

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 5 月 31 日現在

機関番号：12601  
研究種目：基盤研究(B) (一般)  
研究期間：2014～2016  
課題番号：26289024  
研究課題名(和文) グラフェンの超潤滑性解明および極薄潤滑保護膜への応用  
  
研究課題名(英文) Low friction properties of graphene films  
  
研究代表者  
崔 ジュン豪(Choi, Junho)  
  
東京大学・工学(系)研究科(研究院)・准教授  
  
研究者番号：30392632  
交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 12,900,000円

研究成果の概要(和文)：グラフェンは優れた機械的特性や化学的安定性を持つことから、極薄固体潤滑膜として期待されており、その摩擦特性はナノからマクロ荷重スケールにわたり多く報告されている。特にマクロスケールにおける摩擦特性は摩擦条件によって大きく異なり、より良好な摩擦特性を引き出す条件およびその摩擦メカニズムの解明が重要である。

本研究では、大気中および環境制御下においてグラフェンのマクロ荷重スケールでの超低摩擦現象の発現に成功し、そのメカニズムを明らかにした。さらに、産業界への応用のため、目的基板上におけるグラフェンの直接合成や三次元形状の機械要素への応用のため、三次元イオン注入の均一性について検討を行った。

研究成果の概要(英文)：Graphene has excellent mechanical characteristics and chemical stability, and its use as an ultrathin solid lubrication material is especially promising. In recent years, encouraging results have been reported on the friction characteristics of graphene, not only on the microscale or nanoscale but also on the macroscale. As the macroscale friction properties of graphene vary greatly depending on the friction conditions, it is important to find the optimum conditions to obtain better friction properties and elucidate the friction mechanism. In this study, we succeeded in the onset of ultralow friction phenomenon of the graphene on the macro-load scale under air and controlled environmental conditions, and clarified the friction mechanism. Furthermore, for application to the industry, we developed a direct synthesis method of graphene onto a target substrate, and examined the uniformity of ion implantation for the application to the three-dimensional machine elements.

研究分野：トライボロジー

キーワード：graphene friction PBI

## 1. 研究開始当初の背景

(1) ダイヤモンドライクカーボンの超低摩擦性の研究：ダイヤモンドライクカーボン膜はダイヤモンドおよびグラファイト構造の混合構造を持つ非晶質の高硬度炭素膜である。今まで様々な成膜手法を用いて種々のダイヤモンドライクカーボン膜(Diamond-Like Carbon film, 以下DLC膜)を開発し、そのトライボロジー特性について研究を行ってきた。その結果、DLC膜の中にシリコン原子、窒素原子などの異原子を添加することで、またシリコン原子を添加したDLC膜表面に酸素プラズマ処理を施すことで、DLC膜が大気または水素雰囲気中で超低摩擦、超潤滑性を発現することがわかった。

(2) グラフェンの超潤滑性の発見：ナノカーボン材料であるグラフェンは優れた機械的特性や化学的安定性を持つことから、極薄固体潤滑材としての利用が期待されており、グラフェンの摩擦特性に関する研究はマイクロ・ナノスケール荷重に限らず、近年はマクロスケール荷重における研究成果も報告されている。マクロスケールにおけるグラフェンの摩擦特性は摩擦相手材や摩擦雰囲気によって大きく異なり、より良好な摩擦特性を引き出す条件およびその摩擦メカニズムの解明が重要である。我々は、アメリカアルゴン国立研究所のErdemir博士との共同研究からグラフェンの超潤滑性(Superlubricity)を世界で初めて発見した。しかし、グラフェンの超潤滑機構についてはまだ解明できていないのが現状である。

(3) ナノカーボン材料の研究：バイポーラプラズマ利用イオン注入成膜法(Bipolar Plasma Based Ion Implantation & Deposition, 以下、PBII)を用いてナノカーボン材料の一つであるカーボンオニオンを大面積のフィルム状に合成することに世界で初めて成功した。今までカーボンオニオンの合成はダイヤモンド粒子の分解、アークイオンガンを用いる手法などで行われてきたが、いずれの手法も大面積のフィルム状のカーボンオニオンの合成は困難であった。本研究では、PBII法を用いて銀の薄膜にメタンイオンを-20 keVのエネルギーで注入してから、銀薄膜を蒸発させることでフィルム状のカーボンオニオンの合成に成功した。グラフェンの合成手法もカーボンオニオンの合成手法と類似していることから、PBII法を用いたグラフェンの合成が可能であると考えられる。PBII法を用いることで大面積の基板にカーボンイオンを均一に注入することが可能であるため、結晶性が高い高品質かつ大面積のグラフェンの合成が大いに期待できる。

(4) DLC膜の三次元成膜に関する研究：PBII法を用いてマイクロギヤ、トレンチ形状物への三次元DLCコーティングに関する研究を行ってきた。本手法は、炭化水素ガスの雰囲気中でサンプル自身に正の高電圧(1~3kV)パルス印可し真空チャンバー内の電子をサン

プル表面に加速させることでサンプルの形状に添ったプラズマを発生させる。続けて負の高電圧(~20 kV)パルス印可することでサンプル回りの炭素イオンをサンプルの表面に引き込みサンプルの形状に添ったDLC膜のコーティングを行う手法である。PBII法はサンプルの自公転が不要で三次元立体形状物の表面に均一なDLC膜の作成が可能である。本研究からPBII法により、マクロからマイクロスケールの三次元形状の機械部品にDLC膜が適用できることを明らかにした。PBII法の利点を生かし、三次元形状の機械要素の表面上にグラフェンの作成が可能であると考えられる。

## 2. 研究の目的

マイクロ・ナノ機械要素において、たとえば、磁気ディスクの画期的記録密度の向上、超微小金型の離形性・耐久性の改善のためにサブナノスケールの極薄固体潤滑保護膜が求められている。また、マクロ機械要素の自動車ガソリンエンジンにおいては、摩擦エネルギー損失は出力の0.75倍に上り、摩擦エネルギー損失削減が喫緊の課題とされている。しかし、現在の摩擦制御手段は限界に達しており、革新的な摩擦エネルギー損失低減手段が求められている。本研究では、厚さ0.3nmの最も薄くて強い炭素系材料といわれているグラフェンの超潤滑性を解明するとともに、超微小金型、マイクロギヤのようなマイクロ機械要素から自動車エンジン部品、産業用モーター駆動系のマクロ機械要素に至るまでグラフェンの超潤滑性を応用することを目指し基礎研究を行う。さらに三次元形状物へのグラフェンの作成を念頭に三次元イオン注入の均一性を検討する。

## 3. 研究の方法

(1) DLC膜の成膜：本研究ではPBII法を用いてグラフェンの摩擦相手材として用いるDLC膜の成膜を行う。本手法では、被コーティング物に直接正の高電圧パルスを印加し、低ガス圧力下で高密度グロー放電プラズマを被コーティング物近傍に生成し、その直後に負の高電圧パルス(~-15 kV)を印加することにより被コーティング物の形状に沿って全方向からコーティングを行う手法である。グラフェンの摩擦特性は摩擦相手材であるDLC膜の構造に大きく依存することが予測されるため、本研究ではDLC膜の成膜時に印加する負の高電圧を制御することで内部構造が異なるDLC膜を作成し、グラフェンの摩擦試験においての摩擦相手材として用いる。

### (2) グラフェンの合成

熱CVD(Chemical Vapor Deposition)法によるグラフェンの合成：グラフェンは熱CVD法により合成することが一般的であり、本研究でも原料ガスとしてメタンと水素の混合ガスを用いて触媒金属(ニッケルまたは銅)上にグラフェンを合成する。最適グラフ

エン合成条件を見つけるために、合成圧力 (CH<sub>4</sub>およびH<sub>2</sub>の分圧)、合成温度 (~1035)、合成時間 (~2時間)、冷却時の冷却速度などのパラメータを制御しながら合成を行う。

PBII法による大面積・高品質グラフェンの開発：熱CVD法を用いる場合、原料ガスの流れの不均一性、反応炉内部の温度のムラなどにより大面積かつ高品質の単層グラフェンを作成することは困難である。また、低摩擦への応用のために三次元形状の機械要素の表面に合成することはさらに難しい。そこで本研究では、PBII法を用いて大面積・高品質グラフェンの開発を行う。PBII法を用いてメタンイオンを基板には注入 (~20 keV)して、真空中でアニールを行うことでグラフェンの合成を行う。

### (3) グラフェン膜の評価

合成後のグラフェンの評価：グラフェンの合成課程は、光学顕微鏡、走査型電子顕微鏡、原子間力顕微鏡を用いて表面観察を行うことで評価する。合成されるグラフェンは単層と多層グラフェンの混合状態になることが予測されるため、グラフェン層数、膜厚分布、結晶性の評価はマイクロラマン分光分析によるグラファイトピーク (Gピーク) と 2Dピークの比率 (単層グラフェンの場合、I<sub>2D</sub>/I<sub>G</sub> ≈ 2)、2Dピークの対称性評価、Gピークと2Dピークの二次元マッピングを行うことで評価する。

グラフェンの摩擦特性の評価：環境制御が可能なボールオンディスク型摩擦試験装置を用いて、相対湿度、雰囲気ガスなどを変化させながらグラフェンの摩擦特性を調べる。また、グラフェンの摩擦特性はその摩擦相手材により大きく変化することが予測され、本研究では、PBII法を用いてDLC膜を作成する成膜因子 (主に、印加する負の高電圧) を変化させ、様々な内部構造を有するDLC膜を作成する。その内部構造はラマン分光分析により調べる。また、炭素と水素意外に異元素を添加することで組成が異なるDLC膜の作成も行う。

(4) 三次元炭素イオン注入の均一性評価：三次元形状物へのグラフェンの作成を念頭に三次元形状物への炭素イオン注入の均一性を評価する。三次元形状物としては、ナノスケールからマクロスケールのトレンチ形状物を用いて、PBII装置を用いてDLC膜を成膜し、トレンチの上面、底面、側面における成膜されたDLC膜の膜厚分布、内部構造分布、硬さ分布等の測定から評価する。

## 4. 研究成果

### (1) 異なる構造を有するDLC膜に対するグラフェンの摩擦特性

大気中におけるグラフェンの摩擦特性：本研究ではグラフェン膜の摩擦相手材として内部構造が異なる非晶質炭素膜を成膜した硬球を使用し、相対湿度 50%の大気中でボールオンディスク型回転摩擦試験を行った。

DLC膜はその内部構造によってPLC (Polymer-like carbon) 構造、DLC (diamond-like carbon) 構造、GLC (graphite-like carbon) 構造の3種類に分類でき、それらを鋼球 (SUJ2) の表面にコーティングして摩擦試験を行った。その結果、図1に示すように、膜の内部構造によってグラフェンに対する摩擦特性が異なることが明らかになった。DLC膜成膜していない鋼球を用いた場合に比べて、DLC膜を施した場合はいずれもグラフェンの摩擦が抑えられること、とりわけPLC構造の膜を成膜した場合に最も低い摩擦係数が得られることがわかった。摩擦によってグラフェン膜の構造は変化し、PLC構造の膜を用いた場合はグラフェンの層構造が維持されながらナノ結晶化する。一方、DLC構造、GLC構造の膜を用いた場合には層構造が失われてグラファイトライクなナノ結晶された非晶質炭素膜になると考えられる。

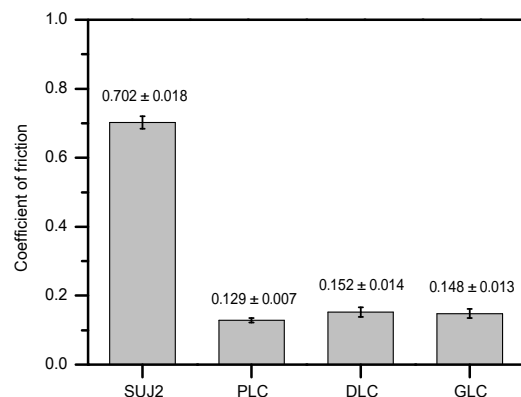


図1 グラフェンの異なる内部構造を有するDLC膜に対する摩擦係数の平均値

不活性雰囲気中での摩擦特性：不活性雰囲気中においてグラフェン膜と種々の内部構造を有するDLC膜を成膜した鋼球との摩擦特性を調べた結果、相手材である鋼球にDLC膜を成膜することで、グラフェン膜が潤滑性を示す条件が存在することがわかった。特に、PLC構造の膜を用いることで、図2に示すように安定した超潤滑性を示す。DLC膜の構造による摩擦特性の違いは摩擦表面におけるグラフェンとの相互作用の違いに起因すると考えられる。PLC構造の膜を成膜した鋼球で摩擦した場合はグラフェン膜の層構造が維持されたのに対し、DLC構造、GLC構造の膜を成膜した鋼球で摩擦した場合はグラフェン膜がナノ結晶構造の非晶質炭素膜へと変化した。また、PLC構造の膜を成膜した鋼球で摩擦した場合には、鋼球から剥がれた摩擦粉がグラフェン膜の摩擦痕中に点在しており、この摩擦粉が非晶質炭素膜同士の摩擦で見られる低摩擦性を発現させた可能性があることがわかった。

### (2) 大気中におけるグラフェンの超低摩擦特性：グラフェン膜と異なる内部構造を有する

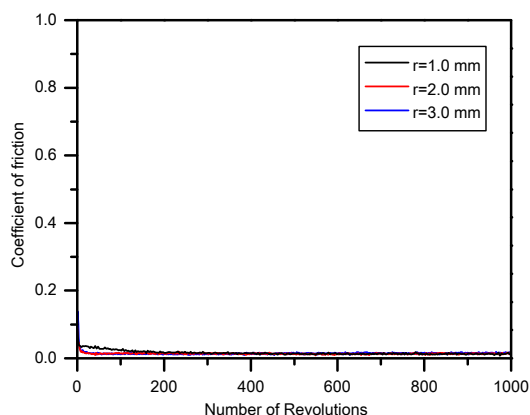


図2 グラフェンの超潤滑性 ( $r$ は摩擦時の回転半径)

非晶質炭素膜とのマクロスケール摩擦特性が調べた結果、大気中において摩擦係数 0.13 程度の潤滑性を示すことがわかった。また、DLC 膜に他原子を添加することで特性を変化させることができ、シリコン原子を添加した DLC 膜 (以下 Si-DLC 膜) は、大気中で低摩擦性と熱安定性を発揮することが知られている。本研究では Si-DLC 膜をグラフェンの摩擦相手材として、異なる相対湿度の大気環境下でマクロスケール摩擦特性を調べ、シリコン添加が及ぼす影響を明らかにすることでグラフェンの低摩擦発現のメカニズムを調べた。以下に得られた結果の詳細を示す。

摩擦相手材として DLC 膜を用いた場合、複層グラフェン膜は大気中で摩擦係数 0.1 程度の潤滑性を示す。

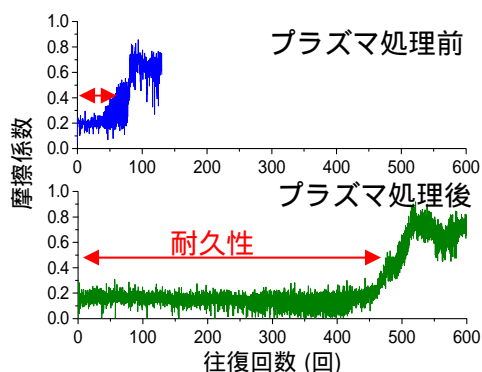


図3 複層グラフェンの摩擦試験結果

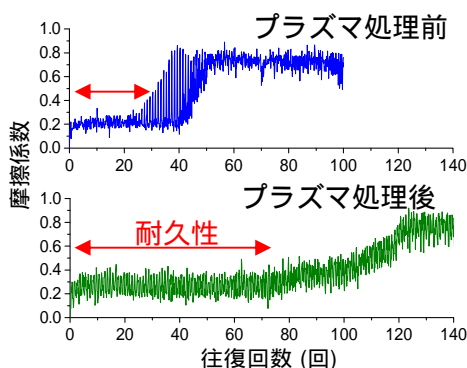


図4 単層グラフェンの摩擦試験結果

Si-DLC 膜を相手材として用いた場合、複層グラフェン膜は大気中で摩擦係数 0.05 を下回る潤滑性を示す。

相手材の Si 含有量と低摩擦を維持するのに最適な湿度には相関がある。

グラフェンが摩擦により凝集した構造と、Si-DLC 膜から剥離した Si 含有炭素膜とが摩擦界面で混じり合うことで低摩擦性が発現することが明らかになった。

(3) フッ素原子修飾によるグラフェンの摩擦特性改善：グラフェンの表面にフッ素原子を修飾し、原子間力顕微鏡を用いたナノスケール荷重下において摩擦係数を測定した結果、フッ素の修飾により摩擦係数が高くなるという報告がなされている。一方、膜中にフッ素原子添加した DLC 膜の場合、マクロスケール荷重下において摩擦係数が減少する報告がなされている。マクロスケール荷重下におけるフッ素原子を修飾したグラフェンの摩擦特性に関する研究は行われていないのが現状であり、本研究では、グラフェン表面にフッ素原子を修飾させた後、マクロスケール荷重下においてその摩擦特性を調べた。グラフェン表面へのフッ素原子修飾は PBII 法によりフッ素プラズマ処理を施すことで行った。研究の結果、以下のことが明らかになった。

PBII 法を用いて複層、単層どちらのグラフェンにおいても、適切な条件を設定しプラズマ処理を施すことでその表面にフッ素原子を修飾させることができる。

複層グラフェンでは、フッ素プラズマ処理により表面エネルギーが低下して摩擦表面間の凝着が減るため、摩擦係数が小さくなることがわかった。一方で単層グラフェンでは、フッ素プラズマ処理により摩擦係数が大きくなる。これは、表面構造の三次元化やグラフェンの欠陥の増加が原因であると考えられる。

複層、単層どちらのグラフェンにおいても、フッ素プラズマ処理により表面エネルギーおよび凝着が低下するため、膜の耐久性は図3と図4(横軸のスケールが異なることに注意)に示すように向上することが明らかになった。

(4) シリコン基板上へのグラフェンの直接合成：グラフェンの産業応用のためには目的とする基板上にグラフェンを直接合成することが不可欠である。本研究ではプラズマ利用イオン注入法によってシリコン基板上にグラフェンを直接合成することを目標とし、触媒ニッケル膜の厚さと炭素イオン注入時間を主なパラメータにグラフェンの直接合成を行い、シリコン基板上へのグラフェンの直接合成に成功した。それぞれの条件で合成を行ったサンプルについて、観察されたニッケル触媒膜の凝集構造を電子顕微鏡を用いて観察した結果の一例を図5に示す。ニッ

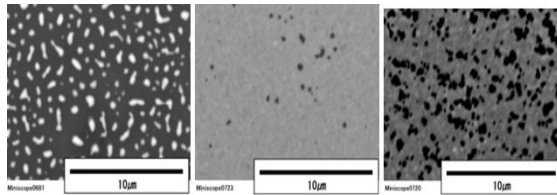


図5 (a)島状構造、(b)低密度ホール状構造、(c)高密度ホール状構造

ケル膜の凝集状態により、グラフェンの合成のメカニズムおよびその結果としてのグラフェンの層数が異なってくる。以下に結果の詳細を示す。

イオン注入時間と合成されるグラフェンの層数の間には正の相関がある。

膜厚が薄い場合ニッケルが蒸発し、グラフェンが合成されない。

膜厚が厚い場合ニッケルの注入時間が延びるほどホール状凝集が起きやすくなり、グラフェンの合成が促進され、注入時間が短くホール状凝集が少ないとグラフェンが合成されることがわかった。

(5)三次元炭素イオン注入の均一性評価:本研究では PBII 法を用いてマクロトレンチ (pitch: 20 μm, aspect ratio: 1.0)、マイクロトレンチ (pitch: 4 μm, aspect ratio: 2.0) およびナノトレンチ (pitch: 300 nm, aspect ratio: 2.0) 上に DLC 膜の成膜を行った。DLC 膜の膜厚は表面粗さ計または走査型顕微鏡で断面を観察することにより計測した。特にマクロトレンチ上の DLC 膜についてはインデンテーション試験により硬さを評価し、マクロ・マイクロトレンチ上の DLC 膜についてはラマン分光分析法により膜の構造を評価した。そしてプラズマシミュレーションにより、被コーティング物のスケールに応じた膜の成膜メカニズムの解明と膜質におよぼす影響に関する考察を行った。プラズマシミュレーション手法として電子、イオンなどの荷電粒子の挙動解析には Particle-In-Cell/Monte Carlo Collision (PIC-MCC) method を、ラジカルの挙動解析には Direct Simulation Monte Carlo (DSMC) method を用いて計算を行った。その結果、マクロトレンチ、マイクロトレンチ、ナノトレンチのいずれについてもトレンチ全面に対して成膜を行うことができたが、平面、上面、底面に比べて側面での膜厚は薄く、硬さの低下と構造のグラファイト化の傾向がみられた。トレンチ側面におけるこうした膜の不均一性の原因を解明するためにプラズマシミュレーションによるプラズマ挙動解析を実施した結果、側面に沿ってイオンシースが形成されていないことがわかった。側面に沿ってイオンシースが形成されないことにより、側面に入射するイオンのフラックス、エネルギーが低下し、膜厚と硬さが低下したといえる。また、平面、上面、底面に高いエネルギー

で垂直に入射するイオンの挙動と異なり、側面に入射するイオンはトレンチ開口部から鉛直下向きに入射した後、トレンチ内部に形成される水平向きの弱い電界に引き寄せられながら側面に対し角度を持ちながら入射する。そのため、側面上に DLC 膜が形成される際には、平面、上面、底面上の DLC 膜とは異なり、イオンとラジカルの入射比率、スパッタ率の違いが生じてしまい、膜質に違いが現れたものと考えられる。さらに被コーティング物であるトレンチのスケールに注目すると、マイクロトレンチに比べマクロトレンチの方が側面での膜質に大きな違いが見られた。マクロトレンチ側面の方がマイクロトレンチ側面よりも、イオンの入射角、入射エネルギーが大きいため、ラジカルの入射比率の不均一性の効果に加えて、スパッタリングの効果がより発現されやすいためであると考えられる。ナノスケールとマイクロスケールではプラズマ挙動に大きな違いはなく、そのため類似した膜質および膜厚分布 (図6) を有していると考えられる。

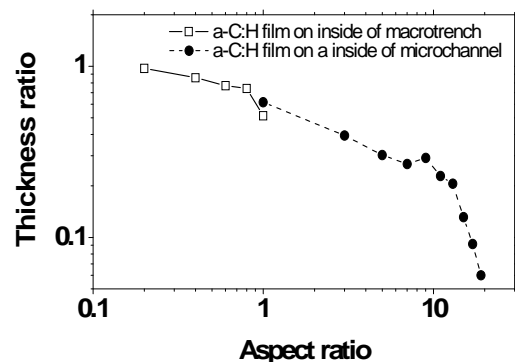


図6 マイクロ・マクロトレンチ側面におけるその側面に成膜した DLC 膜のアスペクト比に関する膜厚分布

## 5. 主な発表論文等

[雑誌論文](計9件)

Y Hirata, J Choi, "Structure and mechanical properties of a-C:H films deposited on a three-dimensional target: Comparative study on target scale and aspect ratio", *Journal of Physics D: Applied Physics*, 査読有, Vol. 50, 2017, pp. 155204(9pp).

<https://doi.org/10.1088/1361-6463/aa5b47>

石川功, 崔竣豪, "a-C:H 膜の内部構造と摩擦特性の相関", *トライボロジスト*, 査読有, Vol. 62, No. 2, 2017, pp. 122-128.

<http://doi.org/10.18914/tribologist.16-00021>

Y Hirata, J Choi, "Deposition of a-C:H films on inner surface of high-aspect-ratio microchannel", *Journal of Applied Physics*, 査読有, Vol. 120, 2016, pp. 065305(7pp).

<http://dx.doi.org/10.1063/1.4960694>

A S Westover, J Choi, K Cui, T Ishikawa, T Inoue, R Xiang, S Chiashi, T Kato, S

Maruyama, C L Pint, "Load dependent frictional response of vertically aligned single-walled carbon nanotube films", *Scripta Materialia*, 査読有, Vol. 125, 2016, pp. 63-67.

<https://doi.org/10.1016/j.scriptamat.2016.07.032>

Y Hirata, Y. Nakahara, K Nagato, J Choi, "Deposition of a-C:H films on a nanotrench pattern by bipolar PBII&D", *Journal of Physics D: Applied Physics*, 査読有, Vol. 49, 2016, pp. 245303(10pp).

doi:10.1088/0022-3727/49/24/245303

J Choi, T Hatta, "Structural changes of hydrogenated amorphous carbon films deposited on steel rods", *Applied Surface Science*, 査読有, Vol. 357, 2015, pp.814-818.

<http://dx.doi.org/10.1016/j.apsusc.2015.09.102>

Y Hirata, J Choi, "Microstructure of a-C:H films prepared on a microtrench and analysis of ions and radicals behavior", *Journal of Applied Physics*, 査読有, Vol. 118, 2015, pp. 085305(9pp).

<http://dx.doi.org/10.1063/1.4929427>

Y Hirata, T Kato, J Choi, "DLC coating on a trench-shaped target by bipolar PBII", *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, 査読有, Vol. 49, 2015, pp. 392-399.

<http://dx.doi.org/10.1016/j.ijrmhm.2014.08.005>

W Park, H Tokioka, M Tanaka, J Choi, "DLC coating on a micro-trench by bipolar PBII&D and analysis of plasma behavior", *Journal of Physics D: Applied Physics*, 査読有, Vol. 47, 2014, pp. 335306 (8pp).

doi:10.1088/0022-3727/47/33/335306

#### [学会発表](計8件)

米山長春, 崔峻豪, "プラズマ利用イオン注入法を用いたグラフェンの合成", 日本機械学会関東支部第23期総会・講演会, 東京都葛飾区東京理科大学葛飾キャンパス, 2017.3.17, pp. OS1502-05

松村健人, 崔峻豪, "グラフェンのマクロスケール摩擦特性に及ぼす相手材の影響", 日本機械学会関東支部第23期総会・講演会, 東京都葛飾区東京理科大学葛飾キャンパス, 2017.3.17, pp. OS1502-03

T. Yoneyama, K. Ishimuro, J. Choi, "Graphene Synthesis by Methane ion Implantation", 26<sup>th</sup> Annual Meeting of MRS-Japan 2016, Industry & Trade Center, Yokohama, Japan (Dec. 20, 2016)

A S Westover, C Pint, S Maruyama, J Choi, "Load-Dependent Frictional Response of Vertically Aligned Single-Walled Carbon Nanotube Surfaces", *Materials Science and*

*Engineering* 2016 (MSE2016), Darmstadt University of Technology, Germany (Sept. 27, 2016)

J Choi, K Matsumura, "Macroscale tribological properties of fluorinated graphene", 20th International Vacuum Congress (IVC-20), Bexco, Busan, Korea (Aug. 25, 2016)

松村健人, 崔峻豪, "プラズマ処理により他原子を修飾したグラフェンの摩擦特性に関する研究", トライボロジー会議2016春東京, 東京渋谷区国立オリンピック記念青少年総合センター, 2016.5.23

J Choi, K Yoshimura, "Deposition of a-C:H Films on Inner Surface of Microchannel" 25<sup>th</sup> Annual Meeting of MRS-Japan 2015, Phoenix Convention Center, Phoenix, Arizona (March. 31, 2016)

K Matsumura, S Chiashi, J Choi, "Frictional Properties of Plasma-Fluorinated Graphene", International Tribology Conference (ITC), 東京都葛飾区東京理科大学, 2015.9.16

#### 6. 研究組織

##### (1) 研究代表者

崔 ジュン豪 (CHOI, Junho)

東京大学・工学系研究科・准教授

研究者番号: 30392632

##### (2) 研究分担者

加藤 孝久 (KATO, Takahisa)

東京大学・工学系研究科・教授

研究者番号: 60152716

##### (3) 連携研究者

中尾 節男 (NAKAO, Setsuo)

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