

IIII ISS 静電浮遊炉 IIIII
(原著論文)

試料の回転を用いた高温高粘性融体の表面張力及び粘性係数測定

石川 毅彦^{1,2}・岡田 純平¹・Paul-Francois Paradis^{1,3}・渡邊 勇基⁴・渡邊 匡人⁵

Surface Tension and Viscosity Measurement of highly Viscous Melts using a Sample Rotation

Takehiko ISHIKAWA, Junpei OKADA, Paul-Francois PARADIS, Yuki WATANEBE
and Masahito WATANABE

Abstract

In order to measure the surface tension and viscosity of high temperature melts with high viscosity, a method using sample rotation is developed. An electrostatically levitated melt was spun with a rotating magnetic field, and the shape evolution of the sample was observed. Especially, the bifurcation behavior was closely monitored by a high speed camera. The experiments confirmed that the rotation frequency at the bifurcation could be precisely measured by monitoring the fluctuation of the power of the He-Ne laser reflected at the sample surface, and thus, the surface tension could be calculated based on the theory. As for the viscosity measurements, preliminary experiments showed that the speed of the shape evolution after the bifurcation was related to the viscosity of the sample.

Keyword(s): Levitation, Rotation, Surface tension, Viscosity

Received 23 Oct. 2014, accepted 7 Jan. 2015, published 31 Jan. 2015

1. はじめに

近年、浮遊技術が進展し、材料科学における多岐に亘る研究に使用されてきている¹⁻³⁾。浮遊法は無容器プロセスングを具現化する方法であり、これにより、容器に起因する様々な問題（例えば試料融体とるつぼとの反応）を回避することが可能となる。更に、容器からの核生成が抑制されるため、深い過冷却状態を容易に達成することができる。浮遊法は高温融体の熱物性計測に広く用いられ始めており、密度⁴⁻⁶⁾、比熱^{7,8)}、輻射率⁹⁻¹¹⁾、熱伝導率¹²⁾、電気伝導率¹³⁻¹⁵⁾、表面張力¹⁶⁻¹⁹⁾、粘性係数^{20,21)}等が各種の浮遊装置を用いて測定されている。そのうち、表面張力及び粘性係数は液滴振動法により静電浮遊炉や電磁浮遊炉で測定されている¹⁷⁻¹⁹⁾。この方法では、浮遊溶解した試料を球状から加振により変形させ、モード2の液滴振動²²⁾を励

起し、その共振周波数(ω_c)及び加振を止めた後の振動減衰時間(τ)から表面張力(γ)及び粘性係数(η)²³⁾を算出する。試料の密度(ρ)および試料の半径(R_0)を用いて、これらの物性値は以下の式により求められる^{22, 23)}。

$$\omega_c^2 = \frac{8\gamma}{\rho R_0^3} \quad (1)$$

$$\eta = \frac{\rho R_0^2}{5\tau} \quad (2)$$

この方法を用いて、融点が2000Kを超える高融点金属の表面張力及び粘性係数が体系的に測定されている。しかしながら液滴振動法は、金属ガラス融体など高い粘性を持つ融体に対しては、振動を励起することが困難であり、適用することが難しい。本研究は、液滴振動法では対応できな

-
- 1 宇宙航空研究開発機構 〒305-8505 茨城県つくば市千現 2-1-1
Japan Aerospace Exploration Agency, 2-1-1 Sengen, Tsukuba, Ibaraki 305-8505, Japan
 - 2 総合研究大学院大学 〒252-5210 神奈川県相模原市中央区由野台 3-1-1
The Graduate University for Advanced Studies (SOKENDAI), 3-1-1 Yoshinodai, Chuo-Ku, Sagamihara 252-5210, Japan
 - 3 INO, 2740 Einstein St. Quebec, Canada G1P 4S4
 - 4 株式会社 エー・イー・エス 〒305-0032 茨城県つくば市竹園 1-6-1
Advanced Engineering Services Co., Ltd., 1-6-1 Takezono, Tsukuba 305-0032, Japan
 - 5 学習院大学理学部 〒171-8588 東京都豊島区目白 1-5-1
Gakushuin University, 1-5-1 Mejiro, Toshima-Ku, Tokyo 171-8588, Japan
(E-mail: ishikawa.takehiko@jaxa.jp)

い高粘性融体の表面張力及び粘性係数を測定する方法を確立することを目標とする。

一般に表面張力及び粘性係数の測定は、エネルギーを加えて平衡状態からずらすことによって行われる。液滴振動法の場合、エネルギーの注入は短時間で少量であるため、高粘性融体を十分に變形させることができない。一方、試料に回転トルクを加えて遠心力を利用して變形させる場合、単位時間あたりに加えるエネルギーは少量であるもののそれを継続・積算することが可能であるため、結果として大きなエネルギーを加えることができる。これを利用して、試料の回転を利用した測定法の構築を目指した。

回転を利用した表面張力測定は既に **Elleman** らによって提案されている²⁴⁾。浮遊溶解した試料を回転させると遠心力により、試料は扁平する。扁平形状は、遠心力と表面張力の釣り合いによって決まる。**Brown and Scriven**²⁵⁾は、有限要素法を用いた数値解析により、回転数と表面張力及び變形についてまとめており、また、宇宙実験を含む浮遊実験により彼らの理論が実験的にも検証されている^{26,27)}。従って、試料の回転数及び試料の扁平形状が測定出来れば、表面張力を求めることができる。**Rhim and Ishikawa**²⁸⁾は、静電浮遊炉で Sn 及び Al 試料について回転を利用した表面張力測定を行い、実験的にこの方法を検証している。

この方法の課題は、試料の回転数計測にある。**Rhim and Ishikawa** の実験においては、試料表面の不純物や凹凸を利用し、He-Ne レーザーの試料からの反射強度が周期的に変化することを利用して回転数を検出しているが、表面が清浄で完全に軸対称な場合は測定ができないと言う弱点を有している。実際、溶解 Zr 等では溶解後表面の酸化物は蒸発してしまうため、試料の回転数を特定することは困難である。

本研究では、試料の回転数を更に上昇させ、試料形状が軸対称から 2 次の非軸対称形状に移行する分岐点 (Bifurcation point²⁵⁾) を利用する。非軸対称試料については上述の回転数計測法が適用可能であるし、分岐点における回転数と表面張力の関係は **Brown and Scriven**²⁵⁾ によって定量的に示されている。本研究ではまず Zr 試料の回転実験を行い、**Brown and Scriven** の理論の検証を行うとともに、高速度カメラを用いて分岐点での試料形状観察を行い、He-Ne レーザーを用いた回転数計測装置が分岐点における回転数を正確に捉えているか検証を行った。更に、ZrCoAl 系金属ガラス融体について、回転を用いた表面張力測定を行った。

粘性係数計測についても、試料の回転を利用した測定法が提案されている。**Ohsaka** ら²⁹⁾は、大気圧下での静電浮遊装置に回転音場によって試料にトルクを与えて試料を

非軸対称状態まで變形させ、その後トルク付加を止めて試料の回転を停止した。1Pa・s 以上の粘度を持つ試料は、その後徐々に形状が非軸対称形状から球状へ戻っていく。この元の形状に戻る時間から粘性を計る方法を実験及び理論を用いて示している。この方法の要点は、トルクを除いた際に空気抵抗によって急速に試料の回転が止まることにあり、金属・合金を扱う高真空状態には適用できない。**Abe** ら³⁰⁾は、同様のトルク付加法を用いて常温大気圧下で高粘性液体を液滴が破断するまで回転させ、破断直前の最大試料長さが粘性係数と良い相関関係にあることを実験的に示して高粘性融体の測定法を提案している。しかし、この方法を高温融体に適用する場合、試料温度の均一性の担保や、実験の効率性の向上、チャンバーの汚れの回避等に課題がある。

本研究では、分岐点における軸対称から非軸対称へ形状遷移過程を高速度カメラで詳細に観察することによって、非軸対称形状が発展していく時間変化の違いから粘性係数が測定できないか実験的に検討を行った。本論文では、粘性係数の小さい Zr 試料と Zr の 10 倍程度の粘性係数を持つ ZrCoAl 系合金の結果を報告する。

2. 実験装置

2.1 静電浮遊炉

本研究で用いる静電浮遊炉は、**Rhim** ら³¹⁾が開発した装置を基礎としている。試料の浮遊はターボ分子ポンプにより 10^{-5} Pa 程度の真空に保たれた高真空チャンパー内で行われる。**Figure 1** のとおり、間隔 10 mm の上下電極の間

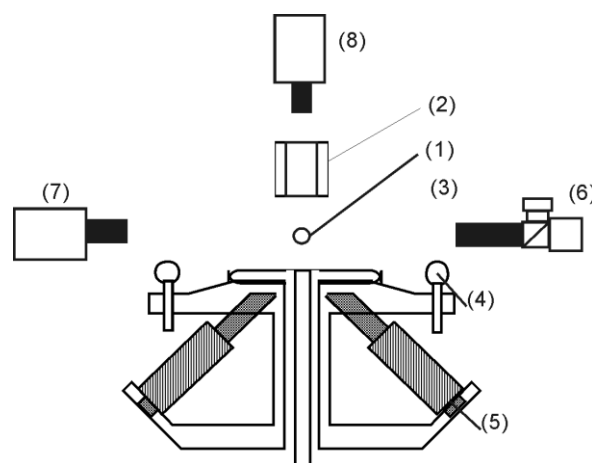


Fig. 1 Schematic side view of the electrode assembly and observation system: (1) sample, (2) top electrode, (3) bottom electrode, (4) four side electrodes, (5) four coils, (6) rotation measurement system, (7) side view camera, and (8) high speed camera.

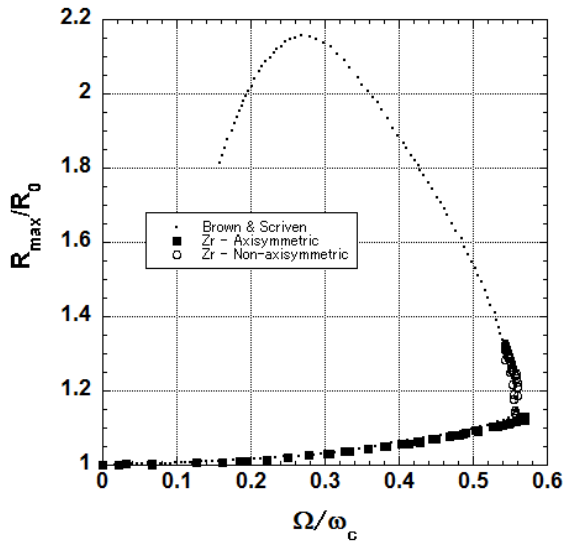


Fig. 2 Shape evolutions as a function of rotation; the abscissa shows the normalized rotation frequency, and the ordinate is the normalized maximum drop radius. Dots correspond to the theoretical prediction²⁵⁾ whereas solid squares are experimental results for zirconium samples (axisymmetric shape), and open circles are the results for zirconium after bifurcation (non-axisymmetric shape).

にクーロン力を利用して直径 2mm 程度の帯電した試料を浮遊させる。重力に拮抗したクーロン力を発生させるため、上下電極間には 10 ~ 20 kV/cm の高電場を印加する必要がある。下電極の周囲に 4 個の横電極を配置し、水平方向の位置制御を行う。試料を安定して浮遊させるため、高速のフィードバック制御が必要であるが、詳細は既出の論文³²⁾を参照されたい。浮遊試料は高出力の炭酸ガスレーザーで 3 方向から加熱され、試料温度は 2 台の放射温度計(単色)で計測される。下電極の下部に回転磁場を生成するための 4 個のコイルが設置されている。鉛直軸周り 400 Hz の回転磁場により試料内部に誘導電流が発生し、磁場と電流の相互作用により試料に回転トルクが発生する。これはブラシレスモーターと同様の原理である。各コイルに流す交流電流の量及び位相を調整することにより、回転磁場の強度及び回転方向を制御し、試料の回転をコントロールすることが可能である¹⁴⁾。

試料の形状観察は、拡大レンズを付加したカメラで横方向から行う。また、後述する回転計測系を用いて回転数計測を行う。更に、上方(上電極にあけた穴)から高速カメラにより試料の観察を行う (Fig. 1)。

2.2 回転法による表面張力測定

試料を浮遊溶融させた後、上述の回転磁場を印加すると

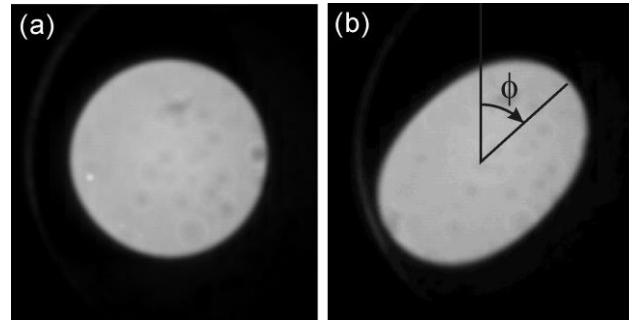


Fig. 3 Sample images taken by the high speed camera through a hole in the top electrode: (a) axisymmetric and (b) non-axisymmetric. ϕ indicates the rotation angle measured by image analysis.

試料は鉛直軸周りに回転をはじめ、回転数の上昇とともに遠心力により試料形状は扁平する。Brown と Scriven の数値解析結果²⁵⁾によれば、試料の最大半径(R_{max})は回転数(Ω)の上昇に伴って Fig.2 の様に増大していく。Figure 2 において、 R_0 は試料が完全な球の場合の半径、 ω_c は(1)式によって決まる試料の共振角速度である。試料の回転数が臨界値(Ω_c)に達すると、試料の形状は Fig.3 に示すとおり軸対称から 2 次の非軸対称形状に変化する(bifurcation)。

この分岐をすぎて更に回転トルクを付加すると、試料は最大半径を長くすることで回転エネルギーを増大させ、回転数はむしろ低下していく。更にトルクを加えると最後に試料は破断する。分岐点における Ω_c と ω_c の関係は同じ数値解析により

$$\omega_c = 0.559\Omega_c \quad (3)$$

とされている。Brown と Scriven の軸対称及び 2 次の非軸対称領域の回転による形状変化は宇宙での液滴実験含めて実験的に検証されている^{26,27)}。なお、理論的にはより高次の非軸対称形状を出現させることが可能であるが、本研究では最も出現させやすい 2 次の形状のみ取り扱っている。

回転を用いて表面張力を測定する方法として軸対称領域での計測及び分岐点を利用した計測の 2 通りが考えられる。軸対称領域の計測は、 R_{max} と Ω を正確に計測し、Fig. 2 の曲線にフィッティングすることによって分岐点の Ω_c を推定し、(1),(3)式を用いて表面張力を求める方法である。分岐点を利用する方法は、試料を非軸対称形状まで回転させて、直接 Ω_c を計測する方法である。前者は、後者に比べて試料の変形度合いが少ないため温度の均一性が良い・到達する回転数が少ないため実験時間が短い・試料が落下する危険が少ない、等のメリットがある。これらの理由から、回転法を用いた表面張力測定はまず軸対称領域で行われている²⁸⁾。

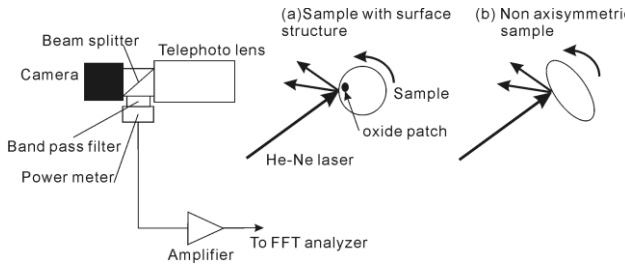


Fig. 4 Schematic drawing of the rotation measurement system.

軸対称領域の計測においては、 Ω の正確な測定が必要である。**Figure 4** に回転数計測方法を示す²⁸⁾。この計測システムは、He-Ne レーザーを試料表面に照射し、その反射光の強度をパワーメーターで測定するものである。試料表面に不均一がある場合（固体の場合の凹凸や液体の場合の不純物など）、測定される反射強度は試料の回転に応じて変化する（**Fig. 4(a)**）。従って、測定信号を高速フーリエ変換（FFT）することによって回転数を得ることが出来る。問題は、液体試料で表面に不純物など明確な異物が存在しない時、計測が出来ないことである。これまでの高融点金属融体の熱物性測定において、融体の回転数を測定できる例はほとんど無い。一方、試料を非軸対称形状まで回転させた場合、表面に異物がなくても試料形状自体が回転対称でないため、He-Ne レーザーの反射強度は回転に伴って変化して、回転数を計測することができると考えられる（**Fig. 4(b)**）。従って、非軸対象領域での回転数計測を通じて表面張力測定が可能と考えられる。

2.3 回転を利用した粘性係数測定

Figure 2 に示した回転数と形状変化は、平衡状態における関係である。表面張力が同じ液体であっても、粘性係数が異なる場合、平衡状態に至る時間は異なると考えられる。すなわち、分岐点を通じて軸対称から非軸対称に遷移して最大半径が発達していく速度に粘性の影響が現れ、これを観察することによって逆に粘性係数を見積もることができる可能性がある。Ohsaka らの研究²⁹⁾が、非軸対称から軸対称への遷移の時間を計測したのに対して、軸対称から非軸対称への遷移挙動を計測するのが本研究である。残念ながら、本研究では実験的データの積み重ねを先行して行った。非軸対称への遷移は非常に短時間で起こるため、高速度カメラによる撮像及びその画像解析を中心として行った。

2.4 画像解析

Figure 3 に高速度カメラで取得した浮遊溶融試料を示

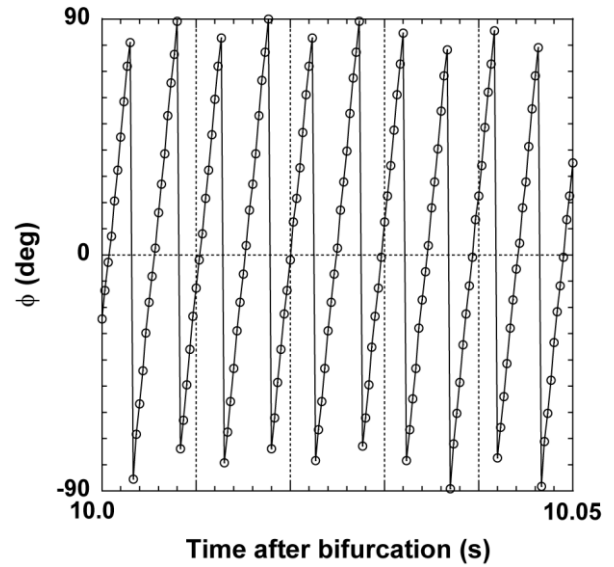


Fig. 5 Typical example of the measured ϕ as a function of time obtained by the image analysis of high speed camera.

す。画像の解析は、Chung らによる浮遊試料の体積計測³³⁾と同様の方法を採用した。まず、試料の中心から放射状等間隔に 400 本の直線を仮想的に引き、その線上での輝度変化から試料の輪郭を抽出した。そして、輪郭を

$$R(\theta) = \sum_{n=0}^5 c_n P_n \{ \cos(\theta + \phi) \} \quad (4)$$

で表される近似式にフィッティングした。ここで $R(\theta)$ は極座標系で表した半径であり、 $P_n(\cos \theta)$ は n 次の Legendre 多項式を用いた。また、 θ は画像上で鉛直から右回りの角度である。 $\cos \theta$ は偶関数で鉛直軸に対して左右対称な図形を前提としているため、良好なフィッティング結果を得るためには、**Figure 3(b)** の様な鉛直軸に対して対称でない画像に対しては ϕ だけ座標を回転させる必要がある。この性質を利用し、以下の誤差関数 F が最小となる c_n (Legendre 多項式の係数) 及び ϕ を決定し、回転角度を求めた。

$$F(c_0, c_1, c_2, c_3, c_4, c_5, \phi) = \sum_{i=1}^{400} \{ R_i - R(\theta_i) \}^2 \quad (5)$$

Figure 5 に非軸対称試料の画像解析によって得られた ϕ の時間変化の一例を示す。得られた結果から試料の回転数を求めた。また、フィッティング結果 $R(\theta)$ を用いて、アスペクト比 Γ (最大半径と最小半径との比) を算出した。

2.5 浮遊実験

実験は、ジルコニウム (Zr) 及び $Zr_{55}Co_{20}Al_{25}$ 試料 (以

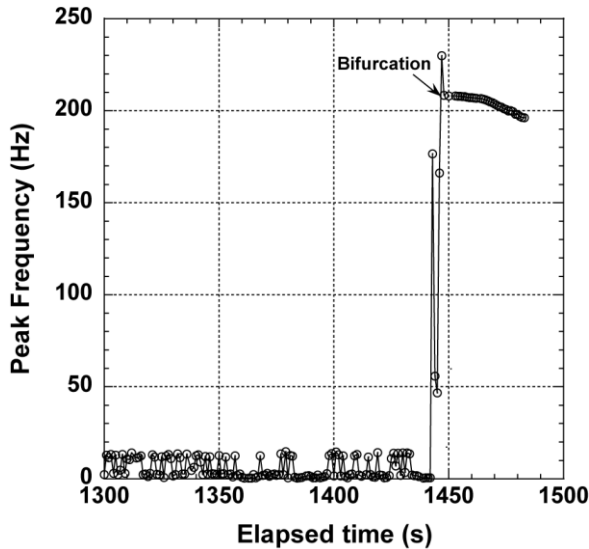


Fig. 6 Peak FFT frequency obtained by the measurement system of Fig.4.

下 ZCA と記す) を用いて実施した。Zr は、蒸気圧が比較的長く長時間の浮遊溶解に適していること、粘性係数が既知で比較的長く、液滴振動法による表面張力測定が可能であり、回転法との比較ができることから技術確立に使用した。一方の ZCA 試料は粘性係数が 40mPa・s 程度と Zr の 10 倍高く、液滴振動法による表面張力測定が低い温度領域では困難な試料であり、回転法を用いた実測定を行った。

各試料を浮遊溶解させた後、一定温度で試料を回転磁場により回転させた。Figure 4 に示す回転計測系を用いて 1 秒ごとの回転数を記録した。一方、高速度カメラでは、メモリの制約から分岐点前後約 25 秒のみを撮影し、3000 fps で約 75000 枚の静止画を得た。高速度カメラ撮影終了後、回転磁場の方向を反転させ、試料を軸対称形状に戻した。ZCA 試料に関しては、その後保持温度を変化させて、分岐点計測を行った。

3. 実験結果

3.1 表面張力計測

Figure 6 に Zr 試料の実験において回転数計測系に記録されたピーク周波数の時間変化を示す。浮遊試料は回転磁場印加開始から約 1450 s 後に分岐点に到達して非軸対称形状に変化した。分岐以前は、試料形状が回転対称で反射強度がほぼ一定であるため、FFT 解析結果はでたらめな値 (主に電源ノイズの周波数) を示した。しかし分岐点に到達して形状が非軸対称になると突然 208 Hz のピークが現れた。そしてその周波数は、 R_{max} の増加に伴って徐々に低下した。Figure 7 は、高速度カメラの画像解析による回転数算出値と回転計測系での値との比較を示す。回転計測系

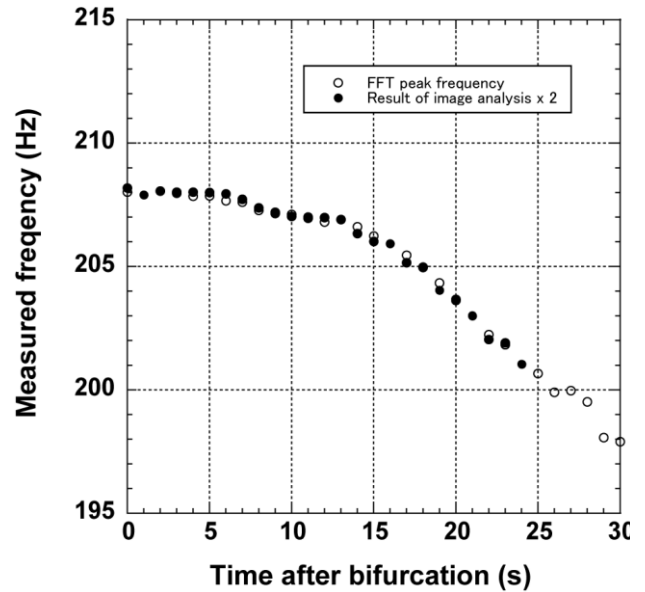


Fig. 7 Comparison between the peak FFT frequency and the calculated rotation frequency from the image analysis.

での測定値は、高速度カメラでの測定値の 2 倍とほぼ完全に一致した。Figure 3(b) のとおり、分岐後の試料形状は 2 回対称であるため、回転毎に 2 回反射強度の強弱が現れる。このため、回転計測系での測定値は実際の回転数の 2 倍になったと考えられる。

Figure 7 より回転数計測の不確かさは約 1 Hz と見積もられる。試料の回転数が 100Hz 前後であることから、 Ω_c 計測の不確かさは 1%程度と見積もることが出来る。従って、回転法による表面張力測定の不確かさ ($\Delta \gamma / \gamma$) は、密度の不確かさ ($\Delta \rho / \rho: 2\%$)、試料半径の不確かさ ($\Delta R_0 / R_0: 1\%$) と次式から 4.1%程度と見積もられる。

$$\frac{\Delta \gamma}{\gamma} \approx \sqrt{\left(\frac{\Delta \rho}{\rho}\right)^2 + \left(\frac{3\Delta R_0}{R_0}\right)^2 + \left(\frac{2\Delta \omega_c}{\omega_c}\right)^2} \quad (6)$$

また、本実験時の軸対称-非軸対称領域における回転数と形状変化の測定結果を Figure 2 にプロットした。Zr 試料においても過去の実験同様に Brown と Scriven の理論線に沿って形状が変化していくことが確認された。なお、Figure 2 においては、試料液滴を一定時間間隔毎に振動させ、共振角速度が回転の影響を受けて増大していく Busse の式³⁴⁾ ((7)式) を用いて軸対称領域の回転数を類推している。

$$\frac{\omega_c(\Omega) - \omega_c(0)}{\omega_c(0)} = \frac{19}{21} \left(\frac{\Omega}{\omega_c(0)}\right)^2 \quad (7)$$

ここで $\omega_c(0)$ は無回転の時に計測した共振角速度、 $\omega_c(\Omega)$ は、

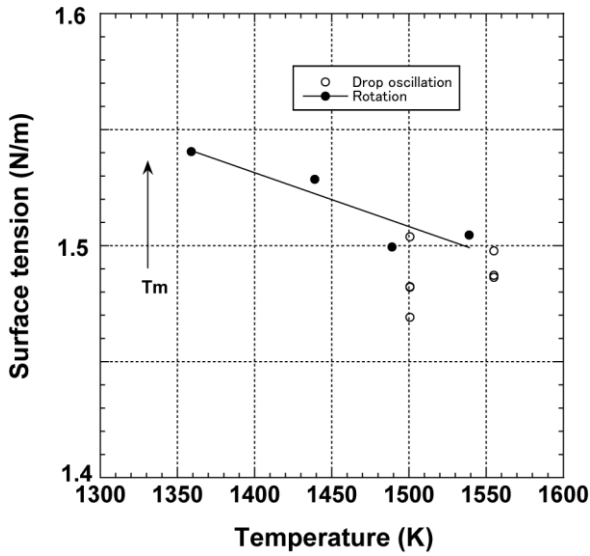


Fig. 8 Measured surface tension of $Zr_{55}Co_{20}Al_{25}$ alloy as a function of temperature

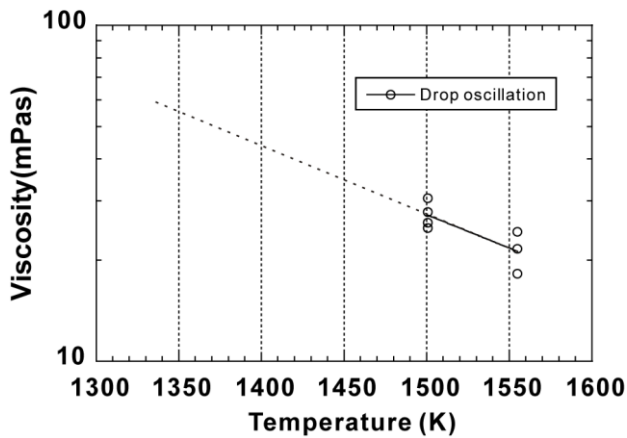


Fig. 9 Measured viscosity of $Zr_{55}Co_{20}Al_{25}$ alloy as a function of temperature.

回転中に計測した共振角速度である。

Figure 8 及び 9 は、回転法及び液滴振動法を用いて測定した、ZCA 試料の表面張力及び粘性係数である。高温において、ZCA 試料の粘性係数は比較的 low (20 mPa·s)、液滴振動法の適用が可能であった。しかし、温度が低くなると振動の励起が難しくなるとともにデータは大きくばらつきはじめ、1500K 以下では測定できなかつた。一方、回転法では 1360K (推定の粘性係数は約 55 mPa·s) まで表面張力測定が可能であった。測定結果から得られた ZCA 試料の表面張力は

$$\gamma(T) = 1.55 - 2.3 \times 10^{-4}(T - T_m) \quad (\text{N/m}) \quad (8)$$

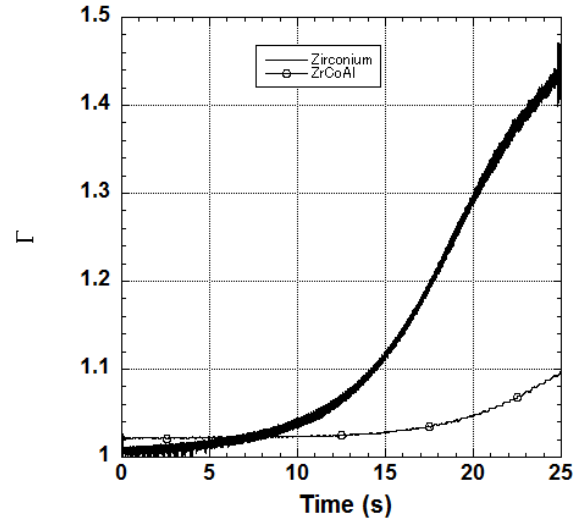


Fig. 10 Evolutions of aspect ratio as a function of time after bifurcation.

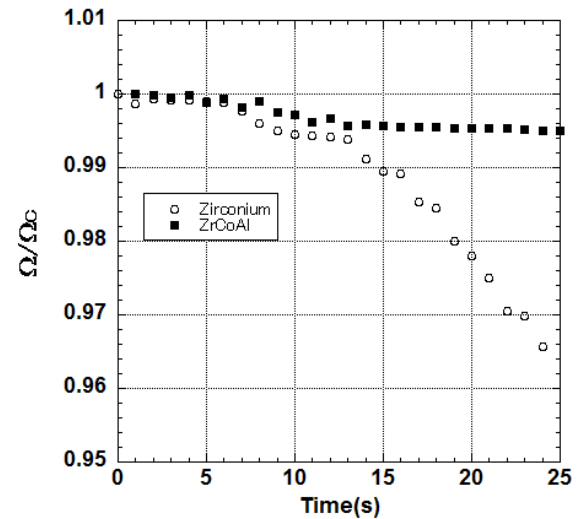


Fig. 11 Comparison of rotation rate changes after bifurcation.

となった³⁵⁾。ここで T_m は $Zr_{55}Co_{20}Al_{25}$ の融点 (1323 K) である。本試料に関して他の測定データがない。しかし、組成が若干異なる $Zr_{55}Co_{22.5}Al_{22.5}$ ³⁶⁾ の測定結果 (1500 K で 1.47 N/m) と比較してほぼ同じであり、妥当な結果であると判断される。

3.2 粘性係数

Figure 10 に画像解析から測定した、融点の Zr 及び ZAC 試料 (温度から推定して粘性係数約 40 mPa·s) の分岐前後のアスペクト比変化を示す。明らかに、粘性係数が低い Zr 試料のアスペクト比の増加が ZAC に比べて早い。

Figure 11 に分岐以降の回転数の変化を示す。Zr 試料では、最大半径の増加に伴う回転モーメントの増加によって回

転数が低下したが、ZAC 試料では回転モーメントがそれほど増加しなかったため、回転数の低下も少なかった。実験結果から、高速度カメラによって分岐点後の試料のアスペクト比の時間変化を詳細に捉えることが可能であること、粘性係数の違いが最大半径の発展速度に影響を与えていることが明らかとなり、分岐点を利用した粘性係数測定への見通しがたった。

4. 結論

試料の回転を利用した表面張力および粘性係数測定について研究を行い、以下の結論を得た。

- 分岐点の回転数は Brown と Scriven の理論に一致し、これを用いて表面張力の計測が可能である。試料の回転数計測は、Fig. 4 の計測系を用いて 1 Hz の不確かさで測定可能である。
- 回転法を利用して、ZrCoAl 融体について液滴振動法では測定が困難な粘性係数の高い温度領域の表面張力測定に成功した。
- 分岐点以降、試料変形の発展速度は、粘性係数の影響を受ける。高速度カメラを用いてこの速度を測定することにより、粘性係数が推定出来る可能性がある。

謝辞

本研究の実験実施にあたって、阪田薫徳博士、Vijaya Kumar 博士、今井済君、山崎曜君（学習院大学）に多大なる協力を頂きました。また、ZAC 試料はソウル大学の C. W. Ryu さん及び E. S. Park 教授より提供頂きました。ここに謝意を表します。本研究は科学研究費補助金（基盤研究（B））の補助を受けて実施されました。

参考文献

- 1) S. Krishnan, J. J. Felten, J. E. Rix, J. K. R. Weber, P. C. Nordine, M. A. Beno, S. Ansell and D. L. Price: *Rev. Sci. Instrum.*, **68** (1997) 3512.
- 2) D. Holland-Moritz, T. Shenk, P. Convert, T. Hansen, and D. M. Herlach: *Meas. Sci. Technol.*, **16** (2005) 372.
- 3) P.-F. Paradis, T. Ishikawa, G. W. Lee, D. Holland-Moritz, J. Brillo, W.-K. Rhim, and J. T. Okada: *Mater. Sci. Eng. R.*, **76** (2014) 1.
- 4) S. Amore, S. Delsante, H. Kobatake, and J. Brillo: *J. Chem. Phys.*, **139** (2013) 064504.
- 5) S. K. Chung, D. B. Thiessen, and W.-K. Rhim: *Rev. Sci. Instrum.*, **67** (1996) 3175.
- 6) V. Sarou-Kanian, F. Millot, and J.C. Rifflet: *Int. J. Thermophys.*, **24** (2003) 277.
- 7) R. K. Wunderlich, Ch. Ettl, and H.-J. Fecht: *Int. J. Thermophys.*, **22** (2001) 579.
- 8) A. J. Rulison and W.-K. Rhim: *Rev. Sci. Instrum.*, **65** (1994) 695.
- 9) S. Krishnan, J. K. R. Weber, C. D. Anderson, P. C. Nordine, and R. I. Sheldon: *J. Nucl. Mater.*, **203** (1993) 112.
- 10) H. Kawamura, H. Fukuyama, M. Watanabe, and T. Hibiya: *Meas. Sci. Technol.*, **16** (2005) 386.
- 11) T. Ishikawa, Y. Ito, J. T. Okada, P.-F. Paradis, Y. Watanabe, and T. Masaki: *Meas. Sci. Technol.*, **23** (2012) 125602.
- 12) H. Kobatake, H. Fukuyama, T. Tsukada, and S. Awaji: *Meas. Sci. Technol.*, **21** (2010) 025901.
- 13) G. Lohöfer: *Meas. Sci. Technol.*, **16** (2005) 417.
- 14) W.-K. Rhim and T. Ishikawa: *Rev. Sci. Instrum.*, **69** (1998) 3628.
- 15) G. E. Rustan, N. S. Spyrisson, A. Kreyssig, R. Prozorov, and A. Goldman: *Rev. Sci. Instrum.*, **83** (2012) 103907.
- 16) B. Glorieux, F. Millot, and J. C. Rifflet: *Int. J. Thermophys.*, **23** (2002) 1249.
- 17) J. Brillo and I. Egrý: *J. Mater. Sci.*, **40** (2005) 2213.
- 18) H. P. Wang, J. Chang, and B. Wei: *J. Appl. Phys.*, **106** (2009) 033506.
- 19) W.-K. Rhim, K. Ohsaka, P.-F. Paradis, and R. E. Spjut: *Rev. Sci. Instrum.*, **70** (1999) 2796.
- 20) T. Ishikawa, P.-F. Paradis, J. T. Okada, M. V. Kumar, and Y. Watanabe: *J. Chem. Thermodyn.*, **65** (2013) 1.
- 21) T. Ishikawa, P.-F. Paradis, J. T. Okada, and Y. Watanabe: *Meas. Sci. Technol.*, **23** (2012) 025305.
- 22) Lord Rayleigh: *Proc. R. Soc. London*, 29 (1879), 71.
- 23) H. Lamb: *Hydrodynamics*, 6th ed. (Cambridge University Press, Cambridge, 1932), 473.
- 24) D. D. Elleman, T. G. Wang, and M. Barmatz: *NASA Tech. Memo*, **2** (1988) 557.
- 25) R. A. Brown and L. E. Scriven: *Proc. R. Soc. London, Ser. A*, **371** (1980) 331.
- 26) W.-K. Rhim, S. K. Chung, and D. D. Elleman: *Proc. 7th European Symp. Materials and Fluid Sciences in Microgravity*, 1989, ESA SP-295, p. 629.
- 27) T. G. Wang, A. V. Anilkumar, C. P. Lee, and K. C. Lin: *J. Fluid Mech.*, **276** (1994) 389.
- 28) W.-K. Rhim and T. Ishikawa: *Rev. Sci. Instrum.*, **72** (2001) 3572.
- 29) K. Ohsaka, A. Rednikov, S. S. Sadhal, E. H. Trinh: *Rev. Sci. Instrum.*, **73** (2002) 2091.
- 30) Y. Abe, S. Matsumoto, T. Watanabe, K. Nishinari, H. Kitahata, A. Kaneko, K. Hasegawa, R. Tanaka, K. Shitanishi, S. Sasaki: *Int. J. Microgravity Sci. Appl.*, **30** (2013) 42.
- 31) W.-K. Rhim, S. K. Chung, D. Barber, K. F. Man, G. Gutt, A. Rulison, and R. E. Spjut: *Rev. Sci. Instrum.*, **64** (1993) 2961.
- 32) T. Ishikawa, P.-F. Paradis, T. Itami, and S. Yoda: *Meas. Sci. Technol.*, **16** (2005) 443.
- 33) S. K. Chung, D. B. Thiessen, and W.-K. Rhim: *Rev. Sci. Instrum.*, **67** (1996), 3175.
- 34) F. H. Busse: *J Fluid Mech.*, **142** (1984) 1.
- 35) T. Ishikawa, J. T. Okada, P.-F. Paradis, Y. Watanabe, M. V. Kumar, and M. Watanabe: *JJAP*, **53** (2014), 126601.
- 36) S. Mukherjee, W. L. Johnson, and W.-K. Rhim: *Appl. Phys. Lett.*, **86** (2005) 014104.