燃料液滴列を燃え広がる火炎に誘発された複数の移動液滴の挙動

日大生産(院) ○須藤 久美子 日大生産工 野村 浩司 宇宙航空研究開発機構 菊池 政雄 山口大 三上 真人

1. 諸言

噴霧燃焼はディーゼル機関など工業的に幅 広く使用されている液体燃料の燃焼方式の-つであるが,燃料の微粒化,蒸発,蒸気の拡散, 点火,火炎の形成,および消炎など,多くの過 程が同時に進行し, 燃焼機構が複雑なため, 未 だ完全な機構解明には至っていない.現在,噴 霧燃焼機構の解明を目的とした燃料液滴列の 火炎燃え広がりを対象とする種々の実験・数値 解析が行われている.しかしながら、その多く が空間に固定された液滴の列を対象としてお り,火炎燃え広がりが液滴の運動に及ぼす影響 や液滴の運動が火炎燃え広がりに及ぼす影響 は調べられていない. Nomuraらは、燃料液滴 の列方向運動に着目した研究として,振り子の 先端に液滴を懸垂することで液滴の列方向移 動を可能にし、固定一固定一列方向移動可能液 滴の正ヘプタン 3液滴列の実験モデルを用い, 火炎の燃え広がり実験を通常重力¹⁾および微小 重力環境²⁾で行った.本研究では,図1のような, 固定液滴および列方向移動可能液滴を直線状 懸垂線に配置した液滴列モデルを用い,火炎燃 え広がりおよび液滴運動の相互作用について 調査を行った.振り子懸垂線を用いて液滴の列 方向移動を可能にする実験モデルに比較し,移 動可能液滴の懸垂方法が非常に単純であるた め,複数の列方向移動可能液滴を容易に配置す ることができる.本稿では固定液滴を4個,移 動可能液滴を1または2個配置し、火炎燃え広が りが液滴運動に及ぼす影響を調べた.

2.実験方法および測定方法

図1 に本研究で用いる液滴列モデルを示す. 水平に張られた長さ30 mmの直線状懸垂線に 液滴を懸垂・配置することにより,液滴の 列方向移動を可能にした. 懸垂線には直径78 µm のSiCファイバ (Specialty Materials社製 SCS-9A)を用いた.移動可能液滴は懸垂線上 を移動するため,液滴と懸垂線間にて発生する 抗力の影響を考慮する必要がある.過去の研究 から懸垂線に化学的表面処理および研磨処理





Fig.2 Schematic of the experimental apparatus.

を施すことで実験に使用可能な懸垂線を製作 することが可能となった. 点火源の影響を排除 するため、点火源に近い第1液滴から第4液滴は 固定液滴とし,各固定液滴中心間距離が1.6 mm ±10%となるように配置した.固定液滴中心間 隔SFは固定液中心間距離の平均値とした.固定 液滴用に, 懸垂線にアルミナが主成分の CERAMABOND 569 (AREMCO社製)を用い て紡錘状のセラミックビーズを作製し, CERAMABOND 569-T (AREMCO社製)でコ ーティングを施した. ビーズを包含するように 液滴を生成し、固定液滴とした.列方向移動可 能液滴は, 懸垂線に炭酸ガスレーザ光で作成し た微小荒れスポット上に生成することで, 初期 位置に静止させた. 微小荒れスポットが液滴と 懸垂線の抗力を増大させることはなかった.燃 料には正デカンを用いた.装置は液滴列支持部, 液滴列生成装置,液滴列移動装置,点火装置, 燃料供給ポンプ,制御装置,および現象撮影装 置から構成される.実験装置の概略図を図2に 示す. 液滴列支持部は前述の直線状懸垂線を取 り付けるためのU字型フレームである. 直径1

Motion of plural movable droplets induced by flame spread along a fuel droplet array

Kumiko SUTO, Hiroshi NOMURA, Masao KIKUCHI and Masato MIKAMI

mm のステンレス管をまげて製作した.

燃え広がり実験時に懸垂線が熱膨張により 若干延びるので, 点火源側の懸垂線固定部は軸 方向にはほぼ自由とした. 液滴列支持部の移動 機構としてスライダ・クランク機構を採用した. マイクロステップのステッピングモータを用 いることにより,液滴列生成後に支持部を移動 させても液滴列配置が乱れないようにした.燃 料は,燃料供給ポンプからテフロンチューブお よびステンレス管を介して,液滴列生成装置に 送られる. 燃料供給ポンプにはシリンジポンプ を用いた. ポンプ駆動用ステッピングモータに 送信するパルス数で燃料の吐出量を制御し,液 滴列生成部に装着された先端外直径約40 μm のガラス針から吐出した.一つの液滴を懸垂線 上に生成した後,液滴列移動装置により懸垂線 を列方向に移動させ、次の液滴を生成した.こ れを繰り返すことにより、液滴列を生成した. 液滴生成装置が燃焼実験の妨げにならないよ う,生成された液滴列は液滴列移動装置によっ て生成位置から観察位置まで水平方向に移動 させた. 点火源として直径0.29 mmの鉄クロム 線をループ状にして液滴列支持部に設置した. 通電することで第1液滴への点火を行った.火 炎燃え広がり現象は、高速度ビデオカメラ(撮 影速度500 fps, 露光時間1998 µs)を用いて観 察した. 液滴列の背後に配置した光源を高速度 カメラに同期させて2コマに1回の周期で点滅 させ, 点灯時に液滴の輪郭を, 消灯時に火炎を 撮影した. 画像解像度は0.02 mm/pix である. 燃料液滴生成装置,液滴列移動装置,点火装置 および高速度ビデオカメラの制御には、シーケ ンサを用いた.

実験は室温・大気圧・通常重力環境で行った. 初期固定-移動可能液滴間隔S_{0F-M1}は第4固定 液滴と移動可能液滴の初期中心間距離とした. 初期移動可能液滴間隔S_{0M1-M2}は, 第1と第2移動 可能液滴の中心間距離である. 液滴を懸垂線と 平行な回転軸を持つ回転楕円体と見なし,液滴 直径dは液滴の短径a(懸垂線に直角な方向で計 測)および長径 b (懸垂線に平行な方向で計 測) を用いて *d* = (*a*²*b*)^{1/3}で計算される等価体積 液滴直径を用いた.初期液滴直径 do には,第 1液滴を除く全液滴の平均初期直径を用いた. 平均値算出に用いるいずれかの液滴の直径が 平均値の±5%の範囲を超えていた場合は、実験 データを無効とした. 初期液滴直径は0.8 mm ± 5%で一定とした.移動可能液滴の位置X_Mは、 第4固定液滴の中心を原点とする列方向,点火 源から遠ざかる向きを正とするX軸(図1参照) の座標とした.移動液滴の変位ΔXは,移動可



Fig.3 History of 1st movable-droplet position.



Fig.4 Histories of 1st movable-droplet position at short span.



Fig.5 Flame-spread limit of the initial spacing between a fixed droplet and a movable droplet.

能液滴の初期位置をからの変位であり,点火源 から遠ざかる向きの変位を正とし,近づく向き の変位を負とする.

3.実験結果および考察

3.1 単数移動可能液滴火炎燃え広がり実験 移動可能液滴が1個の条件の変位履歴を図3 に示す. グラフの横軸は, 第2固定液滴が点火 した時刻からの経過時間を示している. 液滴の 点火時刻の定義は,燃え広がり火炎が液滴の中 心を含む懸垂線に垂直な面に達した時刻とし た. 初期固定-移動可能液滴間隔SoFMI=1.42 mmでは, t=0.052 sで移動可能液滴が正方向に 移動しながら点火し, 梅村らの分類による燃え 広がり形態3)はモード1であった.初期固定-移 動可能液滴間隔SoF-M1がさらに狭い条件での移 動可能液滴の変位履歴を図4に示す.移動可能 液滴が正方向へ移動して点火した後,負方向へ 移動し燃焼中の固定液滴と合体した.これは点 火した移動可能液滴が一時は固定液滴の群燃 焼火炎に押されて正方向へ移動するが,エンベ ロープ火炎が形成されることにより負方向に も推力が働き、そのエンベロープ火炎との群燃 焼火炎が合体することで移動液滴の正方向推 力が減少し,移動液滴が負方向に移動し始める と考えられる. 第4個固定液滴から移動可能液 滴への燃え広がり形態はモード2であった.こ の現象はSor-MIが狭い条件で観察されることが わかった.

移動可能液滴が1個の条件で移動可能液滴が 点火した時点の移動可能液変位ΔX_{ig}に及ぼす 初期固定-移動可能液滴間隔Sor-MIの影響を調 べた.結果を図5に示す.移動可能液滴に燃え 広がりが起こった場合は白丸,燃え広がった後 に移動可能液滴が負方向へ移動したものは二 重丸,燃え広がりが起こらなかった場合は黒丸 のプロットで ΔX_{ig} を示した.ただし、移動可能 液滴に燃え広がりが起こらなかった場合の ΔX_{ig}は0と表示した. 燃え広がり後に負方向に 移動する S_{0F-M1} が狭い条件では、 ΔX_{is} が非常に 大きいことがわかる.また,燃え広がり限界付 近でも ΔX_{ig} は大きいことがわかった. S_{OF-MI} が 1.55 mmを超えると移動可能液滴への燃え広が りは全く起こらなかった.固定液滴から列方向 移動可能液滴に燃え広が起こる限界の SoFMI は1.54 mm付近であることがわかった. 固定-移動可能液滴間の燃え広がりは,固定-固定液 滴間の燃え広がりと比較して,燃え広がり限界 液滴間隔が狭く,液滴の移動が火炎の燃え広が りを妨げていることがわかる.



Fig.6 Histories of movable-droplet position.

3.2 複数移動可能液滴火炎燃え広がり実験

2つの移動可能液滴を含む燃料液滴列につい て初期固定 – 移動可能液滴間隔 S_{0F-M1} を1.43 mmで固定し、初期移動可能液滴間隔 S_{0M1-M2} を 変化させて火炎の燃え広がり挙動を観察した. 燃え広がり挙動は 4つのパターンに分類する ことができた.各パターンの移動可能液滴の位 置履歴を図6に示す.

パターン1の例である図6(a)では, t = 0.032 s で第4固定液滴が点火し,第1移動可能液滴は正 方向に移動を始めた. t = 0.058 sにおいて,モ ード1の燃え広がり形態で第1移動可能液滴が 点火,t = 0.068 sに第2移動可能液滴と合体し始 めている.その後,t = 0.096 sにおいて,合体 した移動可能液滴のエンベロープ火炎が消炎 した.これは,合体により液滴温度が急激に降 下したことが原因と考えられる.合体した移動 可能液滴はそのまま正方向へ移動を続けた.

パターン2の例である図6(b)では、t = 0.032 s で第4固定液滴が点火し、第1移動可能液滴は正 方向に移動を始めた. t = 0.052 sにおいて第1 移動可能液滴が点火した. t = 0.076 s付近から 第2移動可能液滴も正方向に移動を開始し、t =0.088 sにおいてモード1の燃え広がり形態で 点火した. t = 0.112 sにおいて第1移動可能液滴 が第2移動可能液滴に追いつき合体、その後停 止した. t = 0.288 sにおいて、合体した移動可 能液滴は落下した.移動する液滴の前方と後方 に火炎面が存在する場合、液滴は減速し、やが て停止することがわかった.

パターン3の例である図6(c)では、t=0.028 s で第4固定液滴が点火し、第1移動可能液滴は正 方向に移動を始めた. t=0.046 sにおいて、第1 移動可能液滴が点火し、t=0.066 sから減速を 開始、第2移動可能液滴に追いつかずに停止し た.第2移動可能液滴は正方向へ移動しながらt= 0.098 sにモード1の燃え広がり形態で点火 し、青炎が進行方向前方まで形成されると減速、 停止した. t=0.228 sにおいて第1移動可能液滴 が落下. t = 0.262 sには第2移動可能液滴も落 下した.第1および第2液滴にエンベロープ火炎 が形成され、両者が停止したときの液滴間隔は、 初期液滴間隔の1.2倍であった.

パターン4の例を図6(d)に示す. t = 0.036 sで 第4固定液滴が点火した. 第1移動可能液滴は 正方向に移動をしながら, t = 0.052 sにおいて 点火し, t = 0.076 sから減速しはじめ, その後 停止した. t = 0.074 sから第2移動可能液滴は正 方向へ移動を開始し, t = 0.198 sに視野外まで 移動した. t = 0.214 sに第1移動可能液滴は落下 した. 第1移動可能液滴は進行方向前方と後方



Fig.7 Effect of the initial spacing between movable droplet on the flame-spread pattern.

に火炎が存在するので減速・停止し,第2移動 可能液滴は第1移動可能液滴の火炎に第1移動 可能液滴側が局所的に加熱されるので,X軸の 負方向側に燃料蒸気が強く噴出し,正方向へ大 きく移動したと考えられる.以上の4つの燃え 広がりパターンと初期移動可能液滴間隔の関 係を図7に示す.初期移動可能液滴間隔の増大 に伴って,燃え広がりパターンが1から4に向か って変化することがわかる.初期固定-移動可 能液滴間隔を1.60 mm とした場合は,初期移動 可能液滴間隔を2.60 mm とした場合は,初期移動 可能液滴間隔を2.60 mm とした場合は,初期移動

4.結言

通常重力環境下で単数または2個の移動可能 液滴を含む液滴列火炎燃え広がり基礎実験を 行った.燃料は正デカン,初期液滴直径は0.8 mmとした.以下に得られた知見を列挙する.

- (1) 初期固定 移動液滴間隔が狭い条件において,固定液滴から遠ざかりながら点火した移動可能液滴が移動方向を反転し,固定液滴と合体するという新しい燃え広がり挙動が見つかった.
- (2) 固定液滴から移動可能液滴への燃え広が り限界初期液滴間隔は1.5 mm付近である ことがわかった.
- (3) 第1移動可能液滴に火炎が燃え広がる固定-移動可能液滴間隔1.43 mmの条件において、移動可能液滴間隔を変化させ、火炎の燃え広がり挙動を観察した. 燃え広がり挙動は4つのパターンに分類された.

「参考文献」

- 1. Nomura, H., et al., Proc. Combust. Inst., 30 (2005), 1991-1999.
- 2. Nomura, H., et al., Proc. Combust. Inst., 32 (2009), 2163–2169.
- 3. 梅村章, 日本機械学会論文集B編, 68 (2002), 2422-2428.