

国際超強磁場科学研究所

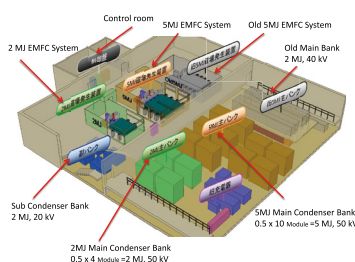
International MegaGauss Science Laboratory

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 1000 テスラ程度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、1000 テスラ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いる。

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 1000 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 1000 Tesla are oriented for new horizons in material science under such extreme quantum limit conditions.

教授 Professor	嶽山 正二郎 TAKEYAMA, Shojiro	助教 Research Associate	三田村 裕幸 MITAMURA, Hiroyuki	技術専門職員 Technical Associate	澤部 博信 SAWABE, Hironobu
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	松尾 晶 MATSUO, Akira
准教授 Associate Professor	徳永 将史 TOKUNAGA, Masashi	助教 Research Associate	三宅 厚志 MIYAKE, Atsushi	学術支援職員 Technical Associate	大圃 一実 OHATA, Katsumi
准教授 Associate Professor	松田 康弘 MATSUDA, Yasuhiro	助教 Research Associate	池田 暁彦 IKEDA, Akihiko	特任研究員 Project Researcher	栗原 綾佑 KURIHARA, Ryosuke
准教授 Associate Professor	小濱 芳允 KOHAMA, Yoshimitsu	特任助教 Project Research Associate	今城 周作 IMAJO, Shusaku	特任研究員 Project Researcher	坂井 義和 SAKAI, Yoshikazu
准教授* Associate Professor	長田 俊人 OSADA, Toshihito	特任助教 Project Research Associate	木下 雄斗 KINOSHITA, Yuto	特任研究員 Project Researcher	松井 一樹 MATSUI, Kazuki
		技術専門員 Technical Associate	川口 孝志 KAWAGUCHI, Koushi	特任研究員 Project Researcher	ヤン ツォウ YANG, Zhuo

* 所内兼務。本務は凝縮系物性研究部門。 / concurrent with Division of Condensed Matter Science



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

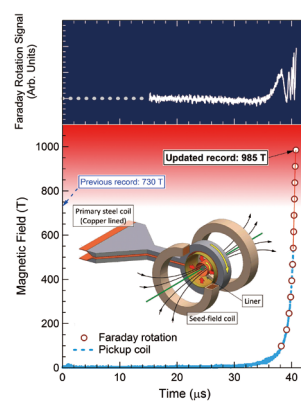
100テスラ以上の超強磁場発生技術開発とそのような極限環境下で発現する物性の探索的研究を行っている。超強磁場の発生手段として、電磁エネルギーを利用して磁束濃縮を行う「電磁濃縮法」と一巻き銅コイルに高速大電流を投入して超強磁場を発生する「一巻きコイル法」を用いている。「電磁濃縮法」では、2018年1月に室内世界最高磁場発生985テスラを実現しているが、更に高い磁場発生とより精度と信頼性を高めた物性計測を目指した研究開発を進めている。2010年より「電磁濃縮1000T計画」の下に装置建設を推進してきた。「一巻きコイル法」では、発生磁場の方向により、横および縦型をそれぞれ有し、横型は主にレーザーを用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200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を通しての磁気物性の解明などを進めている。



新しく開発され完成した電磁濃縮法1000テスラ超強磁場発生装置。5MJと2MJ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。最大充電電圧や電源からコイルへのエネルギー伝達効率などの装置の性能が向上したことで、1000T以上の室内実験世界最高磁場発生が見込まれる。1000テスラを超えた物性計測の開発を目指して建設を進めてきた。

Newly-developed ultra-high magnetic field generator of the electro-magnetic flux compression method. The 5 MJ and 2 MJ fast condenser bank are capable of supplying several mega-amperes, which are injected into a primary coil through the collector plate. By upgrading the performance such as the maximum charging voltage and energy transfer efficiency, ultra-high magnetic fields exceeding 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 985 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. We are now involved in construction of ultra-high magnetic field generator system under the 1000 T project. The horizontal and vertical (H- and V-) STCs are used for more precise measurements up to 200 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.



電磁濃縮超強磁場発生装置で985テスラの磁場発生と磁場値の計測に成功した。ほぼ1000テスラに到達、2011年に嶽山グループが達成した730テスラの自己記録を大幅に更新した。上の図は磁場計測に用いたファラデー回転信号。挿絵は同じく嶽山により開発された新型の磁場発生コイル(銅内張りコイル)とその両側に種磁場コイル。磁場検出コイルでは500テスラまで計測できて、それより強磁場はファラデー回転からの信号で測定された。

The world record for the highest magnetic field generated in laboratories housed in a building has been broken, achieving 985 T and approaching 1000 T. This is applicable to the measurement of physical properties by the electromagnetic flux compression (EMFC) method. Faraday rotation of quartz was used to monitor the magnetic fields that were measured close to the highest value. Record magnetic fields, close to 1000 T, were detected showing that it is possible to generate such flux densities and indicating that it is also possible to measure physical properties in super-strong magnetic fields in the region of 1000 T.

研究テーマ Research Subjects

1. 100 T 以上の超強磁場発生と物性計測技術開発
Technical developments for ultra-high magnetic field magnets above 100 T 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

金道研究室

Kindo Group



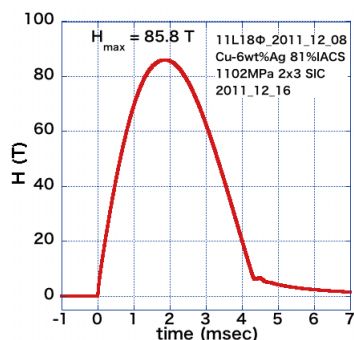
金道 浩一
KINDO, Koichi
教授
Professor



今城 周作
IMAJO, Shusaku
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三種類である。

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 43 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 ρ -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。



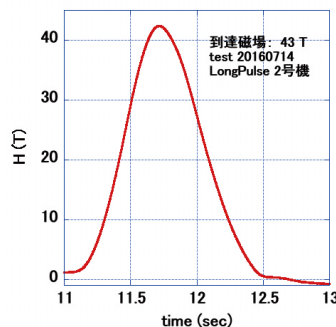
ショートパルスマグネットの磁場波形。非破壊単パルスでの 85T は世界最高記録。このマグネットを 75T の測定用としてユーザーに提供している。

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 43 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 ρ -T measurement can be done by use of flat-top field. Higher long pulsed field is 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 43T。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 43 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



三田村 裕幸
MITAMURA, Hiroyuki
助教
Research Associate



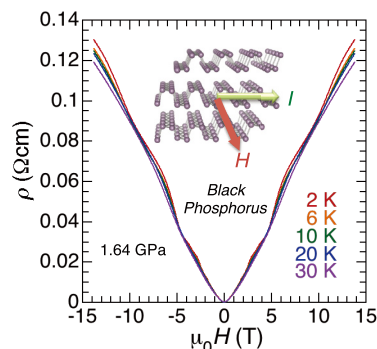
木下 雄斗
KINOSHITA, Yuto
特任助教
Project Research Associate

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。我々は瞬時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精密測定手段を開発・改良し、それら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。

具体的な研究対象の一つとして、量子極限状態における電子物性に注目している。量子極限状態は磁場による閉じ込め効果のため超強相関電子系とみなすことができる。正負のキャリアが共存する半金属を中心に量子極限状態の物性測定を行い、グラファイトにおける磁場誘起量子相や多重極限環境下における半金属黒燐の異常量子伝導などを研究している。

磁気秩序を持つ強誘電体であるマルチフェロイック物質に対して、磁場挿引速度の大きいパルス磁場下で実現できる高感度測定を生かした研究を行っている。代表的マルチフェロイック物質として知られるBiFeO₃においては、双極性抵抗変化メモリー効果や磁場制御可能な強弾性歪みの存在、磁場誘起新奇マルチフェロイック相などを発見している。

また年間40件程度の共同利用研究を行い、様々な遍歴局在スピ系物質、トポロジカル物質などの強磁場物性研究を展開している。



多重極限環境下で測定した単結晶黒燐の磁気抵抗効果。挿入図は黒燐の結晶構造を模式的に示している。図中に示したように、磁場をa軸方向に印加してc軸方向の抵抗を測定した。14 Tまでの磁場範囲で1000倍を超える巨大な正の磁気抵抗効果と、それに重畳した量子振動現象が観測されている。

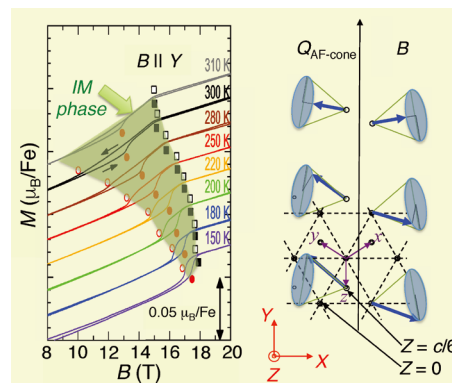
Magnetoresistance of a single crystal of black phosphorus under multiple extreme conditions. Inset shows schematic illustration of the crystal structure. Resistance along the c axis was measured in magnetic fields applied along the a axis. We observed huge positive magnetoresistance larger than 1,000 times of the value at zero field together with superposed Shubnikov-de Haas oscillations.

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 electrons in materials. We study various kinds of phase transitions in high magnetic fields with using non-destructive pulse magnets and developing/up-grading 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 electronic states in the ultra-quantum limit state. Since charge carriers are confined in the smallest cyclotron orbit, Coulomb interaction dominates over the kinetic energy. Therefore, we can realize strongly correlated electron systems in the quantum limit states. In particular, we have been focusing on the semimetals having even number of electrons and holes, and found a novel field-induced phase in graphite and anomalous quantum transport properties in black phosphorus under multiple extreme conditions.

We are also studying multiferroic materials through high precision experiments in pulsed-fields. In BiFeO₃, which is perhaps the most extensively studied multiferroic material, we found bipolar resistive memory effect, magnetic control of ferroelastic strain, and novel multiferroic phase at around room temperature.

In addition to these in-house studies, we accept about 40 joint research projects per year and study various localized/itinerant magnets and topological materials in high magnetic fields.



(左) 新奇マルチフェロイック相(IM相)の存在を示すBiFeO₃単結晶の磁化曲線。(右) IM相で期待されるコニカル型磁気秩序状態におけるスピン配列の模式図。

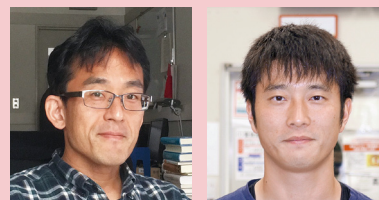
(left) Magnetization curves of single crystals of BiFeO₃. Anomalies of magnetization curves shown in the shaded area suggest emergence of a novel multiferroics phase (IM phase) in this field-temperature region. (right) Schematic illustration of the spin arrangement in the IM phase.

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. トポロジカル物質の強磁場物性研究
High-field study of topological materials

松田康弘研究室

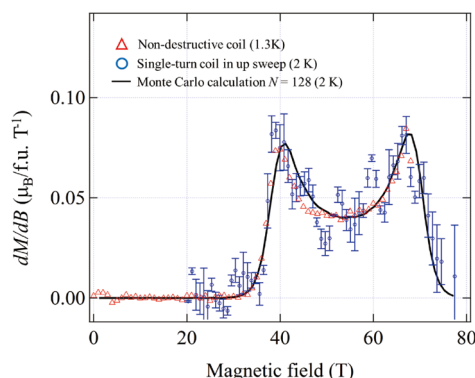
Y. Matsuda Group



松田 康弘
MATSUDA, Yasuhiro
准教授
Associate Professor

池田 暁彦
IKEDA, Akiniko
助教
Research Associate

1000 T までの超強磁場下で現れる物質の性質について研究を行っている。磁場は電子のスピンや軌道運動に直接作用し、強力な磁場により物質の基底状態は大きく変化する。低次元スピン系における非自明な磁気構造、遷移金属酸化物での新奇な局在-遍歴転移、分子性固体における強いスピン-格子結合などを通じ、強磁場中では様々な新規相が期待される。熱励起を抑制した極低温において生じる磁場誘起相転移は量子相転移であり、低磁場では励起状態として存在した状態が、強磁場中で新たな基底状態となる。そのため物質の有する隠れた潜在的性質が磁場中で顕在化し、新現象が現れることが期待できる。100 T を大きく超える磁場の発生には破壊型のマグネットを用いる必要があり、その技術的障壁を越えた先には未開拓の研究領域が広がっている。100 ~ 1000 T 領域における新奇相や新現象の発見のために様々な新しい計測技術の開発にも積極的に取り組んでいる。



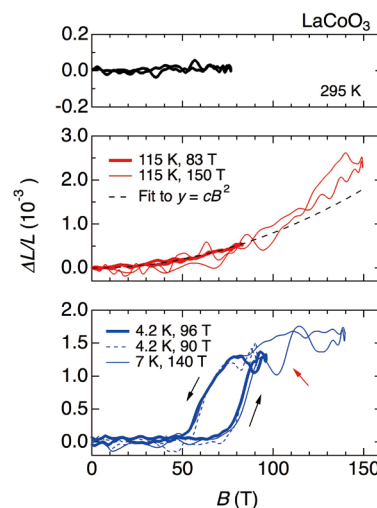
$S=1/2$ の有機スピンラダー物質 BIP-BNO の磁化の磁場微分 (dM/dB) の磁場依存性。ラダーに特徴的な 2 本の明瞭なピーク構造が観測されている。

Magnetic field dependence of the magnetic-field derivative of the magnetization (dM/dB) in $S=1/2$ two-leg organic spin-ladder compound BIP-BNO. The distinct two peaks are the characteristic of the spin ladder system.

We have studied properties of matters that emerge under ultrahigh magnetic fields of up to 1000 T. Ground state of matter can dramatically be changed by applying such strong magnetic field, since spin and kinetic motion of electrons are directly affected by magnetic field. Various kinds of novel phases are expected to emerge in the strong magnetic fields through the phenomena such as formation of nontrivial magnetic structure in low dimensional spin systems, exotic local-itinerant transition in strongly-correlated magnetic compounds, and strong spin-lattice coupling in molecular solids. The field-induced phase transition without thermal excitation at a low temperature is a quantum phase transition where the excited state in weak fields transforms to the new ground state in strong fields. Thus, hidden potential characters of matter appear in strong magnetic fields and novel phenomena can occur. Only short-duration destructive pulsed magnets can produce strong fields far exceeding 100 T; beyond overcoming the technical difficulties regarding the destructive magnetic field, unexplored research fields open. We have also enthusiastically developed new measurement techniques to discover the exotic novel phases in the field range of 100 ~ 1000 T.

Fiber Bragg Grating (FBG) により測定された LaCoO_3 の磁歪。それぞれ異なる温度における結果をしめしている。

Magnetostriction of LaCoO_3 measured with the Fiber Bragg Grating (FBG). The results at different temperatures are shown.



研究テーマ Research Subjects

1. 磁場誘起絶縁体-金属転移
Magnetic-field-induced insulator-metal transition
2. 量子スピン系の超強磁場磁化過程
Ultrahigh-magnetic-field magnetization process of quantum spin systems
3. 重い電子及び価数揺動電子系の超強磁場下での電子状態
Electronic state of heavy fermion and valence fluctuating systems at ultrahigh magnetic fields
4. 固体酸素の磁場誘起構造相転移
Magnetic-field-induced structural phase transition in solid oxygen
5. スピン-格子強結合系の磁場中の物性
Properties of matters with strong spin-lattice coupling in high magnetic fields

小濱研究室

Kohama Group



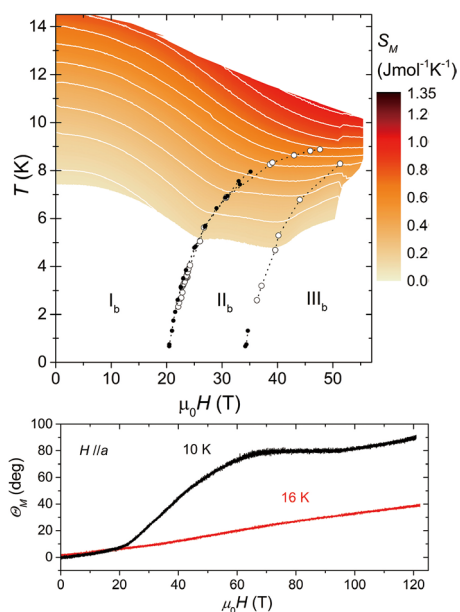
小濱 芳允
KOHAMA, Yoshimitsu
准教授
Associate Professor

100 テスラを超える超強磁場は、ごく最近までその発生すら困難であった極限環境であり、人類未踏の研究領域といえる。このような極限環境下では多彩な物理現象が予想されており、当研究室ではこれら新奇物理現象の発見そして解明を目指している。主な実験手法としては、『1. レーザーを用いた磁気光学測定』、『2. 微細加工デバイスによる超高速電気抵抗測定』そして『3. FPGA デバイスによるパルス強磁場 NMR 測定』を採用しており、これにより様々な強相関電子系における諸現象を探索している。現在の主なテーマは、トポロジカル絶縁体や超伝導物質における強磁場伝導状態の研究や、量子スピン系化合物の磁場誘起相の探索である。また最終的な目標には、1000 テスラ領域での精密な物性研究を掲げており、この達成のために超強磁場発生技術および新規測定技術の開発にも力を注いでいる。

Ultra-high magnetic field (higher than 100 T) is an extreme condition that remains unexplored until recently. Many of unprecedented phenomena are expected to appear in ultra-high magnetic field region, and our group focuses on the observation/understanding of those exotic phenomena. To achieve this goal, we employ the following experimental techniques, “1. Magneto-optical measurement technique”, “2. Ultra-fast magnetoresistance measurement with micro-fabricated devices” and “3. High-field NMR experiment with a FPGA module”. With these techniques, we currently investigate the magnetotransport in topological insulators/superconductors and the novel magnetic phases in quantum spin systems. Our final goal is the condensed matter researches at ultra-high magnetic field region up to ~1000 T, and thus our future work will be also devoted to technical developments for ultra-high magnetic field generations as well as the improvements of measurement techniques.

(a) AuGe フィルムを用いた測定された BiCu_2PO_6 の磁気熱量効果。(b) レーザー光を用いたファラデー回転角。磁気熱量効果の測定は等エントロピー変化 ($T(H)$ s) の測定と同意義であり、磁気相転移に伴う温度変化を観測している。ファラデー回転角はシングルターンコイルを用い 120 T まで測定しており、60 T 付近、90 T 付近で相転移を検出した。

(a) Magnetocaloric effect (MCE) of BiCu_2PO_6 measured by AuGe thin film. (b) Faraday rotation angle of BiCu_2PO_6 measured by laser optics. The MCE data should correspond to the isentropic $T(H)$ s curve in which the temperature change due to field-induced phase transition were observed. The Faraday rotation angle was measured up to 120 T by using a single turn coil system, where the field-induced phase transitions were detected at ~60 and ~90 T.



研究テーマ Research Subjects

1. レーザーを用いた磁気光学効果の研究とその超強磁場科学への応用
Magneto-optical measurements with laser optics and its application to ultra-high magnetic field science
2. パルス強磁場下における NMR 測定とフラストレート磁性体への応用
NMR measurement under pulsed fields and its application to frustrated magnetic materials
3. 微細加工技術を用いた新規デバイスの開発
Development of new device with Nanofabrication process
4. 超強磁場を用いた量子振動の観測とトポロジカル絶縁体のフェルミオロジー
Observation of Quantum Oscillation in Ultra-high magnetic fields and fermiology of topological insulators
5. 微細加工技術を用いた新規測定デバイスの開発
Development of new measurement device with Nanofabrication technology