

## 高出力レーザーを用いた高温金属の研究

神山美理

指導教員：米田仁紀

## 1. 序論

レーザーによる加熱は、高温融点金属を溶かすレベルからプラズマ化させるまでの幅広い応用で使われている。固体を加熱させる場合、通常は表面を加熱し、そこからの熱伝導で加熱領域が進む。この方法では、固体中の温度勾配ができ、系として一定温度などの単一状態になりにくい。これを打開する方法として、浮遊法という真空中に電場もしくは磁場などで物質を浮遊させる手法が提案されている。本研究では、いくつかの浮遊法の中でも電場を用いた静電浮遊法を用いた。この手法を発展させ、高温金属のその先である warm dense matter(WDM)での流体特性(粘性、音速、表面波)の研究を行えるプラットフォームを開発することを目標としている。

## 2. 従来の静電浮遊法と問題点

## 2.1 静電浮遊法の原理

静電浮遊法の概念図は図 1 である。上部電極に正の電圧をかけると金属球は下部電極と同じ極性になるため、負の電荷を帯びる。したがって負に帯電した金属球は電極間の電場によるクーロン力と重力のつり合いによって浮遊することができる。また浮遊させるのに必要な電界は計算でき、電界は式(1)で与えられる。

$$E = \sqrt{\frac{mg}{12\epsilon_0\pi R^2}} = \sqrt{\frac{\rho Rg}{9\epsilon_0}} \quad (1)$$

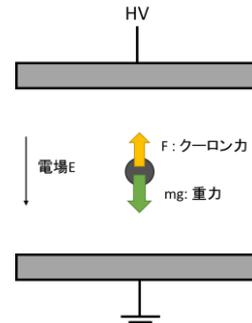


図 1 静電浮遊法の概念図

## 2.2 従来の静電浮遊法とその問題点

JAXA で用いられている静電浮遊炉 (ESL) の概要図は図 2 である。

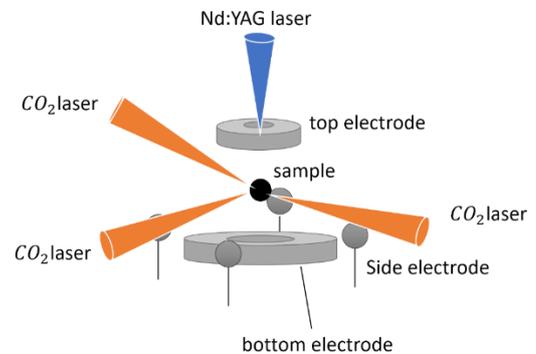


図 2 ESL の概要図[1]

3 方向から出力 200W の炭酸ガスレーザーを照射しさらに高温にするために上方向から出力 500W の YAG レーザーを照射している。この時、上下の電極以外に浮遊物質に対して水平方向に位置制御させるために 4 つの横電極を使用している。しかしこの横電極の電圧は浮遊している物体の位置によって調節しなければならない。そこで本研究では横電極などの複雑な構造を用いず位置制御が容易な静電界を作るために電極の形状を半球にして上下に凸の電極を考えた。上下に凸にした理由は静電浮上力が、局所的な電場強度に比例し、もっとも高い電場の位置に浮遊物質が移送されることを考えると、電極の中心上で静電力が最も高くなると考えたためである。

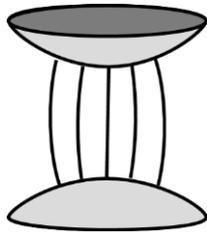


図3 半球電極板の場合の電界形状

しかし図3の場合でも電極の中心軸からずれると浮遊が不安定になる。そこで電界に疎密がある電界形状を考えた。それは図4である。左は上部電極に穴の開いた半球電極、右は針金と皿の形状の電極である。電界が密になっている部分で中心軸に向かって力が働く。

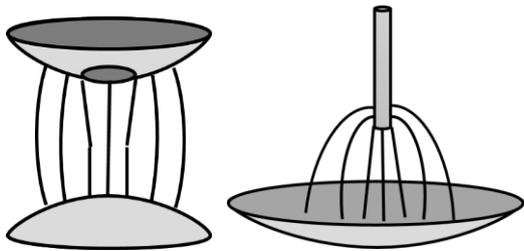


図4 本研究で考案した電極が作る電界形状

### 3. 新しい静電浮遊法の開発

#### 3.1 WDM領域の研究に向けた浮遊観測系

本研究で用いた金属球は鋼球で大きさは0.5mm~3.0mmのものを使用した。浮遊観測系は図5である。

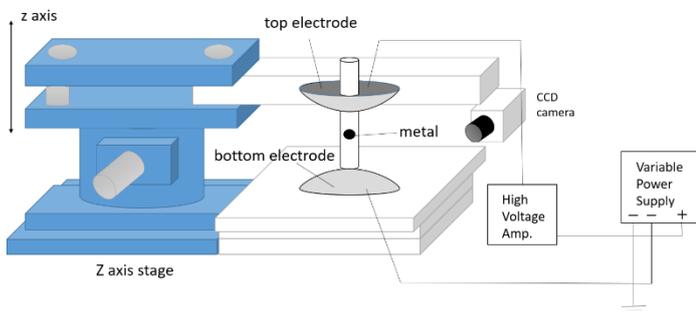


図5 本研究の浮遊観測系

電極には外径4.9mm、内径は3.3mmのステンレス材の半球を用いており、電極間は5.6mm~10mm間で変化させている。

#### 3.2 放電と真空の関係

浮上させるために高電圧をかけるため放電が伴って

しまう。そこでアクリルチャンバーを制作し真空を引いた。時間に対する真空度は図6であった。

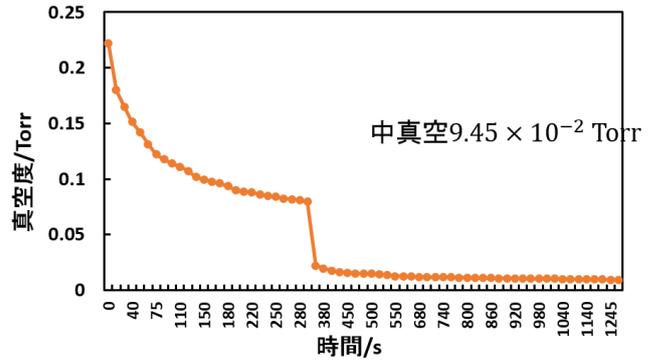


図6 時間に対する真空度

### 3.3 浮上観測実験

#### 3.3.1 電極の中心で浮上を開始させた場合

考案した電界形状を持つ電極で、単純に下部電極に鋼球をのせ電圧をかけても図7のように電極間外に飛んで行くのがみられた。また、図7の場合の結果は表1に示す。

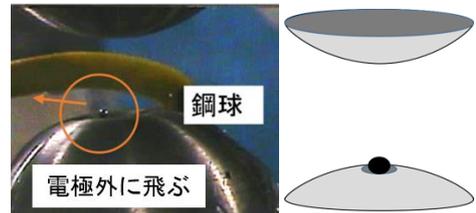


図7 上下電極ともに半球の場合の観測結果

表1 上下電極ともに半球の場合の浮遊観測

鋼球の直径 /mm	電極間距離 /mm	電圧の大きさ /kV	浮遊させるのに必要な電界 /(kV/mm)
0.6	6.0	10.9	1.82

次にガラス管を用いて横方向を制御した場合(図8)や違う電極で単純に下部電極に鋼球をのせ、電圧をかけた場合(図9)、浮上がみられず下部電極に沿って動く。または、静止をしていた。

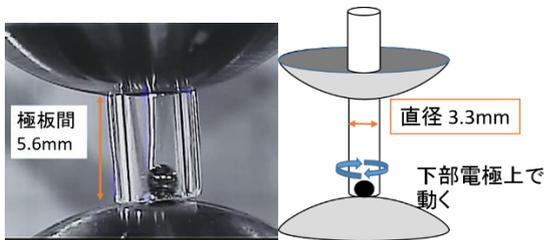


図 8 2.5mm 球の浮上観測実験の結果

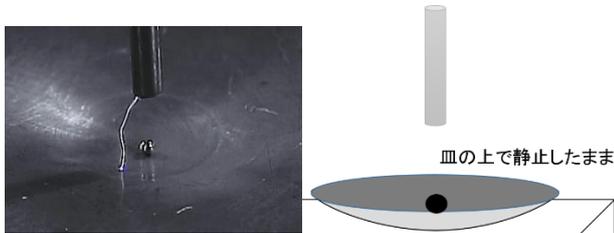


図 9 0.8mm 球の浮上観測実験の結果

3つの場合で、電極間で浮上がみられない理由は帯電した電荷が下部電極に流れてしまうからであり、電極間外に飛んでしまう理由は浮上開始時に縦方向だけでなく横方向の初速度を持ってしまうからであると考えた。

### 3.3.2 帯電をしやすくした場合

ガラス管の底に金属蓋を取りつけ、金属球に帯電した電荷の逃げを小さくさせることを行った。すると鋼球 0.5mm~1.0mm で浮上がみられ、さらにガラス管内で浮遊した。その様子は図 10 であり、大きさを変えた時の電界の値をグラフで表わしたものは図 11 である。同時に式(1)で計算した電界値と比較している。式(1)から鋼球の大きさが大きくなると、浮遊に必要な電界が大きくなるため浮上しにくくなるのがわかる。しかし実際の結果は鋼球 0.8mm を境に大きさが大きくなっても小さくなくても電界値が大きくなるのが分かった。その理由は金属蓋(直径 3.3mm)に対し、鋼球 0.8mm との接触比率が一番小さくなるため、浮上に必要な電界値が最小であったのだと考えた。

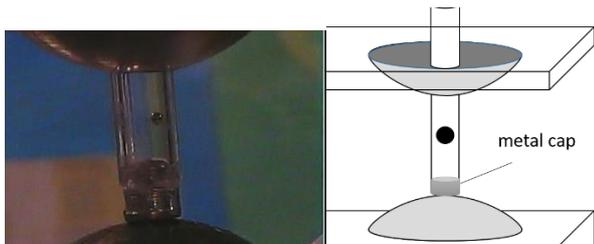


図 10 金属蓋を用いた場合の浮遊観測

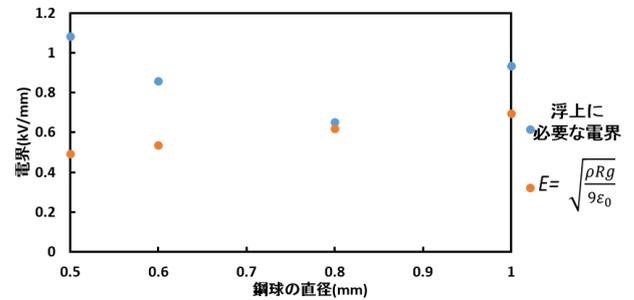


図 11 金属蓋を用いた場合の鋼球の大きさに対する電界値

### 3.3.3 浮上開始時に浮かせた状態を作った場合

浮上開始時に浮かせた状態を作り浮上観測を行った。下部電極に数 mm の誘電体を置いた場合、鋼球の重力があるにも関わらず下部電極に沿って電極間外に飛んだ。図 12 は鋼球の大きさが 0.8mm の時の観測の様子である。

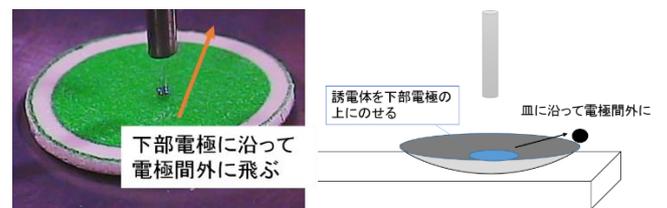


図 12 皿形状の下部電極に誘電体を置いた結果

次にファイバーで上に持ち上げ浮上する方法とガラス管で下から持ち上げ浮上させる方法を行った。その結果両方の方法で浮上を観測した。図 13, 図 14 は鋼球の大きさが 2.5mm, 図 15 では鋼球の大きさは 1.0mm の時の観測結果である。

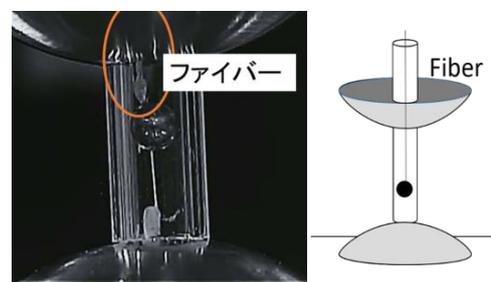


図 13 ファイバーを用いて浮上させた結果

図 14 では電極の真ん中近くで電界をかけると上部電極まで浮上し当たった後に下に落下した。鋼球の大きさに対する浮上に必要な電界値と式(1)を比較したグラフは図 15 である。

### 電極の真ん中近くで電界をかける

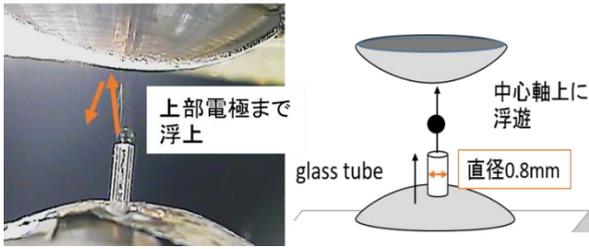


図 14 鋼球をガラス管で下から上に持ち上げた結果

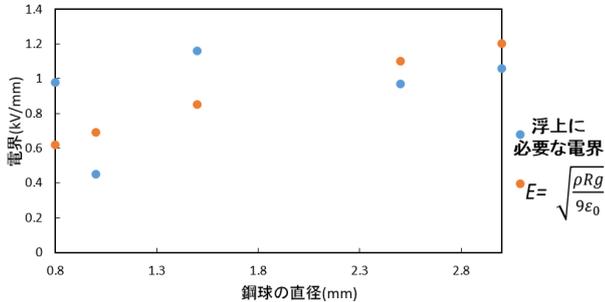


図 15 下から持ち上げた場合の鋼球の大きさに対する電界値

式(1)に対して実際の電界値の傾向にばらつきがあるが 2.5m より鋼球が大きい場合、浮上に必要な電界値が大きくなることが分かった。実際に浮遊させた状態で、レーザーで加熱することを考えるとガラス管で下から持ち上げた場合が間接的に浮上させることができるため有効であることが分かる。しかし慣性の法則で浮上したままの鋼球を止める手法を考える必要があることが分かった。

### 3.3.4 浮上から浮遊にする手法の開発

ガラス管で下から持ち上げ浮上させた鋼球を電極間で止める手法としてカバーガラスの挿入を考えた。その結果、図 16 のようにカバーガラスにくっつく様子が観測された。この結果から上にくっついた状態で上部電極にかける電圧を下げれば鋼球を安定点に落下させることができることが分かった。

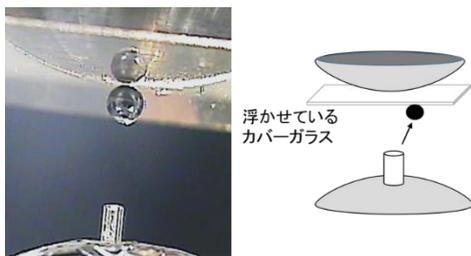


図 16 浮上後カバーガラスにくっついている様子

### 3.3.5 浮遊状態の持続方法の開発

レーザーで加熱することを考えるとより長い時間浮遊し続ける必要がある。そこで大気中、真空中、窒素中で浮遊させ、浮遊時間を比較した。その結果は図 17 であり、大気中では水分が多く、帯電した電荷が逃げやすい、真空中ではグロー放電が起きるときもあり、浮遊が長くできないのに対し、窒素中では乾燥ガスで空気置換をしているため電荷が逃げにくく浮遊が持続できることが分かった。

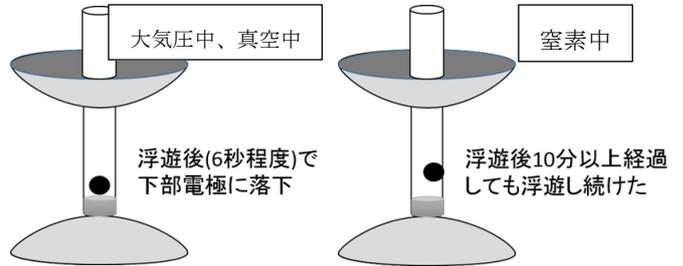


図 17 浮遊持続を比較した結果

## 4. 結論

今回制作したレーザーを用いた高温金属の研究のための新しい静電浮遊法は図 18 である。本研究によってガラス管で鋼球を下から持ち上げる方法が有効的であり、浮上状態から浮遊状態にするのに誘電体を上部に挿入させること、また浮遊持続に窒素などの乾燥ガスで空気置換すればよいことが分かった。

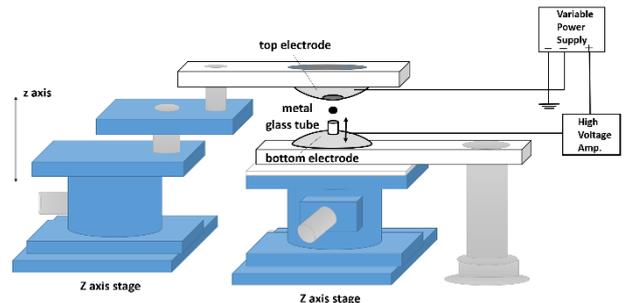


図 18 本研究で考案した静電浮遊法

## 5. 参考文献

[1] Takehiko Ishikawa Paul-François Paradis, Challenges of Handling, Processing, and Studying Liquid and Supercooled Materials at Temperatures above 3000 K with Electrostatic Levitation, crystal (2017)