

燃料液滴列の火炎燃え広がり及び霧囲気圧力と当量比の影響

日大生産工(院) ○池山 典孝
日大生産工 菅沼 祐介

日大生産工 野村 浩司
日大生産工 氏家 康成

1 緒言

近年、我々はエネルギー需要の増加、化石燃焼の枯渇問題、燃焼による環境負荷増大等の観点から、効率良くクリーンにエネルギーを利用していく必要に迫られている。本研究では、燃焼現象のなかでも幅広い機関で用いられている噴霧燃焼に着目し、その機構解明により噴霧燃焼の精確かつ簡便な数値シミュレーション確立に資する噴霧燃焼モデルの構築を目指す。

噴霧燃焼はディーゼルエンジン、ガスタービンエンジンなどの燃焼機関で用いられる燃焼機構である。燃料噴霧における液滴間の燃え広がり現象は、熱発生や火炎の安定性において重要な役割を果たしており、その機構解明は世界中で研究されている。本研究では、燃焼室壁面を物質移動・熱移動の繰り返し対称面と見なせるように工夫し、図1のように三次元液滴マトリクスを一次元液滴列に単純モデル化している。また、実験モデルを三次元マトリクスの燃焼に拡張するためには、対称性を確保するため、微小重力環境で実験を行う必要がある。微小重力環境での一次元液滴列を用いた実験および数値解析は盛んに行われており、噴霧燃焼において特徴的な群燃焼の発生機構解明への有効なアプローチと考えられる。

群燃焼の発生機構の解明には、実機に近い条件での実験データの取得が必要である。過去には、燃焼空間における霧囲気温度や霧囲気圧力を変化させた実験などが行われてきた¹⁻³。本実験では実機の燃焼現象へ拡張しやすくするため、繰り返し対称面を模擬した燃焼容器を用いることで、当量比が定義できる条件での霧囲気圧力が火炎燃え広がり及び霧囲気圧力と燃え広がり速度に及ぼす影響および燃え広がる液滴と燃え尽きる液滴個数について調べた。

燃焼容器は宇宙環境利用科学委員会WG活動で製作した高压容器内に挿入が可能となっている。本報では、霧囲気圧力が火炎燃え広がり速度に及ぼす影響および燃え広がる液滴と燃え尽きる液滴個数について調べた。

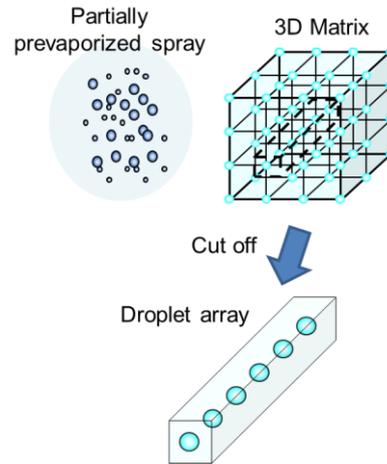


Fig. 1 Concept of a fuel droplet array in the work.

2 実験装置および方法

本研究で用いる微小重力実験装置は、本学内の小型落下塔(微小重力時間: 1.1 s)および株式会社植松電機のコスモトール落下塔(微小重力時間: 2.5 s)の落下カプセルに搭載可能な寸法で設計されている。図2に実験装置の概略を示す。装置は、燃焼容器、液滴列生成装置、点火装置、制御装置および撮影装置により構成されている。本実験で用いる実験モデルは、本学の小型落下塔でも幅広い条件での実験を可能にするため、過去に用いられていたモデルを縮小している²。液滴列が挿入される燃焼容器は正方形断面一辺が15 mm、火炎燃え広がり鉛直方向の奥行きが25.7 mmのものを用いる。過去に得られたデータとの比較を可能とするため、スケールの比から初期液滴直径を0.48 mmとした。液滴列は正方形断面の中心軸上に水平に配置する。液滴の支持方法を図3に示す。液滴の燃え広がり方向に線径7.5 μm のSiCファイバとそれに垂直に線径14 μm のSiCファイバを、生成する液滴個数分張り、交点に液滴を支持させた。点火源側の端の液滴を第1液滴とし、燃焼容器閉端側の最終液滴は液滴間隔の1/2の距離閉端から離れた位置に配置した。燃焼容器壁面は火炎の熱損失を低減させるため石英ガラスを用

Effect of Ambient Pressure and Equivalence Ratio on Flame Spread along a Fuel Droplet Array

Noriyuki IKEYAMA, Hiroshi NOMURA, Yusuke SUGANUMA and Yasushige UJIIE

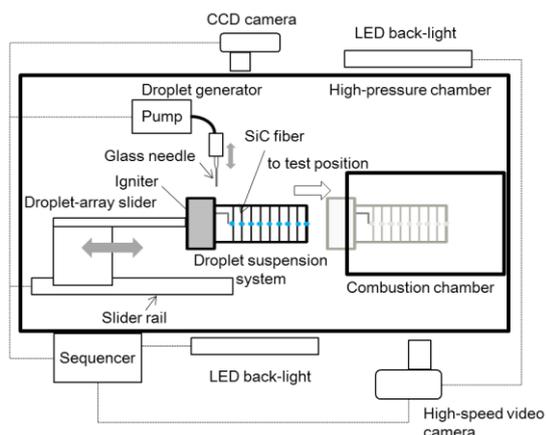


Fig. 2 Experimental apparatus.

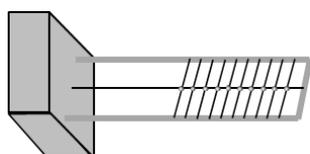


Fig. 3 Droplet suspension

いた。燃料には正デカンを用いた。点火用電熱線に直径0.29 mmの鉄クロム線を用いた。燃料液滴列を火炎が燃え広がる間、液滴列の撮影を行い、液滴列に垂直方向に張られた懸垂線の発光履歴から燃え広がり火炎の挙動を観察・記録した。撮影記録装置には高速度カラービデオカメラmiro 3(撮影速度：2000 fps, 画像サイズ：512×384 pix, 露光時間：オープン)を用いた。燃料液滴の数は10個とした。ただし、液滴間隔が広い無次元液滴間隔7の条件については、燃焼容器内に液滴が10個収まらなかったため、9個とした。火炎の燃え広がり速度については、点火源の影響以外の原因によって速度の変化が見られなかったため、液滴の数を減らしても燃え広がり速度に影響はない。液滴列の初期液滴直径 d_0 は、第2から最終液滴のひとつ前の液滴までの平均初期直径とし、火炎燃え広がり速度の計測範囲も同様の区間とした。液滴間隔 S は0.96~3.34 mmの範囲で変化させた。間隔の精度は $S = 0.96$ mmについては±10%, それ以外の間隔については±5%以内とした。各実験条件で3回の実験を行い、計測値は3回の結果の平均値とした。

燃焼容器が火炎燃え広がり速度に及ぼす影響について観察を行った。燃焼容器内で火炎を燃え広がらせた場合と燃焼容器外で火炎を燃え広がらせた場合について無次元液滴間隔6.25の条件での実験・観察を行った。雰囲気圧力は絶対圧で0.10, 0.30 MPaの2条件とし、微小重力環境で比較を行った。

雰囲気圧力が火炎燃え広がり速度に及ぼす影響を無次元液滴間隔2~7の範囲で調べた。雰囲気圧力は0.10~0.30 MPaの範囲で変化させた。雰囲気温度は室温とし、微小重力環境で実験を行った。火炎の燃え広がり様子を高速度カメラで観察・記録した。また、燃料液滴の燃え尽きる個数についても調べた。ただし、無次元液滴間隔7の条件については、微小重力時間よりも火炎が消えるまでの時間の方が長かったため、燃え尽きる個数の計測はできなかった。燃え尽きる液滴の判断は、液滴が懸垂されている液滴列に対して垂直方向のSiCファイバの発光が消滅した時点で、そのファイバに懸垂されている液滴について個々に行った。

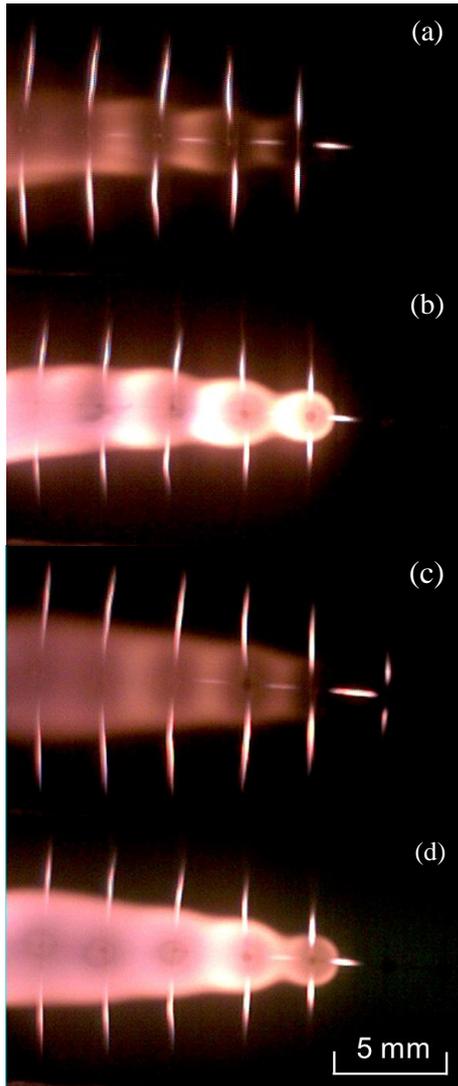
3 実験結果および検討

3.1 燃焼容器の有無が燃料液滴列の燃え広がり速度に及ぼす影響

図3に、燃焼容器が燃料液滴列を燃え広がる火炎に及ぼす影響について調べた結果を示す。画像は、第6液滴が点火してから30 ms後の燃え広がり火炎を示している。燃焼容器内での燃え広がりでは、開端側(画像左側)に輝炎が流される様子が観られる。発生した燃焼ガスおよび膨張した空気が燃焼容器内に閉端側から開端側への流れを形成したと考えられる。燃焼容器無しの場合では、燃焼ガス流および周囲空気の膨張流が全方向に向かうことにより、火炎が液滴列から遠い位置に存在している。燃焼容器内での火炎燃え広がり速度は、燃焼容器無しの場合のそれと比較して小さくなった。燃焼容器内での火炎燃え広がり速度が減少した理由としては、燃焼容器内で形成された開端側への流れが要因として挙げられる。

3.2 雰囲気圧力が火炎燃え広がり速度に及ぼす影響

図4に、雰囲気圧力が火炎燃え広がり速度に及ぼす影響について調べた結果を示す。プロットは実験データの平均値を、エラーバーは最大値と最小値を示している。いずれの雰囲気圧力の条件でも、無次元液滴間隔が2~3の条件では、無次元液滴間隔の増大に伴って正規化火炎燃え広がり速度は増大した。無次元液滴間隔が3の条件で正規化火炎燃え広がり速度は最大となった。無次元液滴間隔が3よりも大きな条件では、無次元液滴間隔の増大に伴って正規化火炎燃え広がり速度は減少した。無次元液滴間隔によって正規化火炎燃え広がり速度の無次元液滴間隔依存性が変化する理由として、梅村によって提唱された火炎燃え広がりモードの変化が原因として考えられる⁴。燃え広がりモード1は、先端の開い



(a) In combustion chamber, $P_0 = 0.10$ MPa,
 $V_f d_0 = 38$ mm²/s
 (b) In combustion chamber, $P_0 = 0.30$ MPa,
 $V_f d_0 = 18$ mm²/s
 (c) Open space, $P_0 = 0.10$ MPa, $V_f d_0 = 42$ mm²/s
 (d) Open space, $P_0 = 0.30$ MPa, $V_f d_0 = 24$ mm²/s

Fig. 4 Flame spreading behavior at $S/d_0 = 6.25$.

た拡散火炎が液滴を次々と内部に取り込みながら進行していく燃え広がりである。燃え広がりモード2は、拡散火炎が液滴間で一度閉じ、未燃液滴周囲に形成されている可燃混合気層に火炎が触れることで燃え広がりが進行する燃え広がり形態である。モード3の燃え広がり形態は、火炎が飛び火的に進行し、未燃次液滴の点火時には独立した火炎が観察される燃え広がり形態である。実験で得られた燃え広がり画像より、無次元液滴間隔が2~3の条件ではモード1、無次元液滴間隔が3の条件ではモード1とモード2の間となっており、無次元液滴間隔が3以上の条件ではモード2および3となっていると推察された。モードによって火炎

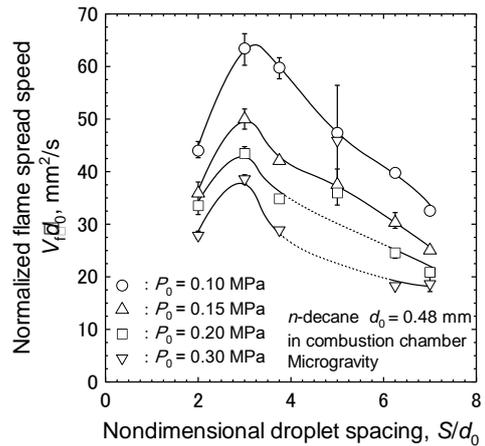
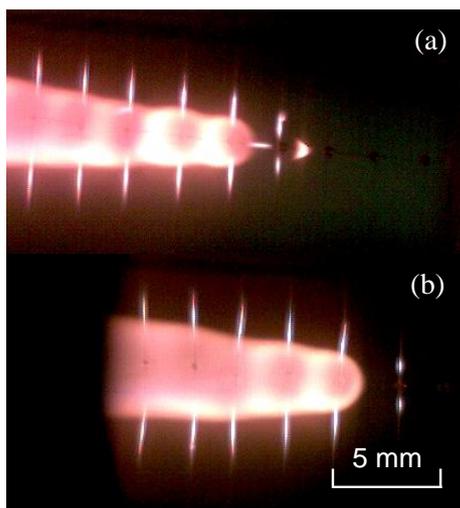


Fig. 5 Effect of ambient pressure on the relationship between normalized flame spread speed and nondimensional droplet spacing.

面から未燃次液滴までの距離が異なり、モード1とモード2の境界付近の条件で火炎から未燃液滴次までの距離が最も近くなる。よって、火炎から未燃次液滴への熱の移動が最も速くなり、燃え広がり速度が最大値を示したと考えられる。また、正規化火炎燃え広がり速度は、雰囲気圧力の増大に伴って減少した。雰囲気圧力を変化させても正規化火炎燃え広がり速度の無次元液滴間隔に対する増減の傾向は変化しなかった。雰囲気圧力の増大によって正規化火炎燃え広がり速度が減少する要因としては、温度伝導率の減少や液滴の初期加熱時間の増大が考えられる。燃え広がり速度のばらつきが非常に大きかった無次元液滴間隔5の条件について、火炎燃え広がり画像を図7に示す。燃え広がり方向に張られたSiCファイバが熱的影響を未燃次液滴に与えていると推察されたため、燃え広がり方向に張られたSiCファイバを排除して実験を行った画像を比較のために示す。図7(a)は燃え広がり方向に懸垂線が存在する画像、(b)は存在しない画像である。どちらの条件も、第7液滴が点火してから3 ms後の画像である。液滴間に懸垂線が存在する場合、未燃次液滴点火直後の火炎から点火直後の液滴付近の流れが火炎進行方向に向かってることが推察される。無次元液滴間隔5、雰囲気圧力0.20 MPa以上の条件についても、図7に示すような火炎の吹き出しが生じた。液滴間に懸垂線がない場合の画像からはこのような現象が観察されなかったことから、液滴間に張られた懸垂線が原因で生じた現象と考えられる。懸垂線を介して温度が伝わる速度と、空気を介して温度が伝わる速度が雰囲気圧力を増大させたことによって逆転し、かつ燃料蒸気を活発に発生させるのに十分な温度に液滴を貫く懸垂線



(a) Normal droplet suspension system.
(b) Single suspender droplet suspension system.

Fig. 7 Flame spreading behavior at $S/d_0 = 5$, $P_0 = 0.3$ MPa.

が達している条件が重なったため、未燃次液滴の既燃液滴反対側で蒸気の吹き出しが起こり、それに燃え広がり火炎が引火して未燃次火炎進行方向に噴き出す火炎が形成されたと考えられる。今後は、液滴間に懸垂線がない液滴列支持部を用いて実験を行う予定である。

3. 3 雰囲気圧力が燃料液滴の燃え尽きに及ぼす影響

図8に雰囲気圧力および無次元液滴間隔が燃料液滴の燃え尽き個数に及ぼす影響について調べた結果を示す。無次元液滴間隔は、液滴個数が10個である2.0~6.25の範囲に限定した。図のハッチング部は、微小重力時間終了時に液滴列に火炎が存在していた範囲である。当量比 ϕ は、液滴列と燃焼容器が列方向に無限に長いとしたときの単位長さあたりの燃料質量と空気質量から算出した。全ての条件について、第10液滴までの火炎燃え広がりが観察された。雰囲気圧力の増大に伴って、燃え尽きる液滴の数は増大した。燃え尽きる液滴は、燃焼容器の開端側から順に現れた。雰囲気圧力の増大によって燃え尽きる液滴の数が増大した理由は、液滴火炎に供給される酸素の量が増大したためだと考えられる。それ故、当量比が1.0よりも過濃側の条件では、いずれの条件についても酸素不足となり、全ての液滴が燃焼途中で消炎に至ったと考えられる。また、当量比が1.0よりも希薄側の条件でも全ての液滴が燃え尽きることはなかった理由としては、閉端側での局所的な酸素不足が考えられる。図5のように燃焼容器内では閉端側から開端側へ流れが生じているため、閉端側では酸素の量が開端側と比較して減少したと考えられる。

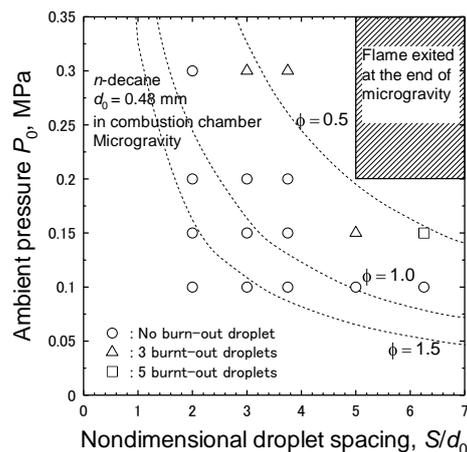


Fig. 8 Effect of nondimensional droplet spacing and ambient pressure on the number of burnt-out droplets.

4 結言

微小重力高圧環境において雰囲気圧力の増大が火炎燃え広がり挙動および速度及ぼす影響について調べた。得られた知見を以下に示す。

- 1) 繰り返し対称面を模擬した燃焼容器内で燃料液滴列を燃焼させることで火炎燃え広がり速度は減少する。
- 2) 雰囲気圧力が増大すると火炎燃え広がり速度は減少する。雰囲気圧力が増大しても、無次元液滴間隔に対する正規化速度の依存性は定性的に変化しない。
- 3) 雰囲気圧力が増大すると燃え尽きる燃料液滴の個数は増大する。

「参考文献」

- 1) Nomura, H., Takahashi, H., Suganuma, Y., Kikuchi, M., Proc., Droplet ignition behavior in the vicinity of the leading edge of a flame spreading along a fuel droplet array in fuel-vapor/air mixture., Combust. Inst. 34., 2013, p. 1593-1600.
- 2) Kobayashi, H., Park, J., Iwahashi, T., Niioka, T., Proc. MICROGRAVITY EXPERIMENTS ON FLAME SPREAD OF ANn-DECANEDROPLET ARRAY IN A HIGH-PRESSURE ENVIRONMENT., Combust. Inst. 29., 2002, p. 2603-2610.
- 3) Kikuchi, M., Wakashima, Y., Mikami, M., Numerical study on flame spread of an n-decane droplet array in different temperature environment under microgravity., Proc. Combust. Inst. Vol. 30., 2005, p. 2001-2009.
- 4) 梅村, 微小重力下での直線燃料液滴列に沿った火炎伝ば, 日本機械学会誌論文集(B編), 68(672), 2002, p. 2422-2642.