

領域略称名：スピ<sup>ン</sup>変換  
領域番号：2602

平成28年度科学研究費補助金「新学術領域研究  
(研究領域提案型)」に係る中間評価報告書

「ナノスピ<sup>ン</sup>変換科学」

(領域設定期間)

平成26年度～平成30年度

平成28年6月

領域代表者 (東京大学・物性研究所・教授・大谷 義近)

# 目 次

## 研究領域全体に係る事項

1. 研究領域の目的及び概要	4
2. 研究の進展状況	6
3. 審査結果の所見において指摘を受けた事項への対応状況	9
4. 主な研究成果（発明及び特許を含む）	11
5. 研究成果の公表の状況（主な論文等一覧、ホームページ、公開発表等）	14
6. 研究組織（公募研究を含む）と各研究項目の連携状況	19
7. 若手研究者の育成に関する取組状況	21
8. 研究費の使用状況（設備の有効活用、研究費の効果的使用を含む）	22
9. 総括班評価者による評価	23
10. 今後の研究領域の推進方策	25

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

研究項目	課題番号 研究課題名	研究期間	代表者氏名	所属機関 部局 職	構成員数
X00 総括	26103001 スピン変換総括班	平成26年度～ 平成30年度	大谷 義近	東京大学・物性研究所・教授	5
Y00 支援	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	大谷 義近	東京大学・物性研究所・教授	1
A01 計画	26103002 磁気的スピン変換	平成26年度～ 平成30年度	大谷 義近	東京大学・物性研究所・教授	6
A02 計画	26103003 電气的スピン変換	平成26年度～ 平成30年度	白石 誠司	京都大学・工学研究科・教授	5
A03 計画	26103004 光学的スピン変換	平成26年度～ 平成30年度	大岩 顕	大阪大学・産業科学研究所・教授	5
A04 計画	26103005 熱・力学的スピン変換	平成26年度～ 平成30年度	齊藤 英治	東北大学・原子分子材料科学高等研究 機構・教授	3
A05 計画	26103006 スピン変換機能設計	平成26年度～ 平成30年度	村上 修一	東京工業大学・理学院・教授	5
計画研究 計7件					
A01 公募	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・応用セラミックス研究 所・准教授	3
A01 公募	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 公募	15H01024 ダイヤモンドスピンセン サーを用いた室温ナノス ピン変換	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
A02 公募	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 公募	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 지니어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

A03 公募	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 公募	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
A04 公募	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 公募	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
A05 公募	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 公募	15H01015 第一原理手法による界面電場・スピン軌道結合係数の見積とスピン変換物質デザイン	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
A05 公募	15H01022 エレクトロマグノン過程に伴うスピン波スピン流の生成理論	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 公募	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	独) 理化学研究所・専任研究員	1
公募研究 計 13 件					

# 研究領域全体に係る事項

## 1. 研究領域の目的及び概要（2 ページ以内）

研究領域の研究目的及び全体構想について、応募時に記述した内容を簡潔に記述してください。どのような点が「我が国の学術水準の向上・強化につながる研究領域」であるか、研究の学術的背景（応募領域の着想に至った経緯、応募時までの研究成果を進展させる場合にはその内容等）を中心に記述してください。

### 【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に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電氣的スピン変換、③光学的スピン変換、④熱・力学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、電氣的、光学的、熱・力学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氣的、電氣的、光学的、熱・力学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. 研究の進展状況〔設定目的に照らし、研究項目又は計画研究ごとに整理する〕（3 ページ以内）

研究期間内に何をどこまで明らかにしようとし、現在までにどこまで研究が進展しているのか記述してください。また、応募時に研究領域として設定した研究の対象に照らして、どのように発展したかについて研究項目又は計画研究ごとに記述してください。

研究班は、スピン変換プロセスに基づき、A01 磁氣的スピン変換、A02 電氣的スピン変換、A03 光学的スピン変換、A04 熱・力学的スピン変換の4つの実験の計画研究班と有機的な連携研究体制を保つためのA05 スピン変換機能設計班で構成される。以下にそれぞれの研究班の研究進展状況を纏める。

### 【A01 磁氣的スピン変換班】

本研究班では、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いる。より具体的には、①に関しては、本研究班で発見された非線形スピン揺らぎを起源として生じる異常スピンホール効果に着目し、新奇な非線形スピン変換機構を開拓することを目指している。②については、異種物質の接合の界面に誘起されるスピン軌道相互作用とそれにより生じるラシュバ効果やジャロシンスキー守谷相互作用とスピンドイナミクスの相関物性を探求し、電場などを用いた新奇な制御手法を開拓することを目指している。①に関しては、最初の非線形効果は弱い強磁性体であるPd-Ni合金のキュリー温度近傍のスピン揺らぎと相関をもって観測されたことから、CuMn スピングラス合金に内在するスピン揺らぎに着目し、Bi との三元合金のスピンホール効果を測定した。その結果、スピングラス温度より十分高い温度ではCu-Bi合金と同じ強度のスピンホール効果が観測されること、スピングラス状態の出現により大きくスピンホール効果が抑制されることが明らかとなった。非線形効果が発現する候補物質として強いスピン軌道相互作用を有するNbやNbN等の超伝導体に着目し、準粒子を媒介とする巨大なスピンホール効果が低温で出現することを発見した。これらはA05班との班間連携研究の成果である。また、単純な酸化物Bi<sub>2</sub>O<sub>3</sub>と非磁性金属界面に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、それによるスピン流電流相互変換現象が生じることも実験的に明らかにした。その他、Jansenグループは、半導体/金属接合においてスピン蓄積信号のバイアス電圧依存性に非線形な変化を観測し、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的に検証することに成功し、現象を説明する理論を構築した(論文準備中)。来年度から広範囲な物質系で実験を遂行する予定である。一方で②についても、電場を用いた磁区構造の制御や世界最小エネルギーの磁化反転を実現した。公募班からも成果が出始めている。一つはFe/MgO/Vトンネル接合における従来比6倍の巨大な界面スピン軌道トルクの発見である。班内連携研究からはFeRh合金における磁気相転移に伴うメモリスター効果が実証された他、FeRh/BaTiO<sub>3</sub>ヘテロ界面において電場を用いた磁気相転移を実現している。

A01班では純良な界面を抽出する手法として、集束イオンビーム装置を購入した。この装置を用いた素子作製手法もほぼ確立した。①と②両テーマに関して、今後はこの素子作製手法を有効に活用し、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原子層界面を抽出して、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に利用することを計画している。これまでに班内・班間共同研究を推進しており、班内連携2件、班間連携2件、国際共同研究3件が進行中である。

### 【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けるスピン流およびスピン蓄積が誘起する現象であり、換言すれば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、電氣的な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、同時に強力な道具立てとなっている。本提案で目指す統一的学理の理解や新物性現象の発見を達成するためにスピン流の拡散長の正確な決定、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の特定等の基礎的

な知見の蓄積と、更に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る。以上の背景から、本提案では、①強磁性体/半導体異種接合界面の形成と界面ラッシュバ効果を十全に活用した新構造界面の実現による高効率電气的スピン変換の実現、②異種酸化物界面で形成されるd電子系電气的スピン変換と物性開拓、③正スピホール効果を活用したテンソルとしてのスピン情報を活用したスピン変換の実現、④異種半導体界面におけるスピン=フォトン変換の高効率化、などを目標とした。

現在までに①については、空間反転対称性の破れた系におけるスピン変換の実現とその機構解明、従来の100倍のエネルギー効率を有するスピン変換の実現を、②ではd電子スピントロニクス of 創出とマグノン励起を用いたGeにおけるスピン輸送とスピン変換の実現を、③では量子ポイントコンタクトスピン偏極の達成を突破口にしてマヨラナ粒子検出を目指した超伝導/半導体アレイの実現を、④ではIII-V族半導体における室温での最長のスピン寿命の実現を達成した。更に当初予期しなかった成果としてトポロジカル絶縁体の表面スピン偏極の電气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、近藤合金へのスピン注入と制御可能なスピン変換の実現、FeドーピングInAsという希薄磁性半導体とNbの接合系における600 mKでの超伝導の観測とスピン三重項超伝導の強い示唆、という結果を得、電气的スピン変換の地平を拓げることに成功した。班内・班間連携も順調に発展し、班内連携3件、班間連携6件が進行中であるほか、国際共同研究も7件を数え、研究の国際化も順調に進んでいる。

### 【A03 光学的スピン変換班】

光学的スピン変換では、光の角運動量から磁性体の集団スピン系への変換の解明と、偏光制御による超高速磁化反転の確立と単一量子レベルのコヒーレントな変換の研究から、光とスピンの変換の学理構築と新機能の創出を目指している。具体的には、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、の大きく4つの課題に取り組んでいる。日大グループは①について、希土類遷移金属合金において金属薄膜表面近傍での光励起後、サブピコ秒程度で一時的に形成される非断熱的電子系熱緩和状態が、吸収エネルギーに対し非線形な閾値応答を示すことを実験的に明らかにし、全光型磁化反転現象の発動条件の重要な知見を得た。東北大グループは②について、時間分解顕微磁気光学システムを構築して、金属磁性体における光励起コヒーレントマグノンの伝播について世界的にも質の高いデータを取得し始め、すでに理論モデルとの比較により、異方的なマグノン伝播の知見を得た。さらにスピン軌道相互作用が強く働く磁性体を調べ、超高速減磁過程やマグノン励起機構に関する新しい知見を得つつある。光誘起ダイナミクスでは界面の役割と活用も重要な課題である。慶應大グループは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精密に調べ、マグノンダンピングが界面スピン変換現象を支配していることを明らかにした。さらに磁性絶縁体から金属へのスピン流の時間領域測定を実現し、パラメトリックマグノンによる非自明なスピン流振動現象を見出し、マイクロ波領域のマグノンによる界面スピン変換現象のエネルギー・時間依存性を明らかにした。大阪大グループはパウリ効果を利用し、単一光子から単一電子スピンへの角運動量変換という④コヒーレント光スピン変換実現のために重要な成果を達成した。続いてg因子の制御と量子ホールエッジ状態を使った単一電子スピン検出を達成した。H27年度から光子対からスピン対へもつれ状態変換に取り組む東大グループが公募研究として参加し、計画研究班との連携により単一量子間での重ね合わせ状態の変換を示す成果をあげている。もつれ光子対変換に関連して超伝導のクーパー対からスピンもつれ相関を持つ電子対を生成することに成功した。また光制御できる高スピン錯体を公募研究九州大グループが計画研究班へ提供し、光誘起ダイナミック測定の共同研究を開始している。これまで班内ミーティングを中心に、班全体で研究方針を議論し、班内・班間共同研究を推進しており、班内連携2件、

班間連携 3 件、国際共同研究 5 件が進行中である。

#### 【A04 機械・熱的スピン変換班】

熱・力学とスピン物理を開拓するための共通設備として、フォノン測定設備（公募研究者にも開放）を導入すると同時に、計画班メンバー、公募研究メンバー全員を集めた集中討論会を行い、研究交流・共同研究を効率的に行うための具体的な研究タイムラインを策定した。研究グループ間融合研究に重点を置いた以下のタスクを抽出し、初期の研究目標を上回る成果を得た。まず、連続体の運動からスピン流が生成される現象を発見した。松尾（高エネルギー物理）らと A05 班前川らと共同で、一般座標変換に対するゲージ理論を構築し、スピン流力学生成を定式化した。機械工学者である小野（原研）とスピントロニクス物理を専門とする齊藤ら（東北大）が協力し、機械的力学運動からのスピン流生成を計測する実験系を設計し、実験を行った。その結果、実験・理論両面から連続体運動によるスピン流生成現象を見出し、A04 班 A05 班共同の論文としてまとめた（Nature Physics に論文を掲載）。これらの成果は、スピン流力学効果の分野を切り開く端緒となる成果である。実際、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の磁性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）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。この成果は常磁性体の回転誘導磁化の検出へも展開され、小野（機械工学）を筆頭著者とした論文も刊行された。次に、この成果を拡張するために、表面波を得意とする公募研究者の慶応大学のグループと原研グループ、東北大グループが共同して、本領域で導入したフォノン測定装置を利用した研究を開始した（共同で応用物理学会に発表、論文投稿）。更に、従来未開拓であった気体領域を得意とする農工大グループと東北大学の共同研究により、偏極原子気体の熱運動からのスピン流生成系を設計した。本年度から測定を始める。

#### 【A05 スピン変換機能設計班】

領域内 5 班のうち理論班として、(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、を目指すと同時に、(b) A01～A04 実験班との連携によるスピン変換機能探索、を行う研究計画である。

(a)では、(a1) 新しい理論的枠組みに立脚したスピン変換物性現象の予言、(a2)新材料・新物質を用いたスピン変換機能追究、(a3)界面、薄膜など構造を利用したスピン変換機能、の 3 つの方針で研究を行う。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、新しい切り口でスピン変換機能探索を行い、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という計画である。計画班、公募班はさまざまな角度からこれらの観点で成果を順調に出しており、例えば(a1)についてはトポロジカル絶縁体上の強磁性体の磁壁の特異な振る舞いの予言、スピン回転結合による流体中の渦によるスピン流生成の理論構築、(a2)は例えばらせん状の構造を持つ金属（テルルなど）での電流誘起軌道磁化生成、反強磁性体でのスキルミオンの挙動、マルチフェロイクスでのエレクトロマグノンの性質、(a3)については例えばジャロシンスキー守谷相互作用のある強磁性細線の磁壁の電氣的制御などについて成果を上げた。

また(b)では、実験によって発見された現象について、班間連携により理論的解釈を試み、新しい学理の構築、物質中のスピン変換現象の解明を行うものである。例えば femto 秒レーザーパルスによる pump-probe 法でのスピン波の空間分解の実験が領域内外の研究者により行われていて、それを説明するために磁気と弾性運動の結合を取り入れた理論的定式化を行い、実験とのよい一致を見た成果などがこれにあたる。これにより物質中での磁気と弾性運動の結合の強さや素性に関する知見が得られるとともに、スピン波の時間発展に関する理論的な理解が進んだ。また上の(a)で上げたフェリ磁性体（Gd-Fe ガーネット）におけるスピンゼーベック効果、流体中での渦によるスピン流生成などもこの実験-理論の間の班間連携による成果としてあげられる。

### 3. 審査結果の所見において指摘を受けた事項への対応状況（2ページ以内）

審査結果の所見において指摘を受けた事項があった場合には、当該コメント及びそれへの対応策等を記述してください。

当領域採択時の審査所見は以下の通りであった。

「本研究領域は、電子スピンの角運動量変換を介して固体中の巨視的物理量が別の物理量に変換されるスピン変換物性の学理を追及し、物質界面をナノスケールで制御することにより、磁氣的、電氣的、光学的、熱・力学的なスピン変換機能の開拓を目指すものである。スピン流という概念の創出やスピンゼーベック現象の発見などスピン変換物性の研究は、近年、日本が世界を圧倒的にリードしてきた研究分野であり、今後も目覚ましい発展を遂げる可能性がある。本提案内容も独創性に優れており、着実な研究成果と新しい研究領域の創成を通じて、その先導的立場の維持と発展が期待される。研究組織は、スピン変換の対象となる物理量（磁気、電気、光、熱・力学）に応じて分類された4つの実験系計画研究とスピン変換機能の設計を担う理論系計画研究から構成されている。新たに付加された理論系計画研究によって、全体を統一してスピン変換物性の学理追求と普遍化を目指す方向性が明確になった。各計画研究の代表者と分担者は気鋭の若手研究者が多く抜擢され、未開拓分野を自ら切り拓こうとする積極的な姿勢が評価される。領域代表者の領域運営に関わる実績も十分である。 **5つの計画研究と公募研究を有機的に連携させて当該分野を世界的に先導していくには、総括班の果たす役割が極めて大きい。当該分野の経験豊富な研究者が総括班の連携研究者や外部評価委員として参加する計画は高く評価されるが、成果報告会などの定期的な活動以外にも日常的に連携を深めていく工夫も検討していく必要がある。」**

上述の所見にあるように全体的な研究計画については概ね高評価を得たが、ボード部分にあるように組織の連携という観点から総括班の役割の強化や充実が重要課題と指摘された。この所見を受けて、国内外連携研究をより促進するための次の施策を講じた。

1. 総括班主導でスピントロニクスにかかわる質の高い国際会議を開催することで、日本の当該分野の学術的プレゼンスを幅広く高める。また、分野横断的に情報交換をする場を提供し、分野を先導する国際共同研究のきっかけを作る。
  - ▶ 具体的には、H27年度に東大物性研究所のISSP国際ワークショップと共催で国際シンポジウム New Perspectives in Spintronic and Mesoscopic Physics (NPSMP2015)を開催した。スピントロニクスとメゾスコピック系の物理の分野横断的情報交換を計った。
  - ▶ H28年度は、理研創発物性科学研究センターと共催で、国際ワークショップ International Workshop on Nano Spin Conversion Science and Quantum Spin Dynamics を開催予定である。国際的にナノスピン変換科学の認知度を上げることを目的とする。
2. 公募研究代表者が孤立することを防ぐために、申請時に計画研究との共同研究の可能性を提案することを推奨した。これにより公募研究者の連携研究が円滑に進むように考慮した。
  - ▶ 現在13件の公募研究が採択され、研究を実施している。共同研究も比較的順調に進行しており、5件の班内計画・公募連携、2件の班間計画・公募連携研究が実現している。
  - ▶ H28年度から、年次報告会、国際ワークショップ、個別の班主催のディスカッションミーティングを通じて、特に実験班の連携研究を強化する予定である。
3. 総括班主導の年次報告会のほかに各班の個別あるいは合同のディスカッションミーティングを開催した。これを通じて、班内の研究に関する情報交換を行い連携研究の芽を育てる方策とした。
  - ▶ H27年度において、5件以上の班内連携研究、9件以上の班間連携研究が進行している。

4. 総括班主導で博士課程学生のインターンシップ制度を充実させた。これにより班間共同研究や新たな共同研究の可能性を探る機会とした。
  - H28年度初めに A01 班大谷グループの博士課程学生 1 名がこの制度を利用し A04 班齊藤グループにて共同研究の一環としてインターンシップを実施。
5. 若手スクール・ワークショップを定期的に行うことにより、若手研究者人材育成と同時に研究者間の情報交換と共同研究の芽を育てる場を提供した。
  - 若手スクール H27 年 9 月 24～25 日於東北大、若手ワークショップ H28 年 4 月 15 日於大阪大学。
6. 平成 27 年度から開始した国際活動支援班の活動の一つとして上述の若手インターンシップ制度を国内だけでなく、国外にも範囲を広げ若手国際インターンシップとして運営することにした。
  - H27 年度から 28 年度にかけて 2 名の大学院生が国際インターンシップを実施し、それぞれイギリスとドイツの研究機関と国際共同研究を行った。

#### 4. 主な研究成果（発明及び特許を含む）[研究項目ごとに計画研究・公募研究の順に整理する]

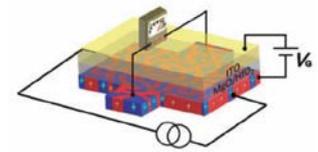
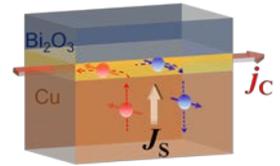
（3 ページ以内）

本研究課題（公募研究を含む）により得られた研究成果（発明及び特許を含む）について、新しいものから順に発表年次をさかのぼり、図表などを用いて研究項目ごとに計画研究・公募研究の順に整理し、具体的に記述してください。なお、領域内の共同研究等による研究成果についてはその旨を記述してください。記述に当たっては、本研究課題により得られたものに厳に限ることとします。

##### 【A01 磁気的スピン変換班】

###### 計画研究成果

- 酸化物  $\text{Bi}_2\text{O}_3/\text{Cu}$  界面の伝導バンドにラッシュバースピン分裂が生じることを発見し、その界面を用いたスピン流電流変換に成功した。（A01 班文献[1]） A04 班 齊藤 G との連携発展研究を遂行し、スピンゼーベック効果の検出手法としてこの効果が使えることを実験的に検証した。（Applied Physics Letters 採択）
- 電圧による磁区構造変化という新規な現象を発見し、電圧によって局所磁化の反転が可能であることを示した。（A01 班文献[2]）
- 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[3]）
- 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。（A05 班前川グループとの共同研究成果 A01 班文献[6]）
- 強磁性金属では強磁性共鳴時に発熱効果が生じることを発見した。（A01 班文献[10]）
- 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[14]）
- 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 Jansen G 論文準備中）



###### 公募班成果

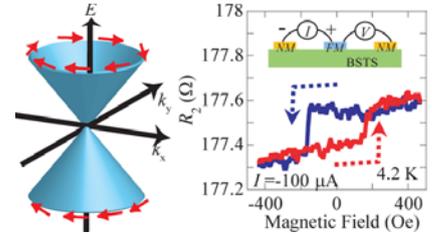
- Fe/MgO/V トンネル接合において、従来比 6 倍の巨大な界面スピン軌道トルクを発見した。（A01 班文献[13]）
- FeRh/BaTiO<sub>3</sub> ヘテロ界面において電場で強磁性一反強磁性転移を誘起することに成功した。その成果を 2016 MMM/Internmag Joint Conf. で発表し、Best Poster Award を受賞した。
- FeRh 細線における Memristor 効果を実証した。公募班谷山と A01 班連携研究者小野グループの領域内共同研究である。（A01 班文献[9]）

##### 【A02 電气的スピン変換班】

###### 計画研究成果

- 空間反転対称性の破れたグラフェン/YIG(右図)、Bi/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[1]）
- 近藤合金である CuFe にスピン注入を行った際にこの系のスピン緩和長が注入スピン量で変調できることを見出した（学会発表済み、論文投稿中）。
- Fe ドープ InAs という希薄磁性半導体と Nb の接合系において 600 mK での proximity-induced 超伝導を観測し、それがスピン三重項超伝導であることが強く示唆されるとの結果を得た（学会発表済み、論文準備中。計画研究班・勝本と公募班・大矢による）。
- マグノン励起によるスピン変換と逆スピンホール効果を利用したゲルマニウムにおける室温スピン輸送の実現とスピン緩和機構の解明に成功した(S. Dushenko, M. Shiraishi et al., PRL114, 196602 (2015))。

- バルク絶縁3次元トポジカル絶縁体である BiSbTeSe においてトポジカルに守られた表面スピンの偏極カレントを、新たな電氣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[13])。これにより「トポジカルスピン変換」という新規スピン変換領域を開拓することに成功した。



**公募班成果**

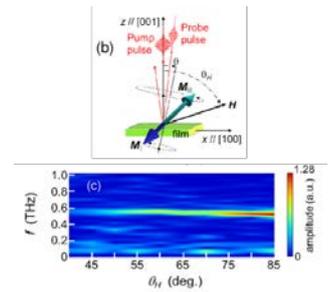
- 上記の proximity-induced 超伝導の観測の成功の他の重要な成果は、ファンデルワールスヘテロ構造を利用した原子膜超伝導体接合系におけるジョセフソン接合の創出の成功である(N. Yabuki, R. Moriya et al., Nature Comm.7, 10616 (2016).)。この成果は「2次元原子膜スピン変換」という新規スピン変換領域の開拓を意味する重要な成果である。

**【A03 光学的スピン変換班】**

2014年10月1日～2016年6月1日

**計画研究成果**

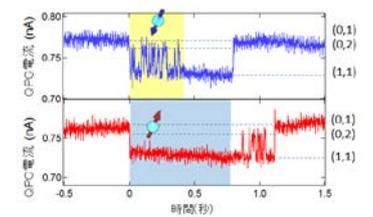
- A03 班の主対象材料である GdFeCo に Pt 隣接層を設け界面、SMR 等磁気輸送を詳細に調べた。(A03 班文献[1]、A01 班と A03 班の共同研究)
- ピコ秒時間領域での非断熱的電子系エネルギー緩和が全光型磁化反転現象の発動条件に重要な働きを担う事を実験的に明らかにした。(印刷中)
- 金属磁性体でテラヘルツ波帯のコヒレントマグノン光パルスで創出した。(A03 班文献[5])



- 非線形マグノン相互作用に基づくスピン流生成の統一的モデルを構築した。(A03 班文献[12])
- 光子もつれ源の電子版として、クーパー対を分離してその電子対がスピン一重項もつれ相関を保持することを明らかにした。(A03 班文献[9])

- 界面スピン軌道相互作用を用いたスピン-電荷変換を観測した。(A03 班文献[10])

- 光生成単一電子スピン検出に利用できる量子ドットと量子ホールエッジ状態間のスピン依存トンネルと、選択的スピン注入

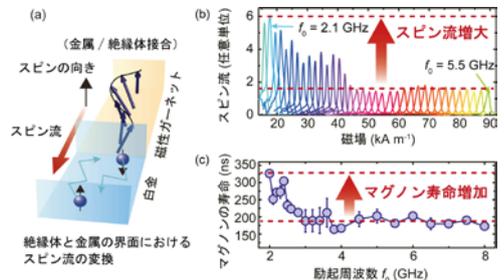


- 単一光子から単一電子スピンへの角運動量変換を実現 (論文準備中)

- 光生成単一電子スピン検出に利用できる量子ドットと量子ホールエッジ状態間のスピン依存トンネルと、選択的スピン注入を実現した (A03 班文献[8])

- 単一光子-単一電子スピン変換を実現する電子スピン g 因子の評価と制御を実現した (A03 班文献[15])

- マグノンを介したマイクロ波-伝導電子スピン流変換におけるスピン系の寿命の役割を明らかにした (A03 班文献[14])



**公募班成果**

- 光学スピン閉塞効果を使い、光子偏光の重ね合わせ状態から電子スピン重ね合わせ状態への変換を示す結果を得た (公募研究松尾グループと計画研究大岩グループとの共同成果。学会発表済、論文準備中)。

**【A04 熱・力学的スピン変換班】**

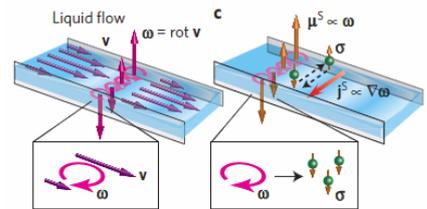
2014年10月1日～2016年6月1日

**計画研究の成果**

- 連続体・気体からのスピン生成：連続体の運動からスピン流が生成される現象を発見し、またその基礎

となる常磁性バーネット効果を観測し、理論構築を行った。(A04 文献[6])

- 多層膜による層間スピン流がスピンゼーベック効果を大きく増強させることを見出した。その成果を *Physical Review B* に掲載した。(東北大・原研グループ A04 文献[8])



公募班成果

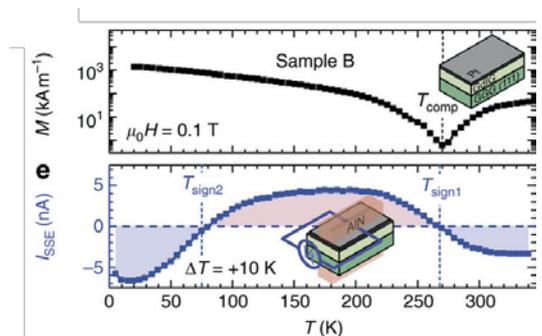
- 慶応大グループ (能崎グループ) 原研グループ、東北大グループと共同で弾性体表面波からのスピン流信号を検出した。本領域共通装置として導入したフォノン測定システムを利用した。(共同で応用物理学学会発表、論文投稿中)
- 農工大グループ (島山グループ) 東北大グループと共同で、スピン偏極させた熱運動する気体からのスピン流生成法を設計した。

**【A05 スピン変換機能設計班】**

2014年10月1日～2016年6月1日

計画研究の成果

- フェリ磁性体 (Gd-Fe ガーネット) におけるスピンゼーベック効果が温度とともに 2 度符号変化することを理論面から解明した (A05 班文献 [1])。これはフェリ磁性体では 2 つの性質の異なる磁気モーメントが共存しており、それらによるスピン波が逆符号の寄与を与えるためであることが分かった。本件は A05 班の前川、Bauer および A04 班齊藤らの共同研究である。



公募研究の成果

- ジャロシンスキー守谷 (DM) 相互作用のある強磁性細線で、電気的手法により磁区の位置を制御する方法を提案した。これは電場により DM 相互作用の強さを変え、スピンスパイラル磁壁のピンギングポテンシャルを変化させるものである (A05 班文献 [13])。
- スピン回転結合を用いた、流体中での渦によるスピン流の生成について理論的に定式化を行い、A04 班の液体金属の細管中の流れの実験に対してこれを適用した場合、理論的にある種のスケール関係が成り立つことを示した。実験結果は実際このスケール関係式によく従うことも示した (A05 班文献 [4])。これは A04 班齊藤らとの共同研究である。
- らせん型の結晶構造を持つ金属において、電流をらせん軸方向に流すとスピン磁化とともに軌道磁化も生じることを理論的に提案した。(A05 班文献[9]) スピン軌道相互作用によらずに電流から磁化を出せる点で新しい理論的提案である。
- トポロジカル絶縁体表面に強磁性体を蒸着した系での、スピンと電荷の特異な結合について明らかにした。特に強磁性体の磁壁は帯電しており電場で制御できること、またトポロジカル絶縁体の電子系のフェルミエネルギーにより、ネール壁とブロッホ壁のどちらが安定か、またそのスピンカイラリティが変わることを明らかにした。(A05 班文献[11])
- Pump-probe 法でのフェムト秒レーザーによる空間時間分解スピン波測定実験結果を解釈するため、磁気と弾性運動との結合を用いた理論的定式化を行った結果、実験とよく一致したことから、実験では磁気と弾性運動との結合が非常に強いことが分かった。(A05 班文献[8])

## 5. 研究成果の公表の状況（主な論文等一覧、ホームページ、公開発表等）（5ページ以内）

本研究課題（公募研究を含む）により得られた研究成果の公表の状況（主な論文、書籍、ホームページ、主催シンポジウム等の状況）について具体的に記述してください。記述に当たっては、本研究課題により得られたものに厳に限ることとします。

- 論文の場合、新しいものから順に発表年次をさかのぼり、研究項目ごとに計画研究・公募研究の順に記載し、研究代表者には二重下線、研究分担者には一重下線、連携研究者には点線の下線を付し、corresponding author には左に\*印を付してください。
- 別添の「(2) 発表論文」の融合研究論文として整理した論文については、冒頭に◎を付してください。
- 補助条件に定められたとおり、本研究課題に係り交付を受けて行った研究の成果であることを表示したもの（論文等の場合は謝辞に課題番号を含め記載したもの）について記載したもののについては、冒頭に▲を付してください（前項と重複する場合は、「◎▲・・・」と記載してください。）。
- 一般向けのアウトリーチ活動を行った場合はその内容についても記述してください。

### 【A01 班磁気的スピン変換班】

（論文）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。

- 1) ◎(電子)▲ S. Karube, K. Kondou, and \*Y. Otani, "Experimental observation of spin-to-charge current conversion at non-magnetic metal/Bi2O3 interfaces", Appl. Phys. Exp., 査読有, 9, 033001-1~4, 2016.
- 2) ◎(電子)▲ H. Kakizakai, F. Ando, T. Koyama, K. Yamada, M. Kawaguchi, S. Kim, K-J Kim, T. Moriyama, D. Chiba, and \*T. Ono, "Switching local magnetization by electric-field-induced domain wall motion", Appl. Phys. Exp., 査読有, 9, 063004-1~3, 2016.
- 3) ◎(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.
- 4) ◎(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.
- 5) ◎(電子)▲ \*K.-J. Kim, Y. Yoshimura, T. Okuno, T. Moriyama, S.-W. Lee, K.-J. Lee, Y. Nakatani, and \*T. Ono, "Observation asymmetry in domain wall velocity under transverse magnetic field", APL Mater., 査読有, 4, 032504-1~7, 2016.
- 6) ◎(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.
- 7) ◎(電子)▲ S. Karube, H. Idzuchi, K. Kondou, Y. Fukuma, and \*Y. Otani, "Spin relaxation characteristics in Ag nanowire covered with various oxides", Appl. Phys. Lett., 査読有, 107, 122406-1~4, 2015.
- 8) ◎(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.
- 9) ◎(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.
- 10) ◎(材料)▲ K. Yamanoi, Y. Yokotani, and \*T. Kimura, "Heat dissipation due to ferromagnetic resonance in a ferromagnetic metal monitored by electrical resistance measurement", Appl. Phys. Lett., 査読有, 107, 182410-1~4, 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)▲ H. Nakayama, L. Chen, H.W. Chang, H. Ohno, and \*F. Matsukura, "Inverse spin Hall effect in Pt/(Ga,Mn)As", Applied Physics Letters, 査読有, 106, 222405-1~4, 2015
- 13) ◎(電子)▲ 公募研究\*S. Miwa, K. Matsuda, K. Tanaka, Y. Kotani, M. Goto, T. Nakamura, and Y. Suzuki, "Voltage-controlled magnetic anisotropy in Fe|MgO tunnel junctions studied by x-ray absorption spectroscopy", Appl. Phys. Lett., 査読有, 107, 162402-1~4, 2015.
- 14) ◎(材料)▲ S. D'Ambrosio, L. Chen, H. Nakayama, \*F. Matsukura, T. Dietl, and H. Ohno, "Ferromagnetic resonance of Py deposited on ZnO grown by molecular beam epitaxy", Japanese Journal of Appl. Phys., 査読有, 54, 093001-1~4, 2015.
- 15) ◎(材料)▲ L. Chen, \*F. Matsukura, and H. Ohno, "Electric-Field Modulation of Damping Constant in a Ferromagnetic Semiconductor (Ga,Mn)As", Phys. Rev. Lett., 査読有, 115, 057204-1~5, 2015.

16) ◎(電子)▲\*S. Kanai, M. Gajek, D. C. Worledge, F. Matsukura, and H. Ohno, "Electric field-induced ferromagnetic resonance in a CoFeB/MgO magnetic tunnel junction under dc bias voltages", Appl. Phys. Lett., 査読有, 105, 242409-1~4, 2014.

(国内および国際会議招待講演) : 2 件(2014),22 件(2015),3 件(2016) 計 27 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),: (国際シンポジウム) New Perspectives in Spintronic and Mesoscopic Physics (NPSMP2015) (参加者約 300 名、英語講演)

### 【A02 班電气的スピン変換班】

(論文)

- 1) ◎(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.
- 2) ◎(電子)▲E. Shigematsu, Y. Ando, R. Ohshima, S. Dushenko, Y. Higuchi, T. Shinjo, H.J. von Bardeleben and \*M. Shiraishi, "Significant reduction in spin pumping efficiency in a platinum/yttrium iron garnet bilayer at low temperature", Appl. Phys. Express 査読有, 9, 053002-1~4 (2016).
- 3) ◎(材料)▲H. Emoto, Y. Ando, G. Eguchi, R. Ohshima, E. Shikoh, Y. Fuseya, T. Shinjo and \*M. Shiraishi, "Transport and spin conversion of multi-carriers in semimetal bismuth", Phys. Rev. B 査読有, 93, 1744281~5, 2016.
- 4) ◎(材料)▲M. Kawano, M. Ikawa, K. Arima, S. Yamada, T. Kanashima and \*K. Hamaya, "All-epitaxial Co<sub>2</sub>FeSi/Ge/Co<sub>2</sub>FeSi trilayers fabricated by Sn-induced low-temperature epitaxy", J. Appl. Phys., 査読有, 119, 045302-1~6, 2016.
- 5) ◎(材料)▲\*S. Yamada, K. Tanikawa, J. Hirayama, T. Kanashima, T. Taniyama, and \*K. Hamaya, "Exchange coupling in metallic multilayers with a top FeRh layer", AIP advances, 査読有, 6, 056115-1~6, 2016.
- 6) ◎(材料)公募研究▲N. Yabuki, \*R. Moriya, M. Arai, Y. Sata, S. Morikawa, S. Masubuchi, and T. Machida, "Supercurrent in van der Waals Josephson junction", Nature Comm. 7, 10616-1~5, 2016.
- 7) ◎(電子)▲R. Ohshima, H. Emoto, T. Shinjo, Y. Ando and \*M. Shiraishi, "Temperature evolution of electromotive force from Pt on yttrium-iron-garnet under ferromagnetic resonance", J. Appl. Phys, 査読有, 117, 17D136-1~4, 2015.
- 8) ◎(材料)▲\*S. Yamada, K. Tanikawa, J. Hirayama, T. Kanashima, T. Taniyama, and \*K. Hamaya, "Low-temperature B2 ordering and magnetic properties of Fe<sub>100-x</sub>Rh<sub>x</sub> films on bcc alloys", Phys. Rev. B., 査読有, 92, 094416-1~7, 2015.
- 9) ◎(材料)▲\*S. Iba, H. Saito, K. Watanabe, Y. Ohno, and S. Yuasa, "Growth condition dependence of photoluminescence polarization in (100)GaAs/AlGaAs quantum wells at room temperature", J. Appl. Phys.,査読有, 118, 083901-1~4, 2015.
- 10) ◎(材料)▲K. Yamasaki, S. Oki, S. Yamada, T. Kanashima, and \*K. Hamaya, "Spin-related thermoelectric conversion in lateral spin-valve devices with single-crystalline Co<sub>2</sub>FeSi electrodes", Appl. Phys. Express, 査読有, 8, 043003-1~4, 2015.
- 11) ◎(材料)▲A. Yamamoto, Y. Ando, T. Shinjo T. Uemura and \*M. Shiraishi, "Spin transport and spin conversion in compound semiconductors with non-negligible spin-orbit interaction", Phys. Rev. B., 査読有, 91, 024417-1~7, 2015.
- 12) ◎(材料)▲\*S. Iba, H. Saito, S. Yuasa, Y. Yasutake, and S. Fukatsu, "Fabrication of Ge-based light-emitting diodes with a ferromagnetic metal/insulator tunnel contact", Jpn. J. Appl. Phys., 査読有, 54, 04DM02-1~4, 2015.
- 13) ◎(材料)▲\*K. Kuroda, G. Eguchi, K. Shirai, M. Shiraishi, M. Ye, K. Miyamoto, T. Okuda, S. Ueda, M. Arita, H. Namatame, M. Taniguchi, Y. Ueda, and A. Kimura, "Tunable spin current due to bulk insulating property in the topological insulator Tl<sub>1-x</sub>Bi<sub>1+x</sub>Se<sub>2-δ</sub>", Phys. Rev. B., 査読有, 91, 205306-1~7, 2015.
- 14) ◎(電子)▲S. Dushenko, Y. Higuchi, Y. Ando, T. Shinjo, \*M. Shiraishi, "Ferromagnetic resonance and spin pumping efficiency for inverse spin-Hall effect normalization in Yttrium-Iron-Garnet-based systems", Appl. Phys. Express, 査読有, 8, 103002-1~4, 2015.
- 15) ◎(材料)▲\*G. Eguchi, K. Kuroda, K. Shirai, Y. Ando, T. Shinjo, A. Kimura and M. Shiraishi, "Precise determination of two-carrier transport properties in the topological insulator TlBiSe<sub>2</sub>", Phys. Rev. B., 査読有, 91,

235117-1~5, 2015.

- 16) ◎(材料)▲\*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.
  - 17) ◎(材料)▲R. Ohshima, A. Sakai, Y. Ando, T. Shinjo, K. Kawahara, H. Ago and \*M. Shiraishi, "Observation of spin-charge conversion in CVD grown single-layer graphene", Appl. Phys. Lett., 査読有, 105, 162410-1~4, 2014.
  - 18) ◎(材料)▲\*G. Eguchi, K. Kuroda, K. Shirai, A. Kimura and M. Shiraishi, "Surface Shubnikov-de Haas oscillations and nonzero Berry phases of the topological hole conduction in Tl<sub>1-x</sub>Bi<sub>1+x</sub>Se<sub>2</sub>", Phys. Rev. B., 査読有, 90, 201307(R)-1~4, 2014.
- (招待講演) 1件(2014),12件(2015),2件(2016) 計16件 (国際会議一般講演) 1件(2014),11件(2015),9件(2016) 計20件 (国内学会講演) 5件(2014),57件(2015),21件(2016) 計83件 (成果発信)雑誌への記事掲載による啓蒙活動 2件(2015年): プレス発表 1件(2015年),1件(2016年): 高校への出張講義 2件(2015年)(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. Okuno, \*Kab-Jin Kim, T. Tono, S. Kim, T. Moriyama, H. Yoshikawa, A. Tsukamoto, and \*T. Ono, "Temperature dependence of magnetoresistances in GdFeCo/Pt heterostructure", Applied Physics Express (掲載決定) 査読有, 2016.
- 2) ▲\*S. Iihama, Y. Sasaki, H. Naganuma, M. Oogane, S. Mizukami, and Y. Ando, "Ultrafast demagnetization of L10 FePt and FePd ordered alloys", J. Phys. D: Appl. Phys. 査読有, 49, 035002-1~7, 2016.
- 3) ◎(材料)▲ H. An, Y. Kanno, T. Tashiro, Y. Nakamura, J. Shi, and \*K. Ando, "Spin current transport in ceramic: TiN thin film", Applied Physics Letters, 査読有, 108, 121602-1~4, 2016.
- 4) ◎(材料)▲\*S. Mizukami, A. Sakuma, A. Sugihara, K.Z. Suzuki, and R. Ranjbar, "Mn-based hard magnets with small saturation magnetization and low spin relaxation for spintronics", Scripta Materialia, 査読有, 118, 70~74, 2016.
- 5) ◎(材料)▲\*S. Mizukami, A. Sugihara, S. Iihama, Y. Sasaki, K.Z. Suzuki, T. Miyazaki, "Laser-induced THz magnetization precession for a tetragonal Heusler-like nearly compensated ferrimagnet", Appl. Phys. Lett., 査読有, 108, 012404-1~5, 2016.
- 6) ◎(量子)▲\*S. Baba, J. Sailer, R. S. Deacon, A. Oiwa, K. Shibata, K. Hirakawa, and S. Tarucha, "Superconducting transport in single and parallel double InAs quantum dot Josephson junctions with Nb-based superconducting electrodes", Appl. Phys. Lett., 査読有, 107, 222602-1~4, 2015.
- 7) ◎(材料)▲Q. L. Ma, S. Iihama, X. M. Zhang, T. Miyazaki, \*S. Mizukami, "Spin dynamics Induced by Ultrafast Heating with Ferromagnetic/Antiferromagnetic Interfacial Exchange in Perpendicularly Magnetized Hard/Soft Bilayers", Appl. Phys. Lett., 査読有, 107, 222404-1~5, 2015.
- 8) ◎(量子)▲\*H. Kiyama, T. Nakajima, S. Teraoka, A. Oiwa, and S. Tarucha, "Spin-dependent current through a quantum dot from spin-polarized nonequilibrium quantum Hall edge channels", Phys. Rev. B., 査読有, 91, 155302-1~8, 2015.
- 9) ◎(量子)▲\*R. S. Deacon, A. Oiwa, J. Sailer, S. Baba, Y. Kanai, K. Shibata, K. Hirakawa, and S. Tarucha, "Cooper pair splitting in parallel quantum dot Josephson junctions", Nature communications, 査読有, 6, 7446-1~6, 2015.
- 10) ▲A. Nomura, T. Tashiro, H. Nakayama, and \*K. Ando, "Temperature dependence of inverse Rashba-Edelstein effect at metallic interface", Appl. Phys. Lett., 査読有, 106, 212403-1~4, 2015.
- 11) ◎(材料)▲S. Haku, T. Tashiro, H. Nakayama, J. Ieda, S. Entani, \*S. Sakai, and K. Ando, "Spin pumping blocked by single-layer graphene", Applied. Phys. Express, 査読有, 8, 073009-1~3, 2015.
- 12) ◎(材料)▲T. Tashiro, S. Matsuura, A. Nomura, S. Watanabe, K. Kang, H. Siringhaus, and \*K. Ando, "Spin-current emission governed by nonlinear spin dynamics", Scientific Reports, 査読有, 5, 15158-1~9, 2015.
- 13) ◎(材料)▲14. S.-Q. Su, T. Kamachi, Z.-S. Yao, Y.-G. Huang, Y. Shiota, K. Yoshizawa, N. Azuma, Y. Miyazaki, M. Nakano, G. Maruta, S. Takeda, S. Kang, S. Kanegawa, and \*O. Sato, "Assembling an alkyl rotor to access abrupt

and reversible crystalline deformation of a cobalt (II) complex", Nature Communications, 査読有, 6, 8810~8810, 2015.

- 14) ▲H. Sakimura, T. Tashiro, \*K. Ando, "Nonlinear spin-current enhancement enabled by spin-damping tuning", Nature Communications, 査読有, 5, 5730-1~7, 2014.
  - 15) ◎(量子)▲\*G. Allison, T. Fujita, K. Morimoto, S. Teraoka, M. Larsson, H. Kiyama, A. Oiwa, S. Haffouz, D. G. Austing, A. Ludwig, A. D. Wieck, and S. Tarucha, "Tuning the electrically evaluated electron Landé g factor in GaAs quantum dots and quantum wells of different well widths", Phys. Rev. B., 査読有, 90, 235310-1~5, 2014.
- (国内および国際会議招待講演) : 6 件(2014),15 件(2015),1 件(2016) 計 22 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 熱・力学的スピン変換班】

(論文)

- 1) ▲\*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", Nature communications 査読有 (Accepted).
- 2) ▲\*K. Uchida, H. Adachi, T. Kikkawa, A. Kirihara, M. Ishida, S. Yorozu, S. Maekawa, and E. Saitoh, "Thermoelectric generation based on spin Seebeck effects", Proceedings of IEEE, 査読有 99, 1~30, 2016.
- 3) ◎(電子)▲\*A. Kirihara, K. Kondo, M. Ishida, K. Ihara., Y. Iwasaki, H. Someya, A. Matsuba, K. Uchida, E. Saitoh, N. Yamamoto, S. Kohmoto, and T. Murakami, "Flexible heat-flow sensing sheets based on the spin Seebeck effect", Scientific Reports, 査読有, 6, 23114, 2016.
- 4) ◎(材料)▲\*Y. Shiomi, and E. Saitoh, "Dispersion-type Hall resistance in InSb vertical bar Pt hybrid systems", Scientific Reports, 査読有, 6, 22085-1~6, 2016.
- 5) ◎(機械)▲\*R. Takahashi, M. Matsuo, M. Ono, K. Harii, H. Chudo, S. Okayasu, J. Ieda, S. Takahashi, S. Maekawa, and E. Saitoh, "Spin Hydrodynamic Generation", Nature Physics, 12, 52~56, 2016.
- 6) ▲\*N. Yokoi, M. Ishihara, K. Sato, and E. Saitoh, "Holographic realization of ferromagnets", Physical Review D, 査読有, 93, 026002-1~6, 2016.
- 7) ◎(材料)▲\*R. Ramos, T. Kikkawa, M. H. Aguirre, I. Lucas, A. Anadon, T. Oyake, K. Uchida, H. Adachi, J. Shiomi, P. A. Algarabel, L. Morellón, S. Maekawa, E. Saitoh, and M. R. Ibarra, "Unconventional scaling and significant enhancement of the spin Seebeck effect in multilayers", Physical Review B., 査読有, 92, 220407(R)-1~5, 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", Physical Review B, 査読有, 92, 174424-1~4, 2015.
- 9) ◎(材料)▲\*K. Uchida, T. Kikkawa, T. Seki, T. Oyake, Y. Shiomi, Z. Qiu, K. Takanashi, and E. Saitoh, "Enhancement of anomalous Nernst effects in metallic multilayers free from proximity-induced magnetism", Physical Review B, 査読有, 92, 094414, (2015).
- 10) ◎(材料)▲\* 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.
- 11) ▲T. Kikkawa, \*K. Uchida, S. Daimon, Z. Qiu, Y. Shiomi, E. Saitoh, "Critical suppression of spin Seebeck effect by magnetic fields", Physical Review B, 査読有, 92, 064413-1~9, 2015.
- 12) ◎(材料)▲\*K. Uchida, J. Ohe, T. Kikkawa, S. Daimon, D. Hou, Z. Qiu, and E. Saitoh, "Intrinsic surface magnetic anisotropy in  $Y_3Fe_5O_{12}$  as the origin of low-magnetic-field behavior of the spin Seebeck effect", Physical Review B, 査読有, 92, 014415-1~8, 2015.
- 13) ◎(機械)▲\*H. Chudo, K. Harii, M. Matsuo, J. Ieda, M. Ono, S. Maekawa, and E. Saitoh, "Rotational Doppler Effect and Barnett Field in Spinning NMR", Journal of the Physical Society of Japan, 査読有, 84, 043601-1~4, 2015.

書籍

- 1) K. Sato and E. Saitoh eds. "Spintronics for Next Generation Innovative Devices", 編纂および Chapter III 主執筆, John Wiley & Sons, 2015.
- (招待講演) 20 件(2014), 27 件(2015), 2 件(2016) 計 49 件 (国際会議一般講演) 2 件(2014), 2 件(2015), 0 件(2016) 計 4 件 (国内学会講演) 8 件(2014), 7 件(2015), 0 件(2016) 計 15 件 (ワークショップ) 若手向けスク

ール「スピントロニクスとスピン流」(参加者約 100 名)

**【A05 スピン変換機能設計班】**

(論文)

- 1) ◎(電子)▲公募研究 K. Sato and \*Oleg A. Tretiakov, "Electrically controlled pinning of Dzyaloshinskii-Moriya domain walls", Appl. Phys. Lett., 査読有, 108, 122403-1~4, 2016.
- 2) ▲公募研究\*S. Miyahara and N. Furukawa, "Theory of antisymmetric spin-pair-dependent electric polarization in multiferroics", Phys. Rev. B, 査読有, 93, 014445-1~6, 2016.
- 3) ◎(材料)▲公募研究\*F. Ishii, Y. P. Mizuta, T. Kato, T. Ozaki, H. Weng, and S. Onoda, "First-principles study on cubic pyrochlore iridates  $Y_2Ir_2O_7$  and  $Pr_2Ir_2O_7$ ", J. Phys. Soc. Jpn., 査読有, 84, 073703-1~5, 2016.
- 4) ◎(材料)▲\*Stephan Geprags, Andreas Kehlberger, Francesco Della Coletta, Zhiyong Qiu Er-Jia Guo, Tomek Schulz, Christian Mix, Sibylle Meyer, Akashdeep Kamra, Matthias Althammer, Hans Huebl, Gerhard Jakob, Yuichi Ohnuma, Hiroto Adachi, Joseph Barker, Sadamichi Maekawa, Gerrit E.W. Bauer, Eiji Saitoh, Rudolf Gross, \*Sebastian T.B. Goennenwein and \*Mathias Klaui, "Origin of the spin Seebeck effect in compensated ferrimagnets", Nature Commun., 査読有, 7, 10452-1~6, 2016.
- 5) ◎(材料)▲\*Kenji Tanabe, Ryo Matsumoto, Jun-Ichiro Ohe, Shuichi Murakami, Takahiro Moriyama, Daichi Chiba, Kensuke Kobayashi, and Teruo Ono, "Observation of magnon Hall-like effect for sample-edge scattering in unsaturated YIG", Physica Status Solidi (b), 査読有, 253, 783~787, 2016.
- 6) \*W. Koshibae, and \*N. Nagaosa, "Theory of antiskyrmions in magnets", Nat. Comm., 査読有, 7, 10542-1~8, 2016.
- 7) ▲ \*Ka Shen and Gerrit E.W. Bauer, "Laser-Induced Spatiotemporal Dynamics of Magnetic Films", Physical Review Letters, 査読有, 115, 197201-1~5, 2015.
- 8) ◎(電子) S. Bosu, Y. Sakuraba, T. Kubota, I. Juarez-Acosta, T. Sugiyama, K. Saito, M. A.Olivares-Robles, S.Takahashi, G. E. W. Bauer, and \*K. Takanashi, "Size dependence of Peltier cooling in ferromagnet/Au nanopillars", Appl. Phys. Express, 査読有, 8, 083002-1~4, 2015.
- 9) ◎(材料)▲公募研究 M.A.U. Absor, \*F. Ishii, H. Kotaka, and M. Saito, "Persistent spin helix on a wurtzite ZnO(10-10) surface: First-principles density-functional study", Applied Physics Express, 査読有, 8, 073006-1~3, 2015.
- 10) ▲Taiki Yoda, Takehito Yokoyama and \*Shuichi Murakami, "Current-induced Orbital and Spin Magnetizations in Crystals with Helical Structure", Scientific Reports, 査読有, 5, 12024-1~7, 2015.
- 11) ▲\*Gen Tatara, "Thermal Vector Potential Theory of Transport Induced by a Temperature Gradient", Phys. Rev. Lett., 査読有, 114, 196601-1~5, 2015.
- 12) ▲Yasuyuki Kato, \*Shigeki Onoda, "Numerical evidence of quantum melting of spin ice: quantum-to-classical crossover", Physical Review Letters, 査読有, 115, 077202-1~4, 2015.
- 13) \*Ryohei Wakatsuki, Motohiko Ezawa and Naoto Nagaosa, "Domain wall of a ferromagnet on a three-dimensional topological insulator", Scientific Reports, 査読有, 5, 13638-1~10, 2015.
- 14) ◎(材料)▲\*Z. Xu, B. Gu, M. Mori, T. Ziman, and S. Maekawa, "Sign change of the spin Hall effect due to electron correlation in non-magnetic CuIr alloys", Physical Review Letters, 査読有, 114, 017202-1~5, 2015.
- 15) ◎(電子) ▲公募および計画研究 A. B. Cahaya, Oleg A. Tretiakov, and \*G. E. W. Bauer, "Spin Seebeck Power Conversion", IEEE Trans. Mag., 査読有, 51, 0800414-1~0800414-14, 2015.
- 16) ▲M. Hamada, T. Yokoyama, and S. Murakami, "Spin current generation and magnetic response in carbon nanotubes by the twisting phonon mode", Phys. Rev. B, 査読有, 92, 060409 (R)-1~060409 (R)-5, 2015.
- 17) ◎(電子)J. Flipse, F. K. Dejene, D. Wagenaar, \*G. E.W. Bauer, J. Ben Youssef, B. J. van Wees, "Observation of the spin Peltier effect", Phys. Rev. Lett., 査読有, 113, 027601-1~5, 2014.

(招待講演) 14 件(2014), 60 件(2015), 0 件(2016) 計 74 件 (国際会議一般講演) 11 件(2014), 1 件(2015), 0 件(2016) 計 12 件 (国内学会講演) 8 件(2014), 6 件(2015), 0 件(2016) 計 14 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)



スピントロニクスに関わる近年の研究動向は、多くの新しいスピン流に関わる物理現象が日本から発信されていることを示して報告されている。その結果、スピントロニクス研究は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し、実際に役に立つスピン変換応用に直結する基礎研究として本新学術領域研究「ナノスピン変換科学」の発足に至っている。しかしながらこの新学術領域研究は基礎学理の構築に重きを置いており、この分野の更なる飛躍の鍵を握る新物質開発が手薄であることが危惧され始めている。一方で、日本発のスピン変換研究に啓発され、英、独、仏、米でも新しいスピン変換材料として金属から有機物まで含む多様な物質へのヘテロ構造の開発に主眼を置いた同規模の研究プロジェクトが走り始めている。この状況を考慮して、本領域研究が中心となって世界規模の連携ネットワークを構築し、欧米の研究機関と相補的な国際共同研究を推進することにより新物質開発研究の強化を図る計画を立案し、遂行している。



更に、既存の共同研究を機軸とした人材育成研究拠点を形成する事は極めて重要で、迅速な対応が必要とされている。このような状況を考慮して、スピン変換科学の研究分野で重要性が増す新しいヘテロ構造、原子層構造をスピン変換研究に取り込むために、上図に示すように、従来の5共同研究機関に加えて新たに英国のリーズ大の Chris Marrows 教授グループ、ケンブリッジ大の Andrew Ferguson 主任研究員グループ、UCL の紅林講師グループ、独国のマインツ大 Sinova 教授グループを新規共同研究先として連携先に組み込んだ。これにより研究面では、ラシュバ・エデルシュタイン効果等のスピン変換に関わる諸現象が発現する舞台である新奇なヘテロ構造や新物質の開発も含めた国際的なスピン変換研究を遂行することが可能となり、若手研究者交流の選択肢を広げることが可能となった。既にこの枠組みを利用して、2名の大学院生が英国とドイツでの国際インターンシップを終えている。

## 7. 若手研究者の育成に係る取組状況（1 ページ以内）

領域内の若手研究者の育成に係る取組状況について記述してください。

今後の本ナノスピンの変換科学研究領域の活力ある発展を維持するためには、長期的な人材育成は不可欠である。初期計画においても若手研究者が主体となって運営するディスカッションミーティングや若手スクールの開催は計画されており、若手スクール:「スピントロニクスとスピン流」(<http://www.spincurrent.jp/>)を東北大にて、若手ワークショップを大阪大学にて実施した。その他、班間連携の一環として研究室の活動を実際に経験しながら共同研究を遂行する国内インターンシップ制度も実施して、一定の成果を上げている。

昨年度国際活動支援班の計画が採択されたことを受けて、H28 年度から規模を国内だけではなく世界に拡大して若手人材育成に取り組んでいる。本領域研究に参画する各研究班では、すでに若手研究者が中心となり金属や半導体を用いたスピン変換に関して世界的な共同研究が推進されているが、今後スピン変換科学の研究分野で重要性が増す新しいヘテロ構造、原子層構造やトポロジカル物質をスピン変換研究に取り込むために、この分野で実績のある欧米の研究機関との新たな連携の可能性も模索しながら拠点形成活動を進める。参画する若手准教授、助教、博士研究員や大学院学生は、既成のスピントロニクスの枠に甘んじることなく、材料的にも物理的にも新しい分野に挑戦し、新しいスピン変換研究の立ち上げを経験することになる。挑戦的な新分野の立ち上げを経験することは、若手研究者の育成に大きな波及効果がある。本研究拠点形成を通して様々な外国研究機関と連携することで、既成の分野を超えたグローバルな視野を育成する。本研究拠点形成ではスピントロニクス分野でノーベル賞を受賞した Albert Fert 教授の研究グループを始めとして世界的にも著名な欧米の研究グループが共同研究機関として参画しており、若手研究者の動機づけの点からも大変有意義な活動が期待できる。

具体的な本領域の活動として研究成果報告会を開催するのに合わせて、上述の欧米共同研究拠点の主要研究者を招待講演者として招聘すると同時に、欧米からの博士研究員や大学院生を含む若手研究者が本新学術研究に参画する研究室に滞在して、共同研究を遂行する。逆に日本の若手研究者は成果発表のために国際集会で発表する際に、単に会議に参加・発表するだけではなく本プロジェクトで連携する欧米の共同研究拠点に6ヶ月から1年滞在し、同様に共同研究を遂行する。このような研究交流を実施するためには充実した研究計画と資金面でのサポートが必要であり、総括班に属する国際活動支援班がその役割を担うことで、グローバルな視野と高い研究能力を持った博士課程修了生と若手研究者を育成する。

## 8. 研究費の使用状況（設備の有効活用、研究費の効果的使用を含む）（1 ページ以内）

領域研究を行う上で設備等（研究領域内で共有する設備・装置の購入・開発・運用・実験資料・資材の提供など）の活用状況や研究費の効果的使用について総括班研究課題の活動状況と併せて記述してください。

### 【設備】

本領域研究計画に於いて購入した班内共有設備に関して状況を以下に述べる。

A01 磁氣的スピン変換班では集束イオンビーム微細加工装置を購入した。H26 年度に本装置が納入された後、H27 年度前半に立ち上げを完了した。H27 年度後半に本装置を使用してナノスケールの素子の作製するプロセスを最適化し、確立したところである。H28 年度から班間連携研究として共同研究に活用する準備は整っている。A02 電氣的スピン変換班の界面スピン変換構造作製装置は H26 年度中に納入・稼働しており、白石と浜屋による  $\text{Fe}_3\text{Si}$  系スピン変換素子作製や、白石と A01 公募班の三輪との Bi 系スピン変換素子作製(A02 班研究計画参照)などの班内・班間共同研究に十全に活用されている。また齊藤チームに納入された光学測定系は齊藤と A03 班大野との共同研究の効率的推進に活用されている。

A03 光学的スピン変換では、希釈冷凍機を H27 年後半に大阪大学産業科学研究所に導入し、レーザー光源と組み合わせた極低温光照射実験という特色のある測定系の構築を行っている。今後、領域内の共有設備として、活用してゆく。また東北大学原子分子高等研究機構ではポンプローブ用面内電磁石を導入し、既存の時間分解磁気光学効果測定系に組み込んで、時空間分解顕微磁気光学効果測定系を構築し、共同研究のための共有設備として稼働している。すでに他班から試料を入手し、時間分解顕微磁気光学効果測定を開始している。A04 機械・熱的スピン変換班では、H26 年度後半に MEMS 加工に利用するためのスパッタ装置を東北大に導入し、東北大グループ原研グループで共同運用している。H27 年度にデジタルオシロスコープ、マイクロ波アナログ信号発生器、ロックインアンプを購入し、現有のドップラーメーターを組み合わせたフォノン分光測定装置を組み上げ、共通利用装置として東北大学に設置した。既に、能崎公募研究者や他班研究者（A01 班大谷）、班内研究者（小野、齊藤）等に利用されており、本領域独自の共通装置として頻繁に活用されている。A05 スピン変換機能設計班は理論研究を主体とする班のため、共通設備は所有しないが、領域内の実験グループとの連携研究を促進するために総括班が可能性を探る A05 班と他班共同研究会等を定期的開催している。

### 【総括班研究課題の活動状況】

審査所見の指摘事項に対する対応状況でも述べたように総括班主導でスピントロニクスにかかわる質の高い国際会議を総括班経費で開催した。具体的には、当新学術領域研究「ナノスピン変換科学」の総括班経費を使用して H27 年度 6 月 10~12 日に東大物性研究所の滞在型 ISSP 国際ワークショップと共催で国際シンポジウム”New Perspectives in Spintronic and Mesoscopic Physics (NPSMP2015)” (URL:<http://www.issp.u-tokyo.ac.jp/public/npsmp2015/>) を開催した。スピントロニクスとメゾスコピック系の物理の分野横断的情報交換を計った。これにより、日本のスピン変換科学に関連する研究の学術的プレゼンスを高めるとともに、分野横断的に情報交換をする場を提供し、分野を先導する国際共同研究のきっかけを作ることができた。

H28 年度は、当新学術領域研究総括班の海外活動支援班が理研創発物性科学研究センターと共催で、国際ワークショップ International Workshop on Nano Spin Conversion Science and Quantum Spin Dynamics を 10 月 12 日~15 日に開催する予定である。この会議では海外活動支援班の予算を使いナノスピン変換科学研究分野の各スピン変換プロセスに関して世界的にも著名な研究者を招聘すると同時に国内からも本領域で活躍する研究者も招聘する。これにより関連研究者が一堂に会し、グローバルな視点から情報交換をすることで、ナノスピン変換科学という研究分野の国際的な認知度を上げ、拠点形成の足掛かりとすることを目的とする。

## 9. 総括班評価者による評価（2ページ以内）

総括班評価者による評価体制や研究領域に対する評価コメントを記述してください。

### 【評価者：宗片比呂夫】

研究体制：学術的な成果も担保しつつ研究者の世代交代がうまくなされている印象を強く受けました。計画、公募班の意気込みが成果を通して伝わってきます。

研究領域：今、スピントロニクス研究は一つの転換期にさしかかっているように思われます。具体的には、物性物理学においては、ナノ量子物理学につらなる界面・表面の新しい電子状態の究明が急速に展開されています。応用物理学・材料科学分野では、エネルギー材料に向かう研究者の流れが形成され始めている。この中であって、特に応用物理・材料科学において、スピントロニクス研究の占める存在感が少し下がったように思われます。その中であって、本領域全体が追う学術的方向は、単に流行を追うのではなく、非常に本質を射抜くものであると思います。具体的には、非線形スピンドYNAMICSとスピン変換の相関物性、光子-電子間のコヒーレントスピン変換、異種接合界面に誘起されるスピン関連物性の制御などです。分野全体に基礎と応用の研究者の乖離が少し見え始めている点は、今後、本領域でも注意深く分析してゆくべきでしょう。

### 【評価者：宮崎照宣】

研究成果の評価

研究グループの規模により、研究成果（特に出版論文）の多い、少ないはあるが、全体として短期間で多くの成果をだしている。将来これらの中から更なる新学術領域形成に発展するものが出てくると期待している。領域代表者は他機関との共催でワークショップの開催、インターンシップの充実等、審査結果の所見における指摘に対して丁寧に対応している。また、これにとどまらず、今後の更なる発展を見据えて、手薄である新物質開発の強化を計っている。これらの点は高く評価される。

### 【評価者：安藤功兒】

ストレージ・メモリーという重要産業を実現したスピン制御技術は、初期の電流注入スピン依存伝導現象を超え、多種多様な新現象へと拡がりつつある。初期技術に拠って応用デバイスを開発してきた本総括班評価者には驚くばかりの展開であり、これら新現象が新たな応用に結実することが期待される。

その観点からみるならば、第一に、本研究の本来のミッションである、新規スピン変換現象の発掘とその学理の構築という面では、当初の期待を大きく上回る成果が得られていると評価される。強力な研究体制の構築と、その巧みな運営の賜物である。

一方で、いまだ多くの新規現象の探索・発見が行われる段階にあり、応用への道は明確ではない。これは本研究のミッションを超えるものであるが、応用志向の評価者としては、個別新現象の集積という形ではなく、その応用可能性と克服すべき課題が整理された形で、後継の材料・デバイス開発へと引き渡されれば嬉しい。幸い、代表研究者の言動からは、実質的な意義を持つ成果を残すという強い意志が感じられ、終了時の成果が期待される。

### 【評価者：大野英男】

スピン変換にかかわる学術を進展させる本新学術領域では、磁気的スピン変換、電気的スピン変換、光学的スピン変換、機械・熱的スピン変換、理論を取り扱うスピン変換機能設計、さらには計画研究でカバーできなかった研究項目を13件加え、わが国における本分野の中核をなす体制を整えた。これまで実績は十分出ていると判断される。特に班内、班間、そして国際的な研究体制に基づく成果が出ていることに注目したい。これらは、採択時の審査所見に総括班に参画するリーダーが真摯に対応した結果に他ならない。

各班から多くの成果が発表されており、それらが高いインパクトを持つ雑誌に掲載されていることは高く評価される。今後はこれらをスピソ変換科学という高い立場から整理して世界に発信していくことを期待したい。

## 10. 今後の研究領域の推進方策（2ページ以内）

今後どのように領域研究を推進していく予定であるか、研究領域の推進方策について記述してください。また、領域研究を推進する上での問題点がある場合は、その問題点と今後の対応策についても記述してください。また、目標達成に向け、不足していると考えているスキルを有する研究者の公募研究での重点的な補充や国内外の研究者との連携による組織の強化についても記述してください。

本領域研究は、現状では計画通りおおむね順調に進んでおり、すべての班で良好な成果が得られている。しかしながら、評価者のコメントにもあるように基礎と応用志向の研究者の乖離や本研究で得られた変換物性をどの様に应用到還元するかのイメージが無いこと等が今後取り組むべき課題として指摘された。これらのことを考慮して、スピン変換科学研究をより大きく発展させるための課題と方策を以下に纏める。

- スピン変換科学研究の最終的な目標は、電子スピンを媒介として発現する電気、光、熱、音、振動の相互変換現象を理論と実験の両面から統一的に理解し、既存の技術を打破する素子機能を提案することも目指している。したがってそれぞれの班で新たに合成した物質や開発した手法を相互に活用しあう班間連携研究あるいは国際共同研究のより一層の促進は不可欠である。
  - 具体的には A01 磁気的変換班、A02 電気的変換班で開発するヘテロ構造やスピン流電流変換手法は多くのスピン変換現象を電氣的に検出する有力な手法となるので、A03 光学的スピン変換班や A04 熱・力学的スピン変換班と積極的に連携研究を進めることで、多くの新奇なスピン変換現象やその制御手法の開拓を目指す。
- 本領域が発足した当初は固体内のスピン軌道相互作用により生じるスピホール効果がスピン流電流変換の主流な現象であったが、最近ではトポロジカル絶縁体表面あるいはラッシュバ界面に特徴的に生じるスピン運動量ロッキング現象を起源としたスピン流電流相互変換現象などが発見され、電場を使った変換効率の変調などの研究が展開しているが、その起源はスピン軌道相互作用のみによっている。スピン軌道相互作用に大きく依存しない新奇なスピン変換機能の開拓を目指す。
  - A05 班の成果にあるようなスピン軌道相互作用を発現機構としない新奇なスピン変換機構が発現する物質探索と検証実験も積極的に進める。公募研究者だけでなく海外活動支援班の設置を通じて強化した海外共同研究者グループとの連携を密にして新物質開拓を遂行すると同時に、A01 班で確立した、純良単結晶の微細加工技術を活用する共同研究を展開する。
- スピン変換に関わる研究領域全体の有機的な連携を活性化させることで、本研究領域を世界的に先導して行く体制を整えることも達成すべき重要課題に位置づける。一方で、当該分野における我が国の優位性や競争力を維持・発展させるためには、国際的な視点から状況を的確に判断し、将来本領域を牽引して行く若手人財の育成と確保もスピン変換研究の推進と共に目標達成のための課題である。
  - 国際活動支援班の発足により補強した海外共同研究者グループも含めた国際会合や国際若手スクールを開催し若手人材育成と国際拠点形成の足掛かりとする。具体的には、この分野における人材育成と国際的な日本の学術的プレゼンスを幅広く高めることを目的として、H28 年度に国際若手スクールと国際ワークショップを計画している。
  - 人材育成の観点から、国際若手スクールの活動を通じて、日本国内だけでなく、インド、ベトナム、中国、韓国、などアジア圏から発掘した優秀な人材を、本研究領域研究を通じて育成し、世界的にプロモートする取り組みも進める。

- ホームページをはじめとするインターネット資源を有効活用して広報機能を充実化することは不可欠である。
  - 本領域研究で得られた成果を発表する論文のオープンアクセス化を進めホームページを通じて公開すると同時に、関連応用研究に関する情報も掲載する。