

広帯域相関計測解析研究部門

熊谷 崇（准教授）（2021 年 4 月 1 日着任）

西田 純（助教）

WANG, Yu（特任研究員）

伊藤 敦子（事務支援員）

A-1) 専門領域：物理化学，走査プローブ顕微鏡，近接場分光，単一分子科学，超高速ダイナミクス

A-2) 研究課題：探針増強近接場分光を基軸としたナノ物質科学の研究

- a) 超高真空・低温探針増強近接場分光による原子スケールの光と物質の相互作用の解明
- b) 超短パルスレーザーと探針増強近接場分光を融合したナノスケールコヒーレント分光の開発と応用
- c) 超高速探針増強顕微分光に基づく多次元・多変量ナノ顕微分光の開発と低次元ナノ物質への応用

A-3) 研究活動の概略と主な成果

- a) プラズモニックナノ接合では，局在表面プラズモン共鳴の励起を介して強く局在化した光電場を発生させることができる。この強く局在化した光電場の性質と，それによって引き起こされる光物理・光化学現象について超高真空・低温探針増強顕微分光によって調べている。最近の重要な成果として，金属単結晶表面に吸着した単一原子のラマン散乱の計測を行い，原子スケールにまで閉じ込められた光電場の存在を証明し，原子スケールの光と物質の相互作用について新しい知見を与える研究を報告している [*ACS Nano* **17**, 10172 (2023)]。
- b) 超高真空・低温走査トンネル顕微鏡のプラズモニックナノ接合に発生する強く局在化した光電場を操る技術と，超短パルスレーザーとを組み合わせるアプローチによって時空間極限におけるナノスケールコヒーレント分光の開発を行っている。最近の重要な成果として，金属単結晶表面上にエピタキシャル成長させた酸化亜鉛超薄膜においてコヒーレントフォノンをナノスケールで直接観測することに成功している [*Science Advances* **8**, eabq5682 (2022)]。
- c) 原子間力顕微鏡に基づく非開口型近接場光顕微分光と，超短パルスレーザーとを組み合わせたナノスケール非線形分光の開発を行っている。この新しい先端計測技術によって，次世代の機能性材料やデバイスの基盤となるナノ物質科学の分野へと展開している。最近の成果として，原子層物質における光誘起ダイナミクスをナノスケールで直接観察し，その微視的機構を解明した研究を報告している [*ACS Photonics* **12**, 207 (2025)]。

B-1) 学術論文

H. WIEDENHAUPT, F. SCHULZ, L. E. PARRA LÓPEZ, A. HAMMUD, Y. PARK, A. SHIOTARI, T. KUMAGAI, M. WOLF and M. MÜLLER, “Plasmonic Light Emission by Inelastic Charge Transport in Ultrathin Zinc Oxide/Metal Heterostructures,” *Nano Lett.* **25**(7), 2870–2877 (2025). DOI: 10.1021/acs.nanolett.4c06099

Y. WANG, J. NISHIDA, K. NAKAMOTO, X. YANG, Y. SAKUMA, W. ZHANG, T. ENDO, Y. MIYATA and T. KUMAGAI, “Ultrafast Nano-Imaging of Spatially Modulated Many-Body Dynamics in CVD-Grown Monolayer WS₂,” *ACS Photonics* **12**(1), 207–218 (2025). DOI: 10.1021/acsp Photonics.4c01545

- C. LIN, J. LI, G. LI, W. LUO, S. LIU, A. HAMMUD, Y. XIA, A. PAN, M. WOLF, M. MÜLLER and T. KUMAGAI**, “Quantitative Comparison of Local Field Enhancement from Tip-Apex and Plasmonic Nanofocusing Excitation via Plasmon-Assisted Field Emission Resonances,” *Nanoscale* **17**, 7164 (2025). DOI: 10.1039/D4NR04262J
- Y. PARK, I. HAMADA, A. HAMMUD, T. KUMAGAI, M. WOLF and A. SHIOTARI**, “Atomic-Precision Control of Plasmon-Induced Single-Molecule Switching in a Metal–Semiconductor Nanojunction,” *Nat. Commun.* **15**(1), 6709 (2024). DOI: 10.1038/s41467-024-51000-w
- B. CIRERA, S. LIU, Y. PARK, I. HAMADA, M. WOLF, A. SHIOTARI and T. KUMAGAI**, “Single-Molecule Tip-Enhanced Raman Spectroscopy of C₆₀ on the Si(111)-(7×7) Surface,” *Phys. Chem. Chem. Phys.* **26**(32), 21325–21331 (2024). DOI: 10.1039/d4cp01803f

B-4) 招待講演

- 熊谷 崇, 「Nanomaterial Characterization Using Infrared Nano-Spectroscopy」, 分子科学研究所研究会「電子強誘電体の新機能と新展開」, 岡崎, 2025年1月.
- 熊谷 崇, 「Single-Molecule Raman Spectroscopy in Plasmonic “Picocavity”」, 一分子の科学, 静岡, 2024年10月.
- T. KUMAGAI**, “Visualizing local exciton formation and many-body dynamics in single-walled carbon nanotubes,” The 67th Fullerenes-Nanotubes-Graphene General Symposium, 高知, 2024年9月.
- 熊谷 崇, 「Nano- & Atomic-Scale Spectroscopy Using Tip-Enhanced Near-Field Optics」, ナノ赤外分光の新展開ワークショップ, 兵庫県佐用町, 2024年7月.
- T. KUMAGAI**, “Ultrafast Nano-Spectroscopy of Photo-Induced Dynamics in Low-Dimensional Materials,” DPG Spring Meetings 2025, Regensburg (Germany), March 2025.
- T. KUMAGAI**, “Tip-Enhanced Vibrational Spectroscopy for Single Atoms & Molecules,” Sino-German Workshop on Surface Science of Complex Systems, Changchun (China), January 2025.
- T. KUMAGAI**, “Nanomaterial Characterization Using Infrared Nano-Spectroscopy,” FHI-ICAT Joint Symposium 2024, Berlin (Germany), November 2024.
- T. KUMAGAI**, “Nanomaterial Characterization Using Infrared Nano-Spectroscopy,” ISSP International Workshop, “Materials Science of Solids and Surfaces using Radiation Field Controlled in Time/Space Domain,” Tokyo (Japan), October 2024.
- T. KUMAGAI**, “Tip-Enhanced Raman Spectroscopy in STM picocavities,” Light-Matter Interaction at Nanoscale 2024, Madrid (Spain), September 2024.
- J. NISHIDA**, “Local Carrier and Exciton Dynamics in Low-Dimensional Semiconductors Probed by Ultrafast Mid-Infrared Nanoscopy,” International Symposium on the Physics of Semiconductors and Applications (ISPSA 2024), Jeju (Korea), June 2024.
- T. KUMAGAI**, “Nano-Spectroscopy for Single Atoms, Molecules, Nanomaterials,” Seminar at University of Malaya, hosted by Prof. Raymond Ooi, Kuala Lumpur (Malaysia), February 2025.
- T. KUMAGAI**, “Nano-Spectroscopy for Single Atoms, Molecules, Nanomaterials,” Seminar at Shinshu University, hosted by Prof. Katsumi Kaneko, Nagano (Japan), February 2025.
- T. KUMAGAI**, “Nano-Spectroscopy for Single Atoms, Molecules, Nanomaterials,” Seminar at Osaka University, hosted by Prof. Masayuki Abe, Osaka (Japan), October 2024.

T. KUMAGAI, “Nano-Spectroscopy for Single Atoms, Molecules, Nanomaterials,” Seminar at CSIC ICM, hosted by Dr. Borja Cirera, Madrid (Spain), September 2024.

T. KUMAGAI, “Nano- & Atomic-Scale Spectroscopy Using Tip-Enhanced Near-Field Optical Microscopy,” Seminar at Yokohama National University, hosted by Prof. Ikufumi Katayama, Kanagawa (Japan), June 2024.

B-7) 学会および社会的活動

学協会役員等

日本表面真空学会中部支部幹事 (2022–).

学会の組織委員等

NanospecFY2023 (2024/3/4–5, 愛知) “Frontier of Nano- & Atomic-Scale Characterization,” Organizer (Chair) (2024).

B-8) 大学等での講義, 客員

北海道大学, 客員准教授, 2020年4月–.

北海道大学触媒科学研究所, 招へい教員, 2024年4月–2025年3月.

大阪大学大学院基礎工学研究科, 招へい教員, 2024年4月–2025年3月.

B-10) 競争的資金

科学技術振興機構創発的研究支援事業 (受託研究), 「時空間極限における革新的光科学の創出」, 熊谷 崇 (2021年度–2027年度).

科研費学術変革領域研究 (A), 「超高速・超広帯域近接場顕微分光で拓く 2.5 次元物質の光科学」, 熊谷 崇 (2024年度–2025年度).

科研費基盤研究 (B), 「キャリア・励起子輸送の実時空間観測とナノスケール制御」, 西田 純 (2024年度–2026年度).

科学技術振興機構創発的研究支援事業, 「極低温フォノンポラリトニクスによる固体物性制御」, 西田 純 (2024年度–2027年度).

大幸財団自然科学系研究助成, 「単一分子振動コヒーレンスの赤外観測と非線形制御」, 西田 純 (2024年度–2025年度).

C) 研究活動の課題と展望

概要としては, 探針増強近接場分光の先端計測を研究室の柱としてナノ物質科学の新しい学際領域の形成, 革新的な光科学・光技術の創出を目指した基礎研究を展開する。超高真空・低温探針増強顕微分光の技術開発についてはほぼ完了し, 超高感度・超高分解能の顕微分光の原理についても理解が深まっている。今後はこの先端計測を応用し, 不均一触媒や光電デバイスなどの物質機能の根幹に関わる表面の局所的な構造や反応, またそれらの動態についての研究へと展開していく。現在は, これまで探針増強分光があまり応用されていなかった半導体・酸化物表面の計測を進めている。原子間力顕微鏡に基づく超高速探針増強近接場分光については, 現在も技術開発要素が残されているが, ナノ物質の計測へと応用を進めることができおり, 現在はナノカーボン, 原子層物質, 有機–無機ハイブリッドペロブスカイト, 生体分子などの研究を進めている。今後は多次元・多変量ナノ顕微分光のコンセプトに基づき, ナノ物質の物性・機能について物理化学的な理解を得ることを目的とした研究を展開する。国際的な研究活動として, 2021年に研究協力協定を締結したフリッツ・ハーバー研究所 (ベルリン, ドイツ) との共同研究や学術交流についても積極的に推進していきたいと考えている。