

平成 26 年 5 月 22 日現在

機関番号：15401

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2011～2013

課題番号：23360379

研究課題名(和文)高周波数パルス detonation 燃焼器をガスタービンエンジンに活かすための基礎工学

研究課題名(英文)Fundamental Engineering for the application of high-frequency pulse detonation combustors in gas turbine engines

研究代表者

遠藤 琢磨 (ENDO, TAKUMA)

広島大学・工学(系)研究科(研究院)・教授

研究者番号：00211780

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 14,500,000円、(間接経費) 4,350,000円

研究成果の概要(和文)：パルス detonation 技術とは、管内で detonation (最も激しい爆発の際の燃焼モード)を繰り返し発生させ、高温のガス流を連続パルスのように発生させる技術である。この技術をガスタービンエンジンの分野で活かすため、燃焼器としての活用および溶射用熱源としての活用に関する研究を行った。前者に関しては実際にタービン駆動実験システムを構築し、約10%の熱効率を達成するとともにエネルギーバランスを実験的に明らかにした。後者に関しては実際に溶射実験システムを構築し、燃焼器で加熱・加速された合金粉体の温度・速度を測定し、溶射条件を適切に設定することでタービン動翼の要求仕様を満たす皮膜を溶射できることを示した。

研究成果の概要(英文)：Detonation is the combustion mode of most intense explosions. The pulse-detonation technology is a technology where detonations are repetitively initiated in a tube, one end of which is closed and the other end open, and hot gas jets are continually created. In order to apply this technology to the field of gas-turbine engines, we carried out experimental studies on the applications of pulse-detonation combustors as the combustors of gas-turbine engines and as the heat sources of the thermal spray. On the former, we constructed a pulse-detonation-turbine-engine system, realized the thermal efficiency of approximately 10%, and clarified the energy balance of the system. On the latter, we constructed a pulse-detonation-thermal-spray system, measured the temperature and speed of alloy powders, which were heated and accelerated by pulsed detonations, and showed that we successfully made a coating, which satisfied the requirements for turbine blades, with proper thermal-spray conditions.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：総合工学・航空宇宙工学

キーワード：推進 エンジン

1. 研究開始当初の背景

パルス detonation (PD) 技術とは、管内で detonation を繰り返し発生させ、高温のガス流を連続パルスのように発生させる技術である。申請者は、管内流れを解析して無駄時間のないガス供給法を開発し、格段に高い周波数での PD 燃焼器運転を可能にした。この技術をガスタービンエンジンの分野で実用化するには、燃焼器としての活用と溶射用熱源としての活用が考えられる。ガスタービンエンジンの定圧燃焼器を PD 燃焼器で置き換えると理論熱効率が上がる。しかし、実験的な熱効率は 5% 以下で、理論値に遠く及ばず、その理由は明らかでない。また、PD 技術を使った溶射は優れた溶射法として知られ、装置としてはユニオンカーバイド社の D ガンが有名で、その運転周波数は 8 Hz 以下である。D ガンによる溶射は、皮膜は緻密であるが、皮膜形成速度が低い。申請者は、高周波数 PD 燃焼器を使った溶射装置を試作し、D ガンと同等の気孔率 0.3% の緻密な皮膜を形成できた。PD 燃焼器運転の高周波数化により皮膜形成速度の増加と装置の小型軽量化が期待されるが、高周波数 PD 燃焼器による溶射の詳細なプロセスは不明であり、溶射条件を最適化する方法は未確立である。

2. 研究の目的

本研究では、基礎工学的な目的を設定して研究を進め、実用装置の開発は行わない。ガスタービンエンジンの燃焼器として PD 燃焼器を活用するための研究では、(i) 装置の冷却機構を十分に整備し、10 分単位の連続運転を実現する、(ii) 装置のガス供給部・燃焼器部・タービン入口部・タービン出口部の各々に複数個の温度センサー・圧力センサーを設置し、長時間連続運転時における各部の状態変化を明らかにする、(iii) 装置各部の状態変化と熱効率の変化との関係を明らかにし、熱効率を向上させるために解決すべき課題を特定する、(iv) 特定した課題の解決方法を推定し、実験によって検証する、という具

体的課題を設定する。溶射用熱源として PD 燃焼器を活用するための研究では、(i) 加熱・加速された溶射材粉体の温度・速度を測定する装置を整備し、溶射条件による溶射材の温度・速度の変化および皮膜特性の変化を明らかにし、またそれらの相関を解明する、(ii) 溶射条件の最適化を試み、実験によって検証する、という具体的課題を設定する。

3. 研究の方法

以下の項目について研究を行った。
 (1) ガスタービンエンジンの燃焼器としてパルス detonation (PD) 燃焼器を活用するための研究
 1-i. 装置の冷却機構の整備
 1-ii. 装置を長時間連続運転した際の各部の状態変化の解明
 1-iii. 熱効率を向上させるために解決すべき課題の特定
 1-iv. 特定した課題の解決方法の推定およびその実験による検証
 (2) 溶射用熱源として PD 燃焼器を活用するための研究
 2-i. 溶射条件による溶射材状態変化および皮膜特性変化、並びにそれらの相関の解明
 2-ii. 溶射条件の最適化およびその実験による検証
 以下、詳しく述べる。
 1-i. 装置の冷却機構の整備
 10 分単位で連続運転できる冷却機構を整備した。実際には、図 1 に示す実験システムを構築した。このシステムは、燃焼器部分のすべてが水冷されたシステムである。実験で使用した燃料は水素、酸化剤・パージガスは空気であり、水冷された detonation 発生促進用障害物が燃焼器内部に設置されている。タービンを衝撃波から保護するためのバッファ室が設置され、タービンには自動車用ターボチャージャーを使用した (システムの出力としてターボチャージャーの圧縮仕事を測定した)。また、タービン入口温度を許容温度以下に抑制するため、一部の空気をタービン

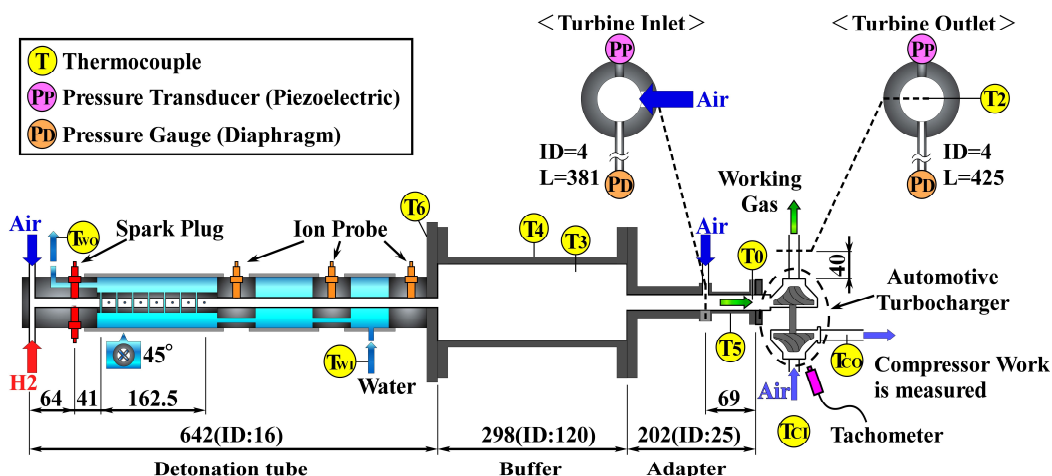


図 1 実験システム (燃焼器完全水冷型)

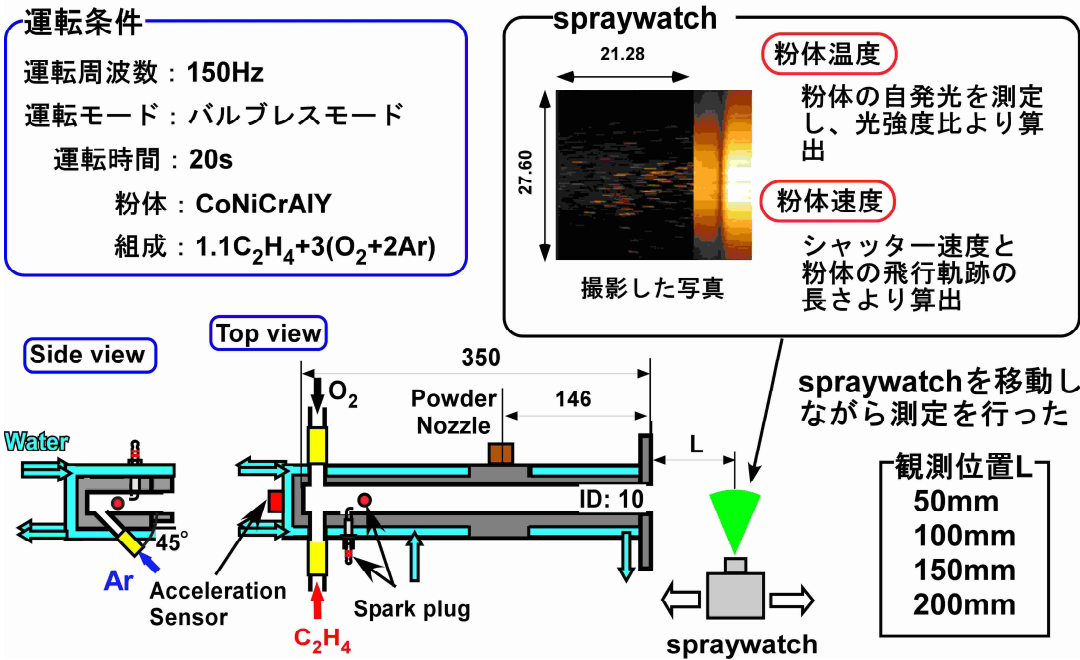


図2 溶射材粉体加熱・加速状態測定配置

入口部に直接供給した。

1-i. ii. 装置を長時間連続運転した際の各部の状態変化の解明
 図1に示したように計測系を整備し、長時間連続運転時における各部の状態変化と出力変化との関係を調べた。

1-i. iii. 熱効率を向上させるために解決すべき課題の特定
 運転周波数を変化させてシステムの熱負荷を変化させ、システム全体におけるエネルギーバランスを測定し、熱損失がタービン出力に与える影響を調べた。また、パルスデトネーションおよび定常空気流でターボチャージャを駆動してターボチャージャの等エントロピー効率を測定し、タービン入口における短周期の圧力変動がターボチャージャの動作に与える影響を調べた。

1-i. iv. 特定した課題の解決方法の推定およびその実験による検証
 改善すべき最重要課題として熱損失の低減を設定し、 燃焼器後半部の空冷化、および パッファ室の表面積低減を行った。

2-i. 溶射条件による溶射材状態変化および皮膜特性変化、並びにそれらの相関の解明
 加熱・加速された溶射材粉体の状態（温度・速度）を測定できるように計測系を整備（具体的には図2に示す実験システムを構築）し、その測定結果を基に溶射条件の最適化を試みた。使用した燃料はエチレン、酸化剤は酸素、パーシガスはアルゴンである。溶射材の粉体はCoNiCrAlYであり、その導入位置は予備実験によって最適な位置を決めた。

2-i. ii. 溶射条件の最適化およびその実

験による検証
 実際に移動ステージを使って平板の上に平面的なCoNiCrAlY皮膜を溶射し、最適な条件における皮膜特性を調べた。

4. 研究成果
 ガスタービンエンジンの燃焼器としてパルスデトネーション燃焼器を活用するための研究に関し、実験で測定されたターボチャージャの等エントロピー効率を図3に示す。横軸のUはタービン動翼の周速度、cはspouting velocityと呼ばれている特性速度である。測定は、定常空気流とパルスデトネーション（周波数は60 Hz および 10 Hz）に関して実施した。図からわかるように、この実験で使用した自動車用ターボチャージャについては、パルスデトネーションによるタービン入口状態の脈動はタービン効率の低

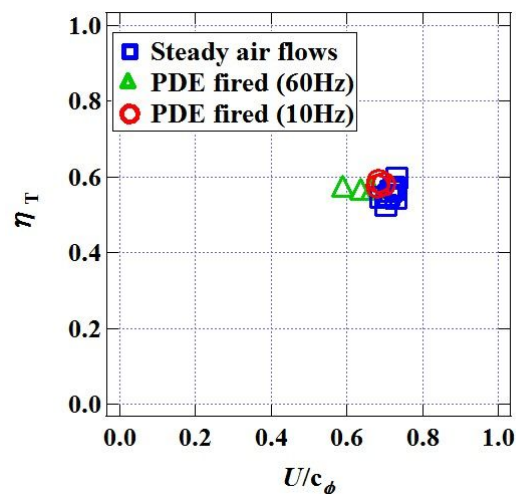


図3 ターボチャージャの等エントロピー効率

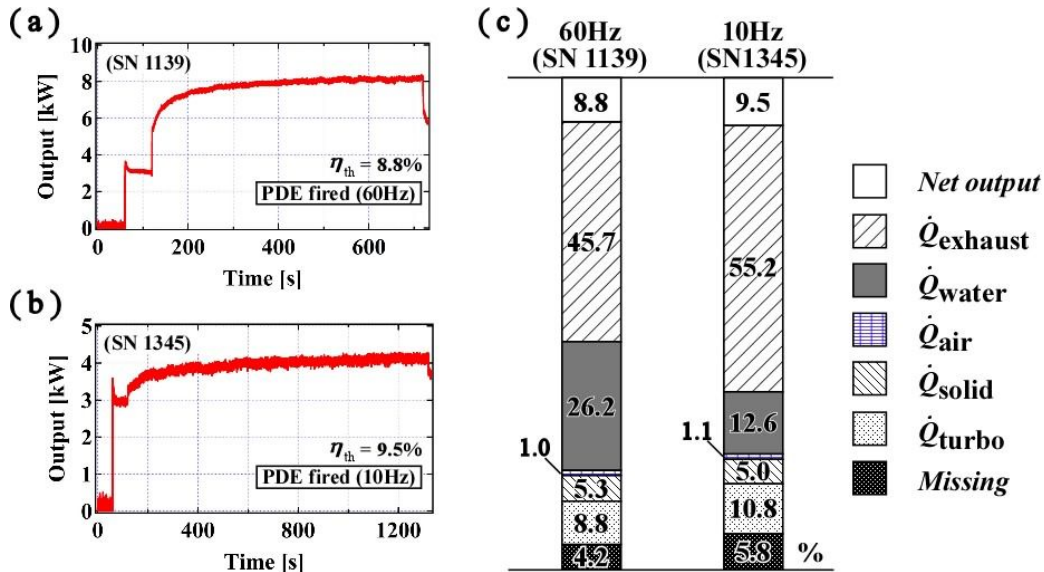


図4 (a)(b) 出力の時間変化, (c) エネルギーバランス

下を引き起こしてはいない。また、実験で測定されたエネルギーバランスを図4に示す。実験時の連続運転時間は、運転周波数 60 Hz の場合が 10 分で、10 Hz の場合が 20 分である。運転終了時には出力はほぼ一定値に落ち着いており、最後の 10 秒間におけるエネルギーバランスを図4(c)に示した。実験的に測定された熱効率は約 10% であり、わずかではあるが運転周波数 10 Hz の場合の方が熱効率が低い。この原因は、運転周波数 10 Hz の場合の方がシステムの熱負荷が小さく、熱損失が小さくなったためであると考えられる。なお、パルスデトネーションタービンエンジンの熱効率として約 10% という値は、知る限り世界最高の値である。これらの結果を受けて、より熱損失を減らすために、燃焼器後半部の空冷化、およびバッファ室の表面積低減を行った。これらの結果、熱損失は数%減ったが、熱効率が顕著に増大するには至らなかった。

溶射用熱源としてパルスデトネーション燃焼器を活用するための研究に関し、実験で測定された（飛行している）CoNiCrAlY 粉体の温度を図5に示す（燃焼器の運転周波数は 150 Hz）。横軸の時刻はパルスデトネーション燃焼器の点火時刻を基準とした時刻であり、燃焼器出口から 50, 100, 150, 200 mm の位置における測定結果を示

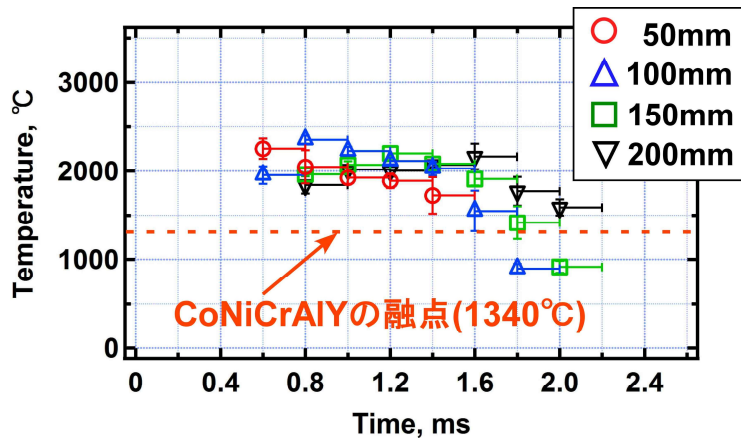


図5 CoNiCrAlY 粉体の温度

した。図からわかるように、燃焼器出口から 100 mm の位置で粉体の温度が最も高くなっており、これは粉体が燃焼器を出た後も高温の噴流によって加熱され続けたためと考えられる。この結果を基に、燃焼器出口から 100 mm の位置が溶射の最適位置と判断し、平板状の基材を x-z ステージに取り付け、水平方向に 75.7 mm/s の速さで、鉛直方向に 1.95 mm/s の速さで基材を動かしながら、基材上に平面的な CoNiCrAlY 皮膜を溶射した（燃焼器の運転周波数は 150 Hz）。図6に、皮膜断面および実験で使用した CoNiCrAlY 粉体の写真を示す。CoNiCrAlY 粉体が良く溶けて皮膜になっ

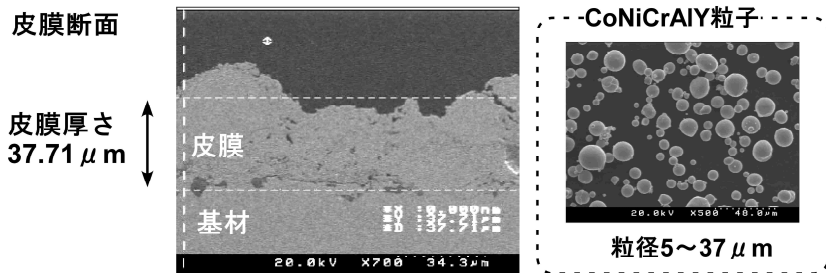


図6 皮膜断面および実験で使用した CoNiCrAlY 粉体の写真

ていることがわかる。皮膜の分析の結果、酸化物度は 0.2%以下、気孔率は 0.6%、基材への密着力は 36.5 MPa であり、いずれもガスタービン動翼に対する CoNiCrAlY 皮膜の要求仕様を満足するものであった。特に、酸化物度の低さは優れており、本研究で開発された溶射装置が優れた小型溶射装置であることを示すものであった。

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 3 件)

1. 遠藤琢磨, 須佐秋生, デトネーション伝播の基礎, 日本燃焼学会誌, 査読無, 55 巻, 2013, pp. 317-328.
2. T. Takahashi, A. Mitsunobu, Y. Ogawa, S. Kato, H. Yokoyama, A. Susa, and T. Endo, Experiments on Energy Balance and Thermal Efficiency of Pulse Detonation Turbine Engine, Science and Technology of Energetic Materials, 査読有, 73 巻, 2012, pp. 181-187.
3. 遠藤琢磨, パルスデトネーションエンジンの気体力学と熱力学, 日本航空宇宙学会誌, 査読無, 60 巻, 2012, pp. 185-191.

[学会発表](計 17 件)

1. 田尻敏浩, 横路尚人, 宗岡聡史, 尾林良太, 木村圭佑, 須佐秋生, 城崎知至, 遠藤琢磨, 松岡健, 花房龍男, 大田耕平, パルスデトネーション溶射における粉体の加熱と加速, 平成 25 年度衝撃波シンポジウム, 3/5-7, 2014, 青山学院大学相模原キャンパス.
2. K. Matsuoka, T. Mukai, and T. Endo, Liquid-Purge Method in High Frequency Valveless Pulse Detonation Engine, 24th International Colloquium on the Dynamics of Explosions and Reactive Systems, 28 Jul-2 Aug 2013, Taipei, Taiwan.
3. T. Endo, Thermal Spray by Pulsed Detonations, 2013 International Workshop on Detonation for Propulsion, 26-28 Jul 2013, Tainan, Taiwan.
4. K. Matsuoka, T. Mukai, and T. Endo, Development of a High Frequency Pulse Detonation Combustor by a Liquid Purge Method, 2013 International Workshop on Detonation for Propulsion, 26-28 Jul 2013, Tainan, Taiwan.
5. 横路尚人, 半田吉紀, 宗岡聡史, 尾林良太, 田尻敏浩, 松岡健, 須佐秋生, 城崎知至, 遠藤琢磨, 花房龍男, 大田耕平, パルスデトネーション溶射における粉体の加熱と加速, 第 45 回流体力学講演会/航空宇宙数値シミュレーション技術シンポジウム 2013, 7/4-5, 2013, タワーホ

ール船堀(東京都江戸川区).

6. 松岡健, 向卓哉, 遠藤琢磨, パルプレスパルスデトネーションエンジンにおける液滴パージ法, 平成 24 年度衝撃波シンポジウム, 3/13-15, 2013, 北九州国際会議場.
7. 遠藤琢磨, 半田吉紀, 森川能匡, 宗岡聡史, 横路尚人, 尾林良太, 田尻敏浩, 松岡健, 須佐秋生, 城崎知至, 花房龍男, 大田耕平, パルスデトネーションによる溶射技術の開発, 平成 24 年度航空宇宙空力班シンポジウム, 1/25-26, 2013, 湯の花温泉 溪山閣.
8. 松岡健, 向卓哉, 遠藤琢磨, パルプレスパルスデトネーションエンジンにおける液体噴霧掃気法の開発, 平成 24 年度航空宇宙空力班シンポジウム, 1/25-26, 2013, 湯の花温泉 溪山閣.
9. T. Endo, K. Kanekiyo, Y. Hanta, T. Morikawa, and R. Obayashi, Compact High-Frequency Pulse Detonation Combustor for Thermal Spraying, 2012 International Workshop on Detonation for Propulsion, 3-5 Sep 2012, Tsukuba International Congress Center.
10. 半田吉紀, 兼清喬平, 森川能匡, 須佐秋生, 遠藤琢磨, 花房龍男, 宗廣修興, 高周波数パルスデトネーションによる溶射, 第 44 回流体力学講演会/航空宇宙数値シミュレーション技術シンポジウム 2012, 7/5-6, 2012, 富山国際会議場 大手町フォーラム.
11. T. Endo, A. Mitsunobu, T. Takahashi, Y. Ogawa, and A. Susa, Experiments on Energy Balance in Pulse Detonation Turbine Engine, Asian Joint Conference on Propulsion and Power 2012, 1-4 Mar 2012, Xi'an, China.
12. T. Honda, T. Dozen, S. Hasegawa, A. Susa, and T. Endo, Appearance and disappearance of triple points in diverging and converging detonations, 4th International Symposium on Energetic Materials and their Applications, 16-18 Nov 2011, Naha.
13. T. Takahashi, S. Kato, H. Yokoyama, A. Mitsunobu, A. Susa, and T. Endo, Experiments on energy balance and thermal efficiency of pulse detonation turbine engine, 4th International Symposium on Energetic Materials and their Applications, 16-18 Nov 2011, Naha.
14. T. Endo, A. Susa, K. Kanekiyo, Y. Hanta, A. Mitsunobu, and T. Takahashi, Development of Pulse-Detonation Technology in Valveless Mode and Its Application to Turbine-Drive Experiments, 2011 International Workshop on Detonation for Propulsion,

- 14-15 Nov 2011, Busan, Korea.
15. T. Endo, A. Susa, T. Akitomo, T. Okamoto, K. Kanekiyo, Y. Sakaguchi, H. Yokoyama, S. Kato, A. Mitsunobu, T. Takahashi, T. Hanafusa, and S. Munehiro, Moving-Component-Free Pulse-Detonation Combustors and Their Use in Ground Applications, 23rd International Colloquium on the Dynamics of Explosions and Reactive Systems, 24-29 Jul 2011, University of California, Irvine, USA.
 16. 光延昭彦, 横山裕之, 加藤慎一, 高橋友彰, 須佐秋生, 遠藤琢磨, 単気筒パルスデトネーションタービンエンジンの熱効率に関する実験的研究, 第43回流体力学講演会/航空宇宙数値シミュレーション技術シンポジウム 2011, 7/7-8, 2011, 早稲田大学国際会議場.
 17. T. Endo, A. Susa, A. Mitsunobu, and T. Takahashi, Experiments on Pulse Detonation Turbine Engine, 2nd Workshop on Detonations and Detonation Engines, 14-15 May 2011, Beijing, China.

〔図書〕(計5件)

1. 大八木重治, 遠藤琢磨, 滝史郎, 理工図書, デトネーションの熱流体力学1 基礎編 第1章 緒論, 2011, pp. 1-18.
2. 遠藤琢磨, 理工図書, デトネーションの熱流体力学1 基礎編 第3章 デトネーションの1次元解析, 2011, pp. 37-74.
3. 遠藤琢磨, 理工図書, デトネーションの熱流体力学1 基礎編 第4章 シングルスピンドトネーションと音波, 2011, pp. 75-90.
4. 遠藤琢磨, 理工図書, デトネーションの熱流体力学1 基礎編 第11章 パルスデトネーションエンジン(PDE)の理論, 2011, pp. 221-248.
5. 遠藤琢磨, 理工図書, デトネーションの熱流体力学2 関連事項編, 2011, 全411頁.

〔産業財産権〕

出願状況(計1件)

名称: パルス燃焼装置、および溶射装置
発明者: 遠藤琢磨, 松岡健
権利者: 広島大学
種類: 特許
番号: 特願 2013-001246
出願年月日: 2013年1月8日
国内外の別: 国内

6. 研究組織

(1)研究代表者

遠藤 琢磨 (ENDO TAKUMA)
広島大学・大学院工学研究院・教授

研究者番号: 00211780

(3)連携研究者

須佐 秋生 (SUSA AKIO)
広島大学・大学院工学研究院・助教
研究者番号: 00376485