

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

○ 柚木聡, 桜井毅司 (埼玉大院), 笹森崇志, 小原哲郎, 大八木重治 (埼玉大工), 村山元英 (IHI)

A Study on Detonative Operation of PDE with Rotary-Valve

YUGI Satoshi, SAKURAI Takashi, SASAMORI Takashi, OBARA Tetsuro and OHYAGI Shigeharu
Department of Engineering, Saitama University, 255 Shimo ohkubo, Saitama, Saitama, 338-8570 JAPAN
MURAYAMA Motohide
Aero-engine & Space Operations, 229 Tonogaya, Mizuho-machi, Nishitama-gun, Tokyo, 190-1297 JAPAN

Abstract

A PDE equipped with the rotary-valve was constructed. Fuel, which is hydrogen, was injected by the solenoid valve. The porous plates was used to promote the mixing of fuel-air mixture. In this paper, multi-cycle operations for 20Hz, 4.5 second were conducted. It was investigated that what kind of porous shape and the fuel injection position were effective to the mixing and subsequent detonation process. As a result, the "IP2", which was downward injection to the air, was the best for the fuel injection position. The porous plate "P3" that has large open ratio and small aperture size was effective to the mixing and detonation. Detonations were not obtained at all cycles because the mixture could not be filled to the combustion tube uniformly.

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 (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る. 本研究グループでは, 大古ら⁽²⁾が高周波/長時間作動を目的に, 強制掃気や燃料充填の必要時間を抑えることで, 40 Hz, 0.25 s 作動に成功した. しかし, これ以上の高周波/長時間作動は不可能と述べている. この原因として, 作動周波数増加に伴って掃気的重要性が増すこと, 管壁に沿って後方まで配置した燃料噴射器が逆に掃気量を多く必要にさせること, そして電磁バルブの供給速度の限界を指摘している. また, 空気吸入をポンペ供給で賄った装置は実機と程遠い. 本研究では, 空気吸入を電磁バルブからロータリーバルブへ変更し, 実用を考慮する上で現実的な吸入方法を採用した. それに伴い, 空気源をブローとし, できる限り低い供給圧で連続作動を試みた. 同時に, 燃料噴射器を閉鎖端に集中させ, 掃気の改善を図った. これまでの研究例を以下に示す. Bussing ら⁽³⁾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⁽⁴⁾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)⁽⁵⁾を構築し, 10 Hz, 5 s 作動を行った. これらの知見を勘案し, 本研究では特に低供給圧の円筒型ロータリーバルブを用

いた装置を構築し, 20 Hz 作動の安定条件を探ることを目的として, 1) 燃料噴射箇所による影響 2) 燃料/空気の混合促進を目的とした多孔プレートによる影響 3) 当量比の影響を明らかにした.

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 1340 mm のステンレス管である. ブローから空気を流し, サージタンク, ロータリーバルブを経て PDE 管に吸入する. 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, 空気量を調整する. 燃料は水素を用い, ロータリーバルブ直後に設置した噴射ポートから PDE 管へ供給する. 噴射ポートは 6 箇所設けられ, 噴射位置を自由に変更できる. 水素噴射には電磁バルブを用いた. また, 水素の供給圧変動を低減するために, 水素ポンペと電磁バルブの間にストレージを設けた. 噴射ポートから 177 mm に点火プラグ, 870 mm, 1170 mm に圧力変換器 (PT1, PT2) とイオンプローブ (I1, I2) を各々対向して設置する. 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, ゲートバルブを全閉とし, 20 Hz 作動時の供給量は 2.1 L/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° 間隔にスリットを設けたエンコーダとフォトセンサを用いる。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、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全行程の 60 % である。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）。

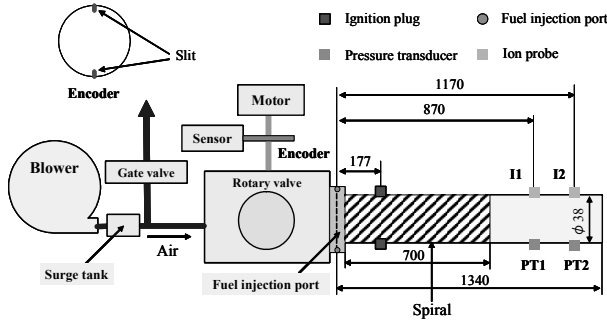


Fig. 1 Schematic of experimental apparatus

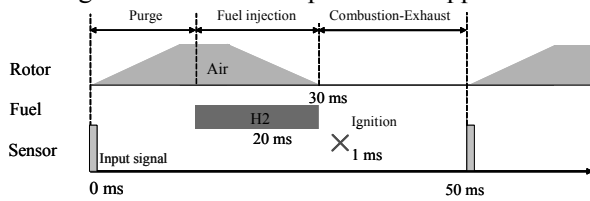


Fig. 2 Time sequence of 1 cycle (20 Hz)

3. 実験方法及び実験条件

実験は 20 Hz, 4.5 s (90cycle) 作動で行い、サイクルの内訳は、強制掃気 (10 ms), 燃料噴射 (20 ms), 点火 (1 ms), 燃焼排気 (19 ms) である。

3-1 燃料噴射方式による影響

実験条件を表 1 に示す。混合促進用の多孔プレートは一切使用しない。2 箇所での噴射ポートを用いて、3 パターン (IP1-IP3) の噴射方式で実験を行った (図 3)。

3-2 多孔プレートの影響

実験条件は表 1 と同様である。3 パターンの噴射方式で、最も燃焼状態が良好な噴射方式で実験を行った。4 パターン (P1-P4) の多孔プレートの仕様を表 2 に、写真を図 4 に示す。開口率は 3 パターンを用意した。また、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、混合状態を改善できると考えた。そこで、P4 を P3 と同じ開口率のまま、直径が 2 種の円孔を設けて、形状を複雑化した。具体的には、P1 をベースに一部の孔径を拡大することによ

って、凹凸を形成させる。凹凸を通過した噴流は、凹部/凸部で噴流の広がり方が異なり、これを利用して混合促進効果を狙った。多孔プレートは燃料噴射ポートを挟んだ 2 箇所 (上流/下流) に設置可能である (図 5)。

3-3 当量比の影響

実験条件を表 3 に示す。最も燃焼状態が良好な噴射方式と多孔プレートの組み合わせで実験を行った。当量比は、水素ストレージ圧力が一定した状態で算出した。ストレージを設置したが、変動を完全に無くすることはできず、約 15 cycle まで供給圧が減少し、それ以降は一定に収束する。従って、作動初期は実験条件に示した当量比より高い。

Table 1 Experimental conditions (3-1, 3-2)

Equivalence ratio	0.43
Fill fraction	1.15
Purge fraction	0.42
H2 injection pressure [MPa]	0.419
Initial conditions	Atmospheric conditions

Table 2 Porous plates

	P1	P2	P3	P4	
Hole diameter [mm]	3	1	3.5	3	5.6
Number of holes	54	218	54	44	8
Open ratio [%]	49	22	64		

Table 3 Experimental conditions (3-3)

Equivalence ratio	0.38	0.43	0.48
Fill fraction	1.13	1.15	1.17
Purge fraction	0.42		
H2 injection pressure [MPa]	0.373	0.419	0.467
Initial conditions	Atmospheric conditions		

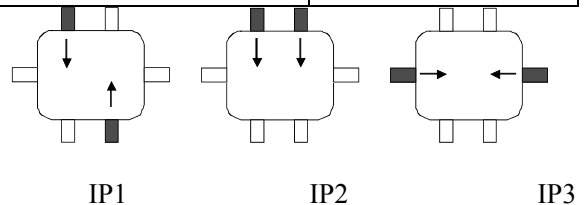
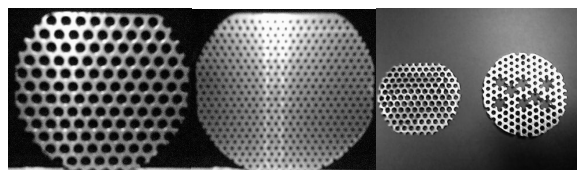


Fig. 3 Injection method



(1) P1 (2) P2 (3) P3
 (4) P4

Fig. 4 Photograph of porous plates

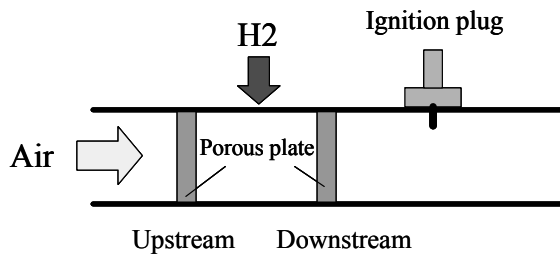


Fig. 5 Position of porous plate

4. 実験結果及び考察

4-1 燃料噴射方式による影響

図 6 に全サイクル (90 cycle) に対する燃焼回数割合 (以下, 着火率) と 5 つの測定サイクル (1st, 30th, 60th, 72nd or 73rd, 90th cycle) における燃焼波と衝撃波が一致した割合 (以下, 一致率) を示す。一致の判定基準は, 衝撃波の到達時刻を基準に 4 μ s 以内とする。横軸は燃料噴射方式と多孔プレートの種類を示している。尚, 図 6 には多孔プレート使用時の結果も併記した。"N"が多孔プレートを使用しないことを表し, 左に

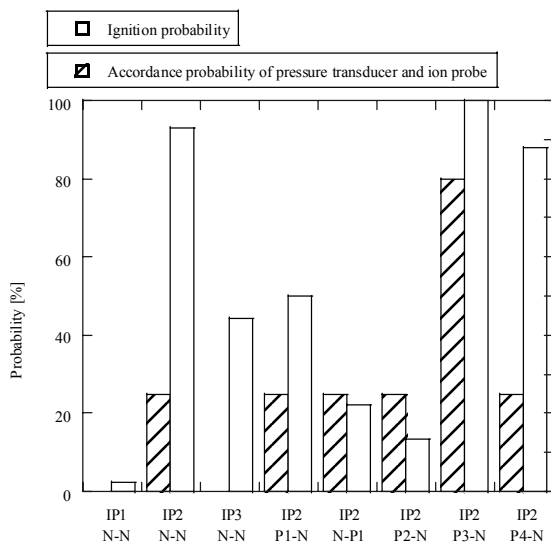


Fig. 6 Ignition probability and accordance probability of

Pressure transducer and ion probe

上流, 右に下流の多孔プレートの種類を示す。例えば, "P1-N"は"上流: 多孔プレート P1, 下流: 多孔プレート無し"を意味する。記号は表の記載と同様である。

IP2 の噴射方式は着火性が格段に良く, 燃焼波と衝撃波の一致率も比較的高いことがわかる。

これは, 噴射方式による混合状態の違いが原因だと考えられる。IP1 は, 2 箇所内の一方を上方向へ噴射している。しかし, 水素は空気より軽いので, 管内の上部へ水素が片寄った分布になり, 濃度分布に差が生じる。従って, 着火がほとんど起こらなかったと考えられる。IP2 では, 2 箇所とも下方向に噴射するため, 上記の現象は起こらず, 少なくとも点火付近では, 混合状態が良好で, 着火率も高いといえる。IP3 の場合, 対向して水平方向へ噴射するため, 点火付近では, 水素濃度が片寄って分布し, サイクル毎に点火付近の濃度分布に違いが生じて, 着火に不安定が生じると考えられる。IP2 において, 当量比 0.43 という薄い混合気でも着火率が高い原因は, 点火付近では濃い混合気が存在するからである。図 2 の通り, バルブが完全に閉じるまで燃料を噴射しているが, この時点の開口面積はゼロに近く, 空気もほとんど吸入されない。従って, 点火付近では, 当量比が計算値より高く, 着火しやすい状態になり, 管後方では, 濃度分布が不均一ではあるが, 全体的に計算より薄い混合気が充填されたと思われる。八房ら⁽⁶⁾も同様の考察を行い, 開弁開始/閉弁終了時には, 当量比が定常値の 2 倍以上になったと指摘する。

4-2 多孔プレートの影響

表 2 に示した多孔プレートを用いて, 図 2 に示したタイムシーケンスで実験を行った。図 6 に着火率, 燃焼波と衝撃波の一致率を示す。噴射方式は IP2 で行う。

まず, 多孔プレート P1 を用いて, 設置箇所 (上流/下流) の違いに対する燃焼状態の影響を調べた。燃焼波と衝撃波の一致率では違いが見られないが, 着火率に関して判断すると, 上流に多孔プレートを設置した方が良いと判断できる。この原因として, 下流に設置した多孔プレートが水素の充填を妨げることが考えられる。水素の充填が不十分なため, 着火できても測定領域で減衰してしまう。

続いて, 多孔プレート (P1-P4) に対する燃焼状態の影響を述べる。多孔プレートは上流に設置した。P1 と P2 を比較すると, 開口率の小さい P2 が, 着火性に劣ることがわかる。ロータリーバルブから供給される空気を妨害し, 水素が測定領域まで十分に充填されてないと判断できる。P1 と P3 を比較すると, 開口率の大きい P3 では, 全て着火が起こり, 圧力ピークとイオンプローブの立下りが一致している確率も高い。従って, 開口率の大きい多孔プレートが有効だとわかる。P3 と P4 を比較すると, P4 で燃焼状態が悪化している。P3 と開口率を同じ

くし、形状を複雑化することで、空気の乱れを狙ったが、期待する効果は得られなかった。原因として、P1 をベースに一部の孔径を拡大したことが考えられる。これによって、形状は複雑化するが、隣同士の孔が重なり合うので、全体として非常に大きな孔になる。よって、孔を通過する空気流間の干渉が弱まり、混合が促進されなかったと思われる。噴射方式 IP2 で”多孔プレート無し”と”P3”を比較すると、着火率にそれほど差は無いが、圧力ピークとイオンプローブの立下りが一致する確率は、後者の方が格段に高い。

開口率と孔径を適切に選択し、燃料噴射箇所に対して上流に多孔プレートを設置すれば、混合促進効果に

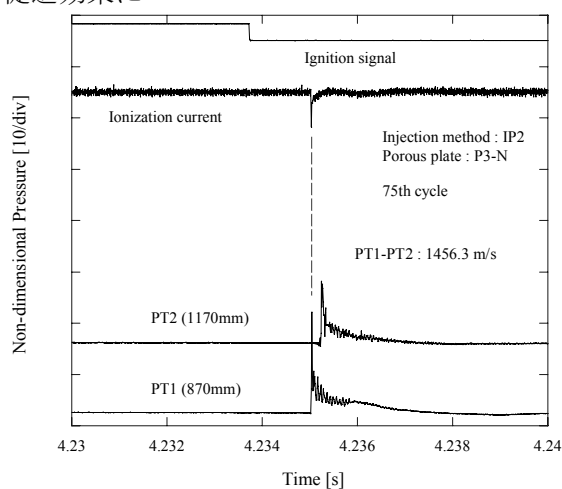


Fig. 7 Pressure and ion probe profiles for the 75th cycle

よって、十分に混合された燃料／空気が管後方まで充填される。噴射方式 IP2，多孔プレート P3 を上流に設置した条件で 75th cycle の圧力波形を図 7 に示す。横軸は時間、縦軸はデトネーションの圧力を大気圧で除した無次元圧力を示す。イオンプローブの立下りは、PT1 の圧力ピークと一致するため、少なくとも I1 (870 mm) の位置までは、デトネーションを維持していることがわかる。衝撃波速度は 1456.3 m/s だが、燃焼波速度はイオンプローブが 1 箇所しか反応しなかったため、測定はできない。当量比 0.43 に対する CJ 速度は、1531 m/s であり、CJ 速度に近い。I2 (1170 mm) が無反応な原因は、水素の充填が不十分なことによる燃焼波の減衰と思われる。水素噴射が終盤に差し掛かる頃には、バルブはほぼ全閉に近く、水素を管内へ押し出す力は弱まる。従って、I2 の位置まで水素が十分に行き渡らなかったと考えられる。また、多孔プレートによって空気の流入運動量

が損失した恐れもある。点火から衝撃波が PT1 に到達する時間は、1.27 ms である。

4-3 当量比の影響

表 3 に基づいて当量比を変化させ、噴射方式 IP2，多孔プレート P3 (上流) に条件を固定して実験を行った。

各々の当量比に対して 1st, 30th, 60th cycle の衝撃波速度を図 8 に示す。当量比 0.38 では、いずれも CJ 速度

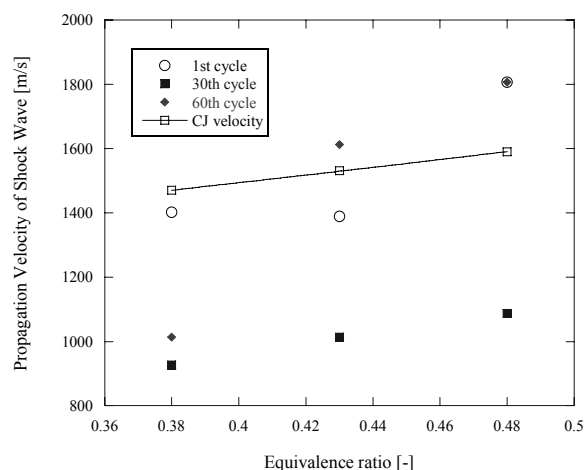


Fig. 8 Equivalence ratio vs. propagation velocity of shock wave

を下回る。それ以外では、CJ 速度を上回る結果も得た。その原因として、測定領域では計算より濃い混合気が充填された可能性がある。前述の通り、水素噴射を終える頃には、バルブはほぼ全閉に近く、水素を管内へ押し出す力は弱まる。当量比 0.38 の場合、点火付近で当量比は高いが、測定領域では計算より薄い混合気が充填されているため、CJ 速度より低くなる。しかし、これ以上当量比を高くすると、稀に濃い混合気が測定領域にも充填され、当量比が高い程その傾向が出ると思われる。当量比が高くて空気量は変わらないため、水素を管内へ充填する力も変わらない。つまり、混合気が管内で停滞する場所も変わらず、それに対して、水素量は増加する。従って、点火付近だけでなく、測定領域でも当量比が計算より高くなると考えられる。

燃焼波と衝撃波の一致率を全サイクルに対して調べ、図 9 に示す。因みに、着火率はいずれも 100 % である。図 9 から、当量比が高い程一致率も高いことがわかる。ただし、一致は I1 と PT1 だけで、I2 では無反応だった。測定領域まで比較的濃い混合気が充填されても、I2 までは充填が不十分で、燃焼波が減衰したと思われる。

図 10, 11 に当量比 0.43, 0.48 の圧力波形とイオンプローブを示す．ピエゾ式圧力変換器に対する熱の影響

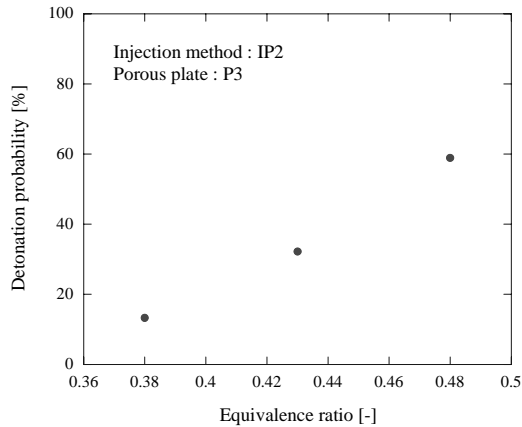


Fig. 9 Accordance probability of pressure transducer and ion probe

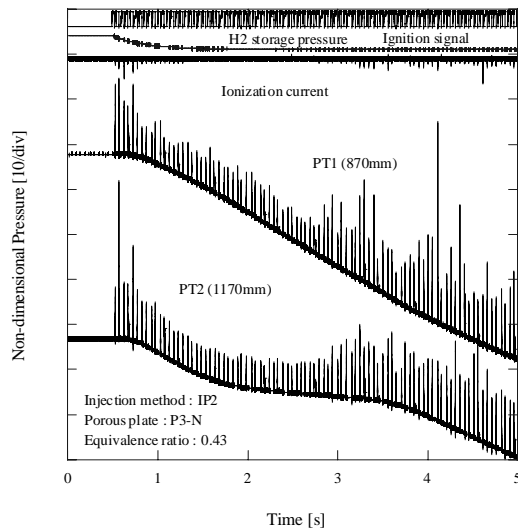


Fig. 10 Pressure and ion probe profiles : E.R.= 0.43

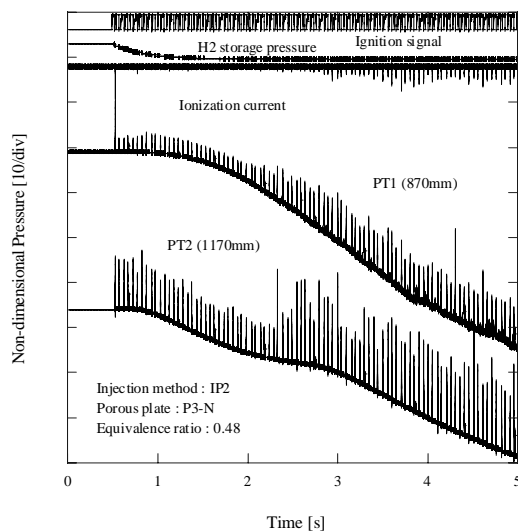


Fig. 11 Pressure and ion probe profiles: E.R.= 0.48

が原因で、グラウンドが低下している．本研究では、シリコングリスを圧力変換器に塗布し、熱の影響を和らげているが、完全に影響を取り除くことは難しい．図 10, 11 から、PT1 の圧力は当量比 0.43 が、PT2 の圧力は当量比 0.48 が全体的に高いことがわかる．しかし、衝撃波速度や燃焼波と衝撃波の一致率から判断すると、当量比 0.48 の燃焼状態が良いと結論付けることができる．当量比 0.48 では、水素ストレージ圧力が十分に安定してから、燃焼波と衝撃波が一致し始めている．

今後は、当量比を更に引き上げ、作動時間も延長して実験を行い、現象を詳細に把握する必要がある．また、強制掃気時間や燃料噴射時間、点火時間に対する影響を調べ、全サイクルで安定したデトネーションを起こすことを目指す．

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) 水素噴射方式は、IP2 (平行噴射) が混合に最適である．
- 2) 高い開口率と比較的小さな孔径の多孔プレートは、混合促進に有効である．本実験では P3 (開口率 64 %) が最適だった．
- 3) 管全体に均一な混合気を充填するには、不完全だが、低圧のプロアで連続作動が可能である．

最後に、本研究は平成 17 年度埼玉大学民間等との共同研究として行われたものであることを付記する．

参考文献

- (1) K, Kailasanath., AIAA J., 41, 2003, pp.145-159
- (2) 大古壮了, パルスデトネーションエンジンの DDT 過程及び連続作動における掃気空気の影響に関する研究, 平成 16 年度埼玉大学修士論文, 2005.
- (3) J.B.Hinkey, S.E.Henderson, and T.R.A.Bussing, AIAA 98-3881, 1998.
- (4) 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.
- (5) 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.
- (6) 八房ら, 液体燃料パルスデトネーションエンジンの推力測定, 日本燃焼学会誌, 第 47 巻 140 号, 2005.