

平成 21 年 6 月 25 日現在

研究種目：基盤研究 (C)

研究期間：2007～2008

課題番号：19560747

研究課題名 (和文) 電磁浮遊法による高温金属融体の新しい粘性計測手法の開発

研究課題名 (英文) Refinement of viscosity measurement using electromagnetic levitation technique by precise surface oscillation analysis

研究代表者

渡邊 匡人 (WATANABE MASAHITO)

学習院大学・理学部・教授

研究者番号：40337902

研究成果の概要：

電磁浮遊液滴の表面振動を計測し、高温融体の粘性を詳細に計測できる手法を確立することが本研究の目的である。これまでに微小重力下においてのみ可能であった電磁浮遊法を用いた粘性測定を地上においてもおこなえるように、できるだけ小さな試料（直径 1mm 程度）を浮遊し任意に液滴振動を生じることができる電磁浮遊技術を確立する必要がある。このため周波数の高い電源（～1MHz）を採用した電磁浮遊装置を本年度において作成し、直径 1.5mm の Ag での熔融浮遊を確認した。浮遊試料を小さくすることで重力による試料変形が抑止され、表面振動周波数の分裂がなくなることを確認した。また、試料をより小さく（Cu では直径 0.8mm 以下）にすることで表面振動が励起されなくなることも確認した。この結果、電磁浮遊法においても外部励起で液滴表面振動を任意に励起できることを明らかとした。さらに、微小重力下における電磁浮遊法による Ag と Cu 融体について、酸素分圧のことなる雰囲気下での液滴表面振動の計測をおこなった。この結果、液滴表面振動から粘性を算出する際にも、雰囲気酸素分圧の影響があることを明らかとし、地上における微小液滴を用いた粘性計測を雰囲気酸素分圧を変えながら系統的に調べる必要があることを示した。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007 年度	1,800,000	540,000	2,340,000
2008 年度	1,500,000	450,000	1,950,000
年度			
年度			
年度			
総計	3,300,000	990,000	4,290,000

研究分野：高温融体物性

科研費の分科・細目：金属生産工学

キーワード：高温融体、電磁浮遊法、表面張力、粘性

1. 研究開始当初の背景

本研究の開始当初、金属性高温融体の粘性は、キャスティングプロセスにおいて重要な物性値であり、その温度依存性の測定が強く求められていた。このため、電磁浮遊法を用いて粘性を測定することが要求されていた。しかし、地上における電磁浮遊法では、電磁力により試料液滴には常に表面振動が励起され、振動の減衰を得ることができず、粘性の測定は地上では困難であった。このため、電磁浮遊法で液滴表面振動から粘性と表面張力を取得するには、微小重力環境で特定の表面振動モードを励起して表面振動の測定をおこなう必要があった。そこで、電磁浮遊法を用いた高温融体の密度、表面張力、粘性測定の手法の改良方法の検討を、液滴表面振動解析の観点からおこない、地上における電磁浮遊法を用いた粘性測定手法を開発するに至った。

2. 研究の目的

上記電磁浮遊法を用いた地上における粘性測定手法を開発する目的のため、できるだけ小さな試料（直径 1mm 程度）を浮遊できるように周波数の高い電源（～1MHz）を採用した電磁浮遊装置を作成し、これまでに粘性測定がおこなわれている純金属融体の粘性計測をおこない、本手法の有効性と精度を確認する。さらに、これまでの方法では、測定精度をあげることが困難であり、詳細な温度依存性や合金の組成依存性の測定ができない。本研究で確立を目指す粘性測定手法は、これまで困難であった電磁浮遊法による精度の良い粘性の温度依存性、および蒸気圧差のある合金系の粘性の測定を可能とすることが最終的な目的である。

3. 研究の方法

液滴振動法による粘性測定は、表面振動している液滴形状の時間変化を測定しておこなう。表面振動している液滴の時刻 t での半径 $r(t)$ は、

$$r(t) = r_0 \left(1 + \varepsilon Y_l^m(\theta, \phi) \right) \exp\left(-\frac{\tau_{l,m}}{t}\right) \quad (1)$$

と表せ、 r_0 は振動していない時の球の半径、 ε は表面振動の振幅、 $Y_l^m(\theta, \phi)$ は球面調和関数、 (l, m) は表面振動のモードを表す整数、 $P_l^m(\theta)$ はルジャンドル多項式、 $\omega_{l,m}$ は表面振動数、 $\tau_{l,m}$ が減衰時間である。試料の質量をとすると、減衰時間と粘性係数の関係は

$$\frac{1}{\tau_l} = (l-1)(2l+1) \frac{r_0}{M} \eta \quad (2)$$

となる。この関係を用いることにより粘性の測定がおこなえる。本研究では、初めにこの関係により粘性が計測できるかを、微小重力下において検証した。この実験において、金属融体の表面は酸素に影響を受けやすいため、液滴振動が雰囲気酸素分圧に影響を受けることが予想されるため、雰囲気酸素分圧を変えて液滴振動を計測することもおこなった。さらに、地上における電磁浮遊法では、電磁力により試料液滴には常に表面振動が励起され、振動の減衰を得ることができず、粘性の測定は地上では困難である。このため、電磁力をなるべく小さくして液滴形状を真球に保てるよう微小な金属融体液滴を浮遊できる電磁浮遊装置を開発し（図 1）、直径 1-2mm の金属融体液滴を浮遊できるようにした。

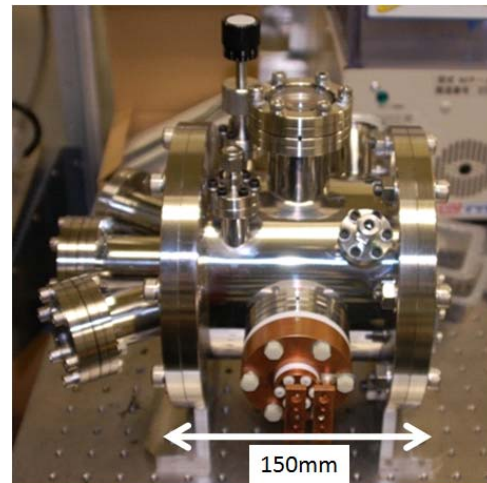


図 1 新たに開発した微小液滴浮遊用電磁浮遊装置

4. 研究成果

液滴振動の減衰を計測するため、航空機（G-II）に Ar-3% H₂ と純 Ar ガスを搭載し、Cu と Ag 融体の表面振動計測をおこなった。Cu 融体について、微小重力下で Ar-3% H₂ 雰囲気中で計測した液滴表面振動の様子を、地上で計測した結果と併せて図 2 に示す。これから、微小重力下において表面振動が減衰することと、パルス電流を加えることで液滴振動を励起できることが確認された。この表面振動の減衰から求めた Cu 融体の 1650K での粘度は 3.3mPa·s で文献値と同程度の値が得られた。これから、液滴振動の減衰から粘性を計測することができることを確認した。さらに、今回 Ar 雰囲気中で Cu 融体の表面振動の減衰を計測すると、Ar-3% H₂ の場合と比べると同じ温度でも約 1.5-1.8 大きく粘度が算出されることもわかった。図 3 に雰囲気ガスを Ar+3%H₂ と Ar の場合での Cu の表面振動の減衰の様子を示す。Ar+3%H₂ では電水するまでの時間が長い、Ar では減衰時間が

短いことが確認される。これは、酸素分圧の高い状況では表面張力が変化するため、見かけ上粘度が酸素分圧依存を示すようになってしまうと考えられる。この雰囲気酸素分圧による見かけの粘性の変化は、バルク中の溶解酸素によるものと、液滴表面の影響の2つの原因が考えられる。今回、電磁浮遊法において液滴振動の減衰を雰囲気酸素分圧を変えて計測することに成功したため、初めてこの現象を明らかにすることができた。このため、今後は液滴振動法による粘性計測においては雰囲気酸素分圧を制御した環境で測定する必要があることを明らかにした。

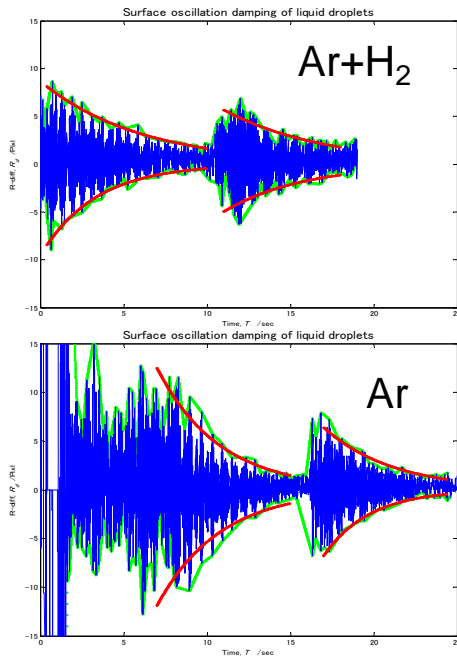


図3 雰囲気ガスの違いによるCu液滴振動の減衰の変化

一方、地上における微小液滴浮遊用小型電磁浮遊装置を用いた実験では、直径0.8mmのCu融体をほぼ真球に近い形状で浮遊できることがわかった(図4)。しかし、電磁力が微小であり液滴形状も真球に近いため液滴振動が励起しないこともわかった。このため、当初計画していた液滴振動の計測から表面振動周波数を得ることができず、新たな解析方法の検討ができない状況となった。しかし、この結果は逆に、液滴振動を任意に励起できることを意味しており、地上においても表面振動の減衰が測定できる可能性を示唆している。しかし、試料を浮遊させるための電磁力が表面振動を減衰させる制動力となり減衰時間が短くなり、見かけ上粘度が大きくなってしまいうことも考慮しなくてはならない。このため、前期した微小重力下での測定と併せて今後も計測をおこない、電磁浮遊法による新たな粘性計測手法を確立していく必要

がある。

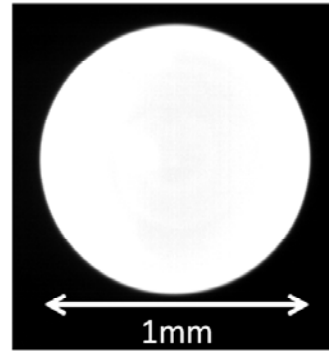


図4. 微小液滴浮遊用電磁浮遊装置で浮遊したCu液滴を上方より観察した画像

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 5 件)

1. 渡邊匡人, 安達正芳, 青柳智勇, 水野章敏, 福山博之, 小島秀和, 淡路智, "過冷却シリコン液体の密度と構造", 日本マイクログラビティー応用学会誌(査読有), 26 (2009)p111-116.
2. M. Adachi, T. Aoyagi, A. Mizuno, M. Watanabe, H. Kobatake, and H. Fukuyama, "Precise density measurement for electromagnetically levitated liquid combined with the surface oscillation analysis", International Journal of Thermophysics (査読有), 29 (2008) p2006-2014.
3. A. Ishikura, A. Mizuno, M. Watanabe, T. Masaki, T. Ishikawa and S. Yoda, "Structure and thermophysical properties of molten BaGe by using electrostatic levitation technique" International Journal of Thermophysics (査読有), 29 (2008) p2015-2024.
4. S. Ozawa, T. Koda, M. Adachi, S. Shiratori, N. Takenaga, T. Hibiya and M. Watanabe, "Identifying Rotation and Oscillation in Surface Tension Measurement Using an Oscillating Droplet Method", Heat Transfer-Asian Research(査読有), 37 (2008) p421-430.
5. S. Ozawa, T. Takenaga, T. Hibiya, H. Kobatake, H. Fukuyama, M. Watanabe, and S. Awaji, "Oscillation Behavior of High Temperature Silicon Droplet by the Electromagnetic levitation Superimposed with Static Magnetic Field", Materials Science and Engineering A (査読有), 495, (2008) p.50-53.

[学会発表] (計 8 件)

1. M. Watanabe, "Density maximum of supercooled liquid silicon" 2008 MRS Fall Meeting, 2008年12月3日, Boston, U.S.A.
 2. A. Mizuno, "Liquid Structures of Metallic Glass-forming Binary Zr Alloys", 2008 MRS Fall Meeting, 2008年12月3日, Boston, U.S.A.
 3. T. Akimoto, "Solidification of bulk metallic glass-forming alloys observed by time-resolved x-ray diffraction combined with levitation technique", 2008 MRS Fall Meeting, 2008年12月3日, Boston, U.S.A.
 4. M. Watanabe, "Surface oscillation of electromagnetically levitated liquid Cu under microgravity conditions", 7th China-Japan Workshop on Microgravity Sciences, 2008年10月28日, Hangzhou, China
 5. M. Adachi, "Surface oscillation of electromagnetically levitated liquid Cu under microgravity conditions", 18th European Conference on Thermophysical Properties, 2008年9月1日, Pau, France
 6. M. Watanabe, "STRUCTURE AND PROPERTIES OF SUPERCOOLED LIQUID, AND IN-SITU DIFFRACTION STUDIES OF CRYSTAL GROWTH FROM SUPERCOOLED MELTS"(invited), 4th International Workshop on Crystal Growth & Technology (IWCGT4), 2008年5月20日, Beatenberg, Switzerland
 7. 渡邊匡人, "Parabolic Flight Experimental Facilities (PFLEX) による高温融体熱物性計測", 日本マイクログラビティ応用学会第23回学術講演会 (JASMAC23), 2008年11月26日, 京都大学
 8. 青柳智勇, "静磁場印加電磁浮遊法を用いた鉄鋼材料融体の密度測定", 日本鉄鋼協会第156回秋季講演大会, 2008年9月23日, 熊本大学
2. T. Masaki, A. Mizuno, and M. Watanabe, Springer, "High-Temperature Measurements of Materials", Eds. H. Fukuyama and Y. Waseda, Series of Advances in Materials Research 2, (2008) 16 ページ (p1-16)

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 件)
なし

○取得状況 (計 0 件)
なし

[その他]
なし

6. 研究組織

(1) 研究代表者

渡邊 匡人 (WATANABE MASAHIRO)

学習院大学・理学部・教授

研究者番号: 40337902

(2) 研究分担者

水野章敏 (MIZUNO AKITOSHI)

学習院大学・理学部・助教

研究者番号: 10348500

(3) 連携研究者

なし

(4) 研究協力者

安達正芳 (ADACHI MASAYOSHI)

学習院大学 自然科学研究科博士後期課程

物理学専攻学生

秋元俊彦 (AKIMOTO TOSHIHIKO)

学習院大学 自然科学研究科博士前期課程

物理学専攻学生

青柳智勇 (AOYAGI TOMOWO)

学習院大学 自然科学研究科博士前期課程

物理学専攻学生

[図書] (計 2 件)

1. T. Hibiya, H. Fukuyama, T. Tsukada and M. Watanabe, John Wiley and Sons Ltd, "Crystal Growth Technology-From Fundamentals and Simulation to Large Scale Production" Eds. Hans J. Scheel, Peter Capper, (2008) 33 ページ (p103-136)