

# 附属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センター (LASOR) では、極短パルス、超精密レーザーや大強度レーザーなどの極限的なレーザーおよび、シンクロトロン放射光による先端的なビームラインを開発し、レーザー科学と放射光科学との融合を目指している。これらの最先端光源を用いて、テラヘルツから軟X線までの広いエネルギー範囲で、超高時間分解分光、超精密分光、超高分解能光電子分光、スピン偏極分光、顕微分光、回折や光散乱、イメージング、発光分光などの研究を行っている。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、界面などの幅広い基礎物性研究とともに、レーザー加工など、社会が求めている学理の探求や産官学協調領域の創出をねらう。柏I、およびIIキャンパスの他に、SPring-8において軟X線分光の研究を行うとともに、東北の次世代放射光施設の整備にも貢献している。

Laser and Synchrotron Research (LASOR) Center develops new lasers with extreme performance of ultraprecise, 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 high resolution, time-resolved spectroscopy, diffraction or scattering imaging, 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 as well as industrial science such as laser processing 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). We contribute to construct the next-generation synchrotron radiation facility at Tohoku.

---

センター長 小林 洋平

Leader KOBAYASHI, Yohei

副センター長 秋山 英文

Deputy Leader AKIYAMA, Hidefumi

副センター長 原田 慈久

Deputy Leader HARADA, Yoshihisa

---

# 板谷研究室 Itatani Group

## 研究テーマ Research Subjects

- 1 位相制御された高強度極短パルスレーザーの開発  
Development of phase-stable intense ultrashort-pulse lasers
- 2 軟X線アト秒パルス発生と原子・分子・固体のアト秒分光  
Generation of soft-X-ray attosecond pulse, attosecond spectroscopy of atoms, molecules, and solids
- 3 強レーザー場中での超高速現象の観測と制御  
Observation and control of ultrafast phenomena in strong optical fields
- 4 超高速軟X線分光法の開発  
Development of ultrafast soft X-ray spectroscopy



准教授 板谷 治郎  
Associate Professor ITATANI, Jiro

専攻 Course  
理学系物理学  
Phys., Sci.



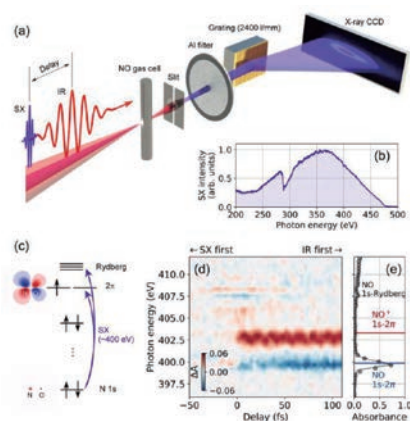
助教 栗原 貴之  
Research Associate  
KURIHARA, Takayuki



特任助教 水野 智也  
Project Research Associate  
MIZUNO, Tomoya

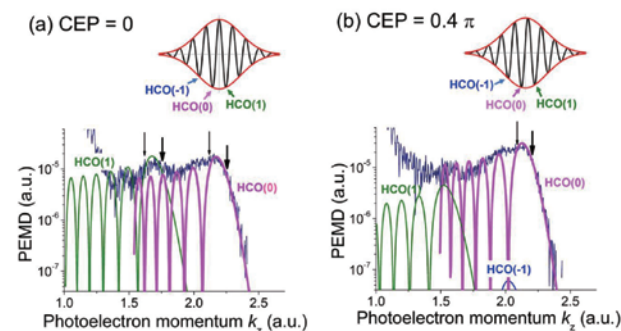
高強度極短パルスレーザーの開発と、強レーザー場下におけるフェムト秒からアト秒領域の超高速現象に関する研究を行っている。光源開発に関しては、可視から中赤外領域での位相制御された高強度極短パルスの発生と、気体媒質での高次高調波発生を利用したアト秒軟X線パルス発生に関する研究開発を行っている。また、チタンサファイアレーザーを超えた次世代極短パルスレーザー光源を目指して要素技術の開発も進めている。光源利用に関しては、アト秒軟X線パルスの超高速分光応用、原子・分子・固体中での高強度光電場で駆動された非線形光学現象に関する研究を主に行っている。位相制御された高強度極短パルス光源を基盤技術とした波長変換により、テラヘルツから軟X線までをカバーした超高速分光が実現可能であり、物質の非平衡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 light sources and their applications to ultrafast spectroscopy of strong-field-driven processes on the femtosecond to attosecond scales. Regarding the R&D of light sources, we focus on the generation of waveform-controlled intense optical pulses from visible to mid infrared spectral ranges, and the generation of soft-X-ray attosecond pulses using the physics of high harmonic generation. Furthermore, we develop the building blocks of next-generation light sources to break the limit of current Ti:sapphire laser-based technologies. Based on these novel light sources and techniques, we develop attosecond soft-X-ray spectroscopy and other ultrafast methodology to explore field-driven nonlinear processes of atoms, molecules, and solids. Our waveform-controlled intense light sources and related technologies are expected to realize novel ultrafast spectroscopy that cover an extremely broad spectral range from THz to soft X rays. We aim to observe and control ultrafast dynamics of non-equilibrium states of matters through various freedoms.



アト秒軟X線パルスを用いたNO分子の過渡吸収分光。(a) 実験配置。(b) 軟X線パルスのスペクトル。(c) NO分子のエネルギー準位。(d) 観測された過渡吸収スペクトル。(e) 定常状態での吸収スペクトル。

Transient absorption spectroscopy of NO molecules using soft-X-ray attosecond pulses. (a) Experimental setup. (b) Spectrum of attosecond pulses. (c) Relevant energy levels of NO molecules. (d) Observed transient absorption spectra. (e) Absorption spectra of the NO molecules at the ground state without excitation.



高強度光電場でトンネルイオン化したXe原子から放出され、再散乱した光電子の運動量分布。(a) はキャリア・エンベロープ位相が0の場合、(b) は0.4πの場合。HCO(n) は、異なる電子軌道を示す。

Photoelectron momentum distribution of tunnel ionized Xe atoms. Due to the rescattering process, the photoelectrons are accelerated with a strong dependence on the carrier-envelope phase. HCO(n) shows the electron trajectories at different half cycles as indicated in the insets.



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

# 岡崎研究室 Okazaki Group

## 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 a 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



准教授 岡崎 浩三  
Associate Professor OKAZAKI, Kozo

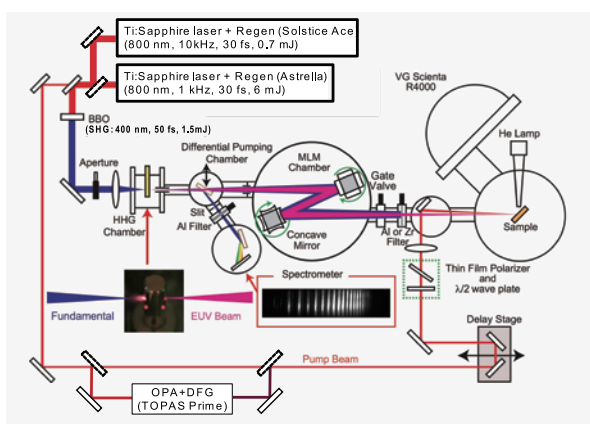


助教 鈴木 剛  
Research Associate  
SUZUKI, Takeshi

専攻 Course  
新領域物質系  
Adv. Mat., Frontier Sci.

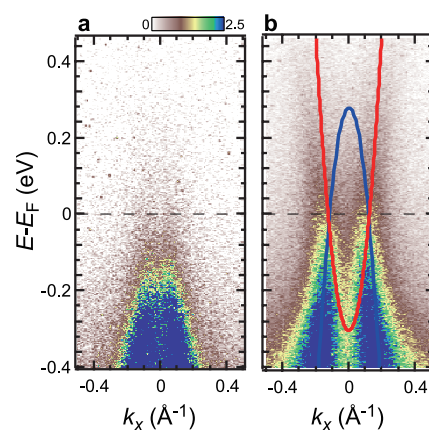
角度分解光電子分光は物質中の電子の運動量とエネルギーの分散関係(バンド構造)を直接観測できる強力な実験手法であるが、フェムト秒レーザーをポンプ光、その高次高調波をプローブ光として用いることで、非平衡状態におけるバンド構造の過渡特性も観測できるようになる。本研究室では、レーザー開発の研究室と共同で高次高調波レーザーを用いた時間分解光電子分光装置の開発・改良を進め、時間分解光電子分光によって、光励起状態からの電子の緩和過程の直接観測、光誘起相転移に伴う電子状態の変化の直接観測等を行い、励起状態からの電子の緩和機構の解明や光誘起超伝導の直接観測による実証を目指している。また、エネルギー分解能  $70 \mu\text{eV}$ 、最低測定温度  $1 \text{ K}$  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 (band structure) of the electrons in solid-state materials, whereas by utilizing a femtosecond laser as pumping light and its high harmonic generation (HHG) as probing light, we can observe ultrafast transient properties of the band structure 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 relaxation dynamics from photo-excited states and demonstration of photo-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  $1 \text{ K}$ .



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.



高次高調波レーザー時間分解光電子分光で観測された励起子絶縁体  $\text{Ta}_2\text{NiSe}_5$  における光誘起絶縁体-金属転移 a, b はそれぞれ、光励起前、光励起後のスペクトル

Photo-induced insulator-to-metal transition in an excitonic insulator  $\text{Ta}_2\text{NiSe}_5$  observed by HHG laser TRPES. a, b. Spectra before and after pump, respectively.



[https://www.issp.u-tokyo.ac.jp/maincontents/organization/labs/okazaki\\_group.html](https://www.issp.u-tokyo.ac.jp/maincontents/organization/labs/okazaki_group.html)



# 木村研究室 Kimura Group

## 研究テーマ Research Subjects

- 1 超精密加工・計測法を活用した高精度 X 線光学素子の開発  
Development of high-precision X-ray optical devices using ultra-precision fabrication and measurement techniques
- 2 X線自由電子レーザーによる液中試料フェムト秒イメージング  
Femtosecond imaging of samples in liquids using X-ray free-electron lasers
- 3 位相回復計算を利用したレンズレスイメージング  
Lens-less Imaging Using Phase Recovery Calculation



准教授 木村 隆志  
Associate Professor KIMURA, Takashi

専攻 Course  
工学系物理工学  
App. Phys., Eng.



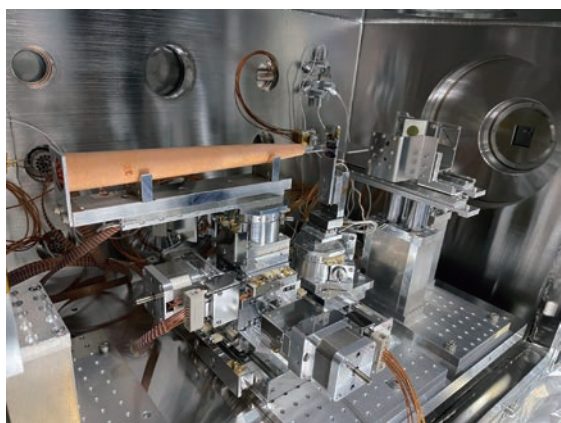
助教 竹尾 陽子  
Research Associate  
TAKEO, Yoko

X線自由電子レーザーや放射光、高次高調波といった先端 X線光源を利用した、新たな顕微イメージング技術の開発に取り組んでいる。

原子レベルに迫る超精密加工・計測技術や電子ビームリソグラフィなどの半導体製造プロセスを組み合わせ、様々な種類の新規 X線光学素子を設計・作製している。具体的には、X線用の超高精度集光ミラーや分光光学素子、溶液中試料計測のためのマイクロ流路デバイスなどのほか、計算機を利用したレンズレスイメージングのための位相回復アルゴリズムの開発を現在行っている。先端 X線光源と超精密 X線光学素子を組み合わせたイメージングによって、生物・非生物を問わず、メソスコピックな微細構造と物性の関係を従来にない空間的・時間的分解能で結びつけ、新たなサイエンスを切り拓くことを目指している。

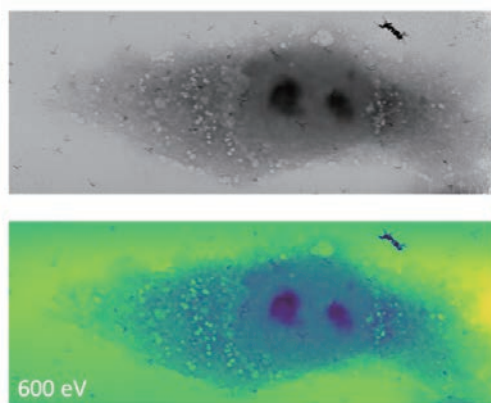
We are developing new micro-imaging techniques using advanced X-ray sources such as X-ray free-electron lasers, synchrotron radiation and high-order harmonics.

We design and fabricate various types of novel X-ray optical elements by combining ultra-precise fabrication and measurement technologies at the atomic level with semiconductor fabrication processes such as electron beam lithography. Specifically, we are developing ultra-precise focusing mirrors and spectroscopic optical elements for X-rays, microfluidic devices for measuring samples in solution, and phase recovery algorithms for computer-aided lens-less imaging. By combining advanced X-ray light sources with ultra-precise X-ray optical elements, we aim to open up new science by linking mesoscopic microstructures and physical properties with unprecedented spatial and temporal resolution in organic and non-organic materials.



SPring-8 の BL07LSU に構築した軟 X線タイコグラフィ装置 CARROT (Coherent Achromatic Rotational Reflective Optics for pTychngraphy)。全反射ウォルターミラーを利用した光学系を導入することにより、様々な波長の軟 X線 で試料を 50 nm 程度の分解能でイメージングすることが可能である。

Soft X-ray ptychography system CARROT (Coherent Achromatic Rotational Reflective Optics for pTychngraphy)。We constructed this achromatic soft X-ray imaging system with 50 nm spatial resolution at BL07LSU of SPring-8.



タイコグラフィにより計測した哺乳類細胞の軟 X線位相像。細胞内の微細構造を薄片化することなく透過観察することが可能である。

Soft X-ray phase image of a mammalian cell measured by ptychography. Intracellular structures can be observed in transmission without thinning.



[https://www.issp.u-tokyo.ac.jp/maincontents/organization/labs/kimura\\_group.html](https://www.issp.u-tokyo.ac.jp/maincontents/organization/labs/kimura_group.html)

# 小林研究室 Kobayashi Group

## 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 レーザー加工の学理  
Fundamental understanding on laser processing
- 3 医療応用中赤外分子分光  
Precision spectroscopy of molecules for medical applications
- 4 サイバーフィジカルシステム  
Cyber-Physical System



教授 小林 洋平  
Professor KOBAYASHI, Yohei

専攻 Course

工学系物理工学  
App. Phys., Eng.

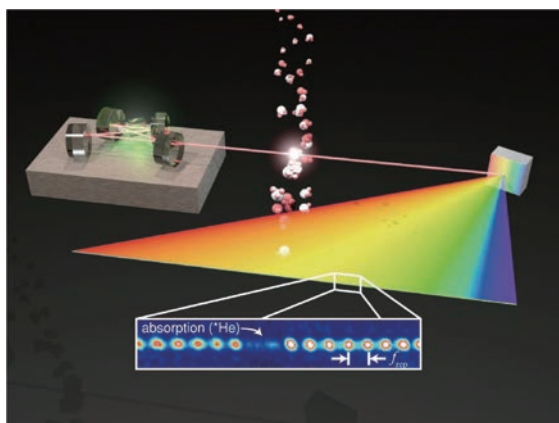


助教 谷 峻太郎  
Research Associate  
TANI, Shuntaro



特任助教 櫻井 治之  
Project Research Associate  
SAKURAI, Haruyuki

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、超短パルス・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展開する。超高繰り返しの方向では世界最小のカーレンズモード同期レーザーを保有する。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での光電子分光や呼吸診断を目指した医療応用の中赤外超精密分子分光を行っている。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、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。



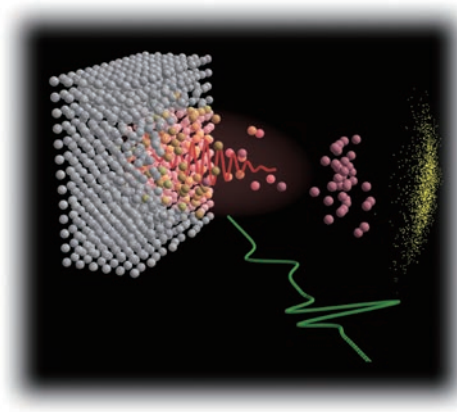
光周波数コムによる原子分光。自作超高エネルギー分解分光器と超高繰り返しモード同期レーザーとの組み合わせにより縦モードが分離された分光が可能となった。図はメタステーブル He の縦モード分解分光の例。

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.

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 femtosecond 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. We would like to know “How is a material cut?”



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.



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

## 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



准教授 近藤 猛  
Associate Professor KONDO, Takeshi

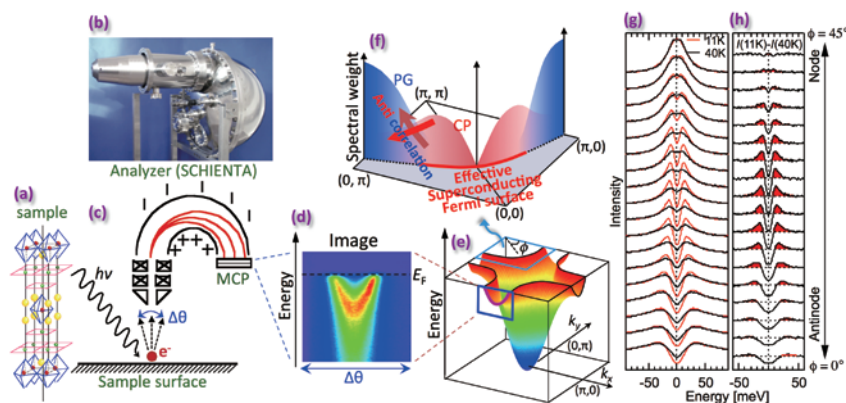
専攻 Course  
理学系物理学  
Phys., Sci.



助教 森 亮  
Research Associate  
MORI, Ryo

固体中の電子が描くバンド構造は、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、光で励起する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同定したり、パルス光で制御する非平衡ダイナミクスをフェムト秒スケールで観測することで、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、(高温)超伝導体、重い電子系や電子相関系物質、トポロジカル量子相、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、極限レーザー光源及びそれを用いた高精度な光電子分光装置を開発し、フェルミ準位極近傍の微細な電子構造(エネルギーギャップや素励起との相互作用)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。(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 ( $T_c = 35\text{K}$ ). (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).





# 原田研究室 Harada Group

## 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 電池触媒、電池電極の表面反応解析、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 battery catalysts and electrodes, electrochemical reaction, photocatalytic reaction and functionality of metalloproteins
- 3 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)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) in strongly correlated materials
- 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



教授 原田 慈久  
Professor HARADA, Yoshihisa

専攻 Course

新領域物質系

Adv. Mat., Frontier Sci.



助教 木内 久雄  
Research Associate  
KIUCHI, Hisao

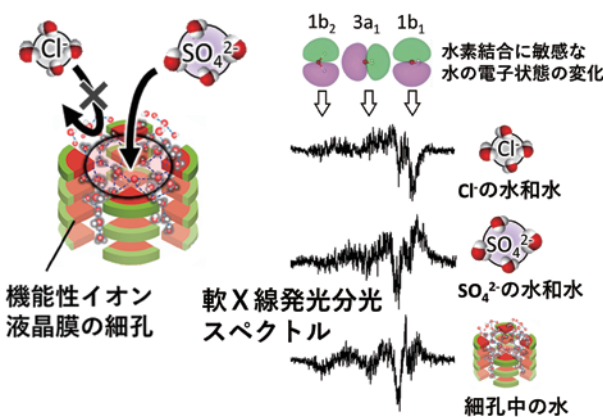
当研究室では、世界最高輝度のX線源である SPring-8 において '軟X線' と呼ばれる光を用いて新しい分光法を開拓し、物質の電気的、磁氣的性質、光学応答を司る電子状態をその成因に遡って調べる研究を行っている。特に光散乱の一種である軟X線発光分光の将来性に着目し、モット絶縁体、新規高温超電導体等の強相関物質における素励起(結晶場励起、スピン励起、マグノン励起、電荷密度波励起、軌道波励起など)の直接観測とその成因の研究、水溶性液体、固液界面の電子状態とマイクロ不均一性の観測、電池触媒、電池電極の表面反応解析、光触媒反応解析のためのその場分析装置の開発、金属タンパク質の電子状態解析など、軟X線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

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 a 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, the surface reaction of battery catalysts and electrodes, electronic structure analysis of reaction center in metalloproteins, electrochemical and photocatalytic reactions. We also explore basic study on high performance soft X-ray absorption and emission spectroscopy for the next generation synchrotron light source.



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 at University of Tokyo outstation beamline BL07LSU in SPring-8.



極めて均一かつナノメートルサイズの穴を持つ機能性イオン液晶膜が、特定のイオンを選択的に透過するために「イオンを取り巻く水の酸素結合構造を認識している」ことが軟X線発光分光で明らかとなった。

Soft X-ray emission spectroscopy has revealed that functional ionic liquid crystalline membranes with extremely uniform, nanometer-sized pores recognize the "hydrogen-bonded structure of water surrounding the ions" in order to selectively permeate specific ions.



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

# 松田巖研究室 I. Matsuda Group

## 研究テーマ Research Subjects

- 1 単原子層におけるディラックフェルミオン  
Dirac Fermions in monatomic layers
- 2 X線自由電子レーザーを用いた非線形X線分光の研究  
Study of non-linear X-ray spectroscopy by X-ray free electron laser
- 3 オペランドX線実験による表面上分子・キャリアダイナミクスの研究  
*operando* X-ray experiments to study molecule and carrier dynamics at surfaces
- 4 次世代放射光におけるアンジュレータビームラインの先端技術開発  
Developments of frontier technologies for undulator beamlines of the next generation synchrotron radiation



教授 松田 巖  
Professor MATSUDA, Iwao

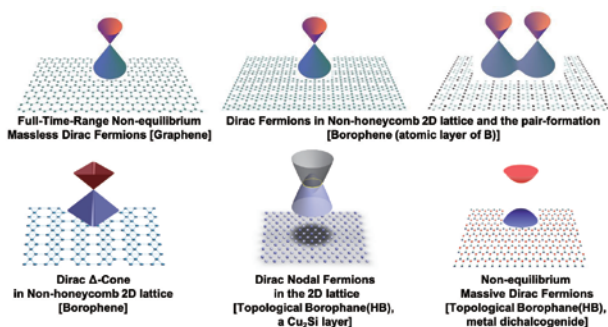
専攻 Courses  
理学系物理学 理学系化学  
Phys., Sci. Chem., Sci.



助教 堀尾 眞史  
Research Associate  
HORIO, Masafumi

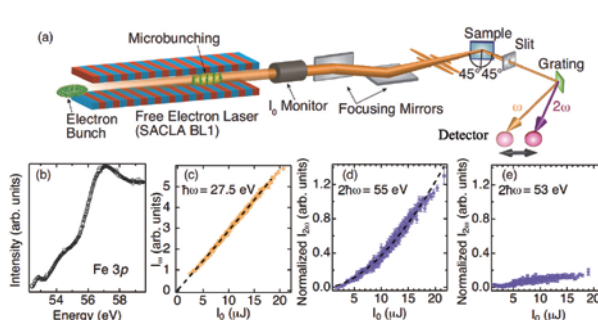
高輝度放射光、X線自由電子レーザー、高次高調波発生レーザーから発生する真空紫外線～軟X線を用いた吸収分光・光電子分光・非線形分光の技術開発をし、完成した先端分光装置を使って材料の動作下における状態変化を「その場」観測するオペランド実験を実施している。光源それぞれの特性を利用してフェムト秒からミリ秒まで各時間スケールでの動的変化をリアルタイムで追跡してそれぞれの詳細を明らかにすると共に、時系列情報をつなぎ合わせて動的現象の全貌も理解する研究を推進している。研究室では主にディラック電子系を有した単原子層や強相関物質の表面/界面系を対象とし、その物性および機能性の研究を行っている。放射光施設SPring-8軟X線ビームラインBL07LSUを管理・運営し、次世代放射光施設のビームライン建設にも携わっている。

We have developed advanced techniques for absorption spectroscopy, photoelectron spectroscopy, and nonlinear spectroscopy using vacuum ultraviolet rays to soft X-rays, generated from high-intensity synchrotron radiation, X-ray free electron lasers, and high-order harmonic generation lasers. With our completed spectroscopy systems, we have conducted *operando* experiments to “*in situ*” observe any changes of the material states under the operation conditions of functionalities. Using the characteristics of each light source, the dynamic changes in each time scale from femtoseconds to milliseconds are tracked in real time to clarify the details and a series of the temporal information is chronically connected to capture the whole picture of the dynamic phenomenon. In our laboratory, we are mainly studying physical properties and functionalities of monoatomic layers with exotic Dirac Fermions and at surfaces/interfaces of strongly correlated materials. We manage and operate high-brilliant soft X-ray beamline BL07LSU at SPring-8. We are also devoting ourselves in constructions of beamlines for the next-generation synchrotron radiation facility.



本研究室で合成および測定した原子層のコレクション。それぞれ特有のディラック電子系を成しており、電子状態とキャリアダイナミクスを詳細に調べた。

A collection of monatomic layers with various types of Dirac Fermions that are synthesized and examined in our group.



GaFeO<sub>3</sub> 結晶からの軟X線第2次高調波発生 (SHG) と元素共鳴効果の観測。(a) X線自由電子レーザー施設 SACLA BL-1 での実験の様子。(b) Fe 3p の吸収スペクトル。入射光,  $I_0$  に対する (c) 基本波と (d,e) SHG 波の依存性。

The soft X-ray second harmonic generation (SHG) and the Fe 3p resonant effect in the GaFeO<sub>3</sub> crystal using free electron laser. (a) The measurement set-up and (b) the absorption spectrum. Intensity,  $I$ , of (c) the fundamental ( $h\nu = 27.5$  eV), (d,e) SHG ( $2h\nu = 55$  and 53eV) with respect to the incident intensity,  $I_0$ .

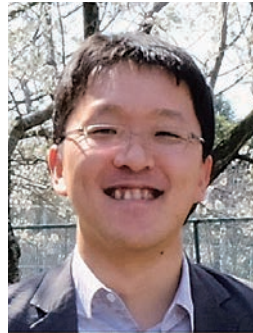




# 松永研究室 Matsunaga Group

## 研究テーマ Research Subjects

- 1 高強度位相安定テラヘルツ・中赤外パルス光源開発及び検出技術開発  
Development of intense, phase-locked terahertz-mid infrared pulse generation and detection technique
- 2 光電場で強励起された非平衡多体系の超高速ダイナミクスの研究  
Ultrafast nonequilibrium dynamics of many-body systems in solids driven by strong light field
- 3 超伝導や反強磁性における集団励起及び異常応答の解明と光制御  
Study and control of collective excitations and anomalous responses in superconductivity and antiferromagnetism
- 4 ディラック/ワイル半金属における巨大非線形応答と高速エレクトロニクス/スピントロニクス  
Giant nonlinear responses in Dirac/Weyl semimetals for high-speed electronics and spintronics



准教授 松永 隆佑  
Associate Professor MATSUNAGA, Ryusuke

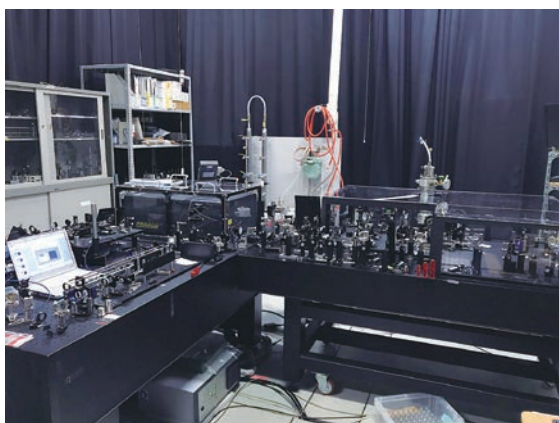
専攻 Course  
理学系物理学  
Phys., Sci.



助教 神田 夏輝  
Research Associate  
KANDA, Natsuki

テラヘルツから中赤外・近赤外・可視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誘起される非平衡状態の性質を調べている。特にテラヘルツ周波数帯の光子エネルギーは数 meV 程度であり、物性物理において重要なフェルミ面近傍の電磁応答を調べることができる重要な実験手法となっている。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、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である。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や、トポロジカル半金属において巨大に現れる非線形応答など、非平衡状態で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 dynamics of light-induced nonequilibrium phenomena in a variety of materials by utilizing terahertz wave, mid- and near-infrared, and visible coherent light sources based on ultrafast pulsed laser technology. Especially terahertz spectroscopy can unveil low-energy electromagnetic 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 by light field. In addition to the development of phase-stable terahertz generation and detection technique and novel nonlinear spectroscopy scheme, we study cooperative behaviors in many-body systems like superconductivity or antiferromagnetism and giant nonlinearity in topological semimetals, and seek hidden transient phases of matters in nonequilibrium system to reveal the functionalities of materials for fast electronics and spintronics in terahertz frequency.



高強度テラヘルツパルス発生および位相安定中赤外パルス発生に用いるフェムト秒再生増幅パルスレーザーシステム

Regenerative-amplified femtosecond pulse laser system for intense terahertz wave generation and phase-locked mid-infrared light generation



テラヘルツ電磁応答および Hall 伝導測定に用いる透過・反射・偏光回転精密計測システム

Transmission, reflection, and polarization rotation spectroscopy system for terahertz electromagnetic response and Hall conductivity measurements



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



外国人客員教授 ボーヴェンジーペン ウヴェ  
Visiting Professor BOVENSIEPEN, Uwe

超高速分光法により、熱平衡に近い、または熱平衡からかけ離れた固体物質系における微視的な相互作用メカニズムを解析することができる。前者は静的分光法に対して精細な修正を提供する一方、後者は物質における新しい状態の探索の機会を与える。特に、構造相転移や界面間の電子およびエネルギーの移動などの問題が興味深い。本質的には、基本的な相互作用が働いた際に、電子構造や幾何構造におけるこれらの過程の影響を解析する。我々の研究では、時間・角度分解光電子分光や軟X線分光などのポンププローブ実験を、ドイツのデュイスブルクにある研究所と、X線自由電子レーザーなどの施設でそれぞれ使用する。

物性研究所では、低次元材料、特に電荷密度波物質の光学的に駆動される構造相転移に取り組む。そのような系では、光励起は構造秩序を抑制または促進することができるが、ホスト所員と共に、これらの傾向を理解し、潜在的に制御することを目指す。

Ultrafast spectroscopy allows to analyze microscopic interaction mechanisms in condensed matter systems close to and far out of thermodynamic equilibrium. While the first provides sensitive amendments to static spectroscopy, the latter grants opportunities to explore novel states of matter. Interesting problems are, among others, structural transitions, electron and energy transfer across interfaces. Essentially, we analyze the effect of these processes on the electronic and geometric structure while the fundamental interactions act. In our research we use pump-probe experiments like time- and angle-resolved photoelectron spectroscopy and soft x-ray spectroscopy in our laboratories located in Duisburg, Germany, and user facilities like x-ray free electron lasers, respectively.

At the Institute for Solid State Physics, I am working on optically driven structural transitions in low-dimensional materials, in particular charge density wave compounds. In such systems optical excitation can either suppress or enhance structural order, and together with my host, we aim at understanding and potentially controlling these trends.

# 軌道放射物性研究施設 / 播磨分室

Synchrotron Radiation Laboratory / Harima Branch

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物性研究や実験技術の開発研究を行っている。播磨分室では、SPring-8 に世界最高性能の高速偏光スイッチング軟 X 線アンジュレータビームライン（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、雰囲気光電子分光ステーション、高分解能軟 X 線発光分光ステーション、3 次元ナノ ESCA ステーションを常設して全国共同利用実験を実施し、国際共同研究、産学共同研究も積極的に受け入れている。SPring-8 における共同利用は 2022 年度前期までで終了し、2022 年度後期の共同利用は、レーザーを用いたスピン角度光電子分光や、X 線管を用いた雰囲気光電子分光などの実験を実施する。また仙台に建設中の次世代放射光源 NanoTerasu を視野に入れた測定技術の高度化を図り、新たに分光イメージングステーションの R&D も行っている。一方、柏の E 棟においては、LASOR レーザーグループとの共同研究として、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、全国共同利用に供している。現在、SPring-8 より E 棟に移設した時間分解光電子分光装置の立ち上げも行っている。

The synchrotron radiation laboratory (SRL) advances novel materials research by developing soft X-ray spectroscopic techniques using the high-brilliance synchrotron radiation source. In the Harima Branch, we have the world's highest performance fast polarization-switching soft X-ray undulator beamline (University of Tokyo Synchrotron Radiation Outstation Beamline) at SPring-8 BL07LSU, which is equipped with ambient pressure photoemission spectroscopy, three-dimensional nano-ESCA, and high-resolution soft X-ray emission spectroscopy stations. We actively accept joint research projects including international and industrial collaborations. Joint Research at SPring-8 will end in the first half of FY2022, and in the second half of FY2022, laser-spin angle-resolved photoemission spectroscopy and ambient-pressure X-ray photoelectron spectroscopy using X-ray tubes will be conducted. We are also working on the R&D of a new spectroscopic imaging station to advance our measurement techniques for the next generation synchrotron radiation NanoTerasu. In the E-building at Kashiwa, an ultra-high resolution spin-resolved photoemission spectrometer equipped with the VLEED spin detector, is under operation and open for joint research using vacuum ultraviolet and soft X-ray laser sources developed by the LASOR laser group. We are also starting up a time-resolved photoemission spectroscopy system moved from SPring-8 to the E-building.

施設長 原田 慈久

Leader HARADA, Yoshihisa

副施設長 松田 巖

Deputy Leader MATSUDA, Iwao



<https://www.issp.u-tokyo.ac.jp/maincontents/organization/sor.html>



