

令和 2 年 6 月 18 日現在

機関番号：24403

研究種目：基盤研究(A) (一般)

研究期間：2017～2019

課題番号：17H01040

研究課題名(和文)原子層膜ナノ電気機械の非線形振動の重ね合わせの状態制御

研究課題名(英文) Superposition of state of nonlinear oscillation on nano-electro-mechanical system consisting of atomic layer material

研究代表者

秋田 成司 (Akita, Seiji)

大阪府立大学・工学(系)研究科(研究院)・教授

研究者番号：60202529

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 34,100,000円

研究成果の概要(和文)：揺らぎを加えたグラフェン等で構成された原子層膜ナノ電気機械の非線形振動の重ね合わせの状態制御の実現を目的とし、同デバイスの作製プロセスの最適化、動作原理の実証とデバイス設計の最適化、最適な制御方法の探索について研究を進めた。その結果、2つのナノ機械振動子を結合した機械共振系で共鳴振動を実現できた。また、原子層の基板との支持部の界面と、振動や電荷、熱の各緩和時間との関係を解明した。さらに、非線形振動へ与える揺らぎとして最も影響の大きいものは光誘起熱効果であることを明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

複数の結合した非線形共振システムはゆらぎの共鳴現象を利用する脳の演算システムを模倣する高速演算システムとして注目を集めている。これを実現するために非線形共振システムとして複数の非線形能動デバイスを組み合わせた電氣的共振回路や量子閉じ込め系などが検討されている。本研究で検討した揺らぎを持つナノスケールの非線形機械的共振器を複数結合した共鳴振動や重ね合わせは、こういった脳の演算システムを模倣する高速演算システムの実用化へ向け大きな意義があると考えられる。

研究成果の概要(英文)：The purpose of this research is to realize superposition of nonlinear vibrations of atomic layer nano-electromechanical systems with fluctuations composed of atomically thin film like graphene. We examined the optimization of the fabrication process of the device, the demonstration of the operation principle, the optimization of the device design, and the optimal control method. As a result, we have realized the resonant vibration in a mechanical resonance system in which two nano-mechanical vibrators are coupled. We also clarified that the interface between the atomic layer substrate and the support plays an important role to the relaxation times of vibration, charge, and heat of the system. Furthermore, it was clarified that the most significant fluctuation on the nonlinear vibration was the photo-induced thermal effect.

研究分野：ナノデバイス

キーワード：グラフェン 原子層膜 ナノ電気機械デバイス ナノ機械共振器 振動の重ね合わせ 非線形振動

様式 C-19、F-19-1、Z-19（共通）

1. 研究開始当初の背景

複数の結合した非線形共振システムはゆらぎの共鳴現象を利用する脳の演算システムを模倣する高速演算システムとして注目を集めている。これを実現するために非線形共振システムとして複数の非線形能動デバイスを組み合わせた電氣的共振回路や量子閉じ込め系などが検討されている。機械的共振器では、揺らぎの候補の一つである振幅のカオス状態も容易に発現でき、さらに各々の共振器を機械的に結合し振動を重ね合わせることができるなど多くの利点があるなど注目を集めていた。

非線形共振現象は機械的振動を支配する運動方程式においてポテンシャル項の非線形性で説明でき、ポテンシャル項を操作することで非線形振動を制御できる。ただし材料物性のみ起因した非線形振動は大振幅条件下でしか発現せず制御が困難であった。ここで、機械的な共振を利用したナノ電気機械システム (NEMS) 構築のための構成要素としてカーボンナノチューブ (CNT) やグラフェン、2次元遷移金属ダイカルコゲナイド等の原子層材料は有力な候補の一つである。さらに、電氣的・光學的にも優れた材料であるため電気光学効果をカップリングさせた NEMS が構築でき、その制御および重ね合わせが可能であることが期待できる。

申請者もナノカーボン NEMS に関する研究を進めてきた。例えばナノカーボン機械共振器の振動を大気中で高精度な測定法を開発し大気中で 8×10^{-20} g の極めて高い質量分解能を達成した。最近では、振動を支配するポテンシャルを変調することで極小振幅振動においても非線形性が発現することを見出した。さらに、線形応答の振動振幅条件下で振動子近傍を電子線により局所的に帯電すると小振幅にもかかわらず非線形性が発現することを見出した。これが周期振動に加えて振動よりも遅い時定数で変化する帯電に誘起された遅延効果により誘起されることを明らかにした。また、グラフェン機械共振器と光共振器を組み合わせた NEMS において光強度を変化することで、非線形振動と線形振動の遷移や非線形振動における反共振状態を見出した。(図1) [①②] このように NEMS における非線形制御の実現にむけ研究を推し進めていた。

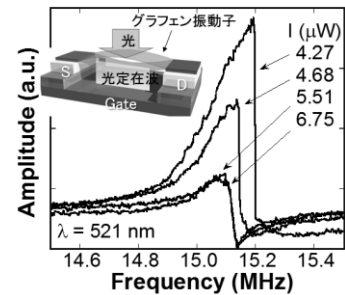


図1 光定在波によるナノ機械共振器の非線形振動制御

2. 研究の目的

本研究では、原子層 NEMS 非線形ナノ機械振動子を弱く結合し、その振動の重ね合わせによる共鳴現象を実現することを主たる目的とし以下の4項目について検討する。

- (1) 遅延効果による非線形振動の静的制御： 電子線照射時の誘電緩和を制御するため、電極を配したデバイスを作製し電子線に頼らない印加電圧による電荷制御可能な非線形原子層 NEMS を構築する。
- (2) 動的フィードバックによる非線形振動の能動制御： 機械的振動から任意の位相差で外場を作用させる動的フィードバックにより非線形応答を発現させ、その機構を明らかにする。
- (3) 2つの機械振動の結合強度を変化できる NEMS の実現： 2つの機械的共振器を機械的な結合を通し結合させる。2つの原子層機械共振器に光誘起熱歪を加え機械的結合強度を変化できるデバイスを実現する。さらに2つの NEMS の結合系の結合強度・方法と重ね合わせ振動の関係を実験・理論両側面から明らかにし、振動の同調現象（共鳴状態）を見出す。

3. 研究の方法

(1) 遅延効果による非線形振動の静的制御

- 誘電緩和時間変調へ向けた界面制御： 接触界面における熱の流入出と振動子の熱容量が決定する熱応答時間を制御するために支持部界面を変化（単分子膜、酸化膜など）しその影響について検討する。また、熱的な遅延効果と同様に界面に単分子膜などを設け系の緩和時間を変化する。
- 理論・実験の非線形振動解析： 非線形項を含む単純化したダフティング型のバネ運動方程式の数値解と実験結果の比較から制御パラメータを抽出する。

(2) 動的フィードバックによる非線形振動の能動制御

- 位相変調と界面効果の関係： 振動と周期的な外場変調の位相を変化し動的なフィードバックを加え非線形効果の制御を電氣的に行う。これを実現するために S/N 向上と高速化を図る。

(3) 2つの機械振動の結合強度を変化できる NEMS の実現

- 機械的結合 NEMS: 図2のように2つの原子層機械共振器を細い原子層で橋渡しした構造を作製する。運動方程式では2つの外力項にそれぞれの振動が結合され各々に個別に外部から光誘起熱歪を与え共振を変調する。さらに振動の重ね合わせによる共鳴現象を実現する。

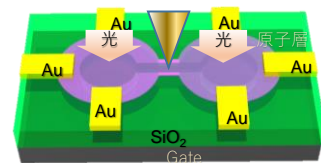


図2 機械的に結合した2つの原子層機械共振器

4. 研究成果

(1) 遅延効果による非線形振動の静的制御

・遅延効果による機械振動制御

界面電荷の影響を明らかにするためにとしてグラフェンと n 型 Si ショットキー界面について検討した。その結果、界面でトラップされたキャリアの蓄積および緩和時定数についてトンネル効果を考慮したモデルで解析できることを明らかにした。〔③④〕さらに、熱容量や熱膨張率の異なる原子層膜を積層するにより、見かけの熱膨張率を制御することに成功した。このような複合系を用いることで熱の効果、静電的な効果などを切り分けて議論することが可能になった。

〔⑤〕

ごく最近、バンドギャップのある半導体的な元素層膜として注目を集めている MoS₂ に関して吸収可能な波長の光照射により共振特性が変化し、Q 値が 2~3 倍向上することを見出した。本研究では、静電駆動法を用いた片持ち梁 MoS₂ または h-BN 機械共振器の駆動方法および共振特性に対する光誘起熱効果について光強度依存性の観点から調べた。

MoS₂, hBN 剥片を機械的剥離法により作製した。PDMS ゲル転写法により、SU-8 上に転写することで、電気的にフローティングした状態の片持ち梁共振器を作製した (図 3(a),(b))。電極間に交流バイアス+直流バイアスを印加し、静電引力により片持ち梁を駆動した。共振特性は、波長 518 nm のプローブレザーを片持ち梁先端付近に、波長 660 または 979 nm レーザー光を片持ち梁全体に照射し、その強度を変化させ、測定を行った。

片持ち梁 MoS₂ の場合、強く吸収する 660 nm 光の照射時、光強度の増加とともに共振周波数が高い方へシフトした。これは、基板と MoS₂ 間の光定在波による光誘起熱効果だけでなく MoS₂ 中の光誘起キャリアによる誘電緩和時間が短くなったためであると考えられる。さらに、Q 値も向上したことから系全体の電気的な静的フィードバックとして作用する緩和時間が短くなったと考えられる。また、DC バイアスの変化により線形・非線形の制御も可能であることが分かった。一方、ほとんど吸収しない 979 nm 光の照射時、ほとんど変化が見られなかった。また、hBN の場合には可視光領域で吸収が殆どないため、どちらの波長でも大きな共振周波数のシフトは見られなかった。このように、光学的に透明な材料を用いることで光誘起熱効果を大きく抑圧出来る事が分った。これにより、静電的な効果と光熱効果を切り分けたモデル実験が可能となった。〔⑥〕

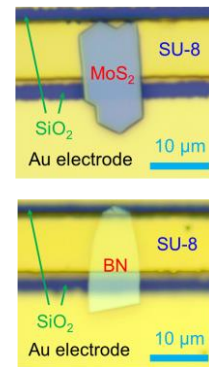


図 3 片持ち梁共振器の光学顕微鏡画像. (a) MoS₂, (b) hBN

・機械振動制御へ向けた 2 次元原子層物質における界面・表面修飾

原子層膜は究極的な薄さという構造上の特徴を有していることから、表面の制御が膜全体の性質の制御につながる。そのため、原子層表面を化学的に修飾する技術が広く開発されてきた。原子層表面の化学修飾は、外来分子センシング感度の向上といった表面機能の開拓だけではなく、NEMS の共振特性の制御にも有効である。したがって、原子層の表面修飾に用いる化学反応の制御が可能となれば、NEMS 共振特性の調整技術の開発につながると期待される。これまでに、代表的な原子層物質であるグラフェンの表面酸化反応に関し、研究分担者のグループにおいては、FET の構造を用いることにより酸化度が制御できることを示してきた。具体的には、FET に印加するゲート電圧が正の時には酸化反応が起こらず、負の時にグラフェン端から酸化反応が進行するというものである〔⑦〕。端から酸化が進行していくということは、未酸化部の幅を制御できることを意味する。この FET 制御型のグラフェン酸化反応について、詳細な実験条件 (図 4a) を詰めることによって、FET 特性 (伝達特性) の制御を実現した (図 4b)。ここでは FET の電流オンオフ比が 20 倍近く上昇しており、未酸化部のグラフェンが狭細化してナノリボ

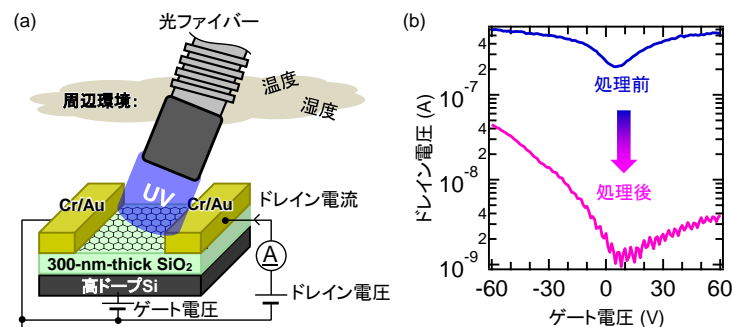


図 4 FET によるグラフェン表面酸化の制御。(a) 制御パラメータ。(b) 処理前後の伝達特性。

ン状になってバンドギャップが形成されたことで理解できる [⑧]。また、FET のゲート電圧印加と同様の効果を及ぼす極性分子層をグラフェン支持基板表面に形成することで、グラフェンの電荷キャリア密度の制御 [⑨] を介したグラフェン表面修飾反応 (光化学的なアール基の付加反応) の制御 [⑩] も成し遂げている。このように、原子層 NEMS の共振特性の制御につながる成果として、種々の原子層表面修飾反応の制御を成し遂げた。

NEMS の共振特性は、振動子の支持部分の特性に大きく左右される。弱い van der Waals 力によって堆積されることが多い原子層膜を振動子として利用する場合、支持部の密着性の悪さが共振特性に対して悪影響を及ぼす可能性がある。そこで、多くの原子層膜と同様の堆積手法が取られる有機半導体単結晶を例に取り、弱い van der Waals 力による接合が電気的特性に及ぼす影響を調査した。代表的な有機半導体であるルブレンの単結晶を貼り付けて作製した二端子素子 (図 5a) は、印加電圧の極性に従って整流性の極性が反転するような、電気的特性の可逆的スイッチングを見せることが明らかとなった (図 5b) [⑪]。これは、電極仕事関数の変調に伴って、電極/半導体界面の電荷注入障壁が変化したことにより理解できる。また、このスイッチングは測定環境中に水分子が存在する場合のみ起こることを確認しており、密着性の悪さによって生じる空間 (図 5c) を介して電極/半導体界面へと環境中の水分子が到達したことによると考えられる。また、他にも、チタニアの原子層をベースとした膜の電気的特性を調査したところ、外来分子ではなく、内在の酸素欠損が電極/半導体界面に移動することによって同様のスイッチングが現れることを明らかとした [引用文献⑫]。これらの結果は、原子層の支持部、特に電極との界面における変調が及ぼす影響を明らかにしたものであり、原子層 NEMS の共振特性の理解にも重要な知見を与えるものである。

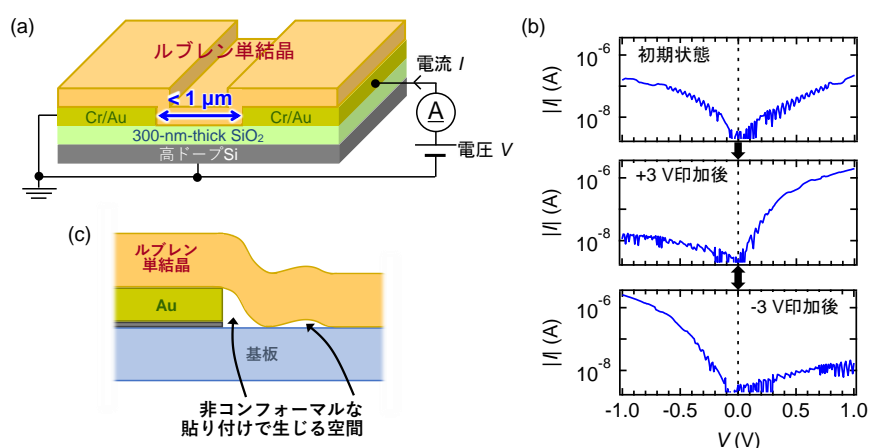


図 5 van der Waals 力によって貼り付けられた系の密着性の悪さに起因する電気的特性の不安定性。(a) テスト素子構造。(b) 観測された電気的特性の可逆的スイッチング。(c) 密着性の悪さにより生じる空間の模式図。このような空間から水分子が侵入した結果、スイッチングが生じたと考えられる。

(2) 動的フィードバックによる非線形振動の能動制御

図 6 に示す実験系において、グラフェンと基板間の光の定在波によって引き起こされる光熱効果による非線形振動領域におけるドラム型グラフェン機械共振器の共振特性の制御について検討した。ここで、2つの波長の異なるレーザー (波長: 406 または 521 nm) をドラム中心に照射しその干渉光強度変化から振動振幅及び位相の周波数依存性を測定した。ここで、位相の共振点近傍の変化率が非線形性を表す良い指標になる事を提案した。[②]

図 7 にプローブ光強度と振幅および非線形性の関係を示す。波長によりその挙動が逆転していることが分かる。さらに、従来のダフティングタイプの非線形性における共振特性とは異なり、非線形共振領域の共振特性は、振幅のわずかな変動にもかかわらず変化していることが分かる。これは、駆動用レーザーの微弱な散乱光が動的なフィードバックとして作用し、さらに光の定在波による静的なフィードバックである光熱効果が重畳したモデルによって説明できる。

この現象を熱伝導方程式と Duffing タイプの非線形効果を取り入れた運動方程式によりモデル化し数値計算を行った。その結果、図の実線に示すように実験結果と計算結果はよく一致しモデルの正当性が示された。この解析を通して、系の熱緩和時間と共振振動周波数の関係が重要であり、遅延効果が共振特性に大きな影響を与えていることが明らかになった。このように、非常にわずかな光熱効果においてもグラフェンの応力または張力の変調させることで遅延効果を引き起こし、振動状態を線形から非線形へと振動振幅の大幅な変化なしに移行できることを示した。

[②]

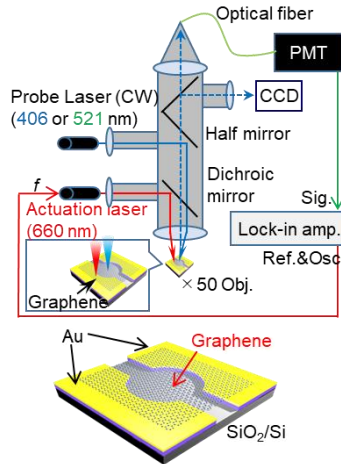


図6 原子層共振器の共振特性の測定系。

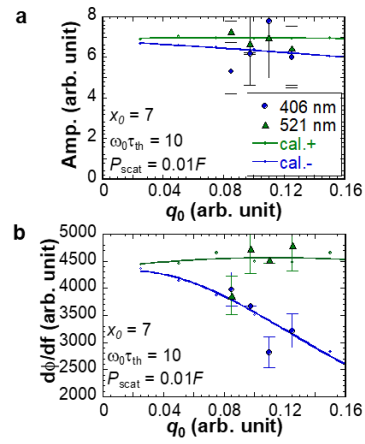


図7 (a)共振振幅と(b)非線形性のプローブ光強度依存性。実線はモデルに基づく計算値。

(3) 2つの非線形機械振動の結合強度を変化できる NEMS の実現

ここでは、グラフェン・ブリッジで接続された2つのドラム型グラフェン機械共振器で構成される結合した機械共振器の結果について述べる。試料はまず単層グラフェンを SiO₂ (500 nm) / Si 基板に転写し、O₂ プラズマでエッチングして幅 10 μm のグラフェンストライプを形成した。次に、グラフェンストライプの下の SiO₂ 層をバッファード HF でエッチングし、超臨界乾燥を使用して乾燥させた。このようにして製作した幅 2 μm のグラフェン・ブリッジと結合した直径 6 μm のグラフェン機械共振器を図8に示す。

2つの機械共振器 (G-MR A, G-MR B) のうち1つのみを図2のピンク矢印で示すように、波長 660 nm の強度変調したレーザーを用い光誘起熱歪みによって駆動した。このような駆動条件で測定した各々の共振特性を図9に示す。同様の共振曲線が G-MR B のみの駆動でも観察された。このように G-MR A または B の一つのみの駆動でも、両方の機械共振器の共振が正常に観測され、確かに2つの共振器がグラフェン・ブリッジを介して結合していることが分かった。さらに、G-MR A の共振周波数で静電駆動を行い G-MR B 中心に CW レーザーを照射することで G-MR A の共振振幅が図10に示すように変調可能なことを見出した。また、12.9 MHz 前後に共鳴振動が観測され、それより高い周波数で複雑な結合共振が観測された。

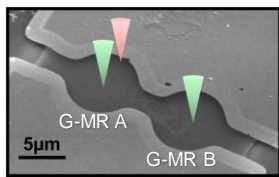


図8 結合したドラム型グラフェン機械共振器の SEM 像。

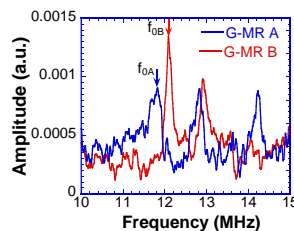


図9 G-MR A のみを駆動した場合の共振特性。

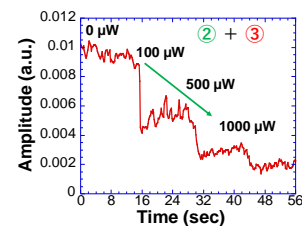


図10 G-MR B への CW 光照射時における G-MR A の振幅強度の変化。

<引用文献>

- ① Masaaki Yasuda, Kuniharu Takei, Takayuki Arie, Seiji Akita, *Sci. Rep.*, **7**, 2825 (2017).
- ② Taichi Inoue, Yuki Anno, Yuki Imakita, Kuniharu Takei, Takayuki Arie, Seiji Akita, *ACS Omega*, **2**, 5792 (2017).
- ③ Shiho Kobayashi, Yuki Anno, Kuniharu Takei, Takayuki Arie, Seiji Akita, *Sci. Rep.*, **8**, 4811 (2018).
- ④ Yuga Miyamoto, Daiki Yoshikawa, Kuniharu Takei, Takayuki Arie, Seiji Akita, *Jpn. J. Appl. Phys.*, **57**, 06HB01 (2018).
- ⑤ Taichi Inoue, Yuta Mochizuki, Kuniharu Takei, Takayuki Arie, Seiji Akita, *2D Mat.*, **5**, 045022 (2018).
- ⑥ Daiki Yoshikawa, Kuniharu Takei, Takayuki Arie, Seiji Akita, *Appl. Phys. Express*, **12**, 105001 (2019).
- ⑦ Nobuhiko Mitoma, Ryo Nouchi, *Appl. Phys. Lett.* **103**, 201605 (2013).
- ⑧ Ryo Nouchi, Morihiro Matsumoto, Nobuhiko Mitoma, *J. Mater. Chem. C* **7**, 1904 (2019).
- ⑨ Ryo Nouchi, Kei-ichiro Ikeda, *Appl. Phys. Express* **13**, 015005 (2020).
- ⑩ Ryo Nouchi, Kei-ichiro Ikeda, *Phys. Chem. Chem. Phys.* **22**, 1268 (2020).
- ⑪ Ryo Nouchi, *Adv. Mater. Interfaces* **5**, 1801261 (2018).
- ⑫ Masaya Sato, Masahiro Hara, Asami Funatsu, Ryo Nouchi, *Nano Express* **1**, 010034 (2020).

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計12件（うち査読付論文 12件／うち国際共著 0件／うちオープンアクセス 7件）

1. 著者名 Nouchi Ryo, Ikeda Kei-ichiro	4. 巻 13
2. 論文標題 Adsorbates as a charge-carrier reservoir for electrostatic carrier doping to graphene	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Applied Physics Express	6. 最初と最後の頁 015005 ~ 015005
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7567/1882-0786/ab5e0b	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 Nouchi Ryo, Ikeda Kei-ichiro	4. 巻 22
2. 論文標題 Photochemical reaction on graphene surfaces controlled by substrate-surface modification with polar self-assembled monolayers	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Chemistry Chemical Physics	6. 最初と最後の頁 1268 ~ 1275
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1039/c9cp05389a	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 Ohoka Takuya, Nouchi Ryo	4. 巻 1
2. 論文標題 Staircase-like transfer characteristics in multilayer MoS2 field-effect transistors	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Nano Express	6. 最初と最後の頁 010002 ~ 010002
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/2632-959X/ab70e6	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 Yoshikawa Daiki, Takei Kuniharu, Arie Takayuki, Akita Seiji	4. 巻 12
2. 論文標題 Dielectric actuation of optically transparent electromechanical resonator consisting of a cantilevered hexagonal boron nitride sheet	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Applied Physics Express	6. 最初と最後の頁 105001 ~ 105001
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7567/1882-0786/ab3b4f	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 Ghazali Norizzawati M., Tomizawa Hiroshi, Hagiwara Noriyuki, Suzuki Katsuya, Hashim Abdul M., Yamaguchi Tomohiro, Akita Seiji, Ishibashi Koji	4. 巻 9
2. 論文標題 Fabrication of tunnel barriers and single electron transistors in suspended multi-wall carbon nanotubes	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 AIP Advances	6. 最初と最後の頁 105015 ~ 105015
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/1.5120816	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 Taichi Inoue, Yuta Mochizuki, Kuniharu Takei, Takayuki Arie, Seiji Akita	4. 巻 5
2. 論文標題 Tuning of the temperature dependence of the resonance frequency shift in atomically thin mechanical resonators with van der Waals heterojunctions	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 2D Materials	6. 最初と最後の頁 45022-1-7
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/2053-1583/aad864	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 Ryo Nouchi, Morihiko Matsumoto, Nobuhiko Mitoma	4. 巻 7
2. 論文標題 Gate-controlled photo-oxidation of graphene for electronic structure modification	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 J. Mater. Chem. C	6. 最初と最後の頁 1904-1912
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1039/C8TC05639K	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 Yuga Miyamoto, Daiki Yoshikawa, Kuniharu Takei, Takayuki Arie, Seiji Akita	4. 巻 57
2. 論文標題 Effect of buffer layer on photoresponse of MoS2 phototransistor	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Japanese Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 06HB01-1-5
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7567/JJAP.57.06HB01	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 Shiho Kobayashi, Yuki Anno, Kuniharu Takei, Takayuki Arie, Seiji Akita	4. 巻 8
2. 論文標題 Photoreponse of graphene field-effect-transistor with n-type Si depletion layer gate	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Scientific reports	6. 最初と最後の頁 4811/1/7
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41598-018-22974-7	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 Yuki Anno, Masato Takeuchi, Masaya Matsuoka, Kuniharu Takei, Seiji Akita, Takayuki Arie	4. 巻 110
2. 論文標題 Effect of defect-induced carrier scattering on the thermoelectric power of graphene	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Applied Physics Letters	6. 最初と最後の頁 263501-1-4
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/1.4989820	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 Masaaki Yasuda, Kuniharu Takei, Takayuki Arie, Seiji Akita	4. 巻 7
2. 論文標題 Direct measurement of optical trapping force gradient on polystyrene microspheres using a carbon nanotube mechanical resonator	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Scientific reports	6. 最初と最後の頁 2825/1/7
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41598-017-03068-2	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 Taichi Inoue, Yuki Anno, Yuki Imakita, Kuniharu Takei, Takayuki Arie, Seiji Akita	4. 巻 2
2. 論文標題 Resonance Control of a Graphene Drum Resonator in a Nonlinear Regime by a Standing Wave of Light	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 ACS Omega	6. 最初と最後の頁 5792-5797
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acsomega.7b00699	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 -

〔学会発表〕 計68件（うち招待講演 11件 / うち国際学会 31件）

1. 発表者名 Ryo Nouchi
2. 発表標題 Gate-controlled chemical reactions at graphene surface
3. 学会等名 6th International Congress on Microscopy and Spectroscopy (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Ryo Nouchi
2. 発表標題 Gate-controlled chemical reactions at 2D materials surfaces
3. 学会等名 CA2D: Carrier Doping in two-dimensional layered materials: toward novel physical properties and electronic device applications (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Ryo Nouchi
2. 発表標題 Gate-controlled chemical reactions at surfaces of two-dimensional materials
3. 学会等名 2nd European conference on Smart Nanomaterials (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Y. Morimoto, K. Takei, T. Arie, S. Akita
2. 発表標題 Electrical actuation of drum type h-BN nano-mechanical resonator
3. 学会等名 2019 MRS Fall Meeting & Exhibit (国際学会)
4. 発表年 2019年

1 . 発表者名 T. Inoue, Y. Mochizuki, K. Takei, T. Arie, S. Akita
2 . 発表標題 Suppression of thermal expansion in nano mechanical resonator by stacking MoS2 and graphene
3 . 学会等名 International Symposium on Hybrid Quantum Systems 2019 (国際学会)
4 . 発表年 2019年

1 . 発表者名 Y. Morimoto, K. Takei, T. Arie, S. Akita
2 . 発表標題 Drum type h-BN nano-electro-mechanical resonator driven by dielectric effect
3 . 学会等名 Recent Progress in Graphene & 2D Materials Research 2019 (国際学会)
4 . 発表年 2019年

1 . 発表者名 S. Akita
2 . 発表標題 Nano-electro-mechanical resonators toward highly sensitive force sensing
3 . 学会等名 The Seventh International Symposium on Organic and Inorganic Electronic Materials and Related Nanotechnologies (招待講演) (国際学会)
4 . 発表年 2019年

1 . 発表者名 D. Yoshikawa, K. Takei, T. Arie, S. Akita
2 . 発表標題 Elimination of photothermal effect on nano-mechanical resonator consisting of optically transparent h-BN sheet
3 . 学会等名 Compound Semiconductor Week 2019 (国際学会)
4 . 発表年 2019年

1 . 発表者名 T. Inoue, T. Endo, K. Takei, T. Arie, Y. Miyata, S. Akita
2 . 発表標題 Persistent resonance frequency shift of MoS2 mechanical resonator by laser irradiation
3 . 学会等名 Compound Semiconductor Week 2020 (国際学会)
4 . 発表年 2019年

1 . 発表者名 D. Yoshikawa, Y. Miyamoto, K. Takei, T. Arie, S. Akita
2 . 発表標題 Electrostatic actuation of cantilevered h-BN sheet
3 . 学会等名 31st International Microprocesses and Nanotechnology Conference (国際学会)
4 . 発表年 2018年

1 . 発表者名 T. Inoue, T. Saito, K. Takei, T. Arie, Y. Miyata, S. Akita
2 . 発表標題 Effect of persistent photoconductivity on MoS2 mechanical resonator
3 . 学会等名 31st International Microprocesses and Nanotechnology Conference (国際学会)
4 . 発表年 2018年

1 . 発表者名 Ryo Nouchi
2 . 発表標題 Surface chemical reactions on field-effect transistors based on two-dimensional materials
3 . 学会等名 3rd EU-Japan Flagship Workshop on Graphene & 2D Materials (招待講演) (国際学会)
4 . 発表年 2018年

1. 発表者名 Ryo Nouchi
2. 発表標題 Gate-controlled chemical reactions at surfaces of two-dimensional materials
3. 学会等名 Tunneling Through Nanoscience 2018 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 赤澤慶祐、望月裕太、井上太一、吉川大貴、竹井邦晴、有江隆之、秋田成司
2. 発表標題 機械的結合されたグラフェン機械共振器による静電駆動
3. 学会等名 第56回フラーレン・ナノチューブ・グラフェン総合シンポジウム
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 野内亮
2. 発表標題 2次元原子層物質表面における化学反応のゲート制御
3. 学会等名 大阪大学産業科学研究所ナノテクノロジーセンター若手セミナー「ナノ・分子科学の最先端」(招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 赤澤慶祐、望月裕太、井上太一、吉川大貴、竹井邦晴、有江隆之、秋田成司
2. 発表標題 機械的にカップリングされたドラム型グラフェン機械共振器
3. 学会等名 第55回フラーレン・ナノチューブ・グラフェン学会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 吉川大貴、竹井邦晴、有江隆之、秋田成司
2. 発表標題 静電駆動による片持ち梁BNの共振特性
3. 学会等名 第55回フラレン・ナノチューブ・グラフェン学会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 T. Inoue, Y. Mochizuki, Y. Imakita, K. Takei, T. Arie, S. Akita
2. 発表標題 MoS2/graphene stacked electromechanical resonator
3. 学会等名 2017 Workshop on Innovative Nanoscale Devices and Systems (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 T. Inoue, Y. Anno, Y. Imakita, K. Takei, T. Arie, S. Akita
2. 発表標題 Resonance control of graphene mechanical resonator in nonlinear regime by standing wave of light
3. 学会等名 30th International Microprocesses and Nanotechnology Conference (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Y. Miyamoto, D. Yoshikawa, K. Takei, T. Arie, S. Akita
2. 発表標題 Effect of buffer layer on photoresponse of MoS2 phototransistor
3. 学会等名 30th International Microprocesses and Nanotechnology Conference (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 T. Inoue, Y. Anno, Y. Imakita, K. Takei, T. Arie, S. Akita
2. 発表標題 Control of nonlinear resonance of graphene mechanical resonator by photothermal effect
3. 学会等名 8th A3 Symposium on Emerging Materials: Nanomaterials for Energy and Electronics (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 S. Akita
2. 発表標題 Electronic and mechanical properties of nanomaterials
3. 学会等名 6th Hsinchu Summer Course and Workshop (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 秋田成司
2. 発表標題 ナノカーボンによるセンシング - ナノからマクロスケールまで -
3. 学会等名 第9回ナノカーボン実用化推進研究会 (招待講演)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 秋田成司
2. 発表標題 カーボンナノチューブのセンサへの応用 - ナノスケールからマクロスケールまで -
3. 学会等名 平成29年度第1回ナノ理工学情報交流会「ナノファイバー・ナノチューブの最近の発展と今後」(招待講演)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 秋田成司
2. 発表標題 ナノスケールバネを用いたナノ物質に対する光圧計測
3. 学会等名 日本物理学会 第73回年次大会（招待講演）
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計2件

1. 著者名 井上太一、秋田成司 他	4. 発行年 2020年
2. 出版社 エヌ・ティー・エス	5. 総ページ数 558
3. 書名 グラフェンから広がる二次元物質の新技术と応用	

1. 著者名 秋田成司 他	4. 発行年 2019年
2. 出版社 技術情報協会	5. 総ページ数 456
3. 書名 カーボンナノチューブの表面処理・分散技術と複合化事例	

〔産業財産権〕

〔その他〕

<p>大阪府立大学工学研究科 電子物理工学分野 ナノデバイス研究グループ http://www.pe.osakafu-u.ac.jp/nanodevice-pe4/ ナノデバイス研究グループ http://www.pe.osakafu-u.ac.jp/nanodevice-pe4/</p>
--

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
研究 分担者	野内 亮 (Nouchi Ryo) (70452406)	大阪府立大学・工学(系)研究科(研究院)・准教授 (24403)	
研究 協力者	有江 隆之 (Arie Takayuki) (80533017)	大阪府立大学・工学研究科・准教授 (24403)	