

令和 6 年 6 月 10 日現在

機関番号：22604

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2021～2023

課題番号：21K04481

研究課題名（和文）圧力増大燃焼で作動する高効率ガスタービンの実証研究

研究課題名（英文）Research on gas turbine using pressure gain combustion for improving thermal efficiency

研究代表者

櫻井 毅司（Sakurai, Takashi）

東京都立大学・システムデザイン研究科・准教授

研究者番号：10433179

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,200,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では圧力増大燃焼の一つであるパルス燃焼をガスタービンに適用し、熱効率向上の実証に取り組んだ。はじめにパルス燃焼の条件を調査した。圧力増大を高めるためには、圧縮波を形成する火炎の加速が重要であることがわかり、燃料充填率や燃焼ガスのパーシを調節することで最大で6.7%の圧力増大を達成した。次にパルス燃焼器を搭載したガスタービンの運転実験を行い、性能を調査した。パルス燃焼によりタービン入口圧力が上昇したことで定圧燃焼時よりも出力が増加することを確認した。ただし、燃焼ガスの脈動は出力変動の増加とタービンや圧縮機の効率低下も招き、熱効率を向上する点については新たな課題を生じることとなった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究で取り組んだパルス燃焼は、燃焼器の入口や出口が解放状態であるため定積燃焼ではない。しかし、燃焼圧力のピークは燃焼前の2倍程度まで達しており、どのような物理機構で圧力が上昇しているのか明らかではなかった。本研究の結果、圧力上昇は火炎の加速によって生じる圧縮波によることを明らかにした。

パルス燃焼は燃焼ガスの大きな脈動を生じる。この脈動がタービンだけでなく、圧縮機の作動状態にも影響し、両者の断熱効率を大きく損なっていることを明らかにした。これは圧力増大燃焼をガスタービンに適用する場合に共通する課題であり、燃焼器で生じる脈動の緩和がガスタービン熱効率の向上において必要である。

研究成果の概要（英文）：In this study, pulse combustion, a type of pressure-gain combustion, was applied to a gas turbine to demonstrate the improvement of thermal efficiency. First, the conditions for pulse combustion were investigated. The acceleration of the flame forming the compression wave was found to be important for increasing the pressure gain, and a maximum pressure gain of 6.7% was achieved by adjusting the fuel filling and purge fractions. Next, the performance of a gas turbine equipped with a pulse combustor was investigated through operational tests. It was confirmed that pulse combustion increased the turbine inlet pressure, resulting in an increase in power output compared to constant-pressure combustion. However, the pulsation of the combustion gas also caused the increase of fluctuations of power output and reduced the efficiency of the turbine and compressor, creating a new challenge in terms of improving thermal efficiency.

研究分野：推進工学

キーワード：圧力増大燃焼 パルス燃焼 ガスタービン 熱効率

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

ガスタービンはジェットエンジンや発電装置として幅広く利用されている熱機関である。地球温暖化抑制に向けた CO₂ の削減や燃料消費率の改善のために継続的な熱効率の向上が取り組まれているが、技術的には成熟しつつあり、熱効率の改善は鈍化している。本研究では、圧力増大燃焼 (Pressure-gain combustion) を用いて既存ガスタービンの熱効率を革新的 (10%程度) に向上することを目標としている。

圧力増大燃焼とは、通常は圧力がほぼ一定のもとで燃焼 (定圧燃焼) するガスタービン燃焼器において、定積燃焼またはデトネーション燃焼することにより圧力の上昇を得る方法である。圧縮機で圧縮された作動流体が燃焼器でさらに圧力上昇することにより、タービンにおいて定圧燃焼よりも大きな膨張仕事を得られ、熱効率が向上する。

圧力増大燃焼には、定積燃焼に近い燃焼状態が得られるパルス燃焼や、パルスデトネーション燃焼、回転デトネーション燃焼といった様々な方式が考案されているが、唯一パルス燃焼のみがガスタービンの運転を実証している。しかし、その燃焼による圧力増大値は高々3%と低く、また、圧力増大による熱効率の向上も実証されていない (Paxson, D., Dougherty, K., *AIAA 2008-0119, 2008*)。

2. 研究の目的

筆者は、本研究の開始以前に、パルス燃焼と定圧燃焼を組み合わせた独自の燃焼方式 (以下、パルス燃焼) を考案し、ガスタービンの運転状態で 2% 弱の燃焼圧力増大を実証していた。ただし、圧力増大は低く、パルス燃焼時のガスタービンの作動状態や熱効率には調査が及んでいなかった。本研究の目的は、5~10%の圧力増大の実現と、パルス燃焼が圧縮機やタービンの作動に及ぼす影響の把握、そして既存の定圧燃焼で作動するガスタービンとの性能比較によるパルス燃焼応用の利点や欠点を明らかにすること、である。

3. 研究の方法

(1) 5~10%の圧力増大燃焼を得るためのパルス燃焼条件の調査

ガスタービン運転状態において、圧力増大を高められる燃料の噴射時間や、燃焼サイクル速度と適切な着火時期の関係についてシュリーレン可視化および圧力計測によりデータを取得した。

(2) パルス燃焼によるガスの脈動が圧縮機やタービンの作動に及ぼす影響の調査

タービンに流入する燃焼ガスの圧力とタービン回転数の時間変化を調査した。また、パルス燃焼で生じた圧力の上昇は、圧縮機の流れに影響し、サージングを生じる懸念もあった。そのため、圧縮機の出入口において圧力や流速を計測し、作動状態を推定した。

(3) パルス燃焼で作動するガスタービンの性能取得と定圧燃焼作動との比較

タービン出口にノズルを設置し、排気噴流が生じる推力を計測する装置を構築した。この推力から出力を評価することで、パルス燃焼時と定圧燃焼時のガスタービン出力を評価した。

4. 研究成果

(1) 5~10%の圧力増大燃焼を得るためのパルス燃焼条件の調査

図1はシュリーレン画像をもとに作成した燃焼1サイクルの波動線図と対応する圧力波形である。3.628秒付近から水素混合気がシュリーレン撮影の観察領域を流れる様子が見られた。混合気の流れ速度は約 20 m/s でほぼ一定であった。水素混合気は火炎伝播時にちょうど燃焼器出

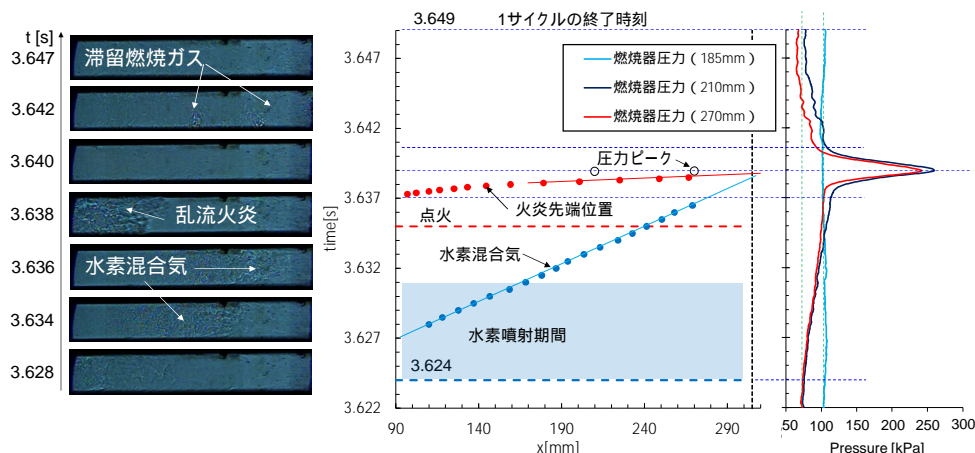


図1 燃焼1サイクルの波動線図と燃焼器圧力波形

口付近へ到達しており、燃料充填率は1であった。スパークプラグを 3.635 秒で点火した後、3.637 秒付近から圧力の上昇が始まっている。火炎の伝播および燃焼ガスの膨張により前進圧縮波が生じている。火炎は加速しており、燃焼器出口に到達する頃に圧力はピークに達している。その後、燃焼ガスが燃焼器から排出され始めると、圧力も低下し始める。1 サイクルの終わりに相当する 3.649 秒には燃焼前とほぼ同じ圧力に戻っている。

パルス燃焼室の入口と出口における 1 サイクルの圧力を以下に示す式で質量平均し、圧力増大値を評価した (図 2)。

$$p_i^{ma} = \frac{\int_0^T \dot{m}(t) \cdot P_i(t) dt}{\int_0^T \dot{m}(t) dt}$$

4.564s 付近で出口圧力はパルス燃焼による 200 kPa ほどのピークを生じている。燃焼圧力の上昇により圧縮機からの空気流入がせき止められたことで、入口圧力は出口圧力のピークから少し遅れて緩やかに圧力が上昇した。図 2 下グラフは圧力と質量流量の時間履歴と積算値を示したものである。燃焼室入口および出口圧力の質量平均値は $p_{in}^{ma} = 128.3\text{kPa}$ 、 $p_{out}^{ma} = 136.9\text{kPa}$ であった。圧力比は $p_{out}^{ma}/p_{in}^{ma} = 1.067$ であり、パルス燃焼により 6.7% の圧力増大が得られた。

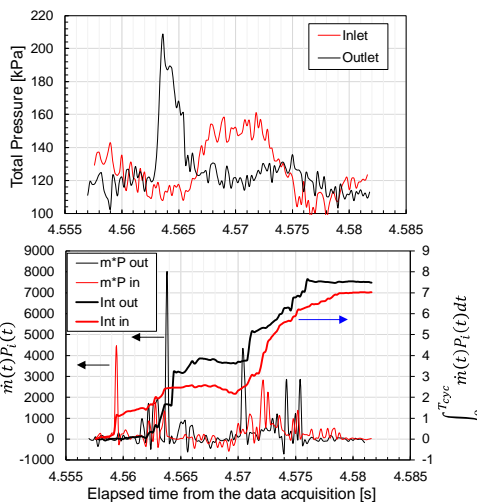


図 2 パルス燃焼室の入口と出口における質量平均化圧力

(2) パルス燃焼によるガスの脈動が圧縮機やタービンの作動に及ぼす影響の調査

図 3 はガスタービン実験装置の概略を示し、図 4 はパルス燃焼時に燃焼器、タービン、圧縮機の各部で計測した圧力履歴を示す。燃焼サイクル速度は 40 サイクル毎秒で、8 サイクル分を示している。燃焼室 A の圧力ピークがパルス燃焼を示し、発生した圧縮波はタービンへ伝播している。加えて、圧縮波は定圧燃焼している燃焼室 B や圧縮機にも影響を及ぼしていることがわかる。

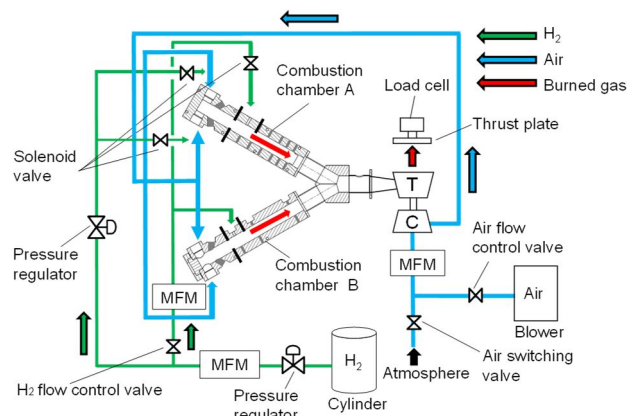


図 3 ガスタービン実験装置

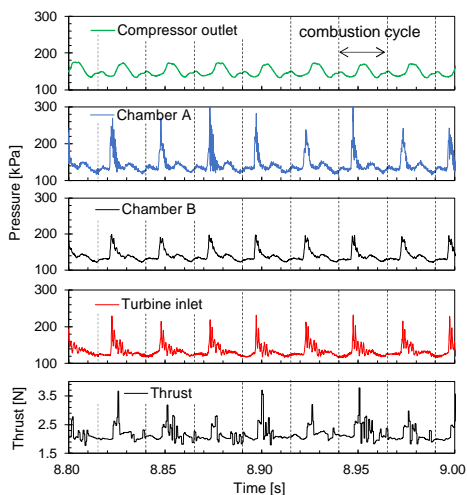


図 4 パルス燃焼時の圧力と推力履歴

図 5 は定圧燃焼時とパルス燃焼時におけるタービン軸回転数とタービン入口および圧縮機出口圧力の時間履歴を示す。定圧燃焼時にはタービン入口圧力は脈動がほとんど無く、回転数もほぼ一定である。回転数の時間平均値は 179,800 rpm であり、変動幅は 500 rpm と小さく、計測に由来するバラツキの範囲である。パルス燃焼時には 40 サイクル毎秒の燃焼に対応してタービン入口圧力と圧縮機出口圧力にも周期的な変動が生じている。その結果、回転数も明確に燃焼サイクルに対応した変化が見られる。回転数の時間平均値 (153,750 rpm) に対して、その変動幅は 2000 rpm であり、定圧燃焼時に比べて変動が大きくなっている。この結果から、パルス燃焼時のタービン断熱効率は定圧燃焼時に比べて低下していることが推測された。

図 6 はパルス燃焼時の圧縮機入口および出口の空気流速および圧力履歴を示している。圧縮機出口流速の時間変化は回転数の変化とほぼ同期しており、パルス燃焼ガスのタービン流入に伴い流速が大きく上下に変動している。特に、出口空気流速は 100 m/s を超えるピークの直後に 20 m/s 程度まで値が急激に低下しており、圧力履歴からはこのタイミングでサージングが発生したものと考えられる。圧力および流速の変化から圧縮機の作動状態は不安定であり、その断熱

効率は定圧燃焼時に比べて悪化した。

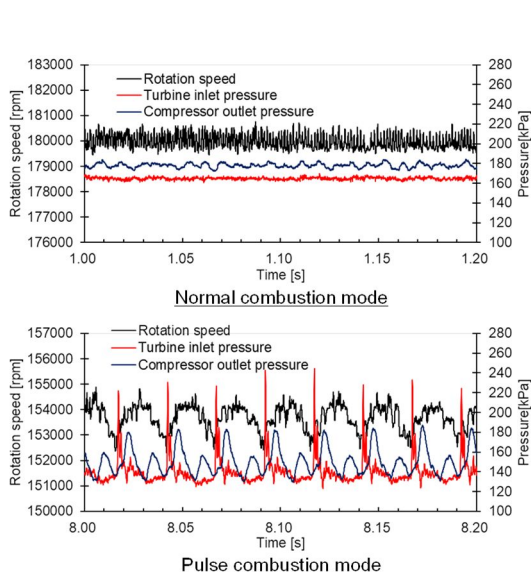


図5 定圧燃焼時とパルス燃焼時のタービン回転数

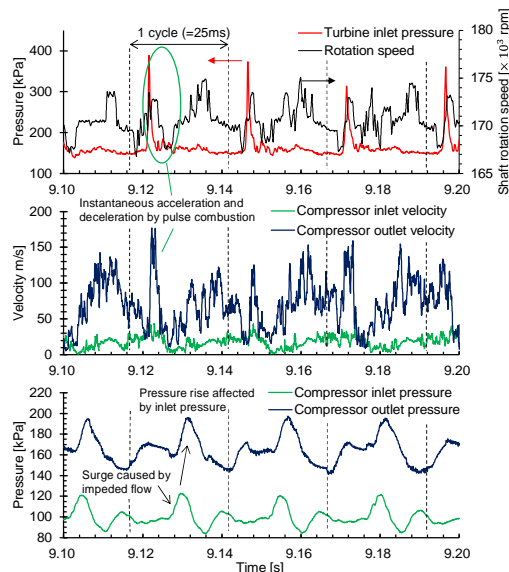


図6 パルス燃焼時の圧縮機作動状態

(3) パルス燃焼で作動するガスタービンの性能取得と定圧燃焼作動との比較

図7は定圧燃焼時とパルス燃焼時のガスタービン出力履歴を示す。このデータはガスタービンを定圧燃焼で運転している途中からデータ計測をしている。0~3秒まで定圧燃焼を継続しており、その後運転モードをパルス燃焼に切り替えて20秒間運転した。定圧燃焼では出力の値は時間に対してほぼ一定であり、また値の変動も小さい。一方で、パルス燃焼時には値の変動が大きくなり、時間に対しても変化している。ノイズのように見える細かい線はパルス燃焼に伴う出力ピークを示している。

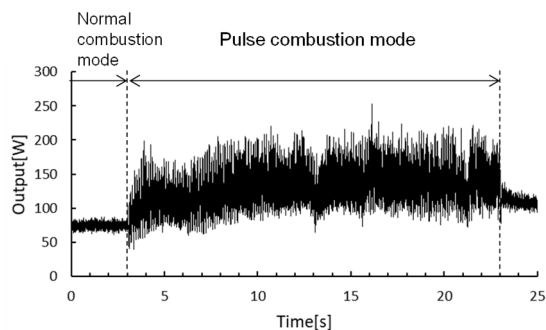


図7 定圧燃焼時とパルス燃焼時のガスタービン出力の時間履歴

表1は図7のデータをもとにした性能値の時間平均値を示している。パルス燃焼では定圧燃焼時よりも出力が増加したが、これはパルス燃焼による圧力増大の効果に加えて、水素流量が増加していることも影響している。水素流量を定圧燃焼とパルス燃焼で揃えるよう試行したが、パルス燃焼時の圧力の変動に伴い流量を調節することが困難であった。そのため当量比とタービン入口温度(TIT)が異なる点に注意が必要であるが、本研究においてはパルス燃焼の熱効率は定圧燃焼に対してわずかに高い程度であった。本来、パルス燃焼では圧力増大の効果により、もっと高い熱効率が得られるはずである。効率が期待したほどでなかった要因として、前述したタービンや圧縮機の断熱効率の低下が挙げられる。

表1 パルス燃焼時と定圧燃焼時のガスタービン性能比較

燃焼モード	\dot{m}_{Air} [g/s]	\dot{m}_{H2} [g/s]	当量比 [-]	TIT [K]	推力 [N]	出力 [W]	熱効率 [%]
定圧燃焼	27.91	0.27	0.33	1048	1.95	74	0.23
パルス燃焼	22.83	0.43	0.65	1271	2.17	138	0.27

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Sakurai Takashi, Sekiguchi Takehiro, Inoue Sora	4. 巻 -
2. 論文標題 Evaluation of Pressure Gain and Turbine Inlet Conditions in a Pulse Combustion Gas Turbine	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Proceedings of ASME Turbo Expo 2022	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1115/gt2022-83528	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 櫻井 毅司, 中村 駿介, 関口 武央, 井上 素良	4. 巻 70
2. 論文標題 圧力増大燃焼で作動するガスタービンの理論性能解析	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 日本航空宇宙学会論文集	6. 最初と最後の頁 215 ~ 226
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2322/jjsass.70.215	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計10件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 5件）

1. 発表者名 Sakurai, T., Inoue, S., Sekiguchi, T., Sato, A.
2. 発表標題 Cycle Analysis of Small Gas Turbine with Pressure Gain Combustion and Experiment of Miniature Engine
3. 学会等名 International Gas Turbine Congress 2023 (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 井上素良, 櫻井毅司
2. 発表標題 Pressure gain combustionを適用するガスタービンのサイクル解析
3. 学会等名 第51回日本ガスタービン学会定期講演会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Sakurai, T., Inoue, S., Sekiguchi, T., Sato, A.
2. 発表標題 Cycle Analysis of Small Gas Turbine with Pressure Gain Combustion and Experiment of Miniature Engine
3. 学会等名 International Gas Turbine Congress 2023 (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 井上素良, 櫻井毅司
2. 発表標題 アクティブパルス燃焼器における水素 - 空気乱流火炎の伝播速度と燃焼圧力
3. 学会等名 第63回航空原動機・宇宙推進講演会
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 Sakurai, T., Nakamura, S., Sekiguchi, T., Inoue, S.
2. 発表標題 Performance characteristics of miniature gas turbine with a pulse combustor
3. 学会等名 Proceedings of ISABE 2022, ISABE2021-061 (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 関口武央, 井上素良, 佐藤あすか, 櫻井毅司
2. 発表標題 パルス燃焼ガスタービンの運転特性
3. 学会等名 第50回日本ガスタービン学会定期講演会, B-10
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Inoue, S., Sekiguchi, T., Sato, A., Sakurai, T.
2. 発表標題 Operating Condition of a Miniature Gas Turbine with a Pulse Combustor
3. 学会等名 11th Asian Joint Conference on Propulsion and Power, AJCPP2023-084 (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 関口武央, 中村駿介, 櫻井毅司
2. 発表標題 パルス燃焼と定圧燃焼を組み合わせた圧力増大燃焼ガスタービンの性能評価
3. 学会等名 第49回日本ガスタービン学会定期講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 井上素良, 関口武央, 櫻井毅司
2. 発表標題 パルス燃焼ガスタービンにおける燃焼圧力の評価および性能への影響
3. 学会等名 第61回航空原動機・宇宙推進講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Sakurai, T., Sekiguchi, T., Inoue, S.
2. 発表標題 Evaluation of pressure gain and turbine inlet conditions in a pulse combustion gas turbine
3. 学会等名 ASME Turbo Expo 2022 (国際学会)
4. 発表年 2022年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

燃焼・推進工学研究室ホームページ
<https://www.comp.sd.tmu.ac.jp/comb/index.htm>
研究者Researchmap
<https://researchmap.jp/tsakuaerospace>

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
--	---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------