

初期液滴直径が異なる液滴列における冷炎燃え広がり挙動

- 実験装置の製作および機能検証 -

日大生産工(院) ○郡司 直人

日大生産工 菅沼 祐介

日大生産工 野村 浩司

1. まえがき

化石燃料の燃焼によって汚染物が排出され、地球温暖化、大気汚染、酸性雨が深刻化している。そのため世界中で排出ガスの削減が重要視されている。2016年にはパリ協定が発効され、日本もその例外ではなく2050年までに温室効果ガスの80 %削減のための取り組みを行っている。現在、排出ガス削減のためにエンジンの高効率化が求められている。噴霧燃焼は、ディーゼルエンジンやロケットエンジンなどの内燃機関に使用されている。燃焼を制御するには、噴霧燃焼のメカニズムを知ることが重要である。燃料噴霧を利用した内燃機関は、約1000 Kの冷炎の後に約2000 Kの熱炎が発生する二段点火が起きる条件で運用されている。冷炎は熱炎の発生位置や発生時間などに大きな影響を及ぼすものであり、噴霧燃焼の燃焼メカニズムを解明するために、冷炎現象が着目されている。燃焼の研究は多くの研究者によって行われている。森上らは揮発性の異なるn-アルカン液滴の誘導時間を比較したり、三上らは火炎の燃え広がり方向と相互作用効果の影響を比較した²⁾。高橋らは二液滴の冷炎発生に液滴干渉を明らかにした³⁾。本研究では、異なる直径の液滴を使用して実験を行い、冷炎の燃え広がり挙動を観察する。点火位置を液滴径の違いによる点火遅れの違いによって制御し液滴燃料を燃え広がりさせる。本研究は、自然対流の影響を無視するため微小重力環境を作り出すことができる落下塔を用いた実験を予定している。本報では製作した実験装置の詳細と、実験装置の機能検証として観測した冷炎現象の様子を報告する。

2. 実験装置

図1に実験装置の全体図を示す。実験装置は燃焼容器、液滴生成部、液滴支持部、液滴列移動部、燃焼容器、観察装置、液滴除去装置、および構造部から構成されている。

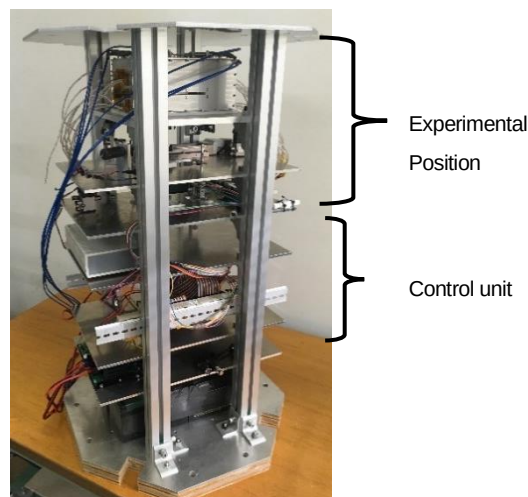


Fig. 1 Experimental device

図2に液滴支持部を示す。液滴支持部は直径 $14\ \mu\text{m}$ の SiC ファイバをアーチ状に2本と、剛性を高めるために直線に2本、直線方向に垂直なファイバを4本、アーチの交点に液滴を保持のための水ガラスを付着させている。本研究では液滴間隔を4 mmと8 mmで実験を行う。ファイバの接着には無機系耐熱接着剤を用いている。無機系耐熱接着剤は加熱硬化させることで燃焼時の火炎に耐えることが可能になる。

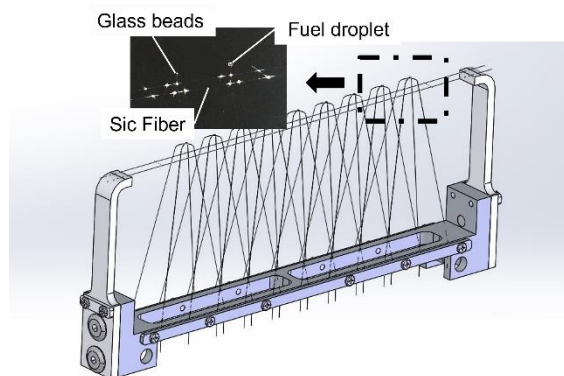
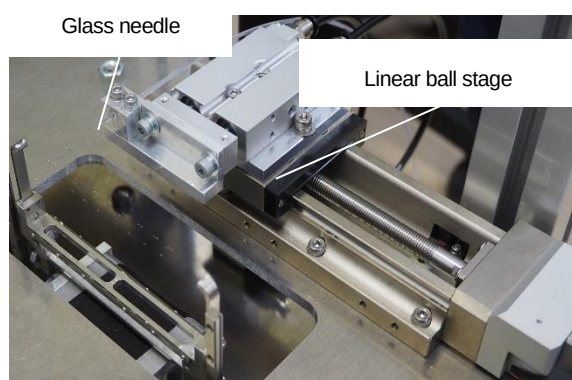


Fig. 2 Droplet array holder

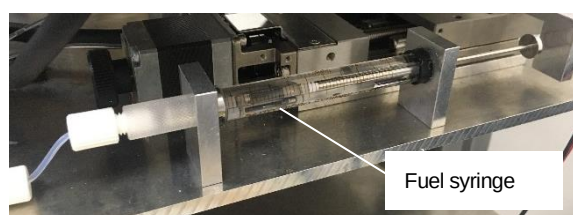
Cool flame spreading behavior of droplet array with different initial diameters
-Manufacturing of experimental equipment and functional verification-

Naoto GUNJI, Yusuke SUGANUMA and Nomura HIROSHI

図3に液滴生成部を示す。液滴生成部は燃料吐出部と燃料供給部からなり、先端外形が50 μm のガラス管、エアシリンダ、PFAチューブ、シリンジ、2つのリニアボールステージで構成されている。エアシリンダおよびリニアボールステージによって生成位置までガラス管を動かした後、シリンジ内の燃料をリニアボールステージで押し出し、PFAチューブを通りガラス管から液滴を生成する。ガラス管はマイクロフォージと電熱線用い、電熱線でガラス管を熱し引き延ばして切断している。図4に切断されたガラス管の先端部分を示す。



(a) Droplet generator



(b) Fuel supply unit

Fig. 3 Droplet array generation system

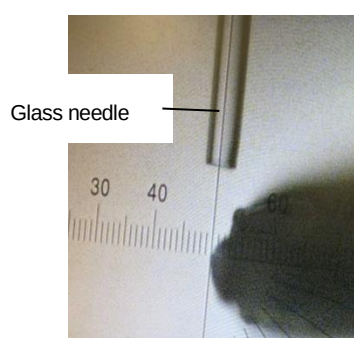


Fig. 4 Glass needle

図5に液滴移動部を示す。液滴列移動部はステッピングモータと構造部で構成されている。スライダ・クランク機構によって液滴列支持部を燃焼容器内のテストポジションに移動させている。600 K付近では自発点火遅れが2~3秒であるため、高温燃焼容器への突入から

実験位置に静止するまでの時間を自発点火遅れの5%である100 msとしている。

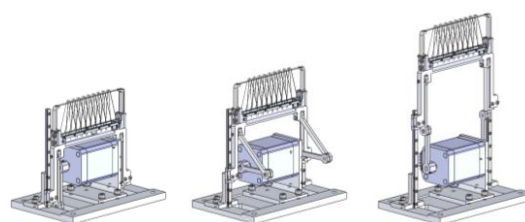


Fig. 5 Droplet lifting device



Fig. 6 Combustion chamber

図6に燃焼容器を示す。燃焼容器はヒータが内蔵され、5本のK種熱電対が配置されている。燃焼容器中心に近い2本の熱電対の平均値を実験条件温度として制御する。また、下部には開閉可能なシャッター、側面には観測用の窓が存在する。

液滴の観測にはハイスピードカメラとLEDライトを使用しバックリット法で液滴の直径を計測する。

実験の流れを記載する。液滴生成部をエアシリンダとステッピングモータ、液滴支持部をステッピングモータで生成位置まで移動させる。その後、シリンジから燃料が供給されガラス管先端より、液滴が生成される。生成後、支持枠、生成部は原点に戻り、燃焼容器下部にあるシャッターが開いた後、液滴支持部を燃焼容器内に移動させる。移動後の液滴直径をハイスピードカメラで観察する。

実験では燃料に正デカン、初期液滴直径は0.6 mm ~1.0 mm、雰囲気ガス組成は空気、雰囲気圧力は大気圧、燃焼容器内温度は580 Kで行う。

4. 冷炎確認実験

実験装置の機能検証として燃料液滴の燃焼実験を行った。初期液滴直径 $d_0=0.9$ mmの燃料

液滴を580 Kの燃焼容器内で自発点火させ、液滴直径の推移を観測した。また、液滴の有無による温度変化を知るため、液滴がない状態での温度履歴を取得した。撮影にはUSBカメラ（ホーザン株式会社製L-8351）を使用した。図7に撮影した液滴の様子を示す。今回の実験では、燃料液滴が実験位置に実験位置に到達した時間を0とし観測を行った。



Fig. 7 Fuel droplets

5. 実験結果および考察

図8に燃料がない場合、図9に初期液滴直径 $d_0=0.9$ mmの燃料液滴を燃焼させた場合の中心

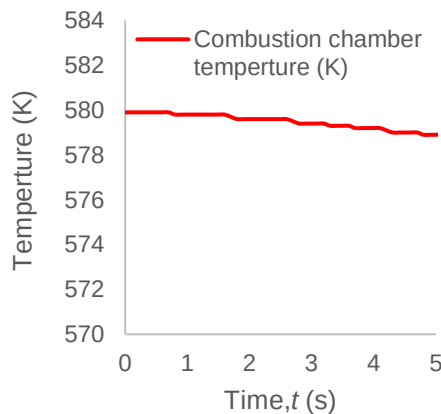


Fig. 8 Temperature in the combustion chamber (no droplet)

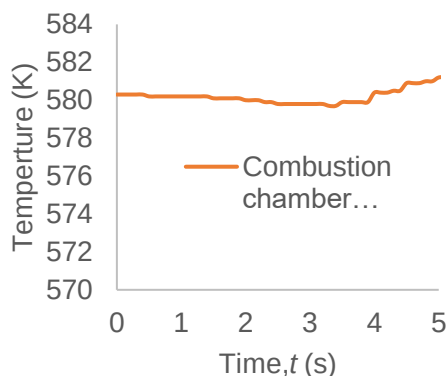


Fig. 9 Temperature in the combustion chamber (droplets)

温度、温度履歴を示す。液滴がある場合は3.5秒ほどたった地点で中心温度が上昇しているのに対して液滴がない場合は温度上昇がみられない。これは液滴が蒸発ではなく燃焼現象を起こしているといえる。

図10に初期液滴直径 $d_0=0.9$ mmの燃料を燃焼させた場合の直径の時間履歴を示す。0~1秒の間、液滴直径が安定していないのは温度上昇による燃料液滴の膨張が影響していると考えられる。図11に図10を正規化したものを示す。図11の直線Kとは傾きの変更点の直後の近似直線である。この直線から傾きは $t/d_0^2 \approx 3.9$ s/mm²で傾きが変わっている。これは図10の $t \approx 3.2$ sに値する。また、この直線の傾きは(-0.2873)である。式の傾きは蒸発速度係数であり、Vedha Nayagamらのデータでは蒸発速度係数は0.39~0.4 s/mm²となっている⁵⁾。今回、取得し

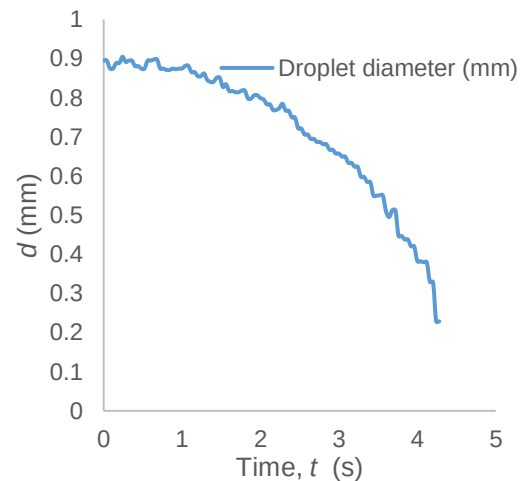


Fig. 10 Relationship between droplet diameter and time

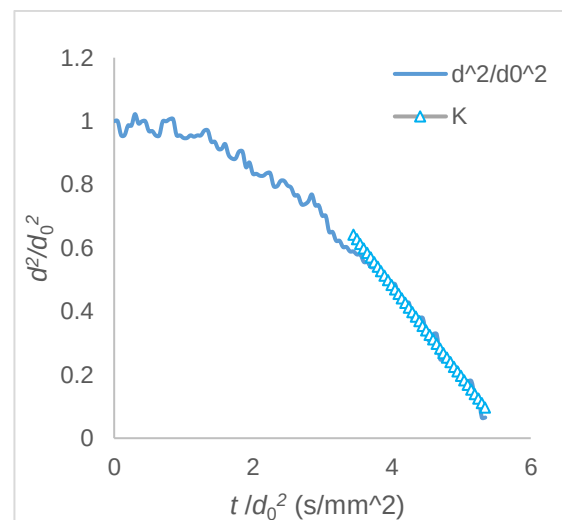


Fig. 11 Normalized the relationship between droplet diameter and time

た蒸発速度係数はVedha Nayagamらのデータと異なる値が取得できた。これは初期液滴直径の違いによる差であると考えられる。このことを踏まえ、図11の傾きの変更地点と図9の温度上昇が3.5秒程度で起きていることから、 $t=3.2$ s地点で冷炎現象が起きていると言える。

4. 結言

冷炎の燃え広がりを観測するため、実験装置を製作した。また、実験装置の機能検証として液滴の直径を観測し、冷炎が発生していること、冷炎の発生時間を確認した。

6. 今後の課題

今後は実験の目的である冷炎の燃え広がりの観測や、液滴感覚および液滴直径の変更し液滴間隔や直径によって冷炎現象の燃え広がりにどのような影響を与えるか確認する必要がある。また、地上実験では自然体流の影響が出てしまうため、微小重力環境下での実験が望まれる。

参考文献

- 1) 森上修, Hans J. Rath, 津江光洋, 河野通方, 佐藤順一, 発揮性の異なる正アルカン液滴の自発点火, 日本航空宇宙学会論文集, Vol.51, No. 592, (2003), pp. 215-219
- 2) Masato Mikami, Hidetaka Watari, Tsutomu Hirose, Takehiko Seo, Herman Saputro, Osamu Moriue, Masao kikuchi, Flame spread of droplet-cloud elements with two-droplet interaction in microgravit, JSME, Vol.12, No2, (2017), pp.1-10.
- 3) 高橋聡史, 竹中悠記, 中村大夢, 森上修, 直径の異なる二液滴の冷炎発生における液滴干渉, 第55回燃焼シンポジウム, 2017, p378-379
- 4) O. Moriue, C. Eigenbrod, H. J. Rath, J. Sato, K. Okai, M. Tsue and M. Kono, EFFECTS OF DILUTION BY AROMATIC HYDROCARBONS ON STAGED, Proc. Combust. Inst, 28 (2000), pp. 969-975.
- 5) Vedha Nayagam, Daniel L. Dietrich, Michael C. Hicks, Forman A. Williams, Cool-flame extinction during n-alkane droplet combustion in microgravity, Combustion and Flame 162 (2015) 2140–2147