

パルスデトネーションエンジン持続運転における熱流体力学

Thermo-fluidynamics of Continuous Operations of Pulse Detonation Engines

大八木重治 (理工学研究科・教授)

Shigeharu Ohyagi (School of Science and Engineering, Professor)

Abstract

A PDE equipped with the rotary-valve was constructed. Fuel, which is hydrogen, was injected through a solenoid valve. Punched plates were used to promote mixing of fuel with air. In this paper, multi-cycle operations for 25Hz, 3.5 second were conducted. It was investigated that what kind of hole shape, number of fuel injection port, equivalence ratio, fill fraction were effective for the mixing and subsequent detonation process. As a result, equivalence ratio of about 1.1 is the optimal value for this equipment.

Key Words : Pulse Detonation Engine, Detonation, Rotary-Valve

1. はじめに

パルスデトネーションエンジン (以下, PDE) は次世代航空宇宙機用エンジンとして様々な研究機関で開発が進められている⁽¹⁾. その基礎として安定した高周波/長時間作動を実機に近い装置で行うことが求められている. これまでの研究例を以下に示す. Bussing ら⁽²⁾は円板型ロータリーバルブとイニシエータを用いた, 2気筒気体燃料 PDE で 80 Hz, 30 s 作動に成功した. 広島大の研究グループは, 酸水素イニシエータを用いた液体燃料 PDE で, 円筒型ロータリーバルブ⁽³⁾を使用し, 10 Hz 単発作動を行った. その後, イニシエータ付き気体燃料 PDTE (パルスデトネーションタービンエンジン)⁽⁴⁾を構築し, 10 Hz, 5 s 作動を行った. これらの知見を勘案し, 本研究では, 低供給圧, 円筒型のロータリーバルブを用いた装置における 25, 30Hz における作動の高性能化を目指して, 前年度の装置での実験結果⁽⁵⁾⁽⁶⁾から最適化した燃料噴射方向, 最適な混合促進体, 当量比/充填率を元に改良 (水素供給のレギュレータ, 掃気改善, 新プレート) を施した装置で, 性能改善への影響の効果を 25Hz での作動について調べた.

2. 実験装置

図 1 に実験装置の概略図を示す. PDE 管は内径 38 mm, 長さ 990 mm のステンレス管である. ブロア (昭和電機, U2S-370) から空気を流し, サージタンク, ロータリーバルブを経て PDE 管に吸入させる. サージタンクは空気供給量の変動を防ぐ目的で設置する. また, 配管の途中にゲートバルブを設け空気量を調節する. 燃料は水素を用いて, 噴射には電磁バルブ (MAC, 35A-AEA-DDFA-1 BA) を用いる. ロータリーバルブ直後に設置した噴射ポートから PDE 管に供給する. 噴射ポートは上下にそれぞれ 2 カ所, 左右に 1 カ所ずつ設けており, 噴射位置を自由に変更でき, 任意の燃料噴射用の電磁バルブを装着できる. また, 水素の供給圧変動を低減するために, 水素ボンベと電磁バルブの間にストレージ, 高精度レギュレータを新たに設けている. 噴射ポートから 117 mm に点火プラグ (NGK, DCPR7E), 735, 887 mm に圧力変換器 (PCB, H113A24 : PT1, PT2) とイオンプローブ (I1, I2) を各々対向設置する. DDT を促進するために, PDE 管には 700 mm のスパイラル溝付管を使用した. 本実験で

は, ゲートバルブは全開にしており, 25 Hz 作動時の供給量は 3.1L/cycle, 全圧 30 kPa である.

図 2 に 1 サイクルのタイムシーケンス例を示す. バルブの開き始めと同時に空気を吸入し, 強制的な掃気 (パージ) を行った後, 燃料噴射を行い, バルブが閉じた後に点火, 燃焼排気という過程を踏む. 開き始めの検出には 180° 感覚にスリットを設けたエンコーダとフォトインタラプタを用いる. つまり, ロータリーバルブの半回転が 1 サイクルに対応する. スリットから透過光 (入力信号) を検出すれば, 制御プログラムが開き始めを認識して燃料噴射・点火・燃焼排気時間を制御する. ロータリーバルブの開弁時間は 1 サイクル時間の 60%に相当する. エンコーダはロータリーバルブ駆動用モーターの軸と同軸上に設置する (図 1).

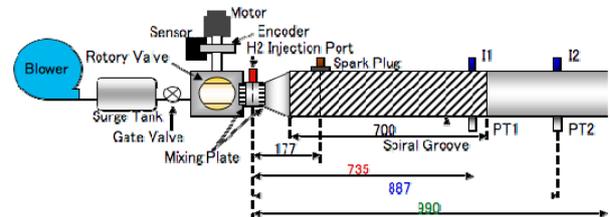


Fig. 1 Schematic of experimental apparatus

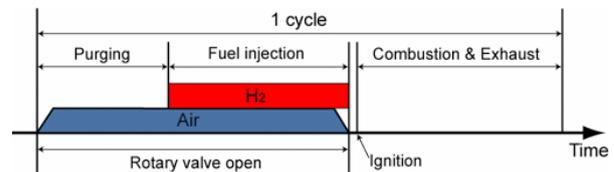


Fig. 2 Time sequence of 1 cycle (25Hz)

3. 実験方法及び実験条件

実験は, 基本的に 25Hz, 90 サイクル (3.5s) 作動で行い, タイムシーケンスを [14-10-1-15] (内訳はパージ-燃料噴射-点火-燃焼排気の順で記載) とした. また燃料噴射は 2 ポート噴射の場合, 上方 2 カ所から, 4 ポートの場合は上下 4 カ所から噴射している.

また, 今回から水素ボンベからの燃料供給の際のレギュレータ (図 4) を高精度調圧弁に替えたところ, 供給圧の変動及び減少が抑えられ, 安定作動に大きく影響した.

3-1 混合促進体の影響

実験条件を表1に示す。図3に使用した多孔プレート、オリフィス型プレート2枚を示す。本研究では噴流断面を複雑化することで空気の乱れを促進し、混合状態を改善することを試みた。

オリフィス型プレートの特徴としては、P1：面内方向に三角柱を挿入した形になっていて、P2：絞り効果をねらった形状になっている。

3-2 当量比・充填率の影響

実験条件を表2に示す。上流、下流ともに混合促進体の有無に関わりがないため、装着せずに実験を行った。

3-3 燃料噴射ポート数の影響

実験条件を表3に示す。3-5の条件同様、混合促進体は装着せずにやっている。2ポート、4ポート噴射の当量比、充填率への数値的影響が在るかどうを示してある。

3-4 30Hzでのデトネーション作動について

各種装置の改良により25Hzにおける安定作動が実証された。このため、30Hzにおいても作動が達成できるか実験を行った。25Hz時のタイムシークエンスをそのままは使えない。実験条件は表4に示す。

Table.1 Experimental Conditions (3-1)

Kind of Plate Pairs	P3-N	P3-P6	P5-P6	N-N
Equivalence Ratio	0.916	0.913	0.916	0.906
Purge Fraction	1.7	1.7	1.7	1.7
Fill Fraction	1.47	1.47	1.47	1.47

Table.2 Experimental Conditions (3-2)

Data Number	#1	#2	#3
Equivalence Ratio	0.906	1.04	1.11
Purge Fraction	1.7	1.7	1.7
Fill Fraction	1.47	1.53	1.56

#4	#5	#6	#7
1.17	0.941	0.938	0.909
1.7	1.85	1.54	1.54
1.58	1.26	1.7	1.69

Table.3 Experimental Conditions (3-3)

Fuel Injection Port Number	2	4
Equivalence Ratio	1.11	1.1
Purge Fraction	1.7	1.7
Fill Fraction	1.56	1.55

Table.4 Experimental Conditions (3-4)

E.R	1.08	1.01	0.845
P.F	1.23	1.07	1.07
F.F	1.55	1.75	1.66
T.S	10.5-9.5-1-12.3	9.5-10.5-1-12.3	9.5-10.5-1-12.3

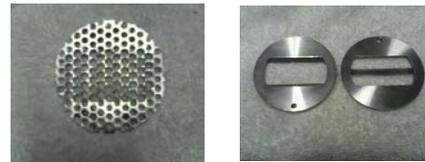


Fig.3 (1)Punched plate P3 (2)Orifice plate P5,P6



Fig.4 Accurate Regulator

4. 実験結果及び考察

高精度レギュレータを用いた時の、180回燃料を連続噴射したときの燃料噴射圧力値の変動を図5に示す。結果として、装置改良後、圧力変動は小さくなり、安定して水素の供給が行われている。実際に同実験条件でのデトネーション発生率は改良後の装置のほうがよいことを確かめた。

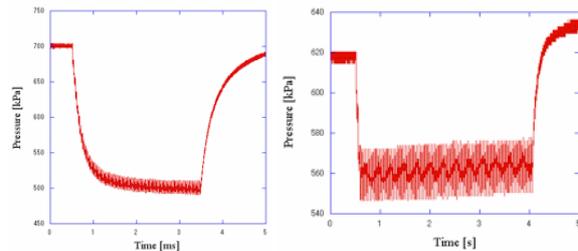


Fig.5 (a)Before improvement (b)After improvement

4-1 混合促進体の影響

レギュレータ改善後、再度混合促進体プレートの形状による作動状態を実験した結果を図6,7に示す。以前の実験においてはその組み合わせや有無で大きくデトネーション作動に影響を与えていたのだが、装置改良後の結果を見ると混合促進体の効果が如実にでているとは言い難い。データからはどれが最適かどうか判断しにくい。さらに何も装着しない状態とさほど変わらないのであれば今後、長時間連続作動時のプレートへの負荷を考えれば装着しない方が望ましいという結論を得た。

レギュレータの改良により燃料の安定供給が実現したことにより上記の結果となったことから、混合促進体の効果については、ある絶対基準量となる燃料の量があるとして、PDE管内の空気噴流に対して毎回の噴射量が安定していれば形状による混合の促進の影響はそれ以上生じないものと考えられる。

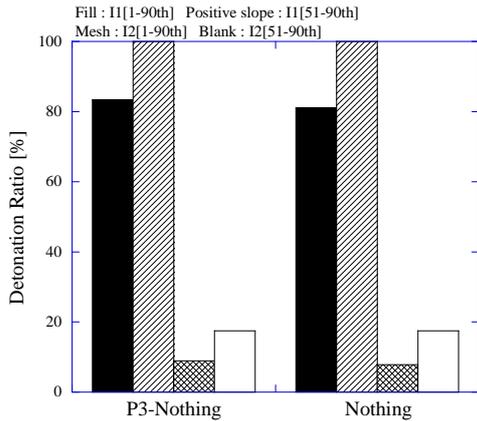


Fig. 6 Detected detonation rate about mixture plate

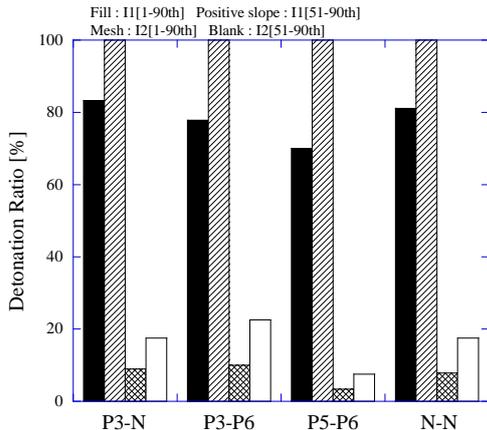


Fig. 7 Detected detonation rate about mixture plate

4-2 当量比・充填率の影響

表 2 に基づいて、当量比・充填率を変化させ、混合促進体を用いずに実験を行った。

当量比のみ変化させた場合、充填率のみ変化させた場合、両方変化させた場合を複合的に図 8 に示した。これは各サイクルでの衝撃波と燃焼波の一致率を全サイクルに対して、さらに 90 サイクル全体での一致率と作動後半 (51-90 サイクル) の一致率の比較もを行っている。その結果、作動後半での一致率がほとんどの実験で 100% に近い値となった。これは管壁への熱損失などが考えられる。当量比の増加に伴い 1.1 前後が最適値となる。測定箇所 I1=735mm, 51-90cycle に着目すると、0.94 前後が最低値となる (#1~#3)。また充填率に関しては、管容積に対して最低 140% 以上混合気を充填する必要がある。

当量比が 1 より大きくなっていることについては、管内の混合状態が均一ではないためであると考えられる。充填率が 100% を超えている事に関しては、以前の実験で見積もりを行った際の空気流量を多めにとりてしまっていることが原因ではないかと考えられる。充填率を上げると、全体としての結果が良くなるため、このまま数値を上げて実験していき、率の上昇がなくなる値を見つけることで PDE 管内に混合気が十分に充填していることになるはずである。

4-3 燃料噴射ポート数の影響

燃料噴射ポートを上方 2 箇所と上下 4 箇所にした場合を比べた結果のデトネーション検知率を図 9 に示す。これよりポート数 2 の方が検知率という点において優

れていることがわかった。燃料と空気の混合への影響として燃料噴射位置と形状に関して、以前の研究で噴射位置に関しては 2 ポートにおいては上方 2 箇所から最適という結果が得られている。今回、2 ポート、4 ポートでどのような基本的差異があるかといえば、各ポートの噴射圧力と PDE 管内の空気噴流に接しているバルブの断面積値の 2 つである。1 サイクルでの燃料の総噴射量が同じであるならば、2 ポートで噴射圧を高くしなければならない。噴射圧が高いと空気流に対しての貫通距離が多くなっているはずであるからその分 4 ポートよりも混合状態はよくなる。また、後者の噴射断面積の大きさの違いに関しては 4 ポートに歩がある。これらを踏まえて、2 ポートによる作動の方が適しているということは、混合への影響は噴射圧が効果を生ずることがわかる。

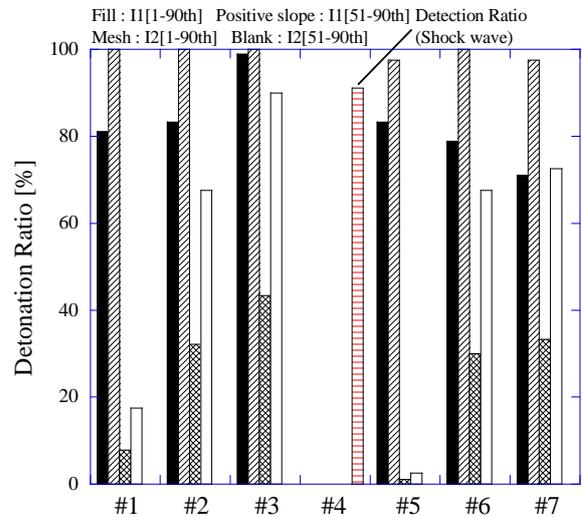


Fig.8 Detected detonation rate about E.R, F.F

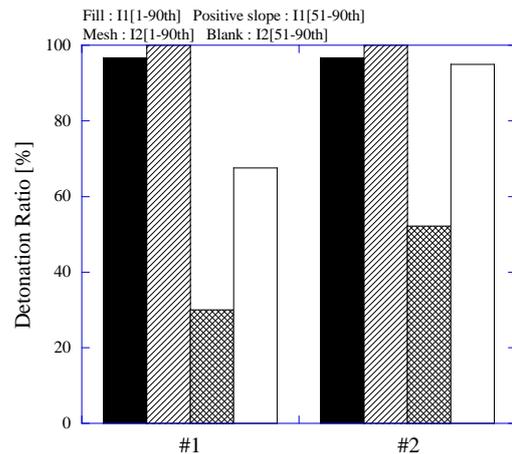


Fig. 9 Detected detonation rate port number 4 (#1), 2 (#2)

4-6 30Hz での作動での影響

図 10,11 に 30Hz でのデトネーション検知率と 90 サイクル全体での圧力波形およびイオンプローブの波形を示す。実験番号 # 1 と # 2 では同当量比でのパーセント割合の変化によるデトネーション作動について比較している。# 2 はパーセント不足でデトネーション作動には

至っていない。30Hz ではタイムシーケンスが 25Hz に比べさらにシビアになっていることがわかる。ページ率に関しては管容積に対して最低 120%以上のページ量が必要である。また、#2 と #3 における同ページ量で当量比を変化させた場合に、当量比を減らした #3 でデトネーション作動が起きていることから、既燃気体を完全に排出するのに必要なページ量の確保が求められ、今後 30Hz 独自のタイムシーケンスの最適化が必要である。また、実際に 30Hz でのデトネーションの性質を CJ デトネーションでの値（速度、圧力）と比較した（図 12,13 参照）。作動後半の方でデトネーション検知率が高いことは前にも述べたが、加熱された管壁からの熱は損失にもなるが混合気の均質化に対しても良い影響を与えているのではないかと考えられる。

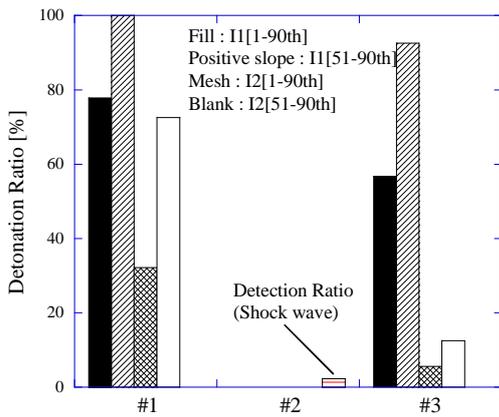


Fig.10 Detected detonation rate (30Hz)

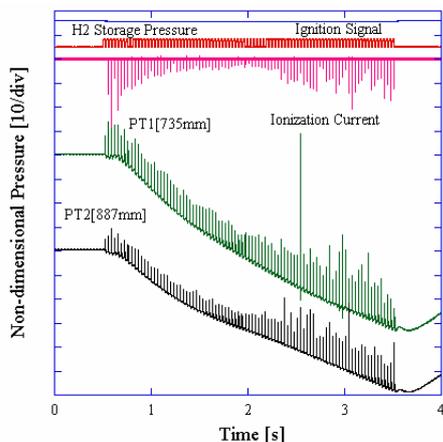


Fig.11 Pressure and ion probe profiles: (30Hz)

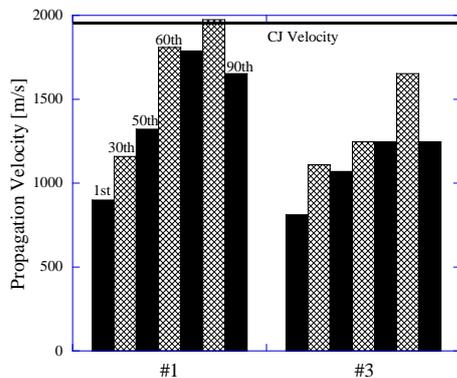


Fig.12 Propagation velocity of each cycle at 30Hz

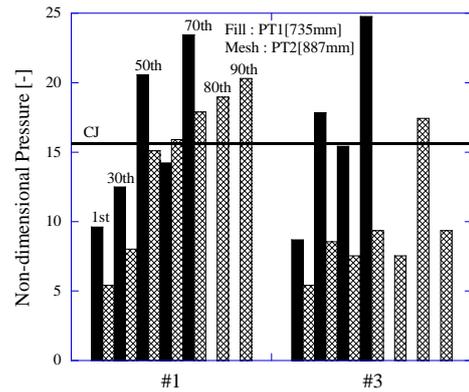


Fig.13 Non-dimensional pressure of each cycle at 30Hz

5. 結論

ロータリーバルブを装着した PDE を構築し、水素／空気の混合促進と正確なデトネーション作動を主な目的として、連続作動実験を行い、以下の知見を得た。

- 1) 混合促進体プレートの 組み合わせや有無は、デトネーション作動に大きな影響を与えない。
- 2) 当量比に関して 1.1 前後が最適値であり、I1 の 735mm の位置での 51-90cycle に着目すると、0.94 前後が最低値である。
- 3) 充填率に関して管容積に対して最低 140%以上混合気を充填する必要がある。
- 4) 空気流に対しては噴射断面積よりも噴射圧力が混合により影響を与える。
- 5) 30Hz 作動において、ページ率に関して管容積に対して最低 120%以上のページ量が必要。

本研究の遂行に当たり、本大学院理工学研究科博士前期課程柚木聡君、遠藤慎介君の協力を得たので深く感謝する。また、研究の全般について、村山元英氏（石川島播磨重工）の助言と協力を得たことを付記する。

参考文献：

- (1) K. Kailasanath., AIAA J., 41, 2003, pp.145-159
- (2) J.B.Hinkey, S.E.Henderson, and T.R.A.Bussing, AIAA 98-3881, 1998.
- (3) 八房ら, 酸水素イニシエータを用いた液体燃料 PDE の作動実験, 第 40 回燃焼シンポジウム講演集, pp. 231-232, 2002.
- (4) 遠藤ら, 単気筒パルスデトネーションタービンエンジンの性能, 第 43 回燃焼シンポジウム講演集, pp. 494-495, 2005.
- (5) 笹森ら, "ロータリーバルブを用いたパルスデトネーションエンジンの試作及び基礎研究", 平成 17 年度埼玉大学卒業論文, 2005
- (6) 柚木ら, "ロータリーバルブを装着した PDE のデトネーション作動に関する研究", 平成 17 年度衝撃波シンポジウム講演論文集, 2005, pp169 - 172