

機関番号：14301

研究種目：基盤研究（A）

研究期間：2008～2010

課題番号：20246004

研究課題名（和文）重い電子系における巨大スピントロニクスへの展開

研究課題名（英文） Verification of the giant spin Hall effect in heavy Fermion systems and application to spintronics

研究代表者

寺嶋 孝仁 (TERASHIMA TAKAHITO)

京都大学・低温物質科学研究センター・教授

研究者番号：40252506

研究成果の概要（和文）：

電子スピンを活用する新しいエレクトロニクス（スピントロニクス）において大きな期待がかけられている細線に電流を流すことで、線に垂直な方向に磁化が生じる現象、スピントロニクス効果について新しい希土類系の物質の開拓を実験・理論の両面から行った。大きなスピントロニクス効果が期待される希土類を含む金属間化合物の薄膜やナノメートルサイズで制御された人工的な構造を持つ物質を実現することに成功した。

研究成果の概要（英文）：

Spin Hall effect, a phenomena to produce a magnetized state by flowing electric current along the narrow wire, is expected to develop new spintronic devices. We have investigated the development of new rare earth based material systems experimentally and theoretically to realize spin-Hall effect devices. Thin films and artificial superstructures of rare earth based intermetallic compounds which are expected to exhibit large spin Hall effects were fabricated for the first time.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	24,200,000	7,260,000	31,460,000
2009年度	10,000,000	3,000,000	13,000,000
2010年度	5,300,000	1,590,000	6,890,000
年度			
年度			
総計	39,500,000	11,850,000	51,350,000

研究分野：固体物理学

科研費の分科・細目：応用物理学・工学基礎、応用物性・結晶工学

キーワード：重い電子系、スピントロニクス、スピントロニクス、スピン-軌道相互作用、MBE、エピタキシャル薄膜、人工超格子

## 1. 研究開始当初の背景

近年、電子の持つ電荷の自由度に加えてスピンの自由度を活用するエレクトロニクス（スピントロニクス）が注目されている。スピントロニクスは高密度磁気記録など実用的な面において重要であるが、微小な領域で起こる磁性現象自体、新たな磁性科学としても興味深く、物理学的にも重要な側面を有している。スピントロニクスにおいてはスピン分極電流の発生・注入過程が基本要素として必

須である。常磁性金属に電流を流した時、スピン-軌道相互作用により電流に直交する方向にスピン流が生じる（スピントロニクス効果（SHE））。

SHE はスピン注入源として用いることができるため今後のスピントロニクスにおいて重要性は高い。SHE はスピン-軌道相互作用に基づいて発現するものであるが、発現機構としてはバンド構造自体に由来する内因的なものと、スキュー散乱、サイドジャン

プなどによる外因的なものがある。1999 年の Hirsch による理論的提案を受け、半導体量子井戸構造において光学的手法で初めて確認され、しばらく SHE は半導体を舞台に研究されてきた。しかし、2006 年に金属の Al および Pt において半導体よりも大きな SHE が生じることが報告された。特に Pt のスピンホール伝導度は n 型半導体の測定値の 10000 倍に達し、スピントロニクスへの応用の観点からも大いに注目されている。現在、金属におけるスピンホール効果の発現機構の解明が理論的研究の急務となっている。分担者の紺谷は、2007 年に Ru 酸化物のスピンホール効果の理論計算を行い、d 電子系では一般に(半導体には存在しない)d 軌道自由度に由来する巨大なスピンホール伝導度が出現するという理論的予測を得た。その後、各種遷移金属のスピンホール伝導度について網羅的に解析を行い、4d、5d 電子系では巨大な SHE が普遍的に実現することを見出した。特に Pt の SHE は実験事実とよく整合する結果である。f 電子を持つ Ce など希土類元素を含む金属間化合物では f 電子と伝導電子の混成した狭いバンドにより、電子の有効質量が自由電子の 100 倍から 1000 倍大きくなった重い電子状態が実現している。スピン-軌道相互作用の大きさは  $(1/r)\partial V/\partial r$  ( $V$  は電子のポテンシャルエネルギー、 $r$  は原子核からの距離) に比例するため、原子核位置に近い場所で存在確率の大きな f 軌道ではスピン-軌道相互作用が大きくなる。f 電子は軌道角運動量が大きく、重い電子状態では f 電子と伝導電子の混成軌道がフェルミレベルにあるためスピン-軌道相互作用も大きくなり、巨大な SHE の発現が期待される。

## 2. 研究の目的

本研究は f 電子を含む重い電子系において理論的に予測されている巨大なスピンホール効果(SHE)の実証を行うものである。併せて重い電子系におけるスピントロニクスという新たな学問分野を開拓し、将来のスピントロニクス技術の基幹となる学理の構築に資することを目的とする。具体的には重い電子系物質である希土類金属間化合物の薄膜を分子線エピタキシー(MBE)法により作製し、電子線リソグラフィ法でサブ  $\mu\text{m}$  サイズに微細加工をして形成した素子構造について SHE の測定を行い、理論との比較を行う。重い電子系における近藤効果は物理的には極めて重要な現象であるが、これまで応用の可能性について検討されることは少なかった。本研究は近藤効果により生じる重い電子状態における大きなスピン-軌道相互作用に起因する巨大な SHE を実験的に実証し、将来のスピントロニクス研究への展開を図

るものである。

重い電子系における SHE 研究は本研究が初めてであり、薄膜・素子構造の作製方法の確立は大きなウェイトを持つ課題である。これまで進めてきた MBE 法による薄膜作製プロセスを完成させ、電子ビームリソグラフィおよびイオンミリングプロセスによる微小素子の形成方法を確立する。特にこれまでまったく試みられていない重い電子系希土類金属間化合物のエピタキシャル成長技術の確立は本研究の中核をなすテーマであり、これに主眼を置いて研究を実施する。エピタキシャル成長に成功した場合には、さらに電子相関がバルクよりも大きくなり、より大きな SHE が期待される重い電子を 2 次元に閉じ込めた人工超格子の作製についても研究を行う。

## 3. 研究の方法

### (1) 希土類金属間化合物薄膜の MBE 成長法の確立

典型的な重い電子系希土類金属間化合物である  $\text{CeIn}_3$  と  $\text{CeCoIn}_5$  についてエピタキシャル薄膜の成長について検討を行う。特に素子構造の作製にあたって重要となる結晶性の向上、薄膜表面の平坦化などについて基板温度、各元素の蒸着速度比、成長速度などの成長条件を十分に最適化する。

現有の MBE 装置は  $2000^\circ\text{C}$  までの加熱が可能な高温用クヌードセンサー(K-セル)が 3 基、In 用の高蒸気圧元素蒸発用 2 温度制御型の K-セルが 1 基の構成になっており、希土類金属間化合物薄膜の作製には対応可能である。この MBE 装置により Ce、Co、La などを高温 K-セルにより蒸発する。

重い電子を 2 次元に閉じ込めることを目的とした人工超格子として f 電子を持たない  $\text{LaIn}_3(4f^0)$  と  $\text{CeIn}_3(4f^1)$  を数ユニットセルとして交互に積層した系の作製を行う。

### (2) 希土類金属間化合物薄膜の微細加工と SHE 素子の形成技術の確立

希土類金属間化合物薄膜の微細加工による素子化はこれまで例がなく、本研究における最も重要な技術的課題である。MBE 法により作製した  $\text{CeIn}_3$  薄膜を電子ビームリソグラフィとイオンミリングにより幅  $100\text{nm}$  程度の細線とする。続いて、電子ビームリソグラフィとパーマロイの電子ビーム蒸着によるリフトオフプロセスで  $100\text{nm}$  幅のパーマロイ細線を形成する。最後にリフトオフプロセスで銅細線を  $\text{CeIn}_3$  およびパーマロイ細線と直交するように形成し試料が完成する。 $\text{CeIn}_3$  細線とパーマロイ細線の間隔をパラメータとして変化させた試料を複数作製し SHE の距離依存性の検討を行う。

### (3) 理論研究

分担者の紺谷は重い電子系の有効模型である周期アンダーソン模型を解析した。その結果、(i) 典型的な Ce 系および Yb 系重い電子系の SHE は Pt の測定値の約 10 倍になる。(ii) 重い電子系のスピンホール伝導度は f イオンの種類によって決まり、Ce 系化合物では負、Yb 系化合物では正になる。(iii) SHE がコヒーレント温度でクロスオーバー的挙動を示す、という解析結果を得た。さらに c-f 混成ポテンシャルや f 準位の波数依存性が大きい物質では、SHE がさらに増大する可能性を指摘した。ゆえに、定量的かつ予言能力のある理論を構築するためには、具体的な物質の特徴的なバンド構造を再現する多軌道強縛模型を構築し、その上で SHE を解析する必要がある。分担者は 20 種類以上の遷移金属のバンド構造を忠実に再現する多軌道強縛模型を構築し、遷移金属のスピンホール伝導度を網羅的に研究した。この経験を生かして、各種重い電子系化合物の有効理論模型を構築し、信頼性の高い輸送現象の研究を行う。なお SHE および異常ホール効果は、不純物の有無にかかわらず多バンド効果により出現する内因的機構 (Karplus-Luttinger 機構) と、不純物によるスキュー散乱による外因的機構に大別される。乱れの少ないバルクの重い電子系では、異常ホール効果は内因的機構として説明可能であり、SHE も内因的機構が主であると考えられる。

## 4. 研究成果

### (1) 実験的研究における成果

重い電子系のスピンホール効果 (SHE) の研究対象となる  $\text{CeIn}_3$  を中心とした希土類金属間化合物の分子線エピタキシー (MBE) 法による薄膜成長について、成長条件の最適化を実施し、良質なエピタキシャル薄膜を作製することに成功した。 $\text{CeIn}_3$  は  $\text{Cu}_3\text{Au}$  型の立方晶で格子定数は  $0.468\text{nm}$  である。 $\text{MgF}_2(001)$  はこれとマッチングの良い基板結晶である。 $\text{MgF}_2$  は正方晶のルチル型構造をとり、fcc 構造を基にした  $\text{Cu}_3\text{Au}$  型とは異なるが (001) 面は正方格子になっており、格子のミスマッチが  $1.2\% (a_0(\text{MgF}_2) < a_0(\text{CeIn}_3))$  と小さい。また、 $\text{MgF}_2$  は絶縁体でかつ蒸着される Ce による還元を受けない物質であり、 $\text{CeIn}_3$  の成長には最適な基板結晶である。この基板について成長条件の最適化を行い、高品質な  $\text{CeIn}_3$  薄膜を作製することに成功した。これまで希土類重い電子系金属間化合物のエピタキシャル成長は例がなく、世界で初めて成功したものである。

スピンホール効果により生じるシグナル (電圧) を大きくするためには、対象とする物質の厚さを薄くすることが有効である。重

い電子系の超薄膜化を目的として希土類金属間化合物の人工超格子の成長を行った。分子線エピタキシー (MBE) 法により f 電子を持つ  $\text{CeIn}_3$  と f 電子を持たない  $\text{LaIn}_3$  を繰り返し成長し、希土類金属間化合物におけるエピタキシャル成長と人工超格子の作製に初めて成功した (*Science* **327**, 980 (2010))。この超格子により、重い電子を 2 次元空間に閉じ込め、量子臨界点に到達し、自由電子の質量の 1000 倍に達する世界で最も重い電子状態を実現することに成功した。この成果は強く相互作用することにより重くなった電子を狭い空間に閉じこめることで、自然界には存在しない 2 次元の重い電子状態を実現し、強相関電子の新しい舞台を提供するものである。これはまた 2 次元にある重い電子の示す SHE の研究を可能にするもので、重要な意義を持つものである。

Au、Ag などの電気伝導度の高い貴金属中に希土類元素を希釈ドーブした系において外因的機構による巨大な SHE が発現することを理論的に明らかにした。Ag に Tm をドーブした系について MBE 法により薄膜化することに成功した。この系においてスピンホール効果と密接な関係のある大きな異常ホール効果が発現することを発見した。

SHE の測定のために必要なパーマロイを蒸着可能な電子ビーム蒸着装置を導入し、良質なパーマロイ薄膜を作製する条件を確立した。さらに本装置の試料導入チャンバーに既存のイオン源を設置し、重い電子系細線およびパーマロイ細線の表面をクリーニングして良好な SHE 特性を得られるようにする条件を確立した。

SHE 測定のための素子化については電子線リソグラフィ法による素子構造の設計と SHE 検出のためのパーマロイ薄膜の細線化を実施した。重い電子系の SHE 測定のための予備実験としてパーマロイ細線におけるスピン流の検出と大きなスピンホール効果が報告されている Pt について Pt/Cu/パーマロイの素子構造を作製し、逆スピンホール効果の測定に成功した。Ag-Tm 細線についてスピンホール効果の測定を実施する準備を整えることができた。

### (2) 理論研究における成果

遷移金属における異常ホール効果およびスピンホール効果の起源としては、多軌道構造に由来する内因性機構と、不純物に由来する外因性機構に大別されるが、その包括的理解は長年の課題であった。我々は遷移金属強磁性体 Fe、Ni、Co における内因性機構について、バンド構造を忠実に再現する 10 軌道強縛模型を構築した上で解析した。その結果、それぞれの金属における異常ホール効果の値を精度よく再現できた。さらに異常ホール

伝導度が、↑スピン電子のスピンホール伝導度と↓電子のスピンホール伝導度の差で与えられることを明らかにした。これらの結果は Fe, Ni, Co における異常ホール効果が内因性起源であることを明らかにすると同時に、異常ホール効果とスピンホール効果の密接な関係を浮き彫りにした。

さらに異常ホール効果には、パイロクロア化合物  $\text{NdMo}_2\text{O}_7$  に代表される「傾いた磁気構造」に由来する非従来型異常ホール効果があり、その理論的解明が長年の課題であった。我々は軌道自由度を考慮したパイロクロア格子に基づきこの問題に取り組み、軌道自由度に由来するベリー位相が、スピンの傾き角  $\theta$  に比例する異常ホール効果をもたらすことを見出した。この機構は、従来軌道自由度を無視した模型に基づき提唱されたスピнкаイラリティー機構より二桁大きく、その重要性が明らかになった。我々の理論は、 $\text{PrMo}_2\text{O}_7$  における無磁化状態で発現する異常ホール効果についても、再現可能である。本機構のスピントロンクスに対する応用は大変興味深く、今後の重要課題である。

スピンホール効果はこれまで遷移金属において精力的に研究が進んだが、軌道の自由度が大きくスピン軌道相互作用が大きい  $f$  電子系において、遷移金属を凌駕するスピンホール効果の発現が期待される。我々は  $f$  電子系の有効模型である周期アンダーソン模型のスピンホール効果を解析し、遷移金属で最も大きなスピンホール伝導度を示すプラチナを凌駕するスピンホール効果が発現するという理論的予言を得た。

#### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 32 件)

- 1) A. Kitada, S. Kasahara, T. Terashima, K. Yoshimura, Y. Kobayashi and H. Kageyama, Highly Reduced Anatase  $\text{TiO}_{2-\delta}$  Thin Films Obtained via Low-Temperature Reduction, *Applied Physics Express*, **4** (2011) 035801-1-035801-3. 査読有
- 2) S. Kasahara, T. Shibauchi, K. Hashimoto, Y. Nakai, H. Ikeda, T. Terashima and Y. Matsuda, Abrupt Recovery of Fermi-Liquid Transport Following the Collapse of the  $c$  Axis in  $\text{CaFe}_2(\text{As}_{1-x}\text{P}_x)_2$  Single Crystals, *Phys. Rev. B*, **83**, 6 (2011) 060505(R)1-060505(R)4. 査読有
- 3) T. Yoshida, I. Nishi, S. Ideta, A. Fujimori, M. Kubota, K. Ono, S. Kasahara, T. Shibauchi, T. Terashima, Y. Matsuda, H. Ikeda and R. Arita, Two-Dimensional and Three-Dimensional Fermi Surfaces of Superconducting  $\text{BaFe}_2(\text{As}_{1-x}\text{P}_x)_2$  and Their Nesting Properties Revealed by Angle-Resolved Photoemission Spectroscopy, *Phys. Rev. Lett.*, **106**, 11 (2011) 117001-1-117001-4. 査読有
- 4) L.E. Klintberg, S.K. Goh, S. Kasahara, Y. Nakai, K. Ishida, M. Sutherland, T. Shibauchi, Y. Matsuda and T. Terashima, Chemical Pressure and Physical Pressure in  $\text{BaFe}_2(\text{As}_{1-x}\text{P}_x)_2$ , *J. Phys. Soc. Jpn.*, **79**, 12 (2010) 123706-1-123706-4. 査読有
- 5) G. S. Jenkins, D.C. Schmadel, A. B. Sushkov, G. D. Gu, H. Kontani and H. D. Drew, Terahertz Hall Measurements on Optimally Doped Single-crystal  $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+x}$ , *Phys. Rev. B* **82**, (2010) 094518-1-094518-10. 査読有
- 6) T. Saito, S. Onari, and H. Kontani, Orbital Fluctuation Theory in Iron Pnictides: Effects of As-Fe-As Bond Angle, Isotope Substitution, and  $Z^2$ -orbital Pocket on Superconductivity, *Phys. Rev. B* **82**, (2010) 144510-1-144510-10. 査読有
- 7) T. Tomizawa and H. Kontani, Anomalous Hall Effect due to Noncollinearity in Pyrochlore Compounds: Role of Orbital Aharonov-Bohm Effect, *Phys. Rev. B* **82**, (2010) 104412-1-104412-14. 査読有
- 8) S.K. Goh, Y. Nakai, K. Ishida, L.E. Klintberg, Y. Ihara, S. Kasahara, T. Shibauchi, Y. Matsuda and T. Terashima, Anisotropic Superconducting Properties of Optimally Doped  $\text{BaFe}_2(\text{As}_{0.65}\text{P}_{0.35})_2$  under Pressure, *Phys. Rev. B*, **82**, 9 (2010) 094502-1-094502-5. 査読有
- 9) T. Tanaka and H. Kontani, Intrinsic Spin and Orbital Hall Effects in Heavy Fermion Systems, *Phys. Rev. B* **81**, (2010) 224401-1-224401-9. 査読有
- 10) J.S. Kim, P.J. Hirschfeld, G.R. Stewart, S. Kasahara, T. Shibauchi, T. Terashima and Y. Matsuda, Specific Heat Versus Field in the 30K Superconductor  $\text{BaFe}_2(\text{As}_{0.7}\text{P}_{0.3})_2$ , *Phys. Rev. B*, **81** (2010) 214507-1-214507-5. 査読有
- 11) K. Hashimoto, M. Yamashita, S. Kasahara, Y. Senshu, N. Nakata, S. Tonegawa, K. Ikada, A. Serafin, A. Carrington, T. Terashima, H. Ikeda, T. Shibauchi and Y. Matsuda, Line Nodes in the Energy Gap of Superconducting  $\text{BaFe}_2(\text{As}_{1-x}\text{P}_x)_2$  Single Crystals as Seen via Penetration Depth and Thermal Conductivity, *Phys. Rev. B*, **81** (2010) 220501(R)1-220501(R)4. 査読有
- 12) T. Naito, D. S. Hirashima, and H. Kontani, Tight-binding Study of Anomalous Hall Effect in Ferromagnetic 3d Transition Metals, *Phys. Rev. B* **81**, (2010) 195111-1-195111-8.

- 査読有
- 13) S. Kasahara, T. Shibauchi, K. Hashimoto, K. Ikada, S. Tonegawa, H. Ikeda, H. Takeya, K. Hirata, T. Terashima and Y. Matsuda, Evolution from Non-Fermi- to Fermi-Liquid Transport via Isovalent Doping in  $\text{BaFe}_2(\text{As}_{1-x}\text{P}_x)_2$  Superconductors, *Phys. Rev. B*, **81** (2010) 184519-1-184519-4. 査読有
  - 14) Y. Nakai, T. Iye, S. Kitagawa, K. Ishida, H. Ikeda, S. Kasahara, H. Shishido, T. Shibauchi, Y. Matsuda and T. Terashima, Unconventional Superconductivity and Antiferromagnetic Quantum Critical Behavior in the Isovalent-Doped  $\text{BaFe}_2(\text{As}_{1-x}\text{P}_x)_2$ , *Phys. Rev. Lett.*, **105**, 10 (2010) 107003-1-107003-4. 査読有
  - 15) S. Onari and H. Kontani, Nonmagnetic Impurity Effects and Neutron Scattering Spectrum in Iron Pnictides, *Physica C – Superconductivity and Its Application – 470 Special Issue*, (2010) 1007-1009. 査読有
  - 16) R. Nakagawa, T. Nakamura, T. Terashima, S. Yonezawa and Y. Maeno, Superconducting Properties of the  $\text{Pb}/\text{Sr}_2\text{RuO}_4/\text{Pb}$  Proximity Junction, *Physica C*, **470** (2010) S744-S745. 査読有
  - 17) H. Kontani and S. Onari, Orbital-Fluctuation-mediated Superconductivity in Iron Pnictides: Analysis of the Five-Orbital Hubbard Holstein Model, *Phys. Rev. Lett.* **104**, (2010) 157001-1-157001-4. 査読有
  - 18) H. Shishido, T. Shibauchi, K. Yasu, T. Kato, H. Kontani, T. Terashima and Y. Matsuda, Tuning the Dimensionality of the Heavy Fermion Compound  $\text{CeIn}_3$ , *Science*, **327** (2010) 980-983. 査読有
  - 19) H. Shishido, A.F. Bangura, A.I. Coldea, S. Tonegawa, K. Hashimoto, S. Kasahara, P.M.C. Rourke, H. Ikeda, T. Terashima, R. Settai, Y. Onuki, D. Vignolles, C. Proust, B. Vignolle, A. McCollam, Y. Matsuda, T. Shibauchi and A. Carrington, Evolution of the Fermi Surface of  $\text{BaFe}_2(\text{As}_{1-x}\text{P}_x)_2$  on Entering the Superconducting Dome, *Phys. Rev. Lett.*, **104** (2010) 057008-1-057008-4. 査読有
  - 20) S. Onari, H. Kontani, and M. Sato, Structure of Neutron-scattering Peaks in  $s_{++}$ -wave and  $s_{+-}$ -wave States of an Iron Pnictide Superconductor, *Phys. Rev. B* **81**, (2010) 060504(R)-1-060504(R)-4. 査読有
  - 21) G. S. Jenkins, D.C. Schmadel, P. L. Bach, R. L. Greene, X. Bechamp-Laganier, G. Roberge, P. Fournier, H. Kontani and H. D. Drew, Origin of the Anomalous Hall Effect in the Overdoped n-type Superconductor  $\text{Pr}_{2-x}\text{Ce}_x\text{CuO}_4$ : Current-vertex Corrections due to Antiferromagnetic Fluctuations, *Phys. Rev. B* **81**, (2010) 024508-1-024508-5. 査読有
  - 22) Y. Nakai, T. Iye, S. Kitagawa, K. Ishida, S. Kasahara, T. Shibauchi, Y. Matsuda and T. Terashima, NMR Evidence for a Residual Density of States at Zero Energy in Superconducting  $\text{BaFe}_2(\text{As}_{1-x}\text{P}_x)_2$ , *Phys. Rev. B*, **81** (2010) 020503(R)-1-020503(R)-4. 査読有
  - 23) T. Tomizawa and H. Kontani, Anomalous Hall Effect in the  $t_2g$  Orbital Kagome Lattice due to Noncollinearity: Significance of the Orbital Aharonov-Bohm Effect, *Phys. Rev. B* **80**, (2009) 100401(R)-1-100401(R)-4. 査読有
  - 24) J. Inoue, T. Tanaka and H. Kontani, Anomalous and Spin Hall Effects in Magnetic Granular Films, *Phys. Rev. B* **80**, (2009) 020405(R)-1-020405(R)-4. 査読有
  - 25) S. Onari, and H. Kontani, Violation of Anderson's Theorem for Sign-reversing s-wave Superconducting State in Iron Pnictides, *Phys. Rev. Lett.*, **103** (2009) 177001-1-177001-4. 査読有
  - 26) K. Hashimoto, T. Shibauchi, S. Kasahara, K. Ikada, S. Tonegawa, T. Kato, R. Okazaki, C.J.v.d. Beek, M. Konczykowski, H. Takeya, K. Hirata, T. Terashima and Y. Matsuda, Microwave Surface-Impedance Measurements of the Magnetic Penetration Depth in Single Crystal  $\text{Ba}_{1-x}\text{K}_x\text{Fe}_2\text{As}_2$  Superconductors: Evidence for a Disorder-Dependent Superfluid Density, *Phys. Rev. Lett.*, **102**, 20 (2009) 207001-1-207001-4. 査読有
  - 27) H. Kontani, J. Goryo and D. S. Hirashima, Intrinsic spin Hall effect in the s-wave superconducting state: Analysis of the Rashba model, *Phys. Rev. Lett.* **102**, 086602-1-086602-4, (2009) 査読有
  - 28) H. Kontani, T. Tanaka, D. S. Hirashima, K. Yamada and J. Inoue, Giant orbital Hall effect in transition metals: Origin of large spin and anomalous Hall effect, *Phys. Rev. Lett.*, **102**, (2009) 016601-1-016601-4. 査読有
  - 29) T. Tanaka and H. Kontani, Giant extrinsic spin Hall effect due to rare-earth impurities, *New J. Phys.* **11**, (2009) 013023-013032. 査読有
  - 30) T. Tanaka and H. Kontani, Theory of an anomalous Hall conductivity in d-electron systems, *Phys. Rev. B* **77**, (2008) 195129-1-195129-11. 査読有
  - 31) T. Tanaka, H. Kontani, M. Naito, T. Naito, D. S. Hirashima, K. Yamada and J. Inoue, Intrinsic Spin Hall Effect and Orbital Hall

Effect in 4d and 5d Transition Metals., Phys. Rev. B **77**, (2008) 165117-1-165117-16. 査読有

- 32) T. Tanaka, H. Kontani, M. Naito, D. S. Hirashima, K. Yamada and J. Inoue, Spin Hall Effect in  $\text{Sr}_2\text{RuO}_4$  and Transition Metals (Nb, Pt), J. Physics and Chemistry of Solids, **12**, (2008) 3250-3252. 査読有

〔学会発表〕(計 45 件)

- 1) 安元智司、水上雄太、宍戸寛明、山下穰、千秋義紀、渡邊大樹、池田浩章、芝内孝禎、松田祐司、寺嶋孝仁、重い電子系超伝導人工超格子  $\text{CeCoIn}_5/\text{YbCoIn}_5$  の作製、日本物理学会第 66 回年次大会、2011 年 3 月 28 日、新潟大学
- 2) 水上雄太、安元智司、宍戸寛明、山下穰、千秋義紀、渡邊大樹、池田浩章、芝内孝禎、寺嶋孝仁、松田祐司  $\text{CeCoIn}_5$  の人工超格子薄膜における上部臨界磁場の異方性、日本物理学会第 66 回年次大会、2011 年 3 月 28 日、新潟大学
- 3) 田中拓郎、紺谷浩、スピンホール効果の内因性項とサイドジャンプ項の関係性に対する理論的研究、日本物理学会第 66 回年次大会、2011 年 3 月 28 日、新潟大学
- 4) 下澤雅明、宍戸寛明、水上雄太、安元智司、樹本好央、芝内孝禎、松田祐司、寺嶋孝仁、重い電子系超伝導体  $\text{CeCoIn}_5$  薄膜によるトンネル接合の作製、日本物理学会第 66 回年次大会、2011 年 3 月 25 日、新潟大学
- 5) 水上雄太、宍戸寛明、芝内孝禎、松田祐司、寺嶋孝仁、 $\text{CeCoIn}_5$  の人工超格子薄膜の作製と評価、日本物理学会 2010 年秋季大会、2010 年 9 月 24 日、大阪府立大学
- 6) 下澤雅明、山下穰、芝内孝禎、松田祐司、寺嶋孝仁、小山大介、河端美樹、河合淳、極低温下で動作可能な SQUID 顕微鏡の作製、日本物理学会 2010 年秋季大会、2010 年 9 月 23 日、大阪府立大学
- 7) 寺嶋孝仁、宍戸寛明、安一樹、水上雄太、芝内孝禎、松田祐司、希土類金属間化合物における超格子の作製と物性、日本金属学会 2010 年春季大会、2010 年 3 月 29 日、筑波大学
- 8) 水上雄太、宍戸寛明、安一樹、芝内孝禎、松田祐司、寺嶋孝仁、重い電子系超伝導体  $\text{CeCoIn}_5$  のエピタキシャル薄膜の作製と評価、日本物理学会第 65 回年次大会、2010 年 3 月 22 日、岡山大学
- 9) H. Kontani, Intrinsic Spin and Anomalous Hall Effects in d,felectron Systems, 4th International Workshop on Spin Currents, Feb. 08-10, 2010, Sendai, Japan
- 10) 安一樹、宍戸寛明、芝内孝禎、紺谷浩、寺嶋孝仁、松田祐司、Ce 化合物／絶縁体

超格子による重い電子系の 2 次元化、日本物理学会 2009 年秋季大会、2009 年 9 月 25 日、熊本大学

- 11) 宍戸寛明、安一樹、加藤智成、紺谷浩、芝内孝禎、寺嶋孝仁、松田祐司、層状成長した重い電子系人工超格子による次元性制御、日本物理学会 2009 年秋季大会、2009 年 9 月 25 日、熊本大学
- 12) 安一樹、宍戸寛明、加藤智成、芝内孝禎、松田祐司、寺嶋孝仁、重い電子系人工超格子をもちいた次元性制御による量子臨界点の実現、日本物理学会第 64 回年次大会、2009 年 3 月 27 日、立教大学
- 13) 田中拓郎、紺谷浩、磁性不純物に起因する外因性スピンホール効果の理論 II、日本物理学会第 64 回年次大会、2009 年 3 月 27 日、立教大学
- 14) 安一樹、加藤智成、宍戸寛明、二井瑛典、芝内孝禎、松田祐司、寺嶋孝仁、人工超格子による重い電子系の次元性制御 I、日本物理学会 2008 年秋季大会、2008 年 9 月 22 日、岩手大学
- 15) 加藤智成、安一樹、宍戸寛明、二井瑛典、芝内孝禎、松田祐司、寺嶋孝仁、人工超格子による重い電子系の次元性制御 II、日本物理学会 2008 年秋季大会、2008 年 9 月 22 日、岩手大学
- 16) 田中拓郎、紺谷浩、d 軌道強束縛模型に基づく外因的スピンホール効果の理論、日本物理学会 2008 年秋季大会、2008 年 9 月 22 日、岩手大学
- 17) 紺谷浩、田中拓郎、平島大、山田耕作、井上順一郎、d 電子系における内因性ホール効果の起源：軌道流の効果、日本物理学会 2008 年秋季大会、2008 年 9 月 22 日、岩手大学

〔その他〕

ホームページ等

<http://www.ltm.kyoto-u.ac.jp/nanouji/>

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

寺嶋 孝仁 (TERASHIMA TAKAHITO)  
京都大学・低温物質科学研究センター・  
教授  
研究者番号：40252506

### (2) 研究分担者

紺谷 浩 (KONTANI HIROSHI)  
名古屋大学・理学(系)研究科(研究院)・  
准教授  
研究者番号：90272533