

戦略プロポーザル 量子2.0

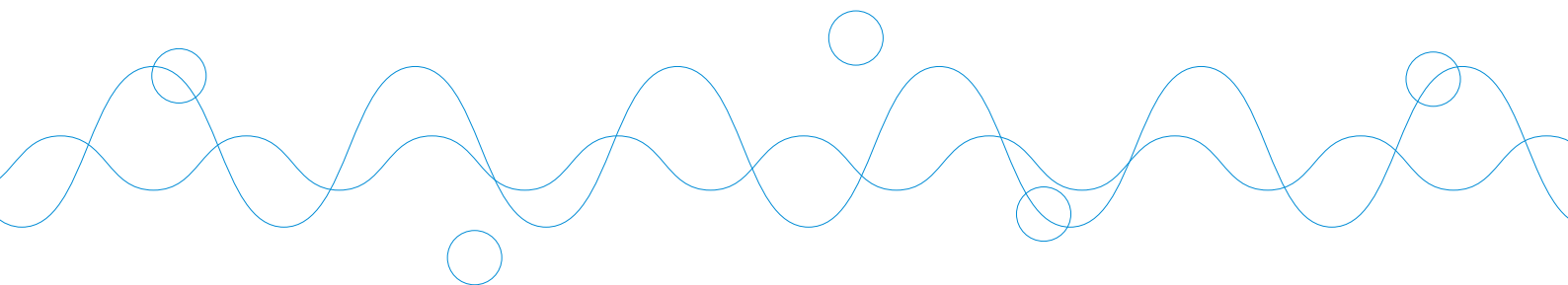
～量子科学技術が切り拓く新たな地平～

STRATEGIC PROPOSAL

Quantum 2.0 :

Quantum Science and Technology Open Up New Horizons

0 1 0 1 0 0 0 1 1 1 0 1 0 1 0 0 0 0 1
0 0 1 1 0 1 0 0 0 1 0 0 0 0 1 1 0
0 1 0 1 1 1
0 1 0 1 0 0 0 1 1 1 0 1 0 1 0 0 0 0 1
0 0 1 1 0 1 0 0 0 1 0 0 0 0 1 1 0
0 1 0 1 1 1
0 0 1 1 0 1 1 1 1 1 1 0 0 0 0 1 0 1 0 1 0 1 1



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

「量子 2.0 ～量子科学技術が切り拓く新たな地平～」とは、量子力学で記述される原子、電子、光子などの微視的挙動を制御することによって、我が国の経済・産業、安全保障を発展させる可能性を有した量子科学技術の確固たる基盤を確立するための研究開発戦略である。ここでは、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、関連する裾野の広い研究開発を、社会・経済的課題の解決や国家安全保障の確保と産業競争力の強化、学術分野・コミュニティと研究者ネットワークの形成へ向けた取り組みとともに推進することを提案する。

Internet of Things (IoT) の普及により、様々な人・モノ・組織がネットワークにつながり、ビッグデータと呼ばれる大量のデジタルデータの生成、収集、蓄積が進みつつある。デジタル化社会の到来により確立されようとしている知的集約型社会では、国家間の相互依存関係が深化、複雑化するとともに、我が国の経済や国民の生活水準の維持・向上に対する様々な制約も顕在化しつつある。エネルギー・資源の枯渇、食料自給率の低迷や少子高齢化、人口減少などの社会的課題の解決と産業応用を視野に、急速に発展する兆しが見られる新しい技術体系の一つが量子科学技術である。

量子力学を計算や通信に応用しようという動きは、1980 年代の Feynman による量子シミュレーションの概念提唱まで遡るが、量子力学と情報科学が融合した量子情報科学の誕生を経て大きな進展が見られたのは、理論どおりに量子を操作・制御することができるようになった 1990 年代後半からである。最近では、量子コヒーレンス、量子もつれといった重要な性質の実験的検証が進み、量子情報の媒体となる量子ビットとして超伝導回路、ダイヤモンド窒素-空孔 (NV) 中心などの様々な物理系が知られるとともに、それらが量子性を保ち情報を保持できるコヒーレンス時間が桁違いに延びてきている。このように、量子科学技術は高度な操作・制御技術の進展によって、社会的課題の解決と産業応用を視野に入れた新たな価値創出の可能性が近年急速に高まってきたところである。

米国、欧州、中国をはじめとした主要国では、国家の安全保障や産業競争力を量子科学技術が左右するとの共通認識の下、極めて大規模な政府投資が行われている。これに対し我が国では、個々の研究が国際的に認知されつつあるものの、大学、研究機関、企業等において散発的に実施されているため、世界の新しい潮流を作るような主導的地位を関連分野で築くことができていない。国際競争力の強化と社会・経済的課題の解決、新しい学術分野の誕生を通じて、将来の成長・発展を導くような量子科学技術の研究開発を戦略的に推進することが必要である。

以下に、量子科学技術の主要な 4 つの領域と、それらを深化、発展させるための共通量子技術基盤の領域において、今後取り組むべき研究開発課題を示す。

①量子コンピューティング・シミュレーション：量子化学計算と量子機械学習など NISQ (Noisy Intermediate-Scale Quantum computing) マシンのキラーアプリ探索に不可欠な量子・古典ハイブリッドアルゴリズムの研究開発、超伝導量子ビットを構成要素とした実機の開発、最終目標である誤り耐性量子コンピュータの実現に向けた計算機アーキテクチャ全体の強化、様々な量子ビット系の制御に係る基礎的な研究開発などを推進すべきである。量子シミュレータの研究開発では、サイズが大きく大量の量子もつれや量子コヒーレンスを要求するような複雑な量子多体系

のモデル化、シミュレーション技術を確立する必要がある。

②量子計測・センシング：具体的な応用分野や産業への出口を明確にし、社会実装を強く指向した研究開発が必要である。ダイヤモンド NV 中心や光あるいは物質の量子もつれ、室温超核偏極によるセンシング技術では、生体計測への応用展開、医療・診断向けプロトタイプ機器の製作と製品化が重要である。原子干渉計型ジャイロスコープと光格子時計については、小型化と安定化を実現し、それぞれ自己位置推定、相対論的測地の原理実証から実用化に向けての研究開発を推進すべきである。我が国発の光格子時計が国際機関での秒の再定義へ貢献する取組みが求められる。

③量子暗号・通信：短期的には、早期の量子鍵配送（QKD）装置の市場投入と試験運用によるキラーアプリ探索、応用分野の特定や QKD 装置の低価格化が重要である。中長期的には、通信衛星 QKD、長距離 QKD や新原理による QKD の研究開発とともに、高速化・長距離化に向け、量子メモリだけでなく全光の量子中継技術に関する研究開発を進めることで、規模拡大が可能な量子中継の原理実証と小規模な量子ネットワークの実現を目指すべきである。将来を見据え国際機関における標準化活動の推進も必要である。

④量子マテリアル：次世代の量子科学技術に貢献できる魅力的な機能と、環境擾乱に堅牢（ロバスト）な新規量子マテリアルを継続的に創出すること、また既存の分野に対して革新を起こすような新概念、新物質、新技術の創出が求められる。トポロジカル量子物質、スピントロニクス材料、エネルギー変換材料、フォトニクス材料が期待される代表例である。

⑤共通量子技術基盤：単一光子制御、量子ビット基盤、量子ビット間の結合・インターフェースの技術などの量子測定・操作・制御技術やその理論を発展させていく必要がある。また、要素技術として微細加工・解析技術、極低温エレクトロニクスの高度化も重要な課題である。

これらの研究開発課題はそれぞれ時間軸が異なるため、短中期（～10 年）と中長期（～20 年以上）の両側面から取り組んでいくことが重要である。研究開発の促進と費用対効果の最大化に向け、また国際的に認知・評価され国内外から優れた研究者を惹きつける場として、中核となる研究開発拠点の形成が不可欠である。

社会・経済的課題の解決に向け、「量子コンピュータ」、「量子計測・標準」、「量子医療・診断」、「量子セキュリティ」、「トポロジカル材料」の 5 つを戦略的推進課題として研究開発を進めることを提案する。ここでは、「分野・領域融合の促進」、「オープンイノベーションの推進」、「起業促進と投資環境の整備」という 3 つの取組みが重要である。また、我が国の強みと弱みを勘案した上で優位性確保を意識しつつ国際連携を図るとともに、標準化、知的財産管理による国家安全保障の確保と産業競争力の強化が必要である。

さらに、研究開発を長期的に支えられるような学術分野・コミュニティと研究者ネットワークを形成するため、分野・領域の連携、多様化、国内外における人材の育成・頭脳循環が持続的に行えるような政策的支援が求められる。社会・経済的課題の解決に向けた戦略的研究開発との相互作用を高め、それによる相乗効果を発揮させることが重要である。

Executive Summary

“Quantum 2.0: Quantum Science and Technology Open Up New Horizons” aims at establishing a solid foundation for quantum science and technology, which have a potential to develop Japan’s economy, industry, and national security by controlling the microscopic behavior of atoms, electrons, photons, etc., as described by quantum mechanics. “Quantum 2.0” is about the ability to control and utilize quantum-specific properties which were difficult to use in the past, such as quantum coherence and entanglement. The related wide-ranging R&D should be promoted along with efforts to address social and economic issues, to strengthen national security and industrial competitiveness, and to form new academic fields, communities and researcher networks.

With the growth of the Internet of Things (IoT), more and more people, devices, and organizations are connected to the network, and a large amount of digital data called “big data” is being generated, collected, and stored. In a knowledge-intensive society led by the advent of a digitized society, the interdependence between countries becomes deeper and more complex, and at the same time, various constraints on Japan’s economy and the maintenance or improvement of the living standard of the people are also becoming prominent. Quantum science and technology is one of the new technological fields that show signs of rapid development in view of solutions to social issues and industrial applications.

The movement to apply quantum mechanics to computation and communication goes back to Feynman’s conceptual proposal of quantum simulation in the 1980s. However, it was not until the late 1990s, when the quantum’s behavior was able to be manipulated and controlled as theoretically expected, that there was significant R&D progress after the birth of quantum information science from the merger of quantum mechanics and information science. Recently, in parallel with experimental verification of important properties such as quantum coherence and entanglement, various physical systems are known as a qubit which serves as a medium of quantum information; their coherence time, during which the qubit can maintain quantum information, has so far been extended by orders of magnitude. Thus, quantum science and technology have promised the possibility of creating new values in terms of addressing social issues and industrial applications through the advancement of high manipulation and control technology.

Therefore, in major countries, very large-scale government investments have been made based on the common understanding that quantum science and technology can provide national security and economic benefits. In contrast, in Japan, while some of the related cutting-edge R&D activities are being internationally recognized, they are not integrated among universities, national labs, companies, etc., which would be a major barrier to establishing our nation’s leading position in many fields that will create a new trend in the world. The R&D of quantum science and technology should be strategically promoted through enhancement of international competitiveness, resolution of social and economic issues, and creation of new academic fields, thereby leading to the future growth and development of

Japan.

In the following, we will show the future R&D subjects in the four major areas of quantum science and technology and in the area of a common quantum technological platform for deepening and developing these areas.

(i) Quantum computing and simulation: The R&D of hybrid quantum-classical algorithms indispensable for killer applications of NISQ (Noisy Intermediate-Scale Quantum computing) machines such as quantum-chemical calculations and quantum machine learning, development of real machines with superconducting qubits as the building blocks, enhancement of the overall computer architecture toward the realization of the fault-tolerant quantum computer as a final goal, and basic R&D related to the control of various qubit systems should be promoted. For the R&D of quantum simulators, it is necessary to establish modeling and simulation techniques for complex quantum many-body systems that intrinsically require large amounts of quantum entanglement and coherence.

(ii) Quantum measurement and sensing: The R&D should be promoted with a strong focus on social implementation by clarifying the specific application fields or industrial exits. In sensing technology using diamond nitrogen-vacancy (NV) centers, quantum entanglement of light or matter, and room-temperature nuclear hyperpolarization, it is important to develop applications for biomedical measurement and to produce or commercialize prototypes for medical and diagnostic purposes. Atomic interferometer-type gyroscopes and optical lattice clocks should be miniaturized and stabilized to demonstrate a proof-of-principle and practical application of self-location estimation and relativistic geodesy, respectively. Particularly, Japan's original optical lattice clocks are expected to contribute to the redefinition of the SI second by international organizations.

(iii) Quantum cryptography and communications: Importantly, in the short term, we should search for killer applications of quantum key distribution (QKD) devices, identify their application fields by early commercialization or trial use, and lower their price. In the medium-to-long term, it is necessary to promote the R&D of the satellite-based QKD, long-range QKD, and new-principle-based QKD technologies. Furthermore, for the development of high-speed and long-distance communications, the R&D of all-photon quantum repeaters as well as quantum memories is required, thereby demonstrating a proof-of-principle of scalable quantum repeaters to realize a small-scale quantum network. Intensive standardization activities in international organizations are also required for the future.

(iv) Quantum materials: We should continuously create new quantum materials that are robust to environmental disturbances and produce attractive functions contributing to the next generation of quantum science and technology; new concepts, materials and technologies that induce innovation in existing fields are also required. Representative examples are topological quantum materials, spintronic materials, energy-conversion materials, and photonic materials.

(v) Common quantum technology platform: It is necessary to develop quantum measurement, manipulation, and control technologies such as the technologies of single-photon control, qubit systems, and coupling or interface between qubits, etc., and their theoretical basis. Microfabrication and analysis techniques and cryogenic electronics should be advanced as essential technologies.

Due to their very different timelines, these R&D subjects should be undertaken in both the short-to-medium (up to 10 years) and medium-to-long (up to 20 years or more) terms. Another important measure to promote R&D is the formation of core hubs, which could become internationally recognized and therefore be expected to serve as a place to attract excellent researchers from Japan and overseas.

To address social and economic issues, R&D should be targeted regarding the following five strategic subjects: "quantum computer", "quantum measurement and standard", "quantum medicine and diagnosis", "quantum security", and "topological materials." For this purpose, three approaches are important; *i.e.*, "enhanced fusions of scientific disciplines and technological areas", "promotion of open innovation", and "encouragement of start-ups and improvement of investment environments". In addition, we need to pursue international cooperation while ensuring our superiority considering Japan's R&D strengths and weaknesses. National security and industrial competitiveness should also be strengthened through standardization and intellectual property management.

In order to create new academic fields, communities, and researcher networks for supporting the R&D in the long term, we need policy support that sustainably enables fusions and diversification of scientific disciplines and technological areas, human-resource development, and brain circulation in Japan and overseas. Importantly, these efforts should enhance the interactions with the activities of the above strategic R&D subjects towards resolving social and economic issues, thereby maximizing their synergistic effects.

目 次

エグゼクティブサマリー

Executive Summary

1. 研究開発の内容	1
2. 研究開発を実施する意義	6
2-1. 現状認識と問題点	6
2-2. 社会・経済的効果	17
2-3. 科学技術上の効果	19
3. 具体的な研究開発課題	21
3-1. 量子コンピューティング・シミュレーション	21
3-2. 量子計測・センシング	23
3-3. 量子暗号・通信	24
3-4. 量子マテリアル	25
3-5. 共通量子技術基盤	26
4. 研究開発の推進方法および時間軸	27
4-1. 社会・経済的課題の解決に向けた研究開発の戦略的推進	27
4-2. 国家安全保障の確保と産業競争力の強化	29
4-3. 新たな学術分野・コミュニティと研究者ネットワークの形成	29
4-4. 戦略的に推進すべき課題と時間軸	31
付録1. 検討の経緯	35
付録2. 国内外の状況	38
付録3. 専門用語の説明（五十音順）	43

1. 研究開発の内容

「量子 2.0 ～量子科学技術が切り拓く新たな地平～」とは、量子力学が記述する原子、電子、光子などの物理現象を高度に制御し利用することによって、我が国の経済・産業、安全保障を発展させる可能性を有した量子科学技術の確固たる基盤を確立するための研究開発戦略である。ここでは、量子コヒーレンス、量子もつれといった、これまで人類が利用困難であった量子特有の性質を操作・制御、利活用できるようになることを「量子 2.0」¹と定義し、社会・経済的課題の解決、国家安全保障の確保と産業競争力の強化、学術分野・コミュニティと研究者ネットワークの形成へ向けた取組みとともに、「量子 2.0」が関連する裾野の広い研究開発を推進することを提案する。取り組むべき「量子 2.0」の概略を図 1-1 に示す。

本プロポーザルが掲げる研究開発課題は、量子コンピューティング・シミュレーション、量子計測・センシング、量子暗号・通信、量子マテリアルの主要な 4 つの技術領域、さらにそれらを深化、発展させる共通原理・共通ツールや、それらだけではカバーできない新たな量子科学技術の種となる新学理・新技術を含む共通量子技術基盤の領域で構成される。



図 1-1 「量子 2.0」概略図

(1) 量子コンピューティング・シミュレーション

小～中規模で誤り耐性がない近似的量子コンピュータ、いわゆる NISQ（Noisy Intermediate-Scale Quantum computing）マシンが有用性を発揮するアプリケーションの探索

¹ 主に 20 世紀までの光・エレクトロニクスにおける素子開発を支えたのは、トンネリング、量子閉込めなどを基礎とした半導体技術であり、これを「量子 1.0」と呼ぶ。英国の国防科学技術研究所 (Defence Science and Technology Laboratory, DSTL) の「UK Quantum Technology Landscape 2014」では、光・エレクトロニクス以外に原子力エネルギー、レーザー、デジタルカメラ等のイメージング素子を「量子 1.0」の研究開発によりもたらされた技術と説明。

に向け、現在期待されている量子化学計算や量子機械学習などの量子・古典ハイブリッドアルゴリズムに関する研究開発が必要である。

量子ビットを集積したデバイスや新しい量子ソフトウェアの性能を測るのに不可欠なテストベッドとして、超伝導量子ビットを構成要素とした実機を日本で開発することが必要である。また、量子ビットデバイス、量子ソフトウェア、システム等、専門性の異なる研究者の連携により、量子誤り訂正を量子ビット集積チップ上に実装することを目指すべきである。

さらに、現在主流となっている超伝導回路方式、イオントラップ方式ともに、誤り耐性量子コンピュータの実現に向けた計算機アーキテクチャ全体を強化するための取組みも重要である。ここでは、半導体量子ドット、トポロジカル量子、光量子など、超伝導回路系、イオントラップ系以外の量子ビットの制御に係る基礎研究も、量子物理、電子工学、材料科学の研究者の連携により取り組む必要がある。

量子シミュレータの研究では、量子多体系における外場刺激後のダイナミクス（時間発展）の計算や、格子模型で表しにくい非結晶系・不規則系（ガラス、液体など）の計算など、サイズが大きく大量の量子もつれやコヒーレンスを要求するような複雑系のモデル化、シミュレーションの技術を確立することが重要である。

(2) 量子計測・センシング

基本原理・概念が検証されてから時間が経過している技術が多い技術領域であり、新世代の原子時計や超精密センサの実現による具体的な応用分野や産業への出口を明確にし、基礎と応用を結ぶ、あるいは社会実装を強く指向した研究開発を推進する必要がある。

ダイヤモンド窒素・空孔（NV）中心に代表される固体量子センサの研究では、化学気相成長法（Chemical Vapor Deposition, CVD）、放射線照射と高温アニールによる手法などにより、ダイヤモンド単結晶の大型化と高品質化や、炭化ケイ素（SiC）をはじめとする新材料の探索が重要課題である。ダイヤモンド NV 中心に加えて、室温超核偏極、光あるいは物質の量子もつれによる計測技術に対して、センシングの理論に基づく研究開発や生体計測応用を促進する必要がある。医療・診断技術への応用に向けてのプロトタイプ機器の製作と製品化、新たな応用分野の探索も重要である。

原子干渉計型ジャイロスコープについては、原理実証から実用化に向けての研究開発を推進すべきである。感度向上と装置全体の小型化を達成することで、高性能自己位置推定の実証機を目指すとともに、三次元ジャイロスコープと重力加速度計を用いた慣性航法による非 GPS（Global Positioning System）ナビゲーションの実現も見据えなければならない。また、光格子時計については社会実装のための応用実証と基礎学理の深化が重要である。我が国が開発した世界最高精度を持つ光格子時計の可搬化とネットワーク化を進めることによって、相対論的測地の地震学、火山学への適用や実地調査への応用実証を進める。最高精度の商用プロトタイプの製作、世界初の製品化に加え、超精密計測による基礎物理学の新展開を図ることで、国際機関での秒の再定義へ向けた大きな寄与が望まれる。

(3) 量子暗号・通信

短期的な視点からは、量子鍵配送（Quantum Key Distribution, QKD）装置に対し、政府関連機関の先行導入による早期の市場投入、試験運用を進め、これによってキラーアプリを探索し応

用分野を特定することが極めて重要である。一方、民生向けは金融取引やゲノム・医療情報のやり取りなど、秘匿性の高い具体的な用途での概念実証から始め、社会実装への道筋を示すことが必要である。また、既存技術と組み合わせた新システム、新サービスによる社会実装の実現も目指すべきである。これらの動きを加速するため、鍵配信速度のさらなる向上や通信インフラとしての安定性を実現するとともに、QKD装置の低価格化が実装には肝要となる。

一方、中長期的な視点からは、通信衛星 QKD や長距離 QKD、新原理に基づく次世代 QKD の研究開発が重要である。地上の光ファイバーネットワークと衛星ネットワークを統合し、地球規模のインフラを構築することが求められる。

また、高速化・長距離化に向けて、規模拡大が可能な量子中継の原理実証と小規模な量子ネットワークの実現を目指すべきである。そこでは、量子メモリにおけるコヒーレンス時間や操作精度の向上に加えて、量子メディア変換（転写）や量子ゲート技術の高度化が必要である。量子メモリ方式と並行して、「全光量子中継」方式や、量子もつれ光子を効率的に生成するための光デバイスの研究開発も推進すべきである。

多数の量子中継器で構成された大規模ネットワークを確立し量子インターネットへの道筋を示すための研究開発も重要である。将来を見据え、欧州電気通信標準化機構（European Telecommunications Standards Institute, ETSI）、国際電気通信連合の電気通信標準化部門（International Telecommunication Union Telecommunication standardization sector, ITU-T）、国際標準化機構（International Organization for Standardization, ISO）などにおける標準化活動の推進も必要である。

(4) 量子マテリアル

コヒーレンスを長時間保つ量子ビットや室温動作が可能な新規デバイスなど、次世代の量子科学技術に貢献できる魅力的な機能と、環境擾乱に堅牢（ロバスト）な新規量子マテリアルを継続的に創出することが重要となる。加えて、エレクトロニクス、スピントロニクス、フォトニクスといった既存の分野に対して革新を起こすような新概念、新物質、新技術の創出も求められる。

トポロジカル材料に対しては、マヨラナ粒子によるトポロジカル量子コンピュータ実現に向けた技術開発、トポロジカルな性質を用いたスピン-電荷変換のさらなる高効率化を図る研究や、低損失・高速な光通信、光メモリ応用を目指す研究も重要である。また、スピントロニクス材料におけるキュリー温度（ T_C ）やスピン MOSFET（Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect Transistor）などのデバイス性能を向上させるための研究、元素戦略的な観点に基づく新材料開発のための素材選択が重要になる。さらに、エネルギー変換材料として学界で研究が活発化しているスピンゼーベック効果や異常ネルンスト効果などの量子現象を工学的に応用するため、熱的運動 $\leftrightarrow$ スピン流 $\leftrightarrow$ 電流の変換効率の大幅な向上、新物質開発と原子レベルでの構造制御が必要になる。フォトニクス材料の研究開発では、省エネルギー光源や次世代量子通信の実現のため、量子ドットやトポロジカルフォトニック結晶などを用いた新概念による高効率レーザー開発や、光学限界を超える素子や電磁波遮蔽を実現するメタマテリアルの開発が必要である。

上記の例以外にも、近年シーズ研究が盛んに行われている量子液晶や準結晶などの既存物性の高度化、新機能に向けた研究開発を加速する必要がある。

(5) 共通量子技術基盤

これまで原子・分子・光科学（Atomic, Molecular and Optical physics, AMO）や量子光学、量子エレクトロニクス分野で精力的に進められてきた高精度の単一光子制御技術、量子ビット基盤技術、異なる量子ビット間の結合・インターフェイス技術などの量子測定・操作・制御技術をさらに発展させる。

AMO 分野では、冷却原子の配置・トラップ技術の高度化や、利用可能な原子種の拡大などが重要な課題となる。冷却中性原子系とイオントラップ系ではそれぞれに利点と欠点があり、共通する要素も少なくないため、相互に連携した研究開発が求められる。一方、量子光学、量子エレクトロニクスに関しては、量子中継やマルチパーティ量子通信、光量子コンピュータへの展開として、量子もつれ光子、多体量子もつれの生成・制御を目指すべきである。また、超伝導回路、半導体量子ドット、ダイヤモンド NV 中心など、種々の固体量子ビットの様々な方式に対して、コヒーレンス時間と制御性双方の向上を目標にした研究開発を継続すべきである。

異種の量子系をつないだハイブリッド量子科学とそのインターフェイスの技術開発も重要であり、中でも固体量子ビットと光との結合をどのように実現・制御するかは、論理量子ビットの構築や量子メディア変換などの様々な研究課題で必要な要素となる。

以上のような要素技術を、既存の微細加工技術、光デバイスやエレクトロニクスと組み合わせて一体的に設計・製造するような枠組みを構築するとともに、様々な量子系の現象を計測するための半導体技術、極低温エレクトロニクス、微細解析技術などの開発も重要である。

これらの研究開発課題に対しては、それぞれの時間軸が大きく異なるため、短中期と中長期の両側面から各課題の解決に向けた取組みを展開すべきである。研究開発の促進と費用対効果の最大化に向け中核となる研究開発拠点の形成は、国際的に認知・評価されるためだけでなく、国内外から優れた研究者を惹きつける場としての機能が期待できるため不可欠である。また、具体的な推進方策として、「社会・経済的課題の解決に向けた研究開発の戦略的推進」、「国家安全保障の確保と産業競争力の強化」、「新たな学術分野・コミュニティと研究者ネットワークの形成」の 3 つを提案する。

社会・経済的課題の解決に向けては、「安全・安心」、「健康・医療・介護」、「環境・エネルギー」「生産性向上」に関して新しい価値を創出する可能性のある研究開発を戦略的に推進することが必要である。このような戦略的推進課題として、社会ニーズだけでなく、技術の成熟度、我が国の強みをもとに、「量子コンピュータ」、「量子計測・標準」、「量子医療・診断」、「量子セキュリティ」、「トポロジカル材料」の 5 つを本プロポーザルでは掲げる。推進に当たっては、「分野・領域融合の促進」、「オープンイノベーションの推進」、「起業促進と投資環境の整備」という 3 つの取組みが重要である。時間軸として、短中期的な出口を有する技術研究開発（～10 年）と中長期的視点で社会実装を期待する基盤技術研究（～20 年以上）を区別し、これらを両輪とした推進を図るべきである。多様なシーズによる産学官共同研究の誘発と、シーズのさらなる発展や新技術の創出・実証、産業化への橋渡しのため、基礎から出口へつなげていくシームレスな研究開発投資が必要である。

国家安全保障の確保と産業競争力の強化には、我が国の優位性を確保することを意識しつつ、国際連携のための戦略的展開を図るため、日本の総力を結集して独自開発すべき研究課題を特定する一方で、国際協力の取組みも進め、両者のバランスをとることが重要である。先進技術であ

る量子科学技術の国際連携には安全保障貿易管理の問題を回避することが難しいため、大学・研究機関からの技術流出の防止に向け、外国為替及び外国貿易法等に基づく管理体制の一層の強化が必要である。また、関連技術の統一基準を設けようという動きが世界的に加速している中、我が国の技術的な優位性を活かした国際標準化に係る戦略的な取組みを展開し、キャスティングボードの獲得を目指すことが重要である。さらに、知的財産については、産官学連携のためのオープンイノベーションに対応した取組みを促進するため、優れたシーズと企業等のニーズとのマッチング・事業化の支援拡充が重要である。

新たな学術分野・コミュニティと研究者ネットワークの形成には、中長期的な視点で、研究開発を持続的に支えられるようなエコシステムを形成する施策が重要である。異分野連携、学会・ワークショップなどを通じて研究領域の多様化を進めるとともに、新しい研究会の創設、既存学会における分科会、領域の見直し、研究者が他組織、産業界との共同研究に着手しやすい研究環境作り（知的財産管理の制度改革などを含む）が求められる。研究者ネットワーク形成の観点では、量子科学技術分野の人材層の質と厚みを高め、それを長期的に維持するため、大学における教育・研究環境を充実・強化し、次代を担う若手研究者・技術者を戦略的に育成するとともに、優れた国内・海外研究者の確保が重要である。また、研究者が研究と教育に専念できる環境や制度の構築、具体的には安定的地位の拡充などの待遇改善も必要である。学術分野・コミュニティを構成する研究者ネットワークは、前々段で述べた社会・経済的課題の解決に向けた戦略的研究開発との相互作用を強め、それによる相乗効果を発揮させることが重要である。

2. 研究開発を実施する意義

21 世紀以降の ICT 進化に伴う IoT の普及により、様々な人・モノ・組織がネットワークにつながり、ビッグデータと呼ばれる大量のデジタルデータの生成、収集、蓄積が進みつつある。それらデータは、AI を用いた分析によって、業務処理の効率化や予測精度の向上、最適なアドバイスの提供、効率的な機械の制御などに活用することができる。デジタル化社会の到来により確立されようとしている知的集約型社会では、国家間の相互依存関係が深化、複雑化するとともに、我が国の経済や国民の生活水準の維持・向上に対する様々な制約も顕在化しつつある。具体的には、エネルギー・資源の枯渇、食料自給率の低迷、少子高齢化や地域経済の疲弊、社会保障費の増大や、社会インフラの老朽化等の問題である。さらに、大規模地震や火山噴火などの自然災害リスク、我が国を取り巻く安全保障環境の変化などにも適切に対応し、国土や社会機能のレジリエンスを高めていくことが求められている。

デジタル化社会の実現に向けた社会的課題の解決と産業応用を視野に、急速に発展する兆しが見られる新しい技術体系の一つが量子科学技術である。新たな価値創出のコアとなる基盤技術のうち、我が国の強みを活かしたコンポーネントを各システムの要素に組み込むことで、国際優位性を確保し、国内外の社会・経済の多様なニーズに対応するシステム構築が可能となる。このような背景から、「光・量子技術」は、「第 5 期科学技術基本計画」（2016 年）と「統合イノベーション戦略 2019」（2019 年）において、それぞれ将来の重点技術領域、社会に変革をもたらす革新的技術として位置づけられている。

2-1. 現状認識と問題点

20 世紀の初めに完成を見た量子力学は、光子や電子、原子などの微視的な物理現象を、粒子性と波動性を併せ持つ量子として記述する学問体系である。量子力学を計算や通信に応用しようという動きとして、1982 年の Feynman による量子シミュレーションの概念を発端に、1985 年に 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）など、重要な理論の発表があった。また、1994 年、1995 年にそれぞれ素因数分解アルゴリズム、量子誤り訂正などの理論が Shor により相次いで発表され、現在主流の公開鍵暗号システムが破れるのでは、と注目を浴びた。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。

量子コヒーレンス、量子もつれ、量子重ね合わせといった量子力学に特有な性質の実験的検証と応用は、レーザー技術、エレクトロニクス（光子発生器、光子検出器等）など、量子を操作・制御する手法と技術の多大な進展によるところが大きい（詳細はコラム 1 を参照）。量子情報の媒体となる量子ビットとして、超伝導回路、ダイヤモンド NV 中心、冷却イオン、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、光量子などの物理系が知られており（コラム 1 と付録 3 を参照）、さらなる操作・制御性の向上や多様な応用可能性の探索に関する研究が進んでいる。量子ビットが量子性を保ち情報を保持できる時間をコヒーレンス時間と呼び、高度な操作・制御技術によりこれが大きく延びることになる。例えば、超伝導回路による量子ビットのコヒーレンス時間 (T_2) は、その動作が確認された 1999 年における 1 ns から 2015 年には 100 μ s を超え 5 桁以上長くなり、ダイヤモンド NV 中心の電子スピンでは 50 μ s (2003 年) から 700 μ s

(2009 年)、最近では同位体炭素 ^{12}C 濃度を高めることで 2.4 ms まで T_2 が延長した。

このように量子ビットの質が着実に上がっている最中の 2011 年、カナダのベンチャー企業である D-Wave が組み合わせ最適化問題を解く世界初の量子コンピュータを発表し、それに米国の Google が興味を示したことで、量子情報科学を最先端技術として利用しようという「量子科学技術」(「量子 2.0」)への世界的注目が集まった。量子科学技術の研究開発が将来の国家安全保障や産業競争力を左右する、と認識する国は多く、米国、欧州や中国を中心に、年間百億円以上の規模で政府投資がなされ始めたところである(詳細は付録 2 を参照)。さらに、諸外国では量子暗号・通信は航海中の艦隊や飛行中の航空機とのやり取りなど、軍事上の利用価値に注目している。例えば、米国では国防高等研究計画局 (Defense Advanced Research Projects Agency, DARPA) や民間などで 2000 年代初めから研究が進み、国家機密に移行した部分もあるとされる。第二次世界大戦において暗号とレーダーが戦争の様相を変えたように、量子科学技術を用いた兵器が将来の軍事情勢を大きく変える可能性を秘めているとして、開発競争はまさに量子技術覇権をめぐる戦いとも見られる。

以下、1 章に示した 4 つの技術領域における研究開発の現状と問題点について記載するが、これらは研究開発の推進方法と深く関係している。我が国では、持続的な経済成長や国際競争力の強化を考慮した量子科学技術に関する研究開発戦略がなく、新しい学術分野の誕生や産業・イノベーションを誘発するような集中的取組みはこれまでに実施されてこなかった。最近になって、関係府省において大型資金による研究開発プロジェクトが進められ個々の研究開発が国際的に認知されつつあるものの、民生利用に向けた取組みが中心で大学、研究機関、企業等に分散して実施されているため、世界の新しい潮流を作るような主導的地位を関連分野で築くことができていない。我が国の強みと弱みを勘案した上で、必要な研究課題を抽出し重点化するための仕組み作りが求められる。また、量子科学技術には「万能だ」、「実用化間近だ」などという誤解、過度な期待が一部にあるが、実際はハイリスクで不確実性の高い研究開発が多く、長期的な支援を要する。このような将来の技術基盤になる基礎研究の遂行や優れた人材の確保、育成など、持続的かつ戦略的な施策が必要となる。

【コラム 1 量子力学の誕生から量子科学技術(「量子 2.0」)に至る経緯】

ここでは、光子、原子、電子を操作・制御する手法や技術の多大な進展とともに、量子もつれ、量子コヒーレンス、量子重ね合わせといった量子力学に特有な性質の実験的検証と応用が如何に進んだかを述べる。

光の波動説に立った古典論では説明できない物理現象を理解しようという動きは、1900 年に黒体輻射を説明するために光のエネルギーが離散化すること(1918 年ノーベル物理学賞)、また 1905 年には光電効果を説明するために光量子仮説(1921 年ノーベル物理学賞)が提唱されたことに端を発する。その後、光科学の歴史を劇的に書き換えることになったのは 1960 年のレーザー発明(1964 年ノーベル物理学賞)である。コヒーレント光を人類が初めて手に入れたことで、計測技術や物質との相互作用の精緻制御法が大きく進展した。例えば、単一分子分光の実現(1989 年)や光の周波数計測を可能にした光周波数コム(2005 年ノーベル物理学賞)の発明は大きな影響を与えた。通常的光子は、間に引力や斥力を生じず、光ファイバーを用いれば遠方まで送れるため、情報通信の媒体として利用されてきた。また、最近における

量子通信の研究を促したのは、量子もつれを利用した量子テレポーテーション実験の成功（1997年）である。

原子操作法の進展は、磁氣的にトラップした中性原子気体を $0.1\sim 1\ \mu\text{K}$ 程度まで冷却することを可能にしたレーザー冷却法（1997年ノーベル物理学賞）の開発が契機となった。この方法では、原子遷移共鳴からごくわずかに低周波数にずらしたレーザー光の吸収放出過程を繰り返すことで、原子の運動エネルギーを輻射場に放散させ、原子系を冷却する（光のドップラー効果）。このようにして熱運動が抑えられた極低温の原子気体では、その波動性がマクロなスケールで現れることから、原子による干渉計測の実験などが行われた（1991年）。波動性を帯びた原子の密度を上げるとボーズ統計の効果が顕著になることを利用して、1995年にレーザー冷却したアルカリ原子（ ^{87}Rb 、 ^7Li 、 ^{23}Na ）でボース・アインシュタイン凝縮（BEC）の観測（2001年ノーベル物理学賞）に成功した。冷却原子を用いた原子干渉計による慣性センサ（原子干渉計型ジャイロスコープ、原子干渉計型重力加速度計）、冷却原子を光双極子トラップに捕捉した光格子時計などの実現に至っている。また、レーザー冷却法は1953年に開発されたイオントラップ法（1989年ノーベル物理学賞）にも応用され、捕捉、冷却された単一、あるいは複数イオンの応用も進んでいる。

量子力学における電子の挙動は、フェルミ=ディラック統計に従うことを利用して、バンド理論などを中心とした固体物理学の進展やそのエレクトロニクス応用に大きく寄与した。また、既存理論の枠組みでは説明できない、電子間相互作用によって発現する強相関電子系の現象を取り扱う研究が大きく展開した。一方、固体物理学のホットトピックである超伝導は、結晶格子の変位（フォノン）を媒介とした電子間の引力相互作用によって形成された電子対（クーパー対）の凝縮というマクロな量子現象であることがBCS理論（1972年ノーベル物理学賞）によって解明されている。超伝導体によるジョセフソン接合（超伝導体/絶縁体/超伝導体）の回路技術と高速現象の計測技術が1990年代に大きく進展したことにより、超伝導回路において異なる量子状態の重ね合わせの制御に成功した。このいわゆる超伝導量子ビットは、半導体と同様の集積化技術により多素子化を実現できる可能性があるため、主に量子コンピュータへの応用が進んでいる。また、同じ時期に計測の高感度化が進み、以前から知られていたダイヤモンド中の発光中心に対して量子ビットとしての研究も促した。具体的には、共焦点レーザー顕微鏡の実現によってダイヤモンドNV中心の単一スピン検出が可能になり、固体量子センサとしての研究に発展している。

また、固体物理学の分野では、1980年に見出された量子ホール効果（1985年ノーベル物理学賞）も大きな発見であり、電子状態のトポロジという概念につながった。1997年に、「トポロジカル誤り訂正」によって量子情報を守るトポロジカル・コンピューティングの概念が提唱され、今日まで量子コンピュータへの応用が検討されている。2000年以降になって、トポロジ概念は、量子スピンホール効果の提唱やトポロジカル絶縁体の発見、スキルミオンの実験的観測など、新しい研究の舞台を提供するに至っている。

(1) 量子コンピューティング・シミュレーション

ムーアの法則に従ったデバイスの微細化・集積化による性能向上の限界とデジタル化社会の到来による高効率な計算ニーズの高まりを背景に、世界中で期待が集まっているのが量子コンピューティングの研究開発である。一方、量子シミュレーションとは、Feynman が想起した量

子コンピュータからあらゆるアルゴリズムを実行できるという汎用性を取り除き、解こうとする量子系（多くは古典計算機で解くのがしばしば困難となる量子多体系）の問題に合わせて作成するモデル実験系である。すなわち、量子コンピュータは、複雑なモデルの作成から暗号解読まで、多様な問題を解決する画期的な方法を提供しうるが、量子シミュレーションはその弟分とも呼ぶべき物理学上の概念である。

現在の第2次量子コンピュータブームの火付け役は、2014年のカリフォルニア大学サンタバーバラ校の Martinis グループによる、高忠実度の超伝導 5 量子ビットデバイスの動作実証である。このブームの特徴は、理論・実験の両面で「量子コンピュータを如何に創るか」という工学的なフェーズに入ったことにある。Google、IBM、Microsoft、Intel、Alibaba といった IT 企業が研究開発投資を拡大し、QC Ware、Rigetti Computing、IonQ、1QBit、Zapata Computing などスタートアップも次々立ち上がった。研究開発レベルは、ハードウェア・ソフトウェアともに米国が高く、中国がその後を追従する。

超伝導量子ビット系では、1999年に日本で実現されてから研究が世界中で大きく進んだことで、現状 53 量子ビットデバイスの動作確認（2019年12月時点）までされており、100 量子ビット程度のサイズでの動作検証も予定されている。イオントラップ系では、160 量子ビットを搭載し 79 量子ビットの計算ができる量子コンピュータが報告されている。このサイズは量子誤り訂正符号の原理実証の他、計算能力の点での概念実証も可能なものと考えられる。ただし、ゲートの誤り率は高く、意味ある量子計算が実行できる量子回路の深さ（ステップ数）は限られる。超伝導量子ビット系、イオントラップ系以外にも、半導体量子ドット、トポロジカル量子（マヨラナ粒子）、光量子などによる量子ビット系も候補として研究開発が進められている。

誤り耐性量子コンピュータの実現にはまだ時間がかかる見込みである。したがって、その前に現実的に手に入る誤り耐性無しの量子コンピュータ（NISQ マシン）上で、誤りを許しながら、量子コンピュータで初めて実行可能になる、すなわち何らかの量子超越性を示す計算を実行することが重要な研究開発課題である。2019年10月に Google は、自社で独自に開発した量子プロセッサ「Sycamore」が世界最高のスーパーコンピュータで一万年かかる乱数生成の計算を 200 秒で解き、量子超越性を実証したと発表した。近年、NISQ マシンでの実行を考慮して、浅い量子回路と（古典）統計処理・最適化を組み合わせる量子・古典ハイブリッドアルゴリズムの提案が相次いでおり、そのような研究開発の流れがより大きくなると予想される。ただし現状では、扱われる問題の設定やアルゴリズムにはいずれも実用性はない。

ハードウェアの技術進展に伴い、その計算能力を最大限引き出すためのソフトウェアの重要性も増してきている。量子ソフトウェア開発の基盤となる量子プログラミング言語として QCL（Quantum Computation Language）、QPL（Quantum Programming Language）、QML（Quantum Machine Language）などが開発されている。最近では、実際の NISQ マシンやそれを模したシミュレータ上で量子化学計算や量子機械学習を実行できるような具体的プラットフォームも登場している。代表的な量子ソフトウェア開発キット（SDK）として、IBM の QISKit、Rigetti の Forest、スイス連邦工科大学（ETH）の Project Q、Microsoft の QDK、Google の Cirq、デルフト工科大学（Delft）の Quantum Inspire などがある。現状では、量子化学計算、量子機械学習について量子超越性の確認には至っていないが、NISQ マシンのキラーアプリケーションを明確にするための環境が世界では整いつつある。

量子回路モデルに基づくゲート型量子コンピュータとは異なる計算原理で動作するコンピュー

タとして量子アニーリングマシンが挙げられる。D-Wave による大規模な商用量子アニーリングマシンは、超伝導回路による 2000 量子ビットを搭載したアナログ量子コンピュータの一種で、量子揺らぎを巧みに利用して最適化問題を解くアルゴリズムを利用する。量子アニーリングの基本原理は我が国の研究者により見出されたという背景から、計算速度やコスト面において従来コンピュータに比べ優位性があるかどうか、実機による性能評価が日本とカナダの両国を中心に活発である。

本技術領域の最終的な目標は誤り耐性量子コンピュータの実現であるが、我が国ではそれに向けたスケールアップのための現実的な設計指針が未確立である。また、現状では、ソフトウェアの研究は IBM や D-Wave が提供するクラウドサービスを使わざるを得ず、その成果を我が国に蓄積することが難しい。大規模化に向けた要素技術の開発も遅れており、量子ビットのさらなる集積化に必要な電子回路設計・レイアウト・プロセス技術といった半導体技術や光技術、量子誤り訂正符号等の理論的アプローチも含め、全体的に研究者層が薄いという問題もある。

一方の量子シミュレータは、多様な量子多体系の基底状態やダイナミクスを模擬できるようになっている。実装方式として、冷却原子・分子系で数 10 万サイト、イオントラップ系では 300 サイト程度までのスケールが実証されている。また、量子アニーリング用に開発された超伝導量子ビット系でも 512 サイトの量子シミュレーション実験も行われた。ハバード模型、ハイゼンベルグ模型、イジング模型などの量子格子模型における定常状態の量子シミュレーションでは様々な成果が上がっているが、物質中における電子の挙動にとどまらず、大規模科学計算による物質設計を可能にするマシン、ダイナミクスや化学反応、非平衡系の量子計算スキームへの要求は強い。本技術領域は欧米が強く、特に欧州連合（EU）の Quantum Flagship では量子コンピュータと並んで量子シミュレーションを主要な研究ターゲットに掲げ重点化している。我が国では冷却原子・分子系の研究が盛んであり、文部科学省の光・量子フラッグシッププログラム（Q-LEAP）において、極低温リユードベリ原子で非平衡ダイナミクスを高速制御する超高速量子シミュレータと基底状態の短距離相互作用を精密制御する高機能ハバード量子シミュレータの開発が進む。

（2）量子計測・センシング

一般に、量子状態は温度や磁場といった環境からの雑音に対して非常に弱く、すぐに破壊してしまう。これは量子コンピュータや量子シミュレーションの実現を困難にしている主要因であるが、そのことを逆手にとって量子状態で環境を敏感に計測・センシングしようというのが本技術領域である。量子コヒーレンスと量子もつれを利用したものが検討され、前者ではかなり研究が進みその応用に主眼が移っている。ダイヤモンド NV 中心、室温超核偏極、原子干渉計、光格子時計、量子もつれセンサが我が国における主な研究対象であるが、全体として応用、産業化のための取組みが諸外国に比べて遅れている。

単一のダイヤモンド NV 中心に対する光検出磁気共鳴（Optically Detected Magnetic Resonance, ODMR）に成功してから 20 年以上にわたって、ドイツと米国を中心に基礎研究が盛んに進められ、温度、pH、磁気などのセンシングにおいて従来技術を凌ぐ可能性が見い出された。単一の電子スピンと核スピンのラビ振動の観測に加え、センサ感度を上げる研究として、材料高品質化によるコヒーレンス時間の延長、（コヒーレンス時間を短縮せずに）NV 中心数の増加、NV 中心の測定方法の改良などの重要な成果がある。また、電氣的制御で NV 中心から発光させる単一光子源の研究も進み、量子センサの制御法も確立されてきている。このような開発経緯の

中で、我が国の大学や研究機関の強みは、ダイヤモンド NV 中心の高い作製技術であり、高品質な材料を提供することで当該分野の発展に大きく貢献してきた。

ダイヤモンド NV 中心には、脳磁計測、心磁計測、細胞内計測、タンパク質構造解析などのバイオセンサから金属の欠陥検出まで、多くの応用が期待されている。ドイツと米国等から NVision Imaging Technologies、Quantum Diamond Technologies、SQUTEC、QNAMI、QZABRE などのスタートアップが多数立ち上がっており、今後数年のうちに市場が形成されていくと考えられる。中国は 10 年近く前からダイヤモンド NV 中心の研究を本格的に実施し、市場浸透を目指した技術開発を強力に進めてきている。一方、我が国の応用研究は遅れをとっていると言わざるを得ない状況であり、Q-LEAP の下で 2018 年度から東京工業大学を代表機関とする研究体制を整備して巻き返しを図っている。

ここ数年、室温の装置で超高感度な磁気共鳴イメージングを可能にする室温超核偏極の技術が注目されている。ペンタセン分子の励起状態を利用する手法を世界で初めて開発した我が国が当該分野を牽引した後、最近では米国やドイツにおいてダイヤモンド NV 中心を用いた手法も見い出され、本技術の医療・診断への応用展開が期待されている。関連する研究課題は、EU の Quantum Flagship にも採択されており、ドイツのスタートアップ NVision Imaging Technologies における大きな柱として位置づけられている。2019 年には極低温下の超核偏極と量子科学の研究者が共同で参画した大型の「Quantum Hyperpolarization」プロジェクトも始動し、ドイツのウルム大学に開設された Center for Quantum BioScience を中心拠点として進められる。このように生命科学・医療をダイヤモンド NV 中心、室温超核偏極技術等の有望な応用分野とする世界的潮流の中で、最近、我が国の研究機関を中心にして量子生命科学という新しい学術領域が立ち上がった。材料技術の強みを活かした新たな応用展開に期待が持たれている。

冷却原子による原子干渉計を用いた重力加速度計やジャイロスコープなどの量子慣性センサや、レーザーを用いた原子時計である光格子時計の研究も進展している。原子干渉計型の重力計は、原子 1 個の挙動を用いるため、高精度で絶対重力が計測できる。米国のスタンフォード大学が目標精度 $\Delta g/g < 10^{-15}$ 、高さ 10 メートルの原子落下タワーによって等価原理の検証や万有引力定数の精密測定への応用を進めているのはじめ、欧米及び中国を含む世界中で重力波検出、ダークマター検出などの基礎物理学実験も行われている。実用化に向けて、資源探査用や地殻変動研究用の重力計や重力勾配計の開発がフランスの Muquans 社などで進められているが、日本では研究の多くが原理実証に留まっている。

干渉計を回転すると角速度に応じて干渉の位相が変化する効果（Sagnac 効果）を用いて、地球の回転角速度や慣性空間に対する回転を測定するのがジャイロスコープである。1997 年に速度選択ラマン原子干渉計を使って、短期感度が $2 \times 10^{-8} \text{ rad/s}/\sqrt{\text{Hz}}$ と従来のレーザー光によるジャイロスコープに匹敵する成果が得られている。これを受け、より高い精度で長期安定度の実現と小型化を目指して、GPS の届かない場所向けの研究開発が国家安全保障との関連で大きく進展している。スタンフォード大学からは AOSense 社がスピンオフしている一方、我が国でも「冷却原子・イオンを用いた高性能ジャイロスコープの開発」に関する大規模プロジェクトが JST 未来社会創造事業で 2017 年から始まった。

他方、日本発の光格子時計は、次世代原子時計の新たな潮流となり、その精度 ($\Delta\nu/\nu$) は 10^{-18} 台（約 300 億年に 1 秒ずれる程度）に達し世界をリードしていることから、2026 年に決議が想定されている国際度量衡委員会での秒の再定義に対し積極的な国際貢献が期待される。現在、日

本をはじめ米国、欧州、中国など世界で 20 以上のグループが研究を進めており、世界の潮流は実用化に不可欠な小型化技術の開発である。最近、我が国でも、エレクトロニクスと光学系を 19 インチのラック 2 つに搭載し、実験室外での無人運転化とシステムの小型・堅牢・高信頼化及びリモートメンテナンスの実証に成功している。光格子時計のネットワーク化と相対論的測地の応用実証を通じて通信・タイムビジネスの市場獲得等につなげる超高精度時間計測の大規模プロジェクト「クラウド光格子時計による時空間情報基盤の構築」が JST 未来社会創造事業で 2018 年に始まっている。

量子もつれセンシングは、光あるいは物質の量子もつれによる機構を利用することで、古典技術では到達不可能な性能を示すことが知られている。量子もつれ光のイメージング・デバイスとしての応用例は量子もつれ顕微鏡や量子光干渉断層計（Optical Coherence Tomography）（量子 OCT）などである。レーザー光を 2 つに分け観察試料の隣接する 2 点に通過させてその位相差を干渉として検出する微分干渉顕微鏡に対して、我が国の研究者がレーザー光の代わりに量子もつれ状態の光を用い解像度向上を世界で初めて実現したのが量子もつれ顕微鏡である。一方、物質の量子もつれによるセンシングは、スクイーズドスピン状態を利用した提案が我が国で行われるとともに、最近では原子気体系での高度な量子制御が可能となったことによってここ数年で大きく発展している。量子もつれを利用した計測・センシング技術はまだ基礎研究が中心であるが、それと応用を結ぶ研究が必要である。

(3) 量子暗号・通信

量子力学的な効果を利用した暗号技術や通信技術の研究領域であり、究極の秘匿通信や微弱光でも超長距離通信が実現できると期待されている。1980 年代に BB84 と呼ばれる最初の量子暗号プロトコルが発表されたが、1994 年の Shor のアルゴリズムの発表によって現在使われている RSA 暗号が量子コンピュータで破られることが示されて以降、量子暗号の技術開発が活発になっている。量子暗号の技術領域では実装に向けた開発が進む一方、量子通信では量子中継・量子ネットワークの技術など、現状では将来へ向けた基礎研究が主である。

量子暗号システムには、単一光子で乱数列の送受信を行うための物理乱数生成、光子伝送、光子制御・検出や、乱数列から盗聴可能性のあるものを排除し実際の暗号に変換するための鍵蒸留など、様々な技術が含まれる。このシステムによって、従来の計算アルゴリズムに基づく暗号技術では不可能な、盗聴されていないことが完全に保証された暗号鍵を配送する技術が QKD である。QKD は、伝送データそのものを量子情報にエンコードするのではなく、送りたい情報を暗号化・復号するための鍵として 1 光子で 1 ビットずつ配送する。現状、送受信機などの必要な要素技術は揃い、システムとしての動作実証も済んでいるため、既に都市圏や都市間で実際の光ファイバーを用いて試験運用されている。通常の光通信と比較して距離や速度は限られ専用線が必要なことから用途は限定的であるが、応用開拓や標準化への取組みが開始されている。

これまでの精力的な研究開発により、BB84 以外のプロトコルが提案されるとともに、装置性能や安全性証明、解析手法の理論でも大きな進展があった。光ファイバーを用いた QKD では、安全な局舎 (trusted node) を介した QKD ネットワークのフィールド実証が世界各地で行われ、長期運転試験、異なる QKD 装置間の相互接続、ネットワーク制御の研究アプリケーションの開発などが進んでいる。これらは 2005 年の米国ボストンに始まり、欧州では 2008 年にウィーンで、日本では 2010 年に構築した Tokyo QKD Network により行われてきた。また、近年では中国に

おける進展が著しく、2017年には2000 kmに及ぶ世界最大の地上 QKD ネットワークの運用開始や、世界初の衛星―地上間 QKD 実証などを発表している。衛星利用の実験は、我が国でも最近実用的な超小型衛星による世界初の量子通信基礎実験に成功しており、世界各国で様々なプロジェクトが立ち上がりつつある。

我が国では、世界に先駆けて、サイバー脅威情報を暗号化通信するための評価実験やゲノム解析データの暗号化通信の実証実験など、QKD の装置やシステムの実用レベルでの評価も開始されている。また、2018年に英国の東芝欧州研究所（東芝欧州研）が、量子メモリを使わずに量子中継1回分の長距離化を可能とする Twin-field QKD 方式を提案し、実証に成功した。ここで用いられている送受信装置は海外製に比べても世界最高の性能であるが、品質保証などの大きな壁やコストの問題により、装置の市販や暗号サービスの提供など事業化には至っていない。さらに、一本の光ファイバー中での QKD 多重化や通常の光通信回線との共存も実用上の重要課題である。

これに対し、欧米では2000年代に入ると、スイスの ID Quantique 社や米国の MagiQTech 社など複数のスタートアップ企業が誕生し、機能は限定的であるものの QKD 装置の商用化に成功している。この他、2018年に韓国 SK Telecom、英国 British Telecom、中国 Huawei、スペイン Telefónica などの大手通信キャリアによって発表された量子暗号への投資も注目される。

QKD 標準化の活動として、古くから QKD デバイスや QKD システムなどの部品・モジュール・インターフェイスの仕様策定やサイドチャネル攻撃対策などの実装安全性に関わる標準が ETSI で議論されている。最近では、国際電気通信連合の ITU-T、国際標準化機構/国際電気標準会議 (International Organization for Standardization/International Electrotechnical Commission, ISO/IEC) の第一合同技術委員会などの国際標準化団体でも検討され始め、我が国の企業が主導してきた QKD ネットワークの基本構成・機能・サービス手順などに関する標準が承認されている。また、量子コンピュータでも解読困難な耐量子計算機暗号の標準規格化、現在の公開鍵認証基盤からの移行作業に関する検討も重要であり、米国の国立標準技術研究所 (National Institute for Standards and Technology, NIST) では2016年から関連プロジェクトを進めている。標準化動向の詳細はコラム2に示す。

一方、QKD は一度に鍵を伝送できる距離・速度に限界がある。BB84 方式の光ファイバを用いた場合の現性能としては、距離は光子が届く距離に制限を受けるため約 100 km、そのときの速度は約 1 kbps である。このため現状では、上記のとおり安全性の保証された局舎を介したネットワーク化が行われている。

これに対し、安全な局舎を使わない量子通信の長距離化には量子中継技術が必須であり、このために量子テレポーテーションや量子メモリといった新たな技術開発が進展している。量子状態を室温で長時間保持でき光で容易に初期化、読み出し可能なダイヤモンド NV 中心を量子メモリとして用いた技術や、光の送受信装置のみで実現可能な「全光量子中継」方式が量子中継の候補として挙げられる。これらの研究はまだ基礎研究段階にあり、量子中継のスケラビリティは誰も実証できていない。量子暗号だけでなく、現状では量子通信も、量子中継も1対1の通信プロトコルでしかない。現在のインターネットを支えている暗号技術、すなわち公開鍵暗号が1対百万、1対千万規模での電子署名を実行しているのと比較して、実現できる機能は限定的と言わざるを得ない。

量子中継と多数の量子中継で構成された量子ネットワークの技術に関しては、量子メモリの各種候補の研究開発だけでなく、それらと通信波長帯の光を繋ぐ波長変換技術の高度化が必要であ

る。量子ネットワークに関しては、長距離量子通信のプロトコルとしての通信理論とネットワーク上での配送理論の融合であるネットワーク符号化理論をはじめ、量子情報理論、情報理論的セキュリティなどの研究が進んでおり、今後はより実用的なネットワークの設計・制御の研究も盛んになると考えられる。本分野の基礎研究は欧州が先行しており、最近立ち上がった **Quantum Internet Alliance** によって量子中継のネットワーク制御の手法や制御プログラム、標準化の議論が組織的に進んでいくと考えられる。

(4) 量子マテリアル

物質の様々な性質を決めている主役は膨大な数の電子である。電子は、電荷 $-e$ と自転の自由度であるスピン $1/2$ を持ったフェルミ粒子で、結晶の作るポテンシャルと他の電子からのクーロン力を感じながら運動している。この複雑な多体問題を、量子力学、電磁気学と統計力学を駆使して理論的に解明し、物質の性質を説明、予言、設計する学問分野が、固体物理学である。金属、半導体と絶縁体の電氣的性質の違いを説明するためのバンド理論では、多体問題が平均場近似により 1 電子問題に帰着させるが、電子間の相互作用によって発現する現象も多く存在する。本技術領域は、このような量子多体系の創発現象を利用して、新しい物性や機能を生み出す材料創製に係るものである。

1980 年後半に一大ブームを巻き起こした高温超伝導の発見を契機として、強い電子間相互作用の重要性が広く認識され、バンド理論の枠組みでは捉えきれない強相関電子系と呼ばれる新たな学術領域の誕生につながり、高温超伝導体以外にもモット絶縁体、マルチフェロイック物質といった新物質群の発見がなされた。

同時期に起こった物性理論における大きな出来事は量子ホール効果である。これは半導体中の二次元電子系に強磁場を印加した際、ホール伝導度が e^2/h を単位に極めて高い精度で量子化する現象であり、その理論的解明のためにトポロジカル秩序と呼ばれる概念が導入された。その後、スピンホール効果や量子スピンホール効果の理論予測がなされ、これらの現象にも物質が持つトポロジカルな性質が関与していることから、一連の物質群はトポロジカル物質と呼ばれるようになった。トポロジカル物質として知られるのはトポロジカル絶縁体、ワイル半金属、スキルミオンなどで、超伝導、金属、半導体、絶縁体、磁性体、誘電体といった従来からの分類の枠を超える新たな物質群として大きな注目を集めている。新規トポロジカル物質の合成、結晶成長、薄膜化や計測・測定では、我が国の大学や研究機関が国際的に高い技術を有しており、理論の予測および実験的検証において重要な成果が輩出している。

トポロジカル秩序は、古典的な対称性や秩序変数によって特徴付けられない量子的な秩序であり、「電子状態の幾何学的性質」という観点から、高温超伝導と量子ホール系の理論には密接な関係があることも認識されてきた。この潮流は、波動関数の位相の情報を幾何学的な性質として表したベリー位相とそれに深く関与するスピン-軌道相互作用によって、金属強磁性体の異常ホール効果などの様々な現象を特徴付けるに至り、スピントロニクス分野でスピン流という考えが広がった。

スピントロニクスの歴史は、1988 年の巨大磁気抵抗 (Giant Magnetic Resistance, GMR) 効果の発見をきっかけにデバイス開発が世界中で進められ、1997 年にハードディスクドライブの GMR ヘッドとして実用化された。その間、1995 年に室温における大きなトンネル磁気抵抗 (Tunnel Magneto Resistance, TMR) 効果も報告された。TMR 効果は電子がトンネルできる程

度の薄い絶縁体層を強磁性層で挟んだときに、強磁性層の磁化の相対的な配置によってトンネル抵抗が変化する効果である。GMR 効果による磁気抵抗変化率（MR 比）が 5～15%程度であるのに対して、TMR 効果では MR 比が 20～70%と格段に高いことから、2004 年に超高記録密度用 TMR ヘッドとして実用化され、世界初の不揮発性メモリである磁気抵抗メモリ（Magnetoresistive Random Access Memory, MRAM）の実現にもつながった。この頃は、磁化が電気伝導に与える影響が研究の中心で、その後の 2000 年頃からは電気伝導が磁化に与える影響に興味を持たれるようになった。実験研究が大きく進んだ結果、電子のスピン角運動量の流れとして理論的予測はなされていたスピン流がスピンホール効果の実験で観測されるに至った。

スピン流は、電気的には絶縁性を示す物質であってもスピン波（マグノン）として生じるもので、スピントロニクスにおける基本的な概念の一つになった。また、磁気と電気の変換（スピンホール効果、逆スピンホール効果）、磁気と熱の変換（スピンゼーベック効果、スピンペルチェ効果）など、磁気と他の物理量との変換の基礎にもなっている。さらに、近年では音や振動といった機械運動とスピン流との変換も発見されている。熱に関わる分野をスピнкаロリトロニクス、力学的運動に関わる分野をスピンメカニクスと呼ばれることもある。以上の潮流は、絶縁体から電気や熱、力学、磁気エネルギーを取り出す新手法として期待され、最近ではその応用研究に注目が集まっている。

固体物理学における大きな発見とともに進展してきた量子マテリアルの研究は、量子光学などの学問の深化やフォトニクス技術（レーザー技術）の高度化によるところが大きい。新たな量子デバイスの原理を積極的に活用しようとする動きは、電子、光子、原子、イオンを 1 個のレベルで観測・制御する単一量子操作が可能になったことによる。例えば、量子ドットや超伝導量子ビットを用いた単一電子や単一磁束量子操作、微小共振器やフォトニック結晶を用いた単一光子操作などである。

最近ではさらに進んで、超小型化と低消費電力化などを目的とした様々なナノフォトニクス技術が光源、レーザー共振器、光受光器、光変調器、光スイッチ、光メモリなどのデバイスに応用され始めている。現状では、その例のほとんどが単一デバイスの性能達成にとどまっているが、高性能化と商品化は日本で先行している。例えば、京都大学では、10 W 以上の出力が可能なフォトニック結晶型の大面積面発光レーザー技術を開発し、これを浜松ホトニクスが商品化している。一方、デバイス集積化に関する取組みとしては、米国でシリコンフォトニクス技術により大規模な集積型フェーズドアレイを実現した例がある。

このように、光インターコネクトなど光素子の集積化が必要な応用に向けてはシリコンフォトニクス技術への期待が大きい。この技術はかなり開発が進んできており、シリコン細線導波路をベースにして、電気光学変調器、電気光学スイッチ、光受光器などを集積する技術が世界各地にあるファウンドリを通じて利用可能になりつつある。

【コラム2 量子科学技術の標準化動向】

(1) 量子コンピューティング

IEEE 内の国際標準化組織である IEEE Standards Association (IEEE-SA) は、2017 年に量子コンピューティング関連用語の定義策定に向けて、プロジェクト IEEE P7130「Standard for Quantum Computing Definitions」（2019 年に「Standard for Quantum Technologies

Definitions」に改称)を立ち上げている¹⁾。検討の対象は、量子技術の物理に関連する用語(トンネル効果、量子重ね合わせ、量子もつれなど)やハードウェア用語(半導体量子コンピューティング、捕捉イオン量子、光格子、溶液核磁気共鳴(NMR)など)である。策定メンバーには、IBM やカナダを拠点とする量子コンピューティングのスタートアップ 1Qbit に加え、量子アニーリング理論の提唱者である東京工業大学の西森秀稔教授らも名を連ねている。また、2018年には、IEEE P7131「Standard for Quantum Computing Performance Metrics & Performance Benchmarking」が発足し、量子コンピューティング性能の指標やベンチマーキングに関する標準化も推進されている²⁾。

(2) 量子暗号(QKD と耐量子計算機暗号)

2008年にETSIにおいてISG(Industrial Specification Group, ISG)・QKDが設置され、QKDデバイス・システムの構成、適合性や保証、評価方法、市場導入に関する標準化が進められている。本活動では、オーストリア研究センター、Hewlett-Packard社、ID Quantique社、マドリード大学、Telefónica社、東芝欧州研ケンブリッジ研究所などの創立メンバーに加え、我が国からも情報通信研究機構(National Institute of Information and Communications Technology, NICT)、東芝、NECなどが継続的に寄与している。

ITU-TによるQKD標準化活動では、SG(Study Group)13においてネットワーク基本構成に関する事項、SG17においてネットワークセキュリティに関する事項の国際標準化が進められている。我が国は、実証テストベッドTokyo QKD Network上で取り組んできたネットワーク技術や様々なセキュリティアプリケーションの開発、長期運用試験による研究成果を有しており、国際標準の骨格を形成するなど本活動に対する寄与が大きい。例えば、QKDネットワークの基本構成と機能、サービス手順などについての上記三者による国際標準勧告が、2019年6月に開催されたSG13会合にて、ITU-T初のQKDに関する国際標準Y.3800(量子鍵配送をサポートするネットワークのフレームワーク)勧告として承認された³⁾。

量子コンピュータに対して安全な耐量子計算機暗号のプロジェクトが、NISTによって進められている。2016年12月に標準化の候補暗号に関する公募が開始され、2018年から3～5年かけて提案された方式の安全性や実装性能を評価中である。世界各国の25カ国から応募があり、国別では米国と欧州からの応募が多く、アジア・オセアニア地域においては日本、韓国、中国、台湾、シンガポール、オーストラリアから提案された。また、我が国からは、KDDI、東芝、NICT、産業技術総合研究所、東京大学を含むグループによる提案であった。

(3) 光格子時計

時間の単位である「秒」の定義は、現在、セシウム原子のマイクロ波遷移に基づく原子時計で実現されているが、マイクロ波より周波数が5桁高い光遷移に基づく光格子時計を用いることで時計の相対精度が大幅に上がる可能性がある。したがって、国際度量衡委員会(CIPM)は、早くて2026年頃にセシウム原子時計に代わってより高精度な光格子時計を秒の新しい定義(秒の再定義)にする予定であり、その下部組織である時間・周波数諮問委員会(CCTF)秒の二次表現作業部会において「秒の二次表現」という秒の再定義の候補リストが作成されている。2012年、秒の二次表現作業部会は、光格子時計の最新成果をもとに「秒の二次表現」の更新を行い、産業技術総合研究所の開発した¹⁷¹Yb中性原子による光格子時計など3つが新

たに追加された⁴⁾。このように、我が国発である光格子時計の技術が、その基礎物理の解明やさらなる精度向上を通して、秒の再定義への多大な国際貢献につながると期待されている。

1) <https://standards.ieee.org/project/7130.html>

2) <https://standards.ieee.org/project/7131.html>

3) <https://www.nict.go.jp/press/2019/07/02-1.html>

4) https://www.aist.go.jp/aist_j/new_research/2012/nr20121101/nr20121101.html

2-2. 社会・経済的効果

デジタル化社会の到来とともに労働集約型社会から知識集約型社会へのパラダイムシフトが急速に進む中、データ駆動型社会の実現へ向けて量子科学技術の進展が産業や社会に大きな影響を与えると考えられる。急速な高齢化・労働人口減少が見込まれる中、量子科学技術に基づくIT（デジタル化）、AIによる革命を通じて、「生産性向上」の実現が期待できる。また、革新的な医療・診断や健康管理等に資する技術革新により「健康・医療・介護」の実現や、個人情報等の秘匿性の高いデジタル情報が急速に増大する中で高度なセキュリティを持つ暗号・通信技術により「安全・安心」の確保、高感度なセンサや新素材・デバイスを用いた蓄電、省・創エネルギー技術により「環境・エネルギー」分野への貢献も予想される。

量子科学技術は様々な領域で、新産業形成による世界・国内市場への寄与が期待されるが、以下では4つの技術領域において想定される社会・経済的効果を記載する。

(1) 量子コンピューティング・シミュレーション

現在のスーパーコンピュータでは非現実的な時間を要する問題を、超高速・超並列情報処理する量子コンピューティング・シミュレーションの技術により、情報通信、製造、金融、運輸、製薬、化学等の幅広い産業・社会分野で新たな価値を創出すると期待される。例えば、原子・分子レベルの大規模な量子化学計算が実現されることによって材料の分子設計が効率化し、化学会社による研究開発の期間が15～20%短縮するとの予想がある（BCGヘンダーソン研究所、2018年）。この予想は、百億ドル超と言われている高性能コンピュータの世界市場に対して、量子コンピューティングの影響が大きく及ぶ可能性を示唆している。

また、量子アニーリングマシンが組み合わせ最適化問題へ適用されることによって、デジタルマーケティング、資産構成の作成や交通渋滞の予測・解消等の新しいサービス市場が開拓されると予想される。国土交通省の試算によれば、日本全国の交通渋滞による年間の経済損失額は約12兆円に及び、我が国の経済面や環境面においても交通渋滞の解消は深刻な課題の一つとなっている。自動運転をはじめとする最先端技術に期待が高まっているが、交通渋滞は道路工事や交通事故、また各車両の車間距離等、複合的な要因で起こるため、本格的な自動運転社会の到来に向けた“全体最適化”の手法としても量子コンピュータへの期待は大きい。

量子コンピュータに期待されるもう一つ重要な点はコンピューティングに要する消費電力が圧倒的に少ないことである。深層学習などの機械学習モデルを訓練するプロセスが大量の電力を消費することは、AI技術における最大の問題であるが、それに対する根本的な解決策は未だ見出されていない。量子コンピュータを用いたAIがこの電力消費の緩和に重要な役割を果たすと見ら

れている。例えば、D-Wave の量子アニーリングマシンでは、消費電力が 25 kW 以下であるが、その大部分は冷却装置とフロントエンド・サーバーの作動に使われているため、計算規模が拡大しても演算の主要部分における電力はほとんど増大しない。したがって、将来予想される大規模演算においては消費電力の面で圧倒的に有利となる。

(2) 量子計測・センシング

既存の技術とは桁違いの精度・感度を持つ量子計測・センシングの技術領域において、他国に依存しない我が国独自の技術基盤を確立し国家の安全保障等に寄与することが可能になる。また、センサ・イメージング分野で、従来技術に比べ超高感度・高分解能を実現することにより、生命現象の本質的理解に基づく新たな診断・治療法、予防法などが登場し、健康長寿の実現と関連する医療・ヘルスケア産業の競争力強化が強く期待される。例えば、様々な細胞（肝細胞、神経細胞・ニューロン、その他実質・間質細胞など）、生体分子（タンパク質など）を対象に、ナノメートルの空間分解能での磁場、電場、温度などの固体量子センサによる計測・センシングや単一分子レベルの NMR が大きく進展すると考えられる。また、ダイヤモンド NV 中心、分子の励起状態を用いた超核偏極技術や量子もつれによる磁気共鳴画像（Magnetic Resonance Imaging, MRI）の超高感度化は人体深部の代謝過程の非侵襲的観察を、量子もつれ顕微鏡や量子 OCT は生体組織の皮下や様々な細胞・微生物の高分解能観測、非侵襲的観察を可能とする。

国家安全保障の面で最も実用化が期待される応用分野の一つに、原子干渉計を搭載した高感度なジャイロスコープや高精度な重力加速度計などの量子慣性センサが挙げられる。量子慣性センサは、高性能自己位置推定機器として自動運転者の多重安全確保や自動運転船舶を用いた物流における安全性確保、光格子時計は高精度な標高基準の維持管理といった相対論的測地への展開、マグマ溜まりの変化検知や GPS 信号の届かない海底のような場所での地殻変動観測などの時空間計測インフラとして期待される。

GPS を含む全地球測位衛星システム（Global Navigation Satellite System, GNSS）の市場については、EU の下で測位衛星の運用、産業創出やセキュリティなどの役割を担う GSA (European GNSS Agency) による予測が詳しい。それによると、GNSS 対応機器は 2025 年までに 90 億台が世界中で利用されると予測している。1,600 億ユーロに達する現在の世界市場はスマートフォン利用を中心とした個人向けの位置情報サービスとカーナビなどの道路交通で全体の 9 割を超えるが、これらの分野には機器の小型化が不可欠であり、量子慣性センサの応用にはまだまだ時間がかかる。当面は、小規模な市場であるが、測量、精密農業、航空、海洋、鉄道などの分野での利用が期待される。

(3) 量子暗号・通信

量子コンピュータでも絶対に破られない原理的安全性を持つ暗号・通信技術開発により、機密性・完全性等を有するセキュリティ環境の構築・高度化が達成され、国民の安全・安心の確保や新産業形成と市場拡大が期待される。例えば、国内外の機関を跨ぐ秘匿通信網や地球観測により高価値の情報を扱う衛星通信ビジネス分野における情報セキュリティの強化が挙げられる。また、個人の生命に関わる情報を扱う医療分野、知的財産情報や製造ノウハウ、経営情報を扱う企業の重要通信文や、金融分野における情報セキュリティなども守られることが期待できる。

QKD 装置については、欧米のスタートアップ企業が製品化を実現しているものの、大きな市

場形成には至っていない。コンポーネントレベルの製品、関連するネットワーク製品を含む量子暗号の世界市場規模は、2018年には1億100万ドルであったが、2023年には5億600万ドルに達するとの予想がある（MarketsandMarkets、2019年）。デジタル化の時代におけるサイバー攻撃事件の増加、サイバーセキュリティコストの増加、クラウドやIoT技術向けの次世代セキュリティソリューション需要増、次世代ワイヤレスネットワーク技術の進化が成長を後押ししていくと考えられる。

さらに先の技術であるが、格段に高いセキュリティを持つ通信ネットワーク構築による量子インターネットの社会実装には大きな期待が持たれている。

(4) 量子マテリアル

極微小空間で発現する新たな量子現象を利用したトポロジカル材料、スピントロニクス材料、フォトリソグラフィによるナノ構造デバイスによって、材料・半導体・デバイス製造、蓄電や省・創エネルギー技術等での新産業形成と市場拡大が期待される。

例えば、トポロジカル材料の工学応用の一つにトポロジカル量子コンピューティングと呼ばれるものがある。電子が持つトポロジカルな性質を利用することによって、量子誤り訂正符号の性能が大幅に向上した量子計算が可能であることが理論的に提唱されている。これが量子コンピューティングにもたらす影響は大きく、欧米を中心にトポロジカル量子コンピューティングの研究開発が本格化しつつある。

また、スピントロニクス材料などの例については、科学技術振興機構研究開発戦略センター「戦略プロポーザル『トポロジカル量子物質』～量子力学の新展開がもたらすデバイスイノベーション～」に詳しく述べられている。電子スピンを動作原理に積極的に組み入れたデバイス応用として不揮発性メモリ、高感度磁気センサなどへの展開が考えられる。現在、コンピュータに対する低消費電力化への大きなニーズの流れがある中、既存メモリよりも低い電力消費レベルの次世代メモリへの期待は大きく、その世界市場は2020年に370億ドルに達するとの予測がなされている（MarketsandMarkets、2015年）。

2-3. 科学技術上の効果

量子科学技術が及ぼす科学技術上のインパクトは様々な分野に及ぶ。まず、量子コンピューティング・シミュレーションの技術領域に対して例を挙げる。量子コンピュータによる量子化学計算は化学・材料の研究開発に大きな影響を与える。例えば、NISQマシンによる大規模計算が可能になることで、人工光合成、二次電池、金属錯体触媒などの研究にブレークスルーをもたらす可能性がある。加えて、機械学習などAIへの応用も注目され、NISQマシンの重要な研究課題になっている。これらの例に共通なのは、古典コンピュータと量子コンピュータを両方とも使う量子・古典ハイブリッドアルゴリズムが期待されている点である。量子科学技術に古典的な従来手法を組み合わせるハイブリッド化によって、新技術の誕生が期待される。

宇宙や生命などの現象を含む複雑系の科学に対して、新展開をもたらすことも期待される。2011年、我が国の研究者によって、物理学の基本原則である不確定性原理に穴があることがスピン測定実験において実証された。基本原則を覆すこの成果は、基礎科学の発展だけにとどまらず、ナノサイエンスの新たな測定技術、重力波検出への応用などに影響を及ぼすことが予想される。

もともと、量子力学に加えて現代物理学の柱を構成するのが、極大の宇宙を構成する時空と重力の理論である一般相対性理論であり、宇宙論と量子科学技術の関連は深い。一方、生命科学と量子科学技術の接点には、量子力学の言葉で生命現象を記述しようとする科学の一分野としての量子生物学が知られている。量子生物学は 1930 年代に登場しており新しい学問ではないが、最近の高度な分光的手法を用いた精密な実験によって、量子力学でのみ説明可能な生体の仕組みが発見され、活況を呈しつつある。今後、従来からの量子生物学の単なる延長でなく、量子科学技術が生命科学や医療・診断技術と融合した新しい学問体系を生み出すことも期待できる。

さらに、各技術領域の融合や異なる量子系の結合による量子-量子複合技術の進展にも期待が高まる。量子コンピュータはそれ単体ではなく、量子センサや量子通信などの量子情報処理技術のほか、インターネットやスマートフォンなどの現代 ICT との適材適所の組み合わせによって、日常生活に大きな変革をもたらすことが期待される。超伝導回路などの巨視的な系における量子状態は、人工的なパラメータ設計が可能であると同時に、光やマイクロ波といった電磁場、電子やスピンといった微視的な量子的自由度との結合が容易であるため、複合化により多様な新しい技術が生まれつつある。

量子科学技術のほとんどは未だ実用化レベルには達していないが、近い将来、普及が始まったときには、それを使いこなすための「量子科学技術リテラシー」が重要となるだろう。当然、量子科学技術によるデバイスやシステムは量子力学の原理にしたがって動作するので、量子科学技術リテラシーの獲得にはまず量子力学そのものの理解が必要になる。本研究開発の領域では、量子力学を技術として使いこなすための量子情報科学が中心となるが、それに限定されず古典・従来技術との融合領域や AI、医療・診断などの応用技術に関する知識も求められる。したがって、旧来の枠組みからは修得が困難である異分野の技術、知識を習得し、学際的分野で活躍しうる多様な人材が輩出すると期待される。

3. 具体的な研究開発課題

本章で記載する研究開発課題には、社会実装に向けた検討が進められる実用化間近の技術もあるが、多くは未だ基礎研究段階にある。したがって、高い技術力の確保と分厚い人材層の構築という観点から、幅広い分野を対象に長期的視野に立ったサイエンスベースでの研究開発を着実に推進していくことが重要である。1、2章で掲げた主要な4領域の発展には、各領域における課題そのものに加えて、これらを横断的に支える共通基盤としての量子科学技術が不可欠である。そこで、主要な4領域だけではカバーできない新たな量子科学技術の種となる新学理・新技術や共通原理・共通ツールを「共通量子技術基盤」としてまとめている。以下、これらの5つに分けて記載する（図3-1）。

- 3-1. 量子コンピューティング・シミュレーション
- 3-2. 量子計測・センシング
- 3-3. 量子暗号・通信
- 3-4. 量子マテリアル
- 3-5. 共通量子技術基盤



図3-1 具体的な研究開発課題の概略図

3-1. 量子コンピューティング・シミュレーション

NISQマシンに適したアプリケーションの探索に向け、量子・古典ハイブリッドアルゴリズムの精力的な研究開発が不可欠である。現在期待されている量子化学計算と量子機械学習への応用

を目指す量子・古典ハイブリッドアルゴリズムの開発には、アルゴリズムをプログラムとして書き下すためのソフトウェア開発環境を整備する必要がある。コンパイラ、ライブラリ、デバッガなどの各種ツール、誤りのある量子デバイスの振る舞いをシミュレーションするシミュレータ、量子プログラミング言語など、従来のコンピュータ科学や電子工学がターゲットとしてきた研究開発の量子版への展開が必要である。

そのためには、量子ビットを集積したデバイスや新しい量子ソフトウェアの実力を測るのに不可欠なテストベッドとしての実機を国内で開発することが必要である。重要となる量子誤り訂正は量子ビット集積チップ上に実装されることから、量子ビットデバイス、量子ソフトウェア、システムといった専門性の異なる研究者の連携が不可欠である。我が国に蓄積のある超伝導量子ビットを構成要素とし、そのコヒーレンス時間を増大させるとともに、量子誤り訂正の方式、マイクロ波多重回路、3次元実装技術、極低温冷却システムなどの開発を重点的に進めることを提案する。

超伝導回路方式、イオントラップ方式ともに誤り耐性量子コンピュータの実現に向けた計算機アーキテクチャ全体（ソフトウェア、システムアーキテクチャ、量子回路最適化・コンパイラ、システム化技術、デバイス化技術）を強化するための取り組みも重要である。アーキテクチャのデザインの根幹は量子誤り訂正符号を如何に取り入れるかであるため、ハードウェア実装性に優れた新しい量子誤り訂正符号の開発を最重要課題に据えた上で、全体的なアーキテクチャの整理が求められる。アーキテクチャ、アルゴリズムを含む量子ソフトウェア開発では、新しい量子誤り訂正のアイデアに加えて、ソフトウェアを量子ビット集積チップ上で実行するため、コンパイラの開発も必要になる。他の量子ビット系の制御に係る基礎レベルの研究として、量子ビット集積度の向上、量子コヒーレンスの破壊要因の理解とそれに基づく改善、量子ゲート操作の忠実度向上を目指す取り組みや、制御用エレクトロニクスの開発を量子物理、電子工学、材料科学の研究者の連携により進めるべきである。

量子アニーリングマシンの研究開発は、早期の実用化に向け、ハードウェア開発はもちろんのこと、ソフトウェア開発とアプリケーション発掘の観点からも幅広い視野で研究開発を進めることが大切だと考えられる。特に、ハードウェアとソフトウェア開発の駆動力となるアプリケーション発掘、逆にアプリケーション発掘やソフトウェア開発のためのハードウェアの大規模化などの研究開発を民間企業も巻き込んで促進すべきである。また、量子アニーリングでは、横磁場の代わりに量子力学的な多体相互作用を量子揺らぎとして導入することで、万能量子コンピュータと等価になることが理論的に示されている。したがって、将来的には量子アニーリングマシンとゲート型量子コンピュータの開発が同じ方向に進む可能性がある。どちらの方式も演算素子段階、あるいは実装段階で要求される課題は類似の部分が多く、ハードウェアの研究開発では協力的な推進、ソフトウェアでは量子アニーリング方式の進化した姿の追求も課題となろう。

量子シミュレータの研究では、現在のNISQ量子コンピュータには困難な課題、例えばサイズが大きく大量の量子もつれやコヒーレンスを要求する量子多体系のような複雑な計算の実現を目指すべきである。また、量子多体系における外場刺激後のダイナミクス（時間発展）の計算や、格子模型で表しにくい非結晶系・不規則系（ガラス、液体など）の計算は、格子系の定常状態の計算に比べて難易度は格段に上であるが、産業応用上の重要性も高い。量子コンピュータの開発課題と同様に、従来の古典的システムでは実行不可能な問題が量子シミュレータで取り扱えることの実証も重要である。そのための問題探索と実証実験が喫緊の課題である。

3-2. 量子計測・センシング

量子計測・センシングの技術領域では、新世代の原子時計や超精密センサの実現により、天然資源探査や医療・診断から GPS の届かない海中等の環境でのナビゲーションまで可能となることが期待され、応用分野や産業への出口を明確にし、基礎と応用を結ぶ、あるいは社会実装を強く指向した研究開発の推進が望まれる。例として、ダイヤモンド NV 中心、室温超核偏極、原子干渉計型ジャイロスコープ、光格子時計、量子もつれセンサに関する具体的な研究開発課題を以下に示す。

ダイヤモンド NV 中心の作製技術としては、化学気相成長法 (CVD) により合成中に窒素を添加したり、窒素イオンを注入したり、予め窒素が含まれているダイヤモンドに電子線を照射したりする方法がある。イオン注入もしくは電子線照射の手法では、最後に 600℃ 以上の高温アニールを行う必要がある。国際的にも高い作製技術を持っている我が国では、ダイヤモンド単結晶の大型化と同時に高品質化も目指し、それによりコヒーレンス時間を増大させることや、炭化ケイ素 (SiC) などの新しい材料の探索も引き続き課題である。一方、センシングの基礎理論については研究者が諸外国に比べ手薄であるため、人材の確保と育成を進めながら、基礎から応用まで見通した研究開発が求められる。

ダイヤモンド NV 中心によるセンシング技術に加えて、分子の励起状態などを利用した室温超核偏極技術、量子もつれによるセンシング技術も生体計測への応用が期待される。例えば、ダイヤモンド NV 中心を利用した量子センサによる脳磁計測や、細胞局所における様々な物理パラメータ (温度、磁場、pH 等) の計測技術の確立により、脳科学や生命科学への貢献が求められる。また、量子イメージングによる非侵襲的・超高画質診断技術の確立や、超高画質脳イメージング技術開発による認知症・神経変性疾患など、先端医療への直接的な貢献も重要である。医療・診断技術への応用と量子生命科学研究の推進という 2 つの方向性の中で、既知の応用分野に向けてのプロトタイプ開発と製品化、新たな応用分野の探索が重要な課題といえる。

原子干渉計型ジャイロスコープについては、我が国が保有する世界的に高い技術力に基づき、原理実証から実用化に向けての研究開発が必要である。2~3 桁の感度向上と装置全体の小型化とを達成することで、振動や加速を伴う実使用環境下でも機能するセンサとしての実装と様々な輸送機器への搭載を通じて、高性能自己位置推定機器の実証機の開発を目指すべきである。原子干渉計型ジャイロスコープの性能が桁で向上すると、重力異常や鉛直線偏差といった極微小な重力変動が自己位置推定に与える影響が無視できなくなるため、原理的にはこの影響を補正するための重力勾配計も必要となる。以上の研究開発を通じて、三次元ジャイロスコープと重力加速度計を用いた慣性航法による非 GPS ナビゲーションの実現を見据えなければならない。

光格子時計については社会実装のための応用実証と基礎学理の深化が重要である。18 桁の精度の光格子時計を用いれば、高さが数 cm だけ違う 2 台の時計で時間の進み方の差が観測できるため、それらをネットワークで結べば、設置場所における微小な重力ポテンシャルの変化が高精度に計測できることとなる。小型乗用車への光格子時計の実装により可搬化が実現することで、相対論的測地の地震学、火山学への応用と実地調査による実証を進めるとともに、18 桁精度の商用光格子時計のプロトタイプ機器の実現、世界初の製品化を目指すべきである。通信ネットワーク網への光格子時計の網羅的設置による高精度時間インフラ構築やその社会利用がその先にある。一方、これらの開発で得た知見のフィードバックによる精度の向上や、物理定数の恒常性の検証、標準モデルを超える新たな物理法則の探索などの基礎研究も必要である。このような光格子時計

のデファクト化と超精密計測による基礎物理学の新展開を図ることで、秒の再定義に対して我が国による大きな寄与が期待される。

3-3. 量子暗号・通信

量子暗号による高度なセキュリティを必要とする応用分野の同定は、本技術領域における今後の発展にとって極めて重要である。早期の QKD 装置の市場投入、試験運用によりキラーアプリを探索する目的で、機密情報のやり取りがある政府関連機関への導入が望まれる。これに対し、民生向けは普及に時間がかかると予想されるため、金融取引やゲノム・医療情報のやり取りなどの具体的な用途での概念実証から始め、社会実装への道筋を示すことが重要である。また、QKD と秘密分散や秘匿計算などの既存の暗号技術とを組み合わせた新サービスや、量子中継なしの比較的短距離でもいいので、例えば 5G/全光ネットワークと併存する量子暗号システムの創出により社会実装を追求することが重要である。

光波長多重化などの既存技術や、量子暗号システムの様々な要素技術（物理乱数生成器、光子伝送、光子制御・検出技術、鍵蒸留技術）を活用することによって、鍵配信速度のさらなる向上や通信インフラとしての安定性を実現するとともに、QKD 装置の低価格化を追求する。また、情報理論や暗号理論、光ネットワーク技術、ワイヤレスネットワーク技術と融合させ、新しい技術体系へ移行することも短期的には重要である。これらの技術開発と同時に、QKD ネットワークのフレームワーク、セキュリティ、鍵管理方式、アーキテクチャ、量子乱数源に係る ETSI、ITU-T の議論を戦略的に主導すべきである。

一方、中長期的な視点からは、通信衛星 QKD や長距離 QKD、新原理に基づく次世代 QKD の研究開発が重要である。宇宙空間は光ファイバーに比べ光子の減衰が圧倒的に小さく、通信衛星による大陸間での長距離 QKD システムの実装に適している。光子伝送の高速化、高精度レーザー捕捉追尾技術等の開発や光通信・QKD 装置を搭載した試験衛星の打ち上げなどが必要な研究開発課題である。地上の光ファイバーネットワークと衛星ネットワークを統合し、地球規模のセキュアネットワークインフラを構築していくことが求められる。

高速化・長距離化に向けた量子中継の研究開発課題として、量子メモリのコヒーレンス時間や操作精度の向上に加えて、（通信は光で行うことから）通信波長帯の光子とメモリとの間の量子メディア変換（転写）や量子メモリ、量子ゲート技術の高度化が必要である。また、量子メモリ方式と並行して「全光量子中継」技術の研究開発も進めるべきであり、量子もつれ光子を効率的に生成するため、高効率な光子源や低損失の光集積回路の開発など、これまで進められてきた光デバイスの研究開発をさらに発展させる必要がある。これによって、規模拡大が可能な量子中継の原理実証を行い、小規模な量子ネットワークの実現を目指すものである。

多数の量子中継器で構成された大規模ネットワークは、QKD の広域化だけでなく、複数の量子コンピュータ間で量子情報をやり取りしながらの分散量子計算、原子時計の精密な時刻同期、宇宙望遠鏡の回折限界を破る量子望遠鏡や量子センサーネットワークなど、様々な分野への波及効果が予想される。このような量子セキュリティ技術プラットフォームを確立し量子インターネットへの道筋をつけるため、保存した量子状態の破壊あるいは情報漏えいのない転写の成功が通知される伝令機能を量子テレポーテーションの原理により実現することや、光万能量子ゲートと小規模量子符号化回路の開発、量子ネットワークの理論、設計・制御の実証的研究も必要とな

る。暗号装置の広範な普及という中長期目標の下、ガイドラインの策定や必要な通信インフラの整備を進めるに当たって、耐量子計算機暗号の標準化活動を推進するなど、将来まで見据えた組織的活動も重要である。

3-4. 量子マテリアル

本技術領域では、コヒーレンスを長時間保つ量子ビットや室温動作が可能な新規デバイスなど、次世代の量子科学技術に貢献できる魅力的な機能と、環境擾乱に堅牢（ロバスト）な量子系を提供する新規量子マテリアルを継続的に創出することが主題となる。加えて、エレクトロニクス、スピントロニクス、フォトンクスといった既存の分野に革新を起こすような新概念、新物質、新技術の創出も求められている。そのために、新規量子物性・物質を予測可能とする新しい理論体系の構築や、第一原理計算をはじめとする計算手法の高度化、データ科学の併用などが有効と考えられる。以下では、ここ 10 年程度の進展が著しいトポロジカル量子物質、スピントロニクス材料、エネルギー変換材料、フォトンクス材料に焦点を当て、具体的な研究開発課題の代表例を列記する。

（トポロジカル量子物質）

マヨラナ粒子を用いたトポロジカル量子コンピュータは、誤り訂正符号化によるオーバーヘッドの大幅な低減が期待されるため、その実現に向けた技術開発が必要である。通常の量子コンピュータのゲート操作に加えて、新たなアルゴリズムやアーキテクチャの構築なども課題となる。また、トポロジカル絶縁体やワイル磁性体が持つトポロジカルな性質を用いたスピン-電荷変換のさらなる高効率化を図る研究や、電子系におけるトポロジーの概念をフォトンクス技術に適用することで、低損失・高速な光通信、光メモリ応用を目指す研究も重要である。

（スピントロニクス材料）

半導体スピントロニクス材料開発に関しては、高いキュリー温度（ T_C ）を得るための指針を確立するため、結晶成長機構の解明、欠陥やキャリア濃度に対する制御方法の開発、バンド構造と強磁性発現機構の理解が求められる。また、スピン MOSFET デバイスでは、室温動作、高いトランジスタ性能、平行磁化と反平行磁化の違いによる大きな磁気抵抗比（磁気電流比）など、すべての要件を満足するための研究開発が必要である。スピン-軌道相互作用の大きな元素はレアアースに多く、新材料の素材を選択するに当たり元素戦略的な観点も必要となる。

（エネルギー変換材料）

安価で大量作製が可能な熱電変換素子や単一デバイスで熱、振動、光等からエネルギーを獲得する多源環境発電等の革新的エネルギー変換技術が求められる中、学術界ではスピンゼーベック効果や異常ネルンスト効果などの量子効果が注目されている。それらを工学応用するためには、熱的運動 $\leftrightarrow$ スピン流 $\leftrightarrow$ 電流の変換効率の桁違いの向上が必要であり、新物質の開発と原子レベルでの構造制御技術が必要になる。

（フォトンクス材料）

省エネルギー光源や次世代量子通信の実現のためには、量子ドットやトポロジカルフォトンク結晶などを用いた新概念による高効率レーザーの開発や、光学限界を超える分光素子や電磁波遮蔽を実現するメタマテリアル開発が必要である。シリコンフォトンクス、ナノフォトンクスの競争力を強化する上で、世界中の人、資金、技術、情報が集まるハブとしての機能を持つ拠点な

どにより研究開発のネットワークを広げていくことが重要である。

上記の量子マテリアルとは異なり、現時点では応用展開が想定されていないものであっても、例えば、量子多体効果により自発的に生じる自己組織化的現象である量子液晶や通常の結晶では実現し得ない高対称性を有する準結晶といった、固体物理学に新たなパラダイムシフトを起こしうる新奇物質群の今後の展開にも目を向けるべきである。これらの研究領域は、2019年度から科学研究費助成事業新学術領域研究（研究領域提案型）に採択されている（付録2を参照）。

3-5. 共通量子技術基盤

上記4つの技術領域の発展には、根底に横たわる普遍的な学理基盤と、各技術領域を様々な角度から支える工学基盤が必要である。このような共通量子技術基盤の研究開発は、これまでAMOや量子光学、量子エレクトロニクスの分野で精力的に進められてきた。高精度の単一光子制御技術、固体量子ビット基盤技術、光・固体量子ビット間のインターフェイス技術などの量子測定・操作・制御技術を今後も強力に発展させていく必要がある。

AMO分野では、冷却原子の配置・トラップ技術の高度化や、利用可能な原子種の拡大などが重要課題である。これらは直接的に原子干渉計や光格子時計などに必須の要素技術であるだけでなく、量子コンピュータ・シミュレータの実装にも貢献する。冷却中性原子系とイオントラップ系ではそれぞれに利点と欠点があり、共通する要素も少なくないため、相互連携を意識した研究開発が求められる。一方、量子光学、量子エレクトロニクスに関しては、室温下で高効率な単一光子発生器、高い性能（高検出効率、低暗計数率、高速動作、光子数識別）を有する光子検出器の開発などに加えて、高効率かつ高精度な量子もつれ光子の生成・制御や多体量子もつれ状態の操作が、量子中継やマルチパーティ量子通信、さらには光量子コンピュータへの展開に向けて重要な技術課題になっている。

また、超伝導回路、半導体量子ドット、ダイヤモンドNV中心など、固体量子ビットの様々な方式に対して、コヒーレンス時間と制御性双方のさらなる向上が必要である。同じ量子ビットでも、例えば量子コンピュータと量子中継、量子メモリそれぞれに要求仕様が異なることに留意すべきである。

異種の量子系をつないだハイブリッド量子科学とそのインターフェイスの技術は極めて重要である。中でも固体量子ビットと光との結合をどのように実現するかは、論理量子ビットの構築や量子メディア変換など様々な研究課題で必要な技術となる。上記のとおり、通信は光で行われることを前提とすれば、量子メモリや量子レジスタなどの形で保持されている量子情報を量子情報として取り出して通信するためには、必ず量子情報間の変換インターフェイスが必要となる。

以上のような要素技術を、既存の微細加工技術、光デバイスやエレクトロニクスと組み合わせて一体的に設計・製造するような枠組みの構築が必要である。また、様々な量子系の現象を計測するための半導体技術、極低温エレクトロニクス、微細解析技術の研究開発も重要であることから、量子ビーム解析・評価技術をはじめとして、周辺・関連技術も包含した裾野の広い基礎基盤的課題の推進、さらにそれらを実現する最先端機器等の整備、共用化の促進も求められる。

4. 研究開発の推進方法および時間軸

本プロポーザルでは、量子科学技術を主要な4つの技術領域とそれらを深化、発展させるための共通量子技術基盤の領域で構成されたとしたが、そこで取り組まれるべき研究開発課題は第3章に示したように多岐に渡り、またそれぞれの達成時間軸も大きく異なる。そのことを踏まえ、本章では一概に研究開発に要する時間を明確に特定せず、短中期、中長期の両側面から各課題の解決に向けた取組みを展開することを提案する。

このような取組みを進めるに当たっては、研究開発を促進し費用対効果を最大化するための中核となる研究開発拠点の形成は不可欠である。国際的に認知・評価されるトップクラスの研究開発拠点には、国内はもとより諸外国から優れた研究者を惹きつける場としての機能が期待できる。海外からの人材確保には、傑出した国際的リーダーの選定、待遇の国際化（給与、言語、昇進など）、国際ネットワーク化を進めることが鍵となる。長期的な戦略を支える人材については、大学、研究機関から産業界において大学院学生、若手研究者に対する就職先の確保や安定雇用ポストの拡充が必要であるが、将来にわたって人材滞留が起こらないよう流動性とのバランスをとることも重要である。

図4-1に推進方策の全体像を示す。ここでは、推進すべき3つの方策として「社会・経済的課題の解決に向けた研究開発の戦略的推進」、「国家安全保障の確保と産業競争力の強化」、「学術分野・コミュニティと研究者ネットワークの形成」を提案するとともに、第3章で挙げた研究開発課題の時間軸についても示す。

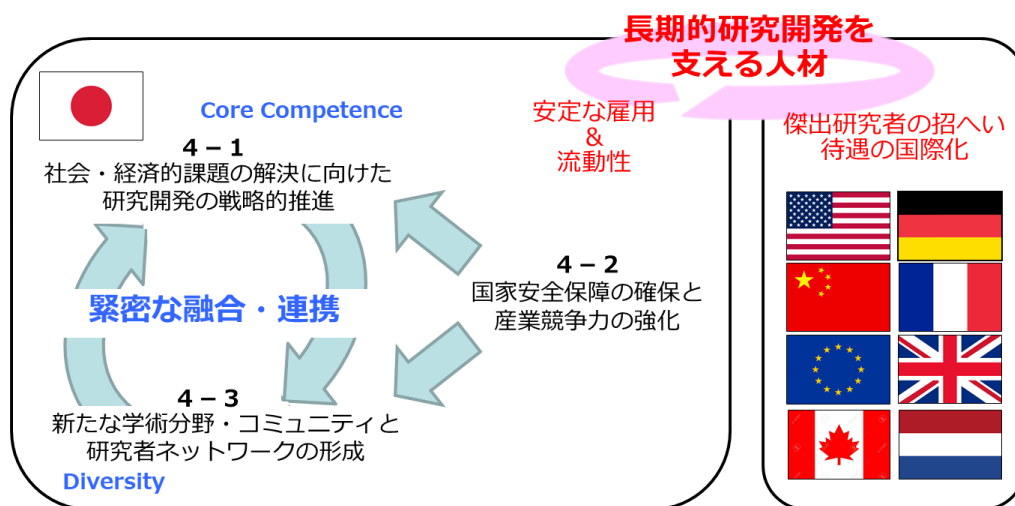


図4-1 研究開発の推進方策

4-1. 社会・経済的課題の解決に向けた研究開発の戦略的推進

2-2で述べた社会・経済的効果により、我が国が抱える様々な課題を解決し将来の持続的な成長・発展に結び付けるとともに、社会ニーズである「安全・安心」、「健康・医療・介護」、「環境・エネルギー」、「生産性向上」に応えるための研究開発を戦略的に進める必要がある。これには次の3つの取組みが重要である。

一つ目は分野・領域融合の促進である。量子科学技術は物理学と情報科学、さらにそれらの学際領域である量子情報科学という学問が基礎になっており、これを土俵（共通言語）として緊密な連携を図るべきである。例えば、新しい原理・原則に基づいた材料創製や新材料によるデバイス開発、それをシステム化する取組みには、化学、生物学や数学などの基礎科学にとどまらず、光学、計測学、材料学、電気・電子工学、機械工学などの工学分野の融合・連携が必要となる。また、場合によっては、量子にこだわらず古典的な従来技術との組み合わせにより、早期実用化への道を探るという取組みも重要である。

二つ目はオープンイノベーションの推進である。量子科学技術には未知の事象や解決の難しい課題が山積しているため、コミュニティ全体で新しいアイデアやアプローチを相互利用できるかどうかが進展の鍵を握る。そのため、産学官の多様なステークホルダーが集い産業利用を模索する場をコンソーシアムとして設置するなど、協調領域でのオープンイノベーションを促進するエコシステムの構築が必要である。様々な組織が自由に研究開発へ参画できたり、関係府省も一緒になって海外の企業や研究機関との連携、産業振興策などを議論できる枠組みが望ましい。また、関連企業からの人材を育成し量子科学技術のリテラシー向上に資するためのリカレント教育の機能も必要である。量子 ICT フォーラム等の既存組織による活動の強化、拡大と並行させ、新しい体制の構築も検討すべきである。

三つ目は起業促進と投資環境の整備である。ベンチャー起業を促進するため、起業を後押しする金銭的支援だけでなく、起業家に対してセーフティーネットや失敗を恐れずに再チャレンジできるプラットフォームの整備を検討することが望まれる。量子科学技術のほとんどは未だ実用化レベルに達していないことから、起業後も海外展開、自立発展、異分野参入、大企業への売却などがしやすいよう少なくとも10年の長期的支援が必要である。また、政府が先行して技術導入、活用に取り組むことで、製品・サービスの提供者やユーザー双方から投資を誘発し、ユーザーによる普及の牽引を促すことも重要である。

時間軸として、短中期的な出口を有する技術研究開発（～10年）と中長期的視点で社会実装を期待する基盤技術研究（～20年以上）とを区別し、これらを両輪とした推進を図るべきである。学術価値の高い研究成果の創出も不可欠であり、中長期的視点の研究で生まれた基礎的成果に対して積極的に短中期的な研究への導入可能性も検討すべきである。より効果的に推進するには、上記のオープンイノベーション型に加えて、少数の研究機関が密に連携したセンター型のスタイルで重点化研究を行うことなども考えられる。

多様なシーズにより産学官の共同研究を誘発し、シーズのさらなる発展や新技術の創出・実証、産業化への橋渡しが必要であり、これらの過程には比較的長期間を有するため、基礎から出口へつなげていくシームレスな研究開発投資が必要となる。例えば、目的基礎研究、応用・実用化研究、産業化の段階に分類し、段階間にゲートを設けそれをクリアした研究には、次段階の研究開発資金を用意するなどの方法が考えられる。したがって、シームレス化を強化する観点で文部科学省、経済産業省、総務省、内閣府等が一体的に取り組むことが望まれる。ここで重要な点は、具体的な研究課題や将来必要となる技術課題の設定に関して、できる限り産業界の意見を反映させたり、異分野の研究チーム形成を資金応募の必要条件とすることである。また、このような基礎から出口への一気通貫な仕組みと同時に、応用・実用化研究、産業化の段階に対して基礎研究の最新成果をタイムリーに適用したり、出口に近い段階で顕在化した問題を解決するために基礎研究に立ち返るなど、柔軟な運用が可能となる体制とすべきである。

4-2. 国家安全保障の確保と産業競争力の強化

国際的な優位性を確保することを意識しつつ、国際連携強化のための戦略的展開を図るべきである。具体的には、産業技術戦略として日本が独自開発すべき研究課題を特定する一方で、それ以外には高い研究・技術水準を有する国々との国際協調の下で進め、両者のバランスをとることが重要である。例えば、米国、EU との多国間協力や、英国、フランス、ドイツ、オランダ、カナダ等を含む欧米各国を中心に二国間協力の枠組みを構築することが想定される。実際に大学・研究機関レベルで国際協力研究を進める際には、その利益・不利益を考慮した上で特定した技術課題ごとに、戦略的かつ多層的な関係を検討することが必要である。また、このような枠組みの構築に当たって、国際共同研究に対する資金制度を各国で整備したり、共同研究の様々な課題を議論するための合同シンポジウム、ワークショップを開催することが必要である。

先進技術である量子科学技術の国際連携には安全保障貿易管理を戦略的に実施する必要がある。技術流出の防止に向け、外国為替及び外国貿易法等に基づく安全保障貿易管理体制の一層の強化が重要である。実際に、関係法令の遵守をはじめ組織における管理を目的に、経済産業省では「安全保障貿易に係る機微技術ガイダンス」を作成し、大学・研究機関への普及活動やeラーニングコンテンツの作成などの個別アプローチも進められている。これらの活動を強化、充実させるとともに、研究開発プロジェクトごとの管理を新たに導入するなどの措置が必要である。例えば、大学・研究機関の管理部門に担当者を配置することも想定されるが、特に秘匿性の高い技術情報を取り扱う場合には、形成した研究開発拠点に独立組織を設置してより厳格に管理すべきである。このような安全保障貿易管理と成果の機微度に応じたプロジェクト管理を徹底するための財政的な支援が求められる。

量子コンピューティングや量子暗号・通信、量子計測・センシングの技術領域では、関連技術の国際標準化に向けた検討が世界的に加速しており（詳細はコラム2を参照）、我が国も技術的な優位性を活かし、国際標準化に係る戦略的な取組みを行うことによって、キャスティングボードの獲得を目指すべきである。国が大学・研究機関と連携し、研究開発段階からの一体的な国際標準の獲得を支援すると同時に、対応する国内の標準化団体からのコミットメントを高めるための施策が不可欠である。例えば、既存団体の体制を充実させたり、関連企業の参画を促したりするための支援を行うことで、標準化が必要な技術の特定や標準策定、認証に至るまでの支援体制構築や、ISO などへの案件提案や審議参画が可能な人材の育成が期待される。

知的財産については、産官学連携のためのオープンイノベーションに対応した取組み、例えば、大学・研究機関における研究開発成果について関連技術も含めた権利化や柔軟な活用を促進するため、優れたシーズと企業等のニーズとのマッチング・事業化の支援が重要である。これに対し、コアコンピタンスな技術に対しては、国際競争力を高めるため特許網を形成するなどのオープン・クローズ戦略が有用である。ここで求められるのは、量子科学技術と国内外の動向を見渡せる目利き人材、プロデューサー人材である。大学、技術移転機関（Technology Licensing Organization, TLO）、研究機関、地方自治体等に限定している現在の育成プログラムの対象を企業にも拡大するなどの検討が求められる。

4-3. 新たな学術分野・コミュニティと研究者ネットワークの形成

本プロポーザルの研究開発は、デジタル化社会の実現や高い社会・経済的効果につながる産業・

イノベーションの可能性を秘めた技術を含むが、これらは地道で息の長い研究や技術基盤から生まれるものであり、ここに我が国は一定の存在感を持つ。したがって、中長期的な視点で、関連する学術分野の進展やコミュニティの充実・多様化と、それらを担う研究開発者のネットワークを整備することによって、量子科学技術の研究開発を持続的に支えられるエコシステムを形成する施策が必要である。

「情報を担う物理系の高度な量子操作・制御を実現する」という共通理念の下、量子マテリアルの技術領域が固体物理学や数学、素粒子物理学の分野を巻き込みながら、量子情報科学、他の量子科学技術への幅広い展開を図ることで新しい分野の開拓が期待される。同時に、その研究手法を提供する共通量子技術基盤の研究開発も推進することが不可欠であり、必要な最先端機器、施設・設備等の整備・共用化を国としても支援すべきである。我が国の強みを活かしつつ、課題解決に向けた新しいビジョン、アイデア、アプローチ、理論、概念等を誘発、育成することが第一であり、具体的なマイルストーンは初めから設定せずに研究の進捗に応じて検討していくことが望ましい。このようなボトムアップ研究には、それを促す風土や組織を如何に作り上げるかが鍵で、研究者の自主性、チャレンジ精神を引き出したり、それを次世代に繋ぐための組織作りや方策が必要である。

量子マテリアル、共通量子技術基盤の技術領域にはハイリスクで不確実性の高い研究開発が多く含まれるため、それらは公的な資金援助により、主に大学・研究機関の傘下で自由度の高い運営を可能にする、文部科学省世界トップレベル研究拠点プログラム（WPI）に類似したスタイルで進めることが望ましい。芽出しのための可能性探索研究（feasibility study）であれば、研究者の自由な発想を大事にする科学研究費助成事業等を研究資金とするが、進展後には JST 戦略的創造研究推進事業（CREST、さきがけ）などによる重点化が必要である。また共通量子技術基盤では、個々の取組みに加えて、生み出された新手法、新技術の連動や、異なる量子科学技術の組み合わせによるハイブリッド量子系の研究、将来の量子ビットを実現し関連技術を成長させる有望な量子系の解明研究など、研究と研究を繋げる面的支援も必要となる。異分野連携、学会・ワークショップなどを通じて研究領域の多様化を進めるとともに、研究者が他組織、産業界との共同研究に着手しやすい体制作り（知的財産管理の制度改革など）が求められる。

現状では、量子マテリアルの技術領域と量子情報科学、他の量子科学技術の領域とはコミュニティが分断されている面もあるため、両者が融合した新たな研究者・技術者コミュニティの形成が必要である。新しい研究会の創設だけでなく、応用物理学会や日本物理学会等の既存学会における分科会、領域の見直しなどに柔軟に取組み、参画者のモチベーションを維持するための活動が期待される。

研究者ネットワーク形成の観点では、量子科学技術分野の人材層の質と厚みを飛躍的に高め、それを長期的に維持するため、大学における教育・研究環境を充実・強化し、優れた若手研究者・技術者を戦略的に育成することが重要である。当該分野と並び国家戦略的に重要なバイオ分野、AI 分野でも高度人材の不足という共通問題を抱えているため、これらの重点分野と適切に連携しつつ、知識習得の機会を持つことが効率的な人材確保につながると期待される。また、取得した専門知識を活かし、産業化・社会実装のための目利きや安全保障貿易、知的財産の管理、国際標準化の活動などを担う人材を育成するため、大学は研究機関（大学共同利用機関を含む）や企業と連携・協力し、特色ある教育プログラム（学部・課程・専攻や講座の設置・改変）を構築する必要があり、国にもそれを後押しする施策の検討が求められる。また、裾野の広い研究分野への

成長を図るため、体系的で共通的な教材を開発し、地方大学、私立大学を含む各大学での活用やインターネット等による教育も検討すべきである。さらに早期の中等教育段階（中学、高校、高等専門学校など）における理数系教育の充実や関連する最先端研究を学ぶ機会の提供、量子技術に関する科学コミュニケーション活動も必要となる。

世界的な人材不足の中、優れた国内研究者の確保と海外研究者の招へいのための取組みを支援・強化することが必要である。産業界や海外から大学、研究機関への積極的な人材登用が図れるように制度や意識の改革が望まれる。競争力のある研究者集団を維持していくには、このような研究者の流動（頭脳循環）を促す施策とともに、研究者が研究と教育に専念できる環境や制度の構築、具体的には安定的な雇用機会の拡充など待遇改善が必要である。

形成された学術分野・コミュニティと研究者ネットワークは、4-1で述べたような戦略的研究開発による最新成果と接点を持ち、相互の緊密な融合・連携による相乗効果を発揮させることが重要である。産業化・社会実装に向けた取組みに関する最新情報を共有することで、ニーズに基づく研究課題の設定、新概念・新技術の活用に結びつけられる。同時に、大学院学生や若手研究者が目的指向の研究開発に触れる機会となり、自身の研究課題のみならず量子科学技術を広い視野でとらえることが可能になると考えられる。民間企業などのニーズに応えられる博士課程修了者が育成され、産官学における人材流動性の向上にも貢献すると期待される。ただし、大学院学生等を研究に参加させる場合には、研究成果を期限内に学術誌論文として発表できることが必要条件となるため、秘匿性の高い研究テーマには関わらせない、企業との連携研究では論文発表を遅延させないよう研究成果を速やかに特許化することを企業側と合意しておく、などの配慮が必要である。

4-4. 戦略的に推進すべき課題と時間軸

第3章に示した研究開発課題の時間軸を図4-2に示す。「量子2.0」を目指す量子科学技術の研究開発はまだ端緒についたばかりであるが、マイルストーンとなるような重要な成果が次々と出てきており、その進展の予測は非常に困難である。米国、欧州、中国を中心に、従来と比較にならないほどの超大型投資が政府や企業からなされていることを考えると、ここ数年～5年のうちにさらなる科学・技術的ブレークスルーが生まれ、研究開発の状況が大きく変化する可能性が高い。したがって、研究開発の計画は柔軟に考えるべきであり、国内外における動向の把握に努めながら、機動的に見直していくことが肝要である。

ここでは、4-1で示した、社会・経済的課題の解決に向け戦略的に推進すべき課題として、社会ニーズだけでなく技術の成熟度、我が国の強みをもとに、「量子コンピュータ」、「量子計測・標準」、「量子医療・診断」、「量子セキュリティ」、「トポロジカル材料」の5つを掲げた。これらの研究開発における時間軸についてより詳細に述べる。

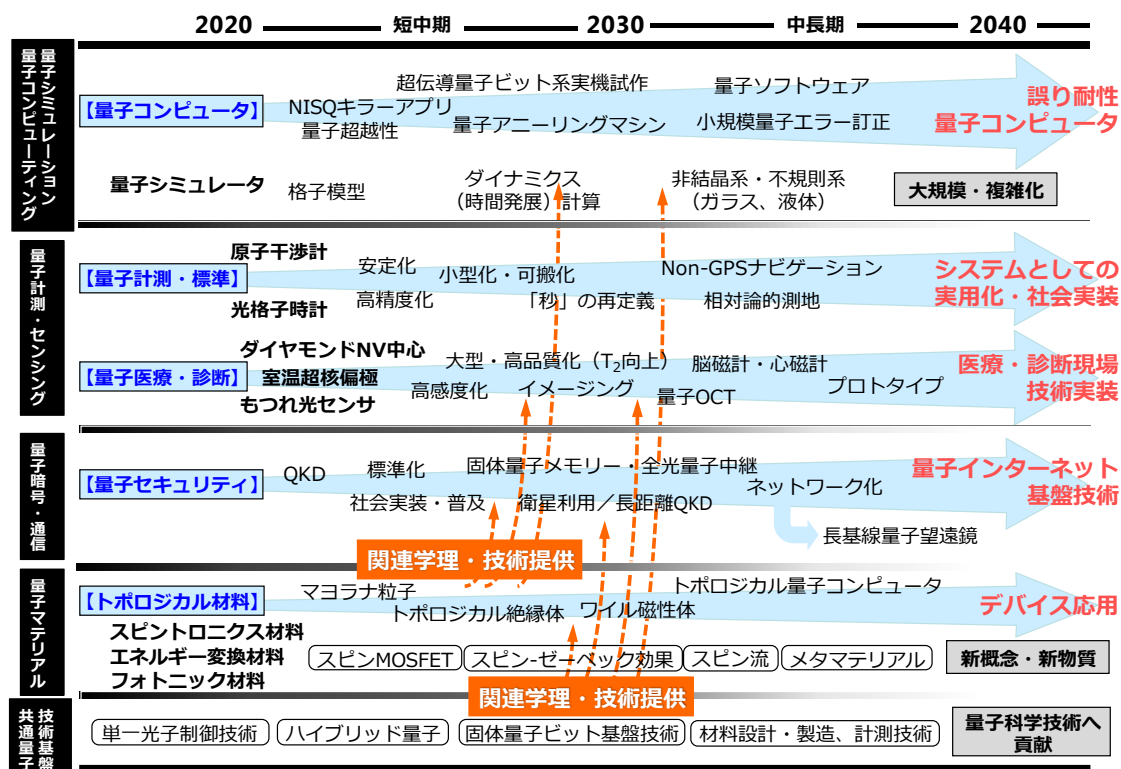


図 4-2 研究開発課題の時間軸

【量子コンピュータ】（量子コンピューティング・シミュレーション）

NISQ キラーアプリケーションの探索の中で、量子超越性と小規模量子誤り訂正の実証や古典・量子ハイブリッドアルゴリズムを短中期的課題として進める。量子コンピュータの実機試作については、ソフトウェア、デバイス、ハードシステムの開発をコンピュータ科学、量子物理学、電子工学、材料科学から低温実装技術、高速エレクトロニクス技術まで分野融合で進めることが必要である。以上の研究開発は 10 年程度を目処に、現在の Q-LEAP 拠点を強化する体制で想定ユーザー等との共同推進が望ましい。

同時に、長期的目標として大規模な誤り耐性量子コンピュータの実現を見据え、量子コンピュータのアーキテクチャに関して、量子ソフトウェア、量子誤り訂正方式、様々な量子ビット系制御のための基盤技術の確立が必要である。

【量子計測・標準】（量子計測・センシング）

原子干渉計型の量子慣性センサは、我が国が世界をリードする光格子時計に関する研究と共通する技術要素が多いため、連携により大きく進展する可能性がある。したがって、現在の JST 未来社会創造事業プロジェクトによる研究をベースにして、一体的な開発を進めるための枠組みが必要である。原子干渉型ジャイロスコープ、光格子時計ともに、企業を含む枠組みで装置の安定性向上と小型化・可搬化を進め、それぞれ自己位置推定機器の実証機試作や相対論的測地の原理実証、ユーザー開拓までを 10 年以内の目標とする。また同時に、国際度量衡委員会が 2026 年に予定している秒の再定義に対して存在感のある貢献も不可欠である。

長期的には、それぞれ実証した原理と装置・機器をシステムとして社会実装することを目指す。

軍事・防衛、宇宙分野への展開も想定されるため、技術流出の防止の観点から知的財産管理、安全保障貿易管理の体制を整えることが重要である。

【量子医療・診断】（量子計測・センシング）

ダイヤモンド NV 中心に代表される固体量子センサの研究は、現在進められているナノスケールでの磁場・電場・温度センシング技術を高度化し、10 年程度を目処にして生体の磁場ベクトルイメージング手法としての応用を目指す。また、10 年程度で生体内代謝イメージングの動物実験を達成することを念頭に、室温超核偏極技術の高度化を推進する。量子もつれ光センサに関しては、感度向上の技術とそれによる量子 OCT プロトタイプ機器の開発を短期的な目標とする。これらの研究開発には、医療機器、電子デバイス業界の技術者だけでなく、医学、生物学、光学、計測学との連携が不可欠であり、Q-LEAP 体制の強化、量子生命科学の関連課題との融合によって量子医療・診断を目指す一体的取組みを進める。

ダイヤモンド NV 中心、室温超核偏極、量子もつれセンサとも、2030～2040 年には量子医療・診断の技術として実装されることを目標とする。産業応用を強く促す方策が最重要であるとともに、技術的ブレークスルーにより世界との激しい競争に勝ち残るための応用分野の探索も継続していく必要がある。

【量子セキュリティ】（量子暗号・通信）

先行導入等の政府による積極的支援の下、量子 ICT フォーラム等によるオープンイノベーションの推進、ETSI や ITU-T による QKD 標準化活動の強化により、量子中継なしの比較的短距離であっても、例えば 5G/全光ネットワークと併存する量子暗号システムとしての実用化・社会実装をできる限り早く実現する。その後、防衛、金融、医療など真のユーザーを発掘するための活動を継続させるとともに、10 年程度を目処に規模拡大が可能な量子中継技術の原理実証、小規模な量子ネットワークの実現を目標とする。

一方、長期的には、衛星利用 QKD や長距離 QKD と量子中継に基づく大規模ネットワーク化により、量子セキュリティ技術のプラットフォームを確立する。量子コンピュータ、量子センサ等をつなげる量子インターネットの時代は 20 年後以降と考えられるが、輸出貿易管理の問題を認識した上での国際連携、耐量子計算機暗号の標準化活動やそのための体制（例えば、情報通信技術委員会、CRYPTREC（Cryptography Research and Evaluation Committees）など）と人材を今から充実させるべきである。

【トポロジカル材料】（量子マテリアル）

新しい技術的枠組みによるデバイス革新を目標に、トポロジカル絶縁体、ワイル磁性体のトポロジカルな性質の解明と新デバイスの創製、マヨラナ粒子によるトポロジカル量子コンピュータの実現に必要な基盤技術の研究開発を継続的に進める。

将来の量子ビットとして有望な量子系の発見など、重要な研究成果は、他の技術領域に絶えずフィードバックをかけながら進めることが重要である。個々の材料に限定せず、量子マテリアルの技術領域とその他の量子科学技術の領域とを融合した新たな研究者・技術者コミュニティの形成は今すぐに取り組むべき課題である。この研究開発課題は基盤的要素が強いいため、人材育成の面にも配慮しつつ、長期的、継続的に取り組めるような仕組み作りが必要である。

デバイス化、加工・計測のための技術を含む共通量子技術基盤については、文部科学省、経済産業省によるプロジェクトの枠組みで進めるべきである。一方、これらで生み出される新手法や、量子ビットの新しい操作・制御技術、ハイブリッド量子系の研究では、最新の研究成果を量子科学技術における他の技術領域に絶えず展開できるよう情報交換のパスを維持した形で進めることが重要である。

量子マテリアルと共通量子技術基盤の技術領域で産み出される新しい学理、技術には、各々の技術領域や戦略的推進課題を相互につなぐ重要な役割が期待できる。これにより緊密な連携・融合を図るような仕組みの構築が必要である。

付録1. 検討の経緯

- ・ 2019年2月にJST 研究開発戦略センター（CRDS）内に戦略プロポーザル作成のための検討チームを発足させた。その後、チームにおいてプロポーザル作成へ向けた調査・分析・検討を重ねた。
- ・ チームでは、調査によって国内外の研究開発動向・技術水準を明らかにしながらスコープの焦点を絞り、その過程においてプロポーザルの方向性を検討するため、以下の有識者との意見交換・インタビューを実施した。
- ・ その上で、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（次頁参照）。
- ・ CRDS では以上の調査・分析の結果と、ワークショップにおける議論等を踏まえてさらにプロポーザル内容について検討を重ね、2020年1月に本戦略プロポーザルを発行するに至った。

■ 意見交換・インタビューを実施した識者（所属・役職は実施時点）

荒川 泰彦	東京大学ナノ量子情報エレクトロニクス研究機構・特任教授
岩本 敏	東京大学生産技術研究所・教授
大森 賢治	自然科学研究機構分子科学研究所・研究主幹、教授
香取 秀俊	東京大学大学院工学系研究科・教授
川崎 雅司	東京大学大学院工学系研究科・教授
小芦 雅斗	東京大学大学院工学系研究科・教授
上妻 幹旺	東京工業大学理学院・教授
小坂 英男	横浜国立大学大学院工学研究院・教授
小林 正治	東京大学生産技術研究所・准教授
佐々木寿彦	東京大学大学院工学系研究科・助教
鈴木 博之	東京大学物性研究所・シニア URA
寒川 哲臣	日本電信電話株式会社先端技術総合研究所・所長
武岡 正裕	情報通信研究機構未来 ICT 研究所・センター長
塚崎 敦	東北大学金属材料研究所・教授
十倉 好紀	東京大学大学院工学系研究科・卓越教授
富田 章久	北海道大学大学院情報科学研究院・教授
中川 賢一	電気通信大学レーザー新世代研究センター・センター長、教授
中辻 知	東京大学大学院理学系研究科・教授
中野 義昭	東京大学大学院工学系研究科・教授
中村 泰信	東京大学先端科学技術研究センター・教授
中村 祐一	日本電気株式会社中央研究所・上席技術主幹
根来 誠	大阪大学先導的学際研究機構・特任准教授
平木 敬	Preferred Networks・シニアリサーチャー
平山 祥郎	東北大学大学院理学研究科・教授
藤井 啓祐	大阪大学大学院基礎工学研究科・教授

古田 彩	日経サイエンス・編集長
馬場 嘉信	名古屋大学未来社会創造機構・所長／教授
松岡 聡	理化学研究所計算科学研究センター・センター長
水落 憲和	京都大学化学研究所・教授
森 初果	東京大学物性研究所・所長／教授
山田 真治	日立製作所研究開発グループ・技師長
山本 貴博	東京理科大学大学院工学研究科・准教授
萬 伸一	理化学研究所創発物性科学研究センター・コーディネーター

■ 科学技術未来戦略ワークショップ 「社会変革を先導する量子科学技術」

開催日時：2019年6月14日（金）10:00～17:30

開催会場：TKP 市ヶ谷カンファレンスセンター バンケットホール9A

オーガナイザー：曾根 純一（JST-CRDS）

司会：八巻 徹也（JST-CRDS）

コメンテーター：寒川 哲臣（NTT）

中村 祐一（NEC）

古田 彩（日経サイエンス）

プログラム：

10:00～10:05 開会挨拶 曾根 純一（JST-CRDS）

10:05～10:20 ワークショップの趣旨説明 八巻 徹也（JST-CRDS）

10:20～12:20 国内外の研究開発動向と国際戦略、人材育成、標準化

10:20～10:45 量子技術への期待 ～国際戦略を中心に～ 荒川 泰彦（東大）

10:45～11:10 量子マテリアル領域 川崎 雅司（東大）

11:10～11:35 量子計測・センシングにおける各国の研究開発動向：量子慣性センサー
に対する期待と挑戦 中川 賢一（電通大）

11:35～12:00 量子暗号ネットワークにおける産学官連携と標準化 富田 章久（北大）

12:00～12:25 産業イノベーションのための量子情報人材育成 藤井 啓祐（阪大）

13:25～14:15 拠点形成・運営と研究推進方策

13:25～13:50 理研計算科学研究センター（R-CCS）およびスーパーコンピュータ「京」
「富岳」の概要 （遠隔） 松岡 聡（理研・神戸）

13:50～14:15 量子生命科学領域の構築と拠点形成について 馬場 嘉信（名大／QST）

14:30～16:00 産業・イノベーション

14:30～14:55 量子コンピュータ研究開発の推進に向けて 萬 伸一（理研・和光）

14:55～15:20 ベンチャー企業からみた量子コンピュータ技術とディープラーニング
技術の共通点・相違点 平木 敬（PFN）

15:20～15:45 企業研究からのオープンイノベーション 山田 真治（日立）

15:45～16:00 内閣府における「量子技術イノベーション戦略」検討状況について
奥 篤史（内閣府）

16:20～17:20 総合討論

ファシリテーター 嶋田 義皓（JST-CRDS）

論点 1. 研究開発の推進方策

2. 拠点形成と運営

3. ボトルネック・重要課題

17:20～17:30 閉会挨拶

曾根 純一（JST-CRDS）

付録2. 国内外の状況

本戦略プロポーザルに関連する研究開発プロジェクトを中心に国内外の状況について記載する。

(1) 日本

政府は、「第5期科学技術基本計画」(2016年1月閣議決定)や「統合イノベーション戦略」(2018年6月閣議決定)の中で、新たな価値創出のコアとなる強みを有する基盤技術、社会に変革をもたらす革新的技術として初めて光・量子技術を位置づけた。2017年8月には、文部科学省が「量子科学技術(光・量子技術)の新たな推進方策」を策定し、これにより量子情報処理、量子計測・センシング、次世代レーザー(極短パルスレーザー、次世代レーザー加工)を重視する推進方策が打ち出された。中長期的な展望にもとづく政策的な後押しによって量子技術を一体的に進めては来なかった。我が国における量子科学技術の研究開発については、関係府省(内閣府、総務省、文部科学省等)が個別の取組みを進められてきた。

内閣府

- 革新的研究開発プログラム(ImPACT)「量子人工脳を量子ネットワークでつなぐ高度知識社会基盤の実現」(プログラスマネージャー(PM):山本喜久(JST)、研究期間:2014～2018年)においては、組合せ最適化問題に特化した新型コヒーレント・コンピュータ(イジングマシン)の開発を進めた。量子ニューラルネットワークのハードとソフト、量子シミュレーション、量子セキュアネットワーク(量子鍵配送)の技術開発が進められた。
- 戦略的イノベーション創造プログラム(SIP)第2期「光・量子を活用した Society5.0 実現化技術」(プログラムディレクター(PD):西田直人(東芝)、研究期間:2018～2022年)では、Society5.0の実現に貢献するため、レーザー加工(目標:レーザー加工市場におけるシェア奪還のためのCPS型レーザー加工機等の実現)、光・量子通信(目標:絶対に破られない暗号技術をサービスとして社会実装)、光電子情報処理(目標:従来の計算機の処理性能を凌駕する、最適化問題等の適用分野での先行実証と社会実装)の研究開発が実施されている。

総務省

- 「衛星通信における量子暗号技術の研究開発」(研究責任者:山口耕司(次世代宇宙システム技術研究組合)、研究期間:2018～2022年)では、人工衛星を標的にしたサイバー攻撃を大幅に低減することを目標として、小型衛星にも搭載可能な量子暗号通信技術や空間光通信用の光地上局の高感度受信技術及び空間光通信・高精度捕捉追尾技術の開発を進めている。特徴的な課題として、QKDを用いた分散秘密ストレージ技術を中心とし認証や計算の機能も取り込んだ量子セキュアクラウドや衛星QKDの研究がある。

文部科学省

- 量子科学技術(光・量子技術)を駆使して非連続な解決(quantum leap)を目指す「光・量子飛躍フラッグシッププログラム(Q-LEAP)」(研究期間:2018～2027年)が進められている。PDの研究開発マネジメントの下、量子情報処理(主に量子シミュレータ・量子コンピュータ)(PD:伊藤公平(慶應大))、量子計測・センシング(PD:荒川泰彦(東大))、次世代レーザー(PD:遠藤彰(早大))の3領域それぞれにおいて、ネットワーク型研究

拠点を形成し **Flagship** プロジェクトと基礎基盤研究を実施している。ネットワーク型研究拠点の中核となる **Flagship** プロジェクトとして、超伝導量子コンピュータの研究開発、固体量子センサの高度制御による革新的センサシステムの創出、先端レーザーイノベーション拠点の3課題が採択されている。

科学技術振興機構（JST）

- 戦略的創造研究推進事業 **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（光産業創成大学院大）、領域期間：2015～2021年）、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）、領域期間：2015～2019年）が進められている。
- **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（東大）、領域期間：2016～2023年）、さきがけ「量子の状態制御と機能化」（研究総括：伊藤公平（慶應大）、領域期間：2016～2021年）では、量子科学技術による新たな物性・情報科学フロンティアの開拓を目指している。
- **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（東大）、領域期間：2018～2024年）、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（東工大）、領域期間：2018～2022年）では、量子マテリアル技術領域におけるトポロジカル材料とそのデバイス応用に焦点を当てた課題が進められている。
- 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）、領域期間：2018～2022年）では、量子科学技術のライフテクノロジー分野での積極的な応用を促すことで生命科学分野の一層の発展を目指している。
- **ERATO**「中村巨視的機械プロジェクト」（研究総括：中村泰信（東大）、研究期間：2016～2021年）では、超伝導量子ビットとそれを用いた量子回路に関する技術を発展させ、高精度な量子状態制御・観測技術を開発している。
- 未来社会創造事業大規模プロジェクト型の課題として、「冷却原子・イオンを用いた高性能ジャイロスコープの開発」（PM：上妻幹旺（東工大）、研究期間：2017～2026年）、「クラウド光格子時計による時空間情報基盤の構築」（PM：香取秀俊（東大）、研究期間：2018～2027年）が進められている。

新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）

- 「高効率・高速処理を可能とする AI チップ・次世代コンピューティングの技術開発／【研究開発項目〔2〕】次世代コンピューティング技術の開発」の研究開発枠（研究期間：2018～2022年）として、「超電導パラメトロン素子を用いた量子アニーリング技術の研究開発」（研究開発責任者：中村祐一（NEC）、「イジングマシン共通ソフトウェア基盤の研究開発」（研究開発責任者：戸川望（早大））が進められている。イジング専用量子マシン、量子アニーリングマシンの研究開発については、従来の半導体・光量子エレクトロニクス技術を用いたものを含めると、海外より一桁多い投資が行われている。

日本学術振興会（JSPS）

- 2015～2019年の科学研究費助成事業新学術領域研究（研究領域提案型）の研究領域として、「トポロジーが紡ぐ物質科学のフロンティア」（領域代表者：川上則雄（京大））、「ハイブリッド量子科学」（領域代表者：平山祥郎（東北大））、「J-Physics：多極子伝導系の物理」（領域

代表者：播磨尚朝（神戸大））が立ち上がっている。それぞれの領域において、トポロジカル物質科学における基礎学理・学問体系の構築、様々な物理量（電荷、クーパー対、電子スピン、核スピン、フォトン、フォノンなど）の小規模な量子結合、多極子に関わる伝導現象の理解などを目指している。

- ・ 2019～2023 年の科学研究費助成事業新学術領域研究（研究領域提案型）の研究領域として、「量子液晶の物性科学」（領域代表者：芝内孝禎（東大））、「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））が立ち上がっている。それぞれの領域において、量子物質が示す液晶類似の電子状態に関する基礎学理の構築、補空間を含む高次元空間において統一的に記述される物質群（準結晶や近似結晶など）に対する新概念の提唱などを目指している。

上記のプロジェクトの他、情報処理推進機構（IPA）による未踏ターゲット事業として、2018、2019 年に量子コンピューティング技術を活用したソフトウェア開発が取り上げられている。ここでは、「アニーリングマシン」（PM：田中宗（早大）、棚橋耕太郎（株）リクルートコミュニケーションズ）、田村亮（物材機構）や「ゲート式量子コンピュータ」（PM：徳永裕己（NTT）、藤井啓祐（阪大）、山本直樹（慶應大））の2部門でのソフトウェア開発人材の育成を進めている。

(2) 米国

2016 年 7 月に大統領府国家科学技術会議（National Science and Technology Council, NSTC）内のサブグループがレポートを発表し、米国の科学的リーダーシップ、国家安全保障、経済的競争性を構成する重要技術として量子情報科学（Quantum Information Science, QIS）を特定した。その流れを受け、2018 年 9 月 24 日に「ホワイトハウス QIS サミット」が開催され、同日に NSTC 科学委員会の量子情報科学小委員会（Subcommittee on Quantum Information Science, SCQIS）が「量子情報科学の国家戦略概要」を発表した。同戦略概要では、「QIS へのサイエンスファーストアプローチ」、「技術者の確保・教育改革」「量子産業の創出」「重要インフラの提供」「国家安全保障と経済成長の確保」「国際協力の推進」の6つの政策の方向性が示された。2018 年 12 月には「国家量子構想法（National Quantum Initiative Act）」が成立した。同法は、量子情報科学と技術応用の発展を加速するための10年計画の目標と優先順位の確立を目的とし、量子情報科学の定義を「量子物理学の法則によってのみ記述できるシステムに符号化されている情報の格納・伝送・操作・測定」とした。

同法を受け、大統領府科学技術政策局（Office of Science and Technology Policy, OSTP）内に国家量子調整室が設置されるとともに、各公的研究機関が量子科学技術に関わる様々な資金拠出を始めた。以下に主なものを挙げる。

- ・ 国立標準技術研究所（NIST）：量子情報科学研究や計量標準の規定、量子情報科学産業の発展を議論するためのワークショップに助成。最大 8,000 万ドル/年
- ・ 国立科学財団（NSF）：量子情報科学と応用技術に関する基礎研究及び人材育成のための学際的センター設立に助成。最大5センターを設立予定。最大 1,000 万ドル/年・センター
- ・ エネルギー省（DOE）：量子情報科学に関する基礎研究に助成。最大 2,500 万ドル/年・センター

国家量子構想法に基づく取組みに加え、OSTP は NSTC 内に量子科学の経済・安全保障上の含

意に関する小委員会を設立した。この小委員会は、量子研究開発に基づく経済成長と国家安全保障上の恩恵と課題に関する助言を提供することを目的としている。

(3) 中国

中国では、中華人民共和国で初めての本格的な科学技術中長期計画である「国家中長期科学技術発展計画綱要（2006～2020年）」の中で、重大科学研究計画として「量子制御」を指定。「国家中長期科学技術発展計画綱要」の後継的性格を帯びた「国家イノベーション駆動型発展戦略要綱（2016～2030年）」では、産業変革を牽引する破壊的技術として、自動運転技術や先進製造技術、人工知能ロボットなどと共に量子情報技術を挙げている。これらの中長期計画を受けて策定された「国家科学技術イノベーション第13次五カ年計画（2016～2020年）」では、重点領域に「量子通信と量子コンピューティング研究」と「量子制御と量子情報」が指定されており、量子情報通信や量子暗号分野での特許登録件数では既に米国を上回っている。

これらの政策を受け、量子科学技術に関わる様々な大型資金拠出が行われている。以下に主なプロジェクト及び研究インフラ構築を挙げる。

- ・「国家重点研究開発計画（国家重点研发计划：National Key R&D Program of China）」で量子制御・量子情報の大規模グラント実施。5年間で各チームに3億円程度が助成されていると見られる。
- ・中国科学院とアリババ（阿里巴巴集团）が「量子計算実験室」を設立。毎年およそ5億円を投資（2015年）。
- ・世界初の量子科学実験衛星「墨子号」で1200 kmの量子暗号通信実験に成功（2017年）。
- ・北京・上海間2000 kmの量子通信ネットワーク「京滬（けいこ）幹線」構築（2017年）。
- ・約1兆2千億円をかけて「量子情報科学国家実験室」を合肥市に建設中。2020年完成予定。

(4) 欧州連合（EU）

EUでは、欧州委員会の求めに応じてロードマップ「Quantum Manifesto」を産官学でとりまとめた（2016年5月）。量子科学技術を、長期的な富の創出、安全保障、産業創出の観点から重要な技術であると位置づけた。その中で、量子通信、量子シミュレータ、量子センサ、量子コンピューティングの4分野を主な柱としている。全欧州規模で実施される、研究及び革新的開発を促進するための欧州研究・イノベーション枠組み計画 Framework Programme (FP) である Horizon 2020 の下で、2018年10月には Quantum Flagship が開始された。10年間で約10億ユーロ（約1,200億円）の資金拠出が予定されている。2018年～2021年の間に基礎研究および4つの応用分野（量子通信、量子シミュレーション、量子コンピューティング、量子計測）で20のプロジェクトに約1.3億ユーロ（約150億円）が拠出される。2021年以降は、次期FPである Horizon Europe の下で量子技術フラグシップへの支援が継続するほか、「Digital Europe プログラム」で QKD ネットワークの配備に多額の投資が行われる予定である。

(5) ドイツ

ドイツでは、科学技術イノベーション基本政策である「ハイテク戦略2025（2018年～）」で重点技術領域である量子シミュレーションシステムを「世界トップへ飛躍させるべき技術」に指定。2018年9月には連邦教育研究省（Bundesministerium für Bildung und Forschung, BMBF）が

「量子技術枠組プログラム」を公表し、政府主導により量子技術の研究開発を促進し、応用・市場化で第二世代の量子技術革命を目指すとしている。同プログラムでは、2018～2022年の4年あまりの期間に6.5億ユーロ（約780億円）を拠出するとしている。重点分野は、(1)量子コンピュータおよび量子シミュレータ、(2)量子暗号通信（QKD）、(3)量子計測ならびに安全保障上重要な量子技術、(3)量子システム実装のための基盤技術、の4分野としている。量子技術分野のイノベーション促進のため、中小企業やスタートアップの支援を強化し、新興技術市場において量子技術に関する標準や規格の開発を支援する。

(6) 英国

英国では、2014年12月に工学・物理科学研究評議会（Engineering and Physical Sciences Research Council, EPSRC）が「National Quantum Technologies Programme」を開始し、5年間で総額2.7億ポンド（約350億円）を拠出。この投資により、量子技術分野での主導的地位を確実にすることにより、通信、医療、安全保障などの世界市場の形成を目指している。Sensors and Metrology、Quantum Enhanced Imaging、Networked Quantum Information Technologies、Quantum Communications Technologies という4つの研究ハブの構築に1.2億ポンド（約156億円）を拠出。

2018年秋には、「National Quantum Technologies Programme」の第二期として、2019年度からの5年間で約3.2億ポンド（約415億円）を措置することが発表された。これには、上記研究ハブへの継続資金8,000万ポンド（約10億円）が含まれる。

付録3. 専門用語の説明（五十音順）

オーバーヘッド

コンピュータで何らかの処理を行う際に、その処理を行うために必要となる付加的、間接的な処理や手続きのことや、そのために機器やシステムへかかる負荷、余分に費やされる処理時間などのことを指す。

計算機アーキテクチャ

コンピュータの基本的な設計・構成・様式などを意味する。狭義には命令セットアーキテクチャを意味するが、マイクロアーキテクチャやシステムアーキテクチャなどの意味でも用いられる。

コンパイラ

高水準のプログラミング言語で書かれたソースコードを、機械語（または、元のプログラムよりも低い水準のコード）に変換するプログラム。プログラミング言語を処理する「言語処理系」の一つ。

スキルミオン

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

スピン流

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

ソフトウェア開発キット（SDK）

アプリケーションソフトウェアを作成するためにソフトウェア技術者が使用する開発ツールのセット。一般的には、統合開発環境、ライブラリ、デバッグ用ツールのほか、サンプルコードやサポートのための技術ノートなどを含む。ハードウェア記述言語：集積回路を設計するためのコンピュータ言語ないしドメイン固有言語（DSL）で、回路の設計、構成を記述する。プログラミング言語とは異なる。

ダイヤモンド窒素-空孔（NV）中心

ダイヤモンド格子中の炭素原子の置換位置に入った窒素（N）と、それに隣接する炭素原子が

抜けてできた空孔（Vacancy）からなる複合不純物欠陥で、中心に電子スピンを持つ。NV 中心に光を照射して返ってくる光の強度からスピンの状態を読み出すことができ、量子センサや量子ビットなどに応用する研究が進められている。

超核偏極

スピンに外部磁場を加えたとき、スピンの磁気モーメントと磁場の相互作用のために磁場の方向によりエネルギー分裂が起こるが、核スピンはそのエネルギー（ゼーマンエネルギー）が低いいため、熱平衡状態では磁場に対して平行と反平行のエネルギー状態の占有数はほぼ同じである。これを電子スピンなどの別の量子状態を用いて、どちらか一方のエネルギー状態に揃えた（偏らせた）状態を超核偏極と呼ぶ。特に近年、分子やダイヤモンド NV 中心の励起状態を経由する際に生じる電子スピン偏極を利用すると、電子スピンと核スピンとの間の超微細相互作用により室温での超核偏極（室温超核偏極）が可能になるため、量子科学技術として注目を集めている。

テストベッド

大規模なシステム開発で用いられる、実際の運用環境に近づけた試験用プラットフォームの総称。

デバッグ／デバグ

プログラムや電気機器中の欠陥（バグ）を発見・修正し、動作を仕様どおりのものとする作業。デバッグはデバッグ作業を支援するコンピュータプログラムのこと。

トポロジー

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

トポロジカル絶縁体

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

光干渉断層計 (Optical Coherence Tomography, OCT)

微弱出力の近赤外線レーザーと光学干渉計の応用により、観察試料の内部から得られた後方散乱光を解析し、試料断面の精密な断層画像を非侵襲的に得ることができる画像撮像技術。生体への為害作用がなく安全であり、リアルタイムで短時間の画像構築を可能とするため、X線、CT、MRI、超音波検査などに次ぐ優れた最先端診断、例えば網膜検査による緑内障の診断などに眼科で使用されている。最高で μm という OCT の深さ分解能をさらに向上させるため、量子もつれ光子対を光源とした量子 OCT の研究開発が進んでいる。

光周波数コム

周波数軸上に等間隔に並んだ成分 (モード) からなるコム (櫛) 形のスペクトルを持つ光信号。光の周波数を正確に測定することができる。

フォトニック結晶

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

マヨラナ粒子

自身がその反粒子と同一な電氣的に中性なフェルミ粒子。Majorana (伊) によって 1937 年に素粒子の一つとして理論的に提唱された。ニュートリノの候補として精力的な研究が続けられているが、未だにその存在の確固たる証拠は見つかっていない。現在では、トポロジカル絶縁体と超伝導接合界面やトポロジカル超伝導体の表面などにマヨラナ粒子が存在することが提案され、量子コンピューティングへの応用も含めて精力的な実験研究が行われている。

リュードベリ原子

電子が原子核から遠く離れたリュードベリ軌道と呼ばれる電子軌道上を運動している原子。原子核からリュードベリ軌道までの距離はナノメートルからマイクロメートルに達する。リュードベリ軌道上を運動する電子をリュードベリ電子と呼ぶ。マイナスの電荷を持つリュードベリ電子とプラスの電荷を持つそれ以外の部分 (イオン核と呼ばれる) の間の距離が長いので非常に大きい双極子モーメントを有している。このためリュードベリ原子同士の相互作用は長距離に及び、この点が多体相互作用をシミュレートするのに非常に適した性質として期待されている。

量子誤り訂正符号

雑音やデコヒーレンスによる量子ビットに生じる未知の変化を元の状態に戻す手法。古典的な誤り訂正と同様に冗長性を持たせ、複数の物理量子ビットを符号化して一つの論理量子ビットを構成する。

量子アルゴリズム

量子コンピュータ上で用いるアルゴリズム。アルゴリズムとは、コンピュータが問題を計算す

る方法や手順をいう。

量子鍵配送 (Quantum Key Distribution, QKD)

量子暗号技術の一つの手法。通信を行う二者間でのセキュア通信を保証するために、量子力学を用いてランダムな秘密鍵を共有し、それをもとに情報を暗号化・復号する。

量子ゲート

量子ビットを操作するゲート演算。

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（ T_2 ）と称する。

量子中継

量子もつれ状態を利用した遠距離の量子通信を実現するために必要な中継技術。

量子超越性

古典コンピュータが現実的時間では実行不可能な特定の問題について、量子コンピュータでのみ取り扱えるようになること。ある実用的な問題で古典コンピュータよりも量子コンピュータの性能が優位になることを表す量子優位性 (quantum advantage)、量子加速性 (quantum speedup) と区別される場合がある。

量子テレポーテーション

原子や光子の量子力学的状態を、空間的に離れた場所にある他の原子や光子で再現すること。元の原子や光子を異なる場所に移すのではなく、その量子状態のみの転送を指し、量子力学的に相関を持つ二つの粒子（量子もつれの関係にある粒子対）と古典物理学的な情報伝達（光速を越えない通常の通信）を組み合わせで行う。その際、元の原子や光子の量子状態は失われ、また光速を越えて転送することはできない。

量子ビット

量子情報の最小単位のこと。通常のデジタル回路では「0 か 1 か」の 2 状態に情報が保持されるのに対し、量子ビットでは「0 でありかつ 1 でもある」状態を任意の割合で組み合わせて表現することができる。超伝導回路、ダイヤモンド NV 中心、冷却原子（集団・単一）、冷却イオン、希土類結晶、半導体量子ドット、トポロジカル量子（マヨラナ粒子）、光量子などの物質系が知られている。

量子ホール効果

半導体界面などの 2 次元面内に閉じ込められた電子の波動関数が磁場中において非自明なトポ

ロジを持つことに由来して生じる効果である。実験的には、低温で強磁場を印加することでホール伝導度が e^2/h の整数倍の値を示す（整数量子ホール効果）。1980 年に Klitzing（独）によって発見され、1985 年にノーベル物理学賞が授与された。素電荷 e とプランク定数 h のみで規定されるため、現在の抵抗標準に用いられている。

量子メモリ

量子ビットに量子情報を蓄えておくメモリ。量子力学の言葉では、重ね合わせ状態を一定時間だけ保持する機能を指す。

量子もつれ

複数の量子ビットの間に生じる量子力学的な相関のこと。例えば、2つの量子ビットが各々「0 または1」であるが、「一方が0のときに他方は1」であることは確定していて相関がある」ような状態を指す。量子コンピュータは、量子ビット間の量子もつれを利用して計算を進める。

量子レジスタ

複数の量子ビットの配列からなり、一連のゲート操作によって量子アルゴリズムを実行できるものを指す。少数量子ビットの量子レジスタは量子誤り訂正などの実験的実証として、量子コンピューティング開発へのステップとなることに加えて、量子センシングや量子中継器に活用することができる。

レーザー冷却

レーザー光を用いて、原子・分子やイオンを絶対零度近くまで冷却（エネルギーを低く）する方法。

ワイル半金属

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

■戦略プロポーザル作成メンバー■

総括責任者：曾根 純一 上席フェロー（ナノテクノロジー・材料ユニット）
リーダー：八巻 徹也 フェロー（ナノテクノロジー・材料ユニット）
メンバー：嶋田 義皓 フェロー（システム・情報ユニット）
宮下 哲 フェロー（ナノテクノロジー・材料ユニット）
新田 英之 フェロー（海外動向ユニット）
藤田 維明 主任調査員（監査・法務部）

※お問い合わせは、下記までお願い致します。

CRDS-FY2019-SP-03

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～

STRATEGIC PROPOSAL

Quantum 2.0 :

Quantum Science and Technology Open Up New Horizons

令和 2 年 1 月 January 2020

ISBN 978-4-88890-656-2

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/>

©2020 JST/CRDS

許可無く複写／複製をすることを禁じます。

引用を行う際は、必ず出典を記述願います。

No part of this publication may be reproduced, copied, transmitted or translated without written permission.

Application should be sent to crds@jst.go.jp. Any quotations must be appropriately acknowledged.

ATTAATC A AAGA C CTAAC T CTCAGACC

CT CTCGCC AATTAATA

TAA TAATC

TTGCAATTGGA CCCC

AATTCC AAAA GGCCTTAA CCTAC

ATAAGA CTCTAACT CTCGCC

AA TAATC

AAT A TCTATAAGA CTCTAACT CTAAT A TCTAT

CTCGCC AATTAATA

ATTAATC A AAGA C CTAAC T CTCAGACC

AAT A TCTATAAGA CTCTAACT

CTCGCC AATTAATA

TTAATC A AAGA C CTAAC T CTCAGACC

AAT A TCTATAAGA CTCTAACT

ATTAATC A AAGA C CT

GA C CTAAC T CTCAGACC

0011 1110 000

00 11 001010 1

0011 1110 000

0100 11100 11100 101010000111

001100 110010

0001 0011 11110 000101

ISBN 978-4-88890-656-2

