

Title	量子科学技術の将来展望 : 第11回科学技術予測調査から
Author(s)	蒲生, 秀典
Citation	年次学術大会講演要旨集, 34: 128-133
Issue Date	2019-10-26
Type	Conference Paper
Text version	publisher
URL	http://hdl.handle.net/10119/16497
Rights	本著作物は研究・イノベーション学会の許可のもとに掲載するものです。This material is posted here with permission of the Japan Society for Research Policy and Innovation Management.
Description	一般講演要旨

量子科学技術の将来展望～第 11 回科学技術予測調査から～

○蒲生秀典（文部科学省科学技術・学術政策研究所）

gamo@nistep.go.jp

1. はじめに

現代のデジタル化社会を担う電子・光デバイスを超える膨大な情報処理能力を有し、生体などを高精度・非侵襲・非接触で計測・センシングできると期待される量子デバイスの研究開発が世界的に活発化している。創薬や新材料・触媒開発の効率化による生産性向上に寄与する量子コンピュータ・シミュレータ、大容量・高速通信・高セキュリティのための量子通信・暗号技術、医療革新のための量子センシング・イメージングなど社会からの期待は増大している。我が国では、統合イノベーション戦略 2019（令和元年 6 月 21 日閣議決定）^[1]において、特に取組を強化すべき主要分野として AI（人工知能）、バイオテクノロジーと並んで「量子技術」を、全ての科学技術イノベーションに影響する最先端の基盤的技術分野と位置づけ、2019 年末までに「量子技術イノベーション戦略」を策定するとしている。なお、中間整理^[2]では、技術開発、国際、産業・イノベーション、知的財産・国際標準化、人材の 5 つの具体的な戦略を提示している。

一方、科学技術・学術政策研究所（NISTEP）では、第 11 回科学技術予測調査^{[3][4]}の一環として 2018～2019 年にデルファイ調査^aを実施している。この調査では科学技術 7 分野^bを設定し、2050 年までの実現が期待される科学技術として 702 トピックを選定した。その中で、分野横断的に量子に関する 22 の科学技術トピックが設定され、産学官の専門家に対する Web アンケートによって、それぞれのトピックについて重要度、国際競争力、技術的・社会的実現時期、政策手段などについての回答を得ている。

本報では、NISTEP 科学技術予測センターの科学技術の兆しやトレンドを捉えるホライズンスキニング^[5]で得られた KIDSASHI^[6]を中心に、量子科学技術の研究開発動向を示すとともに、最新のデルファイ調査結果を基にした量子科学技術の将来展望と科学技術イノベーション政策への示唆について示す。

2. 量子科学技術の研究開発動向（ホライズンスキニング KIDSASHI より）

量子科学技術の最近の研究開発動向について、ホライズンスキニングの KIDSASHI として公表されたトピックを中心に、アプリケーション別に概要を示す。詳細については各 KIDSASHI 記事参照のこと。

「量子情報処理（量子コンピュータ・シミュレータ）」応用では、大手 IT 関連企業の Google、IBM、Intel、Microsoft などがメインプレーヤーとなり、量子コンピュータの開発が世界的に活発化している。2017 年に 9 量子ビットであった集積度がその後の 1 年間で 72 量子ビットへと劇的に向上し、量子状態の保持（コヒーレンス）時間も、この 20 年間でナノ秒から数百マイクロ秒まで飛躍的に伸びている。このように産業界が研究開発を加速する背景には、量子コンピュータの適用による創薬・新材料の設計・開発の高速化・高効率化への期待がある。しかしながら、実用的な量子シミュレーションを実行するためには、最低でも 100 万～1 億量子ビット程度の集積化が必要と考えられ、また現状では従来のコンピュータに対する優位性も実証されておらず、実用化には多くの研究開発課題がある^[7]。

「量子通信・暗号」応用では、情報・データ利用の普及等による情報通信セキュリティのニーズの増大を背景に、盗聴者がいると必ず検知できる究極に安全な通信技術として量子暗号通信が注目されている。量子暗号通信において情報伝達に使われるのは単一光子で、1 個の光子に情報を載せて一定間隔で送信する必要があり、かつ非常に微弱なため安定して遠距離（現状では 100km 程度が限界）に届ける技術が課題である。その実現には、情報を載せる光子 1 個を必要なときに簡便かつ確実に生成できる単一光子源や、安全で長距離の通信を可能とする量子中継技術が必要となる^[8]。

「量子センシング」応用では、室温動作が可能なダイヤモンド NV センターを利用した量子センシングが注目されている。生体などが発する磁場のセンシングやイメージングを可能とすることで、タンパク質の構造解析に必要なナノの領域、ドラッグデリバリーや免疫検査に適用される細胞計測に必要なサブ

^a 多数の人に同一内容の質問を複数回繰り返し、回答者の意見を収れんさせるアンケート手法。

^b ①健康・医療・生命科学、②農林水産・食品・バイオテクノロジー、③環境・資源・エネルギー、④ICT・アナリティクス・サービス、⑤マテリアル・デバイス・プロセス、⑥都市・建築・土木・交通、⑦宇宙・海洋・地球・科学基盤の 7 分野。

ミクロンの領域、医用・食品・構造物の非侵襲計測に必要なミクロン以上の領域まで、スケラブルな応用が拓けると期待されている。現状では、センシングの基本特性が示されつつある段階である^[9]。

3. デルファイ調査にみる量子科学技術の評価と将来展望

3.1. デルファイ調査の概要

デルファイ調査では、2050 年までの実現が期待される科学技術として7分野計702トピックを選定し、産学官の専門家に対する Web アンケートを繰り返し2回実施した。表1に示すように、それぞれのトピックについて重要度、国際競争力、技術的実現見通し、社会的実現見通し、実現に向けた政策手段について質問した。

表1 デルファイ調査アンケート質問項目

項目	内容	選択肢
重要度 (単数選択)	30年後の望ましい社会を実現する上で、日本にとっての現在の重要度	非常に高い、高い、どちらでもない、低い、非常に低い、わからない
国際競争力 (単数選択)	現在の日本が置かれた国際競争力の状況	非常に高い、高い、どちらでもない、低い、非常に低い、わからない
技術的実現見通し (単数選択)	日本を含む世界のどこかで技術的に実現する時期	実現済み、2025年以前、2026～2030年、2031～2035年、2036～2040年、2041～2045年、2046～2050年、2051年以降、実現しない、わからない
技術的実現に向けた政策手段 (複数選択可)	技術的な実現に向け、求められる政策手段	人材の育成・確保、研究開発費の拡充、研究基盤整備、国内連携・協力、国際連携・標準化、法規制の整備、倫理的課題への対応、その他
社会的実現見通し (単数選択)	日本を含む世界のどこかで技術的な実現に続き、日本で社会的に実現する時期	実現済み、2025年以前、2026～2030年、2031～2035年、2036～2040年、2041～2045年、2046～2050年、2051年以降、実現しない、わからない
社会的実現に向けた政策手段 (複数選択可)	日本での社会的な実現に向け、求められる政策手段	人材の育成・確保、事業補助、事業環境整備、国内連携・協力、国際連携・標準化、法規制の整備、倫理的・法的・社会的課題への対応、その他

- ・技術的実現とは、所期の性能を得るなど技術的な環境が整う、例えば、研究室段階で技術開発の見通しがつくこと。または、原理・現象が科学的に明らかにされること。
- ・社会的実現とは、実現された技術が製品やサービス等として利用可能な状況となること、あるいは普及すること。

3.2. デルファイ調査結果：実現時期

デルファイ調査の結果^cを基に、社会的実現年順に示した年表を、重要度と国際競争力、および回答者数のデータと併せて表2に示す。本調査で設定された702科学技術トピック中、量子関連は22トピック（ただし、量子ビーム応用関連は除く）で、そのうち量子コンピュータ及び量子シミュレータに関する量子情報処理（●）のトピックが最も多く10トピック設定され、量子通信・暗号（■）が6トピック、量子センシング（▲）に関するトピックが5トピック、全体に共通する新材料（◆）が1トピックであった。

社会的実現年（アンケート回答の中央値）^dの結果から、トピックにより2032年から2040年までの間に社会的に実現（社会実装・普及）する。これは本調査で設定した702トピックの平均が2032年であることから、量子科学技術は全般的に比較的遅い時期に実現する予測結果となった。量子情報処理関連（●）では、ポスト量子アニーリングの特化型量子コンピュータ及びハイブリッドシステム、薬剤や触媒用シミュレータ、物質物性計算手法が順次実現し、2036年までにはアルゴリズムも含めゲート型量子コンピュータが実装される。さらに、2040年までには、手のひらサイズのハイブリッド量子コンピュータ、そして量子通信や量子メモリなどを含めた量子ニューラルネットワークが実現する。量子通信・暗

^c デルファイ調査結果のデータの詳細は、2019年10月にNISTEPホームページで公表予定である。

^d ここで示す実現年は中央値(1/2値)であり、アンケートの回答にはトピックごとにおおむね前後4～6年、計8～12年程度の幅(1/4-3/4値の幅)がある。例えば、ゲート型量子コンピュータの実現年では、中央値は2035年であるが、2030～2042年の幅がある。

号関連（■）では、1000km 超の量子中継技術、革新的セキュアな量子暗号通信が 2035 年までに、高性能単一光子デバイス、金融システム用量子メモリ、量子インターネットが 2040 年までに実現する。量子センシング関連（▲）では、高コヒーレント量子センサが比較的早期に実現し、その後、生体適用・生命科学応用のトピック群が 2038 年までに実現する。全てのアプリケーションのパフォーマンス向上に寄与する、室温で量子コヒーレンスを長時間保つ新材料（◆）は、2038 年に実現する。

表 2 量子関連科学技術トピックの社会的実現年、重要度、国際競争力、回答者数

社会的 実現年	分類*	科学技術トピック	重要度	国際 競争力	回答者 数
2032	▲	コヒーレント時間が10ミリ秒を超える、超伝導量子ビット、NV(窒素-空孔)センターなどの量子センサー	1.16	0.64	114
2033	●	汎用量子コンピュータ(量子回路)は実現できないが、量子アニーリング機械に続くものとして、特定の量子メカニズムを利用した特化型量子コンピュータの多様化	0.58	0.23	99
	●	量子化学計算に基づく薬剤や触媒デザインを可能にする量子シミュレータ	1.09	0.27	127
2034	■	1000kmに渡り量子状態を保つ量子暗号通信ネットワークを実現する量子中継技術	1.17	0.63	118
	●	量子コンピュータを利用した物質物性計算手法	0.93	0.30	144
	■	量子暗号を利用した革新的にセキュアな量子通信	1.00	0.43	96
	●	創薬や投資・金融の意思決定等に係る効率を3桁改善する、従来のコンピュータ、量子アニーリングマシン、ゲート型量子コンピュータのハイブリッドシステム	1.08	0.22	116
	●	Shorのアルゴリズム、Groverのアルゴリズム以外の古典的なアルゴリズムを本質的に改良する基本的量子アルゴリズム	0.58	0.21	96
2035	■	量子情報通信技術の発展により、ICTシステムの安全性の根拠が、既存の暗号技術に基づくものから、量子技術等に基づく新たな安全性のフレームワークへ置換	0.94	0.34	70
	▲	タンパク質の機能において、量子(力学)レベルでの作動メカニズムを理解する上で必要なパラメータを得るための量子計測技術	0.47	0.18	282
	●	核磁気共鳴や超伝導など現在考察されている量子ゲート実現手法のスケラビリティの大幅な改良による、数百ビットのコヒーレンスが保たれるゲート型量子コンピュータ(量子回路)	0.82	0.25	103
	●	単一スピンを情報担体としCMOSデバイスではなし得ない高速性と低消費電力性の双方を有する情報素子	1.10	0.70	134
2036	●	古典ゲート型コンピュータに比べて演算数を10桁以上削減できる、ゲート型量子コンピュータの特性を十分に生かすアルゴリズム	0.81	0.08	145
	■	オンデマンドで単一光子を高レートで発生できる新デバイス	0.78	0.41	121
	■	量子暗号を用いた高セキュリティな金融システムのための量子メモリ	0.97	0.19	127
	▲	量子もつれ光による超高精度測定を利用した新規な生命現象、生化学現象の解明	0.48	0.33	103
2037	▲	超小型でショットノイズ限界を超える量子センサ	0.74	0.40	121
	◆	室温で量子コヒーレンスを長時間保つ新材料	0.73	0.37	344
	■	量子コンピュータ間の量子インターネットを可能にする高効率な量子通信素子技術	1.00	0.31	127
2038	●	既存のコンピュータに組み込み可能な手のひらサイズの量子コンピュータ・アクセラレータ	0.93	0.19	121
	▲	光をほとんどあてずに測定する被写体(生体)にダメージを全く与えない、量子もつれを利用したイメージング技術	0.51	0.33	116
2040	●	量子しきい値ゲートや学習のフィードバック含めた量子通信路、量子メモリ等の実現による、量子ニューラルネットワーク	0.74	0.14	100

* 分類: ●量子情報処理、■量子通信・暗号、▲量子センシング、◆新材料

重要度・国際競争力: 非常に高い(+2)、高い(+1)、どちらでもない(0)、低い(-1)、非常に低い(-2)としてスコアを算出

3.3. デルファイ調査結果：重要度および国際競争力

量子関連の 22 科学技術トピックの重要度と国際競争力の関係を図 1 に示す。重要度、国際競争力ともに高いと評価された 3 トピックは、スピンあるいは光を利用するデバイス系である。一方、「重ね合わせ」や「もつれ」のいわゆる量子状態を利用するその他のデバイス系では、トピックごとに重要度は異なるが、いずれも国際競争力は比較的低いと評価された。その中で、量子コンピュータ・シミュレータなどの量子情報処理関連では、全般的に国際競争力は低く、近年有力なアプリケーションとして注目される薬剤・触媒開発向け量子シミュレータや、創薬・金融向けハイブリッドコンピュータでは、特に重要度は高いが国際競争力は低いと評価されている。また、量子暗号に関わるトピック群は、高度なセキュリティニーズから、いずれも高い重要度が示されている。また、量子センサ（コヒーレンス 10ms 超）は重要度が高く、国際競争力も高いと評価される一方で、その他の特に生体・医療応用の量子センシング関連トピック群は、比較的重要度は低く、国際競争力も低いと評価された。

3.4. デルファイ調査結果：技術的实现および社会的実現に向けた政策手段

複数回答で聞いた実現に向けた政策手段の選択割合を、アプリケーションごとの平均値で比較した結果を図 2 に示す。全般的に技術的实现、社会的実現ともに、人材の育成・確保が最も多く 60～70%が必要と答えた。続いて、研究開発費や事業補助など金銭面の支援と、研究基盤あるいは事業環境整備が 50%超を示している。社会的実現では、金銭面と環境整備が若干減り、国内外連携では、30～40%レベルではあるが必要とする割合が少し増加している。また、特に量子情報処理関連では人材の育成・確保が最

も高く、その他の政策では量子通信・暗号が比較的高く、特に法規制の必要性は他よりも2倍以上高い結果となった。

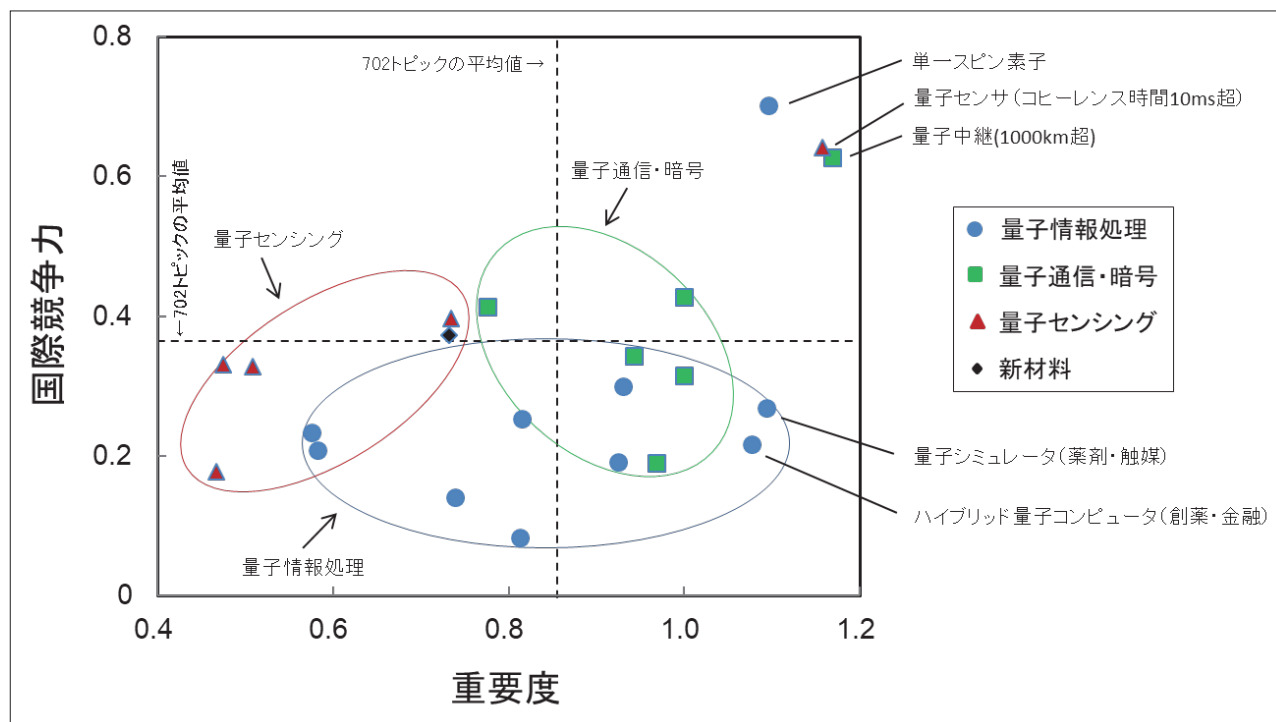
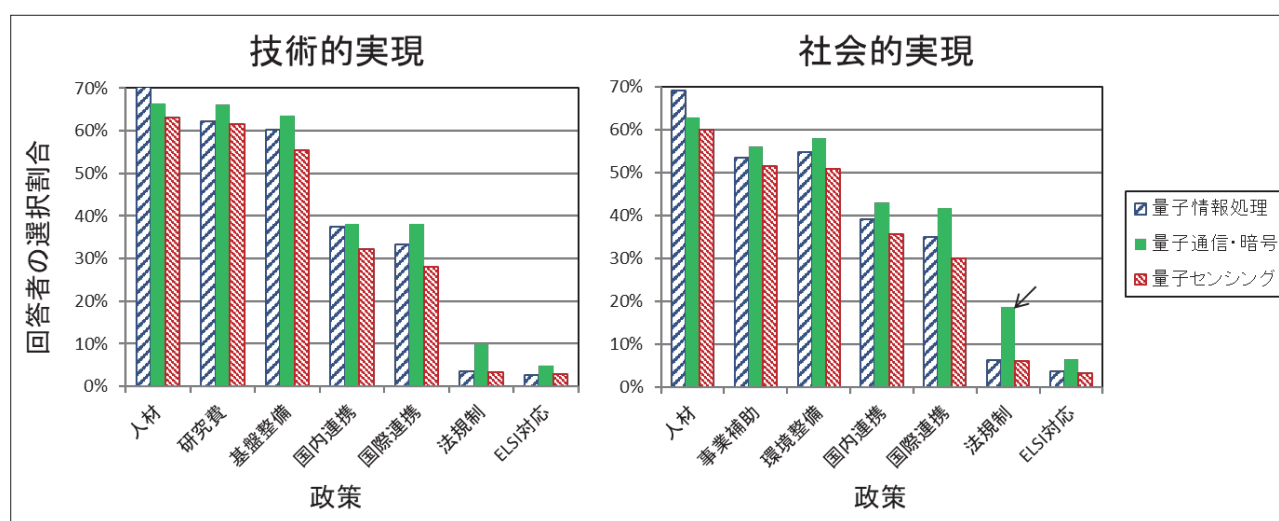


図1 量子関連科学技術トピックの重要度と国際競争力の関係



[政策の略称]人材:人材の育成・確保、研究費:研究開発費の拡充、基盤整備:研究基盤整備、環境整備:事業環境整備、国内連携:国内連携・協力、国際連携:国際連携・標準化、法規制:好気性の整備、ELSI対応:倫理的・法的・社会的課題への対応

図2 技術的実現・社会的実現のための政策手段の選択割合

実現に向けた政策手段の中で、量子科学技術では技術的実現、社会的実現共に、特に人材の育成・確保と研究開発費の拡充／事業補助が、全般的に選択割合が高かったが、選択割合が特に高かった科学技術トピックを表3および表4にそれぞれ示す。

人材の育成・確保においては、技術的実現では量子センサ、社会的実現ではゲート型量子コンピュータが特に選択割合が高い。量子センサ、物質物性計算手法、コンピュータのハイブリッドシステムは、技術的・社会的実現双方で高い。他に技術的実現では量子中継技術、社会的実現では特化型量子コンピュータの選択割合が高かった。技術的実現の研究開発費の拡充では、量子通信・暗号技術、量子センサ、単一スピン素子、ゲート型量子コンピュータ関連トピックが高い。一方、社会的実現の事業補助では、

量子通信・中継技術、量子センサ、ハイブリッドコンピュータ関連トピックの選択割合が高かった。

表3 実現に向けた政策手段〔人材の育成・確保〕の選択割合が高い科学技術トピック

○技術的実現〔人材の育成・確保〕

選択割合	分類*	科学技術トピック
78%	▲	コヒーレント時間が10ミリ秒を超える、超伝導量子ビット、NV(窒素-空孔)センターなどの量子センサー
74%	●	量子コンピュータを利用した物質物性計算手法
73%	●	創業や投資・金融の意思決定等に係る効率を3桁改善する、従来のコンピュータ、量子アニーリングマシン、ゲート型量子コンピュータのハイブリッドシステム
73%	■	1000kmに渡り量子状態を保つ量子暗号通信ネットワークを実現する量子中継技術
72%	●	古典ゲート型コンピュータに比べて演算数を10桁以上削減できる、ゲート型量子コンピュータの特性を十分に生かすアルゴリズム

○社会的実現〔人材の育成・確保〕

選択割合	分類*	科学技術トピック
76%	●	核磁気共鳴や超伝導など現在考察されている量子ゲート実現手法のスケラビリティの大幅な改良による、数百ビットのコヒーレンスが保たれるゲート型量子コンピュータ(量子回路)
72%	●	量子コンピュータを利用した物質物性計算手法
72%	●	汎用量子コンピュータ(量子回路)は実現できないが、量子アニーリング機械に続くものとして、特定の量子メカニズムを利用した特化型量子コンピュータの多様化
71%	▲	コヒーレント時間が10ミリ秒を超える、超伝導量子ビット、NV(窒素-空孔)センターなどの量子センサー
70%	●	創業や投資・金融の意思決定等に係る効率を3桁改善する、従来のコンピュータ、量子アニーリングマシン、ゲート型量子コンピュータのハイブリッドシステム

* 分類: ●量子情報処理、■量子通信・暗号、▲量子センシング

表4 実現に向けた政策手段〔研究開発費の拡充／事業補助〕の選択割合が高い科学技術トピック

○技術的実現〔研究開発費の拡充〕

選択割合	分類*	科学技術トピック
73%	■	量子情報通信技術の発展により、ICTシステムの安全性の根拠が、既存の暗号技術に基づくものから、量子技術等に基づく新たな安全性のフレームワークへ置換
71%	▲	コヒーレント時間が10ミリ秒を超える、超伝導量子ビット、NV(窒素-空孔)センターなどの量子センサー
70%	●	単一スピンを情報担体としCMOSデバイスではなし得ない高速性と低消費電力性の双方を有する情報素子
69%	●	核磁気共鳴や超伝導など現在考察されている量子ゲート実現手法のスケラビリティの大幅な改良による、数百ビットのコヒーレンスが保たれるゲート型量子コンピュータ(量子回路)
69%	■	量子暗号を利用した革新的にセキュアな量子通信

○社会的実現〔事業補助〕

選択割合	分類*	科学技術トピック
62%	■	1000kmに渡り量子状態を保つ量子暗号通信ネットワークを実現する量子中継技術
61%	▲	コヒーレント時間が10ミリ秒を超える、超伝導量子ビット、NV(窒素-空孔)センターなどの量子センサー
60%	●	既存のコンピュータに組み込み可能な手のひらサイズの量子コンピュータ・アクセラレータ
58%	●	創業や投資・金融の意思決定等に係る効率を3桁改善する、従来のコンピュータ、量子アニーリングマシン、ゲート型量子コンピュータのハイブリッドシステム
57%	■	量子コンピュータ間の量子インターネットを可能にする高効率な量子通信素子技術

* 分類: ●量子情報処理、■量子通信・暗号、▲量子センシング

4. まとめと科学技術イノベーション政策への示唆

膨大な情報量を高速処理できると期待される量子コンピュータへの大規模な研究開発投資が、官民間問わず世界的に急速に拡大している。当研究所の実施したデルファイ調査の結果からも、将来社会を大きく変える可能性があるゲート型量子コンピュータは2035年(中央値)には社会実装されると予測されている。その後さらに、量子情報技術の集大成として量子ニューラルネットワークの完成が2040年(中央値)に見込まれている。

我が国における量子関連技術の推進においては、重要度・国際競争力が共に高いと評価され、いずれも基本性能が実証されている、単一スピンデバイス、量子センサ、量子中継技術の開発を推進することが望まれる。また、世界的に研究開発が進む量子シミュレータやハイブリッドコンピュータ、及び量子暗号通信関連技術は、国際競争力は低めながら重要度は高いと評価されており、国際標準など日本としての開発戦略を定めて、推進することが必要である。量子センシング関連では、量子センサなどの新しい量子的センシングデバイスの重要性は高く認識されているが、その応用を扱うトピックにおいては重

要度の評価は比較的低いレベルに止まっており、基礎研究レベルの幅広い取組を持続的に進めることで、将来的に健康・医療分野をはじめとする幅広い応用につながる可能性がある。

量子科学技術は、これまでの固体の半導体や光デバイスとは大きく異なる性質を制御する必要がある。基本性能の向上にはこれまで以上に基礎科学が重要となるが、一方でデバイス実装には、半導体や光デバイスにおける材料・プロセス技術の適用が不可欠となり、日本がこれまで蓄積した技術が強みとなる。いずれのアプリケーションも実用化への課題は多いが、量子状態の持続（コヒーレンス）時間や制御性向上などに関わる材料・デバイスなどのハードウェア、集積化などのシステム化、アルゴリズムなどのソフトウェアの研究開発、量子情報・量子生命などの基礎科学、そしてそれらを担う人材など、多様な科学技術の総合的な推進が求められる。

具体的な政策面の支援として、量子科学技術の関連トピックは、技術的实现、社会的実現ともに、一般的に 60～70%と非常に多くの専門家が「人材の育成・確保」が必要と回答しており、特に量子情報処理関連技術でその必要性が高い。また、研究開発費や事業補助など金銭面の支援と、研究基盤整備あるいは事業環境整備は 50%超が必要と回答している。将来社会に大きな影響を及ぼす可能性がある科学技術として、量子科学技術には、特に人材育成・確保が重要であり、あわせて金銭面と環境整備に対する持続的な政策的支援が求められる。

謝辞

本調査研究を実施するにあたりご協力いただいた、国立情報学研究所 根本香絵教授、国立研究開発法人産業技術総合研究所ナノエレクトロニクス研究部門エレクトロインフォマティクスグループ 川畑史郎グループ長、横浜国立大学 小坂英男教授、京都大学化学研究所 水落憲和教授、東京工業大学 波多野睦子教授に、感謝の意を表します。

参考文献

- [1] 内閣府総合科学技術・イノベーション会議、「統合イノベーション戦略 2019」（令和元年 6 月 21 日閣議決定）；https://www8.cao.go.jp/cstp/togo2019_honbun.pdf
- [2] 首相官邸、量子技術イノベーション戦略中間整理（令和元年 6 月）；
https://www.kantei.go.jp/jp/singi/tougou-innovation/pdf/ryoushi2019_chukan.pdf
- [3] 横尾淑子、赤池伸一、「ST Foresight 2019（速報版）の概要－人間性の再興・再考による柔軟な社会を目指して－」、STI Horizon、Vol. 5, No. 3(2019)；<https://doi.org/10.15108/stih.00185>
- [4] 科学技術予測センター、「第 11 回科学技術予測調査（速報版）」（2019 年 7 月）；
<http://doi.org/10.15108/stfc.foresight11.101>
- [5] 科学技術動向研究センター、「ホライズン・スキヤニングに向けて～海外での実施事例と科学技術・学術政策研究所における取組の方向性～」、STI Horizon、Vol. 1, No. 1(2015)；
<http://doi.org/10.15108/stih.00005>
- [6] 科学技術予測センター KIDSASHI サイト：
<https://stfc.nistep.go.jp/horizon2030/index.php/ja>
- [7] 蒲生秀典、「量子コンピュータ開発の進展～化学薬品・創薬・新材料開発の加速に向けて」、KIDSASHI, NISTEP（2019）；
<https://stfc.nistep.go.jp/horizon2030/index.php/ja/weekly-weakly-signals/qbit20190208>
- [8] 蒲生秀典、「安全な量子情報通信ネットワークの実現に向けて ～ダイヤモンドを利用した量子テレポーテーションを実証～」、KIDSASHI, NISTEP（2017）；
<https://stfc.nistep.go.jp/horizon2030/index.php/ja/weekly-weakly-signals/337>
- [9] 波多野睦子、岩崎孝之、山崎聡、「ダイヤモンドの魅力 ダイヤモンド半導体の先進パワーデバイスと高機能センサへの応用の可能性」、応用物理、85、311(2016)