

『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 JFY2010

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.noda.tus.ac.jp

Abstract: This manuscript introduces activities of the working group on ‘Heat/Mass Transport Phenomena in Interfacial Thermo-Fluid Systems’ in JFY2010. 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 flow fields accompanying with suspended particle motions induced by surface tension difference, 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 JFY2010.

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

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。固体面上を液体が進行あるいは後退する問題や、自由表面を有する液体の挙動・対流場に関する問題は、 μG 下での流体ハンドリング技術に不可避な現象である。これらの問題は、熱交換機器等技術的機器での流体ハンドリング、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への応用が期待される。この現象の素過程として重要なものが、固液気3相境界線（コンタクトライン）の移動であり、また、自由表面上での温度・濃度分布によるマランゴニ効果によって出現する対流場である。特に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。

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。

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(Fig. 1)(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)，

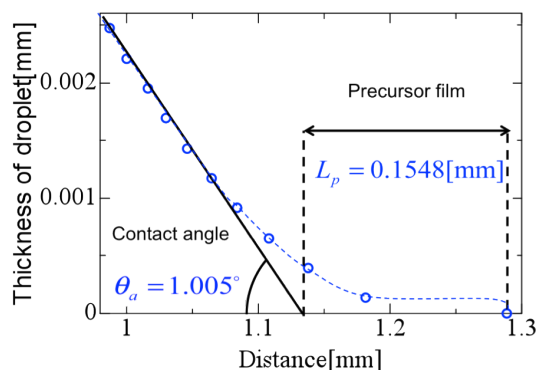


Fig. 1 Reconstruction of precursor film ahead macroscopic contact line of a 2-cSt silicone oil droplet spreading on silicon substrate.

以上は昨年度までの活動に引き続き行っているものである。今年度は、これまで採用してきたレー

ザ干渉計やブリュースター顕微鏡に加え、共焦点型レーザ変位計を導入し、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の再構築を行い(Fig. 1)，その形成過程に関する知見をより強固なものにした。特に先行薄膜先端部の厚さ数十nmオーダーの形状変化の様子の把握に成功した。

○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. 3)(上野)

いずれも一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。

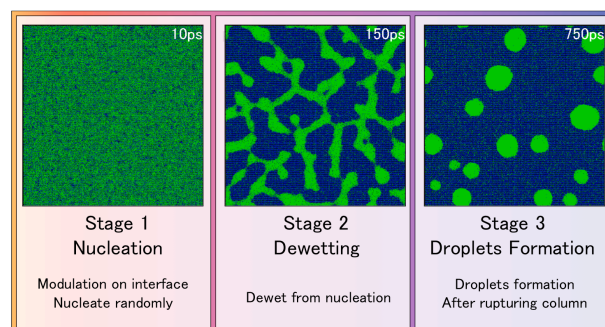


Fig. 2 Example of molecular dynamics simulation on breaking-up and droplet formation of thin liquid film on solid substrate; nucleation as stage 1, dewetting process as stage 2, and droplet formation as stage 3.

(v)では、特に固体基板上に存在する厚さナノメートルスケールの非常に薄い液膜を対象としている。ここでは、不安定化した液膜において局所的に「撥水」領域が発生し、いわゆる dewetting 現象を伴い

ながら最終的にいくつかの微小液滴を基板上に形成する (Fig. 2) . その撥水過程および液滴形成過程において、液膜の厚さを変数として体系的な現象理解を目指してきた。

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、すなわち自由液膜内での対流場の検証と、微小重力実験実現に向けた装置開発を行ってきた。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。特に今年度は、液膜形状が対流場を与える影響を精査した。

○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アスペクト比をパラメータとして、特に厚み方向に2層流れが実現する系での Hydrothermal wave 不安定性現象の発生条件を明らかにした。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い、液膜の静的・動的変形と対流場に関する関係を明らかにした。

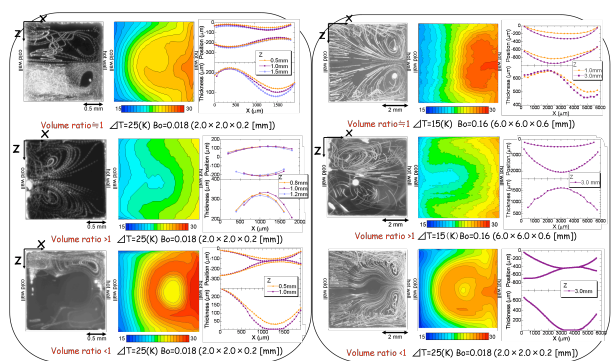


Fig. 3 Typical examples of the induced flow in the free liquid film; path lines (left) and surface temperature deviation (middle) observed from above, and the reconstructed film profile (right)

○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。今年度は固体壁を側方に設置した、より実験に近い系での計算を行ってきた。

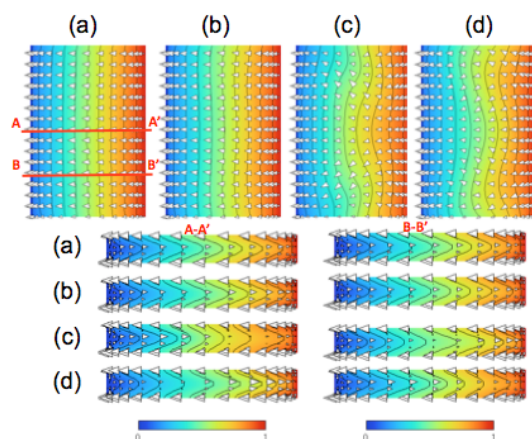


Fig. 4 Snapshots of the temperature and the velocity distribution from top (top), from side (bottom) at $\Gamma_x = 1.5$, $\Gamma_y = 6.67$. (a)-(d) are for $t = 0.2$ s, 1.0 s, 3.4 s, 6.5 s, respectively.

これらの解析により、地上実験と同様の Hydrothermal wave 不安定性が生起することを明らかにした。今後は実験的研究と組み合わせながら対流場の予測をより詳細に行っていく予定である。

以上の内容に関し、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、2007 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、一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。

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. 来年度初期に航空機実験実施を予定しており, 今年度はその微小重力実験用装置開発を行ってきた.

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 渡辺俊貴氏, 勝田健史氏, 出来尾祐美氏によるものである. 来年度実施予定の航空機実験に向けた準備においては, 東京理科大学学部生 石川夏希氏, 五十部恭平氏, 瀬戸口琢磨氏の多大なる協力のもとに進めている.

業績

学術論文

- (1) Ueno, I., Hirose, K., Kizaki, Y., Kisara, Y. & Fukuhara, Y., Precursor film formation process ahead macroscopic contact line of spreading droplet on smooth substrate, Trans. ASME, J. Heat Transfer, accepted.
- (2) Ueno, I. & Watanabe, T., Flow transition in a free rectangular liquid film under a temperature gradient, Int. J. Transport Phenomena, accepted.
- (3) 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.

学会発表

- (1) Ueno, I., Igari, G. & Kisara, Y., Precursor Film Formation ahead Macroscopic Contact Line of Droplet Spreading on Smooth Substrate, Proc. 5th Conf. of the International Marangoni Association (IMA5) (Jun 7-10, 2010, Florence, Italy), CD-ROM, 2010.
- (2) Watanabe, T. & Ueno, I., Thermocapillary-Driven Flow in Free Liquid Film Formed in A Rectangular Hole with Temperature Gradient, Proc. 5th Conf. of the International Marangoni Association (IMA5) (Jun 7-10, 2010, Florence, Italy), CD-ROM, 2010. (poster)
- (3) Ueno, I., Igari, G. & Kisara, Y., Detection of precursor film formed ahead droplet spreading on solid substrate, Proc. 14th Int. Symp. on Flow Visualization (ISFV14) (Daegu, Korea, June 21-24, 2010), usb memory (paper #: ISFV14-1B-2), 2010. (oral)
- (4) Ueno, I., Hirose, K. & Kizaki, Y., Precursor Film Formation of Spreading Droplet, (IHTC-14) (8/8-/13, 2010, Washington D.C., USA), CD-ROM (paper #: IHTC14-22635), accepted after reviews (3 reviews)
- (5) Watanabe, T. & Ueno, I., Thermocapillary-Driven

Flow in Free Rectangular Liquid Film under Temperature Gradient, 8th Japan-China-Korea Workshop: Microgravity Sciences (Sept. 22-24, 2010, Akiu, Sendai, Japan), 2010. (oral)

(6) Katsuta, T., Watanabe, T. & Ueno, I., Static/dynamic deformations induced by flow patterns in thin free liquid film due to thermocapillary effect, 8th Japan-China-Korea Workshop: Microgravity Sciences (Sept. 22-24, 2010, Akiu, Sendai, Japan), 2010. (poster) (International Mohri Poster Award, Parabolic Flight Award)

(7) Dekio, Y. & Ueno, I., Numerical simulation on flow patterns in a thin free liquid film exposed to a temperature difference, 8th Japan-China-Korea Workshop: Microgravity Sciences (Sept. 22-24, 2010, Akiu, Sendai, Japan), 2010. (poster)

(8) Matsuya, T. & Ueno, I., On a thermocapillary-driven flow in a rectangular free liquid film exposed to a temperature gradient, 5th Int. Topical Team Workshop on Two-phase systems for ground & space applications (Sept. 26-29, 2010, Kyoto), p.48 (poster), 2010.

(9) Katsuta, T. & Ueno, I., Flow patterns and resultant static/dynamic deformation of thin free liquid film induced by thermocapillary effect, 5th Int. Topical Team Workshop on Two-phase systems for ground & space applications (Sept. 26-29, 2010, Kyoto), p.99 (oral), 2010.

(10) Dekio, Y. & Ueno, I., Numerical simulation on flow patterns in a thin free liquid film exposed to a temperature difference, 21st Int. Symp. on Transport Phenomena (ISTP-21), (Kaohsiung City, Taiwan, Nov. 2nd-5th, 2010) (poster).

(11) Ueno, I., Katsuta, T. & Watanabe, T., Flow patterns induced by thermocapillary effect in thin free liquid film, Proc. 2nd European Conf. on Microfluidics - Microfluidics 2010 (Toulouse, France, Dec. 8-10, 2010), CD-ROM (paper#: μ Flu10-203), 2010. (poster)

(12) Kono, S. & Ueno, I., Molecular dynamics study of spontaneous behavior of ultra thin liquid film on solid substrate, Proc. 2nd European Conf. on Microfluidics - Microfluidics 2010 (Toulouse, France, Dec. 8-10, 2010), CD-ROM (paper #: μ Flu10-230), 2010. (oral)