

令和 2 年 6 月 3 日現在

機関番号：12701

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2017～2019

課題番号：17H03478

研究課題名(和文) 回転 detonation の伝播モードダイナミクス解明と燃焼器設計指針の確立

研究課題名(英文) Establishment of combustor design principles and clarification of propagation mode dynamics of rotating detonations

研究代表者

石井 一洋 (Ishii, Kazuhiro)

横浜国立大学・大学院工学研究院・教授

研究者番号：20251754

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 12,600,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、回転 detonation エンジンの普遍的な燃焼器の設計指針を確立するために、運転条件や燃焼器サイズ等の設計パラメータが伝播モードならびに推力に及ぼす影響を系統的に調べた。その結果、回転 detonation 波の波頭数が増加する推進剤質量流束の臨界値があること、燃焼器サイズが大きくなると同一の推進剤質量流束でも波頭数および作動周波数が増加すること、燃焼室幅を狭くすると燃焼室内圧力が上昇し、推力が増加することがわかった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究の成果により、様々な混合気に対する回転 detonation 波(RDW)の伝播モードと推進剤質量流束の関係が明らかになり、異なるサイズの燃焼器における回転 detonation 波の挙動が予測可能となった。また、同一サイズの燃焼器を用いて同一の推進剤質量流量を供給しても、燃焼室幅によって推力が異なることが明らかになり、重要な回転 detonation エンジン設計指針が得られた。

研究成果の概要(英文)：Effects of operating conditions and design parameters such as combustor sizes on propagation modes of rotating detonation waves (RDWs) and thrust have been systematically studied in order to establish universal design principles of rotating detonation engines. The experimental results show that there exists a critical propellant mass flux rate at which the wave number of RDWs increases. The larger combustor exhibits more RDWs in the combustion chamber and increase in the operating frequency under the condition that the propellant mass flux rate is kept constant. In addition, decrease in the width of the annular combustion chamber gives higher thrust, which is due to higher pressure in the combustion chamber.

研究分野：航空宇宙工学

キーワード：回転 detonation 燃焼器サイズ 伝播モード 推力

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

デトネーションエンジンは、熱サイクルの加熱過程に通常の予混合燃焼(デフラグレーション)や噴霧燃焼ではなくデトネーションを利用することで、高い理論熱効率を得ることができる。また、デトネーションの特徴である高い伝播速度により高負荷燃焼が可能であり、従来型燃焼器のサイズ短縮が可能と考えられる。さらに、デトネーション波面を構成する衝撃波により未燃混合気が圧縮されるので、コンプレッサーによる予圧縮が無くとも仕事を取り出すことができる。

デトネーションエンジンの中でも、実験的な容易さから、燃焼器内で間欠的にデトネーションを起こすパルスデトネーションエンジン(Pulse Detonation Engine、以下PDE)が主として研究されてきた。PDEの実用化には、推力確保の点からサイクル周波数が少なくとも100 Hzは必要であるが、迅速な混合気供給とデトネーション起動時間の短縮化がPDE実用化を阻む大きな障害となっている。

以上のPDEに関連する諸問題はデトネーションが間欠的に起きることによって生ずるため、燃焼器内でデトネーションを定在させればよい。このような背景から考案されたのが回転デトネーションエンジン(Rotating Detonation Engine、以下RDE)であり、環状燃焼器の周方向にデトネーションを回転させることで燃焼器内にデトネーション波を定在させるものである。RDEはPDEのサイクル周波数を無限大とした場合と等価であり、排気ガスが定常流であるためにPDE多気筒エンジンで問題となる気筒間排気干渉もなく、エンジン全体をPDEよりも更に小型化することができる。

2. 研究の目的

これまでの研究から、RDEでは推進剤の供給量が回転デトネーション波(Rotating Detonation Wave、以下RDW)の伝播モードに影響を及ぼすことが知られているが、様々な燃焼室径や燃焼室幅で実験が行われており、RDW伝播を支配する普遍的パラメーターが不明であり、燃焼器設計指針が確立されていると言える段階ではない。また、RDE燃焼器内で複数の伝播モードが存在する要因ならびに伝播モードと推力性能との関係は明らかになっておらず、普遍的な燃焼器設計指針が確立されている状況ではない。

本研究では、推進剤質量流量や燃焼器サイズが伝播モードに及ぼす影響を系統的に調べ、伝播モードを支配する因子を特定するとともに、伝播モードと推力性能との関係について調べる。以上を複数の推進剤に対して行うことで、回転デトネーションエンジンの安定作動条件を明らかにし、普遍的な燃焼器の設計指針を確立することを目的とする。

3. 研究の方法

本研究では、図1に示すように燃焼器Aと燃焼器Bというサイズの異なる2種類の燃焼器を用いた。燃焼器Aは外形50 mm、内径42 mm、長さ140 mmであり、燃焼室幅は4 mmで一定である。燃焼器Bは外形115 mm、長さは135 mmであるが、内径を99 mm、103 mm、107 mmと3種類に変化させることで、燃焼室幅を4 mm、6 mm、8 mmと3段階に変化させた。

燃料と酸化剤の供給方法は燃焼器AとBで共通であり、燃料は環状燃焼室端に設けたオリフィスから供給し、酸化剤は円周スリットから半径方向内向きに供給している。このように、燃料と酸化剤を互いに垂直に衝突させることで、環状燃焼室内における迅速な混合と、噴出時の圧力損失低減を図っている。さらに、オリフィス孔の大きさと数、円周スリットの幅を変えることで、推進剤の等量比、質量流量、供給圧力を独立に変化させることが可能となっている。

試験部側壁には汎用圧力変換器が軸方向2カ所に設置し、RDW通過時の圧力履歴を記録した。

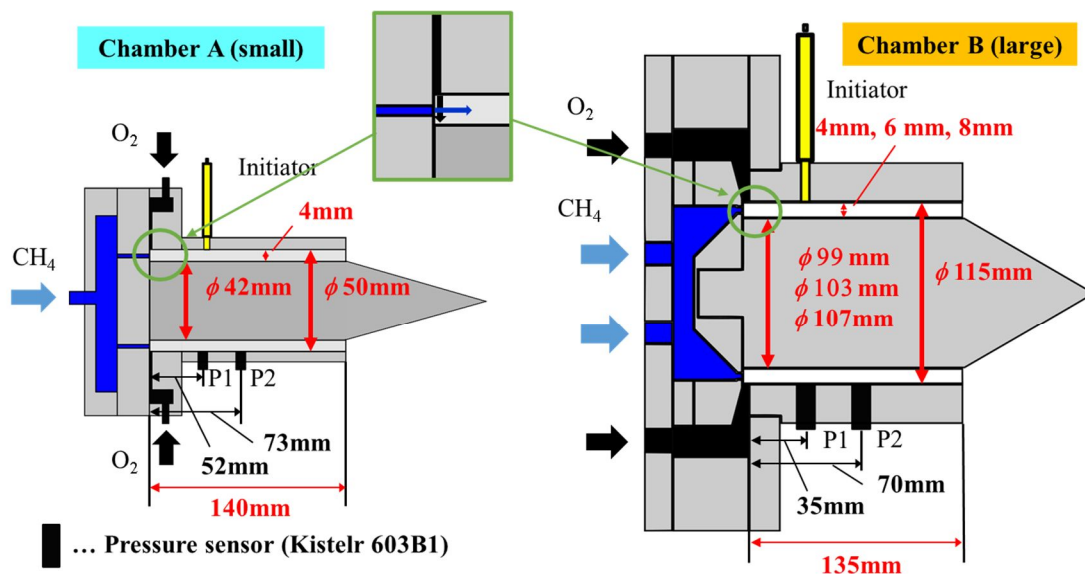


図1 RDE 燃焼器概略図

推進剤としては水素 - 酸素富化空気もしくはメタン - 酸素を使用し、主として当量比 1 で実験を行った。また、イニシエーター管から起動用のデトネーションを入射させることで、環状燃焼室内で RDW を起動させた。このとき、イニシエーター管内には水素-酸素量論混合気を充填し、イニシエーター管端に設けたスパークプラグにより所定のタイミングで点火し、DDT 過程の後にイニシエーター管出口ではデトネーション波を得ることができる。

RDE への気体供給では燃料および酸化剤は各ポンベからいったん大容量のタンクに貯蔵し、そこから燃料は 2 系統、酸化剤は 6 系統の配管を通して燃焼器に導いている。各配管には電磁弁およびニードルバルブが設置されており、気体供給タイミングと細かい流量制御を可能としている。このようにタンクに一時貯蔵しているのは、ポンベと通常の圧力調整器の組み合わせでは、圧力調整器が律速となって流量が不足するためである。他にポンベと燃焼器を直結する方法もあるが、安全性の観点から最大 15 MPa の圧力を直接取り扱うことを避けている。なお、各タンクの容量から試験中の供給圧力低下は免れず、試験時間は 200 ms 程度に制限し、このときの供給圧力の減少は最大で 2 割程度である。また、本燃焼器は無冷却であるため、長時間の試験は燃焼器ならびに圧力変換器にダメージを与えることになり、この程度の試験時間が無冷却の現状と合致していると考えている。

4. 研究成果

(1) 推進剤質量流量が RDW 伝播モードに及ぼす影響

水素 - 酸素富化空気混合気を試験気体とし、燃焼器 B を用いて、燃焼室内での RDW の伝播モードを以下の基準で stable、marginal、unstable に分類した。

- a) stable : RDW が燃焼室内をほぼ一定周波数で伝播し、かつ 0.1MPa 以上の圧力振幅が得られている。
- b) marginal : 圧力振幅は得られるが、周波数が安定しない、もしくは伝播速度が CJ 速度の 70% を下回る。
- c) unstable : 周波数、圧力振幅がともに不安定である。

図 2 に試験時間内の平均質量流量 \dot{m} と室素希釈率 β に対する RDW の伝播モードを示す。ここで図中の n は観測された RDW の波頭数を意味し、 β は酸素富化空気中における酸素に対する室素の体積比を表している。すなわち、推進剤組成は $2\text{H}_2 + \text{O}_2 + \beta \text{N}_2$ と表すことができ、 $\beta = 1$ は酸素、 $\beta = 3.73$ は空気に対応している。同図より、 $\beta = 3.73$ では $\dot{m} > 350 \text{ g/s}$ のとき波頭数 1 で、 $\beta = 2.65$ では $\dot{m} > 200 \text{ g/s}$ のとき波頭数 1~2 で、 $\beta = 1.36$ では $\dot{m} > 170 \text{ g/s}$ のとき波頭数 2~3 で安定伝播視した。なお、本実験では $\beta = 0$ では RDW を確認することはできなかった。これらの結果から、混合気組成にかかわらず \dot{m} の増加に伴い、RDW は安定伝播しやすくなること、同じ \dot{m} であっても、 β によって RDW が示す伝播モードは異なるがわかる。

質量流量 \dot{m} と伝播モードとの関係を調べるため、RDW が消費する推進剤噴出高さ h (以後、出給とネーション高さ) とセルサイズ λ の比を相対燃料噴出高さ h/λ として整理した結果を図 3 に示す。このとき、デトネーション高さ h は、質量保存の式と燃焼室内で大気圧まで断熱膨張すると仮定して次式より求めた。

$$h = \frac{\dot{m} \pi d}{\rho A W} \quad (2)$$

ここで、 ρ は推進剤の密度、 A は燃焼室断面積である。全体の傾向として、 h/λ の増加に伴い unstable モードから波頭数が増加して、marginal、stable というモード遷移をしていく。本研究では、おおよそ $h/\lambda > 3$ の条件が満たされると stable モードが出現することがわかった。

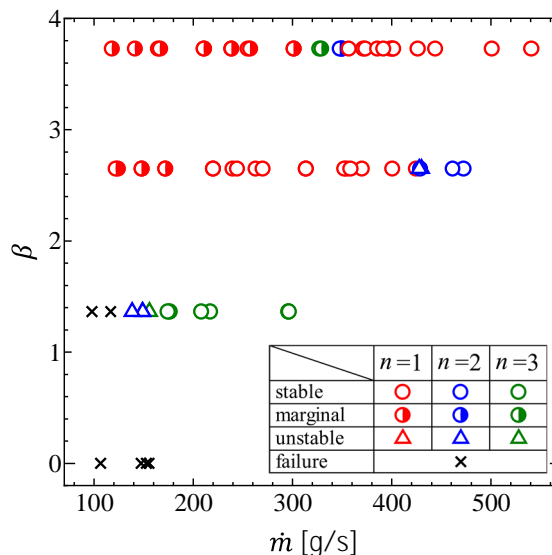


図 2 平均質量流量 \dot{m} と室素希釈率 β に対する RDW の伝播モード

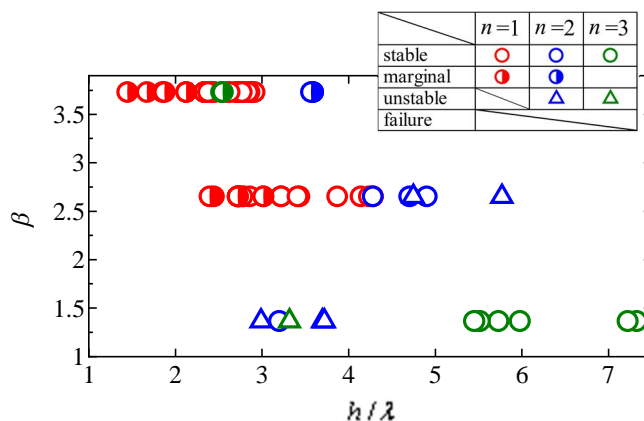


図 3 相対燃料噴出高さ h/λ と伝播モードの関係

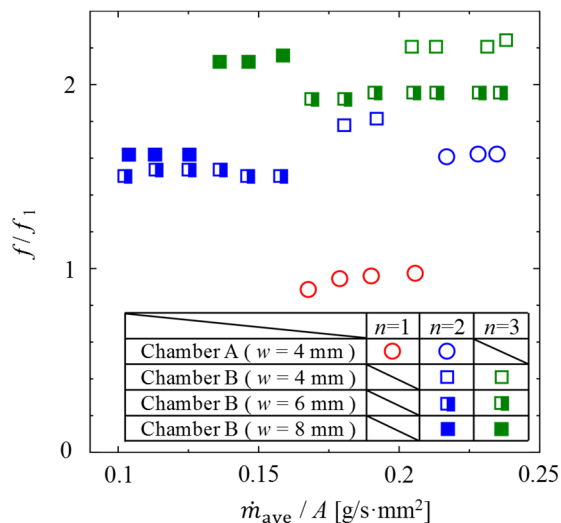


図4 推進剤質量流速と無次元作動周波数の関係

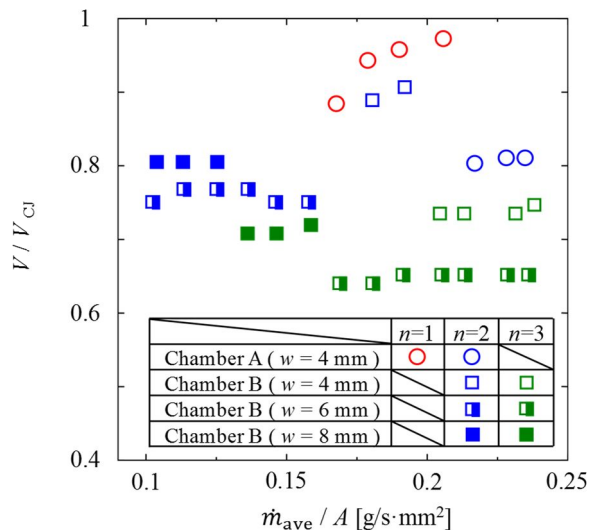


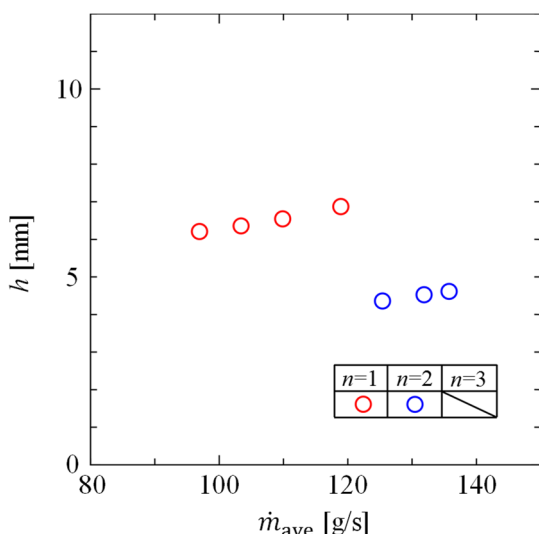
図5 推進剤質量流速と無次元伝播速度の関係

(2) 燃焼器サイズの影響

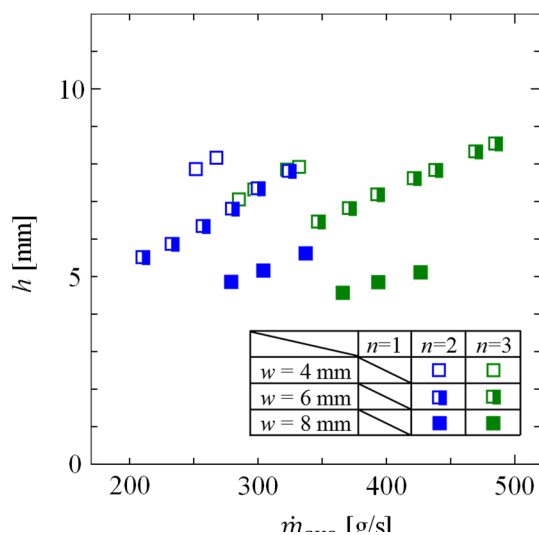
燃焼器サイズの影響を調べる実験では、メタン - 酸素量論混合気を推進剤として用いた。図4に燃焼室に供給する推進剤の質量流速 \dot{m}_{ave} / A (質量流量を燃焼室断面積で除したもの) と無次元作動周波数 f / f_1 の関係に示す。図の f_1 は、波頭数1のデトネーション波が燃焼室をCJ速度で伝播したときの周波数である。小型の燃焼器Aでは、同じ波頭数では \dot{m}_{ave} / A を増加させると f / f_1 がわずかに増加しており、これはBykovskiiらの実験結果と一致している。一方、大型の燃焼器Bでは、同じ波頭数ではほぼ一定の f / f_1 を示している。また、燃焼室幅 $w = 4$ mmで同じ \dot{m}_{ave} / A で比較すると、燃焼器Bでは燃焼器Aよりも波頭数 n および f / f_1 が増加している。さらに、燃焼器Aでは $\dot{m}_{ave} / A = 0.21$ g/(s·cm²)付近で波頭数1から2へ変化しているが、燃焼器Bでは燃焼室幅によって波頭数が変化する推進剤質量流速(以後、臨界質量流速)が異なっており、燃焼室幅の増加とともに臨界質量流速が減少している。

図5に推進剤質量流速に対するRDWの伝播速度の関係を示す。ここで伝播速度は推進剤のCJ速度で無次元化してある。燃焼器サイズにかかわらず、波頭数が増加するとRDWの伝播速度は著しく低下することがわかる。これは、波頭数が増加すると1つのデトネーション波が通過してから次のデトネーション波が来るまでの時間が短くなり、新規に供給される未燃ガスと既燃ガスとの希釈割合が相対的に大きくなるため、単位質量あたり発熱量が低下して伝播速度が減少するためと考えられる。また、波頭数2で燃焼室幅 $w = 4$ mmの場合、燃焼室サイズが大きくなるとRDW伝播速度が増加しており、これは環状燃焼室の曲率の影響と考えられる。

図6に燃焼器Aおよび燃焼器Bに対する、推進剤噴出高さ h と推進剤質量流量 \dot{m}_{ave} の関係を示す。燃焼器サイズによらず、デトネーション高さは推進剤質量流量の増加とともに大きくなることわかる。しかしながら、燃焼器Aでは波頭数が変化する臨界デトネーション高さが約7



(a) Chamber A



(b) Chamber B

図6 推進剤質量流量と推進剤噴出高さの関係

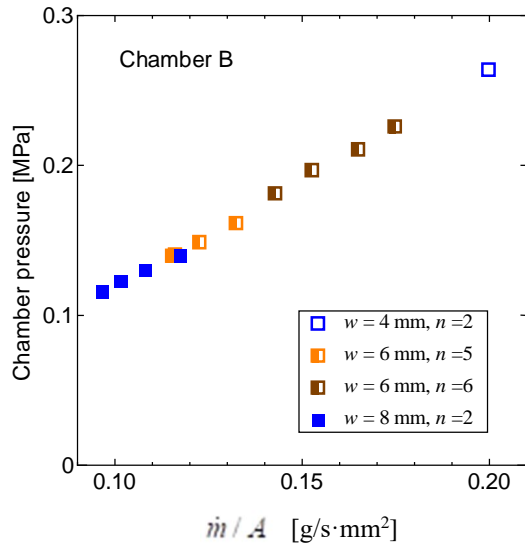


図7 推進剤質量流束と燃焼室内圧力の関係

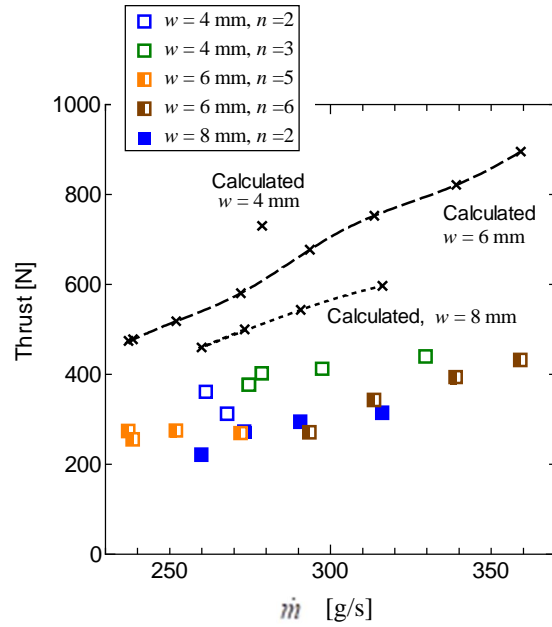


図8 推進剤質量流量と推力の関係

mm であるのに対して、燃焼器 B では $w = 4 \text{ mm}$ および $w = 6 \text{ mm}$ の場合は臨界デトネーション高さが 8 mm、 $w = 8 \text{ mm}$ の場合は 6 mm となっている。

(4) 推力特性

図 7 に、Chamber B の推力壁から 35 mm 離れた位置に圧力導入孔を設けて燃焼室内圧力 P_b を計測した結果を示す。推進剤はメタン - 酸素量論混合気であり、圧力変換器の熱負荷を軽減させるために圧力導入孔に長さ約 400 mm のチューブを接続して圧力計測を行った。また、推力には時間平均圧力が関係しているため、時間応答性に劣る歪みゲージ式の圧力変換器を用いた。図 7 より、燃焼室内圧力は燃焼室幅には依らず推進剤質量流束の増加とともに直線的に増加することが分かる。

次に、Chamber B の燃焼器でメタン - 酸素量論混合気を推進剤に用いた場合の質量流量が推力に及ぼす影響を図 8 に示す。質量流量とともに推力が増加する傾向はどの燃焼室幅でも確認できるが、同じ推進剤質量流量に対して $w = 6 \text{ mm}$ および $w = 8 \text{ mm}$ の場合の推力は顕著な差異はないものの、 $w = 4 \text{ mm}$ は $w = 6 \text{ mm}$ 、8 mm に較べて約 30% 推力は大きい。これは、図 7 に示されるように燃焼室内圧力の差によるものと考えられる。

また、図 8 の推力の計算値は、燃焼室内における推進剤の流れをレイリー流れとして扱い、燃焼室内圧力 P_b を計測した位置では既に熱的閉塞しているもの仮定して求めた。推進剤の質量流量 \dot{m} 、燃焼室断面積 A 、推進剤の淀み点圧力は既知であるから、淀み点状態から燃焼室入口まで推進剤は断熱膨張するとして

$$\frac{P_2}{P_1} = \frac{1 + \gamma M_1^2}{\gamma + 1} \quad (3)$$

を満たす燃焼室入口圧力 P_1 を求めると

$$\frac{u_2}{u_1} = \frac{1 + \gamma M_1^2}{(\gamma + 1) M_1^2} \quad (4)$$

より燃焼室出口流速 u_2 が得られるので、推力 F は

$$F = \dot{m} u_2 + (P_2 - P_a) A \quad (5)$$

から求めた。ここで P_a は雰囲気圧力である。推力の実験値は、このようにして求めた推力の計算値の 40% ~ 60% であった。この差異は、燃焼室内圧力を計測した推力壁から 35 mm の位置では、まだ熱的閉塞に至っていないためと考えられる。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1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 IKEMA Daisuke, YOKOTA Atsushi, KURATA Wataru, KAWANA Haruhiro, ISHII Kazuhiro	4. 巻 61
2. 論文標題 Propagation Stability of Rotating Detonation Waves Using Hydrogen/Oxygen-Enriched Air Mixtures	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 TRANSACTIONS OF THE JAPAN SOCIETY FOR AERONAUTICAL AND SPACE SCIENCES	6. 最初と最後の頁 268 ~ 273
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.2322/tjsass.61.268	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9件（うち招待講演 0件/うち国際学会 6件）

1. 発表者名 W. Kurata, H. Kawana, K. Ohono, D. Ikema, K. Ishii
2. 発表標題 A Study on Effects of Chamber Size on Rotating Detonation Waves
3. 学会等名 The 32nd International Symposium on Space and Technology Science (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 K. Ishii, W. Kurata, H. Kawana, K. Ohno, D. Ikema
2. 発表標題 Effects of Combustor Size on Behavior of Rotating Detonation Waves
3. 学会等名 The 27th International Colloquium on the Dynamics of Explosions and Reactive Systems (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 W. Kurata, H. Kawana, K. Ohono, D. Ikema, K. Ishii
2. 発表標題 A Study on Effects of Chamber Size on Rotating Detonation Waves
3. 学会等名 The 32nd International Symposium on Space and Technology Science (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 K. Ishii, W. Kurata, H. Kawana, K. Ohno, D. Ikema
2. 発表標題 Effects of Combustor Size on Behavior of Rotating Detonation Waves
3. 学会等名 The 27th International Colloquium on the Dynamics of Explosions and Reactive Systems (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 倉田航、川名陽大、池間大輔、石井一洋
2. 発表標題 燃焼室サイズが回転デトネーション伝播に及ぼす影響
3. 学会等名 第56回燃焼シンポジウム
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Wataru Kurata, Haruhiro Kawana, Kazuhiro Ishii
2. 発表標題 A Study on Rotating Detonation Engine Using Different Chamber Sizes
3. 学会等名 15th Joint Symposium between Sister Universities in Mechanical Engineering
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 池間大輔、倉田航、横田篤、石井一洋
2. 発表標題 水素 - 酸素富化空気混合気を用いた回転デトネーション波の伝播安定性
3. 学会等名 第55回燃焼シンポジウム
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 W. Kurata, A. Yokota, D. Ikema, H. Kawana, K. Ishii
2. 発表標題 An Experimental Study on Effects of Chamber Size on Behavior of Rotating Detonation Waves
3. 学会等名 The 6th International Symposium on Energetic Materials and their Applications (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 D. Ikema, A. Yokota, W. Kurata, K. Ishii,
2. 発表標題 An experimental study on stability of rotating detonation waves
3. 学会等名 The 31th International Symposium on Space Technology and Science (国際学会)
4. 発表年 2017年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

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
研究分担者	片岡 秀文 (Kataoka Hidefumi) (10548241)	大阪府立大学・工学(系)研究科(研究院)・助教 (24403)	
研究分担者	前田 慎市 (Maeda Shinichi) (60709319)	埼玉大学・理工学研究科・准教授 (12401)	
研究分担者	小原 哲郎 (Obara Tetsuro) (80241917)	埼玉大学・理工学研究科・教授 (12401)	