

# 極限コヒーレント光科学研究センター

## Laser and Synchrotron Research Center

極限コヒーレント光科学研究 (LASOR) センターでは、超精密レーザーや極短パルス、大強度レーザーなどの極限的なレーザーを開発すると共に、シンクロトロン放射光を用いた先端的軟 X 線ビームラインを開発している。テラヘルツから真空紫外線、軟 X 線までの広いエネルギー範囲の極限的な光源を用いて、超高分解能光電子分光、時間分解分光、スピン偏極分光、顕微分光、回折や光散乱、イメージング、発光分光などの新しい最先端分光計測を開発している。一方、これらの極限的な光源や分光手法を用いて半導体、強相関物質、有機物質、生体物質、表面、界面などの幅広い物性研究とその共同利用を行っている。LASOR センターは、先端的な光科学とそれを用いた物質科学との共同研究、共同利用を目指す総合的なセンターである。柏キャンパスにおいては、大規模なクリーンルームと除振床を設置した先端分光実験棟 (D 棟) 及び、真空紫外・軟 X 線レーザーの物性研究利用を主目的とした極限光科学棟 (E 棟) を有し、光源開発とそれを用いた物性研究を行っている。兵庫県にある SPring-8 においてはシンクロトロン放射光を用いたビームライン BL07LSU において軟 X 線分光の研究を行っている。

Laser and Synchrotron Research (LASOR) Center develops new lasers with extreme performance of ultra-precise, high intensity and ultra-short pulse lasers. The cutting edge soft X-ray beamline is also developed using synchrotron radiation. LASOR center is responsible for the advanced spectroscopy, such as ultra-high resolution photoemission, time-resolved, spin-resolved spectroscopy, diffraction, light scattering, imaging, microscopy and fluorescence spectroscopy, by new coherent light sources based on laser and synchrotron technology over a wide spectrum range from terahertz to X-ray. In LASOR center, a variety of materials sciences for semiconductors, strongly-correlated materials, molecular materials, surface and interfaces, and bio-materials are studied using advanced light sources and advanced spectroscopy. The aim of LASOR center is synthetic science for photon sciences and collaborations with materials science. Most of the research activities on the development of new lasers with an extreme performance and the application to material science are studied in specially designed buildings D and E with large clean rooms and the isolated floor in Kashiwa Campus. On the other hand, the experiments utilizing the synchrotron radiation are performed at beamline BL07LSU in SPring-8 (Hyogo).

教授 (センター長)	辛 埴	助 教	山本 達	技術専門職員	原沢 あゆみ	特任研究員	田久保 耕
Professor (Director)	SHIN, Shik	Research Associate	YAMAMOTO, Susumu	Technical Associate	HARASAWA, Ayumi	Project Researcher	TAKUBO, Kou
教授 *1	小森 文夫	助 教	石田 行章	技術専門職員	工藤 博文	特任研究員	張 鵬
Professor (Deputy Director)	KOMORI, Fumio	Research Associate	ISHIDA, Yukiaki	Technical Associate	KUDO, Hirofumi	Project Researcher	ZHANG, Peng
教授 (副センター長)*2	秋山 英文	助 教	矢治 光一郎	技術専門職員	橋本 光博	特任研究員	崔 藝濤
Associate Professor	AKIYAMA, Hidefumi	Research Associate	YAJI, Koichiro	Technical Associate	HASHIMOTO, Mitsuhiro	Project Researcher	CUI, Yitao
准教授	松田 巖	助 教	石井 順久	技術専門職員	伊藤 功	特任研究員	唐 佳藝
Associate Professor	MATSUDA, Iwao	Research Associate	ISHII, Nobuhisa	Technical Associate	ITO, Isao	Project Researcher	TANG, Jiayi
准教授 (副センター長)	小林 洋平	助 教	宮脇 淳	研究支援推進員	藤澤 正美	特任研究員	パレイユ セドリック
Associate Professor	KOBAYASHI, Yohei	Research Associate	MIYAWAKI, Jun	Technical Staff	FUJISAWA, Masami	Project Researcher	BAREILLE, Cedric
准教授	板谷 治郎	助 教	谷 峻太郎	特任研究員	赤田 圭史	特任研究員	水野 智也
Associate Professor	ITATANI, Jiro	Research Associate	TANI, Shuntaro	Project Researcher	AKADA, Keishi	Project Researcher	MIZUNO, Tomoya
准教授	原田 慈久	助 教	平田 靖透	特任研究員	伊藤 紳二	特任研究員	山添 康介
Associate Professor	HARADA, Yoshihisa	Research Associate	HIRATA, Yasuyuki	Project Researcher	ITO, Shinji	Project Researcher	YAMAZOE, Kosuke
准教授	和達 大樹	助 教 *2	挾間 優治	特任研究員	尾嶋 正治	特任研究員	山本 真吾
Associate Professor	WADATI, Hiroki	Research Associate	HAZAMA, Yuji	Project Researcher	OSHIMA, Masaharu	Project Researcher	YAMAMOTO, Shingo
准教授	近藤 猛	助 教	黒田 健太	特任研究員	太田 由一	特任研究員	卢 发铭
Associate Professor	KONDO, Takeshi	Research Associate	KURODA, Kenta	Project Researcher	OTA, Yuuichi	Project Researcher	LU, Faming
准教授	松永 隆佑	特任助教	谷内 敏之	特任研究員	乙津 聡夫	特任研究員 *2	伊藤 隆
Associate Professor	MATSUNAGA, Ryusuke	Project Research Associate	TANIUCHI, Toshiyuki	Project Researcher	OTSU, Toshio	Project Researcher	ITO, Takashi
特任准教授	岡崎 浩三	技術専門員	福島 昭子	特任研究員	小菅 淳	特任研究員 *2	金 昌秀
Project Associate Professor	OKAZAKI, Kozo	Technical Associate	FUKUSHIMA, Akiko	Project Researcher	KOSUGE, Atsushi	Project Researcher	KIM, Changsu
教授 (客員)	吉田 鉄平	技術専門職員	金井 輝人	特任研究員	趙 智剛	特任研究員 *2	朱 琳
Visiting Professor	YODSHIDA, Teppei	Technical Associate	KANAI, Teruto	Project Researcher	ZHAO, Zhigang	Project Researcher	ZHU, Lin
教授 (外国人客員)	ダンジェロ マリー デルフィヌ	技術専門職員	澁谷 孝	特任研究員	鈴木 剛	特任研究員 *2	陶 仁春
Visiting Professor	D'ANGELO, Marie Delphine	Technical Associate	SHIBUYA, Takashi	Project Researcher	SUZUKI, Takeshi	Project Researcher	TAO, Renchun
						特任研究員 *2	樋山 みやび
						Project Researcher	HIYAMA, Miyabi

\*1 所内兼務。本務はナノスケール物性研究部門。/concurrent with Division of Nanoscale Science

\*2 所内兼務。本務は機能物性研究グループ。 concurrent with Functional Materials Group

# 辛研究室

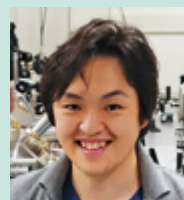
Shin Group



辛 埴  
SHIN, Shik  
教授  
Professor



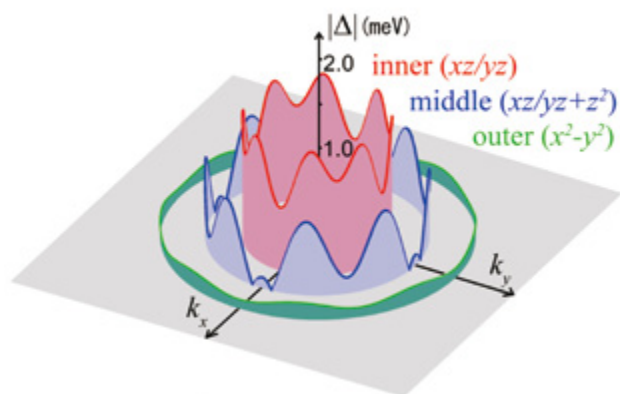
石田 行章  
ISHIDA, Yukiaki  
助教  
Research Associate



谷内 敏之  
TANIUCHI, Toshiyuki  
特任助教  
Project Research Associate

紫外光から軟 X 線レーザーの特長を利用した光電子分光を開発しながら物性研究を行うことに力を入れている。光電子分光は固体電子が持つエネルギー、運動量、時間、場所、スピンの全ての情報を知ることができる実験方法である。

レーザーの持つ単色性を利用して新たに開発されたレーザー光電子分光は 70  $\mu\text{eV}$  のエネルギー分解能を有し、世界最高である。超伝導体や強相関物質のギャップや擬ギャップ等を観測し、輸送現象に直接関係した電子状態を運動量空間で知ることができる。また、固体中のフォノンやマグノン等の固体中の素励起との結合を知ることができる。一方、レーザーのパルスの時間特性を利用してフェムト秒領域の時間分解光電子分光法を行っている。超伝導体、遷移金属化合物、有機物、半導体などの光誘起現象を研究している。また、レーザーの持つ大強度や微小スポットサイズを利用してナノ構造の電子状態を知る顕微光電子分光を行っている。STM にせまるようなナノメートル領域の空間分解能を目指している。

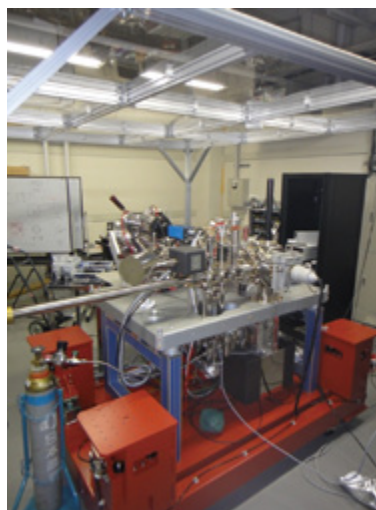


超高分解能レーザー光電子分光法により解明された鉄系超伝導体  $\text{KFe}_2\text{As}_2$  の異方的な超伝導ギャップ構造。超伝導転移温度は 3.4 K である。(Okazaki *et al.*, Science (2012))

Anisotropic superconducting gap structure of the iron-pnictide superconductor  $\text{KFe}_2\text{As}_2$  revealed by ultra-high-resolution laser photoemission spectroscopy. The critical temperature is 3.4 K.

We are investigating the properties of materials through photoemission spectroscopy implemented by lasers in the vacuum-ultraviolet to soft-x-ray region. Photoelectrons carry the complete information of the electrons in solids, namely, their energy, momentum, time, space, and spin.

The photoemission spectrometer utilizing the monochromatic laser achieves the energy resolution of 70  $\mu\text{eV}$ , which is the highest in the world. This enables us to directly observe the superconducting gaps and pseudo-gaps of novel superconductors and strongly-correlated materials, as well as the momentum-resolved electronic structures that are closely related to the transport properties of solids. We can also reveal the electron-phonon or -magnon interactions in solids. We are also performing time-resolved photoemission spectroscopy in order to know the photo-induced phenomena in superconductors, transition metal compounds, organic materials, and semiconductors. Furthermore, we are now developing photoelectron microscope in order to know the nano electronic structure in solids. Our aim is to have the nanometer size microscopy of electronic states.



2.6 ナノメートルの超高空間分解能を持つレーザー光電子顕微鏡 (レーザー PEEM)

Laser Photoelectron microscopy (Laser PEEM) that has an ultrahigh spatial resolution of 2.6 nm.

## 研究テーマ Research Subjects

1. 軟 X 線レーザー極超高分解能光電子分光による超伝導体、低次元物質、新物質等の電子状態の研究  
Ultra-high resolution laser-photoemission study on the superconductors and the low dimensional materials
2. 軟 X 線レーザー時間分解光電子分光による光誘起現象の研究  
Time-resolved laser-photoemission study on the photo-induced phenomena
3. 軟 X 線レーザー光電子顕微鏡によるナノ構造の電子状態の研究  
Laser photoelectron microscopy on the electronic states of nanomaterials

極限コヒーレント光科学研究センター

Laser and Synchrotron Research Center

[http://www.issp.u-tokyo.ac.jp/maincontents/organization/labs/i\\_matsuda\\_group.html](http://www.issp.u-tokyo.ac.jp/maincontents/organization/labs/i_matsuda_group.html)

# 松田巖研究室

I. Matsuda Group



松田 巖  
MATSUDA, Iwao  
准教授  
Associate Professor



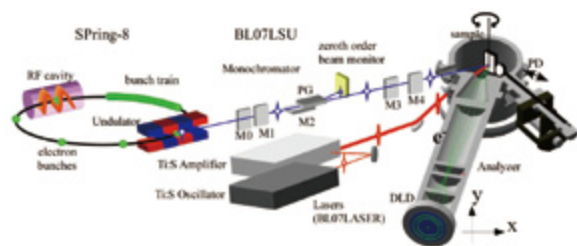
山本 達  
YAMAMOTO, Susumu  
助教  
Research Associate

高輝度放射光、X線自由電子レーザー、高次高調波レーザーを用いた真空紫外線～軟X線分光・散乱実験の技術開発を行い、単原子層及び表面／界面系を中心に物性研究を行っている。

放射光施設 SPring-8 軟X線ビームライン BL07LSU にて分割クロスアンジュレータの調整を行うと共に、その偏光スイッチング特性を活かした新しい磁気光学実験法の開発を行っている。X線自由電子レーザーと高次高調波レーザーによる共鳴磁気光学効果の時間分解測定を行い、磁性超薄膜及び界面層における超高速スピンドYNAMICS研究を実施している。

SPring-8 BL07LSU ではレーザーシステムも整備しており、光電子分光やX線吸収分光の時間分解実験を共同利用として実施している。触媒反応や起電力発生などのテーマで表面・界面系におけるキャリア及び分子ダイナミクス研究が行われている。さらに新しい機能性表面試料の研究も手がけ、ポロフェンの電子構造なども調べている。

光源それぞれの特性を利用してフェムト秒からミリ秒まで各時間スケールでの動的変化をリアルタイムで追跡してその詳細を明らかにすると共に、時系列情報をつなぎ合わせて各動的現象の全貌も理解する研究を推進している。



高輝度軟X線ビームライン SPring-8 BL07LSU における放射光と超短パルスレーザー (BL07LASER) を組み合わせた時間分解光電子分光実験システムの様子。

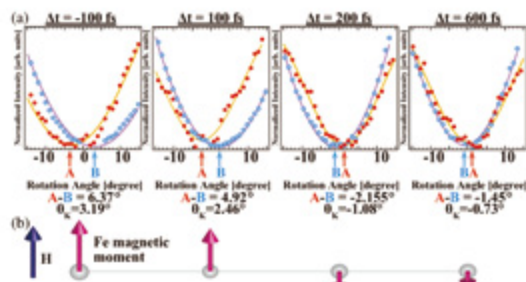
Overview of the time-resolved photoemission system at high-brilliant soft X-ray beamline, SPring-8 BL07LSU. Synchrotron radiation pulses, generated at an undulator, pass through a monochromator that is composed of mirrors (M) and a plane-grating (PG). A Ti:Sapphire laser system (BL07LASER) is installed at the beamline.

We develop experimental techniques using vacuum ultraviolet ~ soft X-ray, generated by high brilliance synchrotron radiation, X-ray free electron laser (XFEL), and high-harmonic generation (HHG) laser, to reveal physical properties of single atomic layers and surface/interface systems.

At SPring-8 BL07LSU, we operate the segmented cross undulator and develop the novel magneto-optical experimental technique using its function of the fast polarization switching. With XFEL and a HHG laser, ultrafast spin dynamics of magnetic ultrathin films and interface layers are investigated by time-resolved measurements of the resonant magneto-optical Kerr effect.

At the time-resolved spectroscopy station in SPring-8 BL07LSU, time-resolved measurements of photoemission and X-ray absorption spectroscopy were made with laser and synchrotron radiation. Through the joint-researches of catalysis and photovoltaics, dynamics of carriers and molecules at the surface/interface are studied. We also investigate functionalities in novel surface materials such as borophene.

With the temporal information collected by individual light sources at each time scale, ranging from femtoseconds to milliseconds, we promote understanding of the whole dynamic picture by combining the sequential information.



フェリ磁性 GdFeCo 合金の時間分解共鳴磁気光学カー効果の実験の結果。(a) 軟X線 FEL ( $h\nu = 53$  eV) でのエリプソメトリ測定の実験データ (○) と三角関数でのフィッティング (実線)。赤と青のデータは互いに逆の磁場に対応している。(b) 実験結果から得られた外場 H に対する Fe の磁気モーメントの時間変化。フェムト秒の時間スケールでスピントリガが起きていることが分かる。

Time-resolved measurement of the resonant magneto-optical Kerr effect of the ferrimagnetic metallic GdFeCo alloy. (a) Experimental results (circles) of the intensity variation with rotation angle (ellipsometry) taken at  $h\nu = 53$  eV for soft X-ray FEL at each delay time shown in each figure with fitting by cosine curve (solid lines). Red and blue colored data were taken at the opposite directions of magnetic field. (b) A schematic diagram of the magnetization reversal dynamics of the Fe magnetic moment with respect to an external field H. The length of the arrows is scaled to the magnitude of the Kerr rotation angle at each delay time shown in (a). One can recognize reversal of the Fe spin in the femtosecond-time scale.

## 研究テーマ Research Subjects

1. 時間分解軟X線分光実験の開発と表面ダイナミクスの研究  
Developments of time-resolved soft X-ray spectroscopy and researches on surface dynamics
2. 光電子分光法による金属および半導体表面上単原子層の電子状態研究  
Electronic structures of monatomic layers on metal and semiconductor surfaces studied by means of photoelectron spectroscopy
3. 超短パルス軟X線を用いた時間分解実験の開発と超高速スピンドYNAMICSの研究  
Development of time-resolved experiments using ultra-short soft X-ray pulses and researches on ultrafast spin dynamics

極限コヒーレント光科学研究センター

Laser and Synchrotron Research Center

[http://www.issp.u-tokyo.ac.jp/maincontents/organization/labs/kobayashi\\_group.html](http://www.issp.u-tokyo.ac.jp/maincontents/organization/labs/kobayashi_group.html)

# 小林研究室

Kobayashi Group



小林 洋平  
KOBAYASHI, Yohei  
准教授  
Associate Professor



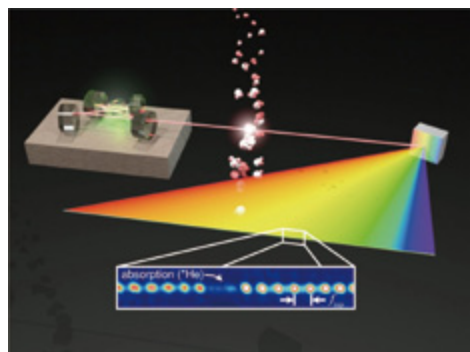
谷 峻太郎  
TANI, Shuntaro  
助教  
Research Associate

最先端レーザーの研究開発とそれを用いた精密・高強度光科学の研究を行っている。特に超短パルスレーザーと超狭帯域レーザーとの融合領域である光周波数コムおよびその応用手法の開発と、ハイパワーレーザーを用いたレーザー加工の学理の構築を中心課題としている。レーザー光源開発は Yb ドープセラミックやファイバーの技術を基に、超高繰り返し、超高平均パワーのレーザーシステムを近赤外、中赤外、紫外、真空紫外の波長領域において開発している。超高繰り返しの方向では縦モード一本ずつを分離し制御できるフェムト秒レーザーを実現し、超高平均パワーの方向ではフェムト秒レーザーをベースとした高輝度コヒーレント真空紫外光を発生させている。光源応用として光電子分光、光原子時計、天文、医療に関する研究を行っている。またレーザー加工の素過程となる光と物質の相互作用において、フェムト秒からミリ秒におよぶマルチスケールな現象が如何に繋がっているのかについて研究し、レーザー加工の学理構築に取り組んでいる。なぜものは切れるのか?を知りたい。

We are developing advanced laser technologies and their applications. Both ultimate technologies of ultrashort pulse generations and ultra narrow-band laser generations were mixed, the optical frequency comb then was born. It opened up a new research area such as carrier-envelope-phase dependent phenomena, attosecond physics, and precision spectroscopy by using a femto-second light source. It also realized the high-repetition and high-intensity physics. It could create wide field of applications in the physics, metrology, medical science, and astronomy.

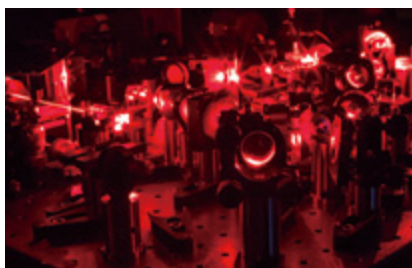
We are developing an Yb-fiber laser-base optical frequency comb, XUV frequency comb, and high-power fiber chirped pulse amplifier system for these applications. The high-repetition-rate laser system will be applied for a calibration of a spectrograph in an observatory or an arbitrary waveform generation in an optical field, or a breath diagnosis.

In addition, we are studying the fundamental processes of laser processing and bridging the gap between them and industrial applications.

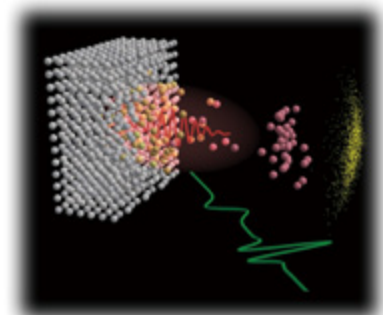


光周波数コムによる原子分光。自作超高エネルギー分解分光器と超高繰り返しモード同期レーザーとの組み合わせにより縦モード1本ずつが分離された分光が可能となった。図はメタステーブルHeの縦モード分解分光の例。

Optical frequency comb based ultra-high precision spectroscopy. The combination of ultra-high repetition-rate laser and ultra-high resolution spectrograph makes it possible to resolve each comb tooth to detect the meta-stable He atom.



オフセットフリー光周波数コム  
Offset-free optical frequency comb.



レーザー加工過程のサブピコ秒時間分解測定

Measurement of laser processing dynamics with sub-picosecond time resolution.

## 研究テーマ Research Subjects

1. 超短パルスレーザーシステムの研究開発及びレーザーの超精密制御  
Development and precise control of ultrashort pulse laser systems
2. 高繰り返し-高強度物理  
High-rep rate, high-field physics
3. 光周波数コムの天文・医療・標準応用  
Astronomical, medical, and metrological application of the optical frequency comb
4. レーザー加工の学理  
Fundamental understanding on laser processing

極限コヒーレント光科学研究センター

Laser and Synchrotron Research Center

[http://www.issp.u-tokyo.ac.jp/maincontents/organization/labs/itatani\\_group.html](http://www.issp.u-tokyo.ac.jp/maincontents/organization/labs/itatani_group.html)

# 板谷研究室

Itatani Group



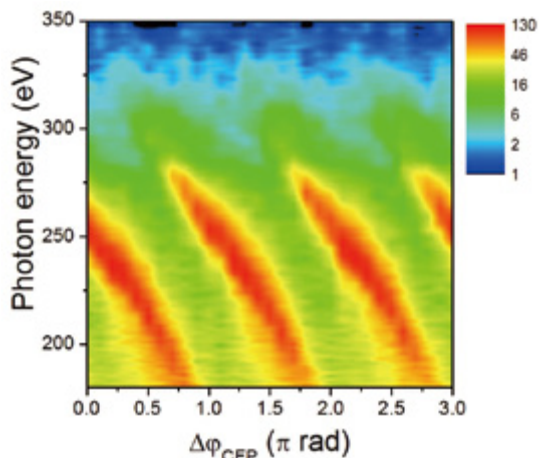
板谷 治郎  
ITATANI, Jiro  
准教授  
Associate Professor



石井 順久  
ISHII, Nobuhisa  
助教  
Research Associate

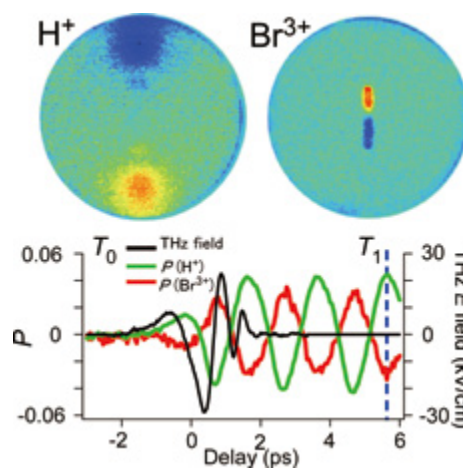
本研究室では、高強度極短パルスレーザーの開発と、それを用いたアト秒からフェムト秒領域の超高速分光に関する研究を行っている。光源開発に関しては、光電場の数周期程度の高強度極短パルス光の発生と電場波形の制御、中赤外からテラヘルツ領域での高強度光電場の発生に関する研究を行っている。また、高次高調波によるアト秒軟 X 線パルス発生に関する研究も進めている。分光応用に関しては、高強度光電場やアト秒軟 X 線パルスを用いた新規分光手法の開拓や、高強度光電場を用いた原子・分子における超高速現象の観測と量子制御、固体のフェムト秒軟 X 線分光に関する研究を行っている。位相制御された高強度超短パルスレーザーとその波長変換を基盤技術とすることによって軟 X 線からテラヘルツにわたる広い周波数領域においてタイミング同期した光パルスの発生が可能であるため、物質の励起状態における動的過程を様々な自由度を通して実時間観測し、さらには光で制御することを目指している。

We work on the development of intense ultrashort-pulse lasers and their applications to ultrafast spectroscopy on femto- to attosecond time scales. As for the light-source development, we work on the methodology to produce waveform-controlled intense optical pulses and to extend their spectral range towards mid-infrared and THz regions. For the spectroscopic applications, we work on novel methods using strong optical fields and attosecond soft-X-ray pulses aiming for dynamic molecular imaging with attosecond and Angstrom precisions, and also on femtosecond soft-X-ray spectroscopy of solids. By using phase-controlled intense ultrafast light sources and frequency conversion, we expect to produce optical pulses in extremely wide spectral ranges with precise synchronization. We aim to use such ultrabroadband coherent light for observing and controlling the dynamics of non-equilibrium states of matters through various freedoms.



高強度赤外レーザーで発生した高次高調波の「水の窓」領域の軟 X 線スペクトルの CEP 依存性

CEP dependences of soft-X-ray high harmonic spectra in the water window produced by an intense IR laser system.



高強度テラヘルツパルスによって誘起された HBr 分子内の回転波束と、観測された分子配向。

Time evolution of rotational wavepackets in HBr molecules (lower panel) and achieved molecular orientation (above panels).

## 研究テーマ Research Subjects

1. 高強度超短パルスレーザーの開発  
Development of intense ultrashort-pulse lasers
2. アト秒物理学  
Attosecond physics
3. 高強度光電場を用いた超高速現象の観測と量子制御  
Observation and coherent control of ultrafast phenomena using strong optical fields
4. 固体の超高速軟 X 線分光  
Soft-X-ray ultrafast spectroscopy of solids

極限コヒーレント光科学研究センター

Laser and Synchrotron Research Center

[http://www.issp.u-tokyo.ac.jp/maincontents/organization/labs/harada\\_group.html](http://www.issp.u-tokyo.ac.jp/maincontents/organization/labs/harada_group.html)

# 原田研究室

Harada Group

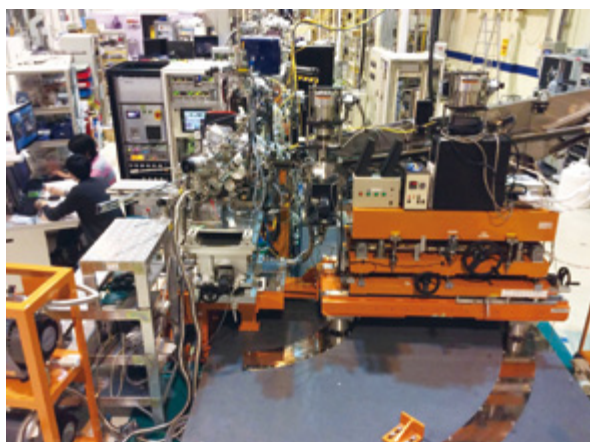


原田 慈久  
HARADA, Yoshihisa  
准教授  
Associate Professor



宮脇 淳  
MIYAWAKI, Jun  
助教  
Research Associate

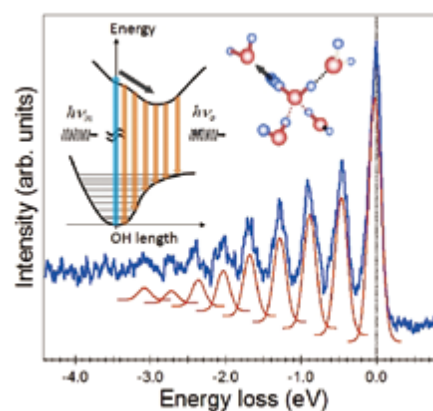
当研究室では、世界最高輝度のX線源である SPring-8 において‘軟X線’と呼ばれる光を用いて新しい分光法を開拓し、物質の電氣的、磁氣的性質、光学応答を司る電子状態をその成因に遡って調べる研究を行っている。特に光散乱の一種である軟X線発光分光の将来性に着目し、モット絶縁体、新規高温超電導体等の強相関物質における素励起（結晶場励起、スピン励起、マグノン励起、電荷密度波励起、軌道波励起など）の直接観測とその成因の研究、水溶性液体、固液界面の電子状態とマイクロ不均一性の観測、電池触媒の表面反応解析、光触媒反応解析のためのその場分析装置の開発、金属タンパク質の電子状態解析など、軟X線発光分光を適用しうる限りの極めて幅広い物質群を研究対象としている。また基礎光学研究として軟X線発光分光の超高エネルギー分解能化と時間分解分光に向けたR&Dを行っている。



当研究室が SPring-8 の東京大学放射光アウトステーションビームライン BL07LSU で独自に開発した 50 meV の高エネルギー分解能を持つ角度分解軟X線発光分光装置。

High energy resolution soft X-ray angle resolved emission spectrometer constructed for University of Tokyo outstation beamline BL07LSU in SPring-8.

We explore the origin of the electronic structure of materials responsible for their electronic, magnetic and optical property using intense and energy tunable X-ray source: SPring-8, one of the most brilliant synchrotron facilities in the world. We have developed novel spectroscopies for material science in ‘soft’ X-ray region. We are leading the world’s soft X-ray emission spectroscopy, a kind of light scattering promising for electronic structure analyses of liquids and operando spectroscopy of a variety of catalysts. Our topics include study on elementary excitations (crystal field excitation, spinon, magnon, charge density wave, orbiton etc.) in strongly correlated materials like Mott insulators and novel high Tc superconductors, electronic structure analysis of aqueous solutions, interaction at solid-liquid interfaces, surface reaction of fuel cell catalysts, electronic structure analysis of reaction center in metalloproteins, electrochemical and photocatalytic reactions. We also explore basic study on ultrahigh energy resolution optics for soft X-ray emission and time-resolved spectroscopy.



高分解能軟X線発光分光で捉えた純水(H<sub>2</sub>O)の多重振動モード。水素結合で形成されたポテンシャルを反映した高次の振動エネルギー分布がOHの乖離するところまで全て観測されている。この手法を用いて液体の水の中にマイクロ不均一性が存在することが裏付けられた。

High order vibrational excitations of H<sub>2</sub>O observed by the high energy resolution soft X-ray emission spectrometer. The energy separation reflects the potential profile of hydrogen bonding. Using soft X-ray emission we confirmed the presence of a microheterogeneity in pure liquid water.

## 研究テーマ Research Subjects

1. 水溶性液体の電子状態とマイクロ不均一性、固液界面の相互作用に関する研究  
Electronic structure analysis of aqueous solutions to study microheterogeneity and interaction at solid-liquid interfaces
2. 燃料電池触媒の表面反応解析、電気化学反応、光触媒反応解析、金属タンパク質の機能解析のためのその場分析手法の開発  
Development of in situ soft X-ray spectroscopy for surface reaction of fuel cell catalysts, electrochemical reaction, photocatalytic reaction and functionality of metalloproteins
3. モット絶縁体、新規高温超電導体等の強相関物質における素励起（結晶場励起、スピン励起、マグノン励起、電荷密度波励起、軌道波励起など）の直接観測とその成因の研究  
Study on the origin and observation of elementary excitations (crystal field excitation, spinon, magnon, charge density wave, orbiton etc.) in strongly correlated materials like Mott insulators and novel high temperature superconductors.
4. 軟X線発光分光の超高エネルギー分解能化と時間分解分光のための基礎光学研究  
Basic study on ultrahigh energy resolution optics for soft X-ray emission and time-resolved spectroscopy

極限コヒーレント光科学研究センター

Laser and Synchrotron Research Center

[http://www.issp.u-tokyo.ac.jp/maincontents/organization/labs/wadati\\_group.html](http://www.issp.u-tokyo.ac.jp/maincontents/organization/labs/wadati_group.html)

# 和達研究室

Wadati Group



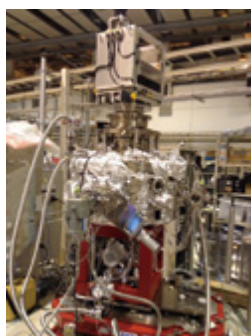
和達 大樹  
WADATI, Hiroki  
准教授  
Associate Professor



平田 靖透  
HIRATA, Yasuyuki  
助教  
Research Associate

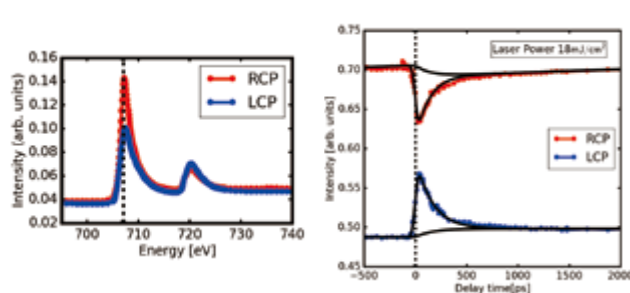
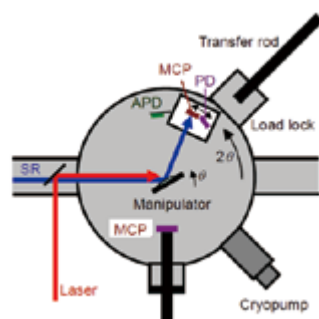
当研究室では SPring-8 などの放射光 X 線を用い、遷移金属化合物などの電子相関の強い物質に対し、その電子状態、秩序状態、ダイナミクスなどを調べる研究を行っている。主に用いている実験手法は共鳴軟 X 線回折であり、これは物質の構成元素の吸収端のエネルギーを持つ X 線による X 線回折である。薄膜やナノ構造など微小試料でも磁気構造が決定できるなど、これまでの回折実験の常識を大きく打ち破ることができる。この手法により、強相関電子系で見られる高温超伝導や巨大磁気抵抗効果などを引き起こす物質内部の秩序状態の直接観測する。さらには、放射光 X 線や SACLA などの X 線自由電子レーザーの時間構造を用い、ピコ秒からフェムト秒領域での動的プロセスを実時間で観測する。以上によって物性発現のメカニズムを解明し、強相関電子系における新たな物性や現象を模索する。

We investigate the electronic structures, ordered states, and dynamics of strongly correlated materials, such as transition-metal compounds, by using x-rays from synchrotron radiation (e.g. SPring-8). Our main experimental technique is resonant soft x-ray diffraction, that is, x-ray diffraction performed by tuning the x-ray energy at the absorption edge of the constituent element. One can determine detailed magnetic structures of extremely small samples including thin films and nanostructures. By this technique we study ordered states in materials which show anomalous behaviors such as superconductivity and giant magnetoresistance. We will further extend this technique to time-resolved measurements by using time structures of synchrotron x-rays and x-ray free electron laser (e.g. SACLA), and directly measure the dynamical processes. These studies will reveal the mechanisms of anomalous behaviors and contribute to search for novel properties and phenomena in strongly correlated electron systems.



SPring-8 BL07LSU における共鳴軟 X 線回折装置。

Resonant soft x-ray diffraction instruments installed at BL07LSU, SPring-8.



強磁性薄膜の時間分解測定。レーザー照射による消磁と回復の過程を示す。

Time-resolved measurements of ferromagnetic thin films. This shows the demagnetization and recovery processes under laser illumination.

## 研究テーマ Research Subjects

1. 共鳴軟 X 線回折による強相関電子系の秩序状態の研究  
Resonant soft x-ray diffraction study of ordered states in strongly correlated electron systems
2. 時間分解共鳴軟 X 線回折の開発  
Development of time-resolved resonant soft x-ray diffraction systems
3. 軟 X 線を用いた新しい分光手法の開発  
Development of novel spectroscopic techniques by using soft x-rays

# 近藤研究室

Kondo Group



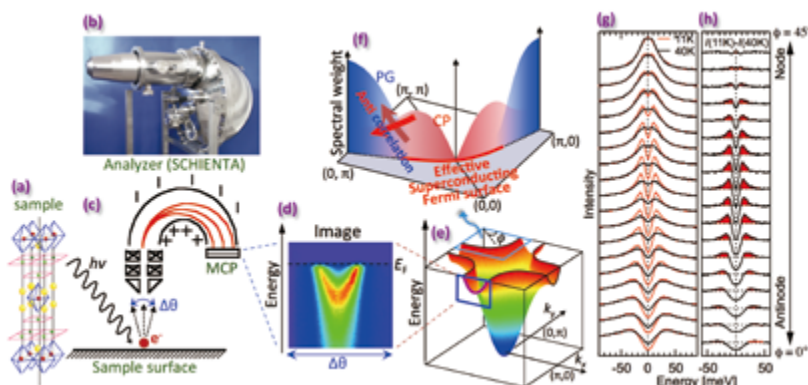
近藤 猛  
KONDO, Takeshi  
准教授  
Associate Professor



黒田 健太  
KURODA, Kenta  
助教  
Research Associate

固体中の電子状態を逆空間で描くバンド構造は、物質のあらゆる電子物性を理解する上での基礎を与える。角度分解光電子分光は、光を物質に照射して飛び出す光電子を角度及びエネルギーの関数としてイメージングすることでバンド構造を可視化する強力な実験手法である。この技術をベースとして、バンドが持つスピン構造をスピン分解によって選り分け、さらには、パルス光で瞬間的に非平衡状態へと乱された電子系が再び冷えて秩序化するダイナミクスをフェムト秒スケールで観測（時間分解）することで、多彩な電子物性がバンド構造を通して見えてくる。当研究室では、このような卓越した光電子分光技術を駆使して、非従来型の（高温）超伝導体、遍歴と局在の狭間で織りなされる重い電子系や電子相関系物質、強いスピン軌道相互作用に起因して発現するトポロジカル量子相、及び固体表面や薄膜で制御する量子井戸構造などの電気磁気物性を、直接観察で得られるバンド構造を舞台に研究する。さらには、ヘリウム3クライオスタットや極限レーザー光源を用いて、最低到達温度及びエネルギー分解能で共に世界最高性能となる角度分解光電子分光装置を開発し、フェルミ準位極近傍で生じる微細な電子構造（エネルギーギャップや素励起カップリング構造）を解明する。

The momentum-resolved band structure provides fundamental information to understand the electronic properties of materials. The angle-resolved photoemission spectroscopy (ARPES) is a powerful technique to visualize the band structure by mapping the intensities of photoelectrons as a function of angle and energy. With the spin-resolved technique, we can also identify the spin-polarized character of the band. In addition, the time-resolved ARPES realized with a pump-probe technique can track the reordering process of electron system from its nonequilibrium state. In our laboratory, we utilize these various ARPES techniques and study the following phenomena: nonconventional superconductors, heavy fermions, strongly correlated systems, topological quantum phases, and quantum well states. Furthermore, we develop a new ARPES machine capable of achieving both the lowest measurement temperature and the highest energy resolution in the world by innovating a  $^3\text{He}$  cryostat and a laser source. The state-of-art equipment will enable us to identify even a subtle electronic feature close to the Fermi level, such as an energy gap and a mode-coupled dispersion, which is typically tied to exotic behaviors of conduction electrons.



(a) 銅酸化物高温超伝導体  $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CuO}_{6+d}$  の結晶構造。(b) 光電子アナライザー。(c) 角度分解光電子分光実験の模式図。(d) バンド分散のスナップショット。(e) バンド構造の全体図。(f) フェルミ面周りで描く超伝導と擬ギャップの競合関係。(g) 超伝導転移温度 ( $T_c$ ) より高温（黒線）と低温（赤線）で測定したフェルミ面周りのスペクトル。(h) (g) で示すスペクトルの  $T_c$  上下での差分。超伝導成分が赤で塗られており、(f) で模式的に示す赤の領域と対応する。

(a) Crystal structure of  $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CuO}_{6+d}$  high- $T_c$  superconductor. (b) ARPES analyzer. (c) Diagram of ARPES experiment. (d) Snapshot of dispersion image. (e) Whole band structure. (f) Competition between superconducting gap and pseudogap. (g) Spectra around Fermi surface below (red) and above (black) superconducting transition temperature ( $T_c = 35$  K). (h) Difference between the curves in (g). Coherent spectral weight is painted with a red color, which is corresponding to the red region represented in (f).

## 研究テーマ Research Subjects

1. 極限レーザーを励起光源とする超高分解能角度分解光電子分光装置の開発  
Development of a laser-excited ARPES system with ultra-high energy resolution
2. 角度分解・スピン分解・時間分解光電子分光で見る超伝導やトポロジカル量子相  
Superconductivity and topological quantum phase investigated by angle-, spin-, and time-resolved photoemission spectroscopy
3. 放射光を利用した光電子分光で研究する強相関電子系物理  
Strongly correlated physics studied by photoemission with synchrotron radiation



極限コヒーレント光科学研究センター

Laser and Synchrotron Research Center

[http://www.issp.u-tokyo.ac.jp/maincontents/organization/labs/matsunaga\\_group.html](http://www.issp.u-tokyo.ac.jp/maincontents/organization/labs/matsunaga_group.html)

# 松永研究室

Matsunaga Group



松永 隆佑  
MATSUNAGA, Ryusuke  
准教授  
Associate Professor

テラヘルツから赤外・可視・紫外領域にわたるコヒーレント光源を用いて、物質の光応答と、光電場によって物質中に誘起される非平衡状態の性質を調べる。特にテラヘルツ周波数帯は光子エネルギーで数 meV 程度に相当し、物性物理学において重要なフェルミ面近傍の電磁気応答を通して物質中の素励起を探る有効な手法となっている。さらに近年開発された極めて高い電場尖頭値を持つ高強度テラヘルツ波を駆使することで、余剰エネルギーを与えることなく低エネルギーの素励起を共鳴的に強く励起する、あるいは物質中の素励起よりもさらにエネルギーの低い光電場による非共鳴的励起によってコヒーレントな相互作用を調べることが可能になる。テラヘルツ発生及び検出技術と非線形分光測定手法を開発するとともに、超伝導や反強磁性のような多体系の秩序に現れる集団励起、非線形応答や非平衡状態のみ現れる物質の新たな状態を調べ、その機能性を明らかにする。

We investigate light-matter interactions and light-induced nonequilibrium phenomena in materials by utilizing terahertz wave, infrared, visible, and ultraviolet coherent light sources based on ultrafast pulsed laser technology. Especially terahertz spectroscopy can unveil low-energy responses of materials on the order of millielectronvolts which include essential information for dynamical motions of electron, phonon, or spin degrees of freedom in condensed matter physics. Recently-developed intense terahertz pulse generation technique has also opened a new pathway toward optical control of materials by strong resonant or off-resonant excitation. In addition to the development of terahertz generation and detection technique and novel nonlinear spectroscopy scheme, we will contribute on the study for cooperative behaviors in many-body systems like superconductivity or antiferromagnetism and seek hidden transient phases of matters in nonequilibrium system to reveal the functionality of materials.

## 研究テーマ Research Subjects

1. 光電場で強励起された非平衡系の超高速ダイナミクスの研究  
Nonequilibrium dynamics of materials induced by strong light field
2. テラヘルツ発生 / 検出技術開発、多次元時間分解テラヘルツ測定系の開拓  
Development of terahertz generation, detection, and multi-dimensional time-resolved spectroscopy
3. 超伝導に代表される多体系の集団励起・協同現象の解明  
Study of collective excitations and cooperative phenomena in many-body system

# 岡崎研究室

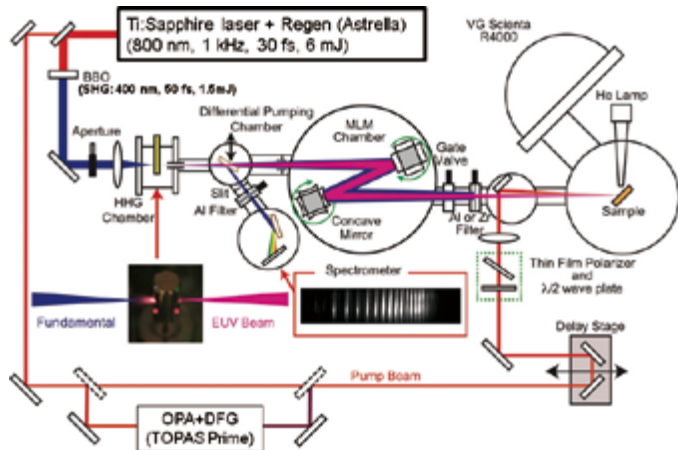
Okazaki Group



岡崎 浩三  
OKAZAKI, Kozo  
特任准教授  
Project Associate Professor

角度分解光電子分光は物質中の電子の運動量とエネルギーの分散関係(バンド構造)を直接観測できる強力な実験手法であるが、フェムト秒レーザーをポンプ光、その高次高調波をプローブ光として用いることで、非平衡状態におけるバンド構造の超高速の過渡特性も観測できるようになる。本研究室では、レーザー開発の研究室と共同で超短パルス高次高調波レーザーを用いた時間分解光電子分光装置の開発・改良を進め、ポンプ・プローブ時間分解光電子分光によって、光励起状態からの電子の緩和過程の直接観測、光誘起相転移に伴う電子状態の変化の直接観測等を行い、励起状態からの電子の緩和機構の解明や光誘起超伝導の直接観測による実証を目指している。また、エネルギー分解能 70  $\mu\text{eV}$ 、最低測定温度 1 K という世界最高性能を有するレーザー角度分解光電子分光装置を用いて、非従来型超伝導体の電子構造、超伝導ギャップ構造を直接観測することで非従来型超伝導の機構解明を目指している。

Angle-resolved photoemission spectroscopy is a very powerful experimental technique that can directly observe a dispersion relation between momentum and energy of the electrons in solid-state materials, whereas by utilizing a femto-second laser as pumping light and its high harmonic generation (HHG) as probing light, we can observe ultrafast transient properties of the band structures in a non-equilibrium state. In our group, we are developing and improving a time-resolved photoemission apparatus that utilizes high harmonic generation of an ultrashort-pulse laser in collaboration with laser development groups, and aiming for understanding the mechanisms of electron relaxations from photo-excited states and demonstration of light-induced superconductivity by direct observations of transient electronic states using pump-probe type time-resolved photoemission spectroscopy (TrPES). In addition, we are aiming for understanding the mechanisms of unconventional superconductivity by direct observations of the electronic structures and superconducting-gap structures of unconventional superconductors with a laser-based angle-resolved photoemission apparatus with a world-record performance that achieves a maximum energy resolution of 70  $\mu\text{eV}$  and lowest cooling temperature of 1 K.

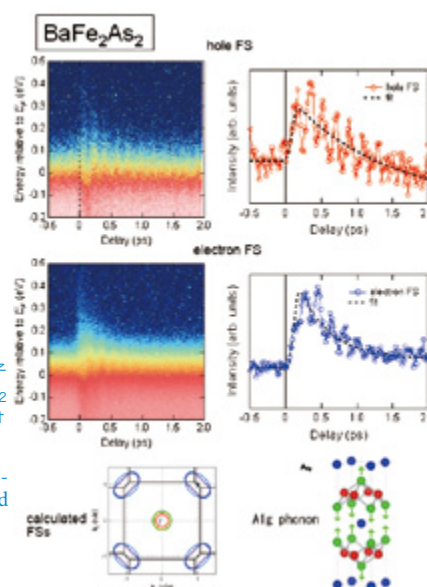


高次高調波レーザーを用いた時間分解光電子分光装置の概略図

Schematic diagram of a time-resolved photoemission apparatus utilizing a femtosecond laser and its high harmonic generation.

高次高調波時間分解光電子分光で観測された  $\text{BaFe}_2\text{As}_2$  におけるコヒーレントフォノン励起

Coherent phonon excitation in  $\text{BaFe}_2\text{As}_2$  observed by HHG TrPES.



## 研究テーマ Research Subjects

1. 高次高調波レーザーを用いた時間分解光電子分光装置の開発  
Development of a time-resolved photoemission apparatus utilizing high harmonic generation from an ultrashort-pulse laser
2. 光励起状態からの物質中の電子の緩和機構の解明、光誘起超伝導の直接観測  
Mechanisms of electron relaxation from photo-excited states and light-induced superconductivity
3. 極低温超高分解能レーザー角度分解光電子分光による非従来型超伝導体の機構解明  
Mechanisms of unconventional superconductivities by ultralow temperature and ultrahigh resolution laser-based angle-resolved photoemission spectroscopy

極限コヒーレント光科学研究センター  
Laser and Synchrotron Research Center

## 吉田研究室

Yoshida Group



吉田 鉄平  
YOSHIDA, Teppei  
客員教授  
Visiting Professor

高温超伝導体を中心に遷移金属酸化物の強相関電子状態を光電子分光法により研究している。これらの物質では多体相互作用の影響を受けた電子構造をもち、高温超伝導、軌道秩序、モット転移などの多彩な物性を示す。高温超伝導の起源に迫るために、我々は角度分解光電子分光のスペクトル形状の分析を進め、クーパー対の情報を得ることを目指している。また、ルテニウム酸化物の電子軌道に伴う新奇な物性を解明するため、軌道秩序をともなったモット転移近傍の電子状態の研究している。物性研究所の辛研究室を中心に各研究室と協力しながら物性研 LASOR の最先端のレーザー光電子分光を用いて、これらの強相関電子状態の解明を目指す。

Strongly correlated electronic structures in transition-metal oxides such as high- $T_c$  superconductors are studied by photoemission spectroscopy. These materials have the electronic structures with many-body interactions and show rich physical properties such as high- $T_c$  superconductivity, orbital order and Mott transition. In order to approach the origin of the high- $T_c$  superconductivity, we are analyzing the spectral line shape of the ARPES spectra and try to obtain the information of the Cooper pairs. On the other hand, in order to clarify novel physical properties arising from the character of electron orbitals in ruthenium oxides, we are investigating the electronic structure in the vicinity of Mott transition with orbital order. In collaboration with Prof. Shin and various laboratories in ISSP, we try to elucidate these correlated electronic states using the state-of-the-art laser photoemission spectroscopy at LASOR.

極限コヒーレント光科学研究センター  
Laser and Synchrotron Research Center

## ダンジェロ研究室

D'angelo Group



ダンジェロ マリー デルフィーヌ  
D'ANGELO, Marie Delphine  
外国人客員教授  
Visiting Professor

シリコンカーバイド (SiC) はワイドギャップ半導体であり、高温・高パワー・高周波数エレクトロニクス材料として適している。その表面物性は技術応用の上で重要であるだけでなく、表面そのものも豊かな現象を示し、1次元構造の形成や水素誘起金属化、可逆金属-絶縁体転移などが報告されている。そこで我々は物性研松田巖研究室と共同で SiC 結晶の時間分解光電子分光測定を元に、そのキャリアダイナミクスを明らかにする研究を行った。実験は SPring-8 BL07LSU において様々な 3C-SiC(001) 再構成表面を対象に実施した。その結果、実験データから2種類の動的プロセスがあることが分かった。1つ目はピコ秒の時間スケールにあり、これは実験に起因するものであった。すなわち光電子の空間電荷効果によって内殻準位ピークは低い結合エネルギー側へシフトした。2つ目は SiC 試料表面に由来し、ミリ秒時間スケールで表面光起電力効果による内殻準位ピークの高結合エネルギーシフトがあった。ワイドギャップ半導体の表面ダイナミクス研究はこれまでほとんどなく、今後これらの成果から新たな研究展開が期待される。

Silicon carbide (SiC) is a wide band gap semiconductor particularly suitable for high temperature, high power and high frequency electronics. Understanding the surface properties has been significant to develop technical applications and it has also attracted academic interests due to rich surface physics such as formation of one-dimensional nanostructures, hydrogen-induced metallization, and reversible semiconductor-metal transition. With the group of Prof. Iwao Matsuda in the Institute for Solid State Physics, we performed the first time-resolved photoemission experiments on a SiC crystal to reveal carrier dynamics at the surface. The measurement was made at SPring-8 BL07LSU with various 3C-SiC(001) surface reconstructions. We could evidence two dynamical phenomena having different time-scales: at the picosecond scale, the space-charge effect leads to a decrease of the binding energy of the analyzed photoelectrons whereas at microsecond scale, the surface photo-voltage leads to a flattening of the bands and to an increase of the binding energy. These results open new science of surface dynamics in wide band gap semiconductors.

## 軌道放射物性研究施設 / 播磨分室 Synchrotron Radiation Laboratory / Harima Branch

<http://www.issp.u-tokyo.ac.jp/labs/sor/index.html>

教授 (施設長) 辛 埴 Professor (Director) : SHIN, Shik  
 教授 小森 文夫 Professor : KOMORI, Fumio  
 准教授 松田 巖 Associate Professor : MATSUDA, Iwao  
 准教授 原田 慈久 Associate Professor : HARADA, Yoshihisa  
 准教授 和達 大樹 Associate Professor : WADATI, Hiroki  
 教授(外国人客員) マリエール・デルフィネ Visiting Professor : D'ANGELO, Marie Delphine  
 助教 山本 達 Research Associate : YAMAMOTO, Susumu  
 助教 矢治 光一郎 Research Associate : YAJI, Koichiro  
 助教 宮脇 淳 Research Associate : MIYAWAKI, Jun  
 助教 平田 靖透 Research Associate : HIRATA, Yasuyuki

技術専門員 福島 昭子 Technical Associate : FUKUSHIMA, Akiko  
 技術専門職員 澁谷 孝 Technical Associate : SHIBUYA, Takashi  
 技術専門職員 原沢 あゆみ Technical Associate : HARASAWA, Ayumi  
 技術専門職員 工藤 博文 Technical Associate : KUDO, Hirofumi  
 研究支援推進員 藤澤 正美 Technical Staff : FUJISAWA, Masami  
 特任研究員 赤田 圭史 Project Researcher : AKADA, Keishi  
 特任研究員 尾嶋 正治 Project Researcher : OSHIMA, Masaharu  
 特任研究員 田久保 耕 Project Researcher : TAKUBO, Kou  
 特任研究員 崔 藝濤 Project Researcher : CUI, Yitao  
 特任研究員 唐 佳藝 Project Researcher : TANG, Jiayi  
 特任研究員 山添 康介 Project Researcher : YAMAZOE, Kosuke  
 特任研究員 山本 真吾 Project Researcher : YAMAMOTO, Shingo

軌道放射物性研究施設 (SOR 施設) は高輝度放射光を利用した先端的物性研究や新しい実験技術の開発・研究を共同で行っている。SPring-8 に設置された播磨分室では、同放射光施設に世界最高性能の高速偏光スイッチング軟 X 線アンジュレタービームライン (東京大学放射光アウトステーション物質科学ビームライン BL07LSU) を整備し、高輝度軟 X 線放射光を利用する最先端の物性科学研究を推進している。播磨分室スタッフは、先端軟 X 線分光技術の開発と新物質・新材料の電子状態研究を行うために、時間分解軟 X 線分光実験ステーション、高分解能軟 X 線分光ステーション、3 次元ナノエスカステーション、軟 X 線磁気光学カー効果ステーション、軟 X 線回折ステーションを立ち上げ、全国共同利用だけでなく、海外からの共同利用も受け付けている。一方、柏の E 棟においては、レーザーグループとの共同研究の基に、真空紫外・軟 X 線レーザー光源を用いた超高分解能スピン偏極光電子分光装置を建設し、全国共同利用に提供している。



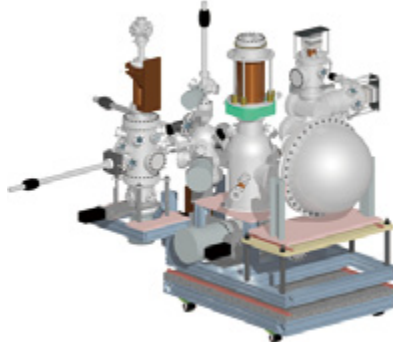
矢治 / YAJI

The synchrotron radiation laboratory (SRL) is promoting advanced solid state spectroscopy using synchrotron radiation in soft X-ray and vacuum ultraviolet region. SRL operates a branch laboratory at SPring-8 to maintain the high-brilliance soft X-ray beamline BL07LSU of the University of Tokyo, where time-resolved soft X-ray spectroscopy, high-resolution soft X-ray emission spectroscopy, 3D (depth + 2D microscopy) nanoESCA, X-ray magneto-optical effect, and soft X-ray diffraction are utilized to study electronic states and dynamics in new materials. SRL developed the fast polarization switching of the undulator light source in cooperation with SPring-8. In the building E at Kashiwa campus, SRL developed the ultra-high resolution spin-resolved photoemission spectroscopy using vacuum ultraviolet and soft X-ray lasers in collaboration with laser light source scientists in ISSP.



SPring-8 BL07LSU の 8 台の Figure-8 アンジュレター。本挿入光源より連続偏角可変型不等刻線間隔平面回折格子分光器を経て、各実験ステーションに高輝度軟 X 線が供給される。

Figure-8 undulators installed in SPring-8, which provide high-brilliance synchrotron radiation into the beamline BL07LSU.



E 棟における高効率スピン VLEED 検出器を備えたレーザー励起高分解能電子分光装置。

A laser-excited spin-resolved photoemission spectrometer with VLEED spin detector, which enables us to measure spectra with very high energy and momentum resolutions.