わなくてもソフトウェアで予測が可能です。しかし、特殊環状ペプチドについては、そのような予測が困難でした。

目標は、ペプチドの化学合成前に PPB の値を予測し、標的に対する良好な結合親和性を持つ化合物でありながら、後から PPB が不適切であったという失敗を避けることです。これにより、ペプチド創薬の期間短縮とコスト改善につながると考えています。

機械学習を用いて予測モデルを作成し、比較的うまく進めることができました。具体的には、複雑な構造を持つペプチドを高次元の特徴ベクトルに変換し、これを深層学習の枠組みに入れることができました。また、データの量が不足しているため、データ拡張と呼ばれる技法により、学習データを増やしました。

その結果、PPB の値が 85%以上の合格ラインか、全く話にならないかを区別することができるようになりました。これにより、実験現場での作業が助けられると考えています。

さらに、ソフトウェアシステムを開発し、クラウド上で動作させることができました。これにより、ユーザーはペプチドの構造情報を入力するだけで、AI が動作し、どのような PPB 値になるか、どこを変更すればより良くなるかなどを示唆することができます。

## 1.1.2. 課題2：細胞膜透過性を予測せよ

細胞膜透過性は、物質が細胞膜を越えて細胞内に入る現象であり、その予測は非常に難しい問題です。特に、小さな6残基ぐらいまでの環状ペプチドが通りやすく、10残基を超えると通りにくいという特性があります。この現象を分子動力学 (MD) を用いて模擬する際には、系が大きくなると計算の系も大きくなり、状態のサンプリングも多く必要となります。また、ペプチドが大きくなると膜の厚みと同等のスケールになり、様々な複雑な相互作用が出てきます。

物質が細胞膜を越えて中に入る方法はいくつかあります。ただ穴を通る場合、エンドサイトーシスと呼ばれる現象を通じて取り込まれる場合など、多くの経路が存在します。しかし、私たちは受動拡散、つまり自分自身で入っていくことが達成できれば万能だと考えており、これを研究対象としています。

機械学習のアプローチを試みましたが、新規データに対応しにくいというのが機械学習の限界です。そこで、脂質二重層を越えていく環状ペプチドの問題に物理化学的なシミュレーションで挑戦しました。

分子動力学法では、フェムト秒の単位が計算の一ステップとなります。膜透過という現象はミリ秒の

領域であると推定されます。これを達成するためには、千倍の千倍の千倍の千倍計算しなければならず、これは単純には実現できません。

最新の GPU がどんどん速くなっており、GPU を駆使した最新の分子動力学計算の速度を享受することで、マイクロ秒レベルのシミュレーションまでは到達できます。しかしまだ全く届かないので、見たい現象以外の無駄な計算をできるだけ減らすという、高度なサンプリング手法の議論が必要です。

Steered MD、Meta dynamics、Supervised MD という三種の手法を試しましたが、成功することはできませんでした。そこで、細胞膜と鉛直方向に 28 地点を取りその地点を中心としてペプチドに緩く拘束をかける REUS (レプリカ交換アンブレラサンプリング法) を採用し、さらに各地点に 8 種類の溶質温度を設けた REST (溶質温度レプリカ交換法) を組み合わせた、 $28 \times 8 = 224$  レプリカによる二次元レプリカ交換分子動力学シミュレーションを実施しました。加えて、脂質二重膜のモデルを見直し、コレステロールを 40~50% 程度含むことで、膜の中まで水分子が安易に入ってくる現象を抑制しました。これらの手法を用いて、10 残基のペプチド 18 種類について実験と予測の相関が非常に良くなり、一定の成功を収めました。このシミュレーションでは一つのペプチドについて約 500 ナノ秒の計算を行い、224GPU を同時稼働させ合計で約 20,000GPU 時間がかかります。18 種類のペプチドの 2 種類のコレステロール濃度の計算では、約 700,000GPU 時間を費やしました。

最近、計算性能の高い H100 GPU が登場しています。しかし、H100 ほどの GPU になると、1 GPU で 1 レプリカを計算するのでは大幅に力が余ってしまいます。そこで、MPS と呼ばれる方法で各 GPU に複数の計算を同時に行わせる必要があります。

以上のことを考慮すると、一つのペプチドあたりのシミュレーションのコストは、現在、最大でも 200,000 円ぐらいで計算できます。まだ無駄の削減の余地がありますので、目標値はペプチドの合成や実験と比較し得る 50,000 円ぐらいです。これにより、世の中に多少の貢献をできると考えています。しかし、私が申し上げているのは 10 残基とか 12 残基ぐらいまでの話であり、1 残基増えるだけで大きく難易度が上がりますので、まだまだ技術開発が必要です。また、実験に勝るものはありませんので、必ずしも実験の代わりになるものでもないということは気をつけたいと思います。

## 1.2. 機械学習での挑戦、ふたたび

最近、膜透過性予測のテーマでも、機械学習への再挑戦を開始しました。膜透過のデータは、以前はほとんど存在しなかったのですが、7,000 種を超える環状ペプチドの膜透過の実験データを収集したデータベースを私たちのチームが発表しました。このデータベースは、正確に構造を記述するための階層型の記法、HELM を使用しています。また登録ペプチド全てに対して、クロロホルム中、水中、真空中での可能な三次元配座も計算しています。

このデータベースを作成したことで、私たちは機

械学習への再挑戦を開始しました。結果は昨年 12 月にバイオアーカイブに投稿した後、現在、専門誌の査読を受けています。私たちは、原子レベル、残基レベル、そしてペプチド全体としての様々な性質の 3 レイヤーの深層学習を組み立てました。また、データ拡張も行い、データの量を増やしました。

## 1.3. 中分子製薬技術の拠点をめざして

今後、東京工業大学と東京医科歯科大学の統合に伴い、新たな形での貢献を目指しています。東京工業大学では、中分子 IT 創薬研究推進体を設立し、情報理工学院と生命理工学院を中心に研究を集約してきました。東京医科歯科大学には、核酸・ペプチド創薬治療研究センターがあります。大学統合後は、私たちが持っているデータサイエンスとシミュレーションの経験を組み合わせることで新たな研究が可能になると考えています。

さらに、企業との連携を通じて、中分子創薬の勉強会や共同研究の母体となるグループを形成することも考えています。これらの取り組みを通じて、私たちは大規模シミュレーションと機械学習の進展を期待しています。これらは、両輪の関係にあり、互いに進展することで、より良い結果を生むと考えています。

## 2. 聴講における感想 (アドバンスソフト)

ペプチド創薬が直面している課題とそれを克服するための革新的なアプローチについて深い印象を受けました。特に、機械学習と物理化学的シミュレーションを組み合わせた研究が、創薬の分野でどのように応用されているかを知ることができ、科学技術、具体的には計算機システムなどの進歩によって未来の創薬がどのように変わっていくかを想像することができました。また、東京工業大学と東京医科歯科大学の統合による新たな研究拠点の設立は、中分子創薬研究を加速させるのだろうと確信しています。それに加えて産学連携を強化し、さらなるイノベーションをもたらす可能性を秘めていると感じます。この分野の発展に期待を寄せるとともに、今後の研究成果に注目していきたいと思っています。



### 【ご経歴】

1990 年 慶應義塾大学 大学院理工学研究科 博士課程修了工学博士。1990 年 通商産業省工業技術院 電子技術総合研究所 研究官。1992 年 京都大学化学研究所 助教授。1996 年 新情報処理開発機構 研究チーム長。2001 年 産業技術総合研究所 生命情報科学研究センター長。2007 年 東京工業大学 大学院情報理工学研究科 教授。2016 年 組織変更により現職。

### 【ご研究内容】

生命情報学、計算創薬、HPC 等の研究に従事。

## 第3回アドバンス・シミュレーション・セミナー2024

慶應義塾大学 理工学部 機械工学科 教授 松尾 亜紀子 様

## 「デトネーションエンジン開発状況とシミュレーション事例の紹介」

## 開催概要

## ○講演概要

デトネーション波とは予混合気体中を超音速で伝播する燃焼波であり、その伝播速度は 2000m/s にも達する。近年、このデトネーション燃焼を用いたエンジンの開発が世界各国において進められており、多くの講演会においてセッションが企画され、数多くの研究及び開発状況の発表がなされている。

講演では、現状での世界におけるデトネーションエンジン研究開発の状況について概説する。特に日本におけるプロジェクトの状況については、世界に先駆けて行われたデトネーションエンジンのロケット打ち上げによる宇宙実証について紹介する。また、我々が取り組んでいる解析事例についても紹介する。

## ご講演内容

## 1. 講演内容

## 1.1. はじめに

本講演では、まず、宇宙開発の状況について説明し、次にデトネーションエンジンについて述べていきます。

世界の宇宙システムの動向については、人工衛星の打上げ需要の増加を背景に、2023年の年間ロケット打上げ数は212回と過去最大数を記録しています。近年では、スペースX社(Falcon9等)の躍進が目覚ましいです。世界の人工衛星の打上げ数の推移については、各国での開発・運用中の大型ロケットの低軌道への輸送能力、打上げ価格の低減が大型ロケットの開発と運用において進展しております。従来、大型のペイロードの打上げに関するニーズへの対応を目的としたもの(衛星コンステレーション構築に向けての衛星の多数機打上げ、静止衛星の大型化、商業宇宙ステーションや月・月近傍の活動拠点の建設、物資・人員輸送など)がありました。これに関連して、大型ロケットの打上げ価格(単位質量当たりの打上げ価格)は、世界的に見て低減傾向にあります。打上げ価格は、2000年代までは10,000USD/キロの水準でしたが、スペースX社のFalcon9が2,900USD/キロを実現するに至りました。一方、我が国では基幹ロケット開発が2種類あります。液体ロケットの開発経緯については、米国からの技術導入により開発が開始され、H-IIロケットにて全段自主技術による開発を達成するに至りました。もう一つの固体ロケットの基幹システムは、我が国独自の技術として1950

年代からシステム技術を発展・蓄積してきており、即応性が高い戦略的技術がイプシロンロケットとして現在も継承されています。

近年の宇宙輸送については、民間企業によるロケット開発への参入が顕著になってきました。そこでは、100~300キロの輸送能力を有する小型ロケットの開発が中心でしたが、衛星コンステレーションへの対応などを背景に、米・中を中心に輸送能力を数トン級まで向上させた中型ロケットの開発も活発化しております。ここでは、小型のロケットエンジンとしてデトネーションエンジンを知って頂こうと思います。

## 1.2. デトネーションエンジン

気体の燃焼には、空気中の酸素と混合するのが拡散燃焼というものがあります。これに対して、予め燃料と酸化剤が混ざっている状態で燃焼するのが予混合燃焼です。予混合の状態により燃焼速度は一意に決まり、乱流の影響が燃焼速度へ加わります。燃焼面が超音速で伝播するのがデフラグレーションであり、超音速で伝播するのがデトネーションです。デトネーションはデフラグレーションに比べて伝播速度が大きく、マッハ数で言うと5~10くらいになります。また、デフラグレーションでは、燃焼することにより圧力は僅かに減少しますが、デトネーションでは圧力は13~55倍程度に増大し、デトネーションによる爆発事故などでは壊滅的な被害につながります。一方、デトネーションは高い圧縮性を伴うため、高い理論熱効率を活かした熱機関への応用が期待されます。また、燃焼完結距離が短くて済むため燃焼機関が小さくできる可能性があります。

デトネーションを利用したエンジンには、パルスデトネーションエンジン(Pulse detonation engine, PDE)と回転デトネーションエンジン(Rotation detonation engine, RDE)があります。2021年7月には、名古屋大学が中心となってこれら2種類のデトネーションエンジンシステムの世界初の宇宙飛行実証に成功しました。

PDEではチャンバーに燃料と酸化剤を充填し、端で点火するとデトネーションによりチャンバー内のガスは消費し尽くされ、もう一方の開放端から既燃ガスを追い出し、再度燃料と酸化剤を充填するというサイクルを高周波で実施します。このとき、デトネーションにより発生する高圧が機器に作用することにより推力を得ることができます。2008年1月には米国空軍研究所グループ(The U.S. Air Force Research Laboratory (AFRL) and Innovative Scientific Solutions Inc. (ISSI))が4気筒PDEによる初の飛行試験に成功しました。PDEを用いたのは10秒間で、その時の飛行速度は50m/s、推力は700Nでした。PDEは着火し続けなければ推進力が維持できませんが、RDEは火炎を消さない限り爆轟波が維持され、この点で有利です。このため、世の中のデトネーション

ンエンジンに関する研究は 2008 年頃から徐々に RDE ヘシフトしてきました。RDE では二重円筒に挟まれた狭い領域に燃焼器があり、ここへ燃料酸化剤を出すことによって回転デトネーションが維持されます。デトネーション波は非常に高速であるため、常に推進機内のどこかに存在する高圧場を利用して推進力を得ることができます。これを利用した RDE 推進が私たちのグループと名古屋大学の笠原先生のグループがメインとなって作ったエンジンです。RDE を乗せて線路を滑走する姿を笠原先生の学生の人がアメリカ航空宇宙学会で発表し、アメリカで大規模な予算がつき、RDE の研究が本格的に進んだという経緯もありました。

### 1.3. デトネーションの数値シミュレーション

こういった物理的な対象が存在する中で、どういった設計をした方がいいか、どういう風にするとエンジン推進の傾向はどう変化するかということシミュレーションで予測するということが挙げられます。デトネーションに関係する圧力は圧力センサーで測定したり、その挙動を高速度カメラで動画を撮影したりすることは可能ですが、そうした実験は非常に高価なものになりますし、詳細を窺い知るとは依然として難しいということがあり、シミュレーションを活用することは十分に価値のあることと考えます。

こうしたデトネーションのシミュレーションの基礎方程式は、3次元の圧縮性オイラー方程式です。デトネーションに関しては、輸送拡散や粘性による影響が僅かであり、デトネーションエンジンとしての推力を観察するのであればこれで充分であろうと思われれます。今回、シミュレーションの成果の一部をご覧頂きます。1つ目は回転デトネーションエンジンにおけるサイズ効果のシミュレーションであり、燃焼器のスケールと爆轟伝播モードの関係について調査することを目的としたものです。RDE の大型化に伴い爆轟波の伝播の仕方がどのように変化するかについて明らかにしておく必要があるためです。諸条件を変化させることにより、二重円筒内を伝播する回転デトネーションが1つの場合と2つ(マルチ)の場合についてシミュレーションを用いて調査しました。伝播するデトネーションがマルチの場合にはデトネーションの伝播速度は多少落ちますが、エンジンの推力としてはそれほど大きな差異が無いことを確認できています。2つ目に紹介するシミュレーションでは、回転デトネーションエンジンにおける形状効果についてのシミュレーション解析を説明します。回転デトネーションの下流では、流れが超音速 ( $M=1\sim 1.75$ ) で排気されます。排気部分をストレート部分と拡大部分で構成し、ストレート部分の長さによって推力はどのように影響を受けるのかについて明らかにすることを目的としたものです。例えば、排気部分が直線形状のみで構成される場合はスラスタ出口のマッハ数はおよそ1ですが、排気部分を5度で拡大しスロート部が存在しない形状の場合でも出口マッハ数がおおよそ1.75まで加速することがわかりました。また、ストレート部分のみで構成さ

れる排気形状よりも拡大スロート部分と合わせた形状構成のほうが推力を得られやすいことがわかりました。3つ目はデトネーションのエアブリージングエンジンへの適用についてです。ロケットエンジンは酸化剤も抱えなければならず、その分だけエンジンの効率は下がります。一方、スクラムジェットエンジンはエアブリージングエンジンの一種であり、酸化剤を輸送することが不要で、ロケットエンジンよりも比推力が大きく、マッハ5以上で作動させることが出来ます。その反面、安定した燃焼を得ることが困難であるという側面があります。そこで、燃焼器を備えた燃料噴射口の近傍でデトネーションを新たに用いることにより、燃料/酸化剤(空気)の混合を促進し高い燃焼効率を得る可能性について調査することを目的としたシミュレーションを実施しました。デトネーションを燃焼器で利用するという意味で幅広く今後もエアブリージングというものを含めて研究が進むものと考えております。

### 1.4. おわりに

回転デトネーションエンジンについてのコンピュータシミュレーション事例について紹介させて頂きました。世界中で非常に活発に研究が行われておりまして、アメリカ航空宇宙学会のシンポジウムでは昔と違い、今では毎日セッションが開催される程に発表件数が増大しました。また、燃焼シンポジウムでも、以前はデトネーションの発表は少なかったですが、今では連日に渡り講演がなされるというように変化してきました。このように、日本でも実験と数値シミュレーションの両面から、数多くの人々がデトネーションエンジンの研究をしております。また、実用化へ向けて特に米国の企業は積極的であるという状況でもあります。今後もこの分野に興味を持って頂ければと思います。



#### 【ご経歴】

1987年 津田塾大学 学芸学部 数学科 卒業  
1993年 名古屋大学 大学院工学研究科  
航空工学専攻 博士課程修了  
2008年 慶應義塾大学 理工学部 機械工学科 教授

#### 【ご研究内容】

専門は、圧縮性流体力学、燃焼工学、数値解析、宇宙推進工学。

## 第4回アドバンス・シミュレーション・セミナー2024

お茶の水女子大学 大学院人間文化創成科学研究科 (兼)  
文理融合AI・データサイエンスセンター長 教授 伊藤 貴之 様  
「シミュレーションのための情報可視化」

## 開催概要

## ○講演概要

計算機による可視化技術は、科学技術に特化した可視化技術と、それに限定されない一般的な情報可視化技術に二分される。科学技術シミュレーションの現場ではこれまで、科学技術に特化した可視化技術が、シミュレーションの検証や制御に用いられてきた。

本講演では、科学技術に特化した可視化技術に加えて、一般的な情報可視化技術がどのようにシミュレーションの現場に貢献できるかについて、講演者自身の研究事例を紹介する。具体的な事例として、航空機飛行シミュレーションへの適用、人物歩行シミュレーションへの適用、その他のシミュレーションへの適用について議論する。

## ご講演内容

## 1. 講演内容

## 1.1. 可視化技術の用途とその幅広い適用

可視化の概要として、可視化技術には「Scientific Visualization」と「Information Visualization」という二つの異なるアプローチが存在する。前者は科学技術系のデータを対象とし、流体力学や構造力学の現場で利用される物理的な空間に基づいたデータの可視化を行い、後者は金融データやセキュリティデータなど、論理的な空間に存在するデータを可視化する手法である。

## 1.2. 流体シミュレーションと可視化

「Scientific Visualization」と「Information Visualization」に基づいたデータの可視化の例として、以下の航空機設計の事例を二つ紹介する。

## 1.2.1. 流線自動生成による流体の比較可視化

シミュレーション結果を比較する際、特に流体シミュレーションでは複数のシミュレーション結果を視覚的に比較することが求められる。しかし、流体シミュレーションにおける流線の可視化においては操作が煩雑な知識や経験、ユーザーが手動で設定することが課題として挙げられる。本講演では、東北大学の流体科学研究所との共同研究における流体シミュレーションの流線の自動生成技術に関する提案を紹介する。自動生成により重要な流線を可視化することで、ユーザーの負担を軽減し、シミュレーション結果の差異をより効果的に理解することが期待できる。

提案は、二つのシミュレーション結果の流線を重

ねて表示するために、視点に依存しない二つの評価基準での可視化手法を適用することである。第一の視点に依存しない評価基準は、流れ場全体の把握ができるように、長く、うねりの有る流線を形状エントロピーで定式化し、この大きさを把握できるという基準である。次に、第二の視点に依存しない評価基準は、二つのシミュレーションの間での条件変更であり、流線の差分の端点からの距離が大きいものを影響度が大きいものとして優先的に選ぶという基準である。そして、「形状エントロピー」および「流線ペア間の差分」の二つの評価基準の線形和に対して、係数によって流れ場、条件変更の可視化の度合いを調整することができるようにしたものである。

一方で、視点に依存する評価基準は、画面上での流線同士の塊として重なってしまう流線を最小化するため、視点に依存しない評価基準が一位だった流線ペアを描画し、その後流線ペアから降順に既に描かれている流線と距離がどれだけ近いかというものを計算するものである。具体的には、距離が近いもの、具体的には流線ペア間の差分を  $D$  として、閾値  $\lambda$  として設定されたもの以上で存在する場合は、この条件を満たす流線は表示させない。つまり、画面上で十分近くにある流線は二本同時には表示しない。N2 組のペアが描画されるまで繰り返すことで、画面上の流線同士の重なりを最小にすることができるという基準となる。

これらの評価基準を適用した可視化手法の例として、航空機における適用事例を紹介する。具体的には迎え角 20 度、27 度と 33 度の場合でデルタ翼に発生する流線の可視化を紹介する。さらに、ランダム選択と本手法における比較を紹介する。これにより CFD における計算条件の迎え角の違いによる可視化結果の差からうねりの状態の差が明確となり、また計算条件変更時の結果の差が形状的な埋もれや差分の情報量が増大された形で視覚的に表現された。

## 1.2.2. 設計最適化過程のパラメータ分布の可視化

航空機や列車の形状設計は、その形状を変えながらシミュレーションを反復し、それに対して多数の目的変数、例えば強度や燃費を算出して最適化を行うため、変数の組み合わせが複数ある多目的最適化問題として取り扱われる。本講演では、前項と同じく東北大学の流体科学研究所との共同研究である設計最適化のパラメータ分布を可視化した例を紹介する。

事例は航空機の翼の形状について 72 個の設計変数、4 つの目的関数、ここでは遷音速巡航の抵抗係数、超音速巡航の抵抗係数、超音速巡航時の翼根にかかる曲げモーメント、そして翼先端部にかかる捻りモーメントの 4 つからなる多目的最適化について、これらを 76 次元のデータとして取り扱い、遺伝的アルゴリズムにより 776 個のパレード解、すなわち 776

通りの設計案を導き出して可視化による理解を試みたものである。

伊藤研究室で開発した可視化アプリケーションにより、次元とサンプル（シミュレーション結果）の2軸をマトリックスとしてとらえ、計算から可視化までをプロットした結果の重なり度合を相関として、点と線で表現した。これにより、経験的に想定された相関を再確認することができた。一方で、経験では得がたい未知の相関を可視化によって見出すこともできた。つまり、既知の事実を確認することと、未知の事実を発見できることの両面に可視化の意義がある。

### 1.3. 人流シミュレーション可視化技術の種類とその違い

次に、「Scientific Visualization」と「Information Visualization」の組み合わせ、また「Information Visualization」に基づいたデータの可視化の例として、以下の人流に関する事例を二つ紹介する。

#### 1.3.1. 人流シミュレーションと可視化

実測の人流データは計測、歩行者同士の近接（歩行者間距離と継続時間で定義）関係におけるネットワークは可視化が研究対象となるが、本事例ではネットワークスポーツ会場での入退場、駅での災害誘導について産業技術総合研究所の人工知能研究センターとの共同研究として行われたものである。

事例はスポーツ会場での人の入退場のシミュレーションについて、群集の近接ネットワークによって、感染症リスクの可視化を行ったものである。ここでは野球場の観客の人流を例に、歩行している人流についてシミュレーションカメラを使って人流ステータスを計測し、継続時間から近接した場合を線で結んでネットワークを作り可視化したものである。

この人流シミュレーションでは、観客が退場する際のゲート選択に着目し、パラメータに設定した。一番近いゲートから退場することを順守する場合、30%または50%の割合でランダムにゲートを観客が選択して退場する場合に分けて可視化を行った。このとき、一番近いゲートからの退出を順守する場合が混雑は抑制され、一方でゲートの選択のランダム率に応じて人流のグループは各ゲートに分散することから、その固まり具合により感染源がどのグループ同士の近接により発生したものかを理解する結果を得ることができた。

#### 1.3.2. 群衆の近接ネットワークの可視化

災害時の避難経路を設計の良し悪しを評価することは安全上の観点から重要となる。ここでは、誘導パラメータ最適化のための可視化として、前項と同じく産業技術総合研究所の人工知能研究センターとの共同研究の例を紹介する。事例は、まず東京駅でのシミュレーションの誘導パラメータとして、経路などにより、出発の差、避難までどれぐらい時間差があるか、動線や階段などの選択をパラメータとして  $\lambda n$  とし、一方で混雑度  $f1$  と避難完了時間  $f2$  という評価指標を駅の3次元的なシミュレーション結果から算出した。次に、混雑度  $f1$  を横軸、避難完了時間  $f2$

を縦軸にした2次元の散布図から、各指標のパレートフロントを算出する。それを重みとして、Parallel Coordinates Plot (PCP) による単一評価指標から重要度の高いパラメータを算出した。混雑度と避難完了時間に重点を置いて可視化による分析を行うことにより、混雑度を重視した場合、混雑度を減らすためには、パラメータ  $\lambda n$  の一つである避難開始時間に差をつけると良い傾向があり、また同様に避難完了時間を重視した場合、地下に人を誘導するパラメータが有利である、という結果をPCPによる可視化から得ることができた。

### 1.4. 今後のシミュレーション

流体シミュレーションから人流シミュレーションにおける可視化技術の応用事例を紹介した。シミュレーション結果を最適化問題として分析した上で、どのようにデータの理解や分析できるかを示した。また、機械学習の利用や、エネルギー分野、金融分野など他の分野への応用の可能性が示唆された。

## 2. 聴講における感想（アドバンスソフト）

科学技術シミュレーションは前処理、計算、後処理とそのプロセスは大別されるが、改めてその要素となる可視化について、俯瞰的に理解することができた。科学技術シミュレーションはトレンドを踏まえた場合、昨今の計算機利用はその演算能力のみに注目されることはなく、画像処理分野で利用されてきたGPUが機械学習やブロックチェーン技術などへ応用され、新しい局面、そして複合的な分野へと発展していることから、今後はそのシミュレーション手法だけにとどまらず、情報可視化技術を含め複合的な新しい知見を見出していくことは重要であるという認識を再確認できた。

専門家から研究分野としての可視化というものをご紹介いただき、その解説と重要性、さらには幅広い応用がわかりやすく強調されており、特にシミュレーション結果の比較やデータの理解において、専門外の研究者・技術者にとって大変有意義になるご講演であった。



#### 【ご経歴】

1992年 早稲田大学 大学院理工学研究科 修士課程修了。  
1992年 日本アイ・ビー・エム（株）東京基礎研究所研究員、科学技術シミュレーション、CAD、コンピュータグラフィックス、分散処理システムなどの研究に従事。1997年 早稲田大学にて博士（工学）。2003年 京都大学大学院 COE 研究員（助教授相当）兼職。2005年 お茶の水女子大学 理学部 情報科学科助教授。2011年 お茶の水女子大学 理学部 情報科学科 教授。

#### 【ご研究内容】

近年では情報可視化、マルチメディア、インタラクション、データサイエンスなどの研究に従事。

## 第5回アドバンス・シミュレーション・セミナー2024

東京大学大学院 工学系研究科 原子力国際専攻 教授 高田 孝 様

## 「シミュレーション技術のリスク評価への適用」

## 開催概要

## ○講演概要

リスクとは、「目的に対する不確かさの影響」(ISO31000:2018、リスクマネジメント - 指針)であり、想定されるシナリオや発生頻度/確率、およびその影響について、不確かさを含めた評価が重要となる。近年、これらの不確かさをシミュレーション上でモデル化し、多数の解析を統計処理することでリスクを評価する、動的リスク評価手法の適用が検討されつつある。

本講演では、主に原子力分野で用いられているリスク評価とシミュレーション技術との関係、動的リスク評価手法や今後の課題等について概説する。

## 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2024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高田先生より、「シミュレーション技術のリスク評価への適用」というタイトルでご講演いただいた。リスク評価についての基礎知識と、原子力発電所などを対象に用いられている確率論的リスク評価手法についてのお話から始まった。そして、従来の手法の課題を解決する方法として、シミュレーション技術を援用した動的リスク評価手法を挙げられ、実際の評価例を交えながらご解説いただいた。ここではそのご講演の内容をご紹介します。

## 1.2. 確率論的リスク評価

リスクという用語は、概ね、不確かさの影響(influence)と定義されているが、特に産業においてリスクを考えるときには3つの要素、シナリオ/確率・頻度/影響(consequence)、が重要である。つまり、リスクとは、主に好ましくない方向への不確かさを有するシナリオ、確率・頻度および影響を組み合わせたものと言える。リスク評価とは、これらの3要素について、どのようなシナリオがあるか、それらがどの程度起こりやすいか、発生したらどのようなひどいことになるのかを定めることである。

不確かさはその特徴からいくつかの種類に分類でき、その中には、シミュレーションや確率論的リスク評価手法(PRA)に適用し易いものが存在する。シミュレーション技術を用いた不確かさ評価手法においては、入力値に対して個々の不確かさを考慮して安

全性を保守的に見積もったり、統計的な信頼区間を利用して事故の起こりにくさを求めたりしている。原子力発電所の安全性評価は従来高い保守性という視点から実施されていたが、定量的なリスク評価手法であるPRAによって、その視点とは異なる状況の事故によってもリスクへ大きく寄与することがあると分かり、今ではリスク評価に基づいて対策することが合理的であり、効果的となっている。

原子力発電所のPRAはシナリオの区切りを基準に3つのレベルに分けられている。炉心損傷を防ぐためのレベル1 PRAを例にすると、事故シナリオの分岐を決めるイベントツリーとそれぞれの分岐の確率を評価するフォールトツリーに基づいて、シミュレーション技術も利用しつつ、各々のシナリオで安全停止するか炉心損傷するかという成功基準を定量化する。この手法は強力であるが課題も存在する。一つは事故シナリオを網羅できるかという点である。シナリオの分岐を決めるイベントツリーは発生しそうなイベント生起順序を工学的に判断して決めており、その順序が変化するシナリオを扱いにくい。また、イベント発生時刻によって成功基準を満たすかどうかが変わりうるような、シナリオの時間依存性を扱うことも難しい。もう一つの課題は、各イベントの影響度が代表シナリオのシミュレーションのみで評価されるため、それを網羅的に評価できないことである。

## 1.3. シミュレーション技術を援用した動的リスク評価

これらの課題を解決する目的から、シミュレーション技術を更に援用した動的リスク評価手法というもの研究開発されている。動的リスク評価手法にはいくつかの種類が存在するが、ここでは、連続マルコフ過程モンテカルロ法を紹介する。この方法では、シミュレーションに組み込まれたイベントモデルを確率論的に発生させ、事故シナリオを動的に構築していく。シミュレーションを行うことで得られる温度や圧力などのパラメータの値がイベントを構成する要素の状態遷移確率の評価に利用される。そして、モンテカルロ法によって状態を遷移させるかどうかを判定し、次の時刻のプラントの状態を決定していく。これを繰り返してシナリオを動的に構築していく。

この手法の適用例として、ナトリウム冷却高速炉における積雪や強風のリスク評価を紹介する。高速炉の場合、ナトリウムの密度が温度に強く依存するため自然循環が起こりやすい性質を利用して、発電所の屋上に空気冷却器が設置されるが、これが積雪や強風によって機能しなくなるもののリスクを評価

した。

積雪時の動的リスク評価は以下の設定で行った。積雪で全電源が喪失するが原子炉は安全に停止し、自然循環による除熱が行われるところから評価を始める。積雪速度は10 cm/hとし、積雪量が多くなるにつれて空気冷却器が機能喪失する確率も高くなるとする。一方で、アクシデントマネジメントとして8時間おきに除雪を試みる。除雪は50%の確率で成功し、成功したら積雪量は0 mになるとする。この設定で100サンプルの計算を行い、時間依存性の異なるシナリオ群を作り出し、安全評価を行った。具体的には、炉心出口最高温度の累積分布に対して正規分布近似式を求め、損傷確率や信頼区間上限値による統計的な到達最高温度を推定した。その結果、24時間以内に炉心出口の配管が設計制限温度を超えることはほぼ無く、損傷しないという結論が得られた。このような統計的な安全評価や、それに基づく合理的な検討は従来のPRAでは行えない。上記の設定に加えて、屋上へアクセスできずに除雪できなくなるイベントや、代わりに電気ヒータを起動させて除雪するイベントを加えた評価も実施した。ただし挙動は複雑になり、得られる情報量が増えるため、効果的な分析を行うことが重要であることが分かった。

一方、強風時の動的リスク評価は以下のとおりであった。この場合の起因事象は風速70 m/s以上の強風の発生で、それに伴い外部電源が喪失するが、非常用発電機が作動し、緊急停止には成功するというものである。その後は強風が12時間継続するが、その間、非常用発電機が破損して機能を喪失したり、破損の際に発電機の燃料の引火による火災が発生し、空気の温度が上昇して冷却機能が劣化したり、補助冷却設備が破損して空気冷却器の機能が喪失するというイベントが確率的に起こるとした。このとき、非常用発電機の破損確率は10%程度であり、補助冷却設備に至ってはほぼ壊れないという特徴をもつことが、積雪時の例と大きく異なる。このような条件で1000個のサンプルを作成しても、90%程のシナリオではイベントが何も発生していなかった。これは発生する事故のリスク評価を行うという目的からは大きな課題となる。この課題を解決する有効なアイデアとして、イベントの発生確率を変更してサンプリングを行い、得られた結果を重み関数で補正することによって評価する方法が考えられる。このとき、成功と失敗の両方のサンプルが均等に出るように、変更後の確率を50%程度にするのがよい。この方法でサンプルを生成した結果、それまで現れなかったシナリオ、特に、イベントの発生順が工学的判断とは逆のケース（空気冷却器の機能が喪失したあとに発電機のタンクが故障するケース）が得られ、網羅的な評価が可能となった。この方法でも、全ての空気冷却器が同時に機能喪失するシナリオの発生率は理論値の20%程度の差であった。この方法では、炉心出口最高温度の累積頻度分布も連続分布的になるが、正規分布近

似の際に、最小二乗法でパラメータ推定するよりも、累積分布値が95%と99%になる値を用いて、2つのパラメータ値を決定する方が目的に叶った評価が行えた。考慮するイベント数が増えるとサンプル数を増やさざるを得ないが、重み付けサンプリングを行うことでその数を抑えることができる。

#### 1.4. 今後の展開

動的リスク評価手法ではシミュレーション技術を利用することで、事故シナリオを動的かつ網羅的に生成でき、事故の影響度評価もシミュレーション結果から自然に得られる。一方で、得られる情報量が多いため、効果的に活用する上での整理の仕方が重要となる。このとき、どの機器のリスクが全体のリスクに強く影響するのかという従来のPRAが扱ってきた指標と、どの入力パラメータが影響を及ぼしているのかというシミュレーション特有の指標での整理が求められる。動的リスク評価手法においてはこれら両方の重要度指標を同時に評価できるが、これらを統一的に扱える指標の構築が望まれている。

## 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を題材に、リスク評価におけるシミュレーション技術の適用というテーマでお話をいただいた。特に、従来の確率論的リスク評価手法の課題と、それを解決するために研究が進められている動的リスク評価手法の特長について分かりやすい内容となっていた。弊社よりお尋ねした、動的リスク評価手法は従来のリスク評価手法に取って代わられるようになるのかという点については、しばらくは相互に補完しながら進んでいくのではないかと予想されていた。計算科学シミュレーションを業務としている弊社として、動的リスク評価手法に役立つ技術への貢献を果たしていきたい。



#### 【ご経歴】

1994年 東京工業大学 大学院理工学研究科 卒業（修士）。2007年 学位取得（大阪大学、工学博士）。川崎重工業株式会社（1994～2005）、大阪大学（2005～2015）、日本原子力研究開発機構（2015～2021）を経て、2021年より、東京大学 工学系研究科 原子力国際専攻 教授

#### 【ご研究内容】

熱流動数値シミュレーション、原子炉安全工学、リスク評価。

## 第6回アドバンス・シミュレーション・セミナー2024

神戸大学大学院 理学研究科 惑星学専攻 特命教授 牧野 淳一郎 様  
「ポスト・エクサ、ポストムーア時代の HPC と AI」

## 開催概要

## ○講演概要

「富岳」を始めとするエクサスケールシステムは世界的にも立ち上げが済み、実際の運用に入っている。また、日本ではポスト富岳のフィージビリティスタディが進み、次世代計算基盤の姿が見え始めてきた。一方、人工知能、特に生成 AI・大規模言語モデルの応用が急激に普及し、汎用 HPC、さらには汎用 CPU の市場よりも AI 向け GPGPU の市場のほうが大きくなっており、HPC 向けのプロセッサの将来像は見えにくくなっている。また、半導体技術は完全にポストムーア時代に入り、開発費は高騰する一方、世代毎の性能向上はマージナルになっている。この状況下でのプロセッサと HPC アプリケーションの将来像を展望する。

## ご講演内容

## 1.講演内容

## 1.1. これまでの計算機の進歩

これまでの計算機の進歩を振り返ってみると、1940年代から2010年代までの70年間はほぼ10年で100倍というような指数関数的進歩（ムーアの法則）が続いてきた。その要因は、使うスイッチ素子が高速になったこと、小型で低消費電力になり、たくさん使えるようになったこと、安価になったことが挙げられる。性能向上を横軸に時間、縦軸に性能としてみると、非常に直線に近いグラフになることが分かる。80年間で16桁弱の高速化となっている。次にスーパーコンピュータの歴史について簡単に振り返っておきたい。1940年代に最初にできた ENIAC は、真空管を18,000本使った非常に大きなシステムであった。消費電力は150KWで当時の電力事情として大きなもので、ENIACが稼働するとフィラデルフィア中の電灯が一瞬暗くなったという話もある。主に弾道計算に使われて、その性能は加減算が1秒間に5,000回、乗算が4,000回くらいであった。1950年代になると真空管も進歩して小さくなり、1960年代になると、シリコントランジスタを利用した計算機が登場する。CDC6600ではCPUのクロックは10MHzで1MFlops程度の性能となった。1つの命令で演算やデータ移動1つを記述するスカラー計算機で近代的な計算機アーキテクチャの原型とされており、ロードストア・アーキテクチャ、複数演算機のアウト・オブ・オーダー（OoO）実行が実装された。1970年代になると、1960年代よりも小型化された Cray-1 が登場し、クロックは80MHzで160MFlops

の性能となった。小規模だがICを用いたことで、小型化が実現された。また、Cray-1は商業的・性能的にも最初に成功したベクトル計算機として有名であり、ベクトルレジスタや半導体メモリを備えている。1980年代になると日本のスーパーコンピュータの時代があって、例えば NEC の SX-2 で LSI を使用することで、6 ns クロックで掛け算、加減算のパイプライン4本の構成で1.3GFlopsとなった。時期的には同じく1GFlopsを超えた富士通 VP-400 や日立 S-810 よりも遅かったが、ピーク性能は高かった。1990年代になると、ASCI-Red が1.8TFlopsと1TFlopsを超える計算機として登場した。200MHzのIntel Pentium Pro プロセッサを9,216台で3次元メッシュネットワーク（ただし、Z方向は2なので、ほぼ2次元）を備えていた。ASCIは核兵器維持管理のための計算機プロジェクトなので、主に核爆弾のシミュレーション用に使用された。2000年代になると2004年に完成したIBMのBlue Gene/Lで131,072個のカスタムプロセッサと3次元トラスネットワークでピーク性能360TFlops、2010年代になると、2012年に完成した「京」はカスタムプロセッサを88,128個、6次元トラスネットワークでピーク性能は11PFlopsとなった。2020年に「富岳」に入れ替えが完了し、約50倍の計算速度となった。現在（2020年以降）のスーパーコンピュータでは、「京」や「富岳」のようにCPUではなく、加速器（多くの場合はNVIDIAのGPU）をたくさん並べて計算性能を高めている。

## 1.2. 現状の困難とポストムーア

スーパーコンピュータの歴史を簡単に振り返ったが、素子の高速化という観点でいうと、スイッチング速度が重要でないわけではないが、配線を信号が伝搬する速度の方が昔から重要であった。理論的には信号はほぼ光の速さで伝わるが、最近のLSI上の配線は非常に細く抵抗（R）が大きいために、キャパシタンス（C）を充電しないといけないうことによるRC遅延により、信号が伝わる速度は光の速さよりも非常に遅くなる。太い配線に大電流を流せば速くなるが、電力消費が大きくなってしまったり、面積も大きくなるので微細化に矛盾するという状況にある。素子の小型化については、真空管、トランジスタ、ICという進化は1970年代までは重要だが、サイズだけでなく消費電力が下がることも重要であった。1980年代から2000年くらいまではCMOS LSIの微細化により電圧を下げることで、速度も向上した。しかし、2000年頃からバンドギャップの限界で電圧が下がらなくなり、速度が上がらなくなった。これは、いわゆるCMOSスケールリングの終焉であり、2015年くらいからは微細化も困難になってきた。また、トランジスタの構造・製造工程が複雑になり、微細化するとかえって価格が上昇するようになったので、一

般にムーアの法則も終焉を迎えたとされている。

### 1.3. 計算機の進歩の方向

CMOS スケーリングに関して、Intel のマイクロプロセッサの線幅とクロックをグラフにしてみると、線幅は 40 年間で 3 桁減少している。一方、クロックは 25 年間で 3 桁上昇して 2015 年以降は頭打ちになっている。線幅とクロックの関係でみると、90nm までは CMOS スケーリング以上に性能が向上しているが、これはある意味で無理をしていたことになる。つまり、90nm までは微細化しても電圧をあまり下げずに、パイプラインの段数を増やすことでクロックを上昇させていた。しかし、消費電力が増えるので、1 チップ 100W になったところで限界となり、2015 年頃からはクロックを上昇させるのではなく、コア数や演算器の数を増やすことで性能を向上させている。また、計算機アーキテクチャの進化を振り返ってみると、1976 年まではスカラ計算機、1976 年から 1992 年までは共有メモリ並列のベクトル計算機で、1993 年から 2008 年まではマルチコアを含むマイクロプロセッサの分散メモリ並列計算機、2008 年からは GPU アーキテクチャなどのアクセラレータとマイクロプロセッサの組合せとなっている。概ね 15 年ごとにアーキテクチャが大きく変わってきたが、GPU の次はまだ現れていない。このようにアーキテクチャが変わってきた理由としては、そのままでは半導体の進歩を有効に利用できなくなったことが考えられる。例えば、IC の開発で使えるゲート数が 1 演算器を超えて大きくなったことや半導体メモリの開発によりメモリが非常に高速になったことでスカラ計算機からベクトル計算機への移行が生じた。ベクトル計算機の進歩は、1 プロセッサのパイプライン数や主記憶を共有するプロセッサ数を増やすことにあったが、メモリへの配線がパイプライン数やプロセッサ数に比例する以上に増えた結果、共有メモリ型は限界を迎えた。その後は、多数のマイクロプロセッサとメモリの組合せの間をネットワークでつなぐ構成が有利となり分散メモリ並列の計算機に移行した。しかし、マイクロプロセッサ内のコア数が増えると、階層キャッシュとオンチップの共有メモリという構成でキャッシュコヒーレンスを維持するための電力の方が支配的となり、この構成での更なる大規模化は難しくなり、GPU を併用するようになった。GPU ではキャッシュコヒーレンスを緩和したり、捨てたりすることで電力消費を若干改善しているが、本質的な改善にはなっていない。また、メモリアクセスだけで消費電力の半分くらいになる場合もあり、B/F を大きくできない。CPU に比べてメモリバンド幅・演算性能の絶対値は高いが、キャッシュでも B/F は低いなどの問題がある。

### 1.4. AI 向けプロセッサの方向と MN-Core について

深層学習向けの計算では、ニューラルネットワークの 1 層は行列ベクトル積、画像認識で主流の畳み込みネットワークやトランスフォーマーでは行列行

列積が主要な計算で精度はあまり必要とされず、32 ビットではなく 8 ビット表現や 4 ビット表現も使われる。NVIDIA の H100 では 16 ビットで  $4 \times 4$  の行列同士の乗算の専用回路で 8 ビットだとその 2 倍の性能になるようなプロセッサで 1 チップ 1 PFlops (通常の 64 ビットだと 50TFlops 程度) となっており、「富岳」よりも 100 倍近く速い。

Preferred Networks と共同開発した深層学習向けプロセッサである 2020 年に完成した MN-Core は当時、深層ニューラルネットワークの学習で世界最高の電力あたりの性能を実現した。16 ビット演算 (FP16) で 524TFlops、1 W あたり 1.2TFlops で同じ半導体技術の NVIDIA V100 の 2.5 倍以上の電力あたりの性能となっている。浮動小数点演算は FP64、FP32、FP16 の性能比が 1:4:16 となっており、全体が SIMD で動く。また、B/F もベクトル演算モードに対して 8 と大きくローカルメモリにデータがあればほぼ理論ピーク性能が出る。さらに通常のアーキテクチャと違い、アーキテクチャレジスタ数の制限がないため、レジスタリネーミングが不要となる。さらに固定長ベクトル命令の採用により、OoO 実行自体も不要になっている。MN-Core の後継には、TSMC 7nm を採用して MN-Core よりも小さいチップで 400TFlops を実現した MN-Core2 が 2023 年に完成した。また、Samsung 2nm を採用して完成時点で世界最高性能を目指すものや LLM 推論向けの開発も始まっている。ソフトウェアの開発環境には、既存の PyTorch から小さい修正で動作するものや汎用 HPC 向けに OpenCL や OpenACC のようなものが用意されている。

## 2. 聴講における感想 (アドバンスソフト)

計算機の進歩について、スーパーコンピュータの歴史や現状がポストムーアの時代であることを半導体技術と計算機アーキテクチャの側面から解説いただき、最先端の AI 向けプロセッサについても紹介いただいた。ヘテロジニアスなシステムをいかに使いこなすかがハイパフォーマンスコンピューティングでは重要になってきた昨今、多くの計算科学技術者にとって、大変有意義な講演であったと思う。



#### 【ご経歴・ご研究内容】

1990 年 東京大学大学院 総合文化研究科 広域科学専攻 博士課程 修了 (学術博士)、東京大学 助教授 (1999-2006)、国立天文台教授 (2006-2011)、東京工業大学 教授 (2011-2013)、理化学研究所 計算科学研究機構 副プロジェクトリーダー (2014-2021)、神戸大学教授 (2016-2023) 等を経て、2023 年から神戸大学 特命教授と、株式会社 Preferred Networks VP コンピュータ・アーキテクチャ担当 CTO を兼任。

## 第7回アドバンス・シミュレーション・セミナー2024

## 千葉工業大学 創造工学部 建築学科 元教授 森川 泰成 様

## 「建築・都市の新たな風環境デザイン」

## 開催概要

## ○講演概要

風は建物建設に伴うビル風（強風化）が問題視されることが多く、その予測や対策・評価手法が、従来さまざまに検討されてきた。一方、気候変動の影響による都市内の高温化や都市内の風通し不足の影響等により、熱中症の危険性が近年大きく注目され始めている。すなわち都市においては、「強風障害」（ビル風）と「弱風障害」（風通し障害）が混在する状態となっている。そこで今後の建築・都市における適切な風環境形成を行うため、評価尺度の観点から「適風環境の概念」を示し、予測手法の観点から CFD による（多視点に基づく）解析・可視化・評価について述べる。

## 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2024 第7回として、千葉工業大学 創造工学部 建築学科元教授の森川 泰成様に「建築・都市の新たな風環境デザイン」というタイトルでご講演いただいた。森川様は長年、建築分野の中で気流及び風環境をご専門とされている。風は建物建設に伴うビル風（強風化）が問題視されることが多く、その予測や対策・評価手法が従来から検討されてきた。一方気候変動の影響による都市内の高温化や都市内の風通し不足の影響等により、熱中症の危険性が近年大きく注目され始めている。すなわち都市においては、「強風障害」（ビル風）と「弱風障害」（風通し障害）が混在する状態となっている。そこで今後の建築・都市における適切な風環境形成を行うために、評価尺度の観点から「適風環境の概念」を示し、予測手法の観点から CFD による（多視点に基づく）解析・可視化・評価についてお話しいただいた。

## 1.2. 都市・建築と風

風について言及する場合、気象的な観点と都市・建

築的な観点から述べる事が出来る。本講演では都市・建築的な観点からの風環境を対象としている。風に関する切り口としては都市気候学、風工学、さらに建築環境工学、大気汚染、ヒートアイランドなどがある。都市気候学では大気境界層が対象エリアとなり、建築物については都市ラフネス群が全体の気候に及ぼす影響が主な検討対象になる。それに対して風工学では接地境界層内部の風の影響を見ることとなり、建物も場所や個々のデザインが検討の対象となる。風のコントロールという点では、風工学の範囲ならば都市や建築の計画によって制御でき、本講演では風のエンジニアリングの観点からお話しされた。

## 1.3. 強風

強風障害としてビル風問題の歴史は 50 年前から検討され、今日では評価手法と対策はほぼフィックスされている。ビル風などの風の特徴については把握されていたが、風環境として評価するにあたり、評価指標をどのように考えるべきか、という点が重要である。風が強い&弱い「強風の吹く頻度の大小」と捉えることができ、このような考え方に基づく我が国の代表的風環境評価尺度に「村上らの尺度」（村上、岩佐、森川による）がある。住民のアンケート調査から風による不快感や風によって起きた被害情報などを整理することにより、日最大瞬間風速 10, 15, 20m/s の3段階を基準風速と捉えることができた。この基準は東京都環境影響評価指針&総合設計制度でも採用された。さらに日最大瞬間風速の基準を用いて強風出現頻度を算出することができ、強風ランク評価として示すことができることになる。この考え方で街区の風評価が可能となった。しかし、ランクを評価するだけで完結してはならず、なぜそうなったか分析することが重要である。近年では、地球温暖化の影響で台風が大型化し、台風の襲来時に多くの構造的な被害が発生している。これらの中には高層建物による風速増加が影響しているものも含まれていると考えられる。

## 1.4. 弱風

これまでの評価だと弱風や無風はよい評価に繋がっていることになる。強風の評価指標は風速が良いが、弱風障害を暑熱感&健康性から捉えると、評価には日射・気温等の考慮も必要になる。評価の捉え方としては強風と同様に、その地域の風向風速特性を考

慮して年間(或いは夏期)の弱風出現頻度に基づき地表付近の弱風域を、気温も考慮しながら評価する必要がある。また一方で、弱風問題をヒートアイランド問題における暑熱感(熱中症)の一部と捉え、年間(夏期)ではなく、酷暑時(ピーク時)を想定した検討を行う必要がある。ヒートアイランド問題は地球温暖化問題とは違い、都市部におけるコンクリー等の多用、緑地不足、人工的な排熱により、都市の温度が高くなる現象で、建物の構成、風の通り道など都市デザインが影響する。ヒートアイランド現象は広域で物理機構が複雑なため、解析することは非常に難しい。そこで2001年に国土交通省が主導し、建築環境・省エネルギー機構(IBECE)によって開発された建築物の環境性能評価システムCASBEE-HIが導入された。

### 1.5. 適風

結論としては、風は強すぎても弱すぎても弊害があり、「適風」の概念が建築・都市の風環境検討には必要である。強風と同様に弱風についても住民アンケートを分析し、指標を整理して、強風ランク評価に重ねると非適風エリアを確認することができた。この適風評価では建築物を建てた後の方が弱風領域を改善できる例も確認でき、建築計画への新しい知見を提供することができた。これを都市計画に適用することを考えると、都市のプランニングにおいて地上付近の風通しが考慮され、エンジニアリングにより適風評価MAPの年間評価も示されるので、プランニングとエンジニアリングの接近により、説得力ある建築・都市計画の実現可能性が現れた。

### 1.6. 解析手法

以上記した強風～適風～弱風環境解析にはCFD解析が最も有効である。CFDを用いるメリットとしては、気流の非定常3次元挙動が把握でき、任意の領域における風速等の解析評価が可能である。さらに独自の評価指標に換算して可視化・分析ができる。また、CFDを利用することによりBreathabilityを高く、かつ地表付近での強風を抑制する市街地設計を検討することができ、さらには住宅街、生活道路における換気能力の向上も検討が可能である。最近ではAI技術の利用により、市街地における建物周辺の風速・風圧分布を簡易かつ短時間に予測ができる。

## 2. 聴講における感想(アドバンスソフト)

都市の風環境評価では強風障害だけでなく、弱風障害も考慮する必要がある。適風の概念を取り入れる点は大変興味深かった。住民アンケート調査の分析により評価尺度を整理して、評価指標にするとこ

ろはまさに社会科学的な発想であり、その指標を用いた適風評価MAPにより風環境の善し悪しが明示され、都市計画の指針につながるころは高層建築計画の自由度を拡大させ、都市デザインに新たな知見を生み出す可能性が感じられた。風環境解析においてCFDが重要な役割を担っているがその精度確保に十分注意する必要がある。乱流モデルの問題と計算負荷についてはまだ課題が残るようだ。

### 【ご経歴】

1984年 東京大学博士課程修了 工学博士。

1984年 大成建設(株)技術研究所。

2009年 副技術センター長(建築技術研究所長兼任)

この間 東大生研研究顧問 慶応、上智、東京都市大、横浜国大非常勤講師 歴任。

2017年 千葉工業大学創造工学部建築学科教授を経て現非常勤講師。

2021年(株)フォレスト環境リサーチ設立。

専門 CFD解析と環境評価技術を中心としたサステナブルな建築・都市環境に関する研究。

### 【ご研究内容】

CFD解析と環境評価技術を中心としたサステナブルな建築・都市環境に関する研究。



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3,228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、2024年も引き続き、全10回のセミナーを開催いたしました。

## 第8回アドバンス・シミュレーション・セミナー2024

九州大学 大学院システム情報科学研究所

情報知能工学部門 主幹教授 井上 弘士 様

## 「極低温超伝導コンピュータ・アーキテクチャ技術とその新展開」

## 開催概要

## ○講演概要

コンピュータの発展を支えてきた半導体の微細化がついに終焉を迎えつつある。いわゆる、ポストムーア時代の到来である。その一方、ニーズ面ではビッグデータや AI 処理に代表されるように高度かつ複雑なアプリケーションが爆発的に普及しており、持続可能な高度情報化社会を実現するには更なる情報処理能力の向上が求められる。この問題を根本から解決するには、半導体微細化に頼らない新たなコンピュータシステム構成法を開拓しなければならない。本講演では、世界最先端を走り続けている極低温超伝導コンピュータ・アーキテクチャ技術を紹介し、今後のコンピューティング技術の方向性を議論する。

## ご講演内容

## 1. 講演内容

## 1.1. はじめに

今回の講演では、最初にコンピュータの動作原理とその歴史を簡単に振り返りながら、それを受けて次の世代の新しいコンピュータの姿とはどのようなものかという観点で、我々が現在進めている極低温超伝導コンピュータというものの研究内容を紹介し、今後の展開を紹介する。

## 1.2. 5分で分かるコンピュータの動作原理

コンピュータではマイクロプロセッサと言われる頭脳の部分と情報を記憶するメモリの部分がある。このメモリ部分にプログラムコードと入力データが保存されており、このプログラムにはこのマイクロプロセッサが処理すべき手順が書かれている。このコンピュータの頭脳であるマイクロプロセッサでは単純な基本的な演算、例えば足し算、引き算、掛け算、割り算という四則演算であったり、ある種の論理演算であったりと、非常に単純な計算しかできない。一方で、このプログラムにおいては、我々はもっと高度で複雑な機能を書き下す必要がある。プログラムで記述された高度な機能は、実際には、この足し算、引き算、掛け算、論理演算、といったような簡単な演算、つまりマイクロプロセッサが直接計算できる演算の組み合わせに置き換えてメモリに格納されているということになる。そして、このマイクロプロセッサは、高度な機能が書かれた手順書であるプログラムをマイクロプロセッサ自身が実行できる単純な処理の組み合わせ（命令セットで定義された命令の組み

合わせ）に置き換わったものに対して、一つずつ、その処理を順に進めていく。これがコンピュータの基本動作原理である。

## 1.3. コンピュータ・アーキテクチャ研究動向

このように、コンピュータではプログラムで書かれた内容を命令の組み合わせに置き換えて、それを一つずつ処理していくことであり、コンピュータの性能が高いというのは、単位時間当たりで処理可能なプリミティブな操作（命令の実行）が多いということである。コンピュータは、この50年間非常な速度で発展を遂げてきているが、その過程でいろんなボトルネックが出てきた。大きなボトルネックが出てきたのは2000年頃の消費電力の問題である。従来クロック周波数というのは処理速度を求めて常に上がってきたがそれが飽和してきた。そこで動作周波数を上げる代わりに並列処理を行うというマルチコア／メニーコアという時代になった。利用可能なトランジスタ数は微細化によって順調に増え続けてきたが、2030年から2040年ごろには限界がくると言われている。コンピューティング能力を提供するシーズとしては、これ以上コンピュータの性能を上げることが難しい時代になる。その一方で、社会からはより高度な複雑なシミュレーションを、高速に問題を解きたいというニーズがある。この間のギャップをどうやって埋めるかという話になってくるが、その一つの方向性として新しいデバイスを使ったコンピューティングを我々は探索している。このときのポイントは、コンピュータをどうやって作るかというコンピュータサイエンスと、デバイスをどうやって作るかというデバイスサイエンスの両者がタッグを組んで連携して研究を進めていく事が非常に重要になってくると考えている。今まで、半導体チップの中のトランジスタ数を増やし、増えた圧倒的な量をコンピュータの性能に変換するという量的イノベーションを続けてきたわけであるが、今後は新しい質的なイノベーションを見出す必要がある。皆さんご存知のキーワードの中で言うと、量子コンピュータというのが一つのこの方向性だと私は考えている。今の半導体集積回路とは異なる新しいデバイスを用いて新しい計算モデルを作っていくという方向である。これはコンピュータサイエンスやっている者、特に計算機工学と言われる分野にいる研究者にとっては、新しいコンピューティングプラットフォームを探索していくという、非常にエキサイティングなところであるが、逆にコンピュータを使うユーザーもしくは皆さんのようにシミュレータを作ってそれを提供する、あるいはシミュレータを使うという観点から見るとこれまでの連続的なコンピュータの発展ではない急激なジャンプをコンピュータのハードウェア・プラットフォームが行う可能性があるという

ことになる。そうなった時に、ではこれまでのソフトウェア資産はどうなるのかとか、これまで計算した結果を再利用できるのかといったようなことも、もしかすると考えなければいけない時代がやってくるかもしれない。まとめると、今後は新しいデバイスの利用を見越したコンピューティングプラットフォームを考えていかなければいけない。そこでは、新しいデバイスをどうやってうまく使うのか、どうやってコンピューティングにつなげるのかというのをソフトウェアとハードウェアの双方向から探索していかなければいけないということになってくる。

#### 1.4. 超伝導コンピューティングの場合

このような歴史的背景の元、我々は一つの新しいデバイスを用いた技術として超伝導コンピューティングの研究を行っている。単一磁束量子 (SFQ) 回路というのがあり、このデバイスの特徴は4K という極低温環境下で動作する超伝導体デバイスであり、概念的には、リングに電流が流れた際にできる一本の磁束をデジタル的に1、周回電流がない時を0というように考えると情報を記憶できる素子となり、このデバイスを使って情報を伝達するときにはパルス幅は1ピコ秒、電圧は1mV程度の非常に微弱なパルス信号を使うことができる。超伝導状態で動作するために抵抗はほぼ0なので理論上は光と同じ程度の高速性を実現しつつ消費電力に関しては今のコンピュータ等のデバイスの2~3桁削減を実現できるポテンシャルを持っている。このSFQ回路を用いたプロセッサを作るという研究は古くからあったが、動作速度だけみると非常に高パフォーマンスなのだが、残念なことにプログラムとしての手順通りの演算を連続的に実行するという観点から見ると全く性能が出ない事が判っていた。しかし、過去の設計というのは、目的が回路動作の実証にあったので、いわゆるビットシリアルな計算をしており、それでは性能が出ていなかったのである。そこで我々はビットパラレルにすべきだという提案をし、また従来のプロセッサで行われてきたパイプライン処理とは粒度が全く違うSFQ向けビットパラレル型ゲートレベルパイプラインアーキテクチャを考案した。当初否定的な意見が多数あったが、実際に50GHzという極めて高速で動作する回路を作成し、コンセプト検証(2017)から始まり、掛け算回路(2019)、小規模ながらAI処理のプロトタイプ(2020)まで実証する事ができた。この過程で重要となるのが、①「SFQデバイスを用いたゲートレベルのモデリング」、ゲートを組み合わせることで何かのファンクションを作る②「マイクロアーキテクチャモデリング」、次にファンクションを組み合わせる事でシステムを作る③「アーキテクチャモデリング」といった3段階のモデリングを行い、シミュレーションを行うことで全体を回して最適化を行うという環境を作る事ができたということであり、このことが大きなブレークスルーとなった。現在ではさらに研究が進み、100GHzを超えるような回路をも作れるようになってきている。

#### 1.5. 量子コンピューティングへ

最後に、量子コンピューティングへの応用展開に

ついて触れたい。ニュース等で理化学研究所が国産初の量子コンピュータを作成したという話題があるが、将来的には、極低温環境下で極めて低消費電力で動作する回路を使ったマイクロプロセッサのようなものが必要になってくる。ここに先ほど説明した単一磁束量子回路SFQを使ったプロセッサが使えるのではないかという考えが出てくる。現在SFQ技術を使った量子コンピュータの制御に関する研究が進行中である。誤り訂正技術等の制御機能の一部を冷凍機の中に入れる可能性等、冷凍機内での極低温環境下でのコンピューティング能力を上げることによる多量子ビットの配置可能性の提案等を考えている。今後の展望ということでは、デバイスの研究だけとかアプリケーションソフトウェアの研究だけではダメで両方見る事が必要である。これを我々はCSDS (Computer Science×Device Science) サイクルと呼んでいる。最後になるが、コンピューティング力は国力である。求められる制約が変わればコンピュータのあるべき姿も変わる。このような変化を世界に先駆けて察知予測して、最先端のコンピューティング技術を開拓し続けていくというのが必要になってくる。そのためには、デバイス技術だけでなく、設計技術、ソフトウェア技術、応用展開技術といったようなところを含めたCSDSサイクルというものを回すという事が非常に重要になってくる。現時点では、残念ながらこういうことのできるツールやシミュレーションフレームワークというものはまだまだ存在しないが、これを実現していくための様々なシミュレーション技術といったようなところも今後見ていく必要があると思われるし、その発展にも期待しているところである。

#### 1.6. 聴講における感想 (アドバンスソフト)

ポストムーア時代を迎え、半導体の微細化に頼らない新たなコンピュータシステム構成法として提唱されているCSDSサイクルという考え方は非常に興味深いものであり、シミュレーション技術を開発しているものとしては、コンピュータ・アーキテクチャそのものが変化するかもしれないということも考慮して開発を進めて行かなければならないと感じた。



##### 【ご経歴】

1996年に九州工業大学 博士課程(前期)、2001年に九州大学 博士課程(後期)を修了。博士(工学)。2001年より福岡大学 工学部電子情報工学科 助手。2004年より九州大学 大学院システム情報科学研究 院 助教授、2015年より 同大教授、現在に至る。

##### 【ご研究内容】

コンピュータ・アーキテクチャ、特に、超伝導コンピュータ、AIアクセラレータ、IoTプラットフォーム、スパコン、量子コンピュータなどの研究に従事。

## 第9回アドバンス・シミュレーション・セミナー2024 開催報告

東京科学大学 総合研究院

ゼロカーボンエネルギー研究所 特任教授 浅野 浩志 様

## 「スマートエネルギーマネジメントシステムのデザイン」

## 開催概要

## ○講演概要

内閣府戦略的イノベーション創造プログラム (SIP) 第3期課題「スマートエネルギーマネジメントシステムの構築」では、従来の一建物や街区レベルにおけるエネルギーマネジメントの枠を超え、需給両面のセクター横断で主に再生可能エネルギーを起源とする電気・熱・水素・合成燃料を含むエネルギーの生産・変換・貯蔵・利用の各種情報を活用するサイバーフィジカル空間で高度なエネルギーマネジメントシステム (スマート EMS) を実現することを目指している。セクターカップリングと P2X を重視し、水素など新しいエネルギーキャリアを含む分散型エネルギーシステムの最適設計や運用シミュレーションも紹介する。

## ご講演内容

## 1. 講演内容

## 1.1. ネットゼロエネルギーシステムに向けて

経年の GHG 排出の状況を日本、アメリカ、EU で比較すると、日本は経済成長が伸び悩んでいることもあり、削減実績については、ほぼ計画通り進んでいる。2035年には60%、2040年には73%削減目標としている。アメリカとEUは計画通り進んでおらず、削減が足りない状況である。

ネットゼロに向かって世界のエネルギーシステムを変革する必要がある。その際には、原子力発電所、再生可能エネルギー、CCUS (Carbon dioxide Capture, Utilization and Storage) などへの高額の投資が必要である。

## 1.2. エネルギーシステムのスマート化はなぜ必要か

上流のエネルギー生産から下流のエネルギー利用までを考えると、中流の石油精製、ガスパイプライン、電力の送配電網、などネットワーク部門がバラバラである。下流には家庭、業務、産業、農業、運輸用需要などがある。ゼロカーボンのエネルギーは電力だけでなく合成燃料、水素、再エネの熱利用などで置き換える必要があり、エネルギーの変換・貯蔵・輸送を統合したものがスマートエネルギーシステムである。実現のためには、エネルギーの間の相互変換とデータ連携がないと不可能であり、エネルギーの生産から利用までのデータ活用が必須になる。カギとな

るのはセクターカップリング (シナジー) である。たとえば産業の排熱を民生利用したり、天然ガスから電力と熱を併産するなどがある。現在注目されているのはバッテリーで、特に停まっている EV の充放電の制御能力を一般送配電事業者に渡せば調整力にもなる。

現在のエネルギーマネジメントシステム (EMS) はビル (BEMS)、住宅 (HEMS)、工場 (FEMS) など建物単位はあるが、見える化と自分が使う分の制御にとどまっている。スマートエネルギーマネジメントシステムでは、電力のスマートメータ、車の走行データ、スマホの位置情報などのデータを活用して、部門横断・広域のエネルギーマネジメントを行うものである。太陽光や洋上風力などの出力をコントロールできない再エネは、2050年に5割から6割になるが、これらの一部を熱や車の燃料などに変換する。スマート=サイバー×フィジカルと考え、エネルギーバリューチェーン全体で再生可能エネルギーを中心としたゼロエミエネルギーを使いこなす統合的なスマート EMS を構築する必要がある。風力発電、太陽光発電や燃料電池など分散型エネルギー資源 (DER) を連携して、大規模集中電源を代替するためにネットワーク化することが進められている。

## 1.3. スマートエネルギーマネジメントシステムの社会実装に向けて

エネルギーの生産、変換・貯蔵・輸送、利用の3段階のマネジメントを考えると、二次エネルギーの相互変換が肝になる。バイオマスでメタン発酵して水素を分離する、太陽光発電の電気でも水を電気分解して水素をローリーで運ぶなどが始まっている。水素、アンモニアは熱にすることもできる。水素は液化の難しさや既存インフラが使えないなどの課題があるが、アンモニアは農業の肥料としても使われているため、扱いやすい。再エネが余っている北海道や九州から東京に地域間のエネルギー融通するためには、現在では送配電網しか使っていないが、水素に変換してパイプラインや海上輸送を使うようにしないと、カーボンニュートラルの実現は難しい。

地域エネルギーシステムの構築は自治体の担当者レベルでできるものではない。SIP 第2期で内閣府の国プロの成果として地域エネルギー需給データベースを構築し、市町村に公開した。データベースではエネルギーフロー図として可視化することができ、簡易なシミュレータで予備的な検討もできる。セクターカップリングとしてはエネルギーとモビリ

ティが有望である。宇都宮市ではLRT、電気バスなどのモビリティと再エネを連携し、余剰電力を地域内の交通で使うなどのセクターカップリングを進めようとしている。電力事業者と交通事業者の間の情報を共有して同時に最適化する。宇都宮市では協議会を作って2027年度まで実験を行っている。計算機シミュレーションで昼間の休憩時間に充電するなど充電スケジュールを最適化すると、太陽光の利用率を2割程度改善することがわかった。バスは運行スケジュールが決まっているが一般の自動車では決まっていないため、集約して統計的に行う必要がある。昼間のピーク時の太陽光をEVで吸収し、自然災害時などには住宅(V2H)や職場(V2B)での利用も可能になる。グリッドに戻す(V2G)はまだ電気事業法上の規制により難しいが、安全性が確保されれば可能になる。

車の買い替え時に2から3割がEVに置き換わると、2030年代には数100万台が置き換わる。九州全域の車載蓄電池の容量を推測すると、現在のスマート充電(V1G)では37万kW、点灯時間帯に放電し昼間の余剰時に充電を行う(V2G)と、130万kWと見積もられる。実際は数十万kWと考えられるが、これは揚水発電所1基分に相当する。

#### 1.4 内閣府戦略的イノベーション創造プログラム(SIP)のサブ課題のテーマ

SIP第3期「スマートエネルギーマネジメントシステムの構築」のサブ課題Aでは、エネルギーとモビリティのセクターカップリングの開発を行っている。事業性を評価するシミュレータも開発している。宇都宮市の例では、東電パワーグリッドの送配電網と関東自動車の路線網の連携を行い、事業性が成り立つか、あるいはどのような規模で実施すればシステム開発コストが正当化されるかどうかを検証している。また、農村のバーチャルパワープラント(VPP)の開発を行っている。農山村では、エネルギー需要密度が低く、熱エネルギーの需要が多いことから、蓄熱システムを導入し、最大に利活用する熱供給システムを研究開発している。

サブ課題Bでは、アンモニア・水素利用の推進、用途によってエネルギーを使い分けるカーボンニュートラルモビリティシステムの構築、インテリジェントパワエレシステムの開発が進められている。産業の高温プロセスでは化石燃料が使われることが多いのでゼロエミッション化が難しいが、それらも転換するために、水素およびアンモニアのサプライチェーンを構築することが必要である。

サブ課題Cでは、自治体向けローカルエネルギープラットフォーム、熱EMS、産業用EMSの情報モデル開発が進められている。実現はかなり難しいがサプライチェーン全体でEMSを連携して最適化し、カーボンフットプリントを算出する研究も行っている。2035年に60%GHG排出を削減するには、省エネ機器や電気自動車の普及では達成は不可能で、40

年から50年使われる建物のようなストックのエネルギーマネジメントが必須である。

#### 1.5 エネルギーシステムの設計と最適化問題

システム構成の設計を考える。構成機器の設備容量、出力が制御変数になる。目的関数はシステム運用コスト(短期的な経済性)、設備費(長期的な経済性)、エネルギー投入量、CO2排出量などである。制約条件は需給バランス、機器の容量制約、変換効率などがある。このシステムの最適化を行う手法は数理計画法、またはメタヒューリスティクスで行われる。日本全体のような大規模な問題では変数が何100万あるため、計算時間を短くするため近似解法の準最適化を行う。エネルギーマネジメントシステムは最適運用を支援するものになる。

運用計画を決める問題(上位問題)と設備容量を決める問題(下位問題)をクーン・タッカーの方法で再定式化すると混合整数計画問題に帰着する。トイモデルによる数値実験では、卸電力市場価格が下限値な時間帯が多いと、水素製造コストが安くなり水素蓄電システムが貢献できることがわかった。

#### 1.6 エネルギーマネジメント技術の今後

国の省エネルギー・非化石エネルギー転換技術戦略2024にもエネルギーマネジメント技術が重要なものとして位置づけられている。送配電協議会による次世代電力ネットワーク構築のロードマップにおいても、グリッドのエネルギーマネジメントシステムが検討されている。実現のためには相互接続のための仕様の統一や、充電器に通信機能を付けるなどの課題がある。グリーントランスフォーメーションとデジタルトランスフォーメーションを掛け合わせた研究成果が海外に及び、日本の産業界が寄与できることを期待する。IEEJによる最適な再生可能エネルギーの比率予測では、2040年・2050年は45%から60%になり、エネルギーマネジメントシステムが必須となる。



#### 【ご経歴】

1984年 東京大学大学院修了。博士(工学)。1993年 東京大学 工学部 助教授、2005年 同大学院 教授を経て、現在、岐阜大学 地方創生エネルギーシステム研究センター 特任教授、(一財)電力中央研究所 研究アドバイザー、東京工業大学

ゼロカーボンエネルギー研究所 特任教授、内閣府戦略的イノベーション創造プログラム(SIP)プログラムディレクター。

#### 【ご研究内容】

専門：エネルギーシステム工学、電力経済。

## 第10回アドバンス・シミュレーション・セミナー2024 開催報告

## 東北大学 未来科学技術共同研究センター

## 特任教授 柿本 浩一 様

## 「AI や電気自動車用半導体単結晶育成のための数値解析と実験」

## 開催概要

## ○講演概要

昨今、AI や電気自動車は毎日のようにニュースやインターネットで話題になっている。これらの中心素子を構成する電子部品は、論理回路、記憶回路、電力回路を半導体結晶中に形成することにより実現できる。このためには、原子レベルの解析から流体解析まで幅広い時間空間スケールにおける物理化学現象の制御が必要となる。さらに、原子レベルと連続体レベルの解析の融合が必須となり、これにより、定量的な物理量の予測が可能となる。今講演では、これらを総合的に解析することが可能なマルチフィジックス・マルチスケール数値解析に基づく解析例を紹介する。

## ご講演内容

## 1. 講演内容

## 1.1. 講演内容

本講演では、半導体の結晶成長に関する研究の権威である東北大学 未来科学技術共同研究センター 特任教授の柿本浩一先生を講師にお迎えして、長年にわたる研究活動から、主に SiC や GaN などの結晶成長に関する理論的および実験的な研究事例についてご講演頂いた。本講演の内容は、現代社会における課題のひとつであるパワーデバイス半導体に関する結晶成長研究の面白さや難しさ、理論的研究と実験的研究の双方に取り組む大切さ、数値計算コードや実験装置を自分の手で作り上げる重要性、AI や機械学習など最新の情報科学技術に対する期待、そして、研究成果を社会貢献に資するために研究者・技術者が持つべき意識など多岐に渡るものであり、半導体分野に限らず多くの研究者・技術者にとって今後の研究・開発活動への指針を示すものであった。

## 1.2. AI やパワーに対する社会的要請

AI と電気自動車は現代社会で非常に重要なテーマであり、社会的な要請も高い。

AI 分野では、コンピュータの性能向上が不可欠であり、特に HBM (High Bandwidth Memory) と呼ばれる DRAM が重要視されている。HBM はプロセッサとメモリ間のデータ転送を高速化し、消費電力を削減するために開発されている。

パワー半導体は、電車や電気自動車などの電力制御に不可欠なデバイスである。現在、パワー半導体には主にシリコンが使用されているが、SiC (炭化ケイ素) などの新材料が注目されている。SiC は、シリコ

ンに比べて高い耐圧、低損失、高温動作が可能であり、電力効率の向上に貢献する。SiC の課題はコストであり、結晶の直径を大きくするだけでなく、結晶の長さを長くすることでコストを削減する必要がある。

## 1.3. 半導体シリコン結晶の結晶成長と欠陥に関する解析例と実験との比較

半導体シリコン結晶の成長と欠陥制御は、デバイス性能を最大限に引き出すために非常に重要である。

- 結晶成長では、原料を溶かす段階から不純物の混入が始まるため、溶解プロセスの詳細な解析が必要である。特に、SiO<sub>2</sub> (石英) とカーボンが反応して CO ガスが発生する現象は、熱力学的な観点から理解する必要がある。
- 結晶成長シミュレーションでは、成長時だけでなく冷却プロセスも考慮する必要がある。冷却速度や温度勾配が、結晶中の欠陥密度や応力分布に大きな影響を与える。
- シリコン結晶中のボイド (空孔) は、デバイスの性能に影響を与える。ボイドの発生を抑制するためには、過剰なシリコン原子を空孔に埋め込むなどの対策が必要である。
- エミシビティ (放射率) は、シリコンの結晶成長において重要なパラメータであり、温度やドーピング濃度によって大きく変化する。
- 結晶の方位によって、転位の入りやすさが異なる。
- 不純物 (酸素など) の濃度も、転位の移動に影響を与える。
- 結晶成長シミュレーションでは、応力の解析が重要であり、有限要素法などが用いられる。
- 結晶成長の数値解析においては、多次元スケールでの現象を考慮する必要がある。
- 実験による観察とシミュレーションによる予測を組み合わせることで、結晶成長のメカニズムをより深く理解することができる。

## 1.4. 半導体 SiC の結晶成長と欠陥に関する解析例

SiC (炭化ケイ素) は、次世代のパワー半導体材料として期待されており、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。

- SiC 結晶は、主に昇華法 (Physical Vapor Transport method) で製造される。昇華法は、SiC 粉末を高温で加熱し、発生したガスを種結晶上に再結晶させる方法である。昇華法は高温プロセスであるため、内部の観察が難しく、数値解析が重要な役割を果たす。
- 結晶中の転位は、デバイスの性能に大きな影響を与えるため、転位密度を制御する必要がある。転位密度を低減するためには、結晶成長条件の最適化や、新しい結晶成長技術の開発が必要で

ある。

- アレクサンダー・ハーゼンモデルを拡張したモデルが、SiC 結晶の転位密度分布の計算に用いられている。SiC 結晶の転位密度分布は、6 回対称性を示すことが知られている。
- 結晶の方位をわずかに傾けることで、転位密度分布が大きく変化する。例えば、結晶軸を 4 度傾けることで、転位密度分布が 6 回対称から 2 回対称に変化する。BPD (Basal Plane Dislocation) などのライフタイムキラーとなる欠陥を制御する必要がある。

### 1.5. 半導体 GaN や Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> の結晶成長と欠陥に関する解析例

GaN (窒化ガリウム) や Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (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。

- Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 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る。Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 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。
- Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> は単斜晶という複雑な結晶構造を持つ。

### 1.6. おわりに

半導体単結晶育成における数値解析と実験では、材料の物性、結晶成長プロセス、欠陥制御など、多岐にわたる要素を考慮する必要がある。

- 実験装置や計算コードを自作することで、現象に対する理解を深めることができる。
- 現象の表現は、数式と図で具現化することが重要である。
- 数値解析は予測が使命であり、2 つ以上の物理量を定量的に予測することが理想である。
- 境界条件の設定には注意が必要であり、境界層を考慮したグリッド設計が重要である。
- 実験結果と数値解析結果を比較する際は、対称性や普遍性を考慮し、現象の本質を見抜くことが重要である。
- 数値解析を行うには、基礎学力 (物理、化学、数学) が必要である。
- 自然の対称性や美しさを追求することが、研究の正当性を判断する上で重要である。
- 研究開発の最終目的は、社会に貢献することである。

### 1.7. 課題と解決策

- SiC のコスト: 結晶の直径を大きくすることによるコスト削減が課題となっている。結晶成長のシミュレーションと実験を組み合わせることで、成長プロセスを最適化し、より低コストで高品質な SiC 結晶を製造する方法を模索している。

- 結晶成長の予測の困難さ: 正確な現象予測は依然として難しい。3 次元の計算が必要な箇所限定して 3 次元解析を行い、他の 2 次元の部分は軸対称として計算する 2D/3D カップリングというアルゴリズムを開発し、計算コストを削減している。
- 結晶中の欠陥: ボイドなどの点欠陥が存在し、デバイスの性能に影響を与えるため、これらの欠陥を抑制することが重要な課題である。シリコン融液中の過剰なシリコン原子を利用して空孔を埋めることで、ボイドの形成を抑制する試みが行われている。
- 成長方位による転位の発生: 成長方位によって転位の発生しやすさが異なる。数値シミュレーションを用いて、成長方位と転位密度の関係を解析し、転位の少ない結晶成長の最適化を目指している。
- ガス流れの制御と評価: 炉内のガス組成をガスクロマトグラフィーで測定し、数値解析の結果と比較することで、ガス流れのモデルの妥当性を検証している。また、炉内の炭素や酸素のコンタミネーション源を特定し、熱力学的な考察に基づいて汚染を抑制するプロセスを開発している。
- 酸化ガリウム (Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) の結晶成長: 結晶の透明性を考慮した熱伝導解析や、冷却方法の最適化によって、結晶の品質向上を目指している。また、コールドクルーシブル法という新しい結晶成長法を適用することで、高品質な結晶を成長させることを試みている。

## 2. 聴講における感想 (アドバンスソフト)

講演から、数値解析には対称性、境界条件、多次元スケール 等の高度な知識・経験が必要であること、実験との比較を通して現象の本質を見抜くことの重要性を学んだ。先生の研究動機である「子供や孫が笑って安全に暮らせるように」という言葉には、研究を通じた未来への強い決意が込められており、倫理観と社会貢献への意志に感銘を受けた。

卓越した研究者の地道な研究が社会を支えていることを改めて認識し、自身の研究へのモチベーションと視野を広げる貴重な機会となった。



#### 【ご経歴】

1979 年 埼玉大学 電子工学科 卒業。1985 年 東京大学 工学系研究科 電子工学専攻 博士課程修了、NEC 基礎研究所 入社。1989 年 ベルギー カトリックルーバン大学 応用数学科 研究員。1996 年 九州大学 機能物質科学研究所 助教授。2001 年 九州大学 応用力学研究所 教授。2016 年 皇太子殿下へご進講。2021 年 九州大学 特任教授。2022 年 東北大学 特任教授。

#### 【ご研究内容】

総合伝熱解析による結晶成長の数値解析に従事。

# アドバンス・シミュレーション・セミナー2024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、アドバンスソフト株式会社が2021年度から主催している公開セミナーであり、我が国の計算科学技術のさらなる発展と産業界への応用を目指して開催されてきました。2024年度もその基本的な趣旨を継続し、全10回のセミナーがオンライン形式で行われました。本セミナーの共通した目的としては、最先端の計算科学・シミュレーション研究の成果を社会全体に紹介することで、技術者や研究者が新たな視点を得る契機とし、研究と産業の接続点を創出すること、さらに長期的には計算科学を中心とした科学技術分野の裾野を広げていくことにあります。

## 2. 2024年度のセミナーについて

### 2.1. 実施内容

2024年度に開催された10回の講演は、それぞれ異なる分野に属しているものの、全体として「シミュレーションが社会課題にどのように貢献し得るか」という共通した問題意識のもとに構成いたしました。取り上げた分野は、宇宙機における自由表面流、分子動力学と深層学習を活用した創薬、デトネーションエンジンの開発、情報可視化技術、原子力発電におけるリスク評価、ポストムーア時代のHPCとAI、都市の風環境デザイン、超伝導コンピュータの新展開、スマートエネルギーマネジメントシステム、AIおよび電気自動車向け半導体結晶育成など、多岐にわたっています。

### 2.2. 共通する点

これらの講演に共通しているのは、現代社会が直面する大きな課題、例えば、脱炭素化、エネルギー転換、AIの発展、都市インフラの最適化、医療と創薬の革新、そして次世代計算基盤の構築などに対して、計算科学とシミュレーションがいかに寄与し得るかという視点です。また、特定の分野における最新の理論や技術的ブレイクスルーに加えて、「それが社会実装にどうつながるか」「現場での課題解決にどう応用されるか」という面も強調されていました。これは、シミュレーションが単なる研究補助の手段から、実

社会の意思決定や設計の基盤技術へと役割を拡張していることを示していると思われます。

### 2.3. 参加者層

一方、本セミナーについては、参加者層に広がりがあることが特徴です。登壇者が研究される分野のみならず、電機、自動車、エネルギー、建築、医薬といった産業界の企業研究者の参加が目立ちました。ここでは、アカデミア中心の空気感ではなく、明確に「産学連携」の要素が強まり、企業の現場で即座に役立つ知見を求めての参加が増加している傾向がうかがえます。また、若手の大学院生やポスドク研究員の姿も見られ、次世代の担い手にとっても有益な学びの場ともなっていると感じています。

## 3. まとめ

計算科学は今や、単なる研究支援の技術ではなく、社会の中核的なインフラとさえ言える存在となりつつあります。今後のセミナーでは、より分野横断的なテーマを設け、異なる専門性の接点を意識した内容が求めていきたいと考えています。複数の技術や分野が交差する領域に焦点を当てることで、新たな協働や発見が促されるはずです。

2024年度の10回にわたる講演は、いずれも高い専門性と社会的意義を兼ね備えたものであったと考えています。さらなる発展のため、情報発信の質を保ちながら、「つながり」や「継続性」を重視する運営が必要となります。単なる講演の場ではなく、学際的かつ実践的な知のネットワークとして、本セミナーが今後も成長させていきたい。

このような観点から、アドバンス・シミュレーション・セミナーを、今後さらに発展させ、計算科学の社会への貢献を拡大するための一助となるように運営していきたいと考えています。

(アドバンスソフト株式会社 代表取締役社長)

<b>第1回 アーカイブ動画</b>	<b>第1回 セミナー資料</b>
	

<b>第2回 アーカイブ動画</b>	<b>第2回 セミナー資料</b>
	

<b>第3回 アーカイブ動画</b>	<b>第3回 セミナー資料</b>
アーカイブ動画は 非公開です	

<b>第4回 アーカイブ動画</b>	<b>第4回 セミナー資料</b>
	

<b>第5回 アーカイブ動画</b>	<b>第5回 セミナー資料</b>
	

<b>第6回 アーカイブ動画</b>	<b>第6回 セミナー資料</b>
	

<b>第7回 アーカイブ動画</b>	<b>第7回 セミナー資料</b>
	

<b>第8回 アーカイブ動画</b>	<b>第8回 セミナー資料</b>
	

<b>第9回 アーカイブ動画</b>	<b>第9回 セミナー資料</b>
アーカイブ動画は 非公開です	

<b>第10回 アーカイブ動画</b>	<b>第10回 セミナー資料</b>
	

※ 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。

# 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 2025

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4,123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、2025年も引き続き、全10回のセミナーを開催いたします。

## 2025年5月～2026年2月 開催中

No.	開催日	講師の先生方	テーマ
第1回	5月30日(金) 14:00～15:30	「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) 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) 14:00～15:30	「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月未定 14:00～15:30	調整中（決まり次第、ホームページでお知らせ予定）	調整中
第5回	9月未定 14:00～15:30	「(講演タイトル未定)」 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	調整中
第6回	10月17日(金) 14:00～15:30	「(講演タイトル未定)」 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

※ 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2025  
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

TEL: 03-6826-3971 FAX: 03-5283-6580

URL: <http://www.advancesoft.jp/> E-mail: [office@advancesoft.jp](mailto:office@advancesoft.jp)

seminar2025\_20250502