

# 磁気および静電力を用いた高出力レーザーターゲット懸架システムの開発

石見叡大 指導教員：米田仁紀

## 1 序論

レーザー加工において、照射部では加工材料の物質変化が個体から気体、プラズマによって起こるが、この詳細は物理的には明らかになっていない。この状態は、Warm Dense Matter(以下 WDM とする。)を再現するためには、レーザー照射により、照射部を高温高密度環境下にすることにより可能であるが、照射点の周辺は低い温度状態であるため、大きな温度密度勾配が生じるため、物質状態の同定においては複雑な系となってしまう。そこで、微小な加工材料を静電的な力によって浮遊させ、高出力レーザー照射を行う事によって Warm Dense Matter 状態の再現を行い、その物質変化や流体力学的特性の測定を可能にする装置の開発を行う。

## 2 原理

### 2.1 浮遊法の選択

浮遊法においては、様々な浮遊法が存在するが、本実験では静電浮遊法を採用する。これは、電極位より生じさせた電解内において、帯電させた試料をクーロン力と重力の釣り合いによって浮遊させる方法である。磁場によって浮遊させる磁場浮遊法の場合、金属がキュリー温度以上で常磁性体となってしまうので、実現できない。また、音波の定在波によって浮遊させる音波浮遊法の場合やガスの噴射によって浮遊させるガス流浮遊法などは、ガスの使用により熱損失が上がってしまう。静電浮遊法の場合、試料に帯電性以外の物性を要求しないため、これを採用した。しかし、試料の帯電量は電極間の位置によって変化してしまうため、電極間の一定の位置に

試料を前もって固定する必要がある。よって、浮遊開始時には磁気浮遊法を用いて、試料を浮遊させ、徐々に静電浮遊法に移行する手順で静電浮遊法を実現する。

### 2.2 静電浮遊法とその実現方法

使用する試料は 400W レーザーによる加熱を想定して直径 1mm の鉄球を使用する。

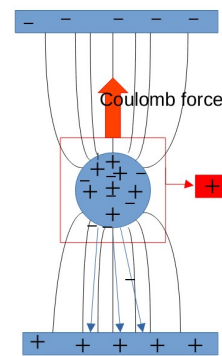


図1 静電浮遊の原理

試料を、極板間に配置し、極板に電位差を加えることで電場を加える。すると電場形状によりポテンシャル勾配が生じる。これにより試料内の電子が極板に移動する。結果的に試料は正に帯電する。これによりクーロン力が発生し、これが懸架力となる。帯電量と浮遊に必要な電場は以下の式で表される。

$$Q = \int 3\epsilon_0 E_0 \cdot n(r) dS \quad (1)$$

$$E_0 = \sqrt{\frac{\rho R g}{9\epsilon_0}} \quad (2)$$

ただし、 $\rho$ ,  $R$ ,  $g$  は、それぞれ試料の密度、試料の半径、真空中の誘電率である。

しかし、試料の帯電量は極板間の試料の位置によって変化してしまい、懸架力が変化してしまう。よって、電場をかける前に、極板間の一定の位置に試料を固定しておく必要がある。

ステージを用いる場合、ステージが導電体だと電子が移動し帯電がなくなってしまうし、ステージが絶縁体であっても今回用いる試料が直径 1mm と小さいため、懸架力に影響を与えてしまう。

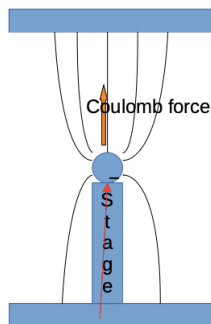


図2 ステージを用いた場合の例

以上の理由から、今回は磁場によって試料を懸架した上で、電場をかけ静電浮遊に移行することで静電浮遊を実現する。

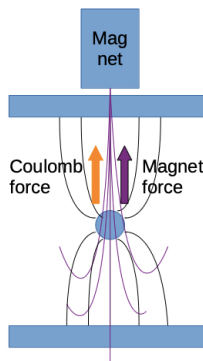


図3 磁場浮遊を用いた例

### 3 実験セットアップ

試料を浮遊させるに必要な電場は、 $6.9 \times 10^5 [V \cdot m^{-1}]$  であり、必要な電位差は 3000V 程度である。(極板間距離 4mm において計算値 2760V) このような高電圧を扱う場合、アナログ回路による高速制

御は難しい。よって、一定の高電圧と制御する電圧に分け、それぞれの極板にそれを加えることで、制御する電圧が小さくなるため、結果的に高速制御が可能になる。

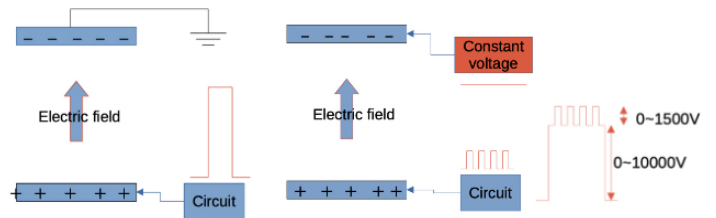


図4 電圧の印加方法のイメージ図

また、磁気浮遊を介して静電浮遊を実現するため、磁気浮遊システムと静電浮遊システムを統合したシステムを設計、作成した。

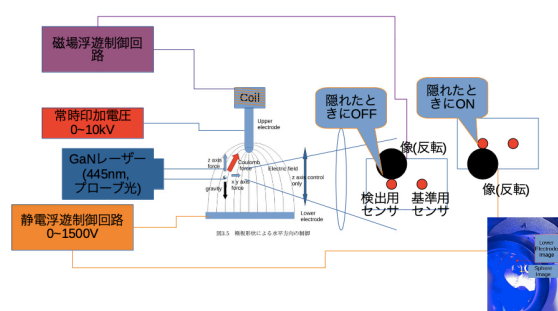


図5 作成したシステムのイメージ図

磁気浮遊システムと静電浮遊システムは、ともに球にプローブ光を照射することによって得られる像を光センサによって検出することによって検出し、それによって生成される差動信号から制御する。

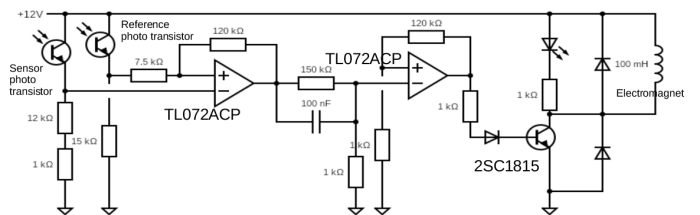


図6 作成した磁場浮遊制御回路

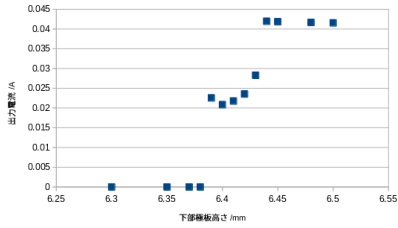


図7 磁場浮遊システムの検出精度

磁場浮遊システムは、電流駆動で、トランジスタによるスイッチングで制御される。検出精度は0.06mm、プローブ光強度 4mW 以上で安定駆動し、出力は 35mA である。

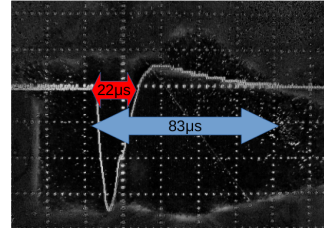


図10 静電浮遊システムの駆動波形

静電浮遊システムはマイクロ秒スケールの高速制御を達成した。鋭いピーク幅 22 ナノ秒における自然落下距離は 2nm であり、十分な制御速度である。

## 4 結果と課題

### 4.1 磁気浮遊観測

実際に、磁気浮遊を観測した。

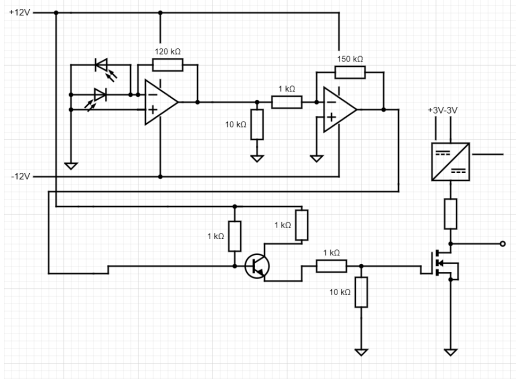


図8 作成した静電浮遊制御回路

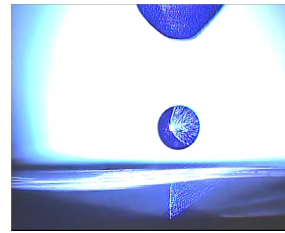


図11 磁気浮遊の様子

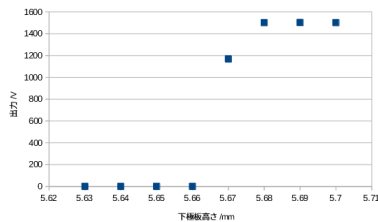


図9 静電浮遊システムの検出精度

静電浮遊システムは、電圧駆動で、MOSFET によるスイッチングで制御される。検出精度は 0.06mm、プローブ光強度 0.3mW 以上で安定駆動し、出力は 850-1500V である。

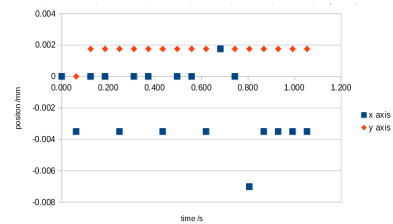


図12 上極板から 2mm 位置での安定した磁気浮遊における運動

安定時、鉛直方向運動 0.002mm 以内、水平方向運動微小振動の磁場浮遊を達成した。

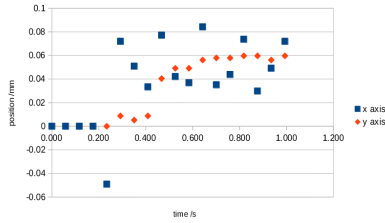


図13 上極板から1.9mm位置での磁気浮遊開始におけるジャンプ運動

また、下極板の粘着力を確認した。これは、試料の磁化によるものと思われ、磁場浮遊の阻害要因となる。

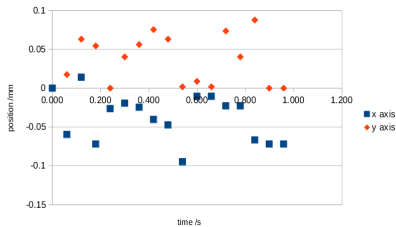


図14 上極板から1.8mm位置での不安定な磁気浮遊における高速振動

また、安定的な磁場浮遊を妨げる高速振動現象を確認した。これは、プローブ光の試料の縁付近における回折光が要因と考えられる。試料は球であり3次元的な立体である。しかし、光センサでの検出地点では、試料の像を2次元的に判定しているため、奥行方向の光の回折波が干渉縞として像とともに検出地点に現れる。回折光幅は0.005mmであり、安定的な磁気浮遊が鉛直方向運動0.002mm以内であることを考慮すると十分影響されうる。

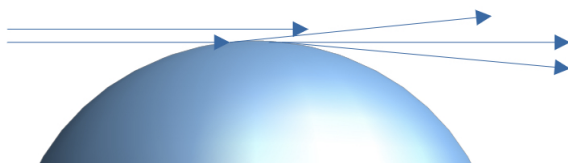


図15 回折波のイメージ図

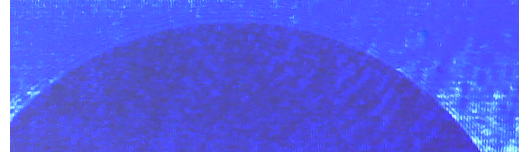


図16 結像地点における回折光

この回折光は、光学系の鉛直方向のアライメントを調節することで幅が変化することを確認している。よって、このアライメントを一致させることで安定的な磁気浮遊に対する影響を小さくすることができると思われる。

#### 4.2 磁場浮遊から静電浮遊への移行

磁場浮遊から静電浮遊への移行の際は、磁力と静電力の2つの力が拮抗している。2つのシステムの浮遊させる地点(トラップ地点)が異なると鉛直方向に振動することがわかった。これにより静電浮遊への安定的な移行が妨げられていることがわかった。

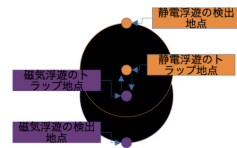


図17 トラップ地点の違いによる振動のイメージ図

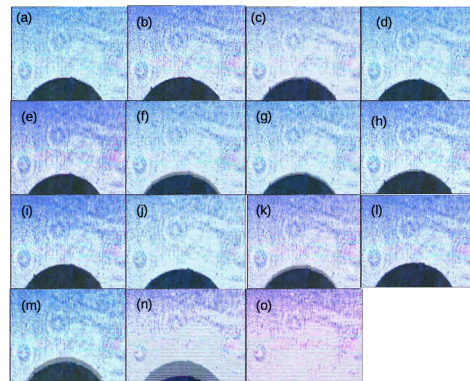


図18 1.7mm地点にて常時印加電圧-1500V環境下における金属球の運動 a=0.077s, b=0.230s, c=0.384s, d=0.538s, e=0.691s, f=0.844s, g=0.999s, h=1.152s, i=1.306s, j=1.460s, k=1.613s, l=1.767s, m=1.920s, n=1.997s, o=2.074s

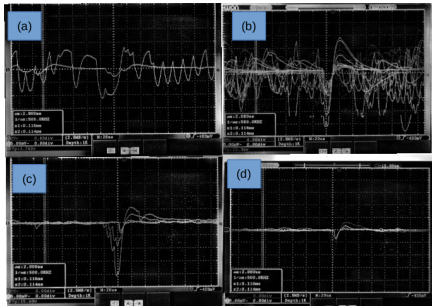


図19 (a) から (d) にかけて像の外縁から内縁における静電浮遊制御回路の出力波形

(a)-(d) は光センサに対して像を 1.2mm 鉛直方向に移動させた際の静電浮遊制御回路の出力であるが、(c) 地点で静電浮遊制御が動作していると考えられる。よって、2つのトラップ地点の一致には光センサに対して 1.2mm、試料に対しては 0.3mm よりも高い精度が必要であることがわかった。

#### 4.3 二通りの展望

以上の問題の解決には二通りの方向性が考えられる。

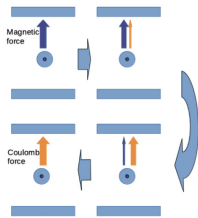


図20 移行方法のイメージ図

一つは2つの浮遊システムのトラップ地点を高い精度で完全に一致させる方法を開発し移行する方法である。

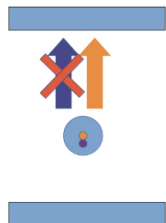


図21 移行方法のイメージ図

もう一つは、静電浮遊回路が動作し試料をトラッ

プしたタイミングで磁場浮遊回路の出力が切れるシステムの開発により実現する方法である。以上のことを実現することで静電浮遊が実現できると考えられる。

## 5 結論

本実験において以下のことを確認した。

1. 磁場浮遊を介して静電浮遊を実現するシステムの実現可能性
2. 磁場浮遊は、検出精度 0.06mm において鉛直方向運動 0.002mm 以下、水平方向運動微小振動に終止し、安定的懸架ないし静電浮遊への移行は実現可能であること
3. 磁場浮遊において、位置検出における鉛直方向の光学系アライメントが安定的懸架に影響すること
4. 2つのシステムにおけるトラップ地点の一致が 1mm 鉄球において 0.3mm より高い精度が必要であること

## 参考文献

- [1] 米田仁紀, Warm Dense Matter 物性, 3-C-4 米田, プラズマ核融合学会誌 81 巻増刊号, 2015, 172-180
- [2] 神山美里, 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, 電気通信大学, 2021