

---

ナノスピンの変換科学  
Nano Spin Conversion Science

---

領域番号：2602

平成26年度～平成30年度  
科学研究費助成事業（科学研究費補助金）  
（新学術領域研究（研究領域提案型））  
研究成果報告書

令和2年6月18日

領域代表者（東京大学・物性研究所・教授・大谷 義近）

## はしがき

本新学術領域研究「ナノスピンの変換科学」では(1)新物性の創出、(2)非線形スピン変換制御手法の確立(3)統一的な学理の構築を最終目的として、①磁気的スピン変換、②電気的スピン変換、③光学的スピン変換、④機械・熱的スピン変換の四つの実験研究班と、理論構築を担当する⑤スピン変換機能設計班が密な連携研究を行った。班内や班間の連携研究を通じて、スピン変換は、固体・固体界面に留まらず、固体・液体、固体・気体界面にもおよぶ角運動量保存則を基本原理とする普遍的でユニークな現象であることが実験と理論の両面から示された。本領域の研究成果は高く評価されており、文部科学大臣表彰若手科学者賞3名、文部科学大臣表彰科学技術賞研究部門4名をはじめとする87件の受賞、著名な国際会議での15件の基調講演、501件の招待講演に結び付いている。その他、3つの国際会議の開催を通じて研究分野の国際的な認知度を上げ、拠点形成の足掛かりを築いた。更に、人材育成研究拠点の形成のために、従来の5共同研究機関に加え4機関を連携先に組み込み、国際的なスピン変換連携研究を展開した。

スピン変換関連研究は、もともと個々の研究者が独自に研究を遂行していた理学と工学の新興学際分野であったが、本領域発足を契機にこの分野に関わる研究者が集まり、情報交換しながら研究を進めたことで、本分野にパラダイムシフトをもたらし、次世代の諸学問の基本概念の構築に導いた。さらに新概念創出の起爆剤としてスピン変換 (spin conversion) という言葉が国際的にも認知され、通常の国内外の会議でも使われる科学用語になり、融合研究の潮流を作ることができた。

## 研究組織 (総：総括班，支：国際活動支援班，計：総括班及び国際活動支援班以外の計画研究，公：公募研究)

研究項目	課題番号 研究課題名	研究期間	代表者・分担者氏名	所属機関 部局 職	構成員数
X00 総	26103001 スピン変換総括班	平成26年度～ 平成30年度	代表者 大谷 義近	東京大学・物性研究所・教授	5
			分担者 齊藤 英治	東京大学・工学系研究科・教授	
			分担者 白石 誠司	京都大学・工学研究科・教授	
			分担者 村上 修一	東京工業大学・理学院・教授	
			分担者 大岩 顕	大阪大学・産業科学研究所・教授	
Y00 支	15K21752 ナノスピン変換科学国際 拠点形成	平成27年度～ 平成30年度	代表者 大谷 義近	東京大学・物性研究所・教授	1
A01 計	26103002 磁気的スピン変換	平成26年度～ 平成30年度	代表者 大谷 義近	東京大学・物性研究所・教授	6
			分担者 木村 崇	九州大学・理学研究院・教授	
			分担者 松倉 文礼	東北大学・原子分子材料科学高等研究 機構・教授	

			分担者 Ronald Jansen	産業技術総合研究所・ナノスピントロ ニクス研究センター・首席研究員	
			分担者 新見 康洋	大阪大学・理学研究科・准教授	
			連携研究者 小野 輝男	京都大学・化学研究所・教授	
A02 計	26103003 電氣的スピン変換	平成 26 年度～ 平成 30 年度	代表者 白石 誠司	京都大学・工学研究科・教授	5
			分担者 浜屋 宏平	大阪大学・基礎工学研究科・教授	
			分担者 勝本 信吾	東京大学・物性研究所・教授	
			分担者 齋藤 秀和	産業技術総合研究所・ナノスピントロ ニクス研究センター・半導体スピント ロニクスチーム長	
			連携研究者 辛 埴	東京大学・物性研究所・教授	
A03 計	26103004 光学的スピン変換	平成 26 年度～ 平成 30 年度	代表者 大岩 顕	大阪大学・産業科学研究所・教授	5
			分担者 塚本 新	日本大学・理工学部・教授	
			分担者 水上 成美	東北大学・原子分子材料科学高等研究 機構・教授	
			分担者 安藤 和也	慶應義塾大学・理工学部・准教授	
			分担者 佐藤 琢哉	九州大学・理学研究院・准教授	
A04 計	26103005 機械・熱的スピン変換	平成 26 年度～ 平成 30 年度	代表者 齊藤 英治	東京大学・工学系研究科・教授	3
			分担者 小野 正雄	日本原子力研究開発機構・先端基礎研 究センター・研究副主幹	
			分担者 高梨 弘毅	東北大学・金属材料研究所・教授	
A05 計	26103006 スピン変換機能設計	平成 26 年度～ 平成 30 年度	代表者 村上 修一	東京工業大学・理学院・教授	5
			分担者 前川 禎通	理化学研究所・創発物性科学研究セン ター・上級研究員	

			分担者 多々良 源	理化学研究所・創発物性科学研究センター・チームリーダー	
			分担者 永長 直人	東京大学・工学系研究科・教授	
			分担者 Gerrit Bauer	東北大学・金属材料研究所・教授	
統括・支援・計画研究 計 7 件					
A01 公	15H01014 メタ磁性転移物質を舞台とした磁気界面マグノン変換と伝播・位相制御	平成 27 年度～ 平成 28 年度	谷山 智康	東京工業大学・科学技術創成研究院・准教授	3
A01 公	15H01017 磁性体におけるスピン軌道トルクの研究	平成 27 年度～ 平成 28 年度	三輪 真嗣	大阪大学・基礎工学研究科・准教授	4
A01 公	15H01024 ダイヤモンドスピネンサーを用いた室温ナノスピンの変換	平成 27 年度～ 平成 28 年度	安 東秀	北陸先端科学技術大学院大学・マテリアルサイエンス研究科・准教授	3
A01 公	17H05181 反強磁性体におけるスピン変換ダイナミクスの解明	平成 29 年度～ 平成 30 年度	森山 貴広	京都大学・化学研究所・准教授	1
A01 公	17H05182 界面磁性を利用したスピン変換現象の研究	平成 29 年度～ 平成 30 年度	三輪 真嗣	東京大学・物性研究所・准教授	2
A01 公	17H05186 キラル物質を用いた新しい選択則のスピン流・電流変換現象の開拓	平成 29 年度～ 平成 30 年度	関 真一郎	東京大学・工学系研究科・准教授	1
A02 公	15H01010 ファンデルワールスヘテロ構造におけるスピン変換技術の確立	平成 27 年度～ 平成 28 年度	守谷 頼	東京大学・生産技術研究所・助教	1
A02 公	15H01011 効率的スピン流生成とスピンホール角制御のための界面制御とバンドエンジニアリング	平成 27 年度～ 平成 28 年度	大矢 忍	東京大学・工学系研究科・准教授	1

A02 公	17H05187 スピン変換研究に向けた 電氣的超高速局所スピン プローブの開発と応用	平成 29 年度～ 平成 30 年度	大塚 朋廣	東北大学・電気通信研究所・准教授	1
A03 公	15H01012 電子スピン制御技術を用 いたもつれ光子対の計測 実験	平成 27 年度～ 平成 28 年度	松尾 貞茂	東京大学・工学系研究科・助教	1
A03 公	15H01018 光制御型高スピン多核錯 体の開発	平成 27 年度～ 平成 28 年度	佐藤 治	九州大学・先導物質化学研究所・教授	1
A03 公	17H05176 空間反転対称性の破れを 利用した反強磁性マグノ ニクス	平成 29 年度～ 平成 30 年度	小野瀬 佳文	東北大学・金属材料研究所・教授	2
A03 公	17H05177 偏光もつれ光子対から電 子スピン対への量子もつ れ相関の転写技術の開発 とその実証	平成 29 年度～ 平成 30 年度	松尾 貞茂	東京大学・工学系研究科・助教	3
A04 公	15H01013 速度選択スピン共鳴を通 じた気体原子と固体容器 間の並進角運動量移行	平成 27 年度～ 平成 28 年度	畠山 温	東京農工大学・工学研究院・准教授	1
A04 公	15H01021 力学的回転運動の回転ス ピン流変換	平成 27 年度～ 平成 28 年度	能崎 幸雄	慶應義塾大学・理工学部・教授	1

A04 公	17H05178 気体と固体，スピンでつ なぐ ～スピン流生成か ら機械的回転まで	平成 29 年度～ 平成 30 年度	畠山 温	東京農工大学・工学研究院・教授	1
A04 公	17H05183 巨視的回転運動と微視的 スピン角運動量の双方向 変換に関する研究	平成 29 年度～ 平成 30 年度	能崎 幸雄	慶應義塾大学・理工学部・教授	1
A05 公	15H01009 Efficient Thermal Spin Conversion in Spin- spiral Systems	平成 27 年度～ 平成 28 年度	Tretiakov Oleg	東北大学・金属材料研究所・助教	1
A05 公	15H01015 第一原理手法による界面	平成 27 年度～ 平成 28 年度	石井 史之	金沢大学・理工研究域数物科学系・准 教授	1

	電場・スピン軌道結合係数の見積とスピン変換物質デザイン				
A05 公	15H01022 エレクトロマグノン過程に伴うスピン波スピンの生成理論	平成 27 年度～ 平成 28 年度	宮原 慎	福岡大学・理学部・准教授	1
A05 公	15H01025 ナノスケールスピン液体におけるスピノン超流動によるスピン変換理論	平成 27 年度～ 平成 28 年度	小野田 繁樹	国立研究開発法人理化学研究所・専任 研究員	1
A05 公	17H05173 Efficient Thermal Spin Conversion in Spin-spiral Systems	平成 29 年度～ 平成 30 年度	Tretiakov Oleg	東北大学・金属材料研究所・助教	1
A05 公	17H05174 スピノン・トリプロン・マグノン分子による熱的スピン流生成についての微視的理論研究	平成 29 年度～ 平成 30 年度	佐藤 正寛	茨城大学・理学部・准教授	1
A05 公	17H05179 歪みによるスピン流及び磁化生成	平成 29 年度～ 平成 30 年度	横山 毅人	東京工業大学・理学院・助教	1
A05 公	17H05180 第一原理手法によるナノスピン変換物質デザイン	平成 29 年度～ 平成 30 年度	石井 史之	金沢大学・理工研究域数物科学系・准 教授	1
公募研究 計 25 件					

## 交付決定額（配分額）

領域総額（総括班、国際活動支援班、計画研究、公募研究、成果とりまとめ）

	合計	直接経費	間接経費
平成 26 年度	336,960,000 円	259,200,000 円	77,760,000 円
平成 27 年度	315,120,000 円	242,400,000 円	72,720,000 円
平成 28 年度	329,420,000 円	253,400,000 円	76,020,000 円
平成 29 年度	277,420,000 円	213,400,000 円	64,020,000 円
平成 30 年度	264,940,000 円	203,800,000 円	61,140,000 円
令和元年度	3,900,000 円	3,000,000 円	900,000 円
総計	1,527,760,000 円	1,175,200,000 円	352,600,000 円

総括班

	合計	直接経費	間接経費
平成 26 年度	11,700,000 円	9,000,000 円	2,700,000 円
平成 27 年度	9,880,000 円	7,600,000 円	2,280,000 円
平成 28 年度	9,880,000 円	7,600,000 円	2,280,000 円
平成 29 年度	15,080,000 円	11,600,000 円	3,480,000 円
平成 30 年度	15,080,000 円	11,600,000 円	3,480,000 円
総計	61,620,000 円	47,400,000 円	14,220,000 円

国際活動支援班

	合計	直接経費	間接経費
平成 27 年度	14,300,000 円	11,000,000 円	3,300,000 円
平成 28 年度	14,300,000 円	11,000,000 円	3,300,000 円
平成 29 年度	14,300,000 円	11,000,000 円	3,300,000 円
平成 30 年度	14,300,000 円	11,000,000 円	3,300,000 円
総計	57,200,000 円	44,000,000 円	13,200,000 円

成果取りまとめ

	合計	直接経費	間接経費
令和元年度	3,900,000 円	3,000,000 円	900,000 円

計画研究

A01：磁気的スピン変換班

	合計	直接経費	間接経費
平成 26 年度	119,470,000 円	91,900,000 円	27,570,000 円
平成 27 年度	56,810,000 円	43,700,000 円	13,110,000 円
平成 28 年度	64,610,000 円	49,700,000 円	14,910,000 円
平成 29 年度	47,450,000 円	36,500,000 円	10,950,000 円
平成 30 年度	47,450,000 円	36,500,000 円	10,950,000 円
総計	335,790,000 円	258,300,000 円	77,490,000 円

A02：電気的スピン変換班

	合計	直接経費	間接経費
平成 26 年度	67,470,000 円	51,900,000 円	15,570,000 円
平成 27 年度	57,330,000 円	44,100,000 円	13,230,000 円
平成 28 年度	47,970,000 円	36,900,000 円	11,070,000 円
平成 29 年度	43,160,000 円	33,200,000 円	9,960,000 円
平成 30 年度	31,330,000 円	24,100,000 円	7,230,000 円
総計	247,260,000 円	190,200,000 円	57,060,000 円

A03：光学的スピン変換班

	合計	直接経費	間接経費
平成 26 年度	64,740,000 円	49,800,000 円	14,940,000 円
平成 27 年度	44,460,000 円	34,200,000 円	10,260,000 円
平成 28 年度	66,560,000 円	51,200,000 円	15,360,000 円
平成 29 年度	35,100,000 円	27,000,000 円	8,100,000 円
平成 30 年度	36,010,000 円	27,700,000 円	8,310,000 円
総計	246,870,000 円	189,900,000 円	56,970,000 円

A04：熱・力学的スピン変換班

	合計	直接経費	間接経費
平成 26 年度	49,270,000 円	37,900,000 円	11,370,000 円
平成 27 年度	53,950,000 円	41,500,000 円	12,450,000 円
平成 28 年度	32,760,000 円	25,200,000 円	7,560,000 円
平成 29 年度	38,480,000 円	29,600,000 円	8,880,000 円
平成 30 年度	38,480,000 円	29,600,000 円	8,880,000 円
総計	212,940,000 円	163,800,000 円	49,140,000 円

A05：スピン変換機能設計班

	合計	直接経費	間接経費
平成 26 年度	24,310,000 円	18,700,000 円	5,610,000 円
平成 27 年度	30,550,000 円	23,500,000 円	7,050,000 円
平成 28 年度	37,180,000 円	28,600,000 円	8,580,000 円
平成 29 年度	37,050,000 円	28,500,000 円	8,550,000 円
平成 30 年度	35,490,000 円	27,300,000 円	8,190,000 円
総計	164,580,000 円	126,600,000 円	37,980,000 円

公募研究

A01：磁気的スピン変換班

	合計	直接経費	間接経費
平成 27 年度	13,520,000 円	10,400,000 円	3,120,000 円
平成 28 年度	13,130,000 円	10,100,000 円	3,030,000 円
平成 29 年度	16,380,000 円	12,600,000 円	3,780,000 円
平成 30 年度	16,640,000 円	12,800,000 円	3,840,000 円
総計	59,670,000 円	45,900,000 円	13,770,000 円

A02：電気的スピン変換班

	合計	直接経費	間接経費
平成 27 年度	10,400,000 円	8,000,000 円	2,400,000 円
平成 28 年度	10,400,000 円	8,000,000 円	2,400,000 円
平成 29 年度	3,250,000 円	2,500,000 円	750,000 円



平成 30 年度	3,640,000 円	2,800,000 円	840,000 円
総計	27,690,000 円	21,300,000 円	6,390,000 円

#### A03：光学的スピン変換班

	合計	直接経費	間接経費
平成 27 年度	10,140,000 円	7,800,000 円	2,340,000 円
平成 28 年度	10,140,000 円	7,800,000 円	2,340,000 円
平成 29 年度	11,310,000 円	8,700,000 円	2,610,000 円
平成 30 年度	12,220,000 円	9,400,000 円	2,820,000 円
総計	43,810,000 円	33,700,000 円	10,110,000 円

#### A04：熱・力学的スピン変換班

	合計	直接経費	間接経費
平成 27 年度	7,540,000 円	5,800,000 円	1,740,000 円
平成 28 年度	8,060,000 円	6,200,000 円	1,860,000 円
平成 29 年度	10,400,000 円	8,000,000 円	2,400,000 円
平成 30 年度	9,100,000 円	7,000,000 円	2,100,000 円
総計	35,100,000 円	27,000,000 円	8,100,000 円

#### A05：スピン変換機能設計班

	合計	直接経費	間接経費
平成 27 年度	6,240,000 円	4,800,000 円	1,440,000 円
平成 28 年度	5,070,000 円	3,900,000 円	1,170,000 円
平成 29 年度	5,460,000 円	4,200,000 円	1,260,000 円
平成 30 年度	5,200,000 円	4,000,000 円	1,200,000 円
総計	21,970,000 円	16,900,000 円	5,070,000 円

## 1. 研究領域の目的及び概要

### 【研究の学術的背景】

20世紀には実用上も現代情報化社会の礎となったエレクトロニクスに代わり、スピンの流れ、いわゆる「スピン流」という新概念が登場した。21世紀に入ると、その理解は単なる電流とは異なる角運動量を運ぶ流れとして一段と深まっている。最近では、このような角運動量流が、固体電子を媒介として、光、スピン、熱等と相互に変換することが分かってきた。例えば、電子スピンに着目すると、伝導電子のスピン角運動量は、交換相互作用を介して角運動量保存則により磁化に加わる回転力（スピントルク）に変換される。これにより磁化は歳差運動、もしくはその向きを反転する。この現象が外部磁場を用いない磁気共鳴励起あるいは磁気記録の書き込み原理として応用され、スピントルク発振子あるいはスピントルク磁気固体メモリとして広く知られている。同様に光も時計回りあるいは反時計回りの円偏光として角運動量を局在スピンの受け渡して磁化反転を誘起する。熱に目を向けると、熱やマイクロ波等の擾乱は磁化の歳差運動を励起する。強磁性体と非磁性体金属の接合を考えると、歳差運動する磁化から伝導電子スピンを経由して、熱が電気に変換される。このように、伝導電子スピン、局在電子スピン、フォトン、フォノンなど多様な粒子・準粒子の間にまたがる相互変換現象を総称してスピン変換と呼ぶ。このスピン変換は、新奇な物性現象の宝庫であり、最近になってやっと発見された現象が数多く存在する。

スピン変換に関わる最近の研究動向を眺めると、我が国の研究者は際立った成果を挙げており、巨大スピンホール効果、巨大スピン蓄積・純スピン流誘起磁化反転、スピントルクダイオード効果、スピンゼーベック効果、絶縁体へのスピン注入、スピン起電力、強磁性超薄膜の磁気異方性電圧制御など日本発の新しいスピン変換に関わる物性の研究報告は、枚挙に暇がない。このように、スピントロニクス研究の著しい発展には我が国の研究者の貢献が極めて大きく、物質科学に実験と理論の両面から多くの知見を与え、活発かつ魅力的な研究分野に成長させた。その結果、基礎研究としてだけでなく、実際に役に立つスピン変換応用を見据えたエレクトロニクス産業の関心を勝ちとるに至っている。

これらの先進的研究で発見されたスピン変換現象の多くは、磁性体、非磁性体、半導体、絶縁体等の異種物質の比較的単純な接合構造で発現しており、次に述べる2つの重要な特徴を有する。第一に、スピン変換現象は優れた汎用性・応用性を持っており、様々な物質やそれらの接合を選択できることから自由度の大きな機能設計が可能となる。第二に、こうしたスピン変換現象の背後に、普遍的な学理があることを意味している。このスピン変換現象を、統一的に理解し学問的に統合することができれば、新しい学術領域を創成するだけでなく、日本が得意とする磁性研究を基として発展してきたスピントロニクス領域を新たなステージに引き上げ、国際的な日本の学術的プレゼンスをより一層高めることができると考える。

### 【達成目標】

以上を考慮して、本研究領域では、多彩なスピン変換機能を発現させるための基礎物性を、①磁気的スピン変換、②電気的スピン変換、③光学的スピン変換、④機械・熱的スピン変換の四つの実験的視点から調べると共に、理論の立場から⑤スピン変換機能設計を行い、実験・理論の連携研究からその基礎となる学理を構築し、新機能の創出を目指す。成果や研究手法は、物性物理学の基礎となり、ひいては我が国の物質科学全体の学術水準を押し上げ、基礎研究の質的な進展をもたらすことは確実である。

そこで、本領域ではこれらの点を踏まえて磁気的、電気的、光学的、機械・熱的スピン変換の全てが密接にかかわる異種物質接合の変換機能に着目して、次のように研究領域の達成目標を設定する。

- (1) スピン変換による新物性の創出：異種物質間の接合状態とスピン変換機能の探索を軸に磁気的、電気的、光学的、機械・熱的スピン変換物理を実験と理論の両面から解明し、卓抜なスピン変換物性を創出する。
- (2) 非線形スピン変換制御技術の確立：従来の線形なスピン変換とは異なる非線形スピン変換過程を開拓し、制御手法の確立を目指す。

(3) スピン変換の統一的な学理の構築：磁性体・半導体・絶縁体におけるマグノン、フォトン、フォノン等の多様な準粒子間の相互変換を実験と理論の両面から統一的に理解し、ナノスピン変換科学の物理体系構築を目指す。

#### 【学術水準の向上・強化につながる研究領域】

本領域で取り組むナノスピン変換科学は、交換相互作用とスピン軌道相互作用を媒介とした伝導電子スピン、局在スピン、核スピン、フォトン、フォノンなど多様な粒子・準粒子が複合的に絡み合った未知の融合領域であり、その解明には、精緻な物理実験と緻密な理論的解釈の連携が必要不可欠である。一方、先述したようにスピン変換に関わる最近の進展の多くは日本の成果によるものであり、金属および半導体スピントロニクスの実験的あるいは理論的研究で世界的にも先導的な役割を果たしている研究者を結集し、本研究領域を推進することにより格段の進歩が期待される。

また、研究プロジェクトにおいては多様な粒子・準粒子が絡み合った物理現象を扱うため、金属、半導体はもとより酸化物までの広範囲な物質群を取り扱うだけでなく、力学的スピン変換現象においては機械工学的センスも必要とすることから、初めてスピン変換の研究に参加する優秀な機械工学研究者も含まれる。さらに、この分野の国際的な認知度と連携体制を反映して、各班に国際的に著名な研究協力者が参加している。また、研究分担者のうち東北大学教授 Gerrit Bauer 氏と産業技術総合研究所首席研究員 Ronald Jansen 氏の 2 名は、最近、日本に頭脳流入した世界的にスピントロニクス分野を先導している理論と実験の稀有な外国人研究者である。

一方で、このようなスピン変換の物理は、ナノスケールの電子デバイスやエネルギー散逸の物理とも密接に関連している。したがって、上述のような国内外の多様な研究者が密接な連携体制をもって、スピン変換に関わる物性物理を統一的に理解し、その基礎学理を確立することは、ナノ磁気デバイスの動作原理やエネルギー散逸の物理に関するより深い知見を得ることに繋がり、従来の学問分野では注目されてこなかったスピン角運動量を媒介とする新規な運動量変換の物理体系が構築されることが強く期待される。

スピン変換科学はそれ自体、物性物理学における基本的な重要課題であるばかりでなく、金属、半導体、絶縁体といった、異種物質間の角運動量とエネルギーの変換・伝搬を横断的に理解するためのあらゆる物性物理の重要な要素を含んでいる。その解明には、従来とは全く異なる発想に基づく新たな実験手法や理論解析手法の構築が必須となる。またスピン変換科学の近年の成果は、物性物理における普遍的な学理を開拓してきた。したがって、その成果や研究手法は、物性物理学の基礎となり、ひいては我が国の物質科学全体の学術水準を押し上げ、基礎研究の質的な進展をもたらすことは確実である。

## 2. 研究領域の設定目的の達成度

### 【A01 磁氣的スピン変換班】

磁氣的スピン変換班では、①非線形スピンドイナミクスとスピン変換の相関物性および②スピン軌道相互作用を通じて出現する界面磁気異方性制御や新奇なスピン変換物性の開拓を二つの主研究課題として研究に取り組んできた。研究項目①に関しては、弱い強磁性体やスピングラス合金のスピンホール効果に非線形効果がスピン揺らぎと相関をもって現れることを理論と実験の両面から検証した。この現象の発見を契機として、スピン揺らぎをスピンホール効果増強に応用する実験が世界的に行われている。発展研究として、超伝導状態の準粒子によって生じるスピンホール効果が巨大な非線形応答することを発見し、A05 班の理論グループとの共同研究よりその発現機構を解明した。また、半導体/金属接合界面におけるスピン蓄積のバイアス電圧依存性に非線形な応答が現れることを発見し、それがフェルミ準位近傍の状態密度の変化に起因することを実験と理論の両面から解明した。一方で、項目②の新奇なスピン変換の探索に関しては、酸化物と非磁性金属界面においてスピン軌道相互作用を通じてラシュバスピン分裂が生じ、それによるスピン・電流相互変換現象が生じることを実験的に発見し、その発現機構を系統的な物質依存性の実験と A05 班の公募班の第一原理計算との詳細な比較から界面における電荷移動やポテンシャル分布によってその符号と大きさが決定されることを明らかにした。さらに、同様の実験手法をトポロジカル絶縁体の表面状態に応用し、52%におよぶ大きなスピン・電荷変換効率を実現した。その他、項目②の電場による効果に関しても、高抵抗磁気トンネル接合素子を用いて電場による世界最小の磁化反転エネルギー（6.3 fJ/bit）を達成した。また、フェリ磁性体における磁壁移動速度の詳細な測定より、角運動量補償温度では磁壁形状の不安定性が生じないことから磁壁移動速度が劇的に増大することを見だし、この効果が角運動量補償温度での反強磁性的スピンドイナミクスに由来することを解明した。A01 班に導入した集束イオンビーム装置を使うことで初めて純良な単結晶中に内在する空間対称性や時間反転対称性が破れたな原子層界面を抽出し、その特異な電子構造やスピン軌道相互作用をスピン変換素子に応用することができた。これにより得られた、予想以上の成果の一つとして、世界で初めて、キラル半導体において3次元のスピン変換現象である電流誘起磁化が観測された。二つ目として、新物質である非共線 Weyl 反強磁性体において従来のスピンホール効果とは質的に異なる磁気スピンホール効果が実験的に発見された。発現機構は国際共同研究を通じて、理論的にも解明された。班内外の横断的な連携研究や国際的な共同研究を通じて、研究拠点形成がなされた。

### 【A02 電氣的スピン変換班】

スピン変換という物理現象は異種界面においてスピン流およびスピン蓄積が誘起される現象であり、異種界面において局所的なスピン偏極が生じることを意味する。これらスピン偏極を検出するには、逆スピンホール効果を利用して起電力を発生させる等の手法が一般的であり同時に強力なツールとなってきた。本提案で目指す①新スピン変換物性現象の発見、②非線型なスピン変換現象の実現、③統一的学理の理解、を電氣的スピン変換の視座から達成するためにはスピン変換を増強又は阻害している微視的な要因が何であるか等の基礎的なスピン変換物性における知見の蓄積と従来の枠組みに捕われない新構想に基づくスピン変換機能の実現を達成することが必要であった。本研究期間を通じ、①についてはトポロジカル絶縁体の表面スピン偏極の電氣的スピン変換による計測を通じた「トポロジカルスピン変換」の実現と当該領域の創出を突破口に、結晶トポロジカル絶縁体におけるスピン変換やグラフェンへの外的なスピン軌道相互作用の導入によるトポロジカル絶縁体化の成功など、トポロジカルスピン変換というコンセプトに基づく学理の大きな広がりを実現した。②に関しては超薄膜Ptに強電界を印加することによってPtのスピン流電流変換機構を非線型かつ大幅かつ自在に変調できる新奇な非線型スピン変換を発見しスピン変換効率を決定する微視的要因の理解を大きく進め知的財産権の創出にも至った。③に関してはスピン変換においてはスピンスと結合する物理量が枢軸的に重要であるという基盤学理の理解に至った。特にA02班では主に $k$  (波数) と $L$  (軌道角運動量) が前者はトポロジカルなスピン変換、後者はスピン軌道相互作用による変換として大きな役割

を果たすため、極言すればスピン変換の場は遍在（ユビキタス）し、極めて多様な異種界面・表面、またバルク材料がスピン変換のステージとなりうることを理解・実証することができた。

班内・班間連携も順調に発展しA01~A05班のすべての班、及び班内の公募研究班すべてのメンバーとの共同研究による論文発表に至っており本新学術領域研究を「場」とする新しい研究の発展を十分に達成した。更に、契約書を取り交わした上での日本企業との共同研究が2件、国際共同研究も9件を数え、研究の国際化と応用展開も順調に進んだ。

### 【A03 光学的スピン変換班】

光学的スピン変換では、光とスピンの変換の学理構築と新機能の創出を目指し、①偏光依存／非依存超高速磁化反転における角運動量変換過程と微視的機構の解明、②光誘起マグノンの励起機構と制御、③界面スピン変換、④コヒーレント光スピン変換の4つの課題に取り組んだ。①では、反強磁性体での逆ファラデー効果や特異な超高速反強磁性共鳴など偏光依存光スピン変換の新現象と表面プラズモンによる逆ファラデー効果増大を実現した。一方、フェリ磁性体の全光型磁化反転では、国際連携を通じて、サブピコ秒領域での強い非平衡加熱状態のエネルギー散逸やスピンおよび軌道角運動量の格子系への移行など磁化反転をもたらす超高速過程でのエネルギーと角運動量移行の微視的機構を解明した。②では、世界最高レベルの時間分解顕微磁気光学システムを構築して、時間・空間的にフーリエ変換によるスピン波の分散関係の導出など画期的な方法を創出するとともに（佐藤・A04 齊藤）、ヘリシティに依存する反強磁性マグノンモードなど新しい現象を見出した（A01 小野・水上・塚本）。加えてスピン流-テラヘルツ光変換という当初予定していなかった逆光スピン変換の新しい成果も得た（水上）。③に関して、金属/絶縁体界面におけるマイクロ波誘起マグノンと伝導電子スピン流の角運動量変換を調べ、マグノン散乱によるスピンドamping変調効果により、非線形スピン流増大現象が広く一般に発現し、その非線形スピン変換によりマグノン励起を介したスピン流生成が統一的に理解できることを示した。さらにマグノン・フォノン結合モードによるスピン流生成を観測した。これらの成果は、マグノン分裂・散乱で記述されるスピン系の非線形性、さらにフォノンまで含めたスピン変換によって現れるスピントロニクス現象の基礎物性の理解に繋がるものである。④では、当初目標にした、単一光子偏光から量子ドット中の単一電子スピンへの角運動量とその重ね合わせ状態の変換を達成した（大岩・公募班）。これは光スピン変換の素過程では、光子から電子スピンへ位相情報を保持した角運動量の変換が可能であるというスピン変換の基本原則を示す結果である。さらに量子もつれという光子の量子力学的相関を導入し、1つのもつれ光子対から単一光子と量子ドット中の単一電子の対の生成に成功し、光子対から電子スピン対へもつれ相関を変換することも可能であることを示した（大岩・公募班）。これは量子情報通信だけでなく固体中の非局所もつれの生成という新たな物性研究を開拓する重要な成果である。

### 【A04 機械・熱的スピン変換班】

本研究班は、代表者らによる金属におけるスピンホール効果に基づくスピン流の生成・検出技術をコアに、機械工学と材料工学を専門とする分担者らとの融合により打破し、力学的運動と熱に対して角運動量変換原理に基づく物理の開拓を目的として行った。特に計画当初より、(1)電子スピンと力学的運動との角運動量変換と(2)スピン角運動量変換を利用した熱エネルギー技術体系の構築にターゲットを絞り、重点的に研究を行った。

研究班内および研究班間の協力関係がうまく形成できたことで研究は順調に進み、当初の予定通り、電流・スピン流と機械運動・熱を相互作用させる新しいエネルギー変換現象の開拓と学理構築を実現できた。まず、(1)電子スピンと力学的運動との角運動量変換においては、従来、固体材料に限られていたスピントロニクス研究の対象材料を、液体金属、核スピン、表面弾性波（公募班）、気体スピン（公募班）、さらにはマイクロ機械技術による磁性体カンチレバー構造にまで拡張した。特に液体金属に関する成果は、Nature Physicsと Nature Material の2誌で独立に、新しいスピン科学の開拓を報じるニュース論文が掲載され、Spin

Mechanics についてのセッションが多く、磁性的の国際会議に設置されるようになった。このようなインパクトは、A04 班におけるスピントロニクス物理学（齊藤、松尾）と機械工学（小野）という従来にない新しい組み合わせによる緊密な共同研究が実現したことによってはじめて生み出された成果といえる。これらの共同研究においては、A05 班との理論共同研究が不可欠であり、実際共同研究論文が多数出版された。次に、(2) スピン角運動量変換を利用した熱エネルギー技術体系の構築においては、磁性層積層構造や反強磁性体、そして 1 次元量子スピン液体などにおけるスピン角運動量熱変換を利用した熱エネルギー技術体系が構築できた。

加えて、研究開始当初は予想もなかった新現象がいくつも見つかった。まず、磁性絶縁体におけるスピナーバック効果を観測し、マグノンとフォノンの混成効果に起因するピーク構造を見出した。このことは、マグノン流に比べて長寿命なフォノン流がスピナーバック効果に寄与することを示唆し、スピナーフォノン変換を用いた機能設計の指針を与える。また、強磁性金属 Co/反強磁性磁性体 CoO/強磁性絶縁体 YIG 接合において、スピン波強度の強い磁化配置依存性を観測した。これはマグノン版スピナーバルブ効果が実現できることを意味し、マグノンによる論理回路の実現へ向けた重要な結果である。さらに Cr2O3 において、反強磁性相転移でのスピン流に対する導体絶縁体転移を見出した。この結果は、スピン流 ON/OFF 変換機能の実現を意味し、スピン流トランジスタの基礎となる重要な成果である。

#### 【A05 スピン変換機能設計班】

A05 班では理論の立場から新しいスピン変換機能を設計し、それに伴う学理を理論的に構築し、それを実現する系を理論的に探索する役割を担っている。当初の目的は 2 つあり、第一に、(a) 新しいスピン変換機能の探索・学理の構築・系の理論的探索であり、従来のスピントロニクス研究にスピン変換という視点を持ち込み、(a1) 新しい理論的枠組み、(a2) 新材料・新物質、(a3) 界面、薄膜などの構造、の 3 つの視点からスピン変換機能探索を行うことで、第二に (b) A01～A04 実験班との連携によるスピン変換機能探索である。応募時の研究目標に照らして予想以上に研究が進展したといえる。

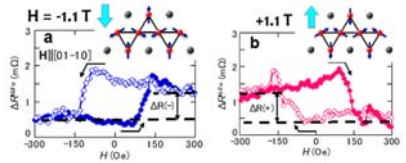
(a1) 新しい理論的枠組みとしては、新しい準粒子であるマグノンポーラロンの測定に関する理論構築を行ったこと、また反強磁性スキルミオンの円状の運動を利用した発信素子を理論提案し、次世代発信素子としてのスキルミオンによるスピントルク発振素子の可能性を示したことが成果として挙げられる。また公募班の研究成果として、反転対称性がない磁性絶縁体への直線偏光電磁波照射によるスピン流生成の理論予言があり、これは質的に新しいスピン流生成方法である。(a2) 新材料・新物質では、例えばフォノン伝搬の非相反性を、マルチフェロイック物質でのフォノンとマグノンの混成効果から理論的に示し、実験結果を説明したことや、公募班と計画班との共同研究として、反強磁性スキルミオンが遍歴電子のトポロジカルホール効果を生み出し、それがスキルミオンの移動度を増大させることを見出したことがあげられる。さらに希土類スピントロニクス実現に向けて、A05 班の理論と A04 班の実験とで共同研究を行い、GdIG でのスピナーバック効果の符号変化の物理を明らかにした。(a3) 構造を利用したスピン変換現象については、らせん形の結晶構造を持つ結晶での電流誘起軌道磁化の異常増大の理論（公募班との共同研究）や、熱流誘起のフォノン角運動量などの新現象予言があり、さらに A01 班の実験との共同研究として、酸化物/貴金属界面 ( $\text{Bi}_2\text{O}_3/\text{M}$  ( $\text{M}=\text{Cu}, \text{Ag}, \text{Au}$ )) の電子状態計算を通じて、実験での Rashba 係数の貴金属依存性の起源を明らかにするなど、広い範囲の研究を行った。(b) 実験班との連携によるスピン変換機能探索としては、上記以外にも、スピンペルチェ効果とスピネルンスト効果の初めての実験観測にかかる理論を構築するなど、多くの研究成果をあげた。このように A05 班では、理論と実験との連携を推進した結果、さまざまな形で新たな連携関係を創成し新現象の発見などの研究成果に着実に結び付けることができた。

### 3. 主な研究成果

#### 【A01 磁気的スピン変換班】

##### 計画研究成果

- 新物質である非共線 Weyl 反強磁性体である  $\text{Mn}_3\text{Sn}$  を用いたスピン変換実験から、従来のスピンホール効果とは質的に異なる磁気スピンホール効果を発見した。(A01 班文献[1])
- 酸化物 ( $\text{Bi}_2\text{O}_3/\text{M}(\text{M}=\text{Cu,Ag,Au})$ ) 界面の伝導バンドにラシュバスピン分裂が生じることを発見し、第 1 原理計算との比較から発現機構を解明した。(A01 班文献[2]A05 公募班石井 GP との共同研究)
- フェリ磁性体  $\text{GdFeCo}$  合金の角運動量補償温度で磁壁移動速度が増大することを見だし、この効果が角運動量補償温度での反強磁性的スピンドायナミクスに由来することを明らかにした。(A01 班文献[3])
- 半導体/金属接合を用いたスピン蓄積信号測定からバンド分散を反映した非線形性が現れることを実験と理論の両面から明らかにした。(A01 班文献[4])
- 高抵抗磁気トンネル接合素子を用いて電場による世界最小の磁化反転エネルギー(6.3 fJ/bit)を達成した。(A01 班文献[6])
- 超伝導体で発現する新しい非線形スピンホール効果を、非局所スピンバルブ構造におけるスピン吸収法で発見した。(A01 班文献[9]A05 班前川 GP との共同研究)
- 強磁性半導体の磁気緩和定数の大きさが電界により変調可能であり、その起源が金属-絶縁体転移に関連することを明らかにした。(A01 班文献[12])



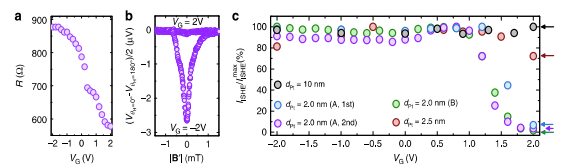
##### 公募班成果

- キラル半導体であるテルル単結晶における Weyl 型のスピン分裂を介して、新奇な電流・スピン変換を検証した。(A01 公募班 論文投稿中)
- 反強磁性体においてスピントルク効果による磁化操作を実証した。本成果は、これまで難しいと考えられてきた反強磁性体における磁化操作における新しい物理機構を開拓・実証した先駆的研究である。(A01 公募班文献[14])

#### 【A02 電气的スピン変換班】

##### 計画研究成果

- 強磁性半導体  $\text{InFeAs}$  上に超伝導体  $\text{Nb}$  ナノギャップ構造を作製し、 $\text{InFeAs}$  の proximity 超伝導の実現に世界で初めて成功した。Fraunhofer パターンの観測と解析から  $\text{InFeAs}$  内に 3 重項超伝導が実現されていることが明らかになった(A02 班文献[2]、公募班大矢 GP との共同研究)。
- 薄さ 2 nm という超薄膜 Pt にイオン液体ゲートを用いた強電界を印加することによって Pt のスピン流電流変換機構を非線型かつ大幅に変調できる非線型スピン変換の新しい効果を発見した(A02 班文献[3])。
- 空間反転対称性の破れたグラフェン/YIG 系におけるスピン変換機構の解明に成功した(A02 班文献[6])。
- 動力学的スピン変換による Ge 中の室温スピン輸送を達成し(A02 班文献[7])、スピン緩和機構の解明に発展した(A02 班文献[5])。
- 3次元トポロジカル絶縁体  $\text{BiSbTeSe}$  において表面スピン流を、新たな電气的スピン変換手法によって計測しその物性を明らかにした(A02 班文献[8])。発展研究として、グラフェンにスピン軌道相互作用を導入することで理論的に予言されていたトポロジカル絶縁体への転移を検証した(A02 班文献[4])ほか、公募班研究で結晶トポロジカル絶縁体  $\text{SnTe}$  におけるスピン変換に成功(A02 公募班文献[14])した。



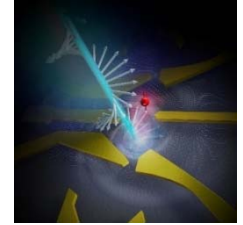
## 公募班成果

- 単一電子移動から生じるスピン状態の変化についてマイクロなモデルによる背景学理の解明に成功した (A02 公募班文献[9])。
- van der Waals ヘテロ構造を利用した原子膜超伝導体接合系におけるジョセフソン接合の創出に成功した。((A02 公募班文献[12,15]))

### 【A03 光学的スピン変換班】

#### 計画研究成果

- 単一光子から単一電子スピンへの角運動量変換と量子状態変換を達成した。(A03 班文献[1],[2]公募研究松尾グループとの共同研究)
- アモルファスフェリ磁性金属の角運動量補償点近傍において、右および左回りのヘリシティに対応する反強磁性マグノンモードを観測し、フェリ磁性体が反強磁性体のようにふるまうこと明らかにした。(論文投稿中) (A01 班小野グループとの共同研究 [3])
- 空間的光角運動量分布が制御された径偏光超短パルスビームを用いることで、偏光依存全光型磁化反転領域の局所化が可能である事を実証した。(A03 班文献[4]国際共同研究機関 Rasing の共同研究)
- 非線形スピン流増大現象が広く一般に発現することや (A03 班文献[5])、マグノン・フォノン結合モードによるスピン流生成を観測した。(A03 班文献[6])
- ビスマス添加希土類鉄ガーネット単結晶の表面上に周期的に電極をつけることで、表面プラズモンを励起し、表面増強効果により巨大な逆ファラデー効果を観測した。(A03 班文献[7])
- 光偏光状態のもつれている光子対の片方を量子ドットに照射し、それにより生成される光電子と残りの光子とを同時に検出することに成功した。(A03 班文献[8]) (公募研究松尾グループとの共同研究)
- 軌道角運動量が消失していない反強磁性体 CoO において、スピン・軌道相互作用によって数テラヘルツに達する反強磁性共鳴周波数と、大きな振動振幅を実証した。(A03 班文献[9])



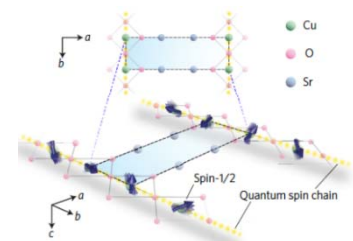
## 公募班成果

- マルチフェロイック基板の表面弾性波デバイスや、空間反転対称性が破れた反強磁性体  $\text{Ba}_2\text{MnGe}_2\text{O}_7$  における反強磁性共鳴付近でマイクロ波非相反性の観測に成功した。(A03 班文献[11],[12])
- 電子移動、スピン転移、プロトン移動などにより磁性や電子物性等が可逆にスイッチするダイナミック物質の開発の現状をまとめた。(A03 班文献[13])

### 【A04 熱・的スピン変換班】

#### 計画研究成果

- 1次元量子スピン液体における熱励起スピン流の生成を検出・実証した。スピノンがスピン流のキャリアとして機能することを意味し、量子スピン演算の基礎をなすものと期待される。(A04 班文献[3])
- 磁性絶縁体におけるスピンゼーベック効果を測定し、マグノンとフォノンの混成効果に起因するピーク構造を見出した。マグノン流に比べて長寿命なフォノン流がスピンゼーベック効果に寄与することを示し、スピンフォノン変換を用いた機能設計の指針を与える。(A04 班文献[4])
- $\text{Cr}_2\text{O}_3$  のスピン伝導特性の温度変化を測定した結果、反強磁性相転移でのスピン流に対する導体絶縁体転移を見出した。この結果は、スピン流トランジスタ開発の基礎となる結果である。(A04 班文献[2])
- 原子核の自転運動である核スピンの集団励起を介したスピン流生成に成功した。従来の電子スピン自由度に由来するスピン変換現象に加えて、核スピンが利用可能であることを実証した。(A04 班文献[1])
- スピンゼーベック効果を利用することで、FePt 強磁性薄膜におけるスピンホール効果の観測に成功し





た。これは、強磁性体におけるスピンホール効果に関する先駆的成果である。(A04 班文献[7])

#### 公募班成果

- 高速回転中の試料が周囲に作る磁場をその場観察できる装置を開発し、Gd 単体多結晶を試料に用いた実験で常磁性状態でのバーネット効果の測定に初めて成功した。(A04 公募班文献[8])
- スピン流のスピン角運動量から巨視的回転運動を生み出す最適条件を詳しく調べた。その結果、電気伝導度が高い非磁性金属の膜厚をスピン拡散長程度にすることが回転運動とスピン波の変換効率向上に重要であることが明らかになった。(A04 公募班文献[9]、研究計画齊藤グループとの共同研究)
- 農工大グループ (畠山グループ) 東北大グループと共同で、スピン偏極させた熱運動する気体からのスピン流生成法を設計し、実験で検証した。(A04 公募班文献[10])

#### 【A05 スピン変換機能設計班】

#### 計画研究成果

- マルチフェロイック物質でのフォノンとマグノンの混成効果からフォノンの伝播が方向依存性を持つことを理論的に示し、実験結果を説明した。(A05 班文献[1])
- スキルミオンに関連したトポロジカルスピン構造であるメロンの格子状態の予言。(A05 班文献[2])
- 希土類スピントロニクスへの第一歩として、GdIG でのスピンゼーベック効果の符号変化の理論的説明を与え、電場による磁気スイッチングにおける電気 4 重極子と磁気双極子の結合の役割を指摘した。(A04 班齊藤グループとの共同研究成果、A05 班文献[3,7])
- らせん形構造の結晶での電流誘起軌道磁化が、古典的ソレノイドと比べ巨大化する理論の構築。(A05 班文献[4])
- カイラルな結晶や極性のある結晶では、熱流がフォノンの角運動量を誘起することを示し、その実証方法として熱流により結晶全体の回転を誘起することを理論提案した。(A05 班文献[5])
- スピンペルチェ効果とスピネルンスト効果の実験観測にかかる理論を構築した。(A05 班文献[6])
- 新しい準粒子であるマグノンポーラロンのカー効果顕微鏡での測定にかかる理論およびそれによるスピンゼーベック効果の理論の構築を行った。(A05 班文献[10])

#### 公募班成果

- 反強磁性スキルミオンの円状の運動を利用した発信素子を理論提案し、次世代発信素子としてのスキルミオンによるスピントルク発振素子の可能性を示した。(A05 班文献[11])
- 反転対称性がない磁性絶縁体への直線偏光電磁波照射による DC スピン流生成理論。(A05 班文献[12])
- 酸化物/貴金属界面 (Bi2O3/M(M=Cu,Ag,Au)) の電子状態計算をおこない、実験から見積もられた Rashba 係数の貴金属依存性の起源を明らかにした。(A01 班大谷グループとの共同研究成果、A05 班文献[13])
- 人工反強磁性である Co/Ru/Co 薄膜での磁区構造と動力学を明らかにし、トポロジカル欠陥が重要な役割を果たすことを見出した。(A05 班多々良グループとの共同研究成果、A05 班文献[14])
- 反強磁性スキルミオンが遍歴電子のトポロジカルホール効果を生み出し、それがスキルミオンの移動度を増大させることを見出した。(A04 班齊藤グループとの共同研究成果、A05 班文献[15])

#### 4. 研究成果の取りまとめ及び公表の状況

(二重下線は研究代表者、一重線は研究分担者、点線の下線は連携研究者、Corresponding author に\*を付している。◎印の融合研究は、物性物理学と電子工学(電子)、機械工学(機械)、量子情報(量子)、材料工学(材料)として分類されている。)

##### 【A01 班磁気的スピン変換班】

(論文)

- 1) ◎(電子) M. Kimata, H. Chen, K. Kondou, S. Sugimoto, P-K. Muduli, M. Ikhlas, Y. Omori, T. Tomita, A-H. MacDonald, S. Nakatsuji, and \*Y. Otani, "Magnetic and magnetic inverse spin Hall effects in a non-collinear antiferromagnet", Nature, 査読有, 565, 627-630, 2019.
- 2) ◎(材料) H. Tsai, S. Karube, \*K. Kondou, N. Yamaguchi, F. Ishii, and Y. Otani, "Clear variation of spin splitting by changing electron distribution at non-magnetic metal/Bi<sub>2</sub>O<sub>3</sub> interfaces", Scientific Reports 8, 5564-1~8, 2018.
- 3) ◎(電子) K.-J. Kim, S. K. Kim, Y. Hirata, S.-H. Oh, T. Tono, D.-H. Kim, T. Okuno, W. S. Ham, S. Kim, G. Go, Y. Tserkovnyak, A. Tsukamoto, T. Moriyama, K.-J. Lee, T. Ono, "Fast Domain Wall Motion in the Vicinity of the Angular Momentum Compensation Temperature of Ferrimagnets" Nature Materials, 査読有, 16, 1187-1192, 2017.
- 4) ◎(電子) A. Spiesser, H. Saito, Y. Fujita, S. Yamada, K. Hamaya, S. Yuasa and \*R. Jansen, "Giant spin accumulation in silicon nonlocal spin-transport devices", Phys. Rev. Appl. 8, 064023-1~10, 2017.
- 5) ◎(電子) K. Kondou, R. Yoshimi, A. Tsukazaki, Y. Fukuma, J. Matsuno, K. S. Takahashi, M. Kawasaki, Y. Tokura, and Y. Otani, "Fermi-level-dependent charge-to-spin current conversion by Dirac surface states of topological insulators", Nature Physics, 査読有, 12, 1027-1031, 2016
- 6) ◎(材料) S. Kanai\*F. Matsukura, and H. Ohno, "Electric-field-induced magnetization switching in CoFeB/MgO magnetic tunnel junctions with high junction resistance", Appl. Phys. Lett., 査読有, 108, 192406-1~3, 2016.
- 7) ◎(電子) Y. Yoshimura, K.-J. Kim, T. Taniguchi, T. Tono, K. Ueda, R. Hiramatsu, T. Moriyama, K. Yamada, Y. Nakatani and \*T. Ono, "Soliton-like magnetic domain wall motion induced by the interfacial Dzyaloshinskii-Moriya interaction", Nature Physics, 査読有, 12, 157-162, 2016.
- 8) ◎(材料) \*Y. Niimi, M. Kimata, Y. Omori, B. Gu, T. Ziman, S. Maekawa, A. Fert, and Y. Otani, "Strong suppression of the spin Hall effect in the spin glass state", Phys. Rev. Lett., 査読有, 115, 196602-1~5, 2015.
- 9) ◎(材料) T. Wakamura, H. Akaike, Y. Omori, Y. Niimi, S. Takahashi, A. Fujimaki, S. Maekawa, and \*Y. Otani "Quasiparticle-mediated spin Hall effect in a superconductor", Nature Materials, 査読有, 14, 675-678, 2015.
- 10) ◎(材料) \*T. Moriyama, N. Matsuzaki, K.-J. Kim, I. Suzuki, T. Taniyama and \*T. Ono, "Sequential write-read operations in FeRh antiferromagnetic memory", Appl. Phys. Lett., 査読有, 107, 122403-1~4, 2015.
- 11) ◎(電子) X. Cui, S. Hu, M. Hidegara, and \*T. Kimura, "Sensitive detection of vortex-core resonance using amplitude-modulated magnetic field" Sci. Rep., 査読有, 5, 17922-1~6, 2015.
- 12) ◎(材料) L. Chen, F. Matsukura and H. Ohno, " Electric-field modulation of damping constant in a ferromagnetic semiconductor (Ga,Mn)As", Physical Review Letters, 査読有, 115, 057204-1~5, 2015.

公募研究

- 13) ◎(材料) T. Nomura, X.-X. Zhang, S. Zherlitsyn, J. Wosnitza, Y. Tokura, N. Nagaosa, S. Seki, "Phonon Magnetochiral Effect", Phys. Rev. Lett., 査読有, 122, 145901-1~4, 2019.
- 14) ◎(電子) T. Moriyama, K. Oda, T. Ohkochi, M. Kimata, and T. Ono, "Spin torque control of antiferromagnetic moments in NiO" Scientific Reports, 査読有, 8, 14167-1~6, 2018.
- 15) ◎(電子) \*Shinji Miwa, Junji Fujimoto, Philipp Risius, Kohei Nawaoka, Minori Goto, and Yoshishige Suzuki, "Strong bias effect on voltage-driven torque at epitaxial Fe-MgO interface", Physical Review X, 査読有, 7, 031018-1~9, 2017.

(国際会議招待講演)7件(2014),21件(2015),26件(2016),28件(2017),51件(2018)計133件, (国内会議招待講演)7件(2014),8件(2015),10件(2016),20件(2017),13件(2018)計58件, (成果発信)雑誌への記事掲載による啓蒙活動2件(2015年) : 広報誌・プレス発表3件(2015年), : (国際会議) New Perspectives in Spintronic and Mesoscopic Physics (NPSMP2015) (参加者約300名、英語講演), International Workshop on Nano Spin Conversion Science and Quantum Spin Dynamics (NSCQSD2016) (参加者約300名、英語講演), One-day Symposium on Spintronic Properties of Graphene and Related 2D Materials (参加者約150名、英語講演)

## 【A02 班電氣的スピン変換班】

- 1) ◎(材料) 公募班との共同研究(斉藤・大矢) T. Kanaki, S. Matsumoto, S. K. Narayananelloré, H. Saito, Y. Iwasa, M. Tanaka, and \*S. Ohya, "Room-temperature side-gate-induced current modulation in a magnetic tunnel junction with an oxide-semiconductor barrier for vertical spin MOSFET operation ", Appl. Phys. Express, 査読有, 12, 023009-1~4, 2019.
- 2) ◎(量子) 公募班との共同研究 (勝本・大矢) \*T. Nakamura, L. D. Anh, Y. Hashimoto, S. Ohya, M. Tanaka and S. Katsumoto, "Evidence for Spin-Triplet Electron Pairing in the Proximity-Induced Superconducting State of an Fe-Doped InAs Semiconductor", Phys. Rev. Lett., 査読有, 122,107001-1~5, 2019.
- 3) ◎(材料) \*S. Dushenko, M. Hokanozo, K. Nakamura, Y. Ando, T. Shinjo and \*M. Shiraishi, "Tunable inverse spin Hall effect in nanometer-thick platinum films by ionic gating", Nature Communications, 査読有, 9, 3118~1-7, 2018.
- 4) ◎(材料) K. Hatsuda, H. Mine, T. Nakamura, J. Li, R. Wu, S. Katsumoto and \*J. Haruyama, "Evidence for a quantum spin Hall phase in graphene decorated with Bi<sub>2</sub>Te<sub>3</sub> nanoparticles", Science Advances, 査読有, 4, eaau6915-1~7, 2018.
- 5) ◎(材料) M. Yamada, Y. Fujita, M. Tsukahara, S. Yamada, K. Sawano, and \*K. Hamaya, "Large impact of impurity concentration on spin transport in degenerate *n*-Ge", Physical Review B, 査読有, 95, 161304(R)-1~5, 2017.
- 6) ◎(材料) S. Dushenko, H. Ago, K. Kawahara, T. Tsuda, S. Kuwabata, T. Takenobu, T. Shinjo, Y. Ando and \*M. Shiraishi, "Gate-tunable spin-charge conversion and a role of spin-orbit interaction in graphene", Phys. Rev. Lett., 査読有, 116, 166102-1~6, 2016.
- 7) ◎ (材料) S. Dushenko, M. Koike, Y. Ando, T. Shinjo, M. Myronov and \*M. Shiraishi, "Experimental demonstration of room-temperature spin transport in n-type Germanium epilayers", Phys. Rev. Lett., 査読有, 114, 196602, 2015.
- 8) ◎(材料・量子) \*Yu. Ando, T. Hamasaki, T. Kurokawa, F. Yang, M. Novak, S. Sasaki, K. Segawa, Yo. Ando and \* M. Shiraishi, "Electrical Detection of the Spin Polarization Due to Charge Flow in the Surface State of the Topological Insulator Bi<sub>1.5</sub>Sb<sub>0.5</sub>Te<sub>1.7</sub>Se<sub>1.3</sub>", Nano Lett., 査読有, 14, 6226~6230, 2014.  
公募研究
- 9) ◎(量子) \*T. Otsuka, T. Nakajima, M. R. Delbecq, P. Stano, S. Amaha, J. Yoneda, K. Takeda, G. Allison, S. Li, A. Noiri, T. Ito, D. Loss, A. Ludwig, A. D. Wieck, and \*S. Tarucha, " Difference in charge and spin dynamics in a quantum dot-lead coupled system ", Physical Review B, 査読有, 99, 085402-1-5, 2019.
- 10) ◎(材料) Y. Sata, \*R. Moriya, N. Yabuki, S. Masubuchi, \*T. Machida, "Heat Transfer at the van der Waals Interface between Graphene and NbSe<sub>2</sub>", Physical Review B, 査読有, 98, 035422-1~7, 2018.
- 11) ◎(材料) T. Ishii, H. Yamakawa, T. Kanaki, T. Miyamoto, N. Kida, H. Okamoto, M. Tanaka, and \*S. Ohya, "Ultrafast magnetization modulation induced by the electric field component of a terahertz pulse in a ferromagnetic-semiconductor thin film", Sci. Rep., 査読有, 8, 6901/1-6, 2018.
- 12) ◎(材料) Y. Yamasaki, \*R. Moriya, M. Arai, S. Masubuchi, S. Pyon, T. Tamegai, K. Ueno, \*T. Machida, "Exfoliation and van der Waals Heterostructure Assembly of Intercalated Ferromagnet Cr<sub>1/3</sub>TaS<sub>2</sub>", 2D Materials, 査読有, 4, 041007-1~10, 2017.
- 13) ◎(量子) \*T. Otsuka, T. Nakajima, M. R. Delbecq, S. Amaha, J. Yoneda, K. Takeda, G. Allison, P. Stano, A. Noiri, T. Ito, D. Loss, A. Ludwig, A. D. Wieck, and \*S. Tarucha, " Higher-order spin and charge dynamics in a quantum dot-lead hybrid system ", Scientific Reports, 査読有, 7, 12201-1-7, 2017.
- 14) ◎(材料・量子) \*S. Ohya, A. Yamamoto, T. Yamaguchi, R. Ishikawa, R. Akiyama, L. D. Anh, S. Goel, Y. K. Wakabayashi, S. Kuroda, and M. Tanaka, "Observation of the inverse spin Hall effect in the topological crystalline insulator SnTe using spin pumping", Phys. Rev. B, 査読有, 96, 094424/1-5, 2017.
- 15) ◎(材料) N. Yabuki, \*R. Moriya, M. Arai, Y. Sata, S. Morikawa, S. Masubuchi, and \*T. Machida, "Supercurrent in van der Waals Josephson junction", Nature Comm., 査読有, 7, 10616-1~5, 2016.

(国際会議招待講演)0 件(2014),12 件(2015),5 件(2016),2 件(2017),9 件(2018)計 28 件, (国内会議招待講演)2 件(2014),7 件(2015),3 件(2016),7 件(2017),4 件(2018)計 23 件 : (成果発信)雑誌への記事掲載 による啓蒙活動 2 件(2014)4 件(2015): プレス発表 1 件(2014),1 件(2015),1 件(2016)3 件(2017),1 件(2018) 計 7 件: 高校への出張講義 2 件(2015) 1 件(2016) 1 件 (2018): 一般向け講演会 1 件(2017), 2 件(2018) (ワークショップ) 「ナノスピン変換関西若手ワークショップ」(参加者約 90 名、英語講演)

### 【A03 班光学的スピン変換班】

- 1) ◎(材料) \*T. Fujita, K. Morimoto, H. Kiyama, G. Allison, M. Larsson, A. Ludwig, S. R. Valentin, A. D. Wieck, A. Oiwa and S. Tarucha, “Angular momentum transfer from a single-photon polarization to an electron spin in a gate defined quantum dot”, Nature comm. 査読有, 10, 2991, 2019.
- 2) ◎(材料) K. Kuroyama, M. Larsson, J. Muramoto, K. Heya, T. Fujita, G. Allison, S. R. Valentin, A. Ludwig, A. D. Wieck, S. Matsuo, A. Oiwa, \*S. Tarucha, “Photogeneration of a single electron from a single Zeeman-resolved light-hole exciton with preserved angular momentum” , Phys. Rev. B **99**, 85203 (2019).
- 3) ◎(材料) \*S. Mizukami, Y. Sasaki, D.-K. Lee, H. Yoshikawa, A. Tsukamoto, K.-J. Lee, and T. Ono, “Laser-induced antiferromagnetic-like resonance in amorphous ferrimagnets”, arXiv:1808.05707.
- 4) ◎(材料) S. Wang, C. Wei, Y. Feng, Y. Cao, H. Wang, W. Cheng, C. Xie, A. Tsukamoto, A. Kirilyuk, Theo Rasing, A. V. Kimel, and X. Li, “All-optical helicity-dependent magnetic switching by first-order azimuthally polarized vortex beams”, Appl. Phys. Lett., 査読有, 113, 171108-1~5, 2018.
- 5) ◎(電子) H. Sakimura, T. Tashiro, and, K. Ando, “Nonlinear spin-current enhancement enabled by spin-damping tuning,” Nature Communications, 査読有, 5, 5730, 2014.
- 6) ◎(材料) H. Hayashi and \*K. Ando, “Spin Pumping Driven by Magnon Polarons”, Physical Review Letters, 査読有, 121, 237202, 2018.
- 7) ◎(材料) A. L. Chekhov, \*T. Satoh, et al., “Surface plasmon-mediated nanoscale localization of laser-driven sub-THz spin dynamics in magnetic dielectrics”, Nano Letters, 査読有, 18, 2970~2975, 2018.
- 8) ◎(量子) K. Kuroyama, M. Larsson, S. Matsuo, T. Fujita, S. R. Valentin, A. Ludwig, A. D. Wieck, A. Oiwa, and S. Tarucha, “Single electron-photon pair creation from a single polarization-entangled photon pair”, Scientific Reports, 査読有, 7, 2045, 2017.
- 9) ◎(材料) \*T. Satoh, et al., “Excitation of coupled spin-orbit dynamics in cobalt oxide by femtosecond laser pulses”, Nature Communications, 査読有, 8, 638-1~6, 2017.
- 10) ◎(材料) Y. Ishii, R. Sasaki, Y. Nii, T. Ito, and \*Y. Onose “Magnetically Controlled Surface Acoustic Waves on Multiferroic BiFeO<sub>3</sub>”, Physical Review Applied, 査読有, 9, 03434-1~4, 2018.
- 11) ◎(材料) R. Sasaki, Y. Nii, and \*Y. Onose “Surface acoustic wave coupled to magnetic resonance on multiferroic CuB<sub>2</sub>O<sub>4</sub>”, Physical Review B, 査読有, 99, 014418-1~8, 2019.
- 12) ◎(電子) Y. Iguchi, Y. Nii, M. Kawano, H. Murakawa, N. Hanasaki, and Y. Onose “Microwave nonreciprocity of magnon excitations in the noncentrosymmetric antiferromagnet Ba<sub>2</sub>MnGe<sub>2</sub>O<sub>7</sub>”, Physical Review B, 査読有, 98, 064416, 2018.
- 13) ◎(材料) \*Osamu Sato, “Dynamic Molecular Crystals with Switchable Physical Properties”, Nature Chem., 査読有, 8, 644-656, 2016.

(国際会議招待講演)10件(2014),15件(2015),15件(2016),16件(2017),13件(2018)計69件, (国内会議招待講演)10件(2014),4件(2015),7件(2016),14件(2017),9件(2018)計44件 : (成果発信)雑誌への記事掲載による啓蒙活動 2件(2015年)1件(2016年) : プレス発表 1件(2014年),1件(2015年)

### 【A04 班 機械・熱的スピン変換班】

- 1) \*Y. Shiomi, J. Lustikova, S. Watanabe, D. Hirobe, S. Takahashi and E. Saitoh, “Spin pumping from nuclear spin waves”, Nat. Phys., 査読有, 15-22~26 (2019)
- 2) \*Z. Qiu, D. Hou, J. Barker, K. Yamamoto, O. Gomonay and E. Saitoh, “Spin colossal magnetoresistance in an antiferromagnetic insulator”, Nat. Mat., 査読有, 17, 577~580, 2018.
- 3) \*D. Hirobe, M. Sato, T. Kawamata, Y. Shiomi, K. Uchida, R. Iguchi, Y. Koike, S. Maekawa and E. Saitoh, “One-dimensional spinon spin currents”, Nat. Phys., 査読有, 13-30~34, 2017.
- 4) \*T. Kikkawa, K. Shen, B. Flebus, R.A. Duine, K. Uchida, Z. Qiu, G.E. Bauer, and E. Saitoh, “Magnon Polarons in the Spin Seebeck Effect”, Phys. Rev. Lett., 査読有, 117-207203, 2016.
- 5) \*D. Hou, Z. Qiu, R. Iguchi, K. Sato, E.K. Vehstedt, K. Uchida, G.E.W. Bauer, and E. Saitoh, “Observation of temperature-gradient-induced magnetization”, Nat. Comm., 査読有, 7,12265\_1-6, 2016.

- 6) \*R. Takahashi, M. Matsuo, M. Ono, K. Harii, H. Chudo, S. Okayasu, J. Ieda, S. Takahashi, S. Maekawa, and E. Saitoh, “Spin hydrodynamic generation”, Nat. Phys., 査読有, 12-52~56 (2015)
- 7) \*T. Seki, K. Uchida, T. Kikkawa, Z. Qiu, E. Saitoh, and K. Takanashi, “Observation of inverse spin Hall effect in ferromagnetic FePt alloys using spin Seebeck effect”, Appl. Phys. Lett., 査読有, 107, 092401-1~4 (2015).
- 8) ◎ (機械) \*M. Ono, H. Chudo, K. Harii, S. Okayasu, M. Matsuo, J. Ieda, R. Takahashi, S. Maekawa, and E. Saitoh, “Barnett effect in paramagnetic states: Revisiting a method for determining gyromagnetic ratio”, Phys. Rev. B, 査読有, 92-174424 (2015).
- 9) ◎ (機械) 公募研究 G. Okano, M. Matsuo, Y. Ohnuma, S. Maekawa, and \*Y. Nozaki, “Nonreciprocal Spin Current Generation in Surface-Oxidized Copper Films”, Physical Review Letters, 査読有, accepted (2019).
- 10) ◎ (材料) 公募研究 \*N. Sekiguchi, K. Okuma, H. Usui, and A. Hatakeyama, “Scattering of an alkali-metal atomic beam on anti-spin-relaxation coatings”, Phys. Rev. A, 査読有, 98-042709 (2018).
- 11) ◎ (機械) 公募研究 D. Kobayashi, T. Yoshikawa, M. Matsuo, R. Iguchi, S. Maekawa, E. Saitoh, and \*Y. Nozaki, “Spin Current Generation Using a Surface Acoustic Wave Generated via Spin-Rotation Coupling”, Physical Review Letters, 査読有, 119-077202-1~5 (2017).

<書籍>

E. Saitoh, K. Takanashi, et al. “Spin Current” Second Edition, Oxford University Press, 2017, 520(3-32, 33-47, 264-272, 322-347, 493-508).

E. Saitoh, K. Takanashi, et al. “Spintronics for Next Generation Innovative Devices”, John Wiley & Sons, 2015, 255(1-19, 43-75).

(国際会議招待講演)17件(2014),24件(2015),18件(2016),17件(2017),9件(2018)計85件, (国内会議招待講演)3件(2014),4件(2015),2件(2016),6件(2017),2件(2018)計17件計92件:(成果発信)広報誌・プレス発表2件(2015年)、:一般向けのアウトリーチ活動14件(2015年1件、2016年3件、2017年7件、2018年3件)

#### 【A05 スピン変換機能設計班】

- 1) ◎(材料) T. Nomura, X.-X. Zhang, S. Zherlitsyn, J. Wosnitza, Y. Tokura, N. Nagaosa, and S. Seki, “Phonon Magnetochiral Effect”, Phys. Rev. Lett. 査読有 122, 145901, 2019.
- 2) X. Z. Yu, W. Koshibae, Y. Tokunaga, K. Shibata, Y. Taguchi, N. Nagaosa, and Y. Tokura, “Transformation between meron and skyrmion topological spin textures in a chiral magnet”, Nature 査読有 564, 95-98, 2018.
- 3) ◎(材料) A. O. Leon, A. B. Cahaya, and G.E.W. Bauer, Voltage control of interface rare-earth magnetic moments, Phys. Rev. Lett. 査読有, 120, 027201, 2018.
- 4) 公募班との共同研究(村上・横山)T. Yoda, T. Yokoyama, S. Murakami, Orbital Edelstein Effect as a Condensed-Matter Analog of Solenoids, Nano Letters 査読有, 18,916-920, 2018.
- 5) ◎(機械) M. Hamada, E. Minamitani, M. Hirayama, S. Murakami, Phonon Angular Momentum Induced by the Temperature Gradient, Physical Review Letters 査読有, 121, 175301, 2018.
- 6) S. Meyer, Y. Chen, S. Wimmer, M. Althammer, S. Geprägs, H. Huebl, D. Ködderitzsch, H. Ebert, G. E.W. Bauer, R. Gross, S. T.B. Gönnerwein, Observation of the spin Nernst effect, Nature Materials 査読有, 16, 977-981, 2017.
- 7) ◎(材料) 計画班内、およびA04班との共同研究(バウアー・前川・齊藤) S. Geprägs, A. Kehlberger, F. D. Coletta, Z. Qiu, E.-J. Guo, T. Schulz, C. Mix, S. Meyer, A. Kamra, M. Althammer, H. Huebl, G. Jakob, Y. Ohnuma, H. Adachi, J. Barker, S. Maekawa, G. E.W. Bauer, E. Saitoh, R. Gross, S. T.B. Goennenwein, and M. Kläui, Origin of the spin Seebeck effect in compensated ferrimagnets, Nature Commun., 査読有, 7, 10452, 2016.
- 8) T. Kikuchi, T. Koretsune, R. Arita, G. Tatara, “Dzyaloshinskii-Moriya interaction as a consequence of a Doppler shift due to spin-orbit-induced intrinsic spin current”, Phys. Rev. Lett., 査読有, 116, 247201, 2016. (PRL Editors’ Suggestion)
- 9) G. Tatara, “Thermal Vector Potential Theory of Transport Induced by a Temperature Gradient”, Phys. Rev. Lett., 査読有, 114, 196601, 2015.
- 10) K. Shen and G.E.W. Bauer, “Laser-induced spatiotemporal dynamics of magnetic films”, Phys. Rev. Lett., 査読有, 115, 197201, 2015.
- 11) ◎(機械) L. Shen, J. Xia, G. Zhao, X. Zhang, M. Ezawa, Oleg A. Tretiakov, X. Liu, and Y. Zhou, “Spin torque nano-oscillators based on antiferromagnetic skyrmions”, Applied Physics Letters, 査読有, 114, 042402-1~5, 2019.

- 12) H. Ishizuka, and M. Sato, “Rectification of Spin Current in Inversion-Asymmetric Magnets with Linearly-Polarized Electromagnetic Waves”, Phys. Rev. Lett. 査読有、122, 197702, 2019.
- 13) ◎(材料) A01 計画班との共同研究(石井・大谷)H. Tsai, S. Karube, K. Kondou, N. Yamaguchi, F. Ishii, Y. Otani, “Clear variation of spin splitting by changing electron distribution at non-magnetic metal/Bi<sub>2</sub>O<sub>3</sub> interfaces”, Scientific Reports, 査読有, 8, 5564-1~8, 2018.
- 14) ◎(材料) A. G. Kolesnikov, V. S. Plotnikov, E. V. Pustovalov, A. S. Samardak, L. A. Chebotkevich, A. V. Ognov, and Oleg A. Tretiakov, “Composite topological structure of domain walls in synthetic antiferromagnets”, Scientific Reports 査読有, 8, 15794-1~11, 2018.
- 15) 計画班との共同研究(Tretiakov・多々良) C. A. Akosa, O. A. Tretiakov, G. Tatara, and A. Manchon, “Theory of the Topological Spin Hall Effect in Antiferromagnetic Skyrmions: Impact on Current-Induced Motion”, Physical Review Letters 査読有, 121, 097204-1~6, 2018.
- 16) ◎(材料) Troels Arnfred Bojesen, S. Onoda, "Quantum spin ice under a [111] magnetic field: from pyrochlore to kagome", Physical Review Letters, 査読有, 119, 227204-1~5, 2017.
- 17) ◎(材料) A04 計画班との共同研究(佐藤・齊藤)D. Hirobe, M. Sato, Y. Shiomi, H. Tanaka, and E. Saitoh, “Magnetic thermal conductivity far above the Néel temperatures in the Kitaev-magnet candidate  $\alpha$ -RuCl<sub>3</sub>”, Phys. Rev. B 査読有, 95, 241112(R), 1-5, 2017. Editors’ Suggestion.

(国際会議招待講演)13 件(2014), 63 件(2015), 58 件(2016), 66 件(2017), 40 件(2018) 計 240 件, (国内会議招待講演) 4 件 (2014), 6 件 (2015), 0 件(2016), 7 件(2017), 6 件(2018)計 23 件 : (成果発信)雑誌への記事掲載による啓蒙活動 0 件(2014 年)2 件(2015 年) : プレス発表 0 件(2014 年), 1 件(2015 年)

・研究費の使用状況  
(1) 主要な物品明細

年度	品名	仕様・性能等	数量	単価 (円)	金額 (円)	設置(使用)研究機関
26	集束イオンビーム走査電子顕微鏡複合機一式	FEIDualBeam (FIB/SEM)システム	1	64,800,000	64,800,000	東京大学(A01班)
	伯東(株)製 界面スピノン変換構造作製装置	伯東 株式会社	1	25,000,000	25,000,000	京都大学(A02班)
	研究開発用マグネトロンスパッタ装置(1式)	アルハック九州(株)製 QAM-4-S	1	19,969,200	19,969,200	東北大学(A04班)
27	Thermal gas cracker source	MANTIS 社製 MGC-75	1	7,602,336	7,602,336	産業技術総合研究所(A01班)
	ストリーカメラ改良ユニット	(株)浜松フオニクス	1	5,998,860	5,998,860	産業技術総合研究所(A02班)
	抵抗加熱蒸着チャンバー	株式会社和泉テック製 IZU-TK J253	1	4,978,800	4,978,800	大阪大学(A02班)
	計算用クラスター	リアルコンピュータニング社製	1	4,399,920	4,399,920	東京大学(A05班)
28	低温プローバー用垂直電磁石	(株)東栄科学産業製 型番 M-28138-0/0.3T	1	7,499,520	7,499,520	東北大学(A01班)
	傾斜シャッター機能付きEB蒸着装置	(株)エイコー社製・EB30SS	1	5,497,200	5,497,200	東京大学(A01班)
	Siセル MB-3000Si	(株)エイコーエンジニアリング製	1	4,883,760	4,883,760	京都大学(A02班)
	計算用クラスター	リアルコンピュータニング社製	1	4,082,400	4,082,400	東京大学(A05班)
	マイクロ波アナログ信号発生器	米国キーサイト・テクノロジー社製・N5173B	1	5,281,200	5,281,200	東北大学(A01班)
29	自動波長掃引フェムト秒OPA	スペクトラフィジックス社製 TPR-TOPAS-VSU2-E	1	6,997,536	6,997,536	日本大学(A03班)
30	スーパーコンティニウムレーザー	NKT Photonics 製 EXR-15	1	7,549,200	7,549,200	東北大学(A01班)
	IT双極子電磁石 PXIe デジタイザ、	英国ダラム・マグネト・オプティクス社製	1	6,253,200	6,253,200	東京大学(A01班)
	任意波形発生器一式	M9010A, M3102A, M3202A, M3601A	1	4,256,280	4,256,280	東京大学(A04班)

(2) 計画研究における支出のうち、旅費、人件費・謝金、その他の主要なもの(

【平成26年度】

・旅費

1. 欧州におけるスピノン変換コンセプトの広報のための講演及び国際共同研究グループとの議論のため、ドイツ物理学会に参加 702,660円 A02班
2. Workshop Tokyo/ENS (フランス)に参加、スピントロニクスに関する発表および研究打合せ 485,921円 A01班
3. Magnetism and Magnetic Materials Conference 2014 (アメリカ・ホノルル)に参加 345,310円 A04班

・人件費・謝金

初年度であったため人件費・謝金ともに発生しなかった。

・その他

1. ヘリウム回収配管工事(大阪大学大岩研究室) 1,663,200 円 A03 班
2. ソフトウェア (COMSOL Multiphysics) 492,132 円 A01 班

#### 【平成27年度】

・旅費

1. 電氣的スピン変換研究成果の発表とスピン変換コンセプトの広報のため、スピントロニクス関連の最も重要な国際会議の一つである MMM などへ参加 1,625,290 円 A02 班
2. Spinmechanics 3 (ドイツ・ミュンヘン) に参加 (仙台⇄ミュンヘンの交通費、宿泊費) 646,260 円 A04 班
3. 招待講演のため国際会議 (スペイン・サラゴサ) に参加、講演のため ICM2015 (スペイン・バルセロナ) に参加 490,075 円 A01 班

・人件費・謝金

1. 博士研究員の雇用 2 名 4,493,744 円、事務補佐員の雇用 1,949,480 円、研究を加速的に進めるため、研究補助者を雇用 1,379,995 円 A01 班
2. 研究支援者の雇用 4,296,341 円 A04 班
3. 特任助教 (本領域研究推進研究者) の雇用 3,086,653 円 A03 班
4. 新学術領域予算管理及び研究の効率的推進のため事務職員・技術職員を雇用 2,455,907 円 A02 班

・その他

1. 光学窓付など特殊仕様のため無冷媒式希釈冷凍機 (コヒーレント光学的スピン変換専用実験装置) を研究機関中レンタル 2,754,000 円 A03 班
2. MPMS 屋外空冷圧縮機交換 (光磁性材料の磁化特性評価に必要な装置の修理) 1,470,204 円
3. 電子ビーム露光装置利用料 339,200 円 A01 班

#### 【平成28年度】

・旅費

1. トポロジカルスピン変換に関する成果に関する講演とトポロジカルスピン変換コンセプトの広報のため、トポロジカル絶縁体とスピン軌道相互作用に関する国際会議参加 915,730 円 A02 班
2. スピントロニクスに関する招待講演を行うため、Spin Orbit Coupling and Topology in Low Dimensions Workshop (ギリシャ・スベツェス) に参加 528,609 円 A01 班
3. ICEM2016 (シンガポール) Spin Caloritronics 7 (オランダ・ユトレヒト)、DIPC Workshop (スペイン・サンバスチャン) に参加 732,268 円 A04 班

・人件費・謝金

1. 博士研究員の雇用 3 名 7,929,894 円、事務補佐員の雇用 1 名 1,732,703 円、研究を加速的に進めるため、研究補助者を雇用 2,326,358 円 A01 班
2. 博士研究員の雇用 6,217,910 円：ハーフメタル強磁性体における純スピン伝導とスピンホール効果の理論の構築を行うため、博士研究員の雇用 4,639,124 円：重元素を用いたスピントロニクス効果の理論を構築し新物性の探索を行うため A05 班
3. 特任助教の雇用 3,088,813 円 博士研究員の雇用 2,607,257 円 A03 班
4. 研究支援者の雇用 5,000,238 円 A04 班
5. 新学術領域予算管理及び研究の効率的推進のため事務職員・技術職員を雇用 2,356,884 円、半導体中の電氣的スピン変換研究推進のため博士研究員を雇用 1,613,305 円 A02 班

・その他

1. 無冷媒式希釈冷凍機を研究機関中レンタル 33,048,000 円 A03 班
2. スピン変換素子作製及び評価のための学内共同利用施設利用費 3,240,000 円 A02 班
3. 無冷媒希釈冷凍機運転に使用する冷水設備工事一式 1,587,600 円 A03 班
4. 走査電子顕微鏡消耗部品交換作業 1,182,600 円 A01 班

#### 【平成29年度】

・旅費



1. 招待講演のため APS March Meeting2019(アメリカ・ロサンゼルス)に参加、講演および研究議論のため University of Manitoba(カナダ・ウィニペグ)を訪問 1,039,860 円 A01 班
2. 国際共同研究 (トポロジカルスピン変換研究推進) のためスペインに滞在 605,701 円 A02 班
3. ICSS2017 (スペイン・サンセバスチャン) に参加 419,340 円 A04 班

・人件費・謝金

1. 博士研究員の雇用 2 名 10,138,456 円、事務補佐員の雇用 1 名 2,245,006 円 A01 班
2. 電氣的スピン量子操作に関する研究のため博士研究員を雇用 3,409,601 円、半導体中の電氣的スピン変換研究推進のため博士研究員を雇用 3,001,322 円 A02 班
3. 博士研究員の雇用 5,141,663 円：重元素を用いたスピントロニクス効果の理論を構築し新物性の探索を行うため A05 班
4. 研究支援者の雇用 5,090,008 円 A04 班
5. 特任助教 (本領域研究推進研究者) の雇用 3,090,218 円

・その他

1. 無冷媒式希釈冷凍機を研究機関中レンタル 4,341,600 円 A03 班
2. デュアルビーム装置 Scios 不具合対応・消耗部品交換一式 2,500,848 円 A01 班
3. トポロジカルスピン変換素子作製に必要な光学顕微鏡修理 279,720 円 A02 班

【平成30年度】

・旅費

1. 電氣的スピン変換研究成果の発表とスピン変換コンセプトの広報のため E-MRS などの国際会議に参加 1,240,260 円 A02 班
2. 招待講演 (IEEE DL)・研究議論のため、Stanford University (スタンフォード) 及び Western Digital Corporation を訪問、発表のため ICM2018 (サンフランシスコ) 参加 711,716 円 A01 班
3. 14th Joint MMM-Intermag Conference (ワシントン、アメリカ) に参加 667,867 円 A04 班

・人件費・謝金

1. 博士研究員の雇用 1 名 5,522,804 円、事務補佐員の雇用 1 名 2,226,865 円 A01 班
2. 研究支援者の雇用 5,117,901 円 A04 班
3. 半導体中の電氣的スピン変換研究推進のため博士研究員を雇用 4,851,941 円 A02 班
4. 博士研究員の雇用 3,714,240 円：ゲージ理論を用いたスピントロニクス理論の構築の研究を行うため A05 班

・その他

1. 無冷媒式希釈冷凍機を研究機関中レンタル 4,341,600 円 A03 班
2. デュアルビーム Scios 消耗部品交換 1,046,800 円 A01 班
3. 電子ビーム描画装置 (電氣的スピン変換素子作製に必須の装置) 修理 375,667 円 A02 班