

俯瞰ワークショップ報告書

量子マテリアル研究の最前線

2023年3月19日(日)開催

エグゼクティブサマリー

本報告書は、国立研究開発法人（JST）研究開発戦略センター（CRDS）が令和5年3月19日に開催した『俯瞰ワークショップ ナノテクノロジー・材料分野 区分別分科会「量子マテリアル研究の最前線」』に関するものである。

量子技術は産業、情報セキュリティ、国防、金融などに大きな影響を及ぼす革新技術と位置付けられ、米国の国家量子イニシアチブ法やEUのQuantum Flagshipプログラム等、世界各国で研究開発の重点化、拠点形成および人材育成等の戦略的な取り組みがなされている。さらに、昨今では、民間企業が中心となって野心的な目標を掲げて量子コンピュータ、量子ネットワーク、等の研究開発や事業化等の取り組みが加速している。我が国では2020年の内閣府「量子技術イノベーション戦略（最終報告）」において、量子技術の4つの主要技術領域として、「量子コンピュータ・量子シミュレーション」、「量子計測・センシング」、「量子通信・暗号」および「量子マテリアル（量子物性・材料）」が示されている。その中で、量子性を発現する量子マテリアルは、量子技術だけでなく幅広い分野への応用が期待され、我が国の産業競争力の強化につながる重要な領域である。我が国の大学・研究機関では、質の高い物性科学研究が長年行われておりその中で量子マテリアルに関する基礎的な知見が蓄積されている。そのような我が国の強みを活かすことで、量子マテリアルの社会実装を加速できると考えられる。

こうした状況に鑑み、量子マテリアル領域を俯瞰し、将来の可能性、応用に向けて解決すべき課題などを把握することを目的としたワークショップを開催した。

本ワークショップは以下に示す4つのセッションで構成されている。

セッション1「量子マテリアルの創製」

一般的に材料中で発現する量子性は非常に不安定であり、周囲の熱雑音等の影響を受けて容易に散逸する。そのため、室温等の実環境における量子性の安定性を高めるために、材料の高純度化や構造等の工夫が必要になる。主な話題は以下のとおり。

- 量子液晶物性科学の取り組みと成果
- トポロジカル量子物質科学の現状と展望
- 量子デバイス応用を目指したダイヤモンド成長技術

セッション2「量子機能の制御」

応用に向けて、量子マテリアルで発現している量子性を高精度で制御する機能を保ったままデバイス化する技術等が求められる。主な話題は以下のとおり。

- 量子マテリアルの物性
- 量子機能の創製と制御
- 粒子線を駆使した量子マテリアルの高機能化

セッション3「量子機能の応用」

量子マテリアルは、量子性を活用して従来の材料では実現が困難であった新規機能を発現させるエマージングな領域であるため、産業的に魅力的な応用先を示すことが研究開発の加速に不可欠である。主な話題は以下のとおり。

- 二次元原子薄膜ヘテロ積層 / 接合材料のテラヘルツ波デバイス応用
- 次世代情報技術基盤としての量子マテリアル開発
- 量子技術を適用した生命科学基盤の創出の取組と成果

総合討論

セッション1～3の話題提供を受けて、以下の3項目について討論を行った。

1. 量子マテリアルで今後取り組むべき研究項目
2. 応用に向けてステップアップに必要な研究課題と要素技術
3. 研究を効果的に加速させる研究開発体制・必要な施策や仕組み

量子マテリアルで今後取り組むべき研究項目のうち基礎的な研究項目として、トポロジ、強相関電子系、非エルミート系、マルチフェロイクスなど、多数の項目が挙げられた。これらの基礎的な研究項目においては、今後も基礎研究の充実が不可欠であることが示された。

さらに、応用先として、エレクトロニクス、エネルギーおよびバイオの3分野に設定し、応用に向けてステップアップに必要な研究課題と要素技術を抽出した。量子デバイスをいかに作るかがキーであり、バルクだけでなく材料表面・界面と電子や光子との作用を理解するとともに、その量子効果が最大化するデバイス化技術が不可欠である。

研究開発体制・必要な施策や仕組みの議論では、量子マテリアルの応用に向けた研究開発の基礎と応用の役割分担が議論された。基礎研究の拡充だけでなく、応用に向けた技術開発ではスタートアップ等を舞台とする産学連携の取り組みが不可欠である。さらに、材料合成、デバイスプロセス、計測・評価およびシミュレーションといったインフラの拡充、VC等の資金のサポートおよび量子人材育成の重要性が議論された。

これらの結果は、CRDSでさらに検討を加えて、今後発行を予定している研究開発の俯瞰報告書に反映させるとともに、今後の戦略提言にも活用していく。

目次

1	ワークショップの開催趣旨	
	曾根 純一、佐藤 隆博 (JST-CRDS).....	1
2	量子マテリアルの創製	4
2.1	新学術領域研究「量子液晶の物性科学」のこれまでの 取組と成果 芝内 孝禎 (東京大学).....	4
2.2	トポロジカル量子物質科学の現状と展望 村上 修一 (東京工業大学).....	11
2.3	量子デバイス応用を目指したダイヤモンド成長技術開発 寺地 徳之 (NIMS).....	18
3	量子機能の制御	23
3.1	量子マテリアルのデバイス物性 岩佐 義宏 (理研).....	23
3.2	量子物質機能の戦略的創製と制御 石渡 晋太郎 (大阪大学).....	28
3.3	粒子線を駆使した量子材料の高機能化 – 量子センサ、 量子ビット形成とその応用 – 大島 武 (量研).....	33
4	量子機能の応用	38
4.1	二次元原子薄膜ヘテロ積層 / 接合材料のテラヘルツ波 デバイス応用 尾辻 泰一 (東北大学).....	38
4.2	次世代情報技術基盤としての量子マテリアル開発 中辻 知 (東京大学).....	42
4.3	さががけ「[量子生体] 量子技術を適用した生命科学基盤の 創出」の取組と成果 瀬藤 光利 (浜松医科大学).....	48
5	総合討論	
	ファシリテーター 八巻 徹也 (JST-CRDS).....	52

付録

付録1 開催趣旨・プログラム 55

付録2 参加者一覧 57

1 | ワークショップの開催趣旨

曾根 純一、佐藤 隆博（JST-CRDS）

JST CRDSは、科学技術に求められる社会的・経済的なニーズを踏まえて、我が国が重点的に推進すべき研究領域や課題、その推進方策に関する提言を行っている。その活動の一環として今回は、量子マテリアル研究について議論していきたい。2020年の内閣府「量子技術イノベーション戦略」では、図1-1に示すように、量子通信・量子暗号、量子情報処理、量子計測・センシングの三つが量子技術の柱であり、基盤技術の一つとされている。

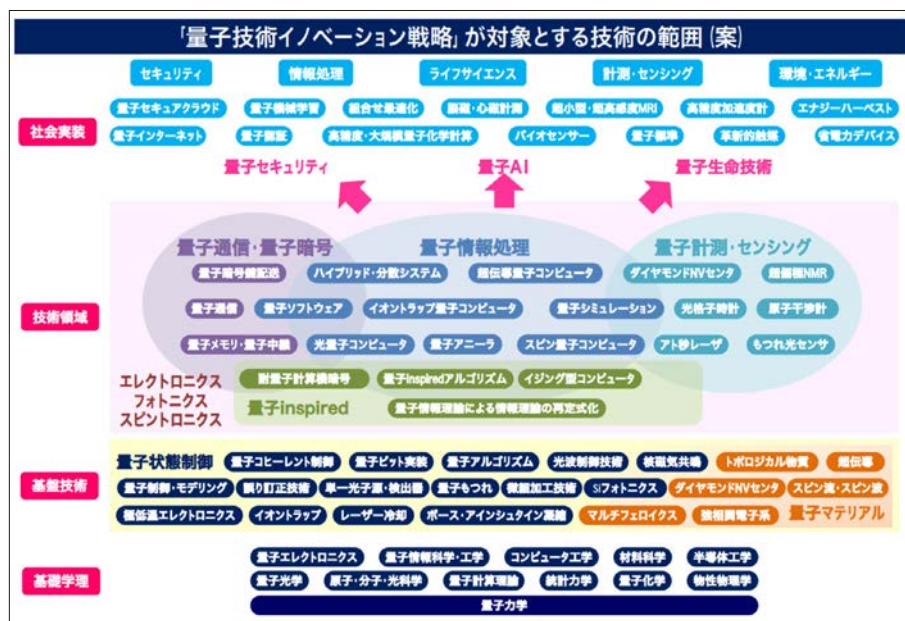


図1-1 量子技術イノベーション戦略が対象とする技術の範囲

<https://www8.cao.go.jp/cstp/ryoshigijutsu/ryoshigijutsu.html>

図1-2に示したように、各種量子科学技術関連の開発プログラムと平行して、量子マテリアル関連の研究プログラムが走っていることから、三つの主要量子技術を支える基盤技術として量子マテリアルが重要視されており、量子マテリアル研究は長年に渡って切れ間なく継続されている。われわれJST CRDSのナノテク・材料ユニットが最近発行した研究開発の俯瞰報告書ナノテクノロジー・材料分野（2023年）においても、環エネ、バイオ、ICT、社会インフラという応用に向けて基盤となっている「物質と機能の設計、制御」において、非常に大きな役割を占めている量子マテリアルをとりあげている。



- 超伝導、電荷秩序
- 磁性材料
- 量子輸送、非平衡ダイナミクス
- トポロジカル材料
- 不均質・ナノ構造材料
- 横断のテーマ（材料合成、装置、理論・モデリング）

- ・電子相互作用と量子ゆらぎの制御・利用による、新規機能バルク材料の設計
- ・トポロジカル状態を利用した画期的な表面物性
- ・ナノ構造における量子効果（コヒーレンス、エンタングルメント）の制御
- ・新規量子材料の創製と技術展開を加速する新規ツール

2

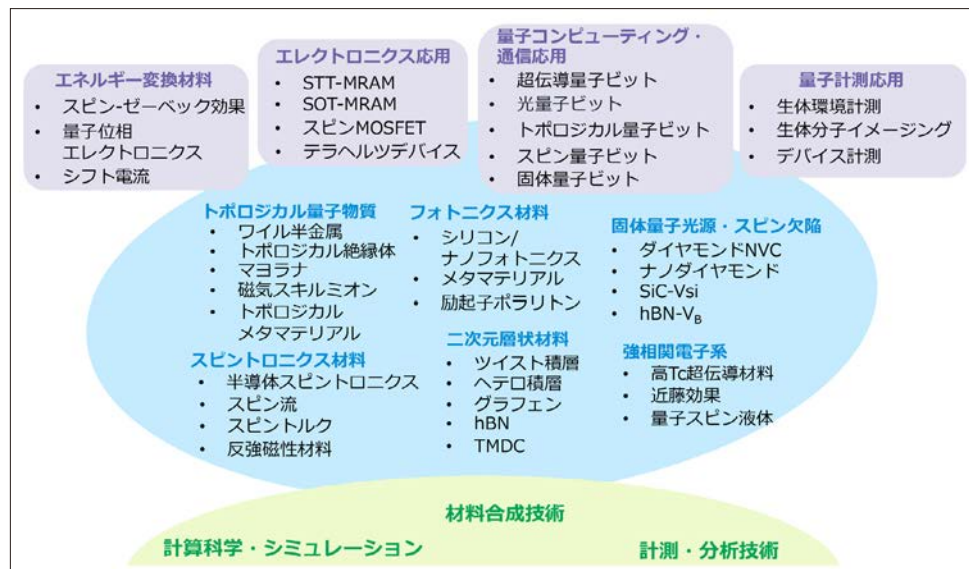


図1-3 「量子マテリアル」領域マップ案

我が国の大学・研究機関では、トポロジカル量子物質やスピントロニクス等について質の高い研究が長年行われており、基礎的な知見が蓄積されているとともに、国際的に評価の高い研究開発を行っている研究者が存在し人材の厚みがある。そのような我が国の強みを活かすことで、量子技術の社会実装を加速できると考えられる。そこで、本ワークショップでは、新規量子マテリアル創製から、量子機能の制御、量子機能の（情報・通信、環境・エネルギー、医療等への）応用までのこれまでの研究を俯瞰し、課題と今後の推進方策について検討することとした。

本ワークショップでは、3つのセッションと総合討論で構成した。最初のセッションは量子マテリアルを作り出す研究開発項目、2番目のセッションは作り出した量子材料の機能制御に関する開発項目、そして3番目のセッションは制御した機能をさまざまな分野に応用するための研究開発項目である。このような3つの段階に繋がって社会実装されると想定されるが、1番目から2番目、2番目から3番目の各段階に移行する部分が難しい谷とされる部分であり、その谷をいかに解決していくかが大きな課題であると認識し、セッションを構成した。また、総合討論では、今後の量子マテリアル研究開発戦略につなげていくことを目的として、取り組むべき量子マテリアル研究項目、日本の強みを生かし研究を進展させていく方策、さらに、それらの研究開発を支援する施策や体制を議論する。

2 | 量子マテリアルの創製

2.1 新学術領域研究「量子液晶の物性科学」のこれまでの取組と成果

芝内 孝禎（東京大学）

令和元年度に始まった科研費 新学術領域「量子液晶の物性科学」について、これまでの取り組みと成果を紹介する。

まず「量子液晶」という概念について説明する。

液晶はソフトマターとして、一大物理学分野が形成されており、たくさんの応用がなされている。液体と液晶の区別は、物理学的には対称性がキーワードである。液晶は方向によって見え方が異なり、対称性が破れている。

古典的な液体に電子系などで現れる量子多体効果を取り入れた分野は、量子流体あるいは量子液体と呼ばれ、物性物理学で非常に重要な位置を占めた学術分野になっている。ここでは、例えば超伝導とか量子ホール効果など新しい重要な概念が確立してきた。

われわれは図2-1-1のマトリクスのように考え、量子液体に対して対称性の破れを導入した系を「量子液晶」と捉えた。液晶の分野では階層性が重要であり、長さ・時間・エネルギーなどさまざまな新しいスケールが現れるということが知られており、「量子液晶」で新しい学術を創生できないかということがスタートとなっている。

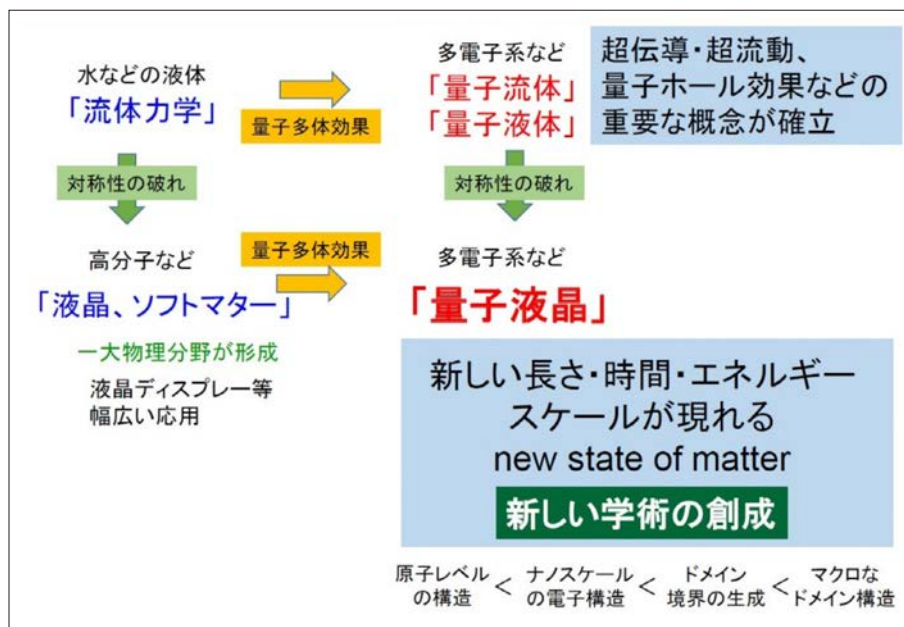


図2-1-1 「量子液晶」とは

量子液晶の例を図2-1-2に示す。下のSTM原子像はいわゆる正方格子であり4回対称性を持っているが、上の電子状態図では1次元的に整列したような形の電子状態が観測されている。これは結晶が持つ回転対称性を破る電子の一種の液晶状態と捉えることができる。図2-1-2は強相関金属系のいわゆる電荷液晶と呼ば

れる状態であるが、視野を広げてみるとそれ以外にも絶縁体やスピン系でも新しい物性が出ているものがある。また、超伝導状態でも対称性が破れている状態がある。電子の液体と固体の中間状態があり、ここに新しい液晶に類似した対称性の破れが出現することがさまざまな分野で見え始めている。

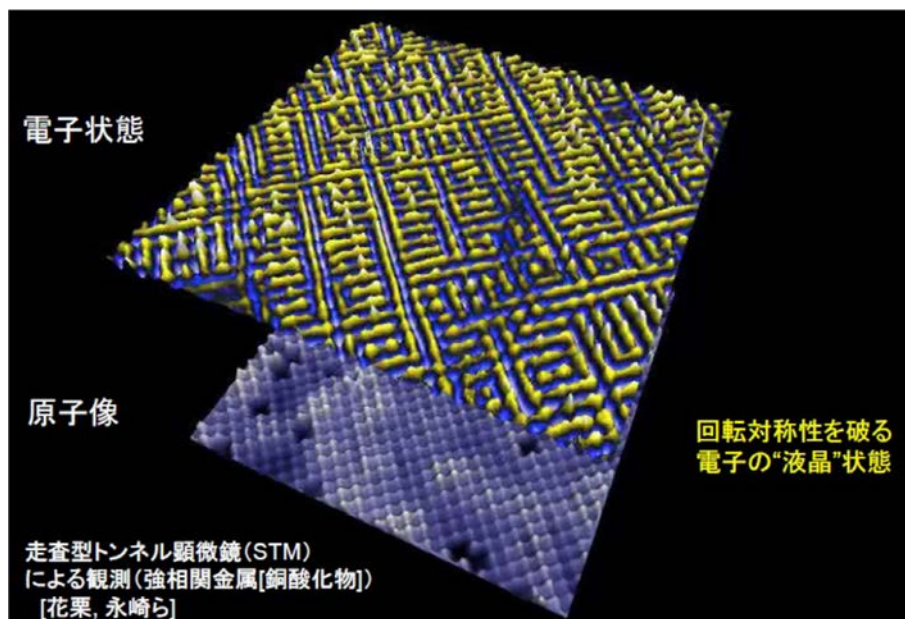


図 2-1-2 量子液晶の例

液晶は、分子自体が棒状や円盤状など形状異方性を持つことが対称性の破れの原因になっている。電子系は古典的には方向性はないと考えているが、量子力学的には、スピン、自由度、あるいは軌道自由度によって方向性を獲得することができ、量子的な液晶ができると考えられる。

古典液晶で重要なのは外部刺激に対して容易に変化することができることであり、この性質が液晶テレビなどに使われている。ここでは分子の回転運動が律速段階になっている。これに対し、電子状態自体を変化させることができれば、超高速かつ巨大な応答を期待できる。これらの系を「量子液晶」として統一的に取り扱うことを狙って、この学術領域を立ち上げた（図 2-1-3）。

新学術領域「量子液晶の物性科学」では、物質別ではなく、研究手法別で班分けをしている。「量子液晶物質の開発」「量子液晶の精密計測」「量子液晶の理論構築」「量子液晶の制御と機能」の 4 班の構成で、班内および班間のシナジー効果を目指しており、現時点で総勢 52 名の PI で運営している。

この新学術領域で、これまでの 4 年間で得られた成果の概要について紹介する。

まず、さまざまな新しい量子液晶が発見できている（図 2-1-4）。量子液晶の場合は下地の結晶格子に対してどの角度を向くかということがあるが、ある種の量子液晶物質では化学置換によって方向性を 45 度変えることができた。そのちょうど中間領域ではゆらぎが発生し、結晶格子の向きにかかわらず、どちらの方向でも向きを変えることができる、自由に制御可能な量子液晶を作ることができることを提唱できた。また、時間反転対称性を破った量子液晶では、原子間でマイクロなループ電流が流れ、極のない電磁石（アナポール）とよばれる状態が起きている証拠を得ることができた。超伝導状態の内部において、高磁場領域で超伝導の一種の対称性を破ったいわゆる FFLO 超伝導状態も見つけている。これは電子対が液晶的になっている状態である。さらに、ある種の超伝導体では、結晶格子の状態と電子の状態をデカップルすることで、量子液晶波を発見することができた。



図2-1-3 新概念「量子液晶」による新学術創成

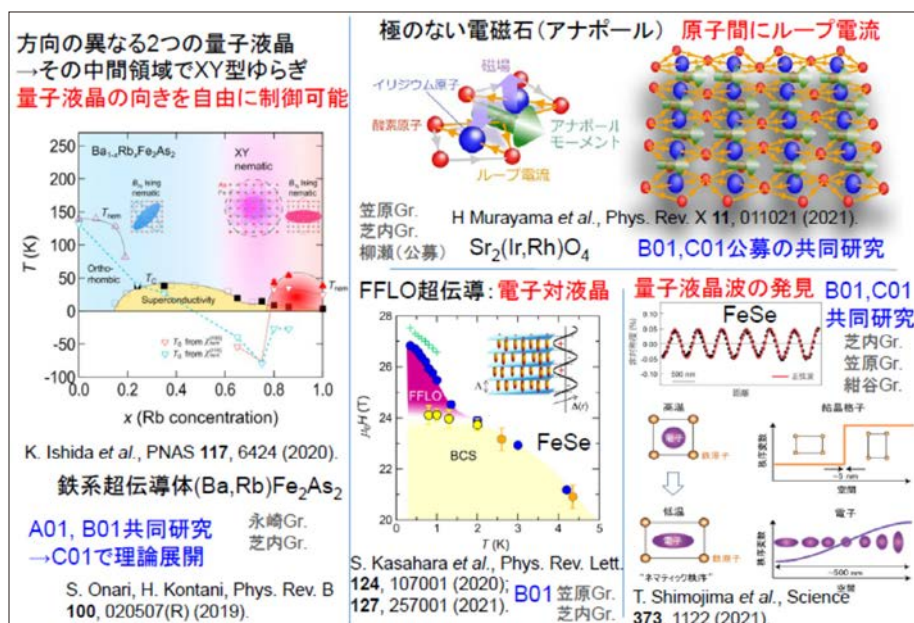


図2-1-4 新学術領域研究「量子液晶の物性科学」での成果①

このように新しい量子液晶状態がさまざまな物質で見つかってきているが、このような多様性をいかに普遍的に理解するか、理論的にも進展があった(図2-1-5)。一見全く異なると思われていた軌道秩序による量子液晶の状態と、前述のループ電流の状態は、どちらも非局所秩序の一種として理解できる。ここで空間反転対称性と時間反転対称性が守られるか破られるかの分類によって、異なる秩序が統一的に理解できるスキームができつつある。これによって、いまだにまだ見つかっていない新しい秩序も、理論的にによって提案されているので、次のステップとしてはその新しい秩序を実験的に見いだすことになると思われる。

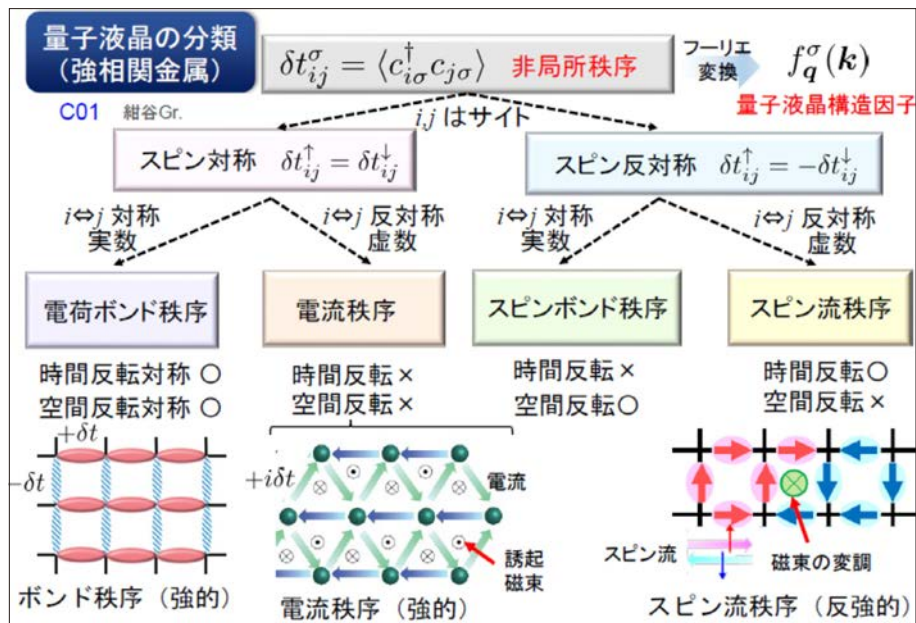


図2-1-5 新学術領域研究「量子液晶の物性科学」での成果②

理論的には、量子液晶状態を壊していき転移温度を絶対零度付近まで下げることにより量子液晶の量子臨界点をつくり出すことができれば、この近辺では量子液晶ゆらぎにより電子対結合力が増大することによって超伝導をつくり出すことができるという示唆が示されていた。この研究には日本もかなり重要な寄与しており、最近、メカニズムを実験的に実証することに成功した。図2-1-6の右下図の点線（Ts：超伝導相転移温度）が0Kになる近辺で、非常に強い磁場をかけても生き残る超伝導がドーム状領域に現れる。電子対結合力を見積もった結果、量子臨界点に向かって非常に増大することが分かった。これは、今まで知られた従来型の格子振動による超伝導、非従来型の磁気ゆらぎによる超伝導に次ぐ、新しい超伝導のメカニズムが量子液晶ゆらぎによって可能であることを示している。高温超伝導、あるいは室温超伝導に向かって新たな可能性を開拓したものである。

4つめとして、マヨラナ粒子に関する量子液晶の成果が挙げられる。マヨラナ粒子は今までは主にトポロジカル超伝導でいろいろ議論されているが、キタエフは磁性体の状態でもマヨラナ粒子が出てくるという理論的な示唆をしている。図2-1-7の右上のような蜂の巣構造を持つスピン系に対して、キタエフが提唱したある種の相互作用を持つような系をつくり出すことができれば、絶対零度までスピンが凍結しない、量子スピン液体というものが出てくると言われていた。ごく最近、蜂の巣構造を持つスピン系 RuCl_3 物質が高磁場下で半整数熱量子ホール効果を示すことが発見された。これは、マヨラナ粒子の自由度が普通の電子の半分しかないため、半整数ということがマヨラナ粒子のエッジ流の強い証拠となっている。さらに興味深いことに、磁場を上げていくと、熱量子ホール効果が消える。この高磁場領域は、回転対称性を破った量子スピン液体になっていることが最近明らかになった。回転対称性の破れによってトポロジカルな性質が変化して、エッジ流が消失して熱ホール伝導度が0になるということが分かった。まだ基礎研究の段階ではあるが、マヨラナ粒子のある種制御できる道筋が見えてきたと考えている。

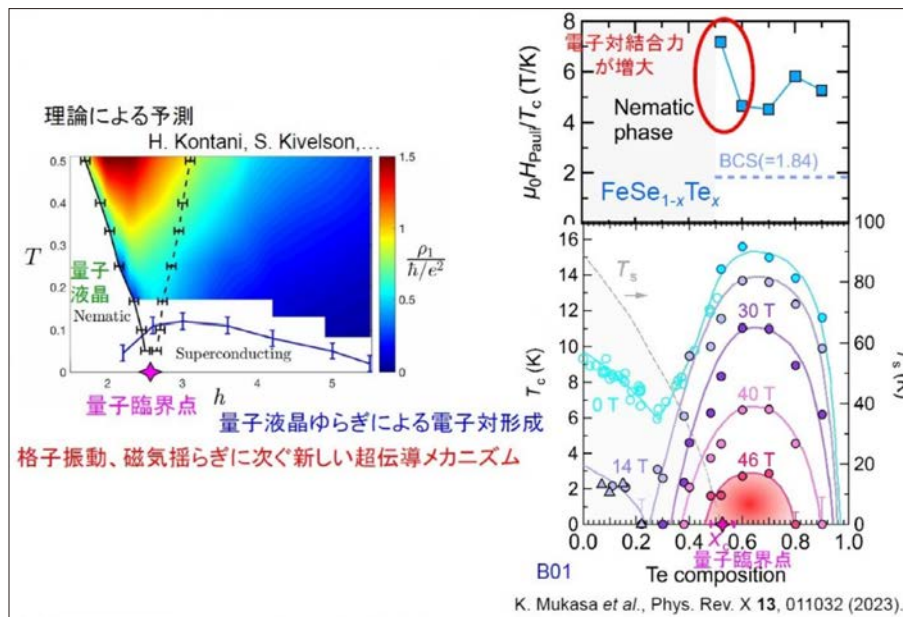


図2-1-6 新学術領域研究「量子液晶の物性科学」での成果③

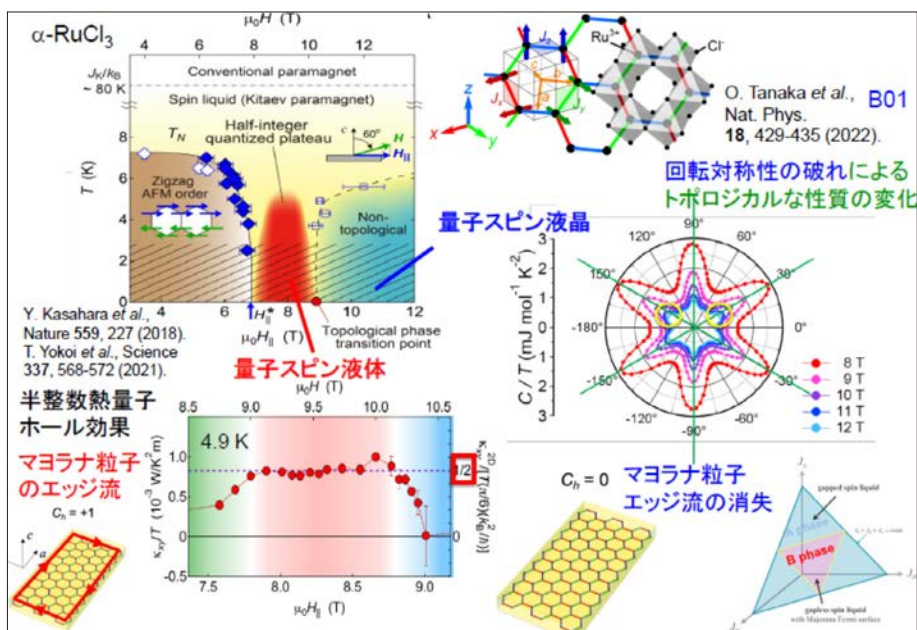


図2-1-7 新学術領域研究「量子液晶の物性科学」での成果④

この分野の国際的な認知度は上がってきている。最近、ICAM (Institute for Complex Adaptive Matter) を中心とした量子マテリアル研究に関する国際ネットワークができています。Quantum Materials Accelnet (QMAC : <https://www.icam-i2cam.org/accelnet>) と呼ばれるもので、北米 (アメリカ、カナダ)、欧州 (ドイツ、フランス、全ヨーロッパ)、日本での計10プロジェクトを結ぶスーパーネットワークである。日本からはわれわれの量子液晶プロジェクトが参加している。この取り組みでは、ポストドクの交流なども始まっている。

量子液晶の基礎物性研究は着実に進展しており、さまざまな量子液晶が発見され、普遍性の理解も進んでいる。さらに、量子液晶の揺らぎを使った新しい超伝導のメカニズムやKitaevスピン液体におけるマヨラナ粒子の性質の変化などが見つかっており、量子液晶の基礎学理の構築が着実に進んでいると言える。

図2-1-8に示すように、これからは、量子液晶をどのように応用に向けて結び付けていくかが課題である。応用に向けて必要な技術要素としては、ナノサイエンスや超高速光技術が挙げられる。これらで量子液晶を制御しながら、機能開拓をし、「量子液晶テクノロジー」を創出したいと考えている。

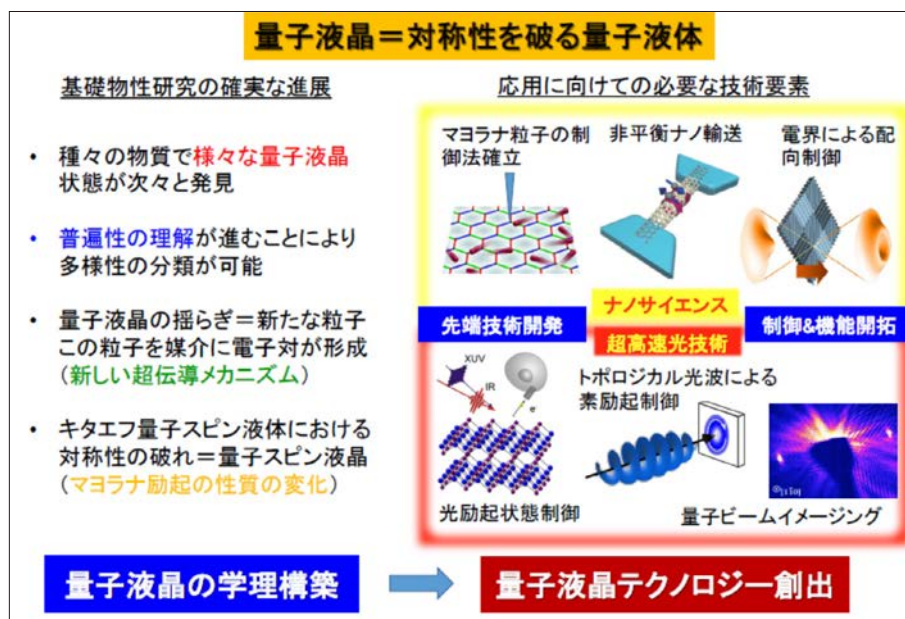


図2-1-8 まとめと今後の展望

【質疑応答】

Q：量子液晶とはどのような物質を指しているのか？

A：量子液晶は物質を指しているのではなく、固体中の電子状態を示すものであり「量子液晶状態」というのが正しい表現だと思う。金属は電子の液体状態といえ、電子が固まった結晶状態としては例えばモット絶縁体が挙げられる。電子の液体状態と結晶状態の中間領域に、流動性があり対称性が破れている電子状態があり、それを量子液晶と呼んでいる。新しい電子状態を取り扱うことにより、新しい電子の応答などを見出そう考えている。

Q：量子液晶の大きな特徴は、超高速で応答すること。電子系の応答であるので、室温で使えれば、電磁波に対する応答や相転移などを外場で制御することができるようになり、実用性が非常に出てくる。今回紹介された現象は低温で動作しているものが多いが、物理的なスケールと動作温度との相関は分かっているのか。室温下で制御できるような条件や環境はどの程度具体的になっているのか。

A：現時点では、現在量子液晶状態が見つかっているものの多くは低温である。ただし、現在は黎明期であり、いろいろな物質パラメータをチューニングすることによって、より高い温度を目指すということは可能だと思う。それによってスケールがどのように変化するかは非常に重要な問題ではあるが、今後の課題と考えている。

Q：量子液晶の探し方、指標のようなものはあるか。

A：量子液晶へは、さまざまなアプローチの仕方があると考えている。例えば、量子液体から始めて何らかの方法で対称性を破る方法や、量子固体と呼ばれている絶縁体的な物質を揺らぎによって融解していく方法がある。また、古典液晶に何か量子効果を加えるようなアプローチの仕方もあると考えている。さまざまなやり方があるので、それらを網羅的にやることで新しい量子液晶が見つけたと考えている。現在は大きな流れの初期段階であり、どんな多様性があるのか、その多様性はどのような普遍性で理解

できるのかを追求している状況である。これによって、指針が出てくるのではないかと期待している。

Q：温度以外の外力によって物性をスイッチするようなこともできるのか。

A：端的な例としては、一軸圧力で結晶に摂動を加えると、結晶と電子系との相互作用によって電子系も向きが変わる例がある。ピエゾ素子を使うことで一軸圧力が制御できるようになってきている。また、光による制御も可能だと考えている。

Q：量子液晶状態を観測する方法として、STM以外に何かあるか。

A：いろいろな方法があるが、一番簡単な例としては、一軸ひずみをかけて電気抵抗の異方性変化を観測する方法がある。例えば温度変化を取ることで感受率を測定できる。この方法で量子液晶になりやすさを測定することができる。磁性という帯磁率に相当する測定であり、これによって量子液晶の性質が明確になりつつある。

2.2 トポロジカル量子物質科学の現状と展望

村上 修一（東京工業大学）

「トポロジカル量子物質科学の現状と展望」というタイトルで、分野の背景を簡単に紹介した後、私が総括を務めているさががけの活動の紹介と、分野の全体的な外観を述べることにする。

トポロジカル相には様々なものが存在するが、昔から有名な例としては量子ホール効果がある。この現象は1980年代に発見され、非常に盛んに研究された対象であるが、2次元電子系のように2次元性が強い対象に非常に強い磁場をかけると、量子ホール効果というトポロジカルな現象が起こるというものである。

量子ホール効果は非常に盛んに研究され、ノーベル賞もいくつか出た非常に有名な分野となったが、初期には、このようなトポロジカル相は「強磁場下の低次元系」といった、ある種特殊な環境でしか実現されないと広く思われていた。しかし、2005年、2006年にトポロジカル絶縁体の理論予言がなされて、ゼロ磁場であっても実現できるトポロジカル相というのがあることが示された。このような相においては、内部は絶縁体であるが、表面もしくはへり、すなわち、2次元系ではへり、3次元系では表面が、金属状態になっている。さらに、その表面の金属状態も普通の金属とは異なり、上向き（アップ）と下向き（ダウン）のスピンの平衡状態で逆向きに定常的に流れているような変わった金属状態になっており、こういった奇妙な状態が、単一の物質で起こるということが、大きな驚きであった（図2-2-1）。

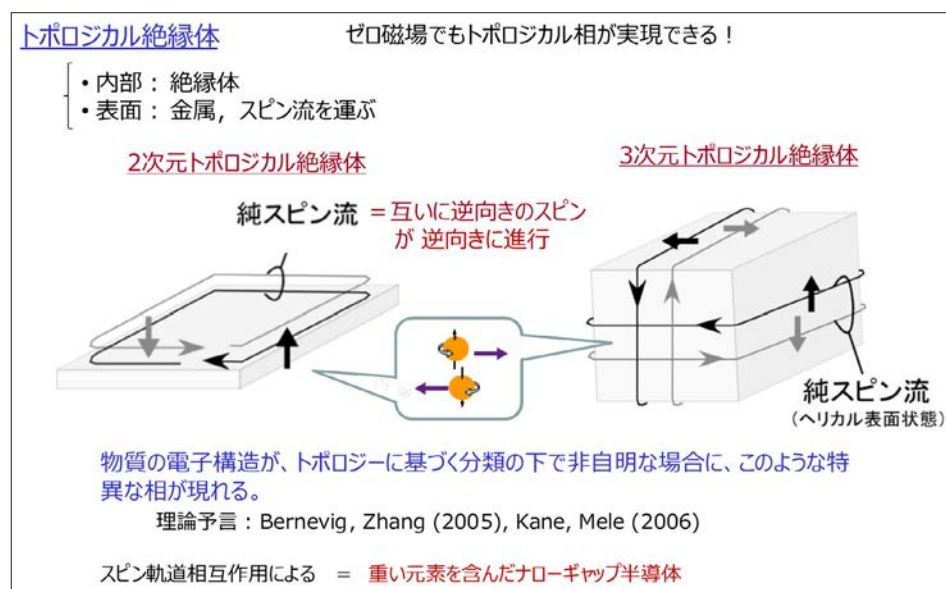


図2-2-1 トポロジカル絶縁体の理論的予言

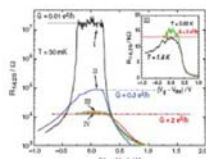
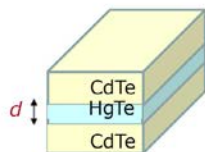
こういった物質が実際に発見されてきた際には、最初に、物質のトポロジーに基づいた電子状態の分類からその可能性が理論予言され、さらにスピン軌道相互作用の大きな重い元素を含んだものであれば、それが実際に確認できるであろうという指針が提供され、実際の物質群の発見につながった。一番有名な例は、水銀テルルの量子井戸におけるもので、「カドミウムテルルと水銀テルルで、図2-2-2のような量子井戸構造をつくれば、水銀が重い元素であるためトポロジカル相が実現しうる」という予言をうけて実験が行われ、試料のへりにアップとダウンが逆向きに流れるようなスピン流を担う金属状態があることが実際に確認されるという経緯を辿った。

2次元トポロジカル絶縁体

CdTe/HgTe/CdTe 量子井戸

理論: Bernevig, Hughes, Zhang, *Science* 314, 1757 (2007)

実験: König, *et al.*, *Science* 318, 766 (2007)



$$\text{量子化コンダクタンス} = 2 \frac{e^2}{h}$$

ビスマス2層薄膜

理論: Murakami, *Phys. Rev. Lett.* 97, 236805 (2006).

実験: Sabater *et al.*, *Phys. Rev. Lett.* 110, 176802 (2013)

Drozdov *et al.*, *Nature Phys.* 10, 664 (2014).

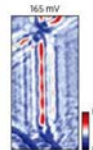
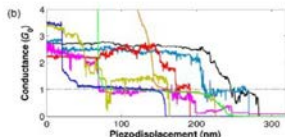
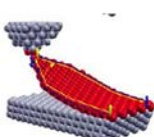
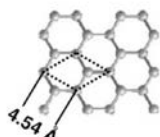


図2-2-2 実験的に確認された二次元トポロジカル絶縁体

私自身もこれより早い時期にビスマス2層薄膜について（トポロジカル相が観測できるという）理論予言をしており、物質的には不安定なのでなかなか実験が難しかったが、実際にそれが実験で実証されている。量子井戸でなく、ビスマスのような単一の物質であっても、トポロジカル相を出せるということが実証されたことになる。

その後には3次元のトポロジカル絶縁体も報告された。最初に紹介した量子ホール効果は、基本的には2次元系の効果であるが、トポロジカル絶縁体は3次元でもできる、すなわちバルクの結晶でもできるというのが大きな質的な違いである。最初の報告はビスマスとアンチモンの合金で、その後ビスマスとテルルの合金などでも確認され、さらに、その後続々と多数報告されているという状況になっている。これが大体2008年、2009年頃の状況である。

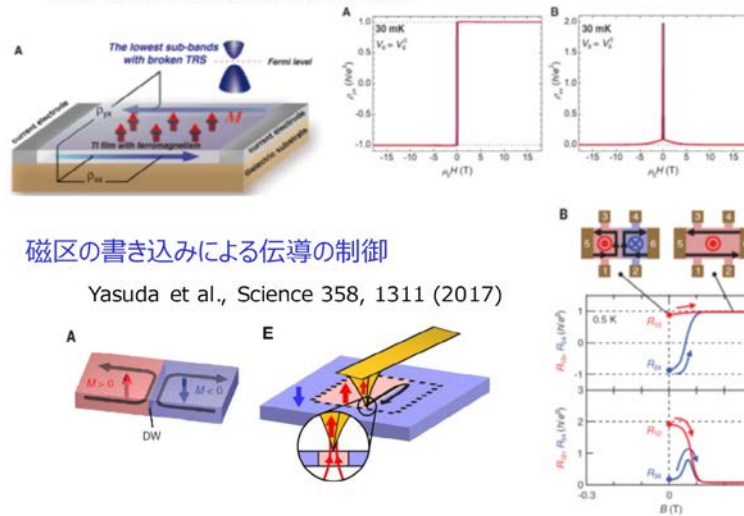
その他の進展としては、量子異常ホール効果の確認がある。最初に挙げた量子ホール効果の場合は物質に非常に強い磁場をかける必要があるが、 $\text{Cr}_{0.15}(\text{Bi}_{0.1}\text{Sb}_{0.9})_{1.85}\text{Te}_3$ のような強磁性体を作ると、ゼロ磁場で自発磁化を持てば、外部から磁場を加えなくても量子ホール効果が出ることが確認された。理論的には「こういったものがあるだろう」という提案が以前からあったが、これが実験で示されたということである。応用的な観点からは、図2-2-3左下にあるように、量子ホール効果のカイラルエッジ状態（へりを回るエッジ状態）が、磁化の向きによって時計回りか反時計回りに変化することを利用して、チップなどで書きこんだ磁化や磁区の情報を、電気伝導によって読み出せるということが理研の十倉グループの実験において示されている。

量子異常ホール効果

実験での実現

Chang et al., Science 340, 167 (2013)

強磁性体 $\text{Cr}_{0.15}(\text{Bi}_{0.1}\text{Sb}_{0.9})_{1.85}\text{Te}_3$ で量子異常ホール効果が初めて観測
 ← ずっと前に理論予想されていたが、実現されていなかった。トポロジカル絶縁体の研究の進展により実現への道が開けた。



磁区書き込みによる伝導の制御

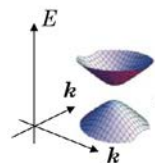
Yasuda et al., Science 358, 1311 (2017)

図2-2-3 量子異常ホール効果の確認

また、今までは絶縁体の話であったが、トポロジカル半金属という、ある種の金属もしくは非常にキャリアが少ない半金属のような状況でも、そういったトポロジカルな物質があるということが分かってきて、ここでは細かな説明はしないが、バンド構造に図2-2-4に示すような円錐状の構造や、伝導バンドなどの電子バンドが波数の空間で線状に縮退しているような構造があり得ることが示された。これらにおいては、縮退しているというだけではなく、ある種のトポロジカルな性質というものも存在する。私が2007年ごろから提案したものであるが、縮退点というのはある種のトポロジカルな性質、数学的な非常に特異な構造をしており、そういう特異な構造を持っていることで、例えばワイル半金属、トポロジカル半金属でしか絶対出ない変わった表面状態や、伝導で言うと線形磁気抵抗効果など、数多くの効果が予想されているという状況にある。

トポロジカル半金属

電子のバンド構造において、バンド同士が近づくと避けあい anticrossing を形成し、縮退しない



→ しかしある場合においては電子の波動関数のトポロジーに起因して、anticrossing をせず縮退する。

=トポロジカル半金属

(1) Dirac半金属: 2重縮退したディラックコーン

(2) Weyl半金属: 縮退していないディラックコーン

(3) nodal-line半金属: ライン状に縮退

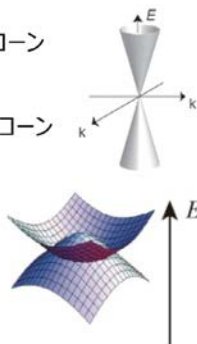


図2-2-4 トポロジカル半金属

その後も、これまでに述べたいくつかの予言に基づいて、物質を1個1個探していく研究が非常に盛んに行われてきた。物質を1個1個探すことはなかなか大変だが、その後に理論的に多くの進展があり、うまくやるとかなり高速に探せるということが分かってきた。そこで、材料・物質のデータベースと理論的なスキームを結合して、高速にトポロジカル物質を探索しようという研究が、Nature誌に3本掲載された。ほとんど同じ時期に、三つの研究グループが同時並行で同じような研究を出したというのが、近年の重要な進展になっている。

その中の一つの論文では、データベースで2万7,000ぐらいの物質を調べると、その中で27%がトポロジカル絶縁体ないしトポロジカル半金属であったということが述べられている。トポロジカル絶縁体、半金属というのは21世紀に入ってから提案されたものであるが、それがいわば見えていなかっただけで、実は身の回り、よく知っているものにもこういった物質というのは多くあったということになる。実は研究対象としての可能性は非常に豊富にあるということになる。

あと重要な進展としてはメタマテリアルがある。トポロジカルな構造というのは、電子系に限らずフォトンクス、フォノンクス、アコースティックなど、様々なものに应用できるため、例えば電磁波については、フェライトの棒を周期的に立てた構造に、マイクロ波を入射すると、先ほどのトポロジカル絶縁体のようなものができるとことが実験的に示されている。マイクロ波が内部にはバンドギャップのために侵入しないが、そのへりをフェライトロッドの磁化の向きによって、時計回りないし反時計回りのみ伝搬するというサーキュレーターみたいなものが実現されている。

さらに最近、Topological insulator laserという応用も提案されている。これは、トポロジカル絶縁体のエッジ状態がトポロジカル保護によってロバストであることを利用してレーザー発振に応用しようというものである。これは実験的にも確認されている。

以上、非常に大急ぎのレビューとなったが、トポロジカル分野には、このような様々な進展があり、多くの分野と非常に密接に絡んでいるということを強調したいと思う。

ここで、さきがけ「トポロジ」領域について軽く説明をさせていただく。2018年からさきがけ「トポロジ」領域で私は研究総括を務めている。領域発足時の文科省資料では「トポロジカル物質はいろいろな分野に波

及効果があり、集中して研究を行う機運が熟成してきた」といったことが書かれており、そこで「トポロジカル材料科学の構築による革新的材料・デバイスの創出」という戦略目標が公表された。細かいことは省略するが、量子物質の色々な分野に横串のようにトポロジーのコンセプトがある種普遍的に登場してきており、そういったものをまとめてCREST・さがけ領域で扱おうということになっている。

これらはもう既に領域発足して5年ぐらい経過しており、1期生は卒業して、今年度2期生卒業という段階にあるが、図2-2-5の領域マップになっている。様々な専門分野、例えば2次元系の井手上先生、張先生、スキルミオンの関先生、ワイル半金属の打田先生、マヨラナ的那須先生、磁性体の第一原理の速水先生や野本先生、トポロジカル理論の渡邊先生、塩崎先生などの研究者が参加している。時間の関係で全員は紹介できないが、とにかく強調したいのはいろんな分野に横断的にあるコンセプトで、しかも対象は違っていても、ある種言語が共通しているため、いろんな人といわばインタラクションすることで、新しい着想に基づいて研究を進行していただけているというふうに思っている。国際的な活動も行っており、ちょうど先週、プラハでワークショップを行い、海外の研究者、第一線の研究者ともいろいろ議論を進めているところである。

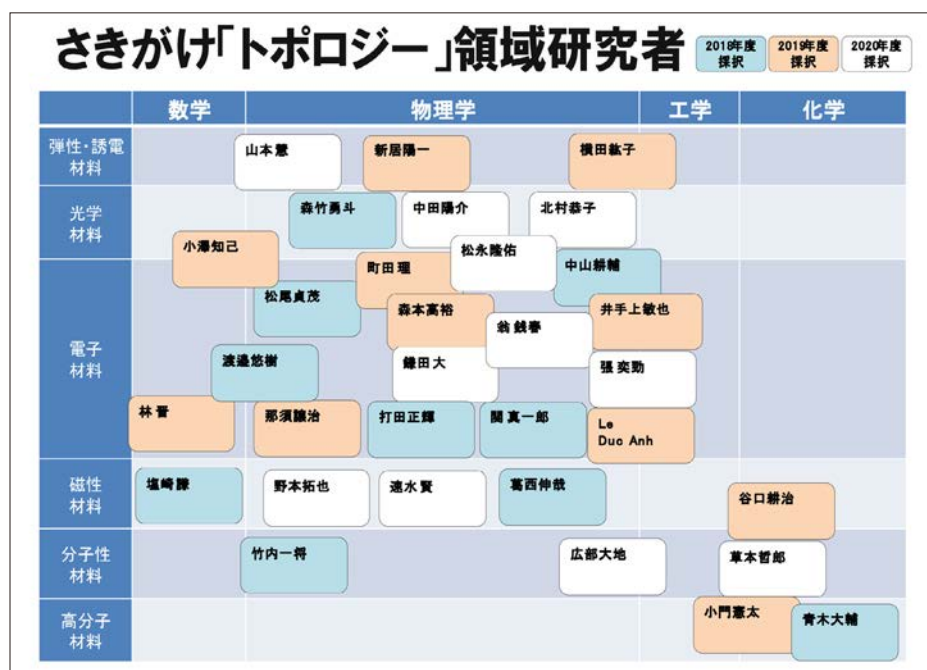


図2-2-5 さがけ「トポロジー」領域研究者

最後に最近の進展について少し軽く触れる。物質探索については飛躍的に進展している。また、特異物性の探索もかなり進んでおり、アクション絶縁体、ワイル半金属の線形磁気抵抗、トポロジカル表面状態、ンジ状態と呼ばれるようないろいろな変わった状態の探索も進んでいる。他分野との境界にも様々な進展があり、電子相関を加えた場合や、低次元系の積層構造でトポロジカルな性質を出す物質などが研究されている。応用に近い面に関しては、量子コンピュータ応用を目指したマヨラナフェルミオンの研究や、メタマテリアルの研究が進められている。

トポロジカル物質科学分野の最近の進展

- トポロジカル物質（トポロジカル絶縁体・トポロジカル半金属）
 - 物質探索が飛躍的に発展した
- トポロジカル物質の特異物性の探索
 - 前項により、特異物性探索に適した物質の探索が進み、また良質な結晶の合成技術も実験技術も進展した。
例：アキシオン絶縁体：量子ホール効果、量子化電気磁気効果
 - ワイル半金属の線形磁気抵抗
 - トポロジカル表面状態等
- 他分野との境界領域の探索
 - 電子相関
 - 低次元物質（ファンデルワールスヘテロ構造など）
 - 超伝導でのマヨラナフェルミオン実現 → 量子計算への応用
- メタマテリアル系への応用
 - （電子系の）トポロジカル物質分野から派生して大きく進展した
- 磁気スキルミオン
 - 磁性体物質の探索
 - 磁性体の種類によって多様な磁気構造(meron, skyrmion string, bi-skyrmion, ...)

図 2-2-6 トポロジカル物質科学分野の最近の進展

これまで述べてきた状況から、この分野を私なりに分析すると、分野の特色としてとにかく非常にいろんな分野に広くまたがるような研究であるということが一番強調したい。今回のワークショップは「応用面も少し見据えてはどうか」というのが主題だと思うので、三分野に分けて状況を話す。

メタマテリアルについては、ある程度系の設計や実現が比較的簡単なため、応用的な意味ではかなり進んでおり、アプリケーションへの糸口、例えば先ほどの Topological insulator laser のような話が多少見えてくる気がする。

一方、電子材料のほうは、材料候補はだいぶ分かってきたが、良質な試料作成が困難なものも多く、現時点では「応用はこれとこれ」というような形で明確化している段階にはまだなっていないように思える。このこれから数年とかで方向性が見いだされていけばいいなという感じの段階に見える。

あと比較的有名な、マヨラナフェルミオンと量子計算については、理論的なことがある程度分かっている、あとはやるだけという感じにはなっているが、試料作成に要求されるレベルがかなり高いので、実験的にかなり難しい点が残っていると思う。欧米など、かなりお金を投資しているところもあるので、キャッチアップしようとしている研究者もいるが、なかなか難しい分野であると感じる。

【質疑応答】

Q：トポロジカル絶縁体に、2次元のものや3次元のものがあるという話があったが、2次元での性質と3次元での性質の間に相関があるのか。

A：デザインの戦略として基本的に重い元素が入っているということが重要だが、どの物質が2次元のトポロジカル絶縁体になって、どの物質が3次元になるかというのは結構ばらばらである。物質によっては3次元だとトポロジカル絶縁体だが、薄膜にするとそうでなくなるとか、その逆であったりするものも結構あるので、一概には言えない。ただ、計算では、バンド構造がよく分かっているものについては全て分かっている状況になっている。

Q：電子材料について試料作成が困難であると言われたが、具体的にどんな困難があるのか。

A：例えばビスマスセレンとテルライドというのは一番よく研究されている物質で、物質として作るのは非常に簡単だが、トポロジカル絶縁体にしようするとバルクは本当に絶縁体になくてはならない。と

ころが、こういった物質群は普通に作ると、真性半導体ではなく勝手にn型やp型になってしまう。それを補償して、フェルミレベルをバンドギャップ中に持ってこようとするとかかなり難しい材料が多い。

Q：今の質問は資料作成の困難についてだが、講演では測定に関しての困難についても言及されていた。それはどんなものか。

A：測定で言うともまずは分解能がある。例えば、マヨラナフェルミオンから出てくる信号とそれ以外の不純物なり本質的でないものから来る信号等を精度良く分離しようとする、STMなどのレゾリューションがかなり必要で、そこはまだ難しいようだ。ただ、測定のレゾリューションというよりは、試料の質のほうがかくからの問題で、試料の質の制御というほうが今の大きな課題になってくるかなと感じている。

2.3 量子デバイス応用を目指したダイヤモンド成長技術開発

寺地 徳之（NIMS）

ダイヤモンドはIV族半導体で、バンドギャップが大きい、破壊電界強度が高いという特徴を有し、これまでパワーデバイス応用研究が進められてきた。私達はダイヤモンドを作るところの高品質化に取り組んでいたが、量子の風が吹いてきてダイヤモンド窒素-空孔中心（NVC）の研究に取り組むようになった。

図2-3-1は上がパワーデバイス、下がNVCに関する論文数である。2009年あたりからNVCの論文数が増加している。この中に緑色は、Nature誌、Science誌、Physical Review Letters（PRL）誌の論文数を示しており、比較的IFが高い論文誌にかなりの数が掲載されている。

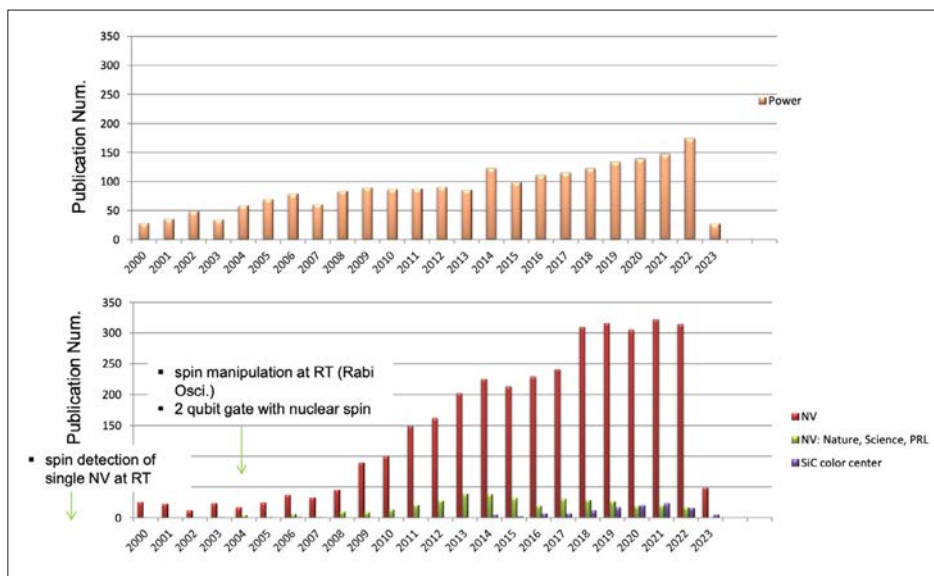


図2-3-1 量子デバイス、パワーデバイスに関する論文出版数の推移

ダイヤモンドには不純物が入り難いが、炭素（C）の横に窒素（N）が入って色中心を作る。ダイヤモンドNVCは古くよりよく知られた色中心であるが、これが量子機能という点で注目されてきた。1997年にドイツのシュトゥットガルト大のJörg Wrachtrup教授らが、1つのNVCを光検出磁気共鳴（ODMR）という光を使った電子スピン共鳴（ESR）で検出に成功したことがきっかけとなっている。2004年には、室温でマイクロ波の印加によって、NVCのスピン状態のラビ振動を室温で検出できることや電子スピンと核スピンの量子ゲートをつくることができることわかり、室温で比較的簡単にセットアップできることから、多くの研究者がこの研究に参画してきた。

NVCの特徴を図2-3-2に示す。室温でスピンコヒーレンス時間が数msと非常に長いだけでなく、スピン状態の初期化・制御・読み取りをマイクロ波と光を使ってできることがNVCの利点である。つまり、スピンを制御しやすい、スピンを読み取りやすいということである。図2-3-2の左下はNVCの電子状態の模式図を示している。通常、基底状態はゼロ磁場で分離しており、磁場が印加されたときには $|0\rangle$ と $|-1\rangle$ あるいは $|0\rangle$ と $|+1\rangle$ という2準位系として扱う。これに緑色のレーザーを照射するとNVCは励起されて最終的に赤く発光する。 $|+1\rangle$ または $|-1\rangle$ の状態にあったものは励起と緩和の過程を経て最後は $|0\rangle$ になるので、緑色のレーザーを照射するだけで全て偏極される。その後、黒い上下矢印に対応する2.87 GHzのマイクロ波を照射することでスピン状態を制御できる。 $\pi/2$ パルスをかければ重ね合わせた状態にできる。ブロッホ球のxy平面内

で測定したい外界と相互作用させた後に、もう一回プロット球の中でz軸の側に倒した後の蛍光強度を調べる。この時の発光強度がスピン状態に対応する。

これを量子ビットとして使えば、量子計算や量子通信ができるが、最も早期に実現できそうな出口が量子センシングである。既に、量子センサとして幾つかの応用の取り組みがされており、光・量子飛躍フラッグシッププログラム（Q-LEAP）で行われている弱磁場計測がその1つである。EVのモーターのバッテリーの温度や電流モニタリングなどへの応用を目指した研究開発が東工大を中心に行われている。2つめは、ナノ空間核磁気共鳴（NMR）というダイヤモンドの表面から深さ100 nm以下のところにNVCをつくり、この表面に付着している分子の核スピンの情報を読み取る方法である。スピンを動的に外界からデカップリングすることで求める核スピンのみの情報を得ることができる。センサとして機能するNVCが原子レベルなので優れた空間分解能を有する。3つめは、Q-LEAPの量子生命Flagshipプロジェクトで行われている生体計測である。例えば、線虫に非常に小さいNVCを餌とともに取り込ませて線虫内のNVCの場所や方向を検出することで消化活動の観察が可能である。また図2-3-2の右下はハーバード大のグループがNVCを使い鉱石中の元素を分析している例である。

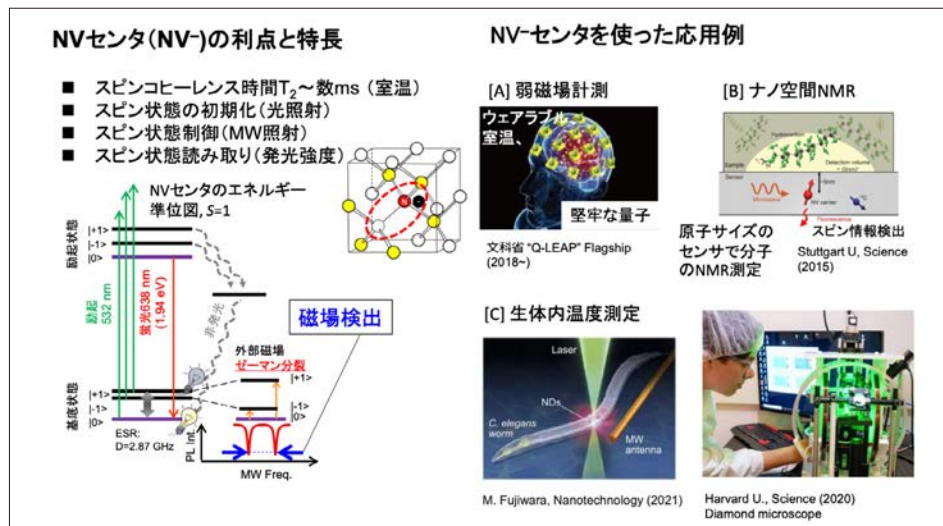
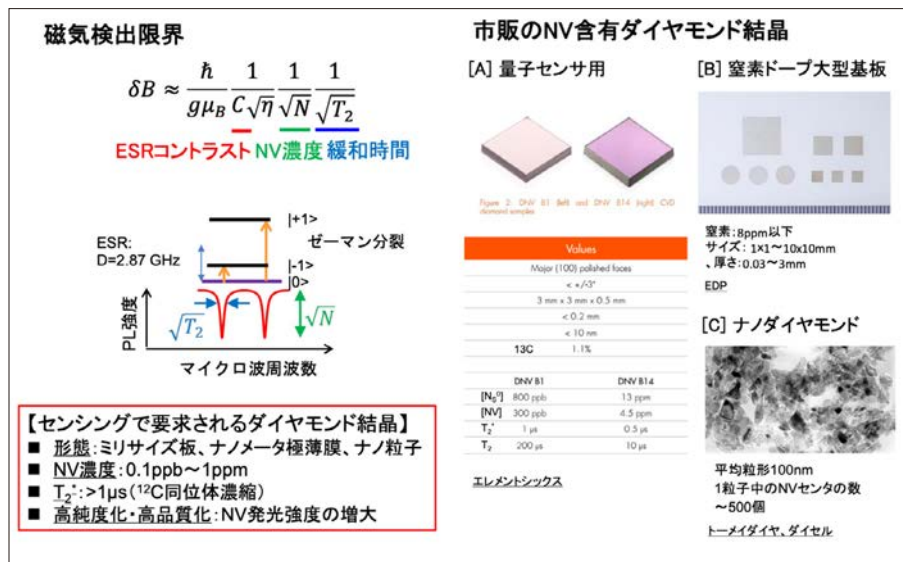


図2-3-2 ダイアモンドを使った量子センサデバイス

量子センシングでは、まずセンサを初期化してスピンの状態をそろえておき、その状態で測定対象とのみ相互作用させた際のスピンの位相のずれを測定する。NVCの場合は室温で可能であることがポイントである。試料に緑色のレーザーを照射し赤色の発光を観察する。スピン状態はマイクロ波で制御する。パルス計測を行う際は、レーザーに音響光学変調（AOM）を入れる。AC測定といって、核スピンを見たいという時は、求めたい核スピンと同じ周波数で π パルスを印加してNVCを振動させると、核スピンからのみコヒーレンスが起るようになる。AC計測はDC磁場測定には使えないが、測定したい磁場が周期的にMHzで回転しているようなものであれば高感度で測定できる。

図2-3-3に示すように、感度はNVC濃度とスピン緩和時間で決まる。センサ材料として、サイズはmmからnmのオーダーまで、NVC濃度は弱磁場センシングには0.1~1 ppmが求められる。 T_2^* という積算する時間については1 μ s以上が望ましい。もちろん、これらの条件を見たすにはダイヤモンド結晶の高純度化・高品質化が必要である。従来、市販の材料は高温高压合成や化学気相成長（CVD）で作られた機械切削用や研磨用が主であるが、最近ではエレメントシックス社から量子センシング用の板材が販売されている。



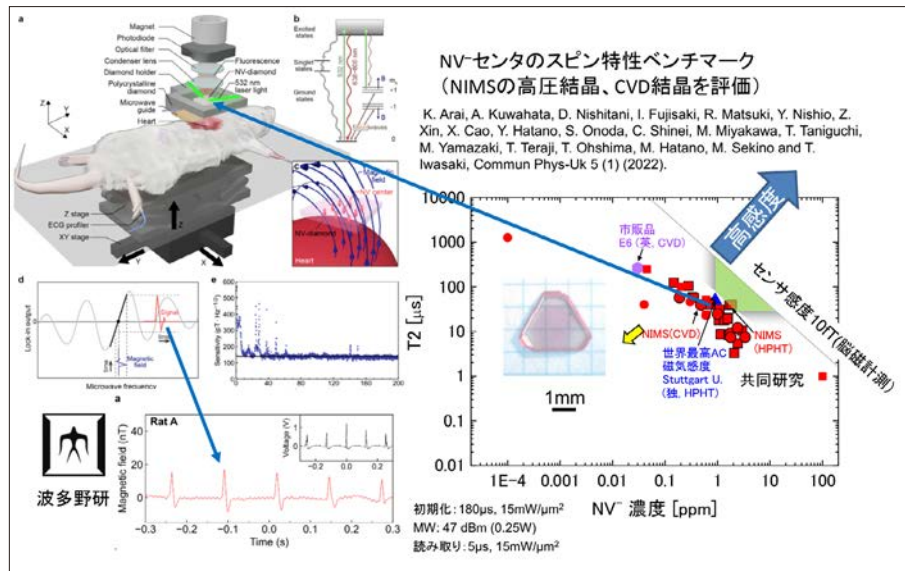


図 2-3-4 磁気検出感度と市販の NV 含有ダイヤモンド

最後に、横浜国立大と共同で研究している量子通信への応用を紹介する。光をそのままファイバーの中を飛ばすと 100 km ぐらいが限界なので、東京-大阪間で量子通信しようとする、量子中継器が必要である。その量子中継器としてダイヤモンド NVC が使えると考えられおり、私たちだけではなく、オランダのデルフト大でも類似の研究を行なっている。量子中継では量子もつれを使うため、発光波長が完全に同じ NVC が 2 つダイヤモンドの中に形成されている必要があるという非常に厳しい条件に対応できる試料を作っているところである。

【質疑応答】

- Q : T_2 と NVC の濃度の関係で負の相関があるようだがこれは NVC 同士が相互作用するからか。負の相関を決めているのは何か。
- A : ダイヤモンドの中に入っている常磁性欠陥の 90% ぐらいが置換された N であり、その 10% ぐらいが NVC になるので T_2 を決定している常磁性欠陥のほとんどは置換サイトで N になっている。 T_2 と濃度の積が高いほどセンサとして高感度になるので、N をどんどん NVC にすればいいが、そうするとスピン制御できる NV^- が NV^0 になって使えなくなる。現状では 30% ぐらいを NV^- にして最高感度が得られている。
- Q : HPHT 法と CVD 法でダイヤモンド結晶を作っているが、N がどこに入っているかというのは分かっているか。
- A : ほとんどの N は置換サイトに入っている。例えば HPHT 法では NVN という形態を取っていたりとか、CVD 法は 10% ぐらい NVH という形態を持っていたりするので、私も最初この研究を始めた際には、HPHT 法と CVD 法で違うと考えていた。しかし、図 2-3-5 の丸のプロットが CVD 法で、四角のプロットが HPHT 法であるが T_2 では現状大きな差はない。 AC 計測から DC 計測に向かうためには、評価基準を T_2 ではなく T_2^* に変える必要があり、その時に 2 者で違いが出るかもしれない。
- Q : NIMS ではこれをさらにナノ粒子にすることをやっているか。
- A : CVD 法でつくったものを粉碎して 100 nm ぐらいの大きさにして特性を評価している。現状、ナノダイヤモンドは砥粒みたいなものであり、様々な純度、 T_2 、凹凸した表面等、課題が多い。
- Q : 図 2-3-4 の左上の図についてマウスの胸を開けて心臓にダイヤモンドを接触させているのか。デバイスの大きさはどのぐらいか。

- A：ほとんど接触している。センサの大きさは1 mm～数mm。デバイス全体の大きさはハンドマイクよりちょっと大きいぐらい。将来的には、既に乳がん診断等の医療現場で使われているハンディ型の磁性用の素子と同じような大きさになる。
- Q：図2-3-4のダイヤモンド試料の写真をみると真ん中でNVCが濃く周辺が薄く見える。NVCの濃度の均一性重要か。
- A：HPHT法では成長セクターといって成長する方向が違くとNの取り込み率が違うので、どうしても不均一性が出る。この試料の場合、真ん中の濃いところをセンサに使うことができる。マウスの心臓等の弱磁場計測に使う場合はほぼ結晶全体を使っており不均一性は問題にならない。ただし、10 nmぐらいの距離で個々のNVCを形成して量子もつれを起こすような量子通信や量子計算では問題になるかもしれない。
- Q：量子もつれの条件としては距離が重要なのか。
- A：距離とあと T_2 が重要。 T_2 が長ければ、距離が長くても量子もつれが起きる。
- Q：量子もつれが起きたことを実験的にどうやって確認するか。
- A：電子-電子二重共鳴（DEER）法で確認する。片方をオペレーターとしてスピン状態を変化させると、もう一方のターゲットのスピン状態が変化すれば量子もつれが起きていると判断する。
- Q： T_2 の理論的な限界は何が決めているか。
- A：縦緩和 T_1 で決まっている。また、操作性を上げるために表面付近にNVCを作ると表面付近の常磁性欠陥によってデコヒーレンスが起こってしまうが、奥深くのNVCは比較的長い T_2 を持っている。

3 | 量子機能の制御

3.1 量子マテリアルのデバイス物性

岩佐 義宏（理研）

前世紀に行われていたデバイス研究は、SiやGaAsなどの典型的な半導体のような限られた物質を対象としており、物質開発的な研究とは一線を画していた。一方今世紀のデバイス研究は、どのような材料であっても単にバルクの物性を測定するだけでなく、デバイスを製作してデバイス物性の測定まで行う場合が多くなり、物質開発とデバイスの距離が非常に近い、あるいはほとんど一体化するようになってきている。例えばトポロジカル材料の輸送特性の研究はすべてデバイスを対象に行う必要があり、基礎物性とデバイスは切っても切れない関係になっていると言える。

超伝導などの量子状態を、電界効果トランジスタ（FET）を用いて電子濃度を変えることによって制御する技術もすでに確立している。電界誘起超伝導について言えば、図3-1-1に示すように大きく分けて2つの方法が知られている。左は、ゲート絶縁膜としてイオン電導性のある電子絶縁体を用いる方法であり、非常に普通のFETよりも2桁近い高密度のキャリアを蓄積できることが特徴で、イオンゲート法とも呼ばれる。右は、キャリア密度は通常のFETと同じであるが、半導体を2次元物質など特別な物質に置き換える方法で、単層グラフェンをひねって重ねたツイスト2層グラフェンが大変有名である。両者ともゲート電圧を印加しないと母物質は超伝導ではなく、ゲート電圧印加によってキャリア数を変えることで超伝導を誘起するという意味では、同じである。

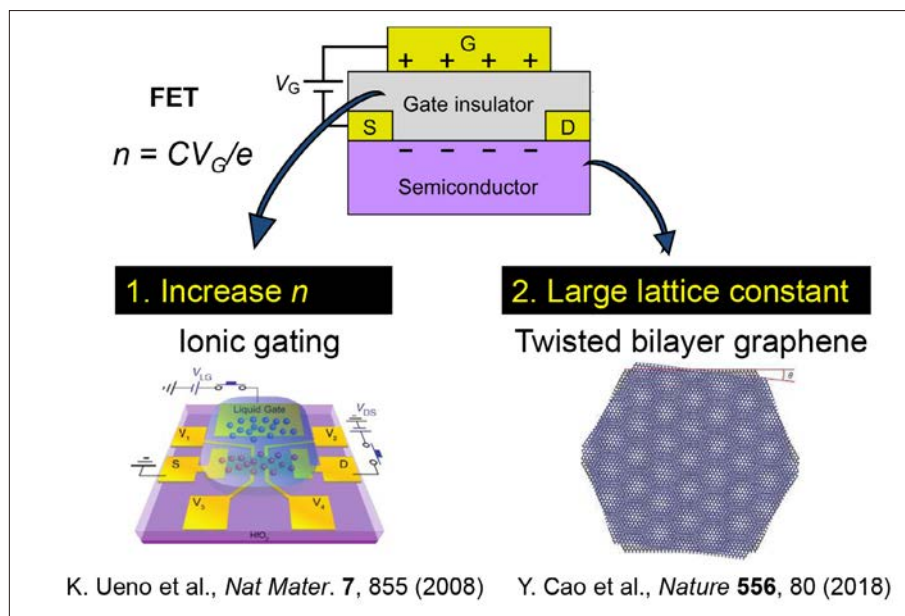


図3-1-1 ゲート誘起超伝導への二つの方法

図3-2-2は、イオンゲート法によって超伝導化するMoS₂（左）と、ツイスト2層グラフェン（右）の超伝導相図の比較を示す。MoS₂の超伝導ドームは一つであるが、ツイスト2層グラフェンは多くの超伝導ドーム

を持っていることがわかる。横軸のキャリア数を見るとMoS₂が10¹⁴オーダのであるのに対しツイスト2層グラフェンは10¹²ぐらいで、2桁ぐらいキャリア数が異なっている。しかし、キャリア数ゼロから少し右に向かって電子がドーピングされた領域を見ると、両物質は非常によく似た超伝導ドームの立ち上がりを示しており、低いキャリア数領域で超伝導が立ち上がる際の物理に共通点がある可能性がある。このような電界による量子相制御は超伝導に限ったことではなく、強相関酸化物における金属絶縁体転移や巨大磁気抵抗効果などのゲート電圧制御はすでに実現されており、その他の様々な量子相にも応用できる可能性を強く示唆している。

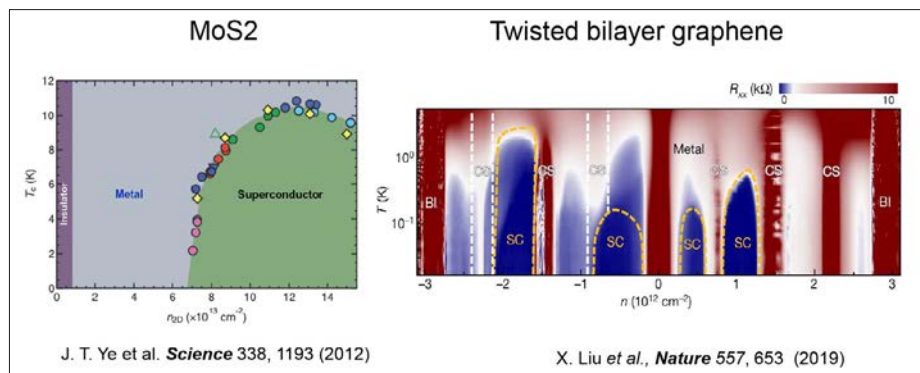


図3-1-2 電気二重層トランジスタ（EDLT）とツイスト2層グラフェンの相図

電気化学的なデバイスによる物性制御はいまだ発展途上で、図3-1-1左図の静電的な電荷蓄積だけではなく、物質内部にLiイオンやプロトンを挿入するインターカレーション法も有用である。図3-1-3は、東北大の塚崎らが考案した、原子層薄膜を一枚一枚エッチングしてデバイス化するという方法である。液体に浸し電圧をかけるとゆっくり溶けるので単原子層の材料作製が可能で、FeSeは原子層薄膜にすると超伝導になることが発見されている。

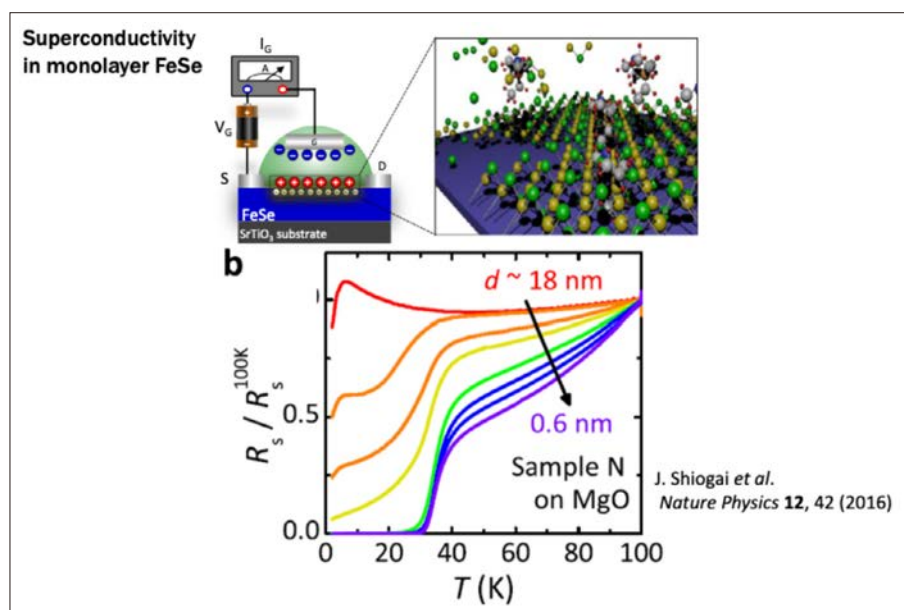


図3-1-3 電解エッチングによる電気二重層トランジスタ作成

FeSe薄膜は薄くすればするほど熱電エネルギーの変換効率の指標である ZT が非常に大きな値になることが分かっている。 ZT は、温度 T 、ゼーベック係数 S 、電気伝導度 σ および熱伝導率 κ を用いて $ZT=(S^2\sigma/\kappa)T$ と表され、この ZT が大きい物質では大きな電力を取り出せると期待されている。現状、FeSe薄膜では κ が測定されていないが、バルクの κ の値を使うと、 ZT は室温での値1.5から低温になると16ぐらいまで増強され、異常に大きな値を示すようになる。非常に薄い膜なのですぐに実用化することは困難だが、現状の実用材料に比べてかなり大きな値である。

次に、非線形伝導現象を2つ紹介する。一つ目は光の電場の2次に比例する光電応答であるバルク光起電力である。まず、バルク光起電力とは、p-n接合を必要とせず、反転対称性の破れた結晶であればバルクのみで発生する光起電力のことである。機構がp-n接合の場合と異なるなど、原理的にShockley-Queisser limit (SQ 限界) として知られるエネルギー変換効率の限界(シリコンで約29%)がない。最近では、バルク光起電力のメカニズムとしてシフト電流やインジェクション電流といった量子力学的なものが提唱されており、近年大きな注目を集めている。このようなp-n接合を必要としない光起電力の研究がバルクを中心に進展しており、理論的な解析も多数なされている。

ナノマテリアルでは、例えば通常の遷移金属ダイカルコゲナイド1層では非常に弱い光起電力しか示さないが、図3-1-4に示すように、丸めたり別の物質と重ねたり引っ張ったりして、対称性を崩すとバルクの値よりも何桁も上がることがある。バルクと異なって対称性や形を変えることによって特性を制御できる点がナノマテリアルの良さである。

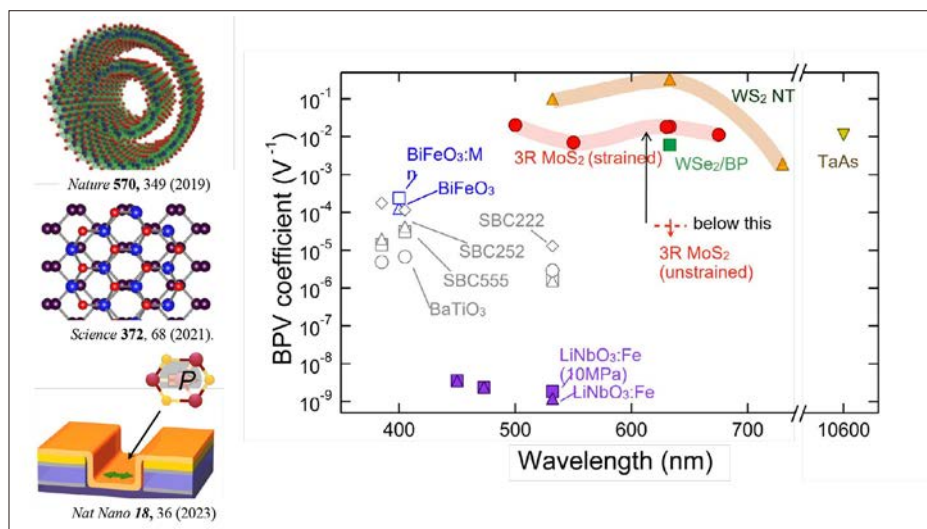


図3-1-4 ナノマテリアルの光起電力

次に、非線形伝導現象の二つ目として、非相反輸送現象を紹介する。それは、図3-1-5のようにある種の結晶に電流を流す場合、赤の矢印の方向に流す時と、青の矢印の方向に流す時で、電気抵抗の値が変わるという現象で、この現象も通常はp-n接合ダイオードで実現される整流現象の一種である。この現象の発現には、空間反転対称性がない結晶であることが要請されるが、結晶はp-n接合と異なり並進対称性を有するので、時間反転対称性がある場合(ゼロ磁場)、はこの現象は出現しない。しかし、今世紀の初めにフランスのグループが磁場をかけると非相反輸送現象が出現することを発見し、2017年に東大の井手上らはラッシュバ型半導体の非相反輸送現象が、その電子状態と直結することを示した。この発見で大事なのは、非相反輸送現象が、ラッシュバ分裂というバンドパラメータだけで記述できるという点である。逆に言えば、非相反輸送現象を測定するとバンドパラメータが求まるということで、非相反輸送現象の重要性が初めて認識された。

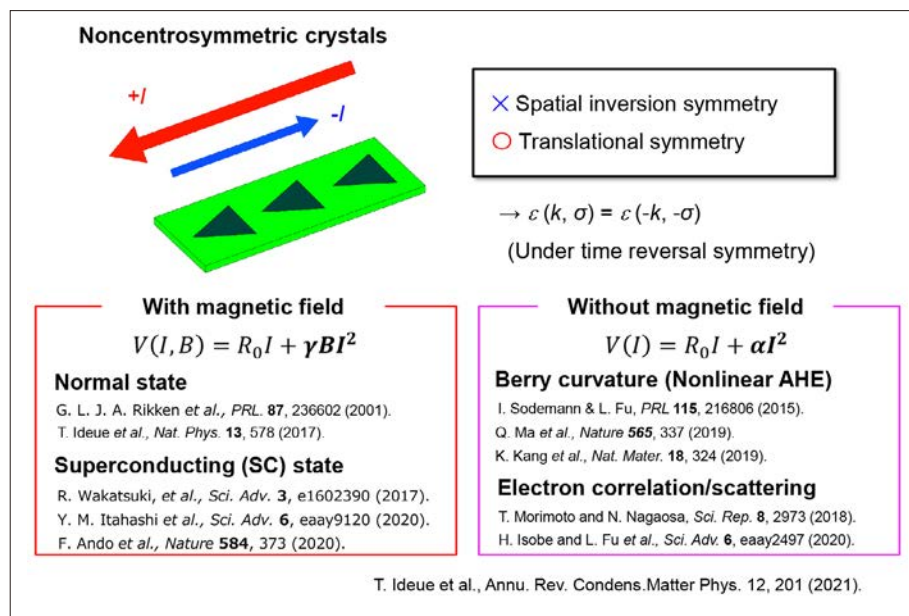


図3-1-5 非相反輸送現象

一方、磁場のない状態では、電流とは垂直の方向に非線形性ホール電圧が発生することも発見され、非線形ホール効果、あるいは非線形異常ホール効果と呼ばれている。これは極性を有する物質特有のバンドパラメータであるベリー曲率双極子による説明がなされており、この場合もバンドパラメータと非線形輸送現象が直結していることを示している。例えば、磁場のある状態では、ラシュバ型の反転対称性の破れた半導体に非相反輸送現象が出てくる。また、超伝導体における磁場下の非相反輸送現象やゼロ磁場下の非線形ホール効果も発見され、これらから反転対称性の破れた超伝導の物性を引き出す研究も始まっている。最近の非常に大きな進展は京大の小野らが2～3年前に発見した超伝導ダイオード効果である。この現象では、反転対称性の破れた超伝導において、臨界電流が電流を流す方向によって異なるというもので、内因的、外因的要因を含め多くの現象が報告されつつある。

まとめると、デバイスを用いた量子マテリアル研究は、応用に向けた機能開発のみならず、基礎物性の解明・探索においても非常に重要であり、世界中で盛んに行われている。この状況は、デバイス研究が特定の典型物質に対してのみ行われていた前世紀とは大きく異なっている。今後は、デバイスを用いた非線形現象や非平衡現象の研究と、その応用展開が大事になると考えている。

【質疑応答】

Q：熱電変換について、薄膜で応用が困難と言っていたがバルクや積層ではどうか。

A：表面状態が大事と考えられるので単純に積層すればいいというわけではない。

Q：表面状態がよくわかってくとプレークスルーになるということか。

A：そのとおり。

Q：1層にするとパワーファクターが大きくなるのはどういう仕組みか。

A：今のところよくわかっていない。本来はシフト電流の大きさを表す指標であるグラス係数で比較しなければならないが、ナノマテリアルではグラス係数の導出に必要な吸収係数がきちんと測定できていない。例えば多層のヒ素化タンタル（TaAs）は薄いとき高い光起電力を示すがバルクでは動作しないといった、薄いとき良い性能を示す傾向はある。

Q： ZT が16というのはすごいが、ゼーベック係数 S 、電気伝導度 σ および熱伝導率 κ はそれぞれ個別に測られているのか。

A : S と σ は測定している。 κ は薄膜が基板の上であって測定が難しいのでバルクの値を用いている。

Q : 通常の太陽電池は正孔と電子が分離して拡散していくが、光シフト電流はどのような仕組みか。

A : 光シフト電流では電子正孔対は不要。光によって分極が発生し光電流になる。

Q : ゼロ磁場中で非線形効果が出るということは DC 分極が発生する光整流と等価ではないか。

A : バルクの光起電力に関してはそのとおり。非線形ホール効果は、分極のある方向に電流が流れるという点では似ている。

Q : 他の物理現象に基づく光起電力との比較は。

A : バンド構造が分かれば計算できるので数年前に多数の取り組みがあった。ただし、今のところ計算のとおりになったという事例は聞いていない。

Q : 超伝導ダイオードは、方向によって超伝導になったりならなかったりということか。

A : 磁場をかけてある方向に電流を流すと超伝導で、逆に流すと常伝導だったということ。京大の小野らが最初に発表した時は、電流の方向による臨界電流密度 J_c (超電導状態を維持できる単位断面積当たりの電流の限界値) の差は絶対値の 1% ぐらいしかなかったが、今は数十% 違うのが当たり前となっており何か興味深いデバイスになると期待している。

Q : ナノマテリアル構造を工夫して高感度センサに応用できないか。

A : 光センサ、赤外センサへの応用研究が進められている。

3.2 量子物質機能の戦略的創製と制御

石渡 晋太郎（大阪大学）

本日は物質創成を基軸とした新規機能開拓という視点で話題提供を行う。

私としては、量子物質というのは図3-2-1に示すように「創発機能を示す物質」とほぼ同じ意味だと考えている。量子多体効果のような複雑な相互作用のために因果律に基づく記述が難しく、結果として戦略的な物質開拓が困難となっている。この難しさの本質は2つに分けることができると考えている。1つ目は狙った物質を設計して、それを実際に合成するという段階にあり、非平衡過程の制御や化学的多様性に伴う困難である。2つ目は、仮に物質が合成できたとして、その物質がどのような性質を示すのかの因果関係が自明で無いという点である。したがって、この分野で物質開拓を行おうとすると、ある程度求める応用や機能から逆算して、その周辺での物質開拓を進めるというアプローチがとられている。

なので、図3-2-1の中にあるようなキーワードの中である程度物質開拓が進むと、その次がなかなか見つからなくなるというジレンマに陥りがちなところがあると捉えている。

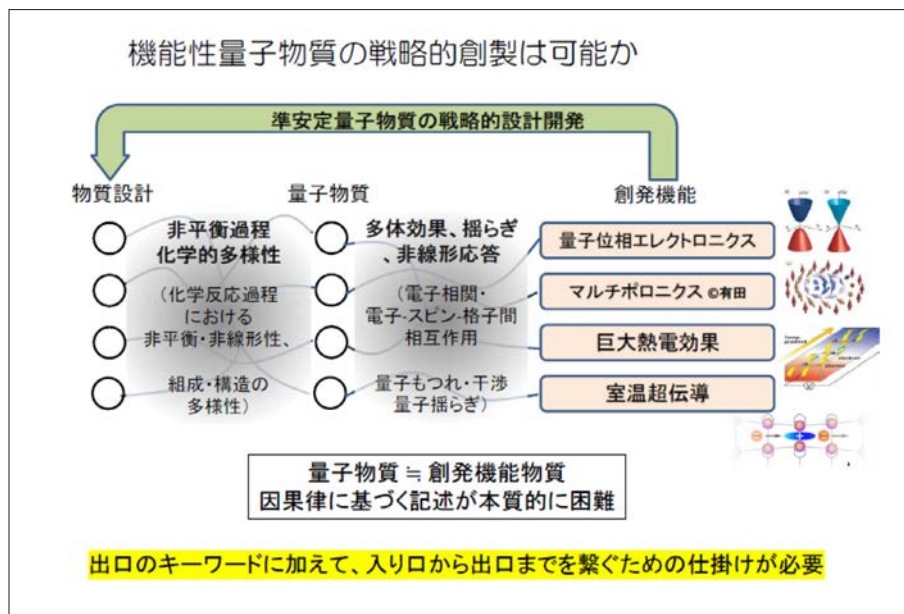


図3-2-1 量子物質開拓が困難な理由

したがって、物質設計から機能までの見通しを良くするような原理、有機化学などで用いられる構造-機能相間的な概念を見出していくことが重要だと考える。量子物質の機能に関して、エネルギー変換やセンサ材料という観点でみると、外場による何らかのインプットによって機能というアウトプットが引き起こされると捉えられる。典型的な外場とし、温度、圧力、電場、磁場の4つを考えると、それに対応した共役な粒子のような自由度が存在し、この自由度間が強い相互作用を示すことで、様々な機能が生み出されている（図3-2-2）。これは強相間物質の特徴であり、圧力によって電荷を制御する（ピエゾ効果）といった交差相間応答が強くなるというのが、特徴である。

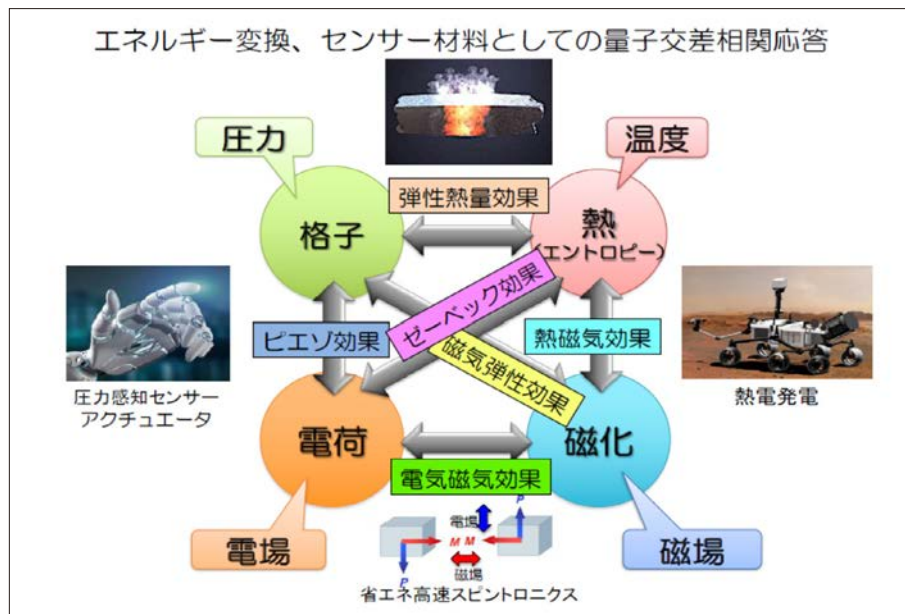


図3-2-2 量子交差相関と昨日の関係

このような効果をインプット（外場）とアウトプット（応答）で図3-2-3のようにまとめると、対角的なものが自明な応答で、非対角なところにセンサ材料として使える応答がある。線形応答の範囲では、このような機能は、物質固有の結晶の対称性や電子構造といったものを物性テンソルとして反映するため、レアな特徴を持つ系に注目することが第一歩となる。

エネルギー変換、センサー材料としての量子交差相関応答

		外場			
		力学的	熱的	電氣的	磁氣的
如左	力学的	弾性	(負) 熱膨張 逆弾性熱量効果	逆圧電効果	逆磁歪効果
	熱的	弾性熱量効果	熱伝導度	熱電冷却 (ペルチェ効果)	磁気熱効果
	電氣的	圧電電気効果	熱電発電 (ゼーベック効果、 ネルンスト効果)	電気抵抗率 分極率	電気磁気効果 磁気抵抗効果 異常ホール効果
	磁氣的	圧電磁気効果 磁歪効果 (磁気弾性効果)	熱磁気効果	電気磁気効果 スピンホール効果	磁化率

応答（出力）＝ 物性テンソル × 外場（入力）

物性テンソル ↔ 対称性、磁性、電子構造
 → レアな特徴（対称性とトポロジー）をもつ系に注目

図3-2-3 外場（インプット）と応答（アウトプット）の関係：具体的な物理効果

トポロジカルな磁性、反転対称性のない極性構造、トポロジカルな電子構造といった性質を持つ物質群が注目されており、そのそれぞれだけでも非常に面白いが、私は特に、複数の特徴を併せ持つ物質に着目して

いる。例えば、磁性と極性の両方を併せ持つ系として、マルチフェロイクスの発展とともに注目されてきているが、トポロジカルな磁性を持つマルチフェロイク物質での機能創成を報告している。また、電子構造×極性に着目した巨大熱電効果、トポロジカルな電子構造×磁性に着目したバルク量子効果といった機能についても報告している。さらに、最近では、この三つの特徴を併せ持つような系として、トポロジカル半金属において非常に特徴的な表面超伝導現象を見出している。ただ、ここで紹介した物質とは、すべて既知の物質であり、物性としては新しいが新物質ではない。データベースに元々あったものの、詳しく調べられていなかったという物質群である。

そこで、新物質で新たな機能を生み出すべく高压合成を中心とした物質開拓を進めている。高压合成のポイントは、ダイヤモンドのような、常圧では到達できない混成軌道や準安定相が得られ、最安定ではないが室温程度では安定して使えるものが得られる、といった点である。最近注目を集めている水素化合物高温超伝導や転移温度の高い銅酸化物超伝導も高压合成で得られている。超高压合成から得られる準安定な量子物質は、普通は混成しにくい軌道を強く混成させて、革新的な機能を生み出すことが期待されている。

当研究室の事例としては、先ほど、磁性トポロジカル半金属について触れたが、トポロジカル電子構造をもたらし層状のリン骨格にユーロピウムの磁性を付与した EuP_3 という材料を高压下で大型単結晶成長した（図3-2-4）。 α 相と β 相があるが、 α 相は高压条件でしか得られない。バンド計算を行うと、フェルミエネルギー近傍に非常に分散的なリンのバンドが見えており、磁性を担う4f軌道と伝導を担う3p軌道とが適度に混成している系であることが分かっている。

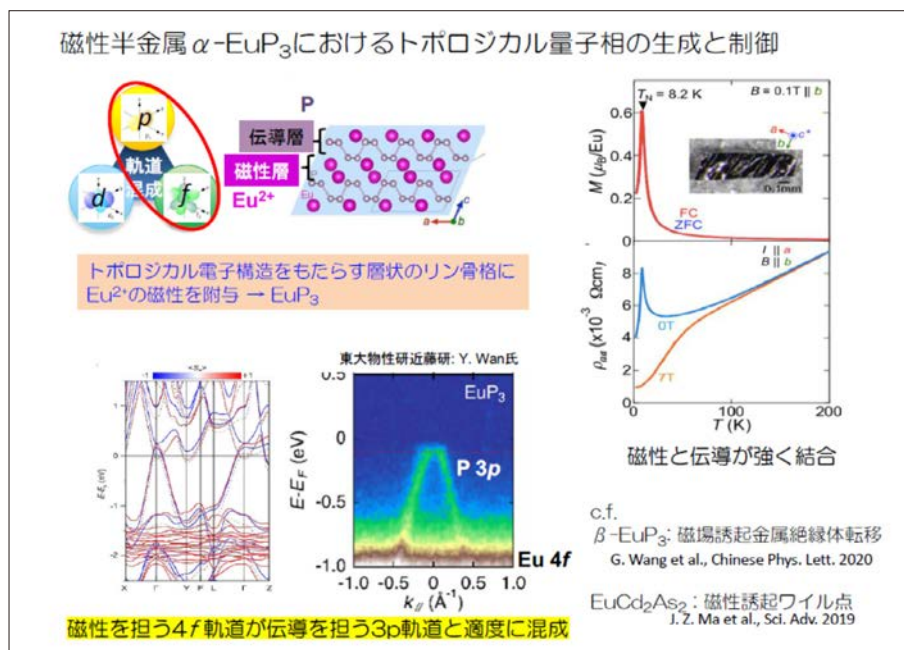


図3-2-4 高压合成によるトポロジカル量子相の生成と制御

この系は、異方的な層状構造を持つことと、その層状構造に垂直な鏡泳面があることがポイントであり、それによって異常ホール効果の異方性が高まっている。このような性質を用いることで、複数のトポロジカル相の磁場による生成やスイッチングに成功している。

また、これまではf軌道とp軌道の混成の話であったが、p-d混成が非常に強い系として、高压合成で作られる4価の異常高原子価と呼ばれるような鉄酸化物を安定化することに成功した。ストロンチウム鉄酸化物 (SrFeO_3) という物質が、多彩なトポロジカルらせん磁性相を示すことを報告している。また、コバルト系に

おいても、 SrCoO_3 が、室温強磁性ということは知られていたものの、さらに格子を伸ばしたりとかひねったりすることで、らせん磁性が現れることを報告しており、このようなp-d混成の強い準安定相が多彩なトポロジカル磁性を内包する系だということができる。

機能に関してはここまでとして、ここからは計算や情報科学を活用した物質開拓の取り組みを紹介する。これまでは泥臭くある程度トライ＆エラーの中で物質開拓を行い、そこで得られた経験則や直感を基に物質設計を進めてきた。AIの進化は、直感で捨ててしまっているものの中の隠れた因果律の発見を促すとともに、因果律ではカバーできない領域の存在を顕在化させていると感じる。特に物質開拓がそれに当たると考えるが、理解可能なAIであるとかの因果律的な解釈はいったん諦めて、ブラックボックスであっても機械学習等を活用して効率化することが必要だと感じている。

理論や計算が先導する物質開拓で近年一番有名なのは、水素化物超伝導の話である。2014年に硫化水素の高圧相で $T_c = 200\text{K}$ 程度となることが理論的に予測され、その半年後にドイツのEremetsらのグループの実験によって検証されている。最近では、室温化に向けて2元系から3元系まで複雑になってきているが、まだまだ発展しそうな勢いがあり、ドイツ、中国、日本が先導している分野である。元々、Eremetsは日本の大阪大学に数ヶ月滞在しており、そこで学んだ技術を持ち帰ってドイツで実験に成功したという背景がある。日本発の技術だったので悔しい部分はあるが、今でも技術的な障壁は高く、誰でも参入できるという分野ではない。

量子物質における計算と情報科学の活用に関するアプローチを図3-2-5に示す。一つは、データベースの活用であるが、量子物質の場合は多くの場合ビッグデータがないということが課題になっている。その中で、私たちのグループでは既知の構造の中から安定解を見つけるという方法論に取り組んでおり、様々な圧力条件に対してconvex hull法等を適用して、構造探索などを行っている。

一つ目のデータベースの活用についてであるが、唯一データがある程度整備されているのがペロブスカイト型構造である。ペロブスカイトは、基本的にはAサイト、Bサイトの金属種のイオン半径で表されるトランスファクターでどんなものが安定かを判断するのが通例となっていた。最近機械学習を使って、様々な記述子を生成すると、新しいトレランスファクターを用いると、ほぼ完全に合成可能性を判定できることが報告されている。ただし、このトレランスファクターは物理的もしくは化学的には解釈不可能なものであり、ペロブスカイト以外への普遍性があるような記述子が必要だと考える。

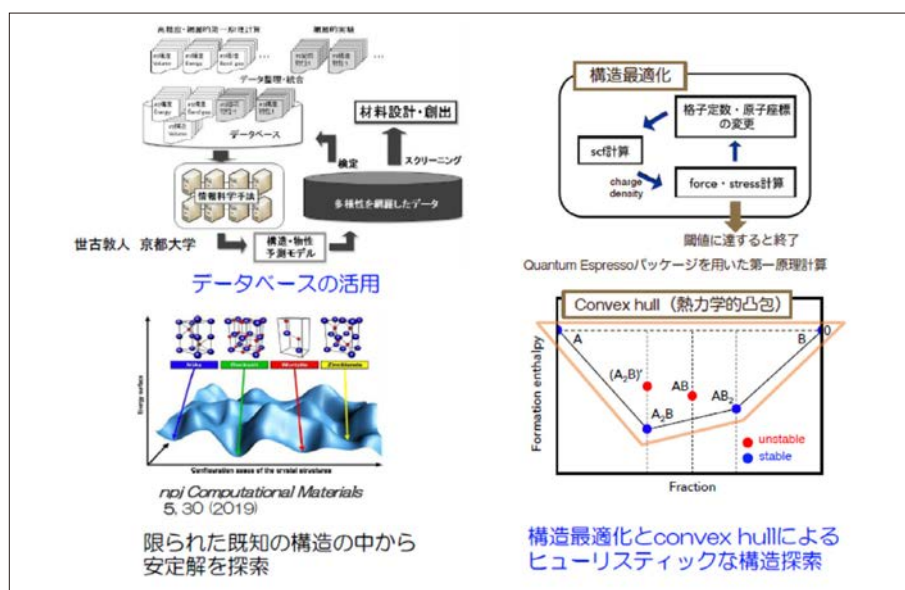


図3-2-5 計算・情報科学を活用した量子物質の探索

また、ペロブスカイトにおいては、構造探索に必要な計算量を減らすためのモデル化といった取り組みを進めた。京都大学のグループとの共同研究によって、ペロブスカイトの酸素欠損配置の網羅的計算を行うために、欠損パターンをイジングスピンモデルに落とし込み、第一原理計算と同等な有効モデルの構築に成功している。機械学習やベイズ最適化を用いて精度を高めると、元々100万通り程度計算しなければならない問題が、1000通り以下に絞り込むことができる。そのような絞り込んだパターンに対して計算を行うと、既報の構造や未知の構造が予測できている。つまり、系の事前知識を活用して探索空間を上手に絞り込む、離散化するというアプローチは有効であるという手応えを得ている。

さらに、合成経路の設計にも計算を利用している。異常原子価を含むペロブスカイト鉄酸化物において、高圧合成とともにオゾン酸化というようなプロセスを含めることを計算的に探索することに成功している。

以上をまとめると、準安定量子物質の戦略的設計開発に向けては、因果律に基づく記述が本質的に困難であり、計算や情報科学の活用が求められている。探索空間と合成経路の可視化、構造機能相間の可視化が期待され、固体化学や計算情報分野との協働が益々求められていくと考える。

【質疑応答】

Q：理論主導の物質科学は今後ますます重要になってくる。未知の物質が理論計算で予測できたとき、それをどうやって合成するかについて戦略はあるか。化学者の勘のようなものも重要か。

A：プロセス・インフォマティクスが関係してくると思うが、計算の立場からは一番苦勞されている点だと認識している。特に温度の効果をどう取り組むかが課題。ペロブスカイトの合成ルート探索の話も、オゾン酸化で異常高原子価になることが分かっており、そのようなゴールに至るイメージを計算に取り入れることは重要。

Q：既存の理論では理解できないような新たなブレークスルーをもたらす物質の探索というのが一番魅力的。その意味では、既存の理論や情報科学によるスクリーニングといった方法は、どの程度そのような物質をとりこぼさない方法論となりうるのか。

A：本講演では、理論や情報科学の活用という観点では、構造設計と合成の間の部分について紹介した。一方で、その物質が本当に面白いかどうかは予測しきれない。したがって、データベースを強化するためにも新物質の種類を増やしていかなくてはならない。その上で効率よく裾野を広げていくことが重要。

3.3 粒子線を駆使した量子材料の高機能化 – 量子センサ、量子ビット形成とその応用 –

大島 武 (量研)

既知の材料を量子センサや量子ビットとして機能化するために、粒子線というイオンビームや電子線を使う方法を紹介する。量研の量子機能創製研究センターでは、NIMS、産総研および電中研等との共同研究で基盤となる材料を得ている。量子技術と量子マテリアルの応用側では、量子コンピューティング、情報・通信およびセンシングにおいて様々な材料が使われている。その中で、私が研究対象としているのは、ワイドバンドギャップ半導体、具体的にはダイヤモンドと炭化ケイ素 (SiC) という2つの材料である。冒頭で述べたが、イオンビームや電子線といった粒子線を活用し、ダイヤモンド窒素-空孔中心 (NVC)、炭化ケイ素のケイ素空孔 (V_{Si}) といった量子機能を有するスピン欠陥を作る高機能化を行っている。ダイヤモンドNVCについては本報告書の「2.1 量子デバイス応用を目指したダイヤモンド成長技術開発」をご参照いただきたい。ここでは、特にSiCについて着目点と機能創製について紹介する。

SiCはワイドバンドギャップ半導体の一つで、シリコンとカーボンが1:1の比からなる。図3-3-1のように立方晶 (cubic, 3C)、六方晶 (hexagonal) でも4層の周期的構造 (4H) や6層の周期的構造 (6H)、さらに菱面体構造 (rhombohedral, 15R) という様々な結晶多形があるが、パワーエレクトロニクス分野ではほぼ4HのSiCが使われている。図3-3-2に様々な半導体の物性値を示す。SiCはちょうどSiとダイヤモンドの真ん中ぐらいのバンドギャップを持っている。SiCは電子移動度 (electron mobility) が比較的Siに近く、絶縁破壊耐圧もあることから、パワーエレクトロニクス材料として世の中に出てきており、実際にトヨタのMIRAI、東海道新幹線および最近ではJRや地下鉄で使われ、実用化が進んでいる。

さらに、SiCは高温環境、放射線場といった極限環境におけるデバイスとして研究が進んでいる。また、SiC基板の高品質化、大型化が進み、大口径のウエハが入手可能になっているとともにデバイス作製プロセスが確立しているため、SiCは量子技術応用可能なスピン欠陥の母材として有望である。ダイヤモンドにはNVC等の非常に有名な欠陥があるが、SiCには、Siが抜けた空孔である V_{Si} 、Siと炭素 (C) が両方抜けた複空孔 (divacancy) (VV)、本来SiがいるところにCが入りSiの隣のCが空孔になっているアンチサイト-空孔ペア ($C_{Si}V_C$)、さらに構造は不明だが酸素由来の表面にできる非常に明るい光子源がある。また、SiCにもNVCがあり、これは近赤外である1300 nmぐらいの波長で発光することから、最近研究が盛んになってきている。

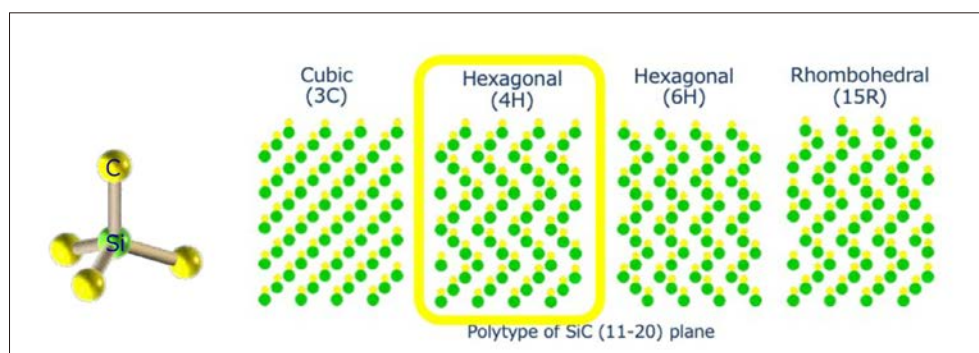


図3-3-1 炭化ケイ素 (SiC) の結晶多形

	Si	GaAs	SiC (4H)	GaN	Diamond
Bandgap (eV)	1.12	1.42	3.26	3.42	5.47
Thermal conductivity (W/cmK)	1.5	0.5	4.9	1.3	20.9
Electron mobility (cm ² /Vs)	1350	8500	1000	1200	1800
Hole mobility (cm ² /Vs)	450	420	120	400	1600
Relative dielectric constant	11.9	12.9	9.7	9.5	5.9
Saturation drift velocity (10 ⁷ cm/s)	1	2	2.2	2.4	2.5
Breakdown electric field (MV/cm)	0.3	0.4	2.8	3	8
Intrinsic semiconductor temperature (K)	600	850	1400	2000	3000

図3-3-2 半導体の物性値

我々はワイドバンドギャップの中にスピンがある欠陥を作るツールとして粒子線に着目し研究を行っている。一般的に、MeV 級の電子線を照射をすると数 mm 厚の半導体試料を貫通するので、試料の中に均一に欠陥生成が可能である。私達の装置は、5 cm × 120 cm の照射エリアを持っており、大量の試料が照射可能であるとともに、比較的高線量で多数の欠陥を生成できる。さらに、高温で電子線照射を行うことによって、照射による結晶損傷の蓄積を低減しながら高濃度で均一分布の欠陥を効率的に形成する技術を研究している。

我々はイオンビームのエネルギーを数十 keV から数百 MeV まで変えて照射を行っている。そうすることで、表面付近から深部まで注入や改質というようなことが可能である。また、水素から始まる軽イオン、金やオスミウムといった重イオンといったさまざまな不純物を注入できる。また、電子線照射の場合と同様に、結晶損傷の場合、高温でアニールしながら照射することも可能である。さらに、重イオンマイクロビームや水素イオンマイクロビームという、ビームをマイクロメートルレベルに絞り任意の位置に照射することで任意の位置に欠陥を作るということも可能である。まとめると、イオンビームでは、位置や深さの制御、多彩な元素注入、欠陥形成ができるという特徴がある。

ダイヤモンドのNVCの形成では、ダイヤモンド基板に電子線やイオンビームを照射して欠陥を作り熱処理をしてNVCを形成している。SiCの場合も基本的なプロセスは同じで条件が異なる。例えば、量子センサの場合は、比較的高濃度の濃いNVCが求められているが、そのような場合は窒素（N）をたくさん含んだダイヤモンド基板に電子線を照射し全体的に均一に欠陥を入れた段階で熱処理すれば均一なNVができる。量子ビットとしてダイヤモンドNVCを1個1個使いたい場合は高純度なダイヤモンド基板にイオン注入という形でNを埋め込む。Nの埋め込みと同時に欠陥ができるので、欠陥とNが入ったところで熱処理をするとNVCができる。このように、照射条件を変えて作りたいものを作ることが可能である。

少しユニークな例として、量子ビット応用で単一のNVを形成する際に、核スピンをなるべく減らしてスピンコヒーレンス時間を長くするために、NIMSから供給された¹²C濃縮ダイヤモンド基板に¹⁵Nのマイクロビームを照射して熱処理をする。ダイヤモンドに元々残留しているNは基本的に天然存在比の大きい¹⁴Nなので、¹⁵Nを打ち込むことで実際に狙った位置にできているか共焦点顕微鏡で確認することが可能である。図3-3-3のように、各点に2～3個ずつNイオンを打ったところ、単一のNVCだけでなく残留するNからもNVCが形成された。確率論的に1個1個NVCを形成することが可能なので、現在、このようにできたものを使って単一NVCの研究がなされている。最終的に絶対論的にイオンを注入するような技術がないと、本当の意味での量子ビットを並べるような応用は現状少し難しい。

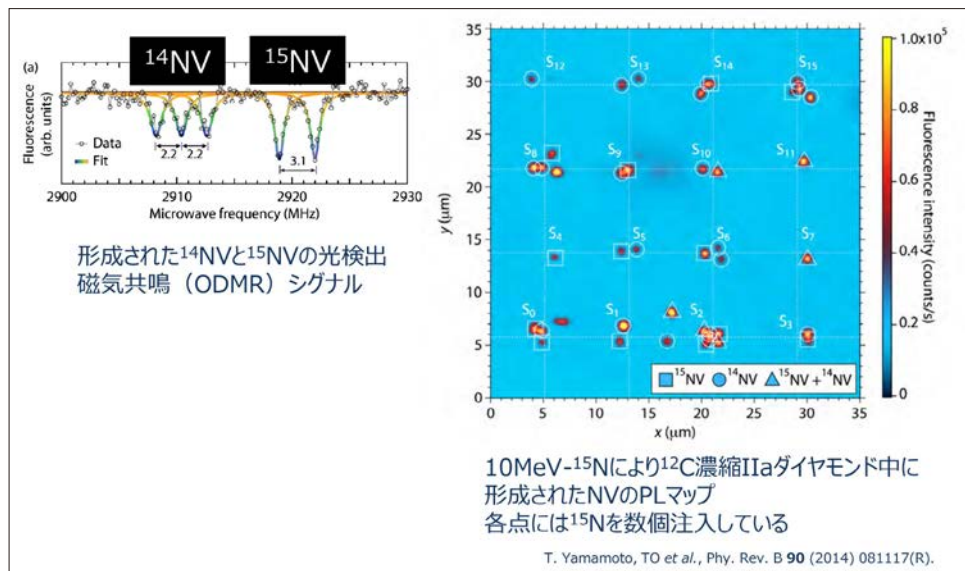


図3-3-3 N イオンマイクロビームによる単一 NV 形成

さらに、図3-3-4に示すように、スケールアップは難しいが、分子イオンを使って隣り合うNVCを形成することができる。1個の分子が注入された時に基板内で碎けてNがばらまかれ、それを熱処理するとNVCが形成される。この方法で数十nmから数十nmぐらいまで本当に近接するNVICが形成できる。例えば、 N_2 イオンを使って形成したNVCのペアをお互いに共鳴させ合うとか、最近は、アデニンという分子を使ったイオンで3つ、それから、Nが8個入っているイオンを使って、4つのNVCを作ることが可能である。このような方法はスケールアップはすぐには難しいが、NVC同士の相関を使うような実験、スピン操作の実験等に利用する、もしくは、小規模な中継器に応用できると考えている。

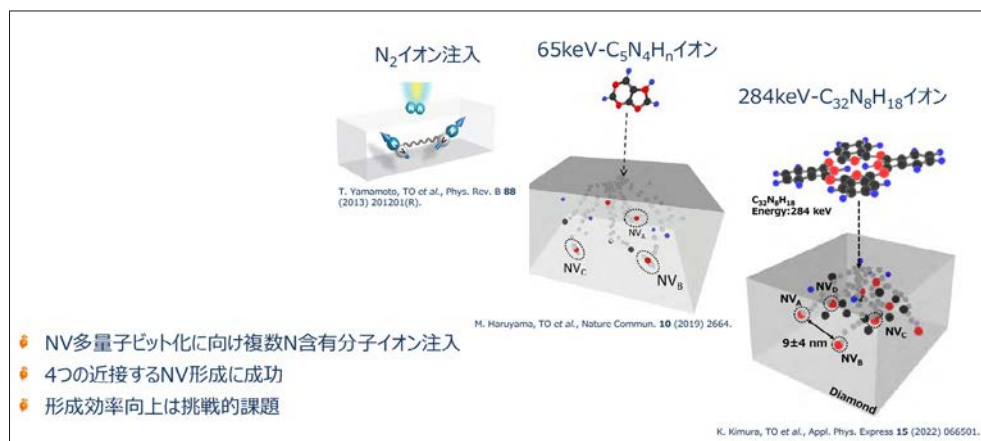


図3-3-4 分子イオン注入による複数NVC形成

もう一つ、SiCの例として、粒子線描画 (Proton Beam Writing, PBW) で局所的に V_{Si} をSiCの中に入れることができる。SiCのパワーエレクトロニクスデバイスでは、普通、センサを接触させてセンシングしているが、 V_{Si} ではまさにデバイスの中に入れて中を直接センシングできる。最終的にはエレクトロニクスと量子デバイスの融合にも使える。図3-3-5は、自作のダイオードにPBWを使って V_{Si} を形成した例である。 V_{Si} 形成の前後でデバイス特性が変わらないことを確認した上で様々な評価を行っている。図3-3-5に赤印で

示したところに10 μm 間隔に0.5 MeVの水素イオンをワンスポット当たり 10^7 個ぐらい照射し共焦点顕微鏡・蛍光顕微鏡でスペクトルを観察すると、照射したところにきちんと V_{Si} が形成されていることが分かる。この V_{Si} が形成されたところについて、ダイオードに電流を流した時に光検出磁気共鳴測定を行い、共鳴周波数のずれから温度に換算することで、電流が流れる前は297 Kだった部分が電流を9 mA ぐらい流した後は320 Kになったことがわかり、局所的にデバイスを調べることに成功した。

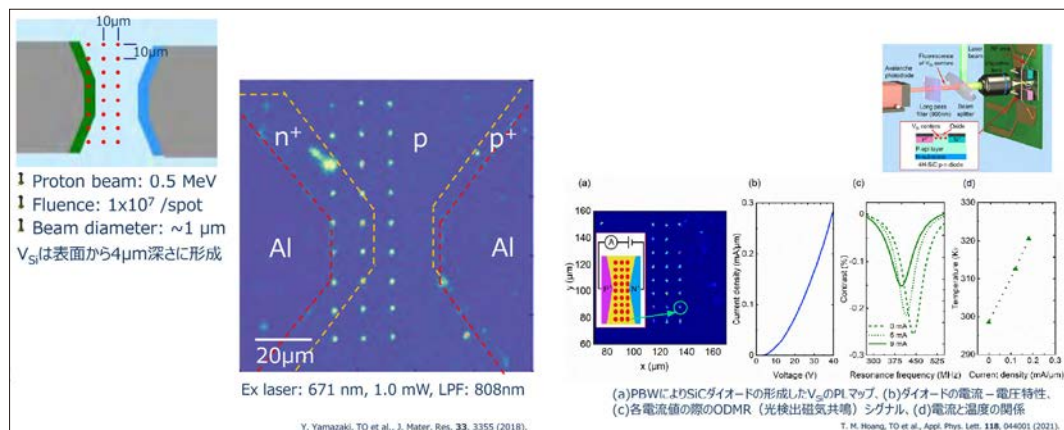


図 3-3-5 PBWにより V_{Si} を形成した4H-SiC pn ダイオードの室温フォトルミネッセンス (PL) マップと、 V_{Si} を用いたSiC ダイオードの局所温度センシング

ここまで粒子線について述べたがやはり光との融合も有望である。光を使うことによって、例えばフェムト秒レーザーでNVCを作る、ダイヤモンドNVCではないがスピンと光の相互作用をうまく使って磁化を高速でスイッチさせるという研究がある。レーザー等の光と粒子線をうまく組み合わせ、量子マテリアルの高機能化や新原理デバイスを創製するのは今後の一つの方向である。

まとめると、粒子線を使うことによって、ダイヤモンドNVCやSiC中 V_{Si} 形成といった、量子マテリアルの機能制御（高機能化）が可能である。さらに、最近注目されてきている新しい二次元材料、hBN（ヘキサゴナル・ボロン・ナイトライド）などの新規量子欠陥の探索にも使える。量子ビット応用に向けて数や位置を高度に制御するというような高品質な量子欠陥を作る技術の開発などやるべきことは多い。光との融合では、ユニークな現象の詳細理解や正確な現象の制御技術の開発が必要である。量子技術の実用化には、量子マテリアルを作る人達と、私たちのような機能化するグループさらに応用するグループがお互いにニーズ・シーズを見せ合って研究開発していくことが大切である。

【質疑応答】

Q：ダイヤモンドでは不純物が入りにくいため、Nを最初に入れておいて空孔を入れる、あるいは、Nそのものを注入する等の方法によってできるものはNVしかないという状況である。一方、SiCは V_{Si} だけでなくVVができてしまうので区別して作れないと思うが、SiCの欠陥の作る時の戦略について教えて欲しい。

A：粒子線は欠陥を自由に作れるが選択はあまり得意ではない。SiCの場合はデバイスを作製するプロセスの研究が進んでおり、どのぐらいの熱処理で欠陥がなくなってくるというのが分かってきている。例えば V_{Si} は一番不安定で600度ぐらいの温度から消えてきてVVとアンチサイトになるが、さらに高温にするとNVCのほうが安定という形である程度分離できる。今、私達が V_{Si} に着目しているのは、既存のSiCパワーデバイスの特性を大きく変えない程度の V_{Si} を入れて、デバイスの中をセンシングでき

るからである。これは熱処理なしでできるので、本当にデバイスを作った後に診断できるという利点がある。

Q： V_{Si} の間隔はどのぐらいまで制御できるのか。

A：マイクロビームのスペックで決まり、現状ではミクロンオーダーである。ビームの径を絞れば精度も上がるので、最終的には数百 nm ぐらいである。

Q：1 個の V_{Si} に 1 つのセンシングの機能を持たせるってということか。

A：センサなので必ずしも 1 個である必要はないが、1 点 1 点にセンサ機能を持たせているということになる。

Q：エンタングルメントを起こそうとすると 10nm ぐらいの近くに持ってこないといけないということか。

A：そのとおり。エネルギーを落とすと精度は上がるので、数十 keV ぐらいのエネルギーのビームで照準を合わせることによってある程度近づけることが可能である。

Q：ダイヤモンド NVC の距離は T_2 緩和時間に関係すると思うが、SiC の場合はどうか。

A：SiC の場合、 ^{13}C をなるべくなくすという同位体制御をすると今のところ 2ms ぐらい室温で出ている。 V_{Si} は、ダイヤモンド NVC と比較するとスピン特性は変わらないが暗いので、単一で使うのであればダイヤモンド NVC のほうが今にところ優れている。

Q：異なる材料を持っている方々から、このような電子線照射で新規機能を出すというような共同研究の打診があるか。もしくは、この方法がどんな物質系や機能への広がり方が想定されるか。

A：探索というところで、イオン注入というのは非常に有利である。結晶成長の時に、特定の不純物の欠陥を作るのは困難だが、ある程度いい基板を作りそこに粒子線で欠陥を入れる、もしくは不純物を入れた時にどうなるかという探究研究として比較的いろいろな人たちから打診がある。GaN 等のナイトライド系、人工オキシサイドのようなワイドバンドギャップ、それから、hBN などをやっている。一方、トポロジカル物質といったあたりでは、現在、共同研究はない。

Q：照射で抜けた Si が近くのインタースティシャルに入っているということはないか。ショットキー欠陥、フレネル欠陥のように特性を悪化させることはないか。

A：粒子線照射によって様々な欠陥ができるので、本当の意味で完璧な結晶がデバイスの中にあつた時には若干その部分の特性が変わるが、デバイス全体の物性が変わらないなるべく最低限の欠陥を入れるようにしている。また、測定の方で V_{Si} が光るところだけにレンジを合わせるという工夫をしている。

4 | 量子機能の応用

4.1 二次元原子薄膜ヘテロ積層/接合材料のテラヘルツ波デバイス応用

尾辻 泰一（東北大学）

私たちが取り組んでいる二次元原子材料を用いたテラヘルツ帯での機能デバイス応用を図4-1-1に示す。プラズモン、共鳴トンネル、スピンおよびフォノン等の相互作用を利用し、極めて高効率で、低消費電力で、テラヘルツの増幅、発振、検出、周波数変換および非線形波動制御等を室温で実現することを目指し、グラフェンを中心とするさまざまな二次元材料、そしてそのヘテロ積層あるいはヘテロ接合を駆使してデバイスを作ろうとしている。材料自身のトポロジカル性というよりは、もう少しマクロなスケールで考えた時のメタマテリアルとしてのトポロジーを活用することによって新機能創製や高効率化を成すものである。

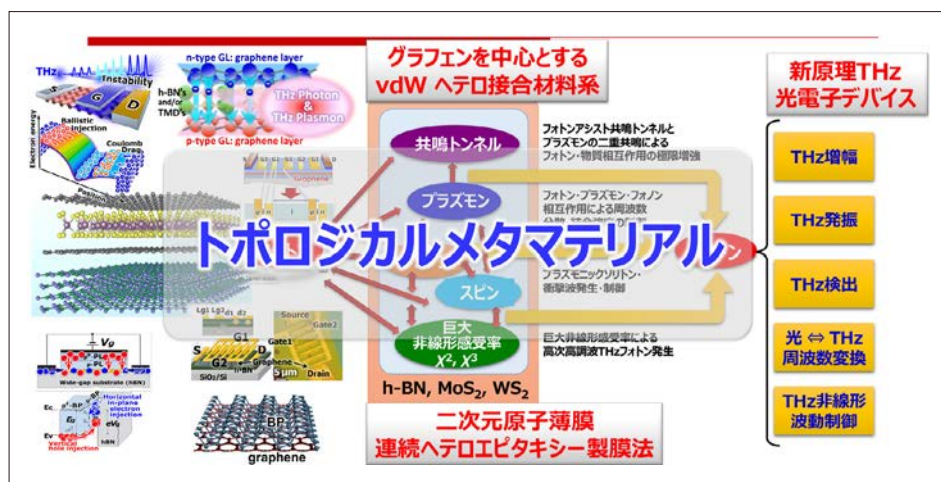


図4-1-1 二次元原子薄膜ヘテロ積層/接合材料による新原理新機能テラヘルツ波デバイスの革新

初めにグラフェンを中心としたテラヘルツの機能デバイスについて紹介する。テラヘルツ波を高感度、高速に検出する手段として、光起電力、光熱電、ボロメトリックおよびプラズモニック等、様々な物理効果がある。最近、格子状のゲート電極を二重に組み合わせてチャンネル内の電子濃度を周期的に変調させることによってプラズモニック整流作用および光電熱型整流作用を発現させることができて、図4-1-2の右下の時間応答波形に示すように、6Gや7Gとして最近話題になっているテラヘルツ無線の応答に耐える高速性と高感度性が得られることが分かってきた。また、素子構造は基本的に同じだが、回折格子を入れ子状にかけると二重回折格子ゲートでドレイン-ソースのバイアスによってチャンネルに電流を流すと、グラフェンプラズモンが不安定になり半導体レーザーの自然放出に似た自励発振現象が現れる。そこに外部からテラヘルツパルス照射すると注入同期によって誘導増幅放出が得られテラヘルツ増幅器として機能する。室温で時間分解分光測定をしたところ、グラフェン単層では3テラヘルツで9%の最大利得があった。グラフェンの光吸収係数はバンド間吸収の場合は2.3%/層と決まっているが、それを大きく超える高効率化も可能である。

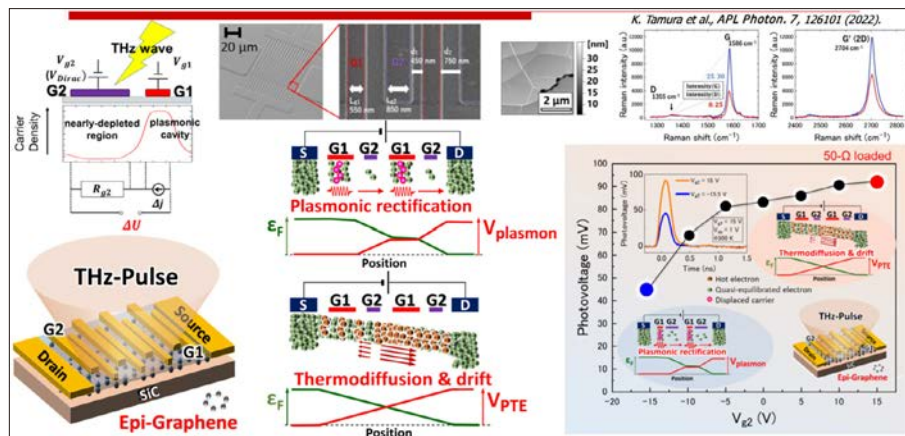


図4-1-2 6G&7G 対応室温・高速・高感度グラフェンTHzディテクタの動向

ここで発想を転換し、パリティ対称性と時間反転対称性を合わせたPT対称性の導入によって、テラヘルツ帯の機能を外場で大きく変調できることに注目した。図4-1-3に示したの是一般論であるが、通常量子力学ではハミルトニアンとしてエルミート演算子を仮定し実数解を得るが、非エルミート性であってもPT対称な系であれば実数解が必ず得られることを1998年にBenderらが発見した。その後にそのようなPT対称な系では電磁波の伝搬が異方性を示すことがわかった。非エルミート性ということは、基本的に非断熱的でエネルギーの流入がある。その観点でPT対称性を電気回路で書くと、値が等しい正の導電率（損失）と負の導電率（利得）を持つ媒質をペアで組み合わせれば、PT対称性が実現できることが分かっている。その時に損失側から電磁波を伝搬させた場合、完全透過で無反射伝搬する。一方、利得側から伝搬させると通常の反射透過になる。電気回路を調べてみると、確かに損失ポートから入れると反射が起こらないことが確認できている。これは、レーザーキャビティに光子を注入する時に完全透過にするとキャビティの中では反射することになるので、Q値を大きくすることにもつながる。

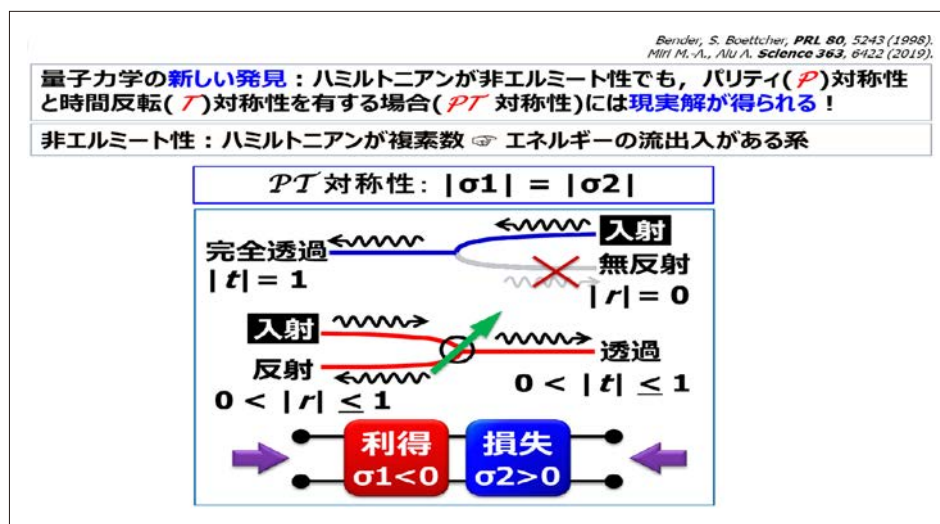


図4-1-3 PT対象性操作による電磁波伝搬制御

図4-1-2に示したテラヘルツのデバイスは、検出器になったり、バイアスによって増幅器になったりする。私たちは非対称二重回折格子ゲートと呼んでいるが、その内部のマイクロ領域を観察すると、増幅器として機能

している場合、回折格子のゲート構造に対応して利得エリアと損失エリアが周期的に繰り返す構造になっている。これは、図4-1-3のように利得エレメントと損失エレメントが対になり、しかもそれが周期的に繰り返されていることに気付く。ゲートバイアスによってこの利得と損失のファクターをうまく合わせてやるとPT対称性になる。ずらすとPT対称性が破れるということになる。つまり、外部電界によってPT対称性を制御できるということに帰着する。

半古典ボルツマン輸送方程式で、グラフェンDiracプラズモンの時間応答の数値解析をした結果を図4-1-4に示す。横軸が時間軸で縦軸は面内の電界強度である。時刻ゼロでドレインバイアスを0 VからPT対称性が保てるある一定のバイアスにステップ関数で上げると、チャンネルの中で電界の自励発振が開始する。その周波数はキャリア濃度、キャビティサイズおよびゲート格子のサイズで決まるが、重要なのは10 ps以内にほぼ定常状態に至るということである。グラフェンの品質に依存するパラメータとしてキャリアの運動量緩和時間を1 psから3.2 psまで変えて解析したところ、運動量緩和時間が、比較的グラフェンの品質が良くない1 psであっても、10 ps以内に定常状態に至ることがわかった。10 psは、伝送レートで100 Gbit/sに相当する。この時間スケールできちんと定常発振に至り、PT対称性を破ると発振が停止することになる。つまり、電流注入型の超高速な直接利得変調ができることを意味している。

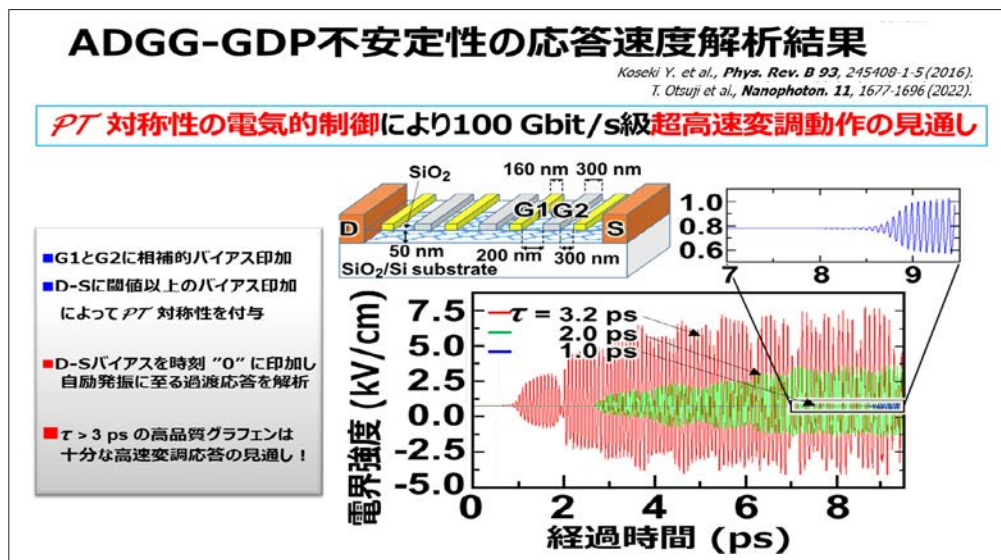


図4-1-4 PT対象性操作による電磁波伝搬制御

上述したように、ある境界条件や電流条件を設定するとプラズモンの振動自体が不安定になる現象について様々な機構が発見されている。私たちは第4の不安定性と呼んでいる。グラフェンは、平均自由行程が室温で1 μ m以上という非常に優れたキャリア輸送特性を持つ。ソース端からゲートまでの距離を1 μ m程度とし、ゲートバイアスでソース端からゲートに弾道的に電子をたくさん注入すると、ゲート直下に既に存在していた平衡状態の電子とのクーロン相互作用で散乱が起こる。この時に、グラフェンの電子は非常に粘性が高いため電流が流れることができず負性微分抵抗が発現する。これが第4の自励発振に至る機構になるということを経験している。一つのトランジスタのチャンネルの中が損失領域と利得領域で構成されるのでPT制御で利得変調できる。また、他のグループの研究で、垂直共振器面発光型レーザー（VCSEL）は複屈折性を持っているので基本的には円偏光になるが、外部から光子を注入してやると、その光子の偏光で発光する光子が変調されるという現象が分かっている。このことから、メタマテリアルでこのデバイスのPT対称性を操作できれば、スピンのエンタングルメントを制御できる量子光源に応用できると考えられる。

次に、グラフェンと相性のいいバンドアラインメントを持っている材料として黒リン（BP）を取り上げ、幾つか機能を紹介する。1つ目は普通のFETのチャンネルをグラフェンとBPの積層で作った場合である。単層程度ではグラフェンのDirac点がほぼバンドギャップの真ん中に位置する。この場合、ゲートバイアスで注入すると基本的にはグラフェンの中に電子が閉じ込められBPの伝導帯にいない。しかし、ドレインバイアスでバンドのポテンシャルにスロープを作り、ドレイン端に近い領域のBPの伝導帯をその手前のグラフェンのフェルミレベルと同じレベルにすると、グラフェン中のエレクトロンがBPに移ることができる。これはグラフェンBPで自励発振器ができることを意味している。これもゲートバイアスとドレインバイアスの制御で損失ファクターと利得ファクターを調整することによって、PT対称性を破ったり保持したりすることができる。一方、パッシブな状況にバイアスを設定しておくと、ポロメータ的にテラヘルツ検出ができるということを理論的に提案している。

まとめると、二次元系の材料を中心として私たちはこれまでたくさんのデバイス応用をテラヘルツ帯でやってきた。トポロジカル物質のような原子オーダーではなく、1桁、2桁大きな物理寸法で、メタマテリアル効果を発現させ新規機能が得られることを示してきた。このトポロジカルメタマテリアルが今後重要と考えている。

【質疑応答】

Q：厳密にPT対称性が成り立たなくても本当にPT対称性があるような場合と同じような現象がある程度発現するという事か。

A：通常のFETにおいて一般的なボルトないしサブボルトオーダーの電圧制御でPT対称を破ったり保持したりできるという見通しである。

Q：二重構造ゲートによるテラヘルツの検出・増幅は、テラヘルツの入射によってプラズモンの自励発振を引き込むということか。

A：そのとおり。

Q：PT対称性の損失側から入ると完全透過、逆側入ると反射透過という現象をどう使うのか。

A：利得領域で電磁波が増幅されて境界の反射係数で通常は反射透過を繰り返す。PT対称な条件を設定すると、利得領域から損失領域に出ていく時には通常の反射透過だが、損失領域から利得領域に入る時は完全透過になる。そのため、キャビティ中に蓄積されるエネルギー密度がPT対称の成立時と不成立時で大きく変わる。これを利用すると自励発振の誘発や停止を制御できる。この時定数は基本的にグラフェンのプラズモンの特性で決まっており非常に速い。

Q：トポロジカルメタマテリアルはどういったものか。

A：材料を空間的に少し大きなスケールでモディファイすることでトポロジカル機能を発現するメタマテリアル。原子サイズのトポロジカル物質では困難な室温でも実現できると考えられ、応用を見据える上で有望である。

Q：グラフェンそのものの質は影響するか。

A：影響する。半導体集積加工で量産化することを考えるとトップダウンのプロセスが必要なので、SiC基板の熱分解でエピタキシャルなグラフェンを作ることを頑張っている。トランスファー技術がないとヘテロ積層できない状況なので、ヘテロエピタキシャル成長技術を開拓していくことが必要である。

4.2 次世代情報技術基盤としての量子マテリアル開発

中辻 知（東京大学）

私は物性物理分野で基礎的な研究を行ってきたが、今回応用のセッションに入れていただいたので、特に応用の視点から見てバックキャストした際の量子マテリアル開発というところを強調しながらお話をさせていただく。時間の許す限り、以下の二つをお話したいと思っている。一つは、情報技術、すなわち高速低消費電力化、それからもうひとつはエネルギー変換に関するものである。

バックキャストは将来の社会像からスタートすることになるが、日本政府の出す Society5.0 で目標とされる超スマート社会とはどういう社会か、何が要求されているかということを考えると、図 4-2-1 のようなサービス群が必要となってくる。



図 4-2-1 超スマート社会を構成するサービス

現在こういったサービスを提供するに当たって最も大きな働きをしているのは、左上の大規模、あるいは今後重要となるマイクロデータセンターであり、これが社会の頭脳であることは言うまでもない。これらのサービスを高度化して提供するために一刻も早くデータ処理性能を上げていかないといけないが、現在のところデータセンターの液浸やデータセンターを北極に作るといったことが検討されるほど、発熱の問題が深刻になっている。そのため、ビット当たりの情報の消費電力の低減と、サービスの低遅延化を実現するための高速化・広帯域化を両立した性能向上が求められている。

また、現在、半導体に関して国を挙げた研究開発が進められているが、デナード則、ムーア則が破れていく中で、電力消費削減の点からも、シリコンの限界を超えるための、ポストシリコン材料というのが求められるようになる。先ほどの尾辻先生の話もその一端かと思うが、そういったところに量子マテリアル登場したら良いと思っている。

私が今回お話しするのは、不揮発なデバイスである。不揮発デバイスは電源供給を絶ってもメモリが消えないため、その間の電力消費が発生しない。トータルの消費エネルギーは、デバイス動作時の消費電力に通電時間をかけたものになることから、熱発生を抑えるためには、駆動電流を小さくして駆動時間を短くすることが重要である。当たり前の話になるが、最終的には電流をゼロに近づける、すなわち電流制御ではなく電圧制御を目指すなくてはならない。以上のことから、目指すべき技術目標は、不揮発メモリ媒体の超高速化、低

消費電力化、電圧駆動化ということになる。図4-2-2にいくつかの技術の比較を示している。他にもたくさんある中で三つ、四つしか挙げていないが、中でも量子物質、量子マテリアルという観点で新しく出てきているものとして反強磁性体がある。今後は、これを中心に紹介していくが、この技術は、原理的に非常な高速化と低消費電力化が両立できると期待される点で興味深いものである。

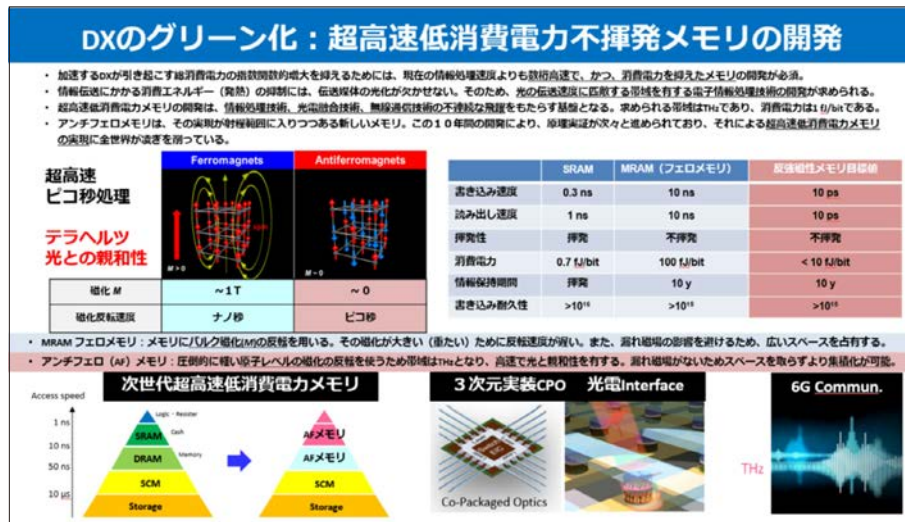


図4-2-2 高速低消費電力不揮発メモリ

ICTのグリーン化が不可欠な状況の中で、さまざまな不揮発性メモリが検討されているが、その一つとして反強磁性のメモリはスピントロニクスの世界で全世界的に非常に大きな研究のうねりになっている。注目される理由のひとつは、Samsung、TSMC、Intelなどが既に実用化している強磁性体を用いたMRAMの次の世代として、2桁、3桁高速なメモリ媒体になりうる点にある。また、同時に、そのような速度になると動作周波数がテラヘルツにも達するため、光技術とも親和性が高くなる。それにより、反強磁性体は、次世代のメモリー・ロジックデバイス用途だけでなく、光電融合や無線といった応用にも必要な素材になることが期待されている。

磁石や磁気記録材料として古くから利用されてきた強磁性体とは対照的に、反強磁性体は、その発見によりノーベル賞を受賞したLois Néelが、ノーベルレクチャーで「物性理論の対象としては非常に興味深い、なんの応用も考えられない」と述べたほど磁気材料としての利用は少なかった。しかし、磁石を近づけても安定であるという性質や、高速に磁場応答する性質などを本質的に備えている材料であり、むしろ、そうした性能を引き出し役に立てることが、発見から70年、80年ぐらいたった今、ようやくできるようになってきたと考えた方が良い。

反強磁性体の性質は様々あるが、近年、特に注目されるようになったのが、トポロジカルな特性が反強磁性体において利用できる形になってきたことによる（図4-2-3）。従来の反強磁性体は磁化が小さく、磁場に対する応答もそれに比して小さかったため、（Néelの言葉通り）あまり応用に向かない材料であった。しかし、近年発見されたトポロジカルな性質を持った反強磁性体には、従来、大きな自発磁化をもつ強磁性体でしか露わに見られなかった物性（異常ホール効果、異常ネルンスト効果、カー効果など）が、磁化の大きさが通常の反強磁性体と同様に小さいにも関わらず、大きく発現するという特性がある。この特性は、「たまたまその物質がそうなっている」わけではなく、トポロジカル電子状態を持つ物質の物理から説明できるものである。そのようなしつかりした学理がある性質のため、それに基づいて物質開拓をするということも可能になってきており、先ほどからさまざま議論されているようなハイスループットの理論での物質探索なども可能になってきている。

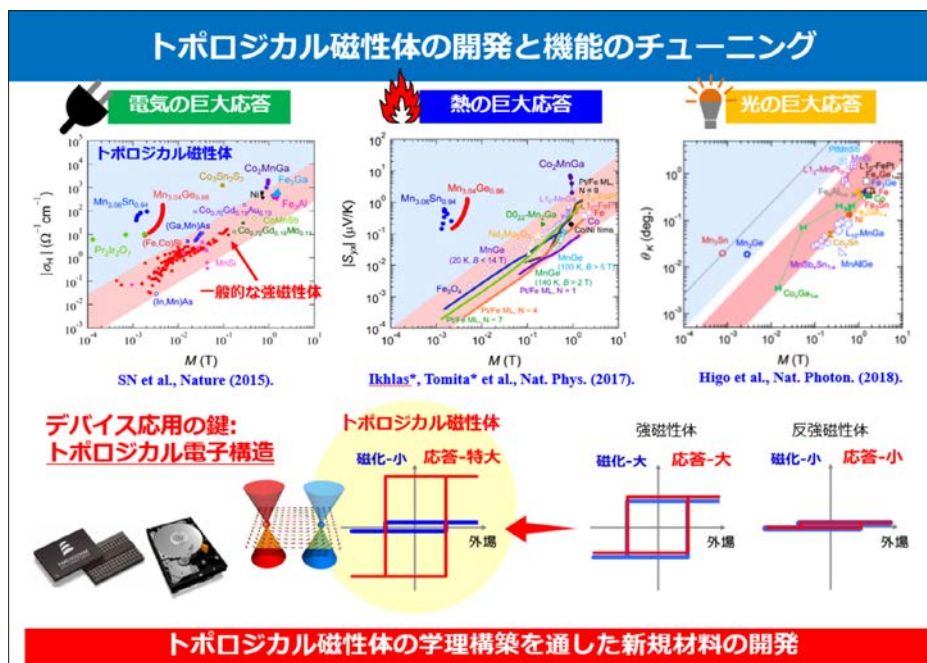


図4-2-3 トポロジカル磁性体の巨大応答

一方で、このような物質は強相関物質でもあるため、簡単に理解することはできない。我々は、物性物理の立場からそれを幾つかに切り分けて理解しようとしているが、その切り分けのための重要な要素の一つが、電子構造のトポロジーであるトポロジカル・バンド・ストラクチャー、もう一つが、反強磁性体の特徴づけるスピン、実空間の自由度であるマルチポールである。現在、反強磁性スピントロニクス of 学理が、それらの複合として非常に発展してきており、それによってさまざまな応用の可能性が見えてきている。

応用の一例として、オプティカルインターコネクトを簡単に説明する。信号伝送を電気配線から光配線に置き換えて、伝送にかかるエネルギーロスを削減するというのは、ICT 技術の中で長年の取り組みの目標であり、将来的にはそれをチップの中にまで到達させようとしている。現在のところ、基幹ネットワークからデータセンターにまでに入り、各サーバーラックに届くあたりまでは光配線化されているが、その後で電気信号に変換して、サーバにデータを送るための、ルータやスイッチでの膨大な電力消費が大きな問題となっている。一刻も早くこの部分を光化することが全世界の目標になっている。そこで必要になっているのは、光の持つテラヘルツ、あるいはもっと高速の情報を、100メガから1ギガヘルツぐらいしか駆動できない電気信号に収めるとともに、光ファイバーのシリアル信号をCPUが扱うパラレル信号にシリアル・パラレル変換するための光 I/O の開発である。

この分野に関連して、我々は、JST の未来社会創造事業の中で「スピントロニクス光電インターフェースの基盤技術の創成」に採択され研究を遂行している。この分野は全世界的に競争の激しい分野であるため、我々アカデミアにとっては厳しい挑戦でもあるが、現在主流のエレクトロニクスとシリコンフォトリニクスの融合ではなくて、我々の得意技であるスピントロニクスをそこに融合させるという基礎的な観点で、さらなる未来の技術を構築しようとしている。

その中で見えてきた、新しい基礎的課題について簡単に紹介する。それらは光電融合の基本となる「光と電子をいかに結合させるか」ということの追求に関係している。そもそも、高速・低損失といった光の有用な性質は、物質と容易にカップルしないことに起因している面も多く、このため、必要な時は強く光と物質をカップルさせたいという要請がある。そのための技術はいくつか既に出てきているが、それらはそれぞれの分野でばらばらに存在している状態である。それらを一気に通貫で研究する戦略的な研究体制を日本で構築するというのが、今後非常に重要だと感じており、それによって、新しい光バッファ、メモリというようなものの芽

も生み出されると考えている（図4-2-4）。それに関連した基礎的な問題としては熱化がある。高速の信号処理とその際の電力ロスを考えようとする際、そもそも熱がどうやって発生するかを、そのような高速のスケールで理解する必要がある。光によってフェムト秒のスケールで電子温度を変化させると、その非平衡状態から、ピコ秒くらいの時間スケールで、スピン温度、格子温度が、それぞれ変化していくが、その詳細な学理を追求することで、速い時間スケールでの熱の制御に繋げることができる。

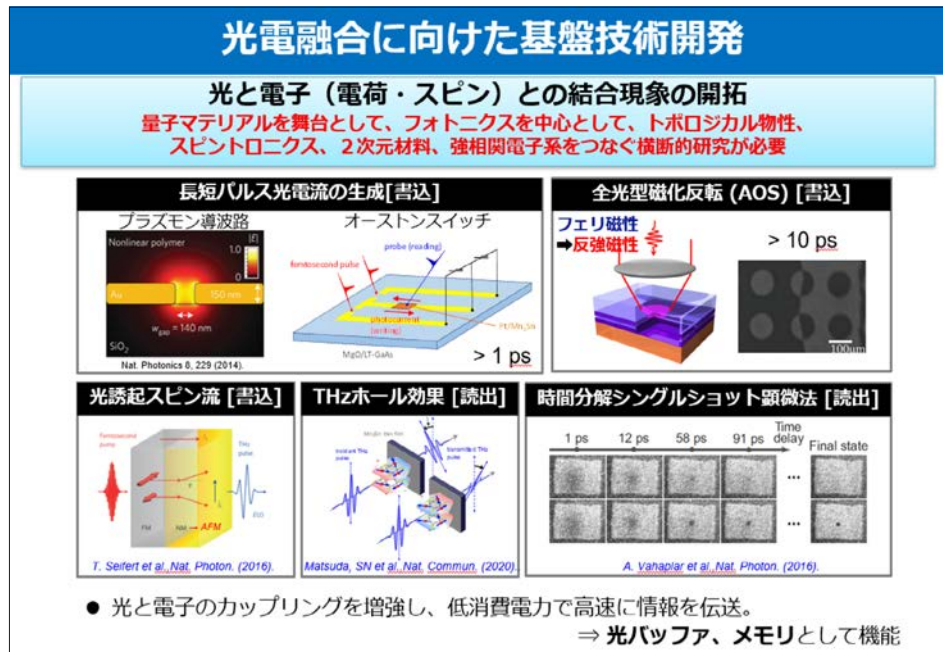


図4-2-4 光電融合に向けた基盤技術

反強磁性スピントロニクスの分野の話では、ピコ秒レベルの高速な駆動電流とスピンの結合がどういったふうにかつプルしていくかということも、今ホットな話題で少しずつ理解されてきている。我々のグループもそれに寄与しているが、その結果から、デバイスの駆動電流低減や高速化、そしてデバイス構造の単純化ができつつある。

量子マテリアル中のトンネル現象の理解も進んできている。強磁性体スピントロニクス分野においては強磁性体内のスピン偏極電流のトンネル現象が非常に有用であるが、同様に、量子マテリアルの実用化にも、その内部の準粒子を室温でトンネルさせることが必要になる。最近ではトポロジカル反強磁性体の理解に有用な磁気八極子というものが、絶縁膜を介してトンネル伝導できることが実験的に検証されており、それに起因するTMR現象も観察されている。我々のグループの結果はMR比で1%程度と、強磁性体を用いたMRAMの200%にはまだ及ばないが、中国のチームが我々と同時期に出した結果では、MR比100%を達成しており、すでに反強磁性体のTMR素子は、強磁性体のTMRに対して遜色ない性能が得られ始めていると言っても良い。

次に、今まで説明したのと同じ学理がエネルギー変換にも使えることを少しだけ紹介する。ここまで、熱の発生をいかに抑えるかの課題について述べてきたが、出てきた熱をどうやって操るのかということも応用上は大切である。熱は、身近に見えているようで、実はどこをどう流れているかは見えてないという性質がある。熱の流れを見ることができれば、いろんな現象の今後の変化の予兆をとらえることができる。熱の流れを電氣的にセンシングする原理としては、ゼーベック効果と異常ネルンスト効果が知られている。ゼーベック効果の場合は、良く知られているように温度勾配と同じ方向に電位差が発生するが、異常ネルンスト効果の場合、温度勾配に対して横方向に電位差が発生する。この違いによって、異常ネルンスト効果を利用すれば、薄膜でかつフレキシブルな熱電変換素子を作ることが可能になる（図4-2-5）。

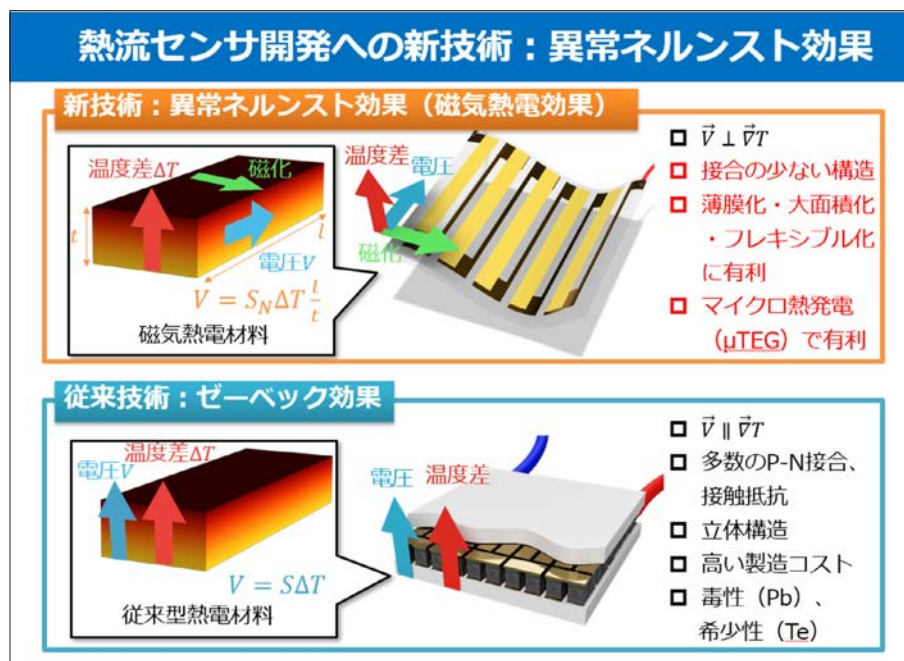


図4-2-5 異常ネルンスト効果を用いた熱流センサ

こういったものが実際に使えるようになってきたのは、トポロジカルな効果により、異常ネルンスト効果を増大することができてからである。先ほどのトポロジカル磁性体と同じ理解がこの磁気熱電効果の理解にもつながっている。これが実用化すれば、ゼーベック効果を使った5万円の素子が、例えば数百円ぐらいでできるようになるということも企業とのコラボレーションで見えてきている。また、この素子は、印刷でもつくることができるので、「roll-to-rollで製造する」、「高性能化してエネルギーハーベスタを作る」、といった可能性も開けてくる。

今後、磁気熱電素子をさらに広く応用していくためには、熱電性能をさらに上げていく必要がある。そのために、これまで従来熱電で行われてきた、「量子自由度の効率的な利用」を磁気熱電にもどんどん取り入れていくことが有効であると考えている。トポロジカル量子相自体も非常に重要な探求のテーマであるが、フォノンドラッグやマグノンドラッグなどの効果を磁気熱電に取り込んでいくことも非常に興味深い対象になる。

最後に、日本はこれからさらに少子化に向かう中で、素材・マテリアル産業に関してはまだ従来からの強みを有していても、それを利用するデバイス構築の技術を有する企業が非常に弱体化している。量子マテリアル・エレクトロニクスで勝っていくためには、そこに対する人材育成というのが非常に重要であると考えている。10年、20年考えた時に、教育を担うわれわれ研究者こそがそういう人材を育てていく、そういうスキームを考えていくことが重要と認識している。

【質疑応答】

Q：最初が反強磁性のMRAMの話で途中から光電融合の話も出てきた。反強磁性体で強磁性のMRAMを置き換えようという発想か。それとも何か他の新しい光電インターフェースを構築しようとしているのか。

A：反強磁性体は非常に高速に応答するため、MRAMの強磁性体を置き換えて高速MRAMとすることもできれば、ピコ秒以下の応答速度となると光信号処理の領域にも迫るため、今は存在しない光バッファ材料のようなものにも展開できる可能性があると考えている。

Q：反強磁性体を強磁性体の置き換えとして使う場合、外部へ磁場が出ないため、読み出し・書き込みが難しいと思うが。

- A：現在世界中のスピン트로ニクス研究者が、対象を強磁性体から、反強磁性体に研究対象を移している。
Mn₃Snは反強磁性体でありながら、TMRはまだ小さいが強磁性体並みの異常ホール効果などを示しているので、材料探索により他の候補物質が出てくれば、現在のスピン트로ニクス素子強磁性体の部分を置き換えるだけで動作する可能性もある。
- Q：応用を考えるとT_cやT_Nの高いものしか研究対象として選べなくなる。パイロクロアやスピンアイスなどの低温での磁性を研究されていた中辻先生としては、そうした物性上面白い材料の研究をどう位置付けているか。
- A：基礎こそが大事というのは間違いない。今日は、バックキャストしたストーリーを紹介したが、私自身がこの対象に出会ったのは、キュリオシティードリブンな物性研究の中であった。そうした、科学者の興味からスタートする研究も、これがその先何につながるだろうという思いから始まる研究もどちらも重要である。

4.3 さきがけ「[量子生体] 量子技術を適用した生命科学基盤の創出」の取組と成果

瀬藤 光利（浜松医科大学）

分析科学の歴史を振り返ると、X線、電子線、核磁気共鳴分光（NMR）の1次元スペクトルの情報を、2次元、3次元スペクトルへと展開させることで、生命科学・医学に大きなブレークスルーがもたらされてきた。その多くがノーベル賞を受賞している。私自身は質量分析の2次元化、即ち質量分析イメージング装置の開発を島津製作所等とともに取り組んで来た。特に、質量分析イメージングを用いた生体内小胞の移動や分布の顕微分析などを専門としている。1次元目の情報を与える物理現象は他にも様々あり、例えばラマン散乱分光がラマン顕微鏡になり、FRET現象の利用も行われてきた。近年新規技術の出現が著しい「量子技術」もその一つとして、発展させれば従来と全く異なる生体情報が取得でき、ひいては我々の健康や長寿につながるのではないかと。そのような考えを持って、JSTさきがけ研究領域「[量子生体] 量子技術を適用した生命科学基盤の創出」（2017～2022年度）（文部科学省H29年度戦略目標「量子技術の適用による生体センシングの革新と生体分子の動態及び相互作用の解明」に基づく）の研究総括を務める機会を頂いた（図4-3-1）。この分野に携わる中で、量子技術を生体に適用するだけでなく、生命の中で量子効果が利用されている現象を探る研究にも関わることとなった。さらに、「量子論」という考え方の枠組み自体の応用を図る研究の方向性があることも知った。学術的には、量子科学技術研究開発機構（QST）の平野理事長（当時）が立ち上げられた「量子生命科学」分野とも関係がある。また、量子技術を利用した新規な生体計測装置・機器の産業展開も期待されると戦略目標には述べられていた。

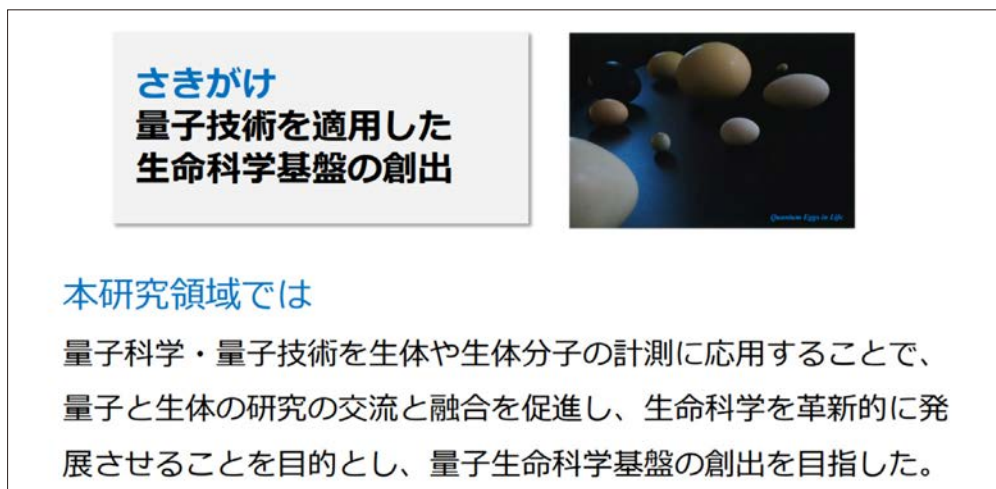


図4-3-1 さきがけ研究領域「[量子生体] 量子技術を適用した生命科学基盤の創出」

戦略目標の下、本さきがけ研究領域では3つの達成目標を掲げた（図4-3-2）。達成目標I「量子センサー技術を用いて生命科学などの新たな潮流を生み出す」は、当初から見込みが高く、実際達成できたと考えている。達成目標II「光量子検出技術などでこれまで可視化されなかった状態を捉える」は、取り組んでみると分からない部分があった。達成目標III「量子ビーム・計測技術の高度化で分子間相互作用や機能を解明する」については、放射光（SPring-8など）やイオンビームも「量子ビーム」と呼び、一体の分野として進めていこうとするものである。

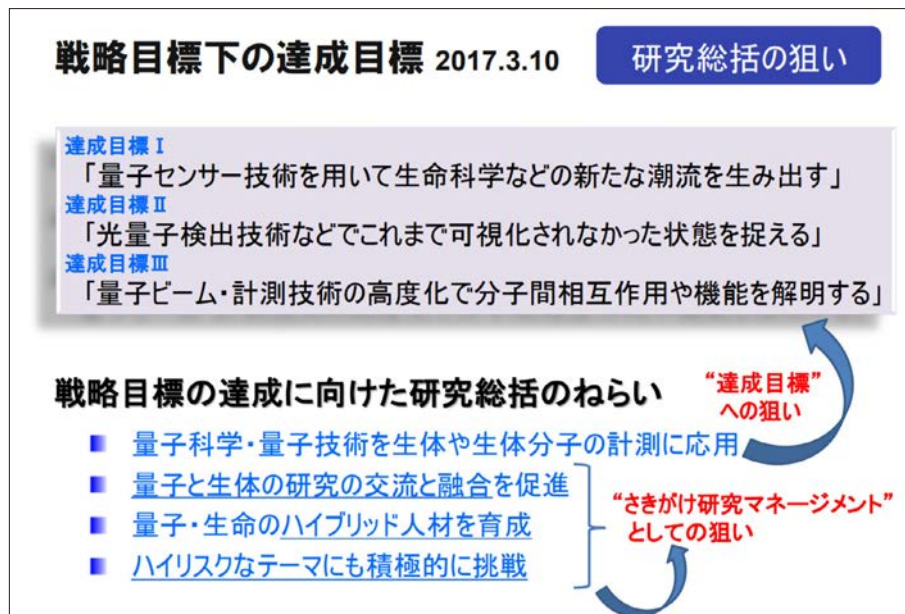


図4-3-2 さがけ「量子生体」における達成目標

研究課題の選考においては、3年半の研究期間で必ずしも成果が出ずとも、長い目で成果の創出が期待できる研究（者）を積極的に採択しようと考えた。応募の中には、量子情報理論や数学の圏論など、選考側が想定していなかった研究内容もあった。また、量子科学計算の内容も想像より多かった。結果、多くの理論系研究者も含めて採択をした（図4-3-3）。また、私の理解の及ばない部分については、領域アドバイザーの先生方に大にご助力頂いた。

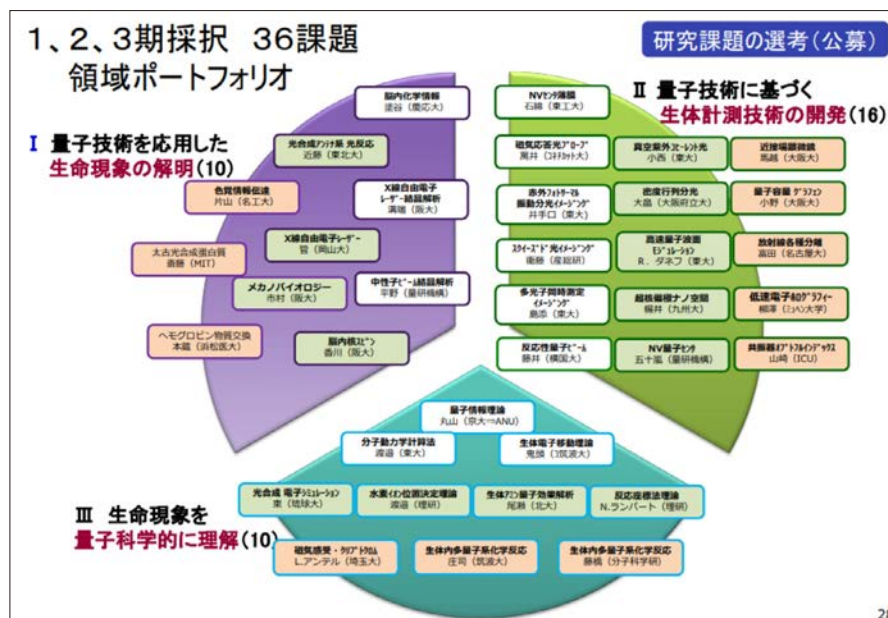


図4-3-3 さがけ「量子生体」における採択課題の領域ポートフォリオ

研究期間はCOVID-19パンデミックと重なったが、オンライン会議等が普及したことで、海外の研究者らにとっては取り組みやすい面もあったと思われる。

研究成果には様々あるが、特に本ワークショップ（WS）のテーマである量子マテリアルに関わるものとしては、まず萬井氏（コネチカット大）の磁場応答光プローブが挙げられる。採択の際は実現見込みについて危惧もあったが、結果的には世界初となるプローブが開発された。計測技術については、各研究課題で着実な成果が上げられたが、特に楊井氏（九州大）の水分子の超核偏極を実現する技術は大きなブレイクスルーと考えている。ナノサイズの有機結晶から水分子へ核スピンの偏極を移行させるという原理である。さらに、水分子からほかの（水溶性）生体分子にも偏極状態を移せるようになれば、従来のPET（Positron Emission Tomography）検査での被ばくを回避して、MRI検査で薬物動態解析などが行えるようになると期待される。新奇マテリアルの研究開発では、設計の発想だけでなく、実際に合成してみないと分からない部分があると思われる。この度のさきがけ研究領域の中でも、思いもしない想像以上の技術が生まれることを目の当たりにした。今後もマテリアル分野がますます発展することを期待したい。

本さきがけ研究領域は2023年2月に終了し、翌月3月には事後評価を頂いた。私自身も総括として貢献をしたという評価と頂き、安堵したところである。

また、他の関連する事業について、JST光・量子飛躍フラッグシッププログラム（Q-LEAP）では、アドバイザーボードメンバーとして参画し、勉強をさせていただいている。文部科学省の令和5年度戦略目標「量子フロンティア開拓のための共創型研究」の検討にも携わらせて頂いた。この戦略目標はマテリアル研究とはやや異なる観点ではあるが、ともに発展してゆくことを期待している。

【質疑応答】

Q：量子マテリアルあるいはそれをデバイス化したものは、医学研究において大きなインパクトをもたらし得るのではと想像する。医学研究者にとってはどのような関心やモチベーションがあるものか。

A：医学の世界では、観察つまり計測も重要ではあるが、あくまでメインは治療すなわち操作である。投薬や手術といった操作によって生体に何か良い作用をもたらせるものが望まれている。例えば、量子マテリアルをがん腫瘍部位に送達し、外部刺激で治療効果を発現させるなど。観察計測と治療操作では、レギュラトリーを含め異なる難しさが存在する。まずは観察計測によって基礎的な現象解明などができた上で、治療操作へと積み上げていくこととなる。このWSの話題の中でも、治療操作へと踏み込める可能性を感じる技術もあったので、今後考えていきたい。

Q：材料の分野でも扱う材料が違うと言葉が通じないことがある。量子科学から医学や生体応用に向かうとしたときの通訳やマネジメントのノウハウについて教えて頂きたい。

A：やはり人材である。量子に抵抗感のない人材を育てていく必要がある。特に放射線科で放射線診断や放射線治療を行っている医師らは、量子生体に関心を持つ人が多い印象である。また観察の道具である放射線と治療の道具である放射線がどちらも量子性があり共通している。基礎医学の研究者と比べて人数が多く、QSTや各大学にも必ず放射線に携わる人材がいるはずで、そこのつながりは重要と考えている。

Q：デバイスの開発者にとってライフサイエンスは重要なカスタマーと成り得る。イメージングやセンシングのデバイスで非常に重要な情報が得られれば、価格が高価であってもビジネスとして成立するからである。同時に、生体は非常に複雑な混合物であるため、非常に高い選択性や感度が必要で、挑戦的な対象でもある。先の質疑にあった、（量子マテリアルを）観察だけでなく操作・治療へ、という観点について、これらの研究開発を一体的に進めようという試みはどのような現状か？

A：医学の一手手前に薬学の世界がある。医学よりも系が純粹であるため、まずは初めにアプローチしやすい分野であろう。創業の世界では豊富な研究費が投じられており、また薬ができればより大きな利益が見込める。一方、実社会（医学）は、社会保障費としてさらに桁の大きな市場が存在するものの、いきなりアプローチできる対象ではない。まず薬学の世界の動物実験で揉まれるというステップを踏むことが現実的と思われる。

Q：この度のさきがけ研究領域の成果から、実際に医学の分野へ適用されるまでには、どれほどギャップがあるか。

A：例えばナノダイヤモンドなどは、創薬におけるドラッグスクリーニングなど、まず *ex-vivo* での応用が考えられる。その後、動物実験などのステップを踏んでヒトの *in-vitro*（生体内の系）へ進むことも考えられる。特にマテリアルの毒性などの検証はどうしても年数を掛けて行う必要がある。

5 | 総合討論

ファシリテーター 八巻 徹也（JST-CRDS）

総合討論では、①取り組むべき「量子マテリアル」の研究項目、②「量子マテリアル」分野の中で日本の強い部分を活かしつつ、応用に向けてステップアップさせるために必要な研究課題と要素技術、③「量子マテリアル」研究を効果的に加速させる研究開発体制・必要な施策や仕組みについて議論した。①～③について以下にまとめる。

①取り組むべき「量子マテリアル」の研究項目

【基礎研究】

- 軌道電流、軌道秩序、量子液晶
- 非相反効果
- 非線形応答
 - ➔バルク光起電力効果（シフト電流、インジェクション電流）
 - ➔非相反輸送現象、非線形ホール効果
 - ➔超伝導ダイオード効果
- 非平衡現象
 - ➔フロック状態、時間結晶、非エルミート系、非平衡トポロジカル相
- マルチフェロイクス、交差相関
- 相転移
 - ➔温度、電場、電流、光などの外場による相転移の誘起
- アシンメトリ物質（空間対称性を破る構造の物質）
- トポロジカル強相関電子系
 - ➔電子の干渉効果としてのフラットバンド
 - ➔カゴメメタル
- トポロジカルメタマテリアル
 - ➔三次元&低次元加工技術によるトポロジカル物性の発現・操作
- 室温超伝導

実に多様な材料系や概念や「量子マテリアル」領域に含まれており、多様な量子性を人為的に発現させ制御しようとする量子科学技術の潮流において、量子マテリアルは既存の材料では実現が難しい量子的機能発現が期待されるエマージングな領域である。そのため、今後も基礎的な研究を充実させていくことが不可欠である。

【応用研究】

- 半導体量子構造・低次元構造/接合
 - ➔量子ドット、超伝導接合、量子ホール状態制御、量子熱電変換、テラヘルツデバイス応用、フォノンエンジニアリング
- 不揮発性メモリ媒体における超高速ダイナミクスと制御
- 量子物質のナノスケールの界面の研究
 - ➔半導体応用を目指した表面伝導現象を持つ物質・材料系の開発
 - ➔次世代メモリ・センサー応用を目指した新しい量子トンネル伝導現象

- ➡ プラズモン効果を利用した光閉じ込めによる電子と光の相互作用
- 光とスピンの相互作用を活用した融合領域
 - ➡ フォトニクス+スピントロニクス+量子欠陥
- 量子位相エレクトロニクス
 - ➡ 量子ピエゾ効果
- 量子電池
- 量子効果を有する（可能性がある）生命分子
 - ➡ 超偏極分子、磁気受容分子、光合成分子、人工酵素、嗅覚受容体分子、抗酸化分子、変異遺伝子、亜硝酸還元酵素、合成生物関連分子、人工酵素

量子マテリアルは、メモリ等半導体デバイス、テラヘルツデバイスおよびセンシングデバイスなど既存のICTデバイスの性能を越える次世代デバイスへの応用が期待されている。さらに、フォトニクスやスピントロニクスとの融合、量子位相エレクトロニクスなどの新しい研究開発領域を支える基盤としても有望である。

さらに、量子力学の観点から生命現象を記述しようとする量子生命科学において研究対象となっている磁気受容分子や光合成分子などの量子性の解明には、量子マテリアルを基盤とする量子センシング技術が不可欠であり、重要な応用先として位置づけられる。

②「量子マテリアル」分野の中で日本の強い部分を活かしつつ、応用に向けてステップアップさせるために必要な研究課題と要素技術

「量子マテリアル」は、我が国の長年にわたる物性科学の基礎研究・応用研究の積み重ねにより、理論・実験・材料開発等において世界的にも強み・競争力を有する領域である。この強みを生かして応用に向かうために必要な研究課題と要素技術として、以下の多数の項目が挙げられた。

- 不揮発メモリ応用
 - ➡ 高速駆動を目指す基礎学理の構築と応用研究
 - ➡ 低消費電力化（電圧駆動）のための基礎研究
- エネルギー変換応用
 - ➡ 熱に係る量子的自由度を適切に利用するエネルギー変換技術
 - ➡ 熱の可視化技術
- バイオ応用
 - ➡ バイオ生産高効率化などのホワイトバイオ
 - ➡ 生命現象イメージング（診断）と制御（治療）
- 新機能物質・材料創製
 - ➡ 対称性の破れに関連した異常物性の研究
 - ➡ 高圧力や高磁場などの極限環境での物性研究
- 基盤技術
 - ➡ 高品質な表面・界面の形成
 - ➡ 極限環境合成、ハイスループット合成
 - ➡ 高精度・高確度の材料改質
 - ➡ デバイスプロセス技術
 - ➡ 高精度・高分解能の計測・評価
 - ➡ 第一原理計算やインフォマティクスによる広域量子物質探索

量子マテリアルはエマージングな領域であることから、幅広い応用への期待があることがわかる。物性研究の範囲に留まらず応用研究を推進していくためには、基礎研究で新機能の実現可能性を示すことによって産

学双方にとって魅力的な応用先を見出し、その実現のために必要な性能の目標値を明確にしていくことが必要である。また、実用化のためには、量子マテリアルに適した材料合成技術、量子性を乱さないプロセス・デバイス加工技術、量子性の高精度・高分解能の計測・評価技術および第一原理計算やインフォマティクスなどによる量子状態のシミュレーション技術も不可欠である。

③「量子マテリアル」研究を効果的に加速させる研究開発体制・必要な施策や仕組み

総合討論の最後に、量子マテリアルの研究を応用に向けて加速させる研究開発体制・必要な施策や仕組みについて、議論した。以下に、挙げられた項目を示す。

- 役割分担の明確化
 - ➔基礎研究者は基礎に集中
 - ◆取り扱っている物質や、研究手法の異なる研究者間の交流
 - ◆量子研究へ展開の可能性の認識
 - ◆化学や計算科学との連携
 - ➔基礎研究の成果を応用に繋ぐ体制
 - ◆材料合成、基礎物性、デバイス応用の連携
 - ◆大学（基礎）と企業（応用）の連携
 - ◆企業で開発経験豊富な人材によるコーディネートやマッチング（特許取得等含む）
 - ◆研究ビジョンを持った若手マネジメント人材の養成
 - ◆エネルギー関連やバイオ関連等の異分野との連携強化
 - ◆社会要請や現行技術のボトルネックの情報共有の仕組み
 - ◆異分野連携（複合化）領域の設置
- 研究の将来性を専門的視点で見極めた上での評価
- 成果に繋がりにくい研究の長期的支援
- 材料創製・先端計測プラットフォームの充実
- テストベッド構築とネットワーク化
- ハイスループット合成や第一原理計算による広域構造・物性予測研究体制
- スタートアップを促す仕組み
- 国際連携の枠組みをつくる仕組み
 - ➔強みを持ち寄った連携
 - ➔素材、回路設計、インテグレーションなどがわかる人材が、日米の両方にWin Winになるように戦略を設定し、IPの問題など法的な整備も呼びかけながら進めることが必要
- 次世代半導体応用
 - ➔大学が国の戦略的投資のもとに、企業と連携することで素材の競争力をさらに高めるとともに、米国の半導体企業と連携して日本で開発した素材をデバイス、ICレベルに引き上げる
 - ➔10年後日本に呼び戻すことも視野に入れ、若手研究者を米国に派遣して現地で半導体技術を習得させ現地のポジションを獲得できる人材を育てる仕組み

量子マテリアルの基礎研究の結果として、ある材料系で新機能の可能性が示されたとしても、デバイス化・システム化の段階で必ずしもその材料系がベストとは限らない。このような状況において、材料探索等からデバイス化・システム化等の応用に向けた技術開発までの産学の役割分担が重要である。さらに、将来、応用に向けた技術開発を担う量子人材の不足は喫緊の課題である。米国や欧州でも量子技術に関連する大学高等教育だけでなく企業人材の育成に積極的に取り組んでおり、国際的な人材交流を活用した人材育成を推進するべきである。

付録

付録1：開催趣旨・プログラム

開催趣旨

JST CRDSは、科学技術に求められる社会的・経済的なニーズを踏まえて、我が国が重点的に推進すべき研究領域や課題、その推進方策に関する提言を行っています。その活動の一環として、今回、量子マテリアルに関する研究開発動向を俯瞰するワークショップを開催いたします。

量子技術は産業、情報セキュリティ、国防、金融などに大きな影響を及ぼす革新技術と位置付けられ、米国の国家量子イニシアチブ法やEUのQuantum Flagshipプログラム等、世界各国で研究開発の重点化、拠点形成および人材育成等の戦略的な取り組みがなされています。さらに、昨今では、民間企業が中心となって野心的な目標を掲げて量子コンピュータ、量子ネットワーク、等の研究開発や事業化等の取り組みが加速しています。我が国では2020年の内閣府「量子技術イノベーション戦略（最終報告）」において、量子技術の4つの主要技術領域として、「量子コンピュータ・量子シミュレーション」、「量子計測・センシング」、「量子通信・暗号」および「量子マテリアル（量子物性・材料）」が示され、その中でトポロジカル量子物質（グラフェン等）、トポロジカル磁性体、スピン流材料、等の量子マテリアルは、次世代デバイス開発や新規物性材料創成によって産業競争力の強化につながる有望な領域として位置付けられました。さらに、2022年4月の内閣府「量子未来社会ビジョン」では、「量子コンピュータ」、「量子ソフトウェア」、「量子セキュリティ・量子ネットワーク」および「量子計測・センシング/量子マテリアル」の4つの領域において、量子技術と従来型（古典）技術システムとの融合、先端の量子技術の利活用促進および量子技術を活用した新産業/スタートアップ企業の創出・活性化が掲げられています。その中で量子マテリアルは、量子コンピュータ、量子センシング、量子ネットワークおよびその他次世代デバイスの実用化に不可欠としています。

我が国の大学・研究機関では、トポロジカル量子物質やスピントロニクス等について質の高い研究が長年行われており、基礎的な知見が蓄積されているとともに、国際的に評価の高い研究開発を行っている研究者が存在し人材の厚みもあります。そのような我が国の強みを活かすことで、量子技術の社会実装を加速できると考えられます。そこで、本ワークショップでは、新規量子マテリアル創製から、量子機能の制御、量子機能の（情報・通信、環境・エネルギー、医療等への）応用までのこれまでの研究を俯瞰し、課題と今後の推進方策について検討します。

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

日時：2023年3月19日（日曜日）10:00～17:35

場所：TKP市ヶ谷カンファレンスセンター 9階（9A）およびオンライン（Zoom）会議

10:00～10:05	開会挨拶	曽根 純一（JST CRDS）
10:05～10:25	ワークショップの開催趣旨説明	佐藤 隆博（JST CRDS）
10:25～11:40	【話題提供1】量子マテリアルの創製	（各発表15分+議論10分）
10:25～10:50	新学術領域研究「量子液晶の物性科学」のこれまでの取組と成果	芝内 孝禎（東京大学）
10:50～11:15	トポロジカル量子物質科学の現状と展望	村上 修一（東京工業大学）
11:15～11:40	量子デバイス応用を目指したダイヤモンド成長技術開発	寺地 徳之（物材機構）
11:40～12:30	昼休み	
12:30～13:45	【話題提供2】量子機能の制御	（各発表15分+議論10分）
12:30～12:55	量子マテリアルのデバイス物性	岩佐 義宏（理研）
12:55～13:20	量子物質機能の戦略的創製と制御	石渡 晋太郎（大阪大学）
13:20～13:45	粒子線を駆使した量子材料の高機能化ー量子センサ、量子ビット形成とその応用ー	大島 武（量研）
13:45～14:00	休憩	
14:00～15:15	【話題提供3】量子機能の応用	（各発表15分+議論10分）
14:00～14:25	二次元原子薄膜ヘテロ積層/接合材料のテラヘルツ波デバイス応用	尾辻 泰一（東北大学）
14:25～14:50	次世代情報技術基盤としての量子マテリアル開発	中辻 知（東京大学）
14:50～15:15	さががけ「[量子生体] 量子技術を適用した生命科学基盤の創出」の取組と成果	瀬藤 光利（浜松医科大学）
15:15～15:30	休憩	
15:30～17:30	総合討論 ファシリテーター：八巻 徹也（JST CRDS） 戦略的に強化すべき領域とボトルネック 必要な研究支援策と研究開発体制（拠点形成、産学・海外連携など） その他（人材育成、知財戦略など）	
17:30～17:35	閉会挨拶	曽根 純一（JST CRDS）

付録2：参加者一覧

招聘有識者

(話題提供者)

芝内 孝禎	東京大学 大学院 新領域創成科学研究科 教授
村上 修一	東京工業大学 理学院 教授
寺地 徳之	物質・材料研究機構 機能性材料研究拠点 主席研究員
岩佐 義宏	理化学研究所 創発物性科学研究センター チームリーダー
石渡 晋太郎	大阪大学 大学院 基礎工学研究科 教授
大島 武	量子科学技術研究開発機構 量子機能創製研究センター センター長
尾辻 泰一	東北大学 電気通信研究所 教授
中辻 知	東京大学 大学院 理学系研究科 教授
瀬藤 光利	浜松医科大学 国際マスメイキングセンター センター長

(コメンテーター)

谷口 尚	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 拠点長
塚崎 敦	東北大学 金属材料研究所 教授
馬場 嘉信	名古屋大学 未来社会創造機構 教授

招聘有識者以外

(JST CRDS)

曾根 純一	ナノテクノロジー・材料ユニット 上席フェロー
眞子 隆志	ナノテクノロジー・材料ユニット リーダー
佐藤 隆博	ナノテクノロジー・材料ユニット フェロー
福井 弘行	ナノテクノロジー・材料ユニット フェロー
沼澤 修平	ナノテクノロジー・材料ユニット フェロー
高村 彩里	ナノテクノロジー・材料ユニット フェロー
馬場 寿夫	ナノテクノロジー・材料ユニット フェロー
宮下 哲	ナノテクノロジー・材料ユニット フェロー
永野 智己	総括ユニット リーダー・研究監
八巻 徹也	ナノテクノロジー・材料ユニット 特任フェロー
本間 格	ナノテクノロジー・材料ユニット 特任フェロー
赤木 浩	ナノテクノロジー・材料ユニット 特任フェロー

曾根 純一	上席フェロー
眞子 隆志	フェロー・ユニットリーダー
佐藤 隆博	フェロー
高村 彩里	フェロー
永野 智己	フェロー
沼澤 修平	フェロー
馬場 寿夫	フェロー
福井 弘行	フェロー
宮下 哲	フェロー
赤木 浩	特任フェロー
伊藤 聡	特任フェロー
岩本 敏	特任フェロー
川合 知二	特任フェロー
佐藤 勝昭	特任フェロー
玉野井 冬彦	特任フェロー
林 喜宏	特任フェロー
本間 格	特任フェロー
村井 眞二	特任フェロー
八巻 徹也	特任フェロー

(ワークショップ開催時のメンバー)

俯瞰ワークショップ報告書

CRDS-FY2023-WR-05

量子マテリアル研究の最前線

令和 6 年 3 月 March 2024

ISBN 978-4-88890-893-1

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

〒102-0076 東京都千代田区五番町7 K's 五番町

電話 03-5214-7481

E-mail crds@jst.go.jp

<https://www.jst.go.jp/crds/>

本書は著作権法等によって著作権が保護された著作物です。

著作権法で認められた場合を除き、本書の全部又は一部を許可無く複写・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。

なお、本報告書の参考文献としてインターネット上の情報が掲載されている場合には、本報告書の発行日の1ヶ月前の日付で入手しているものです。

上記日付以降の情報の更新は行わないものとします。

This publication is protected by copyright law and international treaties.

No part of this publication may be copied or reproduced in any form or by any means without permission of JST,

except to the extent permitted by applicable law.

Any quotations must be appropriately acknowledged.

If you wish to copy, reproduce, display or otherwise use this publication, please contact crds@jst.go.jp.

Please note that all web references in this report were last checked one month prior to publication.

CRDS is not responsible for any changes in content after this date.

FOR THE FUTURE OF
SCIENCE AND
SOCIETY



CRDS

<https://www.jst.go.jp/crds/>

