

平成 21 年 6 月 9 日現在

研究種目：基盤研究 (B)  
 研究期間：2006～2008  
 課題番号：18360403  
 研究課題名 (和文) パルスデトネーションエンジン持続運転における熱流体力学的問題の解決  
 研究課題名 (英文) Solution to thermo-fluid-dynamical problems on the continuous operation of Pulse Detonation Engine  
 研究代表者  
 大八木重治 (OHYAGI SHIGEHARU)  
 埼玉大学・大学院理工学研究科・教授  
 研究者番号：90114818

研究成果の概要：ジェットエンジンやガスタービンエンジンの高効率化を目的として、超音速で伝ばする燃焼波であるデトネーション波を利用した新しいエンジン (パルスデトネーションエンジン) の開発を目的としました。このためにはデトネーション波の開始や伝ば時における挙動について十分な知識が必要です。本研究では基盤的研究と試作エンジンの性能実験を行い、このエンジンの基礎的特性を理解することができました。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2006 年度	7,200,000	2,160,000	9,360,000
2007 年度	4,400,000	1,320,000	5,720,000
2008 年度	1,700,000	510,000	2,210,000
年度			
年度			
総計	13,300,000	3,990,000	17,290,000

研究分野：燃焼工学、推進工学

科研費の分科・細目：総合工学・航空宇宙工学

キーワード：航空宇宙工学、燃焼工学、水素、熱工学、ロケット

## 1. 研究開始当初の背景

パルスデトネーションエンジンに関する理論的背景の記述を含めた最初の論文はミシガン大学航空宇宙学科の教授 Nicholls, J.A. による「断続的デトネーション」と銘打った 1956 年の論文であろう。彼は、1 インチの内径、長さ 6 フィートの管で水素を燃料とし、酸素あるいは空気を酸化剤とする断続的なデトネーションの発生を実現した。酸化剤が酸素では最高 150 Hz、空気では 35 Hz で作動した。その後、ロケットエンジンの全盛期には研究はほとんどなされなかったが 1980 年代後半になり、Naval Postgraduate School の Eidelman らによる研究が開始され、1990 年代

に実地的なエンジン設計やロータリーバルブの開発があり、飛躍的に発展した。わが国では第 36 回燃焼シンポジウムにおいて永田らがパルスデトネーションエンジンを企図した基礎燃焼実験の発表が端緒であると思われる。その後、藤原らによって理論または数値解析的研究、PDRE (Pulse Detonation Rocket Engine) を目指した実験的な研究が笠原らによって開始された。その後、ホワイトガソリンを用いて液体燃料の使用を実用化するための滝らの研究グループ、イグナイターの影響を明らかにする林らの研究グループ、CFD による解析を主とした松尾らの研究グループ、DDT 過程に焦点を当てた石井らの

グループがそれぞれ連携をとりながら研究を行っている。また、Endo and Fujiwara による理論的研究はデトネーション波面背後の膨脹波およびプラトー状態を求め、推力を理論的に計算するもので実験家の指標として重要である。研究代表者のグループは水素燃料による PDE を一貫して研究し、50Hz の連続作動を実現し、発電用のタービン実験にも成功し、先端的位置にあると言える。このように、特に最近多くの研究者がパルスデトネーションエンジンを対象として研究を行っているにもかかわらず、実用化にはまだ多くの困難が待ち受けている。その一部を前節で示し、本研究の課題とした。

## 2. 研究の目的

PDE(パルスデトネーションエンジン)は、現在航空機に用いられているジェットエンジンよりもはるかにシンプルで、速度コントロール幅が広く、離陸からマッハ4までの加速が容易にできるエンジンとして、世界中の注目を集めており、NASA を始め欧米の多くの機関、メーカーにより研究開発が行われている。しかし、航空用応用としては、直接デトネーション可能な燃料の制約や、激しい高温高压パルスによる熱疲労の問題などから実用化はかなり先と考えられる。研究代表者のグループはこれらの制約がなく問題解決が容易な地上発電用 PDE について、フイージビリティスタディを行い、PDE にガス改質器、タービンを組み合わせた発電システムを考案し、サイクル計算上 60%(HHV)近い高発電効率が得られることを示した。しかしながら、このシステムの実現にはパルスデトネーションエンジンにタービンを組み合わせたシステムが必要となり、熱力学および流体力学的な基礎研究に基づいた基礎技術の確立が必要である。

本研究では、このシステムを技術的に実証し、システムの根幹を成すデトネーション開始現象、デトネーション流れとタービンの干渉現象の解明と適正化のために次の研究開発を実施する。

- (1) デトネーション開始促進器の研究
- (2) デトネーションイニシエータの研究
- (3) PDE タービン特性の研究
- (4) 気筒間干渉の問題
- (5) ロータリーバルブの開発と安定連続デトネーション技術の研究

また、PDE を開発するに際して問題となる基礎的な問題として

- (1) 細い管から大きい管へ放出されるデトネーション波の挙動
- (2) 細い管内でのデトネーション開始の条件
- (3) 衝撃波とデトネーション波、燃焼波との干渉現象

に注目し、それらの現象を実験的に明らかに

することを目的とした。上記(1)と(2)は PDE のイニシエータに関連して重要であり、(3)は多気筒 PDE の気筒間干渉において基本的現象である。

## 3. 研究の方法

### 3. 1 基礎実験

(1) デトネーション伝ばの基礎的研究については、矩形断面のデトネーション管を用いた。管内に仕切り版を設置し、その仕切り版にスリットを二つ設けてデトネーション波を通過させた。混合気体としては水素・酸素を用い、初期圧とスリットの諸元をパラメータとし、高速度ビデオを用いたシュリーレン写真と煤膜模様によって現象を可視化し、調査した。

(2) 細い管におけるデトネーションの開始実験では水素・酸素混合気体を用い、初期圧、管寸法をパラメータとし圧力波形、煤膜模様から現象を分類した。

(3) デトネーション波と衝撃波の干渉実験においては、同様に矩形断面のデトネーション管を用い、逆方向に伝ばする衝撃波とデトネーション波を衝突させ、煤膜模様で可視化した。混合気体としては水素・酸素を用い、初期圧をパラメータとした。

### 3. 2 試作 PDE による実験

(1) 2気筒 PDTE (パルスデトネーションタービンエンジン) に関する研究では、図1のように二つの燃焼管と一つのタービンを有するエンジンシステムを試作設計製作し、燃焼管内の現象を圧力測定ならびにイオン電流プローブによる燃焼波検知により衝撃波、燃焼波、デトネーション波の挙動を明らかにする。燃料は水素とし、酸化剤の空気とともに電磁バルブより供給される。タービンの軸にコンプレッサーを接続し、コンプレッサー出入り口の空気圧力及び温度からコンプレッサーの駆動力を求め、それがタービン動力に等しいという仮定からタービン動力を求め、断熱効率を求める。

(2) ロータリーバルブ付き PDE の研究では、空気吸いこみエンジンを模擬して空気を低圧のプロアより供給する。

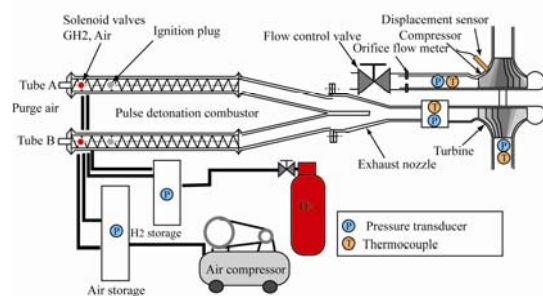


図1 2気筒 PDTE の概略

この場合は単気筒でタービンは付けず、管内の燃焼波の伝ばと推力壁の圧力測定による「図示」推力で性能を比較検討する。

#### 4. 研究成果

##### 4. 1 基礎実験

(1) 可視化によってスリット背後でのデトネーション再開始過程が明らかになった。初期圧やスリット諸元によって現象の分類ができたこと、再開始距離が推定できたので PDE のイニシエータとして水素・酸素混合気を使用する場合の設計基準の基礎となるデータが得られた。

(2) 細い管内での水素・酸素混合気体のデトネーション開始過程を調べた結果、図 2 に示すように DID (デトネーション誘導距離) の管断面寸法依存性が明らかになった。この図では両軸ともこれも、その混合気のセルサイズで無次元化してある。これも水素酸素を用いた PDE イニシエータを設計する際に重要なデータとなる。

(3) デトネーション波と衝撃波の衝突については、衝撃波で高温高压になった混合気中をデトネーション波が伝ばするため、誘導反応距離が短くなってセルサイズが小さくなるという興味深い現象が観察され (図 3)、セルサイズと初期圧及び温度の関係が明らかとなった。これは PDE との直接的な関係はないが、デトネーション波の基本的性質として重要な現象と考える。また、多気筒 PDE では隣接する燃焼室にデトネーション波が回折した場合、衝撃波との干渉が起きると想定され、その場合、性能に大きく影響することが考えられる。

##### 4. 2 試作 PDE による実験

(1) 2 気筒 PDTE については、単気筒 50Hz、つまりトータル 100Hz での作動に成功し、出力が得られた。図 4 は、タービン入口圧力とタービン回転数の変化を示す。圧力は、衝

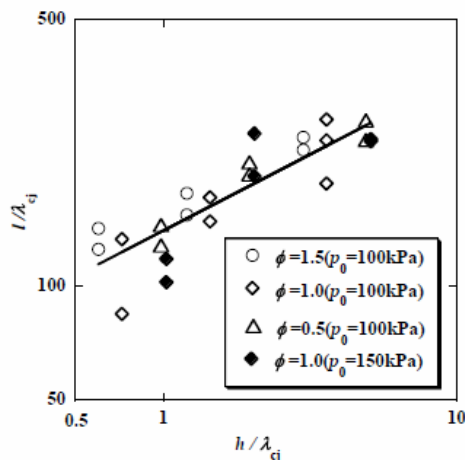


図 2 水素酸素混合気の DID と管寸法の関係

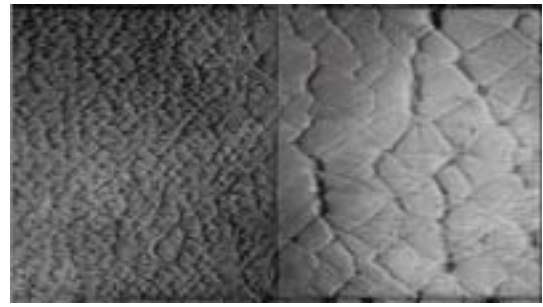


図 3 衝撃波とデトネーション波の衝突

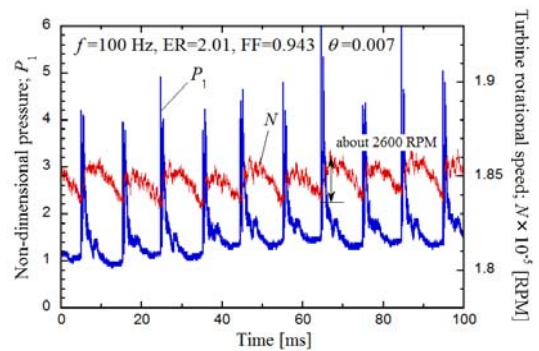


図 4 タービン入口圧力及び回転数の変動

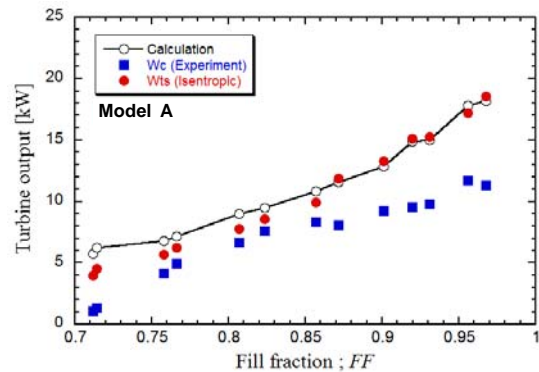


図 5 タービン出力の充填率による変化 (実線は予測値)

撃波の影響でシャープなピークを示し、回転数は 185,000rpm 付近で変動している。この回転数は設計点 (20 万 rpm) に近い。図 5 は充填率 (燃焼管の体積に対する導入混合気 の体積比) に対するタービン出力の関係を示す。青四角がコンプレッサー仕事から求めたもの、赤丸がタービンの圧力比から断熱を仮定して求めたもの、白丸は理論値である。ただし理論値ではタービンの非定常性を考慮した補正係数を掛けてある。このように、コンプレッサー仕事から求めたタービン仕事は理論値より低くなり、タービン圧力比より求

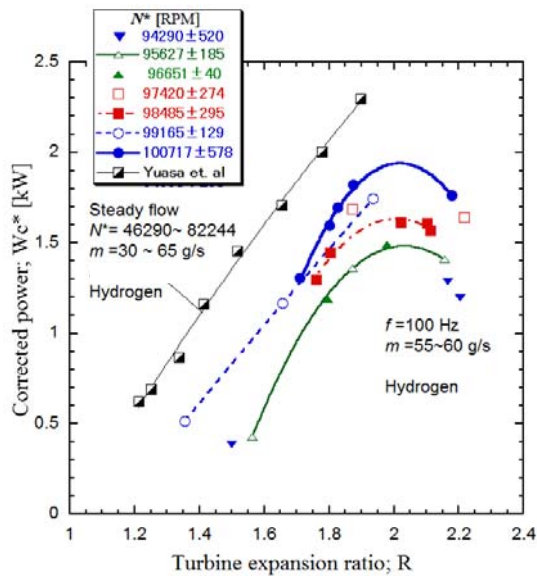


図6 修正出力と圧力比

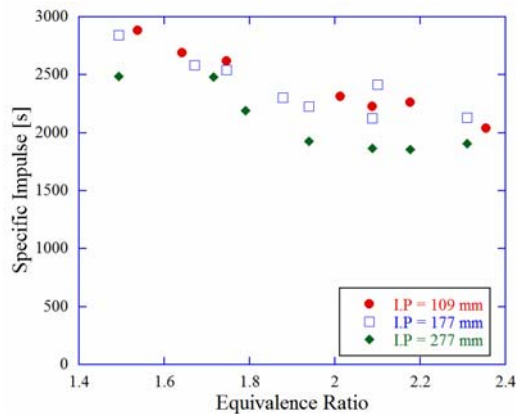


図7 図示燃料比推力と当量比(35Hz)

めたものより低い。実験的ばらつきはあるが、充填率の増加とともに出力が増加するのは質量流量が増加するため当然である。断熱条件や燃焼ガスの組成など仮定に基づくため誤差が大きいと考えられる。また、タービン入り口の全温度の測定は時間応答性の悪いシース熱電対で行っているため高周波数に  
 応答せず、いわば時間平均値が得られている。一方、圧力はピーク値を用いているため一貫性を欠くきらいがある。一方、コンプレッサ出力は、機械損失が未測定である点、負荷のかけ方による測定値の変化など誤差の要因が存在する。また、この出力はタービン内を断熱変化として扱っているためタービンの断熱効率を1としていることになる。図6は、修正出力とタービン圧力比の関係を示す。 $N^*$ は修正回転数、 $m$ は質量流量を示す。図中に定常流と書かれているデータは、小型のガスタービンによるデータ(湯浅ら)である。やはり、燃焼が非定常であることが原因で同じ

圧力比での出力が小さいことが分かる。

(2) ロータリーバルブ PDE に関しては、空気流速が遅いため、燃料との混合状態が悪く、デトネーションへの遷移が不十分なことが考えられる。そこで、空気流を乱すための装置を製作して試験したが、結果的には良い結果が得られなかった。図7は点火位置の影響を調べたものであり、横軸は当量比、縦軸は図示燃料比推力である。点火位置はなるべく推力壁に近い方が比推力が大きいことが分かった。遠藤らによる理論では、当量比1で4200秒であるので、得られた比推力は理想的な値より小さく、十分にデトネーションへ遷移していないことが分かった。

### 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9件)

- ① 桜井毅司、大古壮了、柚木聡、吉橋照夫、小原哲郎、大八木重治、パルスデトネーションエンジンの安定作動に関するパージ空気の噴射量および分布の影響、日本航空宇宙学会論文集、54巻628号、pp.204-209、2006。(査読あり)
- ② 小原哲郎、Jayan Sentanuhady、塚田豊、大八木重治、狭い溝中を通過するデトネーション波の挙動に関する研究、日本機械学会論文集(B編)、72巻718号、pp.1605-1612、2006。(査読有)
- ③ 小原哲郎、Jayan Sentanuhady、塚田豊、大八木重治、スリット板背後におけるデトネーション波の再開始過程(供試気体初期圧の影響)、日本機械学会論文集(B編)、72巻724号、pp.3158-3165、2006。(査読有)
- ④ Jayan Sentanuhady、小原哲郎、塚田豊、大八木重治、スリット板背後におけるデトネーション波の再開始過程(スリット板形状の違いによる影響)、日本機械学会論文集(B編)、73巻732号、pp.1737-1744、2007。(査読有)
- ⑤ 小原哲郎、塚田豊、Jayan Sentanuhady、大八木重治、スリット板背後におけるデトネーション波の再開始過程(デトネーション波の再開始と消炎過程の可視化)、日本機械学会論文集(B編)、73巻735号、pp.2354-2361、2007。(査読有)
- ⑥ 小原哲郎、栗原慶博、落合俊幸、大八木重治、酸水素予混合気体への衝撃波入射により生じる燃焼波の伝ば形態、日本機械学会論文集(B編)、74巻740号、pp.949-956、2008。(査読有)
- ⑦ Obara T.、Jayan Sentanuhady、Tsukada Y.、Ohayagi S.、Re-initiation Process of Detonation Wave behind Slit-Plate, Shock Waves,

- Vol.18, Issue 2, pp.117-127, 2008.(査読有)
- ⑧ Tsuji, T., Shirakawa, S., Yoshihashi, T., Obara, T., Ohyagi, S., Interaction between Two Cylinders in a Pulse Detonation Engine, Advancements in Energetic Materials and Chemical Propulsion, edited by Kuo, K.K. and Hori, K., pp.1035-1046, Begel House Inc., 2008(査読あり)
- ⑨ 永井 厚司, 横川 真人, 吉橋 照夫, 小原 哲郎, 大八木 重治, デトネーション波と衝撃波の干渉現象に関する研究, 日本燃焼学会誌(査読有, 掲載決定)
- [学会発表] (計 32 件)
- (1) 山口 雅也, 池川 昌利, 小原 哲郎, 大八木 重治, 衝撃波の干渉を受けた火炎の挙動に関する研究, 日本機械学会 第 84 期流体工学部門講演会, CD-ROM 版講演論文集(No.06-21), 2006.10
- (2) 永井 厚司, 岡部 俊彦, キム ギョンミン, 吉橋 照夫, 小原 哲郎, 大八木 重治, 細管内の DDT 過程について, 第 44 回燃焼シンポジウム講演論文集, pp.328-329, 2006.12
- (3) 塚田 豊, Jayan Sentanuhady, 大貫 博史, 小原 哲郎, 大八木 重治, スリット板背後におけるデトネーション波の再開始過程, 第 44 回燃焼シンポジウム講演論文集, pp.496-497, 2006.12
- (4) Yugi S., Sakurai T., Obara T., Murayama M., Ohyagi S., A Study on Detonative Operation of PDE with a Cylindrical Rotating Valve, Proceedings of the 6th Asia-Pacific Conference on Combustion, 2007
- (5) Jayan Sentanuhady, Tsukada Y., Obara T., Ohyagi S., Re-initiation Processes of Detonation behind Double Slit-Plate, Proceedings of the 26th International Symposium on Shock Waves, 2007.7
- (6) Nagai K., Okabe T., Kim K., Yoshihashi T., Obara T., Ohyagi S., A Study on DDT Processes in a Narrow Channel, Proceedings of the 26th International Symposium on Shock Waves, 2007.7
- (7) Sakurai T., Murayama M., Yugi S., Ohyagi S., Successive Operation Study of a Cylindrical Rotary Valve PDE at Low Supply Pressure Condition, Proceedings 18th International Symposium on Air-Breathing Engines, 2007.
- (8) Tsuji T., Shirakawa S., Yoshihashi T., Obara T., Ohyagi S., Interaction between Two Cylinders in a Pulse Detonation Engine, Proceedings 7th International Symposium on Special Topics in Chemical Propulsion, 2007.
- (9) Jayan Sentanuhady, Tsukada Y., Obara T., Ohyagi S., Re-initiation Mechanisms of Gaseous Detonation Wave propagated through Double Slits, Proceedings of the 21st International Colloquium on the Dynamics of Explosion and Reactive Systems, CD-ROM, No.135, 2007.8
- (10) Nagai K., Yokokawa M., Yoshihashi T., Obara T., Ohyagi S., A Study on the Interactions of a Detonation Wave with a Combustion Wave, Proceedings of the 21st International Colloquium on the Dynamics of Explosion and Reactive Systems, CD-ROM, No.183, 2007.8
- (11) Togashi F., Loehner R., Tsuboi N., Obara T., Jayan Sentanuhady, Ohyagi S., Numerical Simulation of Detonation behind Slit-Plate, Proceedings of the 21st International Colloquium on the Dynamics of Explosion and Reactive Systems, CD-ROM, No.100, 2007.8
- (12) 永井 厚司, 小原 哲郎, 大八木 重治, デトネーション波の干渉について, 平成 18 年度科研費空力班シンポジウム発表論文集, pp.21-24, 2007.1
- (13) 遠藤 慎介, 柚木 聡, 石田 達矢, 吉橋 照夫, 小原 哲郎, 大八木 重治, 村山 元英, ロータリーバルブを用いた推進用 PDE のデトネーション作動に関する研究, 平成 18 年度衝撃波シンポジウム講演論文集, pp.55-58, 2007.3
- (14) 永井 厚司, 横川 真人, 吉橋 照夫, 小原 哲郎, 大八木 重治, デトネーション波と燃焼波の干渉について, 平成 18 年度衝撃波シンポジウム講演論文集, pp.209-212, 2007.3
- (15) 永井 厚司, 横川 真人, 吉橋 照夫, 小原 哲郎, 大八木 重治, 爆轟波の干渉による圧力上昇について, 安全工学シンポジウム 2007 講演予稿集, pp.459-462, 2007.7.6, 日本学術会議
- (16) 横川 真人, 永井 厚司, 吉橋 照夫, 小原 哲郎, 大八木 重治, デトネーション波と衝撃波の干渉現象, 日本機械学会関東支部ブロック合同講演会/第 3 回埼玉ブロック大会講演論文集, pp.279-280, 2007.9.22, 埼玉大学
- (17) 栗原 慶博, 落合 俊幸, 小原 哲郎, 大八木 重治, 水素-酸素予混合気体への衝撃波入射により誘起される燃焼波の挙動, 日本機械学会関東支部ブロック合同講演会/第 3 回埼玉ブロック大会講演論文集, pp.283-284, 2007.9.22, 埼玉大学
- (18) 遠藤 慎介, 中込 大輔, 吉橋 照夫, 小原 哲郎, 大八木 重治, 村山 元英, ロータリーバルブを用いたパルスデトネーションエンジンの研究, 日本機械学会関東支

- 部ブロック合同講演会／第3回埼玉ブロック大会講演論文集, pp.287-288, 2007.9.22, 口頭発表, 埼玉大学
- (19) 遠藤 慎介, 中込 大輔, 吉橋 照夫, 小原哲郎, 大八木 重治, 村山 元英, ロータリーバルブを装着したパルスデトネーションエンジンの連続作動に関する研究, 第45回燃焼シンポジウム講演論文集, pp.100-101, 2007.12.5, 仙台国際センター
- (20) 横川 真人, 永井 厚司, 吉橋 照夫, 小原哲郎, 大八木 重治, 酸水素混合気中を伝ばするデトネーション波と衝撃波の干渉現象, 第45回燃焼シンポジウム講演論文集, pp.310-311, 2007.12.6, ポスター発表, 仙台国際センター
- (21) Togashi F., Loehner R., Tsuboi N., Obara T., Numerical Simulation of H<sub>2</sub>/O<sub>2</sub> Detonation Wave behind Slit-Plate Using Detailed Reaction Models, Proceedings 46th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, 2008
- (22) 遠藤 慎介, 中込 大輔, 吉橋 照夫, 小原哲郎, 大八木 重治, 村山 元英, ロータリーバルブを用いたパルスデトネーションエンジンの高速化に関する研究, 平成19年度科研費空力班シンポジウム「航空宇宙工学における空力研究」, pp.102-103, 2008.1.25-26, 誌上发表, KKR 伊豆長岡千歳荘
- (23) 横川 真人, 永井 厚司, 吉橋 照夫, 小原哲郎, 大八木 重治, デトネーション波と衝撃波の干渉現象に関する研究, 平成19年度科研費空力班シンポジウム「航空宇宙工学における空力研究」, pp.108-110, 2008.1.25-26, 誌上发表, KKR 伊豆長岡千歳荘
- (24) 大塚 政輝, 辻 俊之, 大八木 重治, 小原哲郎, 吉橋 照夫, パルスデトネーションタービンエンジンにおける作動周波数増加に関する研究, 日本機械学会関東学生会第47回学生会卒業研究発表講演会, pp.243-244, 2008.3.14, 口頭発表, 東京海洋大学
- (25) 辻 俊之, 大塚 政輝, 小原 哲郎, 大八木重治, 2気筒パルスデトネーションタービンエンジンにおける作動周波数向上に関する研究, 平成19年度衝撃波シンポジウム講演論文集, pp.291-294, 2008.3.17, 口頭発表, 東京工業大学
- (26) 栗原 慶博, 落合 俊幸, 小原 哲郎, 大八木 重治, 酸水素予混合気体への衝撃波入射により生成される燃焼波, 平成19年度衝撃波シンポジウム講演論文集, pp.135-138, 2008.3.17, 口頭発表, 東京工業大学
- (27) 神谷 健矢, 吉田 泰輔, 小原 哲郎, 大八木 重治, 異なる気体を伝ばするデトネーション波の挙動, 平成19年度衝撃波シ

- ンポジウム講演論文集, pp.447-448, 2008.3.18, ポスター発表, 東京工業大学
- (28) 渡部 日高, Jayan Sentanuhady, 小原 哲郎, 大八木 重治, スリット板背後におけるデトネーション波の再開始過程, 平成19年度衝撃波シンポジウム講演論文集, pp.435-436, 2008.3.18, ポスター発表, 東京工業大学
- (29) 池川 昌利, 板野 恵大, 小原 哲郎, 大八木 重治, 火炎と衝撃波の干渉過程に関する可視化観察, 平成19年度衝撃波シンポジウム講演論文集, pp.427-428, 2008.3.18, ポスター発表, 東京工業大学
- (30) 池川 昌利, 市川 竜也, 小原 哲郎, 大八木 重治, メタン-空気混合気火炎と衝撃波の干渉に関する可視化観察, 第46回燃焼シンポジウム講演論文集, pp.76-77, 2008.12.3, 口頭発表, 京都テルサ
- (31) 辻 俊之, 島村 雄太, 吉橋 照夫, 小原哲郎, 大八木 重治, 2気筒パルスデトネーション燃焼器によるガスタービンエンジンに関する研究, 第46回燃焼シンポジウム講演論文集, pp.264-265, 口頭発表, 2008.12.4, 京都テルサ
- (32) 神谷 健矢, 中島 陽祐, 小原 哲郎, 大八木 重治, 当量比の異なる界面に入射したデトネーション波の挙動, 平成20年度衝撃波シンポジウム講演論文集, pp.209-210, 口頭発表, 2009.3.18, 名古屋大学

〔図書〕(計0件)

〔産業財産権〕

○出願状況(計0件)

○取得状況(計0件)

〔その他〕

受賞

平成20年度日本機械学会論文賞

対象論文

小原 哲郎, 塚田 豊, Jayan Sentanuhady, 大八木 重治, スリット板背後におけるデトネーション波の再開始過程(デトネーション波の再開始と消滅過程の可視化), 日本機械学会論文集(B編), 73巻 735号, pp. 2354-2361, 2007

6. 研究組織

(1) 研究代表者

大八木重治 (OHYAGI SHIGE HARU)  
埼玉大学・大学院理工学研究科・教授  
研究者番号: 90114818

(2) 研究分担者

小原哲郎(OBARA TETSURO)  
埼玉大学・大学院理工学研究科・准教授  
研究者番号: 80241917

(3) 連携研究者

なし