

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2008～2010

課題番号：20360073

研究課題名(和文) 酸素プラズマ照射によるSi-DLC膜の超低摩擦化および油中における摩擦機構の解明に関する研究

研究課題名(英文) Low Friction Properties of Si-Incorporated DLC Coatings Treated with Oxygen Plasma

研究代表者

崔 ジュン豪 (CHOI JUNHO)

東京大学・大学院工学系研究科・准教授

研究者番号：30392632

研究成果の概要(和文)：本研究ではSi-DLC膜の表面に酸素プラズマ処理を施すことで超低摩擦および高硬度を兼ね備えた膜を開発し、その摩擦摩耗機構の検討を行った。シリコン含有量の増加とともにSi-DLC膜の摩擦係数と硬さはともに減少する。酸素プラズマ処理によりSi-DLC膜の膜全体の硬度は維持したまま、摩擦係数は0.02まで低減できる。酸素プラズマ処理により、シリコン酸化物、カーボンで構成される移着膜を増やすことができ、これにより低摩擦化が実現できる。グラファイト化が進んだカーボンの移着は、Si-DLC膜の低摩擦の一つの原因である。以上の結果から酸素プラズマ処理は、Si-DLC膜の低摩擦化、シリコン添加による硬度減少の防止に有効であると考えられる。

研究成果の概要(英文)：In this study, the effects of silicon oxide layer on frictional properties of Si-DLC coatings were investigated by controlling the amount of silicon oxide on Si-DLC coatings. The amount of silicon oxide on the Si-DLC coating was controlled by oxygen plasma treatment for 30-300 s. In a result, the amount of silicon oxide on the top surface of Si-DLC coating increases with the increasing treatment time of oxygen plasma. The friction coefficients of Si-DLC coatings with 3-7at.%Si decrease to 0.02 due to oxygen plasma treatment, which is the lower value than that of Si-DLC coating with 13at.%Si. The surface hardness of Si-DLC coatings is slightly reduced by oxygen plasma treatment due to formation of silicon oxide on the top surface, whereas the hardness of wear track exhibits the same value to Si-DLC coating before oxygen plasma treatment. The Si-rich oxide layer formed on the Si-DLC coating plays roll of scarifying layer to reduce friction coefficient. The oxygen plasma treatment is effective to reduce the friction coefficient without hardness reduction in the entire Si-DLC coating.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	4,400,000	1,320,000	5,720,000
2009年度	6,700,000	2,010,000	8,710,000
2010年度	3,100,000	930,000	4,030,000
年度			
年度			
総計	14,200,000	4,263,000	18,460,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学・設計工学・機械機能要素・トライボロジー

キーワード：トライボロジー、固体薄膜、潤滑、摩擦、表面・界面物性

1. 研究開始当初の背景

材料表面に種々の薄膜を形成することで、基

材が本来もつ機械的特性や物理的特性を向上させる表面処理の技術が様々な分野で実

用化されている。中でも、ダイヤモンドライクカーボン (Diamond-Like Carbon, DLC) 膜は、高硬度で機械的特性に優れており、かつ電気・光学特性の制御性、化学的安定性にも優れているため注目を集めている。DLC 膜は成膜方法や条件によってその構造や性質は変わり、また膜中に窒素、シリコン、フッ素など異元素を添加することで、その特性を変化させることが可能である。中でもシリコンを添加した DLC 膜 (以下、Si-DLC 膜) は非常に低い摩擦係数・高い熱安定性を示すことで知られており、アルミニウム、マグネシウム押出用の金型、車のエンジンのしゅう動部品など様々な産業への応用が期待される。Si-DLC 膜の摩擦係数は膜中のシリコン含有量の増加と共に減少するが、同時にシリコン・水素含有量の増加に伴う膜のポリマー化・膜内部における空洞の形成に起因する密度の低下により硬度は減少する。一般的に、しゅう動の際、摩耗率は硬さに反比例するので、膜が軟化することは膜の摩耗寿命の短縮を意味する。

2. 研究の目的

本研究は、超低摩擦特性を有する Si-DLC 膜の開発と共に、シリコン含有量の増加による膜の硬度の低下を防ぐ方法を提案し、超低摩擦と高硬度を両立する膜を開発することを目的とする。Si-DLC 膜の低摩擦特性は摩擦試験中に生成されるシリコン酸化物の摩耗粉に深く関係があることが知られている。このことから、低摩擦、高硬度を併せもつ膜の開発は、膜表面に形成される酸化層の制御が重要である。本研究では膜表面のシリコン酸化層の厚さをナノメートルオーダーで制御するために酸素プラズマ処理を用いた。シリコン含有量の少ない Si-DLC 膜の極表面にのみ酸化層を形成することにより、膜の硬度は保ちながらも、シリコン含有量が多い膜と同等、もしくはそれ以下の超低摩擦性をもつ膜の開発が期待できる。

3. 研究の方法

(1) Si-DLC 膜の作成および酸素プラズマ処理: Si-DLC 膜は、イオン化蒸着法によって、成膜圧力 0.4 Pa, フィラメント電流 30 A, アノード電流 0.5 A, リフレクタ電圧 10 V, バイアス電圧 -1.5 kV, バイアス電圧の周波数 1.0 kHz, デューティ比 25% の条件で作成した。原料ガスにはトルエン (C_7H_8) とテトラメチルシラン ($Si(CH_3)_4$) の混合ガスを用い、その流量比を変えることで膜中のシリコン含有量を制御した。基板は (100) 面の単結晶シリコン板を使用し、基板の前処理として、バイアス電圧 -2.0 kV で 20 分間の Ar^+ イオンボンバードメントを施した。酸素プラズマ処理は Si-DLC 膜を作成した後、同じ装

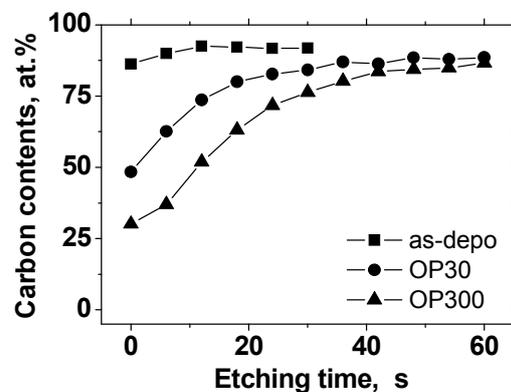
置を用いて試料を大気にさらすことなく、ガス圧力 0.8 Pa, 基板バイアス電圧 -2.0 kV の条件で、30 秒および 300 秒間行った。また比較のためにシリコンを含まない DLC 膜 (0%Si) も同装置を用いて作成した。

(2) 酸素プラズマ処理 Si-DLC 膜の評価: 酸素プラズマ処理前後の Si-DLC 膜の表面組成および深さ方向の組成分布は X 線光電子分光

(X-ray Photoelectron Spectroscopy, XPS) により分析した。また、ラマン分光分析により Si-DLC 膜と摩耗痕の構造解析を行った。膜表面の硬さは超微小硬さ計を用いて測定した。摩擦特性はボール・オン・フラット型の摩擦試験機を用いて、摩擦荷重 4.9 N, 往復角 30° , 回転半径 10 mm, 線速度 1.05 mm/s の条件で行った。Si-DLC 膜の摩擦係数は、相対湿度の変化により変動するため、本研究では湿度発生器を用いて摩擦時の相対湿度を 20% の一定の値に維持しながら摩擦係数の測定を行った。相手材としては直径 5 mm の鋼球 (SUJ2) を用いた。また摩擦試験により鋼球に付着した移着膜の組成分布、構造解析は X 線マイクロアナライザ (Electron Probe X-ray Microanalyzer, EPMA), 走査型電子顕微鏡 (Scanning Electron Microscope, SEM), ラマン分光分析により分析した。

4. 研究成果

(1) 図 1 に 7%Si サンプルの酸素プラズマ処理前後における深さ方向の酸素と炭素の組成分布を示す。酸素プラズマ処理によって、膜の表面での炭素含有量は減り、酸素含有量は増加している。また、酸素プラズマ処理時間が長くなるほど表面での酸素濃度は増加し、酸化層の厚さは厚くなる。XPS による深さ分析の際、 Ar^+ イオンによるエッチング速度は SiO_2 を基準として 0.2 nm/s であり、酸素含有量が 1 分間の Ar^+ イオンエッチングによりほとんどなくなることから酸化層の膜厚は数 nm オーダーであると考えられる。すなわち、酸素プラズマ処理によって Si-DLC 膜表面に厚さ数 nm のシリコン酸化層を形成することが



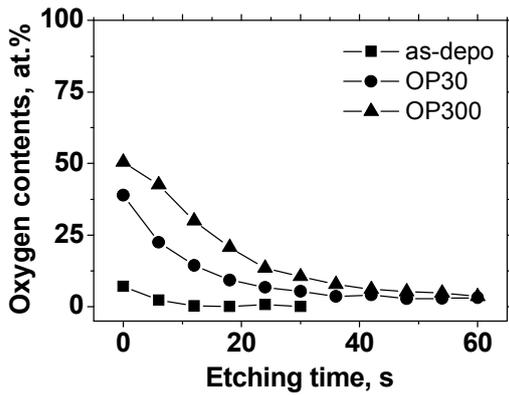


図1 酸素プラズマ処理後のSi-DLC膜におけるXPSによる深さ ∇ 分析結果. OP30: 30秒間酸素プラズマ処理, OP300: 300秒間酸素プラズマ処理.

できる. その薄さから, 形成された酸化層は膜全体の硬さに影響しないと考えられる.

(2) 図2と図3で示すように, シリコン含有量の増加とともにSi-DLC膜の摩擦係数と硬さはともに減少する. また, 酸素プラズマを施すことによって, Si-DLC膜の摩擦係数は低減できた. なお, 酸素プラズマ処理時間が300秒に長くなると摩擦係数は若干大きくなる.

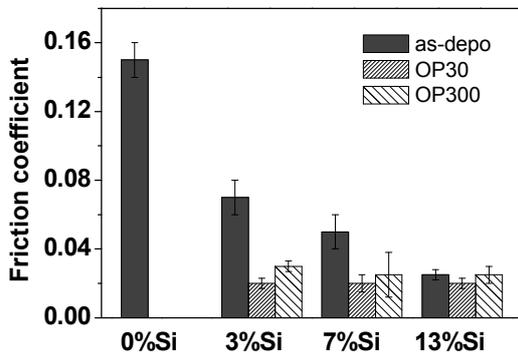


図2 シリコン含有量, 酸素プラズマ処理時間と摩擦係数との関係.

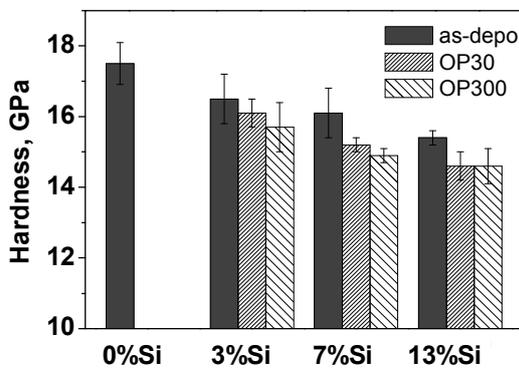


図3 シリコン含有量, 酸素プラズマ処理時間と硬さとの関係.

(3) 図4に300秒間の酸素プラズマ処理をする前と後のSi-DLC膜の表面硬度および酸素プラズマ処理を施したSi-DLC膜を摩擦試験した後に膜の表面に形成される摩擦痕(摩耗トラック)の表面硬度を示す. 図3で示したように, Si-DLC膜の表面硬度は酸素プラズマ処理による極表面に生成される厚さ数nmの酸化層の影響で減少するが, 摩擦痕の表面では酸素プラズマ処理前のSi-DLC膜の硬さと同程度に回復している. すなわち, 摩擦によりSi-DLC膜の表面に形成される酸化層は, 摩擦の低減に有効に働き, またSi-DLC膜の硬さは本来の硬さを維持していることがわかる. 酸素プラズマ処理により形成された極表面のシリコン酸化層は低摩擦化のための犠牲層として有効に働いていると考えられる. すなわち, 酸素プラズマ処理によりSi-DLC膜の膜全体の硬度は維持したまま, 摩擦係数は図2で示したように0.02まで低減できた.

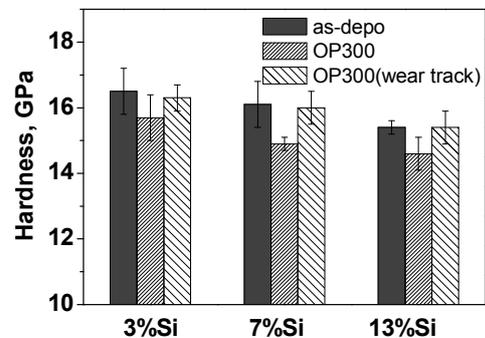


図4 OP300サンプルにおける摩擦試験前後の硬さの変化

(4) 酸素プラズマ処理により, シリコン酸化物, カーボンで構成される移着膜を増やすことができ, これにより低摩擦化が実現できる. 図5と図6に7%Si含有DLC膜と30秒間酸素プラズマ処理を施した7%Si含有DLC膜に対して摩擦試験を行った後, 鋼球側への移着膜の元素分布をEPMAにより測定した結果を示す. シリコンを添加することでSi-DLC膜の表面からシリコン酸化物の移着が起きている. また, 固体潤滑作用が期待されるカーボンが移着膜の全領域に広く分布していることがわかる. 酸素プラズマ処理を行ったSi-DLC膜(図6)の場合, 酸素プラズマ処理を施していないSi-DLC膜(図5)に比べて, 移着膜におけるシリコン酸化物が広く存在し, カーボンの移着量も増えていることが観察される. 過去のSi-DLC膜の低摩擦特性に関する報告では, Si-DLC膜の低摩擦特性はシリコン酸化物の生成およびその移着に起因すると考えられたが, 本研究の結果からシリコン酸化物の生成・移着とともにカーボン移着物の増加がSi-DLC膜の低摩擦に寄与する

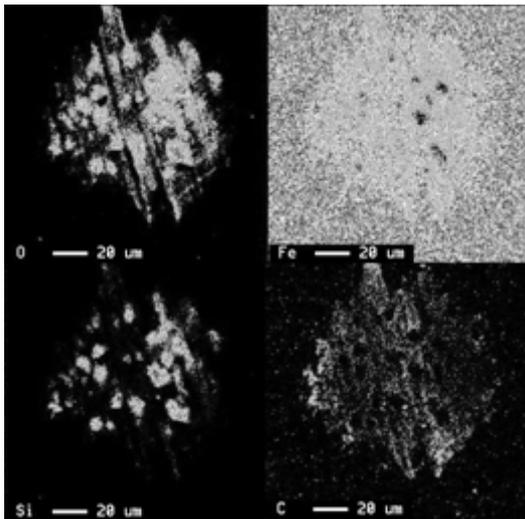


図5 7%Si含有DLC膜に対して摩擦試験を行った鋼球表面のEPMA分析(酸素, 鉄, シリコン, 炭素)結果

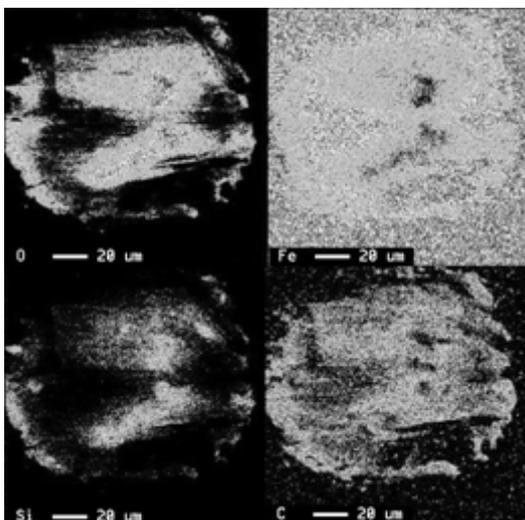


図6 30秒間酸素プラズマ処理を施した7%Si含有DLC膜に対して摩擦試験を行った鋼球表面のEPMA分析(酸素, 鉄, シリコン, 炭素)結果

と考えられる。シリコン酸化物の増加に伴うカーボン移着物の増加に関するメカニズムはまだはっきり分かっていないが、シリコン酸化物がカーボン移着物を鋼球表面に固着させる一種のバインダの役割を果たしていると考えられる。

(5) グラファイト化が進んだカーボンの移着は、Si-DLC膜の低摩擦の一つの原因である。図7に作成したSi-DLC膜と摩擦試験後に鋼球側の移着したカーボン膜のラマン分光分析より得られたGピークの位置の変化を示す。Si-DLC膜のGピークの位置はシリコンの含有量が高いほど低波数側にシフトしているが、摩擦移着膜のGピークの位置は逆転する。

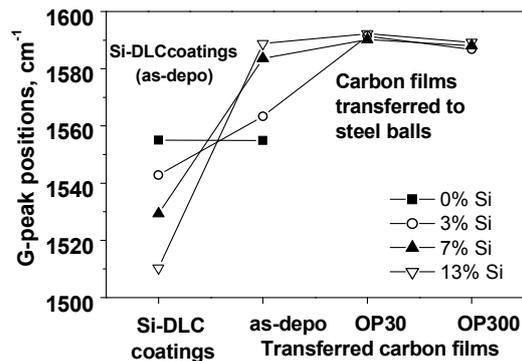


図7 Si含有DLC膜および鋼球に生成される移着膜のラマンG-ピーク位置の測定結果

摩擦試験の結果と比較すると摩擦係数が低い試料ほどGピークの位置は高波数側にシフトしていることがわかる。これよりグラファイト化が進んだカーボンの移着が、Si-DLC膜の低摩擦の一つの原因であると考えられる。DLC膜の摩擦摩耗の過程では、摩擦の際に生じるせん断応力により引張りと圧縮が繰り返され、準安定な sp^3 結合が緩和され sp^2 結合に遷移する。C-Siの結合エネルギーは、C-Cの結合エネルギーより低いため、シリコン含有量が多いSi-DLC膜の場合、摩擦による sp^2 結合への遷移がより起こりやすくなり、グラファイト構造に近い摩耗粉の発生および移着が多くなると考えられる。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計19件), すべて査読有り

- 1) J Choi, K Soejima, T Kato, M Kawaguchi, W Lee, "Nitriding of high speed steel by bipolar PBII for improvement in adhesion strength of DLC films" Nuclear Instruments & Methods in Physics Research B, in press.
- 2) J Choi, K Ishii, T Kato, M Kawaguchi, W Lee "Structural and mechanical properties of DLC films prepared by bipolar PBII&D" Diamond and Related Materials, Vol. 20, 2011, pp. 845-848.
- 3) T Kumagai, S Sawai, J Choi, S Izumi, T Kato, "Nanostructural interpretation for elastic softening of amorphous carbon induced by the incorporation of silicon and hydrogen atoms" Journal of Applied Physics, Vol.107, 2010, pp. 124315-1-124315-7.
- 4) 崔竣豪, 桜井健一, 加藤孝久, 川口雅弘, "シリコン含有DLC膜上の自己組織化単分子膜形成および摩擦特性" トライボロジスト, Vol.55, No.8, 2010, pp.44-50.
- 5) T Kumagai, J Choi, S Izumi, T Kato, "Structures and phonon properties of nanoscale fractional graphitic structures in amorphous carbon determined by

molecular simulations” Journal of Applied Physics, Vol.107, 2010, pp. 104307-1-104307-6.

6) J Choi, K Sakurai, T Kato, “Observation of self-assembled monolayers on diamond-like carbon films: agglomeration of self-assembled FDTS molecules” Surface and Interface Analysis, Vol.42, 2010, pp.1373-1376.

7) S Nakao, T Sonoda, K Tsugawa, J Choi, T Kato, “Effects of nitrogen gas ratio on composition and microstructure of BCN films prepared by RF magnetron sputtering” Vacuum, Vol.84, 2010, pp.642-647.

8) 崔俊豪, 角田篤, 熊谷知久, 加藤孝久, 川口雅弘, “酸素プラズマ処理によるシリコン添加 DLC 膜の低摩擦化” トライボロジスト, Vol.54, No.11, 2009, pp.53-61.

9) M Ikeyama, J Choi, T Miyajima, “Evaluation of Elastic Properties of DLC Coating on SKD61 Steel by Optical Indentation Microscopy” Surface and Coatings Technology, Vol. 203, 2009, pp. 2571-2574.

10) T Kumagai, S. Hara, J Choi, S. Izumi, T. Kato, “Development of empirical bond-order-type interatomic potential for amorphous carbon structures” Journal of Applied Physics, Vol. 105, 2009, pp. 064310-1- 064310-10.

11) M Ikeyama, S Nakao, S Tsutomu, J Choi, “Improvement of corrosion protection property of Mg-alloy by DLC and Si-DLC coatings with PBII technique and multi-target DC-RF magnetron sputtering” Nuclear Instruments & Methods in Physics Research B, Vol. 267, 2009, pp. 1675-1679.

12) 崔俊豪, 石井啓資, 熊谷知久, 加藤孝久, 疋田康弘, “臨界せん断応力によるDLC膜の密着強度の評価” トライボロジスト, Vol.54, No.2, 2009, pp.138 -144.

13) S Nakao, J Choi, T Kato, “Effect of Substrate Bias Voltages on Hardness of BCN Films Prepared by RF Magnetron Sputtering” Transaction of the Materials Research Society of Japan, Vol. 33, 2008, pp. 1047-1051.

14) M Kawaguchi, S Aoki, A Mitsuo, J Choi, T Kato, “Effect of Heat Treatment Temperature on PFPE Molecules Bonded on DLC Surface” Tribology Online, Vol. 3, No. 5, 2008, pp. 259-263.

15) N Hayashi, J Choi, T Kumagai, T Kato, M Kawaguchi, S Nakao, M Ikeyama, “Thermal Stability of SiBCN Films” Tribology Online, Vol. 3, No. 5, 2008, pp.254-258.

16) M Kawaguchi, S Aoki, A Mitsuo, K Morikawa, S Uchida, J Choi, T Kato, “Estimation of DLC Wear Process by Micro Laser Raman Spectroscopy” Tribology Online, Vol. 3, No. 2, 2008, pp.110-115.

17) S Nakao, J Choi, T Kato, “Microstructure of Diamond-Like Carbon Films Prepared Using Acetylene and Toluene by Bipolar-Type Plasma Based Ion Implantation” Physica Status Solidi c, Vol. 5, No. 4, 2008, pp. 973-976.

18) J Choi, S Nakao, M Ikeyama, T Kato, “Effect of Oxygen Plasma Treatment on the Tribological Properties of Si-DLC Coatings” Physica Status Solidi c, Vol. 5, No. 4, 2008, pp. 956-959.

19) J Choi, S Nakao, M Ikeyama, T Kato, “Effect of Deposition Pressure on the Properties of DLC Coatings Deposited by Bipolar-Type PBII&D” Surface and Interface Analysis, Vol. 40, 2008, pp. 806-809.

[学会発表] (計 25 件)

1) 日比貴之, 崔俊豪, 加藤孝久, 川口雅弘, 稲吉成彦, “DLC 膜におけるラマンパラメータと機械的特性の相関評価” 日本トライボロジー学会トライボロジー会議予講集 (東京, 2011. 5. 24)

2) 崔俊豪, 副島広志, 加藤孝久, 川口雅弘, “バイポーラ PBII 法による SKH2 表面へのプラズマ窒化処理” 日本トライボロジー学会トライボロジー会議予講集 (福井, 2010. 9. 15)

3) 崔俊豪, 石井啓資, 熊谷知久, 加藤孝久, 稲吉成彦, 芹澤一史, “バイポーラ PBII 法により作成した DLC 膜の構造および機械的特性評価” 日本トライボロジー学会トライボロジー会議予講集 (東京, 2010. 5. 17) pp. 83-84.

4) 川口雅弘, 清水綾, 崔俊豪, 加藤孝久, “塩水中におけるDLC膜の保護特性 第二報 防食特性” 日本トライボロジー学会トライボロジー会議予講集 (東京, 2010. 5. 17) pp. 81-82.

5) 清水綾, 遊馬なつみ, 川口雅弘, 崔俊豪, 加藤孝久, “塩水中におけるDLC膜の保護特性 第1報: トライボロジー特性” 日本トライボロジー学会トライボロジー会議予講集 (東京, 2010. 5. 17) pp. 79-80.

6) 崔俊豪, 桜井健一, 加藤孝久, “シリコン含有 DLC 膜上の自己組織化単分子膜形成” 摩擦の科学 2009 (名古屋, 2009. 12. 3) pp. 14.

7) J Choi, K Sakurai, T Kato, “Observation of Self-Assembled Monolayers on Diamond-Like Carbon Films” 13th European Conference on Applications of Surface and

Interface Analysis (ECASIA), Antalya, Turkey (Oct. 22, 2009) pp.339.

8) 澤井周, 熊谷知久, 崔竣豪, 加藤孝久, “原子スケールシミュレーションによるシリコン添加ダイヤモンドライクカーボン膜の構造・特性評価” 日本機械学会第 21 回計算力学講演会 CD-ROM 論文集 (金沢, 2009. 10. 11) pp. 298-299.

9) 熊谷知久, 崔竣豪, 加藤孝久, “タイトバインディング法を用いた DLC 膜のフォノンモードの解析” 日本機械学会第 21 回計算力学講演会 CD-ROM 論文集 (金沢, 2009. 10. 11) pp. 296-297.

10) M Kawaguchi, A Shimizu, S Nakanishi, A Monkawa, J Choi, T Kato, “Formation of Carbon Mixing Layer on Silicon Surface by PBII&D” 16th International Conference on Surface Modification of Materials by Ion Beams, Tokyo, Japan (Sept. 15, 2009) pp. 116.

11) M Kawaguchi, S Aoki, A Mitsuo, J Choi, T Kato, “Structural Transformation of Diamond-Like Carbon Films under Various Sliding Conditions” World Tribology Congress 2009, Kyoto, Japan (Sept. 9, 2009) pp. 443.

12) J Choi, A Tsunoda, T Kumagai, T Kato, M Kawaguchi, “Development of Si-DLC Coatings with Ultra-Low Friction and High Hardness” World Tribology Congress 2009, Kyoto, Japan (Sept. 9, 2009) pp. 403.

13) T Kumagai, S Sawai, J Choi, T Kato, “Ab-Initio Investigations of the Atomic Structures of Si-DLC Films” World Tribology Congress 2009, Kyoto, Japan (Sept. 8, 2009) pp. 259.

14) M Kawaguchi, S Aoki, A Mitsuo, J Choi, T Kato, “Study of Change in Structure of a-C:H Films Using Laser Raman Spectroscopy” ECOTRIB 2009, Pisa, Italy (June 9, 2009) pp. 505-510.

15) J Choi, K Ishii, T Kumagai, T Kato, “Critical Shear Stress of DLC Films with Different Film Thickness” ECOTRIB 2009, Pisa, Italy (June 9, 2009) pp. 803-808.

16) 熊谷知久, 崔竣豪, 加藤孝久, “分子シミュレーションによるアモルファスカーボンのフォノンモード解析” 日本トライボロジー学会トライボロジー会議予講集 (東京, 2009. 5. 20) pp. 265-266.

17) 崔竣豪, 桜井健一, 加藤孝久, 川口雅弘, “ダイヤモンドライクカーボン膜上の自己組織化単分子膜形成及び熱安定性” 日本トライボロジー学会トライボロジー会議予講集 (東京, 2009. 5. 20) pp. 259-260.

18) 熊谷知久, 澤井周, 崔竣豪, 泉聡志, 加藤孝久, “原子シミュレーションによるアモ

ルファスカーボンにおけるクラスター構造の検討” 日本機械学会第 21 回計算力学講演会 CD-ROM 論文集 (沖縄, 2008. 11. 2) pp. 438-439.

19) 桜井健一, 崔竣豪, 加藤孝久, “ダイヤモンドライクカーボン膜上の自己組織化単分子膜形成および熱安定性” 日本トライボロジー学会トライボロジー会議予講集 (名古屋, 2008. 9. 16) pp. 403-404.

20) 熊谷知久, 澤井周, 蘭恵清, 崔竣豪, 加藤孝久, “原子シミュレーションを用いたシリコンを含むアモルファスカーボン構造の検討” 日本トライボロジー学会トライボロジー会議予講集 (名古屋, 2008. 9. 16) pp. 399-400.

21) 角田篤史, 崔竣豪, 川口雅弘, 熊谷知久, 加藤孝久, 中尾節男, 池山雅美, “Si-DLC 膜の摩擦特性に対する酸素プラズマ処理の影響” 日本トライボロジー学会トライボロジー会議予講集 (名古屋, 2008. 9. 16) pp. 181-182.

22) 川口雅弘, 青木才子, 三尾淳, 崔竣豪, 加藤孝久, “PBII&D 法により成膜した DLC 膜の摩擦熱の解析” 日本トライボロジー学会トライボロジー会議予講集 (名古屋, 2008. 9. 16) pp. 179-180.

23) 崔竣豪, 桜井健一, 加藤孝久, “DLC 膜上の自己組織化単分子膜形成と熱安定性評価” 摩擦の科学 2008 (刈谷, 2008. 9. 12) pp. 25.

24) A Tsunoda, J Choi, T Kato, S Nakao, M Ikeyama, “Low Friction Mechanism of Si-Incorporated Diamond-Like Carbon Coatings” 63rd STLE Annual Meeting, Cleveland, OH (May 19 2008) pp.1-6 (CD ROM).

25) 石井啓資, 崔竣豪, 疋田康弘, 熊谷知久, 加藤孝久, “DLC 薄膜の剥離荷重に及ぼす膜厚の影響” 日本トライボロジー学会トライボロジー会議予講集 (東京, 2008. 5. 14) pp. 123-124.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

崔 ジュン豪 (CHOI JUNHO)

東京大学・大学院工学系研究科・准教授
研究者番号：30392632

(2) 研究分担者

()

研究者番号：

(3) 連携研究者

中尾 節男 (NAKAO SETSUO)

独立行政法人産業技術総合研究所・サステナブルマテリアル研究部門・主任研究員

研究者番号：60357605