

通常重力環境における液滴間隔の異なる燃料液滴列に沿った 冷炎燃え広がり挙動の観察

日大生産工(院) ○木暮 優成 日大生産工 菅沼 祐介
日大生産工 野村 浩司

1. 緒言

近年, 地球温暖化や大気汚染の深刻化により, 世界的に環境負荷低減への取り組みが加速している。特にカーボンニュートラルや SDGs の枠組みの下で, 温室効果ガス排出削減が急務とされている。日本においても 2050 年までのカーボンニュートラル実現を目指すとともに, 年間約 11 億トンの温室効果ガス排出量を 2030 年までに 7 億トンへ削減する目標が掲げられており, 各産業分野における対策が求められている。とりわけ運輸部門では全体排出量の約 17% を占めており, 環境負荷低減に向けた燃焼技術の向上が必要である。電気自動車の普及も進みつつあるが, インフラ整備やエネルギー供給などの課題から, 船舶や航空機では依然として化石燃料への依存が続くと見込まれる。したがって, 現時点で広く利用されている内燃機関の燃焼改善による性能向上が求められている。内燃機関の中でも, ディーゼル機関やガスタービンには噴霧燃焼が多く採用されている。噴霧燃焼とは, 液体燃料をインジェクタから霧状に噴射し, 空気との接触面積を増大させて燃焼を促進させる方式であり, 液滴間での火炎伝播と噴霧全体の群燃焼を経ることで安定して燃焼する。しかしながら, 噴霧から群燃焼に至る過程は複雑で未解明な点が多い。特に, 炭化水素系燃料では運転条件によって冷炎から熱炎へと至る二段階燃焼が発生することが知られており, その中間過程で現れる冷炎は後続の熱炎形成に大きな影響を及ぼすと考えられている。したがって, 冷炎の特性解明は燃焼機構理解および燃焼改善に向けた重要な課題である。

冷炎の特性解明を目的とした液滴の燃焼研究は多く行われており, 自発点火の特性について明らかになっている。また, 三上らは, 正デカンの複数液滴における液滴群燃焼実験を行い, 火炎伝播の定義は冷炎の存在を含め拡張すべきことを明らかにした¹⁾。先行研究では, 冷炎

の燃え広がり現象に着目し, 燃料液滴列を用いた強制点火による燃え広がり実験を行ってきた。任意の雰囲気温度下に液滴を挿入し強制点火を行うことで冷炎の燃え広がりを開始させ, 高感度近紫外カメラによりホルムアルデヒドの自発光を観察した。この実験は自然対流を抑制することが可能な微小重力環境で行うことが望ましいが, 装置制約により通常重力下で実施した結果, 燃料蒸気が重力の影響を受け液滴下方へ流れることが確認され, 水平方向に配置した液滴列においては冷炎の燃え広がりが軸対称とはならず, 挙動の解析が困難であった²⁾。そこで本研究では, 液滴列を垂直に配置し重力方向と一致させることで, 燃焼現象が軸対称になるよう変更し, 上方火炎燃え広がり実験を行った。本報では, 液滴間隔が冷炎燃え広がり挙動に及ぼす影響について報告する。

2. 実験装置および方法

実験装置の概要を Fig.1 に示す。装置は, 冷炎点火装置, 燃焼容器, 液滴列支持装置, 液滴生成装置, 液滴列移動装置, 温度制御装置, 光学系, 無線 LAN インターフェース, および電源系統から構成されている。冷炎点火装置は, 点火部および自動出力制御が可能な点火回路から構成される。点火部は, 直径 1.0 mm の銅単芯線に直径 0.10 mm のニッケル線をはんだ付けした構造である。液滴列支持装置は, SUS 製のフレームおよび SiC ファイバから構成される。燃料液滴は直径 14 μm の SiC ファイバを懸垂線として X 字型に張り, その交点に液滴保持用のガラスビーズを設けて保持した。これらの X 字ファイバを任意の間隔に配置することで, 燃料液滴を空間上に一列に並べて支持した。燃料には, 他研究者の実験結果と比較ができるよう n-デカンを使用した。液滴列支持装置に点火装置を固定し, 液滴列移動装置により燃焼容器内に素早く移動させ, 移動完了後に液

Visualization of cool flame spread along a fuel droplet array
with different drop spacing under normal gravity

Yusei KIGURE, Yusuke SUGANUMA and Hiroshi NOMURA

滴を点火させて燃え広がりを開始させた。燃焼容器に液滴列が挿入されてから点火装置が作動するまでの時間を点火作動待ち時間 t_{igw} とし、 t_{igw} は 1.2 s とした。点火線に通電している時間を点火装置作動時間 t_{igo} とし、 t_{igo} は 1.5 s とした。液滴間隔 S は 2 mm, 4 mm の 2 条件とした。初期液滴直径は 0.75 mm とし、点火源となる第一液滴のみ 1.0 mm とした。液滴は重力方向に一致させて複数個並べ、下端の液滴を点火することで上方火炎燃え広がりを発生させた。雰囲気条件として、周囲気体は空気、圧力は大燃焼容器内の雰囲気温度 T_a は 510 K, 523 K の 2 条件とした。初期液滴温度のばらつきによる燃焼現象への影響を小さくするため、液滴生成部における雰囲気温度は 293~302 K とした。液滴直径の計測には、バックリット法を用い、液滴の輪郭を CMOS カメラ（撮影速度 15.1 fps）で撮影した。撮影した画像に自作のプログラムを用いて液滴直径の解析を行った。また、冷炎燃焼時は反応生成物としてホルムアルデヒドが発生する。この自発光をイメージインテンシファイアを用いた高感度近紫外カメラ（撮影速度 19.95 fps）によって観察することで、冷炎の二次元分布を取得した。

3. 実験結果および考察

Fig.2 に、液滴間隔 S が 4 mm、雰囲気温度 T_a が 523 K の条件で得られたバックリット画像を示す。左から、実験開始後 0.52 s, 2.26 s, 5.92 s となっており、2.26 s の画像では点火装置が作動しており、冷炎が発生していると考えられる。これらの液滴の画像から、自作のプログラムを用いて液滴直径を解析し、液滴の直径履歴を算出した。

Fig.3, Fig.5 に液滴間隔 S が 2 mm、雰囲気温度 T_a が 523, 510 K の液滴直径履歴を示す³⁾。Fig.4, Fig.6 に液滴間隔 S が 4 mm、雰囲気温度 T_a が 523, 510 K の液滴直径履歴を示す。図中の実線が点火装置作動開始時刻、図中の点線が冷炎発生時刻を示している。冷炎発生時刻は、液滴直径履歴より間接的に推定しており、蒸発速度定数が $0.3 \text{ mm}^2/\text{s}$ 程度の区間を冷炎が発生しているとし、蒸発期間と冷炎発生区間の交点を冷炎発生時刻と定義した。Fig.3, Fig.5 の第 6 液滴、Fig.4, Fig.6 の第 4 液滴については燃焼容器の内部温度を計測する熱電対と像が重なってしまい、解析は行っていない。Fig.3 と Fig.4 の各液滴位置における冷炎点火時刻を比較してみ

ると Fig.3 の方が、冷炎点火時刻が早いことが分かった。Fig.5 と Fig.6 の各液滴位置における冷炎点火時刻を比較してみると、Fig.5 では第 4 液滴が冷炎点火しているのに対し、Fig.6 では第 3 液滴に冷炎点火しなかった。これは、液滴間隔が増大することによって、可燃性混合気層が次液滴に干渉するまでに時間がかかり、冷炎燃え広がりが促進されにくくなっているためであると考えられる。

Fig.7 に通常重力環境における無次元液滴間隔 S/d_0 と正規化冷炎燃え広がり速度 $V_{\text{cf}}d_0$ の関係を示す。液滴直径履歴から算出した冷炎点火時刻と液滴位置の関係から最小二乗法により冷炎燃え広がり速度 V_{cf} を算出、冷炎燃え広がり速度は複数のデータを用いて平均を算出し、エラーバーと共に図中に示した。液滴間隔 S が 4 mm での平均冷炎燃え広がり速度は約 18.6 mm/s、液滴間隔 S が 2 mm での平均冷炎燃え広がり速度は、25.3 mm/s であった。Fig.8 から通常重力場において無次元液滴間隔の増大に伴い正規化冷炎燃え広がり速度も増大する傾向が示唆された。

Fig.8 に液滴間隔 S が 2 mm、雰囲気温度 T_a が

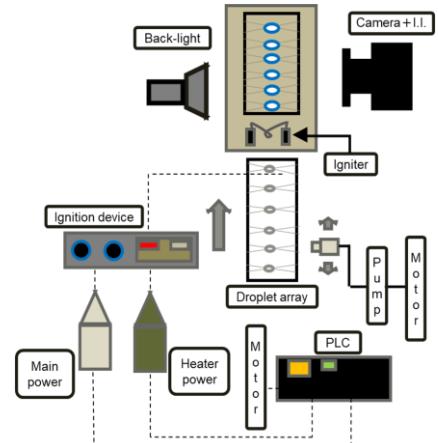


Fig.1 Experimental apparatus.

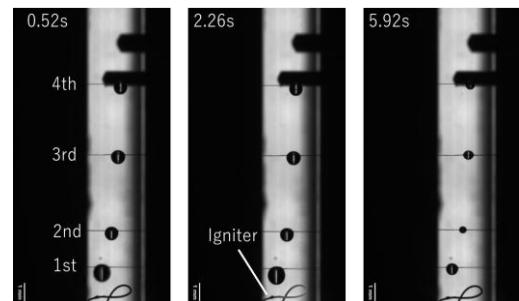


Fig.2 Backlit images during cool flame combustion.

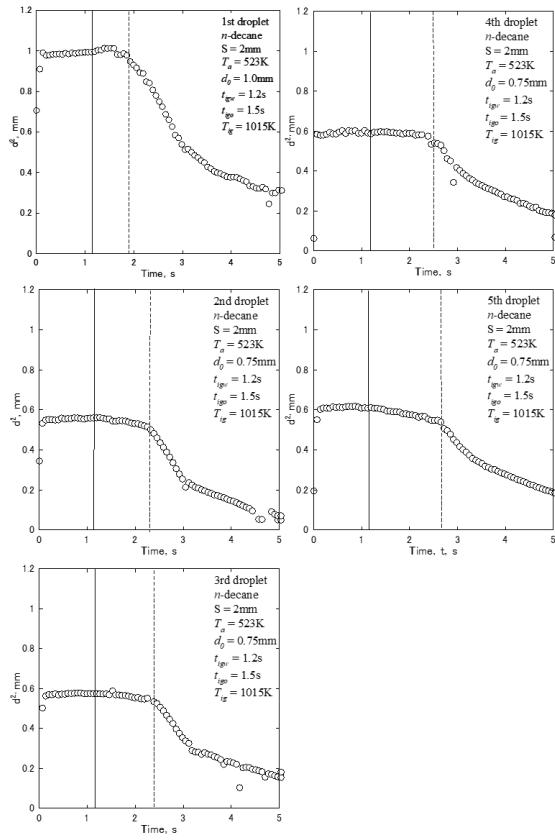


Fig.3 Droplet Diameter History
($S=2$ mm, $T_a=523$ K)

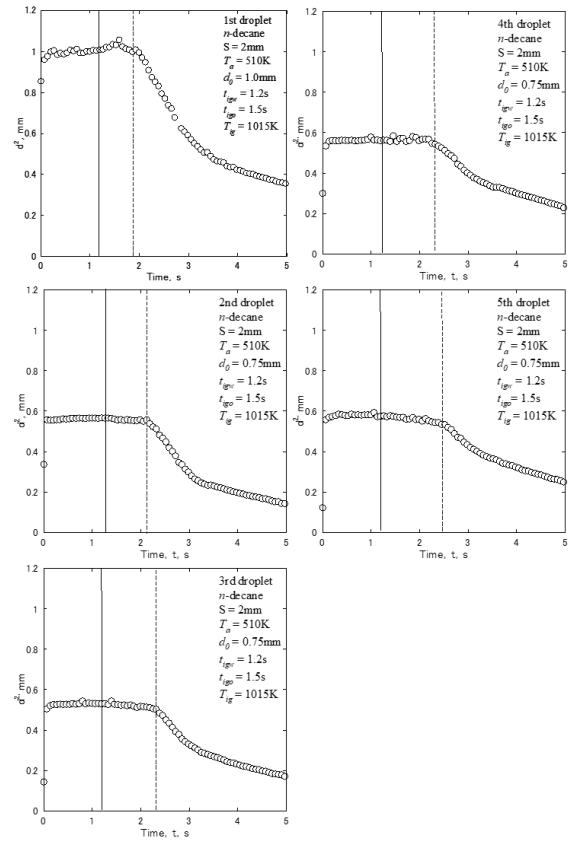


Fig.5 Droplet Diameter History
($S=2$ mm, $T_a=510$ K)

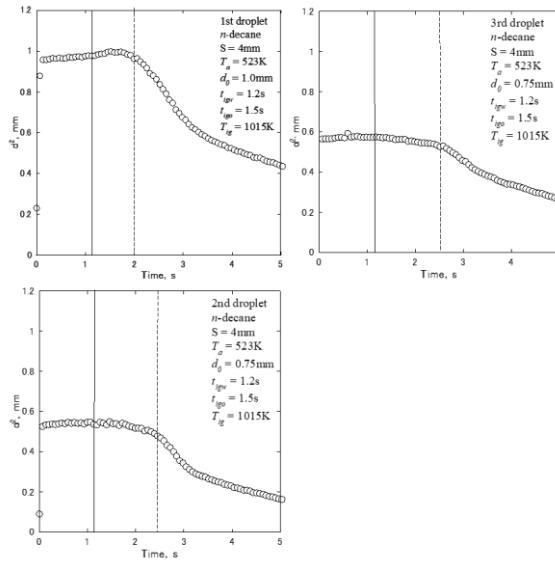


Fig.4 Droplet Diameter History
($S=4$ mm, $T_a=523$ K)

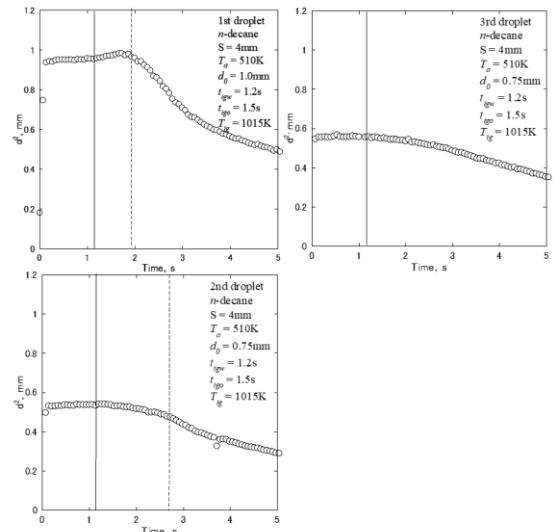


Fig.6 Droplet Diameter History
($S=4$ mm, $T_a=510$ K)

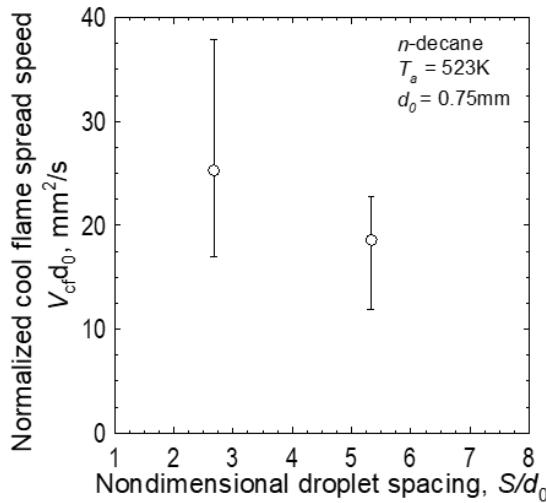


Fig.7 Relationship between nondimensional droplet

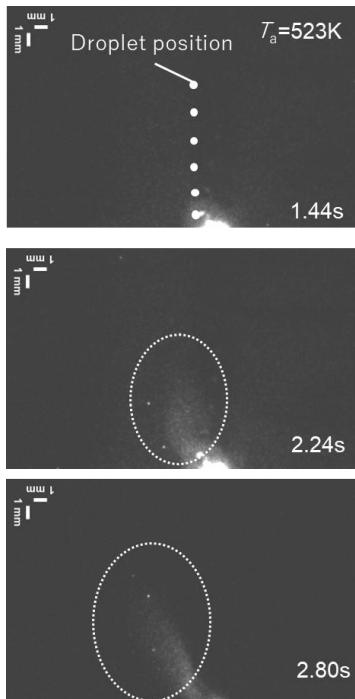


Fig.8 Sequential images of spreading cool flame
($S=2$ mm, $T_a=523$ K)

523 K の、イメージインテンシファイアを装着した CMOS カメラで撮影した冷炎燃え広がり挙動を示す³⁾。冷炎が発生している範囲を点線で示した。Fig.9 に、液滴間隔 S が 4 mm、雰囲気温度 T_a が 523 K の、イメージインテンシファイアを装着した CMOS カメラで撮影した冷炎の燃え広がり挙動を示す。液滴間隔の増大に伴って、冷炎の燃え広がり速度が減少することが確認でき、液滴直径履歴から推定した冷炎点火時刻とおおむね合致した。

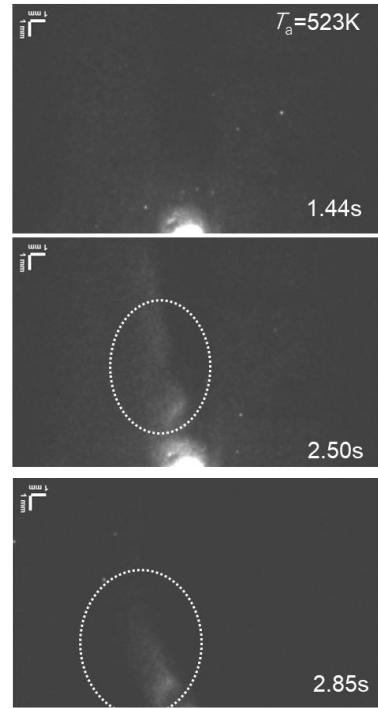


Fig.9 Sequential images of spreading cool
flame ($S=4$ mm, $T_a=523$ K)

4. 結言

燃料液滴列の冷炎燃え広がり実験を、液滴間隔 2 mm, 4 mm, 初期液滴直径 0.75 mm, 雰囲気温度 510 K, 523 K の条件で通常重力環境で行った。冷炎の上方火炎燃え広がりを発生させ、液滴直径計測とイメージインテンシファイアによる冷炎直接観察を行い以下の知見を得た。

- (1) 液滴間隔の増大に伴って、冷炎燃え広がり速度が減少した。
- (2) イメージインテンシファイアによる冷炎の直接観察により、液滴間隔の増大により冷炎が燃え広がる時間が増大することを確認できた。

参考文献

- 1) M.Mikami, K.Matsumoto • Y.Chikami • M.Kikuchi • D.L.Diertrich, Proceedings of the Combustion Institute, 39:2449-2459(2023)
- 2) 藤枝佑毅, 微小・通常重力場における燃料液滴列の冷炎燃え広がり, 日本大学大学院生産工学研究科 2024 年度修士論文
- 3) 木暮優成, 菅沼祐介, 野村浩司, 通常重力環境における燃料液滴列に沿った冷炎燃え広がりの可視化観察, 日本大学大学院生産工学研究科, 第 63 回燃焼シンポジウム