

ATTAATC A AAGA C CTA ACT CTCAGACC  
AAT A TCTATAAGA CTCTAACT  
CTCGCC AATTAATA  
TTAATC A AAGA C CTA ACT CTCAGACC  
AAT A TCTATAAGA CTCTAAC  
TGA C CTA ACT CTCAGACC

CRDS-FY2016-SP-02

# 戦略プロポーザル トポロジカル量子戦略

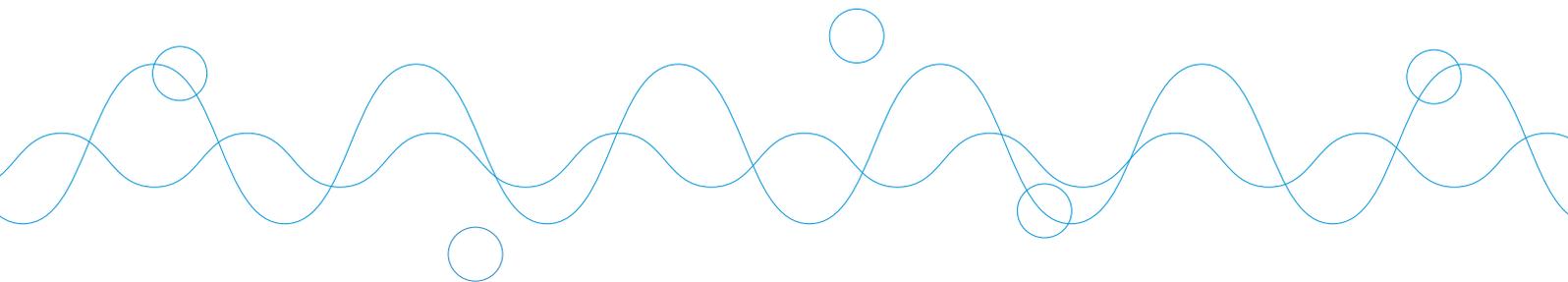
～量子力学の新展開をもたらすデバイスイノベーション～

## STRATEGIC PROPOSAL

### Topological Quantum Matter Initiative

- Device Innovation by New Developments in Quantum Physics -

0101 000111 0101 00001  
01 0001 0000110  
0101 11  
0101 000111 0101 00001  
001101 0001 0000110  
0101 11  
00110 11111100 00010101 011



研究開発戦略センター（CRDS）は、国の科学技術イノベーション政策に関する調査、分析、提案を中立的な立場に立って行う公的シンクタンクの一つで、文部科学省を主務省とする国立研究開発法人科学技術振興機構（JST）に属しています。

CRDS は、科学技術分野全体像の把握（俯瞰）、社会的期待の分析、国内外の動向調査や国際比較を踏まえて、さまざまな分野の専門家や政策立案者との対話を通じて、「戦略プロポーザル」を作成します。

「戦略プロポーザル」は、今後国として重点的に取り組むべき研究開発の戦略や、科学技術イノベーション政策上の重要課題についての提案をまとめたものとして、政策立案者や関連研究者へ配布し、広く公表します。

公的な科学技術研究は、個々の研究領域の振興だけでなく、それらの統合によって社会的な期待に応えることが重要です。「戦略プロポーザル」が国の政策立案に活用され、科学技術イノベーションの実現や社会的な課題の解決に寄与することを期待しています。

さらに詳細は、下記ウェブサイトをご覧ください。

<http://www.jst.go.jp/crds/about/index.html>

## エグゼクティブサマリー

「トポロジカル量子戦略」とは、近年急速に発展しているトポロジカル物質群およびトポロジエに付随して発現する多彩な物性に関する研究開発に着目し、そこで生じている量子力学の新たな展開を加速すると共に工学応用の実現を目指す研究開発戦略である。具体的な応用先は、量子コンピューティングやスピントロニクス、フォトニクス等であり、従来の技術的枠組みを超える新規な概念を導入することでデバイス革新を誘起し、将来の超スマート社会へ貢献する。現在、情報通信技術や人工知能技術の進展を支える電子デバイスに対する微細化・高速化・低消費電力化への要請が世界的に高まり続けている。しかしながら、ムーアの法則の終焉が認識されつつあるように、既存のデバイスや技術では性能向上の限界が顕在化しており、新しい技術的なパラダイムが希求されている。このような状況の中、限界突破を目指すアプローチの一つとしてトポロジカル物質群が示す特異な現象・機能を活用することで、デバイスイノベーションを起こそうとする研究開発戦略を提案する。

これまでのエレクトロニクスの進展を支えてきた CMOS (Complementary Metal Oxide Semiconductor) は、微細化の物理的限界、特性ばらつきの増大、素子の消費電力増大などの限界が見え始めており、この限界を突破するためには主に 3 つの研究開発の方向性があるとされる。1 つ目は、様々な機能のデバイス (CMOS、スピンデバイス、フォトニックデバイスなど) を 3 次元的に集積化する流れである。2 つ目は、ニューロモルフィックコンピューティング、量子コンピューティングなどに代表される、新アーキテクチャを取り入れるアプローチである。3 つ目は、デバイスを構成する材料そのものを見直そうとするものであり、トポロジカル絶縁体やグラフェンのような新物質の持つ電子的な特性を活かし、消費電力削減と超高速化を同時に可能にする革新デバイスを創製しようとする流れである。本提言では、トポロジカル絶縁体に起源を発する新規なトポロジカル物質群がデバイスやアーキテクチャの革新をもたらさうという観点から、2 つ目と 3 つ目の流れに着目する。特に、トポロジカル物質群とトポロジエに付随して発現する多彩な物性を出発点とし、量子コンピューティングや不揮発性メモリ、通信用光集積回路開発等に革新をもたらすことが目標となる。

トポロジエ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り、2000 年以降、それを物質系に適用することで、これまでの金属、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」が示された。トポロジカル物質の代表例であるトポロジカル絶縁体は、物質の内部が絶縁体であるにもかかわらず、物質の表面、外部との境界に電子の伝導状態を有する。これはトポロジエに特徴付けられた特異な電子状態に起因する。このように、トポロジエの概念を用いて物質を分類し直すことで、従来の物質観とは異なる新たな考えや観点が生まれつつある。このことは、新規物質のみならず既知物質においても、新現象や新機能が見出される可能性を意味しており、実用化検討の候補対象となる物質群が大きく拡張されることが期待される。

そのような背景から、本提言では物質が持つトポロジカルな性質を活用した具体的な工

学応用へ向けた技術開発と、関連する学術基盤の一層の強化を掲げる。研究開発戦略を実行する上で取り組むべき研究開発課題は、「理論体系の構築」「物質創製・制御基盤技術開発」「デバイス応用技術開発」の3つで構成される。現在まで、トポロジカル物質群の発見や現象は、理論研究が先行してその存在を予測し、実験によって確認されてきた。今後の工学応用を実現するためには、理論を体系的に構築し、トポロジカル物質群が活躍するデバイス工学の舞台を磐石にすることが不可欠である。さらに、新しい物質の創製と、材料・工学的な制御技術、その際同時に求められる新たな計測・評価技術を開発することが必要である。

具体的な応用先として量子コンピューティング、スピントロニクス、フォトニクスの3つをまずは念頭におくが、さらなる新概念の創出も期待されることから、例えば、フォノンニクス、メカニクス、化学反応など、新分野の応用展開可能性についても検討する。

トポロジカル量子戦略の研究開発にあたって、学術分野としては物性物理学・数学・素粒子物理学の連携が必要となる。さらにデバイス応用のために、電子・電気系や計測系の工学と連携して取り組まなければならない。つまり、これまで行われてきた基礎研究から研究開発のステージを一段上げるギアチェンジが求められる。そのためには、物性物理学、数学、素粒子物理学の学術的知見を備える研究者と、工学研究者や企業研究者が共同して取り組むことが重要である。各々の研究者が持つ学術的好奇心と工学応用への方向性を意図的に合致させる、政策的な仕組みを構築することが必要である。また、リスクの高い新融合分野に参入する若手研究者が日常的に切磋琢磨できる環境を政策的に構築し、長期的な視点でわが国の研究開発力の源泉となる人材を育成することも重要である。

既に Microsoft Research 社においては Station Q という取り組みの中で、世界中の数学、計算機科学、量子物理学の専門家を結集させてトポロジカルな性質を用いた量子コンピューティングの技術開発を開始している。わが国では、まだ産業界の関与は十分といえない状況にあるが、様々な機会を通じてこの分野の動向や技術の重要性、産学連携の可能性等について産業界と情報共有し、プロジェクトや拠点の形成、運営への関与を促進していくことが必要である。そのためには、学のオピニオンリーダー、若手研究者、産業界が互いに情報共有し、今後の研究開発の方向性やシーズとニーズのマッチング等を議論する「将来ビジョン構想会議（仮称）」とも言える場を定期的を開催し、発展させる必要がある。さらに、海外研究機関との戦略的な連携や、人的な交流についても積極的に検討することが重要である。

## Executive Summary

“Topological Quantum Matter Initiative” aims at accelerating the recent development in novel concept of quantum mechanics and realizing its engineering application by noting emerging researches in topological materials group and diverse material properties associated with topology. Typical examples of its application are quantum computing, spintronics, photonics, in which device innovation occurs by introduction of the novel topological concepts to go beyond the present technological framework and contributes to the “super smart society”. Requirements for downsizing, higher speed and lower energy consumption in electronic devices becomes stronger world-wide in recent years, and innovative technical paradigm is strongly desired since limitations become apparent in existing device technologies, as is seen in the end of Moore’s Law for semiconductor devices.

In order to overcome these limitations, we propose an R&D strategy, which leads to innovation utilizing novel phenomena and functions inherent to topological materials. Three major directions to overcome the limitations in CMOS technology are proposed as follows: One is three-dimensional heterogeneous integration of devices with diverse functions, the second is introduction of novel architecture, such as neuromorphic computing or quantum computing, and the third is device innovation by introducing new materials, such as graphene or topological materials. In this proposal we focus on the second and third trends. In particular, we aim at causing innovation in diverse R&D fields such as quantum computing, non-volatile logics, and optical integrated circuits for communication, starting from topological materials and unique physical properties associated with topology.

Topology is the mathematical concept of the properties that are preserved through deformation, twisting, and stretching of objects. By applying the concept of topology to the material system, “topological material” is introduced as a novel type of the material phase, which cannot be described in terms of the conventional category of metal, semiconductor, or insulator. A topological insulator, a typical example of topological material, is a material with non-trivial topological order that behaves as an insulator in its interior but whose surface contains conducting states, which is caused by unique electronic structure at the surface. By reclassifying materials using the topological concepts, a new material viewpoint different from conventional one has gradually arisen. This means topological concepts provide possibilities that new phenomena and new functions are discovered not only in new materials but also in known ones, and that candidate material group leading to practical applications is expected to expand.

Based on considerations described above, this proposal aims at both technical development of engineering application using topological properties in the materials and strengthening of related academic basis. Subjects of R&D to achieve these aims consist of three categories, which are “construction of theoretical framework”, “creation

of new topological materials and establishment of technologies to control unique properties appearing in those materials”, and “development of technology for device application”.

Theoretical prediction of topological materials and their unique physical phenomenon has preceded mostly their experimental discoveries. In order to promote engineering application of those materials, establishment of a theoretical framework and a firm stage of device technology where topological materials play a key role is required. In addition, it is strongly required to develop technologies for creation of novel materials, control of their functions, and characterization of their properties. It is also desired that possibilities should be sought for application of topological materials in the unexploited fields such as phononics, mechanics and chemical reactions, in addition to typical applications such as quantum computing, spintronics and photonics.

In order to conduct R&D for topological quantum initiative, it is strongly expected to establish an interdisciplinary research involving solid state physics, elementary particle physics and mathematics, as well as collaborations with electronics and measurement engineers to realize novel devices based on the topological materials. Therefore, it is expected to change gear to promote researches from the basic stage to higher ones. For this purpose, collaborative works between scientific and engineering researchers are important. Construction of framework of political inducement is needed to purposely direct curiosity-driven researches at academia to engineering application. Long-range viewpoint is also important to cultivate human resources who bear R&D in Japan by establishing suitable environment for young researchers to challenge the risky novel multidisciplinary field.

It should be noted that the Station Q of Microsoft Research gathers professionals of mathematics, computational science and quantum physics together to develop the quantum computing technology utilizing topological phenomena. In contrast, Japanese industries are far behind the approach to quantum computing. Therefore, it is necessary for the research community engaged in R&D of topological materials to announce the importance of this field to industry people and actively promote R&D projects by involving industry people. For this purpose, “future vision concept creating meeting (tentative name)” which consists of opinion leaders, young researchers and industry is necessary to be held regularly with the objectives of sharing the information, discussing the future direction of R&D, and matching of seeds and needs. Furthermore, it is also quite important to establish strategic collaborations and human exchanges with research organizations in overseas.

# 目 次

エグゼクティブサマリー

Executive Summary

1. 研究開発の内容 .....	1
2. 研究開発を実施する意義 .....	8
2-1. 現状認識および問題点 .....	8
2-2. 社会・経済的効果 .....	12
2-3. 科学技術上の効果 .....	14
3. 具体的な研究開発課題 .....	18
4. 研究開発の推進方法および時間軸 .....	29

付録 1. 検討の経緯

付録 2. 国内外の状況

付録 3. 専門用語説明



## 1. 研究開発の内容

「トポロジカル量子戦略」とは、近年急速に発展しているトポロジカル物質群およびトポロジーに付随して発現する多彩な物性に関する研究開発に着目し、そこで生じている量子力学の新たな展開を加速すると共に工学応用の実現を目指す研究開発戦略である。この研究開発の具体的な応用先は、量子コンピューティングやスピントロニクス、フォトニクス等であり、従来の技術的枠組みを超える新規な概念を導入することで新デバイスを実現し、将来の超スマート社会へ貢献する。現在、情報通信技術（ICT）や人工知能（AI）技術の進展を支える電子デバイスに対する微細化・高速化・低消費電力化への要請が世界的に高まり続けている。しかしながら、ムーアの法則の終焉が認識されつつあるように、既存のデバイスや技術では性能向上の限界が顕在化しており、新しい技術的なパラダイムが希求されている。このような状況の中、限界突破を目指すアプローチとしてトポロジカル物質群が示す特異な現象・機能を活用することで、デバイスイノベーションを起こそうとする研究開発戦略を提案する。

図 1-1 は、わが国が今後取り組むべき「トポロジカル量子戦略」の概略を示している。

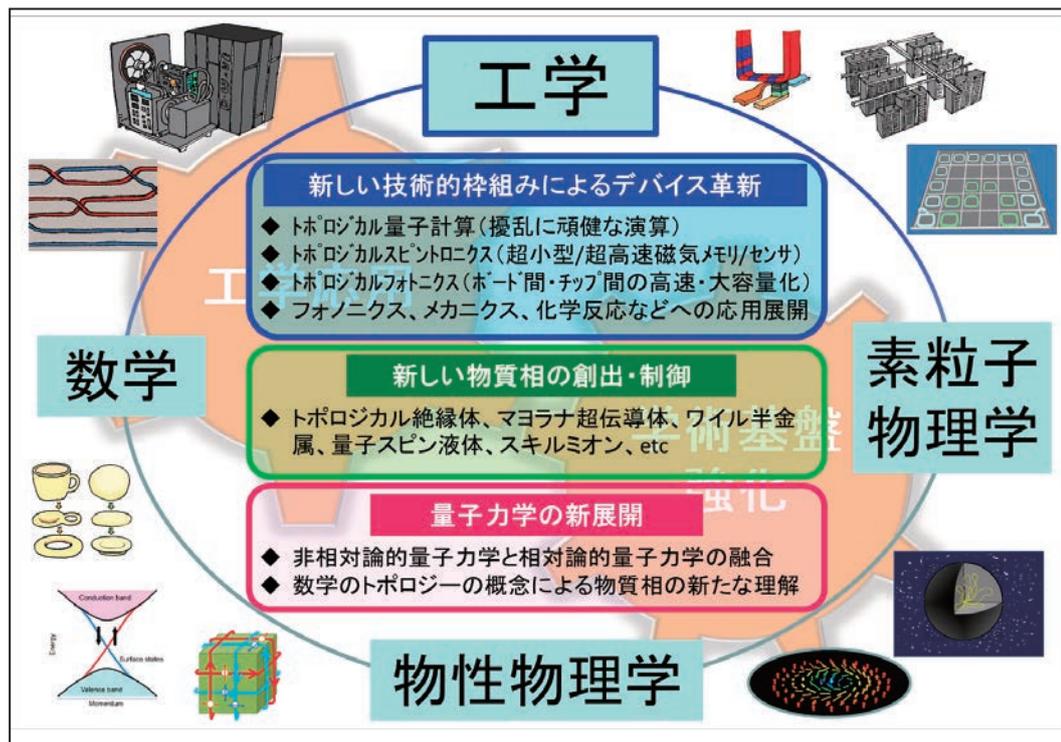


図 1-1 「トポロジカル量子戦略」概略図

本提言では、物質が持つトポロジカルな性質を活用した具体的な工学応用へ向けた技術開発と、関連する学術基盤の一層の強化を掲げる。非相対論的量子力学と相対論的量子力学の融合およびトポロジーの概念による物質相の新たな理解を得ることで「量子力学の新展開」（第1層）を促し、多彩なトポロジカル物質群の発見・デバイス応用へ向けた制御技術を構築する「新しい物質相の創出・制御」（第2層）を通じてもたらされる「新しい技術的枠組みによるデバイス革新」（第3層）を目指した研究開発を戦略的に実施してい

くべきである。以下では、それぞれの層に対応する具体的な研究開発課題である「理論体系の構築」「物質創製・制御基盤技術開発」「デバイス応用技術開発」について概要を記述する（各研究開発課題の詳細については3章を参照）。

## 1. 理論体系の構築

物質科学におけるトポロジカル物質群に関する研究開発は、直近の10年間に学術分野で急速に発展している途上であり、半導体や磁気メモリなどの従来技術の継続的な成長分野とは一線を画した位置付けにある。このトポロジカル物質科学分野は、理論が先行して存在を予測し、実験で実証されてきた数少ない分野の一つである。今後の工学応用を実現する上で欠かせないことは、これら新物質群がデバイスとして活躍する舞台を支える理論的基盤を体系的に構築することである。そのためには、これまで別々に進展してきた物性物理学・数学・素粒子物理学の知識の融合を通じて、従来は理論予測が困難であった、超伝導体、強相関係、アモルファスや準結晶などの無秩序系といった新しいトポロジカル物質群の存在およびその機能を高精度に予測できる理論体系を構築する必要がある。

例えば、既知のトポロジカル物質が持つ特異な性質の原因とされるスピン軌道相互作用に依存しないトポロジカル機能を持つ物質の理論提唱が可能になれば、デバイス化の候補対象となる物質群が格段に広がる。また、物質探索に限定することなく、どのような分子構造、結晶構造であればどのようなトポロジカルな機能が発現するのか、あるいは、応用を実現する上でどのようなデバイス構造が最適なのか、などの工学的視点を含めた理論体系の構築が望まれる。

## 2. 物質創製・評価基盤技術開発

これまでに知られていない新物質の創製とトポロジカル物性を活用する工学的な制御手法、その際同時に求められる新しい計測・評価技術を開発していく必要がある。

### (1) 物質創製・制御技術

2次元トポロジカル絶縁体の端や3次元トポロジカル絶縁体の表面の電子に特徴的な、移動度の高さや散逸に対するロバスト性といった特性を実用に供するためには、室温利用に向けた物質特性の更なる改善と新規物質探索を行う必要がある。新規物質探索では、トポロジカル物質特有の電氣的・磁氣的効果などの新機能の探索や、ワイル半金属と呼ばれる特殊なバンド構造を持つ物質の表面に現れる電子のスピン制御など、従来にはない新しい機能を創出することが課題となる。

トポロジカル絶縁体と超伝導体の接合系やトポロジカル超伝導体に出現すると予想されるマヨラナ粒子の活用による新しい量子コンピューティングの実現に注目が集まっているが、実現するための物質系は未だ確立していない。世界に先駆けて有望な物質系を発見し、誤り訂正を大幅に低減できる量子コンピュータの実用化を現実視できるレベルの特性を達成することが重要である。

トポロジカル物質群において観測されている量子スピンホール効果や量子異常ホール効果などの特性を工学応用へ繋げるためには、物質の薄膜化技術、界面形成技術、デバイスプロセス技術を進展させなければならない。これらの特性の低温での動作実証だけでなく、実用のためには室温近傍においてもその特性を実現することが課題である。ま

た、薄膜化や超構造化および界面形成技術においては、実用面でハードルになるような分子線エピタキシー法などの高度な成膜条件を要する技術だけではなく、スパッタリング法などの既存の成膜技術やバルク合成された物質表面の活用などプロセス面の開拓が必要である。さらに、現在の相変化メモリや太陽電池などの材料系には、トポロジカル物質に近い組成の物質が使われているものもあることから、メモリや太陽電池関連の作製技術やプロセス技術の活用も実用化のための重要なアプローチである。

## (2) 計測・評価技術

トポロジカル物質群はその特異な現象が物質表面や界面に現れることが多く、それらを計測するための手法の開発や既存技術の高度化が欠かせない。特に表面平坦性の制限を緩和するための角度分解光電子分光法 (ARPES) の改良、位相・電流分布などの計測・評価手法、「マヨラナ粒子」の決定的な観測手法、非局所性を観測する新たな計測・評価手法、マルチスケールの高精度計測技術の開発などが課題である。

## 3. デバイス応用技術開発

主にエレクトロニクスを中心とする3つの応用領域 (1) 量子コンピューティング、(2) スピントロニクス、(3) フォトニクスを指向した技術開発を行う。

### (1) 量子コンピューティング

ノイマン型のコンピュータが処理速度とエネルギー消費の限界を迎え、これを抜本的に打破するものとして、量子コンピュータが注目を集めているが、そのボトルネックとなっているのが「誤り訂正」である。これを大幅に低減するためには、「マヨラナ粒子」を用いる「ブレイディング」(通常の量子計算におけるゲート操作に相当) と呼ばれる操作を技術的に確立することが必要である。マヨラナ粒子は、通常とは異なる統計性をもつ準粒子であるため、従来にはない新たなアルゴリズム開発および革新的なアーキテクチャの構築などが課題となる。

### (2) スピントロニクス

既存のメモリ技術の限界を越えるために、将来の高密度ストレージデバイスとして期待され、スピン注入による磁壁移動を利用したレーストラックメモリへのスキルミオン応用や、不揮発性をもち、かつ、ユニバーサルメモリとして注目されている MRAM (不揮発性固体磁気メモリ) へのトポロジカル反強磁性体応用を行う。

スキルミオンはスピンが渦を巻くように整列したトポロジカル磁気構造である。このスキルミオンを用いたレーストラックメモリ実現のためには、実験室レベルの基本動作実証を進めるだけではなく、プロトタイプを作製し、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。さらに、高密度化に向けてスキルミオンの更なる小型化を実現することが課題である。

トポロジカル反強磁性体を用いた MRAM 応用では、情報読み出しに異常ホール効果を利用するが、電子状態のトポロジカルな性質である仮想磁場が高速磁化反転にどの程度寄与しているのかを実験的に検証しなければならない。また、ホール電圧値を実用レベルにまで増大させるために、既存物質の改良、新規物質の探索、デバイス構造の改良

などを行い、室温動作を達成することが必要である。

さらに、トポロジカル絶縁体のスピン運動量ロッキングによる高効率スピン源の利用や、脳磁計などの超高感度磁気センサや熱電素子への応用展開可能性についても追求することが重要である。

### (3) フォトニクス

コンピュータのボード間／チップ間通信に高速・大容量化可能な光を利用することが期待されているが、従来の光導波路においては、導波路構造の不均一性、欠陥などによる光信号の散乱や減衰などが起こることが課題となっている。電子系におけるトポロジーの概念をフォトニクス技術に適用することによって、無散乱走行が可能な光導波路による低損失かつ高速の通信を可能にし、伝播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を目指す。

光（フォトン）は上述してきた電子系とは異なるボース粒子であるため、ボース粒子の統計性に従った理論体系を構築し、ロバスト性の検証、デバイス設計用シミュレーション手法の開発などが必要となる。単一方向伝播光導波路を用いた光集積化回路、光遅延技術を用いた光メモリデバイス、大出力単一モード・レーザやベクトルビームの開発などが挙げられる。そのために、より無散逸性の高いフォトニック結晶の材質・構造改良や新規物質探索、高効率な光閉じ込め・光遅延技術、能動デバイス化へ向けた研究開発を行う。

上記の研究開発課題を実施するためには、学術分野としては物性物理学・数学・素粒子物理学の連携が必要となる。さらにデバイス応用のために、電子・電気系や計測系の工学と連携して取り組まなければならない。

トポロジカル物質に関する研究は、これまで物性物理学が中心となって推進されてきたが、その基礎となっているのは数学や素粒子物理学で培われてきた概念・理論体系である。トポロジカル絶縁体が発見されてからおよそ10年が経過し、比較的容易に物質予測が可能な一体問題の範囲においては基礎科学的な全貌はほぼ明らかになりつつある。今後は、新しい研究開発のステージへとギアチェンジし、様々なデバイス応用に向けた技術的枠組みの変革を促す取り組みを実施することが必要である。そのためには、物性物理学、数学、素粒子物理学の学術的知見を備える研究者と工学研究者や企業研究者などの工学的視点・産業応用的視点を備えた研究者が共同して取り組む体制を構築することが重要である。これら異分野の連携・融合には、各々の研究者が持つ学術的好奇心と工学応用への方向性を意図的に合致させる、政策的な仕組みを導入することが必要である。例えば、複数分野の共同研究を条件とした公募型研究領域の設定や、若手研究者が新分野の研究へ踏み出すことを促進する工夫が求められる。また、中規模拠点を複数形成する拠点形成型の施策も想定される。その際、これまで科研費やその他の施策によって知見や技術が集約されている大学や研究機関には一定の人材交流の基盤が整っているため、それらを活用することも重要な視点となりうる。リスクの高い新融合分野に参入する若手研究者が日常的に切磋琢磨できる環境を政策的に構築することで、長期的な視点で見た場合に、わが国の国際競争力の源泉となる工学応用を目指す人材を育成する。

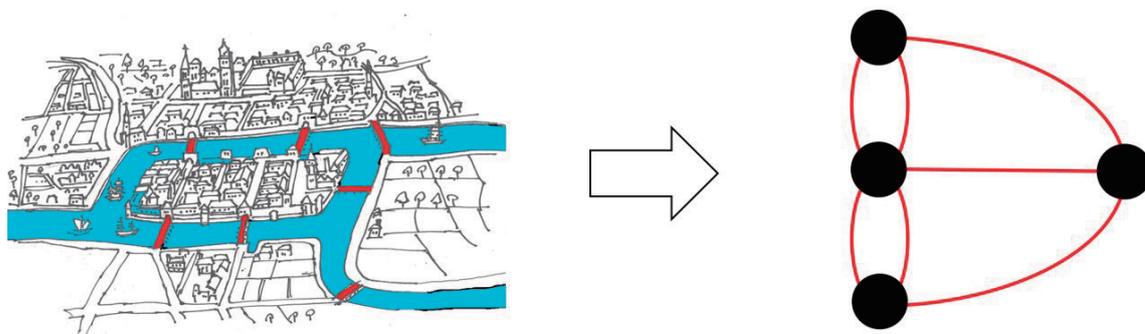
海外に目を向けると、例えば量子コンピュータの研究開発に関しては、D-Wave

Systems 社の世界初商用量子コンピュータの登場以降、Google、Alibaba、IBM、Intel といった世界の名だたるグローバル企業が各国の大型プロジェクトや拠点の形成に主体的に関与し、量子アニーリング方式や量子ゲート方式の量子コンピュータ実現に向けて活発に活動している。一方、Microsoft Research 社においては Station Q という取り組みの中で、米国内だけではなくデルフト工科大学、コペンハーゲン大学、シドニー大学などの世界中の数学、計算機科学、量子物理学の専門家を結集させてトポロジカルな性質を用いた量子コンピューティングの技術開発を本格的に開始している。これに対しわが国では、産業界の関与は十分とはいえない状況にあるが、様々な機会を通じてこの分野の動向や技術の重要性、産学連携の可能性等について産業界と情報共有し、プロジェクトや拠点の形成、運営への関与を促していくことも重要である。同時に、学のオピニオンリーダー、若手研究者、産業界が互いに情報を共有し、今後の研究開発の方向性やシーズとニーズのマッチング等を議論する「将来ビジョン構想会議（仮称）」のような場を定期的を開催する方策も有効的と考えられる。さらに、海外研究機関との戦略的な連携と人的な交流を積極的に進めていくべきである。

【コラム1 トポロジーとケーニヒスベルクの橋の問題】

トポロジー (topology) は数学の一分野であり、何らかの形あるいは空間を連続変形 (伸ばしたり曲げることは許されるが、切ったり貼ったりすることは許されない) しても保たれる性質に焦点を当てたものである。ギリシャ語の topos (位置、場所) と -logy (学) を組み合わせた造語であり、日本語では一般に「位相幾何学」と訳される。例えば、コーヒーカップの形はドーナツの形に連続変形はできるが、ボール (球形) には連続変形できないため、コーヒーカップとドーナツは「穴が一つ」という意味で位相幾何学的には同じ分類 (トポロジー的に同じ) とみなされるが、「穴がない」ボールは別の分類 (トポロジー的に異なる) と言える。

位相幾何学の萌芽的な研究としては「ケーニヒスベルクの橋の問題」が有名である。18世紀初頭、プロイセン王国 (現在のドイツ北部～ポーランド西部) の東部の東プロイセンの首都ケーニヒスベルクに大きな川が流れており、7つの橋がかけられていた (左図)。



あるとき町の人々が「この川にかかっている7つの橋を2度通らずに、全て渡って元の場所に戻ってこられるか。ただし、出発点はどこでもよい。」という疑問を呈したことに對して、数学者のオイラーはこの問題を「一筆書き」の問題として捉え、右

図のように線と点で書き直し、以下のいずれかの条件が成り立つときのみ一筆書きが可能であることを示した。

- 全ての頂点の次数（頂点に繋がっている辺の数）が偶数のとき
- 次数が奇数である頂点の数が2で、残りの頂点の次数は全て偶数のとき

ケーニヒスベルクの橋に関しては上記いずれも該当しないため、「7つの橋を2度通らずに全て渡ることは不可能」という結論に達した。ここでは、「線が繋がっているか」が重要な要素であり、途中で線が曲がっていることや線の長さが短いや長いといったことは関係がない。この「つながり具合を示す幾何学」が後にトポロジー（位相幾何学）の考えにつながったとされている。

## 【コラム2 消えた天才物理学者 Ettore Majorana】

本提言中でしばしば登場する「マヨラナ粒子」は、イタリア・ムッソリーニ政権時代の1937年に Ettore Majorana（1906年生まれ）により理論的に予言された電氣的に中性な粒子であり、かつ、自分自身が反粒子である（つまり粒子と反粒子の区別がつかない）という特異な性質を持つ [1,2]。彼は Enrico Fermi 率いるパニスペルナ研究所に所属し、「Isaac Newton や Galileo Galilei と並ぶ一流である」と Fermi にも認められていた天才物理学者である。しかしながら、その天賦の才を発揮するも周囲との軋轢から徐々に孤立していき、Fermi がノーベル物理学賞受賞後に米国へ移住した1938年、旅行中に突然失踪し、その後行方不明となっている。Majorana の母親がムッソリーニ首相に宛てた嘆願書には、「閣下、高尚な学問をしていたせいで息子は病気になりました…」と書かれていたという [3]。

ムッソリーニ政権時代、Fermi が率いた研究チームは「Ragazzi di via Panisperna（パニスペルナ通りの青年たち）」と呼ばれ、ほとんどのメンバーが1930年当時に10代から20代の若者であった。彼らは、ベータ崩壊の基本原理を発表するなど、その後の原子核研究の発展に貢献した [3]。チームメンバーには、失踪した Majorana の他、Edoardo Amaldi（戦後のイタリア物理学の再建および欧州原子核研究機構（CERN）の設立に貢献）、Bruno Pontecorvo（Fermi を追って米国に亡命し、Fermi とともにマンハッタン計画に協力した後、再びソ連へ亡命してソ連の原子物理学の本拠・ドゥブナ合同原子核研究所の基礎を築いた。1957年ニュートリノ振動を最初に予測）ら がいた。

通常、電子やクォークのような電荷を持った粒子には反粒子が存在し、ディラック粒子と呼ばれている。一方、ニュートリノのように電荷を持たない粒子は、その反粒子が自分自身である（つまり、ニュートリノと反ニュートリノが同一粒子である）としても矛盾のないことが知られており、このような粒子は「マヨラナ粒子」と呼ばれる [2,4]。「マヨラナ粒子」は（相対論的量子力学の枠組みで定式化された）ディラック方程式の実数解として存在し、この解で表される粒子と反粒子は電荷をもたなくなることが、1937年に Majorana によって理論的に報告された [1]。ただし、理論的予言から80年たった現在でも、素粒子物理学の分野では現在のところニュートリノや

ダークマターがこのような粒子の候補物質としてあがっているものの、未だ「マヨラナ粒子」は発見されていない [4]。

しかしながら、物性物理学の分野において、超伝導状態での準粒子の励起が「マヨラナ粒子」として振舞う可能性が指摘され、2012年5月頃から実際に実験によってその証拠が報告され始めている [5]。1938年に忽然と姿を消した Majorana の行方は未だに不明であるが、彼が予言した「マヨラナ粒子」の存在を示す証拠は、80年の時を越えて、我々の前に現れようとしている。これは、まさに「Majorana Returns」 [2] と言っても過言ではない出来事である。

(参考文献)

- [1] E. Majorana, “Teoria simmetrica dell'elettrone e del positrone,” *Il Nuovo Cimento* 14, 171–184 (1937).
- [2] F. Wilczek, “Majorana returns,” *Nature Physics* 5, 614 - 618 (2009).
- [3] ジョアオ・マゲイジョ (著), 塩原通緒 (訳), マヨラナー消えた天才物理学者を追う (NHK 出版, 2013).
- [4] 日本物理学会誌編集委員会 (編), マヨラナ粒子の尻尾をつかめ! 日本物理学会誌 71, 207 (2016).
- [5] V. Mourik et al., “Signatures of Majorana Fermions in Hybrid Superconductor-Semiconductor Nanowire Devices,” *Science* 336, 1003-1007 (2012).

## 2. 研究開発を実施する意義

### 2-1. 現状認識および問題点

ICT や AI 技術の進展を支える電子デバイスは、ますます微細化・高速化・低消費電力化が要請されている。特に、様々な電子機器の消費電力量の増加、スーパーコンピュータやデータセンターなどの大型機器の発熱が、大きな問題の一つとなっている。

これまでのエレクトロニクスの発展を支えてきた CMOS デバイスは、微細化の物理的限界、特性ばらつきの増大、素子の消費電力増大などの限界が見え始めており、この限界を突破するためには3つの方向性があるとされる。1つ目は、様々な機能のデバイス (CMOS、スピンドバイス、フォトリソグラフィデバイスなど) を3次元的に集積化する流れである。2つ目は、ニューロモルフィックコンピューティング、量子コンピューティングなどに代表される、新規のアーキテクチャを取り入れるアプローチによるものである。3つ目は、デバイスを構成する材料そのものを見直そうとするものであり、トポロジカル絶縁体やグラフェンのような新物質の持つ電子的な特性を活かし、消費電力削減と超高速化を同時に可能にする革新デバイスの創製を目指す流れである。1つ目の異種機能デバイスの3次元集積化の流れは、他の2つに比して既に相応の取り組み・技術的段階に来ている。本提言では、トポロジカル絶縁体に起源を発する新規なトポロジカル物質群がデバイス、さらにはアーキテクチャの革新をもたらすとこの観点から、2つ目と3つ目の流れに焦点を当てている。新規なデバイス、アーキテクチャの登場はシステムとして集積化する手法においても変革が要求されることが想定されるが、本提言においては、集積化の前にデバイス、アーキテクチャとしてどのような可能性が提示できるのかに注力している。ここでは、上記のトポロジカル物質群の出現が影響を及ぼす代表的な応用領域として、量子コンピューティング、スピントロニクス、フォトリソグラフィを取り上げる。

1994年に因数分解を超高速で行う量子アルゴリズムが発見されたことを契機として量子コンピュータの研究が加速した。しかし、万能型と呼ばれる量子ゲート方式の量子コンピュータ実現に向けては、量子ビットを用いて計算する際に外界からの擾乱によるエラー発生率が高く、それを防ぐために誤り訂正と呼ばれる特殊な技術が不可欠となる。この誤り訂正のために膨大な数の量子ビットが必要だが、極めて高難度であり、量子ゲート方式の量子コンピュータ実現にとって大きな障壁となっている。

スピントロニクスに関しては、1988年の巨大磁気抵抗効果の発見以降、加速度的に研究開発が推進されている。スピントロニクスを応用したメモリである MRAM は、現在の技術では強磁性体の磁化方向として情報を蓄える方式を採用しているが、強磁性体は磁石と同じ性質を持つことから隣接したメモリセル同士で磁気干渉を起こす可能性があり、高密度化を難しくしている。それを克服すべく様々な研究がなされているが、未だ強磁性体に変わる最適な物質群は見つかっていない。

現状のコンピュータではコンピュータ間、ボード間、さらにはチップ間での同軸ケーブルや金属配線を介した信号伝送の高速化・大容量化に伴って信号遅延、さらには消費電力の増大が深刻な問題になっている。これらの問題の解決のため、コンピュータ間あるいはボード間では既に光ファイバーによる大容量通信が使われ始めているが、これをさらに光導波路を導入してチップ間にまで展開しようとの試みがなされている。しかしながら、光

導波路においては、導波路構造の不均一性、欠陥などによる光信号の散乱や減衰といった問題が生ずる。また、光信号を減衰させることなく、一定時間、微小領域に閉じ込めることが可能になれば、光の遅延回路やメモリ回路が実現でき、光通信用交換機の構造を著しく簡略化できる可能性がある。

今後ますます高性能化、低消費電力化が求められる将来のコンピューティング技術に対し、現状の技術の極限に至るまでの性能追求から、材料、デバイス、アーキテクチャに関する新規な概念の導入に至るまで広範な取り組みが必要になっている。本提言は後者に位置づけられるものであり、物質に関する科学的理解に新たな視点を提示し、従来の技術が依って立つ枠組みを変革する可能性を与える。具体的には、トポロジーの概念に立脚したトポロジカル絶縁体をはじめとするトポロジカル物質群、および、それらに付随して発現する多彩な物性が、量子コンピューティングや不揮発性メモリ開発、通信用光集積回路開発などにゲームチェンジを起こす可能性があることに着目している。このような新しい概念に基づく科学上の発見が新しい技術領域を創出してきたことは歴史が証明するところである。

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り、コラム1に記載の通り、何らかの形を連続変形しても保たれる不変量（トポロジカル数）に焦点を当てたものである。トポロジカル数は整数となることが知られており、コーヒーカップとドーナツの例では、穴の数がトポロジカル数である。2000年以降、トポロジーの概念を物質系に適用することで、これまでの金属、半導体、絶縁体の分類では記述できない新たな物質相として「トポロジカル物質」が示された（コラム3を参照）。トポロジカル物質においては、大きなスピン軌道相互作用によって電子の波動関数の位相にねじれが生じている。そのねじれ具合は必ず整数になるため、これがトポロジカル数に相当する。トポロジカル物質の代表例であるトポロジカル絶縁体は、物質の内部が絶縁体であるにもかかわらず、物質の表面、外部との境界に電子の特異な伝導状態を有するが、これは物質の内部と外部でトポロジカル数が異なることに起因している。このように、トポロジーの概念を用いて物質を分類し直すことで、従来の物質観とは異なる新たな考えや観点が生まれつつある。このことは、新規物質のみならず既知物質においても、新現象や新機能が見出される可能性を意味しており、実用化検討の候補対象となる物質群が大きく拡張されることが期待される。

トポロジカル物質群および物性の研究に関して、特に米国、欧州、中国においては、資金と人材を投入し、研究グループ内に理論、物質開発、計測など一連の技術を集約した体制が構築されている。その結果としてここ数年、電子相関が無視できる一体問題の範疇にあるトポロジカル絶縁体やワイル半金属のような、比較的容易に理論予測可能な新規物質の発見、実験的検証では、米国、中国がリードしている。わが国においては、新学術領域研究内の研究者および個々に分散した物質科学研究者が世界に伍している状況にある。2016年のノーベル物理学賞（詳細はコラム4を参照）は、本研究分野の初期的な理論に対して与えられたものであり、今後は本研究分野が工学応用へ向かって活発化していくことが予想される。

わが国の物性物理学の強みは、理論、多体電子相関効果が重要な系（超伝導や強相関系）

の物質開発、デバイス化する際に重要となる薄膜化技術・超格子化技術・界面制御技術などである。これらの強みはこれまでわが国が世界をリードしてきた高温超伝導や強相関係数などの研究開発において蓄積されてきたノウハウそのものである。一方で、数学は古くからトポロジー（位相幾何学）に強く、素粒子物理学は相対論的量子力学を熟知し、様々な素粒子（マヨラナ粒子、ワイル粒子、ディラック粒子など）の理論提唱に強みがある。しかしながら、現時点においては物性物理学、素粒子物理学、数学との協働が進んでいるとは言えない状況にある。

また、近年、物質のトポロジカルな性質を用いた工学応用の可能性が提案され、まだ小規模ではあるが、工学応用へのトライアルも始まっている。その一つにトポロジカル量子コンピューティングと呼ばれるものがある。電子が持つトポロジカルな性質を利用することで、誤り訂正が大幅に低減された量子計算が可能であることが理論的に提唱されている。Microsoft Research 社は Station Q という取り組みの中でトポロジカル量子コンピューティングの研究開発を本格的に開始している。数学者の M. Freedman 率いる Station Q Santa Barbara を中核とし、Station Q Redmond、Station Q Purdue、Station Q Maryland といった米国内の拠点に加えて、Station Q Delft、Station Q Copenhagen、Station Q Zurich、Station Q Sydney と世界中に拠点を設置し、数学、計算機科学、量子物理学の専門家を結集させた体制を既に構築している。わが国においても、トポロジカル量子コンピューティングやその他の工学応用へ向けた取り組みを本格的に開始すべき時期にきている。

### 【コラム3 量子力学の誕生からトポロジカル物質に至る経緯】

1900年代初頭に誕生した量子力学は、主として分子や原子、あるいはそれらを構成する電子などの微視的な物理現象を記述する理論体系であり、場の量子論を低エネルギー状態に限定した場合の近似形として得られる。また、取り扱う系をミクロな系の集まりとして解析することによって、ニュートン力学では説明が困難な巨視的な現象についても記述することが可能である。量子力学においては、その統計性の違いからフェルミ粒子とボース粒子といった2つの粒子的描像の概念があり、フェルミ粒子の概念はバンド理論の誕生、半導体エレクトロニクス発展へと繋がった。一方で、ボース粒子およびその統計的帰結としてのボース・アインシュタイン凝縮の概念は、超流動、超伝導、レーザの理論的背景となった。高温超伝導の発見を契機として、強い電子間相互作用の重要性が広く認識されるようになり、バンド理論の枠組みでは捉えきれない強相関電子系と呼ばれる新たな学術領域の誕生を促した。

一方、1980年、K. von Klitzing のグループは高移動度の2次元電子系に強磁場を印加することでホール伝導度が量子化する「量子ホール効果」を発見した。電気抵抗の標準値を提供するこの特異な現象に対して、D. J. Thouless らはトポロジーの概念を物性物理学に導入することで理論的に解明することに成功した。その後、物性物理学の歴史の中でトポロジーの概念が表舞台に現れる機会は限定された範囲であったが、2003年に村上・永長・S.-C. Zhang らによって絶縁体であってもスピンホール効果（非磁性の金属や半導体に電場をかけると、電場に対して垂直な方向にスピン流が流れる現象）が起こりうると提唱したことが契機となり、再びトポロジーの概念が

物性物理学の中で脚光を浴びることとなった。スピンホール効果の理論では、スピン軌道相互作用による仮想磁場という相対論的量子論の概念が導入されたことも重要な点である。2005年にC. L. Kaneら、および、S. -C. Zhangらがそれぞれ「量子スピンホール効果」を理論的に提唱し、それを受けて、2007年、L. W. Molenkampのグループは、HgTeをCdTeではさんだ2次元量子井戸構造において、スピン軌道相互作用によるバンド反転が引き起こす量子スピンホール効果を実験的に実証した。さらに同様の現象が3次元系でも起きることをL. Balentsらが理論的に提唱し、これらの物質群を「トポロジカル絶縁体」と命名した。2006年にはL. Fuらによって、 $\text{Bi}_x\text{Sb}_{1-x}$ が3次元トポロジカル絶縁体の候補であること、角度分解光電子分光（ARPES）によって特異な表面状態を観測することが可能であることを理論提唱した。これに基づき2008年にM. Z. HasanグループがARPES測定を行い、この物質が3次元トポロジカル絶縁体であることを実験的に確認した。この頃からトポロジカル絶縁体に関する論文数が爆発的に増え、ホットな研究領域として広く認識されるようになった。3次元トポロジカル絶縁体の表面状態においては電子の進行方向とスピンの向きが直交するスピン運動量ロックングという現象が見られ、ロバストなスピン源として期待されている。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（例えば $\text{Cu}_x\text{Bi}_2\text{Se}_3$ 、 $\text{Sr}_x\text{Bi}_2\text{Se}_3$ など）の中にマヨラナ粒子が存在すること、トポロジカル半金属の1種であるワイル半金属（例えばTaAs）の中にワイル粒子が存在することなどの発見により、物質中に新しいトポロジカルな性質が発現していることがわかり、応用面からも注目されている。これらは、波数空間におけるトポロジーに起因している効果・現象であるが、実空間においても、トポロジーがもたらす現象が観測される。その一例が、スキルミオン（スピンが渦を巻くように整列した磁気構造体）であり、2010年に十倉らによって実験的に観測された。また、J. Seidelらは、強誘電体の分域壁にはトポロジカル欠陥が形成されているとして、誘電分域壁および相境界での伝導パスや大きな光電効果の発現をトポロジーに付随した現象であるとして論じている。さらにフォトニック結晶のエッジにもトポロジカルな光のパスが存在することが実験的に観測されている。

このように、物性物理学をトポロジーという視点で見直してみると、従来からある超伝導、金属、半導体、絶縁体、磁性体、誘電体などの機能性による分類の枠を超えた新たな物質観が浮かび上がることがわかる。この新たな物質観に基づいて、既存技術の限界を超えるエレクトロニクスやコンピューティングの新天地の開拓が望まれている。

他方、トポロジーは、素粒子物理学や数学のような基礎的学問分野においても、新たな領域を拓く重要な役割を果たしつつある。

素粒子物理学においては、主要テーマであるニュートリノを理解するために、「マヨラナ粒子」「ワイル粒子」「ディラック粒子」などの質量をもたない仮想粒子に関する概念が生まれ、その実験的観測が待たれていた。しかし、1998年のニュートリノ振動の観測により、これらの粒子の存在の可能性が極めて低くなった。ところが、物性物理学においては、2次元物質であるグラフェンにおいて、電子がディラック粒子に特徴的な波数空間における線形の分散を持つことが見出され、さらに、先に述べたようにトポロジカル超伝導体にマヨラナ粒子が存在すること、ワイル半金属にワイル

粒子が存在することなど、素粒子実験では実現不可能な素励起（準粒子）が物質中で観測されることが明らかになり、素粒子物理学においてもトポロジカル物質に関する研究が注目されるようになってきた。

数学と物理学の関係に目を向けると、1980年代には場の理論を通じて物理学者と数学者は互いに刺激し合いながら発展してきた。数学に関する最高権威を有するフィールズ賞の多くが数理物理と呼ばれる物理学から生じた数学的問題の解決に対して与えられていることから、物理学と数学は不可分な関係にあるといえる。トポロジカル物質を分類するトポロジカル不変量は整数値をとるが、これは数学における指数定理や非可換幾何学から導かれるチャーン数そのものである。従って、位相幾何学（トポロジー）を物質系に適用したトポロジカル物質の研究から生じた問題が、今度は、数学の分野へ大きなインパクトを与えるものと期待されている。また、数学的知見を活用することで新しいトポロジカル物質を予測することも可能であろう。

以上述べたように、トポロジカル物質群は、物性物理学、素粒子物理学、数学の三者が協働できる絶好の場を提供し、結果として新しい量子力学の理論的枠組みを構築することが期待される。

(参考文献)

安藤陽一（著）、「トポロジカル絶縁体入門」、講談社

齊藤英治・村上修一（著）、「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

## 2-2. 社会・経済的效果

トポロジカル量子戦略に基づく研究開発によって、電子の波動関数の持つトポロジカルな性質から物質相を新たに捉えなおすことが可能となり、新しいエレクトロニクス応用が生まれようとしている。将来期待される社会・経済効果としては、主にエレクトロニクスを中心として3つの応用領域(1)量子コンピューティング応用、(2)スピントロニクス応用、(3)フォトニクス応用、からもたらされる効果が挙げられる。さらに、このような物質群の研究が未成熟である現段階では、想定のとれない偶発的・突発的なイノベーションによって生じる新規な応用領域、例えば化学分野などへの展開も今後は期待される。以下では、代表例として上記3つの応用領域について記載する。

### (1) 量子コンピューティング

量子コンピュータは、従来型のコンピュータでは実質的に解を求めることが不可能な暗号解読や組合せ最適化問題などで解を与えることができ、今後のAIに対して重要な機能を提供できると期待されている。

例えば、AIでは、機械学習によって画像・音声・動画処理、自然言語処理、最適化・推論、シミュレーションを行うことが期待されるが、AIビジネスの2015年度の国内市場は1,500億円であり、2020年度には1兆20億円、2030年度には2015年度比14.1倍の2兆1,200億円に拡大すると予測されている（富士キメラ総研、2016年）。ここでいう

AI ビジネスとは、AI を使った情報サービスや AI 環境を構築するシステムインテグレーション、AI に関連したハードウェアなどを含んでいる。すなわち、量子コンピュータが実現すればこの AI ビジネス市場に入り込むことが想定され、市場の成長・拡大を加速するキラーハードウェアとなることが期待される（※ただし、量子コンピュータの装置単体の市場は現時点で存在しないため、装置市場を予測することはあまり意味をなさない。ここではあくまで量子コンピュータの活用市場を主に想定した記載をしていることに留意が必要である）。想定される活用先は、組合せ最適化問題の高速解法を機械学習に適用することや、量子系の高速度シミュレーション技術をもとにしたタンパク質解析やナノスケール物質のシミュレーションから、新薬・新材料・新デバイスの開発などである。さらに、AI が活用された産業全体の市場規模としては、2030 年時点で 86 兆 9,600 億円になるとの予測がされている（EY 総合研究所、2015 年）。この膨大な市場に量子コンピュータが貢献することが期待されている。

既に、Microsoft、Google、Alibaba、IBM、Intel、HP、NVIDIA といった世界の名だたるグローバル企業は、産学官連携による量子コンピュータの研究開発投資をおこなっていることから、期待の高い将来技術領域であることが窺える。

## (2) スピントロニクス

電子スピンを動作原理に積極的に組み入れたデバイス応用であり、電子スピンの特徴である不揮発性メモリ機能、高感度磁気センシング能力、スピンゼーベック効果あるいはネルンスト効果を用いて、メモリ、センサ、熱電変換素子などへの展開が考えられる。現在、コンピュータに対する低消費電力化への大きな市場ニーズの流れがある中、既存型メモリよりも低い電力消費レベルの次世代メモリへの期待は高く、その世界市場は 2020 年に 370 億ドルに達するとの予測がなされている（米 MarketsandMarkets 社、2015 年）。メモリの低消費電力化を実現するためには、不揮発性動作の導入が有効であり、既に大容量のストレージメモリとしては、MOS（Metal-Oxide-Semiconductor）構造を有する不揮発のフラッシュメモリが広く普及している。不揮発性メモリとしては、上記のフラッシュメモリに加え、抵抗ランダムアクセスメモリ（ReRAM）、相変化メモリ（PCM）、磁気抵抗メモリ（MRAM）、強誘電体メモリ（FeRAM）などがあるが、これらの中で高速の SRAM や DRAM を代替できる可能性のあるメモリは、無限回の書き込みが可能な MRAM に限られる。さらに、MRAM はメモリ応用だけでなくロジック（演算）系のプロセッサにも適用可能であり、これは不揮発の超低消費電力プロセッサの実現が可能になることを意味する。このような新デバイスの市場はまだ存在していないが、既存 CPU 市場が 5 兆円規模であることを考えても、特に低消費電力化が要求される CPU を置き換えると考えれば、数兆円程度を代替する潜在性を有すると考えることができる。

## (3) フォトニクス

フォトニクスは光の科学と応用の総称である。今日のフォトニクスは、家庭、研究機関や産業界・工場などで使われるあらゆる光デバイスの基盤を支えている。例えばレーザは、光ファイバー通信、データ記憶、加工技術や医療技術に活用されている。世界のフォトニクス市場（以下、主にシリコンフォトニクス市場を指す）は、年率 22% で成長し、

2022年に10億7,890万ドルに達すると予測されている（米MarketsandMarkets社、2016年）。フォトンクス技術の成長の主要因は、高速データ転送・データ統合、データ通信、家電などであり、技術的には光導波路、光集積回路、光メモリ、光遅延回路、光変調器、光検出器、レーザ、フィルター等が対象として挙げられる。

本提言の研究開発を実施することによって、無散乱走行が可能な光導波路によるコンピュータのボード間もしくはチップ間の低損失かつ高速の通信が可能になる。さらに高いQ値を持つ導波路が実現できれば、伝播する光の分散関係を制御することで、光の遅延回路、光メモリ応用への道が拓ける。これにより、従来は電子回路で中継していた光を直接的に扱うことが可能になり、装置の簡略化と大幅なコスト低減が期待できる。フォトンクスを用いた高速データ通信・転送サービスを中核に発展することで、フォトンクス市場が牽引されると考えられる。今後、トポロジカルフォトンクスという新しい研究領域から、上記を実現するブレークスルーが生まれることが期待できる。

## 2-3. 科学技術上の効果

### (1) 学術の発展

物質をトポロジーの視点で見直すことで、従来の金属、半導体、絶縁体、超伝導体、磁性体、誘電体などの機能性による分類の枠を超えた新たな物質観が構築されることが期待できる。

本提言の研究開発を推進することにより、物質が持つトポロジカルな特徴が物性を支配する「トポロジカル量子物理融合領域」とも呼ぶべき新しい学問領域が生まれ、学際的な研究コミュニティが形成されることが期待できる。そこでは、物性物理学、数学、素粒子物理学の知見が糾合することで、様々なトポロジカル物質群・物性を高精度に予測・解析可能な新しい理論体系が構築される一方で、物性物理学で蓄積された知見・研究成果に刺激された数学や素粒子物理学における新たな研究課題への取り組みと、そこから生まれる新たな学術的成果が期待される。また、新たなトポロジカル物質群の探索やその特性・特徴の解明だけではなく、工学との協働によりトポロジカルな性質を利用したエレクトロニクス、スピントロニクス、フォトンクス、量子情報などへの応用を目指した材料・デバイス研究が加速される。

さらに、素粒子物理学で導入されたマヨラナ粒子、ワイル粒子といった新たな準粒子の概念が、トポロジカル物質中で観測できる可能性が見出されており、これまで素粒子実験では観測されなかった仮想粒子の存在の証明や特性の理解が進み、素粒子物理学の舞台が拡張されることが期待できる。素粒子物理学は様々な素粒子の存在を実証するために、大規模な高エネルギーの実験施設を必要とするが、物質中でも素粒子と同様の概念が存在することになれば、研究テーマによっては物質中の電子の振る舞いを調べることで代用することが可能になり、実験装置の簡便化や理論と実験との比較が容易になると考えられる。さらに、素粒子物理学の課題である数値計算原理の開発や量子重力理論の発見に対し、物質中の素粒子的な振る舞いにヒントを得た新たな手法の発明が期待され、大きな学術上の相乗効果が見込まれる。また、数学においては、トポロジカル量子戦略に基づく研究開発を実施していく中で数学的に新しい課題を発見し、例えば非可換幾何学に具体性を持たせるような新しい数学的枠組みが構築されることが期待できる。

このような分野間のシナジーによって、物性物理学・数学・素粒子物理学の融合・連携が加速される。さらに、トポロジカル絶縁体、トポロジカル超伝導体、ワイル半金属、量子スピン液体、スキルミオンといった新たな物質相に対して工学的な視点でその特性・機能を制御することで、トポロジカルスピントロニクス、トポロジカルフォトニクス、トポロジカル量子コンピューティングなどの新たな技術領域・工学分野の発展に資する基盤技術を創出することが期待される。

## (2) 技術の発展

本提言の研究開発を推進することにより、量子コンピューティング、超低消費電力コンピューティングデバイス、光デバイスなどの応用を実現する材料設計・合成・作製技術、デバイス設計・シミュレーション・作製プロセス技術、構造や特性の計測・評価技術などが進展することが期待される。特に、物性物理学・素粒子物理学・数学の協働による統合的理論体系の構築、さらに工学との融合・連携によるデバイスイノベーションが期待できる。

例えば、量子コンピューティングにおいては、特異な統計則に従うマヨラナ粒子の性質を用いることで、温度やノイズなどの擾乱に頑健（ロバスト）な演算が可能な量子ビットや量子情報デバイスが実現され、誤り訂正を大幅に低減した量子コンピューティング技術が発展していくと考えられる。

スピントロニクスにおいては、トポロジカル絶縁体表面のスピンの流れやトポロジカル反強磁性体の仮想磁場などの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・電流変換や熱電変換の実現など、新材料・新デバイスの開発を目指した新たなスピントロニクス技術としての発展が期待できる。特に、次世代不揮発メモリである MRAM への波及効果が大きいと考えられるが、メモリ以外にも高感度センサへの応用が期待できる。トポロジカル物質により超高感度の磁気センサが実現すれば、脳磁計測などへの応用が可能になり、ヒトの脳活動のダイナミックで高精細な 3 次元マップが得られるようになる。さらに、アルツハイマーなどの脳疾患診断や、情報機器のマン・マシンインターフェースへの応用が期待される。

光デバイスにおいては、小型化・高性能化・高機能化を目指しているフォトニック結晶デバイスの研究開発にトポロジーの概念を加えることにより、新たなフォトニックバンドエンジニアリングが可能になる。これによって、無散乱・無損失光導波路や光遅延技術を用いた光メモリデバイスといった従来の特性を凌駕する構造やデバイスの作製が可能になり、トポロジカルフォトニクスと呼ばれる新興分野が発展することが期待される。

## (3) 人材育成

本提言における研究開発には、物性物理学、数学、素粒子物理学、光科学、電気工学、量子情報工学、磁気工学、物質・材料科学などの様々な学術分野の知識が必要になる。また、今後の応用展開によっては、化学、機械工学などへも波及する可能性がある。さらに、計測・分析・解析、理論・シミュレーション、材料作製、デバイス作製・プロセスなど、多彩な応用分野の技術的・工学的な知識が必要になる。これらに関わる研究者・技術者が密に協力・連携して研究開発を進めていけるよう、共通の研究拠点やネットワー

クの構築を国が先導することで、相互に研究目的、内容、考え方などを共有・理解し、他分野の知識や技術を相互に獲得することや利用することができるようになる。その結果、研究開発計画全体の中での自分の立場を明確に認識し、様々な学術領域、理論と実験、基礎研究から応用研究、さらには社会への実装までの広い範囲に興味を持てる人材の育成が可能となる。

【コラム4 2016年ノーベル物理学賞－業績の概要と最近の研究展開－】

2016年ノーベル物理学賞は、米国ワシントン大学の David J. Thouless 教授、プリンストン大学の F. Duncan M. Haldane 教授、ブラウン大学の Michael Kosterlitz 教授の3名に授与された。授賞理由は「トポロジカル相転移と物質のトポロジカル相の理論的発見」である。トポロジーというのは、穴が1つあるコーヒーカップはドーナツに変形できるのに対し、穴のないボールには決して変形できないという例（下図）に象徴される「図形の不変な指標（今の場合には穴の数）」に着目する数学の概念である。受賞者たちは、トポロジーという概念を物理学の世界に持ち込むことによって、物質の見方を変え、これによって新しい物理学の世界を拓いた。

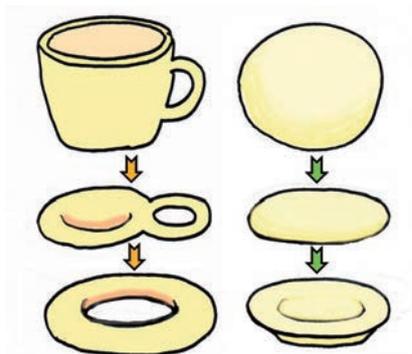


図 コーヒーカップはドーナツに変形できるがボールはドーナツに変形できない

研究は、1970年代にさかのぼる。Kosterlitz と Thouless らは、それまで2次元系では起きないとされていた相転移が、低温領域で「渦の対」などの「トポロジカルな欠陥」があれば起きることを明らかにし、超流動体・超伝導体・磁性体薄膜における相転移現象を説明した。「コストリッツ・サウレス転移」として教科書にも載っているので、ご存じの読者も多いだろう。

1980年代になると、Thouless は甲元真人（元・東京大学）らとともに、当時見いだされた量子ホール効果（極低温において強磁界中の半導体2次元電子ガスの電気伝導率が  $e^2/h$  の整数倍に量子化される現象）が、電子系のトポロジカルな性質で記述できることを明らかにした。一方、Haldane は、Thouless の理論を発展させ、2次元の六方対称系モデルにおいて、磁界がなくても量子ホール効果が出現すること（量子異常ホール効果）を理論予測した。この理論は、2013年にCr添加 (Bi, Sb)<sub>2</sub>Te<sub>3</sub> 薄膜の量子異常ホール効果の観測によって立証された。Haldane は、さらに、トポロジーの効果を取り込むことでスピンの大きさ（整数か半整数か）によって鎖状の磁性体の

性質が異なることを予言した (Haldane 予想)。この予言は実験的にも確認され、その後の磁性体研究の発展の礎となっている。

以上が 2016 年ノーベル物理学賞の主な授賞理由だが、近年ではトポロジーの概念が 3 次元系にまで拡張され、トポロジカル絶縁体をはじめとするトポロジカル物質群が注目されている。トポロジカル絶縁体とは、内部は絶縁体であるが境界 (3 次元系では表面、2 次元系ではエッジ) が金属であるような性質をもつ物質である。2 次元系の境界 (エッジ) を流れる電流は、逆向きスピンをもつ電子が互いに逆方向に回っているため、正味の電流値はゼロであるがスピン流は流れるという不思議な現象が起こる (量子スピンホール効果)。3 次元系では  $\text{Bi}_2\text{Se}_3$  など重い金属の化合物で見られ、スピン軌道相互作用によって電子の流れとスピンの向きが強く結合しているため、スピントロニクスにおけるロバストなスピン源や、スピン流と電流の間の変換効率の高いスピンホール素子への応用が期待されている。

また、トポロジカルな磁気構造であるスキルミオンや誘電体における特殊なドメイン構造などの興味深い現象が次々と見いだされ、「トポロジーで保護された量子状態」を用いたロバストな「トポトロニクス・デバイス」の概念まで現れている。トポロジーの概念はエレクトロニクス分野にとどまらず、フォトニクス分野におけるフォトニック結晶のエッジを用いた方向性光導波路への応用も提案されている。さらに、トポロジカル超伝導体を用いることで、誤り訂正が極端に少ない量子コンピュータの実現も期待され、現在、国内外で精力的な研究がなされている。

以上述べたように、トポロジーが織りなす多彩な物理学の世界に先鞭をつけた、Thouless、Haldane、Kosterlitz3 氏のノーベル賞受賞は、応用物理学の観点からも大変意義深いものである。

(出典)

『応用物理』 Vol. 86, No. 1, 2017 今月のトピックスから抜粋 表現を一部修正

### 3. 具体的な研究開発課題

2章で記載した社会・経済的効果および科学技術上の効果を実現するためには、物質が持つトポロジカルな性質を活用した具体的な工学応用へ向けた技術開発と、関連する学術基盤の一層の強化が不可欠である。本研究開発戦略を実行する上で取り組むべき研究開発課題は、「理論体系の構築」「物質創製・制御基盤技術開発」「デバイス応用技術開発」の3つで構成される（図3-1）。

「トポロジカル量子戦略」の実施によってデバイスイノベーションを起こしうる工学応用領域としては、量子コンピューティング、スピントロニクス、フォトニクス、フォノンニクス、メカニクス、化学反応など、様々な領域が想定される。以下では、これまでの研究によって技術的ブレークスルーの可能性が示唆されている量子コンピューティング、スピントロニクス、フォトニクスの3つの応用領域に関する研究開発課題を記述する。

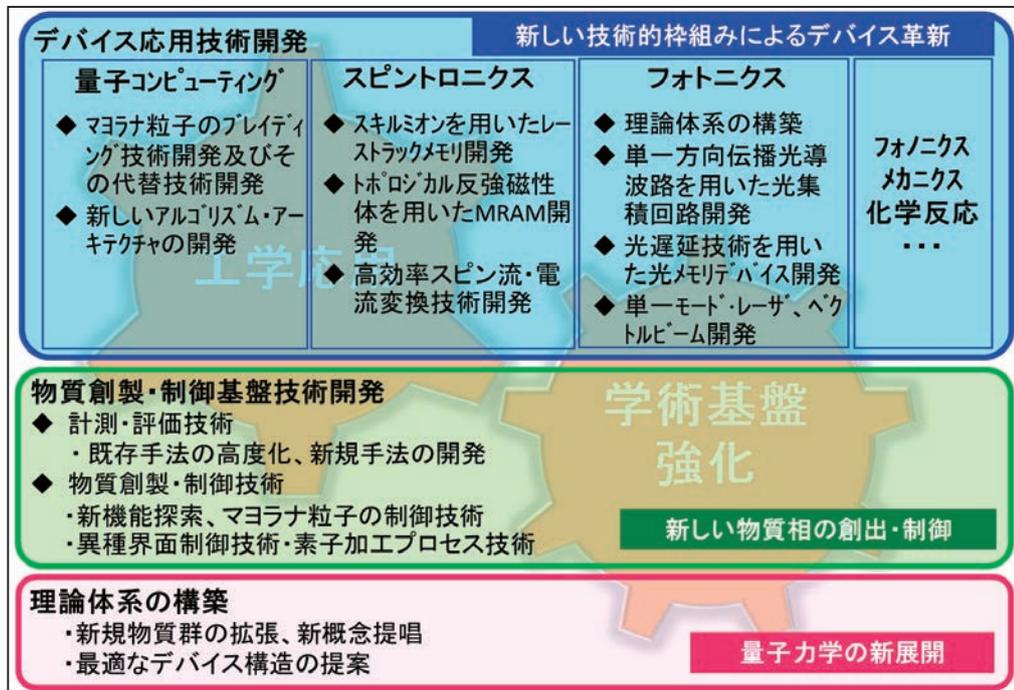


図 3-1 具体的な研究開発課題の概略図

#### 3-1. 理論体系の構築

物質科学におけるトポロジカル物質群に関する研究開発は、直近の10年間に物性物理学を中心とする学術分野において急速に発展している途上にある。このトポロジカル物質科学分野は、理論が先行して存在を予測し、実験で実証してきた数少ない分野の一つである。今後の工学応用を実現する上で欠かせないことは、これら新物質群がデバイスとして活躍する舞台を支える理論基盤を体系的に構築することである。

従来のバンド理論の枠組みでは半導体もしくは半金属に分類されるトポロジカル絶縁体やワイル半金属などの物質群においては、基本的には電子相関が無視できる一体問題の範囲内で捉えることができるため、第一原理計算や従来の計算手法がそのまま活用でき、特にトポロジカル絶縁体に関してはほぼ網羅的に物質探索がなされつつある。今後は、これ

まで別々に進展してきた物性物理学・数学・素粒子物理学の知識の融合を通じて、従来は理論予測が困難であったトポロジカル超伝導体や、量子スピン液体に代表される強相関電子系などの多体の電子相関が本質である新しいトポロジカル物質系の存在およびその機能を高精度に予測できる理論体系の構築が必要である。また、数学における非可換幾何学を用いることで、アモルファス系や準結晶のような無秩序系へ展開できる可能性もある。さらに、素粒子物理学において理論提唱はされているが未だ実験的観測に至っていないアクシオン粒子などの素粒子をトポロジカル物質内で発見することも学術的には価値が高い課題である。

さらに、既知のトポロジカル物質の特異な性質の原因とされるスピン軌道相互作用に依存しないトポロジカル機能を持つ物質の理論提唱が可能になれば、デバイス化の候補対象となる物質群が格段に広がるとともに、新しい機能の発見にも繋がるのが期待できる。また、物質探索に限定することなく、どのような分子構造や結晶構造であればどのようなトポロジカルな機能が発現するのか、あるいは、応用を実現する上でどのようなデバイス構造が最適なのか、どのような応用領域への展開が可能なのか、といった工学的視点を含めた理論体系の構築も重要である。そのためには、理論研究者が実験研究者や企業研究者との密なコミュニケーションを通じて、どのようなニーズがあるのかを把握することが必要である。

### 3-2. 物質創製・制御基盤技術開発

トポロジカル物質の新規機能探索やマヨラナ粒子などのエキゾチックな粒子の制御技術を開発するとともに、工学応用へ繋げるためのデバイス化技術や界面制御技術、加工プロセス技術の開発が重要である。また、トポロジカル物質群においては、その表面や端状態において電子が特徴的な振る舞いをするのが多く、角度分解光電子分光法（ARPES）などの表面に敏感な測定手法が威力を発揮する。

ここでは、従来にない新しい物質の創製と工学的な制御、その際、同時に求められる新しい計測・評価技術を開発していく際に必要となる研究開発課題を記述する。

#### (1) 物質創製・制御技術

##### ・トポロジカル物質群の新規機能探索

トポロジカル絶縁体における特徴は、端もしくは表面の特殊な電子状態のエネルギー分散が線形性（ディラック性）を持つことで従来の半導体に比べて非常に高い移動度を持ち、また、外界からの擾乱に対して堅牢（ロバスト）であることである。一方、このロバスト性は物質に内在しているスピン軌道相互作用の大きさに制限されるため、室温動作を前提とした機能素子へ展開するためには、物質特性の更なる改善（例えば 1eV 程度のバンドギャップの実現）や新規物質探索を行う必要がある。また、磁性を持つトポロジカル絶縁体で初めて観測された量子異常ホール効果を実用するためには、強磁性発現温度を室温近傍まで向上させる必要がある。

また、ワイル半金属やディラック半金属などのトポロジカル半金属では、3次元的な線形分散が電気伝導などの物性を支配しているため、フェルミエネルギーの精密制御や新たな活用法の探索が必要である。さらに、トポロジカル物質特有の電氣的・磁

氣的効果などの新機能の探索を行うことも重要である。例えば、トポロジカル電気磁気効果やカイラル異常などの動作実証研究が挙げられる。さらに、トポロジカル絶縁体を用いた化学反応における触媒効果、ワイル半金属の表面に現れる特殊な電子状態（フェルミアーク）のスピン特性制御、トポロジカルな磁気構造や誘電分極構造、それら界面の特異な物性など、従来にはない新しい機能を用いた応用展開を探索することも重要な課題である。

#### ・ マヨラナ粒子の制御技術

薄膜表面と異種物質との界面接合において、マヨラナ粒子が出現するための特殊な近接効果についての予測的な理論研究が進展している。近年では、実験的にも物質中のマヨラナ粒子観測の報告が相次いでおり、0次元のマヨラナ粒子を用いた量子コンピューティング技術確立が、目下のところ世界的な競争課題となっている。現在、半導体ナノワイヤと超伝導体との接合系、3次元トポロジカル絶縁体と超伝導体との接合系などで、マヨラナ粒子に由来すると判別される実験検証が行われている状況であり、今後、マヨラナ粒子のブレイディング技術など、接合素子での研究開発が必要である。特に、マヨラナ粒子の活用による量子コンピューティング実現に向けては、未だその舞台となる最適な物質系は確立していない状況である。トポロジカル超伝導体そのものの開発も含め、まだ物質探索の余地が残る状況にある。したがって、世界に先駆けて有望な物質系を発見し、実用化を現実視できるレベルの特性を達成することが重要である。さらに、最近発展が著しい Kitaev 模型における量子スピン液体の研究分野においては、2種類のマヨラナ粒子を想定することで、量子スピン液体の物性に現れる特徴を理解できることが示唆されており、その物性を通してマヨラナ粒子の振る舞いを観測できる可能性がある（詳細はコラム5に記載）。今後、理論と実験を一体的に進め、マヨラナ粒子の物質中での振る舞いを明らかにし、それを制御する技術を開発することが重要である。

#### ・ 機能発現と特性向上に向けたデバイス化技術

トポロジカル物質群における新しい物性、量子スピンホール効果、量子異常ホール効果やマヨラナ粒子などを今後、工学応用に向けた研究開発に繋げるためには、物質の薄膜化技術、超構造化技術、界面形成技術、デバイスプロセス技術を進展させなければならない。ここでは、低温での動作実証だけではなく、室温近傍においてもその特性を実現することが実用のためには重要な課題である。そのためには、素子適用を目指した薄膜化技術や超格子技術の高度化が必要である。一方で、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に関しては従来の量子コンピューティング技術と同様の超低温環境での動作となり、実装に関しても同様の技術適用が可能である。しかしながら、素子化可能なトポロジカル超伝導体の薄膜化技術や超伝導体との接合作製技術、例えば量子ビット集積化のためのデバイスプロセス開発、信号処理用の素子回路設計など、工学応用に向けた課題は山積している。本研究分野でわが国が世界を牽引するためには、これらの研究開発課題への早期取り組みが求められる。

#### ・ 異種界面制御技術・素子加工プロセス技術

超伝導体や強磁性体との接合界面形成では、真空一貫搬送の装置設計とそれらを駆使したデバイス物理に通じる研究者がトポロジカル物性研究者と共同で技術開発に乗り出すことが重要であり、国内の技術を集約して取り組むべき課題と言える。スピン

トロニクス分野のスピン運動量ロッキング活用、フォトニクス分野におけるフォトニック結晶作製技術、超伝導分野における接合作製技術など、日本国内に内在する高い基礎技術力の強みを活かした研究展開を推進する融合研究の実行が重要である。

さらに、実用面でハードルになるような分子線エピタキシー法などの高度な成膜条件を要する技術だけでなく、スパッタリング法などの既存の成膜技術やバルク合成された物質表面の活用方法を検討するなど、プロセス面の開拓が必要である。また、相変化メモリとして知られる  $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$  や、太陽電池材料の一種である  $\text{CuInGaSe}_2$  などは、その組成がトポロジカル絶縁体に近いため、メモリや太陽電池関連の作製技術やプロセス技術を活用することも重要なアプローチである。

## (2) 計測・評価技術

トポロジカル物質群はその特異な現象が物質表面や界面に現れることが多く、それらを計測・評価する手法の高度化や新規手法の開発が重要である。例えば、3次元トポロジカル絶縁体の表面状態の観測にはよく角度分解光電子分光法 (ARPES) が使われるが、ARPES は表面状態に敏感であるがゆえに、試料表面を平坦に保つ必要がある。しかしながら、実際の試料においては表面酸化や分子吸着によって表面が凸凹していることが多く、現状の ARPES 測定では超高真空中で試料をへき開するなどして表面清浄を行っている。この表面平坦性の制限を少しでも緩和することができれば、結晶構造上へき開が難しい物質に対しても ARPES が活用できるようになるため、現在の測定性能の更なる高度化が必要である。

また、2次元トポロジカル絶縁体においては、ホールバー測定により端を流れる電気伝導の計測が可能であるが、3次元トポロジカル絶縁体の表面状態の電気伝導を正確に測定する手法は存在せず、ARPES や走査トンネル顕微鏡/分光法 (STM/STS) などによって局所状態のディラック性を観測するに留まっている。また、量子コンピューティングに革新を起こす可能性のあるマヨラナ粒子の観測においても未だ決定的な測定手法は存在しない。表面全体を通して  $e^2h$  ( $e$ : 素電荷、 $h$ : プランク定数) の整数倍の電気伝導を観測する手法開発、マヨラナ粒子の決定的な観測手法開発など、新たな測定・評価手法を構築することが必要である。また、光学分野においては、マイクロ波から可視光までの広い周波数範囲を扱うため、マルチスケールの高精度計測技術の開発などが重要である。

### 【コラム 5 知の越境者① Alexei Kitaev】

「トポロジカル量子戦略」の世界において、鍵となる人物の1人は、本コラムで紹介するカリフォルニア工科大学理論物理学教授 Alexei Kitaev である。

Kitaev は、素粒子物理分野で発展してきた「美しすぎる対称性」(角度を変えない座標変換をしても系が不変に保たれる共形不変性) をもった場の理論「共形場理論」(Conformal Field Theory, CFT) と、準粒子を入れ換える順序によって系の状態が変化するような「非可換準粒子統計」の概念を凝縮系物理学に導入するとともに、そのアイデアを量子コンピューティングに応用した先導者である。彼は、この学際的業績により、2015年、アブドゥッサラーム国際理論物理学センター・ディラック賞を、

ラトガース大学教授 Gregory W. Moore、イェール大学教授 Nicolas Read とともに共同受賞している [1]。

Kitaev は、ロシアで教育を受け、モスクワ物理工科大学で M.Sc (1986 年)、ランダウ理論物理研究所 (LITP) で Ph. D (1989 年) を取得している。その後、LITP 研究員 (1989 年 -1998 年)、Microsoft Research 研究員 (1999 年 -2001 年) を経て、カリフォルニア工科大学教授 (2002 年 - 現在) として現在に至っている。

モスクワ物理工科大学での修士論文研究では、急凝固アルミニウムマンガン合金における正二十面体の点群を有する相の長距離秩序等に関する理論的研究を行っていた。当時は、1985 年 3 月に誕生したゴルバチョフ政権が社会主義体制の改革・刷新を掲げ、ペレストロイカ (改革) を推し進めた頃である。LITP での博士論文研究では、準周期的層状構造体の超伝導に関する理論的研究を行ったが、LITP 研究員となって 2 年後頃 (1991 ~ 1992 年頃) から、完全に量子情報分野の研究にシフトしている。それは、くしくも、ソビエト連邦が崩壊し (1991 年 12 月 25 日)、ロシアからの頭脳流出が加速し始める頃である。

LITP 研究員時代、彼は、「トポロジカル・エラー訂正」によって量子情報を守るトポロジカル量子コンピューティングの先駆的な概念を 1997 年に導入している [2]。1999 年には Microsoft Research 研究員となり、翌 2000 年には、量子ワイヤ中のマヨラナフェルミオンについて探求して 1 次元 p 波超伝導体の模型 (Kitaev 鎖模型) を提案 [3] するとともに、Microsoft Station Q 率いる数学者 Michael Freedman らとともに、トポロジカル量子コンピューティングに関する研究 [4] を行った。その後、カリフォルニア工科大学に移り、2006 年には、基底状態が厳密に量子スピン液体状態を与える Kitaev 量子多体模型 (スピン 1/2 をもつ量子スピンが 2 次元蜂の巣格子上でイジング的な相互作用をしたシンプルな模型) を提案している [5]。この模型は、乱れに強いトポロジカル量子計算を実現しうる模型として理論的に提案されたものであるが、その後の理論研究によって、現実に存在するある種の磁性絶縁体の良いモデルであることが分かっている。物質科学や物性物理学とは全く関係ない数理物理的動機から提案した模型であるにもかかわらず、驚くべきことにそのシンプルさからは想像し難い豊富な物理を含んでおり、量子情報だけでなく、物性物理や統計基礎論など物理学の様々な分野で大きな注目を集めている。

(参考文献)

- [1] Abdus Salam International Centre for Theoretical Physics, Dirac Medalists.  
<https://www.ictp.it/about-ictp/prizes-awards/the-dirac-medal.aspx>
- [2] A.Y. Kitaev, "Quantum computations: algorithms and error correction", Russian Mathematical Surveys Vol.52, No.6, pp.1191-1249 (1997).
- [3] A. Kitaev, "Unpaired Majorana fermions in quantum wires", Physics-Uspekhi Vol.44, No.10 Supplement, pp.131-136 (2001).
- [4] M. H. Freedman, A. Kitaev, M. J. Larsen, and Z. Wang, "Topological Quantum Computation", Bulletin of the American Mathematical Society Vol.40, No.1, pp.31-38 (2003).

- [5] A. Kitaev, "Anyons in an exactly solved model and beyond", *Annals of Physics* Vol.321, No.1, pp.2-111 (2006).

### 【コラム6 知の越境者② Hermann Weyl】

Hermann Weyl は、「現代数学の父」と呼ばれる David Hilbert によって確立されたゲッティンゲン大学の数学の伝統を継承する人物 (1885 年 -1955 年) である。ゲッティンゲン大学の同僚としては、相対論の基礎となる「ミンコフスキー空間 (四次元空間)」で知られる Hermann Minkowski や、後に Weyl が哲学的立場として依拠した「現象学」で知られる Edmund G. A. Husserl がいた。

いわば、Hilbert を数学の父に、Husserl を哲学の母にもった Weyl は、数学の詩人と呼ばれ、その思索力と表現力において他の追随を許さないほど抜群なものであったと言われている。しかも、平気で自分の研究領域を拡張し、物理学や生物学にさえ踏んでゆける真の「知の越境者」であった。その業績は多岐にわたり、数々の数学上の仕事に加え、量子力学や相対性理論などの物理学の分野でも、純粋数学を応用した仕事をしている。

例えば、電磁相互作用の本質が局所ゲージ不変性だということを最初に気づいたのも、Weyl である。ここで、ゲージ不変性とは、時空の各点毎に、素粒子の属性の物差し (ゲージ) を変えても (ゲージ変換)、そのものの物理法則は変わらないとする性質である。1918 年に、彼はゲージの概念を導入し、現在ゲージ理論として知られている最初の例を与えた。Weyl のゲージ理論は、一般相対性理論と電磁気学を結び付けることを目指して、電磁場と重力場を時空の幾何学的性質としてモデル化しようとするものであったが、この試みは成功しなかった。しかしながら、この挑戦から、リーマン幾何学におけるワイル・テンソルの概念が生まれ、共形幾何学の基礎が築かれたのである。

1929 年、Weyl は、ディラック方程式において質量をゼロとしたときの解を探求し、3次元空間での質量ゼロのフェルミ粒子 (ワイル粒子) を提唱した。真空中のワイル粒子は、カイラリティ (スピンの向きと粒子の運動方向が平行か反平行かを表す指標) が永久に保たれるというトポロジカル (位相幾何学的) な性質を持つ。物質中のワイル粒子はカイラリティの異なる二つの粒子が必ずペアで発現し、それらは互いに衝突しない限り質量を持つことがない。素粒子としてのワイル粒子はまだ見つかっておらず、ニュートリノがその有力な候補であると考えられていたが、ニュートリノ振動の観測により、その可能性は低いと考えられている。しかし最近になり、このワイル粒子を物質内に内包した新しい種類の物質「ワイル半金属」が理論的に提案され、注目を集めている。この提案で、ある種の半金属において電子のスピン縮退を解くことで物質内にワイル粒子が生成されるという予測がなされたことから、その物質合成とワイル粒子の実験的検証が強く待ち望まれているが、3次元空間での質量ゼロのフェルミ粒子 (ワイル粒子) の革新的概念を最初に提案したのは、数学の詩人 Weyl である。

(参考文献)

ヘルマン・ワイル (著), 菅原正夫 (訳), 下村寅太郎 (訳), 森繁雄 (訳), 「数学と自然科学の哲学」(岩波, 1969).

ヘルマン・ワイル (著), 内山龍雄 (訳), 「空間・時間・物質」上下巻 (筑摩書房, 2007).

### 3-3. デバイス応用技術開発

コンピュータの低消費電力化はIoTや高性能サーバにおいても強く要求されており、その解決策の候補として量子コンピューティングやスピントロニクスなどへの期待が大きい。しかしながら、従来の量子コンピューティングやスピントロニクスは原理的には有効性は明らかであっても既存技術の延長線上では実用化への道はまだ遠い。

ここでは従前の技術とは全く異なる新しい切り口での研究開発アプローチによって、各応用領域で現在抱えているボトルネックを解消する方策を提案する。すなわち、物質が持つトポロジカルな性質を活用することで技術的枠組みの変革を誘導し、実用化に向けた研究開発を加速させることを目的とする。

まずは、具体的な応用先として量子コンピューティング、スピントロニクス、フォトニクスの3つを念頭におくが、さらなる新概念の創出も期待されることから、フォノンクス、メカニクス、化学反応など、新分野の応用展開についても検討する。

#### (1) 量子コンピューティング

現在の量子コンピュータ実現の障壁となっている誤り訂正を大幅に低減することが期待されているトポロジカル量子コンピューティングを実現するためには、非可換統計性を持つマヨラナ粒子を人工的に制御する必要がある。このとき理論的な枠組みとしては、リー代数、ホップ代数、共形場理論、結び目理論などの数学的あるいは素粒子物理学的手法が必要となる。マヨラナ粒子を用いた量子ビットを構成する基底状態の縮退は、高次の摂動に対しても保持されることが理論的に保証されており、原理的には系のパラメータに対する擾乱に対して極めて堅牢なシステム設計が可能である。システム設計の際には本分野のノウハウを蓄積している量子情報工学者と物性物理学者の協働が不可欠である。尚、近年欧米を中心に盛んに研究がなされている量子誤り訂正技術との関係については、コラム7に記載している。

##### ・マヨラナ粒子のブレイディング技術開発及びその代替技術開発

トポロジカル量子コンピューティングにおいては、複数のマヨラナ粒子が様々な方法でお互いを取り巻いて時間とともに2次元空間を動くことで、図3-3-1のように、それぞれのマヨラナ粒子(この場合には2個)がたどる経路は編みこまれるようにして結び目を持つため、「量子組みひも」と呼ばれる。この量子組みひもを使って、ある初期状態から複数の量子状態を生み出すことが可能になる。この操作を「ブレイディング」と呼び、通常量子計算における量子ゲート操作に対応する。ブレイディング技術はトポロジカル量子コンピューティングを実現する上で不可欠な技術である。一方で、このブレイディングを単純化し、より実現可能性の高い代替技術の開発も進めていく必要がある。

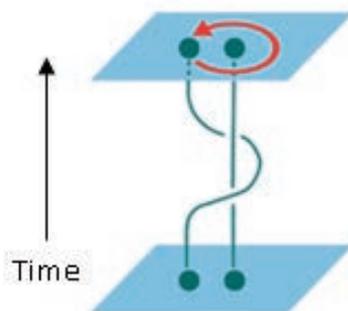


図 3-3-1: 平面にある 2 つのマヨラナ粒子。上の平面は、ある時間後の平面の状態を表し、一方のマヨラナ粒子で他のマヨラナ粒子を取り巻くような交換操作後の状態を表している。なお、各マヨラナ粒子は糸につながれたように視覚的に表現されており、終端のマヨラナ粒子を動かせば「量子組みひも」が実行できる。

- ・ 新しい計算アルゴリズム及びアーキテクチャの開発

トポロジカル量子コンピューティングでは、これまで扱ってこなかった非可換統計性を持つマヨラナ粒子を用いて量子ビットを構成する必要がある。またブレイディング技術といった特殊な技術が不可欠であるため、新しい計算アルゴリズムの開発が必要である。特に、マヨラナ粒子のブレイディング及びトポロジカル保護された操作だけでは万能型量子計算は困難であるという指摘もあり、マジック状態蒸留と呼ばれる特殊な操作と組み合わせることが重要である。それらを実現するための新しいアルゴリズムの開発も必要となる。また、トポロジカル量子コンピューティングはこれまでの超伝導量子ビットや量子アニーリング法とは全く異なるシステム開発が要求されるため、トポロジカル量子コンピューティングに適したアーキテクチャの構築が必要である。さらに、熱的安定性の問題を考慮すると、量子誤り訂正技術等と接続することが重要となる。

(2) スピントロニクス

既存のメモリ技術の限界を超えるために、大容量・高速・低消費電力・不揮発性・低コストを兼ね揃えた次世代ストレージ用メモリとして期待が高いレーストラックメモリへのスキルミオン応用や、不揮発性を持ち、かつ、ユニバーサルなメモリとして注目されている MRAM へのトポロジカル反強磁性体の応用展開を目指す。また、トポロジカル物質の特徴であるスピン運動量ロッキングを活かした高効率スピン流・電流変換技術開発も重要な課題である。さらに、メモリ以外にも脳磁計などの超高感度磁気センサや熱電素子への応用展開の可能性についても追求するべきである。

- ・ スキルミオンを用いたレーストラックメモリ応用技術開発

スキルミオンは、電子の持つスピンが渦を巻いた磁気構造体であり、直径数 nm ～ 数百 nm の大きさをもつ粒子である。パルス磁場によって生成・消滅させることが可能である。また、仮想磁場の効果によって微小な電圧で駆動することが可能なため、レーストラックメモリとしての応用が期待されている。しかし、現時点では研究のほとんどは実験室でのスキルミオンの発生、駆動、制御などの基本動作レベルの観測に留まっている。まずはプロトタイプを作製し、デバイスにした際の安定性や信頼性を検証するレベルにまでステージアップさせることが重要である。さらに、高密度化に

向けてスキルミオンの更なる小型化を実現することが課題である。

- ・ トポロジカル反強磁性体を用いた MRAM 応用技術開発

最近、カゴメ格子構造の反強磁性体を用いた MRAM 応用に向けた研究開発が活発化している。ここでは、情報読み出しに異常ホール効果を利用しようとしているが、電子状態のトポロジカルな性質である仮想磁場が高速磁化反転にどの程度寄与しているのかを実験的に検証する必要がある。また、読み出しの際のホール電圧値を実用レベルにまで増大させるために、既存物質の改良や新規物質の探索、デバイス構造の改良などを行い、室温動作を達成することが必要である。

- ・ トポロジカル絶縁体表面状態を活用した高効率なスピンの電流変換技術の確立

トポロジカル絶縁体の表面状態におけるスピン運動量ロッキングを用いることで、電流をある方向に流した際、電子のスピンの向きを揃えることが可能になり、表面にスピンをためることができる。この表面状態のスピンを無駄なく活用することができれば、理想的には 100% の高効率で電流をスピン流に変換できる。これまでは白金やタンゲステンを用いて 10% 程度の変換効率だったが、ごく最近、トポロジカル絶縁体を用いることで約 52% という効率が得られている。さらに、このスピン流を強磁性体に作用させることで、スピントルクによる磁化反転が低消費電力で実現することが期待されている。今後の課題としては、更なる高効率化を目指すとともに、実際にスピントルク磁化反転をどの程度の低電流で実現できるのか、また既存の STT-MRAM デバイスの中にどのように組み込むのか等を実証していくことが必要である。

### (3) フォトニクス

電子系におけるトポロジーの概念をフォトニクス技術に適用することにより、光導波路によるコンピュータのボード間／チップ間の低損失かつ高速な通信を可能にし、また、伝播する光の分散関係を制御することによる光の遅延回路、光メモリ応用などを旨とする。

- ・ 新しい理論体系の構築および新規機能探索

光（フォトン）は上述してきた電子系とは異なるボース粒子であるため、ボース粒子の統計性に従った理論体系の構築および新規機能探索が必要である。例えば、フォトニック結晶にトポロジカルな性質を導入したときの光伝播特性のロバスト性の検証、光反射・光損失低減のための最適な物質探索・設計、デバイス設計用シミュレーション手法の開発などが挙げられる。また、フォトニックバンドの結合性バンド、反結合性バンドを擬スピンとして取り扱う方法も提案されており、この場合にはフェルミ統計に従う電子系の理論体系がそのまま利用できるのかどうかの検証が必要である。

- ・ 単一方向伝播光導波路を用いた光集積回路の開発

トポロジーの概念を応用することで、エネルギー損失の少ない単一方向伝播光導波路の作製が可能になることが実験的にも検証されつつある。今後はより無散逸性の高いフォトニック結晶作製に向けて材質・構造改良や新規物質探索を進めるとともに、光集積回路の実現に向けた周辺技術体系を構築することが重要である。

- ・ 光遅延技術を用いた光メモリデバイスの作製

情報量が指数関数的に増大しているインターネットの基幹技術である光ファイバーネットワークにおいては、大容量の光パケットの中継、分岐、分配が必要になっている。現在、これらは電子回路によって実行されているが、光パケットを直接的に扱う

光回路で部分的にでも実行できれば中継装置の大幅な小型化・システム簡略化が実現できる。そのためには、光の速度を著しく遅くする、もしくは完全に停止させるなどして情報を蓄積・保持する光メモリ機能や光遅延機能を向上させる必要がある。フォトニック結晶のトポロジカルな性質を利用することで、高効率な光の閉じ込めや光遅延技術を確立することが重要である。

・ 大出力単一モード・レーザ、ベクトルビームの開発

フォトニックバンドの線形性を利用した大面積の単一モード・レーザの開発、光渦状態を用いたベクトルビーム発振レーザの開発が可能であることが *Nature Physics* 誌 (L. Lu et. al., *Nature Phys.* 12, 626-629 (2016)) で提案されている。現時点においては、トポロジカルフォトンクスへの展開に向けた技術開発はほとんどなされていない状況であるが、大出力単一モード・レーザは次世代の自動車ヘッドライト用光源や金属微細加工用レーザとして、ベクトルビームは超高解像度顕微鏡用光源として期待されているため、能動デバイス実現へ向けた研究開発も推進すべき課題である。

(4) その他の応用展開へ向けた研究開発

エレクトロニクスにおいては、トポロジカル相転移を電氣的に制御することによる電気伝導のスイッチングへの可能性、相変化メモリとトポロジの関連性、および誘電体中に生じるシフトカレントの有用性などが議論されており、今後の展開が注目されている。また、量子異常ホール効果の試料端における無散逸伝導や量子スピンホール効果におけるスピン流、グラフェンや遷移金属カルコゲン化合物におけるバレー流など、現時点では低温領域でのみ発現している現象が高温領域でも発現できるようになれば、応用への適用範囲が広がると期待される。

さらに、前節のトポロジカルフォトンクスのように、トポロジの概念を活用することで、新たな機能を提供できる応用領域への展開も重要である。例えば、最近研究が活発になっているフォノン伝導を制御するフォノン結晶にトポロジの概念を適用することで、無散逸フォノンを生成することが可能になれば、熱制御、音響アイソレーションや防音などへの応用展開が考えられる。トポロジの概念をメカニクス分野へ適用することで、圧力や振動などを局在化させることが可能になり、新しい建築技術へ展開する可能性がある。化学分野においても、例えばトポロジカル絶縁体表面のスピン運動量ロッキングを用いた新たな触媒機能の発現などが考えられる。このように現時点ではどのような展開があるのか予測もできない様々な分野への応用可能性も含めた包括的な研究開発を実施することも重要である。

### 【コラム7 量子コンピューティング実現に向けた2つのアプローチ】

量子コンピューティングの実現の主な障壁は、量子ビット（量子情報の最小単位）が望まない相互作用や環境系との結合によって量子性が失われ、量子ビットとして機能しなくなる現象（＝デコヒーレンス）である。デコヒーレンスに対処しロバストな量子コンピューティングを実現する方法は、主に2つのアプローチがある。1つ目のアプローチは本提言でフォーカスしているトポロジカルに保護された非可換統計に従うエニオン準粒子（マヨラナ粒子）の特徴を活かしたアプローチ（以下、物性的アプローチと呼ぶ）である。もう一つのアプローチは、従来から取り組まれている量子誤り訂正技術に基づいた量子情報的アプローチと呼ばれるものである。前者はエニオン準粒子に対してブレイディングという操作を実行することによって、量子操作もトポロジカルに保護しながら行おうとするものであるが、後者は局所的な操作によって外界からの擾乱に対してロバストな性質を持つ特殊な部分空間に量子情報を埋め込むものである。実はこれら2つのアプローチの背景にある数学的構造はともにトポロジーによって統一的に理解されることが知られている。

2つのアプローチの関係についてももう少し詳細に述べる。

量子誤り訂正符号の研究から、トポロジカルな性質を有する新たな可解模型が次々と提案され、その普遍的な性質が研究されている。その代表例として、Kitaevが提案したトーリック符号模型というものがある。ただし、この模型は4体相互作用を含み、物理的に実現することが困難であるため、量子情報操作を利用することによってトーリック符号模型の基底状態（表面符号状態とも呼ばれる）を実現し、デコヒーレンスに対してロバストな「論理」量子ビットを実現しようとする実験的試みがGoogleやIBMといった巨大IT企業等の支援の下、世界中で盛んに行なわれている。

一方、物性的アプローチにおいては、Kitaevトーリック符号模型の低エネルギー有効模型である2体相互作用模型やKitaevハニカム模型と呼ばれる模型を用いて、トポロジカルに保護された状態（トポロジカル秩序相）を実現することが提案されている。さらに、系の対称性を用いて1次元でトポロジカル秩序を実現する1次元Kitaevマヨラナ模型と呼ばれる模型も提案され、その基底状態がロバストな量子ビットとして実現可能であることが知られている。トポロジカル秩序相における励起が上述の非可換統計に従うエニオン準粒子である。現在、その提唱者であるMicrosoftがStation Qという取り組みの中で、世界中の研究者を支援し積極的に推進している。

今後の方向性としては、熱的安定性やよりリッチな性質を持つ準粒子を有する模型、および、より簡単に量子操作を保護することができるトポロジカル符号や模型を新たに探索する必要がある。また、最近、量子誤り訂正符号を用いて、量子重力理論構築における重要な鍵と考えられている重力・ゲージ理論の対応およびホログラフィック原理の理解を深めることも重要である。

## 4. 研究開発の推進方法および時間軸

### 4-1. 物性物理学、数学、素粒子物理学、工学の融合

20世紀初頭の量子力学勃興以来、物性物理学、素粒子物理学、数学は、学術的に別々の方向性・発展形態を辿りながら、それぞれの領域において成功を収めてきたといえる。この三者が、21世紀に入ってトポロジカル物質の出現を契機に互いに関係を持ち始めている。これまでトポロジカル物質の研究は理論先行によって発展してきており、理論研究が不可欠であった稀有な領域である。この基礎となっているのが、数学や素粒子物理学で培われてきた概念・理論体系である。今後、さらに新物質や新現象の探索を進めていく上では、数学や素粒子物理学などの基礎学問との連携が重要な役割を果たすものと考えられる（詳細をコラム3に記載）。

今後の研究開発戦略として目指すべき方向は、第2章に示す社会・経済的効果に到達することであるが、そのためには上記三者の融合研究が欠かせない。2016年のノーベル物理学賞がトポロジカル物質相の理論研究に対して与えられたことが示すように、本研究分野の発展が世界的に認知され、実際にトポロジカル物質を主要テーマとした論文数が2008年頃から急激に増大している（論文動向を付録2に記載）。その一方で、すでに世界におけるおよそ10年の研究蓄積から、一体問題の範囲では基礎科学的な全貌がかなり明らかになりつつある。今後は、より複雑な超伝導や強相関係数などの物質群への研究深化とともに、工学応用へ向けた新しい研究開発のステージへとギアチェンジする必要がある。これまでわが国は、本研究分野に対して主に科研費による支援によって国際的にも重要な業績をあげてきた。しかし現状の物性物理学を中心とする体制だけでは、世界で競争が激化している応用領域、すなわち新たな学術的発見を実際の工学的応用へつなげることは困難である。量子力学の新たな展開に対し学術基盤の一層の強化を図るため、素粒子物理学、数学の学術的背景を持つ研究者の参画が不可欠であり、さらには新たな工学的応用を図るためには工学系研究者や企業研究者の参画が必要になっている。全く異なる学術的背景と研究動機を持つ異分野の研究者が、同じ目的に向かって融合研究を進めるためには、各々の研究者の持つ学術的好奇心と応用への方向性を、意図的に合致させていく政策的な仕組みが必要である。例えば、物性物理学、素粒子物理学、数学、工学の4分野のうち、少なくとも2分野以上の専門家による共同研究を含むことを条件とした戦略的な公募領域を設定することが考えられる。ただし、本研究分野は未成熟な新興分野であることから予想もできない応用領域へ展開する可能性が将来的にはあることを考慮し、上記の学問分野に捉われず裾野を広げておくことが重要である。また、融合分野に積極的に若手人材が参入できるよう、個々には小規模だが幅広い分野の研究者が参画できる公募領域などを設定することも考えられる。さらに、融合分野の中規模拠点を日本に複数形成するような拠点形成型の施策も想定される。その際、科研費やこれまでの施策によって技術蓄積がなされてきた大学や研究機関には、一定の人材交流の基盤が整っていることから、それらを活用する視点も重要である。リスクの高い新分野・異分野融合に参入する若手研究者が、日常的に切磋琢磨できる「道場」のような環境を政策的に構築することが、長期的には新たな工学応用を創出する人材育成の土壌になる。このような枠組みが揃うことで量子力学新時代への道が拓かれると考えられる。

## 4-2. 理論の先導、実験で物質開発、デバイス化へ向かう方策

上述の異分野融合が進んだとしても、工学応用技術開発は如何にして進められるのか。トポロジカル物質は、初期の物質探索と予備的な実験の段階を超え、現在ではより精密且つ系統的な方法による物質探索、およびこれまで予言されている新奇な現象を、実験的に検証していく段階に移ってきている。この領域では米国、欧州、中国の研究の進展は著しく、わが国は一部で遅れを取っている部分もあるものの、物質の合成・結晶成長・薄膜化技術や、計測・測定技術に関してわが国は世界的にもトップレベルにあり、これらを最大限に活かす形で、デバイス化応用研究開発へとステージアップさせることが重要である。トポロジカル物質を工学的に応用するためには、薄膜化やデバイス化などの基盤技術開発と並んでトポロジカル物質の特徴を活かした革新的な応用のアイデア創出が重要なポイントになる。特に学術的に生み出されるトポロジカル物質に関する新たな知見、実験事実を革新的な応用に結び付けていくためにも、応用分野の現状を熟知し、学術的基礎分野にも強い興味を抱くことができる人材の参画が極めて重要である。その意味で、物質科学人材と工学人材との連携は不可欠である。

また、本提言で掲げている3つの主要な応用領域、(1) 量子コンピューティング応用、(2) スピントロニクス応用、(3) フォトニクス応用、の研究をドライブするためには産業界の参入が必要である。諸外国では産業界が開発の方向付けをリードする形で、大型のプロジェクトや拠点の形成に強く関与している。例えば、量子コンピューティングの領域では Microsoft、Google、Alibaba、IBM、Intel、HP、NVIDIA といった名だたるグローバル企業が、各国のプロジェクト・拠点形成に主体的に深く関与し、自らも人材と資金を投入している。特に Microsoft Research 社においては Station Q という取り組みの中で、世界各地の大学の Ph. D を保有した気鋭の若手数学者や、素粒子物理学で宇宙論や超弦理論を研究対象としてきた専門人材を自社雇用し、トポロジカル量子コンピュータの研究開発を本格的に開始している。いずれの研究機関でも、この分野で世界最高の人材を吸引することに余念がない。わが国においては、現時点では上述のグローバル企業の動きに比べ、産業界の関与は薄いのが、この分野に関する世界の動向、最先端の技術動向を積極的に発信・情報共有し、具体的なプロジェクトや拠点の形成、運営への関与を促していくことが重要である。

また、本研究分野では突如として実用化に直結するアイデアや技術が生まれる可能性もあるため、アントレプレナーシップを醸成する教育を行い、グローバルな視点を持ったイノベーション人材を育成することも重要である。

## 4-3. 分野融合・産学連携を加速するための方策

本研究分野は新興分野であるため、現時点では予想の難しい新しい基礎学術の進展や工学応用への展開が生まれる可能性がある。上記2章や3章で記述した社会・経済的效果や具体的な研究開発課題はあくまで事例であることに留意が必要である。

そのような状況の中で、本提言によって生み出される融合領域を活性化し、また産業界を巻き込んだ産学連携の体制を構築するためには、本分野の将来ビジョンや、シーズとニーズのマッチングなどの様々な可能性について、ざっくばらんな意見交換や議論、知恵を出

し合う「将来ビジョン構想会議（仮称）」と言える場を設定する必要があると考えられる。「将来ビジョン構想会議（仮称）」は以下の要件を満たすことが想定される。

- ・ 参画メンバーは、物性物理学・数学・素粒子物理学・工学のオピニオンリーダーや若手研究者、産業界など。これまで関係が希薄であった異分野の専門家を集め、この分野の中核となる新しいコミュニティ形成を促進する。
- ・ 研究開発の現状や今後の方向性、大学・国研などの研究機関と企業の共同研究の可能性等について議論し、共有することを目的とする。話題提供型の公開ワークショップを組み合わせるなど、多様な分野への情報発信も積極的に行う。
- ・ 議論や研究開発の進捗に応じて、行政官や人文社会科学者を招聘し国の関与の仕方やパブリックエンゲージメント等に関する意見交換や、実用化へ向けた密な議論をするための応用テーマ別分科会を設置するなど、状況に応じ柔軟に対応する。
- ・ 国内外の研究動向を把握・分析し、海外研究機関との戦略的な連携の在り方についても検討する。
- ・ 当面の主体は、既に科研費やこれまでの施策によって人材交流の基盤が整っている大学や研究機関が想定されるが、研究開発のステージが産業応用に近づくにつれて、主体をアカデミアから産業界に移し、コンソーシアム化することも考えられる。状況に応じて場を変化させながら発展させていくことが求められる。

#### 4-4. 時間軸

「トポロジカル量子戦略」に基づく研究開発は、ハイリスクで不確実性の高いものであることから公的資金によって行うべき段階にある。関連する機関としては内閣府、文部科学省、経済産業省、JST、NEDO等が想定される。特に、これまで科研費で蓄積・発展させてきた科学的知見や物質探索・合成実験の手法を十分に活かすことは必須である。

したがって、まずは基礎研究から新しい研究開発のステージへのギアチェンジを実現するために、文部科学省やJSTによる資金投入によって5～10年程度の目的基礎研究を実施し、応用・実用化研究に向けてスピニングすべき研究開発テーマに関しては経済産業省やNEDOによる支援を受けることが妥当である。その期間に新興領域である本研究分野を牽引していくリーダー的研究者の同定、および、核となる研究者の育成を図ることが望ましい。並行して、将来ビジョン構想会議（仮称）を活用し、長期的視点で本研究分野を発展させていく仕組みや拠点形成を含む大型プログラム構想などを打ち出していくことが必要である。EUではHorizon2020の枠組みにおいて、「Quantum Technology Flagship」と呼ばれる10億ユーロ規模/期間10年間の巨大研究プログラムを2018年から開始すべく計画準備中である。また、米国Gordon and Betty Moore財団はEPiQSプログラムとして、物性物理学分野の強化とともに若手研究者の育成を目的に2014年から5年間総額約75億円の支援を行っている。このような動きを見ても、向こう10年程度が本研究分野でイニシアティブを取るための境目になると考えられる。また、注視しておかなければならないことは、まだまだ実現が困難と一般的に認識される応用技術であっても、ある一つの理論や物質の発見・デバイス構造の提案がきっかけとなって、極めて短期間の内に新規なアイデアが実用化されてしまうことが、この分野では起こりうるということである。すなわち、日本発の超伝導量子ビットデバイスと量子アニーリング理論を活用

して開発されたカナダ D-Wave Systems 社の量子コンピュータのように、他の誰も予想しえなかった工学的応用が突如として実現されてしまうことが起こる。本研究分野でも同様のことが起きる可能性が高く、応用まではまだ距離のある技術であるとして静観すべきではないと考えられる。海外では既に Google や Microsoft などが量子コンピュータの AI 応用可能性に着目し、研究開発に着手している。わが国ではまだ産業界の関与は薄いですが、この分野の技術動向の積極的な情報発信や意見交換などによって産業界を巻き込んでいく仕組みを構築することが必要である。さらに、上述の期間を限った取り組みだけでなく、量子力学の新たな学術領域を長期的・継続的に進展させていくことも、教育・人材育成の観点から取り組むべきである。本研究分野の初期の重要な発見・提案に日本の研究者は貢献してきたが、これを体系化させ、次世代の人材を供給していくには、長期的な教育施策、特に大学や大学院進学選択時に人材を吸引する施策が求められる。

## 付録 1. 検討の経緯

- ・ JST 研究開発戦略センター（CRDS）では、平成 28 年度に戦略プロポーザルを作成すべきテーマの候補を CRDS 戦略スコープ 2016 策定委員会において指定し、平成 28 年 4 月に CRDS 内にプロポーザル作成のための検討チームを発足させた。その後、チームにおいて提言作成へ向けた調査・分析・検討を重ねた。
- ・ チームでは、調査によって国内外の研究開発動向・技術水準を明らかにしながらスコープの焦点を絞り、その過程において提言の方向性を検討するため、以下の有識者との意見交換・インタビューを実施した。
- ・ その上で、量子力学が新たな展開を迎え、それによってもたらされるデバイスイノベーションの実現に向けたトポロジカル量子戦略の研究開発に関して CRDS が構築した仮説を検証する目的で、科学技術未来戦略ワークショップを開催した（次々頁参照）。ワークショップの結果は報告書として平成 29 年 3 月に CRDS より発行した（CRDS-FY2016-WR-12）。
- ・ CRDS では以上の調査・分析の結果と、ワークショップにおける議論等を踏まえて、平成 29 年 3 月に本戦略プロポーザルを発行するに至った。

■意見交換・インタビューを実施した識者 （敬称略、所属・役職は実施時点）

氏名	所属・役職
安藤 陽一	ケルン大学物理学科・教授
五十嵐悠一	日本電気株式会社 IoT デバイス研究所・主任
岩本 敏	東京大学生産技術研究所・准教授
上田 正仁	東京大学大学院理学系研究科・教授
大谷 義近	東京大学物性研究所・教授
小野 輝男	京都大学化学研究所・教授
川上 則雄	京都大学大学院理学研究科・教授
川崎 雅司	理化学研究所創発物性科学研究センター・副センター長
黒部 篤	株式会社東芝研究開発センター・首席技監
小谷 元子	東北大学原子分子材料科学高等研究機構・機構長
小林 研介	大阪大学大学院理学研究科・教授
齊藤 英治	東北大学原子分子材料科学高等研究機構・教授
笹川 崇男	東京工業大学科学技術創成研究院・准教授
佐藤 宇史	東北大学大学院理学研究科・准教授
佐藤 昌利	京都大学基礎物理学研究所・教授
鈴木 義茂	大阪大学大学院基礎工学研究科・教授
瀬川 耕司	京都産業大学物理科学科・教授
寒川 哲臣	NTT 物性科学基礎研究所・所長
多々良 源	理化学研究所創発物性科学研究センター・チームリーダー
樽茶 清悟	東京大学大学院工学系研究科・教授
寺崎 一郎	名古屋大学大学院理学研究科・教授

十倉 好紀	理化学研究所創発物性科学研究センター・センター長
富永 淳二	産業技術総合研究所・首席研究員
永長 直人	理化学研究所創発物性科学研究センター・副センター長
中辻 知	東京大学物性研究所・教授
野原 実	岡山大学自然科学研究科・教授
橋本 幸士	大阪大学大学院理学研究科・教授
深見 俊輔	東北大学電気通信研究所・准教授
藤井 啓祐	東京大学大学院工学系研究科・助教
胡 暁	物質・材料研究機構国際ナノアーキテクトニクス研究拠点・グループリーダー
前野 悦輝	京都大学大学院理学研究科・教授
三谷 誠司	物質・材料研究機構磁性・スピントロニクス研究拠点・グループリーダー
村上 修一	東京工業大学理学院・教授
村上 裕彦	株式会社アルバック未来技術研究所・所長
村木 康二	NTT 物性科学基礎研究所・主席研究員
村山 斉	東京大学国際高等研究機構カブリ数物連携宇宙研究機構・機構長
求 幸年	東京大学大学院工学系研究科・教授
Anthony J. Leggett	Professor, Institute of Quantum Computing, University of Waterloo/Institute of Condensed Matter Theory, University of Illinois

■ 科学技術未来戦略ワークショップ「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～」

開催日時：2016年12月19日（月）10：00～18：00

開催会場：国立研究開発法人科学技術振興機構 東京本部別館2階セミナー室

プログラム：

オーガナイザー	曾根 純一 (JST-CRDS)
ファシリテーター	塚崎 敦 (JST-CRDS、東北大)
司会	宮下 哲 (JST-CRDS)

10:00～10:05 開会挨拶 曾根 純一 (JST-CRDS)

10:05～10:20 ワークショップ趣旨説明 宮下 哲 (JST-CRDS)

セッション1. トポロジカル物質における研究の現状と将来展望

10:20～10:40 「新学術領域研究「トポ物質科学」の現状と課題」  
川上 則雄 (京大)

10:40～11:00 「磁性とトポロジー」 十倉 好紀 (理研)

11:00～11:20 「トポロジカル絶縁体の将来デバイス展望」  
安藤 陽一 (ケルン大)

11:20～11:40 「トポロジカル物質相に関する理論と材料探索への試み」  
村上 修一 (東工大)

セッション2. 数学、素粒子物理から見たトポロジカル物質

12:40～13:00 「数学による新しいトポロジカル相：秩序系から無秩序系へ」  
小谷 元子 (東北大)

13:00～13:20 「場の量子論とトポロジカル物理」  
佐藤 昌利 (京大)

13:20～13:40 「自発的対称性の破れ、ソリトン、トポロジー」  
村山 斉 (東大)

セッション3. 量子コンピューティングへの展開

13:40～14:00 「量子コンピュータとトポロジカル物理」  
藤井 啓祐 (東大)

14:00～14:20 「トポロジカル物質を用いる量子計算への期待と課題」  
笹川 崇男 (東工大)

セッション4. スピントロニクスへの展開

14:40～15:00 「トポロジカル磁性体のスピントロニクス機能」  
大谷 義近 (東大)

15:00～15:20 「スピン軌道相互作用のデバイス応用」  
鈴木 義茂 (大阪大)

セッション3. フォトニクスへの展開

15:20～15:40 「トポロジカルフォトニクスの新しい展開」  
胡 暁 (NIMS)

15:40～16:00 「トポロジカルフォトニクスとトポロジカルフォノンクス  
～実験の現状と課題～」 岩本 敏 (東大)

16:00～18:00 総合討論 (ファシリテーター 塚崎 敦)

- 論点
1. 提言の骨子の妥当性
  2. 世界をリードするための研究実施体制・産学連携の仕組み
  3. 具体的な研究課題と社会的・経済的インパクト

18:00～ 閉会挨拶 曾根 純一 (JST-CRDS)

ワークショップ参加識者：

(発表者)

- ・安藤 陽一      ケルン大学 物理学科 教授
- ・岩本 敏        東京大学 生産技術研究所 准教授
- ・大谷 義近      東京大学 物性研究所 教授
- ・川上 則雄      京都大学 大学院理学研究科 教授
- ・十倉 好紀      理化学研究所 創発物性科学研究センター センター長
- ・小谷 元子      東北大学 原子分子材料科学高等研究機構 機構長
- ・笹川 崇男      東京工業大学 科学技術創成研究院 フロンティア材料研究所 准教授
- ・佐藤 昌利      京都大学 基礎物理学研究所 教授
- ・藤井 啓祐      東京大学 大学院工学系研究科 助教
- ・胡 暁            物質・材料研究機構 国際ナノアーキテクトニクス研究拠点  
グループリーダー
- ・村上 修一      東京工業大学 理学院 教授
- ・村山 斉        東京大学 国際高等研究所 カブリ数物連携宇宙研究機構 機構長

(コメンテーター)

- ・齊藤 英治      東北大学 原子分子材料科学高等研究機構 教授
- ・寒川 哲臣      NTT 物性科学基礎研究所 所長
- ・永長 直人      理化学研究所創発物性科学研究センター 副センター長
- ・橋本 幸士      大阪大学 大学院理学研究科 教授
- ・村上 裕彦      株式会社アルバック 未来技術研究所 所長

## 付録2. 国内外の状況

### 1. 日本の状況

わが国においては、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目指した「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、研究期間：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目指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、研究期間：2015～2019年度）が始まっている。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一つとして「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ている。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。今後は物質が持つトポロジカルな性質を活用した工学応用へ向けた技術開発と、関連する基礎学術の一層の強化によって、基礎研究の枠を超えた新しい研究開発のステージへとギアチェンジすることが求められている。

### 2. 諸外国の状況

#### (1) 米国

- 国立科学財団（NSF）

2016年8月、NSFは「10 Big Ideas for Future NSF Investments」における「6つの研究アイデア」の中の一つとして「The Quantum Leap : Leading the Next Quantum Revolution（量子飛躍：次の量子革命をリード）」を発表。量子システムの活用によって、より正確・効率的な次世代センシング、コンピューティング、モデリング・コミュニケーションが可能にするためには、粒子やエネルギーの挙動を観測・制御できる量子力学の理解が必要であり、次の量子革命による発見を一般社会に役立つ技術に実装するために、量子物質の研究は必要不可欠である、としている。トポロジカル物質の位置づけは明確には述べられていないが、今後の動向に注視が必要である。

- Microsoft Research 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四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、および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・アーキテクチャを構築するため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 レドモンド本社の敷地にある 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、実世界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 の総力を上げてこれまで以上に積極的に取り組む姿勢を見せている。

- EPIQS (Emergent Phenomena in Quantum Systems)

米国 Gordon and Betty Moore 財団は、Emergent Phenomena in Quantum Systems (EPIQS) プログラムとして、量子システムにおける創発現象（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 2014 年 11 月から 5 年間の研究補助を行っている。その補助金の内訳は、実験研究者 19 名に約 41 億円、物質合成専門家 12 名に約 24 億円、そして理論センターとして 6 大学 (Harvard, MIT, Stanford, UCB, UCSB, UIUC) に約 10 億円であり、総額 75 億円の大型予算である。プログラムオフィサーは 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。

- (2) カナダ

CIFAR (Canadian Institute for Advanced Research) はカナダ国内の基礎研究の促進を目的にして設立され、天体物理学から経済学まで多岐にわたる 12 のプログラムからなる巨大プロジェクトを運営している。その中の一つ Quantum Materials Program (プログラムディレクターはシャープブルック大学の Louis Taillefer 教授) において、トポロジカル物質を含む量子物質の研究開発を支援している。

- (3) 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

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盛んに行われている。また、英国では工学物理科学研究会議（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、UCL 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 Non-Equilibrium States in Strongly Correlated Electron Systems) が推進されている。イタリアの CNR-SPIN やロシアのモスクワ理工科大学 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。

さらに、欧州委員会では、2018 年から Horizon2020 の中で「Quantum Technology Flagship」（10 億ユーロ／10 年間）を推進することを計画中である。この中でトポロジカル物質がどのような位置づけになるのか留意が必要である。

#### (4) 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授賞した 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、中国科学院物理研究所内に Beijing national Lab. For Condensed Matter Physics を設置し、トポロジカル物質群を精力的に進めている。さらに、1988 年の F. D. M. Haldane の理論提唱以降、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。次節の論文動向からも明らかのように、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。

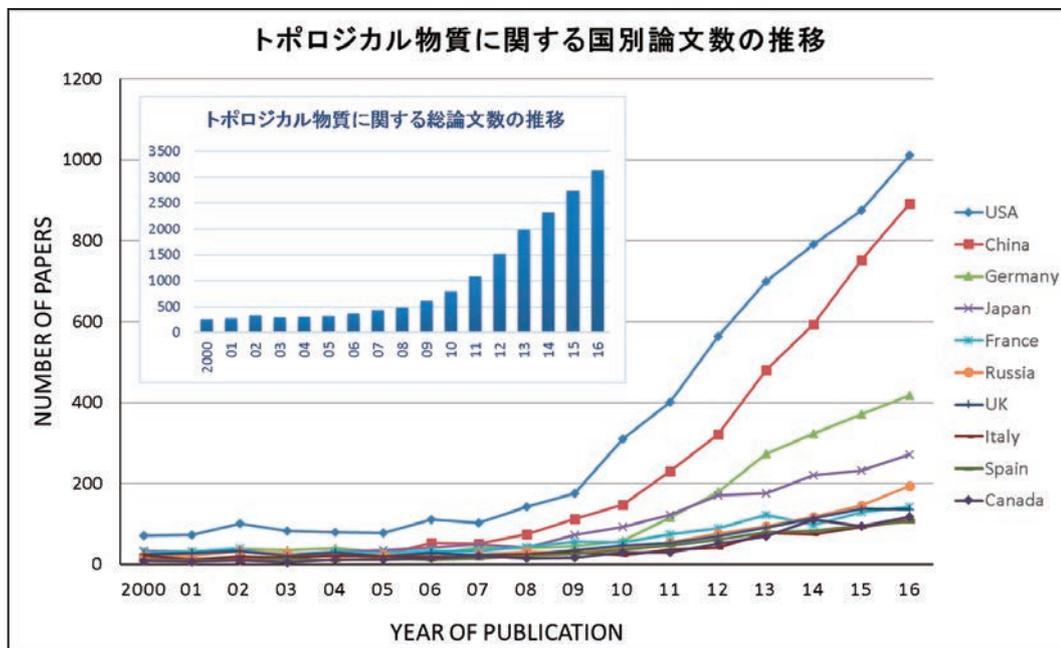
### 3. 論文動向

Clarivate Analytics 社の Web of Science を用いて、トポロジカル物質に関する論文動向（グラフ 1）および応用展開に関する論文動向（グラフ 2）について、2000 年～2016 年までの論文数推移を示す（グラフ 1、2 とも国別論文数は上位 10 カ国まで）。

トポロジカル物質に関する総論文数（グラフ 1 挿入図）は、3 次元トポロジカル絶縁体の実験的に実証された 2008 年以降、急激に増加していることがわかる。国別論文数は、2000 年以降、米国が常に件数でトップを維持しているが、2008 年以降、中国の論文件数の伸び率が大きくなっていることがわかる。2016 年の時点では、米国、中国に次いで、ドイツが 3 位、日本は 4 位となっている。

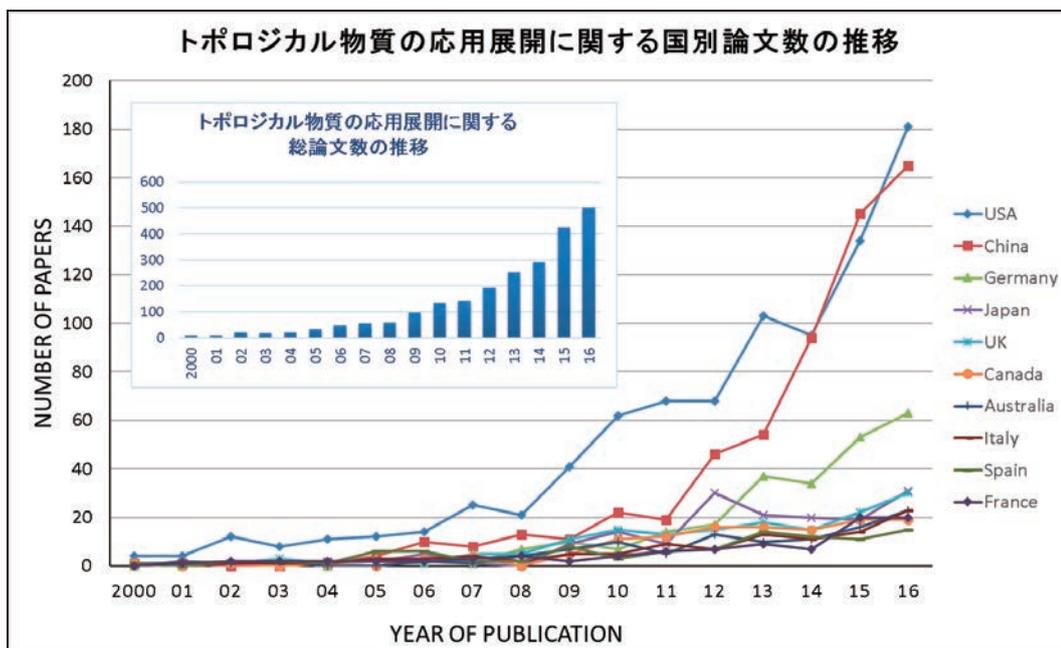
一方で、トポロジカル物質の応用展開に関する総論文数（グラフ 2 挿入図）は 2014 年から 2015 年にかけて約 1.5 倍に増加しており、この頃からトポロジカル物質の応用展開を意識する研究が増え始めたことがわかる。国別論文数では、2013 年頃までは米国が件

数でトップであったが、2015年には中国が米国を抜き1位になっている。2016年時点では、米国、中国、ドイツ、日本、英国の順である。



グラフ1

検索式として「topological AND (material\* OR insulator\* OR superconduct\* OR semimetal\* OR skyrmion\* OR “strongly correlated” OR “spin liquid\*”)」を用いて検索 (2017年2月23日時点)



グラフ2

検索式として「topological AND (“quantum comput\*” OR spintronics OR photonic\*)」を用いて検索 (2017年2月23日時点)

## 付録3. 専門用語説明

### • 角度分解光電子分光法 (ARPES)

アインシュタインが発見した光電効果を用いて、結晶に紫外線や X 線を照射することで物質の表面から放出された電子（光電子）が持つエネルギーや運動量を測定することで、結晶中の電子の状態を知るための実験手法。

### • スキルミオン

電子が持つスピンの渦を巻くように整列した磁気構造体であり、数 nm から数百 nm 程度の大きさを持つ。スキルミオンは 1962 年に T. Skyrme (英) によって原子核をつくる陽子や中性子のような核子の物理を記述するために提唱されたものである。2009 年に S. Mühlbauer (独) らが中性子回折法によって MnSi 中のスキルミオンの集合体の観察に成功し、2010 年、十倉好紀グループ (日) によって  $\text{Fe}_{0.5}\text{Co}_{0.5}\text{Si}$  中のスキルミオン 1 個を電子顕微鏡で観測することに成功した。

### • スピン運動量ロッキング

トポロジカル絶縁体の表面において、電子の運動方向に依存して電子スピンの方向が決まる現象。このため、熱平衡状態にあるトポロジカル絶縁体表面には純スピン流が存在する。また、電流を印加することによって電流と垂直の方向にスピン偏極した、スピン偏極電流を生成することが可能になる。

### • スピン流

スピンの流れ。上向きスピンの電子と下向きスピンの電子が互いに逆方向に流れると、電荷の流れは相殺され電流がゼロとなるが、スピンに関しては、下向きスピンの電子が左から右に流れることと、上向きスピンの電子が右から左に流れることが等価であるため、各電子のスピン流は強め合い、電子 2 個分のスピン流が流れることになる。このように電荷を運ばずにスピンのみを運ぶ電子の流れを純スピン流という。

### • ディラック粒子

1928 年に Paul A. M. Dirac (英) が提唱した相対論的量子力学の枠組みで定式化されたディラック方程式に従うフェルミ粒子。ディラック方程式に従う電子は大きな移動度を持つ。これまでグラフェンや有機導体、トポロジカル絶縁体の表面などでその存在が確認されている。

### • トポロジー (位相幾何学)

トポロジーとは数学における幾何学の一分野であり、何らかの形を連続変形しても保たれる性質に焦点を当てたものである。例えば、「穴の数」という量に注目すると、コーヒーカップの形とドーナツの形は連続変形可能であるため同じトポロジーである、と言える。トポロジーの萌芽的な研究として「ケーニヒスベルクの橋の問題」がある（詳細はコラム 1 を参照）。

### • トポロジカル超伝導

電子の波動関数が非自明なトポロジカル不変量を持つ超伝導。表面にマヨラナ粒子が存在することが理論的に示唆されており、実験的な検証が盛んに行われている。2010年に安藤陽一グループ（日）によって  $\text{Cu}_x\text{Bi}_2\text{Se}_3$  がトポロジカル超伝導であることが実験的に実証された。

### • トポロジカル絶縁体

物質内部は絶縁体であるが、外部との境界（2次元系であれば端、3次元系であれば表面）は金属である物質群。比較的大きなスピン軌道相互作用を内在することが特徴である。2次元系の端状態では、逆向きスピンをもった電子が互いに逆方向に動く特異な性質（量子スピンホール効果）、3次元系の表面状態では、エネルギー分散が線形となるディラック性に加えて、電子の運動方向とスピンの向きが必ず直行する現象（スピン運動量ロック）が現れる。2次元トポロジカル絶縁体は2005年に C. L. Kane ら（米）、S. -C. Zhang ら（米）によって理論提唱され、2007年に L. W. Molenkamp グループ（仏）により CdTe/HgTe 量子井戸構造をもつ2次元電子系において実験的に確認された。また、3次元トポロジカル絶縁体は2007年に L. Fu ら（米）によって  $\text{Bi}_{1-x}\text{Sb}_x$  が候補物質であることが理論予測され、翌年の2008年に M. Z. Hasan グループ（米）による ARPES 実験により実証された。

### • フォトニック結晶

屈折率が光の波長と同程度の長さで周期的に変調されたナノ構造体。ナノ加工技術などによってシリコンなどの誘電体に人工的な周期構造を形成することで作製される。フォトニック結晶は、光の伝播を禁止するフォトニックバンドギャップが存在するため、これを利用して微小な空間に光を閉じ込めることが可能になる。

### •マジック状態蒸留

量子コンピューティングは、クリフォード演算と非クリフォード演算という2つの演算から構成される。クリフォード演算だけからなる量子コンピューティングは古典計算機で効率よくシミュレートできることが知られている。一方で、マヨラナ粒子などの非可換エニオンを用いたトポロジカル量子コンピューティングにおいて、クリフォード演算はトポロジカルに保護できるが、非クリフォード演算はトポロジカルに保護できないことが指摘されている。この問題を解決するために、マジック状態と呼ばれる特殊な状態を用意し、複数のマジック状態から性質の良いマジック状態の純度を上げる（蒸留する）操作を行う必要がある。この操作をマジック状態蒸留と呼ぶ。マジック状態蒸留はクリフォード演算のみで実行可能であるため、マヨラナ粒子とマジック状態蒸留を使うことで万能な量子コンピューティングが可能になる。

### • マヨラナ粒子

自身がその反粒子と同一な電氣的に中性なフェルミ粒子。E. Majorana（伊）によって1937年に素粒子の一つとして理論的に提唱された（詳細はコラム2に記載）。ニュートリノの候補として精力的な研究が続けられているが、未だにその存在の確固たる証拠

は見つかっていない。現在では、トポロジカル絶縁体と超伝導接合界面やトポロジカル超伝導体の表面などにマヨラナ粒子が存在することが提案され、量子コンピューティングへの応用も含めて精力的な実験研究が行われている。

#### • 量子スピン液体

幾何学的フラストレーションなどの強い量子的な揺らぎのため、極低温まで磁気的秩序が存在しない量子状態であり、いわば磁気スピンの液体状態であることから量子スピン液体と呼ばれる。近年、イリジウム酸化物などの強いスピン軌道相互作用を持つ強相関電子系が候補物質であるとされているが、まだ実験的な確証は得られていない。

#### • 量子ホール効果

半導体界面などの2次元面内に閉じ込められた電子の波動関数が磁場中において非自明なトポロジエを持つことに由来して生じる効果である。実験的には、低温で強磁場を印加することでホール伝導度が  $e^2/h$  の整数倍の値を示す（整数量子ホール効果）。1980年に K. v. Klitzing（独）によって発見され、1985年にノーベル物理学賞が授与された。素電荷  $e$  とプランク定数  $h$  のみで規定されるため、現在の抵抗標準に用いられている。

#### • ワイル半金属

相対論効果を取り入れたディラック方程式において、質量をゼロとしたときに得られる粒子をワイル粒子と呼び、1929年に Hermann K. H. Weyl（独）によって提唱された（詳細はコラム6に記載）。ニュートリノの有効候補として有名であったが、ニュートリノ振動の観測によりその存在の可能性は低いと考えられていた。2015年に M. Z. Hasan グループ（米）および Z. Fang グループ（中）によってほぼ同時に TaAs がワイル半金属であることが実験的に確認された。

■戦略プロポーザル作成メンバー■

曾根 純一	上席フェロー	(ナノテクノロジー・材料ユニット)
宮下 哲	フェロー・リーダー	(ナノテクノロジー・材料ユニット)
五明 明子	主任調査員	(研究プロジェクト推進部)
佐藤 勝昭	フェロー	(ナノテクノロジー・材料ユニット)
塚崎 敦	特任フェロー	(ナノテクノロジー・材料ユニット)
永野 智己	フェロー	(ナノテクノロジー・材料ユニット)
馬場 寿夫	フェロー	(ナノテクノロジー・材料ユニット)
的場 正憲	フェロー	(システム・情報科学技術ユニット)

※お問い合わせ等は下記ユニットまでお願いします。

CRDS-FY2016-SP-02

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～

### STRATEGIC PROPOSAL

#### Topological Quantum Matter Initiative

- Device Innovation by New Developments in Quantum Physics -

平成 29 年 3 月 March 2017

ISBN978-4-88890-553-4

国立研究開発法人科学技術振興機構 研究開発戦略センター ナノテクノロジー・材料ユニット

Nanotechnology/Materials Unit,  
Center for Research and Development Strategy  
Japan Science and Technology Agency

〒102-0076 東京都千代田区五番町 7 番地

電話 03-5214-7481

ファックス 03-5214-7385

<http://www.jst.go.jp/crds/index.html>

©2017 JST/CRDS

許可無く複写／複製することを禁じます。

引用を行う際は、必ず出典を記述願います。

No part of this publication may be reproduced, copied, transmitted or translated without written permission. Application should be sent to [crds@jst.go.jp](mailto:crds@jst.go.jp). Any quotations must be appropriately acknowledged.

ATTAATC A AAGA C CTA ACT CTCAGACC  
CT CTCGCC AATTAATA  
TAA TAATC  
TTGCAATTGGA CCCC  
AATTCC AAAA GGCCTTAA CCTAC  
ATAAGA CTCTAACT CTCGCC  
AA TAATC  
AAT A TCTATAAGA CTCTAACT CTAAT A TCTAT  
CTCGCC AATTAATA  
ATTAATC A AAGA C CTA ACT CTCAGACC  
AAT A TCTATAAGA CTCTAACT  
CTCGCC AATTAATA  
TTAATC A AAGA C CTA ACT CTCAGACC  
AAT A TCTATAAGA CTCTAACT  
ATTAATC A AAGA CCT  
GA C CTA ACT CTCAGACC  
0011 1110 000  
00 11 001010 1  
0011 1110 000  
0100 11100 11100 101010000111  
001100 110010  
0001 0011 11110 000101

