

「きぼう」での流体物理実験

−マランゴニ対流におけるカオス・乱流とその遷移過程−

河村 洋(諏訪東京理科大学), 西野耕一(横浜国立大学), 大西 充(JAXA), 上野一郎(東京理科大学)

Abstract

Fluid physics experiment started on 22nd August, 2008 as the first science experiment on Kibo. The Physics Fluid Experiment aims to perform a series of experiment on Marangoni convection in a liquid bridge in the microgravity. The experimental apparatus were operated by remote control from the Tsukuba Space Center., where people from science and operation teams collaborated. The largest difficulty in the early phase of experiment was existence of bubbles in the liquid bridge. The bubbles grew with increasing liquid temperature. After several days of trails, a new method was developed to rupture the bubbles with use of the Marangoni effect. A long liquid bridge was formed. A set of new data on the transition to the oscillatory flow was obtained and traveling of the hydrothermal wave was successfully observed..

2008年8月22日、「きぼう」における最初の科学実験として、流体物理実験が開始された。実験に先立ち、同13日には、宇宙ステーションに長期滞在中のシャミトフ宇宙飛行士により、実験用供試体の組み立てが行われ、100ステップ以上に及ぶ組み立て作業が完全に遂行された。22日に実験を開始し、最初の液柱を成功裡に形成すると共に、温度差を付加することにより、マランゴニ対流を発生することが出来た(図1)。また、50点以上の計測点や、液柱形成に関する駆動機構も、正常に作動することが確認された。

実験は、PI(1名)とCI(3名:共著者)が学生各3名と共に四つのチームを構成し、交代で当番に当たることにより実施した。実験時には、筑波のJAXA内に設けられたUOA(User Operation Area)に二つのチームが入り、地上からの遠隔コマンドによって装置を操作する。実験中は側面(図1)や端面からの画像、いくつかの測定点の温度、ディスクの位置等が、リアルタイムでダウンリンクされるので、実験者は、それらを見ながら、実験を進めた。これらのコマンドのアップロードは、すべてUI(User

Integration)とよばれる仲介者を通して運用側に伝えられ、何段階かのチェックを経て、実際に宇宙ステーションに送信される。実施してみると、ディスクの位置は0.1mmまで、液量は0.01ccまで正確に制御可能であった。また、液体温度の変動も0.01Kのオーダーまで測定可能で、装置は非常に良好に作動した。

実験は、装置の振動(g-jitter)による液柱の崩壊を避けるために、クルーの睡眠時間中(日本時間では午前6時から午後3時)に実施している。夕方には、その日の実験結果を振り返り、翌日の実験計画を策定する。実験期間中はこの日程の繰り返しで、相当にタイトなスケジュールであった。

実験開始後の初期の液柱には複数の気泡が混入しており、単に圧迫する等の方法では破裂しなかったが、マランゴニ対流効果を利用することにより破裂させうることを見出し、気泡の除去に成功した。このような、気泡除去によるリカバリーは、実験時間の限られたロケットやスペースシャトルの実験では困難で、宇宙ステーション実験のメリットを、最大限に利用できたと考えている。

マランゴニ対流が振動的になる臨界温度差については、これまでのロケット実験の結果による大きな直径の液柱では、地上実験から流体力学的に予測される値に比して、非常に大きな値が得られており、これがパラドックスとなっていた。しかし、今回の実験結果では、これまでの地上実験の結果から流体力学的に予測される妥当な結果が得られている(図2)。これは、ロケット実験では、実験時間が10分程度であるため、太い液柱を用いると、実験時間が充分でなかったのに対し、今回は宇宙ステーション実験の特徴を生かして、充分な時間をかけた実験を実施することが出来たためである。

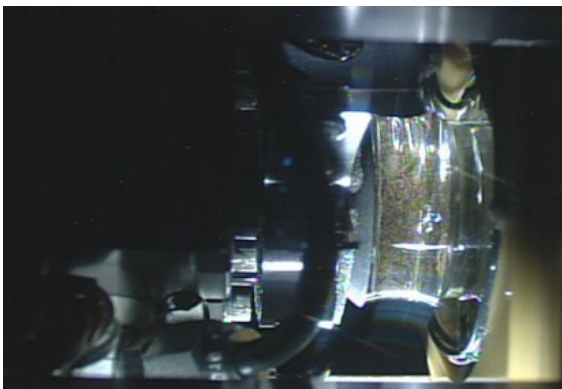


図1. 「きぼう」内に形成された液柱(シリコンオイル:直径30mm)

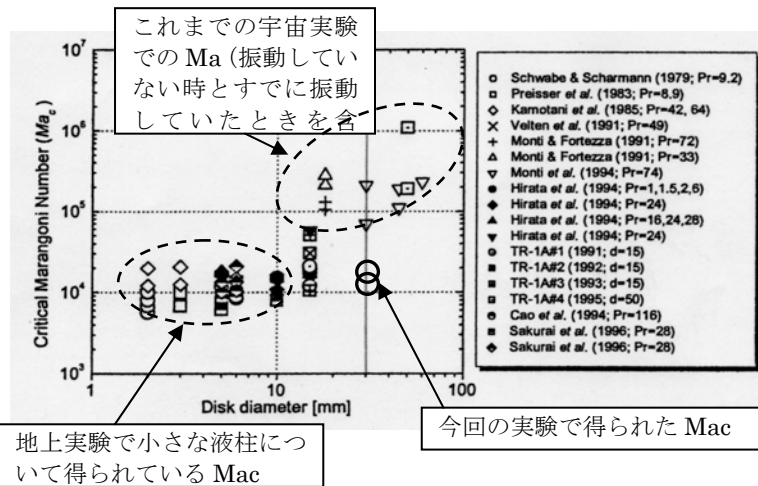


図2 マランゴニ対流が振動流に遷移する条件 (過去の地上実験, 宇宙実験と今回の実験の比較)

今回の一連の実験の最大の成果の一つは、アスペクト比 (=長さ/半径) が 4.0 の液柱を形成し (図3), 長い液柱での臨界温度差を測定すると共に, Hydrothermal wave の伝播を視覚的に捉えることが出来たことにある. このような長い液柱については, これまで一つだけ Schwabe [1] がロケットを使った実験があったが, 熱電対で測定したもので, 波の伝播の方向が, 提案されていた理論 [2] と逆であるところから, 長年パラドックスとなっていた. 今回, 大きな液柱と赤外線温度計を備えた実験装置を用いることにより, 世界的にも初めてこの波を視覚的に捉えることが出来た. 結果は, 理論の示す伝播方向と一致し, この種の不安定現象の原因を確定することが出来た.

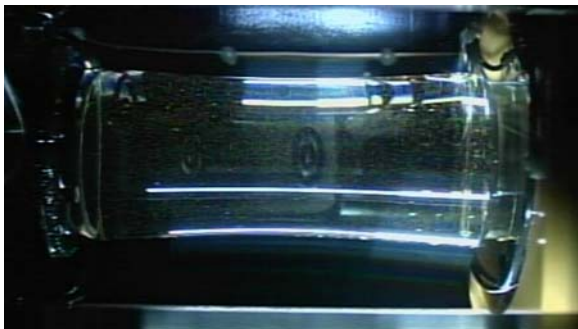


図3 宇宙ではじめて形成された長さ 60mm の液柱

なお, この実験の後, 液柱はいったん分離したが, その後, 大型液滴の再接触の実験を行った後, 液柱を再形成して実験を継続した. 10月16日に, 液柱からの蒸発と凝縮や, 各種の液柱操作による保持特性の経時的な劣化のため, ほぼ予定通りに今回のシリーズを終了した.

その翌週の10月21日~23日に, 国際会議 (IMA4: The 4th International Marangoni Association Conference) を, 筆者が主催して東京理科大学野田キ

ャンパスにおいて開催した. この会議は, マランゴニ対流等の界面流体力学に関する専門家のトピカルミーティングで, 世界各国 (米, 独, 仏, ベルギー, ロシア, ルーマニア, イスラエル, インド, 中国) からの25人の参加者を含め, 全体で58名が参加して活発な討論を行った. 本学会は, 宇宙ステーションや人工衛星を利用したマイクロ重力環境における流体物理実験に関わる専門家の会合でもあり, 研究者のみならず, JAXA やヨーロッパ宇宙開発機構 (ESA) からも参加があった. この国際会議において, はじめて今回の結果を

公表した. とくに遠隔操作による機器の良好な作動や, 上記の温度波の伝播や, 幅広いアスペクト比に対する振動流開始の実験データは, 参加者の強い関心を呼び, 科学的にも高い評価を得た. これによって, この分野では, 我が国が微小重力実験施設においても運用技術においても, 世界のトップランナーとなったことが広く認識された.

以上のように, 本実験は, 所期の目的を十分に達成して, 最初のシリーズを終了させることが出来た. これも, 実験運用にあたっておられる JAXA や JAMSS の数多くの方々のおかげによるものである. また, 本研究テーマは, いわゆる一次選定テーマとして15年前に採択され, 準備を重ねてきた. この間, 変わらぬご支援を頂いた JAXA (旧 NASDA) の依田眞一氏, 石川毅彦氏, 松本聡氏には, とくに深甚な謝意を表したい. また, この種の実験については, 我が国には長い歴史があり, 小型ロケット (TRIA) 実験が実施され, 貴重な経験が積み重ねられて来た. これらの技術が, 今回の宇宙ステーション用の実験装置に結実したのは, IHI 及び日産, 現 IA 社の各位の熱意と技術力による. 最後に, この15年間, つねに熱意を持って地上実験を進め, また今回の実験を直接にサポートしてくれた学生諸君に, とくに謝意を表したい. また, この実験の実施にあたり, PI/CI チームは, 文部科学省の科学研究費補助金の支援を受けた.

参考文献

- [1] Schwabe, D., "Hydrothermal waves in a liquid bridge with aspect ratio near the Rayleigh limit under microgravity", *Physics of Fluids*, 17, (2005), p.112104-1.
- [2] Xu, J-J, and Davis, S. H., "Convective thermocapillary instabilities in liquid bridge", *Physics of Fluids*, 27, (1984), p.1102.