

令和 3 年 4 月 23 日現在

機関番号：24506

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2017～2020

課題番号：17K05105

研究課題名(和文) グラフェンナノ電気機械式スイッチで生じる凝着過程の解明と光による制御

研究課題名(英文) Adhesion process of a graphene nanomechanical switch and its optical control

研究代表者

乾 徳夫 (Inui, Norio)

兵庫県立大学・工学研究科・教授

研究者番号：70275311

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,600,000円

研究成果の概要(和文)：ナノ機械式スイッチは機械的に電流のスイッチングを行う素子で、従来の素子と比べて待機中の消費電力が少なく、また耐熱熱が高いため、省エネルギーに貢献できる期待されている。特に、可動電極がグラフェンであるスイッチは電気伝導性と耐久性に優れているため、注目されている。しかし、可動電極が固定電極と凝着する問題がある。その原因の一つがカシミール効果による引力である。そこで、本研究ではまず、カシミール力によって生じるグラフェンの変形を調べ、印加電圧の増大することで生じる不安定性について考察した。また、光イオン注入を利用したカシミール力の制御方法を提案し、光照射によるグラフェン電極の運動を明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

グラフェンナノ機械式スイッチは優れた耐久性を有するため、実用化に向けた研究がすすめられている。しかし、ナノスケールで顕著になるカシミール力による凝着が問題になっている。本研究では、グラフェンナノ機械式スイッチに作用するカシミール力を計算することで可動電極のたわみを求め、グラフェンが安定に平衡状態を保てる状態を調べた。これにより構造の最適化に必要な計算ができるようになった。また、固定基板を半導体にした場合、光照射によってグラフェンのたわみが変化することを明らかにした。その結果、ナノ機械式スイッチを光信号で制御できる可能性を示せた。

研究成果の概要(英文)：Nanomechanical switches are electrical elements which switch currents mechanically and can reduce power consumptions in comparison with existing switches. In particular, graphene nanomechanical switches, whose movable electrodes are made of graphene sheets have excellent electric properties and durability. However, adhesion between a graphene sheet and a fixed electrode due to the Casimir effect has been a barrier of practical use. Thus, we have investigated the deformation of a graphene sheet by the Casimir force and consider instability, which increases with applied voltage. In addition, we proposed a control method of the Casimir force using optical ion implantation and simulate the dynamics of a graphene sheet after the irradiation.

研究分野：応用物理

キーワード：グラフェン ナノ機械式スイッチ カシミール力 凝着

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景 (4 page)

(1) スマートフォンや IoT (モノのインターネット) が普及するにつれて、高速処理ができる電子デバイスが求められ、その実現のため高密度集積化が行われてきた。しかし、電子回路の基礎となる MOS トランジスタを微細化していくと、絶縁層が薄くなり漏れ電流が増大する。そのため、待機中における消費電力の増大を招いている。

(2) 漏れ電流の低減を目的に開発が進められている電子素子の一つが、ナノ電気機械式スイッチである。基本構造は図 1 (a) に示す様に、ソース、ドレイン、ゲートから成り立っており、ソースは可動電極になっている。OFF の状態はソースとドレインが離れた状態で、十分大きな空気層で絶縁されているため漏れ電流はない。ソースとゲート間に電場を印加すると静電気が発生し、図 1 (b) の様に可動電極であるソースがドレインに接触し、電流が流れる。印加した電圧をゼロにすると、可動電極の復元力によりソースとドレイン間の接触が断たれ、OFF の状態になる。しかし、ここで問題になるのが、可動電極とドレインの凝着である。スイッチングに必要な電圧を下げるためにはソースと可動電極間の距離を短くすることが望ましい。その場合、可動電極に作用するカシミール力が大きくなり、印加電圧がゼロの場合でも可動電極がソースに凝着する現象が起きる。

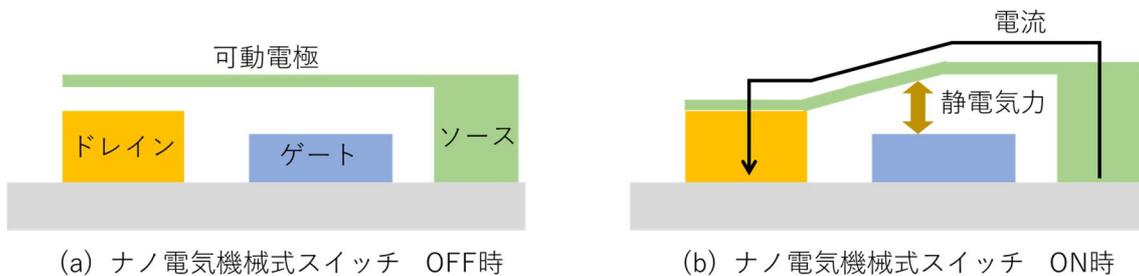


図 1 ナノ電気機械式スイッチの作動原理

(3) 可動電極に求められる条件は伝導性と耐久性であり、かつ微細加工に適している必要がある。これら条件を満たす材料としてグラフェンが有望であり、試作が行われている。従って、グラフェンのカシミール力による凝着防止が望まれている。

2. 研究の目的

(1) グラフェンは代表的な 2 次元物質であり高い電子移動を有する。また、大きなヤング率を有するが、曲げ剛性が小さいため柔軟性がある。加えて、耐久性があるため、ナノ電気機械式スイッチの素材として優れている。しかし、厚みが原子 1 個分と薄く、また、特異な電気的特性を有するので、グラフェンに作用するカシミール力を計算することは容易ではない。一方で、可動電極とゲート間に作用する力の大きさは、それらの間隔のわずかな違いにより、大きく変化するため、デバイス設計には正確なカシミール力の計算値が必要となる。そこで、本研究の第一目標は自立グラフェンに作用するカシミール力の計算である。次に、カシミール力がグラフェンに作用することで、どのように変形するかを検討しなければならない。特に、電源 OFF 時において、可動電極とゲート間の距離を短くしていくと、カシミール力が増大し、グラフェンの復元力を上回る。その結果、プルインと呼ばれる急激な引き付け運動が起こり、可動電極とゲートは接触する。したがって、電源 OFF 時における自立グラフェンの安定構造を求めることが重要となる。

(2) 本研究の特徴の一つがナノ電気機械式スイッチの光制御である。通常、MEMS (Micro Electro Mechanical Systems) を光制御する場合、フォトダイオードのような半導体素子を利用することが多い。しかし、半導体素子をナノ電気機械式スイッチに付加すれば集積度が下がる。また、ナノ電気機械式スイッチの長所である、高耐熱性や高耐放射線といったメリットが失われてしまう。そこで、複雑な電子回路を用いず光照射によりカシミール力を変化する方法の提案を目指した。

(3) 半導体集積回路の作製と比較して、グラフェンを用いたナノ電気機械式スイッチの作製で大きく異なるのが、自立グラフェンの作製である。既に、多くの自立グラフェンが作製され研究に用いられているが、その多くは高配向性熱分解グラファイトから劈開法で作製したものである。品質が高いが同時に多数の自立膜を作製することが困難である。そこで、化学気相成長法で銅薄膜上に作成されたグラフェンを多数の微小ピットが形成された酸化シリコン基板に転写することにより、自立グラフェンが作製できるかを検討した。

(4) 可動電極であるグラフェンがゲートに固着することを防止するためには、グラフェンとゲート間に反発力を発生させ、それを制御できることが望ましい。そこで、注目したのがグラファイトの反磁性である。常温において、グラファイトの反磁性はビスマスに次いで大きく、磁石を近

づけると反発することが知られている。しかし、グラフェンの反磁性については十分には解明されておらず、水にグラフェンを分散し、磁場の印加による運動の変化を解析することとした。

(5) 上記の方法では外部磁場が必要であるので、可能であれば反磁性を利用して、カシミール力を斥力化できれば、グラフェンの固着問題を解消できる可能性がある。近年、ランダム積層グラフェンが大きな反磁性を示すとの理論予測があり、それが正しいと仮定した場合のカシミール斥力を見積もり、ナノ電気機械式スイッチへの応用に必要な条件を探ることを目標とした。

3. 研究の方法

(1) 本研究ではカシミール力が重要な働きをしているので、その発生機構と性質について短く述べる。カシミール力は真空のゼロ点振動により生じる力であり、電的に中性な物体間でも作用する。光が物体と相互作用すると、光の運動量が物体に移動することが可能で、その結果物体に力が作用することになる。古典電気磁気学の範囲では、光が無い状態では力もゼロになるが、量子化して考えると光子の数がゼロであっても、揺らぎはゼロにならず、それがカシミール力の発生源となる。従って、カシミール力の発生に外部エネルギー源は必要としない。質量があれば常に重力が作用するのと同様に、光を少しでも反射すれば、カシミール力が発生する。そのため、MEMS の動力源として有効に活用することが検討されている。重力と著しく異なるのは、重力が質量のみ依存するのに対して、カシミール力は物体の反射率に加えて、形状や温度にも依存する点である。そのため、解析は複雑となる一方、様々な方法でカシミール力を制御できる。

(2) グラフェンとゲート間のカシミール力はそれらの間隔に強く依存する。仮に、グラフェンとゲートの反射率が1である場合、間隔の4乗に逆比例する。つまり、間隔が狭くなると急激に力が増大する。この間隔依存性を決定することが最も重要で、そのためにはグラフェンの反射率が重要となる。ここで、強調すべきは、反射率が周波数に依存する点で、そのため、任意の周波数における誘電率が必要となる。グラフェンはその特異な電的性質のため、反射率がグラファイトとは大きく異なる。その違いを考慮し計算を行った。カシミール力によりグラフェンは変形するが、変形するとカシミール力が変化するため、変形は自己無頓着で解く必要がある。本研究ではカシミール力の計算に Dirac 方程式を用い、形状決定に梁理論を用いた。

(3) カシミール力の光制御方法として、光イオン注入方法を用いた。図2のようにゲート電極をドーブしたシリコン基板とし、光を照射した場合を考える。適切な入射波長を選べるとシリコン内で過剰な電子とホール対を生成することができる。これらキャリアは光の反射率を増大させる。よって、カシミール力が増大する。

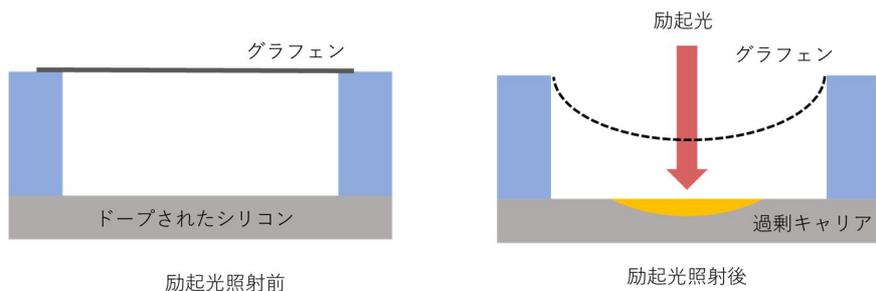


図2 光照射によるグラフェンの変形

(4) グラフェンは酸化シリコンとの密着性がよく、また明暗の違いにより付着の有無を確認できるため、酸化シリコン基板を光リソグラフィー法により加工し、正方形の井戸を表面に形成した。その表面に CVD 法で作製したグラフェンを転写し、走査型電子顕微鏡、ラマン顕微鏡、原子間力顕微鏡で自立膜の確認を行った。注目した点は井戸のアスペクト比と自立の成否である。幅が広く、深さが浅いとカシミール力によりグラフェンが井戸の底面に付着し、自立状態が実現できない。そこで、様々なアスペクト比の井戸を形成し観察を行った。

(5) グラフェンの反磁性を調べるために、グラフェンフレークを水に分散し、そのブラウン運動を暗視野顕微鏡で観察した。磁束密度の空間勾配を変えることにより、グラフェンに作用する力を変化させる。磁場に平行にグラフェンになると光の透過率が上がるため、透過率からグラフェンと磁場のなす角度が推定できる。

(6) 反磁性がカシミール力に及ぼす効果を調べるため、ランダム積層グラフェンの透磁率とカシミール力の関係を計算した。

4. 研究成果

(1) 劈開法によるグラフェンの作製方法が考案されてから間もなく、劈開法を利用した架橋したグラフェンも作製され、原子間力顕微鏡を用いた材料物性測定が行われた。しかし、大量にグラフェンスイッチを作る場合は、CVD(化学気相成長)法で作製されたグラフェンをFIB(Focused Ion Beam)溝加工した基板に転写するのが望ましいと考えられる。その場合、溝が浅いとグラフェンは基板底面と接触して可動電極とならない。そこで、井戸の幅や深さを变えて単層グラフェンを酸化シリコン基板に転写を行い、グラフェン架橋膜を作製した。図3に示すように、電子顕微鏡により井戸の断面を撮影し、自立の有無を確認した。さらにグラフェン膜をラマン顕微鏡および原子間力顕微鏡で観察した。

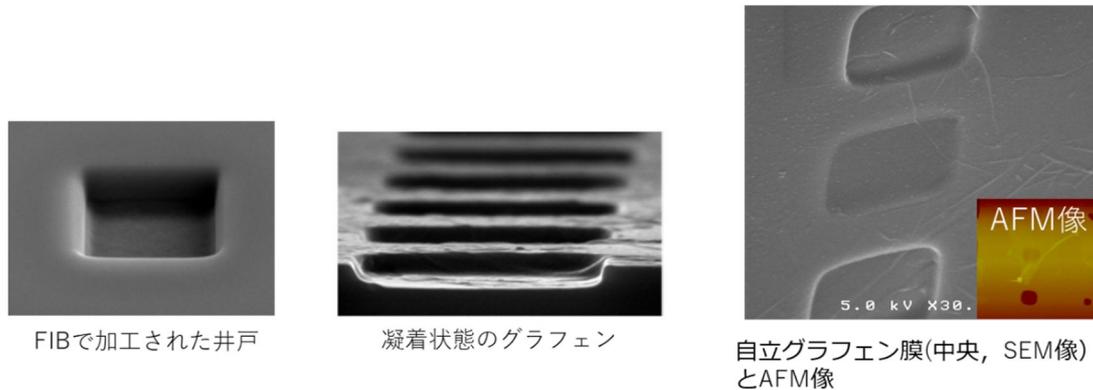


図3 架橋グラフェンの評価

(2) 架橋グラフェンが作製されたので、その光制御について考察した。グラフェンは薄くかつ軽量である。また、単位質量あたりの引っ張り強度は著しく大きい。一方、曲げ剛性は小さいため、グラフェンに外力を加えると高速に変形する。従って、グラフェンと固定電極間の距離と外力の関係が重要になる。主たる外力は静電気力とカシミール力である。カシミール力の計算には通常、リフシツが考案した式が使われ、グラフェンの反射率を振動数の関数で表現しなくてはならない。多くの場合、反射率は誘電関数を用いて計算できるが、グラフェンの厚みが原子一層であるため、マクロな物理量である誘電率を定義することが困難である。そこで、場の量子論から求められた反射率を用いてカシミール力を計算した。次に、平衡状態(カシミール力と静電気力がグラフェンの復元力と釣り合った状態)におけるグラフェンの形状を薄板理論から決定した。固定電極をドーブしたシリコン基板とし、光イオン注入でシリコンの誘電率を変化させた場合を計算した結果、過剰キャリアの増大に伴い、グラフェンは可動電気に引き寄せられ、最終的には固定電極に接地することがわかった。この遷移に要する時間は1 ms以下で微小な光の照射で高速にスイッチングできることを示した[論文7]。また、平衡時の安定についても調べた[論文9]。加えて、カシミール力は常に揺らいでいるため、その温度依存性を調べた[論文6,8]

(3) 前述のグラフェンの運動を解析する際、連続体近似を用いた。そのため、原子スケールにおける凝着の詳細が分からなかった。グラフェンの運動を分子動力学(MD)で計算できれば理想的であるが計算方法が確立していない。その要因の一つはMDが局所的な力で運動を決定するのに対して、カシミール力はグラフェンと固定電極間に存在する電磁場で決まるからである。MDではカシミール力をしばしば原子間の2体相互作用の和で合力を表すが、それは厳密でないため、精度や多体効果の影響を調べた。[論文2,3,10]

(4) グラフェンナノスイッチを大気中で使用する場合、グラフェンがスイッチングで急激に駆動すると、気体分子の衝突がおこる。この気体がグラフェンに衝突してから再び打ち出されるまでのプロセスをMDで解析した。[論文4,5]

(5) カシミール力が光で変化できることを示したが、その方向は常に引力であった。もし、カシミール力を斥力に反転できれば、より自由度の高い制御が可能になる。しかし、真空中でカシミール力が斥力になる物質の組み合わせは知られていない。そこで、グラフェンの反磁性に注目した。グラフェンの透磁率は既存物質の中では極めて小さいく、反磁性が強い、また、図4のように、グラフェンをランダムに回転して積層することで、さらに反磁性が増大することが理論的に予言されている。このようなランダム回転グラフェンはまだ作製されていないが、透磁率が十分小さくなった場合に、カシミール力がどのように変化するか計算した。その結果、磁性誘電体とランダム積層グラフェンの組み合わせにおいて、透磁率が十分小さく、かつ物体間の距離が大きい場合、カシミール力が斥力になることが分かった[論文 1]。

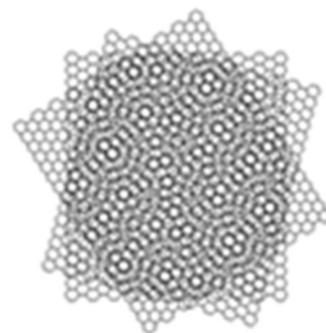


図4 ランダム積層グラフェンのモアレ像

(6) 通常、カシミール力は引力であり、その結果、凝着を引き起こす。したがって、カシミール力を斥力に反転できれば、凝着の予防になる。しかし、真空中で斥力となる物質の組み合わせは発見されていない。そこで、その一つの候補として方向二色性物質に注目した。カシミール力は真空が有する電磁場のゼロ点振動が物質との相互作用により変化することで生じ、物質の反射率がカシミール力の大きさを決める。方向二色性物質は入射方向によって反射率が異なる。特に磁場中のメタホウ酸銅は著しい異方性を示す。そこで、メタホウ酸銅の有するマルチフェロイクスの性質を有する二準位原子系を考え、光の入射方向の違いによる運動量変化を計算した。[論文 11]

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計11件（うち査読付論文 11件／うち国際共著 0件／うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Norio Inui	4. 巻 17
2. 論文標題 Casimir Force Acting on a Multilayer Graphene Sheet with Strong Diamagnetism	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 e-Journal of Surface Science and Nanotechnology	6. 最初と最後の頁 108-116
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1380/ejssnt.2019.108	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 -
1. 著者名 Norio Inui	4. 巻 89
2. 論文標題 Correlation and van der Waals Force between a Single Atom and One-Dimensional Atomic Array	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of the Physical Society of Japan	6. 最初と最後の頁 034001(7)
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.7566/JPSJ.89.034001	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 -
1. 著者名 Norio Inui	4. 巻 87
2. 論文標題 Upper and lower bounds on infinite summation of pair potential energy between atom and single graphene sheet	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Journal of the Physical Society of Japan	6. 最初と最後の頁 104001.1-7
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.7566/JPSJ.87.104001	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 -
1. 著者名 Norio Inui	4. 巻 16
2. 論文標題 Desorption process of an atom from a vibrating graphene surface	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 e-Journal of Surface Science and Nanotechnology	6. 最初と最後の頁 400-405
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1380/ejssnt.2018.400	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 -

1. 著者名 Inui Norio	4. 巻 99
2. 論文標題 Molecular dynamics simulations of Lennard-Jones systems confined between suspended nanoscale graphene sheets	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Physical Review E	6. 最初と最後の頁 022102.1-8
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevE.99.022102	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 -

1. 著者名 Norio Inui	4. 巻 631
2. 論文標題 Interaction force between ultrathin multilayer films induced by quantum fluctuations	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Thin Solid Films	6. 最初と最後の頁 132-140
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.tsf.2017.04.010	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 -

1. 著者名 Norio Inui	4. 巻 122
2. 論文標題 Optical switching of a graphene mechanical switch using the Casimir effect	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 104501(7)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/1.4993672	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 -

1. 著者名 Norio Inui	4. 巻 87
2. 論文標題 Fluctuation of a Piston in Vacuum Induced by Thermal Radiation Pressure	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Journal of the Physical Society of Japan	6. 最初と最後の頁 104006(7)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7566/JPSJ.86.104006	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 -

1. 著者名 Norio Inui	4. 巻 51
2. 論文標題 Equilibrium shape of a suspended graphene sheet under electrostatic and van der Waals forces	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Journal of Physics D	6. 最初と最後の頁 115307(7)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1361-6463/aaad9b	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 -

1. 著者名 Norio Inui	4. 巻 102
2. 論文標題 Nonadditive properties of van der Waals interactions in a one-dimensional dipole array	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review A	6. 最初と最後の頁 022811(9)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevA.102.022811	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 -

1. 著者名 Norio Inui	4. 巻 90
2. 論文標題 Asymmetrical Recoil of an Atom with an Optical Absorption Coefficient Depending on the Incident Direction	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of the Physical of Japan	6. 最初と最後の頁 024706(8)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7566/JPSJ.90.024706(8)	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 -

〔学会発表〕 計6件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件)

1. 発表者名 乾 徳夫
2. 発表標題 方向二色性をもつ分子の光散乱における非対称反跳
3. 学会等名 日本物理学会 第76回年次大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 乾 徳夫
2. 発表標題 直鎖状原子間に生じるファルデルワールス相互作用の非加算性
3. 学会等名 日本物理学会 2020年秋季大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 乾 徳夫
2. 発表標題 1次元双極子列と単一双極子間に作用するファンデルワールス力
3. 学会等名 日本物理学会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 乾 徳夫
2. 発表標題 グラフェンシートと原子間に作用するファンデルワールスポテンシャルの上限と下限
3. 学会等名 日本物理学会第74回年次大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Norio Inui
2. 発表標題 Van der Waals force acting on a graphene electromechanical switch
3. 学会等名 Graphene Week 2017 (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 乾 徳夫
2. 発表標題 多層原子膜間に作用するCasimir 力
3. 学会等名 日本物理学会第72回年次大会
4. 発表年 2017年

〔図書〕 計1件

1. 著者名 伊丹 哲郎, 松井 伸之, 乾 徳夫, 全 卓樹	4. 発行年 2017年
2. 出版社 コロナ社	5. 総ページ数 242
3. 書名 量子力学的手法によるシステムと制御	

〔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