

双音叉型水晶振動子を用いた微小すきまのすきま一定型スクイーズ力計測

Constant-gap measurement of squeeze force in small gaps using a double-ended tuning fork quartz oscillator

名大・工（学）*塩田 千加良 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

Chikara Shiota, Kenji Fukuzawa, Noaki Azuma, Shintaro Itoh, Hedong Zhang

Nagoya University

1. はじめに

加工技術の進歩による高平滑なしゅう動面の実現により、微小しゅう動すきまを介した潤滑技術は様々な分野で重要なになってきている。流体潤滑には、スクイーズ力や動圧などのしゅう動面に対して垂直方向に働く力の発生が不可欠である。一方、ナノすきまでは、粘度の増加などマクロすきまとは潤滑剤分子が異なる性質を持ち、従来の流体潤滑理論の適用が困難であると考えられている¹⁾。しかし、測定の難しさから、ナノしゅう動すきまの潤滑現象の解明は必ずしも十分ではない。とくに、液体の特性はすきまに強く依存するため、ナノスケールのすきまを精密に制御し、かつナノ領域の微小な力を検出する高感度力測定が求められ、これがナノすきま潤滑現象の測定法の確立を難しくしている。従来一般的な物体の変形を用いて力を検出する場合（例えば、原子間力顕微鏡のカンチレバーの変形による力測定）、高感度な力検出のためには力の方向の剛性を低くする必要がある。しかし、垂直力を検出する場合、力の方向はすきま方向であり、すきまの変動が大きくなってしまう。このように、ナノすきまで発生する垂直力を検出する場合、従来一般的な物体の変形を用いて測定する方法では、高精度なすきま制御と高感度な力検出の両立が困難であった。

本発表では、両端を固定端とした双音叉型水晶振動子（double-ended tuning fork: DETF）を用いることで、高精度なすきま制御と高感度力検出を両立させた力測定法を提案した。提案した方法をナノすきま内で発生するスクイーズ力の測定に適用することを試み、原理確認に成功した。

2. 双音叉型水晶振動子を用いたスクイーズ力測定方法

図1に示すように、DETFは二つの振動子の両端を固定した水晶振動子である。垂直方向の力は軸力として振動子に作用し、振動子の共振周波数（固有振動数）を変化させ、共振周波数変化を位相変化として検出することで垂直力を得ることができる。

本水晶振動子は、垂直方向の剛性が高いため、垂直力による変形が小さく、高精度なすきま制御が可能である。また、二つの水晶振動子は、水平方向に逆位相で振動するため、すきま変動に対する影響が小さく、振動による1nm以下の微小なすきま変化を実現できる。さらに、共振を利用するため、垂直方向の力を高感度に検出できる。以上のように、双音叉型水晶振動子を用いることで、高精度なすきま制御と高感度な力検出を両立させた垂直力測定が可能となる。とくにスクイーズ力を測定する場合、すきま方向に力検出素子が変形すると、すきま方向の速度が一定でなくなり解釈を複雑にしてしまうが、DETF水晶振動子では、すきま方向の高い剛性により、この課題も回避できる。

さらに、DETF振動子のすきま方向の剛性の高さを利用し、すきまを微小な振幅で正弦波的に変化させ、その周波数で同期検波することでSN比を向上させることも可能になる。すきま方向に剛性が高いために、発生する垂直力によりすきまが変動せず、設定した通りのすきま変化を与えることができる。

3. 試料と実験方法

3.1 試料

しゅう動材料としては、シリコン基板とガラスレンズを用いた。試料潤滑剤としてはシリコンオイル（200 mPa s）を用いた。

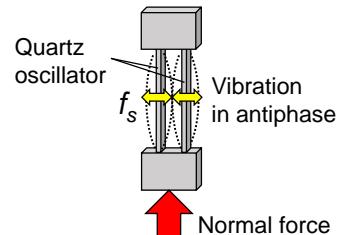


Fig. 1 Schematic for vertical force measurement with accurate gap control using double-ended tuning fork (DETF) quartz oscillator.

3.2 実験方法

図2に測定系を示す。水晶振動子は共振周波数が温度より変化する。そのため、温度による水晶振動子の力測定感度の変化を抑制するために、DETF水晶振動子を含む測定系全体を恒温槽に設置し、環境温度を24°C程度に制御した。DETF振動子は、長軸方向の剛性は高いが、面内方向の剛性は低い。そのため、支持枠を作製し、水晶振動子の固定端部を接着し支持した。そして、ガラスレンズを水晶振動子の片端に接着固定した。支持枠の垂直方向の剛性は、DETF水晶振動子より小さく設定し、垂直力が水晶振動子に効率よく印加されるように寸法設計した。

シリコン基板とガラスレンズの間に、試料潤滑剤を注入した。シリコン基板を一定速度でピエゾ素子で持ち上げ、試料潤滑剤を押し込んだときに、発生するスクイーズ力を、DETF水晶振動子の位相変化として測定した。垂直力による共振周波数の変化は、一定の周波数で加振したときの位相変化から得た。位相変化と垂直力の関係は、既知の力を加えたときの位相変化からあらかじめ測定した。水晶振動子の加振周波数を参考信号とするロックインアンプを用いた同期検出により、SN比を向上させ、力検出の高感度化を図った。

4. 実験結果と考察

図3に測定結果を示す。24.4 nm/s ですきまを小さくした時の測定した垂直力とすきまの関係を示す。あわせて、スクイーズ力の理論値も示した。すきま約50 nm以上では、測定値は理論値とおおむね一致し、それ以下では、小さな値を取った。この結果は、50 nm以上の比較的広いすきまでは、従来の理論が適用できることを示唆している。また、本法によるナノすきまのスクイーズ力測定の妥当性も示している。50 nm以下の狭いすきまでは、これまでのマクロすきまの理論が適用できない可能性も示唆している。

5. おわりに

DETF水晶振動子を用いる高精度すきま制御と高感度力検出を両立可能な垂直力測定法を提案し、ナノすきまで潤滑液体の発生するスクイーズ力測定が可能なことを示した。本法は、ナノすきまにおいて、潤滑剤が発生するスクイーズ力や動圧を定量化でき、ナノすきまにおける潤滑の現象解明が期待される。

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された。

文献

- 1) S. Granick: Motions and relaxations of confined liquids, Science, 253 (1991) 1374-1379.

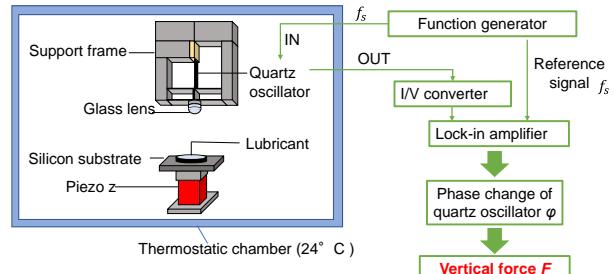


Fig. 2 Experimental setup for vertical force measurement using DETF quartz oscillator.

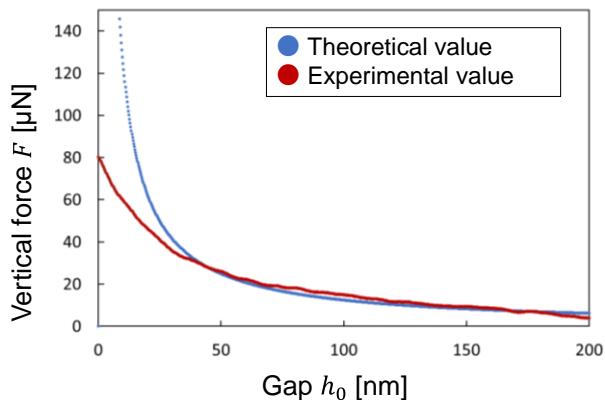


Fig. 3 Measured relationship between vertical force and gap using DETF quartz oscillator.