

ナノすきま内界面スリップ現象解明に向けたスクイーズ流れ・力計測手法の確立

Measurement method of squeeze flow and force for clarifying interfacial slippage in a nanogap

名大・工（学）冷水 健人 名大・工（正）*東 直輝 名大・工（学）尾関 秀隆

名大・工（正）福澤 健二 名大・工（正）宋 玉玺 名大・工（正）伊藤 伸太郎 名大・工（正）張 賀東

Kento Shimizu*, Naoki Azuma*, Hedetaka Ozeki*

Kenji Fukuzawa*, Yuxi Song*, Shintaro Itoh*, Hedong Zhang*

*Nagoya University

1. はじめに

表面加工技術の発展によって、機械要素間のすきまがナノオーダーへと微小化され、機械性能が革新されてきた。一方で、ナノオーダーのすきま（ナノすきま）に閉じ込められた潤滑油の流体特性は、バルクのそれとは異なることが明らかになってきた。ナノすきま内の重要な流体特性の一つに、固体と液体の界面で生じるスリップ現象が挙げられる。通常、金属などの固体表面が潤滑油を挟んでしゅう動する場合には、界面スリップは無視できるほど小さいため、固体表面上の潤滑油の流速は固体表面の速度と同じになる。しかし、ナノすきまでは、せん断応力が急激に増加するために界面スリップが発生し、固体表面上の潤滑油の流速（界面スリップ速度）は固体表面の速度と大きく異なる。界面スリップの発生は固体二面間の潤滑油の流速分布を変化させ、固体二面間に発生する垂直力やせん断力を変化させる。そのため、ナノすきま内の界面スリップ現象の解明には、ナノすきまにおける界面スリップと垂直力・せん断力を定量し、相関を明らかにする必要がある。これまで、ナノすきまの界面スリップを計測する手法として、すきまを狭小化させた際に発生する垂直力（スクイーズ力）を計測する方法が用いられてきた¹⁾。原子間力顕微鏡や表面力測定装置を用いることで、すきまをナノメートル精度で制御しながらスクイーズ力を高精度に計測できる。一方で、この方法によって計測したスクイーズ力から界面スリップを量化するには、スクイーズ力と界面スリップを関係づけたモデル式が必要である²⁾。しかし、これまでに用いられてきたモデル式は、従来の流体理論を用いて構築したものであり、ナノすきまにおいてこのモデル式が適用できるかは明らかにされていない。ナノすきま内の界面スリップ現象を解明するためには、これまでのスクイーズ力計測とモデル式を用いた間接的な界面スリップの定量ではなく、スクイーズ流れの流速分布計測に基づいて界面スリップを定量し、スクイーズ力との相関を明らかにする必要がある。

著者らは、これまでに、潤滑油に混合させた一桁 nm 直径の蛍光粒子を顕微鏡によって追跡することで、すきまを狭小化させた際に発生するスクイーズ流れの面内の流速計測手法を確立した³⁾。また、得られた流速値の個数分布を解析することで界面スリップを定量できる。一方で、この手法によって得られた界面スリップとスクイーズ力の相関は明らかにできていなかった。そこで本研究では、すきまを狭小化させた際のスクイーズ流れとスクイーズ力を同時に計測する実験系を新規に構築し、ナノすきま内の界面スリップとスクイーズ力を定量する手法を確立することを目的とした。

2. 実験装置と実験方法

Figure 1 に示す実験装置を構築した。すきま制御系において、上記の基板として、表面にステンレス薄膜が形成された平凸レンズを使用した。下側の基板としてガラス基板を使用した。ステンレス成膜レンズはピエゾアクチュエータに固定され、ファンクションジェネレータを用いてピエゾアクチュエータに印加する電圧を調整することで、基板間のすきまを狭小化した。顕微鏡系の LED 光源からの励起光は、ハーフミラー、対物レンズ、ガラス基板を通して試料に照射された。上側の基板とガラス基板の間に蛍光粒子を混合させたシリコーンオイル（200 mPas）を導入した後に、ピエゾアクチュエータを用いてすきまを制御した。ガラス基板表面とステンレス膜表面からの反射光の干渉光が、蛍光フィルタによって反射され、カメラへと入射され、光干渉像が観察された。光干渉像の解析によって数 nm 精度ですきまを計測した。一方で、潤滑油中の蛍光粒子から発光された蛍光は、蛍光フィルタを通過して流速計測用のカメラへと入射された。蛍光粒子追跡によるスクイーズ流れの計測と界面スリップの量化は、著者らの従来研究と同様に実施した。蛍光像を PIV (粒子画像流速測定法) によって解析することで流速値を計測した。流速値の個数分布に基づいて、すきま毎の界面スリップを定量した。

また、スクイーズ力測定のために、平行板ばねを用いた垂直力計測系を導入した。平行板ばねの変位を分光干渉レーザ変位計で計測することで、平行板ばねのばね定数と測定した変位から力を算出した。本力測定系において、平行板ばねのばね定数を小さくすると、平行板ばねの変位が大きくなるため、スクイーズ力を高精度に測定

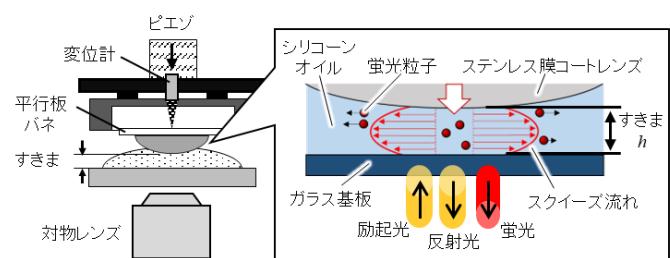


Fig. 1 Experimental setup for measuring squeeze flow and force

できる。一方で、ばね定数を小さくすると、すきま狭小化に伴う平行板ばねの変形によって、実質のすきまの狭小化速度が大幅に低下する。しかし、すきまの狭小化速度の低下はスクイーズ流れの流速を低下させるため、蛍光追跡によって計測できるほど大きな流速値が得られなくなる。一方で、ばね定数を大きくすると、平行板ばねの変位が小さくなるため、すきまの狭小化速度の低下を抑制することができる一方で、高精度なスクイーズ力測定が難しくなる。したがって、したがって、スクイーズ流れとスクイーズ力を同時に計測するためには、平行板ばねの変位と狭小化速度の両方を大きくできるばね定数を選定する必要がある。そこで本研究では、すきま狭小化時の平行板ばねの変位と狭小化速度の理論値を計算し、平行板ばねのばね定数を選定した。

3. 実験結果と考察

Figure 2 にスクイーズ力のバルク理論式から算出した平行板ばねのばね定数の変化に対するすきま 100 nm 時の板ばねの変位と狭小化速度の結果を示す。初期のすきまを 1000 nm、初期の狭小化速度を 400 nm/s とした。Figure 2 に示すように、ばね定数を小さくするほど、板ばねの変位が増加する一方で、狭小化速度が減少する。PIV を用いた流速測定においては、10 $\mu\text{m}/\text{s}$ よりも大きな流速である必要があるため、狭小化速度は 200 nm/s よりも大きくする必要がある。また、本実験で用いた分光干渉レーザ変位計の変位計測の分解能から、変位は数十 nm 以上である必要がある。本実験では、これらを満たすばね定数として 10 N/mm のばね定数の平行板ばねを作製して使用した。

上記の平行板ばねを用いてすきまを狭小化した際のスクイーズ流れの流速とスクイーズ力の同時計測を行った。Figure 3(a)は中心すきま 190 nm におけるPIV 計測結果であり、すきまの狭小化によって中心から放射状にスクイーズ流れが生じたことが示された。PIV 結果からすきま毎の流速値の個数分布を取得し、界面スリップを考慮したスクイーズ流れの理論から得られる流速値の個数分布との比較によって、Fig. 3(b)に示すように、すきま毎の界面スリップ速度の計測を実現した。すきまが 200 nm よりも小さくなると界面スリップが発生し、すきまの狭小化に従って界面スリップ速度も増加するという妥当な結果が得られた。これは、すきまの狭小化に従って、見かけのせん断応力も増加するからである。一方で、界面スリップ計測と同じすきまにおける平行板ばねのばね定数の変位を計測することで、Fig. 3(c)に示すように、すきま毎のスクイーズ力の計測も実現した。これらの結果から、本研究で目的とするすきまを狭小化させた際のスクイーズ流れとスクイーズ力を同時に計測する実験系の構築と実験手法の確立を実現できたといえる。

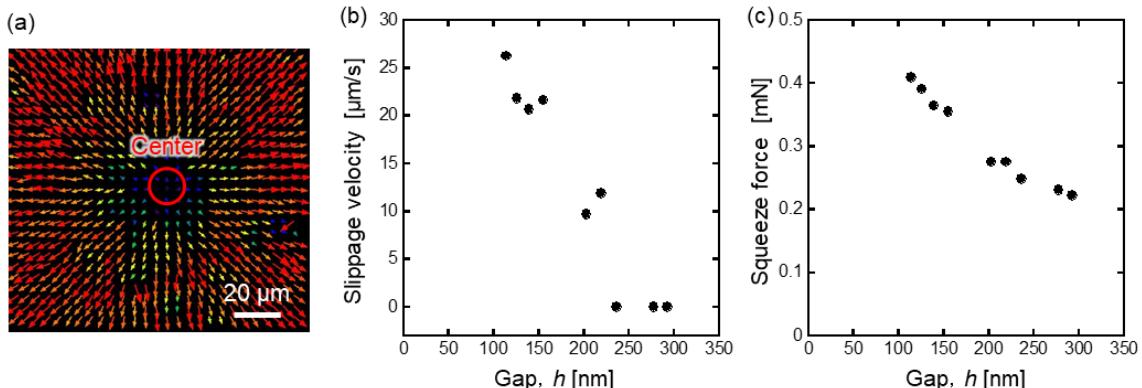


Fig. 3 Experimental results. (a) Squeeze flow measurement in 190-nm-gap using PIV, (b) Slippage velocity with gap obtained from PIV results, (c) Squeeze force with gap measured using the spring with 10 N/mm

4. まとめ

本研究では、ナノすきま内の界面スリップ現象の解明に向けて、すきまを狭小化させた際のスクイーズ流れとスクイーズ力を同時に計測する実験系を新規に構築し、ナノすきま内の界面スリップとスクイーズ力を定量する手法を確立した。力計測系において、スクイーズ力とスクイーズ流れの同時計測を可能とする平行板ばねのばね定数を理論解析によって選定し、作製した平行板ばねを用いて構築した実験系によってスクイーズ流れとスクイーズ力を両方計測する手法を確立した。今後、すきまの狭小化速度や表面・潤滑油材料などを変更して本手法を用いて実験を行うことで、これまでに明らかにされていなかった界面スリップとスクイーズ力の相関を実験的に得られることが期待される。

文献

- 1) Y. Wang, B. Bhushan, and A. Maali: Atomic force microscopy measurement of boundary slip on hydrophilic, hydrophobic, and superhydrophobic surfaces, *J. Vac. Sci. Technol. A* 27, 754 (2009).
- 2) C.W. Wu, P. Zhou, G.J. Ma: Squeeze fluid film of spherical hydrophobic surfaces with wall slip, *Tribol. int.* 39, 863 (2006).
- 3) N. Azuma, H. Ozeki, and K. Miki, S. Itoh, H. Zhang: Quantitative Measurement of Squeeze Flow Distribution in Nanogaps by Particle Image Velocimetry Using Quantum Dots, *Tribol. Lett.* 71, 4 (2023).

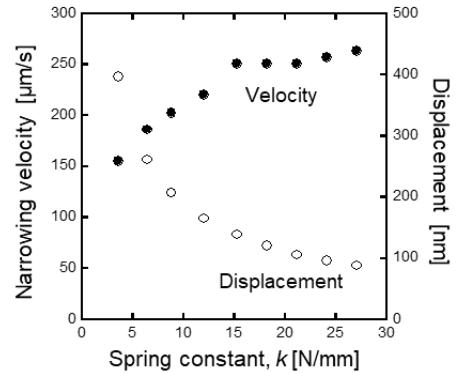


Fig. 2 Narrowing velocity and spring displacement calculated theoretically