

液柱マランゴニ対流の不安定性に関する宇宙実験 -MEIS-4: プラントル数の影響-

西野耕一、矢野大志 (横浜国立大学)、河村洋 (諏訪東京理科大学)、上野一郎 (東京理科大学)、松本聡、大西充、桜井誠人 (宇宙航空研究開発機)

Space Experiment on the Instability of Thermocapillary Convection in Large Liquid Bridge -MEIS-4: Effect of Prandtl Number-

Koichi Nishino, Taishi Yano (Yokohama National University), Hiroshi Kawamura (Tokyo University of Science, Suwa), Ichiro Ueno (Tokyo University of Science), Satoshi Matsumoto, Mitsuru Ohnishi, Masato Sakurai (JAXA)

Abstract: The 4th series of microgravity experiments on the thermocapillary convection in liquid bridges, called Marangoni Experiments in Space (MEIS-4), have been carried out in the period from October 26 to December 22, 2010. The effect of Prandtl number of the fluid on the critical condition is examined. MEIS-4 aims at (1) determining critical temperature difference for the onset of oscillatory flow, (2) carrying out the high Marangoni number experiments and (3) clarifying the effect of volume ratio, heating rate, hysteresis and cooled disk temperature. In this paper, some preliminary, but important results from MEIS-4 are given.

Kew Words: MEIS-4, Thermocapillary convection, Oscillatory flow, Prandtl number

1. はじめに

国際宇宙ステーション(ISS)日本実験棟「きぼう」における初の科学実験であるマランゴニ対流実験(Marangoni Experiment in Space: MEIS)の第4シリーズであるMEIS-4が2010年10月26日から12月22日にかけて実施され、計24日間の宇宙実験が行われた。この実験はPI/CIと学生3~5名で構成されるチームが交代で筑波宇宙センターのUOAに詰め、地上からのコマンド送信によってFPEF(Fluid Physics Experiment Facility)を操作することで行われた。

本宇宙実験は、同軸の2つの円形ディスクの間に形成されるシリコンオイル液柱を対象として、ディスク間に温度差を与えることで生じるマランゴニ対流の振動流遷移過程を明らかにすることを目的とするものである。この流れは温度差駆動の表面張力流(Thermocapillary convection)とも呼ばれる。過去2回の宇宙実験(MEIS-1&2)では、いずれも直径30mmのディスクと動粘性係数が5cStのシリコンオイル(プラントル数: $Pr=67.0$)が使用された。MEIS-4では直径50mmのディスクと動粘性係数が20cStのシリコンオイル($Pr=206.8$)を用いて実験が行われた。MEIS-4の実験目的は次の通りである。

- 各アスペクト比における臨界値を決定する
- 高マランゴニ数実験を行う
- ヒステリシスの影響を調べる
- 液柱体積比の影響を調べる
- 加熱速度(Heating rate)の影響を調べる
- 冷却ディスク温度の影響を調べる

ここで、アスペクト比(Ar)は液柱長さをディスク直径で除すことによって得られる無次元数、マランゴニ数($Ma=|\sigma_T|\Delta TH/(\rho\nu\alpha)$)はマランゴニ対流を支配する無次元数、体積比(Vr)はディスクを底面とする直円柱に対するシリコンオイルの充填率を、それぞれ表している。

本稿ではMEIS-4で得られた成果の概要を述べる。

2. MEIS-4の成果概要

MEIS-4では、 $Ar=0.225\sim 1.25$ の広い範囲において臨界値が測定された。今回の実験では、ほぼ全ての条件について、温度差の $\pm 10\%$ 以内の範囲で臨界値を決定することができた。Fig. 1と2は、それぞれ臨界温度差(ΔT_c)と臨界マランゴニ数(Ma_c)を Ar に対してプロットしたものである。Fig. 2では、過去の宇宙実験とMEIS-4の結果は非常に酷似しており、 Ar が小さくなるにつれ Ma_c が増加、また $Ar=0.8\sim 1.0$ で Ma_c がピークになっていることがわかる。

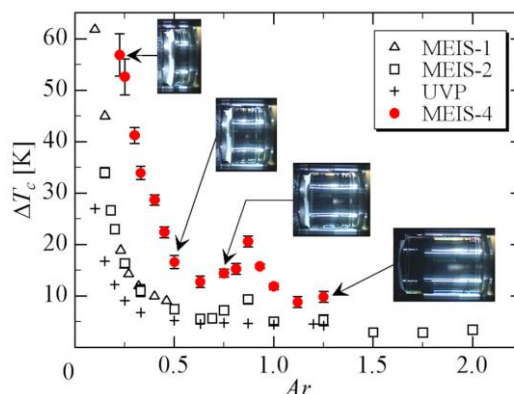


Fig. 1 Critical temperature difference vs. Ar

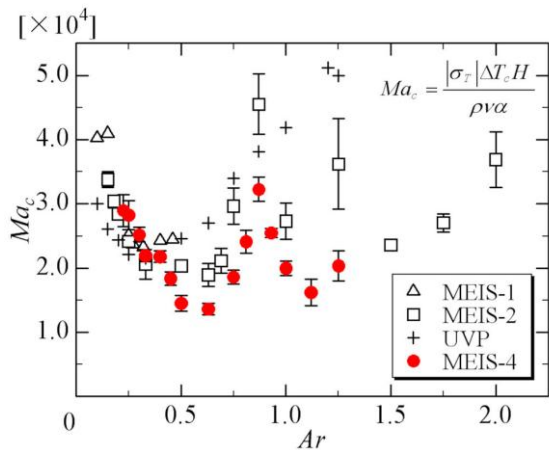


Fig. 2 Critical Marangoni number vs. Ar

Fig. 3 は遷移点における無次元周波数 ($F=2\pi H^2/(Tv)$) をプロットしたグラフである。MEIS-4 ではいくつかの条件において、二つの振動周期が共存する温度波形が確認されたが、MEIS-1&2 の $Ar=1.25$ 付近で見られたような周波数の明確なジャンプは見られなかった。

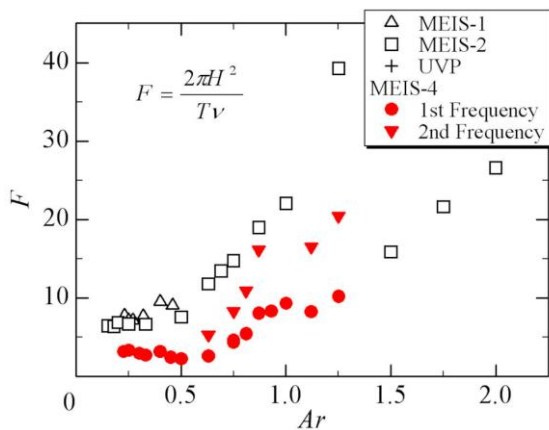


Fig. 3 Dimensionless frequency vs. Ar

Fig. 4 と 5 は $Ar=1.25$ での高 Ma 実験の結果である。Fig. 4 は IR カメラによる表面温度測定結果、Fig. 5 は挿入型熱電対による液柱中央部分における温度変動の測定結果を示している。実験条件は $\Delta T=61.9K$ 、 $Ma=17.2 \times 10^4$ であり、これは臨界値の約 8.4 倍の値である。この条件では振動流はカオス流へと遷移しており、複雑な温度場を形成している。

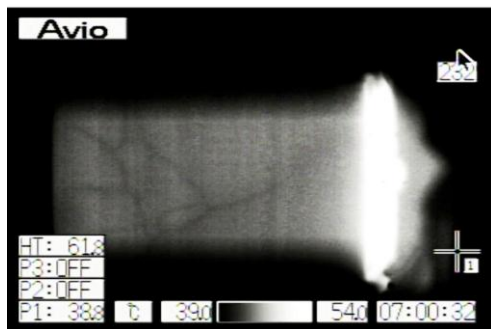


Fig. 4 Enhanced IR image at high Ma experiment ($Ar=1.25$, $\Delta T=61.9K$, $Ma=17.2 \times 10^4$)

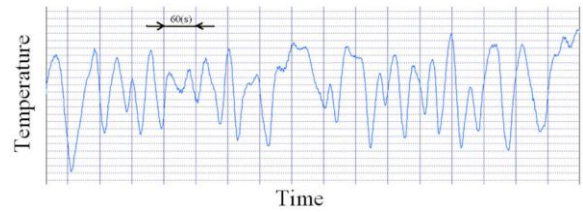


Fig. 5 Temperature variation measured by TC

Fig. 6 は体積比の影響を表したグラフである。 $Vr=0.908 \sim 1.05$ において Ma_c がほぼ一定であることが確認できる。地上実験の結果では、 $Vr=0.9$ 付近で Ma_c が極大となっており、体積比以外の要因を検討する必要があることが示唆される。

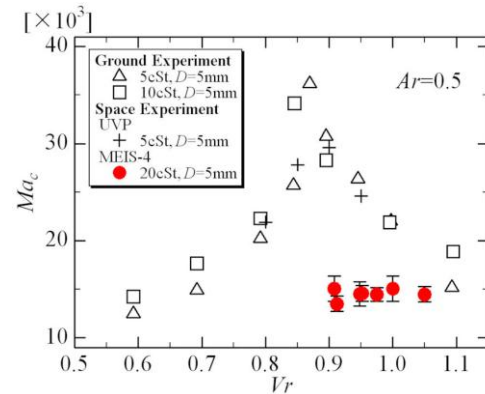


Fig. 6 Critical Marangoni number vs. Vr

また、今回の実験から、加熱速度が振動流遷移の臨界値に与える影響が大きいことがわかった。MEIS ではディスク温度を変更してから定常状態になるまで十分な待ち時間を設けている。これにより、実質 Heating rate=0K/min が実現されており、より正確な臨界値の測定が可能である。

Table 1 と 2 は、それぞれヒステリシス、冷却ディスク温度の影響を示している。この結果から、ヒステリシスの影響は小さく、冷却ディスク温度の影響は大きいことがわかる。

Table 1 Effect of hysteresis

	ΔT_c	Ma_c
Heating	$34.0 \pm 1.25K$	2.20×10^4
Cooling	$33.8 \pm 0.65K$	2.20×10^4

Table 2 Effect of cooled disk temperature (T_c)

T_c	ΔT_c	Ma_c
20°C	$16.7 \pm 1.3K$	1.45×10^4
10°C	$26.3 \pm 2.5K$	2.01×10^4

3. まとめ

2010年10～12月に行われたマランゴニ対流の宇宙実験 (MEIS-4) において、所期の目的を達成する測定結果が得られた。今後は得られたデータの詳細な解析を進める予定である。