

機関番号：22604  
 研究種目：若手研究（B）  
 研究期間：2009～2010  
 課題番号：21760653  
 研究課題名（和文） 出力数 kW 級超小型ガスタービン用パルスデトネーション燃焼器の開発研究  
 研究課題名（英文） Development of a Pulse Detonation Combustor for a Several kW-class Micro Gas Turbine  
 研究代表者  
 櫻井 毅司（SAKURAI TAKASHI）  
 首都大学東京・システムデザイン研究科・助教  
 研究者番号：10433179

研究成果の概要（和文）：出力数 kW 級超小型ガスタービン用のパルスデトネーション燃焼器（燃焼室長さ 20cm、容積 120cm<sup>3</sup>）を製作した。サイクル速度を高める工夫として対向・並列噴射に着目し、予混合気流動の様子や濃度分布を明らかとした。乱流噴流方式のイニシエーターを用いることで水素を燃料とした場合に 200mm の小型燃焼器でもデトネーション燃焼を達成した。燃焼ガスの排気時間を短くする上で空気流入速度の増加が有効である。

研究成果の概要（英文）：A small, pulse detonation combustor with a length of 20 cm and a volume of 120 cm<sup>3</sup> was developed for several kW-class micro gas turbines. As a method to increase the cycle frequency, the counterflow and parallel fuel injection methods were proposed, and the premixture flow behavior and concentration distribution were measured. By using the turbulent flame jet-type initiators, detonation was attained in a hydrogen-fueled combustor. The exhaust behavior of the burned gas was observed. To shorten the exhaust process, the increase of the air flow velocity was effective.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	1,400,000	420,000	1,820,000
2010年度	1,200,000	360,000	1,560,000
年度			
年度			
年度			
総計	2,600,000	780,000	3,380,000

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：パルスデトネーション燃焼器、デトネーション、超小型ガスタービン、PDE、航空宇宙推進

#### 1. 研究開始当初の背景

近年、発達が著しくニーズも増加している小型可搬電子機器や災害救助用ロボットなどの電源として、リチウムイオン等の化学電池や燃料電池よりも高出力密度・高エネルギー密度である超小型ガスタービンの利用が有望視されている。しかしながら、電池に対する超小型ガスタービンの大きな欠点は、小型化に伴う低圧力比のために熱効率が低い

ことである。

このような超小型ガスタービンの熱効率を改善する方法として、瞬時に高压高温を生成するデトネーション燃焼の特性を利用したパルスデトネーション燃焼器を搭載することが画期的な方法となる可能性を持つ。熱力学サイクル解析では、定圧燃焼方式の燃焼器と比較して 10%以上の熱効率の向上が見込まれる。

現在、国内外においてデトネーション燃焼方式のガスタービンが盛んに研究開発されているが、それらは非定常なデトネーション燃焼ガスとタービンとの性能適合に関するものがほとんどである。一方、ガスタービンへの搭載に向けたパルスデトネーション燃焼器の課題に着目すると、迅速な予混合気の形成、デトネーションの短距離開始、高压高温下における多種燃料のデトネーション特性、デトネーション燃焼の安定した繰り返し、NO<sub>x</sub>等の排ガス特性、燃焼器の熱・衝撃耐久性など、未解明の課題は多い。

以上から、超小型ガスタービンを実現するためには、上記の要求課題を満たすパルスデトネーション燃焼器の研究開発が必要である。

## 2. 研究の目的

本研究の目的は、出力数 kW 級超小型ガスタービンに搭載するための世界最小サイズのパルスデトネーション燃焼器を開発することである。具体的にはキャンプ用の LPG/ブタン混合燃料を用いる超小型ガスタービン（出力 1~3 kW、熱効率率 20%）を想定し、パルスデトネーション燃焼器（燃焼室長さ 20cm×高さ 3cm×幅 2cm、容積 120cc、空気流量 16 g/s、圧力比 3:1、NO<sub>x</sub> 排出 20 ppm）の開発研究を行う。

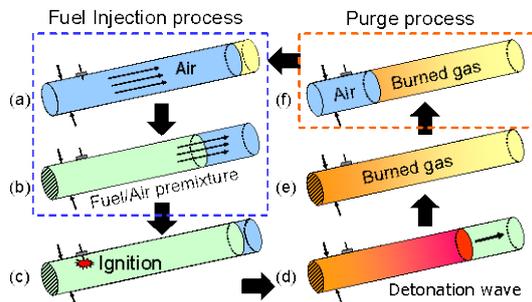


図 1 パルスデトネーション燃焼器における燃焼サイクル

パルスデトネーション燃焼器の燃焼サイクルは図 1 に示した燃料噴射、デトネーション燃焼、排気の 3 行程からなる。上記の燃焼器目標性能の達成に必要な研究課題は、

(1) 燃料噴射：数 ms での高速予混合気生成、燃焼器内部の当量比分布や乱流強さの制御

(2) デトネーション燃焼：デトネーションの短距離開始、高压高温下における LPG やブタン、灯油等のセルサイズの基礎的データ取得、NO<sub>x</sub> や CO、CO<sub>2</sub> などの排出ガス特性の解明

(3) 排気：空気と燃焼ガスとの干渉過程の解明と数 ms での燃焼ガス高速排気方法の考案、

その他、安定かつ確実なデトネーション燃焼の繰り返し実証、燃焼器の耐熱・対衝撃構

造の検討、等である。

## 3. 研究の方法

### (1) 燃料噴射

① 高速度シュリーレン撮影により、予混合気形成時の流動・混合の様子を調べる。

② 熱線濃度プローブやアセトン LIF により、予混合気の濃度計測を行い、濃度分布やその時間変化を明らかにする。

③ 予混合気の当量比分布が、デトネーションの開始距離に与える影響を調べる。

### (2) デトネーション燃焼

① 圧力 3atm、温度 200℃ が可能な耐圧試験装置を製作し、燃焼器に適用する前に必要な LPG やブタン、灯油の基礎的なデータを取得する。

② 試験装置の基礎データをもとに燃焼器における LPG やブタン、灯油燃料のデトネーションの発生有無や開始距離を調べる。

③ 燃焼器出口にガスサンプリングプローブを設置し、採取した燃焼ガスより NO<sub>x</sub>、CO、CO<sub>2</sub> の排出値を計測する。

### (3) 排気

① 空気と燃焼ガスとの干渉過程を高速度シュリーレン画像により解析する。

② 流入空気の動圧や流量(流速)、温度を実験パラメータとして燃焼ガスの排気に要する時間への影響を調べ、最適な流入空気条件を考案する。

## 4. 研究成果

図 2 に製作した燃焼器の概略図を示す。燃焼器は長さ 200 mm・高さ 30 mm・奥行き 20 mm の矩形燃焼室(容積 120 cm<sup>3</sup>)と内径 10 mm、長さ 100 mm、容積 7.5 cm<sup>3</sup> のインシエーター 2 本、空気入口径 12 mm のディフューザー部より成る。燃焼器の側壁は可視化観察のために石英ガラスとした。その他の壁面は真鍮製である。空気はブローヤより定常的に供給され、ディフューザーを通過して燃焼室へと流入する。燃焼室の左端より 10 mm と 80 mm の上下壁面に孔径 3 mm の燃料噴射孔が計 4 ヶ所設けられている。本研究では 4 ヶ所ある噴射孔のうち 2 ヶ所を用い、燃焼室上壁面の 10 mm および 80 mm から噴射した場合を並列噴射と呼び、10 mm における上下壁面から噴射した場合を対向噴射と呼ぶ。

### (1) 燃料噴射

① 図 3 に水素燃料の模擬気体としてヘリウムを用い、噴射開始から 12 ms までの並列噴射と対向噴射のシュリーレン画像を示す。並列噴射の場合、ヘリウムはそれぞれの噴射位置より壁面衝突噴流場を形成し、燃焼室の下面に衝突後、左右および上面方向へ拡散している。対向噴射の場合、ヘリウム同士の衝突噴流が形成され、衝突の中心より左右方向へと混合・拡散している。

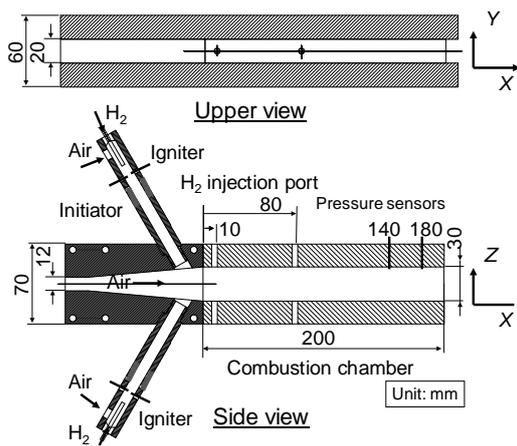


図2 パルスデトネーション燃焼器概略図

並列噴射における混合気の移動速度は 29 m/s であり、対向噴射の場合には 26 m/s となった。この移動速度とヘリウムの噴射位置より、混合気を燃焼室に一様に充填するまでの特性時間（≡燃焼室長さ／移動速度）を求めると、並列噴射では 6.1 ms、対向噴射では 7.3 ms であることが分かった。

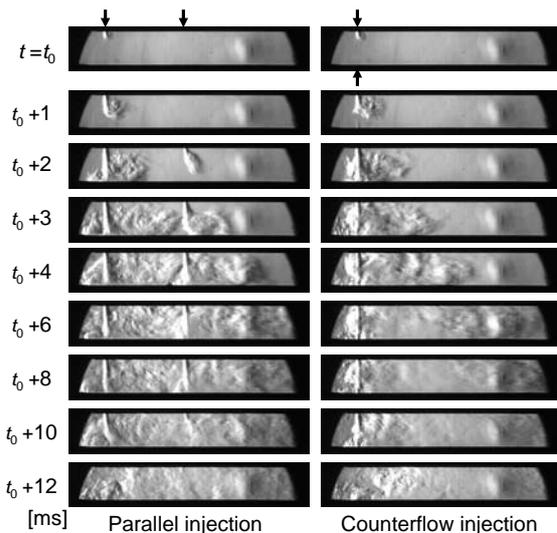


図3 ヘリウム噴射から 12ms までの燃焼室内のシュリーレン画像

② 熱線濃度プローブを用いて計測したヘリウム／空気混合気の濃度の時間変化を図 4 に示す。混合気の移動速度は約 27 m/s であり、シュリーレン画像から見積もられた移動速度によく一致する。混合気が燃焼室内に滞在している時間は、噴射位置に近い 10 mm や 20 mm では約 12 ms であるのに対して、下流側ほど滞在時間が増加し、100 mm では 19 ms、200 mm では 24 ms である。

図 5 に噴射開始より 10 ms における瞬時ヘリウム濃度分布を示す。並列噴射と対向噴射のどちらの図にも、ヘリウム噴射孔付近に高

いヘリウム濃度が見られ、並列噴射の場合にはヘリウムが下面側に高濃度で存在し、高さ方向に濃度勾配が形成された。

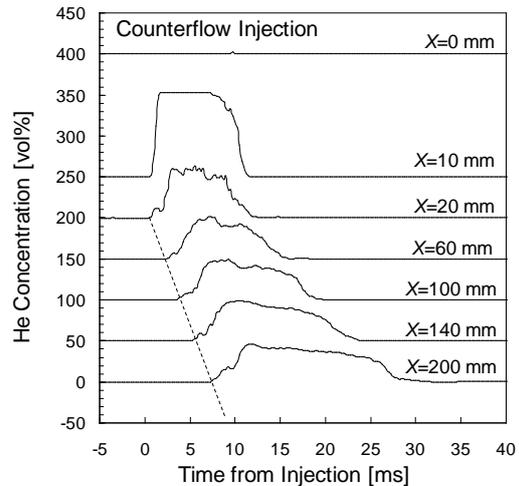


図4 対向噴射時のヘリウム／空気混合気の濃度変化

対向噴射の場合には、噴射孔および出口近傍を除いた領域に対して、高さ方向に一樣な濃度分布が形成され、出口へ向かうに従い徐々に濃度が低下した。なお、アセトン LIF による濃度計測装置系を構築中であり、今後計測を開始する。

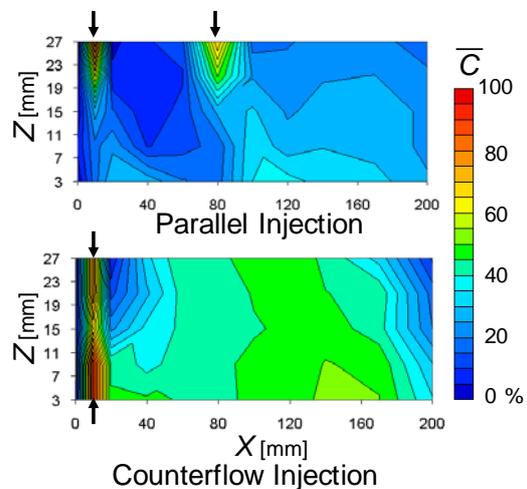


図5 ヘリウム／空気予混合気の瞬時濃度分布

③ 対向噴射と並列噴射のそれぞれについて燃焼実験を行った。乱流噴流火炎を生成するイニシエーターを図 2 に示すように 2 本対向して用いることで燃焼器内にデトネーションを開始できることが分かった。図 6 には対向噴射で得られたデトネーション燃焼時の代表的な燃焼室の様子と圧力波形を示す。80 mm の位置で衝撃波が形成された。時刻  $t_1+0.50ms$  において 110 mm から 140 mm の区間では、伝播

速度が 2000 m/s に達し、デトネーションに移移した。燃焼室の総括当量比は 0.4 であり、CJ 速度は 1488 m/s である。②で示したように予混合気の濃度分布が一様ではないことに起因して、デトネーションの伝播速度は加減速を示した。

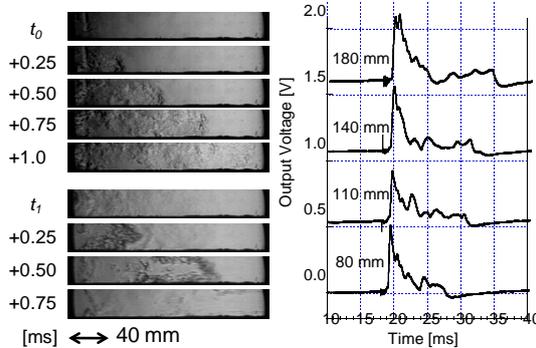


図 6 デトネーション燃焼時のシュリーレン像と圧力波形（対向噴射）

### (2) デトネーション燃焼

① LPG やブタン、灯油燃料の圧力 3atm、温度 200°C におけるデトネーション特性を調べるために図 7 に示す試験装置を製作した。装置の設計および加熱方法の検討に時間を要したため、今後目的とした条件での実験を行う予定である。

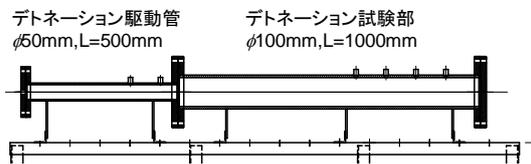


図 7 圧力 3atm、温度 200°C 用耐圧試験装置

### (3) 排気

① 図 8 はデトネーション燃焼後に燃焼ガスが空気によって掃気されていく様子を高速シュリーレン撮影で捉えた結果である。燃焼ガスと空気は丸印で示すように境目を保ちながら燃焼器出口へ流れていく。

② 空気流速を大きくした場合、その様子は図 8 と変わらないが、空気が燃焼ガスを掃気する時間は短くなることが分かった。本燃焼器の条件では、その時間は 20ms 程度と長く、燃焼ガスの排気過程が燃焼サイクルの速度を律速している。

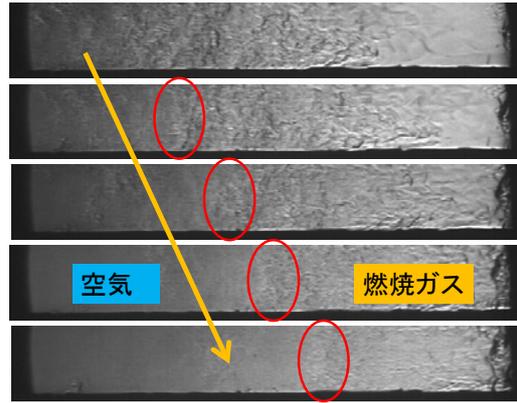


図 8 代表的な燃焼ガスと空気の干渉のシュリーレン像

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕（計 0 件）

〔学会発表〕（計 4 件）

① Sakurai, T., Yuasa, S., Development of a Hydrogen-fueled Pulse Detonation Combustor for 1 kW-class Micro Gas Turbine, 46<sup>th</sup> AIAA Joint Propulsion Conference, AIAA 2010-6881, 2010.

② 桜井毅司, 湯浅三郎: 超小型ガスタービン用パルスデトネーション燃焼器におけるデトネーション限界, 第 48 回燃焼シンポジウム, pp. 520-521, 2010.

③ 桜井毅司, 湯浅三郎, パルスデトネーション燃焼器における予混合気形成過程および燃焼過程の可視化計測, 平成 21 年度衝撃波シンポジウム, pp. 297-300, 2010.

④ 桜井毅司, 湯浅三郎: パルスデトネーション燃焼器における予混合気の濃度分布が燃焼に及ぼす影響, 第 47 回燃焼シンポジウム, pp. 66-67, 2009.

〔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〕

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

櫻井 毅司 (SAKURAI TAKASHI)

首都大学東京・システムデザイン研究科・助教

研究者番号：10433179