

航空機を用いた微小重力環境下での電磁浮遊法による高温融体熱物性値計測

学習院大理 渡邊匡人、首都大学東京 日比谷孟俊

Measurement of thermophysical properties of high temperature melt using electromagnetic levitation technique under microgravity conditions

Masahito Watanabe¹⁾ and Taketoshi Hibiya²⁾

¹⁾ Department of Physics, Gakushuin University, Mejiro, Tokyo 171-8588

²⁾ Department of Aerospace System Engineering, Tokyo Metropolitan University, Hino, Tokyo 191-0065

E-Mail: masahito.watanabe@gakushuin.ac.jp

Abstract: Microgravity conditions have advantages of measurement of the surface tension and the viscosity of metallic alloys by the oscillating drop method with an electromagnetic levitation (EML) device. Since under microgravity conditions the surface oscillation spectra has a single peak and an exponential decay of the surface oscillations, we can obtain the surface tension and the viscosity by analyzing the surface oscillation spectra. However, the surface oscillation spectra has many peaks in sometimes even under microgravity conditions. This is due to modulation of surface oscillation by the sample rotation. From the modulation of the surface oscillation, precise measurements of the surface tension and the viscosity are difficult. In order to obtain the precise surface tension and viscosity from the surface oscillation spectra modulated by the sample rotation, we propose an improved analysis of the surface oscillation spectra of electromagnetically levitated liquid droplet under microgravity conditions. We try to measure the precise surface tension and viscosity by the proposed analytical technique with the measured surface oscillation spectra obtained under microgravity conditions by the airplane parabolic flight. This approach is relevant for high temperature, reactive alloys such as Ti based alloys which can not be measured by the sessile and oscillating or rotating cup method.

Key words; Electromagnetic Levitation, Surface Tension, Viscosity, Surface Oscillation of Liquid Droplet

1. はじめに

宇宙環境の利用により、無容器浮遊技術は大きく発展し、高温融体の熱物性計測、ならびに、過冷却急凝固を組み合わせることによる準安定相生成の研究が可能となり、「過冷却融体の科学」という新しい科学技術の領域が開けつつある。また、応用的な見地からは、無容器浮遊技術を用いた熱物性測定技術は、半導体ウエハーとして使用されるシリコン単結晶製造や、ニッケル基超合金を用いたジェットエンジンのタービブレードの鑄造などの工業プロセスに必要な高温融体の熱物性値データを提供している。現在では、より実用的な観点から融体物性値のデータベース化が強く望まれてきており、無容器法による熱物性計測も測定精度や測定の対象となる物質も社会の要請に答えていかなければならない。特に、金属性高温融体の表面張力測定においては酸素分圧依存性の測定が強く求められている。過冷却域の測定を制御された雰囲気酸素分圧のもとでおこなうには、静電浮遊法は現状では放電の問題が解決できていないため、電磁浮遊法を採用するしかない。また、合金鑄造プロセスでは、融

体粘性値の整備が最も必要とされている。これに対しても、蒸気圧の関係から雰囲気圧力に依存しない、電磁浮遊法を用いて測定する必要がある。そこで我々は、新たな液滴表面振動解析法を用いた航空機による微小重力環境下における電磁浮遊法による表面張力と粘性の高精度計測方法を検討したので報告する。

2. 液滴振動法による表面張力と粘性計測方法

浮遊法を用いた表面張力と粘性の測定では、液滴が表面振動している際の液滴形状の変化について、時刻 t での液滴半径 $r(t)$ が、

$$r(t) = r_0(1 + \varepsilon Y_l^m(\theta, \varphi)) = r_0 \left(1 + \varepsilon P_l^m(\theta) \cos(m\varphi) \cos(\omega_{l,m} t) \exp\left(-\frac{\tau_{l,m}}{t}\right) \right) \dots \dots (1)$$

と表せることから、表面張力と粘性を求めることができる。ここで、 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、 $Y_l^m(\theta, \varphi)$ 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。Rayleigh は、この表面振動して

いる液滴の運動方程式から、表面張力と表面振動の振動数の関係として、

$$\omega_l^2 = l(l-1)(l+2) \frac{4\pi \gamma}{3 M} \quad (2)$$

を導いた。また、減衰時間と粘性の関係が

$$\frac{1}{\tau_l} = (l-1)(2l+1) \frac{r_0}{M} \eta \quad (3)$$

となることも示した[1]。現在でもこの関係を用いて表面張力と粘性の測定がおこなわれている。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、特定の表面振動モードのみを励起することができないため、表面振動数の決定が一義的にできず、表面張力の誤差が大きくなってしまふ。また、常に表面振動が励起されており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、電磁浮遊法でこれらの物性値を取得するには、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る。微小重力下では、浮遊のための電磁力が必要ないため、熔融に必要な電磁力にパルス的に大きな電磁力を印加し、Fig. 1のような表面振動を励起させることが可能である。この振動の周波数と減衰時間から表面張力と粘性を求めることができる。しかし、実際には、Fig. 1のような理想的な表面振動曲線を得ることは難しく、多くの場合には、Fig. 2のようなゆらいだ表面振動曲線となってしまう。これから、表面振動のパワースペクトルを求めるとFig.3のようにピークが分裂してしまい、一義的に表面振動数を決定できず、表面張力値の誤差も大きくなってしまふ。

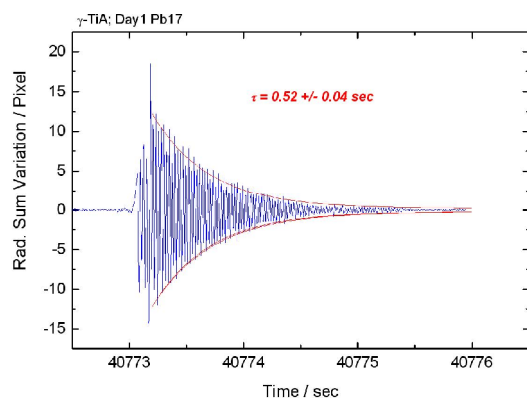


Fig.1 Surface oscillation of electromagnetically levitated liquid TiA under microgravity conditions.

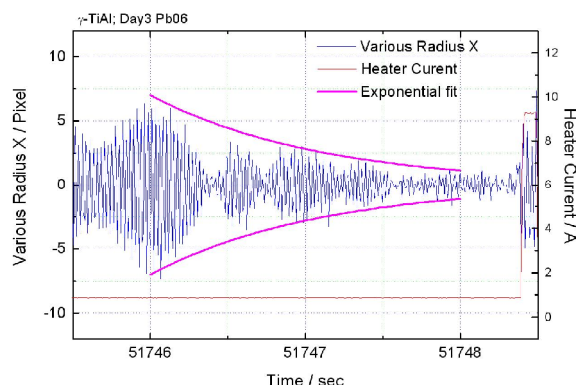


Fig.2 Modulated surface oscillation of liquid TiA by sample rotation under same conditions of Fig.1.

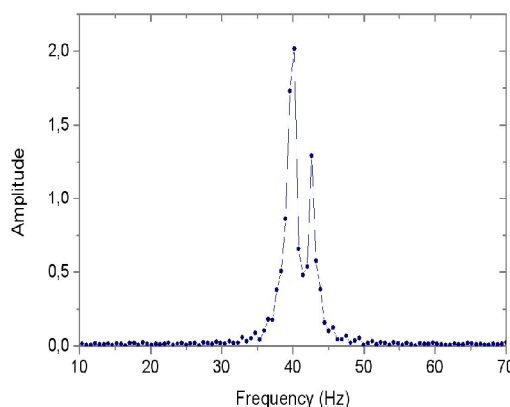


Fig.3 Power spectrum of surface oscillation shown in Fig.2. Two peaks are found in the spectrum. These are surface oscillation peak and rotation peak.

さらに、Fig. 2 から減衰時間を求めるには、複数の減衰時間を仮定した最適減衰曲線から求めなくてはならず、減衰時間の決定に任意性が残り、正しい粘性を求めることができなくなってしまう。このように、微小重力下においても表面張力と粘性を求める際に、これまでおこなってきた液滴表面振動の解析方法のままでは、今後要求される高精度の測定に対応できなくなっている。そこで、以下のような新たな表面振動の解析法により、微小重力下での高精度な表面張力と粘性計測の検討をおこなった。

3. 液滴の回転を考慮した液滴振動解析方法

前記した表面振動のゆらぎが液滴の回転の効果であることが、最近 Egry ら[2]によっても報告されている。浮遊した液滴が回転しながら表面振動をおこなうと、(1)式の振動部分に、回転の周期による振動成分が加わり、液滴半径の時間変化は、

$$r(t) = r_0 \left(1 + \varepsilon P_l^m(\theta) \cos(m \cdot) \cos(\omega_r t) \cos(\omega_{l,m} t) \exp\left(-\frac{\tau_{l,m}}{t}\right) \right) \dots \dots (4)$$

となる。この(4)式をフーリエ変換すると、

$$R(\omega) = \frac{1/\tau_l}{(\omega - \omega_l - \omega_r)^2 + (1/\tau_l)^2} + \frac{1/\tau_l}{(\omega - \omega_l + \omega_r)^2 + (1/\tau_l)^2} \dots \dots (5)$$

となり特定の振動モードを励起した場合に、周波数のパワースペクトルのピークが分裂することがわかる。これを Fig. 2 のようなゆらいだ表面振動の場合に適応すると、液滴回転による周波数と表面振動による周波数のピークを分離できることがわかる。また、パワースペクトルのピークの半値幅から減衰時間 $\tau_{l,m}$ が得られることも(5)式からわかる。この方法で粘性を求めるためには、表面振動のパワースペクトルの半値幅を正確に求める必要がある。これを検討するため、表面振動データを高速フーリエ変換 (FFT) と最大エントロピー法 (MEM) を比較して検討した。この結果、Fig. 4 に示すように MEM で求めた半値幅が(5)式から得た半値幅に良く一致することを確認した[3]。従って、以上のような解析から、液滴が回転し、表面振動の単調な減衰が無い場合でも、表面振動周波数を決定でき、かつ粘性も求められることがわかる。また、この手法では液滴表面振動が完全に減衰しなくても粘性を求めることができるため、航空機による 20 秒程度の短時間微小重力においても粘性測定が可能となる。

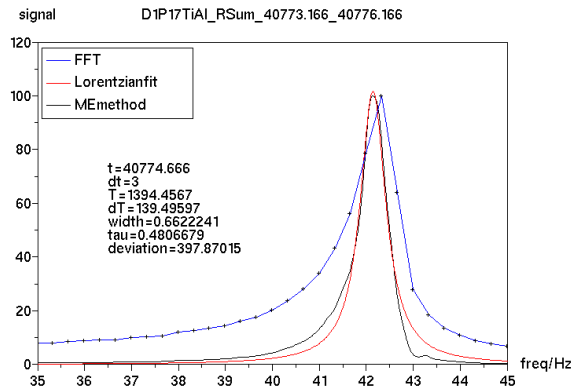


Fig.4 Power spectrum of surface oscillation shown in Fig.1 obtained by maximum entropy method (MEM). Figure contains the spectrum obtained by conventional fast Fourier transfer method (FFT) and analytical method. It is found that MEM results are good agreement for analytical curves.

4. まとめと今後の展望

以上で述べた新しい表面振動の本手法の確立が達成できれば、Ti 系合金などこれまでの測定例がない物質についての測定も可能となる。今年度において、JAXA 保有の航空機搭載用電磁浮遊装置 PFLEX を用い航空機による微小重力での電磁浮遊実験をおこない電磁浮遊液滴の表面振動を計測し、上記で述べた方法で表面張力と粘性を求め計画である。さらに、雰囲気酸素分圧の表面張力依存性を調べるために、酸素分圧を制御したガスボンベを用意し、これを航空機へ搭載し、PFLEX へ接続する。試料周りを石英管で覆い、酸素分圧制御した雰囲気ガスをこの部分にのみ流しながら、PFLE から機外排気装置への接続途中に酸素分圧モニターを設置し、試料表面での酸素分圧を算出できるようにし、酸素分圧を変化させて液滴表面振動の詳細な変化を観測する。

【参考文献】

- [1] L. Rayleigh, Proc. R. Soc. 29 (1879) 71-97.
- [2] I. Egry et al., Meas. Sci. Technol. 16 (2005) 426-431.
- [3] K. Higuchi et al., submitted in Int. J. Thermophysics.