

宇宙航空研究開発機構研究開発報告

JAXA Research and Development Report

2000年IAOテーマ

周期的な渦流れにおける分散粒子のダイナミクス

河村 洋

2006 年 3 月

宇宙航空研究開発機構

Japan Aerospace Exploration Agency

2000 年 IAO テーマ 周期的な渦流れにおける分散粒子のダイナミクス

河村 洋*

Dynamics of Suspended Particles in Periodic Vortex Flows

By

Hiroshi KAWAMURA*

Abstract: Seeding the flow with tracer particles is a common way to visualize the flow in a half zone 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 conducted was 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. The numerical analysis of the three dimensional structure was also performed.

Keywords: Marangoni convection, liquid bridge, particles

概 要

本研究は、微小重力科学国際公募 (IAO) のテーマの一環として、国際宇宙ステーション (ISS: International Space Station) に搭載される実験装置の相互利用を目的として行われた。ハーフゾーン液柱内の対流場を可視化する方法として、一般にトレーサ粒子法が用いられる。地上実験において、対流場が三次元回転振動流を呈する際、トレーサ粒子が1つの閉じたひも状に集合する現象を捉えている。これを Spiral Loop Particle Accumulation Structure (SL-PAS) と名づけた。本研究では、実験用小型ロケット MAXUS6 を用いた宇宙実験を、2004 年 11 月 22 日に欧州宇宙機構 (ESA) の支援により行った。これにより、微小重力環境下においても粒子が集合し、SL-PAS が形成されることが始めて明らかになった。さらに周方向波数 $m = 2$ 及び 3 のいずれの場合も SL-PAS の形成に成功した。SL-PAS の上面及び側面の 2 方向からの可視化により、微小重力環境下における SL-PAS の三次元的構造を再構築することに成功した。さらに同条件での数値シミュレーションによっても SL-PAS の再現に成功した。

1. 緒 言

本研究では、高プラントル数流体におけるマランゴニ対流を研究対象とし、実験対象にはフローティングゾーン (FZ) 法を模擬したハーフゾーン (HZ) 法を用いている。HZ 法は、液柱接触面が同一の径を有する 2 本のロッド間に液柱を形成する。片方のロッドを加熱することにより、液柱端面間に温度差 (ΔT) を付加し、温度差マランゴニ対流を生起させる。この ΔT を大きくしていくに従って、液柱間の対流場は 2 次元の定常流から 3 次元の非定常流へと変化していき、やがては

* 東京理科大学, 〒 278-8510 千葉県野田市山崎 2641, E-mail: kawa@rs.noda.tus.ac.jp

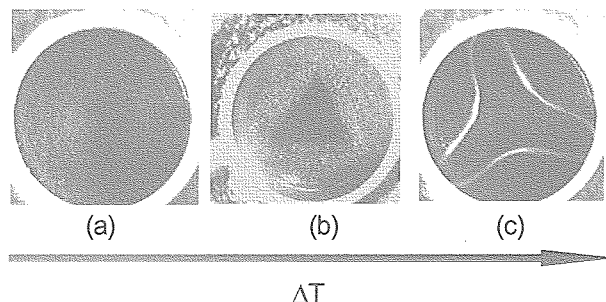


Fig. 1 Transition from 2D study flow to SL-PAS with increase ΔT ($m = 3$).
(a) is Steady flow, (b) is traveling 3D oscillatory flow, (c) is SL-PAS)

カオス流れへと遷移することが知られている。材料生成における偏析の問題などを対象とし、定常流から非定常流への遷移付近に着目した研究が盛んに行われてきているが、近年、流体力学分野の基礎的な現象の理解を目的として、遷移後の複雑な流れへの関心も広がっている[1,2]。

HZ法における対流場の観察には、一般にトレーサ粒子が用いられる。Schwabeら[3]、筆者ら[4]のこれまでの研究において、初期状態で液柱内に広く分布していたトレーサ粒子が、ある限られた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)が見出されている。このように粒子が集合する現象は、アスペクト比や上下ロッド間温度差に依存した液柱内の各流れ場において数種類観察されている。その中でも特に、図1(c)に示すような、特定のパターンを持った3次元的に閉じたひも状に粒子が集合し、その構造が周方向に回転するPASをSpiral Loop PAS (SL-PAS)と呼ぶ[4,5]。

2. 経緯

本研究は、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。

2.1. IAO 候補テーマ概要

2.1.1. 題目と目的

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)

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のメカニズムの解明し、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。

2.1.2. 参加構成員

PI H. Kuhlmann, University of Vienna (Austria)*

CI D. Schwabe, University of Giessen (Germany)

CI H. Kawamura, 東京理科大学 (Japan)

CI E. Meiburg, UCSB (USA)

* 申請時は ZARM (Germany) に所属

各研究者の役割分担の概要を図に示す。PIであるDr. H. Kuhlmannが研究の総括、数値解析及びデータの解析を担当し、実質的な実験の遂行はCIであるProf. Schwabe及び河村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ている。

2.1.3. 使用装置

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。

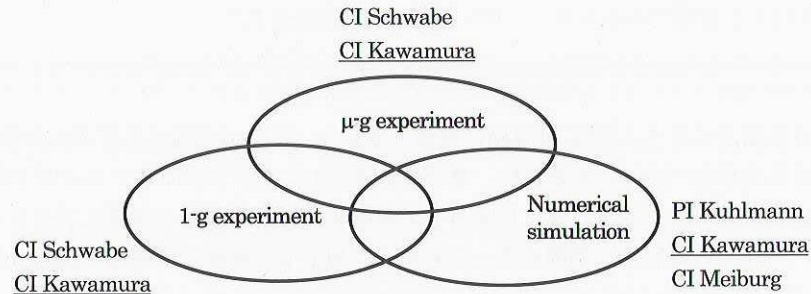


Fig. 2 Share chart of the project.

2.2. MAXUS6 を用いた実験

2.2.1. 題目と目的

TEM-0627 M: 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)

液柱内マランゴニ対流における粒子の集合現象は、地上実験で始めて発見された。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する。

2.2.2. 構成人員

PI D. Schwabe, University of Giessen (Germany)

CI H. Kawamura, 東京理科大学 (Japan)

CI H. Kuhlmann, University of Vienna (Austria)*

* 申請時は ZARM (Germany) に所属

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。

3.1. Trauen (EADS Space transportation) での作業

MAXUS6 に搭載された 5 台の実験モジュールのうち、本実験装置を含む 4 台はドイツ (Trauen) の EADS Astrium Space が製作担当した。製作グループは、異なる専門 (光学、システム、工作など) を持つ数人の技術者で構成されている。これらのメンバーは、TEXUS プロジェクトが立ち上がった時に編成されて以来、これまでのドイツ担当実験装置全ての製作に携わってきたベテランである。装置製作過程では、エンジニアリングモデル (EM) は製作せず、フライトモデル (FM) の製造のみで予算の削減及び時間の短縮を図っている。我々研究者側には、打ち上げ 2 ヶ月前に Trauen に行き、実験装置の動作確認を共同で行うことが要請された。この時、同時に FM を使用した地上実験も行う予定であった。しかし結局、この機会にはほとんど実験を行うことが出来なかった。

これは、後に述べる実験パラメータの変更や、いくつかの未解決部分が、この時点で発見されたことにある。そのため、共同で実験装置の改造を行ったが、SL-PAS を生起させられない状態のまま、Trauen での作業を主張せざるを得なかった。そこで、もう一度 PI の Schwabe が Trauen を訪れ、装置改良を行い、この時点でどうにか SL-PAS を発生させられるようになった。打ち上げはほぼ一ヶ月前の段階であった。実験装置は、その直後、Trauen からミュンヘンに輸送され、技術的な試



Fig. 3 Payload (TEM 06-27) and engaged team.

験を受けたあと、ロケット打ち上げ場であるスウェーデンのキルナへ輸送された。

3.2. Kiruna での作業

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 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、打ち上げに望むことが出来た。

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 4 に、液柱付近の概要を図 5 に示す。

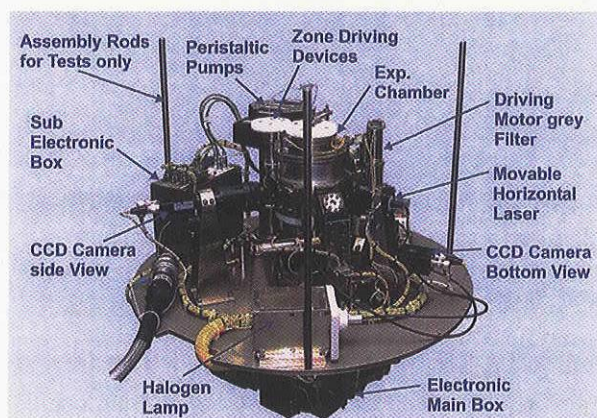


Fig. 4 Experimental apparatus onboard MAXUS6.

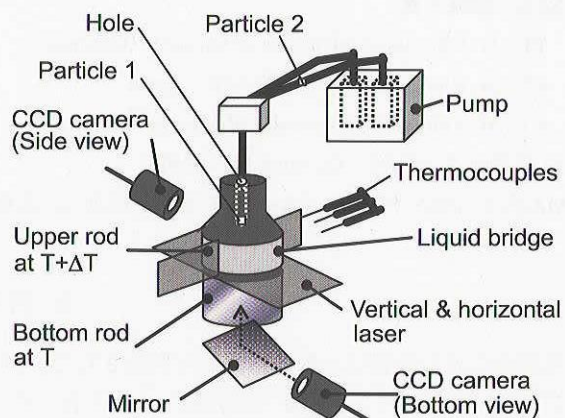


Fig. 5 Arrangement of the half-zone experiment.

4.1. 可視化

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 次元的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。

4.2. 温度制御と計測

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、それぞれベルチエ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 $25 \mu\text{m}$) 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。

4.3. アスペクト比

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さまざまに変化させる。この際、歯車のバックラッシュが、時間の損失の大きな要因のひとつとなった。さらに、オペレーターの負担も大きくミスが生じやすいため、今後は改善が必要である。

4.4. 試験流体

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 ($2\text{ cSt}, \text{Pr} = 28$) を採用し、装置製作も開始していた。ここで地上実験においては、温度勾配の付加は、図 6 (a) に示すように、サファイア側を高温、アルミ側を低温とし、アルミ側のロッドにエッジを切ることによって液だれを防いだ。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、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 (図 6 (b))。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 (図 6 (b))。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。

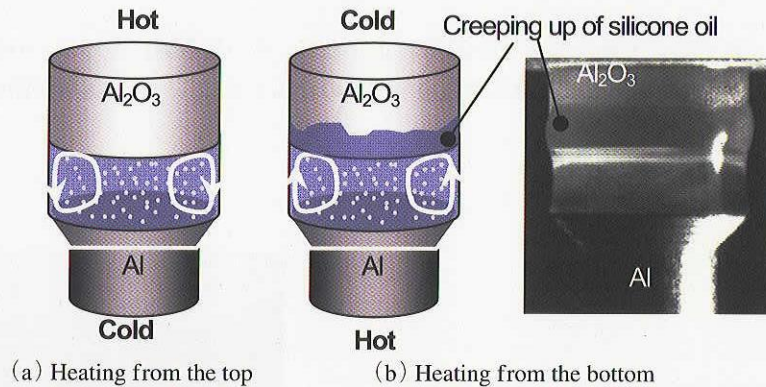


Fig. 6 Stability of the liquid bridge against a direction of thermocapillary convection in the terrestrial experiment.

4.5. 粒子

トレーサ粒子はダイヤモンド粒子 ($10\text{--}15$ 及び $40\text{--}50\text{ }\mu\text{m}$) 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 5 に示す 2 箇所粒子を置き、試験流体で洗い流しながら混入させる方法をとった。図 5 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、図 6 (a) に示すように上部のロッドを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、図 6 (b) に示す様に、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、 $\Gamma = 0.64$, $\Delta T = 14.5$, m2 については $\Gamma = 0.86$, $\Delta T = 10.0$ と決定した。

6. 打 ち 上 げ

MAXUS は ESA 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おこなう。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 7）。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。



Fig. 7 Lift off in the frozen field.

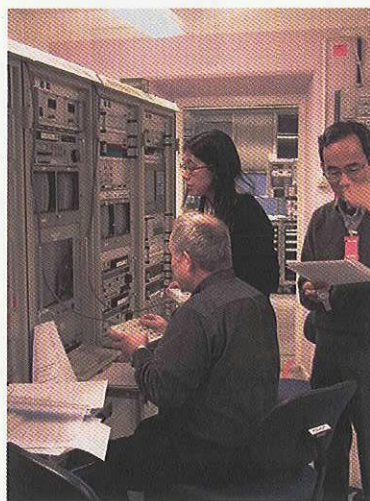


Fig. 8 Training of teleoperation (Schwabe, Tanaka, Kawamura).

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 9）。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 10）。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-0627 M 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。



Fig. 9 Dismounting the flight apparatus.



Fig. 10 Retrieved payload.
(Tanaka, Kawamura, Sasaki)

8. 実験

8.1. 実験の進行状況

実験の進行状況は以下の通りである。(秒数は、速報につき概略値)

- 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

8.2. 実験結果と考察

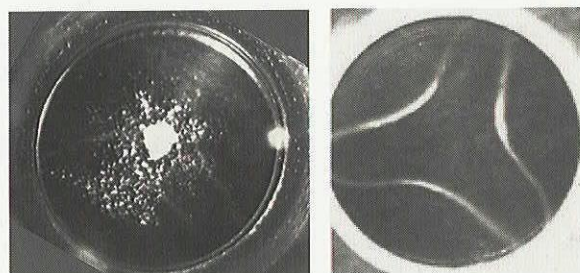
8.2.1. $m = 3$

宇宙実験の結果, まず $m3$ 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 11 に示す. さらにこの条件下での上面及び側面からの可視化画像を用いて SL-PAS の構造の 3 次元再構築を行った. これを図 12 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.

8.2.2. $m = 2$

$m2$ の探索では, 脈動振動流が支配的になり, Γ 及び ΔT をそれぞれ変化させたが, 回転成分を誘起させることが出来ず,



(a) Bottom View



(b) Side View

(1) Experiment (μg) (2) Experiment (1 g)

Fig. 11 Structure of the SL-PAS.

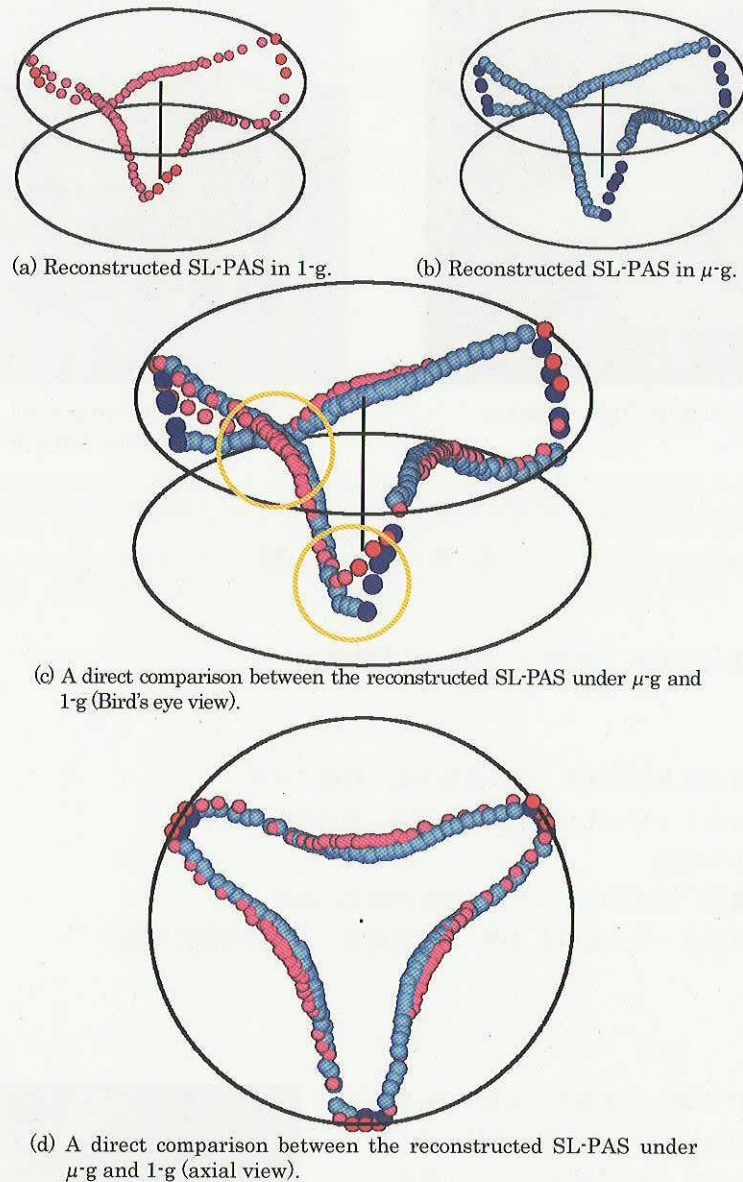


Fig. 12 Reconstructed PAS under μ -g and 1-g, all the other experimental parameters are identical.

地上と同条件においてはSL-PASは観察されなかった。しかしm2からm3へ液柱高さを変化させる過程で、体積比を小さくしたために、回転成分が誘起され、かつSL-PASのm2を捕らえることが出来た。脈動流が支配的な理由の解明は今後の不安定課題である。

9. 数値シミュレーション

MAXUS-6実験と同時に数値シミュレーションによるアプローチも進めてきた。粒子群挙動に着目し、仮想粒子を考慮した数値計算を行うことにより、MAXUS6実験と同条件でのTS-PAS構造を再現し、ISS実験に向けてSL-PASの発生条件を特定することを目的とした。

9.1. 計算手法

計算手法は、流体計算、粒子軌道計算の二段階により構成され、これらを繰り返し実行することで流れ場と粒子挙動の解析結果を得る。仮想粒子の計算手法は、球形微粒子の運動方程式(BBO方程式)を解くことで、慣性、Stokes抵抗力、

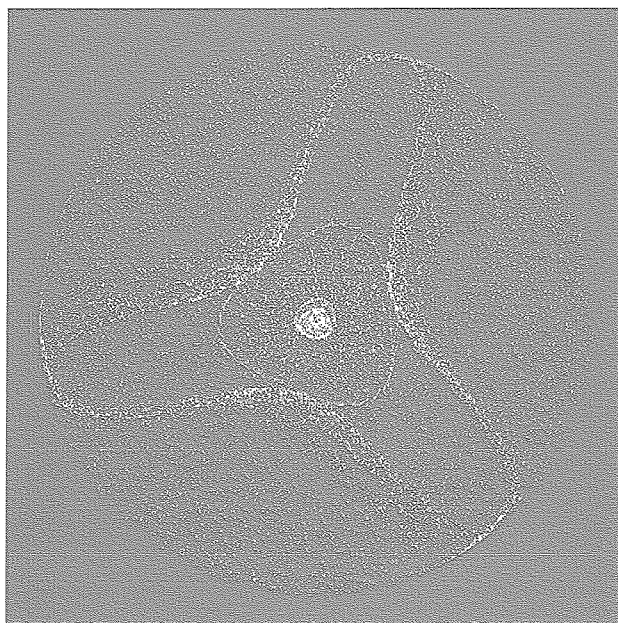


Fig. 13 Calculated SL-PAS by numerical simulation
($Ma = 34,600, \mu g$)

流体加速による圧力勾配などを考慮している。但し、粒子の混合比は十分小さいので粒子同士の衝突および粒子から流れ場への影響はないものとしている。仮想粒子の境界条件については、固体壁では半径分内側の場所で弾性反射するものとし、自由表面では半径分以上表面に接近しないように境界を設け、粒子の大きさを考慮している。また粒子の速度は各計算セル内での一次内挿によって求めている。流体計算における自由表面での速度と温度の関係は、自由表面に沿う表面張力と粘性力との釣り合い方程式より導いた。

9.2. 計算条件

本計算で用いる解析対象は、側表面を自由表面、上下面は固体表面の真円柱とし、重力による影響は無いものとしている。計算格子は $(r, \theta, z) = (64, 48, 46)$ で、最小メッシュ幅は r 方向 $= 0.0022$, z 方向 $= 0.0021$ としている。計算条件は、 $Ma = 34,600$, $Pr = 15$ (n-decane), 粒子直径 $48 \mu m$, 液柱直径 $6 mm$, 液柱高さ $1.92 mm$ とした。これは MAXUS6 実験と同条件である。(トレーサ粒子径を除く)

9.3. 計算結果と考察

数値シミュレーションにより、MAXUS6 実験と同一の対流場、ならびに粒子集合現象 (SL-PAS) を再現することに成功し、MAXUS-6 の状況を再現することが出来た。これを図 13 に示す。しかし、トレーサ粒子の大きさに関しては、ロケット実験では公称直径 $10\text{--}15 \mu m$ の粒子で SL-PAS が、大きい粒子径 ($48 \mu m$) でなければ SL-PAS を再現できなかった。また自由表面上の境界条件を断熱とした場合 SL-PAS は再現されず、放熱を考慮に入れた場合のみ SL-PAS を再現した。今回はパラメータとしなかったが、今後は、無重力とはいえ慣性力として効いてくると予測される密度比 α の影響の考察や、現コード内での粒子の取り扱い (境界条件や粒子間、又は粒子から流体への相互作用、自由表面の静/動的変形の考慮など) のさらなる改良を行っていく必要がある。

10. 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を確立していきたい。

11. 成 果 発 表

- [1] 世木智博, 田中志穂, 河村洋, “小型ロケット実験 (MAXUS6) に向けた液柱内温度差マランゴニ対流における粒子挙動の数値解析”, 日本マイクログラビティ応用学会誌, Vol. 21, 25, 2004
- [2] 河村洋, 田中志穂, 佐々木幸枝, ディートリッヒ・シュワーベ, “MAXUS6 による液柱内粒子集合 (PAS) の宇宙実験”, 第 21 回宇宙利用シンポジウム Space Utilization Research, Vol. 21, 130-134, 2005
- [3] 河村洋, 田中志穂, “MAXUS6 を用いた微小重力実験”, 日本マイクログラビティ応用学会誌, Vol. 22, No.3, 180-183, 2005
- [4] S. Tanaka, H. Kawamura, D. Schwabe, A. Misyov, “Particle accumulation structures in time-dependent thermocapillary flow in a liquid bridge under microgravity Part 1: Realization of PAS with $m = 3$ ”, ELGRA News vol. 24, p. 216, September 2005
- [5] D. Schwabe, A. Misyov, S. Tanaka, H. Kawamura Particle accumulation structures in time-dependent thermocapillary flow in a liquid bridge under microgravity Part 2: Attempts to find PAS $m = 2$ ELGRA News vol. 24, p. 217, September 2005
- [6] Dietrich Schwabe, Shiho Tanaka, Alexey Mizev and Hiroshi Kawamura, “Particle accumulation structures in time-dependent thermocapillary flow in a liquid bridge under microgravity”, Microgravity Science and Technology, (in print)
- [7] 数値解析結果 (現在執筆中)

12. 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。

参 考 文 献

- [1] Melnikov, D. E., Shevtsova, V. M., & Legros, J. C., Onset of temporal aperiodicity in high Prandtl number liquid bridge under terrestrial conditions, Phys. Fluids 16, pp. 1746-1757, 2004.
- [2] Ueno, I., Tanaka, S., and Kawamura, H., “Chaotic behavior of Thermocapillary-Driven Flows in a Half-Zone Liquid Bridge”, Phys. Fluids 15, pp. 408-416, 2003.
- [3] Schwabe, D., Hintz, P., Frank, S., “New features of thermocapillary convection in floating zones revealed by tracer particle accumulation structure (PAS)”, Microgravity Sci. Technol. 9, pp. 163-168, 1996.
- [4] Tanaka, S., Ueno, I., & Kawamura, H., “Dynamic particle accumulation structure in half-zone liquid bridge Part I: Experimental study”, J. Jpn. Soc. Microgravity Appl. 17 (Supplement), pp. 111-112, 2000.
- [5] 田中志穂, 上野一郎, 河村洋; 日本機械学会論文集, B 70, 167 (2004).

宇宙航空研究開発機構研究開発報告 JAXA-RR-05-036

発 行 平成 18 年 3 月 24 日

編集・発行 宇宙航空研究開発機構

〒182-8522 東京都調布市深大寺東町 7-44-1

URL : <http://www.jaxa.jp/>

印刷・製本 (株) 東京プレス

本書及び内容についてのお問い合わせは、下記をお願いいたします。

宇宙航空研究開発機構 情報システム部 研究開発情報センター

〒305-8505 茨城県つくば市千現 2-1-1

TEL : 029-868-2079 FAX : 029-868-2956

© 2006 宇宙航空研究開発機構

※ 本書の一部または全部を無断複写・転載・電子媒体等加工することを禁じます。

