



アドバンス・シミュレーション・ニュース

Vol.2, No.3 (2024年9月4日発行)

第3回アドバンス・シミュレーション・セミナー2024 開催報告

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」

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6月28日（金）14:00～15:30
- 開催方法：オンラインセミナー（Zoomにて開催）
- 主催：アドバンスソフト株式会社 出版事業部
- 講演概要

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

本稿は、2024年6月28日に開催した「アドバンス・シミュレーション・セミナー2024」において、松尾 亜紀子 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

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。燃焼面が亜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エンジンに関する研究は2008年頃から徐々にRDEへ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方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、こ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的一种であり、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。

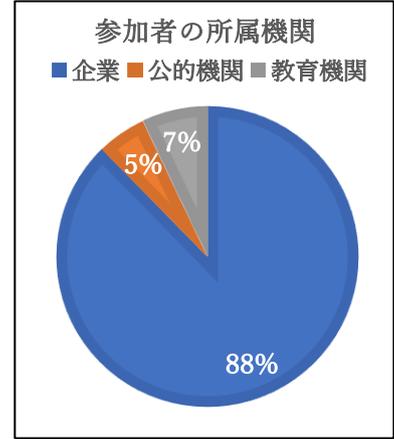
【ご経歴】

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

参加者

申込者は83名、当日の参加者は57名であった。参加者の内訳は、企業が50名、公的機関が3名、教育機関が4名であった。主な業種は、「ソフトウェア

/システム」、「材料/素材」、「鉄道/造船/輸送機器」、「電機/精密機器/IT機器」、「自動車/自動車部品」、「機械/機械部品」、「大学/教育機関」であった。主な職種は、「研究/開発」が約6割、「技術/開発」が約2割、その他（「情報処理/情報システム」、「生産/製造」など）であった。専門分野は、燃焼反応解析、CFD、航空宇宙関係が多かった。



参加者のご意見

- 背景からシミュレーションの結果、今後の展開までたいへんわかりやすく拝聴させていただきました。ありがとうございました。
- メインテーマ（デトネーションエンジン）の前に、宇宙開発の現状をまとめた概論をしていただき、そのおかげもあってメインテーマの理解がスムーズでした。
- ロケットでの輸送や市場の説明があったので、ロケットエンジンに求められる要素が理解でき、その中でデトネーションエンジンの位置づけがわかりやすかった。
- 松尾先生の親しみやすく丁寧なご説明もあり、エンジン分野に明るくない当方でも興味深く聴講させていただきました。デトネーションエンジン開発の現在地および今後の展望について理解することができました。
- 久しぶりに宇宙開発の話聞いて良かったです。
- ロケット・衛星の状況をはじめ、デトネーションエンジンの情報等、興味深い内容だった。

公開資料

今回のご講演のYouTube動画は非公開です。

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。



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 | 「 ロケットと宇宙機に関するいろいろな自由表面流 」 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 | 「 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 」 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) 終了 | 「 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 」 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) 終了 | 「 シミュレーションのための情報可視化 」 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) 終了 | 「 シミュレーション技術のリスク評価への適用 」 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) 受付中 お申込みはこちら  | 「 ポスト・エкса、ポストムーア時代の HPC と AI 」 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) 受付中 お申込みはこちら  | 「 建築・都市の新たな風環境デザイン 」 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 | 「 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 」 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 | 計算機アーキテク チャ |
| 第9回 | 12月17日(火) 準備中 | 「 (準備中) 」 東京工業大学 科学技術創成研究院 ゼロカーボンエネルギー研究所 特任教授 浅野 浩志 様 | (調整中) |
| 第10回 | 2025年1月17 日(金) 準備中 | 「 (準備中) 」 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 | (調整中) |

【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/>