

令和 3 年 6 月 9 日現在

機関番号：11301

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2018～2020

課題番号：18K04880

研究課題名(和文) 異種原子ドーピング2次元材料と流体がつくる固液界面動電現象の解明

研究課題名(英文) Investigation of electrokinetics at flowing water on doped graphene

研究代表者

岡田 健 (OKADA, Takeru)

東北大学・工学研究科・准教授

研究者番号：90616385

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,400,000円

研究成果の概要(和文)：新たなエネルギーハーベスティング技術の一つに2次元材料であるグラフェンと液体流動界面における発電がある。本研究では異種原子ドーピングによって高出力とメカニズム解明に繋がる表面状態制御を行い、その効果を実証することに成功した。適切なドーピング手法とドーパント濃度条件下においては、窒素ドーピンググラフェンと水界面における発電が従来に比べ3倍の起電力と1.3倍の出力を示すことが明らかになった。このことは界面近傍に形成される電位勾配が急峻になったことに起因すると結論付けた。また、マイクロチャンネルを用いた制御流動条件下における発電によって、起電力がグラフェンと水接触面積と流速に依存することを初めて見出した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究では新たなエネルギー創成デバイスとして水の流動と2次元材料であるグラフェン界面における発電について研究を行った。本研究によって発電量を増大させるためにはグラフェンへの窒素ドーピングが有効であることがわかった。また、制御された流れをつくることのできるマイクロ流路を用いることでグラフェン-水界面の発電システムとして等価回路を規定し、起電力は流速と界面接触面積に依存することを明らかにした。本研究の成果は、力学的変換を伴わない新たなエネルギー創成を提案するものであり、将来構想の一つであるトリリオンセンサーユニバースにおいて重要な知見をもたらすものである。

研究成果の概要(英文)：Liquid-flow-induced electricity generation from graphene-water interface has received attention for novel energy harvesting. In this research, we have obtained electricity generation from a single water droplet motion on graphene, and investigated the effect of the graphene surface condition on the electricity generation, which is controlled by heteroatom doping. As a result, nitrogen-doped graphene shows 3 times higher voltage generation compared to pristine graphene due to the doping-induced surface charging. The surface potential tuning is shown to play an important role. Furthermore, to investigate the mechanism and quantification of power density, we have fabricated micro-flow-chip which induces controlled-flow. The output performance per unit contact area between water and graphene is found to be proportional to the flow speed, with an electromotive force density of 0.0025 microvolt. The ability to quantify output density will help to construct guidelines for future applications.

研究分野：ナノ材料科学

キーワード：グラフェン 固液界面 発電

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

今日の我々の生活はモバイルデバイスの高機能化と高い普及率、クラウドコンピューティング、ビッグデータ利用等によって高度情報化社会へ急速に発展しており、将来的に従来よりもはるかに多くのセンサーがあらゆる場所に配置され、多数のセンサーネットワークによる情報の収集と活用が我々の社会に恩恵を与えると期待されている。この社会構想ではセンサーを駆動するエネルギー源として生活環境にある様々な物理現象(熱、振動、光、摩擦等)を活用するエネルギーハーベスティングの重要性が認識されている。エネルギーハーベスティングは情報活用におけるセンサーへの電力供給において、電源への接続がない自律分散型であることが要求される。

固液界面の動電現象を利用した新たなエネルギーハーベスティング技術が近年報告されている。固体材料と接する液体が移動する(流れる)際、固相材料中に電荷移動を誘起し電力を得る動電現象がある。駆動力は雨滴、河川、海洋、生物の運動などによって得られる運動量を持つ流水であり、タービンや水車の力学的仕事からエネルギーを得る水力発電とは異なる。そのため大型のデバイスを必要とせず数 cm のセンサーデバイスに適している。固体材料にグラフェンを用いた場合、一滴の水から約  $2 \mu\text{W}$  発電する報告がある (ACS Nano 10 (2016) 7297)。しかし、固液界面において摩擦が引き起こす電力発生メカニズムは未だ解明されていない。学術的にメカニズムを理解することで高効率発電を実現し、効果的な設置場所や用途、デバイス設計指針を提案できれば将来の実用化が期待される。さらにグラフェン等のしなやかな機械特性を持つ 2 次元材料と構造のない液体の水を用いれば、デバイス構造の低次元化とフレキシブル化が同時に実現できる。またデバイス設計においては材料選択性が高く、曲面での利用等の構造選択自由度が高い利点がある。

### 2. 研究の目的

本研究は水と 2 次元材料表面が作る固液界面において、流れによる摩擦動電現象のメカニズム解明を行い、汎用性が高くしなやかな構造を持つ発電デバイス開発への展開を目的とした。

異相界面における動電現象はセンシングによる環境情報の収集と活用において自律したエネルギー源として重要であるが、現在までにそのメカニズムは未解明であり学術的な議論は十分になされていない。そこで申請者がこれまでの研究で得た半導体材料表面改質と微細加工、および固液界面の物理・化学現象に関する知見を駆使し、2 次元材料の表面状態を原子レベルで精密に改質することで『固体材料中のキャリア伝導』と『液相の流れと電位(イオン)分布』を変化させ、固液界面における動電現象の核となる物理現象を導き出すことを目標とした。さらにデバイス化への展開を想定し高効率発電の実現を目指した。

### 3. 研究の方法

本研究ではプラズマを基盤としたドライプロセスを用いることで 2 次元材料の表面改質を異種原子ドーピングで実現し、固液界面近傍における物理パラメータを制御する。界面の物理現象探求のためには清浄な表面の確保が必須であるため高真空下での表面改質後、速やかに不活性ガス雰囲気下にサンプルを搬送することで精度の高い検討を行う。プラズマ処理はガスの変更のみで様々なドーパントに対応可能で有用である。これまでに実績のあるプラズマのエネルギーを制御した原子構造選択的ドーピング技術を基盤に研究を行う。

### 4. 研究成果

#### (1) グラフェンへの窒素ドーピングによる発生電力増大

固体炭素源を用いた化学気相蒸着法によって合成したグラフェンをシリコン基板に転写し、窒素中性粒子ビーム (Fig. 1 (a)) による窒素ドーピングを行った。Fig. 1 (b) に示すような半値幅の非常に狭い窒素ビームをグラフェンに照射することで窒素ドーピングが可能となる。また、Fig. 1 (c) に示すように傾斜設置したグラフェン基板に液滴を落下させ発電検証を行った。

窒素ドーピンググラフェンの炭素-窒素結合状態を X 線光電子分光によって同定した。Fig. 2 (a) に示すように、窒素原子のドーピングによる結合形成は本研究で行った  $7 \text{ eV}$  のビーム照射条件下において、炭素原子と窒素原子が置換したグラフィティック型が 70% となることが明らかになった。このことは、照射したビームのエネルギー分布が非常に狭く、炭素原子と窒素原子の置換反応を選択的に誘起したことを示している。また、ラマンスペクトル解析を行った (Fig. 2 (b))。対比サンプルとなる酸素ビーム照射グラフェンでは、 $1350 \text{ cm}^{-1}$  付近の欠陥由来の D バンドが強く現れている。酸

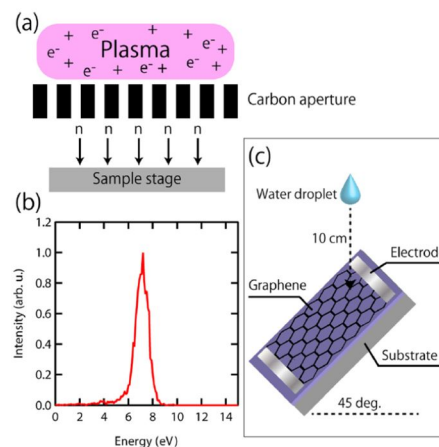


Fig. 1 (a) グラフェン窒素化に用いた中性粒子ビーム装置概念図。(b) 窒素ビームのエネルギー分布。(c) 液滴を用いた発電。

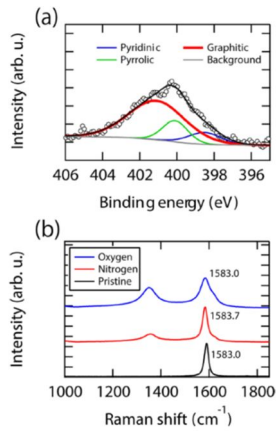


Fig. 2 (a)窒素ドーピンググラフェンの X 線光電子分光スペクトル。(b)ラマンスペクトル。

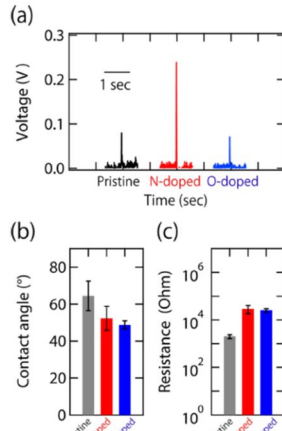


Fig. 3 (a)発生電圧シグナル。(b)接触角計測結果。(c)電気抵抗値。

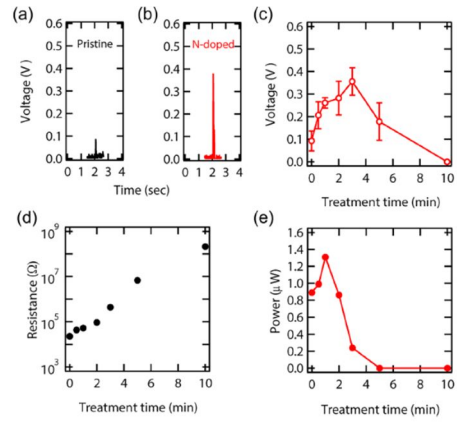


Fig. 4 (a),(b)液滴移動によって発生した電圧シグナル。(c)窒素ドーピング処理時間と発生電圧の関係。(d)ドーピング処理時間による電気抵抗変化。(e)発生電力の窒素ドーピング量依存性。

素ビームとグラフェンの反応性が高く、酸化によって炭素 6 員環構造に欠陥が多く導入されたためと考える。一方、窒素ビームを照射した場合には、D バンド強度は低く、過不足ないビームエネルギーによる欠陥形成を抑制した窒素ドーピングが成功していることを示している。

傾斜設置したグラフェン上部から液滴を落下させることで発生した電圧シグナルを Fig. 3 (a)に示す。スパイク状のシグナルは発生電圧を示しており、液滴がグラフェンに着滴した瞬間に電圧が発生している。この発生電圧シグナルは 10% 以下のばらつきに抑えられており、ドーピング効果を検証するためには十分な精度がある。1 滴の水を落下させることで Pristine グラフェンと水界面から約 80 mV の電圧が発生し、酸素ビーム処理したグラフェンにおいても同様の電圧を発生した。一方、窒素ドーピンググラフェンにおいては、Pristine グラフェンの 3 倍となる 280 mV の電圧が発生することがわかった。なお、接触角 (Fig. 3 (b)) と電気抵抗 (Fig. 3 (c)) 計測結果から、グラフェンはドーピングによって親水化し、電気抵抗が増加することが確認された。

## (2)発生電力の窒素ドーピング量依存性

Fig. 4 に示すように窒素ドーピング量と発生する起電力の相関について検証を行った。Fig. 4 (a)および (b)に示すようにドーパント種によって異なるシグナル強度が得られた。また、Fig. 4 (c)に示すようにドーピング処理時間、つまりドーピング量に対して発生電圧は極大値を示す。一方、窒素ドーピンググラフェンの電気抵抗は処理時間に対して急激に増加する (Fig. 4(d))。これらの結果から求めた出力と窒素ドーピング量には Fig. 4 (e)に示すように 1.5 min の処理時間で極大を示すことが明らかになった。そこで、この条件下における窒素ドーピンググラフェン表面の親水性を評価するため接触角測定を行った (Fig. 5 (a), (b))。Pristine グラフェンでは 70°以上の接触角を示し疎水的であることがわかる。一方、窒素ドーピングを行うことでグラフェン上の液滴形状はつぶれ接触角は減少する。その結果として窒素ドーピンググラフェンと水の接触面積は増加している。窒素ドーピングによるグラフェン表面の親水性変化は、窒素ドーピングによって導入されたグラフィ

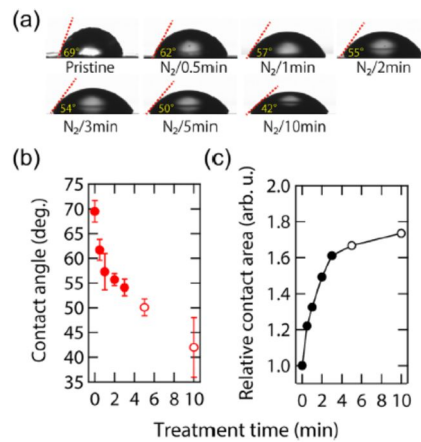


Fig. 5 (a)窒素ドーピンググラフェンの接触角。(b)接触角と窒素ドーピング量の関係。(c)窒素ドーピング量によって変化する接触面積。

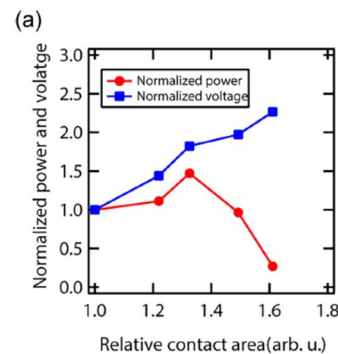


Fig. 6 (a)発生電圧と電力。(b)界面近傍に形成される電位勾配。



ティック窒素の一部が大気暴露などによって酸化し、酸窒化物となることで水との親和性が高くなったためだと考えられる。次に接触角測定に用いた液量と側面からの撮影した液滴像からグラフェンと水の接触面積を求めた (Fig. 5 (c))。接触面積は窒素ドーピング処理時間 4 min までほぼ線形に増加し飽和した。6 min 以降は急激に変化率が減少し、接触角は 50°以下を示した。この条件下 (接触角 50°以下) では発電量は減少している (Fig. 4)。Fig. 6 (a)に Pristine グラフェンを基準とした相対的な接触面積と、発生電圧と発電量の関係を示す。接触面積はドーピング量と同義とみなせるため、発生する電圧はドーピング量と線形の関係を示し、Pristine グラフェンに対して 2 倍以上の発生電圧を示すことが明らかになった。一方、発電量は 1.3 倍で最大となり、それ以上の接触面積、つまりドーピング量では減少した。以上のことから、グラフェンへの窒素ドーピングは液滴の移動によって誘起される動電現象を利用した発電システムの高出力化に有効な方法であることが解明された (Fig. 6 (a))。

グラフェンは水と接触したときに負の表面電位を持つ。負の表面電位は酸窒化物の電離や基板の電位によって形成されると考えられる。そのため、窒素ドーピンググラフェンは表面の官能基によってより負に深い表面電位を持つと考えられる。このとき界面近傍にはカウンタ イオンが引き寄せられ電気二重層と呼ばれる電位勾配が形成される (Fig. 6 (b))。窒素ドーピンググラフェンは Pristine グラフェンに比べて負の電位を持つため、界面近傍の電位勾配は急峻となり電気二重層の厚みも薄くなる。

液滴がグラフェン上を移動するとき、液滴は転がるように移動する。そのため、液滴前面には電気二重層が形成され後方では消滅する。この一連の電気二重層形成消滅プロセスにおいて、グラフェン上に形成される電気二重層は、見かけ上グラフェン上を移動することになり、その結果、電圧が発生したのと考えられる。一方、高濃度の窒素をドーピングした場合、形成される官能基による親水性が高くなる。このとき液滴が表面に着滴するとグラフェン表面の高い親水性によって液滴が通過した後のグラフェン表面には水の薄膜が残ると推測される。この条件下では、ミクロな視点において電気二重層はグラフェン上に固定されることになり移動は制限を受ける。その結果、ドーパントである窒素濃度に依存した発電量変化は極大値を示したと考えられる。

### (3) マイクロ流路を用いた起電力の定量化

上述の検討において、液滴の移動速度に依存する発生電圧の傾向を確認したが、液滴内部の流動状態は複雑であり定量的な評価を行うことが困難であった。そこで、制御された流れをつくることのできるマイクロチャネルを作製し、その内部にグラフェンと電極をアセンブリしたプロトタイプデバイスを作製し起電力の定量化検討を行った。

Fig. 7 (a)に示すマイクロ流路を作製した。マイクロ流路は、ガラス基板、スペーサー、トッププレートから構成され、底部内壁にグラフェンを設置した。また、トッププレートのアクセスポートから電極を接続し、流れ方向の起電力計測が可能となっている。水流の印加は脈動のないシリンジポンプの吸引によって行った。電極には外部可変抵抗を接続し、その両端の電圧を 20 ms のサンプリングレートで計測した。

Fig. 7 (b)にマイクロ流路内に設置したグラフェンのラマンスペクトルを示す。G'バンド (~2700 cm<sup>-1</sup>) 強度が G バンド (~1600 cm<sup>-1</sup>) 強度よりも強く観察されたことから単層グラフェンであることがわかる。また、起電力発生時におけるグラフェンの電気抵抗変化を計測した。Fig. 8 に典型的な発生電圧(a)と電気抵抗変化(b)を示す。水流の ON/OFF によく追従して電圧が発生していることがわかり、このとき、グラフェンの電気抵抗に変化はなかった。

Fig. 9(a)に流速を変化させたときの電圧シ

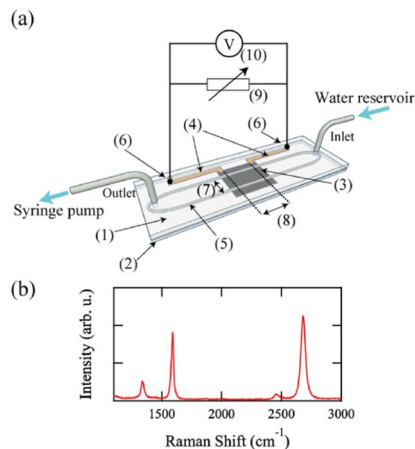


Fig. 7(a)グラフェンを底面にもつフローチップ概要 (1)トッププレート、(2)ガラス基板、(3)グラフェン、(4)電極、(5)スペーサー、(6)電極アクセスポート、(7)チャネル幅、(8)チャネル長さ: d、(9)ロード抵抗  $R_L$ 、(10)計測機器。(b)ラマンスペクトル

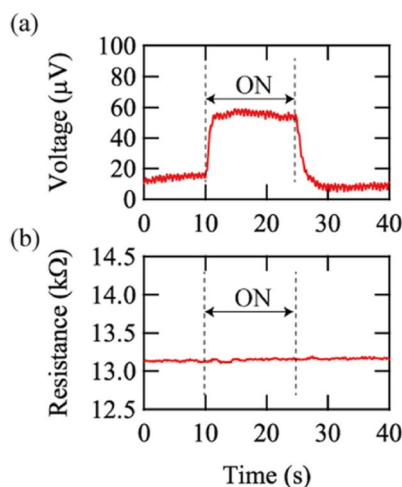


Fig. 8 (a)典型的な発生電圧シグナル。(b)電圧発生時のグラフェンの抵抗。

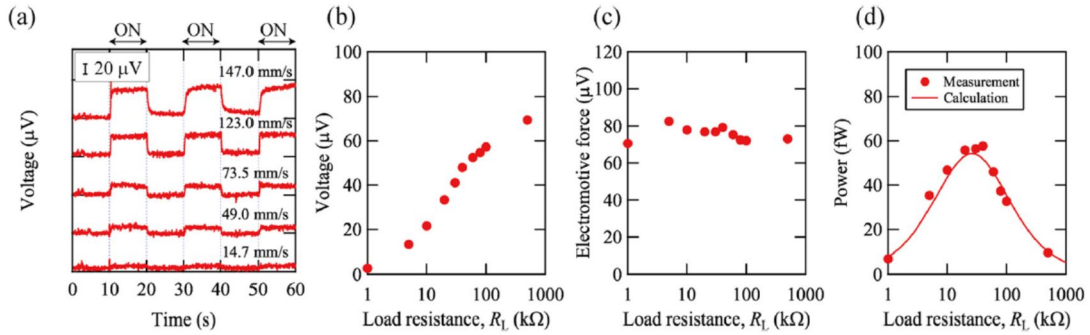


Fig. 9(a)発生電圧の流速依存性。外部可変抵抗と(b)発生電圧、(c)起電力、(d)出力。

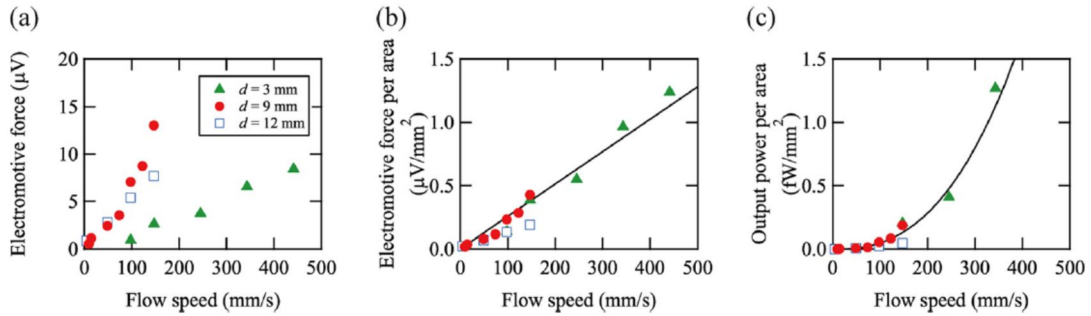


Fig 10 (a)起電力と流速の関係、(b)接触面積で規格化した起電力、(c)出力の流速依存性。

グナルを示す。流速の増加に伴って発生電圧が増加している。また、外部可変抵抗を変化させたときの電圧を Fig. 9 (b)に示す。外部抵抗の増加に依存して発生電圧も増加し飽和する傾向が確認できた。そこで、等価回路を内部抵抗 $r$ を持つ電圧源として仮定し、以下の式から起電力を求め、Fig.9 (c)にプロットした。その結果、起電力は外部抵抗値に依存せず一定であることが明らかになった。

$$E = \frac{r + R_L}{R_L} V$$

さらに、出力を以下の式から算出し、Fig.9 (d)にプロットした。

$$P = \frac{R_L}{(r + R_L)^2} E^2$$

ここでも出力を示すカーブは計算値とよい一致を示した。つまり、グラフェン上を流れる水で誘起される発電システムは、内部抵抗を持つ電圧源と同様の等価回路で表せることが明らかになった。一般的な化学電池と同じ等価回路であり、出力を最大化するためには外部抵抗を内部抵抗と一致させることが必要であることがわかる。

Fig. 10(a)に異なる 3 つのデバイスを用いて得られた起電力と流速の関係を示す。グラフェンと水が接触するチャンネル長によって異なる傾きを示すが、全てのデバイスにおいて線形の増加傾向を示すことがわかった。さらにチャンネル面積で規格化した起電力を Fig. 10 (b)に示す。異なるデバイスから得られたデータが直線近似できることが明らかになり、その傾きは  $0.0025 (\mu\text{V}/\text{mm}^2)/(\text{mm}/\text{s})$  であった。つまり、単位チャンネル面積、単位流速当たりの起電力が  $0.0025 \mu\text{V}$  であり、本研究条件下においてグラフェンと流れる水界面が作る発電システムの性能を定量的に評価できることを示している。同様に、出力も計算値と良い一致を示している (Fig. 10 (c))。

以上のように、グラフェンと水界面における流動によって誘起される発電システムについて研究を行い、液滴落下による発電の実証と窒素ドープグラフェンを用いた高出力化に成功した。また、マイクロ流路を用いたプロトタイプデバイスを作製し、制御された水流を印加することによって発電システムの等価回路規定と起電力の定量化に成功した。これらの成果はアメリカ物理学協会の学術誌 Applied Physics Letters 等で誌上発表を行い、特に興味深い論文として Scilight に掲載された。また、国内外 4 件の招待講演や講演奨励賞受賞など国内外で高い評価を受けた。

今後は詳細な物理現象の理解を進め強固な学術基盤を構築することで、新領域創成や新たな原理に基づく発電、センサーデバイスとしての展開が期待できる。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計6件（うち査読付論文 6件/うち国際共著 6件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Kim Wook, Okada Takeru, Park Hyun-Woo, Kim Jihye, Kim Sungsoo, Kim Sang-Woo, Samukawa Seiji, Choi Dukhyun	4. 巻 7
2. 論文標題 Surface modification of triboelectric materials by neutral beams	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of Materials Chemistry A	6. 最初と最後の頁 25066 ~ 25077
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1039/C9TA09990E	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する
1. 著者名 Okada Takeru, Kalita Golap, Tanemura Masaki, Yamashita Ichiro, Meyyappan M., Samukawa Seiji	4. 巻 112
2. 論文標題 Nitrogen doping effect on flow-induced voltage generation from graphene-water interface	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Applied Physics Letters	6. 最初と最後の頁 023902-1 ~ -4
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/1.5007273	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する
1. 著者名 Okada Takeru, Kalita Golap, Tanemura Masaki, Yamashita Ichiro, Meyyappan M., Samukawa Seiji	4. 巻 20
2. 論文標題 Role of Doped Nitrogen in Graphene for Flow-Induced Power Generation	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Advanced Engineering Materials	6. 最初と最後の頁 1800387-1 ~ -6
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/adem.201800387	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する
1. 著者名 Okada Takeru, Kalita Golap, Tanemura Masaki, Yamashita Ichiro, Ouchi Fumio S., Meyyappan M., Samukawa Seiji	4. 巻 12
2. 論文標題 Effects of nitrogen-dopant bonding states on liquid-flow-induced electricity generation of graphene: A comparative study	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Results in Physics	6. 最初と最後の頁 1291 ~ 1293
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.rinp.2019.01.023	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 該当する

1. 著者名 Kuriya Kei, Ochiai Kotaro, Kalita Golap, Tanemura Masaki, Komiya Atsuki, Kikugawa Gota, Ohara Taku, Yamashita Ichiro, Ohuchi Fumio S., Meyyappan M., Samukawa Seiji, Washio Katsuyoshi, Okada Takeru	4. 巻 117
2. 論文標題 Output density quantification of electricity generation by flowing deionized water on graphene	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Applied Physics Letters	6. 最初と最後の頁 123905 ~ 123905
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/5.0018862	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Kim Wook, Okada Takeru, Samukawa Seiji, Choi Dukhyun	4. 巻 722
2. 論文標題 Neutral Beam Aided Surface Modification for Controlling Triboelectric Behavior	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Proceedings of the Seventh Asia International Symposium on Mechatronics	6. 最初と最後の頁 346 ~ 350
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/978-981-32-9437-0_38	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

[学会発表] 計8件 (うち招待講演 2件 / うち国際学会 7件)

1. 発表者名 1.S. Obayashi, S. Samukawa, T. Takagi, H. Wada, T. Okada, Y. Watanabe, M. Hashimoto, T. Iijima, P. Guy, L. Udpa, Y. Hattori, H. Nagai, K. Shimoyama, M. Hirota, A. Yakeno, G. Kikugawa, A. Komiya, S. Takeda, J. Ishimoto, T. Uchimoto, H. Kosukegawa
2. 発表標題 Multiphase Flow and Interfacial Transport Phenomena at Phase and Material Boundaries
3. 学会等名 Eighteenth International Symposium on Advanced Fluid Information (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 T. Okada, G. Kalita, M. Tanemura, I. Yamashita, F. S. Ohuchi, M. Meyyappan, and S. Samukawa
2. 発表標題 Electrokinetics at the Interface between Graphene and Moving Water Droplet
3. 学会等名 8th International Symposium on Control of Semiconductor Interfaces (国際学会)
4. 発表年 2019年

1 . 発表者名 T. Okada, G. Kalita, M. Tanemura, I. Yamashita, F. S. Ohuchi, M. Meyyappan, and S. Samukawa
2 . 発表標題 Power Generation from the Interface between Graphene and Flowing Liquid Water
3 . 学会等名 32nd International Microprocesses and Nanotechnology Conference ( 国際学会 )
4 . 発表年 2019年

1 . 発表者名 T. Okada, G. Kalita, M. Tanemura, I. Yamashita, F. S. Ohuchi, M. Meyyappan, and S. Samukawa
2 . 発表標題 Investigation of Nitrogen Doping Effect on Electrokinetics at Graphene-Water Interface
3 . 学会等名 Materials Research Society 2019 Fall Meeting & Exhibit ( 国際学会 )
4 . 発表年 2019年

1 . 発表者名 T. Okada, G. Kalita, M. Tanemura, I. Yamashita, M. Meyyappan, and S. Samukawa
2 . 発表標題 Electricity generation by water flow on nitrogen-doped graphene
3 . 学会等名 Fifteenth International Conference of Flow Dynamics ( 招待講演 ) ( 国際学会 )
4 . 発表年 2018年

1 . 発表者名 T. Okada, G. Kalita, M. Tanemura, I. Yamashita, F.S. Ohuchi, M. Meyyappan, and S. Samukawa
2 . 発表標題 Energy harvesting application of nitrogen-doped graphene
3 . 学会等名 12th International WorkShop on New Group IV Semiconductor Nanoelectronics ( 招待講演 ) ( 国際学会 )
4 . 発表年 2018年



1. 発表者名 T. Okada, G. Kalita, M. Tanemura, I. Yamashita, M. Meyyappan, and S. Samukawa
2. 発表標題 Electricity generation from interface between flowing water and graphene
3. 学会等名 Materials Research Society 2018 Fall Meeting & Exhibit (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 栗谷 京生、落合 耕太郎、Golap Kalita、種村 眞幸、小宮 敦樹、菊川 豪太、小原 拓、山下 一郎、Fumio S. Ohuchi、M. Meyyappan、寒川 誠二、鷲尾 勝由、岡田 健
2. 発表標題 グラフェン上における液体流動発電の出力密度定量
3. 学会等名 2020年応用物理学東北支部 第75回学術講演会
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関		
米国	NASA	University of Washington	
韓国	Kyung Hee University		