

機関番号：15401

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2008～2010

課題番号：20560737

研究課題名（和文） 排気バッファ室付きバルブレスパルス燃焼器の高周波数運転による準定常高温噴流の生成

研究課題名（英文） Generation of Quasi-Stationary High-Temperature Jet by High-Frequency Operation of Valveless Pulse Combustor with Buffer Chamber

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

研究成果の概要（和文）：

内径 16 mm, 長さ 401 mm の円筒型燃焼器に排気バッファ室を設置し、研究を進めた。燃焼器を 100 Hz でバルブレス運転し、排気噴流を直接観察するとともに、排気バッファ室出口から 100 mm の位置でよどみ点圧力の時間変化を測定した。排気バッファ室を使用しない場合の排気噴流持続時間が 2.5 ms であったのに対し、排気バッファ室を使用した場合には運転周期に相当する 10 ms にまで伸び、準定常噴流を取り出すことができた。

研究成果の概要（英文）：

We carried out experiments using a cylindrical tube, whose inner diameter and length were respectively 16 mm and 401 mm, with a buffer chamber as the combustor. The combustor was operated at 100 Hz in valveless mode. To evaluate the characteristics of the jet, we directly observed the jet and measured the history of the total pressure at 100 mm from the exit. Although the jet lasted 2.5 ms when no buffer chamber was installed, it lasted 10 ms when a proper buffer chamber was installed, that is, a quasi-stationary jet was successfully obtained.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	1,600,000	480,000	2,080,000
2009年度	1,200,000	360,000	1,560,000
2010年度	700,000	210,000	910,000
年度			
年度			
総計	3,500,000	1,050,000	4,550,000

研究分野：反応性気体力学

科研費の分科・細目：総合工学・航空宇宙工学

キーワード：パルス燃焼器, バルブレス運転, デトネーション, 準定常噴流

## 1. 研究開始当初の背景

パルス燃焼器は、定常的な燃焼器に比べて、より高温の燃焼を実現しやすい。特に、デトネーションとして燃焼させた場合、この特徴は顕著になる。燃焼温度が高いほど、燃焼時のエントロピー上昇が抑えられ、燃焼器の熱効率は上がる。一方、パルス燃焼器では排気もパルスのとなり、ノズルやタービンとの相性が悪く、そのままでは、高温ガスが生成されたとしても、それを効率よく利用することができない。このような観点から、パルス燃焼器から準定常高温噴流を作り出し、それを推進や発電等の分野で実用化することが研究の最終目的である。

これまでは、米国のジェットエンジンメーカーや申請者も含め、燃焼器の多気筒化によってシステム周波数を高め、多気筒化された燃焼器からの排気を重ね合わせることでより準定常高温噴流を作り出す方法を追求してきた。その主な理由は、各気筒の運転周波数を高めようとすると高速作動する大流量バルブが必要となるが、一般に、高速作動するバルブの流量は小さいためである。すなわち、高速作動できる大流量バルブがあれば、よりシンプルな単気筒システムでも多気筒システムに匹敵する運転周波数を実現できるわけである。また、排気噴流を準定常化するためには、各パルスの谷間を埋める必要があるが、何らかの手段によってそれができれば、単気筒システムでも準定常高温噴流を作り出し得るわけである。

## 2. 研究の目的

本研究課題の目的は、片端を閉じた円筒型燃焼器の出口部に排気バッファ室を設置するという比較的シンプルなスキームによって単気筒システムから準定常高温噴流を取り出す実現可能性を、気体力学的側面に絞って明らかにすることである。より具体的には、次の2つの小課題を設定し、研究を進めた。

- (1) 燃料および酸化剤をバルブレス（ガスダイナミックバルブ）モードで供給することにより、気体力学的な限界周波数で単気筒燃焼器を連続運転する。
- (2) 単気筒燃焼器と排気出口との間にバッファ室を設置し、排気噴流の脈動を平滑化する。

バルブレスモードによるガスの供給は、バルブを開放状態に保ち、バルブ下流のガス圧が上がるとガスの供給が止まり、バルブ下流のガス圧が下がるとガスが供給される、というガスの供給方法である。これを実現するために、燃料と酸化剤の供給圧をパージガスの供給圧よりも低くする、という方法を提案し、運転可能性を実証する。このようなガス供給法では、パルス燃焼によって管内圧が上がると全てのガスの供給が停止し、管内圧が下が

ってくると、最初にパージガスのみが供給され、これが高温の既燃ガスをパージし、その後遅れて燃料と酸化剤とが同時供給されるので、管内混合される燃料と酸化剤は高温の既燃ガスに触れずに済む。制御方法としては、各ガスの供給圧を制御して各ガスの供給開始タイミングを制御し、各ガスの配管径を制御して各ガスの単位時間あたりの供給量（および当量比）を制御する。

バッファ室の設置による流れの脈動の平滑化については、燃焼器と排気出口との間にバッファ室を設置することにより、排気出口を燃焼器からの排気の脈動から可能な限り隔離することを目指す。

## 3. 研究の方法

### (1) バルブレスモードによるパルス燃焼器高周波数運転の実証

研究で使用した燃焼器を図1に示す。図中、「P」は圧力変換器を表す。燃焼器の内径は16 mm、長さは401 mmである。燃料にはエチレンを、酸化剤には純酸素を、パージガスにはアルゴンを使用した。ガスの供給流量を制御するため、配管途中に流量調整器を設置した。流量調整器は、その一部を交換することで内径を調節するものである。図中の振動センサーは、パルス燃焼による燃焼器の振動を検知するもので、何らかの理由により燃焼器

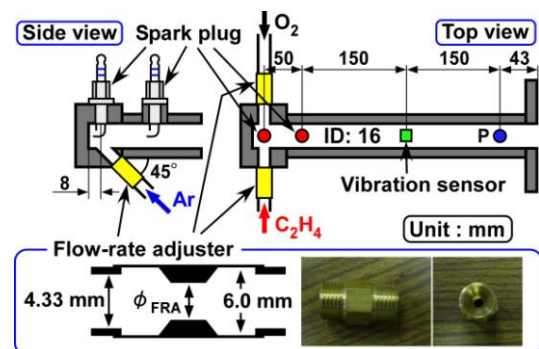


図1 使用した燃焼器

の振動が止まった場合には直ちに燃料と酸化剤の供給を停止させるようになっている。

燃焼器のバルブレスモードによる運転条件を決めるため、最初に、ガスの供給圧と流量調整器の内径とを変えつつ、流量を測定した。この予備的な測定の結果、アルゴン供給系の流量調整器内径は5.0 mmに、酸素供給系のそれは7.0 mmに、エチレン供給系のそれは1.8 mmに決定した。図2(a)に測定した流量を、図2(b)に流量測定の結果から計算した可燃性混合気の当量比を示す。図2(b)からわかるように、ガスの供給圧が変化しても可燃性混合気の当量比はあまり変化しない。このことは、エチレンと酸素の供給圧を等しくしておけば、管内圧が変化しても可燃性混合

表1 バルブレスモードによる高周波数運転実証実験の運転条件

Gas-supply pressure (MPaG)			Operation frequency (Hz)	Operation cycle	Composition of the detonable gas (estimated)	Fill-fraction of the detonable gas (estimated)
C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	O <sub>2</sub>	Ar	(Hz)			
0.36	0.36	0.99	200	75 (0.375 s)	1.1C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> +3(O <sub>2</sub> +2.5Ar)	approx. 100% of the PDC

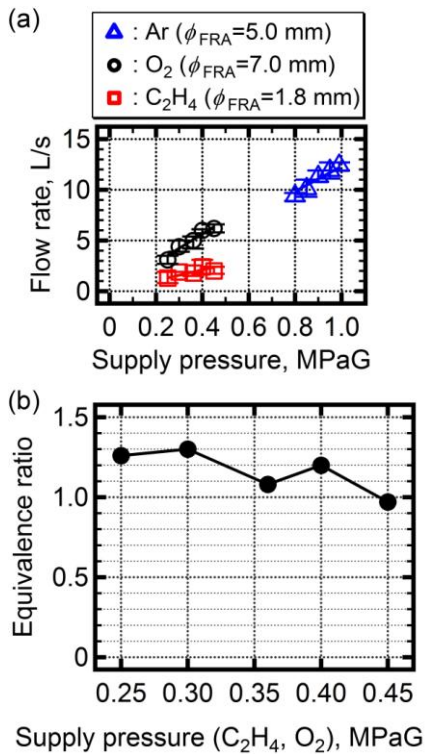


図2 (a)測定されたガス流量  
(b)流量測定の結果から計算された可燃性混合気の当量比

気の当量比はあまり変化しないことを示している。最終的に、運転条件を表1のように決定した。

(2) バッファ室設置による排気噴流の平滑化  
排気バッファ室を3種用意し、排気噴流を平滑化する実験を行った。使用した排気バッファ室は、全て円筒型であり、(a)内径68mm、長さ200mm、(b)内径95mm、長さ200mm、(c)内径68mm、長さ400mm、の3種である。排気バッファ室(a)を基準とし、(b)は(a)の断面積を2倍にしたもの、(c)は(a)の長さを2倍にしたものである。これら3種の排気バッファ室の効果を調べることで、排気バッファ室の体積、断面積、長さが排気噴流に与える影響を調べた。排気バッファ室の出口は内径16mmで固定した。実験では、燃焼器を周波数100Hzでバルブレス運転し、高速ビデオカメラ(1200コマ/秒)によって排気噴流を直接観察するとともに、排気バッファ室出口から100mmの位置に設置した圧力変換器に排気噴流を直接吹き付けることでよどみ点圧力の時間変化を測定した。噴流の定常性は、主として、排気噴流を直接吹き付けた圧力変換器の出力波形によって評価した。実験配置を図3に示す。

#### 4. 研究成果

##### (1) バルブレスモードによるパルス燃焼器高周波数運転の実証

図1に示した燃焼器を周波数200Hzで運転した際に「P」の位置で測定された圧力履歴を図4に示す。自走デトネーションの特性圧力である  $p_{\text{J}}$  に比べて圧力ピークが明らかに小さい場合をパルス燃焼「失敗」と判断するならば、20, 26, 31, 38, 40, 42, 45, 48, 62, 71 サイクル目が「失敗」であり、結果として87%の成功率であった。この結果は、本

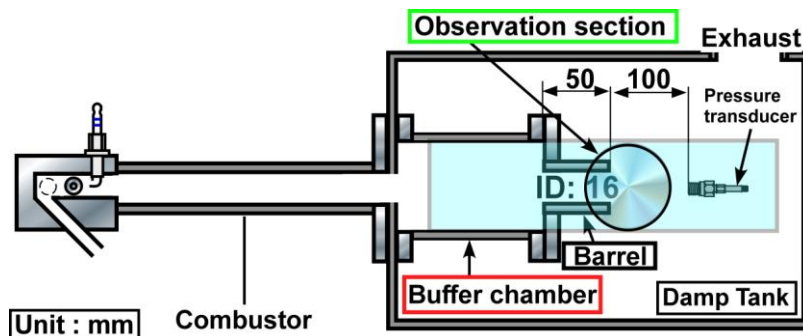


図3 バッファ室による排気噴流平滑化実験の配置

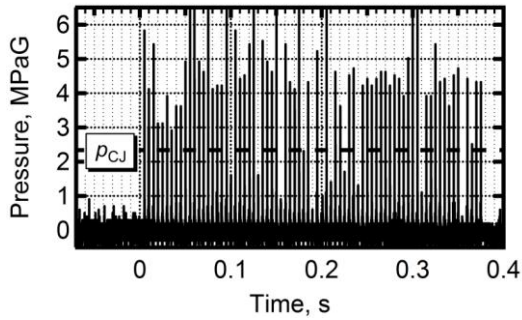


図 4 200 Hz 運転時に測定された管内圧力履歴

研究課題で提案したバルブレスモードによる運転方法が有効であることを示している。

(2) バッファ室設置による排気噴流の平滑化

実験で測定された排気噴流のよどみ点圧力の時間履歴を図 5 に示す。図には、比較のため、アルゴンのみを定常的に流した場合の測定結果も合わせて示した。排気バッファ室を全く使用しない場合の排気噴流持続時間が約 2.5 ms であったのに対し、排気バッファ室を使用した場合の排気噴流持続時間は運転周期に相当する 10 ms にまで伸びた。すなわち、切れ目なく噴流を取り出すことができた。また、排気噴流のよどみ点圧力の脈動の大きさは、排気バッファ室の体積が大きい場合の方が小さく、また、同じ体積の場合には長さが長い場合の方が小さくなることがわかった。この結果は、まだ運転時間が短いため、熱損失の影響を受けているものと考えられるが、排気バッファ室を設置することで準定常的な排気噴流が得られることがわかった。

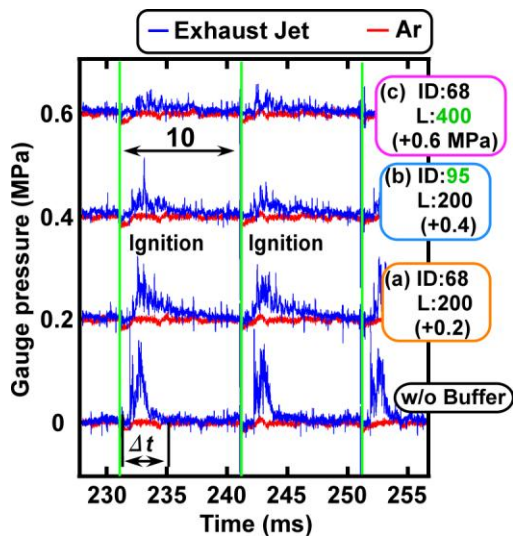


図 5 排気噴流のよどみ点圧力の時間履歴

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 4 件)

1. S. Hasegawa, M. Shimizu, A. Susa, and T. Endo, Experiments on detonation initiation and propagation in extremely thin channels, Science and Technology of Energetic Materials, 査読有, Vol. 72, 2011, pp. 62-67.
2. S. Maeda, J. Kasahara, A. Matsuo, and T. Endo, Analysis on Thermal Efficiency of Non-Compressor Type Pulse Detonation Turbine Engines, Transactions of the Japan Society for Aeronautical and Space Sciences, 査読有, Vol. 53, 2010, pp. 192-206.
3. J. Kasahara, M. Hirano, A. Matsuo, Y. Daimon, and T. Endo, Thrust Measurement of a Multicycle Partially Filled Pulse Detonation Rocket Engine, Journal of Propulsion and Power, 査読有, Vol. 25, 2009, pp. 1281-1290.
4. H. Muro, T. Hino, R. Hamazoe, M. Takemoto, H. Yamazumi, T. Yatsufusa, T. Endo, and S. Taki, Multi-Cycle Experiments on Multi-Tube Pulse Detonation Engine, Advancements in Energetic Materials and Chemical Propulsion, 査読有, 巻無し, 2008, pp. 995-1002.

[学会発表] (計 16 件)

1. 遠藤琢磨, 長谷川俊介, 同前豪, 小西幸英, 須佐秋生, 狭い隙間におけるデトネーションの発生と伝播, 日本機械学会関東支部第 17 期総会講演会, 18-19 Mar 2011, 横浜.
2. 兼清喬平, 岡本哲也, 秋朝智也, 阪口幸男, 半田吉紀, 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燃焼器による溶射実験, 平成 22 年度衝撃波シンポジウム, 16-18 Mar 2011, 相模原.
3. 光延昭彦, 横山裕之, 加藤慎一, 高橋友彰, 須佐秋生, 遠藤琢磨, 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, 平成 22 年度衝撃波シンポジウム, 16-18 Mar 2011, 相模原.
4. 秋朝智也, 岡本哲也, 兼清喬平, 阪口幸男, 須佐秋生, 遠藤琢磨, パルスデトネーション排気噴流の運転周波数依存性, 第 48 回燃焼シンポジウム, 1-3 Dec 2010, 福岡.
5. 岡本哲也, 秋朝智也, 兼清喬平, 阪口幸男, 須佐秋生, 遠藤琢磨, 花房龍男, 竹



- 保義博, 高周波数パルスデトネーション燃焼器による溶射皮膜形成実験, 第48回燃焼シンポジウム, 1-3 Dec 2010, 福岡.
6. S. Hasegawa, M. Shimizu, A. Susa, and T. Endo, Experiments on Initiation and Propagation of Detonations in Extremely Thin Channels, 8th International Symposium on Hazards, Prevention, and Mitigation of Industrial Explosions, 5-10 Sep 2010, 横浜.
  7. 遠藤琢磨, 須佐秋生, 藤井昭彦, 岡本哲也, 秋朝智也, 兼清喬平, ノルアニザ, 花房龍男, 竹保義博, 高周波数パルスデトネーション燃焼器による溶射の基礎実験, 日本溶射協会第91回(2010年度春季)全国講演大会, 5-6 Jul 2010, 大阪.
  8. 兼清喬平, 秋朝智也, 岡本哲也, 藤井昭彦, Noor Aniza, 須佐秋生, 遠藤琢磨, パルスデトネーション燃焼器からの排気噴流の直接観察, 第42回流体力学講演会, 24-25 Jun 2010, 米子.
  9. 長谷川俊介, 清水将司, 須佐秋生, 遠藤琢磨, 非常に狭い隙間におけるデトネーションの伝播挙動, 第42回流体力学講演会, 24-25 Jun 2010, 米子.
  10. 横山裕之, 山積弘信, 加藤慎一, 光延昭彦, 須佐秋生, 遠藤琢磨, 滝史郎, 単気筒パルスデトネーションタービンエンジンの性能評価, 日本航空宇宙学会西部支部講演会2009, 10 Dec 2009, 北九州.
  11. 長谷川俊介, 清水将司, 上田径, 須佐秋生, 遠藤琢磨, 滝史郎, 非常に狭い隙間への火炎の進入とデトネーションの発生・伝播に関する実験, 日本航空宇宙学会西部支部講演会2009, 10 Dec 2009, 北九州.
  12. M. Shimizu, S. Hasegawa, S. Sakae, K. Kaneshige, A. Susa, T. Endo, and S. Taki, Experiments on Detonation Initiation and Propagation in Extremely Thin Channels, 6th Asian-Pacific Conference on Aerospace Technology and Science, 15-19 Nov 2009, Huangshan, China.
  13. A. Fujii, T. Akitomo, T. Okamoto, A. Susa, T. Endo, and S. Taki, High-Frequency Operation of Pulse Detonation Combustor in Valveless Mode, 6th Asian-Pacific Conference on Aerospace Technology and Science, 15-19 Nov 2009, Huangshan, China.
  14. T. Endo, Propulsion Application of Pulse Detonation Technology (Invited), 6th Asian-Pacific Conference on Aerospace Technology and Science, 15-19 Nov 2009, Huangshan, China.

15. 遠藤琢磨, 須佐秋生, 藤井昭彦, 山積弘信, バルブレスモードによるパルスデトネーション燃焼器の高周波数運転, 第53回宇宙科学技術連合講演会, 9-11 Sep 2009, 京都.
16. 遠藤琢磨, 滝史郎, 須佐秋生, 藤井昭彦, 岡本哲也, 秋朝智也, バルブレスモードによるパルスデトネーション燃焼器の高周波数運転, デトネーションシンポジウム, 2-3 Mar 2009, 筑波.

[その他]  
ホームページ等  
<http://home.hiroshima-u.ac.jp/rgdlab/>

## 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

### (2) 研究分担者

( )

研究者番号:

### (3) 連携研究者

( )

研究者番号: