

令和 4 年 5 月 16 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2019～2021

課題番号：19H02341

研究課題名(和文) ジェットエンジン燃焼器におけるバイオジェット燃料の不安定燃焼メカニズムの解明

研究課題名(英文) Analysis on combustion instability of jet engine combustor for bio-jet fuel

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) 14,820,000円

研究成果の概要(和文)：ジェットエンジンモデル燃焼器を用いることで、室温大気圧、高温高圧および実エンジン環境における燃焼試験を実施した。化石燃料であるジェット燃料やケロシン、およびバイオ合成燃料である HEFA、FT-SPK の燃料性状や反応特性の違いに着目し、燃焼器内の CH* 化学発光挙動を高速で観察することで、燃焼不安定性挙動をデータ駆動型アプローチによるスパース学習手法を応用して明らかにした。バイオ合成燃料の安定燃焼限界や希薄吹き飛び限界はジェット燃料より低く、蒸発特性や化学反応特性によるとした。また、他の環境負荷物質の濃度はあまり変わらないがバイオ燃料では粒子状物質の生成低減されることを示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

航空機においても二酸化炭素排出を低減する必要があるが、重力に逆らい飛行するためには推重比が重要なパラメータとなり、フル電動化では長距離を飛行することは困難である。持続可能な航空燃料(SAF)などの使用が有望視されているが、これらの成分の違いによる排気特性や不安定燃焼ダイナミクスの理解はこれらの使用拡大の上で必須である。本研究では高速度カメラの燃焼画像から振動燃焼挙動の特徴量抽出をデータドリブン手法により行い、そのダイナミクスの理解に必要な知見を得た。また、従来燃料との成分の違いが及ぼす影響を燃焼不安定性、吹き飛び限界および排気特性に及ぼす影響を明らかにし、これらの応用に必要な知見を得た。

研究成果の概要(英文)：Combustion behaviors of a jet fuel, kerosene and synthesized paraffine fuels were investigated in model jet engine combustors under the atmospheric pressure and temperature condition, a high pressure and high temperature condition, and an actual engine condition. Focused on physical parameters and chemical characteristics of the fuels, combustion instability mechanisms were clarified with a data-driven approach using high-speed measurements of CH* chemiluminescence. Results indicated that the stable combustion and lean blow-out limits for HEFA was located at lower equivalence ratio than those of the jet fuel. It was due to the better evaporation and combustion characteristics. Although the undesired pollutant emissions except for PM were almost the same, the amount of PM emission for bio-fuels were greatly reduced compared to the jet fuel.

研究分野：航空宇宙工学

キーワード：ジェットエンジン エアブラストアトマイザー バイオ合成燃料 ジェット燃料 排気 振動燃焼 機械学習

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年以降の航空機からの温室効果ガスの排出を制限することが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いる。国内でもバイオ燃料の混合が試みられている。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、食用油等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。Bio-SPK燃料はジェット燃料を用いる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、安定、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を実現するためには、燃料の物理特性や化学特性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、JetA-1およびバイオ合成ジェット燃料であるHEFA(Hydrotreated Ester and Fatty Acid)、バイオマスからフィッシュアトロプッシュ法(FT法)により生成されたFT-SPK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不安定性に着目して実験を実施し、機械学習を応用した特徴量抽出手法を用いることで燃焼不安定性を調べる。

3. 研究の方法

3.1 東京大学における大気圧室温および高温高圧燃焼試験

本研究では、東京大学の風洞試験設備を利用し、大気圧試験および高温高圧燃焼試験を実施した。使用した燃料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あり、図1に示す。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を用いて行った。本研究では主流温度600K、燃焼圧力0.5MPaで実験を実施した。燃焼不安定性の挙動を調査するために、ハイスピードカメラ(Vision Research: V2511)を用いたCH*化学発光測定を行なった。撮影速度は4000fps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。CH*化学発光計測のため、レンズには干渉フィルタ(中心波長430nm, 半値幅15nm)を用いた。高速度カメラによって得られた時系列CH*化学発光画像に対して、Gaborフィルタを用いたスパース動的モード分解手法を用いて解析を行った。さらに、燃料による微粒化性能の違いを調査するために、噴霧炎中の燃料噴霧粒径の計測を行った。本試験では粒径計測手法としてILIDS(レーザー干渉画像法: Interferometric Laser Imaging Droplet Sizing)を用いた。

3.2 JAXAにおける実温実圧燃焼試験

JAXAではJAXAで開発されたリーンバーン燃焼器を用いて、高温高圧燃焼試験設備においてケロシン(灯油)およびFT-SPKの燃焼試験を実施し、燃料の違いによる燃焼振動の強さや排気特性の違いを調べた。図2に本研究で使用した旋回予混合燃焼器を示す。本試験は実エンジン環境模擬試験を実施するため、圧力容器内に燃焼器を組込み、燃焼試験を実施した。また、排気中のNO_x、CO、THCおよびPMの濃度を測定した。同時に振動圧力センサを用いて圧力振動の計測を行った。

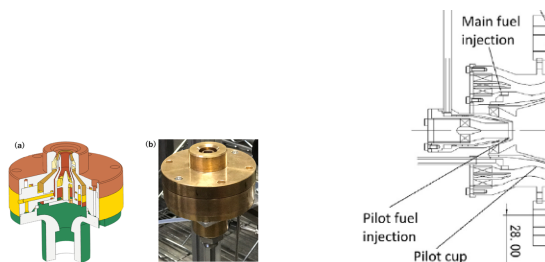


図1 ダブルスワールバーナ 図2 高温高圧燃焼試験装置

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。燃料の違いによる希薄条件での燃焼特性を調べるため、各燃料種における吹き消え当量比を求めた。大気圧条件での実験では、燃焼が60秒以上続いたケースを安定とし途中で吹き消えたケースを吹き消えと判定した。また、この実験を空気流量や当量比を変えながら実施し、空気流量ごとにロジスティック回帰を用いて吹き消え当量比を算出した。図3に吹き消え当量比を示す。空気流量に関わらず、JetA-1に比べてHEFAの方が吹き消え当量比は低くなる結果が得られた。次に、ILIDSを使用して、大気圧環境下にお

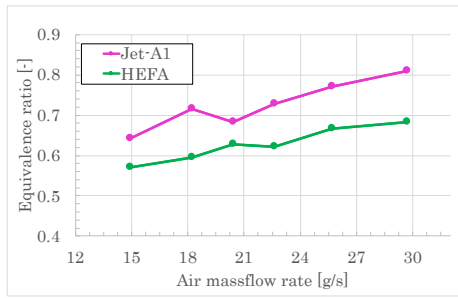


図3 大気圧条件での吹き消え当量比

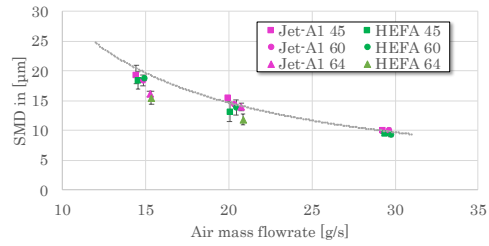
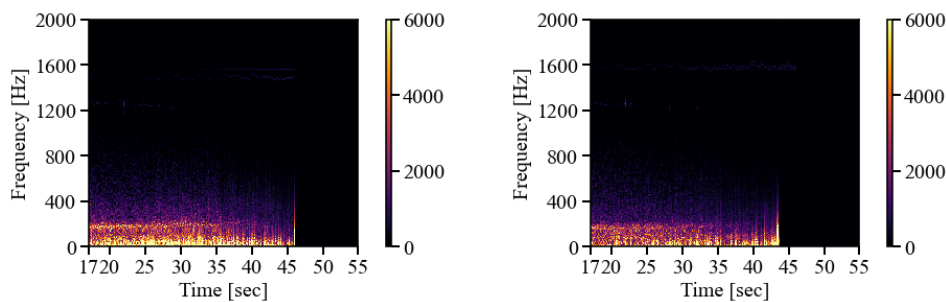


図4 燃焼場での SMD

いて JetA-1 および HEFA の液滴粒径分布を調査し、これらの燃料種の微粒化性能を調べた。凍結流(非反応流)に対して測定を実施し、空気流量は 14.9, 18.6, 22.6, 29.7g/s とした。同時に、アウタースワールの角度を 45°, 60°, 64°とした。今回の結果において、燃料種やスワール角度による明確な微粒化特性の違いは見られなかった。これは、微粒化に影響する物性値である表面張力や粘性係数が今回使用した 2 つの燃料種間で違いがわずかであり、噴霧形成に及ぼす影響は小さいことによると考えられる。図 4 に燃焼場における ILIDS により得られた粒径分布から求めた SMD の値を示す。図の灰色の線は非反応流における結果の平均値を示している。燃焼場では HEFA の方が JetA-1 に比べてほぼ同じかわずかに低い SMD を示す傾向が見られる。燃焼場における高温雰囲気のため、粘性係数や表面張力が小さくなることや、燃料液滴の蒸発によることと考えられる。スワール角度が 64°の場合、他のスワール角度に比べて SMD が小さくなる傾向が見られる。スワール角度 64°の場合はより燃焼器内壁付近にも火炎が存在するため、インジェクタ出口付近の温度が高くなるためであったと考えられる。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も実施した。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した。実験結果は HEFA の蒸発速度が JetA-1 より大きいことを示している。蒸発特性は HEFA の方が良いことがわかる。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。

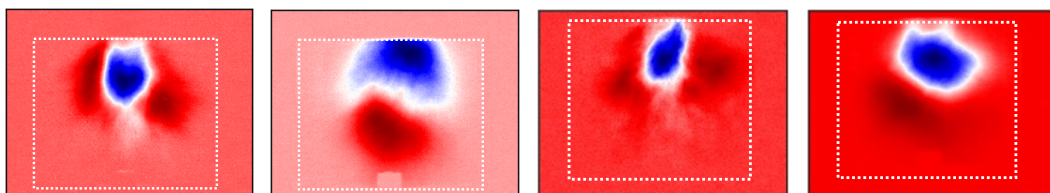
次に高温高圧燃焼試験において、流量調整バルブをステッピングモーターにより駆動し、連続的に当量比を $\phi = 0.8$ から希薄限界の方向に変化させた。燃焼が振動し吹き消える時の当量比を求めた。ローパスフィルターにより 2Hz 以上の振動を取り除き、ウィンドウサイズ 0.5s の移動平均を計算し、吹き飛び限界当量比を求めた。吹き消え当量比は JetA-1 で $\phi = 0.537$ 、HEFA で $\phi = 0.512$ となった。本研究では HEFA の方が吹き消え当量比が小さい。上記の通り蒸発特性は HEFA の方が良いことが示されている。



(a) JetA-1

(b) HEFA

図5 スパース DMD スペクトログラム



(a) JetA-1, $\phi = 0.75$, 196Hz (b) JetA-1, $\phi = 0.70$, 20Hz (c) HEFA, $\phi = 0.71$, 185Hz (d) HEFA, $\phi = 0.65$, 16Hz

図6 スパース DMD により抽出された代表モード

これらの当量比変化に合わせて、時系列 CH*化学発光画像に対して Gabor フィルタを用いたスパース動的モード分解(スパース DMD)を実施した。図 5 に JetA-1 および HEFA の当量比変化時のスペクトログラムを示す。両燃料とも 1200Hz 付近と 200Hz 付近にピークが見られ、当量比の減少と共にピークが薄くなり消滅する。ここで、1200Hz のピークは燃焼器の気柱振動のモードのピークであり、200Hz 付近のピークはスワールによって形成される旋回流のモードのピークである。当量比ごとに CH*化学発光画像 0.1 秒毎に窓関数を適用し、スパース DMD によって支配的な振動モードを求めた。図 6 に代表モードを示す。JetA-1 では $\phi = 0.75$ で、HEFA では $\phi = 0.71$ において形状や周波数から旋回流の存在を示唆するモードが抽出された。一方で JetA-1 に対し $\phi = 0.70$ 、HEFA に対しは $\phi = 0.65$ ではそのようなモードは抽出されず、浮き上がり火炎の高さが周期的に変化するモードが抽出された。JetA-1 と HEFA の共に当量比が低下すること安定的に旋回流で保たれるモードから浮き上がり高さが不安定に振動するモードへと遷移することが確認された。この不安定モードが発生する当量比は JetA-1 が約 0.620、HEFA の場合が約 0.608 であり、HEFA の方が低いことがわかる。これは、燃焼器がスワールバーナーであるため燃料の蒸発時間や混合時間などの影響が小さく、JetA-1 と HEFA の反応性の違いが強く表れたためであると考えられる。また、化学的な特性に着目すると、ASTM D7170 を用いてセタン価を測定した結果を文献から調べると、JetA-1 は 49.35 で HEFA は 65.85 であり、HEFA のセタン価は高く着火しやすいと考えられる。芳香族成分をほとんど含まない HEFA においては着火特性が良いと考えられる。トルエンと正ヘプタンの混合燃料では、トルエンの量が多くなるにつれて着火遅れが大きくなる報告があり、これらの成分の影響が示唆される。蒸発特性だけでなく、芳香族を含まないため化学反応特性も HEFA の方が良く、希薄限界や安定燃焼限界が低当量比側に広がったと考えられる。

JAXA 調布における実環境燃焼試験装置を使用し、旋回予混合燃焼器を使用してケロシンと FT-SPK を燃焼させ、AFR を変化させながら光学測定及び排気測定を実施した。図 7、8 に本試験で行った排気測定の結果を示す。

低負荷時には pilot のみを用いている。図では空燃比 (AFR) 50 以上の領域に相当する。50 以下の空燃比 (AFR) では、高負荷時に対応し pilot と main 両方のバーナを用いている。図 7 に示す排気ガス中の NO_x, THC, CO の排出量をケロシンと FT-SPK で比較すると、低負荷・高負荷いずれの領域でも NO_x, THC, CO の排出量は 2 つの燃料でほぼ同等であることがわかる。一方、図 8 に示される発生したすす (PM : Particular Matter) の重量密度と個数密度は、高負荷時はいずれの燃料でも排出量に差がなく非常に少ないのに対し、低負荷時にはケロシンよりも FT-SPK の方が小さくなることが分かった。図 8 上図の低負荷時 PM 重量密度の比較から、FT-SPK を用いることで重量密度では 1/10 程度まで粒子状物質の発生が抑制されていることが分かる。

この低負荷時に、ケロシン燃料で不安定挙動を示す領域があり、両燃料で燃焼器内圧力を計測して評価した。また燃焼振動が確認された低負荷条件試験では CH*の化学発光の光学測定を行った。図 9 に、ケロシンと FT-SPK の同一入口条件 (圧力・温度) の AFR (空燃比) が近い領域での圧力時間変動を示す。ケロシンで大きな振幅となっているのに対して相対的に FT-SPK の場合は振動抑制されていることがわかる。図 10 には、図 9 の両燃料条件での FFT 分析結果を示す。700Hz 付近にピークを持ち振幅はケロシンの方が大きいことがわかる。本燃焼器燃焼実験

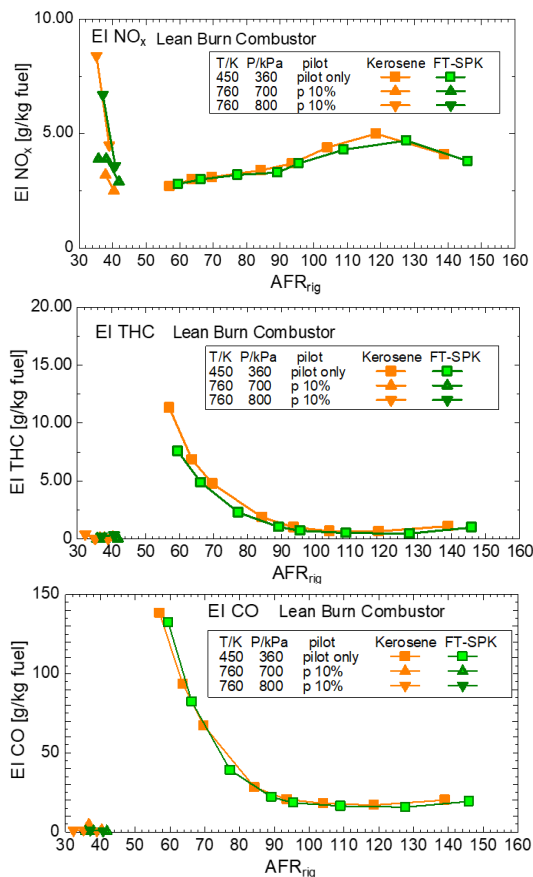


図 7 NO_x, CO, THC の排出量の比較

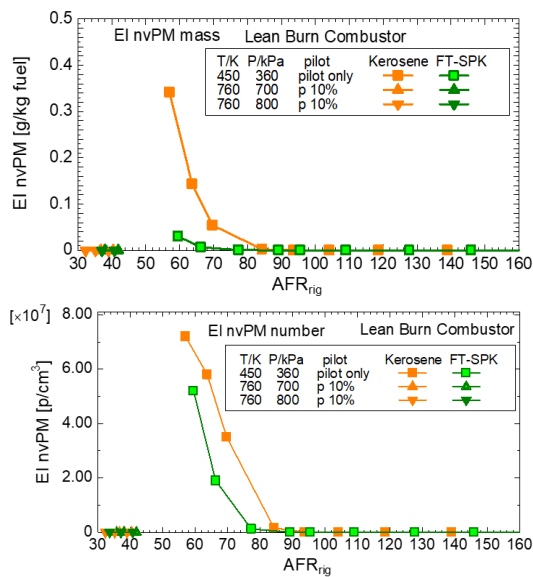


図 8 PM の排出量の比較

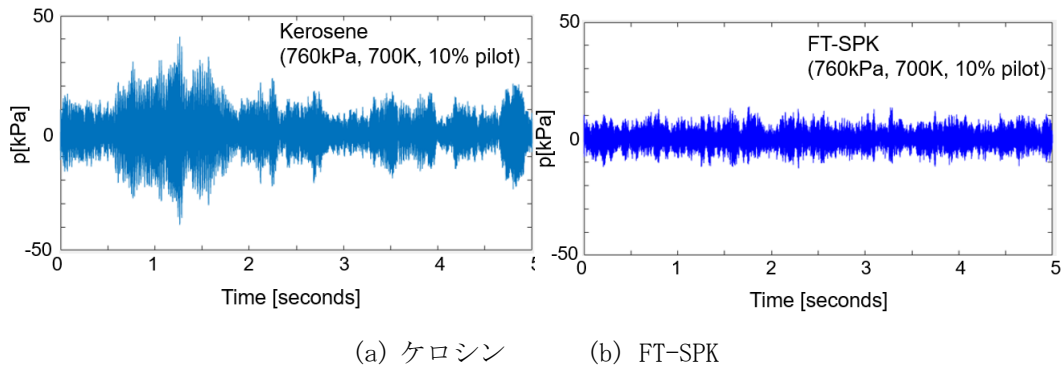


図9 ケロシンと FT-SPK の燃焼時燃焼室内圧力時間変動

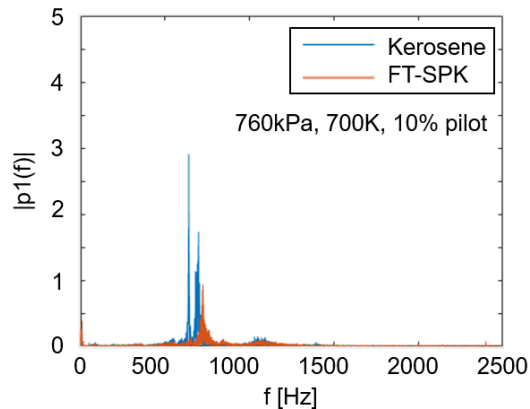


図10 図9の条件における FFT 結果

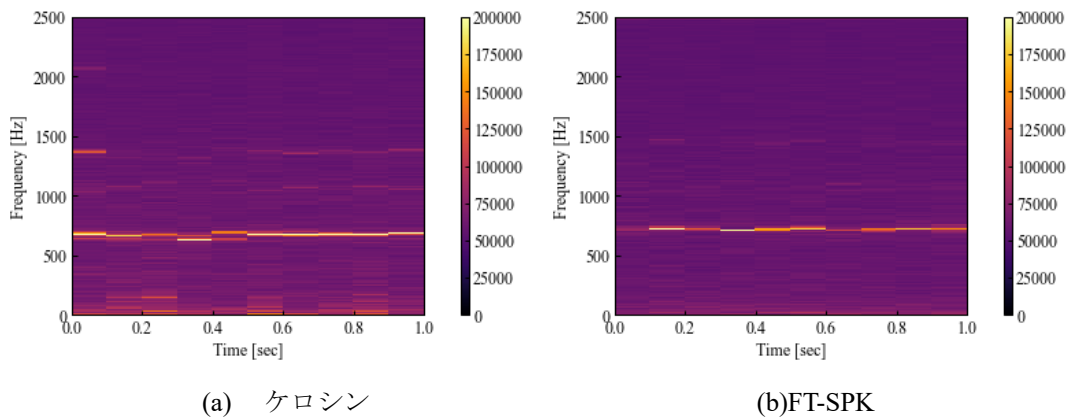


図11 スパース DMD スペクトログラム

において動的モード分解により図5と同様にモード分解を行いスペクトログラムを作成した結果を図11に示す。どちらも700Hz付近にピークが見られるが、これは燃焼器の固有振動数である。ケロシンの結果では1400Hzや2100Hz付近に高調波のピークが薄く表れるほか、100Hz以下の低周波帯域にも薄いピークが見られる。一方FT-SPKの結果では700Hzのピークがケロシンに比べてわずかに薄くなっているほか、高調波や低周波帯域のピークが見られなくなっている。このようにバイオ燃料であるFT-SPKを用いることで旋回予混合燃焼器での燃焼振動が抑制されたことが分かる。

以上のことから、ジェット燃料に用いられるBio-SPK燃料においては、JetA-1やケロシンと比較して粒子状物質の生成が少なく、安定燃焼限界および希薄燃焼限界がより希薄側に拡大されることが示された。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1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 Shion Ando, Yuxiang Wu, Shinji Nakaya, Mitsuhiro Tsue	4. 巻 214
2. 論文標題 Droplet combustion behavior of oxidatively degraded methyl laurate and methyl oleate in microgravity	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Combustion and Flame	6. 最初と最後の頁 199-210
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.combustflame.2019.12.042	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3件（うち招待講演 0件/うち国際学会 2件）

1. 発表者名 岡村一世, 中谷辰爾, 津江光洋, 岡井敬一, 藤原仁志
2. 発表標題 火炎CH*発光による希薄燃焼不安定性に対する当量比の影響
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 Salman, P., Ishikawa, H., Nakaya, S., Tsue, M.
2. 発表標題 Evaporation Rate Measurement of n-Decane by ILIDS in a Turbulent Swirling Flow
3. 学会等名 12th Asia-Pacific Conference on Combustion (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Okai, K., Fujiwara, H., Makida, M., Shimodaira, K.
2. 発表標題 The effect of the fuel change from petroleum kerosene to HEFA alternative jet fuel on the emission of an RQL gas turbine combustor under high pressure and high temperature conditions
3. 学会等名 AIAA SciTech Forum 2020 (国際学会)
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

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
研究 分担者	中谷 辰爾 (Nakaya Shinji) (00382234)	東京大学・大学院工学系研究科(工学部)・准教授 (12601)	
研究 分担者	藤原 仁志 (Hitoshi Fujiwara) (40358453)	国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構・航空技術部門・主任研究開発員 (82645)	
研究 分担者	岡井 敬一 (Keiichi Okai) (00358516)	国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構・航空技術部門・主任研究開発員 (82645)	

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
---------	---------