

東北大学 電気通信研究所  
**研究室外部評価資料**  
(2013 年度-2018 年度)

**Activity Report of Research Laboratory  
for External Review**

April 2013 - March 2019  
(FY. 2013-2018)

**Research Institute of Electrical Communication  
Tohoku University**

ナノフォトエレクトロニクス研究室  
Nano-photoelectronics

<b>A. 研究室名 / Research Laboratory</b>	
ナノフォトエレクトロニクス研究室 Nano-photoelectronics	
<b>B. 構成員 / Faculty and Research Staff (as of May 1, 2019)</b>	
※ 欄を適宜追加削除等調整して下さい。期間内に異動等があった場合には、在籍期間を記載して下さい。	
<b>教授 / Professor</b>	
氏名 Name	上原 洋一 Yoichi Uehara (April 2005 –)
分野名 Research Field	ナノフォトエレクトロニクス研究分野 Nano-photoelectronics
<b>准教授 / Associate Professor</b>	
氏名 Name	片野 諭 Satoshi Katano (August 2006 –)
分野名 Research Field	ナノ光分子エレクトロニクス研究分野 Nano-photomolecular electronics
<b>助教 / Assistant Professor</b>	
氏名 / Name	
<b>他 / Others</b>	
<b>C. 研究目的 / Research Purpose</b>	
<p>ナノフォトエレクトロニクス研究室の研究課題はナノメートル領域で起こる物理、化学現象の研究とナノフォトエレクトロニクス・デバイスへの応用にある。走査トンネル顕微鏡 (STM) で作られる良く収束された電子ビーム励起に対する光学応答計測を通してナノ構造の持つ物性の探索を行っている。このような目的に用いる新奇な計測法の開発にも興味がある。</p> <p>Our main interest lies in studying the physical and chemical phenomena that take place in nanometer-scale regions and their applications in nanophotoelectronic devices. We investigate materials properties of nano-structures through their optical response to local excitations that is generated by well-focused electrons emitted from the tip of a scanning tunneling microscope (STM). We are also interested in developing novel probing methods for nano-science.</p>	
<b>D. 主な研究テーマ / Research Topics</b>	
<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 空間、エネルギー、時間軸での個々のナノ構造の持つ物性研究</li> <li>2. ピコ秒の時間分解能の STM 発光分光法の開発</li> <li>3. ナノ空間中での様々な電磁気学的効果とその工学的応用</li> <li>4. 高効率で広帯域の発光・受光素子の開発</li> <li>5. ナノ構造を機能素子として利用する分子エレクトロニクス</li> <li>6. 単一原子・分子の光励起</li> </ol>	
<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Exploration of material properties of individual nano-structures in spatial, energy and time axes.</li> <li>2. Development of STM light emission spectroscopy with ps time resolution.</li> <li>3. Investigation of various electromagnetic phenomena in nanometer-scale spaces, and their engineering applications.</li> <li>4. Development of efficient and broad-band light sources and detectors.</li> <li>5. Molecular electronics based on the nano molecular assembly.</li> <li>6. Optical excitation of a single atom and molecule</li> </ol>	

E. 学術論文等の編数 / The Number of Research Papers							
	2013	2014	2015	2016	2017	2018	Total
(1) 査読付学術論文 Refereed journal papers	4	4	3	4	3	5	23
(2) 原著論文と同等に扱う 査読付国際会議発表論文 Full papers in refereed conference proceedings equivalent to journal papers	1	0	0	0	0	0	1
(3) 査読付国際会議 Papers in refereed conference proceedings	2	7	6	0	2	2	19
(4) 査読なし国際会議・シンポジウム等 Papers in conference proceedings	1	2	0	0	1	0	4
(5) 総説・解説 Review articles	0	0	0	0	0	0	0
(6) 査読付国内会議 Refereed proceedings in domestic conferences	4	10	5	7	6	6	38
(7) 査読なし国内研究会・講演会 Proceedings in domestic conferences	5	3	3	3	4	5	23
(8) 著書 Books	0	0	0	0	0	0	0
(9) 特許 Patents	0	1	0	0	0	0	0
(10) 招待講演 Invited Talks	2	1	2	1	2	2	10

## F. 特筆すべき研究成果 / Significant Research Achievements (FY.2013–2018)

See Ref. 1. “#” mark indicates research carried out at a former organization.

2013-2018 年度の研究成果（論文・特許など）のうち、前半（2013–2015 年度）と後半（2016–2018 年度）それぞれで代表的な数件（2–3 件程度ずつ）について、参考資料を引用して、その特徴と学術的意義などを簡単に紹介する。英文のみ、もしくは和文と英文で記載。

要約は 300 字程度。論文誌の要約/Abstract のコピー可。学術面での国際的インパクトならびに社会的影響を 100 字程度で記載。

必ずしも当該期間内に発表・出版したものに限るのではなく、例えば過去に発表したものでもこの期間内に成果が得られたり、評価されるようになったりしたものも含むものとする。

インパクトファクターや被引用件数など、できる限り第三者が定量的に評価できる指標を用いてアピールすること。それらの指標にはそぐわない場合には、その事情とそれに変わる適当な評価指標・尺度を示すこと。

特筆すべき研究成果と p. 1 に記された研究テーマの関係を明確にするために、特筆すべき研究成果はテーマ毎に分類されている。各分類の中で、最初に日本語による記述があり、次に英語による記述がなされている。

In order to make clear relationships between Significant Research Achievements and the research topics shown on p. 1, they are classified according to the research topics. In each category, there is a Japanese description first, followed by an English description.

### 研究テーマ： 1. 空間、エネルギー、時間軸での個々のナノ構造の持つ物性研究 2. ピコ秒の時間分解能の STM 発光分光法の開発

[2013–2015]

- [1] Y. Uehara, M. Kuwahara, and S. Katano, "Measurement of Phonon Energy of  $\text{Sb}_2\text{Te}_3$  by Scanning Tunneling Microscope Light-emission Spectroscopy," *Solid State Commun.*, **177**, 29–32 (2014). [IF: 1.897], [Times Cited: 3]

**要約：**走査トンネル顕微鏡（STM）発光分光を試料–探針ギャップへのピコ秒レーザー照射（繰り返し周波数：80 MHz）と組み合わせることにより、 $\text{Sb}_2\text{Te}_3$  の  $A_{2u}$  フォノンモードのエネルギーを決定した。 $\text{Sb}_2\text{Te}_3$  の STM 発光は 1.6 eV 近辺の電子遷移により励起され、約 1.6 eV の光子エネルギーの単一ピークとして観測される<sup>1-1)</sup>。試料–探針ギャップへのピコ秒レーザー照射下で観測される STM 発光では、付加的なピークが現れ、隣り合うピーク間のエネルギー差が  $A_{2u}$  フォノンモードのエネルギーと一致した。

**学術面での国際的インパクトおよび社会的影響：**STM は高い空間ならびにエネルギー分解能を有するが、以下に記す理由で時間分解能は数 m 秒程度に留まる。すなわち、STM を制御するために計測すべきトンネル電流とトンネル電流を計測するための増幅器のバンド幅の積は一定値以上である必要がある。このことから、トンネル電流がバンド幅を制限し、STM の時間分解能は ms かそれより悪くなる。しかし、光計測においてはこのような制限はない。この様な背景から、高い時間分解能を有する STM 発光分光を研究してきた<sup>1-2)</sup>。この研究では、ピコ秒レーザー光により励起されたフォノンのエネルギーが STM 発光により検出されることを示した。フォノンの寿命時間はピコ秒の時間領域にあるので、STM 発光分光により ps の持続時間の現象の観測が可能になることを示す成果である。従って、本研究は学術的に高いインパクトを有する。

- 1-1) Y. Uehara, M. Kuwahara, S. Katano, and S. Ushioda, "Scanning tunneling microscope light emission spectra of polycrystalline  $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$  and  $\text{Sb}_2\text{Te}_3$ ," *Solid State Commun.* **149**, 3 (2009).
- 1-2) Y. Uehara, A. Yagami, K.J. Ito, and S. Ushioda, "Scanning tunneling microscope light emission spectroscopy with picosecond time resolution," *Applied Physics Letters*, **76**, 2487 (2000).

## [2016–2018]

- [2] J. Sakai, S. Katano, M. Kuwahara, and Y. Uehara, "Pump–probe STM Light Emission Spectroscopy for Detection of Photo–induced Semiconductor–metal Phase Transition of VO<sub>2</sub>," *J. Phys.: Condens. Matter.*, **29**, 405001\_1–7 (2017). [IF: 2.617], [Times Cited: 1]

**要約:** ピコ秒のポンプパルス光の刺激による材料物性変化をピコ秒のプロブパルス光に同期した STM 発光で観察した (ポンプ–プロブ STM 発光分光)。試料はルチル型 TiO<sub>2</sub>(001)基板上に作製した VO<sub>2</sub> 薄膜であった。試料表面は半導体的なモノクリニク (M) 相と金属的なルチル (R) 相のナノ・ドメインで覆われている。STM 発光は探針を R 相ナノドメイン上に固定したときのみ得られる<sup>2-1)</sup>。この計測では探針を M 相ドメイン上に固定して、ポンプ光パルスとプロブ光パルスとの間の遅延時間  $\tau$  の関数として STM 発光スペクトルの観測を行った。 $\tau < 30$  ps の遅延時間区間では、STM 発光は観測されなかった。探針を M 相ドメイン上に固定しているため、この結果はリズナブルである。 $30 < \tau < 50$  ps の遅延時間区間では、R 相特有の STM 発光スペクトル<sup>2-1)</sup>が観測された。このことはポンプパルス光の照射後 30 ps で M–R 相転移が起こっていることを示す。言い換えれば、このポンプ–プロブ STM 発光分光は ps の時間領域で起こる光誘起相転移の時間振る舞いの追跡に成功している。

**学術面での国際的インパクトおよび社会的影響:** 上述の VO<sub>2</sub> について要約されたポンプ–プロブ STM 発光分光は Sb<sub>2</sub>Te<sub>3</sub> にも適用され、ポンプ光パルスにより誘起される結晶–アモルファス相転移の時間振る舞いが追跡されている<sup>2-2)</sup>。このように、ポンプ–プロブ STM 発光分光はピコ秒の光パルスに刺激された材料物性の時間発展をピコ秒の時間分解能と STM の原子空間分解能で計測することを可能にしている。このことは大きな学術的インパクトを有する。デバイス開発の視点からは、小電力で動作するメモリーやスイッチのような高速素子が強く求められており、相転移を利用した素子は良い候補となる。これは、状態を維持するための電力を必要としないからである。われわれは VO<sub>2</sub> と Sb<sub>2</sub>Te<sub>3</sub> が共に必要とされるスイッチ速度を有することを示した。従って、本結果は大きな社会的影響も有する。

- 2-1) J. Sakai, M. Kuwahara, M. Hotsuki, S. Katano, and Y. Uehara, "Selective Scanning Tunneling Microscope Light Emission from Rutile Phase of VO<sub>2</sub>", *J. Phys.: Condens. Matter.*, **28**, 385002–1\_5 (2016). (Selected as an IOPselect. Highlighted in LabTalk.)
- 2-2) Y. Uehara, M. Kuwahara, S. Katano, T. Tanno, and J. Sakai, "Pump–probe scanning–tunneling–microscope light–emission spectroscopy of Sb<sub>2</sub>Te<sub>3</sub>," *J. Appl. Phys.*, **124**, 075104\_1–7 (2018).

**Research Topics:**

1. Exploration of material properties of individual nano–structures in spatial, energy and time axes.
2. Development of STM light emission spectroscopy with ps time resolution.

## [2013–2015]

- [1] Y. Uehara, M. Kuwahara, and S. Katano, "Measurement of Phonon Energy of Sb<sub>2</sub>Te<sub>3</sub> by Scanning Tunneling Microscope Light–emission Spectroscopy", *Solid State Commun.*, **177**, 29–32 (2014). [IF: 1.897], [Times Cited: 3]

**Abstract:** We have measured the energy of the A<sub>2u</sub> phonon mode of Sb<sub>2</sub>Te<sub>3</sub> by scanning tunneling microscope (STM) light–emission spectroscopy combined with ps–pulsed laser irradiation

(repetition rate: 80 MHz) of the STM tip–sample gap. It is known that the STM light emission from  $\text{Sb}_2\text{Te}_3$  is excited by electronic transitions at a photon energy of around 1.6 eV, i.e., a single peak with a narrow spectral width appears at the photon energy in the STM light–emission spectrum<sup>1-1)</sup>. For STM light emission occurring with the STM tip–sample gap irradiated by ps laser pulses, several supplementary peaks appear in the STM light–emission spectra (in addition to the single original peak). The difference in energy between adjacent peaks gives the phonon energy of the  $A_{2u}$  mode of  $\text{Sb}_2\text{Te}_3$ .

**International impact on both academic and social aspects:** While STM has high spatial and energy resolutions, its temporal resolution is limited to a few ms. This is because the ratio of tunnel current to be measured for controlling the STM to the bandwidth of amplifier for measuring the tunnel current has to be larger than a specific value. That is to say, the tunnel current limits the bandwidth so that the temporal resolution of STM has to be ms or worse. However, such a limitation does not appear in optical measurements. From such a background, we have been investigating STM light–emission spectroscopy with high temporal resolution<sup>1-2)</sup>. In this research, we demonstrated that the energy of phonons excited by ps laser–pulse irradiation can be determined from the STM light–emission spectra. Since the lifetime of the phonon is in the time range of ps, this result indicates that one can observe phenomena of ps duration by use of STM light–emission spectroscopy. Hence, this study must have a high impact.

1-1) Y. Uehara, M. Kuwahara, S. Katano, and S. Ushioda, "Scanning tunneling microscope light emission spectra of polycrystalline  $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$  and  $\text{Sb}_2\text{Te}_3$ ," *Solid State Commun.* **149**, 3 (2009).

1-2) Y. Uehara, A. Yagami, K.J. Ito, and S. Ushioda, "Scanning tunneling microscope light emission spectroscopy with picosecond time resolution," *Applied Physics Letters* **76**, 2487 (2000).

## [2016–2018]

[2]. J. Sakai, S. Katano, M. Kuwahara, and Y. Uehara, "Pump–probe STM Light Emission Spectroscopy for Detection of Photo–induced Semiconductor–metal Phase Transition of  $\text{VO}_2$ ," *J. Phys.: Condens. Matter.*, **29**, 405001\_1–7 (2017). [IF: 2.617], [Times Cited: 1]

**Abstract:** Variations in material properties that are induced by stimuli of ps pump light pulses were observed through STM light emission synchronized with ps probe light pulses (pump–probe STM light emission spectroscopy). The sample was the  $\text{VO}_2$  thin film deposited on a rutile  $\text{TiO}_2$  (001) substrate. The sample surface was covered by a mixture of semiconducting monoclinic (M) and metallic rutile (R) phase nanometer–scale domains (nanodomains). It was known that STM light emission is obtained only when the tip is located over a R phase nanodomain<sup>2-1)</sup>. In this measurement, the tip was fixed over a M phase nanodomain. We observed STM light emission synchronized with the probe light pulses as a function of delay time  $\tau$  between the pump and probe light pulses. No STM light was observed for  $\tau < 30$  ps. This is reasonable because the tip is fixed over the M phase nanodomain. In the delay time span  $30 < \tau < 50$  ps, the STM light emission spectra<sup>2-1)</sup> of the R phase domains were observed. This result clearly shows that a M–R phase transition occurs 30 ps after the irradiation of the pump pulse. That is to say, the pump–probe STM light emission spectroscopy succeeds to trace temporal behaviors of the light induced phase transition occurring in the ps temporal range.

**International impact on both academic and social aspects :** Pump–probe STM light emission spectroscopy abstracted for VO<sub>2</sub> just above was also applied to Sb<sub>2</sub>Te<sub>3</sub><sup>2-2)</sup>; temporal behaviors of the crystalline–amorphous phase transition induced by ps pump light pulses was successfully traced. In this manner, pump–probe STM light emission spectroscopy makes it possible to measure time evolutions of properties of materials stimulated by ps light pulses with picosecond temporal resolution together with atomic spatial resolution of STM, which has a great academic impact. From a view point of device development, high speed devices such as memories and switches that operate with small power are strongly required, and devices that use phase changes are good candidates because they do not require power to maintain thier states. We demonstrated that both VO<sub>2</sub> and Sb<sub>2</sub>Te<sub>3</sub> have enough switching speed required by such devices. Hence, the present results have also high social impact.

- 2-1) J. Sakai, M. Kuwahara, M. Hotsuki, S. Katano, and Y. Uehara, "Selective Scanning Tunneling Microscope Light Emission from Rutile Phase of VO<sub>2</sub>," *J. Phys.: Condens. Matter.*, **28**, 385002–1\_5 (2016). (**Selected as an IOPselect. Highlighted in LabTalk.**)
- 2-2) Y. Uehara, M. Kuwahara, S. Katano, T. Tanno, and J. Sakai, "Pump–probe scanning–tunneling–microscope light–emission spectroscopy of Sb<sub>2</sub>Te<sub>3</sub>," *J. Appl. Phys.*, **124**, 075104\_1–7 (2018).

研究テーマ： 3. ナノ空間中での様々な電磁気学的効果とその工学的応用  
4. 高効率で広帯域の発光・受光素子の開発

[2013–2015]

- [3] Y. Uehara, S. Katano, M. Kuwahara, and T. Suzuki, "Electromagnetic Properties of Scanning Tunneling Microscope Tip-sample Gap in the Terahertz Frequency Range," *Jpn. J. Appl. Phys.*, **54**, 08LB06–1\_3 (2015). [IF: 1.452], [Times Cited: 0]

要約：STM 発光は試料–探針間ギャップに置かれた双極子からの電磁放射であり、試料–探針ギャップはこの放射過程においてアンテナの役割を果たす<sup>3-1)</sup>。この研究では、THz 域でのアンテナ効果を扱った。探針先端形状を最適化することにより、THz 域での STM 発光が可視域の発光と同程度レベルまで増強されることが示された。

学術面での国際的インパクトおよび社会的影響：THz 域での光応答は強い材料依存性を示す。従って、THz 分光は強い関心が持たれている。しかし、現在利用されている THz 分光の空間分解能は良くない。STM 発光分光の空間分解能は計測すべき光の波長には依らない。従って、THz 域での STM 発光分光は極めて興味深い。双極子放射は周波数の 4 乗に比例するため、nA 領域のトンネル電流で励起される THz–STM 発光は、可検されない程弱いと予想される。この予想に反し、この研究は、探針先端形状の最適化により、観測が可能なレベルまで THz 域の STM 発光が増強されることを示した。この結果は大きなインパクトを有する。

- 3-1) Y. Uehara, Y. Kimura, S. Ushioda, and K. Takeuchi, "Theory of Visible–Light Emission From Scanning Tunneling," *Jpn. J. Appl. Phys.* **1** **31**, 2465 (1992).

[2016–2018]

- [4] T. Inaoka, and Y. Uehara, "Classical electricity analysis of the coupling mechanisms between ad molecule vibrations and localized surface plasmons in STM for vibration detectability", *J. Appl. Phys.*, **122**, 085306 (2017). [IF: 2.328], [Times Cited: 3]

要約：様々な種類の表面吸着分子からの STM 発光スペクトル中に振動誘起構造が観測されている<sup>4)</sup>が、そのような構造に対する理論的な説明はなされていなかった。[3]で触れたように、STM 発光は電子トンネリングにより励起された振動双極子からの放射である。試料と探針の材料が共に金属の場合、この双極子は試料–探針ギャップ内に閉じ込められたプラズモン（局在プラズモン）により増強される。この研究では、振動誘起構造は局在プラズモンと双極子の振動の相互作用により生成されることを示した。双極子活性分子の振動と、電子トンネリングの起点もしくは終点となっている分子の振動を扱っている。理論解析の結果、双極子活性分子の振動が STM 発光に及ぼす効果は極めて弱いこと、電子トンネリングの起点もしくは終点となっている分子の振動が及ぼす効果は観測可能なレベルに到達することが結論された。実際、複雑な特徴をもつ高配向熱分解グラファイト上の銀ナノ微粒子の STM 発光スペクトルがこの理論により再現された。

学術面での国際的インパクトおよび社会的影響：振動分光は材料の同定や状態の決定に極めて有効な手法である。ラマン分光や電子エネルギー損失分光のように現在確立されている振動分光の空間分解能はマクロスコピックなレベルに留まっている。一方、扱われる材料のサイズは多くの科学技術の研究領域でナノメートル領域にある。我々は STM 発光スペクトルの観測

結果に振動誘起構造が現れることを示してきた<sup>4-1)</sup>。このことはSTMの空間分解能での振動分光が可能になることを示す。しかし、振動誘起構造をもたらす機構はよく理解出来ていなかった。この論文は初めて理論的な説明を与えるものである。このことは、大きなインパクトを有すると言える。

4-1) S. Katano, S. Ushioda, and Y. Uehara, "Vibrational Excitation of a Single Benzene Molecule Adsorbed on Cu(110) Studied by Scanning Tunneling Microscope Light Emission Spectroscopy," *J Phys Chem Lett* **1**, 2763 (2010).

Y. Uehara, T. Inaoka, T. Nishio, and S. Katano, "Vibration-induced Structures in Scanning Tunneling Microscope Light Emission Spectra of Ni(110)-(2 × 1) O", *J. Appl. Phys.*, **123**, 224302\_1–8 (2018).  
**(Times downloaded from June, 2018 to June, 2019: 101)**

4-2) Y. Uehara, J. Michimata, S. Watanabe, S. Katano, and T. Inaoka, "Determining the phonon energy of highly oriented pyrolytic graphite by scanning tunneling microscope light emission spectroscopy", *J. Appl. Phys.*, **123**, 104306\_1–9 (2018). **Selected as an Editor's pick article.**

**Research Topics: 3. Investigation of various electromagnetic phenomena in nanometer-scale spaces, and their engineering applications.**

**4. Development of efficient and broad-band light sources and detectors.**

**[2013–2015]**

[3] Y. Uehara, S. Katano, M. Kuwahara, and T. Suzuki, "Electromagnetic Properties of Scanning Tunneling Microscope Tip-sample Gap in the Terahertz Frequency Range," *Jpn. J. Appl. Phys.*, **54**, 08LB06–1\_3 (2015). [IF: 1.452], [Times Cited: 0]

**Abstract:** STM light emission is considered as a kind of electromagnetic radiation from a dipole placed in the tip-sample gap of STM, which functions as an antenna<sup>3-1)</sup>. In this study, the antenna effects were treated in the THz spectral range. It was concluded that by optimizing the front shape of tip, STM light emission in the THz spectral range can be enhanced to the same level as that in the visible spectral range.

**International impact on both academic and social aspects:** Optical responses in the THz spectral range show strong material dependence. Thus, THz spectroscopy attracts much attention. However, the spatial resolution of THz spectroscopy available at present is moderate. The spatial resolution of STM light-emission spectroscopy does not depend on the wavelength of light to be detected. Therefore, STM emission spectroscopy in the THz spectral range is very interesting. It should be noted that since the dipole radiation is proportional to the fourth power of frequency, THz-STM emission excited by tunneling current in the nA range is expected to be undetectably weak. Contrary to this expectation, this study has shown that STM emission is enhanced to a level at which STM light emission spectroscopy will be possible by optimization of the front shape of tip. This result must have a great impact.

3-1) Y. Uehara, Y. Kimura, S. Ushioda, and K. Takeuchi, " Theory of Visible-Light Emission From Scanning Tunneling," *Jpn. J. Appl. Phys.* **1 31**, 2465 (1992).

[2016–2018]

- [4] T. Inaoka, and Y. Uehara, "Classical electricity analysis of the coupling mechanisms between admolecule vibrations and localized surface plasmons in STM for vibration detectability," *J. Appl. Phys.*, **122**, 085306 (2017). [IF: 2.328], [Times Cited: 3]

**Abstract:** Vibration–induced structures have been observed in STM emission spectra of various kinds of surface adsorbed molecules <sup>4-1)</sup>, but no theoretical explanation had been provided for such structures. As mentioned in [3], STM light emission is radiated by a dipole excited by electron tunneling; when both sample and tip materials are metallic, this dipole is enhanced by plasmons localized in the tip–sample gap (localized surface plasmon, LSP). In this work, we showed that the vibration–induced structures are created through interactions of LSP and vibrations of the dipoles. The presented theory examines vibrations of dipolar active molecules and ones of molecules that are the starting point or the end point of electron tunneling. It was found that effects of the vibrations on the STM light emission from the dipolar active molecules are moderate, but those of the molecules serving as the origin or end point of electron tunneling reach observable levels. Such theoretical conclusions are consistent with the experimental knowledge. In fact, the presented theory succeeded to reproduce the STM light emission spectra of Ag nano–particles on highly oriented pyrolytic graphite (HOPG), which show complex features <sup>4-2)</sup>.

**International impact on both academic and social aspects:** Vibrational spectroscopy is an extremely effective method for identifying materials and determining their states. The spatial resolution of vibrational spectroscopy established at present, e.g., Raman spectroscopy and electron energy loss spectroscopy etc., remains at a macroscopic level. On the other hand, material sizes to be handled are in the nanometer scale range in many scientific and technological research fields. We have experimentally shown that vibration–induced structures appear in STM emission spectra <sup>4-1)</sup>, showing that vibrational spectroscopy is possible at the spatial resolution of STM. However, the mechanisms that are responsible for the vibration–induced structures had not been well understood. This work provided the theoretical explanation for the first time. This must have a great impact.

- 4-1) S. Katano, S. Ushioda, and Y. Uehara, "Vibrational Excitation of a Single Benzene Molecule Adsorbed on Cu(110) Studied by Scanning Tunneling Microscope Light Emission Spectroscopy," *J Phys Chem Lett* **1**, 2763 (2010).

Y. Uehara, T. Inaoka, T. Nishio, and S. Katano, "Vibration–induced Structures in Scanning Tunneling Microscope Light Emission Spectra of Ni(110)–(2 × 1) O," *J. Appl. Phys.*, **123**, 224302\_1–8 (2018).  
**(Times downloaded from June, 2018 to June, 2019: 101)**

- 4-2) Y. Uehara, J. Michimata, S. Watanabe, S. Katano, and T. Inaoka, "Determining the phonon energy of highly oriented pyrolytic graphite by scanning tunneling microscope light emission spectroscopy," *J. Appl. Phys.*, **123**, 104306\_1–9 (2018). **(Selected as an Editor's pick article)**

研究テーマ： 5. ナノ構造を機能素子として利用する分子エレクトロニクス  
6. 単一原子・分子の光励起

[2013–2015]

- [5] S. Katano, Y. Kim, T. Kitagawa, and M. Kawai, "Tailoring Electronic States of a Single Molecule Using Adamantane-based Molecular Tripods", *Phys. Chem. Chem. Phys.*, **15**, 14229–14233 (2013). [IF: 3.906], [Times Cited: 13]

要約: 自発的に規則構造を形成する自己組織化単分子膜を利用して、かさ高い機能性分子を基板に対して直立配列できることを示した。さらに STM を用いた単一分子の電子状態観察から、フェロセンなどの機能性官能基が膜内の分子間相互作用を受けずに高い独立性を維持した状態で基板に固定されることを明らかにした。

学術面での国際的インパクトおよび社会的影響: 本論文は、分子集積エレクトロニクスの研究開発を今後推し進めるにあたって基盤技術となると期待される重要な成果である。自立に適した三脚構造を有する分子が階層構造を有する自己組織化単分子膜を形成することを以前に報告した<sup>5-1,5-2)</sup>。本論文では、かさ高い機能性官能基を三脚頭部に有する分子でも直立構造が維持され、その官能基の電子状態が金属基板によって変調されないことを示した。ひとつの分子を能動素子として利用する分子デバイスを実現するためには、電子の集団運動を利用する従来のデバイスとは異なり、個々の原子、分子、電子を精密に制御することが本質的に重要である。本成果は、原子レベルで規定された分子と金属電極間の安定接合を実現した点においても、学術的に高いインパクトを有している。

- 5-1) S. Katano, Y. Kim, H. Matsubara, T. Kitagawa, and M. Kawai, "Hierarchical Chiral Framework Based on a Rigid Adamantane Tripod on Au(111)", *J. Am. Chem. Soc.* **129** (2007) 2511. [IF: 12.113]
- 5-2) S. Katano, Y. Kim, T. Kitagawa, and M. Kawai, "Self Assembly and STM Tip-induced Motion of Ferrocene Adamantane Trithiolate Adsorbed on Au(111)", *Jpn. J. Appl. Phys.* **47** (2008) 6156. [IF: 1.452]

[2016–2018]

- [6] S. Katano, M. Hotsuki, and Y. Uehara, "Creation and Luminescence of a Single Silver Nanoparticle on Si(111) Investigated by Scanning Tunneling Microscopy", *J. Phys. Chem. C*, **120**, 28575–28582 (2016). [IF: 4.309], [Times Cited: 3]

要約: STM 探針を用いて直径数 nm の銀ナノ微粒子を任意の場所に作製し、さらにその銀ナノ微粒子の光電子物性を STM 発光により明らかにできることを示した。銀探針からの電界蒸発により銀ナノ微粒子を Si 基板上にひとつひとつ作製し、それらを任意に配置することに成功した。さらに、その発光スペクトルは、微粒子の大きさや配置に敏感であることを明らかにした。銀ナノ微粒子の発光過程において局在表面プラズモン励起が強く関与していることを実験と理論計算から示した。

学術面での国際的インパクトおよび社会的影響: 本論文は、単一金属微粒子によるナノ光物性制御という新しいプラズモニクス研究領域の開拓に結びつく学術的に高いインパクトを有する。以前に、我々は銀ナノ微粒子集合体の STM 発光を研究し、銀ナノ微粒子が二次元結晶構造を形成した場合のみ協調的効果で強い STM 発光と分子の振動励起が誘起されることを実験的に示した<sup>6-1)</sup>。局在表面プラズモンによる電場増強は粒子の大きさや近傍に位置する

別の微粒子までの距離に強く依存すると考えられているが、それらをナノメートルスケールで精密に制御した例はこれまでなかった。本研究では、STM が得意とするマニピュレーション技術を利用することで単一金属微粒子の光物性を実験的に検証した点が新しい。我々は、局在プラズモン励起を利用して単一分子の振動状態解析ができることを STM 発光解析から示した<sup>6-2)</sup>。ナノ微粒子を用いた増強電場制御によって高感度バイオセンサーや太陽電池の高効率化などの実現が期待され、本研究成果は高い社会的インパクトを有する。

6-1) S. Katano, K. Toma, M. Toma, K. Tamada, and Y. Uehara, "Nanoscale Coupling of Photons to Vibrational Excitation of Ag Nanoparticle 2D Array Studied by Scanning Tunneling Microscope Light Emission Spectroscopy", *Phys. Chem. Chem. Phys.* **12** (2010) 14749. [IF: 3.906]

6-2) S. Katano, S. Ushioda, and Y. Uehara, "Vibrational Excitation of a Single Benzene Molecule Adsorbed on Cu(110) Studied by Scanning Tunneling Microscope Light Emission Spectroscopy", *J. Phys. Chem. Lett.* **1** (2010) 2763. [IF: 8.709]

[7] S. Katano, H. Fujita, and Y. Uehara, "Investigation of local modification and luminescence of a carbon nanotube by scanning tunneling microscopy", *Appl. Phys. Lett.*, **112**, 011601\_1-5 (2018). [IF: 3.495], [Times Cited: 0] (**Times downloaded from Jan., 2018 to Jan., 2019: 347**)

**要約:** 次世代光素子材料として有望視されているカーボンナノチューブの微視的な光物性を STM 発光により明らかにできることを示した。カーボンナノチューブの原子骨格構造を STM を用いて観察し、カーボンナノチューブのバンド間遷移発光に関わる電子準位をナノスケールの空間精度で決定した。さらに、STM を用いて作製された構造特異点によってカーボンナノチューブの発光が局所的に変調されることを見出した。

**学術面での国際的インパクトおよび社会的影響:** STM 発光分光がナノカーボン材料の光物性を微視に決定することができる強力な手段であることを明らかにした学術的に高いインパクトを有する論文である。STM 探針を用いたナノケミストリー<sup>7-1)</sup>をカーボンナノチューブに適用し、カーボンナノチューブ鎖内の発光を高い位置精度で微視的に制御できることを示した。ナノカーボンのナノスケール光物性を高い空間精度で制御した例はこれまで報告されていない。さらに本論文発表後に、グラフェン派生体の光電子物性を微視的に検証することに成功した<sup>7-2)</sup>。これらの研究成果から、ナノ導波路や光デバイス素子の実現などナノカーボンを利用した微小発光素子の有効な設計指針を示すことができた。以上の結果は、スマートなエネルギー変換が求められる持続可能な社会の実現にあたって重要な発見であると考えられる。

7-1) S. Katano, Y. Kim, M. Hori, M. Trenary, and M. Kawai, "Reversible Control of Hydrogenation of a Single Molecule", *Science* **316** (2007) 1883. [IF: 41.058]

7-2) S. Katano, T. Wei, T. Sasajima, R. Kasama, and Y. Uehara, "Localized Electronic Structures of Graphene Oxide Studied by Scanning Tunneling Microscopy and Spectroscopy", *Phys. Chem. Chem. Phys.* **20** (2018) 17977. [IF: 3.906]

**Research Topics: 5. Molecular electronics based on the nano molecular assembly.**

**6. Optical excitation of a single atom and molecule**

**[2013–2015]**

- [5] S. Katano, Y. Kim, T. Kitagawa, and M. Kawai, "Tailoring Electronic States of a Single Molecule Using Adamantane-based Molecular Tripods", *Phys. Chem. Chem. Phys.*, **15**, 14229–14233 (2013). [IF: 3.906], [Times Cited: 13]

**Abstract:** Adsorption structures and electronic states of molecular tripods, having a Br atom (BATT) and a ferrocene derivative (Ferrocene-ATT) at the head part of the adamantane-based trithiolate, adsorbed on Au(111) have been investigated using low temperature scanning tunneling microscopy (STM) and scanning tunneling spectroscopy (STS). We found that BATT and Ferrocene-ATT form self-assembled monolayers (SAMs), and their orderings are identical to one another, which suggests that the adsorption structure of adamantane-based molecular tripod is independent of the type of functional substituent attached to the head part. The electronic states originated from the ferrocene group were confirmed in the STS spectrum of Ferrocene-ATT whereas those are absent in the BATT spectrum. We note that the ferrocene part has few interactions with the Au substrate owing not only to the upright geometry of Ferrocene-ATT but also to the insulative property of the adamantane base. The STS mapping revealed the spatial distribution of the electronic state of Ferrocene-ATT.

**International impact on both academic and social aspects:** This work is scientifically important achievement, which provides a fundamental technology in the development of molecular integrated electronics. Previous our studies have shown that an upright adsorption structure can be accomplished by using the molecules having a tripod structure<sup>5-1, 5-2</sup>. In this paper, we further demonstrated that an upright adsorption structure can be maintained even if we use a molecule having a bulky functional group on the tripod head. This enables us to achieve the preservation of the electronic states of the functional group owing to the electronic isolation from the metal substrate. To realize a molecular device that uses one molecule as an active electronic element, precise controls of individual atoms, molecules and electrons are significantly important. Moreover, the present result has a great impact on the academic field in terms of achieving stable bonding between the molecule and metal electrode, which are defined at the atomic scale level.

- 5-1) S. Katano, Y. Kim, H. Matsubara, T. Kitagawa, and M. Kawai, "Hierarchical Chiral Framework Based on a Rigid Adamantane Tripod on Au(111)", *J. Am. Chem. Soc.* **129** (2007) 2511. [IF: 12.113]

- 5-2) S. Katano, Y. Kim, T. Kitagawa, and M. Kawai, "Self Assembly and STM Tip-induced Motion of Ferrocene Adamantane Trithiolate Adsorbed on Au(111)", *Jpn. J. Appl. Phys.* **47** (2008) 6156. [IF: 1.452]

**[2016–2018]**

- [6] S. Katano, M. Hotsuki, and Y. Uehara, "Creation and Luminescence of a Single Silver Nanoparticle on Si(111) Investigated by Scanning Tunneling Microscopy", *J. Phys. Chem. C*, **120**, 28575–28582 (2016). [IF: 4.309], [Times Cited: 3]

**Abstract:** We have investigated the fabrication of a single silver nanoparticle (AgNP) on Si(111) at room temperature using scanning tunnelling microscopy (STM), and the luminescence of individual AgNP

has been studied by means of STM light emission (STM–LE) spectroscopy. Using the field evaporation method, we succeeded in creating two types of nanostructures, i.e., AgNP and the nano–hole formed by the elimination of Si atoms, on the Si substrate. It was found that two different nanostructures can be created selectively by using the appropriate electric field. STM–LE spectra of AgNP and the Si substrate exhibit the broad peak appearing in the visible light region. The peak intensity increases as increasing the AgNP size, accompanying a slight shift of the peak position. Furthermore, the theoretical calculation based on the finite–difference time–domain (FDTD) method has been used to get an insight into the STM–LE from a single AgNP on the Si substrate.

**International impact on both academic and social aspects:** This paper has an academically high impact on the development of plasmonics regarding the precise control of a single metal nanoparticle. Previously, we have studied the STM light emission from the silver nanoparticle array and have demonstrated that strong STM light emission can be induced only if the silver nanoparticles form a two–dimensional crystal structure <sup>6–1)</sup>. Although so far theoretical studies have presented that the electric field enhancement by localized surface plasmon (LSP) obviously depends on the size of the nanoparticle and the distance between nanoparticles, there has little report on the precise control of them experimentally. In this research, we have demonstrated that a single metal nanoparticle can be formed at the desired place using the STM manipulation technique, and have further shown that optical properties of nanoparticles can be verified experimentally by the STM light emission spectroscopy. Our previous study demonstrated that vibrational analysis of a single molecule can be achieved by utilizing the LSP excitation <sup>6–2)</sup>. Our findings will be important for the realization of high–sensitive biosensors and high–efficient solar cells.

6–1) S. Katano, K. Toma, M. Toma, K. Tamada, and Y. Uehara, "Nanoscale Coupling of Photons to Vibrational Excitation of Ag Nanoparticle 2D Array Studied by Scanning Tunneling Microscope Light Emission Spectroscopy", *Phys. Chem. Chem. Phys.* **12** (2010) 14749. [IF: 3.906]

6–2) S. Katano, S. Ushioda, and Y. Uehara, "Vibrational Excitation of a Single Benzene Molecule Adsorbed on Cu(110) Studied by Scanning Tunneling Microscope Light Emission Spectroscopy", *J. Phys. Chem. Lett.* **1** (2010) 2763. [IF: 8.709]

[7] S. Katano, H. Fujita, and Y. Uehara, "Investigation of local modification and luminescence of a carbon nanotube by scanning tunneling microscopy", *Appl. Phys. Lett.*, **112**, 011601\_1–5 (2018). [IF: 3.495], [Times Cited: 0] (**Times downloaded from Jan., 2018 to Jan., 2019: 347**)

**Abstract:** We have studied the nanoscale luminescence from a carbon nanotube (CNT) adsorbed on Au(111) using a scanning tunneling microscope (STM). By injecting tunneling electrons from the STM tip to the CNT, we observed STM light emission (STM–LE) from the CNT in the visible–light range, showing electronic transitions between the bands associated with the van Hove singularity in the density of states of the CNT. The STM–LE spectrum was obviously changed after introducing the local defect created by the STM tip, indicating the controllability of the nanoscale luminescence within a single chain of a CNT.

**International impact on both academic and social aspects:** This is a scientifically high–impact article, which revealed the nanoscale optical properties of carbon materials using STM light emission spectroscopy. Previously we have demonstrated that the injection of tunneling electrons from the

STM tip to the molecule can induce a chemical reaction in atomic scale <sup>7-1)</sup>. In this research we have utilized this technique to change the chemical state of carbon nanotube. This enables us to control the luminescence from the carbon nanotube chain in atomic scale, which has not been reported so far. After the publication of this paper, we further succeeded in verifying the photoelectronic properties of graphene derivatives using STM <sup>7-2)</sup>. From these achievements, we have proposed a guideline for the realization of nano-opto devices, such as nanoscale waveguides, using nano carbons.

7-1) S. Katano, Y. Kim, M. Hori, M. Trenary, and M. Kawai, "Reversible Control of Hydrogenation of a Single Molecule", *Science* **316** (2007) 1883. [IF: 41.058]

7-2) S. Katano, T. Wei, T. Sasajima, R. Kasama, and Y. Uehara, "Localized Electronic Structures of Graphene Oxide Studied by Scanning Tunneling Microscopy and Spectroscopy", *Phys. Chem. Chem. Phys.* **20** (2018) 17977. [IF: 3.906]

## G. 特筆すべき活動 / Significant Activities (FY.2013–2018)

See Ref. 2–9. “#” mark indicates research carried out at a former organization.

研究室外部評価参考資料の2以降を参照しながら、2013-2018年度のなどの活動の中から特筆すべきものを取り出し、前半（2013–2015年度）と後半（2016–2018年度）に分けて簡単に紹介する。英文のみ、もしくは和文と英文で記載。

### 3. 社会貢献 / Contributions to society

#### (3) 国・地方自治体・公共団体における活動 / Activities for national and local governments, and public organizations

##### 1. 科研費の審査 / Screening of Grants-in-Aid for Scientific Research

#### [2013–2015]

1. 2015年度科研費第1段階審査（書面審査）基盤(S)：基盤(A)（一般）、基盤(B)（一般）、若手(A)

Screening member for 2015FY Grants-in-Aid for Scientific Research (Y. Uehara).

#### [2016–2018]

2. 2016年度科研費第1段階審査（書面審査）基盤(S)：基盤(A)（一般）、基盤(B)（一般）、若手(A)

Screening member for 2016FY Grants-in-Aid for Scientific Research (Y. Uehara).

3. 2018年度科研費審査：基盤研究(B)（一般）

Screening member for Grants-in-Aid for Scientific Research (Y. Uehara).

科研費は日本の基礎研究支援の中核であり、採択・不採択を判断する審査は我が国の科学の発展にとって重要である。これに真摯に取り組んだ。この取り組みが評価され表彰された。

上原洋一、日本学術振興会平成28年度「科研費」審査委員（第1段階審査）表彰、平成28年11月1日

Grants-in-Aid for Scientific Research is one of the core of Japan's basic research supports, and screening to judge adoption or rejection is important for Japan's scientific developments. We worked hard on this. The above mentioned efforts were evaluated and commended :

Y. Uehara, Commendation for 2016FY Screening for Grants-in-Aid for Scientific Research, Nov. 2016.

##### 5. 国際共同研究・連携研究・連携教育活動の実績 / International joint research, collaborative research, and collaborative education

#### [2013–2015]

1. 坂井穰博士（トゥール大学、フランス） / Dr. Joe Sakai (University of Tours, France)

坂井博士の専門はレーザーアブレーションによる酸化膜堆積であり、高品質な VO<sub>2</sub> 試料の提供ができる。VO<sub>2</sub>の表面は半導体的なモノクリニック (M) 相と金属的なルチル (R) 相のナノドメインで覆われている。我々は、STM 発光は R 相のナノドメインの

みからしか観測されないことを発見した。R ナノドメインからは STM 発光は観測されない。STM 光計測でドメインの判別ができることは、STM の空間分解能で、高速の相転移の実時間計測が可能になることを示唆する極めて魅力的な知見である。

発表論文数：1 (査読付学術論文 15)

One of specialties of Dr. Sakai is oxide film depositions by use of laser ablation; he can provide a high quality of VO<sub>2</sub> thin film. The surface of VO<sub>2</sub> is covered by a mixture of semiconducting monoclinic (M) and metallic rutile (R) phase nanometer-scale domains (nanodomains). It was discovered that STM emission can be observed only from the R phase. No STM light is emitted from the R nanodomains. The ability to distinguish domains by STM light-emission spectroscopy is a very attractive finding because it indicates that real-time measurement of fast phase transition is possible with spatial resolution of STM.

Number of published papers: 1 (15 in Refereed Journal Papers)

#### [2016-2018]

1. 坂井穰博士 (トゥール大学、フランス) / Dr. Joe Sakai (University of Tours, France)

我々の提案したポンプ-プローブ STM 発光分光により個々の VO<sub>2</sub> のナノスケールドメインの相転移時間をピコ秒の時間分解能で決定した。特筆されるべき結果である。

発表論文数：1 (査読付学術論文 18)

The phase transition time of individual nanometer-scale domains of VO<sub>2</sub> was determined with ps temporal resolution by use of pump-probe STM emission spectroscopy, which was proposed by us. This achievement should be noted.

Number of published papers: 1 (18 in Refereed Journal Papers)

6. 共同利用・共同研究拠点活動の実績 / Achievements of work done under the framework of Joint Usage/Research Center

#### [2013-2015]

- 1 カルコゲナイドの微細構造体の研究およびメモリー応用の検討 / Study for nano-scale structure of chalcogenide and its application to memory devices

主要な共同研究者：桑原正史博士 産業技術総合研究所

カルコゲン合金はアモルファス相と結晶相の2つの安定相を有し、相間で光学的・電気的性質が大きく異なる。加えて、相転移時間はピコ秒かそれより短い時間領域にある。以上から、これらの材料は、高速のメモリーやスイッチへの応用が期待されている。この共同利用研究では、産業技術総合研究所が試料のカルコゲン合金を提供し、東北大学で STM 発光分光を含む様々な計測がなされた。STM 発光分光ではピコ秒光パルス照射で励起されたフォノンの性質が研究された。また、カルコゲン合金のトンネル接合からの THz 発光も研究された (未発表)。そこで得られた結果は、カルコゲン合金が THz 域での発光・受光素子の材料として期待されることを示唆していた。このように、特筆されるべき共同利用活動であった。

発表論文数：3 (査読付学術論文 8, 10, 11)

Major collaborator: Dr. M. Kuwahara, National Institute of Advanced Industrial Science and Technology

Chalcogen alloys have two stable phases, amorphous and crystalline phases, and optical and electrical properties differ greatly between these phases. In addition, the phase transition time is in the picosecond or shorter time range. Hence, applications of these materials to high-

speed memories and switches attract much attention. In the joint usage research activities, National Institute of Advanced Industrial Science and Technology provided chalcogen alloys as samples, and various measurements including STM emission spectroscopy were made at Tohoku University; in STM light emission spectroscopy, properties of phonons excited by picosecond light pulse irradiation have been explored. THz emission from chalcogen-alloy tunnel junctions was also studied (unpublished); the obtained results suggested that chalcogen alloys are expected as effective materials for light emitting and receiving devices in the THz spectral range. In this way, the joint usage activities should be noted ones.

Number of published papers: 3 (8, 10, 11 in Refereed Journal Papers)

## [2016–2018]

1. ナノスケール材料の相変化現象の探索と光電子デバイス応用 / Exploration of phase change phenomena of nanometer-scale materials and their applications to opto-electronic devices

主要な共同研究者：桑原正史博士 産業技術総合研究所

カルコゲン合金の一種である  $\text{Sb}_2\text{Te}_3$  (産業技術総合研究所より提供) のポンプ-プローブ STM 発光分光を実施し、ピコ秒レーザー照射により誘起される結晶-アモルファス相転移の時間振る舞いをピコ秒の時間分解能で決定した。この方法ではバンド間遷移エネルギーとフォノン周波数の時間振る舞いが決定できるので、相転移の物理の詳細が明らかになる。このように、特筆されるべき共同利用活動であった。

発表論文数：1 (査読付学術論文 22)

Major collaborator: Dr. M. Kuwahara, National Institute of Advanced Industrial Science and Technology

We carried out pump-probe STM light-emission spectroscopy of  $\text{Sb}_2\text{Te}_3$  (provided by National Institute of Advanced Industrial Science and Technology), a kind of chalcogen alloy, and determined temporal behaviors of the crystal-amorphous phase transition induced by picosecond laser irradiation with picosecond time resolution. In this method, the temporal behavior of the interband-transition energy and phonon frequency can be determined, so that the physical details of the phase transition become much more clear in comparison with previous methods. In this way, this joint usage activity should be noted one.

Number of published papers: 1 (22 in Refereed Journal Papers)

2. 金属ナノキューブの光電子物性 / Photoelectronic properties of a metal nanocube

主要な共同研究者：小野篤史 准教授 静岡大学電子工学研究所

大きさ数十ナノメートルの銀ナノキューブを精密に合成することを得意とする静岡大学の小野グループとの共同研究を 2017 年度から進めている。立方体の形状を有する銀ナノキューブ(AgNC)は、球体のナノ微粒子よりも高い波長共鳴性や高い電場増強度を有する新しいプラズモニク材料として注目されている。特に、我々の得意とする STM および表面分光計測を駆使したナノスケール解析により、これまで観測が困難であった AgNC のナノ光電子物性を明らかにすることができると期待される。研究開始から 1 年強とまだ共同研究の期間は短い、

- 1) AgNC の微細構造および微粒子表面に吸着した高分子の化学状態
- 2) AgNC アレイ上における分子の光反応と熱反応

に関する成果をすでに挙げている。現在修士 1 年の岩堀氏は、我々の研究グループに配

属となった4年生からこの研究テーマに精力的に取り組み、これまでに3件の学会発表を行っている。1)の成果については、論文にまとめる作業に既に着手しており、近日中に投稿予定である。

発表論文数：0

Major collaborator: Associate Prof. Atsushi Ono, Research Institute of Electronics, Shizuoka University (Japan)

We have been collaborating with Ono Group at Shizuoka University from FY2017, which specializes in precise synthesis of silver nanocubes (AgNC) with the size of several tens nanometers. AgNC having a cubic shape attracts many attentions as a new plasmonic material owing to the narrow wavelength resonance and higher electric field enhancement. In particular, we expect that nano-photoelectronic properties of AgNC, which were difficult to observe by conventional spectroscopic methods, can be clarified by using STM and surface spectroscopies. Although the joint research has been just started, we already obtained the following results.

1) Surface nanostructures of AgNC and the chemical state of polymers adsorbed on AgNC.

2) Photoreaction and thermal reaction of molecules on AgNC array.

Mr. Iwabori, who is currently first-year master course student, has been intensely working on this topic since he assigned to our research group. He has made three conference presentations so far. About the result of 1), we have started to write a paper, which will be submitted soon.

Number of published papers: 0

3. カーボンナノマテリアルのナノスケール光計測と光電子物性の極限制御 / Nanoscale optical measurement and ultimate photoelectronic control of carbon nanomaterials

主要な共同研究者： Rzeznicka 教授 芝浦工業大学, 荒船竜一博士 NIMS

カーボンナノマテリアルの光電子物性を原子スケールの空間分解能で明らかにする研究を芝浦工業大学の Rzeznicka 教授と NIMS の荒船主任研究員と共同で進めている。片野准教授の専門である STM 発光分光、Rzeznicka 教授の専門である探針増強ラマン分光、荒船主任研究員の専門であるレーザー光電子分光を組み合わせることによって、カーボンナノマテリアルの発光に関与する数 nm に局在した格子振動や励起子のダイナミクスを明らかにすることが本共同研究の目標である。また、共同研究者が通研に訪れた際に講演会を通研で開催した。学生にも積極的にディスカッションに参加してもらい、単なる共同研究に留まらない研究交流を行っている。

1) Izabela I. Rzeznicka “Scanning tunneling microscope tip-aided luminescence from ultrathin organic thin films” 2019年3月6日

2) 荒船竜一 “光励起状態のスピン軌道相互作用：高分解能2光子光電子分光による直接観測” 2018年2月23日

3) Izabela I. Rzeznicka “Tip-enhanced Raman spectroscopy in characterization of two-dimensional growth of inorganic-organic thin films” 2018年2月9日

これまで、カーボンナノチューブやグラフェンに関するナノ光物性を STM で明らかにした論文を2件発表した。今後共同研究者とのさらなる連携を深めて微小空間におけるカーボンナノマテリアルの光電子物性の全容を明らかにする研究に取り組む。

発表論文数：2(査読付学術論文19,20)

Major collaborator: Prof. Izabela I. Rzeznicka, Department of Chemistry, Shibaura Institute of Technology (Japan) and Dr. Ryuichi Arafune, National Institute of Materials Science (Japan)

We have been collaborating a research on the photoelectronic properties of carbon

nanomaterials together with Prof. Rzeznicka of Shibaura Institute of Technology and Dr. Ryuichi Arafune of senior researcher at NIMS. Objective of our collaboration is to elucidate the luminescence behaviors of carbon nanomaterials, including the electron-phonon interaction and exciton dynamics, by the combination analysis of STM emission spectroscopy (Associate Professor Katano), tip-enhanced Raman spectroscopy (Prof. Rzeznicka) and laser photoelectron spectroscopy (Dr. Arafune). In addition, we also held seminars when the collaborators visited RIEC. This enables us not only to facilitate collaborations but also to exchange the latest topics with students.

The titles of seminar are shown as follows.

- 1) Izabela I. Rzeznicka “Scanning tunneling microscope tip-aided luminescence from ultrathin organic thin films” March 6, 2019.
- 2) Ryuichi Arafune “Spin-orbit interaction of photoexcited states: Direct observation by high-resolution two-photon photoelectron spectroscopy” February 23, 2018.
- 3) Izabela I. Rzeznicka “Tip-enhanced Raman spectroscopy in characterization of two-dimensional growth of inorganic-organic thin films” February 9, 2018.

So far, we have published two papers regarding the nano-optical properties of carbon nanotubes and graphene. We will work on collaboration continuously to get a full picture of luminescence of carbon nanomaterials in the nanoscale.

Number of published papers: 1 (19 and 20 in Refereed Journal Papers)

## 8. 叙勲・受賞・表彰 / Honors, awards, and prizes

### [2016-2018]

1. 上原洋一、日本学術振興会平成 28 年度「科研費」審査委員（第 1 段審査）表彰、平成 28 年 11 月 1 日

Grants-in-Aid for Scientific Research is one of the core of Japan's basic research supports, and screening to judge adoption or rejection is important for Japan's scientific developments. We worked hard on this. The above mentioned efforts were evaluated and commended :

Y. Uehara, Commendation for 2016FY Screening for Grants-in-Aid for Scientific Research, Nov. 2016.

2. S. Katano, Research Prize, Ishida Minoru Memorial Foundation 2018, Nov. 2018  
片野諭, 一般財団法人石田實記念財団 平成 30 年度研究奨励賞, “走査トンネル顕微鏡を用いたナノスケール光電子物性解明と極限物性制御に関する研究”, 平成 30 年 11 月

片野准教授は、走査トンネル顕微鏡 (STM) を用いた発光 (STM 発光) の計測手法を独自に進化させることにより、これまで理解が困難とされていた原子レベルの光電子物性を解明する独創的な成果を多数挙げた。

STM 発光から得られるスペクトルの微細構造を解析することにより、STM 探針直下に存在する大きさわずか 1 nm 程度の吸着種の振動状態を高い空間分解能で検出できることを明らかにした。関連研究をまとめた解説論文は応用物理学会誌の表紙として採用され、研究成果が国内外で高く評価されている。さらに、STM 発光の研究で得られた成果を情報通信材料のナノスケール評価に適用する発明として特許化し、情報通信分野への技術移転にも積極的に取り組んだ。また、次世代の光情報通信の材料として有望なカーボンナノチューブに STM 発光を適用し、STM がナノカーボン材料の光物性を微視的に決定できる有力な手段であることを示した。さらに、金属や半導体のナノ構造体の

微視的な光物性を STM 発光により明らかにし、ナノ構造体によって光物性を制御するといった新しいプラズモニクス研究の発展につながる優れた成果を挙げた。

以上、情報通信産業の進歩発展を担うデバイス材料の研究において顕著な実績を挙げたことが評価されて石田實記念財団研究奨励賞を受賞した。

Associate Professor Katano developed STM light emission technique and published many distinct papers regarding the elucidation of nanoscale photo-electronic properties of materials. By analyzing the fine structures appearing on the STM light emission spectrum, he demonstrated that the vibrational states of a single adsorbed molecule can be detected by STM with high spatial resolution. The corresponding review paper has been adopted as the cover of Journal of the Japan Society of Applied Physics, which is regarded as outstanding research over the world. Furthermore, he also patented above results, which can be applicable in the industries. In addition, he applied STM light emission to a carbon nanotube which is expected to be used in the next-generation optical communication. The result strongly indicated that STM is a powerful tool to reveal the nanoscale optical properties of nanocarbon materials. Furthermore, he also applied this technique to metal and semiconductor nanostructures, demonstrating that optical properties can be controlled by tuning the nano structure.

As a result, he received the Minoru Ishida Memorial Foundation Award for his outstanding achievement in the research on the nanoscale analysis, which must be indispensable in the development of the information and communication industries.