

最先端・次世代研究開発支援プログラム
事後評価書

研究課題名	ナノ液体膜の微細パターンニングによる機能性薄膜潤滑システムの創成
研究機関・部局・職名	名古屋大学・大学院情報科学研究科・准教授
氏名	張 賀東

【研究目的】

磁気ディスク装置 (HDD: hard disk drives) や、マイクロマシン (MEMS: micro-electromechanical systems)、マイクロファブリケーションなど、ナノメートルの加工・運動・制御を対象とするナノテクノロジーの分野では、ナノメートルのすきまを隔てた固体 2 面間の相対運動を精確かつ安定に実現することが重要な課題になっている。

このため、ナノ厚さの液体潤滑膜 (ナノ潤滑膜) を介した潤滑技術 (薄膜潤滑技術) に関心が高まっている。薄膜潤滑では、耐久性を確保するためには、接触摺動に対して潤滑膜が破断しないように、固体表面に強固に固定されている自己保持機能、かつ膜が一旦破断した場合にも、周辺部の潤滑剤分子が迅速に流動して破断箇所を修復する自己修復機能を有することが要求されている。これらの相反する要求条件を両立させながら、固体 2 面間の円滑な相対運動を阻害しない低凝着・低摩擦性をナノ潤滑膜に付与することが、薄膜潤滑の実現の鍵を握っているといえる。本研究では、所望の機能・性能を有する機能性薄膜潤滑表面の創成を目指して、フォトマスクを介した紫外線 (UV) 照射によるナノ潤滑膜のパターンニング法 (図 1) を提案し、その有効性を実験と分子シミュレーションの両面から評価するとともに、潤滑剤分子の運動・構造を取り込んだ新しい機能性薄膜潤滑表面設計の方法論を確立する。

目的を達成するために、下記の 4 項目について研究目標を設定した。

- 1) パターンの微細化 凹凸パターンの凸部で摺動子を支持して、接触面積を低減することにより、低凝着・低摩擦を実現することができる。そのためには、凹凸パターンの線幅を摺動部のサイズより十分小さくすることが必須であり、現状の 10 μm から sub-μm までに微細化することを目標とした。
- 2) 摺動子の超平滑化 機能性潤滑表面を創成する方法論を確立するために、パターンの寸法・形状とトライボロジー特性との関係を定量化するとともに、そのメカニズ

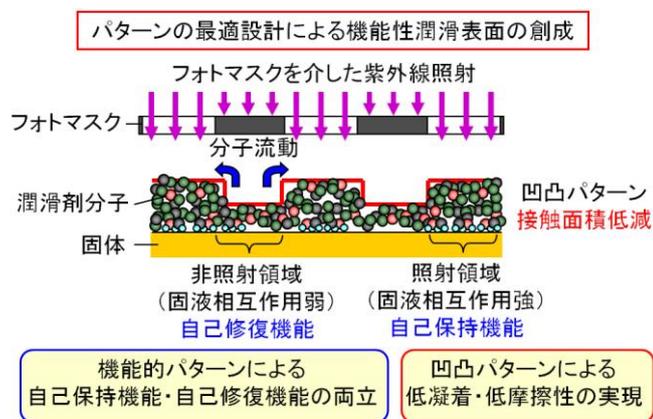


図 1 ナノ液体膜パターンニングによる機能性潤滑表面の創成

ムを解明することが必須である。しかし、従来の摺動子は面精度が不十分なため、粗さの突起先端が潤滑膜を貫通し、固体接触の影響を含んだ特性が観測されている可能性がある。この問題を解決するために、摺動子の面粗さの最大山高さ Rp を 1 nm 以下にすることを目標とした。

3) トライボロジー特性の評価 汎用の評価装置として、走査プローブ顕微鏡 (SPM: scanning probe microscope) および表面力測定装置 (SFA: surface force apparatus) があるが、測定面積や摺動速度に限界があるために、実用性能の評価には適さない。そこで、実用条件に近い μm^2 オーダーの摺動面において、準静的な数 rpm から実用的な数千 rpm ($10^{-3}\sim 1$ m/s オーダー) の速度領域にわたって、ナノ潤滑膜のトライボロジー特性を高精度に測定することを目標とした。

4) 分子シミュレーション ナノ潤滑膜のパターニングは、固液相互作用を利用して、流動性を有する液体膜の運動・構造を制御することにより、初めて実現されるものである。そこで、パターン形成メカニズムや効果を解明するために、量子化学計算と分子動力学シミュレーションを行い、UV 照射や接触摺動などに対するナノ潤滑膜の応答過程を分子論的定量化する。とくに、全原子モデルを用いた分子動力学シミュレーションは計算時間が膨大となり困難であるため、大きな時間・空間スケールをもつ潤滑現象を高効率かつ高精度に扱える粗視化計算手法の確立を目標とした。

【総合評価】

	特に優れた成果が得られている
○	優れた成果が得られている
	一定の成果が得られている
	十分な成果が得られていない

【所見】

① 総合所見

本研究課題は、所望の機能・性能を有する機能性薄膜潤滑表面を目指して、フォトマスクを介して紫外線照射によるナノ潤滑膜のパターニング法を提案し、その有効性を実験と分子シミュレーションの両面から評価するとともに、潤滑剤分子の運動・構造を取り込んだ新しい機能性薄膜潤滑表面の設計論を確立しようとするものである。設定した 4 項目の研究目標はほぼ達成し、先進性・優位性のある研究成果が得られている。しかし、3) トライボロジー特性の評価の項目について 0.2 mN の軽荷重で、摺動速度 100 rpm (0.2 m/s) までの領域において、ナノ潤滑膜の摩擦特性を高精度に測定することに成功したとはいえ、新しい機能性薄膜潤滑表面の設計法の実用化を考慮して当初設定した目標である摺動速度数千 rpm の高速での測定には至らなかった。

最先端・次世代産業技術につなげるために、研究室レベルの本研究課題の成果を具体的に適用した評価は残された課題である。今後企業との連携で本研究成果が実用化に繋がるよう期待する。

<p>② 目的の達成状況</p> <p>・所期の目的が (<input type="checkbox"/>全て達成された ・ <input checked="" type="checkbox"/>一部達成された ・ <input type="checkbox"/>達成されなかった)</p> <p>初期に設定された4つの項目・目標に関して、各項目の達成状況は下記のとおりである。</p> <p>1) <u>パターンの微細化</u> ナノ液体潤滑膜の微細パターンニングに関して、直径 65 mm 磁気ディスクの全周にわたって、線幅 0.5 μm ピッチ 1.0 μm の微細凹凸パターンの形成に成功し、線幅 sub-μm を目標とした微細化を達成した。</p> <p>2) <u>摺動子の超平滑化</u> 表面粗さの最大山高さ R_p が 0.79 nm の超平滑化摺動子を実現し、R_p を 1 nm 以下とした当初の目標を達成できた。</p> <p>3) <u>トライボロジー特性の評価</u> トライボロジー特性を高精度に測定できる装置を開発し、0.2 mN の軽荷重で、摺動速度 100 rpm (0.2 m/s) までの領域において評価できる装置を開発し提案した方法の有効性を定量的に示した。しかし、実際の HDD を想定した数千 rpm までの評価には至らなかった。</p> <p>4) <u>分子シミュレーション</u> 量子化学計算を実施し、UV 照射効果のメカニズムの解明し、また、高精度な粗視化計算手法を確立し高速シミュレーションを可能とした。本シミュレーションと実験の結果を統合的に考察することにより、機能性薄膜潤滑表面を創成するためのパターン設計の方法論を提示した。</p> <p>しかし、本技術を実用化するための方策はこれからの課題である。</p>
--

<p>③ 研究の成果</p> <p>・これまでの研究成果により判明した事実や開発した技術等に先進性・優位性が (<input checked="" type="checkbox"/>ある ・ <input type="checkbox"/>ない)</p> <p>・ブレークスルーと呼べるような特筆すべき研究成果が (<input checked="" type="checkbox"/>創出された ・ <input type="checkbox"/>創出されなかった)</p> <p>・当初の目的の他に得られた成果が (<input type="checkbox"/>ある ・ <input checked="" type="checkbox"/>ない)</p> <p>ナノ液体潤滑膜の微細パターンニングが、潤滑膜の摩擦・摩耗特性を向上させることを実験的に示し、シミュレーションによりそのメカニズムを解明した。ナノ液体潤滑膜の微細パターンニング (線幅 100 nm オーダー) を実現するとともに、それが潤滑膜の摩擦・凝着・減耗・修復特性を向上できることを確認し、世界でも類を見ない先進的な研究成果を生み出した。本研究において、HDD などへの具体的な応用に向けて機能性薄膜潤滑表面を創成するためのパターン設計の方法論を提示したことは先進性がある。</p> <p>軽荷重・高速条件で、ナノ潤滑膜のトライボロジー特性を安定で高精度に測定するため、超平滑な摺動子と軽微荷重条件の使用によりナノ潤滑膜の減耗・損傷を抑制でき、かつ振動発生を抑えた摺動子支持機構を有するトライボテストを開発したことは意義がある。</p> <p>HDD 技術への適用に限れば、本成果はブレークスルーになるが、最先端・次世代産業技術につながるブレークスルーまでには至っていない。</p>

④ 研究成果の効果

・研究成果は、関連する研究分野への波及効果が
(■見込まれる ・ □見込まれない)

・社会的・経済的な課題の解決への波及効果が
(■見込まれる ・ □見込まれない)

潤滑剤分子の運動・構造を取り込んだ機能性薄膜潤滑表面の設計論を確立するという研究目的を設定しており、成果として得られた基礎学術は、直接的には HDD の記録密度向上への寄与が期待され、省エネルギーなどへの貢献が見込まれる。

固体表面の液体の拡散流動、濡れ性、潤滑や摩擦などを対象とする表面・界面科学・工学の技術分野に利用されることが期待される。

また、本研究で開発したトライボテストや分子シミュレーションは、汎用的に使用されることが期待される。

以上、HDD の研究・開発には重要な知見を与えたと高く評価されている。HDD のみならず、マイクロ・ナノマシンや自動車関連の極限潤滑など、ナノレベルの相対運動をともなう技術分野にも展開可能であるため、これらの分野における技術発展に貢献し、低炭素社会の実現に役立つと期待される。

⑤ 研究実施マネジメントの状況

・適切なマネジメントが (■行われた ・ □行われなかった)

研究実施マネジメントの状況については、

- ・研究計画の一部変更があったが、それには対応した。
- ・少人数での実施体制であるが、研究成果から見て、適切な体制である。
- ・頻繁に研究実施状況を把握し、計画の見直しが行われている。

以上より、研究実施マネジメントは適切であると考えられる。

雑誌論文 11 件 (掲載済み (査読有り)、計 9 件 (内 1 件は解説記事)、査読対応中 1 件)、会議発表 26 件 (専門家向け 計 26 件 (内 2 件は 9 月と 10 月に実施))、知的財産権出願中、1 件、新聞・一般雑誌等掲載 1 件。以上より研究成果の積極的な公表や発信は適切に行われた。また、国民との科学・技術対話は講義形式で計 3 件実施し、磁気ディスク装置を例にナノテクノロジーを概説するとともに、本研究での取り組みを紹介するなど適切であった。