

令和 5 年 6 月 16 日現在

機関番号：13901

研究種目：国際共同研究加速基金（国際共同研究強化(A））

研究期間：2019～2022

課題番号：18KK0404

研究課題名（和文）反射往復型デトネーションサイクル伝播維持機構の解明とその工学的長所の探求

研究課題名（英文）Search for the Propagation Mechanism of a Reflected Shuttling Detonation Cycle and its Engineering Merits

研究代表者

松岡 健（Matsuoka, Ken）

名古屋大学・工学研究科・准教授

研究者番号：40710067

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 11,900,000円

渡航期間： 12ヶ月

研究成果の概要（和文）：連続的なデトネーション伝播が可能な回転デトネーションエンジン（RDE）や反射往復デトネーションエンジンは、伝播速度の遅い亜音速燃焼を利用した既存推進エンジンと比較して、10～20%の理論熱効率向上、約1000倍の伝播速度による燃焼器小型化、DW自身での昇圧効果による圧縮機簡素化を実現する。しかしながら、非定常燃焼器特有の煩雑さによりデトネーションエンジンの潜在的優位性であるPressure Gain（PG）は実験的に確認されていない。本国際共同研究では、予混合RDE基礎実験設備を構築した。本装置を起点にPGを阻害する物理メカニズムを解明するための国際的な基礎研究フレームワーク形成につなげる。

研究成果の学術的意義や社会的意義

RDEの概念自体は1950年代に提案されていた。2010年頃から光学可視化・計測技術の高速化に伴い再び着目され始めた。Elsevierが提供する文献データSciValによると、RDEに関する論文数は2017年の77件から2021年の177件と約2.5倍増加し、今後も増加する傾向である。このようにRDE研究が活発化している一方で、RDEのPG性能に関する統一的な研究体系は存在しない。故に、本国際共同研究は「PGを阻害する物理メカニズムを明らかにするための基礎研究フレームワークを早期に確立し、RDE実用化のためのブレイクスルー技術の創出につなげる」意義がある。

研究成果の概要（英文）：Detonation waves propagate continuously in the rotating detonation engine (RDE) and reflective shuttling detonation engine. These detonation-based engines can realize high thrust performance with a simple system. However, the pressure gain (PG), the evidence of the engine's advantage, has been not confirmed yet. The purpose of this study is to fabricate a premixed RDE system for understanding the loss mechanism deeply. This system will be the starting point for the formation of an international basic research framework to investigate the pressure gain of the detonation engine.

研究分野：航空宇宙推進エンジン

キーワード：デトネーションエンジン 予混合 デトネーションエンジン 回転デトネーションエンジン 反射往復デトネーションエンジン

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

1903年のライト兄弟による動力飛行機以来、航空宇宙用推進エンジンには長らく亜音速燃焼が用いられてきた。故に、新しい燃焼形態への転換は、航空宇宙輸送系の研究体系が根底から変わる可能性を秘めている。デトネーション波は、燃料・酸化剤が混合された爆発性混合気中を秒速2000メートルの超音速で伝播する、最も激しい燃焼波である。連続的なデトネーション伝播が可能な回転デトネーションエンジン(RDE)は、伝播速度の遅い亜音速燃焼を利用した既存推進エンジンと比較して、10~20%の理論熱効率向上、約1000倍の伝播速度による燃焼器小型化、DW自身での昇圧効果による圧縮機簡素化を実現する、革新的な推進エンジンである。本研究グループは2021年7月27日にJAXA観測ロケットS-520-31号機を用いて世界で初めてRDEの宇宙環境下での作動に成功させ[1]、世界をリードしている。米国では、NASA、AFRL、Aerojet Rocketdyne、エネルギー省(2017年に11大学と企業に10億円の資本供給)を中心に精力的な研究開発が進行中である。2022年にはthe Defense Advanced Research Projects Agency(DARPA)がRDE飛行実証計画を発表した。また、2023年1月には、NASAが深宇宙探査用実スケールRDEの10分間の連続作動に成功している。以上の通り、RDE研究は激しい競争下にあるものの、非定常燃焼器特有の煩雑さによりRDEの潜在的優位性であるPressure Gain(PG)は実験的に確認されていない。

図1左図にRDE環状燃焼器内の理想的な3次元瞬時流れ場を、図1右図に環状燃焼器の周方向展開図を示す。まず、マニホールドに充填された爆発性予混合気(青色)がインジェクタを通して環状燃焼器内に供給される。燃焼器底部でDW(赤色)が回転伝播しながら混合気を燃焼させ、高圧燃焼ガス(オレンジ色)を生成し、推力を生成する。図1右上図はインジェクタを理想化した場合の数値計算結果であり、性能指標であるPressure Gain(PG)が170%になることが示されている[2]。ここで、PGとはRDE出口燃焼ガス全圧をマニホールド気体全圧で割った値であり、 $PG > 100\%$ によって初めてRDEの潜在的優位性が立証される。

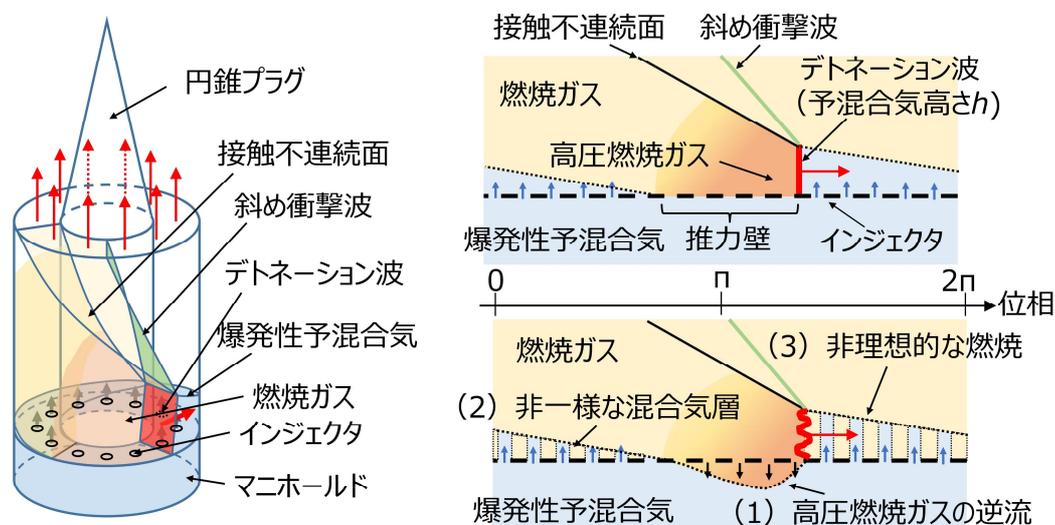


図1 回転デトネーションエンジン内部流れの模式図(左)3次元瞬時流れ場、(右)環状流路展開図(上は理想的な場合、下は実際の流れ場)

これまで、数多くの実験研究がなされている現在においても、PGは90%程度に留まっているのが現状である。これは、図1右下図の(1)~(3)で示される、実際のRDEにおける非理想的な現象が原因であると考えられる。この非理想現象は、様々な実験パラメータに依存する。特に、実験では燃料および酸化剤を別々のマニホールドから燃焼器に供給し混合するが、この混合過程はインジェクタ特性に強く依存し、予混合気を仮定する数値計算との大きな差異である。そのため、これまで得られた多くの実験データは各RDE固有の特性評価になってしまい、PGを阻害する物理メカニズム解明に向けた大きな壁となっている。

2. 研究の目的

本研究の最終目的はこの優位性を実験的に立証し、実用化研究へつなげることである。本国際共同研究では、予混合RDE基礎実験設備を構築し、PGを阻害する物理メカニズムを解明するための国際的な基礎研究フレームワーク形成につなげることを目的とする。

3. 研究の方法

本国際共同研究では、「PGを阻害する物理メカニズムを明らかにするための基礎研究フレームワークを早期に確立し、RDE 実用化のためのブレイクスルー技術の創出につなげる」ことが重要である。そのためには、国際的・体系的な研究コンソーシアムを形成可能な国際的・学術的キーパーソンとの連携が必要不可欠である。共同研究者は California Institute of Technology (Caltech) の Prof. Joseph F. Shepherd であり、デトネーション波の基礎研究分野で最も著名な研究者の一人である。本研究では、1年間の研究期間内で Shepherd 教授が運営する Explosion Dynamics Laboratory 内に予混合 RDE システムを構築する。また、RDE 燃焼試験に必要な予備試験(気密、予混合生成、デトネーション点火)を完了する。

4. 研究成果

図2に、Caltech Explosion Dynamics Laboratory 内に設置した予混合回転デトネーションエンジンシステムの写真を示す。図2左の青色は内容積10Lの高圧予混合気マニホールドであり、図1のマニホールドに相当する。図2右は、マニホールド下流に設置された環状断面を有するRDEである。RDE 燃焼器は外径60mm、内径55mm、燃焼器流路幅2.5mmである。燃焼器側面には、RDE 始動用としてプリデトネータが設置されている。RDE 下流側はダンプタンクと接続されており、両者の間は隔膜で隔てられている。またRDEとマニホールドには混合チャンバーとループ配管で接続されており、混合チャンバー内には混合用ファンが設置されている。RDE 作動手順を以下の通り確立した[3]。

- (1) マニホールド、RDE およびダンプタンクを 100 mTorr 以下まで真空引き
- (2) 遠隔バルブ操作にて燃料、酸化剤、希釈剤の順にマニホールドおよび RDE 内に充填
- (3) 遠隔スイッチにて混合チャンバー内のファンを作動させ、予混合気生成
- (4) RDE とダンプタンク間の隔膜を破膜
- (5) 破膜によりマニホールド内圧力減衰をトリガーとしてプリデトネータ点火
- (6) RDE 作動

本研究期間内で過程(5)までの作動を完了した。過程(6)のためには、初期点火時にデトネーション波がマニホールドまでさかのぼるフラッシュバックを抑制する必要がある。今後、フラッシュバックを抑制し、かつ RDE 作動可能な質量流束を実現可能な多孔質材を調査し、RDE 作動を実現する。また、予混合 RDE 作動中の燃焼器内部を可視化し、内部流動および RDE 作動条件を明らかにする。

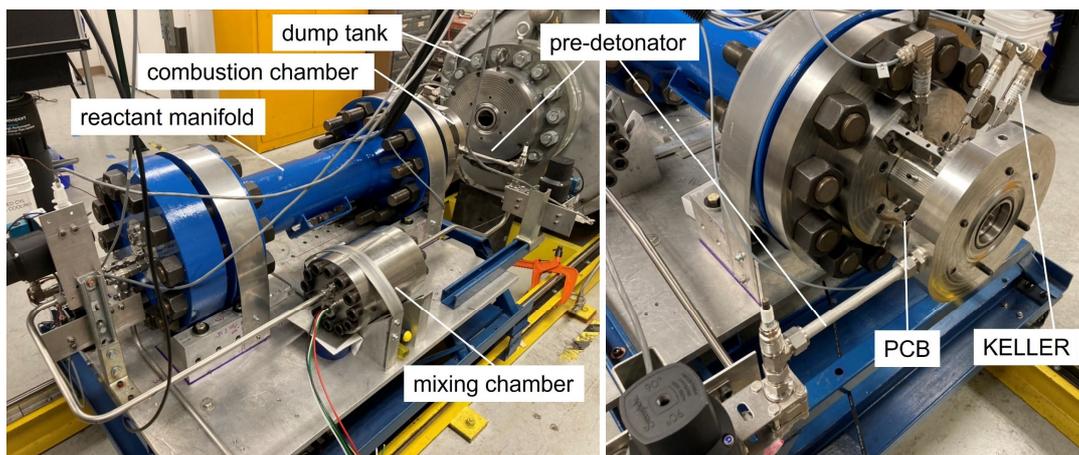


図2 Caltech Explosion Dynamics Laboratory 内に設置された予混合回転デトネーションエンジンシステム[3]

引用文献

- [1] K. Goto, K. Matsuoka, K. Matsuyama, K. Kawasaki, H. Watanabe, N. Itouyama, K. Ishihara, V. Buyakofu, T. Noda, J. Kasahara, A. Matsuo, I. Funaki, D. Nakata, M. Uchiumi, H. Habu, S. Takeuchi, S. Arakawa, J. Masuda, K. Maehara, T. Nakao, K. Yamada, Space Flight Demonstration of Rotating Detonation Engine Using Sounding Rocket S-520-31, Journal of Spacecraft and Rockets, Vol. 60, No.1 (2023), pp. 273-285.
- [2] E. Bach C. O. Paschereit, P. Stathopoulos, M. D. Bohon, An empirical model for stagnation pressure gain in rotating detonation combustor, Proceedings of Combust. Inst., Vol. 38, Issue 3 (2021), pp. 3807-3814.
- [3] K. Matsuoka, D. T. Schoeffler, J. E. Shepherd, Design Considerations for a Premixed Rotating Detonation Combustor, 29th ICDERS, July 23-28, 2023, SNU Siheung, KOREA

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計5件（うち査読付論文 5件／うち国際共著 0件／うちオープンアクセス 0件）

| | |
|--|-------------------------------|
| 1. 著者名 Taguchi Tomoya, Yamaguchi Masato, Matsuoka Ken, Kawasaki Akira, Watanabe Hiroaki, Itouyama Noboru, Kasahara Jiro, Matsuo Akiko | 4. 巻 236 |
| 2. 論文標題 Investigation of reflective shuttling detonation cycle by schlieren and chemiluminescence photography | 5. 発行年 2022年 |
| 3. 雑誌名 Combustion and Flame | 6. 最初と最後の頁 111826 ~ 111826 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.combustflame.2021.111826 | 査読の有無 有 |
| オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難 | 国際共著 - |

| | |
|---|---------------------------|
| 1. 著者名 Yamaguchi Masato, Taguchi Tomoya, Matsuoka Ken, Kawasaki Akira, Kasahara Jiro, Watanabe Hiroaki, Matsuo Akiko | 4. 巻 38 |
| 2. 論文標題 Investigation of combustion modes and pressure of reflective shuttling detonation combustor | 5. 発行年 2021年 |
| 3. 雑誌名 Proceedings of the Combustion Institute | 6. 最初と最後の頁 3615 ~ 3622 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.proci.2020.07.064 | 査読の有無 有 |
| オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難 | 国際共著 - |

| | |
|---|-----------------------|
| 1. 著者名 Matsuoka Ken, Tanaka Masaya, Noda Tomoyuki, Kawasaki Akira, Kasahara Jiro | 4. 巻 225 |
| 2. 論文標題 Experimental investigation on a rotating detonation cycle with burned gas backflow | 5. 発行年 2021年 |
| 3. 雑誌名 Combustion and Flame | 6. 最初と最後の頁 13 ~ 19 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.combustflame.2020.10.048 | 査読の有無 有 |
| オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難 | 国際共著 - |

| | |
|---|---------------------------|
| 1. 著者名 Yamaguchi Masato, Matsuoka Ken, Kawasaki Akira, Kasahara Jiro, Watanabe Hiroaki, Matsuo Akiko | 4. 巻 37 |
| 2. 論文標題 Supersonic combustion induced by reflective shuttling shock wave in fan-shaped two-dimensional combustor | 5. 発行年 2019年 |
| 3. 雑誌名 Proceedings of the Combustion Institute | 6. 最初と最後の頁 3741 ~ 3747 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.proci.2018.06.210 | 査読の有無 有 |
| オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難 | 国際共著 - |

| | |
|---|-------------------------|
| 1. 著者名 Noda Tomoyuki, Matsuoka Ken, Goto Keisuke, Kawasaki Akira, Watanabe Hiroaki, Itouyama Noboru, Kasahara Jiro, Matsuo Akiko | 4. 巻 207 |
| 2. 論文標題 Impact of mixture mass flux on hydrodynamic blockage ratio and Mach number of rotating detonation combustor | 5. 発行年 2023年 |
| 3. 雑誌名 Acta Astronautica | 6. 最初と最後の頁 219 ~ 226 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.actaastro.2023.03.013 | 査読の有無 有 |
| オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難 | 国際共著 - |

〔学会発表〕 計11件 (うち招待講演 1件 / うち国際学会 5件)

| |
|--|
| 1. 発表者名 松岡 健, 田口 知哉, 渡部 広吾輝, 川崎 央, 伊東山 登, 笠原 次郎, 松尾 亜紀子 |
| 2. 発表標題 反射往復 detonation 現象に関する可視化実験 |
| 3. 学会等名 第53回流体力学講演会 / 第39回航空宇宙数値シミュレーション技術シンポジウム |
| 4. 発表年 2021年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 M. Yamaguchi, T. Taguchi, K. Matsuoka, A. Kawasaki, J. Kasahara, H. Watanabe, A. Matsuo |
| 2. 発表標題 Investigation of combustion modes and pressure of reflective shuttling detonation combustor |
| 3. 学会等名 38th International Symposium on Combustion (国際学会) |
| 4. 発表年 2021年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 田口 知哉, 松岡 健, 川崎 央, 渡部 広吾輝, 伊東山 登, 笠原 次郎 |
| 2. 発表標題 矩形反射往復型 detonation エンジンの推進性能評価 |
| 3. 学会等名 第58回燃焼シンポジウム (国際学会) |
| 4. 発表年 2020年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 M. Yamaguchi, K. Matsuoka, A. Kawasaki, J. Kasahara, H. Watanabe, A. Matsuo |
| 2. 発表標題 Mode Classification of Combustion and Propulsive Performance of Reflective Shuttling Detonation Combustor |
| 3. 学会等名 AIAA SciTech 2020 Forum (国際学会) |
| 4. 発表年 2020年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 田口 知哉, 山口 聖人, 松岡 健, 川崎 央, 笠原 次郎, 渡部 広吾輝, 松尾 亜紀子 |
| 2. 発表標題 反射往復型デトネーションエンジンの推進性能評価 |
| 3. 学会等名 2019年度衝撃波シンポジウム |
| 4. 発表年 2019年 |

| |
|---------------------------------------|
| 1. 発表者名 松岡 健 |
| 2. 発表標題 反射往復デトネーションロケットエンジンの推進性能評価 |
| 3. 学会等名 令和元年度航空宇宙空力シンポジウム |
| 4. 発表年 2019年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 山口 聖人, 松岡 健, 川崎 央, 笠原 次郎, 渡部 広吾輝, 松尾 亜紀子 |
| 2. 発表標題 平行 2 平面矩形デトネーション燃焼器内における燃焼形態とその推進性能 |
| 3. 学会等名 第57回燃焼シンポジウム |
| 4. 発表年 2019年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 松岡 健, 山口 聖人, 田中 聖也, 川崎 央, 笠原 次郎, 渡部 広吾輝, 松尾 亜紀子 |
| 2. 発表標題 反射往復型爆轟ロケットエンジンの燃焼形態および推進性能に関する研究 |
| 3. 学会等名 第51回流体力学講演会 / 第37回航空宇宙数値シミュレーション技術シンポジウム |
| 4. 発表年 2019年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 K. Matsuoka |
| 2. 発表標題 Reflective Shuttling Detonation Cycle in a Two-Dimensional Combustor |
| 3. 学会等名 2019 International Workshop on Detonation for Propulsion (招待講演) (国際学会) |
| 4. 発表年 2019年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 野田 朋之, 松岡 健, 川崎 央, 渡部 広吾輝, 伊東山 登, 笠原 次郎 |
| 2. 発表標題 大インレット断面積を有する回転デトネーションエンジンの作動特性 |
| 3. 学会等名 第58回燃焼シンポジウム |
| 4. 発表年 2020年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 K. Matsuoka, D. T. Schoeffler, J. E. Shepherd |
| 2. 発表標題 Design Considerations for a Premixed Rotating Detonation Combustor |
| 3. 学会等名 29th International Colloquium on the Dynamics of Explosions and Reactive Systems (国際学会) |
| 4. 発表年 2023年 |

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

推進エネルギーシステム工学研究グループ
<http://www.prop.nuae.nagoya-u.ac.jp/>
研究代表者個人業績
<http://www.prop.nuae.nagoya-u.ac.jp/member03.html>

6. 研究組織

| | 氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号) | 所属研究機関・部局・職 (機関番号) | 備考 |
|-------------------|--|---|----|
| 主たる渡航先の主たる海外共同研究者 | ジョセフ シェパード (Joseph F. Shepherd) | カルフォルニア工科大学・Department of Aerospace・Professor | |

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

| 共同研究相手国 | 相手方研究機関 | | | |
|---------|------------------------------------|--|--|--|
| 米国 | California Institute of Technology | | | |