

# ナノスケール物性研究部門

## Division of Nanoscale Science

ナノスケール物性科学は、物質表面付近での原子・分子レベルでの現象から無限系の量子輸送まで幅広い時空間スケールで生じる物理・化学現象をその対象とする。この分野が発展してきた背景には、超薄膜成長技術、極微細加工技術、各種表面評価手法、走査プローブ顕微鏡による局所測定技術などの発達がある。当部門では、これらを統合的に用いてナノスケール物性科学に取り組んでいる。

研究テーマの一部を以下に示す。

- ・物質の人工微細構造、複合微細構造において展開される量子・スピン輸送、
- ・走査プローブ顕微鏡を用いた局所電子状態や伝導現象の研究、
- ・固体表面において発現する新奇複合物質や表面状態、ナノスケール構造の物性、
- ・表面化学反応等のマイクロな動的過程の研究、およびこれを利用した新物質の創成、
- ・各種超薄膜のエピタキシャル成長と機能物性開拓。

A wide range of phenomena from atomic or molecular processes at solid surfaces to quantum transport in infinite systems are listed as the subjects of nanoscale science. The prosperity of such fields are sustained by the development of ultra-thin film growth, nano-fabrication, various surface characterization, local measurements with scanning probe microscopes, etc. In Division of Nanoscale Science, we integrate such techniques to study various subjects such as

Quantum and spin transport in artificial nanoscale or hybrid systems,

Study of local electronic states and transport by scanning probe microscopes,

Transport, magnetism and other properties of novel materials at solid surfaces,

Microscopic analysis of dynamical processes such as chemical reaction at surfaces, and creation of new material phases,

Epitaxial growth of ultra-thin films and device applications.

教授 Professor	勝本 信吾 KATSUMOTO, Shingo	助教 Research Associate	遠藤 彰 ENDO, Akira	特任研究員 Project Researcher	浅川 寛太 ASAKAWA, Kanta
教授 Professor	大谷 義近 OTANI, Yoshichika	助教 Research Associate	高橋 竜太 TAKAHASHI, Ryota	特任研究員 Project Researcher	岩田 孝太 IWATA, Kota
教授 Professor	小森 文夫 KOMORI, Fumio	助教 Research Associate	吉田 靖雄 YOSHIDA, Yasuo	特任研究員 Project Researcher	杉本 聡志 SUGIMOTO, Satoshi
教授* Professor	吉信 淳 YOSHINOBU, Jun	助教 Research Associate	中村 壮智 NAKAMURA, Taketomo	特任研究員 Project Researcher	スグマラン サティッシュ SUGUMARAN, Sathish
准教授 Associate Professor	長谷川 幸雄 HASEGAWA, Yukio	助教 Research Associate	宮町 俊生 MIYAMACHI, Toshio	特任研究員 Project Researcher	肥後 友也 HIGO, Tomoya
准教授 Associate Professor	リップマー ミック LIPPMAA, Mikk	助教 Research Associate	一色 弘成 ISSHIKI, Hironari	特任研究員 Project Researcher	ムドゥリ プラサンタ クマール MUDULI, Prasanta Kumar
准教授(客員) Visiting Associate Professor	春山 純志 HARUYAMA, Junji	助教* Research Associate	吉本 真也 YOSHIMOTO, Shinya	特任研究員 Project Researcher	ヤン ホンシャン YANG, Hung Hsiang
		技術専門職員 Technical Associate	飯盛 拓嗣 IIMORI, Takushi	特任研究員 Project Researcher	李 智蓮 LEE, Jiyeon
		技術専門職員 Technical Associate	橋本 義昭 HASHIMOTO, Yoshiaki		
		技術専門職員 Technical Associate	浜田 雅之 HAMADA, Masayuki		
		技術専門職員* Technical Associate	向井 孝三 MUKAI, Kozo		

\* 所内兼務。本務は機能物性研究グループ。 / concurrent with Functional Materials Group

# 勝本研究室

Katsumoto Group



勝本 信吾  
KATSUMOTO, Shingo  
教授  
Professor



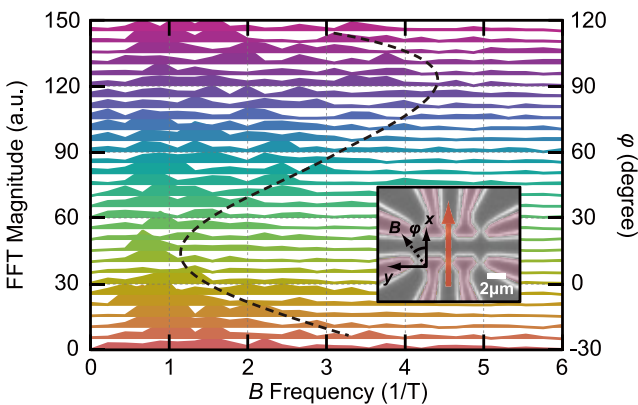
中村 壮智  
NAKAMURA, Taketomo  
助教  
Research Associate



遠藤 彰  
ENDO, Akira  
助教  
Research Associate

半導体や金属の超薄膜成長技術、これらを微細加工する技術を用いて、量子井戸、細線、ドットなどの低次元系の量子効果、多体効果を調べている。また、電子スピン、核スピンを使ったスピントロニクス研究を行なっている。

量子輸送現象をスピン自由度に広げる研究として、(1) スピン軌道相互作用とナノ構造を組み合わせる、(2) 強磁性体モノリシック素子構造などの非平衡スピン量子輸送現象を調べている。(1) では、スピン軌道相互作用の強い系に生じるスピン量子干渉効果、また、電子が移動の際に蛇行する現象(運動の「震え」現象)の存在を明らかにした。グラフェンへのスピン軌道相互作用導入に成功し、スピントロニクス素子への道を開いた。(2) では、エピタキシャル成長鉄から半導体への高効率スピン注入を実現した。また、強磁性半導体を絶縁層に用いたジョセフソン素子で超伝導電流を観測した。

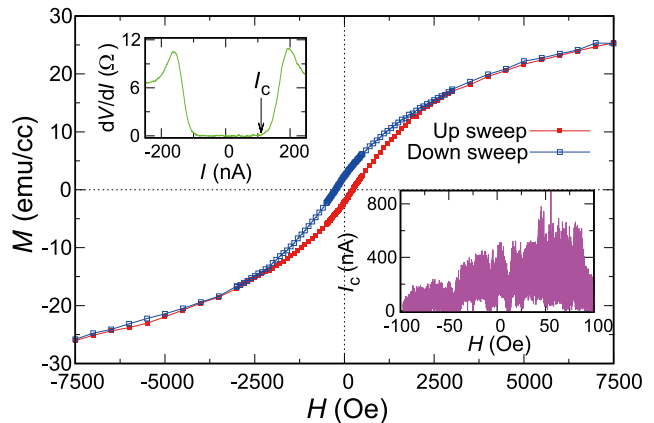


InAs 2次元電子系に現れた、電子の震え (Zitterbewegung) 現象に起因する磁場に対する伝導度揺らぎのフーリエパワースペクトル。磁場の面内回転角  $\phi$  (挿入図の試料電子顕微鏡写真中で定義。赤矢印は電子の経路を示す) に伴い、破線のように変化する。

Fourier power spectra of conductance fluctuation against in-plane magnetic field due to “Zitterbewegung” (trembling motion) of electrons in InAs two-dimensional electrons. The parameter is the azimuth angle  $\phi$  of the field as defined in the scanning electron micrograph of the sample in the inset, in which the red arrow indicates the electron path.

With epitaxial growth of semiconductor and metallic films, and nano-fabrication techniques, we study quantum effects in low dimensional systems. Our research also spans some applications of the physics of electron and nuclear spins to so called spintronics.

To expand the concept of quantum transport to spin degree of freedom, we have tried to create spin currents in quantum structures with (1) combination of the spin-orbit interaction (SOI) and nano-structures, also with (2) spin-injection in semiconductor/ferromagnet monolithic structure. In two-dimensional electrons with a strong SOI, we have realized spin interference devices and also found phenomenon called “Zitterbewegung” (trembling motion). Spin injection from epitaxially grown Fe films with a high efficiency has been achieved. In a hybrid system of superconductor and a diluted ferromagnetic semiconductor we have observed superconducting Josephson currents.



ジョセフソン素子絶縁層に用いた希薄磁性半導体 (In, Fe)As の磁化曲線。左上挿入図は素子の微分抵抗の電流依存性。 $I_c$  が臨界電流を示す。右下挿入図は臨界電流の磁場依存性で極めて激しい振動を示す。

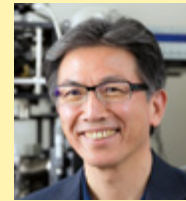
Magnetization curve of a diluted magnetic semiconductor (In,Fe)As, which is used as an insulation layer of a Josephson junction. The upper-left inset shows the differential resistance as a function of the voltage, in which  $I_c$  indicates the critical current. The lower-right inset shows the critical current as a function of magnetic field. Very rapid oscillation of  $I_c$  against the field is recognizable.

## 研究テーマ Research Subjects

1. 量子電荷・スピン輸送現象  
Quantum transport in charge and spin freedoms
2. 量子構造を用いた多体効果の研究  
Study of many-body effects in quantum structures
3. 異対称性ハイブリッド構造に生じる物理現象  
Physics at interfaces between the phases with different symmetries

# 大谷研究室

Otani Group



大谷 義近  
OTANI, Yoshichika  
教授  
Professor



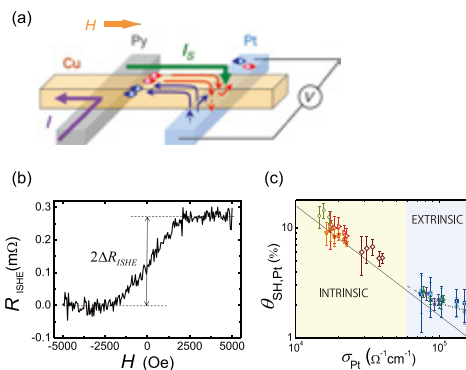
一色 弘成  
ISSHIKI, Hironari  
助教  
Research Associate

20世紀末にスピン角運動量の流れであるスピン流という概念が登場して以来、原子スケールでの角運動量保存則に起因するスピン移行トルクなど新たなスピントロニクス学が進展してきた。その後の10年の間にスピン流の生成・搬送・検出が確立され、スピントロニクス研究は新たな局面を迎えている。最近では、電子・スピン・フォノン・フォトン・マグノン等の準粒子が、固体中のスピン流を媒介として、相互に変換されることがわかってきた。これらの『スピン変換』は、異種物質の接合界面近傍のナノスケール領域で生じるため、極めて優れた汎用性と応用性を持っている。我々の研究室では基礎物理研究の視点から、新しいスピン変換機構の開拓とそれによる新物性開拓に取り組んでいる。また、微細加工技術を駆使して、スピン変換を自在に制御するスピントロニクス素子の研究開発を行っている。

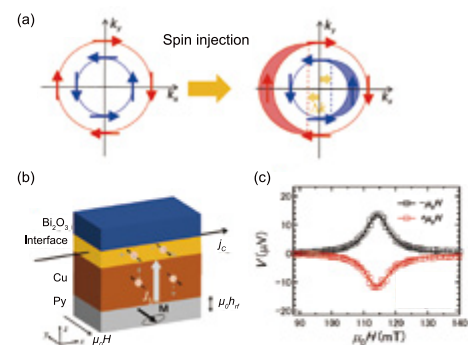
The concept of spin current, a flow of spin angular momentum, appeared in the end of 20th century, and evolved a new spintronic principle based on the atomic-scale angular momentum conservation such as spin-transfer-torque. The methods to generate, transport and detect the spin currents have been well established in the following decade, leading the spintronics research to a new phase. Recent studies revealed interconversions among quasi-particles such as electron, spin, phonon, photon and magnon etc. via spin current in a solid. These interconversions, called as “spin conversion”, often take place in the nano-scale regions at the interfaces of deferent materials, and thus, have great versatility and application possibility. Our fundamental researches explore new processes of the spin conversion and clarify their mechanisms. We also develop the spintronics devices to control a variety of spin conversion processes using nanofabrication technologies.

スピンホール効果の電流-スピン流変換効率と電気抵抗率の関係性の解明。

(a) スピン吸収法の概略図。左側のパーマロイ (Py) と銅 (Cu) の端子間に電流を流すことにより発生した純スピン流がスピン搬送経路 (Cu) を右側に向かって拡散伝導する。純スピン流は、右側のスピンホール物質 (Pt) に吸収され、逆スピンホール効果によって電流に変換される。(b) 白金の逆スピンホール抵抗 ( $R_{ISHE} = V/I$ ) の磁場依存性。(c) Pt のスピンホール角 (スピン流-電流変換効率)  $\theta_{SH}$  の伝導率依存性。Pt の  $\theta_{SH}$  として様々な値が報告されており、統一的な見解が得られていなかった。本研究では、 $\theta_{SH}$  は Pt の膜質による伝導率に依存し、それが外因性・内因性の機構によって説明できることを明らかにした。



The relation between the conversion efficiency of spin Hall effect and the conductivity. (a) The schematic of spin absorption method. The pure spin current generated by the current flows between Cu and Py electrodes, diffuses to right direction through the spin transport channel (Cu). The spin current is absorbed by the spin Hall material (Pt), and converted to charge current via inverse spin Hall effect. (b) The field dependence of inverse spin Hall resistance ( $R_{ISHE} = V/I$ ) of Pt. (c) The conductivity dependence of spin Hall angle (spin-current conversion efficiency)  $\theta_{SH}$  of Pt. There has been a significant spread in the  $\theta_{SH}$  of Pt among reports. We revealed that the  $\theta_{SH}$  depends on the conductivity: the film quality of Pt, and the dependence can be explained extrinsic and intrinsic mechanisms.



逆ラッシュバ-エデルシュタイン効果によるスピン流-電流変換。(a) ラッシュバ効果を示す界面にスピン流を注入すると、生じた非平衡スピン蓄積がフェルミ面のシフトを引き起こし、スピン偏極方向と垂直に電流が生じる。(b) Cu/Bi<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 界面でのスピン流-電流変換実験の概略図。(c) スピンポンピングによるスピン流注入で生じた逆ラッシュバ-エデルシュタイン電圧の磁場依存性。

Spin-to-charge current conversion by inverse Rashba-Edelstein effect. (a) Fermi contours splitting by Rashba effect and the shift of Fermi surface to perpendicular direction of spin polarization induced by non-equilibrium spin accumulation after spin injection. (b) Schematic image of the experimental setup for spin-current conversion at the interface of Cu/Bi<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. (c) Magnetic field dependence of the inverse Rashba-Edelstein voltage by means of spin pumping.

## 研究テーマ Research Subjects

1. 純スピン流の生成および検出機構  
Mechanisms of pure spin current generation and detection
2. スピン流を用いた磁気相転移  
Magnetic phase transition by using spin current
3. トポロジカル絶縁体界面でのスピン流-電流相互変換  
Spin-to-charge current conversion in the interface of topological insulator
4. 有機導体へのスピン注入  
Spin injection into organic materials
5. 強磁性から超伝導体複合素子へのスピン注入  
Spin injection into superconductor from ferromagnet

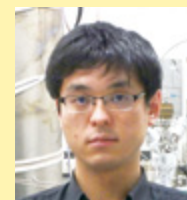


# 小森研究室

Komori Group



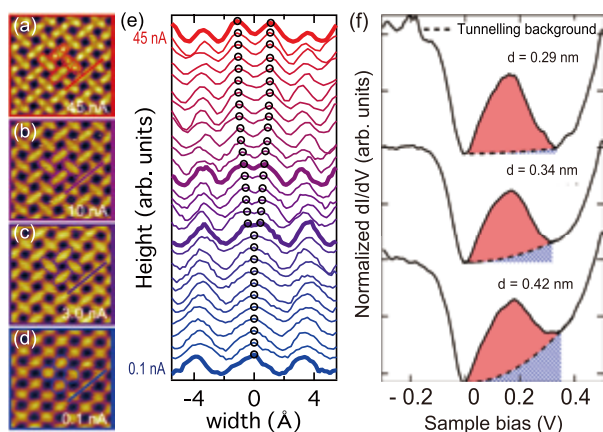
小森 文夫  
KOMORI, Fumio  
教授  
Professor



宮町 俊生  
MIYAMACHI, Toshio  
助教  
Research Associate

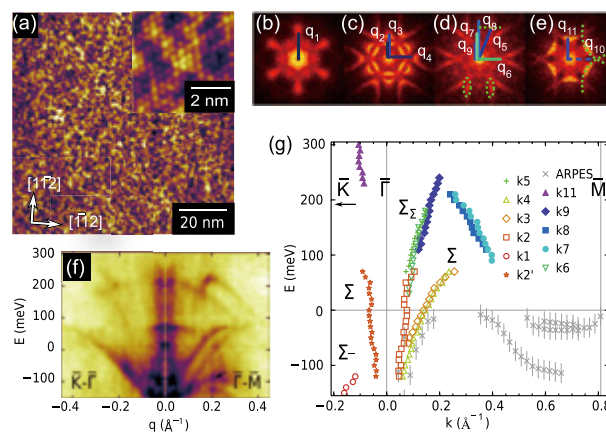
固体表面に形成される低次元系とナノ構造原子層物質の電氣的磁氣的性質を明らかにすることを目標に、超高真空中で走査トンネル顕微鏡 (STM)、光電子分光、磁気カー効果 (MOKE)・第二高調波発生 (SHG) 測定、および放射光分光を用いて研究を行なっている。STM を用いたトンネル分光では局所的な電子状態を、スピン角度分解光電子分光では電子状態のスピンと波数依存性を、MOKE/SHG と放射光分光では磁性を調べている。また、時間分解光電子分光や準粒子干渉測定によって表面での電子励起・散乱・緩和機構と、トンネル電子やレーザー光による電子励起後の新奇物質生成機構に関して、原子スケールの動的過程についても研究している。

Electronic and magnetic properties of low-dimensional and atomic-layer materials with nanometer-scale structures at solid surfaces are studied using scanning tunneling microscopy/spectroscopy (STM/STS), photoelectron spectroscopy and magneto-optical Kerr-rotation/second harmonic generation measurements in an ultra-high vacuum. Local atomic, electronic and magnetic structures, formation processes of surface atomic-layer materials and dynamical processes induced by electron tunneling or photo-excited carriers are examined by STM/STS, while spin-resolved electronic structures, electron dynamics, chemical bonds, and magnetic properties by electron and optical spectroscopy using VUV light and soft-X-ray from laser and synchrotron.



(a-d) Cu(001) 上の Fe<sub>2</sub>N 原子層の STM 凹凸像。トンネル電流  $I$  に依存して系統的に変化する。(e) (a-d) の直線上の STM 凹凸像の断面図。丸印で示したように、 $I$  が増えると山と山の構造が連続的に変化する。(f) トンネル分光曲線の探針表面距離依存性。距離が短い場合には、赤で示した鉄 3d 電子由来の状態密度が支配的に観察される。

(a-d) Topographic STM images of the Fe<sub>2</sub>N monolayer on Cu(001) at four values of the tunneling current  $I$  between 45 and 0.1 nA. (e) Line profiles along lines in (a-d). From the top to the bottom,  $I$  changes from 45 to 0.1 nA. Empty circles indicate peak positions. (f) Distant-dependent  $dI/dV$  spectra measured at the tip-surface distance,  $d = 4.2, 3.4,$  and  $2.9$  Å from the bottom to the top. Iron 3d states are dominant when  $d$  is small.



(a) Bi<sub>1-x</sub>Sb<sub>x</sub> 清浄表面の STM 原子像。(b-e) フーリエ変換された等エネルギー  $dI/dV$  像。フェルミエネルギーとのエネルギー差、 $E - E_F$  は (b) -140、(c) -40、(d) +160、(e) +260 meV である。各エネルギーでの散乱ベクトル  $q_1$ - $q_{11}$  を示した。(f) フーリエ変換された  $dI/dV$  像の  $\Gamma$ -M と  $\Gamma$ -K 方向のエネルギー依存性。(g) 図 (f) から再現した Bi<sub>1-x</sub>Sb<sub>x</sub> の表面バンド構造。

(a) STM images of a clean surface of Bi<sub>1-x</sub>Sb<sub>x</sub>, revealing the hexagonal lattice of surface atoms. (b-e) Fourier transformation (FT) of  $dI/dV$  maps at  $E - E_F = -140$  (b),  $-40$  (c),  $+160$  (d), and  $+260$  (e) meV on the clean surface of Bi<sub>1-x</sub>Sb<sub>x</sub>. The scattering vectors corresponding to the observed FT peaks are labeled by  $q_1$ - $q_{11}$ . (f) Profiles of the FT images in the  $\Gamma$ -M and the  $\Gamma$ -K directions. (g) Band structure of the clean surface of Bi<sub>1-x</sub>Sb<sub>x</sub> reconstructed from data in (f).

## 研究テーマ Research Subjects

1. 単原子層・表面ナノ構造物質の電子状態、磁性および伝導  
Electronic states, conduction and magnetism of atomic layers and nano-structured materials at surfaces
2. トンネル電子やレーザー光励起による電子・原子動的現象  
Electron and atom dynamics induced by electron tunneling and photo-excitation
3. 単原子層・表面ナノ構造物質の形成過程  
Formation processes of atomic layers and nano-structured materials at surfaces

# 長谷川研究室

Hasegawa Group



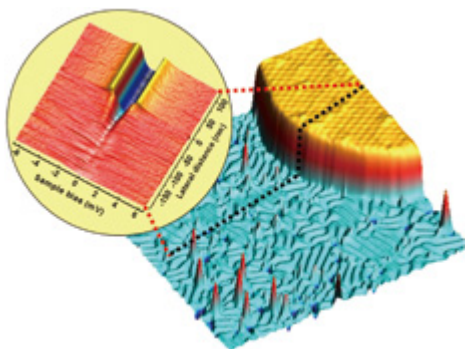
長谷川 幸雄  
HASEGAWA, Yukio  
准教授  
Associate Professor



吉田 靖雄  
YOSHIDA, Yasuo  
助教  
Research Associate

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、非弾性トンネル分光 (IETS) による種々の局所励起エネルギーに関する情報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、渦糸のクラスタリングや巨大渦糸などナノサイズ超伝導体特有の渦糸状態の観察や、磁性体との近接効果により誘起される特異な超伝導状態の実空間観測を行っている。また、SP-STM による磁性薄膜の局所スピン構造と磁気特性に関する研究、IETS によるスピン励起の研究等を進めるとともに、原子マニピュレーションを駆使した物性の制御を目指している。最近では、CeCoIn<sub>5</sub> などの重い電子系物質の電子状態や局所超伝導特性・磁気特性の研究にも取り組んでおり、超伝導ギャップ形状の原子スケールでの変調現象などを見出している。

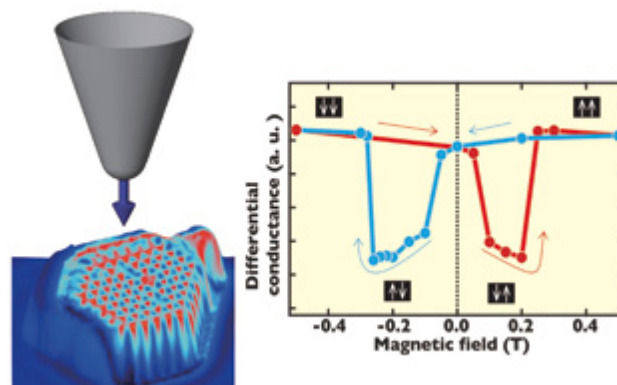


超伝導金属界面での近接効果。Si 基板上の 1 原子層 Pb (水色、常伝導相) と Pb 薄膜 (黄色、超伝導相) の界面近傍で測定されたトンネル分光スペクトルから、超伝導特性が界面から 40nm の領域にわたって染み出していることが観察されている。

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, super) indicate the penetration of superconductivity into the metal layer with a decay length of 40 nm.

Scanning tunneling microscopy (STM) reveals not only atomic structure of surfaces but also electronic states in 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 very low temperature and high magnetic field, we have observed various phenomena on nanosize superconductors such as vortex clustering and giant vortex, and peculiar superconducting states in the proximity with ferromagnetic materials. We also study magnetic properties of thin films related with their atomic structure using SP-STM, and their spin excitation with IETS. Modification and control of these properties with an aid of the atom manipulation are one of the targets of our study. Recent subjects include heavy-Fermion materials, such as CeCoIn<sub>5</sub>; atomic-scale variation in the shape of superconducting gaps was observed.



スピン偏極 STM により得られた Ag 表面上のナノサイズ Co アイランド構造での“磁化曲線”。磁場により探針の磁化方向も反転するため ( $\sim \pm 0.25\text{T}$ )、バタフライ状の曲線が得られている。

Magnetization curve taken on a nano-size Co island structure formed on Ag surface using spin polarized STM. Because the flips of the tip magnetization occur at  $\sim \pm 0.25\text{T}$  a butterfly-shape curve is observed.

## 研究テーマ Research Subjects

1. 低温 STM による局所領域での超伝導特性に関する研究  
Superconductivity in local area using low-temperature scanning tunneling microscopy
2. 原子 / 分子マニピュレーションによる古典 / 量子スピン系の構築とスピン偏極 STM によるその評価  
Fabrication of spin systems by atomic manipulation and their characterization with SP-STM
3. 重い電子系物質の局所電子状態・超伝導特性・磁気特性  
Local electronic states, superconductivity, and magnetic properties of heavy-Fermion materials
4. 走査ポテンシオメトリによるナノスケールでの電位分布・スピン流計測  
Nano-scale distribution of potential and spin current by scanning tunneling potentiometry

# リップマー研究室

Lippmaa Group



リップマー ミック  
LIPPMAA, Mikko  
准教授  
Associate Professor



高橋 竜太  
TAKAHASHI, Ryota  
助教  
Research Associate

水素を生成する水分解光電極は酸化物半導体にとって興味深い課題を抱えている。高効率な光電極反応を得るためには、水の中で化学的に安定に存在し、バンドギャップが約 2eV、さらには室温でのフォトキャリアの移動度が高い半導体材料を使用しなければならない。これまでに我々は Ir:SrTiO<sub>3</sub> や Rh:SrTiO<sub>3</sub> を光電極に用いてきたが、これらの材料は 3 つ目の条件を網羅しておらず、高効率な反応を得ることはできなかった。低いフォトキャリア移動度の材料でも高い光触媒特性を発現させるべく、光触媒材料の中に金属のナノピラー構造が自己組織化した薄膜結晶の作製を試みた。半導体酸化物と金属ピラー構造の界面がショットキー接合になり、内部電界によって電荷を効率良く分離する層として機能する。フォトキャリアの拡散長は短くなり、フォトキャリアの移動度が低い材料でも効率良く電荷分離を可能にする。

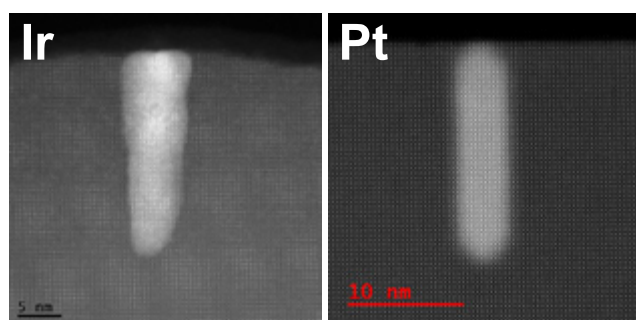


図 1. SrTiO<sub>3</sub> 中で自己組織化した貴金属ナノピラーの STEM 像。ナノピラー構造の析出は Ir, Pt, Pd, Rh の金属で観察された。Ir:SrTiO<sub>3</sub> 薄膜では Ir 金属ナノピラー構造周辺でショットキー空乏層が形成し、水分解反応の効率を高める。

Fig. 1. STEM images of spontaneously formed noble metal nanopyllars in SrTiO<sub>3</sub>. Pillar formation has been observed for Ir, Pt, Pd, and Rh. A suitable depletion layer forms around Ir nanopyllars in an Ir:SrTiO<sub>3</sub> host matrix.

Photocatalytic water splitting for hydrogen production presents an interesting challenge for oxide semiconductor development. The purpose is to design an oxide material that is chemically stable in water, has a bandgap of about 2 eV, and has high photocarrier mobility at room temperature. The first two requirements can be met by using noble metal doped SrTiO<sub>3</sub>, but the best photocatalysts, Ir:SrTiO<sub>3</sub> and Rh:SrTiO<sub>3</sub> have very low photocarrier mobilities. We study the possibility of avoiding the mobility problem by placing self-organized nanoscale metal electrodes inside the oxide semiconductor. Spontaneous noble segregation in a perovskite forms arrays of nanoscale metal pillars (Fig. 1), which can form Schottky-type depletion layers in the surrounding semiconductor (Fig. 2). The required photocarrier diffusion length thus becomes shorter and we can extract photogenerated charge very efficiently from an intrinsically low-mobility semiconductor.

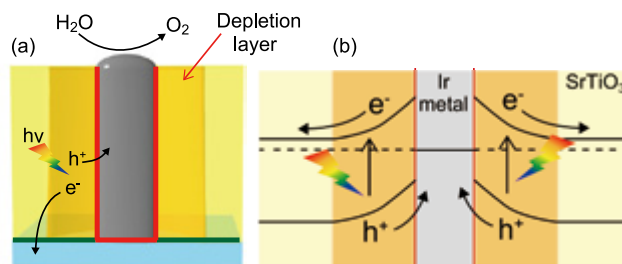


図 2. 薄膜中の金属ナノピラーの模式図。金属と酸化物の界面にショットキー接合を形成し、光誘起したフォトキャリアが再結合する前にホールと電子に効率良く分離させる。また、金属ナノピラー構造は電荷分離したホールが酸素発生する固液界面へ移動するためのパスとしても機能する。

Fig. 2. Schematic illustration of a nanoscale metal nanopyllar in a thin film (a). A Schottky junctions forms between the metal and the oxide (b), effectively separating photogenerated holes and electrons before recombination. The metal nanopyllar provides an efficient charge transport path to the photocatalyst surface for the oxygen evolution reaction.

## 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そしてヘテロ構造の作製  
Growth of thin oxide films and heterostructures by pulsed laser deposition
2. 水分解光電極反応の高効率化に向けた酸化物半導体材料の開発  
Development of oxide photoelectrode materials for photocatalytic water splitting
3. 極性材料とマルチフェロイック材料の開発  
Polar oxides and multiferroic coupling
4. 酸化物ナノ構造またはナノコンポジット薄膜の合成  
Synthesis of nanostructures and nanocomposite thin films



# 春山研究室

Haruyama Group



春山 純志  
HARUYAMA, Junji  
客員准教授  
Visiting Associate Professor

バルク層状物質のセロテープによる機械剥離という簡易な手法を一つの手段として多様な二次元原子層物質を創製、そのスピン・電子・光物性の研究を行っている。特に、独自の非リソグラフィ法として多孔質アルミナ膜をマスクとしナノメッシュ構造を各種原子層（グラフェン、黒リン、窒化ホウ素、二硫化モリブデン ( $\text{MoS}_2$ )）上に創製、その低汚染・低欠陥細孔エッジから生じる微小磁気・スピン信号を高効率で検出し、エッジ終端元素との相互作用がもたらす多様な磁気・スピン物性を探索している。

また、本来スピン軌道相互作用 (SOI) を持たないグラフェン表面の軽元素（水素・フッ素）、または重微粒子（白金、ビスマステルル）修飾などにより、ディラック電子系への Rashba 型・真性 SOI 導入と二次元トポロジカル絶縁体化に挑戦している。さらに次世代原子層光・電子半導体素子への応用を目指して、原子層半導体  $\text{MoS}_2$  への電子線・レーザー照射による金属相への構造相転移創出なども研究している。

Creation of various two-dimensional (2D) atom-thin layers (ATLs) by some methods (e.g., mechanical exfoliation of bulk layered materials using scotch tape) and research of those spintronic, electronic, and photonic properties are ongoing. In particular, nanomesh structures are fabricated on various 2D ATLs (graphene, black phosphorus, hexagonal boron nitride, and molybdenum disulfide ( $\text{MoS}_2$ )) by using an original non lithographic method (i.e., porous alumina template mask) and unique magnetic and spintronic behaviors arising from the ultra-clean and low-defect nanopore edges are studied associated with various adatoms terminating the pore edges.

Research of introduction of Rashba-type or intrinsic spin-orbit interaction (SOI) into graphene, which has no SOI due to its small mass, is also carried out by decoration of small-mass adatoms (hydrogen and fluorine) and heavy-mass nanoparticles (Au, Ag, Pt, and  $\text{B}_2\text{Te}_3$ ). It may lead to possible 2D topological insulating state. As application to next-generation electronic and photonic semiconductor ATL devices, a semiconductor-metal transition of atom-thin  $\text{MoS}_2$  is also studied by using electron- or laser-beam irradiation.