

水平基板上を濡れ拡がる薄液膜と微小構造物間相互作用時における

局所的液滴前縁部加速現象に関する数値解析

江籠 和磨

東京理科大学大学院 創域理工学研究科 機械航空宇宙工学専攻

1 序論

低レイノルズ数 ($Re \ll 1$) 対流場での熱・物質輸送の促進・制御は、マイクロフレイディックスでの粒子選別・分散や化学反応の高効率化に欠かさない課題である。粘性支配であるため、従来では異なる濡れ性を用意した流路や、音響場や電磁場を付与するなど流路の生成およびデバイスの運用に甚大なエネルギー注入をもって実現していた[1-3]。本研究で対象とする馬蹄渦 (Horseshoe vortex) の発現は慣性力支配での現象として長く信じられており[4], $O(1 \mu\text{m})$ から $O(100 \mu\text{m})$ の微小構造物に対し, $Re = O(10^{-4} \sim 10^{-2})$ の粘性支配の対流場においてはそもそも知見の蓄積が十分になされていなかった。著者が所属する研究グループは毛管力支配 ($Re \ll 1$ かつ $Ca \ll 1$) の条件下において、微小構造物周りでの自発的メニスカス形成時にその形状変化により逆圧力勾配が発現し、これを主要因として馬蹄渦を含む複雑対流場が形成されることを数値解析によって明らかにした[5]。本研究では微小構造物群周りにおける馬蹄渦発現とそれらの相互作用を含む複雑対流場の発現過程の解明、および、その熱・物質輸送機構への革新的応用を実現する学際的視点と力学的指標の確立を目的とする。

2 計算手法

解析対象とした領域を図1に示す。計算領域は水平基板上に単一微小円柱状構造物を設置した系である。液体および気体の物性値には、 25°C における 2-cSt シリコーンオイルおよび空気のものを用いた。

気液界面の追跡には、計算セル内部の体積含有率で表現する VOF 法 (Volume of Fluid Method) を、界面張力の取り扱いには CSF 法 (Continuum Surface Force Method) を用いた。液膜が微小構造物と接触することに伴う動的濡れを考慮した流動場を解析対象とするため、OpenFOAM ver.9 の interFoam ソルバーにより解析を行なった。

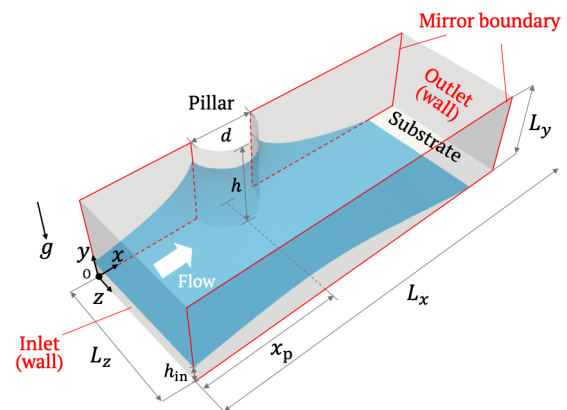


図 1 単一微小円柱と薄液膜の相互作用に着目した解析対象の鳥瞰図。なお、主流方向長さは長さを意図的に限定して示している。

3 結果・考察

先行研究[5]において、基板近傍かつ微小円柱前方領域で逆圧力勾配が発現し、これを主要因として毛管力支配環境下でも馬蹄渦が発現すると明らかにされているため、本稿でも三次元流れ場と基板近傍の圧力場について述べる。図2に薄液膜の濡れ拡がり十分に完了した時刻における、単一微小円柱まわり三次元流れ場の例を示す。馬蹄渦の色は主流方向速度を示している。パネル (a)

より、円柱前方から発現する馬蹄渦は螺旋構造のようなねじれを有しながら分布することが定性的に確認される。これは先行研究で明らかにされた渦構造と同様な構造を示す。本研究では、先行研究[5]と比較し、十分に薄液膜の進行が完了した時刻についても対象としているが、本結果は馬蹄渦がより長い時間存在し続けることを示唆している。パネル (b) より、基板近傍かつ円柱前方に逆圧力勾配が形成されていることが定量的に示される。また、基板近傍かつ円柱周りの領域においては、圧力の値がほぼ大気圧と同等となり、スパン方向に圧力勾配が生じる。この等圧領域外において馬蹄渦を形成していることから、基板近傍の圧力分布が馬蹄渦領域を決定する要因となることを示唆している。

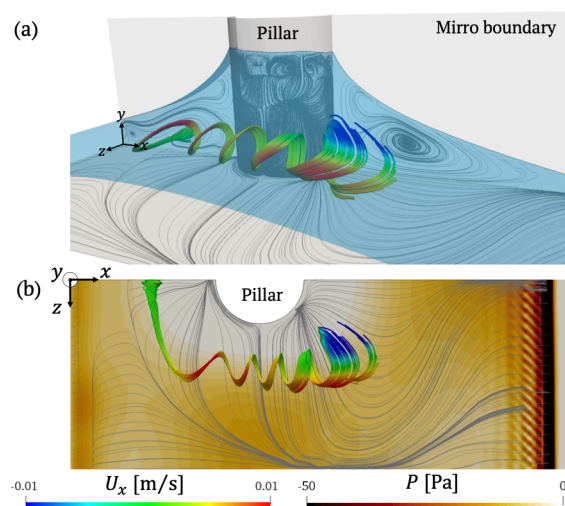


図 2 薄液膜の濡れ拡がり十分に完了した時刻における、単一微小円柱まわり三次元流れ場の例。

(a) 気液界面形状、基板および対称面近傍と円柱表面における二次元流線、ならびに三次元流れ場の鳥瞰図。(b) 基板近傍における圧力および二次元流線、ならびに三次元流れ場の平面図。

4 まとめ・今後の展望

本解析より、薄液膜の基板への濡れ拡がり十分に完了した時刻においても馬蹄渦が発達し、その分布は基板近傍の流れ場や圧力場と大いに関連があることが明らかとなった。

今後の展望としては、馬蹄渦の発現過程の解明のみならず、時空間的な観点からその発現条件の

定量化に取り組む。また、馬蹄渦をはじめとする薄液膜内部複雑対流場が有する攪拌性能を定量化し、単純形状を有する微小構造物と液滴との相互作用を通じて、無動力で熱・物質輸送を促進する仕組みとなるいわゆる『メニスカス・ミキシング』機構を技術として利用可能にするための基礎的知見の蓄積にも取り組む。具体的な工学的応用として、例えば、低重力環境下での高効率液体輸送技術や、微量での試薬および血液の高効率混合技術など、多様な工学的応用可能性を有している。

5 謝辞

本研究の一部は、京都大学スーパーコンピュータ共同研究制度（若手・女性研究者奨励枠）による。また、JSPS 科研費 (grant #: 24KK0081) の助成を受けたものである。ここに感謝の意を表す。

6 参考文献

- [1] L. Chen, Y. Luo, J. Liu, B. Hao, S. Lyu, Z. Luo, The smart valve for micro flow-velocity regulation based on the “Interfacial Barrier” effect of wettability-patterned surfaces, *Mater. Horiz.* 12 (2025) 6310.
- [2] M. Miansari, J. R. Friend, Acoustic Nanofluidics via Room-Temperature Lithium Niobate Bonding: A Platform for Actuation and Manipulation of Nanoconfined Fluids and Particles, *Adv. Funct. Mater.* 26 (2016) 7861-7872.
- [3] J. Tan, H. Wang, M. Sun, P. Tian, Y. Wang, K. Wang, D. Jiang, Regulating droplet impact on a solid hydrophobic surface through alternating current electrowetting-on-dielectric, *Phys. Fluids* 33 (2021) 042101.
- [4] A. Roulund, B. M. Sumer, J. Fredsoe, J. Michelsen, *J. Fluid Mech.* 534 (2005) 351-401.
- [5] K. Ozawa, H. Nakamura, K. Shimamura, G.F. Dietze, H.N. Yoshikawa, F. Zoueshtiagh, K. Kurose, L. Mu, I. Ueno, Capillary-driven horseshoe vortex forming around a micro-pillar, *J. Colloid Interface Sci.* 642 (2023) 227-234.