

ナノすきまにおけるすきま一定型粘度計測のためのマイクロ集積化デバイス

Micro-integrated device for constant-gap viscosity measurement in nano-gap

名大・工（学）*平岩 広羽 名大・工（学）押谷 優太 名大・工（正）福澤 健二

名大・工（正）東 直輝 名大・工（正）伊藤 伸太郎 名大・工（正）張 賀東

Kou Hiraiwa, Yuta Oshitani, Kenji Fukuzawa, Noaki Azuma, Shintaro Itoh, Hedong Zhang

Nagoya University

1. はじめに

材料技術や加工技術の進歩によりしゅう動面の精密加工が可能になり、より小さなしゅう動すきまでの流体潤滑が可能になった。そして、これは機械性能の革新をもたらしている。様々な分野で、従来の μm オーダーから nm オーダーへしゅう動すきまの微小化が求められている。例えば、低燃費を追求する自動車産業では、エンジンなどのしゅう動部の粘性損失を低減する究極の潤滑剤低粘度化が試みられている。半導体業界では、スマートフォン・PC用メモリの次世代製造技術であるナノインブリントリソグラフィにおいて、表面にナノ構造を形成したモールドと基板を紫外線硬化樹脂液で満たしたナノすきまを介して相対移動させ、両者の位置合わせがなされるが、その際、従来のマクロなすきまに対する潤滑理論では説明できない大きな摩擦力が発生し、デバイス製造に必要な位置合わせが困難になるという課題が生じている。

しかし、ナノすきまの潤滑現象は、すきまが小さいため測定が困難であり、ナノすきま潤滑技術は確立されていない。ナノすきまでは、潤滑剤の特性がすきまに強く依存するため、すきまを精密に制御した測定が不可欠である。すなわち、ナノすきまの潤滑剤の特性について定量的な値を得るためには、測定領域内のしゅう動すきまを一定にすること（一様すきまと呼ぶ）が必須である。これを実現する最も直接的な方法は、すきまを介して向かい合った平行な二つのしゅう動面を用意し、その間の試料潤滑剤をしゅう動しせん断力を測定する方法である。しかし、ナノすきまにおいて、しゅう動中のしゅう動面の平行度を保つことは容易でないため、一般的には球面や平面をしゅう動面として用いることが多い。表面力測定装置（surface force apparatus: SFA）では、しゅう動面を荷重によって変形しやすい材料で構成し、その表面を押したときの変形によって発生する平行面をしゅう動面としている。そのため、しゅう動面として利用できる材料が限られ、加圧下の液体の特性を測定することになる。

本研究では、MEMS技術を用いたしゅう動部品とアクチュエータの一体化により、従来の課題を解決する平行平面しゅう動測定系を提案することをねらいとした。

2. 集積化マイクロ潤滑計測デバイスと作製方法

平行平面しゅう動測定系の実現には、1) しゅう動時のしゅう動面の平行度の確保、2) ナノスケールのすきまの制御、が必須であり、本研究ではMEMS技術によりこれらの問題を克服することをねらいとした。図1に、提案する潤滑計測デバイスの概略図を示す。シリコン基板に平行板バネで支持された直方体構造のしゅう動部を形成した。Deep RIE (reactive ion etching) 法により、シリコン基板を基板面に垂直に貫通エッチングすることで、しゅう動部を形成した。しゅう動面には μm オーダーの段差をつけ、しゅう動面積を設定する。次に、ナノメートルすきま形成のため、集束イオンビーム（focused ion beam: FIB）エッチングにより、しゅう動面をナノメートル深さまでエッチングした。さらに、平滑なガラス板をしゅう動部を形成したシリコン基板に、陽極接合で接合した。陽極接合は、接着剤などを介さずシリコン基板とガラス板を接合するので、先にFIBエッチングで形成した深さが、しゅう動部とガラス板の表面との間のすきまとなる。さらに、平行度はシリコン基板とガラス板の平坦度で確保できる。

シリコン基板は導電性であり、しゅう動部と電極部は約 $10\mu\text{m}$ のすきまを介して向かい合い、しゅう動部は、静電気力により水平方向に駆動される。静電力アクチュエータとしては、櫛歯形電極を採用し、駆動力の向上を図った。原子間力顕微鏡（AFM）で一般的に用いられている光てこ法でしゅう動部の変位を測定できるように、光てこ用の構造（光てこパターン）を付加した。従来の摩擦力顕微鏡（FFM）や水平力顕微鏡（LFM）では、カンチレバーのねじ

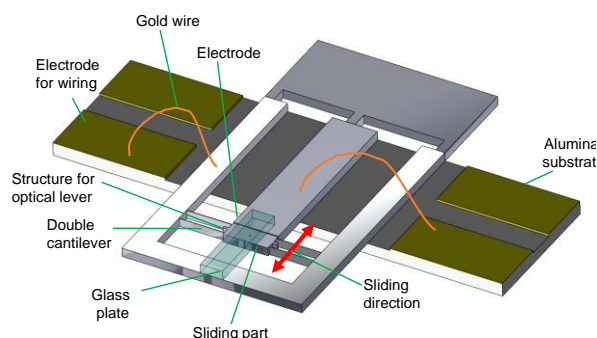


Fig. 1 Schematic of proposed micro integrate device

れ角の変化から相対的な水平力を得ていたが、本法ではしゅう動部が水平方向に変位するため、この方法は適用できない。そこで、しゅう動部に光てこレーザ光のスポット径より小さな光反射用の光てこパターンを形成し、これからの反射光像を AFM 装置の光てこ用位置検出器 (position sensitive detector: PSD) に投影し、この反射光像の変位を検出した^{1),2)}。

以上のように、提案する集積化マイクロデバイスは、MEMS 技術の加工精度を利用することで、上記の 1) と 2) の問題を解決することをねらいとした。さらに、しゅう動部を水平方向に正弦波的に変位させた時の、振動振幅と位相を測定することで、粘性と弾性を得ることができる。

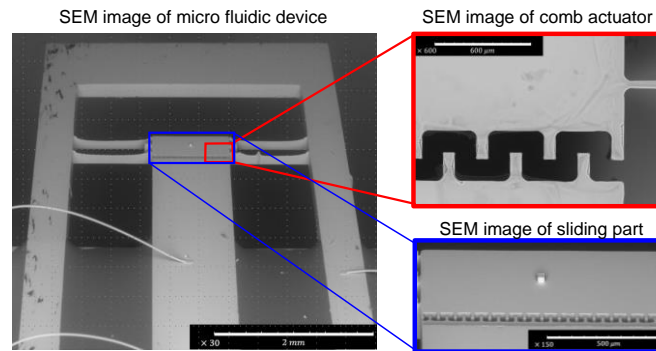


Fig. 2 Fabricated micro-integrated measurement device.

3. 作製結果

図 2 は、集積化マイクロデバイスの作製結果である。中央のしゅう動部は、厚さ約 $9\mu\text{m}$ の平行板ばねで支持した。また、歯形電極の静電力アクチュエータも形成できた。

図 3 は静電力アクチュエータで発生した静電力の測定結果を示す。第 2 項で述べた光てこパターンによる方法を用いて水平変位を測定し、ばね定数を乗ずることで静電力を得た。今回得られた $10\mu\text{N}$ オーダの駆動力はナノすきまの潤滑剤が発生する粘性摩擦力より十分大きく、提案する集積化マイクロデバイスによる粘性測定の可能性を確認できた。

4. おわりに

ナノすきま潤滑の素過程を解明するために、しゅう動部とアクチュエータを一体化した平行平面しゅう動系を実現し、一様すきま条件下でのしゅう動を測定する方法を提案した。また、MEMS 技術を用いて集積化マイクロデバイスを作製し、その実現性を確認した。提案した方法により、すきまに強く依存するナノすきま液体の力学的特性を明らかにすることができる。

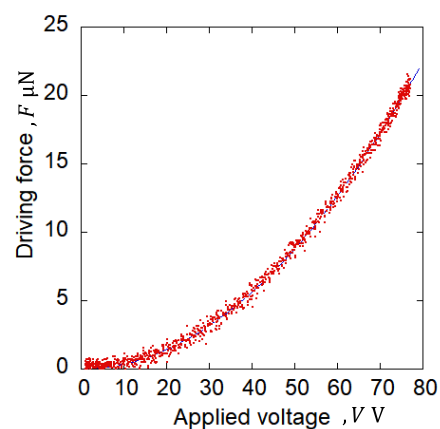


Fig. 3 Electrostatic force generated by fabricated micro-integrated measurement device.

謝辞

本研究の一部は、科学研究費補助金 (20H00214) の助成を受けて実施した。

文献

- 1) H. Amakawa, K. Fukuzawa, M. Shikida, H. Tsuji, H. Zhang, S. Itoh “An electrostatic actuator for dual-axis micro-mechanical probe on friction force microscope”, *Sensors & Actuators: A. Physical*, vol. 175, No. 1 (2012), pp. 94-100S.
- 2) K. Fukuzawa, S. Hamaoka, M. Shikida, S. Itoh, H. Zhang, “Lateral-deflection-controlled friction force microscopy”, *Journal of Applied Physics*, Vol. 116, No. 1 (2014), 084311 (6 Pages).