

戦略プロポーザル

社会課題解決に向けた 量子マテリアルの活用戦略

STRATEGIC PROPOSAL

Utilization Strategy for Quantum Materials to Address Social Challenges

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

CRDSは、科学技術分野全体像の把握（俯瞰）、社会的期待の分析、国内外の動向調査や国際比較を踏まえて、さまざまな分野の専門家や政策立案者との対話を通じて、「戦略プロポーザル」を作成します。「戦略プロポーザル」は、今後国として重点的に取り組むべき研究開発の戦略や、科学技術イノベーション政策上の重要課題についての提案をまとめたものとして、政策立案者や関連研究者へ配布し、広く公表します。

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

さらに詳細は、下記ウェブサイトをご覧ください

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

エグゼクティブサマリー

本提言「社会課題解決に向けた量子マテリアルの活用戦略」は、量子マテリアル研究を課題解決型の研究志向へと導き、将来的には次世代のICTシステムやエネルギーシステム、医療応用などにおける高性能・高効率な革新的デバイスとして社会実装へ繋げることを目指すものである。具体的には、目標を明確にした量子マテリアルの目的基礎研究と、新機能を発現させるために必要な技術開発を行う活用基盤研究を密に連携させ、産業を見据えた魅力的な機能を提示する機能実証の研究開発の実施を提案する。このために、アカデミアと産業界、スタートアップなどのステークホルダーを巻き込んだ体制を構築し、大規模研究施設の利用と海外研究機関との共同研究を促進することが重要となる。

わが国の経済成長と持続可能性を両立させるためには、高度情報化社会の実現、エネルギー高効率利用の実現、健康・長寿社会の実現などが不可欠である。情報分野ではAIやビッグデータ解析の高度化によるDXの加速によって、エネルギー、医療や教育、交通など幅広い分野において効率性と利便性が飛躍的に高まり、社会全体で高度な情報活用が進展している。エネルギー分野では、スマートグリッドとビッグデータ解析を組み合わせることで、電力需要を予測して再生可能エネルギーを効率的に運用する試みが世界各地で進んでいる。医療分野でも、ウェアラブルセンサーから得られる膨大なバイタルデータをAIが解析し、症状の早期発見や遠隔診療を可能にするシステムが一部地域で稼働し始めている。

上記を加速するためには、次の課題を解決する必要がある。まず情報分野ではDXの進展に伴うデータセンターや通信ネットワークの電力消費が年々増加しており、特に昨今のAIの急速な発展を支えるデータセンターの消費電力を抑制することが課題となっている。エネルギー分野ではエネルギー伝送の高効率化が急務であり、送電網におけるエネルギーロスの削減やエネルギー変換プロセスの最適化などが課題となっている。医療分野においては、診断装置の高感度化や低侵襲化が求められているが、対応する技術開発が十分に進んでおらず、安全で高精度な医療技術の確立が課題となっている。これらの課題が解決されないまま拡大が続けば、化石燃料への依存によるエネルギー資源の枯渇や気候変動などの環境リスクがさらに深刻化し、結果として健康・長寿社会の実現も難しくなり、最終的には持続可能な社会の実現が危ぶまれる。

このような状況を打開するためには、既存の材料や技術の枠組みを超え、高効率で低エネルギー消費のICT機器や高精度の診断装置を実現できる新しい材料や技術によるブレークスルーが必要である。それを実現する可能性があるのが、スピントロニクス材料、フォトリソグラフィ材料、低次元材料、トポロジカル材料をはじめとする量子マテリアルである。たとえばスピントロニクス材料では、電子の電荷ではなく、より低エネルギーで高速に操作可能なスピンを利用した量子力学的な特性を持ち、従来の材料では達成できない効率性と省エネルギー性能をもたらすことが期待されている。

材料研究に強みを持つわが国にとって、これらの量子マテリアルがもたらす潜在力を世界に先駆けて切り開くことは極めて重要である。国内に目を向けると量子マテリアルに関するキュリオシティ・ドリブンの基礎研究は進展しているものの、応用を目指した研究開発は依然として限定的である。また、理論・シミュレーション、計測・分析、デバイス・プロセスなど技術分野を越えた連携や、産学連携も一部を除き進展しておらず、海外との連携を推進する人材も不足しているのが現状である。一方、米国、欧州、中国などの主要国では、量子マテリアルに対する大規模な政府投資が行われ、基礎研究から応用研究、産業連携を通じたデバイス開発までを視野に入れたプロジェクトが進行している。したがって、わが国の量子マテリアルの研究開発や産業競争における優位性の維持強化に向けた研究開発戦略を早急に策定し、積極的に研究開発を推進することが喫緊の課題である。

こうした状況の下、量子マテリアルの基礎研究を進展させ、社会課題解決に向けた研究へと展開するために、「目的基礎研究」「活用基盤技術」「新規機能実証」の3つの階層による研究開発課題の実施を提案する。

「目的基礎研究」では、近年になって新奇物性が報告されている量子マテリアルを中心に、実用化を目指した物性理解の研究を推進する。具体的には、シリコンなどの既存の半導体では打ち破れなかった性能の壁を超える革新的な新規機能の発現に向けて、その物性を詳細に理解する研究を推進する。

「活用基盤技術」では、量子状態を精密に計測・制御するための技術を開発し、新規機能の発現を可能とするデバイス実証へと繋げる。具体的には、量子状態を計測する技術、量子状態を推定するシミュレーション技術に加え、量子状態の計測・評価を可能にするための高品質な材料や基板を合成・作製する技術、特異な量子状態・機能を発現・制御する技術の開発を推進する。また、特異な量子状態を保持できるプロセス技術、実環境で量子マテリアルを活用する技術も必要である。

「新規機能実証」では、「目的基礎研究」と「活用基盤技術」の相互連携によって見出された量子マテリアルの新規機能を迅速に社会実装へと繋げるため、新規機能の実証を目的とした評価デバイスを開発する。これを実現するためには、既存のデバイスと比較可能な客観的なベンチマークの設定、評価デバイスの機能性の実環境での評価に加え、量子マテリアルの量産化を目指した場合の製造プロセス上の重要課題の特定と解決策を提示することが必要である。

これら3つの研究開発課題を効率的に推進するために「量子マテリアル活用R&D体制」の構築を提案する。本研究体制を実現するためには、産業界とアカデミアの双方に利益をもたらす共通目標を設定する必要がある。また、アカデミアと公的研究機関が協力し、大規模研究施設を利用し、目的基礎研究と活用基盤技術が相互連携しながら、新規機能実証を目指す研究プロジェクトを進めることが必要である。この場合、量子マテリアルの基礎研究に携わる研究者、合成技術、計測技術、計算科学などを専門とする研究者が連携し、情報を共有しながら研究を進めることが有効である。さらに、量子マテリアルの魅力的な機能を有する評価デバイスを創出することでスタートアップを含む産業界の参画を促進する。また、日本が優位性を持つ研究・技術を明確にすることで、相補的な技術を有する海外機関と連携し、応用に向けた日本の競争力を強化する。このためには、海外の研究機関や企業との積極的な共同研究を推進するとともに、日本での国際ワークショップ開催や海外で活躍する研究者との連携を強化し、量子マテリアル研究の国際的なネットワークを構築する。さらに、量子マテリアルのキュリオシティ・ドリブンの基礎研究を社会実装に繋げるために、量子技術に関する知識を有し、産業界との連携を推進するコーディネーター人材の育成も必要である。

これらの方策を実施することで、わが国の量子マテリアル分野における基礎と応用の両側面の研究が効率的に進展し、次世代のICTシステムやエネルギーシステム、医療応用における革新的なデバイスの創出に向けた研究開発が加速され、さまざまな社会課題の解決に繋がることが期待される。また、国内外の産業界と研究機関との連携を強化することで、量子マテリアルを活用した技術革新を推進し、わが国の産業競争力を大幅に向上させることが可能となる。さらに、量子マテリアルの社会実装を通じて、世界に先駆けた革新的技術開発を先導し、わが国が量子科学技術分野における国際的リーダーシップを発揮することが期待される。

Executive Summary

This proposal, “Utilization Strategy for Quantum Materials to Address Social Challenges,” seeks to transform quantum materials research from a curiosity-driven endeavor into one focused on solving societal problems. Its ultimate goal is to evolve quantum materials research into the development of innovative, high-performance, and energy-efficient devices for next-generation ICT systems, energy systems, and medical applications. To achieve this, the proposal calls for a close integration of two research streams: objective-driven basic research on quantum materials and application-focused research that develops the technologies needed to realize new functions. In parallel, research and development (R&D) will be conducted to demonstrate these new functions in devices attractive to industry. This effort involves establishing a framework that brings together stakeholders from academia, industry, startups, and others, while promoting the shared use of large-scale research facilities and collaborative research with overseas institutions.

For our nation to achieve both economic growth and sustainability, it is essential to realize a highly digital society, maximize energy efficiency, and foster a healthy, long-lived population. In the information field, accelerated digital transformation (DX) spurred by advances in AI and big data analytics is expected to dramatically improve efficiency and convenience across a wide range of sectors—including energy, healthcare, education, and transportation—thereby significantly enhancing people’s quality of life. In the energy sector, global efforts are underway to combine smart grid technology with big data analytics, enabling more accurate forecasts of power demand and efficient operation of renewable energy systems. Likewise, in the medical field, systems that leverage AI to analyze vast amounts of vital data from wearable sensors are beginning to enable early diagnosis and remote medical consultations.

However, to further accelerate these advancements, several challenges must be overcome. In the information domain, the progress of DX has led to a continuous increase in the power consumption of data centers and communication networks. In the energy sector, enhancing the efficiency of energy transmission is an urgent task, with challenges including reducing energy losses in power grids and optimizing energy conversion processes. In healthcare, there is a growing demand for diagnostic devices with higher sensitivity and lower invasiveness. If these challenges continue to expand without resolution, the resulting reliance on fossil fuels could exacerbate energy resource depletion and climate change, making it increasingly difficult to achieve a healthy, long-lived society and ultimately threatening overall sustainability.

To address these issues, breakthroughs beyond the current framework of materials and technology are needed. New materials and technologies capable of realizing high-efficiency, low-energy ICT devices and high-precision diagnostic instruments must be developed. Quantum materials—including spintronics, photonics, low-dimensional, and topological materials—offer such potential. For instance, spintronics materials exploit the quantum mechanical properties of electron spin rather than charge, allowing operations at lower energy and higher speed than conventional materials, and thus promise to deliver efficiency and energy-saving performance unattainable with current technologies.

For our country with its strong expertise in materials research, pioneering the potential of these quantum materials ahead of the global competition is extremely important. Domestically, while curiosity-driven basic research on quantum materials has advanced, application-oriented R&D remains limited. Moreover, collaboration across disciplines—such as theory, simulation, measurement, analysis, device fabrication, and process development—and between academia and industry is still insufficient, and there is a shortage of people capable of promoting international cooperation. In contrast, major countries like the United States, the Europe nations, and China have initiated large-scale government investments in quantum materials, pursuing projects that span from basic research and applied technology to device development through industry collaboration. Thus, it is an urgent priority to formulate and actively implement an R&D strategy that secures our nation's competitive advantage in both quantum materials research and industrial application.

To address these challenges, this proposal advocates a three-tiered R&D approach to extend basic research on quantum materials into socially relevant applications:

1. Objective-Driven Basic Research

Focus on quantum materials that have recently shown novel physical properties. The aim is to thoroughly understand their characteristics so as to overcome the performance limitations of existing semiconductors (e.g., silicon) and enable the emergence of new innovative functions.

2. Foundational Utilization Technology

Develop technologies to precisely measure and control quantum states. This includes advancing measurement techniques, simulation methods for quantum state estimation, and synthesis processes to fabricate high-quality materials and substrates. Additionally, research will focus on methods to induce and control unique quantum states and on process technologies that maintain these states in practical environments.

3. Demonstration of New Functions

Rapidly translate the new functions discovered through the collaboration between basic research and technology development into practical devices. This requires establishing objective benchmarks for evaluation, testing device functionality under real-world conditions, and identifying and addressing key manufacturing challenges for scaling up production.

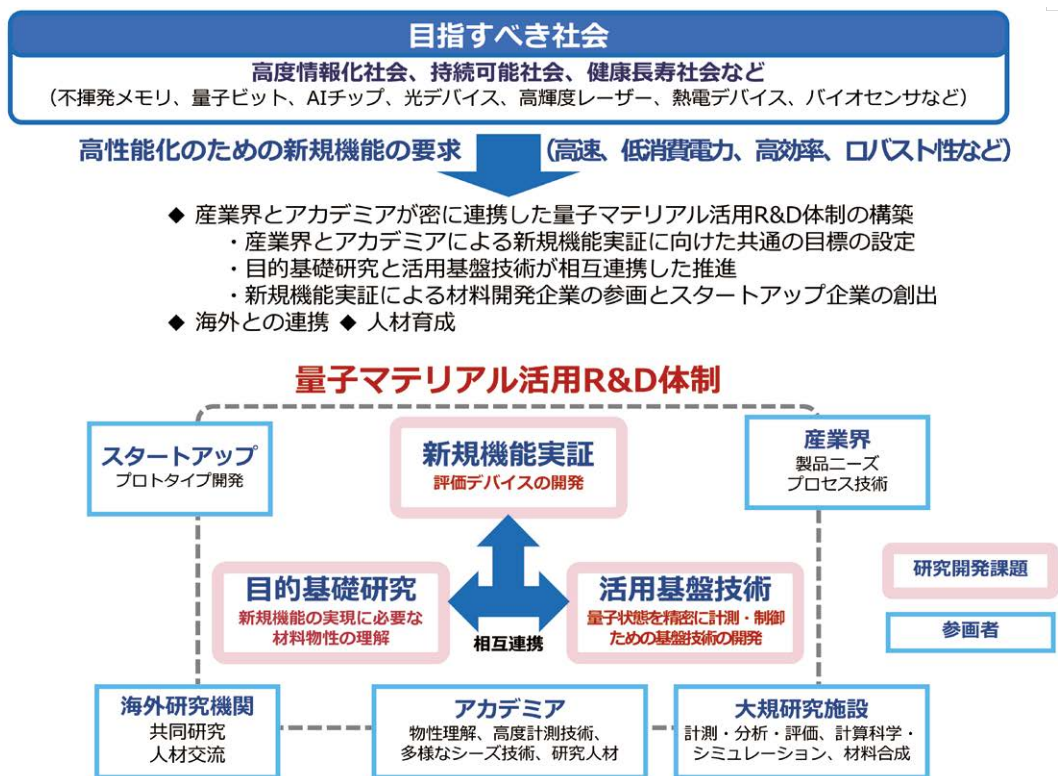
By implementing these three tiers through a Quantum Materials Utilization R&D Framework, we can set common goals that benefit both academia and industry. Cooperation among universities, public research institutions, and industrial partners—leveraging large-scale research facilities—is essential to ensure that basic research and technology development work synergistically toward practical demonstrations. Furthermore, creating evaluation devices that showcase the unique functions of quantum materials will encourage industry participation. Strengthening our nation's research and technological strengths, promoting joint projects with overseas institutions, organizing international workshops, and cultivating experts who can facilitate industry-academia-government collaboration are all critical measures to enhance our competitiveness and global leadership in quantum science and technology.

目次

1	研究開発の内容	1
2	研究開発を実施する意義	3
2.1	現状認識および問題点	3
2.2	社会・経済的効果	9
2.3	科学技術上の効果	11
3	具体的な研究開発課題	19
3.1	新規機能の発現に必要な材料物性の理解（目的基礎研究）	19
3.2	量子状態を精密に計測・制御するための基盤技術の開発 （活用基盤技術）	22
3.3	新規機能を実証する評価デバイスの開発（新規機能実証）	27
4	研究開発の推進方法および時間軸	29
4.1	「量子マテリアル活用 R&D」の推進方法	29
4.2	時間軸	31
付録 1	検討経緯	34
付録 2	国内外の状況	37
付録 3	専門用語解説	46

1 研究開発の内容

本提言「社会課題解決に向けた量子マテリアルの活用戦略」は、量子マテリアル研究を課題解決型の研究志向へと導き、将来的には次世代のICTシステムやエネルギーシステム、医療応用などにおける高性能・高効率な革新的デバイスとして社会実装へ繋げることを目指すものである。図1-1に提言の概略を示す。本提言における量子マテリアルの定義は、「量子状態を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・構造体」とする。



量子マテリアルのキュリオシティ・ドリブンの基礎研究を社会課題解決に向けた研究へと展開するために、新規機能の発現に必要な材料物性を理解する「目的基礎研究」と、量子状態を精密に必要な計測・制御するための基盤技術を開発する「活用基盤技術」を相互連携させた研究を推進し、評価デバイスの開発を通じて「新規機能実証」を行う。各研究開発課題の詳細を以下に記す。

研究開発課題1. 新規機能の発現に必要な材料物性の理解（目的基礎研究）

近年、従来の物質では打ち破れなかった性能の壁を超える新規機能が期待される量子マテリアルが現れ始めており、スピンフォトンクス、モアレ超格子、非エルミート系、トポロジカル反強磁性体は、そのような材料系の代表例である。これらの材料系の実用化を目的に置き、革新的な新規機能の発現に向けて、その物性を詳細に理解する研究を実施する。

研究開発課題2. 量子状態を精密に計測・制御するための基盤技術の開発（活用基盤技術）

量子マテリアルの物性を詳細に理解し、新規機能を発現するデバイスとして実証するため、量子状態を精密に計測・制御するための基盤技術を開発する。具体的には、新規機能の評価に向けた量子パラメーターを計測する技術が必要である。これを実現するためには、測定・評価を可能にする高品質な材料や基板を合成・作製する技術に加え、理論と測定結果を比較し量子状態を正確に推定するシミュレーション技術が重要である。また、特異な量子状態・機能を発現・制御する技術と、特異な量子状態を安定的に保持できる構造を作製するプロセス技術も必要である。加えて、評価デバイスでの実証に向けて、実環境で量子状態を動作させる技術が求められる。

研究開発課題3. 新規機能を実証する評価デバイスの開発（新規機能実証）

目的基礎研究と活用基盤技術の相互連携により見出した量子マテリアルの新奇物性を迅速に社会実装へ繋げるために、基本的な動作原理が確認された段階で、新規機能の実証を目的とした評価デバイスを開発する。これを実現するためには、既存のデバイスと比較可能な客観的なベンチマークを設定すること、評価デバイスの機能性を実環境で評価することに加え、量産化を目指した製造プロセス上の重要課題の特定と解決策を提示する必要がある。

これら3つの研究開発課題を効率的に推進するために、「量子マテリアル活用R&D体制」を構築し、産業界の参画を促すことで、社会課題解決に資する量子マテリアルのデバイスの開発を目指す。また、本研究体制を更に推進するために、海外との連携を進めると共に、産学連携コーディネーター人材を育成する。これらの推進方策の詳細を以下に示す。

推進方策1. 産業界とアカデミアが密に連携した量子マテリアル活用R&D体制の構築

アカデミアと公的研究機関が協力し、目的基礎研究と活用基盤技術が相互連携した大型研究プロジェクトを進めることで、新規機能実証を目指す。さらに、量子マテリアルの魅力を持つ評価デバイスを本体制で試作し提示することで、スタートアップを含む産業界の参画を促進させる。

推進方策2. 量子マテリアル活用R&D体制と海外との連携

トポロジカル反強磁性体やモアレ超格子など日本が優位性を持つ研究・技術を明確にすることで、相補的な技術を有する世界の機関との連携や、世界の優秀な人材を活用し、応用に向けた日本の競争力を強化することが重要である。そのためには、海外の研究機関や企業との積極的な共同研究が有効である。また、日本での国際ワークショップ開催や海外で活躍する研究者との連携を強化し、国際的なネットワークを構築する。

推進方策3. 量子マテリアル活用R&D体制における人材育成

量子マテリアルの基礎研究を社会実装に繋げるために、産業界との連携を推進する産学官連携コーディネーター人材や異分野連携研究を推進するURAを育成する。

2 | 研究開発を実施する意義

2.1 現状認識および問題点

(社会課題解決に向けた量子マテリアルの可能性)

わが国の経済成長と持続可能性を両立させるためには、高度情報化社会の実現、エネルギーの高効率利用の実現、健康・長寿社会の実現などが不可欠である。情報分野では、AIやビッグデータ解析の高度化によりDXが加速し、社会全体で高度な情報活用が進展している。エネルギー分野では、スマートグリッドとビッグデータ解析を組み合わせることで電力需要を予測し、再生可能エネルギーを効率的に運用する試みが世界各地で進んでいる。医療分野でも、ウェアラブルセンサーから得られる膨大なバイタルデータをAIで解析し、症状の早期発見や遠隔診療を可能にするシステムが一部地域で稼働し始めている。

上記を加速するためには、次の課題を解決する必要がある。まず情報分野では、DXの進展に伴い、データセンターや通信ネットワークの電力消費は年々増加しており、特に昨今のAIの急速な発展を支えるデータセンターの消費電力を抑制することが課題となっている。次にエネルギー分野では、エネルギー伝送の高効率化が急務であり、送電網におけるエネルギーロスの削減や、エネルギー変換プロセスの最適化などが課題となっている。さらに医療分野においては、診断装置の高感度化や低侵襲化が求められているが、対応する技術開発が十分に進んでおらず、安全で高精度な医療技術の確立が課題となっている。これらの課題が解決されないまま拡大が続けば、化石燃料への依存によるエネルギー資源の枯渇や気候変動などの環境リスクがさらに深刻化し、結果として健康・長寿社会の実現も難しくなり、最終的には持続可能な社会の実現が危ぶまれる。

こうした課題に対応するために、情報通信技術（ICT）を支える半導体集積回路では微細化や集積度の向上によって大容量化・高速化・省電力化が進んでいるものの、基本となるトランジスタのチャネル材料であるシリコンの微細化による性能向上が難しくなり、ICT機器のさらなる高速化と省電力化には限界が見え始めている。また、最新のエネルギーマネジメントシステムや蓄電技術による送電網の最適化が試みられているが、既存技術では十分な進展が得られていない。医療分野では高感度なイメージング技術やAI解析を融合した新しい診断装置の研究開発などが進められているものの、既存技術に依存したシステムでは診断精度のさらなる向上や低侵襲性の実現が困難である。このような状況を打開するため、既存技術の枠組みを超え、高速度で低消費電力のICT機器や高効率のエネルギー伝送システム、高感度で低侵襲性の診断装置などを実現できるブレークスルーが求められている。

こうした背景を踏まえ、高性能化と低消費電力化の両立を目指す情報通信領域、再生可能エネルギーを用いた効率的な発電技術や蓄電技術を開発する環境・エネルギー領域、低侵襲イメージング技術や生体分子を用いたセンシング技術を開発するバイオ・医療領域、効率的なエネルギーマネジメント技術を開発する社会インフラ領域など、様々な研究領域における技術革新が不可欠である。

同様に、ICT機器の高速化と低消費電力化、エネルギー伝送の高効率化、診断装置の高感度化と低侵襲化といった課題を解決する新たな機能を持つマテリアルを開発する材料領域においても技術革新が求められている。特に、近年の技術の進展で計測が可能になった電子・光・スピン・トポロジという量子性の活用は、既存技術の性能向上にパラダイムシフトをもたらす可能性があると認識されるようになってきた。それを実現するのが、スピントロニクス材料、フォトリソ材料、低次元材料、トポロジカル材料をはじめとする量子マテリアルである（図2-1）。これらの材料は、低エネルギーで高速なスピン操作が可能であったり（スピントロニクス材料）、光の発生・変調・伝搬を高効率に制御したり（フォトリソ材料）、狭い空間に閉じ込めら

れた高速な電子を利用したり（低次元材料）、バルクとは異なる表面での特異な伝導を利用したり（トポロジカル材料）、といった量子力学的な特性を持つ。これらの4つは、従来の材料では達成できなかった機能性と効率性をもたらすことが期待されている。近年、これらの量子力学的な特性を組み合わせることで、さらなる新しい特性を持つ量子マテリアルの開発も進展している。このように、従来の材料や技術の延長線上では到達が難しい超高速動作や超低消費電力、超高感度を実現できる潜在力が量子マテリアルに秘められており、高度情報化社会の実現、エネルギーの高効率利用の実現、健康・長寿社会の実現などに広く寄与できる可能性がある。以下に個々の材料についての現状を述べる。

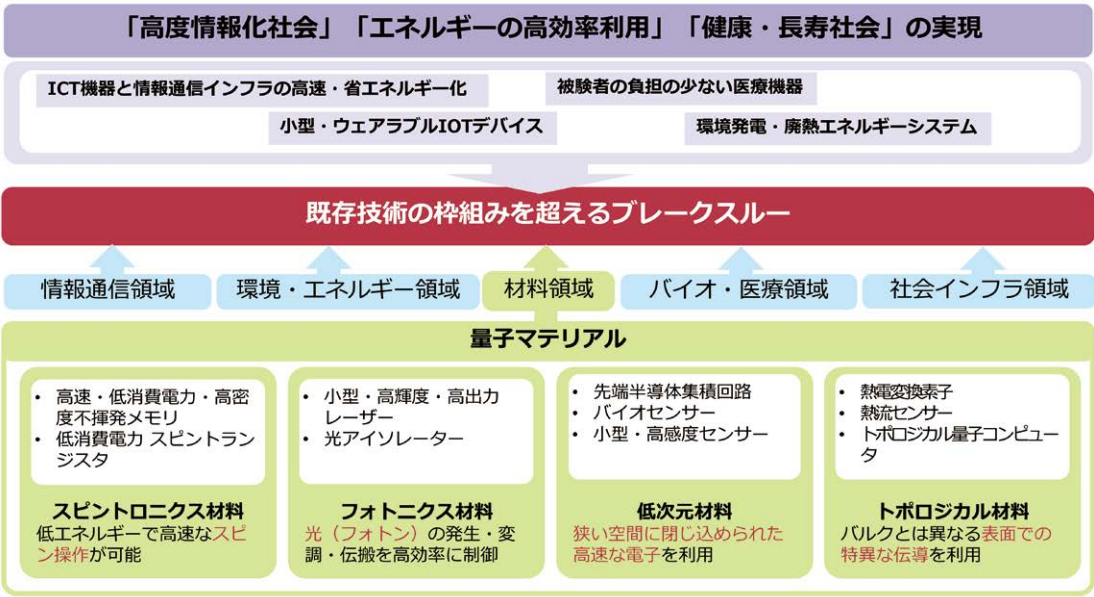


図2-1 目指す社会の実現に向けた量子マテリアルの位置付け

スピントロニクス材料では、電子の電荷ではなく「スピン」という磁気的な性質を情報処理に利用できる点が大きな特徴である。従来の半導体が電荷の蓄積や電流（電荷の流れ）のオン・オフによって情報を扱うのに対し、スピントロニクスでは電子スピンの方向を制御することで、より消費電力を抑えながら高密度な情報処理が可能になる。たとえば、高速動作と高い耐久性を兼ね備えた不揮発性メモリ（MRAM）の実用化が進んでおり、一部の分野では既に従来型メモリを置き換え始めている。これにより、サーバーのストレージや高性能計算機の記憶装置における消費電力を大幅に低減しつつ、読み書き速度を飛躍的に高めることが期待されている。近年では、スピンを電荷ではなく光で制御する「スピンフォトリソ」が注目されており、電子スピンと光子の相互作用を利用することでさらなる超低消費電力・超高速の光情報処理が可能になると期待されている。

フォトリソ材料は、光（フォトン）は量子のひとつ）を利用することで、情報の送受信や演算を行う技術の基盤となる。シリコンなどの従来材料では、電気信号による熱損失やノイズの問題が避けられない一方、光を用いるフォトリソでは、極めて高速で大量の情報をやり取りできるうえ、熱の発生を最小限に抑えられる利点がある。将来、光学回路を利用した超高速コンピュータやオンチップ光配線による省電力化が本格化すれば、データセンター内のネットワークや大規模演算装置の消費電力を劇的に削減できる可能性がある。近年では、「非エルミート系」と呼ばれる光学システムも注目されている（コラム3参照）。通常の光学系（エルミート系）とは異なり、エネルギーの保存が成立しない（損失や利得が存在する）という性質を持つ。損失や利得を制御することにより、従来の方法では実現が難しかった新しい光の制御が可能になる。具体的には、

「フォトリック結晶レーザー」のような小型で大出力・高輝度なレーザーや、光の伝わり方を自在に操るデバイスの開発が進んでいる。

低次元材料のひとつである二次元材料は、厚みが原子数層程度しかない極限的に薄い構造をもつ物質群で、代表例として MoS_2 や WS_2 などの遷移金属ダイカルコゲナイド（Transition Metal Dichalcogenides：TMDC）やグラフェンが挙げられる。電子が二次元に閉じ込められることで量子効果が顕在化し、高いキャリア移動度や多様なバンドギャップなど、シリコンとは異なる独特の物性が得られる。さらに、層同士を独立して扱えるため、異なる性質をもつ層状物質を積み重ねる「ファンデルワールス（van der Waals：vdW）ヘテロ構造」によって、新たな物性や機能を創出する研究が盛んである。こうした二次元材料を用いたトランジスタやセンサー、発光デバイスは、超低電力動作や高感度化が期待されており、将来的にはIoTデバイスや医療機器、バイオセンサーなどのさらなる小型化やウェアラブル化を加速させると考えられている。近年では、二次元材料の層を異なる角度で積み上げる「モアレ超格子」構造が注目されており、この構造を用いることで常温超伝導などの新しい電子特性の発現が期待されている。また、モアレ超格子の周期構造を利用して光の特性を制御することで、微細な光操作や超高解像度イメージングが可能となり、新たな光センサーや光学デバイスへの応用が期待される。

トポロジカル材料は、物質内部と表面・端の性質が大きく異なる点が特徴であり、内部は絶縁体でありながら表面や端にだけ電気伝導性が存在する「トポロジカル絶縁体」などが知られている。表面や端状態ではスピンの固定化され、散逸が少ないまま高速で電子を輸送できる可能性があり、スピントロニクスとの親和性が高い。また、最近ではトポロジカル超伝導体など、さらに複雑な量子現象を利用した材料の研究も活発化している。これらトポロジカル材料を利用すれば、不要な発熱を極力抑えながら演算や記憶を行う革新的デバイス設計が可能になると期待されており、従来のシリコン技術をはるかに超える省エネルギー性能を示すことが見込まれている。さらに近年注目を集めている「トポロジカル反強磁性体」では、反強磁性とトポロジカルな電子状態の両方を兼ね備えており、全体としての磁気モーメントがゼロであるにも関わらず、磁化状態を変化させ、それを電流として読み出すことが可能である。この特性により、高密度・高速動作・低消費電力の特徴を持つメモリデバイスへの応用が期待されている。

量子マテリアルは、量子技術のみならず、次世代のICTシステムやエネルギーシステム、医療応用などの幅広い分野に革新的な技術をもたらす可能性を秘めており、欧米を中心に多様な応用を目指した研究開発が活発化している。近年では、AIが急速に進展し、その開発競争が激化している中、これらの技術革新を支える基盤材料として有望な量子マテリアルの研究推進が、日本の国際的な技術競争力を確保するうえで不可欠である。

（量子論の誕生から量子科学技術の発展）

量子力学の勃興は20世紀初頭の科学革命の一つであり、物質とエネルギーの基礎的な振る舞いを理解する上で画期的なものであった。1900年のM. Planckによる黒体放射の理論、1915年のA. Einsteinによる光量子仮説などの初期の基礎理論の形成に続く、1920年代のN. BohrやW. Heisenberg、E. Schrödinger、P. A. M. Diracらの研究によって、幅広い適用範囲を持つ量子力学の定式化は完了した。

こうして誕生した量子力学は、20世紀前半の間に、物質の基本的な構成要素である素粒子と、それらの間に働く基本的な力について説明する素粒子物理学の発展に貢献したほか、それまで理解が難しかった絶縁体・半導体・金属の電氣的、磁氣的、熱的性質などに対して統一的な説明を与えた。量子力学を固体に適用する際に力を発揮したのが1電子近似である。1電子近似は一つの電子が他の多くの電子・原子から感じる多体の相互作用を有効な平均場に置き換え、その平均場のポテンシャルをその電子が感じる一体問題と考えるものである。エレクトロニクスの基礎となるバンド理論などが、このような従来の物性物理学的取り扱いの中で生まれた。

一方、20世紀後半になると、量子力学を計算や通信に応用しようという動きが現れた。1982年のR. P.

Feynman による量子シミュレーションの概念¹を発端に、1985年にD. Deutschにより提唱された量子チューリング機械（量子コンピュータの数学的モデル）²など、重要な理論の発表が続いた。また、1990年代には、P. Shorが量子力学的原理を用いた、素因数分解アルゴリズム、量子誤り訂正理論を相次いで発表したことで、量子力学を用いたコンピューティングというアイデアの有用性が示された。物理学の一分野であった量子力学と情報科学が融合した量子情報科学の誕生である。量子力学誕生直後に理論的に予測され、量子情報科学においても中心的な役割を果たす、量子重ね合わせ、量子もつれ、量子コヒーレンスといった量子力学に特有な性質は、その後さまざまな手法により実験的に検証されていく。90年代後半になり、真空中の電磁場にトラップされたイオンや、超伝導量子回路において、量子ビット動作が実証されたことで、量子コンピューティングの実現性への期待が大いに高まった。人為的に区別や操作ができる二個の量子状態を取る物理的実体であれば、どんなものでも量子ビットとなることが可能で、現在では、トラップイオン、超伝導回路の他にダイヤモンド NV 中心、冷却中性原子、半導体量子ドット、希土類結晶、マヨラナ粒子（コラム2参照）、光量子などの物理系が知られている。それらは、最初の発見以降も量子ビットの数や質を向上させる努力が続いている。

本提言の量子マテリアルには、量子情報科学に直接貢献することが期待される物質群および、それ以外の用途に適用できる物質群の両方が含まれる。また、物性物理学の観点からは、先に述べた従来の取り扱い（1電子近似など）が成り立たない物質が多く含まれている。1986年の高温超伝導の発見を契機として、強い電子間相互作用の重要性が広く認識されるようになった。この強い電子相関こそが1電子近似を成り立たなくさせる要因であり、その取扱いのためには、強相関電子系と呼ばれる新たな学術領域の誕生を必要とした。強相関電子系においては、通常の金属・半導体・絶縁体の性質とは全く異なる性質が見られる。この分野の研究発展の契機となった銅酸化物高温超伝導の舞台であるモット絶縁体状態を始め、超巨大磁気抵抗効果やマルチフェロイック特性など、電子のもつ電荷・スピン・軌道といった複数の自由度が絡みあった特異な物性が見出されている。その意味で強相関電子系材料は、量子マテリアルの中で重要な位置を占めている。従来の半導体では実現が困難な低消費電力の記憶素子や、磁気電気変換素子といったデバイスの可能性が示唆されている。

もうひとつの従来の物性物理学を超えた物質群は、非エルミート物理が適用される物質・構造・デバイスである。従来の量子力学は、エネルギーの保存を前提とし、ハミルトニアン（エネルギー演算子）はエルミートであるとされる。一方、非エルミートハミルトニアンは、外部とのエネルギーのやり取りがある開放系を説明することができ、特異な物理現象が現れることが知られている。特に損失と利得を比較的自由に制御できる光学においては期待が高く、レーザーや高感度センサー、高効率フィルターなどの応用が期待されている。

これらとは別の流れの量子マテリアルとして、トポロジ（位相幾何学）を用いた概念でその性質が特徴づけられるトポロジカル物質群がある。その最初の例は、1980年にK. von Klitzingらのグループにより見出された高移動度の二次元電子系に強磁場を印加することでホール伝導度が量子化する「量子ホール効果」である³。D. J. Thoulessらによって、この現象が物性物理にトポロジの概念を取り入れることで理論的に解明できることが示されたが⁴、当時は限定された範囲にだけ適用できるものとみなされていた。しかし、2003年に村上・永長・S. -C. Zhangらが、絶縁体であってもスピンホール効果⁵（非磁性の金属や半導体に電場をかけると、電場に対して垂直な方向にスピン流が流れる現象）が起こりうることを提唱したことが契機となり、

1 R.P. Feynman: Int. J. Theor. Phys. 21, 467 (1982)

2 D. Deutsch: Proc. R. Soc. Lond. A 400, 97 (1985)

3 K.v. Klitzing et al.: Phys. Rev. Lett. 45, 494 (1980)

4 D.J. Thouless et al.: Phys. Rev. Lett. 49, 405 (1982)

5 S. Murakami, N. Nagaosa, S.C. Zhang: Science 301, 1348 (2003)

再びトポロジ概念が物性物理学の中で脚光を浴びることとなった。その後、バルク（物質内部）は絶縁体であり、エッジ（端：二次元物質なら周囲、三次元物質なら表面）だけが金属となっているトポロジカル絶縁体、それから派生したバルクは超伝導体でありエッジでは超伝導ギャップが閉じているトポロジカル超伝導体、トポロジカル半金属の一種であるワイル半金属など、従来の固体物理の概念では捉えられなかった物質が次々と発見され、トポロジカル物質は物性物理分野の研究領域として広く注目されている。トポロジカル物質のエッジを流れる不散逸なスピン流や、トポロジカル超伝導体のエッジに存在するマヨラナ粒子は、物質のトポロジカルな性質で保護されているため、不純物や原子の熱振動による擾乱を受けにくく、低消費電力なロジックデバイスや、コヒーレント時間の長い量子ビットへの応用が期待されている。

また、カーボンナノチューブやグラフェンなどの低次元物質も量子マテリアルの物質群のひとつである。2004年、A. K. GeimとK. S. Novoselovらのグループが発見したグラフェン⁶は、1原子の厚みからなる代表的な二次元物質である。類似の二次元物質としては、TMDC、黒リン、六方晶窒化ホウ素（hexagonal boron nitride : hBN）、MXenesなどの材料が注目され、次世代半導体、光学、磁性材料として精力的な研究が行われている。さらに2018年、P. Jarillo-Herreroらのグループが、2枚のグラフェンを互いの結晶格子の方向が約1.1度という「魔法の」角度だけずれるように重ねる（モアレ超格子）ことで超伝導が現れることを明らかにした⁷。二次元物質の層間の角度が電子特性をどのように変化させるかを研究する「ツイストロニクス」と呼ばれる新しい分野が形成されつつある。積層する二次元物質として、異種の組み合わせを選ぶことができるため、材料探索において、元素組成に加えてツイスト角度という新しいパラメータを加えたことになる。この新たな視点により、多様な物質の特性が探求され、より高度な機能を持つデバイスの開発が期待されている。

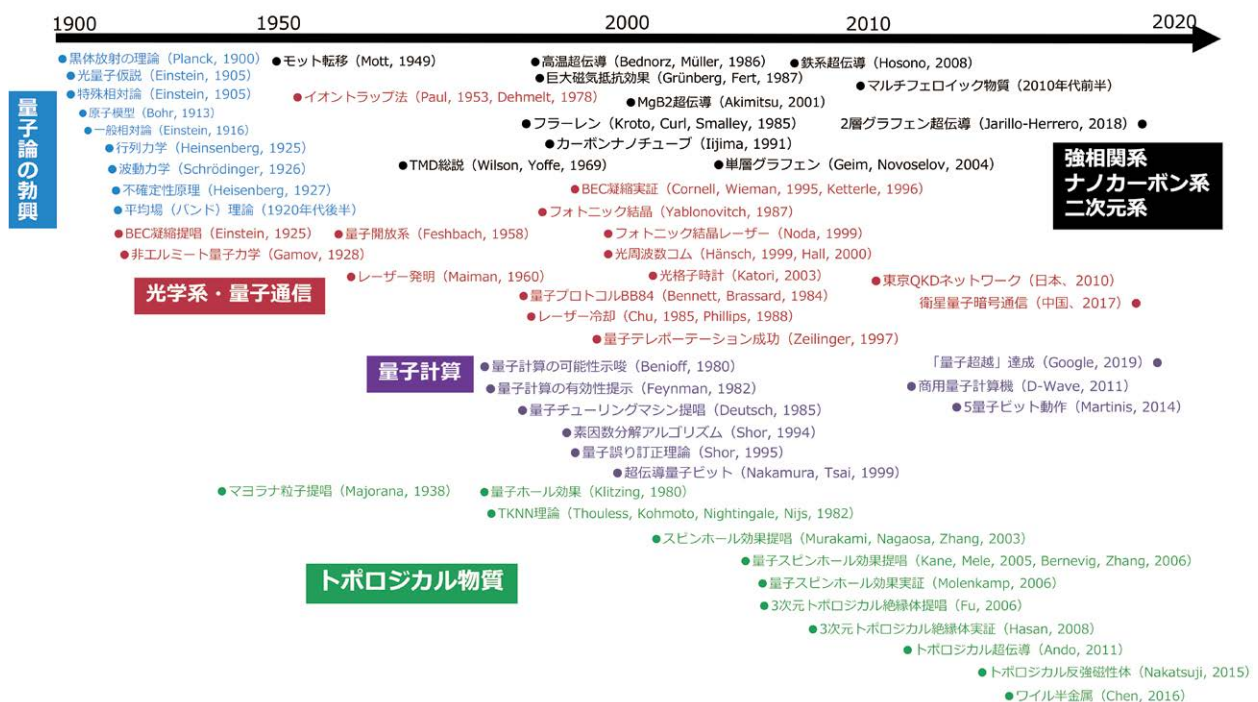


図2-2 量子科学技術の発展の歴史

6 K.S. Novoselov et al. : Science 306, 666 (2004)

7 Y. Cao et al. : Nature 556, 43 (2018)

(量子マテリアルを取り巻く国内外の政策動向と問題点)

日本では、2020年に政府の統合イノベーション戦略推進会議が策定した「量子技術イノベーション戦略」において、「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分野が重点技術とされ、「量子マテリアル」はこれらを支える基盤技術と位置づけられた。このため、特にこれら3つの技術領域に直接貢献する技術として、超伝導量子ビットやダイヤモンドNVCなどの限られた量子マテリアルの応用研究が進展している。加えて、JSPSとJSTが中心となり、量子マテリアルに関連する基礎研究が推進されている。JST-CREST「二次元機能性原子・分子薄膜の創製と利用に資する基盤技術の創出（2014～2021）」では、層間モアレ超格子による新奇物性の発見が進んだ。JSPS 学術変革領域研究（A）「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（2021～2026）」では、グラフェンをはじめとする二次元材料の新たな物性や機能を発現させる研究が展開されている。また、JST-CREST「ナノ物質を用いた半導体デバイス構造の活用基盤技術（2023～2030）」やJST-さきがけ「新原理デバイス創成のためのナノマテリアル（2023～2028）」では、これら二次元材料をさらに深化させるための新たなナノスケールデバイス構造や、従来の半導体技術では実現困難であった機能性を引き出すための基盤技術が開発されている。JST-CREST「トポロジカル材料科学に基づく革新的機能を有する材料・デバイスの創出（2018～2025）」では、トポロジカル絶縁体を利用したスピン流デバイスやトポロジカル超伝導体を応用した量子コンピューティングデバイスの設計が進行している。国際的な連携の観点からは、JSTの先端国際共同研究推進事業（ASPIRE）の枠組みで、複数の量子マテリアル関連の国際共同研究プロジェクトが進行中である。

米国は量子マテリアル研究で世界をリードしており、エネルギー省（Department of Energy：DOE）や国立科学財団（National Science Foundation：NSF）、国防高等研究計画局（Defense Advanced Research Projects Agency：DARPA）が主導する多様なプロジェクトが進行中である。重点分野は量子センサーや量子コンピュータ、トポロジカル材料などであり、基礎研究と応用研究、産学連携を統合した体制を構築している。特にDOEは量子研究拠点を設立し、次世代技術の開発に注力している。DARPAは軍事技術、NSFは人材育成を含む基礎研究を推進しており、技術革新を支える強力な基盤を築いている。

欧州は量子マテリアル研究を量子技術発展の基盤と位置付け、大規模な資金投入と国際協力を推進している。2018年から開始された欧州委員会の「Quantum Flagship」は10年間で10億ユーロを投じ、量子通信や量子センシング、量子コンピューティングなどを支援している。低次元材料やトポロジカル材料を重点に、多数のプロジェクトが進行中である。各国の研究機関や大学は、基礎研究から産業応用までを統合し、新技術の開発を進めている。また、英国やスイスでは量子マテリアルを基盤とした量子デバイス研究が活発である。

中国の量子技術全体に対する研究予算は年間8400万米ドルから30億米ドル近くと推測されており⁸、その一部が量子マテリアルに配分されている。特にトポロジカル材料、二次元材料、スピントロニクス材料の研究を重視しており、清華大学では低消費電力デバイスを目指した反強磁性スピントロニクス、北京大学では二次元材料を基盤とした量子マテリアル研究が進行中である。また、量子センサーや量子情報処理への応用も模索されている。さらに、国家自然科学基金や国家重点研究開発計画などの支援が行われ、基礎研究から応用研究の開発まで幅広く推進されている。

このように、米国、欧州、中国をはじめとした主要国では、社会・経済的課題の解決に量子マテリアルの基盤的研究が不可欠であるとの共通認識の下、極めて大規模な政府投資が行われ、基礎研究から応用研究、産業連携によるデバイス開発までを指向したプロジェクトが進行している。これに対しわが国では、JST-CREST「量子・古典の異分野融合による共創型フロンティアの開拓（2023～2030）」等で量子技術と古典技術を融合し、新しい応用分野を開拓する取り組みが進められているものの、大学、研究機関、企業等で

8 E. Parker et al. :An assessment of the US and Chinese industrial bases in quantum technology. Rand Corporation (2022)

個別に実施されているため、長期的な視点で社会課題の解決に至るまでの研究課題を一体的、かつ一貫通貫で実施する大型プロジェクトはこれまでにない。したがって、世界の新しい潮流を作るような主導的地位を当該分野で築くことができず、現状分析に基づく戦略のもとで、国際競争力を意識した研究開発を推進する体制も十分でない。スピントロニクス、モアレ超格子、非エルミート系、トポロジカル反強磁性体といった量子マテリアル研究のエマージングな領域が登場している中、現状における具体的な問題点は以下の3点である。

◆ 問題点1：新規機能の発現に必要な量子マテリアルの物性の理解が不十分である

量子マテリアルは、多くの場合、電子スピン、量子もつれ、トポロジカル状態といった複数の特性が関与しており、その完全な理解や制御技術が不十分であるため、量子マテリアルが見せる新奇物性を既存技術のレベルまで向上できていない。物性理論・モデルや高度計測からのフィードバックに基づいた基礎研究を、実用可能なデバイス設計に繋げることを意識して進める必要がある。

◆ 問題点2：量子状態を計測・制御する技術の開発が不十分である

量子マテリアルの特性を活用するためには、量子状態を精密に計測し、制御する技術が必要である。量子状態の起源となる詳細な電子構造の観測には、角度分解光電子分光（Angle-resolved Photoemission Spectroscopy：ARPES）などの計測技術の高度化が不可欠であるが、これらの計測は実施できる場所が限られており、研究者や技術者が不足しているため、応用研究までを想定した技術開発は十分ではない。

一方、量子状態の人為的操作、制御には、ナノ～原子スケールでの精密な製造技術や、マイクロ波などを動的に高速制御するための新しい制御技術が必要であるが、現時点では十分な精度を得ることが難しい状況である。また、量子状態は温度や振動、電磁波などの環境要因に非常に敏感であり、その維持や再現性確保に対応する技術が確立されていない。

◆ 問題点3：産業界が注目する魅力的な機能等の提示が不十分である

新技術、新製品への展開等、量子マテリアルの具体的な市場化シナリオを描こうとしても、市場が求める魅力的な機能が十分に提示されていない。また、量子マテリアルを用いた評価デバイスやプロトタイプが少ないため、産業界（デバイスメーカーなど）がそれらの技術の利点を把握し、導入する機会も限られている。

2.2 社会・経済的效果

量子マテリアルの研究開発は、キュリオシティ・ドリブンの基礎研究が先行し、現時点では実験室レベルの微小な材料合成で留まっていることが多く、直接的に社会的な課題の解決に結び付けることは難しい。そのため、10年程度の長期的な視点で、高度情報化社会、エネルギー高効率利用社会、健康・長寿社会への貢献を目指して量子マテリアルの持つ特異な機能性を活用した新たな機能材料・高性能なデバイスの研究開発を進める必要がある。

（高度情報化社会への効果）

量子マテリアルが有する特異な機能性を活用した高速・低消費電力、高効率な半導体デバイスやAIチップなどの集積回路、ロバストな量子コンピュータ用ハードウェア、高感度なセンサーなどの開発により、エレクトロニクス機器、ICT機器の高度化が促進され、サイバー世界と現実世界が高度に融合したCPS（Cyber Physical Society）、Society 5.0といった高度情報化社会の実現が期待される。例えば、数ナノメートルの厚さでも高い移動度を有するグラフェンやTMDCなどは、2 nm以降の先端半導体集積回路への適用が期待

されている。また、反強磁性体を利用したメモリは高速・低消費電力・高集積が可能な不揮発メモリとしての可能性がある。この技術革新により、ICTインフラの省エネルギー化が進み、データセンターの電力消費や運用コストの削減が実現する。さらに、電子、スピン、フォトンなどの伝導に大きな非線形性を有する量子マテリアルは、革新的コンピューティング、AIコンピューティングの一つであるリザーブコンピューティング用のデバイス・材料として魅力的である⁹。量子コンピュータにおいては、超電導材料・ジョセフソン素子、分子・イオン、スピン量子ドット、光などを使った量子ビットの開発が期待される。また、トポロジカル材料中に現われると期待されているマヨラナ粒子（コラム2参照）により、ノイズに対して強く量子情報を安定に保つことができる誤り耐性の高い大規模なトポロジカル量子コンピュータの実現も期待されている¹⁰。

（高効率エネルギー利用への効果）

量子マテリアルにおける電子、スピン、光、熱の非対称な伝導、相互作用などを活用したエネルギーの変換、輸送、蓄積などの高性能化により、エネルギーの高効率利用が進展し、再生可能エネルギーによる持続可能な社会の実現に貢献することも期待される。例えば、従来のエルミート相互作用のみに基づくレーザーの設計に加えて、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、従来以上の高輝度・高出力化を実現可能なレーザーが実証されている¹¹。この進展により、産業用レーザー加工や医療用レーザー治療の効率を飛躍的に向上させ、関連市場の拡大が期待される。また、トポロジカル物質の一つである反強磁性体のMn₃Snを用いた異常ネルンスト効果による熱電変換素子は、デバイス形状の自由度が高い環境発電や高速な熱流センサーとしての利用が考えられ、エネルギーハーベスティング、熱流のセンシングと制御への応用が検討されている。この技術により、廃熱をエネルギーとして再利用する新たな仕組みを提供し、エネルギーハーベスティング市場を加速させる可能性が高い。

（健康・医療への効果）

量子マテリアルにおける、各種の高感度なセンシング機能は健康管理、医療診断への活用が考えられ、健康・長寿社会の実現に貢献することが期待される。例えば、ダイヤモンドNVCに代表される小型で高感度な磁気センサーは、脳や心臓からの信号である微弱な脳磁場心磁場の測定に魅力的であり、被験者に負担の少ない脳磁計、心磁計、MRIなどの医療機器への応用が検討されている^{12,13}。また、高移動度のグラフェンに糖鎖を修飾させたトランジスタにおいて、インフルエンザウィルスの高感度検出が可能なバイオセンサーなどの実証なども行われている¹⁴。これらの技術は、早期診断や感染症対策の効率化を通じて、医療費の削減と患者の治療成果向上に寄与する。また、革新的な医療機器やバイオセンサーの市場拡大は、医療関連産業の成長を促進し、新たな産業活動の活性化が期待される。

（量子マテリアルの市場規模）

（株）矢野経済研究所によれば、「量子固体」の世界市場が2045年に15兆円の規模に成長すると予測し

9 戦略プロポーザル「脳型AIアクセラレータ ～柔軟な高度情報処理と超低消費電力化の両立～」(CRDS-FY2020-SP-04)(2021年3月)

10 戦略プロポーザル「トポロジカル量子戦略 ～量子力学の新展開がもたらすデバイスイノベーション～」(CRDS-FY2016-SP-02)(2017年3月)

11 <https://www.jst.go.jp/seika/bt2024-01.html> (2025年3月6日時点)

12 https://www.aist.go.jp/aist_j/press_release/pr2019/pr20190828/pr20190828.html (2025年3月6日時点)

13 <https://www.titech.ac.jp/news/2024/069363> (2025年3月6日時点)

14 <https://sensait.jp/29033/> (2025年3月6日時点)

ている¹⁵。また、社会実装が進んでいる「スピントロニクスデバイス」について、2045年に世界市場が10兆円の規模に成長すると予測している¹⁶。これらの材料を用いたデバイスやアプリケーションの開発には、材料物性の制御技術や量産化技術などの確立も必要となる。これらの技術開発の進展状況や市場の需要動向によって、市場規模は大きく変動する可能性がある。

2.3 科学技術上の効果

「量子マテリアル」研究とは、「量子状態を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・構造体」に関する新しい量子（量子2.0）時代のトランスフォーマティブな研究である（コラム1参照）。電子の持つ電荷自由度を自在に制御して用いてきた従来の成熟した「エレクトロニクス」に続き、電子の持つ電荷自由度だけでなくスピン自由度も利用する「スピントロニクス」が誕生して、ハードディスクの高性能化や不揮発性磁気メモリなどが既に実用化しているが、「量子マテリアル」研究も革新的進歩を遂げ、非連続的な成長を具現化する新世代量子デバイス等の産業応用へ変革していくと期待される。

「量子マテリアル」研究の主な目標の一つは、非自明な量子機能Xが創発する舞台を実験的に実現することであり、その量子性を精密制御するための道筋を発見することである。その結果、物質内の微視的相互作用パラメーターを選択的に摂動することで物質を望ましい量子状態に変換するための新しい「量子マテリアル」変換戦略の学理の構築につながってゆく。電荷、スピン、軌道、格子の自由度が複雑に絡み合い、さらには強相関効果等の他の要因と複雑に絡み合って生み出される「非自明な電子状態」には、機能の宝庫としての多彩な可能性が眠っており、新たな知の地平が開かれるものと期待される。複雑な自由度が絡み合って生み出される「非自明な電子状態」を有する物質の開発・物性開拓研究として、例えば、空間反転対称性の破れた結晶中でのスピン運動量ロッキングに関する物性制御工学的研究や、非エルミート光ナノ構造（増幅利得や吸収損失の差を導入した系）の物性制御に関する非エルミート光デバイス研究等の挑戦的研究が進み、新奇な量子物理現象の社会実装に向けた革新的技術が確立されるだろう。

二次元物質をvdW力によって角度をつけてねじれた積層構造にすることで、異なる原子配列が規則的に並んだモアレ超格子構造を作り、vdWヘテロ界面での量子物理現象を創発的に発現させる舞台設計（つまり量子マテリアル構造設計）に関する研究から、「ツイスト物理」という新しい学理が誕生するとともに、ツイスト積層角度による電子物性制御に関する応用研究の開拓・進展につながっていくことが期待できる。あるいは、半導体薄膜に周期的に空孔を設けて作成した二次元フォトリソニック結晶をツイスト積層させることで、新しい光閉じ込め機構を有した光ツイストロニクス材料が創成できるかもしれない。さらには、水素のプロトン自由度と電子のスピン自由度のカップリングにより、水素結合上のプロトンが電子と連動して量子力学的に揺らぎ、その結果、量子常磁性と量子常誘電性が同時に発現するような物質系の研究が進展することで、電子の自由度（電荷・スピン・軌道など）や格子系の自由度に加えて、水素の自由度（プロトン・プロチウム・ヒドリド・核スピンなど）をもカップリングさせて自在に利用するための「プロトン固体物性」というべき新しい学理が構築され、電子・格子系の自由度と水素の自由度を自在にカップリングできる「量子マテリアル」設計指針の探求につながってゆく。

上記のようなトランスフォーマティブ研究の進展により、「スピントロニクス」に軌道自由度を付加した「スピンオービトロニクス」、反強磁性体の磁化反転スピードの速さを生かす「反強磁性スピントロニクス」、結晶

15 矢野経済研究所「2022年版 量子技術市場の現状と展望」(株式会社矢野経済研究所, 2022)

16 矢野経済研究所「2024年版 スピントロニクスデバイス市場の現状と将来展望」(株式会社矢野経済研究所, 2024)

内のバレー自由度を用いる「バレートロンクス」、モアレ超格子構造を用いる「ツイストロニクス」、あるいは水素の自由度を従来のエレクトロニクスにカップリングさせて用いる「プロトニクス」等の革新的異分野融合が加速すると考えられる。同時に日本が伝統的に強みを持つ固体物性研究の新たな地平に向けた大きな飛躍となるに違いない。そのためには、「量子マテリアル」開発競争が物質科学・物性物理学・量子物理学だけでなく電気電子工学・情報科学・数理科学等の様々な分野を含む（革新的異分野融合という名の）「総力戦」の様相を呈してきた現状を鑑み、既存分野の先端を拓く先端知（アドバンスト）だけでなく、学際知（インター）、横断知（トランス）、融合知（フュージョン）、間隙知（ニッチ）、および、上位知・俯瞰知（メタ）といった6つのモード¹⁷すべてを有効活用しながら、他分野の研究人材と協働できるような量子マルチリンガル人材が「総力戦」には必要であり、その育成が重要であると言える。今こそ総力を結集すべき時であり、「量子マテリアル」研究が科学技術上の（人材育成に関する）副次効果として、「量子マテリアル」研究に積極的に参画する若手研究人材を増加させることが期待できる。

2

研究開発を実施する意義

17 妹尾堅一郎,「互学互修」モデルの可能性—先端的専門職教育における「学び合い・教え合い」—, コンピュータ&エデュケーション, Vol. 15, pp. 24-30, (2003). ※6つのモードとは、先端知（フロンティア：各ディスプリンの先端部分の知）、学際知（インター：複数の分野をまたぐ知）、間隙知（ニッチ：複数の分野の隙間に位置する知）、融合知（フュージョン：拡張する複数の分野が融合した領域の知）、横断知（トランス：複数の分野に共通する知）、上位知・俯瞰知（メタ：複数の分野をメタレベルで包括する知）であると定義されている。

コラム1

「量子マテリアル」とは何だろうか

量子2.0時代¹⁾の幕開けとともに、量子技術を支える基盤技術としての「量子マテリアル」に関する基礎研究が多様性・多面性と広がりをもって、世界中で展開されている。物の見方は様々な視点・視野・視座によって変わり、見える景色がまるで違ってくるように、多様性・多面性をもった「量子マテリアル」という用語を統一的に定義することは難しい²⁾。本コラムでは、「量子マテリアル」とは何かについて説明するとともに、「量子マテリアル」研究への期待を述べる。

本提案における「量子マテリアル」研究とは、「量子状態を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・構造体」に関する新しい量子（量子2.0）時代の（真理の探究、価値の発見、価値の創造に資する）トランスフォーマティブ研究である。「量子マテリアル」研究には、①高精度な量子状態制御・観測技術に関する研究、②新材料の種となるような物質・構造を見つけ出す探索的物性研究（例えば、複雑な自由度が絡み合って生み出される非自明な電子状態を有する物質の基礎物性研究）に加えて、③空間反転対称性の破れた結晶中で実現する電子のスピンと運動量がロックした状態を制御できるトポロジカル電子デバイス研究、④光ナノ構造を利用した非エルミート光デバイス研究、そして、⑤キラル有機分子カチオンの導入を介して空間反転対称性の破れを制御したような、二次元有機・無機ハイブリッド磁性体の物質開発・物性開拓研究も含まれる。以上、要するに、非自明な量子機能Xが創発する舞台が「量子マテリアル」であり、上記に挙げた研究例以外にも予想を超えた量子機能Xが潜んでいると期待される。

近年、革新的な「量子マテリアル」によって、量子力学の基本原理とマクロな世界での量子現象が当たり前のように利活用され、誰も想像できないような方法で生活のあらゆる側面を変えることができるような「革新的で非連続的なイノベーションを生み出す新世代量子マテリアルデバイス」への期待が高まっている。大規模データの高速処理と低消費電力化を両立するような、既存技術の延長では克服が難しい（例えば、生成AIの爆発的ブームによる膨大な計算量を支えるためのデータセンターの電力消費量が急増する）問題が顕在化しており、その解決が喫緊の課題の一つである。青銅、鋼鉄、半導体などの特定の材料は、人間社会の技術的發展を飛躍的に促進し、文明の進歩を支えてきた。「量子マテリアル」研究に携わる研究者は、学際領域への展開を見据えつつ、量子2.0時代の先導者として、革新的な未来を切り開いていくことが期待される。

参考文献

- 1) 戦略プロポーザル「量子 2.0 ～量子科学技術が切り拓く新たな地平～」(CRDS-FY2019-SP-03) ※量子コヒーレンス、量子もつれなどの量子特有の性質に対して、

これまで困難であった制御と利活用が可能になることを「量子 2.0」と定義している。

- 2) 例えば、Y. Tokura, M. Kawasaki, N. Nagaosa: Nature Physics 13, 1056 (2017); R. Cava, N. de Leon, W. Xie: Chemical Reviews 121, 2777 (2021); N.R. Glavin, P.M. Ajayan, S. Kar: Advanced Materials 35, 2204928 (2023); Kyung-Hwan Jin, Wei Jiang, Gurjyot Sethi and Feng Liu: Nanoscale 15, 12787 (2023) など、「量子マテリアル」という用語の統一的な定義は明確ではない。

2

研究開発を実施する意義

コラム2

マヨラナ粒子とトポロジカル量子チップ (量子機能が発現する舞台設計・評価の一例)

従来型コンピュータの計算性能（処理速度とエネルギー消費）を凌駕する100万量子ビット級量子コンピュータの開発が注目されているが、計算時に出るエラーの訂正が大きな課題であり、重ね合わせ状態をエラーなく保持させる「誤り訂正」技術の革新的進歩が必須である。その解決策の一つは、1937年にイタリアの理論物理学者 E. Majorana が予言した素粒子「マヨラナ粒子」を利用したトポロジカル量子計算であり、エラーを大幅に低減する技術として期待されている¹⁾。ここでは、本提案の主題である非自明な量子機能Xが発現する精密な舞台設計・評価・実証の観点から、トポロジカル量子チップ開発の最新状況を述べる。

Microsoft 社は、数学者 M. Freedman（1986年フィールズ賞受賞）を所長とする量子計算研究拠点 Microsoft Station Q を中心に、（2018年のマヨラナ粒子発見に関する Nature 誌発表論文を他機関からのデータ処理に関する懐疑的指摘により撤回に追い込まれる事案が起きたものの）諦めることなく挑戦的な研究開発を続けてきた。そして2025年2月、同社は（トポロジカル・エラー訂正によって量子情報を守る）世界初のトポロジカル量子チップ「Majorana 1」を開発したと公表した²⁾。同チップは、マヨラナ粒子を観測・制御できる「トポロジカルコア」を活用し、信頼性の高い量子ビットをスケラブルに生成するもので、現在8個のトポロジカル量子ビットを搭載し、将来的に100万量子ビットまで拡張可能な構造を有するとされる²⁾。しかし、一部の専門家は Microsoft 社の発表に懐疑的な見解を示しており、引き続き技術の確立と検証が求められている³⁾。

そもそも「トポロジカル・エラー訂正」によって量子情報を守る先駆的な概念を1997年に導入したのは（ロシア出身の）米国の理論物理学者 A. Kitaev であり、1999年以降、上述の M. Freedman らとともに、トポロジカル量子計算に関する研究を始め、2006年には擾乱に強いトポロジカル量子計算を実現しうる Kitaev 量子多体模型を理論的に提案した¹⁾。そして、2012年に半導体ナノ細線と超伝導体を接合した構造体を作製することで超伝導状態での準粒子の励起が「マヨラナ粒子」として振舞うことを強く示唆する実験結果を発表したデルフト工科大の研究グループも Microsoft Station Q に加わり、マヨラナ粒子を発現させる系（つまり量子機能Xが発現する舞台）の探索・評価・実証に向けて（世界各地の研究機関も追随する形で）精力的に研究を行うようになったのである。マヨラナ粒子が閉じ込められて存在する量子細線に一定の電圧をかけてからゼロに降下させると、電気伝導度が突如ピーク（ゼロバイアス・ピークと呼ばれるマヨラナ粒子存在の動かぬ証拠）に達することが理論的に予想されており¹⁾、日本を含む世界各国でマヨラナ粒子の存在を実証しようとする論文が次々と発表されている。いかにして理論的に予

言された素粒子「マヨラナ粒子」が出現し量子機能が発現する舞台（つまり構造体）を精密設計・評価するか。これこそが量子2.0時代を先導する研究者の腕の見せ所である。

参考文献

- 1) 戦略プロポーザル「トポロジカル量子戦略 ～量子力学の新展開がもたらすデバイスイノベーション～」(CRDS-FY2016-SP-02)(2017年3月) および同タイトルの科学技術未来戦略ワークショップ報告書(CRDS-FY2016-WR-12)(2017年3月)
- 2) Microsoft Azure Quantum : Nature 638, 651 (2025)
- 3) D. Castelvecchi: Nature 638, 872 (2025)

コラム3

トポロジと光の邂逅から生まれた新概念 (量子機能が発現する舞台設計の一例)

「量子マテリアル」というと（一般的には）物質や材料のみをイメージする人が多いが、多様性・多面性と広がりをもった「量子マテリアル」研究の近年の発展を受けて、（狭義の意味では古典技術の延長であると考えられるような、しかし「量子マテリアル」研究に鼓舞された）量子マテリアル・インスパイア技術ともいえる萌芽的先端技術の開発も盛んになってきた。本コラムでは「量子マテリアル」をどこまで捉えるかどうかについて、トポロジと光の邂逅から生まれた新概念¹⁾の観点から述べる。

確かに、「量子マテリアル」の1つの重要なカテゴリーは、（トポロジカル絶縁体を拡張した概念としての）高次トポロジカル絶縁体もしくは高次トポロジカル超伝導体であり、電子の制御にトポロジの概念を使うというのが基本になっているが、最近では、トポロジの概念はトポロジカルフォトンクスという研究領域の方にも展開されている¹⁾。

トポロジと光に関する研究は（光波に現れる特異点と関係して）発展してきたが、歴史的には19世紀初めまで遡ると言われている²⁾。その意味するところは、光の中には特異点に起因する渦のようなものがあるということであり、時間の性質に由来する。渦は、実空間で我々が見ている（トポロジカルな性質としての）光の渦状態であり、そこに特異点があって渦になっている。一方、実空間の他には、波数空間（運動量空間）もあり、その中に光が示す何らかの渦上の構造体があるために「電子のトポロジカルなバンド構造に相当する現象」を引き起こす要因となっている。また、その他、光の次元には、実空間、波数空間以外にも（電子のエネルギーに相当する）周波数という自由度もあるので、そのエネルギーの中に渦状の構造を作り込むことができる。このような応用上の観点のほかに、（電子系では非エルミート・ハミルトニアンを自由に作るのは難しいが）光系では光子の確率振幅を制御できるので、複素エネルギー空間中の光渦に関する「非エルミート光学」的な研究が精力的に行われるようになってきているのが現状である¹⁾。したがって、これらも全部含めて広義の意味で「量子マテリアル」研究として捉えることができる。

トポロジカルフォトンクスがなぜ期待されているかということ（普通の光は障害物があると通れなくなるのに対して）トポロジカルな性質を持った状態を使うことができれば、不思議なことに（後方伝播モードがないために後方散乱の可能性が排除されて）、迂回して通り抜けていくことができる（つまり障害物を避けて継続的に移動できる）からである。このようなトポロジカルな状態を使った高効率レーザーは、構造揺らぎに対してロバストになるという指摘もあり、（トポロジカル絶縁体の考え方を光制御に応用した）新しいトポロジカルフォニックデバイスの可能性が期待

されている。トポロジの概念を光に応用すれば、光回路の弱点（①構造揺らぎによる散乱、②曲げによる散乱）を克服できるかもしれないということで研究が盛り上がっており、光回路への応用がトポロジカルフォトリクス（トポロジカルフォトニクス）の1つの大きな目標となっている。そのためには、光回路との整合性の良い半導体を使うということ、そして（トポロジカルな性質を出すためには周期構造があるので）トポロジカルフォトリック結晶を使うということがあり、現在、半導体トポロジカルナノフォトニクスに関する挑戦的研究が進行している。

参考文献

- 1) 岩本敏: 光学 49, 11, 438 (2020); 岩本敏, 太田泰友, 荒川泰彦: レーザー研究 48, 8, 404 (2020)
- 2) M. V. Berry, “Optical Vorticity”, Topology in Ordered Phases, eds. S. Tanda et al. (World Scientific, Singapore, 2004) pp. 3-4.

3 | 具体的な研究開発課題

量子マテリアルを社会課題解決に向けて活用するための研究開発課題について述べる。具体的には、新規機能の発現に必要な材料物性の理解（目的基礎研究）、量子状態を精密に計測・制御するための活用基盤技術の開発（活用基盤技術）、新規機能を実証する評価デバイスの開発（新規機能実証）の3つの階層で研究開発課題を設定する。近年、新規機能の発現が期待されている量子マテリアルとして、スピンフォトンクス、モアレ超格子、非エルミート系、トポロジカル反強磁性体が注目されている。これらを例とした場合の量子マテリアル活用R&Dの一気通貫の研究開発の方向性を図3-1に示す。3つの階層の研究者が縦方向で互いに連携しながら、横方向で他の材料系の応用展開を常に意識した研究開発を進めることで、量子マテリアルの社会実装を目指す。なお、図3-1に示した4つの材料はあくまでも代表例であってこれ以外の量子マテリアルの研究開発も包含する。

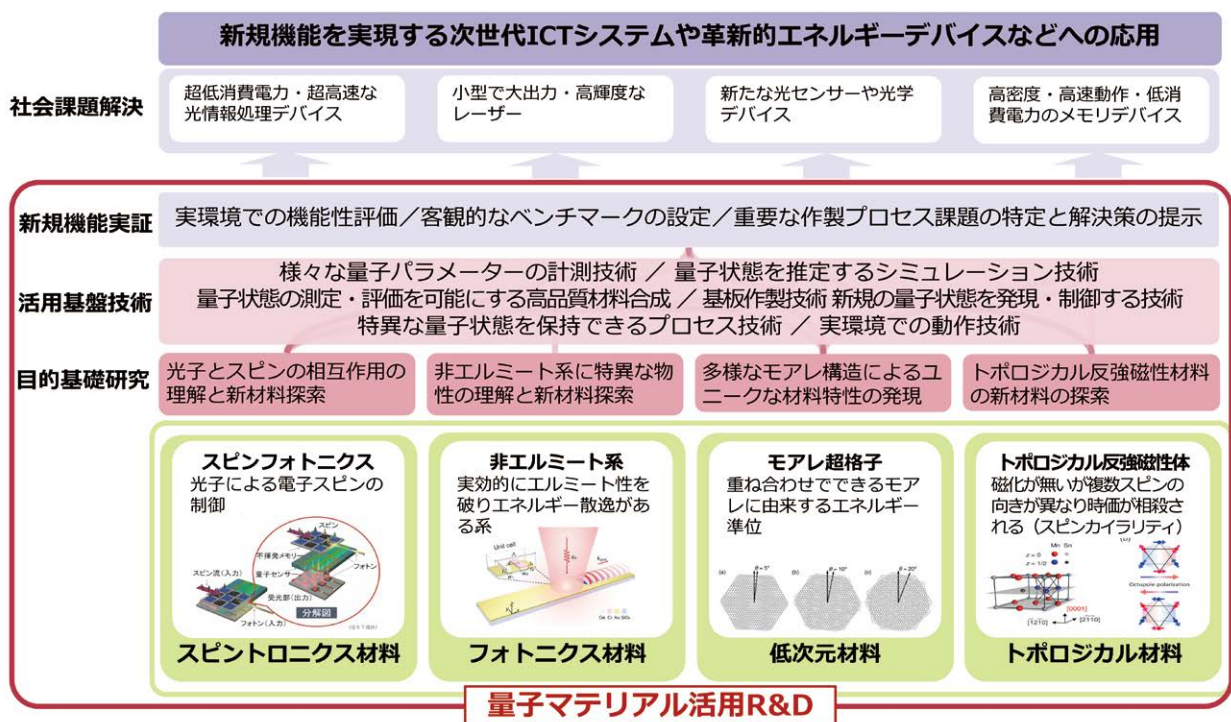


図3-1 具体的な研究開発課題の概要

3.1 新規機能の発現に必要な材料物性の理解（目的基礎研究）

本提案で取り扱う量子マテリアルは、古典的な量子力学の説明の枠を超え、新奇物性を通じて従来の物質では突破できなかった性能の壁を超える可能性を持つ、活発に進展する研究分野であり、新しい発見が連鎖的に生まれる材料系である。

ストークスによる分類^{18、19}では、根本原理のみを追求する基礎研究を「純粋基礎研究（Pure basic research、ボアの象限）」、根本原理を追求するのみならず、用途を考慮することによっても誘発された基礎研究を「用途を考慮した基礎研究（Use-inspired basic research、パスツールの象限）」と呼ぶ。本提案では、この分類における「用途を考慮した基礎研究」を「目的基礎研究」とし、「次世代のICTシステムやエネルギーシステム、医療応用などにおける高性能・高効率な革新的デバイス」を用途（実用）として設定する。本節では、量子マテリアルの分野において目的基礎研究を推進すべき材料系の代表例を示す。

（スピンフォトニクス）

固体中の電子が持つ電荷とスピンの両方を利用するスピントロニクス技術は、従来のエレクトロニクスでは実現できなかった革新的な機能や性能を持つデバイスの実現に向けた大きな期待が集まっている。特に、1990年代半ばに室温下での大きな磁気抵抗効果が発見されたことは、スピン依存伝導の研究を一層加速させ、結果として大容量ハードディスクや不揮発性メモリなどの実用化につながった。また、電子のスピン角運動量の流れであるスピン流は、従来の電荷の流れを介さずに情報を運ぶことができるため、スピンFET（スピン注入型トランジスタ）など、エネルギー効率の高いデバイスの実現が期待されている。しかし、現状のスピントロニクス技術は、スピンの制御に電荷を利用しており、究極の省エネルギーには至っていない。

そこで、光の照射によりスピン流を生成するとともに、量子センシング技術等で微弱なスピン流を高精度で検出・読み取ることを目指すスピンフォトニクスが注目されている。磁性体内の電子とフェムト秒レーザーや円偏光との相互作用を利用すれば、室温かつ超高速でスピン流を生成し、その伝搬方向を自在に制御できる。こうした基盤技術を活用することで、スピン流を増幅しながら高精度で読み取ることが可能となり、超高速光メモリや超低消費電力デバイスの開発につながると期待されている。実際、界面におけるスピン軌道相互作用を適切に利用することでスピン流の減衰を抑え、より長距離にわたって安定して伝搬させる技術も研究が進んでおり、次世代の情報通信技術の基盤となることが大いに期待されている。

スピンフォトニクスの実用化には、いくつかの課題が存在する。まず、スピン流を効率的に生成・伝搬させ、かつ高感度で検出する必要がある。そのためには、界面におけるスピン流の物性を正確に理解し、精密に制御することが不可欠である。スピン流は磁性体と非磁性体の界面を通る際に、わずかな欠陥や不均一性によって散逸や減衰を起こしやすく、スピンホール効果やスピンポンピング効果などの量子力学的な現象も界面の状態に大きく依存する。そのため、界面の構造や電子状態を詳細に解析し、スピン流が損失なく伝わる最適な条件を突き止めることが重要である。また、スピンと光子の結合を計測・制御する技術開発も不可欠であり、量子センシング技術を活用した微弱なスピン流の高精度検出手法など、要素技術のさらなる高度化が求められる。

（非エルミート系）

量子力学においては、観測が可能な孤立系の物理量（オブザーバブル）に対応する演算子はエルミート演算子で表されるが、開放系やエネルギーロス/エネルギーゲインのある系においては、系はエルミートではないエネルギー演算子（非エルミートハミルトニアン）を持ち、そのエネルギー固有値が一般には複素数となる。しかし、ハミルトニアンが非エルミートであっても、PT反転対称性（時間反転と同時に空間反転を行うと同じ状態になる対称性）を持つ場合、固有値は実数となり、その状態の近くで多くの興味深い性質を示すことも予測されている。光学系の場合、電子系よりも利得（ゲイン）と損失（ロス）を調整することが容易なため、

18 Donald E. Stokes (1997), "Pasteur's Quadrant - Basic Science and Technological Innovation", Brookings Institution Press

19 https://www.mext.go.jp/b_menu/shingi/chousa/shinkou/036/attach/1348514.htm（2025年3月6日時点）

非エルミートかつPT対称性を持つ系の研究に非常に適している。非エルミート性を活用した高効率なレーザーや高感度センサなどの、具体的な用途の開拓も進んでいる。また、光のメタマテリアルにトポロジ概念を取り入れたトポロジカルフォトンクスが近年注目を集めつつあるが、ここに非エルミートの考えを加えた、トポロジカル導波路やトポロジカルレーザといった新しい展開も始まっている。

非エルミート系光学材料の実用化には、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2共振器系における共振器のモード周波数を調整したり、任意のモードの間の結合を制御可能にしたりする素子の構造や機構の開発をさらに進める必要がある。また、フォトンクスへ幅広く応用していくためには、集積素子化も重要である。さらには、光以外の振動系（機械振動、音響）への非エルミート展開も模索され始めているため、非エルミートアコースティクスを使った（音が障害物を避けて移動できる）非エルミート系防音壁、非エルミートメカニクスを使った（地震の影響を最小限に抑えるための）非エルミート系耐震構造物といった最適材料設計に関する研究開発が特に重要である。

（モアレ超格子）

2004年のグラフェンの発見²⁰を契機として、二次元物質探索のブームが巻き起こった。TMDCなどの、vdW力で結合した層状物質から剥離する方法などで、原子層レベルの厚みを持つ多くの種類の二次元物質が発見されている。その後、2018年に単層グラフェン2枚の角度を少しずつ積層することで、超伝導が発現することが発見された²¹ことにより、二次元物質の研究開発は新たなフェーズを迎えることになった。二次元物質そのものが持つ物性のバリエーションに加え、積層する二次元物質の組み合わせや、それらを積層する角度という新しい制御パラメーターが加わったことで、新物質・物性探索空間は飛躍的に拡大することになったのである。二次元物質の積層角度の正接（タンジェント）を無理数にすることで簡単に非周期構造やモアレ構造を実現でき、電子構造の対称性やそれが生み出す物性を自在に制御することが可能になっている。こうして見つかった新たな現象の応用にむけた様々な試みが、現在も活発に続けられており、材料科学の一つのフロンティアとなっている。

モアレ超格子の実用化には、高度な計測技術や精緻なシミュレーション技術の開発が不可欠である。さらに、高結晶性を有するウェハーの合成や、精密な積層技術の革新も求められている。

（トポロジカル反強磁性体）

トポロジカル物質は、その特異な位相幾何学的性質と電子状態により、様々な種類に分類される。中でも代表的なものには、トポロジカル絶縁体、トポロジカル超伝導体、ワイル半金属、ディラック半金属、そしてトポロジカル反強磁性体がある。トポロジカル絶縁体は、バルクが絶縁体ながら表面に金属的伝導路を持ち、スピン依存の電気伝導を示すことからスピントロニクスの応用が期待される。トポロジカル超伝導体は、特異なエッジ状態としてマヨラナ粒子を有し、量子コンピューティングへの展開が見込まれている。また、ワイル半金属とディラック半金属は、それぞれワイルフェルミオンやディラックフェルミオンとして知られる特殊な準粒子を含み、異常ホール効果などの特異な現象を示す。

こうしたトポロジカル物質のなかで特に注目されるのがトポロジカル反強磁性体である。トポロジカル反強磁性体は、反強磁性の特性とトポロジカルな電子状態を兼ね備えており、全体としての磁気モーメントがゼロになるため、外部磁場や温度揺らぎに対して非常に安定である。この安定性は、デバイスの信頼性を向上させ、スピン依存の電流を高効率で制御することが可能である。スピントロニクスの分野において、この特性は低消費電力で高い動作速度を実現するエレクトロニクスデバイスの基礎技術となりうる。このため、次世代の

20 K. S. Novoselov et al. : Science 306, 666 (2004)

21 Y. Cao et al. : Nature 556, 43 (2018)

メモリデバイスやロジック回路の実現が期待される。

トポロジカル反強磁性体の目的基礎研究として次の課題が存在する。まず、適切な材料選択と特性最適化が必要であり、高品質な単結晶の合成技術およびスケーラブルな製造プロセスの開発が不可欠である。また、トポロジカル状態のカスタマイズや特定応用に適した特性の制御方法を確立することも求められる。さらに、デバイス設計においては、スピン構造や電気的特性の集積回路への効果的な実装が鍵となり、他の電子材料との相互作用や製造プロセスに伴う特性劣化の防止策を講じる必要がある。これらの課題を克服することで、トポロジカル反強磁性体は新たな電子技術の革新的基盤となるだろう。

以上の4つ以外にも、水素の自由度を従来のエレクトロニクスにカップリングさせて用いるプロトニクス材料、量子マテリアルの触媒への応用可能性を示す量子触媒、分子中の電子スピンを量子ビットとして用いる分子量子ビット、近年発見された第3の磁性体である交代磁性体など、近年になって新奇物性を示す量子マテリアルが現われてきており、これらについても本提言の量子マテリアルに含め、実用化を目指した目的基礎研究の推進することが必要である。

3.2 量子状態を精密に計測・制御するための基盤技術の開発 (活用基盤技術)

前節で述べた材料系の物性を詳細に理解し、新規機能を発現するデバイスとして実証するためには、量子状態を精密に計測・制御するための基盤技術の開発が不可欠である。そのために必要な研究開発課題を本節で述べる。まず、「様々な量子パラメーターの計測技術（3.2.1）」は、量子マテリアルの電荷・スピン・軌道などの複雑な量子状態を正確に把握するための基盤技術である。次に、「量子状態を推定するシミュレーション技術（3.2.2）」の開発は、こうした計測によって得られた実験データを理論的に再現・予測することで、新たな量子状態・機能を見出すための強力な設計指針が作成可能となる。これらの計測・シミュレーションを実際に活かすためには、「量子状態の計測・評価を可能にする高品質材料合成・基板作製技術（3.2.3）」が不可欠である。量子マテリアルの純度や均一性が不十分であれば、高度な計測やシミュレーションを用いても理想的な量子状態を評価・実装することは困難である。こうして得られた高品質な量子マテリアルを活用する「特異な量子状態を発現・制御する技術（3.2.4）」により、メタマテリアルやモアレ構造などの人工的な仕組みを組み合わせることで、従来にはなかった新奇物性を意図的に実現・制御する道筋が拓かれる。一方、量子状態はプロセス技術によるダメージや欠陥に対して非常にデリケートであるため、「特異な量子状態を保持できるプロセス技術の開発（3.2.5）」が不可欠である。リソグラフィや成膜、エッチングといった微細加工プロセス全般を通じて、量子状態を損なわない低ダメージ技術の確立が求められる。そして最終的に、開発した技術を応用に結びつけるためには、「実環境での動作を可能とする技術の開発（3.2.6）」が鍵となる。室温や常圧といった実用的な環境下でも量子マテリアルが安定して機能するためには、ノイズ低減技術や小型冷却技術、欠陥制御技術など幅広い周辺技術との連携が不可欠である。

3.2.1 様々な量子パラメーターの計測技術の開発

異なる空間・時間スケールに跨ったマルチモード計測や、原子スケールの微視的変数と巨視的機能との関連性の解明、希釈冷凍機のような超低温でしか得られない究極の分光エネルギー分解能での測定などが重要である。このため、電子の持つ電荷、スピン、軌道といった性質の複雑な絡み合いで発現する機能の解明と応用に向けて、複合極限場（極低温場・高磁場・極高真空場）からなる測定環境の制御やそれに基づく機

能発現の模擬等によって、量子パラメーター計測技術の高度化、特にその場・オペランド計測技術の開発が鍵を握っている。

ARPES、X線磁気円二色性（X-ray Magnetic Circular Dichroism：XMCD）、共鳴非弾性X線散乱（Resonant Inelastic X-ray Scattering：RIXS）等の放射線X線分光においては、近年、実デバイス計測などの応用研究への展開を見据えた顕微化が世界的に進められ、空間分解能はサブmmから $\mu\text{m} \cdot \text{nm}$ へと飛躍的に向上している。分光のエネルギー分解能も著しく向上するとともに、数フェムト秒の超短パルスX線自由電子レーザー（X-ray Free Electron Laser：XFEL）を用いた高い時間分解能も達成されており、RIXSによる低エネルギーの電荷・スピン・軌道励起の観測、XMCDを用いた磁区、スピン流、スピン・軌道流の可視化などが期待される。また、このような技術進展との相性も良い電流・電圧を印加しながらの計測技術の高度化が求められ、例えばARPESではこれまで禁忌とされてきた磁場印加下の計測によって、デバイス動作時の量子状態変化の可視化と、それに基づく新デバイスの原理検証と構造最適化が重要になってくる。一方、中性子線による散乱分光については、量子スピン系の構造とダイナミクスの双方の情報に同時にアクセスできる中性子非弾性散乱や偏極中性子散乱などが有効である。今後、測定範囲の拡大、測定精度の向上のための中性子源・計測技術、従来観測が難しかった微小・微量試料、表面状態、極端な複合極限場での臨界現象の観測に向けた技術の開発が重要になってくる。

超高分解能ナノ・オペランド計測が可能な走査型プローブ顕微鏡（Scanning Probe Microscopy：SPM）として、走査トンネル顕微鏡（Scanning Tunneling Microscope：STM）、原子間力顕微鏡（Atomic Force Microscope：AFM）、及び10 mKで動作する希釈冷凍機内の磁気輸送のオペランド計測機能を備え、 μeV トンネル分解能を達成するマルチモードSPMが2020年に開発されている。今後、電子スピン共鳴等の新しい走査型プローブ顕微鏡モジュールが組み込まれ、この技術により、デバイスの動作条件を模倣した環境下での構造変化ダイナミクスの検討が進むと期待される。透過型電子顕微鏡（Transmission Electron Microscopy：TEM）を用いたオペランド観察では、vdWヘテロ構造における層間積層角の制御が結晶対称性を工学的に制御し、新しい機能性を付与することが可能となっている。TEMの原子レベル空間分解能を利用したナノスケール電子状態マイクロコピーの研究が進み、強相関電子材料における創発現象の発見、さらには次世代のメモリ素子への応用への展開が不可欠である。

このようなその場・オペランド計測技術の開発においては、データ科学やAIが果たす役割がますます重要で、特に、高分解能計測技術が生成するビッグデータを効率的かつ精度高く解析するために、機械学習や統計モデリングといったデータ科学的手法の更なる活用が必要である。

3.2.2 量子状態を推定するシミュレーション技術の開発

モデリング・シミュレーションの方法やその状況は対象により大きく異なる。例えば、非エルミートフォトンクス・プラズモニクスでは、有効ハミルニアンや結合モード方程式、もしくは有限要素法を用いた電磁界シミュレーションによる数値シミュレーションが比較的容易であり、実験結果ともよく一致することから、機能実証・設計までを見据えたシミュレーション研究が可能である²²。また、トポロジカル反強磁性体においても、スイッチング等の磁気構造ダイナミクスは、有効ハミルニアンやそれを用いたLandau-Lifshitz-Gilbert（LLG）方程式による数値シミュレーションによる解析が可能である²³。これらに利用するパラメーターは、クラスター多極子理論を組み合わせた第一原理計算から抽出することができ²⁴、これは新規反強磁性体の探索や

22 H. Meng et al. : arXiv : 2310.16699 (2023)

23 A. Shukla et al. : arXiv : 2402.01977 (2024)

24 X. Chen et al. : Nature 613, 490 (2023)

設計にも有用な手法となっている。磁気デバイス応用に重要なトンネル磁気抵抗の解析には、第一原理計算に基づいた輸送特性の計算が必要であるが、ノンコリニアスピンに対応した第一原理計算コードが複数整備されている。今後は、より大規模で現実的なデバイス構造への展開が望まれる。一方で、ツイスト積層物質では、積層が引き起こす構造緩和が特性を決める上で重要であるものの、構成原子数の多さが、層の種類・数・角度等の多様性と相まって、第一原理計算による取り扱いを困難にしている²⁵。既存の効率的な手法との組み合わせも含め、精度を担保したより効率的に原子構造および電子状態を計算できる手法の開発が望まれる。さらに、これらの結果に基づき、それぞれの応用に合わせた特性（超伝導やモアレ励起子など）を高精度に計算する必要がある。このように、対象に合わせた手法の選択や開発・発展が必要である。

3.2.3 量子状態の計測・評価を可能にする高品質材料合成・基板作製技術の開発

量子マテリアルを活用していくためには、量子マテリアルの持つ量子状態や機能性を確実に計測・評価できる高品質な材料の合成・成長技術の研究開発が不可欠である。また、量子マテリアルの機能性を活用したデバイスの試作が可能な大きさと品質の基板の作製技術の開発も重要である。例えば、放射光、量子ビーム、ARPESなどの材料そのものの評価には数 μm から数百 μm 程度の均一な領域が存在すれば評価は可能であるが、ホール計測などの電気的特性による評価の場合には、電極構造などの作製が必要であり、この場合には数百 μm 程度以上の均一な材料の合成が必要になる。また、デバイスによる特性評価の場合には、単体デバイスの試作においてもリソグラフィ、成膜、エッチングなどの何段階もの作製プロセスを経ていく必要があるため、少なくとも数 cm 程度の基板を準備しておく必要がある。

単結晶材料の合成・成長に使われる一般的な手法としては、固相成長（固相反応、ゾルゲル）、液相成長（チョコラルスキー（CZ）法、フローティングゾーン（FZ）法、ブリッジマン法、フラックス法、TSSG（Top-Seeded Solution Growth）法、水熱合成法）、気相成長（昇華法、HVPE（Hydride Vapor Phase Epitaxy）、化学気相成長（Chemical Vapor Deposition：CVD）、原子層堆積法（Atomic Layer Deposition：ALD）、真空中での成長（スパッタ、分子線エピタキシー（Molecular Beam Epitaxy：MBE））などの方法があり、それぞれの量子マテリアルに適した合成法を選択して不純物除去、点欠陥や転移などの抑制などにより高品質化の技術を開発することが重要である。例えば、原子層物質（二次元物質）の代表であるグラフェンは、粘着テープを使ってグラファイトからの剥離と他の基板への転写により形成することができる。また最近ではサファイア基板にCu（111）をエピタキシャル成長させ、その上に単層グラフェンを成長させる方法で4インチ基板も形成できるようになっている²⁶。また、 MoS_2 や WSe_2 のようなTMDCの二次元薄膜においては、スパッタ法などで簡便にSi基板上などに成膜してアニール処理で単結晶領域を広げる手法も行われている。hBN上にCVDやALDによるvdWエピタキシーで二次元薄膜を形成する手法の確立も期待される。その他の量子マテリアルの合成・成長についても、それぞれの材料に適し、単結晶領域が広く、欠陥の少ない高品質な領域が得られる手法の開発が不可欠である。

高品質な基板の作製技術として、転写技術の開発も重要である。例えば、高品質な二次元薄膜基板の作製方法としては、原子層レベルの平坦性を持つ絶縁体のhBN基板上にグラフェンやTMDCを転写する方法が行われている。転写には、原子層を剥離する技術と、別の基板に接着させる技術が必要になるが、それぞれの過程で量子状態を劣化させる不純物の付着が無いように、クリーンな環境での実施が必要である。この転写を高速かつ確実に行うためにはロボットシステムによる自動化が望まれる。

ダイヤモンドNVCやシリコン中の電子スピンを利用したシリコン量子コンピュータにおいては、異なる核ス

25 X. Sun et al. : Chemical Reviews 124, 1992 (2024)

26 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」(CRDS-FY2024-WR-06) (2024年12月)

ピンを持つ同位体の影響が量子状態を劣化させたりすることから、同位体制御も重要になる。同位体の少ない高純度の原料を用いた材料合成や基板作製方法についての研究開発も望まれる。

3.2.4 特異な量子状態を発現・制御する技術の開発

自然界に存在する量子マテリアルだけでなく、人工的な構造により特異な量子状態を顕在化させ新たな機能を持つメタマテリアルの研究開発も重要である。例えば、古くは電子系において、半導体の周期構造（超格子構造）により伝導体や価電子帯にミニバンドを形成して、負性抵抗特性やミニバンド間光吸収、ミニバンド間の発光などが実現されている。また、屈折率の異なる材料（半導体、絶縁体）を周期的に配列したフォトリソニック結晶により、光の特異な屈折特性を実現したり、特定の波長のみを伝搬させたりすることができている。また、最近では金属や誘電体の周期構造を二次元的に配置したメタサーフェスの研究が盛んになっており、光や電波の集光、特異な方向への反射などを起こすことも可能になっている²⁷。このような人工構造で特異な量子状態・機能を発現させるメタマテリアルについては、電子、光、電波だけでなく、フォノン、スピンなど他の量子系への展開が望まれる。これには、人工的な構造の導入による特異な量子状態の理論的な予測、人工的な構造と量子状態・機能のデータベース化、モデル化・シミュレーション技術、制御技術などの研究開発も必要である。また、特異な量子状態が発現する空間スケールや時間スケールの拡張、量子状態・機能性の顕在化、複数の量子状態の融合による新たな機能の創出などに関する研究開発も重要であり、JSPS 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」（2024～2028年度）²⁸の研究者との連携、得られた成果の活用なども重要になる。

さらに、二次元物質の原子層を回転して積層することで現れるモアレ構造は、超電導など様々な特異な物性を示すことができ、これも人工的に作り出せるメタマテリアルの一種と考えることもできる。ここでは、重ね合わせる原子層の種類、重ね合わせ角度（ツイスト角）、積層の層数など非常に多くの組み合わせが可能であり、新たな量子状態・機能性を生み出すことが期待されている²⁹。どのような特性が表れるかは基礎研究として現在進められているが、このような興味深い特性を工学的に利用できるようにするためには、原子層の剥離から転写・積層までの安定的なプロセスの開発、所望のツイスト角で安定化する手法の開発、特性の予測が可能なシミュレーションツールの開発などが必要になる。

3.2.5 特異な量子状態を保持できるプロセス技術の開発

特異な量子状態・機能を有する量子マテリアルのバルク材料や基板を用いて、評価用の試料構造、デバイス構造を作製する過程で、その材料の持つ特異な量子状態を保ったままにすることが不可欠である。しかし、プロセス中の熱や応力、高エネルギーのフォトンや荷電粒子、不純物の付着や注入などによる材料への欠陥の導入、結晶構造変化などのダメージにより、特異な量子状態が弱くなったり失われたりすることが懸念される。このため、量子状態を保持できるリソグラフィ技術、成膜技術、エッチング技術などの低ダメージのプロセス技術の開発を行う。

リソグラフィ技術には光学露光（フォトリソグラフィ）、極端紫外線リソグラフィ（Extreme Ultraviolet Lithography：EUV）、ナノインプリントリソグラフィ（Nanoimprint Lithography：NIL）、電子線露光

27 科学技術未来戦略ワークショップ報告書「次世代通信技術の高度化に向けた無線・光融合基盤技術」（CRDS-FY2021-WR-07）（2022年2月）

28 <https://chimera-qp.ee.es.osaka-u.ac.jp>（2025年3月6日時点）

29 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」（CRDS-FY2024-WR-06）（2024年12月）

などがある。ミクロンレベルのパターン描画する光学露光ではほとんど量子マテリアルへのダメージはないと思われるが、ナノレベルのパターンを形成できるEUV、NIL、電子線露光では、それぞれ極端紫外線、熱、電子線によるダメージが生じる可能性があり、ダメージを生じない適切なリソグラフィ技術の選択が重要である。

絶縁膜や金属膜の成膜技術には、蒸着法、スパッタ法、CVD法、MBE法、ALD法など様々な種類があるが、量子マテリアルが直接的に高エネルギーのプラズマやイオン、反応性の原料ガスにさらされないことや、構造変化を起こすような高い基板温度にしない成膜手法の開発が望まれる。

エッチング技術はウェットエッチング、ドライエッチングに大別されるが、エッチング液や分子・ラジカルとの化学的な反応や、物理的にイオンや中性原子の照射により材料を削るものであり、最も量子マテリアルへのダメージが懸念されるプロセスである。ウェットエッチングでは物理的なダメージはほとんどないが、等方性・異方性、残留不純物の影響などを考慮したエッチング液の選択が必要である。ドライエッチングのプラズマエッチング、イオンビームエッチングでは材料への大きなダメージが懸念される。材料への物理的なダメージが少ないエッチング手法として、ラジカルエッチング、原子層エッチング（Atomic Layer Etching：ALE）が注目されており、量子マテリアルに適したエッチング手法と原料ガスの選択が求められる。

プロセス技術としては、上記の他にも拡散やイオン注入による不純物導入、金属膜の成膜による低抵抗オーミック接合形成や、不純物活性化のための熱処理（アニーリング）などもあるので、これらも含めたプロセス全体で量子マテリアルの量子状態が保てる技術を注意深く開発していく必要がある。

3.2.6 実環境での動作を可能とする技術の開発

一般的に、材料中で現れる量子状態はきわめて繊細である。この特性は、熱雑音や電磁ノイズなど外部環境からの影響に対して脆弱であり、容易に有用な量子状態が乱される。そのため、量子マテリアルの物性研究においては、この不安定性を抑えるために、大型の希釈冷凍機を用いて10ミリケルビン以下の極低温環境を整えることが一般的である。このような極低温環境は、量子現象を比較的安定的に観測するために不可欠であり、基礎研究の重要な基盤となっている。

しかしながら、量子マテリアルを実際に応用へと展開するためには、動作原理上、極低温が必要な場合を除き室温動作や標準的な圧力条件下での安定性向上が欠かせない。この課題を克服するには、以下のような多岐にわたる技術開発が求められる。

まず、量子マテリアルの安定性向上のために、結晶欠陥の精密な制御が必要である。結晶内の欠陥は量子状態に大きな影響を及ぼす主要因であり、その制御技術の進展は、量子状態の持続性を向上させる大きな鍵となる。また、安定性をさらに強化するためには、精密に設計されたナノ構造の導入や、クロストークや相互干渉を抑制する洗練された回路設計が重要である。加えて、量子状態を外部のノイズから保護するための環境ノイズ低減技術や、極低温環境を小型で実現する革新的な冷却技術の開発も不可欠である。

次に、スケーラブルな製造プロセスの確立は、応用展開に向けたもう一つの重要課題である。量子マテリアルの多くはナノスケールでの精密な制御を必要とするため、製造プロセスには極めて高い精度が求められる。特に、大量生産や製品間の均一性を保証することは依然として大きな挑戦である。この課題に対応するため、CVDやMBEといった既存技術のさらなる改良が進められているほか、より効率的で高精度な新しい合成手法の開発が期待されている。

さらに、量子物性を実環境下で正確に計測・制御する技術の確立も、今後の飛躍的な進展を支える鍵となる。たとえば、量子スピンや量子位相を長時間にわたり安定的に保持する技術は、量子マテリアルの応用における中核的な要素である。

3.3 新規機能を実証する評価デバイスの開発（新規機能実証）

目的基礎研究（3.1）と活用基盤技術（3.2）の相互連携により見出した量子マテリアルの新奇物性を迅速に社会実装へ繋げるためには、基本的な動作原理が確認された段階で、新規機能の実証を目的とした評価デバイスの作製が必要である。汎用的なICTデバイスやエネルギーデバイスなど幅広い応用を考えた場合には、研究開発フェーズからより実用に近い開発フェーズに移行する必要がある、適切な評価デバイスでの性能試験は必須である。本節では、この目的に必要な項目について述べる。

3.3.1 客観的なベンチマークの設定

量子マテリアルのデバイスの用途は、既存のデバイスの用途・市場に対し、量子マテリアルデバイスの持つ利点（精度・速度・サイズ・消費電力などのデバイス性能、信頼性、寿命など）を活用して置き換えを目指すことになる。この場合、すでにその市場を占めている既存技術によるデバイスと公平に比較できるデータを提供する必要がある。可能性実証の段階では、自らのデバイスが優位を持つ性能のみを強調することも見られるが、機能性実証のフェーズにおいては、既存デバイスと比べてに劣る点を含め、実使用において重要な性質を比較可能な形で提示することが望ましい。このような客観的なベンチマークは、開発中の技術の価値を損なうものではなく、むしろ、今後必要となる開発課題を早期に明らかにする上で開発者自身にとって有益であり、現在から将来にわたってのデバイスメーカーなどの協業者の共感をえるためにも良い影響を与える。

既存技術との比較において、もう一つ重要な点は、既存技術によるデバイスの性能が年々向上していくことを認識することである。開発中のデバイスの上市時期を大まかに設定できた時点で、既存デバイスの性能を比較対象として考慮しなければならない。かつてSi CMOSの市場参入や置き換えを目指した多くの技術のように、競合技術の将来性を正しく推定できない限り、量子マテリアルの新興技術が市場で成功を収めるのは難しい。

3.3.2 実環境における機能性の評価

新奇物性の発見や新規デバイスの動作原理確認のためには、それらが明確に観察できるような特殊な環境や条件の下で実験を行うことも多い。初期段階の原理確認には、極低温・高真空・超高圧・超高磁場、またはそれらを組み合わせた特殊な環境が許容される。しかし、将来的に量産品のデバイスとして利用されることを目指す場合、評価の段階で特殊な実験環境を必要としない設計が必要である。評価デバイスは、開発者自身による安定動作要件、信頼性、性能限界の確認・改良に用いられるだけではない。開発がある程度進んだ段階では、他の機関に所属する研究者や開発者にユーザーとしてのデバイス評価や、自分たちで開発しない周辺技術の開発を担当してもらう場合もあり、そうした外部の研究者や開発者へのエンジニアリングサンプルとしても利用される可能性がある。デバイスの技術成熟度レベル（Technology Readiness Level：TRL）を迅速に向上させていくためには、外部の協力者にとっての利便性を高めておくことが非常に重要である。

3.3.3 製造プロセス上の重要課題の特定と解決策の提示

製品化の流れの中で、調達や製造プロセスにおける大きな問題が原因で、市場投入が断念されるケースが多い。製品開発は、企業がリスクを取って実施することが必然ではあるが、実際にプロセス開発を進めて初めて明らかになる問題も多い。しかし、初期の段階でも予見可能な問題も存在する。たとえば、CMOS LSIプロセスに組み込まれることを想定したデバイスの場合、大面積成膜が可能なこと、パターン形成のための

エッチング手段が存在すること、LSI プロセスの温度や処理に耐えられることなどが重要な要件となる。評価デバイスを作製する段階で、想定されるすべての性能をクリアしている必要はないが、将来的にはこれらの要件をクリアすることが求められる点を念頭に置き、解決策を検討することが重要である。また、製造プロセス上の問題だけでなく、使用している原料の調達が将来的に難しくならないことにも留意する必要がある。研究段階で必要な量の原料であれば入手に困難はないかもしれないが、各種デバイス向けで量産化される段階になると、調達上の問題が生じる可能性もある。特に、既存デバイスやプロセスで使われていない材料を使用する場合、この点を十分に考慮する必要がある。

アカデミアにおけるデバイス研究は、性能のトップデータを目指すことに注力する傾向があり、上記のような視点を持つことは一般的ではないかもしれない。しかし、量子マテリアルを用いたデバイスの研究開発を加速し、イノベーションを実現するためには、基礎研究の段階から将来必要になる点を意識することが重要である。性能的には最善のものには及ばない場合であっても、上記の視点から見た際に最適となる別の材料や技術がその周辺に存在する可能性についても、比較的早い段階から注目することが、将来の量子マテリアルの実用化には必要となる。

3

具体的な研究開発課題

4 | 研究開発の推進方法および時間軸

4.1 「量子マテリアル活用R&D」の推進方法

第3章で述べた研究開発課題を効率的に推進するため、「量子マテリアル活用R&D」体制の構築を提案する。これは、目的基礎研究・活用基盤技術・新規機能実証を一気通貫で推進する体制を意味する。具体的には、産業とアカデミアが密接に連携した量子マテリアル活用R&D体制の構築（4.1.1）、海外との連携（4.1.2）、人材育成（4.1.3）を推進する。これにより、目的基礎研究と活用基盤技術が相互に課題を共有し、新規機能を実証する評価デバイスの創出を目指す。図4-1に量子マテリアル活用R&D体制の全体像を示す。

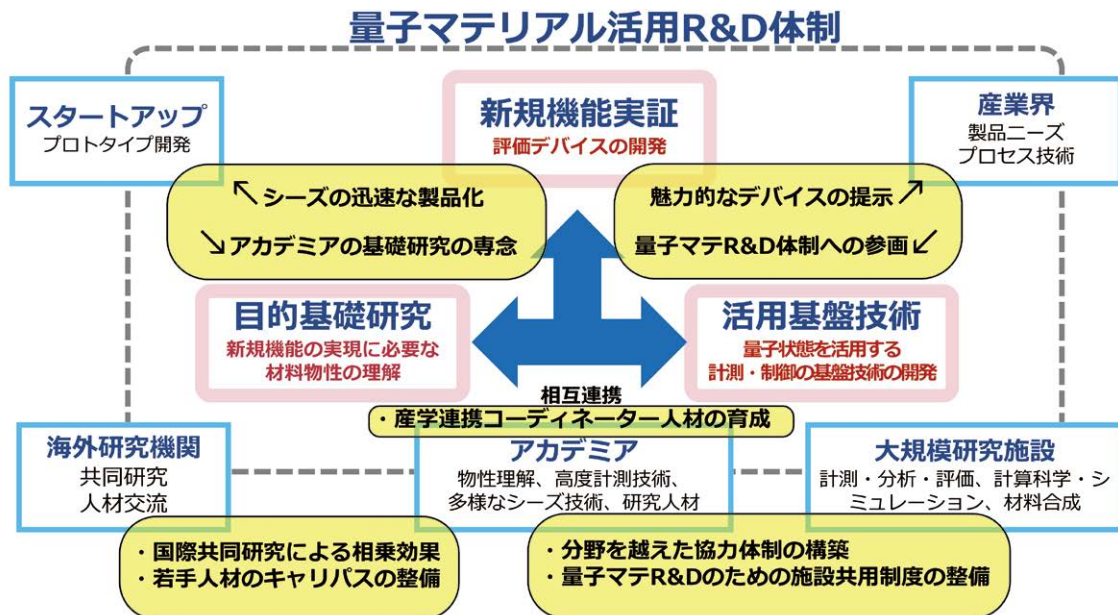


図4-1 量子マテリアル活用R&D体制の全体像

4.1.1 産業界とアカデミアが密に連携した量子マテリアル活用R&D体制の構築

量子マテリアルの社会実装、そのための新規機能実証には産業界とアカデミアの密な連携による基礎研究から応用研究までの一気通貫型の研究体制の構築が求められる。これには次の3つの取り組みが必要である。

◆ 産業界とアカデミアによる新規機能実証に向けた共通の目標の設定

量子マテリアル活用R&D体制を構築するためには、基礎研究の段階から産業界とアカデミアが協力し、アカデミアは産業界のニーズを十分に理解し、産業界はアカデミアのシーズを的確に把握することで、双方に利益をもたらす目標を設定することが必要である。また、アカデミアのシーズを的確に評価し、産業界のニーズと結びつける「目利き」としてのコーディネーターが必要である。本体制を構築する際、政策立案者はコーディネーターの意見を参考にしながら、産業界が量子マテリアルに期待する新規機能について詳細に調査することが重要である。

◆ 目的基礎研究と活用基盤技術の相互連携

現在、量子マテリアルの基礎研究は、主にJSPS 科研費の支援を受けて実施されている。これらの研究は、研究者の好奇心に基づくキュリオシティ・ドリブンのアプローチによって、新たな発見やアイデアの創出に貢献してきた。しかし、これらの成果を社会実装に繋げるためには、課題解決型の研究へと発展させる必要がある。また、量子マテリアル活用 R&D の推進には、目的基礎研究とそれを支える活用基盤技術との密接な連携が不可欠である。このため、JST 戦略的創造研究事業などのチーム型の研究プログラムの活用が適している。これにより、量子マテリアルの純粋基礎研究に携わる研究者、合成技術、計測技術、計算科学などを専門とする研究者が連携し、アカデミアと国立研究機関（国研）が情報を共有しながら量子マテリアルの応用研究を強化することが可能となる。また、活用基盤技術に必要な大型の研究施設（SPRING-8、NanoTerasu、J-PARC 等）を利用するために、量子マテリアル活用 R&D のための使用時間を確保するなど、大規模施設を優先的に活用できる制度の整備が必要である。このような分野を越えた協力体制を築くことで、新規機能を実証する評価デバイスを作製し、結果として量子マテリアルの魅力が産業界に広く認識され、産業界との連携の促進が期待される。

◆ 新規機能実証による材料開発企業の参画とスタートアップ企業の支援

量子マテリアル活用 R&D 体制への産業界の参画は、量子マテリアルの新規機能実証を進める上で重要である。この取り組みには、産学連携や異分野融合を通じて、評価デバイスをプロトタイプの製作まで昇華させることが求められる。このためには、デバイスの量産化を視野に入れた研究開発が必要であるが、これをアカデミアや国研だけで実現することは困難であり、産業界の積極的な関与が必要である。

材料開発企業は、高品質な素材の供給や製造プロセスの大規模なスケールアップにおいて重要な役割を果たす。材料開発企業が量子マテリアル活用 R&D 体制に参画することを促進するためには、経済産業省や内閣府などのTRL の高い研究プロジェクトの支援が有効である。加えて、産業界の関心を引きつけるために、産業界からの参加者が多い学術集会（応用物理学会など）においてシンポジウムなどを開催し、量子マテリアルの具体的な価値の提案や実用可能な技術を提示する場を設けることが有効である。

量子マテリアルを活用するスタートアップは、アカデミアや国研が生み出した新技術を迅速に製品化し、実証実験から市場展開まで柔軟に対応できる重要な存在である。また、これによりアカデミアが基礎研究に専念できる環境を整える役割も果たしている。スタートアップを支援するためには、政策的支援によるリスク軽減のほか、経営を担う人材の確保や生産体制の構築といった実務面が不可欠である。新たな量子マテリアルを市場に投入する際には、既存技術に対する優位性や生産能力を示すデータを基盤とし、綿密なマーケティング戦略を立てることが求められる。また、市場シェア拡大を目的とした知的財産戦略を策定することも重要である。これらの戦略について専門性を持つ人材は、例えばNEDOが実施する大学発スタートアップ向け経営人材確保支援事業を活用し確保することも有効であろう。

4.1.2 量子マテリアル活用 R&D 体制における海外との連携

量子マテリアル活用 R&D 体制における海外との連携を推進するにあたっては、トポロジカル反強磁性体やモアレ超格子など日本が優位性を持つ研究・技術を明確にすることで、相互補完的な技術を有する海外機関との連携や、海外の優秀な人材と共に、応用に向けた研究開発力を強化することが重要である。国内の人材育成が急務であるが、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必要となる。現在、JST ASPIRE を通じて多くの量子マテリアルの研究課題が採択されているが、今後も、国際共同研究プロジェクトをさらに推進することは重要である。海外の研究機関や企業と共同で研究プロジェクトを立ち上げ、人的交流や情報交換を促進することが望ましい。量子マテリアルの研究分野は、理論・実験・計測・計算など、多岐にわたる分野を統合する必要があるため、国際的な共同研究は、異なる専門性を持つ研究者が集結し、

相乗効果を生み出す上で有効な手段となる。

また、国際ワークショップやシンポジウムを定期的に日本で開催することも重要である。量子マテリアルの最新の研究成果や技術動向を共有する場を設けることで、日本を中心とした国際的なネットワークの構築が可能となる。さらに、海外で活躍する日本人研究者との連携は、日本の量子マテリアルの研究分野を活性化の上で重要である。彼らは、海外の研究機関で培った経験や知識を日本に持ち帰るだけでなく、海外の研究ネットワークとの橋渡し役としても期待できる。

加えて、量子マテリアルの研究分野は競争が激化しており、世界各国の研究機関や企業が開発を加速させている。2024年6月に米国NSFが発表した研究セキュリティリスク管理の枠組み「Trusted Research Using Safeguards and Transparency (TRUST)」は、研究のオープン性を維持しながら国家安全保障上のリスクを軽減するための革新的なフレームワークであり、2025年度から量子関連分野で試験導入される予定である。海外との連携においては、米国のTRUSTのような、研究のオープン性を維持しながら国家安全保障上のリスクを軽減するフレームワークを整備し、競争と協調のバランスをうまくとることが重要である。

4.1.3 量子マテリアル活用R&D体制における人材育成

量子マテリアルの基礎研究を社会実装へと橋渡しするためには、研究成果の社会実装を進めるための産業界との連携を推進するとともに、異なる研究分野の研究者の連携を推進する「目利き」としての産学官連携コーディネーター人材が不可欠である。コーディネーター人材は、研究者と同様の専門性は必要ないが、研究者とは異なる知識や能力、研究の状況を俯瞰的かつ的確に把握し研究者を支援する能力を有すると共に、研究者との信頼関係を適切に構築できる人材が求められる。

こうした人材を育成するためには、実務として各研究機関の産学官連携組織やURA組織でのOJT教育を進める必要がある。また、企業経験を持ち必要なスキル・人脈を備えたシニアのコーディネーターの雇用の支援などにより、各研究機関の若手のURA職員が、シニアのコーディネーターによるOJT教育を通じて、新たなコーディネーターとして育成することが求められる。

特に、量子マテリアルの研究分野は、目的基礎研究から応用研究へと研究のステージへと移行させる必要があるため、従来の産学連携の支援に加えて、理論・実験・計測・計算などの異分野連携の推進が極めて重要な状況である。そのため、コーディネーター・URA人材には、異なる研究機関や海外の研究機関との連携を推進する役割が求められる。こうした状況を踏まえ、政府主導の量子マテリアルに特化した大型の研究プロジェクトにおいて、産学連携を主務とする人材を雇用することで、コーディネーター人材が育成され、量子マテリアルの社会実装の加速に繋がる。

4.2 時間軸

量子マテリアルは、従来の量子力学の枠を超えた新機能や卓越した性能が期待される多様な材料群であり、それぞれの材料系に応じて研究開発の進捗や課題も異なる。そのため、一律の時間軸に基づく研究開発戦略では、実際の進展を阻害したり、不適切な期待値が幻滅期を長引かせたりする可能性がある。

短中期的には、アカデミアが中心となって各材料系の研究開発段階に応じて目的基礎研究と活用基盤技術の開発を進め、社会実装に向けた課題を明確にし、異分野と連携しながら着実に解決していくことが不可欠である。一方で、量子マテリアルは新たな発見が連鎖的に生まれる分野であるため、固定的な時間軸にとらわれず、柔軟に戦略を見直すことも重要となる。

中長期的には、活用基盤技術の発展が進んだ材料系を選定し、期待される新機能を実現するために、TRL

の高い大規模プロジェクトを通じて、デバイスの集積化やシステム化を図り、新機能の実証を行う必要がある。この段階において、アカデミアがスタートアップを含む産業界と協働することが重要となる。

本節では、量子マテリアル分野において社会実装に向けて研究開発を推進すべき4つの代表的な材料系の研究開発ロードマップ案を示す（図4-2）。

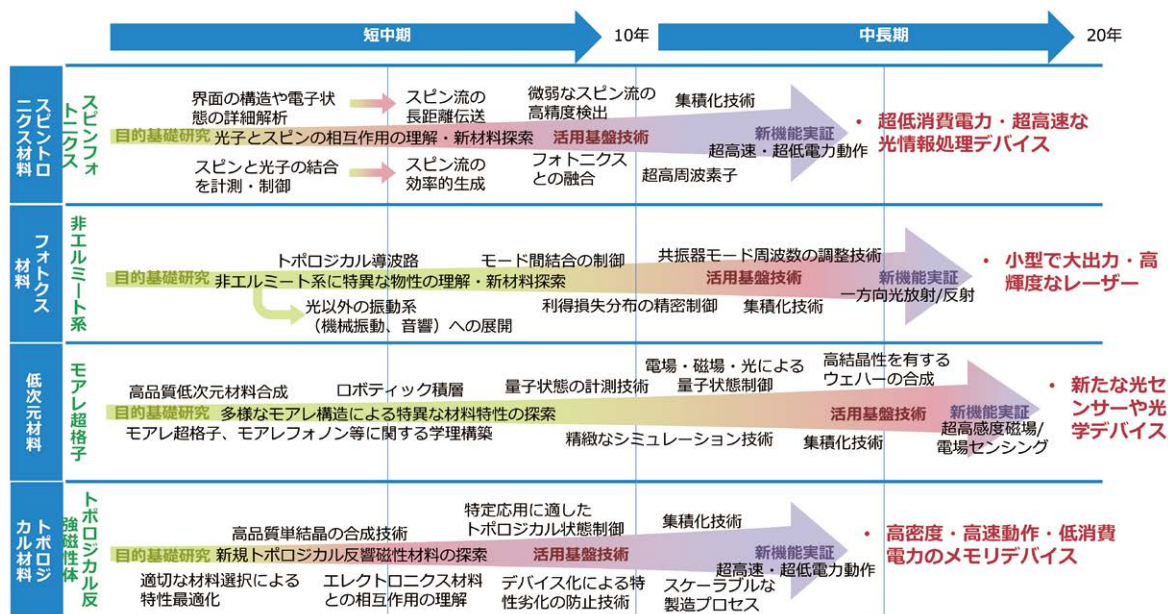


図4-2 4つの代表的な量子マテリアルを例とした研究開発ロードマップ案

（スピントロニクス）

短中期的には、光照射による効率的なスピン流の生成・長距離伝搬を目指し、界面の構造や電子状態を解析して最適条件を特定するとともに、スピンと光子の結合を計測・制御する技術を開発し、高感度なスピン流の検出を実現する。さらに、量子センシング技術等を活用し、精度の高いスピン流検出手法の確立を目指す。この分野では、スピントロニクスやフォトニクスの融合に加え、計測やデバイス製作の専門家と連携し、TRLの目標を設定した枠組みでの推進が効果的である。中長期的には、モノリシックマイクロ波集積回路や超高周波素子の進展により、超高速光メモリや超低消費電力デバイスの実現が期待されるとともに、スピントロニクスの実用化を見据え、新たなスピン流の生成・制御技術の探索を進め、研究分野の拡大を図る必要がある。

（非エルミート系）

短中期的には、トポロジカルフォトニクスに非エルミートの概念を導入することで、非エルミート性がトポロジカル特性に与える影響を理論・実験の両面から解明することが求められる。そのため、基礎研究を進めるとともに、光学系のみならず、音響や力学系など他の振動系への応用可能性も探ることが重要である。一方、中長期的には、利得と損失の分布を精密に制御し、共振器モードの周波数調整やモード間結合の最適化を実現する技術的課題を克服する必要がある。さらに、トポロジカルフォトニクスを広範なフォトニクス分野へ応用するためには、高度な集積化が不可欠であり、これにより一方向放射/反射などの次世代の光学デバイスや革新的な光制御技術の開発が加速することが期待される。

(モアレ超格子)

モアレ超格子の物性には驚異的なバリエーションがあり、これらを積層する角度や組み合わせといった新たな制御パラメーターにより、電子構造の対称性やそれに伴う物性を人工的に制御することが可能となっている。短中期的には、さまざまな二次元物質を積層することで形成されるモアレ超格子が持つ非自明な電子構造やフォノン物性、電気伝導特性を解明する必要がある。このためには、実験精度向上が目的基礎研究上の課題であり、高品質な低次元材料の合成技術とロボティクスを活用した精密な積層技術の開発が不可欠である。中長期的には、計測技術の高度化やシミュレーション技術の精緻化が重要であり、高結晶性ウェハーの合成や積層技術の革新も、二次元物質の制御を一層進展させるために必要である。

(トポロジカル反強磁性体)

トポロジカル反強磁性体に関する基礎研究の短中期的な目標は、まず適切な材料を探索し、選定することにある。材料の探索過程においてその物性を正確に評価し、期待される新規特性が実現可能であるかを見極めることが重要である。また、材料探索だけでなく、活用基盤技術の開発も進める必要がある。特に、高品質な単結晶の合成技術の確立と、エレクトロニクス材料との界面における相互作用の理解は、次世代デバイスとしての機能実証に向けて不可欠な要素となる。中長期的な展望としては、集積化を見据えたスケーラブルな製造プロセスの開発が求められる。このプロセスにより、トポロジカル反強磁性体を用いた集積デバイスを効率的に製造し、実用化に向けた道筋をつけることができる。また、トポロジカル状態のカスタマイズや特定の応用に最適な特性の制御方法の確立も重要な課題である。加えて、実際のデバイス設計においては、スピン構造や電気的特性を集積デバイスに組み込む方法が鍵となる。製造プロセスに伴う特性劣化の防止策も併せて講じることで、最終的には超高速・超低電力・超高密度メモリなどの新機能を実証することが可能になるだろう。

付録1 検討経緯

- ・JST 研究開発戦略センター（CRDS）では、令和5年度に戦略プロポーザルを作成すべきテーマの候補を、CRDS戦略スコープ2023検討委員会を経て選定し、令和5年9月に検討チームを発足させた。その後、検討チームにおいて提言作成へ向けた調査・分析・検討を重ねた。
- ・チームの活動では、調査によって国内外の研究開発動向・技術水準を明らかにしながらスコープの焦点を絞り、その過程において提言の方向性を検討するため、以下の有識者へのインタビュー・意見交換を実施した。
- ・その上で、量子マテリアルに関する研究開発に関してCRDSが構築した仮説を検証する目的で、科学技術未来戦略ワークショップを開催した（次ページ参照）。ワークショップの結果は、令和6年12月に報告書としてCRDSより発行している（CRDS-FY2024-WR-06, <https://www.jst.go.jp/crds/report/CRDS-FY2024-WR-06.html>）。
- ・CRDSでは以上の調査・分析の結果と、ワークショップにおける議論などを踏まえて、令和7年3月に本提案を発行するに至った。

○インタビュー・意見交換を実施した識者（敬称略、所属・役職は実施時点）

吾郷 浩樹	九州大学 総合理工学研究院・教授
石坂 香子	東京大学 大学院工学系研究科・教授
岩澤 英明	量子科学技術研究開発機構 放射光科学研究センター・上席研究員
岩本 敏	東京大学 先端科学技術研究センター・教授
上田 正仁	東京大学 大学院理学系研究科・教授
大澤 辰彦	日本原子力研究開発機構 イノベーションハブ・技術副主幹
大友 季哉	高エネルギー加速器研究機構 J-PARC センター・ディビジョン長
金子 純一	北海道大学 大学院工学研究院・准教授
川北 至信	日本原子力研究開発機構 J-PARC センター・副ディビジョン長
川崎 雅司	東京大学 大学院工学系研究科・教授
熊倉 一英	日本電信電話株式会社 物性科学基礎研究所・所長
越野 幹人	大阪大学 大学院理学研究科・教授
酒井 忠司	東京工業大学 工学院・特任教授
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
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
高木 英典	マックス・プランク固体物理学研究所・教授
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
塚崎 敦	東京大学 大学院工学系研究・教授
寺本 三記	住友電工ハードメタル株式会社・主席
十倉 好紀	理化学研究所 創発物性科学研究センター・センター長
年吉 洋	東京大学 生産技術研究所・教授
中島 健次	日本原子力研究開発機構 物質科学研究センター・センター長
長汐 晃輔	東京大学 大学院工学系研究科・教授

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
畑中 大樹	日本電信電話株式会社 物性科学基礎研究所・主任研究員
波多野 睦子	東京工業大学 工学院・教授
林 喜宏	応用物理学会 システムデバイスロードマップ産学連携委員会・委員長
平本 俊郎	東京大学 生産技術研究所・教授
深見 俊輔	東北大学 電気通信研究所・教授
福谷 克之	東京大学 生産技術研究所・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
山本 秀樹	日本電信電話株式会社 物性科学基礎研究所・部長
脇本 秀一	日本原子力研究開発機構 J-PARCセンター・副センター長

○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」

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

招聘有識者（敬称略、所属・役職は開催時のもの）

（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

プログラム（敬称略）

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 第一部：エマージングな量子マテリアル研究

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 第二部：量子マテリアル研究に求められる活用基盤技術

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 第三部：量子マテリアルの実用化に向けた取り組み

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 総合討論

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 国内外の状況

【日本】

日本は過去10年間にわたり、量子マテリアル分野で世界をリードする基礎研究を展開してきた。量子マテリアルとは、量子力学の原理を利用し、新たな物性や機能を持つ材料を創出するものであり、次世代エレクトロニクス、スピントロニクス、量子情報技術の基盤となる重要な分野である。この分野では、JSPS、JSTおよびNEDOが中心となり、多様なプロジェクトが連携しながら推進されている。

トポロジカル絶縁体やワイル半金属など、トポロジーに基づく新物質の探索が進められ、JST-CRESTの「トポロジカル材料科学に基づく革新的機能を有する材料・デバイスの創出（2018～2025）」では、トポロジカル絶縁体を利用したスピン流デバイスやトポロジカル超伝導体を応用した量子コンピューティングデバイスの設計が進行している。また、JST-さきがけ「トポロジカル材料科学と革新的機能創出（2018～2023）」では、スピン流を活用した低エネルギーデバイスやトポロジカル材料の光学的特性を利用した新たなセンサー技術が開発された。これらの研究は次世代通信技術への応用が期待される成果を生み出している。

グラフェンやTMDCといった二次元材料の研究も急速に進展しており、JST-CREST「二次元機能性原子・分子薄膜の創製と利用に資する基盤技術の創出（2014～2021）」では、層間モアレ超格子による新奇物性の発見が進んだ。たとえば、グラフェンのモアレによる超伝導が実現され、量子シミュレーションや高感度センサー応用が期待されている。また、NEDOの「二次元材料の産業化に向けた革新的製造プロセスとデバイス作製基盤技術の開発（2021）」では、大面積の高品質グラフェンを低コストで製造する技術が開発されており、透明電極やフレキシブルディスプレイといった製品への応用が目指されている。また、JST-CREST「ナノ物質を用いた半導体デバイス構造の活用基盤技術（2023～2030）」やJST-さきがけ「新原理デバイス創成のためのナノマテリアル（2023～2028）」では、これら二次元材料をさらに深化させるための新たなナノスケールデバイス構造や、従来の半導体技術では実現困難であった機能性を引き出すための基盤技術が開発されている。

さらに、量子状態の制御と機能化も重要なテーマであり、JST-さきがけ「量子の状態制御と機能化（2016～2021）」では、超伝導体や量子ドットを用いた量子状態の精密制御が進み、高感度センサーや量子情報通信技術への応用が模索された。また、JST-CREST「量子状態の高度な制御に基づく革新的量子技術基盤の創出（2016～2023）」では、量子ビットの安定性向上や量子センサーの高性能化が研究されており、たとえば超伝導量子ビットのコヒーレンス時間が飛躍的に延長されるなど、量子計算の実用化に向けた基盤技術が確立されている。

このように、いくつかの量子マテリアルの基礎研究で応用が期待されるさらに成果が創出されているだけでなく、近年では、JST-CREST「量子・古典の異分野融合による共創型フロンティアの開拓（2023～2030）」等で量子技術と古典技術を融合し、新しい応用分野を開拓する取り組みが進められている。これらの研究は、量子マテリアル分野のさらなる進展を促進し、社会解決に繋がる革新を生み出すことが期待されている。

加えて、国際的な連携が強化されつつあり、日本国内の研究機関のみならず、世界中のトップ研究者との共同研究も進行している。特に、欧米を中心とした先端的な量子科学技術研究グループとの連携が形成され、国際共同研究による知見の共有が進んでいる。この結果、異なる技術的バックグラウンドやアプローチを持つ研究者が連携し量子マテリアルの応用可能性を広げ、社会的・経済的な影響力を持つ成果が生まれることが期待されている。

量子マテリアルに関連する日本国内の大型研究プロジェクトを以下に記す。

文部科学省関連事業

- 2018～2027 文部科学省「光・量子飛躍フラッグシッププログラム（Q-LEAP）」
量子情報処理技術領域 プロジェクトディレクター 伊藤公平 慶應義塾大学 教授
量子計測・センシング技術領域 プロジェクトディレクター 荒川泰彦 東京大学 特任教授
次世代レーザー技術領域 プロジェクトディレクター 近藤公伯 量子科学技術研究開発機構 部長

JST関連事業

- 2014～2019 ERATO「齊藤スピン量子整流プロジェクト」
研究総括 齊藤英治 東京大学 教授
- 2014～2021 CREST「二次元機能性原子・分子薄膜の創製と利用に資する基盤技術の創出」
研究総括 黒部篤 元（株）東芝 研究開発センター 首席技監
- 2015～2022 CREST「新たな光機能や光物性の発現・利活用を基軸とする次世代フォトニクス
の基盤技術」
研究総括 北山研一 大阪大学 名誉教授
- 2015～2020 さきがけ「光の極限制御・積極利用と新分野開拓」
研究総括 植田憲一 電気通信大学 名誉教授
- 2016～2023 CREST「量子状態の高度な制御に基づく革新的量子技術基盤の創出」
研究総括 荒川泰彦 東京大学 特任教授
- 2016～2021 さきがけ「量子の状態制御と機能化」
研究総括 伊藤公平 慶應義塾大学 教授
- 2016～2021 ERATO「中村巨視的量子機械プロジェクト」
研究総括 中村泰信 東京大学 教授/理化学研究所 センター長
- 2017～2022 さきがけ「量子技術を適用した生命科学基盤の創出」
研究総括 瀬藤光利 国際マスイメージングセンター センター長
- 2018～2025 CREST「トポロジカル材料科学に基づく革新的機能を有する材料・デバイスの創出」
研究総括 上田正仁 東京大学 教授
- 2018～2023 さきがけ「トポロジカル材料科学と革新的機能創出」
研究総括 村上修一 東京工業大学 教授
- 2019～2028 未来社会創造事業大規模プロジェクト型「磁性を活用した革新的熱電材料・デバイスの開発」
研究開発代表者 森孝雄 物質・材料研究機構 グループリーダー
- 2020～2029 未来社会創造事業大規模プロジェクト型「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」
研究開発代表者 中辻知 東京大学 教授
- 2022～2027 さきがけ「物質と情報の量子協奏」
研究総括 小林研介 東京大学 教授
- 2022～2027 ERATO「内田磁性熱動体プロジェクト」
研究総括 内田健一 物質・材料研究機構 上席グループリーダー
- 2023～2028 ERATO「沙川情報エネルギー変換プロジェクト」
研究総括：沙川貴大 東京大学 教授
- 2023～2030 CREST「量子・古典の異分野融合による共創型フロンティアの開拓」
研究総括 井元信之 東京大学 特命教授

2023～2028	さきがけ「量子・古典の異分野融合による共創型フロンティアの開拓」 研究総括 井元信之 東京大学 特命教授
2023～2030	CREST「ナノ物質を用いた半導体デバイス構造の活用基盤技術」 研究総括 齋藤理一郎 東北大学 名誉教授
2023～2038	さきがけ「新原理デバイス創成のためのナノマテリアル」 研究総括 岩佐義宏 東京大学 教授
2024～2029	ERATO「竹内超量子もつれプロジェクト」 研究総括 竹内繁樹 京都大学 教授
JSPS 関連事業	
2008～2013	新学術領域研究「重い電子系の形成と秩序化」 領域代表者 上田和夫 東京大学 教授
2008～2013	新学術領域研究「半導体における動的相関電子系の光科学」 領域代表者 五神真 東京大学 教授
2008～2013	新学術領域研究「分子自由度が拓く新物質科学」 領域代表者 鹿野田一司 東京大学 教授
2009～2014	新学術領域研究「量子サイバネティクス-量子制御の融合的研究と量子計算への展開」 領域代表者 蔡兆申 理化学研究所 チームリーダー
2010～2015	新学術領域研究「対称性の破れた凝縮系におけるトポロジカル量子現象」 領域代表者 前川悦輝 京都大学 教授
2013～2018	新学術領域研究「原子層科学」 領域代表者 齋藤理一郎 東北大学 教授
2014～2019	新学術領域研究「ナノスピン変換科学」 領域代表者 大谷義近 東京大学 教授
2014～2019	新学術領域研究「3D 活性サイト科学」 領域代表者 大門寛 奈良先端科学技術大学院大学 教授
2015～2020	新学術領域研究「トポロジジーが紡ぐ物質科学のフロンティア」 領域代表者 川上則雄 京都大学 教授
2015～2020	新学術領域研究「ハイブリッド量子科学」 領域代表者 平山祥郎 東北大学 教授
2015～2020	新学術領域研究「J-Physics：多極子伝導系の物理」 領域代表者 播磨尚朝 神戸大学 教授
2016～2021	新学術領域研究「光圧によるナノ物質操作と秩序の創生」 領域代表者 石原一 大阪府立大学 教授
2018～2023	新学術領域研究「ハイドロジェノミクス：高次水素機能による革新的材料・デバイス・ 反応プロセスの創成」 領域代表者 折茂慎一 東北大学 教授
2019～2024	新学術領域研究「量子液晶の物性科学」 領域代表者 芝内孝禎 東京大学 教授
2019～2024	新学術領域研究「ハイパーマテリアル：補空間が創る新物質科学」 領域代表者 田村隆治 東京理科大学 教授
2020～2025	学術変革領域研究（A）「動的エキシトンの学理構築と機能開拓」 領域代表者 今堀博 京都大学 教授

2020～2025	学術変革領域研究（A）「超秩序構造構造が創造する物性科学」 領域代表者 林好一 名古屋工業大学 教授
2021～2026	学術変革領域研究（A）「極限宇宙の物理法則を創る-量子情報で拓く時空と物質の新しいパラダイム」 領域代表者 高柳匡 京都大学 教授
2021～2026	学術変革領域研究（A）「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」 領域代表者 吾郷浩樹 九州大学 教授
2022～2027	学術変革領域研究（A）「光の螺旋性が拓く気らる物質科学の変革」 領域代表者 尾松孝茂 千葉大学 教授
2022～2027	学術変革領域研究(A)「光の極限性能を生かすフォトニックコンピューティングの創成」 領域代表者 成瀬誠 東京大学 教授
2023～2028	学術変革領域研究（A）「アシンメトリが彩る量子物質の可視化・設計・創出」 領域代表者 鬼丸孝博 広島大学 教授
2024～2029	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」 領域代表者 村上 修一 東京工業大学 教授

量子マテリアルの研究分野における海外連携の事例として、JSTの先端国際共同研究推進事業（ASPIRE）の量子マテリアル関連の国際共同研究プロジェクトを以下に記す。

表 S2-1 JST ASPIRE に採択中の量子マテリアル関連の研究課題

研究課題	日本側研究代表者	相手側研究代表者	支援期間
トポロジカル物質に基づく革新的量子エレクトロニクス創成	中辻 知 教授 東京大学 大学院理学系研究科	(米) コリン プロホルム 所長 ジョンスホプキンス大学 量子物質研究所	2024年2月 ～2029年3月
トポロジカル量子物性を利用した革新的光回路の実現	雨宮 智宏 准教授 東京科学大学 工学院	(米) アレクサンダー カニカエフ 教授 ニューヨーク市立大学シティ・カレッジ 電気工学	2024年2月 ～2027年3月
半導体およびトポロジカル物質のスピントロニクス構造を用いた量子状態制御	好田 誠 教授 東北大学 大学院工学研究科	(独) トーマス シューパース グループリーダー ユーリッヒリサーチセンター ピーターグリュンベルグ研究所	2024年2月 ～2027年3月
人材育成と量子スピントロニクス技術の基盤確立に向けた日仏共同イニシアティブ	大谷 義近 教授 東京大学 物性研究所	(仏) ルシアン・プレジュブヌ 部門長 仏 原子力・代替エネルギー庁 スピントロニクス・技術研究部門	2024年12月 ～2030年3月
電荷秩序を用いたトポロジカル物質の磁気機能開拓	ヒルシュベルガー・マクシミリアン 准教授 東京大学 大学院工学系研究科	(米) レスリー・シュープ 教授 プリンストン大学 化学専攻	2024年12月 ～2028年3月

【米国】

米国は量子マテリアル研究において、世界のトップを走る研究体制を構築しており、基礎研究から応用研究、産業連携までを幅広く網羅する戦略を進めている。主導的な役割を果たしているのはDOE、NSF、DARPAなどであり、これらの機関がそれぞれ多額の資金を投じて研究を支援している。特にトポロジカル材料、量子センサー、量子コンピュータ関連技術などの分野が重点的に取り組まれている。

DOEは、量子マテリアル研究の中核的存在として、National Quantum Information Science Research Centersを複数設置し、革新的研究を推進している。例えば、フェルミ国立加速器研究所のSuperconducting Quantum Materials and Systems Center (SQMS) では、超伝導材料を用いた次世代量子コンピュータの開発を目指している。このプロジェクトでは、超伝導体のコヒーレンス時間を大幅に向上させる技術や、量子ビットの性能向上に関する研究が進行中であり、5年間で1.15億ドルの予算が割り当てられている。また、オークリッジ国立研究所が中心となっているQuantum Science Center (QSC) では、トポロジカル量子材料の創製、量子アルゴリズムの設計、高感度センサー技術の実証が行われている。さらに、トポロジカル半金属の研究に特化したCenter for the Advancement of Topological Semimetals (CATS) をエイムズ国立研究所に設置し、トポロジカル半金属の開発、薄膜技術、トポロジカル状態の動的操作に関する研究を推進している。このプロジェクトでは、日本で開発されたワイル半金属である Mn_3Sn や Mn_3Ge も研究対象とされており、これらの材料の単結晶薄膜を用いたスピン状態制御や光学的特性の改良が進められている。また、Next Generation Quantum Science and Engineering (Q-NEXT) として、アルゴンヌ国立研究所を中心に量子暗号、通信ネットワーク、量子デバイスのための材料研究を進めている。このプロジェクトは5年間で2.1億ドルの予算が投入され、量子通信ネットワークや量子コンピューティングに必要な基盤技術の開発を行っている。

ゴードン・アンド・ベティ・ムーア財団のEmergent Phenomena in Quantum Systems Initiative (EPIQS) は、量子マテリアル研究の中でも統合的なアプローチを特徴としており、これまでに1.7億ドル以上を投じてきた。このプログラムは、材料合成、実験、理論を一体化した研究を支援しており、トポロジカル絶縁体や超伝導体といった新物質の基礎物性解明に大きく貢献している。特に、基礎研究と応用研究の橋渡しを行う役割を果たしており、科学界と産業界の連携を促進する重要なプラットフォームとなっている。

DARPAは、防衛技術を中心とした応用研究に力を入れており、量子マテリアルを活用した新しい技術開発を目指している。Quantum Imaging of Vector Electromagnetic Radiation (QuIVER) では、磁場センサーを高精度で計測可能な計測技術の開発が進められており、地磁気や磁性体の識別・位置同定技術の向上を目指している。また、Optomechanical Thermal Imaging (OpTIm) では、量子レベルの感度を持つ赤外線センサーを開発し、ナイトビジョンや非侵襲的な医療診断への応用が進められている。これらのプロジェクトは、軍事分野だけでなく、民生技術や医療技術にも波及効果をもたらす可能性がある。

NSFは学術研究を重視し、量子マテリアルに関連する複数の研究拠点を設立している。特に、Quantum Systems through Entangled Science and Engineering (Q-SeNSE) では、量子もつれを活用したセンサー技術の開発が進行している。このプロジェクトでは、従来のセンサー技術を超える精度と感度を実現するための新しいアプローチが模索されている。また、Expanding Capacity in Quantum Information Science and Engineering (ExpandQISE) では、量子科学の基礎研究や人材育成を支援している。このプログラムでは、研究者個人や小規模チームを対象に、最大5年間で最大500万ドルの助成が行われている。これにより、量子マテリアル研究の裾野が広がり、次世代の研究者育成が進んでいる。

これらの取り組みは、米国が量子マテリアル研究における世界的な競争力を維持し、科学技術と経済発展の両面でリードするための基盤を構築するものである。基礎研究、応用研究、産業界との連携を一体化した体制は、量子マテリアルを核とした新たな技術革新を推進する強力な推進力となっている。

量子マテリアルに関連する米国内の大型研究プロジェクトを以下に記す。

国家科学技術会議（NSTC）量子情報科学小委員会（SCQIS）

・ Bringing Quantum Sensors to Fruition（2022年～）

量子センサー実現の戦略的計画を提示

量子情報科学技術（QIST）を先導する研究機関と、ユーザー機関の協力を強化

フィージビリティスタディやプロトタイプ開発を推進する枠組みを整備

米国エネルギー省（DOE）Quantum Science Center（QSC）

National QIS Research Centersの一つとして活動

革新的なトポロジカル量子材料の創製、アルゴリズム、センサー設計の実証を目標

5年間で1億1500万ドル規模の支援

国防高等研究計画局（DARPA）

・ Underexplored Systems for Utility-Scale Quantum Computing（US2QC）（2023年～）

原子蒸気を用いた電場・磁場検出やキャビティーQEDを対象

軍事・防衛を含む広範な分野での応用を念頭に技術開発を加速

【欧州】

欧州は量子マテリアル研究を量子技術全体の発展に不可欠な基盤と位置付け、大規模な資金投入と国際的な協力体制を通じて研究を推進している。その中核を担うのが、欧州委員会による「Quantum Flagship」プログラムである。このプログラムは、2018年から10年間で10億ユーロを投じ、量子通信、量子センシング・メトロロジー、量子コンピューティング、量子シミュレーションといった主要な技術分野を包括的に支援している。量子マテリアルは、これらの分野の基盤を支える重要な要素であり、特に低次元材料やトポロジカル材料の研究が重点的に進められている。

Quantum Flagshipのもとで、多数のプロジェクトが採択されており、量子マテリアルに関する具体的な取り組みとしてTwo-dimensional quantum materials and devices for scalable integrated photonic circuits（2D-SIPC）や「Scalable Two-Dimensional Quantum Integrated Photonics（S2QUIP）」などが挙げられる。これらのプロジェクトでは、二次元材料を基盤としたフォトニック量子回路技術の実証が進められており、量子通信や量子計算のための新たなプラットフォーム構築が目指されている。また、低次元材料を活用した量子センシング技術の開発も進行中であり、次世代の高感度センサーの実現に向けた研究が進められている。

欧州内の主要な研究機関も、量子マテリアル研究の中心的役割を果たしている。たとえば、ドイツのマックス・プランク量子マテリアル大学院センターでは、トポロジカル材料の電子状態制御、ヘテロ構造の合成、コヒーレント光による量子状態操作といった最先端の研究が進められている。また、ケルン大学、アーヘン工科大学、ボン大学、ユーリッヒ総合研究機構が参画するMatter and Light for Quantum Computing（ML4Q）では、固体物理学、量子光学、量子情報科学を統合した研究を進め、量子マテリアルの新たな応用可能性を探っている。これらの研究は、基礎科学の発展だけでなく、実用化を視野に入れた技術開発にもつながっている。フラウンホーファー研究機構などの研究機関では、産業応用を目指して超伝導ジョセフソン接合やスピントロニクス材料を用いた工業スケールでの量子ビット製造技術の実証が行われている。

フランスでは、2021年に発表された国家量子戦略の一環として、量子マテリアル研究にも大規模な投資が行われている。この戦略では、量子センサー技術とその応用に2億5800万ユーロを割り当てており、磁性材料や超伝導材料を基盤とする新しいデバイスの開発が進められている。また、フランス国立科学研究センターが主導するQUCATSプロジェクトは、量子技術の実用化と産業応用を加速するためのロードマップ策定、ベストプラクティスの共有、人材育成を目的としており、量子マテリアルの研究成果を社会的利益へとつなげることを目指している。

スイスのETHチューリッヒでは、半導体ヘテロ構造や量子ドットを基盤とした量子マテリアルの研究が進ん

でいる。特に、Advanced Semiconductor Quantum Materials グループは、新しい量子材料の合成技術やデバイス応用を目指した研究を進めており、量子情報技術の基礎を支えている。また、同大学の Neutron Scattering and Magnetism グループは、多様な量子磁性体の特性を分析し、新しい物性材料の可能性を探索している。

欧州の研究機関は、国際的な連携を強化することで、量子マテリアル研究をさらに発展させている。例えば、HORIZON 2020 プログラムや HORIZON Europe プログラムを通じて、多国間共同プロジェクトが積極的に支援されている。これらのプログラムでは、量子センサー、量子通信、量子シミュレーションといった応用分野における材料技術のブレークスルーを目指している。たとえば、Quantum Photonic Integrated Circuit technologies や Quantum Sensing and Metrology for Market Uptake などのプロジェクトでは、フォトニック量子集積回路や小型量子センサーの開発が進められており、量子技術の市場導入を迅速に進めるための基盤が構築されている。

英国では、量子マテリアル研究の中心的役割を果たしているのが、複数の研究ハブや国立研究施設である。例えば、「UK National Quantum Technologies Programme」では、量子技術の基盤となるマテリアル開発が進められており、特に超伝導材料、トポロジカル材料、スピントロニクス材料の研究が注目されている。また、オックスフォード大学、ケンブリッジ大学、インペリアル・カレッジ・ロンドンといった世界トップクラスの大学が、量子マテリアル研究において主導的な役割を果たしている。これらの機関では、量子ビットのスケラビリティを向上させるための新材料の開発や、量子センサー技術を支える高感度材料の研究が進行中である。スタートアップ企業の育成にも注力しており、国内外からの量子技術関連企業の誘致や、研究成果の商業化支援が進められている。たとえば、Cambridge Quantum（現 Quantinuum）や Oxford Instruments といった企業は、量子マテリアルを基盤とした量子コンピューティングやセンサー技術の実用化を目指して活動しており、産学連携による研究成果の社会実装が期待されている。英国特有の取り組みとして、量子技術の社会導入を推進するための政府調達プログラムがあり、これにより公共部門での量子技術利用が加速している。

量子マテリアルに関連する欧州内の大型研究プロジェクトを以下に記す。

Next generation quantum sensing and metrology technologies

総額 1000 万ユーロ、3 課題（2023）、TRL 4～5

次世代の量子センシング・計測技術・デバイスの性能、信頼性、効率、応用に必要なすべてのコンポーネントの TRL を高めることを目標

低次元材料や磁性・超伝導材料が対象

Quantum sensing and metrology for market uptake

総額 1500 万ユーロ、3 課題（2024）、TRL 6～7

迅速な市場導入のために、小型化、集積化、輸送可能な量子センサーの開発を目標

スピントロニクス材料や低次元材料が対象

【中国】

中国は、量子マテリアル研究において、トポロジカル材料、二次元材料、スピントロニクス材料の研究に重点を置いている。例えば、清華大学を中心に世代メモリや低消費電力デバイスの実現を目指した反強磁性スピントロニクスの研究が進められている。また、北京大学や中国科学院を中心に、二次元材料を基盤とする新奇な量子マテリアル探索に注力しており、量子センサーや量子情報処理への応用可能性を模索している。中国は量子マテリアル研究の国際競争力を高めるため、多額の予算を投入している。清華大学の Cheng Song 教授が主導するプロジェクトには、中国国家自然科学基金や北京市自然科学基金などから多額の資金が支援されている。このような大規模投資は、量子マテリアル研究の基礎科学の進展を促進し、応用研究の開発を加速させる原動力となっている。

【論文の推移】

量子マテリアルに関連する論文数の推移を以下に記す。量子マテリアル全体の論文数は2019年を境に横ばいとなっているが、3.1で述べた4つの代表的な量子マテリアルに関しては、論文数が増加傾向にある。

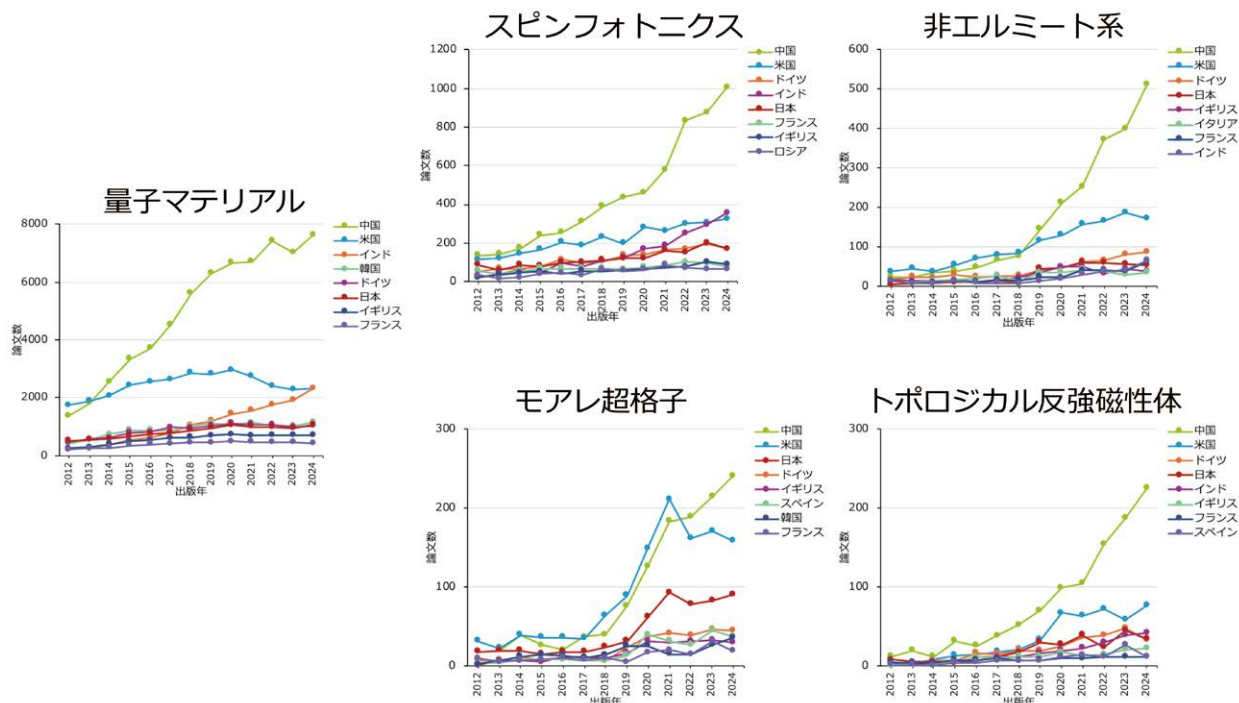


図 S2-1 量子マテリアルに関する論文数

【検索式】

・ 量子マテリアル

“topological material*” OR “topological insulat*” OR “topological superconduct*” OR “topological semimetal*” OR skyrmion* OR (topological AND “strongly correlat*”) OR “quantum spin” OR majorana OR (“topological” AND (“quantum comput*” OR “spintronic” OR “photonic”)) OR “Weyl semimetal*” OR “Weyl magnetic*” OR “Kitaev liquid*” OR “Kitaev model*” OR “Kitaev honeycomb*”) OR ((“atom* layer*” OR “graphene” OR “layer compound*” OR “2D crystal*” OR “2D layer*” OR “h-BN” OR “DLC” OR TMDC*) AND (“electronic*” OR “device*” OR “semiconductor*” OR “transistor*” OR “CMOS” OR “FET” OR “memory” OR “storage*” OR “logic” OR “LSI” OR “IC” or “switch”

・ スピノフォトンクス

“spin photonics” OR “spintronics” OR “photonic spintronics” OR “spin-based photonic devices”

・ 非エルミート系

“non-Hermitian systems” OR “non-Hermitian physics” OR “non-Hermitian operators” OR “non-Hermitian Hamiltonian” OR “non-Hermitian*”

・ モアレ超格子

“moiré potential” OR “moiré superlattice” OR “moiré patterns” OR “twisted bilayer graphene” OR “twistronics”

・トポロジカル反強磁性体

(“antiferromagnetic” AND “spintronics”) OR “topological antiferromagnets” OR “topological antiferromagnetic materials” OR “topological AFM” OR “antiferromagnetic topological insulators”

【対象期間】 2012～2024年

【対象文献】 Article、会議録、総説

【データソース】 Scopus（2025年3月2日時点）

付録3 専門用語解説

遷移金属ダイカルコゲナイド（Transition Metal Dichalcogenides : TMDC）

遷移金属元素（Mo、Wなど）が上下にカルコゲン元素（S、Se、Teなど）に挟まれた層からなる層状物質。層間は弱い力（ファンデルワールス力）で結合しているため、グラフェンのように1層を単離することができる。多層の場合と大きく異なり、半導体デバイスや光電子デバイスなどへの応用に適した特性を示すことから、多様な特性を示す二次元材料として期待されている。

量子コヒーレンス

量子力学ではものの物理的状態（量子状態）は波動関数で表示される。量子コヒーレンスとは同じ一つの粒子（量子）が干渉性を保ちながら二つ以上の状態に対応する波動関数の重ね合わせ状態にあること。この状態は外界からの擾乱によって容易に破壊され波動としての干渉性を失う。干渉性を失う時間を量子コヒーレンス時間と称する。

マヨラナ粒子

粒子と反粒子が同一である特性を持つ電氣的に中性なフェルミ粒子。1937年にE. Majoranaによって素粒子の一つとして理論的に提唱されたが、未だにその確固たる証拠は見つかっていない。固体物理学の分野では、特定の物質中で電子の励起状態がマヨラナ粒子として振る舞うことが理論的に示されている。

スピントロニクス

フォトン（光）により磁性材料や半導体量子構造のスピン状態を制御することで情報を書き込み、さらに超微弱な磁場検出が可能な量子センシングを読み出しに活用する、フォトリニクスとスピントロニクスを融合した技術。磁性体内の電子とフェムト秒レーザーや円偏光との相互作用により室温かつ超高速でスピン流を生成し、その伝搬方向を自在に制御することを可能とする。

モアレ超格子

複数の二次元物質を重ね合わせた積層体において、干渉により生じる新しい周期構造。2枚のグラフェンをわずかな角度だけずらして重ねることで超伝導特性が現れるなど、積層することにより電子特性や光学特性を大きく変化させる。二次元物質の種類や層間の角度の組み合わせが特性にどのような影響を与えるかを研究する新しい分野が形成されつつあり、多様な物質の特性が探求されている。

非エルミート系

エネルギー損失/利得のある散逸系（つまりエネルギーの保存則が成り立たない系）に代表される、エルミート性を持たないハミルトニアンで記述される物理系のこと。近年、非エルミート系では、通常のエルミート系にはない特有のバンド構造を誘起することが明らかとなり、レーザーの増幅技術や低散逸な次世代デバイスへの応用が期待されている。

トポロジカル材料

数学の一分野である位相幾何学（トポロジー）の概念を物質に適用することで、これまでの金属、半導体、絶縁体の分類では記述できない新たな物質群。内部が絶縁体であるにも関わらず、表面では特殊な金属状態が発現することで、高速かつ不純物の影響を受けにくい特性を持つトポロジカル絶縁体はその代表例。

トポロジカル反強磁性体

トポロジカルな電子構造に由来する巨大な応答を示す反強磁性体。物質内のミクロな磁化を担う磁気モーメントが互いに打ち消し合い、全体として磁化がゼロになる磁性体であるにも関わらず、「仮想磁場」の性質を有することで、異常ホール効果、異常ネルンスト効果などが発現することが知られ、不揮発メモリや熱流センサーへの応用が期待されている。

角度分解光電子分光（Angle-resolved Photoemission Spectroscopy : ARPES）

固体表面に光を入射して、光電効果により物質外に放出される電子のエネルギーと角度を計測することで、物質中の電子のエネルギーと運動量との分散関係（バンド構造）を直接的に調べることができる実験手法。さらに、スピン分解技術を用いることで電子スピン状態の分布が分かり、時間分解技術を用いることで電子のダイナミクスをフェムト秒のオーダーで解析することも可能となる。

中性子非弾性散乱

物質に照射した中性子のエネルギーが物質に吸収（または放出）され、変化して散乱される現象。散乱中性子のエネルギーおよび運動量を計測することにより、エネルギーおよび運動量保存則から物質の内部構造やその動的特性、格子振動（フォノン）や磁気励起（マグノン）等についての情報を得ることができる。

有効ハミルトニアン

ハミルトニアンは物理系の全エネルギーを記述する演算子で、シュレーディンガー方程式やハイゼンベルクの運動方程式の中で用いられる。複雑な物理系の正確なハミルトニアンを用いると、多くの場合、シュレーディンガー方程式などが解けなくなる。有効ハミルトニアンは、方程式の解を求めやすくするために、興味ある性質だけを再現できるよう、ハミルトニアンを簡約化したもの。

URA

大学等において、研究者とともに研究活動の企画・マネジメント、研究成果活用促進を行い、研究者の研究活動の活性化や研究開発マネジメントの強化等に従事する人材。「University Research Administrator」の略。

作成メンバー

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	鈴井 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

戦略プロポーザル

CRDS-FY2024-SP-05

社会課題解決に向けた量子マテリアルの活用戦略

STRATEGIC PROPOSAL

Utilization Strategy for Quantum Materials to Address Social Challenges

令和 7 年 3 月 March 2025

ISBN 978-4-88890-975-4

国立研究開発法人科学技術振興機構 研究開発戦略センター

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、当該情報はURLに併記された日付または本報告書の

発行日の1ヶ月前に入手しているものです。

上記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 on the date given in the link or one month prior to publication.

CRDS is not responsible for any changes in content thereafter.

FOR THE FUTURE OF
SCIENCE AND
SOCIETY



CRDS

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