

分子オーダの弾性流体潤滑膜厚さに関する研究

1B14

(第1報 潤滑理論の限界に関する実験的検討)

東大・工 (正) *加藤孝久
東大・院 (学) 松岡広成

1. はじめに

微小な機械要素が実現されるに伴い、微小しゅう動部での摩擦をコントロールする必要が生じてきている。たとえば、磁気ディスク記憶装置においては近い将来、液体潤滑膜を介した数nmから十数nmの浮上スライダの実現が予測されているが^[1]、このような薄い潤滑膜の特性の予測に従来の潤滑理論の適用が可能であるのか、あるいは従来の潤滑理論の適用限界は一体どのくらいの厚さの薄膜であるのか明らかにされているとは言えない。また、2面の弾性変形によって流体膜が保持されるメカニズムが過去50年間の弾性潤滑理論の発展によって示されてきたが、分子レベルの薄膜においては流体粘性力以外の力(表面力あるいは液体構造力など)が働くことが考えられ、これらの力による表面材料の弾性変形が想像に難くない。本研究では既報^[2,3]にて報告した微小潤滑膜厚測定装置を用い、3種類の液体を用いた場合の液体膜厚さを測定した。そして、従来の潤滑理論の適用限界について検討した。

2. 実験装置および

液体試料

図1に実験装置の概要を示す。10~30 μm の厚さの雲母薄膜を曲率半径10mmの円筒凸レンズの表面にシアノアクリレート系接着剤で接着して、一組の試験面を製作した。試験面の一つは剛体で、別の一つは二重ばねで支持し、さらにこれらを微動用弾性ステージおよび粗動用マイクロステージにとりつけた。雲母の表面粗さは $R_a = 0.048 \text{ nm}$ (AFMによる測定値)、ヤング率は $E = 34.5 \text{ GPa}$ (走査型音響顕微鏡による測定値)、ポアソン比は $\nu = 0.205$ (同)である。試験面は円筒面が直交するように配置した。試験面間に液体試料を微量充たした後、二重ばねを利用して押し付け力を調整、続いて、弾性ステージをPC制御して試験面をスライドさせて、膜厚を測定する。膜厚測定は高精度静電容量型変位計(感度約0.7 nm)を利用したが、測定方法については既報^[2,3]に詳しく記述してある。ここで、2面のしゅう動速度は50~200

$\mu\text{m/s}$ とした。続いて、膜厚から、メニスカス力、van der Waals力、バネ力を計算によって求め、さらにこれらの力と釣り合うべき流体力を求めた。2面間の流体力は10~1000 μN であった。なお、液体試料は n -ヘキサデカン(直鎖形状)、シクロヘキサン(疑似球形)、OMCTS (octamethylcyclotetrasiloxane, 球形)を用いた。これらの特性を表1に示す。

3. 実験結果および考察

液体試料として n -ヘキサデカン、シクロヘキサンおよびOMCTSを用いた場合の実験結果を図2, 3および4に示す。図中の点の実験結果であり、カーブは従来の潤滑理論の結果である。ただし、実線は表

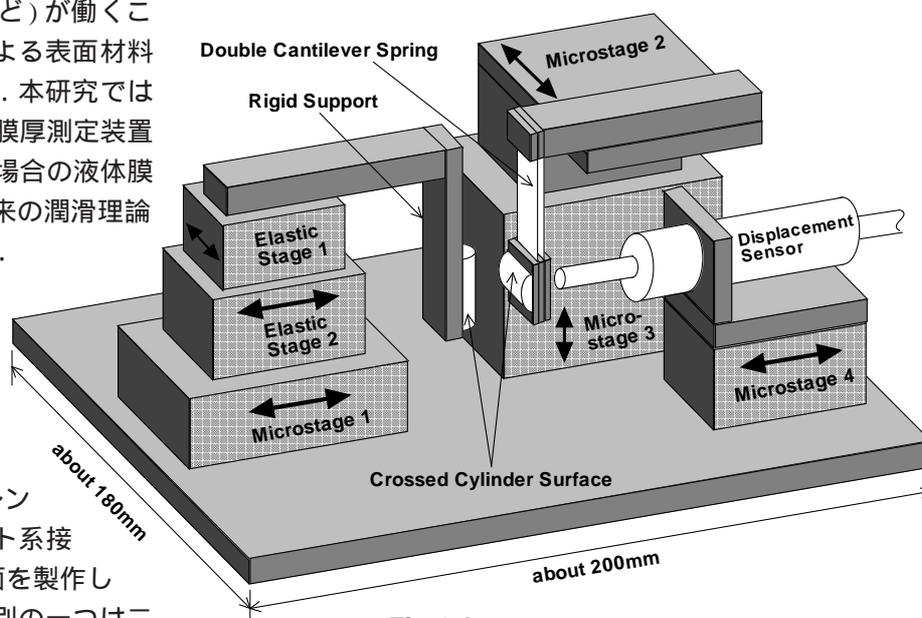


Fig.1 Apparatus

Table 1 Characteristics of liquids

liquid	OMCTS	cyclohexane	n -hexadecane
chemical formula	$[(\text{CH}_3)_2\text{SiO}]_4$	$(\text{CH}_2)_6$	$\text{CH}_3(\text{CH}_2)_{14}\text{CH}_3$
diameter σ	1 nm	0.6 nm	0.4 nm
refractive index n	1.40	1.43	1.42
absorption frequency ω	$1.60 \times 10^{16} \text{ rad/s}$	$1.82 \times 10^{16} \text{ rad/s}$	$1.82 \times 10^{16} \text{ rad/s}$
dielectric constant ϵ_0	2.30	2.02	2.05
viscosity η_0	2.35 mPa·s	0.980 mPa·s	3.35 mPa·s

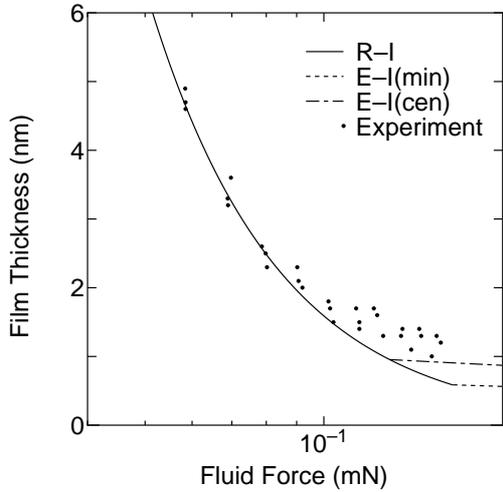


Fig.2 *n*-hexadecane ($u = 200\mu\text{m/s}$)

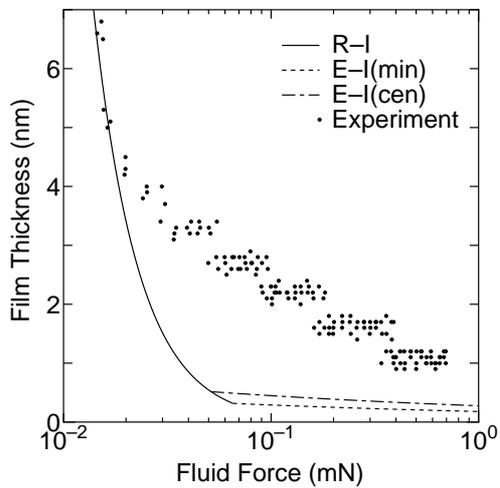


Fig.3 cyclohexane ($u = 200\mu\text{m/s}$)

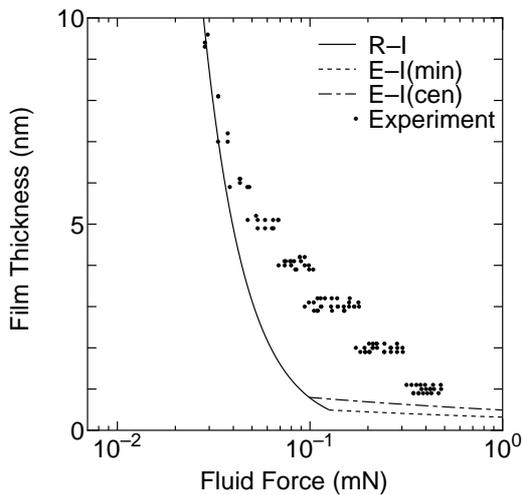


Fig.4 OMCTS ($u = 200\mu\text{m/s}$)

面の弾性変形を無視した場合、また破線および一点鎖線はEHL理論によるものである。図より *n*-ヘキサデカンでは最小2nmまで実験結果と理論結果とがよく一致しているが、シクロヘキサンでは5nm以下およびOMCTSでは7nm以下では理論予測より大きな膜厚となり、また流体力の増加に伴ってステップ状に膜厚が減少することがわかる。そして、ステップの大きさはシクロヘキサンでは約0.6nm、OMCTSでは約1.0nmであり、これらはそれぞれの分子を球形近似した場合の等価直径にほぼ等しい。このように膜厚が理論値よりも厚くなるのは材料の弾性変形によると考えられるが、そのためには流体粘性力以外の力が表面間に働いていなくてはならない。そこで、流体力に関する実験値と理論値との差（付加力と呼ぶ）を求め、どのような力が2面間に働いているのか調べた。結果を図5に示す。図は横軸に膜厚、縦軸に付加力をとってあるが、図より付加力は膜厚の減少に伴って指数関数的に増加していることがわかる。また、すべり速度を変えて実験を行ったところ、付加力と膜厚との関係はすべり速度に依存しないことがわかった^[4]。なお、シクロヘキサンについては実験結果を省略するが、OMCTSと同様、付加力は膜厚の減少に伴って指数関数的に増加した^[4]。

以上の実験結果より、(1)付加力は膜厚の減少に伴って指数関数的に増加すること、(2)液体分子直径と同程度の周期性を持つこと、(3)すべり速度に依存しない静的な力であることがわかった。さらに、OMCTS、シクロヘキサンは *n*-ヘキサデカンに比べて強い構造力を持つことを考えあわせると、付加力の原因は流体の構造力に基づくものであることが考えられる^[5]。流体の構造力とは図6^[6]に示すように、2固体面に働く振動的な力であり、また、2面間距離の

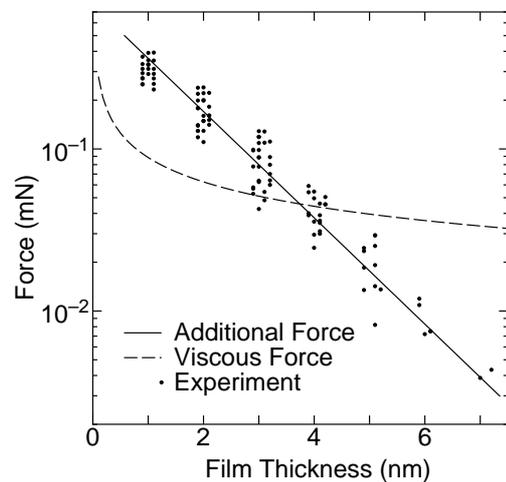


Fig.5 Additional Force

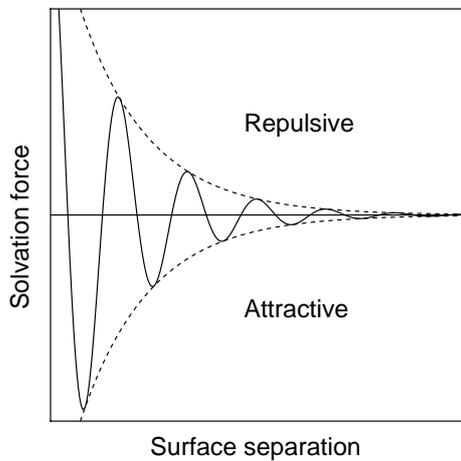


Fig.6 Solvation force

増加に伴って急速に減衰する。この力は固体間の液体の構造すなわち液体粒子の大きさと粒子密度に依存しており、密度が小さければ固体面には引力が、一方密度が大きければ固体面には斥力が働く。また、粒子が大きければ振幅も大きくなる。

以上の考察から、膜厚がごく小さい場合(数ナノメートル)には液体の構造力によって固体表面が弾性変形すると思われる。したがって、流体の構造力が無視できないようなしゅう動条件の場合にはこれを取り込んだ潤滑理論が必要になると考えられる。例えば、図7にHamrock-Dowson チャート^[7]を示すが、本実験条件は図中に長円で囲んである。また、図中のシンボルはシクロヘキサン(+:200 μm/s), OMCTS (:200 μm/s, :100 μm/s, :50 μm/s)の実験において、膜厚が理論値からそれて厚くなり始めるときのしゅう動条件を示す。これらのシンボルは図ではR-

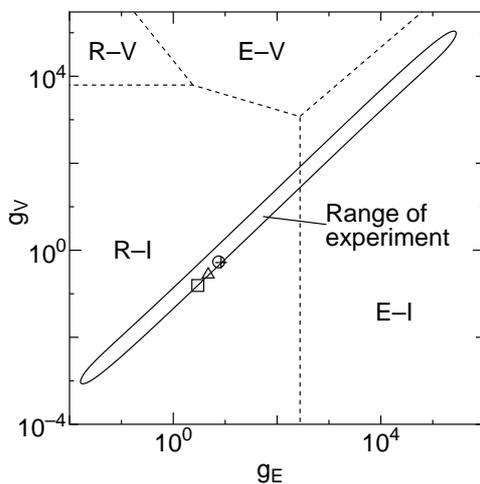


Fig.7 Hamrock-Dowson diagram

I領域に含まれるが、構造力の影響が現われ始め、固体表面の弾性変形が無視できなくなる時である。なお、構造力の定量的な評価は次報、次次報にて報告する。

4. おわりに

原子レベルの表面粗さの雲母表面間に液体をはさんでしゅう動実験を行い、2面間の流体力および膜厚を測定した。その結果、*n*-ヘキサデカンでは膜厚が最小約2nmまで従来の潤滑理論による予測と一致した。しかし、シクロヘキサンおよびOMCTSの場合には理論値より大きく、またステップ状に小さくなる膜厚が測定された。考察の結果、この原因は流体の構造力によるものであると思われる。膜厚が小さくなると、構造力は流体粘性力よりはるかに大きくなり、固体表面の弾性変形を引き起こすと考えられる。したがって、このような場合、流体の構造力を考慮したEHL理論が必要である。

参考文献

- [1] A. M. Homola, Proc. AMRC, 1995.
- [2] 松岡, 加藤, トライボロジー会議予稿集, 1995-5, pp. 441.
- [3] 松岡, 桑田, 加藤, トライボロジー会議予稿集, 1995-5, pp. 445.
- [4] 松岡, 東京大学学位論文, 1996-3.
- [5] D. Y. C. Chan and R. G. Horn, J. Chem. Phys., Vol. 83, 1985, pp. 5311.
- [6] J. N. Israelachvili, Intermolecular and Surface Forces, 2nd ed., Academic Press, 1992.
- [7] M. Esfahanian and B. J. Hamrock, STLE Trib. Trans., Vol. 34, 1991, pp. 628.