

## 科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成25年6月19日現在

機関番号：12102

研究種目：基盤研究（B）

研究期間：2009～2011

課題番号：21360411

研究課題名（和文） デトネーション推進の新展開：デトネーション共振機構と環状エンジンの研究

研究課題名（英文） New Evolution of Detonation Propulsion: Detonation Resonator Mechanism and Curved-Channel Detonation Engines

研究代表者

笠原 次郎（KASAHARA JIRO）

筑波大学・システム情報系・准教授

研究者番号：60312435

研究成果の概要（和文）：

本研究では、デトネーションエンジン機構（「環状デトネーションエンジン」及び「デトネーション共振機構」）を提案し、その物理機構を実験、数値解析によって確認・解明した。デトネーション共振機構に関しては、回転バルブ機構を用いて周波数依存性のない安定した推力生成に成功した。デトネーション共振機構として160Hzの回転バルブを用いたエンジン作動においてPDEサイクルの完全可視化に成功し閉管端近傍でのデトネーション遷移過程を詳細に解明した。比推力232秒、推力71Nを達成した。矩形断面曲管内を伝播するデトネーション波の可視化実験によって、環状デトネーションエンジンの安定作動条件を実験的に解明した。環状デトネーションエンジン内のデトネーション波面形状とセルサイズとの同時観測を実現するMSOP（Multi-frame Short-time Open-shutter Photography）法の開発に成功した。

研究成果の概要（英文）：

In the present study, we proposed the detonation engine mechanism (detonation resonator mechanisms and the curved-channel detonation engines), and we confirmed and analyzed these mechanisms by experiments and CFD analysis.

Regarding the detonation resonator mechanism, we obtained frequency-independent stable operation of the engine using a rotary valve. We also successfully visualized all of the flow fields in the pulse detonation engine cycle at 160-Hz operation. The Deflagration-to-Detonation Transition phenomena near the closed wall of the tube-shaped engine were analyzed. The maximum specific impulse and thrust of the engine was 232 sec and 71 N, respectively. By the visualization of the curved detonation wave propagating in the curved channel, we determined the stable operation condition for the curved-channel detonation engines. We also developed the Multi-frame Short-time Open-shutter Photography Method (MSOP Method), by which we simultaneously observed both the wave shape of the curved detonation wave and cell sizes of the waves.

交付決定額

(金額単位：円)

|        | 直接経費       | 間接経費      | 合計         |
|--------|------------|-----------|------------|
| 2009年度 | 4,300,000  | 1,290,000 | 5,590,000  |
| 2010年度 | 3,500,000  | 1,050,000 | 4,550,000  |
| 2011年度 | 3,400,000  | 1,020,000 | 4,420,000  |
| 年度     |            |           |            |
| 年度     |            |           |            |
| 総計     | 11,200,000 | 3,360,000 | 14,560,000 |

研究分野：工学

科研費の分科・細目：航空宇宙工学・推進・エンジン

キーワード：(1) デトネーション、(2) 航空宇宙工学、(3) 再使用型宇宙輸送機、(4) 熱工学、(5) 新エネルギー、(6) 空気吸い込み式ジェットエンジン、(7) ロケットエンジン、(8) 発電タービンエンジン

## 1. 研究開始当初の背景

この8年間、デトネーション波を利用したパルスデトネーションエンジン(PDE)は、活発に研究されてきた。粘性・熱伝導を無視し、瞬時にデトネーション開始が行われ、管形状のエンジンで推進剤を大気圧下で完全充填した場合(このように単純化されたPDEをSimplified PDEとよぶ)、水素燃料で比推力4200secの空気吸い込み式ジェットエンジン、水素酸素推進剤で比推力190secのロケットエンジンとなることが実験、理論解析、数値解析によって、主に広島大と申請者らの研究グループ[Endo et al., Journal of Propulsion Power (以下 JPP), 2004]やCaltech 研究グループ[Cooper et al., JPP, 2002, Wintenberger et al., JPP, 2003]によって解明されてきた。さらに、推進剤を部分的に充填することで、格段に大きな比推力を獲得可能であることが申請者ら[Sato et al., JPP 2006]、Caltech 研究グループ[Cooper et al., JPP, 2004]によって示され、PDE周囲の圧力が十分に低い場合は、ノズルによる定常流的な膨張加速効果が支配的となることが、NASA グループ [Morris, JPP, 2005]、Caltech グループ[Cooper and Shepherd, JPP, 2008]によって、数値解析と実験で示された。さらに申請者らと Caltech グループは、部分充填効果の物理的本質を衝撃波管型弾道振子実験と数値解析で示した[Kasahara et al., AIAA Journal, 2008]。以上のPDEの基礎的特性を申請者らは、実証試験器 TODOROKI を用いて確認した。申請者らの知る限り世界初の PDE システム実証論文として JPP への掲載が決定している[Kasahara et al., JPP, Accepted, 15 October 2008]。これまでの研究結果から、多種の推力増大効果を組み合わせると、PDEの比推力は空気吸い込み式エンジンで6000sec以上、ロケットエンジンとして(大気圧下であれば)

400sec以上が可能であると考えられる。

2008年1月には米国空軍研究所グループがPDEの飛行試験に世界で初めて成功した。米・英のエンジンメーカー(GE, ロールスロイス, P&W)でもPDEは活発に研究開発が行われている。現在、PDEの基礎研究者には、より高い研究目標設定が求められている。デトネーション開始装置がなくとも、航空燃料にデトネーション波を安定的に伝播させることができ、かつ、高周波数(高推力密度)で作動する、デトネーションエンジン機構の追求である。本研究では、そのような作動が可能な、「デトネーション共振機構」及び「環状デトネーションエンジン」を提案する。また、実験、数値解析によって、これら二つのエンジンの物理機構を確認・解明する。

## 2. 研究の目的

「デトネーション共振機構」及び「環状デトネーションエンジン」を提案し、その物理機構を実験、数値解析によって確認・解明する。また、デトネーションエンジンの実現性を確認する。

## 3. 研究の方法

既燃気体が瞬時置換される場合と、有限時間内に置換される場合の「デトネーション共振機構」を提案し、その作動特性を実験、数値解析にて解明する。最終年度には、デトネーション共振機構の実証試験機にてテストし、デトネーションエンジンとしての実現性を確認する。無限大曲率半径及び有限曲率半径の「環状デトネーションエンジン」を提案し、その作動特性を実験、数値解析にて解明する。また、エンジンの噴射ジェット用壁の通気性比率の最適値を求める。最終年度には、環状デトネーションエンジンの実証試験機にてテストし、デトネーションエンジンとして実現性を確認する。

#### 4. 研究成果

デトネーション共振機構として 160Hz の回転バルブを用いたエンジン (図 1) 作動においてサイクル完全可視化に成功した。

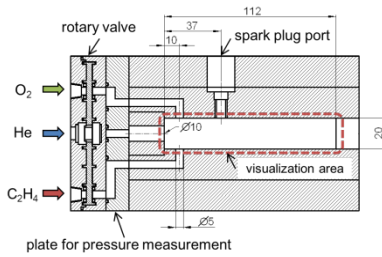


図 1 デトネーション共振機構

図 2 で示すように、世界で初めて PDE サイクルを高時間分解能で完全に可視化し、各過程 (噴射、混合、着火、デトネーション遷移、噴射、パージ) を分析した。

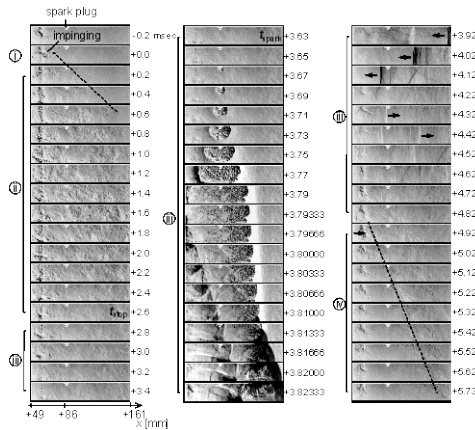


図 2 PDE サイクルの可視化

環状デトネーションエンジン内のデトネーション波面形状とセルサイズとの同時観測を実現する MSOP 法 (図 3) の開発に成功した。また、環状デトネーションエンジンのための安定作動条件及び波面形状予測式を高精度化した。

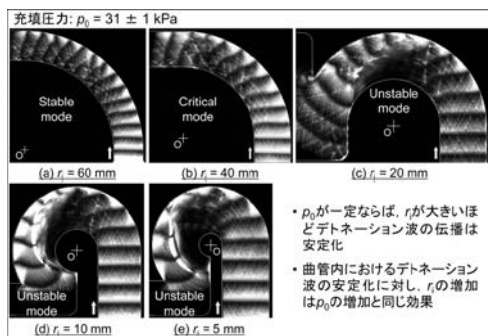


図 3 MSOP 法

普遍的関係から、回転デトネーションエンジン

ン内部を伝播するデトネーション波面の一般表現が求められた (図 4)。

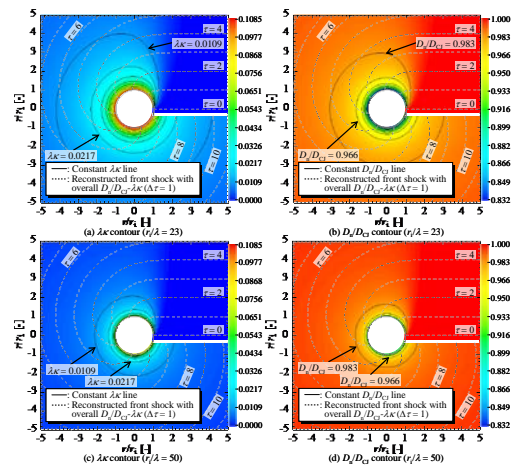


図 4 デトネーション波面の一般表現

#### 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 18 件)

1. 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. (査読有)
2. 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. (査読有)
3. 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. (査読有)
4. H. Yamashita, J. Kasahara, Y. Sugiyama, and A. Matsuo, Visualization Study of Ignition Modes Behind Bifurcated-Reflected Shock Waves, Combustion and Flame, Vol. 159, 2012,

- No. 9, pp.2954-2966. (査読有)
5. 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) (査読有)
  6. 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) (査読有)
  7. S. Maeda, J. Kasahara, A. Matsuo, Unsteady Propagation Process of Oblique Detonation Waves Initiated by Hypersonic Projectiles, Transaction of JSASS Aerospace Technology Japan, **10**, ists28, Pe\_1-6 (2012) (査読有)
  8. 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. (査読有)
  9. S. Maeda, J. Kasahara, and A. Matsuo, Oblique Detonation Wave Stability Around a Spherical Projectile by a High Time Resolution Optical Observation, Combustion and Flame, Vol. 159, 2012, No. 2, pp.887-896. (査読有)
  10. 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. (査読有)
  11. 中道達也, 松岡健, 笠原次郎, 松尾亜紀子, 船木一幸, 爆轟管同軸回転バルブを用いたパルスデトネーションエンジンの性能評価, 航空宇宙技術, Vol. 10, 2011, pp. 107-112. (査読有)
  12. 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. (査読有)
  13. 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. (査読有)
  14. Y. Kudo, Y. Nagura, J. Kasahara, Y. Sasamoto, A. Matsuo, Oblique Detonation Waves Stabilized in Rectangular-Cross-Section Bent Tubes, Proceedings of the Combustion Institute, Vol.33, 2011, pp.2319-2326 (査読有)
  15. S. Maeda, R. Inada, J. Kasahara, A. Matsuo, Visualization of the Non-Steady State Oblique Detonation Wave Phenomena around Hypersonic Spherical Projectile, Proceedings of the Combustion Institute, Vol. 33, 2011, pp.2343-2349 (査読有)
  16. J. Yageta, S. Shimada, K. Matsuoka, J. Kasahara, A. Matsuo, Combustion Wave Propagation and Detonation Initiation in the Vicinity of Closed-Tube End Walls, Proceedings of the Combustion Institute, Vol. 33, 2011, pp.2303-2310 (査読有)
  17. S. Kato, S. Hashimoto, A. Uemichi, J. Kasahara, A. Matsuo, Propagation Characteristics of Shock Waves Driven by Gaseous Detonation Waves, Shock Waves, Vol. 20, No.6, 2010, pp.479-489 (査読有)
  18. S. Maeda, J. Kasahara, A. Matsuo, T. Endo, Analysis on Thermal Efficiency of Non-Compressor Type Pulse Detonation Turbine Engine, Transaction of the Japan Society for Aeronautical and Space Sciences, Vol.53, No.181, 2010, pp.192-206 (査読有)

[学会発表] (計 57 件)

1. J. Kasahara, K. Matsuoka, S. Sakamoto, K. B. Ikeguchi, T. Sakumi, T. Morozumi, A. Matsu, I. Funaki, Multitube-Rotary-Valved Pulse Detonation Rocket Engine for Flight Test, International Workshop on Detonation for Propulsion 2012, September 3-5, 2012, Tsukuba, Japan (査読無)
2. H. Nakayama, J. Kasahara, A. Matsu, I. Funaki, Propagation of Self-sustaining Curved Detonation Waves in Annular Channels with a Rectangular Cross-section, International Workshop on Detonation for Propulsion 2012, September 3-5, 2012, Tsukuba, Japan (査読無)
3. J. Kasahara, K. Matsuoka, R. Sakamoto, K. Ikeguchi, T. Sakumi, T. Morozumi, A. Matsu, I. Funaki, Thrust Measurement of a Four-Cylinder Pulse Detonation Rocket Engine with a Coaxial High Frequency Rotary Valve, 8th International Colloquium on Pulsed and Continuous Detonations, June 10-16, 2012, Budva, Montenegro (査読無)
4. R. Sakamoto, K. Matsuoka, K. Ikeguchi, T. Sakumi, T. Morozumi, J. Kasahara, A. Matsu, I. Funaki, Thrust Measurement of a Multi-Cylinder Pulse Detonation Rocket Engine with a Coaxial High Frequency Rotary Valve, The Asian Joint Conference on Propulsion and Power 2012, AJCPP2012-080, March 1-4, 2012, Xi'an, China (査読無)
5. H. Nakayama, T. Moriya, J. Kasahara, A. Matsu, and I. Funaki, Front Shock Behavior of Stable Detonation Waves Propagating Through Rectangular Cross-Section Curved Channels, AIAA 2012-0618, 50th AIAA Aerospace Sciences Meeting Including the New Horizons Forum and Aerospace Exposition, AIAA 2012-0618, January 9-12, 2012, Nashville, USA (査読無)
6. K. Matsuoka, M. Esumi, K. Ikeguchi, J. Kasahara, A. Matsu, I. Funaki, Thrust Measurement and Visualization Experiment of a Multi-Cycle Single-Tube Pulse Detonation Rocket Engine with a Coaxial Rotary Valve, 47th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference and Exhibit, AIAA 2011-5789, July 31-August 3, 2011, San Diego, USA (査読無)
7. S. Maeda, J. Kasahara, A. Matsu, Visualization of the Initiation and Stabilization Process of an Oblique Detonation Wave Around a Projectile, 23<sup>rd</sup> International Colloquium on the Dynamics of Explosions and Reactive Systems, Paper No.116, July 24-29, 2011, Irvine, USA. (査読無)
8. H. Yamashita, J. Kasahara, A. Matsu, Visualization Study of Detonation Initiations Behind Reflected Shock Waves Using a High Speed Video Camera, 23<sup>rd</sup> International Colloquium on the Dynamics of Explosions and Reactive Systems, Paper No.199, July 24-29, 2011, Irvine, USA. (査読無)
9. H. Nakayama, T. Moriya, J. Kasahara, A. Matsu, Y. Sasamoto and I. Funaki, Study on Detonation Waves Propagating through Curved Channels, 23<sup>rd</sup> International Colloquium on the Dynamics of Explosions and Reactive Systems, Paper No.193, July 24-29, 2011, Irvine, USA. (査読無)
10. J.-Y. Choi, S. Maeda, J. Kasahara, A. Matsu, Drag Coefficients of Hypervelocity Spherical Projectile Initiating Oblique Detonation Wave, 23<sup>rd</sup> International Colloquium on the Dynamics of Explosions and Reactive Systems, Paper No.282, July 24-29, 2011, Irvine, USA. (査読無)
11. S. Maeda, R. Inada, J. Kasahara, A. Matsu, I. Funaki, The Stabilized Oblique Detonation Wave and Unsteady Wave Structure Around Hyper-Velocity Spherical Projectile, AIAA 2011-0505, 49th AIAA Aerospace Sciences Meeting Including the New Horizons Forum and Aerospace Exposition, 4-7 January 2011, Orlando, Florida, USA (査読無)
12. S. Takeuchi, N. Doi, J. Kasahara, A. Matsu, Effect of DDT Process on Impulse of Diaphragm-less Pulse Detonation Tube, 8<sup>th</sup> Asia-Pacific Conference on Combustion, Paper No. 79, 10-13 December, 2010, Hyderabad, India (査読無)
13. Y. Nagura, S. Maeda, Y. Kudo, J. Kasahara, A. Matsu, Detonation Wave Diffraction in the Vicinity of Corners, 8<sup>th</sup> International Symposium on Hazards, Prevention, and Mitigation of Industrial Explosions, Paper No. ISH-108, 5-9 September 2010, Yokohama, Japan (査読無)
14. Y. Sasamoto, A. Matsu, J. Kasahara,

Numerical analysis of detonation waves structure in bend tube, 8<sup>th</sup> International Symposium on Hazards, Prevention, and Mitigation of Industrial Explosions, Paper No. ISH-109, 5-9 September 2010, Yokohama, Japan (査読無)

15. Y. Nagura, Y. Kudo, J. Kasahara, A. Matsuo, Multi-Frame Visualization Analysis of Two-Dimensional Detonation Wave Diffraction and Re-initiation (Work-in Progress Poster), 33<sup>rd</sup> International Symposium on Combustion, 1-6 August 2010, Beijing, China (査読無)
16. K. Matsuoka, M. Esumi, J. Yageta, T. Nakamichi, J. Kasahara, S. Ogawa, T. Yajima, T. Kojima, Study on Valve Systems for Pulse Detonation Engines, 46th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference and Exhibit, AIAA 2010-6672, 25-28 July 2010, Nashville, Tennessee, USA (査読無)

他 4 1 件

〔図書〕 (計 1 件)

1. 笠原次郎, 他 (共著), デトネーションの熱流体力学 1 基礎編, デトネーション研究会編 (編集幹事を担当), 理工図書, 実験計測技術, pp. 173-193, パルスデトネーション (PDE) の実験・計測技術, pp. 249-266, 2011.

#### 6. 研究組織

##### (1) 研究代表者

笠原 次郎 (KASAHARA JIRO)  
筑波大学・システム情報系・准教授  
研究者番号：60312135

##### (2) 研究分担者

松尾 亜紀子 (MATSUO AKIKO)  
慶應義塾大学・理工学部・教授  
研究者番号：70276418

亀田敏弘 (KAMEDA TOSHIHIRO)  
筑波大学・システム情報系・准教授  
研究者番号：40302393