



## 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」

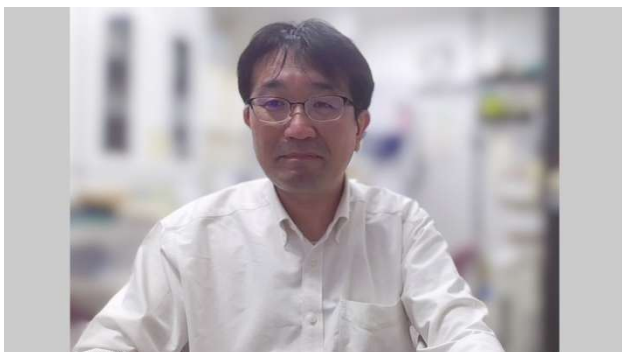
アドバンス・シミュレーション・ニュースは、アドバンスソフト株式会社が2021年度から、我が国における計算科学技術の振興を目的として、幅広い分野の最先端研究を対象として開催している「アドバンス・シミュレーション・セミナー」の開催報告と今後の開催予定をご案内するサービスです。

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：2024年4月19日（金） 14:00～15:30
- 開催方法：オンラインセミナー（Zoomにて開催）
- 主催：アドバンスソフト株式会社 出版事業部
- 講演概要

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

本稿は、2024年4月19日に開催した「アドバンス・シミュレーション・セミナー2024」において、姫野 武洋 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。

##### 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いた。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、表面張力の特性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

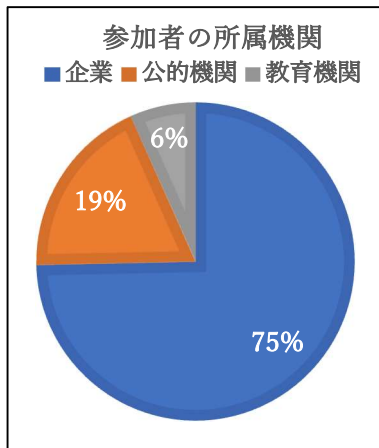
2004年 東京大学大学院 工学系研究科  
航空宇宙工学専攻 講師

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

## 参加者

申込者は104名、当日の参加者は75名であった。参加者の内訳は、企業が56名、公的機関が14名、教育機関が5名であった。主な業種は、「ソフトウェア/システム」、「機械/機械部品」、「建築/土木」であった。主な職種は、「研究/開発」であった。



## 参加者のご意見

- とても面白かった。単純に計算規模を大きくすることで精度を上げ、実用的でないシミュレーションの研究が多い中、物理モデル等の工夫により計算負荷を実用レベルに抑えているのがすごいと感じた。
- 難しいと感じさせない柔らかい内容のご講演で、ずっと頭に入って来ました。今回テーマであった自由表面の問題では、界面の不鮮明さをVOFの技術的限界と思っておりましたが、PLIC-VOFという手法があるとヒントを得たように思います。
- 再現が難しい条件での試験に対して、シミュレーションでの妥当性を検討の上、設計や検証に反映させる一連のプロセスを学ぶことができ、大変有意義でした。
- 非常にわかりやすく、勉強になりました。またメッシュサイズがそれほど大規模でなく効率的なモデル化を目指すところに共感を覚えました。
- 姫野先生のご説明は、工業製品の開発の観点から非常にわかりやすくイメージすることができ、聴講させていただけてよかったです。
- 無重量環境の流体実験・計算について知らなかった事柄に多く触れることができ、とても満足しています。

## 公開資料

ご講演のYouTube動画は、右のQRコードからご覧いただくことができます。



ご講演の資料は、右のQRコードの「資料をダウンロードする」からログイン後、ダウンロードすることができます。ログインアカウントをお持ちでない方は、「資料をダウンロードする」から新規メンバー登録後、ログインしてダウンロードすることができます。



右のQRコードから過去のアドバンス・シミュレーション・セミナーのYouTube動画をご覧いただくことができます。



技術情報誌「アドバンスシミュレーション」Vol.31 発行（無料）のお知らせ

- ・特集：計算科学の裾野を拓げる
- ・発行日：2024年7月5日

ご希望の方は、右のQRコードから「アドバンス/シミュレーションフォーラム会員登録」によりダウンロードをしていただくか、またはお問い合わせのその他の欄に、「技術情報誌「アドバンスシミュレーション」希望」と記載の上、ご連絡ください。後日、送付させていただきます。



## 今後の開催予定

アドバンス・シミュレーション・セミナー

2024 の開催要領

<https://www.advancesoft.jp/seminar/20299/>

No.	日程 受付状況	内容	テーマ
第1回	4月19日(金) 終了	「 <b>ロケットと宇宙機に関するいろいろな自由表面流</b> 」 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	自由表面流の予測と管理
第2回	5月17日(金) 終了	「 <b>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</b> 」 東京工業大学 情報理工学院 情報工学系 教授 秋山 泰 様	バイオ・計算科学
第3回	6月28日(金) 受付中 お申込みはこちら 	「 <b>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</b> 」 慶應義塾大学 理工学部 機械工学科 教授 松尾 亜紀子 様	航空宇宙エンジン
第4回	7月12日(金) 受付中 お申込みはこちら 	「 <b>シミュレーションのための情報可視化</b> 」 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	可視化・AI
第5回	8月23日(金) 準備中	「 <b>シミュレーション技術のリスク評価への適用</b> 」 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	原子力・リスク評価
第6回	9月20日(金) 準備中	「 <b>ポスト・エクサ、ポストムーア時代の HPC と AI</b> 」 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	HPC・AI
第7回	10月11日(金) 準備中	「 <b>(準備中)</b> 」 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
第8回	11月22日(金) 準備中	「 <b>(準備中)</b> 」 九州大学大学院 システム情報科学研究院 情報知能工学部門 主幹教授 井上 弘士 様	(仮) 計算機アーキテクチャ

## 【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

