

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 14 日現在

機関番号：12701

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25420849

研究課題名(和文) 回転デトネーションエンジン安定作動条件の解明

研究課題名(英文) Operating Conditions of Stable Rotating Detonation

研究代表者

石井 一洋 (Ishii, Kazuhiro)

横浜国立大学・工学(系)研究科(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) 4,000,000円

研究成果の概要(和文)：安定な回転デトネーションを得るために、燃料と酸化剤を内部混合させる環状燃焼器を新たに用意し、起爆方法、混合気供給方法が回転デトネーション伝播挙動に及ぼす影響を実験的に求めた。その結果、起爆はイニシエータが必要であり、その供給圧力は主混合気よりも高める必要があることがわかった。さらに、旋回混合型では燃焼室円周方向に混合気の濃度不均一が生じてデトネーションが不安定であったが、全周スリット型では安定な回転デトネーションを得ることに成功した。

研究成果の概要(英文)：Effects of methods of detonation initiation and mixture supply on propagation behavior of rotating detonations have been experimentally studied using a newly developed annular combustor in which a fuel and an oxidizer are mixed internally. It is found that an initiator tube is necessary to initiate detonation in the combustor and that the supply pressure to the initiator tube needs to be higher than that of the main combustor. The outer circumference slit gives stable rotating detonation, while the swirl mixing forms inhomogeneous mixture in the tangential direction resulting in unsteady detonation.

研究分野：燃焼工学、航空宇宙工学

キーワード：デトネーション 推進機関 衝撃波

1. 研究開始当初の背景

現在、航空宇宙用推進機関としてデトネーションを利用したエンジンの研究開発が米国を中心に行われている。デトネーション利用のエンジンでは、既存のジェットエンジンやガスタービンと比較して

- (1) 基本サイクルがハンフリーサイクルで近似でき、同一圧力比のプレイトンサイクルと比べて熱効率が低い
 - (2) 燃焼により高い圧力利得が得られる
 - (3) 燃焼器構造を簡素化できる
- という利点があり、高い推力密度と低コストを同時に実現できる。

これまででは、デトネーション利用の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が PDE 実用化を阻む大きな障害となっている。

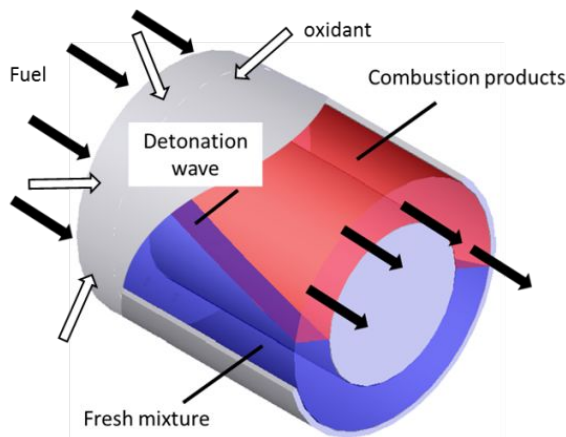


図 1. 回転デトネーションエンジン

以上の PDE 実用化における諸問題は、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図 1 に示す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を定在させるものである。RDE は PDE のサイクル周波数を非常に大きくした場合と等価であり、排気ガスがほぼ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

RDE の実験的研究に関して、海外の研究機関では数秒程度の回転デトネーションが

得られているものの、起動方法、定常状態に至るまでの不安定性、定常状態で複数の伝播モードが存在する要因は未解明となっている。また、回転デトネーションの安定性は燃料と酸化剤の混合状態に強く依存すると報告されており、最適な噴射孔形状ならびに混合方法は確立されていない。

本研究では、安定な回転デトネーションを得るために、燃料と酸化剤を内部混合させる環状燃焼器を新たに用意し、以下の事項が回転デトネーション伝播挙動に及ぼす影響を実験的に求めるものである。

- (1) 点火・起動方法が
- (2) 混合気供給方法
- (3) 燃料および空気の供給圧力

なおデトネーション起動の容易さから、燃料には水素を、酸化剤には酸素を使用した。

3. 研究の方法

(1) 旋回型混合気供給

実験装置概略図を図 2 に示す。試験部には外径 50 mm、内径 44 mm、長さ 110 mm の円環状燃焼室が形成されている。また試験部側壁には汎用圧力変換器 P1、P2、P3 が設置されている。起爆装置および P1 は酸素供給部から 12 mm の位置に円周方向 120° の間隔で配置され、さらに P2、P3 はそこから 11 mm 下流に取り付けられている。

旋回型の水素 / 酸素の供給方法に関する詳細を図 3 に示す。軸方向からは 1 のオリフィス 72 個を介して水素を供給し、周方向の 6 ヶ所から酸素を供給する。これにより燃焼室内に旋回流れ場を作り、水素と酸素の混合を促進している。各気体の供給はそれぞれ電磁弁で制御され、任意のタイミングで供給・停止を可能である。

混合気は燃焼室側壁に取り付けられた起爆装置によって点火するが、この部分を点火プラグもしくはイニシエータ管に交換することで RDE 起動方法を変えることができる。

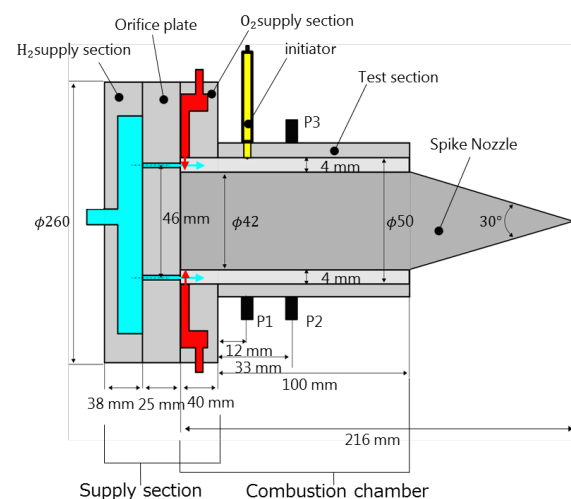


図 2. 回転デトネーションエンジン構造

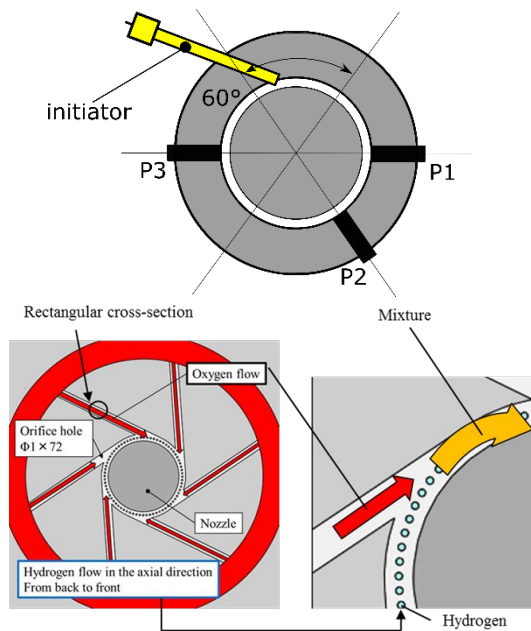


図 3. 巡回型混合気供給部

点火プラグは自動車用のものを用い、火花放電によって混合気を点火、デフラグレーションを生成し、DDT過程を経て回転デトネーションを発生させる。またイニシエータは内径約4 mm、長さ150 mmのステンレス管で、この場合はイニシエータ内部で予めデトネーションを起動させ、それを燃焼室へ入射させることで試験部内の混合気を直接に起爆するものである。

本実験の試験部供給圧力は、イニシエータによる起動では水素、酸素ともに1 MPaとした。

(2) 全周スリット型混合気供給

上述の巡回型混合気供給は、予め混合気に旋回流をかけることができるが、酸素供給が周方向6箇所であるため、円周方向に混合気濃度むらが生ずる可能性がある。そこで本研究では、燃焼室外周にスリットを設け、この全周スリットから気体を供給する試験部を用意した。このとき、巡回型混合気供給とは異なり、軸方向のオリフィスからは酸素を供給し、全周スリットからは水素を供給した。なお軸方向オリフィスレートと周方向スリットリングを交換することで混合気供給量および試験部内の流速を、供給圧力とは独立に制御することができる。スリット幅0.4 mm、直径1 mmの72個のオリフィスを用い、水素、酸素の供給圧力は600 kPa、1100 kPa程度に設定し、概ね当量比1.1の条件で実験を行った。

4. 研究成果

(1) 点火プラグによる起動

点火プラグを用いてデトネーションを起動した場合の試験部圧力履歴を図5に示す。このときの供給圧力は水素539 kPa、酸素753 kPaである。最初に現れる圧力の立ち上

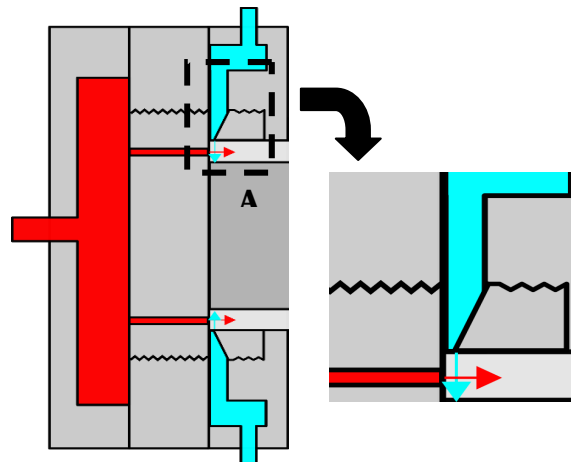


図 4. 全周スリット型混合気供給部

がりは火花放電時によるノイズであるが、燃焼によって得られるピーク圧力は約0.33 MPaであり、AISTJANによって求めたC-J圧力1.94 MPaよりも大幅に小さい。また、圧力のピークはこの後に確認はされず、本実験条件では回転デトネーションは生成されなかった。

(2) イニシエータによる起動

イニシエータによる起動実験では、まず予備実験としてイニシエータのみを用いた実験を行い、イニシエータ内でのデトネーション生成を確認した後、試験部に水素・酸素を供給して本実験を行った。

予備実験では、イニシエータの混合気供給圧力を200 kPa～800 kPaまで100 kPaずつ変化させたが、適切な点火タイミングが確実な起動に最も重要であることがわかった。このとき、電磁弁を閉じる信号に対する点火信号の遅延時間を、200 kPa供給圧力を増加させるごとに5 ms増加させることが、イニシエータ内での確実なデトネーション生成に効果的であった。これは、供給圧力の増加に伴い、電磁弁の応答性が悪くなるためと考

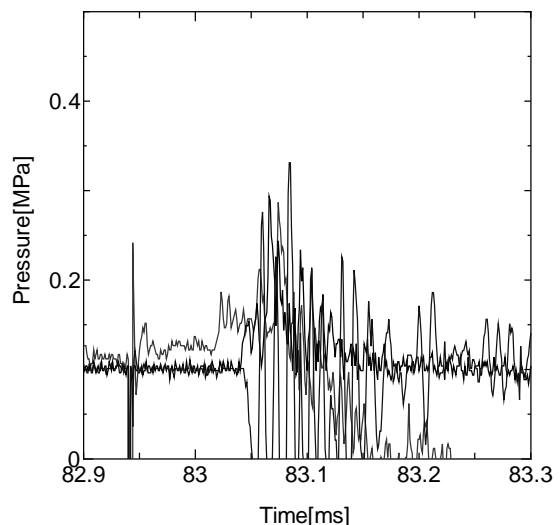


図 5. 点火プラグ起動時の試験部圧力履歴

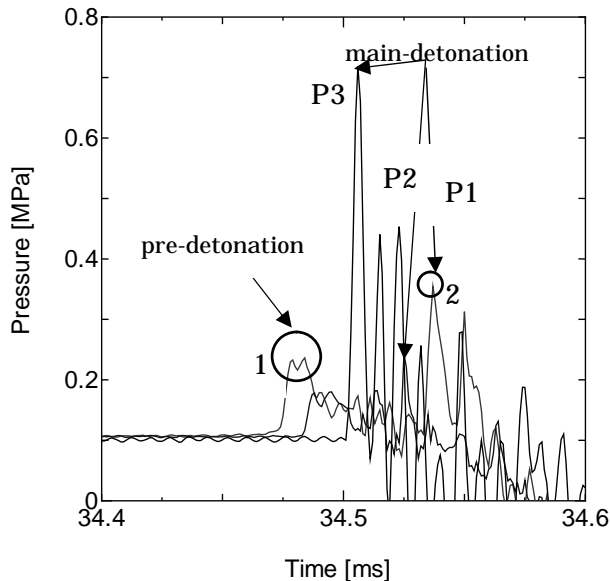


図 6. イニシエータ起動時の試験部圧力履歴

えられる。

本実験は、イニシエータ供給圧力を 200 kPa ~ 400 kPa で 5 回、500 kPa ~ 800 kPa で 10 回行った。その結果、200 kPa ~ 400 kPa で 1 度も試験部内で回転デトネーションが生成されなかったが、500 kPa ~ 800 kPa では 3 回生成に成功した。イニシエータ単独ではデトネーション生成したにも関わらず本試験で成功率が低いのは、試験部へのメイン気体供給によりイニシエータの背圧が上昇し、イニシエータ管内の当量比が変動したためと考えられる。したがって、イニシエータ内で確実にデトネーションを起こすためには試験部に対する供給圧力よりも高い圧力で、イニシエータ管に気体供給を行う必要がある。

図 6 にイニシエータ供給圧力 800 kPa で得られた試験部圧力履歴を示す。まず 34.47 ms ~ 34.50 ms の間で P1、P2 が順に立ち上がり、34.50 ms で P3 が 0.7 MPa を超えるピーク圧力を得ている。これはイニシエータで生成されたデトネーションが燃焼室を伝播し、P3 に到達した時点で回転デトネーションが起きたことを意味している。また図 6 の 1 および 2 の記号は、P1 の圧力が極大となったところである。記号 1 がイニシエータで生成されたデトネーションを示し、そのデトネーションが環状燃焼室を 1 周して P1 を通過したときの圧力が記号 2 に対応していると考え、デトネーションの波面速度は約 2700 m/s と C-J 速度にほぼ等しい。このことから、イニシエータを用いて回転デトネーションが生成したことが確認できる。また、その後の圧力履歴においても、圧力の立ち上がりの順番からデトネーションが回転伝播していると考えられ、圧力ピークの時間間隔から伝播速度は約 2500 m/s と概算される。なお、圧力受圧面への高い熱負荷により、34.55 ms 以降の圧力履歴は大きく落ち込ん

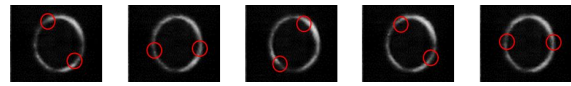


図 7. 高速度カメラ画像

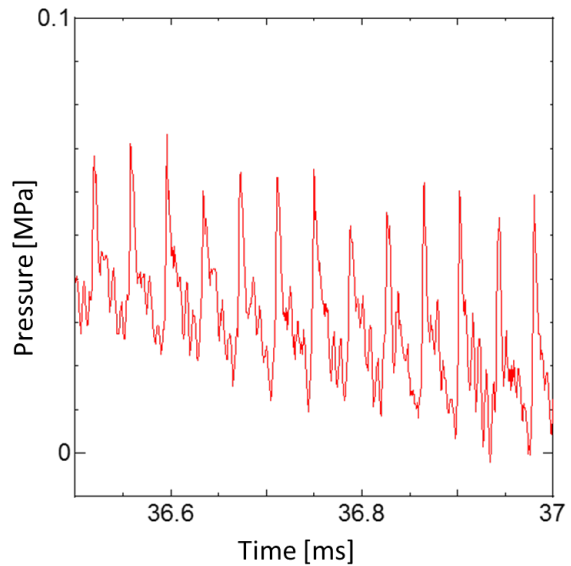


図 8. 回転デトネーション伝播時の圧力履歴

でおり、以後の圧力履歴は伝播速度計算に使用できなかった。

(3) 混合気供給方法の影響

2 章で説明したように、混合気供給は旋回流型と全周スリット型の 2 種類を用いて実験を行った。

旋回流型供給部を用いた実験では、イニシエータからのデトネーション入射により 1 ~ 2 回程度デトネーションが回転するものの、円周方向の混合気の濃度不均一のため、デトネーションは安定伝播することができなかった。また、この供給部では燃焼室内での混合気流速が大きく、デトネーション波面が燃焼室外へと流されることが多く、燃焼室内でデトネーション回転デトネーションが得られる確率が低かった。

図 7 に全周スリット型供給部を用いた場合の燃焼室内の高速度カメラ画像を示す。コマ間隔は 12.5 μ s である。画像中の赤丸で示した箇所がデトネーションの波頭であり、二つのデトネーション波が反時計回りに伝播している。このときの試験部内圧力履歴を図 8 に示す。同一の波形が周期的に繰り返されていることから、回転デトネーションが安定伝播していることが分かる。図 7、図 8 より伝播速度を求めると、ともに 1600 m/s 程度となる。この条件での C-J 速度 2570 m/s より 1000 m/s 程度低いが、他の研究者の報告においても C-J 速度の半分程度の速度で書いて印していることが多い。これは、未燃の供給混合気が既燃ガスと混合・希釈されるためと考えられる。また圧力値が低いのは、デトネー

ションの波頭は圧力計取り付け位置よりも上流で位置し、膨張波により圧力が下がった波面を圧力計が捉えているためと考えられる。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計0件)

〔学会発表〕(計5件)

横田篤、石井一洋、回転デトネーションエンジンの起動方法に関する研究、第52回燃焼シンポジウム、2015年11月18日、つくば

K. Ishii, A. Nojima, A Study on Operating Conditions of Rotating Detonation Engine with Internal Mixing, 30th International Symposium on Space Technology and Science, July 8, 2015, Kobe.

野嶋新斗、石井一洋、内部混合型回転デトネーションエンジンの成立条件に関する研究、日本機械学会関東支部第21期総会・講演会、2015年3月20日、横浜

石井一洋、デトネーションの基礎研究から見た推進応用研究、極超音速燃焼デトネーションの航空宇宙推進機への応用シンポジウム、2015年3月4日、名古屋

野嶋新斗、石井一洋、村上礼雄、回転デトネーションエンジンの安定作動条件、第51回燃焼シンポジウム、2013年12月6日、東京

〔図書〕(計0件)

〔産業財産権〕

出願状況(計0件)

取得状況(計0件)

〔その他〕

ホームページ等

<http://www.ishii-lab.ynu.ac.jp/>

6. 研究組織

(1) 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

(2) 研究分担者

片岡 秀文 (KATAOKA HIDEFUMI)
横浜国立大学・大学院工学研究科・助教
研究者番号：10548241