

ナノスケール物性研究部門

Division of Nanoscale Science

ナノスケール物性研究部門では、様々な低次元ナノスケールデバイスや材料を対象として研究を行っている。電子ビームリソグラフィーや集束イオンビーム加工を用いたり、薄膜成長中に自発的に形成させたり、原子レベルで秩序だった表面へナノスケールレベルの層を堆積させる手法などを利用してナノスケールの材料や電子デバイスを作製している。これらの材料は、走査型プローブ顕微鏡を用いた表面の空間分解物性研究や、低温輸送・磁気輸送技術により特性評価を行っている。最近では、ナノスケールの材料やデバイスの開発と量子計測法を組み合わせるために、新しい微細加工ができる施設を物性研究所内に設置した。この施設では、当研究所の微細加工・分析ツールを活用し、低温や高磁場などでの様々な量子計測に適したデバイスの作製を支援している。最近の研究テーマとしては、ヘテロ構造におけるスピン変換の探索、それをもとにしたスピントロニクスデバイスの開発や、単結晶表面に形成されたナノ構造における超伝導やトポロジ状態の走査プローブによる解明、自己組織化ナノ構造体の創成や量子コンピュータのための新規な構成体の開発などがある。

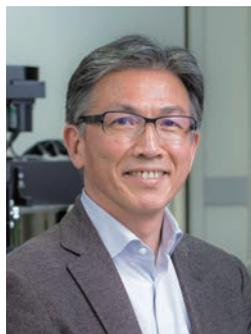
The Division of Nanoscale Science brings together laboratories working on a variety of low-dimensional nanoscale devices and materials. The nanoscale systems that we study are built either by fabricating nanoscale electronic devices, typically by electron beam lithography or focused ion beam milling, or formed spontaneously during thin film growth or by deposition of nanoscale layers on atomically well-ordered surfaces. We use scanning probe microscopes for spatially-resolved physical property studies on surfaces and a variety of low-temperature transport and magnetotransport techniques for materials characterization and property analysis. We have recently started a new microfabrication facility for combining nanoscale materials and device studies with quantum measurement methods available at ISSP. The facility helps researchers to utilize the microfabrication and analytical tools in our laboratories to prepare suitable device structures for a variety of quantum measurements at low temperatures, high magnetic fields, etc. The recent research topics include studies on the exploration of spin-to-charge current conversion phenomena at interfaces and heterostructures, development of spintronic devices, scanning-probe studies of superconductivity and topological states in nanostructures formed on single crystal surfaces, fabricating self-organized nanostructured materials, and the development of new building blocks for quantum computers.

部門主任 リップマー ミック
Leader LIPPMAA, Mikk

大谷研究室 Otani Group

研究テーマ Research Subjects

- 1 磁気弾性強結合による高効率スピン流の生成
Efficient pure spin current generation by magnon-phonon coupling
- 2 重元素を含まない界面での軌道流の生成
Orbital current generation at the interface of light elements
- 3 非共線反強磁性体における電流駆動高速磁壁移動
Current-driven fast magnetic domain wall motion in noncollinear antiferromagnets
- 4 原子間力顕微鏡を用いた局所的熱流注入による異常ネルンスト効果マッピング
Anomalous Nernst effect mapping by local heat flow injection using an atomic force microscope



教授 大谷 義近
Professor OTANI, Yoshichika

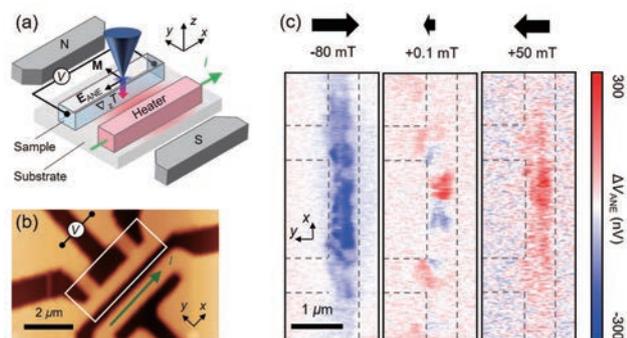
専攻 Course

新領域物質系

Adv. Mat., Frontier Sci.

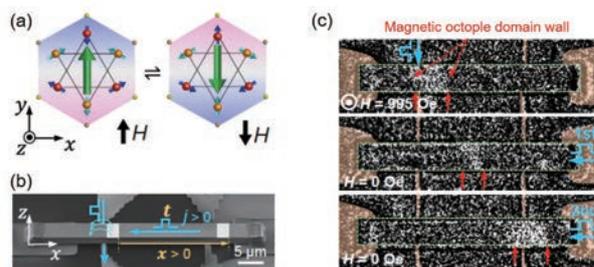
20世紀の終わりに誕生したスピントロニクスは、電流に加え、スピン角運動量の流れであるスピン流を用いることで、これまでにない機能を持った素子を創出する学問領域である。スピントロニクスは、電荷・スピン・フォノン・フォトン・マグノン等の準粒子が、固体中のスピンを媒介として相互に変換される「スピン変換科学」として発展した。ごく最近では、スピン変換科学は、準粒子が強固に結合しマグノンポーラロンなどの新奇準粒子状態を生成する、「強結合スピントロニクス」として展開している。さらに最近では、電子スピンだけではなく電子軌道により角運動量を運ぶ軌道流が登場した。これらのスピンや軌道を媒介とする変換・結合現象は、比較的単純な接合界面近傍のナノスケール領域で生じることが多く、優れた汎用性と応用性を持っている。我々の研究室では、微細加工で作製したナノデバイスを使った実験により、スピンや軌道を媒介して生じる新奇な準粒子間の変換・結合現象の開拓を行っている。また、基礎量子物性の観点から、発見した新現象の機構解明にも取り組んでいる。

Spintronics, which emerged at the end of the 20th century, is a science that creates new functional devices by using spin currents, the flow of spin angular momenta, and charge currents. It has developed as spin conversion science in which quasiparticles such as electrons, phonons, photons, and magnons are interconverted through spins in solids. Recently, this has evolved into strong coupling spintronics, producing new coupled quasiparticles such as magnon polarons. More recently, orbital currents have emerged that carry angular momenta not only by electron spin but also by electron orbitals. Since these spin/orbital-mediated conversion/coupling phenomena often occur in the nanoscale region near the relatively simple junction interface, they have excellent versatility and applicability. Our laboratory develops novel conversion/coupling among quasiparticles mediated by spins/orbitals through experiments using nanoscale devices fabricated by microfabrication technology. Furthermore, we elucidate the mechanisms of novel phenomena from the viewpoint of fundamental solid-state physics.



原子間力顕微鏡の探針誘起局所温度勾配を用いた異常ネルンスト効果のマッピング。(a) 手法の概略図。(b) 素子のトポグラフィ像。(c) 外部磁場印加中の異常ネルンスト電圧のマッピング像。

Magnetic imaging by the locally induced anomalous Nernst effect using atomic force microscopy. (a) conceptual drawing of this method. (b) The topography of the sample. (c) The Spatially resolved anomalous Nernst effect voltage under external magnetic fields.



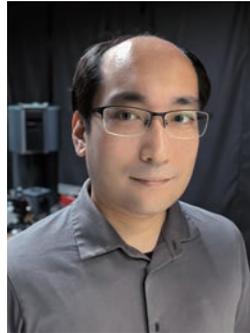
非共線反強磁性体 Mn_3Ge の高速磁壁移動の実証。(a) Mn_3Ge の磁気八極子。(b) 試料の SEM 像。(c) 磁気カー効果により観察されたパルス電流による磁壁の高速移動。

Demonstration of a fast magnetic domain wall motion in a noncollinear antiferromagnet Mn_3Ge . (a) The magnetic octapoles of Mn_3Ge . (b) SEM image of the sample. (c) The fast domain wall motion induced by pulse currents observed by MOKE.



研究テーマ Research Subjects

- 1 半導体モアレ超格子中の電子の精密電気制御による物性探索
Exploration of physical properties via precise electrical control of electrons in semiconductor moiré superlattices
- 2 励起子をプローブとした電子物性の探索手法の開拓
Development of methods for exploring electronic properties using excitons as a probe
- 3 2次元物質による量子デバイス
Quantum devices based on two-dimensional materials



准教授 島崎 佑也
Associate Professor SHIMAZAKI, Yuya

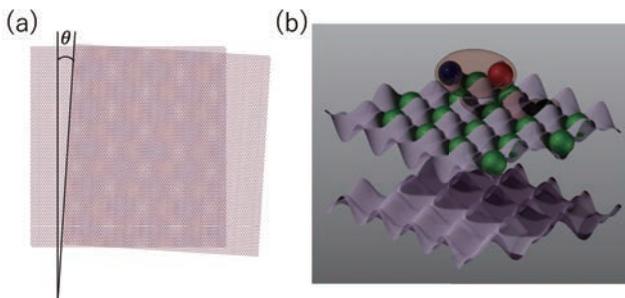
専攻 Course
工学系物理学
App. Phys., Eng.

半導体中に電子を規則的に配列した人工量子系において物性を再現するということは、メソスコピック物理の長年の夢であった。近年このような系が2次元物質の結晶格子のモアレ干渉を利用したナノスケール周期の超格子において実際に実現されており、強相関電子状態、超伝導、磁性、トポロジカル物性など多数の量子物性の出現が確認されている。このような新しい人工量子系の振る舞いを微視的に理解し、制御するための学理を構築することで、ナノスケールの階層におけるメタ物質科学の展開が期待できる。

当研究室では半導体2次元物質を中心として、そのモアレ超格子の電子物性をマクロな量子物性とミクロな量子デバイス物理の両方の観点から研究を行う。特に半導体モアレ超格子の精密電気制御と光励起によるプローブ・制御を通じてその量子物性・量子デバイス物理を明らかにする。励起子をプローブとした電子物性の新しい探索手法についても開拓を行う。

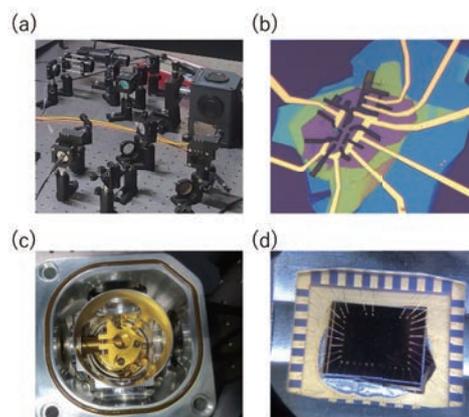
Realizing artificial quantum systems with regularly arranged electrons in semiconductors to simulate physical properties has long been a dream in mesoscopic physics. Recently, such systems have been realized using nanoscale-period moiré superlattices formed by interference patterns in two-dimensional materials. These systems exhibit a wide range of quantum phenomena, including strongly correlated electron states, superconductivity, magnetism, and topological properties. Understanding and controlling the behavior of these novel quantum systems at a microscopic level can lead to the development of metamaterial science at the nanoscale.

Our laboratory focuses on the study of moiré superlattices in semiconductor two-dimensional materials, investigating their electronic properties from both macroscopic quantum phenomena and microscopic quantum device physics. In particular, we aim to reveal quantum properties and device physics through precise electrical control and optical excitation. Additionally, we are developing new methods to explore electronic properties using excitons as probes.



(a) 2次元物質によるモアレ超格子 (b) 半導体モアレ超格子中の強相関電子状態の励起子によるプローブ

(a) Moiré superlattice formed by two-dimensional materials (b) Strongly correlated electron states in a semiconductor moiré superlattice probed by excitons



(a) 光学実験系 (b) 2次元物質デバイス (c) 光学クライオスタット (d) チップキャリア上のデバイス写真

(a) Optical experimental setup (b) Two-dimensional material device (c) Optical cryostat (d) Device image on chip carrier



橋坂研究室 Hashisaka Group

研究テーマ Research Subjects

- 1 分数量子ホール準粒子のエニオン統計
Fractional quantum Hall quasiparticles and their statistics
- 2 トポロジカルエッジ状態のダイナミクス
Dynamics of topological edge states
- 3 メソスコピック系の量子輸送
Quantum transport in mesoscopic systems



准教授 橋坂 昌幸
Associate Professor HASHISAKA, Masayuki

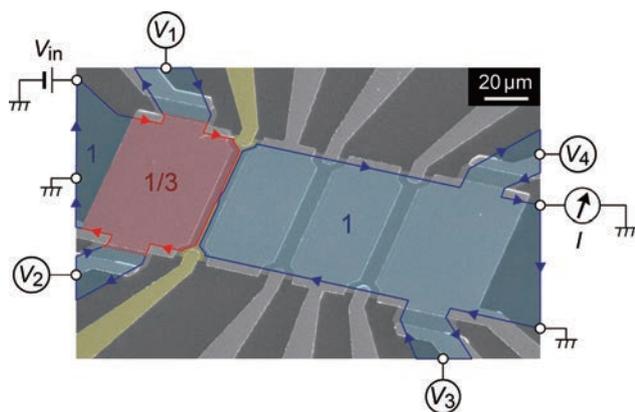
専攻 Course
理学系物理学
Phys., Sci.



助教 佐藤 洋介
Research Associate
SATO, Yosuke

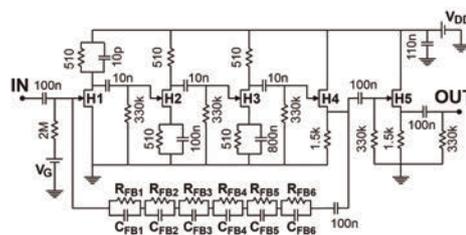
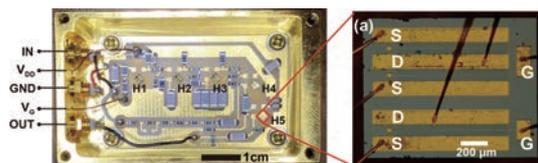
電子の量子的性質と電子間相互作用を起源として、著しく非自明な物性が発現することがある。超伝導、分数量子ホール効果、近藤効果などがその代表例である。これら「量子多体系」の特異性は、その素励起の性質としてひときわ鮮やかに観測される場合がある。例えば分数量子ホール系における素励起（準粒子）は、素粒子であるはずの電子1個の電荷（素電荷）よりも小さな分数電荷を持つことが確かめられている。またこの準粒子は、ボーズ統計・フェルミ統計と異なる量子統計（エニオン統計）を持つことが知られており、トポロジカル量子計算への応用が期待されている。本研究室では、量子多体系の素励起を観測・制御することにより、電子や光子などの自然な粒子では実現できない、新奇な量子技術の確立を目指して研究を行っている。

The interplay of quantum nature and the electron correlation causes exotic phenomena in condensed matter, such as superconductivity, the fractional quantum Hall effect, and the Kondo effect. Our research aims to investigate these quantum many-body phenomena in mesoscopic systems using nanofabrication and our original measurement techniques. The quantum many-body systems sometimes show their peculiarity as the beautiful characteristics of the elementary excitations. The paradigmatic is the quasiparticles in the fractional quantum Hall states. The quasiparticles have fractional charges smaller than the elementary charge. More interestingly, they have anyonic statistics, the quantum statistics that differ from the Bose and Fermi statistics. The quasiparticles with highly nontrivial non-abelian statistics may open a route for synthesizing the fault-tolerant topological quantum computer, thus attracting growing attention in condensed matter physics and quantum computational science. Our goal is to establish such novel quantum technologies originating from the intriguing nature of quasiparticles in quantum many-body systems.



分数・整数量子ホール接合デバイス。占有率1/3領域（準粒子、電荷 $e/3$ ）と、占有率1領域（電子、電荷 e ）の電荷キャリアのミスマッチにより、超電導接合に類似したアンドレーエフ型反射が生じる。

False-color electron micrograph of the fractional-integer quantum Hall junction device. Mismatch between the charge carriers causes Andreev-like reflection at the junction.



自作 FET を用いて作製した低温電流増幅器
Homemade-HEMT-based cryogenic transimpedance amplifier

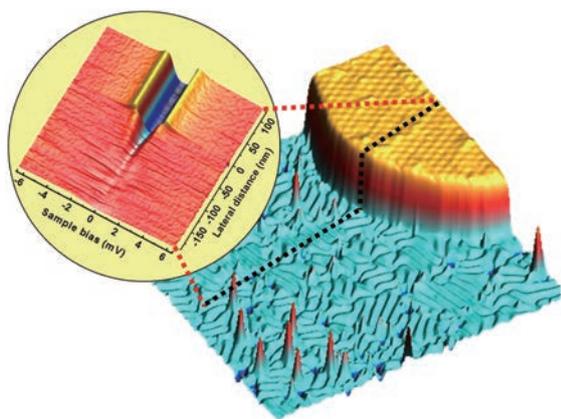


研究テーマ Research Subjects

- 1 低温 STM による特異な超伝導 / トポロジカル物性の探索
Exploration of peculiar superconducting / topological states using low-temperature STM
- 2 マイクロ波導入スピン偏極 STM によるナノスケール磁気共鳴とスピンドYNAMIX
Nanoscale detection of magnetic resonances and spin dynamics by microwave-assisted spin-polarized STM
- 3 スピン偏極走査ポテンシオメトリによるスピン流の実空間計測
Real-space distribution of spin currents by spin-polarized scanning tunneling potentiometry
- 4 データ科学支援による高効率局所電子状態計測
Effective collection of local density of states with an assist of data science

走査トンネル顕微鏡 (STM) は、その像を通じて表面の原子構造を明らかにするのみならず、トンネル分光測定によりサブナノ領域での電子状態に関する知見を与え、さらにはスピン偏極 (SP-) STM による局所磁気特性や表面スピン構造を引き出すことができる。

長谷川研究室では、極低温強磁場下で動作する STM 装置を用いて、表面超伝導など反転対称性の破れた二次元系での超伝導特性、磁性体との近接効果により誘起される特異な超伝導・トポロジカル状態の観測を試みている。また、SP-STM による磁性薄膜でのスピンスパイラルなど特異な局所磁気構造観察、スピン偏極局所ポテンシオメトリによるスピン流計測、さらにはマイクロ波導入による磁気共鳴検出を通じた局所スピンドYNAMIXの研究等も推進しており、プローブ顕微鏡の新たな計測手法を開発することにも取り組んでいる。



超伝導金属界面での近接効果。単原子層 Pb (水色、金属相) と Pb 薄膜 (黄色、超伝導相) の界面でのトンネル分光から、超伝導特性が界面から約 40nm にわたって染み出している様子が観察される。

Proximity effect at superconductor/metal interface. Tunneling spectra taken around an interface between 1ML-Pb layer on Si (blue, normal metal) and a Pb thin film (yellow, superconductor) indicate the penetration of superconductivity into the metal layer with a decay length of 40 nm.



教授 長谷川 幸雄
Professor HASEGAWA, Yukio

専攻 Course

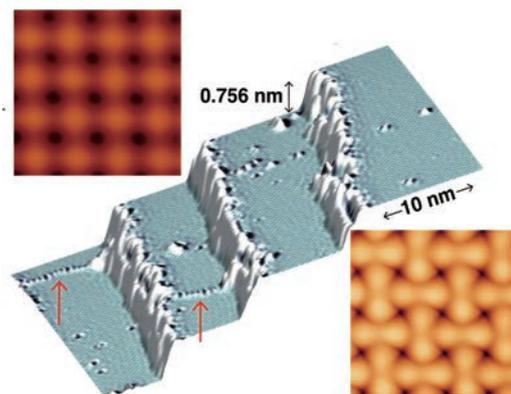
工学系物理学
App. Phys., Eng.



助教 土師 将裕
Research Associate
HAZE, Masahiro

Scanning tunneling microscopy (STM) reveals not only atomic structure of surfaces but also electronic states of sub-nanometer areas by tunneling spectroscopy. With a function of spin-polarized (SP-) STM, the microscope also provides local magnetic properties and surface spin structures, and with inelastic tunneling spectroscopy (IETS), various excitation energies can be extracted.

In Hasegawa-lab., by using STMs operated in ultralow temperature and high magnetic field, peculiar local superconducting and topological states that are found e.g. at surfaces, where inversion symmetry is broken, and in the proximity with ferromagnetic and topological materials, have been explored. We have also studied local magnetic properties of nano magnets, peculiar spin-spiral structures, and energy dispersion of surface magnons using SP-STM and SP-IETS. We have also explored unique functionality of the probe microscopy; recent examples include the investigation of local spin dynamics through the detection of magnetic resonances using microwave-assisted SP-STM, spin current detection using SP-scanning tunneling potentiometry, and efficient collection of local density of states based on data-driven science.



重い電子系物質 CeCoIn₅ で観測された表面軌道秩序。Co 原子が正方配列した面 (中央、左上図) で、探針を近づけて STM 像 (右下図) を撮ると、ダンベル状の d 軌道の秩序配列状態が観察される。

Surface-induced orbital ordered states observed on a heavy-fermion material CeCoIn₅. In STM images taken on a Co-terminated surface in standard conditions, round-shaped Co atoms are observed (center and upper-left images). In STM images taken in closer distances (lower-right) we observed an ordered phase of dumbbell-shaped d-orbitals.



吉信研究室

Yoshinobu Group

研究テーマ Research Subjects

- 1 よく規定されたモデル触媒による分子の活性化と表面反応の研究
Activation and surface reaction of molecules on well-defined model catalysts
- 2 水素と関わる材料の物性と反応
Properties and reactions of materials with hydrogen
- 3 2次元物質エッジ面の電子状態と反応性の研究
Electronic states and reactivity of edge surfaces of two-dimensional materials
- 4 THz パルスによる表面における振動分光と分子ダイナミクスの研究
Vibrational spectroscopy and dynamical processes of molecules on surfaces using THz pulses



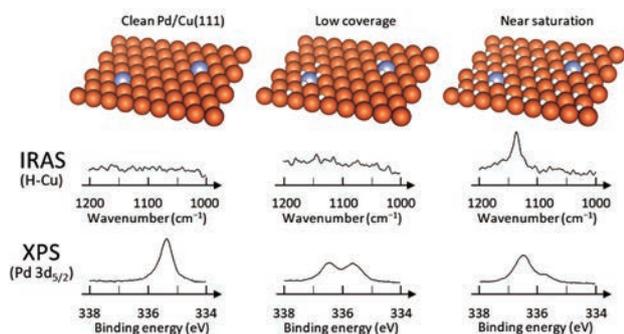
教授 吉信 淳
Professor YOSHINOBU, Jun

専攻 Courses

理学系化学 新領域物質系
Chem., Sci. Adv. Mat., Frontier Sci.

外部から原子・分子を自在に供給し、新しい物質を構築する「反応場」であることが、固体表面の最も重要な特徴である。表面・界面は物質移動の場だけではなく、エネルギー変換の場としても重要である。原子スケールで物質移動を制御し、機能をもつ材料やデバイスを創製するためには、表面・界面における素過程を理解することが不可欠である。表面における原子・分子のダイナミクス研究は、触媒やデバイスだけでなく、さらに地球環境や宇宙における化学反応についても手がかりを与えてくれる。当研究室では、表面・界面における原子・分子のダイナミクス、モデル触媒および低次元材料の構造・物性・反応を、振動分光、光電子分光、走査型トンネル顕微鏡や独立駆動4探針電気伝導測定法を駆使して研究している。また、シンクロトロン放射光を用いたオペランド光電子分光を推進している。最近、THzパルスによる表面プロセス駆動のプロジェクトにも取り組んでいる。

Solid surfaces play an important role as “low dimensional reaction field”, on which we can provide atoms and molecules and manipulate them deliberately. In addition, surface and interface are vital in the energy conversion processes. In order to fabricate atomically-controlled functional materials, we have to understand the dynamical behavior of atoms and molecules on surfaces. The research of these subjects is closely related to the basics of catalysis, semiconductor processes and molecular electronics. In addition, we can simulate chemical reactions on cosmic dust and clouds in atmosphere with laboratory experiments in ultrahigh vacuum at low temperature. We have utilized surface vibrational spectroscopy, photoelectron spectroscopy and local probe methods in order to investigate structures, reactions and electronic properties of atoms/molecules and thin films on surfaces. Synchrotron radiation is also used to study the electronic states of surface and interface, including *operando* X-ray photoelectron spectroscopy. Recently, we have engaged in the study of THz-pulse driven surface processes.



単原子合金モデル触媒 Pd/Cu(111) における水素の解離とスピルオーバープロセス
Dissociation and spillover processes of hydrogen on the single atom alloy Pd/Cu(111) model catalyst surface



THz パルス駆動表面反応装置 (松永研究室との共同研究)

The apparatus for THz-pulse induced surface reactions (collaborated with Matsunaga Lab.)



研究テーマ Research Subjects

- 1 パルスレーザー堆積法による酸化物薄膜およびヘテロ構造の作製
Growth of thin oxide films and heterostructures by pulsed laser deposition
- 2 酸化物ナノ構造およびナノコンポジット薄膜の合成
Synthesis of nanostructures and nanocomposite thin films
- 3 光触媒におけるキャリアダイナミクス
Carrier dynamics in photocatalysts
- 4 薄膜のオートノマス合成
Autonomous synthesis of thin films



教授 リップマー ミック
Professor LIPPMAA, Mikko

専攻 Course

新領域物質系

Adv. Mat., Frontier Sci.



助教 田中 友晃
Research Associate
TANAKA, Tomoaki

新材料の薄膜合成には多くの合成制御パラメータの最適化が必要である。パルスレーザー堆積法の場合、パラメータ空間は6次元以上である。このパラメータ空間で最適点を見つけるプロセスを加速するために、薄膜の表面形状や構造変化を検出できる RHEED を用いて結晶成長を観察する。いくつかの機械学習を利用し、特定の格子パラメータを持つ結晶相や最良の表面平坦性といった、目的の回折的特徴に最適な結晶成長条件を自律的に選択する。回折画像のセマンティックセグメンテーションを使用して類似した回折パターンを抽出し(左図)、続いて周期性分析とパラメータクラスタリングを行うことで、膜の相組成と表面構造の品質係数が得られる。相情報は、相安定性マップを構築するために使用できる(右図)。ベイズ最適化を用いることで、多次元パラメータ空間において最適な成長条件を選択し目的の結晶相を迅速に得るための自律的な合成制御を行う。

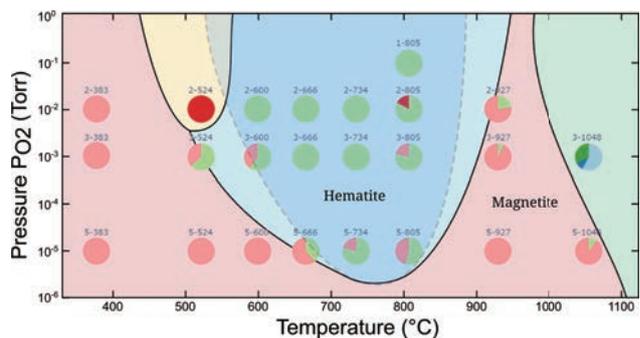
Thin film synthesis of new materials requires the optimization of many synthesis control parameters, such as pressure, temperature, growth rate, etc. For Pulsed Laser Deposition, the parameter space has 6 or more dimensions. To accelerate the process of finding the optimal point in this parameter space, we monitor the crystal growth by RHEED, which detects thin film surface morphology and structure changes. Several forms of machine learning are used to autonomously choose crystal growth conditions that optimize for the desired diffraction features, such as a crystal phase with a specific lattice parameter or the best surface flatness.

Semantic segmentation of the diffraction images is used to extract similar diffraction features (left figure), followed by periodicity analysis and parameter clustering, which gives the phase composition of the film and a quality factor for the surface structure. The phase information can be used to build a phase stability map (right figure). Bayesian optimization is used to obtain autonomous synthesis control to select the best growth conditions and to rapidly obtain the desired crystal phase in a multidimensional parameter space. This autonomous feedback operation is more than an order of magnitude faster than traditional manual parameter optimization.



回折パターンでトレーニングされた UNet ニューラル ネットワークを使用した RHEED パターンからの回折ストリークとスポットの抽出。直接ビーム(元の画像の赤枠)は回折スポットと混同されない。

Diffraction streak and spot extraction from a RHEED pattern with a UNet neural network trained on diffraction images. The direct beam (red box in the original image) is not confused with diffraction spots.



温度と酸素圧力の関数としての、Al₂O₃ 上のヘマタイト (Fe₂O₃) とマグネタイト (Fe₃O₄) の自動薄膜成長相マッピング。

Automated thin film growth phase mapping of hematite (Fe₂O₃) and magnetite (Fe₃O₄) on Al₂O₃ as a function of temperature and oxygen pressure.



https://www.issp.u-tokyo.ac.jp/maincontents/organization/labs/lippmaa_group.html

数間研究室 Kazuma Group



客員准教授 数間 恵弥子
Visiting Associate Professor KAZUMA, Emiko

固体触媒において高い反応性を高度に実現するには、触媒表面での反応機構を分子レベルで理解し反応を制御することが重要である。特に、表面と分子間の相互作用は、反応を支配する主要な因子であり、その制御は重要な触媒戦略の一つである。当研究室では、走査トンネル顕微鏡を用いて電子、光、近接場光、熱といった多様な励起源による表面反応の単一分子レベル研究を展開し、反応素過程、機構の解明を行ってきた。現在はよりリアルな触媒表面における反応の理解と新奇反応の開拓を目指し、表面の構造、電子状態を制御した触媒モデル表面の開発に加え、単分子レベル分析とマクロな表面分析の融合に取り組んでいる。ナノスケール物性研究部門・吉信研究室と協力し、単分子レベル分析と昇温脱離法、赤外反射吸収分光法、低速電子回折法等による表面分析を融合することで表面反応をより包括的に理解し、高効率かつ高選択的な反応を可能にする触媒表面の戦略・指針を獲得する。

Controlling chemical reactions on solid catalyst surfaces based on understanding reaction mechanisms at a single molecule level is crucial to achieving the high reactivity of solid catalysts in a sophisticated manner. In particular, the interaction between the surface and molecule is a principal factor governing the reaction, and controlling the interaction is one of the important catalytic strategies. We have performed single-molecule studies on surface reactions induced with various excitation sources, including electrons, light, near-field light, and heat, using a scanning tunneling microscope, and elucidated the elementary processes and mechanisms of the reactions. To understand reactions on more realistic catalyst surfaces and explore novel reactions, we take on the challenge of not only developing catalyst model surfaces with highly controlled morphological structures and electronic structures but also combining the single-molecule-level analysis with macroscopic surface analysis. In collaboration with Prof. Yoshinobu group, we will combine single-molecule-level analysis with temperature-programmed desorption, infrared reflection absorption spectroscopy, and low-energy electron diffraction to understand surface reactions more comprehensively and obtain strategies for developing catalyst surfaces with high efficiency and selectivity.