

「量子未来社会の健全な発展へ向けた 課題と展望」について

根本 香絵

沖縄科学技術大学院大学 (OIST)

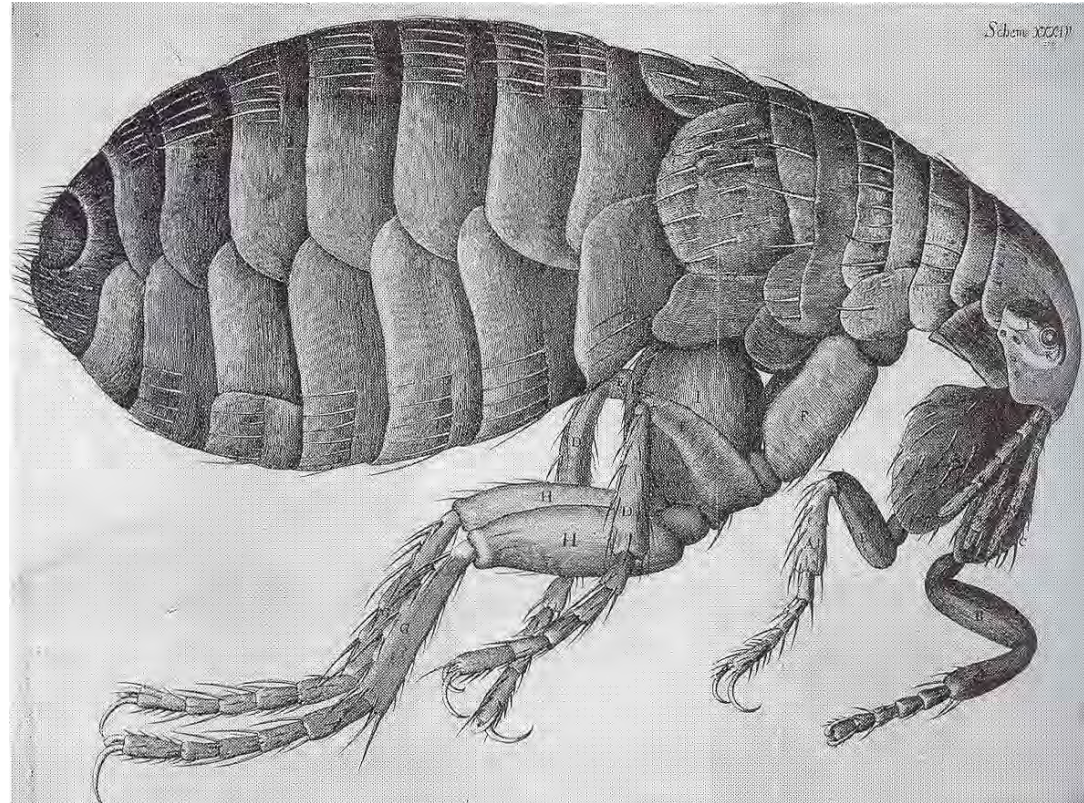
国立情報学研究所 (NII)

「量子未来社会の健全な発展へ向けた 課題と展望」について

量子科学・量子技術とは何か
その本質と意義

技術は人智を越える世界をもたらし そこから新たな科学が生まれる

捉える力としての技術



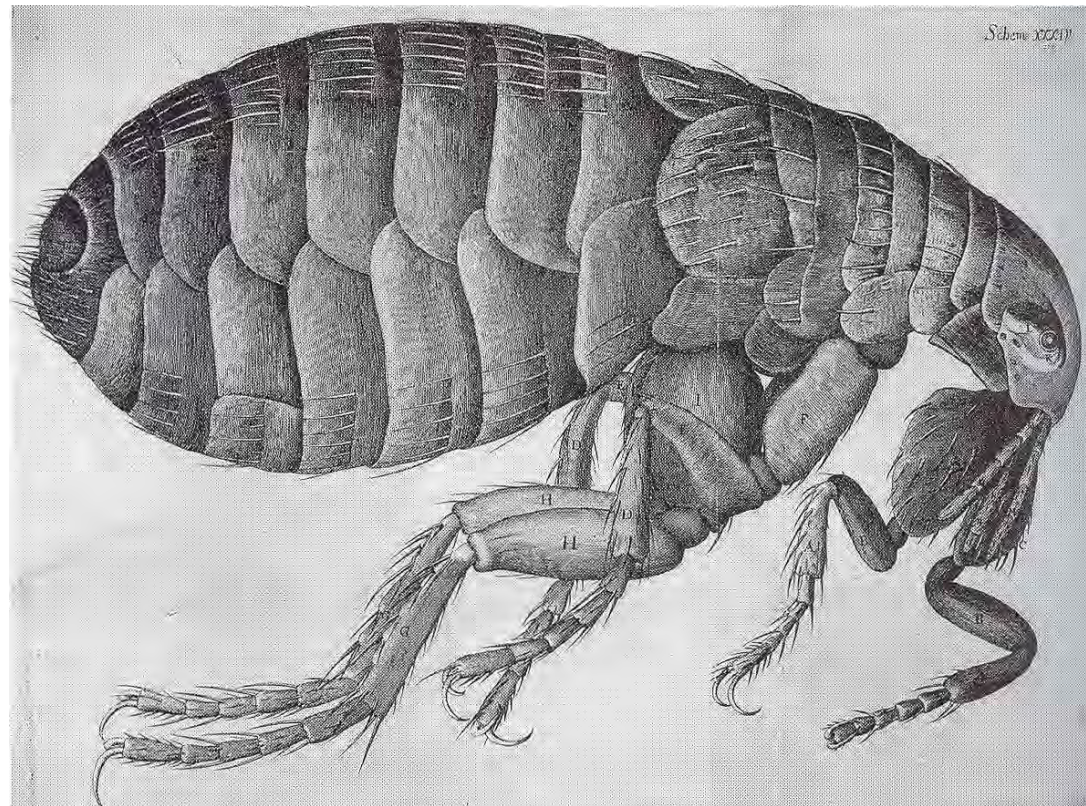
Engraving of a flea from Robert Hooke's 1665/*Micrographia*/, funded by the Royal Society. Some of the illustrations were made by Christopher Wren. Originally, this illustration was a gatefold.

Royal Societyのアーカイブでもっとも多く利用されたと言われる

画像：Royal Societyアーカイブ³より

技術は人智を越える世界をもたらし そこから新たな科学が生まれる

科学技術 — 私たちの考え方、社会のあり方、生活様式など、人類の生き方を変えてきたものでもある



Royal Societyのアーカイブでもっとも多く利用されたと言われる

画像：Royal Societyアーカイブ⁴より

量子力学に基づいた技術は すでに社会を大きく変えてきた

- 量子的な性質を用いた技術 — 第一次量子革命
 - 20世紀を代表する技術となるコンピュータやインターネット、携帯電話などの情報通信技術はもとより、医療やエネルギー等における新しい技術も含まれ、さらに21世紀に入ってから、物流やインフラ、農業などの一次産業などとも融合し、高度情報化社会を迎える。

量子力学に基づいた技術は すでに社会を大きく変えてきた

- 量子的な性質を用いた技術 — 第一次量子革命

	第一次量子革命 20世紀～現在	第二次量子革命 21世紀～進行中
基本原理	量子力学が生む量子効果（離散化など）の利用	量子状態を直接制御・操作する技術
核心的な違い	量子効果の「利用」 (材料・構造への応用)	量子状態の「制御」 (重ね合わせ・もつれの操作)
代表的な技術	半導体・トランジスタ レーザー MRI 太陽電池 LED	量子コンピュータ 量子暗号 (QKD) 量子センサー 量子通信
限界の突破	量子物理学に基づく原理的な限界がある	量子の原理を操ることでその限界を突破 (盗聴不可能な通信・超高速計算など)
成熟度	成熟・社会実装済み (私たちの日常に普及)	萌芽～開発段階 (一部は社会実装が進む)
政策的意義	既存産業基盤として維持・高度化が課題	国際競争が激化中、長期投資と基礎研究が急務

量子技術は、技術の原理を変えるもの

- 量子的な性質を用いた技術 — 第一次量子革命

- 20世紀を代表する技術となるコンピュータやインターネット、携帯電話などの情報通信技術はもとより、医療やエネルギー等における新しい技術も含まれ、さらに21世紀に入ってから、物流やインフラ、農業などの一次産業などとも融合し、高度情報化社会を迎える。



- 量子情報（21世紀的な量子力学の基礎）に基づいた量子技術 — 第二次量子革命

- この量子情報に基づいた量子技術は、これまでの第一次量子革命までの技術を原理から変革するもので、この技術革新の達成により、第二次量子革命を迎える。

量子技術は、技術の原理を変えるもの

- 量子的な性質を用いた技術 — 第一次量子革命

- 20世紀を代表する技術となるコンピュータやインターネット、携帯電話などの情報通信技術はもとより、医療やエネルギー等における新しい技術も含まれ、さらに21世紀に入ってから、物流やインフラ、農業などの一次産業などとも融合し、高度情報化社会を迎える。



- 量子情報（21世紀的な量子力学の基礎）に基づいた量子技術 — 第二次量子革命

- この量子情報に基づいた量子技術は、これまでの第一次量子革命までの技術を原理から変革するもので、この技術革新の達成により、第二次量子革命を迎える。
- これまでの量子技術とどう違うのか
 - 第一次量子革命での技術とは異なり、量子状態を直接制御することで可能となる技術を指す

量子情報技術への移行ではなく、既存技術との融合

原理が変わることで…

古典技術には原理的な限界がある

光学顕微鏡 ⇨ 波長の制限を受ける

⇨ X線顕微鏡

⇨ 電子顕微鏡

可視光よりも波長が短いので、より細かいところまでみえる

原理が変わることで…

古典技術には原理的な限界がある

可視光よりも波長が短い

光学顕微鏡 ⇔ 波長の制限を受ける ⇔ X線顕微鏡
⇔ 電子顕微鏡



量子的な光を用いる ⇔ 同じ波長でも、より細かく測ることができる

- 測れなかったものが、測れるようになる
- 計算できなかったものが、計算できるようになる
- 守れなかったものが、守れるようになる
- より効率的な技術が可能になる

原理的に限界を突破する技術

原理が変わることで…

古典技術には原理的な限界がある

可視光よりも波長が短い

光学顕微鏡 ⇔ 波長の制限を受ける ⇔ X線顕微鏡
⇔ 電子顕微鏡

捉えることができなかったものを捉えられるようになる

- 測れなかったものが、測れるようになる
- 計算できなかったものが、計算できるようになる
- 守れなかったものが、守れるようになる
- より効率的な技術が可能になる

測定は科学の基礎
知り得なかったものを知ることができる

学術領域でのインパクト

	第一次量子革命 20世紀～現在 量子効果の「利用」	第二次量子革命 21世紀～進行中 量子状態の「制御」
第一部 人文・社会科学 文学	計算人文社会学・計算社会科学・人文情報学・情報社会学・計算言語学・計量分析学など ▶ 情報化社会の台頭による新しい学際的学問分野の出現 ▶ 新しい測定技術を用いた史料・文化財へアプローチ ▶ 計算や統計学を用いた解析手法の人文・社会科学での確立	▶ 量子技術の社会的受容性の課題 ▶ 因果関係等の概念の変化や技術の高度化による社会制度・法制度的考察への要請 ▶ 記録やデータ等の考え方の変化に対する、歴史・哲学・認識論的な可能性
第二部 医療・生命科学	分子生物学、生物物理学・情報生物学・医療データサイエンスなど ▶ 量子効果の取り込みによる生命現象の解明に貢献 ▶ 量子効果を利用した医療画像診断・治療方法が確立 ▶ 半導体技術の進歩によりデータサイエンスのアプローチが可能に	▶ 計算力の飛躍的向上による、量子化学や創薬における新しい手法の発展 ▶ センサー技術の向上による単一細胞内現象や単一分子レベルの生命現象の解明と応用 ▶ 医療計測技術の高度化と計算能力向上による計算医学の加速
第三部 工学・情報科学	物理学をはじめとするほぼすべての分野で ▶ 半導体技術の進化で計算能力が飛躍的に向上 ▶ 光通信・無線技術の発展で超高速・広帯域ネットワークが実現 ▶ センサー・MEMS 技術で製造・インフラ・物流の自動化が進展 ▶ 物理学・化学などの基礎科学の発展	▶ 量子コンピュータ等による古典的には困難な問題や課題への解決 ▶ 量子通信ネットワーク（量子インターネット）の構築による新情報インフラ ▶ 量子計測による新しい計測基盤の創出—基礎（時空・物性等）から応用（GPS代替測位・表面等）

量子科学技術の特性

- 萌芽的な段階であり、多くが未知である
- 発展段階が多様で、全体的には長期的な技術の発展を要する
- 広い分野にひろがっている
- 大規模な技術体系を必要とする

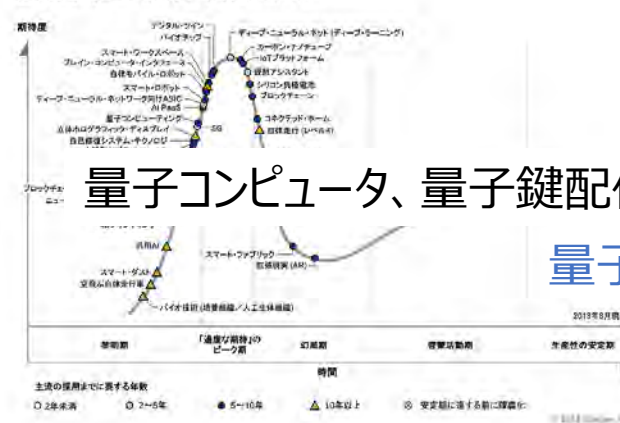
量子科学技術の特性

- 萌芽的な段階であり、多くが未知である

すでにハイプを経験している

量子科学技術の期待と実力とは
かけ離れている

図1. 先進テクノロジーのハイプ・サイクル: 2018年



量子コンピュータ、量子鍵配送など、今知られている量子技術は一部にすぎない
量子科学技術の長期的な発展には基礎研究が重要

出典: ガートナー (2018年6月) IT Leaders Website (<https://it.impress.co.jp/articles/-/16586>) より

- 発展段階が多様で、全体としては長期的な技術の発展を要する
- 広い分野にひろがっている
- 大規模な技術体系を必要とする

量子科学技術の特性

- 萌芽的な段階であり、多くが未知である
- 発展段階が多様で、全体的には長期的な技術の発展を要する

例)

- 量子鍵配送
2000年ごろから実装—現在は社会実装化
計算能力が上がっても安全性が保証される

長距離化



- 量子通信
現在も光と物質の基礎研究

- 量子センサーの開発
多様な利点をもつセンサーが開発されている
量子性は低い

第2次量子革命



- 古典限界を越える量子センサー
LIGOなど極限的な科学実験の現場でみられるのみ

- 広い分野にひろがっている
- 大規模な技術体系を必要とする

量子科学技術の特性

- 萌芽的な段階であり、多くが未知である
- 長期的な技術の発展を要する
- 広い分野にひろがっている

量子技術はICT全体に広がる技術
マイクロからマクロまで技術を革新的に効率化する

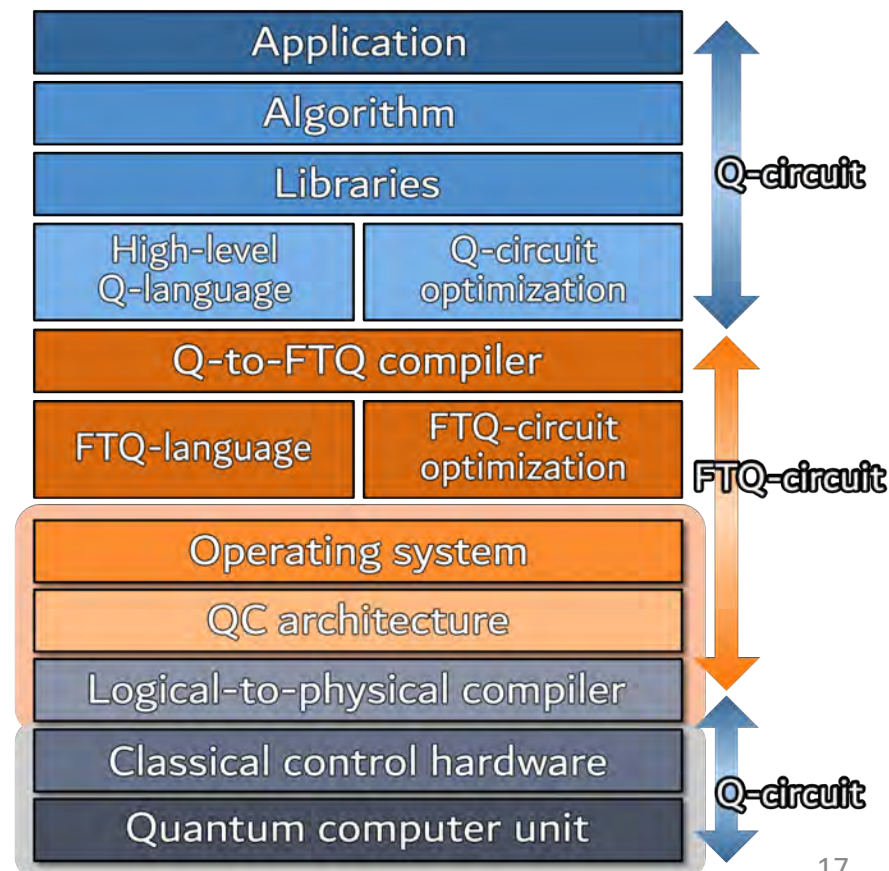
- 大規模な技術体系を必要とする

量子科学技術の特性

- 萌芽的な段階であり、多くが未知である
- 長期的な技術の発展を要する
- 広い分野にひろがっている
- 大規模な技術体系を必要とする

例えば、
大規模（フォールトトレラント）量子コンピュータは大規模な技術体系であり、その実現にはさまざまな科学と技術の結集が必要である

- 急速に発展している



提言に向けて

目的

量子技術の発展は、この10年間に世界的に大きな発展と変動を見せてきた。世界的に開発競争が激化する中において、日本においては特に研究・産業面における世界的な競争力の低下と深刻な人材不足が強く懸念されている。本提言は、これらの量子技術開発を取り巻く状況が生み出す様々な研究開発、教育及び社会実装上の懸念を見据え、学術の立場からその解決の糸口を模索し、量子未来社会の健全な発展のために、技術の発展段階を共有し、今なすべきことを提言としてまとめることを目的とする。

現状と課題

- 量子技術は多岐に渡り、その応用分野までを含めると**広大な学問・産業領域**となる。
- 現在の**高度情報化社会基盤と融合**することで、インフラ、エネルギー、輸送、農業、医療など様々な分野と融合して発展することが期待される。⇒**これらの取り組みは先進諸外国と比較して立ち遅れている**
- 多様な技術レベルが混在
 - 量子技術は全体としては、まだ萌芽的な技術であるが同時に、量子鍵配送などの一部の技術では社会実装が進められるレベルに到達するもの、量子コンピュータなど、**社会的な競争力を持つ技術レベルに至っていない段階から、社会実装が強く求められている分野も存在する。**
- ノンリニアな発展
 - 基礎・応用研究と、社会への実装を念頭においた開発研究の間には、広大な研究の幅があり、**基礎研究と開発研究と安直に分離して位置付けることはできない**
- 長期的な研究分野 — 現在は**まだ技術開発初期の段階**
 - **過度に社会実装を強調することは、量子技術の健全な発展を阻害する可能性もある**
 - 研究力の強化やそれによる人材の育成には**長期的視点での研究への投資が重要**

現状と課題

- 量子技術は多岐に渡り、その応用分野までを含めると**広大な学問・産業領域**となる。
- 現在の**高度情報化社会基盤と融合**することで、インフラ、エネルギー、輸送、農業、医療など様々な分野と融合して発展することが期待される。
- 多様な技術レベルが混在
- ノンリニアな発展
- 長期的な研究分野 — 現在はまだ**技術開発初期の段階**

提言では、これら背景のもと主な量子技術の現時点の発展段階を把握、共有し、政策、教育、産業化の3つの観点から、量子未来社会の健全な発展に向けて、次の2項目を提案する。

- 量子科学技術政策立案に向けた具体的な推進戦略
- 量子未来社会実現へ向けた構造的な課題への取組

量子科学技術政策立案に向けた具体的な推進戦略について

1. 基礎研究と研究力強化

量子技術は、技術の幅、深さともに広いスペクトルを持つ技術であり、特に基礎研究から生まれる新しく多様なアイデアは、今後の量子技術開発を牽引するものである。社会実装に過度に偏重し有害なハypeを生み出すことなく、長期的また継続的に研究の社会還元が可能となるように、戦略を設定することが必要である。

長期的かつ継続的な研究による社会還元が重要

2. 学術との協働による大規模開発への取り組み

量子技術の中には、大規模な量子コンピュータの実装や量子科学技術の社会実装において大規模な取り組みを必要とするものがあり、量子技術における大規模開発は本質的にこれまでとは違う開発構造を必要とする。

すべてのステークホルダーでの対話による日本型の開発体制の創成

また、学術における新しい知見の社会還元による量子産業の競争力を維持するための仕組みづくりとその運用設計が重要であり、国家レベルでの取組が不可欠である。

量子科学技術政策立案に向けた具体的な推進戦略について

1. 基礎研究と研究力強化

長期的かつ継続的な研究による社会還元が重要

2. 学術との協働による大規模開発への取り組み

すべてのステークホルダーでの対話による日本型の開発体制の創成

3. 人材育成における戦略

大学における高等教育を機能的なものとするためには、日本の教育費への公的援助を欧米諸国程度までに高める必要がある。

教育への投資と全国的な高等教育戦略の必要性

社会基盤技術の高度化により重要性を増す大学院教育においては、研究力強化が重要であり、中でも流動性や多様性を確保した教員や研究者数の増加や雇用の質の向上などの人件費への投資が最も重要で、長期的な政策に基づいた戦略が必須である。

研究力強化に資する流動性・多様性の確保

技術分野のワークフォースでは、常にリスキング・リカレント教育を念頭に管理する必要がある。産業界の積極的な関与や公的資金の投資などによるリスキングおよびリカレント教育の仕組みを学術を中心に早急に構築する必要がある。

リスキング・リカレント（学び直し）教育の普及

量子未来社会実現へ向けた構造的な課題への取組

①国際戦略とイノベーションへの取り組み

- 海外からの優秀な人材の流入は、日本の技術開発とイノベーションに必須であり、世界情勢の急速な変動などの影響など、危機管理の観点も含めた立案により戦略的な政策が必要とされる。
競争的資金などにある制度的な弊害を取り除いた政策的な支援の方法の検討
急速に発展する量子技術と変化する国際情勢に対応した専門的な支援体制を早期に構築
- 日本の産業基盤や産業的強みは、海外の量子技術企業にとって十分に魅力的であり、今後の政策的な取り組みによるスタートアップを中心としたイノベーションの加速化が期待できる。

②量子技術とイノベーション

- 量子技術の積極的な既存技術・基盤へのインテグレーションを牽引していくことが必要である。
官学が協働し、それぞれの役割の明確化と、その役割に応じた投資が必要

③21世紀的課題解決へ向けた技術的アプローチ

- 量子技術の多様な優位性に着目した量子技術の開発を促し、その社会実装へ向けて産官学が連携して、様々な21世紀的課題へ技術的な解決をはかる具体的な取り組みが望まれる。
量子技術の優位性・価値の多様化

④産業人材構造変革とイノベーションエコシステムの強化（人材の流動性）

- 量子未来社会の健全な発展へ向けては、21世紀の世界的価値観に合致した社会構造への変革への取組が求められる。産業界における博士人材の採用、国際的な人材流動性の観点からの労働環境の改善、多様な人材の活躍、それぞれのセクターにおける人材評価のあり方などの諸課題を迅速かつ調和的に解決する必要がある。

⑤持続的な量子未来社会の実現

- 量子未来社会の社会的な側面を構築するには、社会における量子技術の受容性を促進することが不可欠である。研究成果や教育を社会に還元するための専門性の高いサポート体制が必要である。