# **TED Plaza**

# 反射体を用いた大口径 PDE イニシエータに関する研究



脇田 督司

北海道大学 助教 大学院工学研究院 機械宇宙工学部門 m-wakita@eng.hokudai.ac.jp

1. はじめに

デトネーションは、可燃性混合気中を先行衝撃波とそれによって誘起される反応面とが一体と なって超音速で自走伝播する燃焼波である. 一般的な燃焼波の伝播形態であるデフラグレーショ ンに比べて伝播速度が格段に速く(2~3 km/s),デトネーションが伝播した可燃性混合気は瞬時 に燃焼し高温・高圧の既燃ガスになる. Zeldovich (1940) (Zeldovich, 2006) は、デトネーショ ンを利用した熱サイクルの理論熱効率がブレイトンサイクル(定圧燃焼サイクル)よりも高いこ とを示した. デトネーションを推進機関に利用する研究は 1940 年に Hoffmann (1940) によって はじめられ, 1957年に Nicholls らによってパルスデトネーションエンジン (PDE) が提案され基 礎研究がおこなわれた(Nicholls, et al., 1957). しかし当時はデトネーションそのものに対する理 解がまだ十分ではなく、研究はあまり進展しなかった.その後、デトネーションに関する基礎的 な理解が深まるにつれ、1980年代後半から 1990年代前半にかけて、PDE をはじめとするデトネ ーションを利用した推進機関に関する研究が再び盛んに行われるようになり、現在では、デトネ ーション波の推進利用のみをターゲットにした International Workshop on Detonation for Propulsion が毎年開催されるなど、本研究分野に対する国際的関心は極めて高い、デトネーションの推進利 用に関するこれまでの研究は、Eidelman ら(1991), Kailasanath (2000, 2003), Roy ら(2004) により優れたレビュー論文が発表されているので参照されたい.現在,デトネーション波を利用 した推進機関には前述の PDE とローテーティングデトネーションエンジン (RDE) の2 方式が主 に検討されている. PDE と RDE の最近の研究動向に関しては笠原(2013)により詳細に述べられ ているので参照されたい.

はじめに PDE のサイクルを図1を使って簡単に説明する. PDE はまず片側が閉じた管内に可燃 性混合気が充てんされる(図 1-①). 次に左端壁面で混合気に点火し,デトネーションが伝播す



る(図 1-②). 点火直後の燃焼波はデフラグレーションであることが多いが,膨張した既燃ガス により加速されデトネーションに遷移する. デトネーションが伝播し高温・高圧になった既燃ガ スを開管端がら噴出させ推力を得る(図 1-③). 最後に既燃ガスと新たに充填される次サイクル の混合気を分離するために空気などのガスを充てんするパージ過程(図 1-④)を経て,①に戻る. PDE は構造が極めてシンプルで,周波数制御により自由にスロットリングが可能といった特長が あるが,推進剤を間欠供給するため大流量化が難しく,またサイクル間の燃焼を分離するための パージ過程の存在により高周波数化も困難である. 結果,高推力 PDE は実現していない.

PDE に対して,近年一段と注目されているのが RDE である. RDE は,2 重円環流路に軸方向から超音速ノズルを利用したインジェクターによって供給された推進剤を,周方向に伝播する回転デトネーションで連続的に燃焼させて推力を得る推進機関である(図 2) (Wolanski, 2013) (Hishida, et al., 2009). 特長として,デトネーションの開始が最初の一度きりでよく,PDE のようなパージ 過程を必要としないため大流量の推進剤を連続供給でき高推力を得ることができる. 一方課題として,周波数が数 kHz オーダーになるため,デトネーションが燃焼器の上流部数 cm のごく限られた領域で伝播し,燃焼室壁面の熱負荷が極めて大きいこと,また,回転デトネーション波が成立可能な流量条件に制約があるため,推力スロットリングできる幅が極めて狭いことなどが挙げられる.

#### 2. 反射体を用いたデトネーションイニシエータ

PDE にしても RDE にしても, 意図したタイミングでデトネーションを開始し, 意図した方向や 場所にそれを伝播させることが極めて重要である.水素 - 酸素混合気やアセチレンやエチレン -酸素混合気といった反応性の高い混合気の場合は一般的なスパーク点火によって容易にデトネー ションを開始することができる.しかしエアーブリージングエンジンとして PDE や RDE を運用 する場合,酸化剤には空気,燃料には炭化水素系の液体燃料の利用が想定される.このような推 進剤は一般的にデトネーションの開始が極めて困難である.また PDE の大推力化を図るために著 者らは大口径デトネーション燃焼器の開発が重要と考えているが、デトネーション燃焼器の直径 が大きくなるとデフラグレーションからデトネーションに遷移する距離が極めて長くなることが 知られている.よってこのような条件下で,短距離短時間で大面積のデトネーション波を開始さ せることが可能なイニシエータ(開始機構)の開発が必要不可欠である. そこで著者らは図3に 示すような「大口径 PDE 用イニシエータ」の開発を行っている(Wakita, 2013, 2012, 2007, 2011). 本イニシエータの特徴は、プリデトネータと呼ばれる細い衝撃波管を利用している点と、反射体 とよばれる障害物を燃焼器内に設置している点である.本イニシエータでは燃料-酸素混合気(ド ライバーガス)を用いてプリデトネータ内に生成した平面デトネーション波(図 3-A)を反射体 に衝突させ、円筒波(図 3-B)、円環波(図 3-C)と波面を拡大し、燃料-空気混合気(ターゲット ガス)を連続供給した大口径 PDE 燃焼器に平面デトネーション波(図 3-D)を伝播させる.デト ネーションの開始にドライバーガスを利用する場合、燃料に加えて酸化剤となる酸素も機体に追 加搭載する必要があるため比推力が低下してしまうという問題がある。そこで可能な限り使用量



Fig. 3 The concept of a detonation initiator with reflector

を削減することが求められるが、これまでの研究成果により、本イニシエータにおけるターゲットガスに対するドライバーガスの利用割合は 1%以下であることが示されている(Wakita, 2013, 2012).また、本イニシエータの重要な特長として、波面拡大の大部分を円筒デトネーション波(図 3-B)が担っている点が挙げられる.一旦、中心部でデトネーション波が開始すれば消炎せずに半径方向に自走伝播するというこの円筒波の性質と、デトネーション波が伝播する途中で複数回壁面に衝突することによる伝播促進効果により、本イニシエータは、拡大管路によりデトネーション波面を単純拡大する場合に比べて、エンジン全体の L/D を劇的に小さくすることができる.

#### 3. 拡大流路における円環デトネーション波の伝播限界

前述の通り,著者らが提案するイニシエータではデトネーション波は4つの伝播形態をとる. その内,円筒デトネーション波(図 3-B)は拡大過程において一定速度で伝播する安定なデトネーション波が形成されれば、半径方向に拡大伝播する過程で消炎することはない.一方,円環デトネーション波(図 3-C)に関しては、その拡大角によってデトネーション波の伝播限界に違いが生じる.本節ではこの拡大流路における円環デトネーション波の伝播限界に関して、著者らが得た知見を紹介する(Wakita, 2011).

実験装置を図4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 d は 10 mm である. 円錐形状反射板は円筒部 Ⅱと円 錐部 III 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(流路の拡大角) αを15~90度に変化させて実験を行うことができる. 燃焼器などの壁 面を灯油等であぶってすすを付着させておくと、デトネーション波が通過時に図5に示されるよ うな特徴的な魚鱗模様が観察される.この鱗模様の一つをデトネーションのセルといい、このセ ルの幅を一般的にセルサイズルと呼ぶ. セルサイズは混合気の組成, 初期圧力, および初期温度のみ によって決まり, 混合気の反応性が高い気体ではセルは小さくなり, 反応性が低い気体では大きくなる. 図5においてデトネーション波は左から右に伝播しており、破線Bの位置が円筒部と円錐部の境界位置 である. 図5の上図はデトネーションのセル模様が破線Bを通過しても変化しておらず, 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が示されている. 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,下図の条件をNogoとし、全実験結果をまと めたものを図6に示す. 図中の白抜きがGo, 中実のシンボルが Nogo である. 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, 横軸は拡大角αである. 図を見て明らかなように拡大角 αが 15 度の条件では L/ λ が 4 以下でも伝播に成功しているのに対し、拡大角αが 30 度以上の条件では 伝播可能な L/えの下限は4程度で一定であることが分かる.この傾向はどの流路幅においても同様であ る.よって拡大流路における円環デトネーション波の伝播限界は拡大角が30度以下の条件で向上するこ



Fig. 4 Experimental apparatus

Fig. 5 Smoke records on the wall (Fig. 4-I)

#### JSME TED Newsletter, No.77, 2015

とが示された.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,拡大角が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度以上の場合は,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,拡大流路によるデトネーション波の伝播限界の向上効果が見られないものと考えられる.



Fig. 6 The transition status



Fig. 7 2D conceptual diagram of the transition of the planar toroidal detonation at the convex corner.

## 4. おわりに

本稿では、デトネーションを利用した推進機関であるパルスデトネーションエンジン (PDE) と最近注目されているローテーティングデトネーションエンジン (RDE) に関して紹介し、著者 らが開発している「大口径 PDE 用イニシエータ」のコンセプトと、その内部における円環デトネ ーション波の伝播限界に関し、著者らが最近得た知見に関して紹介した.デトネーションに関す る研究は過去現在を問わず、主に爆発安全の観点から盛んに研究されてきた.長年の研究の積み 重ねにより、デトネーションは過去の手に負えない危険な存在から、人の手で自在にコントロー ルし、より積極的で有益な利用が可能になってきている.今後も推進用途のみならず、デトネー ションの新たなる利用分野の開拓が望まれる.

## 謝 辞

本研究は JSPS 科研費 25870006, 21760646 の助成を受けたものです.

#### References

- (1) Zeldovich, Ya. B., Journal of Propulsion and Power, Vol. 22 (2006), pp. 588-592.
- (2) Hoffmann, H., German Aeronautical Research, Research Report No. 1265 (1940).
- (3) Nicholls, J. A., Wilkinson, H. R. and Morrison, R. B., Intermittent Detonation as a Thrust-Producing Mechanism, Jet Propulsion, Vol. 27, No. 5 (1957), pp. 534-541.
- (4) Eidelman, S., Grossmann, B. and Lottati, I., Review of propulsion applications and numerical simulations of the pulsed detonation engine concept, Journal of Propulsion and Power, Vol. 7, No. 6 (1991), pp. 857-865.
- (5) Kailasanath, K., Review of Propulsion Applications of Detonation Waves, AIAA Journal, Vol. 38, No. 9 (2000), pp. 1698-1708.
- (6) Kailasanath, K., Recent Developments in the Research on Pulse Detonation Engines, AIAA Journal, Vol. 41, No. 2 (2003), pp. 145-159.
- (7) Roy, G. D., Frolov, S. M., Borisov, A. A. and Netzer, D. W. Pulse Detonation Propulsion: Challenges, Current Status, and Future Perspective, Progress in Energy and Combustion Science, Vol. 30, No. 6 (2004), pp. 545-672.

- (8) 笠原次郎, パルスデトネーションエンジン開発の現状, 日本燃焼学会誌, Vol. 55 No. 174 (2013), pp. 337-348.
- (9) Wolanski, P., Proceedings of the Combustion Institute, Vol. 34 (2013), pp125-158.
- (10) Hishida, M., Fujiwara, T. and Wolanski, P., Shock Waves, Vol. 19 (2009), pp 1-10.
- (11) Wakita, M., Tamura, M., Terasaka, A., Sajiki, K., Totani, T. and Nagata, H., Detonation Transition around Cylindrical Reflector of Pulse Detonation Engine Initiator, Journal of Propulsion and Power, Vol. 29, No. 4 July–August (2013), pp. 825-831.
- (12) Wakita, M., Tamura, M., Terasaka, A., Sajiki, K., Totani, T. and Nagata, H., 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 (2012), pp.Pa\_31-Pa\_36.
- (13) Wakita, M., Numakura, R., Itoh, Y., Sugata, S., Totani, T. and Nagata, H., Detonation Transition Limit at an Abrupt Area Change Using a Reflecting Board, Journal of Propulsion and Power, Vol. 23, No. 2 (2007), pp. 338-344.
- (14) Wakita, M., Numakura, R., Asada, T., Tamura, M., Totani, T. and Nagata, H., Driver Gas Reduction Effect of Pulse-Detonation-Engine Initiator Using Reflecting Board, Journal of Propulsion and Power, Vol. 27, No. 1 (2011), pp. 162-170.
- (15) Wakita, M. Tamura, M. Terasaka, A. Sajiki, K., Totani, T. and Nagata, H., Planar toroidal detonation propagation through gradual expanding channel, Proceedings of the 23rd International Colloquium on the Dynamics of Explosions and Reactive Systems (ICDERS) (2011), Irvine, USA, R11A -98 (on USB).