

流速・垂直力の同時計測によるナノすきまの固液界面スリップ評価

Evaluation of interfacial slip in nanogaps via simultaneous measurements of flow velocity and vertical force

名大院・工（学）*尾関 秀隆 名大・工（正）*東 直輝 名大・工（正）*福澤 健二

名大・工（正）*伊藤 伸太郎 名大・情（正）*張 賀東 名大・情（正）*宋 玉璽

Hidetaka Ozeki*, Naoki Azuma*, Kenji Fukuzawa*, Shintaro Itoh*, Hedong Zhang*, Yuxi Song*

*Nagoya University

1. はじめに

自動車エンジンや駆動システムにおける潤滑では、粘性摩擦によるエネルギー損失を低減するために、潤滑油の低粘度化が進められている。これにより、固体二面間を分離する垂直力(負荷容量)が低下し、固体二面間のすきまはナノメートルオーダー(ナノすきま)に狭小化している。一方で、ナノすきまを流れる流体は、バルクと異なる流体特性をもつことが報告されている。特に、ナノすきまでは急激なせん断応力の増加により、流体が固体表面に対してすべる界面スリップが発生する¹⁾。界面スリップによって、すきま内の流速分布はバルクの流体理論で予測されるものと異なり、これにより摩擦力や垂直力などの潤滑特性が変化する²⁾。したがって、ナノすきまを有する機械システムの潤滑設計には、界面スリップの定量化が必須である。

固液界面のスリップは、一般に、液体で満たされた固体二面間のすきまを狭小化したときに発生する垂直力(スクイーズ力)にもとづいて計測されてきた³⁾。この方法では、実験的に測定した垂直力を、界面スリップによって変化する流速分布にもとづいて算出された理論的な垂直力と比較することで、界面スリップの大きさを表すスリップ長が計測される。しかし、この方法によって得られたスリップ長は、理論モデルの式やフィッティングの方法に強く依存することが報告されている³⁾。そのため、界面スリップの定量的な評価のためには、垂直力測定にもとづく方法に加えて、液体の流体流れを直接に測定することで界面スリップを計測することが重要である。液体の流速測定には、一般に、液体に蛍光粒子を混合し、流れ方向の粒子の移動量から流速を測定する蛍光追跡法が用いられてきた。しかし、従来研究で用いられた蛍光粒子の直径は数十 nm から数十 μm と大きく、壁面との相互作用の影響でナノすきまでの流速測定は困難であった。我々はこれまでの研究で、一桁 nm 直径の蛍光粒子である量子ドットの追跡により、ナノすきまでのスクイーズ流れの流速を定量的に計測し、得られた流速値にもとづいて界面スリップを定量化する手法を開発した⁴⁾。そこで本研究では、ナノすきまのスクイーズ流れの流速計測と同時に垂直力を計測可能な系を構築し、それぞれの手法によって得られた界面スリップを比較・評価した。

2. 実験方法

液体試料として、シリコンオイル 200 mPa・s に直径 6 nm の蛍光粒子である量子ドット(蛍光波長 665 nm)をトルエンを介して濃度 8 mg/L で混合した。混合後の試料の粘度は 25°C で 66 mPa・s であった。Figure 1 の実験装置に示すように、ステンレス膜コーティングされた球面レンズと平面ガラス基板の間のすきまに液体試料を導入し、ピエゾアクチュエータにより基板間のすきまを制御した。液体試料と上下基板との接触角はそれぞれ、14°, 11°であった。上側の球面レンズは、ばね定数 $17 \times 10^3 \text{ N/m}$ の板バネ(SUS304CSP)に固定されており、すきまの狭小化によって発生したスクイーズ力によって板バネが変位する。この板バネの変位量を、ピエゾアクチュエータに固定された治具に取り付けたレーザ変位計で測定し、ばね定数を乗じることでスクイーズ力を計測した。また、ガラス基板の下側から励起光(波長 460 nm)を照射し、対物レンズと蛍光フィルターを通して、量子ドットによる蛍光像および上下基板表面での反射光による光干渉像を 2 台のカメラによってそれぞれ取得した。光干渉像からすきまを、蛍光像から量子ドットを追跡することで流速を計測した。

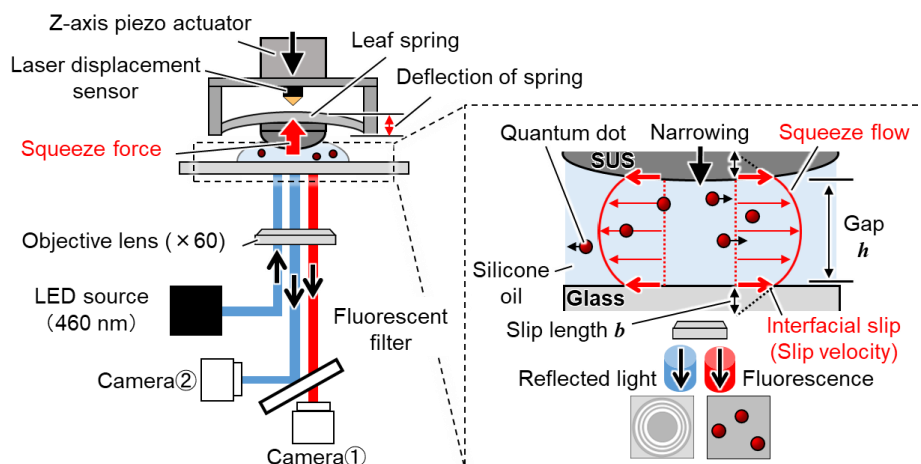


Fig. 1. Experimental setup

3. 実験結果と考察

Figure 2 は、上下基板間のすきまを 600 nm/s で狭小化したときに計測されたスクイーズ力とすきまの関係を示す。スクイーズ力は、200 nm よりも小さなすきまで、スリップなしの場合の理論値よりも小さくなった。これは、界面スリップが発生したことで垂直力が低下したことを示している。そこで、界面のスリップ長 b をパラメータとして、スリップを考慮したスクイーズ力の理論式⁵⁾をフィッティングした結果、スリップ長は 13 nm であると算出された。

Figure 3(a)は、すきま 137 nm における量子ドットの蛍光画像を示す。この蛍光画像にもとづいて、PIV 法(Particle image velocimetry, 粒子画像流速測定法)を用いて流速解析を行った(Fig. 3(b))。さらに、各すきまの PIV 解析によって得られた流速値の個数分布にもとづいて、界面のスリップ速度を算出した(Fig. 3(c))。Figure 3(c)に示すように、すきま 137 nm における実験結果の流速値の個数分布は界面スリップ速度が 17 $\mu\text{m/s}$ のときの理論的な流速値の個数分布と一致した。すきま 137 nm のときのスリップ長は 15 nm であり、スクイーズ力測定によって得られたスリップ長と概ね一致した。この結果は、本手法によって、流速と垂直力の同時計測による界面スリップの定量化を実現できたことを示す。さらに、界面スリップは固体と液体の相互作用によって大きく異なるものの、先行研究でも濡れ性の高い表面で同オーダーのスリップ長が報告されており⁶⁾、本手法での計測結果は妥当であると考えられる。一方で、すきま 111 nm でのスリップ長は 27 nm であり、すきま 137 nm のときと比べ大きく、スリップ長がすきまに対して一定であると仮定した従来の理論モデルと異なる結果であった。これは、すきまごとの流速を直接に測定することによって明らかになった結果であり、従来のスリップ長を一定とするモデルで界面スリップを特徴づけることが困難である可能性を示している。

4. おわりに

本研究では、ナノすきまのスクイーズ流れの流速と垂直力を同時に計測することで、界面スリップ特性を評価する手法を開発した。数百 nm のすきまにおいて、垂直力の測定結果にもとづくスリップ長と、流速測定にもとづくスリップ長のオーダーは概ね一致し、本手法によって流速と垂直力の同時計測による界面スリップの定量化が実現された。一方で、流速測定によって得られたスリップ長は、すきまごとに異なった。これは、スリップ長がすきまに対して一定であると仮定した従来の理論モデルと異なる結果であった。スクイーズ力とスクイーズ流れのそれぞれの計測によって得られた界面スリップ特性の違いやこれらの相関の解明は、今後の検討課題である。

文献

- 1) A. A. Shuvo, L. E. Paniagua-Guerra, J. Choi, S. H. Kim, and B. Ramos-Alvarado: Hydrodynamic Slip in Nanoconfined Flows: A Review of Experimental, Computational, and Theoretical Progress, *Nanoscale* 17, 635 (2025).
- 2) H. Holey, A. Codrignani, P. Gumbsch, and L. Pastewka: Height-Averaged Navier–Stokes Solver for Hydrodynamic Lubrication, *Tribol. Lett.* 70, 36 (2022).
- 3) H. Ishida, H. Teshima, Q.Y. Li, and K. Takahashi: Optimizing the methodology for accurate and accessible slip length measurement with atomic force microscopy, *Int. J. Thermofluids* 22, 100634 (2024).
- 4) H. Ozeki, N. Azuma, K. Fukuzawa, S. Itoh, H. Zhang and Y. Song: Interfacial slip quantification in nanogaps using squeeze flow velocimetry, *Phys. Fluids* 37, 051703 (2025).
- 5) O. I. Vinogradova: Hydrodynamic Interaction of Curved Bodies Allowing Slip on Their Surfaces, *Langmuir* 12, 5963 (1996)
- 6) E. Bonaccorso, H. J. Butt, and V. S. J. Craig: Surface Roughness and Hydrodynamic Boundary Slip of a Newtonian Fluid in a Completely Wetting System, *Phys. Rev. Lett.* 90, 144501 (2003).

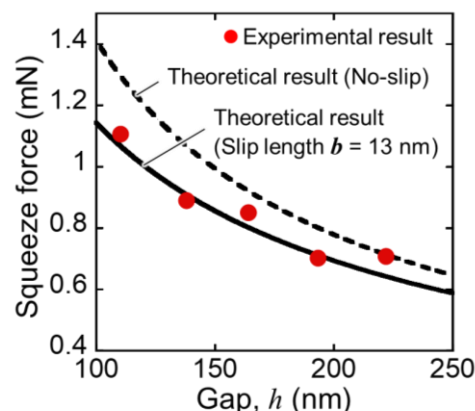


Fig. 2. Result of squeeze force measurement. The dashed and solid curves represent the theoretical squeeze forces for the no-slip condition and for a slip length of 13 nm, respectively.

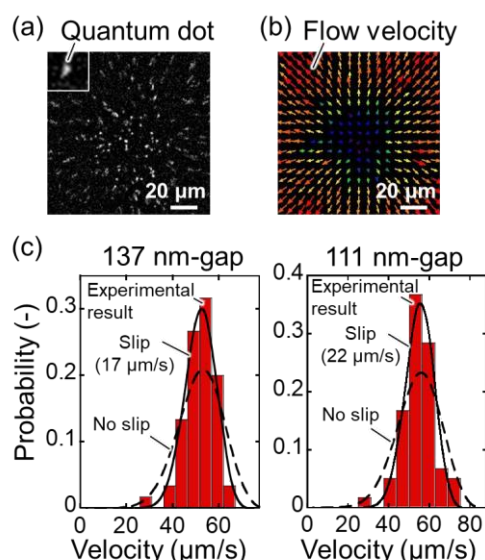


Fig. 3. Result of flow velocity measurement. (a) Fluorescent image at 137 nm-gap, (b) Result of PIV analysis, and (c) Velocity distribution at 137 and 111 nm-gaps. The red histograms represent the experimental results. The dashed and solid curves show theoretical result for the no-slip and slip conditions, respectively.