

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 24 年 5 月 18 日現在

機関番号：10101

研究種目：若手研究（B）

研究期間：2009～2011

課題番号：21760646

研究課題名（和文）円錐形状反射板を用いた大口徑・大推力 PDE 基盤技術の開発

研究課題名（英文）Development of Pulse Detonation Engine Initiator Using Conic Shape Reflector for Large Bore and High thrust Combustor

研究代表者

脇田 督司 (WAKITA MASASHI)

北海道大学・大学院工学研究院・助教

研究者番号：80451441

研究成果の概要（和文）：本研究の目的は、大口徑・小 L/D の PDE を実現するために必要な『円錐形状反射板を用いたパルスデトネーションエンジン（PDE）イニシエータ』を開発することである。本研究により、円錐形状反射体の角度はデトネーション波 3 重点の軌跡の角度よりも浅い 30 度以下にすることにより伝播促進効果があることが示された。またより大口徑な燃焼器に対して本イニシエータを使用することにより、全体に対するドライバーガス使用率 1%未満にできる可能性が示された。

研究成果の概要（英文）：To develop a pulse detonation engine (PDE) with large diameter and small L/D, a new PDE initiator using a conic shape reflector have been proposed. The promotion effect of the transition of detonation wave obtained by the conical body of 15° is extremely high. This is because transverse waves in a detonation wave can reach the sidewall of the conical body, when the conical angle is sufficiently smaller than the angle of the triple point trajectory of the detonation wave. The large diameter cylindrical combustor experiments reveal that the necessary overfilling radius of the driver gas mixture is more than 100 mm to initiate the detonation wave, and this radius is less than 1% of the driver gas usage rate over the whole section of the PDE system.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2009 年度	1,100,000	330,000	1,430,000
2010 年度	1,600,000	480,000	2,080,000
2011 年度	700,000	210,000	910,000
年度			
年度			
総計	3,400,000	1,020,000	4,420,000

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：パルスデトネーションエンジン、デトネーション、円錐形状反射板

1. 研究開始当初の背景

地上から宇宙空間までの広範囲な飛行条件下を、単一エンジンで運用できる革新的な次世代型宇宙往還機用のエンジンとして PDE

が注目されている。デトネーションは衝撃波に誘導される燃焼波の伝播形態であり、その性質から可燃性混合気中を超音速で自走的に伝播し、既燃混合気は瞬時に高温高圧にな

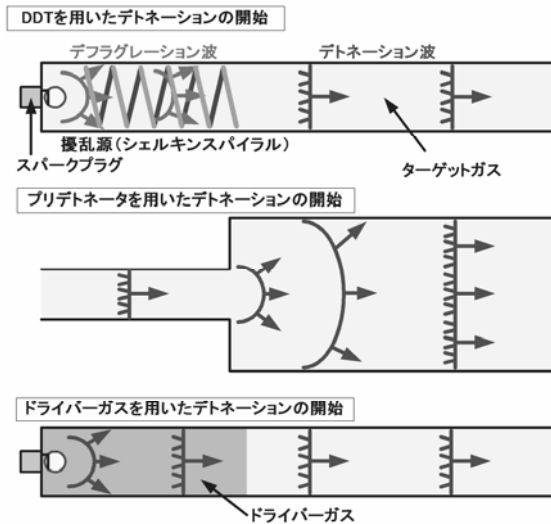


図1 デトネーションの開始

る。PDE は、燃焼器内の混合気をデトネーションで間接的に燃焼させ、その既燃混合気を排出することにより推力を得る推進機関である。その特徴を以下に挙げる。

- (1) 機械的圧縮機構を必要とせず、非常に簡素かつ軽量
- (2) 地上から宇宙空間まで、広範囲な飛行条件において運用可能
- (3) ガスタービンのブレイトンサイクルを上回る熱効率

実用レベルのPDEでは、推力密度の高い液体燃料の使用や高周波数作動による推力の向上、エアブリージングによる比推力の向上などが求められるが (G. D. Roy (2004)), 大型宇宙機に使用するような大口径燃焼器では、デトネーションを開始させることが極めて困難である。

PDE では前述のように液体燃料の使用や、エアブリージングモードでの作動が想定されている。これらの反応性が極めて低いターゲットガスに対して、スパークプラグなどの小さなエネルギー源からデトネーションを開始させる技術を以下に示す。

「DDTを用いたデトネーションの開始」は、最も一般的なデトネーションの開始方法で、図1に示すように擾乱源となるスパイラル等を管内に配置し、乱れにより燃焼速度を上昇させ、デフラグレーションからデトネーションへの遷移 (DDT) させる方法である。Frokov (2006) らは液体燃料ベースのPDEに対しシェルキンスパイラルを用いたPDEの連続作動実験を報告している。この方法では、混合気がデフラグレーションで燃焼する部分はPDEの性能に寄与せず、DDT距離の短い酸水素条件でも比推力が20%程度低下する。また、実験室スケールの小口径燃焼器に比べ、大口径

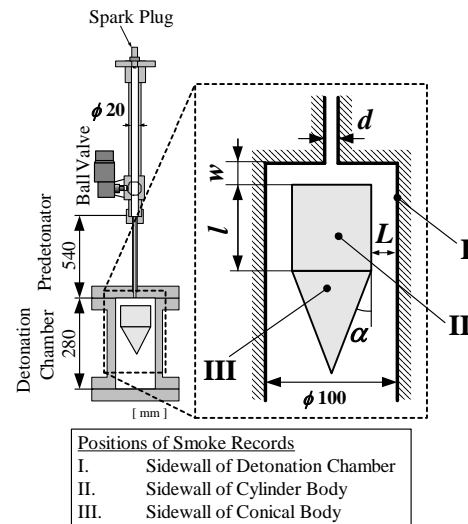


図2 円錐形状反射板を用いた

イニシエータ

燃焼器では一般的にDDT時間・距離が極めて長い。その結果、大口径燃焼器では作動周波数が稼げず推力が低下すると同時に、L/Dも極めて大きなものとなる。

「プリデトネータを用いたデトネーションの開始」は、デトネーションが細い管ほど開始し易い性質を利用し、細い管 (プリデトネータ) 内であらかじめ開始させたデトネーション波を、大口径燃焼器に伝播させる方法である。しかし、この方法のようにプリデトネータと燃焼器の接合部のように管路が急拡大する部分を通るデトネーション波には伝播限界条件があり、想定するターゲットガスではプリデトネータ自体が大口径となる。結局、プリデトネータ内のDDT等が問題となり実用的ではない。

「ドライバーガスを用いたデトネーションの開始」は燃焼器前半部に反応性の高い混合気をドライバーガスとして用いてデトネーションを開始させ、ターゲットガスに伝播させる方法である。しかしドライバーガスを機体に追加的に搭載すると、その搭載量に応じて比推力が劇的に低下するという問題がある。この方法を用いて、前述の「DDTを用いたデトネーションの開始」と同等の比推力低下 (20%) を達成するにはドライバーガス使用量を燃焼器全体の体積の1%以下に抑える必要がある (Bussing ら (1997))。しかし、酸水素などの反応性の高い混合気をもってしてもドライバーガス使用量は燃焼器全体の数十%オーダーである。その上、大口径燃焼器内では、ドライバーガス自体のDDTも無視できなくなり、燃焼器のL/Dも大きくなる。よって現在のところPDEシステムに対するドライバーガスの使用は現実的ではない。

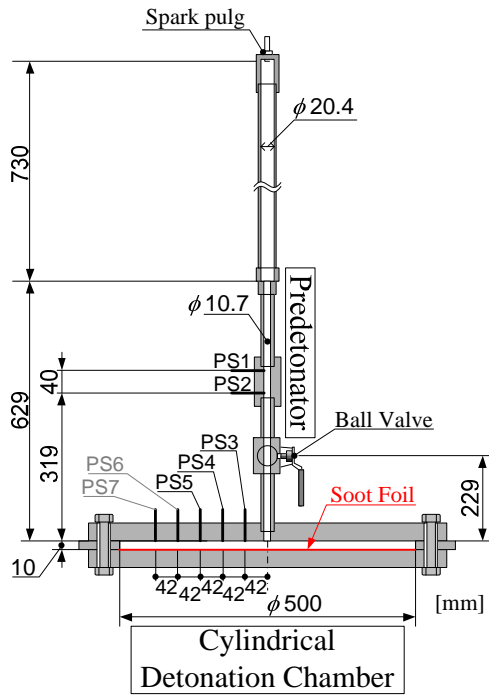


図3 大口径円筒燃焼器

申請者はこれらの問題を踏まえ、実験室スケールの小型 PDE と同等の比推力・作動周波数を持ち、且つ大規模宇宙輸送機に適用可能な大口径・小 L/D の PDE を実現するため、『円錐形状反射板を用いたパルスデトネーションエンジン (PDE) イニシエータ』を提案した。

2. 研究の目的

本研究の全体構想は、申請者が提案する『円錐形状反射板を用いたパルスデトネーションエンジン (PDE) イニシエータ』により、現在の実験室スケールの小型 PDE と同等の比推力・作動周波数を持ち、且つ大規模宇宙輸送機に適用可能な大口径・小 L/D の PDE を実現するための基盤技術を開発することである。本研究では以下に示す3項目を具体的な目標として設定した。

- (1) 円錐形状反射板を装着した新型イニシエータを製作して燃焼実験を行い、ドーナツ状デトネーション波が平面デトネーション波に遷移するメカニズムを解明する。
- (2) 円錐形状を有する拡大管路内において、ドライバーガスとターゲットガスの境界領域が存在する場合のデトネーション波の挙動を観察し、最適なドライバーガス供給量及び円錐部形状を決定し、本円錐形状反射板を用いた PDE イニシエータの限界性能を定量的に評価する。
- (3) 大口径燃焼器に対する、新型イニシエータの性能を評価する。

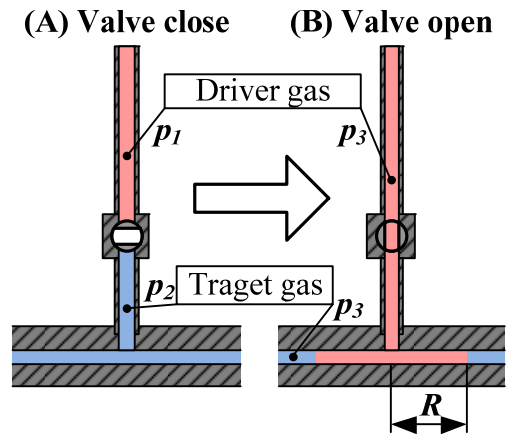


図4 ドライバーガス過供給手順

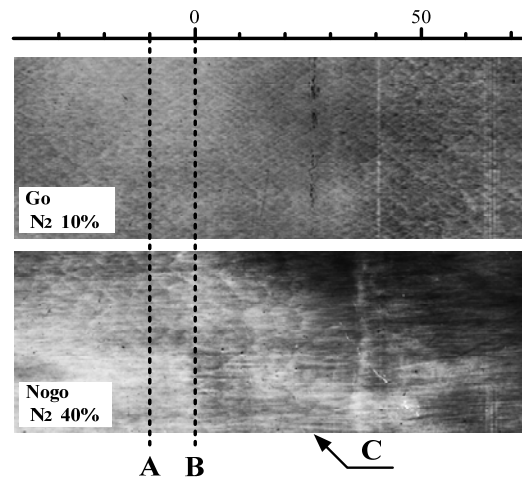


図5 壁面 I におけるすす膜模様

(上: Go 下: Nogo)

3. 研究の方法

- (1) 研究目的 (1) および (2) のために用いた実験装置を図2に示す。実験装置は燃焼器、プリデトネータ、円錐形状反射体からなる。燃焼器の内径は 100 mm、プリデトネータの内径は 10 mm である。円錐形状反射板は円筒部と円錐部からなり、円筒部の直径を変化させることにより流路幅 L を 5, 10, 15, 20 mm, また円錐部の半頂角 α を 15, 30, 45, 90 度に変化させて実験を行った。デトネーションの直接観察法としてすす膜模様法を用いる。図2の I ~ III の壁面にすすを塗布した板を挿入することによってデトネーション波の通過によって生じるセル模様を観察することにより、デトネーション波伝播の有無、強さを観察できる。
- (2) 研究目的 (3) に対し、大型燃焼器を模した円筒燃焼器を製作した (図3)。

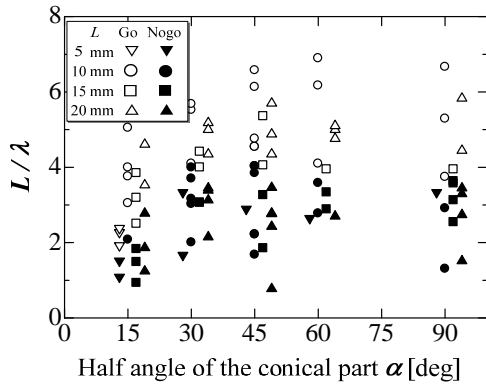


図6 実験結果

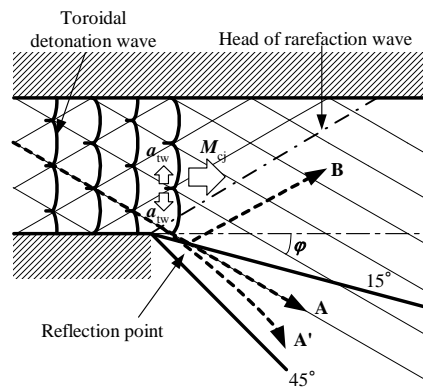


図7 三重点の軌跡と円錐部壁面の関係

本燃焼器のプリデトネータ部は(1)で示したものと同じく内径10 mmである。円筒燃焼器は大口徑燃焼器に本イニシエータを使用した場合の反射体上流部を模擬しており、直径500 mm、円筒部厚さ10 mmである。本装置では反射体前方における円筒デトネーション波形成に必要なドライバーガス過供給量の知見を得る。円筒燃焼器にドライバーガス(水素酸素量論混合気)をプリデトネータから過供給し、ドライバーガス量(過供給半径R)をパラメータにして、ターゲットガス領域に円筒デトネーション波を伝播させる検証を行った(図4)。

4. 研究成果

- (1) 研究方法3-(1)で得られた成果について述べる。図5は図2のIの壁面で得られたすす膜模様を示す。図5において破線Bの位置が円筒部と円錐部の境界位置である。図5の上図は壁面に残されたデトネーションのセル模様が、円筒部から円錐部が変わる部分でも変化せず、デトネーション波が消炎せず連続的に伝播していることを示す。一

方、図5の下図は、破線Bを通過したデトネーション波は破線Cの位置で消炎している。上図の条件をGo、数の条件をNogoとし、全実験場結果をまとめたものが図6である。図中の白抜きがGo、中実のシンボルがNogoを示す。縦軸は円筒流路幅Lをデトネーション波のセルサイズで無次元化したもの、横軸は円錐部の半頂角である。入射する円環デトネーション波は流路幅に関係なく、円錐角度が15°の場合では流路に沿って消えることなく伝播していたが、30°以上の角度では環状流路拡大部分でいったん消炎し円錐部分で再開始することによって円環デトネーションから平面デトネーションに遷移した。また、円環デトネーション波から平面デトネーション波へ消炎することなく遷移する場合の環状流路に存在するセルの個数と、円錐部分の角度αの関係を探ると、αが15°の場合は2.2個、30°の場合は3.2個、45°以上の場合は4.2個以上流路幅に対しセルの個数が存在すれば消炎することなく伝播することが確認された。図7に円環デトネーション波が反射体円錐部に入射する場合の概念図を示す。図中の細線はデトネーション波の三重点の軌跡を表

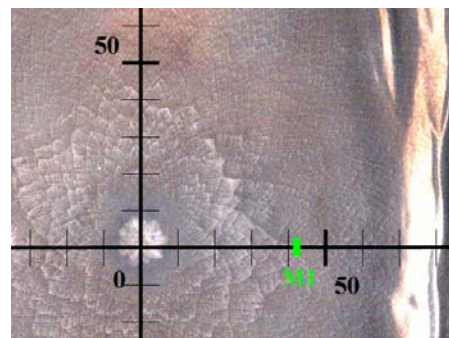


図8 円筒デトネーション波

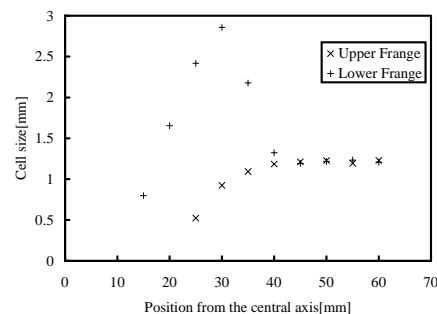


図9 円筒デトネーション波のセルサイズ変化

す。本研究で用いた水素-酸素-窒素系におけるデトネーション波三重点の軌跡の角度 ϕ は約30度である。円錐部入射時に一番反射体に近い三重点の軌跡Aに注目すると、円錐角が15度の場合はこの軌跡が壁面に衝突し強い局所爆発を起こす。その結果、三重点の軌跡が破線Bのように反射し、デトネーション波の消炎を抑える効果が生じる。一方、円錐角が45度の場合、この三重点の軌跡が円錐部壁面に衝突することなく、上記の反射の効果を得られないため、デトネーション波が消炎するものと考えられる。

- (2) 研究方法3-(2)で得られた成果について述べる。図8は図3の全領域をドライバース（水素-酸素量論混合気）で満たして実験した場合における底面（図3赤線部）でのすす膜模様である。セル模様は中心部から放射状に広がり拡大するが半径40mm付近で大きさに変化がない領域が観察される。図9は各半径におけるセルサイズの周平均をプロットしたものである。上下のセルサイズは半径40mmまでは違う傾向を示すが、40mmより大きい領域はドライバースのセルサイズである1mmになる。このことからドライバース組成における安定したデトネーション波は半径40mmの位置で形成されると判断できる。次に、円筒燃焼器にドライバース（水素酸素量論混合気）をプリデトネータから過供給し、ドライバース量（過供給半径）をパラメータにして、ターゲットガス領域に円筒デトネーション波を伝播させる検証を行った。結果を図10に示す。初期圧力が1atmである。最小過供給半径が75mmで水素空気量論混合気（窒素濃度55.6%）のターゲットガスにデトネーション波を伝播させることに成功した。上述のドライバースのみを充填して実験を行った場合、半径40mmの位置で、セルサイズの均一な安定円筒デトネーション波が形成されるが、ターゲットガスに対してドライバースを供給する場合、境界領域に厚さ約40~50mmの混合領域が形成されることが数値解析により判明した。以上の結果より、安定な円筒デトネーション波の形成に必要な位置（半径40mm）までターゲットガス領域を形成するためには、上記の混合領域を考慮してドライバースを充填する必要があることが分かった。以上の結果より、半径が100mmを超える大口径燃焼器に対しては、反射体前方をすべてドライバースを満

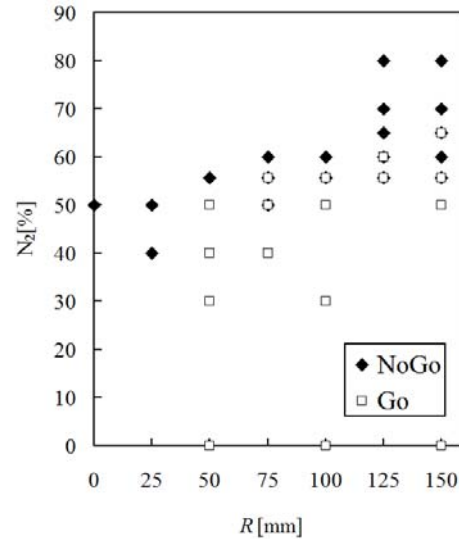


図10 過供給半径に対するデトネーション波の伝播状況

たすことなく円筒デトネーション波を形成できることが分かった。このことから、大口径燃焼器に対しては全体に対するドライバース使用率1%未満にできる可能性が示された。

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2件)

- ① Masashi WAKITA, Masayoshi TAMURA, Akihiro TERASAKA, Kazuya SAJIKI, Tsuyoshi TOTANI and Harunori NAGATA, “Development of Pulse Detonation Engine Initiator Using Reflector for Large Bore Combustor”, TRANSACTIONS OF THE JAPAN SOCIETY FOR AERONAUTICAL AND SPACE SCIENCES, AEROSPACE TECHNOLOGY JAPAN, Vol. 10, No. ists28 pp. Pa_31-Pa_36, (2012).
- ② Masashi Wakita, Ryusuke Numakura, Takatoshi Asada, Masayoshi Tamura, Tsuyoshi Totani and Harunori Nagata, “Driver Gas Reduction Effect of Pulse-Detonation-Engine Initiator Using Reflecting Board”, Journal of Propulsion and Power, 0748-4658, Vol. 27, No.1, pp. 162-170, (2011).

[学会発表] (計10件)

- ① Masashi Wakita, “Development effort of pulse detonation engine initiator using reflector at Hokkaido

university” , International Workshop on Detonation for Propulsion 2011, November 14-15, 2011, Paradise Hotel, Busan, Korea.

- ② Masashi Wakita, Masayoshi Tamura, Akihiro Terasaka, Kazuya Sajiki, Tsuyoshi Totani and Harunori Nagata, “Planar toroidal detonation propagation through gradual expanding channel” , Proc. 23rd International Colloquium on Dynamics of Explosion and Reactive Systems (23rd ICDERS), Irvine, USA (2011), R11A -98 (on USB).
- ③ Masashi Wakita, Masayoshi Tamura, Akihiro Terasaka, Kazuya Sajiki, Tsuyoshi Totani and Harunori Nagata, “Development of Pulse Detonation Engine Initiator using Reflector for Large Bore Combustor” , Proc. 28th International Symposium on Space Technology and Science (ISTS), Naha, Japan (2011), paperNo. 2011-a-57 (on CD-ROM).
- ④ Masashi Wakita, Masayoshi Tamura, Akihiro Terasaka, Tsuyoshi Totani and Harunori Nagata, “Effects of flow passage shape around reflector on detonation transition” , Proc. 8th International Symposium on Hazards, Prevention, and Mitigation of Industrial Explosions (8th ISHPMIE), Yokohama, Japan, Sept. 5-10, (2010)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

脇田 督司 (WAKITA MASASHI)
北海道大学・大学院工学研究院・助教
研究者番号：80451441

(2) 研究分担者

()

研究者番号：

(3) 連携研究者

()

研究者番号：