

~~—(仮称)—~~

量子科学技術 (光・量子技術) の
新たな展開に向けた
推進方策について

～我が国競争力の根源となりうる

「量子」のポテンシャルを解放するために～

中間とりまとめ (案) ~~(たたき台)~~

平成29年〇月〇日
科学技術・学術審議会
先端研究基盤部会
量子科学技術委員会

はじめに	3
1. 量子科学技術について	4
(1) 量子科学技術（光・量子技術）とは	4
(2) 量子科学技術の有する <u>可能性</u> ・ポテンシャル	5
(3) 国際動向	8
(4) <u>我が国における状況</u>	13
2. 内外の研究動向及び我が国の強み・課題	14
(1) 量子情報処理・通信	14
① 量子コンピューティング	14
② 量子シミュレーション	17
③ 量子通信・暗号	20
(2) 量子計測・センシング・イメージング	23
① 量子計測・センシング・イメージング（生物・生命科学系）	23
② 量子計測・センシング・イメージング（物理系）	27
(3) 最先端フォトンクス・レーザー	32
① 最先端フォトンクス・レーザー（光源の先鋭化、新たな光機能の発現・制御）	32
② 最先端フォトンクス・レーザー（産業応用の高度化）	38
(4) 量子ビーム利用推進小委員会における議論（ 軟X線 向 <u>高輝度放射光源とその利</u> 用）	38
3. 推進方策の検討にあたって考慮すべき点	39
(1) 全般	39
(2) 各分野個別の観点	41
(a) 量子情報処理・通信	41
① 量子コンピューティング	41
② 量子シミュレーション	42
③ 量子通信・暗号	42
(b) 量子計測・センシング・イメージング	43
① 量子計測・センシング・イメージング（生物・生命科学系）	43
② 量子計測・センシング・イメージング（物理系）	44
(c) 最先端フォトンクス・レーザー	44
① 最先端フォトンクス・レーザー（光源の先鋭化、新たな光機能の発現・制御）	44
② 最先端フォトンクス・レーザー（産業応用の高度化）	45
(d) 量子ビーム利用推進小委員会における議論（ 軟X線 向 <u>高輝度放射光源とその利</u> 用）	45

4. その他（今後の議論の方向性） 46

はじめに

第5期科学技術基本計画（以下、「基本計画」）が平成28年1月に策定され約1年が経過した。基本計画では、過去20年間の実績として研究開発環境の着実な整備等が挙げられる一方、科学技術における「基盤的な力」の弱体化や政府研究開発投資の伸びの停滞などを指摘しており、それらを背景とした先見性と戦略性、多様性と柔軟性を重視する基本方針の下で、目指すべき国の姿を掲げている。

目指すべき国の実現に向けた4つの柱の一つとして、未来の産業創造と社会変革に向けた新たな価値創出の取組がある。これは、自ら大きな変化を起こし、大変革時代を先導していくため、非連続なイノベーションを生み出す取組を強化し、新しい価値やサービスが次々と創出され、人々の豊かさをもたらす「超スマート社会」を世界に先駆けて実現するための一連の取組を更に進化させつつ「Society 5.0」として強力に推進するものである。量子科学技術（光・量子技術）は、この中で、新たな価値創出のコアとなる強みを有する基盤技術の一つと位置付けられている。

近年の目覚ましい技術進展やサイエンスの深化に伴い、量子科学技術のフロンティアはさらに拡大しつつある。半導体やレーザーなど、量子論を応用した科学技術や光科学技術の進展により、はこれまでも産業や社会は大きく変革してきた。さらには大きなインパクトを与えてきたが、近年、先端レーザーによる量子状態制御や、量子情報処理を可能とする物理素子の要素技術等が生み出されはじめ、サイエンスの進展のみならず、超スマート社会における産業応用を視野に入れた新しい技術体系が急速に発展する兆しがある。

量子科学技術は、その先進性やあらゆる科学技術を支える基盤性から、地道で息の長い継続的な研究や技術基盤・研究基盤が必要となることが多い一方、一旦研究進展やブレークスルーがあれば、当初想定しなかったような応用や、経済・社会に与えるインパクトの可能性が広がりうる。また、その研究成果が、一定期間を経て要素技術として多方面に広く浸透的に利用されることで、経済・社会にインパクトを与えることも多い。

ICTの進展によって、人・モノ・情報の関わり方が更に加速的に増大・多様化・複雑化しており、現代の経済・社会は、様々な課題が複雑化してきている。その様な中、一般的な常識からはかけ離れたふるまいを見せる「量子」を科学し応用する量子科学技術は、複雑な経済・社会的課題の非線形的な解決に新たな示唆を与え、大きく貢献するポテンシャルを秘めたものとして、大きく期待されている。しかしながら量子科学技術は、一般的に難解と捉えられることも多く、国民や社会から、研究成果や進捗状況あるいは経済・社会にとっての意義が見えにくい面があることも事実である。一方で他方、海外に目を向けると、この数年、欧米米欧中政府や世界的企業等がは研究開発投資を拡大しており、21世紀のあらゆる分野の科学技術の進展と我が国の競争力強化の根源となりうる量子科学技術をどのように推進していくべきかの岐路に我々は立たされていると言える。

このような状況の中、先端研究基盤部会の下に設置された量子科学技術委員会では、昨年3月より、量子科学技術の最新の研究動向を俯瞰的に総覧し、量子科学技術が経済・社会に与えるインパクトや我が国の強み・課題、さらにはそこから見えてくる推進方策の方向性についての調査検討を計8.7回に亘り行ってきた。

本報告は、量子科学技術の可能性や課題を「見える化」し、国民・社会と共有するとともに、そのポテンシャルを最大限引き出し、解き放ち、今後の量子科学技術の進展を先導するとともに、将来にわたって国民・社会に広く裨益していくよう、我が国における推進方策を今後更に調査検討していくにあたって、これまでの調査検討を中間的にまとめたものである。

1. 量子科学技術について

(1) 量子科学技術（光・量子技術）とは

「量子科学技術」とは、「量子」のふるまいや影響に関する科学とそれを応用する技術である。量子科学技術の進展は広範な産業分野や社会に大きなインパクトを与えるとともに、知識や技術、社会の飛躍的な発展に貢献してきた。「量子」とは、ナノあるいはナノより小さい、極めて小さな物質やエネルギーの単位のことで、代表的なものに、光の最小単位である光子があげられる。光は、日常生活では波として捉えられるが、粒としてふるまう光子の性質も持っており、量子はこの「粒」と「波」の性質を併せ持つことが特徴的である。物質を形作っている原子そのものや、原子を構成する形作っているさらに微細な小さな電子・中性子・陽子などの粒子もある。量子は、粒と波の性質をあ合わせ持もっている量子だが、このような量子という極めて小さな世界では、時に、私たちの身の回りにある物理法則（ニュートン力学や電磁気学）とは異なるは通用せず、「量子力学」というとても不思議な法則が作用しに従っている。我々が波として身近に接点をもっている「光」も、「光子」という粒としてみると量子の一つである。このように、「光」と「量子」は互いに密接な関係性をこのような量子的な世界における制御では、光は重要な役割を担っており持っており、本報告においては、このような量子と光の科学技術を量子科学技術又は光・量子技術と呼ぶ。

第5期科学技術基本計画の第2章「未来の産業創造と社会変革に向けた新たな価値創造の取組」において、光・量子技術すなわち量子科学技術は、超スマート社会（Society 5.0）における新たな価値創出のコアとなる強みを有する基盤技術の1つであり、「革新的な計測技術、情報・エネルギー伝達技術、加工技術など、様々なコンポーネントの高度化によりシステムの差別化につながる」ものと位置付けられている。

これを、第4期科学技術基本計画における「先端計測及び解析技術等の発展につながるナノテクノロジーや光・量子科学技術」と比較すると、量子科学技術がより広範な分野を支える基盤技術に成長してきていることが分かる。これは、研究者によるこれまでの独創的・先駆的な学術研究の成果の積み重ねにより、産業界において一定程度事業化されている量子の「粒と波と粒の二面性二重性」を活用した技術に加え、量子の「重ね合わせ」状態や「もつれ」状態といった特徴的なふるまいの理解・検証が進んできたことで、それら量子のふるまいが活用できる可能性が多様な分野に広がるとともに、現実的な利用の段階が技術の進展に

よって見えてきたことによると考えられる。

その広がり、科学技術イノベーション総合戦略 2016 の「情報通信、医療、環境・エネルギー等の広範な分野を横断的に支え、精度・感度・容量・省エネ・セキュリティ等の様々な面で社会的要請に応える高次な社会・産業インフラの形成に貢献していくため、計測技術、イメージング・センシング技術、情報・エネルギー伝達技術、加工技術の一層の高度化を行う光・量子技術」から分かるように極めて広範で、量子科学技術は超スマート社会における新たな価値を生み出すとともに、これまでは思いもよらなかった学術領域やイノベーションを生み出す可能性を秘めているおり、21世紀のあらゆる分野の科学技術進展と我が国の競争力強化の根源となり得るものと認識されつつある。

(2) 量子科学技術の有する可能性・ポテンシャル

量子科学技術委員会では、光・量子技術について、(1) 量子情報処理・通信、(2) 量子計測・センシング・イメージング、(3) 最先端フォニクス・レーザーの項目毎に、研究動向や我が国の強み・課題、推進方策の検討にあたって考慮すべき点を議論・検討してきた。また、(4) 量子ビーム利用に関しては、当委員会の下に量子ビーム利用推進小委員会を置き、議論・検討してきた。その詳細概要は第2章以降に示し、ここでは、我が国の目指す「超スマート社会 (Society 5.0)」において量子科学技術が切り拓く開く可能性・ポテンシャルについて述べる。

超スマート社会は、急速な ICT の発展によりあらゆるものがネットワークに接続されてデータとシステムが連携する IoT 時代において、サイバー空間と現実 (フィジカル) 空間を融合して、さまざまなサービスを提供するプラットフォームを提供するものである。

経済・社会の様々な課題が複雑化し、資本や競争優位が一瞬で動く中、量子科学技術には、高度な情報処理から、材料・ものづくり、医療まで、広範な応用があり、非線形に課題を解決する大きな可能性が指摘され、かつ、我が国の産学官が培ってきた強みをベースに、簡単にコモディティ化できない知識集約度の高い技術体系であることから、21世紀のあらゆる分野の科学技術進展と我が国の競争力強化の根源となり得るものと認識されつつある。

このように、そのサイバー・フィジカル空間関連技術を横断的に強化する支えるとともに、「その先」にあるフィジカル空間の高度化に向けての鍵となる、材料・デバイス等に係る新物性・反応・機能を探求・創出するとともにし、新産業創出や健康長寿社会を実現する鍵となる量子科学技術のコア技術として、次のような例が挙げられる。

- ・ 人工知能 (深層学習処理) における情報処理を高度化し、物流・資源割当の最適化を高速に行う量子コンピューティング技術

【パラメータや組合せの最適化は、問題が複雑になると指数関数的に計算時間が増大し、従来技術 (例: スパコン) には限界が存在】

- ・ IoT・ネットワークのセキュリティを向上させる量子暗号・量子中継技術

【従来技術（公開鍵暗号）は、量子技術が発達すれば合理的な時間内に解読可能になるとの中長期的な限界が存在】

- ・ 既存技術を凌駕する精度・感度により、自動走行やIoTはもとより、生命・医療、蓄電・省エネ等の様々な分野でこれまでなかった情報と応用をもたらす量子センサ技術

【従来技術は、古典力学の活用を基本とし、精度・感度に一定の限界が存在】

- ・ 次世代の材料・デバイス産業等の高付加価値化に向け、量子レベルの物性・反応を支配する電子状態の解明に至る、高輝度放射光や極短パルスレーザー技術、それらによる電子状態の解明を基に現在のスパコンの限界を超え、新物質の探索を行う量子シミュレータ技術

【従来技術では、電子状態の鮮明な観察に限界が存在。また、新物質の探索は、従来技術（例：スパコンによる量子化学計算）では、近似が避けられず、現実的な計算量に限界が存在】

- ・ 材料・デバイス製造に汎用されるレーザー加工に革命をもたらし、加工に係る高強度レーザー場と物質反応という非線形・非平衡系現象の学理解明に基づき、高品位・省エネ加工を狙う、GPS（サイバー・フィジカル・システム）型の次世代レーザー加工技術

【従来技術は、ものづくり現場に広く導入されているが、なぜレーザーで物が切れるかは科学的に難解な現象で解明されておらず、最適な加工条件の探索やCFRPといった難加工材料の加工に限界が存在】

これら、量子科学技術（光・量子技術）の今後を担う重要な要素技術の多くが共通あるいは関連しており、我が国の産学官が培ってきた半導体・ナノテクノロジー・光学技術等の強みを発揮することが可能である。

（量子情報処理・通信のうち量子コンピューティング）

量子力学的な効果を用いて超並列・大規模情報処理を行う量子コンピュータは、現在の最速スパコンでも現実的な時間で解けないような一部の問題を、短時間かつ超低消費電力で計算できるようになると期待されている。

量子コンピュータは例えば次のような可能性・ポテンシャルを持っていると考えられる。

- ・ 人工知能（深層学習処理）への適用による、画像認識、自然言語処理、医療診断、金融予測分析、自動運転、マーケティング等の高度化
- ・ 最適な配送経路を瞬時に割り出すことによる物流の最適化や、通信ネットワークにおいて利用する周波数帯域の動的割当、計算機のリソース割当等の資源割当の最適化

- ・ たんぱく質等の分子構造解析や安定結合する化合物の超高速探索による、新たな創薬や触媒の開発の高速化

(量子情報処理・通信のうち量子シミュレーション)

解析の難しい物質中の多数の電子等のふるまいや相互作用の特化した問題に対して、人工的に別に作った多数の粒子の量子状態（量子多体系）で模擬する量子シミュレータは、未解明の物性や反応の理解、さらには、それに基づく新物質や物質が有する機能等の探索と開発が可能になると期待されている。

量子シミュレータは例えば次のような可能性・ポテンシャルを持っていると考えられる。

- ・ 量子レベルの物性・反応を支配する電子状態の解明に基づく、新物質や物質が有する機能等の探索と開発
- ・ 創薬を支える量子ダイナミクスや化学反応機構の解明
- ・ 重要な生命現象（光合成メカニズムなど）のシミュレーションを通じた機構解明・本質的理解

(量子情報処理・通信のうち量子通信・暗号)

量子力学的な効果を通信に応用した量子通信・暗号は、通信の大容量化・低電力化・高セキュリティ化が可能になると期待されている。

量子通信・暗号は例えば次のような可能性・ポテンシャルを持っていると考えられる。

- ・ 超スマート社会においてあらゆるものがつながる IoT・ネットワークのセキュリティが向上することによる、あらゆるサービスの安全な提供・享受
- ・ ネットショッピングや金融取引におけるセキュリティの向上や、秘匿性が確保されたネットワークでの医療データ通信による、医療診断の高度化
- ・ 長期間のデータ安全性を強固に保証するデジタルアーカイブシステムの実現

(量子計測・センシング・イメージング)

外乱で壊れやすい量子状態を逆に利用することで、従来技術では難しい微弱な磁場・電場・温度等の変化を高感度に検出したり、原子や光子等の量子が発現する波としての性質やもつれ合い状態を利用する量子計測・センサ技術は、従来技術を凌駕する感度や空間分解能等を得る計測・センサ技術となると期待されている。

量子計測・センサ技術は例えば次のような可能性・ポテンシャルを持っていると考えられ

る。

- ・ 生命現象の物理的・本質的理解に基づく、高い効果を有する治療法・新薬の効率的な開発や、現代病とも言われる機能性疾患や早期発見が困難な疾病の早期かつ定量的な診断・予防法の確立
- ・ 脳磁・心磁・脳磁の微弱磁気計測による産業・医療応用や、網膜疾患の早期鋭敏診断、食品の安全性評価における混入物検査などの、多岐にわたる高感度計測機器の発展
- ・ ミトコンドリア等の細胞内の局所温度、イオン電流である神経細胞の興奮により形成された微弱磁場といった、従来技術では観察困難な対象の計測による、生命科学・医療の新たなフロンティア開拓
- ・ 生命現象の物理的・本質的理解に基づく、高い効果を有する治療法・新薬の効率的な開発や、現代病とも言われる機能性疾患や早期発見が困難な疾病の早期かつ定量的な診断・予防法の確立蓄電池、燃料電池、パワーデバイス等のエネルギー・車載センサにおける電界・電流・温度モニターとしての効用応用や、地下や構造物における水の流れの検出等、超スマート社会における社会インフラ、エネルギー、製造業にわたる IoT 利活用分野への波及
- ・ 量子レーザ~~ダ~~カメラによる衝突防止センサの発展と、各種センサとの組合せによる自動運転技術の進展発展
- ・ GPS の届かないところの地殻変動の観測等による、地震・火山に関わる防災研究の進展
- ・ 生体内の量子力学的な効果の探索研究の進展

(最先端フォトンクス・レーザー)

エレクトロニクスや画像技術、光による高速インターネット通信や、ものづくりにおけるレーザー切断、医療におけるレーザーメスや血流計などの生体モニターなど、我々の身近な生活を含む社会において様々に活用されているフォトンクス・レーザーは、歴史的に、科学の進展や経済・社会的利用のフロンティアを常に切り拓き、「量子」研究を支えてきたいてきた。近年、光源の先鋭化や新たな光機能の発現・制御への応用に大きな進展があり、更なる革新を与える可能性がある。また、その産業応用は高度化が進展している。

最先端フォトンクス・レーザーは例えば次のような可能性・ポテンシャルを持っていると考えられる。

- ・ 極短パルスレーザーを用いた、量子レベルの物性・反応を支配する超高速の物質の電子状態の解明や制御によるるる、光合成等の化学反応メカニズムや材料物性の発現機構の解明、省エネルギー材料や超高速エレクトロニクスデバイスといった高次の材料・デバイス高性能電池、超高密度磁気デバイス等の開発
- ・ 高強度パワーレーザーによって発生する、超高圧環境下での物質変化ダイナミクスの解明による新極限物質材料の探索や、レーザープラズマ加速を応用した粒子加速器の超小型化

- ・ **高強度**レーザー場と物質反応という非線形・非平衡系現象の学理解明に基づく、CPS（サイバー・フィジカル・システム）型の高品位・省エネ次世代レーザー加工技術による、材料・デバイスの製造・加工 **革新革命**

（3）国際動向

量子科学技術、特に計測・情報・エネルギー分野等において社会を変革する可能性のある技術については、欧米諸国はもとより中国においても、競って研究開発を進めている。各国の共通点は次のとおりである。

- 戦略的に推進すべき重点分野の1つとして量子科学技術を明確に位置づけ、具体的施策を積極的に推進している。
- 国、企業又はその共同により、量子科学技術に関する研究を専門的に推進する複数の研究拠点が設立・運営され、研究環境が整備されつつある。
- 国、企業又はその両方から、量子科学技術に関する研究拠点又は研究プログラムへの多額の投資又は投資の発表がなされている。
- 量子科学技術に関する研究において、産業界も一体となった推進がされており、産業界への技術移転を見据えた取組になっている。
- 量子科学技術に関する研究において、5年間程度あるいはそれ以上の中期的かつ大型のプロジェクトが推進されている。
- 安全保障分野の機関がその推進に深く関わっている国が**多数であるもある**。例えば、米国における国防高等研究計画局（DARPA）などが挙げられる。

次に、各国における量子科学技術に関する政策及び具体的取組について示す。

米国

- 政策文書としては、2009年に国家科学技術会議(NSTC)が、「A Federal Vision for Quantum Information Science」を公表。要旨としては、量子の制御・利用、及び量子情報処理システムの物理的・数理的・機械的な可能性と限界に関する知的基盤の構築を政府が目指すよう提言する内容 **である**。
- これを受け、**全米科学財団 (NSF)** が「量子情報科学における学際的研究プログラム」を設置。目的は①量子コンピュータの可能性の模索と他分野への影響の検討、及び②当該分野における米国人研究者の増加。2015年の予算は4百万ドル（1件当たり最大25万ドル：全体で12～16件採択予定）。採択課題例としては「量子情報科学と数学の学際研究」。その他、2009年以降に公的資金を用いて支援された研究プロジェクトは、データベース

「STARmetrics」によれば、プロジェクトタイトルに” quantum information science” を含む内容が6件ある。

- 2014年には、NSTCとメリーランド大学が、量子情報・コンピュータ科学共同研究センター（QuICS）の設立を決定。
- 2015年に「量子情報科学と米国産業における需要に関する公開ワークショップ」を、NSTCを代表して国立標準技術研究所（NIST）が実施している。
- 安全保障分野の機関であるDARPAやインテリジェンス系の連邦政府横断組織IARPA で に と い っ た 複 数 の フ ア ン デ ィ ン グ 機 関 に お い て も、下 記 の 産 業 界 に お け る 取 組 へ の 支 援 も 含 め、量 子 科 学 技 術 に 関 す る 研 究 に 資 金 助 成 支 援 を 行 っ て い る。
- 産 業 界 で は、2013年 に Go o g l e が Q u a n t u m A I を 設 立 し、カ ナ ダ D - W a v e 社 よ り、世 界 初 の ア ナ ロ グ 型 量 子 コ ン ピ ユ ー テ ィ ン グ の 商 用 機 「 D - W a v e 」 を 導 入。2014年には、カ リ フ ォ ル ニ ア 大 サ ン タ バ ー バ ラ 校 の 量 子 コ ン ピ ユ ー テ ィ ン グ 研 究 グ ル ー プ を 吸 収。2014年にはIBMが超 伝 導 量 子 コ ン ピ ユ ー テ ィ ン グ を 含 む 5 年 間 で \$ 30 億 ド ル B の 研 究 イ ニ シ ア テ ィ ブ を 発 表 し、「 7 nm and beyond 」 と し て シ リ コ ン 半 導 体 の 研 究 及 び 「 post silicon 」 と し て 超 伝 導 量 子 コ ン ピ ユ ー テ ィ ン グ と ニュー ロ シ ナ プ ス コ ン ピ ユ ー テ ィ ン グ を 含 め た 研 究 を 計 画 し て い る。
- 米 国 で は、各 種 プ ロ グ ラ ム に お け る 重 要 な サ ブ テ マ と し て 光 技 術 を 明 示 し、具 体 的 施 策 ベ ー ス で 強 力 に 推 進 し て い る。また、光 技 術 を 研 究 ・ 教 育 の 両 面 か ら 推 進 す る 教 育 研 究 機 関 が 複 数 存 在 し、イ ノ ベ ー シ ョ ン を 生 み 出 す 源 泉 と な っ て お り、SLAC 国 立 加 速 器 研 究 所 の X 線 自 由 電 子 レ ー ザ ー 施 設 LCLS （ Linac Coherent Light Source ） 等 を 用 い た 研 究 が 精 力 的 に な さ れ て い る。また、2014年には、旧 来 の ダ ブ ル ベ ン ド ア ク ロ マ ット と ダン ピ ン グ ウ ィ グ ラ ー を 組 み あ わ せ る こ と で エ ミ ッ タ ン ス 0.55 nm ・ rad を 目 標 と す る 軟 X 線 向 け 3 GeV 級 高 輝 度 放 射 光 源 NSLS-II が 稼 働 開 始 し て い る。
- ロー レン ス ・ リ バ モ ア 国 立 研 究 所 は、光 科 学 に 関 す る 米 国 の 中 心 的 研 究 所 で あ り MJ の 超 高 出 力 レ ー ザ ー か ら 1 ペ タ （ 10 15 ） ワ ット （ PW ） / 10 Hz の 超 高 強 度 レ ー ザ ー 開 発 や レ ー ザ ー プ ロ セ ス 用 の 高 繰 り 返 し レ ー ザ ー の 開 発 を 手 掛 け、一 部 を 欧 州 レ ー ザ ー 施 設 ELI （ Extreme Light Infrastructure ） に も 輸 出 し て い る。また、ロー レン ス ・ バ ーク レー 国 立 研 究 所 で は、1 PW 級 の バ ーク レー 研 究 所 レ ー ザ ー 加 速 器 （ BELLA ） を 大 幅 に 拡 張 す る 計 画 を 現 在 進 行 中 で あ る。
- な お、産 業 用 途 に お け る レ ー ザ ー 技 術 開 発 は 民 間 企 業 の 主 導 で 実 施 さ れ る 場 合 が 多 い。な お、米 国 に お け る レ ー ザ ー に 関 連 す る 政 府 主 導 の 研 究 開 発 は、安 全 保 障 を 主 目 的 と し て 行 わ れ る 場 合 が 多 い¹。

英国

¹ 「平成 27 年度特許出願技術動向調査報告書（概要）パワーレーザ」、特許庁、平成 28 年 3 月

- 政策文書としては、2015年に量子技術戦略アドバイザリボードを代表して InnovativeUK と工学・物理科学研究会議 (EPSRC) が「National Strategy for quantum technologies」を公表。要旨としては、英国における能力基盤の強化、英国のアプリケーション及び市場における機会の活性化、英国の労働力の技能向上、適切な社会の及び規制の状況の構築、国際的な関与による英国の利益の最大化を戦略として特定。英国の量子技術エコシステムの成長を共同で加速するために、大学、産業界等を支援する 10 年間プログラムへの投資、英国の大学が保有する最新施設の産業界による利用等、8つの提言を掲載。
- 2014年には、「The UK National Quantum Technologies Programme」を開始。量子科学技術研究の大型プロジェクトであり、5年間の間に総額2億7千万ポンドの政府投資 イニシアティブ が予定されている。参画機関は、InnovativeUK 及び EPSRC、国防科学技術研究所 (DSTL)、国立物理学研究所等。2015年4月時点で、14の研究領域（その中に55件のグラント）が設定され、各研究領域に経費が配分されている。
- この中で、2014年には、「UK National Network of Quantum Technology Hubs」を構築し、オックスフォード大学が量子コンピューティング技術、バーミンガム大学が量子センサ計測標準技術、グラスゴー大学が量子センサ・イメージング技術、オックスフォード大学が量子コンピュータとシミュレーション技術、ヨーク大学が量子通信技術に取り組むハブとなり、今後英国内17の大学と132の企業をネットワークでつなぐ拠点となる。
- 光技術に関する研究については、EPSRCにおいて研究基盤として、光と物質の相互作用、フォトリック材料、プラズマとレーザー等の研究分野に約6百万ポンドが支援されている。また、ラザフォード・アップルトン研究所におけるピーク出力1PWのパワーレーザーや、Diamond Light Source 放射光施設を用いた研究などが精力的に進められている。さらに高繰り返しセラミックレーザーを開発し欧州 XFEL 施設などに提供するなどしている。

その他欧州各国

- 蘭国では、2013年にデレフト工科大学に、量子研究のナショナルアイコンとしてデレフト工科大学に QuTech センターを開設されたした後、政府は2014年に科学技術外交における4つの「National Icon」の1つとして量子技術を指定し、2015年に10年間で€1.35億ユーロMの研究イニシアティブを発表。誤り耐性量子コンピューティング、量子インターネット及びネットワークコンピューティング、量子ソフトウェア及び理論並びにトポロジカル量子コンピューティングの領域を対象に研究を推進している。中小企業やベンチャー企業のみならず、大企業との共同研究に積極的であり、マイクロソフト社やインテル社とパートナーシップを結んでおり、インテル社は2015年に10年間で5千万ドル\$50Mの支援を伴う共同研究を発表している。
- 欧州では研究者による量子技術研究のロードマップ「Quantum Manifesto」が2016年に発出された。重点領域として原子時計、量子センサ、量子リンク、量子シミュレータ、量子インターネット及び量子コンピュータの6つを挙げ、欧州委員会に10億ユーロ€1B規

模のを投じる量子研究計画の立ち上げを呼びかけた。それを受け、欧州委員会では2018年から、Horizon2020のなか中で、「Quantum Technology Flagship」事業を設立する計画を進行中予定である。

- 欧州での光技術については、Horizon2020において2014年から2020年までの全体予算が約786億ユーロのうち、光技術分野に対して約700百万ユーロが投資される予定である¹。現在、レーザープラズマ加速器のコンセプトデザインを目的としたEuPRAXIAプロジェクト（2015年から2019年。約3百万ユーロ）や、ピーク出力10ペタワット（PW）を目指してチェコ、ハンガリー、ルーマニアに建設中のレーザー施設ELI（Extreme Light Infrastructure）3施設を、将来的に統合運用する準備のためのELITRANS（2015年から2018年。約3.4百万ユーロ）などが進行している。
- 独国では、同国の量子技術の推進及び「Quantum Technology Flagship」に向けた準備のため、連邦教育研究省が、国内イニシアティブ「Quantum technology -fundamentals and applications（QUTEGA）」を立ち上げることを決定し、2017年の初めまでにQUTEGAイニシアティブにおいて対象とすべき研究トピックスなどがまとめられる予定である。QUTEGAの本格的な開始は2018年末から10年間の予定であるが、連邦教育研究省では現在、2017年から開始できる3年間のパイロット研究を数件募集している。
- 独国の光技術は、現在の科学技術基本政策「ハイテック戦略」（2006年開始）において、戦略的に投資すべき将来性の高い最先端17分野の一つの柱として、明確に位置付けている。2014年には「新ハイテック戦略」が発表されているが、今後も引き続き政策支援が行われる見通しである。特に独国では国を挙げたフォトンクス研究開発フレームワークとして「Photonik Forschung Deutschland」に取り組んでおり、2016年2月から、高効率パワーレーザー光源に関する3年間のプロジェクト（EffiLAS）を新たにスタートさせたところであり、直接加工向けkW級青色LD及び極短パルスレーザーによる高精度加工技術が研究開発の柱となっている¹。
- 仏国では、歴史的に光学技術に強みをもち、パワーレーザーに関する産官学の連携が進んでいる。MJ級の超高出力レーザー（LMJ）、数PWの超高強度・高出力レーザー、kJ級レーザーを多数の高出力あるいは短パルス超高強度レーザーシステムを有し、さらに現在10PW級のレーザーが建設中である。また仏国におけるパワーレーザー開発には産官学の連携が重要な役割を果たしている。国の長期的戦略のものとして開発されるパワーレーザーに企業が参画しその技術を欧州レーザー施設ELI、欧州XFELをはじめ欧米アジア諸国に輸出している。
- スウェーデンでは、7つの偏向磁石を用いたマルチバンドアクロマット（MBA）ラティスの採用により、エミッタンス0.3nm・rad程度を目標とする軟X線向け3GeV級高輝度放射光源MAX-IVが2016年より稼働開始している。

中国

- 政策文書としては、中国の科学技術基本政策「国家中長期科学技術発展計画綱要 2006～2020 年」において、**将来の持続可能なイノベーションと経済社会発展のための**基礎研究における重大科学研究 4 項目の一つとして、量子制御が位置付けられており、量子情報処理、量子シミュレーション、量子通信及び情報セキュリティが第 12 次 5 力年計画（2011～2015）に重要な領域として記載されている。2015 年には、中国科学院がアリババと共同で量子計算実験室を設立して、量子コンピュータの開発を進めている。
- 「国家中長期科学技術発展計画綱要 2006～2020 年」には、**将来の持続可能なイノベーションと経済社会発展のための先端技術 8 分野の一つとして、レーザー技術が挙げられている。中国では半導体や太陽電池等の製造向けの基盤技術としてレーザーの研究開発を政府が積極的に支援している。これまで CO₂ レーザー等の開発が主流であったが、近年は製造の高速化、高品質化に対応するために、ディスクレーザーやファイバーレーザーを重視する流れにある¹。**
- 第 12 次 5 力年計画においては、**重大科学施設・設備を整備する方針の中で、2009 年から稼働している中国最大の放射光施設「上海光源」のビームライン増設が打ち出されている。また、中国科学院上海光学精密機械研究所が、最大出力 10PW 級のパワーレーザー施設を開発中である。**

（4）我が国における状況

第 2 章以降に述べるように、概して言えば、我が国には強みも課題も存在する。我が国の基礎研究は国際的にも一定の存在感を有し、例えば超電導量子ビット、量子計算理論、量子センサ材料、光学技術・素子など、その成果が海外で活用・展開されるような事例も見られる。

これらは我が国における地道で息の長い継続的な研究や技術基盤・研究基盤から生まれていることが指摘される。一方で、これも第 2 章以降に述べるように、概して言えば、研究者層の厚みや流動性、分野融合、若手研究者が安定して研究できる環境等に課題が存在する。

こういった中で、上記の国際動向を踏まえ、我が国における推進方策を検討することが必要であるが、世界的に、産業界を含む投資の拡大と産業応用の模索の動きが早く、ここ数年が、我が国の研究・技術の優位性を将来の成長に転換できるかの岐路にあらう。第 5 期科学技術基本計画において**光・量子技術が位置付けられた今、府省横断で政策や政策資源の投入を検討すべき重要な時期にある**と言える。

なお、我が国における量子科学技術に関する最近の政策的な動向については下記のとおりである。

- 従前より、科学研究費助成事業や科学技術振興機構（JST）等の支援事業において支援がなされてきたが、2008 年度より、文部科学省において、10 年間の長期的な支援事業として「最先端の光の創成を目指したネットワーク研究拠点プログラム」が開始。また、同時期に「量子ビーム基盤技術開発プログラム」（5 年間）、続いて、光科学技術と量子ビーム

技術の融合を促進する「光・量子融合連携研究開発プログラム」(5年間)を実施。これらを通じて、新たな基盤技術開発の推進によるイノベーションの促進への貢献を目指してきた。また、内閣府で2009年度より開始された最先端研究開発支援プログラム(FIRST)や2013年度より開始された革新的研究開発推進プログラム(ImPACT)においても支援。

- 2016年に入り、1月に閣議決定された第5期科学技術基本計画において、「光・量子技術」が、新たな価値創出のコアとなる強みを有する基盤技術の一つと位置付け。
- これを受け、2016年3月より、科学技術・学術審議会先端研究基盤部会量子科学技術委員会において、量子科学技術の推進方策についての調査検討を開始。
- また、2016年3月に文部科学省において、科学技術振興機構(JST)戦略的創造研究推進事業(新技術シーズ創出)の平成28年度戦略目標の一つとして、「量子状態の高度制御による新たな物性・情報科学フロンティアの開拓」を決定。4月よりJSTにて、戦略目標に基づく基礎研究の支援を開始(CREST、さきがけ等)。量子関係としては13年ぶりの戦略目標である。
- さらに、2016年4月に、量子科学技術を一体的、総合的に推進するため、国立研究開発法人量子科学技術研究開発機構が発足(放射線医学総合研究所と日本原子力研究開発機構の一部が統合)。

以上を踏まえつつ、今後、科学技術・学術審議会先端研究基盤部会量子科学技術委員会にて「量子科学技術(光・量子)の新たな推進方策について」中間とりまとめを行うものである。

2. 内外の研究動向及び我が国の強み・課題

(1) 量子情報処理・通信

① 量子コンピューティング

研究動向

- 量子コンピューティングは、量子力学的な効果を用いて超並列・大規模情報処理を行う技術であり、現在の最速スパコンでも例えば数千年を要するなど現実的な時間で解けないような一部の問題を、短時間かつ超低消費電力で計算できるようになると期待されている。(注1)
- 1990~2000年代から、量子情報処理を可能とする物理素子、先端レーザーによる量子状態制御といった要素技術や、量子誤り訂正といった理論に進展があり、近年、欧米政府やGoogle社等の世界的企業が中長期的観点からの投資を拡大している。(注2)
- 現在のコンピュータが「0」か「1」の二進法を用いて計算を行うのに対し、量子コンピューティングでは「0」と「1」が重ね合わせで存在する状態を情報処理の単位(量子ビット)として計算を行う。このような量子ビットを用いることにより超並列・大規模情報処理が

可能となる。

- 量子ビットを物理的に実現する素子として、超伝導量子ビット（超伝導材料からなる回路を流れる電流の巨視的量子状態を「0」と「1」の重ね合わせとして利用するもの）、スピン量子ビット（固体中の電子や原子核のスピンと呼ばれる物理量の量子状態を「0」と「1」の重ね合わせとして利用するもの）が、現時点で研究が進んでいる代表例として挙げられる。

（超伝導量子ビット）

- 超伝導量子ビットは、我が国研究者が世界に先駆けてデバイスを開発し、1999年に論文発表された。量子ビットは外乱で壊れやすいのが本質であり、当初は、量子ビットの状態を保持し情報処理に利用できる時間（コヒーレンス時間、いわば寿命）が短かったが、日、蘭、仏、米などの研究者がしのぎを削って現象解明に取り組みながら発展し、これまで約10万倍の100 μ 秒のコヒーレンス時間が実現されている。
- 一方、個々の量子ビットの寿命の延伸は有限なため、複数の量子ビットを一まとめに捉えて、個々の量子ビットの誤りを訂正するアルゴリズムを組み込むことで、実効的な1つの論理ビットとして量子状態を長い時間保持することが行われる。十分長い任意の時間、情報処理に利用するには、更に誤りに対する耐性を持たせるようにすることが必要となるが、現在、世界的に、9量子ビットを集積化して、簡単な誤り訂正アルゴリズムを動かすことが実験的に行われている。
- 今後は、量子ビットのより大規模な集積化と、誤り訂正を組み込んだ論理ビットを1つでも十分長い任意の時間、保持することが次のマイルストーンとされている。（なお、現時点で、既存のスパコンを凌駕するような計算には10⁸~10⁹個以上の論理量子ビットが必要と想定されており、その実現には数々のマイルストーンの達成が必要と考えられる。）

（スピン量子ビット）

- スピン量子ビットも、我が国研究者が世界に先駆けて1996年にデバイスを開発した。日、蘭、英、米、豪などの研究者がしのぎを削って現象解明に取り組みながら発展し、2012年にはコヒーレンス時間が短い（55n秒）ものの、潜在性の高い材料であるシリコン中に1つの電子スピンの量子ビットが実現された。さらに、我が国研究者が作製した、電子スピンの外乱を与えない同位体組成のシリコン結晶がブレークスルーとなって、1m秒のコヒーレンス時間が2014年に実現されている。
- また、シリコン結晶上に2次元の電子回路を組み合わせることで、演算に参加する電子スピン量子ビットの選択性を確保すること、2つの電子を並べて相互作用を使って簡単な演算を行うことが実験的に行われている。

- 今後、シリコン中のスピン量子ビットについては、量子ビットの小規模な集積化方法の解明と、誤り訂正を組み込んだ論理ビットの確立が次のマイルストーンと考えられている。

(各アプローチの概観)

- 個々の量子ビットのコヒーレンス時間は、超伝導量子ビットに比し、シリコン中スピン量子ビットの方が長い時間が実現されている。一方、量子ビットの集積化や相互作用の操作では、超伝導量子ビットの方が道筋が見えているとの特徴が挙げられる。何れも極低温で実現されるという特徴があり、組み合わせる古典制御技術の極低温領域での確立も課題として挙げられる。
- スピン量子ビットでは、常温で実現され、量子コヒーレンス時間が比較的長いダイヤモンド中の電子スピン（0.5秒のコヒーレンス時間が報告されている）も、我が国をはじめ世界的に注目されている。2014年には、常温動作のスピン量子ビットとしては世界で初めて誤り訂正が実現された他、理論主導で大規模な量子コンピュータを実現する素子とアーキテクチャ双方の詳細が世界で初めて示されるなど、ダイヤモンド中の電子スピンにおいても我が国研究者による先導的な成果が生まれている。また、新しい材料によるブレークスルーも期待されるが、集積化のみでは課題があるため、小規模な集積素子をつなぎ、分散型の情報処理を目指すという方向も一つの世界的な流れである。
- 何れも、量子ビットのコヒーレンス時間の保持・向上を目指した上で、スケーラブルな量子情報処理アーキテクチャに基づく、更なる集積化と、誤り訂正を組み込んだ論理ビットの確立が次のマイルストーンと考えられている。誤り訂正の方式や量子情報処理アーキテクチャについても、現在用いられている方式がベストの解という証明はなく、理論的なアプローチからもブレークスルーがあり得る。このように、実験的なアプローチと理論的なアプローチ、さらにはブレークスルーが相互作用・融合しつつ、更なる発展が遂げられると期待される。
- 量子ビットを物理的に実現する他の手法としては、イオン・トラップ法（電場等でイオンを捕捉捕縛し、その原子核のスピンと呼ばれる量子状態を利用するもの）や、トポロジカル量子ビット（未発見・未解明のマヨラナ粒子と呼ばれる素粒子を利用しようとするもの）、光を用いる方法が挙げられる。イオン・トラップ法では複数のスピンを相互作用させられることが確認されているが集積化に工夫が必要と考えられ、現在は主に海外で集積化が試みられている。トポロジカル量子ビットは、安定な量子ビットが実現できる可能性がある指摘されているが、主に海外で基礎的な探索が行われている。

(量子アニーリングマシン)

- 量子コンピューティングに向けては大きく二つの方向性が模索されている。一つは上述の量子ゲート方式と呼ばれるデジタル型の量子コンピューティングである。もう一

方は量子アニーリングマシンに代表されるアナログ型の量子コンピューティングであり、実用化に向けた研究開発が先行している。

- 組合せ最適化問題が短時間かつ超低消費電力で計算できると想定されている量子アニーリングマシンの例としては、カナダのベンチャー会社である D-Wave 社の世界初の商用機「D-Wave」があり 2015 年には 1000 ビット、2017 年には 2000 ビットの商用機を発表発売している。D-Wave には我が国研究者が世界に先駆けて開発した超電導量子ビットの技術が適用されている他、我が国研究者が 1998 年に理論提案をした量子アニーリングの手法が適用されることで実現したものである。
- 一方、組合せ最適化問題に関しては我が国においても、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」プログラムにおいてコヒーレントイジングマシンと呼ぶ、量子ビットに相当するレーザーパルスを用いる、量子アニーリングとは異なる新たな計算手法が提案・実験されている。本プログラムにおいては 2018 年度の終了時点で 10000 ビットの達成を目指しており、今後の展開が注目されている。

我が国の強み・課題

- 超伝導量子ビット・スピン量子ビットに係る世界初の要素技術や、量子アニーリングの理論提案をはじめとして、量子コンピューティングに係る重要なアイデア・要素技術が我が国研究者の研究に端を発することは特筆に値する。これは、我が国に物理学や材料科学の強みがある上で、長年にわたる連綿とした基礎研究の取組と人材育成があつてこそその成果と考えられる。
- 超伝導量子ビットやスピン量子ビットの更なる集積化という面では、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など、これまで我が国で培われてきたような技術の活用・開発が鍵と考えられ、日本の強みとなる期待や可能性がある。
- 要素技術を開発した我が国でなく、欧米で多量子ビット集積化が進んでいることについては、これにはある程度の研究資源が必要であり、欧米の研究者はそれを獲得できているという面がある。また、欧米における更なる集積化に集中したプロジェクト的な研究開発投資や民間企業による研究開発投資の存在も挙げられる。
- 研究者数で言えば、超伝導量子ビットを例にとれば、米国では数百人に対し、我が国では数十人といった人材層の厚みの違いがある。欧州はその中間と言える。実験だけでなく、誤り訂正といった理論的なアプローチについても、同様の人材層の厚みの違いがある。ただし、我が国には国際的に活躍する優秀な若手研究者が存在することも事実。
- 我が国においては、ある研究の進展により新たな領域で若手研究者が育っても、大学等の研究室を主宰できるポストに全体として流動性がなく、ポストに限りがあることも課題。

② 量子シミュレーション

研究動向

- 物質中の電子のふるまいや相互作用は、超伝導、磁性、化学反応における溶媒効果など、多くの重要な物理・化学現象、ひいては物質の物性や反応を支配している。このため、多数の粒子の量子レベルのふるまいや相互作用を理解することは、現代科学における中心課題の1つと言って過言ではない。
- 量子シミュレータは、解析の難しい物質中の多数の電子等のふるまいや相互作用の特化した問題に対して、人工的に別に作った多数の粒子の量子状態（量子多体系）で模擬してシミュレーション実験を行う技術である。この技術を上記の課題に応用すれば、未解明の物性や反応の理解、さらには、それに基づく新物質や物質が有する機能等の探索と開発が可能になると期待されている。（注3）
- 古典計算機によるシミュレーションでは、粒子数が増えると計算量が指数関数的に発散するため、解析の手がつけられなくなってしまう。これに対し、量子シミュレータでは短時間の解析で手掛かりが得られる可能性がある。2020年に向け開発が進められているポスト「京」コンピュータでも、現実の物性や反応の十分な模擬・理解に必要なと考えられる、例えば1000粒子の厳密な計算には 10^{274} 年という非現実的な時間がかかってしまうことに対し、量子シミュレータでは、量子状態を用いて並列的にシミュレーションを行うため100ミリ秒以下のオーダーで模擬できる可能性がある。（注4）
- 量子シミュレータを実現する物理的な素子は、基本的に量子コンピュータと同様の技術であり、実験技術的な基盤や発展基盤に共通する点もある。ただし、量子シミュレータでは、複雑な情報処理を行うのではなく、物理的な素子に存在する量子状態を電子の量子状態に見立てて模擬実験を行う点において複雑性が少ないという特徴がある。このため、量子コンピュータの実現に向けては数々のマイルストーンが存在するのにに対し、量子シミュレータはより短期的に実現が可能であると考えられている。（注5）
- 海外においては、量子コンピュータと同様に欧米が投資を拡大している（注2）。欧州委員会では4つのメインターゲットとして量子コンピュータ等と並んで量子シミュレータを掲げ、5年以内に物質中の電子の挙動のシミュレーション、10年以内に複雑な新物質の探索・開発への応用、10年以降に創薬を支える量子ダイナミクスや化学反応機構のシミュレーションを実現するというロードマップを掲げている。量子シミュレータは主要各国の量子科学技術政策におけるキラーコンテンツの一つとなっている。
- 量子シミュレータの方式には、それを実現する物理的な素子の違いにより、冷却原子・分子方式（レーザー技術で原子・分子を**捕捉捕縛**してその量子状態を利用する方式で、多様な多体系を再現可能との特徴）、イオン・トラップ方式（電磁場でイオンを**捕捉捕縛**する方式で、単一イオンの制御が容易との特徴）、超伝導量子ビット方式（量子コンピュータでも代表例となる超伝導量子ビットを利用する方式で、特定の問題に対する高い制御性・拡張性が特徴）、線形光学素子方式がある。これらの方式の中で冷却原子・分子方式が、我が国を含め研究が進んでいる代表例として挙げられる。

(冷却原子・分子方式による量子シミュレータ)

- 冷却原子・分子方式による量子シミュレータは、レーザー光によって空間的に**捕捉捕縛**された冷却原子の集合体によって物質中の電子のふるまいを模擬するものである。高い制御性に加え、様々な相互作用に基づく多様な物質の性質を調べることが可能であるという特徴がある。
- 冷却原子・分子方式の研究開発については主に低温化と観測・制御の二つの軸がある。低温化に関しては、現在、反強磁性秩序の証拠が見られるところまで進んでいる。世界的な研究のスピードを概観すると、数年後には新しいアイデアが提案され、より低温環境での実験が可能となることで超伝導、超流動現象に関する定量的な理解が得られ、それに基づいた理論的な予測が可能になると期待される。
- 冷却原子・分子方式は既に原子数に限れば 10^5 個以上の規模に達しており、今後は規模を大きくするのではなく、原子の個別観測に基づき、原子間の相互作用といったパラメータを精度よく制御していくことが次の重要な課題である。現在、原子を個別に観測できる量子気体顕微鏡の開発が進んでいるが、将来的には、任意に原子を空間的に配列する手法や、量子状態を制御して安定化させる量子フィードバック制御技術の発展も期待される。量子状態の安定化は、量子コンピューティングにも有益な示唆を与えるものと考えられる。
- 現在、冷却原子・分子を使った量子シミュレータでは、リュードベリ原子や極性分子を初めとする大きな双極子モーメントを有する粒子を使う研究も進んでおり、隣接する原子間の相互作用に関する研究から、長距離相互作用まで含めたシミュレーションに関する研究へとシフトしてきている。この他にも時間発展（ダイナミクス）といった、低温化と観測・制御の二軸以外の研究も含めて重層的に進めていくことにより、光合成メカニズムのシミュレーションなど、多様な物質に関する重要な知見が得られるようになることも期待される。

(各アプローチの概観)

- イオン・トラップ方式についてはこれまで、20 個程度の原子を一次元に捕捉した量子シミュレータが研究されてきたが、二次元で 300 個程度の規模へ拡張する試みがなされており、2016 年には 200 個以上の原子の相関を確認したという報告がある。超伝導量子ビットについては、2 個の量子ビットを用いた量子シミュレータの実証実験が 2015 年頃から始まっている。

我が国の強み・課題

- 物性や反応に係る理論と実験の比較を重ねることは量子シミュレータの信頼性を高める

のに不可欠である。我が国には優れた理論研究者が若手も含めており、量子物性理論、特に強相関電子系の研究は伝統的な強みと考えられる。一方、我が国は伝統的な分野の影響が強く、新しい分野に弱いため、量子情報理論では非常に優秀な研究者がいるものの、人材数は大きく不足している。

- 実験グループの少なさは看過できない弱みの一つである。個々のグループは成果を出しているが、欧米と比較すると層が薄く、特に若手がリードするグループが少ない。低温実験では大規模な初期投資が必要であることが、若手参入のハードルを高くしていると考えられる。また、各分野の高い専門性は我が国の強みではあるが、一方でそれぞれの分野で閉じがちな研究環境が、研究の新規性や、融合化を阻害している面もあり、基礎物理から理論物理、システムまで幅広く扱うための環境作りが重要である。
- 光格子時計やコヒーレント制御の研究に見られるように、我が国における光技術のレベルが非常に高いことは強みであり、関連する技術を冷却原子・分子方式の量子シミュレータに有効活用できると考えられる。また、光学素子やガラス加工、エレクトロニクス分野の国内メーカーについても高い技術力を有していると考えられる。
- 格子上に原子が配列する物質中の電子の挙動を記述するハバードモデル等については、その定常状態を量子シミュレーションする標準的な研究は欧米の層が厚く大幅に先行している。

③量子通信・暗号

研究動向

- 量子通信は、量子力学的な効果を通信に応用したもので、通信の大容量化・低電力化が可能になると期待されている。量子暗号も、量子力学的な効果を用いてセキュリティの高い通信を行う技術であり、現在、私たちが日常的に行っているネットショッピング等において情報を守っている暗号と比べ、より安全性の高い通信が実現できるようになると期待されている。
- 量子通信は 1960 年代のレーザーの発明とほぼ同時にコンセプトが生まれ、量子暗号は 1980 年代に最初のプロトコルが発表された。1994 年に米国の研究者であるピーター・ショアが、量子コンピュータが実現すると主な暗号はすべて破られてしまう、という理論を発表したことで、量子通信・暗号は各国で国家戦略として進められ、近年においても、欧米政府や企業、中国等が大規模ネットワーク形成や中長期的観点からの投資に積極的に取り組んでいる。
- 現在のデジタル通信が電気や電波、光による「0」か「1」の符号で送られる信号を受信し、誤り訂正処理をすることで必要な情報を伝送しているのに対し、量子通信では、受信側で複数パルスを重ね合わせ状態に変換しながら量子コンピューティングによる処理を行うことで大容量・低電力通信を可能とする。

- 量子通信において、通信距離を伸ばすためには量子中継が必須である。これには、量子テレポーテーションや量子メモリといった従来とは全く異なる新たな技術も含まれており、それを実現するための素子として、ダイヤモンドNVセンタが、現時点で研究が進んでいる代表例として挙げられる。
- 現在一般的に使われている暗号は、素因数分解などの活用により、解読に膨大な時間がかかるようにして安全性を高めている一方、量子暗号は、「量子状態は観察されると壊れてしまう」という不確定性原理と呼ばれる性質を利用しているため、盗聴が確実に検知でき、理論上いかなる技術でも破れない高度な安全性の実現が可能となる。
- 量子暗号を実現する方法の一つとして研究開発が主に進められているのが量子鍵配送（QKD）技術で、伝送したい情報を暗号化・復号するための鍵を、量子力学的な効果により情報の送信者と受信者だけが共有できるように配送するものである。BB84 と呼ばれるプロトコルが、現時点で研究が進んでいる代表例として挙げられる。

（量子通信）

- 量子通信における受信過程での重ね合わせの原理を用いた信号識別性の向上には、量子コンピューティングによる超並列計算が必要であり、量子コンピューティングに必要な要素技術の進展とともに今後も発展が期待される。
- 量子中継は量子通信の長距離化に必須の技術であり、通信の中継を絶対的に安全なものにできる。量子中継を実現する基盤技術は量子もつれスワッピングであるが、実現化が進められている物質系の中でも、情報を数秒以上保持できる量子メモリであって、かつ極低温を必要としないダイヤモンドNVセンタが圧倒的に優位である。
- 量子中継の実現には量子もつれの活用が必須であるため、量子もつれの活用を実現化する素子の開発と小規模集積化（注6）が次のマイルストーンと考えられる。また、量子通信は量子暗号を含め、ワイヤレスネットワーク技術等との融合が今後の方向性であると考えられる。

（量子暗号）

- 量子暗号技術の一つである BB84 方式は、光子 1 個で 1 ビットの情報を送ることにより盗聴困難性を保障するものであり、現時点で最も研究が進んでいる。現在の性能としては、通信距離は光子が届く距離に制限を受けるため約 100km、その際の通信容量は約 1kbps である。
- 我が国においては 2001 年以降、産学官連携プロジェクトや ImPACT を通じて、量子暗号方式の実用レベルの技術開発やテストベッドを用いたネットワーク上における安全性実証試験、新しいネットワークアプリケーションの開発を進め、世界をリードしてきた。現在は 6~8 ノードの都市間ネットワークでの暗号プロトコルの安全性保証が堅実に進めら

れているところであるが、市場開拓までには至っていない。

- 欧米ではベンチャー企業がQKD装置を販売しており、性能の面では我が国に及ばないが、研究機関を対象として販売するビジネスモデルを構築している。一方で、大型国家プロジェクトでは基礎研究に軸足を置いていると考えられ、実用化への具体的戦略はあまり読み取れない。中国は総距離 2000km の QKD ネットワークを現在構築中であり、この大規模量子暗号ネットワークを基にした標準化戦略を推進されるおそれがある一方で、大規模ネットワークにおける暗号プロトコルの安全性保証の手法は不透明である。
- 量子暗号は通信距離と通信容量に原理的な限界があることが分かってきており、大規模ネットワーク化には現在、50km 程度で中継する方法がとられている。その中継点には盗聴者を物理的に侵入させないという古典的手法がとられており、理論上安全な量子中継技術の確立が今後のマイルストーンと考えられる。

(各アプローチの概観)

- 量子通信は量子暗号を一部含むような研究に進展してきているが、現在のインターネットを支えている暗号技術である公開鍵暗号が 1 対千万規模での電子署名を実行しているのに対し、量子通信、量子暗号、量子中継は現在 1 対 1 のプロトコルであるなど、実現できている機能はまだ限られている。今後は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、新しい技術体系に移行する方向性と、量子中継を核とした技術の確立が重要である。
- QKD は非常に高い安全性を実現するが、利便性や速度、距離、コストの面を犠牲にせざるを得ない。そのため、衛星と地上間のレーザー光通信のように伝送速度を優先する必要がある場合には、セキュリティはある程度犠牲にし、電波通信で取り扱われつつある物理レイヤ暗号と量子暗号を融合するなどの新分野の技術が期待されている。
- 量子中継のための量子テレポーテーションに成功している物質系は、ダイヤモンド NV センタの他、トラップイオン、半導体量子ドット、超伝導量子回路等があるが、いずれも低温での動作が必要な点が不利である。ダイヤモンド NV センタは、室温でも量子性が確認できるほど量子性に優れ、将来的には集積化も期待できるため、世界的に注目されている。
- 量子テレポーテーションは、半導体量子ドットによる物質系では初めて 2013 年に 5m の距離で実証され、ダイヤモンド NV センタは 2014 年に 3m の距離で実証された。現在は実験室内の数 m での実証試験の時代から、km 単位での実証試験に移りつつある。国内では、発光と吸収のメカニズムを組み合わせ、距離が伸びても伝送レートが低下しない方式なども実証されており、今後も新しいアイデアの開拓が期待されている。

我が国の強み・課題

- 量子通信・暗号において我が国は、理論研究、基礎研究、ネットワーク技術実験で世界を牽引してきた。これは、光工学を含めた物理学、情報工学の強みがある上で、長年に亘る連綿とした基礎研究や産官学連携の取組があってこそその成果と考えられる。
- 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いった異分野との融合についての理論研究や基礎研究が我が国で開始されており、我が国の強みとなる期待や可能性がある。しかしながら、斬新なアイデアが重視されにくいこと、異分野融合を率先するとともに基礎理論や実証実験、アーキテクチャを連携してシステムとしての方向性を組み上げる人材の欠如が課題である。
- 量子中継に必要なデバイスの集積化については、半導体技術や、ダイヤモンドの結晶成長技術など、これまで我が国で培われてきたものづくりの技術とデバイス・アーキテクチャなどの理論との融合による量子デバイス技術の活用・開発が鍵であり、我が国の強みとなる期待や可能性がある。しかしながら、国内で生産されたダイヤモンドのサンプルは国内では入手しづらい状況である。量子中継の研究は近年、海外で活発である一方、我が国では研究の短期的な成果が求められる傾向から活発とは言えないなど、我が国では画期的なアイデアが軽視される傾向にあるため、新しいアイデアは海外へ流れる傾向にある。また、光子検出器については海外製が国産技術よりも優れているため購入せざるを得ず、ボトルネックとなっている。

(2) 量子計測・センシング・イメージング

① 量子計測・センシング・イメージング（生物・生命科学系）

研究動向

- 科学の基本は観察にあり、産業や身近な生活を含む現代社会のあらゆる活動の基本も観察（計測・センシング・イメージング。以下「計測・センサ技術」という。）にあると言っても過言ではない。また、超スマート社会や Society5.0 あるいは IoT 利活用といった未来社会が生み出す新たな価値創出にとっても、計測・センサ技術は鍵となる基盤技術である。
- 計測・センサ技術に量子力学的な効果を利用することで、古典力学の活用を基本とした従来技術を凌駕する感度や空間分解能等を得る量子計測・センサ技術に近年、発展の兆しがある。例えば電子等の粒子が有する量子状態は、外乱で壊れやすいのが本質であるが、それを逆手に利用すれば、磁場・電場・温度等の外界の変化に非常に高感度に反応する計測・センサ技術となる。欧米政府が量子技術への投資を拡大する中、量子計測・センサ技術は幅広い用途にブレークスルーをもたらす技術と位置付けられている。
- 生物・生命科学系においては、光学顕微鏡の発明が細胞の発見に繋がり、光の回折限界を超える微細な観察技術が細胞内小器官の発見や生体分子の解明に繋がっているなど、歴史的に計測・センサ技術の高度化が、生命現象の解明やその応用のフロンティアを常に切り拓いてきたが、それに量子計測・センサ技術が更なる革新を与える可能性がある。

- 生物・生命科学系における量子計測・センサとして、固体量子センサ（例えばダイヤモンドといった固体中の原子レベルの空孔に閉じ込められた電子等の量子状態を利用して磁場等を計測するもの）、量子もつれ光を用いた生体イメージング（通常的光子でなく、2つの光子がどこに存在するかに依らず対となって関連する量子もつれと呼ばれる状態にある「量子もつれ光」を利用して顕微鏡や光干渉断層計の感度・機能を向上するもの）が、現時点で研究が進んでいる代表例として挙げられる。

（固体量子センサの概況）

- ダイヤモンド結晶の格子中の炭素原子の置換位置に入った窒素（N）と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（ダイヤモンド NV センタ）の空孔に電子が閉じ込められており、そのスピンと呼ばれる量子状態の利用や制御が可能であることが2000年代以降、報告されるようになり、量子情報処理・通信を担う素子としてのみならず、計測・センサ分野での利用への期待が大きくなっている。
- 量子状態の利用や制御のために極低温状態が必要な素子が多い中、ダイヤモンド NV センタは、常温・室温で動作する点が大きな特徴である。そのため、実験室ではない実際の社会環境での利用はもちろん、生きた生体の観察に適し、磁場・電場・温度等を高感度に、また空間分解能をナノメートルからミリメートルまでスケラブルに計測することができる。
- 感度の面では、例えば心臓の鼓動に伴う心磁や脳の電気的な活動に伴う脳磁といった、非常に微弱な磁気（ピコテスラ（ 10^{-12} T）からフェムトテスラ（ 10^{-15} T）領域の磁気であり、地球の磁気が数10マイクロテスラ（ 10^{-6} T）であることに対して最大10乗分の1にもなる微弱な磁気）が、SQUIDと呼ばれる超伝導技術を用いた特殊な大型機器を用いなくとも計測可能と期待されている。
- ダイヤモンド NV センタの作製技術としては、化学気相成長（CVD）と呼ばれる半導体・ナノテク分野で培われた技術を使って薄膜を成長させる方法、ダイヤモンドに窒素イオンを注入する方法、窒素入りの不純物ダイヤモンドに電子線等の量子ビームを照射して空孔を作り熱処理を施す方法が挙げられる。いずれも、我が国の大学や国立研究開発法人が国際的にも高い作製技術を有しており、海外の研究グループからも材料提供の依頼があるレベルにあることは特筆に値する。
- 海外では、ドイツがパイオニアとして大学を中心とした欧米融合の拠点となっており、産業界も巻き込んで、固体量子センサに特化した研究拠点の建設が予定され、自動車への搭載や医療応用などを目指した研究が進められている。米国では、ハーバード大学がダイヤモンド NV センタを重要3テーマのうちの一つとして掲げており、医学や宇宙分野などを融合したチームを作っている。
- ダイヤモンド以外で固体量子センサの材料としての発展可能性があるものとして、炭化ケイ素（SiC）が挙げられる。ダイヤモンドと同様、SiCの結晶に原子の空孔を作り、そ

の中の電子スピンを利用するものであり、常温・室温動作するとともに、例えば 100 ナノテスラ (10^{-9} T) の磁気感度を達成したことが 2016 年に報告されている。

- SiC を用いた固体量子センサの特徴としては、センシングに用いる発光波長がダイヤモンド NV センタより生体を透過しやすい赤外波長であることがあげられ、生物・生命科学系の研究では、生体内のより深い場所の状態の計測に適している可能性がある。また、SiC はパワーエレクトロニクス材料として我が国においても材料研究が盛んに行われているため、高品質化・デバイス化に有利で、低コストな材料となる可能性がある。SiC 量子センサの研究は、国際的にも萌芽段階にあるが、ダイヤモンド NV センタと同様に我が国の国立研究開発法人が作製技術を有しており、優位性がある。

(固体量子センサの応用可能性)

- 固体量子センサは、常温・室温動作し、従来技術では難しい微弱な磁場・電場・温度・歪み等の信号を捉える量子計測・センサ技術であるため、応用可能性が非常に多岐に亘る。
- 生物・生命科学系における応用としては、生体親和性を活用し、細胞、ニューロン、タンパク質・生体分子に対して、ナノメートルの空間分解能での定量的な磁場・電場・温度等の計測や、電子スピン共鳴を利用した単一分子の NMR・MRI イメージング、あるいは心磁や脳磁等の計測による産業・医療応用へと展開する可能性がある。例えば、生体内の局所的な温度といった情報は、従来技術では観察困難とされてきたものであり、生命現象の解明の新たなフロンティアを拓きうる。細胞などのミクロンオーダーの生体構造内にナノサイズの固体量子センサを導入する場合には、その手法の研究開発が重要である。また、食品の安全性評価で重要となる混入物検査などにも、固体量子センサ活用の可能性がある。
- 材料・物質系における応用としても、スピン流等の材料・物性研究はもとより、蓄電池、燃料電池、パワーデバイス等の電界・電流・温度モニタ—といったエネルギー分野での応用や車載センサといった製造業分野での応用等が考えられる。センサが高感度で小さいことから、例えば、地下や構造物にある水道管等の水の流れの存在、IC チップ上での局所的な電流の存在といった、他手法では計測できない用途も考えられ、優れた耐環境性を活用し、超スマート社会における社会インフラ、エネルギー、製造業にわたる IoT 利活用にとって重要な役割を担う可能性も指摘できる。
- このように固体量子センサは、超スマート社会や Society5.0 あるいは健康長寿社会を支えるプラットフォーム技術として、中長期にわたり、広い分野の産業界を支える可能性が指摘される。

(量子もつれ光を用いた生体イメージング)

- 量子もつれ顕微鏡は、我が国研究者が世界に先駆けて開発し、2013 年に発表された。量

子もつれ光を利用することで、通常の光よりも少ない光量で高精度な観察が可能であり、照射できる光量に制限がある場合でも高い精度で二次元観察ができる。通常の光の限界を超えた 1.35 倍の S/N 比での微分干渉顕微鏡が報告されている。

- 原理的には、もつれ合い状態にある光子の数を増やしていくことで感度を向上でき、例えばもつれ光子を 10 個に増やした場合は、同じ S/N 比を 10 分の 1 の光量で実現する感度が期待される。これにより、例えば、生体細胞内のわずかな物質分布の変化の観察といった応用の探索が期待される。
- 量子光干渉断層計（量子 OCT）は、量子もつれ光を利用することで媒質の中の構造を高精度で三次元観察できる技術で、従来の OCT の記録である 0.75 マイクロメートルの分解能を超える、0.54 マイクロメートルの分解能が 2015 年に我が国研究者から報告されている。従来の OCT では水分を含む媒質を観察すると分解能が著しく劣化するが、量子 OCT は、量子もつれ光がもたらす特徴により、水分を通して分解能がほとんど劣化しないとの特徴があり、生体観察に適しているとの利点がある。
- 従来の OCT は、例えば網膜疾患を早期に発見するために眼科で利用されているが、量子 OCT による、より厳密な診断や、眼科の他にも様々な生体組織の皮下の高分解能観察ができるようになる可能性がある。現在の課題は計測に時間が掛かることであり、今後、量子もつれ光の発生速度の向上や光子検出器の高速化が期待される。
- 国際的には、量子光学研究は伝統的に欧州に強みがある。光子の検出技術は企業が担うことが多く、当初米国企業が先行し、現在は欧州企業が成長してきているが、我が国企業も存在感を示している。

（量子生物学）

- 上記のような量子技術を用いた新しい生体観察手法が開発されつつあるとともに、細胞や組織中における量子力学的な効果の探索研究が萌芽的になされており、2012 年には量子生物学に係る初の国際会議が英国で開催されている。
- 例えば、固体量子センサといった新しい生体観察手法は、ミトコンドリアや細胞核など細胞内の局所の温度、電子輸送に伴う膜電位形成ダイナミクス、イオン電流である神経細胞の興奮により形成された微弱磁場といった、これまで適当な計測技術がなかった対象に計測の可能性を与え、細胞や組織中における量子力学的な効果の探索研究に繋がる可能性がある。
- このように、細胞や組織中における分子集団のふるまいの時間発展や、光合成やミトコンドリアの中の電子伝達系といった生体内を流れる様々なエネルギーについて、量子論に基づいた理解をしていくことは、生物学・生命科学の進展の鍵の一つになる可能性が指摘される。また、このためには、物理学と生物学という、専門用語や研究手法の異なる分野の交流・融合が重要となることが指摘される。

我が国の強み・課題

- 応用可能性が多岐に亘り、社会的・産業的にインパクトを及ぼす可能性のある固体量子センサの作製技術において、現在、我が国の研究機関に国際優位性があることは特筆される。これは、半導体・ナノテク分野や量子ビーム研究分野での我が国の長年にわたる研究の蓄積が寄与してこそその状況と考えられる。
- 一方、我が国には、固体量子センサを応用した研究グループの数は多くない。応用研究の提案は、大型研究プロジェクトへの投資の拡大とも相まって、欧米が先行している、
- さらに、競争している海外の研究グループからの固体量子センサの材料提供の依頼に対して、国際共同研究の在り方が問われている。現在は、材料や素子の提供に留まるが、作製技術を有する研究人材の流出に至ることになれば、我が国の研究競争力の観点からも懸念される。
- 量子もつれ光を用いた生体イメージングについても、我が国研究者が世界に先駆けて開発を行っていることが特筆される。これは我が国の量子光学の伝統的な強みを背景にしていると考えられるが、一方で、専門用語の垣根やアプローチの違い等のため、物理学と生物学の連携・融合を行う研究グループの数は少なく、相互理解を深めて緊密な連携を加速することが重要である。

② 量子計測・センシング・イメージング（物理系）

研究動向

- 科学の基本は観察にあり、産業や身近な生活を含む現代社会のあらゆる活動の基本も観察（計測・センシング・イメージング。以下「計測・センサ技術」という。）にあると言っても過言ではない。また、超スマート社会や Society5.0 あるいは IoT 利活用といった未来社会が生み出す新たな価値創出にとっても、計測・センサ技術は鍵となる基盤技術である。
- 計測・センサ技術に量子力学的な効果を利用することで、古典力学の活用を基本とした従来技術を凌駕する感度や空間分解能等を得る量子計測・センサ技術に近年、発展の兆しがある。例えば電子等の粒子が有する量子状態は、外乱で壊れやすいのが本質であるが、それを逆手に利用すれば、磁場・電場・温度等の外界の変化に非常に高感度に反応する計測・センサ技術となる。また、原子や光子等の量子が発現する波としての性質やもつれ合い状態を計測・センサに利用することも可能である。欧米政府をはじめ、中国を筆頭にアジア各国で量子技術への投資を拡大する中、量子計測・センサ技術は幅広い用途にブレークスルーをもたらす技術と位置付けられている。
- これまでも物理系の計測・センサ技術として、例えば加速度計や、原子時計、高感度カメラの発明が、万有引力定数の精密計測、世界統一的な時間の標準化や新たな天体の発

見に繋がるなど、物理学の進展や自然科学上の発見を支えてきた。それらはまた、産業機械などの動作制御、GPSによる自己位置測位や画像解析による自動運転など、我々の身近な生活を含む社会において様々に活用されている。このように、計測・センサ技術の高度化は歴史的に、科学の進展や経済・社会的利用のフロンティアを常に切り拓いてきたが、それに量子計測・センサ技術が更なる革新を与える可能性がある。

- 物理系における量子計測・センサとして、量子慣性センサ（例えば原子干渉計を用いた重力加速度計やジャイロスコープ）や光格子時計（レーザーを用いた原子時計）、量子もつれ光を用いた画像センサが、現時点で研究が進んでいる代表例として挙げられる。

（量子慣性センサ）

- 原子を極低温に冷却すると、波としての性質が強くなり干渉を起こすようになるため、その位相差を計測することで原子にかかる加速度や角加速度の高精度計測が可能で量子慣性センサとして活用することができる。1991年にはヤングの二重スリット実験で初めての熱的原子線の干渉が報告され、原子干渉計に繋がる技術に道が開けたが、レーザーによる原子冷却の進展から、翌年には我が国研究者が冷却原子による二重スリット実験を実施したことは特筆される。1990年代後半には、海外における実験で、原子干渉計を活用した重力加速度計やジャイロスコープが、従来技術によるものに匹敵する精度を示すに至っている。
- 従来技術による絶対重力計は、比較的大きな部品の挙動を用いるため精度向上（ $\Delta g/g \sim 2 \times 10^{-9}$ ）の限界に来ているとともに、部品の摩耗により長期連続運転が困難である。また、超伝導重力計は感度は高い（ $\Delta g/g \sim 2 \times 10^{-12}$ ）が、相対値の計測をするものであり、絶対重力計による定期的な校正が必要である。一方、原子干渉計型の重力計は、原子1個の挙動を用いるため、より高い精度（ $\Delta g/g < 10^{-9}$ ）で絶対重力が計測できる。スタンフォード大では目標精度 $\Delta g/g < 10^{-15}$ の、高さ10m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他、欧米及び中国では、宇宙空間でのダークマターの検出といった、基礎物理学実験に向けた準備が進められている。
- 原子干渉計を用いたジャイロスコープについては、レーザーを用いたジャイロスコープを超える安定度のものが海外で報告されている。海外では、非常に高い精度を目指す研究は、安全保障とも関わり進んでいる可能性があるが、公開情報では明確でない。
- 基礎物理学の実験のために感度を上げる場合には大型化すれば良いが、それ以外の実用化に向けては、小型化し感度を上げる必要がある。そのためには、小さな基盤に原子を捕捉し移動させる原子回路や量子もつれ状態などを活用する方法に加え、熱の揺らぎの抑制といった古典技術も含めたブレークスルーが必要である。原子回路については我が国においても約2cm角の基盤上に原子を捕捉する研究が一時的に進められ、1次元の原子干渉計のデモンストレーションが行われた。フランスのパリ天文台では、原子回路上で原子が移動する原子導波路を用いたジャイロスコープの研究が行われている。

- 原子干渉計型の量子慣性センサは、我が国に多くの研究実績がある原子時計に関する研究と共通する技術要素技術が多いため、連携により大きく進展する可能性がある。

(光格子時計)

- 現在の「1秒」を与える国際原子時は、セシウム原子 (^{133}Cs) の共鳴周波数に基づいて3000万年に1秒のずれ (10^{-15} という15桁の精度) で時間を刻んでいる。このセシウム原子時計の精度を更に1000倍以上向上させ、次世代の原子時計を提供する可能性のある研究が近年著しく進展しており、2001年に我が国研究者が提案した光格子時計がその代表例である。光格子時計は、宇宙年齢の138億年でも1秒も狂わないという精度を持つ。
- 光格子時計は、特別な波長のレーザー光で作った光格子の中に、卵パックに入った卵のように原子を捕捉し、別のレーザー光を当てて共鳴周波数を測定する原子時計である。光格子を作るレーザー光による原子の摂動を極限まで抑える「魔法波長」を我が国研究者が2001年に提唱、2003年に実証することにより、誰も想定していなかった光格子を時計に使うという画期的なアイデアが、10数年の連綿とした研究を経て実現に向かうこととなった。
- 光格子時計は現在、次世代原子時計の新たな潮流となり、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いるが、日本における光格子時計の精度は世界をリードしている。欧米諸国が圧倒的にリードしてきた重要な国際的計量標準であり、10年ほど先に控えている国際単位系の「秒の再定義」において、我が国がこれまで為し得なかったような積極的な国際貢献（我が国発でアジア初の積極貢献による「秒の再定義」）が期待できる。
- また、光格子時計により物理定数の恒常性の検証や変化の検出が実験的に可能になり、標準モデルを超える物理学の探索に繋がりと考えられる。仮に、異種原子の光格子時計の高精度比較によって時間のずれが見つかれば、研究対象の物理定数が定数でなくなり、現在の物理学の暗黙の仮定を覆すような発見に至る可能性がある。
- さらに、その驚くべき精度により、時間を計るツールという当初の役割を超え、アインシュタインが相対性理論で見出した「時空のゆがみ」も計測できるツールとしての展開可能性も見えてきている。18桁の精度の光格子時計を用いれば、2台の時計の高さが数cm違うだけで、時間の進み方の差が観測できる。光格子時計の小型化・可搬化や耐環境性向上が今後進むことで、場所を選ばずに光格子時計の設置が可能となり、それらを安定した光ファイバー・ネットワークで結べば、設置場所における「時空のゆがみ」や高低差及び変化、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。つまり、全く新しい計測インフラであり、将来社会の安全・安心に貢献する時空間計測インフラとなる可能性がある。例えば、GNSS水準測量に必要な高精度な標高基準（ジオイド・モデル）の維持管理といった相対論的測地への展開の他、マグマだまりの変化検知やGPS信号の届かない海底のような場所での地殻変動観測といった領域への展開も考えられ、これらの時空間情報は地震・火山に関わる防災研究の更なる進展に貢献する可能性もある。

(量子もつれ光を用いた画像センサ)

- 量子もつれ光を利用したセンサは、既存のカメラによるイメージング等を飛躍的に向上させる可能性がある。2000年代後半には米国で、もつれ合った光子群の一方の光を計測対象に当て、反射光の強さをフォトダイオードによって一点で受信し、もう一方の光子群を対象に当てずに直接 CCD カメラで計測して両者の量子相関を計算すると、フォトダイオードでは計測していないはずの対象の形が構築できるという、ゴーストイメージングとして知られている報告がなされている。
- 現在、自動運転の研究が世界的に進展しているが、使用されるセンサとしてカメラやライダー、ミリ波を用いたレーダーがある。カメラは対象の形状が認識できる高い分解能を持つ一方、天候や逆光の影響を受けやすい。ライダーやミリ波は天候の影響を受けにくい一方、分解能の面で人間の形状までは捉えにくい、というように長短がある。ゴーストイメージングに関連する技術を発展させると、悪天候や逆光の影響を受けることなく、対象の形状をある程度離れた距離でも得られる可能性があり、各種センサ等との組合せにより、更なる自動運転技術の進展が期待される。また、量子もつれ状態をセンサに活用することは、標準量子限界を超えた高精度な観察による、金属微細加工や医療といった分野への展開も考えられる。
- 海外では米国、特に DARPA が主導した研究が進められている。我が国においても、量子通信理論と数理学による制御理論を融合した量子レーダーカメラの研究が行われており、光源や受信機といった基盤技術の研究及び自動車への搭載を目指した実効動作距離数十メートルのカメラシステムの技術実証に向けた10年間の開発が計画されている。

(フォノンセンシング)

- 電気に関する電荷、磁気に関するスピン、光に関する光子に次ぐ、第4のエネルギー量子として、振動に関するフォノンがある。フォノンは高周波数では熱、低周波数では音を伝える役割があり、それらの伝搬を制御するデバイスへの将来的な発展を念頭に、フォノンエンジニアリングと呼ばれる基礎研究が進められている。
- 極低温においてギガヘルツ(10⁹Hz)帯で振動する百ナノメートルスケールの共振器を製作すると、フォノンを1個の単位で検出(10⁻¹⁷m以下のオーダーの変位)できるが、それを自在に操作することで新しい物理や応用が広がると考えられており、米国、スウェーデン、スイスといった欧米のトップグループが研究を牽引している。現在は1個以下のフォノン検知という極限センシングのための純粋科学的な探求が先行しており、センサとしての出口の明確化や、他の技術との差別化が課題である。
- 我が国では巨視的なフォノンすなわち振動の伝搬を動的にスイッチング制御する非線形MEMS素子の研究などが行われている。我が国は材料研究に強みを持っており、半導体やナノカーボン、スピン材料といった材料系とのハイブリッド化によるオプトメカニクス

MEMS センサの検出感度の向上に繋がる新しいブレークスルーとなりうる。

(ハイブリッド量子科学)

- エネルギーと距離的な広がり異なる電荷、光子、スピン及びフォノンといった量子の小規模な結合に関する基礎物理を理解し、高感度計測した物理量の変換や、新たな物理の進展に繋げる領域として、ハイブリッド量子科学がある。
- 例えば、フォノンに対して敏感に特性が変化する量子ドット（電子を保有）を組み込んだ、長さ約 $50\mu\text{m}$ の両持ち機械振動子の微細な振動を、電気抵抗値として増幅できることが我が国で 2016 年に報告されている。量子計測・センサ技術分野以外でも、光を制御するフォトニック結晶と量子ドットの組合せによる強いレーザー発振や高効率な単一光子光源実現の研究などが行われている。また、海外においても、例えば米国におけるダイヤモンド NV センタとトポロジカル絶縁体（内部は絶縁体だが、表面は電子を通す物質）、グラフェンシートを組み合わせて情報を保存、制御、伝送するための層構造材料の研究など、量子結合を活用した複数の研究が進められている。
- ハイブリッド量子科学は、これまで着目されていなかったものを含めた異なる物理量の融合や、マクロとミクロの量子結合の活用と制御によって、多様な科学技術を拓く基礎研究として魅力がある。理論研究を通じて、複数の種類の量子と、我が国が高いノウハウや技術を有している材料研究とをスケールの違いを超えて結合することで、新たな価値を創出する可能性を秘めたものと言える。

(IoT と量子科学技術)

- 世界の産業・市場・社会の成長の源泉は、資本や設備から、情報や知識に変化している。現在は仮想化技術の進歩とともにセンサやネットワークの融合 (IoT)、クラウド処理、ビッグデータ分析等の ICT 技術が急速に進化することで、相互に影響を及ぼし合う人・モノ・コトがグローバルに急増し、社会が急速に複雑化している。
- 近年、国の基盤を成すのは人・モノ・コトづくりであることが世界的に再認識され、IoT を活用した産業システム改革、産業競争力強化の取組が進められている。代表的な例としては、つながる工場などによる産業競争力強化を目指す独国の Industry4.0 や、製造強国を目指す中国の中国製造 2025 などの取組がある。我が国においても、超スマート社会の実現 (Society5.0) に向けて、経済発展だけでなく、社会課題解決の様々な場面でも役立つ IoT を目指した、独自性を持った取組を促進するための、産学官の枠を超えた IoT 推進コンソーシアムといった体制が構築されている。
- IoT 環境においても、精度・感度の高いセンサで取得したデータを分析することが求められており、量子計測・センサは重要な精密計測技術である。また、分析データの相関を取ったり、株式の公正な取引を確保したりするために、量子効果に基づいたノイズに左右

されない高い精度での時間同期は今後も重要な技術である。その他、短時間で近似解を高速に導出する量子コンピューティングや、医療情報等の機微なデータ通信のセキュリティを高める量子通信・暗号技術など、超スマート社会の実現に向けて、量子科学技術の発展に大きな期待が持たれている。

我が国の強み・課題

- 原子干渉計を利用した量子慣性センサは、欧米や中国を中心として、基礎科学実験の他にも慣性航法のための実用化に向けた戦略的な研究開発が進められている。我が国においても早い時期に研究を開始したが、研究グループは少なく、原理実証に留まっている。一方で、原子時計に関連する光格子時計の研究に見られるように、我が国における光技術のレベルが非常に高いことは強みであり、光学素子やガラス加工、エレクトロニクス分野の国内メーカーについても高い技術力を有していると考えられ、連携により大きな発展が期待できる。
- 量子レーダーカメラのコンセプトは DARPA 主催の国際会議の議論から着想が得られたものであるが、我が国に研究グループは少ない。多様な考え方がある中で議論を交わしながら連携することが、斬新なアイデアを生み出す鍵と考えられる。
- 我が国は、半導体・ナノテク分野で培われた材料作製技術や材料研究、デバイス開発に強みをもっているとともに、研究者人口も多い。そのため、単一量子の制御に加えて、異なる物理量を持つ量子のマクロとミクロの融合や、理論系と材料系といったハイブリッド化が進めば、新しいブレークスルーを生み出す可能性がある。
- しかしながら、実用化への筋道が強く求められる時代背景や、世界的な研究競争者が増えている中で、我が国として注力すべき技術の見極めはより困難になるとともに、我が国では企業を含め、広く基盤となる基礎研究が必ずしも十分に行われていない。そのような中では、我が国のオリジナリティは何か、原理的には代替がない技術は何か、出口としてのアプリケーションは何か、を検討し見極めるため、シニア研究者や潜在的ユーザーが若手研究者と議論を重ね、方向付けすることが重要である。

(3) 最先端フォトンクス・レーザー

① 最先端フォトンクス・レーザー（光源の先鋭化、新たな光機能の発現・制御）

研究動向

- 光と光技術は古来より現在まで、人間の生活や産業を支えてきたが、IoT の利活用や将来の超スマート社会 (Society5.0) の実現に向けた新たな価値創出にとって、ますます重要となる基盤技術であり、欧米政府をはじめ、アジアでも中国を筆頭に投資が拡大されている。

- フォトニクス・レーザー技術では、レーザーの発明以来、精力的に研究開発が行われてきたが、近年、光源の先鋭化や新たな光機能の発現・制御への応用に大きな進展があり、レーザーの極短パルス化や高強度化、半導体構造を用いた光の制御などによって、物質の電子状態の観測、物性や光の高度な制御などが可能となる世界が見えてきている。
- これまでにもフォトニクス・レーザー技術は、光速に基づいた世界統一的な長さの標準化や重力波、ポーズ＝アインシュタイン凝縮の発見に繋がるなど、物理学の進展や自然科学上の発見を支えてきた。それらはまた、光による高速インターネット通信や、ものづくりにおけるレーザー切断、医療におけるレーザーメスや血流計などの生体モニターなど、我々の身近な生活を含む社会において様々に活用されている。このように、フォトニクス・レーザーは歴史的に、科学の進展や経済・社会的利用のフロンティアを常に切り拓いてきたが、光源の先鋭化、新たな光機能の発現・制御が更なる革新を与える可能性がある。

（極短パルスレーザーとアト秒科学）

- 極短パルスレーザーは、1つのパルスの時間幅が数ピコ (10^{-12}) 秒から数フェムト (10^{-15}) 秒という非常に短いレーザーである。例えば 100 フェムト秒は、宇宙で最大の速度を持つ光（約 30 万 km 毎秒）でも 30 μ m しか進まない。そのようなオーダーの極めて短い時間幅のパルスレーザーは、1960 年に初めてルビー結晶でレーザーが発振して以降、精力的に基礎研究がなされてきたが、この 10 年ほどで小型化が大きく進み、現在ではパルス幅が 10~100 フェムト秒のものも市販されており、意識しない身近な所でも活用されている。
- 極短パルスレーザーの特徴は、瞬間的な出力が大きくても照射時間が極めて短いため、周りへの熱の伝わりを抑えながら狙った所にレーザーを照射できることである。そのため、例えば眼科のレーシック治療法や白内障手術、歯科治療、燃料噴射ノズルの穴空け、スマートフォン用ガラスの切断、生体観察用の強力なツールとなっている多光子顕微鏡等に応用されるなど、我々の生活を支えるものとなっている。
- プラスチックや化粧品の製造、電池、燃焼過程や生体内活動など、我々の生活に不可欠なもの・現象は、様々な分子の化学反応に基づいているが、反応における分子の化学結合の切断・生成・変化はフェムト秒の時間スケールで起こっている。化学反応をフェムト秒オーダーで見る研究法を創始したアハメッド・ズウェイルは 1999 年にノーベル化学賞を受賞しており、近年では、フェムト秒パルスレーザーで分子の運動を追跡し、なぜ特定の化学反応が起こりやすいかなどを明らかにする研究が可能になっている。
- このような超高速の現象を対象とする研究は、安定的なアト (10^{-18}) 秒パルスレーザー光源の実現などにより、現在はフェムト秒より更に短い時間スケールであるアト秒の科学へと進展をみせている。アト秒は、原子や分子の中の電子が動く時間スケールであり、その電子状態は磁性や超伝導などの物性に深く関連する。そのため、アト秒パルスレーザ

一を含めた極短パルスレーザーにより、化学反応や材料の電子や磁性体の運動をアト秒スケールで計測、制御できるようになれば、光合成反応といった化学反応メカニズムや材料物性の発現機構の解明、電子状態の制御による高性能電池、超高密度磁気デバイス、新材料等の開発に繋がると期待される。

- 複数波長のレーザーが重ね合わせで構成される極短パルスレーザーの発生には、固体レーザーの一つであるチタンサファイヤレーザーが広く利用されており、1980年代に約5フェムト秒までの時間幅を持つパルスレーザーを発振できるまで進展した。その後、1990年代前半に、より短い時間幅のパルスレーザーを発振するブレイクスルーがあり、アト秒パルスレーザーが実現したものである。これは、高次高調波の発生技術と呼ばれ、フェムト秒レーザーをガスに照射することで、元の光の100倍以上の振動数を持つ光が発生し、条件を整えば数百アト秒のパルス列を持ったレーザーが得られるものである。照射するレーザーを数フェムト秒の単一周期のパルスにすると、単一のアト秒パルスレーザーが得られるが、パルスエネルギーの向上には限界があった。我が国では、複数波長のフェムト秒レーザーの合成により、従来の100倍のエネルギーを持ち、計測の精度を向上させられる単一アト秒パルス発生技術が開発されるなど、世界最先端の研究が進められている。高次高調波によるコヒーレント光の波長範囲の拡大は、それを光源として活用する新たな研究分野や応用分野の開拓を促進すると期待されている。
- 物質の電子状態や磁性の計測では、アト秒パルスレーザーにより、これまで困難だった水素分子のイオン化時間(1フェムト秒)の計測や、分子内の電子状態変化の直接計測が行われている。今後、磁性材料の電子スピン運動、タンパク質等の電荷移動計測や放射線によるダメージの解明等に向けた、更なる単一アト秒パルスレーザーの高エネルギー化や円偏光発生、それら先端アト秒レーザー光源を用いた観測手法の開発が課題である。
- 極短パルスレーザーを物質の制御に用いる最大の意義の一つは、物質に現れた量子性(波動性)が失われる前にそのふるまいを制御できることである。このような制御は「コヒーレント制御」として物理、化学、生命科学、量子情報科学などの多岐にわたる分野で世界的に開発が進められ、我が国もパイオニアとして世界をリードしてきた。極短パルスレーザーによるコヒーレント制御は、気体の分子など、周囲の影響を受けない孤立系と呼ばれる系での研究が進展しており、単一分子の波動関数の振幅と位相を用いて超高速な情報処理が可能となることが我が国の研究者によって示されている。一方で、重要な物理・化学現象は固体や液体のように、多数の電子・原子・分子が相互作用し合う凝縮系で起きているものが多く、また固体や液体は、気体に比べ量子性の寿命が格段に短いため、コヒーレント制御はまだ十分に対応できていない。コヒーレント制御には、量子性の寿命よりも短いパルス幅が必要だが、短過ぎると物質をイオン化(破壊)してしまい制御できないため、今後は、量子性の寿命よりも十分に短くかつ物質をイオン化しない光パルスを安定して供給できる極短パルスレーザーの発展が望まれる。
- レーザーは現在、材料の切断や、集積回路を作るためのシリコンウェハーへのパターン露光といった加工にも活用されているが、より微細で高精度の加工を目指し、より短い波長を持つ EUV 光源の開発が進められているところである。EUV によるリソグラフィの

実用化は、Society5.0 実現に向けての喫緊の課題であり、この技術を本格的に実用化するためには、前述の高次高調波を利用したコヒーレント EUV レーザーを用いた様々な検査技術が周辺技術としても必須である。将来的には、多様な材料を超微細かつ超高精度に加工するために、ものが切断される際の化学反応過程を含む電子状態の理解が必要である。このような学理解明においてもアト秒科学の貢献が期待されており、光を超高速で制御する技術が産業界に更に大きなインパクトを与える時代がやってくる。

(パワーレーザー)

- 一つのパルスが持っているエネルギーを変えずに、パルス時間幅を非常に短くしていくと、瞬間的に示す最大出力が極めて高い超高強度レーザーであるパワーレーザーを得ることができる。我が国では、超高強度レーザーとしては世界最高最大出力 2 ペタ (10^{15}) ワット (W) でパルス幅 0.5 ピコ秒/出力 1kJ のレーザーや、単パルスのエネルギーが 10 キロジュール (kJ) でパルス幅 1 ナノ (10^{-9}) 秒及び最大出力 15 テラ (10^{12}) W のパワーレーザー施設が稼働しており、新たな学術やイノベーションを創成するための研究に活用されている。
- 一方、欧米や中国、韓国においてもパワーレーザー施設が稼働しているが、特に欧州のチェコ、ハンガリー及びルーマニアにおいて、Extreme Light Infrastructure (ELI) と呼ばれる施設が現在建設中であり、そこで使用する超高強度レーザーは、既存のパワーレーザーよりも非常に性能の高い目標を掲げて開発中である。また、中国と韓国においても最大出力 10 ペタWに向けた計画が進んでいる。
- パワーレーザーは、物質に高いエネルギー密度の極限状態を引き起こすことができる。1000 万気圧を超える超高压状態を物質に発生させたり、ピコ秒の超高速での加圧や減圧、加熱や冷却、レーザーによって発生する圧力波の時空間制御が可能となる。これまでに、パワーレーザーによって、ダイヤモンドより硬いスーパーダイヤモンドの瞬間的な実現が我が国から報告されているが、このスーパーダイヤモンドが、ものづくりに使用できれば、加工時間の大幅な短縮が期待できる。また、シリコン等の半導体を加圧して金属化しても、圧力を除くと元の物性に戻ることが常識であったが、パワーレーザーを用いた超高压化により、金属化した物性のままとり出せる可能性の示唆等の成果が報告されている。このように、パワーレーザー技術の応用は、新たな物性及び機能性を発現する新材料の創成を通じた産業イノベーションに繋がると期待される。更にパワーレーザーは、惑星内部や核融合燃焼等といった高エネルギー密度状態の極限世界を地上に生み出すことができるため、地球惑星物理学といった学術分野や核融合工学など、幅広い分野において新たな知見の獲得を加速するツールとなる。
- その他、パワーレーザーにより作り出される、気体や固体のプラズマ状態も、新たなフォトニックデバイスとして利用することでイノベーションを生み出す可能性がある。例として、従来の光学素子と比べて 1000 倍以上の強度の光を制御可能なプラズマミラーが挙げられ、1kHz で繰り返し動作する製品が実用化され始めている。他の例としては、プラ

ズマによる粒子加速がある。現在、高周波電圧を利用した加速器によって加速される電子やイオンといった粒子は、殺菌や材料加工への応用、非破壊検査や物質の原子配列を構造解析するためのX線源、がんの治療等の広範な分野で活用されているが、パワーレーザーによって発生するプラズマを応用することで、粒子加速器を超小型化できる。そのため、世界的に精力的な研究が推進されており、我が国においては、世界で最も安定なレーザー加速電子ビームを実現しており、1〜2mのサイズでGeV級の安定な電子ビームを供給できるシステムの開発が進んでいる。

- また、パワーレーザーに関して、高出力化するために複数ビームを結合するコヒーレントビーム結合技術やレーザー増幅の高繰返し化技術の研究開発が進められている。今後、世界的にも強みを持っているレーザー用セラミックや超高耐力光学素子、独自のプラズマフォトリックデバイスを活用した国際競争力のあるパワーレーザーシステムの実現が次のマイルストーンである。パワーレーザー技術の研究は、世界的には主に学術的なフロンティア開拓を念頭に置いて進められているが、我が国においては、光源の高性能化の他、産業利用も含めた活用を念頭に置いた、独自のパワーレーザーシステムの実現を目指すことが重要である。

(光周波数コム)

- 光周波数コムは、精密に等間隔な多数の狭線幅レーザーの集合で、その波形の見え方が櫛（英語で「コム」）に似ていることからこの名前が付いた。1999年に、それまで困難だった光の周波数の高精度な絶対計測を実現した光の「ものさし」であり、2005年にはノーベル物理学賞を受賞している。光の領域の周波数を高精度に計測できるため、2009年には産業技術総合研究所が開発した光周波数コム装置が我が国の「長さ」の計測器の国家標準に指定され、長さの国家標準として発生する「波長」が従来に比べ300倍高精度になっている。
- また、光周波数コムは、マイクロ波から光、EUVの周波数に及ぶ広範囲で大きく離れた周波数の精密な比較や相互変換が可能である。そのため、周波数帯が大きく離れているために独自に技術進展してきた電気や電波と、光に関する技術を、光周波数コムの応用によって繋ぐことができる。また、周波数の他、広いダイナミックレンジの時間や長さも相互に変換できるため、単なる周波数のものさしを超えた応用の可能性が広がりつつあり、計測、物性制御、加工や天文、宇宙といった広範な分野への展開が期待される基盤技術と言える。
- 例えば、周波数にわずかな差のある2つの光周波数コムを組み合わせるデュアルコム分光法により、電波領域の周波数に変換して高速・高精度・広範囲に計測することができるようになってきている。また、200ナノメートルの距離の違いを300m先から計測できるなど、超高分解能を持つ距離の計測にも応用が可能であることが屋外実験により得られているが、光周波数コムを周波数計測以外に応用するこのアイデアは、我が国で最初に発表されたものである。現在は、これをより発展させ、レーザーを一度照射するだけで

3次元形状が計測可能な技術等の研究が進められており、将来的には環境モニタリングや産業ラインにおける高速・高精度計測、究極的には宇宙での超長距離測定といった展開が考えられる。

- 光周波数コム技術は極短パルスレーザーやアト秒科学とも共通する技術であり、それらの進展に大きく貢献するとともに、広い分野に波及効果をもたらす可能性がある。今後は、光源のさらなる広帯域化に加え、応用分野の開拓を進めながら、光源と応用分野をつなぐ高機能な計測や制御技術の開発を継続するとともに、応用システムを目指した小型化や低コスト化を進めることが次のマイルストーンである。光周波数コムにより高精度に制御された光を光ファイバーに乗せ、必要な場所で所要の周波数の光を取り出して実験や計測に使用するネットワークインフラといった応用も考えられる。

(フォトリック結晶)

- フォトリック結晶は、屈折率が光の波長程度の大きさで周期的に変化する構造をもった結晶である。この構造により、多彩な光制御が可能となると期待されている。作製には高度な結晶作製技術が必要であったが、我が国の研究者による、世界初の三次元結晶の実現（2000年頃）と二次元結晶への展開、さらにはその後の光制御技術の発展を経て、現在では30を超える研究機関により、全世界的に研究が進められている。
- フォトリック結晶を用いた技術の中で、特筆すべきものの一つは半導体レーザーにフォトリック結晶を導入したフォトリック結晶レーザーである。フォトリック結晶により発光面全体が共振しているため、通常の半導体レーザーと比べてビーム品質が高く、レンズを用いなくても絞られた範囲にレーザーを照射することができるという特長をもつ。0.2W級の出力を持つものが2014年に実用化されており、実験では1W級の実現できているが、これを10 \sim 100W級、さらにはkW級まで高出力化することができれば、レーザー加工機で用いられている気体レーザー（CO₂レーザーやエキシマレーザー）やファイバーレーザーをフォトリック結晶レーザーに置き換えることが可能となり、その結果、装置を大幅に小型化できるため、レーザー加工機市場を塗り替える可能性も見えてきている。加えて、ミラーを使わず電子的にビーム方向を二次元的に変化させることが可能なフォトリック結晶レーザーが開発されるなど、種々の応用展開も広がりつつある。
- レーザーの他にも、特定の波長帯の光の伝搬を禁止するフォトリック結晶を用いて、光メモリーや、離れた2つの共振器間で光を自在にやりとりする技術など、将来の光量子通信・情報処理のための高機能光回路の実現にとって鍵となる技術が次々と開発されている。また、フォトリック結晶を熱輻射制御に応用し、高効率太陽光発電を実現する技術等の開発や、通常、極めて応答が遅い熱輻射を4桁も速く変調できる技術の開発も行われている。

我が国の強み・課題

- 加工用レーザーとして広く用いられている CO₂ レーザーやリソグラフィ用のエキシマレーザーについて、我が国はこれまでの技術開発に立脚した一定の競争力を持っている一方、今後の加工用レーザーとしての成長が予測されているファイバーレーザーについては米国と独国の後塵（こうじん）を拝している。また、極短パルスレーザー用として広く使用されているチタンサファイヤレーザーは米国と、仏国など欧州の技術力が高い。我が国においては、ファイバーレーザーと並び成長が期待されるセラミックスレーザーについて、材料研究から要素技術化、レーザー全体システムへのインテグレーションに強みがあり、異なるセラミックを光学的に接続するコンポジットセラミック技術などが開発されている。また、励起用半導体レーザーや超高耐力の光学素子、大型回折格子や、それらを支える量子光学に強みがある。
- 極短パルスレーザーについて、アト秒パルスレーザー光源に関係する圧力勾配型中空ファイバーやルーズフォーカシング法等の、我が国で開発された技術が、世界初のアト秒レーザー光源共同利用施設として、2018 年からの利用を目指してハンガリーに建設中の ELI-ALPS に適用されるなど、関連要素技術に強みがある。一方で、システムとして組み上げれば中規模の装置となるため、研究者以外にも技術者の持つ技術の継承を含めた人材育成が課題である。極短パルスレーザーの特性を活かした先端的な光技術の開拓において、我が国はコヒーレント制御の研究で分野を先導しており、世界的なプレゼンスが高い。
- パワーレーザーについて、世界最高性能のレーザー用セラミックや超高耐力光学素子は、世界のマーケットでも認められている我が国の強みである。また、我が国独自のプラズマフォトリックデバイス技術は世界で最も安定なレーザー電子加速を実現している。材料開発レベルから関係機関の連携によって技術開発を推進するとともに、社会への応用展開を念頭においた技術開発を実施している点も、我が国の強みと言える。極短パルスレーザー同様、欧州のような巨額の集中投資は容易ではないと考えられ、これらの強みを活かした独自のパワーレーザーシステムをどのように構築できるか検討することが必要である。
- 光周波数コムについて、ファイバーレーザー光源開発や距離測定への応用など、世界が追随する精密計測技術を世界に先駆けて開発し保有していることが我が国の強みである。
- フォトリック結晶は、2000 年頃、高い結晶作製技術に支えられ世界に先駆けて実現した、我が国発の技術であり、現在でも我が国のプレゼンスは極めて高い。様々な応用可能性を持つとともに、一部は産業化の段階に入りつつあり、我が国の大きな強みとなり得る光技術である。
- 量子技術と同様に、我が国における人材流動性の確保は重要な課題であるが、これまでの光技術に関する施策等を通じて、産学及び異分野での人材交流が進んでおり、特に、若手研究者の交流には大きな期待が持てる。一方で、博士人材に安定な環境を提供することも重要である。

② 最先端フォトンクス・レーザー（産業応用の高度化）

【議論の骨子案を転載予定】

（４）量子ビーム利用推進小委員会における議論（**軟X線向け高輝度放射光源とその利用**）

内外の研究動向及び施設動向

- 我が国の放射光施設は、これまで物質科学、生命科学、地球科学分野等の幅広い分野で数々の高インパクトな学術成果を生み出すとともに、創薬から新材料開発等の広範な産業利用や応用展開を通じて幅広く社会に還元され、様々な科学的・社会的課題の解決に資するイノベーションの源泉としての役割を果たしてきた。
- 一方、海外においては、2000年代に数ナノメートルラジアン[nm·rad]級のエミッタンス性能を備えた軟X線向け高輝度光源が相次いで建設されたのに加え、2010年代には更なる低エミッタンス化を目指した光源が米国、台湾、スウェーデンで稼働開始しているなど、3 GeV級の低エミッタンスリングの整備が進んでいる状況であり、世界的にMBAという新しいラティスにより第3世代放射光源よりもエミッタンスを下げた第4世代放射光源を目指すという方向性があると言える。
- 海外で3 GeV級の光源建設が進んでいるのは、いわゆるテnder-X線（2～5 keV）及び軟X線（2 keV以下）のエネルギー領域は科学的及び産業的なニーズが高い領域であるとともに、このエネルギー領域に加えて硬X線領域（5～20 keV）もカバーできる加速器技術が進展してきたことが要因である。
- これまでの放射光研究は構造解析に重きが置かれていたが、物質の機能を調べるには物質内の電子状態も同時に調べることが必要であり、近年、放射光を利用した電子状態研究が非常に重要な役割を果たしつつある。最先端のサイエンスは、物質の構造解析から物質の機能の理解へと向かっており、機能を理解するためには軟X線光源が非常に有用であり、様々な分野の研究及びイノベーション創出の飛躍的な進展が期待され、求められている。
- 産業利用においても、これまで硬X線による構造解析が様々な製品開発に活かされてきた。一方、製品で起こる複雑な現象の理解には、物質構造に加え、機能に影響を与える「電子状態」、「ダイナミクス」の統合的理解が重要であり、軟X線向け高輝度光源を複雑な材料系である実際の製品の開発に積極的に活用することが期待されている。

我が国の強み・課題

- 我が国の放射光利用の全般的な強みは、国際的に見ても産業利用が進んでいることである。SPring-8では産業利用課題が全課題数の2割を占めている他、製薬中心の海外放射

光施設と異なり、自動車触媒、エコタイヤ等様々な製品が生まれている。また、SAGA-LS（2006年利用開始）、Aichi-SR（2013年利用開始）等の小型放射光施設においては産業利用に重点を置いた施設運営がなされている。

- 我が国では2017年1月現在で9つの放射光施設が整備されているが、軟X線領域に強みを持つ高輝度光源の放射光施設が存在せず、この波長領域を重点的に利用する分野の研究開発において世界と互角に競争していくための環境が整っているとは言えない状況にある。

3. 推進方策の検討にあたって考慮すべき点について

(1) 全般

- 我が国独自の視点やアイデア

我が国の限られた資源と、欧米等の投資規模や研究者層の厚さを考えると、我が国独自の視点やアイデアを生み出し、伸ばすことが非常に重要である。基礎研究や基礎理論における斬新なアイデアを重視し、それを国内で展開・実証しやすい環境にすることも、想像をはるかに超えた量子科学技術の進化に対応するための取組として重要である。

- 突出した点と点を繋ぎ、若手の多様なアイデアを基に新しい領域を拓くハイブリッド型の研究推進

世界的に興味深い技術、アイデア等が出続けており、突出した点と点をつないで競争力を生み出す組合せがほぼ無限にあって、若手研究者の多様なアイデアを基に新しい領域を拓くような、ハイブリッド型の研究推進による競争力強化が強く望まれる。

- 領域によっては、トップダウン的なアプローチや、ネットワーク拠点型のアプローチが有効

領域によっては、実験者、物性理論研究者や潜在的ユーザーと一緒に、一定の目標を定め、課題に取り組むような、トップダウン的な開発アプローチが必要となりうる。また、産業界を含む、異なる分野や技術段階の連携により、異分野融合を促進するためには、ネットワーク型の研究拠点の形成による推進が適切となりうる。

(オープンサイエンスの推進)

- 国際的に基礎研究の成果としてオープンな研究交流： 諸外国は量子科学技術の推進に関する政策を強力に推進し、その研究開発に対して政府及び民間企業が大規模な投資を行っているが、大部分の研究においては、一国に閉じた開発が可能であるとは考えられておらず、国際的な協力のもと多くの課題が推進されている。そのため、国際的な研究協力や共同研究といったオープンな研究交流を通して、新しいアイデアを常に取り入れながら、相乗的に技術を向上させ、時宜に応じた政策的な対応を図るような国際化への対

応が求められる。

- 海外の研究グループとの積極的な研究ネットワーク構築： 欧州では研究者が国境なく往来して共同研究を実施しており、一国当たりの研究者数は限られていても、欧州全体として見ると多くの研究者が存在している。我が国の研究環境を改善することで、欧米との研究協力や共同研究を促進し、相乗的に技術を向上させるような国際化への対応が重要となりうる。また近年、中国やシンガポールといったアジアの研究グループも急速に力を付けてきている（注8）。アジアの研究グループとの積極的な研究協力や共同研究を含む研究ネットワークの構築についても検討すべき時期に来ている。

（人材育成）

- 理論や実験など、各分野のレベルが高度化している中において、分野間の協力や融合努力を積極的に評価する視点や、基礎物理からシステム開発まで見通せる人材を育成する観点が必要である。異なる分野や技術段階の間での連携や流動性が重要で、このような広がりにも跨がるような基礎研究や人材育成が重要である。これにより、オープンイノベーションをリードしていく人材の育成が期待される。例えば、異分野の若手研究者同士の協力関係を加速するための中規模の研究費の枠組みや、各々の研究費を合わせて大きな研究開発に展開できるようなフレキシブルな枠組み、異分野の一流のシニア研究者が若手研究者に対して支援・アドバイスをを行う体制などの工夫により、一層の分野を超えた連携や流動性が期待できる。

（オープンイノベーション（産学連携）の推進）

- 異なる分野や技術段階の連携によりプロトタイプを示す進め方は、可能性を明確化し異分野融合を促進するためにも有効である。将来の潜在的ユーザーと対話しながら、段階的に、着実に量子技術を向上させる取組が効果的である。技術シーズ側とニーズ側両方の言葉を理解して通訳できる、両者のコーディネーションができる人材の育成が必要であり、大学や研究機関と産業界両方を経験できる人材流動性や、両者と対等にコーディネーションできる立場を確保する枠組みをいかに構築するかを検討すべき。

（知的財産・標準化戦略）

- 国際競争の観点からも、産業界を含む大きな体制での研究開発が必要であり、その中で、人材育成、知的財産確保、標準化も進めることが重要である。なお、出口としてのアプリケーションが明確に決まっている場合には、ノウハウ等の成果情報の取扱いについて留意が必要である。

(社会との関係深化)

- 量子科学技術のような基盤技術に対しては、長期的視点に立った継続的な研究が必要である、そのためには、技術がどのようなレベルにあるのか、その進展によってどの様なポテンシャルや可能性があるのか、どの様に社会に役立ち世界が開けるのかを国民と企業に分かりやすく発信することが重要である。

(2) 各分野個別の観点

(a) 量子情報処理・通信

① 量子コンピューティング

- 我が国の限られた資源と欧米の投資規模を考えると、正面突破は難しく、現時点で本命技術を決めて集中投資するのは時期尚早で失敗する確率が高いと考えられる。
- 独自の視点やアイデアを生み出すことが非常に重要。欧米とは地理的にも距離があるが、それを逆手にとって勝負すべき。
- 世界的に興味深い技術、アイデア、ソフトウェアが出続けており、現在ある点や線を深掘りするより、突出した点と点をつないで新しい領域を拓くような、ハイブリッド的な推進方策が望ましいのではないか。
- その際、世界的な潮流は理解した上で、若手研究者のアイデアを開花させるような、探索的でクリエイティブな研究の新しい芽を育てることが重要。クリエイティブな人材を生み育むための方法でもある。
- 2016年度から開始された戦略目標「量子状態の高度制御による新たな物性・情報科学フロンティアの開拓」では、特にさきがけで、探索的でクリエイティブな研究の新しい芽を見出し育てることが期待される。
- 量子コンピューティングの実現に向けては数々のマイルストーンが存在するため、国際的にも、基礎研究の成果としてオープンな研究交流がなされることが重要であり、その切磋琢磨の中でブレークスルーが生み出されるのではないか。他の量子情報処理・通信技術と同様に、量子コンピューティングにおいても、一国に閉じた開発が可能であるとは考えられておらず、国際的な協力のもと推進されていることが、欧米における量子コンピューティングの急速な進展の一因であると考えられる。

② 量子シミュレーション

- 既に実験室レベルで実現している大規模な量子多体系の存在を前提に、物性理論研究者や潜在的ユーザーと一緒に、探求すべき物質等について一定の目標を定め、量子状態の個別観測・制御の高度化といったハードの課題に取り組むとともに、現実の物理

系を量子シミュレータに写像する理論や誤差の理論的評価といったソフトの課題に取り組むような、トップダウン的な開発アプローチが必要ではないか。

- 層の厚い欧米に対し、我が国は独自性のある研究を進めていくことが非常に重要であり、物性理論の強みを基に、例えば、定常状態の計算より格段に難しい非定常な時間発展（ダイナミクス）のシミュレーションや、ガラス・液体等のソフトマターといった不規則系の物質を対象にしたシミュレーションに挑んでいくことも重要ではないか。
- 理論や実験など、各分野のレベルが高度化している中において、分野間の協力や融合努力を積極的に評価する視点や、基礎物理からシステム開発まで見通せる人材を育成する観点が必要ではないか。

③ 量子通信・暗号

- 現在の量子通信・暗号の技術体系に、情報理論や光ネットワーク技術、ワイヤレスネットワーク技術といった異なる分野を融合した技術体系に移行することで普及を促すことが必要（注7）。その際、量子暗号と数理論暗号といったライバル分野や、周辺分野との連携関係も構築することが、短期的なニーズに応えながら、我が国の強みである理論研究や基礎研究を長期的に継続できる基盤となると考えられる。将来の潜在的ユーザーと対話しながら、段階的に、着実に量子技術を向上させる取組が効果的。
- 基礎理論や基礎研究における斬新なアイデアを重視し、それを国内で実証しやすい環境にすることも、想像をはるかに超えた量子科学技術の進化に対応するための取組として必要ではないか。
- 研究や実験など、各分野のレベルが高度化している中において、分野間の協力や融合努力を積極的に評価する視点や、基礎物理からシステム開発まで見通せる人材の育成が必要ではないか。

(b) 量子計測・センシング・イメージング

① 量子計測・センシング・イメージング（生物・生命科学系）

- 量子計測・センサは、半導体・ナノテク分野で培われた材料作製技術、デバイス開発、量子光学、量子ビーム利用など、我が国の強みが多面的に発揮できる上、医療からエネルギー・製造業まで非常に波及効果が広い。突出した点と点をつないで競争力を生み出す組合せがほぼ無限にあって、若手研究者の多様なアイデアを基に、新しい領域を拓くような、ハイブリッド型の研究推進による競争力強化が強く望まれる典型である。
- 比較的小規模な研究費から立ち上げが可能な点でも、若手研究者が斬新なアイデアを出せる分野であり、若手研究者をどのように幅広く支援、育成し、活躍、独立させるかを考える良い領域である。

- 量子計測・センサの開発には、理論、基礎物理、材料、物性、デバイス、計測、分析化学、生命科学など、異なる分野や技術段階の間での連携や流動性が重要で、このような広がりには跨がるような基礎研究や人材育成が重要である。これにより、オープンイノベーションをリードしていく人材の育成が期待される。例えば、異分野の若手研究者同士の協力関係を加速するための中規模の研究費の枠組みや、各々の研究費を合わせて大きな研究開発に展開できるようなフレキシブルな枠組み、異分野の一流のシニア研究者が若手研究者に対して支援・アドバイスを行う体制などの工夫により、一層の分野を超えた連携や流動性が期待できる。
- 異なる分野や技術段階の連携によりプロトタイプを示す進め方は、可能性を明確化し異分野融合を促進するためにも有効である。また、国際競争の観点からも、産業界を含む大きな体制での研究開発が必要であり、その中で、人材育成、知的財産確保、標準化も進めることが重要である。これらには、ネットワーク型の研究拠点の形成による推進が適切ではないか。

② 量子計測・センシング・イメージング（物理系）

- 量子計測・センサは、半導体・ナノテク分野で培われた材料作製技術、デバイス開発、量子光学、量子ビーム利用など、我が国の強みが多面的に発揮できる上、医療からエネルギー・製造業まで非常に波及効果が広い。突出した点と点をつないで競争力を生み出す組合せがほぼ無限にあって、若手研究者の多様なアイデアを基に新しい領域を拓くような、ハイブリッド型の研究推進による競争力強化が強く望まれる典型。
- 比較的小規模な研究費から立ち上げが可能な点でも、若手研究者が斬新なアイデアを出せる分野であり、若手研究者をどのように幅広く支援、育成し、活躍、独立させるかを考える良い領域である。
- 量子計測・センサの開発には、理論、基礎物理、材料、物性、デバイス、計測、分析化学、生命科学など、異なる分野や技術段階の間での連携や流動性が重要で、このような広がりには跨がるような基礎研究や人材育成が重要。これにより、オープンイノベーションをリードしていく人材の育成が期待される。例えば、異分野の若手研究者同士の協力関係を加速するための中規模の研究費の枠組みや、各々の研究費を合わせて大きな研究開発に展開できるようなフレキシブルな枠組み、異分野の一流のシニア研究者が若手研究者に対して支援・アドバイスを行う体制などの工夫により、一層の分野を超えた連携や流動性が期待できる。
- 異なる分野や技術段階の連携によりプロトタイプを示す進め方は、可能性を明確化し異分野融合を促進するためにも有効。国際競争の観点からも、産業界を含む大きな体制での研究開発が必要であり、その中で、人材育成、知的財産確保、標準化も進めることが重要。これには、ネットワーク型の研究拠点の形成による推進が適切ではないか。なお、出口としてのアプリケーションが明確に決まっている場合には、ノウハウ等の成果情報の取扱いについて留意が必要である。

- 光格子時計では、地道で継続的な研究によって、当初想定しなかった応用と、将来の経済・社会にインパクトを及ぼす可能性が見出されている。今後の量子科学技術の推進にあたっての示唆とするとともに、光格子時計の研究進展や展開の注視及び時宜に応じた推進を図ることが重要と考えられる。

(3) 最先端フォトニクス・レーザー

① 最先端フォトニクス・レーザー（光源の先鋭化、新たな光機能の発現・制御）

- 最先端フォトニクス・レーザーは、材料研究、半導体・ナノテク分野で培われた材料作製技術、量子光学など、我が国の強みを発揮している分野であり、学術の開拓、医療、エネルギーや製造業まで非常に応用範囲が広い。これまでの施策によって開発した技術、得られた成果及び育成された人材を、いかに継続的に進展させるとともに、いかに活用するかを考える良い領域である。
- 最先端フォトニクス・レーザーは、物理、化学、計測、生命科学など分野横断的に先端研究を更に広く波及することが重要である。特に、技術シーズ側とニーズ側両方の言葉を理解して通訳できる、最先端光源をニーズ側が使いやすいように工夫できるといった両者のコーディネーションができる人材の育成が必要である。そのためには、大学や研究機関と産業界両方を経験できる人材流動性や、両者と対等にコーディネーションできる立場を確保する枠組みをいかに構築するかを検討すべきである。
- 欧州等の近年の大規模投資に対して我が国が対抗するには、競争だけでなく、それを乗り越えて機関間を連携・協調させる拠点施策は有効である。
- 光周波数コムは、発明された当初は3か国しか実現できず、我が国はその一つであったが、従来の重点分野の切り口に合致しにくいことなどから研究が断続的になり、国全体としては初期のアドバンテージを活かせていない。このような基盤技術に対しては長期的視点に立った継続的な研究が重要である。そのためには、光技術と量子技術ともに、技術がどのようなレベルにあるのか、その進展によってどのようなポテンシャルや可能性があるのか、どのように社会に役立ち世界が開けるのかを国民と企業に分かりやすく発信することが重要である。

② 最先端フォトニクス・レーザー（産業応用の高度化）

【議論の骨子案を転載予定】

(4) 量子ビーム利用推進小委員会における議論（~~軟X線向け高輝度放射光源~~とその利用）

- ~~軟X線向け高輝度放射光源~~では、実験、データ解析など様々な面での困難さが出てくる

と考えられ、産業利用を促すためには、学術側のサポートが必要であると考えられる。学術的に共有できる部分は「協調領域」として共有して基盤を作り、それが出来た上で各社における課題に関しては「競争領域」で進めていくなど、本格的な産学連携を促すための体制づくりが重要である。

- 光源が不安定で実験ができないということになれば、企業にとってリスクであり、機会損失につながる恐れもある。したがって、基礎科学はもちろんのこと、産業利用促進の観点からも光源の安定性が重要である。
- 軟 X 線向け高輝度放射光源は、高い民間研究開発投資の誘発効果が見込まれ、財政事情の厳しい折、地域や産業界の活力を取り込み、財源負担を含め、言わば官民地域パートナーシップにより推進することが、プロジェクトの実現や成功にとって重要である。
- 加速器はもちろんエンドステーションにおいても克服すべき技術課題があることから、軟 X 線向け高輝度放射光源の建設・利用技術の開拓には高い技術力を持った研究者・技術者が協力していくことが重要であり、オールジャパン体制で進めるべきである。また、放射光施設間の役割分担、連携強化によって、日本全体でのパフォーマンスを上げるという観点が重要である。
- 整備に当たっては現実的かつ合理的な設計とすることが重要である。これまでの我が国における技術的な実績と経験から、世界レベルの先端性（エミッタンス 1 nm·rad 前後）と安定性（実効性能の発揮及び運転での定常的運転）を両立し、かつ、コンパクトな 3 GeV 級放射光源（周長 325~425 m 程度）の整備が可能である。

4. その他（今後の議論の方向性）

- 量子技術と光技術は密接な関係にあり、情報通信、ナノテクノロジー・材料、ライフサイエンス、環境・エネルギー等の重点的に推進すべき分野を横断する基盤的分野である。大変革時代を先導し、新しい価値やサービスが次々と創出される「超スマート社会」を世界に先駆けて実現するための、新たな価値創造のコアとなる強みを有する基盤技術であり、革新的な計測技術、情報・エネルギー伝達技術、加工技術など、様々なコンポーネントの高度化によりシステムの差別化につながるものである。
- 様々なコンポーネントの高度化によって、我が国の優位性を確保しつつ、国内外の経済・社会の多様なニーズに対応するためには、量子技術と光技術を更に糾合して推進する必要がある。理論、基礎物理、材料、物性、デバイス、計測、分析化学及び生命科学などの異なる分野、学術及び産業といった異なる技術段階の間での対話、融合及び流動を推進するための、量子科学技術のネットワーク型研究拠点の形成による推進が適切となりうる。
- 我が国は、物理や材料分野における基礎研究、半導体等のデバイス製造技術に強みがあるとともに、世界的にも枢要なアイデア・要素技術を生み出している。量子科学技術は、それらの突出した点と点をつないで競争力を生み出す組合せがほぼ無限にあり、若手研

研究者の多様なアイデアを基に新しい領域を拓くような、ハイブリッド型の研究推進による競争力強化が強く望まれるとともに、領域によっては、実験研究者、物性理論研究者や潜在的ユーザーと一緒に、一定の目標を定め、課題に取り組むような、トップダウン的な開発アプローチが必要となりうる。

- 今後、「量子」のポテンシャルを最大限引き出し、解き放ち、今後の量子科学技術の進展を先導するとともに、将来にわたって国民・社会に広く裨益していくような、我が国における量子科学技術の推進方策を、推進方策の検討にあたって考慮すべき点に留意しながら、具体化を進めることとする。

注記

(注1)

デジタル量子コンピュータでは、素因数分解（例えば通信暗号の解読）やビッグデータの超大規模検索など特定のアルゴリズムが超高速に超低消費電力で計算できると想定されている。例えば、キャッシュカード取引・銀行間の秘匿通信やインターネットの電子決済に用いられている現代の暗号通信は、「公開鍵暗号」が基盤となっており、現在のコンピュータ（フォン・ノイマン型）が素因数分解の処理に超天文学的・非現実な時間を要してしまう事実から成立しているが、量子コンピューティングが実現すれば、公開鍵暗号を合理的な時間内に解読することが可能になり、現在の暗号通信インフラの前提が覆る可能性がある。

また、アナログ量子コンピュータの一つである量子アニーリングマシンでは、組合せ最適化問題が超高速に超低消費電力で計算できると想定されている。膨大な数の選択肢の中から一番良い選択肢を見つけ出す問題であり、例えば、セールスマンが複数の都市を回る際に所要時間が最短になる経路を求める巡回セールスマン問題が代表例である。カーナビのルート検索、複数の飛行機の最適配置・最適経路、大きさの異なる貨物の積載といった、交通・物流の経路や配置の最適化、携帯電話等の無線周波数割当てなどの有限資源の最適分配、集積回路設計や工場の行程設計等のものづくり利用など、様々な現実の経済・社会における課題の最適化を促す可能性がある。

(注2)

2010年、カナダのベンチャー企業である D-Wave 社が量子アニーリングマシンと呼ばれる世界初の商用機（128ビット）を発表。2015年までに1000ビットの商用機を発表しており、ロッキードマーチン社や Google 社等が導入している。

米国では、政府のファンディング機関である国防省傘下の DARPA や情報機関傘下の IARPA が量子コンピューティングに関して大学や企業への研究開発投資を活発に行っている中、2013年に Google 社がカリフォルニア大学サンタバーバラ校の研究グループを吸収。2014年には IBM 社が5年間で 30億ドル~~\$3B~~の量子コンピューティングを含む研究投資を発表している。

欧州では、2013年に英国政府が 5.5年間で 2.7億ポンド~~£270M~~、2015年にオランダ政府が10年間で 1.35億ユーロ~~€135M~~の量子コンピューティングを含む研究イニシアティブを発表。オランダ政府が投資するデルフト工科大学には、Microsoft 社や Intel 社（10年間で 5千万ドル~~\$50M~~の支援を2015年に発表）も投資している。また、欧州委員会でも、2018年から「Quantum Flagship」と呼ばれる研究プログラムに 10億ユーロ~~€1B~~を投じる計画を進行中。

(注3)

高温超伝導物質は世界的に高い関心で研究が進むが、30年前に発見された酸化物高温超伝導物質についても、どういったメカニズムで超伝導が起きているか解明されていない。格子上に原子が配列する物質の中で、絶縁層と呼ばれる層から電子が供給され、超伝導層と呼ばれる層において電子がどうふるまって相互作用するかが超伝導メカニズムの鍵となるが、この電子状態は、例えばハバードモデルと呼ばれる、固体中で相互作用する電子を記述する最も単純なモデルの一つで記述できると考えられている。

量子シミュレータでは、ハバードモデルといったモデルで記述された高温超伝導物質の超伝導層の

電子の量子状態をシミュレーション実験することが可能であり、これが実現されれば、実際の物質について現在も続く実験・観察事実の新発見を組み入れながらシミュレーションを行い、系統的な量子状態の理解と複雑な相を示す超伝導物質の物性や反応の理解を相乗的に深めることが可能となる。このような本質的かつ理論的な理解が進めば、そこから得られる理論的予言を指針に、より高い温度あるいはブレイクスルー的に高い温度で超伝導を示す物質を、効率的に系統だって探索・開発することが可能になると考えられる。

(注4)

古典計算機では、厳密な計算(厳密対角化法)では極めて限定的な粒子数の計算が限度となるほか、模擬精度や計算精度を落とす近似計算が避けられない。

古典計算機による量子多体系モデル(ハバードモデル等)の厳密なシミュレーションとしては、2004年に当時我が国で最も早いスパコンの一つであった地球シミュレータで、厳密対角化法を用いて正方格子ハバードモデルの計算が行われているが、 4×5 の正方格子にある20粒子の計算が限度である。例えば1格子当たりの電子の量子状態は、上向きスピン、下向きスピン、双方のスピン、スピンなしの4つの異なるスピン状態で模擬されるため、格子が N 個が増えると、解くべき行列の次元が $4N$ 倍になり、必要な計算量も大幅に増加する。そのため、現在稼働中の「京」コンピュータでも、 5×5 の正方格子にある25粒子の計算が限度となり、ポスト「京」コンピュータでも、 5×6 の正方格子にある30粒子の計算が限度となる。

(注5)

デジタル量子コンピュータは、量子力学的な効果を用いて超並列・大規模情報処理を行うもので、素因数分解やビッグデータの超大規模検索など特定のアルゴリズムが超高速に計算できると想定されているが、その実現に向けては数々のマイルストーンが存在する。

また、アナログ量子コンピュータの一つである量子アニーリングマシンについては2010年以降、D-Wave社から商用機が発表されているが、これは組合せ最適化問題を対象としたものである。

一方、量子シミュレータは物質中の電子の量子状態を物理的な素子に存在する量子状態で模擬実験をするもので、デジタル量子コンピュータよりも短期的に実現が可能であると考えられており、未解明の物性や反応の理解、さらにはそれに基づく新物質の探索等が可能になると期待されている。

(注6)

将来展望として、量子もつれを利用したネットワークにより、量子中継による量子通信速度の向上が期待される。

(注7)

例えば、超長期安全性を持つデジタルアーカイブシステムはニーズが高いが、現代暗号のみでは解決できない課題があり、それを量子技術と従来技術の融合により解決できる可能性がある。また、進展する移動体への成果展開や技術の取り込みを必要とする「空の産業革命」を支えるセキュア通信技術においては、いかに接続性の高いネットワークを構築するかが重要であり、情報理論、暗号、量子の新しい境界領域である物理レイヤ暗号が期待される。

物理レイヤ暗号

- ・ 正規通信路と盗聴通信路の性質が推定できる場合に、適切な符号化を行うことで安全かつ高効率にメッセージの伝送や鍵交換を行う暗号通信技術。
- ・ 通常、電波や光のワイヤレス通信（特に視野通信）を想定。
- ・ どんな計算機でも解読できないことが証明できる（情報理論的安全性）。

（注8）

近年、欧州と中国の連携も強まってきており、例えば量子情報処理・通信の分野においては、2016年に打ち上げられた中国の研究用衛星を使用してオーストリアとの共同実験が実施されることになっている。