

# 静磁場中における電磁浮高温融体の表面振動解析と密度計測の精密化

Precise Measurement of Density of Electromagnetic Levitated Melt in Static Magnetic Fields

学習院大理 渡邊匡人, 安達正芳, 青柳智勇, 水野章敏  
東北大多元研 小島秀和, 福山博之  
首都大学東京 小澤俊平, 尺長憲昭, 日比谷孟俊  
東北大金研 淡路 智

M. Watanabe<sup>A</sup>, M. Adachi<sup>A</sup>, T. Aoyagi<sup>A</sup>, A. Mizuno<sup>A</sup>, H. Kobatake<sup>B</sup>, H. Fukuyama<sup>B</sup>, S. Ozawa<sup>C</sup>, N. Takenaga<sup>C</sup>,  
T. Hibiya<sup>C</sup> and S. Awaji<sup>D</sup>

<sup>A</sup>Department of Physics, Gakushuin University

<sup>B</sup>Institute of Multidisciplinary Research for Advanced Materials, Tohoku University

<sup>C</sup>Department of Aerospace System Engineering Tokyo Metropolitan University

<sup>D</sup>Institute of Materials Research, Tohoku University

## 1. はじめに

近年製鉄プロセスにおけるプロセスシミュレーションの役割はますます重要になり、高精度化が要求されてきている。しかし、シミュレーション技術の進歩に比べ、シミュレーションに用いる物性値の整備はあまり進んでいないのが現状である。このため、我々は、現在電磁浮遊法を用いて金属や半導体など高温融体の密度計測をおこなっている<sup>1)</sup>。しかし、地上では浮遊に必要な電磁力が大きいため浮遊している液滴の表面振動が顕著に現れてしまい、正確な体積を画像から求めることが困難であり、融液密度の温度依存性を求めるのに十分な精度を確保するのが困難であった。そこで、電磁浮遊による密度測定において、液滴画像からの体積算出の際に液滴表面振動の解析に基づき軸対称画像を抽出し、密度測定精度を上げる手法の開発をおこなっている。平成 18 年度の研究において、Si 融体の密度の静磁場中での測定に成功したが<sup>2)</sup>、静磁場中で電磁浮遊した融体は、ある程度の磁場を印加した場合、液滴形状が球形から変形し回転することが明らかとなった。この液滴形状変形は、物質によって磁場依存性が異なるため、そのメカニズム解明が必要である。このため、液滴形状の詳細な計測が必要であり、平成 19 年度ではまずバックライト光学系による電磁浮遊液滴形状の観測システムを構築し、試料温度変化に依存せずに精密な液滴形状の観測手法を確立した。この手法を用いて、SUS304 等の鉄鋼材料融体密度の温度依存性を計測した。

## 2. 実験方法

### 2.1 静磁場印加電磁浮遊装置

電磁浮遊法ではコイル内に試料を設置し、そのコイルに高周波をかけることで試料の浮遊力を得る。静磁場を試料に印加するため、コイルを強磁場・超伝導材料研究センターの超伝導マグネット (6T-CSM) 内に設置した。Si の実験ではコイルを真空チャンバ内に設置し Ar ガス雰囲気中で置換した環境で浮遊し密度計測をおこなったが<sup>2)</sup>、SUS304 などの鉄鋼材料は質量が大きいため大きな電磁力を印加しなくてはならず、このため試料温度が上昇しやすく、冷却することが難しいという問題があった。そこで、試料に効率よく冷却ガス (He ガス) を吹きつけて冷却する方法を採用した。このため、Fig.1 に示すように石英管内に試料を配置し、この管の下方から He ガスを浮遊している試料に直接吹きつけて冷却できるようにした。この石英管には試料形状が正確に測定できるように、平面窓が設置されており液滴形状を歪むことなく観察できるようにした。試料温度は 2 色放射温度計 (測定波長 900nm,1350nm) を用いて試料の下方から測定した。

### 2.2 バックライト光学系による液滴形状観察システム

これまでは、高温の融体試料からの輻射による自己発光を用いて液滴形状を観測していたが、この場合高温時と低温時で発光強度が変化し、密度の温度依存性が高温領域と低温領域で異なってしまう恐

れがある。また、磁場印加による液滴変形のみか、メカニズム解明には、液滴形状のわずかな変化を計測する必要があった。このため、Fig.2 に示すように試料後方から平行光に成形したレーザー光 (546nm) を試料に照射し、試料前方から試料の影を撮影して、液滴形状を観察するような観測系を構築した。ここで、鉄鋼材料では、融体試料温度が高くバックライトのレーザー光よりも放射光のほうが強度が強いため、分可能 1nm の干渉フィルターをカメラ前方に挿入し、試料からの放射光をカットし液滴形状の影を撮影できるようにした。このようにして、撮影したベアリング用の SUS304 固体球の計測結果を Fig.3 に示す。形状計測が正しくおこなえるかを確認するために、試料が融解しないよう温度は融点以下に設定して観察した。Fig.3 からバックライトを用いることにより試料と背景の境界がより明瞭となっていることがわかる。この状態で冷却しながら試料形状を観察していったが、自己発光の場合には低温では強度が弱くなり観察可能な温度領域が限られてしまったが、バックライトを使用した場合には室温まで試料形状を観察することが可能であった。(冷却するため電磁力も低下したため、途中で試料は浮遊できなくなってしまったため、試料台上で形状観察をおこなった。) この結果、バックライト光学系を用いることにより、より正確な試料形状の観察が可能となり、また試料温度によらない形状観察ができるようになった。

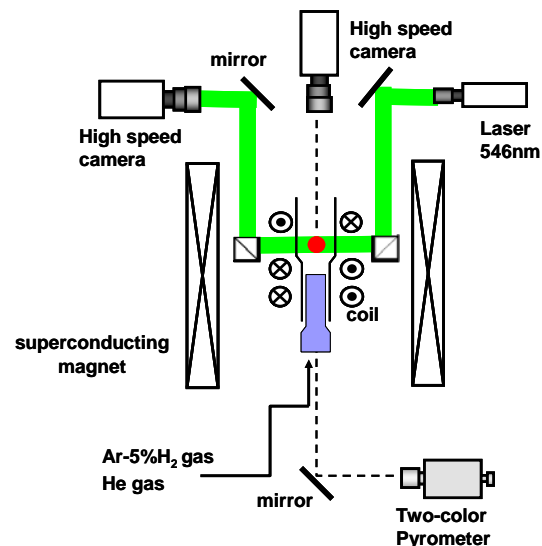


Fig.2 バックライト光学系による液滴形状観測システム

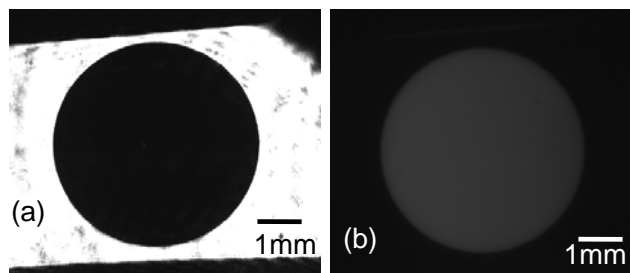


Fig.3 バックライト光学系により観測した SUS304 固体球(a)と自己発光により観測した像(b) (1400K)

### 3. 鉄鋼材料融体密度計測結果と考察

この手法を用いて、SUS304 を電磁浮遊した場合の液滴振動抑止に必要な静磁場の大きさをはじめに求めた。Fig.4 に静磁場印加無しの場合と 4T の静磁場を印加した場合の、SUS304 融体密度の見かけ上の値の時間変化を示す。この密度は、浮遊した液滴をコイルのギャップを通して側方から液滴形状を観察し見かけ体積を求めて得た値である。静磁場印加無しの場合には、密度の値が見かけ上±5%程度変化しているが、4T の静磁場を印加した場合は密度の値は時間依らず一定の値となっていることがわかる。つまり、静磁場印加無しの場合には、液滴振動しており、液滴形状が時間とともに変化し見かけ上の体積が変化し密度の変動として観測されてしま。一方、4T の静磁場を印加した場合には液滴振動が抑止され、液滴形状が時間により変化せず密度

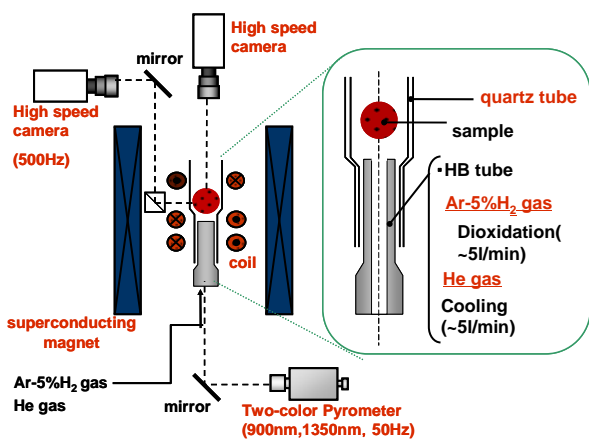


Fig.1 鉄鋼材料用静磁場印加電磁浮遊装置

の値が常に一定として得られる。また、Fig.5に4Tの静磁場を印加した場合の SUS304 融体を上方から観察し、重心に原点を固定して求めた x 軸方向長さと y 軸方向長さの差の時間変化を示。この結果より、長さの差がほぼ 0 であり、かつ時間変動していないことからこの液滴の形状は、上から見たときに円形となっていることが確認できる。つまり、静磁場を印加した場合には、静磁場の方向と平行な鉛直軸に対して軸対称な形状に液滴が固定されることがわかる。Si の場合には、液滴振動している状態からこの軸対称な形状に変化する間に、軸対象からずれた形状となる印加磁場強度の領域があったが、ステンレス系の鉄鋼材料の場合には、この磁場印加で変形する現象は明瞭に観測できなかった。このため、磁場印加による液滴形状の変化のメカニズムは不明であるが、物質によって異なるため表面張力粘性などの物性値に依存している可能性がある。鉄鋼材料融体の場合には、磁場による変形が観測されなかったため密度計測に問題はないが、他の物質でも変形が生じる可能性が、今後続けて磁場による液滴形状変形のメカニズムを調べていく。

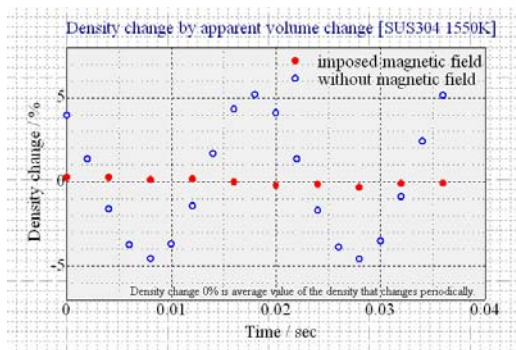


Fig.3 静磁場印加(4T)した場合としない場合の SUS304 融体の見かけ密度の時間変化

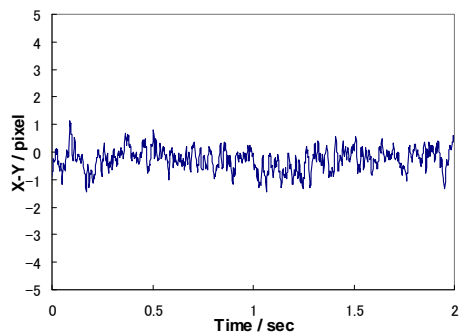


Fig.4 SUS304 融体を上部から観察したときの、x 軸長さと y 軸長さの差の時間変化

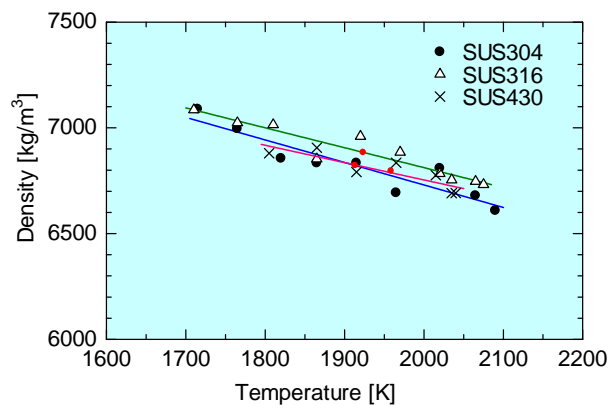


Fig.6 SUS 系鉄鋼材料融体密度の温度依存性

これまでの結果から、4Tの静磁場印加により、それぞれの融体密度の温度依存性を計測した。この結果を Fig.6 に示す。SUS304, SUS316, SUS430 ともに密度は、温度変化に対して負の温度依存を示し直線的に変化することがわかる。これらの密度の温度依存性についての測定結果を最小 2 乗法で回帰し得た結果を、 $\rho(T) = \alpha \times T + \rho_0$  [ $\text{kg} / \text{m}^3$ ] の形で表したものを Table1 にまとめて示す。それぞれの密度の温度依存性はほぼ同様の傾向を示しているが、それぞれの組成が若干異なるため、温度依存性も多少の違いが見られる。この測定における 1 温度での測定の不確かさは、 $61\text{kg}/\text{m}^3$  でありこの差が測定の誤差によるものなのか、測定の不確かさからくるものであるのかは判断できていない。このため、現在純粋な Fe 融体の密度計測をおこなっており、今後この結果に基づいて議論していく。

Table1 SUS 系鉄鋼材料融体密度の温度依存性

鋼種	密度温度依存性[ $\text{kg}/\text{m}^3$ ]	温度範囲[K]
SUS304	$\rho(T) = -1.07 \times T + 8860$	1715 - 2090
SUS316	$\rho(T) = -0.94 \times T + 8700$	1710 - 2075
SUS430	$\rho(T) = -0.82 \times T + 8390$	1805 - 2040

## まとめ

SUS 系鉄鋼材料融体の密度を静磁場印加電磁浮遊法により計測した。浮遊液滴形状を正確に計測するためにヴバックライト光学系観測システムを構築し、従来よりも精密な計測が可能となった。

## 参考文献

- 1) K. Higuchi *et al.*, Meas. Sci. Technol., 16(2) (2005).
- 2) M. Watanabe *et al.*, Faraday Discuss. 136 (2007) 279.