

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 9 日現在

機関番号：13901

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2014～2016

課題番号：26820371

研究課題名(和文) 燃料液滴パージ法によるパルステネーションエンジンのkHz高周波数作動

研究課題名(英文) Kilohertz Operation of a Pulse Detonation Engine using Liquid-Purge Method

研究代表者

松岡 健 (Matsuoka, Ken)

名古屋大学・工学研究科・講師

研究者番号：40710067

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,100,000円

研究成果の概要(和文)：デトネーションサイクルは、燃焼サイクルで最大の理論熱効率と燃焼器小型化を同時に実現する。パルステネーションサイクル(PDC)は、燃焼器中でデトネーションを間欠的に生成し、この繰り返し周波数増加によって推力密度が増加する。本研究では、独自の手法である燃料液滴パージ法に、新たに酸化剤高速充填手法(特願2015-251952)を導入した。内径10mm、全長100mmの燃焼器での1010ヘルツのPDC作動実験を実施し、酸化剤供給圧力を242%増加させることで、DDT距離・時間を約50%短縮されることに成功した。最終的に、1916ヘルツの繰り返し周波数を達成し、従来の周波数のオーダーを1桁向上させた。

研究成果の概要(英文)：A detonation cycle can realize a maximum theoretical thermal efficiency and combustor miniaturization. In the pulse detonation cycle (PDC), the detonation waves are intermittently generated in a cylindrical combustor, and the thrust density increases with increase in the cyclic frequency. A novel semi-valveless PDC method, in which the inner diameter of the oxidizer feed line is equal to that of the combustor, can increase the pressure of detonable mixture by increasing total pressure of supplying oxidizer. In demonstration experiments, ethylene as fuel, pure oxygen as the oxidizer and the combustor having an inner diameter of 10 mm and length of 100 or 60 mm were used. A PDC was successfully operated at the frequency of up to 1916 Hz. Under the condition of 1010 Hz operation, the total pressure of supplying oxidizer were varied. As the results, it was found that the DDT distance and time decreased by approximately 50% when the total pressure of supplying oxidizer increased by 242%.

研究分野：航空宇宙推進工学

キーワード：デトネーション パルステネーションサイクル 高周波数 気液相転移

1. 研究開始当初の背景

デトネーション波[1]は、燃料と酸化剤が予め混合された爆発性混合気中を超音速で伝播する燃焼波である。このデトネーション波を内燃機関に応用したデトネーションエンジン (DE) は既存燃焼サイクルで最高の理論熱効率[2]と高速燃焼による燃焼器の小型化を実現する。DE には大きく分けて、環状燃焼器内をデトネーション波が周方向に連続伝播する回転デトネーションエンジン[3]と筒状燃焼器中で間欠的にデトネーション波を生成するパルスデトネーションエンジン (以下、PDE) [4]がある。PDE は、燃焼器内で①燃料・酸化剤の混合と充填、②点火・デトネーション波への遷移 (DDT)、③デトネーション波の伝播・高圧既燃ガスの排出、④残留既燃ガスのパージ) を繰り返すことで作動する。この一連のサイクルをパルスデトネーションサイクル (以下、PDC) と呼ぶ。推進剤供給量を一定に保ちながら燃焼器全長を短縮し、PDC の繰り返し周波数 (作動周波数) を増加させることで推力密度および推力重量比が増加する。しかしながら、既存技術では、100 Hz オーダの作動周波数が限界である。

2. 研究の目的

作動周波数を 1 桁向上させるための運転手法として、準バルブレス PDC (特願 2015-251952) を提案した。本研究の最終課題である 1000 Hz の作動周波数を達成するため、本手法を基礎とした以下の 2 つの目的を設定した。

(1) 混合気高圧化による DDT 短縮

準バルブレス PDC では、酸化剤の供給圧力を増加させることで、実際の PDC 作動中の混合気圧力を増加させることが可能である。酸化剤供給圧力増加によって過程②の DDT 距離及び時間を短縮できることを実証する。また、混合気圧力と DDT 距離の関係を明らかにする。

(2) 高周波数作動実証

一次元数値解析 (慶応義塾大学 松尾亜紀子教授) により燃焼器長さで決定する気体力学的上限周波数を見積もる。混合気高圧充填によってキロヘルツでの作動周波数を実証し、気体力学的上限周波数に対する達成率を評価する。

3. 研究の方法

図 1 に、提案する準バルブレス PDC の模式図を示す。本システムは、筒状燃焼器、スパークプラグ、燃料インジェクタで構成されており非常に単純な機構である。酸化剤は、左側から定常的に供給されるバルブレス供給方式である。一方、燃料は、燃料インジェクタによって燃焼器側壁から燃焼器軸に対して垂直に供給される。自動車エンジン用ピエゾ型燃料インジェクタ (BOSCH, HDEV4) を適用することで 3000 Hz 程度の作動周波数ま

で追従可能である。つまり、燃料噴霧と点火のタイミングによって間欠的にデトネーション波を発生させることで PDC 作動を実現する。酸化剤の供給は、デトネーション波によって生成した高圧の既燃ガスによって気体力学的に一時的に停止する (バルブレス)。

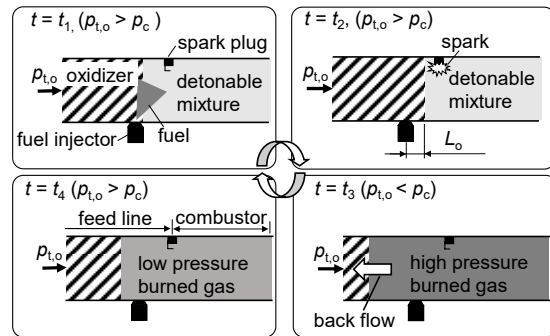


図 1 提案した準バルブレスパルスデトネーションサイクル

(1) 混合気高圧化による DDT 短縮

PDC の気体力学的上限周波数は、燃焼器全長 (スパークプラグから燃焼器出口までの距離) に反比例する。燃焼器全長 L_c が短縮されると、DDT 過程に必要な距離 x_{DDT} (スパークプラグから DDT ポイントまでの距離) をこれまでにない手法で大幅に短縮する必要がある ($L_c \gg x_{DDT}$)。提案した準バルブレス PDC は、酸化剤配管と燃焼器の内径が等しく、全圧損失なしに供給可能である。また、供給する酸化剤の供給圧力を増加させることで混合気圧力を増加させることができる。

図 2 に実験で使用した燃焼器を示す。目的

(1) に対しては、Type A の燃焼器を使用した。燃焼器の内径と全長はそれぞれ $i_{dc} = 10 \text{ mm}$ および $L_c = 100 \text{ mm}$ とした。酸化剤としてガス酸素、燃料として超臨界エチレンを使用した。酸素の供給全圧は、低压条件 (S1) として $p_{t,o} = 0.23 \text{ MPa}$ 、高压条件 (S2) として $p_{t,o} = 0.55 \text{ MPa}$ とした。S1 と S2 で混合気の当

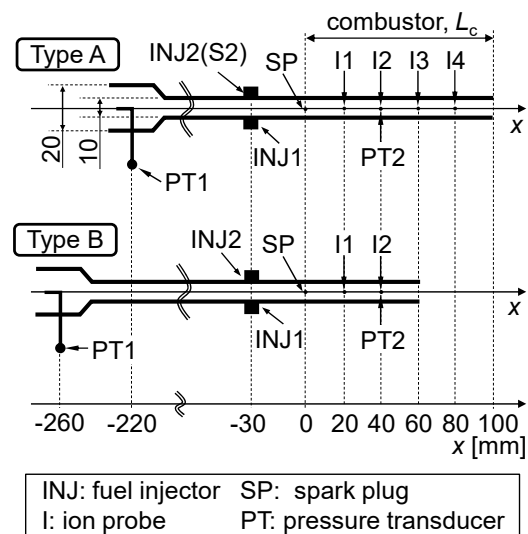


図 2 実験で使用した燃焼器

量比を等しくするために、S2 では燃料インジェクタを2本使用した。作動周波数は 1010 Hz とし、1 サイクルあたりの燃料噴霧割合は $DR = 30\%$ とした。

(2) 高周波数作動実証

目的 (1) の実験における燃料・酸化剤供給条件と等しく、燃焼器長さを 40%短縮した $L_c = 60$ mm を使用した (図2の Type B)。作動周波数は 1916 Hz とし、噴霧割合は 34% とした。Type A および Type B とともに燃焼器内の圧力履歴は $x = 40$ mm の位置に取り付けた圧力センサ (PT2) (PCB Piezotronics, Inc, 113B24) によって測定した。なお、 $x = 0$ mm はスパークプラグの設置位置である。PDC 作動は、燃焼器側面に取り付けたイオンプローブ群 (I) によって測定した燃焼波伝播速度から判定した。

4. 研究成果

(1-1) 圧力履歴

図3に $x = 40$ mm における圧力履歴を示す。図3 (a) は低圧条件 (S1)、図3 (b) は高圧条件 (S2) に対応している。図中の灰色の領域は、一次元数値解析で見積もられたチャッ

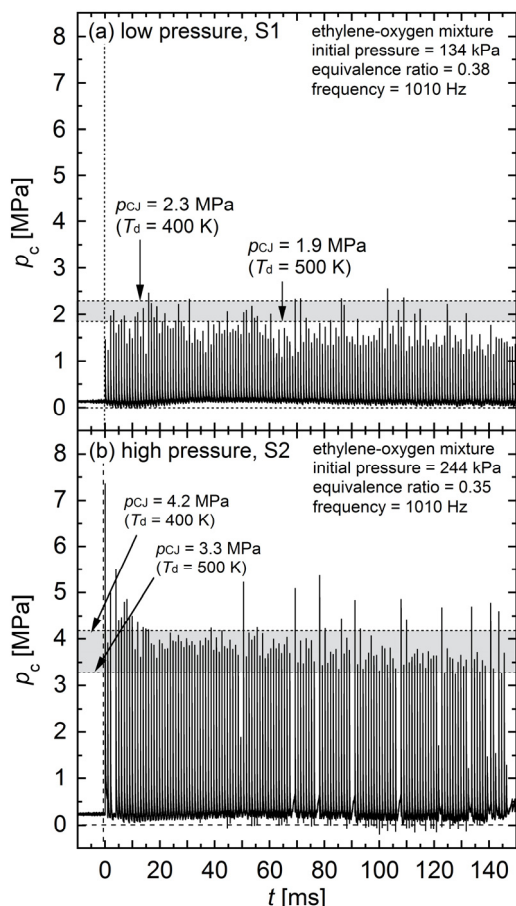


図3 $x = 40$ mm に設置された圧力センサによって測定された圧力履歴, (a) 低圧供給条件 (S1), (b) 高圧供給条件 (S2)。

プマン-ジュゲドネーション圧力 p_{CJ} であり、実験的な初期混合気圧力および温度領域 400–500 K を仮定している。

2 条件の比較から、高圧条件では見積もられた理論デトネーション圧力に近い値が得られた。一方、低圧条件では理論値よりも低い値が確認された。これは、低圧条件では $x = 40$ mm の位置ではまだ DDT が発生していないことが原因であり、この考察は後述する。

(1-2) 燃焼波伝播速度

図4にイオンプローブ群で計測された燃焼波伝播速度の燃焼器軸方向の変化を示す。イオンプローブは、燃焼器の通過によって出力電圧が急激に立ち上がる。この電圧の立ち上がり時間 Δt とイオンプローブ間距離 (30 mm) を用いて燃焼波伝播速度 $V_f = \Delta t / 30$ を算出した。

図3と同様、図中の狭い灰色領域は推定した混合気状態から計算されるチャップマン-ジュゲドネーション速度 D_{CJ} およびに混合気充填速度 u_d (音速) を加味した実験室固定座標系における見かけのデトネーション速度 $D_{CJ} + u_d$ である。図4 (a) の低圧供給条件 (S1) では、 60 mm $\leq x \leq 80$ mm で $D_{CJ} + u_d$ を

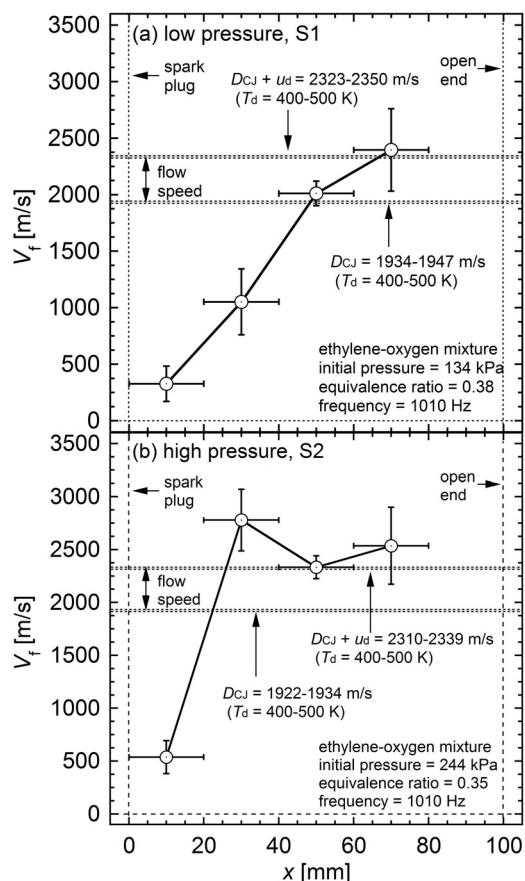


図4 イオンプローブ群によって測定された燃焼波伝播速度, (a) 低圧供給条件 (S1), (b) 高圧供給条件 (S2)。

超えたことから、DDTはこの領域内で発生していると考えられる。故に、圧力センサの設置位置 $x = 40 \text{ mm}$ では、DDTがまだ発生していたため、図3 (a) に示されている通り、理論値に対して小さいピーク圧力が確認された。

一方、図4 (b) の高圧供給条件 (S2) では、 $20 \text{ mm} \leq x \leq 40 \text{ mm}$ で $D_{CJ} + u_d$ を超えた。この結果、実際の PDC 作動中において、混合気の高圧充填によって DDT 過程が短縮したことが確認された。Kuznetsov ら[5]は、静止した量論水素-酸素混合気によるシングルショット実験を行い、DDT 距離 x_{DDT} [mm] と混合気圧力 p_d [bar] に以下の関係があることを示した。

$$x_{DDT} = a \cdot p_d^{-b} = 0.7 p_d^{-1.17} \quad (1)$$

本実験においても、この関係が成り立つと仮定すると、係数はそれぞれ $a = 0.10 \pm 0.01$ および $b = -1.50 \pm 0.34$ であった。これにより、例えば混合気圧力を 10 bar (1 MPa) まで増加させた場合、DDT 距離は 3 mm まで短縮されることが期待される。

一次元数値解析から、実験的な混合気供給条件および燃焼器全長における気体力学的上限周波数は $f_{upper} = 1542\text{--}1694 \text{ Hz}$ と見積もられた。その結果、本実験における作動周波数 1010 Hz は気体力学的上限周波数の $\alpha = f_{ope}/f_{upper} = 60\text{--}66\%$ であった。

(2) 高周波数作動実証

目的 (1) に対して、混合気の高圧充填で DDT 距離が短縮されることが確認された。そこで、燃焼器全長 L_c を短縮することで、既燃ガス排気時間を減少 (気体力学的上限周波数を増加) させた。一次元数値解析から、実験的な混合気供給条件および燃焼器全長における気体力学的上限周波数は $f_{upper} = 2058\text{--}2322 \text{ Hz}$ であり、実験作動周波数 $f_{ope} = 1916 \text{ Hz}$ は上限周波数の $\alpha = f_{ope}/f_{upper} = 83\text{--}93\%$ と見積もられた。図5に、 $x = 40 \text{ mm}$ で確認された圧力履歴を示す。本実験では、点火器の応答限界のため 6 サイクルのみの PDC 作動が確認された。

本研究によって、混合気高圧充填による DDT 短縮が実証された。この手法はオリフィスプレートなどの燃焼器内へ障害物を挿入することによる DDT 促進とは異なる手法であり、実験的に初めて実証・モデル化された。障害物挿入では、障害物そのものの冷却や圧力損失が問題になるが、これらの課題を解決できる。ロケットシステムへの適用では、酸化剤として純酸素を使用しているため、デトネーションおよび DDT 過程の特性長であるセルサイズが 1 mm、静止予混合気中での DDT 距離が数十 cm オーダーである (小さいほど爆発性が高い)。さらに、高圧燃焼環境となるため、式 (1) で示されているようにセルサイズはさらに小さくなる。そのため、DDT 過程を排除した更なる燃焼器の小型・高

周波数化を目指す。一方、酸化剤として空気を使用する空気吸い込み式エンジンシステムへの応用では、セルサイズが cm、DDT 距離は m オーダーである。そのため、混合気高圧充填による DDT 短縮は空気-燃料混合気に対して大きな効果が期待できる。

最高作動周波数として 1916 Hz を達成した。これは、従来の作動周波数の 1 桁高い値であった。さらに、推進性能を決める PDC の気体力学的上限周波数を数値計算から見積もった。最終的に、燃焼器全長 60 mm における上限周波数の 83-93% まで増加させることができた。

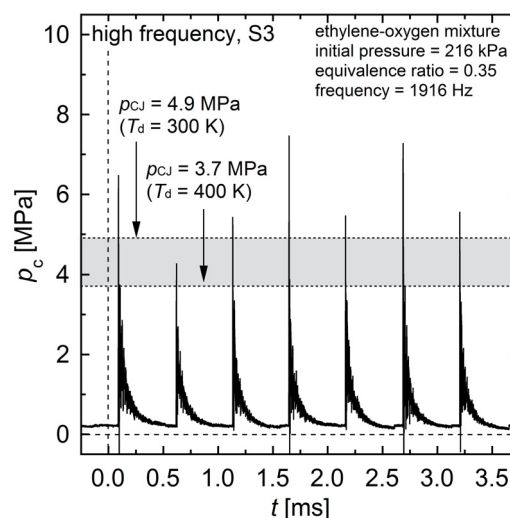


図5 1916 Hz 作動における $x = 40 \text{ mm}$ における燃焼器内圧力履歴

<引用文献>

- (1) Kailasanath, K. (2000) Review of propulsion applications of detonation wave. *AIAA Journal*, 38(9):1698-1708.
- (2) Endo, T., Yatsufusa, T., Taki, S., and Kasahara, J. (2004b) Thermodynamic analysis of the performance of a pulse detonation turbine engine. *Sci. Technol. Energetic Mater.*, 65(103):103-110 (in Japanese).
- (3) Bykovskii, F. A. Zhdan, S. A. and Vedernikov, E. F. (2006) Continuous Spin Detonations. *J. Propulsion and Power*, 22(6): 1204-1216.
- (4) Kailasanath, K. (2003) Recent developments in the research on pulse detonation engines. *AIAA Journal*, 41(2):145-159.
- (5) Kuznetsov, M., Alekseev, V., Matsukov, I. and Dorofeev, S. (2005) DDT in a Smooth Tube Filled with a Hydrogen-Oxygen Mixture. *Shock Waves*. 14(3):205-215.

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 1 1 件)

1. K. Matsuoka, S. Takagi, J. Kasahara, A. Matsuo, and I. Funaki "Validation of Pulse Detonation Operation in Low-Ambient-Pressure

- Environment,” *Journal of Propulsion and Power* 査読あり, (accepted on March 29th, 2017)
2. S. Nakagami, K. Matsuoka, J. Kasahara, Y. Kumazawa, J. Fujii, A. Matsuo, and I. Funaki, “Experimental Visualization of the Structure of Rotating Detonation Waves in a Disk-Shaped Combustor,” *Journal of Propulsion and Power*, 査読あり, Vol. 33, Special Section on Pressure Gain Combustion, pp. 80–88, 2017.
DOI: 10.2514/1.B36084
 3. J. Fujii, Y. Kumazawa, A. Matsuo, S. Nakagami, K. Matsuoka, J. Kasahara, “Numerical Investigation on Detonation Velocity in Rotating Detonation Engine Chamber,” *Proceedings of the Combustion Institute*, 査読あり, Vol. 36, Issue 2, pp. 2665–2672, 2017.
DOI: 10.1016/j.proci.2016.06.155
 4. S. Nakagami, K. Matsuoka, J. Kasahara, A. Matsuo, I. Funaki, “Experimental Study of the Structure of Forward-Tilting Rotating Detonation Waves and Highly Maintained Combustion Chamber Pressure in a Two-Parallel-Plane Combustor,” *Proceedings of the Combustion Institute*, 査読あり, Vol. 36, Issue 2, pp. 2673–2680, 2017.
DOI: 10.1016/j.proci.2016.07.097
 5. K. Matsuoka, K. Muto, J. Kasahara, H. Watanabe, A. Matsuo, T. Endo, “Investigation of Fluid Motion in Valveless Pulse Detonation Combustor with High-Frequency Operation,” *Proceedings of the Combustion Institute*, 査読あり, Vol. 36, Issue 2, pp. 2641–2647, 2017.
DOI: 10.1016/j.proci.2016.07.069
 6. K. Matsuoka, K. Muto, J. Kasahara, H. Watanabe, A. Matsuo, and T. Endo “Development of High-Frequency Pulse Detonation Combustor without Purging Material,” *Journal of Propulsion and Power*, *Journal of Propulsion and Power*, 査読あり, Vol. 33, Special Section on Pressure Gain Combustion, pp. 43–50, 2017.
DOI: 10.2514/1.B36068
 7. T. Endo, K. Masuda, W. Watanabe, T. Mukai, H. Nagai, J. Johzaki, K. Matsuoka, “Reduction of air flow rate for pulse-detonation-turbine-engine operation by water-droplet injection,” *Journal of Thermal Science and Technology*, 査読あり, Vol. 11, No.2, 2016, Paper No.16–00322.
DOI: 10.1299/jtst.2016jtst0022
 8. T. Endo, R. Obayashi, T. Tajiri, K. Kimura, Y. Morohashi, T. Johzaki, K. Matsuoka, T. Hanafusa, S. Mizunari “Thermal Spray using a High-Frequency Pulse Detonation Combustor Operated in the Liquid-Purge Mode,” *Journal of Thermal Spray Technology*, 査読あり, Vol. 25, Issue 3, pp. 494–508, 2016.
DOI: 10.1007/s11666-015-0354-8
 9. K. Matsuoka, T. Morozumi, S. Takagi, J. Kasahara, A. Matsuo, and I. Funaki “Flight Validation of a Rotary-Valved Four-Cylinder Pulse Detonation Rocket,” *Journal of Propulsion and Power*, 査読あり, Vol. 32, No. 2, pp. 383–391, 2016.
DOI: 10.2514/1.B35739
 10. K. Matsuoka, R. Sakamoto, T. Morozumi, J. Kasahara, A. Matsuo, and I. Funaki “Thrust Performance of Rotary-Valved Four-Cylinder Pulse Detonation Rocket Engine,” *Transactions of the JSASS*, 査読あり, Vol. 58, No. 4, pp. 193–203, 2015.
DOI: 10.2322/tjsass.58.193
 11. K. Matsuoka, T. Mukai, T. Endo, “Development of a Liquid-Purge Method for High-Frequency Operation of Pulse Detonation Combustor,” *Combustion Science and Technology*, 査読あり, Vol. 187, No. 5, pp. 747–764, 2015.
DOI: 10.1080/00102202.2014.965300
- [招待講演] (計 2 件)
1. K. Matsuoka, “Experimental Study on Control Technique of Pulsed Detonation,” 2016 International Workshop on Detonation for Propulsion, Singapore, 2016.7.13-15.
 2. K. Matsuoka, “High-Frequency Operation of a Valveless Pulse Detonation Combustor,” 2015 International Workshop on Detonation for Propulsion, Beijing, China, 2015.8.26-29
- [学会発表] (計 6 7 件)
1. H. Watanabe, A. Matsuo, K. Matsuoka, J. Kasahara “Numerical Investigation on Burned Gas Backflow in Liquid Fuel Purge Method,” 2016 AIAA Science and Technology Forum and Exposition, AIAA2017-1284, Jan. 9-13, 2017, Texas, USA.
 2. H. Watanabe, A. Matsuo, K. Muto, K. Matsuoka, J. Kasahara, and T. Endo, “One-Dimensional Investigation of Purging Process in Liquid Fuel Purge Method,” 36th International Symposium on Combustion, Work in Progress Poster, July 31-Aug. 5, 2016, Seoul, Korea.
 3. K. Matsuoka, K. Muto, J. Kasahara, H. Watanabe, A. Matsuo, T. Endo, “Investigation of Fluid Motion in Valveless Pulse Detonation Combustor with High-Frequency Operation,” 36th International Symposium on Combustion, July 31-Aug. 5, 2016, Seoul, Korea.
 4. K. Muto, K. Matsuoka, J. Kasahara, H. Watanabe, A. Matsuo and T. Endo, “Development of High-Frequency Pulse Detonation Combustor without Purging Material,” AIAA SciTech 2016, Paper No. AIAA 2016-0123, Jan. 4-8, 2016, San Diego, USA.
 5. K. Matsuoka, K. Muto, J. Kasahara, H. Watanabe, A. Matsuo and T. Endo, “Development of a Liquid-Purge Method for Valveless Pulse Detonation Combustor using Liquid Fuel and Oxidizer,” 25th International Colloquium on the Dynamics of Explosions and Reactive Systems, Paper No. 81, Aug. 2-7, 2015, Leeds, UK.

6. 廣田 成俊, 川崎 央, 松岡 健, 笠原 次郎, 液体燃料・酸化剤噴霧を伴うパルスデトネーションサイクルに関する実験的研究, 平成 28 年度衝撃波シンポジウム, 3D2-1, ヴェルクよこすか, 2017 年 3 月 8-10 日, 神奈川.
7. 瀧 春菜, 松岡 健, 川崎 央, 笠原 次郎, 渡部 広吾輝, 松尾 亜紀子, 遠藤 琢磨, 液体燃料の相転移を伴うパルスデトネーションサイクルのキロヘルツ作動, 平成 28 年度衝撃波シンポジウム, 3D2-2, ヴェルクよこすか, 2017 年 3 月 8-10 日, 神奈川.
8. 松岡 健, 液体燃料相転移を用いたデトネーションサイクルに関する研究, 平成 28 年度航空宇宙空力シンポジウム, 1L7, 鳥羽シーサイドホテル, 2017 年 1 月 20-21 日, 三重.
9. 松岡 健, 瀧 春菜, 笠原 次郎, 渡部 広吾輝, 松尾 亜紀子, 遠藤 琢磨, 小型高出力パルスデトネーションエンジンの研究開発, 第 53 回中部・関西支部合同秋期大会, A11, 名城大学ナゴヤドーム前キャンパス, 2016 年 11 月 26 日, 名古屋.
10. 松岡 健, 高尾 和幸, 瀧 春菜, 廣田 成俊, 笠原 次郎, 渡部 広吾輝, 松尾 亜紀子, 遠藤 琢磨, 準パルプレスパルスデトネーション燃焼器における既燃ガス逆流過程の評価, 第 54 燃焼シンポジウム, E344, 仙台国際センター, 2016 年 11 月 23 日-25 日, 仙台.
11. 松岡 健, 高尾 和幸, 瀧 春菜, 廣田 成俊, 笠原 次郎, 渡部 広吾輝, 松尾 亜紀子, 遠藤 琢磨, パルスデトネーション燃焼器のキロヘルツ作動に向けた実験研究, 第 60 回宇宙科学連合講演会, 2A06, 函館アリーナ, 2016 年 9 月 7 日-9 日, 函館.
12. 松岡 健, 高木 駿介, 笠原 次郎, 松尾 亜紀子, 船木 一幸, 低背圧環境におけるパルスデトネーション作動 実証, 第 48 回流体力学講演会 / 第 34 回航空宇宙数値シミュレーション技術シンポジウム, 2E10, 金沢歌劇座, 2016 年 7 月 6 日-8 日.
13. 松岡 健, 武藤 浩平, 笠原 次郎, 渡部 広吾輝, 松尾 亜紀子, 遠藤 琢磨, “パルスデトネーション燃焼器の高周波数運転手法,” 平成 27 年度衝撃波シンポジウム, 1B4-1, 3 月 7-9 日, 2016, 熊本市. (Best Presentation Award)
14. 松岡 健, 笠原 次郎, 松尾 亜紀子, 船木 一幸, 遠藤 琢磨 “パルスデトネーション燃焼器に関する実験的研究,” 平成 27 年度航空宇宙空力シンポジウム, 2L12, 1 月 22-23 日, 2016, 指宿
15. 松岡 健, 高木 駿介, 細野 恵介, 笠原 次郎, 松尾 亜紀子, 船木 一幸, “宇宙機の姿勢制御用 3N 級パルスデトネーションスラスターの動作特性に関する研究,” 第 53 回燃焼シンポジウム, 11 月 16-18 日, 2015, つくば市.
16. 松岡 健, 武藤 浩平, 笠原 次郎, 渡部 広吾輝, 松尾 亜紀子, 遠藤 琢磨, “燃料液滴ページ法によるパルスデトネーション燃焼器の高周波数作動,” 第 47 回流体力学講演会, 7 月 2-3 日, 2015, 東京都.

[産業財産権]

○出願状況 (計 2 件)

名称: 回転デトネーションエンジン
 発明者: 笠原次郎, 松岡健,
 権利者: 同上
 種類: 特許
 番号: 特許願 2016-029768
 出願年月日: 平成 28 年 2 月 19 日
 国内外の別: 国内

名称: パルスデトネーション燃焼装置及びその燃焼方法
 発明者: 松岡健, 笠原次郎, 武藤浩平
 権利者: 同上
 種類: 特許
 番号: 特許願 2015-251952
 出願年月日: 平成 27 年 12 月 24 日
 国内外の別: 国内

[その他]

ホームページ等

<http://www.prop.nuac.nagoya-u.ac.jp/member03.html>

6. 研究組織

(1)研究代表者

松岡 健 (MATSUOKA Ken)
 名古屋大学大学院工学研究科 講師
 研究者番号: 40710067

(2)研究分担者

該当なし

(3)連携研究者

該当なし

(4)研究協力者

遠藤 琢磨 (ENDO Takuma)
 広島大学大学院工学研究院 教授

松尾 亜紀子 (MATSUO Akiko)
 慶應義塾大学理工学部 教授

笠原 次郎 (KASAHARA Jiro)
 名古屋大学大学院工学研究科 教授

渡部 広吾輝 (WATANABE Hiroaki)
 慶應義塾大学院理研究科 博士 1 年

瀧 春奈 (TAKI Haruna)
 名古屋大学大学院工学研究科 修士 1 年