磁気ディスクとダイヤモンド触針との間に形成される 分子液架橋のばね定数と減衰係数の測定*

三矢保永^{*1}, 大島康司^{*2}, 張賀東^{*3}
青山慶^{*4}, 河合敏行^{*5}, 福澤健二^{*3}

Stiffness and Damping of Molecularly Thin PFPE Lubricant Bridging between Magnetic Disk and Diamond Probe Tip Yasunaga MITSUYA^{*6}, Yasuji OHSHIMA, Hedong ZHANG, Kei AOYAMA, Toshiyuki KAWAI and Kenji FUKUZAWA

^{*6} Department of Micro-Nano Systems Engineering, Graduate School of Engineering, Nagoya University,
Furo-cho, Chikusa-ku, Nagoya-shi, Aichi, 464-8603 Japan

The spring constants and damping coefficients of molecularly thin liquid bridges of PFPE lubricant forming between a diamond tip and DLC surface of a magnetic disk are estimated by means of regression analysis of tip damping vibration. Two PFPE lubricants having functional end groups (Zdol 2000 and Zdol 4000) with respective thicknesses of roughly 20 nm and 40 nm, were coated on a DLC disk surface in order to form a liquid bridge between the disk and the probe tip. This tip, with an exceptionally small curvature radius of 0.1 mm, was in separate experiments both retracted from and extended toward the disk surface in a stepwise motion, and the liquid bridge was made to vibrate at each step. By applying regression analysis to observed waveforms, the spring constant and the damping coefficient of the liquid bridge were estimated within an elongation range from 50 to 800 nm. The spring constant, k_m , of the liquid bridge had negative values varying from -0.15 to -0.1 N/m. Damping values expressed in the form of frequency-multiplied damping coefficients, $c_m \times \omega$, ranged from 0.02 to 0.06 N/m. It is interesting to note that both $|k_m|$ and $c_m \times \omega$ decreased with bridge elongation, and after reaching the minimum, those values began to increase.

Key Words: Meniscus, Liquid Bridge, Thin Lubricant, PFPE, Adhesion Force, Lubricant Elongation, Magnetic Disk, Probe Tip

1. ま え が き

マイクロ・ナノテクノロジーの分野では、単分子レベルの高分子の変形量や作用力を定量化するという技術課題がある。例えば、磁気ディスク装置においては、ディスク表面に塗布されている単分子膜厚さ(1.5~2 nm)の潤滑剤(ナノ潤滑剤)が、ヘッドと接触した場合の挙動を評価する手段として、その動的特性を解明することが課題となっている。また、ナノバイオテクノロジーの分野では、単一のタンパク質の力変位特性が、タンパク質の構造解析の一手法として採用されている。

分子層レベルの液体薄膜の動的特性については、一方の面を往復加振して、他方の面の応答特性を測定し、伝達関数として粘弾性特性を求める方法が採用されてきた。研究の流れとしては、せん断方向の特性と法線

方向の特性の測定がある。これまで、せん断方向については、主として表面力解析装置(Surface Force Apparatus)が使用され、二つの透明な半円筒(曲率半径 10 mm)を十字形に交差させ、高荷重を与えてすきまがほぼ平行になるように変形させて、ナノ閉じこめ状態における粘弾性特性が測定された⁽¹⁾。また、微小な二つの球(曲率半径が 90 μm と 20 μm)を対向させて、数十~数百 nm のすきまにおけるせん断時の粘弾性特性が測定された⁽²⁾。一方、著者らは摺動子として先端を球状(曲率半径 200 μm)に形成した光ファイバを用いて、ナノメートルのすきまを介した相対運動における粘弾性特性を測定した⁽³⁾。法線方向の特性については、平面と球面(曲率半径 10 mm)の間に、メニスカスを形成して、数十~数百 μm のすきまにおけるメニスカスのばね定数と減衰係数が測定された⁽⁴⁾。最近では、微小な二つの球(曲率半径がともに 20 μm)を対向させて、数十~数百 nm のすきまにおける粘弾性特性が測定された⁽⁵⁾。

磁気ディスクにおいては、浮上すきまが 10 nm まで微小化されるに及んで、ヘッドとディスクとの接触の機会(間欠的な接触)が増大しており、信頼性・耐久性を支配する要因として、ナノ潤滑膜の動的特性を定量化する必要性が高まっている。特に、間欠的な接触が

* 原稿受付 2004年7月26日。

^{*1} 正員, フェロー, 名古屋大学大学院工学研究科(☎464-8603 名古屋千種区不老町)。

^{*2} 正員, 愛知江南短期大学現代幼児学料(☎483-8086 江南市高屋町大松原172)。

^{*3} 正員, 名古屋大学大学院工学研究科。

^{*4} 宇宙通信(株)(☎140-0002 東京都品川区東品川2-2-8)。

^{*5} 名古屋大学大学院工学研究科。

E-mail: mitsuya@nuem.nagoya-u.ac.jp

致命的な破壊に至らない場合と、致命的な破壊に至る場合の境界条件を明確にすることが、さらにすきまを微小化するための重要な課題になっている。法線方向の粘弾性特性を測定する従来の方法⁽⁵⁾は、摺動子の曲率半径が20 μm であり、膜厚さに比較すると桁違いに大きいため、ヘッドとディスクの接触・非接触の境界近傍において形成される微細な液架橋の動的特性を適確に表していることにはならない。

著者らは、これまでにダイヤモンド触針(先端の曲率半径0.1 μm)付きのプロブを用いて、PFPE系の潤滑膜の塗布された磁気ディスクに触針を接触させて、プロブを上げたときに生じられるプロブの過渡振動により、潤滑剤の液架橋に作用する力と伸び量を測定する方法を開発した⁽⁶⁾⁽⁷⁾。本報では、この方法を拡張して、プロブを引上げて、液架橋を伸ばした状態に維持したままで、プロブに過渡振動を発生させて、この減衰振動波形を回帰分析することにより、粘弾性特性を測定する方法を導入した。また、本方法を用いて、磁気ディスクで使用されているPFPE系潤滑剤(Zdol 2000, Zdol 4000)について、液架橋が切断される直前の極めて微細な液架橋のばね定数・減衰係数を測定することに初めて成功した。ばね定数(絶対値)、減衰係数とも、架橋の伸びとともに減少し、最小値をとったのちに増加に転じるという興味ある特性があることを見出した。

Fig. 1 Schematic diagram of experimental apparatus

2. 実験装置と実験手順

2.1 実験装置 実験装置の概略を図1に示す。

基本的には前報⁽⁷⁾の構成と同じであり、概要のみを説明する。

He-Ne レーザからの光ビームは、ビームエキスパンダを通して10倍に拡大され、ハーフミラーにより2本のビームに分割されて、物体面(カンチレバー)と参照面(全反射ミラー)に入射する。物体面と参照面からの反射光は、ハーフミラーで合成され、顕微鏡を通して拡大されて、撮像素子面に干渉縞を形成する。撮像素子としては超高速カメラ(最高40 500コマ/秒)を用い、カンチレバーの動的な変動に伴う干渉縞画像の変化を連続的に撮影する。触針を上下駆動するために、カンチレバーはピエゾアクチュエータ(PZT)に固定され、このPZTを搭載しているジンバルによりピッチング角とローリング角が微調整される。一方、試料台もジンバルに搭載され、微動用のPZTと粗動用の z 軸マイクロステージにより垂直方向に位置決めする。

2.2 触針の仕様

触針としては、先端を三角錐に形成したダイヤモンドを使用した。電子顕微鏡写真を図2に示す。先端の曲率半径は100 nmである。カンチレバーはステンレス製で、厚さ20 μm 、幅0.2 mm、全長8.1 mmで、PZTに接着した後のたわみ部の長さ(有効長さ)は4.47 mmである。カンチレバーの触針の背面にはシリコン板を接着固定して、この表面上にマイケルソン干渉縞を形成した。ダイヤモンド触針、シリコン板、カンチレバーたわみ部の質量の計算値は、それぞれ31.6 μg 、9.3 μg 、141.4 μg である。

カンチレバーのばね定数は、カンチレバーの幾何学的形状から計算した。計算に必要な有効長さを精度良

Fig. 2 Image of probe tip taken with by scanning electron microscope

く測定することは困難であるので、先端の集中質量(触針とシリコン板)とカンチレバーに沿う分布質量を持つ振動系として振動解析を行い、計算で得られた固有振動数と実測値の固有振動数を比較して、両者が一致するように計算で使用するたわみ部長さを補正して、一致した値を有効長さとした。今回の実験系では、たわみ部の長さの測定値 4.5 mm に対し、測定した固有振動数に基づいて補正した有効長さは 4.47 mm で、その差はわずか 0.7% であり、よい精度で振動系が同定されたとえいる。有効長さを用いて計算される第一次モードの振動としてのばね定数と等価質量を、以下の振動解析に使用した。それぞれ、0.856 N/m, 65.0 μ g である。

2.3 実験手順

実験手順は以下のとおりである。
(1)カンチレバー表面と試料表面上の両方に干渉縞を形成し、(2)カンチレバー側の PZT を最大に伸ばした状態において、試料側の z 軸マイクロステージと PZT を用いて試料を触針に接触させ、(3)超高速カメラの撮影開始と同期した信号により、カンチレバー側の PZT を縮めて、カンチレバーを上昇させ、触針を試料表面から引き離す。(4)撮影開始からの干渉縞の変化を連続画像として処理し、カンチレバーの変位を求める。撮影した縞画像から、カンチレバーの変位を求める画像処理手順については、前報と同じであるので、ここでは説明を省略する。なお、後述の実験においては、2.02 秒間において、縞画像を合計 81 810 枚採取し、画像解析により、触針の変位を求めた。

架橋が形成された状態の振動系は、剛性が極めて小さい微妙な系であり、わずかの外乱によっても、振動

が誘起される。この影響を抑制するために、装置を空気ばね式の除振台に搭載し、かつ実験は外乱が最小となる深夜に実行した。

2.4 カンチレバーの多段階駆動の導入

本報において、新しく導入した点は、カンチレバー側の PZT を駆動する電圧波形を発生させるために、関数発生器を用いたことである。これによって、カンチレバーを任意の時間軌跡で引上げられるようになり、液架橋が伸びた状態において、過渡振動を発生させ、その減衰振動波形を観測することにより、伸び量に対応した動特性を測定できるようになった。さらに、液架橋が切断される直前の状態に維持しておけば、極微細な液架橋の動特性の測定が可能である。

本報では、プローブの上昇過程における四段階の引上げと、下降過程における四段階の引下げを行うこととした。それぞれにおける PZT 駆動電圧の時間軌跡を図 3 に示す。上昇過程においては、最初の引上げ区間では傾斜を設けて(速度を落として引上げる)、この区間で過渡振動が発生しないようにした。傾斜区間の終了後に、ステップ状に電圧を上昇させて、過渡振動を発生させた。下降過程においては、いったん最大電圧を与えてから、階段状に電圧を下降させた。上昇過程と下降過程の二つの条件を設けた理由は、液架橋内部において、分子の流動に起因するクリープ現象の発生の有無を確認するためである。

2.5 供試ディスクと潤滑剤の仕様

供試ディスクとしては、ガラス基板を用いた 2.5 インチサイズの実用品を使用した。表面にはイオンビーム法により、水素添加のダイヤモンドライクカーボン(DLC: diamond like carbon)が形成されている。DLC 膜の厚さは 3 nm、表面粗さは $R_a=0.6$ nm, $R_{max}=5\sim 8$ nm である。潤滑剤としては、PFPE(perfluoropolyether) Zdol 2000 と Zdol 4000 を使用した。この潤滑剤は、 $X-CH_2-CF_2-O-(CF_2-CF_2-O)_m-(CF_2-O)_n-CF_2-CH_2-X$ ($X=CF_2CH_2OH$, $m/n\approx 2/3$) の構造を持つ直鎖状の高分子で、Zdol 2000, Zdol 4000 の分子量はそれぞれ、2 000, 4 000 である。また、それぞれの潤滑剤の一つの分子の大きさに関して、分子回転半径は、1.1, 1.5 nm、分子を直線的に伸ばしたときの長さは、7, 14 nm、分子の太さは、ともに 0.7 nm と見積もられている。

潤滑剤は、フロン系の溶媒(hydrofluoroether) HFE 7200(構造式: $C_4F_9OC_2H_5$)で希釈し、ディップコーティング法により、ディスク面上に塗布した。希釈度の範囲は、2.5~5.5%、引上げ速度は、一定の 2.5 mm/s とした。塗布した後の潤滑膜の厚さは、走査形

Fig. 3 Stepwise movement of cantilever

エリブソメータ(Five Laboratory 社: MARY 102)で測定した。潤滑膜の厚さは、液架橋の形成を容易にするために、実用ディスクの場合より厚くして、薄い場合を 22~24 nm, 厚い場合を 44~49 nm とした。実験した液架橋の伸びは、おおよそ 50~800 nm の範囲である。実験は同一の条件において、ディスクの場所を変えて複数回行った。触針への潤滑剤の付着効果を除去するために、触針先端部は実験ごとに毎回洗浄した。

3. 過渡振動における 振動パラメータの同定法

液架橋が形成された状態におけるカンチレバーの振動系のモデルを図 4 に示す。先端部の等価集中質量 m が、カンチレバーのばねとダンパ(ばね定数 k_c , 減衰係数 c_c)と液架橋のばねとダンパ(ばね定数 k_m , 減衰係数 c_m)で支持されている。触針の変位を z , 引上げ用 PZT の変位を z_p とすれば、運動方程式は以下のように表される。

$$m \frac{d^2 z}{dt^2} = -k_c(z - z_p) - c_c \left(\frac{dz}{dt} - \frac{dz_p}{dt} \right) - F_m \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 F_m は液架橋に作用する力で、静的な力を F_0 とすれば、以下のように表される。

$$F_m = k_m z + c_m \frac{dz}{dt} + F_0 \quad \dots\dots\dots (2)$$

式(1)の自由振動解における対数減衰率と角固有振動数は次式で与えられる。

$$n_b = \frac{c_c + c_m}{2m} \quad \dots\dots\dots (3)$$

$$\omega_b = \sqrt{\frac{k_c + k_m}{m} - n_b^2} \quad \dots\dots\dots (4)$$

式(4)から、液架橋のばね定数は、以下のように求められる。

$$k_m = \left(\omega_b^2 + n_b^2 - \frac{k_c}{m} \right) m \quad \dots\dots\dots (5)$$

等価質量は、実測した量ではないために、不確かさが大きい。そこでこれを実測できる量に変換する。液架橋が形成されていないときの自由振動の対数減衰率、角固有振動数を n_0 , ω_0 とすると、それぞれ以下のように与えられる。

$$n_0 = \frac{c_c}{2m} \quad \dots\dots\dots (6)$$

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{k_c}{m} - n_0^2} \quad \dots\dots\dots (7)$$

式(6), (7)より m を求め、式(5), (3)に代入すれば、次式を得る。

$$k_m = (\omega_b^2 + n_b^2 - \omega_0^2 - n_0^2) \frac{k_c}{\omega_0^2 + n_0^2} \quad \dots\dots\dots (8)$$

$$c_m = \frac{k_c}{\omega_b^2 + n_b^2} n_b - c_c \quad \dots\dots\dots (9)$$

以下のパラメータ同定においては、液架橋がある場合と、ない場合に観測された振動波形を用いて、最小二乗法に基づく回帰分析により、角固有振動数と対数減衰率を同定し、それぞれ式(8), (9)に代入して、ばね定数と減衰係数を求めた。

4. パラメータ同定結果と考察

4.1 ばね定数の同定結果 触針の上昇時と下降時の振動波形の代表例を図 5(a), (b) に示す。回帰分析によって同定した固有振動数も図中に合わせて示した。引上げ時には、3 段めまでのおおむね類似の波形が観測されているが、詳細にみると、1 段めのほうが減衰が早い。4 段めでは振動が急速に減衰し、減衰後に静的なバランス状態には維持されずに、クリープして分離が始まり、最終的に破断してカンチレバーの片持支持の自由振動が始まる。固有振動数は、液架橋の伸びとともに上昇して最大値をとった後に減少に転じることがわかる。4 段めにおいて、振動が急速に減衰することは、切断直前において減衰係数が急上昇することを示している。なお、4 段めの減衰振動が収斂した後に、クリープして破断する例は偶然観測されたものである。

下降時の特性も基本的には同じであり、固有振動は、下降に伴いいったん増加して最大値をとったのちに、再び減少する。また、液架橋が最も伸びた状態における振動は急速に減衰するが、他の段階における過渡振動は上昇時と類似していることがわかる。なお上昇時も下降時も基本的には、同様の特性が得られるので、以下のパラメータ同定の結果は、上昇時の場合のみを示す。

Zdol 2000 の膜厚さが 24 nm の場合について、液架橋のばね定数の同定結果を図 6 に示す。異なる測定点

Fig. 4 Vibration system model

において複数回行った結果をまとめたものである。実験ごとのばらつきがあるのは、ディスク表面の場所によって潤滑膜の厚さやその存在形態が局所的に変動している影響と思われる。しかしその変動幅は小さく、よい再現性が得られているといえる。

液架橋は負のばね特性を示す(伸びるに従って作用する力が小さくなる)ので、その大きさを絶対値 $|k_m|$ で評価することにする。 $|k_m|$ は $0.1 \sim 0.15 \text{ N/m}$ 程度であり、伸びるに従って小さくなり、最小値をとった後に増加するという興味ある特性を示すことがわかる。

なお、ばね定数の変化に応じて、振動数も変化するが、カンチレバーのばね定数に比較して、液架橋のばね定数は小さいため、実験条件における振動数の変動

範囲は、 $520 \sim 540 \text{ Hz}$ と狭い。したがって、ここで得られた結果は、周波数がほぼ一定の条件における特性といえる。

膜を厚くした場合(49 nm)の結果を図7に示す。膜が薄い図6に比較して、減少の領域が広いことがわかる。これは、ばね定数の減少が飽和する特性、あるいは増加に転じる特性は、液架橋が細く伸びたときに生じることを示唆している。

Zdol 2000 に比較して分子量が2倍に大きい Zdol 4000 の場合について、膜厚さが24 nmの結果を図8に示す。 $|k_m|$ の大きさは Zdol 2000 の場合とほぼ同じであるが、伸びに対する飽和開始点が伸びの長い側へ移動していること、最小値をとった後に増大に転じる特性が顕著であることに差異が認められる。この差異は、図9に示すように膜を厚くした場合(44 nm)も同様であり、Zdol 2000 に比較して分子が長い特性が反映されたものと解釈できる。⊗印は最終段に引上げる過程で破断した場合であり、このときには、カンチレバーのみのばね定数を求めたことになるが、参考値として示した。

4・2 減衰係数の同定結果 振動現象における減衰の大きさを表す方法としては、減衰係数、減衰係数×角振動数、減衰比などがあるが、ここでは、粘弾性的な特性を表す場合に使用されている減衰係数×角振動数を使用することにする。この場合には、ばね定数と同じ単位となり、粘性効果と弾性効果の比較が容易である。

潤滑剤が Zdol 2000、膜厚さが22 nmの場合について、液架橋の減衰係数の同定結果を図10に示す。減衰係数×角振動数の値はおおむね $0.02 \sim 0.06 \text{ N/m}$ の範囲にあり、伸びとともに減少し、最小値をとった後に増加する特性は注目に値する。特に高い減衰を示した点は、図5(a)に示した最終段の後に膜がクリープ破断に至った場合である。⊗印は最終段に引上げる過程で破断した場合であり、このときには、カンチレバーのみの減衰係数を求めたことになるが、参考値として示した。

図11に膜厚さを49 nmに厚くした場合の結果を示す。基本的な特性は薄い場合と類似しているが、伸びに対する飽和が膜の厚い側へ伸びており、この範囲では減衰の急増は観測されなかった。

Zdol 4000 の場合の膜厚さが24 nmの結果を図12に示す。減衰係数×角振動数の大きさは Zdol 2000 の場合とほぼ同じであるが、伸びに対する飽和開始点が伸びの長い側へ移動していること、最小値をとった後に増大に転じる特性が顕著であることに差異が認めら

(a) While tip retracting

(b) While tip extending

Fig. 5 Typical waveforms for Zdol 2000 with film thickness of 22 nm

れる。この差異は、図 13 に示すように膜を厚くした場合 (46 nm) も同様であり、Zdol 2000 に比較して分子鎖が長い特性が反映されたものと解釈できる。

ここで、伸びに伴う減衰係数の増減が、伸びが小さい領域と、伸びが大きい領域で逆転する特性について考察する。直鎖状の PFPE 分子は、ディスク表面では、押しつぶされた球のような形態で存在し、引上げ前の状態では、多数の PFPE 分子が触針との接触部の周辺にメニスカスを形成していると考えられる。また、分子運動に比較して、触針の振動速度は十分遅いため、分子の変形は瞬時に回復されると考えられる。したがって、分子変形の影響は小さく、図 14 に示すように、分子の移動によって液架橋が伸びると考えられ

る。このような状態において、減衰に関連する要因としては、粘性流体としてのスクイーズ効果と、メニスカスの運動のヒステリシス (wetting と dewetting の差) が考えられる。振動数がほぼ一定であるので、スクイーズ効果は伸びの二乗に反比例すると考えられる。メニスカスのヒステリシスとしては、液体と固体の境界位置が固定され、液表面の曲率が変化するモデル (接触角変動モデル) と、液表面の曲率が固定され、境界位置が変化するモデル (境界位置変動モデル) があり、後者のほうが、ヒステリシス現象である wetting と dewetting の繰返しにより、損失が大きくなることが確認されている⁽⁴⁾。図 14 (a) と (b) を比較すると、(a) の場合には、スクイーズ効果が大きく、メニスカ

Fig. 6 Identified spring constant relative to bridge elongation for Zdol 2000 with film thickness of 24 nm

Fig. 8 Identified spring constant relative to bridge elongation for Zdol 4000 with film thickness of 24 nm

Fig. 7 Identified spring constant relative to bridge elongation for Zdol 2000 with film thickness of 49 nm

Fig. 9 Identified spring constant relative to bridge elongation for Zdol 4000 with film thickness of 44 nm

ス内部の流体全体が移動して、表面の変形が容易に生じるために、接触角変動が支配的であり、(b)の場合には、スクイーズ効果が小さく、液架橋の中央部の分子が移動しにくいために、触針に接触する分子と表面との境界位置が変動する境界位置変動が支配的になっているものと考えられる。

以上の考察から、伸びが小さい領域では、損失の主要因はスクイーズ効果であり、伸びとともに減少し、伸びの大きい領域では、損失の主要因はメニスカスの境界位置が変動するヒステリシスであり、伸びとともに増大すると考えることができる。すなわち、これらの二つの効果が重畳して、伸びに対してU字形の変

化を示す特性が生じたものと推測できる。

なお、測定したばね定数はおおむね $-0.15 \sim -0.1$ N/m、減衰係数 $\times$ 角振動数はおおむね $0.02 \sim 0.06$ N/mであり、曲率半径 $20 \mu\text{m}$ の球を用いて測定された従来の測定値⁽⁵⁾のおおむね10分の1の微量量である。

5. ま と め

磁気ディスク表面に塗布されているPFPE潤滑膜の振動的な特性を定量化するために、先端曲率が $0.1 \mu\text{m}$ のダイヤモンド製触針を用いて、極性基を持つ潤滑剤PFPE Zdol 2000, Zdol 4000(厚さ約 20 nm , 約 40 nm)を塗布したディスク面に接触させて、これ

Fig. 10 Identified frequency-multiplied damping coefficient relative to bridge elongation for Zdol 2000 with film thickness of 22 nm

Fig. 12 Identified frequency-multiplied damping coefficient relative to bridge elongation for Zdol 4000 with film thickness of 24 nm

Fig. 11 Identified frequency-multiplied damping coefficient relative to bridge elongation for Zdol 2000 with film thickness of 49 nm

Fig. 13 Identified frequency-multiplied damping coefficient relative to bridge elongation for Zdol 4000 with film thickness of 46 nm

Fig. 14 Mechanism of damping action induced by meniscus motion

を階段状に上昇あるいは下降させて、階段状変位ごとに発生する過渡振動波形を回帰分析することにより、振動パラメータを同定して、50～800 nmの範囲における液架橋の長さに依存した液架橋のばね定数と減衰係数を測定した。液架橋の伸びとともに、ばね定数の絶対値、減衰係数はともに減少し、最小値をとった後に増加に転じ、破断直前に急増することを見出した。

得られた結果を要約すると以下のとおりである。

(1) 液架橋のばね定数 k_m は負の値を持ち、測定された値は $-0.15 \sim -0.1$ N/m であった。測定された減衰係数 c_m を減衰係数 $\times$ 角振動数、 $c_m \times \omega$ 、として表示すると、その大きさは $0.02 \sim 0.06$ N/m であった。また、 $|k_m|$ 、 $c_m \times \omega$ とともに、液架橋の伸びとともに漸減し、最小値をとった後に増加に転じる。

(2) 潤滑膜が薄い場合と厚い場合を比較すると、膜が厚い場合のほうが、 $|k_m|$ 、 $c_m \times \omega$ の最小値を与える伸び量がより長い側へ移行するとともに、これらの値が増加に転じる特性が弱くなる。

(3) 分子量が小さい場合と大きい場合を比較すると、 $|k_m|$ については、大きな差異はないが、 $c_m \times \omega$ については、分子量が大きいほうが、値が最小値をとったのちに増加に転じる特性が顕著に現れる。

(4) 上記の特性を解析すると、液架橋の減衰が生起するメカニズムとして、液架橋の伸びが短い領域では、スクイーズ効果が支配的な要因であり、伸びが長い領域では、メニスカスの境界位置が変動するヒステリシス (wetting と dewetting) が支配的な要因と考えられる。

(5) 先端の曲率半径が $0.1 \mu\text{m}$ の触針で測定した $|k_m|$ 、 $c_m \times \omega$ の値は、曲率半径 $20 \mu\text{m}$ の二つの球の間に形成されたメニスカスにおける値のおおよそ 10 分の 1 である。

本研究の一部は、文部科学省産学官イノベーション創出事業補助金 (13104) および平成 15 年度科学研究費補助金 (15760305)、情報ストレージ研究推進機構、愛知江南短期大学特別研究費の助成を得て実施された。また、実験を支援した学生の服部真之君に謝意を表す。

文 献

- (1) Israelachvili, J. N., *J. Colloid Interface Sci.*, **110**-1 (1986), 263-271.
- (2) Choi, J. and Kato, T., *Tribology Int.*, **36** (2003), 475-481.
- (3) 伊藤伸太郎・福澤健二・張賀東・三矢保永, 機論, **70**-691, C (2004), 233-240.
- (4) 松岡広成・福井茂寿・加藤孝久, トライボロジスト, **45**-10 (2000), 757-768.
- (5) 崔竣豪・加藤孝久, トライボロジスト, **48**-10 (2003), 855-865.
- (6) 三矢保永・大島康司, 機論, **66**-642, C (2000), 140-148.
- (7) 大島康司・三矢保永・岩瀬友輔, 機論, **68**-667, C (2002), 965-972.