

# 『界面熱流体システムにおける熱物質輸送現象とその制御』研究班WG 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

## Activities of Space Utilization Research WG on 'Heat/Mass Transport Phenomena in Interfacial Thermo-Fluid Systems' in JFY2008

*Ichiro Ueno<sup>1,\*</sup>, Atsuki Komiya<sup>2</sup>, Tatsuto Kimura<sup>3</sup>, Junichiro Shiomi<sup>4</sup>,  
Shigeo Maruyama<sup>4</sup>, Satoshi Matsumoto<sup>5</sup> & Takashi Mashiko<sup>6</sup>*

<sup>1</sup>Tokyo University of Science, 2641 Yamazaki, Noda, Chiba 278-8510

<sup>2</sup>Tohoku University, 2-1-1 Katahira, Aoba, Sendai, Miyagi 980-8577

<sup>3</sup>Kanagawa University, 3-27-1 Rokkakubashi, Kanagawa, Yokohama, Kanagawa 221-8686

<sup>4</sup>The University of Tokyo, 7-3-1 Hongo, Bunkyo, Tokyo 113-8656

<sup>5</sup>JAXA, 2-1-1 Sengen, Tsukuba, Ibaraki 305-8505

<sup>6</sup>Shizuoka University, 3-5-1 Johoku, Naka, Hamamatsu, Shizuoka 432-8561

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

**Abstract:** This manuscript introduces activities of the working group on 'Heat/Mass Transport Phenomena in Interfacial Thermo-Fluid Systems' in JFY2008. This WG is based on the WG on 'Dynamics of the fluid in the vicinity of the contact line' up to JFY2007. It is of great importance to control of thermal-fluid phenomena, such as wetting and dewetting processes of the solid material by the liquid, and heat/mass transport without any mechanical parts in microgravity/microscale systems, for technological applications. The present WG has been interested in this phenomenon accompanying with the surface deformation and the movement of the boundary line of solid-liquid-gas three phases ('contact line'), and has carried out collaborating research on this topic through experimental and numerical approaches. The main objectives of this WG are on developing technologies of liquid/fluid handling in the partially-wet system, and of environment controls under microgravity conditions. This manuscript introduces a summary of the activities of the WG in JFY2008.

**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  $\mu g$ ）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。固体面上を液体が進行あるいは後退する問題は、 $\mu g$  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。この現象を構成するのが、固液気3相境界線（コンタクトライン）の移動であり、多相・多成分系での系では重要な問題となる。コンタクトライン近傍流体は、分子スケールでの固液分子相互作用で決定する濡れ性・物質移動の問題から、表面張力と密接に関係している接触角、さらに移動液滴の形状および分裂・合体などを含む。また、コンタクトライン

前方には先行薄膜と呼ばれる薄い液膜が形成することが知られており、ミクロスケールでの化学反応制御などにおいて非常に重要な存在となる。

本WGでは、特殊環境下での熱物質輸送の鍵となる先行薄膜、および表面張力を利用した流体・粒子輸送に着目し、地上での実験および数値計算、さらに航空機等を利用した微小重力実験を体系的に行い、将来の長時間宇宙実験実施を目指すとともに、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である、『濡れ性』および『表面張力』が引き起こすメゾスコピック熱流体现象の理解および能動的制御の実現を目的とする。

なお本WGは、平成16年度採択の「宇宙環境利用流体科学WG(SURF)」(代表:河村洋(東理大))中のサブグループの1つ『コンタクトライン近傍流体の動力学』として活動を開始し、翌平成17年度より独立して『コンタクトライン近傍流体の動力学』

研究班 WG として活動を行ってきた。平成 20 年度から、より包括的にメゾスコピックな界面熱流体システムを対象として研究を進めていくため、『界面熱流体システムにおける熱物質輸送現象とその制御』に関する研究班WGと改称して活動を継続している。

### 研究WGの体制および内容

本WGは、大きく2つの内容に関する研究活動を行っていく。すなわち、(1) 基板上を広がる液滴コンタクトライン近傍流体の挙動、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、であり、それぞれ実験および数値計算によって当該現象にアプローチしている。以下、研究体制および内容を示す。

#### 活動内容(1)

○実験的研究 [担当: 上野(東理大), 小宮(東北大), 松本(JAXA), 益子(静岡大)]

(i) 高精度干渉計固体面上を移動する液滴前縁および後縁コンタクトライン近傍流体のプロファイル再構築(上野・小宮・松本), (ii) 位相シフト技術の導入による干渉計の高精度化(小宮・松本), (iii) コンタクトラインの移動に対する重力および固体面上温度勾配の影響(上野), (iv) 先行薄膜領域の検出機構の構築(上野), (v) 微小重力実験の実施(上野・益子)。

(i)~(iii)は、昨年度までの活動に引き続き行っているものである。特に前縁部近傍流体だけでなく、後縁部近傍流体に関する知見蓄積を果たしてきている。特に(iv)において、ブリュースター顕微鏡を導入し、これまでと異なる手法による先行薄膜領域の検出を実現した。これにより、これまでに得ていた知見をサポートする結果を得ている。これらの内容については、来年度の国内外学会にて詳細を発表する予定である。

さらに、WG 代表者の東京理科大学グループおよび静岡大学グループは、宇宙航空研究開発機構宇宙科学本部の石川毅彦准教授、稲富裕光准教授(50音順)とともに航空機実験を昨年9月に実施し、マイクロ重力状態下での液膜前縁部の挙動および先行薄膜領域検出に関する予備的実験を行った。取得したデータは現在解析中であり、一連の実験結果および実験装置系の開発により、来年度の大気球を用いた微小重力実験の実施を予定している。

○数値計算 [担当: 上野(東理大), 木村(神奈川

大), 塩見・丸山(東大)]

(i) 分子動力学法を用いたカーボンアルコール系に関するポテンシャル構築およびコード開発(木村),

(ii) カーボンナノチューブ内外における水の移動および相変化(塩見・丸山)

(iii) 液滴内対流によるカーボンナノチューブの輸送過程(塩見・丸山)

(iv) ナノワイヤー上に形成した液膜に生起する不安定性(上野・塩見),

(v) ナノ液膜に生起する不安定性 (Fig. 1) (上野)

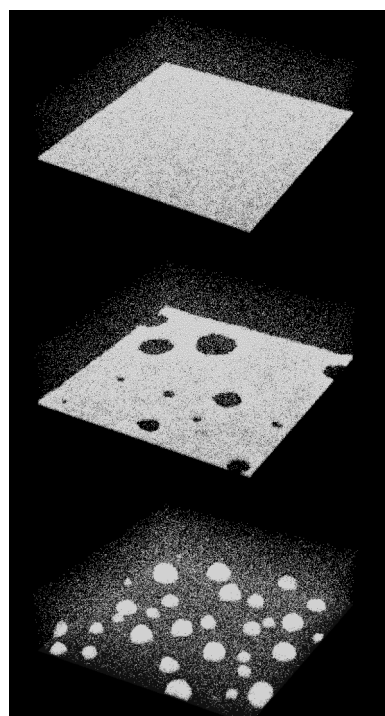


Fig. 1 Example of molecular dynamics simulation on breaking-up and droplet formation of thin liquid film on solid substrate (bird-eye view).

(i), (ii)および(iv)は昨年から継続で行っている内容である。特にCL近傍をミクロ的に注目し、分子スケールでのCLおよびその移動時のダイナミクスの理解を目指している。試験流体として、一般的なレナード・ジョーンズ流体に加え、水やアルコールを、さらに試験固体としてカーボンを採用した際のポテンシャル系の構築を行ってきた。

(iii)では、特に液滴内のカーボンナノチューブの分散および運動の制御を目的として行っているものである。

(v)では、特に固体面上に存在する非常に薄い液膜を対象とし、当該液膜に生起する不安定現象に注目している。ここでは、不安定化した液膜において局所的に乾いた面が発生し、いわゆる dewetting 現象

を伴いながら最終的にいくつかの液滴を基板上に形成する。今年度はレナード・ジョーンズ流体を対象として、このスピノーダル撥水として知られる現象を分子動力学を用いて解析を行った。

活動内容 (2)

今年度は特に、2自由表面を有する薄液膜、すなわち自由液膜 (Fig. 1) 内での対流場の検証と、微小重力実験実現に向けた検討を行ってきた。今回対象とする系は、周囲を固体面で囲まれた液膜であり、いわゆるシャボン玉を作る際の針金の輪っかの中の液膜を想像していただければよい。本研究では、その自由液膜に温度勾配を付加した場合に液膜内に生起する熱対流パターンおよび粒子挙動に注目して研究を行うものである。

○実験的研究 [担当: 上野 (東理大), 松本 (JAXA), 益子 (静岡大) ]

今年度は、地上での通常重力下においても自由液膜を形成可能な実験系の構築 (Fig. 3) を行い、液膜の厚さ、アスペクト比、温度勾配をパラメータとして現象の全体像の把握を目指した。これにより、付加する温度勾配の大きさにより、温度勾配方向と平行な2次元対流場から3次元対流場へ移行し、さらに温度勾配方向と垂直な2次元対流場が実現することを明らかにした (Fig. 4)。また、微小重力実験実現に向け、液膜形成機構などの実験装置群の検討を行った。

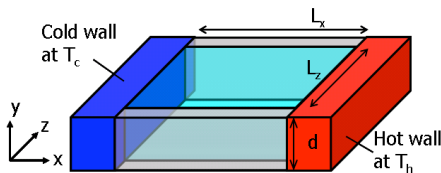


Fig. 2 Target geometry: a free liquid film exposed to a temperature gradient.

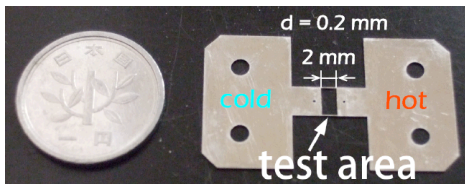


Fig. 3 Liquid film holder (right). Liquid film is formed in a square region indicated by a circle. Thickness of the holder is of 0.2 mm.

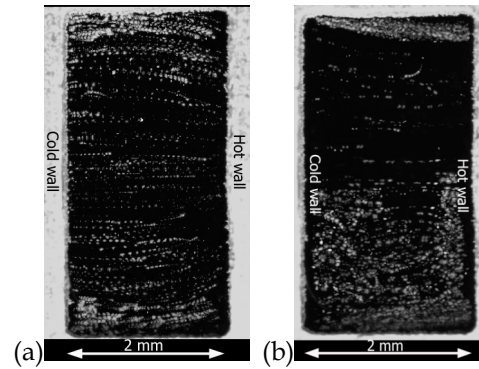
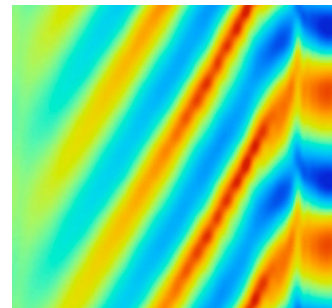
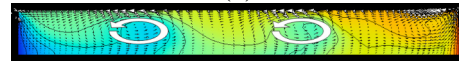


Fig. 4 Typical examples of the induced flow in the free liquid film of  $(L_x, d, L_y) = (2.0 \text{ mm}, 0.7 \text{ mm}, 4.0 \text{ mm})$  observed from above; (a)  $\Delta T = 4.7 \text{ K}$  ( $Ma = 220$ ), (b)  $\Delta T = 31.5 \text{ K}$  ( $Ma = 2107$ ). The images are obtained by exposed for 1.0 s.

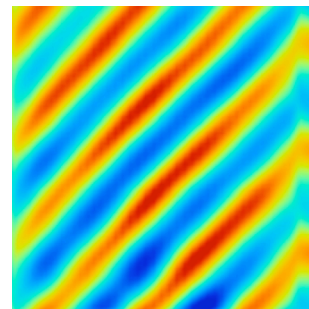


(1)

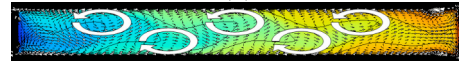


(2)

(a) thin liquid film in the cavity



(1)



(2)

(b) free liquid film

Fig. 5 Typical example of 'oscillatory' flow; (1) top view of the deviation of the temperature over the top free surface and (2) cross-sectional view in x-y plane in the cases of (a) a thin liquid film in the cavity (a single free surface (top surface is free)) and (b) two free surfaces under the same intensity of the thermo-capillary effect. Right-hand side is the hot wall, and the opposite is the cold wall for each frame.

## ○数値計算 [担当：上野（東理大）]

当該系の3次元数値計算コードを構築し、1自由表面を有する薄液膜に生起する Hydrothermal wave 不安定性と同様の不安定性が生起することなどを明らかにした。これまでのところ、温度差マランゴニ効果が弱い状態での2次元対流場は実験で得られたものと同様の流れ場を実現出来ているが、温度差マランゴニ効果を強くしていくに連れ、実験との差異が明確となり、実験で得られた対流場の発生機構を数値計算によって明らかにしていくのが今後の課題である。

以上の内容に関し、研究グループ内での不定期ミーティングを実施した。さらに、国内外における学会にて研究成果の発表を行った。

## 結言

本WGは、昨年度までの『コンタクトライン近傍流体の動力学』研究班WGを母体に、より包括的にメゾスコピックな界面熱流体システムを対象として研究を進めていくため『界面熱流体システムにおける熱物質輸送現象とその制御』に関する研究班WGと改称して活動を継続してきた。

本WGは、大きく2つの内容に関する研究活動を行ってきた。すなわち、(1) 基板上を拡がる液滴コンタクトライン近傍流体の挙動、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である。

研究(1)では、光学測定技術を駆使した実験的アプローチによる、固体面上を移動する液滴先端部における動的挙動およびコンタクトライン前方に存在する「先行薄膜」と呼ばれる薄液膜の存在領域の計測、また、分子動力学法数値シミュレーションによる固体面上を移動するナノスケール液滴の動的挙動の解析を行った。将来の宇宙環境利用実験に向けた予備的実験として、JAXA宇宙科学研究本部の石川毅彦准教授・稲富裕光准教授(50音順)のご協力のもと、代表者上野の東京理科大学グループおよび共同研究者益子の静岡大学グループにより航空機実験を実施した。

研究(2)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、通常重力下でも実現可能な小スケールでの地上実験の実施、および、3次元数値シミュレーションによる解析を行った。

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

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鳥居孝充氏、学部生渡辺俊貴氏、Lin Weison氏によるものである。また、航空機実験実施に献身的なご協力をいただいた宇宙航空研究開発機構宇宙科学本部の石川毅彦・稲富裕光両准教授、DAS、日本宇宙フォーラム関係諸氏に謝意を表す。

## 学会発表等

- (1) Konisho, T. & Ueno, I., Detection of Advancing Edge and Length of Precursor Film Ahead of Macroscopic Contact Line of Droplet Spreading on Solid Substrate, in *Interdisciplinary Transport Phenomena* (ed. Sadhal, S.), New York Academy of Science, New York, accepted in appear.
- (2) Hirose, K., Konisho, T. & Ueno, I., Existing length of precursor film ahead droplet traveling on the solid substrate, Proc. 13th Int. Symp. on Flow Visualization (ISFV13)/12th French Congress on Visualization in Fluid Mechanics (FLUVISU12) (July 1-4, 2008, Nice, France), CD-ROM(#185-080420.pdf), 2008.
- (3) Ueno, I. & Torii, T., Flow patterns in free liquid film exposed to temperature gradient, 37th COSPAR (Committee on Space Research Scientific Assembly, Montreal, Canada, 13-20, July 2008), CD-ROM, 2008.
- (4) Shibata, A. & Ueno, I., Molecular dynamics simulations of Rayleigh instability of liquid film on nanowire, Heat Transfer and Fluid Flow in Microscale III (Sept.21-26, 2008, Whistler, BC, Canada), CD-ROM, 2008.
- (5) Ueno, I. & Torii, T., Thermocapillary-driven flow in a thin liquid film sustained in a rectangular hole with temperature gradient, 59th Int. Astronautical Congress (Glasgow, Scotland, 9/29 - 10/3, 2008), DVD (paper #: IAC-08.A2.2.2), 2008.
- (6) Shibata, A. & Ueno, I., Simulations of Rayleigh Instability of Liquid Film on Nanowire, J. The Japan Society of Microgravity Application 23 (JASMAC 日本マイクログラビティ応用学会第23回学術講演会, 11/25 - /26, 2008, 京都), 2008.
- (7) Watanabe, T. & Ueno, I., Flow Patterns and Particle Behavior in Thin Liquid Film Sustained in Rectangular Hole Exposed to Temperature Gradient, J. The Japan Society of Microgravity Application 23 (JASMAC 日本マイクログラビティ応用学会第23回学術講演会, 11/25 - /26, 2008, 京都), 2008.
- (8) Hirose, K. & Ueno, I., Detection of precursor film ahead of droplet traveling on inclined solid substrate, J. The Japan Society of Microgravity Application 23 (JASMAC 日本マイクログラビティ応用学会第23回学術講演会, 11/25 - /26, 2008, 京都), 2008.