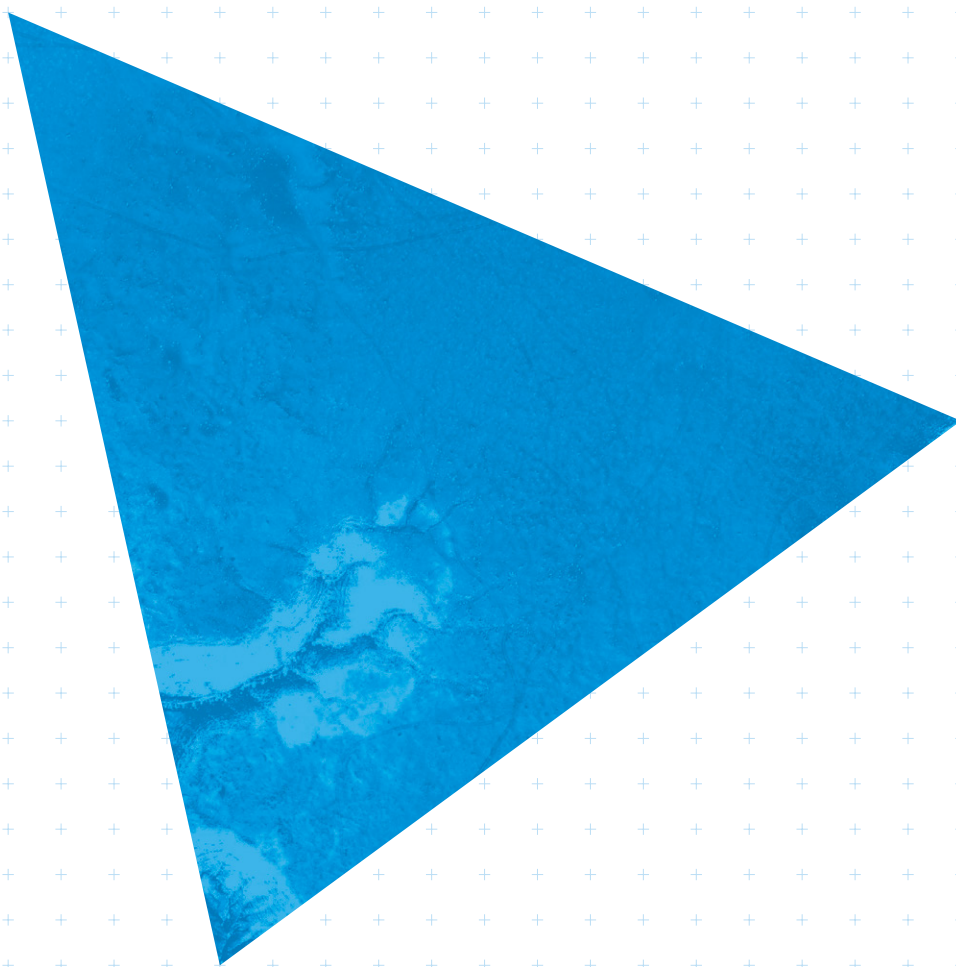


科学技術未来戦略ワークショップ報告書

量子マテリアル活用基盤技術の 創出

2024 年 9 月 14 日（土）開催



エグゼクティブサマリー

本報告書は、国立研究開発法人科学技術振興機構（JST）研究開発戦略センター（CRDS）が令和6年9月14日に開催した科学技術未来戦略ワークショップ「量子マテリアル活用基盤技術の創出」に関するものである。

デジタル化が進展した近年において、大規模データの高速度処理と低消費電力化の両立のような、既存技術の延長では克服が難しい問題が顕在化している。一方、量子マテリアルは、量子技術を支える基盤技術として研究開発が推進され、その過程で著しい進展を見せている材料や新たな材料も現れてきており、新規機能を実現する次世代ICTシステムや革新的エネルギーデバイスなどをはじめとした様々な応用の期待が高まってきている。量子マテリアルは、電子やスピン等の量子状態を人為的に制御することで新たな量子力学的機能を発現する物質・材料であり、その多くは日本が伝統的に強みを持つ固体物性研究の対象とされてきた。2020年1月に内閣府から出された「量子技術イノベーション戦略」では「量子通信・量子暗号」、「量子情報処理」、「量子計測・センシング」の3つが主要な技術領域とされる一方で、「量子マテリアル」はこの3つの技術領域を支える基盤技術の1つに位置付けられた。しかし、近年になって、広い分野に革新を起こす新たな量子マテリアルが出始めている。このような背景を踏まえ、JST-CRDSでは、様々な応用へ向けた量子マテリアルの研究開発が必要ではないかとの問題意識から、調査活動を進めてきた。

モアレ構造、非エルミート系、反強磁性スピントロニクスなどのエマージングな量子マテリアルにおける基礎研究が着実に進展する一方で、次世代デバイスとしての実用化を見据えた研究が限られている。この基礎研究と応用研究の間のギャップを埋めるためには、量子マテリアルR&Dを一気通貫に実施する研究開発体制が不可欠である。具体的には、社会実装に向けた課題を量子マテリアル活用R&Dにトップダウン的に取り入れ、基礎研究と活用基盤技術が相互に課題を共有し、新規機能を有するデバイスを実証する方向性こそが、日本が伝統的に強みを持つ固体物性研究と社会実装を繋ぐ架け橋になると考えた。そこで、その具体的な方策を考えるためワークショップを企画した。

本ワークショップでは、3つのセッションで話題提供がなされた。第1部「エマージングな量子マテリアルの基礎研究」ではモアレ超格子や非エルミート光学、スピントロニクスについて、第2部「量子マテリアル研究に求められる活用基盤技術」では量子マテリアルの合成・加工技術、理論、計測技術について、第3部「量子マテリアルの実用化に向けた取り組み」では企業における新規材料開発の取り組みについて、それぞれ情報提供と質疑応答が行われた。

最後の総合討論においては、3つの論点で議論が行われ、事前アンケートの回答も含めて、以下のようにまとめた。

（1）量子マテリアルの新規機能の発揮に必要な材料物性を理解するために必要な目的基礎研究

量子マテリアルの新機能を発現させるには、材料が持つ潜在的な物性を深く理解することが必要である。また、研究分野を特定の目的に偏らせず、幅広い視野を持って設定することが重要である。キュリオシティ・ドリブンのアプローチが新たな発見をもたらす可能性が高いことから、目的基礎研究においては「ニーズ」だけでなく「シーズ」にも焦点を当てることが重要である。社会実装や応用を見据えながらも、それらに引きずられることのない柔軟な目的設定が必要である。

(2) 量子マテリアルの材料物性を新規機能の発揮に繋ぐために必要な活用基盤技術

量子マテリアルの新規機能を発揮させるためには、量子状態を適切に計測し、制御する技術が不可欠である。その実現には、計測技術の高度化だけでなく、物質合成や材料理論との連携が重要である。量子マテリアルを実用化するためには、高品質な基板作成技術の確立が必要である。また、量産を常に意識しながら、研究段階での小規模な実験システムで試行錯誤し、社会実装に必要な関連周辺技術に関するプロトタイプ開発研究を進めることが求められる。

(3) 産業界を含む量子マテリアル R&D を推進するために必要な方策

量子マテリアル R&D を推進するためには、目利き人材やコーディネーターの育成と、実用に近い研究開発を実施する人材の評価体制の整備が必要である。また、日本の材料合成分野の強みを維持するためにも、継続的な技術発展と資源投入が重要である。ニーズとシーズのマッチングを促進するためには、企業と大学間の連携を強化し、研究成果を社会実装へとつなげる仕組みの構築が必要である。加えて、日本の量子マテリアル技術の優位性と独自性を明確にするために、海外との連携やコミュニケーションの活性化も必要である。同時に、国内の人材育成を急務としつつ、海外で活躍する多様な人材を日本に取り込む体制を整えることも重要である。

これらの議論を踏まえ、CRDS では今後国として重点的に推進すべき研究領域と具体的研究開発課題を検討し、研究開発の推進方法も含めた戦略プロポーザルとして、関係府省や産業界・学界等に提案する予定である。

目次

1	趣旨説明	
	鈴井 伸郎 (JST-CRDS)	1
2	エマージングな量子マテリアル研究	6
2.1	モアレ構造による新たな物性・機能の創出 (ファンデルワールス複合原子層) 町田 友樹 (東京大学)	6
2.2	非エルミート光学とその周辺 岩本 敏 (東京大学)	15
2.3	“量子マテリアル” 研究とスピントロニクス素子への応用可能性 深見 俊輔 (東北大学)	21
3	量子マテリアル研究に求められる活用基盤技術	27
3.1	量子マテリアルの機能創出のための合成・加工技術と連携体制 吾郷 浩樹 (九州大学)	27
3.2	理論による量子マテリアルの新機能・魅力の提示と技術への期待 村上 修一 (東京工業大学)	33
3.3	量子マテリアルの特徴を明確化させる計測技術 佐藤 宇史 (東北大学)	39
4	量子マテリアルの実用化に向けた取り組み	49
4.1	トポロジカル物質を用いた新しい事業の展開 佐藤 太紀 (TopoLogic 株式会社)	49
4.2	固体量子センサ材料としての単結晶ダイヤモンド 辰巳 夏生 (住友電気工業)	52
5	総合討論	
	ファシリテーター 佐藤 隆博 (JST-CRDS)	58
付録		63
付録 1	開催趣旨・プログラム	63
付録 2	参加者一覧	65

1 | 趣旨説明

鈴木 伸郎（JST-CRDS）

デジタル化が進展した近年において、大規模データの高速処理と低消費電力化の両立のような、既存技術の延長では克服が難しい問題が顕在化している。一方、量子マテリアルは、量子技術を支える基盤技術として研究開発が推進され、著しい進展を見せている材料や新たな材料も現れてきており、新規機能を実現する次世代ICTシステムや革新的エネルギーデバイスなどをはじめとした様々な応用の期待が高まってきている。

量子マテリアルは、電子やスピン等の量子状態を人為的に制御することで新たな量子力学的機能を発現する物質・材料であり、その多くは日本が伝統的に強みを持つ固体物性研究の対象とされてきた。2020年にCRDSが発刊した戦略プロポーザル「量子2.0」では、量子マテリアルは量子技術の4つの大きな柱の一つとして提案した（図1-1）。

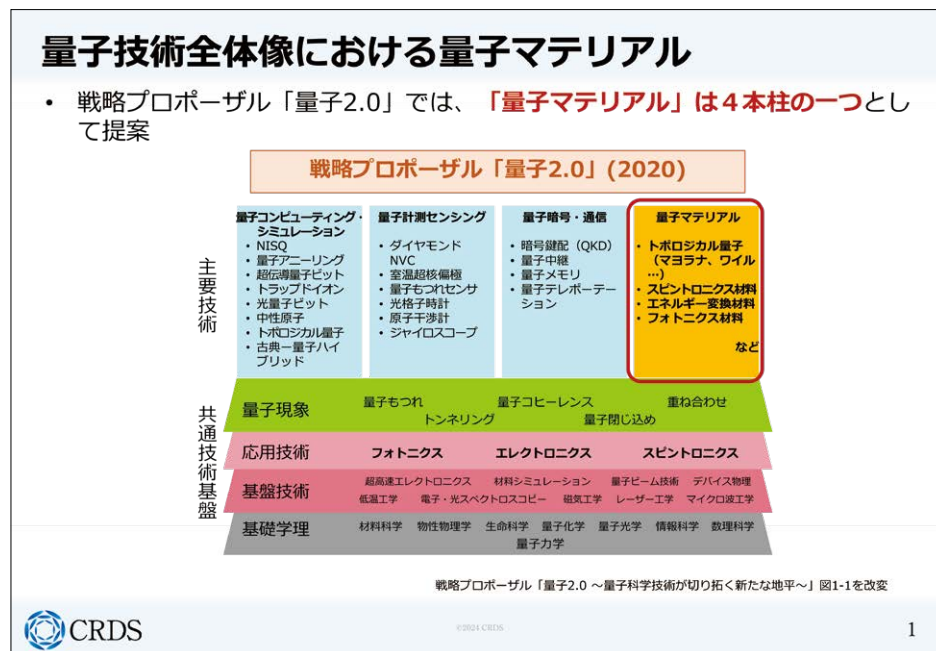


図 1-1 量子技術全体像における量子マテリアル

しかし、2020年に閣議決定された内閣府・量子技術イノベーション戦略では、「量子通信・暗号」「量子情報処理」「量子計測・センシング」を支える基盤技術として量子マテリアルが位置けられた（図1-2）。CRDSは、近年、広い分野に革新を起こすような新規の材料系・概念が出はじめていることに注目し、量子3本柱の基盤技術に留まらない、広い応用へ向けた研究開発の可能性について、調査活動を進めてきた。

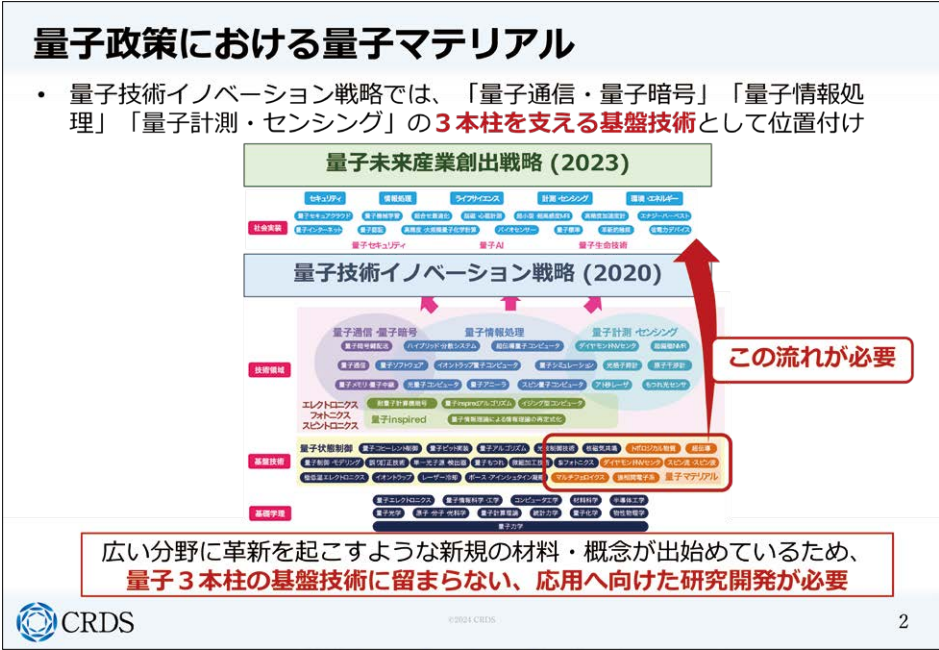


図 1-2 量子政策における量子マテリアル

図1-3に量子マテリアル研究の俯瞰図を示す（2023年3月開催CRDS俯瞰ワークショップ「量子マテリアル研究の最前線」の報告書からの引用）。調査活動を行う中で、赤枠で示した材料系（スピントロニクス材料、フォトンクス材料、二次元層状材料、トポロジカル量子物質）が特に注目されていること、そしてこれらの基礎研究と応用研究の間にギャップがあることが分かってきた。

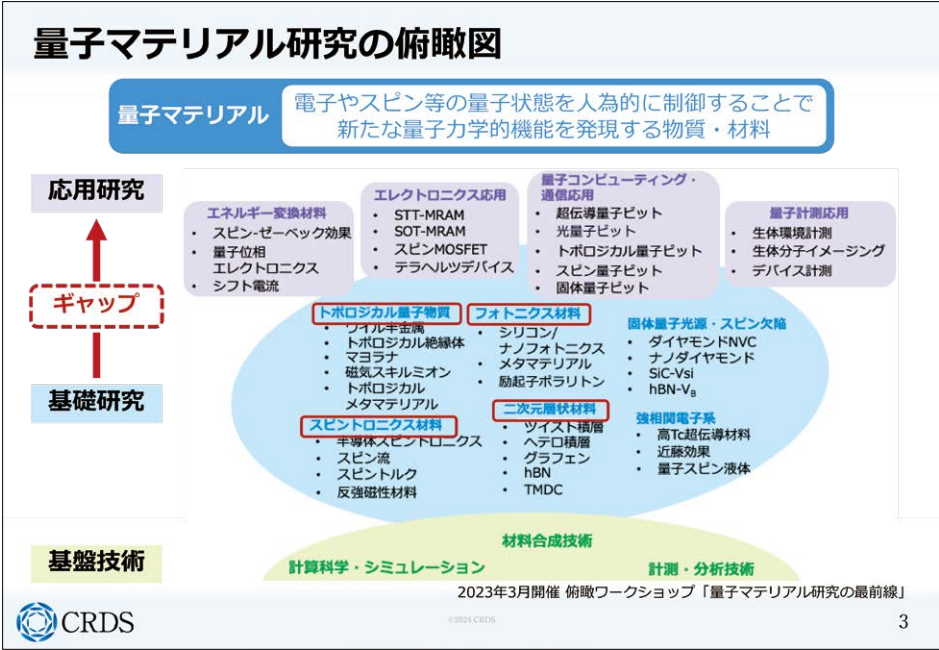


図 1-3 量子政策における量子マテリアル

図1-4に幅広い量子マテリアルの中で著しい進展を見せる4つのエマージングな材料系を示す。スピンフォトニクス、非エルミート系、モアレポテンシャル、トポロジカル反強磁性体の4つの材料系は、それぞれ古典的な材料において、近年になって新しい物理現象が見出されており、「応用に向けた研究課題」を克服することで、紫で示す実社会へ応用が期待されている状況である。

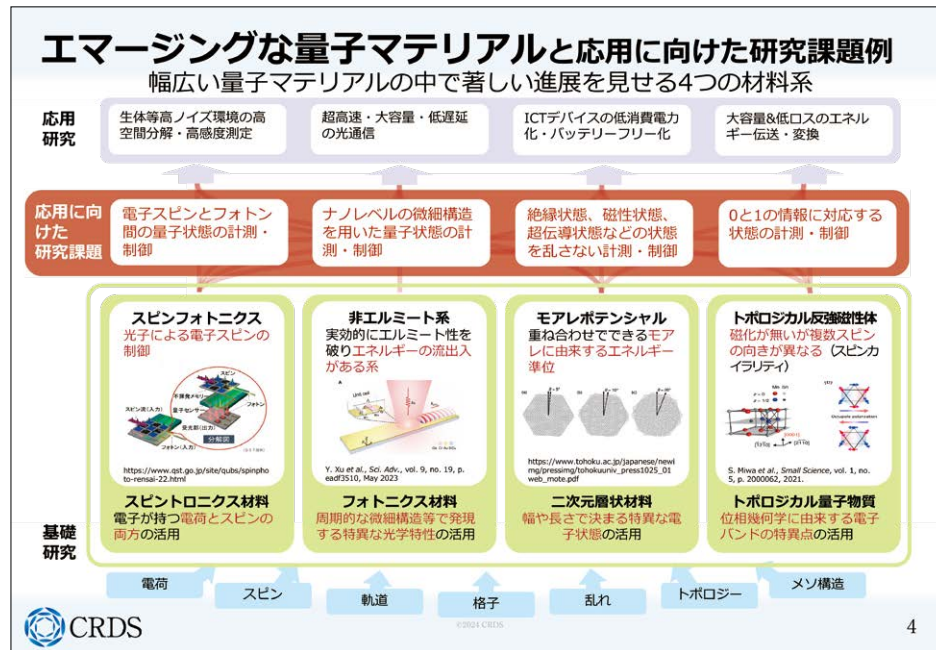


図 1-4 エマージングな量子マテリアル

図1-5に量子マテリアルの応用に向けた研究開発領域を示す。基礎研究と応用研究の間のギャップを埋めるために、「量子マテリアル活用R&D」を提案したい。具体的には、目的基礎研究、活用基盤技術、新規機能実証の3つのレイヤーに分け、それぞれ応用を見据えた研究を推進することで、紫で示す実社会へ応用を実現し、最終的には新規機能を実現する次世代ICTシステムや革新的エネルギーデバイスなどをはじめとした様々な応用を目指したいと考えている。

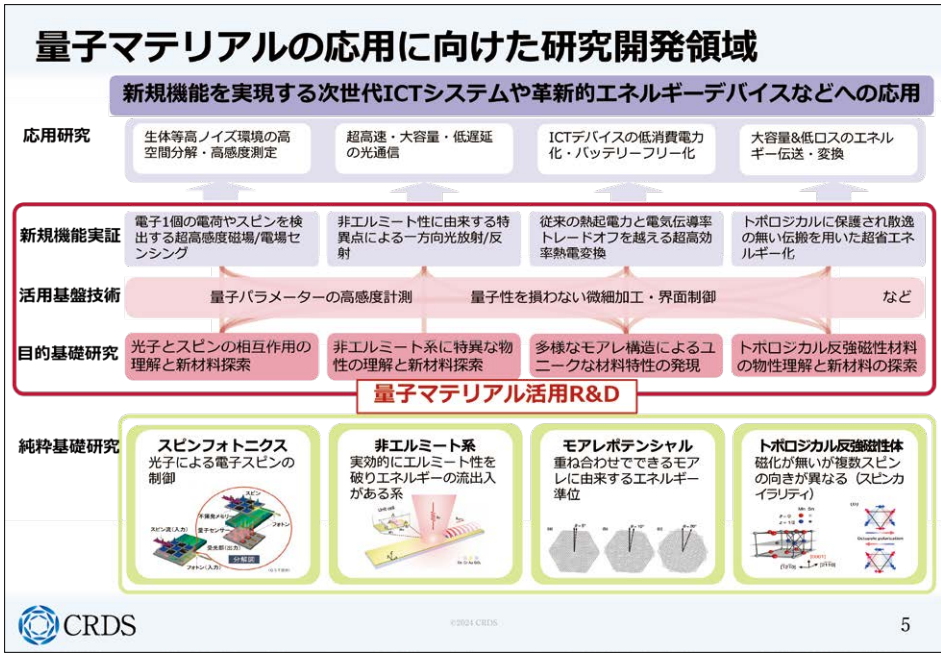


図 1-5 量子マテリアルの応用に向けた研究開発領域

図1-6に研究課題の推進方法を示す。具体的には、社会実装に向けた課題を量子マテリアル活用R&Dにトップダウン的な取り入れ、目的基礎研究と活用基盤技術が相互に課題共有し、新規機能を有するデバイスを実証すると共に、共通の目標（新規機能実証）に向け、産業界とアカデミアが密に連携した体制を構築する。これにより、目的基礎研究と活用基盤技術の相互の課題共有から、新規機能を有する評価デバイスの実証を目指す。

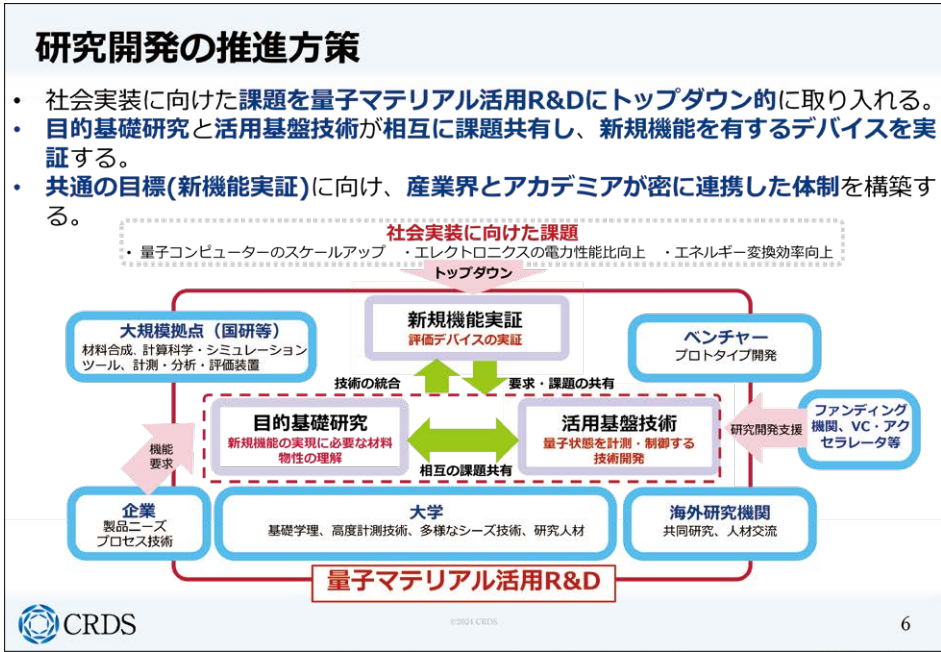


図 1-6 研究課題の推進方法

本日のワークショップでは、「エマージングな量子マテリアル研究」、「量子マテリアル研究に求められる活用基盤技術」、「量子マテリアルの実用化に向けた取り組み」の3つのセッションで、量子マテリアルの基礎研究、活用技術、社会実装に関する情報提供を頂き、議論する。最後に、最後の総合討論として、(1) 量子マテリアルの魅力的な材料物性を理解し明確化するために必要な目的基礎研究、(2) 量子マテリアルの材料物性を新規機能の発現に繋ぐために必要な活用基盤技術、(3) 産業界を含む量子マテリアルR&Dを推進するために必要な方策、の3点について議論する。

CRDSではここでの議論をもとに提言を作成し、国の政策に活かしていきたいと考えている。

2 | エマージングな量子マテリアル研究

2.1 モアレ構造による新たな物性・機能の創出 (ファンデルワールス複合原子層)

町田 友樹 (東京大学)

ファンデルワールス接合を使ったモアレ構造の物性について紹介する。我々がターゲットとしてるのは、ファンデルワールス接合という複合原子層であり、グラフェンをはじめとする様々な原子層膜、2次元マテリアルをファンデルワールス力で積み上げた系である。最大の特徴は、界面での格子整合が要らないことであり、様々な物性の原子層を積み上げることができることである。また、原子層をどのような角度で積み上げるか、他の材料系にはない角度という制御の自由度がある。これを使って、図2-1-1に示すようなモアレ超格子というものが作れる。図の左下は六角形が並んでるグラフェン（青色）とボロンナイトライド（赤色）を模式的に描いたものであり、重ねるとモアレ構造が見える。実際の系では格子定数が2%違うが、若干デフォルメしてある。実際の系では、 0° で重ねると13 nmの周期になり、これを回転させてツイスト角度を大きくすると周期はもっと小さくなる。このように、正確な六角形対称の周期ポテンシャルが入ることになる。ボロンナイトライドは絶縁体なのでグラフェンに電気的な作用はないが、この周期ポテンシャルによってバンド構造が変わる。図の左上のように、普通のディラックコーンではなく、第二のサブディラック点というのが上と下に出てくることが分かっている。その様子は簡単に電気伝導を測るだけで分かる。図の右上の抵抗値の3つのピークは、ディラック点と上下のサブディラック点に対応するものになっている。ツイスト角度を変えると、これらのピークが外に動く様子が見える。ポイントは、ツイスト角度という新しい制御自由度があることと、ツイスト角度を変えるとバンド構造と物性が変わってしまうことである。

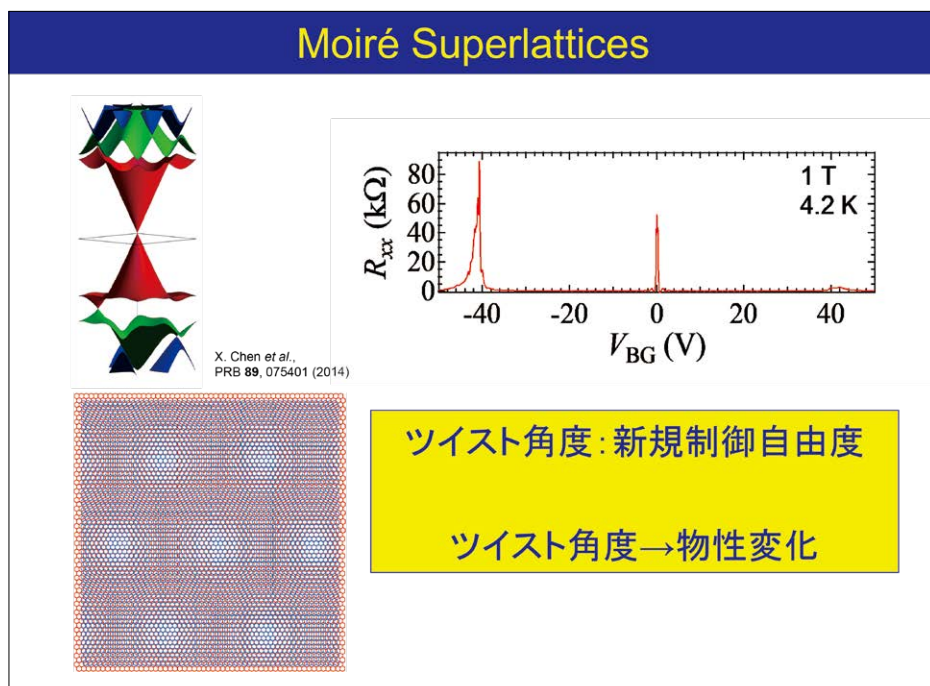


図 2-1-1 モアレ超格子

図2-1-2にはグラフェンとグラフェンを重ねた場合（twisted bilayer graphene：ツイスト2層グラフェン）を示す。ツイスト角が 0° だと何も起こらないが、ツイストするとやはりモアレが生じてバンド構造が変わり、非常に有名な現象として知られているように、ツイスト角度を 1.1° プラスマイナス 0.1° 程度にすると超電導になる。重要なのは、グラフェン自体は超電導にならないが、超電導にならない原子層を2層重ねると超電導になるということであり、原子層A+原子層AはAとは全く違う物性が出るということになる。

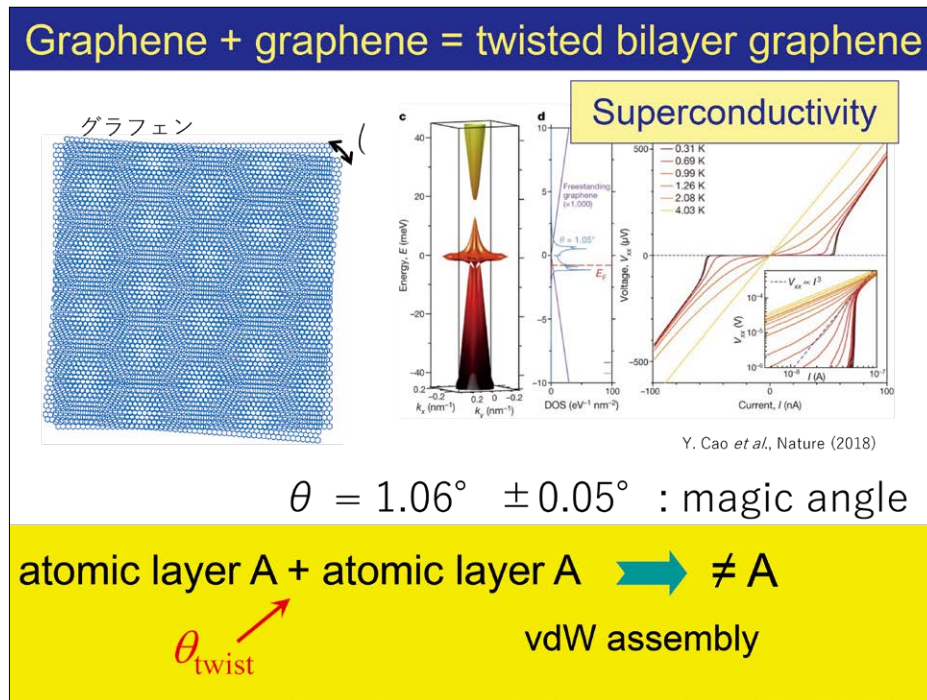


図 2-1-2 ツイスト2層グラフェン

その観点からすると、A + A + A、A + A'、A + B + Cなどはどうなるのか、無限の可能性がある。ベースとなる2Dマテリアル（2次元物質）は何十種類もあり、組み合わせはほとんど無限にあるので、その中には特異な物性がまだたくさん眠っている、あるいはダイヤモンドの原石が発見を待っている、という状況にある。

具体的な物性に入る前に、実際にどのように作るかを簡単に紹介する。ベースとなる2Dマテリアルは、層状物質をメカニカル劈開（へきかい）法、つまりスコッチテープを使った方法で単原子膜にする。これは古典的な方法だが、一番高品質の原子層膜を作ることができる。単原子層膜のグラフェンを作っておき、パーツとして積み重ねる。

我々のところでは、空気が入らないように窒素ガス雰囲気中で、それを全てロボティックオペレーションで行っている。例えば、図2-1-3は30層のグラフェンとボロンナイトライド（BN）を重ねたものであり、写真の中央部分が30層のファンデルワールス超格子になっている。このようなものが自由自在に作れる状況になってきている。

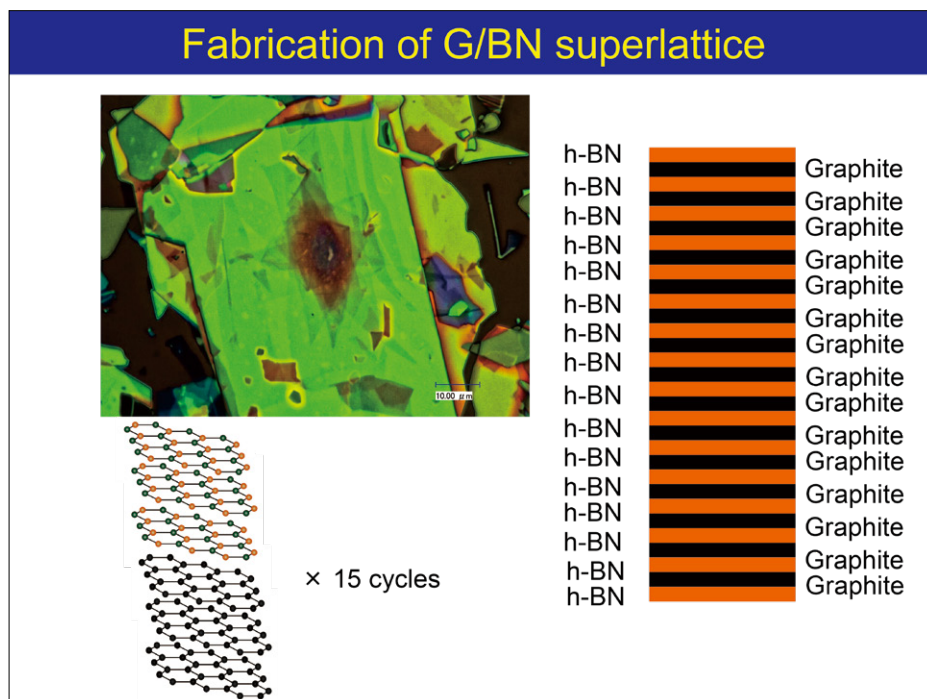


図 2-1-3 グラフェン／ボロンナイトライド（BN）超格子の作製

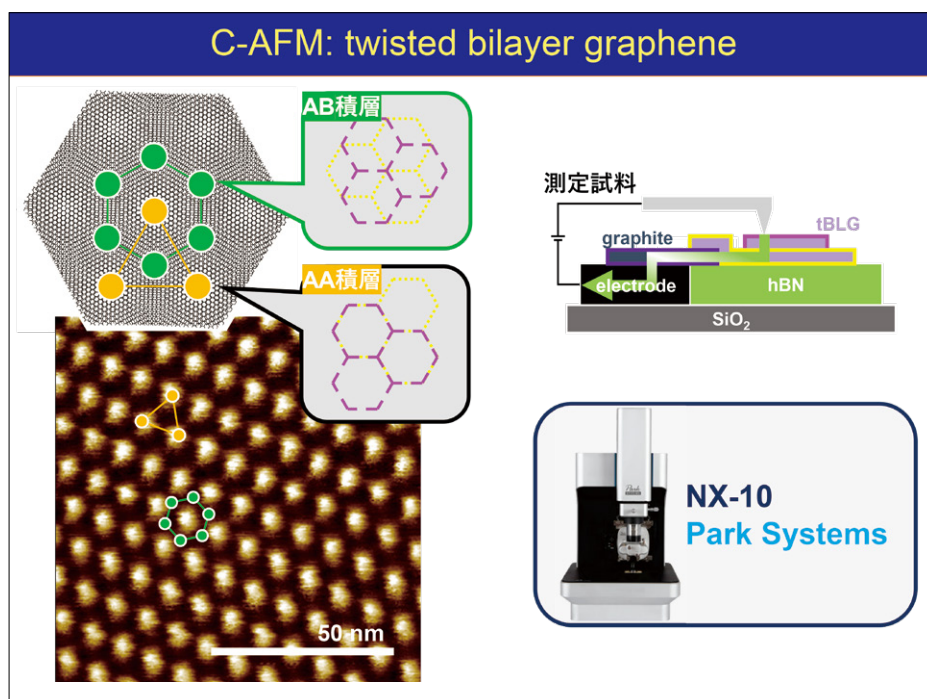


図 2-1-4 ツイスト2層グラフェンの原子間力顕微鏡像

ツイスト角度の制御については、例えば1枚のグラフェンを2つにちぎっておき、片方のツイスト角度を希望する角度にしてから、それぞれ持ち上げて積層すれば、正確にツイスト角度が制御できる。この方法でツイスト2層グラフェンなどが作れる。

このような方法で作ったものが実際にモアレになっているリアルスペースで見なくなるが、図 2-1-4 は実際にコンダクティングモードの原子間力顕微鏡 (C-AFM) で見たものであり、ツイスト 2 層グラフェンのモア

レ構造がきれいに見える。AFM像に記した三角形や六角形は左上の模式図のものに対応している。このようなものが簡単に見える状況になっている。その他の例としては、グラフェンとBNの二重のモアレ構造が見えてるもの、 WSe_2 という違う結晶格子の遷移金属ダイカルコゲナイドの原子層をツイストして重ねたものなどがあり、モアレ構造が違った形で見える。

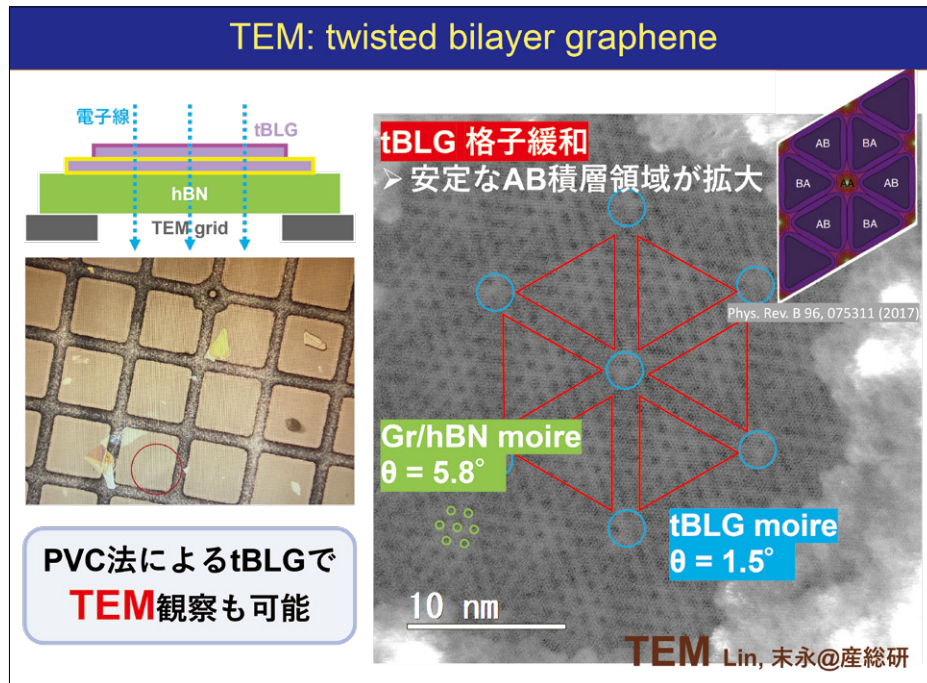


図 2-1-5 ツイスト2層グラフェンのTEM像

図2-1-5は透過電子顕微鏡（TEM）像であり、モアレ構造が見えるが、面白いことに単純なモアレにはなっていない。積層するときにAA積層とAB積層ではAB積層のほうが安定になるので、小さなツイスト角度の場合は安定なAB積層領域が広がるという効果がある。実際には、モアレ格子の緩和や再配列があるので、図2-1-4の模式図のようににはなっていない。このため、格子緩和の効果なども考慮しないと、本当の物理現象は分からないことになる。

実際にどんな物性が見えるか、我々の実験を少し紹介する。我々は「1+1」がどうなるかという問題を解いている状況にある。つまり、ファンデルワールス積層（vdW assembly）に関しては、「1+1」の解は自明ではない。例えば、グラフェンとグラフェンを単層ずつ重ねると、もちろん2層グラフェンにもなり得るが、ツイスト角度 1.05° だと超電導、 30° だと準結晶になる。また、ポロンナイトライド絶縁体で「1層+1層」をやると、強誘電性が出てくる。このように「1+1」は当たり前の問題ではない。次に WTe_2 を用いた「1+1」の問題として反転対称性に注目した実験を紹介する。 WTe_2 は、図2-1-6にあるような結晶構造になっており、ユニットセルが長方形であり、 60° の回転対称性がないという特徴を持つ。右下の図のように一部をピックアップし、テルル（Te）をつないで三角形を描き、これを反転対称操作をしてみると、他のところにぴったり重る。つまり、単層の WTe_2 は反転対称性が保持されている材料系ということになる。

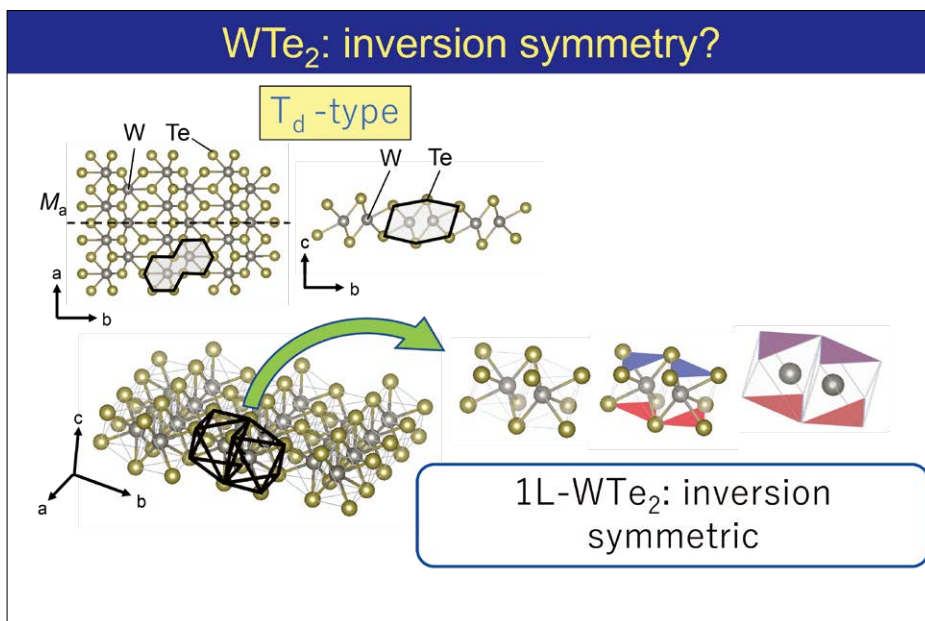


図 2-1-6 WTe₂の反転対称性

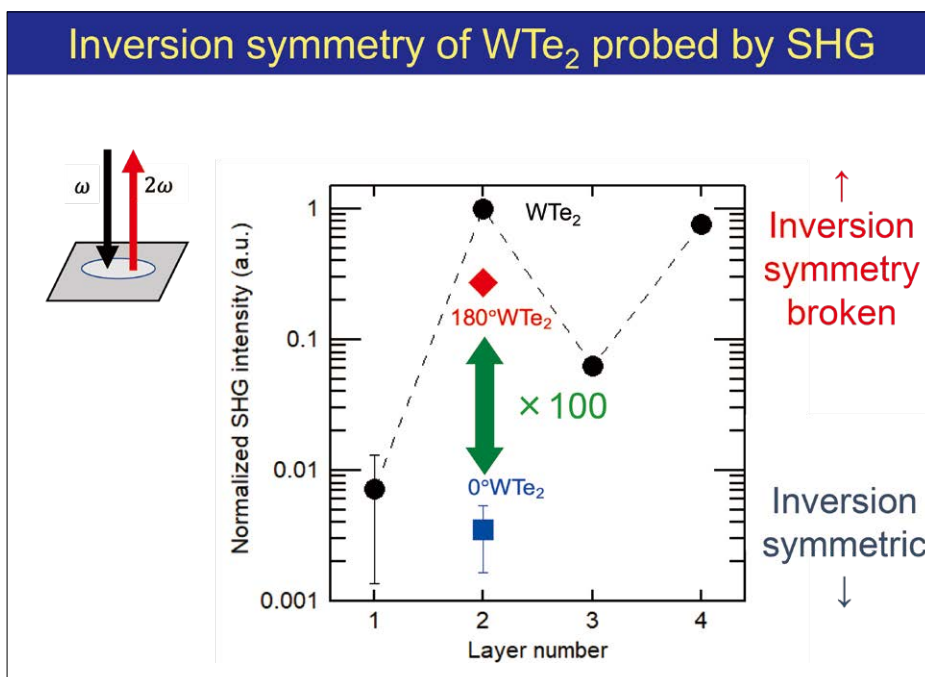


図 2-1-7 SHGで検出したWTe₂の反転対称性

ここでやりたいのは、ツイスト角0°と180°の「1+1」の比較である。実は、パラレルスタッキング（ツイスト角0°）とアンチパラレルスタッキング（ツイスト角180°）では対称性が変わり、アンチパラレルにスタックすると反転対称性はなくなるが、パラレルスタッキングでは反転対称性が残る。そうすると、物性が変わるはずであり、実際にこれらを作って物性を調べた。反転対称性の評価は第2次高調波の発生（SHG）で評価することができる。周波数 ω の光を当てて 2ω の光が出てくるかどうかを調べるもので、反転対称性が崩れてると 2ω の光が多く出る。図2-1-7に示すように、天然WTe₂の1、2、3、4層（黒丸：●）のWTe₂は反転対称性を反映してSHGが振動するが、「1+1」の180°は上の方にあり、「1+1」の0°は下の方にきて天然の2層のものとは100倍程度違っている。つまり、ツイスト角度を制御するだけで反転対称性が制御でき

ることになる。そうすると、物性やバンド構造が違って来るはずであり、この2つの「1+1」に対してLaser ARPES（レーザー励起角度分解光電子分光）でバンド構造を直接調べた。

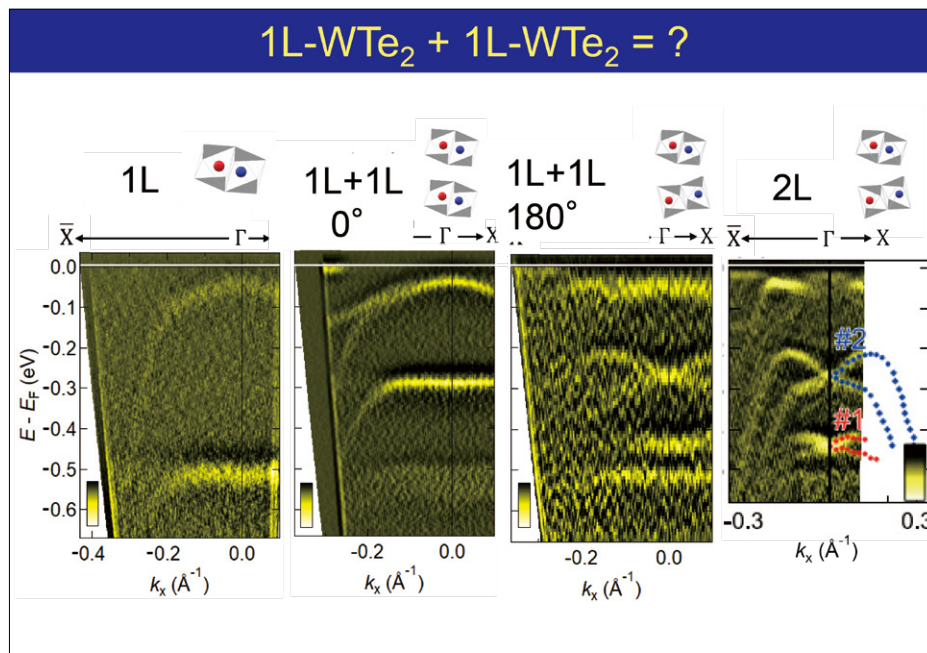


図 2-1-8 ARPESで測定した「1L-WTe₂+1L-WTe₂」バンド構造

図2-1-8に測定したバンド構造を示す。左端と右端のバンド構造が天然の単層と2層、その間の2つが人工的に作った「1+1」0°と180°である。「1+1」180°を見ると、天然の2層とほとんど同じバンド構造になっているのがわかる。一方、「1+1」0°はこれらと全く違うバンド構造になっており、スピン分裂があるかないかという違いが出ている。これは反転対称性がないかあるかという違いから来ている。このようにファンデルワールス積層で反転対称性を制御すると、実際にバンド構造までも制御できることになる。ここでは「1+1」がどうなるかという問題について示したが、「1+1+1」や「2+2+2」の実験も行っており、いずれでも反転対称性を制御できており、symmetry engineering（対称性工学）ができる可能性がある。また、ここでは0°と180°だけを見たが、その間の角度にも様々な面白い物性があるだろうと期待される。

非常に分かりやすい1次元モアレの実験を紹介する。WTe₂同士を重ねて回すとモアレが出るが、驚くべきことに56°～58°辺りで1次元的なモアレになる。さらに回すと、60°では2次元的になり、62°になるとさっきと垂直な方向に1次元的なモアレになる。これらはTEMを使って観察したが、1次元モアレが見えることは、他の実験（回折など）でも確認できている。ここで面白いのは、「2D+2D」が「1D」になることであり、モアレ超格子の「A+A」は様々な可能性があることを示している。

さて、モアレ超格子を調べる上でどんなことが必要か考えてみたい。その組み合わせは無限にあるが、それをどのように調べるかがポイントであり、そのためには2つの技術が必要と考えている。1つは、ツイスト角度を自由自在に制御することである。例えば、原子層を上下に置いてくっつけると天然の2層グラフェンと同じ物性になる、一度離して回してからくっつけると超伝導体になる、また角度を変えてくっつけると今度は強磁性あるいは準結晶になる、といったことができると非常に面白い。逆にそのような技術が無いと、0.1°変わるだけで物性が全く違うものに対するツイスト角度依存性を調べるには、何万個ものサンプルを作らなければいけない。我々がやってる実験は、原子間力顕微鏡のカンチレバーの先に原子層を付け、下側に置いてある原子層にくっつけ、すぐに離して角度を変える、といったものである。実際に初期的な実験として、カンチレバー

でグラフェン同士をくっつけてフリクション（摩擦）を測り、ツイスト角度を変えてまた測るということを繰り返したら、 60° 周期の摩擦のツイスト角度依存性が出た。これは初期的な実験であるが、接触と非接触を制御できたことになる。このようなことができると、例えば、グラフェン同士を連続的に動かすとモアレが上下に動くが、ポテンシャル（電位）はチャージ（電荷）を引きずるので、モアレの機械的な動きを電流に変えることができるというトポロジカルポンプあるいはサウレスポンプと呼ばれる現象を固体物性として見えるのではないかと考えている。

組み合わせが無限にあるということは、人がいくらやってもきりがないので、インフォマティクスの助けが欲しい。その初期的な実験として、グラフェンと MoS_2 超格子を例にして、熱伝導を最小にできる構造の探索に、マテリアルズ・インフォマティクスの常とう手段であるベイズ最適化使って効率的に最適化しようと考えている。実際にベイズ最適化を使って設計し、熱伝導が最小になる候補の1つを実際作ると、熱伝導が非常に小さくなった。単に MoS_2 を重ねただけ、グラフェンだけを重ねただけ、グラフェンと MoS_2 を交互に重ねたものよりもさらに小さな熱伝導になった。さらに、ツイスト角度を変えると熱伝導が変わることも分かってきており、インフォマティクスを組み合わせることでよりハイスループットに研究が進むと考えている。

応用に向けては、我々のグループではサブバンドエレクトロニクスをやっている。歴史的には半導体ヘテロ構造が大先輩であり、量子井戸や超格子構造は半導体で作れるが、原子層ヘテロ構造でこのようなことができるか興味がある。これには遷移金属ダイカルコゲナイドの複数層のサブバンドを使う。例えば、4層の WSe_2 は天然の量子井戸のような形になり、4つのサブバンドができる。これを組み上げていけば、様々な構造を作る量子井戸テクノロジーができると考えている。実際に簡単な二重量子井戸構造を作ると、きれいな NDR（負性微分抵抗）を伴う共鳴トンネル効果も観測している。さらにこの構造を最適化すると、NDRのP/V比（ピーク・バレー比）は半導体のトップデータに近いところまで大きくできている。このようなことができるので、サブバンドエレクトロニクス、オプトエレクトロニクスといったものにかかなり可能性がある思っており、図2-1-9に示すようなファンデルワールス量子カスケードレーザーなども作りたいと考えている。

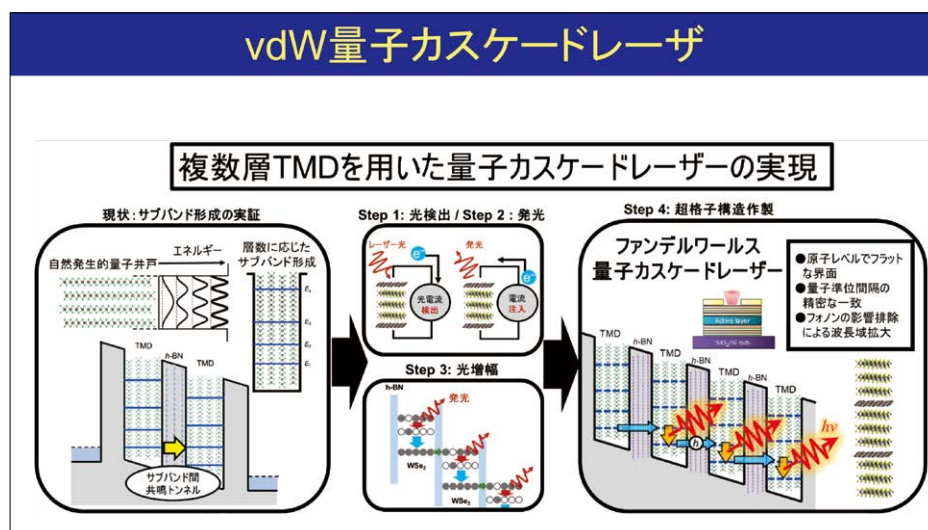


図 2-1-9 vdW量子カスケードレーザー

【質疑応答】

- Q：機械的な動きを電子や光の機能に変換できる可能性を魅力に感じたが、2次元から1次元に次元性が変わるの、かなりダイナミックな物質の変化が起こると思う。あまりそこには触れられなかったと思うが、どんな可能性があるのか。
- A：1次元だとラッティンジャーリキッドになるなど基礎物性の変化はあるし、実際にそのような実験も少しはある。今は閉じ込めはそれほど大きくないかもしれないが、次元性が変わるという点でどのようなバンド構造になるかまだ全く分かってない。この1次元モアレの観測も実は論文を書いている段階である。
- Q：ツイストアングルを本当に連続的に自由自在にできるのか。エネルギー的には完全にフラットになっているのか。エネルギーの変化があって、安定になるところがあったりしないのか。
- A：安定点はある。例えば、積層してから400℃といった高温にする、勝手にくるっと回ることがある。ツイスト角が安定な0°に全部になってしまうこともある。また、実際には作りやすい角度と作りづらい角度があり、操作によってはちょっとしたことで安定点に行くこともある。しかし、ファンデルワールス接合の良い点は、不安定なところや準安定なところでも実際に作ることができる。ツイスト角度が小さいと、部分的に再構成してしまうこともある。様々な要素があるので、どのツイスト角が安定かというのは単純な模式図にはならずかなり複雑ではあるが、その中に面白い物性があると思っている。
- Q：大変面白いが、ロバストネスが気になる。ちょっとした擾乱があると、安定点に動いてしまうのではないのか。
- A：安定点に動いてしまうことはあると思う。ただし、欠陥などで引っかかったりすることもありうる。実際には、ほぼ狙った角度に作れている。例えば、1.5°を狙って作ってAFMで測ってみたら1.44°だったというように、この場合は0.06°だけずれたけれども、この程度の精度では作れる。
- Q：超電導になるところのツイスト角度の幅はどの程度か。また、なぜそこで超電導になるのか分かっているのか。
- A：1.05° ± 0.05°である。違う材料系だともう少し安定にできることや、幅をもう少し広げるやり方など、マジックアングルの安定性は興味深い、いずれにしても幅が狭いのは共通であり、0.1°変わると違う物性になる。なぜ超電導になるのかも概ね分かっており、その角度でバンド構造が変わってフラットバンドができ、電子相関が強くなって超電導になるといったモデルで説明されている。
- Q：量子カスケードレーザー（QCL）は化合物半導体で数十年の研究の歴史があるが、そのボトルネックは何で、この2次元系でそれをどう解決するか教えてほしい。
- A：QCLにGaAs系の半導体を使うと、周波数5～12THzのところは、GaAsのフォノンが邪魔してほとんど作れない領域がある。2Dマテリアルは基本的にフォノンのエネルギーはより高エネルギーに行きやすく、GaAsのフォノンのエネルギーとは違って来るので、この周波数領域のものが作れると思っている。また、厚みの制御は高精度にやる必要があるが、原子層の場合は完全に離散的なので、全部3原子層で100層作るといっても難しくない。厚み精度という点では大きな優位性を持っていると思う。まだ研究の初期段階なので難しいが、十分な発光強度とゲインが得られることが実用化には必要と考えている。技術的な課題は多くあると思うが、QCLを目標にしている理由の一つは、実用を考えた時にQCL1個の値段が高く、コストなどをあまり気にしなくてもよいことがある。波長3～12μmのQCLを買ったときに2,000万円程度だったので、今は作れない5～12THzのQCLが作れたら1個5,000万円程度で売れ、1日で1個できればよいのではないかと考えた発想である。
- Q：安定な積層をする時に、グラフェンのようにカーボンだけでできているものと、BNやWTe₂など異種元素でできているものでは、組み合わせによって重要性が変わってくると思うが、どう考えているのか。
- A：実際にそうだと思う。例えば、WSe₂をTEM見ると、ツイスト角6°程度までは格子緩和が見えるが、その後は格子はほぼ元に戻る。何度まで格子緩和するかは、実際にやるとマテリアルによって変わり、全く違う。このような2Dマテリアルを材料として使うための基盤的な学理がまだ構築できてない

段階だと思っている。

Q : WTe₂のSHGの話で、論文を見ると波長900 nmで測定していたと思うが、SHGの波長依存性は調べたのか。波長依存性を調べることで、エネルギーギャップがわかると思う。

A : 残念ながらやっていない。単一波長だけである。この測定は京都大学の松田一成先生のところで測定させてもらったが、あまりマシンタイムが取れなかったので現実的な選択をした。

Q : 将来的な産業化につなげていくことに関連して聞きたい。現状は、一番良い特性が得られるようにスコッチテープを使って原子層を剥がしているが、将来、どの程度のサイズまでマニピュレーションできるか。マニピュレーションの間にどうしてもディフェクト（欠陥）が発生する可能性があると思うが、どのように対処するのか。サブバンド間を使ったデバイスなどは特に抵抗を上げないようにしないといけないと思うが、積層する際の電気伝導の制御はどのようにするのか。

A : サイズに関しては、劈開法だとしわもなく作るには頑張って100 μm角程度と思う。作る効率に関しては、ロボティックオペレーションを使えばいくらでも上げられると思っている。それ以上のサイズになると、吾郷先生などがやっているCVDなどの成長方法を使うことになると思う。我々の基礎研究で作れる可能性を示せたら、作る部分は成長の専門の方に頑張ってもらうことになると思う。ただし、電子デバイスでは普通は大きなサイズのデバイスは作らず、2~3 μmあれば足りるので、100 μm角あれば用途によっては問題ないと思っている。2つ目のディフェクトに関しては、動かしてる時に、ディフェクトが全く入らないとは言えないが、むしろしわができることがある。我々はAFMで見て、しわなどがないきれいなところだけを抜き出して使ってるので、あまりディフェクトの影響はないと考えている。意図的にBNにカーボン（C）をディフェクトとして使った実験もやっているが、その時にはその影響が見えている。実際にそのようなディフェクトを使ったトンネル効果の実験もやっている。このように意図的にディフェクトを入れるようなことをしないと、変わった特性は見られず、明確なディフェクトはほとんどないと思っている。3つ目の電気伝導・抵抗の制御については、マテリアルの選び方、設計次第と考えている。例えば、サブバンドエレクトロニクス共鳴トンネルダイオードについては、絶縁体のBNを1原子層増やすと抵抗が100倍程度増加し、2~3層では10kΩ程度になる。また、グラフェンの場合には数十Ωまで下がって金属的になる。

Q : 普通の半導体レーザーでは、p型ドーピング層、n型ドーピング層、活性層を作るが、その時にトータルの微分抵抗をかなり小さくしないと大きなロスになるが、その辺りのイメージがあれば教えてほしい。

A : あまり明確なものは無い。遷移金属ダイカルコゲナイド（TMD）の多層構造デバイスにp⁺にドーブしたMoS₂を使うとに良い電極ができ、その抵抗は割と小さい。ただし、既存の半導体に比べたら、まだ高いと思う。

Q : ツイスト角度を変えることで様々な機能が発生するのは大変興味深く思った。ツイスト角度を変えて超電導ができていますが、既存の超電導と比べてどれだけその超電導の特性が活かせるか。また、この方法を使うことで、世の中になかった新たな機能が生み出せないか。

A : 現時点だと、超電導の応用として優れているという面はまだないと思う。やはり、この研究は既存のマテリアルにない物性（ダイヤモンドの原石）を探し求めるといったところに尽きると思っている。

2.2 非エルミート光学とその周辺

岩本 敏（東京大学）

非エルミート光学とその周辺分野について紹介する。本日、フォトリクスの話題提供するのは私だけであり、自身の研究というよりは分野の話題について皆さんに共有して議論頂きたいと思う。

まず、エルミート系はエネルギーが保存された系である。一方、非エルミート系は、損失や利得を含む系であり、一般にエネルギー非保存の系である。有限の損失を持つ時点で系は非エルミート系といえるため、我々の周りには非エルミート系というのがあふれているということもできる。フォトリクスにおいて、損失や利得の大きさや空間分布を制御し、より積極的に活用することで、様々な興味深い現象や新たな応用の可能性を探求するのが非エルミート光学である。

レーザーは利得・損失が関与する代表的デバイスであるが、非エルミートの効果をうまく活用することで、より良い設計・特性ができる。野田先生のグループで積極的に開発されているフォトリック結晶の面発光レーザーは非常に素晴らしいレーザーであるが、従来のエルミート相互作用のみに基づく設計に加えて非エルミート性を考慮することで、非常に大きい面積で高ビーム品質、今まで以上にパワー、キロワット級を実現可能なレーザーの設計が報告されている。

本日は、非エルミート物理という観点から、より特徴的なものを議論する。「非エルミートとは何か?」ということだが、基礎的量子力学では、ハミルトニアンはエルミートだと習い、そこではエネルギーは保存されている。ただし、系は一般には開放系であるのでエネルギーは増えたり減ったりする散逸系であり、そこで発現する興味深い物理や現象を調べるというのが非エルミート物理といえる。光の系では、ロス制御が可能であるだけでなく、レーザーのように利得の導入・制御も可能であるため、この非エルミート物理の学理を調べ、その中に潜んでいる応用の可能性を調べることができる舞台として、注目されている（図 2-2-1）。

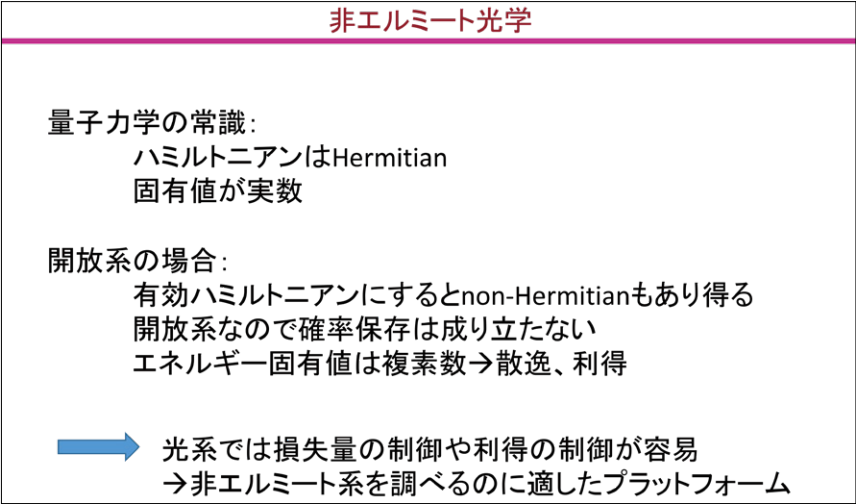


図 2-2-1 非エルミート光学

非エルミート物理に特徴的な現象が2つあり、その1つは、非エルミート表皮効果というもので（図 2-2-2）、格子モデル、それぞれ例えば共振器だと考えると、共振器の間に、右に行く時と左に行く時に結合の仕方が違うという、非対称結合の概念を入れると、中にあるモードのエネルギーが、この例でいうと全て左側に集まるというような特殊な効果が起こる。このような系は既に光系でも実現されていて、ファイバーループを

使った実験で入り口が色々あるが、どこに入れても必ず最後同じところに出てくる。本日の話題は光だが、この現象は、音、機械振動、熱などでも実現し得るので、例えば局在した振動を電気に変えることができれば、エネルギーハーベスティングへの応用という可能性もある。

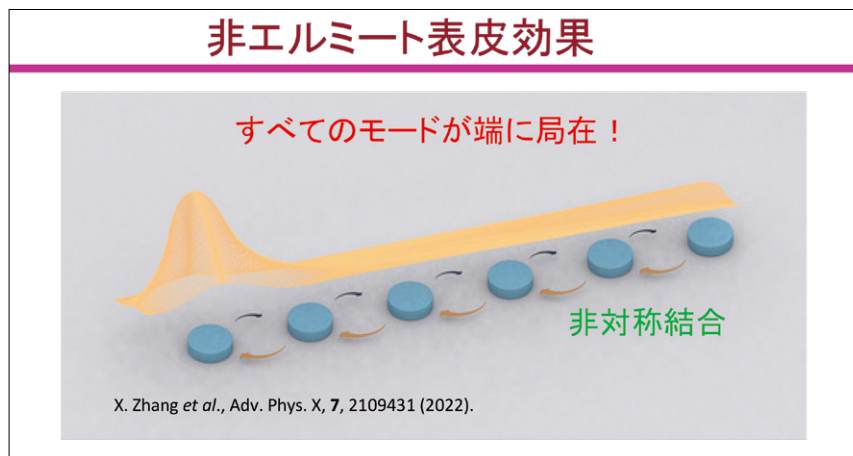


図 2-2-2 非エルミート表皮効果

もう一つ特徴的である、PT 対称系とそこで現れる現象について紹介したいと思う。PT 対称系とは空間反転と時間反転を行うと元の状態に戻る系である。今日は、PT 対称系で生じる面白い現象のいくつかをご紹介していきたいと思う。

このような系は、光の場合は非常に簡単に作ることができる。図 2-2-3 が一つの例で、損失を持った共振器と同じ共鳴周波数で利得を持った共振器がある結合度でつながっている系である。系を表すハミルトニアン行列自体は、複素数が入った非エルミートな行列になっている。その時の固有エネルギーを計算すると図 2-2-3 の下図になる。損失（利得）の大きさと結合度の関係により、このエネルギーが実数になったり複素数になったりするものが、この系の特に面白いところである。

図 2-2-4 は、この系の固有振動数を示している。振動数に対応する固有エネルギーの実部が左、損失(利得)の対応する虚部の値が右のグラフになる。このように特徴的なダイアグラムを描くことができ、損失（利得） γ が小さい場合は二重振子と一緒なので、2つの固有モードが違う周波数で現れてくる。連成振子で言うと、Out-of-Phase モードと In-Phase モードが形成されている状態である。この2つのモードは共通の損失（今の例ではゼロ）を持つ。 γ を大きくしていくとある点で、2つのモードの周波数が1つに収斂しその点を境にして虚部が分裂する。この特殊な点は「例外点」と呼ばれている。この例外点の周りでいろんな興味深いことが起こるというのが最近知られており広く研究されている。数年前に出した我々の理論論文では、フォトニック結晶の共振器の構造を少し揺らがして損失分布を制御すると共振器の中の右円偏光モード、左偏光モードのどちらかだけを選択的に生き残らせることができることを示したが、このコンセプトを使った円偏光レーザーが実現されている。

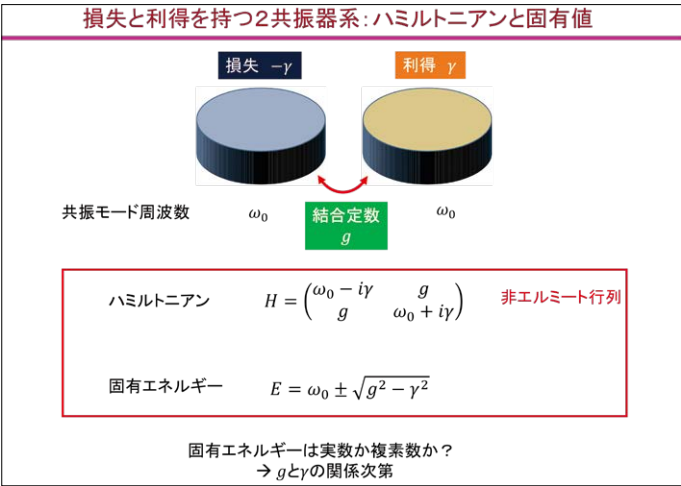


図 2-2-3 損失と利得を持つ2共振器系：ハミルトニアンと固有値

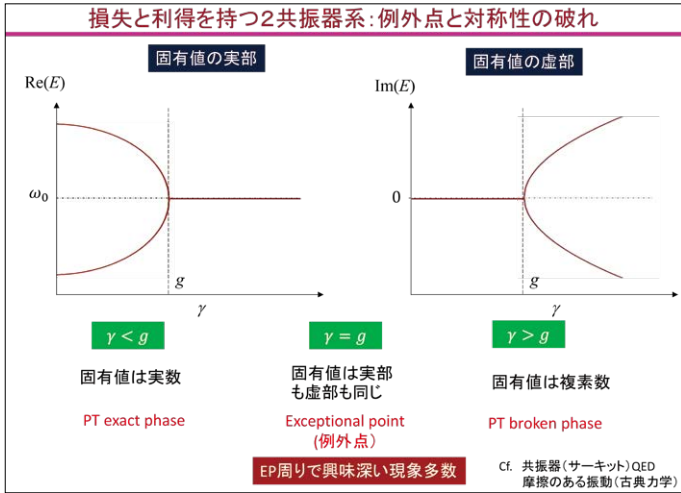


図 2-2 4 損失と利得を持つ2共振器系：例外点と対称性の破れ

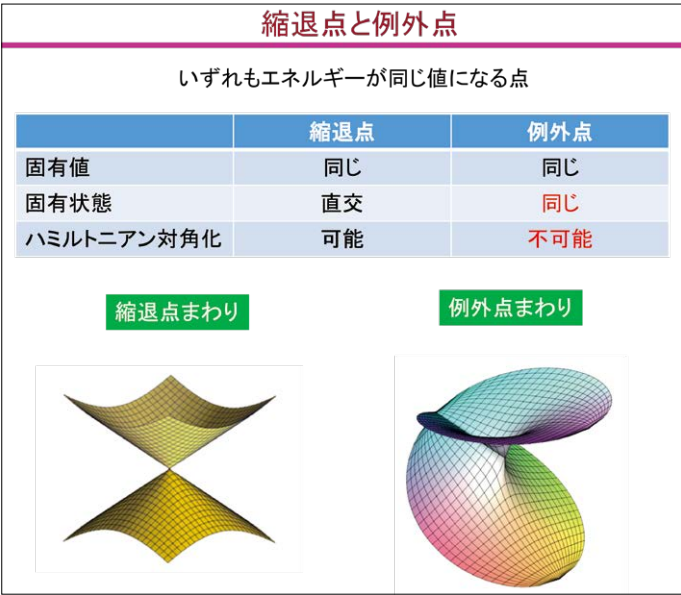


図 2-2-5 縮退点と例外点

例外点と似たようなものに縮退点というのがある(図 2-2-5)。例外点は先ほど説明したが、縮退点も2つのモード周波数が重なる点であり、Dirac 点は代表的な例である。モード周波数が同じになるという点ではよく似ているが、この2つは大きく違っており、縮退点では固有モードの数は変わらず、直交した固有ベクトルは2本存在するのに対して、例外点では固有ベクトルは1個になっている。例外点のこの特徴を使っているような応用がある。

その1つは高感度なセンサーである。動作点をこの例外点の周りに設定しておく、例えば共振器に分子が付着して損失が少し変わるなどといった摂動が入ると、その影響で例外点の近くで系の状態が動くので、モード周波数が $\sqrt{\epsilon}$ 的に変化する。結果的には縮退点周りで動作させた場合に対して、同じ摂動に対してより大きな変化が得られ、高感度なセンサーができる可能性がある(図 2-2-6)。この効果は微小共振器系で実現されているほか、ファイバージャイロにも応用されている。しかし、例外点周りに動作点を設定する必要があることから、元々の共振器を正しく合わせる必要がある等の様々な技術的課題もある。例外点を直接使ったものではないが、磁気結合型の無線給電システムにPT対称系の概念を導入することで、その効率を安定化するという応用も報告されている。

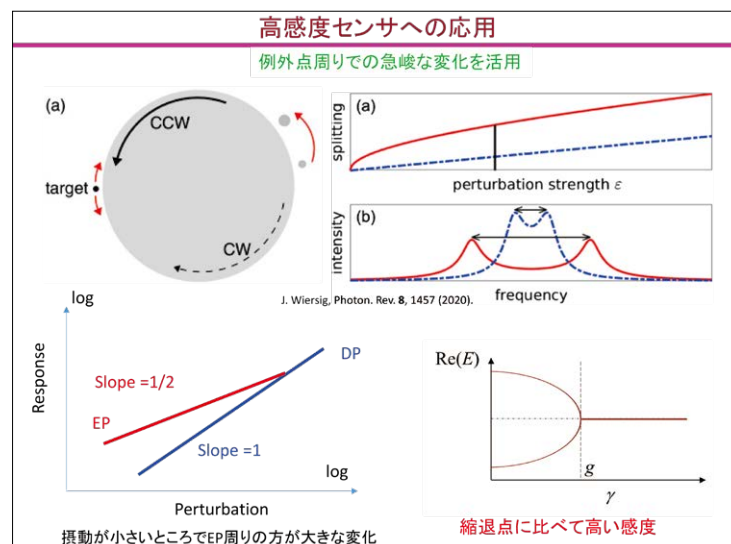


図 2-2-6 高感度センサへの応用

非エルミート光学 (Non-Hermetic Photonics) は高い関心を集めており、Applied Physics Lettersでも特集が組まれている。この特集号では、40本ぐらい採択されているが、残念なことに日本からは1件のみしか採用されていない。こうした基礎研究やエマージングな技術に対する日本の貢献が見えてくることを期待している。

まとめ

- ✓ 非エルミート性: 開放系、損失や利得のある系 ← 普通はこう
- ✓ 非エルミート光学: 損失や利得、その空間分布を、これまでに以上に積極的に活用した新奇物理や機能性の探求
- ✓ レーザ、高感度光センサから無線給電まで幅広い応用の可能性
- ✓ 光だけでなく音や振動、熱などの古典的波動にも広く展開
トポロジカル“X”の展開と同じ傾向
→ 量子“inspired”技術と捉えることで裾野は大きく広がる
- ✓ “量子”マテリアル + 非エルミート性で生まれる新機能、応用は？

図 2-2-7 まとめ

最後にまとめを述べる。非エルミート性は、世の中にありふれている。特に光の系で言うと、その損失・利得の影響や空間分布をこれまで以上に積極的に使うことで発現する新機能を探究するのが、非エルミート光学と呼ばれる分野である。このコンセプトは光だけではなく、音や振動、さらには熱などにも広がっており、これはトポロジカル物理学がフォトンクス、さらにアコースティクスやメカニクスなどに展開した時と非常に似ている。今日紹介した内容は量子力学を直接的に活用したものではないが、量子化学、量子技術にインスパイアされた技術として新たな可能性が含まれている。量子マテリアルの中に非エルミート性が入った時にどのような機能ができるのかに関しては、この後議論させていただければと思う。

【質疑応答】

Q：非エルミートは理論的には日本が非常に強く世界最先端だと思っていた。散逸は定量的に全然取り扱うことができないというのが電子系の問題だと思うが、光だとそれがある程度できると言うことを今日いろいろ素晴らしいご発表で聞かしていただいて感銘を受けた。ただし、熱が入ってくると、光でも非エルミートの良いところを使えなくなると思うが、非エルミート系を科学として進めるための条件で何故、光で成り立っているのか。

A：理論の強さをご指摘のとおりだと思う。先ほどの非エルミートスキン効果も羽田野ネルソンモデルというのが非常に有名で、理論における日本の貢献は非常に大きいと思う。光でいろいろ進んだというのは、光の場合、やはりこれまで培ってきた技術があり、損失・利得の導入・制御がかなり高度にできるところが一番大きいと思う。電子系になるとそこが難しいというのがるのでそこは一つのチャレンジだと考える。

熱は、最近一つの話題として出てきていて熱のトポロジカル輸送も一つのトピックであり、散逸の理解や制御など、今後の課題も多いと考える。

光の場合だと、損失（光ファイバーの損失も含め）はかなり定量的に測れる。共振器の損失は、Q値から求めることができるので設計と実際作ったもので合わせ込みながら、理論と実験の整合性・比較をする事ができる。これが非エルミート物理のプラットフォームとして光が広く利用されている理由の一つでもあると言える。

C：光の損失に関するコメントについて、最初に京都大学の野田先生の研究を紹介されたが、あのような大きい、直径で3mm、1cm、の面発光 PCSEL を1つの横モードで完全に動かす時は、まさに非エルミート性を活用しないとできない。その時にCW駆動で発振させると熱が必ず邪魔をするので、光を

使ってその熱を逆に言うとか抜いていくことで全体の制御をしている。今推進されるのは、熱と光と電気、そしてその非エルミート性を全部連立させて解くことである。

Q：非エルミートの理論については日本がかなり先行している。しかしApplied Physics Lettersだと1本しかないのは反省する点はある。その観点で、どうすれば理論から応用にうまくつながられるか？

A：海外では理論の先生と実験の先生のリンクが日本以上に強いと思う。例えば、同じ学会や学科にいるのは当然だけど、普段からそういった会話をしていると想像する。日本はなかなかそこが進んでないのではないかと、そこが大きな課題と思っている。もう一つは、日本は最近「何に使えるのか？」を最初に問い過ぎているのではないかと思う。海外は、それ本当なの？と言うキュリオシティ・ドリブンの研究を皆でやっているところが多いと思う。そこをエンカレッジしていくと、その中から（一部かもしれないが）応用につながって展開していくと思う。別の言い方をすると、もっと裾野を広げる努力をする必要があると思う。

Q：非エルミート光学を利用したデバイスの提案が出ているが、社会実装という観点からすると、今どういう位置付けにあるのか？

A：まず、非エルミート光学をどこまで含めるかというのが定義だと思う。いわゆるレーザーを非エルミートであることを置いておくと、やはりまだ基礎研究の段階だろうと私は認識している。光学ではないが、最後に紹介したような無線給電は、かなり（社会実装に）近いというのが私の個人的印象である。質問に対して直接答えるとすれば、製品という意味ではセンサーはまだ商品化はされていない。

C：私は認識が少し違っている。先ほど申したフォトニック結晶を使った非エルミート性の理解とその活用によって、ようやく、直径3mmで50W、100W、それから直径1cmで単一モード1kW動くというのは、この非エルミート性の理解とその活用によって実現できた。及び、まさに今、企業との連携研究がスタートしていて、もう間もなく様々な社会実装が進むと思う。もう一点が、岩本先生がご紹介いただいたような利得と損失を近くに近づけて物理的な観点からいろいろ調べていこうと言う先ほどの例外点がこうあるとかだと思う。従って研究の方向性として2つに分かれているかという気がする。つまり、そういう必然から発生した非エルミート性の物理と、どちらかというとそういう非エルミートの昔からの学理から来ている方向が、今、合体しようとしているのかなという気がする、

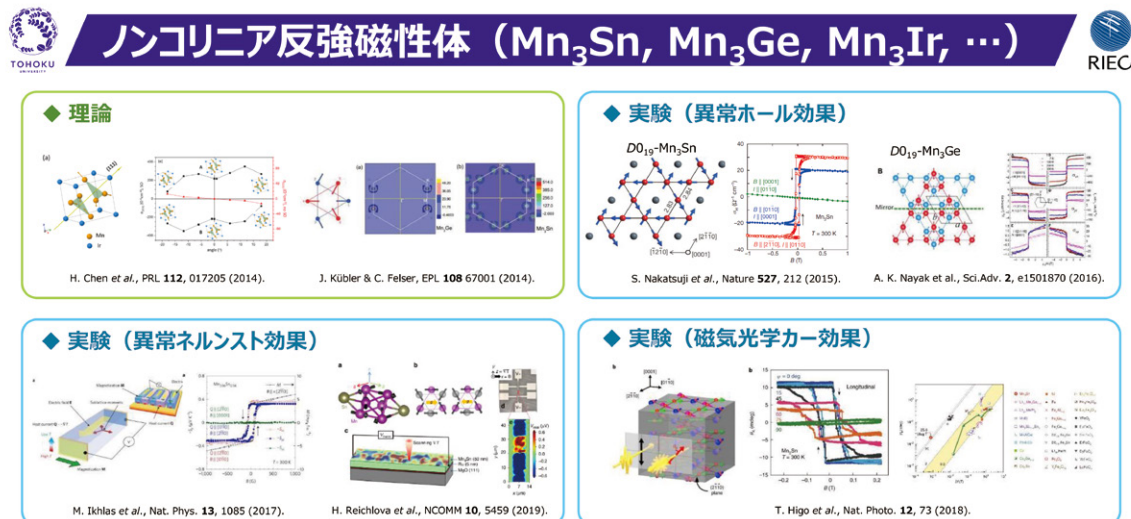
A：まさに先生が話された2つ流れがあるというのはおっしゃるとおりである。今日、私が中心にしたのは、むしろ後者をご紹介したと理解いただければと思う。

C：先ほどのApplied Physics Lettersの話ですが、まさに岩本先生がおっしゃった点で、それがどう使えるかと、やっぱりそれが社会にどう変革を与えるかという観点での研究フェーズが随分意識するようになって、我々も昔はフォトニック結晶をやっていた頃は「これは何に使えるのか？」と言われながら楽しんでやってきたが、40歳を超えると社会実装をしていく事が重要で、それをやっていると逆に社会実装から新しい学術が出てくると言う良いサイクルになることを期待している。

2.3 “量子マテリアル”研究とスピントロニクス素子への応用可能性

深見 俊輔（東北大学）

今日は、自分の研究紹介としてノンコリニア反強磁性性の話題を紹介し、その後で、量子マテリアルにはカテゴライズされないであろう材料からなるデバイスと量子マテリアルデバイスの公平な比較を行ってみる。最後に量子マテリアルへの期待と提言を含めたまとめを述べる。



磁化が無いのに強磁性体と同様な性質→新機能素子が実現できないか？

図 2-3-1 ノンコリニア反強磁性体

ノンコリニア反強磁性体は、中辻先生らが先駆的な仕事をされている。スピンの平行でも反平行でもない秩序構造を持っている。全体としてスピンの相殺しているためマクロな磁化をほとんど持たないが、波数空間の性質によってまるで強磁性体であるように振る舞う。異常ホール効果、異常ネルンスト効果、磁気光学カー効果が、ほとんど磁化を持たないにも関わらず大きく発現することから、何か新しい機能性の素子が実現できないか、新機能が生まれないかという期待をもって研究を行っている。

これらの特異物性は、結晶構造、スピンの配列に依存しているため、エピタキシャル薄膜が必要である。我々はwell-definedな実験を行うために、 Mn_3Sn の良質な試料の作製から研究をスタートした。その結果、ノンコリニアなスピン構造が膜面直に立っているM面配向試料と膜面内でノンコリニア構造ができているC面配向試料をきちんと作り分けることができたようになった。これが、我々のその後の研究の基礎になっている。これらの配向膜はそれぞれ性質が異なっている。異常ホール効果については、M面配向の膜では起こるがC面配向の膜では見られないのに対し、縦方向のスピン流はC面配向で起こる。

図2-3-2に示すのが、M面配向試料で起こるカイラルスピン回転という現象である。 Mn_3Sn と重金属（Ta, W, Ptなど）の積層構造に電流を流すと、スピン流が Mn_3Sn に注入される。すると、図2-3-2右の模式図のように、ある閾値を超えたところでそれぞれの磁気モーメントがカゴメ面内で回転するモードに入る。これをカイラルスピンローテーションと呼んでいるが、この現象は外部からの磁場印加なしで起こり、かつ、スピン回転の周波数が、流した電流に応じて速くなるという特徴を持つ。



カイラルスピン回転

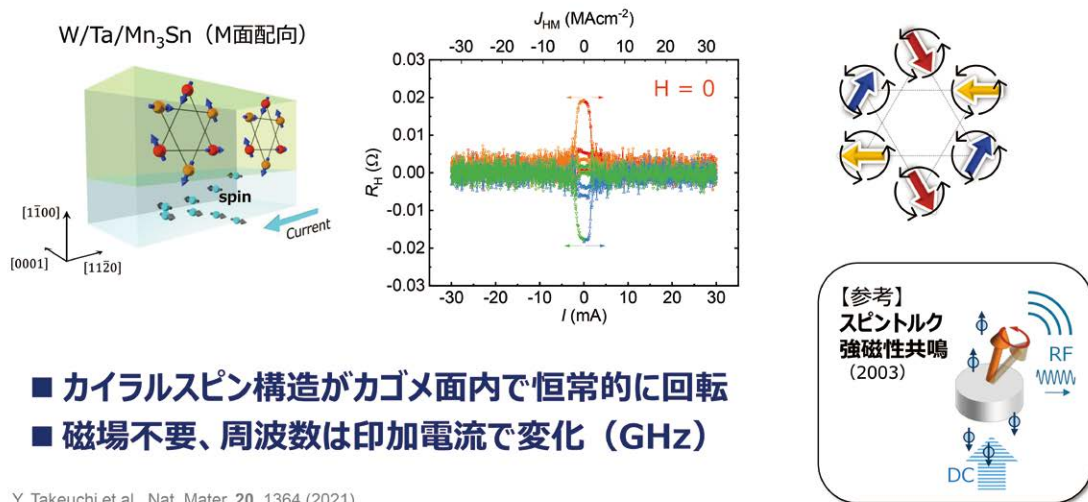


図 2-3-2 M 面配向 Mn₃Sn におけるカイラルスピン回転

スピントロニクス歴史の中では、この現象はこれまでのものとは似て非なるものである。比較対象として、図 2-3-2 右下のスピントルク強磁性共鳴を考えると、これは、その磁性体に電流を流した時に、磁化が歳差運動をする現象で、スピンは安定点の周りを小角で回っている。これを観測するためには多くの場合磁場が必要となるうえ、周波数がある共鳴条件を満たした場合にしか起こらない。この条件と比べると、先ほどのカイラルスピン回転が、如何に異質かが良くわかる。まず、このような興味深い現象を観測したところから、現在はさらに継続していろいろな研究を行っているところだが、まだ未公表結果であるため今日の講演では省略する。

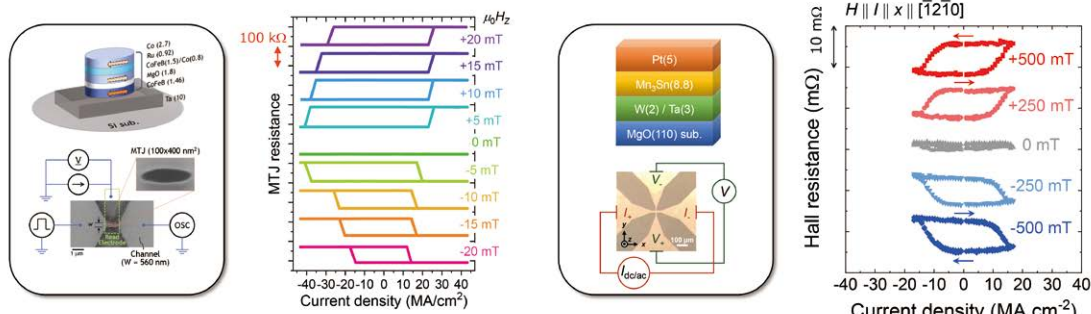


カイラルスピン“反転”



□ Ta/CoFeB/MgO

□ W/Ta/Mn₃Sn/Pt



■ 強磁性体素子と同様、スピン軌道トルクによってカイラルスピン構造を反転できる

➤ See also: H. Tsai et al., Nature 580, 608 (2020); T. Higo et al., Nature 607, 474 (2022)

図 2-3-3 M 面配向 Mn₃Sn におけるカイラルスピン反転

また、強磁性体と同じような使い方もできる。図2-3-3左が強磁性体の研究例で、右側がノンコリニア反強磁性体 Mn_3Sn の研究例であるが、強磁性体と同じように、電流を流して外部磁場を印加すると、そのスピン状態を反転することができる。ここで示したのは我々の実験結果であるが、中辻先生と大谷先生のグループも論文を出されている。以上が、我々のところでの研究紹介となる。

次に、非量子マテリアルである強磁性体の素子との比較を行ってみる。まず、熱安定性指数、すなわち、メモリとして利用するとして、書き込んだ情報をどれぐらい安定に保持することができるかを比較する。我々は、 CoFeB/MgO の磁気トンネル接合の研究も行っているが、この素子の場合には、直径2ナノメートルぐらいまで微細化しても、熱安定性指数の必要値は確保できている。そのため、量子マテリアルで既存技術の限界を突破するという意味では、2ナノ以下までの熱安定性が必要になる。これが具体的ニーズであるが、実際に Mn_3Sn ナノドットの熱安定性を測ってみると、直径200ナノメートル以下で必要値を下回ってしまう。つまり、その意味で、熱安定性は既存デバイスに比べて悪いという結論になる。

また、反強磁性体を応用したスピントロニクスが、数年前から流行りはじめ、その利点の説明の中で「強磁性体素子の場合には磁化を有するため、ここから発生する漏洩磁界（ストレイフィールド）があり、その影響でメモリ素子を密にパッキングできないのに対し、巨視的には磁化を持たない反強磁性体の場合には、漏洩磁界が存在せず、強磁性体よりもより密に素子を詰めることができる」という主張が度々述べられている。実デバイスにおいては、磁性体ドットの下にはトランジスタがあり、上には配線があるので、それらのサイズ以下には詰めることはできないのだが、こういう主張をする研究者は結構多い。

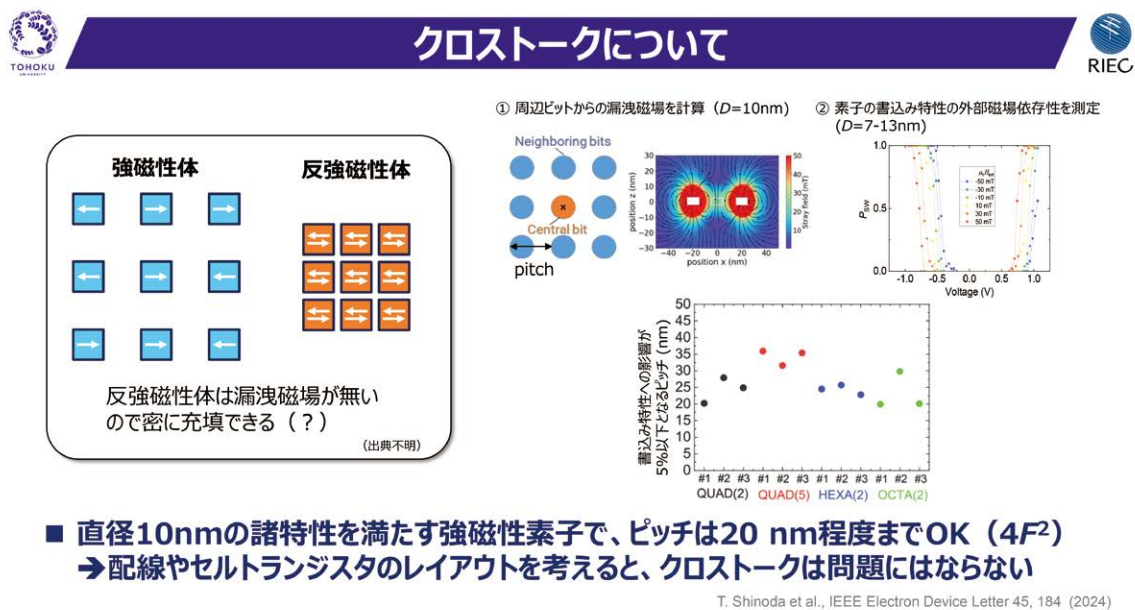


図 2-3-4 強磁性体素子におけるクロストーク

我々は小さな素子を作ることができるので、実際に強磁性体素子が、どれぐらいまで詰められるのかという実験を行ってみた。細かい実験手続きは省略して結論だけを述べると、直径10ナノメートルで、主要な要件を全て満たすような強磁性素子において、ピッチ20ナノメートル（つまり10ナノメートル間隔）までは詰めることができた。これは、メモリ業界の用語でいう4F2のセルサイズが実現できたことになる。結局、下にセルトランジスタを付け、上下に配線を施すというセルレイアウトも考慮すると、強磁性体は少なくとも10ナノメートル辺りまではクロストークは問題にならないということが結論できる。この実験は、10ナノメートルで行ったが、これが8ナノとか6ナノに低減されても、その分だけ（磁性体の体積が小さくなるために）漏洩磁

界も減っていくため、多分、4F2は強磁性体で普通に達成できるというのが我々がこの研究で得た結論となる。

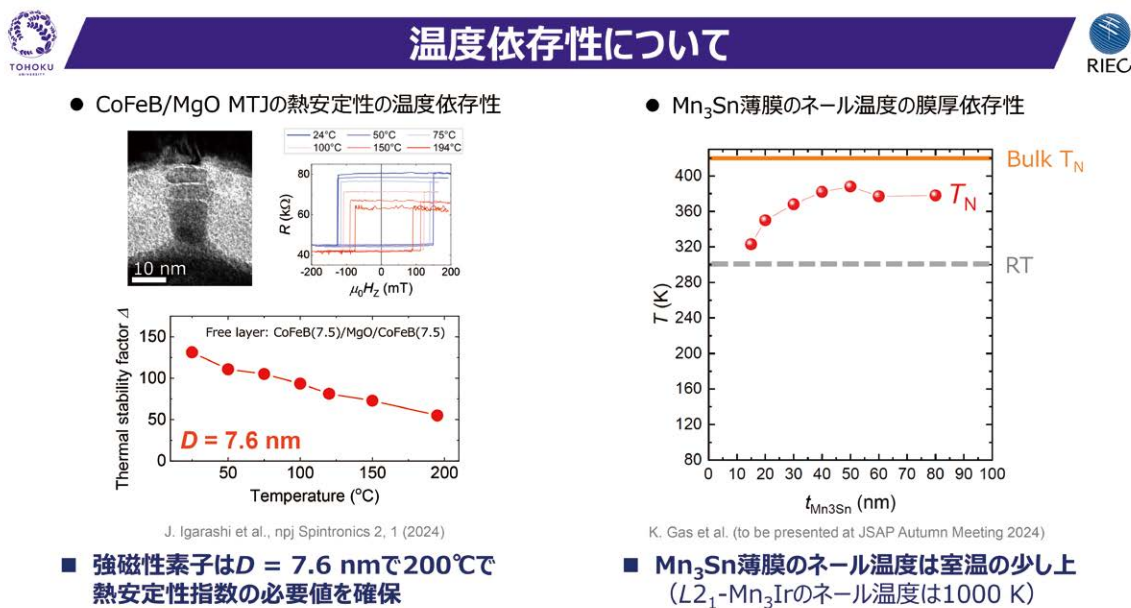


図 2-3-5 強磁性体素子と反強磁性体素子の熱安定性

次に、温度依存性について述べる。7.6ナノメートルの強磁性素子で、熱安定性を測定した。熱安定性は温度依存性の中で最もクリティカルなもので、高温でデータを保持できるかにつながる。図2-3-5左に示すように、我々は強磁性体素子に関して、色々と技術を向上してきた結果、200度でも熱安定性の必要値を確保できるところまで到達している。

これに対し、ノンコリニア反強磁性 Mn₃Sn は反強磁性磁気秩序が消失するネール温度が室温の少し上にある。温度がこれ以上になると、スピンの秩序がない普通の常磁性金属に転移するため、情報を保持するとかそういうレベルではない。ただ、これは Mn₃Sn という物質の問題で、Mn₃Ir という材料であれば、ネール温度は1,000 ケルビン近くになるため、高温での熱安定性は向上する可能性はある。次の実験としては、イリジウム使って調べてみれば良いと思うが、イリジウムの値段が近年、非常に高騰しているため、現状は躊躇しているというのが現状である。

あと、その他の強磁性素子の特徴としては、(1) シリコン基板上で作ることができる、(2) 室温で製膜できる、(3) 読み出し信号強度が十分、(4) 磁化反転時間は200ピコ秒まで確認済み、100ピコ秒あたりで最初のハードル、(5) エッチングはやや難しい、(6) 外部磁場耐性も、数十から100ミリテスラぐらいまで保証という状態であり、現時点で、市販されるレベルの性能を満たしている。こういった点では、ノンコリニア反強磁性体の各性能については、まだまだ、強磁性体素子を凌駕する何らかの可能性が見出されている段階には到達していないと言える。

つぎに、「それでもノンコリニア反強磁性体（量子マテリアル？）は面白い」という話をする。最近の研究で、Mn₃Sn が面白いと感じたのがこの研究である。アインシュタインの一般相対性理論では、質量の大きな物質の周りでは時空が歪んでおり、光は歪んだ時空の測地線に沿って進むため直進しないといったことが起こる。この時空の曲がりを記述するのが計量であるが、それと類似した量子力学版の数学的な概念で、量子計量というものがある。この量子計量の基本的な考え方が1980年に提案され、2014年には電気伝導に及ぼす影響が理論的に予言されていた。ちなみに量子幾何構造というものが、量子計量とベリー曲率の和で、実部が

量子計量、虚部がベリー曲率にあたる。

我々は、はじめベリー曲率の研究を行いたいと考え、ベリー曲率ダイポールによる特徴的な輸送現象を捉えようとして研究をおこなった。図2-3-6の実験結果は、当初は、ベリー曲率ダイポールの効果をとらえたものと考えていたが、その後、理論家と議論の結果、ベリー曲率ダイポールではなく、量子計量の効果によるものであることがわかってきた。アインシュタインの計量と同様な効果で電子が曲げられてると考えると、この実験結果を矛盾なく説明できる。これは、宇宙論を卓上で再現したようなもので、現状、何かの役に立つわけでは決していないが、非常に面白いと感じている。

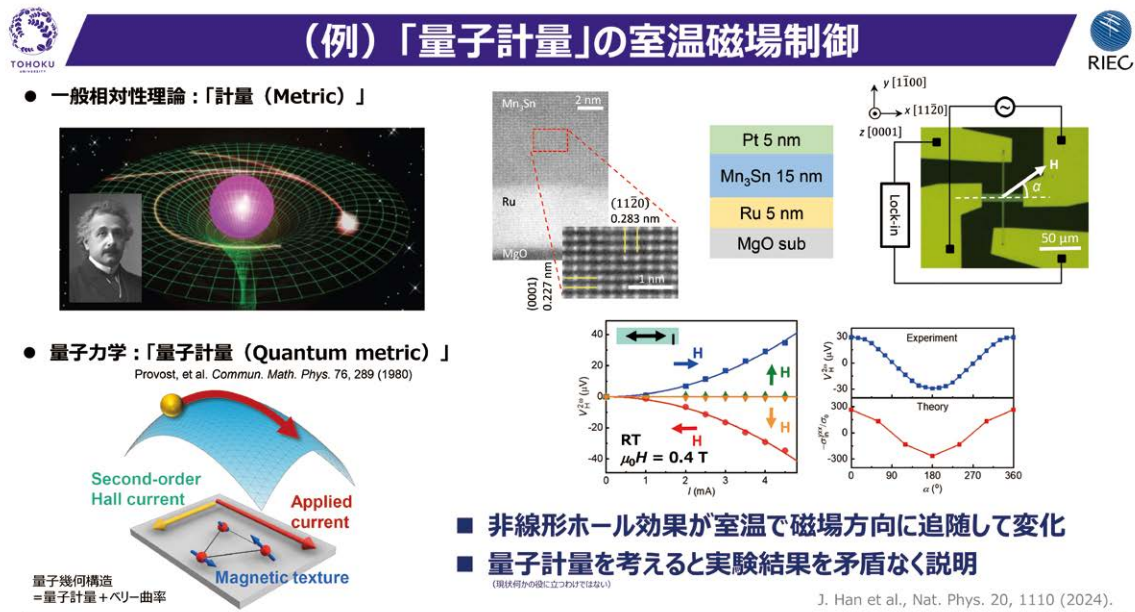


図 2-3-6 Mn_3Sn における量子計量

まとめを述べる前に、スピントロニクス分野における量子マテリアルに関する意見を述べたい。量子マテリアルを国策で推進するとしたら、やはり定義がちゃんとしなないといけないと考える。ジョセフソン接合、ダイヤモンド NV センター、冷却原子、トラップドイオン、マヨラナ粒子などのような、量子ビットに使えるものが量子マテリアルというのは良い。Si、GaN、Fe、CoFeB、Pt、W などのスピントロニクスの材料系は非量子マテリアルだろう。しかし、ノンコリニア反強磁性体、ワイルセミメタル、磁気スキルミオンなどのトポロジカル材料は、量子マテリアルだとしても、ハーフメタルや Altermagnet、磁壁 / ボルテックス、ホブフィオンなどはどちらなのかは、スピントロニクス分野としたら迷うところである。定義がはっきりしていないと、たとえば、さががけのようなプログラムに若者が確信をもって応募できないのではないかと考える。

講演のまとめとしては、まず、量子マテリアルは、未知の物理を開拓するツールとして非常に有能だと思っている。岩本先生も「curiously driven でもっと自由に」と質疑討論で述べていたが、私も同感である。純粋なサイエンス研究として扱った方が、応用可能性の名案が見つかる可能性も高いのではないかと。低消費電力で高速処理とか言い出してしまうと、アンフェアで不健全な方向に進んでしまうのではないかと印象である。

現状で量子マテリアルが既存技術を凌駕するようには見えないが、国策としてその実用化を進めることを行うのであれば、既存技術と並行して推進してフェアに比較しながら進めることが重要と考える。大事なことは、量子マテリアルに基づく有用な技術確立することではなく、工学的に有用なマテリアル技術確立することであろう。



まとめ（提言）



- 量子マテリアル(?)は未知の物理を開拓するツールとしては有能
 - 量子計量の室温制御はその一例
 - 純粋なサイエンス研究と推進させてもらいたい。その方が応用可能性の芽が見つかる可能性は高いのではないか？
- 一方で、総合的に見て既存技術を凌駕するポテンシャルは今のところ（自分には）見えていない
 - 「既存技術の延長では克服困難な問題の解決」を大義名分として推進するのであれば、既存技術も並行して推進しフェアに比較しながら進めることが望ましい。量子マテリアルのみにフォーカスして、特定の性能指標でその優位性を追求するのは不健全。重要なのは工学的に有用な量子マテリアル技術を確立することではなく、工学的に有用なマテリアル技術を確立すること。
 - 既存技術の成長はなんだかんだで止まらない。
 - 物性が結晶など周期的な構造に由来するマテリアルで既存技術の限界を打破できるか？
 - 量子マテリアルから何かを学び、既存マテリアルやその人工構造でその物性を実現する、という道もある。
- 電子デバイスについては大規模化、量産技術、アプリケーションとの整合性は早い段階から意識
 - 大口径アモルファス（ SiO_2 ）基板上に形成できるか？
 - 汚染、パーティクル、ピール試験などに合格できるか？
 - 機械的・化学的・熱的安定性、プロセスマージン、回路動作マージン、動作温度範囲、エラーレート、スケラビリティ、コスト、...
- （今日の趣旨とは異なるが）既存材料、既存物性での新規デバイス機能開拓にも多くの可能性。これも包含した戦略策定が有効なのは？

あくまでスピントロニクス分野限定の見解です

図 2-3-7 まとめ

また量子マテリアルの目標設定を行う際には、既存の非量子マテリアルに基づく技術も成長し続けるということも常に考えに入れておくべきである。20年後に実現する技術をやるのなら、既存技術の20年後と比較しなければいけない。また、量子マテリアル自体を使うのではなく、量子マテリアルから何かを学んで、その物性を既存材料で再現する、実現するという道もあると考えている。

電子デバイス応用を考えた場合には、大規模量産技術アプリケーションとの整合性は早い段階からきちんと意識する必要があるだろう。特に、例えば、ピール試験などは、これを絶対に通さないと会社では量産ラインに乗らない。

今日の趣旨と異なるが、既存材料とか既存物性で新しいデバイス機能を開拓するということも考えてよいのではないか。今日のテーマは、既存のデバイスの性能をさらに凌駕するための新しい材料だが、そうではなく、既存の材料、既存の物性で新しい機能を実現するというのも可能性があると考える。それを包含した形でのバランスの良い戦略策定が面白いのではないかと考えている。

【質疑応答】

- C：自分も量子マテリアルに関する会を主宰しているが、会員から「量子マテリアルってなんだ」という質問をよく受ける。全然結論は出てないが、量子マテリアルの定義はあんまりぎりぎり狭く決めずにやっていただきたいと考えている。
- A：CRESTだったら、著名な先生の提案が通ることになると思うが、さきがけの場合、提案する人が、「自分のテーマが出せるのか」がわからないと思う。その意味でなんらかの整理が必要と考える。
- Q：速度の話が出た。「100 ピコ秒あたりで壁がある」というのはどういう意味か
- A：磁化反転のスピードで、エネルギーバリアを超えるスピードがこのくらいということ。反強磁性体が強磁性体よりも速いというのは注意が必要。安定性の周りでの共鳴周波数、これは確かに速くて、それで信号を出すとかならテラヘルツくらいまで行くかもしれない。しかし、ネールベクトルを反転させるのは強磁性体の磁化反転と同じくエネルギーバリアを越えなければならないので、強磁性体の場合と変わらないだろう。エネルギーバリアを下げると今度は熱安定性が下がってしまう。これは強磁性でも反強磁性でも変わらない。

3 | 量子マテリアル研究に求められる活用基盤技術

3.1 量子マテリアルの機能創出のための合成・加工技術と連携体制

吾郷 浩樹（九州大学）

量子マテリアルと関連して、本日は次の3点についてお話しする。まず、「クオリティが物性を決める」ということで、私が研究している単層グラフェン、遷移金属ダイカルコゲナイド（TMD）を取り上げる。次に、「研究の進展にはウエハースケール、大面積のアセンブリーが必要になる」ということで、最近の成果である革新的なテープ転写法を紹介する。最後に、「コラボレーションが研究を大きく加速する」ということで、2021年に開始した学術変革領域研究(A)、産学連携のためのオープンイノベーションミーティングなど、コラボレーションの取り組みを紹介する。

図3-1-1はグラフェンの化学気相成長（CVD）に関する我々の研究を示す。高いキャリア移動度等の優れた物性を示すグラフェンのCVD合成では、金属触媒、特に銅（Cu）触媒の表面でメタンを原料として高温成長させるのが一般的である。しかし、市販されているグラフェンは、多結晶のCu箔で合成され、六員環の方向が異なる小さなドメインからなり多層グレインも一部混在することから、期待されるような高い移動度を示さないという問題があった。グラフェンのエピタキシャル成長のための触媒にCu単結晶の（111）面を使うのが理想だが、これではコストが高く応用には不向きであった。そこで、比較的安価なサファイアなどの単結晶基板上にCu（111）面配向膜を堆積し、それを触媒にすることによって単層で六員環の方向が揃った高結晶性のグラフェンの合成に成功した。なお、これはJSTさきがけの支援で得られた研究成果である。



図 3-1-1 グラフェンCVDに係るこれまでの研究

Cu(111)/サファイアによるCVD法でエピタキシャル成長させたグラフェンは多くのメリットを有する。まず、グラフェン六方格子の方位がCu(111)面のそれと一致しているので、角度分解光電子分光（ARPES）測定ができるくらい高い結晶性を示す。また、下地にサファイア基板を使っていることにより、触媒となるCu(111)面が原子レベルでフラットである点や、あとで述べるように転写時のハンドリングが容易になる点で、従来の多結晶Cu箔を用いた場合とは異なる。結果として、我々が合成するグラフェンには多層の成長や破れがほとんど見られず、市販品と比べてはるかに品質が高い。

ベンチマーキングとして、世界的に大きな販売実績を有する海外企業で製造されたグラフェンと比較してみた。従来のCu箔触媒で合成される同社のグラフェン電界効果トランジスタ（GFET）の移動度を測定すると、最大で1,000～2,000 cm²/Vsの範囲であった。これに対し、我々のグラフェンでは2,000～5,000 cm²/Vsと3倍高い値が得られたことから、グラフェンの高いクオリティが確認できた。このような理由から、グラフェンデバイスの特性向上を目指す企業や研究室から多くの引き合いがあった。

多くのサンプルの依頼に応えるためのスケールアップとして、2015年にNEDO予算で4インチ基板向けのCVD装置を開発した。その後、2018年に九州大学のギャップファンドで市場調査を行い、2019年に産学連携機構九州（九大TLO）を通じて、我々のグラフェンの試験販売を開始した。その後、研究室のスタッフが2021年に「二次元材料研究所」という大学発ベンチャー企業を立ち上げた。この大学発ベンチャーは、今年ついに大学から自立して独自にオフィスを構えるとともに、高価なCVD装置を含めすべて自前で準備できるようになった。最近、Cu(111)面上にエピタキシャル成長させるグラフェンのスケールアップについては、北京大学のBeijing Graphene Instituteやケンブリッジ大学、イタリアの研究所なども活発に研究を行っており、世界的な競争が激しくなっている。

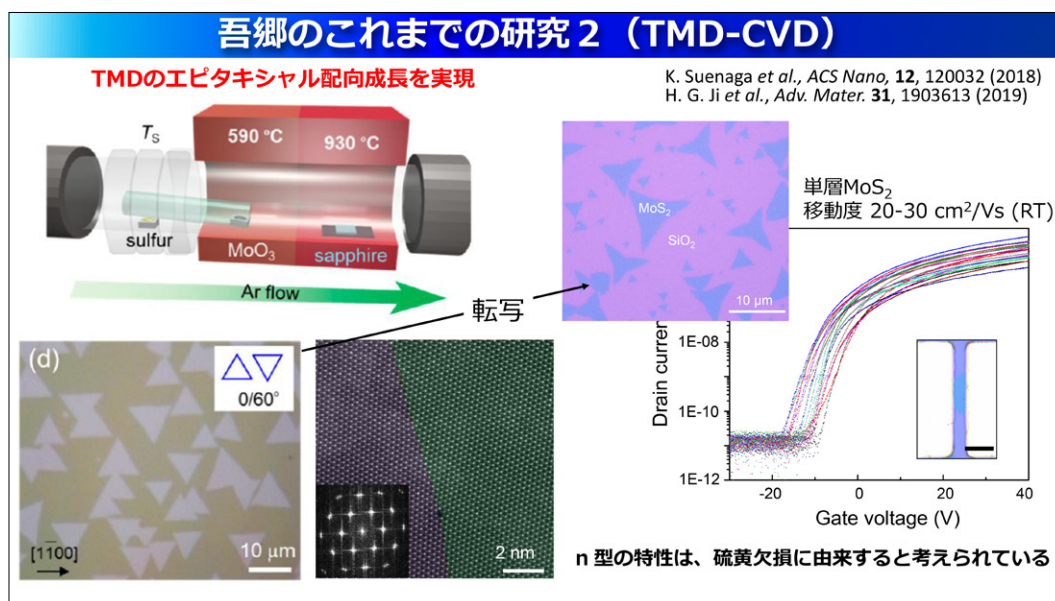


図 3-1-2 TMD-CVDに係るこれまでの研究

次に、図3-1-2にTMDのCVDに関する我々の研究を示す。代表的なTMDである二硫化モリブデン（MoS₂）の合成でもグラフェンと同様にCVD法を用いて大面積合成がなされ、この場合は原料として硫黄と酸化モリブデン等が用いられる。特に、サファイア基板上で単層 MoS₂を高品質にエピタキシャル成長させることができ、配向成長した場合には原子分解能の電子顕微鏡により界面がシームレスにつながっているのが確認された。サファイア基板上からシリコン基板へ転写し、電極を取り付けてデバイスにして移動度を測定すると、20～

30 cm²/Vsであった。ここで観察されるn型の伝導特性は硫黄欠損、すなわちMoS₂格子上的硫黄原子が一部抜けていることに起因するとされている。このような欠陥など、二次元物質の品質評価が重要であり、グラフェンではラマン分光が効果的だが、MoS₂やニセレン化タングステン（WSe₂）などのTMDや六方晶窒化ホウ素（h-BN）に対してはラマン分光はあまり有効でない。

そこで、新たな欠陥評価法の研究開発が行われており、例えば走査型トンネル顕微鏡（STM）を用いた手法が発表されている。STMで評価できる範囲は狭く効率的な手法ではないが、これを用いてフラックス法による成長条件を最適化し、WSe₂における点欠陥の密度を低減させることで、840 cm²/Vsという高い移動度を得ることに成功している。グラフェン以外の二次元物質の欠陥評価は容易ではないが、量子マテリアルの物性制御による機能化・応用には極めて重要な課題である。

それから、先ほど出てきた転写というプロセスも二次元物質研究の肝である。例えば、Cu(111)触媒の上に合成したグラフェンからトランジスタを作るには、グラフェンをシリコン基板などに転写する必要がある。このプロセスでは、グラフェンの表面を高分子保護膜で覆ったうえで、エッチング液中で間にあるCu触媒を化学的に溶解させ、浮いてきたグラフェンと高分子保護膜をシリコン基板ですくうのが基本である。ただし、転写プロセスの際にグラフェンに破れが生じたり、最後に有機溶媒で高分子保護膜を除去してもその残渣がグラフェンの特性に影響を及ぼしたりするなどの課題がある。また、この転写は経験者による職人技的な側面がある。

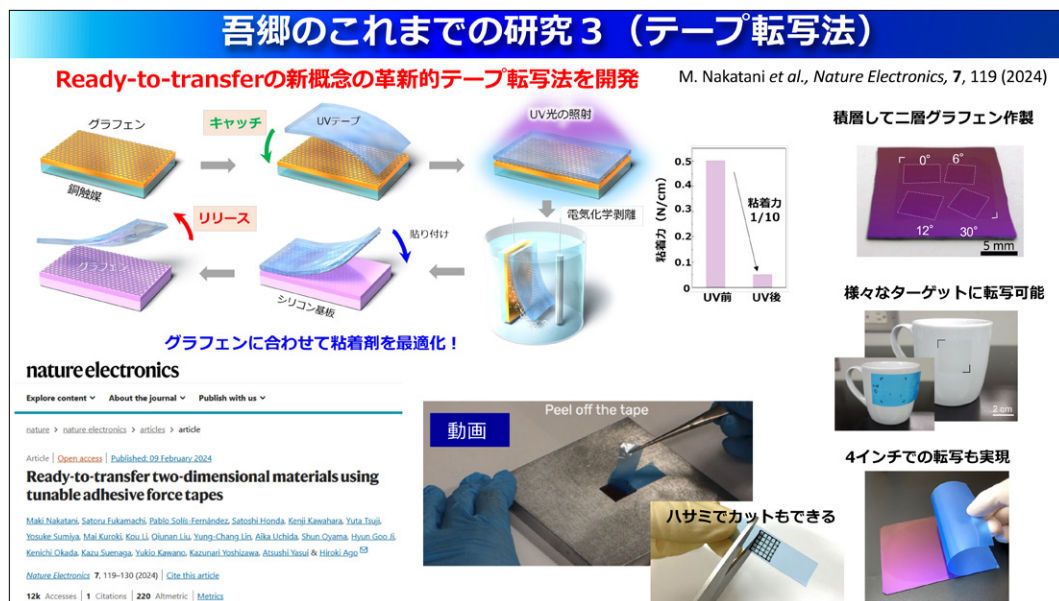


図 3-1-3 テープ転写法に係る成果

この問題を解決するために、簡便なテープ転写法を企業と共同で開発し、今年、Nature Electronics 誌に発表した。本成果のポイントは、図 3-1-3 に示すとおり、粘着力を紫外光で10分の1にまで低下できる粘着テープをグラフェンやh-BNなどの二次元物質用に開発するとともに、それぞれに最適なキャッチアンドリリースの手法を得たことである。粘着テープによる転写のため、試料のカットや複数層グラフェンなどの積層、さらにはコーヒーカップ上への転写も可能で、ハンドリングが従来法に比べて非常に容易になる。また、企業と共同で、4インチ（100 mm）もの大面積グラフェンをそのまま転写するシステムを開発しており、将来的には300 mmのウエハーレベルの転写によって、ナノシートトランジスタ等の次世代半導体の開発に貢献していきたい。

最後に、コラボレーションとそれを企業との枠組みに発展させたオープンイノベーションとについて説明する。2021年度より、私は科学研究費助成事業学術変革領域研究（A）の「2.5次元物質科学：社会変革に向けた物質科学のパラダイムシフト」領域の代表者を務めており、40人の先生方とオールジャパンの体制でコラボレーションを推進している。本領域のコンセプトは二次元物質を1枚1枚重ねることによるバンド構造の制御であり、例えばバンドギャップをチューニングしたり、グラフェンを少し回転させて重ねることでモアレ模様を作り超伝導性等のエキゾチックな物性を観測したり、異なった二次元物質を重ねたときの相互作用で新しい発光現象を見出したりするなどの研究開発を実施している。これらに加えて、重ねた二次元物質の層間に様々な物質を挿入することで、新しい物性、機能の創出も目指している。本領域の活動は多岐にわたっており、東京大学で開発されたロボティク積層システムを領域メンバーが誰でも使えるように共有するといった共同利用拠点の整備と活用から、国際ネットワークの強化・国際的な認知度向上、サンプル見本市をはじめとした各種イベント、インターンシップ支援・研究会を通じた若手育成まで非常に活発に行っている。領域の開始から2年半で査読付き論文は200報以上発表し、このうち約40%が領域内の共同研究による成果であることを強調したい。本領域の代表的な研究成果のいくつかを図3-1-4に示す。多くは合成、物性測定、機能化・応用などの複数の研究者による共同研究であり、積層・モアレやナノ空間、合成・材料、応用に係る様々な優れた成果が得られている。

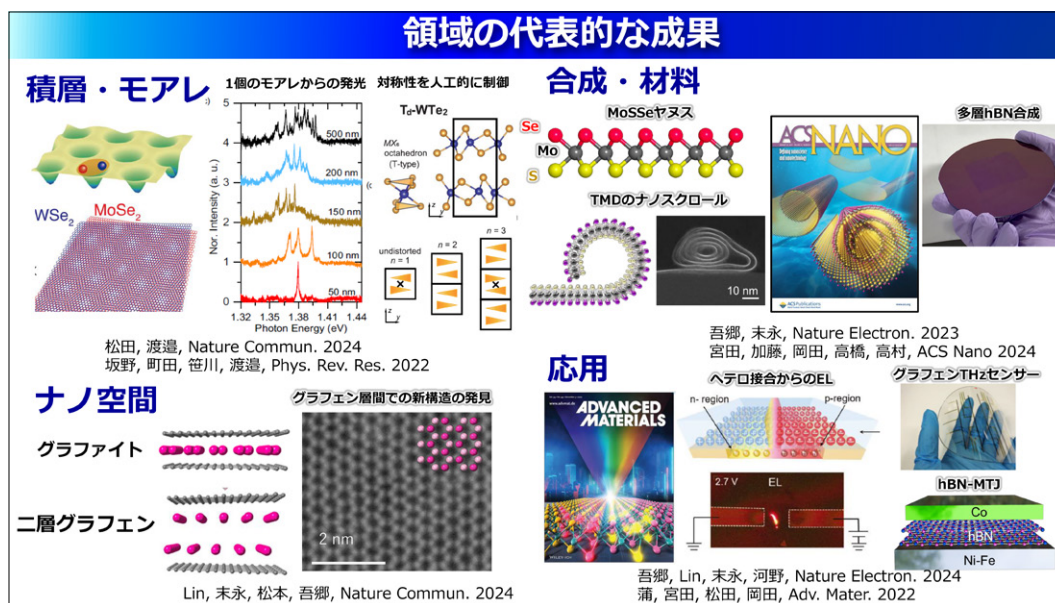


図 3-1-4 学術変革領域研究（A）における代表的な成果

一方、オープンイノベーションについては、私の以前の所属が九州大学の産学連携センターであったこともあり、同大におけるオープンイノベーションのための産学官連携モデル、通称「koine (Kyudai global Open Innovation Network Engine)」による活動も活発に実施している。図3-1-5に示すとおり、二次元物質に興味をもつ多くの企業の方に集ってもらい、大学やJST、NEDOからの講師によるセミナーを実施するとともに、セミナー後には2時間ぐらいかけてフリーディスカッションを行っている。重要なのは、意見交換会や懇親会を通してネットワークを作って、通常の産学連携にとどまらず、産産連携などを含む多様なコラボレーションが進むことを望んでいる。将来的には、こういったネットワークをファンディング機関でサポートいただけたらと考えている。

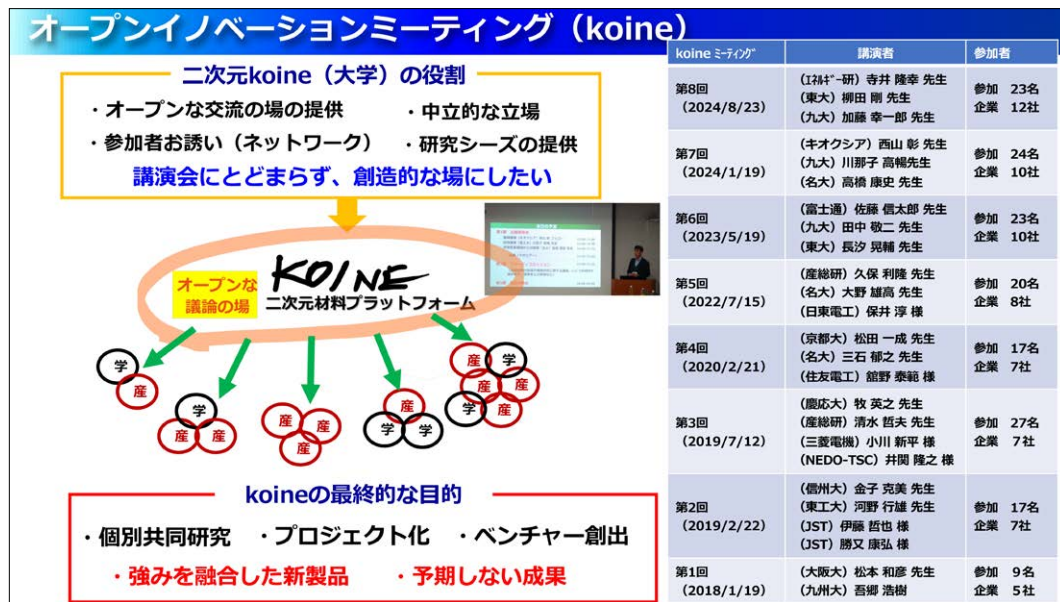


図 3-1-5 オープンイノベーションミーティング (koine) について

【質疑応答】

- Q：二次元材料の大面積化は我が国が主導しているという話だったが、一方で国際競争も激化していると思われる。その観点で重要となってくる国際連携についてはどうなっているか。
- A：合成の分野では中国などが強いこともあって連携は簡単ではない。合成、物性測定、機能化・応用など、異なる階層の方々と共同研究するのがよいと考える。基本的には、国内で装置や理論的知見をしっかりと共有して、それを強みとして研究開発を進めるのが先決ではないかと考える。
- Q：海外の著名研究者を招へいして議論するなどの活動は行っているのか。
- A：我々の領域では招へいに限らず、様々な国際連携を進めている。海外での日本のプレゼンス向上や共同研究の活性化を目的に、来週、イギリスとチェコに10人で出張してワークショップを開催する予定である。
- Q：テープ転写法のような大面積化に必要な技術等、知財化の活動はどう考えているか。特に、海外との関係においては重要と思われる。
- A：大学の予算は限られているので、研究室の発明のほとんどが大学から出願してもらうことは困難である。今回、我々のグラフェンの知財はJSTの支援により外国出願することができた。その後、大学がJSTから特許を買い取っている。今のところは、JST等からの支援や企業との共同で出願するしかない状態である。ただ、二次元物質、あるいは2.5次元物質の研究は、まだその端緒についたばかりの側面もあるので、どの技術が主流になるか明確ではない。したがって、企業でも比較的オープンに研究を進めることを考えている。
- Q：話に出たImecのロードマップを見ると、確かもう10年後ぐらい、2030年には二次元物質によるデバイスが実現するとのことだが、そのためには大面積のシリコン基板への転写を実現すること、グラフェン、あるいはそれ以外のどの材料をするかも決めていくことが必要と考える。当該業界では、こういった方向性に行きそうで、今どこが一番強いのか。
- A：300 mm、あるいは8インチの大面積を、二次元半導体で目指すのが主流になりつつある。WSe₂、MoS₂を大面積で作っているのはImec、米国や中国の大学などがある。今後、我が国でもこういった研究を早急に行う必要があると考える。
- C：10年で追い付けることを期待している。我が国が強みとする材料技術でリードできればと考える。

Q：立ち上げたベンチャーにおける現在の経営はどうなっているか。

A：以前私の研究室にいたテクニカルスタッフの方が立ち上げている。その方の考えから、独立性を保つため、株式会社ではなく合同会社をしている。私は技術アドバイザーとして協力している。

Q：それでも、CVD装置を購入されるレベルには財政基盤は整っているのか。

A：銀行や市からの融資や支援金を受けて経営していると聞いている。

Q：先ほどの話だと、購入客は基本的には研究の連携先と思ったらいいか。

A：連携先に限らない。大学では1～数枚であるのに対し、会社だと数十枚以上買いたいということが多く、大口の購入客は企業の研究開発の方である。やはり問題は、もっと安価に、というリクエストが強いことである。

Q：ちなみに、1枚いくらかで販売しているのか。

A：転写したグラフェンは1センチ角のサイズで、1枚当たり3万円ぐらいだと思う。

3

量子マテリアル研究に
求められる活用基盤技術

3.2 理論による量子マテリアルの新機能・魅力の提示と技術への期待

村上 修一（東京工業大学）

私の専門分野は物性理論で、主に解析的手法を用いてトポロジカル相やスピントロニクスなどの研究をしている。本日は、前半では量子マテリアルの新機能と今後の方向性について、特にトポロジカル材料を例としてお話しした後、後半では私が研究総括として関わっていたさがけと現在領域代表をしている学術変革領域研究の紹介をさせていただきたい。

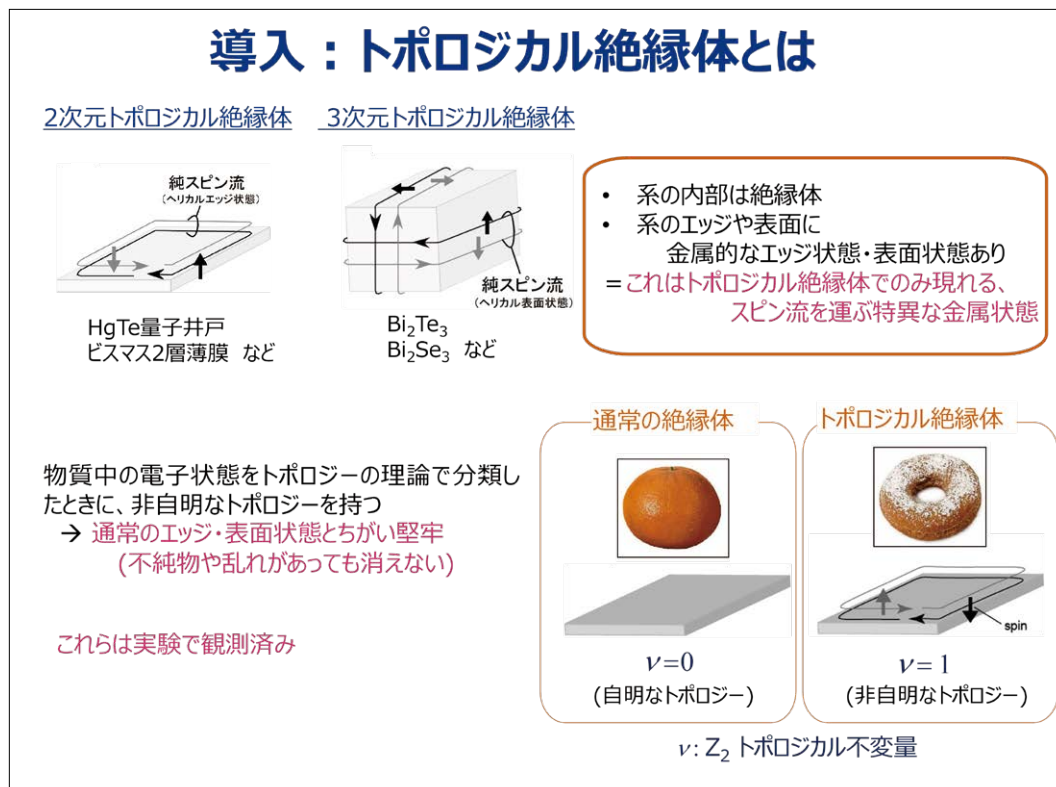


図3-2-1 トポロジカル絶縁体とは

まず最初に「トポロジカル絶縁体」について簡単に説明する。図3-2-1に示すように、2次元系、例えば薄膜では、端（エッジ）だけが金属状態で、中は絶縁体になっている。3次元系の場合は表面のみ金属状態で、電子スピンのアップとダウンが互いに逆向きに一方向のみに流れる特異な状態になっている。この状態は数学のトポロジーに特徴づけられる非自明な状態である。通常の状態と異なり、不純物や乱れに堅牢であることが実験でも実証済みである。

トポロジカル材料を歴史的に紐解くと、1980年代に量子ホール系の研究が精力的に行われており、2000年くらいまではそれが唯一のトポロジカル相と思われてきた。2003年頃に我々が非磁性体でのスピホール効果の研究を行ったことを皮切りに、磁場や磁性がなくても量子ホール効果が起こるのではないかという研究がアメリカでも行われ、今日のトポロジカル物質のブレイクスルーにつながった。こちらは完全にキュリオシティ・ドリブンな研究で、純粋な興味からこういったものがあるのではないかということで理論提唱され、それが実際に実験でも観測されて、様々な面白い性質が出るということが分かった。我々もビスマスの薄膜がトポロジカル絶縁体であることを初めて提唱したりして、材料科学への展開もいろいろ進んできた。半金属系の

トポロジカル相についても我々の研究も含めて非常に盛んに研究がなされている。それ以外にも様々なトポロジカル相が発現することが理論的にも分かっており、実験での解明も非常に進んできている。物質のデータベースと照合すると2万7,000個ぐらいの物質のうち、27%がトポロジカル物質だったという研究成果もある。トポロジカル物質自体は2000年を過ぎてから発見されたものであるが、実はもう身の回りの物質のかなりのものがトポロジカル物質であったという非常に驚くべき結果と言える。

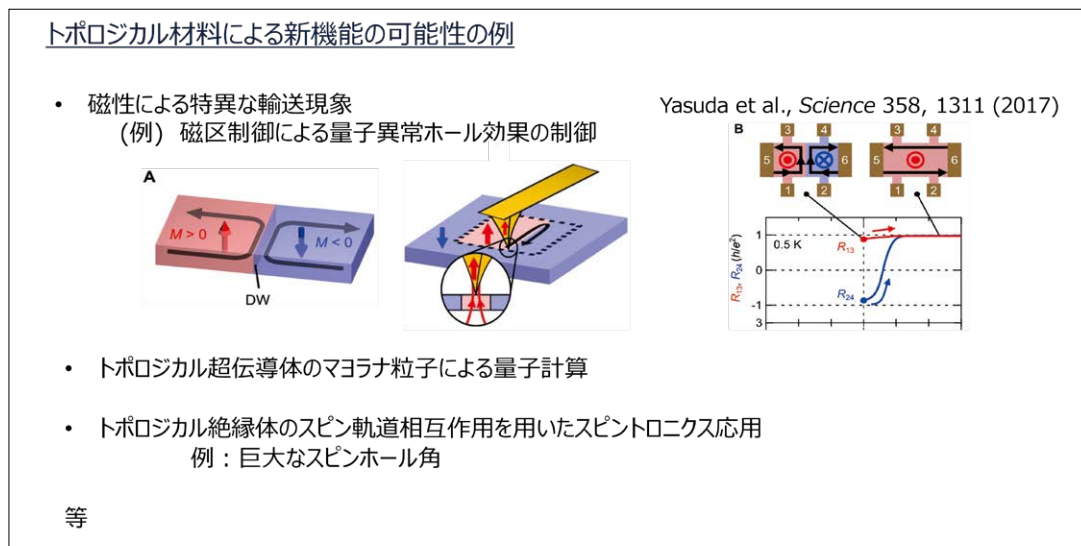


図3-2-2 トポロジカル材料による新機能の可能性の例

新機能については多くの研究があるため分かりやすい例を一つ挙げる。図3-2-2は、理研の十倉グループの実験結果だが、磁性体の磁区をアップにするかダウンにするかで、例えばダウンにすると試料のエッジを時計回りに回るような金属状態が出るが、アップにすると逆向きに回る。いわば伝導のパスを磁化によって変えることができるため、その磁区を書き込むことで制御できることが示されている。

他には、トポロジカル超伝導体のマヨラナ粒子を使うことで量子コンピューティングが可能になる、とか、スピントロニクス応用など様々な応用先が考えられている。材料科学的にどこまで応用が進むかは今後の課題だとは思いますが、科学としては非常に進展している。他方、定型化した研究になりつつあるため、今が過渡期なのではないかと感じている。つまり、物性物理として普遍的に何が起こるかについては大体分かってきたと思う一方で、通常材料科学では様々な材料がある中で、この材料はこういう性質、この材料は似ているけど少し違う性質を持っている、という形で、物質の個性に着目した研究が必要になるが、トポロジカル材料科学は今のところはまだ普遍的な性質を見るにとどまっているため、物質の個性に着目して進化する余地がまだ残っているのではないかと考えている（図3-2-3）。

例えばマヨラナ粒子についても、結局、材料科学的な課題によってうまくいけばトポロジカル量子計算ができるはずだが、残念ながらまだそこまで至っていない。他にも触媒や化学反応、結晶成長といったところにもトポロジカル物性が利いているはずで、そのような分野へも展開の余地も残っていると考えている。つまり、量子マテリアルとしての魅力はまだ十分にあるだろうと思っている。

導入：トポロジカル材料科学の現状と課題

トポロジカル材料科学

物性物理学での理解は大きく進展、一方で…

定型化した研究スタイル：

トポロジカル相の理論予測 → 計算で既存物質から候補を洗い出し → 実験実証

トポロジカル相の候補物質の発見

普遍的性質の理解（特に輸送特性や光学特性）

課題

従来の材料科学にあるような各物質の個性に焦点を当てた研究はまだ不十分
例えば化学結合や反応性、高機能な新物質の探索など

例 1：量子異常ホール効果：原理的には室温程度も可能はずだが、現在は極低温領域のみ。

例 2：マヨラナ粒子（＝トポロジカル超伝導で実現する準粒子で、量子コンピューティングの基盤）

→ 材料科学上の問題で物質プラットフォームは確立していない。

例 3：ナノ結晶成長や触媒といった化学反応の舞台としてのトポロジカル表面状態の役割

→ ごく少数の先行研究のみ

今後は、トポロジカル材料の物質としての理解の深化や、目的とする物性を実現するための最適な物質設計・選定へとシフトする必要

図 3-2-3 トポロジカル材料科学の現状と課題

前半をまとめると、トポロジカル材料科学は物性分野を横断的につなぐ新しい分野として、理論・計算・実験の緊密な連携で大きく発展していった分野ではあるが、まだ材料科学としては発展の余地がある。トポロジカル材料一つ一つの側面も加えた理解だとか、デバイス利用に向けた様々な課題解決、あとは化学反応や触媒などの研究が少しずつ進められているところである。さらにメタマテリアルの応用などもある。

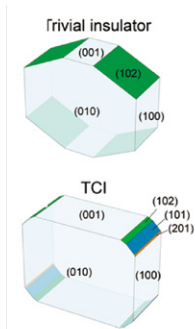
トポロジカル物質の結晶形状・成長

金属的なトポロジカル表面状態が存在すると、結晶表面の持つエネルギーは増加するため、結晶の形状に影響すると期待。

結晶のトポロジカル相の種類によって、ある表面方位では表面状態が存在するが、別の方位ではトポロジカル表面状態を持たない。



トポロジカル表面状態の有無により結晶表面エネルギーが変化するため、結晶の平衡形状がトポロジカル相かどうかで変化する



Y. Tanaka, T. Zhang, M. Uwaha, S. Murakami, Phys. Rev. Lett. **129**, 046802 (2022)

Y. Tanaka and S. Murakami, Phys. Rev. B **107**, 245148 (2023).

Y. Tanaka, S. Zhang, T. Zhang, S. Murakami, in preparation

長い歴史を持つ結晶成長の学問に新しい一歩
トポロジカル材料の新しい側面

図 3-2-4 トポロジカル物質の結晶形状・成長

我々も研究を始めているが、例えばトポロジカル材料の特異な表面状態が化学反応や結晶成長にも関係しているだろうということで、結晶の形にどのように影響を与えるかに関してまずはモデル計算からスタートしている。トポロジカル相があることで結晶の平衡形状が変化するという計算結果を得ている（図3-2-4）。

さらに、東大の渡辺悠樹先生らの研究では、例えば非常にありふれた食塩が、実はある種のトポロジカルな性質を持っていることがわかり、結晶のコーナーに分数電荷が出るという研究結果がある。8分のeという非常に小さい電荷ではあるものの、結晶成長や化学反応などに影響を及ぼすのではないかとということで、無機化学や触媒化学といった異分野と連携しながら解明していきたいと考えている。

量子マテリアルの新しい方向性へ

研究を大きく2種類に分ける

• 課題解決型

他よりも優れた何かが必要

資金、マンパワー、蓄積した技術や既存の装置、質の高い人材、卓越した着想

* 金とマンパワーについてはアメリカや中国に勝つのは現状難しいので、後者について入念な分析と十分な勝算の下で取り組むことが必要

• 課題発掘型 (curiosity-driven)

萌芽的な課題を埋もれさせず発掘する仕組み・インセンティブが必要

目的を明確化しすぎないことが必要

(もちろん目的が自由すぎるのも×)

理論・計算・実験の緊密な対話が重要

枠組みを工夫することで、こうした研究を大きく発展させることができる

JSTの競争的資金はそのためにより仕組み (= 総括の裁量が大きい)

図3-2-5 量子マテリアルの新しい方向性へ

以上から、トポロジカル材料を1つとっても、今後の研究の方向性として課題解決型と課題発掘型に分かれる。課題解決型では、こういう課題があってそれを解決したいという研究をしないといけませんが、日本においては米国や中国と比べると資金とマンパワーが十分ではないため、入念な分析を行いながら勝機を見つけていく必要がある。課題発掘型であるキュリオシティ・ドリブンの研究に対しては、例えばJSTのファンディングによって大きく発展させられる余地はいろいろとあると感じている。特に分野間の緊密な対話とか、萌芽的な課題を発掘する仕組みなどが大事だと思う。そのあたりを後押しすることで、量子マテリアルの新しい方向性を発掘できる余地は十二分にあると感じている。

実際に、私がさががけのトポロジカル材料科学の研究総括をさせていただいたときにJSTの競争的資金は非常に良い仕組みであると感じた。領域のポートフォリオは非常に大きく広い分野にわかっていたが、それが功を奏して様々な分野間の研究者の対話を促進することでいろんな新しい研究展開ができた。

特にさががけは非常に自由度が大きく研究総括の裁量も大きいため、さががけ研究者に自由に研究を展開していただくことができた。多くの研究者が「今後につながる長期的な研究テーマを見いだせた」というコメントを残していることからわかるように、大枠としてはトポロジカル材料科学としていたが、その中で自由に研究展開をすることで次世代の、次の10年につながる課題を洗い出すことができたのではないかと考えている。

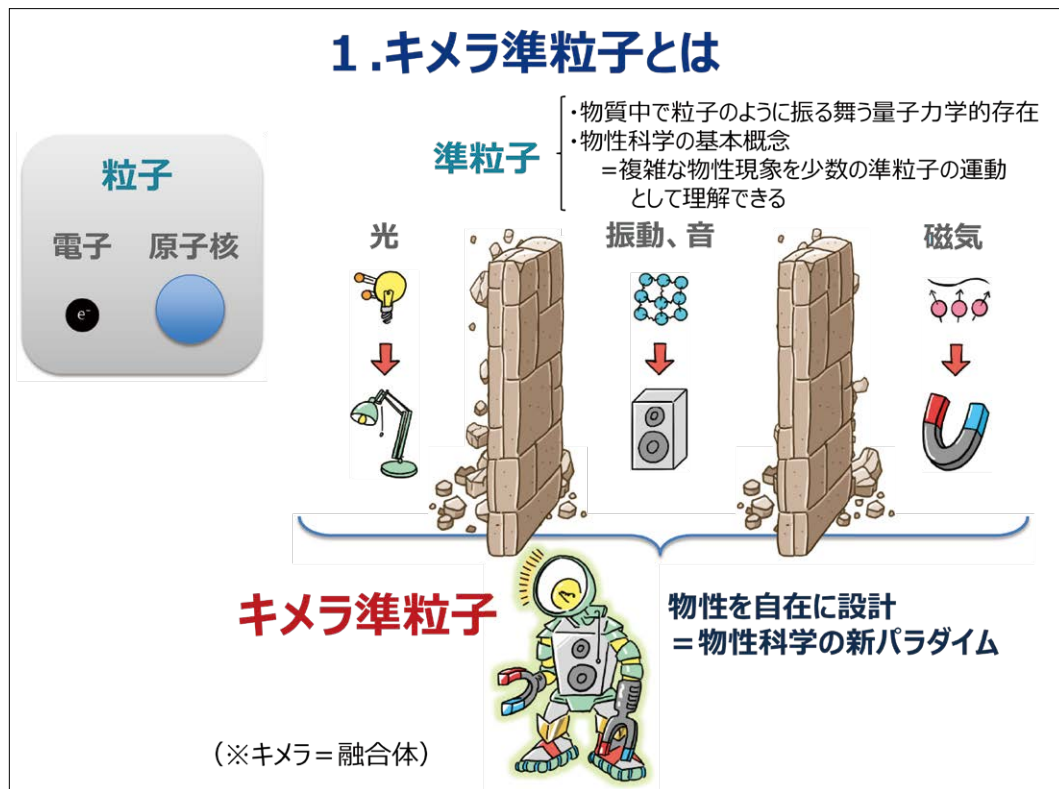


図3-2-6 キメラ準粒子とは

最後に、私が領域代表をしている学術変革領域研究（A）「キメラ準粒子が切り拓く新物性科学」の紹介をさせていただきたい。準粒子とは、フォトンやフォノン、マグノンなどを指す言葉だが、そのような準粒子を組み合わせた複合準粒子、ここではキメラ準粒子と名付けたが、そういったものを自由自在にデザインして作ることで分野間の壁を取り払おうというのが基本的なコンセプトである（図3-2-6）。

複合準粒子の科学というものは昔からあったわけだが、これまでは個別的な研究が多く、そちらを横断的に、かつ、様々な分野にまたがって行おうという取り組みはなかった。準粒子ごとに長さスケールや時間スケールが異なっているため、各々の固有スケールをどのように超越させて準粒子を混ぜるか、ということが最大の課題である。詳細は省くが、例えば積層構造や共振器構造、メタマテリアルを用いることで、いろんなスケールを超えて準粒子を複合化できるのではないかと考えている。ここでは、有機分子もキラルな構造として面白い研究対象になっている。

研究体制としては、スピントロニクス分野が一番多いが、他にはメタマテリアルとキラル分子科学の研究者にも入ってもらって、分野横断的に融合することで、キメラ準粒子科学を確立しようとしている。今までなかったような分野の組み合わせではあるものの、分野横断的な対話によって新しい学理に到達することができると期待している。

分野横断と簡単に言いながらも実際にやろうとすると難しい場面もあると思う。ただ、例えばキラルな構造、螺旋みたいな構造というものは実は様々なスケールでいろんな場面に表れている。全く異なるコンテキストではあるものの互いに対話することで新しい地点に到達できるものも多いのではないかと。メタマテリアルやキラル分子など、無機結晶でもキラルな構造もあるため、共通部分もあるはずで、異分野間の対話を通じて是非とも融合研究を完遂させたいと考えている。

以上をまとめると、課題発掘型研究であっても理論・計算・実験の緊密な対話によって、かつJST等の競争的資金の枠組みをうまく使うことで、新しい量子マテリアルの境地に達することができるのではないかと、ということが本日伝えたかったことである。

【質疑応答】

- Q：結晶成長にもトポロジカルな性質が関係しているという話だったが、トポロジカル相として説明できる部分もある反面、トポロジカルな性質を導入することで反応を制御することも想定範囲に含まれているのか。以前、量子触媒という話を聞いたことがあるが、本当にトポロジカルな性質が効いていると言えるものなのか。
- A：量子触媒に関しては複合的なものが絡んでおり、トポロジカルな性質が唯一の原因ではないと思うが、トポロジカル状態が表面に現れることを考えるとかなり主要な原因となっているのではないかと考えている。
- Q：これが出たらトポロジーが影響していると言えるものがあればいいのだが。
- A：そのあたりはまだわかっていない部分でもあるが、トポロジカル物性が触媒作用に関係しているのではないかと自体は有望な方向性だと感じている。
- Q：トポロジカル物質には20年の歴史があるという話もあり、キュリオシティ・ドリブン研究の重要性も十分に理解するものの、今後は社会実装に向けた課題解決にも力を入れるべきではないか。
- A：話し方が悪かったのかもしれないが、トポロジカル材料科学は既に課題解決のフェーズに達している。マヨラナ粒子の話も理論的な枠組みでは量子計算への道筋はできており、あとは適した材料を探すフェーズに入っているため課題解決型かなと感じている。他にもスピントロニクスも課題解決型と言える。
- Q：キメラ準粒子の学術変革で何を狙っているのか、もう少し詳しくお聞きしたい。
- A：例えばフォノンとマグノンといった2個の準粒子に対して、これまでは準粒子ごとの個別の研究だったものを分野横断的に行うことで新しいことができるのではないかと考えている。物性物理だけではなくメタマテリアルやキラル分子などの分野の方の知見も取り入れて新しい準粒子の組み合わせから新しい学理を構築することと、そこから新しい機能の開発をすることが目的である。
- C：社会実装に関してコメントしたい。トポロジカル材料は社会実装にはまだ程遠い状況ではあるものの、トポロジカル絶縁体のエッジ流が非常にロバストな散逸電子流であることは既の実証済みである。シフトカレントもやはり非散逸な電子流が波動関数の位相によって流れるということがわかっており、従来では全く考えられなかった非散逸電子流が出ることが実証されている。社会実装には距離はあるにせよ、室温で出る量子ホール効果や波動関数の位相で流れる電子流というのは20年前にはなかった概念であり、それが実際に薄膜デバイスで実証されているというのはかなり進展しているということだろう。そのような例がいくつか出ており、量子マテリアルというものはそういう可能性を秘めている物質群だと言えると感じている。
- Q：触媒や化学反応の話が何度か出てきたが、トポロジカル絶縁体の表面に電子系が局在することでエンハンスされるものだと考えていいのか。
- A：その通りだと思う。まだ実証はできておらず、実証すること自体も難しいのではないかとも思うが、例えば触媒としてよく使われているプラチナの表面には実はトポロジカルな状態があることが分かっており、触媒反応と何か関連がありそうだという話もある。理屈としてもトポロジカルな金属状態が表面にあると、それが化学的に活性になって反応を促進するというのはあり得るシナリオだと思う。

3.3 量子マテリアルの特徴を明確化させる計測技術

佐藤 宇史（東北大学）

「量子マテリアルの特徴を明確化させる計測技術」について、今回のセッションでは、私たちが取り組んでいる放射光と縁が深い光電子分光を踏まえて、話題提供を行う。計測とは何か？ということを考えてみると、何かを測れば何でも計測であり、それをどうやって量子物質にうまく当てはめるか？というのは、ざっくりとしていて難しい話である。光計測、スピン計測など、挙げればきりががないほど計測はたくさんある。

放射光を用いた計測について、東北大学の青葉山新キャンパスでは、2024年4月からナノテラスが稼働しており、最終的に全部で27本稼働可能なビームラインの内、図3-3-1に示す10本が先行ビームラインとして既に動いている。これらは、特にニーズが高い実験、例えば、動作中のデバイスなどオペランドで分光する実験、硬X線を使ってさまざまな材料をイメージングする実験、光電子分光、共鳴非弾性X線散乱など、様々な実験を進めている。

放射光施設NanoTerasu (4月から稼働)

SRIS International Center for Synchrotron Radiation Innovation Smart Tohoku University
東北大学 国際放射光イノベーション・スマート研究センター

放射光X線計測と限定しても
今この瞬間を、照らす。
光がつなぐイノベーション。

パラメータ	数値
エネルギー	3.0 GeV
リング周長	350 m
エミッタンス	1 nmrad

先行ビームライン10本ラインナップ

- オペランド分光
- 構造・電子状態トータル解析
- 階層的構造解析
- コヒーレントイメージング
- 磁気イメージング
- 電子状態解析
- オペランド分光
- ナノ光電子分光
- ナノ光吸収分光
- 超高分解能共鳴非弾性散乱

量子マテリアルの機能性開拓に役立つという観点（物性家の観点）では：
物性機能を司る「低エネルギー励起」が直接観測できる手法が有効
(エネルギースケール：
輸送特性 数100 meV, 磁性~ 数 eV)

ARPES, STM, XMCD, RIXS, 中性子散乱...

図3-3-1 ナノテラスで先行して稼働している10本のビームライン（2024年4月）

これらの実験は、それぞれが量子マテリアルの計測として利用できる。物性の観点から見ると、物質材料の機能を司るのは非常にエネルギーが低い電子励起のため、低いエネルギーにアクセスできる実験が重要になる。例えば、輸送特性は、フェルミ・ディラック分布関数の幅で数百 meV のエネルギースケールの物理現象であり、磁性だと交換相互作用の大きさ（最大で数 eV）で決まる。よって、この程度のエネルギースケールを確実に観測できる計測手法が、マテリアル開発には有効である。

実際には、1つの計測手法ですべてがわかることは無いので、光電子分光、STM、中性子散乱、量子ビームなど、様々な計測手法を総合的に使って、量子マテリアルの情報を調べていくことが重要である。例えば、実空間で見えるものと逆格子空間で見えるものは情報が異なるため、それらを相補的に使い、両者をにらみながら物質材料を計測することが大事になる。

先ほど村上先生からトポロジカル絶縁体に関する話があったが、その研究における私の位置付けは、逆格子空間でバンドを直接見ることができる光電子分光を用いて計測することである。特に、トポロジカル物質において、光電子分光は表面近傍の電子状態を直接観測することを得意としており、表面科学、強相関電子系、超伝導体などにおいて、様々な物質の実証や物性解明に役に立った経緯がある。

2000年代に入ってからトポロジカル物質が理論的に提案され始めた頃になるが、トポロジカル絶縁体の特徴として、バルクは絶縁体であるのに対して、トポロジカル絶縁体は数nmくらいの表面の非常に薄い領域に、ディラック電子に起因した金属状態が出てくることが報告された。光電子分光はこの金属状態の計測に最適であり、トポロジカル物質に光を照射して電子を測定することで、ディラック電子を直接計測できる。

図3-3-2に例を示すが、これまでに光電子分光を用いることで、様々な新しいトポロジカル物質の同定がなされている。2008年には、米国のプリンストン大学の研究グループが表面バンドを観測することで、ビスマス-アンチモン合金が3次元トポロジカル絶縁体であることが明らかになった。その後、2009年にスタンフォード大学の研究グループなどが、テトラジマイト系物質で明確なディラック電子バンドを観測できるという報告を行った。私たちも、2010年位からこの分野に参入して、様々なトポロジカル物質を実証してきた。

光電子分光を含め電子構造を精密に測る実験が、トポロジカル材料開発でどのようなメリットがあるか?ということを端的に示す例として、図3-3-3に示すように、ケルン大学の安藤先生のグループと共同で、応用に適したトポロジカル絶縁体であることを実証した $(\text{Bi,Sb})_2(\text{Te,Se})_3$ について述べる。

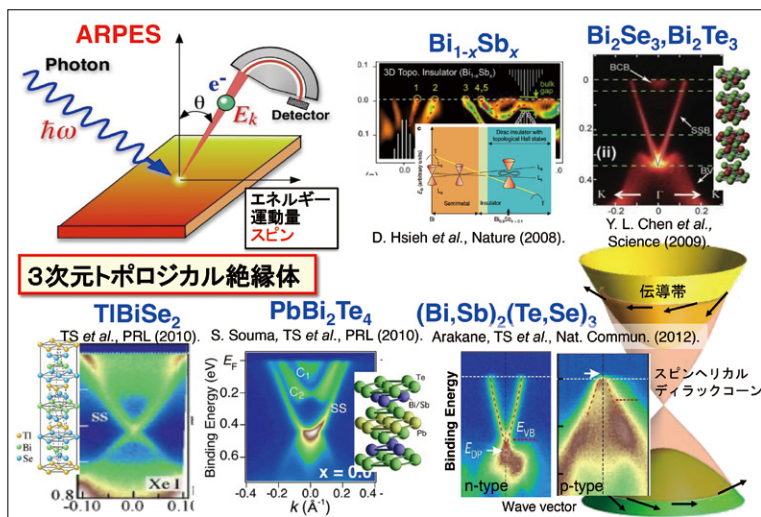


図3-3-2 角度分解光電子分光（ARPES：Angle-Resolved PhotoEmission Spectroscopy）による3次元トポロジカル絶縁体の実証への貢献

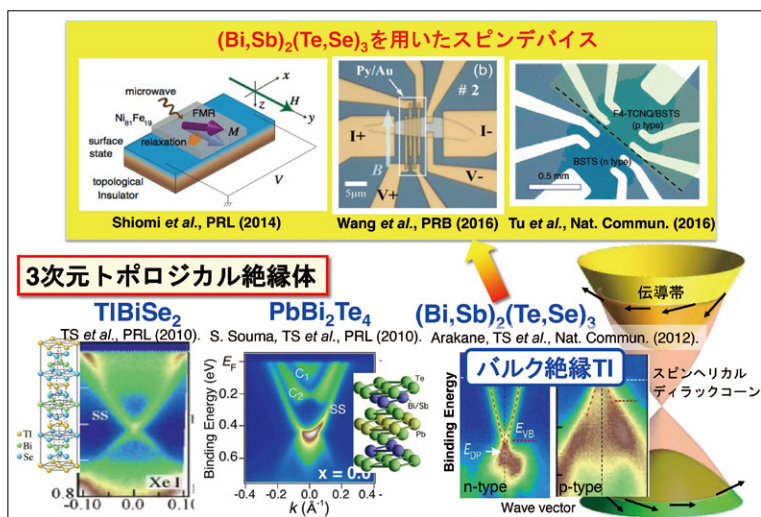


図3-3-3 3次元トポロジカル絶縁体の発見とデバイス研究への進展

私たちは、 $(\text{Bi,Sb})_2(\text{Te,Se})_3$ において、ビスマス、アンチモン、テルル、セレンの4元素を含む複雑な物質の組成を制御することで、この物質ではバルクがしっかりとした絶縁体となり、表面の金属的ディラック電子のp-n性を制御できることを実証した。その後、齋藤英治先生と塩見雄毅先生らが2014年に発表したスピン-電流変換デバイスの開発などにも繋がった。

トポロジカル物質の分野については、光電子分光で電子構造を調べることで物質の発見・確認ができ、物性の解明が進み、さらに、ものによっては新規量子現象が発現したデバイスの研究が進んでいる状況である。

また、異なる分野の研究者間の連携について、図3-3-4に示すように、2015年から川上則雄先生が代表を務める新学術領域『トポロジーが紡ぐ物質科学のフロンティア対称性に基づいた新奇トポロジカル物質の探索』において、私は計画班代表として研究を進めた。

新学術領域研究では、光電子分光はトポロジカル物質の開拓に非常に役に立つという観点のもと、物質の開発、光電子分光による計測、理論、それをデバイス化するチームを構築し、電子状態の可視化とバンド構造の制御を核とした、様々なトポロジカル物質の開拓に関する研究を進めた。結果として、図3-3-5に示すような様々な新しいトポロジカル物質の実証にも繋がった。このような成果は、光電子分光の成果だけではなく、第一原理計算による予測、実際ものを作る開発など、各チームの緊密な連携により実現できたものである。

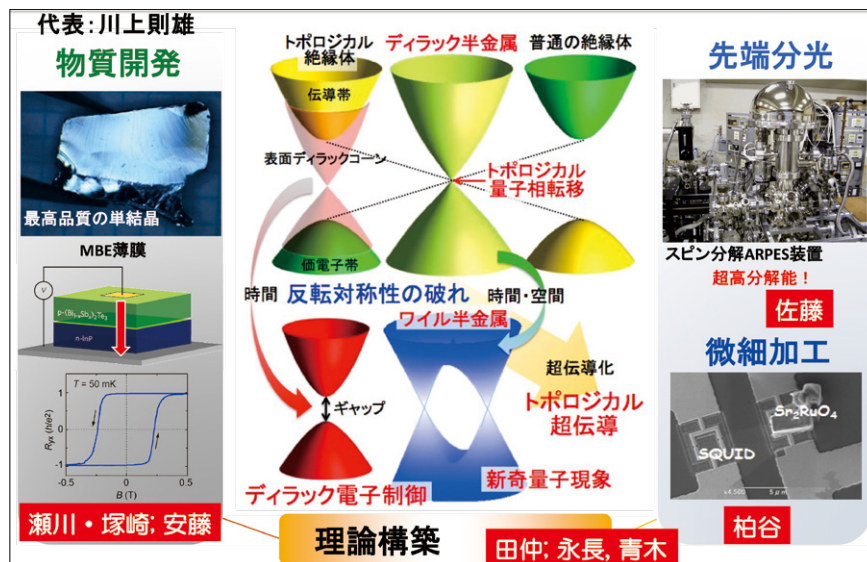


図3-3-4 日本学術振興会 科学研究費助成事業 新学術領域研究
トポロジーが紡ぐ物質科学のフロンティア「対称性に基づいた新奇トポロジカル物質の探索」



図3-3-5 チーム構築（物質開発、計測、理論、デバイス化）によるトポロジカル物質実証の例

トポロジカル物質の探索分野においては、研究の基本的な流れは決まっており、第一原理計算からの物質予測と連携してまず物質開発があり、次に計測があり、たまに計測した結果を物質開発にフィードバックして改善して新しい物質を探索する。しかし私は、計測の位置付けがこれで本当に良いか?ということを常々考えており、できればもっと計測をフルに物質開発に役に立てたいというのが私の夢である。

その様な観点から、色々なところで提案しているのが、図3-3-6右に示すように、もっと計測自体を物質開発に直接組み込んだ物質開発ができないか?ということである。例えば、計測に加えてX線や電子線などにより構造決定を行い、物性（磁場中の輸送特性など）を測定して、計算にフィードバックして物質開発を行う。このフィードバックのループをいかに効率的に行うか?が、量子マテリアル開発に重要であると考えている。デバイス化はさらに先にあるので、色々な要素が上手くかみ合った場合にデバイス化に進むというのが、スペクトロスコピーのセンスで考えていることである。

このフィードバックのループの例として、図3-3-6左に、中国のXueらのグループが異常量子ホール効果を発見した例を示す。彼らは、トポロジカル絶縁体のビスマスアンチモンテルという薄膜の組成を非常に精密に制御するとともに、光電子分光でディラック点がフェルミ準位付近に位置することを確認して、時間反転対称性を破る磁性不純物を入れることでディラックコーンにギャップを開けて、ギャップ内にフェルミ準位を持つてくることにより、初めて異常量子ホール効果を発見した。この発見は、スペクトロスコピーが役に立つことで新しい量子現象が見えてきた一例である。

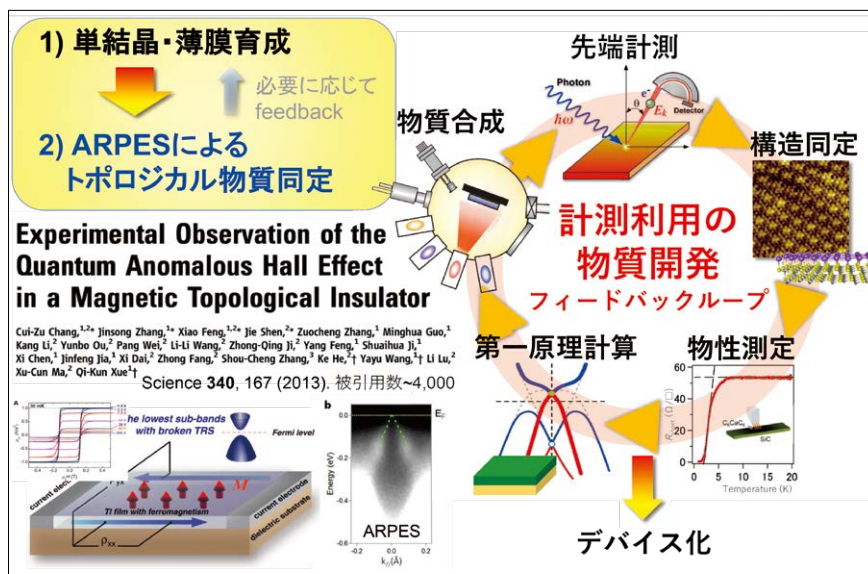


図3-3-6 計測を利用した物質のフィードバックループ

この様に、物質開発と計測の連携は大変大事になってきている。私たちは、この観点から、15年ほど前から継続して、光電子分光による計測の研究だけではなく、計測と薄膜開発を連携した研究に取り組んでいる。

図3-3-7に、東北大学で研究を進めているスピン分解ARPES-分子線エピタキシー（MBE）複合装置の例を示す。光電子分光装置とMBE装置をドッキングしたシステムに加えて、スピン分解測定ができるシステムの開発を、計測主導で進めている。作製した薄膜を真空一貫搬送して電子計測を行い、装置の隣にある大規模なPCにより即座に第一原理計算を行えるようにする事で、シームレスな研究を実現するシステムを開発している。

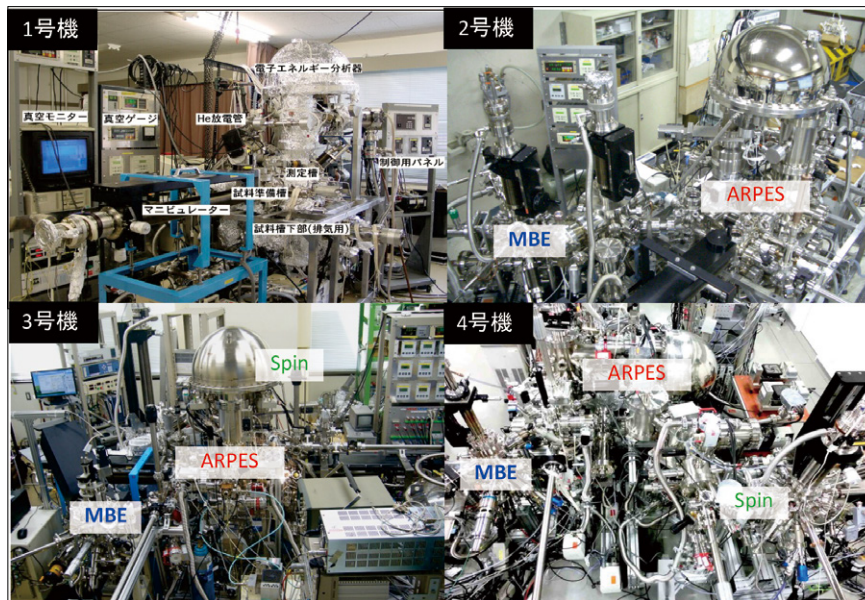


図3-3-7 スピン分解ARPES-MBE複合装置の開発

計測が物質開発に本当に立つのか?という例として、図3-3-8にグラフェンの例を示す。光電子分光により、グラフェンの表面にカリウムを蒸着することで、バンドギャップが制御できることを可視化した、ローレンス・バークレー国立研究所の研究グループの有名な論文である。この論文が発端となり、グラフェンのゲート制御や、バンドギャップ制御、グラフェン以外のTMDの制御などの報告に繋がっている。これらは、スペクトロスコーピーが突破口となることで、様々なデバイス開発に繋がった研究の事例と言える。

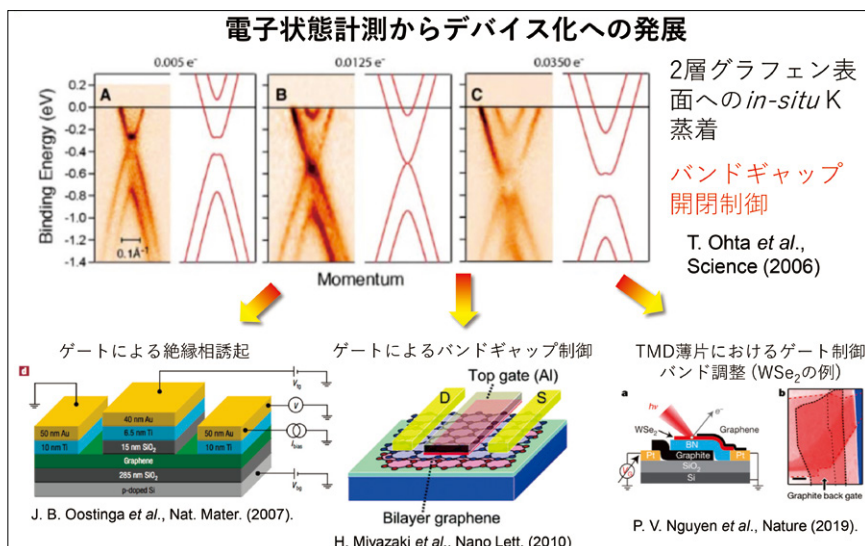


図3-3-8 薄膜作製と先端計測の連携の例：グラフェン

その様な観点から、私たちは、薄膜をつくる研究と、ものを計測する研究を連携して研究を進めている。多くは2次元材料の研究だが、これまでに新しい遷移金属ダイカルコゲナイド (TMD) や、グラフェンの層間に様々なものを挟んだグラフェン超伝導体などの研究を行っている。さらには、マヨラナ粒子を内包するトポロジカル超伝導を実現する狙いでトポロジカル絶縁体と超伝導体のヘテロ接合などの研究を進めている。

具体例を示すと、図3-3-9上に示すように、2層グラフェンをシリコンカーバイドの上にエピタキシャル成長して、層間にリチウムを挿入して、リチウムをトポタクティク反応でカルシウムに置換すると、2層グラフェンのカルシウムインターカレーション版を作ることができる。

このようなものを作ると、光電子分光によるバンドの可視化が重要になってくる。リチウム系は π バンドに電子が入ったような単純なバンド構造をしているが、カルシウム系は電子バンドの他に自由電子的なバンドが観測される。これは、インターレイヤーバンドと呼ばれており、GICの時代から超伝導に効くのではないかと議論になっていたものである。

私たちは、このインターレイヤーバンドに十分電子を占有させることで超伝導にできるのではないかと、光電子分光の観点から考えた。図3-3-9下に示すように、実際に、4探針STMで測定すると超伝導になることが確認できた。この結果は、スペクトロスコピーを契機として新しい物性を開拓できた例になる。

さらに我々は、スペクトロスコピーが2次元物質薄膜の開拓に役に立った例として、光電子分光でバンドを可視化することで、一部の遷移金属ダイカルコゲナイド（TMD）が強固な純粋2次元のモット絶縁体である事も初めて明らかにしている。

これらの成果の大きなポイントは、実空間のSTM、逆格子空間の光電子分光、電気抵抗測定、バンド計算を、全て連携させることにより、初めてこのような発見ができた点にある。スペクトロスコピーだけでは不十分で、様々な測定手法を複合的に利用してマテリアル開発を行うことが重要である。

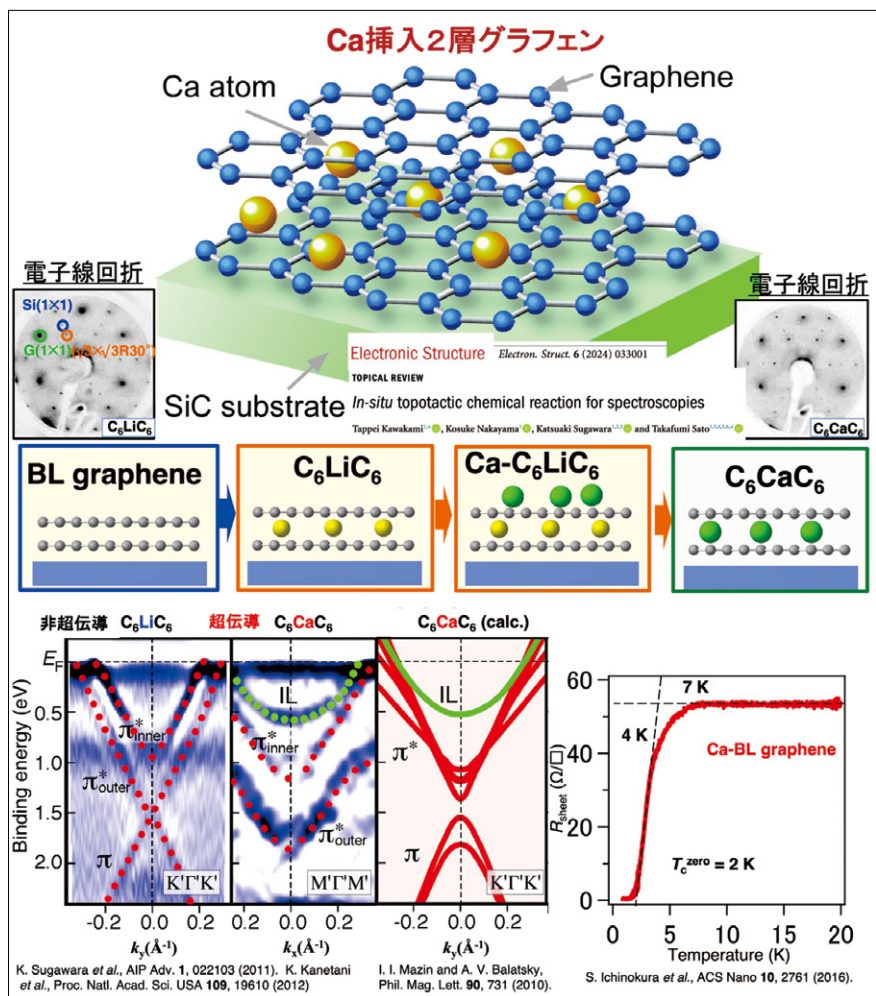


図3-3-9 バンドエンジニアリングによるグラフェンの超伝導化

よって、図3-3-10に示すような、複合的に研究を進めるフィードバックループを、どの様に強固に構築するか?が大事である。このループの中ではとりわけ理論との連携が重要であり、実験家だけで閉じていると、なかなか良い仕事ができない。under one roofで、理論家と常に相談して研究を進めて行くのが良いと思う。

日本は、その様な取り組みは弱いと思っている。10年以上前から、思い付いたら中国や米国などが先に研究を進めている状況を何とかしたいと思っているが、まだ明確な打開策が見出せていない状況である。分野は異なるが、近い研究者で良い研究を行っている人は沢山いるので、研究者間のカップリングを、いかに上手くつなげるか?が大事であり、今後、何らかの方法で強化していきたいと考えている。

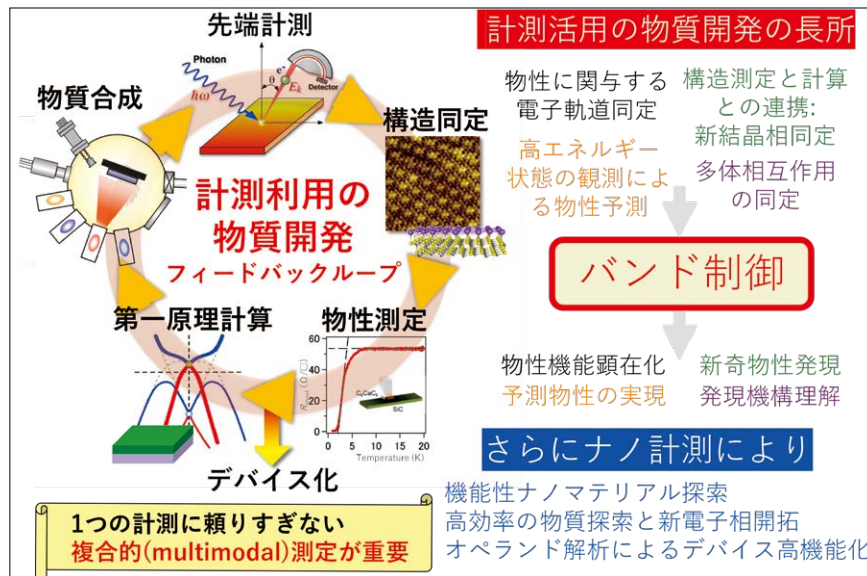


図3-3-10 計測を活用した量子マテリアルの開発

今後は、計測のレベルを向上させることが、新しい物質を発見するのに大事である。量子効果はナノレベルで起こる現象であるため、ナノ空間の現象を可視化することが、量子物質の機能性の解明に直結する。現状では、 $\sim 1\ \mu\text{m}$ より大きいサイズの領域は計測できるが、 $\sim 1\ \mu\text{m}$ 以下のサイズの領域は国内の光電子分光（ARPES）ではまだ太刀打ちできていない。計測手法の先鋭化、特に高空間分解能化など、計測レベルを向上できると、これまで見えていないモノが可視化できて物質開発の役に立つ。

また、私は、上田先生が代表を務めるJST-CRESTのトポロジの研究領域で研究を進めており、現在、数百nmくらいの空間分解能をもつ新しい装置を立ち上げて図3-3-11に示すような極めて小さい粉末試料の実験や、量子マテリアルの実験（キラル結晶Teにおける一次元エッジ状態の観測など）を進めている。

今後、計測を基軸とした量子マテリアル開発をどの様に発展させるか?について、1つのアイデアとして、米国の放射光施設（例えばALS）では量子マテリアルを開発するための大型の専属のビームラインを作っており、ビームライン内で物質開発と計測が完結するような実験を行っている。費用の話は別として、その様なビームラインは、日本でも作れるだろうと考えている。さらに、AIをうまく連携して、ビッグデータを解析することも必要である。単独の実験だけではなく、色々な所をにらみながら、連携して進めていくことが重要である。

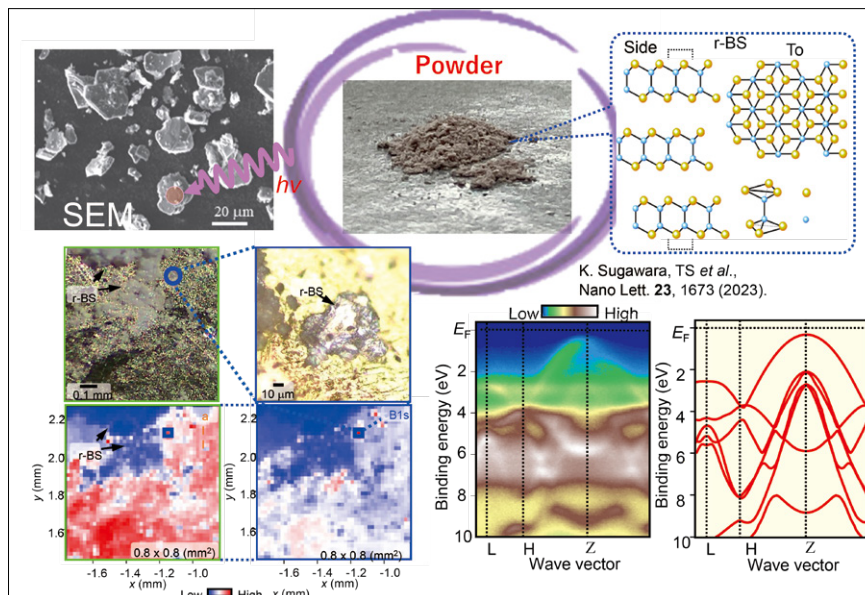


図3-3-11 粉末微小結晶の電子状態可視化

【質疑応答】

- Q：微小領域の計測になると、表面の不均質性や、スペクトロスコピーが入ると、データが爆発的に多くなるが、その辺をどの様に扱うのか？
- A：現在、直面してる現実的な問題として、放射光のデータは、昔のデータ類に比べて3～4桁くらい多い莫大なデータ量、人間の目では追えないビッグデータが取れる。よって、人間の勘を頼りにした経験的なAIを発達させて、その上で良いところを選び抜いた結果を人間が見るくらいのことをやらないと、今後、太刀打ちできない。よって、AIを上手く連携することが必須になる。個人ベースではなく、色々なデータを網羅して、データセンターなどの構築も含めて、施設ベースで研究を進める必要がある。
- Q：過去に、超高圧電子顕微鏡とスーパーコンピューターが、直接つながって、計測と計算を行いながら進める研究や、2009年にNIMSスタートしたGREENでは、under one roofで計算、計測、実験を一体化する取り組みが行われていたが、その様なことになるのか？。
- A：そこは、研究者単位でどうにかなるレベルを超えてるので、組織づくりも含めてやらないといけない。under one roofで、連携して研究を進める意識は当然あって、どこまで行けるかが難しい。
- Q：キュリオシティ・ドリブンが非常に強いと、他の人とのバリアをどうするか？という問題があるので、連携して研究を進める様な場を積極的に作る事が大事であるのか？
- A：多分、キュリオシティ・ドリブンが進めると、自分の好きな方に勝手に行ってしまい、別のキュリオシティの研究者との相互作用はほぼないと思う。放っておくと何も起こらないので、トップダウンで、連携する仕組みを作る必要がある。
- Q：合成と計測のループの中で、持ち寄られた材料の評価に対して、フィードバックがかかって研究が進むが、残留不純物、組成の揺らぎ、ひずみなど、その様な観点は、どこかでループに入っていくのか？
- A：どこまできれいなものができてるかを調べると同時にそれらを同時に評価するのは、物性との相関を知る上でも大事である。今まで、それらが正確に見えなかった所に問題があり、計測が進むと見たくないものまで全部見えてしまう。そこは、見たくないから見ないではなく、データベース的に残留物があるようなところ、例えば、光電子分光の場合では、XPSを測ればどの様な組成か？どの様な結合か？は、構造、不純物などの情報も含めて、情報として全部入ってくる。そこを、どの様にうまく利用するか？が、

重要である。

Q：純度がどのくらいのレベルにあるのか？も分かるのか？

A：純度は、光電子分光では簡単には分からないので、実験手法を選ばないといけない。よって、マルチモーダルな実験が必要になる。物性屋は究極にきれいなものを追い求める傾向にあるので、汚いところは目をつぶってしまう事がある。しかし、実際の物質には不純物や不均一性が不可避に含まれるので、そこに目をつぶらずに、しっかり見ながら研究を進めること課題である。

Q：ナノテラスでは、物質開発から計測など、すごく高度な連携を組んでいるが、他の研究者が装置をシェアして活用するには、どのような使い方を考えたら良いか？

A：ナノテラスは色んなビームラインがあり、ARPESビームラインの近くには、XMCD/XASやRIXSのビームラインなど様々な計測装置がある。お互いのビームラインは独立だが、やってることはかなり近い。例えば、ビームラインを跨いで簡単に計測できるようにしたり、ビームラインも含めて全体を俯瞰的に見れる人材が何人かいたほうが良い。その様な人とすぐに相談できるなど、装置を利用しやすい環境が必要である。

遠方の他大学の人材が、装置を利用する場合は、共用装置があるので、申請すれば利用できる。私たちの装置は、まだ共有ではないが、ビームラインは共有であり誰でも利用できる。また、利用して計測してみたいが、何を計測したいかよく分からない場合もあるので、そのようなことを簡単に相談できる窓口があれば、裾野が広がって、誰でも比較的簡単に実験できるようになると思う。

C：自分の研究を進展させようと思うと装置を占有してしまう。しかし、装置共有の依頼が来る場合もあり配分が難しい。まずは、研究参加者が優先的に使わないといけないので、装置の共用化を進めていく時にどうしていくか？という課題はある。

Q：量子物質がこれからデバイスなどヘナテクノロジーとして使われていく中で、界面の部分の性能が支配的な分野なので、電子構造など計測は重要になってくる。アメリカのオークリッジにあるDOEのSpallation Neutron Sourceでは、10年後にセカンドステーションの構築を進めており、輝度を100倍くらいに向上した20nmのデバイスの構造の計測に加えて、エネルギー分解や時間分解などを計測しようとしていたり、界面も計測できるようにする取り組みを進めている。こちらのナノテラスでも、先ほど界面の話が出ており、空間スケールはだいぶ小さくなって行くようだが、例えば、時間スケール、ダイナミクス、非エルミートのように、エネルギーが流入するところでの計測は、今後、ますます重要になってくると思う。その様なところに対するプローブは、どのような状況か？

A：放射光だと、放射光のビームはバンチごとにパルスとして出てくるので、時間スケールは放射光のバンチで決まる。極めて高い時間分解能の実現は放射光では一般には難しく、むしろレーザーのほうが有利である。レーザーであれば、電子状態を測る手法の場合は数10から100フェムト秒くらいの時間分解能で計測できる。現状は見たい現象に合わせて複数の手法を相補的に使うのが有効である。時間分解能に関しては、放射光だけではおそらく足りず、レーザーに加えてX線自由電子レーザーとか異なるアプローチもあるが、基本はレーザーベースのものを上手く組み合わせる必要があると思う。時間とスピンと空間では、それぞれ得意な計測手法が違うので、併用することが大事である。

C：NIMSの蓄電池基盤プラットフォームは、その研究者が使うのではなく、完全に共用の拠点だった。電子顕微鏡やXPSなどの装置を揃えたとともに、テクニカルスタッフも全部揃えて、メンバーはフリーで使える取り組みを10年間行っていた。最近では、GteXを通じて、さらにアドオンして、全国共用にして、コロナの間も試料を送ったら計測する取り組みを行っていた。それは、理想的ではあるが、国研

だからできたところもあると思う。やはり、研究者が自分のものが欲しいから装置を購入するのは別に、プラットフォーム的な共用設備は、別途、用意する必要がある。

4 | 量子マテリアルの実用化に向けた取り組み

4.1 トポロジカル物質を用いた新しい事業の展開

佐藤 太紀（TopoLogic 株式会社）

TopoLogicは、2021年から東京大学中辻知先生の研究成果をベースに、トポロジカル物質の特性を応用したテクノロジーの開発等を行っているスタートアップ企業である。量子マテリアル分野とそれ以外の分野を組み合わせ、事業という観点からどういった取り組みが必要であるかについて、お話を少しさせていただく。

TopoLogicは、社内で材料や物質の研究をするというより、大学の研究成果をベースに応用の開発を行い、回路設計やICの設計をする、いわば二人三脚の体制を敷いている。異常ネルンスト効果を使ったトポロジカル反強磁性体およびワイル強磁性体のメモリ、異常ネルンスト効果を使った薄膜のセンサおよび熱電変換デバイスの開発といった、比較的近くに事業化できる応用先にフォーカスして取り組んでいる。大学発スタートアップという形でありながらも、産業界で設計・開発経験が長いメンバーを中心に構成している。

中辻先生には、技術指導として助言をいただいている。事業としては、知財やビジネス展開が重要である。私自身、元々経営コンサルティングやスタートアップの経営部で仕事をしてきており、餅は餅屋という体制になっている。

我々は、従来のMRAMと比べて、耐久度と消費電力を大幅に下げていくことを目標に、反強磁性体を応用したメモリ開発に取り組んでいる（図4-1-1）。単純に1つの物質が良ければいいという話ではなく、それをいかにしてプロセスの中に組み込むか、今の材料の中でも、技術面で活かしていきたい性質とどのようにして組み合わせていくかが肝になる。そのため、純粋な物質の研究ではなくて組み合わせの開発という泥臭いことに会社として取り組んでいるとご理解いただきたい。そうしたテクノロジーの開発に取り組む中で、量子マテリアルの研究成果が、具体的にどういった事業に落とし込まれ、どのように展開していくのかを描くことは非常に重要な仕事である。特に、メモリがどのような分野で活用できるのか。従来のMRAMと違う分野なのか、あるいは同じ分野でも役割分担していくのかなど、我々の将来的なパートナーや客先となり得る企業とも連携しながら進めている。

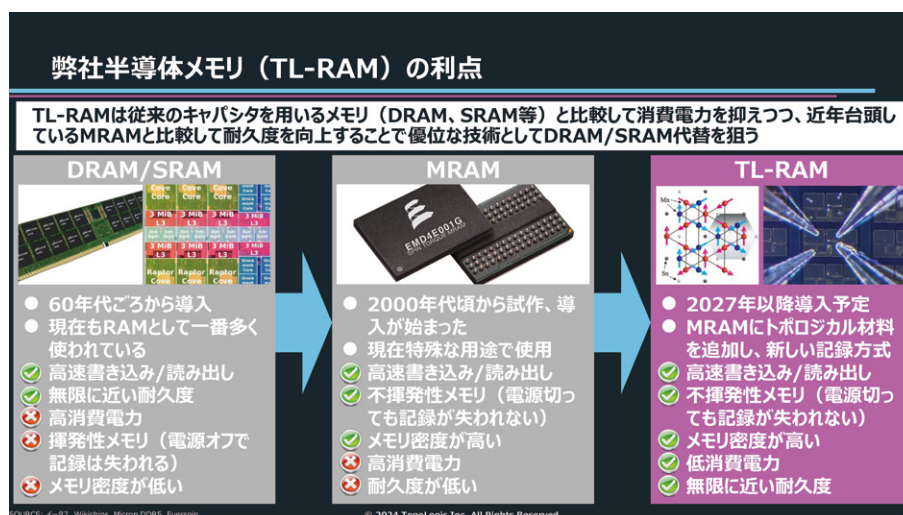


図4-1-1 反強磁性体を応用したメモリ（TL-RAM）の開発

もう一つ、我々が取り組んでいる熱電変換デバイスについても、自動車関連や製造設備関連といった応用先の多数の企業と連携することによって、社会実装に取り組んでいる（図4-1-2）。応用先の企業からすると、量子マテリアルであろうと非量子マテリアルであろうと関係無く、使い勝手の良さや機能性の高さが大事である。

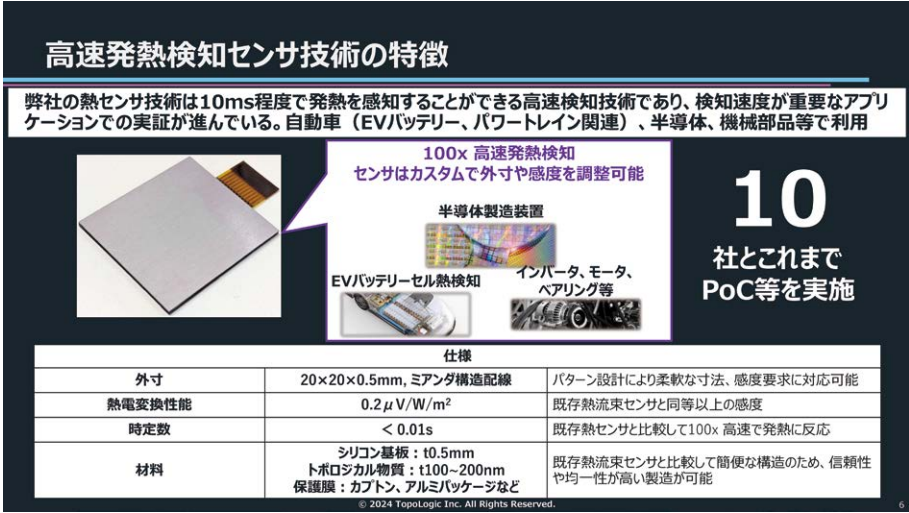


図 4-1-2 熱電変換デバイス（熱センサ）の開発

このように事業展開していく上で、応用を見据えた学術分野の横断的な連携が非常に重要なポイントと考えている。餅は餅屋という言葉は意外と重要である。得意とする技術をきちんと組み合わせて社会実装を行っていかないと、足りないピースがあるために実装が進まない状況に陥ってしまう。

例えば、TopoLogicでは、材料開発の部分を大学との共同研究等で補完しながら、大学の研究では不足している半導体設計、半導体製造プロセス、センサ、IC、回路技術といった部分をエンジニアが中心となって補強している。それにより、必要な技術要素をトータルで揃えることに注力しているが、それでも、事業化に足りない部分はたくさんある。例えば、試作工程やプロセスの検証に必要な設備については、東京大学以外に海外も含めた機関との連携に取り組むことで足りない部分を補完している。さらに、応用先として、材料開発関連以外の企業との連携を重要視している。

事業を展開していく際に、事務的な仕事を研究者がするのは極めてもったいないので、それぞれが得意な分野で力を発揮できる組織づくりや連携づくりが必要である。事業に関係することは、商社出身、あるいは私のようにコンサルタント出身のメンバーで構築するとよい。特許の出願に関しても、TopoLogicでは弁理士を設けている。技術者や研究者が、1分1秒でも長く研究に従事できる体制をつくるために、それ以外の事務的な作業はできるだけなくても良い環境にすることが極めて重要である。これは、企業だけではなく大学でも、重要な点である。昨今、研究者が研究に従事している時間がどんどん短くなっているという報告がある中で、それをどう是正していくかが、競争力を高めていくために重要なポイントである。

最後に、実際にビジネスを展開していくにあたって、社会課題といかにしてひも付けるかという点も、見落とされがちなポイントである。最初に社会課題があるのが理想だが、材料や技術のシーズは往々にしてそうではないところから出てくるので、社会課題とシーズの間をいかに早い段階でひも付けて補完していくかが重要である。結局、研究開発のストーリーをどうつくっていくかになる。量子マテリアルの研究開発でどのような社会課題を解決していくのか。量子マテリアルと非量子マテリアルをどう定義し、どのように組み合わせて、今までにない価値を生み出し新しいものをつくっていくかという観点が、極めて重要と考える。

ただ、これは結構大変な作業である。実現するためには、量子マテリアルという分野と外部とのコミュニ

ケーションがこれからの課題と思われる。例えば、量子マテリアル以外の分野での、限界や課題をしっかりと把握する必要がある。さらにどのような学術領域とつなげていけばいいのか。出口を意識してどういうチームを編成していくのか。こういった観点について、日本は不得意と長年言われ続けている。完全に別の組織が必要なのかもしれないが、いろいろなシーズを俯瞰的に見ている人たちが横連携のチームを提案するなど、抜本的な推進をどこかが担っていかなければならない。それは、おそらく大学という単位でもなければ、企業という単位でもない。JSTか文科省か、または経産省と文科省の間で連携する新しい組織かもしれない。

【質疑応答】

- Q：メモリのような市場競争相手がいてベンチマークもしっかりしているビッグビジネスと、センサのような新しいマーケットでは、やり方が違うと思うがどういう思想でやっているのか。
- A：メモリのマーケットは3社で98%から99%ぐらいに極めて寡占が進んでいるので、シェアを奪うというより、そうした企業に向けて我々の技術を一部採用してもらうというアプローチを取っている。センサの方は、車載と家電でラインナップが異なるなど非常に分散したマーケットなので、独自ブランドを展開するか、用途ごとにライセンスングしていくといった形になる。このように、ビジネスで目指す先が異なってくるので、開発は一部共通化しているが、事業展開としては相応に独立している。
- Q：特許を取るのは、自分のビジネスを守るためか。それとも、特許を外販するためか。
- A：回避するにはコストがかかってしまうと思われる程度のポートフォリオを、早期に構築しなければならない。特許数は一つの指標に過ぎないが、面で特許を取っていくことは重要と考えて投資している。
- Q：特許はどこで取っているのか。20～30件が毎年国際特許になるとすると、スタートアップ企業でその費用を賄えるのか。
- A：国際出願を基軸で展開している。基本的には、日、中、台湾、米国、欧州ぐらいをカバーすれば、大体7、8割のマーケットは取れる。調達した資金のおよそ10%弱を特許出願と維持に使っている。研究者個人や大学の学部、部局単位ではおそらく判断できないので、大局を見ている機関が社会的ポテンシャルを見抜いて積極的に投資してほしい。
- C：特許の維持費も、大きな問題である。

4.2 固体量子センサ材料としての単結晶ダイヤモンド

辰巳 夏生（住友電気工業）

本日は、住友電気工業（以下、住友電工）という会社の環境と、どのようにダイヤモンドを合成してきたかということに関する話題提供をして、皆さんにご意見を頂ければと思っている。

住友電工は1897年創業以来、「銅事業、電線製造で培った技術」をベースに5つの分野（自動車、情報通信、エレクトロニクス、環境エネルギー、産業素材）で事業をグローバル展開している。住友電工の根幹は、電線ケーブルである。それらの電線を作る目的で作られたのが工具部門であり、工具のための硬質材料の一つとしてダイヤモンドも含まれる形で開発が進んできた経緯がある。当社は主に、大阪・伊丹・横浜の3ヶ所に研究活動拠点を置き、多様な製品に応じた研究をしているが、この中でダイヤモンドを合成しているのは、伊丹のアドバンスマテリアル研究所である。1923年にシュレーターが超硬質合金（硬質の金属炭化物の粉末を焼結して作られる合金）を開発したのに続き、1931年に当社も超硬質合金を使った超硬工具イゲタロイを開発する。そして、1954年にGEがダイヤモンドの合成に成功したことを契機に、当社も、そのダイヤモンドを線引きやダイスなどに使う目的で、1977年からダイヤモンドの合成に取り組んでいる。以上要するに、当社には銅の高純度化の技術があり、それを電線の製造に使うというニーズがあったのである。その電線を作るためには工具が必要であり、最初は超硬合金を使っていたが、最終的には、やはりダイヤモンドが必要ということで、ダイヤモンドの開発をしてきたのだ。当社が最初に開発した独自技術だけではなくて、ダイヤモンドのニーズが先にあったのではないかと思う。

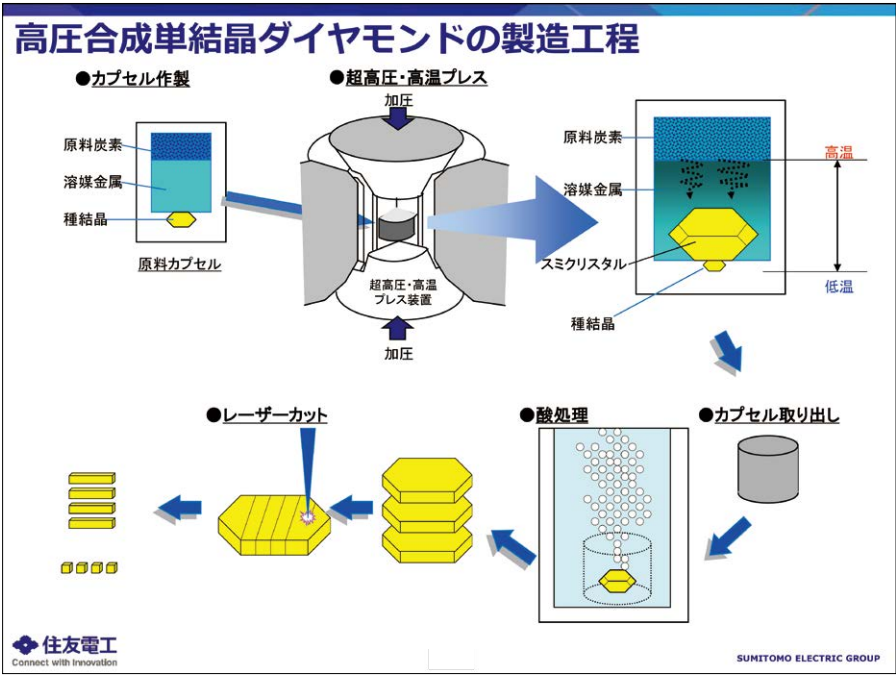


図4-2-1 高圧合成単結晶ダイヤモンドの製造工程

ダイヤモンドの合成法には、主にCVD（Chemical Vapor Deposition：化学気相成長）法と超高压合成であるHPHT（High Pressure and High Temperature）法があり、当社は両方の合成方法を採用しているが、超高压合成が当社の最も特徴的な技術になっている。図4-2-1に示すように、超高压合成の仕方としては、原料をカプセルに入れて、超高压でプレスした後、そのカプセルを酸処理で溶かし出し、ダイヤモンド

を取り出してレーザーカットして工具にするという流れである。HPHT法とは、要は、地面の下で起きていることを再現して（つまり、天然ダイヤモンドが地中で生成される環境を模倣して）合成ダイヤモンドを製造する手法である。天然ダイヤモンドは、約5万気圧、1350℃の（地中の）環境で成長するが、そのような地中環境を模倣して、Fe、Ni、Co等で構成される金属溶媒の片側に炭素原料、反対側に種基板のダイヤモンドを設置して（図4-2-1および図4-2-2）、温度差を付けると単結晶ダイヤモンドが成長する。今では、CVDやPVD（Physical Vapor Deposition：物理気相成長）等の技術のみを用いて量子マテリアルを作っているところがあるが、当社は、技術を使いながらも、自然界の力を利用した成長という形をとっている。

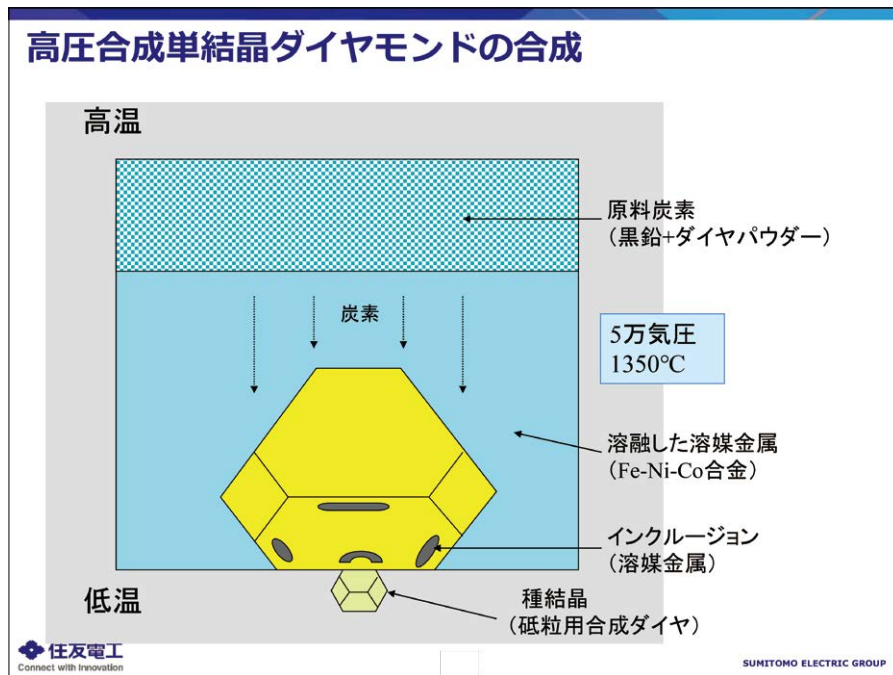


図4-2-2 高圧合成単結晶ダイヤモンドの合成



図4-2-3 高圧合成単結晶ダイヤの結晶形

高圧合成ダイヤモンドの形状は宝石に似ているが、得られる結晶系を合成温度でコントロールしている。低温の状態で合成すれば六面体のサイコロ状のものが得られ、高温の状態で合成すれば正八面体に近いものが得られる（図4-2-3）。図4-2-4に示すように、ダイヤモンドの面方位は、100と111面の低指数面だけで囲まれるように、自然界によって決められていると言える。

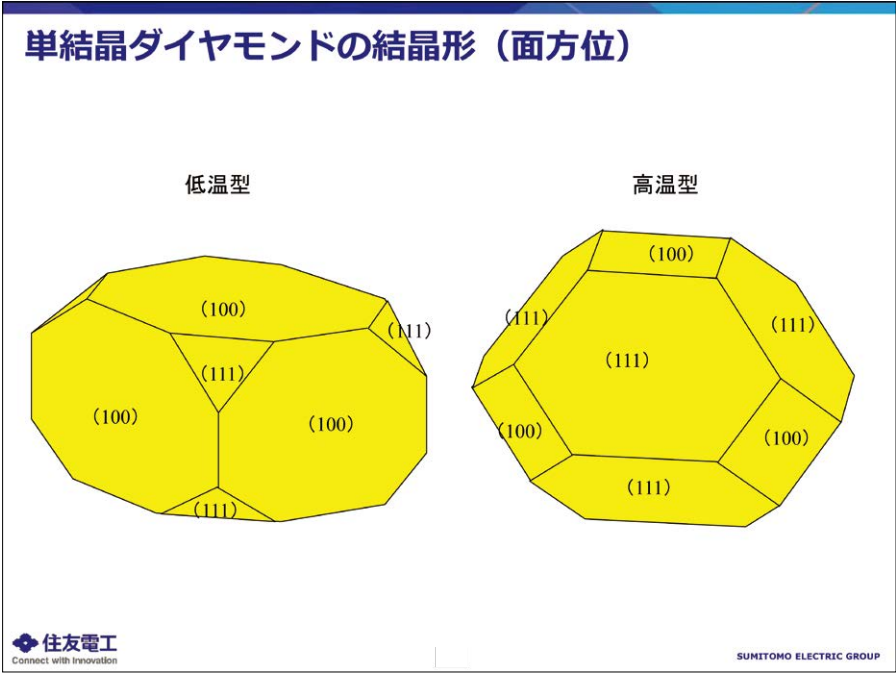


図4-2-4 単結晶ダイヤモンドの結晶形（面方位）

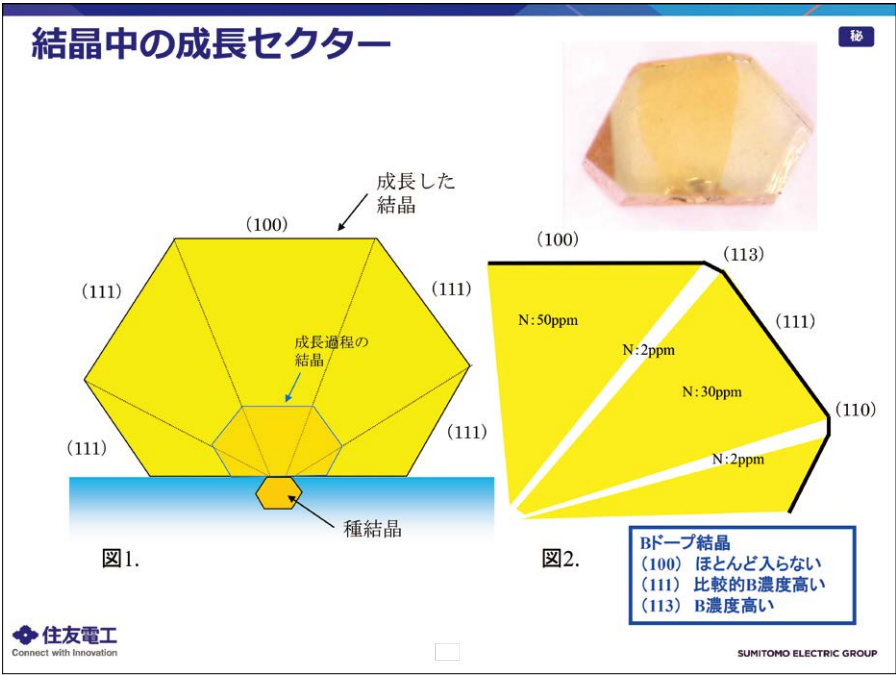


図4-2-5 結晶中の成長セクター

次に、ダイヤモンド窒素・空孔（Nitrogen Vacancy: NV）センターの話題に移る。結晶中の成長セクターの違いによって不純物量（窒素濃度）が変わってくるという特徴が超高压合成単結晶ダイヤモンドにある。図4-2-5（右上）の写真に示すように、真ん中のところだけ黄色い部分があるが、これが（100）面に向かった成長であり、窒素濃度が50ppmと非常に窒素が多いところである。これを（001）成長セクターと呼ぶ。また、（111）面方向の成長によって形成された（111）成長セクターの窒素濃度は30ppmであり、少し窒素が入りにくくなっていく。さらに、（110）成長セクターや（113）成長セクターといった狭間のところは、自然現象としてもっと窒素が入りにくいので、当社は、これらをコントロールすることで量子マテリアルを作っている。このようなところのコントロールは、他社には難しい技術である。成長セクターの不純物量（窒素濃度）は、個々にSIMS（Secondary Ion Mass Spectrometry：二次イオン質量分析法）で測定することはなかなか難しいので、当社はフォトルミネッセンスやカソードルミネッセンスなどのマッピングによって発光色の違い（窒素濃度の違い）を観察している。

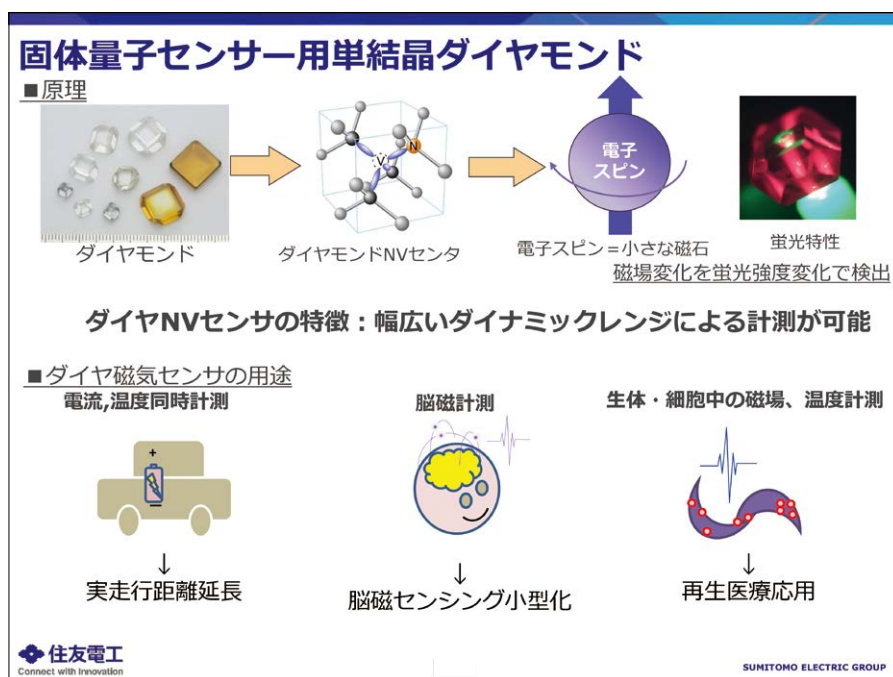


図4-2-6 固体量子センサー用単結晶ダイヤモンド

以上要するに、超高压合成単結晶ダイヤモンドには、結晶中の成長セクターの違いによって不純物量（窒素濃度）が変わってくるという特徴があるので、このような濃度分布を有するダイヤモンドNVセンターを作っている。そして、ダイヤNVセンサの特徴は幅広いダイナミックレンジによる計測が可能であるので、NVセンターの電子スピンを維持するものを使って（磁場変化を蛍光強度変化で検出できるような）脳磁センサ、心磁センサやEVバッテリーモニター等の様々なマーケットに向かっているところである（図4-2-6）。

NVセンターの性能を良くするためには、スピン緩和時間を延ばしてやる必要がある。特に、 T_2^* と呼ばれるコヒーレンス時間については、 ^{13}C 同位体の不純物、結晶歪や欠陥などにより制限されるので、このようなコントロールが必要となってくる。特に、図4-2-7（左下）に示すように、 ^{13}C の磁気ノイズの他に、窒素同士の干渉や、結晶歪などの干渉が起きてしまう。理想的なダイヤモンド構造にNVセンターだけを導入するには、このようなコントロールが必要であり、図4-2-7（右）に示すような原料合成→超高压原石合成→加工（研磨・切断）→電子線照射→アニール処理を経てNVセンターを作る工程で、我々はコントロールを行っている。

普通に合成すると大気中の窒素が取り込まれた黄色いダイヤモンドが得られるが、窒素ゲッターといわれる

チタンやアルミで窒素を抜くと、真っ白な透明ダイヤモンドになる。今日、1ppm～10ppm程度に窒素濃度をコントロールしたものが要求されており、まだまだ難しい技術なので、現在、光・量子飛躍フラッグシッププログラム（Q-LEAP）などに支援を頂いて合成をしているところである。また、結晶欠陥も種基板から広がってくるものであるが、それにより大きくコヒーレンス時間が制限されてしまう。天然ダイヤモンドには、そのような結晶欠陥が非常に多く含まれ、複屈折像でマッピングを取ると真っ赤に見える。また、天然ダイヤモンドには、結晶成長の履歴が刻まれた（木の）年輪のような模様があり、中心から外側に広がっている。何万年、何百万年とかけて天然合成されているものには、環境の変化による年輪状のひずみが出たりする。それに対して、当社の工具用合成ダイヤモンドは、結晶欠陥が少なく、ほとんど複屈折を示さない。また、CVDダイヤモンド等も他社から市販されているが、CVDでは種基板からの欠陥を引き継ぐこともあり、また界面からの欠陥の発生も多くなっているのに対して、当社の超高压合成ダイヤモンドは、それよりも欠陥が少ないのが特徴である。



図4-2-7 固体量子センシング用ダイヤモンド素子の開発

最後に、ダイヤモンドNVセンサの開発成立要素（不可欠の3要素）に関して述べたい。ダイヤモンドNVセンサを当社は開発しているが、固体量子センシング用ダイヤモンド素材だけではダイヤモンドNVセンサの開発は難しいので、当社グループ会社の電機メーカー・日新電機が（ダイヤモンドNVセンサを用いたアプリケーションとしての）量子センサモジュールを作っている。このような形で、素材（量子マテリアル）と量子センサを分離した形でグループ内において独立に、それぞれが違う時間軸で開発してきたというところもあって、比較的、開発が上手く進んできたのではないかなと思う。そして、やはり企業だけでは非常に開発が難しいので、この量子センサをどう扱うかについて、専門的な計測技術（量子操作技術）を要する大学（東京科学大学や京都大学など）にアドバイスを頂きながら開発しているのが当社の現状である。

【質疑応答】

Q：同位体制御に関してお聞きしたい。13Cを完全に取り除くことはできないと思うが、今日入手できるので、どのくらい位相が長く保持されるようにコヒーレンス時間が長く（良く）なっているのか？また、

同位体制御は絶対必要なのか？それらの点に関して、どのような状況にあるのか？

A：実際のコヒーレンス時間については、論文等を準備しているところである。やはり、 T_2^* （Rabi振動の減衰を解析することで得られる位相緩和時間）を求める際に一般的に使われるCW（continuous wave）測定モードでは、均一磁気共鳴線の半値幅が小さいシャープなものが欲しいということで、 ^{13}C を取り除いたものが好まれる。また、パルス計測を行ってHahnエコー法により T_2 （Hahnエコー法により得られる位相緩和時間）を求める際には、周期的に振動して減衰していくスピンエコー信号に ^{13}C に起因する結構厄介なうなりが含まれ、そのうなりを考慮した計算をしないといけませんが、 ^{12}C 濃縮によりうなりがなくなって（スピンエコー信号が）綺麗な減衰の形状をするので、やはり量子センサとして使うには、 ^{13}C を取り除いたほうが良いというのが今の見解である。

Q：今日は、量子センサとしてのダイヤモンド応用というお話だったが、各国で取り組みが見られる量子メモリ等へのダイヤモンド応用に関して、住友電工がアプローチできる可能性はあるか？

A：アプローチできる可能性はあるが、企業として、それだけ長い時間やれるかというと、非常に難しいところがある。今のところは、まずは、当社の中では量子センサまでにしておいて、量子メモリなどは、大学や他社にまずは見てもらうという風に考えている。

Q：単結晶ダイヤモンドは、どれぐらいの大きさまで作られているか？

A：普通に工具に使うものでは、大体3ミリ角ぐらいであるが、技術的には1センチ角以上の大きさも可能。

Q：1センチまで育つには、大体どれぐらいの時間がかかるか？

A：不純物にもよるが、窒素入りなら、数日くらいで成長できる。

Q：熱伝導率は、CVDで作るよりも、凄く良いか？

A：やはり単結晶のほうが、界面のフォノン散乱がないので、ほぼ理想的な熱伝導率の値を示す。

Q：熱伝導率は2000 W/mKぐらいの数値か？

A：そうである。

Q：ダイヤモンドNVの場合は、日新電機の方で実際にデバイスを出されていると伺ったが、どのようなところをマーケットとして狙っているのか？そのマーケットとしては、やはりバイオ系なのか？将来の部分も含めて、国内・海外展開等、どのように考えているのか？

A：具体的な用途を示すことは、はっきり言って難しい。まずは、社内向けのセンシング用途を考えている。その他、バイオ・医療系に関連するものも、非常に盛んにやっているけれども、当社だけでは、なかなかできないと思うので、パートナーを見つけながら、そのようなところまでアクセスできたらいいと考えている。他にもいろいろな用途に展開しようと考えているが、他社同様、社内用途以外はキラーコンテンツと言えるような（大きな市場を持った）ものを明確に示すことが難しいのが正直なところである。

Q：社内用途としては、想像するに電流センサに関するものか？

A：電流も含めて社内でいろいろな分野があるので、そのようなところに向けた利用を考えている。

Q：住友電工のライバルに関してお聞きしたい。例えば、量子センサあるいは量子マテリアルとしては、分野によっては海外製品しかないようなところがあると思うが、ダイヤモンドに関して、国内・海外のライバルはどのぐらいいるか？

A：今のところ、ダイヤモンドに関しては工具用も含めて住友電工と（欧米のサプライヤーである）Element Sixが代表的な会社である。ただし、国内のOrbray（旧社名：アダマンド並木精密宝石）あるいは産総研ベンチャー・EDPのように、CVDによる大口径単結晶人工ダイヤモンド基板を供給する企業なども多数ある。

5 | 総合討論

ファシリテーター 佐藤 隆博（JST-CRDS）

総合討論では、①量子マテリアルの新規機能の発揮に必要な材料物性を理解するために必要な目的基礎研究、②量子マテリアルの材料物性を新規機能の発揮に繋ぐために必要な活用基盤技術、③産業界を含む量子マテリアルR&Dを構築するために必要な推進方策について議論した。以下、3つの論点における招聘者（話題提供者、コメンテーター）への事前アンケートの回答のまとめと総合討論での主要なコメントを示し、最後に総合討論のまとめを示す。

論点① 量子マテリアルの新規機能の発揮に必要な材料物性を理解するために必要な目的基礎研究

【設問①】

現在の量子マテリアル研究において、物性の理解が不十分のため、新規機能の発揮にまで至っていないと考えています。目的基礎研究として、量子マテリアルの新たな機能の発見やその可能性を明確にするために、重要と考えられる研究開発項目をご記入下さい。

【回答①のまとめ】

1. 基礎研究と応用研究のバランス

- ・ 基礎研究と応用研究の連携が必要
 - ➡「目的」に引きずられすぎない地道な基礎研究の継続的支援も大切。
 - ➡「目的型」研究とそれ以外の基礎研究のバランスを取るべき。
 - ➡社会や産業界のニーズを的確に把握することが重要。

2. 量子マテリアルの定義と研究方向

- ・ 応用には遠い印象、基礎研究のフェーズとしての認識。
- ・ 極低温でしか発現しない機能の産業的魅力が乏しいため、計算科学でそのような系を発見することが望ましい。
- ・ 量子マテリアルの必要性やエレクトロニクス、エネルギー分野への貢献、タイムラインの明確化が望ましい。

3. 連携と研究体制の強化

- ・ 企業が目的基礎研究に着手するためには、シーズの応用先の明示と知財化が必要。各段階で技術を販売できる環境も必要。
- ・ アプリケーションへの優位性の検証が重要、他業種との連携や一貫通貫の研究体制が必要。
- ・ 目的の明示は重要だが、新規性や独自性が必須、基礎研究が量子物質の未知の物性や機能の可能性を探ることも重要。

【論点①での主要なコメント】

（基礎研究と応用研究のバランス）

- ・ 応用を目指した将来展開を意識することは非常に重要であるが、目的から少し外れる可能性がある研究にも寛容であるべきである。
- ・ 量子マテリアルを社会実装に近づけるためには、社会や産業のニーズを把握して目的を設定すべきである。

（量子マテリアルの定義と研究方向）

- ・あえて量子マテリアルと名付けて限定せずに、目的に合った材料を使用すれば良いのではないか。
- ・量子マテリアルは量子現象に基づく材料として強調されている。20年前にナノテクノロジーが注目を浴びたように、JSTとしては、量子マテリアルに光を当て国際的な競争力を強化すべきであると考える。
- ・量子マテリアルが新たな物理現象を生むことは理解しているが、JSTの事業としては、単に驚きや面白さだけでなく、有用性を重視すべきである。
- ・海外での量子マテリアル研究は低次元物質やトポロジカル物質が多く、非量子マテリアルとみなされる領域も含まれているが、それも興味深い成果が期待できる
- ・定義付けは目的に応じて決まるものである。日本が量子マテリアル分野の幅広い材料シーズに強みを持ち、それを基盤に競争力の高い産業を育成することが目的であれば、定義を広く取り多様なシーズを育成すべきである。
- ・量子物質の定義は物質を量子か否かで分けるのではなく、物性や機能における量子性に着目するものである。
- ・社会実装に向けてバックキャストするだけでなく、シーズ・ドリブンやキュリオシティ・ドリブンのアプローチで新しい機能を探索し、集合体として切磋琢磨することが重要である。
- ・JSTでは純粋なキュリオシティ・ドリブンではなく、応用に繋がる機能の探索が求められる。この視点から量子マテリアル研究を展開することは、日本の材料産業の競争基盤を強化するメッセージといえる。

論点② 量子マテリアルの材料物性を新規機能の発揮に繋ぐために必要な活用基盤技術

【設問②】

現在の量子マテリアル研究において、量子状態を計測・制御する技術の開発が不十分であると考えています。活用基盤技術として、新たな機能を安定的に計測したり、目的に合うように特性を制御させるために、重要と考えられる研究開発項目をご記入下さい。

【回答②のまとめ】

1. 量子状態の計測・制御技術の重要性

- ・量子マテリアルの実装技術や周辺技術の進化も必要。
- ・まだ発展途上であり、ナノ計測技術や計算科学（AIなど）の発展が重要。
- ・一般的な技術や高スループット技術の必要性にも言及。
- ・基礎研究と実用化の両方において重要であり、国際共同研究や競争が必要。

2. 実用化に向けた基盤技術と評価

- ・実用環境での評価を迅速に行い、応用先との連携が重要。
- ・量子マテリアルのタイムラインや課題解決の明確化が、作製技術の重要性を高める。
- ・大面積高品質成膜技術や多角的な性能評価が必要。
- ・再現性の高い均一な品質での大面積試料が実用化に必要。
- ・量子状態計測・制御技術の企業への継承と、大面積高品質成膜技術の継続的研究が必要。

3. 技術の発展と連携の必要性

- ・高い空間分解能や時間分解能を持ち、構造・欠陥を簡便に解析する手法が望ましい。
- ・合成技術とのタイトなフィードバックが必要。
- ・2次元原子層の研究が量子マテリアル開発として位置づけるには時間がかかるが、ブレイクスルーの可能性もある。

4. 研究体制と基盤技術の支援

- ・基礎研究チームと量子状態計測・制御チームの連携が重要。

【論点②での主要なコメント】

(量子状態の計測・制御技術の重要性)

- ・物質合成や材料理論との連携が重要であり、計測に関わる者も広い視野を持つ必要がある。さらに、計測技術は急速に進展し、5年後には現在の技術が陳腐化する可能性が高い。そのため、技術の進化を見据えた情報発信や他分野との連携が重要であり、トップダウンでの強化策も必要と考える。
- ・計測分野の人材や組織のコミュニティ形成が課題である。量子マテリアルの進展には、専用の機能や組織を持つことが重要である。

(実用化に向けた基盤技術と評価)

- ・SIPにおいて、NVダイヤモンドナノ粒子を用いた医療応用研究が進行中であるが、医療承認には大量生産が不可欠である。しかし、均一品質の大量生産を担う企業やスタートアップが不足しているため、量子マテリアルのセンサー応用における課題となっており、生産体制の構築が必要である。
- ・ロボティクスやインフォマティクスの活用は重要だが、実際に大面積化の必要性については疑問がある。小規模でコストが抑えられれば十分ではないかとも考えている。
- ・新しい機能を生み出す研究と、それを量産に結びつけるためのスケールアップには、大きなイノベーションが不可欠である。物理主導で始まった量子ドット研究も、化学によるコロイダル微粒子製法の革新により量産が可能となり、ディスプレイや医療分野に実用化された。新機能の創出と量産化の両輪で、マーケット投入に向けた製造面での大規模なイノベーションが求められていると考える。

論点③ 産業界を含む量子マテリアルR&Dを構築するために必要な推進方策

【設問③】

現在の量子マテリアル研究において、産業界が注目するような魅力的な機能の提示が不十分であると考えています。アカデミアと産業界が一体となって、新規機能を有する評価デバイスを実証していくために、重要と考えられる研究支援の枠組み、研究拠点の整備と連携、産学の連携を強化する方法などを記入下さい。

【回答③のまとめ】

1. 一貫通貫の研究体制の重要性とその構築
 - ・産学連携のコーディネータの役割も重要。
2. 基礎研究と応用研究のギャップを埋める必要性
 - ・基礎研究側が応用ニーズを把握し、応用側が基礎研究の成果を知ることが重要。
 - ・量子マテリアルと非量子マテリアルの応用研究の並行が最終的には量子マテリアルの可能性を明らかにする。
 - ・一貫通貫or役割分担が良いかは対象に依存。応用研究の評価基準についても再考が必要。
3. 産学連携と異分野融合の推進
 - ・大学や国立研究所と企業の組織的な連携が必要で、個別の共同研究を超えた取り組みや支援が望ましい。
 - ・異分野の融合が必要で、量子物理と材料科学の両方に深い理解を持つリーダーシップが重要。
4. 研究支援と制度の充実
 - ・アカデミアと企業との共同研究支援の充実、研究リスクの許容、クローズドな研究の選択など、柔軟な研究体制が必要。
 - ・国内限定のR&Dに優位性があるとは限らず、海外との連携が重要。若手研究者や学生の育成も含めた研究プロジェクトが必要。

5. 具体的な社会実装に向けたビジョンの明確化

- ・量子マテリアルが社会課題を解決するストーリーを明確にし、産業界に具体的な効果と実装時期を提供することが重要。

【論点③での主要なコメント】

(産学連携のコーディネーター)

- ・産学連携のためには、基礎研究と社会ニーズをつなぐコーディネーターが必要である。特に、量子マテリアル分野では、社会実装に精通した人材が重要で、彼らの貢献が評価される仕組みも必要と考える。
- ・コーディネーターを通じて研究者同士が有益なマッチングを行い、理論・実験・計測・計算などの分野間の媒介役を強化することで、日本全体として研究交流の促進が期待される。

(異分野融合の推進)

- ・理論的な面白さは重要な価値であるが、実用性への可能性にも注目すべきである。理論家が気づかない新たな価値を発見することもあるので、好奇心や実用性など多様な価値を引き出し、教えてくれる人や場が必要であると考え。
- ・異分野が集う広い場が新たな価値を生む要因となる。キュリオシティ・ドリブンの研究は重要だが、視野が狭いと発展性を欠くため、理論・実験・計測・計算の専門家が集まった多様な視点の場が求められる。

(研究支援と制度の充実)

- ・産学連携において、基礎研究から社会実装に至るプロセスが課題となっている。かつては、企業が研究所でプロトタイプを作り、大学と基礎研究段階から連携することで実用化が進んでいたが、現在の日本企業にはその体制が不足している。
- ・スタートアップ企業は常に応用先を見据え、試作品作成や評価を進めるため、大学や企業の設備を利用しつつ、必要な部品を自由にピックアップしている。一方、大学や研究機関には同様の自由度がなく、それが研究の進展や応用を妨げている可能性がある。日本の産業基盤強化を目指すなら、研究の公平性を意識しつつも、研究機関の自由度を高め、産業成長に寄与するシーズ育成を促進すべきである。
- ・企業との連携が技術の社会実装を促進すると考えられるが、マテリアルの成長にはさらに先のユーザー層への探索が不可欠であり、各段階に異なる国の支援が求められる。
- ・JSTとNEDOの連携により、基礎研究から応用展開へのスムーズな移行が期待される。特に量子マテリアルは産業と距離が近くも遠くもある難しい分野であり、JSTとNEDOが共に連携会議を通じて進行を図ることが重要である。
- ・基礎研究から実用化へのギャップには、適材適所の役割分担が重要である。大学や国研の評価が論文に重きを置くため、実用化を目指す開発には報酬や評価制度の工夫が必要で、社会実装に成果が出た際に適切な評価が与えられる仕組みが求められる。
- ・企業が国プロに参画するには、トップの指示がある場合は容易だが、研究内容がトップダウンではない場合には時間や束縛が増え、企業にとって負担が大きくなる。特に量子マテリアルのようなリスクが高い分野では、失敗を許容するような評価基準があれば、企業は参加しやすくなると思う。
- ・国の研究政策では広く平等を目指しているが、先行する企業を優遇する仕組みがあれば、企業は参入しやすくなる。現行制度では後発企業を排除できず、企業としての判断が鈍る要因となっている。
- ・日本が新物質の分野で強みを持つ時代は過去のものとなったため、世界の動向を踏まえ、海外との連携を強化すべきである。
- ・日本は素材分野で依然として優位性があるが、インテグレーターが不足しているため、素材が十分に活用されない問題がある。
- ・優秀な人材が高給を求めて海外や他分野に流出しており、国内に彼らを受け入れる高評価の就職パイプ

ラインが必要である。インテグレーターや研究開発の海外拠点の活用を視野に入れ、こうした人材が日本へ戻る仕組みづくりが急務である。

【総合討論のまとめ】

総合討論においては、事前アンケート結果に対するコメントを含め、様々な有益な情報や指摘があった。以下に要点をまとめる。量子マテリアルに関する戦略提言に向け、具体的な研究開発の課題や推進方法など、この総合討論の議論を反映し、検討を進める。

(1) 量子マテリアルの新規機能の発揮に必要な材料物性を理解するために必要な目的基礎研究

量子マテリアルの新規機能を発現させるには、材料が持つ潜在的な物性を深く理解することが必要である。また、研究分野を特定の目的に偏らせず、幅広い視野を持って設定することが重要である。キュリオシティ・ドリブンのアプローチが新たな発見をもたらす可能性が高いことから、目的基礎研究においては「ニーズ」だけでなく「シーズ」にも焦点を当てることが重要である。社会実装や応用を見据えながらも、それらに引きずられることのない柔軟な目的設定が必要である。

(2) 量子マテリアルの材料物性を新規機能の発揮に繋ぐために必要な活用基盤技術

量子マテリアルの新規機能を発揮させるためには、量子状態を適切に計測し、制御する技術が不可欠である。その実現には、計測技術の高度化だけでなく、物質合成や材料理論との連携が重要である。量子マテリアルを実用化するためには、高品質な基板作成技術の確立が必要である。また、量産を常に意識しながら、研究段階での小規模な実験システムで試行錯誤し、社会実装に必要となる関連周辺技術に関するプロトタイプ開発研究を進めることが求められる。

(3) 産業界を含む量子マテリアルR&Dを推進するために必要な方策

量子マテリアルR&Dを推進するためには、目利き人材やコーディネーターの育成と、実用に近い研究開発を実施する人材の評価体制の整備が必要である。また、日本の材料合成分野の強みを維持するためにも、継続的な技術発展と資源投入が重要である。ニーズとシーズのマッチングを促進するためには、企業と大学間の連携を強化し、研究成果を社会実装へとつなげる仕組みの構築が必要である。加えて、日本の量子マテリアル技術の優位性と独自性を明確にするために、海外との連携やコミュニケーションの活性化も必要である。同時に、国内の人材育成を急務としつつ、海外で活躍する多様な人材を日本に取り込む体制を整えることも重要である。

付録

付録1 開催趣旨・プログラム

開催趣旨

JST-CRDS では、国内外の科学技術動向の俯瞰調査から、国として重点的に推進すべき研究領域や課題を抽出し、その推進方策を含めた戦略提言へとつなげる活動を行っています。「科学技術未来戦略ワークショップ」は、CRDSが重要と考え、これから戦略提言へ進めようとする内容について、課題設定の検証・充実や推進方策の具体化などを目的として開催するものです。

量子マテリアルは、電子やスピン等の量子状態を人為的に制御することで新たな量子力学的機能を発現する物質・材料であり、その多くは日本が伝統的に強みを持つ固体物性研究の対象とされてきました。2020年1月に内閣府から出された「量子技術イノベーション戦略」では「量子通信・量子暗号」、「量子情報処理」、「量子計測・センシング」の3つが主要な技術領域とされる一方で、「量子マテリアル」はこの3つの技術領域を支える基盤技術の1つに位置付けられました。しかし、近年になって、広い分野に革新を起こす新たな量子マテリアルが出始めており、量子3本柱の基盤技術に留まらない、様々な応用へ向けた研究開発が必要ではないかとの問題意識から、CRDSが1年前から調査活動を進めて参りました。

モアレ構造、非エルミート系、反強磁性スピントロニクスなどのエマージングな量子マテリアルにおける基礎研究が着実に進展する一方で、次世代デバイスとしての実用化を見据えた研究が限られているのが現状です。この基礎研究と応用研究の間のギャップを埋めるためには、量子マテリアルR&Dを一気通貫に実施する研究開発体制が不可欠であると言えます。具体的には、社会実装に向けた課題を量子マテリアル活用R&Dにトップダウン的に取り入れ、基礎研究と活用基盤技術が相互に課題を共有し、新規機能を有するデバイスを実証する方向性こそが、日本が伝統的に強みを持つ固体物性研究と社会実装を繋ぐ架け橋になると考えられます。

こうした状況に鑑み、エマージングな量子マテリアルの基礎研究、量子マテリアル研究に求められる活用基盤技術、量子マテリアルの実用化に向けた取り組みの事例を俯瞰し、量子マテリアルR&Dの可能性、解決すべき課題、効果的な開発体制などを把握するためのワークショップを開催します。

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、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

開催日時：2024年9月14（土）10:00-17:35
場所：TKP市ヶ谷カンファレンスセンターバンケットホール3D および オンラインのハイブリッド開催

10:00-10:05	開会挨拶	魚崎 浩平（JST-CRDS）
10:05-10:25	趣旨説明	鈴木 伸郎（JST-CRDS）
10:25-11:40	<u>第一部：エマージングな量子マテリアル研究</u>	
	話題提供1：「モアレ構造による新たな物性・機能の創出」	町田 友樹（東京大学）
	話題提供2：「非エルミート光学とその周辺」	岩本 敏（東京大学）
	話題提供3：「“量子マテリアル”研究とスピントロニクス素子への応用可能性」	深見 俊輔（東北大学）
13:00-14:15	<u>第二部：量子マテリアル研究に求められる活用基盤技術</u>	
	話題提供4：「量子マテリアルの機能創出のための合成・加工技術と連携体制」	吾郷 浩樹（九州大学）
	話題提供5：「理論による量子マテリアルの新機能・魅力の提示と技術への期待」	村上 修一（東京工業大学）
	話題提供6：「量子マテリアルの特徴を明確化させる計測技術」	佐藤 宇史（東北大学）
14:30-16:20	<u>第三部：量子マテリアルの実用化に向けた取り組み</u>	
	話題提供7：「トポロジカル物質を用いた新しい事業の展開」	佐藤 太紀（TopoLogic）
	話題提供8：「固体量子センサ材料としての単結晶ダイヤモンド」	辰巳 夏生（住友電気工業）
16:30-17:30	<u>総合討論</u>	ファシリテーター：佐藤 隆博（JST-CRDS）
17:30-17:35	閉会挨拶	魚崎 浩平（JST-CRDS）

付録2 参加者一覧

(敬称略、所属・役職はワークショップ開催日時点のもの)

招聘有識者

(話題提供者)

吾郷 浩樹	九州大学 総合理工学研究院 教授
岩本 敏	東京大学 先端科学技術研究センター 教授
佐藤 太紀	TopoLogic株式会社 CEO
佐藤 宇史	東北大学 材料科学高等研究所 教授
辰巳 夏生	住友電気工業株式会社 グループ長
深見 俊輔	東北大学 電気通信研究所 教授
町田 友樹	東京大学 生産技術研究所 教授
村上 修一	東京工業大学 理学院 教授

(コメンテーター)

川崎 雅司	東京大学 大学院工学系研究科 教授
寒川 哲臣	日本電信電話株式会社 先端技術総合研究所 常務理事
高梨 弘毅	日本原子力研究開発機構 先端基礎研究センター センター長
谷口 尚	物質・材料研究機構 理事
中辻 知	東京大学 大学院理学系研究科 教授
野田 進	京都大学 大学院工学研究科 教授

招聘有識者以外

(JST-CRDS 検討チームメンバー)

魚崎 浩平	ナノテクノロジー・材料ユニット 上席フェロー/チーム総括責任者
鈴井 伸郎	ナノテクノロジー・材料ユニット フェロー/チームリーダー
魚見 和久	ナノテクノロジー・材料ユニット フェロー
大淵 真理	ナノテクノロジー・材料ユニット フェロー
佐藤 隆博	ナノテクノロジー・材料ユニット 特任フェロー
曾根 純一	ナノテクノロジー・材料ユニット 特任フェロー
馬場 寿夫	ナノテクノロジー・材料ユニット フェロー
眞子 隆志	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 特任フェロー
八巻 徹也	ナノテクノロジー・材料ユニット 特任フェロー
的場 正憲	システム・情報科学技術ユニット フェロー
赤崎 寿樹	JST プログラムマネージャー 研修生
阿部 一英	JST プログラムマネージャー 研修生

(JST-CRDS)

伊藤 聡	ナノテクノロジー・材料ユニット 特任フェロー
佐藤 敏文	ナノテクノロジー・材料ユニット 特任フェロー
佐々木 高義	ナノテクノロジー・材料ユニット 特任フェロー

- 中西 周次 ナノテクノロジー・材料ユニット 特任フェロー
- 高村 彩里 ナノテクノロジー・材料ユニット フェロー
- 福井 弘行 ナノテクノロジー・材料ユニット フェロー
- 矢ヶ部 信吾 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

総括責任者	魚崎 浩平	上席フェロー	ナノテクノロジー・材料ユニット
チームリーダー	鈴木 伸郎	フェロー	ナノテクノロジー・材料ユニット
メンバー	魚見 和久	フェロー	ナノテクノロジー・材料ユニット
	大淵 真理	フェロー	ナノテクノロジー・材料ユニット
	佐藤 隆博	特任フェロー	ナノテクノロジー・材料ユニット
	曾根 純一	特任フェロー	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
	眞子 隆志	フェロー	ナノテクノロジー・材料ユニット
	宮下 哲	特任フェロー	ナノテクノロジー・材料ユニット
	八巻 徹也	特任フェロー	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
	鈴木 和拓	フェロー	環境・エネルギーユニット（2024年3月まで）
	赤崎 寿樹	研修生	JST プログラムマネージャー
	阿部 一英	研修生	JST プログラムマネージャー

科学技術未来戦略ワークショップ報告書

CRDS-FY2024-WR-06

量子マテリアル活用基盤技術の創出

令和 6 年 12 月 December 2024

ISBN 978-4-88890-950-1

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/>