

令和 6 年 6 月 17 日現在

機関番号：24405

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2020～2023

課題番号：20K04922

研究課題名（和文）自発着火する微細燃料液滴群内部におけるPM生成過程

研究課題名（英文）PM formation processes inside autoignited fine fuel-droplet clusters

研究代表者

瀬川 大資（Segawa, Daisuke）

大阪公立大学・大学院工学研究科 教授

研究者番号：00264804

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）：微細燃料液滴群および単一燃料液滴が高温空気雰囲気中に導入されると、大気圧下においても冷炎発生と推測される温度上昇が液滴近傍で確認され、その温度上昇遅れは雰囲気温度の上昇とともに短くなった。ただし、熱炎が発生して自発着火する直前の高温雰囲気中では、遅れ時間は雰囲気温度の上昇とともに長くなる傾向が見られた。微細燃料液滴群および単一燃料液滴が高温空気雰囲気中で自発着火すると、その直後に液滴群の内外または液滴周囲にすすが生成され、燃焼期間の後半にすすが徐々に減少することが確認され、液滴間隔が液滴直径の6倍程度ですす量は極大となった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

自動車のPM、PN規制が強化されるなど、燃焼によるすす生成への対策が強く求められている。そのため、多様な状況下でのすす生成挙動の詳細が明らかにされ、すす生成の数値シミュレーション手法も大幅に発展したが、低い計算負荷で精度良く計算できるようなすす生成の簡略反応モデルが必要とされている。本研究の実験結果は、そのような簡略反応モデルの開発のための検証データになるものと期待される。

研究成果の概要（英文）：A temperature rise which was assumed to be due to cool flame was observed near droplet even at atmospheric pressure, when clusters of fine fuel droplets and single fuel droplets were introduced into high-temperature air ambience. Delay of the temperature rise decreased with increasing the ambient air temperature, while the delay turned to increase just below the air temperature for autoignition with hot flame appearance. Soot was formed inside and outside of the clusters and around the droplets just after the ignition, when the clusters and the droplets were introduced into high-temperature air to autoignite. Amount of the soot was observed to decrease gradually in the latter half of the burning time. The amount reached maximum when droplet spacing was around six-times of the initial droplet diameter.

研究分野：航空宇宙工学関連

キーワード：液滴群燃焼 自発着火 PM 冷炎 すす

様式 C-19、F-19-1 (共通)

1. 研究開始当初の背景

自動車の PM, PN 規制が強化されるなど、燃焼によるすす生成への対策が強く求められる状況下で、すす生成に関連する研究も大きく進展している。多分散性の高い噴霧火炎そのものを対象とする実験研究では、光学計測手法の大幅な発展も相まって、多様な状況下でのすす生成挙動の詳細が明らかにされた。またそれに対応するように、すす生成の数値シミュレーション手法も大幅に発展した。しかしながら、低い計算負荷で精度良く計算できるようなすす生成の簡略反応モデルが必要とされており、そのような簡略反応モデルの開発にあたっては、検証のための実験データが必要と考えられる。

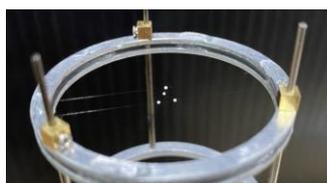
2. 研究の目的

実験研究により相互干渉を含む微細燃料液滴群の燃焼形態の把握を目指し、提案者らのこれまでの手法と知見を基礎として、窒素酸化物とともにその低減が求められている PM の生成挙動に及ぼす燃料直径、燃料間隔、雰囲気温度の影響を明らかにすることで、噴霧燃焼機構の解明に寄与する知見の取得を目指す。全体がほぼ球対称となるよう微細燃料液滴が等間隔に配置された燃料液滴群を作製し、高温空気雰囲気中に導入して蒸発、自発着火、燃焼させる。そして、その一連の過程を光学的に観測し、自発着火挙動、燃料液滴群の内外に生成されるすすの挙動などを明らかにする。

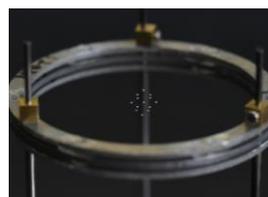
3. 研究の方法

(1) 微細燃料液滴群および単一燃料液滴の自発着火挙動

燃料液滴群または単一燃料液滴を高温空気雰囲気中に導入して、液滴近傍の温度変化を測定し、冷炎の発生や自発着火に及ぼす雰囲気温度と初期液滴直径の影響を調べた。実験装置は、高温雰囲気を実現する電気炉内部の燃焼部、燃料液滴群の保持と燃焼部への移動を行う燃料供給部、光学系、制御系などで構成される。装置の作動は PLC で制御し、燃料液滴群を燃料供給部に取り付けて装置を作動させると、燃料供給部が移動して液滴群が燃焼部に入り、実験を行うことができる。超々ジュラルミン製の燃料保持輪の上面に、SiC の極細線 (線径 14 μm) を交差させて固定し、その交点に燃料液滴を保持させて、燃料液滴群を実現した。燃料には、室温よりやや高温下で融解する n-エイコサンを利用した。凝固した燃料粒子を加熱融解して極細線の交点に懸垂し、所定の粒子直径や粒子間隔の燃料粒子群を用意した (図 1)。燃料粒子は、加熱された電気炉内に導入されると、直後に融解して燃料液滴となる。液滴近傍の温度測定には、露出型温接点の K 型熱電対 (素線径 100 μm) を使用した。燃料保持輪と同様な保持輪に熱電対の素線を絶縁して固定することで、温接点を所定の位置に配置し、温度変化をデータロガーに記録した。また、燃料液滴の挙動を、電気炉下方に設置したミラーを介して、ビデオカメラで撮影、記録した。燃料液滴の数 N は 1 または 4、初期直径 d_0 は 0.35~0.75 mm、液滴間隔 s は 3~8 とした。また、電気炉の設定温度 $T_{\text{炉}}$ は 673~973 K とした。



液滴数 4



液滴数 13

図 1 微細燃料液滴群の例

(2) 低温酸化反応を含む反応モデルによる混合気着火遅れの数値解析

オープンソースの反応解析ソフト Cantera (version 2.6.0) を利用して、0 次元の反応器で断熱、圧力一定として初期温度を設定し、反応の時間変化について計算を行った。計算に使用した PC の計算負荷を考慮して、燃料としては n-ヘプタンを採用し、酸化剤は空気として、反応モデルには CRECK modeling Group (Politecnico di Milano, Italy) の簡略化反応モデル n-heptane mechanism (version 1410, October 2014) を利用した。圧力は 0.1 MPa として、初期温度は 640~1180 K、当量比は 0.5~3.0 の範囲で計算を行った。

(3) 微細燃料液滴群の内外および単一燃料液滴の周囲におけるすす生成挙動

燃料液滴群または単一燃料液滴を高温空気雰囲気中に導入して自発着火させ、着火後に液滴群内外または液滴周囲に生成されるすすの影画像を観察し、すす生成に及ぼす雰囲気温度と初期液滴直径の影響を調べた。実験装置の構成は、自発着火挙動の実験で使用したものと同様である。すすの影画像は、電気炉下方に設置したミラーを介して、LED 光またはレーザー光を電気炉内部に導入し、電気炉上面に設置したガラス窓からビデオカメラで撮影、記録した (図 2)。そして、すすの影画像から、次式で定義される透過光減衰率 A を算出した。

$$A = -\log_{10}(I/I_0)$$

ただし、 I_0 は入射光強度、 I は透過光強度である。燃料液滴の数 N は1, 4または13, 初期直径 d_0 は0.3~0.79 mm, 液滴間隔 s は2~6とした。また、電気炉の設定温度 T_{fur} は930~1000 Kとした。



図2 すすの影画像の例

4. 研究成果

(1) 微細燃料液滴群および単一燃料液滴の自発着火挙動

単一燃料液滴（単滴）を高温雰囲気中に導入したときに、液滴近傍で測定された温度変化の例を、図3に示す。熱電対の温接点は、燃料液滴の約2.2 mm下方に配置した。実験は地上で行った。電気炉内の所定の位置への燃料液滴の移動が完了した時点をも、時刻0とした。燃料液滴なしで測定した温度変化と比較して、温度の上昇が認められ、また液滴が蒸発しつくしたあたりで温度が低下に転じた。この結果が既報[1]の温度変化と類似していること、液滴が蒸発しつくすと温度が低下したことから、冷炎が発生して温度が上昇したと推測される。このような冷炎に及ぼす初期液滴直径と電気炉温度の影響を、図4に示す。初期液滴直径が最も大きい場合と電気炉温度が最も高い場合には熱炎が発生したが、それ以外の広い範囲では冷炎発生と推測される温度上昇が測定された。

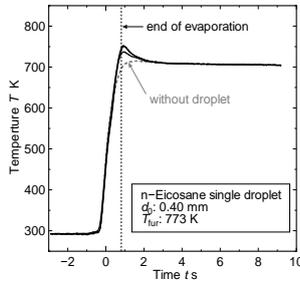


図3 液滴近傍の温度変化（単滴）

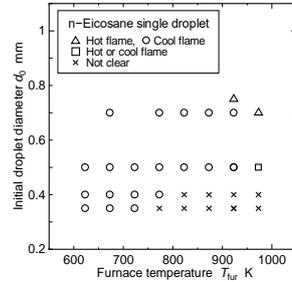


図4 冷炎発生条件（単滴）

冷炎発生（温度上昇）の遅れ時間に及ぼす電気炉温度の影響を、図5に示す。初期液滴直径が小さくなり、また電気炉温度が高くなると、冷炎発生は早くなった。後者については既報[2]とほぼ一致している。しかしながら、900 Kを超える電気炉温度では、温度が高くなるとともに冷炎発生がやや遅れる傾向が見られた。測定された最高温度に及ぼす電気炉温度の影響を、図6に示す。測定された最高温度は冷炎温度に対応すると考えられるが、既報[1]のような安定した冷炎温度を測定することはできなかった。

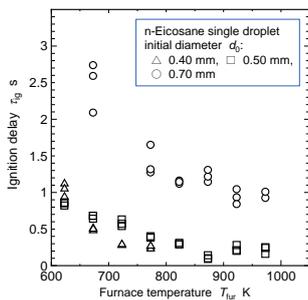


図5 冷炎発生遅れ時間（単滴）

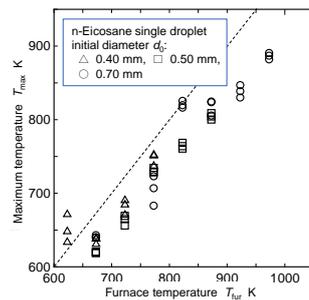


図6 測定された最高温度（単滴）

微小重力下における単滴近傍で測定された温度変化の例を、図7に示す。実験装置の制約から、1秒程度の実験時間となったが、冷炎発生と推測される温度上昇が認められた。冷炎発生の遅れ時間に及ぼす電気炉温度の影響を地上実験での結果と比較したものを、図8に示す。微小重力下では冷炎発生が早くなり、また電気炉温度が高くなると冷炎発生が遅れる傾向が見られた。

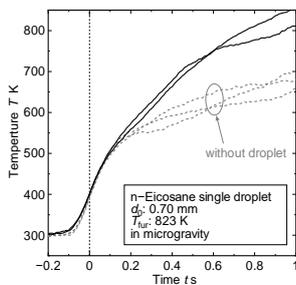


図7 単滴近傍の温度変化(微小重力)

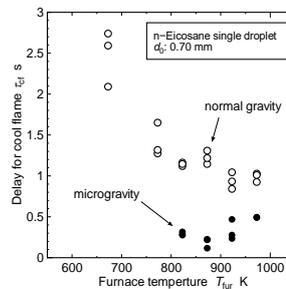


図8 単滴の冷炎発生遅れ(微小重力)

液滴数 N を 4 とし、各液滴を正四面体の頂点に配置した液滴群の、冷炎発生が遅れ時間に及ぼす電気炉温度の影響を、図 9 に示す。ただし、熱電対の温接点は正四面体の重心に配置した。比較のため、液滴の総体積を 4 液滴と同一とした単滴の結果(温接点は 2.3 mm 下方)も示している。実験は地上で行った。液滴群の場合においても、電気炉温度が高くなると冷炎発生が遅れる傾向が見られた。冷炎発生が遅れ時間に及ぼす液滴間隔の影響を、図 10 に示す。液滴間隔が小さくなると冷炎発生が早くなる傾向が見られたが、総体積が同一の単滴では冷炎発生が遅くなったことから、実験範囲外の液滴間隔 3 mm 未満において、冷炎発生が遅れ時間が最短になると推測される。

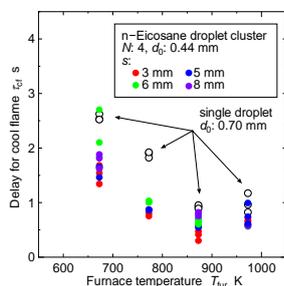


図9 液滴群の冷炎発生遅れと電気炉温度

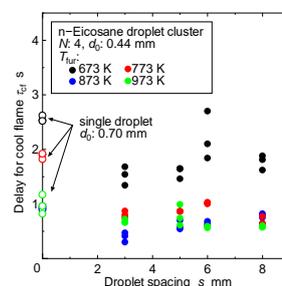


図10 液滴群の冷炎発生遅れと液滴間隔

(2) 低温酸化反応を含む反応モデルによる混合気着火遅れの数値解析

初期温度を 640 K としたときの温度変化を、当量比 0.5~3.0 のいくつかの場合について、図 11 に示す。計算した範囲の当量比においては、いずれの場合にも 800 K あたりで温度上昇が一旦停滞してから燃焼温度まで上昇する、二段着火が確認された。この結果は、大気圧下においても冷炎が発生する可能性があることを示唆している。当量比の影響については、燃焼温度は量論付近で最高となり、一般的な燃焼の特徴を表す結果となったが、冷炎温度に相当すると考えられる、温度上昇が一旦停滞したときの温度は、当量比の上昇とともに単調に上昇した。また、冷炎発生に対応する最初の温度上昇の遅れ時間と、熱炎発生に対応する二度目の温度上昇の遅れ時間は、いずれも当量比の上昇とともに短くなった。

冷炎発生および熱炎発生が遅れ時間(着火遅れ)に及ぼす初期温度の影響を、図 12 に示す。ただし、温度上昇の停滞が確認された場合には、最初の温度上昇の遅れ時間を冷炎の着火遅れ、二度目の温度上昇の遅れ時間を熱炎の着火遅れとみなし、温度上昇の停滞が確認されなかった場合には、温度上昇の遅れ時間を熱炎の着火遅れとみなしている。また、図の横軸は、初期温度の逆数を 1000 倍した値を示している。横軸が 1.37 付近からより小さくなると、つまり初期温度が 730 K あたりより高くなると、冷炎の着火遅れは確認されなくなった。そして、その温度範囲では温度の上昇とともに熱炎の着火遅れは短くなり、着火遅れに及ぼす当量比の影響が小さくなった。また、冷炎の着火遅れが確認された温度範囲は、熱炎の着火遅れについての負の温度係数領域となっており、温度の低下とともに、冷炎の着火遅れは長くなったが熱炎の着火遅れは短くなった。

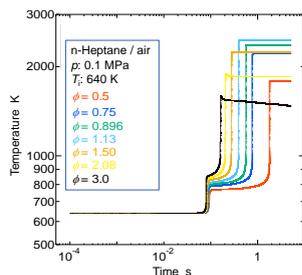


図11 二段着火の温度変化

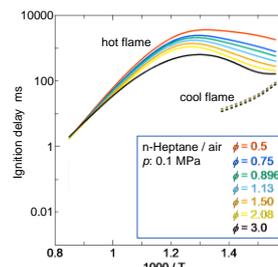


図12 冷炎と熱炎の着火遅れ

(3) 微細燃料液滴群の内外および単一燃料液滴の周囲におけるすす生成挙動

液滴数 N を 4 として各液滴を正四面体の頂点に配置した液滴群の、自発着火から燃焼終了までの時間（燃焼時間）に及ぼす液滴間隔の影響を、図 13 に示す。比較のため、液滴の総体積を 4 液滴と同一とした単滴の結果も示している。実験は地上で行った。全体としては、液滴間隔が大きくなると燃焼時間が短くなる傾向が見られたが、液滴群では大きな違いが見られなかった。透過光減衰率 A の時間変化の例を、図 14 に示す。燃焼時間（図 13）との比較から、着火直後にすすが急速に生成され、燃焼期間の後半にすすが徐々に減少したと考えられる。

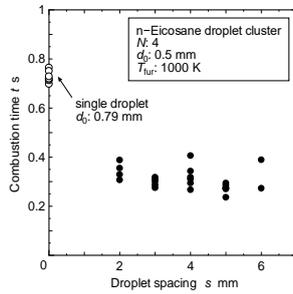


図 13 液滴群の燃焼時間

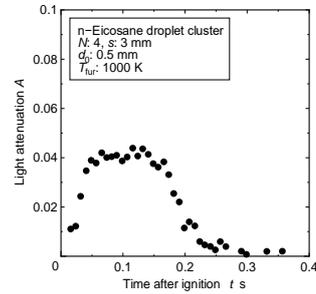


図 14 透過光減衰率の時間変化

すす生成領域の投影面積より算出された等価直径に及ぼす液滴間隔の影響を、図 15 に示す。液滴間隔 5~6 mm で等価直径が急減するのは、すすの生成領域が液滴群全体の内外から各液滴の周囲へと遷移することによるものと推測される。透過光減衰率 A に及ぼす液滴間隔の影響を、図 16 に示す。結果にはばらつきが見られるが、液滴間隔 3 mm あたり、つまり液滴直径の 6 倍程度で透過光減衰率が極大になると推測される。

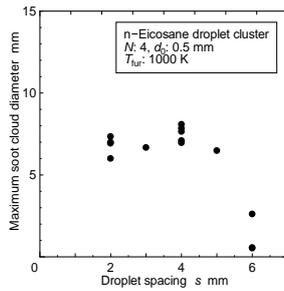


図 15 すす生成領域の等価直径

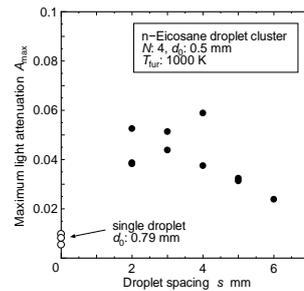


図 16 透過光減衰率と液滴間隔

液滴数 N を 13 として各液滴を六方最密構造に配置した液滴群の、着火遅れに及ぼす電気炉温度の影響を、図 17 に示す。実験は地上で行った。電気炉温度の上昇とともに、着火遅れは単調に減少した。透過光減衰率が最大となる時期に及ぼす電気炉温度の影響を、図 18 に示す。電気炉温度が高くなるとともに、より遅い時期まですす生成が続いた。

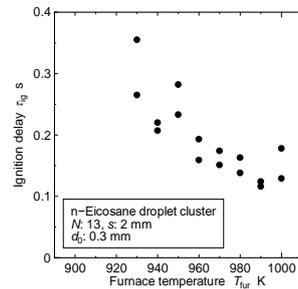


図 17 液滴群の着火遅れと電気炉温度

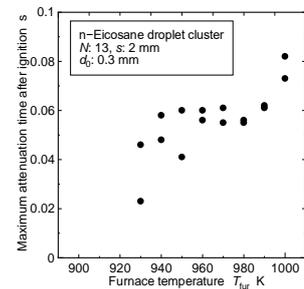


図 18 透過光減衰率の最大時期

引用文献

1. 森上, 日本燃焼学会誌 56: 133-139 (2014).
2. Schnaubelt, S., Moriue, O., Coordes, T., Eigenbrod, C., and Rath, H. J., Proc. Combust. Inst. 28: 953-960 (2000).

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計3件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

| |
|--|
| 1. 発表者名 吉田 圭佑, 金光 宏武, 瀬川 大資, 片岡 秀文 (大阪府立大学) |
| 2. 発表標題 エイコサン単一液滴の自発着火挙動に及ぼす初期液滴直径の影響 |
| 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 吉田 圭佑 (大阪府立大学), 瀬川 大資, 片岡 秀文 |
| 2. 発表標題 エイコサン単一液滴の自発着火挙動に及ぼす雰囲気温度の影響 |
| 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 盆子原 聡美 (大阪府立大学), 瀬川 大資, 片岡 秀文 |
| 2. 発表標題 自発着火する燃料液滴のすす生成挙動の観察 |
| 3. 学会等名 自動車技術会関西支部第37回卒業研究発表講演会 |
| 4. 発表年 2021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 | 片岡 秀文 (Kataoka Hidefumi) (10548241) | 大阪公立大学・大学院工学研究科 ・講師 (24405) | |

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 |
|---------|---------|
|---------|---------|