燃料液滴列における液滴挙動が火炎燃え広がりに及ぼす影響

日大生産工(院)	瀬谷	昭範	日大生産工	野村	浩司
日大生産工	氏家	康成	(株)ノーリツ	原	人志

1. 緒言

噴霧燃焼は,ガスタービン,ボイラ,ディー ゼル機関などの燃焼器に広く用いられている 燃焼方式である.化石燃料の枯渇問題および地 球環境問題の解決が急務の課題となっている 今日,噴霧燃焼の機構を解明することは,これ らの燃焼器の性能向上に寄与し、燃料消費率の 低減および有害排出ガス削減などに役立つと 考えられる.噴霧燃焼は,燃料蒸発,拡散・混 合,燃焼の過程が同時に進行するため,現象を 直接解析することは非常に困難である.噴霧燃 焼を解明するため、噴霧燃焼の基礎研究として 最小構成単位である単一燃料液滴の蒸発 ,燃焼 の研究が過去に行われてきた1).単一燃料液滴 の研究で得られた知見を噴霧燃焼に拡張する ためには、燃料液滴列の燃焼に関する研究が必 要である.従来の燃料液滴列の燃え広がり実験 において,他研究者は,液滴を懸垂線で空間に 固定して実験を行っていた2-5).しかしながら, 液滴を固定して行う実験では、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を調べることがで きない.そこで,液滴を列方向移動可能にして 実験を行った結果,列方向移動可能液滴は先行 して燃焼する液滴の影響を受けて未燃側に移 動することが確認された⁶⁾.本報告では,固 定 - 固定 - 列方向移動可能液滴の3液滴列およ び固定 - 固定 - 固定液滴の3液滴列の火炎燃え 広がりを比較し ,火炎の燃え広がり挙動 ,火炎 燃え広がり限界、および燃え広がり遅れ時間に 及ぼす液滴移動の影響を調べた結果を報告す る.

2.実験装置および実験方法

実験装置の概略を図1に示す.装置は,液滴 懸垂部,燃料送り装置,点火装置,液滴生成装





置,それらを制御するシーケンサからなる.懸 垂線には線径15 μmのSiCファイバを使用した. 燃料送り装置は、マイクロシリンジをステッピ ングモータによって駆動されるステージで押 すことにより、高精度に燃料吐出量を制御でき る.3本のマイクロシリンジを燃料送り装置に 装着することで3個の液滴を同時に生成した. 燃料には正ヘプタンを用いた .雰囲気には大気 圧の空気を用い,空気温度は300±3Kである。 液滴初期直径は,0.8 mm ± 10%とした.液滴 生成装置は,エアスライドステージとそれを制 御する流量調整弁により構成されている 燃料 液滴を懸垂線に付着しやすくするため,懸垂線 先端に300 ~ 400 µmのセラミックスの玉を つけた.図2に,液滴懸垂部を示す.点火線に 近い方から第一懸垂線,第二懸垂線,第三懸垂 線と呼ぶことにする.第三懸垂線の列方向移動 は,振り子機構を用いることにより可能にして いる.振り子の支持部には輪を設け,懸垂線が 液滴の列方向移動を妨げる力を低減するように

Effect of Droplet Behavior on Flame Spread of a Fuel Droplet Array

Akinori SETANI, Hiroshi NOMURA, Yasushige Ujiie and Hitoshi HARA

工夫した.懸垂線の全長を30 mmと長くするこ とで,振り子の周期を長くし,鉛直方向の移動 を少なくした.第三液滴に固定懸垂液滴を使用 する実験においては,振り子式懸垂線を第一お よび第二懸垂線と同じ固定懸垂線に付け替えて 実験を行った.点火装置には,電気火花点火方 式を採用し,液滴に対する加熱の影響を最小限 にした.現象の撮影では,バックライトによっ て写し出された液滴と火炎の自発光を,イメー ジインテンシファイア付き高速度カメラによっ てデジタル画像として記録した.高速度カメラ の撮影速度は1000 fpsとした.

液滴直径dには 液滴の短径aおよび長径bとし d=(a²b)^{1/3}と定義される等価液滴直径を用い た.液滴間隔は,第一および第二、第二および 第三懸垂液滴の初期中心間距離の平均値を3つ の液滴の平均初期直径doで除し,無次元液滴間 隔sとした.第三懸垂液滴の変位は,初期位置を 基準にした変位をdoで除して無次元変位dxigと した.ただし,第二懸垂液滴から遠ざかる方向 を正とし,第二懸垂液滴に近づく方向を負とす る.

3.実験結果および考察

3.1 火炎燃え広がりモード

燃え広がりモードの定義を図3に示す.モー ド1は第三懸垂液滴が第二懸垂液滴の初期エン ベロープ火炎の内側に存在し,点火した場合, モード2は第三懸垂液滴が第二懸垂液滴の初期 エンベロープ火炎の外側に存在し,第二懸垂液 滴の火炎が第三懸垂液滴周囲の燃料蒸気 - 空 気混合気に伝播する場合,モード3は第三懸垂 液滴の火炎が第二懸垂液滴の火炎とは独立し て発生する場合とした.

3.2 燃え広がりが液滴挙動に及ぼす影響

図4の連続写真は,移動液滴の変位がほぼ最 大となるs = 5.6の場合の火炎燃え広がり挙動 の画像である.第一液滴が点火した時刻をt = 0s とした.t = 0.03 s において移動可能液滴は 移動を開始し,t = 0.04 s において点火する. t = 0.09 sで,点火後の移動可能液滴の正方向 移動量は最大となる.t = 0.20 sでは,自然対 流と振り子の復元力により,移動可能液滴が負 方向へ移動をすることがわかる.s が5から6 の範囲で,先行して燃焼する液滴の熱膨張流お











Fig.4 Sequential images of flame spread. (s = 5.6)

よび既燃ガスの流れにより,移動可能液滴が正 方向に移動する現象を確認した.火炎燃え広が りが液滴の移動を誘起することがわかったの で,本報告では液滴の移動が火炎燃え広がりに 及ぼす影響を調べた.

3.3 液滴挙動が火炎燃え広がりに及ぼす影響

図5に,各火炎燃え広がりモードが現れる無次元液滴間隔を(固定-移動可能)液滴間と(固定-移動可能)液滴間と(固定・固定)液滴間で比較して示す.燃え広がりが起こらなかった事象はゼロとして示した.移動可能液滴の場合,正方向に移動した後に,振り子の復元力および自然対流の影響によって負方向へ移動を転じ,点火するような事象がある^[3].このような事象は,燃え広がりが起こらなかったとして扱い,モードをゼロと表示した.移動可能液滴の場合,モードが遷移する無次元液滴間隔は,固定液滴と比較して,若干小さいことがわかる.火炎燃え広がり限界については,前述の移動液滴の戻り現象があるため,この図から議論することはできない.

図6に,(固定-移動可能)液滴間と(固定-固定)液滴間の燃え広がり遅れ時間を示す.燃 え広がり遅れ時間は,第二懸垂液滴に火炎が発 生したのを確認してから、第三懸垂液滴に火炎 が発生するまでの時間と定義した.また,火炎 の発生時刻が判断しにくいモード1については, 図に結果を示していない.各点は, s = 2.5から 7までの範囲を0.5間隔に分割し、それぞれの分 割範囲について平均をとった値である.平均値 をとった母集団において、燃え広がり遅れ時間 の最大値と最小値をエラーバーで示した.(固 定 - 移動可能)液滴間および(固定 - 固定)液 滴間いずれの場合も 燃え広がり遅れ時間は無 次元液滴間隔の増大とともに増大し, s = 5.5 付近から急激に増大することがわかる.また, (固定 - 移動可能)液滴間の場合は,(固定 -固定) 液滴間の場合より燃え広がり遅れ時間 は長い.これは,移動可能液滴に燃え広がりが 起こる前に、第二液滴から遠ざかる方向に移動 可能液滴が移動するのが原因と考えられる.

図7に,(固定 - 移動可能)液滴間と(固定 -固定)液滴間について,燃え広がり速度を示す. 燃え広がり速度は,液滴間隔を燃え広がり遅れ 時間で除することによって求めた.図3同様, モード2および3について結果を示した.無次



Fig.6 Relation between dimensionless span and flame spread delay time.



Fig.7 Relation between dimensionless span and flame spread speed.

元液滴間隔が増大するとともに ,燃え広がり速 度は減少する.(固定-移動可能)液滴間の燃 え広がり速度は,(固定-固定)液滴間の燃え 広がり速度と比較して小さく,その差は,無次 元液滴間隔の増大に伴って減少することがわ かる .先行して燃焼する第二液滴の初期火炎半 径の値は, doで除した無次元値で約2.5であり, 第三液滴が第二液滴の初期火炎から遠ざかる に従って火炎燃え広がり速度が単調に減少す ることがわかった.また,(固定-移動可能) 液滴間の燃え広がり速度がほぼゼロとなる無 次元液滴間隔においても , (固定 - 固定)液滴 間の燃え広がり速度は(固定 - 移動可能)液滴 間の燃え広がり速度より大きいことより,(固 定 - 移動可能)液滴間の燃え広がり限界は(固 定 - 固定)液滴間の燃え広がり限界より短くな ることが予想される.

図8は,移動可能液滴が点火した時点の無次 元変位Axigと無次元液滴間隔の関係を示して いる.変位の測定精度は,0.0225 mmであり, 無次元変位にすると0.028である.s=5付近ま では、計測できる程度の変位はみられなかった. S=5付近から△xigは急激に増大し,燃え広がり 限界付近であるs = 6.0付近で最大値を示す. s=6.3を超える領域については,移動液滴が負 方向に移動を転じてから点火した事象が含ま れていたため,結果を示していない.s = 5付 近までは移動可能液滴の変位が計測されなか ったが、火炎面近傍の温度勾配は急峻であるた め、計測できない程度の液滴の正方向微小変位 が燃え広がり速度を減少させていると考えら れる、今後,無次元液滴間隔が小さい領域につ いて詳細に調べる予定である.

4. 結言

通常重力場において,(固定 - 固定 - 列方向 移動可能)および(固定 - 固定 - 固定)の3液滴 列の火炎燃え広がりを比較し,以下の知見を得た.

- (1)(固定 移動可能)液滴間の場合,火炎燃 え広がりモードが遷移する無次元液滴間 隔は,(固定 - 固定)液滴間と比較して, 若干小さい.
- (2)(固定 移動可能)液滴間の燃え広がり遅れ時間は,(固定 固定)液滴間と比較して,長い.



Fig.8 Relation between dimensionless span and dimensionless displacement at ignition.

- (3)(固定 移動可能)液滴間の燃え広がり速度は,(固定 固定)液滴間の燃え広がり速度と比較して小さい.また,火炎燃え広がり限界の無次元液滴間隔は,(固定 移動可能)液滴間の場合の方が,(固定 固定)液滴間の場合よりも短くなることが予想された.
- (4) 移動可能液滴の点火時の変位は,無次元液 滴間隔が5付近から急激に増大し,燃え広 がり限界付近で最大値を示す.
- 5.参考文献
- 角田敏一,佐藤公美,瀬川大資, 丸谷洋一,佐藤順一, 機論B,65 (1999),pp.310-315
- 2). 岡島 敏・木本哲郎・阿部和利・山口修次, 機論B,47 (1981),pp.2058-2065.
- 加藤伸一郎・小林秀昭・新岡 崇, 第35回燃焼シンポジウム講演論文集, pp.624-626(1997).
- 4).吉田茂徳・原 人志・岡島 敏, 機論B,55 (1989),pp.1241-1245.
- 5) .角田敏一,小浜良太,瀬川大資,津江光洋, 機論B,65 (1999),pp.303-309.
- Nomura,H,.Takahashi,M.,Ujiie,Y., Hara,H., The proc.Comb.Inst. ,Vol.30. (to be pubrished)