

論文

分子オーダの流体潤滑膜厚さの測定

原稿受付 1995 年 3 月 29 日

“トライボロジスト” 第 41 巻 第 5 号 (1996) 427~434

松 岡 広 成

東京大学 大学院学生

(〒 113 東京都文京区本郷 7 丁目 3-1)

加 藤 孝 久

東京大学 工学部

(同上)

概 要 表面間力および表面間距離を測定する実験装置を設計製作した。この実験装置を用い、オクタメチルシクロテトラシロキサン (OMCTS) を潤滑剤とした、雲母表面間の流体潤滑膜厚さを測定した。これにより潤滑膜厚が約 10 nm (流体分子直径の 10 倍) 以上では従来の流体潤滑理論に従うことがわかった。10 nm 以下では膜厚の離散化が観察された。これは構造力の影響であると考えられ、従来の流体潤滑理論の適用限界は流体分子直径の 10 倍程度までであることが推測された。

1. 緒 言

近年の機械技術の発展とともに、機械要素は非常に小型化している。これに伴い、相対運動する 2 面間距離も急速に小さくなっている。たとえば、ハードディスクではその記録密度の向上のため様々なヘッド・媒体インタフェースが考えられており、現在の磁気ヘッドスライダは空気膜を介して約 0.1 μm 以下の浮上量が達成されているが、その高記録密度化を図る一手法として液体浮上方式が提案されている^{1,2)}。この場合、軽荷重 (数百 μN) であり、浮上量も数~数十 nm と非常に小さなものになっている³⁾。このような例からもわかるとおり、非常に小さな膜厚における潤滑特性に関する知見はこれからのキーテクノロジーを支えるものとして必要不可欠であろう。本研究では、この潤滑特性の一つ、潤滑膜厚に着目する。

非常に小さな膜厚、あるいは非常に小さな荷重の下ではファンデルワールス力⁴⁾やメニスカス力⁵⁾などの自然発生的な力が無視できなくなり、従来の人工的に与えた負荷荷重のみを考慮した潤滑理論に修正を加えなければならないことが予想できるが、こうした自然発生的な力を考慮した潤滑膜厚に関する理論あるいは実験は皆無である。

また、非常に小さい流体潤滑膜厚さを測定した例としては、著者の調べた限りでは 10~15 nm 程度が最小であり、これ以上の膜厚範囲ではほぼ古典的流体潤滑理論が成り立つことが示されている^{6,7)}。これらの実験では、荷重が数十 N であり、上述したような自然発生的な力は無視されている。また、ファンデルワールス力が無視できなくなるのは数 nm 以下の膜厚の場合であり、このような膜厚における潤滑膜厚の測定および従来の理論との比較が望まれる。そこで、本研究は、2 面間の距離、垂直力を高精度に測定できる実験装置を設計・製作し、これを用いて 10 nm 以下の流体潤滑膜厚さを測定することを目的とする。この実験結果を、ファンデルワールス力とメニスカス力を考慮して従来の理論と比較した。その結果、10 nm 以下の流体潤滑膜厚さについて新しい知見を得たので報告する。

2. 実験装置および試料

本研究で製作した実験装置の模式図を Fig. 1 に示す。潤滑面は直交円筒面とした。これは接触点近傍で球と平面の配置と近似的に等価である。円筒面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

Measurement of Ultrathin Lubrication Film Thickness in Molecular Scale

By Hiroshige MATSUOKA, Student, Graduate School, The University of Tokyo (3-1, Hongo 7-chōme, Bunkyo-ku, Tokyo 113) and Takahisa KATO, Faculty of Engineering, The University of Tokyo (ditto)

に支えられている。これらの面の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 3~5 Hz, 30 秒間で 0.7~0.8 nm 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 piezo 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。弾性ステージによる変位速度は 0.1~500 $\mu\text{m/s}$ 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。本実験では温度 $21.5^\circ\text{C} \pm 0.5^\circ\text{C}$ 、湿度 20 % R.H. 未満とした。

本研究では 10 nm 以下の膜厚を測定するため、固体表面の表面粗さは 1 nm 以下であることが望

まれる。そこで、このような分子的に滑らかな面が大面積で容易に得られるものとして雲母を用いることにした。雲母は多くの分子的な実験に使われており、その物理的性質もよく知られているものである。また、液体試料としてはオクタメチルシクロテトラシロキサン (octamethylcyclotetrasiloxane, 以下 OMCTS と略記) を用いた。これは、分子形状が直径約 1 nm の球形であり、極性はほとんどない⁸⁾。雲母および OMCTS の諸性質をそれぞれ Table 1, 2 に示す。

3. 実験方法

この実験装置を用い、雲母表面間の潤滑膜厚さを測定する。まず、1 辺約 10 mm の正方形の雲母を数十 μm (10~30 μm 程度) の厚さにへき開し、シアノアクリレート系接着剤で円筒レンズに接着する。次に曲率半径 R を確認するため円筒レンズに接着した雲母の両端を表面粗さ計を用いて低倍で測定し ($R = 10.15 \pm 0.15$ mm), 電子天秤で板ばね側の円筒および固定用座金の質量を測定した後、二つの円筒面を実験装置にセットする。非接触変位計の焦点を合わせ、その出力を FFT アナライザに入力し、振動を与えて板ばねの固有

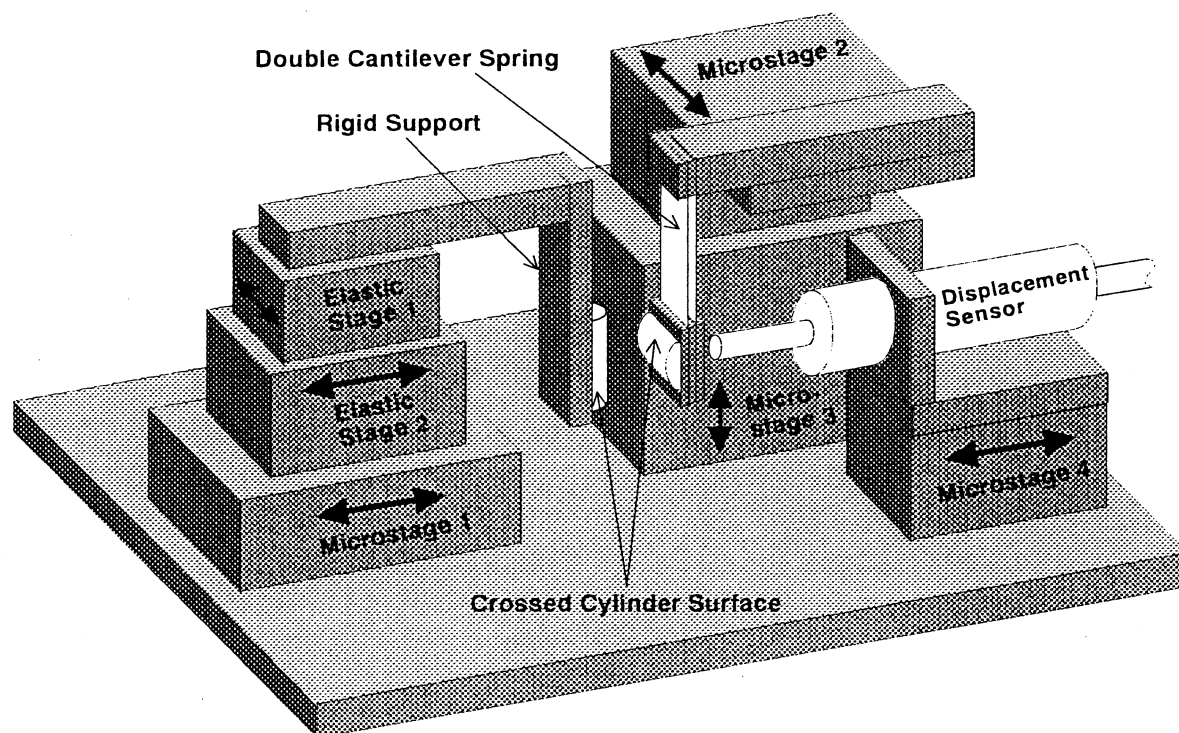


Fig. 1 Apparatus

振動数を測定し、板ばねのばね係数 k_s を求める ($k_s = 132.5 \pm 2.5 \text{ N/m}$)。ここで問題となるのは、滑りを与えたとき面が平行に動かず、斜めに動くことである。これは製作誤差や取付け誤差から生じるものであると考えられるが、本研究のように微小な変位、微小な力を測定する場合にはこれを極力抑える必要がある。これは、何度か乾燥面を滑らせたデータを取りながら補正した。本研究ではこの平行度を 7 nm (垂直方向) / $100 \text{ }\mu\text{m}$ (滑り距離) 未満で実験を行なった。この平行度の誤差によって起こる相対運動中の荷重変化は $2 \text{ }\mu\text{N}$ 未満である。乾燥条件下で、弾性ステージ 1 を用いて 2 面を接触させながら滑らせた場合の非接触変位計の出力の例を Fig. 3 に示す。このグラフからわかるとおり、2 面は完全に平行に動くのではな

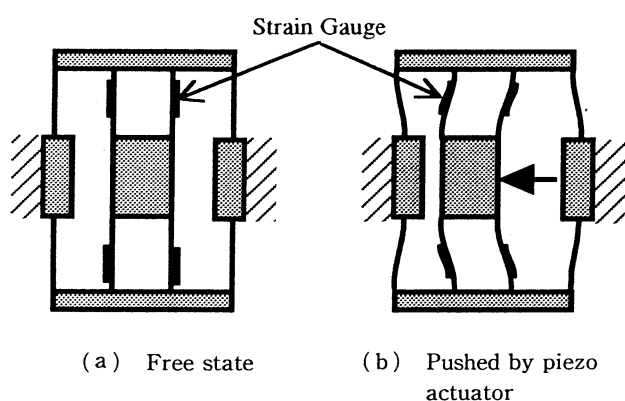


Fig. 2 Elastic stage

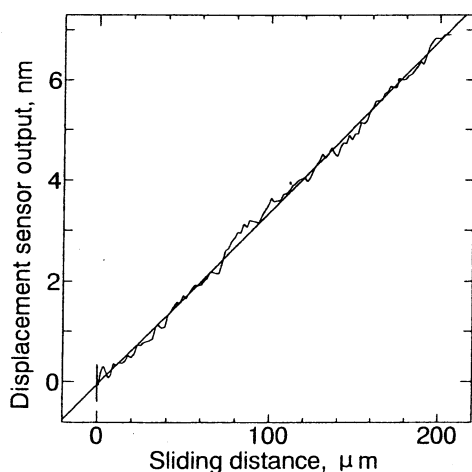


Fig. 3 Dry sliding

く、斜めに動く。この平行からのずれは多少ふらつくものの、原点を通る直線で近似できることがわかる。

さて、本実験ではいくつかの表面間力が作用するので力の釣合いに注意しなければならない。本研究では力の釣合いを次のように考えた。平行度を確認した後、非接触変位計のオフセットを求めてから [Fig. 4(a)], 液体を注射器で $0.1 \sim 0.2 \text{ cm}^3$ つける。このときメニスカスにより変位計出力が変化するので [Fig. 4(b)], 弾性ステージ 2 を用いて最初のオフセット値に戻す [Fig. 4(c)]。このとき、2 面間にはメニスカス力 F_m とファンデルワールス力 F_{vdw} が働いていることに注意する。これらの力の詳細は第 4 章に述べるが、これらは 2 面間距離 h の関数である。なお、「2 面間距離」は固体表面を基準にした言葉であるが、本研究は流体潤滑膜厚についての議論であるので、以後 2 面間距離 h を潤滑膜厚 h あるいは膜厚 h と呼ぶことにする。次に、 F_{vdw} と F_m で大きいものは F_m であり、板ばねを用いてこれをキャンセルする力 F_0 を発生させる [Fig. 4(d)]。すなわち、板ばねを引っ張る方向に弾性ステージ 2 を動かすことになるが、2 面がこの時

Table 1 Properties of Mica

chemical formula	$\text{K}(\text{Al}_2)(\text{Si}_3\text{Al})\text{O}_{10}(\text{OH})_2^{20)}$
refractive index n	$1.60^{8)}$
absorption frequency ω	$1.9 \times 10^{16} \text{ rad/s}^{8)}$
dielectric constant ϵ	$7.0^{10)}$
Young's modulus E	34.5 GPa^*
Poisson's ratio ν	0.205^*
roughness	$0.048 \text{ nm}(R_a)^*, 0.62 \text{ nm}(R_{\max})^*$

* denotes measured value.

Table 2 Properties of OMCTS

chemical formula	$[(\text{CH}_3)_2\text{SiO}]_n^{8)}$
diameter	$1 \text{ nm}^{8)}$
refractive index n	$1.40^{8)}$
absorption frequency ω	$1.60 \times 10^{16} \text{ rad/s}^{8)}$
dielectric constant ϵ	$2.30^{8)}$
contact angle(for mica) θ	7°^*
surface energy γ_L	$19.7 \text{ mJ/m}^{210)}$
viscosity η_0	$2.35 \text{ mPa}\cdot\text{s}^{8)}$

* denotes measured value.

点で離れてしまうのを防ぐため F_0 は F_m を越えないようにしなければならない。この状態で弾性ステージ1により2面を滑らせると、2面間に流体力が生じ、このため2面は離反する。このときの膜厚を h とする。流体力を F とすると、力の釣合いは、

$$F = -F_0 + F_{vdw} + F_m + F_s \quad (1)$$

である [Fig. 4(e)]. ここで、 F_s は2面の離反に伴う板ばねの変位による力で、 $F_s = k_s h$ と表わされ、 k_s は板ばねのばね定数である。

このようにして測定した潤滑膜データ（非接触変位計の出力）の例を Fig. 5 に示す。前述したように、滑りが完全には平行でないため、斜め右

上がりのデータが得られる。ただし、この場合には2面間に液膜が存在するため、Fig. 3 と異なりオフセットを伴う。Fig. 3 で示したように乾燥摩擦の場合は平行からのずれが原点を通る直線で近似できることを利用し、Fig. 5 のように直線部分を最小二乗法で直線近似する。そして、その y 切片を膜厚 h とした。

以上の手順をまとめると、 F_0 を与えて Fig. 5 のようなデータを得、最小二乗法により y 切片を求めて膜厚 h とする。続いてこの h を用いて式 (1) から流体力 F を計算する。 F_0 を変化させてこれを繰り返す、流体力 F と膜厚 h の関係を得る。以上が本研究で用いた実験方法および膜厚 h を求める方法である。次に、 F_{vdw} および F_m を膜厚 h から求めるための理論、および連続流体潤滑理論について述べる。

4. F_{vdw} および F_m の算出

4.1 ファンデルワールス力

Fig. 6 に示すように同種の固体1が物質3を介して相互作用するとき、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⁴⁾。2平面間の

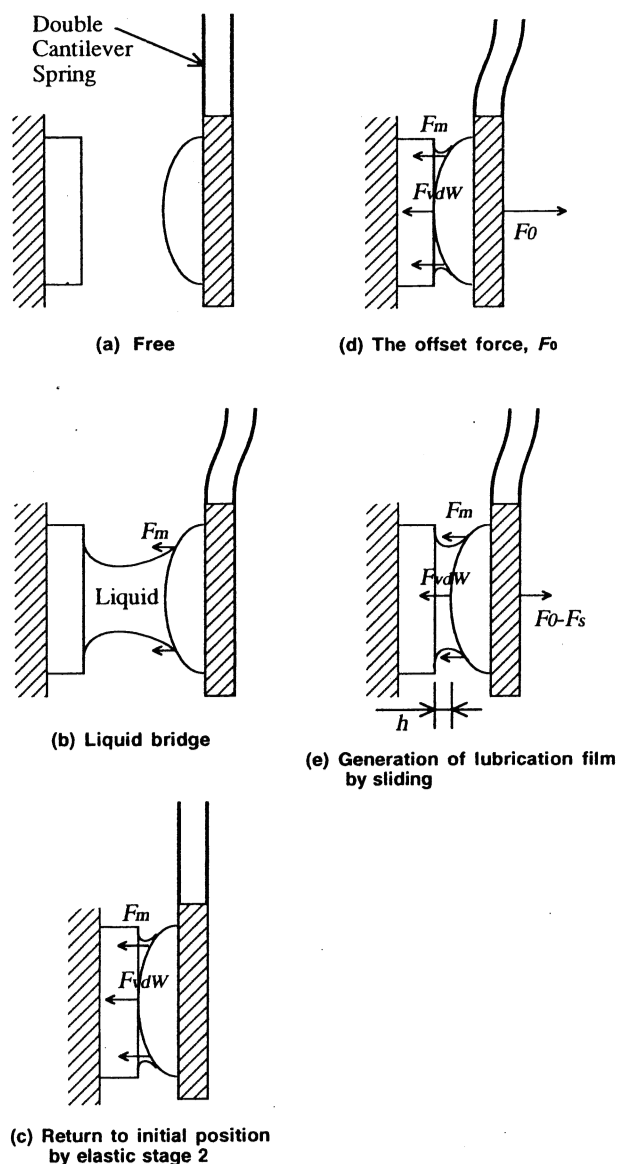


Fig. 4 Procedure of experiment

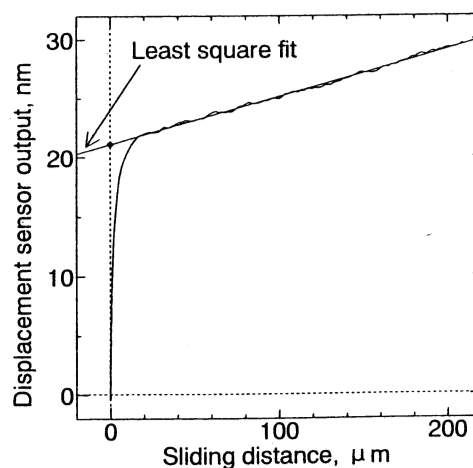


Fig. 5 Positive offset due to the fluid film

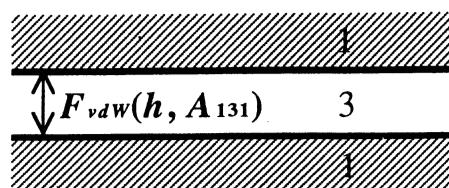


Fig. 6 Interaction between planes

単位面積あたりの相互作用エネルギー W は次式で与えられる⁹⁾.

$$W = A_{131}/12\pi h^2 \quad (2)$$

ここで、 h は膜厚、 A_{131} は h と各物質の屈折率 n 、誘電率 ϵ 、吸収振動数 ω の関数である。式(2)から本実験装置で採用している球と平面間のファンデルワールス力 F_{vdw} が次式で求まる¹⁰⁾.

$$F_{vdw} = 2\pi R W = A_{131} R / 6h^2 \quad (3)$$

ここで、 R は球面の曲率半径である。 A_{131} は一般的には定数として扱われ、HAMAKER定数と呼ばれるが、厳密には膜厚 h の関数であり、本研究のように膜厚が数nmの場合には定数として取り扱うことはできず(付録参照)、次式のような複雑な形で表わされる^{9,11)}.

$$A_{131} = -\frac{3}{2} k_B T \sum_{n=0}^{\infty} \int_{r_n}^{\infty} x \{ \ln(1 - \bar{\Delta}_{13}^2 e^{-x}) + \ln(1 - \bar{\Delta}_{13}^2 e^{-x}) \} dx \quad (4)$$

$$\bar{\Delta}_{jk} = \frac{\epsilon_j S_k - \epsilon_k S_j}{\epsilon_j S_k + \epsilon_k S_j}, \quad \bar{\Delta}_{jk} = \frac{S_k - S_j}{S_k + S_j},$$

$$S_k^2 = x^2 + \left(\frac{2\xi_n h}{c} \right)^2 (\epsilon_k - \epsilon_3),$$

$$r_n = \frac{2h\xi_n \sqrt{\epsilon_3}}{c}, \quad \xi_n = \frac{2\pi n k_B T}{\hbar},$$

$$\epsilon_k = \epsilon_k(i\xi_n), \quad \hbar = \frac{h_p}{2\pi}$$

$$\epsilon_k(i\xi_n) = \begin{cases} 1 + \frac{n_k^2 - 1}{1 + \xi_n^2/\omega_k^2} & (\text{for } \xi_n > 0) \\ \epsilon_{k0} & (\text{for } \xi_n = 0) \end{cases}$$

ここで、 k_B :ボルツマン定数、 T :絶対温度、 c :光速、 h_p :プランク定数であり、総和記号の右肩にある「 n 」は最初の項を1/2することを意味する。

したがって、式(4)から数値計算により A_{131} を求め、これと測定された膜厚 h を式(3)に代入して F_{vdw} が求まる。

4.2 メニスカス力

次にメニスカス力 F_m は膜厚 h の関数として次式で表わされる¹⁰⁾.

$$F_m = \frac{4\pi R \gamma_L \cos \theta}{1 + ah} \quad (5)$$

ここで、 γ_L は液体の表面エネルギー、 θ は接触角、 a は定数である。2面が接触しているとき($h=0$)は、一般によく知られているメニスカス

力の式である。メニスカス力の変化を測定した例がFig. 7である。2面間距離が増加するに従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。ただし、このときには2面間距離が非常に大きいため、ファンデルワールス力は無視できると考えられ、この仮定の下に最小二乗法を用いて定数 a を求めたところ、 $a = (7.1 \sim 10) \times 10^{-4} (\mu\text{m}^{-1})$ であった。したがって、数~数十nmの膜厚ではほとんど膜厚による影響はない。なお、本研究では以後 $a = 10^{-3} (\mu\text{m}^{-1})$ として F_m を計算した。

以上で式(1)で流体力 F を計算するのに必要な式が得られた。

5. 流体潤滑モード

実験結果と比較するために、流体力 F と潤滑膜厚 h との関係を従来の理論により明らかにしておく。球面と平面との間の潤滑油膜厚さを求めるためには、レイノルズ方程式を数値計算によって解く必要があるが、過去の研究で流体力と膜厚の関係が指数関数を用いて与えられている¹²⁾。これにはいくつかの種類の数式があり、荷重、速度、流体や固体の性質などの潤滑条件により適用数式が違ってくる。潤滑条件は四つのモードに分類されることが多く¹³⁾、したがって、まず本実験の潤滑モードを把握しておく必要がある。この四つのモードは、潤滑される固体がRigidかElasticか、液体がIsoviscousかVariableviscousかの組合せで決められる。これを決定するチャートとしてHAMROCK-DOWSON線図が提案されており¹⁴⁾、これをFig. 8に示す。Fig. 8の実線の曲線内が本研究における実験範囲である。ただし、図中でR-IはRigid-Isoviscous、R-VはRigid-Variable-

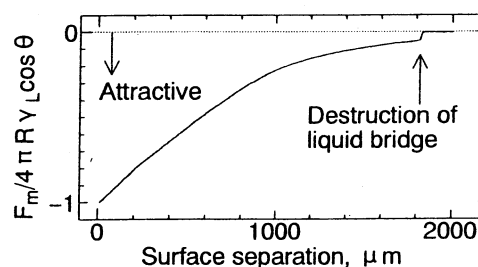


Fig. 7 Meniscus force

viscous, E-IはElastic-Isoviscous, E-VはElastic-Variableviscousを表わし, Fig. 8の横座標 g_E , 縦座標 g_V および各定数はそれぞれ以下のとおりである. なお, g_E , g_V はそれぞれ, 材料の弾性変形の影響, 流体の粘度変化の影響を表わす無次元数である.

$$\begin{aligned} g_E &= W^{8/3} U^{-2}, \quad g_V = G W^3 U^{-2}, \\ W &= F/E'R^2, \quad G = \alpha E', \quad U = \eta_0 u/2E'R, \\ R &= 10^{-2} \text{ (m)}, \quad E' = 36.0 \text{ (GPa)}, \\ \alpha &= 10 \sim 30 \text{ (GPa}^{-1}\text{)}, \\ \eta_0 &= 2.35 \text{ (mPa}\cdot\text{s)}, \\ F &= 1 \sim 1000 \text{ (}\mu\text{N)}, \\ u &= 50 \sim 200 \text{ (}\mu\text{m/s)} \end{aligned}$$

Fig. 8より本実験における潤滑モードはR-IまたはE-Iであることがわかる. R-IおよびE-Iにおける膜厚 h と流体力 F との関係は次式で表わされる^{15,16,13)}.

$$\text{R-I: } h = 3.55 \times 10^{-5} (\eta_0 u)^2 F^{-2} \quad (6)$$

$$\text{E-I: } h_c = 1.73 \times 10^{-6} (\eta_0 u)^{0.66} F^{-0.21} \quad (7)$$

$$h_{\min} = 1.12 \times 10^{-6} (\eta_0 u)^{0.66} F^{-0.21} \quad (8)$$

ここで, 固体が剛体の場合は最小膜厚, 弾性変形する場合は, 球面中央の膜厚 (サフィックス c) と最小膜厚 (サフィックス $\min$) で膜厚を評価するのが一般的であるため, E-I領域で二つの式が現われる.

6. 実験結果および従来の理論との比較

第3章で説明した方法によって得られた実験結果および第5章で説明した理論曲線(6)~(8)を

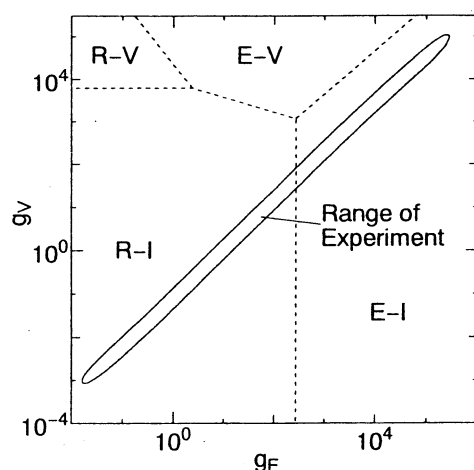


Fig. 8 HAMROCK-DOWSON diagram

Fig. 9に示す. 滑り速度は $u=200$ ($\mu\text{m/s}$)であり, 横軸は流体力 F , 縦軸は潤滑膜厚 h である. 図より, 膜厚が10 nm以上ではR-I領域における従来の潤滑理論とほぼ一致することがわかる. なお, 過去の実験によると, 流体潤滑膜厚を50 nm¹⁷⁾, 15 nm⁷⁾, 10 nm⁶⁾以上の範囲で測定したところ, 理論値と一致するという報告がされている. 次に, 10 nm以下の潤滑膜厚を詳しく観るため, Fig. 9の10 nm以下の部分を拡大したのがFig. 10である. 膜厚が7~8 nm程度になると理論からずれはじめ, 膜厚は理論的予測よりも大きくなる. 膜厚が5 nm以下になると, 荷重を大きくしても一定の安定な膜厚を保ち, さらに荷重を大きくすると次の安定な膜厚にジャンプする現象, すなわち, 膜厚の離散化が観察できる. この離散

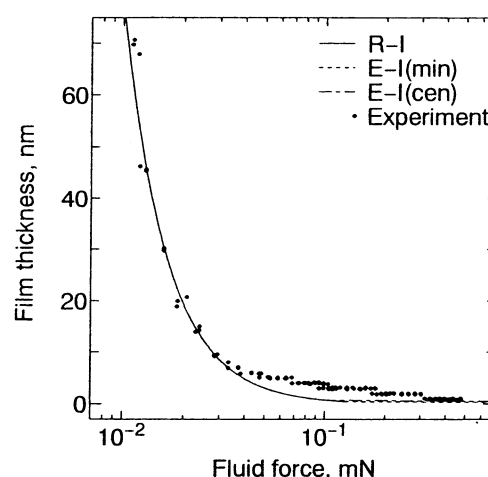


Fig. 9 Ultrathin film thickness

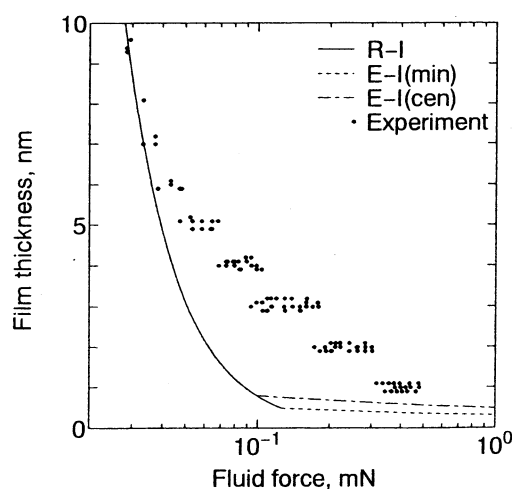


Fig. 10 Film thickness less than 10 nm

化した膜厚の間隔は約1 nmであり、これはOMCTSの分子直径に等しい。膜厚が数 nm 程度になると、2面間に介在する流体分子の影響により特別な力が発生することが、静的な理論¹⁸⁾および実験⁹⁾から確認されている。この力は構造力 (structural force あるいは solvation force) と呼ばれ、膜厚が流体分子直径の5~10倍程度で非常に大きなものになる⁸⁾。これは、2面間の分子を排除するとき、または2面間に外部から流体分子を挿入するときを生ずるもので、膜厚に対して振動的な力となり、その周期は介在流体分子直径にほぼ等しい。動的な場合にも、スクイーズフィルムの実験ではこの構造力の影響により膜厚が離散的に変化することが報告されている¹⁹⁾。また、分子動力学の計算からも、固体表面近傍における流体分子は層状に配列することが示されており³⁾、これも構造力の原因になる。これらのことから、本研究のような数分子直径程度の膜厚においては流体の粘性による粘性力 (hydrodynamic force) よりも流体分子の離散性および表面近傍における分子配列に起因した構造力が支配的になり、Fig. 10にみられるような膜厚の離散化が起こったものと考えられる。したがって、従来の潤滑理論の適用限界は介在流体分子直径の10倍程度までではないかということが考えられる。

7. 結 言

表面間力および表面間距離を高精度に測定できる実験装置を設計製作した。この実験装置を用いて、OMCTSを潤滑剤とした雲母表面間の流体潤滑膜厚さを低速、低流体力において測定した。その結果、膜厚が約10 nm (流体分子直径の10倍) 以上では従来の流体潤滑理論に従うことがわかった。10 nm 以下では膜厚の離散化が観察された。これは構造力の影響であると考えられ、従来の流体潤滑理論の適用限界は流体分子直径の10倍程度までであることが推測できる。

謝辞

NTT 境界領域研究所金子特別研究室五十嵐賢氏より雲母表面の特性に関して、工業技術院計量研究所山口幸夫氏、同物質工学工業技術研究所西村良弘氏より雲母の力学的特性に関して有意義な

ご助言をいただきました。ここに感謝の意を表します。

文 献

- 1) 加藤幸夫・浜口哲也・東谷輝義：日本トライボロジー学会トライボロジー会議予稿集 (1994-5) 75.
- 2) F. A. D. BRUYNE & D. B. BOGY : Trans. ASME, J. Trib., **116** (1994) 541.
- 3) 池田裕一・田子一農：トライボロジスト, **40**, 3 (1995) 253.
- 4) E. M. LIFSHITZ : Soviet Physics, JETP, **2**, 1 (1956) 73.
- 5) F. M. ORR, L. E. SCRIVEN & A. P. RIVAS : J. Fluid Mech., **67**, 4 (1975) 723.
- 6) D. COOPER & A. J. MOORE : Wear, **175** (1994) 93.
- 7) G. J. JOHNSTON, R. WAYTE & H. A. SPIKES : STLE Trib. Trans., **34**, 2 (1991) 187.
- 8) R. G. HORN & J. N. ISRAELACHVILI : J. Chem. Phys., **75**, 3 (1981) 1400.
- 9) D. C. PRIEVE & W. B. RUSSEL : J. Colloid Interface Sci., **125**, 1 (1988) 1.
- 10) J. N. ISRAELACHVILI : Intermolecular and Surface Forces, 2nd. ed., Academic Press (1992).
- 11) J. N. ISRAELACHVILI : Proc. Roy. Soc. Lond., Ser., A, **331** (1972) 39.
- 12) B. J. HAMROCK & D. DOWSON : Trans. ASME, J. Lub. Tech., **98**, 2 (1976) 223.
- 13) B. J. HAMROCK & D. DOWSON : Proc. 5th Leeds-Lyon Symp. on Trib. (1978) 22.
- 14) M. ESFAHANIAN & B. J. HAMROCK : STLE Trib. Trans., **34**, 4 (1991) 628.
- 15) C. H. VENNER & W. E. ten NAPEL : Wear, **152** (1992) 351.
- 16) C. H. VENNER & W. E. ten NAPEL : Wear, **152** (1992) 369.
- 17) G. DALMAZ : Proc. 5th Leeds-Lyon Symp. on Trib. (1978) 71.
- 18) D. HENDERSON & M. LOZADA-CASSOU : J. Colloid Interface Sci., **114**, 1 (1986) 180.
- 19) D. Y. C. CHAN & R. G. HORN : J. Chem. Phys., **83**, 10 (1985) 5311.
- 20) G. L. GAINES, Jr. : J. Phys. Chem., **61** (1957) 1408.

付 録 : A_{131} に関する検討

式(3)に示した A_{131} は厳密には式(4)により示されるが、一般には定数として扱われ、HAMAKER定数と呼ばれる。ここでは、数 nm の膜厚において A_{131} を定数として扱ってよいかどうかについて検討する。

膜厚が非常に小さな場合 ($h \rightarrow 0$) においては A_{131} は物質の組合せによる定数とみなすことができ、次式で近似される⁸⁾。

$$A_{131} = \frac{3}{4} k_B T \left(\frac{\epsilon_{10} - \epsilon_{30}}{\epsilon_{10} + \epsilon_{30}} \right)^2 + \frac{3\hbar \sqrt{\omega_1 \omega_3}}{64 \epsilon_0^{7/4}} \times \frac{X^2 \bar{\epsilon}_0 + 2X \Delta \epsilon_0 \bar{\epsilon}_0^{1/2} + \Delta \epsilon_0^2 (3 + 2Y)}{[(Y - \sqrt{Y^2 - 1})^{1/2} + (Y + \sqrt{Y^2 - 1})^{1/2}]^3} \quad (\text{A } 1)$$

$$\bar{\epsilon}_0 = \frac{1}{2}(n_1^2 + n_3^2), \quad X = \frac{\omega_1}{\omega_3}(n_1^2 - 1) - \frac{\omega_3}{\omega_1}(n_3^2 - 1),$$

$$\Delta\epsilon_0 = n_1^2 - n_3^2, \quad Y = \frac{1}{4\bar{\epsilon}_0^{1/2}} \left\{ \frac{\omega_1}{\omega_3}(n_1^2 + 1) + \frac{\omega_3}{\omega_1}(n_3^2 + 1) \right\}$$

これは膜厚 h の関数ではなく、物質の組合せによって決まる定数となっている。厳密式(4)を数値計算で解いた解と近似式(A1)から求めたHAMAKER定数を Fig. A1 に示す。これからわかるとおり、 A_{131} を定数として扱えるのは、OMCTS についてはほぼ 1 nm 以下である。したがって、本研究のように数 nm の膜厚を考えた場合には近似式(A1)は適用できず、厳密式(4)を用いなければならな

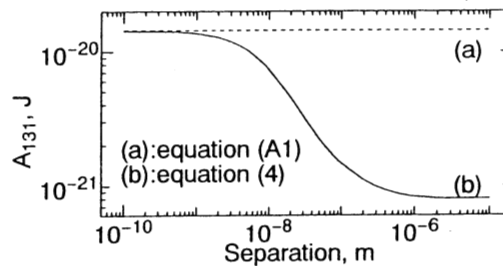


Fig. A1 Calculation of A_{131}

いことがわかる。