

令和 6 年 6 月 18 日現在

機関番号：17102

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2021～2023

課題番号：21K03899

研究課題名（和文）燃料液滴群の自着火の支配因子の抽出

研究課題名（英文）Elucidation of Controlling Factors of Spontaneous Ignition of Fuel Droplet Cloud

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） 3,300,000円

研究成果の概要（和文）：燃料噴霧の高温雰囲気中の自着火の基礎研究として、実際の噴霧を構成する液滴と同等の直径数10ミクロンオーダーの単一微小液滴、微小液滴から直径1mmオーダーの粗大液滴で構成される二液滴、の自着火特性の実験ならびに数値解析による調査を行った。では窒素中の蒸発実験で概ね数値計算と合う蒸発速度を得たが、空気中の燃焼実験では冷炎の自着火遅れに数値計算と隔たりがあった。ではこれまで冷炎は液滴群の外側の高温部でのみ発生することが確認されていたが、条件によっては液滴間で発生することなどが確認された。これらが、従来の反応場の温度、濃度だけでなく、局所ダムケラ 数を支配因子に加えて数値解析により説明された。

研究成果の学術的意義や社会的意義

単一微小液滴について、冷炎の自着火遅れに実験と数値解析で隔たりが見られたが、特に逆火や過早着火を予測する数値解析においては、冷炎発生限界近傍における化学反応モデルの信頼性の改良が要されることが示唆される。冷炎を発生する低温酸化反応は温度依存性が高く、粗大二液滴の実験においては、従来二液滴の外側の高温部でのみ冷炎が発生することが確認されていたが、数値計算上初期液滴径を減少させると液滴間で冷炎が発生し得ることが確認された。反応場の局所的な温度、濃度の履歴が自着火の有無、場所を支配する因子として扱われてきたが、局所ダムケラ 数も支配因子として重要であることを示している。

研究成果の概要（英文）：A fundamental study on spontaneous ignition of fuel spray in hot ambient gas was carried out. Ignition behavior of an isolated fine fuel droplet whose diameter is about dozens of microns was experimentally and numerically studied. Evaporation rates obtained by the experiments were almost comparable with those of numerical analysis, while ignition delays of cool flame were not comparable. Ignition behavior of a fuel droplet pair was also experimentally and numerically studied. In most conditions cool flame appears from the outside of the pair. However, in several conditions cool flame appears between the droplets. The behavior above was explained by numerical analysis considering Damkohler number as one of controlling factors.

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

液体燃料を使用する燃焼器において燃料は直径数  $10\mu\text{m}$  程度の微小液滴から構成される噴霧として燃焼場に供給される。燃料と酸化剤の混合は燃焼器の効率や汚染排出物抑制を大きく左右するため、燃料噴霧の蒸発、高温雰囲気との混合、自着火の過程は工学的に重要である。その素過程として、直径  $1\text{mm}$  程度の粗大燃料液滴を対象とする実験的研究が行われてきた。結果、予混合気と同様に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。また、研究代表者らにより液滴の自着火の数値計算モデルが開発され、その妥当性が粗大液滴の実験との比較で確認された。一方、微小液滴では物理的な輸送の特性時間と化学反応の特性時間のバランスが異なると思われる。この観点から研究代表者らは微小液滴の蒸発を観測可能な実験装置を作成した。また、液滴間干渉の効果の研究として、二つの粗大液滴の自着火の研究が研究代表者らによって行われ、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を明らかにした。その傾向は反応場の局所的な温度、濃度の履歴で説明されたが、液滴径の減少とともに物理的な輸送の特性時間が短くなることについての影響が十分に議論されていなかった。

### 2. 研究の目的

研究の目的は、粗大液滴との比較から研鑽された数値計算モデルが微小液滴についても適用可能か確認すること、複数液滴の自着火を支配する因子を明らかにすることである。

### 3. 研究の方法

開発済の微小液滴自着火の実験装置 (図 1) を用い、自着火が生じると予想される条件で実験を行い、数値計算と比較する。雰囲気が流れるガラス管内にピエゾ式のインジェクタから微小液滴を吐出する。その下流でガラス管を外部より急速に加熱し、高速度カメラ、長距離拡大レンズで液滴の挙動を確認する。冷炎の発生は蒸発速度の変化から検知する。また、現有の別装置により二つの粗大液滴の自着火実験を行う。さらに、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う。

### 4. 研究成果

他の関連研究との比較が容易となるように燃料は正デカンとした。正デカンの揮発性はおよそ灯油に相当する。微小液滴自着火の実験装置について、改良により、室温から高温へのなるべくステップワイズな温度上昇と高温部の  $5\text{K}$  以内の均一性を達成した。また、録画、データ処理の自動化を導入し、時間分解能の改善が行われた。図 2 に 1 例を示す。大気圧、雰囲気温度  $670\text{K}$  で、雰囲気は窒素もしくは空気とした。窒素中蒸発実験結果から  $d^2$ - $t$  則をよく満たしていることが確認される。 $d^2$ - $t$  の減少率が蒸発速度に相当するが、概ね数値解析と合致していた。一方、空気中の実験においてもほぼ同様の履歴となっている。数値解析予測では  $0.05\text{s}$  ほどで冷炎が発生するが、実験では液滴寿命全域において窒素中と蒸発速度にほぼ違いがなく、冷炎が発生していないことを示している。以上より、冷炎発生限界近傍における化学反応モデルの信頼性の改良が要されることが示唆される。

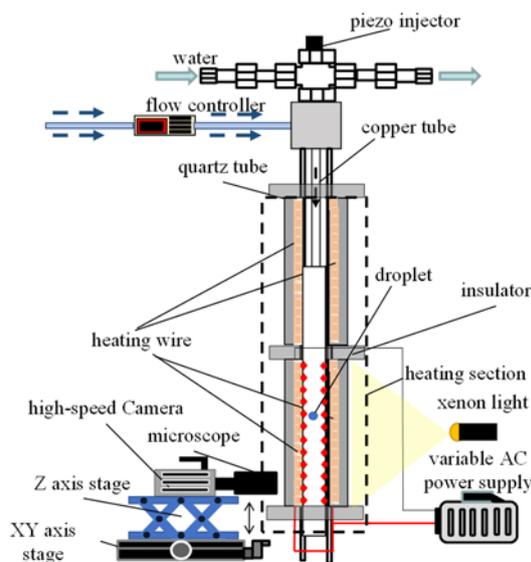


図 1 微小液滴自着火実験装置

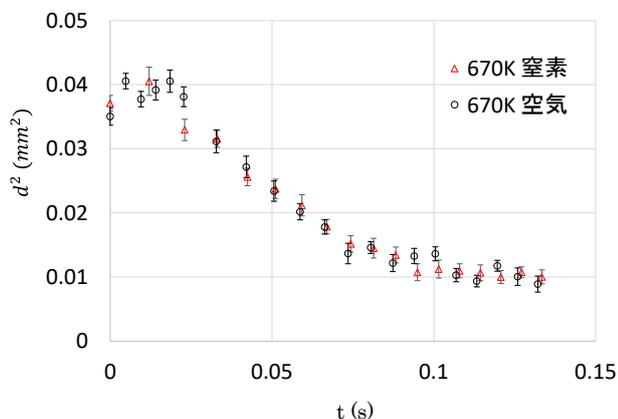


図 2 高温雰囲気中の微小液滴の直径二乗の履歴 (実験, 正デカン, 大気圧,  $670\text{K}$ )

粗大二液滴の実験においては、冷炎もしくは熱炎による最初の熱発生までは、液滴間干渉は自着火を抑制する方向に主に働くことが観測されていたが、径の異なる複数粗大液滴の自着火実験では熱炎発生限界近傍の雰囲気温度では液滴間干渉が自着火を促進する方向に働くことが確認されている。これは一方の液滴径が小さく輸送の特性時間が短いこと、ならびに雰囲気温度が熱炎発生限界近傍で化学反応の特性時間が長いことによりダムケラー数が非常に小さい条件であったためと考えられるが、この傾向が2次元数値解析において局所ダムケラー数を定量的に評価することにより解釈された。また、これまで冷炎は二液滴の外側の高温部でのみ発生することが実験上も数値解析上も確認されていたが、条件によっては液滴間で発生することが数値解析において確認された(図3)。図において、横軸は二液滴の対称軸であり、縦軸は対称面に相当する。原点は二液滴の中間点である。従来の計算より初期液滴径を減少し、雰囲気温度を下げた状態で観測されているが、どちらもダムケラー数を減少させる方向であり、やはりダムケラー数の影響により説明された。すなわち、二液滴の間によどみ面が存在するため、単一液滴の場合と比べてダムケラー数の低下が抑えられる。場のダムケラー数が小さ過ぎる条件では、この影響が二液滴の相互冷却の効果を上回る。以上、従来は反応場の局所的な温度、濃度の履歴で自着火の有無、場所が議論されてきたが、局所ダムケラー数も支配因子として重要であることが示された。

また、単一粗大液滴の自着火への酸素濃度の影響も広い温度・圧力領域において系統的に実験的に調査された。熱炎の発生下限温度は酸素濃度に大きく依存することが確認された。雰囲気が空気なら1~2気圧程度の低圧では冷炎から熱炎への二段点火が生じる温度領域は存在しないが、酸素濃度の増加により同温度領域が現れる。すなわち、今後の研究において、高圧下が難しい実験装置でも二段点火の観測が可能なが示された。

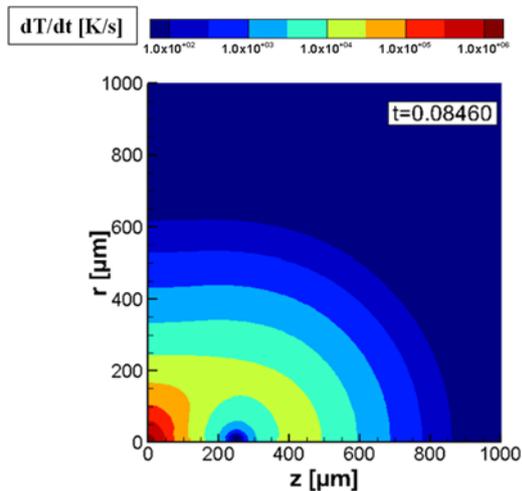


図3 同一径の二液滴周囲の温度上昇率(数値解析, 正デカン, 3MPa, 600K, 初期液滴径 100 $\mu\text{m}$ , 液滴中心間隔 100 $\mu\text{m}$ , 時刻 0.0846s)

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, Kei Shimada, Daijiro Eto, Osamu Morieue	4. 巻 33
2. 論文標題 Experimental Investigation of Cool Flame Behavior of Isolated n-Decane/Ethanol Droplet under Microgravity	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Microgravity Science and Technology	6. 最初と最後の頁 Article no. 54
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1007/s12217-021-09893-5	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8件（うち招待講演 0件/うち国際学会 3件）

1. 発表者名 田辺 光昭, 齊藤 允教, 菅沼 祐介, 野村 浩司, 高橋 晶世, 高橋 賢一, 森上 修, 三上 真人, 後藤 芳正, 山村 宜之, 野倉 正樹, 山本 信, Eigenbrod Christian, 石川 毅彦, 菊池 政雄, 嶋田 徹, 稲富 裕光
2. 発表標題 複数液滴の冷炎ダイナミクスに関する観測ロケット実験"PHOENIX-2", 2022年度進捗報告
3. 学会等名 第37回宇宙環境利用シンポジウム
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 佐々木 明輝, 稲森 彰人, 小山 賢晋, 安藤 詩音, 森上 修
2. 発表標題 正デカン液滴の自発点火に及ぼす雰囲気酸素濃度の影響
3. 学会等名 第60回燃焼シンポジウム
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 小山 賢晋, 洪田 秀, 安藤 詩音, 森上 修
2. 発表標題 燃料液滴対の蒸発の数値計算と局所ダムケラー数を用いた自発点火の解析
3. 学会等名 第60回燃焼シンポジウム
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Shion Ando, Kenshin Koyama, Hiroya Tanaka, Osamu Moriue
2. 発表標題 Evaluation of Cool Flame Characteristics of Droplet Pairs with Two-dimensional Calculation
3. 学会等名 International Conference on Liquid Atomization & Spray Systems 2021 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 小山 賢晋, 安藤 詩音, 森上 修
2. 発表標題 初期径の異なるデカン液滴対の冷炎・二段点火発生挙動におよぼす雰囲気および液滴間距離の影響
3. 学会等名 第59回燃焼シンポジウム
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 仲宗根 大生, 佐々木 明輝, 安藤 詩音, 森上 修
2. 発表標題 正デカン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30回微粒化シンポジウム
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Shion Ando, Kenshin Koyama, Takuto Tamura, Osamu Moriue
2. 発表標題 Effects of Pressure on Cool Flame Characteristics of an Isolated n-Decane and Ethanol Blended Droplet
3. 学会等名 13th Asia-Pacific Conference on Combustion 2021 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Shion Ando, Kenshin Koyama, Osamu Moriue
2. 発表標題 Numerical Investigation on the Effect of Droplet Interaction on Cool-flame Characteristics of n-Decane Droplet Pairs
3. 学会等名 33rd International Symposium on Space Technology and Science (国際学会)
4. 発表年 2022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