

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 5 月 30 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(S)

研究期間：2012～2016

課題番号：24224010

研究課題名(和文)重い5d遷移金属酸化物のスピン軌道相互作用と新奇電子相

研究課題名(英文)Strong spin-orbit interaction and novel electronic phases in heavy 5d transition metal oxides

研究代表者

高木 英典(Hidenori, Takagi)

東京大学・大学院理学系研究科(理学部)・教授

研究者番号：40187935

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 164,200,000円

研究成果の概要(和文)：5d遷移金属酸化物の強いスピン軌道相互作用と電子相関の協奏により生み出される新奇電子相の発見と学理構築を目標として研究を推進した。スピン軌道相互作用誘起ハイゼンベルグ磁性、ディラック半金属、磁性絶縁体転移、スピン軌道相互作用と軌道秩序の競合などを明らかにすると同時に、量子スピン液体、新奇トポロジカル相、励起子絶縁体、スピン流検出機能を実現する新物質相を発見/創成した。

研究成果の概要(英文)：We had explored the exotic electronic phases produced by an interplay between electron correlations and in 5d transition metal oxides and physics behind them. Spin-orbit coupling induced Heisenberg magnetism, Dirac semimetal-magnetic insulator transition and competition between spin-orbit coupling and orbital ordering were revealed. New compounds with a quantum spin liquid state, an exotic topological phase, an excitonic insulating state and spin detection function were discovered/designed.

研究分野：物性物理実験、固体化学

キーワード：スピン軌道相互作用、電子相関、5d遷移金属酸化物、イリジウム、スピン軌道モット絶縁体、相関トポロジカル半金属、トポロジカル量子スピン液体、スピン流検出

1. 研究開始当初の背景

重い元素で相対論効果が顕著な 5d 遷移金属の酸化物、特にイリジウム複合酸化物は相関電子物理の新しいパラダイムである。これまで相関電子物理の主な舞台は、同じ d 軌道を占めた時のクーロン反発 (電子相関) U が 3-10 eV 程度に及ぶ銅酸化物やマンガン酸化物をはじめとする 3d 遷移金属酸化物であった。これに対して、 U が 2 eV 程度と小さい 5d 遷移金属酸化物は、弱相関ゆえに物理的に自明な電子状態を有すると長く考えられていた。

本研究の申請時は、まさにこの認識が変わろうとしていた時期であった。重い 5d 遷移金属元素では相対論効果に起因するスピン軌道相互作用が 1 eV 近くと 3d 元素より一桁以上大きい。5d 遷移金属酸化物ではスピン軌道相互作用は電子の運動エネルギーや U に対して無視できず、実際には非自明な電子状態が出現する大きな可能性を秘めている。

認識の変化の契機となったのは、本課題がスタートする数年前の申請者らの成果である。層状ペロブスカイト Sr_2IrO_4 において、強いスピン軌道の帰結として、「スピン軌道モット絶縁体」と呼ぶ新奇な電子固体が実現することを X 線共鳴散乱の実験により示した。1 eV 近いスピン軌道相互作用は 5d t_{2g} バンドを $J_{\text{eff}}=1/2$ バンドと 3/2 バンドに分裂させ、半充填の $J_{\text{eff}}=1/2$ バンド (一つの軌道に一つの電子) が出現するため、比較的弱い U のもとでも相関効果が顕著となることが明らかとなった。

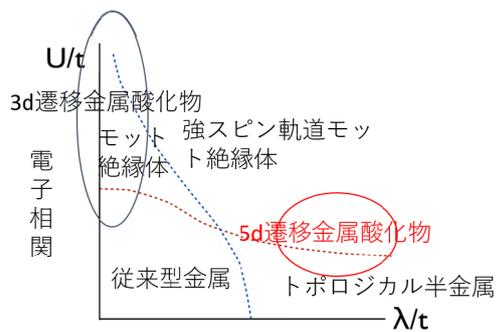
スピン軌道複合体である $J_{\text{eff}}=1/2$ の波動関数を有する電子が、比較的弱い U にもかかわらず遍歴・局在のはざまにあることが明らかとなったことにより、申請者らは相関電子物理の新しいパラダイムが出現しうると確信した。図 1 に電子相関とスピン軌道相互作用の関数としての 5d 遷移金属酸化物の位置づけを示す。絶縁体側では、量子力学的位相因子を内包した $J_{\text{eff}}=1/2$ モーメントが交換相互作用や超交換相互作用を通じて相互作用するために新奇な磁性、例えば量子スピン液体やスピン軌道相互作用誘起のハイゼンベルグ磁性などが期待できる。遍歴側はトポロジカル電子相の強相関版と見なすことができる。これらスピン - 軌道複合体の織り成す電子相の素励起も新しい物理である。

2. 研究の目的

上記の認識のもと本課題は 5d 遷移金属酸化物におけるスピン軌道相互作用と電子相関の協奏の物理を物性科学 (相関電子物理) の新分野として確立する。

3. 研究の方法

上記目的を達成するために、5 年間の研究期間を通じて、新奇電子相、特にスピン軌道モット絶縁体、新奇量子磁性相、相関トポロジカル相を開拓し、同時にこれらの相競合や



スピン軌道相互作用

図 1 電子相関 (クーロン反発) エネルギーとスピン軌道相互作用エネルギーの関数としての 2 次元相図 (概念図)。3d 遷移金属に対する 5d 遷移金属の位置づけ、スピン軌道相互作用によるモット絶縁体の安定化を示す。図のアイデアは Leon Balents 氏による。

スピン軌道強結合系の特徴的電子構造、素励起などの物理を明らかにする。物質探索、基礎物性測定、重い 5d 元素で強みを発揮する共鳴 X 線散乱などを駆使する。

4. 研究成果

5 年間で上記の目標はほぼ実現し、また励起子絶縁体などの予想外の進展があった。特筆すべき成果として、トポロジカルスピン液体の舞台となる物質の開発、スピン軌道モット絶縁体 Sr_2IrO_4 の素励起・磁性の理解、ディラック半金属と磁性絶縁体の相競合の制御、スピントロニクス機能の開拓を挙げたい。5d 遷移金属酸化物の科学は、相関電子物理とトポロジカル電子物理をつなぐ領域として、関連国際会議でシンポジウムが開催されるなど、物性の一分野として確立した。上記の成果は低温国際会議 (LT28 予定) やフラストレーション磁性国際会議 (HFM) などの主要国際会議において基調講演に選ばれ、分野の進展を代表する位置づけにある。

(1) スピン軌道相互作用が誘起する新奇電子局在電子相

① スピン軌道モット絶縁体 Sr_2IrO_4 の 2 次元ハイゼンベルグ反強磁性 ([2], [11], [19]) : スピン軌道モット絶縁体はその最外殻電子がスピン軌道複合 $J_{\text{eff}}=1/2$ 状態で記述されるため、3d モット絶縁体と質的に異なる磁性が予測される。 $J_{\text{eff}}=1/2$ モーメントが酸素との 180° 結合で結ばれる Sr_2IrO_4 では、異方性の起源であるスピン軌道相互作用が、等方的ハイゼンベルグ結合をもたらすことを実証した。放射光共鳴 X 線磁気散乱実験の 2 次元磁気散漫散乱から $J_{\text{eff}}=1/2$ モーメントの動的相関長の温度依存性を測定し、磁気ダイナミクスが反強磁性相互作用 $J \sim 0.1$ eV の 2 次元ハイゼンベルグモデルでのみ記述できるこ

とを示した。磁化率の振る舞いも平均場近似の範囲内で、上記の結果と整合することを明らかにした。スピン軌道相互作用によって、銅酸化物超伝導体の母物質 La_2CuO_4 と等価な状態が実現したことになる。この結果を受けて、世界各地でドーピング実験が盛んに行われている。

② 2次元 Ir ハニカム酸化物の Kitaev 型トポロジカルスピン液体： x, y, z 方向にのみ働く 3 種類の強磁性イジング結合が 3 つの 120° 結合からなるハニカム格子の上に順番に置かれると競合する (図 2(a))。この状況を記述する Kitaev 模型は基底状態が量子スピン液体状態となることが厳密解として知られている。素励起には局在遍歴 2 種類のマヨラナ粒子が登場することもあり、注目を集めた。

$\alpha\text{-Li}(\text{Na})_2\text{IrO}_3$ は Ir^{4+}O_6 八面体が稜共有で隣接し、2 次元ハニカム格子を構築する。この時 $J_{\text{eff}}=1/2$ 波動関数の複素位相項の存在により干渉効果が生じ、 $J_{\text{eff}}=1/2$ モーメント間の超交換相互作用は $\text{Ir-O}_2\text{-Ir}$ 面に垂直な方向のイジング強磁性結合を与える。すなわち超交換相互作用だけなら、現実の物質中で Kitaev 模型が実現している。世界中で $\alpha\text{-Li}(\text{Na})_2\text{IrO}_3$ を舞台とする量子スピン液体状態の探索が行われたが、イジング項以外の相互作用の効果により、低温で磁気秩序が観測され、量子スピン液体状態の実現は不可能と考えられていた。

本課題では物質開発の立場から周辺物質の開拓を行い、新規 2 次元ハニカム型イリジウム酸化物 $\text{H}_3\text{LiIr}_2\text{O}_6$ (図 2(b)) において主に NMR 測定から 1 K 以下の低温まで磁気秩序が生じないことを見出した。この結果を根拠として基底状態が量子スピン液体状態であると結論した。異常な素励起の存在を示唆する結果も得られつつある。これらが Kitaev 型のスピン液体に期待されるトポロジカルな励起と何らかの関係があるのか、理論グループと緊密に連携しながら、解析を進めている。 $J_{\text{eff}}=1/2$ 量子スピン液体状態の実現は、本研究課題の当初の大きな目標の一つであったが、最終年度によりやくそれが実現した。

③ ハイパーハニカム格子 $\beta\text{-Li}_2\text{IrO}_3$ の発見と圧力誘起量子スピン液体 ([7])： 新物質 $\beta\text{-Li}_2\text{IrO}_3$ (図 2(c)) を発見した。 $\beta\text{-Li}_2\text{IrO}_3$ では Ir^{4+} が、直交する 3 つの $\text{Ir-O}_2\text{-Ir}$ 面からなる 120° 結合で結ばれ、ハニカム格子の 3 次元版と呼べるネットワーク (ハイパーハニカム格子) を形成する。理想的な異方的強磁性結合で結ばれれば、基底状態が 2 次元ハニカム格子と同様に Kitaev スピン液体と予言されている。 $\beta\text{-Li}_2\text{IrO}_3$ は約 40 K でノンコリニア型の磁気秩序を示すが、Kitaev 型スピン液体に極めて近い状態が実現していると考えられた。このため圧力を印加したところ、2.5 GPa 程度の圧力で静的な磁気モーメントは消失し、スピン液体状態が発現していることが明らか

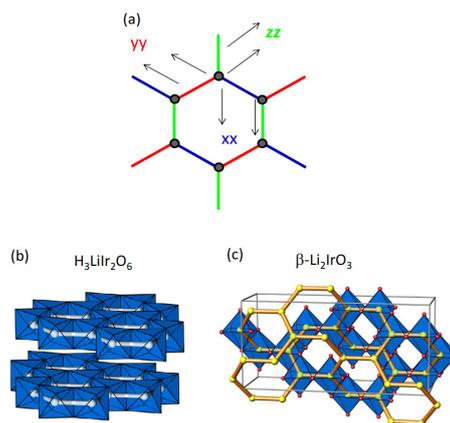


図 2 ハニカム格子上的 Kitaev 量子スピン液体 [(a)概念図] を複合イリジウム酸化物(b) $\text{H}_3\text{LiIr}_2\text{O}_6$ および(c) $\beta\text{-Li}_2\text{IrO}_3$ で実現。

となった。米国では密接に関連した 3 次元ハニカム構造 $\gamma\text{-Li}_2\text{IrO}_3$ も発見されている。

④ 人工的ハニカム格子の創成とトポロジカル相の開拓 ([6])： 新奇トポロジカル相実現を目指し、(111)配向のペロブスカイト型 $(\text{Ca},\text{Sr})\text{IrO}_3/\text{SrTiO}_3$ 超格子薄膜作製に世界に先駆けて成功した。ペロブスカイト酸化物を [111] 結晶軸方向へ 2 層ずつ積層させた超格子構造は「人工的なハニカム格子」とみなすことができる。グラフェンの強スピン軌道相互作用極限版とみなすことができ、トポロジカル絶縁体の実現も理論的に予言され注目を集めていた。磁気秩序に伴う金属絶縁体転移が観測され、電子相関により基底状態は自明なモット絶縁体であると考えられた。金属絶縁体転移はトポロジカル転移の可能性がある。

(2) スピン軌道相互作用が誘起する新奇遍歴電子相

① ディラック半金属 $\text{Sr}(\text{Ca})\text{IrO}_3$ ([3])： 斜方晶ペロブスカイト $\text{Sr}(\text{Ca})\text{IrO}_3$ は強いスピン軌道相互作用と結晶歪に起因して半金属となる。バンド計算によるとこの半金属相には線状にギャップがゼロとなるディラックラインノードが存在する。ペロブスカイト相は高圧下でのみ安定であるが、エピタキシャル薄膜技術により $\text{Sr}(\text{Ca})\text{IrO}_3$ を作製した。磁気輸送現象の基板依存性は、質量の極めて軽いディラック電子と重い正孔の共存と理解できることを示した。エピタキシャル歪に対する半金属状態の安定性は、対称性に保護されたディラックノードの存在を支持する。

② スピン軌道相互作用誘起半金属 $\text{Na}_3\text{Ir}_3\text{O}_8$ ([9])： 3 次元ハイパーカゴメ格子 $\text{Na}_3\text{Ir}_3\text{O}_8$ を発見した。この物質は量子スピン液体 $\text{Na}_4\text{Ir}_3\text{O}_8$ への正孔ドーピング系とみなせる。とこ

ろが Ir 当たり 1/3 個の正孔がドーピングされているにも関わらず、少数キャリアの半金属的振る舞いを示した。この半金属状態の物理的起源が軌道秩序を伴う分子軌道形成とスピン軌道相互作用の競合によるものであることを明らかにし、概念として確立した。 t_{2g} 軌道の軌道秩序に伴う分子軌道形成により、この物質は本来バンド絶縁体である。強いスピン軌道相互作用による軌道の混成によって分子軌道ギャップが抑制され、スピン軌道誘起半金属相が出現する。

(3) スピン軌道相互作用誘起電子相の相競合と制御

① **SrTiO₃-SrIrO₃ (001)超格子の半金属-磁性絶縁体転移 ([4])**: スピン軌道半金属-モット絶縁体転移の物理を構築するモデルシステムとして、スピン軌道半金属 SrIrO₃ n 層とバンド絶縁体 SrTiO₃ 1 層からなる (001) 超格子構造を作製し、物性の層数依存性を詳細に調べた。SrIrO₃ 層数 n が小さくなり、2 次元性が高まるに従い、 $n=3$ で半金属絶縁体転移が生じる。半金属絶縁体転移は、磁気秩序の出現と同期して起きる。このことから、磁気秩序によって時間反転対称性が破れ、半金属状態の起源であるディラック点にギャップが生じ、半金属磁性絶縁体転移が生じたことと結論した。ディラック半金属と磁性絶縁体が競合する強スピン軌道相互作用系に特徴的な相競合が明らかにされただけでなく、イリジウム酸化物の超格子薄膜研究が世界中に広まる契機となった。

(4) スピン軌道相互作用に誘起された機能開拓

① **IrO₂ の巨大逆スピンホール効果とスピン流検出機能 ([13])**: 二元系酸化物 IrO₂ が極めて大きな逆スピンホール効果を示すことを見出した。IrO₂ では、貴金属元素の s 電子などに比べ局在性の高い d 電子が伝導を支配しているゆえ、電気抵抗率が高い。このため、スピン流の検出素子として用いた場合、より大きな電圧が得られる。実際、スピン流検出デバイスの性能を表すスピンホール抵抗は従来の貴金属ベースのデバイスに比べ桁程度大きい $\rho_H \sim 38 \mu\Omega\text{cm}$ に達する。これに関して特許を取得した。

(5) 新物質開発-励起子絶縁体、ディラック電子

① **Ta₂NiSe₅ の励起子絶縁体転移 ([1],[17])**: 励起子絶縁体とはナローギャップ半導体もしくは半金属において、電子-正孔がクーロン相互作用により対 (励起子) を形成することで絶縁化した状態である。以前から理論的に活発に議論されてきた。その電子相を体現する物質はいくつか候補が提案されてきたが

決定的な証拠は未だ得られていない。 $5d$ 遷移金属層状カルコゲナイド Ta₂NiSe₅ が励起子絶縁体の最も有力な候補物質であることを示した。Ta₂NiSe₅ は約 330 K で半導体-絶縁体転移を示す。この転移について、(1)ほぼゼロギャップ状態から 0.3 eV 程度のギャップが出現する、(2)励起子束縛エネルギーはギャップの程度であると見積もられる、(3)元素置換および圧力効果により一電子バンドギャップを変化させた際、ゼロギャップ付近で転移温度が励起子絶縁体に特徴的なドーム型のギャップ依存性を示す、(4)転移前後のエントロピー変化のほとんどは電子系の寄与と見なせる、ことを明らかにした。以上の結果は Ta₂NiSe₅ の低温相が励起子絶縁体であることを強く支持する。Ni を d 電子数の同じ Pd で置き換えた物質 Ta₂PdS₅ はキャリア数の大きな半金属で、励起子絶縁体転移は示さないが、代わりに $T_c = 6 \text{ K}$ で超伝導転移を示す。この超伝導状態の上部臨界磁場 H_{c2} がパウリ極限を破っていることを見出した。スピン軌道相互作用が強い系での dirty limit 超伝導が原因と提唱した。

② **アンチペロブスカイト酸化物の 3 次元ディラック電子と量子極限の物理 ([5])**: アンチペロブスカイト A_3BO ($A=\text{Ca, Sr, Ba}$ $B=\text{Pb, Sn}$) は理論的に 3 次元ディラック電子系であると指摘された。一連の物質群について、構造解析を行い、トレランス因子によって、立方晶を保つ場合と、斜方晶に転移する場合に分けられることを見出し、相図として整理した。立方晶を保つ Sr₃PbO について単結晶を作製することに成功し、3 次元ディラック電子による異常なディラック電子に起因すると考えられる異常な磁気抵抗の振る舞いを観測した。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 71 件)

(1) Y. F. Lu, H. Kono, T. I. Larkin, A. W. Rost, T. Takayama, A. V. Boris, B. Keimer, and H. Takagi, **Zero-gap semiconductor to excitonic insulator transition in Ta₂NiSe₅**, *Nature Communications* **8** (2017) 14408-1-7, 査読有
DOI: 10.1038/ncomms14408.

(2) T. Takayama, A. Matsumoto, G. Jackeli, and H. Takagi, **Model analysis of magnetic susceptibility of Sr₂IrO₄: A two-dimensional $J_{\text{eff}}=1/2$ Heisenberg system with competing interlayer couplings**, *Phys. Rev. B* **94** (2016) 224420-1-7, 査読有
DOI: 10.1103/PhysRevB.94.224420.

(3) D. Hirai, J. Matsuno, D. Nishio-Hamane, and H. Takagi, **Semimetallic transport properties of epitaxially stabilized perovskite CaIrO₃ films**, *Applied Physics Letters* **107** (2015) 012104-1-4, 査読有

DOI: 10.1063/1.4926723.

(4) J. Matsuno, K. Ihara, S. Yamamura, H. Wadati, K. Ishii, V. V. Shankar, H.-Y. Kee, and H. Takagi, **Engineering a spin-orbital magnetic insulator by tailoring superlattices**, *Phys. Rev. Lett.* **114** (2015) 247209-1-5, 査読有
DOI: 10.1103/PhysRevLett.114.247209.

(5) J. Nuss, C. Mühle, K. Hayama, V. Abdolazimi, and H. Takagi, **Tilting structures in inverse perovskites, M_3TtO ($M = Ca, Sr, Ba, Eu; Tt = Si, Ge, Sn, Pb$)**, *Acta Crystallographica Section B* **71** (2015) 300–312, 査読有
DOI: 10.1107/S2052520615006150.

(6) D. Hirai, J. Matsuno, and H. Takagi, **Fabrication of (111)-oriented $Ca_{0.5}Sr_{0.5}IrO_3/SrTiO_3$ superlattices—A designed playground for honeycomb physics**, *APL Materials* **3** (2015) 041508-1-6, 査読有
DOI: 10.1063/1.4913389.

(7) T. Takayama, A. Kato, R. Dinnebier, J. Nuss, H. Kono, L. S. I. Veiga, G. Fabbris, D. Haskel, and H. Takagi, **Hyperhoneycomb iridate β - Li_2IrO_3 as a platform for Kitaev magnetism**, *Phys. Rev. Lett.* **114** (2015) 077202-1-5, 査読有
DOI: 10.1103/PhysRevLett.114.077202.

(8) H. Kawasoko, T. Takayama, and H. Takagi, **Thermoelectric properties of semi-metallic $Ru_2Sn_{3-\delta}$ with low thermal conductivity**, *Appl. Phys. Express* **7** (2014) 115801-1-3, 査読有
DOI: 10.7567/APEX.7.115801.

(9) T. Takayama, A. Yaresko, A. Matsumoto, J. Nuss, K. Ishii, M. Yoshida, J. Mizuki, and H. Takagi, **Spin-orbit coupling induced semi-metallic state in the 1/3 hole-doped hyper-kagome $Na_3Ir_3O_8$** , *Scientific Reports* **4** (2014) 6818-1-6, 査読有
DOI: 10.1038/srep06818.

(10) D. Hirai, R. Kawakami, O. V. Magdysyuk, R. E. Dinnebier, A. Yaresko, and H. Takagi, **Superconductivity at 3.7 K in ternary silicide Li_2IrSi_3** , *Journal of the Physical Society of Japan* **83** (2014) 103703-1-4, 査読有
DOI: 10.7566/JPSJ.83.103703.

(11) S. Fujiyama, H. Ohsumi, K. Ohashi, D. Hirai, B. J. Kim, T. Arima, M. Takata, and H. Takagi, **Spin and orbital contributions to magnetically ordered moments in 5d layered perovskite Sr_2IrO_4** , *Phys. Rev. Lett.* **112** (2014) 016405-1-5, 査読有
DOI: 10.1103/PhysRevLett.112.016405.

(12) Y. Lu, T. Takayama, A. F. Bangura Alimamy,

Y. Katsura, D. Hashizume, and H. Takagi, **Superconductivity at 6 K and the violation of Pauli limit in $Ta_2Pd_xS_5$** , *Journal of the Physical Society of Japan* **83** (2014) 023702-1-4, 査読有
DOI: 10.7566/JPSJ.83.023702.

(13) K. Fujiwara, Y. Fukuma, J. Matsuno, H. Idzuchi, Y. Niimi, Y. Otani, and H. Takagi, **5d iridium oxide as a material for spin-current detection**, *Nature Communications* **4** (2013) 2893-1-6, 査読有
DOI: 10.1038/ncomms3893.

(14) P. D. C. King, T. Takayama, A. Tamai, E. Rozbicki, S. M. Walker, M. Shi, L. Patthey, R. G. Moore, D. Lu, K. M. Shen, H. Takagi, and F. Baumberger, **Spectroscopic indications of polaronic behavior of the strong spin-orbit insulator $Sr_3Ir_2O_7$** , *Phys. Rev. B* **87** (2013) 241106(R)-1-6, 査読有
DOI: 10.1103/PhysRevB.87.241106.

(15) K. Ohgushi, J. Yamaura, H. Ohsumi, K. Sugimoto, S. Takeshita, A. Tokuda, H. Takagi, M. Takata, and T. Arima, **Resonant x-ray diffraction study of the strongly spin-orbit-coupled mott insulator $CaIrO_3$** , *Phys. Rev. Lett.* **110** (2013) 217212-1-5, 査読有
DOI: 10.1103/PhysRevLett.110.217212.

(16) S. Fujiyama, K. Ohashi, H. Ohsumi, K. Sugimoto, T. Takayama, T. Komesu, M. Takata, T. Arima, and H. Takagi, **Weak antiferromagnetism of $J_{\text{eff}}=1/2$ band in bilayer iridate $Sr_3Ir_2O_7$** , *Phys. Rev. B* **86** (2012) 174414-1-5, 査読有
DOI: 10.1103/PhysRevB.86.174414.

(17) Y. Wakisaka, T. Sudayama, K. Takubo, T. Mizokawa, N. L. Saini, M. Arita, H. Namatame, M. Taniguchi, N. Katayama, M. Nohara, and H. Takagi, **Photoemission spectroscopy of Ta_2NiSe_5** , *Journal of Superconductivity and Novel Magnetism* **25** (2012) 1231–1234, 査読有
DOI: 10.1007/s10948-012-1526-0.

(18) K. Taniguchi, A. Matsumoto, H. Shimotani, and H. Takagi, **Electric-field-induced superconductivity at 9.4 K in a layered transition metal disulphide MoS_2** , *Appl. Phys. Lett.* **101** (2012) 042603-1-3, 査読有
DOI: 10.1063/1.4740268.

(19) S. Fujiyama, H. Ohsumi, T. Komesu, J. Matsuno, B. J. Kim, M. Takata, T. Arima, and H. Takagi, **Two-dimensional Heisenberg behavior of $J_{\text{eff}}=1/2$ isospins in the paramagnetic state of the spin-orbital Mott insulator Sr_2IrO_4** , *Phys. Rev. Lett.* **108** (2012) 247212-1-5, 査読有
DOI: 10.1103/PhysRevLett.108.247212.

(20) T. Takayama, K. Kuwano, D. Hirai, Y. Katsura, A. Yamamoto, and H. Takagi, **Strong coupling superconductivity at 8.4 K in an antiperovskite phosphide SrPt₃P**, *Phys. Rev. Lett.* **108** (2012) 237001-1-5, 査読有
DOI: 10.1103/PhysRevLett.108.237001.

(21) M. F. Cetin, P. Lemmens, V. Gnezdilov, D. Wulferding, D. Menzel, T. Takayama, K. Ohashi, and H. Takagi, **Crossover from coherent to incoherent scattering in spin-orbit dominated Sr₂IrO₄**, *Phys. Rev. B* **85** (2012) 195148-1-7, 査読有
DOI: 10.1103/PhysRevB.85.195148.

(他 50 件)

[学会発表] (計 134 件)

(1) H. Takagi, **Strong spin-orbit coupling and exotic magnetism in complex Ir oxides** (基調講演), *8th International Conference on Highly Frustrated Magnetism*, Taipei (Taiwan), 2016 年 9 月 10 日.

(2) H. Takagi, **Quantum spin liquid state in honeycomb-based complex iridium oxides**, *Gordon Research Conference on Correlated Electron Systems*, Mount Holyoke (USA), 2016 年 6 月 26 日.

(3) H. Takagi, **Spin-orbit coupling and electron correlations in complex 5d Ir oxides** (基調講演), *Korrelationstage 2015*, Dresden (Germany), 2015 年 9 月 28 日.

(4) H. Takagi, **Exotic magnetism of $J_{\text{eff}}=1/2$ iso-spins in complex Ir oxides**, *SCES*, Grenoble (France), 2014 年 7 月 8 日.

(5) H. Takagi, **Spin-orbit coupling and electron correlations – exotic magnetism of $J_{\text{eff}}=1/2$ iso-spins in complex Ir oxides** (基調講演), *The 13th International Conference on Muon Spin Rotation, Relaxation and Resonance, μ SR 2014*, Grindelwald (Switzerland), 2014 年 6 月 3 日.

(他 129 件)

[産業財産権]

○取得状況 (計 1 件)

名称: 電流-スピン流変換素子

発明者: 藤原宏平, 福岡康裕, 松野丈夫, 大谷義近, 高木英典

権利者: 国立研究開発法人理化学研究所

種類: 特許

番号: 特許第 5590488 号

出願年月日: 平成 22 年 8 月 27 日

取得年月日: 平成 26 年 8 月 8 日

国内外の別: 国内

[その他]

ホームページ等

http://park.itc.u-tokyo.ac.jp/takagi_lab/

6. 研究組織

(1)研究代表者

高木 英典 (TAKAGI HIDENORI)

東京大学・大学院理学系研究科・教授

研究者番号: 40187935

(2)研究分担者

山本 文子 (YAMAMOTO AYAKO)

(H24 年 4 月~H25 年 3 月)

芝浦工業大学・大学院理工学研究科・教授

研究者番号: 50398898

(異動により、平成 25 年度以降分担者削除)

有馬 孝尚 (ARIMA TAKAHISA)

東京大学・大学院新領域創成科学研究科・教授

研究者番号: 90232066

(3)連携研究者

谷口 耕治 (TANIGUCHI KOUJI)

東北大学金属材料研究所・錯体物性化学研究部門・准教授

研究者番号: 30400427

大隅 寛幸 (OHSUMI HIROYUKI)

国立研究開発法人理化学研究所・放射光科学総合研究センター・専任研究員

研究者番号: 90360825

松野 丈夫 (MATSUNO JOBU)

国立研究開発法人理化学研究所・創発物性科学研究センター・専任研究員

研究者番号: 00443028

小野田 繁樹 (ONODA SHIGEKI)

国立研究開発法人理化学研究所・古崎物性理論研究室・専任研究員

研究者番号: 70455335

北川 健太郎 (KITAGAWA KENTARO)

東京大学・大学院理学系研究科・講師

研究者番号: 90567661

平岡 奈緒香 (HIRAOKA NAOKA)

東京大学・大学院理学系研究科・助教

研究者番号: 40758827

(4)研究協力者

高山 知弘 (TAKAYAMA TOMOHIRO)

Max Planck Institute for Solid State Research · Department of Quantum Materials · Scientist