

## 温度差マランゴニ効果によって生起する液柱内粒子集合現象 — 液柱形状の影響 —

安部 裕喜子 (東理大院), 上野 一郎 (東理大), 河村 洋 (東理大)

### Dynamic Particle Accumulation Structure (PAS) due to Thermocapillary Effect in Half-Zone Liquid Bridge – Effect of Liquid-Bridge Shape –

Yukiko ABE<sup>1</sup>, Ichiro UENO<sup>2</sup>, Hiroshi KAWAMURA<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Div. Mech. Eng., Sch. Sci. & Tech., Tokyo University of Science

<sup>2</sup>Dept. Mech. Eng., Fac. Sci. & Tech., Tokyo University of Science

We focus on the dynamic particle accumulation structure (PAS) due to thermocapillary effect in a half-zone liquid bridge. In present study, we analyzed effects of liquid-bridge shape described by its volume ratio upon shape of the PAS itself and motion of particle on the PAS by tracking particles in the liquid bridge and by measuring temperature on the free surface. It is found that the variation of the liquid-bridge volume ratio leads to a significant variation of the temperature gradient on the free surface, which results in difference of the shape of the PAS. By considering the particle motion as simply modeled motion, we explained that the variation of the PAS shape is determined by drastic change of the axial velocity of the particle.

#### 1. 緒言

自由表面上に温度差が生じると、それに起因した表面張力差を駆動力とした流れが発生する。この対流は温度差マランゴニ対流と呼ばれており、これまでに様々な系において研究が行われてきた。

本研究で対象とする系はハーフゾーン (以下 HZ) 液柱である。これは 2 本の円柱ロッド間に液柱を形成し、両端に温度差を付加したものであり、対流は高温側から低温側に向かって発生する。HZ 液柱では、温度差がある臨界点に達すると、対流場が二次元定常流から三次元非定常振動流に遷移することが知られている<sup>[1]</sup>。さらに温度差を付加すると、ある条件で液柱内のトレーサ粒子が集合し、周方向に波数  $m$  を有する紐状の三次元構造を形成する。(図 1) この現象は“Particle Accumulation Structure (PAS)”と名付けられた<sup>[2]</sup>。PAS に関しては従来の研究で、三次元構造<sup>[3][4]</sup>や発生条件<sup>[5]</sup>などが明らかにされている。

本研究の着目点は、PAS に対する液柱形状の影響である。従来の研究により、液柱形状が振動流への臨界値に大きな影響を与えることが実験的に明らかにされており<sup>[6]</sup>、数値計算も行われている<sup>[7]</sup>。しかし、PAS への影響に関してはほとんど知見が得られていない。そこで、本研究では液柱形状の PAS を形成する粒子の運動に対する影響を明らかにすることを目的とし解析を行った。

著者らのグループは 2008 年以降、国際宇宙ステーション上の日本の実験施設 (JEM) において本テーマの宇宙実験を行う。よって、本研究はその地上予備実験としての位置付けもある。宇宙実験による成果により、将来は宇宙における物質輸送技術などに応用できることが期待される。

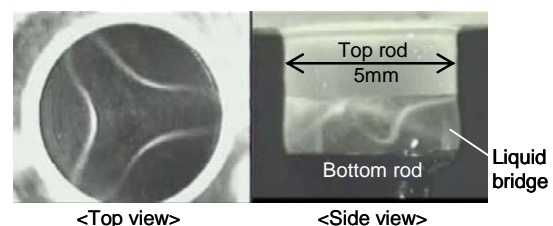


Fig. 1 SL-PAS of azimuthal wave number of 3 in HZ liquid bridge of 2 cSt silicone oil.

#### 2. 実験

実験装置図を図 2 に示す。試験流体には 2 cSt のシリコンオイル ( $\text{Pr} = 28$ ,  $25^\circ\text{C}$ )、トレーサ粒子には公称直径  $10\mu\text{m}$  の銀コーティング中空ガラス (S-HGS) 及び  $30\mu\text{m}$  の金コーティング架橋アクリルを用いた。

液柱は同軸円柱の 2 本のロッド間に形成する。ロッドの半径  $R = 2.5\text{ mm}$ 、液柱の高さ  $H = 1.6\text{ mm}$  とし、液柱のアスペクト比  $\Gamma (= H/R)$  は 0.64 に固定した。このアスペクト比では、対流場は  $m = 3$  の構造を呈する<sup>[8]</sup>。下部ロッドにはアルミ、上部ロッドにはサファイアを用い、液柱側面と上部から同時に観察を行った。上部ロッドはヒータで加熱、下部ロッドは冷却水で冷却して温度差を付加し、両端の温度は熱電対で測定した。また、液柱表面の温度を IR カメラを用いて測定した。

液柱内のトレーサ粒子の運動は、三次元粒子追跡法 (3-D PTV) を用いて追跡、再構築を行った。対象の液柱が小さいため、液柱の上部にビームスプリッタを配置することにより、2 台のカメラを用いた三次元計測を可能とした<sup>[4]</sup>。粒子画像は、高速度カメラを用いて 250fps で取得した。

温度差マランゴニ対流は、マランゴニ数  $Ma = \sigma_T \Delta T H / \rho \nu \kappa$  によってその強度が表される。ここで、 $\sigma_T$  : 表面張力温度係数、 $\Delta T$  : 液柱両端面温度差、 $\rho$  : 密度、 $\nu$  : 動粘度、 $\kappa$  : 温度拡散率である。本実験では  $Ma = 4 \times 10^4$  で一定とした。

液柱の形状は体積比  $V/V_0$  を用いて表す。 $V_0$  はロッド半径  $R$ 、液柱高さ  $H$  により決定する真円柱の体積 ( $V_0 = \pi R^2 H$ ) であり、 $V$  は液柱自身の体積である。本実験では、 $0.8 < V/V_0 < 1.2$  とし、 $m = 3$  の PAS が発生する範囲を対象とした。

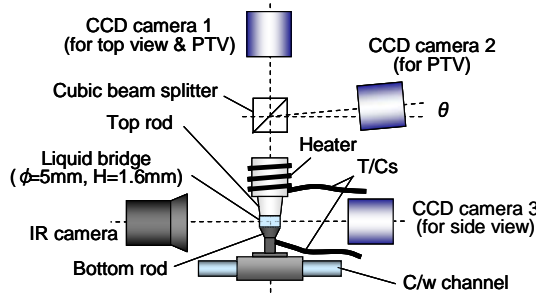


Fig. 2 Experimental apparatus

### 3. 結果と考察

液柱内に形成された PAS の写真を図 3 に示す。上面図中の点線で囲った部分は PAS の“羽根”と呼ばれる部分である。前述の通り対象は  $m = 3$  の対流場であるので、3 枚の羽根が観察される。この羽根の形状に注目すべき差異が見られた。体積比が大きい、すなわち液柱が太っているほど羽根の幅が狭くなっている。これらの PAS 上に存在する 1 粒子をそれぞれ追跡し、運動を再構築した結果を図 4 に示す。ここで、(c)  $V/V_0 = 1.1$  の場合の上面図の表面近傍の粒子と鳥瞰図が欠落しているのは、凸型の液柱表面で粒子がカメラの死角に入り観察が困難であったためである。図 4 では、PAS の“羽根”に対応する粒子軌跡における“羽根”があり、PAS と同様、体積比の増加に伴い幅が減少している。

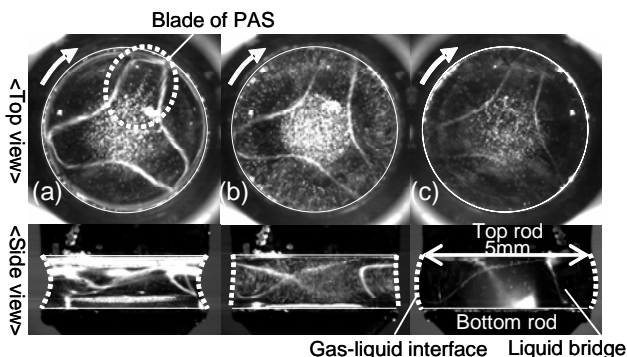


Fig. 3 Typical examples of formed PAS in the case of (a)  $V/V_0 \approx 0.9$  (b)  $V/V_0 \approx 1.0$  (c)  $V/V_0 \approx 1.1$  Arrows in the top view indicate direction of the PAS rotation. (PAS rotates either clockwise or counterclockwise at the same possibility).

さらに、図 4 中の点線で囲った箇所、すなわち粒子が表面近傍を降下する箇所 (図 4、鳥瞰図) と表面を降下後、液柱内部に浸入する箇所 (図 4、上面図) における粒子の速度 (図 4 では粒子の点と点の間隔) を図 5 に示す。半径方向速度、軸方向速度共に絶対値の最大値 (図 5 中の矢印の点) が体積比の増加に伴って増加していることが分かる。

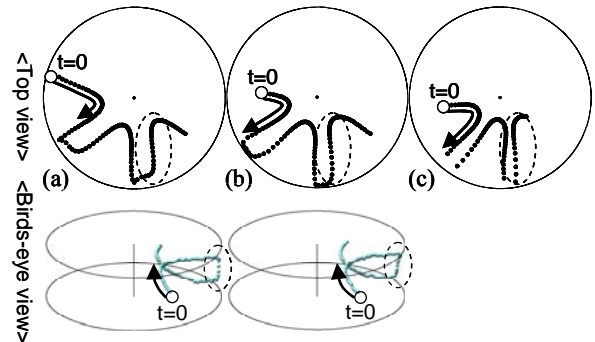


Fig. 4 Reconstructed motion of a particle on the PAS at (a)  $V/V_0 \approx 0.9$  (b)  $V/V_0 \approx 1.0$  (c)  $V/V_0 \approx 1.1$  (for 1 s in top view, 0.6 s in birds-eye view). Arrows show direction of the particle motion.

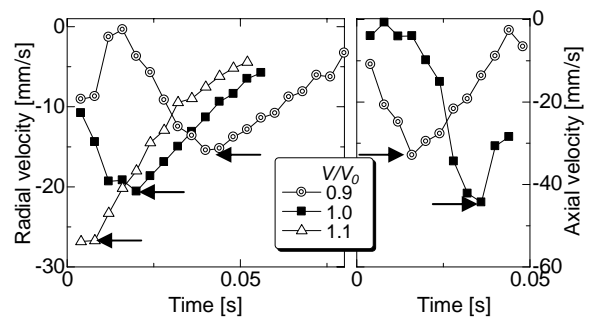


Fig. 5 Time series of particle velocities in radial direction in return flow (left), and the one in axial direction near free surface (right). Arrows indicate maximum absolute velocity. Velocities in the region of  $0.36 < r/R < 0.92$  for left, and  $0.18 < z/H < 0.69$  for right are plotted ( $r = 0$ : center of the liquid bridge,  $z = 0$ : bottom end surface).

IR カメラを用いて計測した液柱表面上の温度分布を図 6 に示す。周方向に伝播する温度波において相対的に低温な領域 (図 6 中の白線で囲った領域) に着目すると、温度分布に違いが見られる。図 7 にその低温領域における軸方向の温度分布を示す。特に上部ロッド端面近傍では、体積比が大きいほど軸方向の温度勾配が急になっていることが分かる。PAS 上の粒子は軸方向の温度勾配によるマランゴニ効果により加速されるため、この温度勾配の差異により図 5 で前述した粒子の速度の変化が生じる。

ここで、PAS 上の粒子の運動と PAS の関係について述べる。図 8 (a) は Tanaka et al<sup>[5]</sup> により示された関係図を模擬したものであり、かつらむきにした液

柱表面の一部を表している。  $t_i$  で示した実線及び点線は  $t = t_i$  における PAS を表しており、時間間隔  $\Delta t = t_{i+1} - t_i$  は一定である。すなわちこれらの線の水平間隔は PAS の回転速度に比例する。また、丸で示したのは PAS 上に存在し表面近傍を低温ロッド側に降下する任意の粒子である。図中に矢印で示した部分が PAS の羽根の幅に相当する。粒子の運動を平均化して考えると、この PAS の羽根の幅  $\Delta W$  は次式で表すことができる。

$$\Delta W = \frac{V_A + R|\omega_{PAS}|}{|V_Z|} \Delta Z \quad (1)$$

ここで、 $V_A$  : 粒子の周方向速度、 $\omega_{PAS}$  : PAS の回転速度、 $V_Z$  : 粒子の軸方向速度、 $\Delta Z$  : PAS の羽根の高さ (= 粒子の軸方向移動量) であり、粒子の周方向移動方向を正方向としている。筆者らは、羽根の幅を決定する上記の 4 つのパラメータに対する体積比の影響を調査した。その結果、ある一定の体積比変化に対する粒子の軸方向速度の変化率が他の 3 つよりも相対的に大きく、支配的なパラメータであることが分かった。よって、式(1)で粒子の軸方向速度のみを考慮すると、PAS 羽根の幅は軸方向速度に反比例することが分かる。つまり、図 8 に示すように、(a) の場合よりも軸方向速度がより小さい（体積比が小さい）場合、PAS の羽根の幅は広くなり（図 8 (b)）、逆に軸方向速度がより大きい（体積比が大きい）場合、その幅は狭くなると言える。

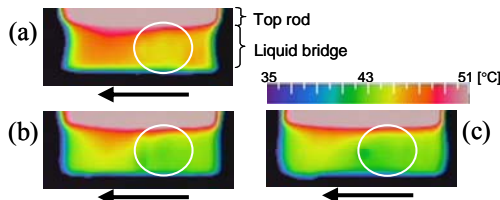


Fig. 6 Surface temperature distribution of the liquid bridge observed from side by IR camera (a)  $V/V_0 \approx 0.9$  (b)  $V/V_0 \approx 1.0$  (c)  $V/V_0 \approx 1.1$ . Arrows indicate propagating direction of the thermal wave.

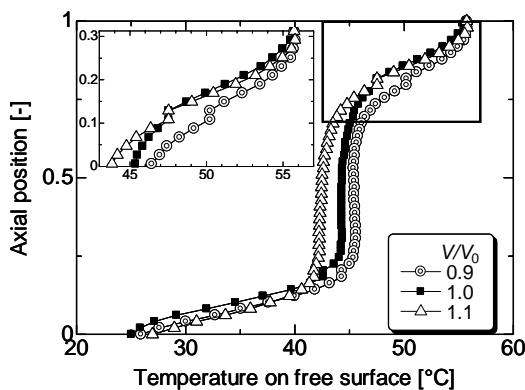


Fig. 7 Surface temperature distribution in the axial direction on the relatively cold region in the cases of three different volume ratio  $V/V_0$  (Axial position = 1: top end surface).

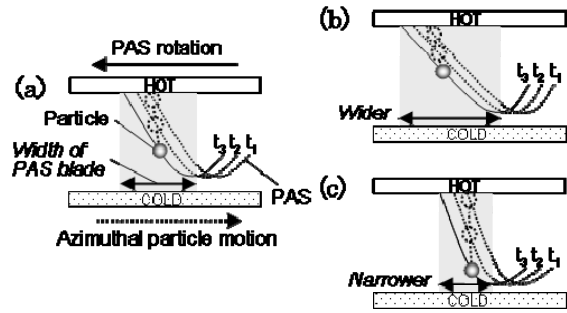


Fig. 8 Spatio-temporal correlation between the PAS itself and motion of a particle on the PAS from unrolled side view of liquid bridge; (a) base condition<sup>[5]</sup>, (b) lower axial velocity case and (c) higher axial velocity case. Note that directions of rotation of PAS itself and azimuthal particle motion are opposite.

## 謝辞

本実験の実施にあたり、西野耕一教授（横浜国立大学）に多大なご支援を頂いた。記して謝意を表す。

## 参考文献

- [1] e.g., Ueno, I., Tanaka, S., & Kawamura, H., 2003, “Chaotic behavior of Thermocapillary-Driven Flows in a Half-Zone Liquid Bridge,” *Phys. Fluids*, 15, 408.
- [2] Schwabe, D., Hintz, P., & Frank, S., 1996, “New features of thermocapillary convection in floating zones revealed by tracer particle accumulation structures (PAS),” *Microgravity Sci. Technol.*, 9, 163.
- [3] Tanaka, S., Ueno, I., & Kawamura, H., 2000, “Dynamic particle accumulation structure in half-zone liquid bridge - Part I: Experimental study,” *J. Jpn. Soc. Microgravity Appl.*, 17, 111.
- [4] Nishimura, M., Ueno, I., Nishino, K., & Kawamura, H., 2005, “3D PTV measurement of oscillatory thermocapillary convection in half-zone liquid bridge,” *Exp. Fluids*, 38, 285.
- [5] Tanaka, S., Kawamura, H., and Ueno, I., 2006, “Flow structure and dynamic particle accumulation in thermocapillary convection in a liquid bridge,” *Phys. Fluids*, 18, 067103.
- [6] Hu, W. R., Shu, J. Z., Zhou, R. & Tang, Z. M., 1994, Influence of liquid bridge volume on the onset of oscillation in floating zone convection I. Experiments,” *J. Cyst. Growth*, 142, 379.
- [7] e.g., Nienhuser CH. & Kuhlmann H. C., 2002, “Stability of thermocapillary flows in non-cylindrical liquid bridges,” *J. Fluid Mech.*, 458, 35.
- [8] Kawamura, H., Ono, Y., and Ueno, I., 2001, “Transition and Modal Structure of Oscillatory Marangoni Convection in Liquid Bridge,” *J. Jpn. Soc. of Mech. Eng.*, 67, 1466.