

## 『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<sup>\*</sup>      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 JFY2009

*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 JFY2009. 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 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. 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 JFY2009.

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

#### はじめに

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ものである。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。

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。この現象の素過程として最も重要なものが、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不可避な問題となる。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

輸送に注目し、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現象の理解および能動的制御の実現を目的とする。

### 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(Fig. 1)(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、これまで実施してきた干渉計を用いた実験結果と同等の結果を得た。これにより、異なる光学系を利用した検出過程によって先行薄膜の存在領域に関する知見を強固なものにしたと考えている。

さらに、WG代表者の東京理科大学グループは、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)とともに同機構の橋本樹明教授による大気球実験に参加し、マイクログラビティ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実験機会をいただいた。40 km 上空まで大気球により実験カプセルを持ち上げ、カプセル内に静置した直径 30 mm ほどの中子に装置群を組み込んで、カプセルの自由落下中での環境における流体挙動の観察を目指して行った。温

度環境の変化を考慮した流体ハンドリングの準備が不十分であったため、残念ながら結果は残せなかったが、異なる微小重力実験機会において非常に貴重な知見を蓄積することができた。

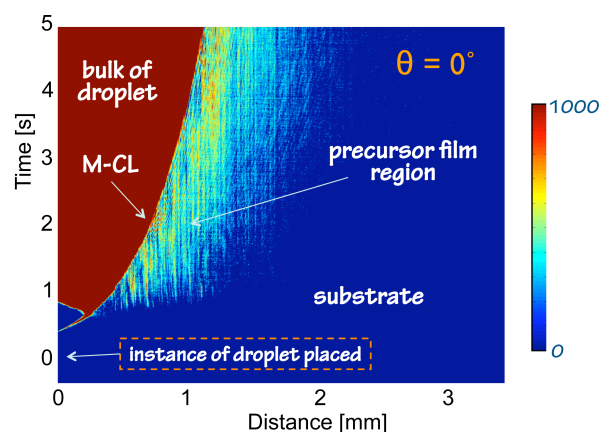


Fig. 1 Detection of precursor film ahead macroscopic contact line of a silicone oil droplet spreading on silicon substrate.

○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(Fig. 2)(上野・塩見)，
- (v) ナノ液膜に生起する不安定性(上野)

いずれも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。

(iv)では、特にナノメートルスケールの固体線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細線上に形成する。今年度はレナ

ード・ジョーンズ流体を対象として、このスピノードル撥水として知られる現象について分子動力学を用いて解析を行った。

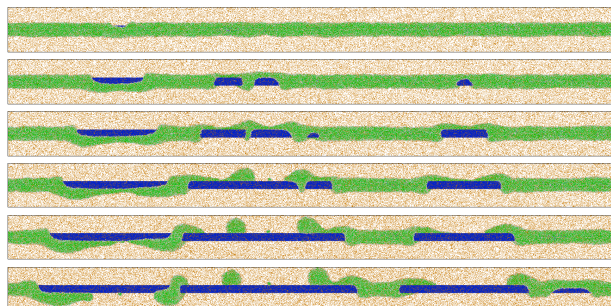


Fig. 2 Example of molecular dynamics simulation on breaking-up and droplet formation of thin liquid film on solid thin wire (side view).  $\epsilon_{INT} = 0.467 \times 10^{-21}$  J,  $R_{PI} = 3.11$  nm,  $R = 5.26$  nm,  $L = 457$  nm. First frame is taken at 5500 ps, and frame interval is constant at 500 ps.

## 活動内容（２）

昨年度に引き続き、２自由表面を有する薄液膜、すなわち自由液膜(Fig. 3)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。本研究では、固体壁に囲まれた矩形孔に自由液膜を形成し、矩形孔の両端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。

○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発生条件を把握しつつ、表面温度の変動を取得することにより、１自由表面系での Hydrothermal wave 不安定性との関連について調べた(Fig. 4)。また、高精度変位計を用いた液膜形状および膜厚の測定を行った。これにより、さまざまな対流場における液膜の静的・動的変形に関する知見を蓄積した。

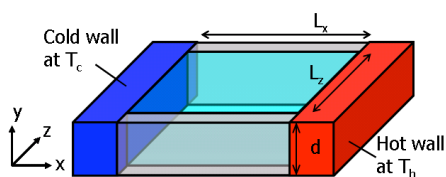


Fig. 3 Target geometry: a free liquid film exposed to a temperature gradient.

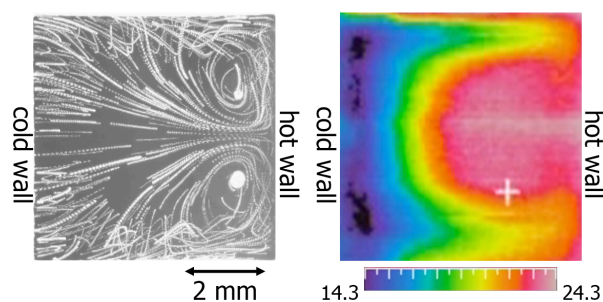


Fig. 4 Typical examples of the induced flow in the film of  $(L_x, L_z, d)$  [mm] = (6.0, 6.0, 0.6) under  $\Delta T = 15.0$  K observed from above. Path line (for 1 s) (left) and surface temperature observed with IR camera.

○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。昨年度まで周期境界条件によって生起する不安定性について知見を蓄積してきたが、今年度は固体壁を側方に設置した系での計算を行ってきた。それにより、実験で見られてきた薄い液膜内でのセル状流れ(Fig. 4 左)に似た流れ場を再現することが出来た。今後も検証を続け、実験的研究と組み合わせながら対流場の予測を行っていく予定である。

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、一昨年度までの『コンタクトライン近傍流体の動力学』研究班 WG を母体に、昨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きた。

本WG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、橋本樹明教授による大気球実験に代表者上野の東京理科大学グループが参加する機会を得た。

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。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

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柴田篤志氏、渡辺俊貴氏、同学学部生勝田健史氏によるものである。また、大気球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、橋本樹明教授に謝意を表す。同実験は東京理科大学大学院生木皿吉昭氏、福原良純氏の多大なる協力のもとで行われた。

## 学会発表等

- (1) Ueno, I. & Torii, T., Thermocapillary-driven flow in a thin liquid film sustained in a rectangular hole with temperature gradient, *Acta Astronautica*, in press.
- (2) Ueno, I., Hirose, K. & Kizaki, Y., Formation of precursor film ahead macroscopic contact line of spreading droplet, 6<sup>th</sup> Interdisciplinary Transport Phenomena VI (Volterra, Italy, Oct. 4-9, 2009), paper #ITP-09-38, 2009. (oral, keynote lecture)
- (3) Ueno, I., Watanabe, T. & Matsuya, T., Flow transition in free liquid film induced by thermocapillary effect, 7th IUTAM Symp. on Laminar- Turbulent Transition (Stockholm, Sweden, June 23-26 2009), pp. 76-77 (oral: 70 oral papers selected from 176, 3 reviewers), 2009. (oral)
- (4) Ueno, I., Watanabe, T. & Matsuya, T., Transition of flow in free liquid film exposed to temperature gradient, 7th World Conference on Experimental Heat Transfer, Fluid Mechanics and Thermodynamics (ExHFT-7) (Krakow, Poland, June 28<sup>th</sup> – July 3<sup>rd</sup>, 2009), DVD, 2009. (oral)
- (5) Watanabe, T. & Ueno, I., Flow transition in a free rectangular liquid film under a temperature gradient, ECI: 6<sup>th</sup> Interdisciplinary Transport Phenomena VI (Volterra, Italy, Oct. 4-9, 2009), CD-ROM(paper# ITP-09-14), 2009.

(oral)

- (6) Ueno, I., Hirose, K., Kizaki, Y., Kisara, Y. & Fukuhara, Y., Precursor film formation process ahead macroscopic contact line of spreading droplet on smooth substrate, ASME 2009 2nd Micro/Nanoscale Heat & Mass Transfer International Conference (12/18-/21 2009, Shanghai, China), CD-ROM, paper #: MNHMT2009-18314, 2009. (oral)
- (7) Shibata, A. & Ueno, I., Molecular dynamics of rupture phenomenon in a liquid film on nanowire under isothermal condition, ASME 2009 2nd Micro/Nanoscale Heat & Mass Transfer International Conference (12/18-/21 2009, Shanghai, China), CD-ROM, paper #: MNHMT2009-18310, 2009. (oral)
- (8) Ueno, I., Watanabe, T. & Matsuya, T., Flow transition in free liquid film induced by thermocapillary effect, 7th IUTAM Symp. on Laminar- Turbulent Transition (Stockholm, Sweden, June 23-26 2009), IUTAM Bookseries 18 (Schlatter, P. & Henningson, D. S. eds.), in press.
- (9) 上野一郎, 廣瀬寛二, 木崎裕介, 固体基板上を拡がる液滴の巨視的 3 相境界線前方における先行薄膜発達過程, 日本流体力学会年会 2009 (東京, 9/2 - /4 2009) , CD-ROM, 2009. (oral)
- (10) 上野一郎, 渡辺俊貴, 自由液膜内温度差マランゴニ対流における遷移過程, 日本流体力学会年会 2009 (東京, 9/2 - /4 2009) , CD-ROM, 2009.
- (11) Ueno, I., Hirose, K. & Kizaki, Y., Formation of precursor film ahead macroscopic contact line of droplet spreading on solid substrate, *J. Jpn. Soc. Microgravity Appl.* 26 (JASMAC24, 日本マイクログラビティ応用学会第 24 回学術講演会, 10/19 -/21 2009, 沖縄), p.359, 2009. (oral)
- (12) Matsuya, T. & Ueno, I., Simulation on thin liquid film sustained in rectangular hole exposed to temperature gradient, *J. Jpn. Soc. Microgravity Appl.* 26 (JASMAC24, 日本マイクログラビティ応用学会第 24 回学術講演会, 10/19 -/21 2009, 沖縄), p.390, 2009. (poster)
- (13) Igari, G., Kisara, Y. & Ueno, I., Dynamics of precursor film ahead solid-liquid-gas boundary line under temperature gradient, *J. Jpn. Soc. Microgravity Appl.* 26 (JASMAC24, 日本マイクログラビティ応用学会第 24 回学術講演会, 10/19 -/21 2009, 沖縄), p.391, 2009. (poster)
- (14) Kisara, Y., Fukuhara, Y., Ueno, I., Inatomi, Y. & Ishikawa, T., Fluid dynamics in the vicinity of macroscopic contact line under  $\mu\text{g}$ , *J. Jpn. Soc. Microgravity Appl.* 26 (JASMAC24, 日本マイクログラビティ応用学会第 24 回学術講演会, 10/19 -/21 2009, 沖縄), p.392, 2009. (poster)