

「界面現象と流体不安定性研究」ワーキンググループ活動報告

JAXA 松本 聡
 ケースウェスタンリザーブ大学 鴨谷康弘
 九州大学 今石宣之
 東京理科大学 河村 洋
 横浜国立大学 西野 耕一
 トロント大学 川路正裕
 東京理科大学 上野一郎
 東北大学 小宮敦樹
 JAXA 大平博昭、益子岳史

Activity Report of Research Working Group on Interfacial Phenomena and Fluid Instability

Satoshi Matsumoto
 Japan Aerospace Exploration Agency, 2-1-1, Sengen, Tsukuba, Ibaraki 305-8505
Yasuhiro Kamotani
 Case Western Reserve University, 10900 Euclid Avenue, Cleveland, Ohio 44106-7222, U.S.A
Nobuyuki Imaishi
 Kyushu University, 6-1, Kasuga-Koen, Kasuga, Fukuoka, 816-8580
Hiroshi Kawamura
 Tokyo University of Science, 2641 Yamazaki, Noda-shi, Chiba-ken 278-8510
Koichi Nishino
 Yokohama National University, 79-5 Tokiwadai, Hodogaya, Yokohama 240-8501
Masahiro Kawaji
 University of Toronto, Toronto, Ontario M5S 1A4, Canada
Ichiro Ueno
 Tokyo University of Science, 2641 Yamazaki, Noda-shi, Chiba-ken 278-8510
Atsuki Komiya
 Tohoku University, 1-1, Katahira, 2-chome, Aoba-ku, Sendai 980-8577
Hiroaki Ohira, Takashi Mashiko
 Japan Aerospace Exploration Agency, 2-1-1, Sengen, Tsukuba, Ibaraki 305-8505
 E-Mail: matsumoto.satoshi@jaxa.jp

Abstract: This report was described the activity of a research working group on Interfacial Phenomena and fluid instability. Primary three themes which would promise to utilize the microgravity condition were discussed. The research plan and organization concerning these themes were established. We start the preparatory study to accomplish each objective.

Key words: Fluid instability, Marangoni flow, Crystal growth, Bubble formation, g-jitter

1. 研究班の活動目的

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立案する。また、最終的には微小重力実験の実施により現象課題を解決する。

2. 構成メンバー

表1に構成メンバーと役割を示す。

表1 構成メンバーおよび役割

氏名・所属	役割
松本 聡 JAXA	WG 取り纏め SG1: 干渉計を用いた温度場の計測実験 SG2: 気泡挙動の観察 (SG2 リーダ)
鴨谷康弘 Case Western Reserve University	SG2: 対流中の気泡挙動に関する数値解析
今石宣之 九州大学	SG1: 環状液層内での凝固界面形状不安定性の実験、数値解析
河村 洋 東京理科大学	SG1: 矩形液膜における凝固界面の形態計測と不安定性限界、過冷度の実験、数値解析 (SG1 リーダ)
西野耕一 横浜国立大学大学院	SG3: 軌道上での g-jitter を模擬した実験 (SG3 リーダ)
川路正裕 University of Toronto	SG3: g-jitter を模擬した界面変形に関する実験および数値解析
上野一郎 東京理科大学	SG1: 矩形液膜における凝固界面の形態計測と不安定性限界、過冷度の実験、数値解析
小宮敦樹 東北大学	SG2: 気泡を模擬する混入物質の検討
大平博昭 JAXA	SG2: 数値解析による気液、固液密度差の評価
益子岳史 JAXA	SG2: 実験装置製作および実験実施

3. 本年度 WG 会合開催

3. 1 合同会合

- (1) 第1回: 平成 18 年 10 月 7 日
研究の進捗報告および議論
- (2) 第2回: 平成 19 年 3 月 8 日 (予定)
研究の進捗報告、今後の進め方の議論

4. 活動内容

本 WG は、平成 15~17 年度に宇宙環境利用科学委員会の研究班 WG として活動を継続・発展させてきた。議論において 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ている。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

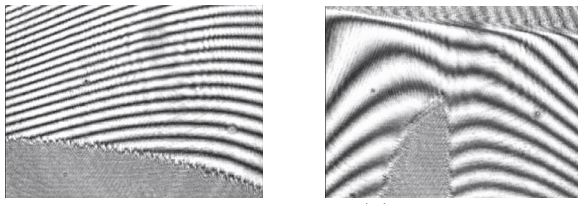
凝固に及ぼす対流の影響を系統的に研究する第一歩として、マイクロ・マクロモルフォロジ不安定性発生限界に対する対流の寄与を明らかにすることを目的とする。対流としては、自然対流 (浮力対流あるいはマランゴニ対流) を溶液内に誘起し、その条件下で結晶成長を行い、その界面形態の観察を行う。形状としては、直線的な固液界面を基本形状とする矩形液膜系が一般的であるが、この系においては両側面の影響が避けられない。そこで側面を有しない配置として環状液膜も取り上げることとし、矩形液膜と環状液膜の両者について検討する。さらに、デンドライト界面などの不安定発生後の形態に対する影響についても併せて研究を行う。

(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、ガ厚さ 0.5 mm 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 μm 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 $\mu\text{m/s}$ 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 (F 位 g. 2 (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



(a) Initial stage (b) final stage
Fig. 1 Dendrite interface shape

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。

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

気泡の整列に関して以下の3つの要因を考えた。

(1) 気泡の表面流動と主流動との相互作用

気泡表面での温度差により局所的マランゴニ対流が発生することによる気泡間斥力による整列。

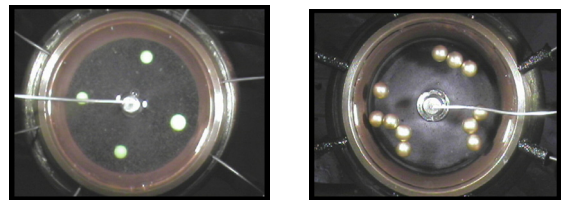
(2) 気泡の排除体積効果

サイズをもつ物体としての気泡の存在が周囲の流れに影響し、その結果として整列する。

(3) 作動流体自身の周期構造形成

主流において周方向にパターンが形成されており、そのパターンを反映して気泡が整列する。

上記仮説を確かめるために、直径 30 mm 環状セルを有する実験装置の製作を行い、地上での予備実験を開始した。実験では、シリコンオイルによるマランゴニ対流を発生させ、その対流中に比重を一致させた液滴 (主流体とは相分離) を数個混入した状態を実現した (Fig. 2)。その際、液滴は条件によって周方向に均等な間隔で整列したが、



(1) liquid droplet (2) Solid ball
Fig. 2 Pattern formation of liquid droplets and balls

現時点では整列する条件の特定には至っていない。固体球を混入した場合にはむしろ固体球同士が接触する状況となった。

固液あるいは気液の2相流れを取り扱う数値解析コード作成し、マランゴニ対流中の気泡の運動を解析した。気泡が一つの場合に対流の中心に気泡が移動する様子を模擬することができた。今後は、実験で行っている環状プールでの複数の気泡の運動を解析し、実験結果との比較により、気泡整列メカニズムの解明を行う。

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るた。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。