

第3章 国際宇宙ステーション日本実験棟「きぼう」における 最初の科学実験:MEIS

諏訪東京理科大学
河村 洋

MEIS:The first science experiment on Kibo of International Space Station

Suwa Tokyo University of Science
Hiroshi Kawamura

ABSTRACT MEIS, Marangoni Experiment In Space, 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 was operated by remote control from the Tsukuba Space Center. The largest difficulty in the early phase of experiment was appearance of bubbles in the liquid bridge. After several days of trials, 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.

1. 科学実験の開始

国際宇宙ステーションに取り付けられた日本実験棟「きぼう」は、2008年3月の土井宇宙飛行士、同5月の星出飛行士の取り付け作業により、順調に稼働状態に入った。我々の実験装置「流体物理実験装置」通称(FPEF)は、8月22日に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た。組み立て作業は、マニュアルを丹念に見ながら、慎重に行われ、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。20日には、流体物理実験装置の初期検証が行われ、50点以上の計測点や、液柱形成に関する駆動機構が正常に作動することが確認された。

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(図1)。当日は、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2)。

実験は、PI(1名)とCI(3名)が学生各3名と共に四つのチームを構成し、交



図1 実験初日の UOA (User Operation Area)
©JAXA/諏訪東京理科大学

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した。実際の操作は、UI (User Integration)とよばれる研究者と運用側の仲介者を通して運用側に伝える。UIの役割は重要で、研究者側の意向と、実験運用の現実的な可能性の両方を考慮しつつ、両者の調整に当たる。実験中は側面や端面からの画像、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

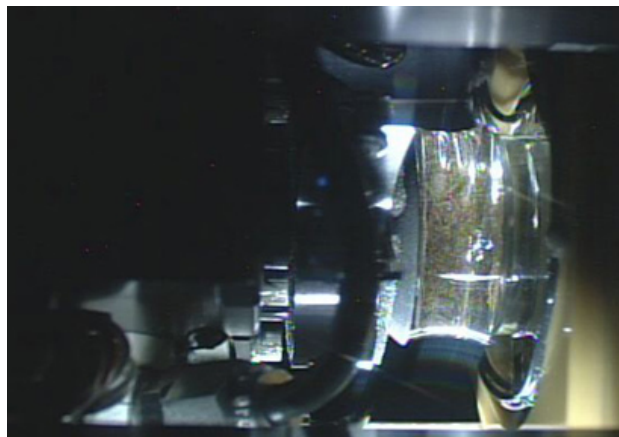


図2 「きぼう」内に形成された液柱
(シリコンオイル：直径 30mm，長さ約 10mm)
©JAXA/諏訪東京理科大学

ので、実験者は、それらを見ながら、実験を進めることが出来る。そのためには、ディスクの移動量や液体量の調節を、その都度送信する必要がある。これらのコマンドのアップロードは、UI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。信号はジョンソン宇宙センター経由で送信され、画像はマーシャル宇宙センター経由で受信される。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、液体温度の変動も0.01Kのオーダーまでそれぞれ測定や制御が可能で、装置は非常に良好に作動することが確認された。

2. 実験の実施

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)に実施した。ただし、クルーの就寝時間帯にも液柱が振動することを観察することもあった。液柱は、毎日の実験終了時には収納した。その後、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。それに基づき、翌日の加熱、冷却両ディスクの温度プロファイルを、午後7時まで提出する必要があった。実験期間中はこの日程の繰り返しで、相当にハードなスケジュールとなり、学生諸君の協力は不可欠であった。

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

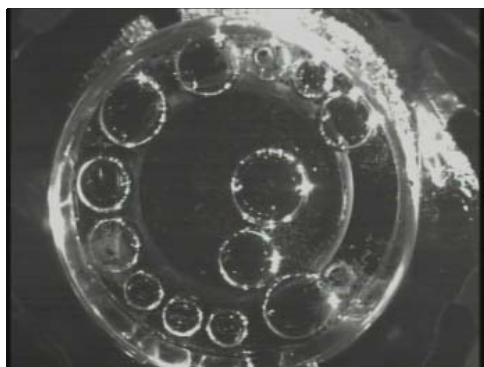


図3 (a)初期に気泡の混入した液柱

図3 (b)気泡を除去した液柱

(ディスク端面から見た画像) ©JAXA/諏訪東京理科大学

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。(図3(a),(b))

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不可能で、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。ただし、このような困難点を解決するまでは、試行的に行う方策が、成功するとは限らないので、精神的にも非常に大きな負荷がかかり、サイエンス側チーム内、また運用側との協力なくしては、解決は困難であることを実感した。

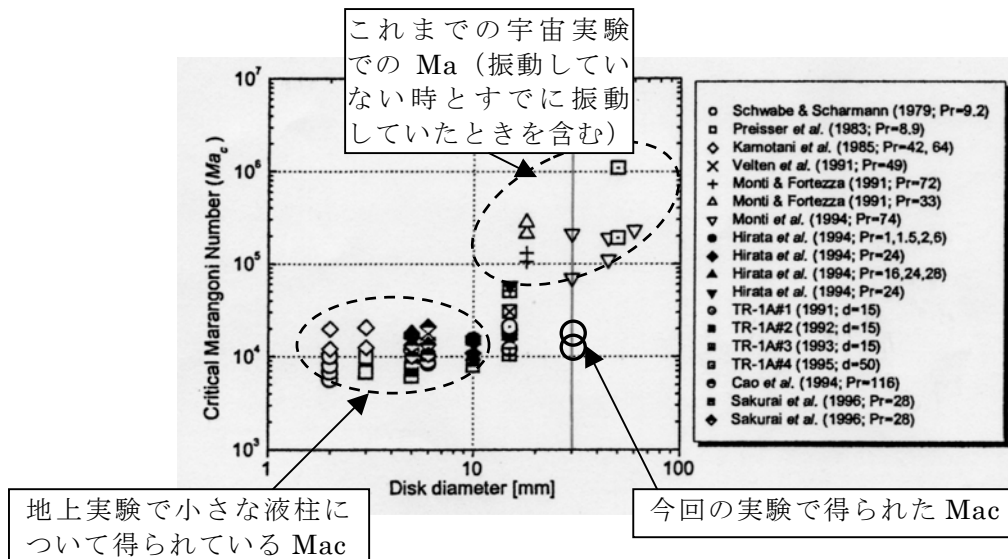


図4 マランゴニ対流が振動流に遷移する臨界条件（これまでの地上及びロケット実験の結果と今回の宇宙ステーション実験の結果の比較）。 ©JAXA/諏訪東京理科大学

3. 実験成果の速報

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、今回得られた実験結果では、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4)。

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液柱の太さに比して、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。このほかにも、振動流における周方向の周期性(モード数 m)と液柱アスペクト比(Γ =長さ/半径)の関係等においては、地上予備実験からは予測しなかった結果が得られた。すなわち、これまでの地上実験からは、アスペクト比 Γ とモード数 m の間には、積($m\Gamma$)がおおよそ2.0~2.2という結果が得られていたが、宇宙実験では、より小さなモード数が得られ、 $m\Gamma$ はおおよそ1.5であった。そのため、宇宙実験中には、地上実験からたてた計画を変更する必要もしばしば生じ、宇宙実験の困難さを実感した。

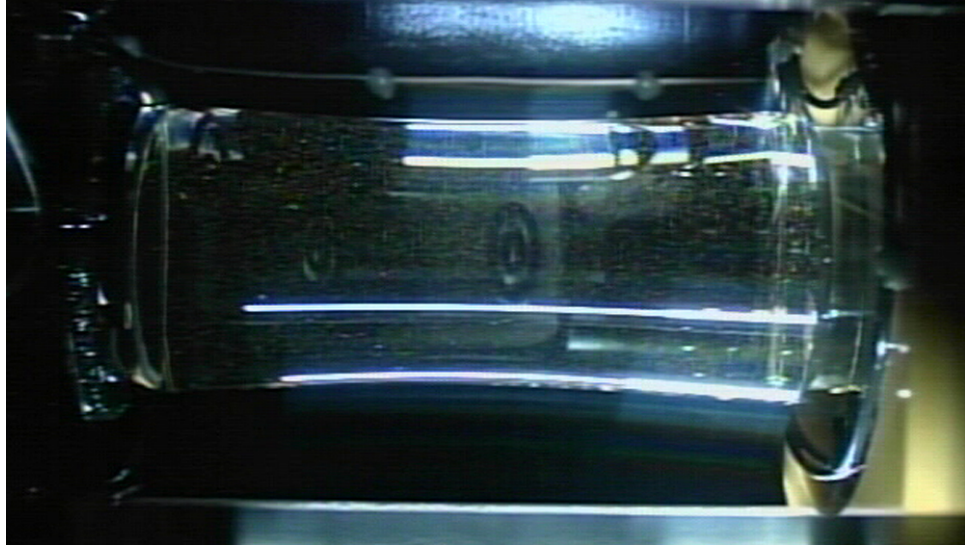


図5 宇宙ではじめて形成された長さ 60mm の液柱
(2008年9月27日(土)14:00) ©JAXA/諏訪東京理科大学

今回の一連の実験の最大の成果の一つは、アスペクト比が4.0の液柱を形成し(図5)、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、これまで一つだけドイツのSchwabeがMAXUSロケットを使って行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。なお、この実験の後、液柱はいったん分離し、大きな液滴が形成された(図6左)。このことは、あらかじめ予想してい

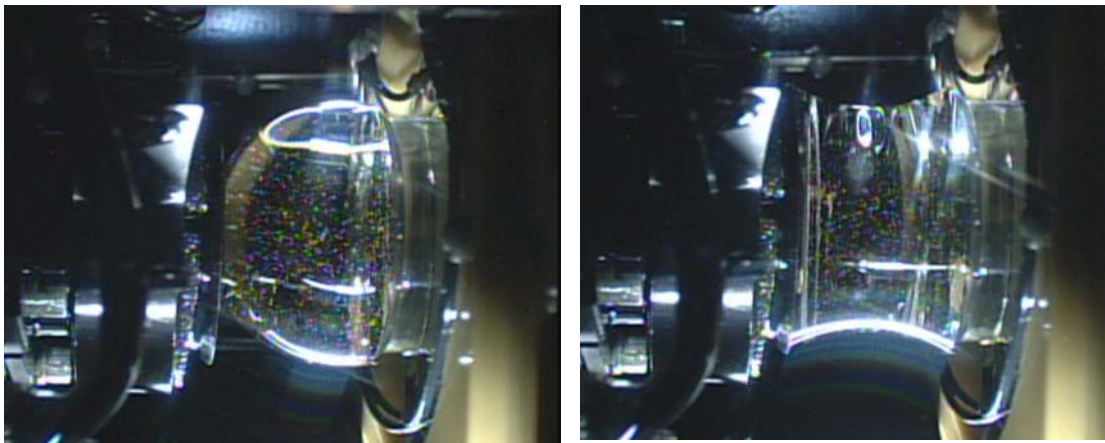


図6 液柱の分離による大液滴の形成(左)と液柱の再形成(右)
©JAXA/諏訪東京理科大学

たので、この液滴を使った実験を実施した後、液柱を再形成して実験を継続した(図6右)。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、液柱

の形成が困難になり、今回のシリーズを終了した。

ちょうどその翌週の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, 露, ルーマニア, イスラエル, トルコ, 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



図7 実験後我が国で開催した微小重力流体力学実験の国際会議(IMA4)。この分野の専門家が参集し、今回の宇宙実験の運営と実験結果に強い関心と高い評価が寄せられた。©東京理科大学

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。今後の予定としては、より粘性の高い液体での実験や液柱内流速の3次元観察を主体とする実験を2009年に予定している。次の試料カセットはすでに軌道上に運搬されており、装置の清掃も終了している。

4. 謝辞

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、先駆者である故平田彰教授(早稲田大学)、東久雄教授(大阪府大、当時NAL)等による小型ロケット(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。また、榎戸氏、河合氏(JAMSS)、木暮氏(JSF)には、数多くの調整会をアレンジし、製作側や運用側との調整を重ねて頂いた。最後に、この15年間、つねに熱意を持って地上実験を行い、この1～2年は宇宙ステーション実験の準備を熱心に進め、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、謝意を表したい。