フェムト秒レーザー誘起ナノ構造による硬質薄膜のトライボロジー特性制御

安丸 尚樹¹, 宮崎 健創², 木内 淳介³

¹福井工業高等専門学校 機械工学科 (〒916-8507 福井県鯖江市下司町)

²京都大学 エネルギー理工学研究所 (〒611-0011 京都府宇治市五ヶ庄)

³アイテック(株) 表面処理事業部 (〒916-0016 福井県鯖江市神中町2-6-8)

Control of Tribological Properties of Hard Thin Films with Femtosecond-Laser-Induced Nanostructuring

Naoki YASUMARU,¹ Kenzo MIYAZAKI,² and Junsuke KIUCHI³

¹Department of Mechanical Engineering, Fukui National College of Technology, Geshicho, Sabae, Fukui 916-8507

²Institute of Advanced Energy, Kyoto University, Gokasho, Uji, Kyoto 611-0011

³Surface Treatment Division, Eyetec Co., Ltd., 2-6-8 Kaminakacho, Sabae, Fukui 916-0016

(Received January 20, 2009)

This paper reviews a new technology to control the tribological properties of hard thin film surfaces on which periodic nanostructures are produced by femtosecond (fs) laser ablation. The nanostructure was formed in an area more than $15 \times 15 \text{ mm}^2$ on the surface of such thin films as diamond-like carbon (DLC) and TiN, using a target-scan system developed for fs-laser surface texturing. The friction properties of DLC film have been greatly improved by coating a MoS_2 layer on a uniformly nanostructured surface, and the friction coefficient can be increased by a net-like patterning of the nanostructured area. The micro-tribological nature was also measured for the nanostructured surface. The results show that the tribological properties of the DLC surface can be controlled with fs-laser induced nanostructuring.

Key Words: Femtosecond-laser ablation, Nanostructure, Hard coating, Tribology, DLC

1. はじめに

気相コーティング技術の進歩により、トライボロジー特性、耐環境性、生体親和性、光学特性等に優れた高機能硬質薄膜の開発とその応用例が急増している。例えば、窒化チタン(TiN)などの窒化物・炭化物系セラミックス薄膜は、高硬度で耐酸化性に優れた皮膜として、金型や工具類など機械関連分野への応用が普及している。また、ダイヤモンド状炭素(Diamond Like Carbon: DLC)薄膜は、自動車部品、マイクロエレクトロニクス、バイオ材料、光学材料、MEMS等幅広い分野で期待されており、摩擦係数が極めて小さい平滑な膜であることから、固体潤滑膜としてトライボロジー分野への応用が急速に進展している¹⁾。これらの硬質薄膜は硬くて脆い難加工材で機械加工が難しく、化学的に除去することも極めて困難である。一方、高強度なフェムト秒レーザーを用いると、各種材料について熱影響の少ない精密加工ができ、硬質薄膜の加工にも応用され始めている^{2,3)}。

また、レーザーテクスチャリングにより硬質薄膜の表面をパターン化し、摩擦係数を低減しようとする研究が

報告されている⁴⁻⁶⁾。例えば、Dumitruらは、DLCやTiNの薄膜表面に、直径 $25 \sim 30 \mu\text{m}$ 、深さ $15 \sim 20 \mu\text{m}$ の穴を周期的に加工することにより、トライボロジー特性を大幅に向上させることに成功している^{4,5)}。このようなレーザーテクスチャリングは、各種材料の摩擦特性を改善するために研究されており⁷⁾、テクスチャリングのサイズはミクロンレベルまでが報告されている。一方、薄膜に対するテクスチャリングは、薄膜本来の基板に対する保護効果や密着力を維持するために、ナノメートルレベルのサイズであることやレーザー加工時の熱などによるダメージができるだけ小さいことが必要となる場合が多い。

筆者らは、TiNやDLCなどの硬質薄膜に対し、フェムト秒レーザーパルスをアブレーションしきい値近傍の低フルエンスで照射すると、照射部の薄膜表面にナノメートルレベルの微細な周期構造が形成されることを見出した⁸⁻¹²⁾。直線偏光のレーザーパルスでは、偏光方向と直交する細長い構造が周期的に形成され、円偏光ではドット状の微細構造が形成された。ナノ周期構造の平均間隔は、波長の1/10まで減少することが観察され、波長

267 nmの紫外フェムト秒レーザーにより、約30 nmサイズの周期的微細構造が硬質薄膜表面に加工された。レーザー照射によって標的材料表面に生成することが知られているリップル構造^{13,14)}と比較すると、このナノ構造のサイズははるかに小さい。

さらに、レーザー照射によりナノ構造が形成されたDLC薄膜では、同時に照射部がガラス状炭素(Glassy Carbon: GC)に改質することを観測した^{9,12)}。GC層はDLCより高い導電性及び耐熱性を示し¹⁵⁾、DLCに新たな応用分野が広がる可能性を有している。

表面改質を含むナノ周期構造生成のメカニズムについては、実験結果を基に、表面の微細な凹凸部で自由電子が形成する局所的な増強電場(近接場)と表面プラズモンポラリトンの励起に拠るモデルが提唱され、偏光依存性及び波長依存性などの主な特性が矛盾なく説明されている^{16,17)}。

本稿では、硬質薄膜表面へのフェムト秒レーザーによるナノ構造形成に関する研究成果に基づき、主にナノ構造が形成されたDLC薄膜のトライボロジー特性について紹介する¹⁸⁻²⁰⁾。試料表面の広い範囲にナノ構造を均一に加工するためのフェムト秒レーザー加工システムを開発し、ボール・オン・ディスク型摩擦摩耗試験機によりレーザー照射面の実荷重域のトライボロジー特性を評価した¹⁸⁾。その結果、ナノ構造が平面状に均一に形成されたDLC膜は、表面に二硫化モリブデン(MoS_2)を被覆すると摩擦係数が大幅に低下すること、さらにナノ構造を網目状にパターン化して形成させると逆に摩擦係数が増加することを見出した。また、マイクロトライボロジー特性として、1000 μN および0.1 μN 付近の微小荷重で測定された摩擦特性を報告する^{19,20)}。これらの結果は、DLC薄膜などの硬質薄膜に形成されるナノ構造を最適化することにより、トライボロジー特性を広範囲に制御できることを示している。

2. ナノ構造のレーザーテクスチャリングとトライボロジー特性の制御

2.1 ナノ構造のレーザーテクスチャリングシステム

トライボロジー特性の制御を目的とした表面設計技術を開発するために、硬質薄膜としては近年トライボロジー分野への応用展開が著しいDLC薄膜を加工対象とした。基板としては鏡面研磨された純チタン板(JIS2種、厚さ2 mm)とステンレス鋼(SUS304、厚さ1 mm)を用いた。DLC薄膜は、非平衡マグネトロンスパッタリング装置((株)神戸製鋼所製)をバイアス電位150 Vで稼働し、カーボンのターゲットを用いて、Arと5% CH_4 の混合ガス中で被覆した。実験には膜厚1.4 μm 、硬度HV3000、表面粗さ9 nmのDLC薄膜を用いた。

ナノ構造をトライボロジー特性の最適化等に応用するためには、ナノ構造を均一に大面積に形成する技術を開発することが必要になる。著者らは、ナノ構造をパターン化してある程度の面積にテクスチャリング加工ができるフェムト秒レーザーシステムを開発し、その加工条件を検討した¹⁸⁾。DLCを被覆した基板を精密3軸ステージ

にセットし、フェムト秒レーザーを大気中で試料面に直角に照射した。用いたレーザーパルスは、波長800 nm、パルス幅100 fs、繰り返し周波数1 kHzで、直線偏光している。焦点距離500 mmの凹面反射鏡(放物鏡)にて集光し、110 μJ のレーザー出力で照射実験を行った。110 μJ のレーザーフルーエンスは0.14 J/cm^2 に対応しており、文献(9)に記されたDLC薄膜のアブレーションしきい値0.11 J/cm^2 近傍のフルーエンスである。DLC薄膜をセットしたステージを一定速度でスキャンさせ、同一場所の打ち込みパルス数が約150パルスとなるように調整した。1回の直線状スキャンでアブレーション加工された線幅 D は約240 μm であった。

照射方法としては、Fig. 1に示すように、(a)直線状の走査線を距離 L だけ平行にずらしながら行う平面状照射と、(b)走査線を一定間隔 H だけ空けながら直交させて行う網目状照射の二種類を行った¹⁸⁾。(a)タイプの照射は均一にナノ構造が加工された平面を得るために、(b)タイプはレーザーテクスチャリング的手法によりナノ構造が加工された領域を周期的に形成させるために行った。なお、 $L = D/2 = 120 \mu\text{m}$ 、 $H = 2D = 480 \mu\text{m}$ とし、照射面積は最大で15 mm $\times$ 15 mmとした。

また、ナノ構造が形成されたDLC薄膜表面に二硫化モリブデン MoS_2 をスパッタリングにより0.5~1 μm 蒸着し、低硬度の潤滑膜が被覆された場合のトライボロジー特性も評価した。

レーザー照射面のナノ構造の形態は電界放射型走査電子顕微鏡(FE-SEM)を用いて高分解能で観察し、照射部の表面粗さおよび加工痕深さは走査型プローブ顕微鏡(SPM)を用いて計測した。DLC薄膜表面は極微ラマン分光分析装置(スポット径1 μm)を用いて状態分析を行い、レーザー照射による改質状況を調べた。

2.2 平面状・網目状にテクスチャリングされたナノ構造と表面改質

Fig. 2 (a)は平面状照射($L = 120 \mu\text{m}$)、(b)は網目状照射($H = 480 \mu\text{m}$)で加工されたDLC薄膜表面のSEM写真を示す¹⁸⁾。レーザーの走査により形成される試料表面のう

Fig. 1 Schematic diagram of the laser scan for (a) the uniformly nanostructured surface and (b) the net-like patterning of the nanostructured area.

Fig. 2 SEM images of the DLC surfaces irradiated with fs pulses of (a) the parallel scan and (b) the crossed scan along a net-like pattern, and (c) the image of nanostructured surface. The image magnifications are 30 for (a) and (b), and 20,000 for (c). The arrow indicates the polarization direction of fs laser pulses.

ねりをSPMにより測定したところ10 nm以下と小さく、走査線の影響はほとんどないことが判明した。Fig. 2 (c)はレーザー照射面における2万倍のSEM像であり、レーザーを照射した全面において、レーザーの偏光方向に直交した向きに配向したナノ構造が形成されているのが確認された¹⁸⁾。周期的に形成されているナノ構造の平均間隔は約120 nmであり、以前の著者らの報告と同様に、使用されているレーザー波長よりはるかに小さい。

また、DLCの場合、ナノ構造が形成されるレーザーの照射条件で、照射面がGCに改質されることが見出されている^{9,12)}。今回平面状に形成されたナノ構造形成面をラマン分光で詳細に分析した。その結果、レーザー照射面の全面からFig. 3 (a)に示すラマンスペクトルが得られ、(b)の未照射部DLCからのラマンスペクトルと比較して、照射面がほぼ均一にGCに改質されていることが明らかとなった^{18,21)}。

2.3 ナノ構造形成面のトライボロジー特性(実荷重域)

2.3.1 平面状にテクスチャリングされたナノ構造の特性

実荷重域におけるナノ構造が形成されたDLC薄膜のトライボロジー特性を調べるために、大気中でボール・オ

Fig. 3 Raman spectra of (a) the nanostructured DLC film and (b) the non-irradiated film.

ン・ディスク型摩擦摩耗試験機を用いて、摩擦係数の変化を回転数 $R = 10^4$ 回までモニタリングした。試料ボールは6 mmの超硬ボール(WC-Co, HV1600)と軸受鋼SUJ2ボール(HV600)を用い、摩擦速度は30 mm/sと一定で、回転半径は3~5 mm、荷重は2~10 Nを用いた。

Fig. 1 (a)に示す平面状照射により、ナノ構造を平面状にテクスチャリングされたDLC薄膜に対し摩擦係数を測定した。Fig. 4に、荷重 $W = 10$ Nで測定した結果を未照射のDLC薄膜と比較して示す¹⁸⁾。ここで(a)は軸受鋼ボールに対し $R = 2,000$ 回転後、(b)は超硬ボールに対し $R = 10^4$ 回転後の摩擦係数である。ナノ構造が形成されたDLC薄膜表面の摩擦係数は、軸受鋼では未照射材の約8割となり、レーザー照射により摩擦係数が低減する傾向を示した。これは照射によってDLC表面に軟質な改質層が形成されたことにより、凝着性の高い軸受鋼に対して良好な摩擦摩耗条件が得られたためと考えられる。一方、超硬ボールに対しての摩擦係数は約0.08となり、軸受鋼ボールより値が小さく未照射材と比較してほとんど変化しないことが判明した。これは超硬ボールの高硬度と低凝着性の特性のためと考えられる。

次に、DLC薄膜のナノ構造形成面に潤滑性に優れた低

Fig. 4 Friction coefficients of the nanostructured DLC film (shaded bar) and the non-irradiated DLC (white bar) measured under the load $W = 10$ N with (a) the steel ball at $R = 2,000$ and (b) the WC-Co ball at $R = 10^4$.

Fig. 5 Friction coefficients of the nanostructured DLC with MoS₂ coating (black bar), the non-irradiated DLC with MoS₂ coating (hatched bar), and the non-irradiated DLC (white bar). Each group represents the results measured with (a) the steel ball at $W = 2$ N and $R = 10^4$, (b) the WC-Co ball at $W = 10$ N and $R = 4,000$, and (c) the WC-Co at $W = 10$ N and $R = 10^4$.

硬度MoS₂薄膜を被覆し、トライボロジー特性を調べた。Fig. 5は、ナノ構造形成後MoS₂を被覆したDLC薄膜、MoS₂を被覆した未照射のDLC薄膜、DLC薄膜のみの3種類の摩擦係数を比較している¹⁸⁾。(a)は軸受鋼ボール(荷重2 N)に対し $R = 10^4$ 回転後の結果、(b)は超硬ボール(荷重10 N)に対し $R = 4,000$ 回転後の結果、(c)は $R = 10^4$ 回転後の結果をそれぞれ示している。これらの結果は、DLC薄膜の摩擦特性に与えるMoS₂層の優れた効果を明確に示している。例えば(a)の軸受鋼ボールの場合では、ナノ構造形成面へのMoS₂被覆により、摩擦係数は未照射材の約2/5に低減している。一方、未照射材へのMoS₂被覆では、摩擦係数は約3/4の低減となっている。MoS₂被覆による摩擦係数の大幅な低減効果は、(b)ならびに(c)でも確認できる。未照射材の約1/4という最も顕著な低下は(b)の超硬ボール4,000回転で観測され、摩擦係数は0.02という最小値を示した。ナノ構造形成後MoS₂被覆により摩擦係数が大幅に低減するのは、表面のナノ構造が移動しやすいMoS₂層を蓄える油溜めの効果を示すこと、低硬度のGCに改質された表面層がMoS₂の保持効果を向上させることが原因と考えられる。

ナノ構造をDLC薄膜表面に均一に形成後MoS₂を被覆することにより、指定領域の摩擦係数を大幅に低下させる表面設計技術として応用できる。

2.3.2 網目状にテクスチャリングされたナノ構造の特性

Fig. 1 (b)に示す網目状照射により、ナノ構造を網目状にテクスチャリングされたDLC薄膜に対し、平面状照射の場合と同様な試験法で摩擦係数を測定した。Fig. 6は、10 Nの荷重で、(a)軸受鋼と(b)超硬ボールにより測定された結果を未照射材と比較して示す¹⁸⁾。網目状照射の場合、両ボールとも摩擦係数および振動が大きく、軸受鋼ボールに対しては $R = 187$ 回転、超硬ボールに対しては $R = 52$ 回転で測定を中止した。Fig. 6のように、超硬ボールに対しては摩擦係数が未処理材の0.08から0.45

Fig. 6 Friction coefficients of the DLC film partially nanostructured with the net-like pattern (shaded bar) and of the non-irradiated DLC (white bar), measured at $W = 10$ N with (a) the steel ball and (b) the WC-Co ball. In (a) and (b), the revolutions $R = 187$ and $R = 52$ were used, respectively, for the partially nanostructured DLC, and $R = 10^4$ for the non-irradiated DLC.

に顕著に増加した。この摩擦係数の急激な増加は、以下に記すように、ナノ構造形成領域のパターン加工により試料表面の硬度が空間的に変動することが影響するためと考えられる。すなわち、この照射条件ではフルエンスがアブレーションしきい値近傍と小さいため、表面粗さはほとんど影響を受けない。実際、SPMで測定された照射部の表面のうねりの大きさは10 nmのオーダーであり、摩擦試験の結果には影響を与えないと判断される。一方、ナノ構造が形成されるレーザー照射の条件で、DLCからGCに構造が変化することにより薄膜表面の照射部の硬度が低下する。網目状照射によりパターン化されたナノ構造形成領域は240 μm の周期で表面硬度の空間的変動を生じるため、DLC薄膜の摩擦係数が増加すると考えられる。

網目状照射の線幅 D と線間隔 H を変化させて摩擦係数の増加量を調整することにより、DLC薄膜表面の起伏をほとんど変化させずに、指定領域の摩擦係数を増加させる表面設計技術として応用できる。

2.4 ナノ構造形成面のマイクロトライボロジー特性(微小荷重域)

DLC薄膜に対するナノ構造形成面の微小荷重域のマイクロトライボロジー特性としては、(A)1,000 μN および(B)0.1 μN 付近の荷重での摩擦特性を調べた。

(A)1,000 μN の荷重域は、SPMに付属されたTriboscope (Hysitron社)によるナノスクラッチ試験を用いて評価した¹⁹⁾。先端半径1 μm のダイヤモンドチップにより、摩擦係数の変化を10 μm のスクラッチ長さに対し計測した。

直線偏光のレーザーの照射面には、Fig. 2 (c)に示すように、偏光方向と直交して細長い粒状のナノ構造が形成されている。レーザーの偏光方向に直交した方向でナノ構造形成面の摩擦係数を1,000 μN の荷重で測定したところ、約0.25の値を示した。なお、レーザー偏光に平行な方向で求めた摩擦係数は、約20 %増加していた。また、未照射のDLC薄膜は約0.1の摩擦係数を示した。未照射材より摩擦係数が増加する理由は、ナノ構造の凹凸による抵抗力の増加とGC改質による表面硬度の低下が

影響していると考えられる。実際、測定用チップの押し込み深さは、未照射材の約30 nmから照射材は約120 nmに増加しており、その分チップにかかる摩擦力が増加している。

この荷重域ではナノ構造形成部のみの摩擦係数を増加させることができるため、局部的に摩擦係数を増加させる技術としての利用が考えられる。また、レーザー照射部はGCに改質され導電特性が向上するため、絶縁性のDLC内に局部的に導電性を有し、摩擦係数の増加したパスやスポットを加工する目的に応用できる。

(B)0.1 μN の荷重域は、環境制御可能なチャンバー内に設置した原子間力顕微鏡(AFM)を用いた摩擦試験の結果を報告する²⁰⁾。垂直荷重を20~130 nNと変化させ、測定範囲1 $\mu\text{m} \times 1 \mu\text{m}$ 、すべり速度2 $\mu\text{m/s}$ として、コンタクトモード(垂直荷重一定)で測定した。ナノ構造を付与した表面を測定するためのプローブには、市販のカンチレバーにガラス球(JIS試験用粉体2(GBM20)、直径22 μm)を接着したガラス球探針を用いている。

DLC薄膜のナノ構造形成面の摩擦力(水平力)を測定し未照射材と比較すると、摩擦力が約1/3と大幅に低減することが判明した。また、引き離し力も未照射材と比較して約1/4と大幅に低減していた。超微小荷重域では、微小な表面粗さが凝着力を大きく減少させ、摩擦係数を小さくすることが指摘されている^{22,23)}。ナノ構造形成面では表面に形成される周期的微細構造により接触面積が小さくなり、摩擦力や引き離し力が低下したと判断される。

3. おわりに

フェムト秒レーザーパルスを硬質薄膜に照射して、表面に形成されるナノ構造のサイズ・形状を制御する加工技術^{8-12,18)}は、かなり確立されたものになってきている。また、最近の研究によって、ナノ周期構造生成過程の詳細も明らかにされつつある^{16,17)}。

本稿では、フェムト秒レーザーによる硬質薄膜表面へのナノ構造形成技術とトライボロジー特性制御法への応用について、DLC薄膜を中心に紹介した。自動車産業等の実荷重域では、平面状のレーザーテクスチャリングによりナノ構造を均一に加工後 MoS_2 を被覆することにより、指定領域の摩擦係数を大幅に低下できることを示した。一方、ナノ構造の網目状のテクスチャリングは、表面の起伏をほとんど変化させずに指定領域の摩擦係数を大幅に増加させた。このようにナノ構造のテクスチャリングにより、摩擦係数を非常に微小な値から大きな値まで制御した表面を設計することが可能である。

また、微小荷重域では、1,000 μN および0.1 μN 付近の荷重での摩擦特性を紹介した。前者ではナノ構造形成部の摩擦係数が増加する方向に変化するため、絶縁性のDLC内に局部的に導電性を有し、摩擦係数の増加したパスやスポットを加工する技術への応用を示した。また後者の超微小荷重では、表面のナノ構造により接触面積が小さくなり、摩擦力や引き離し力が大幅に低減する現象が生じる。

以上のように、フェムト秒レーザーの特徴を生かした硬質薄膜表面へのナノ構造加工技術は、幅広い荷重領域に対応した次世代表面設計技術に発展することが期待される。

参考文献

- 1) See, for example, C. Donnet and A. Erdemir: *Tribology of Diamond-Like Carbon Films* (Springer, New York, 2008).
- 2) J. Bonse, M. Geuß, S. Baudach, H. Sturm, and W. Kautek: *Appl. Phys. A* **69** (1999) S399.
- 3) J. Bonse, H. Sturm, D. Schmidt, and W. Kautek: *Appl. Phys. A* **71** (2000) 657.
- 4) G. Dumitru, V. Romano, H.P. Weber, S. Pimenov, T. Kononenko, J. Hermann, S. Bruneau, Y. Gerbig, and M. Shupegin: *Diamond Rel. Mater.* **12** (2003) 1034.
- 5) G. Dumitru, V. Romano, Y. Gerbig, H. P. Weber, and H. Haefke: *Appl. Phys. A* **80** (2005) 283.
- 6) A. Erdemir: *Tribol. Int.* **38** (2005) 249.
- 7) I. Etsion: *Trans. ASME J. Tribol.* **127** (2005) 248.
- 8) N. Yasumaru, K. Miyazaki, and J. Kiuchi: *Appl. Phys. A* **76** (2003) 983.
- 9) N. Yasumaru, K. Miyazaki, and J. Kiuchi: *Appl. Phys. A* **79** (2004) 425.
- 10) K. Miyazaki, N. Maekawa, W. Kobayashi, M. Kaku, N. Yasumaru, and J. Kiuchi: *Appl. Phys. A* **80** (2005) 17.
- 11) N. Yasumaru, K. Miyazaki, and J. Kiuchi: *Appl. Phys. A* **81** (2005) 933.
- 12) 安丸 尚樹, 宮崎 健創, 木内 淳介: *レーザー研究* **33** (2005), 519.
- 13) See, for example, D. Bäuerle: *Laser Processing and Chemistry* (Springer, Berlin, 1996) Chap. 28.
- 14) J. Reif, F. Costache, M. Henyk, and S. V. Pandelov: *Appl. Surf. Sci.* **197-198** (2002) 891, and references therein.
- 15) A. Dekanski, J. Stevanovic, R. Stevanovic, B. Z. Nikolic, and V. M. Jovanovic: *Carbon*, **39** (2001) 1195, and references therein.
- 16) G. Miyaji and K. Miyazaki: *Appl. Phys. Lett.* **89** (2006) 191902; **91** (2007) 123102.
- 17) G. Miyaji and K. Miyazaki: *Opt. Express* **16** (2008) 16265.
- 18) N. Yasumaru, K. Miyazaki, and J. Kiuchi: *Appl. Surf. Sci.* **254** (2008) 2364.
- 19) N. Yasumaru, K. Miyazaki, J. Kiuchi, and K. Komai: *Proc. 8th Int. Symp. on Laser Precision Microfabrication (LPM2007)*, Vienna, April, #07-18: P-73 (2007).
- 20) A. Mizuno, T. Honda, J. Kiuchi, Y. Iwai, N. Yasumaru, and K. Miyazaki: *Tribology Online* **1** (2006) 44.
- 21) M. Yoshikawa, N. Nagai, M. Matsuki, H. Fukuda, G. Katagiri, H. Ishida, A. Ishitani, and I. Nagai: *Phys. Rev. B* **46** (1992) 7169.
- 22) 安藤 泰久, 田中 敏幸, 伊能 二郎, 角田 和雄: *日本機械学会論文集(C編)* **65** (1999) 3784.
- 23) 安藤 泰久: *精密工学会誌* **67** (2001) 1916.

レーザワード

ガラス状炭素(glassy carbon: GC)

ガラス状炭素は黒いガラスのような外観をしており、破面がガラスに類似していることから命名された。グラファイトの一種であり、結晶子サイズが約3 nmと非常に小さい硬質炭素材である。バルク材は熱硬化性樹脂を高温で処理(炭素化)することによって得られ、耐摩耗性・耐食性・耐久性・低反応性に優れ、不純物がでにく

い高精度な電極材や半導体関連部品等に製品化され、燃料電池、ハードディスク用基板、ロケット等への応用が検討されている。摩擦摩耗特性ではDLC(ダイヤモンド状炭素)薄膜が注目されているが、GCはDLCにない耐熱性・耐酸化性や導電性にも優れた硬質炭素材として期待されている。
(安丸 尚樹)

トライボロジー(tribology)

トライボロジーとはギリシャ語のtribos(摩擦)を語源とした造語で、固体の摩擦・摩耗・潤滑を扱う工学分野を指し、相對運動を行いながら相互作用を及ぼし合う表面、ならびにこれに関連した諸問題と応用に関する科学技術と定義されている。トライボロジーが扱うものは、自動車など一般工業製品から微小荷重域のマикроマシン

ンや人工関節等のバイオ製品など幅広い分野・領域にわたっている。この特性に優れた材料はトライボマテリアルと呼ばれており、高硬度で表面平滑性、摺動特性、化学的安定性等に優れたDLC(ダイヤモンド状炭素)薄膜が、非常に期待される材料として応用展開が急速に進んでいる。
(安丸 尚樹)