

自由液膜内温度差マランゴニ対流場の転移ダイナミクス –「界面熱流体システムにおける熱物資輸送現象とその制御」活動報告–

東京理科大学 上野一郎* 東北大学 小宮敦樹 神奈川大学 木村達人
 東京大学 塩見淳一郎, 丸山茂夫 宇宙航空研究開発機構 松本聡
 静岡大学 益子岳史

Dynamics of flow transition of thermocapillary-driven flow in free liquid film
 – Report on activities of space utilization research WG on ‘Heat/mass transport phenomena in interfacial thermo-fluid systems’ –

Ichiro Ueno^{1,}, Atsuki Komiya², Tatsuto Kimura³, Junichiro Shiomi⁴,
 Shigeo Maruyama⁴, Satoshi Matsumoto⁵ & Takashi Mashiko⁶*

¹Tokyo University of Science, 2641 Yamazaki, Noda, Chiba 278-8510

²Tohoku University, 2-1-1 Katahira, Aoba, Sendai, Miyagi 980-8577

³Kanagawa University, 3-27-1 Rokkakubashi, Kanagawa, Yokohama, Kanagawa 221-8686

⁴The University of Tokyo, 7-3-1 Hongo, Bunkyo, Tokyo 113-8656

⁵JAXA, 2-1-1 Sengen, Tsukuba, Ibaraki 305-8505

⁶Shizuoka University, 3-5-1 Johoku, Naka, Hamamatsu, Shizuoka 432-8561

*E-Mail: ich@rs.tus.ac.jp

Abstract: It is of great importance for technological applications to control of thermal-fluid phenomena, such as wetting/dewetting processes of the solid material by the liquid, and heat/mass transport without any mechanical parts in microgravity/microscale systems. In JFY2011 our group focus on the flow dynamics in thin free liquid film induced by thermocapillary effect. We have carried out two series of parabolic flight experiments as well as a series of experimental and numerical works. This manuscript introduces some essential topics of the researches.

Keywords; Space Utilization, Wettability, Precursor film, Surface tension, Mesoscopic thermal-fluid dynamics.

はじめに

有人・無人宇宙環境利用において熱流体関係技術開発に不可欠な要素として、微小重力（以下 μg ）環境下において顕在化する『濡れ性』および『表面張力』の影響が挙げられる。これらは μg 下での流体ハンドリング技術、すなわち、有人生活や科学実験等での流体輸送、短期間水質検査等の長期宇宙滞在に対する生命環境制御技術等の開発、熱交換機器等技術的機器での流体ハンドリングに不可避な現象である。今年度は特に、特殊環境下での熱物質輸送の鍵となる表面張力を利用した流体・粒子輸送に注目し、地上での実験および数値計算、さらに航空機を利用した微小重力実験を行った。本研究実施の背景の1つとして、2003年にアメリカの宇宙飛行士 Donald Pettit 博士が当時建設中であった国際宇宙ステーションにおいて実施した流体デモンストレーション実験[1]が挙げられる。この実験では、直径約 15 cm のリング状の針金に水の膜を形成し、ミルクを垂らしてそっと混ぜることでパイこね変換を模擬したり、インクと注射器を使ってドラゴンの絵を液膜上に描いたりしている。さらに、Pettit

博士は、自由液膜を保持しているリング近くに半田ごてを近づけることで、液膜内に「2 次元的」な対流を実現している（図 1）。この場合、厚み方向に均一に、すなわち、2 次元的な対流場が励起されている。注目すべきは、半田ごてを近づけた高温側に対流が発生している点である。これまでこの現象について様々な議論が行われてきたが、その主要なものとして、この現象は高温領域での水の蒸発に起因して高温側に向かう対流場が形成されたというものがある。今年度の活動はこの自由液膜内に生起する対流現象の解明を目的として行った。

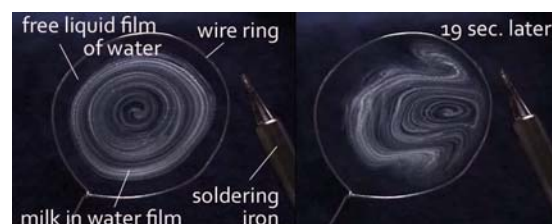


Fig. 1 Flow in a free liquid film of water induced by placing a soldering iron near the wire holding the film (captured from a DVD of ‘Saturday Morning Science’ delivered from Dr. Donald Pettit. (c) NASA).

結果概要

地上では前述の通り、液膜形成に重力の影響を受けるため、ボンド数 $Bo = \rho g d^2 / \sigma$ が小さくなるような液膜を形成する必要がある。そこで矩形孔を有する試験片を作製し、その孔内に表面張力および濡れ性により液膜を保持することによって自由液膜の実験を行った。ここでは、試験流体として動粘性係数 5 cSt のシリコンオイル ($Pr = 68.4$ at 25°C) (信越化学工業(株)製) を用いた。この流体の特徴として、物性が安定しており、また、表面張力の温度係数がほぼ一定 (著者らの測定結果により、 $\partial\sigma/\partial T = -6.37 \times 10^{-5} \text{ N/(m}\cdot\text{K)}$) であることが挙げられる。これまでの研究により、自由液膜のアスペクト比 (温度勾配方向長さ L_x とスパン方向長さ L_z の比、および、温度勾配方向長さ L_x と厚み方向長さ d の比の2種類のアスペクト比) によって、「2層流れ」と「1層流れ」という2つの基本流れが存在することが明らかになっている[2]。今年度においては、Pettit 博士のデモンストレーション実験に対応する「1層流れ」に着目する。

地上実験により、空孔に対する液膜含有率、すなわち液膜体積率 V/V_0 によって温度差マランゴニ効果に起因する対流方向が逆転することを明らかにした。図2は空孔体積を1とした液膜体積率について、 $V/V_0 < 1$ (上)、 $V/V_0 \sim 1$ (中)、および $V/V_0 > 1$ (下) の場合における表面温度の発達の様子を時系列で示している。各フレームとも1辺が2 mmの液膜 (厚さ 0.2 mm) を上方から観察しており、右手が加熱壁、左手が冷却壁に相当する。今回用いた試験流体のプラントル数 Pr が約68と大きいことから、熱は対流によって輸送される。すなわち、温度の発達がほぼ対流の発達状態を表している。液膜体積比 $V/V_0 < 1$ の場合に液膜のスパン方向中央部において高温部から低温部に対流が発生した状態から、体積比を上昇するにしたがい、低温部から高温部に向かって対流が発達している様子を明確にとらえることが出来る。すなわち、地上では液膜の形状、特に凸型形状を有する液膜において、Pettit 博士のデモンストレーションと同様の低温部から高温部へと流れる対流場の存在を明らかにした。

同様の系において、対流パターンに対する重力の影響を見るため、航空機を利用した微小重力実験を実施した。今年度は6月および12月に実施したが、6月分は2010年9月に仙台にて開催された8th Japan-China-Korea WS Microgravity Sciences での International Mohri Poster Session における Parabolic Flight Award の副賞として、12月分は日本マイクロ重力応用学会第25回学術講演会での毛利ポスターセッション優秀賞の副賞として (ともにダイヤモンドエアサービス社 (愛知県西春日井郡) ご提供)、機会をいただいたものである。2回実施した航空機実験のうち、異なる体積比を有する液膜の

十分に発達した状態における表面温度分布の結果を図3に示す。ここで液膜の状態は左上の $V/V_0 < 1$ の条件における表面温度分布から、右、さらに左下から右下に行くにしたがい徐々に V/V_0 が大きくなる。図2に記した地上実験の結果と高温・低温の位置が左右反転していることに注意しながら結果を見ると、地上実験と同様、体積比がある値を超えたところで対流方向が逆転している。この傾向はフライト時の $0.2 \text{ G} \sim 1.8 \text{ G}$ の範囲で確認出来た。

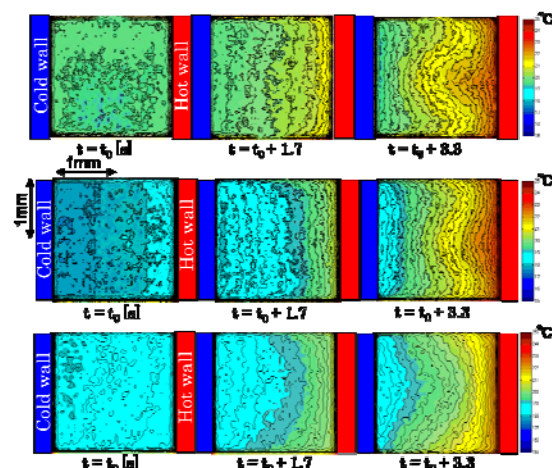


Fig. 2 Temporal variations of surface temperature of the free liquid film of $(L_x, d, L_z) = (2 \text{ mm}, 0.2 \text{ mm}, 2 \text{ mm})$ under normal gravity; volume ratio of the film is $V/V_0 < 1$ (top), $V/V_0 \sim 1$ (middle) and $V/V_0 > 1$ (bottom).

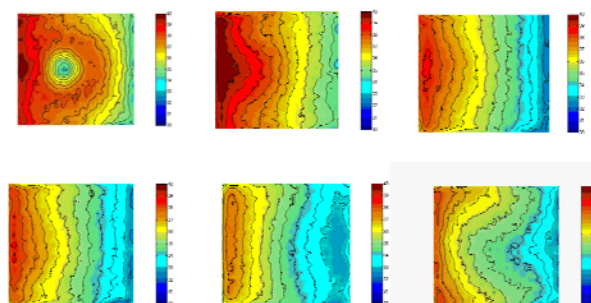


Fig. 3 Snapshot of surface temperature of the free liquid film of $(L_x, d, L_z) = (2 \text{ mm}, 0.2 \text{ mm}, 2 \text{ mm})$ under reduced gravity; volume ratio of the film increases from the top left ($V/V_0 < 1$) to the bottom right ($V/V_0 > 1$) (bottom right). Note that the positions of hot and cold walls are opposite to those in Fig. 2.

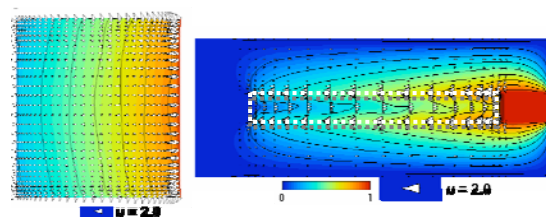


Fig. 4 Snapshot of numerical result in the system taking account of ambient gas region around the free liquid film; temperature and vectors on the surface observed from above (left) and cross sectional view (right). Rectangle by dashed line corresponds to the free liquid film.

また、今年度は周囲気体を考慮に入れた「2層流れ」に関する3次元数値計算を行い(図4, 5), 自由液膜に生起する Hydrothermal wave 不安定性[4]への周囲気体との熱伝達の影響を明らかにした. 図5は周囲気体領域の大きさが Hydrothermal wave 不安定性に与える影響について, 不安定性の振幅および周波数を周囲気体領域のアスペクト比に対して示したものである. これらの解析結果は, 今後実施する地上および微小重力環境下での実験に反映していく予定である.

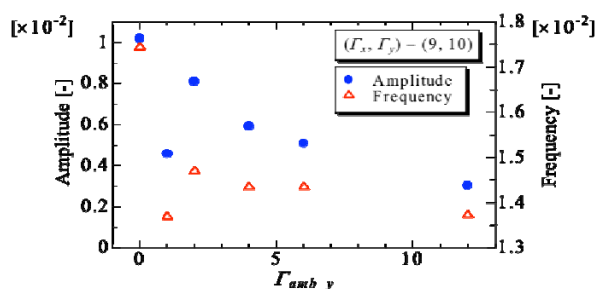


Fig. 5 Amplitude and frequency of hydrothermal wave arisen in free liquid film against aspect ratio of ambient gas region.

結言

本研究グループでは, 大きく2つの内容に関する研究活動, すなわち(1)先行薄膜領域まで考慮したメゾスコピックな濡れ現象および(2)2自由表面を有する薄液膜内に生起する対流場について研究を行ってきた. 今年度は特にテーマ(2)の内容について精査してきた.

今年度では, 温度差マランゴニ効果により生起する2自由表面液膜内非線形対流場に対し, 通常重力下および微小重力環境下での実験の実施, および, 周囲流体を考慮した3次元数値シミュレーションによる解析を行った. 表面温度と対流場の関係, および表面振動および膜厚変化と対流場の関係に注目して研究を行った.

来年度においては, さらに研究活動を継続していくと同時に, 外部資金の獲得やさらなる微小重力実験実施に向けて活動を行っていく予定である.

謝辞

航空機を用いた微小重力実験実施に献身的なご協力をいただいたダイヤモンドエアサービス株式会社(愛知県西春日井郡)および塚本勝男教授(東北大学)に心からの謝意を表す. 本稿にて紹介した研究結果のうち, 東京理科大学グループにおけるものは, 東京理科大学大学院生 勝田健史氏, 同学学部生 池袋紘一氏, Dhirapat Limsukhawat 氏によるものである. また, 航空機実験に向けて尽力してく

れた東京理科大学大学院生 石川夏希氏, 五十部恭平氏, 瀬戸口琢磨氏, および, 同大学学部生の杉岡廣紀氏に改めて謝意を表す.

参考文献

- [1] http://science.nasa.gov/headlines/y2003/25feb_nosoap.htm
- [2] Ueno, I. & Torii, T., Thermocapillary-driven flow in a thin liquid film sustained in a rectangular hole with temperature gradient, *Acta Astronautica* 66, pp.1017-1021, 2010.
- [3] Ueno, I. & Watanabe, T., Flow transition in a free rectangular liquid film under a temperature gradient, *Int. J. Transport Phenomena* 12, pp.301-306, 2011.
- [4] Smith, M. K., & Davis, S. H., Instabilities of dynamic thermocapillary liquid layers, Part 1. Convective instabilities, *J. Fluid Mech.* 132, pp.119-144, 1983.