

世界初！深宇宙探査用デトネーションエンジンの 宇宙飛行実証に成功

国立大学法人東海国立大学機構 名古屋大学未来材料・システム研究所、名古屋大学大学院工学研究科の研究グループ（笠原 次郎 教授、松山 行一 特任教授、松岡 健准教授、川崎 央 助教、渡部 広吾輝 助教、伊東山 登 特任助教、後藤 啓介 特任助教、石原 一輝 博士後期課程2年、ブヤコフ バレンティン 博士前期課程2年、野田 朋之 博士前期課程2年、秋元 雄希氏、菊地 弘洋氏ら）は、慶應義塾大学（松尾 亜紀子 教授）、国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構（JAXA）宇宙科学研究所（船木 一幸 教授、羽生 宏人 准教授、竹内 伸介 准教授、山田 和彦 准教授、荒川 聡氏、増田 純一氏、前原 健次氏、中尾 達郎氏）、国立大学法人室蘭工業大学（中田 大将 助教、内海 政春 教授）との共同研究で、デトネーション^{注1)}エンジンの宇宙飛行実証に世界で初めて成功しました。

本研究で開発したデトネーションエンジンシステムは、観測ロケット S-520-31 号機のミッション部に搭載されて、2021 年 7 月 27 日午前 5 時 30 分に JAXA 内之浦宇宙空間観測所から打ち上げられました。第 1 段のロケット分離後、宇宙空間にて、回転デトネーションエンジン^{注2)}、パルスデトネーションエンジン^{注3)} が正常に作動し、画像、圧力、温度、振動、位置、姿勢データが「テレメトリ^{注4)}」及び「展開型エアロシェルを有する再突入カプセル RATS（JAXA 山田和彦准教授の研究グループが開発）」の洋上回収によって取得できました。

デトネーションエンジンは極めて高い周波数（1～100 kHz）でデトネーション波や圧縮波を発生させることにより反応速度を格段に高めることで、ロケットエンジンを革新的に軽量化し、また、推力を容易に生成することで高性能化します。本宇宙飛行実証実験の成功によって、デトネーションエンジンは、深宇宙探査用キックモーター、ロケットの初段・2 段エンジン等としての実用化に大きく近づくことになります。

本研究の成果は、飛行データの詳細解析後、学術論文誌にて公開予定です。

本研究は、2014～2021 年度 JAXA 宇宙科学研究所宇宙工学委員会戦略的開発研究（工学）、2014～2016 年度 NEDO エネルギー・環境新技術先導研究プログラム、2019～2023 年度日本学術振興会科学研究費補助金特別推進研究の支援のもとで行われ、デトネーションエンジンシステムの開発は、株式会社ネッツ（中村 秀一 社長、豊永 慎治氏、原田 修氏、河野 秀文氏、山本 文孝氏、川本 昌司氏、東野 和幸氏）、明治電機工業株式会社（味田 直也氏、神藤 博実氏、堂山 一郎氏、加藤 辰哉氏）の協力のもと実施され、また、制御・計測システムには日本ナショナルインスツルメンツ株式会社の製品（CompactRIO・LabVIEW）が使用されました。

【ポイント】

- ・デトネーションエンジンの宇宙飛行実証に世界で初めて成功した。
- ・回転デトネーションエンジン、パルスデトネーションエンジンが、フライト環境に耐えて宇宙空間で正常作動し、それらエンジンの作動データの取得に成功した。
- ・本研究の結果から、デトネーションエンジンは深宇宙探査用キックモーター等、航空宇宙用エンジンとしての実用化に大きく近づいた。

【研究背景と内容】

デトネーションエンジンは極めて高い周波数(1~100kHz)でデトネーション波や圧縮波を発生させることにより反応速度を格段に高めることで、ロケットエンジンを革新的に軽量化し、また、推力を容易に生成することで高性能化します。現在、宇宙用高性能エンジンとして、実用化を視野に入れた研究が日欧米、アジアで活発に行われています。

本共同研究グループは、デトネーションエンジンの宇宙飛行実証に世界で初めて成功しました。

本研究で開発したデトネーションエンジンシステムは、観測ロケット S-520-31 号機のミッション部に搭載されて、2021 年 7 月 27 日午前 5 時 30 分に JAXA 内之浦宇宙空間観測所から打ち上げられました。第 1 段のロケット分離後、宇宙空間にて、回転デトネーションエンジン(6 秒間作動、推力 500N)、パルスデトネーションエンジン(2 秒間作動×3 回)は正常に作動し、画像、圧力、温度、振動、位置、姿勢データはテレメトリ及び展開型エアロシェルを有する再突入カプセル RATS(JAXA 山田 和彦准教授の研究グループが開発)の洋上回収によって取得されました。

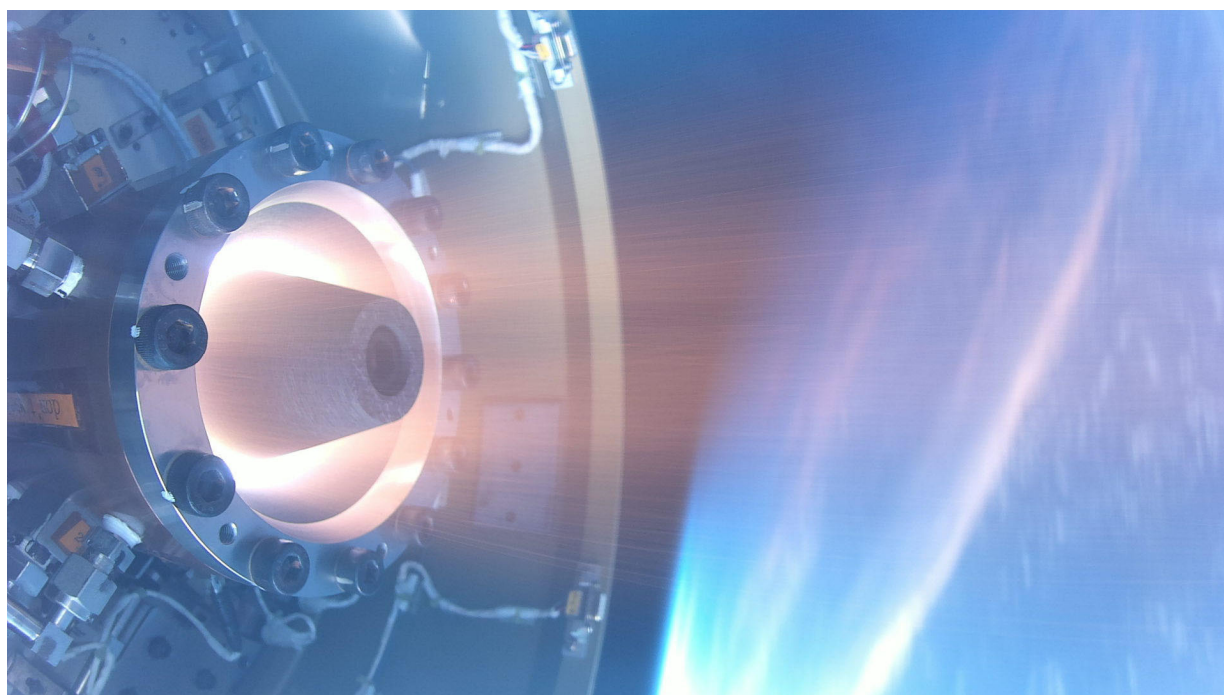


図 1 回転デトネーションエンジン(RDE)の宇宙空間での世界初の作動の瞬間。画面左の楕円状の発光部分が二重円筒型の回転デトネーションエンジンの燃焼器部分。推力は約 500N。画面右は宇宙空間から撮影された地球。本画像データは展開型エアロシェルを有する再突入カプセル RATS にて洋上回収した。【Credit: 名古屋大学, JAXA】

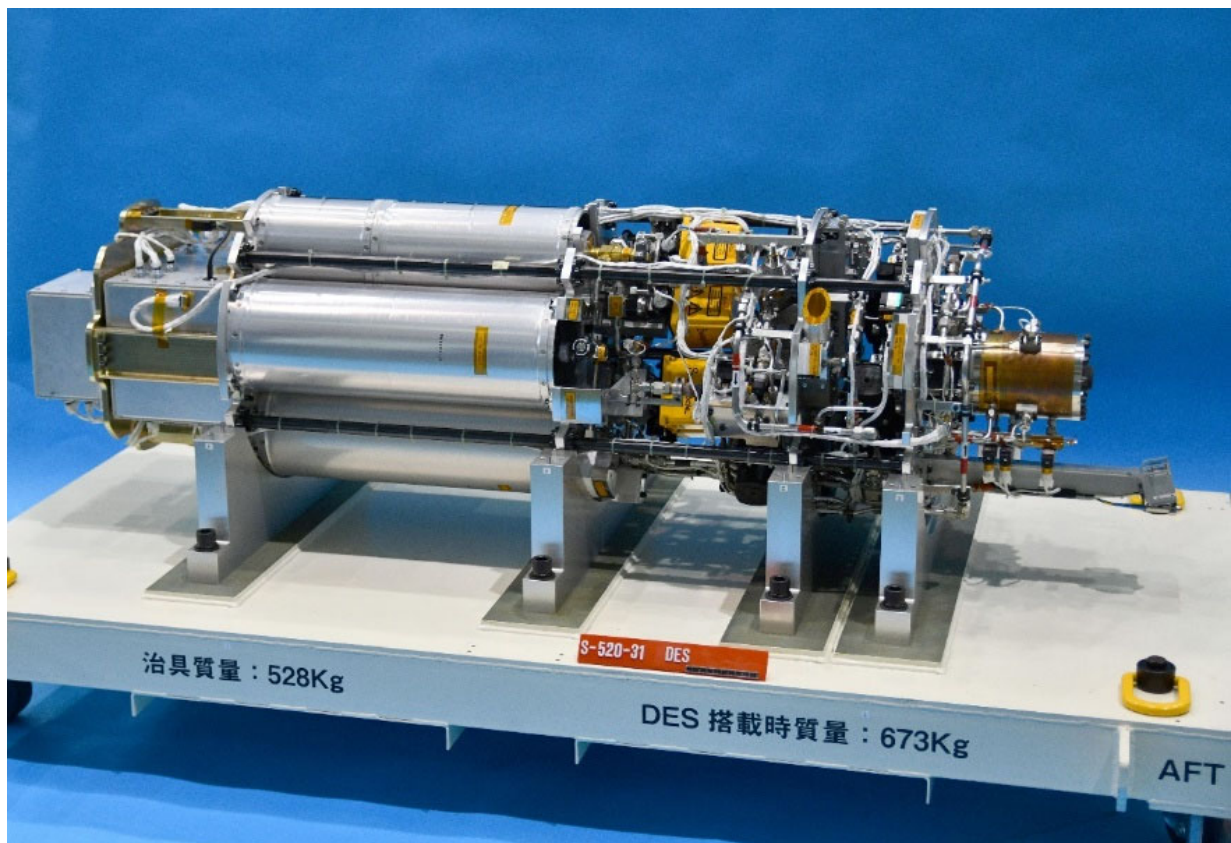


図2 デトネーションエンジンシステム (DES) の写真。【Credit: 名古屋大学】

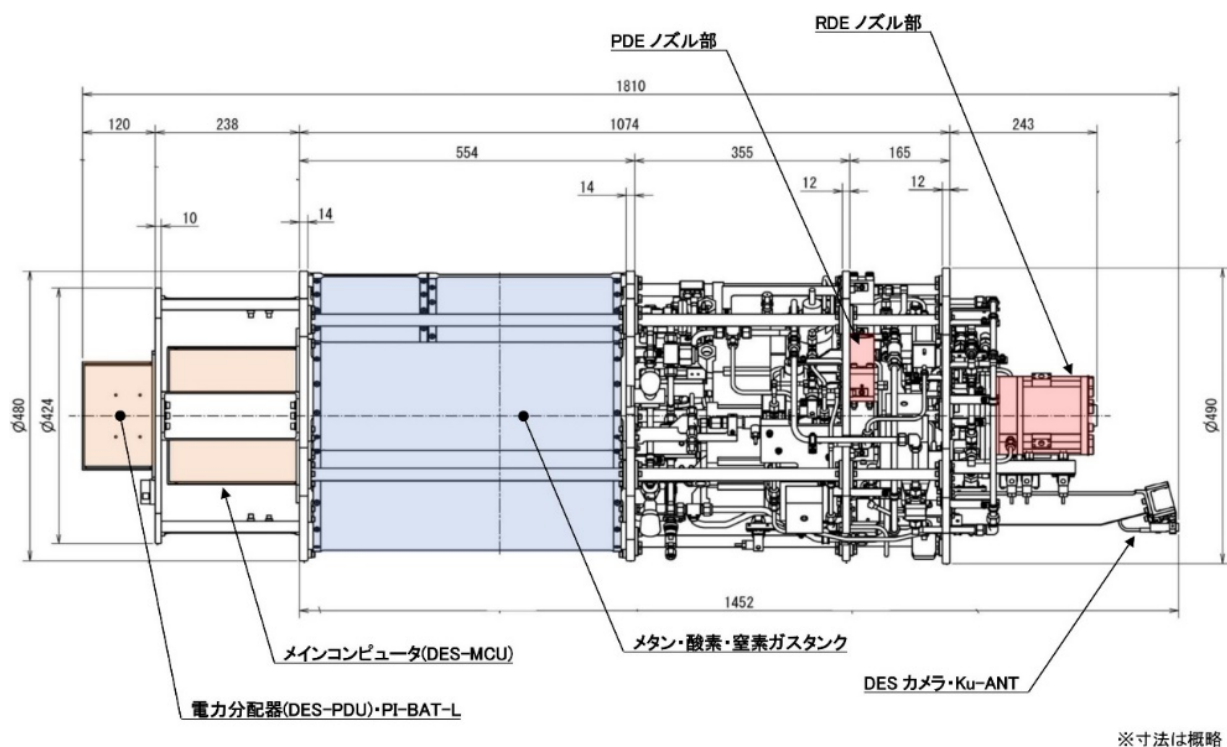


図3 デトネーションエンジンシステム (DES) の概要図。図左から DES アビオニクス (DES-PDU, DES-MCU, PI-BAT-L)、メタンガス、酸素ガス、窒素ガスのタンク、ガス供給用システム、パルスデトネーションエンジン (PDE)、回転デトネーションエンジン (RDE)、DES カメラと Ku-TV 用アンテナ 【Credit: 名古屋大学】

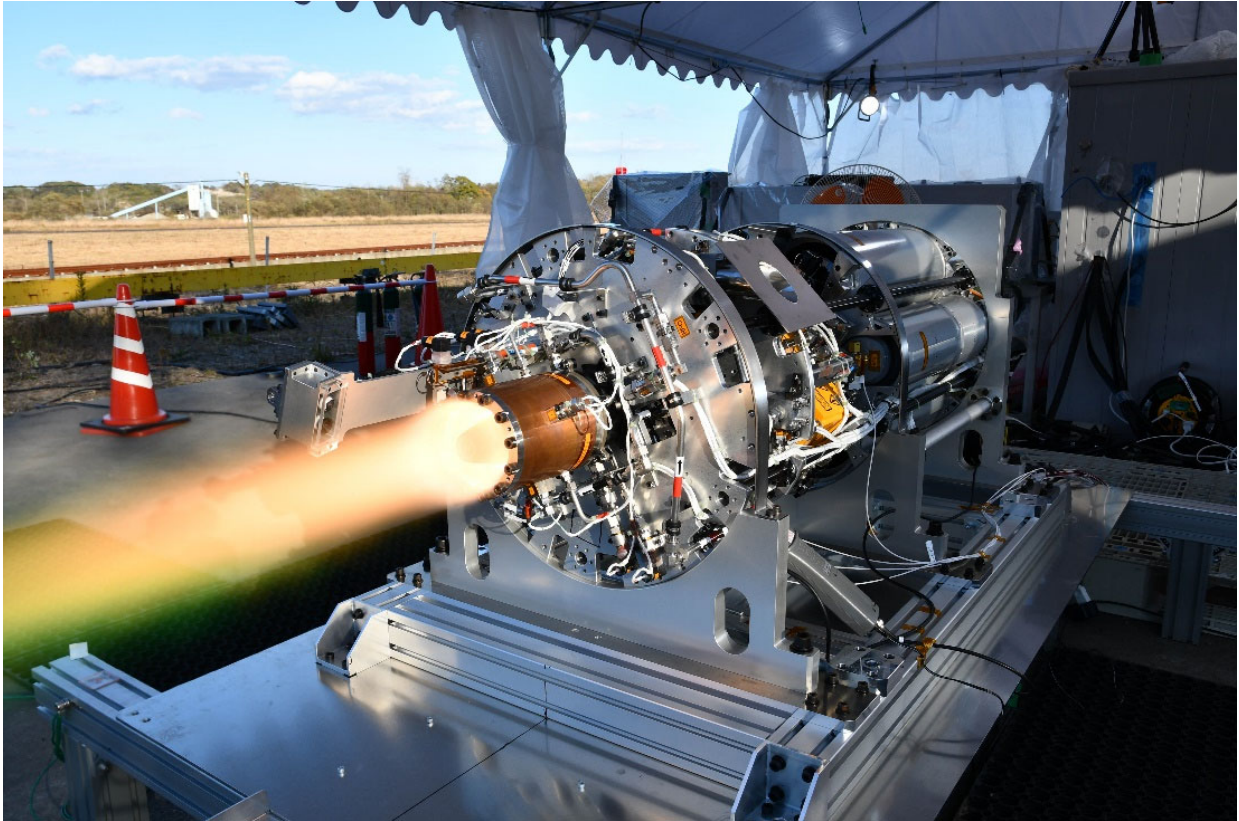


図4 デトネーションエンジンシステム（DES）の室蘭工業大学白老試験場での地上燃焼試験の様子。【Credit: 名古屋大学】

【成果の意義】

本宇宙飛行実証実験の成功によって、デトネーションエンジンは、深宇宙探査用キックモーター、ロケットの初段・2段エンジン等としての実用化に大きく近づくことになります。

既存のロケットエンジンが、デトネーションエンジンとなることで、エンジンを軽量化し、また、高性能化することができるため、デトネーションエンジンへと置き換わっていくことになります。つまり、本研究成果は、航空宇宙機用のエンジンや、航空宇宙機のシステムを大きく変革していく、きっかけとなります。

【用語説明】

注1) デトネーション：

衝撃波にともなって、化学反応による熱開放が行われる燃焼現象。その伝播速度は、2 km/s にもなるため、可燃性のガスを高速で燃焼させることが可能。

注2) 回転デトネーションエンジン：

デトネーションを連続的に伝播させることで、連続的な推力を得ることができるエンジン。これまで2重円筒形状の燃焼器の底部でデトネーションを円筒の周方向に伝播させるものが多く研究されてきた。推進剤は、軸方向に噴射され、その反対方向に推力を得ることができる。

注3) パルスデトネーションエンジン：

デトネーションを間欠的に伝播させ、その燃焼後の既燃ガスを排気し、反動を得ることで、間欠的な推力を得ることができるエンジン。

注4) テレメトリ：

離れた遠隔地（観測ロケット）での測定結果を、データセンター（内之浦宇宙空間観測所の宮原テレメータセンター）へ送信すること。

【謝辞】

本研究は、2014～2021 年度 JAXA 宇宙科学研究所宇宙工学委員会戦略的開発研究（工学）、2014～2016 年度 NEDO エネルギー・環境新技術先導研究プログラム、2019～2023 年度日本学術振興会科学研究費補助金特別推進研究の支援のもとで行われ、デトネーションエンジンシステムの開発は、株式会社ネッツ（中村 秀一 社長、豊永 慎治氏、原田 修氏、河野 秀文氏、山本 文孝氏、川本 昌司氏、東野 和幸氏）、明治電機工業株式会社（味田 直也氏、神藤 博実氏、堂山 一郎氏、加藤 辰哉氏）の協力のもと実施され、また、制御・計測システムには日本ナショナルインスツルメンツ株式会社の製品（CompactRIO・LabVIEW）が使用されました。

【関連情報】

(1) 宇宙科学研究所 Web サイトに記事掲載

<https://www.isas.jaxa.jp/topics/002693.html>

(2) JAXA プレスリリース「観測ロケット S-520-31 号機 打上げ結果について」

https://www.jaxa.jp/press/2021/07/20210727-1_j.html

(3) 推進エネルギーシステム工学研究グループ Web サイト

<http://www.prop.nuae.nagoya-u.ac.jp/index.html>

(4) デトネーション現象（John, H. S. Lee 著、化学工業日報社）

<https://www.chemicaldaily.co.jp/697-8/>

(5) 関連学術論文（本研究グループ発表）

1. S. Sawada, K. Goto, K. Ishihara, A. Kawasaki, K. Matsuoka, J. Kasahara, A. Matsuo, I. Funaki, Experimental Study of Torque Around the Axial Direction on Rotating Detonation Engines, Journal of Propulsion and Power (accepted 2nd July, 2021)
2. K. Goto, Y. Kato, K. Ishihara, K. Matsuoka, J. Kasahara, A. Matsuo, I. Funaki, D. Nakata, K. Higashino, and N. Tanatsugu, Thrust Validation of Rotating Detonation Engine System by Moving Rocket Sled-Test, Journal of Propulsion and Power, Vol.37, No. 3, 2021, pp.419–425.
3. K. Matsuoka, M. Tanaka, T. Noda, A. Kawasaki, J. Kasahara, Experimental Investigation on a Rotating Detonation Cycle with Backflow of Burned Gas, Combustion and Flame, Vol.225, 2021, pp.13–19.
4. R. Yokoo, K. Goto, J. Kasahara, V. Athmanathan, J. Braun, G. Paniagua, T. Meyer, A. Kawasaki, K. Matsuoka, A. Matsuo, I. Funaki, Experimental Study of Internal Flow Structures in Cylindrical Rotating Detonation Engines, Proceedings of the Combustion Institute, Vol.38, No. 3, 2021, pp.3759–3768.
5. M. Yamaguchi, K. Matsuoka, A. Kawasaki, J. Kasahara, H. Watanabe, A. Matsuo, Investigation of combustion modes and pressure of reflective shuttling detonation

- combustor, *Proceedings of the Combustion Institute*, Vol.38, No. 3, 2021, pp.3615–3622.
6. R. Yokoo, K. Goto, J. Kim, A. Kawasaki, K. Matsuoka, J. Kasahara, A. Matsuo, I. Funaki, Propulsion Performance of Cylindrical Rotating Detonation Engine, *AIAA Journal*, Vol. 58, No. 12, 2020, pp.5107–5116.
7. K. Matsuoka, H. Taki, A. Kawasaki, J. Kasahara, H. Watanabe, A. Matsuo, and T. Endo, Semi-Valveless Pulse Detonation Cycle at a Kilohertz-scale Operating Frequency, *Combustion and Flame*, Vol. 205, 2019, pp. 434–440.
8. J. Shepherd, J. Kasahara, Analytical Models for the Thrust of a Rotating Detonation Engine, GALCIT Report FM2017.001,
9. A. Kubota, K. Matsuoka, A. Kawasaki, J. Kasahara, H. Watanabe, A. Matsuo, and T. Endo, Optical Measurement of Fluid Motion in Semi-Valveless Pulse Detonation Combustor with High-Frequency Operation, *Combustion Science and Technology*, Vol. 192, 2020, pp.197–212.
10. K. Goto, J. Nishimura, A. Kawasaki, K. Matsuoka, J. Kasahara, A. Matsuo, I. Funaki, D. Nakata, M. Uchiumi, K. Higashino, Experimental Propulsive Performance and Heating Environment of Rotating Detonation Engine with Various Throat Geometries, *Journal of Propulsion and Power*, Vol. 35, No. 1, 2019, pp.213–223.
11. A. Kawasaki, T. Inakawa, J. Kasahara, K. Goto, K. Matsuoka, A. Matsuo, I. Funaki, Critical Condition of Inner Cylinder Radius for Sustaining Rotating Detonation Waves in Rotating Detonation Engine Thruster, *Proceedings of the Combustion Institute*, Vol. 37, No. 3, 2019, pp. 3461–3469.
12. M. Yamaguchi, K. Matsuoka, A. Kawasaki, J. Kasahara, H. Watanabe, A. Matsuo, Study on a Reflective Shuttling Detonation Wave in Fan-Shaped Two-Dimensional Combustor, *Proceedings of the Combustion Institute*, Vol. 37, No. 3, 2019, pp. 3741–3747.
13. K. Matsuoka, S. Takagi, J. Kasahara, A. Matsuo, T. Endo, Validation of Pulse Detonation Operation in Low-Ambient-Pressure Environment *Journal of Propulsion and Power*, Vol. 34, No. 1, 2018, pp.116–124.
14. S. Nakagami, K. Matsuoka, J. Kasahara, Y. Kumazawa, J. Fujii, A. Matsuo, I. Funaki, Experimental Visualization of the Structure of Rotating Detonation Waves in a Disk-Shaped Combustor, *Journal of Propulsion and Power*, Vol. 33, No. 1, 2017, pp.80–88.
15. 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*, Vol. 33, No. 1, 2017, pp.43–50.
16. 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 Disk-Shaped Combustor, *Proceedings of the Combustion Institute*, Vol. 36, No. 2, 2017, pp. 2673–2680.
17. 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*, Vol. 36, No. 2, 2017, pp. 2641–2647.
18. K. Matsuoka, T. Morozumi, S. Takagi, J. Kasahara, A. Matsuo, I. Funaki, Flight Validation of a Rotary-Valved Four-Cylinder Pulse Detonation Rocket, *Journal of Propulsion and Power*, Vol. 32, No. 2, 2016, pp.383–391.
19. K. Matsuoka, R. Sakamoto, T. Morozumi, J. Kasahara, A. Matsuo, I. Funaki, Thrust Performance of Rotary-Valved Four-Cylinder Pulse Detonation Rocket Engine, *Transaction of the Japan Society for Aeronautical and Space Sciences*, Vol. 58, No. 4, pp. 193–203, 2015.
20. H. Nakayama, J. Kasahara, A. Matsuo, and I. Funaki, Front shock behavior of stable curved detonation waves in rectangular-cross-section curved channels, *Proceedings of the Combustion Institute*, Vol. 34, 2013, pp.1939–1947.
21. H. Nakayama, T. Moriya, J. Kasahara, A. Matsuo, Y. Sasamoto, and I. Funaki, Propagation of Curved Detonation Waves Stabilized in Annular Channels, *Transaction of JSASS Aerospace Technology Japan*, 10, ists28, Pe 7–14 (2012)
22. K. Matsuoka, M. Esumi, K. B. Ikeguchi, J. Kasahara, A. Matsuo, and I. Funaki, Experimental Investigation of a Multi-Cycle Single Tube Pulse Detonation Rocket Engine with a Coaxial Rotary Valve, *Transaction of JSASS Aerospace Technology Japan*, 10, ists28, Te_1–4 (2012)
23. K. Matsuoka, M. Esumi, K. B. Ikeguchi, J. Kasahara, A. Matsuo, and I. Funaki, Optical and Thrust Measurement of a Pulse Detonation Combustor with a Coaxial Rotary Valve, *Combustion and Flame*, Vol. 159, 2012, No. 3, pp.1321–1338.

24. H. Nakayama, T. Moriya, J. Kasahara, A. Matsuo, Y. Sasamoto, and I. Funaki, Stable Detonation Wave Propagation in Rectangular–Cross–Section Curved Channels, *Combustion and Flame*, Vol. 159, 2012, No. 2, pp.859–869.
25. K. Kawane, S. Shimada, J. Kasahara, and A. Matsuo, The Influence of Heat Transfer and Friction on the Impulse of a Detonation Tube, *Combustion and Flame* , Vol. 158, No. 10, 2011, pp.2023–2036.
26. K. Matsuoka, J. Yageta, T. Nakamichi, J. Kasahara, T. Yajima, T. Kojima, Inflow–Driven Valve System for Pulse Detonation Engines, *Journal of Propulsion and Power*, Vol. 27, No.3, May–June 2011, pp.597–607.
27. J. Kasahara, M. Hirano, A. Matsuo, Y. Daimon, T. Endo, Thrust Measurement of a Multicycle Partially Filled Pulse Detonation Rocket Engine, *Journal of Propulsion and Power*, Vol.25, No.6, November–December 2009, pp.1281–1290
28. J. Kasahara, A. Hasegawa, T. Nemoto, H. Yamaguchi, T. Yajima , T. Kojima, Performance Validation of a Single–Tube Pulse Detonation Rocket System, *Journal of Propulsion and Power*, Vol.25, No.1, January–February 2009, pp.173–180
29. J. Kasahara, Z. Liang, S. T. Browne, and J. E. Shepherd, Impulse Generation by an Open Shock Tube, *AIAA Journal*, Vol.46, No. 7, 2008, pp.1593–1603