

平成18年度「界面現象と流体不安定性の研究ワーキンググループ」活動報告書

WG 代表者 JAXA 松本 聡

1. 構成メンバ

氏名	所属
松本 聡	JAXA
依田 眞一	JAXA
鴨谷康弘	Case Western Reserve Univ.
今石宣之	九州大学
河村 洋	東京理科大学
西野耕一	横浜国立大学大学院
川路正裕	University of Toronto
上野一郎	東京理科大学
小宮敦樹	東北大学
大平博昭	JAXA
益子岳史	JAXA

2. 本年度 WG 会合開催実績

2.1 全体会合

- (1) 第1回：平成18年10月7日
- (2) 第2回：平成19年3月8日

2.2 サブグループ会合

- (1) 第1回：平成18年10月10日
- (2) 第2回：平成18年10月27日
- (3) 第3回：平成19年11月22日
- (4) 第4回：平成19年3月12日
- (5) 第5回：平成19年3月27日

3. 活動目的

流体力学的不安定性に関する研究は、19世紀のレイノルズの研究に始まり100年を超える非常に長い歴史があり、単純な系における現象の解明は相当進んできた。しかし、流体力学と表面現象、相変化を伴うカップリング現象に関しては、未解明・未着手の領域も多い。

そこで、流体不安定性と結晶成長や気液二相の相互作用等に関するサブグループを形成し、研究に着手し、次ステップへの発展を図る。特に、微小重力環境の利用が有効な、界面を有する流体挙動の現象解明、モデル材料を用いた対流やgジッタが結晶成長に及ぼす影響の解明、マランゴニ対流下での微小気泡

配列現象の解明等の研究課題を検討し、地上研究の実施及び短時間微小重力実験手段で体系的な研究成果を創出可能な研究構想を検討することが目的である。

4. 活動内容

本WGは、議論を通じ3つの研究課題を設定し、それぞれサブグループとして活動を行った。以下の各サブグループにおける目的、活動状況を記述する。

4.1 流れを伴う相変化不安定性解明 (SG1)

(1) 目的

凝固に及ぼす対流の影響を系統的に研究する第一歩として、ミクロ・マクロモルフォロジ不安定性発生限界に対する対流の寄与を明らかにすることを目的とする。対流としては、自然対流（浮力対流あるいはマランゴニ対流）を溶液内に誘起し、その条件下で結晶成長を行い、その界面形態の観察を行う。形状としては、直線的な固液界面を基本形状とする矩形液膜系が一般的であるが、この系においては両側面の影響が避けられない。そこで側面を有しない配置として環状液膜も取り上げることとし、矩形液膜と環状液膜の両者について検討する。さらに、デンドライト界面などの不安定発生後の形態に対する影響についても併せて研究を行う。

(2) 活動状況

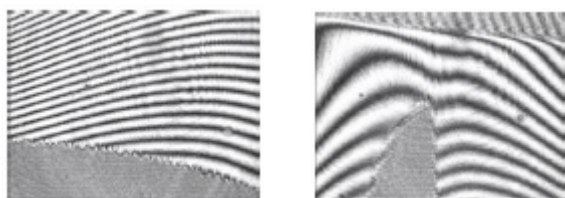
モデル材料（サクシノニトリル等）を用いた流れと結晶成長界面形態、組成分布変動について実験及び数値解析による研究とし、研究計画を立案した。

干渉計を利用し結晶成長界面近傍の温度場濃度場を取得するために、干渉計のセットアップ、厚さ0.5mm程度のガラスセルの設計・製作した。対流を発生させる場合には、ガラスセルの左右側面からペルチェにより加熱を行い、底面を冷却することで浮力対流による一対の対流セルを誘起し、底部より結晶を成長させる。また、対流を抑制した実験に

においては側面を断熱とし、上部を加熱、底部を加熱する。本実験装置を用い、対流による界面前方の温度勾配、濃度勾配の変化を計測する。

実験としては、ガラスセル内にサクシノニトリル 5% アセトン を封入し、試料すべてを溶かした状態でまず対流の様子を確認した。意図した通り、セル内の側面で上昇し、セル中心で下方流となる対流が発生した。この状態でセル内の温度を徐々に下げ、結晶成長させた。成長初期においては、 $100\text{ }\mu\text{m}$ 程度の太さを持つデンドライトが成長した。このときの成長速度は $106\text{ }\mu\text{m/s}$ であった (Fig. 1 (a))。成長とともに、特定のデンドライトが選択的に突出するようになり、最終的には太さ 1 mm 程度の太さを持つ結晶となった (Fig. 1(b))。突出する部分是对流が結晶に向かって流れていることが分かった。この箇所は比較的冷たい溶液の部分であり、結晶はその冷たい部分で選択的に成長した。

今後は制御された流動下での結晶成長を行い、成長界面近傍の温度勾配、濃度勾配を二波長干渉計により測定し、成長の駆動力である界面過飽和度を算出する。そのことにより、対流強度による成長界面不安定性限界への影響を明確化する。



(a) 成長初期段階 (b) 成長終了段階

Fig. 1 デンドライト形状

4.2 対流中に存在する気泡によるパターン形成 (SG2)

(1) 目的

マランゴニ対流の微小重力実験 (OTFE-2) において、微小気泡が等間隔に整列する特異な現象が見出された。この現象は、定常マランゴニ対流実験時に偶然混入した数個の気泡が、互いに離れる挙動を通じて、円周方向に整列するものである。この気泡はマランゴニ流れの渦中心に留まっているが、次の気泡が混入すると小さな気泡は時間と共に離れて行き、

複数個の気泡が混入した場合には最終的に円周方向に等間隔に整列した。この事実は、気泡間にあたかも何らかの斥力的相互作用が存在することを意味している。本研究を通じて、地上では困難な気泡に関する実験手法を確立すると共に、気泡の運動に関する解明を図る。さらに、長距離相関を持つ斥力相互作用の解明を目指す。

(2) 活動状況

前年度の予備実験で実験装置に関する問題点がいくつか明らかになったため、新しいセルを作製し、以下のような実験系の改良を行った。

- (a) 小型化による相対的浮力効果の低減
- (b) 側壁の平滑化
- (c) 加熱・冷却システムの強化
- (d) 壁面温度測定システムの整備

新セルのサイズは内壁直径 4 mm 、外壁直径 20 mm であるが、(a)により、 Ra/Ma (レイリー数とマランゴニ数の比) は旧セルの $1/4$ 程度に減少した。また、旧セルにおいては流体運動の可視化に用いるトレーサー粒子が内壁面にこびりついてしまうことがあったが、(b)はこれを防止するための措置である。(c)は具体的には、内壁ヒーターの駆動電源や、外壁内部を流れる水の循環冷却装置の交換を行ったが、これにより幅広い Ma について実験を行うことが可能となった。さらに(d)については、データロガーの交換およびプログラム作成によって温度データのリアルタイム統計処理を行えるようにするとともに、熱電対の校正や装置カバーの設置によって $\pm 0.5^\circ\text{C}$ 程度の精度で安定した内外壁温度が実現されるようにした。

気泡整列の主因として予想した

- (1) 気泡の表面流動
- (2) 気泡の排除体積効果
- (3) 対流自身の周期構造形成

の 3 種の効果について、これらが実際に気泡整列に影響しているかを調べるための実験を行った。

まず(1)については、対流中に気泡を模擬した液滴を投入しその物性値を変化させた時の振る舞いの変化を調べることで、表面流動の効果を評価するが、そのためにはまず作動流体 (シリコンオイル) と密度を等しく調整した液体を準備することが必要である。ここ

では2種類の液体AおよびBの混合液を用いることとし、数十種類の液滴を試したが、安全性、AとBの混合性、作動流体に対する不溶性など要求される条件をクリアする混合液は現在のところ実現できておらず、(1)の効果の是非は未だ不明である。

次に(2)について、表面流動のない固体球を対流中に投入する実験を行った。具体的には金コーティングにより密度調整したポリプロピレンのビーズを用いた。今年度は単一の直径(3.2mm)のビーズを用いて実験を行ったが、ビーズ間に斥力相互作用は見られず(逆に引力がはたらく)、排除体積効果が気泡整列に及ぼす影響は大きくないことが示唆されている。

(3)について行った、トレーサ(粒径 $20\text{--}30\mu\text{m}$ のポリエチレン粒子)を用いた可視化実験では、興味深い現象が観察された(Fig. 2)。Maが低い場合にはトレーサが対流渦の中心付近に集まってリング状の凝集パターンを形成し、Maの増大とともにこのリングが成長するが、最終的にはリングに亀裂が入り崩壊する、というものである。なお、Maを減少させた時にはリング状パターンが再形成された後、縮小していくという逆プロセスが観察された。この現象は、対流自身の構造が気泡整列に影響を及ぼすことを示唆している。

開放円筒容器内にマランゴニ対流が生じている系において、混入した気泡や液滴の挙動を評価し物理現象を解明するため、解析手法の構築を行っている。本解析手法では、有限要素法にレベルセット法を適用した手法を採用している。開放容器におけるマランゴニ対流場に気泡や液滴が混入した場合、気泡や液滴界面にも表面張力差によりマランゴニ力が発生し、気泡や液滴を高温領域に駆動する。これらの数値計算には、

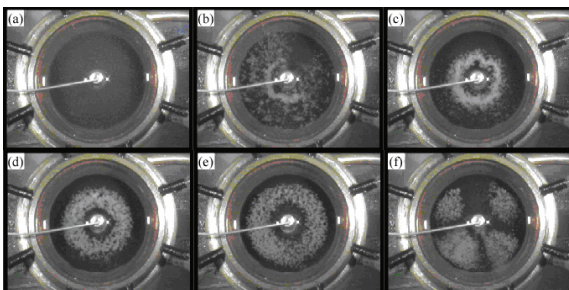


Fig. 2 トレーサ粒子の凝集パターン

数百万程度の空間要素数を要するため、並列計算が不可欠となる。

本年度は、これまでに構築した1CPU用の解析コードをMPIを用いて並列化を行い、約200万要素(Case 1; rough)及び約100万要素(Case 2; fine)を用いた3次元解析を行った。Fig. 3にCase 1条件における気泡の移行にともなう矩形ダクト内温度分布を示す。本解析結果を、過去のスペースシャトルで実施した同条件の実験結果(LMS)と比較的良好な一致が得られ、気泡界面のマランゴニ効果のモデリングの妥当性を確認した。

今後は実験結果による検証、及びスペースシャトルで行われた実験のように、開放容器におけるマランゴニ対流場における複数気泡挙動の解析を実施する予定である。

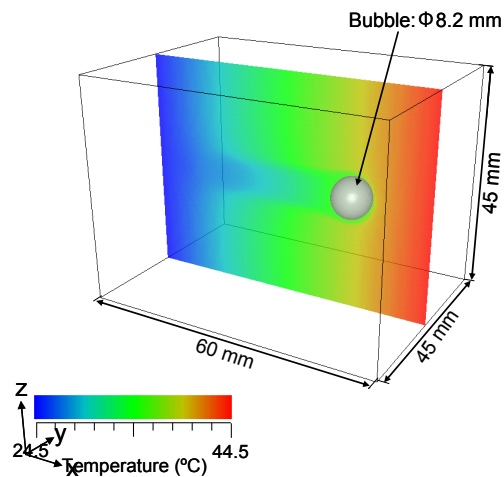


Fig. 3 気泡移行時の温度分布(Case 1)

4.3 表面張力駆動流に対する重力変動の効果 (SG3)

(1) 目的

国際宇宙ステーションにおける流体物理実験テーマとして採択されている温度差駆動の表面張力流を対象として、重力変動が与える効果(具体的には、重力変動がもたらす気液界面の動的変形、対流パターンの変化、振動流遷移への影響、気液界面熱輸送との関係など)を明らかにする。また、任意の重力変動を再現するためのプラットフォームとして、gジッタシミュレータを開発し、地上において重力変動の効果を研究するための基盤技術として展開する。これまで、重力変動をノイズと捉え、その影響を調べた

研究は散見されるが、任意の重力変動を人工的に再現し、その影響を課題として検討する研究は国内外で初めてである。

(2) 活動状況

g-jitter および対流による界面の微細な変形を捉えられた。g-jitter による界面変形は、液柱の固有振動数の理論的解析値にほぼ一致した。また、振動流による界面変形と液柱の形状から決まる固有振動数の周波数が異なる場合、jitter の有無による対流への影響は無かった。また、数値解析とバネ-マス-ダンパ系による振動数の解析との比較においても実験値をよく再現した。ただし、数値解析においては対流が組込まれておらず、対流を加味した解析を今後行う予定である。この解析により、対流の振動周期と固有振動数が一致した場合の影響について解析を行う。

5. 成果

5.1 学会発表

- 1) 山川智史、河村洋、松本聡、凝固過程における固液界面近傍の濃度分布に対する融液流れの影響、JASMA-22 講演論文集、J. Jpn. Soc. Microgravity Appl. Vol.23, No.4, p.292 (2006)
- 2) T. Mashiko, S. Matsumoto, H. Ohira, Y. Kamotani, S. Yoda, Pattern Formation in Marangoni Convection in an Annular Cell, 59th Annual Meeting of the Division of Fluid Dynamics, APS Vol.59, No. 9 (2006)
- 3) 益子岳史、松本聡、大平博昭、鴨谷康弘、依田真一、環状セルにおけるマランゴニ対流の周方向パターン形成、日本流体力学会年会 2006
- 4) T. Mashiko, S. Matsumoto, H. Ohira, Y. Kamotani, S. Yoda, Mechanism of Particle Formation in Marangoni Convection, 25th International Symposium on Space

Technology and Science, 2006-h-16 (2006)

- 5) H. Ohira, S. Matsumoto, T. Mashiko, S. Yoda and Y. Kamotani, Numerical analysis of thermocapillary flows in a cylindrical container, 25th International Symposium on Space Technology and Science, 2006-h-17 (2006)
- 6) H. Ohira, S. Matsumoto, T. Mashiko, S. Yoda and Y. Kamotani, Numerical analysis of bubble migration in thermocapillary flows of an open cylindrical container, Book of Abstracts of the fourth International Conference on Computational Fluid Dynamics (ICCFD4), pp. 41-42 (2006)
- 7) K. Nishino, Y. Kanashima, S. Tiwari, Development of G-jitter Simulator for Marangoni Convection Experiment, Sixth Japan / China Workshop on Microgravity Sciences
- 8) S. Tanabe, K. Nishino, S. Yoda, Effect of G-jitter on Oscillatory Thermocapillary Convection, Extended Abstracts of 8th International Workshop on Short-Term Experiments under Strongly Reduced Gravity Conditions, p.57 (2006)
- 9) 松本 聡、鴨谷康弘、今石宣之、河村 洋、西野 耕一、川路正裕、上野一郎、小宮敦樹、大平博昭、益子岳史、宇宙利用シンポジウム (第 23 回) プロシーディング、pp 98-100 (2007)

5.2 外部資金

- 1) 平成 18 年度科学研究費補助金 若手研究 (B)「マランゴニ対流におけるパターン形成機構の解明」採択
- 2) 平成 19 年度科学研究費補助金 基盤研究 (C)「成長界面モルフォロジ不安定性に対する融液流れの影響とそのマルチスケール解析」採択内定