

Hydrothermal Wave 不安定性と気液界面熱伝達に関する 日欧共同宇宙実験の提案

横浜国立大学 西野耕一

東京理科大学 河村洋、上野一郎

宇宙航空研究開発機構 松本聡

Proposal of Japan-Europe Joint Space Experiment on Hydrothermal Wave Instability and Interfacial Heat Transfer

Koichi Nishino, Yokohama National University*

Hiroshi Kawamura, Ichiro Ueno, Tokyo University of Science

Satoshi Matsumoto, Japan Aerospace Exploration Agency

* Yokohama National University, 79-5 Tokiwadai, Hodogaya-ku, Yokohama 340-8501

E-mail: nish@ynu.ac.jp

Abstract: The activity of the working group on “Hydrothermal Wave Instability and Interfacial Heat Transfer” is reported in this paper. The goal of this working group is to embody a Japan-Europe joint space experiment on this subject. The outline of the space experiment agreed in the ESA-JAXA joint meeting held at ESTEC in Holland in October, 2006, is described here.

Key words; Hydrothermal Instability, Heat Transfer, Space Experiment

1. はじめに

著者らは、宇宙環境利用科学委員会研究班WGにおいて、Hydrothermal Wave 不安定と気液界面熱伝達に関する日欧共同宇宙実験を立案中である。その具体的取り組みとして、2006年10月にオランダESTECで開催されたESA-JAXA合同会議に出席し、欧州側研究者グループ(ESA Topical Team)との協議の結果、宇宙実験のアウトライン化を行った。本稿では、地上研究による日本側研究者の準備状況とともに、宇宙実験計画の概要を報告する。

2. 地上研究による準備状況

表面張力流が臨界条件を越えると定常流から振動流へと遷移することはよく知られており、典型的な流れ場形状として、同心円板間に懸架された液柱が対象とされてきた。Fig.1は液柱振動流の可視化画像である。直径5mm、高さ2.5mmのシリコンオイル(5cSt)の液柱である。透明加熱ディスク越しに観察した流れ場画像(図中左上)、液柱側方から観察した流れ場画像(図中右上)、液柱表面温度の赤外線放射温度画像(図中左下)において、遷移直後に明瞭な往復モード(pulsating mode)の振動流状態が観察される。

このような振動流への遷移は、液柱条件のみで規定されると考えられてきたが、最近の地上研究によって、周囲気体拳動と液柱気液界面熱伝達の強い影響を受けることが明らかにされつつある。

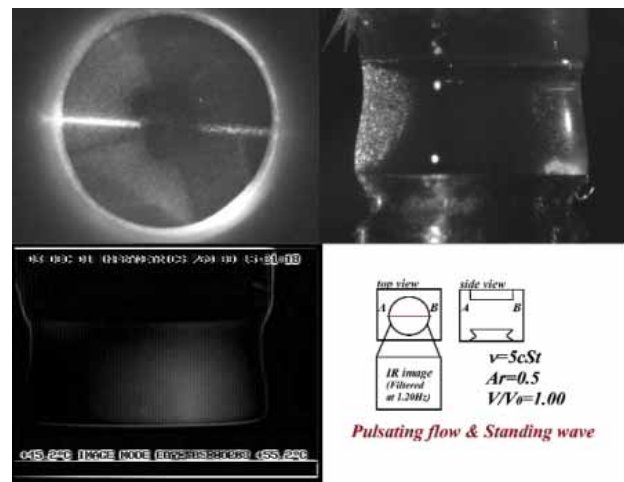


Fig.1 Flow and temperature visualization of a liquid bridge, 5mm in diameter and 2.5mm in height, of 5-cSt silicone oil

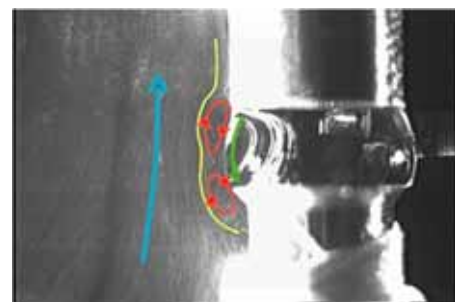


Fig.2(a) Motion of surrounding air in absence of the partition disks.

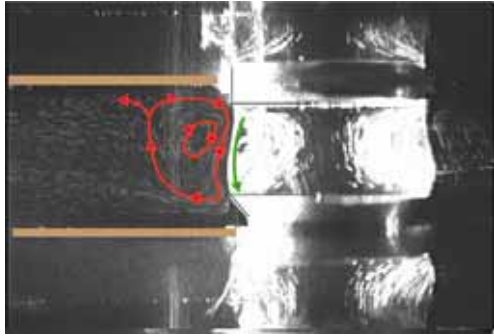


Fig.2(b) Motion of surrounding air in presence of two partition disks, 3.5mm apart.

Figs.2(a)と2(b)は仕切板 (partition disk : PD) を設置することによる周囲気体流動の抑制効果を可視化した結果である。PD の設置によって、液柱表面近傍の循環領域が拡大する。それに伴って、気液界面における熱伝達率が低下し、液柱から周囲気体への熱損失が減少すると予想される。

Fig.3(a)と3(b)は液柱表面張力流と周囲気体流動を連成させた数値解析結果である。1g 条件を与え、マランゴニ数 19700 である。上述した可視化結果に対応する周囲気体流動が解析されている。

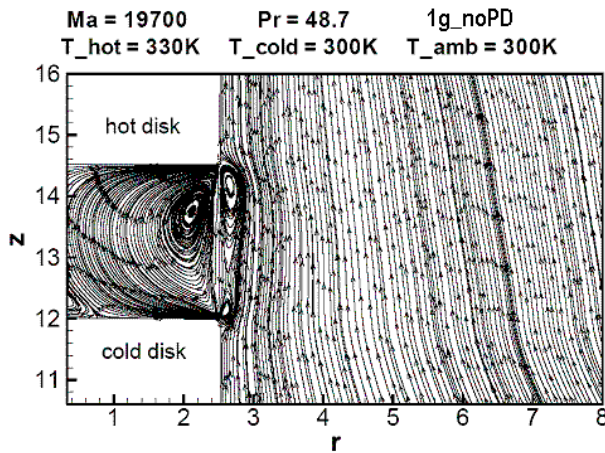


Fig.3(a) Streamlines in the liquid bridge and in the surrounding air in absence of PD in 1g.

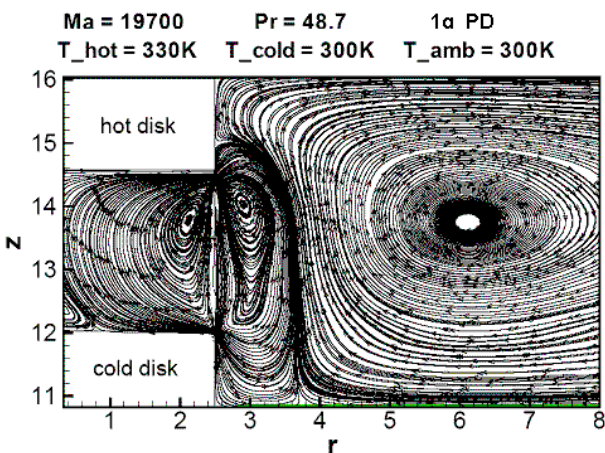


Fig.3(b) Streamlines in the liquid bridge and in the surrounding air in presence of PD in 1g.

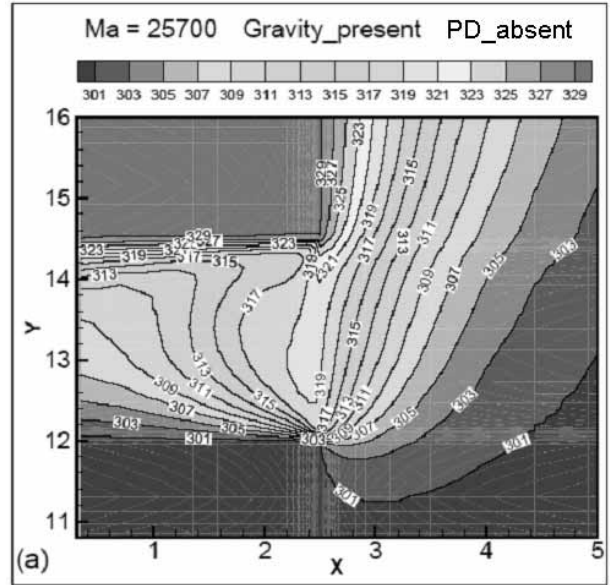


Fig.4(a) Temperature contours in the liquid bridge and in the surrounding air in absence of PD in 1g.

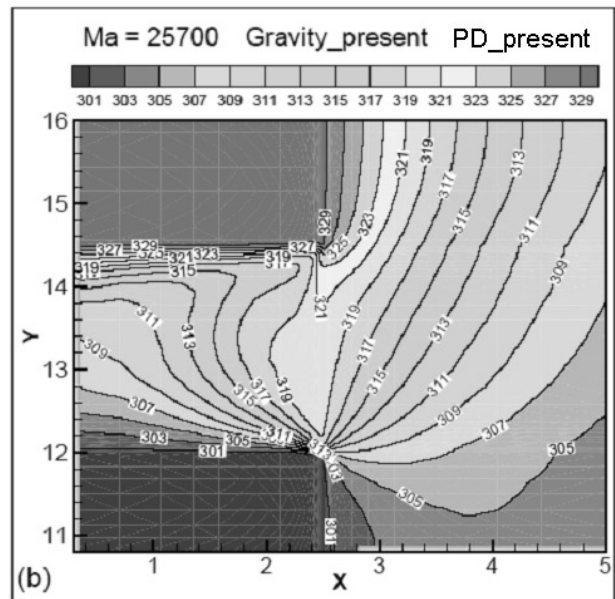


Fig.4(b) Temperature contours in the liquid bridge and in the surrounding air in presence of PD in 1g.

Fig.4(a)と4(b)は、1g のPD無しと有りにおける温度分布の等値線図である。マランゴニ数は 25700 である。PD 無しでは、液柱表面近傍の周囲気体側の温度等値線が密になっており、相対的に大きな温度勾配が存在することがわかる。そのことは大きな熱損失を伴うことが推察される。それに比較して、PD 有りの結果では、温度勾配が周囲気体の全域で緩やかになっており、熱損失も減少しているものと考えられる。

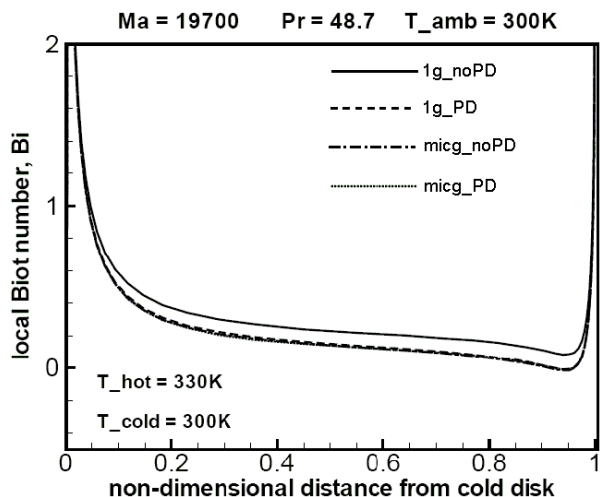


Fig.5 Local Bi number distribution for 1g_noPD, 1g_PD, micg_noPD and micg_PD.

Fig.5 は数値解析で求めた局所 Bi 数分布である。加熱ディスク近傍は周囲気体温度が高いため Bi が相対的に小さく（液柱からの熱損失が小さく）、冷却ディスクに向かって増大する。Bi 数（熱損失）は 1g の PD が存在しない条件（1g_noPD）のみが他の条件より常に大きな Bi 数を示す。一方、1g の PD が存在する条件（1g_PD）は微小重力の二つの条件（micg）と同程度の Bi 数を示す。このことから、地上実験において PD を設置して周囲気体流動を抑制した条件は、微小重力において自然対流が消失した条件に、少なくとも熱損失の状況は近いとの仮説が立てられる。

Fig.6 は PD の有無による臨界マランゴニ数の分布を実験的に調べた結果である。ここで、 L は上部 PD と上部加熱ディスク面との距離である。下部 PD は下部ディスク下方 1mm の位置に固定し、上部 PD の位置を変えた。上部 PD が加熱ディスク面に接近し、周囲気体流動が抑制されると臨界値が顕著に増大し、表面張力流が安定化することがわかる。

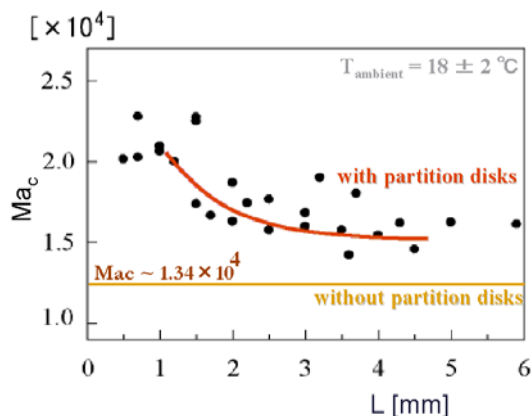


Fig.6 Critical Ma number with and without PD in 1g.

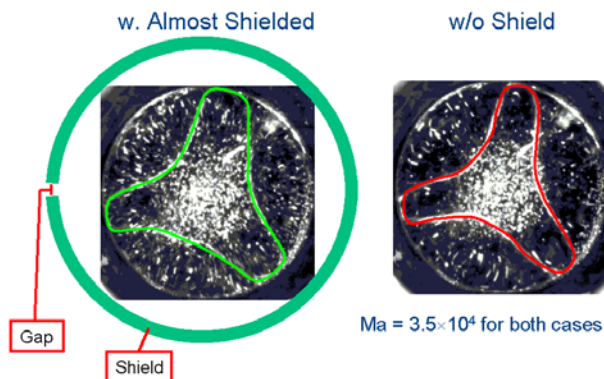


Fig.7 Effect of the cylindrical shield on particle accumulation structure.

Fig.7 は液柱を囲む円筒シールドの存在が粒子集積構造（particle accumulation structure：PAS）に与える影響を可視化した結果である。シールドで囲むことによって同一のマランゴニ数における PAS が変化することが観察される。

以上のような実験的・数値解析的な地上研究によって、周囲気体挙動が液柱気液界面熱伝達に影響を及ぼし、臨界マランゴニ数や粒子集積構造に影響を与えることが明らかにされつつある。

3 . ESA-JAXA 合同会議

著者らは、欧州研究者が代表を務める ESA 軌道実験公募 (ESA AO2004) への提案に共同研究者として参画し、日欧共同宇宙実験の立案を進めている。ESA AO2004 への提案題目等は次の通りである。

題目：Influence of surrounding thermal and kinematic conditions on the stability of flow in liquid bridges

代表者：V. Shevtsova (Universite Libre de Bruxelles)

本提案の微小重力実験としての意義ならびに科学的意義の第三者評価を踏まえて、ESA がサポートする Topical Team が構成され、将来の宇宙実験に関する検討が開始された。著者らの一部（KN と SM）は、研究班 WG の活動の一環として、2006 年 10 月 24 ~ 25 日に ESA ESTEC（オランダ）で開催された Topical Team 会合に出席し、日欧共同宇宙実験について欧州研究者グループと協議した。本会合への出席者は次の通りである。

Agency 側：

S. Yoda (JAXA, Japan), O. Minster (ESA, EU)

日本側研究者：

Prof. K. Nishino (Yokohama National Univ., Japan)

Dr. S. Matsumoto (JAXA, Japan)

欧州側研究者：

Prof. V. Shevtsova 他 4 名(ULB, Belgium)

Prof. D. Schwabe (Giessen University, Germany)

Prof. H. Kuhlmann (TU, Austria)
Prof. G. Amberg (KTH, Sweden)
Prof. R. Savino (Naples, Italy)
Prof. C. Delcarte (LIMSI, France)
Prof. G. Labrosse Gerard (LIMSI, France)
Prof. A. Nepomnyashchy (Technion, Israel)
Mr. F. Conrado (University of Extramadura, Spain)

本会合の成果として、表面張力対流に関する日欧共同軌道実験を早急に提案することを合意し、研究目的、微小重力環境の必要性、期待される成果を具体化した。また、日本の流体物理実験装置である FPEF (Fluid Physics Experiment Module) を用いた軌道実験の実現性について協議し、費用、リソース制限、スケジュールなどを考慮した実験計画のアウトライン化を行った。さらに、2007年3月末までに以下の準備を日欧共同で進め、軌道実験の提案書を具体化することとした。

- ・現象理解に向けた知見を蓄積する。
- ・軌道実験の最適化に向けて地上実験と数値解析を共同して行う。
- ・高マランゴニ数対流への取り組みを進める。

4. まとめ

本稿では、Hydrothermal Wave 不安定と気液界面熱伝達に関する地上研究ならびに日欧共同宇宙実験の立案状況について記述した。地上研究では、実験的・数値解析的なアプローチによって、周囲気体挙動が液柱気液界面熱伝達に影響を及ぼし、臨界マランゴニ数や粒子集積構造に影響を与えることを示した。日欧共同宇宙実験の立案については、2006年10月にオランダ ESTEC で開催された Topical Team 会合に著者等の一部 (KN と SM) が出席し、欧州側研究者グループとの協議の成果として、宇宙実験のアウトライン化と今後の準備項目を具体化した。