

## 第3回アドバンス・シミュレーション・セミナー2023 開催報告

### 特別セミナー

#### 招待講演①「複雑流動現象の数値シミュレーション」

大阪大学 基礎工学研究科 機能創成専攻 教授 後藤 晋 様

#### 招待講演②「機械学習による流体解析の拡張」

University of California, Los Angeles (UCLA) 教授 平 邦彦 様

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

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

### 開催概要

- 日時：2023年6月22日（木）9:30～12:00
- 開催方法：オンラインセミナー（Zoomにて開催）
- 主催：アドバンスソフト株式会社 出版事業部
- 講演概要

講演① 大阪大学 教授 後藤 晋 様



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。

講演② UCLA 教授 平 邦彦 様

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

本稿は、2023年6月22日に開催した「アドバンス・シミュレーション・セミナー2023」において、後藤 晋 様及び平 邦彦 様にご講演いただいた内容をアドバンスソフトがまとめたものです。

### ご講演①（大阪大学 後藤 晋 様）

#### 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年にコルモゴロ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、乱流中の渦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。

## ご講演② (UCLA 平 邦彦 様)

### 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。人間が目で見てい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。

### 【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～)。

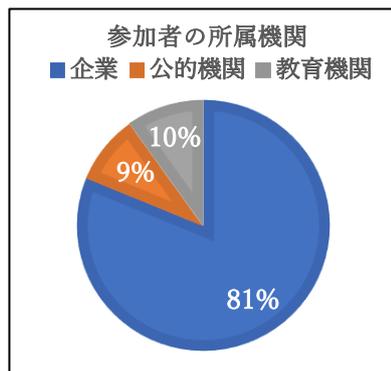
った。また、担当分野は、研究／開発の方が8割を占めていた。

## 参加者のご意見

- 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。

## 参加者

申込者は267名、当日の参加者は213名であった。参加者の内訳は、企業が173名、公的機関が19名、教育機関は21名であった。主な企業の業種は、「自動車・自動車部品」、「機械・機械部品」、「材料／素材」であ



## 公開資料

今回のご講演のYouTube動画は、非公開です。右のQRコードから過去のアドバンス・シミュレーション・セミナーのYouTube動画をご覧ください。



## 今後の開催予定

アドバンス・シミュレーション・セミナー

2023 の開催予定

<https://www.advancesoft.jp/seminar/11637/>

No	日程 受付状況	内容	テーマ
第1回	4月21日(金) 終了	「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」 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
第2回	5月19日(金) 終了	「半導体デバイスの歴史と展望」 IEEE LIFE FELLOW 広島大学 名誉教授 角南 英夫 様	半導体
第3回	6月22日(木) 終了	特別セミナー 「複雑流動現象の数値シミュレーション」 大阪大学 基礎工学研究科 機能創成専攻 教授 後藤 晋 様 ----- 「機械学習による流体解析の拡張」 University of California, Los Angeles (UCLA) 教授 平 邦彦 様	複雑流動・機械学習
第4回	7月21日(金) 終了	「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」 東京工業大学 学術国際情報センター 教授 青木 尊之 様	流体・HPC
第5回	8月3日(木) 終了	「原子力安全に必要となる計算科学技術への期待」 東京大学大学院 工学研究科 原子力国際専攻 教授 笠原 直人 様	原子力安全
第6回	8月28日(月) 受付中 	「サイバー空間の脆弱性と AI: エコーチェンバー、ディープ フェイク、ChatGPT の社会的影響」 東京工業大学 環境・社会理工学院 イノベーション科学系 准教授 笹原 和俊 様	生成 AI
第7回	9月14日(木) 受付中 	「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」 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
第8回	10月6日(金) 準備中	「爆轟から見える CAE の方向性」 青山学院大学 理工学部 名誉教授 林 光一 様	爆轟
第9回	11月10日(金) 準備中	「都市のデジタルツイン」 国立研究開発法人 産業技術総合研究所 デジタルアーキテクチャ研究センター 総括研究主幹 中村 良介 様	デジタルツイン
第10回	12月15日(金) 準備中	「[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]」 筑波大学 数理物質系 教授 岡田 晋 様	ナノ

## 【お問い合わせ先】

アドバンスソフト株式会社 出版事業部

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

TEL: 03-6826-3971 FAX: 03-5283-6580 E-mail: office@advancesoft.jp

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

当社では随時人材の募集も行っております。

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