

レーザー加速ニードルレス液滴システムの開発

米田研究室
豊島 圭一郎

1. 背景・目的

現在, ワクチン接種などで多くの人が注射を年に数回受けている. 実際に金属の注射針を使った方法が使われているが, 廃棄物が多いこと, 汚染の問題から非接触の方法が提案されている. 非接触の手法としては, レーザーやガス圧よるもの, ピエゾ素子を用いるものがあるが, レーザーは打ち込む液滴の速度や容量の制御性の点で有利である^[1]. 先行研究として, レーザーを用い, 液中で圧力を発生させることで高速な液体を出射させ, 皮膚下に導入する方法が提案されている^[2]. より深部への注入のためには, 高速な液体流を生じさせる方法が望まれている. そこで, 本研究では液滴をパルスレーザーで直接加速する方法を提案し, その原理実証を目指している.

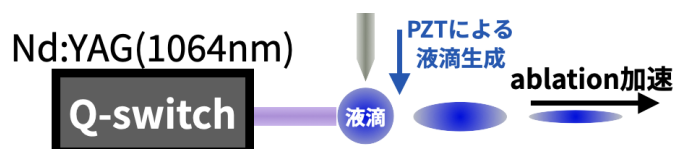


図1. 提案手法

本手法は, レーザーのエネルギーが液滴の加速のみに使用されるため, 対象へより深く打ち込める点, 高効率ゆえに装置の小型化が見込める点が期待される.

2. 原理

2.1 高速撮影

動く現象を観察するには, 高速撮影が有効な手法である. それを実現するために, 高速度カメラを利用するのが1つの手である. ただし, 反復して同じ現象を生じさせることが可能な場合には, fpsが30Hz程度のカメラでも擬似的に高速な現象を捉えることができる. 写真撮影するタイミングを少しずつ変化させながら何度も繰り返し撮影する手法である. この手法は, 反復的な現象のみを捉えるのに利用できるが, 安価なカメラで高速な現象を捉えられるという点に大きなメリットがある.

2.2 暗視野撮影

図2のように, 物体に当たらずに通過した 0 次光のみをフィルタで除去する手法である. 背景の明るさを除去することにより, より高いコントラストの撮影が可能になる.

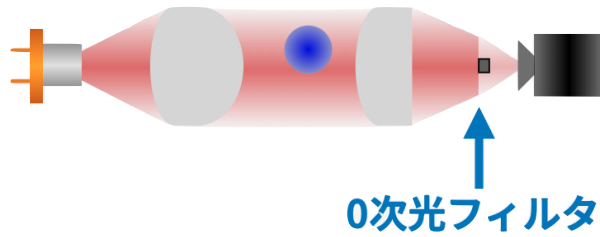


図2. 暗視野撮影の概念図

高速撮影や、撮影する像を拡大した場合には、カメラに入る光量が減るため、この撮影法は有効である。

3. 方法

3.1 観測系の構築

提案手法の実現に向けて、具体的にはまず、加速する液滴を市販のマイクロジェットシステムを利用して、空気中に出射させる。この液滴の大きさは小さい方が同一のレーザー照射でも加速効率が高くなるので、微小化させる必要がある。その一方で、空気中を飛翔させるために、ノズルから先では空気の対流の影響などを受け、方向や速度に影響が出て、加速用レーザー照射位置が固定できなくなる問題がある。そのため、本研究ではまず、 $10\mu\text{s}$ の時間分解能で $0.1\mu\text{m}$ の空間分解能を持つ観測系を半導体レーザーと暗視野光学系を構成し、パルス発生器で時間遅延を制御することで液滴を観測できる装置を作成した。

この観測系は液滴がぶれなく撮影できるよう、probe光のパルス幅を $30\mu\text{s}$ に設定している。ま

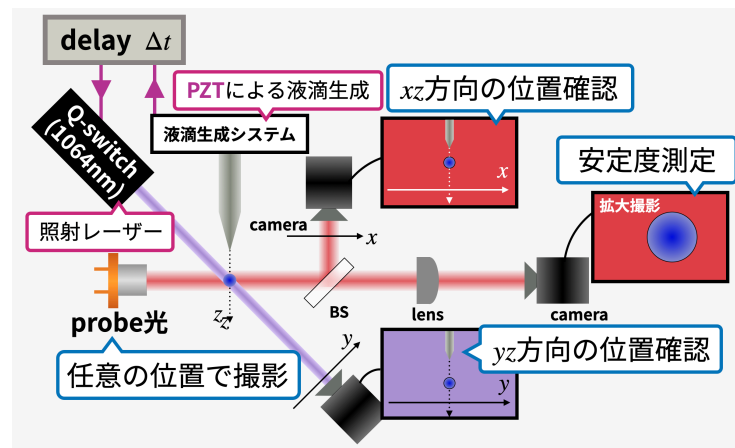


図3. 観測系の概念図(赤色のビームライン)

た、液滴の位置の確認と、その位置の安定度を測定を同時に行うために、広範囲な撮影と拡大した撮影を同時に行える光学系として設計した。

この観測系を用いて、PZTで生成される液滴の位置の安定度、液滴の直径、液滴の速度を測定した。

3.2 レーザー照射試験

前節の測定値を用いて、照射に関する遅延時間を計算し、それをシステムへ反映した。そして、液滴を加速するレーザーの集光径を絞りながらカメラで液滴の存在を確認して、さらに絞っていくことを繰り返した。(図4参照)



図4. レーザー照射試験の概念図

加速レーザーとしては、パルスレーザーとして尖頭値が高く、液体特に水での吸収が期待できる波長 $1\mu\text{m}$ のNd:YAGQスイッチレーザーを用いた。将来の応用を考えると、レーザーの加速効率も重要であるために、パルスエネルギーを 10mJ 以下で加速できるようにしている。実際の実験システムでは、液滴の落下していく軸とその照射位置の観測光学系の軸、さらに加速レーザーの照射軸の3軸が互いに直交する配置に設置している。

4. 結果

4.1 液滴(ターゲット)の観察

液滴の生成条件を変えながら、位置の安定度を測定したグラフが図5である。これより、 50V 、 $60\mu\text{s}$ で液滴を発射する場合が最も位置が安定することがわかった。さらに、液

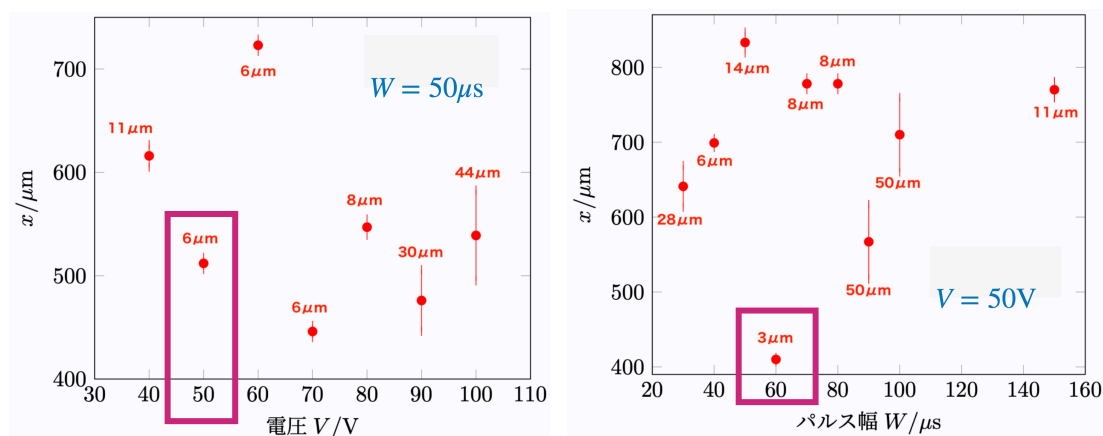


図5. 位置の安定性 (エラーバーが位置 x の標準偏差)

滴を暗視野で撮影することにより、直径は $(43 \pm 2)\mu\text{m}$ であることがわかった。また、撮影するタイミングを変化させることで測定した液滴の落下速度は、 $(11 \pm 2)\text{m/s}$ であることがわかった。

4.2 液滴への照射

照射レーザーを1mmまで絞った状態で、照射試験を行った。図6がその様子である。

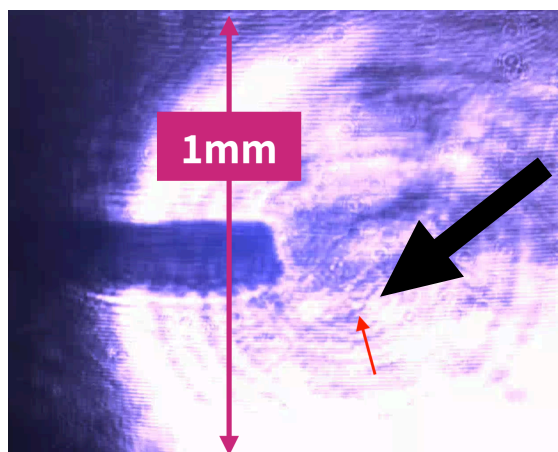


図6. 集光径1mmでの液滴

液滴の撮影に成功し、これにより照射のタイミングが正確であることがわかった。アブレーション加速を生じさせるには、集光径が $1\mu\text{m}$ 程度であることが要求されるので、さらに空間アライメントの精度を向上させて、照射レーザーを絞ることが必要である。

5. 結論・まとめ

本研究では、加速効率を向上させたレーザー注射システムを提案した。液滴に関する各種パラメータの測定を行い、液滴へ照射するための条件を特定した。具体的には、速度 11m/s で大気中へ放出させた場合、ノズル先端位置から 5mm のところで、位置制御 $3\mu\text{m}$ の精度で加速レーザー照射位置を決定できることが分かった。この条件を反映したシステムを構築し、集光径 1mm にて液滴の撮影に成功した。今後は、このシステムを用いて音速近傍までマイクロジェット液滴を加速させ、その飛翔特性を評価していく。

参考文献

[1] Needle-free delivery of fluids from compact laser- based jet injector, Jan Krizek et.al, ROYAL SOCIETY OF CHEMISTRY, 2022

[2] Laser-induced microjet injection into preablated skin for more effective transdermal drug delivery, Hun-jae Jang et.al, Journal of Biomedical Optics, 2014