

光ピンセットを用いたオレイン酸メチルエステルの蒸発の実験

日大生産工(院) ○山崎 卓人 日大生産工 今村 宰
日大生産工 山崎 博司

1 まえがき

実用熱機関であるディーゼルエンジンやジェットエンジン、火力発電所などでは、自己着火性を活かした噴霧燃焼が用いられている。噴霧燃焼とは、液体燃料を霧状にしてから燃やす方法である。噴霧燃焼では、点火や火炎の形成の解明は完全には出来ていない。その原因の一つは、噴霧は数 μm から数十 μm の燃料液滴群となるため現象が複雑となり、これを解明することが困難な点である。そのため、簡易的に単一液滴のみを調べる方法が求められてきている。その方法の一つに、懸垂線を用いた単一液滴燃焼がある。しかしながら、単一液滴燃焼は噴霧燃焼よりも現象の解明などに関して問題点がある。この方法では懸垂線が用いられているため、液滴と懸垂線が接触状態にあり、液滴に及ぶ現象などの結果に影響が出ることがある。具体的な影響として、懸垂線からの熱流入がある。そのため、非接触で液滴の現象の解明が出来る光ピンセット技術を用いて液滴を単一燃焼させる方法が有用な研究手段になる可能性がある。光ピンセット (Optical Tweezers) とは、光を回折限界に集束させることで、溶液中の微粒子などをその集光点に捕捉する光技術である。この光学系を光学顕微鏡に導入することで、研究対象となる微小物体を非接触・非侵襲で捕捉し、三次元的に自由に動かすことが可能となる。

図1は光ピンセットの模式図である。まず、屈折率が周辺媒質よりも高い微小球を光ピンセットする原理を説明する。図1は、顕微鏡の対物レンズで集光されたレーザー光が、球状微粒子の上の部分照射している状態を示した図である。光線 a に着目すると、微粒子の表面で屈折し進行方向を変える。そのため、屈折の前後で光線の運動量が変化する。この運動量変化により、微粒子の表面に光圧 F_{at} が作用する。出射点においても同様に光圧 F_{ao} が作用する。これらの合力として、微粒子の中心には

力 F_a が作用する。光線 b についても同様である。この結果、光圧 F が上向きに働き、重力と浮力の差とこの力が釣り合う位置で微粒子は光トラップされる。以前までの研究では、光ピンセットを用いて水や n -ペンタンなどの液滴を懸垂させることに成功している。今後の展開としては、様々な燃料に関して液滴懸垂の可能性を探る必要がある。特に環境問題に対応する燃料として近年注目されているBDFは、環境負荷への影響などの現状を加味して、その微粒化、蒸発、着火、燃焼、詳細な化学反応機構や環境適合性などに関する知見が求められている。

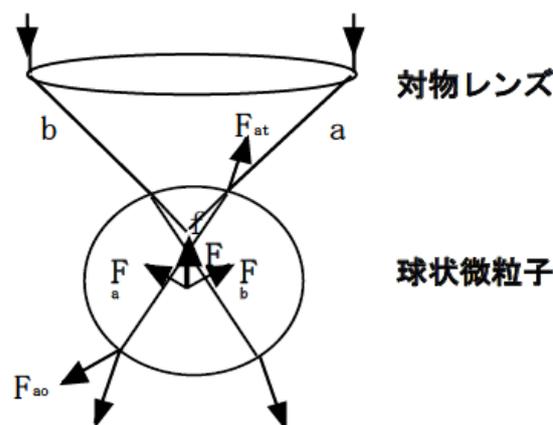


図1 光ピンセットの模式図

他方でBDF燃料には生成の過程で水分が多量に混入する場合は想定され、さらにエマルジョン化すると非常に粘性の高い燃料となる。前述のように以前までの研究では、光ピンセットを用いて水や n -ペンタンなどの液滴を懸垂させることに成功している。しかし、これらよりも粘度が高い物質での実験は成功していない。これは、噴射器を用いて物質を噴射する際に、粘度が高いものでは液滴の形成が難しいためである。これらの問題点を改善し、粘度の高い

A Study of the Oleic Acid Methyl Ester Droplet Suspension and Evaporation Using Optical Tweezers Technique

Takuto Yamazaki, Osamu Imamura, Hiroshi Yamasaki

エマルジョン液滴を懸垂することもBDF燃料の利用促進に関して意義深いものと考えている。

以上のような背景から、本研究の非接触の液滴懸垂に有用とされる光ピンセットを用いて、BDF液滴の懸垂と、燃焼を成功させる技術を確立させ、液滴燃焼を解明していくことを目標としている。本報ではBDFの主成分であるオレイン酸メチルエステルの液滴の懸垂と蒸発について知見が得られたので、基礎試験とともに以下に報告する。

2 実験方法および測定方法

この実験方法は単一对物レンズ方式と呼ばれ、ピントを合わせやすいという利点がある一方、利用可能な倍率の幅が狭いという欠点もある。使用する主な実験装置について概説する。まず初めに、液滴を懸垂させるために用いるNd:YAGレーザ（波長532nm, Elforlight社, HPG 5000）について説明する。このレーザの最大出力は8Wと示されているが、パワーメータの測定によると、最大出力は1.379Wであるとわかった。レーザの設定出力と実際の出力、また電流について表1にまとめた。使用方法としては、レーザをPCに接続、ソフトウェアTeraTermによって出力レベルの調整やレーザ口の開閉等を管理するものである。次に凹レンズである。凹レンズでレーザを分散させ、ミラーで対物レンズに誘導する。3つ目に対物レンズ（凸レンズ、倍率20倍、開口数0.4）である。凹レンズ及びミラーにより分けられたレーザを対物レンズにより焦点へ集光させる。4つ目にメッシュ式微粒化器（噴霧粒子径約5 μ m, ネブライザーNE-U22, オムロン社製）である。本来医療用吸入器として利用されているが、容易に液体を微粒化でき、扱いやすいため採用する。ただし、オレイン酸メチルエステルの噴霧に関しては、液滴の粘度が高いためメッシュ式微粒化器での液滴噴霧が困難であった。従って、オレイン酸メチルエステルの噴霧のみ、エアブラシMJ724（口径サイズ：0.3mm）を使用した。5つ目にカラーCCDカメラ（撮像素子1/3インチ、38万画素、シグマ光機社製）である。撮像素子とはレンズから入ってきた光を電気信号に変換する電子部品のことである。CCDとC-MOSの2種類あり、CCDはC-MOSに比べ受光量が大きく画質がきれいで高感度化に対応しやすいといった特徴がある。最後にカメラレンズ（焦点距離50mm, f値1.2, ニコン社製）である。

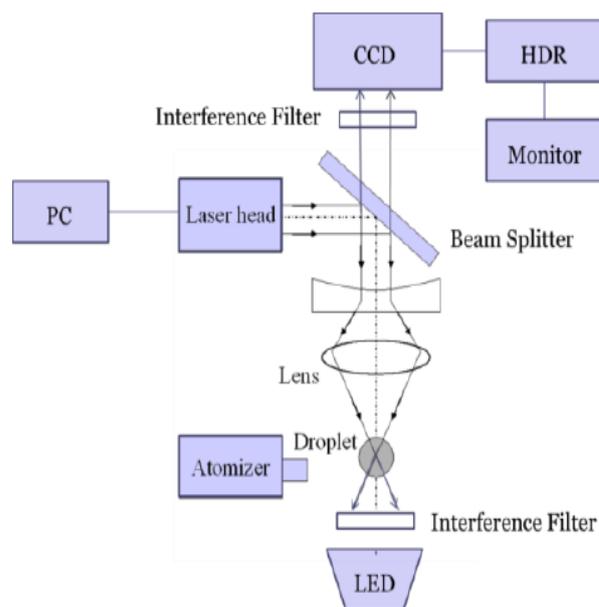


図2 実験装置概略図（単一对物レンズ方式）



図3 実験装置概要写真

表1 レーザ出力と電流に関するまとめ

設定出力 [%]	実際の出力[W]	電流 [A]
0	-	-
10	-	-
20	-	-
30	0.03	1.26
40	0.12	1.68
50	0.22	2.11
60	0.41	2.53
70	0.680	2.95
80	1.050	3.37
90	1.070	3.79
100	1.379	4.21

次に、液滴粒径の観測方法に用いた干渉画

像法について説明する。採用したレーザ干渉画像法は透明球形粒子からの反射光と屈折光の位相差により空間に生成される干渉縞を観測する手法である。カメラをオフフォーカスにすることにより見えてくる液滴の干渉縞を見ることができ、その数を測定することにより、液滴の粒径が測定できると考えられている。

3 実験結果および検査

実施した実験により、様々な液体の懸垂に成功した。写真は懸垂に成功したオレイン酸メチルエステルの様子である。懸垂に用いた水とオレイン酸メチルエステルでは、懸垂するための条件に違いがあることを確認することが出来た。その違いは懸垂するためのレーザ出力である。レーザ口から凹レンズまでの距離などを同一にした場合、水では409.0mW、オレイン酸メチルエステルでは230.0mWをレーザ出力にした場合、それぞれで液滴の懸垂に成功することが出来た。この違いの原因の1つに液滴の屈折率があると考えた。屈折率とは、真空中の光速を物質中の光速（より正確には位相速度）で割った値であり、物質中での光の進み方を記述する上での指標である。真空を1とした物質固有の値を絶対屈折率、2つの物質の絶対屈折率の比を相対屈折率と呼んで区別する場合もある。

MKSA単位系あるいは国際単位系(SI)では屈折率 n は、真空中の光速 c を媒質中の光速 v （より正確には位相速度）で割った値で表される。

$$n = \frac{c}{v} = \sqrt{\frac{\epsilon \mu}{\epsilon_0 \mu_0}} \dots (1)$$

ここで μ 、 ϵ は材質の透磁率、誘電率、 μ_0 、 ϵ_0 は真空の透磁率、誘電率である。

吸収のある物質内では、複素屈折率の実数部が1より小さくなり、位相速度が真空中の光速よりも大きくなる場合があるが、エネルギーや情報が位相速度で伝わるわけではないので、相対性理論とは矛盾しない。近年、フォトニック結晶などが作成されて、特定の周波数に対しては屈折率が負になる現象も観察されている。また、フェムト秒パルスレーザーなどの非常に強いレーザ光を用いると非線形光学現象が起こり、屈折率が光強度に依存するような現象も知られている。

いくつかの物質の屈折率は以下である（ナトリウムD線・波長589.3 nmの光に対して）。

水の屈折率は1.3334、オレイン酸メチルエステルは1.452である。オレイン酸メチルエステルの屈折率が水よりも大きいため、懸垂のための出力は小さくなったと考えた。

以上の結果に加え次に、噴霧させた回数に対してそれぞれの液体が何回懸垂できたかについてまとめた。水以外にエタノール、オレイン酸メチルエステル50%+エタノール50%を用いて懸垂した結果、それぞれ10回噴霧させたところ、エタノールとOME50%+エタノール50%は8回懸垂できた。それに対して、水は3回懸垂できた。懸垂時間についてまとめた。エタノールは最長13分30秒、OME50%+エタノール50%は18分であった。この結果より、様々な液体に対しても屈折率が液滴懸垂、また懸垂の安定性に影響があると考えられる。

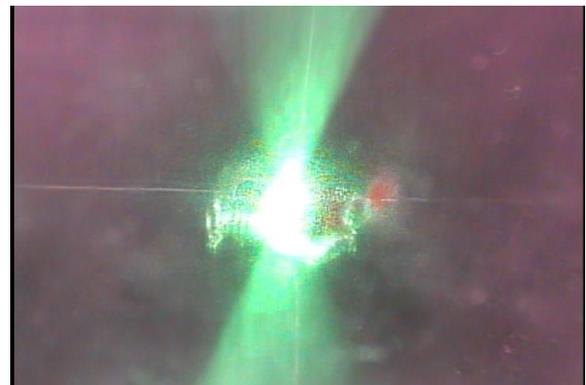


図4 オレイン酸メチルエステルの懸垂の様子

次に、干渉画像法の結果についてまとめる。

今回の実験では、レーザ出力を100%、90%ならびに80%と変化させたときに得られた結果についてまとめる。

干渉画像法では、以下の式(2)によって液滴粒径 d_p が予想できると考えられている。

$$d_p = \frac{2\lambda N}{\alpha} \left[\cos(\theta/2) + \frac{m \sin(\theta/2)}{\sqrt{m^2 - 2m \cos(\theta/2) + 1}} \right]^{-1} \dots (2)$$

λ はレーザ波長、 α は受光系の集光角、 θ は受光からみ角であり、 m は液滴と周囲媒体の相対屈折率、また N は干渉縞の数である。

本実験では $\lambda=20^\circ$ 、 $\lambda=532\text{nm}$ 、 $m=1.451$ 、 $\theta=5^\circ$ を用いた。

以下の写真は、オレイン酸メチルエステルを、レーザ出力を100%、90%、そして80%と変更させながら懸垂したときに撮影した3枚の

写真である。そして、写真1ではN=23, 写真2ではN=22, また写真3ではN=21であると判断した。

以上の値を式(2)に代入した結果、レーザ出力100%では液滴粒径が $62.58\mu\text{m}$ 。出力90%では液滴粒径が $59.05\mu\text{m}$ 。出力80%では液滴粒径が $56.61\mu\text{m}$ であった。

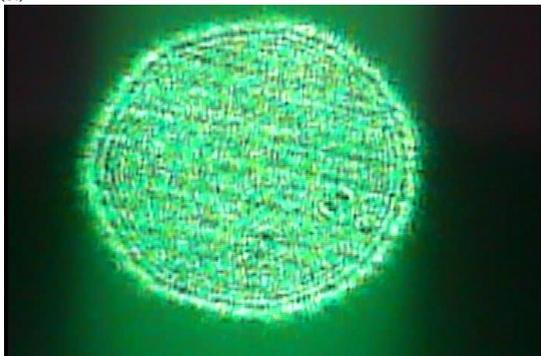
なお、これらの写真はオフフォーカスで撮影したオレイン酸メチルエステルの液滴または液滴群である。したがって、以下の写真の干渉縞を数えることにより、今回懸垂することが出来た液滴の粒径または液滴群の大きさを把握することが出来たと考えられる。

したがって以上の結果より、レーザ出力を上げることにより屈折率の向上につながり、より大きな液滴または液滴群を懸垂で出来ることにつながると判断出来た。

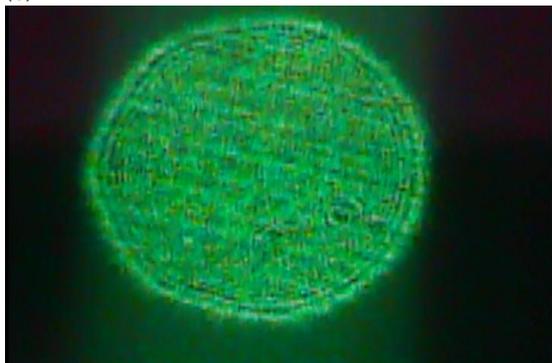
本実験では、液滴の蒸発実験も試みた。

この蒸発実験では、液滴が懸垂される高さと同等の高さである対物レンズから4mmほど離れた所にニクロム線を設置し、ニクロム線に電流を流して熱を発生させ液滴の蒸発を試みるものであった。懸垂を1分以上続けられた液滴に対して熱を与えての変化を見たところ、電流を流してから懸垂液滴を無くすことが出来た。この結果が、ニクロム線の熱によるものかどうか判断することは今後の課題である。

(a)



(b)



(c)

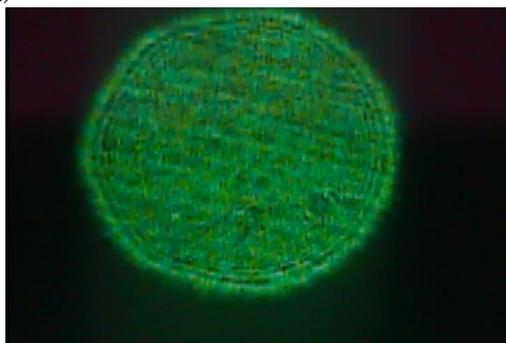


図5 (a)レーザ出力100%時の液滴
(b)レーザ出力90%時の液滴
(c)レーザ出力80%時の液滴

4 まとめ

本研究では、光ピンセット技術を用いたBDF燃料の懸垂技術の確立を目指して、水やエタノール、オレイン酸メチルエステルとエタノールの混合液体を用いた試験およびオレイン酸メチルエステルを用いた蒸発試験を行った。水、およびオレイン酸メチルエステルとも数分の懸垂に成功した。液体の差異による懸垂に必要なレーザ出力の差異は、液滴の屈折率に起因するものと推測された。

以上の結果よりそれぞれの液滴の懸垂を行う条件を整えることができた。

「参考文献」

- 1)<技術ノート>光ピンセット
西山雅祥, 岡本憲二 p.27
- 2)マイクロオプトメカトロニクス特論
光ピンセットの理論解析(5)
浮田宏生
- 3)レーザ干渉画像法による噴霧液滴径・速度の面的同時計測法の開発:川口達也 小林俊弘 前田昌信 (2002-2) p432
- 4)干渉画像法による非定常噴霧流の粒子径・速度の空間分布計測:赤坂幸広 前田昌信 (2002-13-01) p-1