CRDS-FY2016-WR-12

科学技術未来戦略ワークショップ報告書

# 「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～」

2016年12月19日（月）　開催

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
Center for Research and Development Strategy, Japan Science and Technology Agency

# エグゼクティブサマリー

本報告書は、国立研究開発法人科学技術振興機構（JST）研究開発戦略センター（CRDS）が平成 28 年 12 月 19 日に開催した科学技術未来戦略ワークショップ（WS）「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～」に関するものである。

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は、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近づいていると認識されているように、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。

本ワークショップは、限界突破を目指すアプローチの１つとして、近年急速に発展しているトポロジカル物質群と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する。トポロジーの概念に立脚した量子力学の新たな展開を加速すると共に工学応用領域のデバイスイノベーションを目指す一連の研究開発戦略「トポロジカル量子戦略」を掲げ、研究の現状の把握、今後取り組むべき研究開発課題の抽出、固体物理・素粒子物理・数学・工学が融合・連携するための仕組みなどについて第一線の研究者と議論することを目的に開催した。

ワークショップでは、まず、JST-CRDS における調査・分析結果から得られた全体像、課題、研究開発戦略検討の仮説を提示し、その後にトポロジカル物質に関する研究の現状と将来展望、数学・素粒子物理から見たトポロジカル物質の理解、さらには量子コンピューティング・スピントロニクス・フォトニクスなどへの具体的な応用展開に関する話題提供、最後に総合討論を行った。

CRDS から、「トポロジカル量子戦略」を推進していく方向性として、以下の 3 点の仮説について示し、事前アンケート形式で招聘者の意見を聴取した結果、おおむね賛同の意が得られた。

- トポロジカル物質はこれまで科研費などを中心に公的資金の支援がなされてきたが、今後はそれを越えた目的基礎研究のステージでの研究開発を推進すべきである
- トポロジーや位相の概念を用いて飛躍的な性能向上を期待できる応用領域として、量子コンピューティング、スピントロニクス、フォトニクスが有望である
- 上記の仮説を実現するためには、物質科学のみならず、数学、素粒子物理学、工学との協働により、基礎学術面の更なる深化・拡張および新物質探索の加速が必要である

トポロジカル物質における研究の現状と将来展望としては、現在、科研費新学術領域研究を中心に基礎研究が進展しており、理論や超伝導・強相関系などの物質開発には強みを有するものの、弱相関系の物質開発においては米国や中国の人海戦術に圧倒されつつあること、また超低消費電力デバイス候補としてスキルミオンへの期待が大きく、欧州では複数の研究プロジェクトが推進されている中でわが国は立ち遅れ気味であること等の懸念点、および戦略的な取り組みの重要性についての指摘があった。さらに、トポロジカル量子ビット実現のためにはマヨラナ粒子の制御が必須であるが、まだ最適な物質系が確立さ

れていないこと、新しいトポロジカル物質を発見するためには、理論提唱と物質開発の有機的な連携が必須であり、分野を超えた研究体制の構築が重要であることが確認された。

数学、素粒子物理から見たトポロジカル物質の理解としては、数学において発展してきたK理論や非可換幾何学などを用いると、秩序系のみならず、アモルファスなどの無秩序系のトポロジカル相への展開が可能であること、素粒子物理と物性物理の共通言語である場の量子論を用いることで、マヨラナ粒子などの非可換エニオンの存在条件や新しい種類のトポロジカル表面状態などを提唱することが可能になる。一方で、実際にどのような物質系で実現されるのかまでは素粒子物理だけでは提案できないため、物質研究者との共同研究が必須であること等の指摘があった。さらに、かつて素粒子物理と物性物理が互いに刺激しあって発展してきたように、トポロジカル物質の研究に対しても、素粒子物理のアイデアが物性物理における普遍的な枠組みを与え、また物性物理のテクニックを用いて素粒子物理のアイデアをテストできる可能性があることなど、互いにwin-winの関係を築ける可能性があることが確認された。

3つの応用領域（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）への展開については、まず量子コンピューティングに関して、量子誤り訂正技術を用いる量子情報的アプローチとトポロジカル秩序を用いる物性的アプローチは共に背景にある数学的な構造は同じであり相補的に推進していくことが望ましいことや、トポロジカル秩序においてもマヨラナ粒子を制御することで万事うまくいくわけではなく、熱的安定性などの検証が必要であること等について指摘があった。また、上述のとおり、マヨラナ粒子に対しては最適な物質系が未だ確立しているわけではないため、更に物質開発を推進していく必要があることが確認された。スピントロニクスに関しては、今考えられているスピントロニクス機能のほぼ全てがトポロジカル物質で実現できる可能性がある点、トポロジカル反強磁性体がもつ仮想磁場を起因とする巨大異常ホール効果を活用することで、MRAMや熱電素子にブレークスルーを起こせる可能性がある点、スピン軌道相互作用を用いたデバイス開発が実用可能な範疇にある点等について報告された。フォトニクスに関しては、時間反転対称性が保持されたトポロジカルフォトニクス、時間反転対称性が破れたトポロジカルフォトニクス両方の現状が報告され、特に今後必要な取り組みとして、レーザや大角度偏光などのアクティブ素子への展開が重要であること等の指摘があった。

総合討論においては、主に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、および社会・経済的インパクトについて議論を行った。本研究分野を推進していく上で重要なことは、米国や中国のような人海戦術ではもはやわが国に勝ち目はなく、若手研究者の活用および異分野融合・連携を加速させつつ、現存のリソース（ヒト、モノ、カネ）を効率よく組み合わせた戦略的な研究実施体制を構築することが重要であること等の共通認識が得られた。また、まだ基礎研究の段階ではあるものの、実用化されたときのインパクトが大きい分野になる可能性を秘めているため、産業界を巻き込んだ研究コミュニティを形成することが重要であること等の指摘があった。

ワークショップでの議論を踏まえ、CRDS は、今後国として重点的に推進すべき研究領域、具体的な研究開発課題を検討し、研究開発の推進方法を含めて戦略プロポーザルを策定し、関係府省や関連する産業界・学界等へ提案する予定である。

# 目　次

エグゼクティブサマリー…… i

1．開会挨拶　曽根　純一（JST-CRDS）…… 1

2．ワークショップ趣旨説明　宮下　哲（JST-CRDS）…… 3

3．トポロジカル物質における研究の現状と将来展望 …… 6
3.1　新学術領域研究「トポ物質科学」の現状と展望　川上　則雄（京都大学）…… 6
3.2　磁性とトポロジー　十倉　好紀（理化学研究所）… 14
3.3　トポロジカル絶縁体の将来デバイス展望　安藤　陽一（ケルン大学）…… 21
3.4　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（東京工業大学）… 29

4．数学、素粒子物理から見たトポロジカル物質 …… 36
4.1　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（東北大学）…… 36
4.2　場の量子論とトポロジカル物質　佐藤　昌利（京都大学）…… 41
4.3　自発的対称性の破れ、ソリトン、トポロジー　村山　斉（東京大学）…… 48

5．量子コンピューティングへの展開 …… 55
5.1　量子コンピュータとトポロジカル物理　藤井　啓祐（東京大学）…… 55
5.2　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（東京工業大学）… 62

6．スピントロニクスへの展開 …… 68
6.1　トポロジカル磁性体のスピントロニクス機能　大谷　義近（東京大学）…… 68
6.2　スピン軌道相互作用のデバイス応用　鈴木　義茂（大阪大学）…… 76

7．フォトニクスへの展開 …… 83
7.1　トポロジカルフォトニクスの新しい展開　胡　暁（物質・材料研究機構）… 83
7.2　トポロジカルフォトニクスとトポロジカルフォノニクス
～実験の現状と課題～　岩本　敏（東京大学）…… 90

8．総合討論　ファシリテーター：塚﨑　敦（JST-CRDS、東北大学）…… 97

9．閉会挨拶　曽根　純一（JST-CRDS）… 103

付録 …… 104
付録１：開催趣旨・プログラム…… 104
付録２：参加者一覧…… 107

# 1．開会挨拶

曽根　純一（JST-CRDS）

本日は、「トポロジカル量子戦略」というタイトルで終日のワークショップを開催するに当たり、ご講演いただく先生方、および産業界を含め広い視点でのコメントをいただくことになるコメンテーターの先生方にお集まりいただいたことに感謝したい。

CRDS という組織は、科学技術に関して様々な調査を通して「日本として何をやるべきなのか」を国に向けて提言することをミッションとしている。我々は特にナノテクノロジー・材料分野を担当しており、エレクトロニクスやスピントロニクス、フォトニクスなどをカバーしている。

今年度に入ってから、「トポロジカル量子戦略」に関していろいろと調査してきた。今年のノーベル物理学賞でトポロジカル相転移が授賞理由となったが、我々の認識としては、ノーベル物理学賞の授賞内容はこのエキサイティングな領域の前駆的な内容であり、将来的に第 2、第 3 のノーベル物理学賞が出てくる可能性がある領域ではないかと感じている。非常に新しい量子力学の世界が広がってきているという実感を持っており、理論先行で新しい現象が予言され、実験的に実証されているという点はこれまでの固体物理にはなかった領域ではないか。さらに素粒子物理の概念や数学的な視点も入り全く新しい理論体系やそれをベースにした様々な新たな物質相が生まれている。

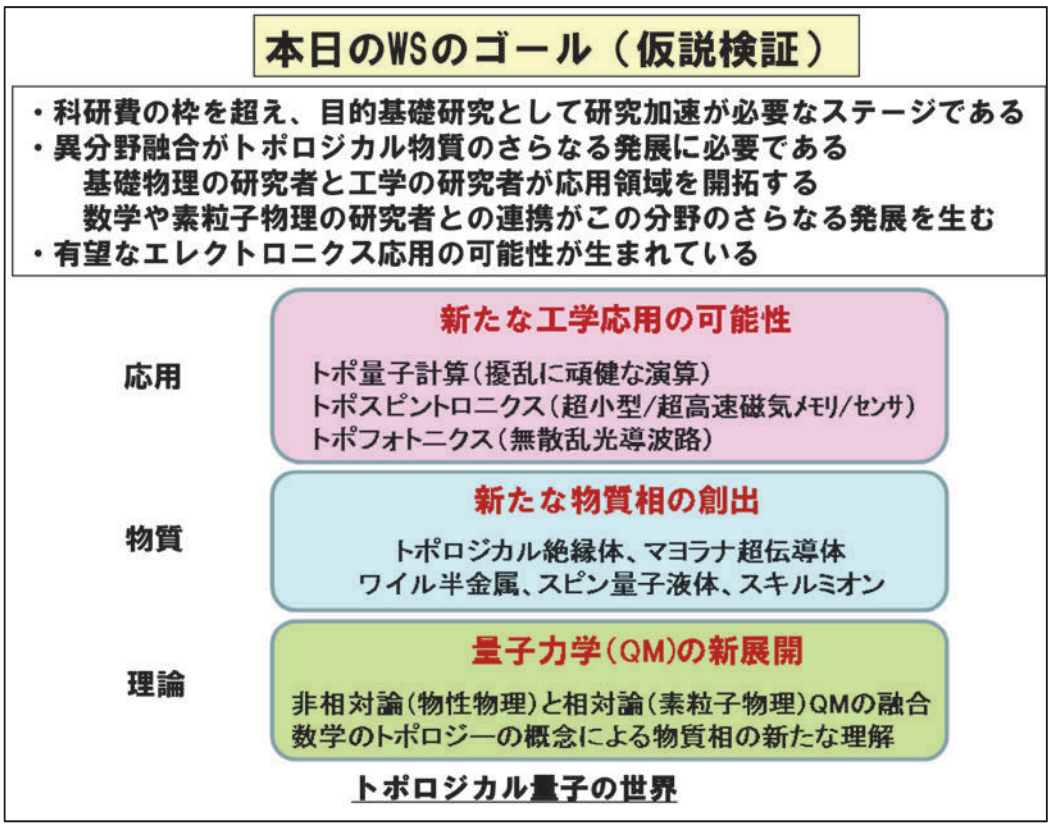



図 1-1

フェルミ粒子とボース粒子の 2 種類の粒子が固体物理学の分野に出現してきたが、フェルミ粒子は半導体エレクトロニクスの勃興を支え、ボース粒子は超伝導という形で我々の生活に価値を与えてきた。今回議論を行うこの領域においてはフェルミ粒子でもボース粒子でもない様々な新しい粒子群が生まれつつあり、それをベースにした応用領域が広がりつつあるという点が大変興味深い。

図 1-1 にはこれまでの調査によって得られた我々なりの仮説を記載している。本日のワークショップでは我々の立てた仮説が正しいのかどうかを確認したい。あるいは間違っているのであれば軌道修正したいと考えている。

1 つ目としては、今、科研費の中で大勢の研究者がこの領域に集まってきているが、それを JST のような目的基礎研究のフェーズに移して、科研費と一緒にこの領域を発展させていく、加速させていくステージにきているのではないかと考えている。また、2 つ目として、異分野融合が重要な領域と感じており、応用を考える上では基礎物理と工学の融合が必要である。さらに新しい学術領域という点で固体物理と数学や素粒子物理との連携やコミュニケーションが必要になってくるのではないか。これはこの領域の研究者層を厚くする、特に若手が参入するという意味でも重要であると考えている。3 つ目として、本日特に集中して議論したいこととして、この領域がエレクトロニクスもしくはもっと広い意味で応用領域に将来的にどのようなインパクトを与える可能性があるのか、について確認したい。

上記 3 点に関する議論ができると、我々も提言書を作成できると考えている。是非とも有益な議論をお願いしたい。

# 2. ワークショップ趣旨説明

宮下　哲（JST-CRDS）

本日のワークショップでは「トポロジカル量子戦略」という研究開発戦略を掲げるにあたり、トポロジカル絶縁体を始めとするトポロジカル物質・物性に関する研究が世界的にも競争が激化している中、応用領域への展開または基礎研究の更なる発展を促進するためには何をするべきなのか、この研究分野はどのような社会ニーズに応えていけるのか等について皆様と一緒に議論し、中長期的な方策を見出したい。

既にご承知の通り、1900 年初頭に量子力学が生まれてから、これまでは主に非相対論的効果を取り扱う固体物理と主に相対論的効果を取り扱う素粒子物理の 2 つの流れがあったが、様々な経緯を経て、今、トポロジカル物質というテーマの下、固体物理、素粒子物理、さらに数学が一緒になって研究できる新しい量子力学が構築されつつあるのではないかと感じている。その中で、トポロジカル物質群が持つ特徴的な機能が活用できる応用領域として、ここでは量子コンピューティング、スピントロニクス、フォトニクスの 3 つを取り上げ、社会へのインパクトがどの程度あるのか等について本日議論したい。

現時点では、トポロジカル物質群やトポロジカル物性に関して、基礎研究においても応用研究に向けてもまだまだ解決すべき課題がたくさんある状況にあるのではないか。本研究分野の論文動向を見てみると、例えば「topological insulator」で検索してみると、2008 年、2009 年あたりから論文数が急激に増えていることがわかる。本研究分野は物性物理学には珍しく理論が先行し、物質が提唱された後に実験によって検証されるという流れになっている。近年の状況を見ると、物質開発においては、米国、欧州、中国が中心になっているものの、超伝導や強相関系、薄膜化技術といったところでは日本が世界をリードしていると認識している。また、2016 年のノーベル賞がトポロジカル相転移の先駆的理論研究に与えられたことは、本研究分野の重要性を証明することになったのではないか。

本研究分野に対して、日本においては世界に先駆けて前野先生が代表をされた新学術領域研究という大きなプロジェクトが立ち上がり、それを今、川上先生が代表をされている新学術領域研究が引き継いでおられる。小谷先生が拠点長をされている東北大学 WPI-AIMR においては、「トポロジカル機能性材料」が 3 つのターゲットプロジェクトの一つとして推進されている。それ以前には十倉先生の FIRST や安藤先生の次世代 FIRST で世界を牽引する成果を上げてこられ、この分野で決して日本は世界に引けをとっていないと感じている。諸外国を見ると、米国ではムーア財団やマイクロソフトが本研究分野に投資をしている。特にマイクロソフトでは 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にターゲットを絞って世界中の優秀な研究者を集めて研究を開始している。中国においては、中国科学院や上海交通大学内に拠点を作り、多くの人材と資金を投入している。川上先生の新学術領域研究では、世界中の関連プロジェクトとアライアンスを形成して人的交流も含めたネットワークを構築されているが、そのような状況の中で、日本としてはこれからどのような戦略で研究を進めていくべきか、どのような国際

連携を進めていくべきか、本日じっくりと議論したい。

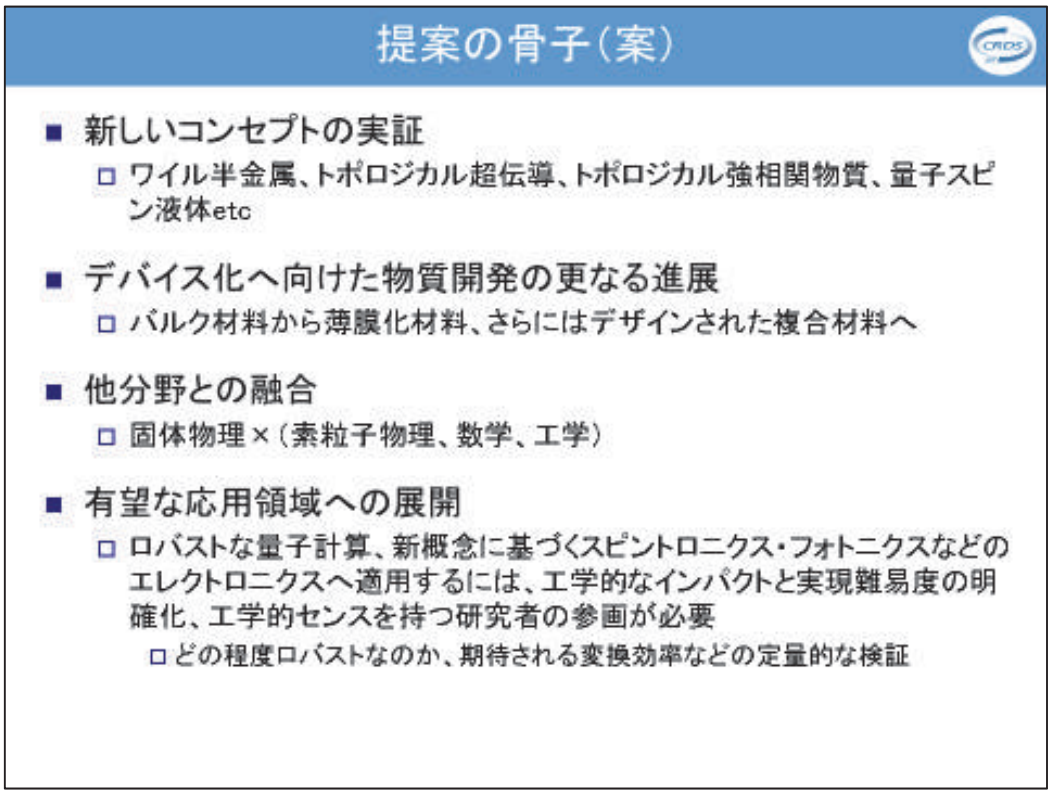



**図 2-1**

図 2-1 は、現在我々が考えている提案の骨子案である。新しいコンセプトの実証に向けてまだまだ基礎研究を拡張すべきところ、デバイス化へ向けて進展させるべきところがあるのではないかと考えている。そのためには固体物理だけではなく、素粒子物理や数学、工学との協働が必要であり、有望な応用領域への展開を目指すべきであろう。ここでは、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、フォトニクスを挙げているが、他にも様々な応用領域があるのではないかと感じている。

我々の骨子案を元に、本日お集まりいただいた先生方には 3 つの仮説について事前にアンケートを実施させていただいた。その結果が図 2-2 であるが、本日の総合討論の時間で事前アンケート結果を踏まえて、今後国としてどのように本研究分野を推進していくべきかについて一緒に議論したい。

総合討論では、塚﨑先生にファシリテーターとしてリードしていただくが、主に 4 つの論点について議論したい。1 つ目は我々の仮説の妥当性について、2 つ目は取り組むべき研究課題やグローバルな方向性の中でのわが国の強みについて、3 つ目はどのような研究プロジェクトの形態がありえるのか、4 つ目は公的資金を投じる意義や社会的・経済的・科学技術インパクトについてである。

本日 1 日長丁場となるが、どうぞ宜しくお願いしたい。

図 2-1

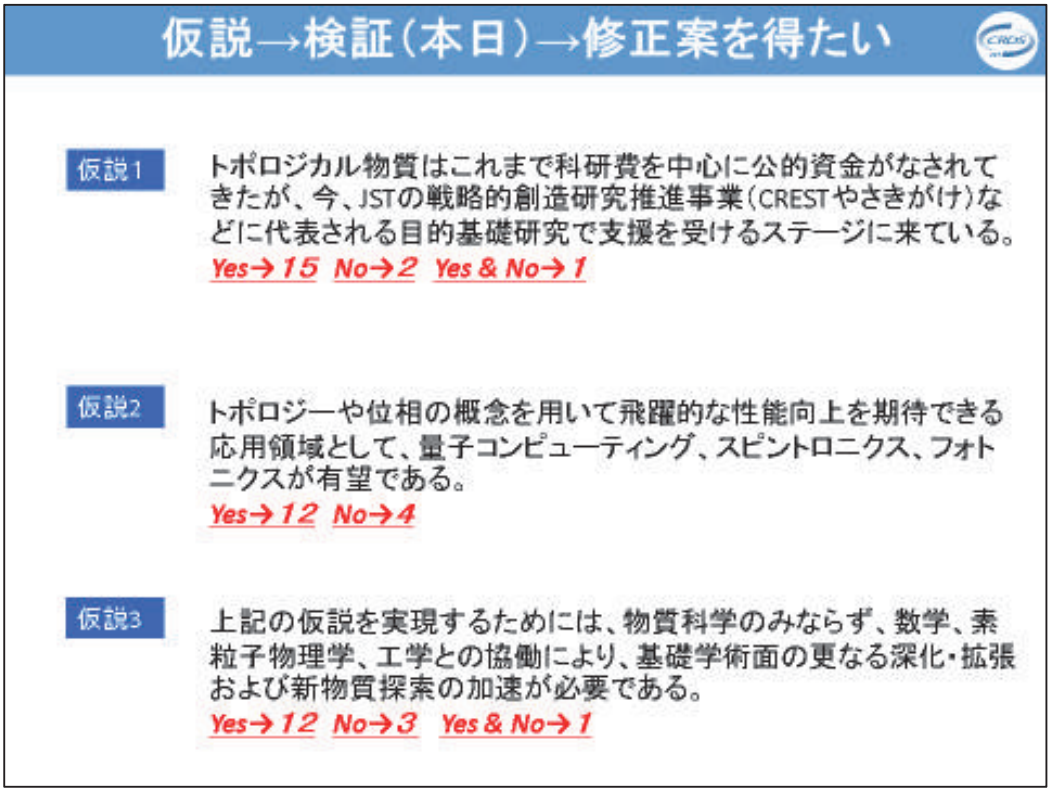

仮説→検証（本日）→修正案を得たい
仮説1
トポロジカル物質はこれまで科研費を中心に公的資金がなされてきたが、今、JSTの戦略的創造研究推進事業（CRESTやさきがけ）などに代表される目的基礎研究で支援を受けるステージに来ている。
Yes→15 No→2 Yes & No→1
仮説2
トポロジーや位相の概念を用いて飛躍的な性能向上を期待できる応用領域として、量子コンピューティング、スピントロニクス、フォトニクスが有望である。
Yes→12 No→4
仮説3
上記の仮説を実現するためには、物質科学のみならず、数学、素粒子物理学、工学との協働により、基礎学術面の更なる深化・拡張および新物質探索の加速が必要である。
Yes→12 No→3 Yes & No→1

図 2-2

# 3. トポロジカル物質における研究の現状と将来展望

## 3.1 新学術領域研究「トポ物質科学」の現状と展望

川上　則雄（京都大学）

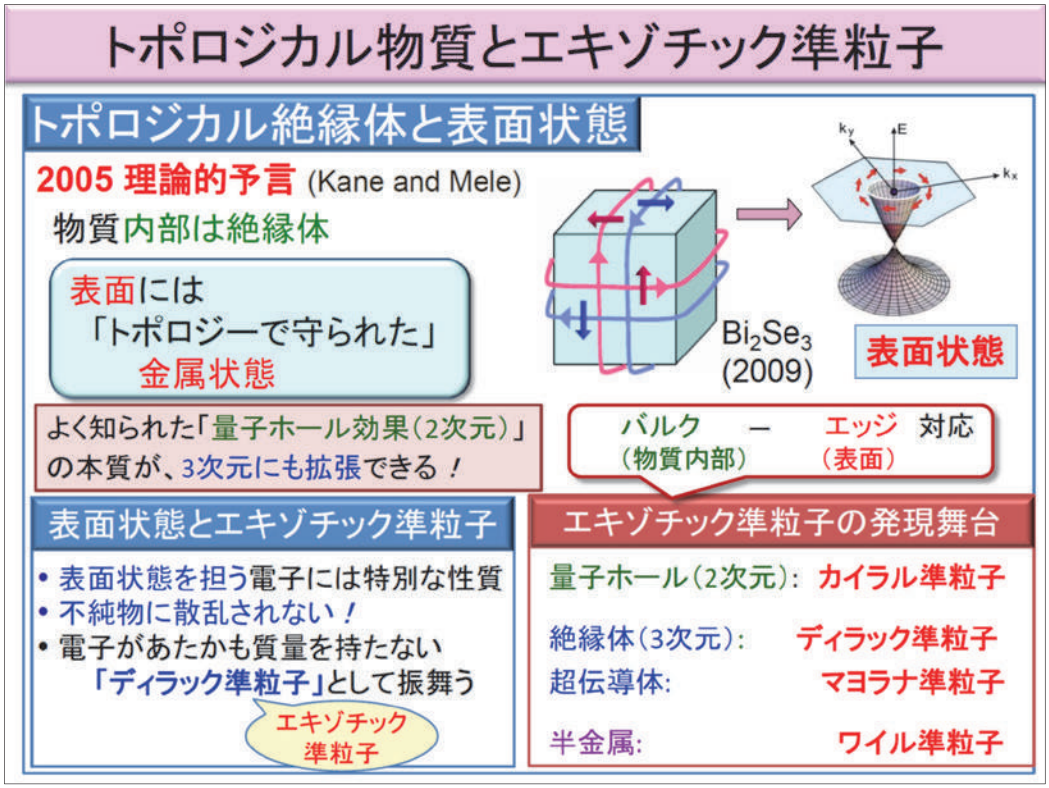



図 3-1-1

新学術領域「トポ物質科学」は昨年度から始まり、5 年間のプロジェクトである。図 3-1-1 に示すように、対象としているのはトポロジカル物質とそれに付随するエキゾチックな準粒子で、その典型例がよく知られているトポロジカル絶縁体とその表面状態である。2005 年に 2 次元に対して予言され、今では多くの物質が見つかっている。表面にはトポロジーで守られた状態が出現し、それがよく知られている量子ホール効果の 3 次元版になっている。ここに表れるエキゾチック準粒子は、例えば不純物に散乱されない、ディラック準粒子のようにふるまう、といった性質を持っている。このようなエキゾチック準粒子の発現舞台としては、よく知られている 2 次元の量子ホール効果（カイラル準粒子）、トポロジカル絶縁体（ディラック準粒子）、超伝導（マヨラナ準粒子）、半金属（ワイル準粒子）などがある。これらは、よく知られているバルク・エッジ対応の典型例になっている。

前野新学術領域では、トポロジカル量子現象というものは様々な物質に現れるということと、多くの分野に発現する現象であるという認識を広めた。我々の研究では、この成果に基づき、さらなる展開を図ろうとするものである。その新展開の必須要素として我々が考えているのが、物質に多様性と機能性をもたらす強相関系、結晶構造などの対称性を用

いた新しい物質開発のアプローチ、構造制御などのナノサイエンスである。このようなキーワードを基に、前回の新学術を越えて、例えば、トポロジカル半金属や、トポロジカル磁性体といった強相関系への新展開、人工超格子などによるトポロジカル新物質などの開発を考えている。このような物質科学の網羅的な研究を行うことで、トポロジカル物質科学の確立を目指している。

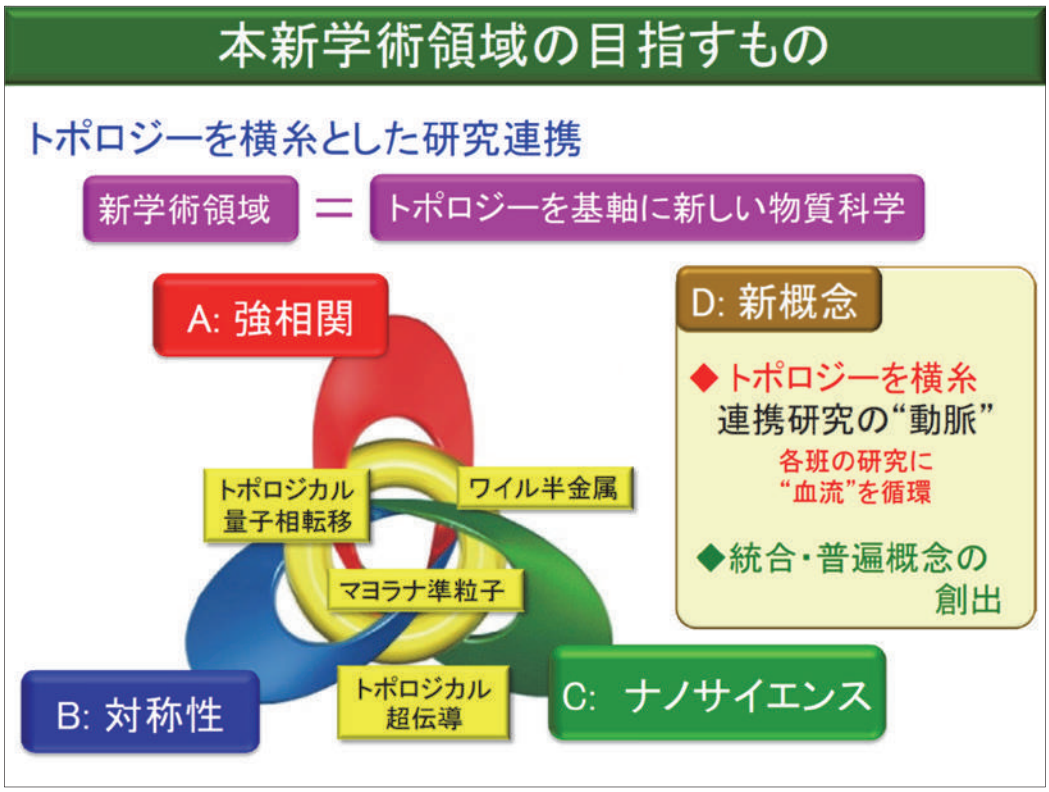



**図 3-1-2**

図 3-1-2 に示すように、A：強相関、B：対称性、C：ナノサイエンスに対してそれぞれ研究班（計画研究）を設け、さらに、これらの連携研究を加速する D：理論班（黄色い部分）を設けている。ワイル半金属やマヨラナ準粒子といった具体的な研究を通して、トポロジーを基軸にした新しい物質科学を築きたいと考えている。これら（A、B、C、D の各班）について簡単に説明する。

A 班では、強相関物質のトポロジカル相を研究する。例えば、ディラック半金属やワイル半金属などのトポロジカル半金属、スピン液体を含んだトポロジカルモット絶縁体、強相関のトポロジカル超伝導体の開発、探索などがある。この A 班には前野悦輝（京都大学）さんが代表で、松田、高木、藤本、鄭、浅野、宇田川さんが分担している。

B 班では、対称性に基づいた新奇なトポロジカル相の探求を目的としている。そのために、高品質の単結晶の育成や、世界最高分解能の先端分光などを用いている。トポロジカル量子相転移が現れるディラック半金属やワイル半金属の研究などが具体的な例である。この対称性班のリーダーは東北大の佐藤宇史さんで、瀬川、柏谷、田仲、塚崎さんが分担者である。安藤先生はケルンに移られたので、連携研究者になっている。

C 班では、トポロジカル物質ナノ構造での輸送現象の研究を主に行っている。よく知られている量子ホール効果のエッジ状態、あるいは量子スピンホール系のヘリカルエッジ状

態の研究などがある。さらにスピンの幾何学的位相の制御なども目的としている。この C 班のリーダーは東工大の藤澤利正さんで、村木、好田、野村、江澤さんが分担者になっている。

D 班では、トポロジカル相におけるエキゾチック準粒子の理論研究を目的としている。図 3-1-2 で示したロゴマークの黄色い部分に該当し、A・B・C の連携研究の動脈となっており、それらを加速、刺激する役割を担っている。もちろん、新学理の構築を目的としており、その学理を周辺の領域である、冷却原子、超流体ヘリウム、中性子星、高密度クォークなどに展開したいと考えている。私がこの D 班のリーダーで、上田、佐藤昌利、水島、西田、新田さんが分担者になっている。素粒子や原子核の人達が連携研究者として加わっている。

今年度から A・B・C・D 班に新しく 19 名の公募研究者が参画している。内容についての説明は省略するが、助教クラスの若い研究者が中心で、この環境を利用して活躍してもらいたいと考えている。

新学術領域というのは特に連携研究を重視しており、我々としては「トポロジカル物質とエキゾチック準粒子」といったタイトルで、弱相関から強相関までを研究できれば良いと考えている。連携強化のテーマの具体例としては、トポロジカル量子相転移、トポロジカル超伝導、ワイル半金属、マヨラナ準粒子がある。これらのテーマにおいて、強相関、対称性、ナノ、理論班がそれぞれのテーマを持ち、班間の連携研究を利用して新しい成果を出したいと思っている。ここでは、トポロジカル超伝導と強相関系に関してごく最近のいくつかの成果を紹介する。

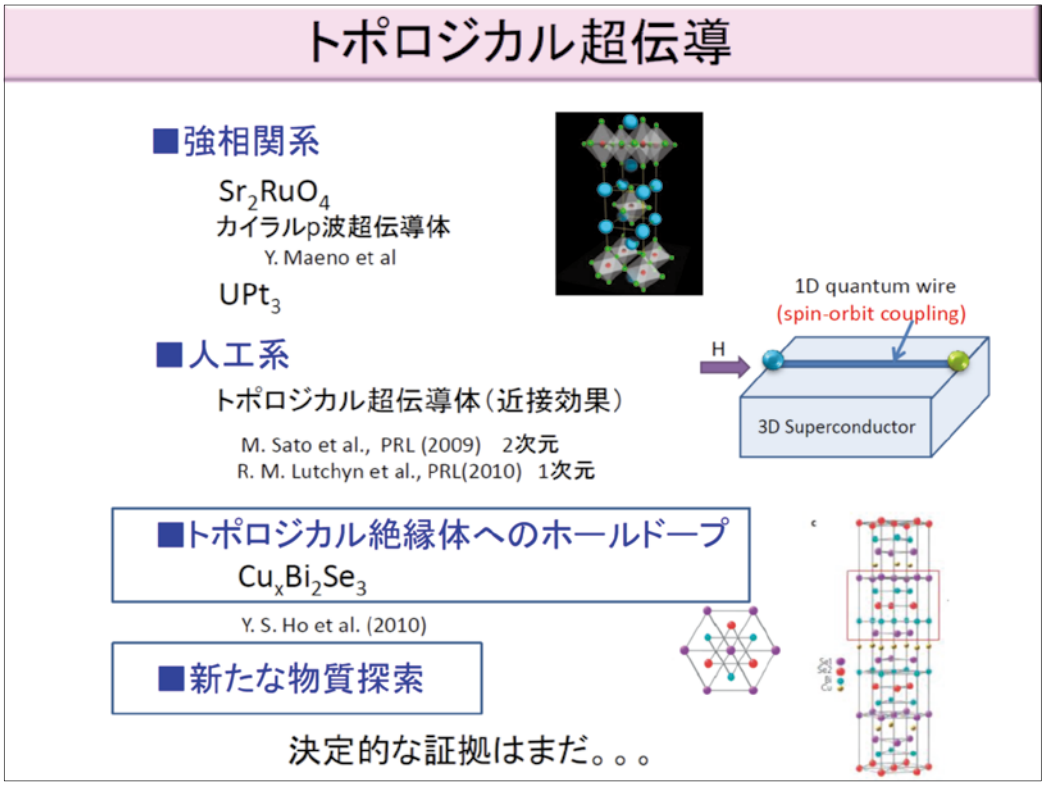



図 3-1-3

一つは図 3-1-3 に示すトポロジカル超伝導に関する成果である。トポロジカル超伝導の候補はたくさんある。強相関系の $Sr_2RuO_4$、$UPt_3$、人工系では超伝導の近接効果を利用した一次元ナノワイヤ、トポロジカル絶縁体にホールドープしたもの、新たな物質探索などあるが、決定的な証拠はまだない。この中で、トポロジカル絶縁体のホールドープ、および新たな物質探索に関して進展を紹介する。

候補として考えられていた Cu ドープした超伝導体（$Cu_xBi_2Se_3$）で、最近、B 班の瀬川、安藤さんと、A 班の NMR のグループが協力し、NMR のナイトシフト（Knight shift）の温度依存性と磁場の角度依存性から、この超伝導の対称性がスピン回転対称性を破っているということがわかった。これはバルクの物理量であるが、スピン回転対称性の自発的な破れを実験的に観測したことは、スピン三重項超伝導であるという考えを強く支持する。これがトポロジカル超伝導を確立していくうえで、大変重要な結果だと思っている。この結果は 5 月に発表されたが、10 月にはその関連として、安藤さん達のグループと A 班の前野さん達のグループに公募班の理論の人達が加わって、新しい実験結果を発表した。この実験では比熱という熱力学量を磁場の角度を変えて測定することで、先の結果と合わせて、奇パリティのネマチックな超伝導という全く新しいものになる証拠を示し、トポロジカルな超伝導になっている可能性がより高くなった。

このように、従来からある物質に関してのさらなる研究の進展と、新しいものを探していく必要があるが、もう一つの例を紹介する。これも前野さん達のグループと佐藤昌利さん達の理論のグループがやったものである。アンチペロブスカイト構造と呼ばれる物質（$Sr_{3-x}SnO$）で、初めて超伝導現象を発見した。この物質はディラック金属になっており、佐藤さん達がトポロジカル奇パリティの超伝導の可能性があるということ提案している。今後、これについてさらなる研究が進んでいくと思われる。

もう一つは図 3-1-4 に示す強相関への展開であり、我々のプロジェクトの売りになっている。量子ホール効果から分子量子ホール効果に展開するときに電子間相互作用が重要であったように、我々のプロジェクトでも電子間相互作用が重要だろうと考えている。そこで、強相関系のワイル準粒子、トポロジカル磁性体におけるマヨラナ準粒子、さらにはトポロジカルモット絶縁体などに研究を展開したいと考えている。

強相関物質の典型例を図 3-1-5 に示す。A 班の高木さん（東大、マックスプランク）が研究しているイリジウム化合物であり、大変良い候補になっている。その理由は、一般にスピン軌道相互作用が周期表の左上から右下に行くにしたがって大変強くなり、かつイリジウムの辺りは強相関系でもある。イリジウム化合物が磁性体におけるキタエフ・マヨラナ準粒子の発現舞台、強相関系でのワイル半金属の発現舞台、トポロジカルモット絶縁体の発現舞台になると考えられている。

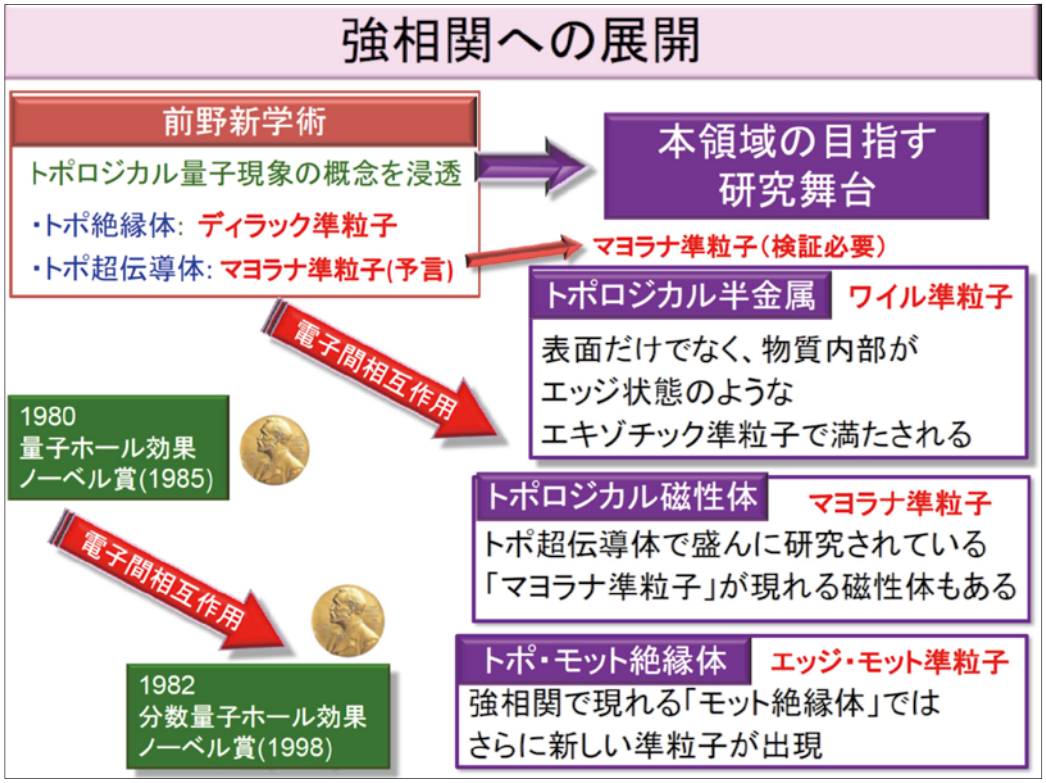

強相関への展開
前野新学術
トポロジカル量子現象の概念を浸透
・トポ絶縁体: ディラック準粒子
・トポ超伝導体: マヨラナ準粒子(予言)
本領域の目指す研究舞台
マヨラナ準粒子(検証必要)
トポロジカル半金属
ワイル準粒子
表面だけでなく、物質内部がエッジ状態のようなエキゾチック準粒子で満たされる
電子間相互作用
1980
量子ホール効果
ノーベル賞(1985)
トポロジカル磁性体
マヨラナ準粒子
トポ超伝導体で盛んに研究されている「マヨラナ準粒子」が現れる磁性体もある
電子間相互作用
1982
分数量子ホール効果
ノーベル賞(1998)
トポ・モット絶縁体
エッジ・モット準粒子
強相関で現れる「モット絶縁体」ではさらに新しい準粒子が出現

図 3-1-4

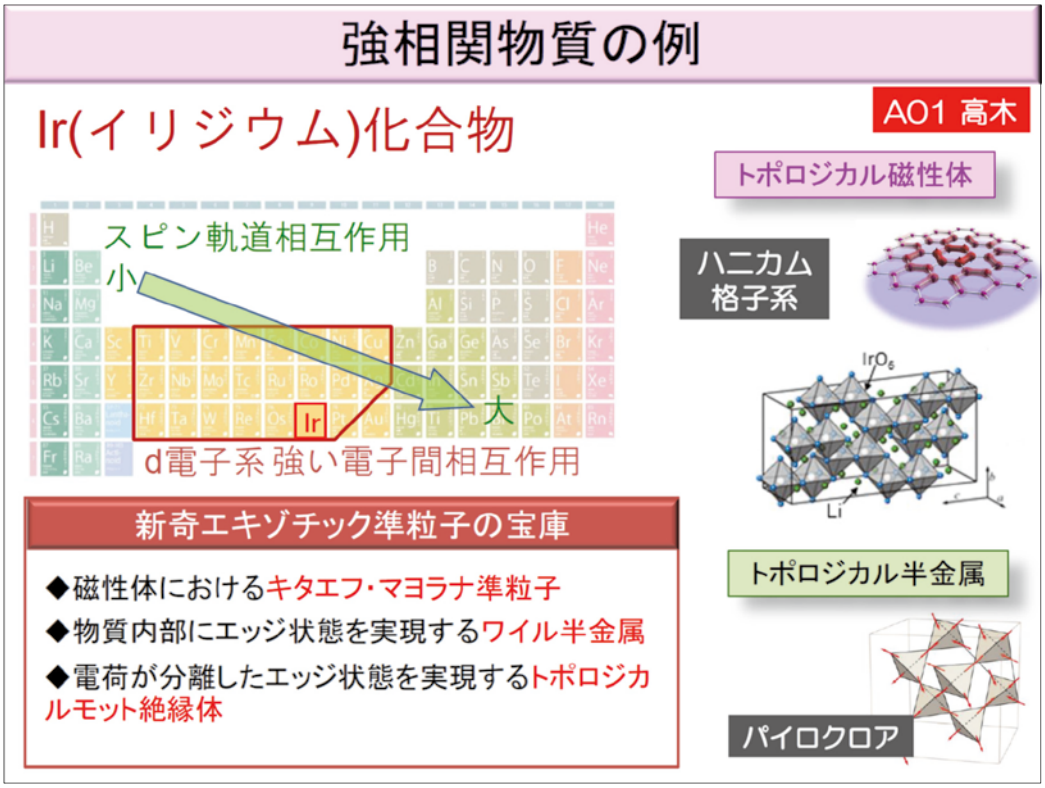

強相関物質の例
Ir(イリジウム)化合物
A01 高木
トポロジカル磁性体
スピン軌道相互作用
小
大
Ir
d電子系 強い電子間相互作用
ハニカム格子系
新奇エキゾチック準粒子の宝庫
◆磁性体におけるキタエフ・マヨラナ準粒子
◆物質内部にエッジ状態を実現するワイル半金属
◆電荷が分離したエッジ状態を実現するトポロジカルモット絶縁体
トポロジカル半金属
パイロクロア

図 3-1-5

イリジウム化合物の一つの例を紹介する。$Li_2IrO_3$ という物質にはいくつか種類があるが、高木グループはベータ型を作製した。この場合には、反強磁性に転移して磁気秩序を起こしてしまい、トポロジカルなスピン液体になるのは難しいと思われていた。しかし、キタエフスピン液体の大変近くにいる物質だということが分かっているため、3 年程度で結果が出れば良いと考えていた。また、それに対する理論の展開としてマヨラナモンテカルロという方法もあり、共同研究ができると考えていた。ところが昨日の東北大学での新学術領域のシンポジウムで、高木さんからブレークスルーがあったことが伝えられた。このリチウムの一部を水素に置き換えると、スピン液体になっているということが発見された。この物質の構造から、高木さんはキタエフのスピン液体であると思っている。また、彼によると、物質科学というのは柳の下にドジョウが百匹いるようなもので、このようなカギになる物質が見つかれば、その辺りには多くの物質を見つけることが可能になるとのことである。実際に、彼はこれを見つけた後に 2 種類のスピン液体と思われる物質を発見したようだ。この新学術領域はあと 3 年ちょっとであるが、その間に強相関系の研究が展開することを期待している。

トポロジカル超伝導、トポロジカル絶縁体、ワイル・ディラック半金属などに対する課題を以下に示す。個々の問題に関しては別途話があると思うので、ここでは我々の現状について説明する。

○トポロジカル超伝導
・実験の着実な進展
＃トポロジカル超伝導の多角的視点からの確立
＃マヨラナ準粒子の実証
○トポロジカル絶縁体
・バルク絶縁性の向上（B01：安藤、C01：村木）。
＃対称性を利用して新たな物質探索
＃バルク絶縁性をよりよくする
○ワイル・ディラック半金属
・弱相関の物質は、米国や中国が先導
＃時間反転対称性を破った強相関ワイル（公募：藤岡、計画：高木）
○強相関系・量子スピン液体
・理論はかなり進展、実験の急展開
＃イリジウム系でのキタエフスピン液体の実現
＃強相関の超格子系での超伝導
○人工系
・ナノ系、冷却原子などでの進展（公募：高橋、サウレスポンプの実現）
＃ナノ系、冷却原子系
○関連分野への展開
・中性子星など

トポロジカル超伝導に関しては、本当は表面の状態を調べてマヨラナ準粒子をまず見つけたいが、バルクなところから超伝導に対する新たな進展があった。最終的なマヨラナ準粒子を実証するのが我々のプロジェクトの目的である。トポロジカル絶縁体に関しては、安藤さんなどとC班の村木さん達がバルク絶縁性をかなり向上させている。これに加え、対称性を利用して新たな物質探索を行いたいと考えている。ワイル・ディラック半金属に関しては、物質開発の観点ではアメリカや中国がかなり先導しているため、我々のプロジェクトとしては強相関のワイルを発見して研究を展開したいと考えている。これに関しては、公募班の藤岡さんや高木さん達が物質開発に大変強いので期待している。強相関の量子スピン液体に関しては、理論はかなり進展している。ごく最近になって実験が急に展開しているため、ここで成果を出したいと考えている。人工系に関しても、ナノ系や冷却原子系などでの進展や、サウレスポンプというトポロジカルなポンピングが実現しておりその展開も期待している。関連分野への展開も理論班として行いたい。

我々の新学術領域研究を中心として、様々な海外機関と連携研究を行って、国際的に共同研究を展開し数を増やしたいと考えている。

このプロジェクトも残りが3年3か月となったが、まだまだ面白い成果が出てきそうなので、弱相関から強相関までを系統的に研究し、楽しんで成果を出したいと考えている。

【質疑応答】

Q：新学術では若い研究者がどんどん参画して盛り上がっているが、参画している研究者数はどのくらいか。

A：計画研究が50人弱（連携研究者を含む）、公募研究が19人である。

Q：安藤先生や高木先生は海外で活躍されているが、様々なところとコミュニケーションする中で、日本が海外に対して欠けているところ、あるいは日本の強いところ、伸ばしていくべきところはどのようなところなのか。

A：日本は物質合成を含め物質に関して大変強いバックグラウンドを持っていると思うが、最近は日本の若い世代で物質合成ができる人が少ないという印象を持つ。今は、中国からどんどん新しい物質が出てきている。日本はそれなりに高い技術を持っていると思うが、基本的に人数が少ないと感じている。このため、日本のもともとの強みである物質合成とその周辺の技術がやや弱くなっているのではないかという危惧がある。海外に行かれた安藤先生の技術を継いでいる若い人はいても、数が少ないという実感である。一方、理論では若い人達が驚くような新しい理論をどんどん出して活躍している。また、昨日まで3日間シンポジウムを開いたが、若い人達がどんどん質問して会場が若い人達であふれかえっているという雰囲気であり、日本にとって大変良い傾向だと思う。

Q：ものを作る若い人が減っているというのは、光の分野でも共通しているのではないかと思う。例えば、新しく見つかった物質を作るのに時間がかかる、というところも若い人たちは敬遠するところがある。物質科学の場合に、なぜ若い人たちがものをつくるところに入ってこないのか。

C：新物質の開発の場合には、人海戦術に頼るところがかなり大きい。特にトポロジカル

絶縁体の新物質開発は、中国の大きい研究室が大量のお金とマンパワーを投入してやっている。このため、日本としては人海戦術で対抗するのは無理な面がある。高温超伝導の頃は日本でも、若くて活気にあふれた若手が多く、人海戦術で新しい超伝導体の発見をしてきたが、今はそういうことをやろうという若手は減っている。ある意味では、日本の若手の研究者は昔よりもスマートになっていて、人海戦術でやるよりももっと賢くやろうという戦略に変わっているとポジティブに捉えた方が良いと思う。

C：頑張っている若い人は多くいる。物質科学の物性物理や物質のところでは、若い人が頑張っていると思うし、この新領域に入っていないかもしれないが、頑張っている若い人は多いと思う。ただし、若い人が自分で独立してやれるポストの問題はある。テニュアトラックのような制度があるため、皆が小さくまとまって小さく仕事をしようという傾向が強くなっている。大きなことができなくなっていることは非常に深刻な問題だと思っている。

Q：中国と比較して、日本が弱いと思っているのは、第一原理計算との連携である。中国科学院物理研究所の Zhong Fang は非常に大きなグループを率い、トポロジカル物質を多く設計して実験と結びつけ、非常に良く機能している。これが中国がリードしている理由だと思う。川上先生の新学術の中で、第一原理計算の位置付けはどうなっているのか。

A：計画研究の中には入っていなかったが、公募研究では入っている。今は大阪大学産業科学研究所の第一原理計算のグループと、東北大学の角度分解光電子分光（ARPES）の実験グループが協力して研究している。ただし、中国などに比べると規模が小さく、人が少ないというのが現実であり、我々も意識してこの部分を強くしようとしている。

## 3.2 磁性とトポロジー

十倉　好紀（理化学研究所）

すべての物質は電子が絡む限りは量子物質と考えられ、量子物質研究の色々な発展が世界的な規模で今起こっている。図 3-2-1 は量子物質が持つ創発機能の概念図であるが、外部から電気的、磁気的、あるいは光、熱、機械的な刺激を加えたときにどのような機能を創発していくかをまとめたものである。強い電子間相互作用、超伝導、スピン軌道相互作用、量子ホール効果や様々な機能がある中で、特に今後重要になってくるものは波動関数の位相の概念、つまり、ベリー位相のエンジニアリングであろう。

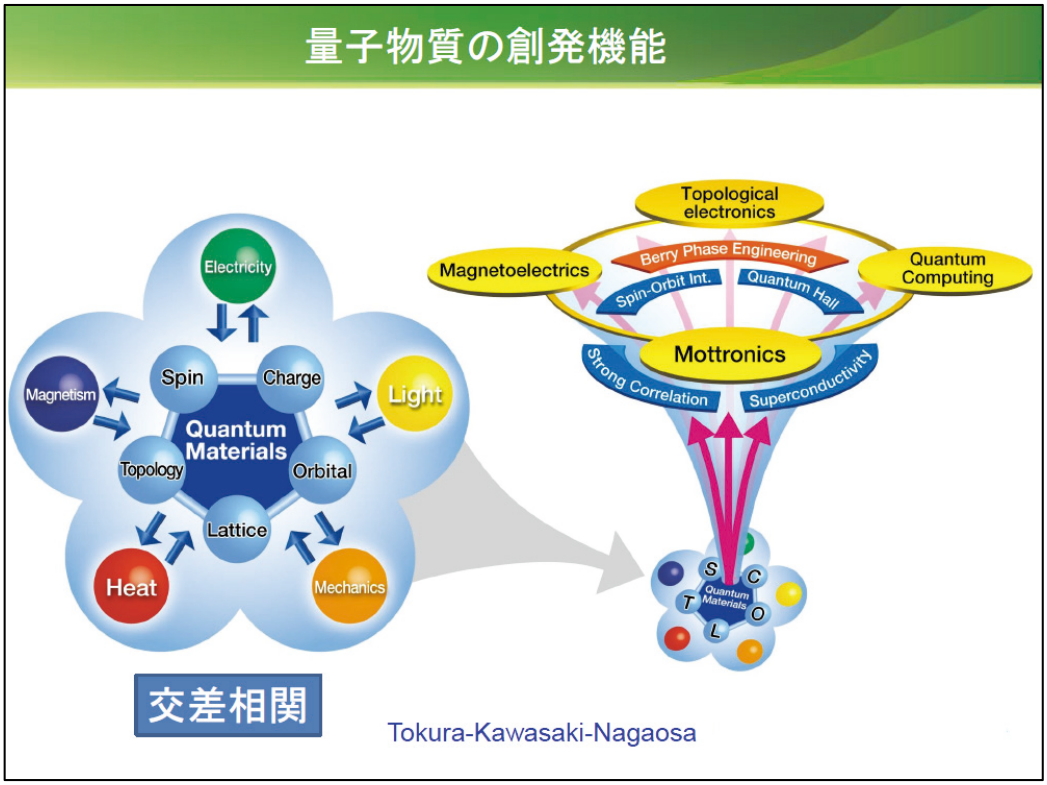



図 3-2-1

本日は､特に磁性に関してトポロジーがどう機能発現していくのかについてお話したい。ここでは、2 通りの考え方があり、実空間と運動量空間（k 空間）である。今日これからお話しするスキルミオンやマルチフェロイクスは実空間の話である。一方で、トポロジカル絶縁体やワイル半金属などは k 空間の話である。ただし、どんどんサイズが小さくなってくると、実空間と k 空間がお互いに結合し始めるため、その統一的な考え方も重要である。

そもそもトポロジーをきちんと定義することは難しいが、スピンがひねられた空間においてはベクトルスピンカイラリティというものが存在し、これが実はスピン流とほぼ等価であることがわかっている。実際に、スピン流が流れるとある方向に分極が現れるが、こ

れを定式化したのが Katsura-Nagaosa-Balatsky の 2005 年の論文である。つまり、有限のベクトルスピンカイラリティを持つ物質は必ず強誘電体になり、電気分極と磁性が固体の中で非常にクリアに結びついたのである（図 3-2-2）。さらに、マルチフェロイクス物質にも繋がっており、磁場をかけると分極が現れ、電場をかけると磁化が現れる。最近では室温で電界誘起の磁化反転を起こすこともできるようになっている。

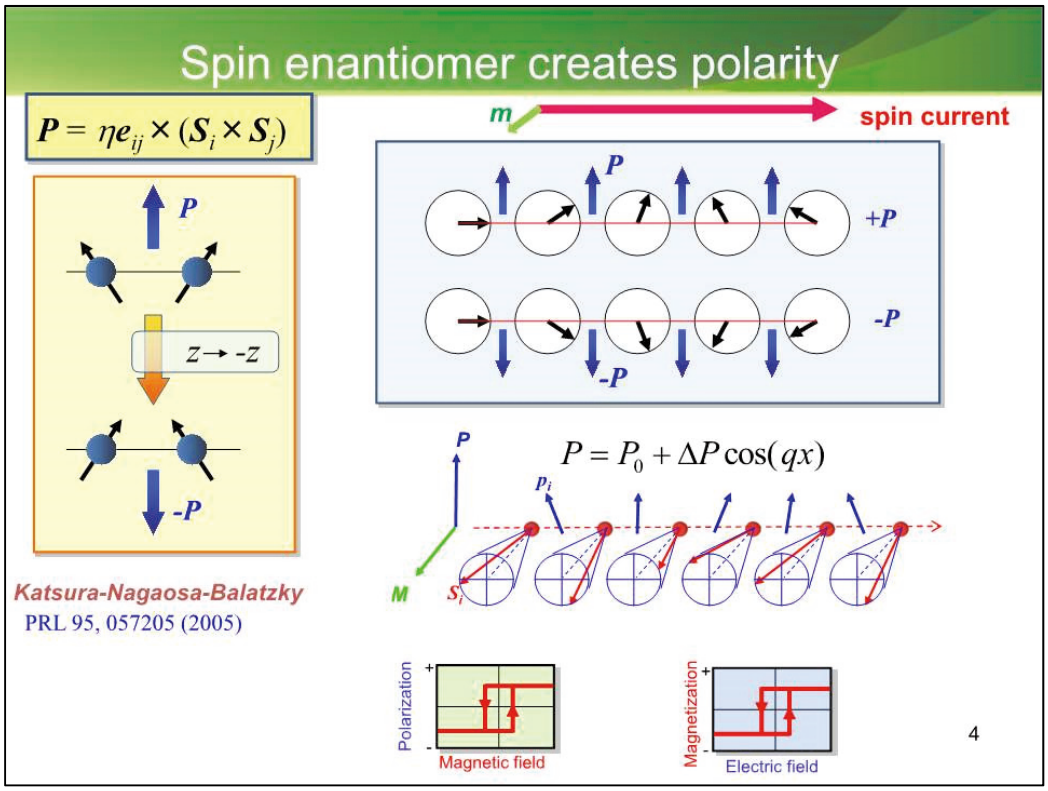



図 3-2-2

このようなスピンテクスチャーは新しい機能を生む可能性がある。典型的にはベクトルスピンカイラリティが分極と結合する、すなわち、スピン流と分極が結合する。他にはトロイダルモーメントという物理量があり、空間反転対称性と同時に時間反転対称性も破れているマルチフェロイクスのオーダーパラメーターになりうる。スピン軌道相互作用があると、物質のトロイダルモーメントとベクトルポテンシャルが等価となり、様々な面白い電磁的性質が出ることがわかっている。

スピンのテクスチャーでもう一つ面白いこと、スピンが同一直線状および同一平面上にない場合には、立体角が存在し、実効的に電子に対して大きな磁束を与える場合がある。その典型例がスキルミオンというこれから話す内容である。

スキルミオンというものは、元々は Tony Skyrme が、核種の励起状態をトポロジカルなソリトンとして定義しようというアイデアから生まれたものであるが、液晶や量子ホール系などで存在するのではないかと言われるようになった。

その後の研究によって、この現象が磁石の中に存在することが分かってきた。図 3-2-3 は、スキルミオンの一つの具体例であるが、最外円のスピンが上を向いて、グルグルと渦

を巻いて回り、最内円では下を向くようなものを全部集めるとハリネズミのような形になる。ちょうど球を１回覆うことになるため、これは連続変形できない。このようなスキルミオンはトポロジカルに非常に安定であり、他の強磁性や反強磁性とは同じ状態にはなれない。

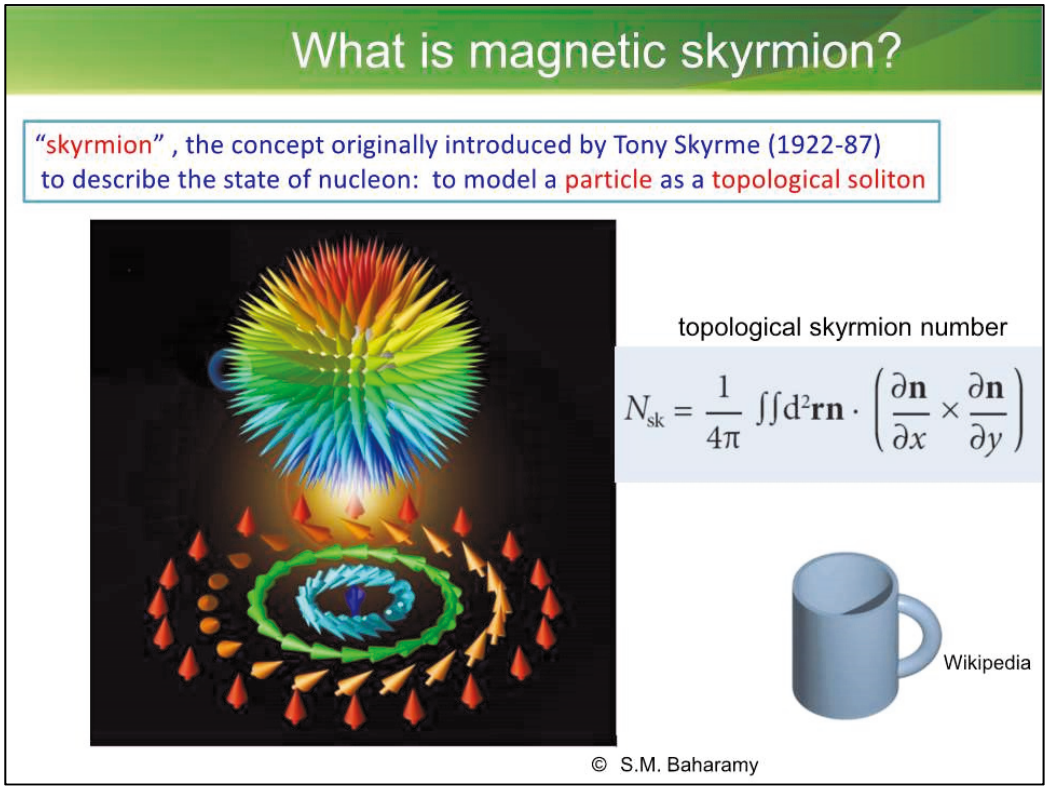



**図 3-2-3**

この立体角の大きさがトポロジカル数となり、１個や２個でも独立に存在することができるため、小さなナノ粒子として興味深い性質を持つのではないかという期待を持つようになった。

スカラー・スピン・カイラリティの大きさが、運動する電子の波動関数の位相を与えるが、もしこのスキルミオンのモーメントに電子のスピンが強く結合しているのだとすると、スキルミオン１個でちょうど磁束量子１個のモーメントを与えることになる。これはとてつもない大きさの磁場のような働きをし、10 $nm^2$ 当たり１個のスキルミオンで約 400 T という極めて大きな値になることが分かっている。

図 3-2-4 の右上の図のように、スピントロニクスではスピン偏極した電流を流すことで磁壁を動かす技術を用いているが、スキルミオンではゼロ次元の粒子を電流で駆動可能である。そのときの電流の大きさは磁壁の場合と比べて数桁小さいことがわかってきた。さらにスキルミオンは大きな仮想磁場を持っているため、スキルミオンの運動で電磁誘導も起こせる。

この仮想磁場は電子にしか作用しないが、大きな電磁誘導を物質中で起こせるはずであり、新しい機能に繋がると考えている。実際に熱流を与えてスピン流を起こすとスキルミオンが回転する様子も観測している。

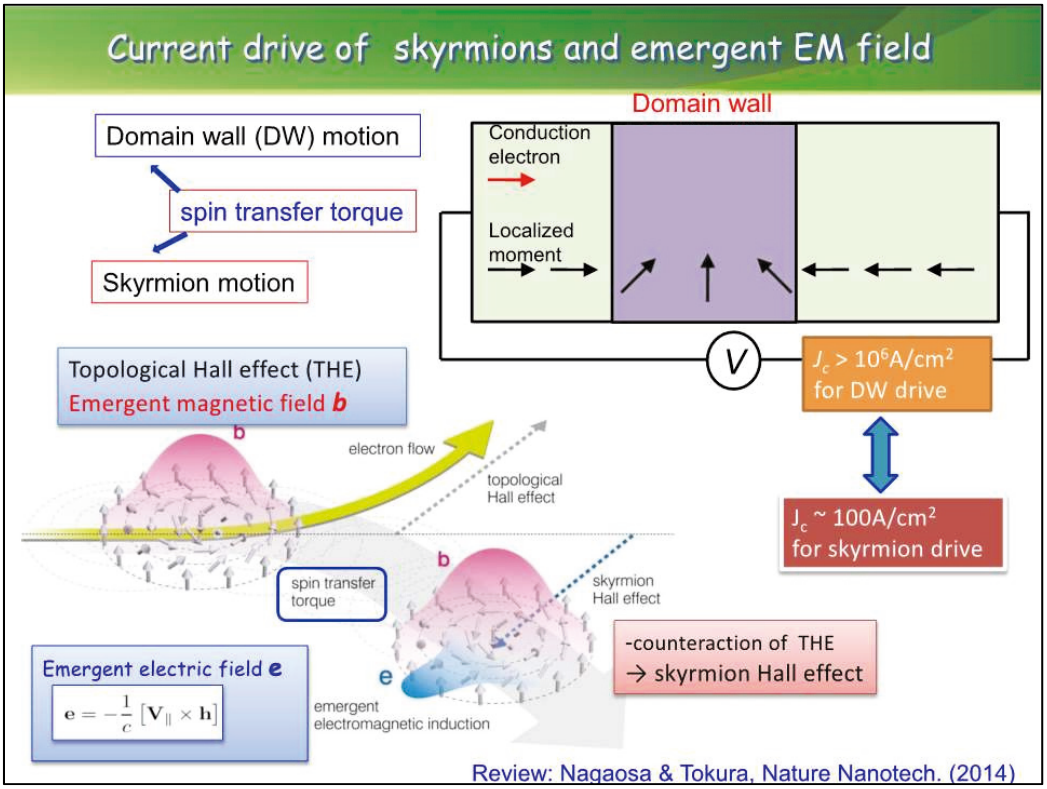



**図 3-2-4**

今、ヨーロッパを中心に世界中でスキルミオンを用いた新しいスピントロニクスにおける情報の担体が注目されており、理論的あるいは実験的に基本的な性能が確かめられている。非常に少ないエネルギーで書き込み可能、かつ非常に低い電流で動作可能であり、磁気メモリ系のポートフォリオの中で極めて優秀な値を占めるのではないかと期待されていることから、ヨーロッパではスキルミオンに関するいくつかの国家プロジェクトも立ち上がっている。

スキルミオンは、キラルな磁石や強磁性金属の薄膜の接合系などで反転対称を破ることで作製できる。図 3-2-5 は、最近見つけた新しい物質の相図である。400K くらいになると通常のスキルミオンは不安定になってしまうが、右図の矢印のような経路を辿ると、トポロジカルに安定になる。つまり、一旦室温より高いところで少し磁場をかけてスキルミオンを作り、400K 以下に冷却すると、結晶はスキルミオンだらけになり安定化することがわかった。

また、同様の物質系でスキルミオンの半径を小さくしていくと、3 次元的な結晶のようになることもわかっている。

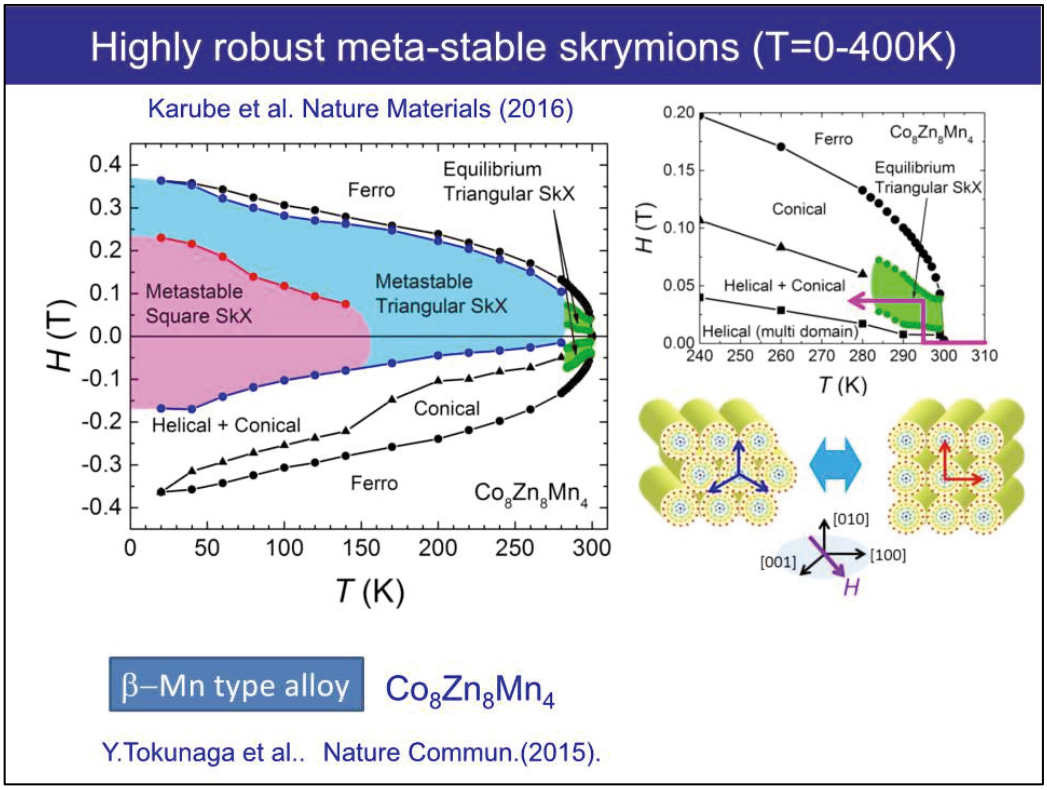

Highly robust meta-stable skrymions (T=0-400K)
Karube et al. Nature Materials (2016)
Ferro
Equilibrium
Triangular SkX
Metastable
Square SkX
Metastable
Triangular SkX
Helical + Conical
Conical
Ferro
Co8Zn8Mn4
H (T)
T (K)
Conical
Helical + Conical
Helical (multi domain)
[010]
[100]
[001]
H
β–Mn type alloy
Co8Zn8Mn4
Y.Tokunaga et al.. Nature Commun.(2015).

図 3-2-5

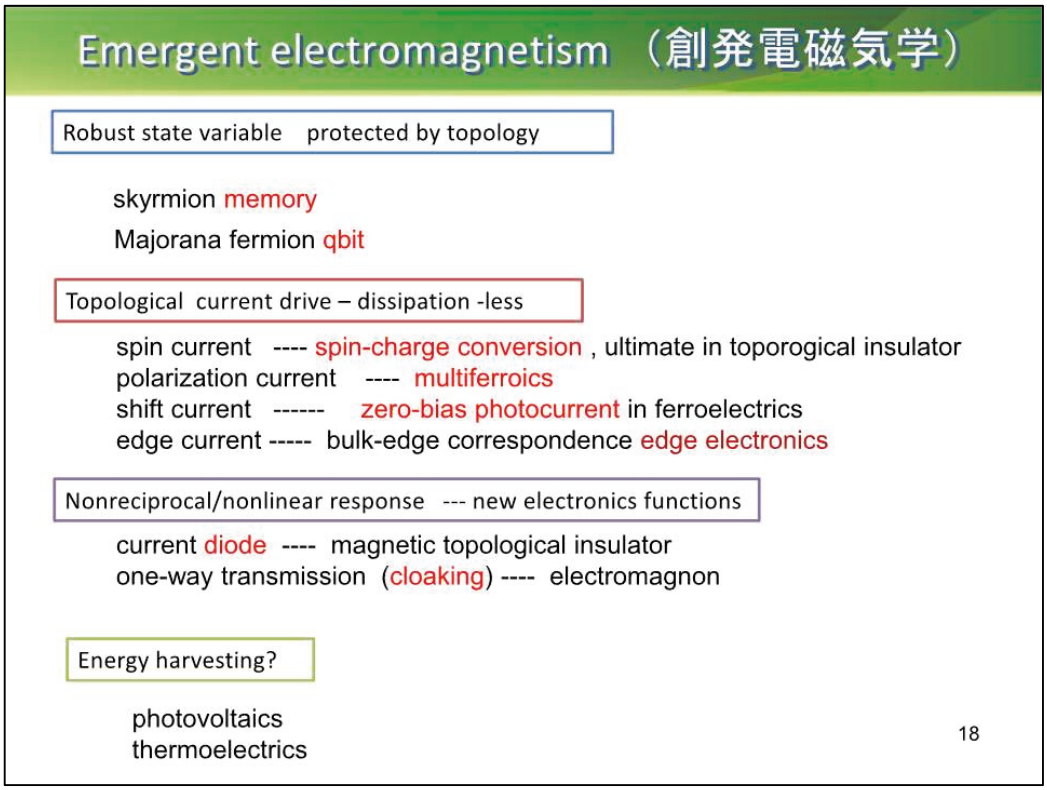

Emergent electromagnetism （創発電磁気学）
Robust state variable protected by topology
skyrmion memory
Majorana fermion qbit
Topological current drive – dissipation -less
spin current ---- spin-charge conversion , ultimate in toporogical insulator
polarization current ---- multiferroics
shift current ------ zero-bias photocurrent in ferroelectrics
edge current ----- bulk-edge correspondence edge electronics
Nonreciprocal/nonlinear response --- new electronics functions
current diode ---- magnetic topological insulator
one-way transmission (cloaking) ---- electromagnon
Energy harvesting?
photovoltaics
thermoelectrics
18

図 3-2-6

以上の話をまとめる（図 3-2-6）。トポロジカルなテクスチャーを使った時に、実空間においてどういうことが考えられるかを創発電磁気学（emergent electromagnetism）と呼ぶ。トポロジカルに保護されて非常にロバストな状態の変数ができるため、メモリに使えるだろう。また、マヨナラフェルミオンのようなものを作ると、エラー訂正不要のロバストな qubit に使える可能性がある。

もう 1 つ大事なことは、波動関数の位相を使って非常に散逸が少ない電子の流れを作ることが可能である。その典型例であるスピン流を用いると、スピン電荷変換が非常に高効率で可能になる。また、スピン流で作る分極はマルチフェロイクスそのものである。さらに、強誘電体に少し光を与えることで電流が流れる（シフトカレント）が、ペロブスカイト太陽電池の最初のプロセスではないかという説がある。シフトカレントとは、k 空間のベリー位相で駆動できる電流である。また、量子ホール系のようなエッジ流を始めとして、トポロジカル絶縁体の表面や界面を用いることで非常に散逸の少ないエレクトロニクスが生まれる可能性がある。新しいエレクトロニクスに新しい機能を与えるという意味では、非線形な応答も重要である。例えばスピン系にトポロジカル現象を用いることで非常に効率の良い電流のダイオードができる可能性もあり、電気と磁気を結合させることで光の一方向伝播も可能になる。メタマテリアルで一部できている、クローキングのような機能を出すことも可能になる。最後にエネルギーハーベストにもトポロジーの概念が使えるのではないかと感じている。

【質疑応答】

Q：スキルミオンはハリネズミのような球状になっているという話があったが、どのように観測するのか。

A：2 通りの方法がある。1 つ目は普通の方法で、スキルミオンは磁気バブルの小さいものとみなされるため、ナノ加工してトンネル磁気抵抗（TMR）を読む方法がある。もう一つは、スキルミオンによって電子が仮想磁場を感じて進行方向が曲げられるのを読む方法がある。いすれにしても、検出するためには一度マクロな電流や電圧として外に取り出さないといけない。

Q：TMR だと MRAM よりも電圧が低いのではないか。今の MRAM でもスキルミオンはたくさんできていると思うが、これまではそれが観測されてこなかった。やはり磁場をかけてホール効果を測ることになるのか。

A：スキルミオン自身が創発磁場を持っているため、磁場は必要ない。現状では、その強度が低温領域では大きいことがわかっているが、金属系の界面でできたスキルミオンに対しては温度が高い領域では強度が十分ではないので難しい。

Q：スキルミオンはシークエンシャルアクセスに使えるということか。

A：レーストラックメモリに使えるのではないかと考えている。

Q：大きさは 10nm くらいか。

A：いくらでも小さくすることはできるが、小さくしすぎると基板の格子と結合し始めるため、現実的な大きさとしては 20 ～ 30nm 程度だろう。

Q：ハードディスクの磁気セルの大きさが 10 ～ 20nm 程度であるため、それと対抗しないといけない。確認だが、超伝導の量子磁束と同様に、電子がスキルミオンの上を通っ

たときに 400T の創発磁場を感じるということか。

A：本当は磁束密度で測る必要があり、スキルミオン 1 個の場合だと単位面積あたりで考える必要がある。極端な場合だと、スキルミオンで量子ホール効果が起こせる可能性もあり、創発磁場をうまく利用することが重要である。

## 3.3 トポロジカル絶縁体の将来デバイス展望

安藤　陽一（ケルン大学）

本日はトポロジカル絶縁体の将来デバイス展望というタイトルで、まずはトポロジカル物質に期待される応用例について話したい。

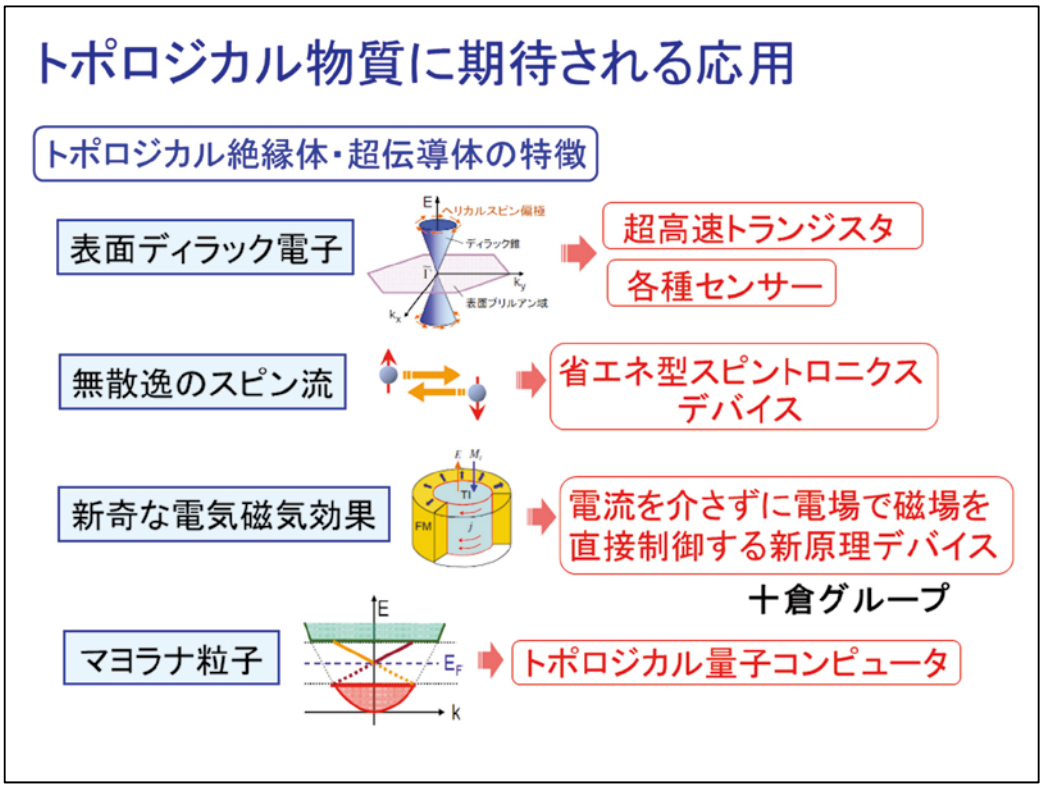



図 3-3-1

トポロジカル絶縁体、超伝導体は図 3-3-1 に示したような特徴を持っており、例えばトポロジカル絶縁体で一番顕著な特徴は、表面にディラック電子が存在することである。このディラック性を用いることで、超高速トランジスタや、遠赤外領域もしくはテラヘルツ領域の各種センサーへの適用が考えられる。また、表面状態はスピン偏極を持っており、平衡状態で電流は流れない（電荷の流れはない）が、スピン角運動量が流れるという無散逸のスピン流が包含された状態になっている。したがって、これをうまく利用すると省エネのスピントロニクスデバイスができるだろうと期待されている。また、このトポロジカル絶縁体の電磁応答がアクシオンダイナミクス（Axion dynamics）を示すことが知られている。それを使うことで新規な電気磁気効果、具体的には電流を介さずに電場で磁場を直接制御する新原理デバイスができると期待されており、これに関しては最近十倉グループにおいて実験的にかなり有望な進展がみられている。さらに、トポロジカル超伝導体に関しては、マヨラナフェルミオンを使ったトポロジカル量子コンピュータの実現が期待されている。では次に、このマヨラナフェルミオンについて詳細を述べたい。

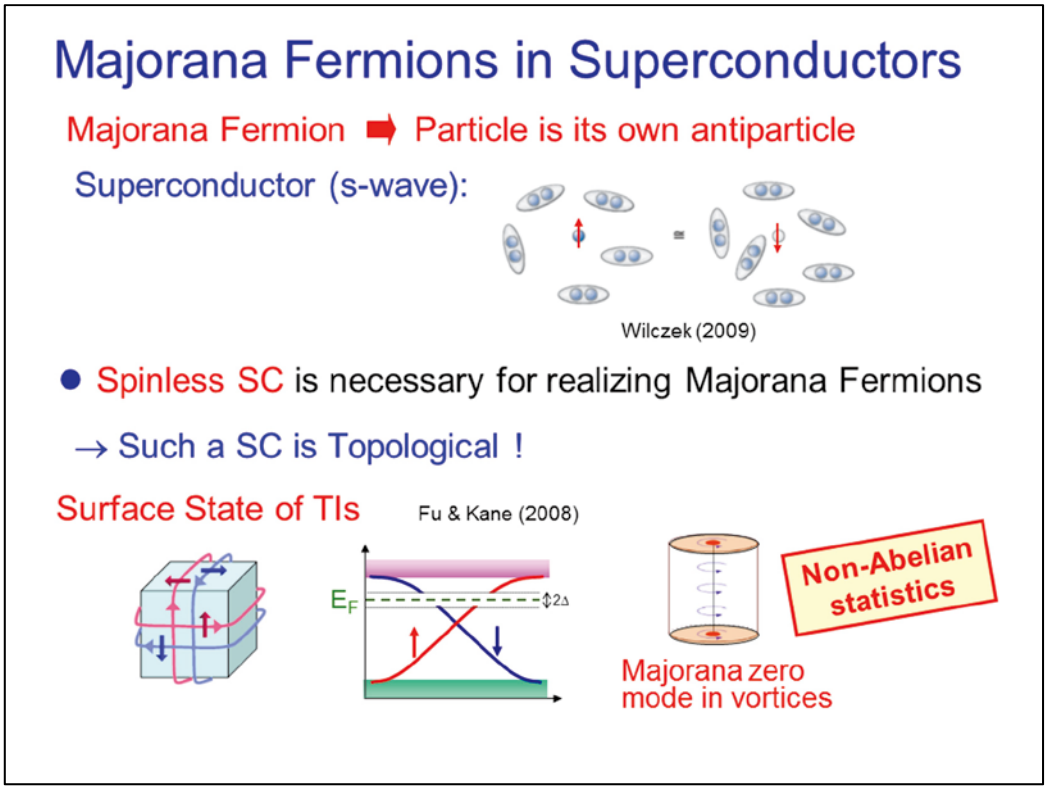



図 3-3-2

マヨラナフェルミオンというのは元々素粒子のニュートリノの問題であったが、今のところ、素粒子としてマヨラナフェルミオンは見つかっておらず、代わりに固体中に準粒子として存在するマヨラナフェルミオンが関心を集めている。マヨラナフェルミオンは粒子がそれ自体の反粒子であるという顕著な特徴を持ち、固体中で見つけるには超伝導体が非常に良い舞台になっている。その理由は、超伝導状態は、Particle-Hole Symmetry、すなわち電子正孔対称性というのを持ち、直観的にはこのクーパー対の海の中に電子が 1 個いる状況と正孔が 1 個いる状況が基本的に同一視できるという特徴を持っている。ただし、普通の超伝導体（s 波超伝導体）ではスピンシングレット状態で、アップスピンとダウンスピンがペアを組んでいるため、この電子と正孔はスピンが逆向きになってしまい完全に同一ではない。したがって、完全に電子と正孔が同一の状態を生むためには、スピンの無い超伝導というものを考える必要がある。もし超伝導状態がスピンレスになると、フェルミ統計を満たすためにはスピンの波動関数が使えなくなり、軌道の自由度で満たさなければならなくなるため、軌道の波動関数は必ず奇パリティ（odd parity）を持つことになる。そのようなスピンレス超伝導体は必ずトポロジカルになるという性質を有する。

実際にはスピンレスの超伝導体というのは自然界には存在しにくいため、そのような物質を対象にしたマヨラナフェルミオンの探索は困難であったが、2008 年に L. Fu と C. Kane がマヨラナフェルミオンを出現させる革新的な提案をした。トポロジカル絶縁体の表面状態においては、波数を指定するとスピンの向きが自動的に決まるため、スピンの方向が固定されている。つまり、スピンの「自由度」は失われ、一種のスピンレスの状態になっている。この状態に近接効果を使って超伝導を誘起すると、低エネルギー励起状態が出現

し、それを超伝導渦（ボルテックス）のコアの中に局在させることで、非可換統計に従う準粒子が表れ、量子計算に使えるようになる。このような彼らの革新的な提案以来、トポロジカル絶縁体をベースにした量子計算が非常に注目を集めている。

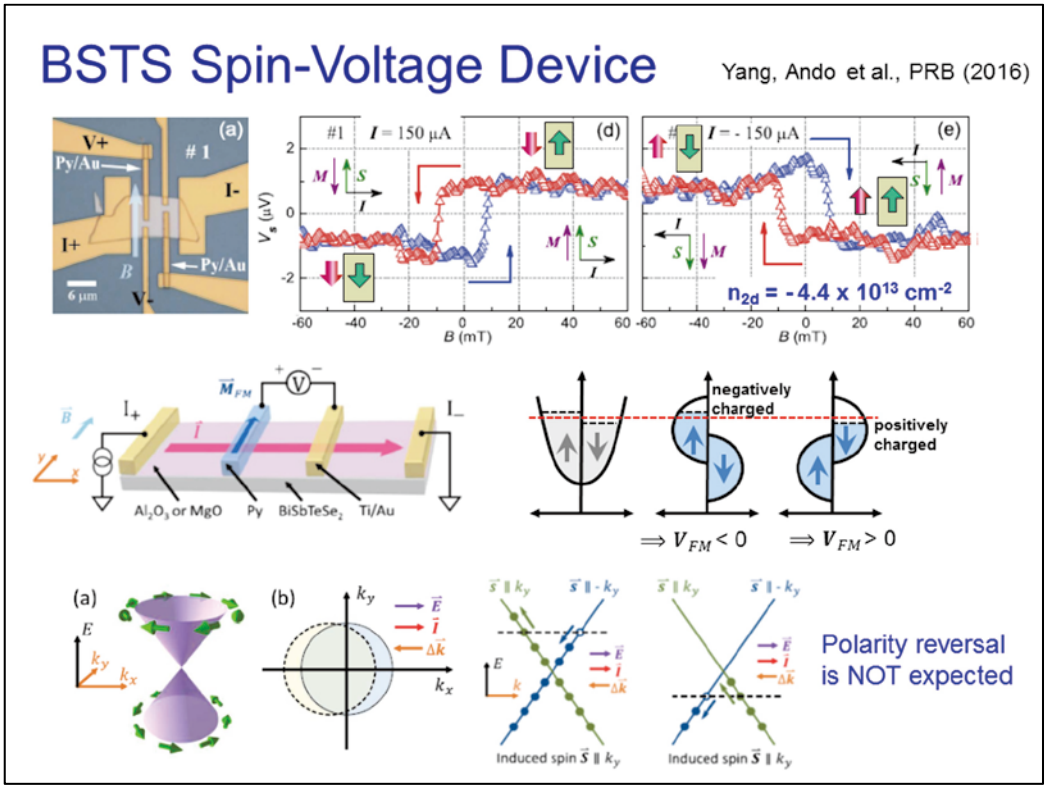



**図 3-3-3**

トポロジカル絶縁体の興味の中心は、スピン偏極した表面状態である。初期の頃に見つかったトポロジカル絶縁体においては、実は化学ポテンシャルがバルクのバンドにかかっていて絶縁体になっておらず、電流を流すとほとんどがバルクのほうに流れてしまっていた。そのため当時は如何にバルク絶縁性を高めた物質を探すかということが大きな課題であった。我々のグループは、この課題に対して 2010 年に BTS（$Bi_2Te_2Se$）、2011 年に BSTS（$Bi_{2-x}Sb_xTe_{3-y}Se_y$）を発見することで解を与えた。例えば、我々が合成した特別な組成の BSTS（$Bi_{1.5}Sb_{0.5}Te_{1.7}Se_{1.3}$）においては、見かけの抵抗率がサンプルの厚さに依存することが観測され、その膜厚依存性から、流した電流のうちの 7 割が表面に流れていることが結論された。トポロジカル絶縁体の物質開発においては、表面状態が支配的な輸送特性を実現することがマイルストーンになっていたが、これは我々が 2011 年に初めて達成した。

この BSTS を用いて最近我々のところではスピン電圧デバイスのようなものを作っている（図 3-3-3）。グラフェンのようにへき開したトポロジカル絶縁体の表面に電流を流すと、電流の向きに応じたスピン偏極が生じる。それをトポロジカル絶縁体の表面にナノ加工で形成した強磁性電極を使って検知することで、電流の方向に応じて実際に誘起されるスピンの向きが反転することが確認できる。

ただ、このトポロジカル絶縁体の表面状態を使った電流誘起のスピン偏極においては、化学ポテンシャルをディラック点の上下で変えても、スピン偏極の方向は反転しない。これは電圧制御によるスピントランジスタ動作ができないということを意味する。しかし最近、我々のところで、BSTS とパーマロイを組み合わせ、トポロジカル絶縁体中の化学ポテンシャルを制御することで、スピン偏極が反転する現象が再現性よく観測された。この予想外の観測結果は、パーマロイとトポロジカル絶縁体の界面におけるバンドベンディング（バンドの曲がり）に起因しており、トポロジカル絶縁体ベースでスピントランジスタを実現する新しい原理を与えるものである。

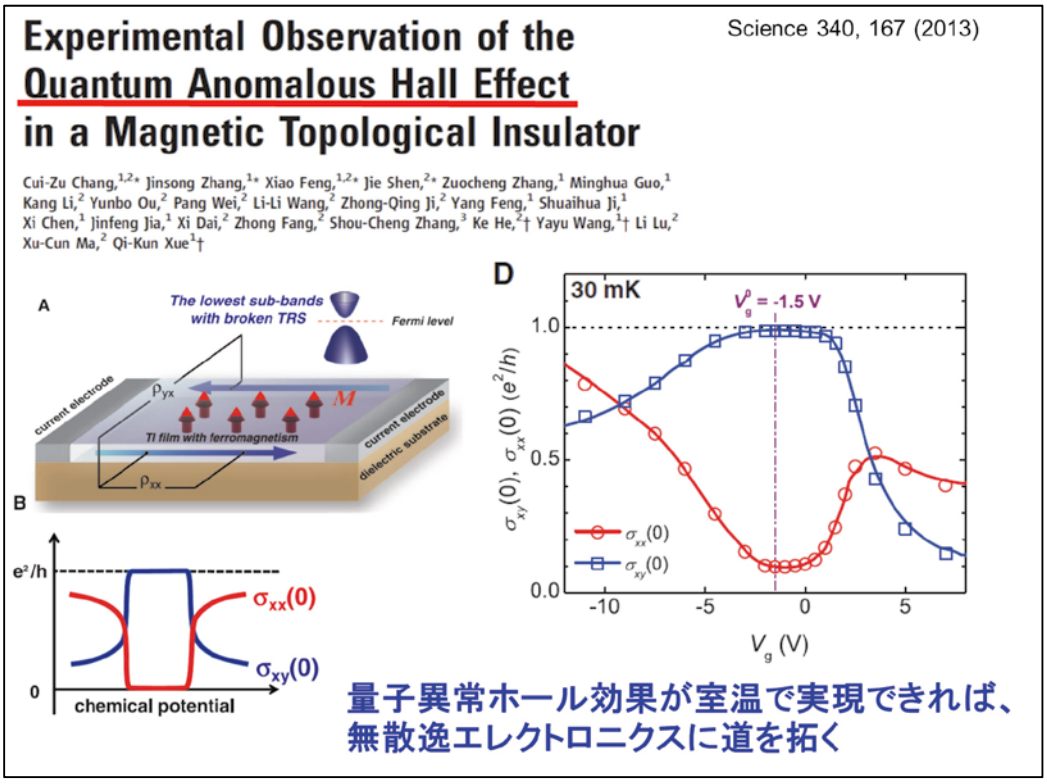



図 3-3-4

また、トポロジカル絶縁体の応用として、無散逸エレクトロニクスが面白いと考えている（図 3-3-4）。中国のグループが 2013 年にトポロジカル絶縁体薄膜にクロムをドープして強磁性状態を実現し、ゼロ磁場でもゲート電圧によりチューニングされた異常ホール抵抗が量子化される量子異常ホール効果を初めて観測した。量子異常ホール効果では、縦抵抗もゼロになるはずであるが、2013 年の報告ではゼロになっていなかった。最近では、様々なところで再現実験が行われ、例えば十倉先生のグループでも量子異常ホール効果の再現実験に成功し、かなり広いゲート電圧の範囲で縦抵抗がゼロになることが確認されている。つまり、この縦抵抗がゼロになる現象をうまく使うことで無散逸の電流を流せることが可能になる。異常量子ホール効果では外部磁場がなくてもゼロ抵抗が使えるため非常に有望である。ただし、現状では極低温に限られた現象であり、最近、十倉グループから、2 K、3 K でもゼロ抵抗が見えることが報告されているが、さらにもっと頑張って、もし室温で

この量子異常ホール効果が実現できるようになれば、室温での無散逸エレクトロニクスが創製できる。

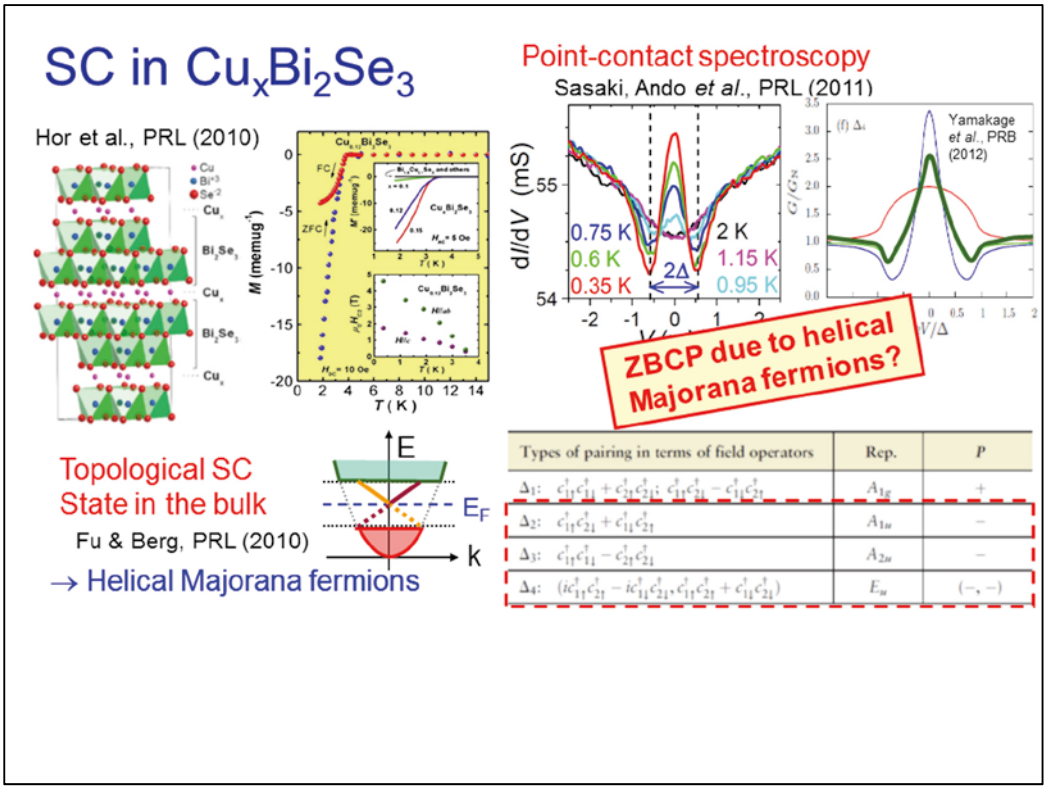



図 3-3-5

次に、マヨラナフェルミオンの実験について述べる。先ほど川上先生も触れられたが、トポロジカル絶縁体に銅をドープした物質 $Cu_xBi_2Se_3$ がトポロジカル超伝導体として注目を集めている。この物質においては、トポロジカル絶縁体の波動関数の仕組みから、通常の電子間引力相互作用のもとでもバルクにトポロジカルな状態が現れるのではないかという理論的な予言が 2010 年になされた。この理論的な予言では、この物質で可能な超伝導状態というのは 4 種類しかなく、さらにその 4 種類のうち 3 種類がトポロジカル超伝導で、かつマヨラナフェルミオンが出現するということであった。我々のグループで、$Cu_x$-$Bi_2Se_3$ の表面にポイントコンタクトを作り、微分コンダクタンスのバイアス電圧依存性を測ると、ゼロバイアスで微分コンダクタンスにピークが出る現象が見えた（図 3-3-5）。これをゼロバイアスコンダクタンスピークという。マヨラナフェルミオンが出現しているとゼロバイアスコンダクタンスピークが観測されることが既に理論計算で示されていたため、我々の実験結果はこの物質に特有なヘリカルスピン偏極を持ったマヨラナフェルミオンが存在することを示すものであるとして、2011 年に最初に報告した。一方で、半導体ナノワイヤを超伝導体上にのせて強い磁場をかけたときに、ゼーマンエネルギーが超伝導エネルギーよりも大きくなり、非常に極限的な状況を実現するとマヨラナフェルミオンが出現するという理論的予言もあった。こちらはデルフト工科大学のグループが 2012 年に実験的に観測し、彼らもゼロバイアスコンダクタンスピークに基づいてマヨラナフェルミオンの存在を主張した。しかし、ゼロバイアスコンダクタンスピークは他の起源でも出る

ことがあるため、マヨラナフェルミオンが出現している確実な証拠にはなっていない。ナノワイヤベースのマヨラナ粒子の観測に関しては、2016 年 3 月にコペンハーゲン大学の Charles Marcus のグループが、マヨラナフェルミオンがナノワイヤの端にいないと説明できない証拠（ナノワイヤが長くなるとともにマヨラナモードのエネルギー分裂が小さくなり、マヨラナモードが指数関数的に保護されること）を示した。これでほぼマヨラナフェルミオンが存在することは確実になったと考えている。

さらに最近では、ナノワイヤのマヨラナ粒子を使ってどうすれば実際に量子ビット演算が可能になるのかという提案や、どのような形状のナノワイヤを作れば、ブレイディングというトポロジカルなゲート操作が可能になるのかという提案が出てきている。量子コンピュータのゲート操作では、ブロッホ球上で量子ベクトルをどう回すかという操作が基本となり、例えば、超伝導量子ビットを用いた量子計算のゲート操作では、マイクロウェーブをある時間だけ当てることによって目的の値のところまで回す操作を行う。しかしこの場合、その時間の揺らぎによって目的値まで行った先が揺らぎ、さらに途中で雑音が入ると全く違うところに行ってしまうこともあり、量子ゲート操作にどうしてもエラーを含んでしまう。これに対してトポロジカルなブレイディングは離散的な操作であるため、量子ベクトルの回転が必ず決まった値（例えばπ /4）になり、回転操作の不確実性に伴うエラーが発生しない。このため、原理的にエラーがないブレイディング操作に基づいたトポロジカル量子計算は、量子コンピュータを実現する上で非常に有望であると考えられている。

ただし、そのトポロジカル量子計算において、ゲート操作でエラーが無いと言っても、マヨラナフェルミオンそのものがゼロエネルギーで生成できるため、有限温度であればマヨラナフェルミオンが対生成されてしまい、量子情報を乱してしまう。つまり、トポロジカル量子計算においてもエラーフリーにはなり得ないという認識が最近広まってきており、マヨラナフェルミオンを使うとしても、やはりエラー訂正を含めたアーキテクチャが必要である。現在、「サーフェスコード」と呼ばれるエラー訂正を内在したアーキテクチャが量子コンピュータ開発の最先端では有望視されており、従来型の超伝導量子ビットでこれを実現する研究が実際に行われている。このサーフェスコードをマヨラナフェルミオンで構築すると、これまで検討されているプラットフォームよりもずっと良いものができると考えられている。

以上のようなことを背景にして、最近、量子技術のブームが世界中で起こっている（図 3-3-6）。私のいるヨーロッパでは、Quantum Technologies Flagship の立ち上げがアナウンスされ、10 億ユーロ（1000 億円）以上の大規模プロジェクトが立ち上がりつつあるところである。それに対抗して米国もホワイトハウスが戦略を発表し、Google はカリフォルニア大学サンタバーバラ校の John Martinis をリクルートしてサーフェスコードを用いてジョセフソン接合ベースの量子ビットで量子コンピュータを実現しようとしている。また、IBM も同じ戦略でサーフェスコードを実現しようとしている。一方、Microsoft は少し前に Microsoft Station Q という研究所を立ち上げ、トポロジカル量子計算の理論研究を進めてきたが、つい最近、新たに実験研究を本格的に始めることをアナウンスした。この Microsoft の新しいプロジェクトには、ナノワイヤを使ったマヨラナフェルミオン検出研究で先行している、デルフト工科大学の Leo Kouwenhoven やコペンハーゲン大学

の Charles Marcus を雇用して、実際にマヨラナフェルミオンを用いたサーフェスコードの実現に向けて動き出すようである。これは Microsoft が本気でマヨラナフェルミオンを使ったトポロジカル量子計算を実現しようとしている表れである。

図 3-3-6

トポロジカル絶縁体と超伝導体のハイブリッドを使ったマヨラナフェルミオンの検出はやはり有望である。最近、独ヴュルツブルグ大学の Laurens Molenkamp グループと、東京大学の樽茶グループとの共同研究の成果として、2 次元トポロジカル絶縁体を介したジョセフソン接合系でマヨラナフェルミオンが出現していることを示唆する研究報告があった。この実験では、普通のジョセフソン接合の特性とは違う 4 π 周期性が観測され、マヨラナフェルミオンの存在を強く示唆する結果となっている。

一方で、3 次元トポロジカル絶縁体でジョセフソン接合を作る場合、トポロジカル絶縁体自体のバルク絶縁性を上げる必要があるが、バルク絶縁性を上げるとジョセフション電流が流れなくなるという、難しい面がある。しかし、最近になって、上記と同じく、樽茶グループと Molenkamp グループが共同で、HgTe ベースの 3 次元トポロジカル絶縁体に超伝導体を接合したジョセフソン接合が示すシャピロステップ（マイクロ波照射によって現れる量子化された電圧のステップ）に異常な振る舞いが見られることを観測し、マヨラナフェルミオン存在の証拠ではないかと主張している。

もし、うまくトポロジカルなジョセフソン接合ができるようになると、例えば、非対称な超伝導量子干渉素子（SQUID）を使ってマヨラナフェルミオン存在の確証を高めることも可能になる。また、最近、3 次元絶縁体の上面と下面のマヨラナフェルミオンが対消滅することによる異常現象を観測することも可能になるのではないかという提案もなされ

ており、我々のグループでも今取り組んでいるところである。

さらに、3 次元トポロジカル絶縁体の上に蜂の巣構造の超伝導体を接合することで、先ほど述べたナノワイヤベースとは違った戦略でマヨラナサーフェスコードが実現できるという提案も 2015 年になされており、将来的には 3 次元トポロジカル絶縁体ベースのジョセフソン接合による量子計算デバイスも有望になるのではないかと感じている。

まとめると、トポロジカル絶縁体のスピントロニクスデバイス及び電気磁気効果デバイスは有望分野である。室温での量子異常ホール効果が実現すれば、無散逸エレクトロニクスも夢ではなくなる。マヨラナフェルミオンの存在はどうやら確認されたが、その占有・非占有状態を上手く制御し、読み出すことがトポロジカル量子ビットを実現する上での今後の課題である。マヨラナフェルミオンを用いたマヨラナサーフェスコードは量子コンピュータを作るための最も有効な戦略と考えられる。現状では、Microsoft がマヨラナサーフェスコードに投資しているが、日本は大きく出遅れている。

【質疑応答】

Q：室温の無散逸エレクトロニクスに非常に興味がある。室温でなくても効率よく計算ができる論理回路ができれば、希釈冷凍機でも十分価値があると思っているが、極低温でも論理回路に使えるアイデアがあれば教えてほしい。

A：無散逸エレクトロニクスに関して、例えば、今のスパコンを作るための配線を無散逸配線にすることによってスパコンの消費電力を下げることが可能になる。今のスパコンはこのまま規模を拡大していくと 1 台のために発電所 1 か所が必要になると言われているが、極低温でも無散逸エレクトロニクスを使って非常に少ない消費電力で計算できるようになればインパクトは大きい。もし、室温で可能になればもっと大きいインパクトがある。

Q：スピン応用に非常に興味があるが、どう検出するのか。スピントランジスタにおいて、磁場のヒステリヒスカーブが出ていたが、どういう原理で検出するのか。

A：基本的に、電流を流すとフェルミ面がずれ、例えばアップスピンとダウンスピンの化学ポテンシャルの位置がずれる。その上にパーマロイのような強磁性体をくっつけることで、例えばパーマロイの多数スピンと、少数スピンで化学ポテンシャルに差が出るため、それぞれのアップスピンとダウンスピンがトポロジカル絶縁体のアップスピンとダウンスピンの化学ポテンシャルと平衡に達し、全体の電位が変化するのではないかと考えている。

Q：その現象をミリボルトオーダーにすることは可能か。

A：トンネルバリアの最適化が必要になるが、今はマイクロボルトオーダーのシグナルしか出ていない。スピントロニクスの技術をきちんと導入すれば、もっとシグナルを大きくできるはずである。

## 3.4 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（東京工業大学）

私の専門は解析理論を中心とした物性理論とトポロジカル物質の物質探索であり、ここでは主に物質探索の観点で、私がやってきたことを中心に、どのように今後の研究を進めるべきか、国に期待することなどを紹介したい。

新しい物質探索には、既存の物質に新しい観点を見出すなど、様々な観点がある。初期の段階では、経験と勘で皆が知っている物質から探っていくが、最近では様々な方向に発展している。例えば、計算機科学でやる、人海戦術で機械的に何万もの物質を網羅的にやる、理論的な観点でどういった物質であるべきか絞り込む（我々のやり方）、といったことが挙げられる。また、トポロジカル物質のカテゴリーが広がっており、トポロジカル物質の新しいカテゴリーを探すといった方向もある。さらに、空間的な構造を利用して、超格子を作ったり、薄膜や表面を工夫したりすることでバンドをデザインしていく方向もありうる。それぞれに関して､今までに無かった他分野との連携が非常に重要になってくる。

図 3-4-1

図 3-4-1 にトポロジカル相の分類を示すが、バルクが絶縁体のトポロジカル物質として最初に調べられたのは量子ホール系である。ここから理論的に展開し、トポロジカル絶縁体、トポロジカル結晶絶縁体、トポロジカル超伝導などが出てきた。

トポロジカル絶縁体は、2 次元の薄膜や量子井戸、3 次元のバルクの結晶で実現されているが、図 3-4-2 に示すように私は 10 年前にビスマスの超薄膜でトポロジカル絶縁体が実現することを予言していた。トポロジカル絶縁体で一番有名なものは、水銀テルル

（HgTe）の量子井戸であり、私より少し遅れて予言されたが、実験的には先を越された。私が予言したビスマスの薄膜についても、2013 年、2014 年に検証された。これは最初に述べた話で言えば、主に経験と勘という話である。ビスマスのバンド構造を既に知っていたため、トポロジカル絶縁体の話を聞いたときに、ビスマスがちょうど良いと思って研究を始めた。ビスマスは半金属であり絶縁体ではないが、キャリアが非常に少ないので、少し加工すれば絶縁体化してトポロジカルになるという予想の下にやった。実際、非常に薄くすると、ギャップが少し開いて絶縁体化する。これに対して理論計算をしたところ、トポロジカル絶縁体になるという結果が出て、2006 年に予言をした。検証はだいぶ遅れたが、その理由は、実はビスマスは薄膜のままでは少し不安定で、別の構造に転移をしやすかったため、検証がなかなかできなかった。例えば、ビスマス薄膜をバルクからはがした瞬間に測るという曲芸をやるとか、ビスマスのバルクのテラス（段になってるところ）を見るとトポロジカル絶縁体のエッジ状態に特有のものが STM で見える。この経験から得た反省点としては、きちんと第一原理計算をし、実験と連携してやっておくべきだった。連携してやっていくことで、効率的に研究が進められると思っている。

ビスマス薄膜は膜と垂直方向に交互に凸凹しているが、基板を上手く選んでフラットなものを作れると、ギャップが 200meV と大きく開いて室温でトポロジカル絶縁体になるという理論が以前からあり、非公式ではあるが最近実験で出たという話がある。このようなことを進めていけば、既存のよく知っている単体であっても、様々な可能性が広がる。

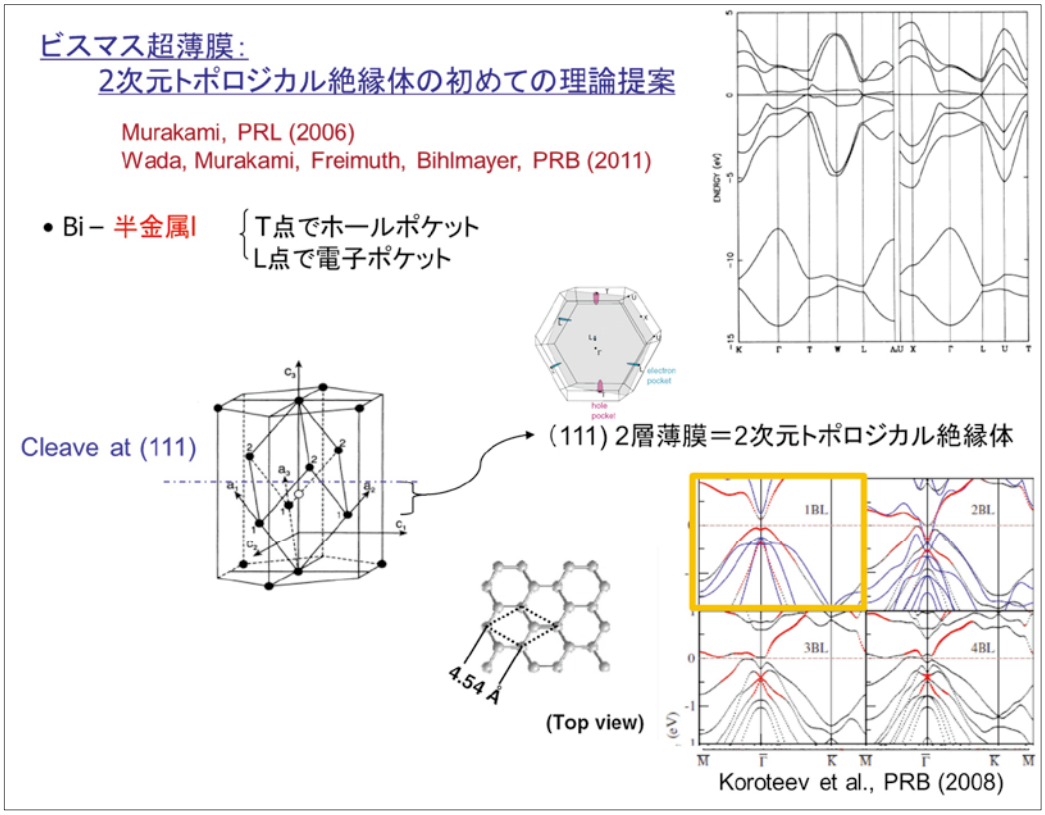



図 3-4-2

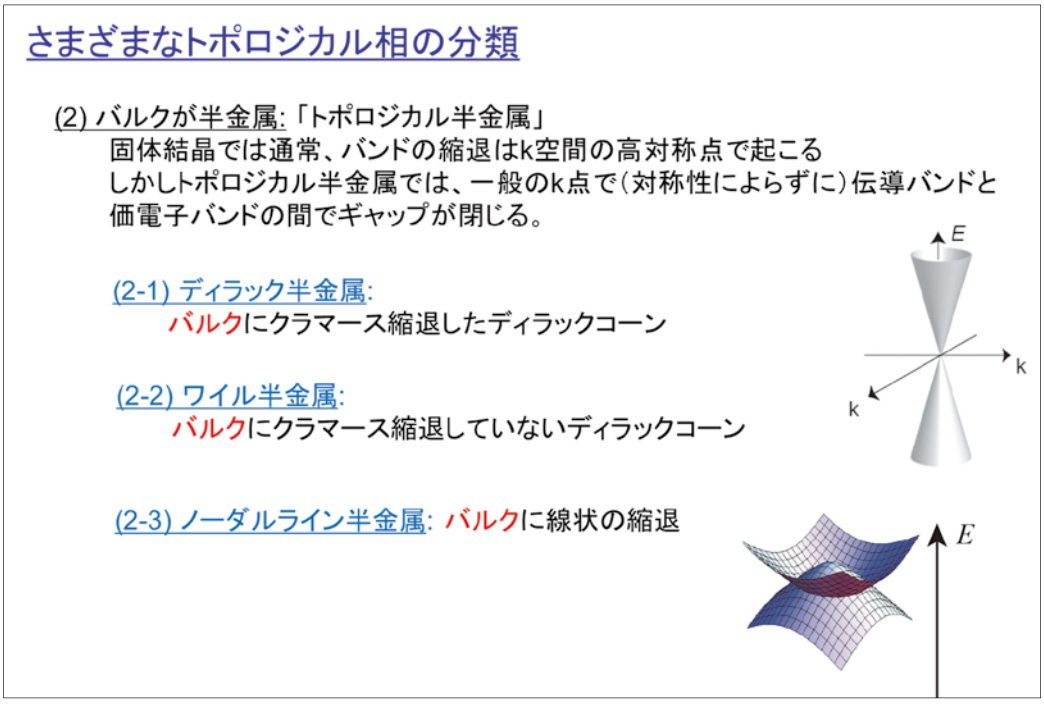



図 3-4-3

トポロジカル半金属の種類については図 3-4-3 に示すが、要するにギャップの閉じ方がトポロジーの性質によって普通の物質とは違う変わったものである。ディラック半金属、ワイル半金属のように、円錐型でギャップが閉じるものや、ノーダルライン半金属のように線状にギャップが閉じるものなどがある。これらは理論的な観点から絞り込みをすることができる。

2007 年頃に、図 3-4-4 に示すようなトポロジカル絶縁体と通常の絶縁体の相転移の一般論を研究した。詳細は省くが、基本的には空間反転対称性が無いもの、要するに少し対称性が低い結晶を使うと、トポロジカル絶縁体と通常の絶縁体との間にワイル半金属という、円錐状でギャップが閉じるものがあるということを提案した。これは、ワイル半金属の理論的提案とされている 2011 年の論文より 4 年前の話であり、最近、やっと様々な実験結果が出てきている。これに対しても、私の反省として連携をきちんとやっていれば良かったと思っている。要するに、連携の重要性は私自身が痛感している。

少し詳細な話をする。トポロジカル物質の話は、直観に反し、今までのバンド理論からすると不思議なものが様々ある。例えば、空間反転対称性がある（点対称のある）結晶に圧力を加えていくとか、組成を変えていくとかすると、トポロジカルな転移をすることがある。この場合は、ギャップが一瞬閉じてまた開く。空間反転対称性の無い結晶でこれをやると、少し変わった振る舞いをし、ギャップが閉じて、閉じた点が分裂し、閉じた点で円錐状のバンドを形成し、そのような円錐が波数空間をクルクル動いて最後はギャップが開くという変わった転移を示す。このようなことが必ず起こるということを理論的に示した。トポロジカル物質という概念が出てきて、初めて固体の結晶のバンド理論として、このようなことが分かってきた。

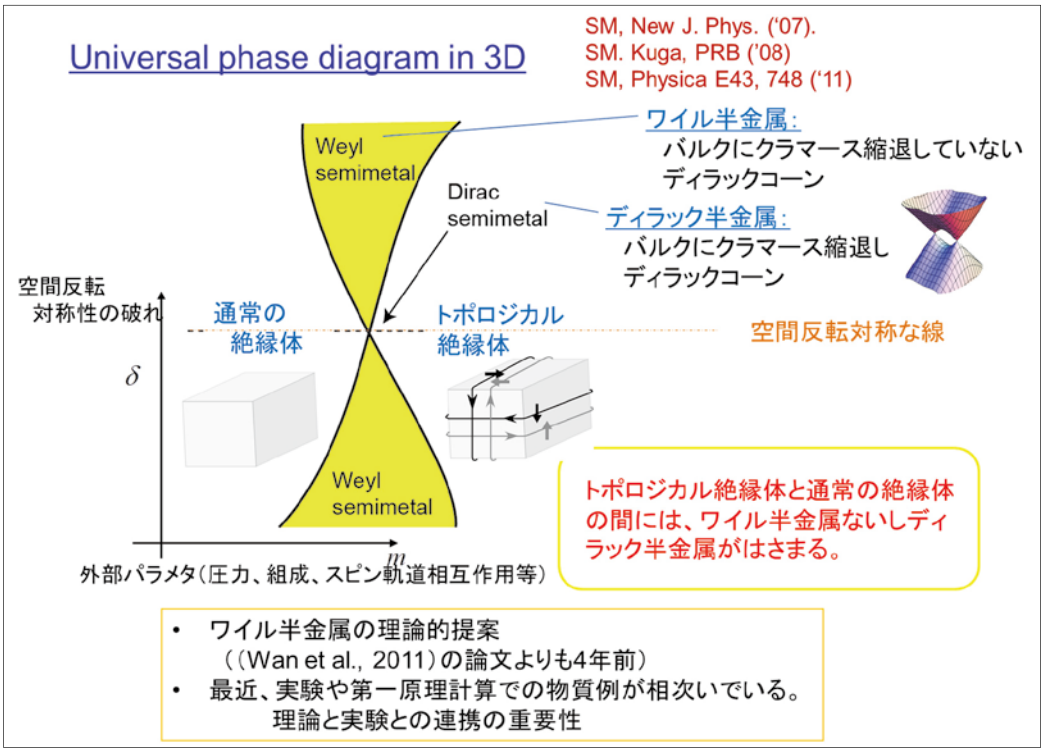



**図 3-4-4**

これをもう少し広げていくと、次の結論に達し、今年論文を出した。例えば、非常に一般的な空間反転対称性が破れた半導体のギャップを閉じることを考える。閃亜鉛鉱型の半導体は全部当てはまり、GaAs、CdTe などはまさにこのカテゴリーである。これらに対し、例えば元素を置換したり、加圧したりしてギャップを閉じるとどうなるかを考えた。何かの物質に限定した話ではないため、対称性で分類するしかない。細かいことは省略するが、空間反転対称性の無い半導体でギャップを閉じると、次の二つのいずれかのトポロジカル半金属になるという驚くべき結論が得られた。一つはノーダルライン半金属であり、ギャップが線状で閉じるものである。もう一つはワイル半金属で、円錐状にギャップが閉じる。このため、ギャップが閉じてすぐ開くという絶縁体－絶縁体転移（insulator-to-insulator transition）は起こらない。これがなぜ驚くべきかと言うと、問題設定としてトポロジカルという話は全くないが、どんな半導体でもギャップを閉じると必ずこの二つのトポロジカル半金属になることである。非常に不思議な現象である。

これを利用すると、どんな半導体に対しても必ずどちらかになるため、新しい物質を探す際の指針になる。例えば、LuSI はギャップは狭く、加圧するとワイル半金属になると言える。また、超格子系ではこうしたワイル半金属の実現の提案が既にある。さらに、Te の結晶はらせん形の鎖からなる面白い結晶構造であるが、高圧になるとワイル半金属になるという結果が出てくる。

アルカリ土類金属のカルシウム（Ca）も高圧になると、ノーダルライン半金属になることが最近わかった。少し難しい話になるが、ここから何が言えるか紹介する。ベリー位相がパイ（π）になるようなノーダルラインが出てくるということが分かった。k 空間でベリー位相を直線状で積分した量（ザック位相：Zak phase）と関係があるが、それを計算すると、k 空間のある領域でザック位相がπになる。これはトポロジカルな構造がバン

ドの中に残っていることを示す。細かいことは省略するが、ザック位相は表面の分極と関係がある。強誘電体の分極と似たようなものが出て、結果としてノーダルラインが出ると表面に電荷が出ることが分かる。カルシウムの表面に非常に大きなプラスの電荷が出る。それを簡単に見積もると、表面はスクリーニングされるのだが、実際に電荷が表面に出ることが分かった。これは半金属なので、強誘電の分極は最終的には出ないが、ノーダルラインを広げていってブリルアンゾーンの端まで行って消すことができると、絶縁体で強誘電の分極が出るようなものを作ることができる。

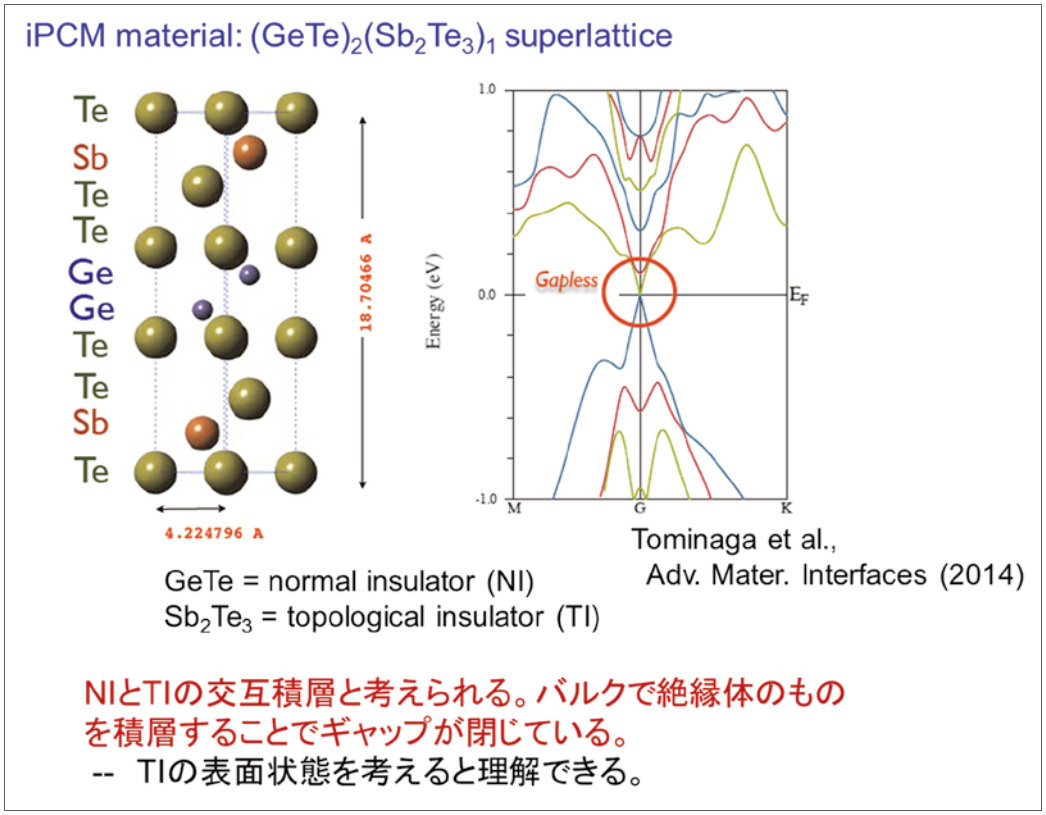



**図 3-4-5**

超格子もいろいろと面白く、例えば図 3-4-5 に示すようなトポロジカル絶縁体と通常の絶縁体の超格子を作るという話がある。メモリに利用する相変化物質もこのような物質ととらえることができる。実際に図 3-4-5 に示す組成で積層すると、トポロジカルな要因でギャップが閉じることが分かっている。

最後に、従来と異なる視点での物質探索が求められており、既存の物質にも面白いものが眠っているため、分野間の連携を有機的に行うことが研究の推進に非常に役に立つということを言っておきたい。

【質疑応答】

Q：空間反転対称の物質がトポロジカル相転移の途中でワイル半金属が出てくるということだが、例えば、強誘電分極があるトポロジカルワイル半金属があれば、その分極を反転することができ、もっと大きな応答が出られるのではないか。分極反転したときには、k 空間のモノポール・アンチモノポールが相互に入れ替わるのか。

A：そうだと思う。

Q：強誘電や強磁性の場合に、エレクトロニクスが使っているものはほとんどドメインウォールであるが、その時のドメインウォールの 2 次元面は散逸の無い状態になるのか。

A：そのような場合が多いが、一般的にそう言えるかどうかはわからない。

Q：フェルミ・アーク（ワイル半金属の異常なフェルミ面）と同じように、時間反転対称性を破ったワイル半金属で、磁壁のドメインウォールを作ると、表面に金属層ができる。強誘電体でも同じことができるのか。普通の強誘電体の分野では強誘電体の界面での電子状態を制御することが流行っており、高いモビリティ（移動度）などとの関連があれば面白いと思うが。

A：一般的にそうなるかどうかまだ分からないが、そのような例はあると思う。例えば、テルルの 2 種類の結晶のドメインがどうなるかを調べているが、ある場合にはバルクは絶縁体でドメインが金属的になる。

Q：直感的には、ドメインウォールの方が出やすいような気がするが。

A：テルルはドメインを簡単に動かすことはできないが、強誘電体であれば動かせるため有効ではないかと思う。

Q：通常の半導体でバンド反転を起こすと、必ずワイル半金属かノーダルライン半金属になるのか。例えば、s 軌道と d 軌道のように空間反転対称性が同じもので反転を起こしても同じ結論になるのか。

A：空間反転があると話が別である。空間反転対称性が無い場合には、s、p、d のパリティの区別が無いため基本的には同じである。空間反転対称性があると、パリティが偶か奇かでバンドが交わるのかどうかは異なる。

Q：2 つのバンドを持ってくると、その相互作用を考えるが、相互作用はどういう形になっているのか。

A：s と d であっても、対称性が破れているため s と p のように交じり合い、基本的にはフェルミ面付近で線形分散になる。

Q：最近の機械学習やディープラーニングと、トポロジカル物質の探索との整合性はどうか。

A：整合性は良いと思う。機械学習では何をインプットするかが重要であり、単にデータを集めてくるだけでは平均的なものしか出てこない。今まで知られていない外れ値を出そうとすると、別の観点が必要になる。例えば、物質理論から新たなものを探すというようなアイデアを持ってやらないとうまくいかないのではないかと思う。

Q：例えば、最近の硫化水素系ならうまく行くかもしれないが、高温超伝導物質の探索では今まで成功したためしがない。このトポロジーでは、相互作用がそれほど強くなければ使える範疇に入るのか。

A：相互作用が強くないものが多いと思うので、機械学習との整合性は良いと思う。ただ

し、やはりインプットが大事である。

Q：最後の GeTe と $Sb_2Te_3$ との超格子のところをもう少し説明して欲しい。

A：GeTe も $Sb_2Te_3$ も基本的にはバルク絶縁体であるが、これらを 2：1 で積層していくと、バンド計算ではギャップが閉じるという結果になる。これは不思議なことであるが、$Sb_2Te_3$ がトポロジカル絶縁体であることを考えると理解できる。トポロジカル絶縁体の表面状態があって、それを積んでいくと表面状態の間に混成が生まれて全体が繋がり、ギャップが閉じて金属的になるということである。

Q：閉じたギャップを何らかの方法で開くことはできないのか。材料を変えないとだめか。電界を加えるとどうなるのか。

A：実験的にはなかなか難しいが、基本的にはできる。要するに、相の境界ぎりぎりにあるため、理論的には外場で少しずらすとギャップは開く。

# 4. 数学、素粒子物理から見たトポロジカル物質

## 4.1 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（東北大学）

数学イノベーションの時代になった。今、物理や材料で使われている K 理論は基本的な K 理論であり、数学の世界では K 理論は大きく発展している。本日は、K 理論を使うことで多様な展開があるのではないかということを提案したい。

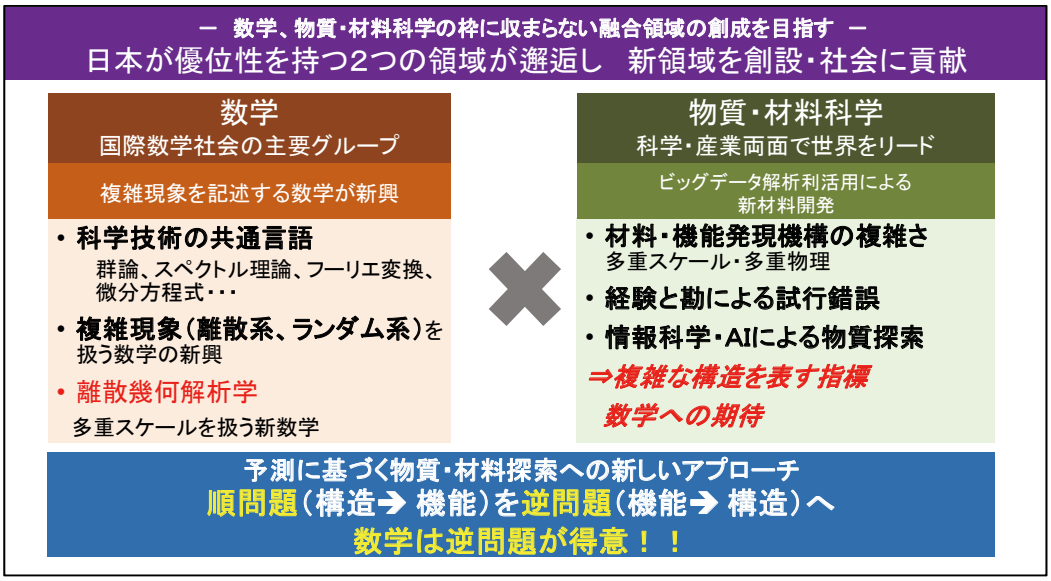



図 4-1-1

日本の純粋数学は国際的に高い評価を受けているが、今まで材料研究とはほとんどインタラクションがなかった。数学は科学の共通言語を提供してきたが、20 世紀の数学は複雑な現象を扱うことが苦手で、理想的な状況しか扱うことができなかった。ところが 21 世紀になって複雑現象を扱うための数学が進展し、さらにデータ科学が発達したことによって、二つの領域が出会うタイミングが整ったといえるだろう（図 4-1-1）。

1980 年以前は数学と物理の間は少し乖離していたが、素粒子物理や宇宙物理との出会いにおいても両方の領域に大きな進展があり、インパクトを与えた。トポロジカル相の研究は数学者が興味を持ちやすいテーマであり、実際に急速に興味が高まっている。2012 年に東北大学 WPI-AIMR の拠点長になった時に、数学と材料のターゲットプロジェクトを 3 つ立ち上げたが、その 1 つがトポロジカル機能性材料である。

数学から提案したいこととして、拡張された K 理論の活用がある。K 理論は A. Grothendick という数学の神様のような人が導入した理論である。数学の世界では、多くの果実が K 理論の周囲で生まれている（図 4-1-2）。

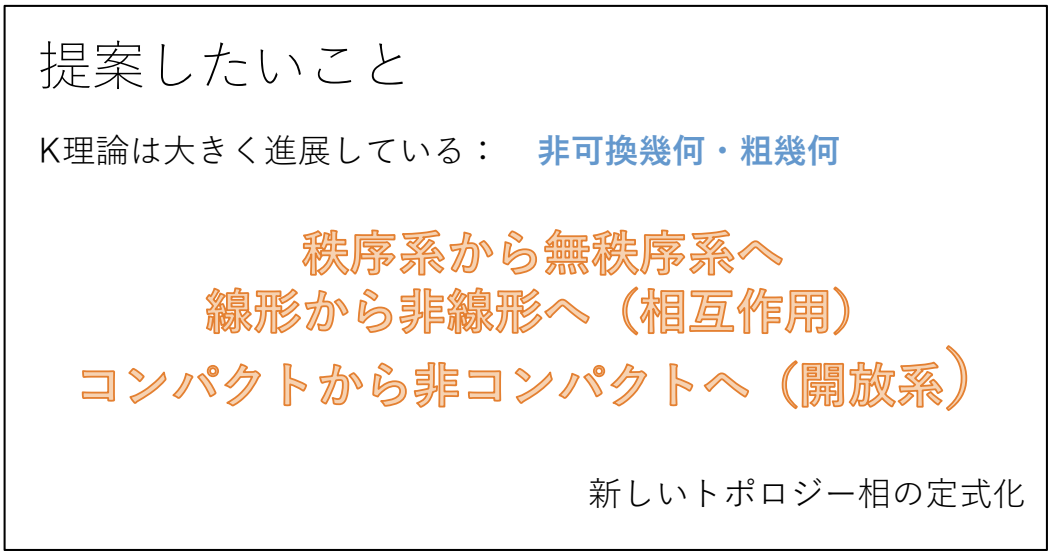



図 4-1-2

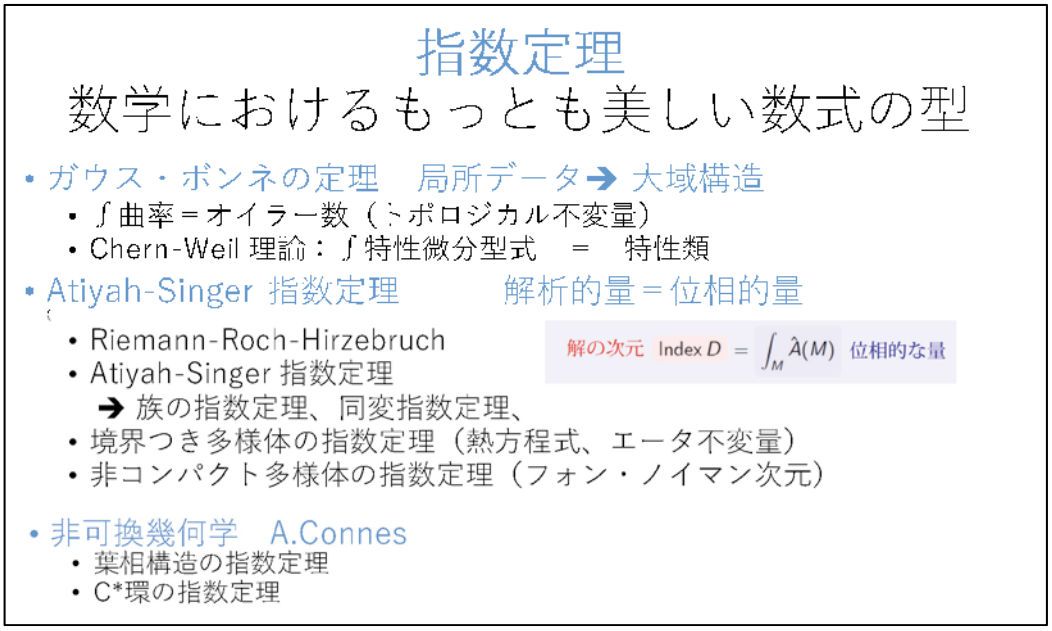



図 4-1-3

Atiyah-Singer の指数定理は数学の中で最も尊敬されている、最も美しい数式の型である。指数定理によって､解析的な量と幾何的な量が等しいということを示すことができる。すなわち､解析と幾何という､全く異なる由来のものが等式で結べるという点で「美しい」のである。

より大切なことがある。ガウス・ボンネの定理が典型であるが、局所的なデータを集めることでトポロジーという大域的な量になる。つまり、局所データから大域的な構造が決まってくるという定理である。これらを合わせると、解析的な量と位相的な量と局所的なデータが全てつながることになる。これが典型的な Atiyah-Singer の指数定理であり、数

学の中ではとにかく美しい型とされ、色々な拡張・展開がなされている。その中でこれから説明することは、「非可換幾何」という枠組みにおける展開である（図 4-1-3）。

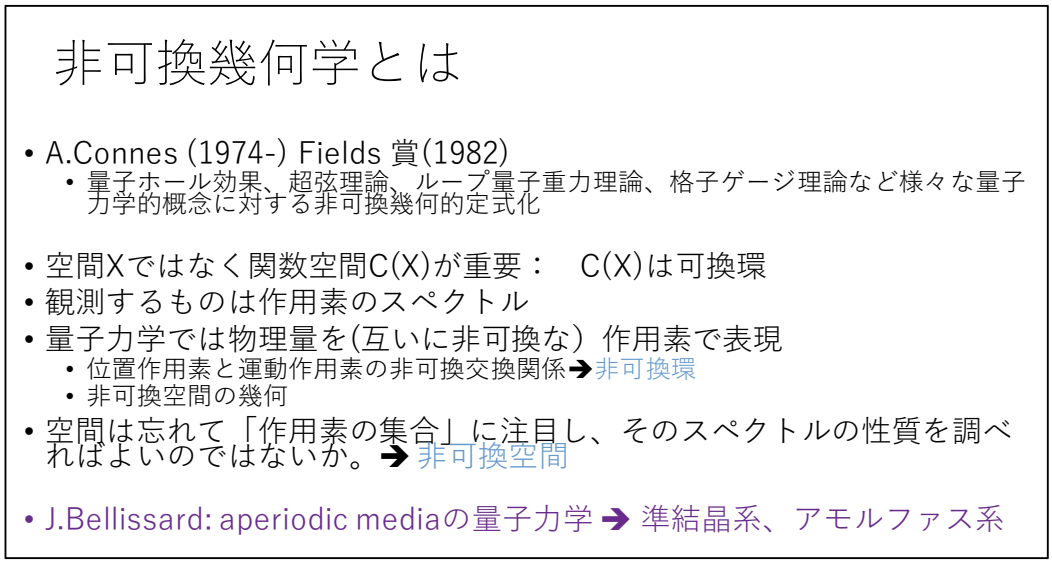



**図 4-1-4**

非可換幾何学は、フィールズ賞を受賞したフランスの A. Connes が 1985 年に導入した。J. Bellissard が非可換幾何学を用いて、aperiodic media の量子力学を展開している（図 4-1-4）。

非可換幾何の考え方を説明する。我々は「空間」が大切と感じているが、実は見ているのは空間ではなくて空間の上に定義された「関数」であり、そこに作用する「作用素のスペクトル」であることに着目する。そうすると、空間は忘れて作用素全体の空間を考えればよいのではないかという発想に行き着く。これが「非可換空間」である。

非可換幾何の手法を使うといくつかのことができる（図 4-1-5）。まずは普遍的な枠組みができる。それから無秩序系に展開することができる。特に、粗幾何というものを使って、全く秩序がない、アモルファスを含んだ disorder 系のトポロジカル相を定義することが可能になる。

また、バルク・エッジ対応をより普遍的な枠組みで理解するために我々が提案したいことの一つに「ギャップ指数」がある。ギャップ指数は数学的な概念で物理的な意味は定かではないが、バルク指数やエッジ指数の上位概念として定義できる。バルク指数やエッジ指数は、このギャップ指数をそれぞれの K 理論に押し出したものである。すなわち、元々同じ由来があり、異なる場に表現されているため、バルク指数とエッジ指数が対応することは自然である、というように理解できることを示した。これは普遍的な見方であるため、様々な異なる設定におけるバルク・エッジ対応に適用できる。

次に、周期系にランダムポテンシャルを付加したバルク・エッジ対応が非可換幾何の枠組みでの K 理論を使うことで構成できる。実際に、セミメタルの数理モデルを Thiang-Varghese が構築している。

図 4-1-5

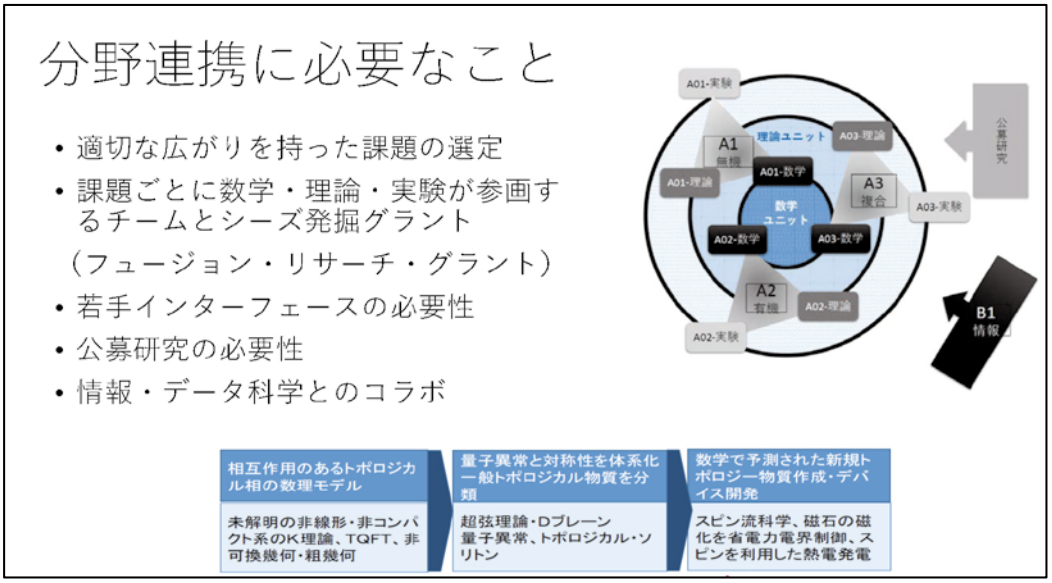



図 4-1-6

最後に、分野連携に必要なこととして、適切な広がりを持った課題の選定、そして課題ごとに全てのパートナーが参加するような分野融合チームにシーズ発掘の資金が付いていること、若手が参加すること、新しいアイデアのための公募研究などが有効である。また、情報科学やデータ科学とのコラボレーションも必要になる。以前は言葉が通じなかったが、今は少し通じるようになったのではないか。5 年前に AIMR を立ち上げたとき、最初は心細い気持ちだったが、5 年経ったら数学×材料の論文が結構出るようになった。材料科学や企業の方も興味を持つような成果が出ている。今はこのような異分野融合の進展が非常に速いため、まさに、数学と物理と工学とが一緒になって研究開発をする時代だと思っている（図 4-1-6）。

【質疑応答】

Q：K 理論を一言で説明してほしい。また、数学・物理学・工学の連携でルネッサンスが起こると予言されているが、数学の手法を用いると、どういう指針が得られるのかを簡単に教えていただきたい。

A：K 理論をざっくりいうと、ベクトル空間を束にしたようなものをどうやって分類するかという話である。波数空間において、あるエネルギーレベル以下の固有空間へのプロジェクションを作ると、波数によってパラメータ付けされたベクトル束ができるため、そのトポロジーを理解する道具が K 理論である。ワイル半金属は、ベクトル空間の次元が退化するため、特異点付きの K 理論を用いる。固体物理で使われている K 理論だけではなく、非可換幾何や粗幾何の新しい K 理論が発達しているため、これを使うと理論を拡張できる。ただし、この「できる」は工学的な「できる」とは全く異なり、物理でいう「できる」とも違い、インスピレーションをここから得られるというくらいの期待でいてもらいたい。

Q：トポロジーという概念がどんどん発展してきているが、今、秩序系から無秩序系へということで、無秩序系でも定義ができるのか。それとも無秩序系だからこそ新しいものができるのか。

A：無秩序系で、非可換ブリルアンゾーンなどを使って定義することができる。例えば、欠陥がある場合など、新しいトポロジカル相が見つかる可能性がある。

Q：離散量ではなく、この数学が連続量・物理量に対してどういう予言能力を持つのか。

A：K 理論を使うことの１つの利点は、離散と連続の間をつなぐような道具が使えるということである。

## 4.2 場の量子論とトポロジカル物質

佐藤　昌利（京都大学）

場の量子論という枠組みでは、素粒子論と物性理論は大きな違いがあるわけではなく、時に互いに強い影響を受け、それぞれの分野が発展してきた。今回は、素粒子論の研究で使われている場の量子論や数学が、トポロジカル物質の研究にどのように役に立ってきたのか、またはどのように役に立たなかったのか、ということの例を 2 つほど、個人的な経験を元にお話しする。1 つは超伝導体におけるマヨラナ・非可換エニオンを実現する研究について、もう一つは K 理論を使った新しいトポロジカル相の追及についてである。この話の目的は、異なる分野の視点や数学が新しいアイデアの源泉になるという例を挙げるということ、しかしそれを十分に発展させるにはより広い分野の連携を促すシステムが必要ではないかということを示すことである。

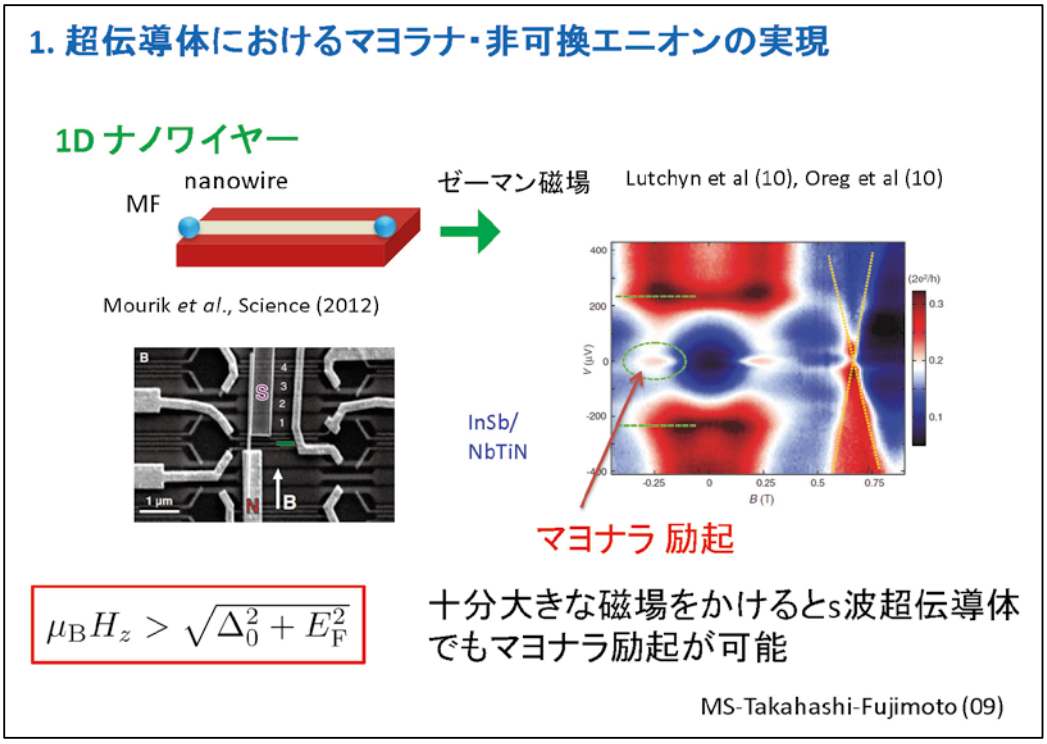



図 4-2-1

まず、超伝導体におけるマヨラナ・非可換エニオンの実現であるが、現在、1 次元ナノワイヤを使うものが最も有望だと考えられている（図 4-2-1）。超伝導体の上に大きな Rashba スピン軌道相互作用をもつナノワイヤを置き、臨界値以上の横磁場をかけると、ナノワイヤの端の部分にマヨラナフェルミオンが出てくるという実験が報告されており、その確立に向け研究が進められている段階である。

超伝導体におけるマヨラナ励起・非可換エニオンの歴史を振り返ってみると、割と新しく、2000 年に Read-Green が、カイラル p 波超伝導体に非可換エニオンが存在するとい

う理論を発表したことが始まりである。しかし、カイラル p 波超伝導体は、クーパー対がスピンを持つスピン三重項超伝導体であり、スピン三重項超伝導体として現在確立している物質が 1 つもないことが問題であった。私自身は、これをなんとかして普通の s 波超伝導体に置き換えたいと考え、研究を開始した。2003 年に最初に気がついたことは、普通の電子でなく、線形の分散を持つディラック電子の s 波超伝導体を使うと、非可換エニオンを作ることができるということである。2008 年になって、トポロジカル絶縁体のディラック電子を使うという物質の提案があったおかげで、このスキームは広く物性の世界で知られるようになった。また更に、2009 年になって、普通の電子の s 波超伝導体でも、スピン軌道相互作用とゼーマン磁場を考慮すると、非可換エニオンを作ることができることを見出した。Rashba スピン軌道相互作用とゼーマン磁場というありきたりの相互作用を使うことでマヨラナ励起が作れることが明らかになったため、これで一気に類似の提案がなされることになり、現在は特に同じスキームを使った一次元ナノワイヤで研究が進められている状況となっている（図 4-2-2）。

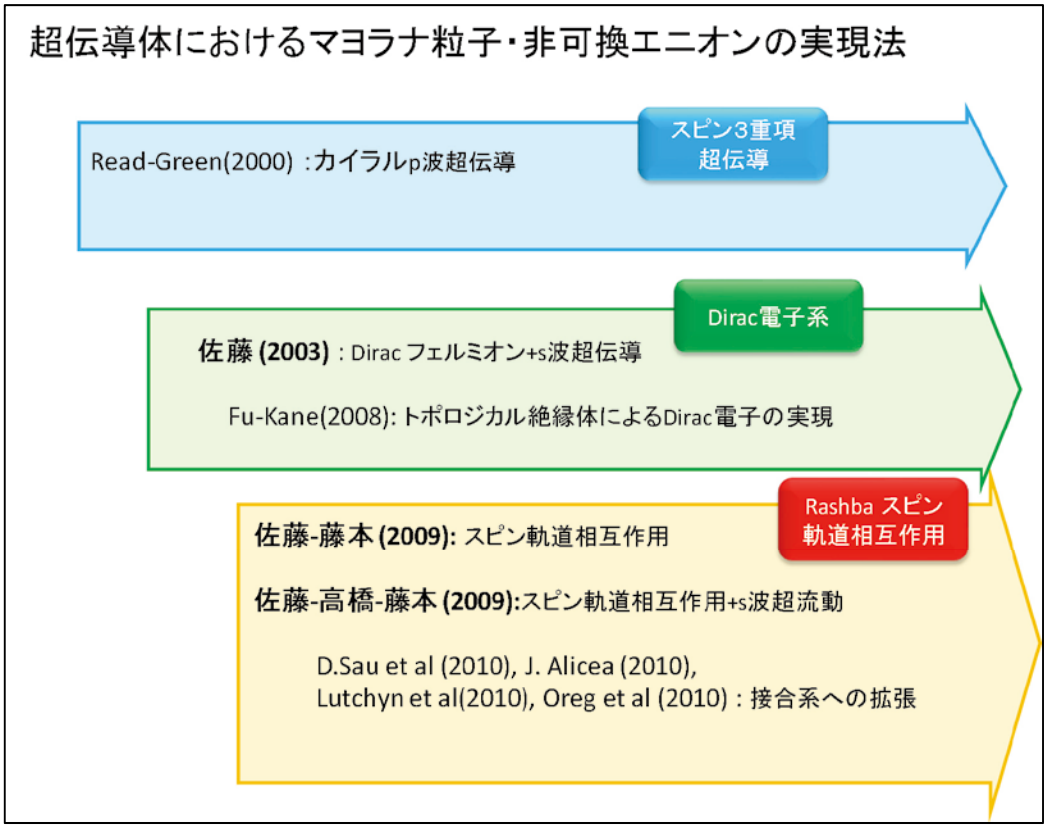



**図 4-2-2**

ここで、場の量子論の知見がこれらの研究を行う上でどのように役立ったか、振り返りたい（図 4-2-3）。実は、2000 年頃には、s 波超伝導状態ではマヨラナ励起は作ることができないと考えられていた。元々、Read-Green は、マヨラナ励起を作るのに、強磁場下で実現される量子ホール状態の類似状態を超伝導体で考えるというスキームを提案していた。彼らは、量子ホール状態を作るのに必要な磁場の代わりに、カイラル p 波超伝導のクーパー対が作る内部磁場を使っても、量子ホール状態の類似状態を作ることができると気が

ついたのである。クーパー対による内部磁場によって、量子ホール状態を特徴づけるトポロジカル数であるチャーン数が必ず 1 となり、対応して超伝導渦に必ずマヨラナゼロモードが一つ現れ、その結果、非可換エニオンとなることを示したわけである。ところが、s 波超伝導体の場合にはクーパー対が内部磁場を作らず、そのため、量子ホール状態を特徴づけるトポロジカル数もゼロになってしまう。したがって、超伝導渦を作ってもマヨラナゼロモードが存在せず、非可換統計も実現できないということが当時信じられていた。

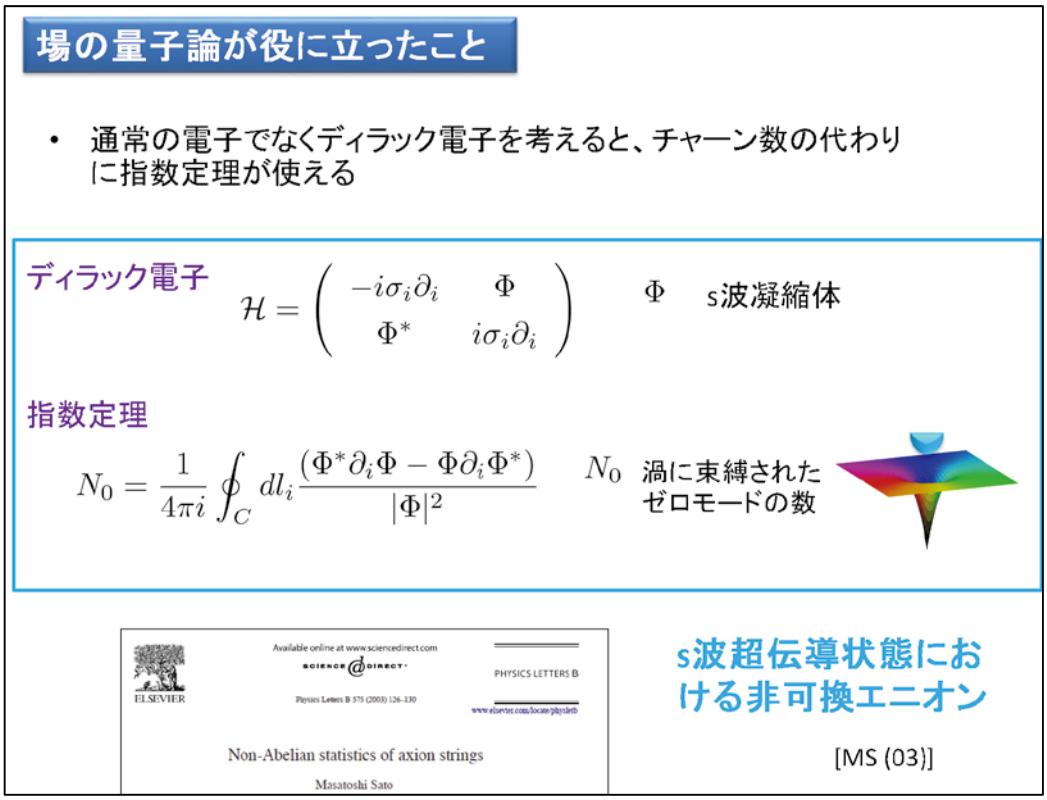



**図 4-2-3**

物性物理では上のように信じられていたが、素粒子論の場の量子論の立場から言うと、内部磁場がない超伝導体の渦であっても、ゼロモードが存在可能であることは半ば常識であった。実際、普通の電子の代わりに、ディラック電子を考えると、チャーン数を使わなくても、数学で知られている指数定理を使うことが可能になり、渦にゼロモードが現れることを示すことができる。また、このゼロモードは自然とマヨラナゼロモードとなり、渦は非可換エニオンとなる。そこで、これらの結果をまとめて、2003 年に s 波超伝導体でも非可換エニオンが可能だという論文を発表した。

ところが、場の量子論が全然役に立たなかったところがある。どうやって物質系で実現するかという部分である。物質系での実現に関しては、2008 年に Fu-Kane によって、トポロジカル絶縁体の表面のディラック電子を s 波超伝導体との近接効果によって超伝導状態とするというアイデアが提案された。ここでの教訓は、数学や場の量子論は非常にいいテクニックであるが、物質系でどう実現できるかは教えてくれないため、具体的な提案をするには、実際の物質の知識あるいはそれに詳しい人の協力が必要であるということである。

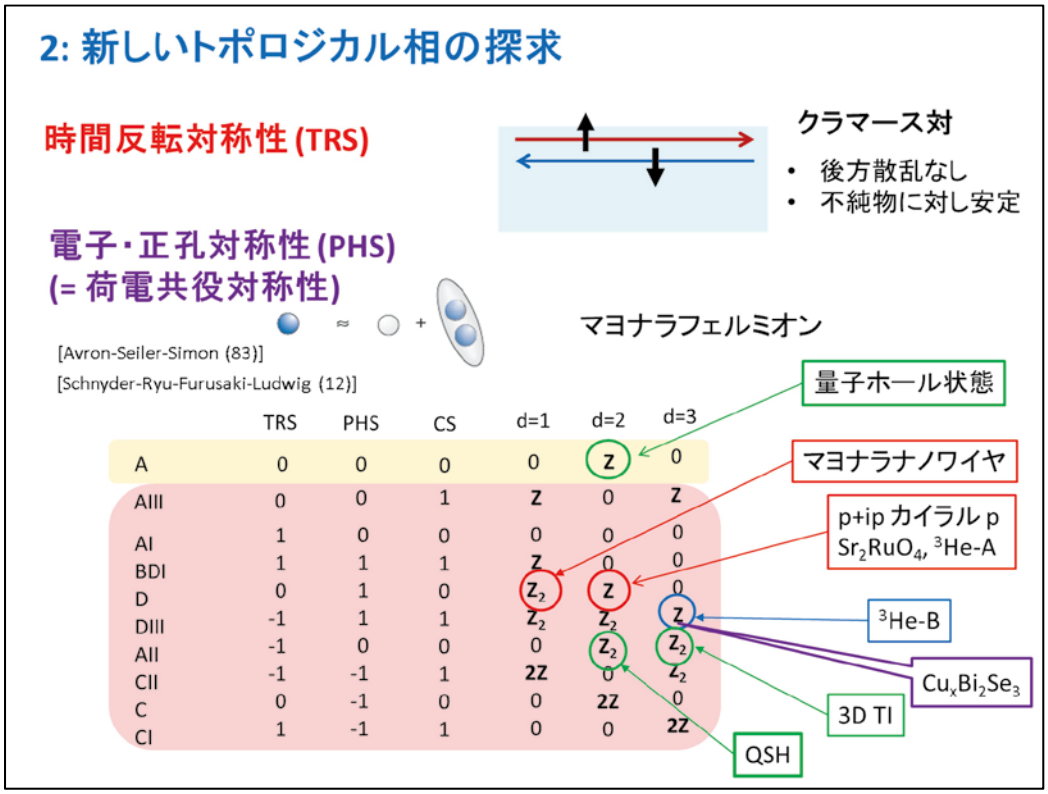



**図 4-2-4**

同じような例として、トポロジカル相の探求についても話しておきたい（図 4-2-4）。トポロジカル相は、量子ホール状態が最初の例であり、それ自体は 30 年以上前の 1980 年代初頭に発見されている。1983 年には、他にどのようなトポロジカル相が可能なのかということも数理科学者によって議論されており、何の対称性を仮定しない場合には量子ホール状態以外のトポロジカル相は存在しないということが明らかになっている。実は、最近のトポロジカル相の発見は、トポロジーにとって対称性が重要であることに気がついたことから始まっている。トポロジカル絶縁体は、時間反転対称性によって安定性を得ており、また超伝導体特有の対称性である電子・正孔対称性によって、トポロジカル超伝導体にはマヨラナ励起が存在できる。実際に、時間反転対称性と電子・正孔対称性を考慮すると、様々なトポロジカル数が可能となり、対応して様々なトポロジカル相が実現される。

興味深いことに、物質がもつ結晶構造に起因する結晶対称性によって初めて可能となるトポロジカル相も存在する。実際、SnTe 結晶の表面には、鏡映対称性によってトポロジカル相固有の表面ディラック電子が存在することが実験で確認されている。同じようなアイデアは超伝導体にも拡張でき、スピン三重項超伝導体の最有力な候補物質である $Sr_2RuO_4$ の格子欠陥には、結晶対称性によって守られたマヨラナゼロモードが存在することが理論的に示されている。しかし、これらの場合は、通常のトポロジカル絶縁体やトポロジカル超伝導体と同じディラック励起あるいはマヨラナ励起が現れ、単にその数が違うだけで、それほど目新しくない。そこでどうやったらもっと変わったトポロジカル相が可能なのかということを追求した（図 4-2-5）。

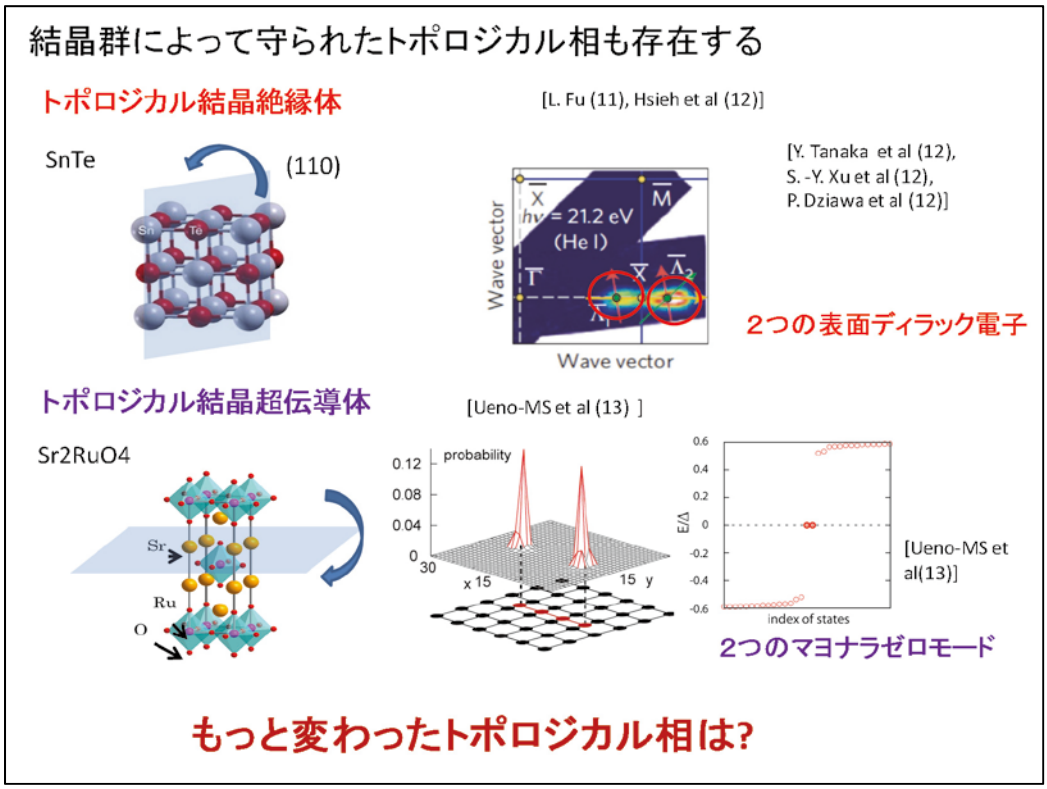

結晶群によって守られたトポロジカル相も存在する
トポロジカル結晶絶縁体
[L. Fu (11), Hsieh et al (12)]
SnTe
(110)
Sn
Te
Wave vector
hν = 21.2 eV
(He I)
[Y. Tanaka et al (12),
S. -Y. Xu et al (12),
P. Dziawa et al (12)]
2つの表面ディラック電子
トポロジカル結晶超伝導体
[Ueno-MS et al (13) ]
Sr2RuO4
Sr
Ru
O
probability
index of states
[Ueno-MS et al(13)]
2つのマヨナラゼロモード
もっと変わったトポロジカル相は?

図 4-2-5

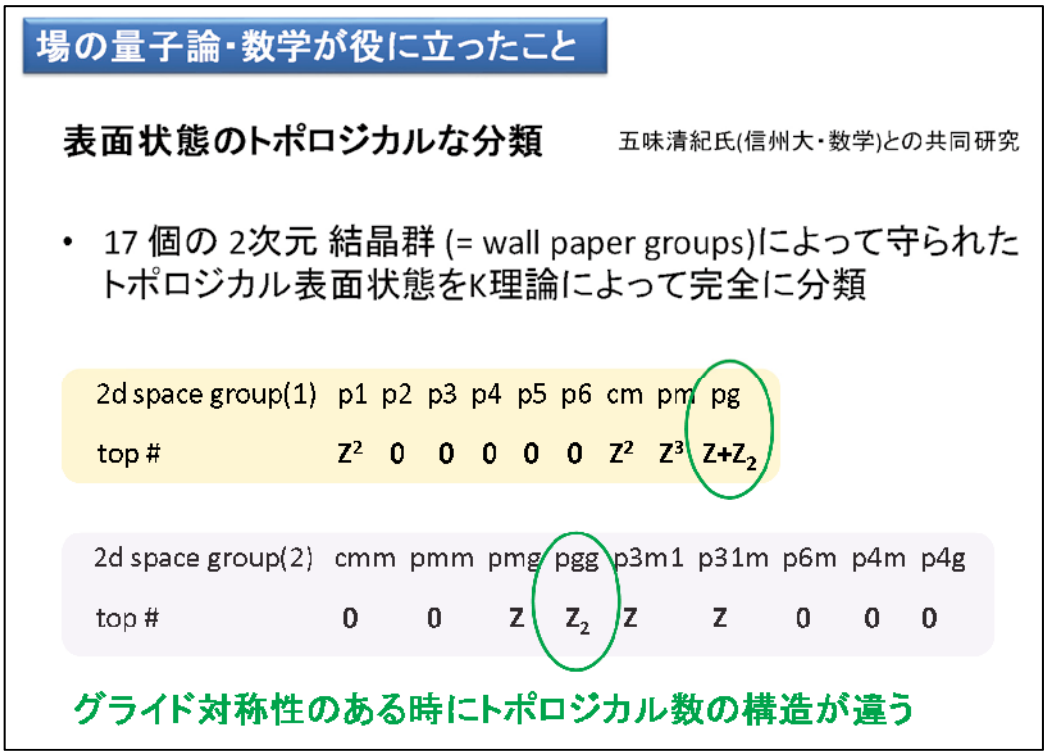

場の量子論・数学が役に立ったこと
表面状態のトポロジカルな分類
五味清紀氏(信州大・数学)との共同研究
• 17 個の 2次元 結晶群 (= wall paper groups)によって守られたトポロジカル表面状態をK理論によって完全に分類
2d space group(1) p1 p2 p3 p4 p5 p6 cm pm pg
top # Z² 0 0 0 0 0 Z² Z³ Z+Z₂
2d space group(2) cmm pmm pmg pgg p3m1 p31m p6m p4m p4g
top # 0 0 Z Z₂ Z Z 0 0 0
グライド対称性のある時にトポロジカル数の構造が違う

図 4-2-6

この種の研究には、場の量子論あるいは数学が活躍する（図 4-2-6）。トポロジカル相には特有の表面状態が存在するため、それを分類すれば可能なトポロジカル相がわかる。表面は 2 次元であり可能な結晶対称性は 17 個と数が限られているため、可能なトポロジカル表面状態を K 理論によって完全に分類することできる。17 個の結晶対称性に対応して様々なトポロジカル数が現れるが、特に注目したい点は、整数 Z のトポロジカル数でなく、偶数か奇数かという区別しかできない $Z_2$ 数が現れる場合があることである。$Z_2$ 数は映進（グライド）という、鏡映と半並進を組合せて作られる対称性がある時だけ現れており、このことから、映進対称性がある時に、本質的に新しいトポロジカル表面状態が出現するのではないかと予想することができる。実際、映進対称性がある時には、$Z_2$ 数だけでなく、時間反転対称性や電子・正孔対称性を組み合わせることで $Z_4$ 数という今までなかったようなトポロジカル数をもつトポロジカル相も現れる。結論だけ述べると、$Z_2$ や $Z_4$ の構造がある場合には、運動量空間でメビウスの輪のような構造を持つ、新しい種類のトポロジカル表面状態が出現する（図 4-2-7）。これは通常のトポロジカル絶縁体に現れる表面状態とはかなり違った形をしている。通常は運動量のどの方向に行っても表面状態は必ずバルク状態に吸収されていくが、この場合の表面状態には吸収されない方向が存在する。また、この表面状態は運動量空間でスパイラルなスピン構造を持っており、この点も通常と異なっている。

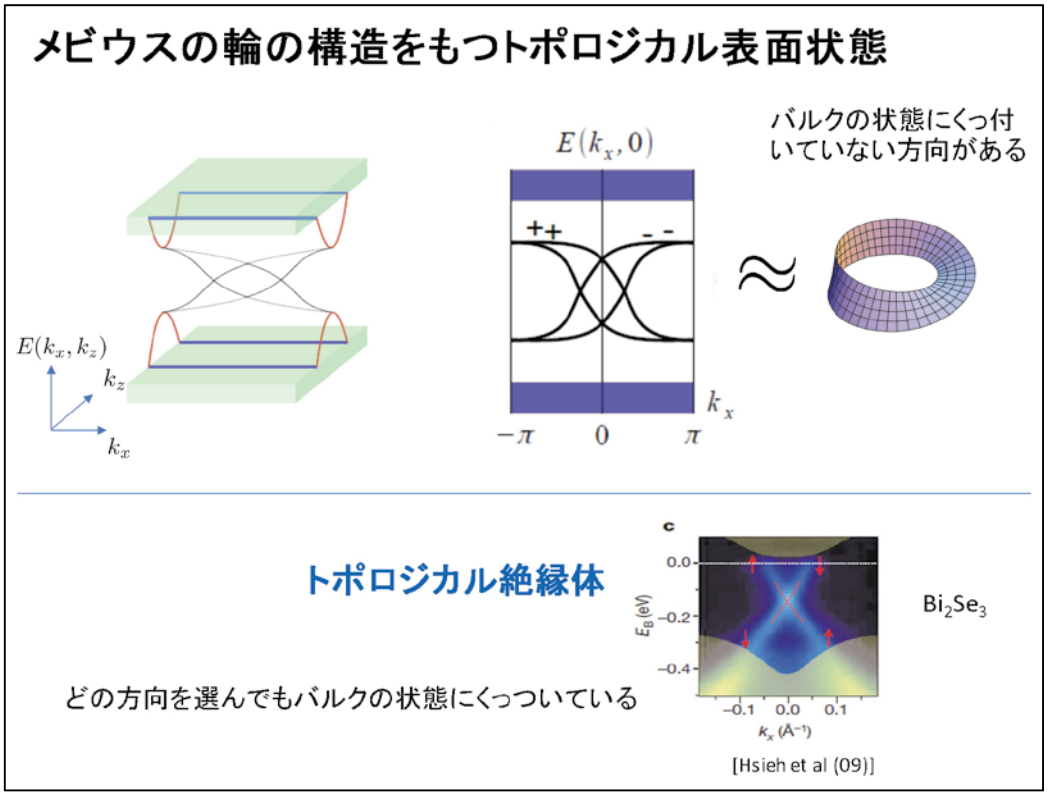



**図 4-2-7**

しかし、この新しいトポロジカル状態をどのような現実の物質で実現するのかという点に関しては、他のグループに先を越されてしまった。数学や場の量子論は、どのような新しいトポロジカル表面状態が可能かという点は教えてくれるが、実際に物質探索する時に

はそれほど役に立たない。現実の系に適用するには、物質の性質をよく理解している物質研究者の協力が必要である。これらの経験から数学者、数理的な手法が得意な研究者、非常に現実に即して研究を進めることが可能な研究者が集結して１つの論文を作るような状況、環境を作ることが今後の発展にとって、望ましいのではないかと考えている。

【質疑応答】

Q：トポロジカル周期表はどのように分類されているのか。

A：結晶の対称性で決まっている。

Q：フォトニック結晶でも線形の分散が出てくるのだが、そこでも指数定理は使えるのか。

A：線形分散であれば、ここでのディラック電子と同様に指数定理が定義できるためフォトニック結晶にも適用できると考えている。

## 4.3 自発的対称性の破れ、ソリトン、トポロジー

村山　斉（東京大学）

本日は、「自然対称性の破れ、ソリトン、トポロジー」というタイトルをつけていたが、「物性・素粒子・数学」がいかに密接に結びついているかということをお話したい。

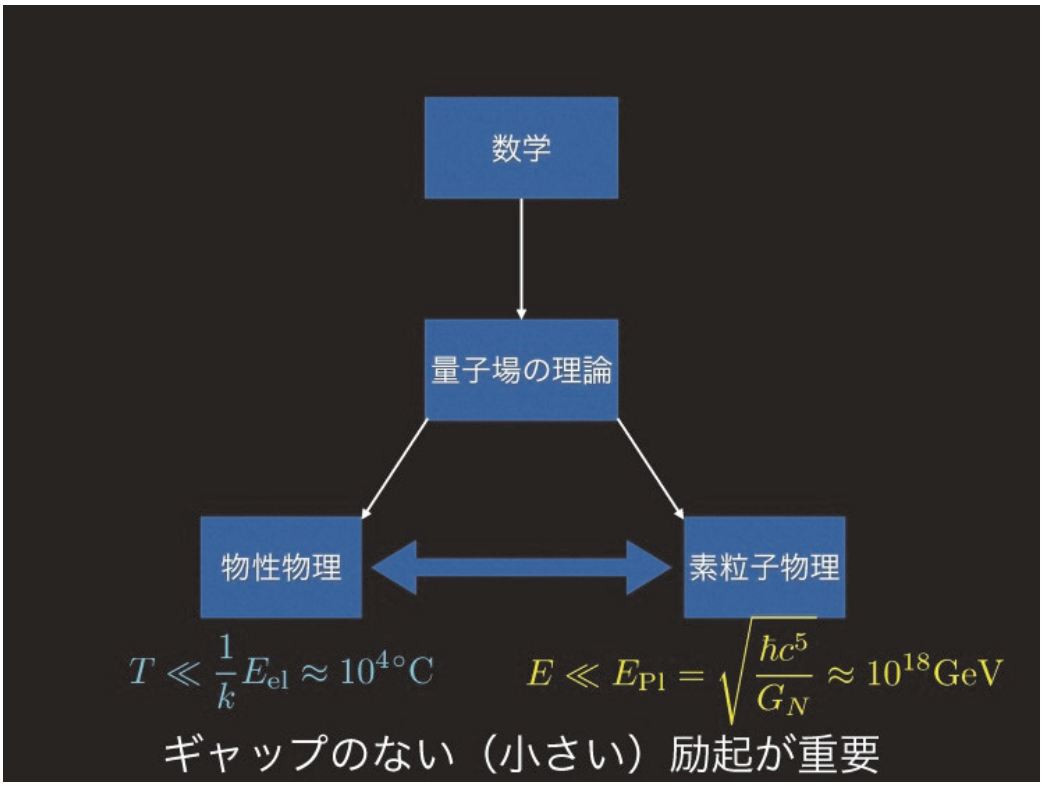



**図 4-3-1**

物性物理学と素粒子物理学はかなり昔に分化してしまったが、量子場の理論は両者の共通言語であり、数学化されている。さらに、普段我々が生活している温度領域は電子系のバンドギャップ $E_{el}$ よりずっと低く、一方、素粒子の実験も究極のエネルギースケールであるプランクスケールと比較するとずっと低くなる（$E<<E_{Pl}$）ため、基本的にはギャップが無い、もしくは小さい励起が重要であるというところも同じである（図 4-3-1）。

特に素粒子物理が、物性物理に学んで本当によかったと思うものは超伝導である。超伝導があったからこそ南部先生が自発的対称性の破れを素粒子物理に持ち込み、それが Goldstone にも通じて、対称性の破れについてギャップの無い粒子が出るだろうという提唱に繋がった。さらに、Anderson がゲージ理論でもギャップの無い粒子が出るということで、この 2 つの問題を合わせると、キャンセルして問題がなくなるという訳の分からない論文を書き、それと独立に Higgs 達が本当にそうなるということを証明して、ヒッグス粒子が予言された。やがて LHC（大型ハドロン衝突型加速器）ができ、50 年後にヒッグス粒子が発見された。

我々素粒子物理学者が何千億円もかけて実現した大発見だったわけだが、悔しいことに、この大発見の直後、東大の島野亮先生が、超伝導体に強いTHzレーザを当てると、真空が揺れだすことを発表した。揺れるということはヒッグスモードが存在し、その揺れがテラヘルツ帯で観測できている。これが数億円でできてしまうという非常に羨ましい話である。したがって、素粒子物理学や宇宙物理でなかなかテストしづらいことを物性のテクニックを使うと現実にして観測することができるという好例であり、我々素粒子物理としても将来にものすごく期待したくなるわけである。

今日の話の主題のトポロジーを使うと、ドーナツとコーヒーカップのように色々なものが分類できる。詳細によらずにおおまかに大事な点を抜き出せるという点がトポロジーの良さであり、そのことを考えると確かに不純物がどれだけあるかなどの詳細によらずロバストである。つまり、散逸が無いシステムができて、様々な物理量が整数で量子化されるため正確なデバイスにもなる可能性があり、そこに期待がかかるということは、理論屋から見てももっともであると感じている。

既にトポロジーを使って素粒子と物性の間で共通のものはたくさんある。例えば超伝導体、超流動体、量子渦（宇宙物理では宇宙ひも）でもトポロジーが使われている。また、先ほど話があったスキルミオンが素粒子では陽子・中性子である。そして、トポロジーによって量子化が実現している有名な例は整数量子ホール効果であるが、トポロジーで厳密に整数になるため、標準抵抗に使われるような厳密な値が出る。

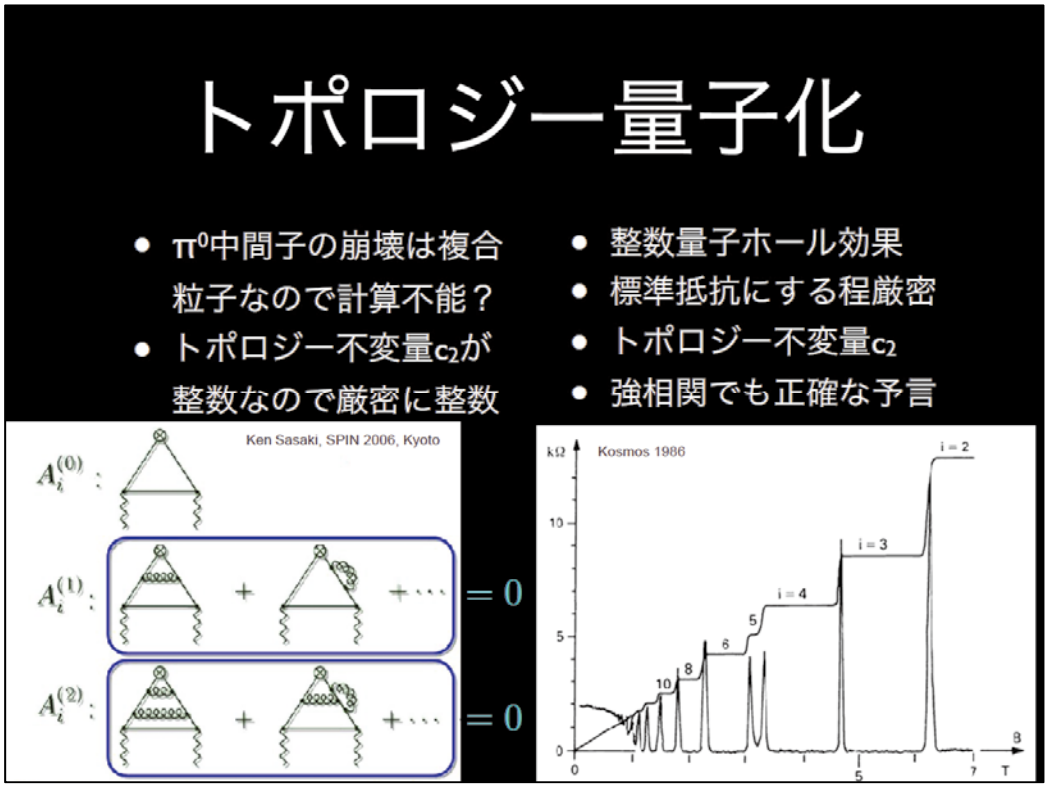



図 4-3-2

同様に、素粒子物理学において、図 4-3-2 の左図はある種の粒子の崩壊についての計算であるが、$A_i^{(0)}$ が最低次の計算で、これはクォークが閉じ込められている強相関系であり、$A_i^{(1)}$ や $A_i^{(2)}$ など、高次のグラフを入れることで全部グチャグチャになるだろうと考えられるのだが、$A_i^{(1)}$ や $A_i^{(2)}$ は全部 0 になり、全く補正がない。その理由は先ほど小谷先生も強調された局所的な量であるが、それを積分すると指数定理に対応し、整数になるため、係数が補正を受けることはないと厳密に決まっている。このように、トポロジーはよく大雑把といわれる一方で、実はトポロジーのおかげで厳密な予言ができる。

すでにある系の性質を知っていると、それから新たなギャップレスな励起が無ければいけないこと、要求されることに対して素粒子物理からアイデアを出すことが可能である。例えば、素粒子物理学ではある種の粒子が見つかると、それ以外にこういう性質を持った粒子が無くてはいけないという予言がなされ、実際にその通りに発見されてきた。今、物性物理学で議論になっているトポロジカル絶縁体に関係する例としては、K 理論で $Z_2$ のトポロジカル不変量が出て、そのためにギャップレスの無散逸なエッジ状態の自由度があるという話になっている。このことは、素粒子物理と全く同じで、例えばタウ粒子という第 3 世代の粒子が最初に見つかって、これは小林・益川理論の証明の第 1 歩だったわけだが、その直後に、これではダメだ、やはり $Z_2$ の不変量があるため、こういう粒子は少なくとも偶数なければいけないということがわかった。最終的にはトップクォーク、ボトムクォークなどの 3 つの粒子が見つかり、1+3=4 で偶数となり OK ということになった。つまり、すでに知られている物理の性質を使うことで、こういうものも無ければいけないということを確信を持って言えるということである（図 4-3-3）。

図 4-3-3

もう１つ、どちらの分野でもギャップレスな励起が出る例としては、自発的な対称性の破れがあると南部・ゴールドストーン粒子が出る。一般論では、全ての破れた対称性に対して１個１個ギャップレスの励起が出るはずだという定理があったのに、励起が少ないことがある。具体的な例は単なる磁石である。反強磁性体の場合には図 4-3-4 のような配位がある。本当は３次元の回転の対称性がある中で軸対称しか残っていないため２つの対称性が破れており、真空が二次元球面で記述されているわけであるが、この時には確かに２つ対称性が破れている分だけギャップレスの粒子が出る。ところは強磁性体の時には１個しか出ない。定理によると、分散関係は１次であるはずなのにこっちの場合は２次であり、どうも上述の南部理論では答えがおかしい。

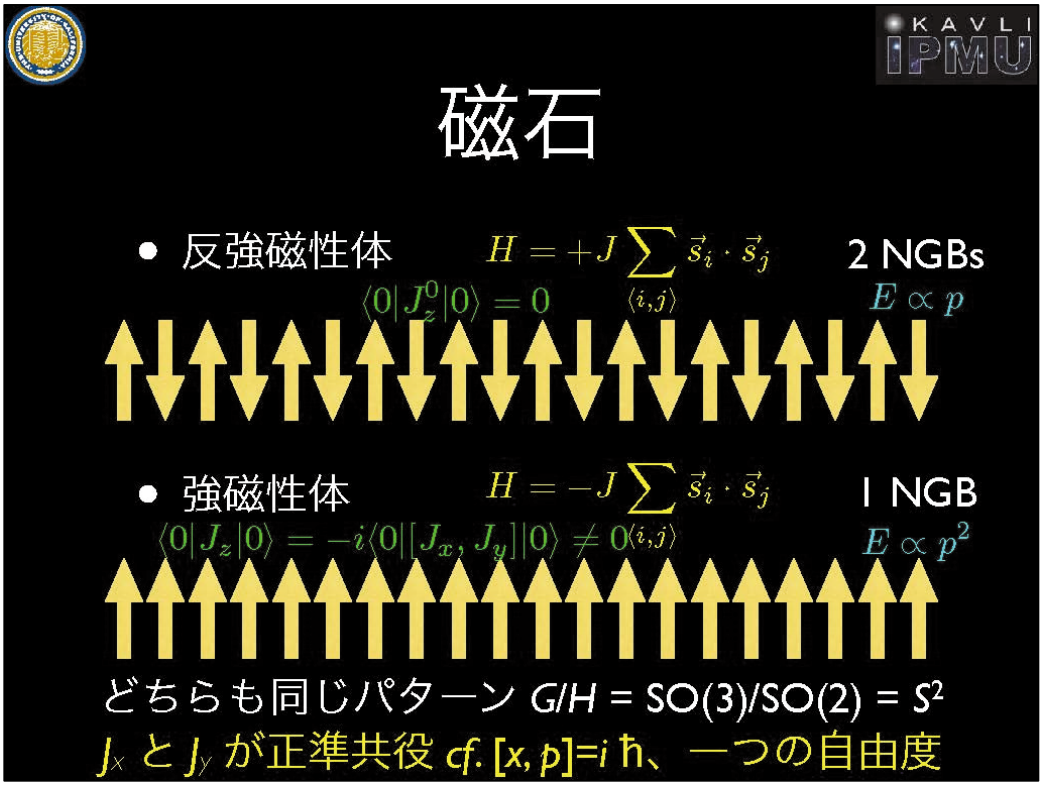
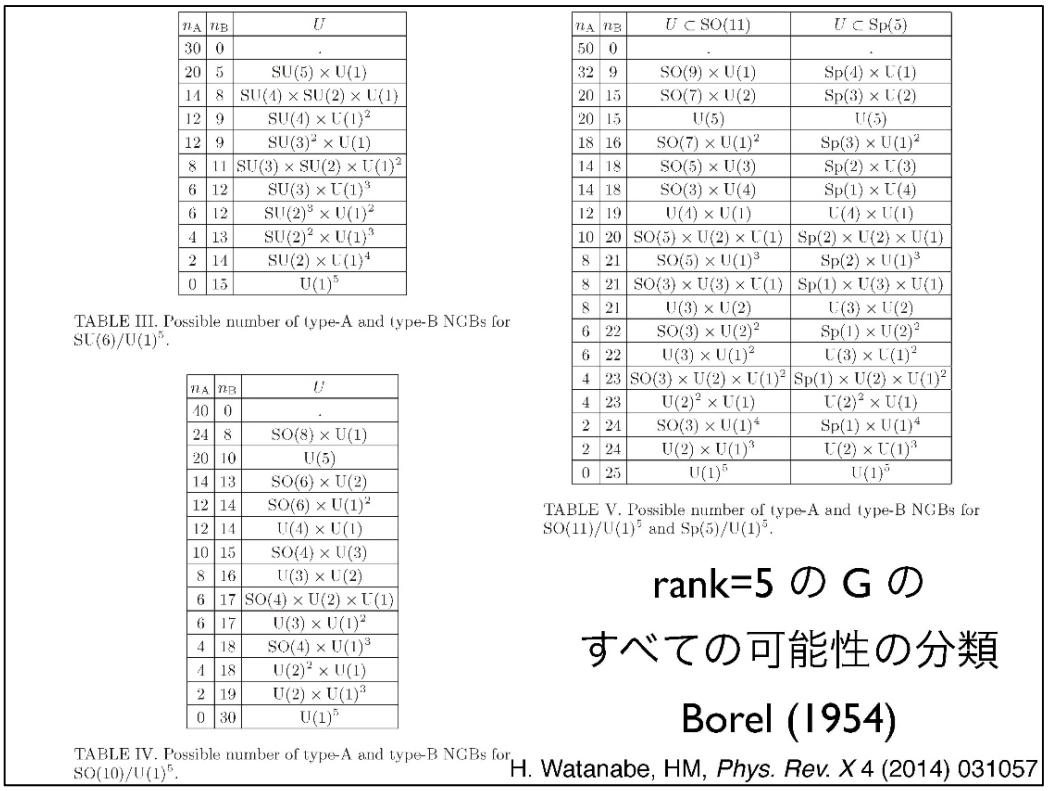



**図 4-3-4**

私が物性理論の人と一緒に研究した例だが、全く同じ対称性の破れのパターンなのに全く違う答えが出るのは何が違うのか、その背後の数学は何だろうか。もちろん具体的な例としては昔から知られていたわけであるが一般論が無かった。一般論が分かってみると実に単純なことで、反強磁性の場合には、スピンが隣でキャンセルしているので期待値はゼロであるが、強磁性の場合は全部立ち上がっているので期待値はゼロではない。Z 方向のスピンは、X 方向のスピンと Y 方向のスピンの交換関係 ($S_xS_y - S_yS_x=iS_z$) で書き表されるため、２つの演算子が交換しない。これは、数学で言うシンプレクティック構造であり、X と P の位相空間の座標が正準共役の関係にあるため、交換関係がゼロにならないことと、全く同じ構造である。つまり、２つの演算子は２つで初めて１つの自由度を記述しているため、２つ対称性が破れていてもギャップレスモードが１個しか出ない、ということが一般論として分かった。

最も興味深い例は冷却原子系である。ハイパーファインの状態を 1 つ持っている冷却原子を作ると複雑な対称性の破れ方をして、真空の空間が 3 次元になる。ところが、ギャップレスな自由度は 2 つで、1 つが 1 次、もう 1 つが 2 次の分散関係になっている。何が起きているかというと 3 次元の空間のうち 2 つの座標は位相空間（X と P）になっており、3 つ目の座標は普通の X だけというものが混ざっている。この非常に奇妙な空間になっていることで、X と P は 2 つで 1 つの自由度で 2 次の分散関係になり、残り 1 個の部分がきちんと 1 つの自由度で 1 次になっており、合計 1+2 で 3 つになるという仕組みである。これらは私のバークレーの友人 Edwards Marti らが実験的に確認している。

実はプリシンプレクティック構造という数学の分野でもめったに聞かないものを用いて、そういう不思議な構造の可能性を分類できる。ファイバー束の概念で底空間というのは位相空間で X と Y だけで、そこに我々がタイプ B と言っている自由度があり分散関係が 2 次（$E \propto p^2$）である。一方ここでつぶれてしまうファイバーのところが我々はタイプ A と呼んでおり、そちらは X と P が両方なくて X だけになり、プリシンプレクティックになる。




| $n_A$ | $n_B$ | $U$ |
|---|---|---|
| 30 | 0 | . |
| 20 | 5 | $SU(5) \times U(1)$ |
| 14 | 8 | $SU(4) \times SU(2) \times U(1)$ |
| 12 | 9 | $SU(4) \times U(1)^2$ |
| 12 | 9 | $SU(3)^2 \times U(1)$ |
| 8 | 11 | $SU(3) \times SU(2) \times U(1)^2$ |
| 6 | 12 | $SU(3) \times U(1)^3$ |
| 6 | 12 | $SU(2)^3 \times U(1)^2$ |
| 4 | 13 | $SU(2)^2 \times U(1)^3$ |
| 2 | 14 | $SU(2) \times U(1)^4$ |
| 0 | 15 | $U(1)^5$ |

| $n_A$ | $n_B$ | $U$ |
|---|---|---|
| 40 | 0 | . |
| 24 | 8 | $SO(8) \times U(1)$ |
| 20 | 10 | $U(5)$ |
| 14 | 13 | $SO(6) \times U(2)$ |
| 12 | 14 | $SO(6) \times U(1)^2$ |
| 12 | 14 | $U(4) \times U(1)$ |
| 10 | 15 | $SO(4) \times U(3)$ |
| 8 | 16 | $U(3) \times U(2)$ |
| 6 | 17 | $SO(4) \times U(2) \times U(1)$ |
| 6 | 17 | $U(3) \times U(1)^2$ |
| 4 | 18 | $SO(4) \times U(1)^3$ |
| 4 | 18 | $U(2)^2 \times U(1)$ |
| 2 | 19 | $U(2) \times U(1)^3$ |
| 0 | 30 | $U(1)^5$ |

| $n_A$ | $n_B$ | $U \subset SO(11)$ | $U \subset Sp(5)$ |
|---|---|---|---|
| 50 | 0 | . | . |
| 32 | 9 | $SO(9) \times U(1)$ | $Sp(4) \times U(1)$ |
| 20 | 15 | $SO(7) \times U(2)$ | $Sp(3) \times U(2)$ |
| 20 | 15 | $U(5)$ | $U(5)$ |
| 18 | 16 | $SO(7) \times U(1)^2$ | $Sp(3) \times U(1)^2$ |
| 14 | 18 | $SO(5) \times U(3)$ | $Sp(2) \times U(3)$ |
| 14 | 18 | $SO(3) \times U(4)$ | $Sp(1) \times U(4)$ |
| 12 | 19 | $U(4) \times U(1)$ | $U(4) \times U(1)$ |
| 10 | 20 | $SO(5) \times U(2) \times U(1)$ | $Sp(2) \times U(2) \times U(1)$ |
| 8 | 21 | $SO(5) \times U(1)^3$ | $Sp(2) \times U(1)^3$ |
| 8 | 21 | $SO(3) \times U(3) \times U(1)$ | $Sp(1) \times U(3) \times U(1)$ |
| 8 | 21 | $U(3) \times U(2)$ | $U(3) \times U(2)$ |
| 6 | 22 | $SO(3) \times U(2)^2$ | $Sp(1) \times U(2)^2$ |
| 6 | 22 | $U(3) \times U(1)^2$ | $U(3) \times U(1)^2$ |
| 4 | 23 | $SO(3) \times U(2) \times U(1)^2$ | $Sp(1) \times U(2) \times U(1)^2$ |
| 4 | 23 | $U(2)^2 \times U(1)$ | $U(2)^2 \times U(1)$ |
| 2 | 24 | $SO(3) \times U(1)^4$ | $Sp(1) \times U(1)^4$ |
| 2 | 24 | $U(2) \times U(1)^3$ | $U(2) \times U(1)^3$ |
| 0 | 25 | $U(1)^5$ | $U(1)^5$ |

**図 4-3-5**

具体的には図 4-3-5 のように、交換関係を計算し、そのランクさえわかれば、必ずギャップレスの励起の式はこの式になります、という定理を我々が示した。バークレーにいた非常に若い学生だった渡辺君と一緒にやった仕事で Physical Review Letters の Editor’s suggestion にもなった。少なくともこの公式は、物性系から中性子星みたいな天体物理、素粒子でも全部使える。しかも数学的なことが一度分かってしまうと、どういうパターンがありうるかというのも原理的に全部分類できる。

では、これがどういう物質に対応するかと言うと我々理論屋にはその答えを出せないが、少なくともどういう答えがありうるかということはこれで全部わかる。一旦分かってしまうと少し応用できる例として、スキルミオンがある（図 4-3-6）。

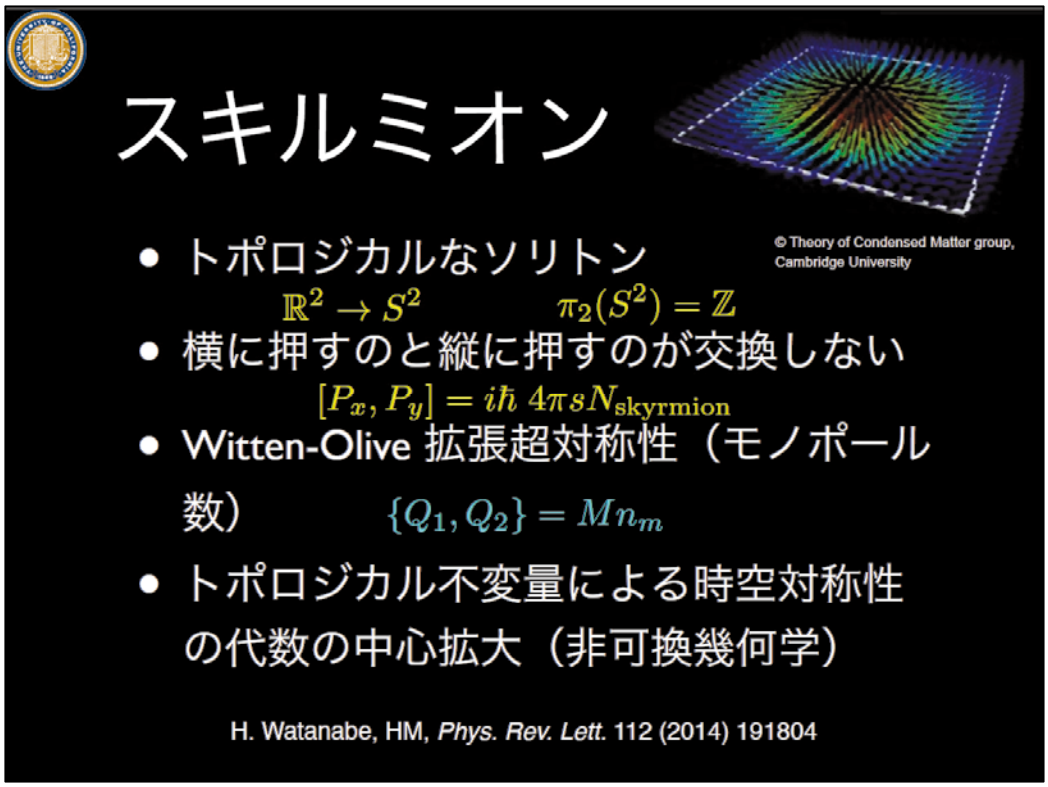



**図 4-3-6**

スキルミオンはトポロジーが出てくるソリトンの 1 種である。2 次元空間である真空に巻き付くために安定なソリトンになるわけであるが、今の理論を使って計算すると横に押すことと縦に押すことが交換しないという不思議なことが起きる。通常は横に押してから縦に押すことと、縦に押してから横に押すことは同じところに到達すると思うわけであるが、先ほどの小谷先生のお話にもあったように、これは非可換幾何の一番簡単な例になっており、答えがずれる。ずれる度合いがトポロジカルな不変量で決まっている。外場が無くてもこのようなことが起きる。このことは素粒子の立場から言うと、先ほども出てきた Witten とか Olive が導出した非常に理論的に美しい超対称性を持った理論で実現していたことが物性系で実現することに対応している。トポロジカルな不変量や時空対称系の代数の中心拡大という高度に数学的なトピックが実際に実験できてしまうという繋がりがあることが分かって非常に興味深い。

何が言いたかったかというと物理学は非常に多様な系を扱うわけであるが、超伝導、磁石、ヒッグス粒子、結晶、中性子星などそういうもの全てが基本的に 1 つの原理で説明できるため、物性物理と素粒子物理が繋がるということは非常に重要なことであると感じている。つまり、非常に密接な関係があって、特に素粒子物理学者の目から見ると、物性物理を使って、素粒子のアイデアを実験でテストすることが可能になり非常に興味深い。スキルミオン、モノポール、マヨラナ粒子、アキシオンというものも素粒子でできた概念であるが、物性物理で色々最近テストがされるようになってきている。もう 1 つは実際にそのような概念を用いたデバイスができると、素粒子物理も実験と観測に基づいているため、そこで使いたいという要求が出てくる。また、素粒子物理で特に最近ではひも理論の研究で出てきた非常に不思議なホログラフィー原理、例えば 5 次元の空間の重力理論が 4 次元の空間の場の理論に対応している。それを実際に物質系に応用するという研究も少しずつ進みつつあり、2 つの分野の連携というものがこれから面白く進展するであろう。

【質疑応答】

Q：スキルミオンの量子性が最近徐々に注目を集めている。先ほど Witten-Olive の拡張超対称性という難しい話が出たが、素粒子物理ではどういうことが議論されているのか。

A：例えばここで何が起きているかというと超対称性がある理論を考えた時に、しかもそれが 1 個ではなくてたくさんあるという非常に特別な理論を考える。その時に 2 つの超対称性は、この場合可換ではなくて半可換するはずだが、なぜか半可換せずにおつりが残る。このおつりがモノポールのトポロジカルな量子数で決まるという式になっている。しかもこの超対称性のジェネレーターはそのままエネルギーに関係している。それを元に、Witten やサイバーグが超対称性のある理論の厳密解を求め、それが今では数学の位相幾何での様々な不変量の計算に使われるようになっており、数学のほうに発展した式になっている。これが物理にどう役に立つかは分からないが深い意味を込めているのは間違いないと感じている。

Q：スキルミオンの話が出てきたが、その理論を超伝導の量子渦に適応すると何か新しいことが出るのか。

A:量子渦の場合にも、可換ではない部分が例えば渦の巻き数で現れることがわかっている。

Q：数学や素粒子物理と物性物理がコラボレーションするにはどうような仕組みが必要と思われるか。

A：分野が異なるため、初めは言葉が通じないことがよくある。言葉が通じない時にどうするかというと子供に戻ってこれは何、あれは何というところから始められるようにならないと、会話が成り立たない。そのような環境を作るような仕組みがあれば雰囲気が変わるのではないかと感じている。

# 5. 量子コンピューティングへの展開

## 5.1 量子コンピュータとトポロジカル物理

藤井　啓祐（東京大学）

本日は、量子コンピュータとトポロジカル物理がどのような関係にあるのかを中心に、量子情報とトポロジカル物理の接点や、その中でキーワードになっている量子誤り訂正やKitaev トーリック符号模型に関して説明し、トポロジカル量子計算の実現に向けて量子情報的なアプローチと物性的なアプローチの2つの潮流があることをお話したい。最後に、量子コンピュータに関する世界の状況について紹介する。

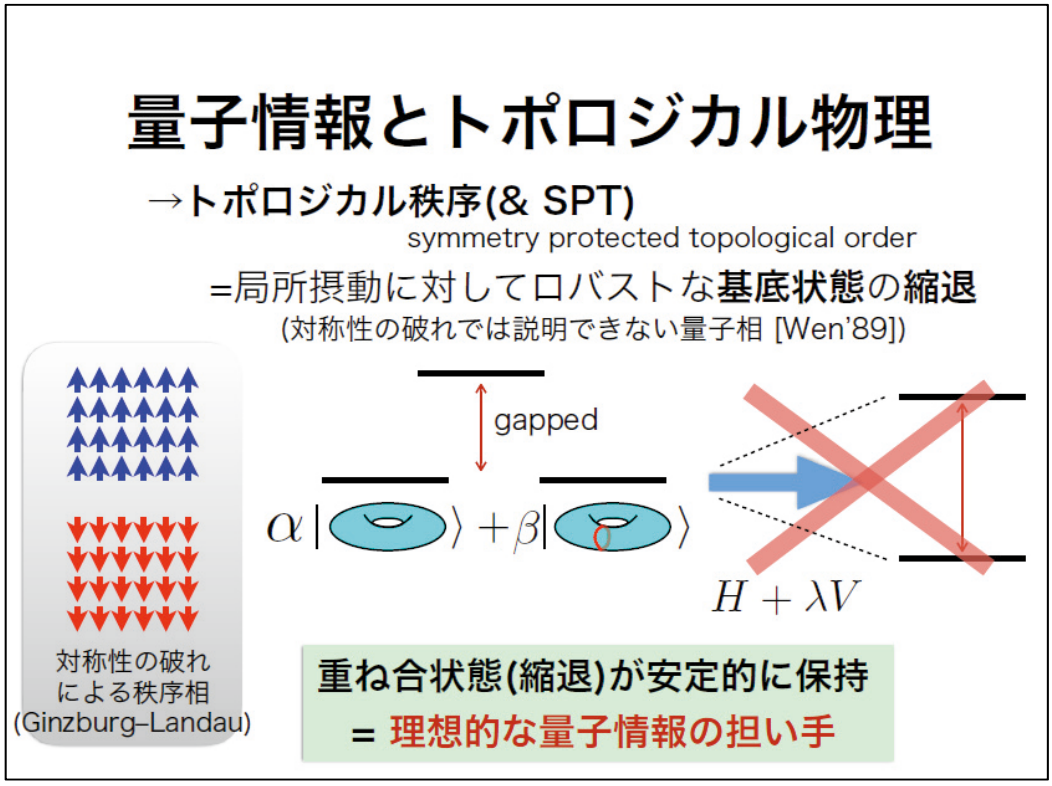



図 5-1-1

量子情報に関連するトポロジカル物理のキーワードとして、トポロジカル秩序および対称性によって保護されたトポロジカル秩序（symmetry protected topological (SPT) order）というものがある（図 5-1-1）。何らかの対称性によって縮退している系に対しては、局所的な秩序パラメータで記述されるような秩序が対称性を破ることが知られている（Ginzburg–Landau 理論）。しかし、トポロジカル秩序相は Ginzburg–Landau 理論では記述できない量子相であり、例えば 2 つに縮退している量子状態がトポロジカル秩序を持っている場合には、いかなる局所的な摂動に対しても量子状態の縮退が解けず、対称性が破れないため、それらの重ね合わせ状態が重ね合わせ状態として保持される。そのため、理想的な量子情報の担い手になるのではないかと期待されている。

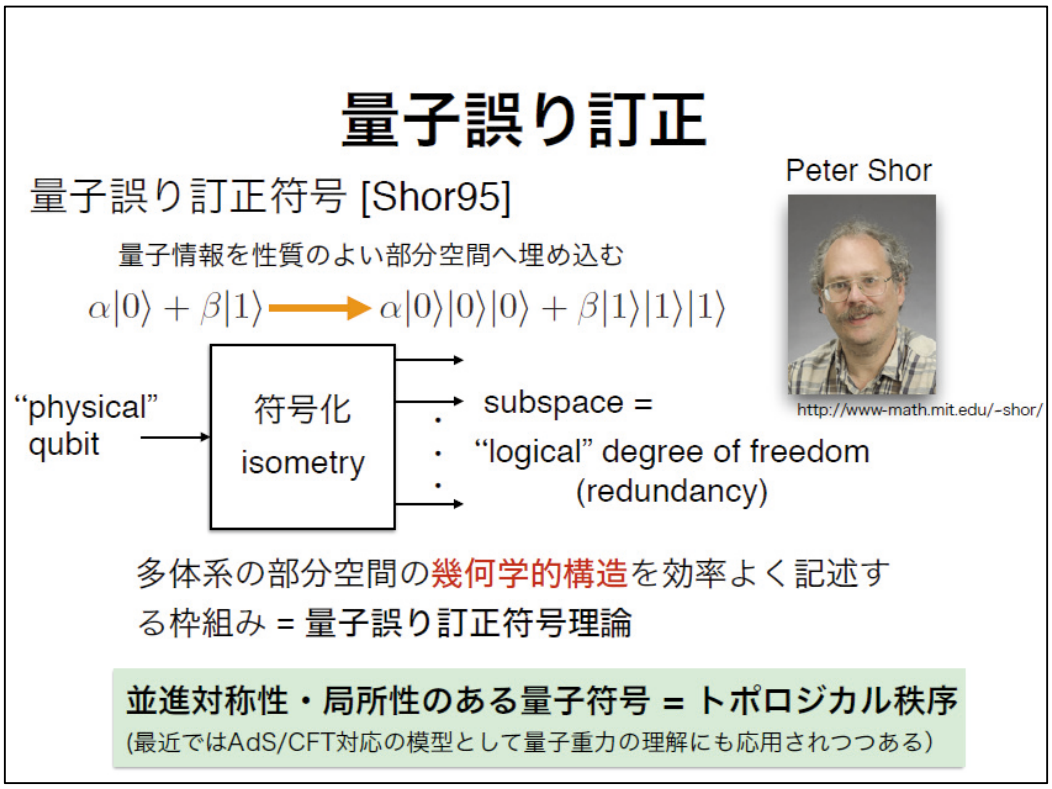



**図 5-1-2**

量子状態を安定的に保持するための研究は、長らく量子情報の中心的課題であり、その一つに量子誤り訂正という枠組みがある。通常、量子ビットは何らかの物理情報を持っているが、外界からの擾乱によってその量子状態が壊れ、情報を失ってしまう。それを回避するために、冗長性（redundancy）を導入して、複数の粒子で構成した多体量子系の大きな空間のうち、性質の良い部分空間（論理ビット）に情報を符号化して埋め込み、論理ビットの中で情報を保持しようとする方法が量子誤り訂正符号のアイデアである（図 5-1-2）。

量子誤り訂正を効率よく記述するために、量子情報の分野では色々な数学的なツールが開発されている。また、量子誤り訂正符号に並進対称性と局所性という 2 つの要請を課したものがトポロジカル符号に対応することが知られている。さらに、量子誤り訂正符号理論が多体系の部分空間の幾何学的構造を効率よく記述できることを利用することで、AdS/CFT（反ド・ジッター / 共形場理論）と呼ばれる重力と場の理論の対応を記述することも可能になるため、最近では量子重力の理解にも応用されつつある。

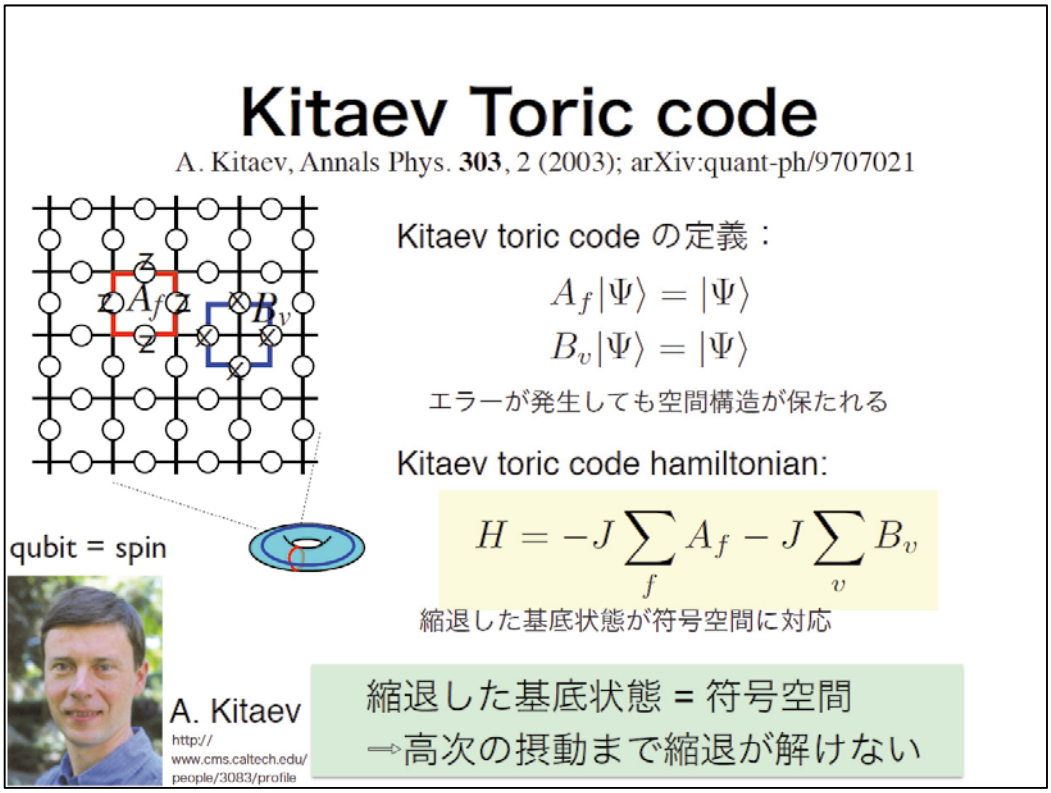



**図 5-1-3**

トポロジカル秩序に関して、もう少し具体的に述べる。Kitaev トーリック符号模型というトポロジカル秩序を記述する模型がある（図 5-1-3）。どのような模型かと言うと、周期的境界条件を満たす格子（トーラス）上にスピン 1/2 量子ビットが配置され、この量子ビットに対して、エラーが発生しても空間構造が保たれる演算子（$A_f$、$B_v$）を定義し、それらで記述できるハミルトニアン H を作ることができれば、縮退した基底状態が符号空間に対応し、ロバストになる。この縮退した基底状態に対して、局所的に高次の摂動を加えたとしても、縮退は解けずに量子状態の重ね合わせ状態もそのまま保持される。

以上のことを出発点として、図 5-1-4 に示すように、量子情報の分野では量子情報的なアプローチと物性理論的なアプローチの 2 つのアプローチによってトポロジカル量子コンピュータへと繋げるための研究開発が進められている。量子計算とトポロジカル量子場理論（Topological Quantum Field Theory：TQFT）が対応することは早くから Kitaev や Freedman によって指摘されていた。

先ほど Kitaev のトーリック符号模型について少し紹介したが、四体相互作用が入っているため自然な模型ではない。ただし、例えばフェルミ粒子を使って対称性を生かして 1 次元にすれば二体相互作用で SPT 秩序（対称性によって保護されたトポロジカル秩序）が実現される。また、2 次元でも、うまく二体相互作用を構成することによってトポロジカル秩序が出てくる。そのようなことを考慮した Kitaev のマヨラナモデルと Kitaev のハニカムモデルが提案されている。

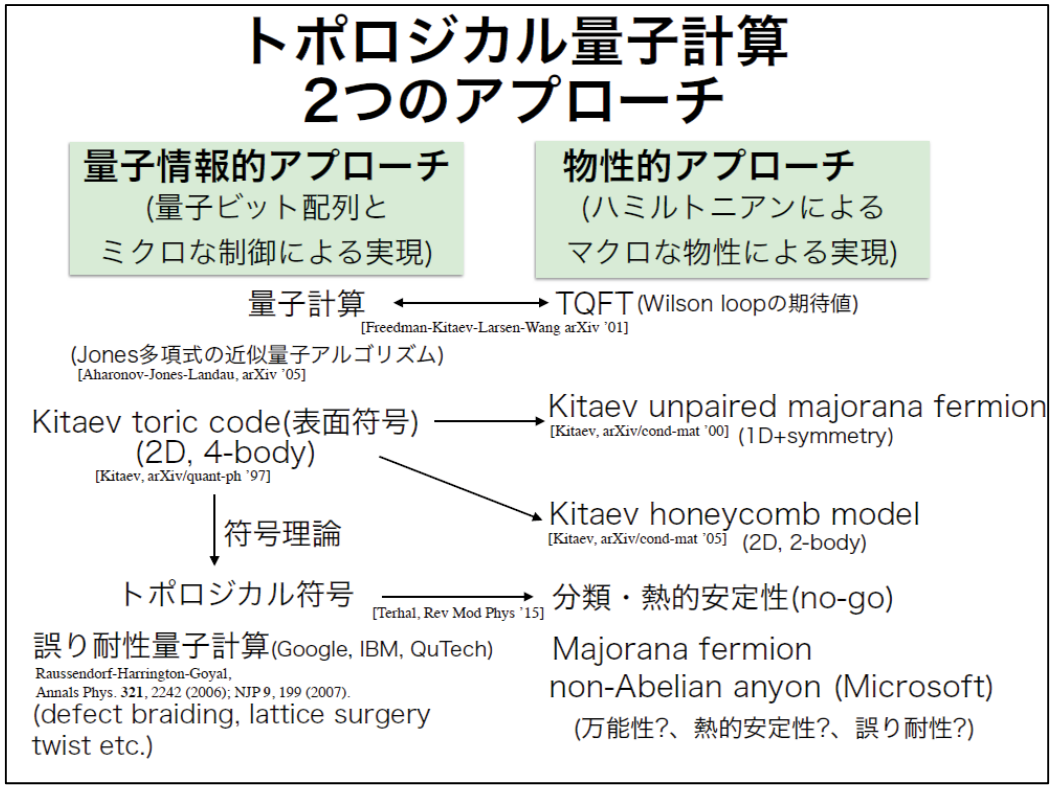



**図 5-1-4**

量子情報の分野では様々な情報理論を使って、このトーリック符号を一般化するために、トポロジカル符号の研究が精力的になされている。そこで得られた知見を物性理論に持ち出すことによって、分類や有限温度におけるトポロジカル秩序の安定性の議論がなれている。さらに、量子情報的アプローチにおいては量子ビットを 2 次元格子状にたくさん並べて色々な量子操作を実行することによって誤り耐性量子計算を実現しようとしている。これは、Google、IBM、デルフト工科大の QuTech、JST-ERATO 中村プロジェクトなどが用いている方法である。一方で、物性的アプローチとしてはマヨラナフェルミオンの物性を記述するハミルトニアンによるマクロな物性を使ってロバストな量子計算を実現しようとしている。そこではマヨラナフェルミオンや非可換エニオンが研究対象になっており、量子ビット配列を使って個々の操作で実現することを目指している。これら 2 つのアプローチの背景にある数理的構造は全く同じものである。

量子情報的アプローチで量子コンピュータを実現するためには、2 次元空間内に量子ビットをたくさん配列し、トーリック符号を作り込み、それをブレイドすることによって量子計算を実現するストーリーが描かれている。

そのためにはまずは量子ビットの 2 次元配列を作らなければならない。これまでに Google および UCSB の John Martinis のグループが量子ビットを 9 個並べた 1 次元系、IBM は 4 個の量子ビットの 2 次元系、デルフト工科大学は 5 個の量子ビットを用いた 1 次元系など、それぞれが競争しつつ挑戦的な研究を続けている。日本では、2016 年 10 月から JST-ERATO 中村巨視的量子機械プロジェクトが始まり、3 × 3=9 個の量子ビットの 2 次元系の実現を目指して研究を進めている。一方、Microsoft Station Q は、物性的

アプローチを採用し、Michael Freedman、Leo Kouwenhoven、David Reilly、Charles Marcus といった世界的に著名な研究者に積極的に投資をしている（図 5-1-5）。

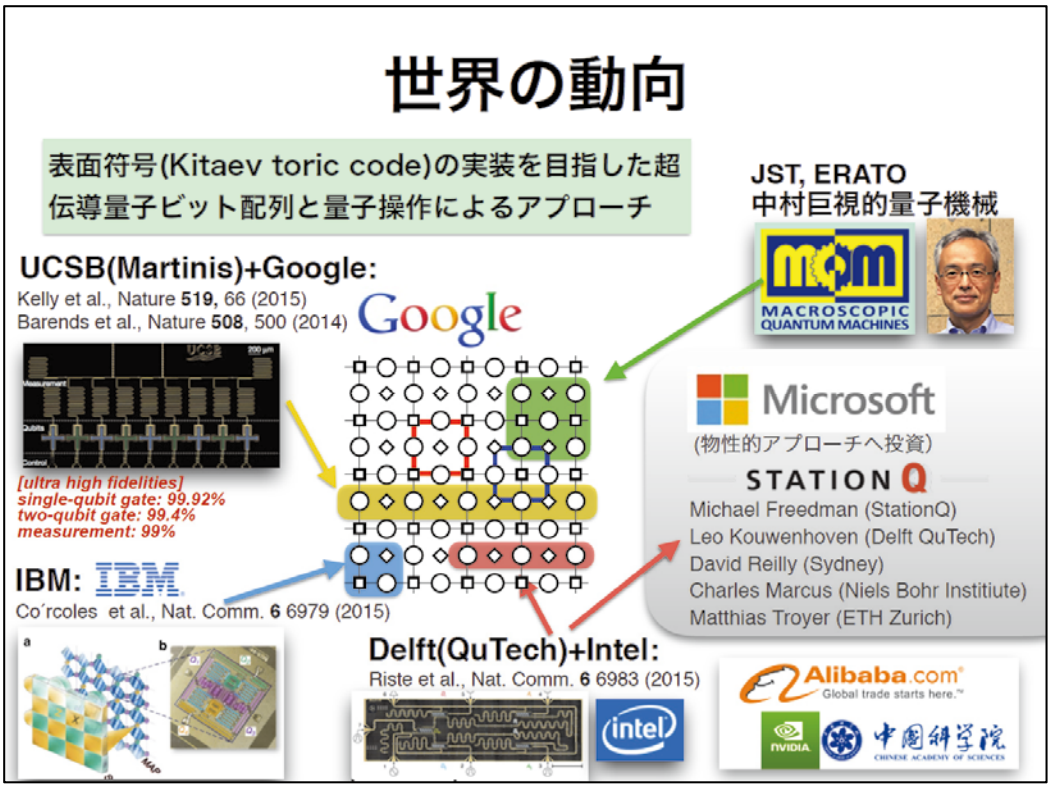



図 5-1-5

マヨラナ型量子計算においては、ロバストで長寿命な安定した量子ビットが実現されることが期待され、量子情報のコミュニティも非常に注目をしている。前述の Microsoft Station Q は T ジャンクションを使う方式に着目している。マヨラナフェルミオンをどのように測定し、どのようにブレイディングし、どのように量子計算を実現するかというマイルストーンを設定した上で、それに向けて何を実現しないといけないかという議論やフィジビリティスタディが進んでいる。

最近のアーカイブに出た Station Q の Michael Freedman と Charles Marcus の共同研究論文は大変興味深いものであった。2 人は Station Q のプロジェクトを通じた共同研究の中で、マヨラナ型量子計算に対して、これまで用いていた T ジャンクションの方法ではない新しいアイデアを提案している。つまり、実はマヨラナフェルミオンのブレイディングだけでは万能の量子計算できるわけではなく、クリフォード群というユニタリー群のサブクラスに属する必要があること、万能な量子計算を実現するためにはマジック状態蒸留と呼ばれる上位の量子情報プロトコルが必要であると述べている。

もう 1 つ気になる点は、先ほど安藤先生のお話にもあったトポロジカル秩序の熱的安定性である。縮退した基底状態の有限温度での振る舞いについては、量子情報の分野でも話題になっている。これまでの研究で、4 次元系であれば有限温度でもトポロジカル秩序の存在が証明されているが、3 次元系以下では有限温度で量子状態を保持できるトポロジ

カ秩序が存在しないことがわかっている。デバイスは 2 次元や 3 次元でないと実現できないため、トポロジカル秩序がある系であっても何らかの誤り訂正をして、非平衡にドライブする必要があり、例えば、トーリック符号をボソンの熱浴につける方法や、マヨラナ粒子の上に構造物を作って表面符号を実現する方法などが提案されている。

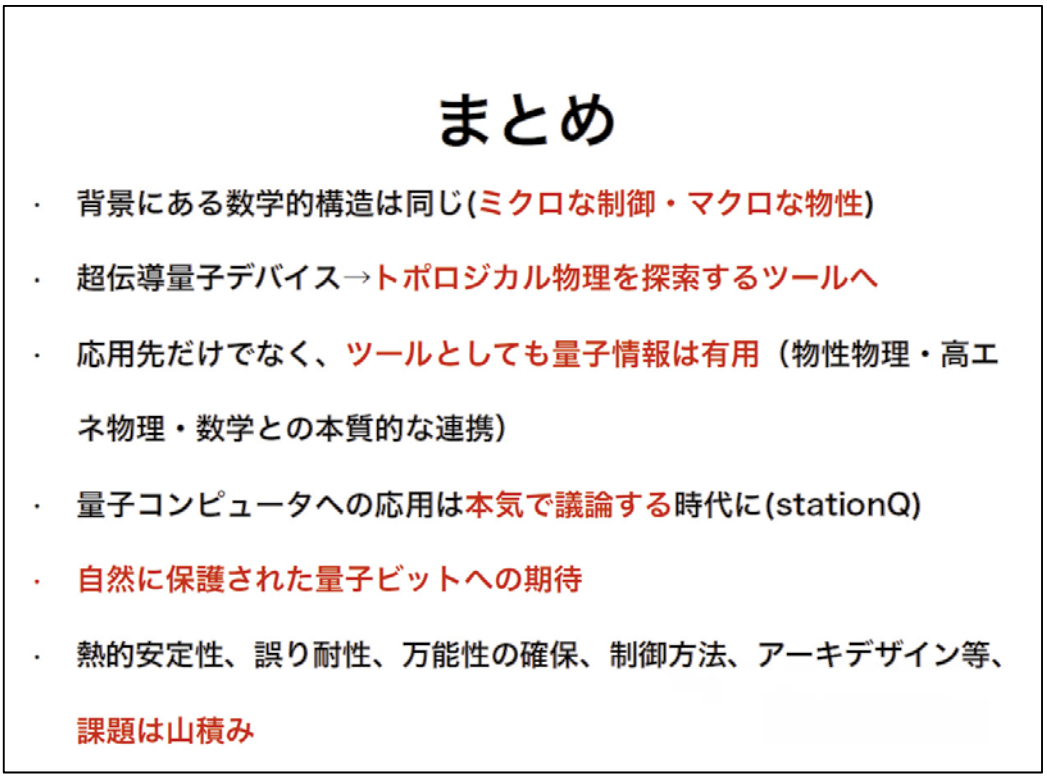



**図 5-1-6**

以上をまとめると、量子誤り訂正符号とトポロジカル秩序は、数学的構造は同じで、ミクロな制御をするかマクロな物性を使うかの違いだけである。最近の超伝導量子デバイスの進展は非常に速いため、各スピンを操作した 2 次元デバイスが実現すれば、非常に強力なトポロジカル物理の探索ツールとして使えるのではないかと考えている。また、マヨラナフェルミオンを用いた量子コンピュータに関しては、有限温度ではどうなるのか、熱的安定性や誤り耐性があるのか、万能性をどのようなロジックで担保するのか、ということが本気で議論され始めている。課題は山積みではあるが、トポロジカルに保護された量子ビットを実現できる可能性があり、非常に面白い研究分野であると考えている。

【質疑応答】

Q：量子重力との連携に関したコメントがあったが、例えば、量子誤り訂正やトーリック符号の観点から、量子重力との連携が実際に有用な方向に発展するのかどうかの見通しについて教えてほしい。

A：最近、ホログラフィー原理を記述するようなトイモデルが出てきているが、結局、ホログラフィー原理とは「重力理論の宇宙」と「物質の量子情報」を結び付ける発端を

与えるものであるため、量子誤り訂正符号は体系的なアプローチが可能で、新しいことが見えてくるのではないかと感じている。北米では、量子場、量子重力、量子情報に関して米国サイモンズ財団による「It from Qubit」というプロジェクトが立ち上がり、分野横断型の議論をしているようである。同様の分野横断型の取り組みが日本でもできると共同研究が進むのではないかと考えている。

Q：超弦理論では量子重力の解明という動機で研究がなされていると思うが、量子情報ではどのような研究動機があるのか。

A：量子誤り訂正符号は実用的な課題から生まれた数学的な枠組みであるが、それが量子重力に寄与できるなら大変興味深い研究対象になると感じている。

## 5.2　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（東京工業大学）

本日は、トポロジカル物質を用いる量子計算への期待と課題というタイトルで、物質科学者の立場でお話ししたい。

まず、トポロジカルな電子相のエッセンスとしては非常に安定な基底状態や励起状態が作られるということである。一つの例として、超伝導体中のボルテックスもトポロジーが関連している。ここでは物質の種類や大きさといったものは重要ではなく、リングができているとその中をクーパー対が 1 周して波動関数が繋がらないといけないという状況が出てくるために、自然定数だけで決まる磁場の値が出るということが、トポロジーのエッセンスである。

図 5-2-1

それでは、タイトルにある量子計算にフォーカスしてお話したい。図 5-2-1 に示すように、古典計算の場合は 0 と 1 の 2 ビットの計算で、京コンピュータにおいては多くの計算機を並べて並列計算している。大きな設置場所が必要であり、2 万世帯分くらいの電気を消費している状況である。京コンピュータは 1 秒間に $10^{16}$ 回の演算が可能で、10 PFlops（ペタフロップス）の計算能力を持つが、例えば 100 歳まで生きる間にフルパワーで動かしたときにどのような計算ができるかというと、数が亀の子のように増えていくような計算問題を解こうとすると、86 個の問題サイズになると、生きている間に計算結果を見ることができない。これに対して、威力を発揮するのが量子計算であり、0 と 1 の状

態を両方持つような重ね合わせ状態を使って超並列計算が可能であるため、23 ビットあれば上記の問題に匹敵する計算ができてしまう。超伝導方式を使うと、小さいスペースで電力もそれほど消費しない状況が実現できると言われている。

そのためには、アルゴリズムが非常に重要である。指数時間問題を多項式時間にできるようなアルゴリズムがあると、先ほど 100 歳生きても見ることができない答が、量子計算を用いることで、1 秒間に 1 回しか計算できなかったとしても 2 時間で解ける。現実的な問題としてよく言われている例としては現在使われている RSA 暗号解析（128bit 素因数分解）がある。京コンピュータを使うと高速フーリエ変換で時間を費やしてしまい、$5 \times 10^{19}$ 時間がかかる。一方、量子計算では量子フーリエ変換を使うことによって、2.3 時間程度で計算できるようになる。ただし、実際に量子コンピュータを作り上げ、論理ビットとして 300 個くらいの量子ビットを安定に動作させることが課題であり、現実はそれとは程遠い状況である。

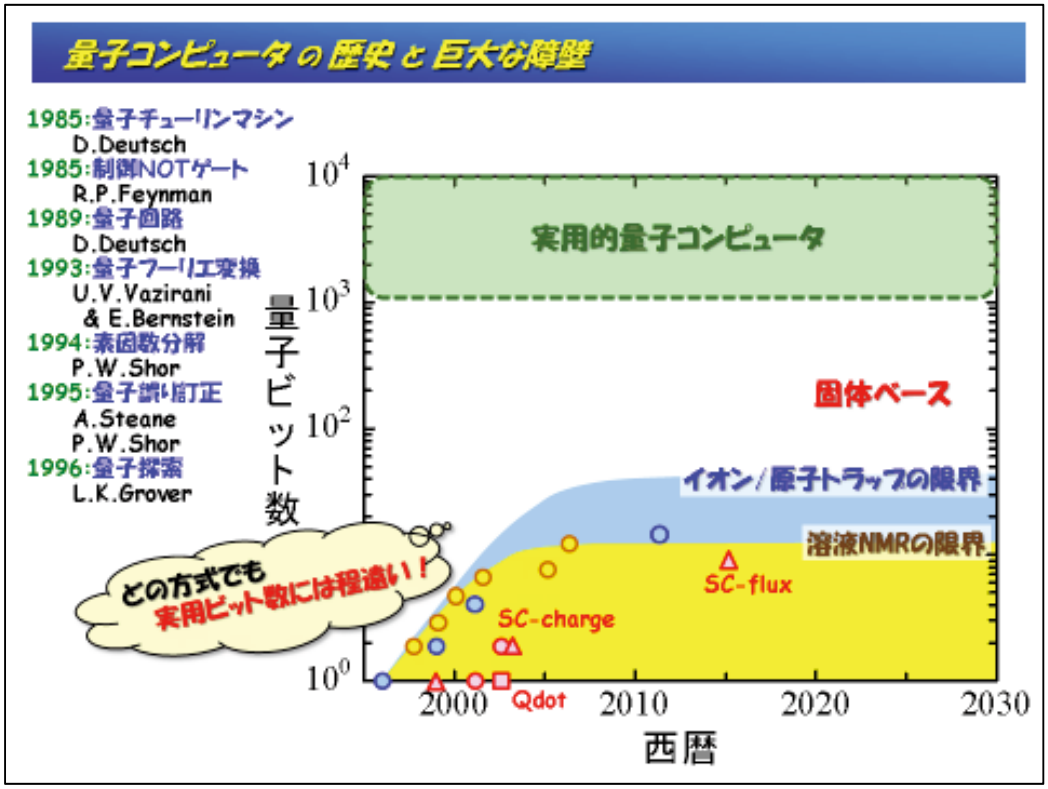



**図 5-2-2**

図 5-2-2 に示すように、1985 年に初めて量子計算のアイデアが出て、先ほどの素因数分解に関するアイデアが 1994 年に出されている。実用量子コンピュータに対して、現実はどのような状況かと言うと、様々な方式で量子ビットを作る研究がなされており、最初にイオントラップを用いた量子ビットが登場したのが 1995 年である。その後も溶液 NMR を利用する方法が研究されているが、図 5-2-2 のグラフのように頭打ちすることが理論的に予想されている。

今注目している固体ベースの計算方法では、超伝導量子ビットとシリコン量子ビットを使う方式が主に研究されているが、量子コンピュータを作るにはまだまだ道のりは長い。ちなみに D-Wave 社の量子コンピュータは、実用に近いと言われているが、量子アニーリング方式であり、因数分解などの論理計算はできない。量子ゲート方式で論理計算を実現するには、量子ビットが極めてエラーに弱いという問題を克服しないといけない。エラー訂正を行う方法にはいくつか方法があり、例えば 0 という情報を 0000 というようにして、データの数を増やして何とか誤り訂正を実現しようとする方式がある。論理的な量子ビットを N 個作るためには、物理的な量子ビットを ~10 × $N^2$ 個用意する必要がある。つまり、1000 個の動く論理ビットを作ろうとすると、~$10^7$ くらいの数の物理的な量子ビットが必要になってしまい、全然現実的ではない。一方、回路的にトポロジカルにデータを保護する方式が研究されており、物理的な量子ビットの数を ~100N まで減らせると言われていることから、1000 個の論理ビットを作るには ~$10^5$ 個の量子ビットが必要という計算になる。

そのような中で、我々はトポロジカルに保護された量子ビットが物質のもつ自然の性質によって作られる可能性に注目している。この場合には ~10N くらいの量子ビット数でよいことがわかっている。したがって、~$10^4$ くらいの量子ビットを物理的に作ることができれば、1000 ビットの量子計算ができることになる。トポロジカル物質を使った量子ビットは、今問題になっている量子計算のビット数を増やすための突破口になると感じている（図 5-2-3）。

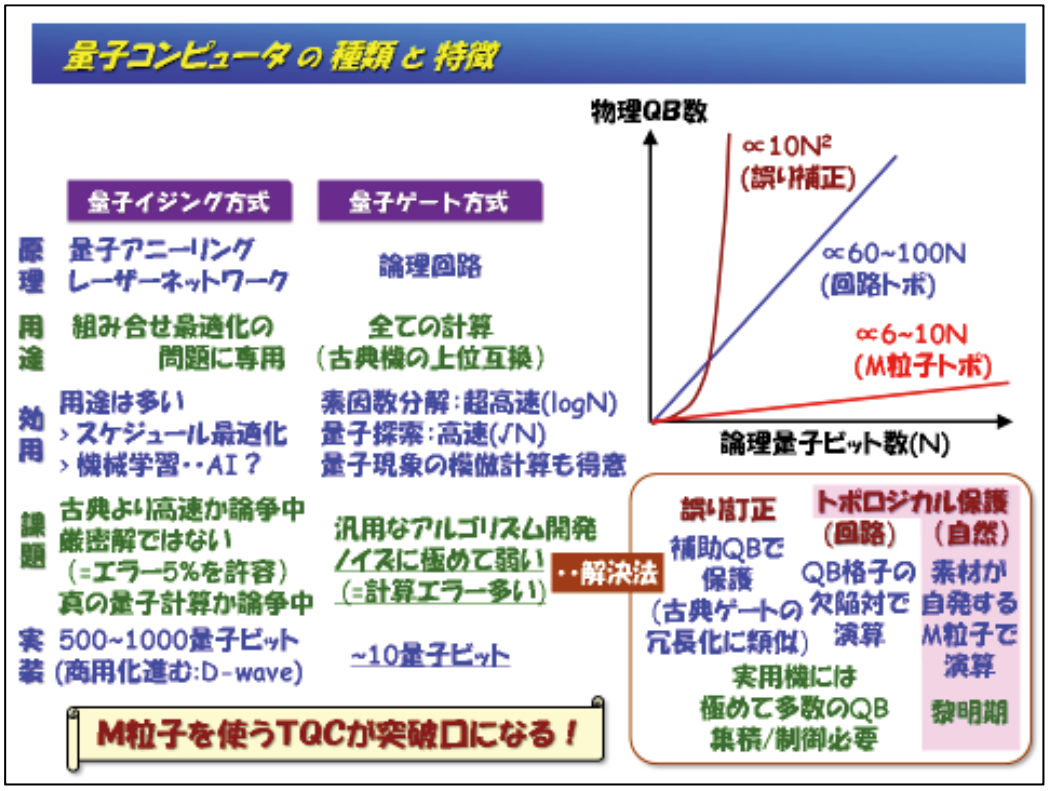



図 5-2-3

トポロジカル量子計算においては、マヨラナ粒子を使うことが一つのポイントである。マヨラナ粒子は、今まで知られたボース粒子やフェルミ粒子とは違う性質を持つ。ボース粒子の場合は、2 つの粒子の位置を交換する前後で波動関数の符号は変わらない（Ψ (1,2) ＝＋Ψ (2,1)）ため、全く同じ状態である。さらに、もう 1 回位置を交換してもやはり元の状態のままである。フェルミ粒子の場合には位置の交換に対してマイナス符号が付く（Ψ (1,2) ＝－Ψ (2,1)）ため、2 回交換することで、また元に戻り、マイナス×マイナスで何も起きなかったように見える。しかし、マヨラナ粒子の場合は 2 回交換してまた元の位置に戻ったとしても、それが元の状態には戻らない（Ψ (1,2) ＝ M Ψ (2,1)）。このような性質を非可換と言い、この性質を使うことで量子計算ができることが 2003 年に予言された。このアイデアは、ブレイディング（編み込み）という操作をしながら、2 次元の空間でマヨラナ粒子をどういう順番で交換をしていくかという順序だけ決めればよく、エラーに非常に強い量子計算ができる（図 5-2-4）。

図 5-2-4

Microsoft がこのトポロジカル量子計算の方式を Station Q という研究組織で本格的に研究している。Station Q は、Michael Freedman という数学者が中心になって 2005 年に立ち上げた研究組織であるが、2016 年には世界中にどんどん拡大していて、Station Q Delft、Station Q Copenhagen、Station Q Zurich、Station Q Sydney 等が作られている。

Station Q Delft が設置されているデルフト工科大学には、オランダ政府が巨額の資金を提供して設立された QuTech という組織があり、誤り訂正を持つ量子コンピュータを作ることを目指している。ここには Intel も投資している。QuTech の研究目標には、トポロジカル量子計算も明記されている。このように、諸外国では企業が中心となって本気で

トポロジカル量子計算を実現しようとしている。

先行研究を少し紹介する。まず、Station Q ができるきっかけでもあり、マヨラナ粒子が出現する可能性のある舞台として力を入れてきたテーマが分数量子ホール効果である。次にトポロジカル電子状態の理論の進展によって研究対象となり、現在最も成果が上がっているものが 1 次元のナノワイヤと超伝導体のヘテロ接合にマヨラナ粒子を発生させる試みである。超伝導体の上にナノワイヤをつけて、近接効果によってナノワイヤ中に超伝導状態を作り、外部磁場によって超伝導ギャップよりも大きなゼーマン分裂を起こし、フェルミ準位をチューニングすることでナノワイヤの両端にマヨラナ粒子が出現する、というアイデアである。このような 1 次元方式を Station Q では推進している。

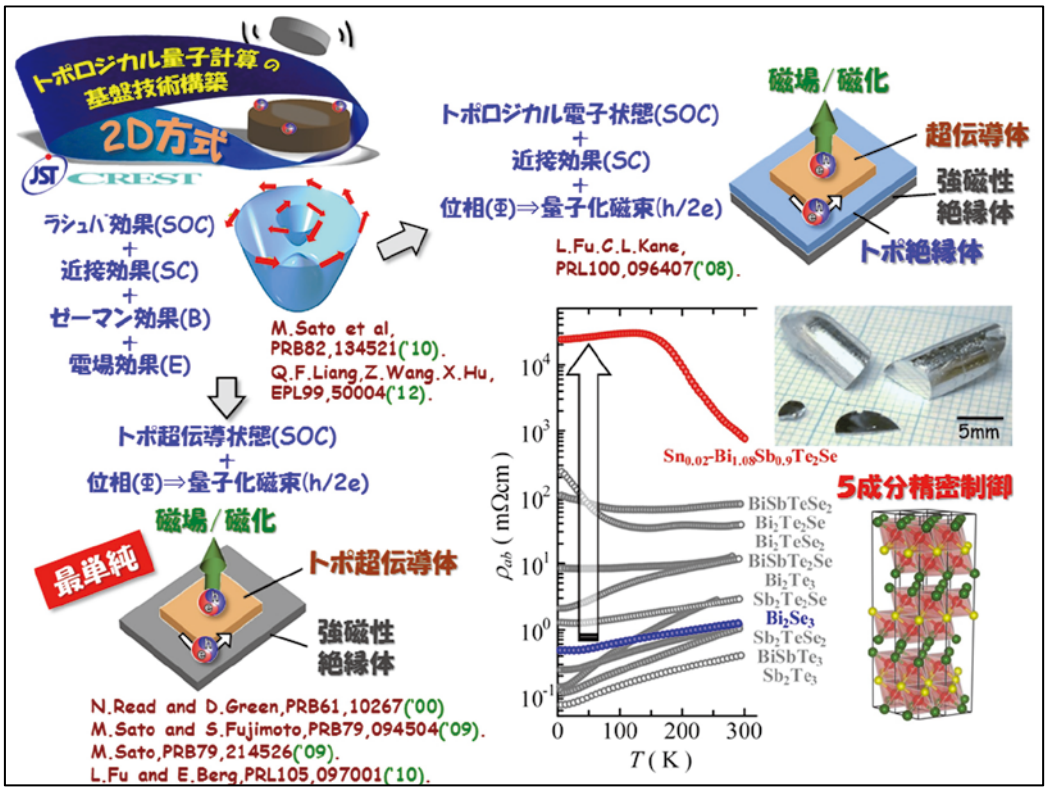



**図 5-2-5**

それに対して、我々は 2 次元方式が有望ではないかと考え、トポロジカル絶縁体と超伝導体の接合系に着目している（図 5-2-5）。そのためのバルク絶縁性の良いトポロジカル絶縁体の開発も既にできている。

また、トポロジカル絶縁体と超伝導体の接合系ではなく、トポロジカル超伝導体そのものを使うことによって、最も単純な 2 次元の量子ビット構造が構築可能ではないかとも考えており、JST-CREST の支援を受けてこの 10 月から研究を開始したところである。

今取り組んでいるもう一つのテーマとしては、新しいトポロジカル超伝導体物質を発見することである。これまでにトポロジカル絶縁体にキャリアをドープして超伝導にするというアイデアがあるが、層間へのキャリアドープや元素置換が必要になるため、マクロスコピックに見ると複雑な系になってしまうのではないかと感じている。したがって、トポロジカルな表面状態を持つような半金属を作り、その中で超伝導になるものを探していこうと考えており、既に $PdBi_2$ という物質開発に成功した。また、ラシュバ効果を超伝導体に使う方法と似ているが、反転対称性を持たない物質の中でトポロジカルな電子状態を持つ物質も発見している。今は、反転対称性がない物質の中で、さらにカイラルな対称性をもつ超伝導体を見つけて、その超伝導状態の研究を実施しているところである。

最後にまとめると、今日の半導体テクノロジーはフェルミ粒子という電子の量子性を利用してきたわけであるが、現実になりつつある D-Wave 社の量子コンピュータはボース粒子である超伝導を使っている。今後トポロジカルな量子論理計算においては、フェルミ粒子でもボース粒子でもないマヨラナ粒子を利用することが有望ではないかと考えている。夢としては、トポロジカル物質を使うことによって、今まで停滞していた量子ビット数を押し上げていきたい。2 次元方式に着目しているが、どのようなトポロジカルな超伝導体が最も適しているのかも今はわからない状況である。もしかすると近い将来、ものすごく良い物質が見つかり、ゲルマニウムからシリコンに代わった時に半導体テクノロジーがジャンプしたようなことが起きるのではないかと期待している。

【質疑応答】

Q：2 次元のトポロジカル超伝導を使う時に、どのようにマヨラナを扱うのか。ボルテックスを利用するのか。

A：ボルテックスを中に入れておきながら、エッジ状態をブレイディングして使うことを考えている。

Q：超伝導量子ビットの場合には寿命が 100 ナノ秒～数百マイクロ秒であり、クリーンで理想的な量子ビットになるように感じている。マヨラナ粒子を使ったアプローチでは、自然にプロテクトされているとよく言われるが、実際にトポロジカル量子コンピュータを作った時にどのくらいのタイムスケールまで寿命がもつのか。

A：全くデータがないため、やってみないと分からない状況である。

Q：トポロジカル量子計算は動作速度が遅いという話を聞いたことがあるが。

A：例えば、D-Wave はエラーを許してそれを 1000 回くらいやってもっともらしい答に行きつくという方法を用いている。一方、トポロジカル量子計算では、例えば 2 次元でマヨラナ粒子を作った時に、原理原則から言うと、低温状況下では永久に安定である。つまり、動作速度はゆっくりであっても、とても安定して使えるコンピュータができるという点が、トポロジカルな量子ビットを使った場合の一つの特徴であると考えている。

# 6. スピントロニクスへの展開

## 6.1　トポロジカル磁性体のスピントロニクス機能

大谷　義近（東京大学）

本日はスピントロニクスの観点から、トポロジカル物質やトポロジカル磁性体というものがどのように役に立つかという話をしたい。スピントロニクスにおいては、「室温で実験できる」という鉄則がある。トポロジカル物質、特にトポロジカル絶縁体の表面などを利用すると室温でも非常に面白い効果が見えてくることを主にご紹介したい。

私は、新学術領域研究「ナノスピン変換科学」の領域代表をやっているが、領域の狙いや、その中にトポロジカル物質をどう組み込んでいけるのかについて最初にお話しする。後半では、共同研究者である中辻先生のトポロジカル反強磁性体、カイラル反強磁性体を使った最近の研究の概略をお話したい。

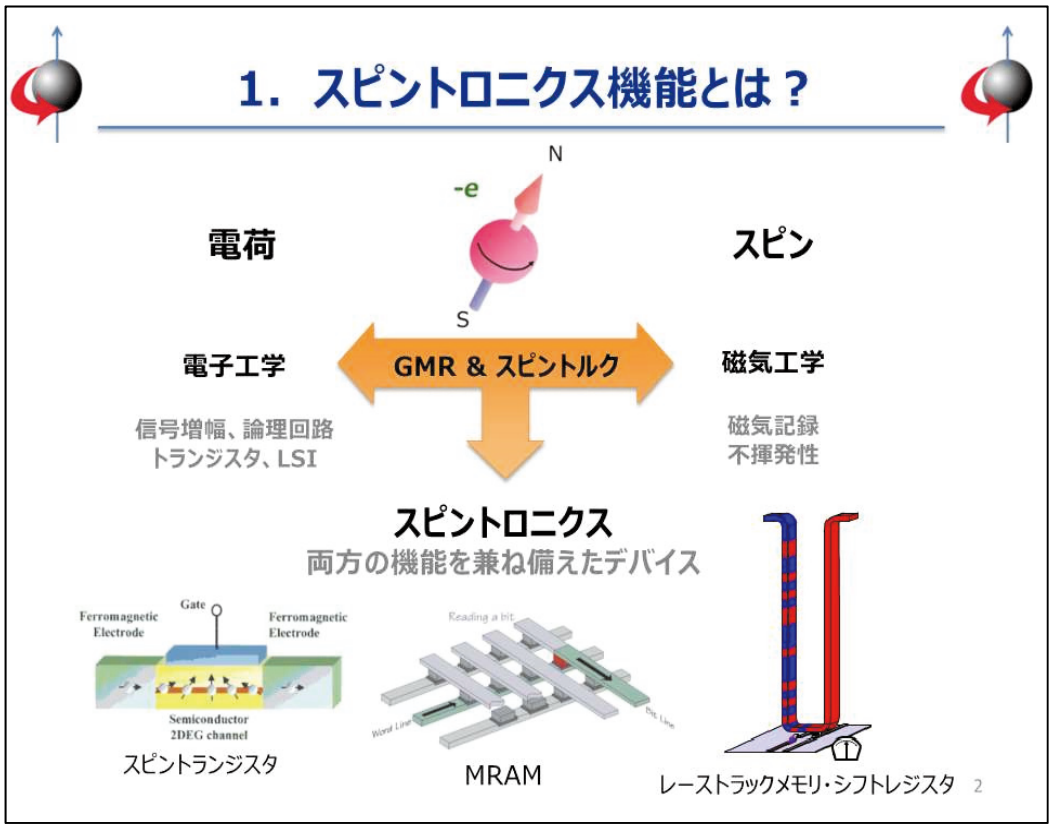



図 6-1-1

まず、スピントロニクスとは、電子が持っている２つの自由度である電荷とスピンの両方とも利用しようという分野である。図 6-1-1 に示すように、電荷については、電子工学に結び付いて、その成果として信号増幅、論理回路、トランジスタ、LSI など生活に役立つ機能がある。一方、スピンについては、磁気工学として独立に発達し、磁気メモリ、磁気記録媒体など不揮発性という重要な機能がある。スピントロニクスは、信号増幅など電荷の機能とスピンの機能を一緒に合わせてやろうということで発展してきた。その成果と

して、スピントランジスタやMRAM、レーストラックメモリなどがある。これが第1世代のスピントロニクスである。

新学術領域研究「ナノスピン変換科学」では、これよりもう少し進んだ第2世代に入ろうと研究を進めている。概略だけ紹介すると、図6-1-2のように、物理的な励起、たとえば、熱、振動、音、光などを使って、スピンを媒介させて相互に変換する。最終的には、電気に変換することが重要で、スピンを媒介とした新規な相互変換現象を研究することを目標としている。その中には当然、これらの励起の準粒子であるフォトン、フォノン、マグノン、エレクトロンなど多様な準粒子間の相互変換をきちんと理論的に理解したいと考えている。

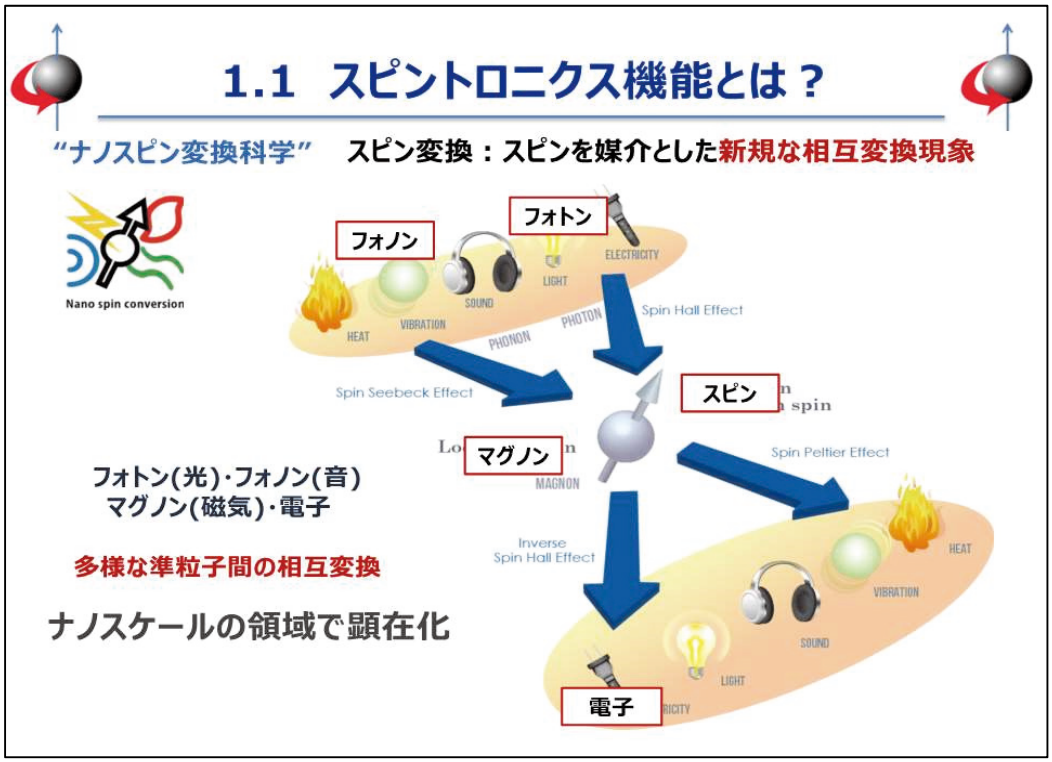



図6-1-2

特に、ナノスケール、つまり、数十から数百ナノメートルの大きさで生じる現象に着目し、3つの大きな題目を決めている。1つ目はスピン変換によって新しい物性を創出することである。スピン流は拡散量であるためどんどん減衰していくが、何らかの非線形な変換が可能になれば非常に役に立つのではないかという目論見がある。準粒子間の相互変換を統一的に理解する学理を構築するために、実験グループを4つ構成し、領域を運営している。

では、どういう変換かというと、例えば、スピンゼーベック効果という非常に有名な効果がある。熱でスピン波（マグノン）が励起される。スピン波はスピンが歳差運動する集団と考えられ、局在スピンが主役を務める。この局在スピンと、流れている伝導電子のスピンが交換相互作用をして、スピンポンピングという現象が起こり、互い違いに伝導電子が流れるため、電荷の部分はキャンセルして、スピンの角運動量だけを一方向に運ぶスピン流ができる。さらに固体中にはスピン軌道相互作用があるため、互い違いに流れている

電子が結果として同じ方向に散乱されて電流に戻すことができる。このような変換過程で生じるスピンホール効果や、逆スピンホール効果という現象を、トポロジカル物質を使って発現できないかということで様々な研究が行われている。

スピントロニクス機能の代表例として上述のスピンホール効果がある。スピン流から電流、あるいは電流からスピン流を相互に変換することで、角運動量は流れるが電荷を運ばない流れが生じ、これを磁化にぶつけることで磁化が回転するスピントルクという現象が起こる。この原理を基本として、先ほどの十倉先生のお話にも出てきたように、あるスピンのねじれた構造、スキルミオンも含めてそこに電流を流すとスピントルクが働いて動いていくという現象に繋がる。それがスピントルク磁壁移動や磁化反転、それから上手く条件を合わせるとそれが自励発振するというものが出てくる。

もう１つのスピントロニクス機能として、スピンゼーベック効果がある。熱によってスピンの流れを誘導すると、それを逆スピンホール効果で電流として検出し、効率を上げれば環境発電にも資するであろうという観点で興味を持たれているものである。

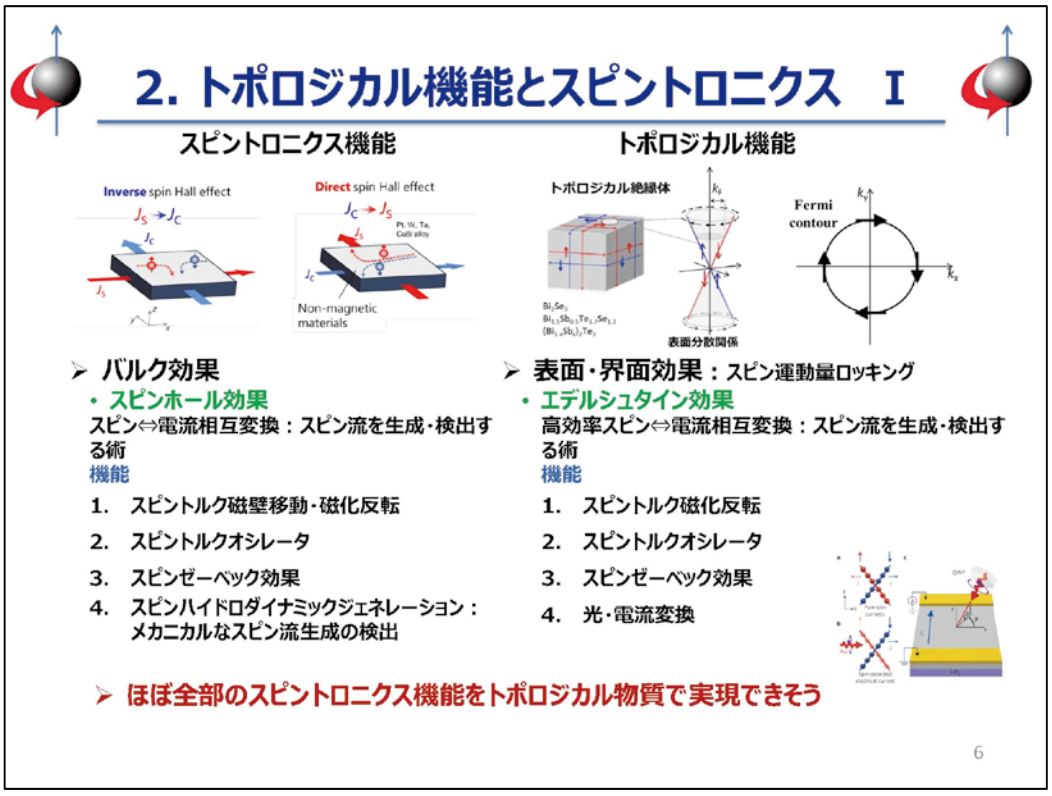



図 6-1-3

図 6-1-3 に示すように、トポロジカル絶縁体の表面状態においては、スピンの運動量とスピンの方向が直交的にロックされている（スピン運動量ロッキング）ため、電流を一方向に流すと、必ず伝導電子のスピンは全部同じ向きになるという現象が起きる。つまり、安藤先生もお話されたように、電流を流すと表面にスピンがたまるという現象が起きる。その特徴をうまく引き出すことでスピン流が作れるわけである。したがって、それを強磁性体と作用させると、スピントルクによって磁化反転も可能になる。さらに、まだこれは実現されていないが、条件を整えることによって、スピントルク発振器もできるではない

かと期待されている。あるいは、スピン流を電流に変換する機能を持っているため、界面流を利用すれば、スピンゼーベック効果も可能になるのではないか。

最近、トポロジカル表面状態に光を照射することで、特に円偏光したフォトンはスピンを持っているため、光のスピンを電子系に移して電流を生成する光・電流変換の実験も発表されている。したがって、「ほぼ全てのスピントロニクス機能はトポロジカル物質で実現できそうだ」という感触を私自身は持っている。

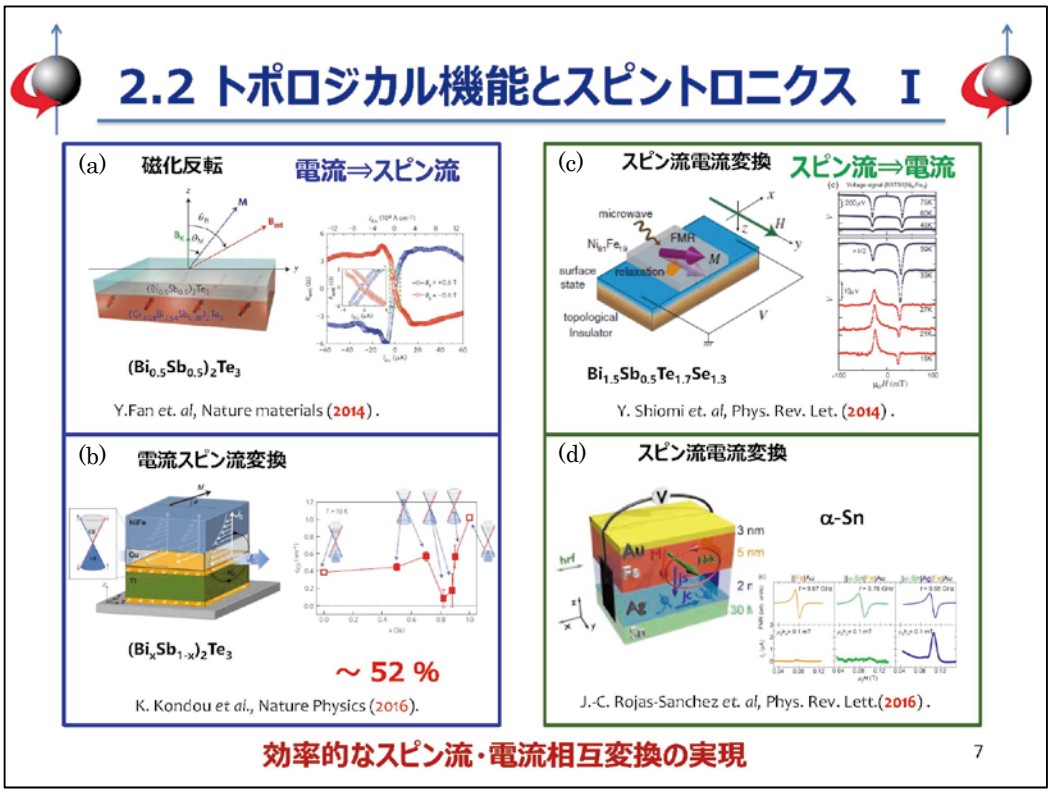



図 6-1-4

図 6-1-4 には、今述べた変換の実験例を掲げる。図 6-1-4(a) には電流・スピン流変換による磁化反転を示す。最近の技術の進歩によってトポロジカル磁性体 $(Bi_{0.5}Sb_{0.5})_2Te_3$ と強磁性体 $(Cr_{0.08}Bi_{0.54}Sb_{0.38})_2Te_3$ を積み重ねることによって強磁性体のトポロジカル磁性体を作ることも可能になる。これを用いて磁化反転を電流で起こすということができるという実験も出ている。

また、図 6-1-4(b) に示すように、最近、我々と十倉先生、川﨑先生、塚﨑先生たちと共同で、$(Bi_xSb_{1-x})_2Te_3$ のディラックコーンにおいて、フェルミエネルギーを制御しながらスピン偏極がどう変化するかを定量的な実験を行った。スピン運動量ロッキングを用いることで電流からスピンに変換する時にほぼ 100%のスピン偏極量が出ることがナイーブには想像されるが、実際には、スピン流を取り出すために銅などの金属をつけるため、スピン緩和が起こり、結果として我々の実験では 50%くらいのスピン偏極が出ることが分かった。

次に、図 6-1-4(c) に示すように、先ほどと逆効果のスピン流・電流変換効果も実証されている。これは東北大の齊藤先生のグループの成果であるが、スピン流の中にマイクロ波を入れて電流に変換して電圧信号として読み取ることができている。

これらの物質系はもっぱら Bi, Sb, Te, Se の 4 元系物質であったが、最近フランスのグループでは、図 6-1-4(d) に示すように、α -Sn の極薄膜を使ってスピン流電流変換が可能になるというデモンストレーションがなされている。したがって、物質探索や、簡単な物質で出るかどうかというのは非常に 1 つの重要な観点であり、先ほどの 1 つ前の講演で泥臭いという話が出たが、我々のこの分野も非常に泥臭いという印象を受けている。先ほど述べたように、50%くらいのスピン変換効率はもう出ているため、トポロジカル絶縁体の表面状態を使うことで比較的高効率のスピン流・電流相互変換が実現するだろうと考えられる。

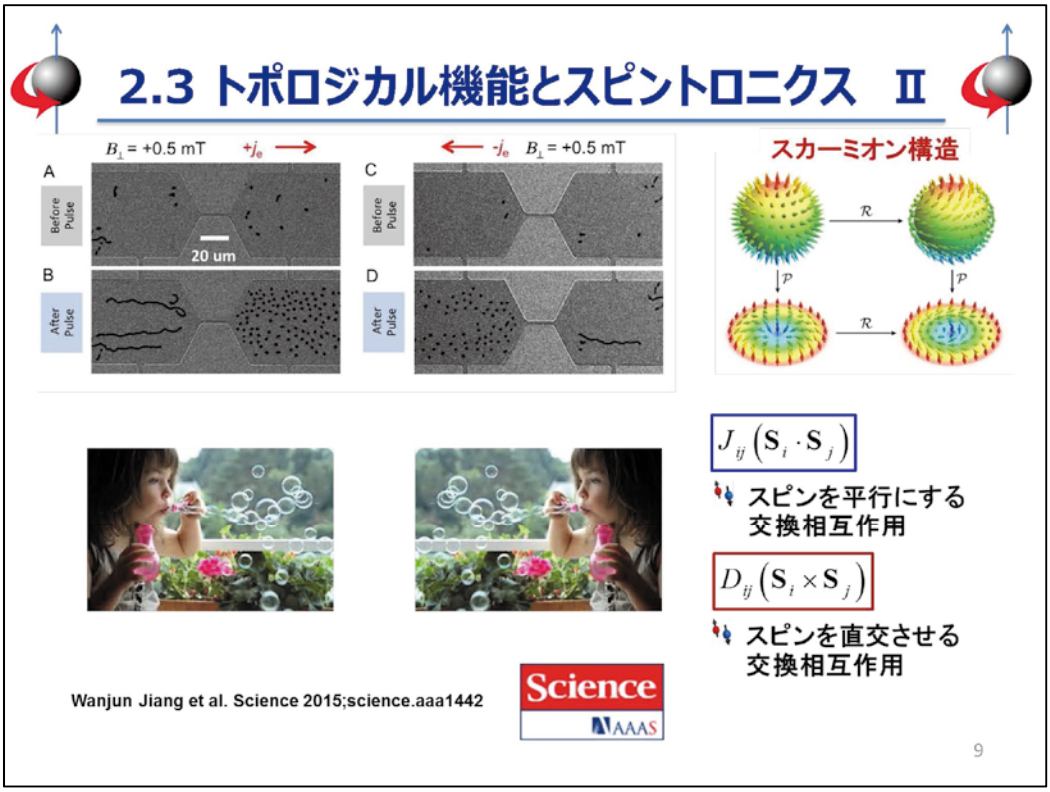



図 6-1-5

トポロジカルな構造を実空間で動かすことはスピントロニクスが得意とするところで、磁区という分域構造に電流を流すとスピントルクによって磁壁を動かせることができる。実際、磁壁は構造的にはスキルミオンに似ているため、スキルミオンも電流で駆動できるということを今世界でし烈な競争が起こっている。日本ではスキルミオンというキーワードで集まる研究者のグループが非常に少なく、危機感を感じている。スピントロニクスのコミュニティがそこにマッチングして盛り上げていくか何か対策を講じないとどんどん世界との差が開いてしまうのではないか。図 6-1-5 にはスキルミオンの制御性という観点から、スキルミオン・バブルの実験例を示す。くびれた構造を使って電流を流すことで、あたかも風船を出すようにスキルミオンが生成され、制御性良く作ったり消したりすること

が可能であることを米国の研究者が発表した。サイズとしては、非常に大きいものであるが、そういうことができるということである。

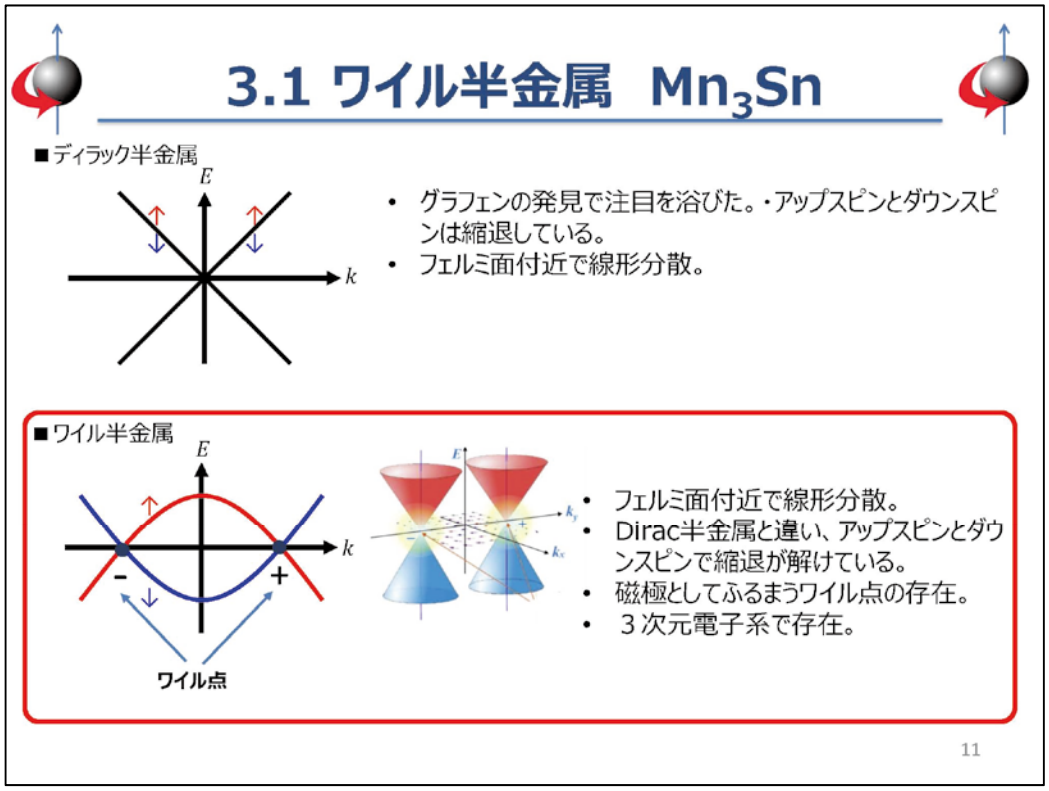



図 6-1-6

最近、反強磁性体がスピントロニクスの世界で非常に注目されている。理由としては、強磁性体では 1 テスラくらいの漏洩磁場があるが、反強磁性体の場合はほぼゼロであるため、微細化に非常に有利である。また、強磁性体の磁気共鳴の周波数は GHz であるが、反強磁性体ではサブ THz まで上げることが可能であるため、高速動作も期待されている。さらに、室温領域のネール温度をもつ反強磁性半導体を作ることが比較的可能で、実際の例もある。磁場との相互作用を考えた場合にも、強磁性体では外部磁場に直接反応してしまいロバストではないが、反強磁性体の場合には間接的であるため外部磁場に対しても比較的強く、情報を運ぶことにも適しているだろうと考えられている。

ワイル半金属は、図 6-1-6 に示すように、ディラックコーンが 2 つ並んだような状態で、この点が磁石で言う磁極のような役割をするため、2 つのワイル点の間で磁束が繋がっているような描像が成り立つ。したがって、内部磁場として電子系に非常に大きな仮想磁場を与えるのではないかと考えられている。最近、中辻先生のグループが発見した $Mn_3Sn$ という物質では、飽和磁化はほとんどゼロに近く微小磁化しかないにもかかわらず非常に大きな異常ホール効果を示す強磁性体のような効果がみられる。つまり、微小磁化の大きさから見積もられる理論値では 0.01 μ Ω cm くらいであるが、実際には 3 μ Ω cm という数百倍の大きさを示すことで注目を集めている（図 6-1-7）。

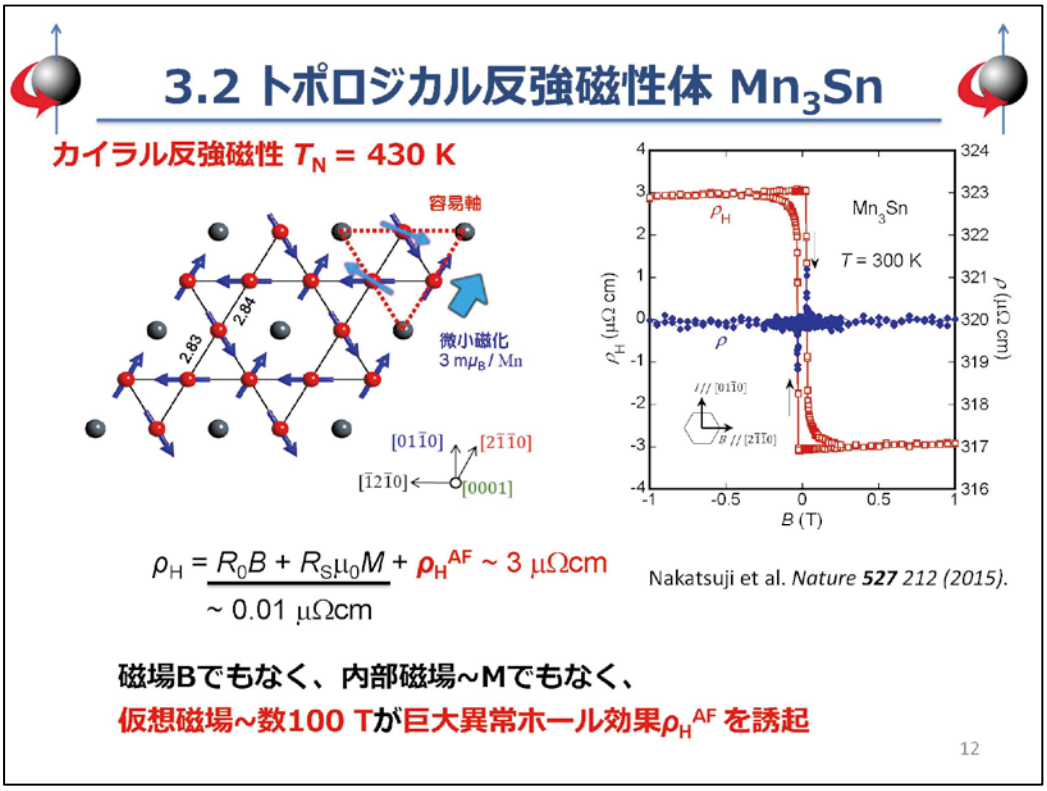



図 6-1-7

このような巨大な異常ホール効果が出るため、熱電効果も大きいのではないかと調べてみると、強磁性体に匹敵するような異常ネルンスト効果、すなわち温度勾配に対して横向きの電圧が生じる現象が見つかった。この現象をスピントロニクスに生かせるのではないかと考え、スピントロニクス機能を測っているところである。

全体をまとめると、トポロジカル絶縁体の表面状態の特徴であるスピン運動量ロッキングがスピンドロニクスで非常に役に立つだろうと考えられており、既に多くの研究がなされている。スキルミオンを用いたスピントロニクスは今後の発展が期待できると感じているが、研究人口が小さい。したがって、対外的に競争力を高める場合には、新学術領域研究のような大きな研究コミュニティの形成が必要なのではないか。また、トポロジカル反強磁性体はスピントロニクスに資する可能性があると考えており、未開拓な部分が多く、もっと精力的な研究を進めていくべきである。

【質疑応答】

Q：$Mn_3Sn$ に関してはどういうトポロジカルな特徴を持つのか。ワイル点があるのか。

A：カイラル反強磁性体の構造を持っているということと、仮想磁場が非常に大きく、この物質にワイル点があるのではないかと理論予測されているためトポロジカル反強磁性体と呼んでいる。実際に、理研の有田先生が第一原理計算でワイル点に近いものがあることを証明されている。また、物性研では ARPES 実験でそれらしきものが見えつつあるという状況である。

Q：反強磁性体のスピントロニクスではサブテラヘルツで動くということだが、上手く使うと色々なアプリケーションが考えられるのではないか。強磁性体の場合には、情報を磁壁で蓄えるかと思うが、反強磁性体のときはどのような形で蓄えるのか。

A：先ほどお話しした $Mn_3Sn$ ではカゴメ格子であるため、面内にものすごく小さいが、Mn 原子 1 個当たり $3 \times 10^{-3}$ $\mu_B$ くらいの自発磁化を持っている。詳細はまだはっきりわかっていないが、自発磁化があり残留磁化もあるために非常にシャープなヒステリシスが出ているのではないかと考えている。磁化曲線でも同様のヒステリシスが現れる。おそらく弱いキャントの強磁性磁化でそのスピンカイラルな位相が変化しているのではないかと考えている。

Q：反強磁性体のスピントロニクスは米国で大きなコミュニティになっていると思うが、彼らはどういう物質系でやられているのか。

A：欧米ではまさに $Mn_3Sn$ と同じホイスラー合金だが、これの Sn を Ga に置き換えた物質系をマックスプランク研究所のディレクターのスチュワート・パーキンとクラウディア・フェルサーが共同で研究している。

## 6.2　スピン軌道相互作用のデバイス応用

鈴木　義茂（大阪大学）

本日はスピントロニクスのかなり応用寄りの話をする。トポロジカルという言葉を使うほどではないため、スピン軌道相互作用のデバイス応用という形で話したい。

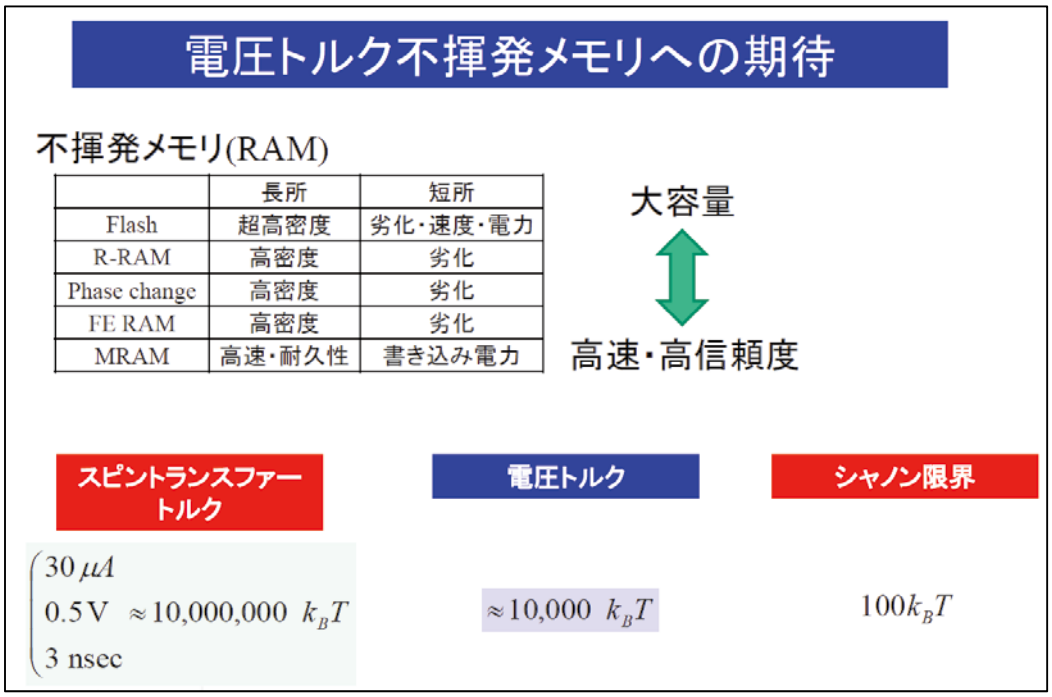



図 6-2-1

最初の話題は、電圧トルク磁気メモリの話である。不揮発性メモリには図 6-2-1 の表にあるように、Flash（電荷をためる）、R-RAM（抵抗変化を使う）、Phase change（ブルーレイディスクと同じ原理を使って記録する）、FE RAM（強誘電性を利用）、MRAM（磁性を利用）などがある。一番よく知られているものは Flash メモリで、超高密度という利点がある。ただし、劣化があったり電力を結構消費したり速度がそれほど早くないという欠点もある。大容量のメモリ (SSD) としてハード磁気ディスクの置き換えに使われているが、CPU の周りの DRAM や SRAM としては使いにくいため、そのようなものに向くものとして MRAM が興味を集めている。MRAM は、高速で耐久性がある一方で、残念ながら書き込み電力が大きいという問題がある。最近では、スピントランスファートルク（STT）という電子の角運動量を利用する形で磁化反転を記録する方式が開発され、かなり書き込み電力を下げることに成功し、実用の商品も出始めている。しかしながら、市場獲得にはほとんど至っておらず、セキュリティなどの特殊用途に特化している状況である。STT を使った MRAM でどの程度の電力を消費するかというと 1bit の書き込みで 10,000,000$k_BT$ くらいである。情報理論におけるシャノン限界では 1bit の書き込みに 1 $k_BT$ しか要らない（書き込みエラーとか書き込み速度とかの要請を考えても 100 $k_BT$ くらいでいい）ことに比べると非常に多くのエネルギーを使っている。

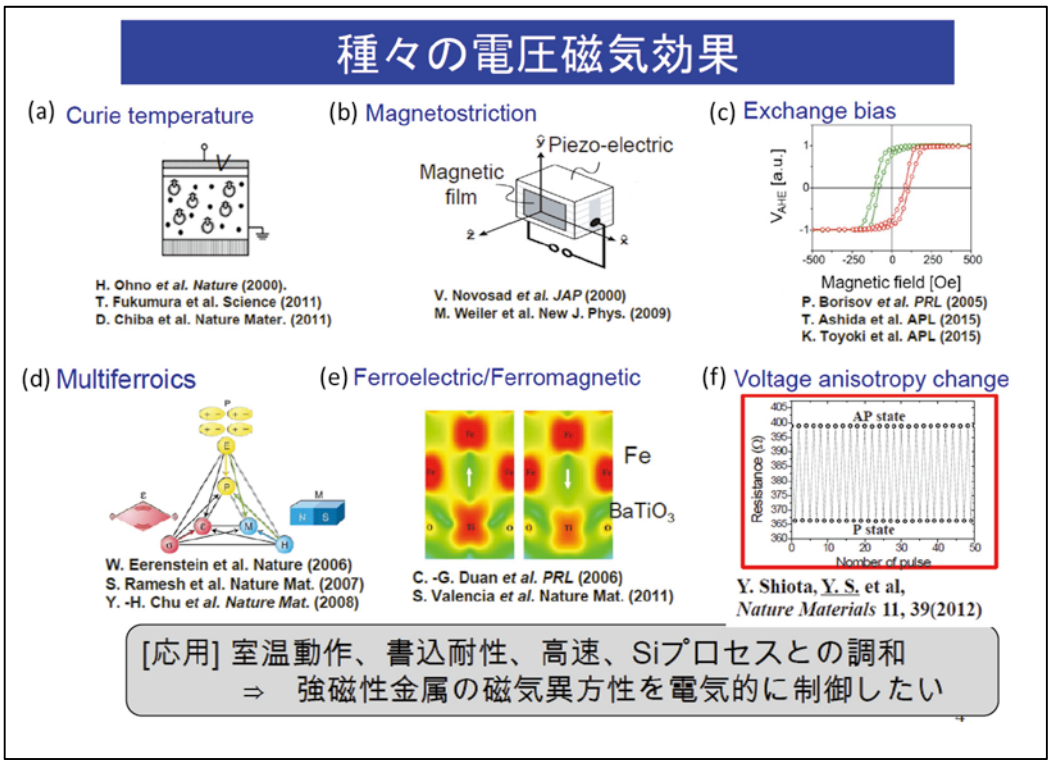



図 6-2-2

図 6-2-2 は、書き込みのエネルギーを下げるために電流を使わず電圧で磁化反転をしようという提案である。STT-MRAM のスピントランスファーにおいては、角運動量を与えるために磁石と同じだけの角運動量を持つ電子を与えなければならないので、たくさんの電子が必要でエネルギーを下げられないが、電圧による磁化反転であれば、原理的にはシャノン限界くらいまで下がるはずである。そう考えて色々な人たちが色々な提案をしている。

例えば、図 6-2-2 (a) の磁性半導体では、キャリア濃度を変えてキュリー温度の制御を行う。このとき強磁性も変わる。(b) では、磁歪により結晶をひずませて磁化の向きを変える、(c) では交換バイアスを変える、(d) ではマルチフェロイックス、すなわち、強誘電的性質と強磁性的性質を同時に使うなどである。しかし、我々の狙いは応用であるため、室温で、かつ書き込み耐性があり、高速で、さらにシリコンの LSI プロセスとの適合性があるという厳しい条件がある。強磁性半導体のキュリー温度は低温であるため使えない。CPU 周りでは $10^{15}$ 回も書き換えるため、圧電素子でひずませると結晶が劣化してしまい耐久性の問題で磁歪素子は使用できない。また、交換バイアスやマルチフェロイックの場合は、室温動作するものもあるが、結晶が複雑で、シリコンとのプロセス融合がまだ難しい状況である。このような細かい条件を課すると、結局、簡単な物質でやりたいという解になり、我々は鉄に電圧を加えて磁気異方性を変えるという非常に簡単な方法を採用している。最初は 200V かけて異方性を変化させていたが、最近では 1V くらいの電圧で (f) のようにスイッチングを繰り返しできるということを示すことに成功した。

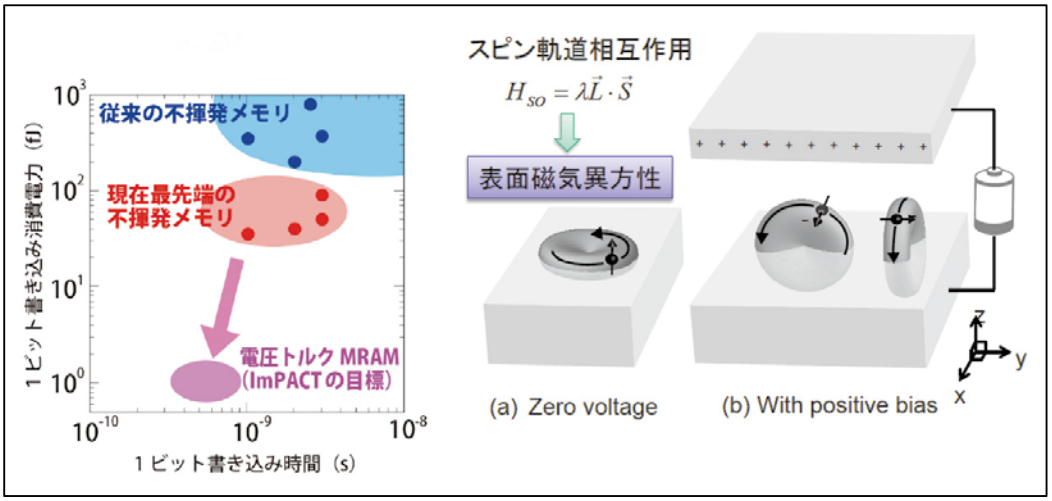



図 6-2-3

その成果が注目され、ImPACT の佐橋プロジェクトの中の重要なテーマとして取り上げていただくことになった。佐橋プロジェクトは「無充電で長期間使用できる究極のエコ IT 機器を実現」という題名になっており、我々の電圧トルク MRAM もターゲットの１つになっている。ただ原理的にできることと使えるようにすることには非常に大きなギャップがあるため、そこを埋めなければならない。図 6-2-3 (a) に示すように、表面の電子の軌道運動は、通常は表面から外に出る運動よりも表面に沿ってくるくる回っているほうが好まれる。スピン軌道相互作用があると、スピンはこの軌道角運動量に平行になり、結果的には (b) に示すように、電子は表面に垂直な角運動量、すなわち、磁化を持つことになる。これが、表面磁気異方性である。電圧による磁気異方性の制御の簡単な原理は対向電極を付けて電圧で電子を引っ張り出すと、この軌道の向きが変わるため電子スピンの向きも変わるという非常に単純な原理である。

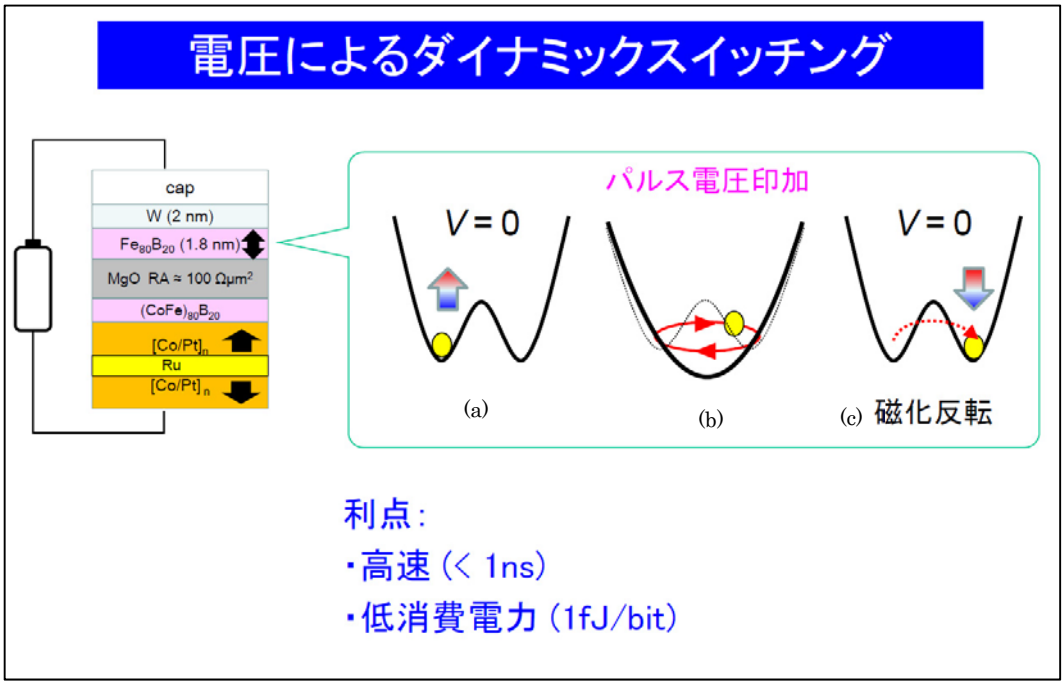



図 6-2-4

図 6-2-4 は電圧誘起磁化反転のメカニズムの説明図である。例えば、上側の磁性体 $Fe_{80}B_{20}$ のスピンが垂直上向き（↑）であるとする。パルス電圧 V=0 のとき↑スピンは図中 (a) のポテンシャルの 2 つの谷の片側にいるが、電圧 V を印加すると、(b) のようにポテンシャル障壁がなくなり、スピンは最低エネルギーに落ち込む。実際にはエネルギーをすぐに失うことはできないため歳差運動を起こす。このとき電圧を切ると障壁が復活するが、どちらの谷に行くか分からないので書き込みにならない。書き込むためには、(b) で歳差運動して右側の谷に行った瞬間に電圧を切れば障壁ができて (c) のように戻れなくなり書き込める。この歳差運動の周期は 1ns より短い超高速であり、消費電力も非常に少ない。

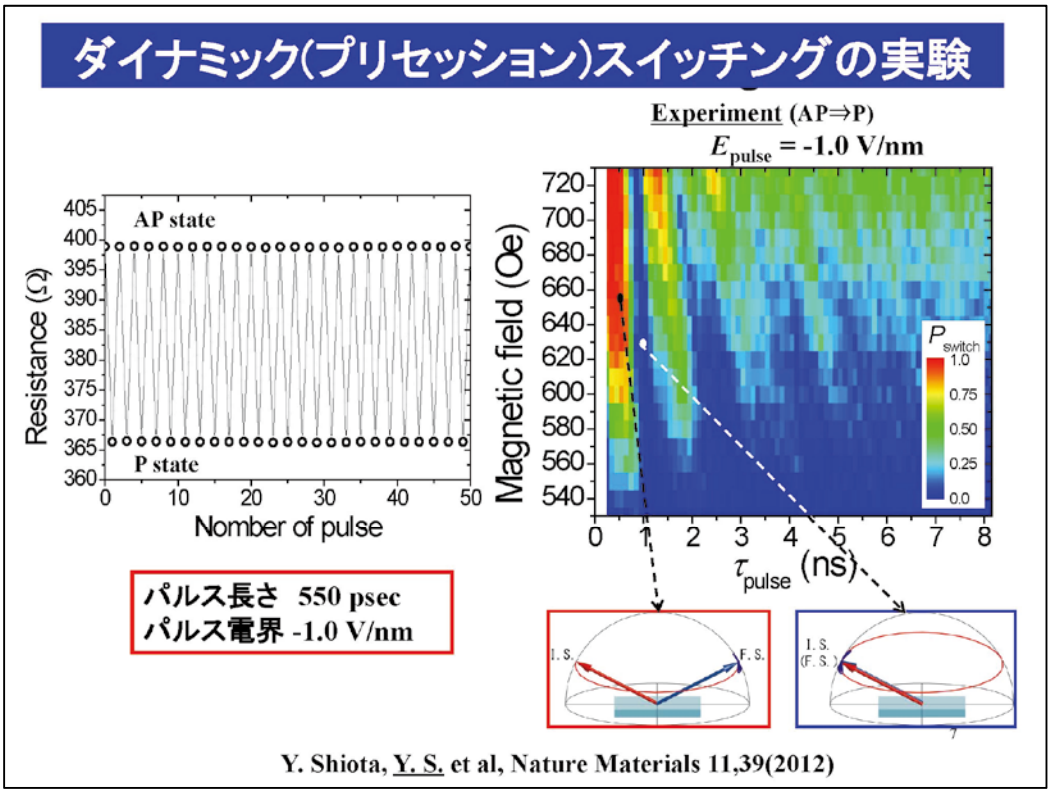



図 6-2-5

図 6-2-5 左図が、ダイナミックスイッチングの実験結果である。500psec くらいの 1V/nm のパルス電界を加えると、対向電極との間に反平行な状態（AP）と平行な状態（P）を往復する。このくらいの回数であれば 1 回も間違えずにできる。歳差運動である証拠を右図に示す。横軸がパルスの長さで、縦軸が磁界の強さである。カラーチャートはスイッチングの成功率 P である。パルスが短ければ 100%成功するが、長すぎると完全に失敗する。半回転だったのが 1 回転になると元に戻ってしまいスイッチングしない。

これを実用しようというプロジェクトができたが、実用化は非常に大変である。図 6-2-6 の横軸は西暦年、縦軸はこの電圧によってどれだけ異方性を変えられるかという量である。磁性体の磁気異方性が強くないと熱擾乱で磁化が消えてしまう。高集積度メモリのためには小さいビットの磁化をブラウン運動により動くことを防ぐために非常に大きな

磁気異方性が必要である。それを打ち消すだけの電圧による効果が必要になるため、メモリを電圧で磁化反転するには、1000fJ/Vm 以上の電圧誘起異方性効果が必要であり、我々が発見したものとは大きな開きがある。ところがアメリカのグループを中心に大きな効果が報告されている。図 6-2-6 の青い部分が ImPACT のターゲットである。実は、MIT の成果も Nancy の成果も、確かに異方性変化は起きているものの、酸化還元反応をともなっており、遅いし劣化が激しいため使えない。我々は純粋に電子的な原理による電圧誘起異方性効果を大きくすることを目指しており、現状ではピンクの星印や青の星印のあたりに来ている。矢印の傾きとほぼ同じに上がっているため、再来年の終了時には目標を達成できるのではないかと期待を持って研究に励んでいる。

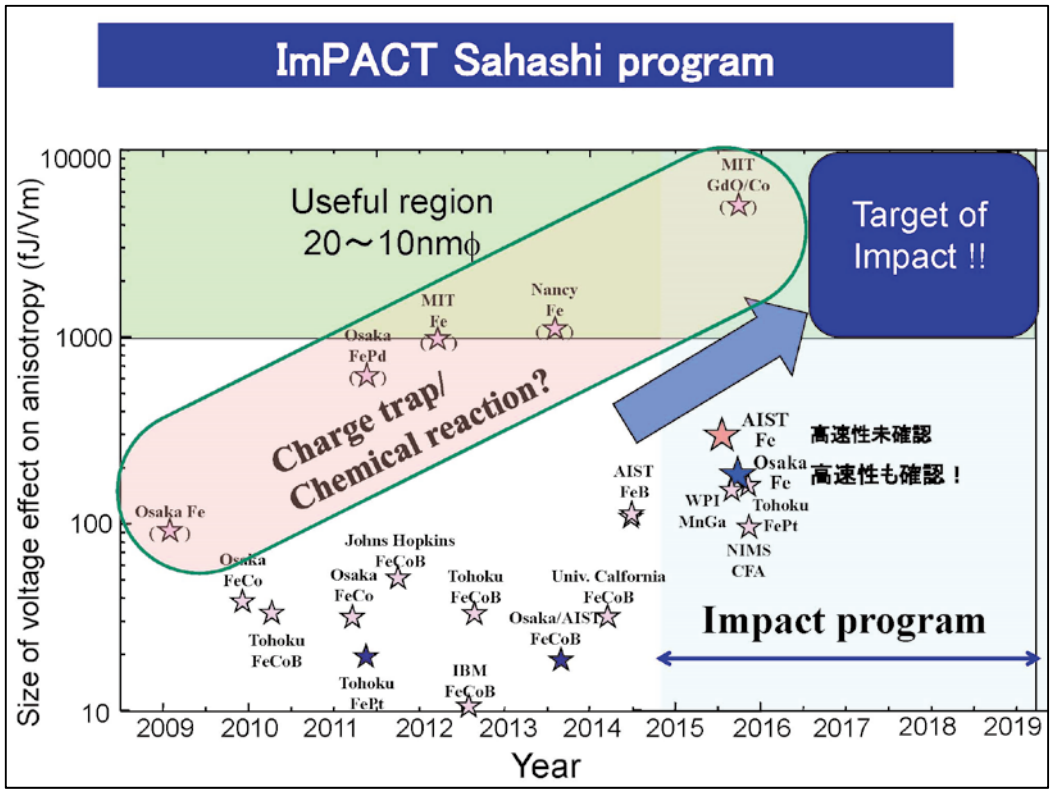



図 6-2-6

ターゲットまでいけば全部いいかというと、まだいろいろと問題がある。実用というのは、1 つできれば突破してしまうのではなくて、1 つでもダメなものがあると使えないということである。パルスによる磁化反転はトグルスイッチングの 1 種であり、1 を書き込むには今の状態が 1 か 0 か知らないと 1 にできない。そのため 1 回読むプロセスが入り時間のロスが生じる。それを避けるために、Dzyaloshinskii-Moriya 相互作用（DMI）という反対称交換相互作用を利用する。MRAM の磁気セルを三角に配列しようとしているが、そこに DMI があると角のほうで磁化がカールする。このカールした部分が反転核になると、電圧の向きによって上向きから下向きかに確実にスイッチできる。これによってこの問題がすべてクリアできる。実際にどのくらいの電圧で DMI が出来るかを実験したときの説明図が図 6-2-7 である。

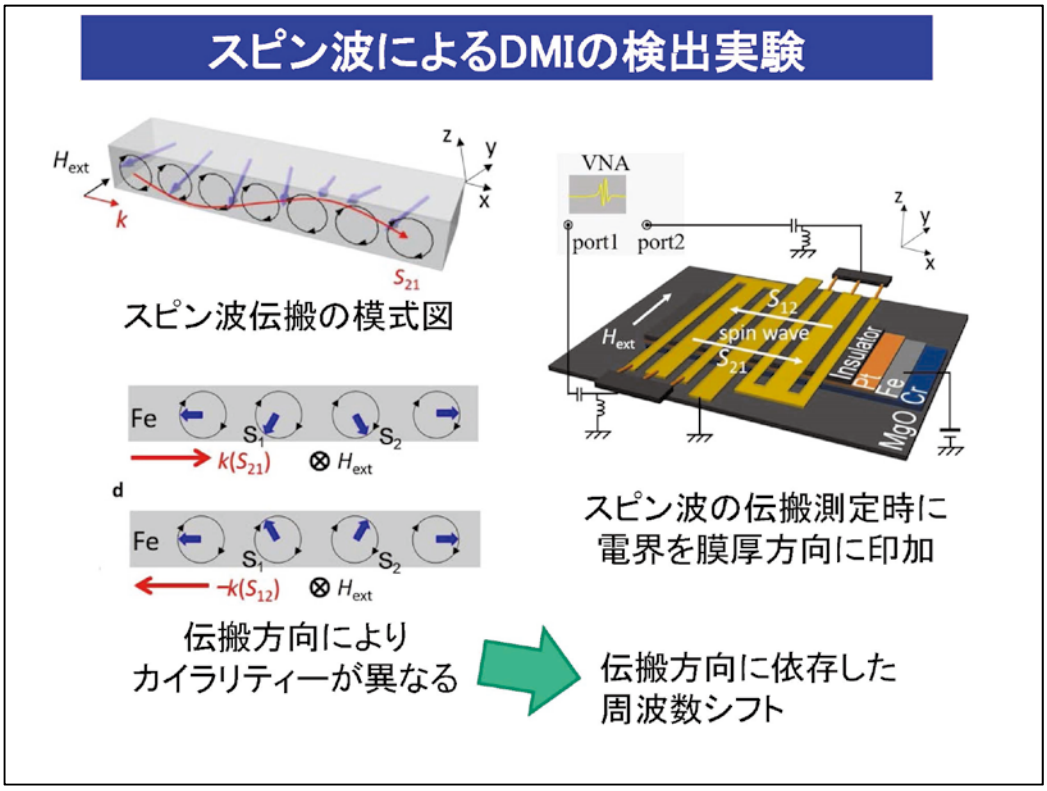



図 6-2-7

スピン波はカイラルな構造を作るため、電圧をかけるとスピン波の周波数がシフトする。実験してみると、実際に図 6-2-7 右図のように膜厚方向に電圧をかけると、右向きに行くスピン波と左向きのスピン波はカイラリティが逆であるため伝搬方向に依存した周波数シフトが生じる。これによってどの程度の電圧で DMI が生じたかが測定でき、磁化反転の制御に十分な大きさがあることがわかった。実験で出たパラメータを使って計算した結果、スキルミオンも電圧で十分に安定化できるということも分かった。

最後に、少し毛色の違う話をしたい。非常に省エネルギーのプロセッシングが可能になると何ができるかという 1 つの目標として、脳を作りたいという話がよく出てくる。例えば、スピングラスは昔から計算能力があり、人工ニューラルネットワークのモデルとなると言われている。これまでは、帯磁率などの異常を測定したり、非常に難しい理論があったり、何だか良く分からない議論がされているという印象を持っていた。そのような状況が今どのように変わろうとしているかというと、MRAM を用いれば、エネルギー消費が少ない脳型コンピュータができるのではないかと考えている。

本日の話がどこまでトポロジーに関係していたかはわからないが、スピン軌道相互作用の関係で言うと、例えば電圧効果のメモリを作るためには 10 倍くらいまだ効果を大きくしないといけない状況であるものの、DMI は想像以上に大きくなり、利用可能になってきている。最後にお話した脳型の計算機に関しても物理あるいは数学の方の協力を得たいと考えている。トポロジカル物質に関しては、我々もスペインのグループとの共同研究の

中でトポロジカル絶縁体へのスピン注入などの実験も始めていることもあり、色々な期待を持っている。

【質疑応答】

Q：電圧でスキルミオンを生成できるということだが、トポロジカル数を変化させるためにはシンギュラリティを入れる必要があるため、おそらく電圧を一様にかけた状態では難しいのではないか。

A：私も周期的境界条件では、生成できないのではないかと考えていたのだが、数値計算の中では一応できている。熱消磁した状態から作っているが、もう少し詰めないといけないと感じている。

Q：DMI の電界変化は非常に興味深い。一般には、DM 相互作用は相対性理論から来るスピンをひねろうとする相互作用であり、反転対称が無い状況であることが前提になる。今の系で、組織構造が分からなかったのだが電場で変わるということは、ポテンシャルが変化しているのか、もしくはキャパシタ構造で少し電子数が変わることでバンドフィリングが変化しているのか、どちらが効いているのか。

A：Fe の上に Mg を付けた場合と、それら間に Pt を入れた場合で、3 倍くらい大きくなる。この電子状態を見ると、Katsura-Nagaosa 理論の逆効果みたいなモデルで説明できるのではないかと感じている。つまり、Fe と Pt の間にある電子状態が分極を持つというモデルである。

Q：DMI は、元々はローカルな物理だと考えていたが、バンドフィリングを少し変えることで k 空間のバンド交差付近でものすごい勢いで DMI が変化しているようだということが最近色々な系で分かり始めている。DMI の外場制御は大変興味深い。

A：バンドフィリングの影響があるのかどうかについてはまだ全然計算はしてないが、通常、異方性変化は非常に大変な作業で、DMI の制御が思ったより簡単にできるということは驚いた。

# 7. フォトニクスへの展開

## 7.1 トポロジカルフォトニクスの新しい展開

胡　暁（物質・材料研究機構）

本日は、トポロジカルフォトニクスの新しい展開についてお話したい。

まず初めに量子ホール効果とトポロジーについて復習すると、量子ホール効果ではご存知のとおり、2 次元電子ガスに強い磁場を垂直にかけることでカイラルエッジ状態ができ、アップスピン電子もダウンスピン電子もエッジに沿って反時計回りに動く。一方で、スピン軌道相互作用がある場合には、いわゆる量子スピンホール効果が起こり、このときはヘリカルエッジ状態が実現し、アップスピン電子は時計回り、ダウンスピン電子は反時計回りと互いに逆向きにエッジを回るため、時間反転対称性が守られている。

もう一つ有名なトポロジカル現象として、量子異常ホール効果があるが、このときには系が持つ内部磁化を利用するため、磁場は不要である。量子ホール効果と量子異常ホール効果では時間反転対称性は破られている。トポロジカル指数は、チャーン数で定義され、1、2、3、・・・と整数になる。この数はまさにエッジ状態の数に相当する。

量子スピンホール効果では、時間反転対称性は守られている。トポロジカル指数 $Z_2$ になり、0 と 1 しかとることができない。1 はトポロジカル状態を指し、逆方向に動くエッジ状態のペアの数に対応する。

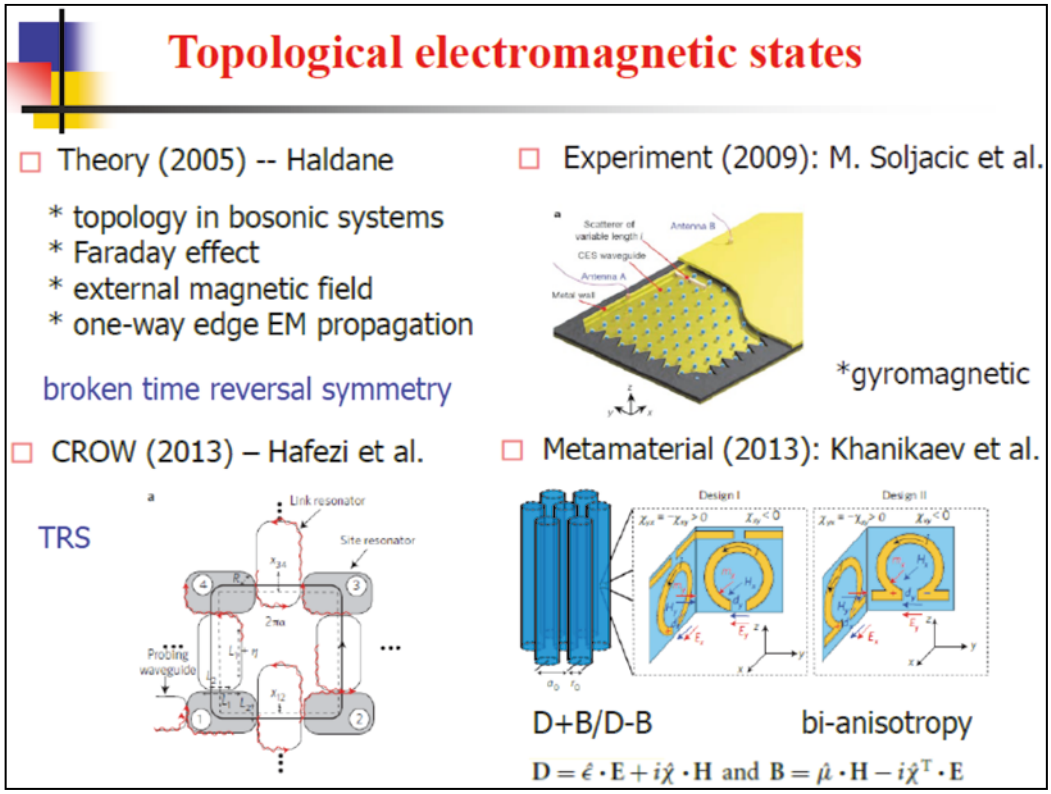



図 7-1-1

図 7-1-1 は、トポロジカル電気磁気状態のこれまでの主な研究成果である。通常、量子スピンホール効果は電子系で起こるが、2005 年に Haldane が、電磁波等、ボース粒子に対応する物理系においてもファラデー効果等を用いることでトポロジーの概念が適用可能であることを提案した。ご存知のとおり、光（電磁波）には偏極がある。磁場をかけることで誘電率あるいは透磁率に純虚数の非対角項が生まれ、スピン軌道相互作用に類似した相互作用が実現され、電磁波のカイラルエッジ状態を作ることが可能になる。2009 年には、MIT の Soljacic のグループがジャイロマグネティック物質により実験的に確認した。また、2013 年の Hafezi らの実験では、シリコン光ファイバのループ中のフォトンに時計回りと反時計回りの状態があり、それがアップスピンとダウンスピンのような疑似的なスピンを作ることで、量子スピンホール効果が実現できることを示している。さらに、Khanikaev らは、メタ構造を作ることによって、いわゆる電気変位と磁束密度の線形結合で、結合状態と反結合状態をそれぞれ擬スピンのアップとダウンに見立てることができると発表した。

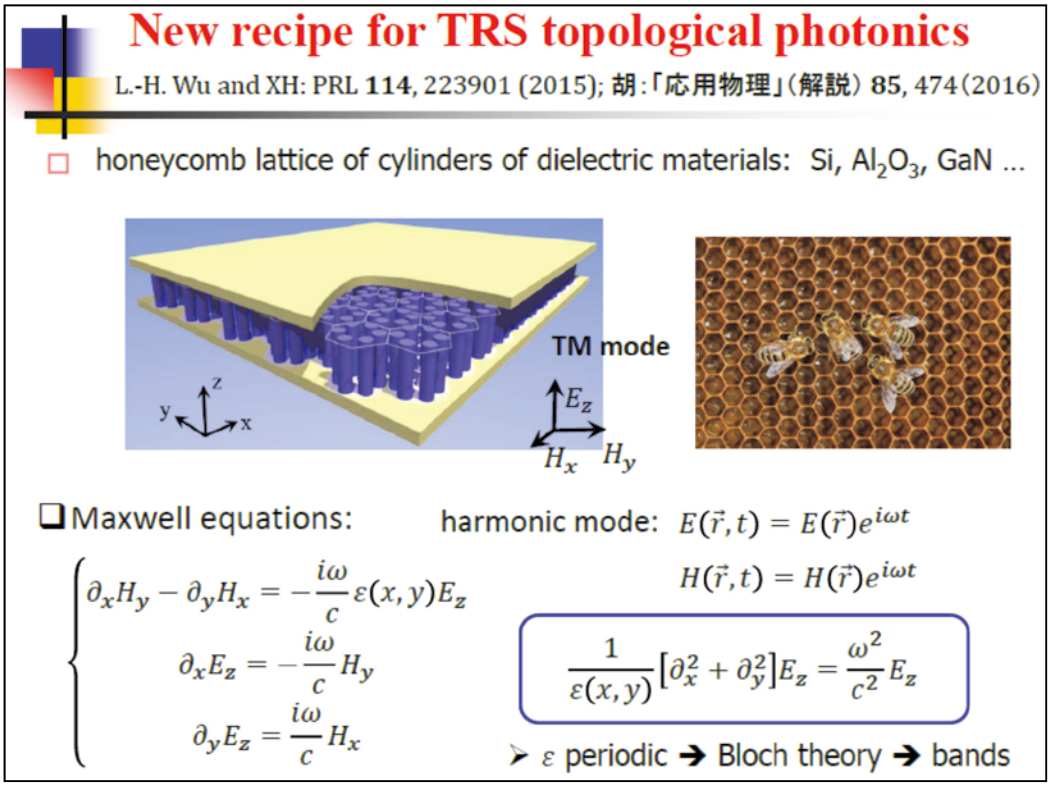



**図 7-1-2**

このようにいろいろな発想が発表される中で、我々は一般性と汎用性のある時間反転対称トポロジカルフォトニクスをどのように実現すればいいかについて考えた（図 7-1-2）。我々はシリコンやアルミナなどの誘電体の円柱、あるいはナノロットを Z 方向に成長させるとともに、XY 面内には蜂の巣状のパターンを持つ構造を考えた。電磁波には TE 波と TM 波があるが、ここでは TM 波、つまり、Z 軸方向にしか電場が有限にならないモードについて考察する。

電磁波を一定の周波数をもつモードに分解すれば、マックスウェル方程式は 1 つの方程式で表され、我々はこれをマスター方程式と呼んでいるが、Ez の空間変化を記述するための方程式になっている。ただし、誘電率は空間位置の関数になり、周期構造を考えることでブロッホ定理が使え、許される電磁モードがバンドになることはご承知のとおりである。

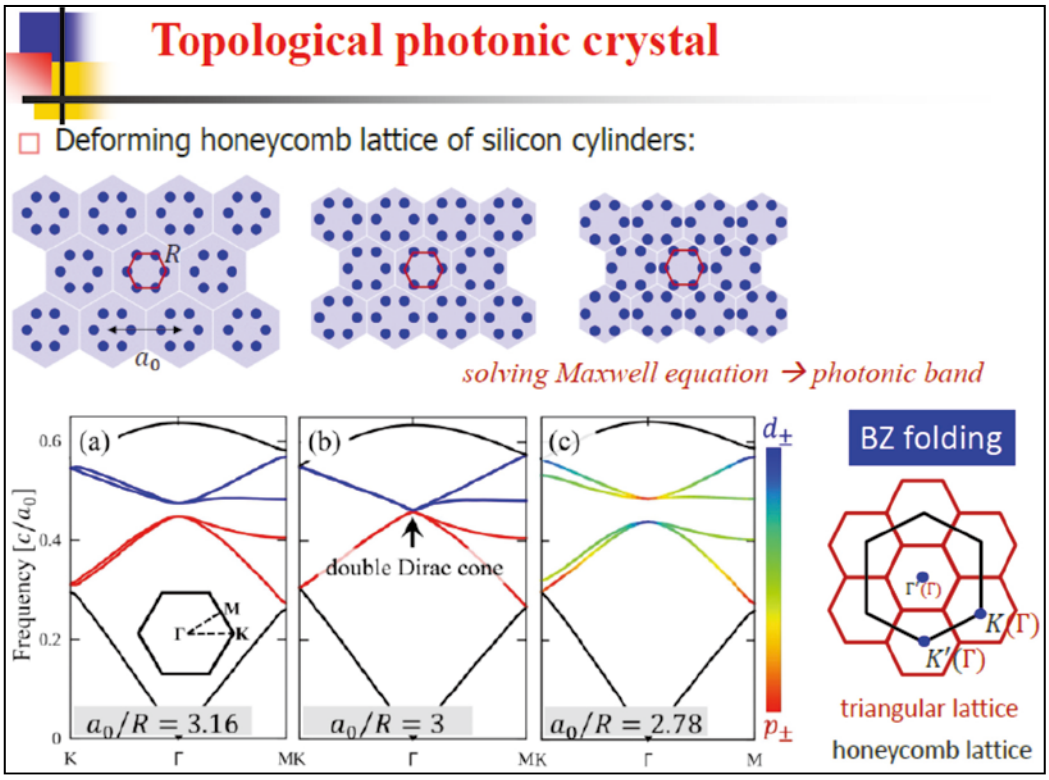



**図 7-1-3**

図 7-1-3 に我々の結果を示す。ハニカム格子の全ての格子点を六員環（図 7-1-3 中の格子構造図にある赤い六角形）でグルーピングすると、六員環の三角格子とみなせる。次に、六員環のサイズや形、角度などを保ったまま、六員環同士の距離を変化させる。先ほどのマスター方程式を解くと（これは電磁波の第一原理計算に相当する）、フォトニックバンドが得られる。元々のハニカム格子構造では、グラフェンでお馴染みのディラック型分散関係が現れる。今の場合、単位胞を六員環にとっているため、ディラック点は G 点に現れ、しかもディラックコーンが 2 重縮退になっていることが重要なポイントである。ここで興味深いことは、六員環の距離を大きな値から小さくしていくと、元々開いていたギャップ（図 7-1-3 (a)）が一旦閉じて（図 7-1-3 (b)）、再度開く（図 7-1-3 (c)）。この過程でバンド反転が起こり、トポロジカル絶縁体と同じ状況が再現できる。なぜなら、それぞれのバンドの成分を見ると、図 7-1-4 のように p 波と d 波が定義できる。

p 波は空間反転対称操作に対して奇のパリティを持っており、d 波は偶のパリティを持っているため、この 2 つのバンドが反転することでトポロジカル状態が出てくることになり、ボース粒子系でも量子スピンホール効果が起こせることがわかる。

実際に実験グループと一緒にアルミナを用いて実験した結果が図 7-1-5 である。投稿論

文が査読中になっている結果であるが、トポロジカルな状態とトリビアルな状態を六員環の距離を制御することで作製した（図 7-1-5 (a)）。トポロジカルな状態とトリビアルな状態の界面に擬スピンをもつ電磁波を発振させると、擬スピンの向きに応じた一定方向の電磁波が伝わることが観測されている。また、鋭角的な界面にも関わらず電磁波が散乱されないことも確認されている。

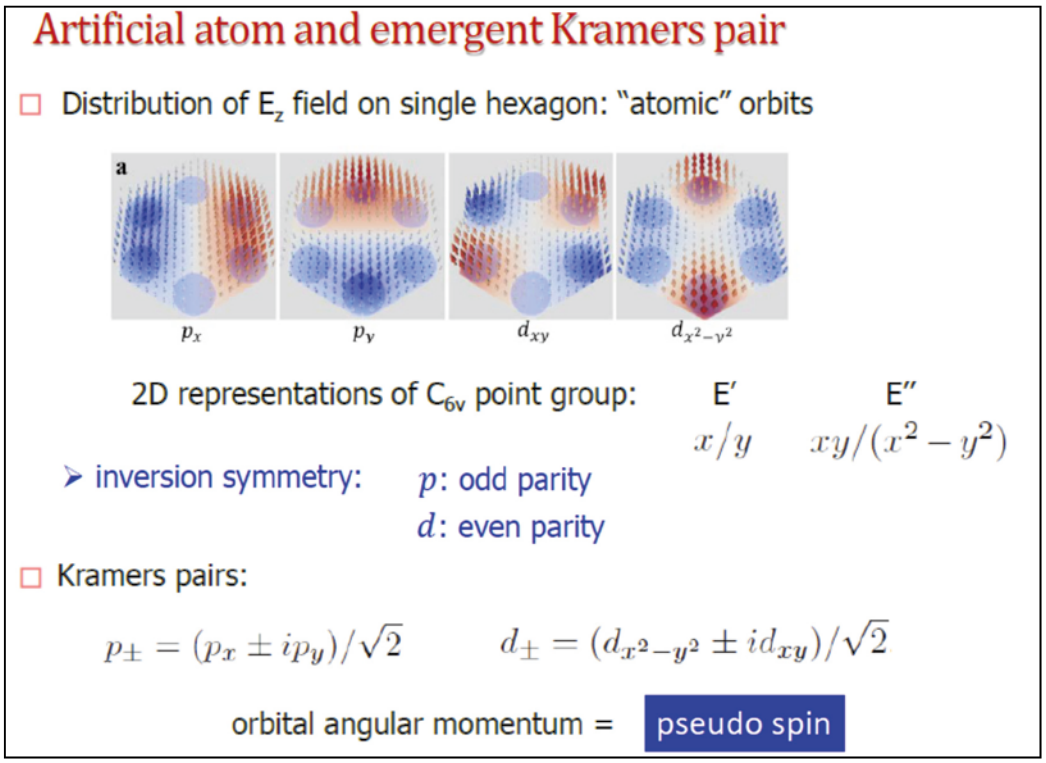



**図 7-1-4**

また、この考え方をフォノン系で検証した結果が 2016 年 8 月に Nature Physics に発表されたため、次に紹介する（図 7-1-6）。

鋼鉄の円柱をハニカム格子に並べ、円柱の半径を調整することでトポロジカルな音波領域とトリビアルな音波領域の界面で音波の量子スピンホール効果に由来する音波伝播が起こっていることがわかる（図 7-1-6 右上図）。具体的には、この界面に音波を入れると、スピンアップのものが自然にスクリーニングされることによって 3 つある出口の中で 2 つしか音波が観測されていない。これらを実験によって確認し、フォノンでの量子スピンホール効果の実験検証に成功している。

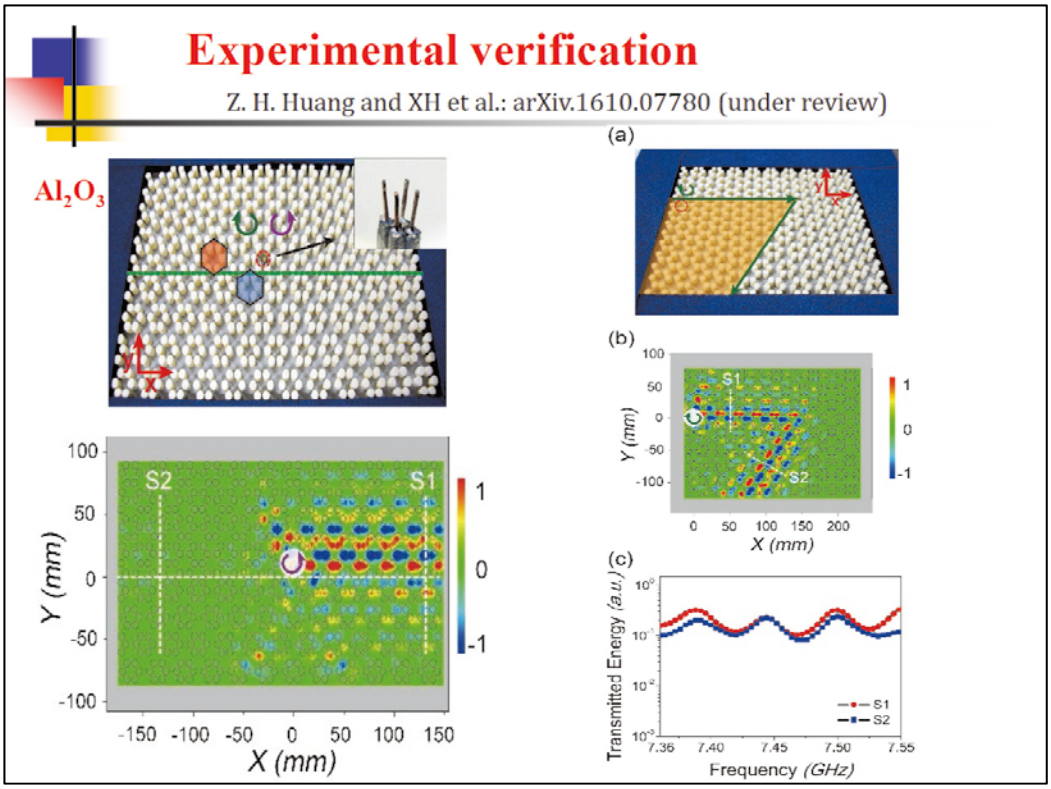

Experimental verification
Z. H. Huang and XH et al.: arXiv.1610.07780 (under review)
$Al_2O_3$
(a)
(b)
(c)
S1
S2
Y (mm)
X (mm)
Transmitted Energy (a.u.)
Frequency (GHz)

図 7-1-5

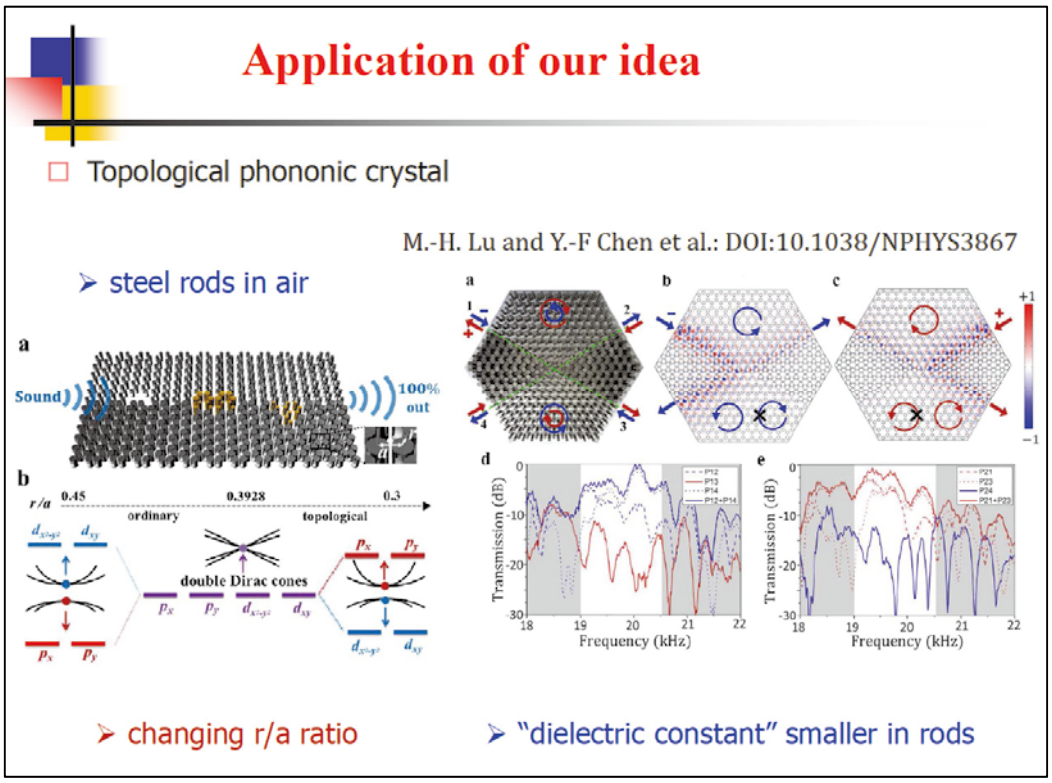

Application of our idea
Topological phononic crystal
M.-H. Lu and Y.-F Chen et al.: DOI:10.1038/NPHYS3867
steel rods in air
Sound
100% out
ordinary
topological
double Dirac cones
changing r/a ratio
"dielectric constant" smaller in rods
Transmission (dB)
Frequency (kHz)

図 7-1-6

では、上記のアイデアが電子系にもフィードバックできることについて述べたい。図 7-1-7 のように最近接ホッピングをもつハニカム格子を考える。図 7-1-7 右上図のように、六員環の最近接ホッピングを $t_0$、六員環間の最近接ホッピングを $t_1$ とする。$t_0$ と $t_1$ の相対的な大きさを変えるとトポロジカル状態が作れるというのが先ほどの電磁波との類似でわかる。特に、今の場合、電子系のトポロジカルエネルギーギャップは $t_1$ と $t_0$ の差で与えられる。ここまでは我々の提案であるが、スタンフォード大学のグループが既に関連する実験をしていた。Cu の（111）表面に CO 分子を並べれば、表面電子系のハニカム格子ができる（図 7-1-7 左中図）。そこに余分の分子を入れることで、一部の六員環が変調を受けて、余分の分子がない場合のディラックコーン（図 7-1-7 左中図青線のグラフ）が消え、エネルギーギャップが見えている（図 7-1-6 左中図赤線のグラフ）。まだエッジ状態は見ていないが、今我々からエッジ状態を見るように提案しているところである。ここで重要なことは、電子のエネルギーギャップが 2000K に相当し、非常に大きいことである。

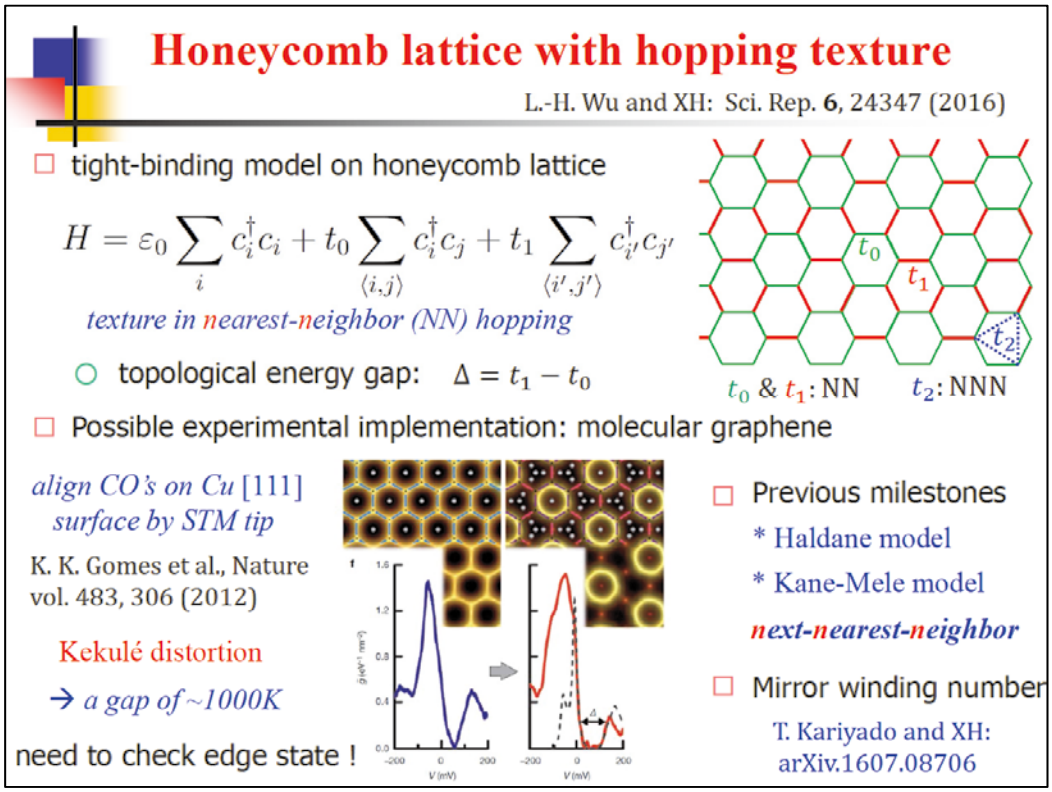



**図 7-1-7**

以上をまとめると、ハニカム格子で最近接ホッピングに空間的なテクスチャーを入れることで、時間反転対称なトポロジカル状態がボース粒子系でもフェルミ粒子系でも作製できる。ポイントは擬スピンの導入である。また誘電体だけでトポロジカルフォトニクスが可能になるため、可視光の周波数まで適用可能である。強調されるべきことは、実空間における局所的操作でロバストなトポロジカル状態を作ることができる、ということである。

トポロジカルフォトニクスの優位性は、サンプル作製が比較的容易、操作も簡単であることであり、光なので目で確認することができる。また室温でトポロジカル特性が機能することも大きな利点である。このトポロジカルフォトニクスを実現するアイデアを発展さ

せることで、遅延ラインや光フィルタ、光通信にも使える。また、フォトンによる非可換統計も可能で、量子コンピューティングに利用できることが期待されている。

【質疑応答】

Q：スピン軌道相互作用がなくてもいいと言うことだが、通常そのような場合には１次元のトポロジカル絶縁体になってエッジ状態には分散関係が出てこないように思うのだが。

A：エッジ形状の制御が必要で、今の場合には、フラットな分散関係ではなく、有限の群速度を持つエネルギー分散や周波数分散が出てくるように、界面と表面の形状をうまく作ることが大事である。

Q：最後の量子計算に使えるというところだが、マヨラナ粒子のようなものが光でも出てくるということなのか。

A：その通りである。我々の仕事ではないが、ハニカム格子から出発し、格子点の位置をずらすことでボルテックスが形成され、そこにゼロエネルギーモードが出てくるという論文がある。それを使って非可換統計が実現可能ということである。

## 7.2 トポロジカルフォトニクスとトポロジカルフォノニクス ～実験の現状と課題～

岩本　敏（東京大学）

本日は、トポロジカルフォトニクスやトポロジカルフォノニクスについて実験の現状と課題に関して、国内外の状況にも触れつつ、どういうところが問題になっているのかについてお話したい。

フォトニック結晶とは誘電率の周期構造からなる構造で、光に対するバンド構造を作ることが特徴である。電子系と類似したフォトニックなバンド構造のエンジニアリングが可能であることで研究が進展している。

これまでのフォトニックバンドエンジニアリングでは、どの方向にどのようなエネルギーの光が進むか、どの波長の光が閉じ込められるかという点に主に注目してきた。これを第 1 世代とすると、最近ではトポロジカルフォトニクスという研究の中でフォトニックバンドのトポロジカルな性質など、これまで注目されてこなかった特性に着目したバンドエンジニアが進みつつある。その意味で、私が勝手に「第 2 世代のバンドエンジニアリング」と呼んでいる。

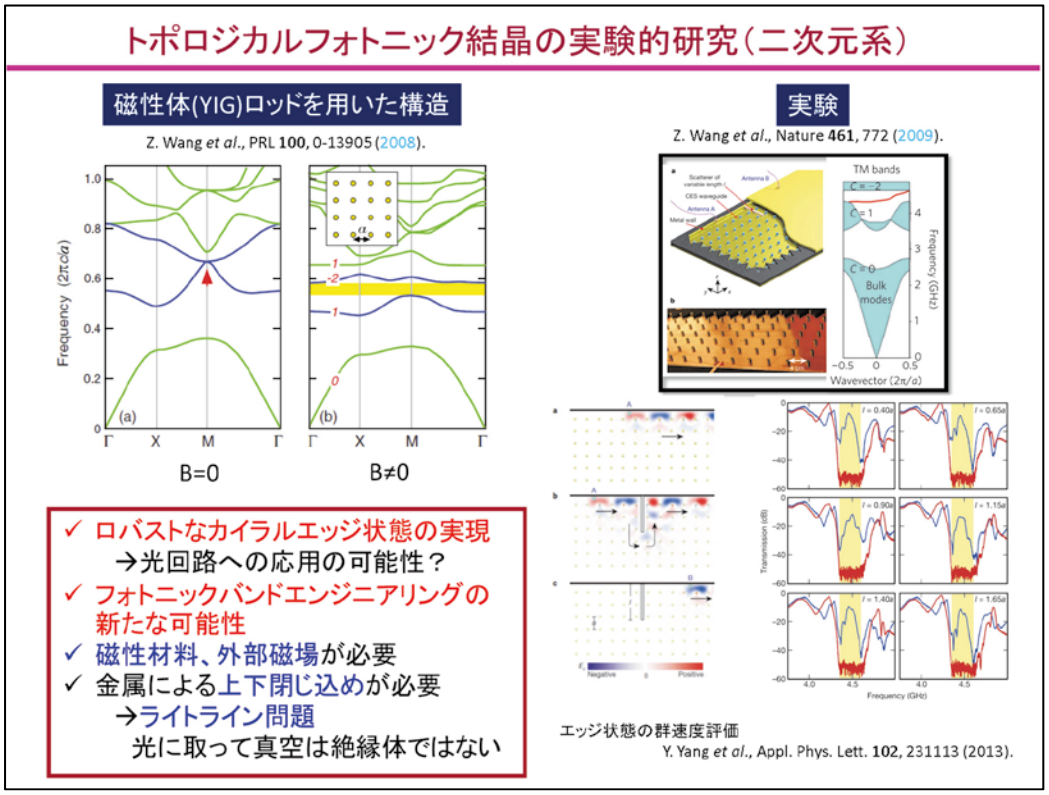



**図 7-2-1**

我々のグループでも、3 次元カイラルフォトニクス結晶や 2 次元スラブを対象に検討を進めている。また、フォノニクスの分野ではあるが、1 次元フォノニック結晶においては、トポロジカルに保護された共振器を実現することにも成功している。

では、これまでの主なトポロジカルフォトニック結晶の実験結果を紹介する（図 7-2-1）。最初に、MIT のグループが YIG という磁性体を用いて周期構造を作れば実現できることを 2008 年に提案した。Haldane が最初にトポロジカルフォトニクスを提案した論文は 2008 年に出ているが、実は投稿したのは 2005 年であり、おそらく MIT のグループは 2005 年くらいから理論的なところを共有しながら検討・実験を進めていたのではないかと考えられる。また、2009 年には同じ MIT グループから先ほどの構造を作った実験結果が報告された。動作波長域が光の領域ではなくマイクロ波領域であったが、時間反転対称が破れたカイラルエッジ状態が観測されたことから、ロバストな光回路への応用が期待されている。このあたりからフォトニックバンドエンジニアリングの新しい可能性が見えはじめてきたと言える。

しかしながら、磁性材料や外部磁場が必要となっている。光の領域では磁気光学効果はあまり大きくないこともあり、できれば外部磁場をかけることなくトポロジカルな性質を使えるかが、課題の一つである。また、MIT グループの成果はマイクロ波領域であったため、金属平板による閉じ込めが可能であったが、光にした場合にはどのように閉じ込めるかという問題もある。後半で紹介したいが、トポロジカルフォトニクスの利用を考えた場合には、このライトライン問題が重要であると考えている。これは、電子系にとって真空は絶縁体だが、光にとって真空は絶縁体ではないことによるものである。

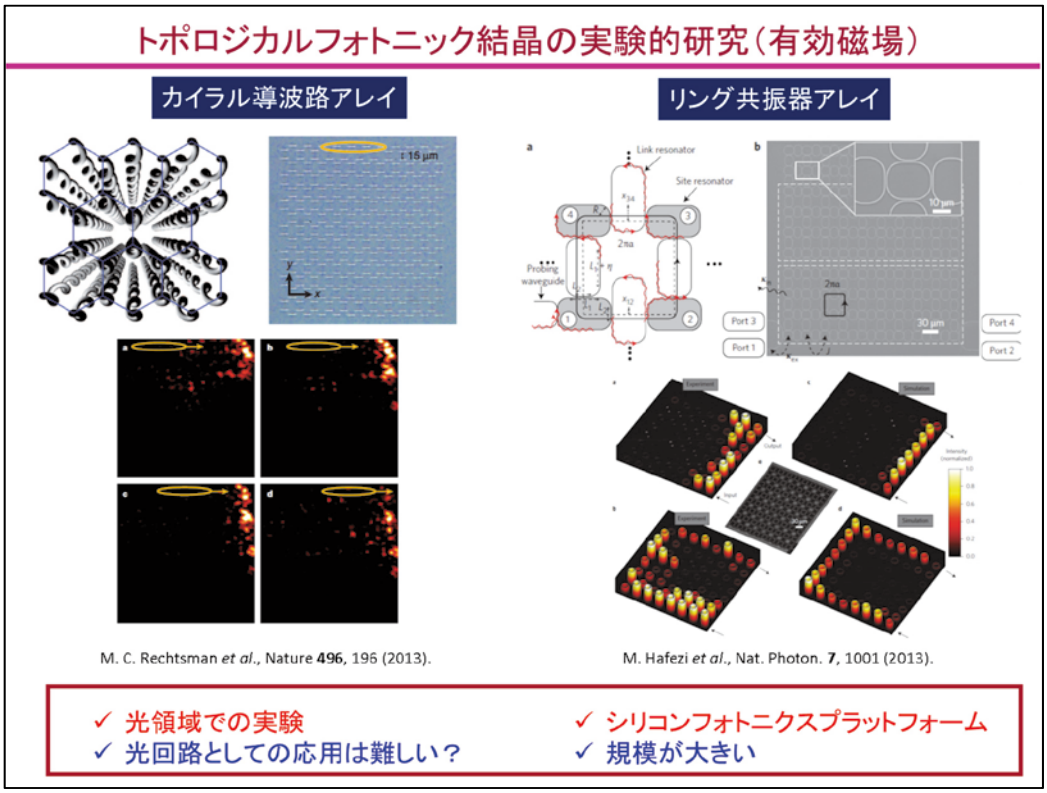



図 7-2-2

磁場による制御は簡単ではなく、できれば磁場は使いたくないため、何らかの工夫で有効磁場を作りトポロジカルな特徴を実現しようとした例として、カイラルな導波路を並べた系の実験がある（図 7-2-2 左図）。手前から奥に向かって光を導波させ、Z 方向を時間軸とみなして、時間反転対称性が実効的に破れている構造を作っている。これは光の領域になっているが、光回路への応用の観点からはギャップがある。図 7-2-2 右図はリング共振器を並べたものであり、シリコンフォトニクスという光デバイスの重要なプラットフォームに実現できるという大きな利点がある。共振器の欠損などの欠陥にはロバストだが、リング中の光の進行する向きに対応する“スピン”をフリップさせてしまうような欠陥があると後方散乱が起こるという問題がある。

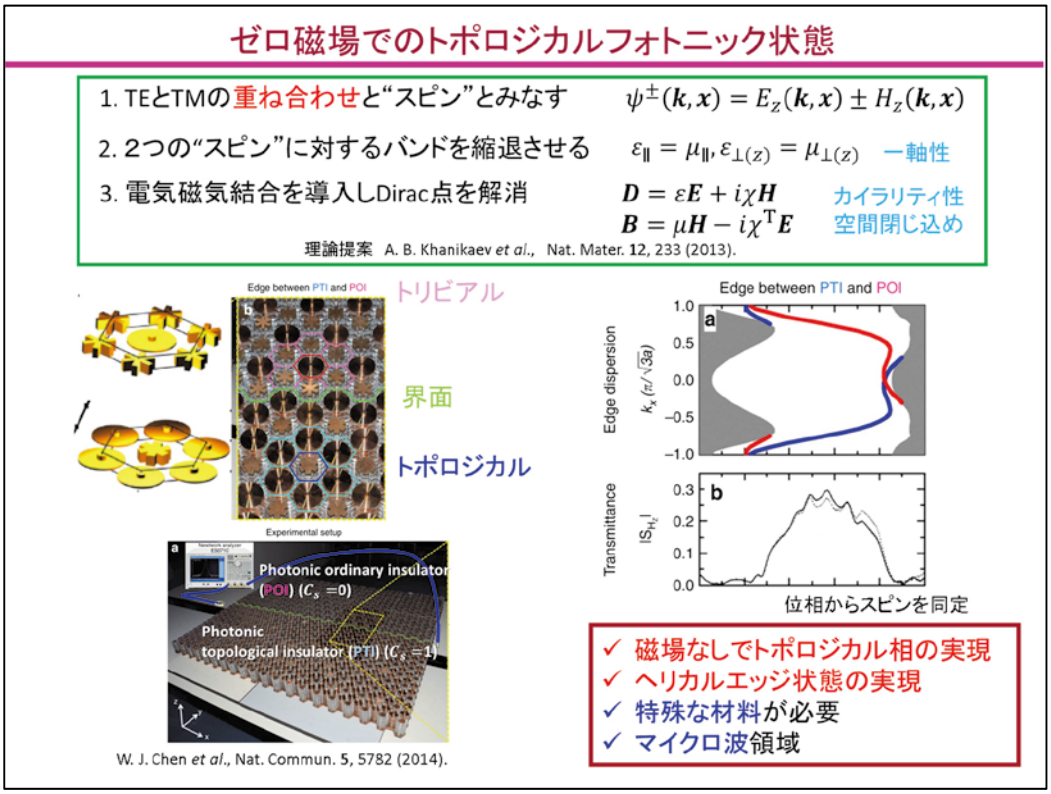



**図 7-2-3**

他の方法として、先ほど胡先生の講演でもお話があったように、何らかの形で擬スピンを作る方法がある。図 7-2-3 の例では、TE 偏光と TM 偏光の結合状態、反結合状態をそれぞれアップスピン、ダウンスピンとみなし、電気磁気結合を利用してフォトニックディラック点を分裂させギャップを生じさせるとトポロジカルな性質が生み出せる。具体的には、金属で円盤や星型の構造を作り、並べることでトポロジカルな構造とトリビアルな構造を作って、ヘリカルなエッジ状態を観測したという報告がある。ただし、ここでもマイクロ波領域の結果で、やはり特殊な材料や構造が必要になっており、胡先生が提案された誘電体だけで作るというのは大きなインパクトがある。また、ここでもやはりどのように光を閉じ込めるのか、つまり、ライトライン問題が残された課題の一つであると考えている。

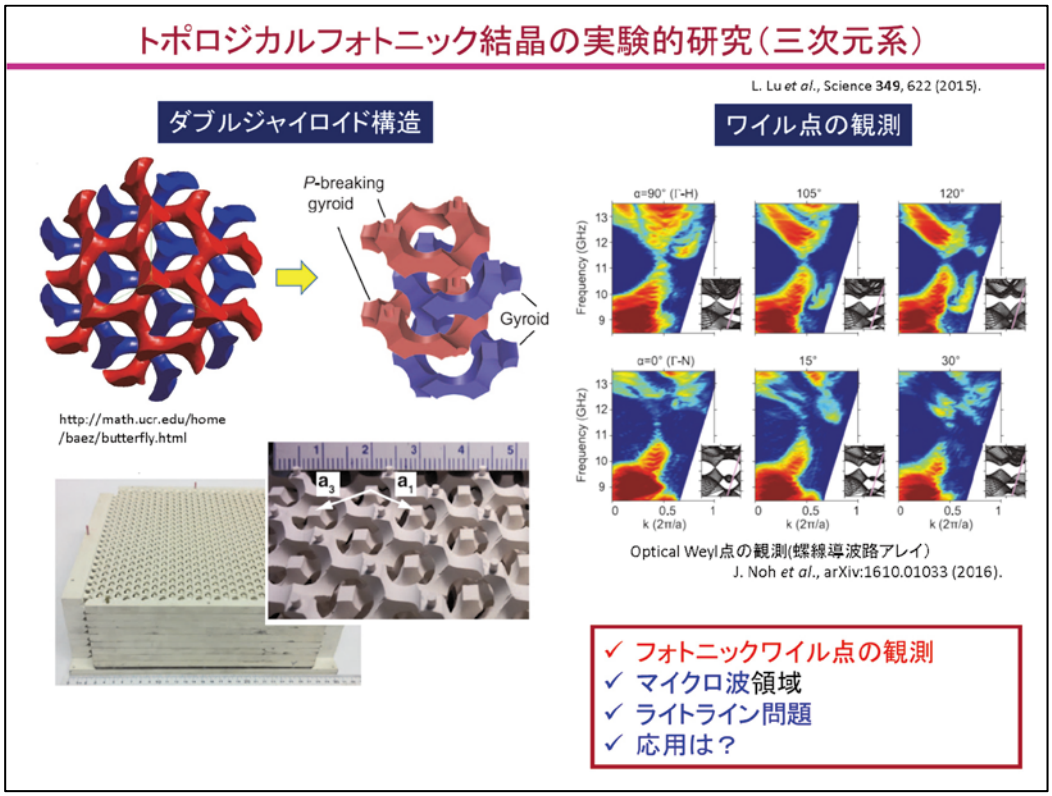



**図 7-2-4**

3 次元系でも様々な進展があり、図 7-2-4 に示すように、2015 年に MIT のグループが、ジャイロイドを 2 つ重ねた構造であるダブルジャイロイド構造において、空間反転対称性を破ることにより、ワイル点の形成とその観測に成功している。図 7-2-4 の写真から明らかなように、この報告で用いられた構造は大きくマイクロ波領域での動作である。また、ワイル点もライトラインの外側にあるため、マイクロ波を空気と構造の間に閉じ込められていない状態であり、応用にどう使うのかが課題である。我々のグループでもカイラルな 3 次元フォトニック結晶を対象に 3 次元系での光学領域におけるトポロジカルフォトニクス現象の検討を進めている。

少し話が変わるが、最近ではバレー自由度を用いたバレートロニクスの概念を光に応用しようとする話もある。フォトニックバンドエンジニアリングにおいて、利用できる新たな自由度として今後進展していくのではないかと考えている。

では、ここでトポロジカルフォトニクスの意義や問題点をまとめたい（図 7-2-5）。私見にはなるが、第 2 世代のフォトニックバンドエンジニアリングの研究の舞台として、トポロジカルフォトニクスは大変興味深い。光デバイスとして応用が期待されている光の領域での原理実証はこれからの課題であり、そのための問題の 1 つがライトライン問題である。光の場合のライトラインというのは、外に光が漏れるかどうかの境界線のことを意味する。光にとって真空は絶縁体ではないため、うまく閉じ込める方法が必要である。その解となりうる提案の 1 つが MIT グループの結果（図 7-2-5 左下図）である。2 次元構造を 3 次元フォトニック結晶で挟むという難しいことを提案している。ここでは、フォトニッ

クディラック点を持つ2次元構造の例が示されている。原理的には確かに可能ではあるが、そのような構造を作るのはかなり大変な作業を要する。特徴あるバンド構造をライトラインの下に入れるためには、低次のバンドがトポロジカルな性質を持っている必要がある。期待が持てる構造の一つは図 7-2-5 右下図のようなスラブ型である。面内構造は通常の微細加工プロセスで作製可能であり、縦方向は光の全反射で閉じ込められるため、上下が空気でも閉じ込めの問題は解消できる。最近、ハニカム構造をもつフォトニック結晶スラブを用いた研究は報告されているが、明確なフォトニックディラック点やトポロジカルな特性の観測には至っていない。

光閉じ込めの問題と合わせて、できるだけ誘電体などの一般的な材料で、かつ、簡素なプロセスで作製可能な新しい構造が今後見出されることを期待している。

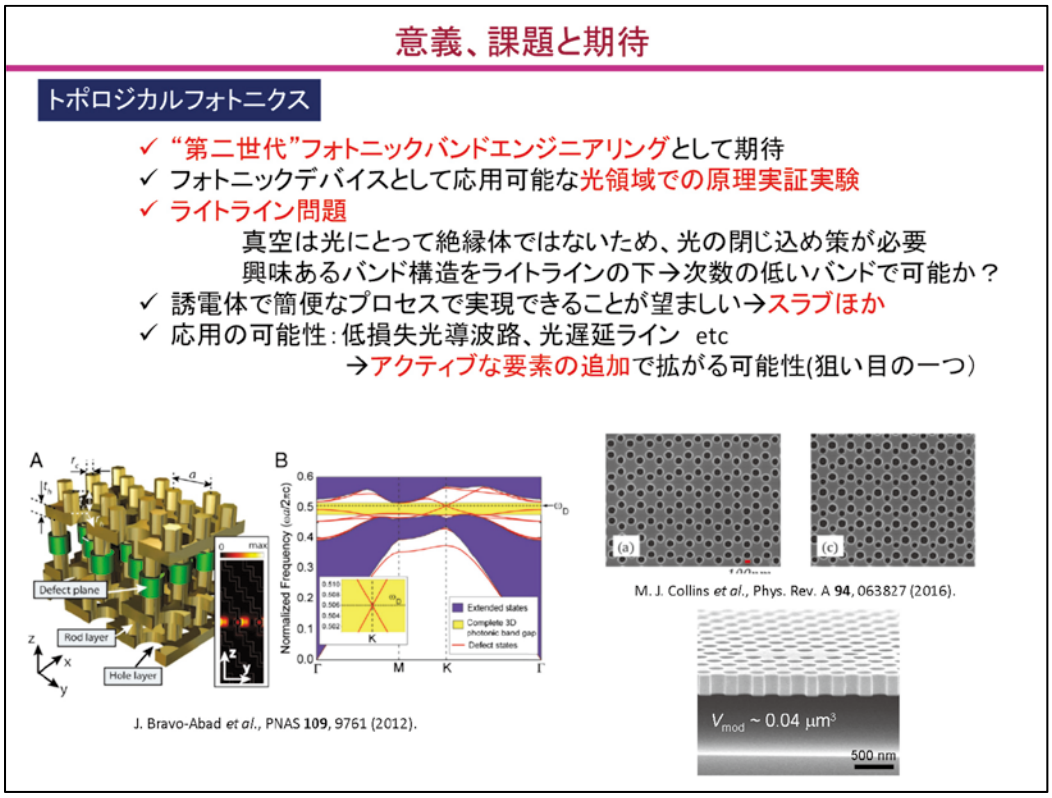



**図 7-2-5**

応用の可能性としては、よく言われる話ではあるが、低損失な光導波路や遅延ラインが可能であり、光回路への適用が期待されているが、いずれもパッシブな特性である。個人的な見解では、例えばレーザや光変調、もしくは電圧や電流、光などの外場による制御といったアクティブな要素が追加できると、応用範囲が拡張されるのではないかと考えている。

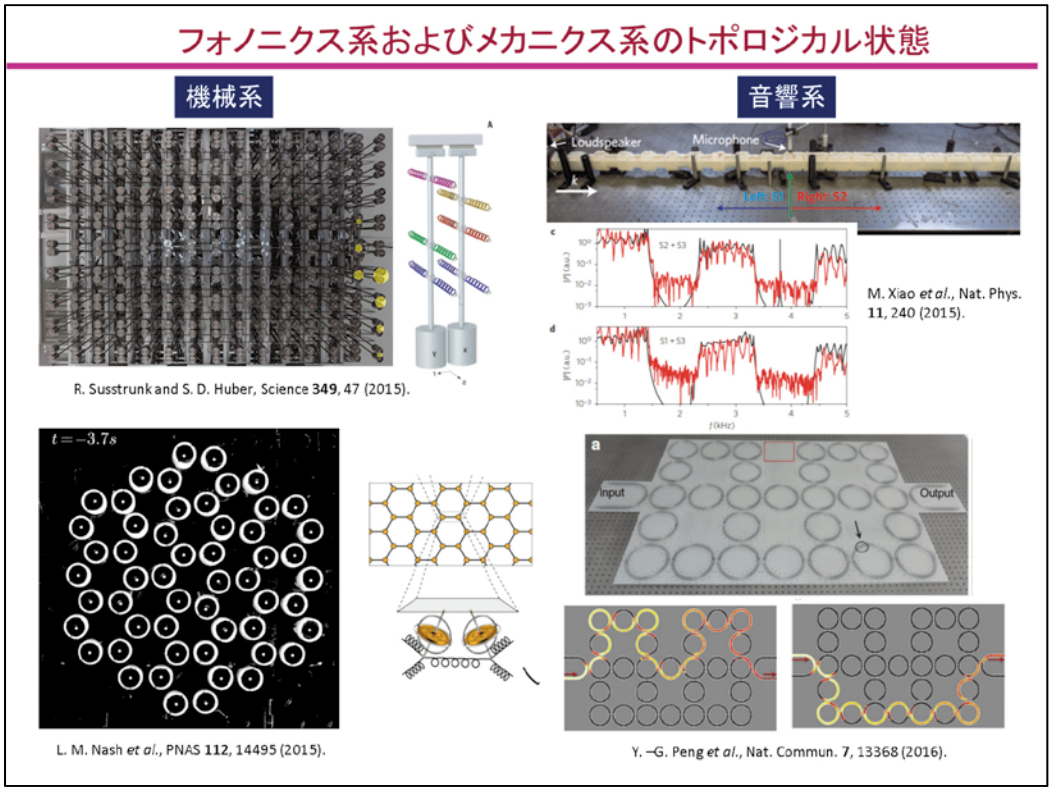



図 7-2-6

最後に、フォノニクスやメカニクスへの応用について簡単に紹介する。図 7-2-6 の左上図は、振り子をばねで繋いだ系であるが、相互の振り子の結合を適切に設定することでエッジ制御ができるというデモンストレーションである。図 7-2-6 左下図も同様にメカニクスの系であり、ジャイロスコープをうまく配列させると周囲だけが大きく回転するようなトポロジカルエッジ状態が現れるという報告である。音響系でも最近実験が進展しており（図 7-2-6 右上図）、1 次元の周期構造をもった音波管のようなものを作製し、音響バンドギャップのトポロジカルな性質が異なる 2 つの音波管を結合することで、その界面に音波の閉じ込め状態が見えるという報告もある。また、音波の導波路からなるリング共振器系でもトポロジカルな性質を利用した音波の伝播が報告されている（図 7-2-6 左下図）。これらの報告が全てここ 1 ～ 2 年の最近のものである点が注目に値する。

トポロジカルフォノニクスでは目に見える、体感できるというメリットがあり、トポロジカルな特性の応用を説明するには良い系であると感じている。今後は固体中の弾性波への展開など、新しいデバイスへの展開もありえる。本日紹介できなかったが、ゼロ振動モードというものがあり、それを利用すると、圧力や歪みを制御することが可能であるという話もあり、建築に応用可能という話が述べられている論文もある。また、音響的なアイソレーションや熱制御にも利用可能ではないかと考えられている。

以上をまとめると、フォトニクス、フォノニクスの両方の分野でトポロジカルな性質を用いた実証実験が世界中で活発に進められている。提案から実証までが極めて短期間で行われており、理論と実験が発案レベルから強い連携のもとで研究が進められているものと

考えられる。具体的な応用先はこれから開拓していく必要があるが、実験的に実証しやすい新しい系が見出されると基礎研究はもちろん、応用検討も大いに加速すると期待している。また、構造が複雑だとその作製が困難になり、この分野への参入障壁が高くなってしまう。

今後は応用をいかに見つけるかが重要なポイントであり、パッシブな機能・応用だけではなくアクティブな要素を付加した機能化やその応用など、新たな切り口を見つけることが重要である。海外との比較を考えた場合、フォトニクスは日本が非常に強い分野であるが、トポロジカルフォトニクスの研究となると日本は非常に遅れているというのが現状である。この原因の一つは分野間の連携不足にあるのではないかと考えている。また、これからトポロジカルフォトニクスに本格的に取り組むためには、海外とは異なる視点を盛り込みながら進めていく必要があると感じている。

【質疑応答】

Q：日本が得意なスラブ型フォトニック結晶の技術の延長線上でトポロジカルな機能を作りこむことは難しいのか。

A：理論的にはおそらく可能だと思う。研究として見た場合に、2 つポイントがあると感じている。1 つ目はトポロジカルな性質には、これまであまり注目してこなかったが、視点を移して、培ってきた技術を如何にうまく活かせるか。2 つ目は海外でも同様の動きがあり、その競争に勝てるか。そのためにアクティブ化などの新たな展開を進められるかが重要であると感じている。

Q：ボース粒子系を扱う場合、例えばエキシトンやポラリトンなどの自由度とのハイブリッド系でトポロジカルな性質を作ることができれば可能性が拡がるのではないか。

A：エキシトンやポラリトンの研究は既にあるようだが、ハイブリッド系を考えることで、単一系では困難もしくは不可能な機能が実現できる可能性があると考えている。

Q：応用面は確かにアクティブな要素がないと、導波路だけでは物足りない気がする。ところで無散乱な導波路ができると Q 値はどうなるのか。

A：散乱のない導波路でリング共振器を構成したとすれば。極めて高い Q 値が得られる可能性があると考えられている。

# 8. 総合討論

**ファシリテーター：塚崎　敦（JST-CRDS、東北大学）**

これまでの各プレゼンテーション・質疑、招聘者への事前アンケートの結果を踏まえて、1. 本日の講演内容のまとめ、2. 提案骨子を作成するに当たっての仮説の妥当性、3. 世界をリードするための研究実施体制や産学連携の仕組み、4. 社会的・経済的インパクト、に関連する議論を行った。以下では、総合討論において挙がった主要な議論を、項目ごとに要約して記載する。

## 1. 本日の講演内容のまとめ

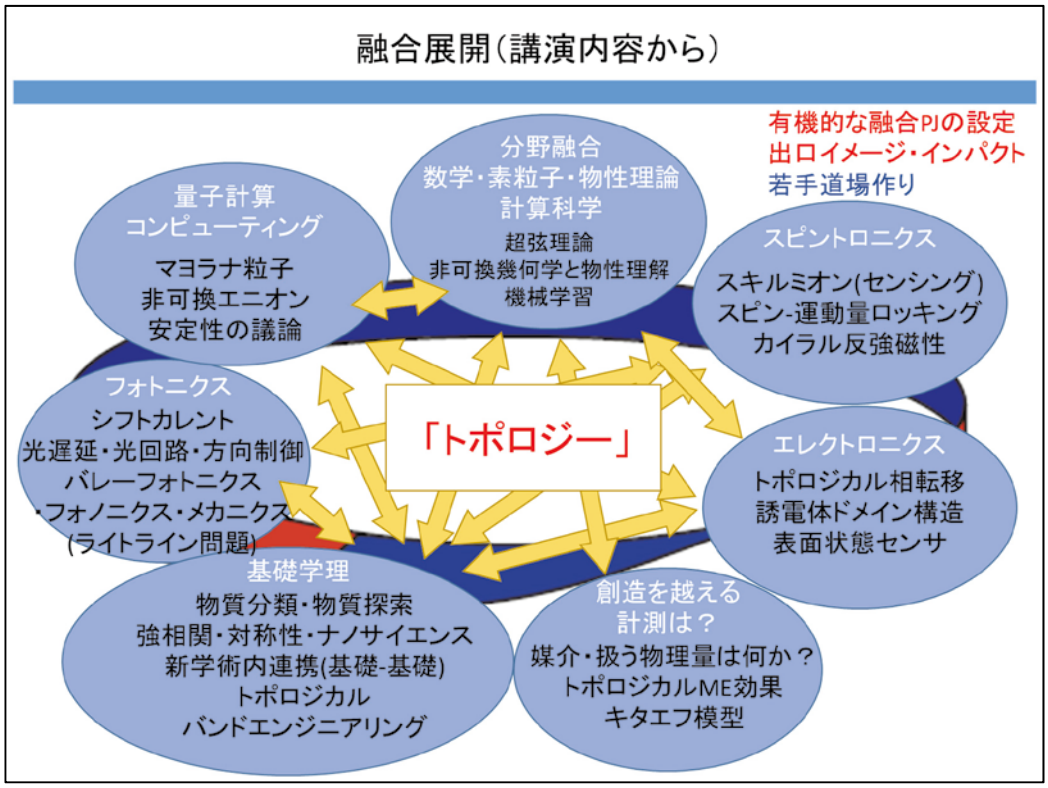



**図 8-1**

- 日本もしくは海外も含めて基礎学理（物質分類、物質探索、新学術領域を含む基礎の連携など）が急激に発展している
- 応用領域としては、フォトニクス、量子コンピューティング、スピントロニクス、エレクトロニクス、さらにはおそらく、現時点では想定のつかない応用先、想像を超える発見がこの中から生まれる可能性がある
- 分野融合（素粒子物理、数学、物性物理、計算科学など）が進展する
- 図 8-1 に挙げているキーワードの大半は、いずれも従来の半導体やバンド理論では理解が困難なものであった。これらを基礎研究から工学応用に運ぶことが JST の

1 つの指針になる可能性がある
・想像を超える計測手法も必要になる
・このような状況の中で有機的な融合プロジェクトを設定する必要があり、どのようなインパクトのある出口イメージがありうるか。若手の道場を作って分野融合を図ることも必要だが、異分野の研究者をバインドする目的設定が必要

## 2. 仮説の妥当性

CRDS の調査・分析結果から得られた仮説については、招聘者へ事前アンケートの結果から、大きく間違っていないことが確認された（図 8-2、8-3、8-4）。

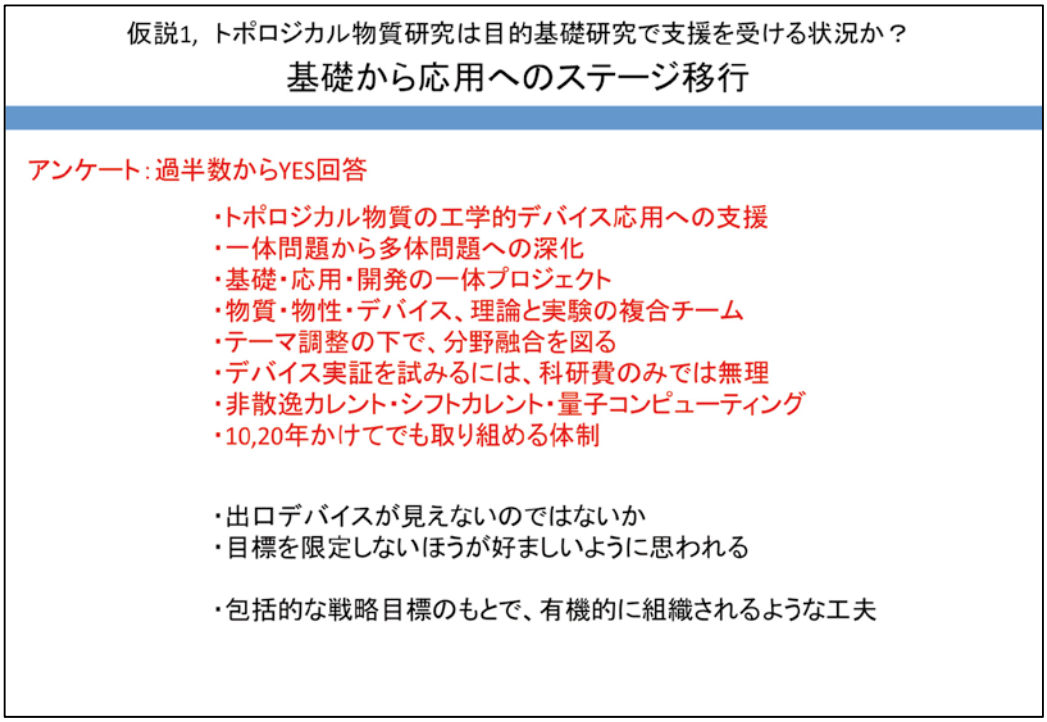



図 8-2

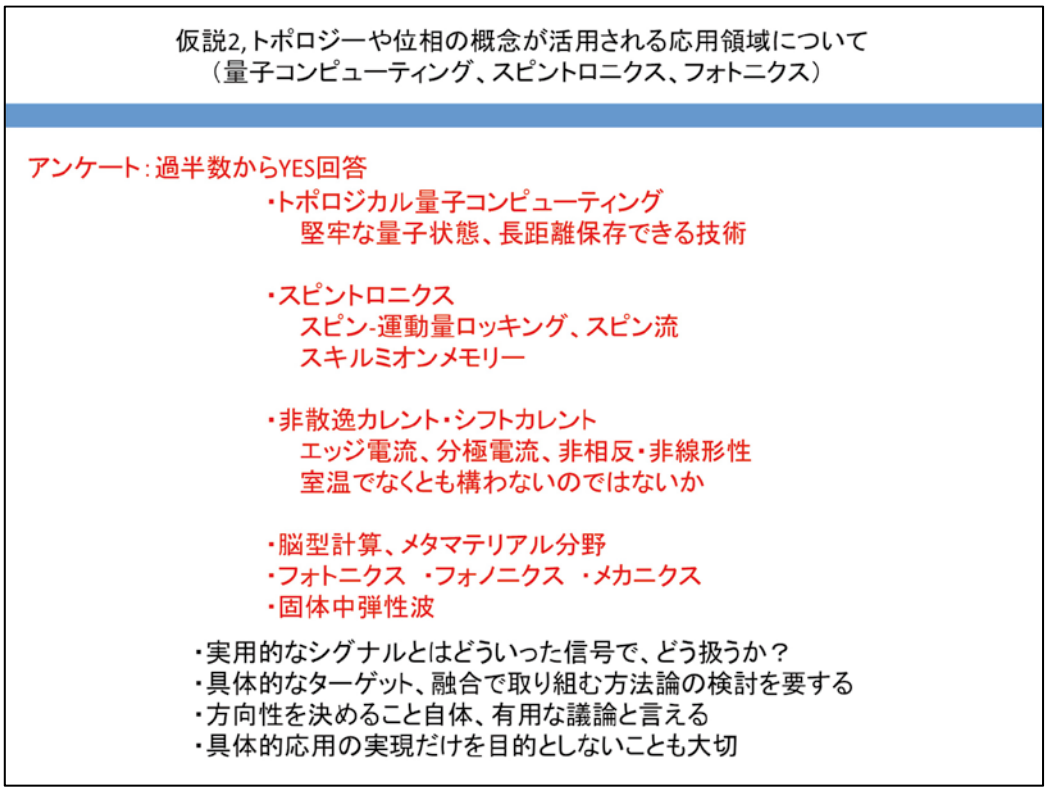

仮説2,トポロジーや位相の概念が活用される応用領域について
（量子コンピューティング、スピントロニクス、フォトニクス）
アンケート：過半数からYES回答
・トポロジカル量子コンピューティング
堅牢な量子状態、長距離保存できる技術
・スピントロニクス
スピン-運動量ロッキング、スピン流
スキルミオンメモリー
・非散逸カレント・シフトカレント
エッジ電流、分極電流、非相反・非線形性
室温でなくとも構わないのではないか
・脳型計算、メタマテリアル分野
・フォトニクス ・フォノニクス ・メカニクス
・固体中弾性波
・実用的なシグナルとはどういった信号で、どう扱うか？
・具体的なターゲット、融合で取り組む方法論の検討を要する
・方向性を決めること自体、有用な議論と言える
・具体的応用の実現だけを目的としないことも大切

図 8-3

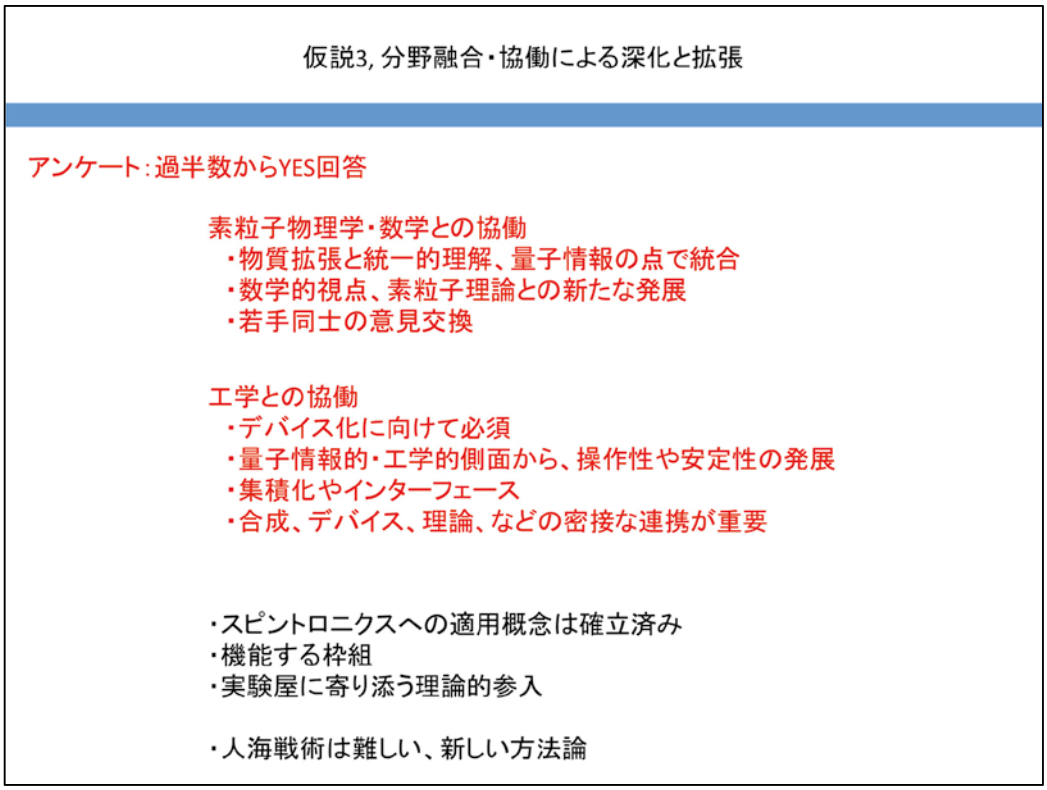

仮説3, 分野融合・協働による深化と拡張
アンケート：過半数からYES回答
素粒子物理学・数学との協働
・物質拡張と統一的理解、量子情報の点で統合
・数学的視点、素粒子理論との新たな発展
・若手同士の意見交換
工学との協働
・デバイス化に向けて必須
・量子情報的・工学的側面から、操作性や安定性の発展
・集積化やインターフェース
・合成、デバイス、理論、などの密接な連携が重要
・スピントロニクスへの適用概念は確立済み
・機能する枠組
・実験屋に寄り添う理論的参入
・人海戦術は難しい、新しい方法論

図 8-4

## 3. 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

- 量子コンピューティングはまだまだ基礎段階、若手の道場など自由な発想が重要。方向性を決めないほうがよいのではないか。
- スピントロニクスはスピンホール効果などの性能がある一定以上は使えると言われており、トポロジカル物質群はその限界を超えることが理論的に予測されているため、方向性をある程度定めた支援を行う段階である。海外のように分業制では人数が必要になるが、日本の若手はスマートさが売りなので、各グループ間が分業するのではなくしっかりと相互作用していく方策をとるべき。
- 理学と工学の中間を繋ぐようなプロジェクトフォーメーションが必要ではないか。現時点では、大きな可能性を秘めていることがわかっているものの、海のものか山のものか、将来どこまで使えるものになるのかがわからないような研究分野に対して、基礎の部分を重厚に推進することも大切であり、それは国のレベルを超えて、サイエンスの発展という視点からも重要である。
- 反強磁性スピントロニクスは現状でもある程度はできているが市場を取るまでには至っていないため、大企業の支援が得られない。また社会の状況（原油価格など）の影響も受けてしまうため、どういう方策が有効か議論することは難しい。
- スピントロニクスで理論と実験の連携が進んだ理由は、実験家の話を聞いてアドバイスできる理論家がいたからである。ただし、優秀な若手をいくら育成しても、安定した行き先がないと結局いい研究ができない。プロジェクト型だとどうしても 5 年後のポジションの心配が出てしまう。長期的な支援体制が必要。
- フォトニクスはツールが確立しているので、新しい概念を導入した方向性をしっかりと決めて基礎と工学が組んで資金投入してやるべきステージではないか。
- 新学術ではこれまでやられていなかった強相関系など基礎学術としてのブレークスルーを目指してやっているが、フォトニクスやスキルミオンなど少し応用が見え始めたところは手が付けられていないため相補的なプロジェクトが立ち上がれば若手が非常に成長・活躍できる舞台になるのではないか。
- トポロジカル絶縁体はバルクと表面の状態が異なるので、計測屋や計算屋、物質開発が組まないとなかなか進まない点が参入する障壁になっているのではないか。
- 企業目線のアドバイスがもらえる環境に若手をおくことが成長するには必要ではないか。
- 応用物理学会など、企業の人の目に届く場所で研究発表することも重要。
- 戦略的にやるテーマは 2 種類ある。一つは既に技術的ブレークスルーがなされ、マイルストーンが明確な領域（例えば光格子）。もう一つはゲームチェンジを起こしうるテーマ（例えば、ハイブリッド量子（量子×バイオ）、トポロジカル）。キタエフ模型で遊んでいるだけでは不足である。なぜなら、キタエフは既にゲームチェンジしたため、それを超える新しいアイデアを生み出すことが必要。異分野を混ぜることで、専門家では思いつかないアイデアが出ることがある。様々な考え方にインスパイアされた人材が次代の領域を作る。
- 企業人にも興味ある人間はたくさんいるのではないか。企業でもこれまでの反省を踏まえて、10 年後、20 年後のためのタマ込めを本気でしようとしている人がたく

さんいる。拠点のような集中型か、国家プロジェクトのような分散型のどちらがいいかはわからないが、企業の人も巻き込んで一緒に研究することで仲間意識が芽生え、10 年後 20 年後に何か大きなことに繋がっていく可能性もある。

- 素粒子はクリーンな系を扱っているため、素粒子物理の理論を専門としている若手にとって、フォトニクス分野は参入しやすいかもしれないが、固体物理にはいきなりは参入しにくいかもしれない。少しトレーニング期間を設けて徐々に参入できるような仕組みが必要ではないか。
- 例えば理論と実験の両方がわかる若手（東工大の村上先生のような）を育成することが重要。ただし、それでも最初は別々の方向を向いているので、さきがけのようなある程度の異分野交流の期間がないとそういう人材の育成も難しい。若手は異分野を混ぜる場があるだけでも成長できる。マイクロソフトと同じ路線は得策ではなく、日本独自の分野形成が必要ではないか。
- 異分野を混ぜるということを明確にしたフォーラムのような呼び水を作ると若手が良い提案をしてくるだろう。そこに集まる若手が次の分野を作っていくことも期待できる。

## 4．社会的・経済的インパクト

- 量子コンピューティングに関して超伝導ビットを集積する方向性は 10 年 20 年かければ達成できることが理論的に保証されており、ストーリーがしっかりしているため Google や IBM は大型投資している。一方、マヨラナ量子コンピューティングは良くも悪くも何が起こるかわからない、しかしポンと出てきたときに素性が良ければ量子状態がいくらでも保持できる状態が実現できるためインパクトはものすごく大きい。しかし、作ってみると思ったほど性能出ないね、となる可能性もある。ストーリーがない面白さがあるため、マイクロソフトは投資しているのではないか。
- 将来的に存在すれば人類の幸福に貢献できるかという視点から言えば、反強磁性スピントロニクスは、既存技術よりも高性能なものが作れる可能性や、周波数領域でも空間的にも既存のものを超える可能性は十分にある。
- トポロジーを分かりやすく説明できるようにすることが重要であり、コップとドーナツの説明ではトポロジカル物質の説明にはなっていない。
- 将来何か社会に役立ちそうな、しかもできたら破壊的イノベーションになるものがなんとなくみえているが、そのためにはまだまだ基礎をやらないといけないというのが真の目的基礎研究であり、ロードマップが書けるものは目的基礎研究とは言わない。一方で、この技術は使えるということを見せられる応用領域に関しては、どんどん企業に働きかけることも重要。両輪で動かしていくことが必要。

## 5．まとめ

- 日本は中国のような人海戦術で競争しても勝ち目はなく、戦略的な旗の下で如何にリソース（ヒト、モノ、カネ）を効率よく組み合わせるかが重要。
- トポロジーを基軸とする連携のもたらす飛躍の可能性は高く、広い視点で有望なところから融合を進めて発展を促すことが重要。

・異分野融合・連携によって若手研究者から日本発と言えるような新しいアイデアを出してもらって、活躍できる場を作ることで将来の日本の国力を挙げていく源泉となる。

# 9. 閉会挨拶

曽根　純一（JST-CRDS）

本日は長時間議論していただいたことに感謝申し上げたい。特に、どのように進めていくべきかについて様々なご意見を伺うことができた。

本研究分野は今まで我々が取り扱ったことないような、非常にエキサイティングな研究分野であることを認識することができた。最終的には行政側とも意見交換していきながらにはなるが、既存のプログラムにこだわらず、様々な実施形態を考えながらプロポーザルを作っていきたい。

このプロポーザル活動をしていく中で、私も多くの先生方とお会いしたが、物性物理、素粒子物理、数学などの分野に関わらず非常に優秀な若手がたくさんいるという印象を強く持った。先ほど議論の中にもあったように若手の道場を作れば更に活性化されるのではないか。その中から本研究分野を極めていって将来のノーベル賞に繋がる人材や、あるいはアプリケーションに繋げる人材が輩出されるのではないかと感じている。もしくは、本研究分野から離れて、ここで得たことをベースに他の研究領域へその DNA を持って行って全く違った新しい研究領域に展開していくことも必要なことではないか。

応用に関しては、私自身も非常に興味がある。私は元々は理学出身だが、頭の中は完全に応用に染まっている。例えば、スピントロニクスについては、もしかすると一番先にブレークスルーが起こるのではないかと感じている。スキルミオンや反強磁性体を用いたスピントロニクスが今後どう展開していくのか、非常に楽しみにしている。MRAM は今曲がり角にさしかかっていると感じていて、様々なアプリケーションが期待されているが、更に大きく発展させるためには新しいアイデアが必要になっている。先ほどもコメントがあったように、産総研にはモノを作る技術が揃っているため、そこに新しいアイデアを吹き込めば一気にブレイクする可能性があるのではないか。今までにない発想が重要である。

また、フォトニクスの展開も非常に楽しみである。物質の制限に捉われないで様々な自由な発想が可能な場であるため、物質系で生まれたトポロジカルのコンセプトをフォトニクスの世界に持ち込むことで様々な花を開かせていただきたい。室温で動作するということも魅力の一つである。

量子コンピュータに関しては、現在では IoT や AI の大きな流れがあり、データセンターやクラウドなどではビッグデータを扱うコンピューティングが必要になっている。世の中が大きく変わろうとしている。これまでは Intel のチップが CPU の世界を席巻していたわけだが、ムーアの法則が限界に近づいている今、インテルのチップだけでは欲しいサーバーが設計できなくなりつつあり、Microsoft なども自前で CPU チップを作り始めている。その中に AI が入ってきている。そのような状況の中で極低温でも誤り訂正不要の量子コンピューティングが実現できるならそのインパクトは計り知れない。

本日の議論を踏まえて、これからは我々の責任でプロポーザルにまとめていきたい。場合によってはさらにご意見・お知恵を拝借することもあると思うが、引き続き、ご協力をお願いしたい。

# 付録

## 付録 1：開催趣旨・プログラム

### 開催趣旨

JST 研究開発戦略センター（CRDS）では、科学技術に求められる社会的・経済的ニーズを踏まえて国として重点的に推進すべき研究領域や課題を俯瞰の視点から系統的に抽出し、そのファンディング戦略を明確にするための活動を行っております。このような活動の一環として、これまでに技術分野の俯瞰を目的とした「俯瞰ワークショップ」や、重要テーマの研究開発戦略を検討する「科学技術未来戦略ワークショップ」などを開催して参りました。

本ワークショップ「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～」は、上記「科学技術未来戦略ワークショップ」に位置付けられます。数学の「トポロジー」という概念が固体物理に最初に導入された 1970 年代以降、それまでの物質観を変える成果・アイデアが次々と産み出されています。特にここ 10 年の間にトポロジカル絶縁体を始めとするトポロジカル物質群に関する理論提唱、実験的検証が精力的に進められ、世界規模で研究開発競争が激化しています。最近ではトポロジーの概念を利用した量子コンピューティング、スピントロニクス、フォトニクスなどへの応用展開も始まりつつあります。そのような状況の中、我が国においては JSPS 新学術領域を中心に基礎研究フェーズにおいて世界を牽引する成果が創出され、応用展開に関しても研究室レベル・機関レベルではあるものの少しずつトライアルが始まっています。また、トポロジカル物質群においてはトポロジーの概念に加え、非相対論的効果が重要な役割を果たすことから、固体物理学者と数学者、さらには素粒子物理学者の融合・連携により新しい学理の展開が期待できる分野です。基礎学術面の更なる深化・拡張を図るとともに新物質探索研究を加速させ、工学との融合・連携により革新的量子制御技術開拓を積極的に促進するべきであると考えています。

本ワークショップでは、トポロジカル物質における研究の現状や将来展望、数学・素粒子物理から見たトポロジカル物質の理解、さらには量子コンピューティング・スピントロニクス・フォトニクスなどへの具体的な応用展開に関する話題提供を基に、戦略的に取り組むべき重要な研究開発課題、世界をリードするための効率的・効果的なファンディングや研究実施体制および産学連携の仕組み、人材育成・社会受容などを含む社会的・経済的インパクトについて議論します。これらの議論を通して、世界に冠たるトポロジカル量子戦略となりうる研究開発の方向性を明らかにし、取り組むべき科学技術とその推進方法の共通認識を得たいと考えています。

なお、本ワークショップは非公開とさせていただきますが、議論の内容は報告書として纏め、参加者及び関連府省に配布後、CRDS の web サイト上で一般公開させていただくと共に、今後の施策や提言書作成の参考にさせていただきます。

## プログラム　（敬称略）

開催日時：2016 年 12 月 19 日（月）10:00 ～ 18:00
開催会場：JST 東京本部別館 2 階セミナー室

| | | |
|---|---|---|
| オーガナイザー | | 曽根　純一（JST-CRDS） |
| ファシリテーター | | 塚﨑　敦　（JST-CRDS、東北大） |
| 司会 | | 宮下　哲　（JST-CRDS） |
| 10:00 ～ 10:05 | 開会挨拶 | 曽根　純一（JST-CRDS） |
| 10:05 ～ 10:20 | ワークショップ趣旨説明 | 宮下　哲　（JST-CRDS） |

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） |

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） |

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） |

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） |

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ニクス
～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　塚﨑　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　曽根　純一（JST-CRDS）

## 付録２：参加者一覧

招聘識者

（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　　国立研究開発法人理化学研究所 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　　国立研究開発法人物質・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　　国立研究開発法人理化学研究所 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

JST-CRDS トポロジカル量子チームメンバー

- 曽根　純一　　上席フェロー・チーム総括責任者（ナノテクノロジー・材料ユニット）
- 宮下　哲　　フェロー・チームリーダー（ナノテクノロジー・材料ユニット）
- 五明　明子　　研究プロジェクト推進部　主任調査員
- 佐藤　勝昭　　フェロー（ナノテクノロジー・材料ユニット）
- 塚﨑　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・ユニットリーダー（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）

関係府省・機関

- 柘植　丈治　　内閣府 政策統括官（科学技術・イノベーション担当）付 産業技術・ナノテクノロジーグループ　上席フェロー

・上田　光幸　文部科学省 科学技術・学術政策局 研究開発基盤課 量子研究推進室 室長
・橋本　一郎　文部科学省 科学技術・学術政策局 研究開発基盤課 量子研究推進室 室長補佐
・鬼柳　亮嗣　文部科学省 科学技術・学術政策局 研究開発基盤課 量子研究推進室 行政調査員
・庄司　暁　文部科学省 研究振興局 参事官（ナノテクノロジー・物質・材料担当）付　学術調査官
・西迫　貴志　文部科学省 研究振興局 参事官（ナノテクノロジー・物質・材料担当）付　学術調査官
・北澤　英明　国立研究開発法人物質・材料研究機構 先端材料会席研究拠点／経営企画部門 経営戦略室　副拠点長／調査役
・川喜多磨美子　国立研究開発法人物質・材料研究機構 経営企画部門 経営戦略室 主任エンジニア
・鶴田　修一　国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構 技術戦略研究センター ナノテクノロジー・材料ユニット　研究員
・藤代　芳伸　国立研究開発法人産業技術総合研究所 材料・化学領域 研究企画室 室長
・中西　毅　国立研究開発法人産業技術総合研究所 数理先端材料モデリング オープンイノベーションラボラトリ　ラボ長

JST
・田中　一宜　CRDS ナノテクノロジー・材料ユニット／国立研究開発法人産業技術総合研究所　特任フェロー／名誉リサーチャー
・清水　敏美　CRDS ナノテクノロジー・材料ユニット／国立研究開発法人産業技術総合研究所　特任フェロー／フェロー
・荒岡　礼　CRDS ナノテクノロジー・材料ユニット　フェロー
・河村　誠一郎　CRDS ナノテクノロジー・材料ユニット　フェロー・エキスパート
・末村　耕二　CRDS ナノテクノロジー・材料ユニット　フェロー
・勝又　康弘　戦略研究推進部 グリーンイノベーショングループ　主任調査員
・辻　伸二　戦略研究推進部 グリーンイノベーショングループ　主任調査員
・中田　希衣　戦略研究推進部 グリーンイノベーショングループ　係員
・濱田　智之　戦略研究推進部 グリーンイノベーショングループ　主任調査員
・前野　仁典　戦略研究推進部 グリーンイノベーショングループ　主任調査員
・嶋田　義皓　戦略研究推進部 ICT グループ　主査
・上田　幸弘　戦略研究推進部 ACCEL グループ　主任調査員
・栗原　健二　戦略研究推進部 研究評価グループ　主任調査員
・上田　正仁　戦略プロジェクト推進部／東京大学 大学院工学系研究科　PO ／教授
・新井　正伸　戦略プロジェクト推進部 グリーンイノベーショングループ　主任調査員
・永井　諭子　戦略プロジェクト推進部 グリーンイノベーショングループ　副調査役
・清水　信宏　産学連携展開部 研究支援グループ　イノベーション推進マネージャー

・植木　千尋　　イノベーション拠点推進部 地域イノベーショングループ
　　マッチングプランナー
・千田　篤史　　イノベーション拠点推進部 SIP グループ　副調査役
・斉藤　明日香　理数学習推進部 企画・調査課　係員

■ワークショップ企画・報告書編纂メンバー■

| | | |
|---|---|---|
| 曽根　純一 | 上席フェロー・総括責任者 | （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） |
| 塚﨑　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） |

CRDS-FY2016-WR-12

科学技術未来戦略ワークショップ報告書

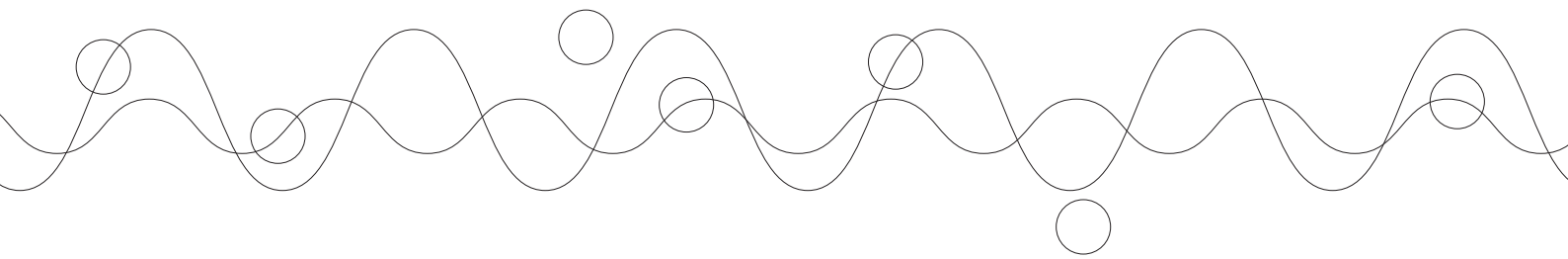
# 「トポロジカル量子戦略
## ～量子力学の新展開がもたらすデバイスイノベーション～」

平成 29 年 3 月
ISBN 978-4-88890-552-7

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
電　話　03-5214-7481
http://www.jst.go.jp/crds/

© 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. Any quotations must be appropriately acknowledged.

ISBN 978-4-88890-552-7