短時間微小重力環境を利用した液滴列を燃え広がる火炎の低圧力雰囲気における

燃え広がり限界圧力に関する研究

日大生産工(院) ○金 豊

日大生産工 野村 浩司 日大生産工 菅沼 祐介

# 1. 緒言

地球温暖化や酸性雨などの環境問題が深刻 である. 化石燃料の大量消費が要因であり, その対策として,水力発電,風力発電やバイ オマス燃料などのような再生可能エネルギの 利用が挙げられる.但し,化石燃料への依存 はまだ続くことが現実であり、化石燃料を効 率よく利用できることが望ましい. そこで, ディーゼル機関やガスタービンなどの内燃機 関に広く採用されている噴霧燃焼方式に注目 した. 噴霧燃焼方式とは、液体燃料と空気との 接触面積を増大し,混合を促進させるため,燃 料を微粒化にして,霧の状態で噴出,燃焼を行 う方式である. しかしながら, そのメカニズム は非常に複雑で、まだ完全には解明されていな い. 解明されれば、内燃機関の燃焼室を設計す る際のシミュレーション精度の改善や、燃焼過 程の制御に役立つと考えられる. 噴霧中の液滴 間火炎の燃え広がり特性は噴霧火炎の安定性 に重要な役割を果たしているため、本研究では、 噴霧火炎の燃え広がり速度について調査した. 火炎の挙動を観察可能にするため、実験時の液 滴直径を実機の µm オーダーから mm オーダー にした.液滴直径の拡大により、本来無視でき た自然対流の影響が著しくなる. 自然対流の影 響を抑制し、より実機に近い現象を再現するた め、本実験は微小重力環境で行った.

燃え広がりの特性データを拡充するため, 雰囲気圧力が0.10 MPaより低い圧力の条件で の実験を行った.低圧力雰囲気での実験は, 高空を飛ぶジェットエンジンの再点火条件を 把握する基礎研究でもある.三上ら<sup>1)</sup>は雰囲 気圧力0.025 および0.1 MPa で火炎燃え広が りの限界液滴間隔を調べた.それに対して, 本報では,0.10 MPa 以上の条件で取得した過去 のデータ<sup>2)</sup>と合わせて,0.025 から0.080 MPa の範囲の低圧力雰囲気における燃え広がり特



Fig. 1 Experiment apparatus<sup>2</sup>).



**Fig. 2** Droplet suspension system (I-type)<sup>2</sup>.



Fig. 3. Behavior of flame spreading along a droplet array in the condition of  $S/d_0 = 6.25$ ,  $P_a = 0.06$  MPa. Taken by CCD camera 2.

性を調査し、火炎燃え広がり限界圧力を調べた結果について報告する.

Short-duration microgravity experiments on the spread-limit pressure of a flame spreading along a fuel droplet array at low pressure

Feng JIN, Hiroshi NOMURA, Yusuke SUGAMUMA

Table 1	Experimental	Conditions.

S/d <sub>0</sub>	2.00	3.00	3.75	5.00	6.25	7.50	9.00	10.00	
S [mm]	0.96	1.44	1.80	2.40	3.00	3.60	4.32	4.80	
d <sub>0</sub> [mm]	0.48 ± 5%								
Error of S [%]	± 10% ± 5%								
Droplet suspender type	I-type								
Fuel	n-decane								
P <sub>a</sub> [MPa]	0.03 -	03 ~ 0.60 0.025 ~ 0.60 0.025 ~ 0.30				0.10 ~ 0.20	0.025 ~ 0.15		
Droplet number	10						8	6	
V <sub>f</sub> Target droplets	$3^{rd} \sim 8^{th}$						$3^{rd} \sim 7^{th}$	$2^{nd} \sim 5^{th}$	
R <sub>soDi</sub> Target droplets	4 <sup>th</sup> +5 <sup>th</sup> +6 <sup>th</sup>							3 <sup>rd</sup> +4 <sup>th</sup> +5 <sup>th</sup>	
R <sub>soDs</sub> Target droplets	3 <sup>rd</sup> +4 <sup>th</sup> +5 <sup>th</sup>							2 <sup>nd</sup> +3 <sup>rd</sup> +4 <sup>th</sup>	
/ <sub>d</sub> [mm]	35.7								
I <sub>wh</sub> [mm]	15								
Frame rate of high-speed camera [fps]	2000								
Video image resolution [pix]	512 x 384								
Gravity	Microgravity (about 1.1 sec)								

# 2. 実験装置及び方法

図1に実験装置の概略を示す.本実験装置は, 文献2で使用した実験装置に若干の変更を加え た装置である.実験装置は主に液滴列支持装置, 燃焼容器,液滴列の移動装置,液滴生成装置, 圧力容器,光学観察系および制御装置から構成 されている. 液滴支持装置は図2に示したよう に、2本のステンレス管と直径 14 µm の SiC フ ァイバで構成され,液滴への保持力を高まるた め,ファイバの中点にガラスビーズを付着させ て、燃料液滴をそのガラスビーズに懸垂した. 液滴懸垂ファイバは等間隔に設置され、この間 隔が液滴間隔Sである. 燃焼熱によりファイバ が膨張し、定められた液滴間隔が保てなくなる ことが過去にあったため、ファイバの両端にテ ンショナが設けられている. このテンショナに より、繰り返し実験しても液滴間隔はほぼ変化 しないことが確認された. 石英製光学セルであ る燃焼容器は正方形断面の一辺が15mm,奥行 きが 35.7 mm である, 石英ガラスは熱伝導率が 比較的小さいので、光学セル壁面への熱損失低 減と火炎の可視化が達成できる. さらに, その 壁面を物質移動・熱移動の繰り返し対称面と見 なせば,一次元液滴列の実験結果を三次元マト リックスに拡張して論議できると考える.液滴 列は燃焼容器の開端から挿入する. 燃焼容器の





Fig. 4. Burning behaviors of droplet array. Taken by high speed camera. Droplet images were superposed.





-278 -

奥行きが固定であるため,液滴の個数(N個) は液滴間隔に応じて6から10個となる.第N 液滴は,閉端壁面からS/2離して設置した.ピ エゾポンプにより燃料がタンクからガラス針 へ流れ,ガラス針の先端から燃料が液滴支持装 置のガラスビーズに吐出される.生成された液 滴の大きさはCCDカメラ(CCD camera 1)と LEDバックライトを用いて撮影し,自作のプロ グラムで測定する.液滴列はステッピングモー タ駆動の液滴列移動装置により燃焼容器に移 動され,微小重力状態がセンサにより感知さ れた瞬間,第1液滴(燃焼容器の開端側)が 鉄クロム製の電熱線で点火される.液滴列に 沿って燃え広がる火炎の挙動を高速度カメラ

(撮影速度 2000 fps, 露光時間オープン)を用 いて, バックライトなしで録画し, 解析用の データとした.また低圧力雰囲気で途中消炎 する燃え広がり火炎を観察するため, 新たに 設置した CCD カメラ (CCD camera 2, 撮影速 度 30 fps)を用い, 液滴列全体の連続直接画像 を取得した.図3 にこの CCD カメラを用い て取得した画像の一例を示す.これにより, 火炎の燃え広がりの到達位置, 火炎の形や色 などの情報を取得することが可能になった.

表1に実験条件,解析条件および高速度カ メラの撮影条件をまとめて示す.初期液滴直 径 $d_0$ は 0.48 mm (±5%)とした.正デカン を実験試料として使用した.無次元液滴間隔  $S/d_0$ は 2 から 10,雰囲気圧力  $P_a$ は 0.025 か ら 0.60 MPa の間で変化させた.雰囲気温度 の影響を考慮し,実験準備の段階で雰囲気温 度を 20 から 25 °C の間に調整した.実験の 前後に,圧力容器内部温度を熱電対により測 定し,記録した.全ての実験には本学内にあ る小型落下塔(微小重力時間 1.1 s)を用いた.

ー条件に対して三回実験を行い,得られたデ ータの平均値を計測値とした.

図4に無次元液滴間隔  $S/d_0 = 3.00$ , 雰囲気 圧力  $P_a = 0.030$  MPa の条件下で,液滴火炎が 燃え広がる様子を高速度ビデオカメラで撮影 した連続画像を示す. 画像の左から右へ火炎 が燃え広がる. 図中の丸は液滴の位置を示す. 点火後,ファイバは液滴火炎により加熱され, 火炎に触れている部分が発光する. 火炎に触 れてから発光するまでの遅れ時間は約 1 ms と見積もられる<sup>3)</sup>. 本研究では,ファイバの



Fig. 6 Relationship between ambient pressure and nondimensional flame spread speed.



Fig.7 Map of flame spread limit.

発光が観察された画像の1コマ前の時刻を液 滴の点火時間とした.

#### 3. 実験結果および考察

#### 3.1 点火時刻と火炎先端位置の関係

図5に、高速度カメラ画像から取得した点 火時刻と火炎先端位置の関係を示す.高速度 カメラの視野には第3液滴から第8液滴まで が入っている.無次元間隔が3.00、雰囲気圧 力が0.040 MPaの条件では、火炎は第8番目 の液滴まで到達した.液滴列全体を観察して いるCCDカメラの画像から、燃え広がり火炎 が第9液滴に到達していることが観察された. 一方、同一間隔条件の雰囲気圧力が0.030 MPaの条件については、火炎が第7番目の液

滴まで到達し、その後、消炎した. 無次元間 隔 S/d<sub>0</sub> = 3.00 については, 雰囲気圧力 P<sub>a</sub> = 0.030 と 0.040 MPa の間に火炎燃え広がりの 限界圧力があると考えられる. 第N番目の液 滴と燃焼室の奥壁面の距離を S/2 に設定した ので、壁面による火炎の冷却を考慮し、本研 究では燃え広がり火炎が N-1 番目の液滴まで 到達できなかった場合を燃え広がり火炎の途 中消炎と定義した.燃え広がり限界圧力は, 液滴間隔が同一な条件で,途中消炎が1回も 起こらなかった雰囲気圧力の中で最も低い雰 囲気圧力と定義した.また、プロットを最小 2 乗法で直線近似したときの傾きを燃え広がり 速度 V<sub>f</sub>とした. 算出された燃え広がり速度 V<sub>f</sub> と初期液滴直径 doの積を正規化燃え広がり速 度 V<sub>f</sub>d<sub>0</sub>と定義した.

## 3.2 雰囲気圧力と燃え広がり速度の関係

図6に雰囲気圧力が正規化燃え広がり速度に 及ぼす影響を両対数グラフで示す. エラーバー は、実験結果の最大値と最小値を示している. 無次元液滴間隔 3.75 および 5.00 の条件以外は, 正規化燃え広がり速度が雰囲気圧力の減少に 伴って増大することがわかる.雰囲気圧力の減 少に伴い、空気の温度伝導率が増大すること で、燃え広がり速度が増大したと考えられる <sup>2)</sup>. また, 雰囲気圧力 0.030 MPa 以下の無次元 液滴間隔が 3.75, 5.00, 6.25 および 10.0 の場 合を除けば,燃え広がり速度と雰囲気圧力の 関係は両対数グラフにおいて直線的であるこ とがわかる. このことより, 0.040 MPa 付近ま では文献2で得られた知見が拡張できること がわかった.一方,除外した前述の条件の燃 え広がり速度を示すプロットは, 直線の延長 線の下方にある.これは、雰囲気圧力の減少 により火炎温度が減少し,燃え広がり速度が 減少したと推察される.雰囲気圧力を更に減 少させると, 高速度カメラで火炎燃え広がり速 度を計測している領域で燃え広がり火炎の消 炎が観察された.このような場合,燃え広がり 速度は測定しなかった.

# 3.3 火炎燃え広がり限界圧力

図7は, P<sub>a</sub>=0.10 MPa 以下の領域において, 燃え広がり火炎が到達しなかった液滴の個数 を,雰囲気圧力と無次元液滴間隔でマッピン グして示している. 無次元液滴間隔 2.00, 3.00, および 3.75 の場合, P<sub>a</sub>=0.030 MPa で途中消 炎が起こり, 無次元液滴間隔 5.00, 6.25, 7.50, および 10.0 の場合,  $P_a = 0.025$  MPa で途中消 炎が起こった.前述したように, 火炎温度が 低下して未燃次液滴を加熱できなくなったこ とが原因と推察される.無次元液滴間隔が 3.75 以下の条件で燃え広がり限界圧力が若 干増大したのは, 火炎温度低下の原因に加え て当量比が約 4.5 以上であり,未燃液滴周り の空気が燃え広がり火炎によって加熱される と更に未燃液滴周りの当量比が増大するため, 途中消炎が若干高い圧力で発生したと推察さ れる.実験の範囲全体で見ると, 燃え広がり 火炎の途中消炎現象は, 無次元液滴間隔にあ まり依存していないことがわかった.

# 4. 結言

低圧力雰囲気の微小重力環境で燃料液滴列 を燃え広がる火炎を観察した.液滴間隔と雰囲 気圧力が正規化燃え広がり速度に及ぼす影響 を調べた.得られた知見を下記の通りに示す.

- 7) 雰囲気圧力が減少すると、正規化燃え広が り速度が増大する. 雰囲気圧力が 0.030 MPa 以下になると燃え広がり火炎の消炎 現象が観察された.
- 火炎燃え広がりの限界圧力はほぼ無次元液 滴間隔に依存せず、0.025 から0.030 MPa の間であった.

## 参考文献

- M. Mikami, N. Sano, H. Saputro, H. Watari, T. Seo., "Microgravity Experiment of Flame Spread over Droplets at Low Pressure" Int. J. Microgravity Sci. Appl. Vol. 31, No.4, 2014, pp.172-178.
- 2) S, Kitta, Y. Suganuma, H, NOMURA, Y, UJIIE., "Effect of Ambient Pressure and Droplet spancing on a Flame Spreading along a Fuel Droplet Array under Microgravity Conditions" Proc. the Fifty-Fourth symp. on combust., Sendai, Japan, 2016, B231.
- N. Sano, N. Motomatsu, H. Saputro, T. Seo, M. Mikami., "Flame-Spread Characteristics of n-Decane Droplet Array at Different Ambient Pressure in Microgravity" Int. J. Microgravity Sci. Appl. Vol.33, No. 1, 2016, 330108.