

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 20 日現在

機関番号：13801

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2014～2015

課題番号：26600115

研究課題名(和文) 光マニピュレーション技術による微小単一液滴の燃焼ダイナミクス解析とモデル化

研究課題名(英文) Laser manipulation for dynamics combustion analysis of a single droplet

研究代表者

川田 善正 (Kawata, Yoshimasa)

静岡大学・電子工学研究所・教授

研究者番号：70221900

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,000,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、光マニピュレーション技術を用いて、単一または複数の微小燃料液滴を操作し、ナノメートルからマイクロ領域における燃焼反応のダイナミクスを解析する技術を開発するとともに、微小領域における熱流体の解析、熱伝搬解析を行うための理論構築を行うことを目的として研究を進めた。光マニピュレーション技術を用いることにより、大気中で微小な単一の液滴を捕捉して制止させ、顕微光学系を用いて、微小領域の燃焼過程を観察・解析することを可能とした。微小領域の反応ダイナミクスを3次的に制御・解析するための手法を開発した。

研究成果の概要(英文)：In this research, we have developed a laser manipulation technique for the dynamic combustion analysis of a single droplet. Laser manipulation technique is a useful technique to control and trap small particles and many applications have been developed. We have developed the technique to trap a single droplet of alcohol using a two contour-propagating beams. By using the counter propagating two beams, it is possible to trap a droplet with low numerical aperture lens with long working distance. We succeed to observe the combustion dynamics of a single droplet with high speed camera.

研究分野：応用光学

キーワード：光マニピュレーション レーザートラップ 光学顕微鏡 燃焼解析 微小液滴 光操作 光速度観察
レーザー計測

1. 研究開始当初の背景

微小な領域における物体の燃焼過程の解析は、エンジン内における噴霧燃料の燃焼効率、不燃性ガスの発生など、エネルギー効率や環境保全などの面で多くの研究課題を有している。これまでの燃焼解析は、マクロ領域の解析がほとんどであり、微小領域における反応過程を解析したものは、ほとんど報告されていない。噴霧された燃料が、微小領域で着火され、それがどのように燃え広がるのかを解明することは非常に重要である。燃料によって構成される微小液滴は、相対的に表面積が大きくなるため、マクロな反応過程とは異なることが予想される。また、微小液滴間の燃焼の伝搬などを解析することは、エンジンやガスタービンなどの熱機関の燃焼効率を向上させる上で非常に重要である。

2. 研究の目的

本研究では、光マニピュレーション技術を用いて、単一または複数の微小燃料液滴を操作し、ナノメートルからマイクロ領域における燃焼反応のダイナミクスを解析する技術を開発するとともに、微小領域における熱流体の解析、熱伝搬解析を行うための理論構築を行うことを目的とする。図1に本研究の原

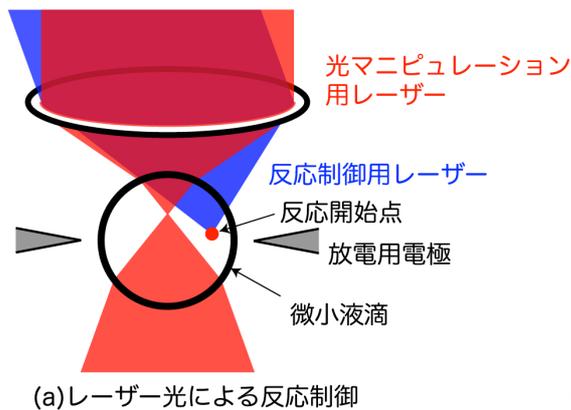


図1. 光マニピュレーション技術による微小単一液滴の燃焼ダイナミクス解析とモデル化

理を示す。光マニピュレーション技術を用いれば、大気中で微小な単一の液滴を捕捉して制止させることができるため、顕微光学系を用いて、微小領域の燃焼過程を観察・解析することが可能になる。また、共焦点光学系や多光子励起過程を用いることによって、微小領域の反応ダイナミクスを3次的に制御・解析するための手法を開発する。

本研究は、光マニピュレーション技術を用いて微小液滴の燃焼過程を解析するためのモデル化技術を開発することに特徴がある。光マニピュレーションのための光学系を用いて、捕捉のためのレーザーとは異なるレーザー光を微小液滴に照射し、微小液滴の燃焼過程を制御すれば、燃焼過程の発生位置を3次的に制御することが可能となる。また、空間位相変調素子を光マニピュレーションに導入することにより、複数の微小液滴を操作することが可能となり、粒子間隔や配列形状を自由に制御可能となる。また、粒子径なども適当な液滴を選択することによって調整可能となる。つまり、光マニピュレーション技術を用いることにより、燃焼過程をモデル化することが可能となり、燃焼反応の伝搬、伝搬の時間応答など、燃焼過程の相互作用のダイナミクス解析が可能となる。微小液滴内の燃焼反応の発生位置による燃焼過程を解析し、熱流体の挙動解析、熱伝搬の解析を行う。

3. 研究の方法

一般にレーザートラッピングは、高開口数の対物レンズを用いて単一ビームで行なわれることが多い。このとき作動距離が小さいため、捕捉した液滴を外部から操作することは困難であることが多い。

そこで本研究では、単一液滴の捕捉には対向ビームによるレーザートラッピングを用いて、可燃性液体の液滴の燃焼の初期状態の解析を行なった。対向ビームによるレーザートラッピングには低開口数、長作動距離の対物レンズを用いた。低開口数レンズでは作動距離が大きいことによって捕捉した液滴周りの領域を広く取ることが可能となり、外部からの操作および観察を容易に行なえるという利点がある。

本研究では燃焼解析のための可燃性液体としてエタノールを用いた。燃焼現象は非常に高速な現象であるため、高速度カメラを用いて点火および火炎の広がりの様子を観察した。エタノール液滴を点火するためには液滴を加熱するなどしてエネルギーを与えなければならない。懸垂線を用いた実験の懸垂線と液滴間の表面張力と比較して、レーザートラッピングによる微粒子の捕捉力は非常に微小であるため、点火方法によっては液滴が燃焼開始するまで液滴を捕捉し続けられない。そのため、様々な方法で捕捉したエタノール液滴への点火を試み、レーザートラッ

ピングを用いて捕捉した液滴の燃焼解析に有効な点火方法および条件を検討した。

図 2 に対向ビームレーザートラッピングの実験光学系を示す。レーザートラッピングには Nd:YVO4 レーザー (Spectra Physics 製 Millennia II、波長 532 nm、出力 0.2~2.0 W) を使用し、液滴捕捉用対物レンズは乾燥系低開口数対物レンズ (Nikon 製 CFI L Plan EPI SLWD 50X, NA=0.45, WD=17 mm) を使用した。光源から発振したレーザーはビームエキスパンダーで拡大された後、ビームスプリッターで 2 本の光線に分割され、それぞれ対向する低開口数対物レンズに入射させた。対向する 2 本の光線は対物レンズ間のガラス容器 (スライドガラスを用いて作製、23.7×26×76 mm、厚み 1.15 mm) 内で集光し、焦点位置付近で液滴を捕捉した。本研究では作動距離 17 mm の対物レンズを用いているため、対物レンズ間の距離が 34 mm であり、非常に広い作業領域を有する。捕捉した液滴の詳細な挙動の観察および燃焼解析への応用を考慮し、観察には高速度カメラ (Photron 製 FASTCAM Mini UX) を用いた。高速度で撮影を行なうために高輝度な照明が必要であるためメタルハライドファイバー照明装置 (シグマ光機製 IMH-250) を用いた。

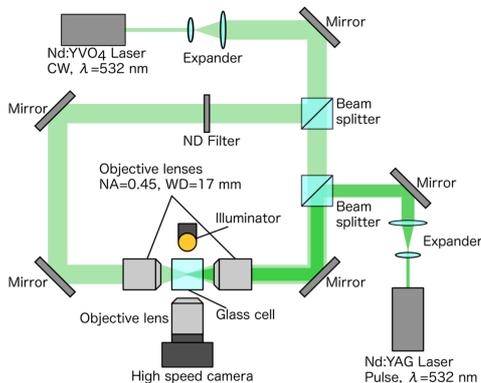


図 2. レーザートラッピングの光学系とレーザー着火のための光学系

4. 研究成果

図 3 に対向ビームレーザートラッピングにより水液滴が捕捉される様子を示す。レーザーは左右から照射され、図中の緑色の破線はおよそのレーザー照射領域を示し、赤色の矢印は捕捉される液滴を指している。図 3(a) は液滴がレーザー照射領域に進入する前の様子である。露光時間に対して液滴の移動速度が速く液滴が鮮明ではないが、液滴が下降していることを確認できる。図 3(b) では液滴がレーザー照射領域に進入した直後の様子を示し、液滴の進行方向は一定のまま下降を続けていることがわかる。レーザー照射領域の外周部では中心部よりも放射圧による力が弱く、液滴の運動に大きな変化が現れないと考える。図 3(c) では液滴の運動方向が

変化していることがわかる。液滴が照射しているレーザーの光軸付近に達すると、下降していた液滴は進行方向を変え対物レンズ間の中央へ移動する。図 3(a) および図 3(b) と図 3(c) を比較すると、液滴は下向きにも加速していることがわかり、放射圧によって光の進行方向へ押し出されるだけでなく、光軸方向へ引き寄せられていることが確認できる。照射したレーザー強度は右側が 420 mW、左側が 400 mW であった。

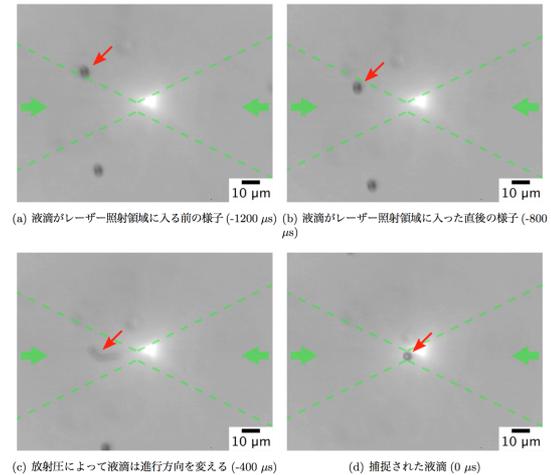


図 3. 対向レーザービームによる微小液滴の捕捉

レーザートラッピングによって捕捉したエタノール液滴にパルスレーザーを照射する点火実験において、照射するパルスレーザーの強度を変化させ点火可能な最小エネルギーを求めた。表 1 に捕捉したエタノール液滴の有無による最小点火エネルギーの比較を示す。表 1(a) は捕捉したエタノール液滴に片側からパルスレーザーを照射した時のレーザー強度と、その時の燃焼の有無を示している。表 1(b) は捕捉したエタノール液滴に両側からパルスレーザーを照射した時の、左右からのレーザー強度の和と、その時の燃焼の有無を示している。

この結果からパルスレーザーを照射して点火する方法において、照射したレーザーのエネルギーは独立して作用するのではなく、液滴に照射されたレーザーのエネルギーの総和が燃焼に必要な閾値を超えることで点火できることがわかる。レーザートラッピングによる液滴の捕捉を行っていないエタノール噴霧中にパルスレーザーを照射した場合、最小点火エネルギーは 2.1 mJ という結果が得られた。レーザートラッピングによってエタノール液滴を捕捉している噴霧中にパルスレーザーを照射した場合、最小点火エネルギーは 0.6 mJ という結果が得られた。すなわち、レーザーを用いた点火において、捕捉した液滴にパルスレーザーを照射する

ことにより、少ないエネルギーで点火可能であることがわかった。

パルスレーザーを用いた点火においては、形成されたプラズマの熱エネルギーにより燃料液滴は着火する。レーザートラッピングによって液滴の捕捉を行っていないエタノール噴霧中では、プラズマが形成される位置とエタノール液滴の距離が一定ではないため、プラズマの熱エネルギーによる液滴の加熱量も一定ではない。一方、レーザートラッピングによってエタノール液滴の捕捉をしている場合、プラズマが形成される位置に必ず液滴が存在しているため、効率よくプラズマの熱エネルギーを液滴に伝達することができる。そのため、レーザートラッピングによって液滴を捕捉することにより、最小点火エネルギーが低下すると考えられる。また、金属のターゲットを用いてプラズマを形成する方法が、ガスブレイクダウンによりプラズマを形成する方法よりも小さいエネルギーでプラズマを形成できるため、さらに小さい最小点火エネルギーで点火可能である。レーザートラッピングによって液滴を捕捉することで、この液滴がターゲットと同等の働きをしてプラズマが形成されている可能性もある。プラズマに吸収されるエネルギー、発光強度などを調べれば詳しい原理を解明できると考える。

照射したレーザーの強度が小さくなると燃焼頻度が少なくなることが確認できたため、レーザー強度以外に点火に必要な条件が存在することがわかる。燃料が燃焼するための条件として、燃料噴霧の濃度および温度が大きく影響することが知られているが、今回の実験ではこれらを考慮せずに行っているため燃焼頻度から考察できることは少ない。今後、濃度および温度を考慮した測定を行なう必要がある。

表 1. レーザー着火による燃焼実験

Power [mJ]	Combustion	
	Trapping	Spray
0.5	×	×
0.6	○	×
0.8	○	×
1.0	○	×
1.6	○	×
2.1	○	○
2.6	○	○
3.1	○	○

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)

[雑誌論文] (計 5 件)

①M. Kikawada, A. Ono, W. Inami, Y. Kawata
Intensity distribution analysis of cathodoluminescence using the energy loss

distribution of electrons,
Ultramicroscopy, 査読無, 160 巻,
2016, 225-229

②M. Kikawada, A. Ono, W. Inami, and Y. Kawata,
Plasmon-Enhanced Autofluorescence
Imaging of Organelles in Label-Free Cells
by Deep-Ultraviolet Excitation,
Analytical Chemistry, 査読無, 88 巻
No. 2, 2016, 1407-1411

③福田真大, 居波 涉, 小野篤史, 川田善正
モンテカルロシミュレーションと有限差分
時間領域法の組合せによる蛍光薄膜内外の
電子線励起発光分布の解析, 電子情報通信
学会論文誌 C, 査読無, J99-C 巻, No.
2, 2016, 18-25

④D. Thangaraju, Y. Masuda, I. Khaleelullah
Mohamed Mathar Sahib, W. Inami, Y. Kawata,
Y. Hayakawa
Multi-modal imaging of HeLa cells using a
luminescent ZnS:Mn/NaGdF4:Yb:Er
nanocomposite with enhanced upconversion
red, RSC Advances, 査読無, 6 巻, No.
40, 2016, 33569-33579

⑤福田 真大, 居波 涉, 小野 篤史, 川田 善正
モンテカルロシミュレーションと有限差分
時間領域法の組合せによる蛍光薄膜内外の
電子線励起発光分布の解析, 電子情報通信
学会論文誌 C, 査読無, J99 巻-C, 2016, 18-25

[学会発表] (計 5 件)

①伊藤 銀河, 手老 龍吾, 居波 涉, 川田 善正
第 10 回情報フォトンクス研究会関東学生研
究論文講演会, 人工細胞膜を用いた単一イオ
ンチャンネルの高分解能観察, 2016 年 03 月 07
日~03 月 07 日, 千葉大学西千葉キャンパス
(千葉県千葉市)

②堀場大輝, 居波 涉, 川田善正,
レーザー学会学術講演会第 36 年次大会,
電子線照射による細胞刺激法の開発, 2016 年
01 月 09 日~01 月 11 日, 名城大学天白キャン
パス (愛知県名古屋市)

③藤川正太郎, 居波 涉, 川田善正
レーザー学会学術講演会第 36 年次大会, レー
ザートラッピング法を用いた単一液滴の燃
焼解析, 2016 年 01 月 09 日~01 月 11 日, 名
城大学天白キャンパス (愛知県名古屋市)

④今村聡志, 居波 涉, 川田善正
レーザー学会学術講演会第 36 年次大会, 位相
分解蛍光寿命測定法を用いたマグネシウム
イオン濃度の測定, 2016 年 01 月 09 日~01

月 11 日, 名城大学天白キャンパス (愛知県名古屋市)

⑤藤川正太郎, 居波渉, 川田善正
レーザー学会学術講演会第 36 年次大会, レーザートラッピング法を用いた単一液滴の燃焼解析, 2016 年 01 月 09 日~01 月 11 日, 愛知県名古屋市

[図書] (計 0 件)

[産業産権]

○出願状況 (計 0 件)

○取得状況 (計 0 件)

[その他]

ホームページ等

<http://optsci.eng.shizuoka.ac.jp/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

川田 善正 (KAWATA, Yoshimasa)

静岡大学・電子工学研究所・教授

研究者番号: 70221900

(2) 研究分担者

居波 渉 (INAMI, Wataru)

静岡大学・電子工学研究所・准教授

研究者番号: 30542815