

正ヘプタン液滴列燃焼時の液滴間に発生する力の計測

日大生産工(院) ○桃井 亮多 日大生産工 野村 浩司 日大生産工 菅沼 祐介

1. 緒言

世界的なエネルギー消費量は経済成長とともに増加を続けている。特に人口の多い中国、インドを中心としたアジア太平洋地域における今後のエネルギー消費量の大幅な増大が懸念されている。それに加え、世界で使用されている一次エネルギーの約9割は石油・石炭・天然ガス等の化石燃料であり、扱いやすいエネルギー源である化石燃料は今後も開発途上国の成長とともに大量に消費されることが予想される。大量消費に伴い、燃焼の過程で排出される物質による大気汚染や地球温暖化などの環境問題が深刻化する懸念がある。そこで、有害排出ガスの削減や燃料消費率の低減に一般に広く用いられている噴霧燃焼の機構解明が役立つと考えられる。噴霧を微視的に捉えやすくするために単一液滴・液滴列・液滴群といった要素に噴霧を単純モデル化し、研究が進められている^{1,2)}。過去には燃料液滴の列方向移動に着目し、単数および複数の移動可能液滴を含む液滴列火炎燃え広がり実験を行い、火炎燃え広がりと液滴挙動の関係を調べられてきた¹⁻³⁾。しかしながら、液滴を移動させる力について詳細は明らかにされていない。そこで、本研究では液滴列燃焼時に液滴を移動させる力に着目し、2液滴の正ヘプタン燃焼時に液滴間に発生する力を定量的に調べた。本稿では、採用した懸垂方法による燃焼時に発生する力の算出方法、単一および2液滴燃焼実験の結果を報告する。

2. 実験方法および測定方法

2.1 実験方法

実験装置の概略を図1に示す。実験装置はV

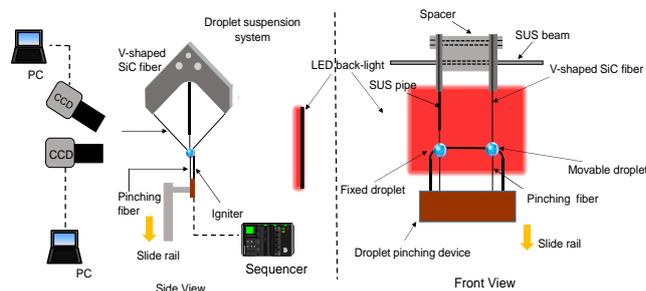


Fig.1 Experimental apparatus.

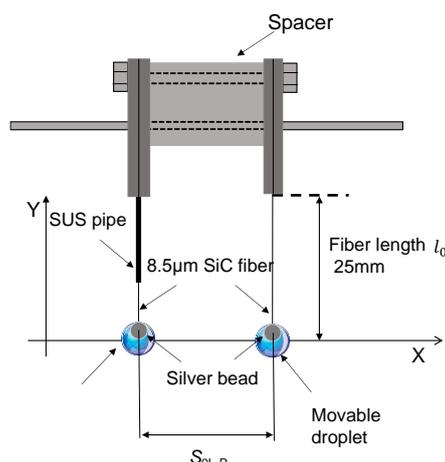


Fig.2 Droplet suspension system.

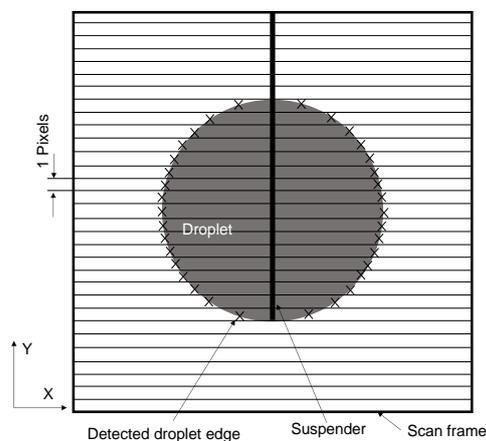


Fig.3 Schematic of digitized droplet image.

Measurement of the Force Generated by n-heptane Droplets Combustion

Ryota MOMOI, NOMURA and Yusuke SUGANUMA

字型液滴懸垂線機構、液滴支持器、点火装置、および現象撮影装置から構成されている。懸垂線には SiC ファイバ(直径 8.5 μm , 宇部興産社製)を使用する。V 字の交点には、液滴を付着し易くするためと液滴の移動量を小さくするため、銀ペースト(化研テック社製, CM-3212)で銀ビーズを設けた。図 2 に V 字型液滴懸垂線機構の詳細を示す。V 字型液滴懸垂線機構は実験を単純化するため、固定液滴懸垂用と移動可能液滴懸垂用で構成されている。固定液滴懸垂用には直径 0.6 mm のステンレスパイプに SiC ファイバを内挿したものを使用している。点火時は液滴支持器に設置された直径 14 μm の SiC ファイバで液滴を固定する。点火の擾乱が減衰した時点で液滴支持器を下方に液滴から引き抜き、擾乱が液滴運動に及ぼす影響を排除した。現象撮影装置には、液滴観察用(SONY 社製, XCD-MV6, 撮影速度 120 fps, 露光時間 3.3 ms)および火炎観察用(SONY 社製, XC-555, 撮影速度 30fps) に CCD カメラ 2 台を用いた。全ての実験は、室温、大気圧、および通常重力環境で行った。初期液滴直径 d_0 は 1.0 mm \pm 5% とし、燃料には正ヘプタンを用いた。

2.2 液滴位置計測方法

液滴直径履歴の取得には、液滴背後から LED ライトを投射することで液滴輪郭を撮影するバックリット法を用いた⁽⁴⁾。図 3 に概略を示す。液滴観察用 CCD カメラ(空間分解能 128 pix/mm)で得られた動画をデジタル静止画像に分解し、画像上の液滴像を含む解析領域を設定した。各ピクセルラインの X 方向光強度プロファイルから、背景光強度と液滴光強度を求め、それらを 2 対 1 に内分する光強度以上の光強度を示すピクセルの中で最も懸垂線に近いピクセルの位置を液滴の輪郭位置とし、輪郭位置の差をそのピクセルラインの液滴幅とした。液滴幅が最大液滴幅の 50% を超える全てのピクセルラインに対して最小平均二乗法により液滴輪郭位置を楕円近似し、液滴の中心位置を求めた。液滴直径は、求めた楕円を懸垂線と平行な軸まわりに回転させ

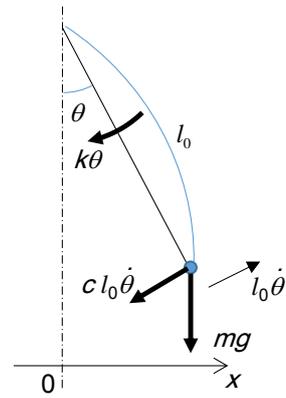


Fig.4 Pendulum suspender model.

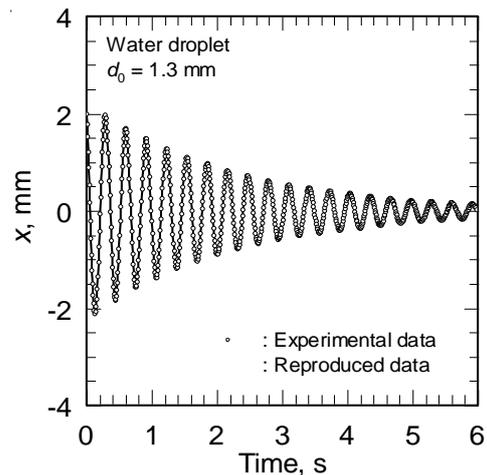


Fig.5 Experimental results and reproduced results.

た回転楕円体の体積と等価な体積を持つ球の直径と定義した。

2.3 力の算出方法

現象を単純化し、V 字型液滴懸垂機構に懸垂された液滴の運動方程式を空気抵抗を受ける振り子運動で記述した。図 4 にモデルを示す。懸垂線の質量は無視し、振れ角 θ が十分に小さいとすると、運動方程式は次式となる。

$$m\ddot{x} = -\frac{k+m_l g}{l_0^2}x - c\dot{x} + f(t) \quad (1)$$

ここで、 x は釣り合い点から液滴中心までの水平距離、 m は液体燃料と銀ビーズの質量の和、 l_0 は振り子の腕長さ、 g は標準重力加速度、 c は空気抵抗の係数、 k はトルクばね係数である。また、 f は液滴間に作用する力であり、時間 t の関数とした。燃焼実験においては、 m および c は液滴直径の関数とした。以上より、液滴間に作用する力の計算に用いた式は、

$$f(t) = m(d) \cdot \ddot{x} + c(d) \cdot \dot{x} + K(d) \cdot x \quad (2)$$

である。ただし、

$$K(d) = \frac{k+m(d)l_0g}{l_0^2} \quad (3)$$

である。力を求めるためには、 K と c を液滴直径の関数として求めておく必要がある。そこで、単一の非燃焼および燃焼液滴を微小振動させて、 K と c を同定した。非燃焼の実験には、液滴の蒸発が無視できる水を正へプタンの代わりに用いた。

3. 実験結果および考察

3.1 係数同定実験

水液滴を単振動させ、式(1)で近似した結果の一例を図5に示す。振り子の数値モデルが、V字型液滴懸垂機構に懸垂された液滴の運動を記述できていることがわかる。

初期直径の異なる水液滴を用い、 K を液滴質量(=液体質量+銀ビーズ質量)の関数として、 c を液滴直径の関数として求めた結果を図6に示す。 K は液滴質量とほぼ直線関係にあることがわかる。これは、式(3)から予想された結果である。また、 c はほぼ一定であることがわかる。本実験でのレイノルズ数は4未満である。空気抵抗が球体である液滴だけに作用していると考え、この結果はストークスの抵抗法則に反する。これは懸垂線に作用する空気抵抗が液滴に作用する空気抵抗を大きく上回っていることが原因ではないかと考えられる。力の計算においては、 c は液滴直径に依存しない一定値とした。

燃焼実験では、液滴および懸垂線周囲の気体温度が高温になる。粘性係数は温度に依存するので、 c については燃焼時の値を求めた。 K の値は、支点を含めた懸垂線の大部分が火炎の外にあるため、非燃焼時の値と変わらないと仮定した。正へプタン液滴を懸垂し、点火した後に振動させた実験で得られた液滴中心位置履歴から c を求めた結果を図7に示す。横軸は初期液滴直径である。式(4)において、 m と K は液滴直径の関数として計算し、 c は液滴直径に依存しないとして最小二乗法により決定した。

本実験装置で決定した係数及び空間分解能によって実際の燃焼実験において生じる力を

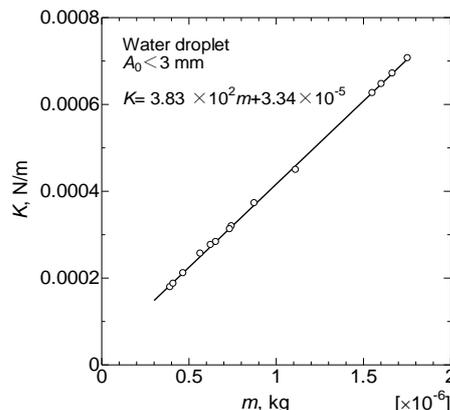


Fig.6 Coefficient of x in Eq. 2.

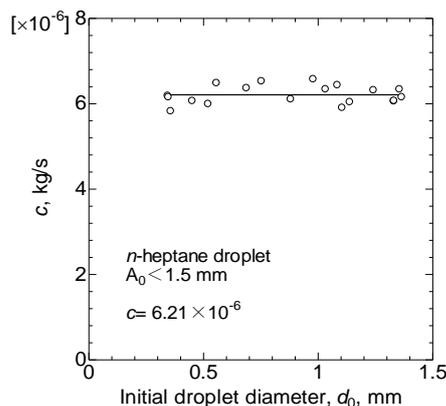


Fig.7 Coefficient of \dot{x} in Eq. 2 during combustion.

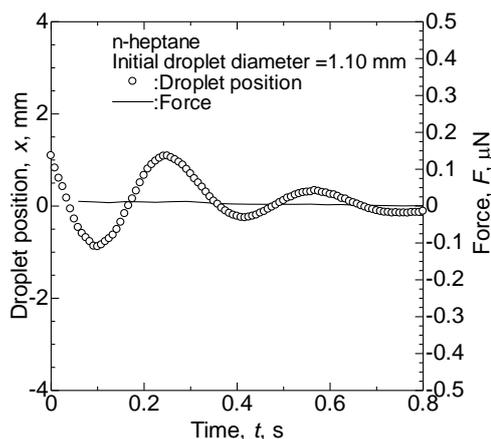


Fig.8 Histories of droplet position and force.

測定できるかの検討を行うため、単数液滴燃焼実験を行った。釣り合い位置から初期液滴位置をずらし、燃焼時に液滴を振動させ力を求めた。液滴の釣り合い位置は燃焼終了時の懸垂線の位置とした。結果を図8に示す。単一液滴・微小振動のため、式(2)から算出される力は0Nとなるはずであるが、残差ノイズとして0.025 μNを下回る程度の力が算出されていることがわかった。つまり、0.025 μNを

十分に超える力であれば、力を評価できることがわかった。

3.2 2液滴燃焼実験

初期液滴中心間隔 S_{OL-R} を変化させ、同時点火した場合の初期無次元液滴間隔と力の関係を調べた。結果を図9に示す。測定期間はピンチングデバイスを引き抜いた時点から、消炎までの時間としている。どの初期液滴間隔の場合も液滴に負方向の力が働いていることがわかる。これは無次元液滴間隔が狭いため、燃焼後期まで2つの液滴は群燃焼火炎に取り囲まれており、液滴負方向側よりも液滴正方向側の加熱が常に活発であることで、液滴を負方向側に移動させる力が生じたと考えられる。燃焼による液滴直径の減少に伴う無次元液滴間隔の増大により、力は次第に減少していくことがわかる。これは液滴直径が減少していくことで、液滴から発生する単位時間あたりの蒸気量が低下するため、推力が低下するためだと考えられる。また、初期無次元液滴間隔の増大に伴って、力の大きさが減少していることがわかる。この結果は、液滴間隔が減少するのに伴って移動可能液滴が負方向に移動する速度が速くなった過去の結果²⁾を説明できている。

4. 結言

液滴燃焼時に液滴を移動させる力に着目し、2個の正ヘプタン液滴燃焼時に液滴間に発生する力を定量的に調べた。以下に得られた知見を示す。

- 1) V字型液滴懸垂機構に懸垂された燃焼中の液滴運動を単純化した数値モデルを構築した。
- 2) 初期無次元液滴間隔4以下の条件では、燃焼中の液滴に働く力は常に負方向である。
- 3) 初期無次元液滴間隔が増大すると力の大きさの最大値は減少する。

「参考文献」

- 1) Hiroshi Nomura, Masashi Takahashi, Yasushige Ujiie and Hiroshi Hara., "Observation of droplet motion during flame spread on three-fuel-droplet array with a pendulum suspender", Proc. Combust. Inst. 30. (2005)

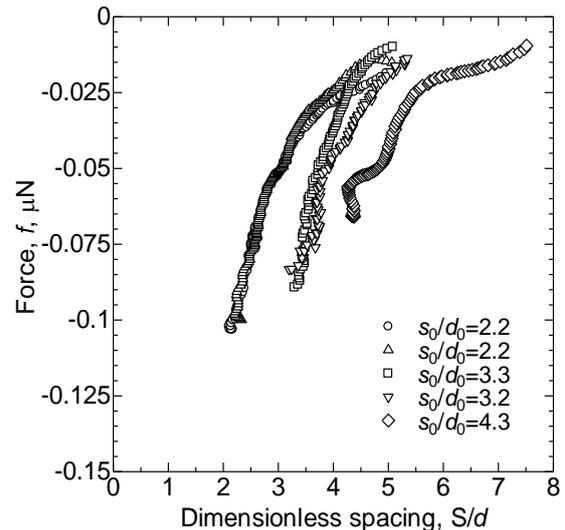


Fig.9 Force acting between two droplets as a function of dimensionless spacing.

p.1991-1999.

- 2) Hiroshi Nomura, Yusuke Suganuma, Akinori Setani, Masashi Takahashi, Masato Mikami and Hiroshi Hara., "Microgravity experiments on droplet motion during flame spreading along three-fuel-droplet array", Proc. Combust. Inst. 32. (2005) p.2163-2169.
- 3) 法華津 祥太, 第 52 回燃焼シンポジウム講演論文集 B344 464-465 (2014)
- 4) Hiroshi Nomura, Hiromu Takahashi, Yusuke Suganuma, Masao kikuchi, "Droplet ignition behavior in the vicinity of the leading edge of a flame spreading along a fuel droplet array in fuel-vapor/air mixture", Proc. Combust. Inst. 34. (2013) p.1593-1600