

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 6 年 9 月 19 日現在

機関番号：13901

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2020～2023

課題番号：20H02349

研究課題名（和文）反射往復爆轟燃焼器を用いた既燃気体全圧の高精度推定

研究課題名（英文）Estimation of Burned-Gas Total Pressure using Reflective Shuttling Detonation Combustor

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） 10,400,000円

研究成果の概要（和文）：本研究の目的は、申請者独自の手法「反射往復デトネーションサイクル」を用いて、燃焼器内部を光学可視化し、デトネーション波の伝播メカニズムを解明し、圧力ゲイン燃焼を阻害する要因を明らかにすることである。

反射壁間距離 $W=25$ 、 $45$ mmの2つの燃焼器を作成し、自発光可視化、およびシュリーレン光学可視化を実施した。その結果、無次元デトネーション波伝播距離 $(W/n^*h)$ がおおよそ3程度を維持することが明らかになった (Taguchi et al., Combustion and Flame, 2022)。ここで、 $W$ は反射壁間距離、 $n$ はデトネーション波の枚数、 $h$ は予混合気の充填高さである。

研究成果の学術的意義や社会的意義

デトネーション波の伝播構造を解明することは、従来の内燃機関より高い熱効率を単純なシステムで達成するエンジンの実現に直結するため、工学的にも社会的にも重要である。また、非定常な高速乱流燃焼場を理解することは、学術的な意義も有している。本研究は、これまで困難だったデトネーションエンジン燃焼器内を可視化することのできる手法を提案した。デトネーションエンジン伝播条件を支配する無次元量を提案し、直接可視化実験からその無次元量の妥当性を示した点で、デトネーション波伝播構造の理解およびデトネーション波の工学的応用の観点で重要な成果である。

研究成果の概要（英文）：Detonation engines can achieve higher thermal efficiency than a conventional internal combustion engine with a smaller system. However, the propagation mechanism of detonation wave is still unknown because of the high speed and unsteady phenomenon. Present study utilized the original method "reflected shuttling detonation cycle" (Yamaguchi et al., Proceedings of the Combustion Institute (PCI), 2021), to visualize the internal flow of the combustor.

Two combustors having reflective wall distance  $W = 25, 45$  mm were used in the combustion test. The chemiluminescence and schlieren visualization were performed using ethylene as fuel and oxygen as oxidizer. The results show that the dimensionless detonation propagation distance  $(W/n^*h)$  maintains approximately 3 (Taguchi et al., Combustion and Flame, 2022). Here,  $n$  is the number of detonation waves, and  $h$  is the filling height of the mixture.

研究分野：航空宇宙推進

キーワード：デトネーション波 デトネーションエンジン 推進エンジン

## 様式 C - 19、F - 19 - 1 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

デトネーション波(爆轟波)は、燃料と酸化剤の混合気中を約 2000m/s(混合気音速の 5~7 倍)で伝播する最も激しい超音速燃焼波であり、亜音速燃焼である既存ロケット燃焼器を小型高出力化できる。また、デトネーション燃焼サイクルは既存燃焼サイクルと比べ高い熱効率を獲得できる(Endo et al., Sci. Technol. Energetic Mater., 2004)。これは、デトネーション波先頭の強い垂

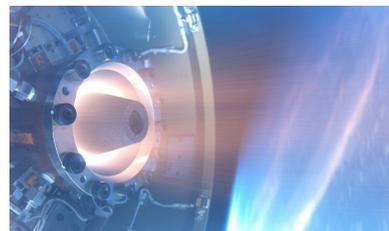


図1 宇宙空間で作動する回転デトネーションエンジン

直衝撃波で混合気が断熱圧縮された後に燃料が燃焼する(エントロピー増加量が小さい)ためである。故に、デトネーション燃焼器は全く新しい非定常燃焼器として航空宇宙機、発電機、船舶における定常燃焼器を全て置換し得るポテンシャルを有し、現在では米露欧中日を中心に研究開発が激化している。図1は、本研究グループが世界に先駆けて実証した「実宇宙空間でのデトネーションエンジン作動」である。

この工学的背景から、環状流路内でデトネーション波の伝播を継続できる回転デトネーション燃焼器(RDC)が着目されている。図2はRDCの展開図であり、下面から混合気が連続的に燃焼器内へ供給され、単一のデトネーション波が混合気中を左から右に回転伝播し、上面から既燃気体ジェットが流出している。しかし、実際のRDCでは燃焼器形状や燃料と酸化剤の供給条件によってデトネーション波の回転方向や波数が増える無数のデトネーション波伝播モードが存在し、現在までにその伝播機構や制御手法は確立されていない。これは、RDC内部が複雑な超音速乱流燃焼場であり、曲率を有する燃焼器での可視化計測や数値計算による再現が困難なためである。この非定常燃焼器特有の問題により、デトネーション燃焼器の潜在的優位性(燃焼器の小型高出力化、既存燃焼サイクル以上の熱効率)を実験的に立証する手段が未だに確立されていない。

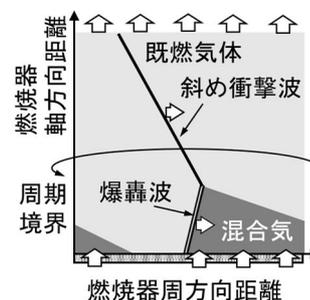


図2 回転デトネーション燃焼器の展開図(単一のデトネーション波が混合気中を右に回転伝播している)

### 2. 研究の目的

デトネーションエンジンの潜在的優位性の立証には、まずデトネーション波の伝播メカニズムを解明し、その非理想的な現象を定量的に評価することが重要である。しかしながら、回転デトネーション燃焼器は筒形状をしているため、デトネーション波伝播構造を2次元的に可視化することが困難である。また、燃焼器自体が曲率を有するため、平行光を利用するシュリーレン法等の可視化手法が適用できない問題がある。そのため、本研究では以下の二つの目的を設定した。

一つ目は、デトネーション波を2次元的に理解可能かつシュリーレン光学可視化が適用可能なデトネーション燃焼器を用いて、デトネーション波の伝播構造を直接可視化することである。

二つ目は、得られた可視化結果から、デトネーション波の伝播形態(デトネーション波の枚数や速度)を支配する無次元量を整理することである。

### 3. 研究の方法

図3に、一つ目の目的を達成するために独自に提案した反射往復デトネーション燃焼器(RSDC)のサイクル図を示す。RSDCはコの字型の矩形燃焼器であり、単一のデトネーション波が燃焼器の左右壁面で反射しながら往復伝播している(1→2→3→4→1を繰り返す)。本研究の最大の学術的独自性は、曲率を有するRDC(環状燃焼器)では実現できない、シュリーレン光学可視化やPIV計測などの光学可視化計測が2次元燃焼器内部全面で可能な点である。加えて、燃焼器壁の片面を圧力計測面とすることで、燃焼器内圧力測定と自発光・ラジカル発光観測が同時に実現できる点も学術的強みである。

二つ目の目的に対して、混合気充填高さをシュリーレン光学可視化を用いて測定する。混合気充填高さは、デトネーション波の枚数や速度と関係していることは報告されている。しかしながら、先行研究における混合気充填高さの評価は、自発光可視化観測のみであり、混合気充填過程を直接測定した例は存在しない。本研究では、密度勾配を直接可視化できるシュリーレン法を用いて、混合気充填過程を直接可視化し、混合気充填高さをより正確に評価する。

### 4. 研究成果

図4に実験で使用した反射往復デトネーション燃焼器の模式図を示す<sup>1</sup>。図4(a)は正面図、(b)はA-A断面である。燃焼器は薄型矩形であり、反射壁間距離は45mm、奥行き5mm、長さ53mmである。図4(b)で、燃焼器側面に透明な覗き窓を設置することで、燃焼器内部の自発光を可視化した。その反対の壁面を金属とすることで、圧力測定ポートを配置した。また、両側壁を透明な材質とすることで、シュリーレン光学可視化に必要な平行光を通すことが可能である。燃料としてガスエチレン、酸化剤としてガス酸素を用いた。可視化には、高速度カメラ(Vision Research社Phantom V2011)を用いた。

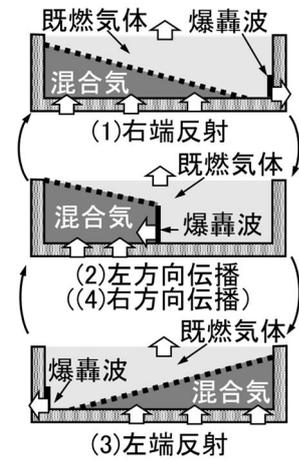


図3 反射往復デトネーションサイクルの模式図(単一のデトネーション波が混合気中を左右に往復伝播している)

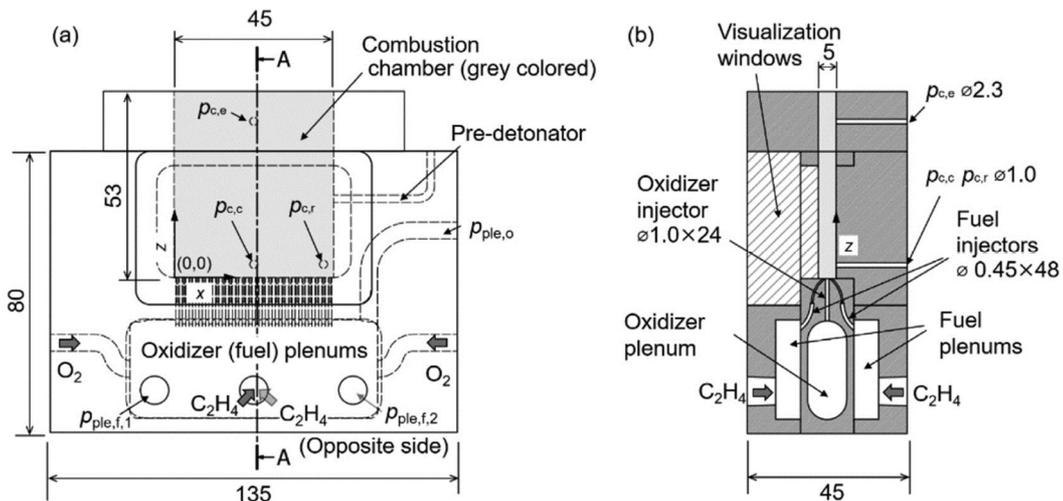
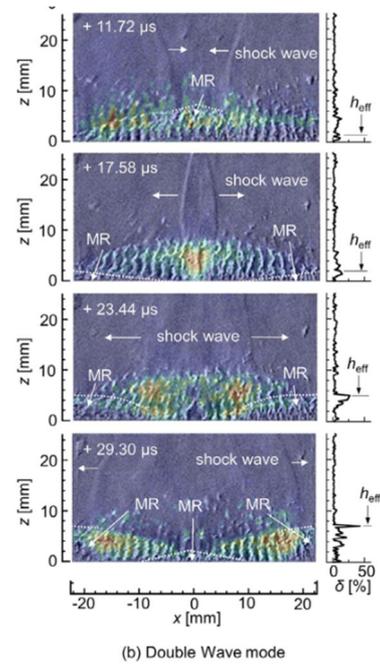


図4 燃焼実験で使用した反射往復爆轟燃焼器(反射壁間距離45mm)<sup>1</sup>

### (1) デトネーション波伝播構造の可視化

図5に、化学自発光画像とシュリーレン画像を重ね合わせた画像を示す。図中のMRは混合気層を示している。また、シュリーレン画像から、デトネーション波(図中の shock wave)が2枚伝播していることが確認できる。2枚のデトネーション波が燃焼器中央で衝突し、その背後で激しい化学自発光(燃焼)が確認できる(図5の上から2番目)。また、混合気ジェットとデトネーション波が干渉することで混合気がデフラグレーション燃焼していることが確認できる。本実験結果から、シュリーレン法を用いて密度勾配として初めて混合気充填過程を可視化できることが示され、自発光可視化画像との重ね合わせによって燃焼場全体を捉えることに成功した。



(b) Double Wave mode  
図5 自発光画像とシュリーレン画像を重ね合わせ<sup>2</sup>

### (2) デトネーション波伝播構造の支配パラメータ

図5の右側に示す $h_{\text{eff}}$ は、燃焼器右壁面における混合気充填高さを示している。図6に、計測された $h_{\text{eff}}$ を用いて計算された無次元デトネーション伝播距離 $\Pi_D$ と混合気質量収束の関係を示す。 $\Pi_D$ は以下の式で計算された。

$$\Pi_D = \frac{W/n}{h_{\text{eff}}}$$

ここで、 $W$ は反射壁間距離、 $n$ はデトネーション波の枚数である。 $W/n$ はデトネーション波一枚が他のデトネーション波と衝突するまでの距離に相当するため、 $\Pi_D$ はこのデトネーション波伝播距離を $h_{\text{eff}}$ で除した値である。故に、 $\Pi_D$ は充填された混合気の三角形形状を表している。図6の中実シンボルは反射壁間距離 $W = 25 \text{ mm}$ での結果である。また、シンボルの形状はデトネーション波の枚数を示しており、 $\circ$ は一枚、 $\triangle$ は二枚で対称伝播(図5)、 $\diamond$ は二枚で非対称伝播を示している。この結果から、 $\Pi_D$ は反射壁間距離やデトネーション波の枚数にかかわらず、おおよそ3になることが示された。

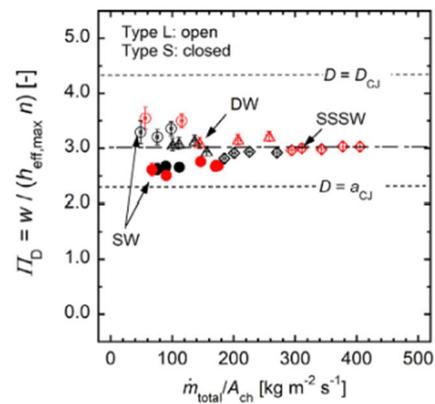


図6 予混合気質量流束と無次元デトネーション伝播距離との関係<sup>2</sup>

以上の通り、本研究によってデトネーション燃焼器全体を可視化可能な反射往復デトネーションサイクルの実用性が示された。また、デトネーション波伝播形態を支配するパラメータとして $\Pi_D$ が重要であることが明らかになった。今後、 $W$ や混合気種を変化させ、 $\Pi_D$ の普遍性やその物理的な解釈を示していく。

### <引用文献>

- (1) M. Yamaguchi, T. Taguchi, K. Matsuoka, A. Kawasaki, J. Kasahara, H. Watanabe, A. Matsuo, Investigation of Combustion Modes and Pressure of Reflective Shuttling Detonation Combustor, Proceedings of the Combustion Institute, Vol. 38, Issue 3, pp. 3615-3622, 2021.
- (2) T. Taguchi, K. Matsuoka, M. Yamaguchi, K. Kawasaki, H. Watanabe, N. Itouyama, J. Kasahara, A. Matsuo, Investigation of Reflective Shuttling Detonation Cycle by Schlieren and Chemiluminescence Photography, Combustion and Flame, Vol. 236, 2022.

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 4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 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 -
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 -

〔学会発表〕 計4件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 高橋 佑輔, 松岡 健, 渡部 広吾輝, 川崎 央, 伊東山 登, 笠原 次郎, 松尾 亜紀
2. 発表標題 反射往復型デトネーションエンジンの伝播モードと推進性能に関する実験的研究,
3. 学会等名 第60回燃焼シンポジウム
4. 発表年 2022年

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
2. 発表標題 反射往復デトネーション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) (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 矩形反射往復型デトネーション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
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

研究代表者の研究業績 <a href="http://www.prop.nuae.nagoya-u.ac.jp/member03.html">http://www.prop.nuae.nagoya-u.ac.jp/member03.html</a>
---

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
--	---------------------------	-----------------------	----

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
---------	---------