

「きぼう」液柱マランゴニ対流実験

松本 聡 (JAXA)

Experiment on Marangoni Convection in Liquid Bridge on "Kibo"

Satoshi Matsumoto

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

E-Mail: matsumoto.satoshi@jaxa.jp

Abstract: In order to systematically understand convective instability of Marangoni convection in a liquid bridges, JAXA has promoted the project study grouping numerous researchers from Japan and oversea. Through the deep discussion among group member, space experiment using the International Space Station (ISS) was proposed and selected. The full-scale space experiment utilizing Japanese Experiment Module, Kibo which is one of major module of the International Space Station (ISS) had started in 2008. The first memorial science experiment on Kibo was Marangoni Experiment in Space (MEIS) and it completed the experimental operation. 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. Numerous findings are obtaining until now. JAXA Marangoni project has twelve experiment series in total. Marangoni experiment on Kibo will continue until 2018. 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

流体力学的な安定性不安定性問題は、1883年の Reynolds の研究¹⁾を代表例として古くから取り扱われている。また、流れの不安定性問題では、いくつかの代表的なモデル流動 (Rayleigh-Bénard 対流、Taylor-Couette 流、ステップ流など) により、流れの不安定性発現に伴う遷移過程等が調べられている。

マランゴニ効果は、地上においても多くの流動に寄与しているにもかかわらず、理解の進んでない現象である。例えば、溶接プールにおけるマランゴニ対流や、半導体ウェハの洗浄に利用されるなどである。マランゴニ対流は、その駆動力が表面に局在する対流不安定性のモデル流として好適である。また、液柱の形態は、系の良い対称性を持つことから数学的に扱いやすいこともあり基礎的な研究に適している。しかしながら、地上ではマランゴニ対流が浮力対流と混在し発生するため、現象の理解を妨げている。1970年代より宇宙開発の進展と共に微小重力手段が利用可能となり、宇宙実験が行われるようになってきた。その中でマランゴニ対流に関する実験も欧米を中心に多く行われるようになってきた。また、我が国も観測ロケット TR-IA を使い実験技術を蓄えと共に、科学的データの取得を行ってきた。

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 (μg) を利用した実験結果をまとめたものを Fig. 1 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。

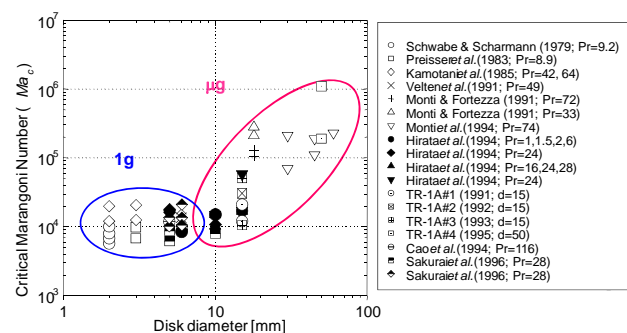


Fig. 1 Dependence of Critical Marangoni Number on the size of the liquid bridge

宇宙航空研究開発機構 (当時の宇宙開発事業団) では、マランゴニ対流における二次元定常軸対称流から三次元振動流への遷移現象を解明し、その物理モデルを構築することを目的とした課題研究を開始した。この課題研究では、実験、数値解析および線形安定性解析による横断的なアプローチにより振動流遷移モデルの構築を行い、そのモデルの妥当性の

検証を行うことである。研究の特徴は以下の点にある。1) 定常流から振動流へ遷移する過程の総合的理解、2) 実験、直接数値計算、および線形安定解析による横断的研究、3) 広範なプラントル数を対象とした体系的な研究、4) 自由表面の動的変形を考慮した研究である。その中で、非常に強い非線形性を示す高プラントル数流体に関し、地上では実現不可能な大型の液柱で、高精度な実験データが必要となり、国際宇宙ステーション (ISS) での宇宙実験が提案された。

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：依田真一 (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：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) マランゴニ対流現象を支配する主要パラメータ

は何か？それにより対流の制御がどの程度かのうであるか？

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。

$$Ma = \frac{|\sigma_r| \Delta T L}{\rho \nu \alpha} \quad (1)$$

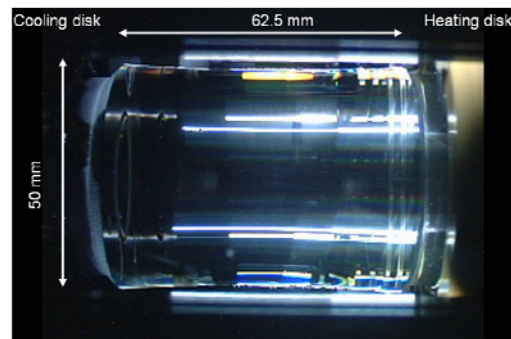


Fig. 2 Large liquid bridge formed in International SpaceStation “Kibo” (diameter: 50mm, Length: 62.5mm)

ここで、 σ_r は表面張力の温度係数、 ΔT は温度差、 L は代表長さ、 ρ は密度、 ν は動粘性係数、 α 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. 2)、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。

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 μm 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変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²⁾。

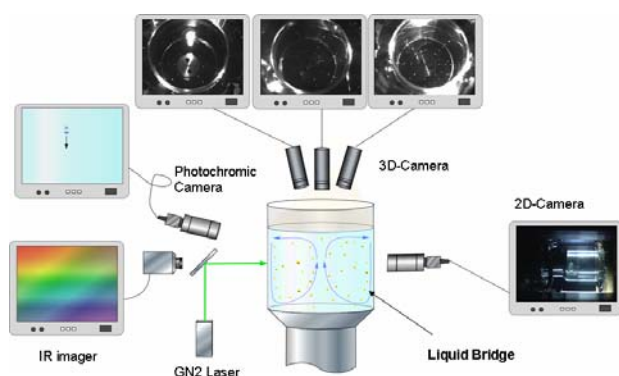


Fig. 3 Schematic diagram of observation system

3. 宇宙実験の成果

これまでに、約 7 年にわたって「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り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、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⁾。

(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⁾。

(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、温度波がある条件では低温から高温へ、また、別の条件では逆に温度伝播について明らかにすることができた。これは、新たに線形安定論による理論予測を検証することに成功した。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よりそれらの関係を明らかにした⁴⁾。

(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^{5,6)}。

(5) カオス化過程が明らかになってきた

赤外線カメラにより撮影された液柱表面の温度分布より、hydrothermal wave (HTW) の時空間構造、温度変動のパワースペクトラムおよびカオス解析が行われた。それにより、カオス化過程が明らかになりつつあり、Rayleigh-Bénard 対流等のカオス化過程と類似のシナリオを見いだしつつあるが、ソフト乱流の存在の検証や、他の流動様式との比較による統一的整理、あるいは特異性等について今後の実験で明らかにする計画である。

(6) 周囲雰囲気ガスとの熱授受の影響

自由表面に駆動力を有するマランゴニ対流では、表面における熱授受は重要な因子であると考えられてきたが、最近の研究により予想以上に鋭敏に影響

することが明らかになってきた。宇宙実験においてもその影響についてのデータの取得が行われるようになり、より精緻な実験は4つめの実験テーマにより系統的な実験を行う計画である⁸⁾。

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、7つのシリーズのマランゴニ対流実験が完了した。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6割程度まで進捗したこととなる。

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2018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。

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。

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) Reynolds, O., An experimental investigation of the circumstances which determine whether the motion of water shall be direct or sinuous, and of the law of resistance in parallel channels, *Phil. Trans. Roy. Soc.*, 174, pp. 935-982 (1883).
- 2) 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).
- 3) Yano, T., Nishino, K., Kawamura, H., Ueno, I., Matsumoto, S., Ohnishi, M. and Sakurai, M., 3-D PTV measurement of Marangoni convection in liquid bridge in space experiment, *Experiments in Fluids*, 53, pp. 9-20 (2012).
- 4) Yano, T., Nishino, K., Kawamura, H., Ueno, I. and Matsumoto, S., Instability and associated roll structure of Marangoni convection in high Prandtl number liquid bridge with large aspect ratio, *Phys. Fluids*, 27, 024108 (2015).
- 5) Kuhlmann, H.C., Mukin, R.V., Sano, T. and Ueno, I., Structure and dynamics of particle-accumulation in thermocapillary liquid bridges, *Fluid Dynamic Research*, 46, 041421 (2014).
- 6) Kuhlmann, H.C., Lappa, M., Melnikov, D., Mukin, R., Muldoon, F. H., Pushkin, D., Shevtsova V. and Ueno I., The JEREMI-Project on Thermocapillary Convection in Liquid Bridges. Part A: Overview of Particle Accumulation Structures, *Fluid Dynamics and Materials Processing*, 10, pp.1-10(2014).
- 7) Sato, F., Ueno, I., Kawamura, H., Nishino, K., Matsumoto, S., Ohnishi, M. and Sakurai, M., Hydrothermal wave instability in a high-aspect-ratio liquid bridge of $Pr > 200$ - On-orbit experiments in the Japanese Experiment Module 'Kibo' aboard the International Space Station -, *Microgravity Science and Technology*, 25, pp. 43-58 (2013) 2013.
- 8) Shevtsova, V., Gaponenko, Y., Kuhlmann, H.C., Lappa, M., Lukasser, M., Matsumoto, S., Mialdun, A., Montanero, J.M., Nishino, K. and Ueno, I., The JEREMI-Project on Thermocapillary Convection in Liquid Bridges. Part B: Overview on Impact of Co-axial Gas Flow, *Fluid Dynamics and Materials Processing*, 10, pp. 197-240 (2014).