

## 「コンタクトライン近傍流体の動力学」研究班WG活動報告

東京理科大学 上野一郎<sup>1</sup> 東北大学 小宮敦樹<sup>2</sup> 神奈川大学 木村達人<sup>3</sup>  
 東京大学 塩見淳一郎<sup>4</sup> 丸山茂夫<sup>5</sup> 宇宙航空研究開発機構 松本聡<sup>5</sup>

Activities of space utilization research working group on 'Dynamics of the fluid in the vicinity of the contact line' in JFY2006

*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>*

<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

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

**Abstract:** This manuscript introduces activities of the working group on 'Dynamics of the fluid in the vicinity of the contact line' in JFY2006. To understand and to control of wetting and dewetting processes of the solid material by the liquid are of great importance for technological applications under microgravity as well as microscale conditions. The present authors' group has been interested in this phenomenon accompanying with 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.

**Keywords;** Space Utilization, Contact Line, Wettability, Interferometry, Molecular Dynamics.

### はじめに

固体表面上において液滴や液膜の移動によるいわゆる「濡れ」の現象は、窓ガラス上をのりたり落ちる雨滴や、コップややかんに注いだ水の動きなど、身近に存在し日常的によく見かける現象である。この濡れの問題は身近な例に限らず、工業的にも幅広い業種において見られる。機械設計・開発時においては、要素間の潤滑や除熱など熱流体力学の問題は必然的に生起するため、考慮が不可欠な事象である。さらに当該熱流体现象は、国際宇宙ステーションや大規模プラントなどサブキロメートルオーダーから、マイクロ・ナノロボットなどナノメートルオーダーに至るまで非常に幅広い領域に亘るものであると同時に、各スケール間の相互作用も含めた複雑なものである。すなわち、「濡れ性」と呼ばれる性質は界面近傍の分子レベルからなるミクロな現象が、液滴全体の形状や運動といったマクロ的な挙動に影響を与えるというメゾスコピックな現象であると言える。

本研究グループでは、このようなメゾスコピックな熱流体力学に関する知見を蓄積すると共に、宇宙環境における部分的な濡れを有する系を利用した応用技術の高効率化、また部分的濡れを有する系の環境制御可能化を目指して研究を行っている。特に宇宙環境においてこのような系が大きく寄与するのは熱流体现象を利用した技術であり、沸騰や凝縮現象を伴う熱交換器の伝熱特性に直結

する問題であると言える。また、結晶成長や薄膜コーティング、軌道上あるいは宇宙運行施設等におけるより高速な水質試験技術などを含む化学反応試験、さらに動植物の環境保持に深く関与している。一方、今後人類が宇宙進出するにつれ、さまざまな重力レベルでの産業あるいは生活活動を行うことが考えられる。このような環境での活動を行うにあたり、これまで重力が全く考慮されていなかった「濡れ」という問題に対して、重力をパラメータとして新しい理解・制御法の確立を行うことは極めて重要かつ不可欠なことである。

本研究グループでの活動では、まず相変化・化学反応を考慮せず、固体面上を移動する液滴前縁部（固液気3相境界線（コンタクトライン：以下CL））近傍領域に注目した研究を、マクロ熱流体力学的な実験的アプローチによるもの、分子動力学法を利用した計算力学的アプローチによるものを実施している。本発表では、2006年度における活動内容を紹介する。

### 研究WGの体制および内容

本研究グループでは、前述の通り主に実験および分子動力学法を用いた数値計算から当該現象にアプローチしている。研究体制および内容を以下に示す。

○実験的研究 [担当：上野（東理大）、小宮（東北大）、松本（JAXA）]

- (i) 高精度干渉計を用いた、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 (Figs. 1-3) (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 (Fig. 4) (小宮・松本),
- (iii) コンタクトラインの移動に対する固体面上温度勾配の影響 (上野).

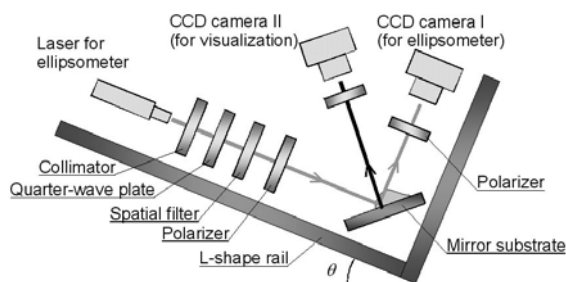


Fig. 1 Experimental apparatus for detecting precursor film ahead the traveling droplet on the solid substrate.

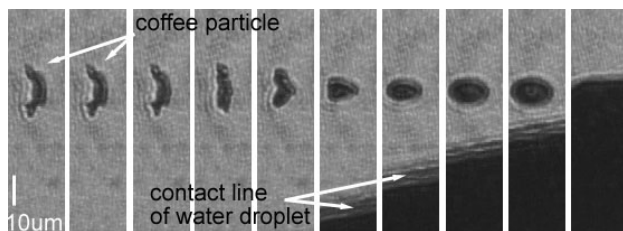


Fig. 2 Typical example of a series of snapshots of fringe pattern (obtained by CCD camera I in Fig. 1) in the case of silicon-water system with frozen coffee particle. The droplet travels upward in this figure. The coffee droplet melts before the macroscopic contact line reaches it. The frame interval is 2.0 s.

(i)では、これまでの研究成果による前縁部近傍流体の動力学に関する知見の蓄積に加え、さらに後縁部近傍流体に関する知見蓄積を目指した新しい実験的研究を開始した。今年度は特に、移動液滴前方に存在する先行薄膜と呼ばれる領域の存在長さの計測を試み、従来の理論的研究および実験的研究との比較を行った。来年度以降においては、当該現象に関する周囲流体の影響に注目して研究を継続していく予定である。

(ii)においては、(i)でも記述した先行薄膜領域の長さおよび厚さのより精密な計測実現を目指して、当該実験系における位相シフト技術の導入を行ってきた。

(iii)では、これまでの等温系での実験だけでなく、実際の熱伝達機器等への応用を目指して、固体面

上の温度分布を制御した状態での CL の移動に注目して、実験装置系の構築および予備的実験を行ってきた。これにより、来年度以降においては先行薄膜領域における熱伝達問題も含めた研究の実現を目指す。

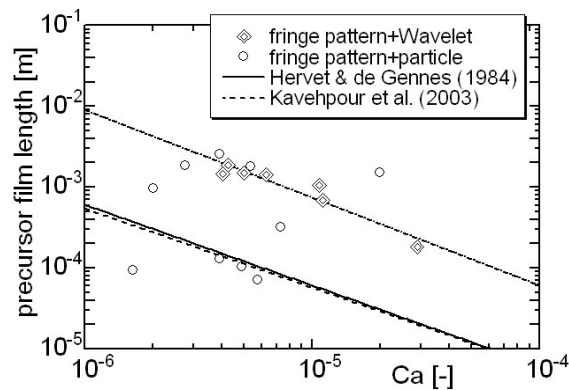


Fig. 3 Precursor film length as a function of non-dimensional number  $Ca \equiv \rho v U_{CL} / \sigma$ , where  $\rho$  is the fluid density,  $v$  the fluid viscosity,  $U_{CL}$  the traveling speed of the macroscopic contact line, and  $\sigma$  the surface tension; double diamond indicates evaluated precursor film lengths by applying Wavelet transformation to the time series of brightness data of the fringe pattern. Solid and dashed lines indicate theoretical prediction<sup>1)</sup> and empirical equation<sup>2)</sup>, respectively. Circle mark presents positions where tiny particle ahead the advancing droplet was affected by the precursor film.

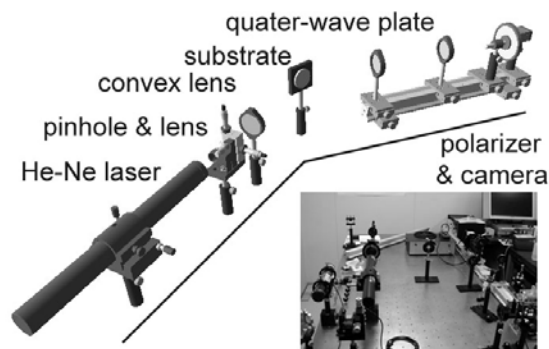


Fig. 4 New-designed experimental apparatus applying the phase-shift ellipsometry.

○分子動力学法を用いた数値計算 [担当: 上野 (東理大), 木村 (神奈川大), 塩見・丸山 (東大)]

- (i) 固体面上を移動するナノスケール液滴に関する動力学 (木村・上野),
- (ii) 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),
- (iii) カーボンナノチューブ内外における水の移動 (Fig. 5) (丸山・塩見)

(iv) 移動するナノ液滴に対するナノスケール粗さの影響 (Fig. 6) (上野),

(v) ナノ液柱に生起する不安定性 (Fig. 7) (上野)

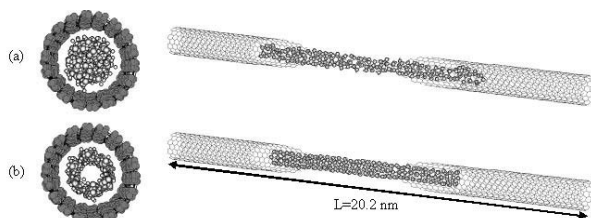


Fig. 5 (a) A typical initial condition of a saturated water cluster in a (9, 9) SWNT, and (b) the ice-nanotube crystallized by lowering the SWNT temperature to 200 K (N=6).

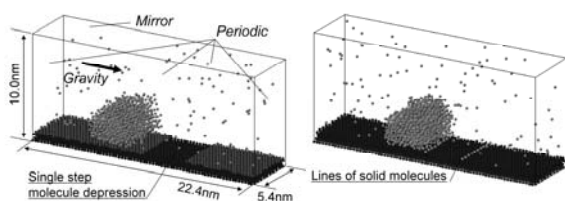


Fig. 6 Target geometries for MD simulation considering the effect of nanometer-scale roughness on the solid substrate upon the traveling droplet; a fully span-wise single-step-molecule depression (left) and double-line structure of solid molecules located perpendicular to the direction of the gravity (right).

(i) 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研究を行った。来年度以降は解析スケールの巨大化を実現し、マクロ的な Navier-Stokes 方程式上での取り扱いに向けてより精密なモデル化を目指した解析を行っていく予定である。

(ii) これまで行ってきた解析は主に Lennard-Jone 流体を対象としてきたが、工業的に非常に重要となる系の解析実現を目指し、試験流体として水やアルコールを、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。これらの研究により、より現実的な現象解析が実現される。

(iii) 近年その工業的応用が爆発的に伸びているカーボンナノチューブに注目し、水との相互作用に関する知見蓄積を行ってきた。将来的にはナノチューブを固体基板上に規則的に密集成長させたナノチューブカーペットの電子機器への応用

実現や、微小重力環境下での高品質製造技術確立を目指した研究を行っていく予定である。

(iv) いわゆる固体面上を流体が移動する際に問題となる「粗さ」に関し、分子スケールでのその問題の存在と制御実現を目指して研究を行っているものである。特に、ナノスケール粗さの付与により、移動液滴の運動の受動的制御の可能性を示しており、固体面上での液滴ハンドリング技術の開発をも視野に入れた解析を行っていく予定である。

(v) 実験(i)で記述した固体面上を移動する液滴後縁部に生起するサテライト液滴の形成に関する分子的な解析を目指して行っている。これにより微小液滴生成の制御技術などの開発をも視野に入れているものである。

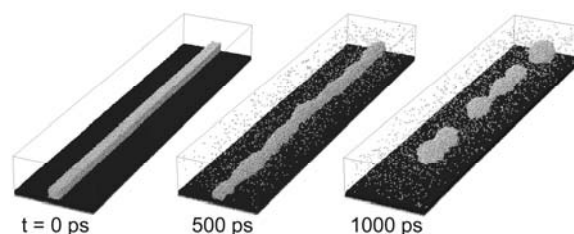


Fig. 7 Typical example of Rayleigh-Plateau-like instability on nanometer-scale liquid bridge sitting on the solid substrate.

以上の内容に関し、研究グループ内でのミーティングを実施 (2007 1/16 現在で3回実施済、第4回を年度内に実施予定) 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

固体面上を移動する液滴前縁部 (固液気3相境界線 (コンタクトライン: 以下 CL)) 近傍領域に注目した研究を、マクロ熱流体力学的な実験的アプローチによるもの、分子動力学法を利用した計算力学的アプローチによるものを実施してきた。

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 渡邊拓也氏 (現在 (株) ジェイテクト)、大澤琢真氏、小仁所匠氏、東京理科大学学部生 川瀬智也氏 (現在 (株) デンソー) によるものである。

記して謝意を表する.

#### 参考文献

1) Hervet, H. & de Gennes, P.G., The dynamics of wetting:precursor films in the wetting of dry solids,

*C. R. Acad. Sci.* 299 II, 499, 1984.

2) Kavehpour, H. P., Ovryn, B. & McKinley, G. H., Microscopic and macroscopic structure of the precursor layer in spreading viscous drops, *Phys. Rev. Lett.* 91, #196104, 2003.