

204 高精度表面間力測定装置の開発

A High Precision Apparatus for Surface Force Measurements

○学 松岡 広成 (東大院) 正 加藤 孝久 (東大工)

Hiroshige MATSUOKA, Graduate School of The University of Tokyo, 7-3-1, Hongo, Bunkyo-ku, Tokyo
Takahisa KATO, The University of Tokyo, 7-3-1, Hongo, Bunkyo-ku, Tokyo

This paper describes a new apparatus which can measure a normal force between surfaces brought into close proximity with high precision. The apparatus consists of two elastic stages with strain gauges for smooth and fine movement driven by a piezoelectric actuator, four microstages for coarse movement driven by a DC motor and a high precision non-contact capacitive displacement sensor for normal force measurements. Some examples of normal force measurements between mica surfaces in crossed cylinder geometry detected by the new apparatus are presented.

Key Words : High Precision Measurement, Surface Forces, Adhesion Force, Meniscus Force, Ultrathin Fluid Film Thickness

1. はじめに

マイクロマシンやハードディスクのヘッドなどに見られるように、近年の機械技術の発展と共に機械要素は急速に小型化している。このような小さな機械要素の運動を考えると、従来のような大きな質量をもつ機械要素の運動では無視されていたメニスカス力⁽¹⁾のような小さな力が、非常に大きな影響を及ぼしてくる。また、2面間距離が非常に小さくなると、2面間にファンデルワールス力が働くことが知られている⁽²⁾。さらに、2面間に液体が存在すれば、液体分子の影響により構造力や電気二重層力と呼ばれる特別な力が2面間に働くことも知られている^(3,4)。したがって、非常に小さな膜厚における潤滑を考える場合にもこれらの力は重要な役割を演ずるものと考えられる。これらのことから、2面間に働く力の性質を理解することはこれからのキーテクノロジーとして必要不可欠のものであろう。本報では2面間に垂直に働く表面間力を高精度に測定できる実験装置を開発したのでその構成について報告する。また、この装置を用いて凝着力、メニスカス力、流体潤滑膜厚さを測定した例を示す。

2. 実験装置

本研究で製作した実験装置の模式図をFig.1に示す。相互作用させる2面の形状としては様々なものが考えられるが、本研究では点接触を保証するため直交円筒面とした。円筒には光学レンズを用い、一方の円筒面は剛体で支えられ、もう一方は2枚の柔らかい板ばねに支えられている。これらの面の

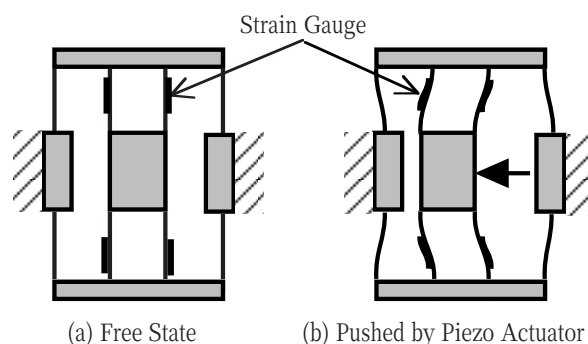


Fig.2 Elastic Stage

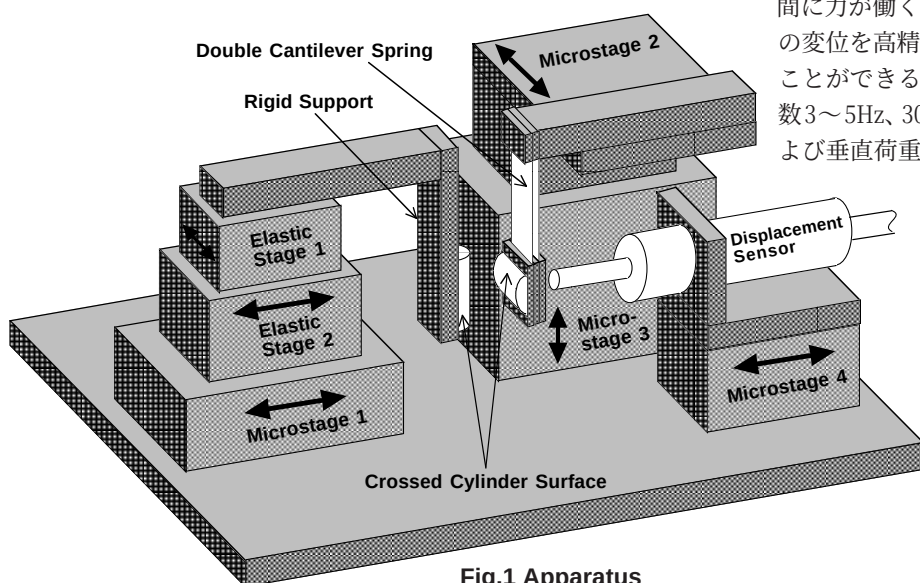


Fig.1 Apparatus

間に力が働くと、板ばねがたわみ円筒面が変位する。その変位を高精度非接触静電容量型変位計により測定することができる。この変位計の分解能は、カットオフ周波数3~5Hz、30秒間で0.7~0.8nmである。2面間の滑りおよび垂直荷重はそれぞれ弾性ステージ1および2によって与えることができる。弾性ステージの構造をFig.2に示す。Fig.2(b)のように中央にある固体を押すことにより4枚の板ばねの弾性変形を利用して小さな力でスムーズな動きを達成できるものである。弾性ステージの駆動には変位拡大てこ付きのピエゾ素子を用いた。また、弾性ステージの変位を板ばねに貼った4枚のひずみゲージにより測定できるようにした。この弾性ステージの全変位量は約500 μ m、変位速度は約0.1~500 μ m/s程度である。マイクロステージ1~3は粗動

用、4は変位計移動用であり、それぞれDCモータにより遠隔操作できる。この実験装置をアクリルケースで密封し、空気ばね式除振台に載せてクリーンブース中に置き、温度と湿度を制御できるようにした。変位計、ひずみゲージからの出力はアンプ、A/D変換器を介してパーソナルコンピュータにて記録される。また、駆動系の制御はGP-IBを介してパーソナルコンピュータからソフトウェアで行うことができる。

以下の測定例では円筒レンズ上に雲母を接着し、雲母表面間の相互作用力を測定した。これは、雲母表面の表面粗さが非常に小さく (AFMで測定した結果、 $R_a=0.048\text{nm}$, $R_{\text{max}}=0.6\text{nm}$)、表面間の相互作用現象の観察に適していると考えたからである。また、円筒面の曲率半径は $10.15\pm0.15\text{mm}$ 、温度 $21.5\pm0.5^\circ\text{C}$ 、湿度20%R.H.未満である。ただし、これらの測定法および理論については文献(5)、(6)に詳しく述べている。

3. 測定例

3.1 凝着力

まず、空気中および種々の液体中での雲母表面間の凝着力を測定した。液体はメニスカスで2面間に保持されている。Fig.3に示すように、2面を弾性ステージ2を用いて微小荷重(初期荷重)で接触させ、荷重を減少させていくとある負の力で2面が突然分離する。

この突然分離する前後の力の差を凝着力とした。この測定結果をTable 1に示す。空気中では15回、各液体中では5回ずつ測定した。これらより、本装置による実験値と過去の文献に見られる実験値はよく一致することが分かる。

したがって、本実験装置は凝着力のような小さな力を精度良く測定できることがわかる。

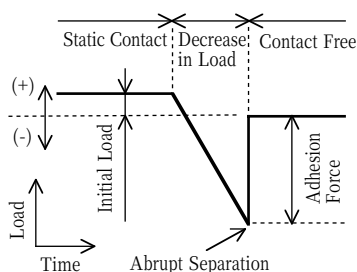


Fig.3 Adhesion Force Measurement

Table 1 Adhesion Forces between Mica Surfaces

	Present Experiment (mN)	Reference (mN)
Air	6.05 ~ 6.30	5.65 ~ 6.78 ⁽⁷⁾
OMCTS	0.880 ~ 0.930	0.854 ⁽⁸⁾
n-octane	0.649 ~ 0.685	0.672 ⁽⁹⁾
n-hexadecane	0.532 ~ 0.578	0.612 ⁽³⁾

3.2 メニスカス力

2面間距離によってメニスカス力に変化することが知られている^(10,11)。本実験装置では、簡易的な方法ではあるが、これを測定することができる。マイクロステージ1をDCモータにより一定速度で動かし、メニスカス力変化を測定した例がFig.4である。2面間距離が増加するにしたがってメニスカス力が減少し、あるところで流体の架橋が突然切れるのが観察される。

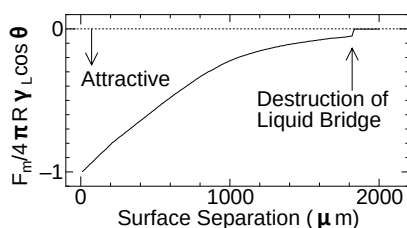


Fig.4 Meniscus Force

3.3 流体潤滑膜厚さ

2面間にメニスカスで流体を保持し、適当な荷重で弾性ステージ1を用いて滑りを与えると、流体潤滑膜が発生し、板ばね側の円筒面が浮上する。本実験装置ではこの膜厚さをナノメータのオーダーで測定することができる。Fig.5はOMCTSを潤滑剤とし、滑り速度を $200\mu\text{m/s}$ とした場合の流体潤滑膜厚さ測定例である。黒丸は実験値、実線および点線は連続体の理論値を示す。

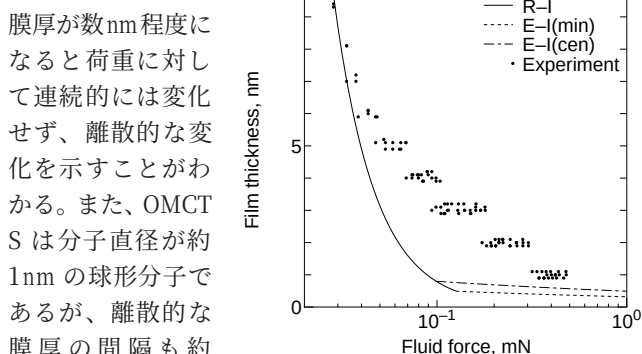


Fig.5 Ultrathin Film Thickness

膜厚が数nm程度になると荷重に対して連続的には変化せず、離散的な変化を示すことがわかる。また、OMCTSは分子直径が約1nmの球形分子であるが、離散的な膜厚の間隔も約1nm程度であり、液体の構造が影響していることがわかる。

4. おわりに

表面間力を高精度に測定できる装置を開発した。これは、高精度非接触変位計、微動用弾性ステージ、粗動用マイクロステージなどから構成されている。2面間に垂直に作用する種々の力の測定例を挙げた。空気中および液体中での凝着力、メニスカス力、流体潤滑膜厚など、今後の技術におけるキープポイントである多くの物理現象の測定が可能であり、汎用性の高い装置である。

文献

- (1) Orr, F. M., Scriven, L. E. and Rivas, A. P., *Pendular rings between solids: meniscus properties and capillary force*, Journal of Fluid Mechanics, **67** (1975), 723-742.
- (2) Lifshitz, E. M., *The Theory of Molecular Attractive Forces between Solids*, Soviet Physics, JETP, **2** (1956), 73-83.
- (3) Horn, R. G. and Israelachvili, J. N., *Direct Measurement of Structural Forces between Two Surfaces in a Nonpolar Liquid*, Journal of Chemical Physics, **75** (1981), 1400-1411.
- (4) Israelachvili, J. N. and Adams, G. E., *Measurement of Forces between Two Mica Surfaces in Aqueous Electrolyte Solutions in the Range 0-100nm*, Journal of Chemical Society, Faraday Transactions I, **74** (1978), 975-1001.
- (5) 松岡広成、桑田敏、加藤孝久、分子オーダの流体潤滑膜厚さの測定(第1報 凝着力の測定), 日本トライボロジー学会トライボロジー会議予稿集, (1995-5), 441-444.
- (6) 松岡広成、加藤孝久、分子オーダの流体潤滑膜厚さの測定(第2報 膜厚の測定), 日本トライボロジー学会トライボロジー会議予稿集, (1995-5), 445-448.
- (7) Christenson, H. K., *Adhesion between Surfaces in Undersaturated Vapors - A Reexamination of the Influence of Meniscus Curvature and Surface Forces*, Journal of Colloid and Interface Science, **121** (1988), 170-178.
- (8) Christenson, H. K., Horn, R. G. and Israelachvili, *Measurement of Forces Due to Structure in Hydrocarbon Liquids*, Journal of Colloid and Interface Science, **88** (1982), 79-88.
- (9) Chan, D. Y. C. and Horn, R. G., *The drainage of thin liquid films between solid surfaces*, Journal of Chemical Physics, **83** (1985), 5311-5324.
- (10) Israelachvili, J. N., *Intermolecular and Surface Forces*, 2nd ed., Academic Press, 1992.
- (11) Gao, C., Tian, X. and Bhushan, B., *A Meniscus Model for Optimization of Texturing and Liquid Lubrication of Magnetic Thin-Film Rigid Disks*, Tribology Transactions, **38** (1995), 201-212.