

第 8 章 小型ロケット (MAXUS6) を用いた 液柱内マランゴニ対流の観察

東京理科大学 理工学部 機械工学科
河村 洋

Experiment of Marangoni convection in a liquid bridge with use of a sounding rocket MAXUS6

Department of Mechanical Engineering, Tokyo University of Science
Hiroshi Kawamura

Abstract: Marangoni convection emerges in melt of crystal growth owing to the difference in surface tension over a free surface. The distribution of the surface tension is caused by the that of the temperature or concentration. The Marangoni convection affects significantly the quality of the produced crystal. Seeding the flow with tracer particles is a common way to visualize the flow in a liquid bridge. In our experiments on the ground, these tracer particles were found to accumulate and to form a rotating closed loop when the flow field is three dimensional and traveling. We named this structure the Spiral Loop Particle Accumulation Structure (SL-PAS). The present experiment was conducted using the sounding rocket MAXUS6, which launched on 22. 11. 2004 operated by ESA. The SL-PAS was firstly confirmed to emerge under the microgravity, too. The SL-PASs with mode number of 2 and 3 were formed successfully. Bottom and side views of the SL-PAS were recorded.

1 . 経緯

本実験は、国際宇宙ステーション (ISS) に搭載される実験装置の相互利用を目的とした微小重力科学国際公募 (IAO) の候補テーマの一環として行われたものである。テーマ名は *Dynamics of suspended particles in periodic vortex flows* (周期的な渦流れにおける分散粒子のダイナミクス) であった。本テーマは、FZ 法を模擬した HZ 法を用いた液柱内マランゴニ対流の実験において、初期状態で液柱内に広く分布しているトレーサ粒子が、ある条件下で、特定のパターンを持って集合するという現象、PAS (Particle Accumulation Structure) のメカニズムを解明し、環境内における粒子輸送や、材料製成における粒子状成分の挙動解析等に資することを目的としている。

実験の遂行は Prof. Schwabe (ドイツ、ギーセン大学) 及び河村 (東京理科大学) が共同で担当している。当研究室では微小重力実験、地上実験、数値シミュレーション全てを担当した。実験に使用する ISS 実験装置は、日本モジュール“きぼう”に搭載予定の流体物理学実験装置 (Fluid Physics Experiment Facility: FPEF) を想定している。

2 . MAXUS6 を用いた実験

液柱内マランゴニ対流における粒子の集合現象は、地上実験で初めて発見された。しかし微小重力環境下では未だ観察されていない。そこで ISS 実験に先立ち微小重力下における SL-PAS の形成の有無を調べることを目的とした。

構成員は

PI D. Schwabe, University of Giessen (Germany)

CI H. Kawamura, 東京理科大学 (Japan)

CI H. Kuhlmann, University of Vienna (Austria)

から成る。MAXUS 実験の PI は D. Schwabe で実験を統括し、実質的な実験の遂行、解析は Prof. Schwabe 及び河村が共同で担当した。

3 . 打ち上げまでの準備

実験のための準備は、約 2 年前から開始された。パラメータ決定や現象把握のための地上実験は、ドイツ（ギーゼン）及び日本（野田）で、分担または比較しながら行った。意見交換やディスカッションは、主として e-mail や FAX を用いたが、不十分である部分は相互にそれぞれの研究室を訪問し、共同実験を行った。

研究者側はドイツ側、日本側共に打ち上げ約 20 日前に現地入りした。打ち上げ場に用意された作業場で、FM(Flight Model)を使った地上実験と、現象を再現するためのパラメータの決定、及びテレオペレーションのトレーニングを開始した。しかしながらこの時点でも技術的な問題が残っており、打ち上げ前日まで装置を改良しながらの実験及びトレーニングとなった。最終的には、後述するトレーサ注入の確実性に疑問が残ったものの、地上での現象の再現性が確認された上で、打ち上げに臨むことが出来た。

4 . 実験装置

本実験の大きな特徴は、微小重力実験中に、ある決められた条件において現象を観察するのではなく、条件が未知の状態から、現象の発生条件を探る点にある。従って本実験にはテレオペレーションが必要であるが、この実現には、開発段階や実験中に多くの労力を必要とした。搭載する実験装置は、基本的に MAXUS4 で用いた液柱内マランゴニ対流実験装置をベースに改良を施したものである。搭載した実験装置写真を図 1 に、液柱付近の概要を図 2 に示す。

MAXUS4 における液柱内対流場の可視化は、側面からの観察のみで、鉛直方向のレーザーシート光を用いて液柱中心を通る面を横切る粒子を捕らえていた。一方今回の実験では、SL-PAS の 3 次元的構造を把握するため、2 本のロッドのうち、片側を透明なサファイア製、片側をアルミ製とし、液柱端面及び側面からの同時可視化を可能にした。光源は、水平方向レーザーシート光も導入した。加えて、側面及びサファイア側から光ファイバー

を通してハロゲン光を照射することにより，実験中に対流場の3次元の挙動を把握できるようにした．また，遠隔操作での液柱形成の際，液柱形状を目視判断するためのバックライトを取り付けた．これらはそれぞれ状況にあわせて on/off が可能であり，またレーザーの強度も調整できるようにした．

液柱間温度差 (ΔT) は，温度差の平均値が一定の値を取るよう，2本のロッド温度をそれぞれペルチェ素子を用いることにより制御した．サファイア側が低温，アルミ側が高温

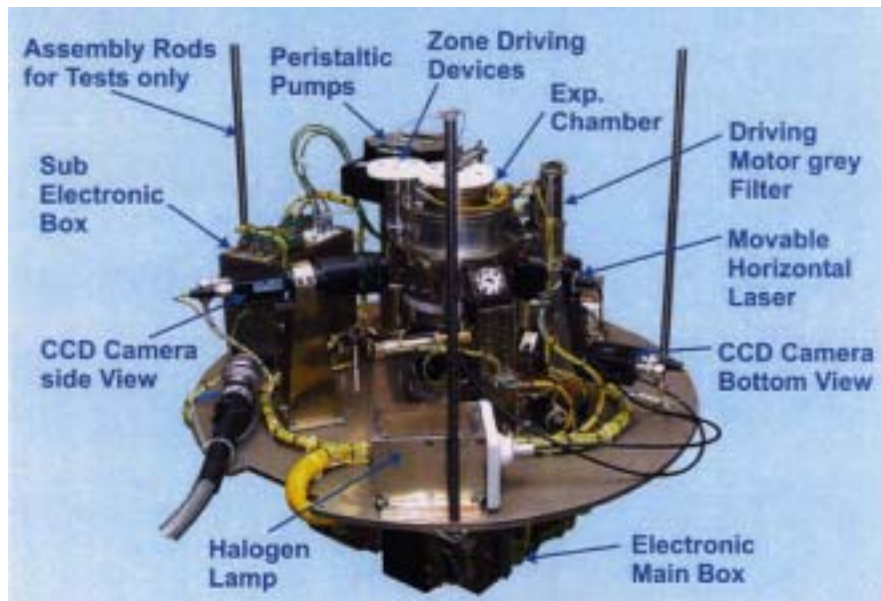


図1 MAXUS6 に搭載した実験装置 (©ESA)

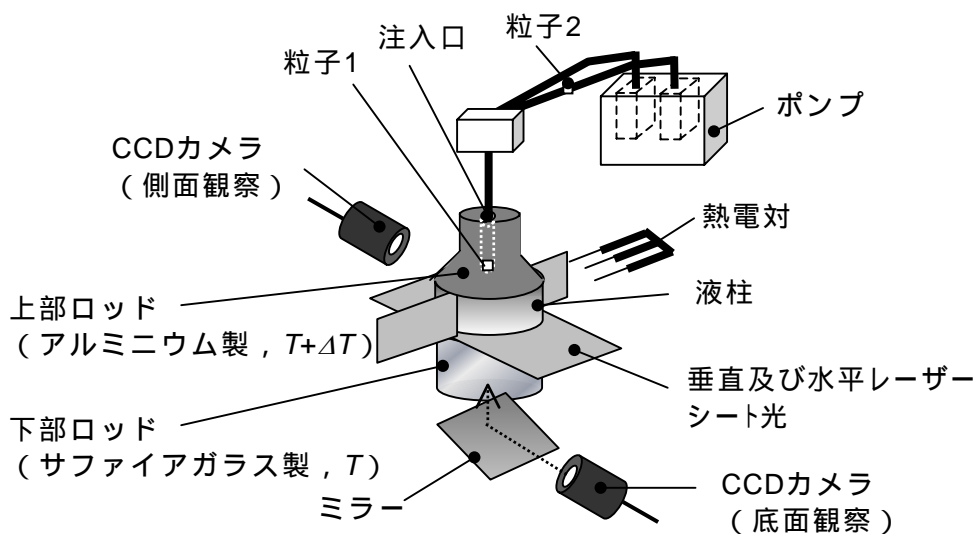


図2 ハーフゾーン液柱の実験系及び観察系

ロッドとなる。液柱自由表面の温度振動時系列データは、周方向に配置した3本のK型熱電対(約25 μm)を用いて測定した。これまでの地上予備実験により、熱電対が液柱に触れる、または接近すると、その擾乱によりSL-PASが崩壊することが分かっている。従って、熱電対の初期設定位置は液柱から十分離れた位置にとり、実験開始後、現象を見ながらモータで熱電対を液柱付近に挿入できるようにした。また、液柱軸方向位置に関しては、これら3本の熱電対を中心付近に設置した上で、液柱高さの変化に対応できるように、実験中に液柱軸方向にも調整できるようにした。液柱高さ H と半径 R の比であるアスペクト比($\Gamma = H/R$)は、高温側のアルミ製ロッドをステップモータで移動させ、液柱高さを変化させた。実験ではSL-PASを発現させるため、アスペクト比を大小様々に変化させた。

当初、試験流体としてはISS実験にも使用予定の高プラントル数流体であるシリコンオイル(2 cSt, $\text{Pr} = 28$)を採用し、装置製作も開始していた。しかしながら微小重力実験装置では、MAXUS4の装置をベースにするという方針での設計の為、図2に示すように付加温度は、サファイア側が低温、アルミ側が高温となった。この場合、可視化サファイア側にはエッジが切れないため、マランゴニ効果によってシリコンオイルがサファイアロッドに沿ってはい上がり、液柱を維持することが出来ないという問題が生じた。そこで、液柱保持が容易である新しい試験流体を導入せざるを得ず、表面張力の比較的大きいデカンへ変更した。しかしながら、シリコンオイルと比較してデカンは非常に汚れやすいという問題が顕著に現れた。特に試験流体保持容器、ポンプ、管やチューブなどの材質を見直し、樹脂からテフロンへ変更した。その上で実験前には、これらを念入りに洗浄した。

トレーサ粒子はダイヤモンド粒子(10-15及び40-50 μm)を選定した。これは密度が一定で、球形、粒度分布も比較的狭い範囲で得られる。二種類の粒子を別々に使用するため、システムもそれだけ複雑になる。何ヶ月も前から粒子の注入方法は議論されてきたが、試験流体の変更に伴う材料の変更などから、様々な問題が立ち上がった。最終的に図2に示す2箇所に粒子を置き、試験流体で洗い流しながら混入させる方法をとった。図2のように、一番目の粒子はロッドの穴の中、二番目の粒子は試験流体の通るチューブの中にセットした。しかし2番目の粒子の注入法については、地上実験でよい結果が得られなかったため、不安を残したままの打ち上げとなった。

5. 初期条件の決定

SL-PASの発現のための主なパラメータは、 ΔT 、及びアスペクト比 Γ である。これらの条件は、当初、試験流体として選定していたシリコンオイル(2 cSt)については、早い段階で野田において詳細に調べ、その後デカンについても野田とGiessenにおいて調査を重ねた。これらの実験は上部にサファイアロッドを配置し、加熱したものであった。前述の液だれの問題を解決した後、デカンについては、温度勾配方向を重力に対して逆にした場合の実験も同様に行った。その結果、地上実験において下部ロッドを加熱した場合、TS-PASはほとんど発現しないことがわかった。実際、下部加熱の際、粒子集合が観察されたのは、 $m3$ の $\Gamma = 0.70$ で1回のみで、全く再現性はなかった。一方、上部加熱の場合、SL-PASが出現する領域は広く、 $m3$ の場合、その中心は約0.64であった。従って、 $m3$

については、 Γ の微小重力環境における SL-PAS の存在領域は、0.64 から 0.7 の間であろうという見解を得た。

上記の地上実験，及び Kiruna における FM を用いての実験結果を統合し，初期条件は m3 については $\Gamma = 064$, $\Delta T = 14.5$ ，m2 については $\Gamma = 086$, $\Delta T = 10.0$ と決定した。

6．打ち上げ

MAXUS は ESA(European Space Agency)のプロジェクトであり，その打ち上げはスウェーデン（Kiruna）において，Swedish Space Cooperation（SSC）及びドイツの EADS の共同で実施される．今回使用した MAXUS6 のペイロード部は，全長約 6.7 m，重量 800 kg で，打ち上げ後，約 710 km に達し，約 740 秒間の微小重力時間を実現する．微小重力時間の間，実験遂行に必要なパラメータの変更などはリアルタイムで行った．

実験準備を行っている同じ作業所内では，ロケットの組み立ても平行して行われた．ロケットはパラシュートが二段階に開くようになっており，弾道飛行の後パラシュートを開いて平原に落下したところを回収される．周辺には湖が多いが，気温が氷点下約 25 度を下回る日が続けばロケット着陸に十分な厚さの氷が出来るということだった．

打ち上げ当日，実験を行うメンバーは予定時刻の 1 時間前には，作業場の中にあるブロックハウスと呼ばれる安全な操作室に移動し，微小重力実験に向けた最終的な準備を行う．それ以外のメンバーは研究者や技術者のほかに，ESRANGE で働く社員も全員が，安全確保のため，打ち上げ台から 2 km 程離れた丘の上に退避し，打ち上げを見守ることになっていた．

本番のカウントダウンは，-45 分時に天候の具合で約 20 分停止したが，その後順調に進行し，9 時 35 分に MAXUS6 は打ち上げられた（図 3）．ブロックハウスの中では，微小重力環境開始の合図と共に，一斉に実験が開始された．



図 3 氷原からのロケット打ち上げ



図 4 テレオペレーション訓練の様子
（左から Schwabe，田中，河村）



図5 回収されたペイロード



図6 ペイロード部の解体作業

7. 回収

ロケット打ち上げの間、ヘリコプターが待機しており、GPSを使ってすぐにロケットの回収が行われた(図5)。打ち上げからわずか1時間程で、回収されたロケットが作業場に運ばれ、すぐに解体が開始された(図6)。実験室での実験のような手作業の操作で作業が行われ、各研究者が直接作業に加わることも出来た。着地の衝撃に耐え、本テーマの実験装置 TEM-0627Mは無傷であった。今回我々の実験では、温度データ、画像データなどの実験データはリアルタイムで転送され、この時点ですでに記録したものを入手している。別のチームの中には、微小重力下で得られた試験体などを自らすぐに回収していたところもあった。

8 . 実験

実験の進行状況は以下の通りである .

0 - 70 秒 加速時

70 - 130 秒 液柱の形成

130 - 280 秒 $m = 3$ の PAS 形成条件の探索 , その結果形成と観測に成功

280 - 375 秒 $m = 3$ の PAS のレーザー光カット画像の取得と形成時間の測定

375 - 680 秒 $m = 2$ の PAS の探索

680 - 780 秒 $m = 3$ への復帰 , 過渡的にモード 2 の PAS の観測に成功

780 - 840 秒 $m = 3$ の PAS のレーザー光のトラバースと熱電対による温度振動の測定

宇宙実験の結果 , まず m_3 に関しては地上における SL-PAS の発現条件と同条件 ($\Gamma = 0.64, \Delta T = 14.5 \text{ K}$) において , 地上実験の結果と類似の形状の SL-PAS を捉えることに成功した . さらに鮮明な SL-PAS を得るため , 遠隔操作により $\Delta T = 12 \text{ K}$ としたところ鮮明な SL-PAS を実現することが出来た . これを図 7 に示す . 地上実験において , SL-PAS 上の粒子は低温ディスクに接触しないことが分かっているが , 微小重力においても同様に SL-PAS は低温ディスクに接触していない . しかし微小重力実験 SL-PAS では , 地上実験

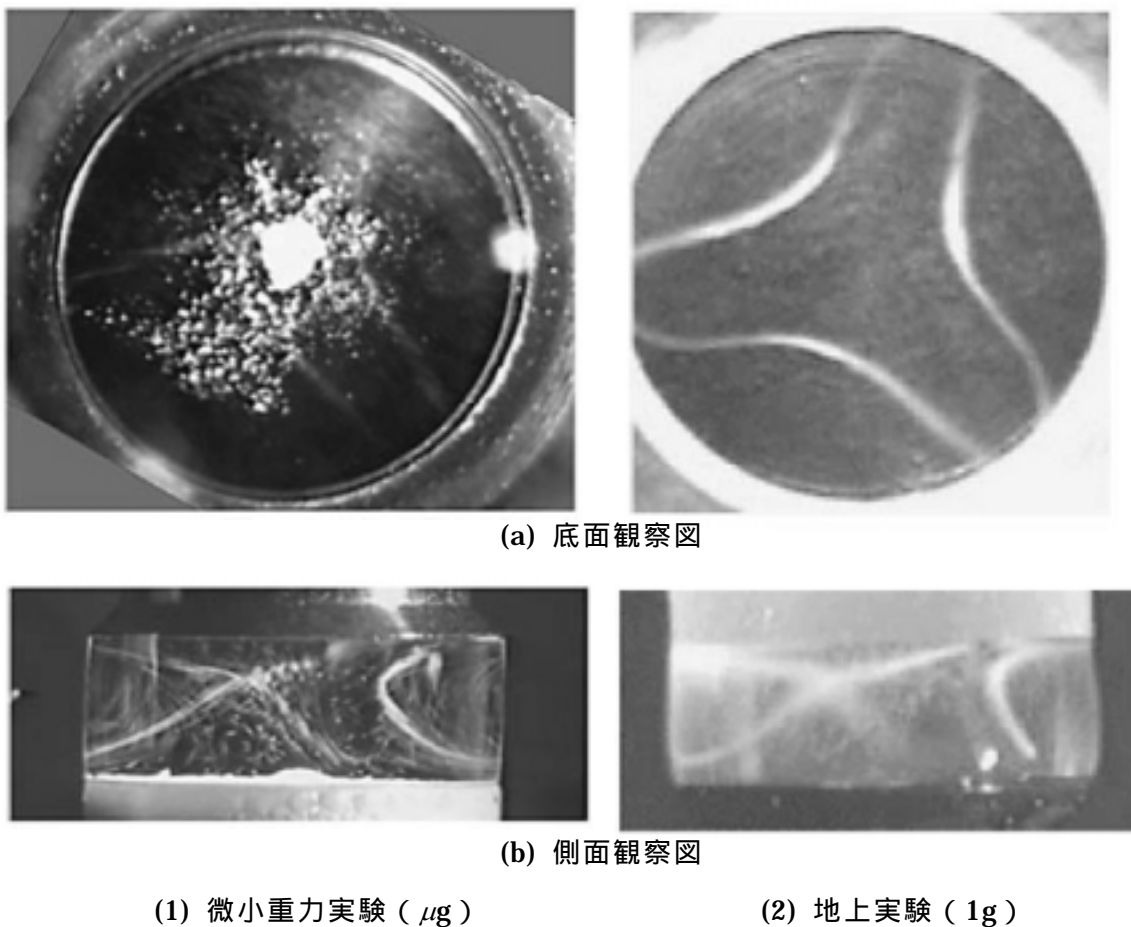


図 7 SL-PAS の構造

の場合と比較して下部ディスクからの距離が短いことが分かる．このような SL-PAS の発生条件や三次元形状の，地上実験と微小重力実験の差異の解明は，今後の課題である．

なお，実験の最終段階で $m = 3$ を対象に 2 番目の粒子の実験を行う予定としていたが， $m = 2$ の実験段階で回転振動流の探索に時間を使ったことと，2 番目の粒子の注入に不安が残っていたため，レーザーシートのトラバースを優先した．しかし，このような緊急の場合の対処は，事前に決定していたため，実験をスムーズに進めることが出来た．

9．まとめ

1. 地上実験において，重力に対するマランゴニ対流の方向を変化させることにより，下部加熱では SL-PAS は形成せず，重力の影響が大きいことが分かった．
2. 微小重力環境下において，周方向波数 $m = 3$ では，地上実験で予測した条件下において粒子集合 SL-PAS の発生に成功した．また $m = 2$ に関しても，液柱体積を変更する過程で SL-PAS が観察され，SL-PAS の発生はマランゴニ対流に本質的な現象であることを示した．
3. 数値シミュレーションを行い，実験とほぼ同条件で SL-PAS の再現に成功した．しかし発生温度差や粒子径については有意な差がみられた．SL-PAS の発生機構について今後のさらなる検討が必要である．
4. SL-PAS の発生条件に関しては，特に $m = 2$ に関しては地上実験からの予測とは異なった結果が得られた．また， $m = 3$ の SL-PAS の 3 次元構造は微小重力実験と地上実験では有意な差異が見られた．これらの解明には，より広範囲なアスペクト比及び ΔT での実験，異なる粒子密度や粒子直径での実験が必要であり，ロケット実験の微小重力時間では探査しきれないことから，ISS を用いた長時間の実験に接続して行きたい．
5. ESA のロケット実験に参加して，ヨーロッパの微小重力実験の実施方法に関する貴重な経験を得た．研究者と技術者がともに作業をしながら意見をたたかわせ，解決策を見出していくので，臨機応変な装置の改良が出来た一方，各種の重要な決定に対して，現場の状況や，従事者の人間関係の影響が避けにくいこと，さらに準備作業の日程を維持しての進行と確実性には困難がなかったとは云えない．我が国とヨーロッパ方式のそれぞれの利点を取り入れた方法の確立が望まれる．

10．謝辞

本打ち上げ実験は，欧州宇宙機構（ESA）の支援により行われた．ロケット実験の実施については，PI の D. Schwabe 教授との協力と，同教授の微小重力実験に関する豊富な経験に接し得たことを感謝したい．他方，日本側の地上実験遂行，人員派遣などは JAXA，日本宇宙フォーラム，日本学術振興会（科学技術研究費），東京理科大学の支援によるものである．記して感謝したい．