

微小重力環境下における雰囲気酸素分圧依存性を考慮した表面張力測定技術の開発

小澤俊平¹, 渡邊匡人², 諸星圭祐¹, 青柳智勇², 尺長憲昭¹, 安達正芳², 水野章敏²,
日比谷孟俊³, 藤井秀樹³

1 首都大学東京, 2 学習院大学, 3 慶應義塾大学大学院

Development of surface tension measurement method of high temperature melts in consideration of oxygen partial pressure under microgravity condition

Shumpei Ozawa¹, Masahito Watanabe², Keisuke Morohoshi¹, Tomowo Aoyagi², Noriaki Takenaga¹,
Masayoshi Adachi², Akitoshi Mizuno², Taketoshi Hibiya³, and Hideki Fujii³

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

² Gakushuin University, 1-5-1 Mejiro, Toshima, Tokyo 171-8588

³ Keio University, 1-1 Hiyoshi, Kohhoku, Yokohama 223-8526

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

Abstract: The electromagnetic levitator for microgravity condition called PFLEX (Parabolic Flight Levitation Experiment Facility) was improved for precision measurement of surface tension of high temperature melt. We succeeded in the electromagnetic levitation of molten copper during the parabolic flight regardless of the gravitational change from 1.5G to μ G. Several peaks were observed in the frequency spectrum for the surface oscillation of the molten copper, the spectrum becomes simple under μ G due to the release of the external force from gravitational acceleration and electromagnetic force.

Key words; surface oscillation, microgravity, oxygen partial pressure, electromagnetic levitation.

1. はじめに

金属性融体の表面は化学的に活性であるため、表面張力は僅かな表面活性元素にも非常に敏感で、16族の酸素やイオウがこれに当たる[1, 2]. 特に酸素は常温でも気体状態で存在しうするため、表面張力値は、融体が接する気相の雰囲気酸素分圧 P_{O_2} にも大きく影響を受ける[3]. しかしながら、雰囲気酸素分圧依存性を考慮して測定された金属性融体の表面張力データは殆ど無い. また、従来の容器を用いた測定では、高温で融体と容器の反応が避けられないため、測定が比較的低温の融点近傍に限られている問題もある.

金属性融体の正確な表面張力を測定するための最も有効な方法の1つとして、電磁浮遊炉(EML: Electromagnetic levitator)を用いた液滴振動法が挙げられる. この方法では、液滴の表面振動数から表面張力値を計算することが可能で[4]、以下の大きな利点がある

- (1) 容器からの汚染を完全に回避できる
 - (2) 容器との反応が無いため、従来よりも高温を達成できる
 - (3) 異質核生成サイトとなる容器壁が無いため、過冷却状態での測定が可能となる
 - (4) 雰囲気制御が比較的容易である
- しかしこの方法を地上で適用した場合、重力と電磁

力の影響によって、液滴が卵形に変形してしまう. その結果、液滴の表面振動周波数が、レイリー振動と呼ばれる単振動から、 $m=0, \pm 1, \pm 2$ 周波数の5つに分裂し、その補正が必要となる[5]. この補正式は理論的に導かれたものであり、その有効性について、実験的にはまだ完全に確認されていない.

ヨーロッパの研究グループは、TEMPUS と呼ばれる EML を利用して、微小重力環境下で高温融体の表面張力測定を試みている. しかし TEMPUS では P_{O_2} の制御と測定が出来ない問題がある.

本研究では、PFLEX (Parabolic Flight Levitation Experiment Facility) と呼ばれる、航空機搭載用 EML を利用して、微小重力環境下において、雰囲気酸素分圧依存性を考慮した高温融体の表面張力測定技術の構築を目的とした.

2. 実験方法

角状の銅を、試料ホルダにセットし、チャンバ内をロータリーポンプおよびターボ分子ポンプで、 10^{-3} Pa 程度まで真空引きした. その後、酸素含有量が 0.1ppm 以下のアルゴンガス (P_{O_2} : 10^{-2} Pa 以下) または、水分含有量が 2.66ppm の Ar -3% H_2 ガスで置換した. 航空機の水平飛行中に、試料に上記ガスを吹き付けながら試料に電磁力を印加し、微小重力環境突入前の過重力環境中まで、無容器浮遊加熱を

行った。微小重力環境突入と同時に試料を完全に溶融させ、その後、試料の浮遊位置を保持できるだけの十分小さい値まで電磁力を低下させた。この時の液滴の温度や振動挙動は、高速度ビデオと放射温度計によって記録した。およそ 20 秒間の微小重力環境が終了した後、試料ホルダを回転し、同様の実験を一度のフライトにつき、16-18 回繰り返した。得られた動画から、液滴の表面振動挙動を解析した。

3. 結果および考察

航空機実験では、 μG 突入前に過重力となる。従来の実験では、この環境で試料を電磁浮遊させることが困難であったため、 μG 突入後に試料の浮遊溶融を行っていたことから、表面振動観察に利用できる時間が限られてしまう問題があった。本研究では、浮遊コイルの改造と、この過重力を 1.5G 以下とすることで、液滴を水平飛行中から引き続き浮遊保持することに成功した。また、 μG 中で浮遊する高温液滴近傍のガスをサンプリングし、 P_{O_2} を測定することに成功した。

Figure 1 に、地上および μG で得られた液滴の表面振動振幅の時間変化を示す。地上では、液滴を浮遊させるために、電磁力を与え続ける必要があり、常に液滴の振動が励起される。それに対して μG 中では、液滴の浮遊位置を保持するための電磁力は必要となるものの、それは非常に僅かであるため、液滴の振動が減衰するのが観察された。また、液滴の表面振動が完全に減衰してしまうと、表面張力が測定できなくなる。そこで本研究では、 μG 中に電磁力を新たにパルスで加え、振動を再び励起することに成功した。

Figure 2 に地上および μG 実験で得られた液滴振動周波数の解析結果を示す。地上実験では複数の振動周波数ピークが観察されたが、 μG 実験では、重力と電磁力の影響を無くすことが出来るため、単一振動ピークが観察された。しかし同じような条件であっても、メインピークの他に、僅かに小さなピークが観察される場合もあった。この原因として、微小重力突入時の液滴形状や、並進運動の影響が考えられる。

以上のように、航空機の放物線飛行による μG 実験において、銅融体を無容器浮遊させることに成功した。また、 μG では液滴振動が減衰することや、電磁力をパルスのように印加することで、再び振動を励起できる事を確認した。今後はこの基礎データを元に、この手法のさらなる改良を行うとともに、地上実験に対するベンチマークデータの取得を試みる。

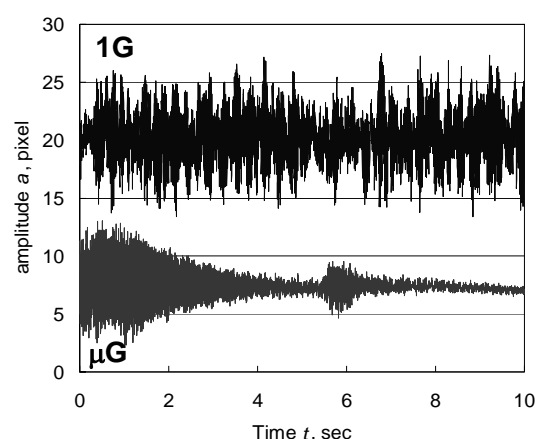


Figure 1 Amplitude of surface oscillation of molten copper using PFLEX under 1G and μG

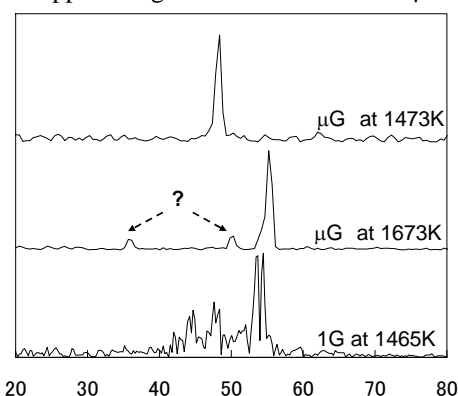


Figure 2 Frequency spectrum of surface oscillation for molten copper under 1G and μG .

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 WG」に属し、研究活動・議論を行っていることを記す。また本研究は、日本宇宙フォーラムの地上公募研究の助成を受けて行った。また一部は、JST から東北大学を通じて委託された、「高度ものづくり支援—超高温熱物性計測システムの開発」の成果である。

参考文献

- 1) 金属データブック
- 2) C. A. Heiple, and J. R. Roper, *Welding J*, **61**, (1982) 97s-102s,
- 3) K. Mukai, Z. Yuan, K. Nogi, and T. Hibiya, *ISIJ International*, **40** (2000), 148-152.
- 4) L. Rayleigh, *The Royal Society*, **29** (1879), 71-97.
- 5) D. L. Cummings, D. A. Blackburn, *J. Fluid Mech.*, **224**, (1991) 395-416.