

レビテーションを用いた高出力レーザーと物質との相互作用に関する研究

米田研究室 神山美理

1. はじめに

レーザーを用いた高エネルギー密度状態の研究は、熔融された高温流体における過冷却状態の研究から恒星中心の高密度プラズマの状態方程式研究まで幅広いパラメータ範囲で研究されている[1]。レーザーで物質を加熱させる場合、その遮断密度が固体密度の2桁程度低いことから膨張した成分で吸収され、そこから熱伝導で高密度領域にエネルギー輸送される[2]。一方、大きな体積の一部を加熱した場合は、その高温部から低温部にかけて大きな温度勾配が生じ、大きな熱伝導損失が生じる。より一定温度状態を実現するために、質量制限ターゲットという薄膜化されたものを加熱することもあるが、膜の横方向には熱が逃げるために、完全な独立系とはなっていない。これらを打開する手法として本研究ではレビテーション(浮遊法)を用いて高エネルギー密度状態、特に **warm dense matter** の研究を行う装置の開発を行った。浮遊法には音波、ガス流、電場や磁場など用いる手法があるが、物質状態に関わらず、真空内でプラズマ温度まで加熱するためには、静電法が最適となる。しかし、この手法では、浮遊初期に絶縁破壊電界に迫る電界強度と高電圧の高速制御が必要となる。そこで、安定した浮遊制御を実現させるために、本研究では最初に磁気浮上により浮上させ、浮遊安定点で電場を印加する手法を採用した。

2. レビテーションを用いたプラットフォームの開発

2-1. 浮遊安定装置の開発

本研究では引力型の磁場浮遊法を利用し、図1(a)のような浮遊安定装置を開発した。この装置は主に図1(b)のようにコイルを用いて球の浮上を誘導させる装置と浮上球がある高さで固定されるように磁場を制御する回路から構成されている。

浮遊状態で加熱により高温化された金属球は高い輝度で発光してしまう為、制御回路の位置検出に100mWの紫外 GaN レーザーを用いて透過像を利用した。透過像は sensor photodiode の位置で映し出されるように設置し、sensor photodiode と reference photodiode の入射光量の差分信号で磁場強度を変化させる回路となっている。金属球として直径0.5mm~5.0mmの鉄球を使用した。

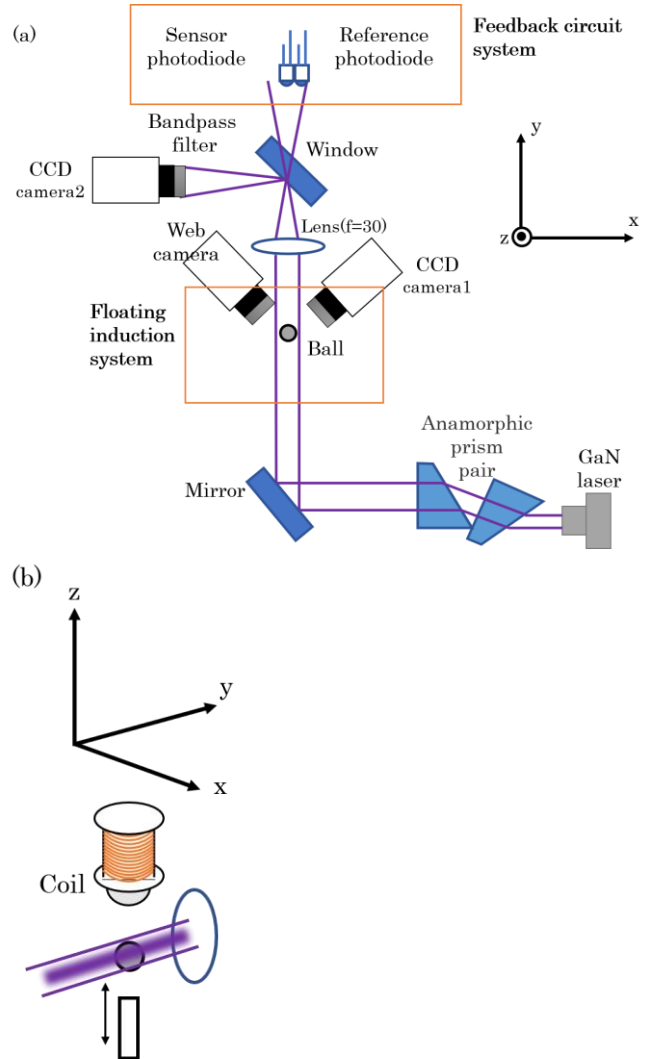


図1 浮遊安定装置
(a)装置全体の概要 (b)コイルを用いた浮遊誘導装置

2-2. 浮上開始条件の計測及び懸架精度の測定

使用する金属球を浮上させるのに必要な磁束密度を計測した。コイルは自作した400回巻コイル(0.32mmのエナメル線)を使用し、印可電流を変化させた時のコイルの磁束密度を計測した。その結果が図2であり、図2から浮上開始にはコイルまでの距離が0mmの場合、0.9Aの印可電流が必要で、コイルまでの距離が0.5mmの場合、印可電流が1.0A必要であることが分かった。すなわち、磁束密度としては、1.4mT程度以上のもので浮上が可能であることが分かった。

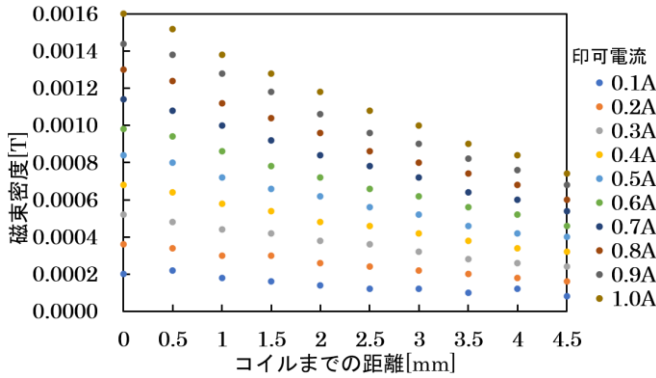


図2 400回巻コイルの磁束密度

浮上開始条件の計測結果から磁場による浮遊実験を行った。浮遊を安定化させるために、コイルに鉄心を用意し、磁場形状が中心に向かうように設計した。鉄心が図3(a)のような半球の形の場合、図3(b)のように直径5.0mmの浮遊を観測することができた。またこの時の浮遊時の振動範囲は水平方向に100 μ m、垂直方向に50 μ mであった。

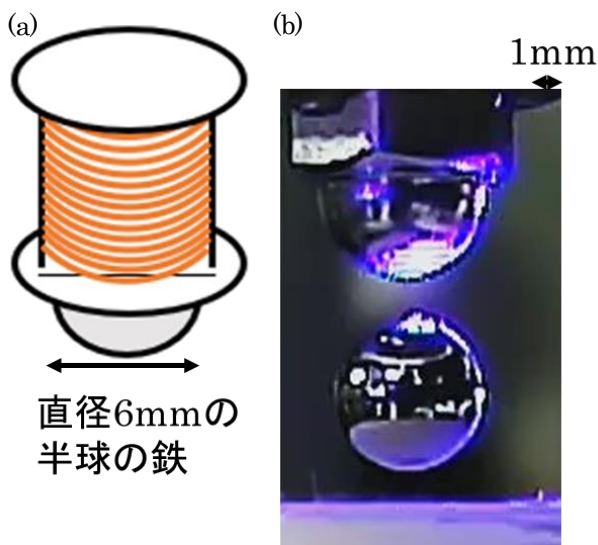


図3 直径5.0mm球の浮遊時の様子

次に、より小さい球を浮遊させるために鉄心の素材を鉄から透磁率の高いパーマロイに変更し、図4(a)のように鉄心の長さとおさを浮遊球に合わせて小さく設計した。その結果図4(b)のように直径1.0mm球の振動を確認し、また浮遊時の振動範囲は水平方向に18 μ m、垂直方向に14 μ mであった。このことから小さい球においても安定した磁気懸架を実現することができた。

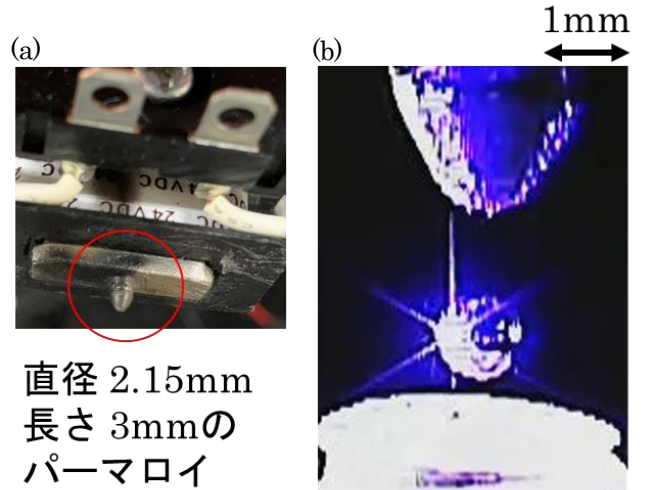


図4 直径1.0mm球の浮遊時の様子

2-3. 位置制御

垂直方向のみ位置制御だけでなく、水平方向に関してさらなる位置制御の導入を行うために、シングルボードコンピュータであるJetson Nanoを用いて位置検出プログラムを作成し、浮遊姿勢を制御できる装置を作製した。作成した位置検出プログラムの流れは

- ①カメラによって得られたRGB画像をグレースケール化し、閾値で金属球以外を取り除く。
 - ②値化画像の境界を点として認識し、線で結ぶ。
 - ③境界に沿って囲った図形を円として認識し、円の中心座標を計算する。
 - ④事前に調べた球の初期位置(静止時の座標)と現在の座標のズレを計算する。
 - ⑤①に戻り繰り返す
- である。実際にこのプログラムを用いて位置検出している様子が図5である。図5の白い数字は球の(x, y)座標であり、赤い文字は初期位置からのズレを表示している。(x軸を画面の水平方向、y軸を画面の垂直方向と設定している。)



図5 位置検出の様子

作成した位置検出プログラムをさらに計算処理時間が短くなるように画像の取り込みサイズや画像の取り込み方法を変えながら複数種類のプログラムを作成した。複数のプログラムを比較した結果が表1である。

表1 各プログラムの比較

	プログラム1	プログラム2	プログラム3	プログラム4
pixel number	307200	76800	119600	26000
Measured value of framerate[fps]	71.54	115.85	103.97	116.40
calculating time[s] (from read to finish calculate)	0.009809	0.005996	0.005231	0.006561
error number	0	19	0	3
Resolution[dpi]	vertical: 95.62 horizontal: 96.19	Vertical: 95.25 horizontal: 95.62	Vertical: 95.77 horizontal: 95.71	Vertical: 95.85 horizontal: 95.85

表1の結果からエラー数が0で、計算時間が最も短いプログラム3を位置検出プログラムとして使用することを決定した。

次に実際にプログラム3を用いてフォトダイオードと影絵を利用したアナログ信号と Jetson Nano による位置座標の計算結果から出力したデジタル信号の出力時間の比較を行った。その概要図が図6である。

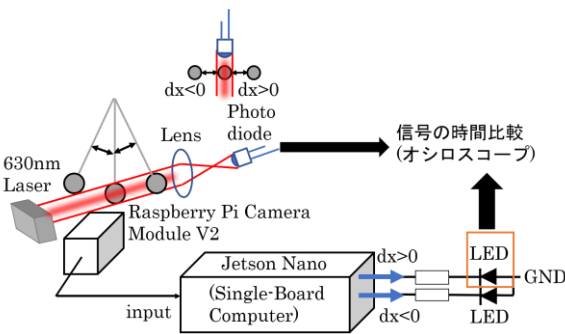


図6 時間遅延の計測

2つの検出時間を比較するためにオシロスコープを使用した。その結果は図7であった。

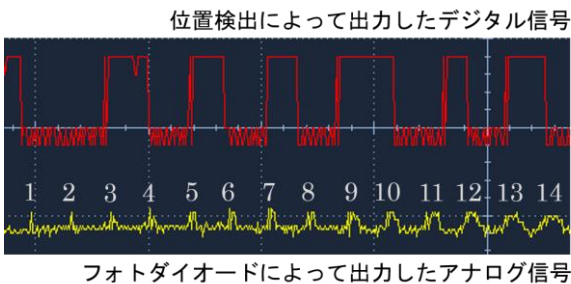


図7 位置検出信号とアナログ出力信号の比較

また図7の結果からグラフにプロットした結果が図8であった。図8の時間差 Δt の求め方は $\Delta t = (\text{デジタル信号の出力開始時間}) - (\text{フォトダイオードの発光開始時間})$ である。

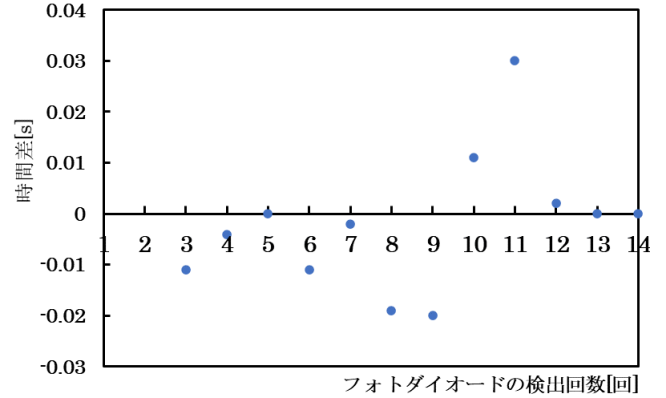


図8 各回数におけるアナログ信号とデジタル信号の時間差

図8からNo.1とNo.2はデジタル信号の出力がなかった為、プロットされていない。その原因として検出1回目~2回目間の振動速度が6700m/s以上であったからであると考えられる。ここで位置検出プログラムは浮遊時の振動速度に対し、処理速度が十分である為、No.3以降の検出について検討する。3回目以降では時間差が負であるため、デジタル信号の検出の方がアナログ信号に比べ速かったことが示されている。一方で9回目以降ではデジタル信号の方がアナログ信号に比べ遅いことが示されている。この原因として振動速度が遅くなるほど初期位置付近で球が振動する回数が多くなるため、GPIOの処理速度が追いついていないことが原因であることが考えられる。したがって、球の振動に対して十分に位置検出可能であることが分かったが、今後の課題として浮遊時に見られる振動範囲でGPIOの処理速度を計測する必要があると考える。

3. レビテーションを用いたレーザー加熱実験

3-1. レーザー加熱装置の開発

直径0.5mm~2.0mmの金属球を浮遊させ、波長1 μm の最大出力400WのYbファイバーレーザーを用い、レーザー加熱実験を行った。加熱実験の概要図は図9である。また、球の加熱を観測するために最大1000fpsの高速度カメラを使用している。また図9では加熱レーザーを3方向から照射しており、それぞれ120度間隔である。加熱実験を行う際に加熱条件として球の大きさ、レーザー出力パワー、高速度カメラの露光時間を変えて行った。

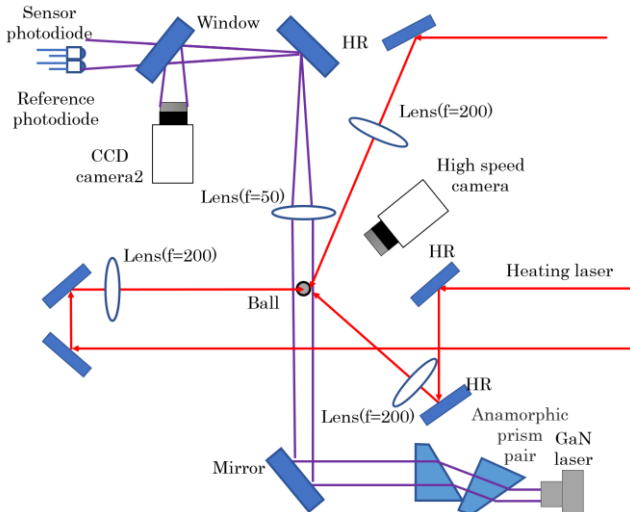


図9 レーザー加熱実験の概要図

3-2. レーザーアブレーションの観測

プラズマ温度までの加熱を目指す為にはレーザーアブレーションが起こるほどの加熱パワーが必要である。そこでアブレーションが起きる単位面積当たりの照射強度閾値の測定を行った。その結果が図10である。

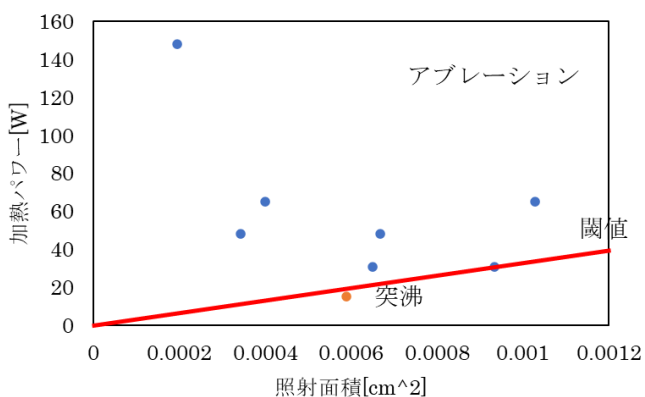


図10 アブレーションが起こる単位面積当たりの照射強度

図10から単位面積当たりの照射強度の最小値をアブレーションが起こる閾値とした。またその値は $3.3 \times 10^4 \text{W/cm}^2$ であった。この時のアブレーションの様子は図11である。

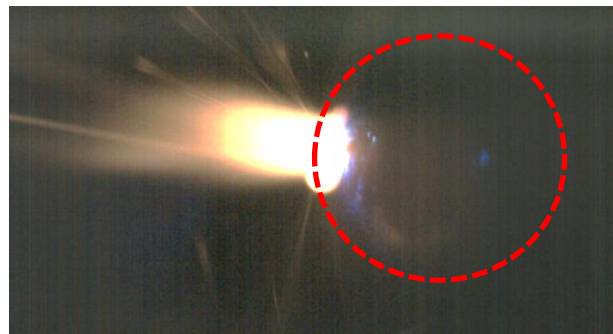


図11 アブレーションの様子

また、アブレーションが起こる閾値付近(図10中のオレンジの点)での単位面積当たりの照射強度 ($2.5 \times 10^4 \text{W/cm}^2$) では図12のような突沸現象が起きることが分かった。

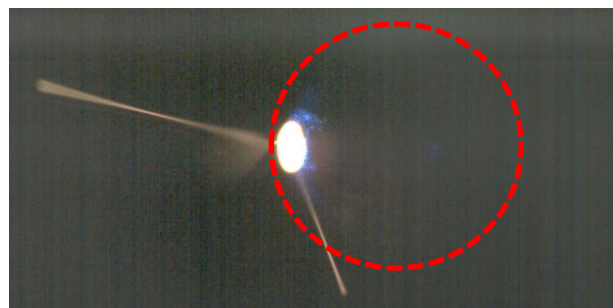


図12 突沸の様子

一方向からレーザー照射を行った場合、アブレーションによって図13のように浮遊状態から加熱が進むにつれて横方向に運動してしまうことが確認できた。

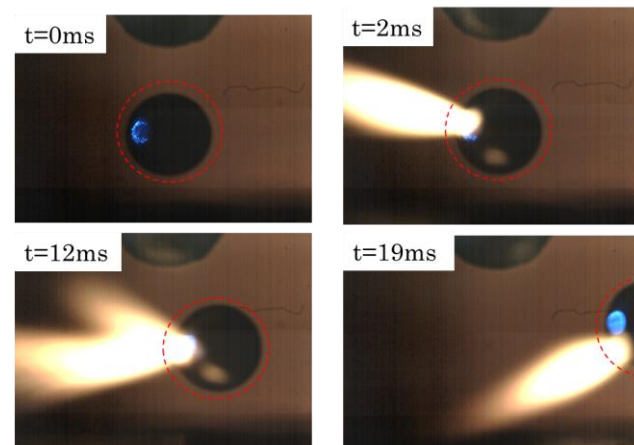


図13 アブレーションによる反作用力で横に運動する様子 (加熱パワー148W, 直径0.7mm球, 露光時間274μs, 一方向照射)

そこで、アブレーションによる反作用力の計測を行った。図 14 は各時間での水平方向の初期位置からのズレを示している。

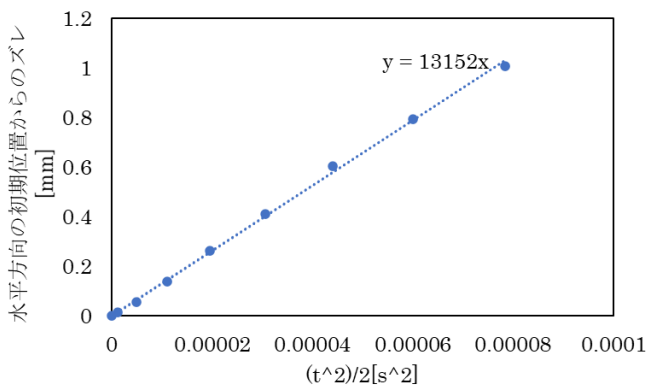


図 14 アブレーションの反作用力による運動の様子

図 14 において各プロット点を通る近似直線を引くことができ、また近似直線から加速度 $13m/s^2$ の等加速度運動をしていることが分かった。この等加速度運動を抑制させる、つまりアブレーションによる反作用力を抑制させる外力として静電力を加えた場合、 0.336 kV/mm の電場が必要になる。これは図 15 の(a),(b)のような放電が起きやすい高電圧であり、静電力によるアブレーションの反作用力の抑制は困難であることが分かる。したがって静電力以外のアブレーションの反作用力を抑制する外力を考慮する必要がある。

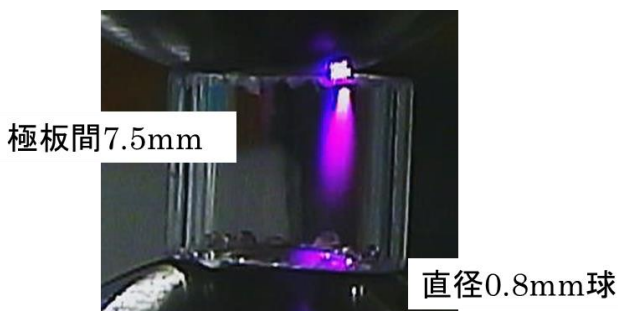
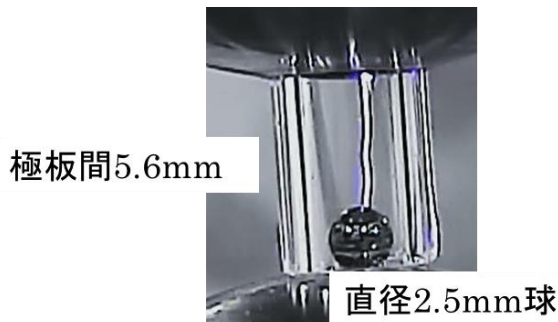


図 15 高電圧を印可した場合の放電の様子
(a)アーク放電(印可電圧 7kV)、
(b)グロー放電(印可電圧数 kV)

複数方向照射によるアブレーションの抑制について検証を行った。まず2方向照射を行った場合の加熱の様子は図 16 であった。

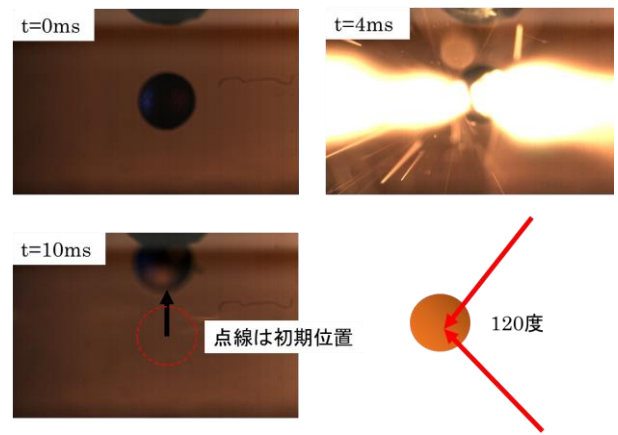


図 16 2方向照射によるアブレーションの様子
(加熱パワー148W、0.7mm 球、露光時間 274 μ s)

図 16 の加熱の様子から2方向照射では加熱が進むにしたがって、2方向のアブレーションが起き、その反作用力によって上に運動してしまっていることが分かる。次に3方向照射を行った場合の加熱の様子は図 17 であった。

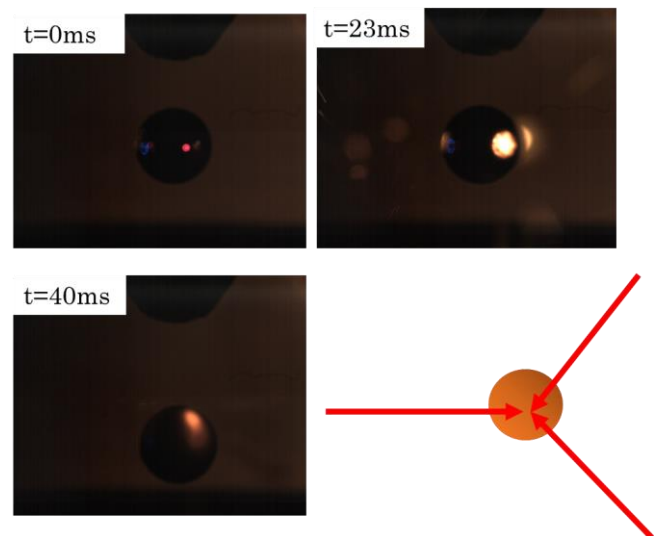


図 17 3方向照射によるアブレーションの様子
(加熱パワー115W、1.0mm 球、露光時間 118 μ s)

図 17 より3方向照射の場合、加熱が進むにしたがって3方向のアブレーションが起きるが、最終的に球が静かに落下している様子が確認できた。つまり、球がキュリー温度以上まで加熱し、磁場浮遊ができなくなっていることが分かる。したがってアブレーションの反作用力を抑制する手法として3方向照射によるアブレーションのバランスを取る手法が有効であることが分かった。

3-3. キュリー温度以上の加熱の実現の検証

前章の結果からアブレーションの影響を抑制する手法としてアブレーションが起こる単位面積当たりの照射強度以下で加熱を行うか、3方向照射による加熱であることが分かった。そこで実際に2つの手法で加熱を行ない、キュリー温度まで加熱した場合の加熱パワーに対するキュリー点までの時間の両対数グラフは図18であった。

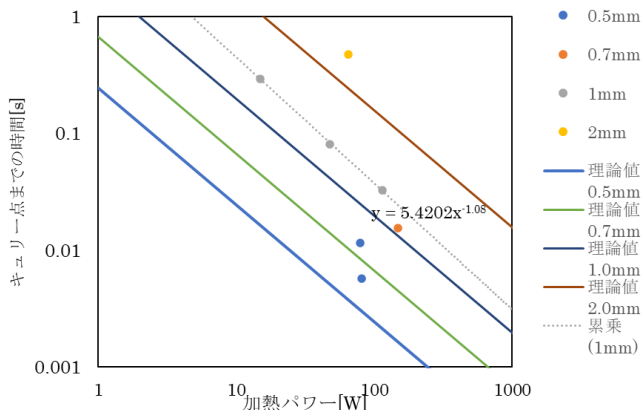


図18 加熱パワーに対するキュリー点までの加熱時間

図18より、直径1.0mmにおいて点線のように累乗近似を取ることができることが分かった。このことから、加熱パワーの対数とキュリー点までの加熱時間の対数の間に反比例の関係があることが分かった。また、以下の式を理論値としてグラフに表したのが4つの直線である。

$$T = \frac{Pt}{mc} \quad (1)$$

ここで P:加熱レーザーの出力パワー、t:レーザー照射時間、m:浮遊球の質量、c:浮遊球の比熱である。

4つの直線の傾向から球の大きさが小さくなるほどキュリー点までの加熱時間が小さくなるという球依存性があることが分かった。

次に実際のキュリー温度までの加熱の様子を高速度カメラで観測したのが図19である。図19からキュリー点を超え、落下が開始する瞬間(t=27ms)の球の色温度は1300Kであることが分かった[3]。したがって、キュリー温度以上の加熱が実現していることが分かった。

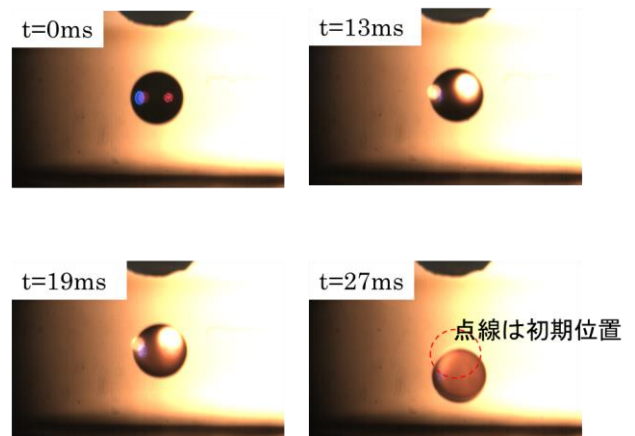


図19 キュリー温度以上の加熱の様子

4. まとめ

本研究では高エネルギー密度状態の研究にむけてレビテーションを用いたプラットフォームの開発を行い、実際にレーザー照射実験を行った。まず、プラットフォームの開発については直径0.5mmまでの小直径球のレビテーションに成功した。また、位置制御を行う為のプログラムを作成し、球の振動に対して十分な検出可能であることが分かった。次にレビテーションを用いたレーザー照射実験を行い、アブレーションが起こる単位面積当たりの照射強度の閾値が $3.3 \times 10^4 \text{ W/cm}^2$ であることを確認した。また、アブレーションによる反作用力を観測し、直径0.7mm球では加速度 13 m/s^2 の等加速度運動が起きてしまうことが分かった。このアブレーションによる反作用力を抑制させるために静電力を用いても、放電電圧程度の高電圧が必要であり、バランスのとった照射が必要であることが分かった。さらにバランスのとった照射として3方向照射が有効であることが分かった。また、キュリー温度まで加熱した場合の加熱パワーの対数とキュリー点までの加熱時間の対数の間に反比例の関係があり、理論値から球依存性を確認した。実際に高速度カメラを用いて加熱の様子を観測した結果、球の落下開始時の色温度が1300Kであることを確認し、キュリー点以上の加熱の実現ができたことを確認した。今後の課題として多方向照射によるアブレーションのバランスのコントロールでさらに高い温度への加熱の確認を行いたいと考える。

5. 参考文献

- [1] 兒玉了祐, Journal of Plasma and Fusion Research, Vol.81, Suppl. (2005)
- [2] 米田仁紀, Journal of Plasma and Fusion Research Vol.81, Suppl. (2005)
- [3] Color Temperature, Brandon Lighting Factory "https://brandon-lighting.com/color-temperature/"