

気相の挙動に着目した低プラントル数流体 液柱マランゴニ対流の解明の試み

首都大学東京¹ 都立科学技術大学² 林貴昭¹, 白鳥英², 小澤俊平¹, 日比谷孟俊^{1,2}

A new approach to experimental study of Marangoni flow in half-zone liquid bridge of low Prandtl number fluids by observing ambient flow

Takaaki Hayashi¹, Suguru Shiratori², Shumpei Ozawa¹, and Taketoshi Hibiya^{1,2}
Tokyo Metropolitan University¹, Tokyo Metropolitan Institute of Technology²
6-6 Asahigaoka, Hino, Tokyo 191-0065
E-Mail: Taka-884@astan1.tmit.ac.jp

Abstract: In order to overcome experimental difficulty for Marangoni flow study of low-Pr number fluid, particularly difficulty of flow visualization due to opaqueness of fluids, a new method is introduced. This paper reports a new visualization method by observing ambient atmosphere flow. The experiment results suggest use of strong illumination and suppression of buoyancy flow in ambient atmosphere.

Key words: Marangoni, Low Prandtl number fluid, Visualization, PIV

1. はじめに

微小重力下において顕在化するマランゴニ対流は、地上においても結晶成長などの熱物質輸送プロセスに大きな影響を与えている。フローティング・ゾーン法による結晶成長を模擬した液柱マランゴニ対流の研究では、マランゴニ数 Ma の上昇に伴って起きる対流の振動化への遷移のメカニズムやその対流の構造の解明が主な焦点となっている。この対流の遷移のメカニズムは数値計算により液体のプラントル数によって異なり、金属融液等の低プラントル数流体では軸対称定常流から振動流に遷移する過程に三次元定常流という状態を経ることが報告されている¹⁾。しかし、低プラントル数流体における実験的研究の例は少ない。その原因の一つとして、低プラントル数流体が可視光に不透明性であることから、流れ場の直接観察が極めて困難であることが挙げられる。

このような低プラントル数流体におけるマランゴニ対流の実験的困難さを克服するために、現在まで(1)トレーサ粒子とエックス線や超音波を用いた流れ場の可視化^{2),3)}(2)熱電対による温度場振動の観測⁴⁾(3)位相シフト干渉法による圧力場の振動の観測⁵⁾、などのような手法を用いて様々な情報が得られてはいるものの、直接可視化で得られるような融液表面の流速などの基本的な流れの物理量を計測するには至っていない。

本研究では流れ場の情報取得が困難である低プラントル数流体における液柱マランゴニ対流において、液柱表面近傍の気相の流れに着目して、液柱表面の流れを推測する新たな手法を提案し、測定技術を開発することを目的とする。ここではその手法構築の現状と可能性について報告する。

3. 気相を利用した観測手法

マランゴニ対流は流体の自由表面に起こる現象であり、二相界面ではその駆動力は両方の流体に作用する。そのため、可視化が困難な低プラントル数流体のマランゴニ対流において、この性質を利用して界面の流れを可視化が容易な雰囲気から測定する方法が考えられる。この手法によって通常は困難である低プラントル数流体のハーフゾーンの問題においても、液柱表面の流れの情報が得られることが期待される。Fig.1 は液柱の周囲気体も対象にした液柱マランゴニ対流 ($Ma=10$) についての数値計算の結果である。縦の破線の右側が気相の領域、左側が上下ロッドとそれに挟まれた液柱である。液柱内部でマランゴニ対流が発生しているとき、液柱外部には内部の対流と対称なセルが生ずることが分かる。実験的にこのような気相の流れ、特に界面近傍の流れを捉えることがこの手法の課題となる。

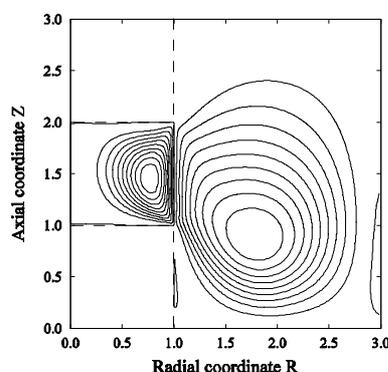


Fig.1 Streamlines of flow in liquid and in air

4. 実験

気相の可視化には空間情報を多く得られる PIV (Particle Image Velocimetry) を用いた。その実験装置の構成を Fig. 2 に示す。

観察窓付きのチャンバ内に試料を支持するユニットを組み、上下ロッドを覆う PBN(Pyrolytic Bron nitride)ヒータにて加熱をし、半径 10mm、高さ 5mm の液柱を形成させた。この時試料には銀を使用した。銀の液柱を作るためにロッド端部には銀と濡れのよい白金のプレート埋め込んでいる。この白金プレートに熱電対を当て、上下間温度差をモニターした。また、雰囲気は 6N アルゴンを用い、トレーサ (MgO 粉末 融点 2800) をアルゴンガス経路内で拡散させ混入した。互いに直角に配置された観察窓の片方からレーザーシート光 (CW アルゴン 150mW 488nm) を入れ、もう一方から高速度カメラ (Redlake motionscopePCI100s) にて粒子像を撮影した。撮影窓とカメラの間には装置の内部発光のみを抑えるためにレーザー波長のバンドパスフィルタを設置した。

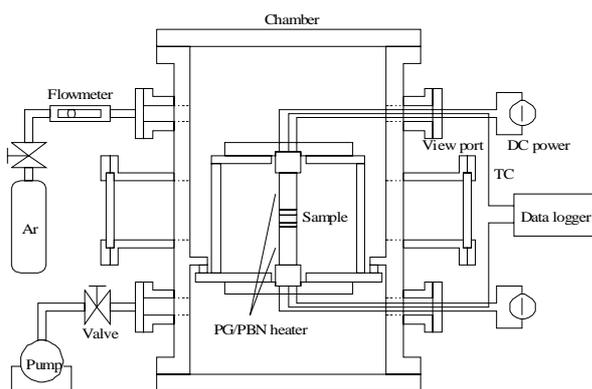


Fig.2a Experimental setup

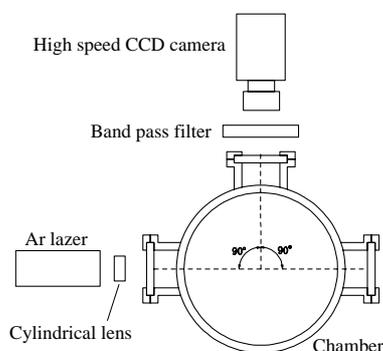


Fig.2b Arrangement of optical equipment

5.結果と課題

Fig.4 は撮影の結果得られた画像である。これを見ると、まず、粒子の可視化が十分でないという問題が分かった。これは、加熱に伴う装置内の発光強度が予想よりも高く、必要なレンズの絞り (F5.5) に対して粒子像の輝度が足りなかったことによる。このため、取得画像から十分な粒子数を得られず PIV の解析にかけことは出来なかったが、静止画上の数点の粒子像を目測で追うことで気相の流れの方向、そのおおよその速度は把握できた。図中のマーカはある時刻での粒子像の位置を時間間隔 $t=0.17$ で追ったものである。これにより、装置内では液柱表面近傍においても大きな上昇流が発生していることが分かった。このマーキングした点の移動から判断すれば、その流速はおよそ 40mm/s 程と推測できる。この流れはマランゴニ対流とは逆向きの流れであることから、装置内を循環する浮力対流といえる。

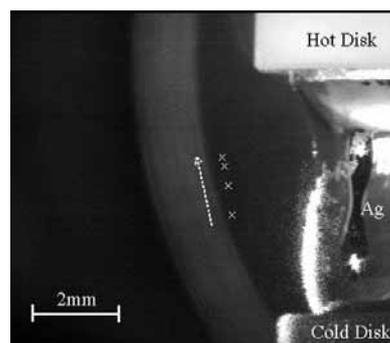


Fig. 3 Tracer in buoyant convection

この結果を踏まえ銀液柱近傍の浮力対流を抑えるために上下ロッドにセラミックの遮蔽板を設置した。この場合、二枚の板の間にロールセル状の気流の渦が発生していることが認められた (Fig.5)。Fig.3 の結果の時と同様に、ある粒子像に注目し、

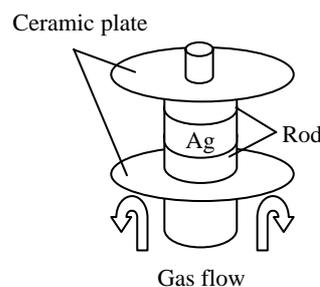


Fig. 4 Setting of ceramic plates

マーキングして流れを追うと (Fig.5 にマーキングした点の $t=0.1$), 流速はおよそ 15mm/s と見積もられ, 遮蔽板を設置する前と比べ速度が低くなる効果は得られている事が分かる. また, 副次的ではあるが, 遮蔽板がヒータの発する強力な発光を視界から遮り, より良い条件で撮影が出来たという効果もあった. しかしながら, この遮蔽板間の流れの速度は依然としてマランゴニ対流に近い規模のものであり, 測定の妨げになるものである.

4) N.Yamane et al. , Journal of materials science **40** (2005)2221-2225

5) N.Okubo et al. , Journal of materials science **40** (2005)2245-2249

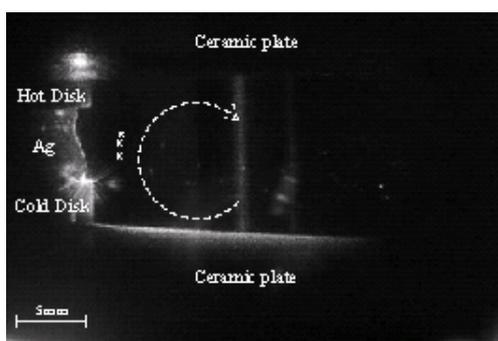


Fig.5 Air flow near the Surface with ceramic plates

以上のことから, この測定手法の開発のためには, 1.粒子像の輝度値を上げること 2.浮力による気流の乱れを軽減すること が求められる. これに関して現在, より高出力のレーザによる可視化と, 装置の均熱化の対策を進めている. これにより気相側のマランゴニ対流が観測できた場合, さらに液柱側の情報を得るための測定手法としての評価, 改良を行っていきたい.

6.まとめ

低プラントル数流体液柱マランゴニの表面流れの情報を気相の流れを可視化して推測する手法の開発を行った. 実験の結果から, 粒子の装置内発光に対する相対輝度不足と, 装置内の気相の浮力による対流が主に測定を困難にしているという問題を抽出した. 今後は高強度の光源と, 装置の均熱化によってこの問題を解決し, 液柱表面流の情報を得る技術を確立していく.

参考文献

- 1) N. Imaishi et al. , *Journal of Crystal Growth*, **230** (2001), 164-171.
- 2) 中村新ら, 日本マイクログラフィティ応用学会誌, **15 No.3**(1995), 179-184.
- 3) 林田均ら, 可視化情報 Vol.23 Suppl. N02 (2003) B231 169-170