

# 国際超強磁場科学研究施設

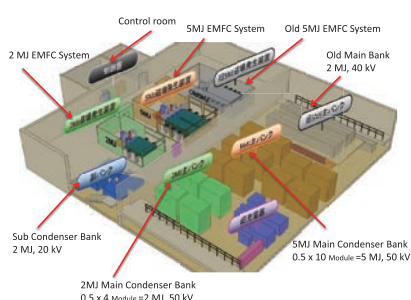
## International MegaGauss Science Laboratory

当施設では、パルスマグネットによって強力な磁場を発生し、様々な物質（半導体、磁性体、金属、絶縁体など）の性質を変化させてその電子状態を調べている。また、極限的な強磁場を用いた新物質相の探索も行っている。非破壊的に発生する磁場は80テスラ程度まで、破壊的な手法（一卷コイル法および電磁濃縮法）では730テスラまでが発生可能である。非破壊パルスマグネットは、精密な物性計測（電気伝導、光学、磁化測定など）、他の極限物理環境（高圧、低温）と組み合わせた実験、また国内外の強い磁場を必要とする物性科学の研究に幅広く利用されている。世界最大の直流発電機（210メガジュール）を用いた超ロングパルス（1～10秒程度）や非破壊100テスラ磁場発生の開発も強力に推進している。他方、破壊型装置では、100テスラ以上での超強磁場という量子極限状態での新しい物性を探索する研究を行っており、電磁濃縮法による1000テスラの発生に向けた開発も進行中である。

The aim of this laboratory is to study the physical properties of matter (such as semiconductors, magnetic materials, metals, insulators) under ultra-high magnetic field conditions. Such a high magnetic field is also used for realizing the new material phase and functions. Our pulse magnets can generate up to 80 Tesla by non-destructive way, and up to 730 Tesla by destructive (the single turn coil and the electro-magnetic flux compression) methods. The former serves for the physical precision measurements (the electro-conductance, the optics, and the magnetization). The multiple extreme physical conditions combining the strong magnetic field with ultra-low temperature and ultra-high pressure are also available, and are open for domestic as well as for international scientists. The magnet technologies are intensively devoted to developments for the quasi-steady long pulse magnet (an order of 1-10 sec) energized by the world largest DC generator (210 MJ), and also to a 100 Tesla class nondestructive magnet. Whereas, the explosive pulse magnets capable of generating over 100 T are oriented for new horizons in material science under such extreme quantum limit conditions. Development for 1000 T-generation by means of the electro-magnetic flux compression method is also our mission.

教授 Professor	嶽山 正二郎 TAKEYAMA, Shojiro	助教 Research Associate	近藤 晃弘 KONDO, Akihiro	技術専門員 Technical Associate	川口 孝志 KAWAGUCHI, Koushi
教授 (施設長) Professor (Director)	金道 浩一 KINDO, Koichi	助教 Research Associate	中村 大輔 NAKAMURA, Daisuke	技術専門職員 Technical Associate	澤部 博信 SAWABE, Hironobu
准教授 Associate Professor	徳永 将史 TOKUNAGA, Masashi	助教 Research Associate	三宅 厚志 MIHYAKE, Atsushi	技術専門職員 Technical Associate	松尾 晶 MATSUO, Akira
准教授 Associate Professor	松田 康弘 MATSUDA, Yasuhiro	助教 Research Associate	池田 暁彦 IKEDA, Akihiko	技術補佐員 Technical Staff	大矢 孝一 OYA, Kouichi
准教授* Associate Professor	長田 俊人 OSADA, Toshihito	特任助教 Project Research Associate	小濱 芳允 KOHAMA, Yoshimitsu	特任研究員 Project Researcher	坂井 義和 SAKAI, Yoshikazu
准教授 (客員) Visiting Associate Professor	石渡 晋太郎 ISHIWATA, Shintaro			特任研究員 Project Researcher	佐藤 由昌 SATO, Yoshiaki

\* 極限環境物性研究部門と併任 / concurrent with Division of Physics in Extreme Conditions



電磁濃縮超強磁場発生装置が新規導入された。実験室中央に位置するのは50 kV、5MJの主コンデンサバンクで、1000 Tの超強磁場発生が可能な設計となっている。横に配置されたのは同じく50 kV、2MJのコンデンサバンクであり、簡易型の電磁濃縮装置に電流を供給する。600 T程度の超強磁場発生が可能な設計となっている。電磁濃縮の初期磁場発生コイル用として、20kV、2MJ副コンデンサバンクが新規設置、より強い初期磁場が得られる。

Newly installed electro-magnetic flux compression (EMFC) system. The new EMFC generator energized by the 10 modules of 50 kV condensers, all together 5 MJ, is designed to generate 1000 T ultra-high magnetic fields. Another 2 MJ main condenser modules are used to inject an energy to the relatively light EMFC system for frequent use, but capable of generating around 600 T. The seed field coils, generating the initial magnetic field, which is compressed by the EMFC, are connected to the sub condenser bank modules of 20 kV, 2 MJ.

# 嶽山研究室

Takeyama Group



嶽山 正二郎  
TAKEYAMA, Shojiro  
教授  
Professor



中村 大輔  
NAKAMURA, Daisuke  
助教  
Research Associate

100テスラ以上の超強磁場発生技術開発とそのような極限環境下で発現する物性の探索的研究を行っている。磁場の発生方法として、電磁エネルギーを利用して磁束濃縮を行う「電磁濃縮法」と一巻き銅コイルに高速大電流を投入して超強磁場を発生する「一巻きコイル法」を採用している。「電磁濃縮法」では、すでに室内世界最高磁場発生730テスラを実現しているが、更に高い磁場発生とより精度と信頼度を高めた物性計測を目指した研究開発を進めている。「一巻きコイル法」では、発生磁場の方向により、横および縦型をそれぞれ有し、横型は主にレーザーを用いた磁気光学測定に、縦型では極低温容器と組み合わせた低温磁化測定、光ファイバーを利用した磁気光学測定に用いている。「一巻きコイル法」では再現性と高い測定精度が得られ、およそ300テスラまで物性実験を行っている。当研究室では、このような超強磁場量子極限環境下で、カーボンナノチューブ、グラフェンや半導体ナノ構造での超強磁場磁気光学による電子状態の解明、超伝導体の臨界磁場、フラストレート量子スピン磁性体などの超強磁場磁化過程の解明などを進めている。

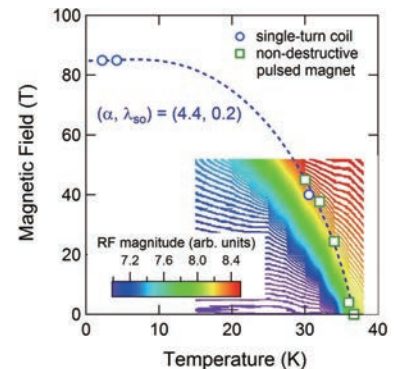
新しく開発された電磁濃縮法の超強磁場発生装置。5MJの高速コンデンサバンクから送り出される大電流(max 8 MA)が集電板を経由して主コイルに流れる。最大充電電圧や残留インピーダンスなどの装置の性能が向上したことで、1000 Tの室内実験世界最高磁場発生用途物性計測の確立を目指す。



Newly-developed ultra-high magnetic field generator of the electro-magnetic flux compression method. The 5MJ fast condenser bank is capable of supplying maximum electrical current of amount to 8 mega-ampere, which is injected to a primary coil through the collector plate. By upgrading the performance such as the maximum charging voltage and the residual impedance, ultra-high magnetic fields up to 1000 T are planned to generate.

We are engaged in development for generating ultra-high magnetic fields above 100 T, and pursue the solid-state science realized under such an extreme condition. We employ two methods for the ultra-high magnetic field generation, one is the electro-magnetic flux compression (EMFC) and the other is the single-turn coil (STC) method. We have established a new type of coil for the EMFC, and currently the maximum magnetic field is 730 T. This value is the highest achieved thus far in an indoor setting in the world. Further development is underway for achieving much higher fields, more precise and reliable measurements for the solid-state physics. The horizontal and vertical (H- and V-) STCs are used for more precise measurements up to 300 T, respectively, in accordance with their magnetic field axes. The H-STC is mainly used for magneto-optical measurements by use of laser optics, whilst the V-STC is more suitable for the study of low-temperature magnetization in a cryogenic bath. We are conducting the studies on magneto-optics of carbon nano-materials or of semiconductor nano-structures as well as on the critical magnetic fields in superconducting materials and on the high-field magnetization processes of the magnetic materials with highly frustrated quantum spin systems.

銅酸化物高温超伝導体  $\text{La}_{1.84}\text{Sr}_{0.16}\text{CuO}_4$  の温度-磁場相図。高周波電気伝導度から見積もられた上部臨界磁場の値が示されている(○: 一巻きコイル法、□: 非破壊パルスマグネット)。カラーマップは高周波プローブ信号の振幅の変化を示す。点線は Werthamer-Helfand-Hohenberg (WHH) 理論による上部臨界磁場曲線のフィッティング結果であり、パウリ効果が上部臨界磁場を決める要因になっている。



The temperature-magnetic field phase diagram of the cuprate superconductor  $\text{La}_{1.84}\text{Sr}_{0.16}\text{CuO}_4$ . The open symbols are the upper critical field evaluated from the high-frequency electrical conductivity measurement (○: single-turn coil, □: non-destructive pulsed magnet). The intensity map shows the evolution of the high-frequency probe signal. The dashed curve is a fitting curve of the upper critical field by the Werthamer-Helfand-Hohenberg (WHH) theory. The upper critical field is determined by the Pauli effect in this material.

## 研究テーマ Research Subjects

1. 破壊型超強磁場発生と物性計測技術開発  
Technical developments for destructive ultra-high magnetic field magnets and for solid-state physics measurements
2. 超強磁場磁気光学効果  
Magneto-optics in ultra-high magnetic fields
3. 超強磁場磁化過程、超伝導体の臨界磁場  
Magnetization processes of magnetic materials and the critical magnetic field in superconducting materials in ultra-high magnetic fields

国際超強磁場科学研究施設

International MegaGauss Science Laboratory

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

# 金道研究室

Kindo Group



金道 浩一  
KINDO, Koichi  
教授  
Professor



近藤 晃弘  
KONDO, Akihiro  
助教  
Research Associate

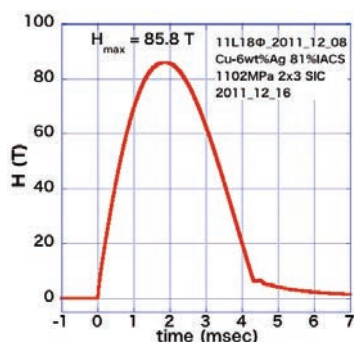


小濱 芳允  
KOHAMA, Yoshimitsu  
特任助教  
Project Research Associate

当施設に設置されたコンデンサー電源およびフライホイール付き直流発電機を用いて、非破壊で強磁場を発生し、その磁場下で精密な物性測定を行う。様々な用途に応じて、特殊なマグネットの開発を行っており、現在、ユーザーが利用可能な磁場条件は以下の二種類である。

- ①ショートパルスマグネット:パルス幅 5 ミリ秒、最大磁場 75 テスラ
- ②ミッドパルスマグネット:パルス幅 30 ミリ秒、最大磁場 65 テスラ
- ③ロングパルスマグネット:パルス幅約 1 秒、最大磁場 36 テスラ

ショートパルスマグネットは主に絶縁体の磁化測定などに用いられ、ミッドパルスマグネットは金属的な試料の測定に用いられている。当研究室で製作されたマグネットは非破壊パルス強磁場(単パルス)の世界記録を更新しており、現在も 100 テスラの発生を目指した開発を行っている。平成 20 年 5 月より世界最大のフライホイール付き直流発電機の運転が始まり、これを電源として用いることでパルス幅が 1 秒の磁場発生が可能となった。これを用いて磁場中比熱測定を行っている。またフラットトップ磁場を発生することにより強磁場下の  $\rho$ -T 測定も可能になった。もっと強磁場を発生出来るロングパルスマグネットの開発も進行中である。



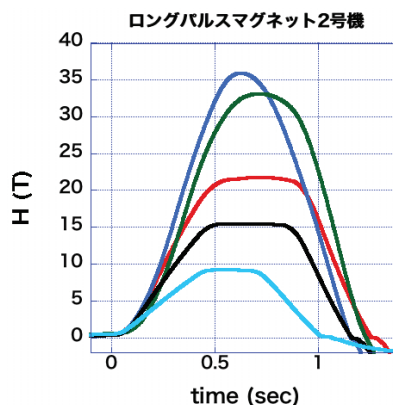
ショートパルスマグネットの磁場波形。非破壊単パルスでの 85T は世界最高記録。このマグネットを 75T の測定用としてユーザーに提供している。

Profile of magnetic field for Short pulse magnet. The maximum field of 85T is the highest record for mono-coil field. This magnet is used for the 75T-measurements as a user's coil.

We carry out precise measurements under non-destructive pulsed high magnetic fields that are generated by capacitor banks and flywheel DC generator installed at the facility. Various magnets have been developed at user's requests. Up to now, available field conditions for users are as follows.

1. Short pulse magnet: Pulse duration 5 ms, maximum field 75 T
2. Mid pulse magnet: Pulse duration 30 ms, maximum field 65 T
3. Long pulse magnet: Pulse duration 1 sec, maximum field 36 T

Short pulse magnet is used mainly for magnetization measurements on insulating materials and Mid pulse magnet is used for various measurements on metallic materials. Our magnet has been breaking the world record of non-destructive mono-coil field and we continue to develop a new magnet aiming at the new world record of 100 T. We have installed the flywheel DC generator on May 2008. The generator enables us to generate long pulsed field with the duration of 1 second. The Long pulsed field is used for the heat capacity measurement under high field and the  $\rho$ -T measurement can be done by use of flat-top field. Higher long pulsed field are under development.



ロングパルスマグネットの磁場波形。現在の最大磁場は 36T。このマグネットを磁場中比熱測定用としてユーザーに提供している。

Profiles of magnetic field for Long pulse magnet. The maximum field of 36 T is used for the heat capacity-measurements under high field.

## 研究テーマ Research Subjects

1. 量子スピン系物質の磁性研究  
Study on magnetism of quantum spin systems
2. 強相関伝導物質の磁性と伝導の研究  
Study on magnetism and conductivity of strongly correlated electron systems
3. 非破壊 100 テスラマグネットの開発  
Development of non-destructive 100 T-magnet
4. 超ロングパルスマグネットの開発  
Development of ultra-long pulse magnet

# 徳永研究室

Tokunaga Group



徳永 将史  
TOKUNAGA, Masashi  
准教授  
Associate Professor



三宅 厚志  
MIYAKE, Atsushi  
助教  
Research Associate

磁場は電子のスピン、軌道および位相に直接作用する外場であり、物性物理学の幅広い研究分野で不可欠な外場である。我々は瞬間的にのみ発生可能な強磁場環境下において、磁化、磁気抵抗、電気分極、偏光顕微鏡観察など多岐にわたる測定手段を駆使して、強磁場下で起こる様々な相転移の研究を行っている。

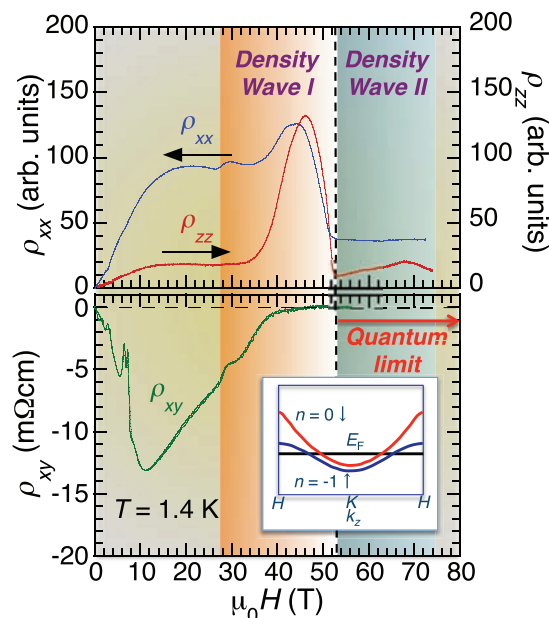
最近我々が注目しているテーマの一つに量子極限状態にある半金属の相転移がある。キャリア数の少ない半金属では、パルスマグネットで発生可能な磁場範囲で、すべてのキャリアが最低ランダウ準位のみを占有する量子極限状態が実現できる。我々は代表的半金属として知られているグラファイトに対して最大 75 T までのパルス強磁場下における磁気抵抗、ホール抵抗および磁化測定を行った。その結果は 53 T 付近で量子極限状態が実現していることを示唆しており、より強磁場では量子極限状態における新たな電子相の出現を示す電気抵抗の非単調な増大が観測されている。この新たな相の解明に向けて現在多方面からの実験を遂行している。

パルス強磁場下で測定した単結晶グラファイトの(上図)面内( $\rho_{xx}$ )および面間( $\rho_{zz}$ )磁気抵抗と(下図)面内のホール効果( $\rho_{xy}$ )。磁場はc軸方向に印加した。下図の挿入図は約53 Tでフェルミ面と交差していると考えられる2本のランダウサブバンドの分散関係。53 T以上の量子極限状態で観測された $\rho_{zz}$ の非単調な増大は新たな電子相の出現を示唆している。

(top) in-plane ( $\rho_{xx}$ ) and out-of-plane ( $\rho_{zz}$ ) magnetoresistance and (bottom) in-plane Hall resistance ( $\rho_{xy}$ ) of single crystals of graphite measured in pulsed high magnetic fields applied along the c-axis. The inset in the lower figure schematically shows the expected dispersion relation of the two Landau subbands crossing the Fermi energy. Anomalous increase of the  $\rho_{zz}$  in this quantum limit state suggests the emergence of novel electronic state above 53 T.

Magnetic fields have been extensively used in broad research fields of solid state physics because they can directly tune the spins, orbitals and phases of the electrons. We study various kinds of phase transitions in high magnetic fields with using non-destructive pulse magnets and various experimental techniques; e.g. magnetization, magnetoresistance, electric polarization, polarizing optical microscopy, and so on.

As one of our recent projects, we focus on the phase transitions of semimetals in the quantum limit state. Owing to the small carrier density, some semimetals can go into the quantum limit state, in which all the carriers occupy only the lowest Landau level, in the field range accessible by pulse magnets. Our magnetic and transport measurements on graphite, which is known as a typical semimetal, suggest the emergence of the quantum limit state above about 53 T. The non-monotonic increase in the resistance at the higher field indicates the emergence of a novel electronic phase above 53 T. We are carrying out various experiments on graphite to make clear the nature of this novel phase.



## 研究テーマ Research Subjects

1. マルチフェロイック物質の磁場誘起相転移  
Field-induced transitions in multiferroic materials
2. 量子極限状態における電子相転移  
Electronic phase transitions in the quantum limit state
3. パルス強磁場下における高速偏光顕微鏡観察  
High-speed polarizing microscope imaging in pulsed-high magnetic fields
4. 高温超伝導体の強磁場物性  
High-field studies on high temperature superconductors

# 松田康弘研究室

Y. Matsuda Group

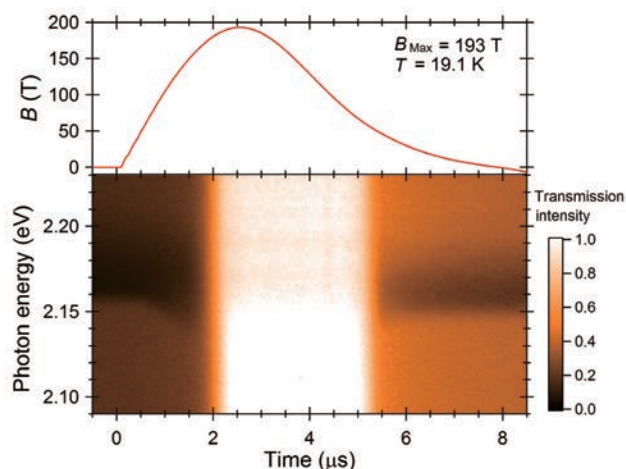


松田 康弘  
MATSUDA, Yasuhiro  
准教授  
Associate Professor



池田 暁彦  
IKEDA, Akihiko  
助教  
Research Associate

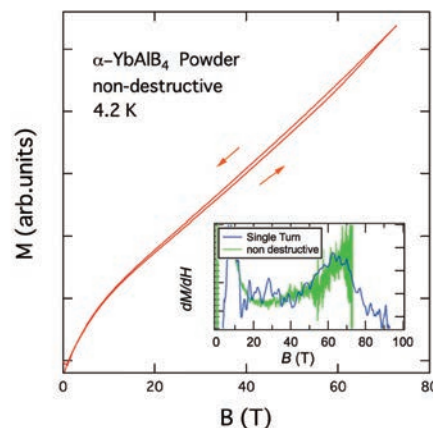
本研究室では嶽山研究室と連携し、磁場誘起相転移やクロスオーバー現象を中心に、100 テスラを超える超強磁場領域での固体の電子・磁気物性の研究を行っている。物性研究所の電磁濃縮法は700 テスラ級の超強磁場発生が可能であり、その際のゼーマンエネルギーは温度換算で室温を大きく超えるため、多くの物質で顕著な磁場効果が期待できる。具体的には、(1) 固体酸素の磁場誘起新規相の解明、(2) 磁場誘起絶縁体 - 金属転移、(3) 低次元量子スピン系の強磁場磁化過程、(4) 重い電子系の磁場中電子状態、などの研究を行っている。また、SPRING-8 や KEK-PF において非破壊型パルス強磁場を用いた 40 T 程度での X 線吸収分光や X 線磁気円二色性分光の研究も行っており、ここからは微視的な視点から磁場誘起現象の理解が得られると期待できる。



固体酸素  $\alpha$  相から強磁場新規相への磁気光吸収スペクトルの変化。上図は磁場波形。Magnetotransmission spectra image at the field-induced phase transition from the  $\alpha$  phase to novel phase of solid oxygen. The upper panel shows the waveform of the magnetic field.

We have been studying the electronic and magnetic properties of matter in ultrahigh magnetic fields exceeding 100 T in collaboration with Takeyama Group. Magnetic-field-induced phase transitions and crossover phenomena in strongly correlated systems are the main subjects.

Magnetic field can precisely control the electronic states through the Zeeman effect and Landau quantization. In ISSP, a 700-Tesla magnetic field is generated by the electromagnetic flux compression technique. Since the Zeeman energy in such a high field is larger than the energy corresponding to a room temperature, significant field effects are expected. Specifically, the following subjects are studied: (1) Novel magnetic-field-induced phase of solid oxygen, (2) Magnetic-field-induced insulator-metal transition, (3) Magnetization process of quantum spin systems, and (4) Electronic states of heavy fermions in high magnetic fields. We also carry out the X-ray magneto-spectroscopy in pulsed high magnetic fields using synchrotron X-rays at the SPRING-8 and KEK-PF. Element- and shell-selective X-ray magneto-spectroscopy is expected to uncover the microscopic mechanism of magnetic-field-induced phenomena.



価数揺動物質  $\alpha$ -YbAlB<sub>4</sub> の超強磁場磁化過程。挿入図は磁化の磁場微分の磁場依存性

Ultrahigh magnetic field magnetization process in a valence fluctuating compound  $\alpha$ -YbAlB<sub>4</sub>. The field derivative of the magnetization is plotted as a function of magnetic field in the inset.

## 研究テーマ Research Subjects

1. 固体酸素の磁場誘起新規相の解明  
Study of the magnetic-field-induced novel phase of solid oxygen
2. 磁場誘起絶縁体 - 金属転移  
Magnetic field-induced insulator-metal transition
3. 低次元量子スピン系の強磁場磁化過程  
Magnetization process of quantum spin systems
4. 重い電子系の磁場中電子状態  
Electronic states of heavy fermions in high magnetic fields

# 石渡研究室

Ishiwata Group



石渡 晋太郎  
ISHIWATA, Shintaro  
客員准教授  
Visiting Associate Professor

無数の電子が織りなす不可思議な量子現象の発見とその理解を目指し、我々は固体化学を出発点とした物性研究を行っている。これまで、巨大電気磁気効果、異常磁気輸送現象、高温超伝導、巨大熱電効果など、従来の固体電子論による記述が困難な現象を示す無機化合物の開拓を進めてきた。

一般に、望みの物性を示すバルク物質を設計開発することは困難である。従って合成のターゲットは通常、望みの物性を示す既知の系の周辺物質から始まり、それらと同様な特異なスピン構造・バンド構造をもつ系へと広げられるが、常圧の固相反応法による物質開発は、ほどなく頭打ちになってしまう。我々はその先に進むべく、超高压合成やソフトケミストリーなどの特殊な合成手法を積極的に活用している。また、新奇な量子現象の戦略的な発掘を目指した、超高压・強磁場などの極限環境下における物性測定にも力を入れている。徳永准教授とは、強磁場下における新奇な磁気輸送現象の探索を進めている。

We are studying condensed matter physics to discover and understand mysterious quantum phenomena of countless electrons as solid state chemists. So far, we have mainly synthesized and studied inorganic compounds showing unusual phenomena such as giant magnetoelectric effect, anomalous magnetotransport, high-temperature superconductivity, and giant thermoelectric effect, which can not be fully described by the conventional solid state electronics.

Generally, it is rather difficult to design a new bulk material showing interesting physical properties. Thus, the search for such materials is typically starting from the related compounds of the known interesting system, followed by synthesizing isoelectronic compounds. However, such compounds obtained by conventional solid state reactions are limited. To overcome this situation, we adopt special synthetic methods such as a high-pressure technique and a soft chemistry process. Furthermore, we put our efforts on the measurements of physical properties under high pressures and/or high magnetic fields to search for novel quantum phenomena. For the measurements at high magnetic fields, we collaborate with Tokunaga laboratory.