

jh250026

デトネーション燃焼器を利用した超音速乱流燃焼促進法に関する 大規模数値シミュレーションによる物理解明

松尾亜紀子（慶應義塾大学理工学部）

概要

本研究では、スクラムジェットエンジンの実用化を阻む技術的課題を解決するため、デトネーションを用いたスクラムジェットエンジン用燃料噴射器を提案し、大規模数値解析によって燃料噴射器の基本性能評価を行った。特に本年度は、計算機科学分野の研究者とのコード開発により、OpenMP/MPI を併用した計算を高速に行うことが可能となった。これにより、燃料噴射器に対する大規模計算の計算時間を短縮し、デトネーションによって誘起される主燃料噴流の非定常的な挙動を解像することに成功した。これらの知見は、今後のデトネーションアシスト型燃料噴射システムにおける燃焼器幾何形状の設計に指針を与えるものである。

1. 共同研究に関する情報

(1) 共同利用・共同研究を実施している拠点名

東北大学 サイバーサイエンスセンター

(2) 課題分野

大規模計算科学課題分野

(3) 参加研究者一覧と役割分担

- ・ 松尾亜紀子(慶應義塾大学理工学部) : 代表者, 研究総括
- ・ 江川隆輔(東京電機大学工学部, 兼・東北大学サイバーサイエンスセンター) : 副代表者, ノードレベル最適化
- ・ 磯部洋子(日本電気株式会社, 兼・東北大学協力研究員) : 並列化処理
- ・ 加藤季広(日本電気株式会社) : 並列化処理
- ・ 宮下萌乃(慶應義塾大学大学院理工学研究科) : 並列化処理
- ・ 藤原海帆 (慶應義塾大学大学院理工学研究科) : 並列化処理
- ・ 佐藤響(慶應義塾大学理工学部) : 並列化

処理

2. 研究の目的と意義

本研究では、スクラムジェットエンジンの実用化を阻む技術的課題を解決するため、デトネーションを用いたスクラムジェットエンジン用燃料噴射器を世界に先駆けて提案し、大規模数値解析によって燃料噴射器の基本性能評価を行うことを目的とする。

デトネーションとは、衝撃波を伴いながら超音速で伝播する燃焼波であり、近年デトネーションを熱機関に応用する試みが加速している。例えば、回転デトネーションエンジン(Rotating Detonation Engine, 以下 RDE)は、デトネーションを円筒状の燃焼器内に発生させ、燃焼器の周方向に回転伝播させることによって推力を得る仕組みであり、ロケットエンジンへの応用が検討されている。また、現在提案されているデトネーションエンジンは、ロケットエンジンへの応用例が主であるが、近年エアブリージングエンジンの一部に適用する提案も増加している。エアブリージングエンジンは、ロケットエンジンとは異なり搭載する酸化剤の大幅な削減

が可能であり、ロケットエンジンよりも高い輸送効率を実現できる。デトネーションの高温高压かつ高い燃焼効率といった特性をエアブリージングエンジンにも活用することで、デトネーションのさらなる汎用性向上が期待できる。

一方で、デトネーションエンジンの燃焼器内で生じる現象は複雑かつ高速であり、実験でその現象を詳細に捉えることは困難である。また、エアブリージングエンジンで必要となる高速な流入空気を実験で再現するためには、大規模な設備が必要となる。以上の背景から、デトネーションのエアブリージングエンジンへの応用例を実験的に確立することは非常に困難である。よって、デトネーションのエアブリージングエンジンへの適用可能性検討のためには、数値解析を用いた現象の詳細分析を行うことが必要不可欠である。また、デトネーションや超音速乱流燃焼場の解析には衝撃波や大規模乱流構造を正確に捉える必要があるため、三次元性が無視できず、大規模かつ高解像度の解析が求められる。

継続課題である本研究は、一連の活動を通じて、デトネーションを用いたスクラムジェットエンジン用燃料噴射器を世界に先駆けて提案し、超音速気流中での燃料噴射器の基本性能評価を行うことを目的としている。継続課題の3年目となる本年度は、【1】大規模数値解析に向けたコードの高速化、【2】大規模数値解析による燃料噴射器の基本性能評価、を段階的に実施した。

3. 当拠点の公募型共同研究として実施した意義

本課題では、Navier-Stokes 方程式、気体種保存則から成る微分方程式系を時空間離散化し、各空間離散点に対して繰り返し同一の時間積分を行う。高解像度・三次元の数値解析であるため離散点数が多く、これらの演算を行うためにはベクトル型コンピュータである SX-Aurora の利用が不可欠である。本課題研究の演算のためのコードは、過去5年に渡る SX-ACE や SX-Aurora を用いた研究によって最適化されつつある。しかし、RDE を対象とした二次元解析や低解像度三次元

解析に用いた実績はあるものの、高解像度三次元解析は未だ実施例がなく、大規模化に伴うさらなるコードの改善および計算機科学に関する知見が不可欠である。

以上のように、本課題研究の内容は高度に学際的であり、実施に際して計算力学を専門とする慶應義塾大学と、計算機科学を専門とする東北大学の共同研究により実施した。

4. 前年度までに得られた研究成果の概要

前年度は、回転デトネーション燃焼器の排気流特性に着目した解析を行った。燃焼器単体での低解像度解析を行い、燃焼器出口から排気される排気流の生成過程、および外部超音速流に対する排気流の貫通高さや燃焼効率等の評価を行い、以下の知見を得た。

1. デトネーションがもたらす昇圧効果により、デトネーションエンジン内に供給された未燃ガス流は、動圧値が上昇しながら既燃ガス流となり排気される。この動圧値の向上により、超音速気流中における貫通高さの改善に寄与できる可能性が示唆された。
2. デトネーション燃焼によって、既燃ガス流は高温かつ活性化学種を含んだ状態で排気される。この特性は、超音速気流中での乱流燃焼に対し反応時間を短縮する効果のある高温ガスを、拡散燃焼による生成時と超音速主流中における燃焼効率を改善できる可能性が示唆された。
3. デトネーションエンジン内部では、1-100kHz もの高周波数でデトネーション波が連続伝播し、既燃ガス流には強い圧力擾乱が含まれる。この圧力擾乱により、高速気流中で乱れを連続的に発生させる効果が期待できる。

以上のような前年度の研究結果を踏まえ、本年度は、デトネーション燃焼器のみならず、超音速気流領域も併せた大規模数値解析を実施した。

5. 今年度の研究成果の詳細

5.1 大規模数値解析に向けたコードの高速化

本課題で使用している流体-反応連成解析コー

ドは、Flat MPI による実行実績はあるものの、OpenMP/MPI 並列計算については未だ実績がない状態であった。そのため、本課題の下半期に予定する大規模数値解析の準備として、OpenMP/MPI 並列計算が可能なコードとなるよう開発し、高速化の達成度を測定した。

Flat MPI 実行時と OpenMP/MPI 並列実行時との比較を図 1 に示す。なお実行にあたっては、同一規模のテスト問題に対し、使用 VE 数を 256-3968 VH と変化させ、Flat MPI 実行時と OpenMP/MPI 並列実行時の実行時間および使用メモリ量を比較した。

図 1(a)に示す iteration 時間について見ると、256 VE, 512 VE などの比較的小規模実行時においては、Flat MPI による実行の方が iteration に要する時間は短い。1024 VE 以上の場合では、MPI/OpenMP 並列実行の方が iteration に要する時間が Flat MPI よりも短縮されていることが確認された。また、図 1(b)に示す使用メモリ量について見ると、実行を行なった全てのケースにおいて、MPI/OpenMP 並列実行の方が Flat MPI よりも少ないメモリ量で計算されていることが明らかとなった。なお、下半期に予定している大規模解析の計算規模はおおよそ 1024-2048 VE であることから、大規模実行時においても上述の効果が得られると考えられ、期待していた高速化を達成したと結論付けた。

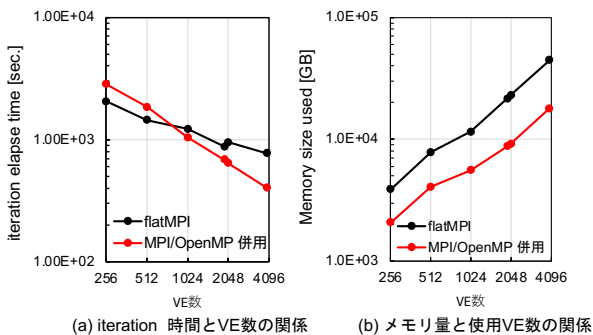


図 1 Flat MPI 実行時と OpenMP/MPI 並列実行時の比較

5.2 回転デトネーション燃焼器を用いたスクラムジェットエンジン用燃料噴射器に関する大規模数値解析

5.2.1 解析対象および数値解析手法

前節のコード準備状況を踏まえ、下半期には、本研究の対象である「回転デトネーション燃焼器を用いた燃料噴射器」の大規模数値解析を実施した。解析対象は、図 2,3 に示すように、単円筒型 RDC 部と、超音速主流領域とが垂直に接続された領域とした。超音速主流領域における計算格子および境界条件を図 3 (a)に示す。主流領域に供給す

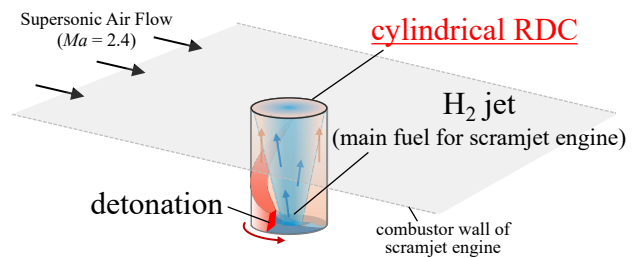


図 2 解析対象(単円筒回転デトネーション燃焼器を用いた燃料噴射器の概略図)

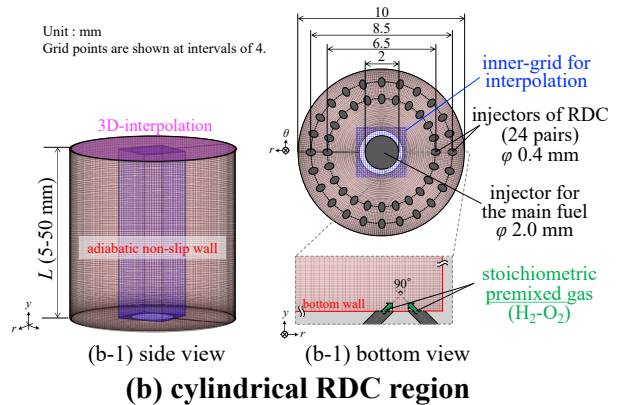
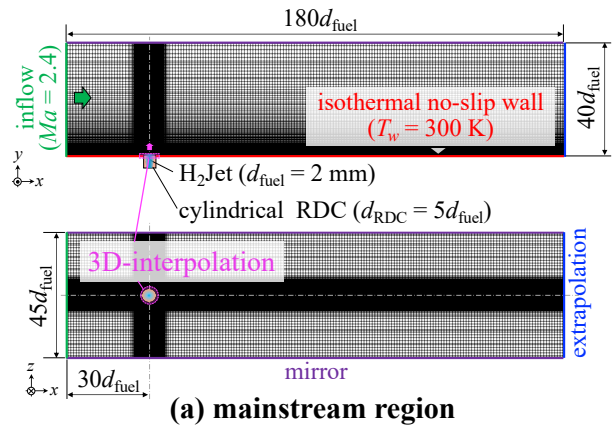


図 3 計算格子および境界条件

る水素噴流の質量流量は 3.92 g/s とし、これは解析領域全体に対して当量比 0.12 に相当する。鉛直方向に噴射される燃料噴射孔の直径は 2 mm とし、これを基準長さ d_{fuel} として用いた。

図 3(b)に示すように、単円筒形 RDC 部は、直径 $d_{\text{RDC}} = 5d_{\text{fuel}}$ の直管状の燃焼器から構成されており、本報告では燃焼器長さ(L)を 5 mm から 50 mm まで変化させた。以下では、燃焼器長さに対応して、各ケースを $L05$ から $L50$ と呼称する。最小格子幅は約 $5 \mu\text{m}$ とし、これはデトネーション燃焼における誘導長に対して約 20 点の格子解像度に相当する。燃焼器底部には、デトネーション燃焼に必要な燃料および酸化剤を供給するため、24 組の噴射器対を配置し、さらに、図 3(b-2)に示すように、主燃料噴射器を底面中央に設置した。なお、デトネーション燃焼用に供給される推進剤は、当量比 1.0 の $\text{H}_2\text{-O}_2$ 予混合気を用いた。単円筒 RDC は、スクラムジェット燃焼器を模擬した超音速主流領域の下壁に垂直に接続し、この接続部においては、各ステップごとに保存量を三次元的に内挿することで、単円筒 RDC 部と主流領域を連成した数値解析を行った。

本研究では、三次元圧縮性 Navier-Stokes 方程式、9 化学種($\text{H}_2, \text{O}_2, \text{H}, \text{O}, \text{OH}, \text{H}_2\text{O}, \text{HO}_2, \text{H}_2\text{O}_2, \text{N}_2$)の保存則を支配方程式として用い解析を行った。対流項の離散化には MUSCL 法[1]により三次精度化された AUSMDV [2], 拡散項の離散化には 2 次精度中心差分を用いた。時間積分法には TVD Runge-Kutta 法[3]を用い、化学反応モデルには Hong et al.による詳細反応モデル[4]を適用した。乱流モデルは、超音速主流領域においては Wilcox(2006)による $k\text{-}\omega$ モデル[5], RDC 領域については Mixed scale model を用いた。

5.2.2 結果と考察

図 4 に、代表的なケース ($L05, L15, L25, L30$) について、RDC 内部におけるデトネーション伝播および主燃料噴流分布の瞬時場を示す。なお、デトネーションは圧力の等値面によって示し、主燃料噴流は水素モル分率が 0.9 の等値面によって示

している。いずれのケースにおいても、単円筒型 RDC が超音速主流領域に接続された条件下で、安定したデトネーション伝播が確認された。特に、燃焼器長さが 5 mm から 25 mm のケースでは、単一のデトネーション波が観測された一方、30 mm および 50 mm のケースでは、デトネーションの波数が 2 枚となった。これらの結果から、短い燃焼器では単一波モード (single-wave mode) となり、燃焼器長さが長くなると二枚波モード (double-wave mode) へと遷移することが確認された。次に主燃料噴流の挙動に着目すると、single-wave mode のケース ($L05\text{-}L25$) では、噴流は特徴的な螺旋構造を示し、非定常的に噴出する様子が確認された。一方で double-wave mode のケース ($L30$ および $L50$) では、デトネーション伝播に起因する明確な非定常挙動は認められず、主燃

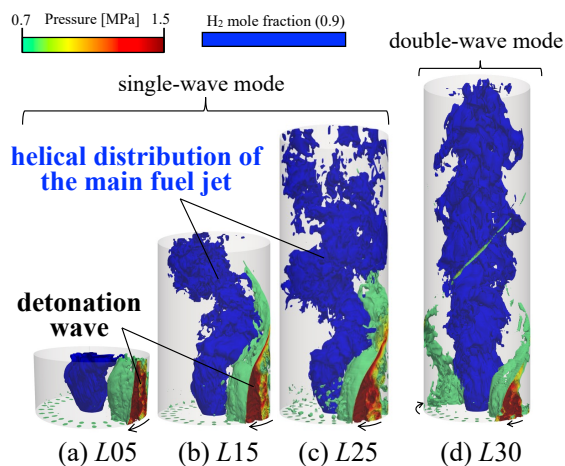


図 4 RDC 内部の可視化

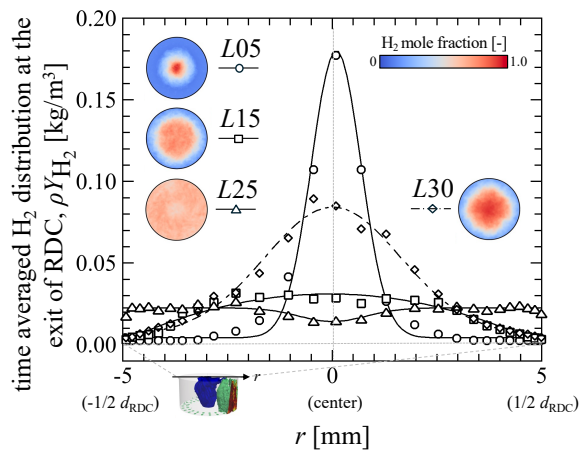


図 5 RDC 出口における主燃料水素の分布

料噴流は概ね定常的に主流中へ噴出する様子が確認された。

デトネーションの非定常性によって誘起される主燃料とデトネーション既燃ガスとの混合状態を調査するため、図 5 に RDC 出口断面における水素密度の一次元分布を示す。これらの結果から、L05 から L25 のケースでは、燃焼器長さが長くなるにつれて水素分布がより均一になることが確認された。特に、L25 のケースでは、燃焼器断面全域で概ね様な分布が得られており、主燃料とデトネーション既燃ガスとの混合が最も促進されていることを示している。一方で、L25 (single-wave mode) よりも長い燃焼器である L30 (double-wave mode) では水素分布の広がり著しく低下した。これらの結果は、single-wave mode の場合は燃料と既燃ガスの混合を促進する効果を持つ一方で、double-wave mode へ遷移すると混合性能が顕著に低下することを示している。

次に、RDC 出口において観測された混合状態の違いが、主流中における燃焼効率に与える影響を評価した。図 6 に、最も混合が促進されたケースである L25 について、主流方向に沿った燃焼効率の分布を示す。比較のため、研究代表者らによる文献[6]中で行われた baseline model の結果も黒実線で併記している。燃焼効率は、先行研究と同様に、文献[6]の式(10)に基づいて算出した。図 5 に示すように、L25 のケースでは、解析領域全体にわたって baseline model よりも高い燃焼効率を得られた。特に、燃焼器出口における燃焼効率は、baseline model と比較して 0.16 point 高い結果となった。これは、単円筒型 RDC を用いた場合、baseline model と同等の燃料消費に、流出方向に沿って 57.3% 早い位置で到達したことを示している。

最後に、主流出口における燃焼効率と、RDC の燃焼器長さおよびデトネーション伝播モードとの関係を図 7 に示す。L05 から L25 のケースでは、これまでの結果が示すように、燃焼器長さの増加に伴って燃焼効率が向上する傾向が確認された。baseline model と比較すると、図中の線で示され

るように、燃焼効率は単調に増加している。しかし、燃焼器長さが L30 を超えるケースではこの傾向は維持されず、燃焼効率の低下が確認された。

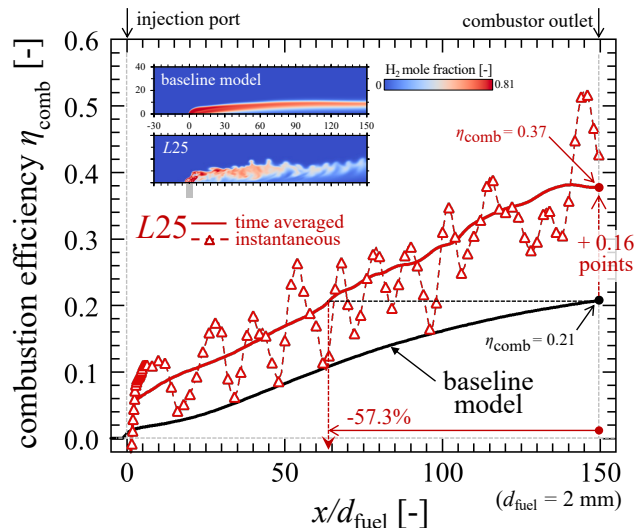


図 6 主流中における燃焼効率(L25)

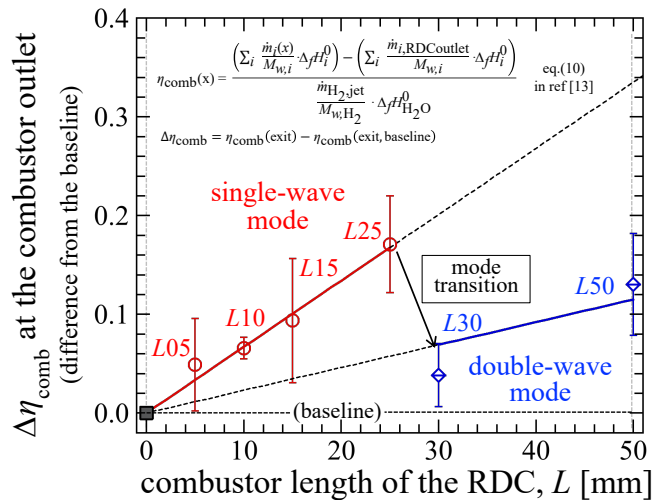


図 7 RDC の燃焼器長さ
主流中における燃焼効率の関係

5.3 結言

本研究では、単円筒型回転デトネーション燃焼器 (Rotating Detonation Combustor : RDC) を用いた新しいデトネーションアシスト型燃料噴射システムを検討した。特に、デトネーション伝播に起因する非定常性が、主燃料噴射挙動および超音速主流中における燃焼効率与える影響に着目して検討を行った。

その結果、RDC 燃焼器長さの増加により混合が促進されることが明らかとなった。特に、デトネーションが単一波モード (single-wave mode) で伝播する条件下では、二重波モード (double-wave mode) と比較して、燃焼効率の向上が顕著であることが示された。この傾向は、可視化結果において確認された主燃料噴流の螺旋状挙動に起因し、デトネーションの非定常混合効果によって誘起されたものと考えられる。これらの知見は、今後のデトネーションアシスト型燃料噴射システムにおける燃焼器幾何形状の最適化に指針を与えるものである。

6. 進捗状況の自己評価と今後の展望

本研究課題の実施により得られた知見は以下の通りである。また、申請時に設定した年度計画を基にした進捗の評価についても述べる。

本研究では、単円筒型回転デトネーション燃焼器 (Rotating Detonation Combustor : RDC) を用いた新しいデトネーションアシスト型燃料噴射システムを検討した。特に、デトネーション伝播に起因する非定常性が、主燃料噴射挙動および超音速主流中における燃焼効率与える影響に着目して検討を行った。

その結果、RDC 燃焼器長さの増加により混合が促進されることが明らかとなった。特に、デトネーションが単一波モード (single-wave mode) で伝播する条件下では、二重波モード (double-wave mode) と比較して、燃焼効率の向上が顕著であることが示された。この傾向は、可視化結果において確認された主燃料噴流の螺旋状挙動に起因し、デトネーションの非定常混合効果によって誘起さ

れたものと考えられる。これらの知見は、今後のデトネーションアシスト型燃料噴射システムにおける燃焼器幾何形状の最適化に指針を与えるものである。

さらに、計算機科学分野の研究者との共同研究によってコードの高速化が達成され、当初の想定通り課題実施が円滑に進んだ。一連の解析を予定通り実施できたことと、採択された全 NH の 100% を予定通り消費したことから、概ね当初の計画どおり実施できたものと考えられる。

なお本課題では次年度も引き続きデトネーション燃焼器および主流中の超音速燃焼現象に対する高解像度解析を行っていく予定である。2026 年度では特に、乱流構造のさらなる詳細評価や、実際の実験結果との比較による数値解析結果の妥当性向上に取り組むことにより、デトネーションの新たな工学的応用例の提案へと繋げたい。

<参考文献>

- [1] Y. Wada, M. Liou, "An Accurate and Robust Flux Splitting Scheme for Shock and Contact Discontinuities", Journal of Scientific Computing, vol.18, 1997.
- [2] S. Yamamoto, H. Daiguji, Higher-order-accurate up-wind schemes for solving the compressible Euler and Navie-stokes equations, Computers Fluids, 22 (1993).
- [3] S. Gottlieb, S. Chi-wang, "Total Variation Diminishing Runge-Kutta Schemes", Mathematics of Computation, vol.67, 1998.
- [4] Z. Hong, D. F. Davidson, R. K. Hanson, "An improved H₂/O₂ mechanism based on recent shock tube/laser absorption measurements", Combustion and Flame, 158, pp. 633-644, 2011.
- [5] D. C. Wilcox, Turbulence Modeling for CFD, 2006.
- [6] M. Miyashita, A. Matsuo, E. Shima, A. Kawasaki, N. Itouyama, K. Matsuoka, J. Kasahara, Numerical investigation of a

detonation-assisted fuel injection system in
supersonic crossflow. Combust. Flame 281
(2025).