

jh200028-NAH

回転 detonation エンジンのインジェクタに関する数値解析

松尾 亜紀子 (慶應義塾大学)

概要

回転 detonation エンジン (RDE) のインジェクタ内の圧力損失を数値解析で予測するためには、インジェクタ内の摩擦損失、入口損失、衝撃波の逆流を再現する必要がある。しかし、RDE の全領域を計算対象とした場合、格子サイズと領域サイズのインバランスから、計算コストが非現実的に大きくなってしまふ。本研究では、"Single-element Simulation" を用いてこの課題を解決した。Single-element Simulation では、計算領域を 1 つのインジェクタに限定し、さらに時間変化する燃焼室の状態を境界条件として与えることで燃焼室の計算を省略し、コストを削減した。これにより、RDE 全体を解析する従来の "Full-scale Simulation" と比較して計算速度は 32 倍高速で、誤差は 0.6% と十分小さかった。また、輸送係数の算出方法を改め、ベクトルコンピュータ向けの最適化を行った。さらに、この手法を用いた新規インジェクタ形状探索として、直管を模したインジェクタと入口角部を丸めたインジェクタの比較を行った。その結果、丸めたインジェクタは縮流や乱流を抑制し、直管よりも 31% 圧力損失を低減した。

1. 共同研究に関する情報

(1) 共同研究を実施した拠点名

東北大学

(2) 共同研究分野

超大規模数値計算系応用分野

(3) 参加研究者の役割分担

- ・ 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 (東北大学サイバーサイエンスセンター) : 副代表者, 並列化処理
- ・ 小林広明 (東北大学大学院情報科学研究科) : 並列化処理
- ・ 磯部洋子 (東北大学サイバーサイエンスセンター) : 並列化処理
- ・ 滝沢寛之 (東北大学サイバーサイエンスセンター) : コード最適化
- ・ 笠原弘貴 (慶應義塾大学大学院理工学研究科) : 並列化処理
- ・ 山口貴史 (慶應義塾大学大学院理工学研究科) : 並列化処理
- ・ 鈴木寛人 (慶應義塾大学大学院理工学研究科) : 並列化処理
- ・ 田中来武 (慶應義塾大学大学院理工学研究科) : 並列化処理

2. 研究の目的と意義

本課題研究の目的は、回転 detonation エンジン (RDE) の性能低下の原因であるインジェクタ内の損失および衝撃波伝播による推進剤流量の減少を再現し、より低い圧力損失で動作できるインジェクタの形状設計を行うことである。RDE は、燃焼室内を連続的に伝播する detonation を利用したロケットエンジンであり、ターボポンプの廃止や簡素化により打上げコストを低減できる可能性がある。しかし、前述した 2 つの現象により、圧力損失が十分大きくなければ RDE は安定して動作しない。そこで、損失や衝撃波による推進剤流量の低下を低減し圧力損失が小さくても動作するインジェクタ形状を設計する。計算コスト低減のため、多数あるインジェクタの内 1 つのインジェクタのみに計算領域を限定する新手法の Single-element Simulation を利用する。また、detonation を含む流体解析では非常に硬直性の強い方程式系を解く必要があり、化学反応の時間積分を反復させることでこれに対応している。この反復回数が場所によって大きく異なるため、数値解析における並列化率の向上の妨げとなっている。さらに、多気体種を処理するためにループ長が長くなり、ベクトル化が

不可となる箇所がある。そのため、共同研究により化学反応処理の負荷バランスの改善など、スーパーコンピュータシステムに向けたコードの最適化を行う。

本課題研究はターボポンプ省略・簡略化が可能となる RDE の開発に繋がる。そのため、本課題研究は宇宙開発の低コスト化という面で航空宇宙分野の発展に寄与できる。また、本課題研究によって得られたインジェクタ形状の設計技術は実験・数値解析の双方に貢献することができ、当分野の発展を促すことが期待される。

3. 当拠点公募型研究として実施した意義

本研究では RDE 内部を解析対象としており、気相デトネーションの再現が必要である。このような急激な化学反応を含む流体解析では、方程式系の硬直性により、化学反応を含まない解析と比較して計算コストが高い。また、インジェクタの圧力損失には速度境界層の発達に影響すると考えられる。本研究で対象とする流れ場において、必要な格子解像度は $1\ \mu\text{m}$ 程度であり、対してインジェクタ長さは $1 \times 10^4\ \mu\text{m}$ のオーダー、RDE 全長は $3 \times 10^5\ \mu\text{m}$ のオーダーである。このスケールのインバランスにより、格子点数が非常に多くなり、計算コストが高くなる。そのため、大規模な計算資源が必要である。

本報告で用いる数値解析のプログラムでは、空間的に離散化した各格子点に対して同一の処理を繰り返し行う。このように同一処理を大量に行う計算にはベクトル型コンピュータが適している。また、前述した通り格子点数が非常に多いため、MPI を用いた大規模並列化により、効率よく計算時間を短縮することが可能であると予想される。以上の利点により、東北大学のスーパーコンピュータ SX-Aurora を利用することには意義があると考え、本研究を実施した。

さらに、本研究ではスーパーコンピュータ

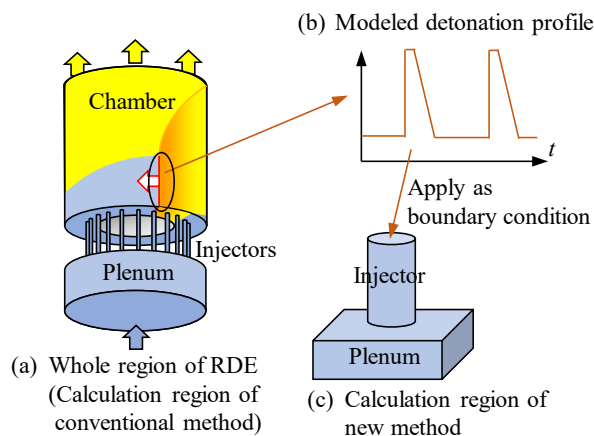


Fig. 1 RDE の模式図と Single-element Simulation の概要

システムに向けたコードの最適化も目的となっている。そこで、計算機科学が専門の東北大学と共同研究を行い、並列処理モデルの改善を目指した。

4. 前年度までに得られた研究成果の概要

本研究は新規課題のため無し。

5. 今年度の研究成果の詳細

新たに開発した数値モデル

まず、本研究で計算コスト低減のために提案した Single-element Simulation (以下 single-element)の概要を Fig. 1 に示す。従来の Full-scale simulation (以下 full-scale)では、Fig. 1a に示すような RDE のプレナム、全てのインジェクタ、燃焼室を含む全体を解析対象としていた。しかし、この手法では粘性や乱流を考慮した場合、インジェクタ内部の準定常的な圧力分布を得るために非現実的な計算時間が必要となってしまふ。そのため、single-element では燃焼室の状態を、時間変化する保存量の分布(Fig. 1b)として境界条件に陽的に与えることで、計算コストを削減する。保存量の分布を得る手法は、他の精度の低い full-scale の結果を用いたり、デトネーションの理論式から分布を計算したりすることが考えられるが、任意である。Figure 1c のように計算領域が 1 つのインジェクタおよびプレナムのみに限定される

ため、計算コストが削減される。Single-element の具体的な手順を Fig. 2 のフローチャートに示す。この手法は解析のための準備段階と、圧力損失を求める 4 つのステップのイタレーションから成る。準備段階では境界条件として用いる 1 サイクル分のデトネーションを作成する。ここでの 1 サイクルとは、準定常状態の RDE 燃焼室において、デトネーションの先行衝撃波があるインジェクタに到達した瞬間から、そのデトネーションが RDE 内を 1 周して再びそのインジェクタに到達するまでである。次にステップ 1 では、新しいインジェクタ形状を設計し、その計算格子を作成する。ステップ 2 ではデトネーション点火前の定常流を、化学反応を含まない数値解析によって求める。ステップ 3 では、ステップ 2 の流れ場を初期条件として、非定常流の計算を行う。準備段階で作成した 1 サイクル分のデトネーションをインジェクタの出口境界条件に与えると、そのデトネーション由来の衝撃波、圧縮波がインジェクタ内を逆流する現象が再現できる。このとき、1 サイクル分の計算では初期条件の影響が残ってしまうため、同じ 1 サイクル分のデトネーションを与えることを 20 回繰り返す。20 回目の 1 サイクルについて、インジェクタ内の時間平均圧力分布を得る。ステップ 4 では圧力損失を求める。圧力損失は時間平均したプレナム圧と燃焼室圧で定義される。

申請時の研究計画では、上半期に新しい化学反応時間積分手法の導入を行う予定であった。しかし、実際に解析を行うにあたって乱流モデル・RANS の導入が必要となった。その過程で各輸送係数算出の計算負荷が支配的であったことが判明したため、そちらを優先してコードの改善を行った。本研究では推進剤を予混合気として扱っている。そのため、計算領域内の多くの場所を水素空気の予混合気が占め、異なる組成が存在するのはデトネーションがインジェクタ付近を通過した際のみである。インジェクタ内に存在する既燃気体が少ないこと

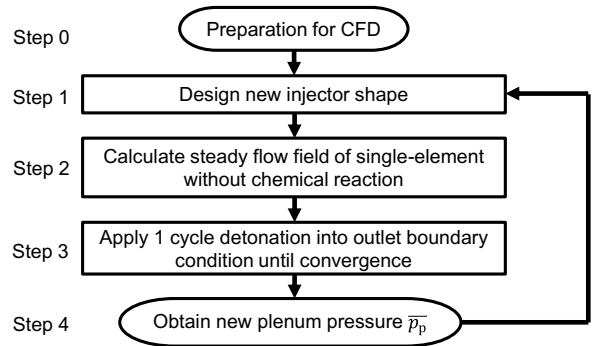


Fig. 2 Single-element Simulation のフローチャート

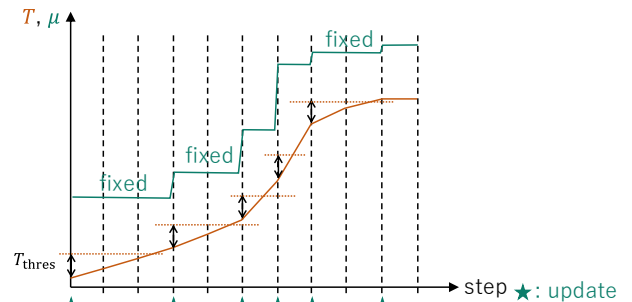


Fig. 3 温度しきい値により輸送係数を算出する手法の概念図

から、single-element における拡散現象は圧力分布に対して支配的ではないと考えられる。一方で、現在用いているモデルでは、拡散係数の算出に化学種数の 2 乗のコストが掛かり、計算速度向上のボトルネックとなっていた。そのため、拡散項の計算を省略する手法を導入した。また、同様に single-element の殆どの領域では温度、化学種組成が変化しないにも関わらず、毎ステップ粘性係数を求めていることも計算負荷の原因と考えられる。そこで、本節では流れ場に変化が少ない格子点では粘性係数を更新しない手法を考案した。粘性係数は質量分率、静温度の関数になっていて、本研究で扱うデトネーションにおいては、温度が変化せずに各質量分率が変化することは少ない。そのため、温度変化を監視すれば十分であると考えた。この手法では、ある温度しきい値を設けて、前回の更新からの累積温度変化がしきい値を超えた場合のみ粘性係数、熱伝導率の更新を行う。

ベクトル型コンピュータ利用のための工夫として、共同研究先の東北大学からご提案頂いたブロック化を導入した。前述したしきい値を

設けて輸送係数を更新する手法では、格子点によって処理が異なる。このような計算では、ベクトルコンピュータの利点を活かすことができない。ブロック化とは、格子点をベクトルコンピュータのベクトル長である 256 点ずつに分割し、各ブロック内では必ず同一の処理を行う手法である。本研究では、各ブロック内に 1 つでも温度変化がしきい値を超えた点があった場合にのみ粘性係数、熱伝導率の更新を行うようにした。

妥当性と計算速度改善の確認

プレナム、インジェクタ、燃焼室の全てを計算対象とする Full-scale の計算領域を Fig. 4a に示す。解析に用いる座標系は燃焼室周方向を x 軸、軸方向を y 軸とする。本報告では Full-scale の計算結果は Single-element との比較のために用いる。Single-element において、ステップ 2 では Fig. 4b、ステップ 3 では Fig. 4c に示すインジェクタ 1 つ分の計算領域を用いた。

まず、Single-element Simulation に乱流モデルを導入して求めたインジェクタ内の圧力分布と、従来の RDE 全体解析(Full-scale)によって求めた圧力分布を比較した。Fig. 5 のグラフに示す通り、両者の結果は良い一致を示した。圧力損失の指標となるプレナム圧の誤差は 0.6% であり、コードの妥当性が確認された。計算速度は Single-element が Full-scale の 32 倍高速であった。

温度しきい値を用いた輸送係数の算出計算では、しきい値を”時間刻み 1 ステップあたり温度変化が 10 K 以下”とように設定した。拡散係数の計算の有無、しきい値の有無を変更して計算した結果を Fig. 6 に示す。図示するように、各計算結果は非常によく一致し、大きな差は見られなかった。Table 1 にコードの実行時間を示す。従来手法の w/diff と比較して、温度しきい値を用いて拡散項を無視した w/o diff $T_{thres} = 10K$ ではサブルーチン単体の計算コストが 1/10 程度に減少している。コード全体で見ても、41%の計算時間短縮に寄与した。以上

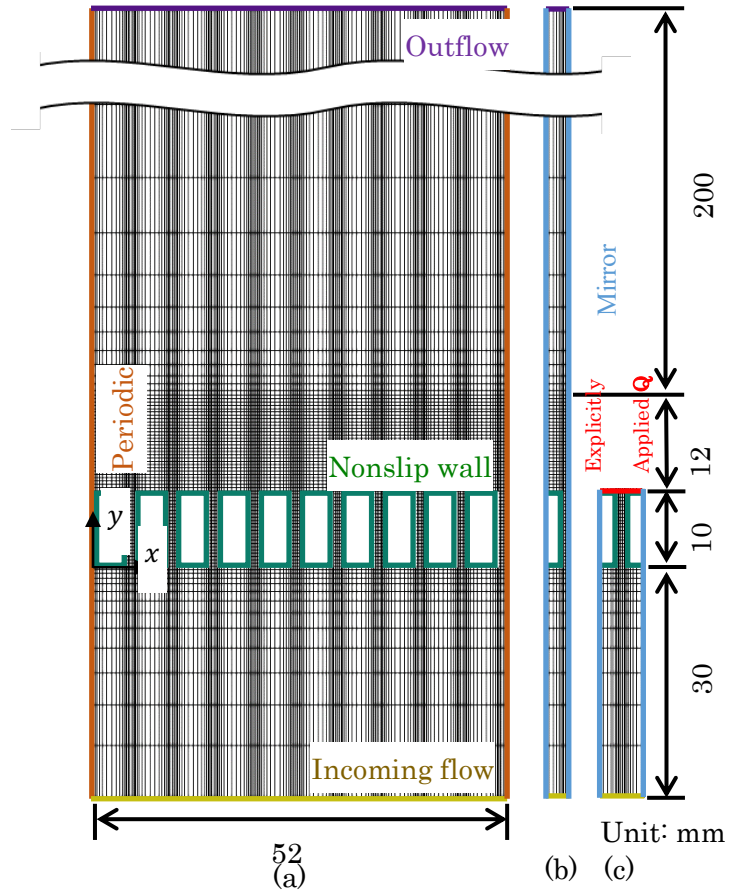


Fig. 4 計算領域と境界条件
(a) Full-scale, (b) Single-element のステップ 2, (c) Single-element のステップ 3

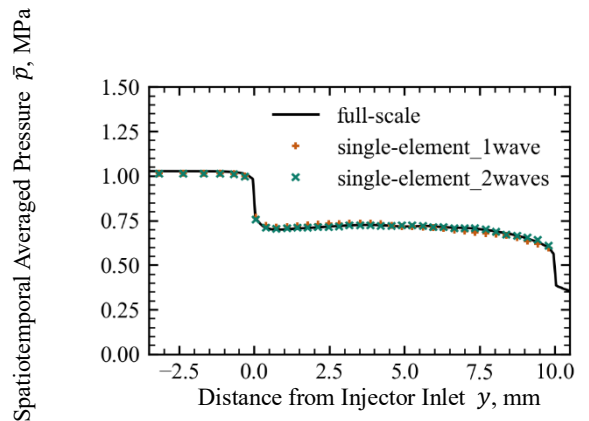


Fig. 5 インジェクタ内の時間平均圧力分布

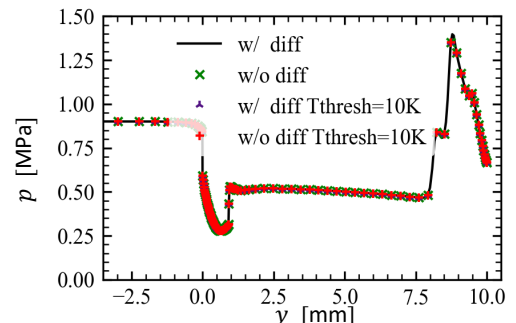


Fig. 6 デトネーション侵入時のインジェクタ内圧力分布の比較

Table 1 輸送係数算出手法を変えた場合の計算コストの比較

	w/ diff	w/o diff	w/ diff μ with $T_{thres} = 10K$	w/o diff μ with $T_{thres} = 10K$
Subroutine itrns [s]	13114	1993	1739	1382
Total [s]	29038	17637	18364	17059

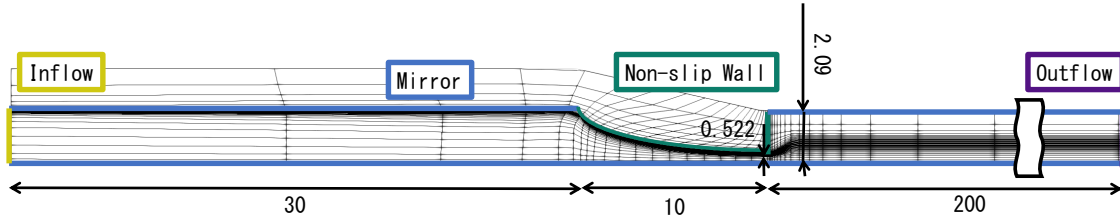


Fig. 7 新規インジェクタ形状

から、Single-element, 温度しきい値の両手法は共に計算精度を損ねず、高速に計算できる手法であると考えられる。

新規インジェクタ形状の探索

申請時の研究計画では下半期に三次元解析によるインジェクタ形状の探索を行う予定であったが、時間の都合により、二次元解析で2ケースの比較を行うに留まった。比較したのは従来の直管インジェクタを模したインジェクタ、インジェクタの入口(プレナム側)角部を丸めた丸めインジェクタである。直管インジェクタの形状は Fig. 4 に示したものと同様であり、新たに設計した丸めインジェクタは Fig. 7 に示す形状である。いずれも境界層が解像できるよう、最小格子幅が1 μm となっている。それぞれの瞬時の全圧分布を Fig. 8, 9 に示す。直管インジェクタでは、まず入口角部付近の縮流によって全圧が減少し、その後急速に乱流境界層が発達することで、全体的に低い全圧となった。一方、丸めインジェクタでは、局所的な全圧の低下が見られなかった。これは縮流が抑制されたことにより、角部より下流の乱流増加、境界層発達も低減され、損失が少なかったためと考えられる。時空間平均した圧力分布は Fig. 10 のようになった。直管インジェクタのプレナム内の平均圧力は0.93 MPa, 燃焼室底面圧力は0.51 MPaであったため、インジェクタ内部における圧力損失は0.42 MPaである。一方で、丸め

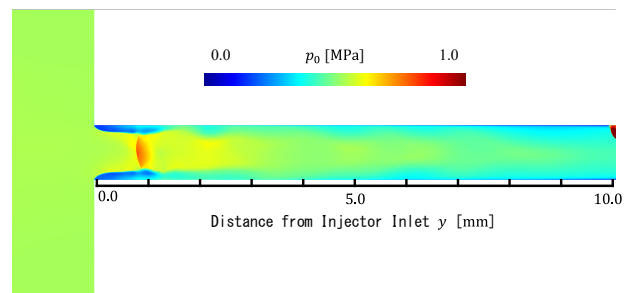


Fig. 8 直管インジェクタ内部の瞬時全圧分布

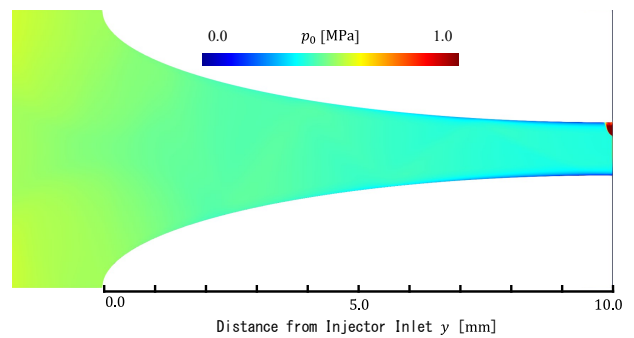


Fig. 9 丸めインジェクタ内部の瞬時全圧分布

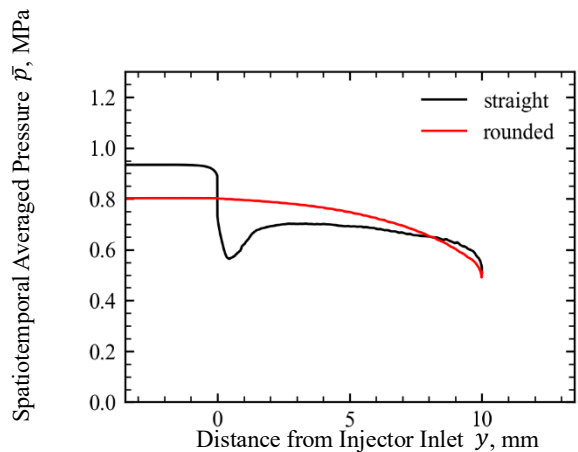


Fig. 10 時空間平均した圧力分布

インジェクタではプレナム圧0.80 MPa, 燃焼室底面圧0.51 MPaであり, 圧力損失0.29 MPaとなった。よって, 丸めインジェクタは直管インジェクタの 69%の圧力損失で, 同じ流量の推進剤を注入可能である。つまり, 31%の圧力損失低減に成功した。

6. 今年度の進捗状況と今後の展望

本研究では, スーパーコンピュータシステムに向けたコードの最適化として, 以下の進捗があった。

- full-scale, single-element の両手法で同等の条件を用い, インジェクタ内圧力分布とプレナム圧の算出を行った。両手法で圧力分布は良い一致を示し, プレナム圧も誤差 0.6%の精度で一致した。
- 両手法で圧力分布は良い一致を示し, プレナム圧も誤差 0.6%の精度で一致した。
- single-element は full-scale よりも 32 倍高速であることが確認できた。
- 拡散項の計算を省略し, 拡散係数以外の輸送係数についても 10 K の変化が見られるまで更新を行わない手法を取り入れた。この手法は圧力分布には影響を与えず, 41%の計算時間短縮が可能であった。

また, インジェクタの形状設計に関して, 以下の進捗があった。

- 直管インジェクタを用いて, 推進剤を噴射するだけの非反応定常流解析を行った。インジェクタ入口の縮流およびインジェクタ内部の境界層で全圧の低下が見られた。
- 縮流を低減することが圧力損失低減に繋がると推測し, 直管インジェクタの入口角部を丸めた”丸めインジェクタ”を提案した。非反応定常流において丸めインジェクタ内部では縮流が見られず, 境界層の発達による全圧低下も僅かであった。
- 丸めインジェクタでは全圧の低下が直管インジェクタと比較すると少なかった。圧力

損失は直管インジェクタの 69%となり, 31%の損失低減に成功した。

- インジェクタの入口の角を丸めることは, 縮流およびそれに伴う乱流境界層の発達を抑制し, 圧力損失低減に寄与することが判明した。

衝撃波の減衰や乱流には三次元的な影響も考えられる。本研究からは縮流の抑制が圧力損失低減に有効であるという知見が得られたが, この知見を活かして三次元形状を探索する必要がある。当初の計画通り, 三次元解析を進めたい。

7. 研究業績一覧 (発表予定も含む。投稿中・投稿予定は含まない)

(1) 学術論文 (査読あり)

Kasahara, H., and Matsuo, A., ‘Three-Dimensional CFD-RBD Analysis of Hypersonic Projectile’, Journal of Spacecraft and Rockets’ accepted : February 2021

(2) 国際会議プロシーディングス (査読あり)

なし

(3) 国際会議発表 (査読なし)

Suzuki, T., Matsuo, A., Daimon, Y., Kawashima, H., Kawasaki, A., Matsuoka, K., and Kasahara, J., ‘Prediction of Pressure Loss in Injector for Rotating Detonation Engines Using Single-element Simulations’, The AIAA Propulsion and Energy Forum and Exposition, 24-26 August, 2020

(4) 国内会議発表 (査読なし)

鈴木寛人, 松尾亜紀子, 大門優, 川島秀人, 川崎央, 松岡健, 笠原次郎, ‘単一噴射器シミュレーションによる回転デトネーションエンジンの噴射圧力損

失予測手法の提案’，流体力学講演会
／航空宇宙数値シミュレーション技術
シンポジウム 2020 オンライン，2020 年
9 月

鈴木寛人，嶋英志，松尾亜紀子，大門優，
川島秀人，川崎央，松岡健，笠原次郎，
‘Single-element Simulation を用い
た回転 detonation エンジンの低圧
力損失インジェクタの探索’，2020 年
度衝撃波シンポジウム，2021 年 3 月

田中来武，松尾亜紀子，‘オゾン付加が
detonation のセルサイズに与える
影響に関する数値解析’，2020 年度衝
撃波シンポジウム，2021 年 3 月

(5) 公開したライブラリなど

なし

(6) その他(特許, プレスリリース, 著書等)

なし