

# 微小重力場における燃料液滴列の冷炎燃え広がり及び

## 液滴間隔の影響

日大生産工(院) ○藤枝 佑毅

日大生産工 菅沼 祐介

日大生産工 野村 浩司

### 1. 緒言

噴霧燃焼は、ディーゼル機関やガスタービンなどに多く用いられており、液体燃料を霧状で噴霧することで空気との接触面積を増大させ、混合を促進し燃焼を行う方式である。しかしながら、噴霧の群燃焼メカニズムは複雑であり、現在においても完全には解明されていない。この噴霧燃焼を採用しているディーゼル機関やガスタービンに多く用いられる炭化水素系燃料は、高温、高圧環境で、約 1000 K 程度の低温酸化反応である冷炎に続いて約 2000 K の高温酸化反応である熱炎が発生する二段階燃焼が起こる場合がある。この冷炎反応は、後に発生する熱炎の発生位置や発生時間等に影響を及ぼすことが分かっている<sup>1)</sup>。そのため、冷炎の燃焼特性を明らかにすることは、燃焼現象の詳細な把握や噴霧燃焼のメカニズムの解明のために重要であり、燃焼改善のため現在国内外で研究が行われている。

田辺らの研究により、単一燃料液滴を用いた自発点火特性評価の実験で冷炎の発生が確認された<sup>2)</sup>。また、森上らの研究により 2 液滴間での冷炎反応による干渉効果に関する研究が行われた<sup>3)</sup>。単一液滴の自発点火による冷炎の発生や 2 液滴間における液滴間の相互作用効果に関しては明らかになっているが、冷炎の燃え広がり挙動に関しては知見が不足している。そこで先行研究において、通常重力場で任意の雰囲気温度下に燃料液滴列を挿入し強制点火および自発点火により冷炎の燃え広がりを発生させる実験が行われた<sup>4,5)</sup>。強制点火による燃え広がり実験より、通常重力場において燃料蒸気形成の時間が冷炎燃え広がり速度に影響を及ぼしていることが分かった。以上の先行研究を踏まえ本研究では、微小重力場において高温雰囲気中に燃料液滴列を挿入し、液滴を強制点火することで冷炎の燃え広がり実験を行い、燃料液滴列の冷炎燃

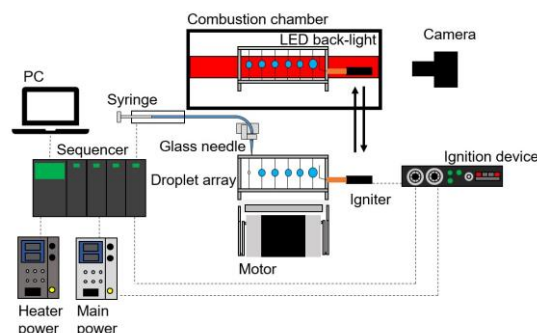


Fig.1 Experimental apparatus.

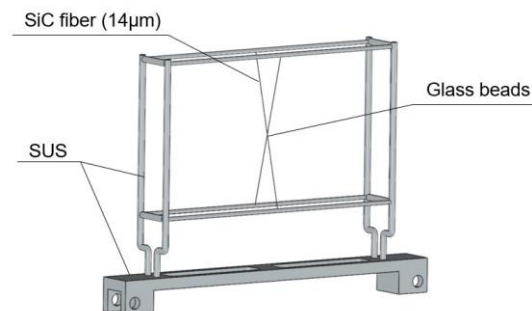


Fig.2 Droplet array holder.

え広がり及び液滴間隔による影響を検討した。本報では、50 m 級微小重力実験施設であるコスモトローレにて実施した微小重力場における燃え広がり実験の結果を報告する。

### 2. 実験装置および方法

実験装置は、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、電源系統から構成されている。冷炎点火装置は、点火部と自動出力調整が可能な点火回路から構成されており、点火部は、直径 1.0 mm の銅の単芯線に直径 0.1 mm のニッケル線をはんだ付けし使用した。本研究では、燃料液滴列を強制点火させ冷炎のみを発生させるため、熱線流速計の原理を応用した回路を用いており、ホイートストンブリッジ、

Effect of droplet spacing on cool flame spread of a fuel droplet array in microgravity

Yuki FUJIEDA, Yusuke SUGANUMA and Hiroshi NOMURA

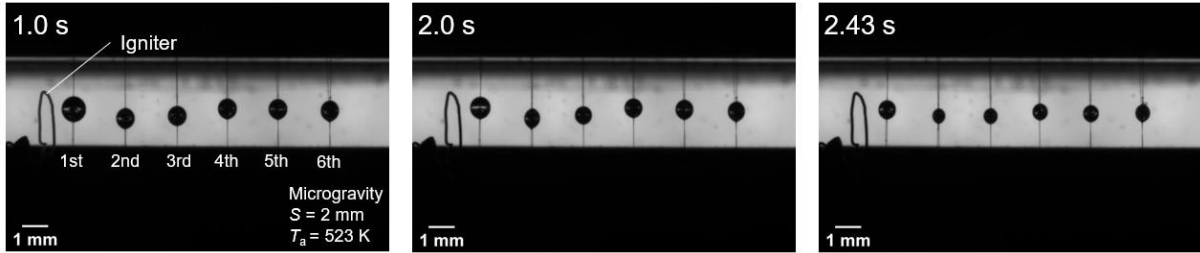


Fig.3 Backlit image.

差動増幅器，トランジスタなどで構成されている．この回路は，ブリッジ内の可変抵抗を調整することで点火線の温度を任意の値に調整することが可能となっている．作動原理としては，ホイートストンブリッジからの不平衡電圧が，差動増幅器へ入力後，トランジスタにより電流が増幅され，加熱に必要な電流が生み出される．ブリッジからの不平衡電圧を差動増幅器により，0 Vにできるようにフィードバック回路が組み立てられており，熱線を瞬時に赤熱させるとともに一定の温度に保つことが可能となっている．また冷炎の発生時，点火線が冷炎により加熱されることで点火回路中の差動増幅器が設定値に戻そうと出力を下げるため電圧の降下が発生する．そのため，回路の電圧降下から冷炎の発生も確認できるようになっている．液滴列支持装置は，直径1.0 および1.6 mm の SUS 管により構成され，交点を銀ロウ付けし固定した．支持枠の固定用のプレートは，燃焼容器内の温度低下の防止のため熱伝導率が小さく，落下実験時の衝撃にも耐えられるよう SUS で製作した．燃料液滴の保持は，SiC 製のファイバーを懸垂線として X 字に張りその交点にガラスビーズを付けることで可能にした．液滴生成装置は主に，先端外径が 50 ~ 60  $\mu\text{m}$  のガラス管，PFA チューブ，シリンジ，エアシリンダ，燃料吐出用のリニアボールステージ，液滴生成位置制御用のリニアボールステージで構成されている．エアシリンダおよびリニアボールステージで液滴生成位置までガラス管を移動させ，シリンジ内の燃料をリニアボールステージで押し出すことで燃料を吐出させ液滴を生成する仕組みとなっている．

冷炎の燃え広がり実験は，燃焼容器内の雰囲気温度  $T_a$  を 523 K として行った．液滴間隔  $S$  は，2 mm および 4 mm の 2 条件とした．懸垂線は，2 mm 間隔で設置し， $S=2$  mm の場合は液

滴を 6 個， $S=4$  mm の場合は 4 個懸垂した．点火線温度は約 1015 K とした．液滴支持装置が燃焼容器内の測定位置に停止してから点火装置を作動させるまでの時間を点火作動待ち時間  $t_{\text{igw}}$  と定義し，すべての実験において  $t_{\text{igw}}=1.0$  s に固定して実験を行った．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．点火源となる第 1 液滴は，初期液滴直径  $d_0$  を 1.0 mm，第 2 ~ 6 液滴は  $d_0=0.75$  mm とした．微小重力実験は，50 m 級微小重力実験施設であるコスモトーレで実施した．この実験施設では，約 2.5 秒の微小重力時間を作り出すことが可能となっている．冷炎の発生を確認するため，点火装置の電圧波形をシーケンサーにより記録した．液滴直径の計測には，液滴の背後からバックライトを当てるバックリット法を用い，液滴の輪郭を CMOS カメラで撮影した．撮影した液滴の画像から，自作のプログラムを用いて液滴直径を解析し，得られた液滴直径履歴から冷炎燃え広がり速度を算出した．その後，液滴間隔の違いおよび通常重力実験と微小重力実験による冷炎燃え広がりへの影響を比較，検討した．

### 3. 実験結果および考察

Fig.3 に微小重力場，液滴間隔  $S=2$  mm の条件においてバックリット法により撮影した液滴の画像を示す．図中の経過時間 1 秒の画像が点火装置の作動した時刻であり，それ以降の 2 秒，2.43 秒では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.4 に， $S=2$  mm の微小重力実験より得られた液滴直径履歴を示す．微小重力場における雰囲気温度 523 K， $S=2$  mm の条件での液滴直径履歴から第 1 液滴は約 1.37 秒でグラフの傾きが大きく変化した．これは，蒸発してい

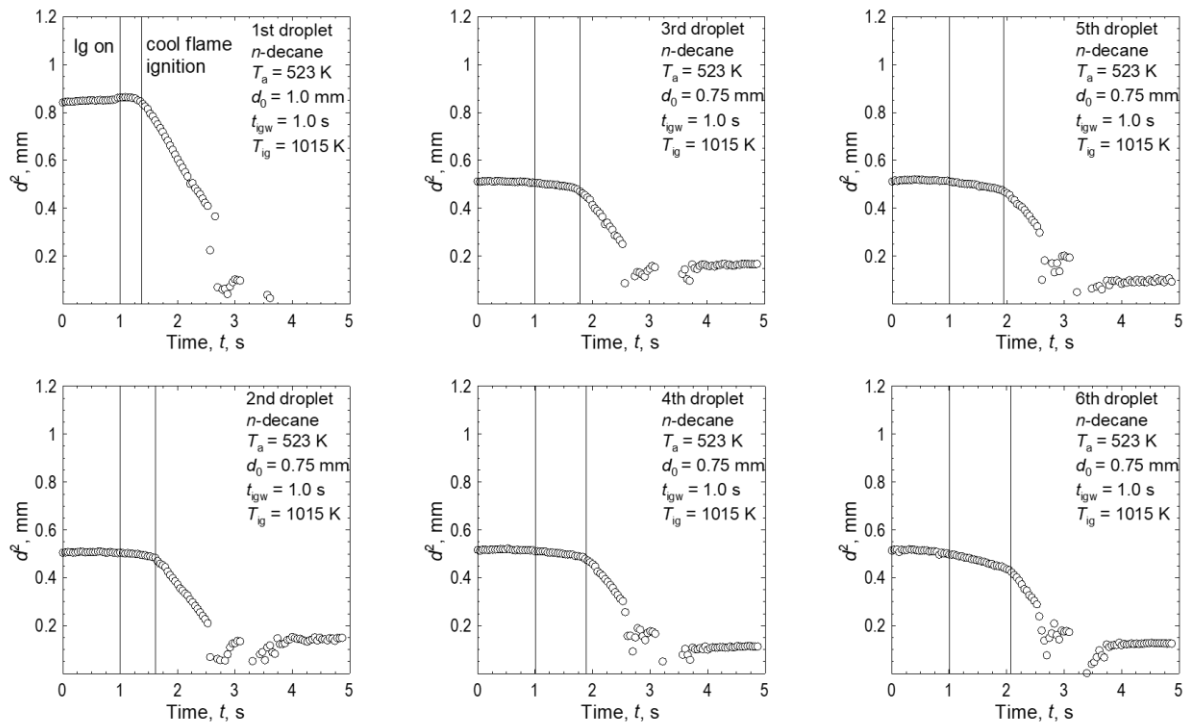
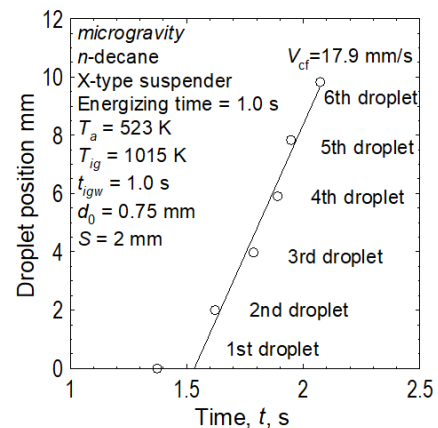


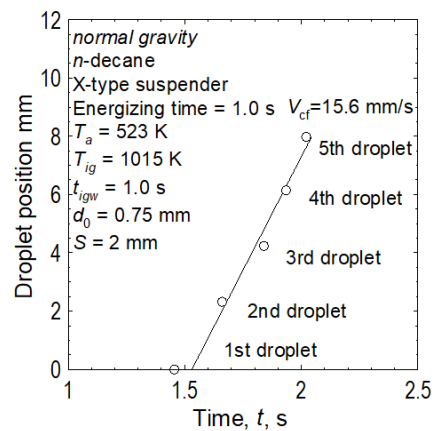
Fig.4 Droplet diameter history.

た燃料液滴に冷炎が発生したためであると考えられる。このことから、点火装置作動後約0.37秒で冷炎が発生したと考えられる。加えて、第1液滴以降もグラフの傾きに大きな変化が表れていることから第6液滴まで冷炎が燃え広がっていると考えられる。また、微小重力場における  $S=4$  mm での実験でも同様に冷炎による燃え広がり発生が確認できた。

Fig.5 に、 $S=2$ mm における通常重力実験および微小重力実験から算出した液滴直径履歴から得られた冷炎点火時刻と液滴位置の関係を示す。このグラフ上のプロットを最小二乗法により直線近似し傾きを算出することで、冷炎燃え広がり速度  $V_{cf}$  を算出した。この算出の際、点火源となる第1液滴と計測が困難だった通常重力実験の第6液滴を除外し結果を検討した。 $S=2$  mm における通常重力と微小重力の結果を比較すると、通常重力では冷炎燃え広がり速度が約  $15.6$  mm/s であるのに対し微小重力では約  $17.9$  mm/s であり、通常重力に比べて微小重力の方が冷炎燃え広がり速度が速いことが確認できた。これは通常重力の場合、液滴から蒸発した燃料蒸気が重力の影響を受け液滴下部へと流れてしまうのに対して、微小重力場では十分な可燃性混合気が液滴周囲にとどまることができ、燃え広がりが促進されるため燃え広がり速度が速くな



(a) Microgravity.



(b) Normal gravity.

Fig.5 Relationship between cool flame ignition time and droplet position ( $S=2$  mm).

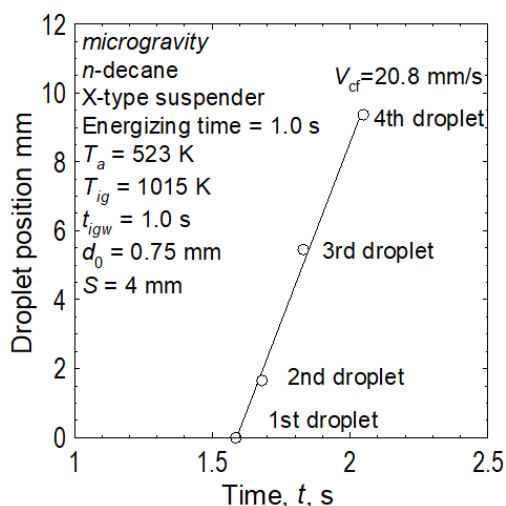


Fig.6 Relationship between cool flame ignition time and droplet position ( $S=4$  mm).

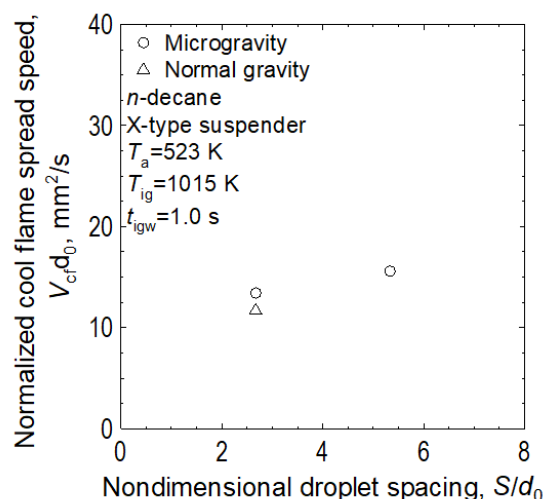


Fig.7 Relationship between nondimensional droplet spacing and normalized cool flame spread speed.

ったと考えられる。

Fig.6に液滴間隔 $S=4$  mmでの液滴直径履歴より得られた冷炎点火時刻と液滴位置の関係を示す。また、Fig.7に微小重力および通常重力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 $V_{cf}d_0$ の関係を示す。液滴間隔 $S=4$  mmでの冷炎燃え広がり速度は約20.8 mm/sであり、微小重力場において $S=2$  mmに比べて $S=4$  mmの方が冷炎燃え広がり速度が速いことが明らかとなった。加えてFig.7から、微小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。そこで、今後 $S/d_0$ の値を変化させ実験データを拡充し液滴間隔が冷炎の燃え広がり速度に及ぼす影響を調査、検討し明らかにしていく予定である。

#### 4. 結言

微小重力場において強制点火装置を用いて、任意の雰囲気温度下に燃料液滴列を挿入し冷炎燃え広がり実験を行った。得られた知見を以下にまとめる。

- (1) 液滴直径履歴をバックリット法により撮影した画像から計測し直径履歴から冷炎点火した時刻を算出し燃え広がり速度を求めた。
- (2) 冷炎燃え広がり速度は、通常重力場に比べ微小重力場のほうが速いことが確認できた。

- (3) 微小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が増大する傾向が示唆された。

#### 参考文献

- 1) 山田裕之, 手崎衆, 後藤雄一, 予混合圧縮着火過程における高温燃焼発生メカニズム, 日本機械学会論文集(B編), 72巻721号 (2006) pp. 211-217.
- 2) M. Tanabe, M. Kono, J. Sato, J. Koenig, C. Eigenbrod and H. J. Rath: Effects of natural convection on two stage ignition of an n-dodecane droplet. Symposium (International) on Combustion/The Combustion Institute, **25** (1994) pp.455-461
- 3) O. Moriue, Y. Nishiyama, Y. Yamaguchi, H. Hashimoto, E. Murase: Effects of droplet interaction on spontaneous ignition of an n-decane droplet pair. The Combustion Institute, **34** (2013) pp.1585-1592
- 4) 新海祥吾, 燃料液滴列の冷炎燃え広がりにおよぼす雰囲気温度の影響, 日本大学大学院生産工学研究科 2021 年度修士論文
- 5) 郡司直人, 異なる初期液滴直径をもつ液滴列を燃え広がる冷炎の燃焼挙動, 日本大学大学院生産工学研究科 2021 年度修士論文