

# 銀融液ハーフゾーン液柱におけるマランゴニ対流の実験研究

永淵圭介<sup>1</sup>, 山根規義<sup>1</sup>, 白鳥英<sup>1</sup>, 小澤俊平<sup>2</sup>, 日比谷孟俊<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> 東京都立科学技術大学, <sup>2</sup> 首都大学東京

## Experimental study on Marangoni flow in half-zone liquid bridge of silver melt

Keisuke Nagafuchi<sup>1</sup>, Noriyoshi Yamane<sup>1</sup>, Suguru Shiratori<sup>1</sup>, Shumpei Ozawa<sup>2</sup>  
and Taketoshi Hibiya<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Tokyo Metropolitan Institute of Technology, <sup>2</sup>Tokyo Metropolitan University  
6-6 Asahigaoka Hino Tokyo 191-0065

E-Mail: keisuke@astan1.tmit.ac.jp

Abstract: The experimental study on Marangoni flow in half-zone liquid bridge of silver melt was carried out. Use of silver melt as a representative of low-Prandtl number fluid has the following merits; It is easy to lower the Marangoni number due to its thermophysical property. Solubility of oxygen in silver melt is sufficiently high and an oxide film is not formed at the melt surface under the atmospheric condition. Using a molten silver bridge, the Marangoni number of as small as  $Ma = 160$  was obtained and an oscillatory flow with frequency of  $f = 0.26$  Hz was observed.

Key words: Marangoni, half-zone, low Prandtl number fluid,

### 1. 緒言

液体自由表面に温度差があると、表面張力の不均一によって自由表面上にせん断力が発生し、流体内にマランゴニ対流と呼ばれる流れを引き起こす。マランゴニ対流は微小重力下において顕在化する。振動流となったマランゴニ対流が結晶成長における不純物偏生成の要因となることが明らかとなつてから<sup>1)</sup>、現象解明が求められている。マランゴニ対流の研究はハーフゾーン液柱と呼ばれる一方向温度勾配をもったモデルによって多く行われてきた。しかしながら低プラントル数流体( $Pr \sim 0.01$ )におけるマランゴニ対流の実験研究は、数値計算による研究<sup>2)</sup>に比べ詳細な報告例が少なく、現象解明のためには数値計算と実験の相互確認が必要である。特に数値シミュレーションにおいて詳細に報告されているマランゴニ数  $Ma$  の低い領域( $Ma \sim$  第2臨界値  $Ma_{c2}$  付近)での実験研究の報告例は少ない<sup>3)</sup>。実験的に低  $Ma$  領域の流れを実現するためには、高温、酸化、不透明、上下間温度差コントロールなどといった様々な困難な課題を伴う。そこで、これらの困難さを軽減する特徴を持った銀融液を用いた実験を提案し、実験研究を行っている。本報告ではその実験研究の進行状況について報告する。

### 2. 作動流体としての銀の特徴

マランゴニ対流の実験では、対流の駆動力となる液柱自由表面が清浄である必要がある。ところが、熔融金属や半導体などの低プラントル数流体は酸化膜が形成され易く、マランゴニ対流を妨げてしまうことがある。そのため、実験には雰囲気細心の注意を払う必要がある。銀融液を作動流体に用いた

場合では、酸化物  $Ag_2O$  は約 430K から  $Ag$  と  $O_2$  に分解し、また、 $AgO$  は約 370K から分解するという性質をもつため、液柱を形成した際に表面に酸化膜が形成されないという利点をもつ。さらに、その物性値<sup>4)</sup>から、実験報告例の少ない低  $Ma$  領域の流れを実現させやすいという利点がある。シリコン<sup>5)</sup>、やスズ<sup>6)</sup>の例と比較すると、半径 5mm、液柱高さ 5mm の条件において  $Ma=50$  とするには、Table.1 に示すように、液柱上下間温度差はシリコンの場合には 0.34K、スズでは 3.1K であるのに対し、銀では 16K と温度差を比較的大きく取ることができるため、

Table 1 Temperature difference between top and bottom of liquid bridge with a radius of 5mm and a height of 5mm as a function of  $Ma$  among Si, Sn and Ag.

Ma	Temperature difference between top and bottom of liquid bridge (K)		
	Si	Sn	Ag
10	0.068	0.62	3.2
50	0.34	3.1	16

Table 2 Variation of  $Ma$  number as a function of temperature increment between top and bottom of liquid bridge with a radius of 5mm and a height of 5mm among Si, Sn and Ag.

Temperature increment	Variation of $Ma$ number		
	Si	Sn	Ag
1.0	150	16	3.1
5.0	740	80	16

温度コントロールが容易である。さらに、Table.2 に示すように温度差の変化に伴う  $Ma$  の変化においても銀は有利であり、上下温度差 1K の変化で、シリコンでは  $Ma$  が 150 上昇するのにに対し、銀では 3.1 の上昇にとどまる。この特徴は低  $Ma$  領域を狙った実験を行う上で上下間温度差コントロールの困難さを軽減する。

### 3. 実験

実験装置概略図を Fig.1 に示す。6N アルゴン雰囲気中に置換したチャンパー内において、PBN ヒーターにて銀試料を融解し半径 5mm の液柱を形成した。銀は純度 99.99% の丸棒から切り出したものを、アルミ容器内に満たした炭酸水素ナトリウム水溶液中に入れ、空気中の微量な硫化水素と反応して生成する硫化銀を、電解作用を利用して除去した。液柱形成には融液との濡れ性が良い材料のロッドで液柱を保持することが必要であり、本実験では銀融液と濡れ性の良い白金製の 1mm 厚のディスクを埋め込んだアルミナ製ロッド間に液柱を形成した。温度測定は 2 色放射温度計にて液柱中心の表面温度振動を測定し、ロッド内を通した熱電対を上下白金ディスクに接しさせて上下間温度差を測定した。

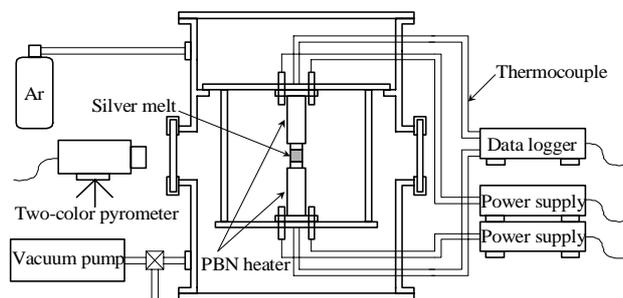


Fig. 1 Experimental setup.

### 4. 結果と考察

形成した銀液柱の様子を Fig.2 に示す。液柱形成初期には、表面には酸化膜の存在が認められたが、これは、時間の経過に伴い消失した。酸化膜が消失し、熔融銀の自由表面が現れると、放射温度計にて測定している融液表面温度は、単一周期に近い振動を示すことが観測された。液柱半径  $a=5\text{mm}$ 、高さ  $h=5\text{mm}$ 、アスペクト比  $As=1.0$  ( $As=h/a$ ) において観測された融液表面温度振動の結果を Fig. 3 に示す。このときの上下間温度差は  $\Delta T=52\text{K}$ 、 $Ma$  に換算すると  $Ma=160$  であった。また、このときの温度振動のメインピークは、Fig.4 に示すフーリエ変換の結果に示すように、0.26Hz であった。低  $Pr$  での数値計算からの第二臨界については、Imaishi ら<sup>2)</sup>により  $Pr=0.01$ 、 $As=1.0$ 、において  $Re_{c2}=6650$  ( $Ma_{c2}=66.5$ )、 $\omega_c=76.5$  と報告されている。これと比較すると、本研究での条

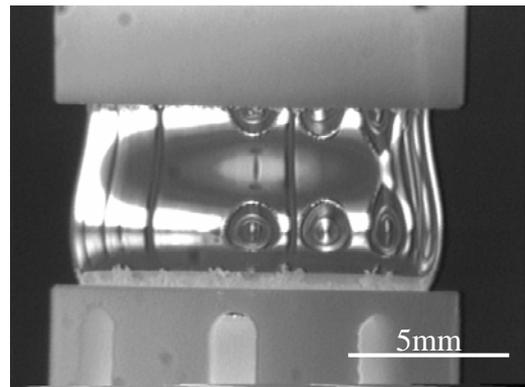


Fig. 2 Half-zone liquid bridge of silver melt.

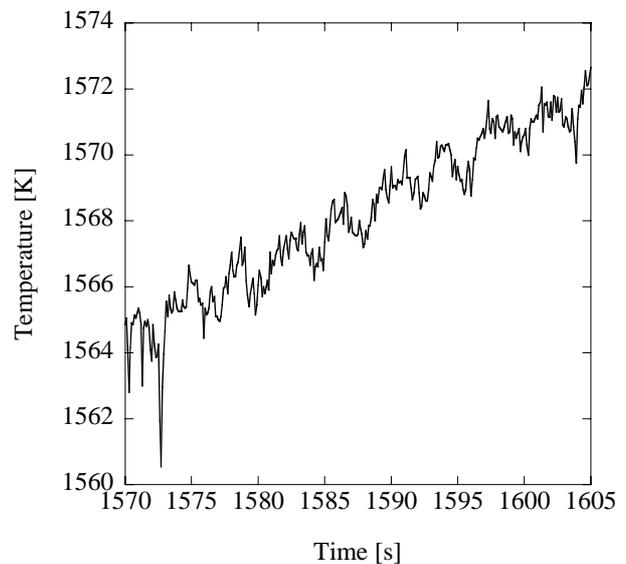


Fig. 3 Temperature oscillation measured by Two-color pyrometer.

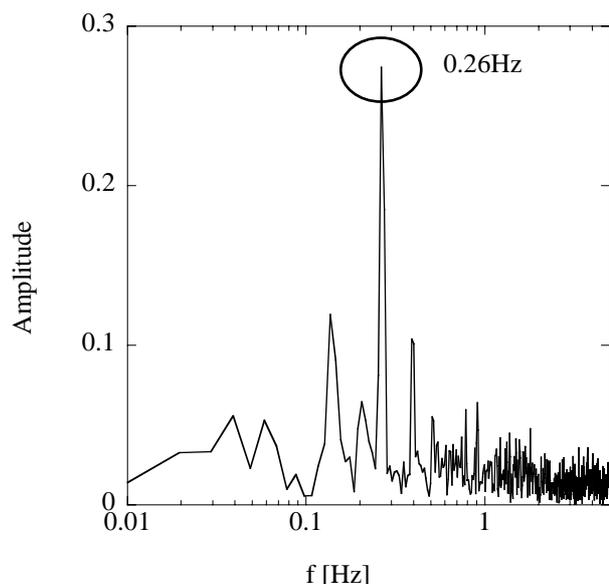


Fig. 4 Frequency of temperature oscillation corresponding to Fig. 3 by Fast Fourier Transformation.

件は  $Ma = 2.4 \times Ma_{c2}$  程度であったことになる。周波数については Imaishi<sup>2)</sup>らの結果を銀の物性値 ( $\sigma = 1.6 \times 10^{-4} \text{ N/m} \cdot \text{K}$ ,  $\mu = 3.88 \times 10^{-3} \text{ Pa} \cdot \text{s}$ ,  $\nu = 4.15 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ ,  $Pr = 6.28 \times 10^{-3}$ )で有次元化すると  $f_c = 0.20 \text{ Hz}$  となり、本研究で観測された  $0.26 \text{ Hz}$  と振動流遷移後の周波数としてよく一致する。

## 5. まとめ

銀融液を用いた低プラントル数流体ハーフゾーン液柱におけるマランゴニ対流研究の可能性を探った。  $As = 1.0$  の液柱において  $Ma = 160$  で  $f = 0.26 \text{ Hz}$  の表面温度振動が観測され、その振動周波数は既往の研究における数値計算と良く一致した結果であった。

## 参考文献

- 1) A.Eyer, H.Leiste, and R.Nitsche: Proc.5th European Symposium on Materials Sciences under Microgravity, Schloß Elmau, ESA SP-222 (1984) 173.
- 2) N. Imaishi, S. Yasuhiro, Y. Akiyama, S. Yoda, J. Crystal Growth, 230 (2001) 164-171.
- 3) 佐々木 宏衛, 松本 聡, 林田 均, 依田 眞一, 依田 英里香, 今石 宣之, 茂木 徹一, 第 42 回日本伝熱シンポジウム講演論文集 (2005 - 6) 373.
- 4) 金属データブック, 改訂 3 版, 日本金属学会編, 丸善, 1993.
- 5) N. Yamane, K. Nagafuchi, S. Shiratori, H. Okubo, N. Sato, T. Hibiya, J. Materials Science 40 (2005) 2221-2225.
- 6) K. Takagi, M Otaka, H. Natsui, T. Arai, S. Yoda, Z. Yuan, K. Mukai, S. Yasuhiro, N. Imaishi, J. Crystal Growth 233 (2001) 399-407.