

## 「きぼう」マランゴニ対流実験の状況および今後の展開

松本 聡 (JAXA), 依田 眞一 (JAXA), 西野 耕一 (横浜国立大), 河村 洋 (諏訪東京理科大) 上野 一郎 (東京理科大), 大西 充 (JAXA), 桜井 誠人 (JAXA), 川路 正裕 (トロント大) 小宮 敦樹 (東北大)

### Status and outlook of Marangoni experiment on ISS

Satoshi Matsumoto\*, Shinichi Yoda, Koichi Nishino, Hiroshi Kawamura, Ichiro Ueno, Mitsuru Ohnishi, Masato Sakurai, Masahiro Kawaji, Atsuki Komiya

\*JAXA, 2-1-1, Sengen, Tsukuba, Ibaraki 305-8505

E-Mail: matsumoto.satoshi@jaxa.jp

Abstract: JAXA has just started the full-scale space experiment utilizing Japanese Experiment Module, Kibo which is one of major module of the International Space Station (ISS), in 2008. The first memorial science experiment on Kibo was Marangoni Experiment in Space (MEIS). Four experiment themes concerning Marangoni convection is now ongoing. Each theme has several series of experiments, which means the experiment with different diameter of a liquid bridge, different viscosity of a working fluid, different kind of tracer particles and so on. JAXA Marangoni project has twelve experiment series in total. Marangoni experiment on Kibo will continue until 2016. In this report, the current status and outlook of these experiments are described.

*Key words:* Marangoni convection, Space experiment, International space station, Kibo

#### 1. はじめに

国際宇宙ステーション (ISS) の特長の1つとして、長時間微小重力環境があげられる。そのメリットを活かして様々な宇宙実験が行われている。ISS の日本モジュールである「きぼう」において実施中あるいは今後実施が計画されているマランゴニ対流観測実験は、以下の4つの研究課題である。

- (1) 「マランゴニ対流におけるカオス・乱流とその遷移過程 (MEIS)」代表研究者：河村 洋 (東京理科大学) / 西野耕一 (横浜国立大学)
- (2) 「マランゴニ対流における時空間構造」代表研究者：依田眞一 (宇宙航空研究開発機構)
- (3) 「高プラントル数流体のマランゴニ振動流遷移における液柱界面の動的変形効果の実験的評価」代表研究者：松本 聡 (宇宙航空研究開発機構) / 鴨谷康弘 (ケースウェスタンリザーブ大学)
- (4) 「温度差表面張力流における不安定性の界面鋭敏性と制御」代表研究者：松本 聡 (宇宙航空研究開発機構)

「きぼう」での宇宙実験機会を最大限活かし、成果を得るために、上記4テーマを日本におけるマランゴニ対流研究の一連の課題として位置づけ、体系的にデータ取得を行うことを進めている。

本稿では、「きぼう」で実施中のマランゴニ対流実験について説明した後、これまでに得られた成果および今後の展望について述べる。

#### 2. 宇宙実験

##### 2.1 宇宙実験の目的

「きぼう」でのマランゴニ対流実験では、微小重力を利用して液柱内のマランゴニ対流を観測し、精度のデータを取得し、以下の問題を解決することを狙いとしている。

- 1) どのような条件で定常流から振動流へと流動様式が変化するのか?
- 2) そこに統一的な法則はあるか? 液柱が長くなるとどうなるのか?
- 3) 振動流はどのような振る舞いをするのか?
- 4) 粒子集合構造が宇宙での大きな液柱でも発生するか?
- 5) マランゴニ対流を制御するための主要パラメータは何か?

##### 2.2 微小重力環境の意義

マランゴニ対流においては、制御パラメータ (温度差) を大きくすることにより、他の対流現象と同様に定常流から振動流、カオス流、乱流へと遷移することが知られている。特に、定常流から振動流へと遷移する条件は、無次元パラメータであるマランゴニ数  $Ma$  を用い臨界マランゴニ数として整理される。マランゴニ数は以下のように定義される。

$$Ma = \frac{|\sigma_\tau| \Delta T L}{\rho \bar{v} \alpha} \quad (1)$$

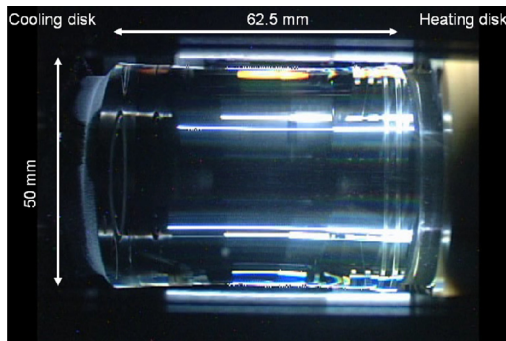


Fig. 1 Large liquid bridge formed in International SpaceStation “Kibo” (diameter: 50mm , Length: 62.5mm)

ここで、 $\sigma_T$  は表面張力の温度係数、 $\Delta T$  は温度差、 $L$  は代表長さ、 $\rho$  は密度、 $\nu$  は動粘性係数、 $\alpha$  は温度伝導率である。

流動が遷移する条件については実験データが十分でなく、広範なデータの蓄積が必要である。特に、直径 5 mm を越える液柱は、地上では大きな変形を伴うことや、自重を表面張力が支えきれず、形成さえ困難である。一方、宇宙の無重力状態は、大きな液柱形成を可能とし (Fig. 1)、パラメータ範囲を拡大し体系的なデータが得られる。すなわち、1) 大きな液柱が形成可能、2) それによるパラメータ範囲の拡大、3) 密度差対流が発生しない、4) 重力による液柱の変形がない、などが微小重力実験の特長である。

「きぼう」の提供する長時間微小重力環境は、精度の高いデータを体系的に取得するために適している。

地上実験 (1g) および小型ロケットやスペースシャトルなどの微小重力環境 ( $\mu g$ ) を利用した実験結果をまとめたものを Fig. 2 に示す。縦軸は振動流へと遷移する臨界マランゴニ数  $Ma_c$ 、横軸は液柱の直径である。地上実験ではほぼ一定のマランゴニ数であるのに対して、過去の微小重力実験では直径の増加と共に臨界マランゴニ数が上昇する傾向が見られる。このことはある種のパラドックスとされ、「きぼう」での宇宙実験で明らかにすべき課題とされてきた。

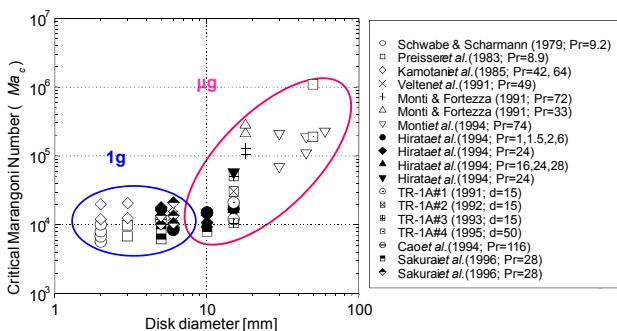


Fig. 2 Dependence of Critical Marangoni Number on the size of the liquid bridge

### 2.3 実験の概要

宇宙実験では、直径 10、30 あるいは 50mm の液柱を形成し、その液柱に温度差を印加することでマランゴニ対流を発生させる。その対流の様子を画像で観察すると共に、熱電対や白金温度センサなどで各所の温度を計測しデータを得る。実験試料として、動粘性係数が 5~20 cSt のシリコンオイルを用いる。シリコンオイルは、化学的に安定で、毒性も無く (宇宙ステーションのような有人の閉鎖空間では非常に重要)、透明な液体であることで内部の流れが観察可能などの理由からしばしば使われる。シリコンオイルの中に、直径 30 ないし 180  $\mu m$  の微小粒子を混ぜ、その粒子の動きから内部の流れの様子を観察する。

観察系の概略図を Fig.3 に示す。流れの観察は、液柱上面から透明な加熱ディスク越しに、互いに角度・位置を変えた 3 台の CCD カメラで画像を取得する。このことにより、得られた画像を粒子追跡法により解析し三次元的な流れ場を構築し、液柱内部の流れの構造やその時間的变化を知ることが出来る。また、液柱側面からの観察により、液柱の形状や側面から見た流れの様子を捉える。マランゴニ対流は前述のように、自由表面に駆動力を持ち、そこでの流速変化が非常に大きい。そこで、フォトクロミック法による表面流速計測を行うことが出来る。表面温度分布の観測は、赤外線カメラを使用している。

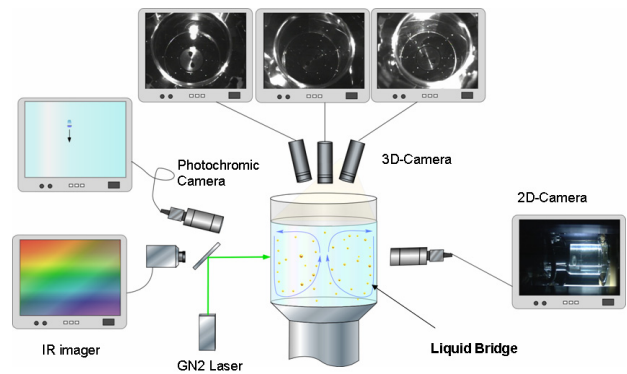


Fig. 3 Schematic diagram of observation system

### 3. 宇宙実験の成果

これまでに、約 3 年半にわたって「きぼう」マランゴニ対流観測実験を行ってきており、多くの実験データが蓄積された。これまでに明らかになった成果<sup>1)</sup>をまとめると以下である。

(1) 振動流遷移条件を広範なパラメータ範囲で決定した。

過去の小型ロケット実験やスペースシャトル実験では、振動流遷移の条件が液柱直径とともに増大す

る結果が得られており (Fig.2)、液柱直径には依存しないとする理論的な予測と対立していた。今回の「きぼう」実験では幅広い条件について長時間実験から信頼性の高いデータが得られ、振動流遷移の条件が液柱直径に大きく依存しないことを実験的に初めて明らかにした。

(2) 長い液柱について新しい振動流遷移モードを捉えた。

地上では実現できない長い液柱を形成し、振動流遷移条件を明らかにした。その結果、液柱長さとともに振動流遷移条件が不連続に変化することを発見した。また、「きぼう」に搭載された最新の観察装置を用いて、長い液柱における振動流の様子を詳細に明らかにした。

(3) 温度波の伝播方向を実験的に決定し、理論の検証を果たした。

長い液柱において、液柱表面を伝わる温度波が「高温側から低温側に伝播するのか？」あるいは「その逆なのか？」という未解決の問題があった。今回の「きぼう」実験では、液柱表面温度を赤外線放射温度計で可視化することによって、温度波が回りながら高温側から低温側に伝播することを明らかにした。また、「きぼう」搭載の計測装置を駆使して、表面温度、表面流速、内部流動の同時計測に成功した。

(4) 粒子集合構造 (PAS: Particle Accumulation Structure) を大きな液柱で初めて観測した。

地上実験において形成できるような小さな液柱では、振動流が発生すると内部に注入した粒子がきれいなパターンに集合することが知られている。この粒子集合構造は、マランゴニ数が臨界点よりも数倍大きい範囲で観察されていた。しかし、宇宙実験による大きな液柱では、臨界点より少し大きなマランゴニ数において観測することができた。PASについてはまだまだ分からないことが多く、今後データを更に蓄積すると共に、メカニズムを明らかにすることが課題である。

#### 4. 今後の展望

「きぼう」マランゴニ対流観測実験が始まり3年半経過し、その間、5つのシリーズのマランゴニ対流実験が実施されました。マランゴニ実験は4つの実験テーマの12シリーズの実験が計画されていますので、シリーズ数でカウントすると4割程まで進捗したことになる。

この分野は、欧米が先行し盛んに宇宙実験を行ってきた。しかし、「きぼう」における良質かつ長時間微小重力環境での高精度の実験が可能になると、次々と新たなことが明らかにされ、今では日本がリ

ードする立場となってきた。4番目の研究課題では、欧米の研究者を巻き込んだ宇宙実験が計画され、日本はその中核的な役割を担っている。

「きぼう」マランゴニ実験は2016年頃まで継続的に実施される予定である。ここまでの実験は、マランゴニ対流の様相をしっかりと観察し、そこでの現象を把握することに主眼が置かれている。今後は、更に深く振動流遷移のメカニズムに斬り込み、物理的なモデリングを果たす計画である。更に、それをベースにマランゴニ対流を制御することに最終目標としている (Fig. 4)。

今後も宇宙実験を通じ多くの実験データが蓄積され、マランゴニ対流の理解が今後も、マランゴニ実験は継続的に行われ、多くのデータ取得から科学的成果が創出されマランゴニ対流の全体像が明らかになるであろう。また、それらを世界に向けて日本から発信されることが大いに期待される。更に、これらの成果は、流体力学の発展のみならず、材料製造や熱制御機器、マイクロ流体ハンドリング、医療診断など様々な分野への応用されることを期待する。

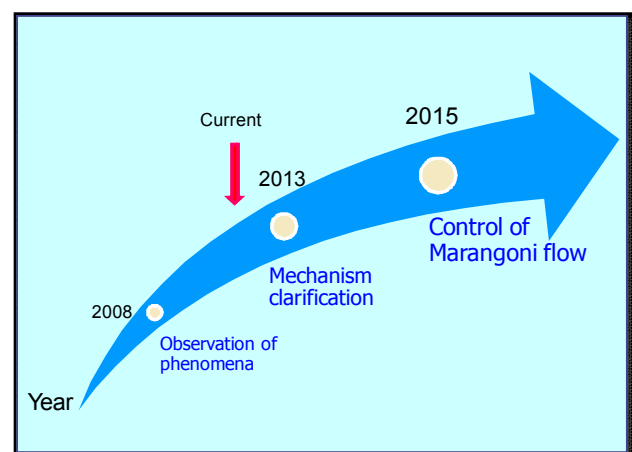


Fig. 4 Progression of JAXA Marangoni project in KIBO

#### 謝辞

国際宇宙ステーション「きぼう」での実験実施にあたり、実験実施を支援いただいております関係者、実験運用に携わる運用要員およびNASA、ESA、CSAなどISS国際パートナーのご協力なしには宇宙実験は成立しません。ここに謝意を表します。

#### 参考文献

- 1) Kawamura, H., Nishino, K., Matsumoto, S. and Ueno, I., Report on microgravity experiments of Marangoni convection aboard international space station, *Journal of Heat Transfer*, 134, pp. 031005-1 - 031005-13 (2012).