

科学研究費助成事業（学術研究助成基金助成金）研究成果報告書

平成25年 5月20日現在

機関番号：32665

研究種目：若手研究（B）

研究期間：2011～2012

課題番号：23760177

研究課題名（和文） 光ピンセット技術を用いた大径自由液滴の懸垂手法の開発

 研究課題名（英文） Development of Suspending Method of Large Free Droplet
Using Optical Tweezers System

研究代表者

今村 幸（IMAMURA OSAMU）

日本大学・生産工学部・准教授

研究者番号：50436515

研究成果の概要（和文）：

液滴燃焼は工業的に重要な噴霧燃焼の基礎として多くの研究が行われているが、多くの場合燃料液滴は細線を用いて懸垂されており、細線が液滴の蒸発や燃焼に及ぼす影響が少なからず存在する。本研究は細線の代わりに光ピンセット技術を利用した無接触での燃料液滴の懸垂技術の確立を目指して、その実証および基礎研究を行ったものである。懸垂技術の他、微粒化および観察手法に関して検討を行い、様々な燃料において光ピンセット技術を用いて燃料液滴が懸垂可能であることを実証した。

研究成果の概要（英文）：

Although there are many experiments to observe vaporizing or burning fuel droplets as a basic model of spray combustion, the droplets are usually suspended by a fiber in the experiments and the effect of fiber on vaporization cannot be eliminated. This study reports basic experiments of a noncontact droplet suspension method using optical tweezers instead of the suspender. Atomization and observation systems are developed as well as suspension method. As a result, various fuel droplets was successfully suspended by optical tweezers system.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
交付決定額	3,600,000	1,080,000	4,680,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学・熱工学

キーワード：燃料液滴・光ピンセット・自由液滴・蒸発・燃焼

1. 研究開始当初の背景

噴霧燃焼はディーゼルエンジンや工業炉等、工業的に広く用いられている燃焼形態であり、噴霧の単純なモデルである燃料液滴についての点火、蒸発、燃焼に関する研究は数多く行われてきている。実際の噴霧では燃料液滴は10 μ mのオーダーであるが、観察に際して十分な空間的、時間的な分解能を有することは難しい。そのため実験室では、観察を容易とするため1mm程度の大きさの燃料液

滴が用いた実験が多く行われており、グラフホフ数の相似性を保つために微小重力環境を用いた試験も数多く行われてきている。これら多くの試験においては、観察の容易さから燃料液滴を懸垂線と称される細線に懸垂して実験を行っている。そのため懸垂による液面の变形や懸垂線からの熱流入の影響は必ずしも無視できない。また他方で液滴を空間に浮遊させる自由液滴の実験も見受けられるが、生成の確率が悪いこと、カメラの視

野に収めることが難しいことなどが問題である。以上から、自由液滴を空間的に非接触で固定することができれば、懸垂線の影響を除外した燃料液滴の実験が可能となり、有用な実験手段と成り得ると思われた。

2. 研究の目的

上記のような立場から、本研究においてはいわゆる「光ピンセット」を燃料液滴の懸垂に適用し、液滴を非接触で懸垂する方法について検討した。「光ピンセット」の原理は液滴内を通過し屈折するレーザー光の運動量変化を利用するものであり、近年、生化学や半導体の分野などで用いられているが、燃料液滴の懸垂に適用したという例はない。そのため本研究では光ピンセット技術を用いた過去の研究より燃料液滴の懸垂の可能性について議論し、液滴の懸垂の実証試験を行った。以下にそれらの結果を観察によって得られた知見とともに報告する。

3. 研究の方法

図1に本報で試験した実験系を示す。基本的な構成は微粒化器で生成した噴霧を光ピンセット光学系の焦点近傍に誘導し、光ピンセットの捕捉力によって液滴を空間に固定し、その様子を観察するというものである。微粒化器については、一般的な超音波微粒化器の他、物性の異なる燃料を微粒化するためにメッシュ式超音波微粒化器(ネブライザーNE-U22,オムロン社製)を用いた。光ピンセット用のレーザーであるが、出力100mWの小型ダイオードレーザー(波長640nm, COHERENT社, CUBE640-100C)および最大出力5WのNd:YAGレーザー(波長532nm, Elforlight社, HPG-5000)を用いている。レーザー光はミラー、凹レンズを介して、対物レンズにて集光する光学系としている。観察にはカメラレンズとLEDで作成したバックライト、高速度カメラ(最大500fps, NAC社製, MEMRECAN Ci)を主に用いて試験を行った。液滴であるが基礎試験は主として水を用いて行い、本システムの有効性について議論した。その後、燃料としてエタノール、正ペンタン、正ヘプタン、正オクタンを用いて実験を行った。

光学系の構成は上記が基本の構成であるが、この他にビームスプリッターと干渉フィルターを利用して光ピンセット用の対物レンズと観察用の対物レンズを共用した光学系の構成も行い、懸垂、観察試験を行った。これは、観察系の改良を目指してのものであったが、液滴の懸垂に関しては図1に示すものとほぼ同様の結果が得られたが、観察の改善に関しては十分な結果が得られなかったため、本報では記載しないものとする。

液滴の観察については干渉画像法を用い

て行った。これは液滴の表面と液滴内部で反射する光の干渉を捉えることで液滴径を観測するものである。使用した撮影レンズにより分解能は異なり、液滴径の分解能は0.9~4.3 μm の間である。

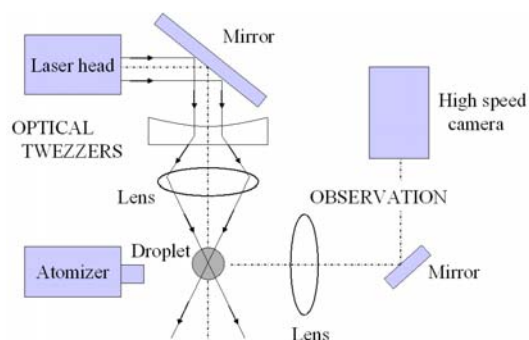


図1 実験装置概略図

4. 研究成果

(1) 懸垂実証試験と周囲流動が及ぼす影響
実験および検討の結果、光ピンセットを用いて液滴の懸垂を行うにあたっては、周囲流動の影響について考慮しなければならないことが明らかとなったので、以下にその概要を示す。図2は周囲流動等の影響についての検討の結果を示したものである。図の横軸は光ピンセットの捕捉力として有効に使えるレーザー出力である。 Q は軸方向の捕捉効率で光学系によって定まるパラメータであり0.05~0.1程度の値をとり、 P はレーザーの出力である。図2中における d_g は、光ピンセットによる捕捉力と重力と等しくなる境界を示しており、曲線より下部が無風状態において懸垂可能な領域である。

次に周囲流動の影響に関連して、液滴の生成方法についてここで簡単に議論しておく。過去に行われている懸垂線を用いた多くの実験においては、燃料は細管を通して供給され、液滴は懸垂線と細管との接触と離脱によって生成される。すなわち細管の先端から表面張力に打ち勝って懸垂線に液滴を生成している。本システムにおいても細管を用いると、光ピンセットによって表面張力に打ち勝つだけの仕事をしなくてはならない。例えば液体の表面張力を30mN/mと仮定すると、光ピンセットに起因する力では表面を 1×10^{-9} m程度のしか変形させることができない。これはすなわち液滴の微粒化機構が別途必要であることを示しており、実際の液滴の懸垂に関しては、微粒化器で微粒化された液滴を導入し、光ピンセットで捕捉する、という手筈となると考えらえる。

このような液滴の生成方法を加味すると、

周囲流速場に対して液滴の懸垂がどのような影響を受けるかについて検討が必要であることがわかる。第一にある速度で空間を移動してくる液滴を、その慣性に逆らって静止させなければならない。およそ液滴径程度の距離で速度 v_e で移動してきた液滴を光ピンセットの捕捉力で静止させることができる限界線を書いたものが図2中の v_e にあたり、破線よりも下部が静止させることが可能な領域である。他方で液滴が光ピンセットで捕捉後には、周囲の流動に対して補足力が十分大きくなければならない。液滴が周囲流動によってストークス抵抗を受けると仮定し、ストークス抵抗に抗して光ピンセットによる捕捉力で液滴を静止させることができる限界線が v_c であり、図2中では実線より下部が静止可能な領域となる。

以上を踏まえて図2を改めてみると、 QP の値が決定すると、図は各線で示される液滴径より小さい液滴径の液滴が光ピンセット技術によって懸垂可能であることを示している。これから比較的 QP 値が低いところにおいては、ストークス抵抗によって液滴が捕捉できなくなる影響が大きいことがわかる。他方で QP 値が大きくなると比較的大きな液滴が懸垂可能となるが、今度はその慣性に抗して液滴を静止させることが困難になることがわかる。以上のように数十 mm/s の周囲流動であっても、光ピンセットを用いた懸垂では問題となることが基礎の実験の結果からも明らかになったため、大気の流れを避ける試験容器を適宜製作して流動の影響を極力排除して実験を行った。図3は試験容器内にて液滴が懸垂可能であった例である。容器内の鉛直方向の高さは10mm程度である。この図に示されるように集光部付近に液滴が懸垂されている様子がわかる。試験容器がない場合には液滴の懸垂は最大3分程度は可能であったが、試験容器を用いた試験においては最大で1時間程度液滴を同一点に固定することが可能であった。図において推測できる液滴の直径はおよそ $15\mu\text{m}$ 程度であった。

この図においては、出力が 100mW のレーザーを用いており、 $QP=10^{-2}\text{W}$ 程度である。また懸垂された場合に雰囲気中の液滴の流動から周囲流速を見積もると、鉛直上方向に $2.5\sim 10\text{mm/s}$ 程度の微風が生じている場合が多く、図2に示している結果と必ずしも一致しない。この場合はストークス抵抗は鉛直上向きに生じており、重力は光ピンセットによる補足力とストークス抵抗との合力と釣り合っている可能性が指摘された。すなわち複数の要素が同一の方向を有する場合については図2に示す限りではなく、別に検討する必要があることが明らかとなった。

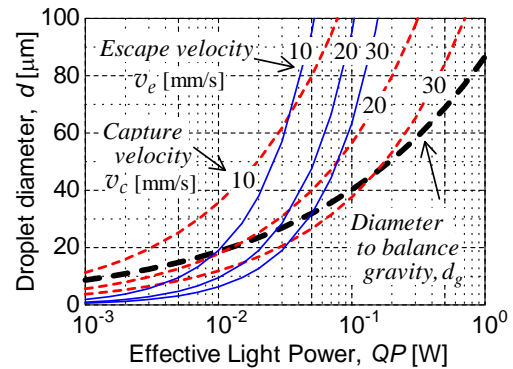


図2 懸垂に及ぼす周囲流動等の影響に関する検討

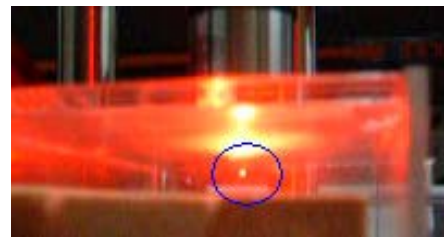


図3 液滴の懸垂の様子

(2) 液滴径の見積もりと蒸発挙動について
前節で示したように、雰囲気の流れを極力抑えるために実験容器を製作しその内部において液滴懸垂を試みた場合には、本来の目的である液滴の蒸発挙動がほとんど観察せず、これは雰囲気中の蒸気濃度が飽和蒸気圧に近くなり蒸発現象が生じにくいためであると考えられた。これを解決する手段としてはレーザーの捕捉力を大きくし、実験容器を取り除く必要があったため燃料液滴の懸垂試験においては最大出力 5W の Nd:YAG レーザーを用いて試験を行った。

図4には実験にて得られた正ペンタンの干渉画像の一例を示す。この図に示されるように、光ピンセットとして設計した空間的位置から干渉画像が観察され続けており、これは光ピンセットによって捕捉されている液滴（もしくは液滴群）からの干渉画像であると推測できる。これにより燃料液滴についても光ピンセットを用いて空間に液滴を保持できることが明らかとなった。干渉画像より見積もられる液滴像のスケールは、最大で $70\mu\text{m}$ 以上であったが、後述するようにこれは液滴径のスケールではないものと考えられる。

図5には正ペンタンを燃料とした場合に本研究で観察された液滴の蒸発挙動を示している。この図に示されるように、およそ $D2$ 則に従って液滴径が減少しているように

観察された。本研究の観察においては図5より見積られる蒸発速度定数は、 $0.01 \text{ mm}^2/\text{s}$ から $1 \text{ mm}^2/\text{s}$ の範囲である。エタノール、正ヘプタン、正オクタンなどを燃料として場合にも同様の傾向であった。

図6はエタノールを燃料とした場合の光ピンセットによって空間的に保持された二液滴の直接写真を示している。この図に示されるようにレーザーの光軸方向に2つの液滴が並んで配置される場合も観察されている。すなわち異なる大きさの液滴が存在するとそれに加わる空気力、重力、光ピンセットによる捕捉力が異なり、空間的に釣り合いの取れる位置が変わるため、高出力のレーザーを用いると複数の液滴が同時に懸垂できる場合が存在するようである。図4に示された $70\mu\text{m}$ 超の干渉画像より見積られる液滴像のスケールであるが、これは液滴の直径ではなく、複数液滴からの干渉画像、すなわち液滴間隔の距離を計測している可能性が否定できない。図4に示されるような干渉画像と図6に示されるような直接写真を本システムでは同時に計測できないため断定はできないが、図5において蒸発速度定数が非常に幅広い範囲を有していることを考慮すると、観察されている非常に大きな蒸発速度定数は液滴間隔が変化していることに起因するものと考察する方が自然であると言える。このように考えると実際の蒸発速度定数は得られた結果のうち最小の蒸発速度定数を与えていると考えるのが妥当といえる。またこの差異は直接画像と干渉画像を同時に計測することで明らかにすることができる。

以下、液滴の蒸発挙動に影響を与えると思われる他の現象について検討を行っておく。本研究においては液滴が微小のため、表面張力に関する考慮が必要かと思われる。半径 r の液滴では、表面張力によって $2\gamma r$ の外圧がかかっていることと同様となる。この外圧がない場合の蒸気圧 p^* に対する外圧の存在による飽和蒸気圧の変化 p/p^* は

$$\ln(p/p^*) = (2\gamma r) (V_m / RT)$$

と記載できる。ここで γ は表面張力、 V_m , R , T は各々相変化の条件下におけるモル体積、気体定数、温度である。 p/p^* は $0.1\mu\text{m}$ 程度の液滴に関しても 1.01 程度あり、表面張力が蒸気圧に及ぼす影響は非常に小さいと言える。

また観察している環境において雰囲気は幾分の流速を持っている。周辺を流動している液滴の様子から、雰囲気の流速は最大で 5cm/s 程度と見積られた。この時、常温常圧の空気の値を用いてレイノルズ数を見積ると $Re \sim 0.01$ のオーダーであり、周囲の流速による対流効果が物質拡散に及ぼす影響は小さいと予測される。

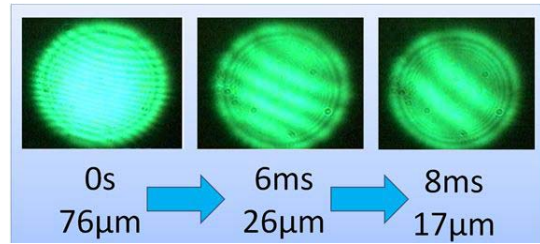


図4 正ヘプタンの干渉画像の時間変化の様子

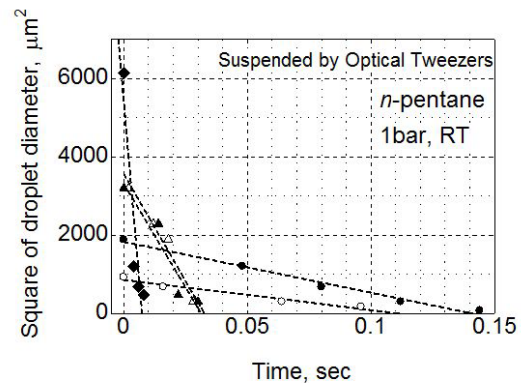


図5 正ペンタン液滴の蒸発挙動の様子



図6 複数液滴が同時に懸垂されている様子

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[学会発表] (計4件)

① 今村 室, 山崎 博司, 津江 光洋, 光ピンセット技術を用いて懸垂された自由液滴の液滴径の観察, 第50回燃焼シンポジウム, 2012年12月7日, 名古屋

② 今村 室, 佐藤 政史, 山崎 博司, 中谷 辰爾, 津江光洋, 微小重力実験に向けた非接触液滴懸垂法に関する研究, 日本機械学会 関

東支部第 18 期総会講演会, 2012 年 3 月 9 日,
習志野

③ 佐藤 政史, 藤島 孝太郎, 今村 宰, 中谷
辰爾, 津江 光洋, 光ピンセットを用いて懸
垂された燃料液滴の蒸発挙動, 第 49 回燃焼
シンポジウム, 2011 年 12 月 6 日, 横浜

④ 今村宰, 佐藤政史, 藤島孝太郎, 中谷辰
爾, 津江光洋, 光ピンセットによって懸垂さ
れた微小液滴の蒸発挙動について, 熱工学コ
ンファレンス 2011, 2011 年 10 月 29 日, 浜
松

6. 研究組織

(1)研究代表者

今村 宰 (IMAMURA OSAMU)

日本大学・生産工学部・准教授

研究者番号：5 0 4 3 6 5 1 5