

2.3.3 スピントロニクス

(1) 研究開発領域の定義

固体中の電子が持つ電荷とスピンの両方を工学的に応用する分野であり、電荷の自由度のみに基づく従来のエレクトロニクスでは実現できなかった機能や性能を持つデバイス実現をめざす研究開発領域である。ハードディスクの大容量化や省電力化、不揮発性メモリの実現など、私たちの生活の中ですでに使われている技術もあるなか、デバイスの高機能化・省電力化に向けた研究開発が進められている。最近では、熱スピン流に基づいた熱電変換をめざすスピнкаロリトロニクスや物質のトポロジカルな性質に着目したスピン流の制御、スピントロニクスで発展した技術の量子状態制御への応用、さらにはスピンを用いた人工知能デバイス研究など新しい展開をみせている。

(2) キーワード

スピン流、スピントルク、スピン軌道相互作用、スピンホール効果、スピンゼーベック効果、不揮発性メモリ、電圧トルク、トポロジカル物質、量子状態制御、スピнкаロリトロニクス、スピンメカニクス

(3) 研究開発領域の概要

[本領域の意義]

電子は電荷とスピンの2つの自由度を持つことがよく知られている。従来、研究分野として電荷を主に扱う「電子工学」とスピンを主に扱う「磁気工学」の2つに分かれて発展してきたが、1990年代以降のナノテクノロジーの発展により、電子の電荷とスピンを効果的に結びつけて利用する学理体系の構築が始まり、スピントロニクスと呼ばれる研究領域の誕生へとつながった。なかでも強磁性金属とその多層膜をベースとした分野がもっとも応用研究が進展しており、すでにハードディスクの磁気ヘッドとして広く普及し、記録密度の大容量化に貢献している。さらに、スピン流を用いることで、従来の電子素子が抱えていたジュール熱によるエネルギー損失の問題の解決にもつながり、電子機器類の小型化・高性能化、画期的な省エネデバイス開発や量子効果の制御への寄与等が期待できる。

[研究開発の動向]

スピントロニクスの歴史は、1857年のW. Thomsonの磁気抵抗効果の発見にさかのぼる。当時は磁気抵抗効果の大きさを表すMR比が低く、実用化にはほど遠い状況であった。1988年のA. FertおよびP. Grünbergらによる巨大磁気抵抗 (Giant Magnetoresistance: GMR) 効果の発見をきっかけに、GMR効果を利用したデバイス開発が世界中で進められ、1997年にGMRヘッドとして実用化された。その間、1995年に宮崎照宣とJ. S. Mooderaがそれぞれ室温における大きなトンネル磁気抵抗 (Tunnel Magnetoresistance: TMR) 効果を報告した。TMR効果は電子がトンネルできる程度の薄い絶縁体層を強磁性層で挟んだときに、2つの強磁性層の磁化の相対的な方向によってトンネル抵抗が変化する効果である。TMR効果についてはGMR効果発見以前から研究が行われていたが、室温における高いMR比は報告されていなかった。GMR効果のMR比が5~15%程度であることに対して、TMR効果は20~70%と格段に高いことから、2004年に超高記録密度用TMRヘッドとして実用化された。さらに、S. S. P. Parkinと湯浅新治が開発したMgOを絶縁層とするTMR素子では100%を超えるMR比が得られ不揮発性固体メモリ (Magnetoresistive Random Access Memory: MRAM) の実現にもつながっている。

1990年代には、磁化が電気伝導に与える影響が研究の中心で、かつ金属系と半導体系の2つの流れがあったが、2000年頃からは電気伝導が磁化に与える影響に興味を持たれるようになり、スピン注入磁化反転や電流による磁壁駆動、スピンホール効果などの研究が精力的に行われるようになった。さらに、TMRやスピン注入、スピンホール効果などが、既存の材料の分類である金属・半導体・絶縁体の枠を超えて観測されており、スピン流の概念で解釈されている。スピン流とは、電子のスピン角運動量の流れであり、実験的に電流と分離して生成・検出することが可能である。スピン流は、電気的には絶縁性を示す物質であってもスピン波（マグノン）として生じるもので、スピントロニクスにおける基本的な概念の1つである。また、磁気と電気の変換（スピンホール効果、逆スピンホール効果）、磁気と熱の変換（スピンゼーベック効果、スピンペルチェ効果）など、磁気とほかの物理量との変換の基礎にもなっている。さらに、近年では音や振動といった機械運動とスピン流との変換も発見されている。熱にかかわる分野をスピнкаロリトロニクス、力学的運動にかかわる分野をスピนมカニクスと呼ぶこともある。これらの変換にはスピン軌道相互作用が大きな役割を果たしているが、界面における結晶対称性の破れがその根底にある。スピン軌道トルク（Spin Orbit Torque : SOT）による磁化反転はその例である。

2000年代初頭に発見されたトポロジカル物質と呼ばれる、物質が持つトポロジーによって特徴づけられる新しい物質群においてもスピン軌道相互作用が大きく影響しており、ごく最近ではトポロジカル物質であるワイル磁性体やトポロジカル絶縁体をスピントロニクスへ応用するトポロジカルスピントロニクスと呼ばれる分野も形成されつつある。

(4) 注目動向

[新展開・技術トピックス]

• スピン軌道トルク MRAM

スピンホール効果あるいはスピン軌道相互作用によるラッシュバトルクを用いることで、現在実用化が進む STT-MRAM に比べて高効率の MRAM が作れることが期待されている。原理的に3端子であるため書き込みラインと読み出しラインを分離できるという回路上の利点もある一方で、素子サイズが大きくなるという問題も抱えている。近年、その高速性、高信頼性を生かした SRAM 置き換えの研究開発が進んでいる。MRAM によりキャッシュを不揮発にすることで携帯端末などの省エネルギー化も期待されている。

• 電圧駆動 MRAM

現在、実用化が進んでいる STT-MRAM やスピン軌道トルクを用いる SOT-MRAM は電流が作る磁界を書き込みに使う場合に比べて非常に低消費電力となるものの、電流を用いてスピン流を発生するためにジュール熱によるエネルギー散逸を伴う。一方、電圧電界誘起磁気異方性変化によるトルク（電圧トルク）を書き込みに用いる新しい不揮発性メモリ「電圧駆動 MRAM」は、電流をほとんど流さずに電圧のみで書き込むため、理論的にはさらに2桁程度小さなエネルギーでの書き込みが可能となる。近年、電圧パルスによる高速双方向磁気書き込みが実験的に示されたこと、 10^{-7} 台のエラーレートが実証されたことで、実用化の可能性が高まっている。その他にも電圧による磁気異方性変化自体を大きくする必要があるが、最近、FeIr系などで従来の10倍以上の電圧効果が見出され実用化に着実に近づいている。

• 電圧駆動スピントロニクスメモリ（Voltage Control Spintronics Memory : VoCSM）

2016年に提案されたスピン軌道トルクと電圧による磁気異方性変化を同時に利用することにより低電力化と高集積度を同時に満たすことをめざした MRAM の新しいアーキテクチャである。1つの重金属ワイヤの上に複数の磁気トンネル接合を作ることが特徴で、このうち電圧をかけたもののみを低消費電力で書き換えるこ

とが可能になる。

• 高感度磁場センサ

トンネル磁気抵抗素子およびマグネットインピーダンスセンサ (MIセンサ) を用いた心磁計、脳磁計の研究が進んでいる。すでに、心磁・脳磁の信号測定に成功しており今後の実用化が期待される。

• スピンMOSFET (Metal-Oxide-Semiconductor Field Effect Transistor)

スピンMOSFETは、電力増幅作用を持ち、出力電流やトランスコンダクタンスを磁化状態によって操作でき、不揮発で、既存のSi集積回路で蓄積された微細加工技術や回路設計技術などの資産を使うことができるという特徴を持つ。原理的にはCMOS回路構成も可能である。スピンMOSFETからなる論理回路は、素子数の少なさと不揮発性により低消費電力動作が期待できる。まだ理想的な出力特性を得るにはいたっていないものの、これまでいくつかの試作と原理的な動作実証の研究が行われている。このような再構成可能な論理回路や不揮発性論理回路の実現は、今後のスピントロニクスにおける重要な目標になると考えられている。

• Siへのスピン注入、輸送、検出とスピンMOSFETの試作

大阪大学-TDKグループは、スピンMOSFETの作製とその動作実証を試み室温でスピンMOSFETを動作させたと報告した。ゲート電圧によるドレイン電流の変調はある程度できているが、スピン注入と検出による磁気抵抗比は0.01~0.04%程度と非常に小さいものであった。最近、東京大学グループは、GaMnAs/GaAs/GaMnAsからなる強磁性半導体ヘテロ接合を用いた縦型FETにサイドゲートを付けた独特のトランジスタ構造を作製し、低温ではあるがスピンMOSFETの動作と大きな磁気抵抗比60%の達成に成功した。また、東工大-NIMS-東大グループは、既存のTMR素子とMOSFETを組み合わせるという手法により、擬似スピンMOSFETの作製と良好な特性の室温動作を示した。

• マグノニクスと脳型コンピューティング

スピン波やマグノンキャリアとするデバイスの実現をめざす、マグノニクスと呼ばれる研究領域も誕生しており、ドイツや日本を中心に進展している。例えば、スピン波スピン流を用いた論理ゲートが提案され、動作実証が報告されている。スピン波は室温でも十分に干渉効果を得ることが可能であるため、これを利用することでデバイス構造を簡易化可能であることが指摘されている。また、スピン波やスピントルク発振の非線形性を利用して脳型コンピューティングを行おうという動きもある。スピントルク発振器とディレイラインを用いてリザーブコンピューティングの実証が行われ注目を集めている。また、スピントルク発振器はHDDのさらなる記録密度向上のためのマイクロ波アシスト磁気記録 (Microwave Assisted Magnetic Recording : MAMR) 用の発振器としても期待されている。その他、磁性ドット間の双極子相互作用を利用した脳型計算のシミュレーションが発表されるなど近年急激に研究開発が活発になっている。

• トポロジカルスピントロニクス

トポロジカル絶縁体表面のスピン流やトポロジカル反強磁性体の仮想磁場などのトポロジに起因する特性を利用することにより、素子の高密度化や高速動作、高効率なスピン流・電流変換もしくは熱電変換の実現など、新材料・新デバイス開発をめざした新しいスピントロニクス技術として期待されている。特に近年、ワイル反強磁性体であるMn₃SnやMn₃Geなどにおいて、反強磁性体では発現しないと考えられてきた異常ホール効果、異常ネルンスト効果、磁気光学効果などが、電子構造のトポロジを起源として出現することが東大物性研グループにより報告され、反強磁性体を用いたスピントロニクスに新しい方向性を切り拓きつつある。また、実空間でトポロジに保護された磁気構造であるスキルミオンに関しても、レーストラックメモリ活用に向けた研究が進められている。

• スピンゼーベック・異常ネルンスト効果を含む垂直熱発電

従来型の熱電変換は熱流と電流が平行であったため、性能に限界があった。これに対しスピンゼーベック効果、異常ネルンスト効果は熱流と電流が垂直方向であるため、非常にシンプルな構造で高い変換効率が期待される。理論上の上限であるカルノー効率に達することが原理的には可能であると示された。最近の垂直熱発電の出力密度は $200\mu\text{W}/\text{cm}^2$ に達しており、あと1桁向上すればBiTe系の従来型熱電素子を超えるところまで達している。

• 超伝導トポロジカル量子整流

第二種超伝導体MoGeを、磁性絶縁体 $\text{Y}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$ 基板に成膜した試料において、試料の温度を一定に保ちながらこの薄膜試料の面内方向にある特定の強度の磁場を印加すると、外部からの入力がないにもかかわらずMoGeの面内方向に直流電圧が発生した。この直流電圧は、電磁ノイズのある測定環境では一日中安定して観測され続けた。この直流電圧はMoGeがいわゆる渦糸液体相にあるときに生じており、磁性体界面と開放側界面における渦糸のアンバランスが整流機能を生じたと考えられる。温度差ではなく環境のゆらぎを検出しており、低温動作ながらも非常に感度の高い整流素子であり、ノイズ評価や微弱信号の検出に利用できる可能性がある。

• フレキシブルスピントロニクス

磁気抵抗素子をフレキシブル基板上に製膜することにより磁歪効果を用いたベクトル型のひずみセンサとなることが示された。今後、ゼロエネルギー消費のデータロガー付きセンサとなる可能性があり注目されている。

• 量産化へ向けた動き

米GlobalFoundries、米Everspin Technologies、米Intel、韓国Samsung Electronics、台湾TSMCなどの大手ファウンドリや半導体メーカーが軒並み、混載用MRAM (eMRAM) やSTT-MRAMの個別部品を300mmウェハで量産済み、もしくは量産準備が整ったとしている。

[注目すべき国内外のプロジェクト]

スピントロニクスは基礎研究から応用研究まで多くの先駆的研究が日本から生まれてきた研究領域である。わが国においては、JSPS 科研費特定領域研究「スピン流の創出と制御」(領域代表者：高梨弘毅、2007～2010年度)やJST 戦略的創造研究推進事業(さきがけ)「革新的次世代デバイスを目指す材料とプロセス(略称：次世代デバイス)」領域(研究総括：佐藤勝昭、2007～2013年度)において、スピン流物理に関する基盤が構築された。特に特定領域「スピン流の創出と制御」からは、巨大スピンホール効果やスピンゼーベック効果の発見、スピン起電力の実証等、スピン流の学術的基盤に関して非常に高水準な研究成果が多数報告されたことが高く評価されている。また、さきがけ「次世代デバイス」においても、磁性誘電体中のスピン流を利用した電気信号の伝達、グラフェンを介したスピン流の制御など、スピントロニクスの発展に寄与する多くの成果が生まれている。その後、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追求、物質界面のナノスケール制御による磁氣的、電気的、光学的、熱的、機械力学的なスピン変換機能の開拓をめざすJSPS 科研費新学術領域「ナノスピン変換科学」(領域代表者：大谷義近、2014～2018年度)が発足した。また、内閣府革新的研究開発推進プログラム(ImPACT)「無充電で長期間使用できる究極のエコIT機器の実現」(PM：佐橋政司、2014～2018年度)では、AI/IoT時代における低消費電力化への要請に応えるため、電圧で磁気メモリに情報記録する究極の不揮発性メモリや省電力スピントロニクス論理集積回路などのコンピュータにおける各メモリ/ストレージ階層の省電力を極めることに挑戦した。また、JST 戦略的創造研究推進事業におけるCREST「トポロジカル材料科学に基づ

く革新的機能を有する材料・デバイスの創出」(研究総括:上田正仁、2018～2025年度) およびさきがけ「トポロジカル材料科学と革新的機能創出」(研究総括:村上修一、2018～2023年度)においても、ワイル磁性体やスキルミオンなどのトポロジカル物質をスピントロニクスに応用したトポロジカルスピントロニクスに関する研究が推進されている。さらに、2020年から開始となったCREST「情報担体を活用した集積デバイス・システム」(研究総括:平本俊郎、2020～2027年度) およびさきがけ「情報担体とその集積のための材料・デバイス・システム」(研究総括:若林整、2020～2025年度)においてもスピントロニクスは重要な分野の1つとして取り上げられている。加えて、JST未来社会創造事業大規模プロジェクト型・技術テーマ「トリリオンセンサ時代の超高速情報処理を実現する革新的デバイス技術」においては、「スピントロニクス光電インターフェースの基盤技術の創成」(研究開発代表者:中辻知、2020年度～)が採択され、スピントロニクスとフォトニクスを融合した革新的情報処理ハードウェア技術開発が推進されている。

また、日本学術会議「マスタープラン2014」重点大型計画および文部科学省「学術研究の大型プロジェクト-ロードマップ2014」においてスピントロニクスが重点課題の1つとして取り上げられた。これを受けて「スピントロニクス学術研究基盤と連携ネットワーク」拠点の整備が始まりスピントロニクス学術連携研究教育センターを拠点大学(東京大学、東北大学、大阪大学、慶應義塾大学)に設置し、主要大学、国研、関連企業をはじめとする国内有力研究機関を結ぶネットワークを形成している。スピントロニクスは日本学術会議「マスタープラン2020」重点大型計画および文部科学省「学術研究の大型プロジェクト-ロードマップ2020」にも採択され、新しく京都大学を拠点に加えた整備を開始する。しかし、上記のマスタープラン・ロードマップは直接の予算措置を伴うものではなく、将来的には予算措置を含む国の施策が求められる。

米国においては、NSF、DOE、DODなどの支援の下、スピントロニクス関連の研究プロジェクトが多数存在し、基礎研究から応用研究まで幅広く実施されている。なかでも、DOEのエネルギーフロンティア研究センター(Energy Frontier Research Centers:EFRCs)の1つであるSpins and Heat in Nanoscale Electronic Systems(SHINE、2014～2020年)では、伝導電子スピン流とマグノン流を制御するナノ電子システムを構築することを目的とし、カリフォルニア大学リバーサイド校を中核に米国におけるスピントロニクスに関する機関(ほかにはジョーンズ・ホプキンス大学、カリフォルニア大学ロサンゼルス校、テキサス大学オースチン校)が参画している。また、同じくEFRCの1つであるInstitute for Quantum Matter(IQM、2018～2022年)においては、量子もつれやコヒーレンスなどの量子効果が巨視的に発現する新しい量子物質や物性を開拓することを目的としている。ジョーンズ・ホプキンス大学を中核機関とし、コーネル大学、ペンシルバニア州立大学、プリンストン大学、ラトガース大学が参加している。

欧州では、Horizon 2020の枠組や各国の研究資金で基礎研究を中心に実施されている。Horizon 2020においては、反強磁性スピントロニクスの実現をめざしたAntiferromagnetic Spintronics(ASPIN、2017～2021年)プロジェクトや新規トポロジカル物質・トポロジカル物性の開拓をめざすTopological materials: New Fermions, Realization of Single Crystals and their Physical Properties(TOPMAT、2017～2022年)がある。また、ドイツにおいてはDFG支援の下、スピнкаロリトロニクスに関する新しい研究分野開拓をめざしたSpin Caloric Transport(SpinCAT、2011年～)、スキルミオンを含む実空間でのトポロジカルスピンソリトンを用いたデバイスとアプリケーション開発に向けた基礎研究を行うSkyrmions: Topological Spin Phenomena in Real-Space for Applications(2018年～)などがある。特にSpinCATに関しては、2008年に慶應大グループによって発見されたスピンゼーベック効果に注目した大型プロジェクトである。

2.3

俯瞰区分と研究開発領域
ICT・エレクトロニクス応用

(5) 科学技術的課題

磁性半導体をはじめとする半導体スピントロニクス材料開発に関しては、高いキュリー温度を得るための指針を確立するため、結晶成長機構の解明、欠陥やキャリア濃度の制御方法の開発、バンド構造と強磁性発現機構の理解、さらにはそれらの理解に基づくマテリアルデザイン方法の確立が求められる。また、スピンMOSFETなどスピンドバイスの研究については、着実に進歩しているものの、室温動作、満足すべきトランジスタ性能、平行磁化と反平行磁化の違いによる十分大きな磁気抵抗比（磁気電流比）など、すべての要件を満足するデバイス作製が今後の重要な課題である。

近年、スピン軌道相互作用にかかわる物理が大きな発展をみせているものの、一般的にスピン軌道相互作用の大きな元素はレアアースが多く元素戦略的な観点が必要となる。また、スピнкаロリトロニクスやスピンメカニクスにおいては、応用のためには熱/力学的運動⇄スピン流⇄電流の変換効率の桁違いの向上が必要であり、新物質の開発と原子レベルでの界面制御技術が必要になる。さらに、スピン流やトポロジカル物質を用いたスピントロニクスに関しては、まだ基礎研究フェーズであるといえるものの、実験室レベルの基本動作実証からプロトタイプの作製、デバイスの安定性や信頼性を検証するレベルまでステージアップさせることが必要である。

(6) その他の課題

スピントロニクスはもともと磁性薄膜の成長と物性を得意とする研究グループに牽引されてきた経緯があり、個々の研究者が前述の分野全体にわたる広い知識を必ずしも有しているわけではない。そこで、この分野では、物理・数学・物性・結晶工学・磁気工学・半導体工学・微細加工技術・計測工学の諸分野の研究者、さらにシステム（回路）・デバイスの専門家や産業界をいかに結集し学際的かつ産学連携を誘発する土壌を豊かにしていくかが重要な課題といえる。本研究開発領域は日本が強みを有する領域であり、今後も競争力を維持していくためには若手人材の育成と確保も最重要課題の1つである。

(7) 国際比較

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	各国の状況、評価の際に参考にした根拠など
日本	基礎研究	◎	→	<ul style="list-style-type: none"> ・JST 戦略的創造研究推進事業などを中心に基礎研究が継続的に行われている。 ・トポロジカルスピントロニクスなどの新しい概念に基づく研究開発が成果をあげ始めている。
	応用研究・開発	○	↘	<ul style="list-style-type: none"> ・実用化へ向けた本格的な研究開発は少なくなりつつある。企業のより一層の寄与が必要である。
米国	基礎研究	◎	↗	<ul style="list-style-type: none"> ・NSF、DOE、DOE傘下のNERSC、ONRからの手厚い支援のもと、良質な基礎研究成果を出し続けている。
	応用研究・開発	○	↗	<ul style="list-style-type: none"> ・キャッチアップが早く、電圧トルクなど多くの応用研究が始まっている。Everspin、Global-Foundries、IntelがMRAMの量産体制を準備しつつある。

欧州	基礎研究	◎	→	<ul style="list-style-type: none"> ・英国ではEPSRCとJSPSとの共同プロジェクトとして、有機スピントロニクス等の研究が行われている。 ・フランスではフランス国立研究機構 ANRにより、かなり広範囲にわたってスピントロニクス関連の支援が行われている。 ・ドイツではDFGの支援のもと、スピン流-熱流変換現象を扱う大型プロジェクト SpinCaT が2010年に立ち上がり、多くの研究グループが参画している。 ・トポロジカル現象を用いた新しいスピントロニクス研究も積極的に行われている。
	応用研究・開発	△	→	<ul style="list-style-type: none"> ・IMECなどが応用研究を再開したがそれほど目立った進展はない。
中国	基礎研究	◎	↗	<ul style="list-style-type: none"> ・量子異常ホール効果の実証など、質の高い研究が行われるようになってきている。 ・潤沢な研究資金と豊富な人材を活用し、欧米を凌ぐ勢いで研究が行われ、高いポテンシャルを有する。
	応用研究・開発	△	↗	<ul style="list-style-type: none"> ・応用研究に関する情報はそれほどないが、基礎研究の質が高くなってきているなか、今後国家的事業として重厚な支援がなされる可能性がある。
韓国	基礎研究	○	↗	<ul style="list-style-type: none"> ・これまで理論中心だったが、界面DMIの研究などの実験においても良質な研究がみられるようになってきている。 ・個別研究レベルでは秀逸な研究が存在する。
	応用研究・開発	○	↗	<ul style="list-style-type: none"> ・SamsungがMRAMの量産体制を準備している。 ・財閥系企業などからの潤沢な資金をもとに応用研究・開発を活発に行う可能性がある。

(註1) フェーズ

基礎研究：大学・国研などでの基礎研究の範囲

応用研究・開発：技術開発（プロトタイプの開発含む）の範囲

(註2) 現状 ※日本の現状を基準にした評価ではなく、CRDSの調査・見解による評価

◎：特に顕著な活動・成果が見えている

○：顕著な活動・成果が見えている

△：顕著な活動・成果が見えていない

×：特筆すべき活動・成果が見えていない

(註3) トレンド ※ここ1～2年の研究開発水準の変化

↗：上昇傾向、→：現状維持、↘：下降傾向

関連する他の研究開発領域

- ・新機能ナノエレクトロニクスデバイス (ナノテク・材料分野 2.3.1)
- ・トポロジカル材料 (ナノテク・材料分野 2.5.5)

参考文献

- 1) 齊藤英治, 村上修一『スピン流とトポロジカル絶縁体—量子物性とスピントロニクスの発展—』(共立出版, 2014) .
- 2) G. Binasch et al., "Enhanced Magnetoresistance in Layered Magnetic Structures with Antiferromagnetic Interlayer Exchange", *Physical Review B* 39, no. 7 (1989) : 4828. doi : 10.1103/physrevb.39.4828
- 3) M. N. Baibich et al., "Giant Magnetoresistance of (001) Fe/ (001) Cr Magnetic

- Superlattices", *Physical Review Letters* 61, no. 21 (1988) : 2472. doi : 10.1103/physrevlett.61.2472
- 4) T. Miyazaki and N. Tezuka, "Giant Magnetic Tunneling Effect in Fe/Al₂O₃/Fe Junction", *Journal of Magnetism and Magnetic Materials* 139, no. 3 (1995) . doi : 10.1016/0304-8853(95) 90001-2
- 5) J. S. Moodera et al., "Large Magnetoresistance at Room Temperature in Ferromagnetic Thin Film Tunnel Junctions", *Physical Review Letters* 74, no. 16 (1995) : 3273. doi : 10.1103/physrevlett.74.3273
- 6) Satoru Nakatsuji, Naoki Kiyohara and Tomoya Higo, "Large Anomalous Hall Effect in a Non-collinear Antiferromagnet at Room Temperature", *Nature* 527, no. 7577 (2015) : 212-15. doi : 10.1038/nature15723
- 7) 科学技術振興機構 CREST 研究領域「トポロジカル材料科学に基づく革新的機能を有する材料・デバイスの創出」,
https://www.jst.go.jp/kisoken/crest/research_area/ongoing/bunyah30-3.html (2021年2月17日アクセス)
- 8) 科学技術振興機構 さきがけ研究領域「トポロジカル材料科学と革新的機能創出」,
https://www.jst.go.jp/kisoken/presto/research_area/ongoing/bunyah30-3.html (2021年2月17日アクセス)
- 9) 科学技術振興機構 CREST 研究領域「情報担体を活用した集積デバイス」,
https://www.jst.go.jp/kisoken/crest/research_area/ongoing/bunya2020-3.html (2021年2月17日アクセス)
- 10) 科学技術振興機構 さきがけ研究領域「情報担体とその集積のための材料・デバイス・システム」,
https://www.jst.go.jp/kisoken/presto/research_area/ongoing/bunya2020-4.html (2021年2月17日アクセス)
- 11) 科学技術振興機構 未来社会創造事業 大規模プロジェクト型 技術テーマ「トリリオンセンサ時代の超高度情報処理を実現する革新的デバイス技術」,
<https://www.jst.go.jp/mirai/jp/program/large-scale-type/theme08.html> (2021年2月17日アクセス)
- 12) 日本学術会議 第24期学術の大型研究計画に関するマスタープラン (マスタープラン2020) ,
<http://www.scj.go.jp/ja/info/kohyo/kohyo-24-t286-1.html> (2021年2月17日アクセス)
- 13) 文部科学省 学術研究の大型プロジェクトの推進に関する基本構想 ロードマップの策定 -ロードマップ2020-,
https://www.mext.go.jp/b_menu/shingi/gijyutu/gijyutu4/toushin/1388523_00001.htm (2021年2月17日アクセス)