

1. 実験テーマ名

微小重力下での光ピンセットによる懸垂液滴径の計測

Measurement of droplet diameter suspended by Optical Tweezers under the Microgravity

2. 実験の目的、概要

(1) 背景

多くの燃焼器における燃料の燃焼は噴霧燃焼の形態をとる。噴霧燃焼は多くの過程が同時に進行する複雑な現象であり、そのメカニズムの解明は工学的に重要な課題である。噴霧燃焼の基礎研究においては、噴霧の最も単純な要素である単一液滴を用いた研究が広く行われている。それらの研究においては、観察を容易にするために液滴を懸垂線という細線に固定することで実験を行っている。しかし懸垂線による液面の変形や熱流入などの影響は無視できないものと言われており、液滴を空間に非接触で固定することができれば有用な実験手段となり得る。そのため、本研究室では光ピンセット技術を燃料液滴懸垂に適用することを考えている。

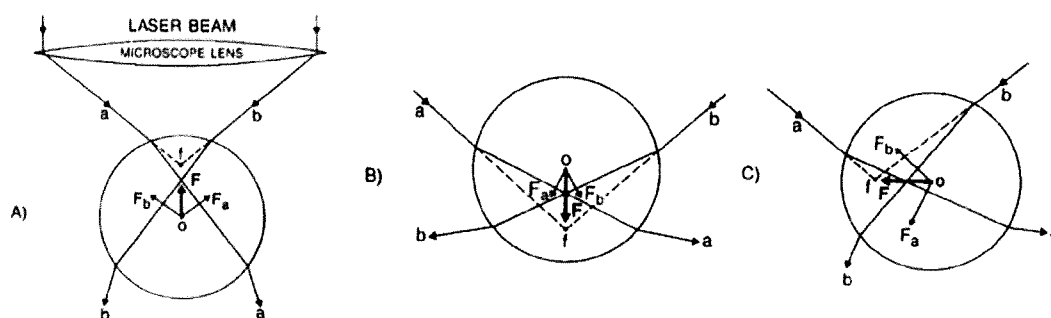
(2) 目的

本実験では微小重力下で光ピンセットにより懸垂される液滴径を計測する。

(3) 原理・概要

(i) 光ピンセットの原理

光ピンセットは集光したレーザーにより微小物体を非接触で捕捉する技術である。光ピンセットの原理は液滴内で屈折した光が液滴に運動量を与えることで液滴が懸垂されるというものである。図1にその原理を示す。



1. Fig. 1 Principle of Optical Tweezers (Ashkin, A., Biophys. J. 61: 569-582 (1992)より引用)

光ピンセットによる力のつり合いはレーザーによる捕捉力と重力のつり合いと考えられ

$$QnP/c = \pi\rho gd^3/6 \quad (1)$$

と記述される。ここで Q は軸方向の捕捉効率であり開口数などの光学系に依存する値である、 P はレーザーのパワー[W]、 c は光速、 n は溶媒の屈折率である。

(ii) 液滴径の見積もり

本研究室で作成した光学系においては $Q=0.024$ となっている。放物線飛行により上下 G が $0 \sim 2$ の範囲で変化した場合に(1)式から計算される水滴の径の見積りを図2に示す。

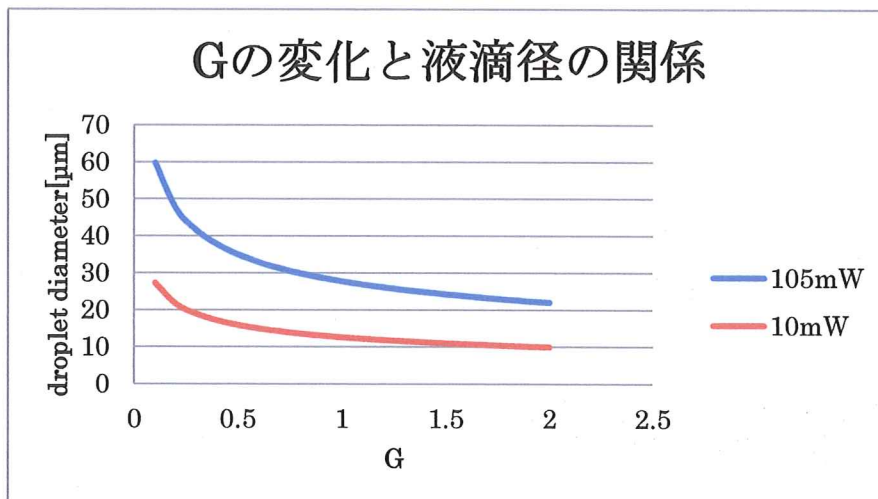


Fig.2

本実験で用いる半導体レーザーは出力が 105mW の以下の範囲で可変であり、出力の変化によっても懸垂液滴径に幅を持たせることが可能であると考えられる(図2)。本研究室で行った実験においては約 $30\mu\text{m}$ の水滴を分単位で懸垂すること成功しており(図3)地上においては問題なく懸垂できることは確認済みである。

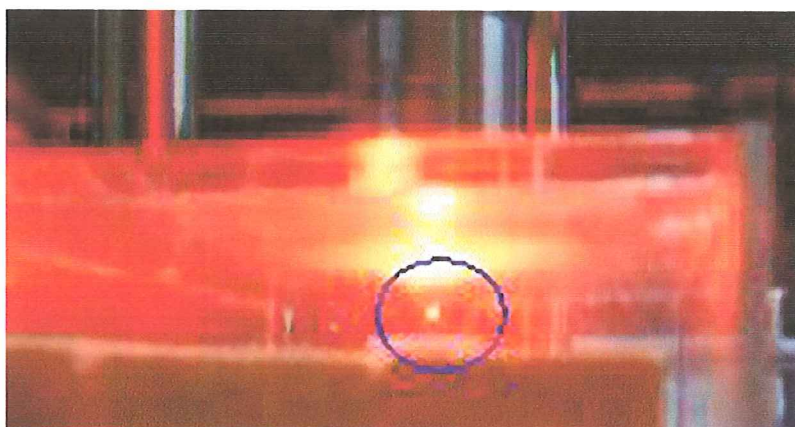


Fig.3 Direct Image of a droplet suspended by optical tweezers

(iii) 液滴径の計測法

液滴径の計測には干渉画像法を用いる。図4に示すように高速度カメラによる画像には明瞭な干渉縞が確認される。



Fig.4 Interferometric Image of a droplet suspended by optical tweezers

この干渉縞の本数を数えることで液滴径を算出する。

干渉画像法の式は

$$d = \frac{2 \lambda N}{\alpha} \cdot \frac{1}{\cos \frac{\theta}{2} + \frac{m \sin(\theta/2)}{\sqrt{m^2 + 1 - 2m \cos(\theta/2)}}} \quad (2)$$

と記述される。ここで式中の各値はdが液滴の直径、 λ がレーザーの波長、 N が干渉縞本数、 α が集光角、 θ が散乱角、 m が屈折率である。本光学系では $\theta = 90^\circ$ 、 α は対物レンズの開口数から計算し約0.26である。右辺の N 以外は実験系によって定まるため、液滴径dを算出することができる。

(4) 期待される成果

光ピンセットと微小重力実験を組み合わせることで様々な径の液滴が懸垂可能なことが示される。実際の燃焼器内の噴霧燃焼と同じオーダー(10 μm)の液滴径を用いた実験が可能になることが示唆され、将来的には燃料液滴で蒸発や燃焼の実験をすることで噴霧燃焼のメカニズムの解明に寄与すると考えられる。

Optical tweezers enables to fix a free droplet spatially . Under microgravity, the capture force of optical tweezers becomes more effective due to no existence of gravity force and there is a possibility that this method will be strong tool for experiments of droplet vaporization and combustion especially under microgravity. Under Microgravity, it is possible to obtain a lot of knowledge by optical tweezers system, because the range of diameter of suspended droplet seems to be expanded and the phenomenon can be simplified by disregarding the influence of the gravity and the convection.

The purposes of this experiment are comparison of droplets diameter with assumption and suspending the biggest and the smallest droplet in the past experiments.

3. 実験内容の区分

理工

4. 実験手順

- (1) 地上で光学系を設置 (図 5)。レーザー光と霧が漏れぬよう暗幕をラックに設置。各機器の動作チェック。
- (2) 離陸後、実験準備開始の合図でレーザーと記録装置起動。レーザーは 105mw に設定。
- (3) パイロットコール (-60 秒)~30 秒
録画開始。噴霧器により生成した噴霧をレーザーの焦点付近に誘導し液滴を懸垂する。
- (4) -30 秒~-10 秒
噴霧器により生成した噴霧をレーザーの焦点付近に誘導し液滴を懸垂する。
- (5) -10 秒~20 秒
噴霧器により生成した噴霧をレーザーの焦点付近に誘導し液滴を懸垂する。
- (6) 以下(3)~(5)を繰り返し各 G での液滴を撮影する。成功率が高い場合はレーザーの出力も変化させ(3)~(5)を繰り返す。

5. 実験装置概要

実験装置は

- レーザー CUBE640-100C (COHERENT 社)
- 噴霧器
- カメラ MEMRECAN Ci (NAC 社)
- 光学部品
- 光学系を固定する板 (自作)
- ノート PC

を用いて設計する。噴霧には水を用いる。実験装置の概要と光学系の図 5 に示す。図 6 は光学系の一例である。簡便な光学系なので配置の変更は容易であり図 6 のものより固定が強固な光学系に変更予定。

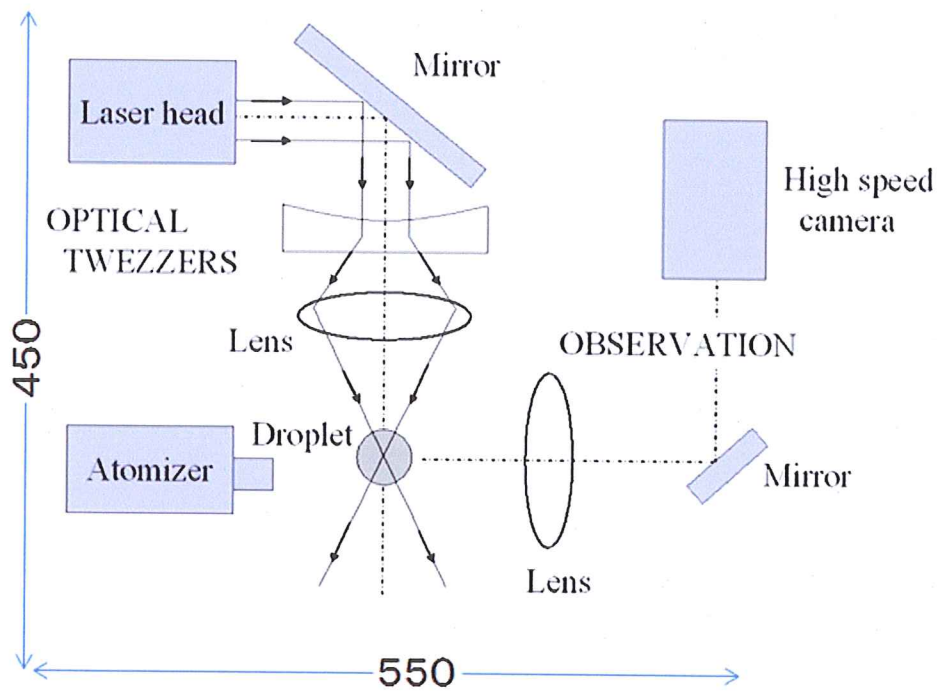


Fig.5 Schematic of experimental apparatus

図の奥行き方向の寸法は 450 である。



Fig.6 Experimental apparatus

6. 実験装置のサイズ、重量概算

実験装置のサイズは図5で示したように550×450×450(mm)である。

重量は約12kgになると想定される。

7. 必要な電源容量概算

AC100V・DC28V

8. 実験支援装置の利用要望

実験開始信号、計測データの収録装置の利用を希望。

9. 危険物等の搭載の有無

クラス3Bの半導体レーザー。

10. 実験実施時の航空機への登場希望有無

有

11. 役割分担

装置の設置、実験は一人で可能である。装置の運搬は全員で行う。

12. その他特記事項

実際に液滴が懸垂される様子を撮影した動画もございますので、ご検討に必要がありましたら提出することも可能です。実験装置の実現性に関して、同様の光学系を用いて水とエタノールの懸垂に成功した基礎実験の内容を第48回燃焼シンポジウムと *8th* Japan-China-Korea Workshop on Microgravity Sciences for Asian Microgravity Pre-Symposium にて発表しました。

レーザー光は実験者が保護メガネをかけラックを暗幕で覆うことで安全性に配慮します。

地上での実験では懸垂は噴霧誘導後数秒で確認されるので短時間微小重力実験も可能だと考えます。