

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(A)

研究期間：2008～2010

課題番号：20246034

研究課題名(和文) 異元素分散による炭素系硬質膜の構造制御および吸着性制御

研究課題名(英文) Control of Structural and Adsorption Properties of Diamond-Like Carbon Films by Adding Various Elements

研究代表者

加藤 孝久(KATO TAKAHISA)

東京大学・大学院工学系研究科・教授

研究者番号：60152716

研究成果の概要(和文)：本研究ではDLC膜中にさまざまな元素を添加することで、DLC膜の構造・物性の制御を行った。また、構造制御により得られたDLC膜の機械的特性、物理的特性、吸着特性を明らかにした。DLC膜の作成は、プラズマCVD法、イオン化蒸着法、プラズマ利用イオン注入・成膜法などさまざまな手法と成膜因子を用いて行った。実験で作成したDLC膜の表面・バルク構造・機械的特性は、分子シミュレーションを用いて得られた結果と定性的によく一致することを示した。

研究成果の概要(英文)：In this study, structural properties of diamond-like carbon (DLC) films were controlled by adding various elements in DLC film, and mechanical, physical and adsorption properties of developed DLC films were investigated and clarified. Various techniques such as plasma CVD, ionization vapor deposition, plasma-based ion implantation and deposition technique were used for the film deposition. The surface and bulk properties and the mechanical properties obtained by molecular simulation show good agreement qualitatively with those obtained by experimental studies.

交付決定額

(金額単位：円)

| | 直接経費 | 間接経費 | 合計 |
|--------|------------|------------|------------|
| 2008年度 | 17,800,000 | 5,340,000 | 23,140,000 |
| 2009年度 | 16,300,000 | 4,890,000 | 21,190,000 |
| 2010年度 | 3,900,000 | 1,170,000 | 5,070,000 |
| 年度 | | | |
| 年度 | | | |
| 総計 | 37,000,000 | 12,400,000 | 49,400,000 |

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、表面・界面物性、DLC膜、吸着、分子シミュレーション、有機膜

1. 研究開始当初の背景

近年、カーボン系薄膜はその安定性、安全性、安価であることから多くの利用が期待されている。なかでもダイヤモンドライクカーボン(Diamond-like Carbon, DLC)は物理気相蒸着(PVD)や化学気相蒸着(CVD)などにより容易に作成できるため各種の機械要素、製品に応用することが考えられている。例えば、耐久性・低摩擦性を期待して自動車エンジンの

同弁系に、磁気ディスクの保護膜に、ガスバリア性を期待してPETボトルや水素燃料電池容器に、透光性を期待して自動車のウィンドウ(リア、フロント)に、また低表面エネルギー(離形性)を期待して金型内壁皮膜に実用化が考えられている。特にDLCの優れた摩擦摩耗特性が注目されており、1990年代より摩擦部コーティングとしての本格的研究が始まった。そして、剃刀の刃、ディーゼルエン

ジンのインジェクター、水道蛇口のカーンなど新しい材料を必要としているところで実用化が試みられるようになった。そして2000年には年間150を越える研究論文が公開されており、その数は今も増えている。現在における研究は、高密度・高強度・高耐久性のDLC膜をどのような方法で作成するかが焦点となっている。応募者は、DLC薄膜の吸着性改善に関してこれまで研究を行ってきた。そして、DLC薄膜成膜後に大気にさらすことなく単分子厚さの潤滑剤分子を吸着させることにより、摩擦耐久性が著しく向上することを明らかにしてきた。研究の過程で、炭素に加えて窒素、シリコン、ボロン、フッ素、水素、などの異種元素が吸着性に大きな影響を及ぼすことが明らかになってきた。たとえば、窒素を微添加させることにより潤滑剤の吸着量は増加するが、水素を添加するとかえって吸着量が低下する。あるいはシリコン元素を添加しても吸着性に影響を与えるが、これはシリコン(4配位)がDLCの構造に影響して sp^2 (3配位)と sp^3 (4配位)の割合を変えるためではないかと推定している。

2. 研究の目的

本研究では、異元素分散による炭素系硬質膜の構造制御、および吸着制御を目的としており、それぞれ、試作研究と分子シミュレーションとからなる。試作研究では異元素分散に対応できるよう現有の成膜装置を改良して成膜を行う。試作したサンプルは元素分析、構造分析、表面分析、機械特性分析、トライボロジー特性分析などを行って、総合的に評価する。一方、分子シミュレーションでは炭素のみからなるDLCの構造を正確に記述できるような分子動力学ポテンシャルに異元素分散の影響、および表面の影響を付加する方向で研究を実施する。そして、異種元素の内部構造(sp^2 および sp^3 の分布、空孔形成など)に与える影響、および異種元素のDLC表面の吸着特性(水分子・潤滑剤分子、汚染分子などの吸着)に与える影響を詳細に調べる。そして、試作研究と分子シミュレーションとは深く連携しあって、効率的な炭素系硬質膜開発を行うとともに、異種元素の本質的な働きを解明する。

3. 研究の方法

(1) 異種元素分散による構造制御：現有のイオン化蒸着装置に手を加え、異種元素(シリコン、ボロン、フッ素、窒素、水素およびそれらの組合せ)の導入に対応でき、かつ高電圧下でのイオン化、成膜が可能な装置に改良する。イオン化蒸着装置のバイアス電圧は最大-5kV程度であり、より高いエネルギーのイオンを基板表面に照射し、膜と基板との高い密着性およびイオン注入効果による異種元素

分散効果を得るために、パルス型の正・負の高電圧電源を導入する。最大電圧は20kVである。DLC成膜のパラメータとして、チャンバー真空度、異種元素導入量、イオン化電圧、バイアス電圧などを変化する。成膜したDLCサンプルは以下の方法で評価した。まず、XPS(X線光電子分光)、ラマン分光、ラザフォード後方散乱法によってDLCの構造(sp^2 , sp^3 の割合)および水素含有量を評価する。また、膜の表面エネルギーは、水(極性液体)および炭化水素液(無極性液体)を用いた接触角測定により評価する。さらにDLC膜の機械的特性はナノインデント(微小硬さ)、ピンオンディスク型摩擦試験機(マクロな摩擦評価)、原子間力顕微鏡(ミクロな摩擦評価)を用いて評価した。

(2) 構造制御のための分子シミュレータ開発：DLC膜の炭素原子は3配位(sp^2)もしくは4配位(sp^3)をとる。この研究では、分子動力学法を用いてDLC内部の構造を検討し、異種分子分散によって構造がどのように変化するか原子構造の視点から明らかにする。DLC膜中の sp^3 密度は炭素原子密度の増加に伴って増大することが実験からわかっている。これについては第一原理計算からは予測がなされているが、分子動力学計算ではこれまでシミュレーション不可能であった。新しいアイデア(炭素六員環間のねじれエネルギーを考慮する)を用いることよって、 sp^3 密度の炭素原子密度依存性を表しうるモデルを構築する。さらに、 sp^2 の密度と空孔体積との関係を明らかにする。これらを用いて、異種元素がDLC膜内部に分散した場合のDLC膜内部構造予測を行い、そしてDLC膜内部構造が強度、弾性係数など物理特性に及ぼす影響を明らかにする。

(3) 異種元素分散による吸着性制御：作成したDLCサンプルの吸着特性に関して実験を行う。現有の高機能真空蒸着装置を用いて試作サンプル表面をアルゴン粒子でスパッタ後に、有機分子を蒸着する。また、吸着性とサンプルの表面エネルギーとの関係を明らかにする。さらに、有機分子の吸着分子量は、表面エネルギー変化計測から、またXPS、FTIR(フーリエ変換赤外分光法)を用いて計測する。

4. 研究成果

(1) 水素添加DLC膜の構造解析：作成したDLC膜のGピーク位置に対する $m/I(G)$ とGピークの半値幅(FWHM(G))の変化を図1に示す。ここで m はラマンスペクトルの蛍光バックグラウンドの傾き、 $I(G)$ はGピークの強度である。 $m/I(G)$ が大きくなると、DLC膜中の水素濃度が高くなるといわれており、本研究でもRBS-HFSによる水素濃度定量分析から、それ

らの相関は確認した。図1からGピークの位置が低波数側にシフトすると同時に、 $m/I(G)$ は高くなり、さらにFWHM(G)は極大値を持つように変化しているのがわかる。これらの結果から、膜の非晶質化(ピークのブロード化)と水素濃度の上昇に伴いGピークは低波数側にシフトする。さらに水素濃度が上昇すると、膜のポリマー化が進むためFWHM(G)は小さくなり、ピークは鋭くなると考えられる。FWHM(G)が大きくなるほどつまり非晶質の割合が高いほど、DLC膜は硬くなることは知られていたが、図1でFWHM(G)が極大値をとる(1540cm^{-1})付近の前後で分別することで、図2のように2パターンの相関があることが新たにわかった。また、内部応力に対してもFWHM(G)に対して、同様の傾向を得た。

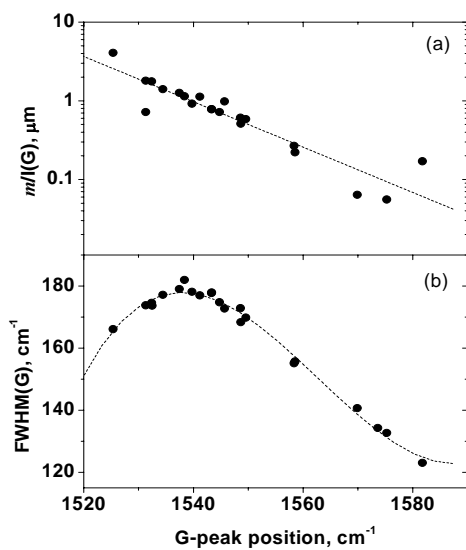


図1 ラマンGピーク位置に関する $m/I(G)$ および FWHM(G) の変化

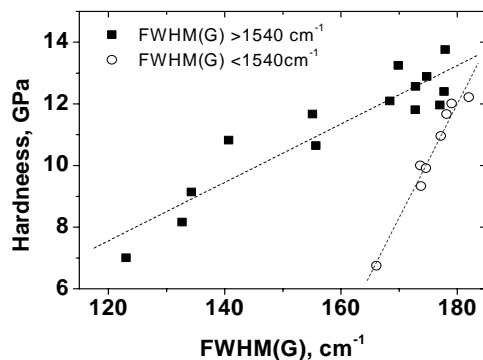


図2 FWHM(G) に対する DLC 膜の硬さの変化

(2) 窒素添加 DLC 膜の構造解析・導電性：窒素ガス流量比に対する G ピークの位置と D ピークと G ピークの強度比を図3および図4に示す。窒素流量比が大きくなるにつれて、 $I(D)/I(G)$ 、G ピークの位置は上昇した。カーボン膜のラマン分光のスペクトルにおいて D ピークと呼ばれる 1350cm^{-1} のピークは、六員

環の sp^2 結合に起因し、G ピークと呼ばれる 1580cm^{-1} 付近のピークは鎖状、環状を含めすべての sp^2 結合に起因する。窒素添加によってアモルファスカーボン内にグラファイトのクラスター化が進んでいる。また、クラスター化が進んでいることで窒素添加 DLC 膜の電気抵抗値は、図5で示すように非常に小さくなることわかった。

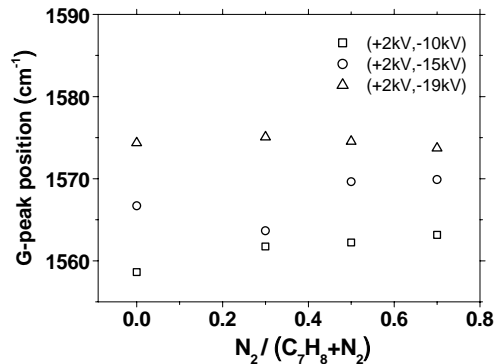


図3 窒素流量比に対する G ピークの位置

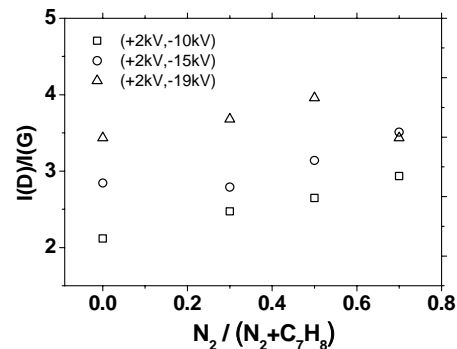


図4 窒素流量比に対する $I(D)/I(G)$ 比

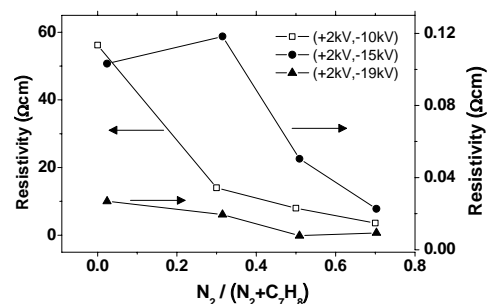


図5 窒素流量比に対する電気抵抗率測定の変化

(4) Si 添加 DLC 膜の構造解析

①分子シミュレーションによる Si 添加 DLC 膜のバルク構造解析：密度ごとに分類した Si 添加量と体積弾性率の相関を、参考実験値とともに図6に示す。Si 添加量の増加に伴い、体積弾性率が低下する傾向が見られた。また、水素を含有している DLC および Si 添加 DLC は、含有していないモデルと比べ、体積弾性

率が全体的に低い値を示した。本結果は実験結果と定性的によく一致する。Si 添加による体積弾性率低下の原因は、C-C 結合の減少及び Si-C 結合の増加により、構造が弱くなったと考えられる。一方 H 添加による体積弾性率低下の原因は、H が C や Si のダングリングボンドと結合し終端かすることによって、隣接する原子からの拘束が弱くなり、構造が変化したときの構造緩和がされやすいためであることがわかった。

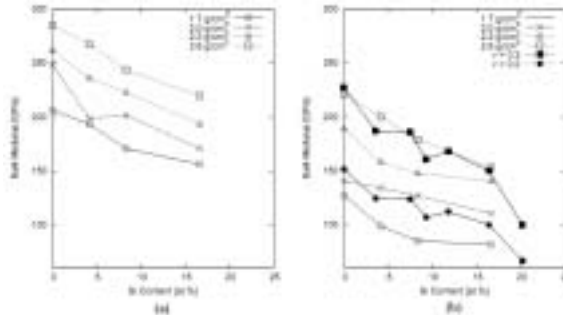


図 6 Si 添加率と体積弾性率
(a) H 含有なし (b) H 含有あり

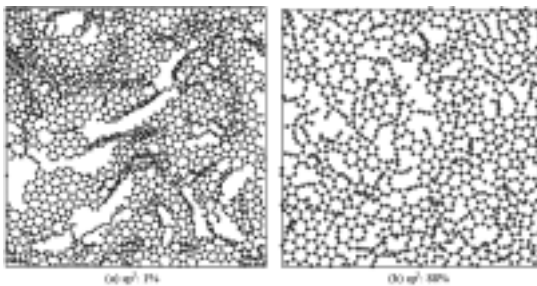


図 7 DLC の表面構造モデル

②分子シミュレーションによる Si 添加 DLC 膜の表面構造解析：図 7 に構造中の sp^3 比率が 1% および 88% の表面近傍の構造を示す。 sp^3 -poor の構造では表面のグラファイトがクラスタ化し内部まで貫通しているため、表面に大きな溝が形成されていることが観察できる。一方 sp^3 -rich の構造では凹凸が小さく水平方向に表面を形成していることがうかがえる。これはバルク中の sp^3 結合の原子が多いと、グラファイトクラスタ化を抑制し、表面への影響を及ぼさず、表面付近のみでグラファイト化することが原因である。

(5) 異種元素分散による吸着性制御

①Si 添加 DLC 膜：Si-DLC 膜上に有機シラン自己組織化単分子膜 (Self-Assembled Monolayer, SAM) を形成し、その吸着過程、摩擦特性を原子間力顕微鏡を用いて調べた。浸漬時間とともに島状の吸着した SAM 分子の密度が増加し、最終的に直立した状態の単分子膜が得られた。SAM 形成後の表面粗さは Si-DLC 基板と同程度になった。シリコン含

有量の増加に伴い吸着サイトが増えて SAM の形成速度が速くなるとともに、Si-DLC 膜と SAM の界面が安定化して、摩擦特性が向上した。

②窒素添加 DLC 膜：DLC 膜中に窒素原子を分散させることで、有機分子の吸着特性の変化を原子間力顕微鏡を用いて調べた。窒素添加 DLC 膜 (N-DLC 膜) は、化学気相蒸着成膜法を用いて作成した。有機分子の吸着特性は 1H, 1H, 2H, 2H-perfluorodecyltrichlorosilane (FDTS) を DLC 膜または N-DLC 膜上に浸漬法および真空蒸着法で吸着し、自己組織化単分子膜を形成することで調べた。SAM の形成では、浸漬初期に島状構造が出来上がり、それが成長すると同時に、新たな島が DLC 表面露出部分に形成され、結果として島の密度が増加した。窒素含有量の増加に伴い吸着サイトが増えて膜の形成速度が速くなることがわかった。また、N-DLC 膜を作成し、大気にさらさず、真空中で FDTS 分子を吸着させることで、浸漬法で自己組織化単分子膜を形成するより吸着速度および吸着量が増加した。

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) 崔俊豪, 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) 崔竣豪, 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, N Setsuo, 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) 崔竣豪, 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, 崔竣豪, 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) 崔竣豪, 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) 崔竣豪, 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, 崔竣豪, 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, 崔竣豪, 加藤孝久, “塩水中におけるDLC膜の保護特性 第一報: 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) 崔竣豪, 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

加藤 孝久 (KATO TAKAHISA)
東京大学・大学院工学系研究科・教授
研究者番号: 6 0 1 5 2 7 1 6

(2) 研究分担者

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: 3 0 3 9 2 6 3 2

(3) 連携研究者

田浦 裕生 (TAURA HIROO)
長岡技術科学大学・工学部・助教
研究者番号: 2 0 3 3 4 6 9 1
田中 健太郎 (TANAKA KENTARO)
東京海洋大学・海洋工学部・准教授
研究者番号: 6 0 3 5 9 6 9 3
川口 雅弘 (KAWGUCHI MASAHIRO)
地方独立行政法人東京都立産業技術研究センター・研究開発部第 2 部・研究員
研究者番号: 4 0 4 6 3 0 5 4