

「界面現象と流体不安定性の研究」研究班 WG 活動報告

宇宙航空研究開発機構 松本 聡、石塚博弥

ケースウェスタンリザーブ大学 鴨谷康弘

東北大学 小宮敦樹

静岡大学 益子岳史

フロリダ大 Ranganathan Narayanan

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

Satoshi Matsumoto, Hiroya Ishizuka

Japan Aerospace Exploration Agency, 2-1-1, Sengen, Tsukuba, Ibaraki 305-8505

E-Mail: matsumoto.satoshi@jaxa.jp

Yasuhiro Kamotani

Case Western Reserve University, 10900 Euclid Avenue, Cleveland, Ohio 44106-7222, USA

Atsuki Komiya

Tohoku University, 1-1, Katahira, 2-chome, Aoba-ku, Sendai 980-8577

Takashi Mashiko

Shizuoka University, 3-5-1, Jyohoku, Hamamatsu, Shizuoka 432-8561

Ranganathan Narayanan

University of Florida, Gainesville, Florida 32611, USA

Abstract: This report was described the activity of a research working group on Interfacial Phenomena and fluid instability. We discussed the phenomena which depend on the gravity or make clear under the reduced gravity. Three problems are taken in this research working group as follows; (1) An alignment of equally-spaced air bubbles, (2) An instability that arises from imposed time dependent accelerations (Faraday Instability) and (3) the onset of oscillations in Marangoni-Bénard instability and pattern generation.

Key words; Interface, Pattern formation, Faraday Instability, Marangoni-Bénard instability

1. はじめに

流体力学と表面現象、相変化を伴うカップリング問題に関しては、未解明・未着手の領域も多い。そこで、界面を伴う流体不安定性現象の中で、特に重力依存現象あるいは重力を取り除いたときに初めてその本質が見えてくる現象に着目し、その現象における研究課題の抽出、微小重力環境利用の有効性について検討を行った。

対象とした現象は以下の3つである。

- (1) 環状マランゴニ対流中の気泡整列現象
- (2) 非混合液体界面に発生するファラデー不安定性
- (3) マランゴニ-ベナル対流における振動モードの発現

これらの検討結果概要について以下に述べる。

2. 活動内容

2.1 環状マランゴニ対流中の気泡整列現象

スペースシャトルにおけるマランゴニ対流実験 (OTFE-2) において、気泡が等間隔に整列する特異な現象が見出された (Fig. 1)。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。気泡整列の主因として以下の3つを仮説として検討している。(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。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予備検討として、気泡に見立てた固体球や非混合液体をマランゴニ対流中に投入しその挙動を観察した。その結果、固体球の場合、最終的に凝集する傾向が見られた。一方、液体を投入した場合、一部の条件において斥力的な挙動を示した。また、極小のトレーサ粒子を混入した実験においては対流自身の周期構造も見出されている。



Fig.1 マランゴニ対流中の気泡の整列現象 (OTFE-2)

予備検討実験として、直径 30 mm の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 (Fig. 2)。実験では、中心に加熱用のヒータを設置して加熱し、側面を冷却水を通すことで冷却した。そのことにより、シリコンオイル中に温度差マランゴニ対流を発生させ、気泡に見立てた固体球や非混合液体をマランゴニ対流中に投入しその挙動を観察した。その結果、固体球の場合、最終的に凝集する傾向が見られた。一方、液体を投入した場合、一部の条件において斥力的な挙動を示した (Fig. 3)。また、極小のトレーサ粒子を混入した実験においては対流自身の周期構造も見出されている。

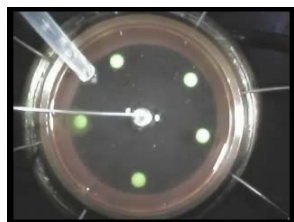
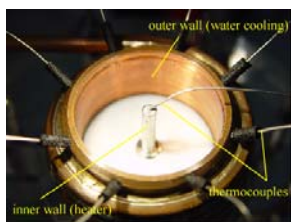


Fig.2 実験セル Fig.3 気泡模擬液滴の配列

解析では、有限要素法にレベルセット法を適用した手法を採用し、まず上記の容器に生じるマランゴニ対流の定常解を求め、次に適当な位置に発生させ、その動きをシミュレーションするという手順で行った。昨年度は、上記円筒容器の 45°セクターモデルに単一気泡が存在する場合の解析を実施し、気泡

速度は容器中心 (ヒータ表面) に近づくにつれて増大し、渦中心方向に移行することを明らかにした。

Fig.4 に示したように、円筒容器の 90°セクターに 2 個の気泡が存在し、相互作用について解析を実施した。気泡位置は、高さ方向及び半径方向は上記の単一気泡の場合と同じであるが、周方向は 30°及び 60°と、周方向に非対称な位置とした。Fig. 5 に周方向速度コンターを示す。2 個の気泡間の速度コンターが外部よりも密となり、気泡間に斥力が作用していることがわかった。したがって、ヒータ表面に近い領域において、これらの斥力により気泡は互いに離れた位置へ移動すると考えられる。

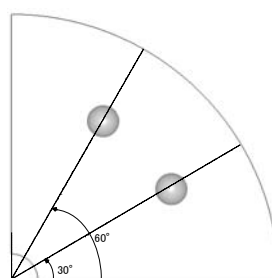


Fig.4 90°セクターモデルの初期気泡位置

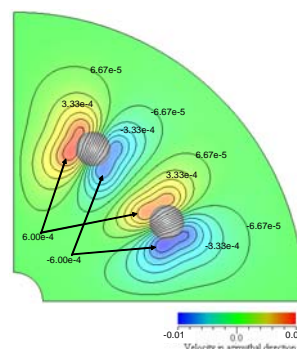


Fig.5 周方向流速コンター分布 (t=27.5)

2.2 非混合液体界面に発生するファラデー不安定性

異なった密度を持つ非混合液体に振動を与えると、臨界値を超えたところで界面に不安定波が発生することが知られている (Fig.6)。これは、ファラデー不安定性と呼ばれ、古くから知られているが、この現象は重力依存性を持つものと推測される。通常重力下では、現象は安定化しその臨界点は無重力の場合と比較し大きくなるものと予測されている (Fig.7)。しかしながら、これらはいまだ証明されておらず微小重力実験が望まれている。この現象は、数秒から数十秒で発生することから、短時間微小重力手段 (パラボリックフライト、小型ロケット) による実施が可能であると考えている。

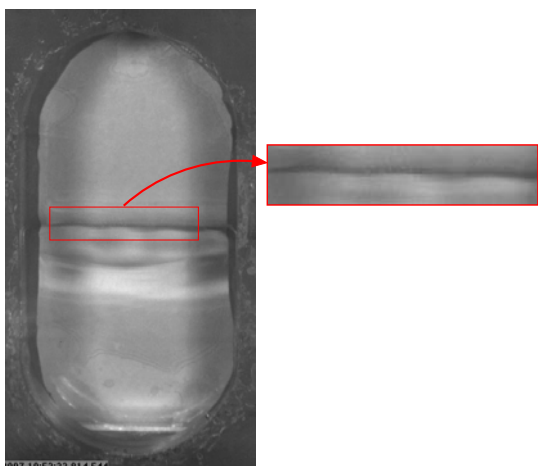
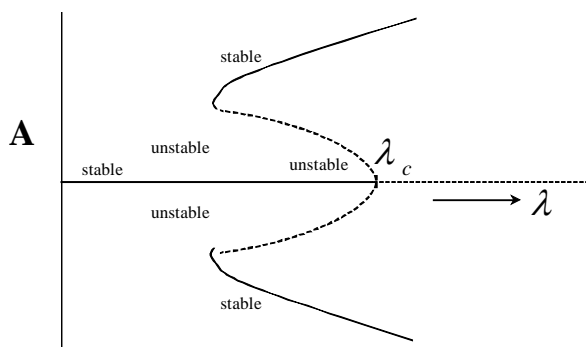
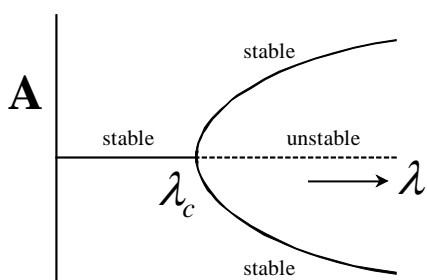


Fig. 6 非混合液体界面に発生するファラデー不安定性現象



(1) 1g (Backward pitchfork)



(2) 0g (supercritical (forward) pitchfork)

Fig.7 ファラデー不安定性分岐における重力依存性

2.3 マランゴニ-ベナール対流における振動モード
 上面が空気と接した液膜を液体側（下面）から熱すると対流が発生することはよく知られている。無重力に置いても対流はマランゴニ効果により発生し、Fig. 8 に示すような六角形型の対流パターンは典型例である。

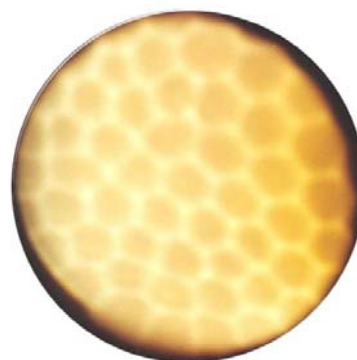


Fig. 8 マランゴニ-ベナール対流のシャドウグラフ像

Fig. 9 にはパターン形成する臨界マランゴニ数のアスペクト比依存性を示す。内在するモード数 m は複雑に横切り、複数のアスペクト比において多重化したパターンが発生するケースがある（例えば、アスペクト比が 1.3 や 2.3 付近）。このようなアスペクト比では、振動的に複数のモード構造が発現するものと考えられる。しかしながら、この現象は地上で実験した場合に浮力対流の影響を受けるために、理論と実験結果が一致していない。このことから、微小重力環境を利用してこの現象を確認することが必要である。

本現象の特性時間は、1 時間程度であることから長時間微小重力環境が必要であり、ISS などの利用に向けて検討を実施中である。

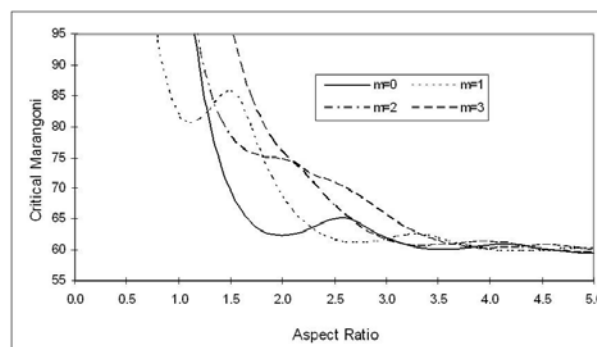


Fig. 9 線形モデルにおける臨界マランゴニ数のアスペクト比依存性

3. まとめ

ここで取り上げた現象はいずれも重力環境下では精度のよい観察が困難、あるいは重力が存在することにより異なった挙動を示す現象が確認されており、理論や数値解析結果と異なったものである。実験結果が異なるものは、それが本質的な現象であるか否かについて、微小重力環境下での実験で確認すべく、さらなる検討を実施する予定である。