

令和 3 年 6 月 24 日現在

機関番号：17102

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2018～2020

課題番号：18K03986

研究課題名(和文) 燃料噴霧の自着火の素過程モデル構築

研究課題名(英文) Elementary Process of Spontaneous Ignition of Fuel Spray

研究代表者

森上 修 (Moriue, Osamu)

九州大学・工学研究院・教授

研究者番号：70363124

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)：燃料噴霧の自着火の素過程として液滴群を対象とした、直径数10ミクロンオーダーの微小液滴の高温雰囲気中における蒸発特性が粗大液滴のそれに従うことを実験的に確認され、発光を伴わない冷炎の発生が液滴径履歴より確認可能であることが示された。また、直径の異なる複数粗大液滴の高温空気中の自着火の実験により、直径の小さい方の単一液滴の場合よりも複数液滴の方が系全体の自着火が促進される条件が存在することが実験的に初めて確認されるなど、液滴間干渉の自着火への影響が液滴径、液滴間隔、雰囲気条件の諸条件に複雑に依存することが示された。上記が数値計算を用いて説明された。

研究成果の学術的意義や社会的意義

噴霧燃焼の基礎研究として単一もしくは複数の燃料液滴を扱う研究はこれまで多く行われてきたが、実験時の空間的・時間的分解能の確保のために直径1mm程度の粗大液滴が対象とされた。本研究では実用噴霧と同サイズの数10ミクロンの液滴の蒸発特性が実験的に観測され、従来の理論の適用が可能であることが確認された。また、複数液滴における液滴間干渉については同一径であることがこれまで前提であったが、液滴径の違いの影響が調査され、概して小さい液滴の存在が系全体の現象に対して支配的であるが、着火限界近傍では異なることが確認された。噴霧燃焼のモデル化において、粒度分布の評価が重要であることを示唆する。

研究成果の概要(英文)：As an elementary process of spontaneous ignition of fuel spray, fuel droplet clouds were studied. It was experimentally shown that evaporation rate of fine droplets with the diameters of about dozens of microns is comparable to that of large droplets, and that detection of cool-flame appearance around such fine droplets is possible through the observation of droplet-diameter history. Droplet interaction was studied through the experiments of spontaneous ignition of a large-droplet pair whose diameters are different. The effect of droplet interaction on spontaneous ignition depends complicatedly on the conditions such as droplet diameter, inter-droplet distance and ambient gas condition, which was explained with the help of numerical calculation.

研究分野：燃焼工学

キーワード：燃焼 噴霧 自着火

1. 研究開始当初の背景

燃料噴霧の自着火による燃焼開始過程のメカニズムの解明は熱機関の熱効率向上、逆火の防止、排気中の汚染物質の低減にとって重要である。燃料噴霧の自着火の基礎研究として、これまで噴霧を構成する最小要素である単一液滴、もしくは複数液滴に関する研究が行われてきた。これにより、燃料の部分的な酸化である冷炎が発生してある程度の遅れの後に熱炎が発生するという二段点火が生じる、など多くの知見が得られてきたが、実験においては観察時に十分な空間・時間分解能を確保するために直径 1mm 程度の粗大液滴が対象とされてきた。しかしながら実際の噴霧を構成する液滴は直径数 10 μ m 程度の微小液滴であり、粗大液滴とは物理的な輸送に関する特性時間のオーダーが異なる。しかしながら、微小液滴の実験的な観察が欠落していた。また、複数液滴の研究により液滴間干渉の影響が調査されてきた。研究代表者らにより、冷炎の発生前は液滴間の相互冷却という負の影響が大きく、冷炎発生後は燃料蒸気の湧き出しが増えたという正の影響が大きいことなどが確認されてきたが、複数液滴においては同一径であることが前提であった。しかしながら、実際の噴霧を構成する液滴群には粒度分布があり、径の不均一性が液滴間干渉に及ぼす影響については不明であった。

2. 研究の目的

①微小液滴の実験的観測を行い、粗大液滴について得られた知見が微小液滴に適用可能か確認すること、さらに、②異なる液滴径からなる複数液滴の自着火を支配する因子を調査すること、が目的である。

3. 研究の方法

①について、微小液滴の蒸発の実験装置を新規に製作した。ピエゾ式のインクジェット法によるインジェクタから独立した微小液滴が生成される。雰囲気気をガラス管内に流し、その中に微小液滴を射出し、雰囲気気との相対速度が無視できる状態にする。ガラス管を外部から加熱し、液滴の蒸発を観測する。観測には高速度カメラ、長距離拡大レンズを利用する。液滴径の計測のために液滴を拡大して撮影するため、同一の液滴の蒸発履歴を追うことは不可能である。よって、撮影位置を上流から下流に徐々に移動して、異なる液滴の蒸発履歴を追った。②については、液滴近傍の高分解能の観察を要するため、従来通り粗大液滴を対象とした。製作済の燃料液滴自着火装置を用い、異なる液滴径の二液滴について自着火実験を行った。条件によっては、自然対流の影響を取り除くため、落下実験施設(北海道宇宙科学技術創生センターの 50m 落下塔、微小重力時間 2.5s)を利用し微小重力実験を行った。冷炎・熱炎の観測にはレーザ干渉計を用いた。また、自ら開発した数値計算コードを利用して、実験的観測が困難な現象の解析を行った。

4. 研究成果

実験においては、実用燃料に近い物理的特性、化学的特性を持つ純成分燃料として、燃料を正デカンに固定した。微小液滴の蒸発実験から、図 1 に例として示されるような蒸発履歴が得られた。過去の粗大液滴の実験との比較から妥当性が確認されている数値計算モデルと比較したところ、概ね一致し、微小液滴の蒸発特性が粗大液滴のそれに従うことが確認された。数値計算モデルには含まれない表面張力の影響、気液界面の非平衡性を考慮する必要性が懸念されていたが、その必要はないと判断された。また、冷炎は視認できる発光をほとんど伴わず、特に微小液滴についてはその発生の確認が困難であるが、冷炎発生後は蒸発速度が上昇するため、液滴径の時間履歴を詳細に追うことにより、冷炎の発生が検知可能であることが示された。

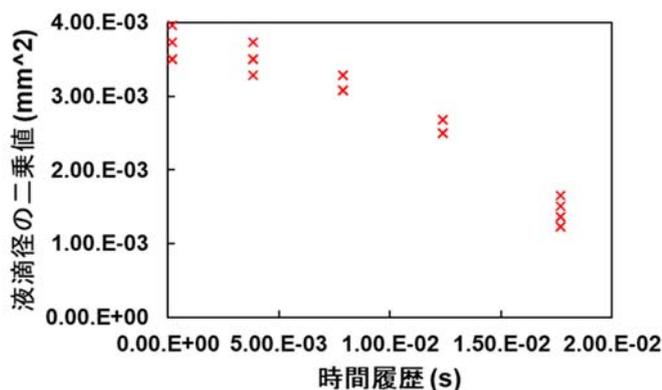


図 1 微小液滴の液滴径の二乗値の時間履歴
(正デカン, 初期直径 60 μ m, 雰囲気気 520K)

異なる径の二液滴の自着火実験において、大きい方の液滴を液滴 (大)、小さい方の液滴を液滴 (小) と記述する。液滴 (大) の径を固定し、液滴 (小) の径を変じたところ、多くの条件において、冷炎、熱炎ともに点火遅れは液滴 (小) の径の減少とともに減少した。(図 2) さらには、液滴 (小) の径の減少とともにやがて液滴 (大) と同じ径の単一液滴の点火遅れ (図 2) における横軸 0 のデータ) を下回る。これは、多くの条件において、小さい液滴の存在が系全体の現

象に対して支配的であることを示す。一般に、単一液滴の自着火において、液滴径の減少とともに冷炎の点火遅れ、熱炎の点火遅れはともに減少する。これは、実験的にも数値計算上も確認されており、燃料の蒸発に要する物理的な遅れが減少するためである。このことから、異なる径の二液滴の自着火実験において確認された上記傾向は理解し易い。しかしながら、液滴間隔、雰囲気条件を様々に変じたところ、液滴（小）と同じ径の単一液滴の点火遅れよりも二液滴の方が点火遅れが短くなる条件も確認された。これは、解析的にはその可能性が示唆されていたが、実験的に確認されたのは初めてである。単一液滴の自着火において、ある程度まで液滴径を減少させると、冷炎、熱炎の発生限界が現れる。これは簡単に言うと点火遅れよりも液滴の蒸発寿命が短くなってしまうためであるが、化学反応の特性時間に対する流れの特性時間の比であるダムケラー数によって説明される。すなわち、液滴径の減少とともに流れの特性時間が短くなるが、化学反応の特性時間は変わらないため、ダムケラー数が小さくなり過ぎ着火に至らない。異なる径の二液滴の自着火実験において確認された上記の例外的傾向は、このような点火限界近傍の条件に相当すると思われる。すなわち、このような条件では、液滴（小）単一の場合に比べて、液滴（大）の存在により二液滴間に淀み点が生じ、燃料蒸気の液滴表面から無限遠方への散逸が緩和されて、燃料が化学反応が活発な領域に留まる時間が増えることによるとと思われる。このように、液滴間干渉の自着火への影響は液滴径、液滴間隔、雰囲気条件の諸条件に複雑に依存する。以上より、噴霧燃焼のモデル化においては、粒度分布の評価が重要であると思われる。

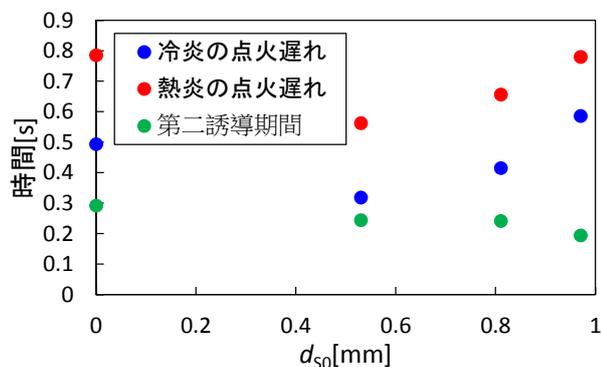


図2 異なる径の二液滴の点火遅れ
 (正デカン, 液滴 (大) の直径 1mm, 雰囲気 0.3MPa, 600K, 液滴間隔 4mm, 微小重力場, 横軸は液滴 (小) の直径)

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 2件）

1. 著者名 Mitsuaki TANABE, Masanori SAITO, Yusuke SUGANUMA, Masato MIKAMI, Masao KIKUCHI, Yuko INATOMI, Osamu MORIUE and Hiroshi NOMURA	4. 巻 37/ 4
2. 論文標題 Scope of PHOENIX-2 Sounding Rocket Experiment, "Cool Flame Dynamics in Multi-droplet Ignition"	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 International Journal of Microgravity Science and Application	6. 最初と最後の頁 370401-1~9
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.15011/jasma.37.4.370401	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 菅沼祐介, 齊藤允教, 後藤芳正, 山村宜之, 山本信, 野倉正樹, 三上真人, 菊池政雄, 稲富裕光, 森上修, 野村浩司, 田辺光昭	4. 巻 37/ 4
2. 論文標題 観測ロケットを利用した燃料液滴冷炎燃焼実験の装置開発	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 International Journal of Microgravity Science and Application	6. 最初と最後の頁 370403-1~5
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.15011/jasma.37.4.370403	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

〔学会発表〕 計7件（うち招待講演 0件/うち国際学会 1件）

1. 発表者名 田中 大也, 安藤 詩音, 森上 修
2. 発表標題 初期液滴径の異なる二液滴系における冷炎発生挙動に関する数値計算
3. 学会等名 第58回燃焼シンポジウム
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 安藤 詩音, 森上 修
2. 発表標題 カウス過程による補間モーメントを用いた炭化水素燃料の0次元すす生成計算
3. 学会等名 第58回燃焼シンポジウム
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Satoshi TAKAHASHI, Hiroya TANAKA, Hiromu NAKAMURA, Osamu MORIUE
2. 発表標題 Numerical study on evaporation and low-temperature oxidization of a droplet pair with different diameters
3. 学会等名 20th Annual Conference on Liquid Atomization and Spray Systems - Asia (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 高橋 聡史, 森上修, 田中大也, 中村大夢
2. 発表標題 直径の異なる二液滴の蒸発および冷炎発生の数値計算
3. 学会等名 日本マイクログラビティ応用学会 第31回学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 中村大夢, 木原一穂, 田中森悟, 森上修
2. 発表標題 直径の異なる二液滴の自発点火における液滴間干渉
3. 学会等名 第57回燃焼シンポジウム
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 高橋 聡史, 森上 修
2. 発表標題 直径の異なる二液滴の蒸発の数値計算
3. 学会等名 第56回燃焼シンポジウム
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 中村 大夢, 高橋 聡史, 森上 修
2. 発表標題 直径の異なる二液滴の自発点火に液滴間干渉が及ぼす影響
3. 学会等名 第56回燃焼シンポジウム
4. 発表年 2018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

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