

## 2.5.5 トポロジカル材料

### (1) 研究開発領域の定義

トポロジーにもとづく新たな物質観によって導かれる物質群の創出とその基礎学理の構築およびトポロジカル材料を応用した革新的デバイス創出をめざす研究開発領域である。原理的にその性能向上の限界が顕在化しているエレクトロニクスデバイス分野等において新たなパラダイムを築き、Society 5.0を支える基盤強化等への貢献が期待されている。

### (2) キーワード

トポロジカル絶縁体、トポロジカル物性、ワイル磁性体、スキルミオン、量子異常ホール効果、量子スピンホール効果、スピン運動量ロッキング、マヨラナ準粒子、トポロジカル量子コンピューティング、トポロジカルスピントロニクス、トポロジカルフォトンクス

### (3) 研究開発領域の概要

#### [本領域の意義]

トポロジーは位相幾何学という数学の分野で発展してきた学問体系であるが、2000年以降、それを物質系に適用することで、従来の金属・半導体・絶縁体の分類では記述できない新たなタイプの物質相として「トポロジカル物質」が登場した。トポロジカル物質の代表例であるトポロジカル絶縁体においては、物質の内部は絶縁体状態であるにもかかわらず、物質の表面、つまり外部との境界（3次元系であれば表面、2次元系であれば端）にトポロジーに特徴づけられた特異な金属状態が実現している。その金属状態を流れる電子は質量がほぼゼロで、かつスピンの向きを揃えていること（スピン運動量ロッキング）が特徴である。また、トポロジカル絶縁体の派生物質であるトポロジカル超伝導体の中にマヨラナ粒子が存在しうること、トポロジカル半金属の1種であるワイル半金属の中にワイル粒子が存在することなどが相次いで発見されている。これらの準粒子はトポロジカル物質の特異な物性の起源となっている。通常の物質とは異なり、トポロジカル物質には非磁性の欠陥や不純物に対して堅牢（ロバスト）な性質を持つ電子が存在するため、スピントロニクスや量子コンピューティングへの応用に大きな期待が寄せられている。さらに、実空間のトポロジーに起因したスキルミオンは、高密度高速メモリへの応用に向けた精力的な研究が行われている。

#### [研究開発の動向]

本領域では、物質の有する電子構造の成り立ちを基礎的に理解することから始まり、空間群と電子構造を繋ぐ新たな分類を確立しつつある。理論的な観点から、元素を選択するだけで物質の対称性と電子構造の計算結果を表示し、トポロジカルな構造を有するかどうかを示してくれる“Topological Materials Database”もweb上で利用できるようになっている。トポロジカルな電子構造の示す各種物性を基礎的観点から理解することに加えて、それらの制御指針の確立に向けた取り組みが行われている。こうした物質の探索に加えて、薄膜や界面を用いたデバイス化技術の構築も行われつつある。トポロジカルな電子状態に起因する巨大な信号生成や高効率なエネルギー変換、信頼性の高い量子計算技術など高度な情報処理に貢献する技術開発を行っている。最近では、薄膜や界面を精密に合成することで電子構造の制御を通じた物性制御の基礎的応用研究も進んでいる。また、表面状態の示す高効率スピン運動量ロッキングを介した強磁性スピン状態の制御や量子異常ホール状態に生じる非散逸エッジ状態の電子伝導方向制御、マヨラナ準粒子の検証実験が広く行

われ、基礎と応用の両面で着実に研究が進んでいる。

#### (4) 注目動向

##### [新展開・技術トピックス]

###### • 量子異常ホール効果

二次元トポロジカル物質系に生じる1次元のエッジチャネルは非散逸な伝導チャネルとして活用できることが期待される。従来の量子ホール効果では、エッジ状態を形成させるために強い磁場を印加する必要があるため、標準抵抗の応用以外には、電子素子などへの展開を検討することが困難であった。一方、磁性トポロジカル絶縁体では、磁化でエッジチャネルが形成されるため、小さな外部磁場印加によって磁化の方向を制御して、エッジチャネルの伝導を連動させて制御することが可能になる。すでに、磁化と伝導方位の制御技術は低温で実証されている。強磁性転移温度の上昇やさらなる精緻な伝導性制御が実現されることで、低消費電力素子への基礎技術に発展する可能性がある。

量子異常ホール効果のエッジ状態とs波超伝導体との近接効果によって、マヨラナ準粒子を保持することが理論的に示唆されており、実験的にも観測を主張する報告がなされた。再現の報告が待たれる状況ではあるが、マヨラナ準粒子を制御するためのいくつかの手法の1つとして高い注目を集めている。

量子異常ホール効果は2013年の観測以来、表面状態を保持する三次元トポロジカル絶縁体をベースに磁性不純物を添加することで磁氣的相互作用を発現させてギャップを形成し、量子化を実現してきた。この手法では精密なフェルミ準位制御を必要とするため、現象が発現する材料系は薄膜や積層構造に限定されている。加えて、最近では、強磁性体とのヘテロ接合により近接効果を誘起してギャップ形成を行う手法も開発されている。

量子異常ホール効果を実現する方法の開発が進むとともに、新たな物質開拓も成果を挙げている。それら量子異常ホール状態をベースとするトポロジカル物性の制御技術開発としても、エッジ流の制御、巨大な電気磁気効果、マヨラナ粒子の形成など、着実に開発が進められている。

###### • ワイル半金属、ワイル磁性体

ワイル半金属では、物質の結晶構造に由来した偶数個のワイル点を有しており、それぞれがスピンの湧き出しと吸い込みの関係にある。特に、物質の磁性によって創出されるワイル点を持つワイル磁性体は、電子構造と物性の関連について検証が進められている。これらの物質では、ワイル点を持つトポロジカルな電子構造に起因する仮想磁場を利用することで、巨大な異常ホール効果や異常ネルンスト効果が発現する。従来の強磁性体と比較した場合、数十～数百倍程度大きな値を示すことが報告されており、これらの巨大な効果を用いた磁気センサや熱電変換素子の実証研究が進められている。こうした電子素子に加えて、3次元で線形な電子構造に由来する高い電子移動度を利用すべく、触媒反応や水分解反応にワイル半金属を適用する研究も複数報告されている。表面にはワイル点を投影した特徴的なバンド状態（フェルミアーク）も存在するため、化学的な側面での研究も今後増える可能性がある。

###### • スピン流生成と磁化反転

トポロジカル物質群の有する線形な電子状態がもたらすスピン運動量ロッキングを活用したスピン流生成と電流印加による強磁性スピン状態の制御研究が進められている。従来の物質中のスピンホール効果によるスピン流生成に比べて、スピン運動量ロッキングでは高効率にスピン流を生成できることが報告されている。実

際に、強磁性体との接合作製では、三次元トポロジカル絶縁体のみならず、ディラック半金属などでも研究がなされており、低電流密度での磁化反転の実証実験が様々な物質の組み合わせで実現されている。また、磁性を持つワイル半金属中のスピン流生成や磁化反転を伴う制御についての報告も増えている。

#### • スキルミオンメモリ制御

実空間でトポロジーに保護された磁気構造としてスキルミオンが注目されている。B20型構造におけるスキルミオン格子の直接観察以来、結晶構造の対称性から物質探索が進み、スキルミオン格子を実現する物質系がおおいに拡張された。特に、外部磁場ゼロで室温においてスキルミオン格子を安定に保持する物質（Co-Zn-Mn合金など）が発見されたことは、実用化に向けて重要な進展と言える。トポロジカルなスピン構造の開拓としても、新たに3次元構造であるヘッジホック構造が見出され、物質の対称性や磁気的性質との相関によって、サイズや安定性の理解について議論が進められている。評価技術においても、ローレンツ顕微鏡を用いた直接観察や中性子散乱、動的安定性の評価など、詳細な検討が進められている。さらに、金属積層構造や各種の積層構造においても、界面のジャロシンスキー守谷相互作用を活用した磁気スキルミオンの形成が世界中から報告されている。特に、電流印加や熱などの外部刺激を用いて、スキルミオンを動作させる研究が急速に進展している。

#### • シフトカレント、非相反現象

波数空間の電子構造に由来して、実空間で絶縁体でも光照射によって効率的に電流を生成する現象がシフトカレントである。空間反転対称性の破れた強誘電体などを中心に研究されている。半導体を用いた光電効果は、pn接合で電荷制御された界面における光吸収と電荷分離を原理としており、太陽電池への応用が考えられる。一方、シフトカレントは物質中に電荷分布の必要はなく、光吸収によって生成された電荷は波数空間での要請から、実空間で電荷を運ぶことに寄与するため、高速な電荷移動による高効率な光電変換現象として期待されている。

空間反転対称性の破れた界面などにおいて、右向きと左向きの電流や光伝搬の度合いが異なるいくつかの現象が報告されている。ある種のダイオード現象であり、単純な試料構造であるにもかかわらず、信号制御などに利用できる可能性もあり、進展が注目されている。

#### • マヨラナ準粒子探索

マヨラナ準粒子が持つ非可換統計性を用いることで、誤り訂正を大幅に低減したトポロジカル量子コンピューティングが実現できるとして、世界中の研究者がマヨラナ準粒子の探索を進めている。まだ実証はされていないものの、現状では、超伝導とナノワイヤのヘテロ接合系、分数量子ホール系、量子スピン液体、鉄系超伝導の量子渦などでマヨラナ準粒子が存在するのではないかと示唆がなされている。

#### • トポロジカルフォトンクス

電子系のトポロジーの概念をフォトンクスに適用することで、無散乱走行可能な光導波路による低損失かつ高速通信や、伝搬する光の分散関係を制御することで光の遅延回路や光メモリへの応用が進められている。特に最近では、半導体ナノフォトンクスのプラットフォームでの研究がさかんになっている。例えば、半導体ナノフォトンクスを用いたバレーフォニック結晶導波路、蜂の巣構造フォニック結晶やバレーフォニック結晶エッジ状態を用いたレーザ開発、高次トポロジカル状態に対応するコーナー状態を利用した光ナノ共振

器の実現、トポロジカルスローライト導波路の提案などがなされている。

### [注目すべき国内外のプロジェクト]

#### • 日本

2010年から科学研究費助成事業の新学術領域研究において、トポロジーをキーワードとした新しい物理現象の発見および普遍概念の創出をめざした「対称性の破れた凝縮系におけるトポロジカル量子研究」(領域代表者：前野悦輝・京都大学教授、2010～2014年度)が開始された。5年間の研究によって、「トポロジカル量子現象」が世界的にも広く認知されるものとなり、特に超伝導体・絶縁体だけではなく、超流動体・冷却原子系も含めた世界的にも他に例を見ない分野融合型プロジェクトをわが国が世界に先駆けて推進した。さらに2015年度からは、上記新学術領域研究の格段の発展と、トポロジカル物質科学の基礎学理構築をめざして新学術領域研究「トポロジーが紡ぐ物質科学のフロンティア」(領域代表者：川上則雄・京都大学教授、2015～2019年度)が発足した。他には、東北大学原子分子材料科学高等研究機構(WPI-AIMR、拠点長：小谷元子・東北大学教授)における3つのターゲットプロジェクトの1つとして「トポロジカル機能性材料」が取り上げられ、数学者と材料科学者の共同研究が推進された。また、最先端研究開発支援プログラム(FIRST)「強相関量子科学」(中心研究者：十倉好紀・理化学研究所センター長、研究期間：2009～2013年度)や最先端・次世代研究開発支援プログラム(NEXT)「トポロジカル絶縁体による革新的デバイスの創出」(研究代表者：安藤陽一・大阪大学教授(当時)、研究期間：2010～2013年度)においても世界を牽引する研究成果が創出されている。さらに、2018年にはこれまで蓄積された基礎研究成果を元にデバイス応用へ向けた研究を加速することを目的として文部科学省の戦略目標「トポロジカル材料科学の構築による革新的材料・デバイスの創出」が設定された。それを受けて、JSTにおいては戦略的創造研究推進事業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」領域(2018～2025年度、研究総括：上田正仁・東京大学教授)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」領域(2018～2023年度、村上修一・東京工業大学教授)が発足し、トポロジーの概念によって基礎学理からシーズ育成研究、応用研究までを通して統合し、新たな機能を持つトポロジカル材料の開発や小型化、高速化、低消費電力化、耐傷・伸縮性向上などに資する革新的材料およびデバイスの創出をめざした研究開発を推進している。

#### • 米国

#### Microsoft Station Q

Microsoftは、カリフォルニア大学サンタバーバラ校キャンパスにStation Q Santa Barbaraという研究施設を開設し、トポロジカル量子コンピューティングに関する先導的な基礎研究を行ってきた。Station Q Santa Barbaraを率いるのが数学者のMichael Freedmanであり、トポロジーにおいて難問とされるポアンカレ予想が4次元において成立することを証明し1986年にフィールズ賞を受賞した人物である。Station Qでは、数学者、物理学者、コンピュータ科学者、工学者が共同で、物質のトポロジカル相がどのように、頑強でスケラブルな量子コンピュータ・アーキテクチャの構築に使えるかを理解することを目的として、世界中の大学の研究者とも協力しながら基礎研究を進めている。また、Microsoft レドモンド本社のあるStation Q Redmondでは、量子アーキテクチャと量子計算に関する研究を行っており、量子アルゴリズムの開発とそれらの意味を理解することに専念するとともに、スケラブルで誤り耐性のある量子コンピュータのアルゴリズムやプログラムを作るための包括的なソフトウェア・アーキテクチャをデザインすることに打ち込ん

でいる。さらに、世界中の共同研究者と一緒に量子コンピュータを構築するための取り組みを積極的に行っている。例えば、オランダのデルフト工科大学 Leo Kouwenhoven 教授、デンマークのコペンハーゲン大学 ニールス・ボーア研究所 Charles Marcus 教授、スイスのチューリッヒ工科大学 Matthias Troyer 教授、オーストラリアのシドニー大学 David Reilly 教授の 4 氏が、各大学の教授の立場を維持したまま Microsoft にも雇用される形態をとっている。Microsoft は、各大学にそれぞれ Station Q Delft、Station Q Copenhagen、Station Q Zurich、Station Q Sydney を開設し、プロジェクト最高責任者 Todd Holmdahl のもと、トポロジカル量子コンピュータ研究開発に Station Q の総力をあげて研究開発を実施している。

#### Gordon and Betty Moore Foundation

米国 Gordon and Betty Moore 財団は、Emergent Phenomena in Quantum Systems (EPiQS) Initiative として、量子物質における創発現象（電子多体系での高温超伝導、重い電子状態、トポロジカル物性、新しい準粒子の出現など）に関する基礎研究を対象に、第 1 ステージ（2014～2019 年）では実験研究者 19 名（約 2.2 億円/人・5 年）、物質合成専門家 12 名（約 2.0 億円/人・5 年）、理論センターとして 6 大学（ハーバード大学、マサチューセッツ工科大学、スタンフォード大学、UCバークレー校、UCサンタバーバラ校、イリノイ大学アーバナ・シャンペーン校）に約 10 億円/5 年、さらに第 2 ステージ（2020～2025 年）では実験研究者 20 名（約 1.6 億円/人・5 年）、物質合成専門家 13 名（約 1.7 億円/人・5 年）、理論センターとして 8 大学（カリフォルニア工科大学、ハーバード大学、マサチューセッツ工科大学、プリンストン大学、スタンフォード大学、UCバークレー校、UCサンタバーバラ校、イリノイ大学アーバナ・シャンペーン校）に約 9.4 億円/5 年を投資している。プログラムディレクターは Dusan Pejakovic 氏であり、米国内の物性物理学分野の強化とともに若手を含む質の高い研究者の育成を図っている。

#### エネルギー省 (DOE)

米国 DOE が実施する 41 の「Energy Frontier Research Center: EFRC」(約 2.1～4.2 億円/センター・年)のうち、エイムズ研究所の Center for the Advancement of Topological Semimetals (CATS) およびジョンズホプキンス大学の Institute for Quantum Matter (IQM) では、新規トポロジカル材料開発を実施している。

#### • 欧州

ドイツにおいては、ビュルツブルグ大学の Laurens W. Molenkamp 教授、マックスプランク物理学研究所の高木英典教授、および同じくマックスプランク固体化学物理学研究所の Andrew Mackenzie 教授、ケルン大学の安藤陽一教授を中心に、トポロジカル絶縁体、量子スピン液体、トポロジカル超伝導などの研究がさかんに行われている。特に DFG のエクセレンス戦略におけるエクセレンスクラスターの 1 つとして、2019 年よりケルン大学を中心とした「Matter and Light for Quantum Computing: ML4Q」が開始され、トポロジカル量子コンピューティング実現へ向けた研究開発が開始されている（第 1 期は 2025 年まで）。また、英国では工学物理科学研究会議（Engineering and Physical Sciences Research Council: EPSRC）の支援の下、セントアンドルーズ大学、エジンバラ大学、オックスフォード大学、ユニバーシティ・カレッジ・ロンドンが共同し、2011 年から 6 年間、総額 680 万ポンドの研究プログラム TOPNES (Topological Protection and NonEquilibrium States in Strongly Correlated Electron Systems) が推進された。イタリアの CNR-SPIN やロシアのモスクワ物理工科大学 Superconducting TQP lab などでもトポロジカル物質関連の研究が行われている。また、上述の通り、オランダのデルフト工科大学では、Microsoft Station Q の支援の下、トポロジカル量子コンピューティング実現に向けた研究開発を実施している。

## • 中国

上海交通大学の SCCP (Shanghai Center for Complex Physics) においては、2003年にノーベル物理学賞を受賞した Anthony J. Leggett 教授をディレクターに招聘し、100人以上の教職員を抱えて、超高強度レーザー物理、トポロジカル量子物質、高温超伝導、宇宙論、ダークマターなどを対象とした研究開発を推進している。また、1988年の F. D. M. Haldane 氏による理論提唱以降、実験的な観測がなされていなかった量子異常ホール効果を2013年に世界で初めて実証した精華大学 Qi-Kun Xue 教授に2016年9月、第1回未来科学大賞 (中国版ノーベル賞、賞金100万ドル) が授与された。さらに、Qi-Kun Xue 教授を院長とする北京量子情報科学研究院 (Beijing Academy of Quantum Information Sciences: BAQIS) を2017年12月24日に設立した。研究者および技術者合わせて約1200名 (うち、主任研究者 (PI) が約50名) の大所帯であり、4つの研究部 (量子物質科学研究部、量子計算・通信研究部、量子材料・デバイス研究部、量子精密測定研究部) と2つの技術支援プラットフォーム (先端微細加工プラットフォーム、総合計測・評価プラットフォーム)、技術移転・産業化センター、管理部から構成されている。近年の中国の本研究分野に対する研究アクティビティは質・量ともに非常に高くなっていることは注目に値する。

### (5) 科学技術的課題

トポロジカル物質群の示す特徴的な性質は、従来の半導体や絶縁体、磁石にはない機能をもたらす可能性がある。これまでは、電子構造と物性との関わりを体系的に理解することが進められてきた。これらは、特に、物理学分野や物質科学分野での研究者が中心となって推進されている。こうした基礎学術の分野では、実験技術の高度化や複合的な検証が世界的な潮流となっており、計算と実験、合成と評価、合成とデバイスなどの融合研究が必須である。国内では、新学術領域がこうした分野融合や共同研究を推進する役割を果たしてきた。今後、基礎と応用、理学と工学の観点で橋渡しして世界に伍する研究発展を加速させる必要がある。基礎の観点では、demand-drivenの研究展開を模索することも重要と思われる。例えば、物理の分野ではあまり研究されていない、省エネや創エネ、水分解などの触媒、電池などの化学的性質に関連した物質適用の研究があげられる。国内においても、独自の新しい物質や薄膜、界面は多く開発されて合成もされているため、それらの物質の有効性を多方面から検証することが新たな機能開発をもたらす可能性があると考えられる。

物性の応用については、工学分野との連携をより一層推進することが今後の課題である。例えば、スピントロニクス分野でのスキルミオンやワイル磁性体を用いた磁気メモリの開発、量子計算分野でのトポロジカル超伝導素子やマヨラナ粒子制御に関する素子、光学素子分野でのトポロジカル光開発などがあげられる。量子計算技術にトポロジカル物質群を用いることが大きなメリットを有することは自明であるものの、段階的な研究開発を長期的な視野に立って持続する必要がある。そうした技術発展を進めることが困難な要因は、基礎研究における検証から、工学応用に向けた制御技術の確立、単一素子から多数素子への工学発展、などの技術的要点があまりに異なっているためである。1人の研究者が統括して、スタートからゴールまでを牽引することは困難であることが多いため、個々のポイントで強いグループをいかにチームとして連携できる体制を作れるか、が課題と考えられる。

### (6) その他の課題

これまで、内閣府の最先端研究や科研費の新学術領域、JSTのCRESTやさきがけによる主導的研究が行われてきたため、これら技術を企業へと技術移転していくためにも新たな仕組みを検討する段階に来ていると思われる。海外では、マヨラナ粒子を利用する量子計算技術の確立に複数の企業が積極的に乗り出している

一方、日本企業は手つかずといえる状況である。米国では、量子物質や量子計測の基礎研究や技術開発の支援に対して、Gordon and Betty Moore FoundationのEPIQS (Emerging Phenomena in Quantum Systems) プロジェクトの継続が決定されている。一方、国内ではJSTにおけるCREST、さががけが継続しているものの、JSPS新学術領域が終了し、これまでの優位を継続することが困難になる可能性がある。

研究課題の推進に合わせて、人材育成も現在の日本における重要な課題の1つである。新学術領域の推進を通して、当該分野で活躍する博士課程学生や若手研究者を多数育成できており、彼らの研究能力をより一層発揮させる制度設計が求められる。特に、技術の発展をめざす場合には、研究者自身に視野を広げさせ、分野を超えた共同研究を活発に推進させることが必要となる。

### (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"> <li>ワイル半金属・ワイル磁性体の開発がさかん。ネルンスト効果を用いた創エネ研究の基礎に強み。</li> <li>2010年以降、新学術領域が分野を牽引している。特に、トポロジカル超伝導体に関する理論と実験に強み。シフトカレントやスキルミオンについても国内に先駆的な研究推進グループが存在。最近では、トポロジカル光のグループも増加。</li> </ul>
	応用研究・開発	○	↗	<ul style="list-style-type: none"> <li>スピン運動量ロッキングを活用した高効率スピン流生成とその活用方法の検討。ワイル磁性体などを用いたセンサやメモリの応用向け基礎研究が発展途上。</li> <li>マヨラナ粒子を用いたトポロジカル量子コンピューティングが提唱されているが、技術的にはまだ遠い。スキルミオンを用いたメモリなどのデバイス展開が模索。</li> </ul>
米国	基礎研究	◎	→	<ul style="list-style-type: none"> <li>物質開発に強み。ARPESやSTMの先端計測のリーディンググループも分野を牽引。</li> <li>スピン運動量ロッキングの活用についても積極的。スピントロニクス分野の研究者が多く参入して、スピン流生成やスキルミオン駆動の研究を牽引。トポロジカル超伝導の実験は企業を含めて強力に推進。政府系、財団系問わず、量子物質や量子技術の開発に積極的なサポート。</li> </ul>
	応用研究・開発	◎	↗	<ul style="list-style-type: none"> <li>Microsoft Station Qを中心にトポロジカル量子コンピュータ開発に向けた研究開発が活発である。</li> </ul>
欧州	基礎研究	○	→	<ul style="list-style-type: none"> <li>エッジ伝導の制御と応用への可能性を検討。ドイツのMolenkampグループの試料を用いた共同研究が進行。</li> <li>MPIのFelserグループが理論を牽引。物質合成と精密計測を加速させている印象。特にワイル半金属を中心に開拓が進む。</li> <li>Molenkampグループの薄膜試料を用いたマヨラナ粒子検出やエッジ伝導制御の研究が進行。Fertグループを中心に、金属積層薄膜に生成されるスキルミオンの電流駆動など、制御技術開発が進められている。</li> </ul>
	応用研究・開発	○	↗	<ul style="list-style-type: none"> <li>オランダのデルフト工科大学、ドイツのケルン大学などで、トポロジカル量子コンピュータ開発に向けた研究開発がさかんに行われている。</li> </ul>
中国	基礎研究	◎	↗	<ul style="list-style-type: none"> <li>若手研究者らの積極的な分野参入。大型の複合研究機器の導入により、理論家との共同研究を通して、合成と計測が加速的に進められている印象。</li> <li>一旦理論が生まれると、合成から物性計測までスピーディに行える体制が整っている。</li> </ul>
	応用研究・開発	○	↗	<ul style="list-style-type: none"> <li>実用化に向けた大きな動きは見られないが、基礎研究所内に技術移転・産業化センターを設置するなど、今後の活発化していく可能性がある。</li> </ul>

2.5

俯瞰区分と研究開発領域  
物質と機能の設計・制御

韓国	基礎研究	○	→	・特に顕著な動きは見られない。
	応用研究・開発	△	→	・特に顕著な動きは見られない。

(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)
- ・集積フォトニクス (ナノテク・材料分野 2.3.2)
- ・スピントロニクス (ナノテク・材料分野 2.3.3)
- ・量子情報・通信 (ナノテク・材料分野 2.3.6)
- ・量子計測・センシング (ナノテク・材料分野 2.3.7)
- ・マテリアルズ・インフォマティクス (ナノテク・材料分野 2.5.3)
- ・低次元材料 (ナノテク・材料分野 2.5.6)

参考・引用文献

- 1) トポロジカル絶縁体入門 安藤陽一著 講談社
- 2) スピン流とトポロジカル絶縁体 齊藤英治・村上修一著 共立出版
- 3) 科学技術振興機構 研究開発戦略センター「戦略プロポーザル『トポロジカル量子戦略～量子力学の新展開がもたらすデバイスイノベーション』」(CRDS-FY2016-SP-02) (2017年3月), <http://www.jst.go.jp/crds/pdf/2016/SP/CRDS-FY2016-SP-02.pdf> (2021年2月17日アクセス)
- 4) M. Z. Hasan and C. L. Kane, “Colloquium : Topological insulators”, *Review of Modern Physics* 82, no.4(2010) : 3045-3068. doi : org/10.1103/RevModPhys.82.3045.
- 5) O. Vafek and A. Vishwanath, “Dirac Fermions in Solids - from High Tc cuprates and Graphene to Topological Insulators and Weyl Semimetals”, *Annu. Rev. Mat. Sci.* 5 : 83-112 (2014). doi : 10.1146/annurev-conmatphys-031113-133841.
- 6) N. P. Armitage, E. J. Mele and A. Vishwanath, “Weyl and Dirac semimetals in three-dimensional solids”, *Review of Modern Physics* 90(2018) : 015001. doi : 10.1103/RevModPhys.90.015001.
- 7) N. Nagaosa, T. Morimoto and Y. Tokura, “Transport, magnetic and optical properties of Weyl materials”, *Nature Reviews Materials* 5 (2020) : 621-635, doi : 10.1038/s41578-020-0208-y.
- 8) Y. Tokura, K. Yasuda and A. Tsukazaki, “Magnetic topological insulators”, *Nature Reviews Physics* 1 (2019) : 126-143. doi : 10.1038/s42254-018-0011-5.

- 9) N. Nagaosa and Y. Tokura, *Nature Nanotechnology* 8, 899 (2013).
- 10) K. E. Sitte, J. Masell, R. M. Reeve and M. Klaui “Perspective : Magnetic skyrmions—Overview of recent progress in an active research field”, *J. Appl. Phys.* 124 (2018) : 240901. doi : 10.1063/1.5048972.
- 11) X. Zhang et al., “Skyrmion-electronics : writing, deleting, reading and processing magnetic skyrmions toward spintronic applications”, *J. Phys. : Condens. Matter.* 32, no.14 (2020) : 143001. doi : 10.1088/1361-648X/ab5488.
- 12) Database, <https://www.topologicalquantumchemistry.com/#/> (2021年2月17日アクセス)
- 13) B. Lian, J. Wang and S. C. Zhang, “Edge-state-induced Andreev oscillation in quantum anomalous Hall insulator-superconductor junctions”, *Phys. Rev. B* 93 : 161401 (2016). doi : 10.1103/PhysRevB.93.161401.
- 14) Q. L. He et al., “Chiral Majorana fermion modes in a quantum anomalous Hall insulator-superconductor structure”, *Science* 357 (2017) : 294-299. doi : 10.1126/science.aag2792.
- 15) M. M. Otrokov et al., “Prediction and observation of an antiferromagnetic topological insulator”, *Nature* 576 (2019) : 416-422, doi : 10.1038/s41586-019-1840-9.
- 16) Y. Deng et al., “Quantum anomalous Hall effect in intrinsic magnetic topological insulator MnBi<sub>2</sub>Te<sub>4</sub>”, *Science* 367, no. 6480 (2020) : 895-900. doi : 10.1126/science.aax8156.
- 17) E. Liu et al., “Giant anomalous Hall effect in a ferromagnetic Kagomé-lattice semimetal”, *Nature Physics* 14, no.11 (2018) : 1125-1131. doi : 10.1038/s41567-018-0234-5.
- 18) L. Ye et al., “Massive Dirac fermions in a ferromagnetic kagome metal”, *Nature* 555, no.7698 (2018) : 638-642. doi : 10.1038/nature25987.
- 19) S. N. Guin et al., “Zero - Field Nernst Effect in a Ferromagnetic Kagome - Lattice Weyl - Semimetal Co<sub>3</sub>Sn<sub>2</sub>S<sub>2</sub>”, *Advanced Materials* 31, no. 25 (2019) : 1806622. doi : 10.1002/adma.201806622.
- 20) A. Sakai et al., “Giant anomalous Nernst effect and quantum-critical scaling in a ferromagnetic semimetal”, *Nature Physics* 14 (2018) : 1119-1124, doi : 10.1038/s41567-018-0225-6.
- 21) K. Kuroda et. al., “Evidence for magnetic Weyl fermions in a correlated metal”, *Nature Materials* 16 (2017) : 1090-1095, doi : 10.1038/nmat4987.
- 22) C. R. Rajamathi et al., “Weyl Semimetals as Hydrogen Evolution Catalysts”, *Advanced Materials* 29 (2017) : 1606202. doi : 10.1002/adma.201606202.
- 23) G. Li et al., “Surface states in bulk single crystal of topological semimetal Co<sub>3</sub>Sn<sub>2</sub>S<sub>2</sub> toward water oxidation”, *Science Advances* 5 (2019), no.8 : 9867. doi : 10.1126/sciadv.aaw9867.
- 24) A. Soumyanarayanan, N. Reyren, A. Fert and C. Panagopoulos, “ Emergent phenomena induced by spin-orbit coupling at surfaces and interfaces”, *Nature* 539, no.7630 (2016) : 509-517. doi : 10.1038/nature19820.
- 25) Y. Fan and K. L. Wang, “Spintronics Based on Topological Insulators”, *SPIN* 6, no.2 (2016) : 164001. doi : 10.1142/S2010324716400014.
- 26) Z. -K. Shao et al., “A high-performance topological bulk laser based on band-inversion-

2.5

俯瞰区分と研究開発領域  
物質と機能の設計・制御

induced reflection”, *Nat. Nanotechnol.* 15(2020) : 67-72, doi : 10.1038/s41565-019-0584-x .  
27) H. Yoshimi et al., “Slow light waveguides in topological valley photonic crystals”, *Opt. Lett.* 45, no.9 (2020) : 2648-2651. doi : 10.1364/OL.391764.