

令和 3 年 6 月 5 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(A)（一般）

研究期間：2017～2020

課題番号：17H01038

研究課題名（和文）回折限界をはるかに超える原子スケールテラヘルツナノサイエンスの開拓

研究課題名（英文）Atomic-scale terahertz nanoscience far beyond the diffraction limit

研究代表者

平川 一彦（Hirakawa, Kazuhiko）

東京大学・生産技術研究所・教授

研究者番号：10183097

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 33,400,000円

研究成果の概要（和文）：近年、ナノワイヤー、分子などナノ量子構造を用いてトランジスタを形成し、その中における電子のダイナミクスを応用して、エレクトロニクスに新しい局面を拓こうとする研究が重要となりつつある。しかし、ナノ構造の物性解明と制御に非常に有効なテラヘルツ（THz）電磁波と極微細なナノ量子構造との相互作用は極めて弱い。

本研究では、nmオーダーのギャップを有する極微金属電極をTHz電磁波に対するアンテナとして用いることにより、回折限界をはるかに超えてTHz電磁波を集光し、極微ナノ構造中の電子状態や伝導ダイナミクスを明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

テラヘルツ電磁波の光子エネルギーは、単一分子やナノワイヤーなど極限ナノ構造内の様々なエネルギースケールと整合するため、電子状態やダイナミクスを明らかにするために適している。しかし、テラヘルツ電磁波の波長が100ミクロン程度と非常に長いので、ナノ量子構造に集光することができなかった。本研究では、原子スケールのギャップを有する電極をテラヘルツ電磁波のアンテナとして用いることにより、単一分子の振動によるテラヘルツ信号を読み出すことに成功した。本研究は「テラヘルツナノサイエンス」という新しい学問分野が立ち上がる大きなきっかけとなった。

研究成果の概要（英文）：In recent years, it has become important to form transistors using quantum nanostructures such as nanowires and molecules, and to apply electron dynamics in these structures to open up a new dimension in electronics. However, the interaction between terahertz (THz) electromagnetic waves, which are very effective in elucidating and controlling the properties of nanostructures, and ultrafine nanoscale quantum structures is extremely weak. In this study, we focused THz electromagnetic waves far beyond the diffraction limit by using an ultrasmall metal electrode with a gap of nm order as an antenna for THz waves, and clarified the electronic states and transport dynamics in ultrasmall nanostructures.

研究分野：量子ナノエレクトロニクス

キーワード：単一分子トランジスタ テラヘルツ電磁波 ナノギャップ電極 カーボンナノチューブ フラレーン

1. 研究開始当初の背景

近年、量子ドット、ナノワイヤー、単一分子など極微ナノ量子構造を活性層に用いた新規トランジスタの研究が注目されている。例えば量子ドットは単一電子トンネル現象の舞台として、量子技術に広く応用が検討されている。また、単一分子も分子機能を発揮するデバイスとして注目されるとともに、分子振動は量子力学的な機械振動子としての性質を持っており、新しい量子情報処理の媒体となる可能性が検討されている。

このような極微ナノ量子構造中の量子準位や分子振動などの素励起のエネルギーは、おおよそテラヘルツ (THz) 電磁波の光子エネルギーに対応するため、THz 電磁波を用いることにより、ナノ量子構造の物理に関する非常に有用な情報が得られると期待されている。

しかし、THz 電磁波の波長は数百 μm 程度あり、一方、ナノ量子構造のサイズは sub-nm から数十 nm のオーダーであり、 $10^3 \sim 10^5$ 倍も異なるため、THz 電磁波とナノ量子構造の相互作用は極めて小さい(回折限界の問題)。また、一般にナノ量子構造中には極少数の伝導電子しかおらず、THz 電磁波の吸収は極めて弱いため、通常の透過・吸収測定で信号を検出することは困難であった。

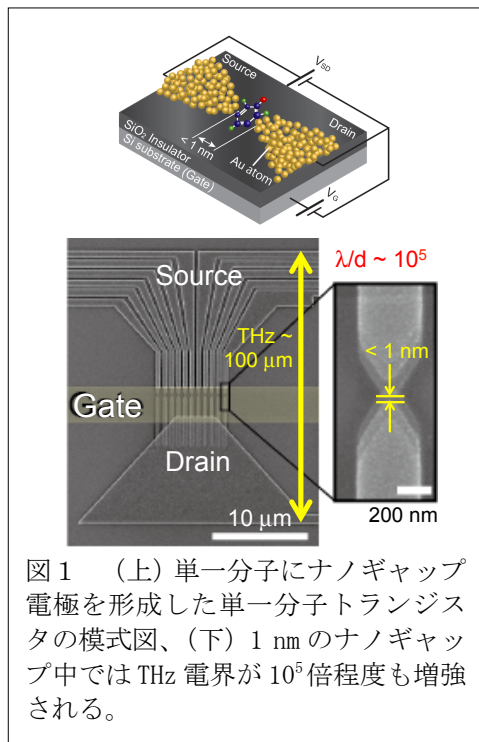


図1 (上) 単一分子にナノギャップ電極を形成した単一分子トランジスタの模式図、(下) 1 nm のナノギャップ中では THz 電界が 10^5 倍程度も増強される。

2. 研究の目的

最近、我々は sub-nm~数十 nm オーダーのギャップを有する電極を量子ドットや単一分子に形成し[1-4]、それらを THz アンテナとして用いることにより、単一分子レベルまで THz 電磁波を集光するとともに[5]、THz 誘起の電流変化を計測することにより、極微弱な THz 信号が測定できるようになってきた[6]。また、sub-nm ギャップ中の THz 電界は、真空中のそれに比べて 10^5 倍も増強され、MV/cm オーダーの極めて強い THz 電界にさらされた電子伝導という非常に興味深い状況も作り出せることもわかってきた。このように、ちょうど今、THz 電磁波と極微ナノ量子構造の相互作用の研究は新しいフェーズに入ったと言える。上記のような背景の下、単一分子など新しいデバイスの活性層として注目されているナノ構造中の電子の伝導ダイナミクスをテラヘルツ電磁波を用いて明らかにし、「テラヘルツナノサイエンス」という新しい学問領域を開拓することを本研究の目的とする。

3. 研究の方法

本研究では、単一分子に極微ギャップを有する金属電極を用いて電氣的にアクセスする単一分子トランジスタ (single molecule transistor; SMT) 構造を用いることにより、単一分子の静的特性のみでなく、THz 電磁波を用いた動的な特性を超高感度に測定する実験を行った。単一分子トランジスタとは、ゲートを有する電界効果トランジスタであり、ゲート電圧を印加することにより、分子内の静電ポテンシャルや電子数を精密に制御することができる構造である。本研究では、特に単一分子のソース・ドレイン電極として用いるナノギャップ電極を THz 電磁波に対するアンテナとして用いることにより、単一分子に長波長の THz 電磁波を集光するとともに、THz 電磁波により誘起される光電流を信号とすることにより、単一分子が吸収する微弱な THz 吸収を測定する実験を行った。この構造を用いれば、帯電状態が異なる分子の THz ダイナミクスを比較するという、STM など他の方法では実現し難い測定も可能である。

4. 研究成果

(1) C_{60} 分子の超高速重心運動とバイブロン支援トンネル[7]

ナノギャップ電極により測定したい単一分子を捕獲したかどうかを調べるためには、まず電気伝導測定を行う必要がある。図 2 (a) は、単一 C_{60} 分子トランジスタの微分コンダクタンス ($\partial I_{SD}/\partial V_{DS}$) を、ソース・ドレイン電圧 V_{DS} およびゲート電圧 V_G の関数として色でマッピングしたものである(クーロン安定化ダイアグラム)。図中で交差する線は、この試料が単一電子トランジスタとして動作していることを示している。さらに、クーロン安定化ダイアグラム中に、 C_{60} 分子の 33 meV の内部振動モードの励起が観測されており、確かに C_{60} 分子がナノギャップ電極で捕獲されていることが確認される。

次に、フェムト秒レーザーパルスで励起した広帯域THzパルスを用いて、単一分子の超高速振動に関する情報を得ることを考える。一般に、単一分子トランジスタはMΩオーダーの高い抵抗を有している。従って、単一分子トランジスタを用いたシングルショットの超高速信号の読み出しは不可能である。

この問題を克服するために、我々は、図3(a)に示すように、時間領域THz自己相関測定を採用した。ビームスプリッターを用いて、パルスレーザービームを2つの経路に分割し、時間相関を設けた2発のレーザーパルスを発生させる。この2連のレーザーパルスでInAsウェハの表面を励起し、時間相関を持った2連のTHzパルスを生成する。このTHzダブルパルスで誘起された単一分子トランジスタ内の光電流をTHzパルス間の間隔 τ の関数として記録することで、THz放射によって1分子内に誘起された光電流のインターフェログラムを得ることができる。

図2(b)の黒線はTHz照射なしの状態での試料のコンダクタンスを、また赤線はTHz電磁波で誘起された電流の変化分を表す。黒い曲線のピークは、単一C₆₀分子トランジスタの電荷縮重点(クーロンピーク)に対応している。電荷縮重点近傍で、非常に小さいが100 fAのオーダーのTHz誘起光電流が観測されている。

図3(b)は、光電流のピーク位置にゲート電圧を設定したときの、単一C₆₀分子トランジスタのTHz誘起光電流の自己相関波形(インターフェログラム)を示している。中央に明瞭なピークと干渉パターンが見取れる。この自己相関波形をフーリエ変換することで、単一C₆₀分子のTHzスペクトルが得られる。図3(c)に示すように2meV(約500 GHz)と4meV(約1 THz)付近に2つのピークが観測されており、単一分子トランジスタ構造を用いることにより、1分子の振動スペクトルが測定できることに注目されたい。

観測された2つの低エネルギー励起は、THz電磁波で励起されたC₆₀分子の重心運動と結合して電子が伝導するバイブロン支援トンネル(vibron-assisted tunneling)によるものである。バイブロンとは分子振動を量子化したものである。電気伝導の実験では、トンネル電子を注入することで分子振動が励起され、クーロン安定化ダイアグラムにバイブロンの励起が現れる。一方、THz分光測定では、分子振動はTHzパルス電界によって励起され、電子の新たなトンネル経路、すなわち、図2(c)、(d)に模式的に示されているようなバイブロン支援トンネリング過程が誘起される。図2(c)のように最低非占有分子軌道(LUMO)準位が電極のフェルミ準位より上に位置する場合、暗状態では電極中の電子は分子内に入ることができない。しかし、THz放射でC₆₀分子の重心運動が励起されると、電極内の電子がバイブロンを吸収して分子内にトンネルすることが可能となる。この場合、分子上の電子数はNからN+1へと増加し、分子の状態はC₆₀からC₆₀⁻へと変化する。今回の実験だけではNを決定することはできないが、Nは0である可能性が高いと考えている。一方、図2(d)は、最高占有分子軌道(HOMO)準位が電極のフェルミ準位以下の場合のバイブロン支援トンネル過程を示している。HOMOにある電子は暗状態では分子外に出ることができないが、THz電磁波を照射し、分子振動を励起すると、バイブロンを吸収して分子外に出ることができる。さらに、バイブロンピークの線幅から、C₆₀分子振動のQ値が3~5程度と見

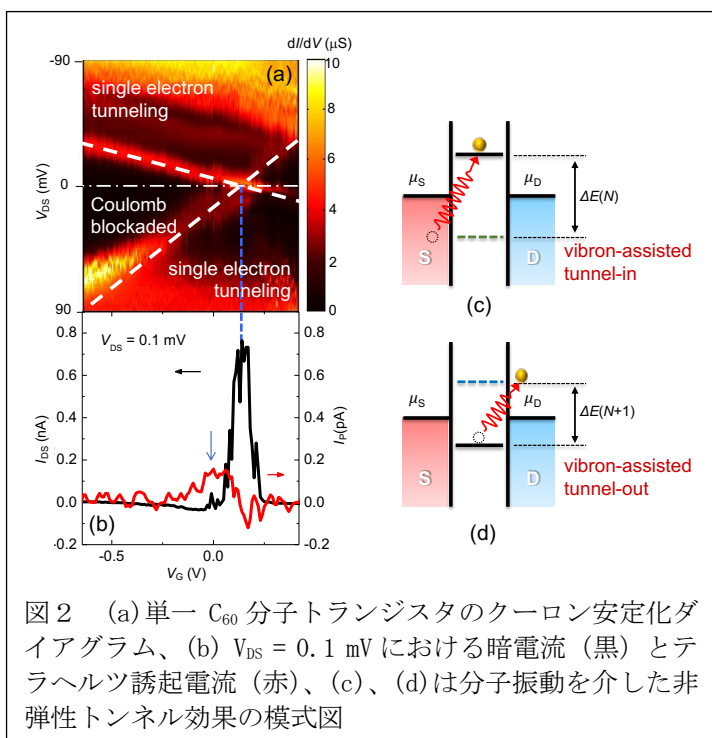


図2 (a)単一C₆₀分子トランジスタのクーロン安定化ダイアグラム、(b) V_{DS} = 0.1 mVにおける暗電流(黒)とテラヘルツ誘起電流(赤)、(c)、(d)は分子振動を介した非弾性トンネル効果の模式図

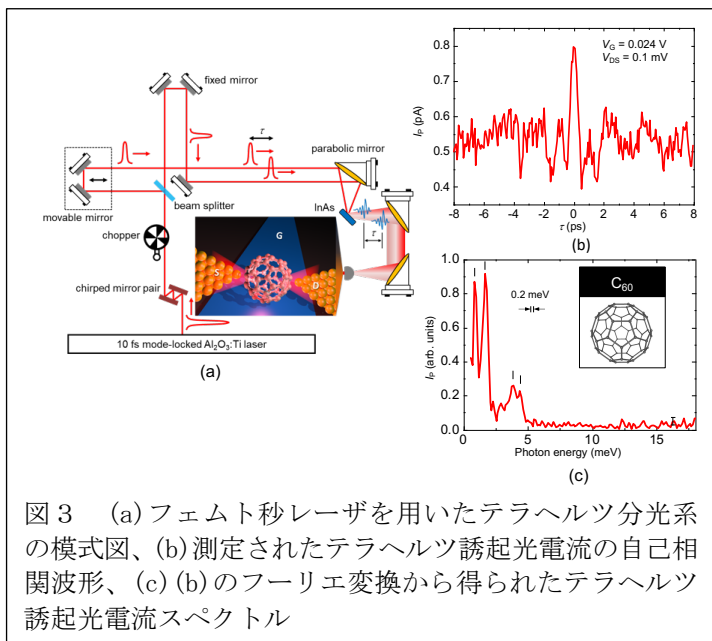


図3 (a)フェムト秒レーザーを用いたテラヘルツ分光系の模式図、(b)測定されたテラヘルツ誘起光電流の自己相関波形、(c) (b)のフーリエ変換から得られたテラヘルツ誘起光電流スペクトル

積もることができる。これは、 C_{60} 分子上に飛び移った電子が、分子が約 $3\sim 5$ サイクル振動する間は分子上に滞在し、その後、分子から電極に飛び降りることを意味していると考えている。

さらに、スペクトルをよく見ると、2 meV 付近と 4 meV 付近の分子振動のピークが細かく 2 つに分裂していることに気づく。2 meV 付近と 4 meV 付近でのピーク分裂の大きさは、それぞれ 0.8 meV と 0.6 meV である。我々は、Au(111) 表面上の中性および負に帯電した C_{60} 分子のファンデルワールス密度汎関数を用いた計算を行った[27]。平衡状態における C_{60} 分子と Au 表面の距離は 0.243 nm、振動エネルギー hw は 4.1 meV であった。一方、 C_{60} 分子が負に帯電すると C_{60} の LUMO と Au(111) 面との反結合状態が部分的に占有されるため、系が不安定化する。これにより平衡距離は中性状態における値より 0.011 nm 長くなり、振動エネルギーは 0.7 meV 低下する。この結果は金属電極の鏡像電荷力のみを考慮した場合の単純な予想とは逆の傾向である。我々の計算は分子の重心運動の周波数が分子の荷電状態に依存していることを示唆しており、その結果、パイブロン支援トンネルのピークが分裂することが予想できる。実際、観測された分裂の大きさ (0.6~0.8 meV) は計算された振動エネルギーの変化 (0.7 meV) とよく一致している。このように、単一分子トランジスタ構造を用いることにより、単一電子の充放電に伴う分子の電子状態の変化を極めて高感度に検出できることがわかって頂けると思う。

(2) フラーレン分子に内包された金属原子のダイナミクス[8]

フルーレン分子は、様々な種類の原子や分子をカゴ構造に収容できることが知られている。このような原子や分子を内包したフルーレンは、スイッチング素子や量子情報処理への応用が注目されている。さらに、内包された原子とフルーレンのカゴとの相互作用に起因する新しい物性が発現することも知られている。したがって、内包フルーレン分子のダイナミクスを明らかにすることは非常に重要である。

我々は、 C_{60} 分子で行ったのと同じナノギャップ電極を用いる手法で、金属内包フルーレンの一つである $Ce@C_{82}$ の THz 分光の実験を行った。基本的な実験系は前節で述べたものと同じであるが、より広い周波数をカバーするために、光源としてフーリエ分光器に組み込まれている黒体放射光源を用いた。ゲート電圧を光電流のピーク位置 ($V_G = -6.82$ V; 図 4 (b) の黒矢印) に設定したときの単一 $Ce@C_{82}$ 分子トランジスタの THz 誘起光電流のフーリエスペクトルを図 4 (c) に示す。5 meV 付近と 15 meV 付近に極性の異なる 2 つのブロードなピークが観測される。一般に、単一分子トランジスタにおけるソース側とドレイン側のトンネル抵抗は異なり、

この非対称性により、THz 誘起の光電流は光起電力効果で流れる成分があることがわかっている。従って、この 2 つのピークの極性の違いは特別なものではなく、またバイアス電圧を変化させると極性も変化する。

観測されたピークの起源を理解するために、中空のカゴ分子である単一 C_{84} 分子の伝導測定を行い、20 meV 以下の振動モードは存在しないことを確認した。これに対して、 C_{82} ケージに金属原子を注入すると、新たな低エネルギー励起モードが現れる。このことは、5 meV と 15 meV 付近の 2 つの振動モードが Ce 原子に起因していることを示している。理論計算[9]との比較により、5-6 meV 付近の振動モードは Ce 原子が C_{82} ケージ壁に対して横方向に振動するモードであり、15-16 meV 付近のピークは Ce- C_{82} の縦振動によるものであると対応づけられる。従来、 $Ce@C_{82}$ 分子アンサンブルの THz 測定では、1 meV 付近から 12 meV 付近まで伸びるブロードな構造しか観測されておらず[9]、2 つのピークを分解して見ることはできなかった。これは不均一広がりの影響によるものと考えられる。今回、内包 Ce 原子が C_{82} カゴ分子の中で動き回る 2 つのラトリング (rattling) モードの観測は、単一分子を測定することで不均一広がりを除去して初めて可能になったと言える。

また、光電流のピーク幅は非常に広く、横振動モードのピーク幅は ~ 4 meV、縦振動モードのピーク幅はさらに大きく (~ 8 meV) なっていた。これらのブロードなピーク幅は、内包された Ce 原子が弾性を持ったフルーレンカゴ分子と相互作用し、Ce 原子の運動がカオス化するという理論的な予言[10]と一致している。このようにナノギャップ電極を用いることにより、単一原子のテ

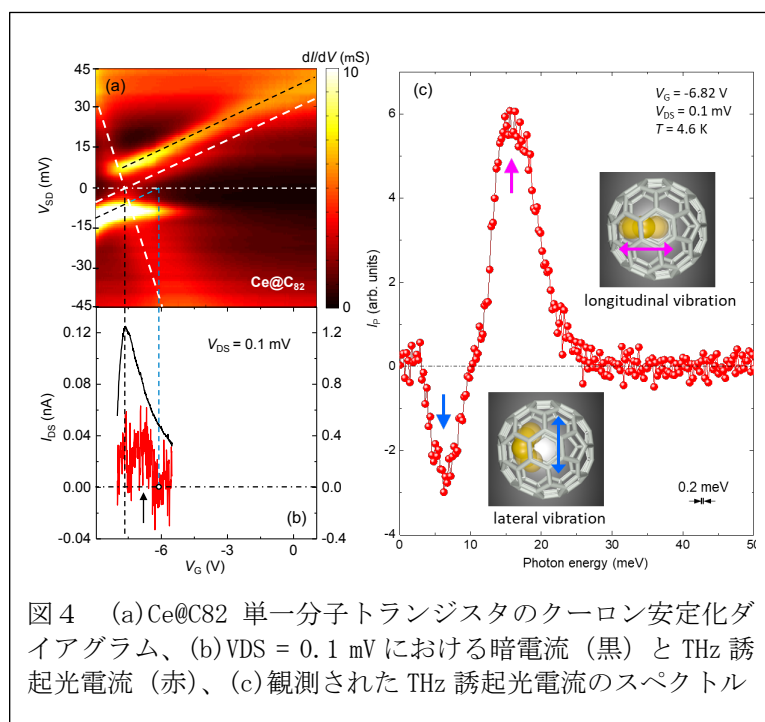


図 4 (a) $Ce@C_{82}$ 単一分子トランジスタのクーロン安定化ダイアグラム、(b) $V_{DS} = 0.1$ mV における暗電流 (黒) と THz 誘起光電流 (赤)、(c) 観測された THz 誘起光電流のスペクトル

ラヘルツダイナミクスにも迫ることが可能となった。

(3) 単一カーボンナノチューブのテラヘルツ分光と電子状態

近年非常に重要性を増している電子材料がカーボンナノチューブである。単一の単層金属型単層カーボンナノチューブに電極を形成し、単一電子トランジスタ構造とすることにより、THz 分光を行った[11]。その結果、図5に示すように、シャープなサブレベル間遷移スペクトルを観測した。観測されたナノチューブ内のサブレベル間遷移のスペクトルは非常にシャープで、半値幅は0.3 meV程度であった。この半値幅の大部分は電極とのトンネル結合によるものかと思われるが、ナノチューブ内の電子の散乱時間が、少なくとも10 ps以上であることが見積もられる。

また、観測されたサブレベル間遷移のエネルギーは、これまで知られているカーボンナノチューブのバンドパラメータ(フェルミ速度 v_F と呼ばれる) から期待される遷移エネルギー $\hbar v_F/2L$ と一致した。一方、ナノチューブ内では、電子とテラヘルツ電磁波の相互作用において、電子間の多体効果が誘起され、それがサブレベル間遷移のエネルギーに影響を与えるべきであるが、それによる遷移エネルギーのシフトは観測されなかった。電子間相互作用の効果が顕著に観測できなかったことについては、周辺の電極による遮蔽効果など電磁場環境の効果を調べていく必要がある。

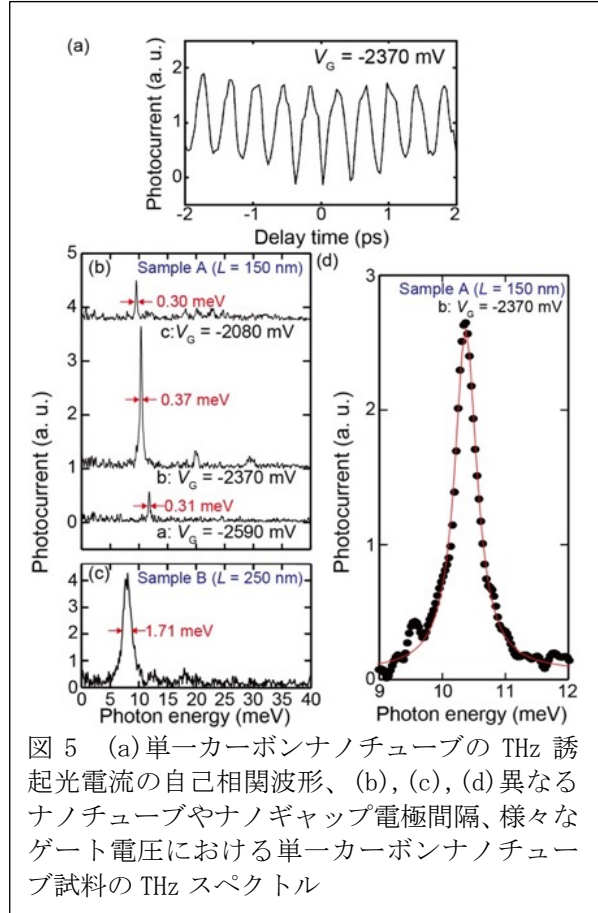


図5 (a) 単一カーボンナノチューブの THz 誘起光電流の自己相関波形、(b), (c), (d) 異なるナノチューブやナノギャップ電極間隔、様々なゲート電圧における単一カーボンナノチューブ試料の THz スペクトル

参考文献

- [1] A. Umeno and K. Hirakawa, Appl. Phys. Lett. **94**, 162103 (2009).
- [2] K. Yoshida, I. Hamada, S. Sakata, A. Umamo, M. Tsukada, and K. Hirakawa, Nano Lett., **13**, 481 (2013).
- [3] S. Sakata, K. Yoshida, Y. Kitagawa, K. Ishii, and K. Hirakawa, Phys. Rev. Lett., **111**, 246806 (2013).
- [4] N. Okamura, K. Yoshida, S. Sakata, and K. Hirakawa, Appl. Phys. Lett., **106**, 043108 (2015).
- [5] K. Yoshida, K. Shibata, and K. Hirakawa, Phys. Rev. Lett. **115**, 138302 (2015).
- [6] Y. Zhang, K. Hirakawa, et al., Nano Lett. **15**, 1166 (2015).
- [7] S. Q. Du, K. Yoshida, Y. Zhang, I. Hamada, and K. Hirakawa, Nature Photonics, **12**, 608–612 (2018).
- [8] S. Q. Du, Y. Zhang, K. Yoshida, and K. Hirakawa, Appl. Phys. Exp. **13**, 105002 (2020).
- [9] S. Lebedkin, B. Renker, R. Heid, H. Schober and H. Rietschel, Appl. Phys. A. **66**, 273 (1998).
- [10] W. Andreoni and A. Curioni, Phys. Rev. Lett. **77**, 834 (1996).
- [11] T. Tsurugaya, K. Yoshida, F. Yajima, M. Shimizu, Y. Homma, and K. Hirakawa, Nano Lett. **19**, 242 (2019).

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計9件（うち査読付論文 7件/うち国際共著 2件/うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 Bayogan Janice Ruth, Park Kidong, Siu Zhuo Bin, An Sung Jin, Tang Chiu-Chun, Zhang Xiao-Xiao, Song Man Suk, Park Jeunghye, Jalil Mansoor B A, Nagaosa Naoto, Hirakawa Kazuhiko, Sch?nenberger Christian, Seo Jungpil, Jung Minkyung	4. 巻 31
2. 論文標題 Controllable p-n junctions in three-dimensional Dirac semimetal Cd3As2 nanowires	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Nanotechnology	6. 最初と最後の頁 205001 ~ 205001
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1361-6528/ab6dfe	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 T. Tsurugaya, K. Yoshida, F. Yajima, M. Shimizu, Y. Homma, and K. Hirakawa	4. 巻 19
2. 論文標題 Terahertz spectroscopy of individual carbon nanotube quantum dots	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Nano Letters	6. 最初と最後の頁 242-246
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acs.nanolett.8b03801	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 S. Du, K. Yoshida, Y. Zhang, I. Hamada, and K. Hirakawa	4. 巻 12
2. 論文標題 Terahertz dynamics of electron-vibron coupling in single molecules with tunable electrostatic potential	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Nature Photonics	6. 最初と最後の頁 608-612
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41566-018-0241-1	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 Q. Weng, K. Lin, K. Yoshida, H. Nema, S. Komiyama, S. Kim, K. Hirakawa, and Y. Kajihara	4. 巻 18
2. 論文標題 Near-field radiative nano-thermal imaging of non-uniform Joule heating in narrow metal wires	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Nano Letters	6. 最初と最後の頁 4220-4225
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acs.nanolett.8b01178	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 Jung Minkyung, Yoshida Kenji, Park Kidong, Zhang Xiao-Xiao, Yesilyurt Can, Siu Zhuo Bin, Jalil Mansoor B. A., Park Jinwan, Park Jeunghye, Nagaosa Naoto, Seo Jungpil, Hirakawa Kazuhiko	4. 巻 18
2. 論文標題 Quantum Dots Formed in Three-dimensional Dirac Semimetal Cd3As2 Nanowires	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Nano Letters	6. 最初と最後の頁 1863 ~ 1868
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acs.nanolett.7b05165	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 S. Du, K. Yoshida, Y. Zhang, I. Hamada, and K. Hirakawa	4. 巻 1
2. 論文標題 Terahertz dynamics of electron-vibron coupling in single molecules with tunable electrostatic potential	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Mesoscale and Nanoscale Physics (cond-mat.mes-hall)	6. 最初と最後の頁 1
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
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 K. Shibata, K. Yoshida, K. Daiguji, H. Sato, T. Ii, and K. Hirakawa	4. 巻 111
2. 論文標題 Electric-field control of conductance in metal quantum point contacts by electric-double-layer gating	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Applied Physics Letters	6. 最初と最後の頁 153104 ~ 153104
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/1.4995318	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 平川一彦、杜 少卿	4. 巻 42, No. 5, 9月号
2. 論文標題 エレクトロマイグレーションを用いたナノギャップ電極の作製と単一分子ナノエレクトロニクスへの展開	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 日本信頼性学会誌、展望「新機能、高機能半導体材料デバイス、及び、信頼性評価技術の開発」	6. 最初と最後の頁 222-229
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
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 Du Shaoqing, Zhang Ya, Yoshida Kenji, Hirakawa Kazuhiko	4. 巻 13
2. 論文標題 Ultrafast rattling motion of a single atom in a fullerene cage sensed by terahertz spectroscopy	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Applied Physics Express	6. 最初と最後の頁 105002 ~ 105002
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.35848/1882-0786/abb68e	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50件 (うち招待講演 18件 / うち国際学会 23件)

1. 発表者名 K. Hirakawa
2. 発表標題 Terahertz Spectroscopy of Electron-Vibron Coupling in Single-Molecule Transistors
3. 学会等名 Colloquium "Terahertz Nanoscience" (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 S. Q. Du, Y. Hashikawa, I. Hamada, Y. Murata, K. Hirakawa
2. 発表標題 Charge dependent vibration of a single water molecule encapsulated in a C60 fullerene
3. 学会等名 International Symposium on Hybrid Quantum Systems (HQS) 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 K. Hirakawa
2. 発表標題 Terahertz Spectroscopy of Electron-vibron Coupling in Single Molecules
3. 学会等名 The 7th Workshop on Physics between Ecole Normale Superieure and University of Tokyo (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 K. Hirakawa
2. 発表標題 Terahertz Spectroscopy of Electron-vibron Coupling in single Molecules by Using Nanogap Electrodes
3. 学会等名 International School and Symposium on Nanoscale Transport and Photonics 2019 (ISNTT2019) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 T. Tsurugaya, K. Yoshida, and K. Hirakawa
2. 発表標題 Ultrannarrow intersublevel transitions in carbon nanotube quantum dots
3. 学会等名 Infrared Terahertz Quantum Workshop (ITQW2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 K. Hirakawa
2. 発表標題 Terahertz Dynamics of Single Molecules and Single Atoms Studied by Using Nanogap Electrodes
3. 学会等名 the 21st International Conference on Electron Dynamics in Semiconductors, Optoelectronics and Nanostructures (EDISON 21) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 K. Hirakawa
2. 発表標題 Terahertz dynamics of electron-vibron coupling in single molecules with tunable electrostatic potential
3. 学会等名 Hybrid Quantum Systems Workshop (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 杜 少卿、橋川祥史、濱田幾太郎、村田靖次郎、平川一彦
2. 発表標題 C60フラーレンに閉じ込められた単一水分子の電荷に依存した分子振動
3. 学会等名 第67回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 S. Du, Y. Hashikawa, I. Hamada, Y. Murata, K. Hirakawa
2. 発表標題 Terahertz spectroscopy of single water molecule encapsulated in a fullerene cage
3. 学会等名 第2回ハイドロジェノミクス研究会（招待講演）
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 S. Du, Y. Hashikawa, Y. Murata, K. Hirakawa
2. 発表標題 Electron-induced vibrations of a single water molecule encapsulated in a C60 fullerene
3. 学会等名 第80回応用物理学会秋期学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 平川一彦
2. 発表標題 ナノギャップ電極を用いた単一分子・単一原子のテラヘルツ分光
3. 学会等名 テラヘルツ波科学技術と産業開拓 第182委員会（第39回）（招待講演）
4. 発表年 2019年

1 . 発表者名 S. Du, Y. Zhang, K. Yoshida, and K. Hirakawa
2 . 発表標題 Terahertz spectroscopy at the atomic-scale level
3 . 学会等名 CLEO Pacific Rim 2018 (招待講演) (国際学会)
4 . 発表年 2018年

1 . 発表者名 K. Yoshida, T. Tsurugaya, F. Yajima, M. Shimizu, Y. Homma, and K. Hirakawa
2 . 発表標題 Terahertz spectroscopy of individual carbon nanotube quantum dots
3 . 学会等名 the 34th International Conference on the Physics of Semiconductors 2018 (ICPS2018) (国際学会)
4 . 発表年 2018年

1 . 発表者名 C. C. Tang, S.Q. Du, K. Yoshida, Y. Zhang, and K. Hirakawa
2 . 発表標題 Rotation effect in endohedral metallofullerene Ce@C82 single-molecule transistors
3 . 学会等名 the 34th International Conference on the Physics of Semiconductors 2018 (ICPS2018) (国際学会)
4 . 発表年 2018年

1 . 発表者名 H. Kiyama, A. Korsch, N. Nagai, Y. Kanai, K. Matsumoto, K. Hirakawa, and A. Oiwa
2 . 発表標題 Single-electron charge sensing in self-assembled quantum dots
3 . 学会等名 the 34th International Conference on the Physics of Semiconductors 2018 (ICPS2018) (国際学会)
4 . 発表年 2018年

1. 発表者名 平川一彦
2. 発表標題 ナノギャップ電極を用いた単一分子・単一原子のテラヘルツ極限センシング
3. 学会等名 第66回応用物理学会春季学術講演会（招待講演）
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 平川一彦
2. 発表標題 Terahertz spectroscopy of single molecules and single atoms by using nanogap electrodes
3. 学会等名 東北大学CSRセミナー（招待講演）
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 S. Q. Du, Y. Zhang, K. Yoshida, and K. Hirakawa
2. 発表標題 Sensing ultrafast motion of a single atom encapsulated in a cage molecule by terahertz spectroscopy
3. 学会等名 第66回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 平川一彦
2. 発表標題 テラヘルツ電磁波の新展開 遠赤外線はコーヒー豆を煎るだけではないー
3. 学会等名 平成30年度 国立情報学研究所市民講座 情報学最前線 第5回（招待講演）
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 S. Q. Du, Y. Zhang, K. Yoshida, and K. Hirakawa
2. 発表標題 Sensing ultrafast motion of a single atom encapsulated in a fullerene cage
3. 学会等名 新学術領域「ハイブリッド量子科学」第7回領域会議
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 平川一彦
2. 発表標題 マイクロ・ナノ技術によるテラヘルツ検出の新展開
3. 学会等名 平成30年度先端ICTデバイスラボ成果報告会（招待講演）
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 S.Q. Du, K. Yoshida, Y. Zhang, C.C. Tang, T. Nishimura, A. Singh, H. Inokawa, and K. Hirakawa
2. 発表標題 Thz rectification through a single metal nanoparticle
3. 学会等名 第79回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 吉田健治、鶴谷琢磨、矢島史彬、清水麻希、本間芳和、平川一彦
2. 発表標題 単一カーボンナノチューブ量子ドットのテラヘルツ分光
3. 学会等名 第55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 2018年

1. 発表者名 吉田健治、鶴谷琢磨、矢島史彬、清水麻希、本間芳和、平川一彦
2. 発表標題 単一カーボンナノチューブのテラヘルツ分光と電子状態
3. 学会等名 新学術領域「ハイブリッド量子科学」第7回領域会議
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 F. Valmorra, K. Yoshida, L. Contamin, T. Cubaynes, M. Dartiailh, M. Desjardins, S. Massabeau, K. Hirakawa, J. Mangeney, A. Cottet, and T. Kontos
2. 発表標題 Coupling a terahertz cavity to a carbon nanotube quantum dot
3. 学会等名 DPG Spring Meeting (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Y. Zhang, B. Qiu, N. Nagai, M. Nomura, and K. Hirakawa
2. 発表標題 Enhanced sensitivity of MEMS-based terahertz bolometers by introducing two-dimensional phononic crystal structures
3. 学会等名 2017 Workshop on Innovative Nanoscale Devices and Systems (WINDS 2017) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 K. Hirakawa, S. Du, K. Yoshida, C. Tang, and Y. Zhang
2. 発表標題 Terahertz spectroscopy of single molecules and single atoms
3. 学会等名 4th International Symposium on Microwave/Terahertz Science and Applications (MTSA 2017) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1 . 発表者名 K, Hirakawa, S. Du, K. Yoshida, and Y. Zhang
2 . 発表標題 Terahertz spectroscopy of single molecules and single atoms far beyond the diffraction limit
3 . 学会等名 Russia-Japan-USA-Europe Symposium on Fundamental & Applied Problems of Terahertz Devices & Technologies (RJUSE TeraTech 2017) (招待講演) (国際学会)
4 . 発表年 2017年

1 . 発表者名 Y. Zhang, B. Qiu, N. Nagai, and K. Hirakawa
2 . 発表標題 Improving the thermal sensitivity of MEMS resonators by 2-dimensional phononic crystal structures
3 . 学会等名 International Symposium on Hybrid Quantum Systems 2017 (HQS2017) (国際学会)
4 . 発表年 2017年

1 . 発表者名 S. Du, Y. Zhang, K. Yoshida, and K. Hirakawa
2 . 発表標題 Terahertz spectroscopy of a single atom in a fullerene cage
3 . 学会等名 International Symposium on Hybrid Quantum Systems 2017 (HQS2017) (国際学会)
4 . 発表年 2017年

1 . 発表者名 T. Tsurugaya, K. Yoshida, F. Yajima, M. Shimizu, Y. Homma, S.Q. Du, Y. Zhang, and K. Hirakawa
2 . 発表標題 Terahertz Spectroscopy of Carbon Nanotube Quantum Dots Performed by Detecting THz-induced Photocurrent in the Single Electron Transistor Geom
3 . 学会等名 International Symposium on Hybrid Quantum Systems 2017 (HQS2017) (国際学会)
4 . 発表年 2017年

1 . 発表者名 Y. Zhang and K. Hirakawa
2 . 発表標題 Novel bolometric THz detection by MEMS resonators
3 . 学会等名 14th International Conference on Intersubband Transitions in Quantum Wells (ITQW2017) (招待講演) (国際学会)
4 . 発表年 2017年

1 . 発表者名 Y. Zhang, K. Shibata, N. Nagai, C. Ndebeka-Bandou, G. Bastard, J. Y. Wang, H. Q. Xu, and K. Hirakawa
2 . 発表標題 Intersublevel transitions in zero-dimensional nanomaterials probed by terahertz photocurrent spectroscopy
3 . 学会等名 14th International Conference on Intersubband Transitions in Quantum Wells (ITQW2017) (国際学会)
4 . 発表年 2017年

1 . 発表者名 S. Du, Y. Zhang, K. Yoshida, and K. Hirakawa
2 . 発表標題 Terahertz spectroscopy of a single atom in a fullerene cage
3 . 学会等名 42 International Conference on Infrared, Millimeter and Terahertz Waves (IRMMW-THz 2017) (招待講演) (国際学会)
4 . 発表年 2017年

1 . 発表者名 S. Du, K. Yoshida, Y. Zhang, I. Hamada, and K. Hirakawa
2 . 発表標題 Terahertz dynamics of electron-vibron coupling in single molecules with tunable electrostatic potential
3 . 学会等名 The 20th International Conference on Electron Dynamics in Semiconductors, Optoelectronics and Nanostructures (EDISON20) (国際学会)
4 . 発表年 2017年

1. 発表者名 K. Hirakawa
2. 発表標題 Ultrafast nanomechanical oscillation of single C60 molecules investigated by terahertz spectroscopy
3. 学会等名 Japan-China International Workshop on Quantum Technologies (QTech 2017) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 東出世羽、木山治樹、長井奈緒美、浜屋宏平、山田晋也、沖宗一郎、平川一彦、大岩顕
2. 発表標題 量子ドットを含む横型スピナルブ構造の作製と測定
3. 学会等名 日本物理学会第73回年次大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 唐九君、杜少卿、吉田健治、張亜、平川一彦
2. 発表標題 Rotation effect in endohedral metallofullerene Ce@C82 single-molecule transistors
3. 学会等名 第65回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 鶴谷拓磨、吉田健治、矢島史彬、清水麻希、本間芳和、平川一彦
2. 発表標題 テラヘルツ分光による単一カーボンナノチューブ量子ドットの電子状態の評価
3. 学会等名 第65回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 吉田健治、鶴谷琢磨、矢島文彬、清水麻希、本間芳和、平川一彦
2. 発表標題 単一カーボンナノチューブ量子ドットのテラヘルツ分光
3. 学会等名 新学術領域「ハイブリッド量子科学」第六回領域会議
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 唐九君、杜少卿、吉田健治、張亜、平川一彦
2. 発表標題 金属内包Ce@C82単一分子トランジスタにおける分子回転効果
3. 学会等名 新学術領域「ハイブリッド量子科学」第六回領域会議
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 F. Valmorra, K. Yoshida, L. Contamin, T. Cubaynes, M. Dartiailh, M. Desjardins, S. Massabeau, K. Hirakawa, J. Mangeney, A. Cottet, T. Kontos
2. 発表標題 Coupling a terahertz cavity to a carbon nanotube quantum dot
3. 学会等名 新学術領域「ハイブリッド量子科学」第六回領域会議（招待講演）
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 東出世羽、木山治樹、長井奈緒美、沖宗一郎、山田晋也、浜屋宏平、平川一彦、大岩顕
2. 発表標題 量子ドットを含む横型スピバルブ構造の作製
3. 学会等名 第22回 半導体におけるスピン工学の基礎と応用
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 S.Q. Du, Y. Zhang、吉田健治、C.C. Tang、平川一彦
2. 発表標題 テラヘルツ電磁波を用いた金属内包Ce@C82 フラーレン分子内の単一Ce 原子の観測
3. 学会等名 新学術領域「ハイブリッド量子科学」 第五回領域会議
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 鶴谷拓磨、吉田健治、矢島史彬、清水麻希、本間芳和、平川一彦
2. 発表標題 ナノギャップ電極を用いた単一カーボンナノチューブのテラヘルツ分光
3. 学会等名 新学術領域「ハイブリッド量子科学」 第五回領域会議
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 杜少卿、張亜、吉田健治、唐九君、平川一彦
2. 発表標題 Terahertz spectroscopy of a single atom in a fullerene cage
3. 学会等名 第8回 光電子融合ワークショップ--若手による成果報告
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 鶴谷拓磨、吉田健治、矢島史彬、清水麻希、本間芳和、杜少卿、張亜、平川一彦
2. 発表標題 単一カーボンナノチューブのテラヘルツダイナミクス
3. 学会等名 第8回 光電子融合ワークショップ--若手による成果報告
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 H. Kiyama, N. Nagai, K. Hirakawa, and A. Oiwa
2. 発表標題 Single-electron charge sensing in InAs self-assembled quantum dots
3. 学会等名 新学術領域研究「平成29年度ナノスピンの変換研究会」
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 吉田健治、平川一彦
2. 発表標題 Ptナノギャップ接合におけるトンネル磁気抵抗効果
3. 学会等名 第78回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 鶴谷拓磨、吉田健治、矢島史彬、清水麻希、本間芳和、平川一彦
2. 発表標題 ボウタイアンテナ型電極を用いたカーボンナノチューブ単一電子トランジスタへのテラヘルツ光集光とその光応答
3. 学会等名 第78回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2017年

〔図書〕 計1件

1. 著者名 Shaoqing Du and Kazuhiko Hirakawa	4. 発行年 2021年
2. 出版社 Springer	5. 総ページ数 約450
3. 書名 Quantum Hybrid Electronics and Materials (出版予定)	

〔産業財産権〕

〔その他〕

ファイラメントはなぜ切れる テラヘルツ波に注目した量子の研究30年
<http://www.ryosi.com/qc/202002/01/>
 平川研ホームページ
<http://thz.iis.u-tokyo.ac.jp>
 平川研ホームページ
<http://thz.iis.u-tokyo.ac.jp>

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
連携研究者	杜 少卿 (Du Shaoqing) (30805974)	東京大学・生産技術研究所・特任助教 (12601)	
連携研究者	濱田 幾太郎 (Hamada Ikutarou) (80419465)	大阪大学・工学研究科・准教授 (14401)	

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		
韓国	DGIST		
フランス	エコールノルマルスーペリア		