

<p>サブテーマ名：「高輝度光ビームによる薄膜形成技術に関する研究」 小テーマ名：「高機能硬質膜のレーザ表面加工・改質技術の開発」</p>
<p>サブテマリーダー（所属、役職、氏名） 福井工業高等専門学校、教授、太田泰雄 研究従事者（所属、役職、氏名） 福井工業高等専門学校、教授、安丸尚樹 (株)アイテック、主管技師、木内淳介 京都大学エネルギー理工学研究所、教授、宮崎健創</p>
<p>研究の概要、新規性及び目標</p> <p>研究の概要</p> <p>フェムト秒レーザを難加工性硬質薄膜（TiN・DLC等）に照射することにより、レーザ波長の1/10～1/5サイズの周期的微細構造（ナノ構造）を薄膜表面に形成し、波長・偏光・フルーエンスによりその形状・サイズを制御する技術やDLC膜表面をガラス状炭素（GC）に改質する方法を開発した。</p> <p>研究の独自性・新規性</p> <p>DLC等の硬質薄膜表面に、ナノ構造のサイズ・形状を制御して加工し、目的により MoS₂等の固体潤滑膜と複合化する3Dレーザ改質により、ナノ～マクロ領域の超トライボロジー表面を創成する研究は前例がない。この成果は、マイクロマシンから自動車部品までのトライボロジー特性を最適化する次世代要素技術として期待される。DLC薄膜のGC化は、DLC薄膜に導電性や耐熱性等の新機能を付与する改質法として、DLCの新たな応用分野（高性能電極・センサー等）を開拓する。</p> <p>研究の目標（フェーズ毎に数値目標等をあげ、具体的に）</p> <p>フェーズ：フェムト秒レーザによる高機能硬質膜の表面ナノ加工・改質技術の開発 フェーズ：表面ナノ加工・改質技術の確立と大面積でのサンプル加工（10cm×10cm） フェーズ：3Dレーザ改質技術の確立とナノ～マクロ領域のトライボロジー制御委託加工の開始</p>
<p>研究の進め方及び進捗状況（目標と対比して）</p> <p>フェーズ：(1) 気相コーティング法により窒化物、DLC、MoS₂等薄膜を各種条件で複合化し最適条件を確立する。摩擦係数$\mu = 0.03$以下のトライボロジー特性に優れた複合膜を開発した。 (2) 京都大学宮崎との共同研究により、硬質膜及び各種固体材料へ偏光制御フェムト秒レーザを各種条件で照射し、照射面の粗さ解析等により周期的ナノ構造形成技術を開発した。</p> <p>フェーズ：県内の眼鏡枠等精密加工関連業界の硬質薄膜に関する新技術創出のニーズに基づき、フェムト秒レーザによる硬質薄膜の微細加工に関する研究を開始した。その過程で、フェムト秒レーザを用いた硬質薄膜（TiN、DLC）の精密加工時に、レーザ波長の1/10～1/5の周期的微細構造（ナノ構造）が形成されるのを見出した。さらにレーザ条件（波長、偏光、フルーエンス）によりそのナノ構造のサイズや形状を制御する新技術を開発し、基本特許の出願をした。また、ダイヤモンド状炭素（DLC）薄膜に対しては、フェムト秒レーザ照射によりナノ構造が形成されると同時に、照射部表面が導電性や耐熱性に優れたガラス状炭素（GC）薄膜に改質することを見出し、特許出願をした。この二つの基本特許（硬質薄膜表面のナノ構造化（ナノ加工）とDLCのGC化）は産業界の先端的シーズとして波及効果が大きく、これら技術の確立と大面積でのサンプル加工を目的に、精密駆動ステージを有するナノ加工用フェムト秒レーザシステムを構築した。平面状にナノ構造を形成させるためにレーザ側とステージ側の条件を詳細に検討し、ナノ構造を大面積化（10cm×10cm）する条件を見出した。また、反射率の変化の測定から、in-situでナノ構造をモニタリングする技術を開発した。</p> <p>硬質薄膜表面のナノ加工（ナノ構造化）に関しては、トライボロジー特性の制御・最適化技術への応用が期待される。そのためDLC薄膜について、ナノ加工のみまたはナノ加工後固体潤滑膜（MoS₂）を複合化した3Dレーザ改質面に対して、ナノ～マクロ領域の摩擦摩耗特性を評価した。マクロ領域に対しては、ボール・オン・ディスク型摩擦摩耗試験機を用いて、1～10Nの大荷重で計測した。その結果、ナノ加工のみでは相手材に影響され、鉄系の凝着性が高い相手材に対しては2～4割程度摩擦力が低減することが判明した。さらに、DLCをナノ加工後MoS₂を複合化した3Dレーザ改質では、MoS₂を複合化した未処理のDLC膜より摩擦力が半減し、相手材が超硬ボールの場合、目標値である摩擦係数$\mu = 0.02$を達成することができた。また、ナノ領域に対しては、走査型プローブ顕微鏡を用いて100nN前後の超微小荷重で計測し、ナノ加工により摩擦力が約1/3、引き離し力が約1/4と大幅に低減し、ナノテクノロジー分野でのトライボロジー特性最適化技術へ応用できる可能性を示した（Bグループ岩井、本田両氏が測定）。このように、フェムト秒レーザを応用した3D改質により、ナノ～マクロ領域のドライ環境下で、優れたトライボロジー特性を示す表面改質技術を開発するこ</p>

とができた。

フェーズ：研究成果の実用化を目的として、これまで得られた研究成果をベースに残された研究課題の解決を図る。

主な成果

具体的な成果内容：

特許出願 1「超短パルスレーザーを用いた微細加工方法およびその加工物」(フェムト秒レーザーの照射条件を制御して、材料表面に周期的微細構造を形成させる光ナノ加工技術の開発)

特許出願 2「炭素薄膜構造並びに炭素薄膜の加工方法および製造方法」(DLC 膜の表面を改質し、ガラス状炭素(GC)の薄層を任意の領域に形成する薄膜創成技術の開発)

特許件数：3

論文数：10

口頭発表件数：27

研究成果に関する評価

1 国内外における水準との対比

この研究チームが開発したフェムト秒レーザーによるナノ加工技術は、硬質薄膜表面にレーザー波長の1/10~1/5と微細な周期構造(ナノ構造)を形成し、そのサイズと形状を、レーザーの偏光・波長・フルエンスで制御するものである。特に、波長267nmの紫外フェムト秒レーザーで加工したナノ構造のサイズは約30nmであり、X線レーザーを用いずにナノメートルレベルの周期構造の加工が可能であることを世界で初めて実証した。また、ナノ加工のみまたはナノ加工後固体潤滑膜(MoS₂)を複合化した3Dレーザー改質面は、ナノ~マクロ領域のドライ環境下で、優れたトライボロジー特性を示すことを実証した。なお、新規に開発したDLC薄膜のGC化技術は、従来困難であったGCの薄膜形成法として、さらにDLCで問題となっていた導電性・耐熱性を向上させる光改質法として期待される。

2 実用化に向けた波及効果

フェムト秒レーザーを用いたナノ加工技術は、マイクロマシン等のナノテクノロジー分野において、極微小表面のトライボロジー特性を制御・最適化する技術として応用が期待できる。さらにナノ加工と固体潤滑膜を複合させた3Dレーザー改質により、自動車部品や金型等の摩擦摩耗が関与する機械製品の耐久性・信頼性向上のための応用が可能である。また、チタン製人工歯根等の生体材料に微細な凹凸を付与することで生体との結合性が向上することが指摘されており、生体分野への応用展開が考えられる。DLC薄膜のGC化は、DLC薄膜に導電性や耐熱性等の新機能を付与する改質法として、DLCの新たな応用分野(高性能電極・センサー等)を開拓することが期待される。

残された課題と対応方針について

ナノ構造を高品質で大面積に各種サイズで形成させるために、レーザーパルス強度の安定性向上、レーザーパルスエネルギーの強度分布のフラット化、発振周波数の増大、レーザー波長の可変性が重要であり、レーザー側の改良を継続して実施する。

3Dレーザー改質材のナノ~マクロ領域に対応したトライボロジー特性データを蓄積し、幅広い目的に対応した表面改質技術を確立する。委託加工事業を含むトライボロジー制御加工の研究開発拠点の設立を目指す。さらに、DLCのGC化とナノ加工を組み合わせた製品の開発を継続して検討する。

	J S T 負担分 (千円)							地域負担分 (千円)							合 計
	H 12	H 13	H 14	H 15	H 16	H 17	小計	H 12	H 13	H 14	H 15	H 16	H 17	小計	
人件費	1,119	5,336	4,803	4,859	4,814	3,952	24,883	0	0	0	0	0	0	0	24,883
設備費	475	5,807	3,780	8,990	3,444	0	22,496	0	0	0	0	0	0	0	22,496
その他研究費 (消耗品費、 材料費等)	1,878	1,793	798	2,410	9,353	9,634	25,866	0	0	0	0	0	0	0	25,866
旅費	127	421	317	186	61	164	1,276	0	0	0	0	0	0	0	1,276
その他	5	266	408	257	287	327	1,550	0	0	0	0	0	0	0	1,550
小 計	3,604	13,623	10,106	16,702	17,959	14,077	76,071	0	0	0	0	0	0	0	76,071

代表的な設備名と仕様 [既存 (事業開始前) の設備含む]

J S T 負担による設備 : 画像処理解析ソフト、レーザプロセス解析用顕微鏡、レーザ照射面解析用システム、光学用超精密ステージ、高効率フェムト秒高調波発生装置

地域負担による設備 : なし

複数の研究課題に共通した経費については按分する