

# 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、
- ・表面化学反応等のミ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	家 泰弘 IYE, Yasuhiro	助教 Research Associate	遠藤 彰 ENDO, Akira	技術専門職員 Technical Associate	向井 孝三 MUKAI, Kozo
教授 Professor	勝本 信吾 KATSUMOTO, Shingo	助教 Research Associate	吉本 真也 YOSHIMOTO, Shinya	技術専門職員 Technical Associate	飯盛 拓嗣 IIMORI, Takushi
教授 Professor	大谷 義近 OTANI, Yoshichika	助教 Research Associate	高橋 竜太 TAKAHASHI, Ryota	技術専門職員 Technical Associate	橋本 義昭 HASHIMOTO, Yoshiaki
教授 Professor	小森 文夫 KOMORI, Fumio	助教 Research Associate	木俣 基 KIMATA, Motoi	技術専門職員 Technical Associate	浜田 雅之 HAMADA, Masayuki
教授 Professor	吉信 淳 YOSHINOBU, Jun	助教 Research Associate	吉田 靖雄 YOSHIDA, Yasuo	特任研究員 Project Researcher	金 皓元 KIM, Howon
准教授 Associate Professor	長谷川 幸雄 HASEGAWA, Yukio	助教 Research Associate	中村 壮智 NAKAMURA, Taketomo	特任研究員 Project Researcher	小坂谷 貴典 KOITAYA, Takanori
准教授 Associate Professor	リップマー ミック LIPPMAA, Mikk	助教 Research Associate	宮町 俊生 MIYAMACHI, Toshio	特任研究員 Project Researcher	家永 紘一郎 IENAGA, Koichiro
准教授(客員) Visiting Associate Professor	金崎 順一 KANASAKI, Jun'ichi			特任研究員 Project Researcher	大槻 匠 OHTSUKI, Takumi
准教授(客員) Visiting Associate Professor	安 東秀 AN, Toshiu			特任研究員 Project Researcher	ムドゥリ プラサンタ MUDULI, Prasanta

# 家研究室

Iye Group



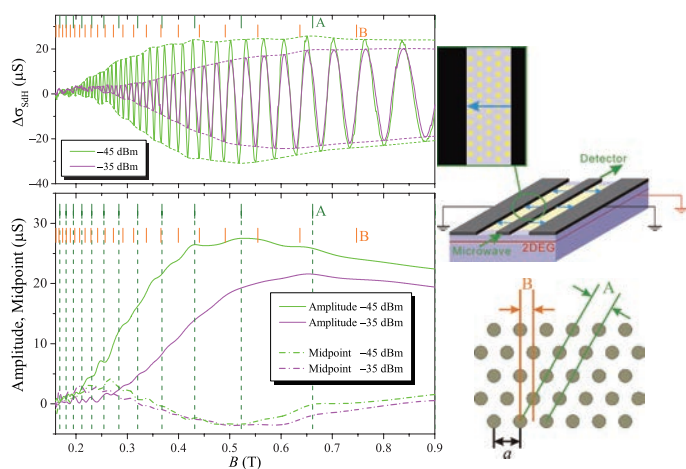
家 泰弘  
IYE, Yasuhiro  
教授  
Professor



遠藤 彰  
ENDO, Akira  
助教  
Research Associate

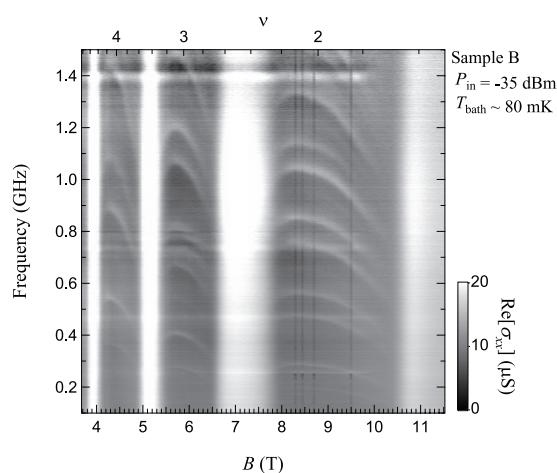
GaAs/AlGaAs 半導体界面2次元電子系に人工的な超周期ポテンシャルを付加した系(平面超格子)では、磁気抵抗の整合振動効果やアハロノフ・ボーム効果などの現象が観測される。また、高移動度試料の量子ホール領域において観測される電子固体相(ストライプ、バブル)の固有周期と人工的に付与した周期との関係による整合効果やピンング効果も期待できる。本研究では、六方格子状の周期変調ポテンシャルを付加した系の高周波伝導をコプレーナ型導波路を用いて調べた。低磁場領域の高周波磁気伝導度は、六方格子に含まれる2つの主たる周期に対応する整合性振動およびシュブニコフ・ドハース振動の振幅変調を示す。整数量子ホール領域においては、高周波伝導度に複数の共鳴ピークが現れ、特徴的な磁場(ランダウ準位充填率)依存性を示す。

Two-dimensional electron system (2DES) in GaAs/AlGaAs hetero-interface subjected to artificial potential modulation (lateral superlattice) exhibits such phenomena as commensurability magnetoresistance oscillation and Aharonov-Bohm effect. In the quantum Hall regime, where electron solid (stripe and bubble) phases are observed in high mobility samples, commensurability effect and/or pinning effect associated with the relation between the intrinsic periodicity of the electron-solid phase and the artificially imposed periodicity can be expected. In this study, high frequency conductivity of 2DES with hexagonal potential modulation was measured by use of a coplanar waveguide. In the low field regime, the magneto-conductivity exhibits commensurability oscillations and amplitude modulation of the Shubnikov-de Haas oscillations, whose periodicity corresponds to the two principal periods associated with the hexagonal lattice. In the quantum Hall regime, multiple resonant peaks in the ac conductivity are observed and they exhibit characteristic magnetic field (Landau level filling) dependence.



六方格子変調を施した2次元電子系の高周波伝導度の振動成分。下図は上図のSdH振動の解析から、振動の中心と振幅をプロットしたもの。垂直線は、六方格子配列に含まれる2つの周期AとBに対するflat-band条件の位置を表している。

Oscillatory ac magnetoconductivity of a 2DES with hexagonal potential modulation. The lower panel shows the center line and the oscillation amplitude extracted from the traces in the upper panel. The vertical dashes indicate the positions of flat-band conditions for the two periodicities A and B associated with the hexagonal lattice.



六方格子変調を施した2次元電子系の高周波伝導率の磁場および周波数依存性。整数量子ホール領域に特徴的な磁場依存性を示す複数の共鳴ピークが観測される。

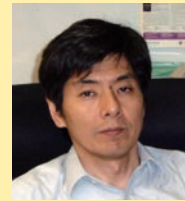
The magnetic field- and frequency-dependence of ac conductivity of a 2DES with hexagonal potential modulation. Multiple resonant peaks appear in the integer quantum Hall regime and exhibit a characteristic magnetic field dependence.

## 研究テーマ Research Subjects

1. 空間変調構造下の2次元電子系の量子輸送現象  
Quantum transport in 2DEG systems under artificial potential modulation
2. 量子ホール系における熱電効果と高周波伝導  
Thermoelectric effects and a.c. transport in quantum Hall systems
3. グラファイト、グラフェンの量子伝導  
Quantum transport in graphite and graphene

# 勝本研究室

Katsumoto Group



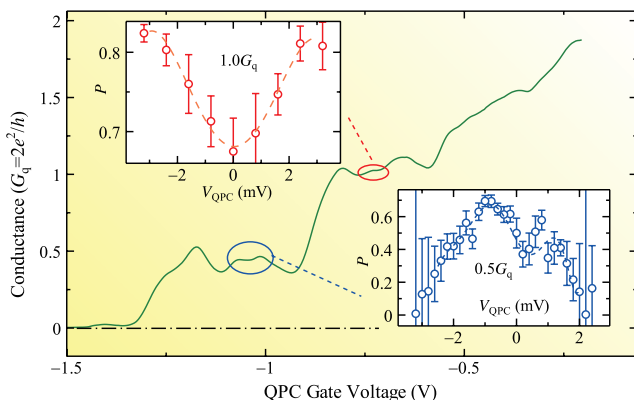
勝本 信吾  
KATSUMOTO, Shingo  
教授  
Professor



中村 壮智  
NAKAMURA, Taketomo  
助教  
Research Associate

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によりスピン注入する、などの方法でスピン流を生じさせ、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量子ポイントコンタクト系で、2つの特徴的機構により高いスピン偏極が生じることを明らかにしてきた。(2) では、エピタキシャル成長した鉄から半導体への高効率スピン注入を実現した。これらを用い、スピノル干渉効果の研究を進めている。また、超伝導体とのハイブリッド構造、グラフェンへのスピン軌道相互作用導入についても研究を行っている。

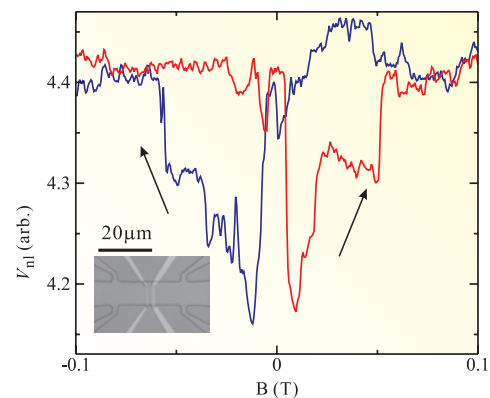


(In,Ga)As 量子井戸 2次元電子系から作製した量子ポイントコンタクト (QPC) 伝導度のゲート電圧依存性。伝導度単位は伝導度量子  $G_q = 2e^2/h$ 。挿入図は、スピン偏極度のバイアス電圧 ( $V_{QPC}$ ) 依存性を QPC の  $0.5G_q$  と  $1.0G_q$  の量子化平坦部でそれぞれ測定した結果。

Conductance of a quantum point contact (QPC) made from an (In,Ga)As two-dimensional system as a function of the gate voltage. The unit is the quantum conductance  $G_q = 2e^2/h$ . The insets show bias voltage ( $V_{QPC}$ ) dependence of spin-polarization of  $0.5G_q$  and  $1.0G_q$  plateaus respectively.

With epitaxial growth of semiconductor and metallic films, and nano-fabrication techniques, we study quantum effects in low dimensional systems. Our research also spans 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 and nano-structures, also with (2) spin-injection in semiconductor/ferromagnet monolithic structure. In (1), we have shown that high spin polarization is realized in the combination of quantum dot and quantum point contact through two different mechanisms. In (2), spin injection from epitaxially grown Fe films with a high efficiency has been achieved. With these techniques, we are exploring the quantum interference in the spinor space. Hybrid systems of superconductors and quantum structures, and introduction of a spin-orbit interaction to graphene are also our subjects.



エピタキシャル成長した Fe から InAs2 次元系にスピン注入し、非局所電圧を測定してスピンバルブ構造を検出したもの。挿入図は試料の電子顕微鏡写真。

Spin injection from eptaxially grown Fe into an InAs2 quantum well has been detected through spin-valve magnetoresistance structure in non-local voltage. The inset shows a scanning electron micrograph of the sample.

## 研究テーマ Research Subjects

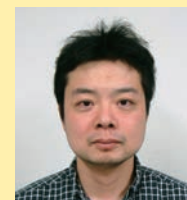
1. 量子電荷・スピン輸送現象  
Quantum transport in charge and spin freedoms
2. 量子構造を用いた多体効果の研究  
Study of many-body effects in quantum structures
3. 異対称性ハイブリッド構造に生じる物理現象  
Physics at interfaces between the phases with different symmetries

# 大谷研究室

Otani Group



大谷 義近  
OTANI, Yoshichika  
教授  
Professor

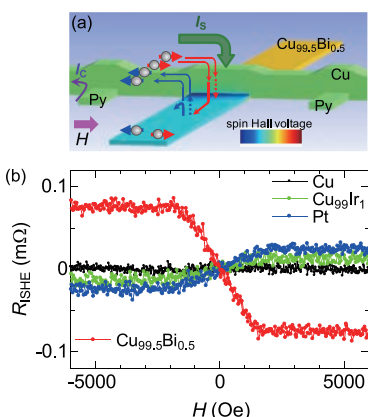


木俣 基  
KIMATA, Motoo  
助教  
Research Associate

スピントロニクス研究では、電子の電荷とスピンの2つの自由度をもったスピンの流れが重要な役割を果たす。中でも電荷の流れを伴わないスピン角運動量のみ流れは「純スピン流」と呼ばれ、次世代の超低消費電力素子への応用が期待されるだけでなく、基礎的な側面でも新しい物理量として近年非常に注目されている。我々はこの純スピン流の生成、検出、制御法を研究している。具体的には、スピン軌道相互作用を有する非磁性体、強磁性体、超伝導体、有機導体など多様な物質を用い、それらをスピン流の減衰長であるナノメートルスケールまで微細化して、スピン流の生成や検出、及び制御を行う。最終的には微細加工技術を駆使して、スピン流を自由自在に制御できるような新しいスピントロニクス素子の研究開発を目指している。

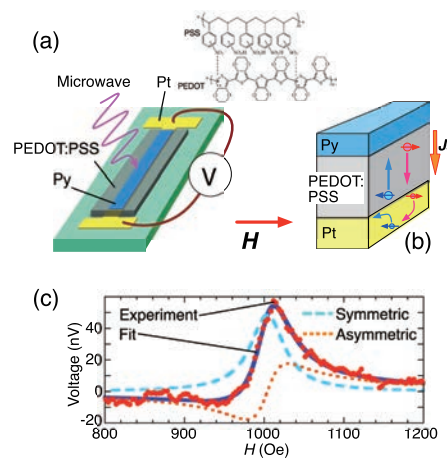
Spin currents possessing two independent degrees of freedom, charge and spin, play an important role in spintronics research. Among those currents, a flow of spins with no net charges is called “pure spin current”, which is not only expected to be an essential element for low power consumption devices but also considered as a novel physical quantity for fundamental spintronics researches. We are aiming at establishing principles to generate, detect, and manipulate the spin currents by using a variety of materials with spin-orbit interaction including non-magnets, ferromagnets, superconductors, organic materials, etc. Particularly we are elucidating the characteristic functions of spin currents appearing when the size of devices becomes of the order of the relaxation length of the spin currents.

(a) スピン吸収法の概念図。強磁性体パーマロイ Py から非磁性体である銅 Cu に電流 (I<sub>c</sub>) を流すことで、Cu 細線右側に純スピン流 (I<sub>s</sub>) が流れる。CuBi 合金の強いスピン軌道相互作用のため、純スピン流がそちらの方向に積極的に吸収され、逆スピンホール電圧として検出される。(b) さまざまな物質 (Cu, Pt, CuIr, CuBi) での逆スピンホール効果の結果。測定は 10 K で行った。



(a) Schematic of spin absorption method in lateral spin valve structure. By flowing an electric charge current (I<sub>c</sub>) from a ferromagnetic permalloy (Py) wire to a nonmagnetic copper (Cu) wire, a pure spin current is induced on the right side of the Cu wire. Thanks to a strong spin-orbit interaction of Bi-doped Cu alloy, the pure spin current is preferentially absorbed into the CuBi wire and converted into a charge current via inverse spin Hall effect (ISHE). (b) Inverse spin Hall effects observed in several nonmagnetic metals (Cu, Pt, CuIr, and CuBi). All the measurements were performed at 10 K.

(a) 導電性高分子薄膜 PEDOT:PSS を用いたスピン注入素子および分子構造の概念図。この実験では、強磁性共鳴を利用して、純スピン流を PEDOT:PSS に注入する。(b) 強磁性体 Py から注入された純スピン流は PEDOT:PSS を通過して、白金電極に到達する。白金に到達したスピン流は逆スピンホール効果によって電圧信号として検出できる。この際、スピン流は PEDOT:PSS 内で緩和するため、その膜厚依存性を調べることで PEDOT:PSS のスピン拡散長を決定できる。(c) Py/PEDOT:PSS/Pt 三層構造素子で観測された白金の逆スピンホール電圧。



(a) Schematics of our spin injection device using a conductive polymer PEDOT:PSS and its molecular structure. In this experiment, the pure spin current is injected from a ferromagnet into PEDOT:PSS using a spin pumping effect operated by ferromagnetic resonance. (b) The pure spin current transmitted through the polymer layer reaches the Pt layer and is converted into a charge current via the ISHE of Pt. Since the spin current decays in the PEDOT:PSS layer, its spin diffusion length can be determined by studying the thickness dependence of the ISHE signal detected at the Pt layer. (c) Inverse spin Hall voltage observed in the Py/PEDOT:PSS/Pt trilayer device.

## 研究テーマ Research Subjects

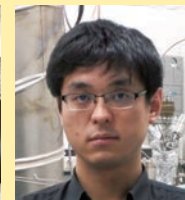
1. 純スピン流の生成及び検出機構の研究  
Study of generation and detection methods of pure spin current
2. スピン流を用いた磁気相転移  
Magnetic phase transition using spin current
3. 強磁性 / 超伝導体複合素子におけるスピン注入  
Spin injection into superconductor/ferromagnet hybrid devices
4. 有機導体へのスピン注入  
Spin injection into organic materials
5. ナノスケール磁気渦格子を用いたスピンドYNAMICSの研究  
Spin dynamics in nano-scale magnetic vortex lattice

# 小森研究室

Komori Group



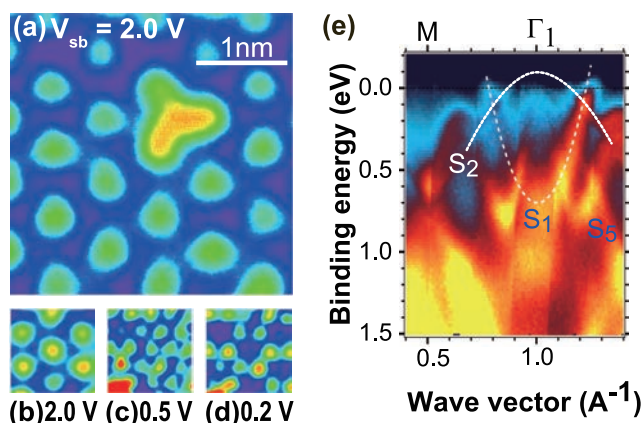
小森 文夫  
KOMORI, Fumio  
教授  
Professor



宮町 俊生  
MIYAMACHI, Toshio  
助教  
Research Associate

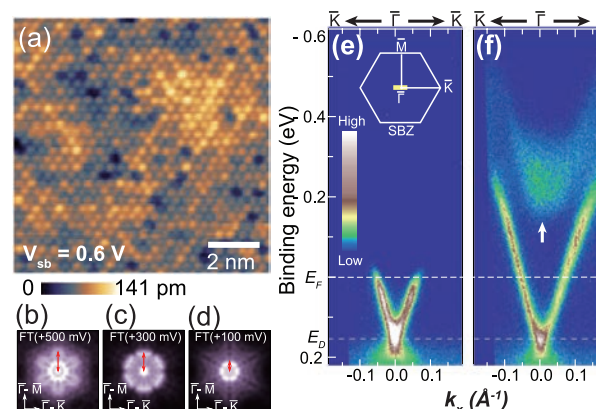
固体表面に形成される低次元系とナノスケール物質の電氣的磁氣的性質を明らかにすることを目標に、超高真空中で走査トンネル顕微鏡 (STM)、光電子分光、磁気カー効果 (MOKE)・第二高調波発生 (SHG) 測定を用いて研究を行っている。STMを用いたトンネル分光では局所的な電子状態を、角度分解光電子分光では波数依存電子状態を、MOKE/SHG 測定では磁性を調べている。また、ナノスケール化合物の研究において重要な試料生成機構に関して、原子スケールの動的過程を調べている。表面では、トンネル電子やレーザー光によって励起された電子系のエネルギーが格子系へ緩和する過程を用いて、新奇な物質を作製することもできる。そこで、トンネル電子注入による原子移動緩和や不純物ポテンシャル散乱機構について研究している。

Electronic and magnetic properties of alloys, compounds and other materials with nanometer-scale structure 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. Band structures of the filled surface states and the chemical bonds are studied by photoelectron spectroscopy using VUV light and soft-X-ray. Local atomic, electronic and magnetic structures, formation processes of surface nano-structured materials and dynamical processes induced by electron tunneling or photo-excited carriers are examined by STM/STS. Local atomic structure can be manipulated through electron-lattice interaction by electronic excitation of tunneling electrons and photons.



金吸着 Ge(111) 表面上にできた 2 次元構造の STM 凹凸像 (a-d) と ARPES 強度分布像 (e)。金の三量体が規則配列しており、三つの三量体の大きさのクラスターも観察できる。三量体が規則配列した STM 像には、バイアス電圧 ( $V_{sb}$ ) 依存性があり、 $V_{sb}$  を下げると三角格子からハニカム格子に変化する。表面金属バンドが 2 本 ( $S_1, S_2$ ) あり、 $S_1$  は強いスピン軌道相互作用のためにラッシュバ分裂し、面垂直成分をもってスピン分極している。

Topographic STM image (a-d) and ARPES intensity mapping (e) of Au-adsorbed Ge(111) surface. Atomic-size protrusions of a gold trimer make a triangular lattice on the surface. The triangle lattice pattern changes to a honeycomb one with decreasing the sample bias voltage ( $V_{sb}$ ). A triangle cluster made of the three trimers in size is seen in (a). There are two metallic surface bands ( $S_1, S_2$ ), and  $S_2$  is anisotropically split to two spin-polarized bands owing to the strong spin-orbit interaction.



(a) トポロジカル絶縁体  $\text{Bi}_{1.5}\text{Sb}_{0.5}\text{Te}_{1.7}\text{Se}_{1.3}$  へき開表面の STM 凹凸像。表面には Te と Se 原子がみえていて。 (b-d) 弾性散乱 (準粒子干渉) 強度像。各バイアス電圧 ( $V_{sb}$ ) での  $dI/dV$  像のフーリエ変換によって得られた。バンドギャップ内のトポロジカルバンド内での散乱が観察された。(e, f) 時間分解 ARPES 強度分布像。プローブパルス (250 fs, 5.9 eV) がポンパルス (170 fs 1.5 eV) に先行 (e) あるいは後行 (f) している。非占有トポロジカルバンドの分散が観察された。

(a) Topographic STM image of a cleaved surface of  $\text{Bi}_{1.5}\text{Sb}_{0.5}\text{Te}_{1.7}\text{Se}_{1.3}$ . (b-d) Bias ( $V_{sb}$ )-dependent amplitude maps of the elastic scatterings, or QPI, derived by Fourier transformation (FT) of the  $dI/dV$  images. Intra band scatterings within the topological surface band are observed in the bulk band gap (e, f) Intensity maps of ARPES by a 250-fs probe laser pulse (5.9 eV) before (e) and after (f) impinging a 170-fs pump laser pulse (1.5 eV). Unoccupied topological surface band is observed in (f).

## 研究テーマ Research Subjects

1. 表面ナノ構造物質の電子状態、伝導および磁性  
Electronic states, conduction and magnetism of nano-structured materials at surfaces
2. トンネル電子やレーザー光励起による表面動的現象  
Surface dynamical phenomena induced by electron tunneling and photo-excitation
3. 表面ナノ構造物質の形成過程  
Formation processes of nano-structured materials at surfaces

# 吉信研究室

Yoshinobu Group



吉信 淳  
YOSHINOBU, Jun  
教授  
Professor



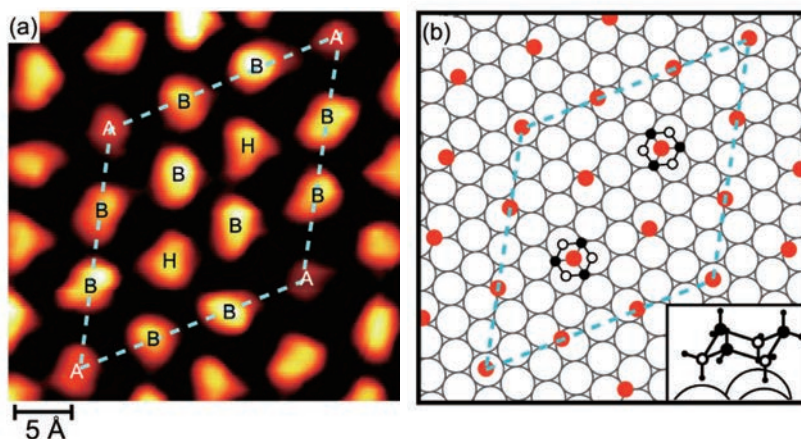
吉本 真也  
YOSHIMOTO, Shinya  
助教  
Research Associate

表面界面の特徴の一つは、バルクの対称性が破れ表面特有の構造や物性が現れることだけではない。外部から原子・分子を自在に表面に供給し、新しい物質を構築できる「反応場」として利用できることが最も重要な特徴である。最近では、原子・分子レベルで制御されたナノマテリアル（例えば、サイズの整ったクラスター、異方性の強い低次元化合物、配向の特定された分子凝集系など）や、制御されたナノデバイス構造を作製することも可能になってきた。原子スケールで反応を制御するためには、表面における物質移動や反応などを理解することが不可欠である。これらの表面ダイナミクスの研究は、触媒反応・半導体プロセス・分子エレクトロニクスと密接に関連しており、宇宙における分子進化についても手がかりを与えてくれる。当研究室では、表面や界面における原子・分子の動的挙動（吸着、拡散、成長、脱離）、表面ナノ物質の構築および表面界面の物性を、表面振動分光、光電子分光などの表面分光法と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。必要に応じてシンクロトロン放射光(KEK-PF, SPring8 など)を用いた実験も行っている。

Solid surfaces are intriguing objects, because novel structures and electronic properties emerge as a result of symmetry breaking of bulk. In addition, a solid surface plays an important role as “low dimensional reaction field”, on which we can provide atoms and molecules and manipulate them deliberately. In order to fabricate atomically-controlled surface 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 with laboratory experiments in ultra-high vacuum at low temperature. We have utilized surface vibrational spectroscopy, photoelectron spectroscopy and scanning tunneling microscopy in order to investigate structures, reactions and electronic properties of atoms and molecules on surfaces. Synchrotron radiation (KEK-PF, SPring8 etc.) is also used to study electronic structure of surface and interface.

Rh(111) 表面に吸着したシクロヘキセンの (a)STM 像と (b) の吸着モデル。

(a) an STM image and (b) the proposed model of adsorbed cyclohexane molecules on Rh(111).



## 研究テーマ Research Subjects

1. モデル触媒による小分子の活性化と表面反応の研究  
Activation and surface reaction of small molecules by model catalysts
2. 固体表面における原子・分子の動的過程の研究  
Dynamical processes of atoms and molecules on solid surfaces
3. 半導体光触媒薄膜の作製と表面電子状態および化学反応の研究  
Fabrication of thin film of semiconductor photocatalyst and its electronic states and surface chemical reaction
4. グラフェンやシリセンなど低次元物質表面の電子状態と反応性の研究  
Electronic states and reactivity of low-dimensional materials on surfaces
5. 雰囲気中の固体表面における化学反応の研究  
Chemical reaction on solid surfaces under ambient conditions

# 長谷川研究室

Hasegawa Group



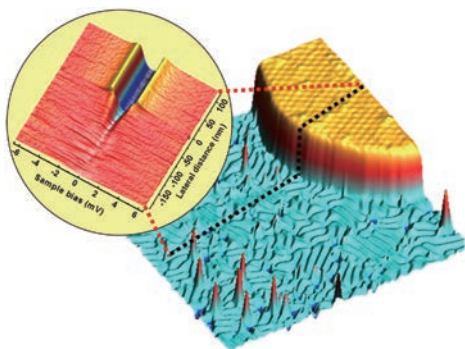
長谷川 幸雄  
HASEGAWA, Yukio  
准教授  
Associate Professor



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てこう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。

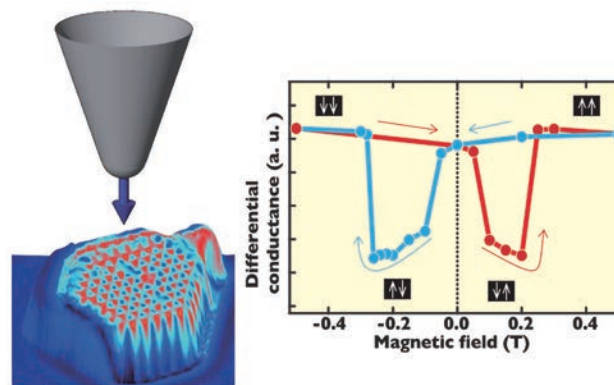


超伝導金属界面での近接効果。Si 基板上の 1 原子層 Pb (水色、常伝導相) と Pb 薄膜 (黄色、超伝導相) の界面近傍で測定されたトンネル分光スペクトルから、超伝導特性が界面から 40nm の領域にわたって染み出していることが観察されている。

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抵抗分布測定  
Nano-scale resistance and its spatial distribution 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

酸化物の薄膜結晶には触媒材料を開発するための多くの利点がある。我々は太陽光を照射することで水から水素を効率よく生成する光触媒材料として、チタン酸ストロンチウムベースの材料を使って、電子構造、ナノ構造体、そして光触媒特性について研究している。特にロジウム、イリジウム、白金をチタン酸ストロンチウムの薄膜にドーピングすることで、価電子帯のバンドエッジを高くし、材料のバンドギャップを制御している。図1にはXESやXASなどの軟X線分光の手法を利用し、材料の電子構造を精密に計測した結果を示す。測定によって得られた電子構造は第一原理計算の結果と比較し、光触媒特性との関連について調べている。図2ではp型伝導を示すRhをドーピングしたチタン酸ストロンチウムの水素発生光触媒についてまとめており、Rhのドーパントの価数によって変化する光誘起された電荷の再構成について調べている。このような価数によって変化する光触媒特性はIrをドーピングしたチタン酸ストロンチウムの酸素発生光触媒でも見出された。

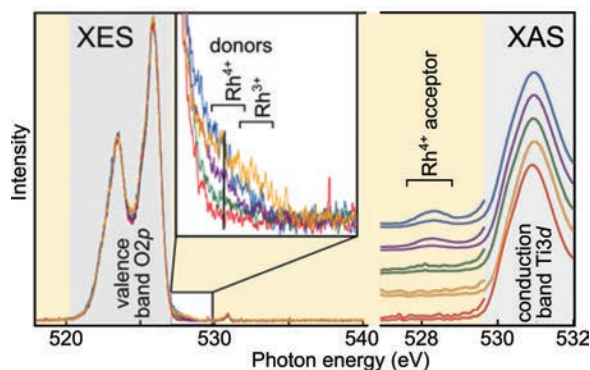


図1. X線発光分光(XES)とX線吸収分光(XAS)を用いて、RhやIrをドーピングしたチタン酸ストロンチウム薄膜やバルク結晶のバンドギャップ中のドナーやアクセプター準位を測定する。アクセプターの非占有準位はRh<sup>4+</sup>をドーピングしたチタン酸ストロンチウムでのみ発生する。一方、価電子帯上端におけるRh<sup>4+</sup>とRh<sup>3+</sup>の占有準位では若干の準位のシフトが観察された。

Fig. 1. X-ray emission (XES) and absorption (XAS) spectroscopies are used for determining the location of in-gap donor and acceptor states in photocatalytic Rh and Ir-doped SrTiO<sub>3</sub> thin films and bulk samples. The unoccupied acceptor states only appear in Rh<sup>4+</sup>:SrTiO<sub>3</sub>, while only minor shifts are seen in the occupied Rh<sup>4+</sup> and Rh<sup>3+</sup> states close to the top of the valence band.

Oxide thin films offer many advantages for developing catalytic materials. Our interest is to study the electronic structure, atomic-scale microstructure, and photoelectrochemical activity of SrTiO<sub>3</sub>-based photocatalytic materials that can be used for hydrogen production from water by sunlight. In particular, we study Rh, Ir, and Pt-doped SrTiO<sub>3</sub> thin films with the aim of tuning the bandgap of the material by lifting the valence band edge. A variety of soft x-ray spectroscopic techniques, including XES and XAS are used for determining the electronic spectra of the materials (Fig. 1). The measurement results are compared with first-principles calculation results and interpreted in terms of photocatalytic activity. In this work, we have identified the factors that determine the photogenerated charge collection activity as a function of the dopant valence state, as summarized for the case of p-type Rh:SrTiO<sub>3</sub> hydrogen photocatalyst in Fig. 2. Similar valence-dependent efficiency differences have also been identified for n-type oxygen-evolution catalyst Ir:SrTiO<sub>3</sub>.

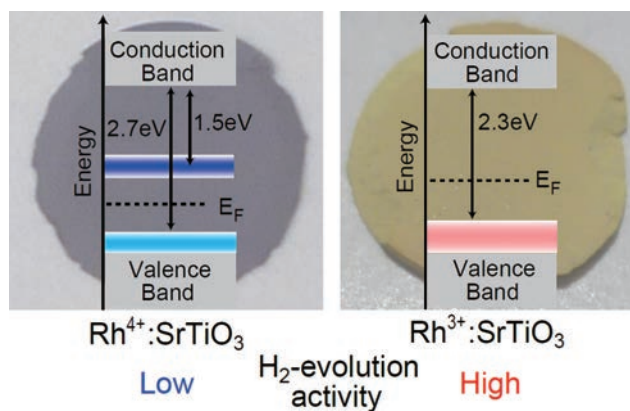


図2. Rh<sup>4+</sup>(紫)とRh<sup>3+</sup>(黄色)をドーピングしたチタン酸ストロンチウムの電子構造。Rh<sup>4+</sup>ドーパントの非占有アクセプター準位によって光キャリアの再構成が速まり、水素を生成する光触媒特性の効率の減少に繋がる。

Fig. 2. Schematic illustrations of the electronic structures of Rh<sup>4+</sup>:SrTiO<sub>3</sub> (purple) and Rh<sup>3+</sup>:SrTiO<sub>3</sub> (yellow). The presence of the unoccupied acceptor state associated with the Rh<sup>4+</sup> dopant results in fast photocarrier recombination and very low photocatalytic hydrogen evolution efficiency.

## 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. 外場誘起の酸化物の相転移現象  
Phase transition mechanisms in oxides under external excitations
3. 酸化物—液体界面における光触媒能  
Photocatalytic activity at oxide – liquid interfaces
4. 極性結晶とマルチフェロイック物性  
Polar oxides and multiferroic coupling



# 金崎研究室

Kanasaki Group



金崎 順一  
KANASAKI, Jun'ichi  
客員准教授  
Visiting Associate Professor

固体電子系の励起により発生する種々の原子過程の機構を解明し、電子系・格子系の動力学を制御して新規の物質相や高次機能構造を創製する事、を目的としている。この為、光励起により発生する非平衡電子励起状態の性質とその後の緩和動力学の解明に向けた研究を推進している。

励起電子系の緩和動力学を解明する為には、電子密度分布をエネルギー・運動量空間において実時間追跡する事が本質的に重要である。ポンプ光により注入した励起電子を、遅延時間を制御したプローブ光により光電子として放出させ分光する時間分解2光子光電子分光法は、エネルギー・運動量の多次元空間における電子密度分布の時間発展に関する直接的知見を与える。本研究室では、この手法を用い、半導体結晶における励起電子系の緩和を支配する散乱素過程を解明している。客員期間中は励起電子の表面への散乱と緩和・消滅に関する実験を行い、半導体表面での光誘起現象の電子論的解明を目指す。

The aim of research is to establish advanced technologies controlling carrier and atomic dynamics by fully exploiting electronic-excitation effects. For this purpose, considerable attention is focused to the elucidation of underlying physics concerning the ultrafast dynamics of excited carriers, which play crucial roles in several excitation-induced reactions in solids.

In order to elucidate the elemental processes of the many-body interaction following the electronic excitation, it is essential to survey the dynamic in femtosecond time regime of photo-injected carriers with resolving their evolutions in energy and momentum spaces. Angle-resolved two-photon photoemission spectroscopy with time resolution of fs time scale (fs-AR2PPE) has a strong advantage for resolving the carrier dynamics directly in energy and momentum spaces. Using fs-AR2PPE technique, we determined transient electron distributions after photoexcitation and successfully elucidated ultrafast processes such as intervalley scattering, impact ionization, and electronic thermalization in several semiconductors. An important topic to be resolved is the bulk-to-surface transition and subsequent surface relaxation of excited carriers, providing an important key to greater understanding of photoinduced effects on semiconductor surfaces.

# 安研究室

An Group



安 東秀  
AN, Toshi  
客員准教授  
Visiting Associate Professor

磁性体中のスピンの磁気共鳴現象をナノスケールで励起・計測・イメージングする走査マイクロ波顕微鏡開発の研究を行っている。

バルク、薄膜、ナノ構造の磁性体中において、マイクロ波、スピントルク、熱等を用いて強磁性共鳴やスピン波を励起することができる。本研究室では、これらの磁気共鳴信号を局所に捉え、且つ、イメージングすることが可能な、ナノサイズに先鋭化された走査型のマイクロ波プローブ等の検出機構を開発している。このマイクロ波プローブを用いて磁気トンネル接合素子中へのスピン注入発振現象の酸素欠陥等に起因した劣化を可視化する研究等も可能となる。このようなギガヘルツ帯のスピン歳差運動のダイナミクスを捉える磁気共鳴計測局所プローブ法が確立されれば、強磁性共鳴、スピン波、電子スピン共鳴、核磁気共鳴信号をナノスケールで画像化することが可能となり、固体物性等の基礎科学を研究するツールとしてだけでなく、スピントロニクス、分子科学、生命科学等の広い分野への波及効果が期待できる。

Magnetic resonance phenomena excited in magnets and its nanoscale detection are the main subjects of our research.

In magnet of bulk, thin film, and nanostructure, collective motions of spins; ferromagnetic resonance and spin waves, are excited and modulated by microwave, spin torque, and heat. We are developing nanoscale scanning probes, such as scanning microwave microscope, which can excite, detect, and image magnetic resonance locally. This local probe can be applied to image spatial distribution of excited spin waves. It can also be applied to spintronic device system, for instance, spin-injected magnetic oscillation in tunneling magnetic junction to study the spatial variations of excitation probability of magnetic resonance depending on the quality of interface between insulating layer and magnetic layer where defects of oxide degrade the magnetic excitation probability. This method of imaging spin-precession signal can be applied not only ferromagnetic resonance phenomena in magnet but also electron spin resonance and nuclear spin resonance phenomena in other solid state materials, and in molecular and cell systems.