

静磁場印加中で電磁浮遊したシリコン液滴の振動挙動

小澤俊平^{1,2}, 尺長憲昭¹, 江田拓朗², 小島秀和³, 福山博之³, 渡辺匡人⁴, 日比谷孟俊^{1,2}, 淡路智³
¹首都大学東京, ²東京都立科学技術大学, ³東北大学, ⁴学習院大学

Oscillation behavior of silicon droplet levitated by electromagnetic force superimposed to static magnetic field

Shumpei Ozawa^{1,2}, Noriaki Takenaga¹, Takuro Koda², Hidekazu Kobatake³, Hiroyuki Fukuyama³, Masahito Watanabe⁴, Taketoshi Hibiya^{1,2}, and Satoshi Awaji⁴

¹Tokyo Metropolitan University, 6-6 Asahigaoka Hino Tokyo 191-0065

²Tokyo Metropolitan Institute of Technology, 6-6 Asahigaoka Hino Tokyo 191-0065

³Tohoku University, 2-2-1 Katahira, Aoba, Sendai 980-8577

⁴Gakushuin University, Mejiro, Toshima, Tokyo 171-8588

E-Mail: shumpei.ozawa@tmit.ac.jp

Abstract: A static magnetic field up to 1.0T was superimposed to silicon droplet levitated by electromagnetic force. The influences of the superimposition of the static magnetic field on the surface oscillation of the droplet were investigated. Surface oscillation of $m=0, \pm 1$, and ± 2 modes was attenuated vanishingly above 0.5T. Although another oscillation like $m=\pm 2$ mode still remained under the static magnetic field from 0.5 to 0.8T, an analysis of a deflection angle for the elliptically deformed droplet showed that it was due to the rotation.

Key words; Surface tension, oscillating droplet technique, electromagnetic levitation, Static magnetic field, High temperature melt

1. 緒言

近年のコンピュータ技術の発達により、半導体シリコンの結晶成長や、航空機用タービンプレードの精密鋳造などの、高付加価値高温融体プロセスの最適化が、容易にシミュレーションされるようになり、製品開発コストの削減と開発期間の短縮が可能となっている。このコンピュータシミュレーションによって信頼に足る予測結果を得るために、用いる高温融体の正確な熱物性値が求められている。特に、マランゴニ対流を記述するための温度係数に関しては、使用されているデータには1桁以上のばらつきもある例があり、その精密測定が喫緊の課題となっている[1]。

我々はこれまでに、高温融体の正確な表面張力および温度係数を得るべく、電磁浮遊炉を用いた液滴振動法による測定を行ってきた。この方法は、浮遊する液滴の振動周波数から表面張力値を求めることが可能で、

- ① 融体を無容器浮遊保持できるため、容器からの汚染を完全に回避できる
- ② 高温や過冷却状態を容易に達成できるため、広い温度範囲での測定が可能である
- ③ 雰囲気制御が非常に容易である

などの利点がある。しかしながら地上では、重力の影響と電磁力によって液滴が変形するため、液滴の振動が、単振動 (Rayleigh 振動) から5つのモー

ドに分裂し[2], その補正が必要となる。したがって、重力の影響を完全に無視できる微小重力環境での測定[3]が望ましい。

近年、電磁浮遊法に静磁場印加を組み合わせることで、液滴の振動モードが選択的に残存し、ただ1つの振動周波数だけが得られると報告された[4]。また、強い静磁場を印加することにより融体の熱伝導率や半球全放射率の測定も、重力加速度の存在下で可能となってきた[5]。この方法が、もし、表面張力測定にも利用可能ならば、微小重力環境を利用せずとも、従来よりも正確な表面張力測定が行える可能性がある。

本研究では、電磁浮遊法によって無容器浮遊させた高温シリコンメルトに静磁場を印加し、静磁場が液滴挙動に及ぼす影響について調べた。また、この方法を正確な表面張力測定へ利用することの、可能性や問題点について明らかにし、微小重力実験の代替手段となり得るかについて検討する。

2. 静磁場印加型電磁浮遊実験

Figure 1 に実験装置の概略を示す。高純度シリコンインゴット (電気伝導度: $7.5 \times 10^{-7} \Omega \cdot \text{cm}$) を 480mg (溶融時の直径 7.3mm) の矩形に切り出した。これをフッ酸: 硝酸=1:3 の混合液で洗浄したのち、電磁浮遊コイル内の石英ガラスホルダにセットした。チャンバ内を 10^{-4}Pa 程度まで真空引きした後、

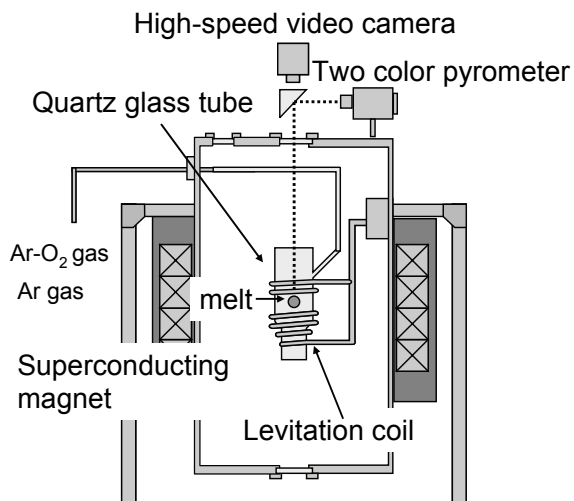


Figure 1 Experimental setup

99.9999%のアルゴンガスで置換した。試料は808 nmの波長を持つ半導体レーザーで予備加熱した後、浮遊コイルを用いて加熱浮遊させた。試料を完全に熔融させた後、超伝導マグネットによって0-1.0Tの上方向の垂直磁場を印加した。このときの液滴の様子と温度は、上部から高速ビデオカメラと二色光高温計を用いて観察した。

3. 浮遊液滴振動法による表面張力解析

得られた動画から、figure 2 に示すような面積 (Area), 重心位置 (Gx, Gy), X軸, Y軸に沿った直径 (Dx, Dy), Dx+Dy (Sum) および Dx-Dy (Diff) の時間変化を求めたとき, “Area” および “Sum” には, $m=0$ および $m=\pm 1$ モードが, “Diff” には, $m=0, m=\pm 1, m=\pm 2$ モードの振動が現れる (表 1). これらを最大エントロピー法 (MEM :maximum entropy method) によって解析し, 液滴の各振動モード周波数を同定した。得られた振動周波数と重心移動周波数を Cummings and Blackburn の式[2]に代入し, 表面張力値を計算した。

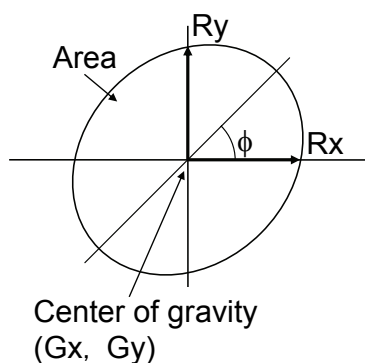


Figure 2 Schematic diagram of top view of droplet

Table.1 Relationship among oscillation mode of $m=0, m=\pm 1$ and $m=\pm 2$, corresponding to Area, Sum and Diff.

	$m=0$	$m=\pm 1$	$m=\pm 2$
Area	Yes	Not No	No
Sum	Yes	Yes	No
Diff	No	Yes	Yes

4. 結果

静磁場印加中で、シリコン液滴を電磁浮遊させた動画から、磁場印加が液滴の重心移動の抑制だけでなく、振動振幅を抑制する様子が確認された。そこで、液滴の各振動モードの振幅と静磁場強度の関係について詳細に調べた。Figure 3 は、磁場印加しない場合を基準としたときの、代表的な “Area”, “Sum”, “Diff” の振幅と静磁場強度の関係である。静磁場強度を大きくするにつれて, “Area” と “Sum” の振幅が小さくなった。このことは Table 1 に従うなら、静磁場印加によって, $m=0$ および $m=\pm 1$ 振動が抑制されることを意味する。それに対して “Diff” の振幅は、静磁場強度が 0.4T まで増加するに従って減少した後、0.5T-0.8T で一旦わずかに増加し、その後再び減少した。このことは、0.5-0.8T では、 $m=\pm 2$ 振動のみが選択的に残存しているように見える。

この残存した振動が $m=\pm 2$ 振動であることを確認するために、MEM を用いてその周波数解析を行った。Figure 4 は、様々な温度において、0.5T の静磁場を印加した場合の、“Diff” の周波数解析結果である。表面張力値は、液滴変形に対する復元力であり、通

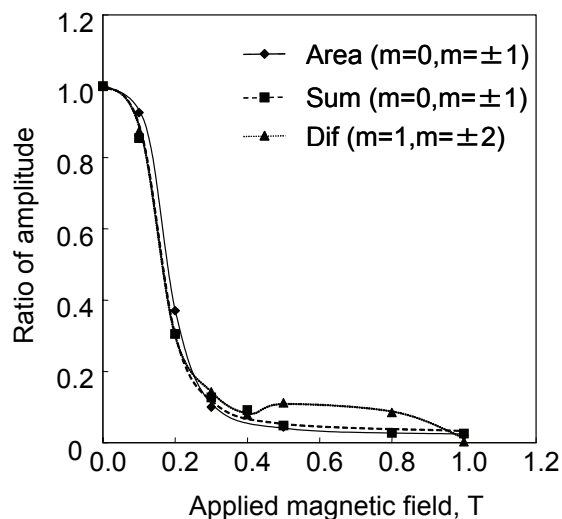


Figure 3 Decrement of amplitude for oscillation mode at 1790K. Amplitude of oscillation of “Area” and “Sum” modes are attenuated vanishingly above 0.5T, whereas oscillation of “Diff” mode exclusively remained although the amplitude became small in the magnetic field.

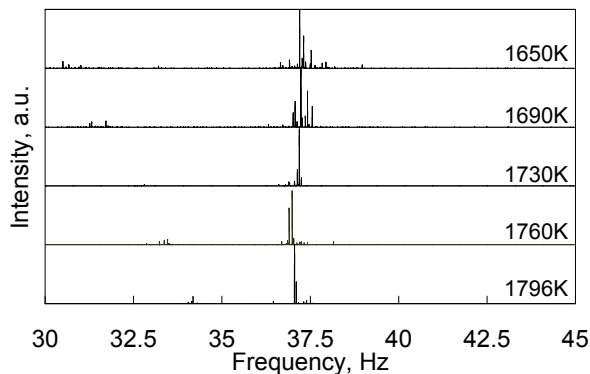


Figure 4 Frequency spectrums for oscillation mode of “Diff” at 0.5T. Oscillation frequency does not show temperature dependence, implying that it is not from surface .surface oscillation mode of $m=\pm 2$.

常は負の温度依存性を持つ。したがって、液滴の表面振動周波数は、温度によって変化しなければならない。しかしながら、figure 4 で認められたピークは、温度に依らずおよそ 37Hz に存在し、温度依存性を持たない。したがって、この周波数ピークは、 $m=\pm 2$ 振動に起因するものではないと考えられる。

5. 考察

仮に $m=0$ および $m=\pm 1$ モード振動と同様に、0.5T 以上の静磁場印加によって $m=\pm 2$ モード振動が抑制された場合、静磁場印加しない場合に比べて回転挙動が容易に観察されるようになる。この結果、“Diff”の周波数解析結果には、回転周波数が顕著に現れることが十分に考えられる。そこでここでは、液滴の回転について検討する。

浮遊液滴が楕円に変形し、それが z 軸を中心にある一定周期で回転する場合には、その周波数の二倍の値が“Diff”の周波数解析結果に現れる。これは、液滴の偏角 ϕ が $0 \leq \phi \leq \pi$ [rad] の範囲と $\pi \leq \phi \leq 2\pi$ [rad] の範囲で等しくなるため、液滴が一回転する間に、同じ“Diff”の値が二度カウントされるためである。したがって、0.5–0.8T の静磁場印加中で残存したおよそ 37Hz ピーク (figure 5 参照) が液滴の回転によるものであるならば、その回転周波数はおよそ、18.5Hz となる。

これを確認するために、本研究では液滴の最大直径が作る偏角 (figure 2 参照) の時間変化に注目した。 z 軸を中心として反時計回りに回転する楕円の剛体を上部から観察した場合、偏角の時間変化は、figure 6 のようになる。偏角 ϕ は第 1 象限および第 2 象限、つまり $0 \leq \phi \leq \pi$ [rad] の範囲の値として示すため、 $\phi=\pi$ [rad] を超えると再び 0 [rad] から始まる (以降この減少挙動を“ π 飛び”と呼ぶ)。その結果、偏角の時間変化は三角波となる。液滴が半回転する度に、この“ π 飛び”が発生するので、この三

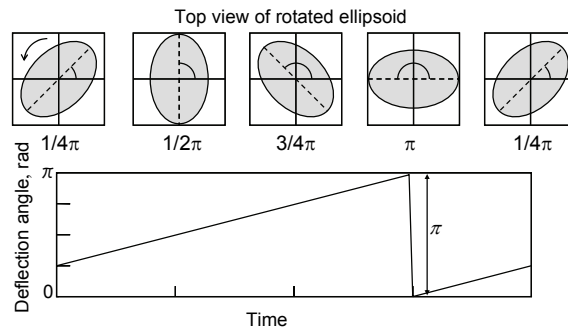


Figure 6 Transition of deviation angle for ellipsoid that rotates counterclockwise. It suddenly decreases from π radian to 0 when the ellipsoid rotates.

角波の周期を二倍することで、“Diff”の周波数解析結果とは独立に、液滴の回転周波数を求めることが可能となる。

Figure 7 に 0.5T の静磁場中で電磁浮遊させた液滴の代表的な偏角の時間変化を示す。この図から、“ π 飛び”が二回発生 (液滴が一回転) する周期 t はおよそ 0.054 [s] であるため、その周波数 f は $1/t=18.5$ [Hz] となる。この値は、“Diff”の周波数解析結果から求めた液滴の回転周波数とよく一致しているため (Fig.4 参照)、0.5–0.8T の静磁場印加中で残存したおよそ 37Hz の周波数を持つ振動は、 $m=\pm 2$ モード振動によるものではなく、楕円に変形した液滴の回転によるものであると結論づけられる。

なお figure 3 では、1.0T の静磁場印加によって液滴振動だけでなく、回転も殆ど抑制されているように見えるが、これは静磁場印加によって上方から観察した液滴形状がほぼ真円となり、最大直径の時間変化が見えなくなるためであると考えられる。因みに、磁場中で凝固させたシリコン試料では、 z 軸周りの回転のみが残存していることが見てとれる [5]。

以上のことより、静磁場印加は電磁浮遊したシリコン液滴の重心移動を抑制する効果があるものの、液滴振動をも減衰させてしまうため、正確な表面張

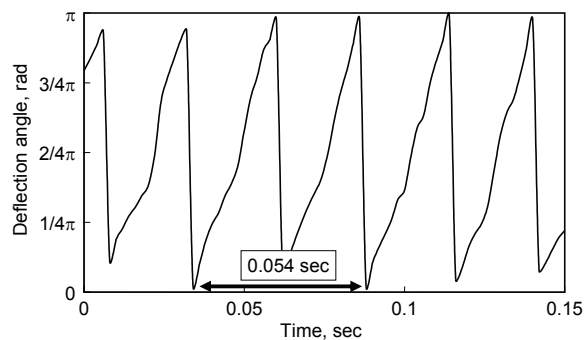


Figure 7 Typical transition of deflection angle for silicon droplet at 0.5T. Average double “ π Jump” period is 0.054 seconds, indicating that rotation frequency of droplet is about 18.5Hz

力測定を行うことは困難であり、微小重力環境の代替手段とはなり得ない。液滴振動法によって正確な表面張力測定を行うためには、微小重力実験が最も適していると考えられる。

6. まとめ

本研究では、電磁浮遊したシリコン液滴に静磁場を印加し、その影響について検討した。その結果、静磁場強度が増すにつれ、 $m=0, \pm 1, \pm 2$ 振動が抑制された。また、液滴の回転挙動が顕著になることが明らかとなった。したがって、表面張力測定の場合では、静磁場印加は微小重力環境の代替手段とはなり得ない。

謝辞

本研究テーマは、「微小重力下での酸素分圧制御による金属性融体の表面張力測定ワーキンググループ」（代表：日比谷孟俊（首都大））に属し、研究活動・議論を行っていることを記す。なお、本研究の一部は、財団法人機械システム振興協会が日本自転車振興会の機械工業振興事業補助金の交付を受け、その財源により受託実施したもので、深く謝意を表す。また、一部は「知的基盤創成・利用推進研究開発事業」制度の一環として、NEDO からダイフク・アルベック・ソフトウェアを通じて委託された「溶接設計支援システム用データベース構築の調査研究及び研究開発等」の成果である。磁場中での測定実験は、東北大金属材料研究所附属強磁場超伝導材料研究センターとの共同研究により実施した。

参考文献

- 1) 塚田隆夫、水戸光将、室沢光紀、You-Rong Li、今石 宣之、“シリコン単結晶成長に関する最近の数値シミュレーション技術と熱物性値” 日本結晶成長学会誌, 30, (2003) 357-363.
- 2) D. L. Cummings, D. A. Blackburn, “Oscillations of magnetically levitated aspherical droplets”, J. Fluid Mech., 224, (1991) 395-416.
- 3) H. Fujii, T. Matsumoto, N. Hata, T. Nakano, M. Kohno, K. Nogi, “Surface tension of molten silicon measured by electromagnetic levitation method under microgravity”, Metall. Mater. Trans. A, 31, (2000) 1585-1589.
- 4) H. Yasuda, I. Ohnaka, Y. Ninomiya, R. Ishii, S. Fujita, K. Kishio, - “Levitation of metallic melt by using the simultaneous imposition of the alternating and the static magnetic fields” - J. Crystal Growth, 260, (2004) 475-485.
- 5) H. Kobatake, H. Fukuyama, I. Minato, T. Tsukada, and S. Awaji, “Noncontact Measurement of Thermal Conductivity of Liquid Silicon in a Static