

パルスレーザーを用いた静電浮遊液滴の大変形挙動の観察

野口 正晴¹・正木 匡彦²・松本 聡^{1,3}

Large Deformation Behavior of Electrostatic Levitated Liquid due to the Photon Energy by Using a Pulse Laser

Masaharu NOGUCHI¹, Tadahiko MASAKI² and Satoshi MATSUMOTO^{1,3}

Abstract

In this study, we investigate the deformation of the levitated droplet using a YAG pulsed laser and the possibility of the measurement of its thermo-physical properties. The sample was levitated by using an electrostatic levitator (ESL). The behavior of levitated droplet was observed by high-speed camera that has been installed on the side of ESL chamber. A hole on the droplet was provided by the laser radiation pressure. During the relaxation of deformation, a small liquid drop (satellite) jumped out from the levitated sample. The size of satellite drop depends on the power of the YAG-laser. Weber number was estimated when the satellite droplet was formed. The Weber number at satellite formation was similar to the experiment on the International Space Station.

Keyword(s): Electrostatic levitation, Pulse laser, Surface tension

Received 28 May 2015, accepted 14 July 2015, published 31 July 2015

1. はじめに

高融点金属の精製や新規材料製造における特性の制御において、液体金属の密度、粘性係数、表面張力、比熱、凝固潜熱や熱伝導率といった熱物性値を把握しておくことは、極めて重要である。従来の高融点金属の熱物性測定法においては、測定試料をるつぼなどの容器に入れて扱うため、その容器との化学反応による不純物の混入などがあり、正確な測定が困難であった。

上記の問題を解決するために、静電浮遊法をはじめとした様々な無容器プロセッシングが開発されてきた¹⁾。静電浮遊法を用いた表面張力や粘性係数の測定では、浮遊させた試料に対して振動電場を加えて液滴振動を誘起し、その固有振動数や減衰時間からそれらの物性値を求めることが行われている²⁾。その時の液滴の形状は、線形近似のもとで導出された解析式(1)により表される。

$$r(t) = r_0 + \sum_{n=2}^{\infty} r_n \cos(\omega_n t) P_n(\cos\theta) \exp\left(-\frac{t}{\tau_n}\right) \quad (1)$$

ここで、 r_0 は完全な球形の半径であり、 ω_n は n 次の

振動モードの固有角速度、 $P_n(\cos\theta)$ は n 次の Legendre 多項式、 θ は鉛直軸からの角度、 r_n は n 次の振動モードの振幅、 τ_n は n 次の振動モードの減衰時間である³⁾。

液滴振動法は、液体金属のような粘度の低い液体に対してよく用いられてきた。また、極めて粘度の高い試料については、試料に音響トルクや回転磁場を印加して自転させ、遠心力による変形を利用することが試みられている^{4,5)}。

従来の液滴振動法では、印加する電場の振動数を掃引しながら、液滴の振動モード 2 の固有振動数をサーベイすることが行われてきた。近年、モード 2 を励起するために電極間に印加する電場の振動周期と静電浮遊法における電場のフィードバック制御の周期が近いために、液滴の振動が共振を起し、液滴振動による粘性計測などに影響が見出されている。そのため、浮遊中の制御周期の調整が必要なることがわかっている⁶⁾。液滴振動における各モードの固有振動数は以下の式(2)で与えられる。

$$\omega_n^2 = n(n-1)(n+2) \frac{\gamma}{\rho r_0^3} \quad (2)$$

ここで、 γ は試料の表面張力であり、 ρ は密度である。

1 筑波大学 大学院 システム情報工学研究科 〒305-8573 茨城県つくば市天王台 1-1-1
Graduate School of Systems and Information Engineering, University of Tsukuba, 1-1-1 Tennoudai, Tsukuba, Ibaraki 305-8573, Japan.
2 芝浦工業大学 工学部 材料工学科 〒135-8548 東京都江東区豊洲 3-7-5
Material Engineering, Shibaura Institute of Technology, 3-7-5, Toyosu, Koto-ku, Tokyo, Japan.
3 宇宙航空研究開発機構 〒305-8505 茨城県つくば市千現 2-1-1
Japan Aerospace Exploration Agency, 2-1-1, Sengen, Tsukuba, Ibaraki 305-8505, Japan.
(E-mail:s1520909@u.tsukuba.ac.jp)

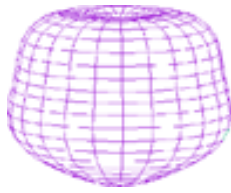


Fig. 1 A shape of mode3 + mode5.

より高次のモードであるほど固有振動数は高くなり、例えばモード3はモード2と比較して約2倍の固有振動数を示す。このような高次の振動モードを励起できれば、浮遊のための電場の制御周期とカップリングを起こささないような液滴振動を起こさせることが可能であり、液滴振動の適用範囲を広げることが可能である。

式(1)から得られる液滴の振動モードのうち、奇数モードの振動を重ね合わせることで、液滴の一部が窪んだような液滴形状を作ることができる。例えば、モード3とモード5を重ね合わせると Fig. 1 のような形状が得られる。このような形状の液滴の緩和過程では、各モードの固有振動数と固有緩和時間の液滴振動の重ね合わせで得られるはずである。すなわち、瞬間的にそのような液滴形状を作ることができれば、複数モードの振動を同時に励起したことに同じになり、原理的には液滴形状の時間変化から各モードの固有振動数と減衰時間を同時に計測することが可能になるであろう。

YAG-レーザーなどのパルスレーザーは、Qスイッチを用いることによりパルス幅がナノ秒程度の光子のかたまりを放射することができ、これを試料に照射することにより試料に対して瞬間的に大きな運動エネルギーを与えることができる。例えば、落下中の微小液滴に対して高強度のパルスレーザーを照射した場合、その照射圧により液滴を円盤状に変形できることが見出されている⁷⁾。このパルスレーザーの強度と集光を適切に制御することにより、液滴表面の一部をくぼませるように変形することが可能である。

浮遊液滴に対するパルスレーザーの照射はこれまでにほとんど研究されておらず、静電浮遊液滴に対するパルスレーザーの照射装置や方法を始め、照射した際に浮遊が維持できるかどうかなど技術的な課題を明らかにする必要がある。本研究では、このような実験が可能装置を構築し、試行的な実験としてパルスレーザーの放射圧による液滴の変形と液滴の変形挙動を解明することを目的とした。

2. 実験装置および実験条件

2.1 静電浮遊装置

静電浮遊は、Fig. 2 に示すように、上下の電極間に帯電させた試料を挿入し、クーロン力によって浮遊させる方法である。導電性試料の場合、上電極に負の電位を印加することで、試料表面が正に帯電し重力と拮抗するクーロン力

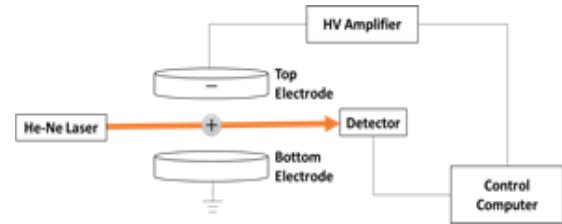


Fig. 2 Schematic figure of electrostatic levitator.

が働き、試料を浮遊させることができる。静電浮遊法では電磁浮遊法のように試料周りにコイルを配置する必要が無いため試料に対する観察視野を大きくとることが可能であるが、浮遊に対する安定点を作ることが出来ないため、常に位置を検出して電極間の電位に高速のフィードバック制御を行う必要がある。本研究で用いた静電浮遊装置は、Rhim et al.⁸⁾ により開発されたものをベースとしている。上下一対の電極と左右の位置制御のための電極を円筒型の真空チャンバー内に設置し、その側面に浮遊した試料位置検出、放射温度計による温度計測、試料を帯電させるためのUVランプ、加熱用CO₂レーザーのための窓に加え、YAG-レーザー導入用および高速ビデオカメラ用の観察窓を取り付けたものを使用した。実験中の金属試料の酸化を防止するためにチャンバー内の真空度を $1.0 \times 10^{-4} \sim 2.0 \times 10^{-4}$ Pa に保ち、試料の加熱溶融のためのCO₂レーザーとして、最大出力240Wと、100Wの2つのレーザーを対向させて配置した。また、電極への電圧印加は最大出力-30kVの高速高圧アンプを用いた。

静電浮遊法の帯電量により浮遊の安定性が左右され、試料の表面から不純物が蒸発する際の損失により試料の帯電量は減少する。本実験では、UVランプ（ウシオ電機型式SP-0240DB）を用いて、試料を光電効果によって帯電させながら加熱を行った。一般的な液滴振動法では、上下の電極間の電位差に液滴との共振周波数の正弦波を重畳し、液滴の共振を起こさせるが、本研究では、パルスレーザーを照射することによる液滴の局所的な変形を試みた。使用したパルスYAG-レーザーはNd³⁺を活性物質とし、母材結晶としてYAG（Yttrium Aluminium Garnet）を用いた固体レーザーで、波長1064nmの遠赤外線領域で発振する。本実験では、チャンバー内で浮遊している試料に撃力を与える為に、Qスイッチでパルス幅16~18nsのシングルショットパルスレーザー光を発生させた。

Figure 3 に示すようにYAG-レーザーを設置し、試料に対して水平方向から照射した。また、Fig. 4 に示す様にYAG-レーザーの照射口に1064nmのみを透過するバンドパスフィルターを設置し、可視光域の高調波が浮遊のための位置検出の妨げにならないよう対策した。YAG-レーザーとチ

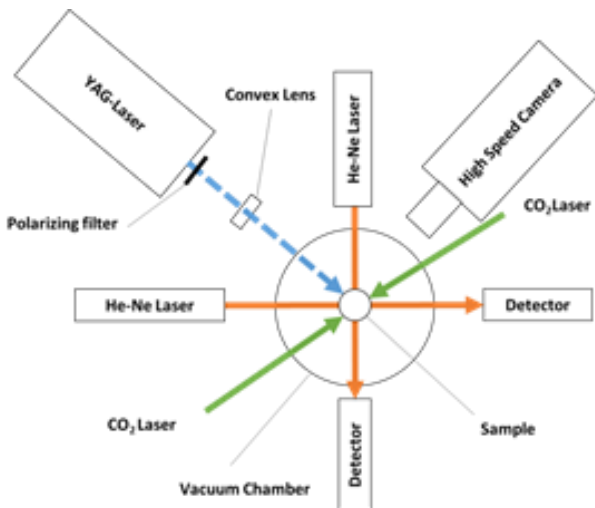


Fig. 3 A top view of electrostatic levitator with a YAG-laser and a high speed camera.

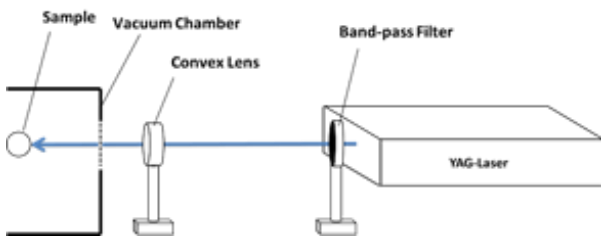


Fig. 4 Configuration of laser and lens.

チャンバーの間に凸レンズを置き、パルスレーザー光を集光させた。試料表面に相当する位置でのスポット径はアルミ箔を標的とした実験から 0.5 mm 程度であることを確認した。レンズおよびチャンバーの窓にはフッ化カルシウム (CaF₂) を用い、レーザー光に対する透過率が 90%以上となるものを用いた。

Figure 3 に示すようにハイスピードカメラ (MEMRECAM ci-4) を YAG-レーザーの照射方向に対して 60 度の角度から観察するに設置し、液滴形状の観察を行った。本実験ではフレームレート 1000 fps, シャッタースピード 1/3000 s, 画素数 400×282 pixels で記録した。

2.2 実験手順

試料にはガス浮遊法を用いて作製した直径 2mm のジルコニウム球を用いた。静電浮遊させた試料に対して CO₂ レーザーによる加熱を行い融点以上に加熱して溶融させたのち、その試料に対してパルス YAG-レーザーによって出力 27~30 mJ, 16~18 ns のパルス幅のシングルショットビームを照射することによって変形させ、ハイスピードカメラを用いて照射前後の 20 ms 間の挙動を記録した。

3. 実験結果

3.1 試料の変形挙動

浮遊させた溶融試料に対して側部からパルスレーザーを照射した際の様子を Fig. 5 に示す。Fig. 5 の 1~8 はパルスレーザーが照射される直前から照射による変形までを 0.001 秒間隔のコマ送りで示したものである。

YAG-レーザーが試料に当たった瞬間 (Fig. 5-2) に試料表面は大きく凹み、それが球形に戻る際の反動で試料の一部が分離し、小さな滴となって射出していることが明らかになった。国際宇宙ステーション (ISS) の微小重力環境において D. Pettit が行った研究では、形成した直径数 cm の大型の水滴に対して空気を吹き付けることにより外力を加え、液滴の表面の一部をくぼませるように変形させている。その変形した液滴がもとの球形に復元する際に、今回の実験と同様の液滴の射出が見られている⁹⁾。今回の実験では、その宇宙実験における水滴の変形と微小液滴の射出現象と類似の現象を、地上重力下で静電浮遊させた金属液体に対してパルスレーザーを照射することで再現することができた。

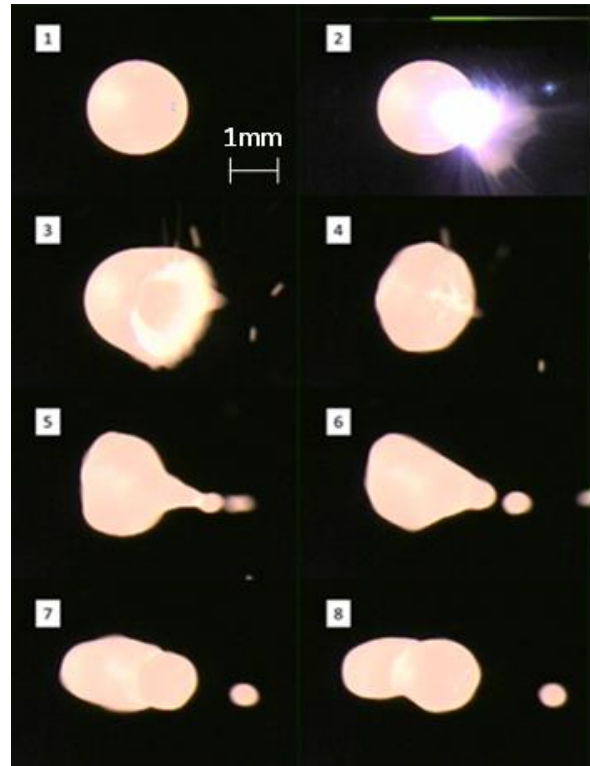


Fig. 5 Snap shot of shapes of levitated liquid sample irradiated by YAG-laser (1/1000s interval).

3.2 液滴形状変化とパルスレーザーの出力の関係

試料表面から射出される液滴の大きさと照射直後の液滴の変形（表面のくぼみ）の大きさ，すなわちパルスレーザーの出力は何らかの相関をもつと考えられる．そこで，パルス YAG-レーザーの出力の設定値を変えた時の液滴の挙動の違いを調べた．その結果を Fig. 6 に示す．

パルスレーザーの出力を上げることにより，液滴に与えるエネルギーが大きくなり，射出される小滴の直径が増加することが明らかになった．

小滴の射出に関係した流体パラメータとしてウェーバー数 We を見積もった．本研究では We 数を式(3)のように定義した． We 数は慣性力と表面張力の比を表す無次元数である．

$$We = \frac{\rho Lv^2}{\gamma} \quad (3)$$

ここで， ρ は液体密度， L は代表長さであり本実験では初期に変形させた液滴表面のクレーター状のくぼみの直径を用いた．その際，試料液滴径を既知とし，真球状の試料直径とクレーター状のくぼみの直径をビデオ画像で比較して L を求めた．なお，本実験の試料直径は 2 mm であり，宇宙実験における水滴の直径は 50 mm¹⁰⁾とした． v は射出された液滴の速度であり，ビデオのフレームレートと液滴の位置の変化から求めた． γ は液滴の表面張力である． We 数を算出する際に用いた値を Table 1 に示す．パルスレーザーの出力設定値を 28 mJ とした際の We 数は 1.5 であり，30 mJ とした際には 1.4 であった．また，ISS での D. Pettit の実験⁹⁾における We 数を純水の物性とくぼみの直径から見積もったところ 1.5 であった． We 数を用いて整理すれば，本実験と ISS の実験はきわめて近い条件であり， We 数がこの近傍において液滴の射出が観察されることがわかった．また，Fig. 6 に示し

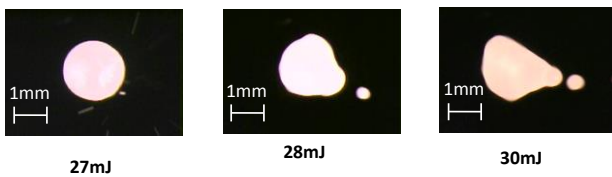


Fig. 6 Injected satellite droplet depending in power of pulse laser.

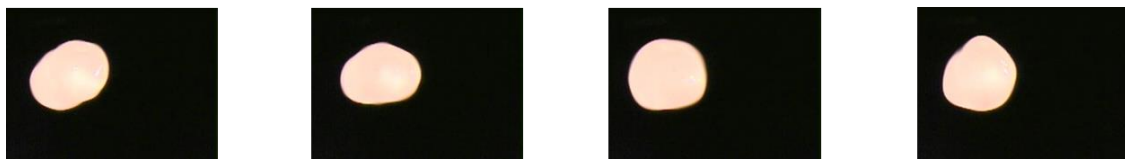


Fig. 7 Shapes of droplet.

Table 1 Parameters for calculating We

Samples	Liq. Zr (Laser Power28m J)	Liq. Zr (laser Power30m J)	Water (on the ISS)
$\rho, \text{kg/m}^3$	6208	6208	999.97
L, mm	2.0	2.3	46.2
$v, \text{m/s}$	0.42	0.38	0.048
$\gamma, \text{mN/m}$	1500	1500	72.75

たが，出力の設定値を 27 mJ とした時，非常に小さな液滴が射出する様子が観察された．このことから，液滴の射出に対するパルスレーザー出力の閾値があることが考えられる．この時の実験では，クレーター状のくぼみが小さくいためにその直径を判別できなかったが，くぼみが復元する際の慣性力が表面張力を上回る条件で液滴が射出するものと予想される．

今回の実験では，パルスレーザーの出力設定値をパラメータとしたが，本来は試料部におけるレーザーの真のエネルギー値で整理すべきである．そのためには試料部におけるレーザーの真の出力値をパワーメーターなどで計測する必要があるが，静電浮遊装置を用いた場合 Fig. 2 に示すように試料近傍の上下の電極間隔は 8 mm 程度であるため，その場所にパワーメーターの検出部を設置することができなかった．今回の実験は浮遊液滴とパルスレーザーを組み合わせた初めての試みであり，レーザー出力と液滴の射出の定積的な関係までしか議論することができなかったが，今後，パルスレーザー出力の検出方法などの改良を加え，さらなる実験データを蓄積したうえで定量的な議論へ発展させたい．

3.3 観察された液滴形状と振動モード

本実験では，パルスレーザーによる変形が緩和する過程において，様々な液滴形状が観察された (Fig. 7)．試料が球形から微小な軸対称の変形をした時，その形状 r_n は Rayleigh によると，式(1)で表され，その固有振動数は式(2)で表される．

また，式(2)の減衰時間 τ は，式(4)で表される．

$$\frac{1}{\tau_n} = (n - 1)(2n + 1) \frac{\eta}{\rho r_0^2} \quad (4)$$

Table 2 Shapes, oscillation frequency and damping constant corresponding to n th mode.

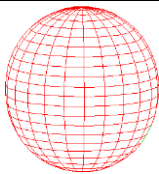
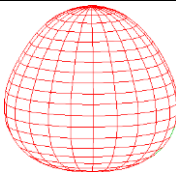
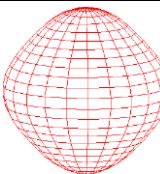
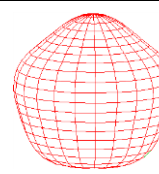
Mode	$n = 2$	$n = 3$	$n = 4$	$n = 5$
Shapes				
τ (s)	0.28	0.099	0.051	0.039
f (Hz)	221	428	664	925

Table 2 に式(1)から得られる各モードの液滴形状を示した。表中の図は、振動による変形が最も大きくなった時の形状を記載した。また、融点における液体ジルコニウムの物性を用いてもとめた各モードの固有振動数と減衰時間を示した。粘性係数 η は 4.74×10^{-3} Pa \cdot s とした。高次のモードになるほど振動数が高くなり、早く減衰するが、今回の測定条件（観測時間 0.02 秒, 1000 fps, シャッター速度 1/3000 秒）を考慮すると、モード 5 までであれば、液滴の変形が最も大きくなった時の特徴的な形状を高速カメラの一コマの画像として観測できる可能性を有している。**Figure 7** に示した液滴形状は、それぞれモード 2 からモード 5 に類似の形状を示している。これらがそれぞれのモードの液滴振動の結果であるかどうかについては現時点では判別することは難しいが、近年では 2,000,000 fps 程度の高速ビデオカメラが市販されており、このような機器を導入しさらに微小変形とみなせるようなパルスレーザーの強度を選ぶことにより、これらの観測が可能となると考えられる。

4. 結論

本研究では、パルスレーザーによる静電浮遊液滴の変形挙動に関して、以下の結論を得た。

- 静電浮遊させた熔融液滴に対して YAG-レーザーを照射し、そのときの変形挙動を記録することに成功した。

- 照射するレーザーの出力を上げることによって射出する液滴の直径が増加することがわかった。
- We 数を用いると、ISS での実験と近い条件で液滴が射出していることがわかった。

参考文献

- 1) T. Ishikawa: Study on thermophysical property measurements of molten refractory metals using electrostatic levitation methods, PhD thesis. Tokyo Institute of Technology (2001) (in Japanese) 1.
- 2) W.K. Rhim, K. Ohsaka and P.F. Paradis: Rev. Sci. Instrum., **70** (1999) 2796.
- 3) L. Rayleigh: Proc. R. Soc. Lond., **29** (1879) 71.
- 4) Y. Abe, S. Matsumoto, T. Watanabe, K. Nishinari, H. Kitahara, A. Kaneko, K. Hasegawa, R. Tanaka, K. Shitanishi and S. Sasaki: Int. J. Microgravity Sci. Appl., **30** (2013) 42. (in Japanese)
- 5) K. Ohsaka, A. Rrdnikov, S.S. Sadhal and E.H. Trinh: Rev. Sci. Instrum., **73** (2002) 2091.
- 6) T. Ishikawa, P.F. Paradis, N. Koike and Y. Watanabe: Rev. Sci. Instrum., **80** (2009) 013906.
- 7) <http://dx.doi.org/10.1103/APS.DFD.2014.GFM.V0016>
- 8) W.K. Rhim, S.K. Chung, D. Barber, K.F. Gutt, A. Rulison and R.E. Spjut: Review of Scientific Instruments, **64** (1993) 2961.
- 9) <http://www.physicscentral.com/explore/sots/episode13.cfm>
- 10) D. Pettit (private communication)