

正ヘプタン液滴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(院) 法華津 祥太
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、火炎燃え広がりやと液滴挙動の関係を調べられてきた^{1),2),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、本研究では液滴燃焼時に液滴を移動させる力に着目し、単一および複数での正ヘプタン燃焼時に発生する力を定量的に調べる。本稿では、液滴懸垂方法の選定、採用した懸垂方法による燃焼時発生力の算出結果、および燃焼実験の結果を報告する。

2. 懸垂方法の選定

液滴に発生している力を、液滴の位置を検出することで算出可能な液滴の懸垂方法を検討し、図1に示す3タイプ考案した。Aタイプは、現在行われている液滴列火炎燃え広がりやと液滴運動の相互作用を調べる研究に

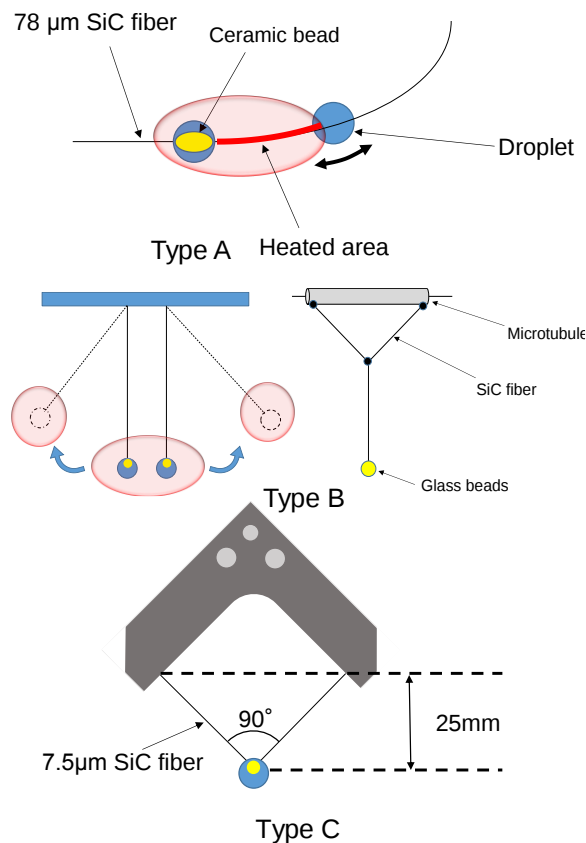


Fig.1 Droplet array system.

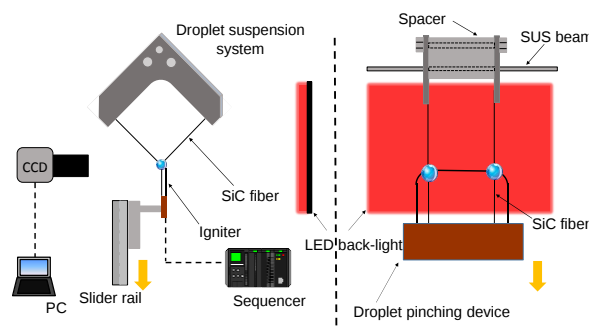


Fig.2 Experimental apparatus.

用いている移動可能液滴用懸垂線を利用する案である。実験装置を流用できるため比較的簡便に実験を行うことができる。しかしながら液滴が懸垂線上を移動する

Measurement of the Force Generated by n-heptane Droplet Combustion

Ryota MOMOI, Shota HOKETSU, Hiroshi NOMURA and Yusuke SUGANUMA

ため、固定液滴周囲に形成された火炎からの熱が懸垂線を伝わり、対象となる移動液滴に流入するという現象への影響が懸念される。B タイプは以前の研究で移動可能液滴を懸垂した振り子懸垂機構を利用する案である。液滴間に懸垂線が無いため、A タイプのような懸垂線の熱的影響は無いが、懸垂機構が非常に複雑で、振り子製作の再現性や複数個を精度よく並べることが困難であると予想される。C タイプはV字型に懸垂線を張り、振り子のように用いる案である。懸垂の構造が簡便であるため、複数個への対応や微小重力実験の減速時衝撃にも十分耐えうる構造あることから本研究ではCタイプを採用した。

3. 実験方法および測定方法

実験装置の概略を図2に示す。実験装置はV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、水ガラス(CERAMABOND 569T)でガラスビーズを設けた。図3にV字型液滴懸垂線機構の詳細を示す。単一液滴の実験を行う場合には(a)を、2液滴の実験を行う場合には(b)の機構を用いた。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、CCDカメラ(SONY社製,XCD-MV6,撮影速度 120 fps, 露光時間 3.3 ms)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る。

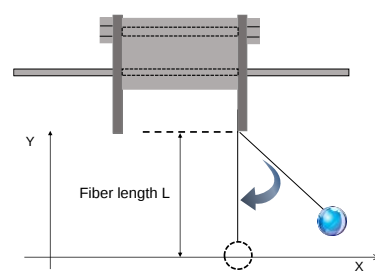
4. 実験結果および考察

4.1 振り子運動のモデル化

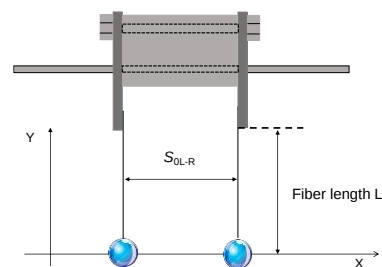
V字型液滴懸垂機構に懸垂された液滴の運動方程式を同定する。現象を単純化し、空気抵抗を受ける振り子運動で運動方程式を記述した。図4にモデルを示す。運動方程式は

$$m \frac{d^2 x}{dt^2} = -\frac{mg}{L}(x - x_0) - c \frac{dx}{dt} \dots (1)$$

で表すことができる。ここで m は液滴の質量、 x_0 はつ合い位置、 x は任意の時刻の位置、 L は腕長さ、 c は空気抵抗の係数である。よって位置は



(a) Single pendulum model.



(b) Double pendulum model.

Fig.3 Droplet-suspension system.

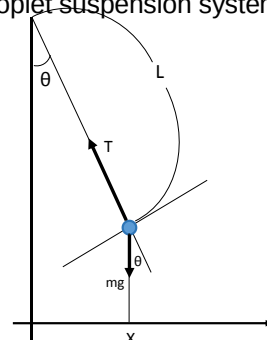


Fig.4 Pendulum suspender.

$$x = A_0 e^{-bt} \cos(\omega_d t + \varphi)$$

で表すことができる。ただし、 A_0 : 積分定数、 b : 減衰係数、 ω_d : 減衰系固有振動数、 φ : 位相、である。

液滴に作用する力 f は次式から求めた。

$$f(x) = m \frac{d^2 x}{dt^2} + c \frac{dx}{dt} + \frac{mg}{l}(x - x_0) \dots (3)$$

この数値モデルが、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かを検討するため、振動中に蒸発が無視できる水を液滴に使用して振動実験を行った。懸垂線の質量と懸垂線の弾性力を考慮し、振り子の腕長さは未知数として実験結果から同定した。また、空気抵抗の係数も懸垂線を考慮し、実験結果から同定した。図5に、液滴中心位置を数値モデルから算出した結果と実験結果を比較して示す。両者がよく一致していることがわかる。

燃焼実験では、液滴直径および質量が時々刻々変化するため、振り子の腕長さおよび空気抵抗の係数を液滴

直径の関数として求めておく必要がある。振り子の腕長さおよび空気抵抗の係数の液滴直径と依存性を調べた結果を図6に示す。実験には正ヘプタン液滴を用い、燃焼はさせずに室温で振動を観察した。液滴直径の増大に伴い、空気抵抗の係数は比例的に増大した。見かけの振り子腕長さは、液滴直径の減少と伴に直線的に減少した。燃焼時には液滴の周囲は高温の燃焼ガス雰囲気となり、図6(a)と異なる空気抵抗の係数を示すと考えられる。そのため高温環境下で空気抵抗の係数と液滴直径の関係を調べることが今後の課題である。ビーズの密度を増大させて液滴速度を小さくすることで、不確定な空気抵抗の係数の影響を抑制することも考えている。

4.2. 単数液滴燃焼実験

火炎が液滴挙動に与える影響を調べるため、単数液滴での実験を行った。釣り合い位置から初期液滴位置をずらすことで燃焼時に液滴を振動させた。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。振幅が小さい場合の液滴位置履歴を図7(a)に示す。画像解像度から、本解析による液滴に加わる力の測定精度は $0.01\ \mu\text{N}$ である。振動開始から燃焼終了までにかかった力の値に大きな変動は見られなかった。これは、液滴変位量が小さいことで液滴と火炎の相対位置が変わらず、液滴から発生する蒸気の液滴振動方向における不均一性が無かったためだと考えられる。振幅が大きい場合の液滴位置履歴を図7(b)に示す。振幅を大きくすると、液滴進行方向に逆方向の力が働いていることがわかる。また、液滴移動速度が極大になる時刻付近で力のピークが現れ、液滴位置履歴と力に位相差があることが確認できた。これは、液滴移動速度が大きいため、火炎と液滴の相対距離に液滴進行方向とその反対方向で差が生じたためと推察される。火炎よりも液滴の移動が先に起こるため、液滴進行方向側で火炎と液滴の相対距離が減少することにより、液滴進行方向逆方向の力が働いていたと考えられる。また過去の研究結果⁴⁾からもこの速度において、液滴と火炎の相対位置に変化が観られていることは、この考察を支持している。ただし、空気抵抗の係数は温度が高くなると増大することから、室温で測定した空気抵抗の係数を力の算定に用いたことが原因で得られた結果である可能性も充分にある。

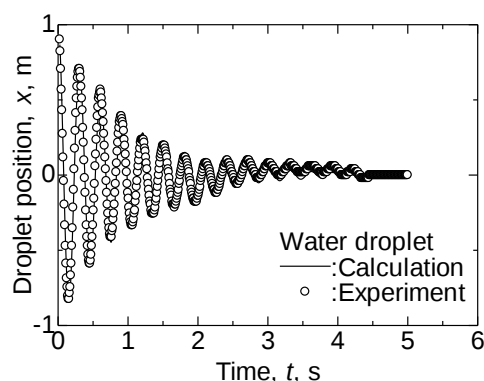
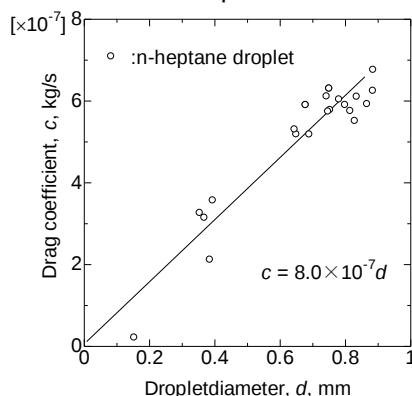
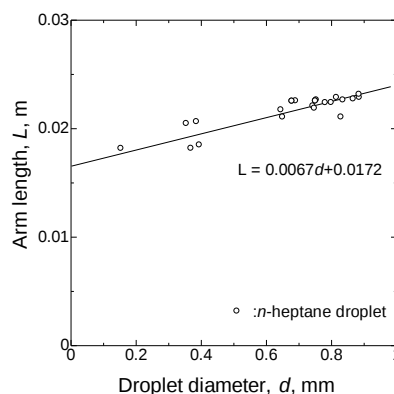


Fig.5 Calculation and experimental results.



(a) Relation between droplet diameter and velocity coefficient of drag.



(b) Relation between droplet diameter and arm length.

Fig.6 Estimation of calculation parameters.

4.3. 液滴対燃焼実験

初期中心間距離 S_{0L-R} を $5\ \text{mm}$ として撮影した液滴の連続写真を図8、液滴中心位置と算出された力の履歴を図9に示す。液滴の釣り合い位置を初期液滴位置とした。力の変位履歴から、この条件において相互作用力はほぼ発生していないことがわかる。またこの間隔において過去の実験結果^{1),2)}と比較したところ、液滴間に引力も斥力も働いていない液滴間隔付近であったため、この力の計測結果は妥当であると考えられる。

5. 結言

火炎と液滴の干渉により発生する力に着目し、単一および液滴対で正ヘプタン燃焼時に発生する力を調べた。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液滴の運動について数値モデルを構築した。
- 2) 液滴直径の減少に伴って空気抵抗の係数および見かけの腕長さが減少するため、数値モデルに両者を液滴直径の関数として組み込んだ。
- 3) 高温環境下で空気抵抗の係数と液滴直径の関係を調べる必要がある。
- 4) 初期液滴中心間距離が 5 mm の条件での液滴対燃焼においては、液滴間に力は働かないことがわかった。

「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) 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) 高橋 昌士, 平成 15 年度日本大学生産工学研究科修士論文

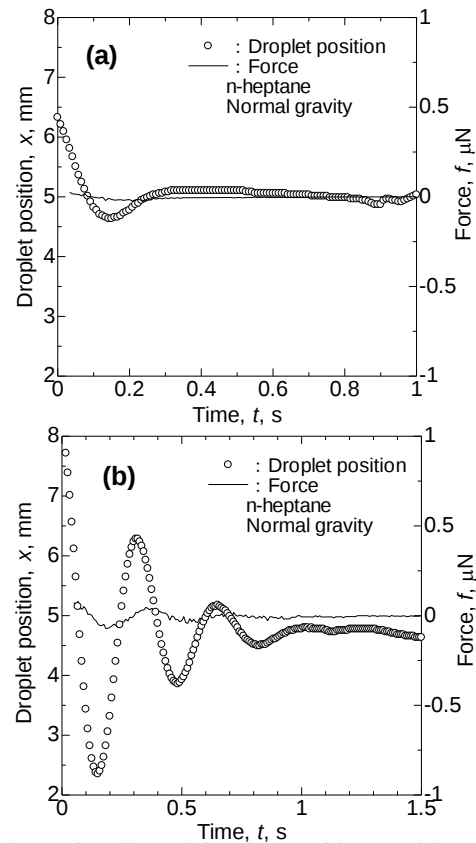


Fig.7 Histories of droplet position and force.

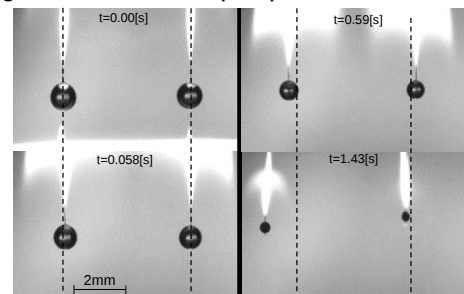


Fig.8 Histories of droplets position.

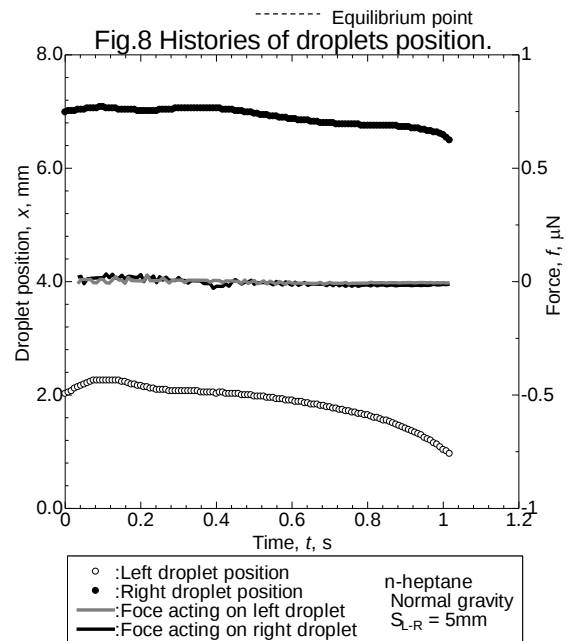


Fig.9 Histories of droplets position and force.