

先端的ナノトライボロジー計測による情報記憶装置の革新

福澤 健二

名古屋大学大学院工学研究科

1. 研究のねらい

情報記憶装置の中核である磁気ディスク装置（ハードディスクドライブ）のヘッド・ディスク潤滑技術には、大きな技術的転換が求められている。次世代の装置においては、高記録密度化のために、ヘッド・ディスク間のすき間として 10 nm 以下が要求されており、これを実現するには、ヘッドを空気膜で浮上させていた従来の潤滑方式から、ディスク表面にヘッドを接触させながら走行する潤滑方式の確立が必須となる。しかし、すき間 1 nm オーダのヘッド・ディスク間の潤滑現象を従来の計測法ではとらえることが困難で、次世代の潤滑方式確立の大きな障害となっていた。耐久性の確保のために、ディスク表面には、厚さ 1 nm オーダの超薄膜状の液体潤滑膜（ナノ潤滑膜）が塗布されている。そのため、本計測法では、ナノ潤滑膜の摺動時の力学応答計測が重要となる。そして、本計測法では、微小すき間の現象を対象とし、かつ、ナノ潤滑膜の発生する力も微弱であるため、高精度なすき間制御と高感度な力検出の両立が求められる。これを満たす計測法は従来なく、新規な計測法を確立することを試みた。

2. 研究成果

ナノ潤滑膜が発生する力としては、粘弾性力などの水平方向の力、摺動による動圧力などの鉛直方向の力が重要で、ナノすき間の潤滑現象を把握するには、これらの水平・鉛直方向の力を精密に定量化する必要がある。さらに、ナノ潤滑膜は厚さが極めて薄いと言っても液体膜であるので分布が容易に変化し、それが力学応答に影響を与える可能性がある。そのため、液体膜の分布の把握も重要である。そこで、本研究においては、水平方向の力、鉛直方向の力、膜分布の観測のそれぞれの計測法を確立し、さらにそれらを統合し、同時計測することを試みた（図 1）。各計測法について得られた成果を下に述べる。

a. 水平力計測

先端を球状に加工した光ファイバをプローブとした新規な計測法を考案し、ナノ潤滑膜の粘弾性力計測を試みた。ディスクとプローブの間に潤滑膜を挟み、プローブを加振しディスクに対して平行に相対運動させる。その際の水平せん断力による振幅・位相変化から潤滑膜の粘弾性特性を得た。本プローブは、面内方向には柔であるため、高感度な水平力測定が可能であり、鉛直方向に剛であるため、分解能 0.1 nm の高精度なすき間制御が可能となった。また、先端の微小ガラス球をマイクロレンズとして利用した新規なプローブ変位検出法を開発し、最小検出限界 10 pN オーダ（力検出限界 0.01 nN オーダ）という超高感度検出を達成した。本法により、摺動すき間が数十 nm 以下になると粘性の増加

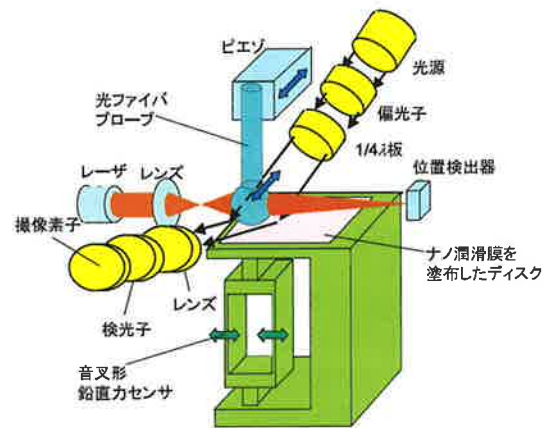


図 1. ナノ厚さ潤滑膜の力学特性計測法の概念図

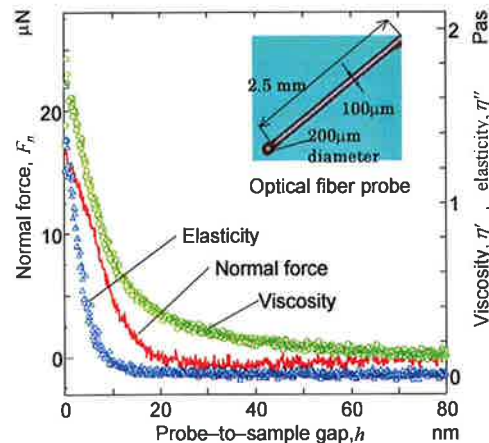


図 2. 測定したナノ潤滑膜の力学特性. 水平・鉛直力の同時測定結果

と弾性の出現が見られ、ナノすき間に閉込められた潤滑膜はバルク状態とは異なった粘弾性特性を示すことを明らかにした(図2)。

b. 鉛直力測定

鉛直力測定においても、高精度なすき間制御と高感度力検出の両立が必須である。そこで、試料台を両持ちの音叉上に配置して一体形成し、鉛直力(音叉にとっては張力あるいは軸力)によって生ずる共振周波数変化を測定する力センサを開発した(図1)。センサ構造を工夫し、測定時のすき間変動が1 nm以下で、かつ最小検出限界1 μN オーダの鉛直力測定を実現した。さら

に、開発した水平力測定法と統合し、水平力・鉛直力の同時測定に成功した。図2に示した測定例のように、ナノ潤滑膜の粘度の増加に対応した動圧力の増加の定量化に成功した。

c. ナノ潤滑薄膜の可視化

エリプソメトリー(偏光解析)に基づく光学的な方法により、ナノ潤滑膜の直接可視化法の確立を試みた。光検出器として高感度撮像素子を用いることにより、膜厚分布を輝度分布に変換し、二次元的な膜分布を像として得ることに成功した(図1)。画像処理技術および光学系の改良によりSN比を向上させ、厚さ1 nm オーダの潤滑膜について、膜厚分解能0.1 nmでの静止面観測を可能とした(図3)。

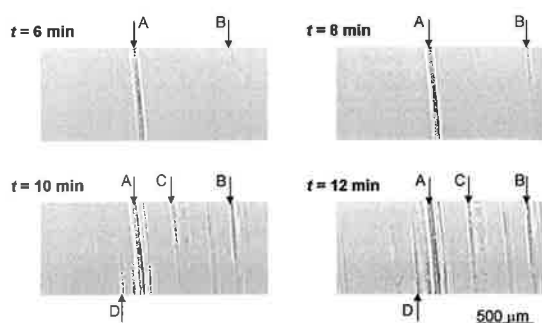


図3. 厚さ5.8nmの潤滑膜の経時変化の直接可視化像。撥水現象による膜分布の変化の可視化に成功

3. 主な論文

- ・ K. Fukuzawa, T. Deguchi, J. Kawamura, Y. Mitsuya, T. Muramatsu, H. Zhang, "Nanoscale Patterning of Thin Liquid Films on Solid Surfaces," *Applied Physics Letters*, Vol. 87, No. 20, pp. 203108-1-3 (2005).
- ・ K. Fukuzawa, T. Ando, M. Shibamoto, Y. Mitsuya, H. Zhang, "Monolithically Fabricated Double-Ended Tuning-Fork-Based Force Sensor," *Journal of Applied Physics*, Vol. 99, No. 9, pp. 094901-1 - 5 (2006).
- ・ K. Fukuzawa, T. Shimuta, T. Yoshida, Y. Mitsuya, H. Zhang, "Direct Visualization of Dewetting of Molecularly Thin Liquid Films on Solid Surfaces," *Langmuir*, Vol. 22, No. 16, pp. 6951-6955 (2006).
- ・ K. Fukuzawa, S. Terada, M. Shikida, H. Amakawa, H. Zhang, Y. Mitsuya, "Dual-Axis Micro-Mechanical Probe for Independent Detection of Lateral and Vertical Forces," *Applied Physics Letters*, Vol. 89, pp. 173120-1 - 3 (2006).

4. その他

特許

- ・ 福澤 健二, 式田光宏, 寺田論, 測定プローブ, 試料表面測定装置, 及び試料表面測定方法, 特願 2006-037030, 出願人: 科学技術振興機構
- ・ 福澤 健二, 式田光宏, 寺田論, 測定プローブ, 試料表面測定装置, および試料表面測定方法, PCT/JP2007/052626, 出願人: 科学技術振興機構

受賞

- ・ 2004年度 日本機械学会船井賞(業績賞)受賞, 「先端的ナノトライボロジー計測による情報記憶装置の革新」(2005年3月)
- ・ 2004年度 日本トライボロジー学会論文賞受賞, 「化学的テクスチャ付き表面における単分子層潤滑膜の表面流動特性」(2005年5月)
- ・ 2005年度日本機械学会賞(論文)受賞, 「ファイバーウォブリグ法によるナノ閉じ込めされた分子潤滑膜の弾性特性の測定」(2006年4月)