

液柱マランゴニ対流における振動モード —高アスペクト比(Ar)液柱—

札埜圭祐、松岡良祐、西野耕一（横浜国立大学）

Mode of oscillation of thermocapillary convection in long liquid bridge

Keisuke Fudano, Ryosuke Matsuoka, Koichi Nishino (Yokohama National University)

Abstract: Marangoni Experiment in Space (MEIS) has been conducted on the International Space Station. The critical temperature difference, ΔT_c , is measured to understand the instability mechanisms of Marangoni convection in a liquid bridge. The aspect ratio, Ar , which is the ratio of the length to the diameter of liquid bridge, is varied from 0.1 to 2.0. In the present study, a ground experiment has been conducted with a small liquid bridge formed between coaxial disks. Their diameters are chosen to be 1mm in order to form a long liquid bridge in 1g experiment. Ar is varied from 0.5 to 2.2. This small diameter can suppress the natural convection inside the liquid bridge as well as the gravitational deformation of the gas-liquid interface.

Key Words: Marangoni convection, liquid bridge, Aspect ratio, Instability

1. はじめに

MEIS (Marangoni Experiment in Space) によってマランゴニ対流の不安定性に与える液柱アスペクト比 Ar の影響が幅広い Ar に対して測定された。ここで、 Ar は液柱長さ H に対する液柱ロッド直径 D の比である。その宇宙実験結果と対比できる地上実験の結果を得ることを本研究の目的とする。地上で高 Ar 液柱を実現するために直径 1mm の液柱ロッドを用いる。

このような小径液柱を用いる利点として、グラスホフ (Gr) 数が減少し自然対流の影響が抑制されること、またボンド (B) 数が減少し液柱変形が抑制されることがある。しかし、液柱が小さいため、実験及び観察が困難であるということ、および蒸発の影響が増大するという欠点がある。

2. 実験装置及び実験方法

実験装置の概略図を Fig. 1 に示す。実験は常温 (20°C) で行う。液柱はマイクロメータヘッドを取り付けたマイクロシリンジにより形成する。作動流体は 2cSt シリコンオイルである。液柱体積比が 0.95 になるように注入量を調節する。ここで、液柱体積比は液柱の体積を真円柱体積で除したものである。上部ディスクの昇温速度を 1K/min とし、下部ディスクを 20°C になるよう冷却する。振動流遷移点は、熱電対による温度波形と IR カメラによる画像によっ

て判断する。Fig. 2 に本実験で形成された種々の Ar の液柱を示す。

以上の条件より、 $Ar = 0.5 \sim 2.2$ における臨界温度差 ΔT_c と周波数 f を測定した。

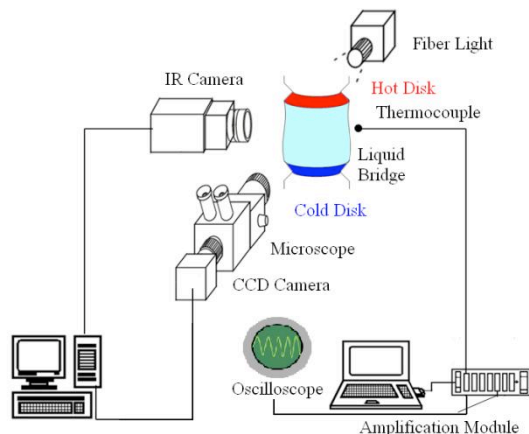
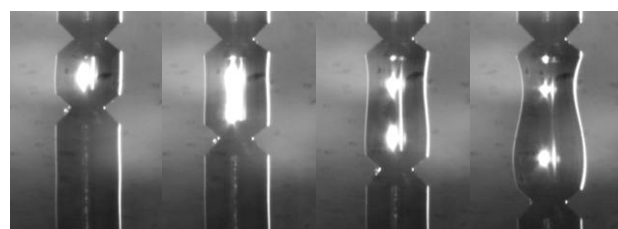


Fig. 1 Experimental set up



$Ar=0.5$ $Ar=1.0$ $Ar=1.5$ $Ar=2.0$

Fig. 2 liquid bridges in 1g experiment

3. 臨界マランゴニ数

臨界マランゴニ数 ($Ma_{c,H}$) を Ar に対してプロットしたグラフを Fig. 3 に示す。ここで、 $Ma_{c,H} = \sigma_T |\Delta T_c H| / (\rho \bar{\nu} \kappa)$ で、 σ_T は表面張力温度係数、 ρ は密度、 κ は熱拡散係数である。また、 $\bar{\nu}$ は上部ディスク温度と下部ディスク温度で定義された二つの動粘性係数の平均値である。本結果は $Ar = 1.0$ と 1.6 で弱い極大値を示し、 $0.75 \leq Ar \leq 1.4$ では MEIS との差異が大きい。一方、 $D = 1.5\text{mm}$ の地上実験 (Kawamura 2009) とは良好に一致する。

"Terrestrial experiment"	"Space experiment"
• Present	• MEIS-1 (2008)
◆ 2cSt ($Pr=28$), $D=1\text{mm}$	○ 5cSt ($Pr=68$), $D=30\text{mm}$
• Matsuoka (2010)	• MEIS-2 (2009)
▲ 2cSt ($Pr=28$), $D=2\text{mm}$	● 5cSt ($Pr=68$), $D=30\text{mm}$
▲ 2cSt ($Pr=28$), $D=4\text{mm}$	• Schwabe (2005)
• Kawamura G. (2009)	○ 2cSt ($Pr=28$), $D=6\text{mm}$
△ 2cSt ($Pr=28$), $D=2\text{mm}$	
▽ n-decane ($Pr=15$), $D=1.5\text{mm}$	"Calculations"
	• Ermakov (2010)
	■ $Pr=68$

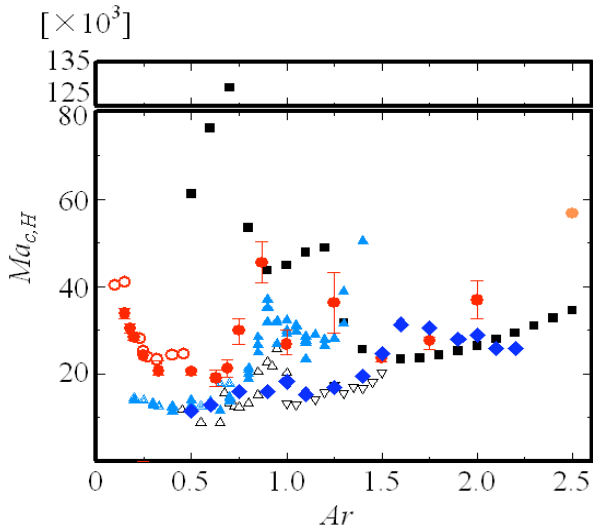


Fig. 3 $Ma_{c,H}$ vs Ar

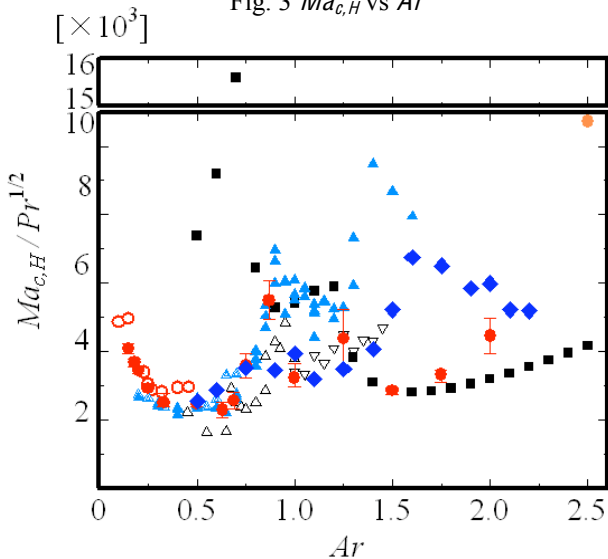


Fig. 4 $Ma_{c,H}/Pr^{1/2}$ vs Ar

プラントル数の影響を考慮した $Ma_{c,H}/Pr^{1/2}$ のグラフを Fig. 4 に示す。 $Ar \leq 0.75$ では全ての実験結果が概ね一致する。 $Ar \geq 1.25$ では地上実験 (小径液柱) と宇宙実験 (大径液柱) に定性的な差異が見られる。

4. 無次元周波数

無次元周波数 $F = f \cdot H^2 / (\kappa \cdot Ma_{c,H}^{1/2})$ を Ar に対してプロットしたグラフを Fig. 5 に示す。本結果は $Ar = 1.25$ 付近で、不連続な減少を示す。これは、他の地上実験や MEIS と一致している。本実験では、この不連続な減少に伴って振動モードが Standing wave から Rotating wave に変化する様子が観察された。一方、MEIS では無次元周波数の変化に依らず Standing wave が観察されており、本実験結果と異なる。

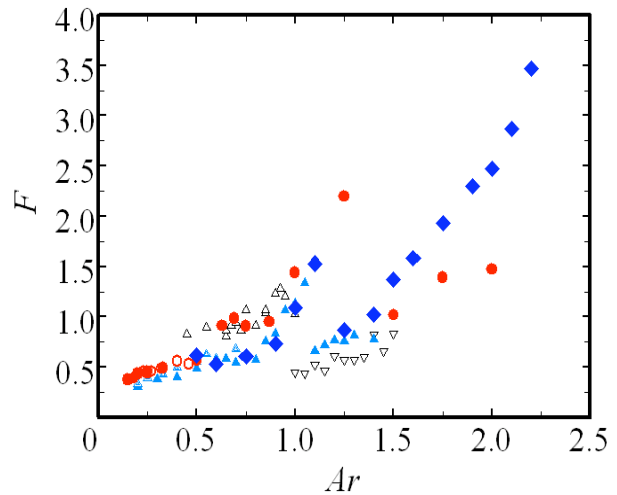


Fig. 5 Non-dimensional oscillation frequency

参考文献

- 1) Matsuoka, R. et al., Onset of Oscillation of Marangoni Convection in Large Aspect-Ratio Liquid Bridges, 5th Conference of the International Marangoni Association (2010).
- 2) 河村 洋 他 2 名, 液柱内マランゴニ対流における振動流遷移とモード構造, 日本機械学会論文集. B 編, vol.67 (2001), pp.1466-1473.

謝辞

本研究の遂行にあたり科学研究費補助金 (21360101) を受けた。記して謝意を表す。