

## 論文の内容の要旨

論文題目           液体ナノメニスカス架橋の動的特性に関する研究

氏名               崔    峻    豪

21世紀のテクノロジーの中でナノテクノロジーは重要なキーワードの一つになると予測されるが、微小な機械要素のしゅう動部に形成される微小なメニスカス架橋（ナノメニスカス架橋）の特性を把握することはナノテクノロジーにおいては重要な課題である。従来の液体薄膜の研究は、表面力測定装置(Surface Forces Apparatus, SFA)や原子間力顕微鏡(Atomic Force Microscope, AFM)の開発とともに飛躍的に発展してきたが、これらによって液体ナノメニスカス架橋が存在する液体薄膜の動的特性を明らかにすることは非常に困難である。例えば、表面力測定装置の場合には、非常に大きな接触面積を持つ雲母を固体試料として使用しているが、この場合流体力に比べてメニスカスカの寄与は無視できる。原子間力顕微鏡の場合には、表面間の距離の絶対値やチップの形状も正確には分からないのが現状で、このために、メニスカス架橋の動的特性を定量的に明らかにすることは非常に困難である。そこで、本研究では、1) 二面間の距離を正確に決定できる実験装置を設計製作し、2) 微小接触面積と単純な形状の固体試料を用いて液体メニスカス架橋が存在する液体薄膜システムの動的特性を明らかにすることを目的とする。

本論文は、「液体ナノメニスカス架橋の動的特性に関する研究」と題して、以下に示す全7章から構成されている。

第1章「序論」では、液体ナノメニスカス架橋について概説し、液体ナノメニスカス架橋が存在する液体薄膜についての研究において、既存の実験技術を用いた場合の問題点を挙げるとともに、本研究の目的と本論文の構成について述べる。

第 2 章「実験装置及び試料」では、本研究のために新たに設計製作した実験装置の原理、構成および性能に関して説明する。また、本研究で使用した固体試料と液体試料の物性値や形状について述べる。

第 3 章「予備実験」では、本実験の前に、新たに製作した実験装置の精度および信頼性を確認するために行った二つの予備実験について述べる。ここでは、メニスカス架橋の静的特性に関する予備実験として、空気中でのガラス球間の凝着力を測定し、従来の研究と比較検討している。そして、メニスカス架橋の動的特性に関する予備実験として、液体薄膜の粘度を動的方法で測定し、その結果を示した上検討している。

第 4 章「液体ナノメニスカス架橋の静的特性－メニスカス力の速度依存性」では、液体メニスカス架橋の基礎理論を理解する上、その静的特性を調べ、理論値と比較検討し、測定結果について考察を述べている。

第 5 章「液体ナノメニスカス架橋の動的特性－Normal Oscillatory Method」では、液体薄膜に関する従来の研究について述べた上で、垂直振動方法を用い、液体メニスカス架橋システムのナノレオロジー特性を定量的に調べた結果を述べる、また、従来の研究結果と比較検討を行った結果や考察を加えている。

第 6 章「液体ナノメニスカス架橋の動的特性－Lateral Oscillatory Method」では、実用的で多くの分野で応用できるせん断方向の振動実験を行い、実験結果を示し、考察を加えている。

第 7 章「結論」では、以上の成果を総括している。

図 1 に新たに設計製作した実験装置の構成図を示す。この装置では、原子間力顕微鏡の光テコ方式(optical lever deflection technique)を用いてマイクロカンチレバーに加わる力を  $10^{-11}$  N の分解能で測定することが可能である。本研究では、直径  $20\ \mu\text{m}$  のガラス球間(せん断振動実験の場合は、直径約  $20\ \mu\text{m}$  と  $90\ \mu\text{m}$  のガラス球間)に長さ数十 nm のメニスカス架橋を形成させ、 piezotransducer 側に接着してあるガラス球をメニスカス架橋の軸方向(垂直振動方法)または軸方向に対して垂直方向に振動(せん断振動方法)を与えて、両ガラス球間の位相差と振幅比を 2 位相ロックインアンプで測定し、その測定値から液体メニスカス架橋のレオロジー特性を明らかにした。液体試料は、コンピュータのハードディスクの潤滑剤として使用されている高分子液体 Fomblin PFPE Zdol を用いた。本実験で用いた振動周波数の範囲は  $2 \sim 1000$  Hz(せん断振動実験の場合は  $5 \sim 80$  Hz)であり、振動振幅は  $1.5\ \text{nm}$ (せん断振動実験の場合は  $100\ \text{nm}$ )である。ガラス球間の距離  $D$  は約  $30$

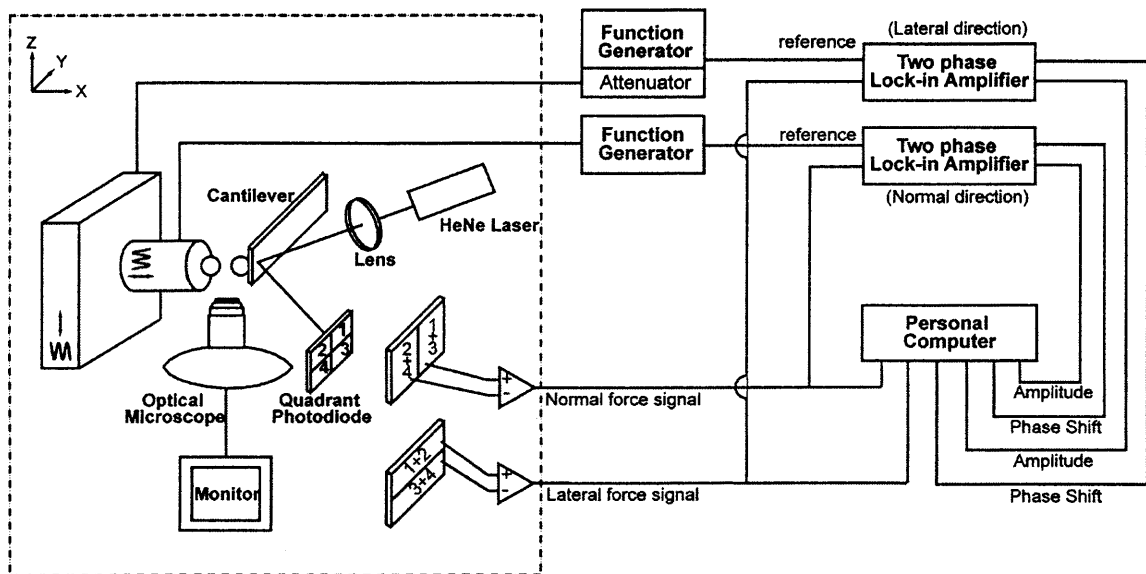


Fig. 1 Experimental setup.

nm の範囲で実験を行った。また、PFPE Zdol の  $R_g$  (unperturbed radius of gyration) の値は約 1 nm であるので、本実験の表面間距離の領域は  $30 R_g$  以上となる。この領域での SFA を用いた過去の研究によると、高分子液体薄膜はバルク液体の特性を示す領域である。

図 2 に垂直振動方法から得られた液体ナノメニスカス系のバネ係数  $k$  や粘性係数  $\omega b$  と振動周波数との関係を示す。図 2(a)によりシステムのバネ係数はほとんど周波数に依存していないことが分かる。即ち、液体メニスカス架橋システムは、バルク液体とは全く異なる粘弾性固体(viscoelastic solid)の挙動を示しているということである。図 2(b)から、高周波数で、しかも表面間距離が小さい時に  $\omega b$  曲線の傾きが 1 になっていることが分かる。このことは、この領域の液体は一定粘度を持つニュートン流体としての挙動をしていることを意味する。これに対して、表面間距離が 266 nm より大きくなると、 $\omega b$  曲線の傾きは 1 より多少小さな値を示している。即ち、液体薄膜の粘度は非ニュートン挙動を示すものとする。この効果は、周波数が低くなり、表面間距離が大きくなるほどより顕著に現れる。図 2(a)と(b)とを重ね合わせて、 $k$  曲線と  $\omega b$  曲線の交差点から COF(Cross Over Frequency)を求める。この COF とは、システムの弾性力と粘性力との割合が同じになる周波数のことを意味し、この COF を求めることにより次のことが明らかになった: 1) 弾性力は低周波数領域で、粘性力は高周波数領域で支配的である。これは典型的なフォークトモデルの特徴である。 2) COF はガラス球間の距離が増加するに従ってその値は大きく

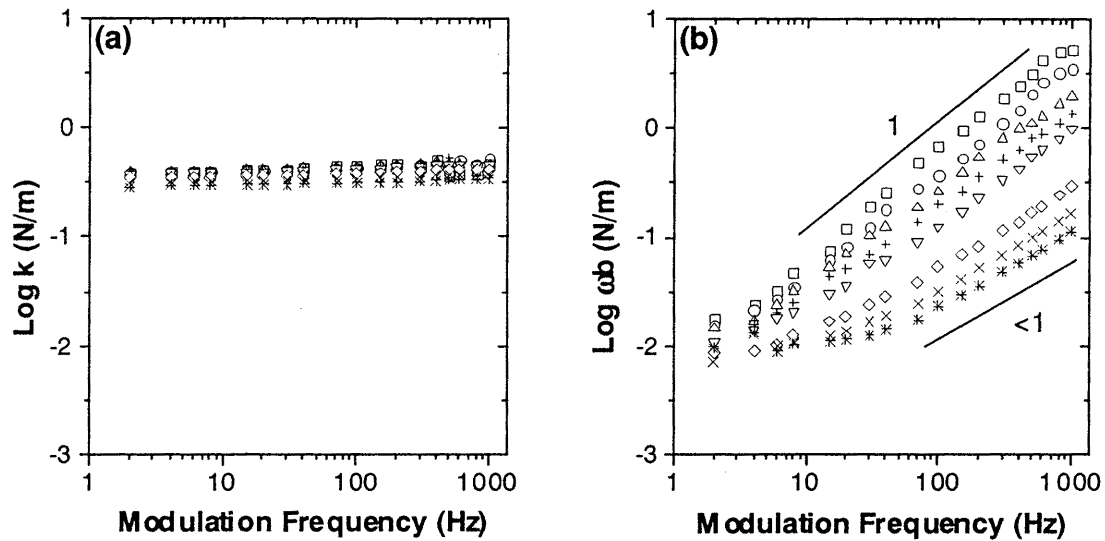


Fig.2 Log plots of (a) elastic and (b) viscous force constants,  $k$  and  $\omega b$ , respectively as a function of modulation frequency at various surface separations: ( $\square$ ) 32 nm; ( $\circ$ ) 51 nm; ( $\triangle$ ) 131 nm; (+) 195 nm; ( $\nabla$ ) 266 nm; ( $\diamond$ ) 520 nm; ( $\times$ ) 720 nm; ( $*$ ) 980 nm.

なる。即ち、これはシステムの遅延時間が短くなることを意味し、システムは大きい表面間距離では弾性力によって支配されることが分かる。

以上のように、小さい半径を持つ二つのガラス球間に形成される高分子液体ナノメニスカス架橋システムは、バルクの高分子液体とは全く異なる動的特性を示すということが明らかになった。上述の全ての結果は垂直振動方法を用いて得られて結果であり、また、せん断振動方法を用いた場合も定性的に類似な結果が得られた。

以上