

宇宙実験における液柱マランゴニ対流内部流動の3次元計測

矢野大志、西野耕一（横浜国立大学）、河村洋（諏訪東京理科大学）、大西充（宇宙航空研究開発機構）、上野一郎（東京理科大学）、松本聡、依田真一、田中哲夫（宇宙航空研究開発機構）

3-Dimensional Measurement of Marangoni Convection in Liquid Bridge in Space Experiment

Taishi Yano, Koichi Nishino (Yokohama National University), Hiroshi Kawamura (Tokyo University of Science, Suwa), Mitsuru Ohnishi (JAXA), Ichiro Ueno (Tokyo University of Science), Satoshi Matsumoto, Shin-ichi Yoda, Tetsuo Tanaka (JAXA)

Abstract: Marangoni Experiment in Space (MEIS) has been conducted in International Space Station in order to clarify the transition process of Marangoni Convection in liquid bridge. The use of microgravity allows us to generate a long liquid bridge, 30mm in diameter, up to 60mm in length. Several flow visualization techniques have been applied in MEIS, and 3-D PTV was used to reveal highly three-dimensional flow patterns that appear after the transition. Conventional 3-D PTV and multi-frame particle tracking were combined to obtain better understanding of unsteady, 3-D flow fields in oscillatory state. As the result, it was observed that the flow patterns change from a 2-D axisymmetric steady flow to a 3-D non-axisymmetric unsteady flow, when the temperature difference exceeds the critical value.

Kew Words: MEIS, Marangoni convection, 3-D PTV, Transition process

1. 研究背景

近年、科学技術が発展する中で宇宙環境を利用した研究・開発が数多く行われている。その中には新素材の開発に関する研究もあり、半導体などにも使われる単結晶の製造法であるフローティングゾーン法（FZ法）もその一つである。FZ法では微小重力環境の特性を生かすことで、製造された単結晶が原料の種結晶とのみ接触するため、不純物の少ない高純度の単結晶製造が可能である。しかし、ここで問題となったのがマランゴニ対流（Marangoni convection）の顕在化である。FZ法では原材料となるロッドをリングヒーターにより加熱融解し徐々に凝固させていくことで単結晶を製造するが、その際に融解部分と凝固部分で温度差が生じる。地上では重力による影響が大きいため密度差対流が支配的であるのに対して、微小重力環境ではこれらが抑制されるため、温度差による表面張力差を駆動力とするマランゴニ対流の影響が非常に大きなものとなる。さらにマランゴニ対流は温度差がある臨界値を境に二次元的な定常流から三次元的な振動流あるいはカオス的な乱流へと遷移することが知られており、これらが単結晶の品質に影響を及ぼす。これらの遷移メカニズムはいまだ解明されておらず、その解明を目的として始まったのが、MEIS宇宙実験である。本研究では2009年7～8月に行われたMEIS IIにおける3-D PTVによる液柱マランゴニ対流内部流動の計測を行った。MEIS IIでは、高アスペクト比において軸方向の振動モードの存在が指摘されており、その意味でも内部流動を計測できる3-D PTVによる解析は大きな意味を持つと言える。

2. 3-D PTVによる解析

MEIS宇宙実験ではFZ法の一部を模擬したHalf-Zone(HZ) liquid bridgeを用いた実験を行っている。この方法では、二つのディスク間にシリコンオイルを流し込んで液柱を形成し、上下ディスク間に温度差を与えることでマランゴニ対流を発生させている。加熱部のディスクはサファイアでできており、これを通して3台のCCDカメラで液柱を撮影、そのデータを3-D PTV解析に用いる。

3-D PTVによる解析は以下のような手順で進められる。

- 1.) カメラキャリブレーション
- 2.) 粒子追跡
- 3.) 三次元再構築

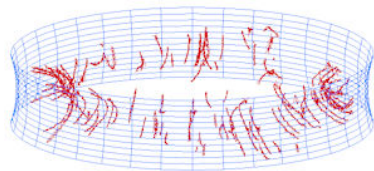
3. 解析結果

現在、いくつかの条件について3-D PTV解析が終了しており、それらの結果を以下に示す。

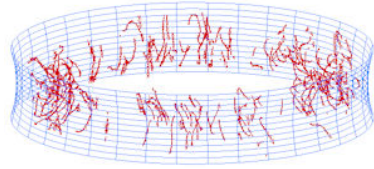
- 1.) Ar=0.2における解析

Table1 Experimental conditions

Aspect ratio	0.2
Volume ratio	0.95
Flow pattern	Oscillatory Flow
Mode number	Mode4 Pulsation →Mode4 Rotation
Temperature difference	23.5 [K]→25.5 [k]
Oscillatory cycle	6 [second]



Pulsation mode ($\Delta T=23.5[K]$)



Rotation mode ($\Delta T=25.5[K]$)

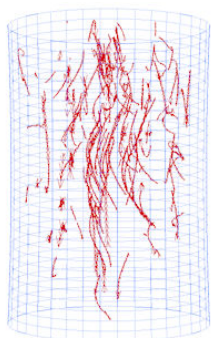
Fig.1 3-D PTV Results ($Ar=0.2$)

それぞれの解析結果は6秒間におけるものである。Pulsation においては振動流遷移直後で温度差があまり大きくないため周方向の速度成分は小さく、かなり定常流に近い。しかし昇温により Rotation モードに移行すると周方向の速度成分も大きくなり、流れ場の乱れが目立つ。

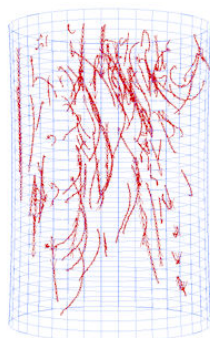
2.) $Ar=1.5$ における解析

Table2 Experimental conditions

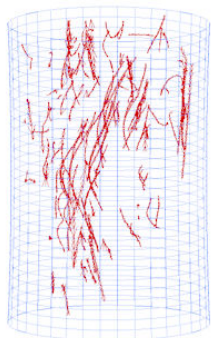
Aspect ratio	1.5
Volume ratio	0.95
Flow pattern	Oscillatory Flow
Mode number	Mode2 Pulsation
Temperature difference	11.2 [K]
Oscillatory cycle	30 [second]



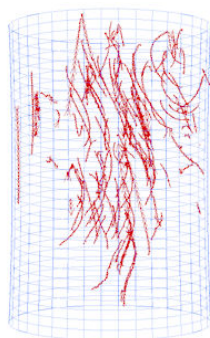
Time = 0~15[sec]



Time = 15~30[sec]



Time = 30~45[sec]



Time = 45~60[sec]

Fig.2 3-D PTV Results ($Ar=1.5$)

この流れは臨界温度差からさらに約 $7.5^{\circ}C$ 昇温し、振動流が十分に発達した後のものである。上の解析結果より、マランゴニ対流が周期約 30 秒で半径方向に対して振動していることが良くわかる。また軸方向に対して、流れが波打っているような動きも観測できる。これは ME I S II において指摘された軸方向の振動モードを示唆している可能性がある。

4. 結論

ME I S 宇宙実験において、3-D PTV による解析で液柱マランゴニ対流の内部流動を観測することに成功した。解析結果から振動流において流れが半径方向に振動していることがわかった。また高アスペクトの液柱においては軸方向に流れが波打つのが見られ、これは軸方向の振動モード数を示唆している可能性があり、今後も調査が必要である。

謝辞

本研究は、きぼう船内実験装置を利用するテーマとして進められたものであり、実験にあたり協力していただいた関連組織、研究室の皆様に深く感謝致します。

参考文献

- Nishimura M, Ueno I, Nishino K, Kawamura H (2005) 3D PTV measurement of oscillatory thermocapillary convection in half-zone liquid bridge, *Experiments in Fluids*, 38:285-290
- S. J. Beak, S. J. Lee (1996) A new two-frame particle tracking algorithm using match probability, *Experiments in Fluids*, 22:23-32
- 西野耕一、鳥居薫、山根徹 (1992) 3次元 PTV のカメラ校正, 日本機学会流体力学部門講演資料
- 可視化情報学会 (2002) PIV ハンドブック, 165-190