The University of Osaka
Institutional Knowledge Archive

Title	量子技術のELSI（倫理的・法的・社会的課題）に関する文献紹介 : 2021～2022年を中心に
Author(s)	岸本, 充生; 長門, 裕介
Citation	ELSI NOTE. 2022, 24, p. 1-21
Version Type	VoR
URL	https://doi.org/10.18910/89731
rights	
Note	

The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA

https://ir.library.osaka-u.ac.jp/

The University of Osaka

大阪大学 社会技術共創研究センター
Research Center on Ethical, Legal and Social Issues

ELSI NOTE No.24

2022 年 12 月 19 日

量子技術のELSI（倫理的・法的・社会的課題）に関する文献紹介

2021～2022年を中心に

Authors

岸本 充生	大阪大学社会技術共創研究センター　センター長（2022年12月現在）
長門 裕介	大阪大学社会技術共創研究センター　特任助教（常勤）（2022年12月現在）

本ノートの作成は、大阪大学 社会技術共創研究センター（ELSI センター）と株式会社メルカリとの共同研究の一環として行ったものである。

大阪大学

Osaka University
Research Center on
Ethical, Legal and
Social Issues

目次

はじめに.....3
1．イギリスにおけるパブリックダイアログの実践.....5
2．世界経済フォーラムによるガバナンスの検討.....6
3．量子コンピューティングの専門家らによる呼び掛け.....8
4．倫理的量子コンピューティングのロードマップ.....9
5．法律家による法的-倫理的枠組みの提案.....9
6．哲学者による量子科学の倫理学に関する問題の定式化.....11
7．人権（human rights）への影響に着目した論考.....11
8．量子コンピュータの法的課題に対処するための量子規範.....13
9．科学と社会の接点で実装に失敗しないための提言.....13
10．量子技術に関する文書のレトリック分析.....15
11．責任あるイノベーション概念の適用可能性.....15
12．文献調査に基づき軍事応用の可能性を概観.....16
おわりに.....17
引用文献リスト.....19

はじめに

2022 年 4 月に日本政府が閣議決定した「新しい資本主義のグランドデザイン及び実行計画」では、科学技術・イノベーションは様々な社会的課題を解決する力があることに加えて、「・・・最終的な勝者を決めるのは、科学技術の力である」と明記された。そして、重点投資の対象分野として、（1）量子技術、（2）AI 実装、（3）バイオものづくり、（4）再生・細胞医療・遺伝子治療等、が挙げられた。量子技術については、2020 年 1 月に「量子技術イノベーション戦略」が策定されたが、その後、量子コンピュータの国際競争が激化するとともに、量子技術の経済安全保障の観点からの重要性にも注目が集まり、これに加えて、2022 年 4 月には「量子未来社会ビジョン」が策定された[1]。前者が研究開発のための戦略、後者が社会変革に向けた戦略と位置付けられている。量子技術は萌芽的技術であると同時に、社会実装や産業化によって社会全体のトランスフォーメーションを引き起こすことが目指されているという特徴を持っている。量子未来社会ビジョンにおいては、「国内の量子技術の利用者を 1,000 万人に」「量子技術による生産額を 50 兆円規模に」「未来市場を切り拓く量子ユニコーンベンチャー企業を創出」といった目標も掲げられている。

本 NOTE では 2022 年現在ではまだ顕在化していないため表立って取り上げられることの少ない量子技術の ELSI（倫理的・法的・社会的課題）に関する研究事例を取り上げる。量子技術、特に量子コンピュータはまだ研究開発途上の萌芽的な技術であり、いずれ実用化されることは確実だとしても、いつ誰によってどのような形で実用化されるかはまだ不明である。既存のコンピュータ技術と、また、AI などの他の新しい技術と合わさった形で実用化されると考えられている。ただ、社会に大きな影響をもたらすであろうことは確かであり、悪用や誤用される場合も含めて、量子技術の進展と並行してリアルタイムで ELSI を検討し、定期的に検討内容を更新していく必要があるだろう。

量子技術の ELSI を検討するにあたって、技術分野の総称としての量子技術とその応用領域としての個別の量子技術をひとまず区別して考えてみることが重要である（長門 forthcoming）。総称としての量子技術は「量子力学で記述される原子、電子、光子などの物理現象について、これまで人類が利用困難であった量子特有の性質（重ね合わせ、量子もつれなど）を操作・制御、利

[1] 「量子未来社会ビジョン（令和 4 年 4 月 22 日 統合イノベーション戦略推進会議決定）」「量子技術イノベーション戦略（令和 2 年 1 月 21 日 統合イノベーション戦略推進会議決定）」については下記ウェブサイトを参照。
https://www.mext.go.jp/a_menu/shinkou/ryoushi/mext_01422.html

活用する技術」を指している[2]。他方、個別の技術領域としては、量子コンピュータ、量子ソフトウェア、量子セキュリティ・量子ネットワーク、量子計測・量子センシング、量子マテリアルなどの広がりがある。

本 NOTE では、量子技術、特に量子コンピュータが社会実装されるにあたり顕在化するかもしれない ELSI 論点を探索するために、文献調査を行った。その結果、2021 年あたりから量子技術の ELSI に関する文献が公表され始めたことが分かった。そこで、本 NOTE では主に 2021 年から 2022 年にかけて公表された文献を収集し、紹介することとした。第 1 節のみ、2021 年よりも前の文献であるが、先駆的な事例として 2017 年にイギリスで実施されたパブリックダイアログを取り上げる。これを参考にして、日本においても 2022 年に大阪大学の学生を対象としてフォーカルグループインタビューが実施された（肥後ら 2022）[3]。

第 2 節では、世界経済フォーラム（WEF）による「量子コンピューティング・ガバナンス」と題するプロジェクトの活動を取り上げる。第 3 節では 2021 年 2 月に YouTube 映像として量子技術の倫理的側面への懸念と早期の取り組みの呼び掛けが行われた事例を取り上げる。第 4 節以下は順不同に文献を 1 つずつ取り上げる。4〜8 節と 12 節では個別の技術として量子技術のアプリケーションを扱っているのに対して、9〜11 節は総称としての量子技術や「量子産業」全体の問題を扱っているという特徴がある。

---

[2] 文部科学省ウェブサイト「量子技術（Quantum Technology）」の説明による。https://www.mext.go.jp/a_menu/shinkou/ryoushi/mext_01422.html　また、過去の第一次革命に対して、現在起きている量子技術の革新は第二次革命とも呼ばれる。最初の革命は、量子力学の法則を知り、その法則に従ったデバイスを作ることで、レーザーやコンピュータの基本構成要素であるトランジスタなどが発明された。

[3] ここでは複数の学生が「量子」という語について「怪しい」「うさんくさい」というイメージがあるとし、その原因として「引き寄せの法則」などのオカルト的な要素を持つニューエイジ系の書籍の存在を挙げている。疑似科学との接点については本 NOTE では扱っていない。

1．イギリスにおけるパブリックダイアログの実践

量子技術と社会との関係を検討するうえで先駆的な事例として、2017 年にイギリスで、量子技術をテーマにした市民参加型議題抽出イベント、すなわちパブリックダイアログ（Quantum Technologies Public Dialogue、QTPD）がある（EPSRC 2017）。英国工学物理学研究会議（EPSRC）の委託を受けた Kantar Media 社が実施した。実施拠点は、国家量子技術ハブとして指定された 4 拠点（ヨーク大学、バーミンガム大学、オックスフォード大学、グラスゴー大学）であり、参加者は英国の人口動態に沿うように選ばれた 77 名であった。目的は、一般市民による、量子技術に関する期待や懸念、要望などを含んだ知識と意見を掘り下げることであった。ステークホルダーワークショップに続いて、4 か所での終日の対話ワークショップが 2 回開催された。一般市民の多くが「量子」という言葉についてほとんどが「表層的なレベルの連想」に留まったとしたうえで、意見を求められると「なんとも思い難くて混乱してしまう」「どんな意見が求められているかもわからない」とする率直なコメントが見られた。
報告書のエグゼクティブサマリーにおいて要約された提言は次のとおりである。

- 参加者は、英国が量子技術に投資し、国際舞台でこれを主導することを望んでいた。なぜなら、個人と社会に進歩をもたらし、他国も技術を開発するなら国家安全保障が確保できるという利点があると考えたからである。
- 参加者が量子技術に対して中立性を感じたということは、量子コミュニティが独自のストーリーを語り、量子技術とポジティブな関係を築く機会があり、ニーズが高まっていることを示唆している。
- 参加者は、量子技術に関連する潜在的な利益に興奮し、これらの情報、特に健康、人道、セキュリティ、効率性の便益を持つ量子技術について、より多くの情報を知りたいという関心があった。
- 量子コンピュータと暗号化については、社会にとって最も大きな変化と潜在的な脅威をもたらし、それゆえに人々の恐怖を引き起こすと考えられたため、懸念に対処する必要があることが議論された。
- 自動化、プライバシーと監視、気候変動を含む、技術の進歩に関連する懸念に関する幅広い議論に参加することと、量子科学のこれらの議論への貢献を検討することが有用であるとの意見が出された。
- 利益だけでなく公共の利益を考慮し、より広い社会的影響を考慮し、量子技術の商業化前に加害者（政府や公的機関、個人、企業を含む）を抑止し処罰するための適切な規制と執行を担保するガバナンス・メカニズムが作られることが望まれていた。

- 研究者は、責任ある研究とイノベーション（RRI）にもっと真剣に取り組むべきである。

2．世界経済フォーラムによるガバナンスの検討

世界経済フォーラム（WEF）は、マルチステーホルダーから構成される量子コンピューティング・ネットワークの取り組みとして「量子コンピューティング・ガバナンス」と題するプロジェクトを実施している。パートナーには世界各地から大学や企業、省庁、学術団体が 20 組織以上参加している[4]。次のようなアプローチが提案された。

- より良い社会を形成するために、いかにして量子倫理（quantum ethics）が利用されうるかについての、ステークホルダーの会話の骨組みを作り、エコシステムの意識を形作る。
- 量子コンピューティングに関連する固有のリスク、倫理的問題、社会的含意、およびその他の未知の影響を研究する。
- 量子コンピューティングの倫理原則を設計する。
- 量子コンピューティングの責任ある設計と採用のためのより広い枠組みを設計する。
- 専門家コミュニティによって特定される量子コンピューティングのいくつかの新しいアプリケーションにおいて、開発された枠組みをテストする。

2022年1月には「量子コンピューティング・ガバナンス原則」と題する報告書が公表された（World Economic Forum 2022）。公表の目的として、最初のステップとして認知度を高めて、量子コンピューティングの関係者に議論に参加してもらうことが挙げられている。ガバナンス原則の構造は次のとおりである。最上位には「コア価値（Core values）」があり、原則が適用される優先分野として「テーマ（Themes）」がある。そしてテーマごとに、達成されるべき「目標（Goals）」、量子コンピューティングが提供できる「機会（Opportunity）」と、引き起こすかもしれない「リスク（Risks）」、ステークホルダーの熟議のための役に立つ「原則（Principles）」、機会を活用し、リスクを軽減しながら、技術を開発するための「行動（Actions）」が設定されている。

◆ 「コア価値（Core values）」は、共通善（Common good）、アカウンタビリティ（Accountability）、包摂性（Inclusiveness）、平等性（Equitability）、無危害（Non-maleficence）、アクセシ

[4] 日本の組織の参加はないようである。

ビリティ（Accessibility）、透明性（Transparency）の 7 点が挙げられている。

◆ 「テーマ（Themes）」は、1）変革を引き起こす能力（Transformative capabilities）、2）ハードウェア・インフラストラクチャーへのアクセス（Access to hardware infrastructure）、3）オープンイノベーション（Open innovation）、4）関心を高める（Creating awareness）、5）人材開発とキャパシティ構築（Workforce development and capacity-building）、6）サイバーセキュリティ（Cybersecurity）、7）プライバシー（Privacy）、8）標準化（Standardization）、9）持続可能性（Sustainability）の 9 点が挙げられている。以下にそれぞれのテーマにおいて指摘された「リスク」の概要を示す。

◆ テーマ 1：変革を引き起こす能力では、リスクとして、量子技術の影響評価（Impact assessment）が行われなかったために未知の大きな影響が生じること、トランジションマネジメントが不十分なために責任の所在が不明確になること、悪影響を受けるステークホルダーを事前に特定し損ねること、適切で包括的なリスク評価枠組みを欠いてしまうことなどが挙げられた。

◆ テーマ 2：ハードウェア・インフラストラクチャーへのアクセスでは、リスクとして、高コストと技術的専門性から少数のアクターに限られることで独占が生じること、スキルと知識の偏った分配が既存の不平等を拡大し、また新たな不平等を生み出すこと、さらには地政学的な悪影響が指摘されている。

◆ テーマ 3：オープンイノベーションでは、リスクとして、協働や透明性が欠如することで技術の進歩が阻害されたり、グローバルな課題に取り組む動機が損なわれたりすること、基礎的な知識発見への特許が知識の私財化をもたらすことなどが挙げられている。

◆ テーマ 4：関心を高めるでは、リスクとして、一般人の関与や関心がない場合に量子コンピューティング関係者とそうでない人々の間の信頼関係が築けないこと、誤った情報により人々が過度に恐れたり懐疑的になったりすること、反対グループが誤解を広めることを試みること、ハイプは短期的にはメリットがあっても長期的には害の方が大きいこと（「量子の冬[5]」）、ハイプは政策を歪めることなどが挙げられた。

◆ テーマ 5：人材開発とキャパシティ構築では、リスクとして、量子人材が足りなくなること

[5] 量子の冬（quantum winter）という表現は、2000 年代に AI へのハイプがひと段落した後、一転して投資が冷え込んだ「AI の冬」に倣っている。

だけでなく、多様性の欠如や、人材のトランジションの困難、量子コンピューティング教育への公平なアクセスが担保されないことなどが挙げられた。

◆ テーマ６：サイバーセキュリティでは、リスクとして、量子脆弱性を持つ通信メッセージを傍受する攻撃が行われること、クラウドに保存されたデータに対して公開鍵暗号スキームを破る攻撃が行われること、デジタル署名の整合性を破り、偽造や成りすましを可能にすること、ブロックチェーンなどの新興インフラのガバナンス・プロトコルが不安定化すること、地下で開発された量子コンピューティングにより、すぐに検出できない攻撃を可能にすること、耐量子セキュリティ・ソリューションがなければあらゆる法規制が遵守できなくなること、量子セキュアな世界へ同時に移行できなければデジタルインフラの「バルカン化」[6]がおこりうることなどが挙げられた。

◆ テーマ７：プライバシーでは、リスクとして、量子セキュアな暗号で保護されていないデータがハッキングされること、AIなどの他の技術と組み合わさることで強力なデータ分析アルゴリズムが用いられ、個人情報を予測・推測することが容易になること、独裁政権などの強い組織によって、監視やプライバシー侵害、市民的自由の侵害のために利用されてしまうことが挙げられた。

◆ テーマ８：標準化では、リスクとして、標準の欠如が開発ペースを遅らせてしまう反面、厳密で未成熟なまま標準化されることは研究開発フェーズにおいては自己抑制的に働いてしまう可能性などが指摘された。

◆ テーマ９：持続可能性では、リスクとして、量子コンピュータを構築するために必要な資源にレアアース金属が含まれていること、いくつかのマテリアルが不足するかもしれないこと、マテリアルや資源やチップの製造が環境リスクを伴うこと、エネルギー費用が大きくなることが挙げられた。

３．量子コンピューティングの専門家らによる呼び掛け

2021 年 2 月、量子コンピュータの 6 人の専門家グループは 13 分間のビデオ「量子倫理：行動の呼び掛け（Quantum Ethics | A Call to Action）」を Youtube に投稿し、戦争のための新規材

[6] ある地域や国家が小さな地域・国家に分裂していく様子をあらわす地政学用語であるが、サイバー文脈ではインターネットが政治的理由で分断された状態になることを指す。

料を作成する、及び、ヒト DNA の操作を加速する可能性についての倫理的懸念を表明した（The Quantum Insider 2021）。このビデオの目的は、他の量子コンピューティング業界のリーダーたちと、この技術の倫理的含意について話し合うきっかけを作ることだという（Castellanos 2021）。ビデオに出演している Cambridge Quantum 社の CEO である Khan 氏は、量子コンピュータのための倫理ガイドラインができるまでは数年かかるとしたうえで、英国政府の関係者と会話を始めているという。Quantum Daily の Editor である Swayne 氏は、量子倫理のトピックを議論する専門家諮問グループを作ることを目指していると述べた。同時に「懸念は喚起したいが、恐怖は引き起こしたくない」とも発言している。

4．倫理的量子コンピューティングのロードマップ

オーストラリアのシドニー工科大学（University of Technology Sydney）の量子ソフトウェア及び情報センターに所属する量子情報科学の専門家である Perrier 氏は 2021 年 2 月に最初に公開された論文「倫理的量子コンピューティング：ロードマップ」において、その重要性にもかかわらず、量子計算の倫理的意味合いに関する体系的な研究はほとんど行われていないとしたうえで、倫理的量子コンピューティングのための最初のロードマップを提示し、将来必要となる研究プログラムを例示した（Perrier 2021）。2022 年には、2 で紹介した世界経済フォーラムのガバナンス原則案も引用した第三版に更新された（Perrier 2022）。

論文では、4 節において倫理的な量子計算の条件として、倫理的な手続きと倫理的な帰結の 2 点が挙げられた。また、倫理的な量子計算の監査と証明可能性が重要な研究エリアであることが指摘された。5 節では公平な機械学習（FML）を量子計算に適用した、量子公平機械学習（QFML）の倫理的課題がいくつか取り上げられた。6 節ではプライバシーと暗号技術について、特に解読不可能な暗号の倫理的含意が取り上げられ、量子技術へアクセスできる者とできない者との間の分配的公正の問題などが論じられた。7 節では分配面における倫理について深掘りされた。

5．法律家による法的-倫理的枠組みの提案

知財弁護士でもあり、スタンフォード大学ロースクールのフェローでもあった Kop 氏は 2021 年、量子技術に対する人々の認識を高めることが重要であり、そのためには、法的-倫理的な枠組みを議論し、ベストプラクティスや道徳的指針といったリスクベースの技術影響評価（technology impact assessment）ツールを活用することが有効であると主張した（Kop 2021）。

今後数十年の間に、量子技術と AI の相乗効果によって、世界に新しい科学の地平がもたらされるために、まだ技術の方向性を制御することが可能な今、法的-倫理的枠組みを確立する必要が

あり、量子技術のための法的・倫理的枠組みは、AI に対する既存のルールや要件を基に構築され、ナノテクノロジーでの経験もミックスされるべきであるとされた。Kop 氏が提案する量子技術に関する 10 の指針は以下のとおりである。

- 原則 1：私たちは、人間の尊厳、人間の主体性、人間による監督、説明を受ける権利、および機械に関する人間の権利を含む人権を侵害しません。
- 原則 2：人間の自律性と自由（liberty）を含む基本的な人間の自由（freedoms）を尊重します。
- 原則 3：私たちは、人権、基本的自由、民主主義的規範、倫理的基準、普遍的で文化的にセンシティブな道徳的価値観に従い、AI、ナノテクノロジー、ブロックチェーン、VR などの他の新興技術との相乗効果を含む量子技術システムの調査、開発、設計を行います。
- 原則 4：公正、透明性、機会均等、利益の共有、無差別、多様性、連帯、繁栄に貢献します。これには、ネット中立性の実施と保護、力の非対称性の回避、民主主義社会における量子インターネットの平等なサービスとアクセスの提供が含まれます。
- 原則 5：民主的な意思決定の過程と結果を尊重します。これには、量子力学および関連技術に関する一般市民の教育が含まれる。
- 原則 6：私たちは、適正手続きと法の支配の原則に則り、責任ある、そしてアカウンタブルなやり方で量子技術を適用します。
- 原則 7：私たちは、標準、ベンチマーク、監査、認証を通じて、技術の堅牢性を保証し、人々の（精神的、物理的）安全、セキュリティ、完全性を保証する。
- 原則 8：私たちは、データ保護、データガバナンス、プライバシーに関する法規制を遵守します。
- 原則 9： 私たちは、量子技術を社会的、持続可能な形で利用し、環境、社会、人類への有害な影響を防止します。
- 原則 10：私たちは、これらの原則のいずれかに違反する量子アプリケーションを作成、取引、または輸出しません。これには、再帰的自己改良システムといった、人類に存亡リスクを課すような利用を認めないことも含まれます。私たちは、自滅を避けるために、量子軍拡競争を法律で禁止します。

また、現在までに特定された最も差し迫った社会的リスクのリストを、第 1 節で紹介したイギリ

スでのパブリックダイアログを引用しながら 10 点挙げている。そして、こうしたリスクを監視・検証するためのツールとして、「量子技術インパクトアセスメント(QIA)」が必要であるとした。起業家、科学者、プログラマー、政府に対して、量子技術を製品やサービスに安全かつ責任を持って実装するためのロードマップと、事前の行動規範を提供するものとされた。過去に実施されたテクノロジーアセスメントの方法と、近年 AI に対して提案されているインパクトアセスメントの両方から知見が得られると主張している。

6．哲学者による量子科学の倫理学に関する問題の定式化

フランスのグルノーブル大学の哲学研究所に属する哲学者である Menissier 氏は、2022 年 10 月にグルノーブルで開催された QuantAlps の会議にペーパーを提出した（Ménissier 2022）。QuantAlps はグルノーブル地域の研究機関が中心となった量子科学技術のための研究連合体であり、2022 年から 25 年までの 3 年間の学際的なプロジェクトである。著者は「量子倫理（Quantum ethics）」という言葉を使わず、「量子技術の倫理」あるいは「量子科学のための倫理」という言葉を使うという。理由としては、量子的な倫理学という誤解を招くこと、量子でなく量子技術が対象であることなどが挙げられている。倫理学とは何かという予備的な議論を行ったうえで、量子技術の問題を定式化するために 3 点の「観察」結果を提示している。1 点目は、技術成熟度に関するものである。2 点目は科学的発見からイノベーション（社会実装）への変化に関するもの。3 点目は技術の倫理の位置づけに関するものである。

著者はこれらの 3 つの「観察」に対して、「思考の方向付け」を行うための問題定式化を試みた。1 点目については研究倫理に関するもので、過去の経験、例えばマンハッタン計画の関係者が経験した道徳的なジレンマは量子科学の倫理を考えるうえで先例になるか、それとも反例となるかという点である。2 点目については、科学者が経験する可能性のあるジレンマにあたる「義務の倫理」とイノベーションの世界に典型的な「功利主義の倫理」との間に生じるはずの「倫理的推論の衝突」をどのように整理するかというものである。3 点目については、技術の倫理／技術のための倫理に何が期待されているのかに関わり、倫理的に評価するための基準は何だろうかというものである。

7．人権（human rights）への影響に着目した論考

カナダ・オタワ大学の法学部教授であり、サイバースペースにおける人権問題の専門家である Krishnamurthy 氏は、量子科学がその普及に伴い、人権を侵害することなく、人権を促進することをどのようにして保証することができるかという問題意識から、インターネット技術の人権へ

の影響を管理した経験をもとに、量子科学技術（QST）コミュニティが、人権コミュニティと対話を行うことで、人権を尊重し促進する技術を構築・発展させるために役立つ教訓を導き出すことを目指した（Krishnamurthy 2022）[7]。新規技術の社会的影響については倫理的観点から評価されることが多いが、それだけでは人権への影響を考慮するには不十分であるとする。その理由として、第一に人権保護は法律に明記されていること、第二に国際的に共通する規範が「共通言語」で提供されていることが挙げられている。そのうえで本論文では、人権の概要が説明されたのちに、3 つの「最もエキサイティングな」量子技術、すなわち量子センシング、量子コンピューティング、量子通信の人権への影響の可能性について検討された。

具体的には、量子技術の開発が、「経済的、社会的及び文化的権利に関する国際規約（ICESCR）」に謳われている「すべての人が科学の進歩とその応用による利益を享受する」権利とどのように関連するかが問われるという。また量子センシングではプライバシーの侵害リスクを伴う。量子コンピューティングは、機械学習アルゴリズムよりも強力なプロファイリングを行ったり、私たちに関する重大な決定を下したりするために利用されるかもしれない。量子技術は、既存の暗号技術のほとんどを陳腐化させる可能性がある一方で、現在の技術よりもプライベートで安全な新しい通信システムを生み出す可能性があるため、人権への影響を総合的に検討し始める必要があるとした。

最後に、私たちが、インターネットが人権に与える影響をどのように管理したかの経験から次の 3 つの重要な教訓を導き出し、量子技術が人権に及ぼすプラスの影響がマイナスの影響を上回るようにするために応用することができると主張する。

- 新規技術の開発の初期段階において、人権への潜在的な影響を検討し、そのアーキテクチャの中に人権への配慮を設計・構築すべき。
- 量子原理を具体化した特定の製品やアプリケーションの開発者にとって、これらの技術のライフサイクルを通じて人権デューデリジェンス（HRDD）（＝人権に悪影響を及ぼす可能性や実際の影響を特定し、それを防止、緩和、是正するためのプロセス）に取り組むべき。
- 政府は量子技術が人権を尊重した形で発展することを保証するうえで重要な役割を担っていることを認識すべき。現段階で量子技術を規制するための法律を制定する必要はないが、技術のアーキテクチャの設計と展開に関する対話に積極的に早い段階から参加し、必要な場合

[7] Vivek Krishnamurthy, Quantum technology and human rights: an agenda for collaboration. Quantum Sci. Technol. 7 (2022) 044003 https://iopscience.iop.org/article/10.1088/2058-9565/ac81e7/meta

には立法化する能力をあらかじめ身につけておく必要がある。

8. 量子コンピュータの法的課題に対処するための量子規範

スウェーデンのルンド大学の法学部准教授であり、「量子法（Quantum Law）プロジェクト」の PI でもある Jeutner 氏は、量子コンピュータに関連するリスクを回避するためには、量子コンピュータに関する規制措置の指針となる法原則（legal principles）を策定することが重要であるとしたうえで、量子コンピュータに関する法原則を 3 つの柱からなる「量子規範（quantum imperative）」として提案し、その策定に貢献することを目指すとした（Jeutner 2021）。 量子規範とは、規制当局と開発者が、量子コンピュータの開発において、保証しなければならない約束事である。

1. 不平等を生じさせたり、悪化させたりしない。
2. 個人の自律性を損なわないこと。
3. その利害に影響を与える人々との協議なしにそれは行われてはならないこと。

これらを実践するためには、量子技術を開発する主体は、各自が量子コンピューティングとの関係や見方について自律的に選択する能力を保護するために、量子コンピュータの可能性とリスクの両方を真剣に説明する努力をする必要があるとする。このように量子コンピュータが社会に与える影響を理解することは、核爆弾の破壊的な結果を理解するために核分裂の仕組みを詳しく知る必要はないことと同様、量子力学の複雑な議論に入り込むことなく可能なことであると主張した。著者が特に主張していることは、規制当局は、量子コンピュータの開発や運用に関する基本的な決定が民主的な監視と統制から逃れることのないように監督することである。

9. 科学と社会の接点で実装に失敗しないための提言

ドイツのカールスルーエ工科大学の技術評価及びシステム分析研究所（ITAS）の研究者である Coenen 氏と Grinbaum 氏らは、いまや世界中の科学技術政策において重要な優先分野となっている量子技術が科学と社会の接点において、実装の失敗に陥ることを防ぐための実用的な提言を行った（Coenen et al. 2022）。

- 理解しやすい（Comprehensible）：量子技術は、競争と戦いのレトリックを避け、様々なステークホルダー・グループごとに特有の利点と不利益を持つかもしれない非古典的なプロトコルや利用可能な応用に焦点を当てて、読みやすく、正直で、公的にアカウンタブルな方法

で提示されるべき。

- 具体的（specific）：抽象的なメタ歴史物語、社会学的決まり文句、量子力学の謎に関する歴史的議論に頼るのではなく、新しい資源、応用分野、関係するアクター、開発戦略、法的・倫理的考察、科学的課題などを示しながら、量子技術に特有のイノベーション経路、社会技術的プロセス及びデザインに関心を向けるべき。
- オープン（open）：量子技術の研究を、アーリーアダプター国、スタートアップ企業、ビッグテック企業以外のコミュニティにも利用可能とし、グローバルサウスに対して最先端研究施設にアクセスできるようにすべき。
- アクセスしやすさ（accessible）：この分野の人材の多様性を高め、最大限多様なユーザーや状況を想定して実装をデザインし、産業界にとって最初の商業的なユースケースや米国、中国、EU に対する地政学的な利点に固執するような視野狭窄を避けるべき。
- 責任ある（responsible）：持続可能性の研究、テクノロジーアセスメント、責任ある研究・イノベーション（RRI）の実践を行い、我々だけでなく将来世代の利益にも目を向け、意図しない結果を含む量子技術のありうる長期的影響を調査すべき。
- 文化的に組み込む（culturally embedded）：様々な文化的背景のもとで、量子技術の持つ意味を一般的なイメージで論じる市民のためにアウトリーチ活動や市民参加の機会を展開すべき。
- 意義のある（meaningful）：多様な社会的なニーズ、希望、関心に応え、産業界だけでなく社会にとっても意義のある応用に向けて量子技術の開発を誘導すべき。

ITAS では 2021 年から 2024 年まで"QuTec"（量子科学イノベーションと社会）と題する研究プロジェクトを実施中である[8]。このプロジェクトでは、量子技術の展望、イノベーションと変革への期待、量子技術の社会的側面に関する調査が実施されており、量子技術分野の研究者へのインタビューや「責任ある研究とイノベーション（RRI）」についてのワークショップが行われる予定であるという。また、量子テクノロジーアセスメントに関する今後の研究への提言も行う予定とのことである。彼らはナノテクノロジーに関する議論や経験を 1 つのレファレンスとして量子

[8] プロジェクトの詳細はウェブサイトを参照。
https://www.itas.kit.edu/english/projects_coen21_qutec.php

科学のガバナンスを検討している（Coenen and Grunwald 2017）。

10. 量子技術に関する文書のレトリック分析

オーストラリア研究会議（ARC）の Centre of Excellence for Engineered Quantum Systems のポスドク研究者であり、科学コミュニケーターでもある Roberson 氏は量子技術に関する様々な文書に対してレトリック分析を行っている。

1 つ目の論文において、新規技術が公共の利益（public good）をもたらすかどうかは初期段階での設計上の選択の影響を受けるという前提に基づき、イギリス、カナダ、アメリカにおける量子科学技術の国家戦略文書のレトリック（修辞学的）分析を行った（Roberson et al. 2021）。文書作成に関与した関係者（elite framers）へのインタビューも実施された。戦略文書は「量子競争（quantum race）」に関するもので、国家的な脅威や勝利といった狭いフレーミングが利用されがちであり、量子研究の成果を語るレトリックは起業家的なハイプ（誇張）に支配され、国家安全保障や大企業における応用に関心が寄せられてきたことを明らかにした。これらは、個々の物理学者のフレーミングと対照的であったことから、著者らは、量子研究コミュニティは、国家によるナラティブの代わりとなるナラティブを生み出し、研究によってもたらされる可能性のある様々な公共の利益（public good）の成果に関するパブリックダイアログのためのネットワークを広げることで役割を果たすことを提案した。

2 つ目の論文では、個々の研究者や研究機関のレベルでどのようなレトリックが用いられているのかを明らかにするために、2002 年から 2020 年の間に国の研究助成機関であるオーストラリア研究会議が助成した研究助成金の提案書のレトリック（修辞学的）分析を通じて、「量子技術」やその関連の概念がどのように出現し、この分野における未来ビジョンや期待をどのように形成したかについて考察された（Roberson 2021）。

11. 責任あるイノベーション概念の適用可能性

イギリスのオックスフォード大学のコンピューターサイエンスを専門とする研究員である Holter 氏らによって、責任あるイノベーション（RI）の考え方を量子コンピューティングに適用した実践の結果が報告された（Holter et al. 2021）[9]。これはイギリスの「量子技術ハブ（Quantum

[9] 関連する内容の論文に、Inglesant et al (2021)もある。著者の Holter 氏はさらに、責任あるイノ

Technology Hub）」内にある「責任あるイノベーション（RI）イニシアティブ」によって実施された実証的な作業（NQIT-RRI と呼ばれるプロジェクト）から得られた知見をまとめたものである。

調査は、半構造化インタビュー、ケーススタディに焦点を当てたワークショップ、そして最終的には「アクション・リサーチ」の手法を用いた一連の「RI ロードショー（RI roadshow）」、1 回限りのパブリックダイアログによって、イギリス内の 4 つの量子技術ハブすべてにおいて作業のデモンストレーションと普及を行うという多層的なものだった。ケーススタディでは、量子技術が将来的に応用されると予想されるユースケースとして、量子機械学習、国防と国家安全保障が取り上げられた。これらの調査の結果から下記のようないくつかの提言がなされた。

- 研究者から政策立案者へのより明確で直接的な経路を構築すべき。
- 社会とのより頻繁な、より詳細な対話を生み出すべき。
- 研究者のエンパワーメントを図るための分野横断的な学際的対話を支援すべき。
- 技術への幅広い、民主的なアクセスを確保すべき。
- グローバルな協力のための努力に参加すべき。
- 責任あるイノベーションの範囲を拡大すべき。
- 意見交換をするステークホルダーの幅を広げるべき。

12. 文献調査に基づき軍事応用の可能性を概観

チェコ工科大学の原子力科学及び物理工学研究科に所属している物理学者である Krelina 氏は、公開された膨大な文献情報をもとに、量子技術の軍事利用の可能性を検討し、応用分野ごとに現状と将来の可能性をまとめた（Krelina 2021）。量子テクノロジーは典型的なデュアルユース技術であり、防衛・安全保障産業や軍事・政府関係者の関心を集めている。量子技術は現代の戦争

ベーション（RI）の観点から、量子コンピュータの社会実装時に国家間、地域間、個人間でアクセスに不平等が生じる可能性に対して fairness や equity といった倫理原則をどのように中心に据えるかについて考察した論文も公表している。

のあらゆるドメインに影響を与え、それゆえ「量子戦争（quantum warfare）」につながり、新しい軍事戦略、教義、政策、倫理を確立する必要があるとする。以下の具体的な応用先について現状がまとめられた。

- 量子サイバーセキュリティ（防御と攻撃）
- 量子コンピュータ性能
- 量子通信ネットワーク
- 量子 PNT（測位・航法・タイミング）
- 量子 ISTAR（インテリジェンス・監視・目標捕捉・偵察）
- 量子電子戦争
- 量子レーダー＆ライダー
- 量子水中戦争
- 量子宇宙戦争
- 化学・生物学的シミュレーションと検出
- 新素材デザイン
- 脳イメージングとヒューマンマシンインターフェイス

量子技術は現時点では新たな兵器を生み出すものではないが、個別のアプリケーションを通して現在の軍事技術を向上させることで、攻撃面や警告面を改善し、意思決定の時間を短縮する効果がある。そのため世界平和への影響については不確実なことも多い。

本論文は公開情報に基づいたものであり、報告書やマスメディアの記事などでは、実現可能性に対して楽観的過ぎる記述があり、そういったものに影響を受けている可能性もある。逆に、機密情報として公開されていないものもあり過小評価している部分もあるかもしれない。また、価格情報（費用対効果）についても

おわりに

本 NOTE では主に 2021～2022 年に公表された量子技術の ELSI に関連する文献を 12 件、紹介

した。多様な人文・社会科学分野からの多様なアプローチがすでに実施されつつあることが分かった。取り上げた研究事例は、イギリス（第 1 節、第 11 節）、フランス（第 6 節）、スウェーデン（第 8 節）、ドイツ（第 9 節）、オーストラリア（第 4 節、第 10 節）、カナダ（第 7 節）、アメリカ（第 5 節）、チェコ（第 12 節）と地理的にもバラエティに富み、各国で ELSI に関連した研究が始まっていることが分かる。

世界経済フォーラムによる「量子コンピューティング・ガバナンス」プロジェクトがグローバルな議論を主導することを強く意図している。7 点のコア価値と 9 点のテーマが挙げられ、それぞれに目標・機会・リスク・原則・活動が提案された（第 2 節）。他にも、法学者による法的-倫理的観点からの 10 の原則が提案されたり（第 5 節）、社会実装の失敗を防ぐための実用的な提言がなされたり（第 9 節）、責任あるイノベーション実践のための提言なされたり（第 11 節）もしている。

また、フランスの QuantAplps プロジェクトに哲学者が参加していたり（第 6 節）、イギリスの量子技術ハブの中に「責任あるイノベーション（RI）イニシアティブ」が設置されていたり（第 11 節）、ドイツのカールスルーエ工科大学の”QuTec”（量子科学イノベーションと社会）というプロジェクトが実施されていたり（第 9 節）、量子科学の研究者と人文・社会科学者との協働がすでに始まっている様子も見て取れる。スウェーデンのルンド大学には「量子法プロジェクト」がすでに設置されているという（第 8 節）。量子コンピュータの専門家からの呼び掛け（第 3 節）や量子情報科学者による論考（第 4 節）など、量子科学の専門家からの問題提起もすでにいくつか見られる。人権の専門家からも注目されている（第 7 節）。軍事応用の可能性についても注目されている（第 12 節）。

研究の方法論についても、市民参加型ワークショップの実践と解析（第 2 節）や、国家戦略文書や研究助成金の提案書のレトリックの分析（第 10 節）、半構造化インタビューやワークショップ、アクション・リサーチ（第 11 節）など、多様なアプローチが実践されている。

量子技術の ELSI としては、少数のアクターに技術が独占される可能性が多くの文献で触れられている。また、デュアルユース技術としての側面も多くの文献において指摘され、セキュリティやプライバシーの側面がとりあげられている。また、社会とのコミュニケーション不足による過剰な期待（ハイプ）や過剰な恐れについての指摘もある。

ELSI への対応としては、事前に技術応用が社会に与える影響（リスク）を予測する取り組みの必要性ことが多くの文献で提案されている。具体的には「量子技術インパクトアセスメント」（第 2 節、第 5 節）や、人権への影響については「人権デューデリジェンス（HRDD）」などが挙げられる。

引用文献リスト

[はじめに]

肥後 楽、長門 裕介、鹿野 祐介（2022）．大学生を対象とした量子技術に関する印象の聞き取り調査．ELSI NOTE No.18、大阪大学社会技術共創研究センター、2022 年 6 月 30 日.

長門裕介（forthcoming）．「量子技術」、標葉隆馬、見上公一編『科学と社会」を学ぶ』（仮）、13 章、ナカニシヤ出版.

[第 1 節]

EPSRC (2017). Quantum Technologies Public Dialogue Report. Engineering and Physical Sciences Research Council. https://nqit.ox.ac.uk/content/quantum-technologies-public-dialogue-report.html

[第 2 節]

World Economic Forum (2022), Quantum Computing Governance Principles, Insight Report January 2022.　https://jp.weforum.org/reports/quantum-computing-governance-principles

[第 3 節]

The Quantum Insider (2021). Quantum Ethics | A Call to Action. https://www.youtube.com/watch?v=5qc7gpabEhQ　（2021 年 2 月 2 日公開）

Castellanos, Sara (2021).　Quantum Computing Scientists Call for Ethical Guidelines, The Wall Street Journal (Feb. 1, 2021) https://www.wsj.com/articles/quantum-computing-scientists-call-for-ethical-guidelines-11612155660

[第 4 節]

Perrier, Elija (2021, 2022）. Ethical Quantum Computing: A Roadmap, [Submitted on 1 Feb 2021 (v1), last revised 20 Apr 2022 (this version, v3)] https://arxiv.org/abs/2102.00759

[第 5 節]

Kop, Mauritz (2021). Establishing a Legal-Ethical Framework for Quantum Technology, Yale Journal of Law & Technology, March 30, 2021. https://yjolt.org/blog/establishing-legal-ethical-framework-quantum-technolog

[第 6 節]

Ménissier, Thierry (2022). The ethics of quantum technologies: a problematic formulation. QuantAlps Days, Oct 2022, Grenoble, France. ⟨halshs-03796455v2⟩ https://shs.hal.science/halshs-03796455/

[第 7 節]

Krishnamurthy, Vivek (2022). Quantum technology and human rights: an agenda for collaboration. Quantum Science and Technology 7. https://iopscience.iop.org/article/10.1088/2058-9565/ac81e7/meta

[第 8 節]

Jeutner,Valentin (2021). The Quantum Imperative: Addressing the Legal Dimension of Quantum Computers. 2021 Morals & Machines. 1(1), pp.52-59. https://doi.org/10.5771/2747-5174-2021-1-52

[第 9 節]

Coenen, Christopher, Grinbaum, Alexei, Grunwald, Armin, Milburn, Colin, and Vermaas, Pieter (2022). Quantum Technologies and Society: Towards a Different Spin. Nanoethics 16, pp.1–6. https://doi.org/10.1007/s11569-021-00409-4
Coenen, Christopher, Grunwald, Armin (2017). Responsible research and innovation (RRI) in quantum technology. Ethics and Information Technology 19, pp.277–294. https://doi.org/10.1007/s10676-017-9432-6

[第 10 節]

Roberson, Tara, Leach, Joan, and Raman, Sujatha (2021). Talking about public good for the second quantum revolution: analysing quantum technology narratives in the context of national strategies. Quantum Science and Technology, 6(2). https://iopscience.iop.org/article/10.1088/2058-9565/abc5ab
Roberson, Tara M.(2021).On the Social Shaping of Quantum Technologies: An Analysis of Emerging Expectations Through Grant Proposals from 2002–2020. Minerva 59, pp.379–397. https://doi.org/10.1007/s11024-021-09438-5

[第 11 節]

Holter, Carolyn Ten, Inglesant, Philip, and Jirotka, Marina (2021). Reading the road: challenges and opportunities on the path to responsible innovation in quantum computing.

Technology Analysis & Strategic Management.0:0, pp.1-16.
https://doi.org/10.1080/09537325.2021.1988070
Inglesant, Philip, Holter, Carolyn Ten, Jirotka, Marina. and Williams, Robin. (2021). Asleep at the wheel? Responsible Innovation in quantum computing. Technology Analysis & Strategic Management 33(11). https://doi.org/10.1080/09537325.2021.1988557
Holter, Carolyn Ten, Inglesant, Philip, Srivastava, Rupesh and Jirotka, Marina (2022). Bridging the quantum divides: a chance to repair classic(al) mistakes? Quantum Science and Technology 7(4). https://iopscience.iop.org/article/10.1088/2058-9565/ac8db6

[第 12 節]

Krelina, Michal (2021). Quantum technology for military applications. EPJ Quantum Technology 8(24). https://doi.org/10.1140/epjqt/s40507-021-00113-y

ELSI NOTE No. 24

量子技術の ELSI（倫理的・法的・社会的課題）に関する文献紹介 2021～2022 年を中心に

令和 4 年 12 月 19 日

大阪大学 社会技術共創研究センター
Research Center on Ethical, Legal and Social Issues

〒565-0871 大阪府吹田市山田丘 2-8
大阪大学吹田キャンパステクノアライアンス C 棟 6 階
TEL 06-6105-6084
https://elsi.osaka-u.ac.jp

大阪大学

Osaka University
Research Center on
Ethical, Legal and
Social Issues