

科学研究費助成事業（学術研究助成基金助成金）研究成果報告書

平成25年6月7日現在

機関番号：12701

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2011～2012

課題番号：23656536

研究課題名（和文）衝撃波風洞を利用した可燃性高速流中における回転デトネーションの実現

研究課題名（英文）Rotating Detonation in High-speed Combustible Flows Using A Shock Tunnel

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

研究成果の概要（和文）：回転デトネーションの成立条件について実験的に調べた。衝撃波風洞を利用し、反射衝撃波背後の高圧の試験気体をオリフィスプレートを通じて燃焼器に流入させ、試験気流を得た。オリフィスプレート前後の圧力比 r を変化させて実験を行い、燃焼器内のデトネーション挙動について調べた。その結果、 $r=2.5$ の条件では逆火が生じたが、 $r=7.5$ の条件でデトネーションは5回の回転を示し、デトネーション起動に必要な圧力条件を求めることができた。

研究成果の概要（英文）： An experimental study has been made on initiation and propagation of rotating detonation waves. A test gas behind a reflected shock wave in a shock tunnel flows into an annular combustion chamber through an orifice plate to clarify conditions of steady propagation of rotating detonation waves. By varying the pressure ratio across the orifice plate, it is found that rotating detonation is achieved for the pressure ratio of 7.5, whereas the pressure ratio of 2.5 results in flash-back. The present study clarifies the pressure ratio needed for stable condition for initiation of rotating detonation waves.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
交付決定額	3,100,000	930,000	4,030,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：総合工学・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

(1) 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衝撃波で作動ガスを圧縮するため圧縮機が不要となり、構造の簡素化と低コストを同時に実現できる。また、その基本サイクルがハンフリーサイクルで近似でき、同一圧力比のブレイトンサイクルと比べて熱効率が低い。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、これまでは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。

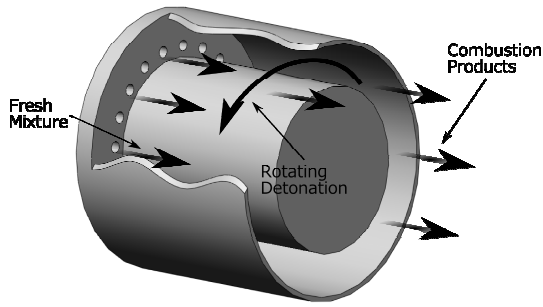


図1 回転デトネーションエンジン

(2) PDE の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) である。RDE は、図 1 に示すように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ている。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と考えられ、エンジン全体を PDE よりも更に小型化することができる。

(3) これまでに RDE に関して幾つかの実験例が報告されているものの、主として混合気供給は燃焼器側壁から行われており、圧力のアンバランスによる上流への圧力波・デトネーション波の伝播については触れられていない。また RDE に関するほとんどの研究では、壁面から可燃性ガスが湧き出すような、現実には即していない境界条件を用いた数値計算例が多い。

2. 研究の目的

(1) 回転デトネーションエンジン (RDE) の提案概念では、環状燃焼器の上流側推力壁の小孔より可燃性混合気を流入させ、燃焼器内でデトネーションを周方向に回転させることで定在させている。一般にデトネーション波面直後では初期圧力の 20 倍程度の高圧状態となるため、上流方向へデトネーションが伝播する危険性がある。これを阻止するには、混合気供給圧力をデトネーション波背後の圧力よりも高める必要があると考えられている。

(2) 本研究では、衝撃波風洞を用いて可燃性高速気流中を生成し、燃焼器上流の推力壁に設けた小孔から混合気を供給することで、RDE の提案概念どおりの状況を作り出す。小孔の大きさを変化させることで上流へのデトネーション伝播を抑制し、回転デトネーションの成立条件を実験的に明らかにすることを挙げる。

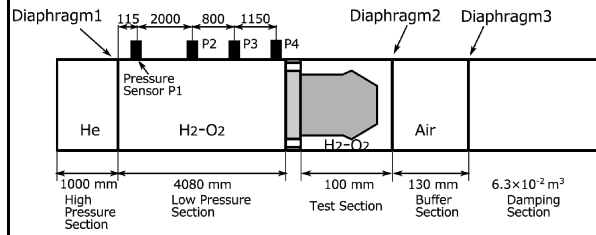


図2 実験装置概略

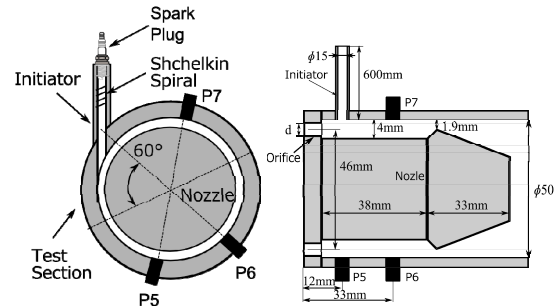


図3 試験部詳細

3. 研究の方法

(1) 実験装置の概略を図 2 に示す。衝撃波管の低圧部に試料気体として量論比の水素-酸素混合気を初期圧力 0.2 MPa で充填し、高圧部には駆動気体としてヘリウムを充填する。隔膜 1 を自然破断させ、低圧部に衝撃波が伝播し、低圧部管端に設置したオリフィスプレートで反射する。このとき、入射衝撃波速度は低圧部に設置した汎用圧力変換器 P1~P4 にて計測する。反射衝撃波背後の高圧の試験気体は、オリフィスプレートに設けられている小孔から試験部に流入する。環状燃焼器を構成している試験部は、バッファ部を介してダンブタンクに接続されており、バッファ部ならびにダンブタンクは予め所定の圧力まで減圧しておく。熱線を用いて所定のタイミングで隔膜 3 を破断させることによりバッファ部を減圧し、これにより隔膜 2 が破断する。その結果、試験部内は一時的に減圧することとなる。隔膜 3 の破断時に試料気体が熱線で点火することを避けるため、バッファ部には空気を充填しておく。

反射衝撃波背後の高圧試料気体を一定流量で試験部に流入させるため、オリフィスプレートには直径 2 mm の小孔が等間隔に 16 個空いており、試験部は減圧されているために小孔で流れは閉塞している。

試験部の詳細を図 3 に示す。試験部は内径 44 mm、幅 4 mm、長さ 38 mm の円管部と長さ 33 mm のノズルが設置されている。試験部に流入した試験気体を起爆するために、

内径 15 mm、長さ 600 mm のイニシエータが取り付けられている。回転デトネーションの検出のため、試験部には汎用圧力変換器 P5～P7 が設置されている。イニシエータおよび P5 はオリフィスプレートから 12 mm の位置に 60° の挟み角で配置され、さらに P6、P7 は 11 mm 下流に取り付けられている。なお P5 と P6 は 60°、P6 と P7 は 120° の挟み角で設置されている。

試験部の起爆には、まずイニシエータ管端に設置した自動車用スパークプラグによりイニシエータ内に充填した試験気体を点火する。点火部付近にシェルキンスパイラルが挿入されており、これにより火炎が加速し、デトネーションに遷移する。このようにイニシエータ内部で生成したデトネーション波を試験部へ導入させることで、環状燃焼器内の試験気体を起爆させる。

(2) 上述の実験ではデトネーション起動にイニシエータを使用しているが、装置の構成上、実際には燃焼器内で火花放電等により点火することが望ましい。今後の RDE 研究における点火方法を策定するために、入射衝撃波背後の高速気流中における点火実験を行い、その後の火炎伝播ならびにデトネーション起動について調べた。とくに、火花放電位置を入射衝撃波が通過してから火花放電するまでの時間が、デトネーション遷移に及ぼす影響について調べた。

4. 研究成果

(1) 本研究では、オリフィスプレート前後の圧力比 r を変化させて、試験部におけるデトネーション挙動を調べた。

① $r = 2.5$ の場合

図 4 にダンピング部を減圧せずに試験部でデトネーション起動を行った結果を示す。このとき反射衝撃波背後の圧力は 0.5 MPa であり、試験部内は 0.2 MPa であるため $r = 2.5$ に相当する。図 4 の横軸は圧力変換器 P1 で入射衝撃波の到達を検出した時刻を時間原点としており、P2 から P7 は各圧力変換器で得られた圧力履歴を示している。時刻 4.7 ms に P4 で複数の鋭い圧力ピークがみられるが、まず入射衝撃波により約 0.35 MPa に上昇した後に、直ちに反射衝撃波により約 0.5 MPa まで圧力が上昇している。この場合、図 5 に示すように、オリフィスプレートから試験気体が流入した直後にデトネーションの起動を行っている。図 5 では、P5 から P7 の圧力はほぼ同時に立ち上がっており、これはイニシエータから入射されるデトネーションが、環状燃焼器断面において時計方向と反時計方向の両方に伝播したためと考えられる。その後、約 10 μ s 経過して P7 で 2 度目の圧力ピークが見られるが、これは図 3 において

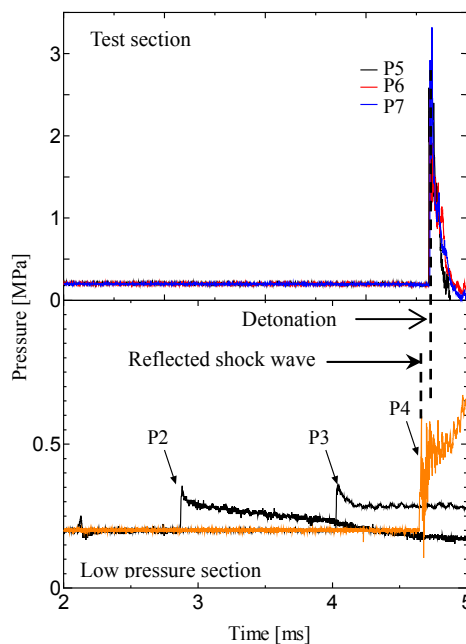


図 4 ダンピング部を減圧しなかった場合 ($r = 2.5$) の低圧部および試験部圧力履歴。

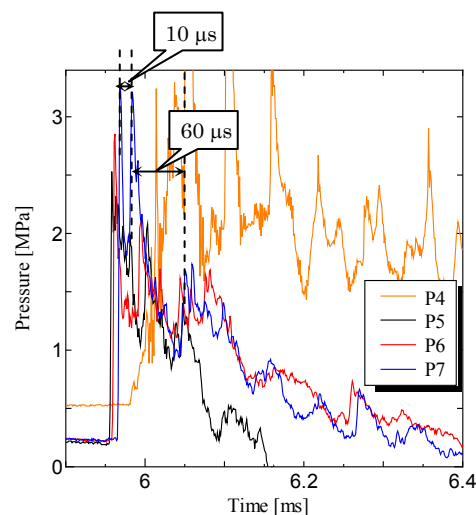


図 5 ダンピング部を減圧しなかった場合 ($r = 2.5$) の試験部圧力履歴の詳細。

P5、P6 の順に反時計方向に回転しているデトネーション波を検出したためである。さらに約 60 μ s 後に弱い圧力ピークが見られる。この時の C-J 速度は約 2800 m/s と見積もられ、デトネーションが直径 50mm の円筒の周囲を 1 回転するには 56 μ s かかることとなる。したがって、第 2 と第 3 の圧力ピークの間隔 60 μ s は、ほぼデトネーションの回転周期と一致している。なお、圧力変換器にはとくに熱対策を施していないため、受圧部のダイヤフラムの膨張により見かけ上の測定圧力が低下していると考えられる。

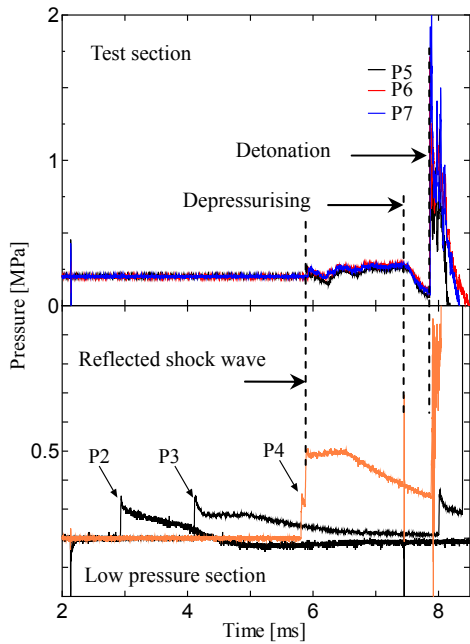


図6 ダンピング部を減圧した場合($r=7.5$)の低圧部および試験部圧力履歴.

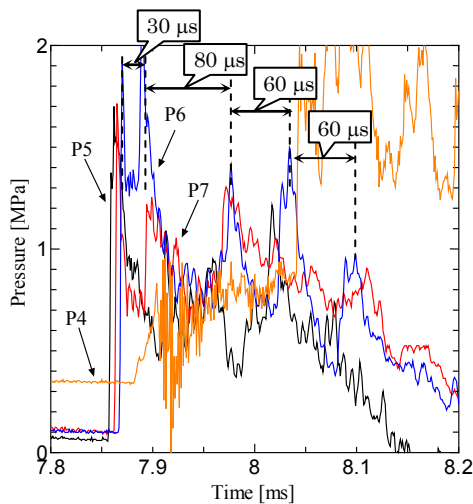


図7 ダンピング部を減圧した場合($r=7.5$)の試験部圧力履歴の詳細.

② $r=7.5$ の場合

図6に $r=7.5$ とした場合の圧力の時間履歴を示す。P4は時刻6.0ms付近で2段階の立ち上がりを見せているが、1回目は入射衝撃波の到達を、2回目は入射波がオリフィスプレートで反射した反射衝撃波の到達を検出している。試験部内に設置したP5~P7は7.4ms付近で圧力が急激に減少している。これは隔膜2,3を破膜させたことにより、試験部内の圧力が低下したためである。その後、7.9msでP5~P7の圧力は一時的に上

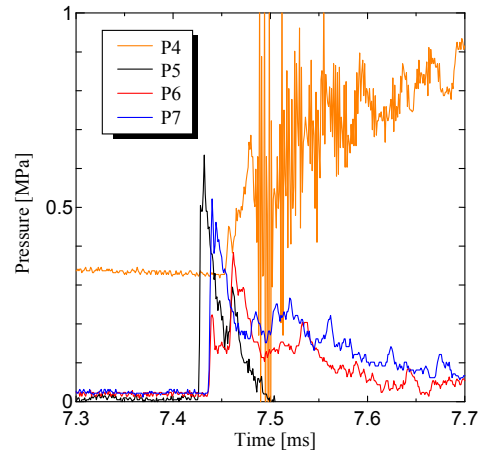


図8 ダンピング部を減圧した場合($r=15$)の試験部圧力履歴の詳細.

昇し、再び急激に低下している。これは、試験部上流の反射衝撃波背後で高圧となった試験気体がオリフィスプレートを通り、試験部内に流入したためである。

図7に、イニシエータで生成したデトネーション波が試験部内に入射した際の圧力履歴を示す。まず、P5~P7の圧力は7.86ms付近で急激に立ち上がっている。これは、イニシエータにより起爆された試験部内のデトネーション伝播を検出している。前述のように、デトネーションが直径50mmの円筒の周囲を1回転するには56μsの時間を要する。しかしながら、P6、P7における最初の圧力ピーク間隔は約30μsと短い。これは $r=2.5$ の場合と同様に、イニシエータから入射したデトネーションの時計・反時計の両方向への伝播のためである。その後、P5~P7は約55~90msの間隔で5度立ち上がった。したがって、少なくともデトネーションは試験部で5回転したと言える。その後は圧力が徐々に低下し、再びデトネーションを検出することはなかった。この原因として考えられるのは、イニシエータからデトネーションが入射する際の試験部内の圧力が、図6のP4で確認されるように0.3MPaまで低下している。そのため試験部内の圧力がオリフィスプレート上流圧力よりも高くなり、上流側の可燃性気体が試験部内に供給されなくなった結果、連続的なデトネーション伝播が途絶えたと考えられる。

③ $r=15$ の場合

オリフィス前後の圧力比 $r=15$ のときの試験部での圧力履歴を図8に示す。P5~P7は試験部での起爆で1度圧力が立ち上がったものの、その後はデトネーション伝播は確認できなかった。本研究では、オリフィスプレー

ト上流の圧力は一定であり、試験部の減圧過程において、イニシエータから試験部に入射するデトネーションのタイミングを変えることで、圧力比 r を変化させている。したがって、 $r=15$ の場合は $r=7.5$ の場合よりもデトネーション入射時の試験部内圧力は低い。一般に、デトネーションの特性長であるセルサイズは初期圧力の低下とともに増大し、 $r=15$ の条件でのセルサイズ λ は約 5 mm と見積もることができる。一方、チャンネル内をデトネーションが安定伝播するためには、チャンネル高さを d とすると、 $d > 3\lambda$ が必要な条件となる。本実験では $d = 4\text{mm}$ であり、 λ は 1~2 mm 以下でなくてはならない。したがって、 $r = 15$ の条件で回転デトネーションが安定伝播しないのは、オリフィスプレート前後の圧力バランスが原因ではなく、デトネーション起動時の初期圧力が低く、セルサイズが環状燃焼室のチャンネル幅に比べて大きいためと考えられる。

(2) 衝撃波風洞で生成された可燃性高速気流に壁面で火花放電を行った場合、入射衝撃波が通過してから火花放電を行うまでの時間が短いほど、デトネーション遷移時間が長くなり、また再現性も低下する結果が得られた。これより、火花放電を行う位置での境界層の厚さ及びその状態が、火炎核の成長・発達、ひいてはデトネーション遷移に影響を及ぼす大きな要因であることがわかった。この結果は、イニシエータを用いることなく燃焼室内の火花点火によりデトネーションを起動させる場合、最適な点火位置を決定する上で重要な知見となった。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 0 件)

[学会発表] (計 3 件)

① Kazuhiro Ishii, Reo Murakami, Initiation Process of Rotating Detonation Waves in A Premixed Combustible Gas, 29th International Symposium on Space Technology and Science, June 6, 2013, Nagoya.

② 村上礼雄、石井一洋、可燃性高速気流中における回転デトネーション成立条件の研究、第 50 回燃焼シンポジウム、2012 年 12 月 07 日、名古屋

③ 石原咲子、石井一洋、片岡秀文、入射衝撃波背後への強制点火により生ずる火炎の挙動とデトネーション生成、第 49 回燃焼シンポジウム、2011 年 12 月 5 日、横浜

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
出願年月日：
国内外の別：

○取得状況 (計 0 件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
取得年月日：
国内外の別：

[その他]

ホームページ等

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

()

研究者番号：

(3) 連携研究者

()

研究者番号：