

論文要旨

Imbibition of Micro-Patterned Surfaces (微細加工表面への浸透現象) Marie TANI (谷 茉莉)

自然界には、微細構造を持つ表面が多く存在する。例えば、ハスの葉表面にはマイクロサイズの微細構造がある [1]。その結果、ハスの葉は水を非常によくはじく表面となる。これは、微細構造により表面積が増えることで、その物質がもともと持っている濡れ性（ハスの葉の場合は撥水性）が強められるためである。このように表面積の増減により濡れ性を制御することを、表面処理等の“化学的な”濡れ性制御と比較して“物理的な”濡れ性制御ということもできる。近年の微細加工技術の進歩により、現在“物理的に”濡れ性が高められた微細加工表面での濡れの研究が親水性（または親油性 [2,3]）・撥水性 [4]（または撥油性）ともに盛んに行われている。

親水性微細加工表面の濡れすなわち浸透現象の理解は、物理的にも産業・実用的にも重要な問題である。しかし、未だ包括的理解に至っていないのが現状である。浸透現象の中で最も基本的なものは、1900年代初めから研究されている“毛管現象”であろう；半径 1mm 程度までの毛管をその物質をよく濡らす液体に接触させると、液体は管の中を上昇しある高さで停止する。最終高さ及び上昇の動力学は、実験と理論の両面からよく理解されている。特に上昇の初期（粘性）領域では、上昇高さ z が経過時間 t の $1/2$ 乗に比例する。微細加工表面での浸透現象でも同様の $1/2$ 乗則が実験的・理論的に確認されている [2]。一方で、別の微細加工表面での浸透現象では $1/3$ 乗則が実験・理論から確認された [3]（ $1/3$ 乗則はコーナーへの毛管上昇でも確認されている [5,6]。幾何学は異なるが、この場合も理論的には同様に理解できる）。このべきの違いは、微細加工表面上に並ぶ微細構造の形状および大きさの違いだと考えられている。しかし、現在のところ、そのクロスオーバーは明らかになっておらず、浸透現象の包括的理解には至っていない。

私は 2 種類の表面での浸透現象を実験的・理論的に研究した。主な成果を以下に示す。

(1) フナムシの脚およびその模倣表面への浸透現象 [7] (本文 6 章)

フナムシは水辺に住む鰓呼吸の生物（甲殻綱等脚目（脚は 7 対 14 脚））である。しかし、ごくわずかな時間しか泳ぐことができない。すなわち、彼らが生きていくためには、腹部にある鰓に適時適量の水を輸送するシステムが必要である。そのシステムが、彼らの 6、7 番目の脚間での毛管上昇と、それを実現するための脚表面の微細構造である。我々は 6 番目の脚をフナムシから採取し浸透実験を行ったところ、その一部で液体が上昇する様子が確認された。この上昇は液体の先端が枝分かれや逆走を伴う不均一なものであるが、下の節をほぼ完全に満たしてから次の節へ浸透し始めるという特徴的なものであった。このときの各節の高さ z を液体の到達時刻 t に対してプロットすると、線形関係にあった。すなわち、液体上昇高さは“マクロには” $z \sim t$ であった。浸透現象の動力学は通常“遅くなる動力学”であることを考えると、この“遅くならない動力学”は特に長距離輸送等に有利であり、非常に重要な性質である。そこで、我々はこのフナムシの脚表面の一部を模倣した人工的な表面を作製し、同様に浸透実験を行った。この実験ではフナムシ脚に特徴的な動力学

は再現できず、その動力学は $z \sim t^{1/2}$ であった。一方で、この実験結果は我々が新たに構築した複合モデルできれいに説明することができた。また、フナムシを模倣してハイブリッド構造にすることで、通常のノンハイブリッド構造の場合よりも、浸透が速くなることがわかった。

(2) “Open-capillary(開毛管)” への毛管上昇 [8] (本文7章)

我々は片面が開放されている毛管 “Open-capillary” (ないしは角底の溝) を作製し、浸透実験を行った。その結果、ある高さで上昇が停止する “バルク” と、その先端に上昇し続ける “先行薄膜” があることを発見した。バルクに対して、静力学 (最終高さ) および初期 (粘性)・後期 (粘性・重力) の動力学はそれぞれ通常の毛管上昇とよく似た理論式に乗ることがわかった。また、先行薄膜に対して、薄膜長 h が経過時間 t の $1/3$ 乗に比例する ($h \sim t^{1/3}$) 結果が得られた。これより、“薄膜” は先行研究 [5,6] (コーナーへの毛管上昇) と同様に開毛管のコーナーでの毛管上昇であることがわかり、この場合のスケーリング法則と実験結果が良く一致した。さらに、開毛管のデバイスとしての有用性を示すために、2種類のデモンストレーション (BTB 溶液の色の変化および GFP 発現) を行った。これらの結果から、我々のデバイスは従来のデバイス (ポンプを使用し、また蓋を接着するという難工程を伴う) と比較して有利な点を多く持ち、新たなデバイスとして有効であろうと考える。

本論文は以下の3部構成である。第1部「イントロダクション」(研究背景、毛管現象の基礎および流体力学の式の概説)、第2部「浸透現象の先行研究」(毛細管での毛管現象および微細加工表面での毛管上昇の概説)、第3部「本研究」(上述の(1)および(2))である。

参考文献

- [1] W. Barthlott and C. Neinhuis, Purity of the sacred lotus, or escape from contamination in biological surfaces. *Planta* **202** 1-8 (1997).
- [2] C. Ishino, M. Reyssat, E. Reyssat, K. Okumura and D. Quéré, Wicking within forests of micropillars. *Europhys. Lett.* **79** 56005 (2007).
- [3] N. Obara and K. Okumura, Imbibition of a textured surface decorated by short pillars with rounded edges. *Phys. Rev. E* **86** 020601(R) (2012).
- [4] A. Lafuma and D. Quéré, Superhydrophobic states, *Nat. Mater.* **2** 457-460 (2003).
- [5] A. Ponomarenko, D. Quéré and C. Clanet, A universal law for capillary rise in corners. *Journal of Fluid Mechanics* **666** 146 (2011).
- [6] L. -H. Tang and Y. Tang, Capillary rise in tubes with sharp grooves. *J. Phys. II France* **4** 881 (1994).
- [7] M. Tani, D. Ishii, S. Ito, T. Hariyama, M. Shimomura and K. Okumura, Capillary rise on legs of a small animal and on artificially textured surfaces mimicking them. *PLoS One* **9(5)** e96813 (2014).
- [8] M. Tani, R. Kawano, K. Kamiya and K. Okumura, Toward combinatorial mixing devices without any pumps by open-capillary channels: fundamentals and applications. *Sci. Rep.* **5** 10263 (2015).