

新物質科学研究部門

Division of New Materials Science

酸化物高温超伝導体、フラーレンやカーボンナノチューブ、有機伝導体などの例に見られるように、「新物質」の発見はこれまでに何度となく物質科学の新しい局面を開いてきた。新奇な物性現象の発見はまた将来の新しい素材やデバイスの開発にもつながる。新物質科学研究部門では、新しい物質を合成し、高度な技術を用いてその性質を測定することにより、新しい物質観につながる物性現象を発見し解明することを目標としている。

当部門は現在5つの研究室から成り、各研究室は自由な発想のもとに高品質の試料作成や精密物性測定、新しい物性測定技術の開発などを行いつつ、物性測定グループと試料作成グループとの部門枠を越えた連携も心がけている。特に物質設計評価施設とは強い協力関係を保ちながら研究を推進している。当部門では現在、遷移金属化合物、重い電子系物質、有機伝導体など強い電子相関を示す物質におけるスピン、軌道、電荷の秩序や揺らぎの効果がもたらす多彩な現象の解明を主要なテーマの1つとしており、極低温における輸送現象測定、精密磁化・比熱測定、核磁気共鳴、光学伝導度などにおいて高度な実験技術を駆使した研究が進められている。

Discoveries of new materials have often opened new horizons in materials science. High temperature oxide superconductors, carbon clusters and nanotubes, and organic conductors are good examples. New materials also lead to the future development of new devices and technologies. The goal of the Division of New Materials Science is to uncover novel phenomena that lead to new concepts of matter, through combined efforts of search, synthesis and characterization of new materials. Currently, our division consists of 5 groups. Although each group has its own research style and projects, we try to maintain close collaboration between those groups working on production of high quality materials and those working on advanced technology for measuring physical properties.

In particular, we keep strong collaboration with the Materials Design and Characterization Laboratory. One of the subjects of our current intensive research is the effects of strong electronic correlation, in particular, various ordered phases and fluctuations involving spin, charge and orbital degrees of freedom, in transition metal compounds heavy electron systems, f-electron compounds and organic conductors. Here, various advanced experimental techniques are employed, such as transport, magnetic and calorimetric measurements, nuclear magnetic resonance and optical measurements.

教授 瀧川 仁
Professor Masashi TAKIGAWA

教授 榊原 俊郎
Professor Toshiro SAKAKIBARA

教授 森 初果
Professor Hatsumi MORI

准教授 中辻 知
Associate Professor Satoru NAKATSUJI

特任准教授 大串 研也
Project Associate Professor Kenya OHGUSHI

教授(客員) 澤 博
Visiting Professor Hiroshi SAWA

助教 三田村 裕幸
Research Associate Hiroyuki MITAMURA

助教 吉田 誠
Research Associate Makoto YOSHIDA

助教 松本 洋介
Research Associate Yousuke MATSUMOTO

助教 橘高 俊一郎
Research Associate Shunichiro KITTAKA

助教 上田 顕
Research Associate Akira UEDA

教務職員 村山 千壽子
Technical Associate Chizuko MURAYAMA

特任研究員 荒木 幸治
Project Researcher Kouji ARAKI

特任研究員 久我 健太郎
Project Researcher Kentaro KUGA

特任研究員 平田 靖透
Project Researcher Yasuyuki HIRATA

特任研究員 グルビッチ ミハイル
Project Researcher Mihael GRBIC

特任研究員 富田 崇弘
Project Researcher Takahiro TOMITA

特任研究員 志村 恭通
Project Researcher Yasuyuki SHIMURA

特任研究員 ワン ボゼン
Project Researcher Bosen WANG

瀧川研究室

Takigawa Group

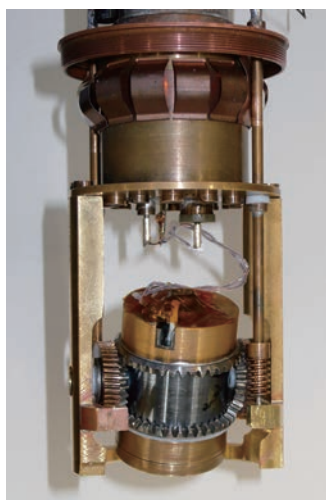


瀧川 仁
Masashi TAKIGAWA
教授
Professor



吉田 誠
Makoto YOSHIDA
助教
Research Associate

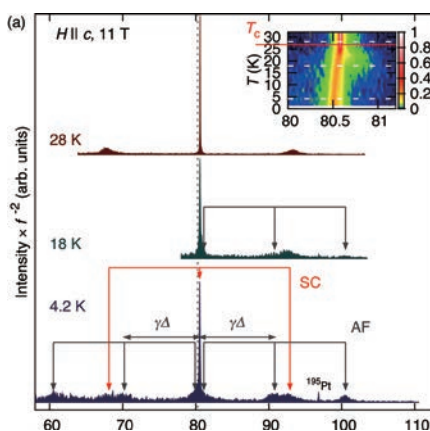
核磁気共鳴法 (NMR) を主な実験手段として、固体内の強い電子間相互作用に起因する現象を研究している。強相関電子系では、超伝導、強 (反強) 磁性、電荷秩序、軌道秩序といった多彩な秩序状態が拮抗しており、磁場・圧力などの外的条件を変えることでこれらの間の量子相転移が起こり得る。原子核は固有の磁気モーメントや電気四重極モーメントを持っており、これらは周囲の電子が作る磁場や電場勾配を感じている。このためNMRは、固体内電子のスピン、電荷、軌道などの自由度が絡み合って現れる特異な秩序状態や揺らぎの性質を、ミクロに探る有力な実験手段となる。我々は色々な特色を持つパルスNMR測定装置を整備し、低温・強磁場・高圧などの外的環境条件と組み合わせ、遷移金属化合物、希土類化合物や有機固体を対象とした研究を行っている。



当研究室で開発された対向アンビル型NMR用高圧力セルが、試料回転用2軸ゴニオメータにセットされたところ。対向アンビルを用いたコンパクトなセルでありながら、約7mm³の試料体積に10万気圧以上の高圧を発生することができる。液化アルゴンを封入して圧力媒体として用いることにより、静水圧性の良い圧力環境が得られる。超伝導マグネット中で単結晶試料を任意の方向に向けてることにより、高圧下でも精密な角度分解NMRスペクトルが得られる。

The opposed-anvil-type high pressure cell designed for NMR experiments developed in our laboratory is installed on a double axis goniometer. In spite of the compact size, the cell is capable of generating more than one hundred thousand atm. Good hydrostaticity is obtained by using sealed liquid argon as the pressure transmitting medium. Single crystal samples in the cell can be directed along arbitrary directions in a superconducting magnet, allowing us to obtain precise angle-resolved NMR spectra.

We use nuclear magnetic resonance (NMR) as the major experimental tool to investigate exotic phenomena caused by strong electronic correlation in solids. A remarkable feature of strongly correlated electron systems is the competition among various kinds of ordering such as superconductivity, ferro- or antiferromagnetism, charge and orbital order. Quantum phase transitions between these ground states can be caused by changing the external parameters such as magnetic field or pressure. Nuclei have their own magnetic dipole and electric quadrupole moments, which couple to the magnetic field or electric field gradient produced by surrounding electrons. This makes NMR a powerful local probe for microscopic investigation of the exotic order and fluctuations of multiple degrees of freedom of electrons, i.e., spin, charge and orbital. We use various NMR spectrometers in different environment (low temperature, high magnetic field and high pressures) to investigate transition metal compounds, rare earth compounds, and organic solids.



5.7万気圧の高圧下における鉄ヒ素系化合物 SrFe₂As₂ の⁷⁵As 原子核のNMRスペクトル。常伝導常磁性領域(28K)では一本の中心共鳴線と四重極分裂した2本の共鳴線が観測される。低温(4.2K)では、これらの3本の共鳴線が反強磁性秩序によってそれぞれ2本ずつに分裂したスペクトル(AF)と、反強磁性の内部磁場が発生せずに分裂しないスペクトル(SC)が共存する。核磁気緩和率の測定から後者は超伝導状態にあることが分かる。

⁷⁵As-NMR spectrum in the iron-pnictide compound SrFe₂As₂ under high pressure on 57000 atm. In the paramagnetic and normal-conducting state (28K), one central and two quadrupole-split resonance lines are observed. At the low temperature (4.2K), the whole spectrum consists of two parts. In one of them (AF), each of the three lines splits into two lines by antiferromagnetic order. In the other part (SC), they do not split by antiferromagnetic internal field. The latter is shown to belong to a superconducting state from the measurements of nuclear relaxation rate.

研究テーマ Research Subjects

1. 低次元、フラストレート・スピン系のダイナミクスと量子相転移
Dynamics and quantum phase transitions in low dimensional or frustrated spin systems
2. 特異な超伝導体
Exotic superconductors
3. 強相関電子系における電荷・軌道・多極子の秩序と揺らぎ
Ordering and fluctuations of charge, orbital, and multipoles in strongly correlated electron systems
4. 磁性有機伝導体におけるスピンと電荷のダイナミクス
Spin and charge dynamics in magnetic organic conductors

榊原研究室

Sakakibara Group



榊原 俊郎
Toshiro SAKAKIBARA
教授
Professor



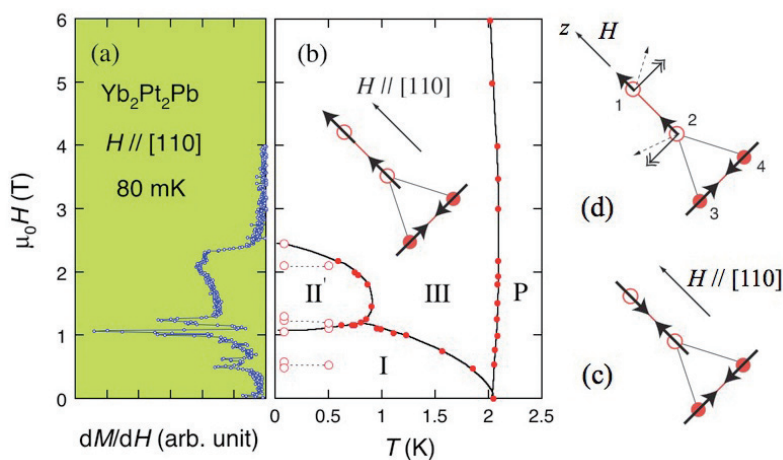
橘高 俊一郎
Shunichiro KITAKA
助教
Research Associate



三田村 裕幸
Hiroyuki MITAMURA
助教
Research Associate

物質の示す磁気現象は広い温度範囲にわたっている。その中で重い電子系などある種の物質系では1ケルビンよりも遙かに低い温度領域で興味深い性質を示す場合がある。このような温度領域では通常の磁気測定手段を適用することが困難なため未開拓の課題も多く、新しい物性現象が期待される。当研究室ではこのような低い特性温度を持つ様々な物質系の磁気物性の研究を行っている。具体的にはf電子化合物や重い電子系、量子スピン系およびフラストレートスピン系などが研究対象で、磁化や比熱測定を主な実験手段として研究している。この目的のために、我々は30ミリケルビンの極低温まで磁化測定が可能な高感度の磁力計や、異方的超伝導体のギャップ構造の特定に有効な角度分解の磁場中比熱測定装置など、独自の装置開発も行っている。

Magnetic phenomena in condensed matter extend over a wide temperature range. In some systems like heavy fermions, interesting magnetic behavior is quite often observed at low temperatures much below 1 K, where ordinary magnetic measurements are difficult and not much work has been done yet. Our research interest lies in those magnetic materials having low characteristic temperatures, such as f electron compounds, heavy fermions, quantum spin systems and geometrically frustrated spin systems. In order to study these systems, we have developed high sensitivity magnetometers which can be operated at very low temperatures down to ~30 mK. We also perform angle-resolved specific heat measurements in a rotating magnetic field, which is a powerful tool for investigating the nodal structures of anisotropic superconductors.



直交ダイマー構造を持つイジング反強磁性体 $\text{Yb}_2\text{Pt}_2\text{Pb}$ の (a)80 mK における微分磁化率および (b) 磁気相図。磁場方向は $[110]$ 方向。 (c) 弱磁場で予想される磁気構造 (I 相)。磁場と直交するダイマーの磁気秩序は磁場の影響を受けず (III 相、挿入図)、磁場に依存しない転移温度を示す。一方、II' 相では磁場に平行なダイマーは連続的に磁化が増加する。この振る舞いはイジングスピンモデルでは説明できず、高次多極子を非対角成分に持つ擬スピンのフロップの可能性が高い。 (d) は II' 相における磁気モーメントの概略図で、2重矢印が高次の磁気多極子モーメントを表す。

(a) Differential susceptibility at 80 mK and (b) the phase diagram of the Ising antiferromagnet $\text{Yb}_2\text{Pt}_2\text{Pb}$ having an orthogonal dimer structure. The magnetic field direction is $[110]$. (c) The expected collinear magnetic structure at low fields (phase I). The magnetic structure for the dimers perpendicular to the magnetic field is immune to H and the transition temperature is independent of H (phase III, inset). In phase II, magnetization of the dimers parallel to H increases continuously. This behavior cannot be explained by an Ising spin model, and strongly suggests the occurrence of a "pseudospin flop" due to a hidden high-rank multipole moment. (d) Schematic diagram of the magnetic moment (thick arrows) and the high-rank multipole moments (double arrows) in phase II'.

研究テーマ Research Subjects

1. 重い電子化合物の磁性と超伝導
Magnetism and superconductivity in heavy electron systems
2. f電子化合物の多極子自由度に由来する秩序と揺らぎ
Multipole orderings and fluctuations in f electron systems
3. フラストレート磁性体の磁化過程
Magnetization of geometrically frustrated magnets
4. 量子スピン系の基底状態
Ground state properties of quantum spin systems

森研究室

Mori Group



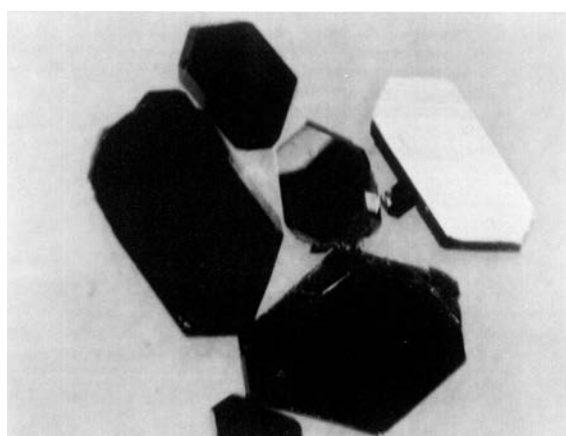
森 初果
Hatsumi MORI
教授
Professor



上田 顕
Akira UEDA
助教
Research Associate

分子性(超)導体、磁性体および誘電体などの機能性分子性物質の開発とその構造、物性の研究を行っている。

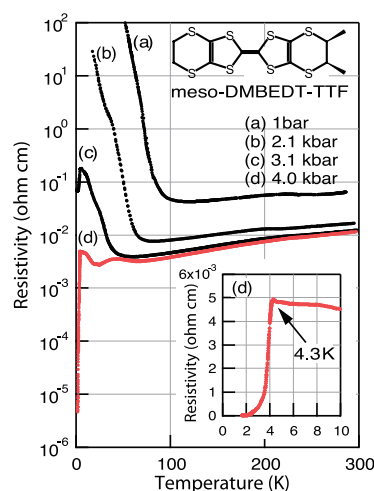
分子性物質の魅力は、1) 多彩な分子および分子間相互作用が設計・制御可能であること、2) 分子は非常に柔らかいため外場応答が大きく、分子を媒介として電子-格子相互作用が大きいこと、3) 電子間クーロン相互作用(電子相関)が大きく、電子の波動性(伝導性)と粒子性(磁性)が競合することなどが挙げられる。我々も、分子をデザインすることにより分子間相互作用および電子相関など物性パラメータを少しずつ変化させて、電荷、格子、スピンの自由度が現れる、分子性物質ならではの特異な機能性を研究している。最近、分子の屈曲と伸縮の自由度と電子相関のため現れるチェッカーボード型電荷秩序相と、圧力下で超伝導相が競合する新しい有機超伝導体(図参照)を見出した。



定電流電解法で作成した有機超伝導体 $[\kappa\text{-ET}_2\text{Cu}(\text{NCS})_2]$ の単結晶
Organic superconductor $[\kappa\text{-ET}_2\text{Cu}(\text{NCS})_2]$ prepared by the electrocrystallization method

The syntheses and structural and physical properties for molecular functional materials such as molecular (super)conductors, magnets, and dielectrics have been studied. The attractive points of molecular materials are 1) that a variety of molecules and intermolecular interactions are designable and controllable, 2) that large response of external pressure and electron-phonon coupling are observed due to softness of molecules, and 3) that large Coulomb interactions (electron correlation) reflect the magnetism as well as conductivity in molecular conductors.

Our group has investigated the curious molecular functional materials based upon charge, lattice, spin, and molecular degree of freedom by changing physical parameters with designed molecules. Recently, we found new organic superconductors, in which the superconducting state is competitive to the charge ordered state owing to the electron correlation and the bending and stretching of designed molecules. (See the figures)



新規電荷秩序系有機超伝導体 $\beta\text{-}(\text{meso-DMBEDT-TTF})_2\text{PF}_6$ の電気抵抗の圧力依存性。常圧下、90 Kでチェッカーボード型電荷秩序形成に伴い金属-絶縁体転移を起こすが、加圧と共に転移温度が降下し、4.0 kbar下、4.3 Kで超伝導転移を起こす。

Electrical resistivities under pressures for new organic superconductor, $\beta\text{-}(\text{meso-DMBEDT-TTF})_2\text{PF}_6$. The metal-insulator transition occurs at 90 K at ambient pressure with accompanying checkerboard-type charge ordering. By applying pressure, the transition was suppressed, and the superconductivity was found at 4.3 K under 4.0 kbar.

研究テーマ Research Subjects

1. 分子の自由度を生かした新規有機(超)導体の開発と機能性研究
Development and studies of structural and physical properties for novel organic (super)conductors based upon molecular degree of freedom
2. 固体中で電子がプロトン運動と協奏した有機伝導体、誘電体の開発と機能性研究
Development and studies of structural and physical properties for electron-proton coupled molecular functional materials
3. 磁性と伝導性が競合する金属錯体の開発と機能性研究
Development and studies of structural and physical properties for novel metal complexes whose magnetism and conductivity are competitive
4. 分子性物質の外場(光、磁場、電場、温度、圧力)応答の研究
Studies of responses by external stimuli (light, magnetic and electric fields, temperature, pressure) for molecular materials

中辻研究室

Nakatsuji Group



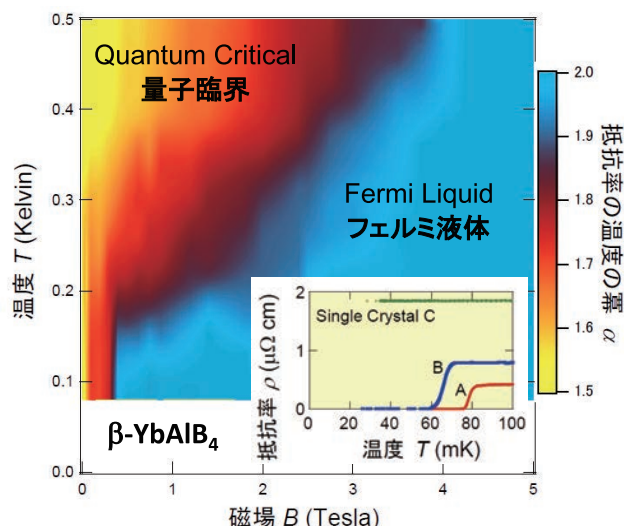
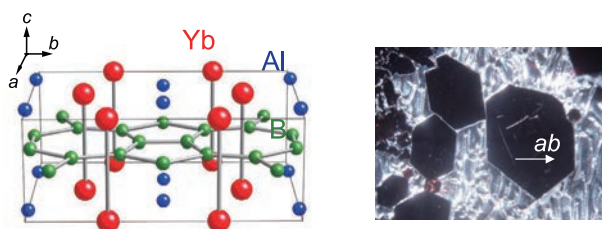
中辻 知
Satoru NAKATSUJI
准教授
Associate Professor



松本 洋介
Yousuke MATSUMOTO
助教
Research Associate

物性物理学のフロンティアは、新しい物理現象の発見にある。なかでも、現代の電子・情報社会を支える材料としての無機物質から、物質中の 10^{23} 個もの電子が相互作用して創りだすマクロな量子現象が続々と発見されており、物理と化学を駆使した新物質の開発こそが新しい量子現象を目指す物性物理の醍醐味であると言える。私達は、特に遷移金属化合物や、重い電子系と呼ばれる金属間化合物の新物質開発に取り組み、量子相転移近傍に現れる新しいタイプの超伝導・異常金属状態、磁性金属における巨視的トポロジカル効果、従来型のスピン秩序を抑えることで期待される、磁性半導体での量子スピン液体状態などに注目して研究を進めている。

The discovery of new phenomena is at the forefront of research in condensed matter physics. This is particularly true for the inorganic materials, which provide an important basis in current electronic and information technology research, which keep providing numbers of macroscopic quantum phenomena due to correlations among the Avogadro numbers of electrons. Thus, the search for new materials that exhibit new characteristics is one of the most exciting and important projects in the materials research. We have synthesized new materials in so-called strongly correlated electron systems including transition metal compounds and heavy fermion intermetallics. Our interest lies in quantum phenomena such as exotic superconductivity and anomalous metallic states close to a quantum phase transition, macroscopic topological effects in magnetic metals, and quantum spin liquids in magnetic semiconductors.



私達が発見した量子臨界超伝導体 β -YbAlB₄。
(左上) 結晶構造。主に Yb の 4f 電子が磁性と超伝導を担う。(右上) フラックス法で育成した純良単結晶。(下) 電気抵抗の振る舞いの変化から決定した状態図。金属では初めてチューニングなしに、ゼロ磁場で量子臨界状態が実現する。(挿入図) 超高純度の単結晶でのみ、この量子臨界状態から超伝導が現れる。

Quantum Critical Superconductor β -YbAlB₄ found in our group
(Top left) Crystal structure. 4f-electrons mainly contribute to magnetism and superconductivity. (Top right) High quality single crystal grown by Al-flux method (Bottom) Phase diagram constructed by the contour plot of the exponent α of the power law behavior of the resistivity. Quantum critical region appears under zero field without tuning for the first time in a metal. (Inset) Superconductivity emerges from the quantum critical state only in the case of ultrapure single crystals.

研究テーマ Research Subjects

1. 量子相転移近傍での新しい超伝導と異常金属状態
Exotic superconductivity and anomalous metallic states near quantum phase transitions
2. 磁性金属における巨視的トポロジカル効果
Macroscopic topological effects in magnetic metals
3. 2次元磁性半導体での量子スピン状態
Quantum spin liquids in two-dimensional magnetic semiconductors

大串研究室

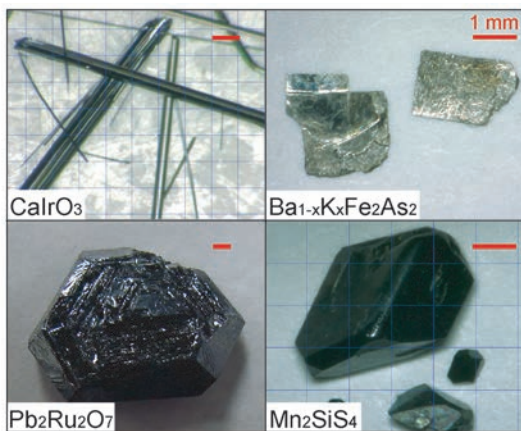
Ohgushi Group



大串 研也
Kenya OHGUSHI
特任准教授
Project Associate Professor

遷移金属化合物を舞台に、超伝導・磁気秩序・金属絶縁体転移など強相関効果に起因する量子多体現象の研究を行っている。

対象とする物質群は、酸化物・カルコゲナイド・砒素化合物などであり、フラックス法・気相成長法・高压合成法を含む様々な固体化学的手法により純良試料を育成している。バルク試料に対する電気的・磁氣的・熱的・光学的性質の評価を通して、電子状態の微視的な解明を進めている。また、共鳴 X 線散乱や中性子散乱など大型施設を利用した研究も積極的に推進している。最近の成果として、1. スピン軌道相互作用が顕在するイリジウム酸化物における特異な磁性と金属絶縁体転移の研究、2. Hg 原子のラットリング運動の顕著な新超伝導体 Hg_xReO_3 の発見、3. 反転対称性の破れた導電体における第二高調波発生の観測、4. 鉄系超伝導体 $Ba_{1-x}K_xFe_2As_2$ のホール効果の解明、5. 梯子型鉄系超伝導体関連物質の電子状態解明などが挙げられる。

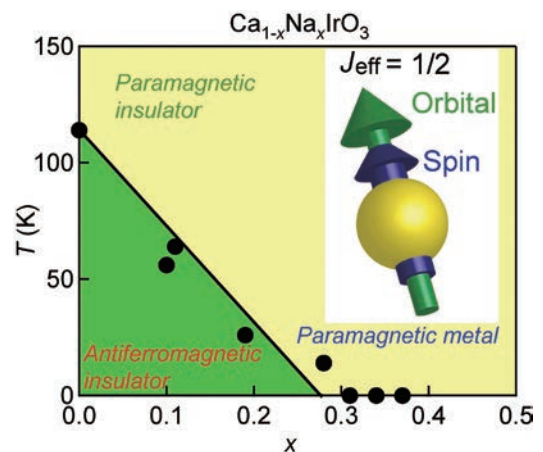


強相関遷移金属化合物の単結晶。相対論的相関系 $CalrO_3$ 、鉄系高温超伝導体 $Ba_{1-x}K_xFe_2As_2$ 、反転対称性の破れた金属 $Pb_2Ru_2O_7$ 、新奇磁性体 Mn_2SiS_4 。

Single crystals of correlated transition-metal compounds. Strongly spin-orbit coupled Mott insulator $CalrO_3$, Fe-based high-temperature superconductor $Ba_{1-x}K_xFe_2As_2$, non-centrosymmetric metal $Pb_2Ru_2O_7$, and anomalous antiferromagnet Mn_2SiS_4 .

Our group's research is focused on the exploratory synthesis and characterization of strongly correlated transition-metal compounds, which exhibit novel quantum phenomena such as superconductivity, magnetic order, and a metal-insulator transition.

We synthesize high-quality transition-metal compounds using a variety of techniques such as the flux, chemical vapor transport, and high-pressure methods. The electrical, magnetic, thermal, and optical properties of these compounds are then characterized on a microscopic scale. To investigate their crystal and magnetic structure, x-ray and neutron diffraction measurements are also carried out at external facilities such as SPring 8. Our recent achievements includes (1) identification of the novel magnetic order and a metal-insulator transition in strongly spin-orbit coupled iridates, (2) discovery of a new superconductor, Hg_xReO_3 , which exhibits strong rattling motion of the Hg atoms, (3) observation of second harmonic generation in non-centrosymmetric metals, (4) elucidation of the Hall effect in the Fe-based high-temperature superconductor $Ba_{1-x}K_xFe_2As_2$, and (5) clarification of the electronic properties of Fe-based ladder compounds.



$Ca_{1-x}Na_xIrO_3$ の電子相図。挿入図は、スピンと軌道が結合した相対論的電子の模式図。

Electronic phase diagram for $Ca_{1-x}Na_xIrO_3$. Inset is a schematic view of a spin-orbit coupled electron.

研究テーマ Research Subjects

1. 遷移金属化合物における磁性と超伝導
Magnetism and superconductivity in transition-metal compounds
2. 遷移金属化合物における輸送現象と光物性
Transport and optical properties of transition-metal compounds
3. 高压合成法を用いた新物質開発
Search for novel materials using high-pressure synthesis
4. 量子ビームを用いた構造物性研究
Investigation of structural properties using quantum beams

澤研究室

Sawa Group



澤 博
Hiroshi SAWA
客員教授
Visiting Professor

放射光X線回折を用いて物質の特異な量子現象の発現機構を明らかにする構造物性 (Structural material science) 研究を行っている。扱う物質群は酸化物などの無機材料から、有機分子性結晶まで多岐に渡り、超伝導、熱電材料、強相関電子系などの興味深い物性の理解を目指している。最近では、銅酸化物における量子液体状態の解明、新しい鉄系高温超伝導体の開発、新世代白色LEDのための蛍光体の開発研究、自己組織化する機能性分子による固体電解質、強相関軌道秩序と捉えられる分子性導体の分子軌道の直接観測など、多くの取り組みを所内外の研究者と協力して進めている。

The focus of our research is the structural material science to investigate the novel quantum phenomena using synchrotron X-ray diffraction experiments. The present targets include transition metal oxides and molecular crystals, where a variety of exotic phenomena appears. Our current research topics are as follows: clarification of the mechanism of spin-orbital entangled quantum state in cuprate, development of novel iron based superconductors, fabrication of the new emitting phosphor for white light-emitting diodes and so on.