

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

A-2) 研究課題：探針増強顕微分光の先端計測を基軸としたナノ科学の研究

- a) 超高真空・低温探針増強顕微分光を応用したプラズモニックナノ接合における光と物質の相互作用についての研究
- b) 超短パルスレーザーを用いた探針増強顕微分光に基づく時空間極限における顕微分光の開発と超高速非平衡ダイナミクスについての研究
- c) 超高速・超広帯域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についての研究

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（プラズモン増強場）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顕微分光の開発を行っている。具体的には、科研費・帰国発展研究に採択された研究課題として、低次元物質におけるフォノンダイナミクスを原子スケールで直接観測する研究に取り組んでいる。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、超高速・超広帯域パルスレーザーとを組み合わせた多次元・多変量ナノ顕微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くことを目指している。これは分子科学研究所への着任に伴い新しく開始した研究課題であり、JST 創発的研究支援事業に採択されている内容である。最近の成果として、強相関物質である二酸化バナジウムのナノ粒子を計測し、その特徴的な絶縁体-金属相転移の微視的機構を解明した研究を報告している [J. Phys. Chem. C 127, 16485 (2023)]。

B-1) 学術論文

J. NISHIDA, A. OTOMO, T. KOITAYA, A. SHIOTARI, T. MINATO, R. IINO and T. KUMAGAI, “Sub-Tip-Radius Near-Field Interactions in Nano-FTIR Vibrational Spectroscopy on Single Proteins,” *Nano Lett.* **24**(3), 836–843 (2024). DOI: 10.1021/acs.nanolett.3c03479

C. LIN, F. KRECINIC, H. YOSHINO, A. HAMMUD, A. PAN, M. WOLF, M. MÜLLER and T. KUMAGAI, “Continuous-Wave Multiphoton-Induced Electron Transfer in Tunnel Junctions Driven by Intense Plasmonic Fields,” *ACS Photonics* **10**(10), 3637–3646 (2023). DOI: 10.1021/acsp Photonics.3c00714

K. NISHIKAWA, J. NISHIDA, M. YOSHIMURA, K. NAKAMOTO, T. KUMAGAI and Y. WATANABE, “Metastability in the Insulator–Metal Transition for Individual Vanadium Dioxide Nanoparticles,” *J. Phys. Chem. C* **127**(33), 16485–16495 (2023). DOI: 10.1021/acs.jpcc.3c02151

S. LIU, F. P. BONAFE, H. APPEL, A. RUBIO, M. WOLF and T. KUMAGAI, “Inelastic Light Scattering in the Vicinity of a Single-Atom Quantum Point Contact in a Plasmonic Picocavity,” *ACS Nano* **17**(11), 10172–10180 (2023). DOI: 10.1021/acsnano.3c00261

R. WILCKEN, J. NISHIDA, J. F. TRIANA, A. JOHN-HERPIN, H. ALTUG, S. SHARMA, F. HERRERA and M. B. RASCHKE, “Antenna-Coupled Infrared Nanospectroscopy of Intramolecular Vibrational Interaction,” *Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A.* **120**(20), e2220852120 (2023). DOI: 10.1073/pnas.2220852120

J. NISHIDA, P. T. S. CHANG, J. Y. YE, P. SHARMA, D. M. WHARTON, S. C. JOHNSON, S. E. SHAHEEN and M. B. RASCHKE, “Nanoscale Heterogeneity of Ultrafast Many-Body Carrier Dynamics in Triple Cation Perovskites,” *Nat. Commun.* **13**, 6582 (2022). DOI: 10.1038/s41467-022-33935-0

B-2) 国際会議のプロシーディングス

J. NISHIDA, A. OTOMO, R. IINO and T. KUMAGAI, “Sub-Tip-Radius Near-Field Interactions in Nano-FTIR Vibrational Spectroscopy on Single Protein Particles,” *Enhanced Spectroscopies and Nanoimaging 2023*, 1265403 (2023). DOI: 10.1117/12.2676631

B-4) 招待講演

西田 純, 「赤外ナノ分光で挑むバルク物性とナノ物性の境界線」, 日本物理学会 2024 春季大会, オンライン開催, 2024 年 3 月.

熊谷 崇, 「Atomic-Scale Spectroscopy in Plasmonic Tunneling Junction」, 一般社団法人レーザー学会学術講演会第 44 回年次大会, 東京, 2024 年 1 月.

熊谷 崇, 「Exploring Atomic and Molecular Scale Structures and Dynamics by Tip-Enhanced Raman Spectroscopy」, 表面界面スペクトロスコピー 2023 [ISSP ワークショップ], 東京, 2023 年 12 月.

西田 純, 「赤外近接場分光によるキャリア・励起子の局所ダイナミクスの解明」, 自然科学研究機構先端光科学研究分野プロジェクト研究会, 岡崎, 2023 年 11 月.

西田 純, 「赤外ナノ・超高速分光の現状と赤外放射光の可能性」, UVSOR-SPring-8 赤外ビームライン合同ユーザーズミーティング, 岡崎, 2023 年 9 月.

J. NISHIDA, “Probing local carrier and exciton dynamics in spatially confined nanomaterials with infrared nano-spectroscopy,” Annual Meeting of the Japan Society of Vacuum and Surface Science 2023 (JVSS 2023), Nagoya (Japan). November 2023.
T. KUMAGAI, “Atomic-Scale Optical Spectroscopy at Surfaces,” SPIE Nanoscience + Engineering, San Diego (USA), August 2023.

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 (2023-).

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-.

京都大学大学院理学研究科, 客員准教授, 2023年4月-2024年3月.

B-10) 競争的資金

科研費国際共同研究加速基金(帰国発展研究), 「時間分解探針増強ラマン分光による時空間極限における原子層物質のフォノン計測」, 熊谷 崇 (2021年度-2023年度).

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).

科研費若手研究, 「時空間極限分光測定による有機鉛ペロブスカイトの電子-格子相互作用の実時空間観測」, 西田 純 (2022年度-2023年度).

光科学技術研究振興財団研究助成, 「超高速赤外ナノイメージングによる励起子・キャリアの局所ダイナミクス」, 西田 純 (2023年度).

C) 研究活動の課題と展望

探針増強顕微分光の先端計測を研究室の柱として物理化学, 分子科学, 物質科学, そしてナノ科学にまたがる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していきたいと考えている。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・超広帯域探針増強分光については, 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。