

令和元年6月3日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16H04586

研究課題名(和文) バイオ燃料を用いた環境適合型ジェットエンジンの燃焼ダイナミクス

研究課題名(英文) Combustion dynamics of environment-friendly jet engine fueled by bio-derived oil

研究代表者

津江 光洋 (Tsue, Mitsuhiro)

東京大学・大学院工学系研究科(工学部)・教授

研究者番号：50227360

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,430,000円

研究成果の概要(和文)：JetA-1およびバイオ合成パラフィンケロシン(Bio-SPK)の一種であるHEFAの燃焼挙動を、液滴燃焼試験およびRQL燃焼器などに使用されるダブルスワールバーナを用いて大気圧環境、高温高圧環境、実燃焼器環境において調べた。圧力測定と化学発光画像ベース診断手法を用いて、ジェットエンジン燃焼メカニズムを明らかにした。ジェット燃料とHEFAの燃焼挙動の違いを液滴径測定、燃焼速度測定により明らかにした。実燃焼試験を用いた排気サンプリング試験においては、HEFAおよびジェット燃料において窒素酸化物、一酸化炭素、炭化水素成分の差異はほとんど無かったが、粒子状物質の生成が大幅に抑制されることが示された。

研究成果の学術的意義や社会的意義

航空機において地球温暖化を抑制するためにバイオ合成燃料の使用が考えられる。ジェット燃料の物理性状に近いバイオ合成燃料が混合されて使用されるが、ジェット燃料の組成と比べて方向族化合物などの成分が大きくなるため、その燃焼安定性や排気特性が大きく異なる。本研究は実験室環境、高温高圧環境および実用燃焼器環境において航空機に使用される噴射器を使用して燃焼試験を実施した。また、単一液滴に着目した基礎燃焼試験を実施し物性値の影響を調べた。ジェットエンジン燃焼器におけるバイオ合成燃料とジェット燃料の燃焼挙動および排気特性の違いを、燃料性状および化学特性の違いに着目し明らかにした。

研究成果の概要(英文)：Combustion behaviors of JetA-1 and HEFA(Bio-SPK: Bio Synthetic Paraffin Kerosene) were investigated using the combustor under the atmospheric pressure, a high-pressure and a high-temperature, and an engine operating conditions. Detailed measurements of pressure and CH* chemiluminescence were performed to investigate the dominant combustion mechanism. Also, droplet combustion measurements were performed to investigate the effects of the physical and the chemical fuel properties on the combustion behaviors. In addition, exhaust gas was sampled under an engine operating condition for JetA-1 and HEFA. Results indicated that the lean blow-out limit for HEFA was extended compared to JetA-1. This tendency was discussed on the properties of fuels. When components of the pollutants were focused, emission indices of NO_x, CO and THC were not different between JetA-1 and HEFA. On the other hand, emissions of the particulate matter for HEFA was reduced greatly compared with that for Jet A-1.

研究分野：航空宇宙推進工学

キーワード：ジェットエンジン バイオ燃料 環境 粒子状物質 燃焼不安定性 液滴燃焼

様式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

近年、地球温暖化や大気汚染に対する関心が高まっており、航空機エンジンの高性能化やエミッションの低減が急務である。2020年までの航空機からの温室効果ガスの排出制限が ICAO, IATA により示されている。その実現には、バイオ燃料の使用が不可欠である。欧米においても、ジェット燃料に一定割合のバイオ燃料を混合した運用が行われており、国内でもバイオ燃料の混合が試行された時期がある。これらのバイオ燃料は ASTM7566 (D4054) 規格に適合したものが使用されている。カメリナ、ジャトロファ、食用油由来のバイオ合成ジェット燃料 (Bio-Synthetic Paraffin Kerosene: Bio-SPK) が使用されている。これらの燃料から熱分解、水素化処理により合成され、エンジン等の改良を必要としないドロップイン型の燃料として使用されている。将来的には、更なる二酸化炭素削減のため、バイオ燃料の混合割合の増大に加え、専用エンジンを用いた非ドロップイン型の燃料の使用も考えられる。これらの燃料はジェット燃料と物性値や組成が異なる。そのため、これらの多様な燃料種の噴霧燃焼形態、燃焼不安定性、燃焼限界および排気特性の理解が、安全で環境負荷の少ないエンジンの実現において必須である。

2. 研究の目的

ジェットエンジン燃焼器において、安定したバイオ燃料の燃焼形態を実現するためには、燃料の違いが燃料の微粒化、蒸発特性および燃焼の化学反応挙動に及ぼす影響を明らかにする必要がある。そのため、本研究では、ジェット燃料およびバイオ合成ジェット燃料の 1 つである HEFA (Hydrotreated Ester and Fatty Acid) に着目し、それら違いが燃焼挙動や環境負荷物質生成特性に及ぼす影響を詳細に調べる。液滴燃焼、大気圧燃焼、風洞を用いた高温高圧燃焼、JAXA 実環境燃焼試験により実施しバイオジェット燃料の燃焼特性に関する基礎的な知見を蓄積する。本研究では、特に希薄条件での燃焼安定性や排気特性に着目して実験を実施した。また、ジェット燃料の噴霧燃焼における燃焼安定性に大きく影響を及ぼすと考えられる、微粒化性能、液滴蒸発速度、燃料の反応性について、要素実験や文献調査を通して比較を行い、様々な条件化における燃焼試験結果の考察を行う。

3. 研究の方法

3.1 東京大学における大気圧および高温高圧燃焼試験

最初に、大気圧試験および高温高圧力燃焼試験に使用した燃料噴射器を図 1 に示す。本噴射器は、プレフィルミング型エアブラスト微粒化方式のアトマイザーで、現在航空エンジンで一般的に用いられる微粒化方式である。噴射器は 2 つの方向の異なるスワラーを有しており、これらによって生じるせん断流を用いて、円筒膜状に噴射された燃料を微粒化する。本研究では、インナーズワラー角度を $+45^\circ$ 、アウターズワラー角度を -45° として実験を行なった。旋回羽の幾何形状からスワラー数を見積もるとおよそ 0.86 となる。高温高圧燃焼試験は、東京大学柏キャンパスにある極超音速高エンタルピー風洞にて行った。本風洞は、貯気槽にためた高圧空気をペブル式加熱器に通し、高温高圧の空気流を得る吹き出し型風洞である。

図 2 に高温高圧燃焼試験装置の概略図を示す。流路断面は直径 100 mm の円であり、内圧を保つために出口を絞リチョークさせている。また燃焼器には石英ガラスの可視化窓があり、燃料噴射面から 77 mm 後流までの領域を観測できる。点火には水素-空気予混合火炎トーチを用いており、着火後にトーチを停止した。スワラーの上流下流にそれぞれ圧力センサ (KYOWA: PHL-A-2MP) を取り付けており、上流圧 P_{in} および燃焼圧 P_c を計測した。計測データの収録にはデータロガー (KEYENCE: NR-600) を用い、サンプリングレートは 10kHz とした。燃料の Jet-A1 および HEFA は燃料タンクを窒素で加圧し、メータリングバルブを用いて流量を調整したのち、コリオリ流量計 (KEYENCE, FD-SS02A) によって流量を計測した。空気流量については、ノズルのチョーク流量を元に推定を行なった。流入空気の圧力・温度および燃料流量より NASA-CEA による平衡計算でノズルでの流量を求め、これが仮定した空気流量と一致するまで繰り返し計算を行なった。

燃焼時の火炎の挙動を調査するために、ハイスピードカメラ (Vision Research: Miro LC 310) を用いた光学計測を行なった。撮影速度は 1000 fps とし、レンズには NIKON 製単焦点レンズ (焦点距離 85mm, $f=2$) を用いた。ハイスピードカメラには干渉フィルタ (中心波長 430 nm, 半値幅 15 nm) が取り付けられており、CH* の化学発光を撮影した。また、可視化部分にレーザーシートを入射し、噴霧の散乱光撮影も同時に行っている。燃料による微粒化性能の違いを調査するために、噴霧火炎中の燃料噴霧粒径の計測を行った。本試験で用いた、粒径計測手法は ILIDS (レ

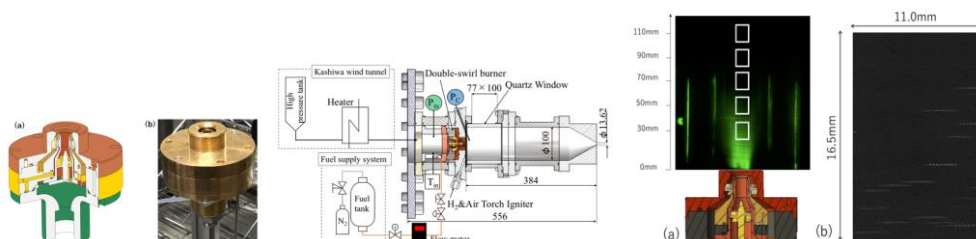


図 1 ダブルスワールバーナ 図 2 高温高圧燃焼試験装置 図 3 ILIDS による液滴粒径測定

一ザ干涉画像法：Interferometric Laser Imaging Droplet Sizing) であり，噴霧液滴の前方散乱光の干渉を非焦点面で撮像することで，各液滴がそれぞれ一つの干渉縞となって観測できる．この干渉縞の本数が，粒径に比例する．図 3 に本試験で粒径を計測した領域と観測例を示す．

3.2 JAXA における実環境燃焼試験

JAXA においてはケロシン（灯油）および HEFA の燃焼試験を実施し，燃料の違いによる排気特性の違いを調べた．図 4 に本研究で使用した RQL (Rich burn Quick quench Lean burn) 燃焼器を，図 5 に圧力容器の画像を示す．本試験は実エンジン環境模擬試験を実施するため，圧力容器内に RQL 燃焼器を組み込み，燃焼試験を実施した．試験は空気/燃料比 (AFR) を変化させて定常燃焼させた．この時の排気を燃焼器後部で採取し解析した．本研究では窒素酸化物 (NO_x)，一酸化炭素 (CO)，全炭化水素 (THC) および粒子状物質 (PM) 量の測定を実施した．

4. 研究成果

最初に大気圧環境下において燃焼試験を実施した．大気圧環境下ではダブルスワールバーナの基本的燃焼挙動を画像ベース診断により明らかにした．高速度カメラを使用して 2000fps で CH^* 化学発光を測定した．それらの結果に対して，固有直行分解 (Proper Orthogonal Decomposition) により分解し，固有値が大きい順から 4 個選択し，それらの成分を考慮した後，独立成分分析 (Independent Component Analysis) を適用し独立なモードを明確にした．その結果例を図 5 に当量比 0.71，空気質量流量 20g/s，およびスワール数 0.86 の場合の結果を示す．モード a, b, c から画像を再構築すると，燃焼室内で火炎が旋回している様子が再現できる．一

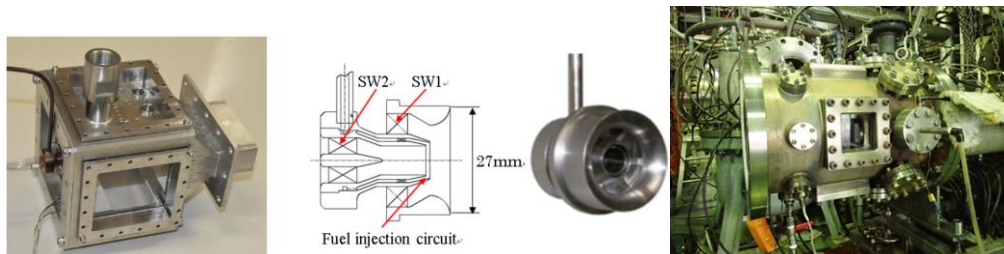


図 4 RQL 燃焼器とインジェクタ概略図

図 5 圧力ケース

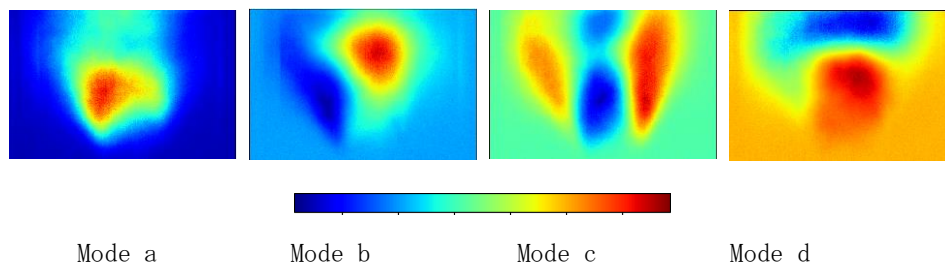
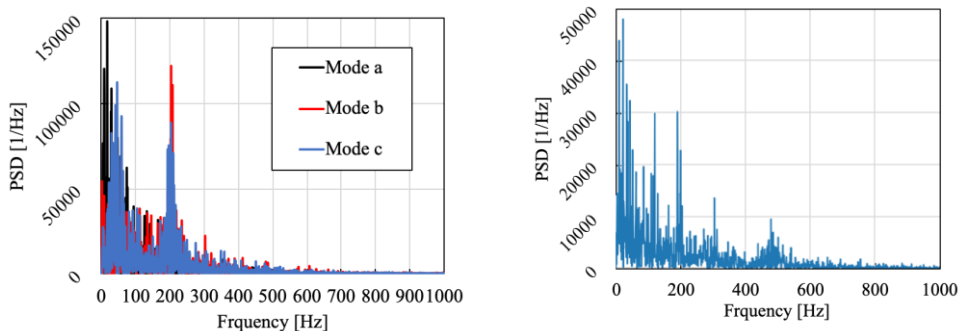


図 6 JetA-1 燃焼時の当量比 0.71，空気質量流量 20g/s，スワール比 0.81 時の ICA モード



(a) Modes a, b and c

(b) Mode d

図 7 モード振幅のパワースペクトル密度関数

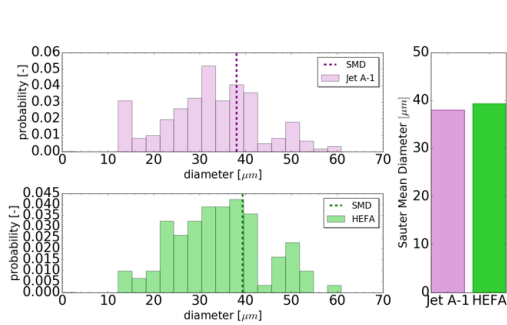


図 8 液滴粒度分布

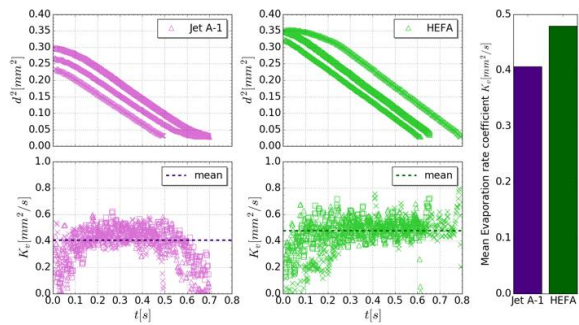


図 9 JetA-1 および HEFA の蒸発挙動

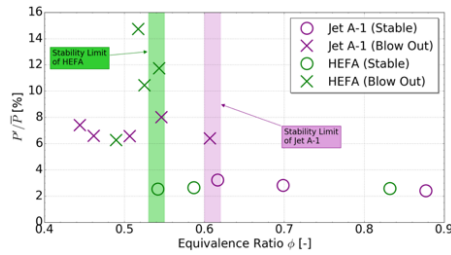


図 10 高温高压燃焼試験における燃焼安定性

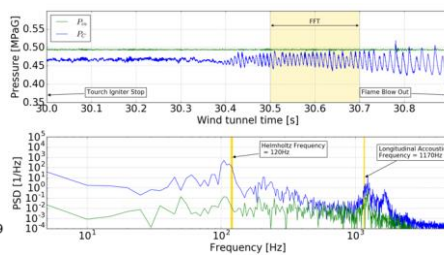


図 11 Jet A-1(当量比 0.52) の圧力履歴および周波数解析結果

方で、モード d を用いると火炎が上下に振動している事がわかる。図 7 にその周波数成分を示す。モード a, b, c においては旋回流に特有な渦構造の歳差運動 PVC (Processing Vortex Core) に起因する周波数が観察された。一方でモード d に着目すると、500Hz 付近に周波数が観察される。これは燃焼室の長さ方向の音響周波数に相当する。燃焼場はスワールと音響成分の足し合わせに分解され、どのように燃焼しているかが画像ベース診断により明らかにされた。

次に、ILIDS を使用して、大気圧環境下において噴射器 30mm 上方における液滴粒度分布を JetA-1 および HEFA に対して求め、燃料の違いによる微粒化特性の違いについて調べた。この測定地点は、浮き上がり火炎が始まる位置よりも低く、単純に微粒化のみを比較することができると考えられる。粒径分布より、粒径の代表値としてザウター平均粒径を算出した。図 8 にその結果を示す。この時の空気質量流量は 15g/s で当量比は 0.71、スワール数は 0.86 である。平均粒径は JetA-1 と HEFA で、ほとんど同じ値となり、わずかに Jet A-1 の方が小さい値となる。つまり、差はわずかであるが、Jet A-1 の方が微粒下性能が高く、燃焼安定性には有利となると考えられる。微粒化には、燃料の表面張力や粘性が影響するが、これらの物性値は Jet A-1 と HEFA でほとんど同じ値となる。そのため、微粒化性能にもあまり差が生じなかったと考えられる。

燃料の違いによる蒸発特性を調べるため、大気圧、750°C、窒素雰囲気中における単一液滴の蒸発試験を実施した。図 9 に単一液滴蒸発試験において得られた、液滴径の二乗の変化とそれにより算出した瞬間の蒸発速度定数の結果を示す。また、燃料による蒸発速度を比較するため、瞬間蒸発速度定数が比較的一定値をとる液滴寿命の 40% から 80% までの期間における瞬間蒸発速度定数の平均値を平均の蒸発速度定数と定義し比較する。液滴の蒸発について、一般的な準定常理論では d^2 則が成り立ち、液滴径の二乗が時間に対して線形に変化するとされ、その比例定数は蒸発速度定数と呼ばれる。その結果、HEFA の方が蒸発速度が大きくなり、より速やかに蒸発が完了するという事となる。燃焼安定性には、速やかに蒸発が完了する方 HEFA の方が有利であると考えられる。蒸発速度に差が生じた理由は、燃料の組成の違いによるものだと考えられ、より詳細な成分分析などを行う必要があると考えられる。

図 10 に高温高压燃焼試験の結果を示す。この図は横軸に当量比、縦軸に燃焼圧変動量を平均圧に対する割合で示し、安定に燃焼した条件と吹き消えが生じた条件でプロットを変えてある。この結果から、希薄吹き消えが生じる当量比はおおよそ図の帯状の位置にあると考えられ、Jet A-1 と比較して HEFA の方が希薄吹き消え当量比が低いという結果となった。これまでの微粒下性能、蒸発速度、反応性の比較から、微粒下性能に大きな差はなく、蒸発速度や反応性が HEFA の方が高かったことによって、HEFA の方が広い条件で安定燃焼が可能となったのだと考えられる。蒸発速度が HEFA の方が大きいことは上記で示されている。また、反応速度に関しては、Allen らが従来ジェット燃料とバイオジェット燃料について、低温領域における燃料蒸気と空気の混合気の着火遅れ時間を、急速圧縮機を用いた実験で調査している。従来ジェット燃料と比較して、バイオジェット燃料の方が着火遅れ時間が短いという結果が得られている。さらにその差は大きく、約 2 倍から 3 倍程度の差があり、より反応にかかる時間が短いバイオジェット燃料の方が、燃焼安定性には有利であると考えられる。このような違いが生じた理由としては、Allen らは反応性の比較的低い芳香族の含有量の差によるものだと考察している。

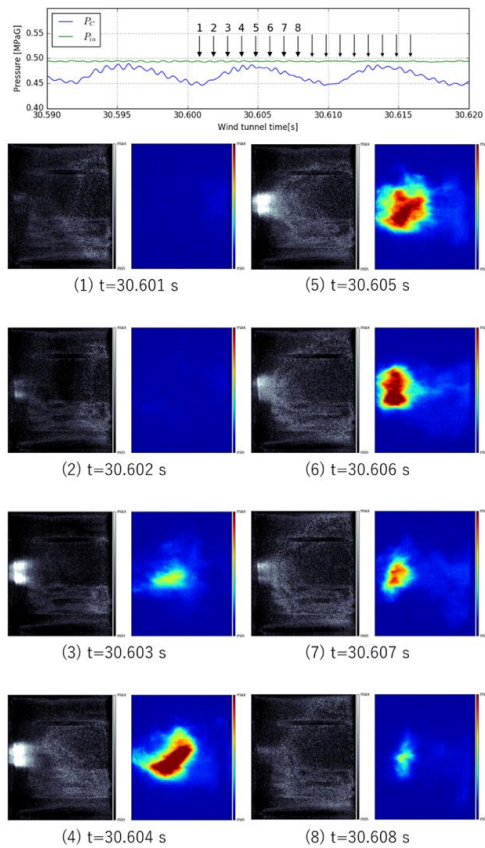


図 11 Jet A-1(当量比 0.52)燃焼振動の様子

図 11 に当量比 0.52 における Jet A-1 の圧力履歴およびその周波数解析結果を示す。点火用水素トーチを消してから、しばらくして周期的な燃焼振動が発生し、その後火炎が吹き消えている。この周期的な燃焼振動についての周波数解析を行った結果、主要なピークは燃焼器のヘルムホルツ振動数とおおむね一致した。そのため、ここで生じた燃焼振動はヘルムホルツ振動と関連するものである可能性がある。

図 12 に同じ条件での噴霧と CH 化学発光の変化の様子を示す。燃焼圧の振動により、噴射器の差圧が変化し、空気流量・流速が変化していると考えられる。その結果、燃焼器に供給される噴霧量に変動が生じ、発熱量の変動を引き起こしている。差圧が最大となる、燃焼圧の谷のタイミングで、空気流速の増大に伴い、燃焼器内に供給された燃料噴霧が、蒸発・化学反応を経て熱発生が生じた時期が、ちょうど燃焼圧の山のタイミングとなっており、熱発生がヘルムホルツ振動を励起する形となっている。これは、燃料噴霧の蒸発・反応にかかる時間が振動を励起する長さであったことが原因であると考えられる。一方で HEFA では、このような周期的な振動は確認されなかった。これは、蒸発・化学反応にかかる時間が Jet A-1 より短かったことで、熱発生がヘルムホルツ振動を励起するタイミングで生じなかったことが原因であると考えられる。

JAXA 調布における実環境燃焼試験装置を使用し、RQL バーナーを使用してケロシンと HEFA を燃焼させ、AFR を変化させながら排気測定を実施した。その結果を図 12 および 13 に示す。図 12 より、ケロシンと HEFA バイオジェット燃料で、NO_x, CO, THC の排出にはほとんど差が無いことが分かる。図 13 には、発生したすす(PM: Particulate Matter)の重量密度と個数密度の比較を示す。図 13 の右図では、PM 個数密度の比較を示す。個数密度は重量密度ほどではないが、こちらも HEFA バイオジェット燃料を用いると発生が抑制されていることが分かる。

5. 主な発表論文等

[学会発表] (計 4 件)

- ① 飯田裕明, 安藤詩音, 石川裕睦, 藤原仁志, 中谷辰爾, 津江光洋, 「大気圧下での旋回流動場における Jet-A1/バイオ燃料噴霧燃焼挙動のモード解析」, 2017 年 11 月, 第 55 回燃焼シンポジウム.
- ② 石川裕睦, Patrick Salman, 安藤詩音, 中谷辰爾, 津江光洋, 藤原仁志, 「ダブルスワールバーナによる高温高圧場におけるケロシン系燃料の燃焼挙動に関する研究」, 第 46 回日本ガスタービン学会定期講演会, 2018 年 10 月.
- ③ Keiichi Okai, Hitoshi Fujiwara, Seiji Yoshida, Takeshi Yamamoto and Kazuo Shimodaira, The Effect of the Fuel Change from Petroleum Kerosene to HEFA Alternative Jet Fuel on the Concentric Lean-burn Burner for an Aero-engine, 2018 AIAA Aerospace Sciences Meeting, 2018 年 1 月.

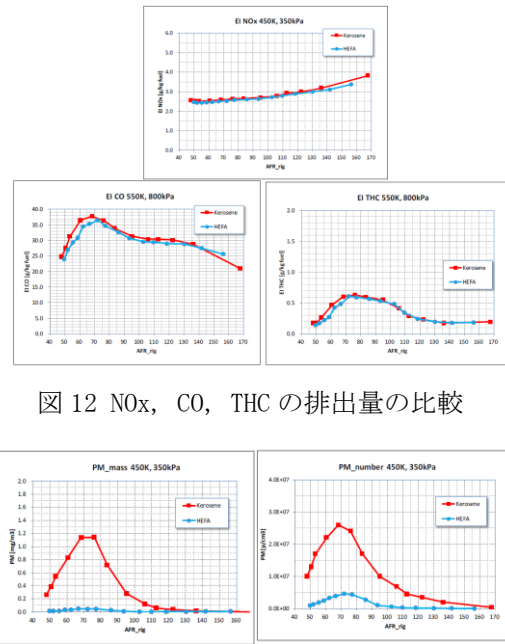


図 12 NO_x, CO, THC の排出量の比較

図 13 PM の排出量の比較

- ④ Keiichi Okai, Hitoshi Fujiwara, Mitsumasa Makida and Kazuo Shimodaira, The effect of the fuel change from petroleum kerosene to HEFA alternative jet fuel on the number of PM emission of an RQL gas turbine combustor, AIAA SciTech Forum, 2019年1月.

[図書] (計1件)

- ① Hitoshi Fujiwara, Shinji Nakaya, Mitsuhiro Tsue, Keiichi Okai, Emissions from HEFA Fueled Gas Turbine Combustors, Chapter 16 in Innovations in Sustainable Energy and Cleaner Environment (Green Energy and Technology) edited by Ashwani K. Gupta, Ashoke De, Suresh K. Aggarwal, Abhijit Kushari, Akshai Runchal, Springer, Berlin, 2019年9月

6. 研究組織

(1) 研究分担者

研究分担者氏名：中谷 辰爾

ローマ字氏名：Shinji Nakaya

所属研究機関名：東京大学

部局名：大学院工学系研究科

職名：准教授

研究者番号 (8桁)：00382234

研究分担者氏名：藤原 仁志

ローマ字氏名：Hitoshi Fujiwara

所属研究機関名：国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構

部局名：航空技術部門

職名：

主任研究開発員

研究者番号 (8桁)：40358453

※科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。