

2.3.6 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、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、最近では電子スピンを用いた熱電変換や人工知能の研究において、さらには量子効果の制御などにおいて新しい展開をみせている。高度にスピン偏極した材料の開発、スピン状態の制御といった研究開発課題がある。

（2）キーワード

スピン流、スピントルク、スピン軌道トルク、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、核スピン、不揮発性メモリ、電圧トルク、磁気センサー、反強磁性体、フェリ磁性体、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、スピン波、マグノン

（3）研究開発領域の概要

〔本領域の意義〕

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。中でも強磁性金属とその多層膜をベースとした分野では最も応用研究が進展しており、既にハードディスクの磁気センサーとして広く普及し、記録密度の大容量化に貢献した。

電子が有する電荷の自由度に加えてスピンを利用する意義は、スピンの不揮発性とその操作が低エネルギーでできることにある。スピントロニクスが提示した重要概念であるスピン流の散逸機構は電流のそれと大きく異なることから、従来の電子素子のジュール熱によるエネルギー損失を解決し、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寄与できる。

既にスピン流を用いた固体不揮発メモリである磁気抵抗メモリ（MRAM）が実用化され、その市場は広がりにつつある。最近では、スピンの有する量子力学的な整流作用や量子ゆらぎを利用したスピン流生成現象や物質中の原子核の持つスピンを利用したスピン流生成効果・熱電変換現象も発見され、新原理のエネルギーデバイス技術として注目されている。スピンの運動を計算技術へ応用する試みも実験・理論の両面から開拓が進んでおり、将来的なデバイス利用に向けた基礎の確立が進められている。

〔研究開発の動向〕

• 論文・特許動向

論文数は増加しており、中国とインドの増加が特に顕著である。日本の論文シェアは低下傾向だが、2021年時点で4位を維持している。また、論文の質を表すTop1%論文数・Top10%論文数では欧米、中国およびドイツが多く、日本はそれに続く位置に付けている。領域全体の特許ファミリー件数は増加しており、将来有望な分野として応用に向けた研究開発の継続を表している。特許ファミリー件数のシェアでは、10年間で中国の増加と、日本の減少が顕著であり、応用に向けた研究開発活動の低下も懸念される。（詳細は「研究開発の俯瞰報告書 論文・特許データからみる研究開発動向（2024年）」を参照）

• 磁気ヘッドや不揮発メモリへの応用

スピンと電気伝導の研究は1960年代の強磁性半導体の研究、1975年のトンネル磁気抵抗素子の研究にさかのぼるが、スピントロニクスという概念が意識されるようになるのは1988年の強磁性金属多層膜におけ

る巨大磁気抵抗効果（GMR）の発見以降である。A. Fertらの1988年の論文に、Fe/Cr多層膜において非常に大きい磁気抵抗効果がGMRとして示されている。単に磁気抵抗効果が大きいということのみならず、発現メカニズムがナノスケールの構造に起因することから、ナノテクノロジーの大規模応用の代表例としても挙げられる。Fertらによる論文発表と同時期にP. Grunbergらも基本的に同じメカニズムによる磁気抵抗効果を見出しており、さらには磁気ヘッドへの応用に関する先見的特許申請も行った。Grunbergらの研究では、GMRの大きさ自体はFertらのものより小さいが、磁気ヘッドへの応用に直結する3層構造が用いられている。ほどなく米国・日本を中心にハードディスクの読み出しに応用され、記憶容量の爆発的な増大（年率60%）をもたらした。さらに2つの強磁性金属でトンネル障壁層を挟んだトンネル磁気抵抗（TMR）素子において大きな磁気抵抗効果が発見され、ハードディスクの記憶容量のさらなる増大に寄与した。GMR素子において磁気スピン注入によるスピントルク発振（STO）も見いだされ、磁気ヘッドにSTOを取り付け、局所的磁気共鳴によって高異方性媒体へ書き込むことで記憶容量を増大させる方法が研究されている。読み取りに関してもスピンホール効果や異常ホール効果を用いた読み取りヘッドの特許申請が数年前に行われ、その実現を目指した研究が行われている。スピン注入磁化反転を用いた不揮発性メモリSTT-MRAMは既に小規模なものが市場に出荷され、現在ではDRAM置き換えを狙う大規模なものやSRAM置き換えを狙う高速なものも開発が進んでいる。

• スピン波コンピューティング

最近、急浮上してきたのが、スピン波コンピューティングである。スピン波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。また、スピン波の非線形な干渉効果を用いた非線形コンピューティングも注目を集めている。スピン波は室温でも十分に干渉効果を得ることが可能なため、これを利用することでデバイス構造を簡易化できる。反強磁性体のスピン波やスピン流を利用したスピン情報伝送の実験も進められている。

• 熱、光、音などからのスピン流への変換

熱、光、音などからスピン流が作られる現象が続々と発見されている。代表的な例がスピンゼーベック効果であり、磁性体/金属界面に温度勾配を加えるとスピン流が生成されることが2008年に日本の研究者によって見出され、この効果を利用した新しい熱電変換技術の研究も始まっている。最近では、スピン流が電気と運動を相互に変換する物質機能を担うことが示され、MEMSとスピントロニクスが融合したスピンメカニクス分野にも注目が集まっている。

(4) 注目動向

[新展開・技術トピックス]

• スピントルク発振素子（Spin-torque oscillator: STO）

ハードディスクのさらなる高密度化のためにSTOを利用する試みがなされており、この技術はマイクロ波アシスト磁気記録（Microwave Assisted Magnetic Recording: MAMR）と呼ばれる。近年、MAMRヘッドが企業から出荷され始めた。また、STOは超伝導量子回路のマイクロ波源としても注目されている。

• 磁気抵抗メモリ（MRAM）

スピンホール効果あるいはラシュバ型スピン軌道相互作用を用いることで高効率の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があるが、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。

STT-MRAMやスピン軌道トルクMRAM（SOT-MRAM）は、書き込みに電流が作る磁界を使う場合に比

べて低消費電力となるものの、ジュール熱によるエネルギー散逸を伴う。一方、電圧誘起磁気異方性変化による電圧トルクを書き込みに用いる電圧制御型スピントロニクスメモリ（Voltage Control Spintronics Memory: VoCSM）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。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。

• スピンMOSFET

スピンMOSFETの論理回路は、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。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。最近、東大グループは、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を組み合わせることにより、擬似スピンMOSFETの作製と良好な特性の室温動作を示した。

• 反強磁性スピントロニクス

反強磁性体やフェリ磁性体はネットの磁化がほぼゼロであり、メモリデバイスのセル間の干渉低減によって高集積化や高速化に有益である。近年、コヒーレントな反強磁性ダイナミクスに基づくスピン輸送と操作が出現し、東大および東北大学のグループがそれぞれ反強磁性の Mn_3Sn にSOTによる情報書き込みに成功したことを報告している。双極子による記録保持から、多極子への展開の可能性を秘めている。

• 原子核スピン流生成と核スピン熱電効果

最近、強い超微細相互作用を有する磁性体材料において、ラジオ波及び熱流を入力とした核スピン流生成とその電氣的検出が実現され、核スピンゼーベック効果と名付けられた。核スピンゼーベック効果は、核スピンの高エントロピー特性により、絶対零度に迫る極低温域（100 mK）で増大する。今後、絶対温度4ケルビン以下の低温域で機能するパワーデバイス、熱センサー、冷却技術へと展開が期待されている。

• スピンメカニクス

物体の力学回転とスピンはスピン回転結合により相互作用し、スピンを回転の軸にそろえる効果（バーネット効果）を生む。これを用いると、物体回転によるスピン制御や、スピンによる回転の検出（ジャイロセンサー）への応用が期待される。

さらに、最近我が国のグループから、スピン流注入によってスピンのゆらぎを制御することで磁性体材料の体積を変調する新原理（スピン流体積効果）が実証され、微小化が進む精密機器部品において、スピントロニクス分野の知見を用いた新たな材料開発、力学素子作製・制御の可能性が示された。

• 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・新デバイス開発を目指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 Mn_3Sn や Mn_3Ge 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の新しい方向性が切り拓かれつつある。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。

・量子スピン液体を用いたスピントロニクス

2017年に1次元ラッティンジャー量子スピン液体系におけるギャップレス素励起「スピノン」によるスピン流が観測された。その後2021年に、1次元スピン鎖におけるスピンのダイマー状態（スピンの2個ずつ強く結合した状態）における素励起「トリブロン」によるスピン流が実証され注目を集めている。スピノンやトリブロンを示す物質群は、磁気秩序がないために周囲の回路やデバイスに磁気的影響を与えず、かつ原理的には原子レベルまでダウンサイズ可能であるという特徴を有している。

・非線形コンピューティング

スピン波（マグノン）は強い非線形性を示すため非線形コンピューティングの媒体として有望である。近年日本のグループから、スピン波の非線形性を用いた確率的ビットが提案・実証されている。さらに、スピン波の非線形ゆらぎを用いた超高感度磁場測定や新たな量子コンピューティング技術の基盤となることが期待されており、東北大と産総研において、それぞれ脳型コンピューティングをターゲットにした研究開発に力が入れられている。スピントロニクス分野のAIハードウェアに関する研究は米国、ドイツ、フランスをはじめ世界中の大きな潮流となっている。

・マグノンスピントロニクス

磁性体中のマグノンを情報担体として利用しようとする研究分野である。マグノンの位相は、コヒーレンスが数百ナノ秒で消失してしまうため、従来のスピントロニクスでは活用されてこなかった。しかし、近年の超高速パルスレーザー技術の進展により、ごく短時間での磁化ダイナミクスの励起や観測が可能となってきたため、マグノンの位相コヒーレンスを利用した新たな研究領域の創出が期待されている。応用として、マグノン伝搬による不揮発性マグノンメモリなどが検討されている。将来的にはマグノンを利用したテラヘルツ級の高速デバイス実現の可能性もある。

・計算科学を用いたスピントロニクス材料探索

機械学習や量子アニーリングによって、磁気抵抗効果素子の特性改善を狙ったハーフメタル材料の探索や、大きなTMRの実現を目指した研究開発が行われている。さらには薄膜成長やデバイス用ヘテロ構造形成のためのプロセスインフォマティクスも広く活用されると予想される。強磁性材料では、計算科学や放射光を用いたナノ測定の高度化に支えられて多元合金・新規化合物が再び着目されている。

[注目すべき国内外のプロジェクト]

[日本]

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气的、電氣的、光学的、熱的、機械力学的なスピン変換機能の開拓を目指す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。2020年開始のCREST「情報担体を活用した集積デバイス」(研究総括: 平本俊郎)においてもスピントロニクスは重要な分野の一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リソグラフィ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。

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一つとして取り上げられた。これを受け「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た。

さらに、文部科学省次世代X-nics半導体創生拠点形成事業の東北大学「スピントロニクス融合半導体創出拠点」では、東北大学国際集積エレクトロニクス研究開発センター(CIES)の設備群を活用し、スピントロニクスを中核に据えた、新材料・素子・回路・アーキテクチャ・集積化技術の研究開発を推進している。

日本学術会議の提言「未来の学術振興構想(2023年版)」では、「グランドビジョン⑪: 数学・数理科学・量子情報科学が切り拓く未来社会」において「スピントロニクス・量子情報学術研究基盤と連携ネットワーク」として、スピントロニクスの学理と要素技術を、20～30年でより進化させ互いに融合していくことにより、さらに高度な学術と技術、新機能デバイスを創製することが示されている。

[米国]

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。中でも、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、ジョンホプキンス大学、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)が参画した。

[欧州]

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目指した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目指すTopological materials: New Fermions, Realization of Single Crystals and their Physical Properties(TOPMAT、2017～2022年)が行われた。欧州の学術・産業関係者が参加しているSpinTronicFactory(STF)は、欧州磁性協会(EMA)およびIEEE磁気学会と協力し、将来のチップにおける磁性材料の位置づけを明確化する活動を2023年に開始している。

また、ドイツにおいてはDFG(ドイツ研究振興協会)支援の下、スピントロニクスに関する新しい研究分野開拓を目指した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 Skirmionics: 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。フランスでは France 2030の優先プログラムとして2021に PEPR SPIN exploratory program が取り上げられた。

(5) 科学技術的課題

スピン軌道トルク (SOT) は実用化の道筋がある程度見えてきた一方で、重要な課題がまだ多く残されている。まず、SOTの物理メカニズムが必ずしも十分には解明されていない。スピンホール効果のようなバルクの寄与と、ラシュバ効果のような界面の寄与の両方があるとされているが、微視的メカニズムには多くの議論がある。種々多彩な理論モデルが発表されており、しっかりとした取り組みが必要である。つぎに SOT を利用したデバイス構造について、微視的ではなく半古典的な範囲においても、アンチダンピングトルクとフィールドライクトルクがデバイス動作にどのように寄与して、反転電流の低減や書き込みエラーレートの低下に繋がられるかも明確でない。さらに、材料選択に関しては、Ta や W は有力な SOT 材料であるが、電気抵抗率が高いことが集積デバイス化への一つの障碍となっている。トポロジカル物質は非常に魅力的であるが、輸送メカニズムや製造プロセスとの兼ね合いを考慮する必要がある。

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、高い強磁性転移温度 (TC) 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nde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、高いトランジスタ性能、平行磁化と反平行磁化の違いによる大きな MR 比や磁気電流比など、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。

異分野との融合も重要な課題である。特に注目されるのが光物性・光技術である。原理的に電子スピンと光の間の相互作用は弱いと、これらを融合することによる新現象・新機能の創出は容易ではないが、突破口となり得る研究も少なくない。結晶欠陥や分子性物質の利用は、基礎的観点での一つの攻めどころである。また、円偏光によるスピン操作、具体的には光学的磁化反転はメモリやストレージへの応用が展望できる。近年、スピン軌道相互作用に関わる物理が大きな発展を見せているものの、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、スピンカ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、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が、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。そのため、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である。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一つである。

経済安全保障の観点からは、スピントロニクスはメモリ等の ICT だけでなく、磁気センシングの高感度化やモーター等の高効率化など幅広い用途に活用可能という点で、デュアルユース性や公共性が高いと言える。

2.3

俯瞰区分と研究開発領域
ICT・エレクトロニクス応用

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	◎	→	・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、核スピントロニクス、スピンメカニクスなどの新しい概念に基づく研究開発が成果を上げ始めている。
	応用研究・開発	○	→	・複数の企業がMRAMの生産を開始した。企業のより一層の寄与が必要である。
米国	基礎研究	◎	↗	・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。とりわけ、二次元物質を利用した新規スピントロニクス機能の開拓が盛んに進められている。
	応用研究・開発	◎	↗	・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	◎	→	・フランス、ドイツ、イギリス、オランダ等を中心に良質なスピントロニクスの基礎研究が展開されており、スピン波を利用した計算処理技術などの基礎開拓が進んでいる。
	応用研究・開発	○	↗	・グラフェン・フラッグシップの活動を支援する欧州委員会の資金援助により、二次元物質を利用したMRAM素子の開発に向けた研究が行われている。
中国	基礎研究	◎	↗	・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。 ・潤沢な研究資金と最新機器を活用し、米国・欧州帰りの研究者が活発に研究を行っており、高いポテンシャルを有する。
	応用研究・開発	△	↗	・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おり今後国家的事業として一気にアクティビティが高まる可能性がある。
韓国	基礎研究	○	↗	・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。
	応用研究・開発	○	↗	・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。
その他の国・地域	基礎研究	○	↗	・シンガポールのA*STARがスピントロニクス研究に力を入れている。
	応用研究・開発	◎	↗	・台湾の大手ファウンドリがMRAMの量産体制を整備した。

↗：上昇傾向、→：現状維持、↘：下降傾向

2) G. Binasch, et al., "Enhanced magnetoresistance in layered magnetic structures with

- antiferromagnetic interlayer exchange,” *Physical Review B* 39, no. 7 (1989) : 4828., <https://doi.org/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., <https://doi.org/10.1103/physrevlett.61.2472>.
 - 4) Terunobu Miyazaki and Nobuki Tezuka, “Giant magnetic tunneling effect in Fe/Al₂O₃/Fe junction,” *Journal of Magnetism and Magnetic Materials* 139, no. 3 (1995) : L231-L234., [https://doi.org/10.1016/0304-8853\(95\)90001-2](https://doi.org/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., <https://doi.org/10.1103/physrevlett.74.3273>.
 - 6) Ken-ichi Uchida, et al., “Thermoelectric Generation Based on Spin Seebeck Effects,” *Proceedings of the IEEE* 104, no. 10 (2016) : 1946-1973., <https://doi.org/10.1109/JPROC.2016.2535167>.
 - 7) Andrii V. Chumak, et al., “Advances in Magnetism Roadmap on Spin-Wave Computing,” *IEEE Transactions on Magnetics* 58, no. 6 (2022) : 0800172., <https://doi.org/10.1109/TMAG.2022.3149664>.
 - 8) Yuki Shiomi, et al., “Spin pumping from nuclear spin waves,” *Nature Physics* 15 (2019) : 22-26., <https://doi.org/10.1038/s41567-018-0310-x>.
 - 9) Takashi Kikkawa, et al., “Observation of nuclear-spin Seebeck effect,” *Nature Communications* 12 (2021) : 4356., <https://doi.org/10.1038/s41467-021-24623-6>.
 - 10) Daichi Hirobe, et al., “One-dimensional spinon spin currents,” *Nature Physics* 13 (2017) : 30-34., <https://doi.org/10.1038/nphys3895>.
 - 11) Yao Chen, et al., “Triplon current generation in solids,” *Nature Communications* 12 (2021) : 5199., <https://doi.org/10.1038/s41467-021-25494-7>.
 - 12) Hiroki Arisawa, et al., “Observation of spin-current striction in a magnet,” *Nature Communications* 13 (2022) : 2440., <https://doi.org/10.1038/s41467-022-30115-y>.
 - 13) Hiroyuki Chudo, et al., “Observation of Barnett fields in solids by nuclear magnetic resonance,” *Applied Physics Express* 7, no. 6 (2014) : 063004., <https://doi.org/10.7567/APEX.7.063004>.
 - 14) Masaki Imai, et al., “Angular momentum compensation manipulation to room temperature of the ferrimagnet Ho_{3-x}Dy_xFe₅O₁₂ detected by the Barnett effect,” *Applied Physics Letters* 114, no. 16 (2019) : 162402., <https://doi.org/10.1063/1.5095166>.
 - 15) Takahiko Makiuchi, et al., “Parametron on magnetic dot: Stable and stochastic operation,” *Applied Physics Letters* 118, no. 2 (2021) : 022402., <https://doi.org/10.1063/5.0038946>.
 - 16) Tomosato Hioki, et al., “State tomography for magnetization dynamics,” *Physical Review B* 104, no. 10 (2021) : L100419., <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.104.L100419>.
 - 17) Hiroki Shimizu, et al., “Numerical study on magnetic parametron under perpendicular excitation,” *Applied Physics Letters* 120, no. 1 (2022) : 012402., <https://doi.org/10.1063/5.0063103>.
 - 18) Hyunsoo Yang, et al., “Two-dimensional materials prospects for non-volatile spintronic memories,” *Nature* 606, no. 7915 (2022) : 663-673., <https://doi.org/10.1038/s41586-022-04768-0>.

2.3

俯瞰
区分と研究開発領域
ICT・エレクトロニクス応用

- 19) 国立研究開発法人科学技術振興機構 (JST)「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」CREST, https://www.jst.go.jp/kisoken/crest/research_area/ongoing/bunyah30-3.html, (2023年1月6日アクセス)。
- 20) 国立研究開発法人科学技術振興機構 (JST)「トポロジカル材料科学と革新的機能創出」さきがけ, https://www.jst.go.jp/kisoken/presto/research_area/ongoing/bunyah30-3.html, (2023年1月6日アクセス)。
- 21) 国立研究開発法人科学技術振興機構 (JST)「情報担体を活用した集積デバイス・システム」CREST, https://www.jst.go.jp/kisoken/crest/research_area/ongoing/bunya2020-3.html, (2023年1月6日アクセス)。
- 22) 国立研究開発法人科学技術振興機構 (JST)「情報担体とその集積のための材料・デバイス・システム」さきがけ, https://www.jst.go.jp/kisoken/presto/research_area/ongoing/bunya2020-4.html, (2023年1月6日アクセス)。
- 23) 国立研究開発法人科学技術振興機構 (JST)「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」未来社会創造事業, <https://www.jst.go.jp/mirai/jp/program/large-scale-type/theme08.html>, (2023年1月6日アクセス)。
- 24) Satoru Nakatsuji, Naoki Kiyohara and Tomoya Higo, “Large anomalous Hall effect in a non-collinear antiferromagnet at room temperature,” *Nature* 527, no. 7577 (2015) : 212-215., <https://doi.org/10.1038/nature15723>.
- 25) 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>, (2023年1月6日アクセス)。
- 26) 文部科学省研究環境基盤部会 学術研究の大型プロジェクトに関する作業部会「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」文部科学省, https://www.mext.go.jp/b_menu/shingi/gijyutu/gijyutu4/toushin/1388523_00001.htm, (2023年1月6日アクセス)。
- 27) Secrétariat général pour l’investissement (SGPI), “France 2030: 600 millions d’euros pour 13 nouveaux programmes de recherche,” Gouvernement, <https://www.gouvernement.fr/france-2030-600-millions-d-euros-pour-13-nouveaux-programmes-de-recherche>, (2023年1月6日アクセス)。
- 28) Luqiao Liu, et al., “Spin-Torque Switching with the Giant Spin Hall Effect of Tantalum,” *Science* 336, no. 6081 (2012) : 555-558., <https://doi.org/10.1126/science.1218197>.
- 29) Nguyen Huynh Duy Khang, Yugo Ueda and Pham Nam Hai, “A conductive topological insulator with large spin Hall effect for ultralow power spin-orbit torque switching,” *Nature Materials* 17 (2018) : 808-813., <https://doi.org/10.1038/s41563-018-0137-y>.
- 30) P. A. V. der Heijden, et al., “Magnetic sensor using inverse spin hall effect,” US9947347B1 (2018)。
- 31) Tomoya Higo, et al., “Perpendicular full switching of chiral antiferromagnetic order by current,” *Nature* 607, no. 7919 (2022) : 474-479., <https://doi.org/10.1038/s41586-022-04864-1>.
- 32) Yutaro Takeuchi, et al., “Chiral-spin rotation of non-collinear antiferromagnet by spin-orbit torque,” *Nature Materials* 20 (2021) : 1364-1370., <https://doi.org/10.1038/s41563-021-01005-3>.
- 33) Dongjoon Lee, et al., “Orbital torque in magnetic bilayers,” *Nature Communications* 12 (2021) : 6710., <https://doi.org/10.1038/s41467-021-26650-9>.

2.3

俯瞰区分と研究開発領域
ICT・エレクトロニクス応用

- 34) Seungchul Jung, et al., “A crossbar array of magnetoresistive memory devices for in-memory computing,” *Nature* 601, no. 7892 (2022) : 211-216., <https://doi.org/10.1038/s41586-021-04196-6>.
- 35) Julie Grollier, et al., “Neuromorphic spintronics,” *Nature Electronics* 3 (2020) : 360-370., <https://doi.org/10.1038/s41928-019-0360-9>.
- 36) Qiming Shao, Zhongrui Wang and Jianhua Joshua Yang, “Efficient AI with MRAM,” *Nature Electronics* 5 (2022) : 67-68., <https://doi.org/10.1038/s41928-022-00725-x>.
- 37) C.-H. Lambert, et al., “All-optical control of ferromagnetic thin films and nanostructures,” *Science* 345, no. 6202 (2014) : 1337-1340., <https://doi.org/10.1126/science.1253493>.

2.3

俯瞰区分と研究開発領域
ICT・エレクトロニクス応用