

平成 28 年 5 月 31 日現在

機関番号：13901

研究種目：基盤研究(A) (一般)

研究期間：2012～2015

課題番号：24246137

研究課題名(和文) MHz級デトネーションエンジンの物理機構解明：バルブ共振型と回転爆轟波型エンジン

研究課題名(英文) Elucidation of MHz-Class Detonation Engine Physics Mechanism: Valve Resonance and Rotating Detonation Type Engines

研究代表者

笠原 次郎 (Kasahara, Jiro)

名古屋大学・工学(系)研究科(研究院)・教授

研究者番号：60312435

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 35,700,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、回転デトネーションエンジンの性能を実験的・数值的に解明した。回転デトネーションエンジン内のデトネーション波の安定生成条件に関して、予測モデルを構築した。デトネーション波の生成、消滅にプロセスを可視化解明した。二平面型RDEでは、噴射・混合プロセスを含んだ1waveのデトネーション波の全体構造を解明した。また、前方に衝撃波が傾斜した新しいデトネーション波を発見した。また、2次元数値解析にて、インジェクター形状や、既燃ガスがデトネーション波に、どのように影響を与えるかを解明した。飛行試験型PDE、滑走試験型RDEを製作し、世界初のPDE垂直飛行試験、RDE滑走試験に成功した。

研究成果の概要(英文)：In the present study, we elucidated performance of rotating detonation engines experimentally and numerically. We made models for predicting the stabilization condition in which detonation waves can propagate in the rotating detonation engines. We also elucidated the mechanism of detonation generation and quench. In the two flat disc shaped rotating detonation engine, we show the whole structure of the flow field including injection, mixing of fuel and oxidizer. We discovered a new detonation wave (forward tilting detonation wave) in this disc shaped engine. By the two-dimensional computational fluid dynamics analysis, we elucidated the effect of injector shapes and burned gases on detonation waves. We successfully performed the flight test of a pulse detonation engine and the sled test of a rotating detonation engine.

研究分野：航空宇宙工学

キーワード：デトネーション 航空宇宙工学 ロケットエンジン 空気吸い込み式ジェットエンジン 発電用タービンエンジン 再使用型宇宙輸送機 熱工学 新エネルギー

1. 研究開始当初の背景

デトネーションエンジンの基礎研究は、Simplified Pulse Detonation Engine とよばれる、一定断面管内をデトネーション波が伝播し、生成ガスが排気される過程を理論化することから開始され、申請者グループ、広島大、Caltech、Stanford 大等のグループで研究され、最新の成果は、摩擦や熱伝達を考慮したモデルが申請者グループによって提案されている [Kawane et al. Combustion and Flame (以下 Combust. Flame), 2011]。このような単純なデトネーション管でも水素燃料の空気吸い込み式エンジンで 4200 秒の比推力が、管長管径比が 50 以下であれば獲得可能である。水素 - 空気や水素 - 酸素といった推進剤を部分的に充填すると推力は増大する。この研究は、申請者グループ、Caltech、AFRL (米国空軍研究所)、広島大で行われ、タービン・ファン機構なしでも、それらと等価な効果を間欠流で生み出すことが理論的に可能であることが、申請者と Caltech の共同グループが示した [Kasahara et al., AIAA J., 2008]。水素燃料ベースで (音響インピーダンスが十分高い気体 (空気など) に対して、最大の部分重点効果を得ると) 比推力 15,000 秒程度の理論性能であるが、実際のエンジンとして実用化するためには、少なくとも kHz オーダーの作動周波数でデトネーションを開始する必要がある。米国では、2008 年に AFRL と企業 ISSI による有人飛行試験に成功し、計画が大きく前進した。現在、航空機エンジンメーカー P&W、GE、AFRL、NRL (米国海軍研究所)、NASA がグループとなり、艦船用タービンエンジンで、DARPA の Vulcan engine の Phase II プログラムに採択された。

EU では飛翔体トップシェアメーカー MBDA がロケットエンジンとして、実用化研究を進めており kHz オーダーの作動周波数を水素酸素ロケットエンジン (回転伝播型のデトネーションエンジン) の地上燃焼試験に成功し、2011 年 6 月の段階で、Isp333.5 秒を達成している。日本では、申請者らが、独自の供給系である、自律作動バルブ [Mastuoka et al., Journal of Propulsion and Power (以下 JPP)] や、爆轟管同軸回転バルブ [Matsuoka et al., Combust. Flame, 2012] を開発し、世界初の地上滑走試験に 2006 年に成功 [Kasahara et al., JPP, 2008] した。地上試験では、すでに推力 102N、比推力 250 秒、1 気筒あたり作動周波数 0.2kHz を達成している (飛行は 4 気筒エンジンで 0.64kHz で行う)。さらに、JAXA と申請者らで、宇宙機の姿勢制御用 Reaction Control System (以下 RCS) として早期の実用化を目指した研究が開始された (2011 年度)。kHz オーダーの作動周波数は、専用バルブの開発や、回転デトネーションの応用で、実現可能であるが、しかしながら、直径数 100mm 程度のエンジンサイズでは、デトネーション燃焼過程より、燃料供給過程が 1~2 桁程度時間が長く、理想的とはまだいえ

ない。デトネーション燃焼過程の占める時間が推進剤の供給過程の占める時間より支配的になるためには、MHz オーダーの作動周波数が必要であり、その時には、推力性能の理論上限値に近づくと考えている。広島大と申請者らは、掃気過程を考慮しても、熱効率でデトネーション燃焼過程が定積燃焼過程を上回ることを示した [Endo et al., Sci. Tech. Energetic Materials, 2004]。MHz オーダーのデトネーションエンジンでは、既存ターボファンエンジンやロケットエンジンをより単純なシステムで置き換え可能となる。また、MHz オーダーでデトネーションを発生させた場合、1 サイクルあたりの推進剤量が 1/1000 になり、生成される衝撃波は減衰し、エンジン騒音は、既存エンジンと遜色ない音圧レベル SPL になる。

2. 研究の目的

5 つの研究を展開する。まず、MHz 作動での理論上限モデルを構築する (周囲空気との干渉効果、熱力学的非平衡 (温度非平衡)、部分充填効果、イジェクター効果、宇宙環境を考慮する)。また、プラズマ理工学、可視化技術を駆使したナノ秒オーダーでのデトネーション開始に関する研究を行い、MHz 作動に適した開始方法を切り開く。また、kHz エンジンの小型ロケット用の供給系に開発した、自律作動バルブと同軸管回転バルブを組み合わせた、10~100kHz 作動用の自律回転バルブの機構を構築し、宇宙用 RCS などデトネーションの早期実用化につなげる。回転爆轟型 MHz デトネーションエンジン機構及び、バルブ共振型 MHz デトネーションエンジン機構の物理機構を実験、数値解析によって確認・解明する。これら二つのエンジンでは、デトネーション開始機構を用いずに、デトネーション波を発生させることが可能である。実証試験機を製作・テストし、デトネーションエンジンとしての実現性を確認する。

3. 研究の方法

デトネーションエンジンの MHz 作動での理論上限モデルを構築する (周囲空気との干渉効果、熱力学的非平衡 (温度非平衡)、部分充填効果、イジェクター効果、宇宙環境を考慮する)。プラズマ理工学、可視化技術を駆使したナノ秒オーダーでのデトネーション開始に関する研究を行い、MHz 作動に適した開始方法を切り開く。自律作動バルブと同軸管回転バルブを組み合わせた、10~100kHz 作動用の自律回転バルブの機構を構築する。回転爆轟型 MHz デトネーションエンジン及び、バルブ共振型 MHz デトネーションエンジン及びの物理機構を実験、数値解析によって確認・解明する。これらエンジンの実証試験機を製作・テストし、デトネーションエンジンとしての実現性を確認する。

4. 研究成果

- 1) MHz作動デトネーションエンジンの推力理論の構築 [笠原・松尾・船木]
理論、数値解析、実験によって、回転デトネーションエンジン内の流れを定量的に解析した。特にノズルによる推力増加を実験的に実証し、理論と矛盾しない結果を得た。スロート付きRDEを用いて、最大推力400N、大気圧下で比推力200秒を達成している。また、燃焼圧を計測し、燃焼器の特性排気速度効率が95%以上を達成した。また、これらの作動に関するデトネーション波の安定生成条件に関しても、セルサイズを用いた整理を行い、安定作動限界に関して定量的な予測モデルを構築した。デトネーション波の生成、消滅に関して、高速度カメラからストリーク画像を構成・分析することで、そのプロセスを解明した。
- 2) プラズマ工学、可視化技術を駆使したナノ秒オーダーでのデトネーション開始に関する研究 [榊田・笠原・松尾]
誘電体バリヤ放電(DBD)技術によるデトネーション開始の実験装置の開発を行い、矩形管、特殊円筒管の観測容器を開発し、DDTプロセスの可視化実験を行った。MHz級のデトネーション開始装置を開発し、その初期圧力によって、デトネーションの伝播の安定性に差異があることを確認した。弱電離プラズマを利用した乱流促進機構に関しても、高速度カメラによる可視化により、理解を深めた。
- 3) 10~100kHz作動自律回転バルブ型エンジンの物理機構解明 [笠原・松尾・船木]
1kHz型エンジン(液体N₂O、エアモーター使用)にて平均推力256N、比推力131s、推力重量比0.8、1.5secにて、世界初のパルスデトネーションエンジンの垂直飛行試験に成功した。
- 4) MHz作動回転爆轟型MHzデトネーションエンジンの物理機構解明 [笠原・松尾・船木・榊田]
二平面型RDEでは、前方に衝撃波が傾斜した新しいデトネーション波を発見した。また、2次元数値解析にて、インジェクターを含む回転デトネーションエンジン内の流れを解析し、デトネーション波の速度が、インジェクター形状や、既燃ガスによって、どのように影響するのかを解明した。
滑走試験型RDEを製作し、世界初のRDE滑走試験に成功した。また、壁面への熱流束を試験にて確認した。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者に

は下線)

(雑誌論文)(計13件)

1. Y. Nagura, J. Kasahara, A. Matsuo, Multi-Frame Visualization for Detonation Wave Diffraction, Shock Waves (published online on May 28th, 2016(DOI 10.1007/s00193-016-0663-y)).
2. 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 (accepted on March 29th, 2016).
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, Proceedings of the Combustion Institute (accepted on March 29th, 2016)).
4. J. Fujii, Y. Kumazawa, A. Matsuo, S. Nakagami, J. Kasahara, Numerical Investigation on Velocity Deficit of Detonation Wave in RDE Chamber, Proceedings of the Combustion Institute (accepted on March 29th, 2016)).
5. 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 (accepted on February 28th, 2016).
6. 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.
7. H. Yamada, Y. Yamagishi, H. Sakakita, S. Tsunoda, J. Kasahara, M. Fujiwara, S. Kato, H. Itagaki, J. Kim, S. Kiyama, Y. Fujiwara, Y. Ikehara, S. Ikehara, H. Nakanishi, and N. Shimizu, Bending

- and turbulent enhancement phenomena of neutral gas flow containing an atmospheric pressure plasma by applying external electric fields measured by schlieren optical method, Japanese Journal of Applied Physics, Vpo. 55, 01AB08, 2016.
8. 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, 2015 pp. 193-203.
 9. S. Maeda, S. Sumiya, J. Kasahara, A. Matsuo, Scale Effect of Spherical Projectiles for Stabilization of Oblique Detonation Waves, Shock Waves, Vol. 25, 2015, pp. 141-150.
 10. Y. Sugiyama, A. Matsuo, H. Nakayama, and J. Kasahara, Numerical Investigations on Detonation Propagation in a Two-Dimensional Curved Channel, Combustion Science and Technology, Vol. 186, 2014, 1662-1679.
 11. Y. Nagura, J. Kasahara, Y. Sugiyama, and A. Matsuo, Comprehensive Visualization of Detonation-Diffraction Structures and Sizes in Unstable and Stable Mixtures, Proceedings of the Combustion Institute, Vol. 34, 2013, pp.1949-1956.
 12. 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.
 13. S. Maeda, S. Sumiya, J. Kasahara, and A. Matsuo, Initiation and Sustaining Mechanisms of Stabilized Oblique Detonation Waves around Projectiles, Proceedings of the Combustion Institute, Vol. 34, 2013, pp.1973-1980.
- [学会発表](計 103 件)
1. 笠原次郎, デトネーションエンジンの研究開発の現状と課題, 平成 27 年度宇宙航行の力学シンポジウム, 2015.12.10. JAXA 宇宙科学研究所.
 2. J. Kasahara, 500-N Class Rotating Detonation Rocket Engine Experiments, IWDP2015, Peking University, August 26-29, 2015, China.
 3. J. Kasahara, 500-N Class Rotating Detonation Rocket Engine Experiment and Sounding Rocket Flight Test Program, Special Session: Rocket Applications of PGC, AIAA Propulsion and Energy Forum, July 27-29, 2015, Orlando US.
 4. J. Kasahara, Present Status for Pulse and Rotating Detonation Engine Researches, 25th International Colloquium on the Dynamics of Explosions and Reactive Systems, August 2-7, 2015, Leeds, UK.
 5. 笠原次郎, デトネーション推進研究の現状と課題, 日本航空宇宙学会 西部支部 第 43 期(平成 27 年度)支部総会特別講演, 平成 27 年 3 月 18 日, 広島大学
 6. J. Kasahara, The Pulse Detonation Rocket Engine Flight Demonstrator “Todoroki II” and RDE Visualization Research, IWDP2014, Institute of Aviation, Warsaw, Poland, 22-24 June, 2014
 7. 笠原次郎, デトネーション波のエンジン応用研究 - これまでの歩み, Todoroki II による飛行試験, そして将来展望 - , 平成 25 年度衝撃波シンポジウム特別講演, 青山学院大学, 2014. 3.7
 8. J. Kasahara, Pulse Detonation Rocket Engine “Todoroki II” Flight Test and Rotating Detonation Engine Visualization, International Session - Status of Pressure Gain Combustion for Propulsion, Research & Application I, AIAA SciTech2014, Maryland, US, 2014. January 15.
 9. J. Kasahara, K. Matsuoka, R. Sakamoto, T. Morozumi, T., Kashiwazaki, Y. Fujiwara, A. Matsuo, I. Funaki, Experimental Study on a Four-Cylinder Pulse Detonation Rocket Engine Test Model, IWDP 2013, Tainan, Taiwan, 2013. July 26th-28th.
 10. 笠原次郎, デトネーション現象とその推進応用 - 飛行実証に向けて, 日本航空宇宙学会中部支部 第 291 回定例談話会, 名古屋大学, 2013. 6. 28.
 11. 笠原次郎, 坂本龍基, 両角智人, 藤原大, 松岡健, 松尾亜紀子, 船木 幸, 回転バルブ型 4 気筒パルスデトネーションロケットエンジン(PDRE)の推力測定実験とその飛行実証計画, 航空装備研究所, 2013. 2.27

12. J. Kasahara, R. Sakamoto, T. Morozumi, Y. Fujiwara, K. Matsuoka, A. Matsuo, I. Funaki, Pulse Detonation Rocket Engine Flight Test in Japan, University of Poitiers, France, 2013.2.18
13. S. Nakagami, K. Matsuoka, J. Kasahara, Y. Kumazawa, J. Fujii, A. Matsuo, I. Funaki, Structure of Rotating Detonation Waves in a Two-Parallel-Plane Combustor with Orthogonally Mixing Injectors, AJCPP2016-155, Asian Joint Conference on Propulsion and Power, March 16-19, 2016, Sunport Hall Takamatsu, Kagawa, Japan.
14. K. Ishihara, Y. Kato, K. Goto, K. Matsuoka, J. Kasahara, Y. Sato, A. Matsuo, I. Funaki, Experimental Flow Analysis of the Combustion Channel Flow of a Rotating Detonation Engine, AJCPP2016-157, Asian Joint Conference on Propulsion and Power, March 16-19, 2016, Sunport Hall Takamatsu, Kagawa, Japan.
15. S. Takagi, K. Hosono, K. Matsuoka, J. Kasahara, A. Matsuo, I. Funaki, Experimental Performance Evaluation of 3N-Class Pulse Detonation Thruster using Liquid Purge Method, SciTech 2016, 54th AIAA Aerospace Sciences Meeting, AIAA 2016-0122, January 4-8, 2016, San Diego, California, USA.
16. K. Muto, K. Matsuoka, J. Kasahara, H. Watanabe, A. Matsuo, T. Endo, Development of High-Frequency Pulse Detonation Combustor without Purging Material, SciTech 2016, 54th AIAA Aerospace Sciences Meeting, AIAA 2016-0123, January 4-8, 2016, San Diego, California, USA.
17. H. Watanabe, A. Matsuo, K. Muto, K. Matsuoka, J. Kasahara, T. Endo, One-Dimensional Numerical Investigation on Purging the Burned Gas by the Evaporation of Water Droplets in Pulse Detonation Combustor, SciTech 2016, 54th AIAA Aerospace Sciences Meeting, AIAA 2016-1401, January 4-8, 2016, San Diego, California, USA.
18. Y. Kato, K. Ishihara, K. Matsuoka, J. Kasahara, A. Matsuo, I. Funaki, Study of Combustion Chamber Characteristic Length in Rotating Detonation Engine with Convergent-Divergent Nozzle, SciTech 2016, 54th AIAA Aerospace Sciences Meeting, AIAA 2016-1406, January 4-8, 2016, San Diego, California, USA.
19. K. Matsuoka, K. Muto, J. Kasahara, H. Watanabe, A. Matsuo, T. Endo, Development of a liquidpurge method for valvelss pulse detonation combustor using liquid fuel and oxidizer, The 25th International Colloquium on the Dynamics of Explosions and Reactive Systems, Leeds, UK, 2-7 August 2, 2015.
20. T. Hayashi, A. Matsuo, J. Kasahara, The effect of radius of curvature on the detonation propagating to the unconfined Space, The 25th International Colloquium on the Dynamics of Explosions and Reactive Systems, Leeds, UK, 2-7 August 2, 2015.
21. J. Fujii, A. Matsuo, J. Kasahara, Two-dimensional simulation on detonation wave supported by the cylindrical inner wall injecting premixed gas, The 25th International Colloquium on the Dynamics of Explosions and Reactive Systems, Leeds, UK, 2-7 August 2, 2015.
22. K. Ishihara, Y. Kato, K. Matsuoka, J. Kasahara, A. Matsuo, I. Funaki, Thrust performance evaluation of a rotating detonation engine with a conical plug, The 25th International Colloquium on the Dynamics of Explosions and Reactive Systems, Leeds, UK, 2-7 August 2, 2015.
23. S. Nakagami, K. Matsuoka, J. Kasahara, A. Matsuo, I. Funaki, Schlieren-System-Visualization of Combustion Phenomena in a Two-Parallel-Plane Combustor, Propulsion and Energy 2015, 51st AIAA/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference, AIAA 2015-4102, July 27-29, 2015, Orland, Florida, USA.
24. K. Ishihara, Y. Kato, K. Matsuoka, J. Kasahara, A. Matsuo, and I. Funaki, Experimentally Performance Evaluation of a Rotating Detonation Engine with a Conical-shape Nozzle, 2015-a-30, 30th ISTS, July 4-7, 2015, Kobe, Japan.
25. K. Ishihara, K. Matsuoka, J. Kasahara, A. Matsuo, I. Funaki, Performance Evaluation of a Rotating Detonation Engine with Conical Shape Tail, SciTech 2015, 53rd AIAA Aerospace Sciences Meeting, AIAA 2015-0630, January 5-9, Kissimmee, Florida, 2015, USA
26. S. Nakagami, K. Matsuoka, J. Kasahara, A. Matsuo, I. Funaki, Visualization of Rotating Detonation Waves in a Plane Combustor with a Cylindrical Wall Injector, SciTech 2015, 53rd AIAA Aerospace Sciences Meeting, AIAA 2015-0877, January 5-9, Kissimmee, Florida, 2015, USA

27. K. Matsuoka, S. Takagi, J. Kasahara, T. Morozumi, A. Matsuo and I. Funaki, Flight Demonstration of a Rotary-Valved Four-Cylinder Pulse Detonation Rocket Todoroki II, 14th International Space Conference of Pacific-basin Societies (ISCOPS), May. 28 - 30, 2014, Xi'an, China.
28. K. Matsuoka, T. Morozumi, S. Takagi, J. Kasahara, A. Matsuo and I. Funaki, Flight Demonstration of a Pulse Detonation Rocket System Todoroki II, 65th International Astronautical Congress 2014, Sep. 29 - Oct 3, 2014, Toronto, Canada.
29. K. Matsuoka, T. Morozumi, S. Takagi, J. Kasahara, A. Matsuo, I. Funaki, Flight Demonstration of a RotarValved Four Cylinder Pulse Detonation Rocket Engine "Todoroki II", 35th International Symposium on Combustion, San Francisco, August 3-8, 2014. USA
30. S. Takagi, T. Morozumi, K. Matsuoka, J. Kasahara, A. Matsuo, I. Funaki, Study on Pulse Detonation Rocket Engine Using Flight Test Demonstrator "Todoroki II", AIAA 2014-4033, 50th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference, Cleveland, July 28-30, 2014, US.
31. Y. Kato, K. Gawahara, K. Matsuoka, J. Kasahara, A. Matsuo, I. Funaki, D. Nakata, K. Higashino, N. Tanatsugu, Thrust Measurement of Rotating Detonation Engine by Sled Test, AIAA 2014-4034, 50th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference, Cleveland, July 28-30, 2014, US.
32. Y. Yamagishi, H. Sakakita, S. Tsunoda, J. Kasahara, J. Kim, S. Kiyama, Y. Ikehara, H. Yamada, "Study on the electrical characteristics between the atmospheric pressure plasma and the neutral gas flow", Plasma Conference 2014, Niigata (2014.11.18-21).
33. Yusuke YAMAGISHI, Hiromasa YAMADA, Hajime SAKAKITA, Syuichiro TSUNODA, Jiro KASAHARA, Jaeho KIM, Susumu KATO, Hiroto IITAGAKI, Satoru KIYAMA, Masanori FUJIWARA, and Yuzuru IKEHARA, "Flow control of a neutral gas along with an atmospheric pressure plasma flare", ISPlasma 2015, Nagoya (2015/03/26-31).

(他 70 件)

〔図書〕(計 1 件)

1. 松村幸彦, 遠藤琢磨, 笠原次郎, 他(共著), 熱力学, 朝倉書店, pp.13-52, 第2

章 - 第 5 章, 2015.

〔産業財産権〕

出願状況(計 1 件)

名称: 回転デトネーションエンジン
 発明者: 笠原次郎, 松尾亜紀子, 船木一幸, 名出智彦, 中村秀一, 松岡健
 権利者:
 種類: 特許
 番号: 20001420163
 出願年月日: 2016.2.19
 国内外の別: 国内

〔その他〕

ホームページ等

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

6. 研究組織

(1) 研究代表者

笠原 次郎 (Jiro Kasahara)
 名古屋大学・大学院工学研究科・教授
 研究者番号: 6 0 3 1 2 4 3 5

(2) 研究分担者

松尾 亜紀子 (Akiko Matsuo)
 慶応義塾大学・理工学部・教授
 研究者番号: 7 0 2 7 6 4 1 8

(3) 研究分担者

船木 一幸 (Ikkoh Funaki)
 国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構・宇宙科学研究所・准教授
 研究者番号: 5 0 3 1 1 1 7 1

(4) 研究分担者

西岡 牧人 (Makihito Nishioka)
 筑波大学・システム情報工学研究科・教授
 研究者番号: 7 0 2 0 8 1 4 8

(5) 研究分担者

榊田 創 (Hajime Sakakita)
 国立研究開発法人産業技術総合研究所・研究グループ長
 研究者番号: 9 0 3 5 7 0 8 8

(6) 研究分担者

前田 慎市 (Shinichi Maeda)
 埼玉大学・学内共同利用施設等・助教
 研究者番号: 6 0 7 0 9 3 1 9

(7) 研究分担者

松岡 健 (Ken Matsuoka)
 名古屋大学・大学院工学研究科・助教
 研究者番号: 4 0 7 1 0 0 6 7