OUKA
The University of Osaka
Institutional Knowledge Archive

Title	「量子の未来」をめぐる23の話題 : 株式会社メルカリ mercari R4D量子情報技術チームへの重点的グループインタビュー
Author(s)	森下, 翔; 肥後, 楽; 永山, 翔太 他
Citation	ELSI NOTE. 2023, 29, p. 1-135
Version Type	VoR
URL	https://doi.org/10.18910/92424
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.29

2023 年 8 月 17 日

「量子の未来」をめぐる23の話題

株式会社メルカリ mercari R4D量子情報技術チームへの重点的グループインタビュー

Authors

森下　翔	大阪大学 社会技術共創研究センター　特任研究員　（2023年8月現在）
肥後　楽	大阪大学 社会技術共創研究センター　特任助教 / 株式会社メルカリ mercari R4D リサーチャー　（2023年8月現在）
永山　翔太	株式会社メルカリ mercari R4D シニアリサーチャー　（2023年8月現在）
寺元　健太郎	株式会社メルカリ mercari R4D リサーチエンジニア　（2023年8月現在）
久保　健治	株式会社メルカリ mercari R4D リサーチャー　（2023年8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　（2023年8月現在）
鹿野　祐介	大阪大学 COデザインセンター／社会技術共創研究センター　特任助教　（2023年8月現在）
小林　茉莉子	株式会社メルカリ mercari R4D リサーチャー　（～2023年5月）
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　（2023年8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

重点的グループインタビューまでの経緯 3

重点的グループインタビューの概要 5

インタビューの書式について 7

カテゴリ 1：量子情報技術がもたらす変化をめぐる話題 8

話題 1. バイ・デザイン方式による社会的課題の解決 8
話題 2. 身近なアプリケーション 11
話題 3. 暗号化技術の発展によるセキュリティ課題の解決 14
話題 4. 従来技術に対する量子コンピュータの利点：素因数分解と最適化問題 19
話題 5. SDGs 等への貢献 27

カテゴリ 2：量子情報技術の克服すべき課題をめぐる話題 31

話題 6. テストベッド・エコシステムの構築 31
話題 7. 競争か、協力か？ 36
話題 8. 標準化の文化：デファクトとデジュール 41
話題 9. ベンチマーク：量子ボリューム 44
話題 10. 利用しやすいシステムとアーキテクチャの設計 53
話題 11. 量子の制御にまつわる困難 62
話題 12. 「広く薄くばらまく」段階と「選択と集中」の段階 66
話題 13. ELSI を含む量子情報技術ロードマップの作成 70

カテゴリ 3：量子情報技術の人材をめぐる話題 76

話題 14. 量子人材に必要なスキルセット 76
話題 15. 人材像の具体化 80
話題 16. 人材のサーキュレーションと日本の研究環境の特殊性 85
話題 17. 人文社会科学系を含めた量子人材の裾野の拡大 90

カテゴリ 4：公共における量子のイメージをめぐる話題 96

話題 18. パブリックダイアログの実施による量子イメージの現状把握 96
話題 19. 文学やフィクション等による社会的イメージの形成と普及 102
話題 20. ハイプ（過剰な期待）とロックイン 109

カテゴリ 5：量子情報技術の懸念をめぐる話題 115

話題 21. 悪用・ハイリスク利用・デュアルユース 115
話題 22. 境界的領域・擬似科学の生成 122
話題 23. 格差や不平等の拡大 126

参考文献 129

本 Note は、2023 年 1 月～2023 年 3 月に実施された、mercari R4D 内の量子情報技術チームへの重点的グループインタビューの報告である。

重点的グループインタビューまでの経緯

大阪大学社会技術共創研究センターの mercari 共創研究チームは、2021 年 6 月より、量子情報技術についてのテクノロジー・アセスメントへ向けて、mercari R4D の量子情報技術チームとミーティングを開始した。

2022 年 11 月、議事録のコーディングおよびカテゴリゼーションに基づき、それまでの量子チームとの議論を整理することにより、量子 ELSI 論点集の素案を作成した（図 1 上部の「インタビューを始める前の段階での論点・カテゴリ」）。この論点案に基づき、12 月～1 月期に重点的グループインタビュー[1]を実施、それぞれの話題について議論を深め、議論の深化の度合いに応じて論点とカテゴリの再編成を行った（図 1 下部の「インタビュー終了後に再整理された論点・カテゴリ」）。

2022 年 1 月末より、森下と肥後がインタビューデータの整理を開始した。最終的に、23 の話題が 5 つのカテゴリに分類されている。それぞれのカテゴリは読みやすさを考慮した大まかなものであり、相互に重複しないものでもなければ網羅的なものでもないことに注意されたい。

カテゴリ 1 では、「量子情報技術がもたらす変化をめぐる話題」として、主に量子情報技術の発展が社会にもたらしうるポジティヴな影響についての話題を集めている。カテゴリ 2 では、「量子情報技術の克服すべき課題をめぐる話題」として、そのような発展のために克服しなければならない課題についての話題を集めている。カテゴリ 3「量子情報技術の人材をめぐる話題」では、量子情報技術の発展のために必要な人材についての話題を集めている。カテゴリ 4「公共における量子のイメージをめぐる話題」では、公共における量子のイメージをめぐる話題を集めている。カテゴリ 5「量子情報技術の懸念をめぐる話題」では、主に量子情報技術が社会にもたらしうるネガティヴな影響についての話題を集めている。

[1] ミーティング形式で実施された本対話を、インタビューと呼ぶべきかどうかについては議論があった。対話あるいはダイアログと呼ぶことがふさわしいのではないかという意見もあったが、おおむね量子に関する話題について、量子情報技術の非専門家である ELSI センター側研究者の質問に対して、専門家である mercari R4D 量子情報技術チームの研究者が回答するという形式を取っている点を鑑み、（社会学的・人類学的意味での）インタビューと呼ぶことが適切であると考えた。社会学・人類学において、インタビューは単に「回答者の考えを聞き取る」行為ではなく、「質問者と回答者の相互作用の結果として作り上げられる対話」であると考えられており、本 Note もそのような意味で「インタビュー」の語を用いている。

インタビューを始める**前**の段階で整理された論点・カテゴリ（**実際にインタビューを行った話題の順番**）

カテゴリ1：量子技術の発展	カテゴリ2：社会の期待やハイプとの向き合い方	カテゴリ3：人材育成	カテゴリ4：社会実装によるベネフィットとリスク
話題1 制御の困難さの克服	話題7 パブリックダイアログの実施による量子イメージの現状把握	話題13 テクノロジーアセスメントの実施による人材像の具体化	話題19 バイデザイン方式による社会的課題の解決
話題2 量子技術の国際標準化	話題8 文学やフィクションを含めた社会的イメージの形成と普及	話題14 文系・社会実装の専門家を含めた量子人材の裾野の拡大	話題20 SDGs等既存の課題の解決への寄与
話題3 ロードマップの作成	話題9 健全な期待に基づくポスト・研究資金の充実	話題15 継続的に人材を育成できるスキームの確立	話題21 暗号化技術の発展によるセキュリティ課題の解決
話題4 海外動向のキャッチアップと優位性の確立	話題10 特定のイメージの定着によるロックイン	話題16 官公庁の量子人材の定着	話題22 暗号化技術のセキュリティを脅かす可能性
話題5 身近なコモディティ技術の生産	話題11 境界的領域・擬似科学の生成	話題17 量子人材に必要なスキルセットの構築	話題23 ハイリスク利用・デュアルユース
話題6 テストベッド・エコシステムの構築	話題12 「あやしげな科学」としてのイメージの定着	話題18 人材交流拠点の形成	話題24 格差や不平等の拡大

↓

インタビュー終了**後**に再整理された論点・カテゴリ（**本Noteに掲載の話題の順番**）

カテゴリ1：量子情報技術がもたらす変化をめぐる話題	カテゴリ2：量子情報技術の克服すべき課題をめぐる話題	カテゴリ3：量子情報技術の人材をめぐる話題	カテゴリ4：公共における量子のイメージをめぐる話題	カテゴリ5：量子情報技術の懸念をめぐる話題
話題1 バイ・デザイン方式による社会的課題の解決	話題6 テストベッド・エコシステムの構築	話題14 量子人材に必要なスキルセット	話題18 パブリックダイアログの実施による量子イメージの現状把握	話題21 悪用・ハイリスク利用・デュアルユース
話題2 身近なアプリケーション	話題7 競争か、協力か？	話題15 人材像の具体化	話題19 文学やフィクション等による社会的イメージの形成と普及	話題22 境界的領域・擬似科学の生成
話題3 暗号化技術の発展によるセキュリティ課題の解決	話題8 標準化の文化：デファクトとデジュール	話題16 人材のサーキュレーションと日本の研究環境の特殊性	話題20 ハイプ（過剰な期待）とロックイン	話題23 格差や不平等の拡大
話題4 従来技術に対する量子コンピュータの利点：素因数分解と最適化問題	話題9 ベンチマーク：量子ボリューム	話題17 人文社会科学系を含めた量子人材の裾野の拡大		
話題5 SDGs等への貢献	話題10 利用しやすいシステムとアーキテクチャの設計			
	話題11 量子の制御にまつわる困難			
	話題12 「広く薄くばらまく」段階と「選択と集中」の段階			
	話題13 ELSIを含む量子情報技術ロードマップの作成			

図 1 量子 ELSI 論点概要図

重点的グループインタビューの概要

表 1　重点的グループインタビューの概要

	日時	主な議題となった（本 Note での）話題番号	参加者	備考
第 1 回	2022 年 12 月 7 日	話題 9, 11	森下・肥後・長門・鹿野・岸本・カテライ・永山・寺元・久保	
第 2 回	2022 年 12 月 14 日	話題 2, 6, 17	森下・肥後・長門・鹿野・岸本・永山・寺元・久保	録音データなし
第 3 回	2022 年 12 月 21 日	話題 10, 13	森下・肥後・長門・鹿野・岸本・カテライ・永山・寺元・久保	
第 4 回	2022 年 12 月 28 日	1.話題 155	森下・肥後・長門・鹿野・岸本・永山・寺元・久保	
第 5 回	2023 年 1 月 11 日	話題 7, 12, 14, 15, 17	森下・肥後・長門・鹿野・岸本・永山・寺元・久保	
第 6 回	2023 年 1 月 18 日	話題 18, 19, 20, 22	森下・肥後・長門・岸本・永山・寺元・久保	
第 7 回	2023 年 1 月 25 日	話題 1, 3, 5, 21, 23	森下・肥後・長門・鹿野・岸本・永山・寺元・久保	第 7 回までで一次聞き取り終了。第 8 回～第 10 回は追加聞き取りの位置づけで、全体を振り返ったうえで、第 7 回までに十分な聞き取りができなかった点を聞き取るために実施した。

第 8 回	2023 年 2 月 8 日	話題 9, 10, 16	森下・肥後・長門・鹿野・岸本・永山・寺元・久保	
第 9 回	2023 年 2 月 14 日	話題 4, 14	森下・肥後・長門・鹿野・岸本・永山・寺元・久保	
第 10 回	2023 年 3 月 1 日	話題 8	森下・肥後・長門・岸本・永山・寺元・久保・小林	この回のみ小林が参加し、標準化について議論した。

インタビューにおける主な質問者は森下であった。各インタビュー前には、森下と肥後がミーティングを行い、各話題について質問内容を大まかにとりまとめた。

それぞれの話題ごとに、インタビューの録音書き起こしに基づき内容を再構成したうえで、読みやすさのために会話の前後を入れ替える、分量が長くなりすぎない形に省略する、インタビュー内容が話題から逸れている場合には内容に合った話題に移動する・新しい話題を作る、などの編集を適宜加えたものとなっている。ただし、第 2 回の記録については録音が残っていないため、話題 2・6・17 については議事録をベースとした再構成となっている [2]。編集の過程で話題の順序を大きく組み替えたため、インタビューにおける議題の順番と本ノートにおける話題の順番は異なっている [3]。

第 3 回インタビューにて、本インタビューを下に ELSI Note の形式で報告することが決定された。第 4 回まではとくに時間制限を設けず議論を進めていたが、第 5 回インタビューにて 1 つの話題につき 10 分〜15 分程度で議論することを決めた。

実際の会話データの編集作業は森下・肥後が担当した。録音データの文字起こしは、まず森下が OpenAI の書き起こしソフトウェア「Whisper」（Open AI 2023b）を用いて文字起こしを行ったうえで、森下と肥後が録画・録音を視聴し、書き起こし内容の確認・修正・編集をした。その後、それぞれの話題について簡単な背景を「話題の背景」として記したうえで、3 月〜7 月に

[2] この再構成に限らず、インタビューの書き起こしに際しては、リアルタイムに記録された議事録が非常に参考になった。議事録を記録された mercari R4D のメンバーには厚く感謝申し上げる。

[3] したがって、本 Note は単純なインタビューの書き起こし記録ではない。実際の録音記録は話題ごとに編集され、理路整然とした内容になるよう再構成されたものであることに留意されたい。

かけて mercari R4D 量子情報技術チームとともに事実関係等を確認し、必要な部分にさらなる修正を加えている。

インタビューの書式について

読みやすさのため、インタビューにおける主要な質問部分および重要語句・重要な発言を**太字**としている（主要な質問部分については、発話者名も**太字**）。阪大側と mercari R4D 側の発話者を区別できるよう、mercari R4D 側の発話者による発言部では、発話者名を囲み線で囲っている（とくに永山・寺元・久保は量子情報技術の専門家である点に留意されたい）。インタビューの中であらわれる専門用語等については、適宜脚注および参考文献を付した（キッコウカッコ〔〕は著者による補足をあらわす）。ひとつの話題の中で大きく話題が転換している場合、区切り線を入れている。各話題を独立して読むことが出来るよう、注の内容が重複している場合もあるが、ご容赦願いたい。

カテゴリ 1：量子情報技術がもたらす変化をめぐる話題

話題1. バイ・デザイン方式による社会的課題の解決

話題の背景

バイ・デザインとは、プライバシーやセキュリティについての対策を製品開発後に行うのではなく、製品の企画や設計（デザイン）の段階から組み込むという発想である[4]。**EU 一般データ保護規則**（General Data Protection Regulation; GDPR）[5]では、バイ・デザインの考え方に基づき、データの保護措置を設計段階から考慮に入れることを求めている（第 25 条）。

永山は、これまでの技術では、究極的には業務従事者の良心に頼らざるをえなかったプライバシーの確保やセキュリティ上の課題を、量子技術によって技術的に、原理的に解決できるようになる可能性があるのではないか、と話す。

森下　**――バイ・デザイン方式について。「契約などで縛らなくても、技術によって実現できることがあるのであれば技術で実現した方が良いだろう」と〔本インタビュー以前の大阪大学 ELSI センターと mercari R4D とのミーティングで〕永山さんがおっしゃられていたことがありますが、それはプライバシー・バイ・デザインなどの考え方と似ています。**

永山　そうですね。僕がバイ・デザインについて話したのは、まさにプライバシー・バイ・デザインやセキュリティ・バイ・デザインのような話でした。量子もそこに貢献できることがあるから、ちゃんとそういうふうに社会実装したいよねと。

森下　**「量子のバイ・デザイン方式による社会実装」について、具体的にはどんなことをイメージされていますか。**

---

[4] カナダ・オンタリオ州の情報・プライバシーコミッショナーであったアン・カブキアンにより提唱された「プライバシー・バイ・デザイン」の 7 つの原則についてはカブキアン（2011）を参照のこと。

[5] GDPR の詳細については個人情報保護委員会（n.d.）を参照のこと。

永山　従来の技術では、クラウドを使った計算は暗号化されていない計算になります。なぜ従来の情報技術では暗号化していないかというと、任意の計算を暗号化して行おうとすると、計算量がすごく増えちゃって現実的に実行できないんですね。だから、〔暗号化されていない〕デジタル技術でのクラウドでの計算はその気になったら管理者とかは見れてしまうんだけど、契約で見ないことになってるわけですよね。

だけど、契約で縛るというのは、その気になったら悪いことできちゃうし、ヒューマンエラーとかは完全に防げるわけではない。なので、本来は技術的にそういうことできないようになっているのが一番よい。で、量子インターネットのクラウド技術だと暗号化した場合に効率的にやれるっていう話があり。システムアーキテクチャ上、正しい設計はそっちのはずだと。

寺元　既存のものでも、管理者が極力重要なデータを見ることができないようなアーキテクチャを作るんです。それでもごく稀に漏れちゃうんですよね。

永山　原理的には〔悪意の個人による攻撃や悪用が〕可能。

寺元　普段の開発は本番の環境とは別の環境でやっていて、多くの人がそこで開発して動作を確認しています。動くようになったら本番環境の本当に重要なデータが入ってるデータベースをつないで使用する。その時に、そこのデータベースに触れるのは本当に一部の人だけで、アクセスする際にはすべてログが残る、というような仕組みを作ることが多いです。ただですよ、その限られたアクセス権をもっている数人を狙って攻撃がやってくるんです。

永山　攻撃者も原理的には不可能ではないから攻撃するわけで。その原理的に可能な隙を狙ってくる。だからもう原理的に不可能にしちゃうのがバイ・デザインで。

森下　バイ・デザインと人材の話を絡めてお聞きしたいのですが、「量子によってセキュリティの問題やプライバシーの問題をバイ・デザイン方式で解決することができるのではないか」と以前永山さんはおっしゃっています。そういうことをするのであれば、企画・設計の開発の初期の段階から人文系のプロフェッショナルの人がプロセスに入ってないと難しいのではないかと思います。

技術が生み出す法的な課題を後から法学の専門家が検討するのではなく、製品を製

造する段階から、セキュリティやプライバシーに関する専門家が開発に入っているというイメージで考えていたんですが、そういう可能性はありえますか？

永山　入った方がいいんじゃないですか？ヒューマンエラー減らす方向とか、ヒューマンエラーが問題なくなる方向とか、間違いなく良い方向に進む筈です。そこに賛同していただける方というのは必ずいると思いますし、むしろ入っていただいた方がいいと僕も思いますね。

森下　反対があるとすれば、スピードが遅くなるという事がありそうです。つまり、関係する人間の数が増えるので、その分だけ開発のスピードに遅れが出てしまい、競争に勝てなくなるのではないかという懸念です。一方で、このような専門家が参画することは、競争力の源泉にもなり得るのかなとも思います。

永山　そう思います。古典の OS とかコンピュータも結局使いやすいものが残ってきているわけだから。Apple のマッキントッシュがここ 10 年くらいでぐーっと伸びているのもそういうことですよね。デザインの勝利ですね。「とりあえず作ってみよう」という流れを差し止めてしまった場合は開発のスピードは遅くなると思いますが、とはいえより良いものが出来ているときに、人文社会科学系の方が「それは我々の考えているバイ・デザインが入ってない」と言って止める可能性はどの程度あるのだろうか。

森下　専門家ですから、良心に基づいて止めるべきだと考えたら口を挟む人はいるかと思いますね。

話題2. 身近なアプリケーション

話題の背景

量子情報技術が社会にとって身近なものになるためには、一般ユーザが利用できる、直感的に分かりやすいアプリケーションがあるとよいと考えられる。最近 AI がこうした方向性で著しい成功を収めていることを背景に、量子でも同じように身近なアプリケーションの可能性がないかを尋ねている。ナノテクノロジーの先例は、自由な市場においては必ずしも科学的に信頼できる商品ばかりが流通するわけではないことを示唆している。

森下　いま〔2023 年 1 月現在〕生成 AI[6]が大人気ですが、ああいう感じで一般ユーザが使える量子技術をイメージすることはできますか。妄想レベルでもいいのですが。

永山　妄想レベルだと、（量子）暗号をみんな使っている世界。

久保　一般ユーザが意識して使うんだろうか。

永山　意識せずに使わせられれば大勝利、意識せずに使えるように開発できたという話で、量子もそこまでもっていきたい。

久保　AI は分かりやすいアプリが出てき始めている。いっぽう、スパコンが何しているのかは知らない人がほとんど。量子コンピュータもそういう感じで、それを意識することってあまりない。

森下　インフラになっていくものが多いっていうことですかね。インフラ化以外の可能性はあると思いますか。

---

[6] SNS では当時、OpenAI による DALL-E2 などの画像生成 AI や ChatGPT が話題となっていた。
DALL-E2：https://openai.com/dall-e-2
ChatGPT：https://chat.openai.com/

永山　量子センサを頭につけるとか？

寺元　BCI[7]とかの文脈が量子に来るのかどうか。

永山　脳から本当に欲しいものとか知られたくない。プライバシーがあぶない。

森下　最近は BCI も ELSI 界隈では話題になっています。

岸本　まさにうち〔阪大 ELSI センター〕は共同研究やってます。顔認識関連だと、考えていること、政治的指向や犯罪傾向を顔の情報から勝手に読み取れるといったような、怪しい論文も出ている[8]。脳は直接つなげなくてはいけないので、勝手にはできない。顔は外から読み取れるので、プライバシー侵害はそちらのほうが懸念されている。間接的に脳波や心拍が読めるんじゃなかったかな[9]。

森下　量子の医療応用の可能性はあると思いますか？

永山　あります。量子情報・量子生命研究センターっていうのがあるくらいです[10]。

久保　量子生体マーカーみたいなものを作るという話があります。

岸本　比べたくなるのはナノテクノロジー（ナノテク）で、いまの量子のようにブームが起こったとき、日用品から入った。日焼け止めとか化粧品、テニスラケットとかボーリングとか。そのころナノテクにかかわっていたので、ドラッグストアにいって 1000 個くらいあったのを集めた。イメージだけでナノって言っているやつなんかもあって、かなりカオスな状況になっていた。ナノテクとの比較は面白そう。動物実験でカ

---

[7] Brain Computer Interface の略（Brain Machine Interface; BMI とも呼ばれる）。BCI あるいは BMI とは、「脳と外界との情報の直接入出力を可能とする技術」（JST CRDS 2007: i）あるいは「脳と機械を人工的に接続する」（川人・佐倉 2010:21）技術であり、さまざまな ELSI が生じることが懸念されている。

[8] アメリカ合衆国のハリスバーグ科学技術大学の研究者によって書かれたこの論文は、抗議を受け最終的に非公開とされた。顛末については WIRED の記事を参照のこと（WIRED 2020）。

[9] ホームズは、顔認識以外の、本人への侵襲的な介入抜きに利用することができるバイオメトリクスを用いた認識技術について紹介している（Business Insider 2019）。

[10] 大阪大学量子情報・量子生命研究センター（QIQB）（2023）。

ーボンナノチューブに発がん性が指摘されたことでナノマテリアルの過剰なブームは収まったけれど[11]、そのときに知名度が高まった。

森下　目に見えないからあることないこと言える面があるわけですね。

長門　そういう話は擬似科学の話ともリンクするように思います。最近中国では量子〇〇といったグッズが出ている[12]。美顔器とか健康グッズや浄水器。規制当局が怒っていて。

岸本　コモディティ化するとボーダーライン上のものがいっぱい出てくる。

久保　医療応用とかのほうが分かりやすい。

寺元　薬の話とかは最初に出てきてほしい。

[11] Takagi et al. (2008) による報告。当時毎日新聞等でも報道された（毎日新聞 2008）。
[12] 東方新報による報道。https://www.afpbb.com/articles/-/3352878

話題3. 暗号化技術の発展によるセキュリティ課題の解決

話題の背景

暗号化技術は本 Note 公刊時点で量子技術の具体的かつ有力な応用領域とみられている。

1. **量子鍵配送ネットワーク（Quantum Key Distribution (QKD) Network;「量子暗号ネットワーク」とも呼ばれる）**は、光子を用いて暗号鍵を配送・共有する技術であり、2000年代より国内の量子情報技術分野での研究が進められてきた。QKD の安全性には論争があり、米国国家安全保障局（National Security Agency; NSA）等はデータ転送保護のために QKD を使用することを非推奨としているが（本文参照）、異論も存在しており[13]、中国などでは QKD Network の整備が進められているほか、ITU-T[14]などの標準化活動においては QKD のプレゼンスも小さくない（標準化活動については話題 8「標準化の文化：デファクトとデジュール」も参照）。

2. 現行の暗号技術のひとつである **RSA 暗号**は、大きな桁数を持つ数の素因数分解を現実的な時間（多項式時間[15]）で解くことが困難であることを安全性の根拠とする暗号化技術であるが、量子コンピュータは理論上素因数分解を現実的な時間で解けるようにしてしまい、将来的に RSA 暗号の安全性を脅かすと考えられている[16]。このような量子コンピュータによる脅威に耐性を持つ古典暗号形式は**耐量子計算器暗号**（Post Quantum Cryptography; **PQC**、ポスト量子暗号、あるいは単に**耐量子暗号**とも）と呼ばれている。米国の国立標準技術研究所（National Institute of Standards and Technology; NIST）では、ポスト量子暗号の標準化プロセスを開始している（National Institute of Standards and Technology 2023）。

---

[13] たとえば佐々木(2022)。

[14] International Telecommunication Union Telecommunication Standardization Sector。国際電気通信連合電気通信標準化部門。

[15] 計算時間にかかわる概念として、**多項式時間**と**指数関数時間**について紹介しておく。計算量は一般にデータの量 N に応じて増加する。ある計算にかかる時間が、N に関する多項式で表現される計算が多項式時間の計算である。同様に、N に指数関数で表現される計算が指数関数時間の計算である。N の増加に対して、指数関数時間は多項式時間よりも爆発的に増加するため、一般に指数関数時間の計算は実時間での計算が困難であるとされる。

[16] 楕円曲線暗号、あるいは AES 等既存の方式による共通鍵暗号についても、量子コンピュータに対する脆弱性が指摘されている（清藤・四方 2019）。

森下　――まず量子暗号化とは何か、またどこまで進んでいるのかというのをお聞かせいただければと思うのですが。

永山　暗号化に関してはいくつか話があって。古典ビットを量子技術で暗号化しようという話と、量子ビットを量子技術で暗号化しようという話がありますね。

で、結局量子ビットと古典ビットの違いの話で、今の話と共通すると思うんですけど、古典ビットとかデジタルデータって、やっぱりコピーが容易な所に強みが活かされていることがよくありますよね。一方で量子ビットってコピーできないんですね。非クローン定理で。セキュリティ的にはそこがマッチしてて。勝手に鍵を複製されないみたいな。

森下　なるほど。

永山　正確には鍵の複製ではないんですけど、鍵を作るための量子もつれの複製とか、量子ビットの複製とかっていう話になるので。量子ビットの特徴がすごい活きてるのが暗号分野ですね。

その秘匿性を担保するための技術というのはまずもちろんあります。盗聴を防止するためのね。で、相手がまさに通信したい相手なのか、本当に正しい相手と通信しているのか。認証という話もセキュリティの重要なポイントで、そっちも理論上は提案されている。だけど、現在の量子暗号ネットワークでは実現されてない。

森下　**「現在の量子暗号ネットワーク」**って何ですか？

永山　**QKD** です。「量子鍵配送」と呼ばれる量子暗号のことですね。量子インターネットが量子通信の究極の形ではあるんですけど、それって実現するのが難しかったんです。なんで難しいかっていうと量子信号中継がすごく難しくてできないから。10 年前、15 年前くらいには、すぐの実現性はなかったんですよね。量子コンピュータ技術の発展に伴って量子中継も出来そうになっているから、実際実証もされているんですけど、今となっては量子インターネットも出来そうじゃんという流れがある。

一方で、量子インターネットとか、量子データを通信するようなタイプのネットワークを作るのが難しいから量子信号中継を諦めよう、すぐ目の前（の未来）でやるのを諦めようと。1 リンクごとに、1 つ目から次のルータまでの間で量子技術で鍵を作

り、次のリンクではまた別の鍵を作り…という風にすると、各ルータにはたくさん鍵が出てくるわけですけど、それでも組み合わせでネットワーク作れるんじゃないか?という試みをした人たちがいるんですね。それが今、量子暗号ネットワークって呼ばれてて。

森下　なるほど。QKD に力を入れるのは世界的な流れですか？

永山　全世界的というわけではない。残念ながら。米国は「QKD は NSA は推奨しません」と言ってますし [17]。英国も NSA じゃなくてどこだっけ。公開のドキュメント出てますよ。このへんに疑義があるみたいな [18]。

Technical Limitation って言ってますね。共有秘密鍵を作るということしかしていないというのが 1 つ目かな [19]。2 つ目が専用のデバイスとかマシンインフラが必要になる。3 つ目、Trusted node、だから、全てのルータとかが信頼できなきゃいけない。安全になるのは光ファイバーに対する盗聴だけなので、別にそれが安全にならないよねという話。4 つ目が検証（Validation）。今の暗号通信の仕組みって、ものすごいいろんな検証されてるわけですけど QKD はまだそれ相当ではない。全然使い込まれてないので、検証も困難だっていう話ですね。5 つ目が Denial of Service（DoS）[20]か。盗聴が QKD に対する妨害、鍵共有の動作の妨害になっちゃうんで。使えなくなるっていうのはすごいリスクだから。セキュリティの 3 大要素の一つは Availability（可用性）と言われるぐらいなんで、そこに対する攻撃が容易だというのはコンフィデンシャリティを高めようとも、トレードオフとして適切なのかという話なんじゃないか

---

17 National Security Agency/Central Security Service (n.d.)

18 英国サイバーセキュリティ・センター（National Cyber Security Centre; NCSC）。政府や軍事応用での QKD の使用を非推奨とし、ビジネスにおける使用でも、とくに重要国家基盤（Critical National Infrastructure）に関連するセクターにおいては、QKD のみに依存することに警告を発している（National Cyber Security Centre 2020）。

そのほか、欧州では欧州ネットワーク・情報セキュリティ機関（European Union Agency for Cybersecurity; ENISA）から「ポスト量子暗号：現状と量子ミチゲーション（Post-Quantum Cryptography: Current state and quantum mitigation）」というレポートが発行されており、QKD については意図的に参照を避けているとの言及がなされている(ENISA 2021: 29)。フランスの国防安全保障事務局は、セキュアな QKD ネットワークの構築にはスケーラビリティに関する問題があると指摘しており、ポスト量子古典暗号の使用のほうがデータ保護の観点からも望ましいとしている。

19 なお NSA の 1 点目の指摘には QKD は送信元の認証手段を提供しないという論点が含まれている。この認証について PQC のような情報理論的安全性をもたない認証鍵を使用する方法が考案されているが、このような認証鍵を用いる場合には、（QKD によって実現が見込まれる）情報理論的安全性を確保するためには実装に注意が必要であるという指摘もある（Pacher et al. 2016）。

20 DoS 攻撃とも。「ウェブサイトやサーバに対して過剰なアクセスやデータを送付するサイバー攻撃」を指す（NTT Communications n.d.）。

な。

森下　アメリカ合衆国は何を推しているんですか？

永山　アメリカは 1 つが **Post Quantum Cryptography**、古典の方の耐量子暗号。

森下　古典の量子耐性を発展させようっていうのには量子の技術はいらないんですか？

永山　そこはもう今の計算機上の話ですね。量子でも解けない問題を使って暗号を作ろうっていう話ですね。素因数分解問題を使って RSA を作ったように、素因数分解は量子で解けちゃうんだけど、じゃあ量子で解けない問題、別のやつ持ってこようっていう。

量子暗号、量子とセキュリティの分野は特殊で、逆にセキュリティ分野の方が冷静というか、量子をそんな信用していない部分があるんで、量子暗号側が「必要です」って盛り上げようとしても、セキュリティ側が乗らないみたいな状況ですね。

岸本　アメリカで発出された大統領令[21]は Post Quantum Cryptography しかないですよ。

永山　NIST が結構何年も前から標準化を進めようとしている。

岸本　そうそう。まさにその文脈。いや、これ面白いな。なんでこんなことになってるのか。

永山　アメリカは懐疑的だけど、逆に中国 QKD 結構推してて[22]。2000 キロ、QKD ネットワークをつくるっていう。中国の国内、縦 4 本横 3 本みたいな QKD ネットワークを作ろうとしているとか。中国の思惑としては、さっきの Trusted node が危険だっていう話は、軍の基地にすればいいだろうと。それはよく言われてるんですよ。ノードにアクセスできないようにしたらいいじゃないかみたいな。物理セキュリティ高めよ

---

[21] 2022 年 5 月に発出された、バイデン大統領による量子情報科学への 2 つの大統領令（The White House 2023）。NIST へ「PQC への移行プロジェクト」（cf. National Institute of Standards and Technology 2023）の設立が指示されている。

[22] CRDS による 2021 年の海外記事（中国科技網；CSTNET）の翻訳を参照のこと（CRDS 2021）。「中国、天地一体化量子通信ネットワークの建設に成功」「中国の科学者は、量子暗号通信の「京滬（北京―上海）幹線」と「墨子号」量子科学実験衛星を利用して、世界最初の 700 余本の地上光ファイバー量子鍵配送リンクおよび自由空間高速量子鍵配送リンクを集積させた広域量子通信ネットワークを完成させた」。

うっていう。それに向けたサイバー攻撃はまた別にあるよねって話なんだけど。Trusted Node の QKD はファイバーの上は確かに量子暗号使ってるんで、ファイバーに対する盗聴には強いんですけど、ルータとかに対する盗聴やネットワークオペレータや組織に対するソーシャルアタックには弱い。量子セキュリティ分野側の主張にも一定の理解は出来ますが、セキュリティ分野側が納得して積極的に推進したくなる形で量子セキュリティを実現してやる必要があります。数年前に IETF の参加者から「量子（暗号）は信用してない」とはっきり言われたことがあります。僕自身の取り組みとしても、学生時代に、QKD を IPsec（インターネットの暗号プロトコルスイート）で利用するための拡張規格を IETF で作ろうとして、うまく理解を得られなかったことがあります。こういう社会実装先の専門家の理解を得られる使い方、説得プロセスかもしれませんが、そのような使い方もきっとあるはずで、それを見つけることが肝要に思います。

僕自身がやりたい量子の暗号の話だと、やっぱり量子インターネットに行き着くんですよね。量子インターネットの場合は、中継ノードが鍵を知ることはないので。それが、インターネットが想定している安全性なんですよ。ファイバーに盗聴者がいても平気だし、間のルータが攻撃されても平気だし、ということになる。

話題4. 従来技術に対する量子コンピュータの利点：素因数分解と最適化問題

話題の背景

従来技術に対する量子コンピュータの利点について、**素因数分解**と**最適化問題**を例に尋ねている。

話題 3 にも記したように、現行の RSA 暗号は素因数分解を現実的な時間で解くことができないことを安全性の根拠としている。量子コンピュータでは素因数分解を理論上現実的な時間で解くことができるアルゴリズムが知られており、セキュリティ上の課題となっていると同時に、量子コンピュータによるイノベーションの鍵となると考えられている。そのほか、さまざまな応用の可能性を持つ**逆行列計算**も、量子コンピュータによって高速化できることが知られている。

量子コンピュータを用いることで、**組合せ最適化問題**を高速化できる可能性があるとみられている。**量子アニーリングマシン**は組合せ最適化問題への適用・高速化を目的とする量子計算機であるが、高速化が理論的に保証されているわけではない（西森 2022）。

森下　古典コンピュータと量子コンピュータの違いについて教えていただけますか。つまり「量子コンピュータによって、何がよくなるの？」っていう話です。

永山　一言で言うと、どっちが優れているではなくて補完関係だと思います。古典ではできないことが量子コンピュータにはできる。ただし量子コンピュータは高コストなんで、古典コンピュータを使いたいケースの方がいろいろ多いでしょうとか、量子コンピュータを使うためにそもそも古典コンピュータがシステムの中に必要、そういう関係ですね。

量的な話と質的な話がきっとあって、古典コンピュータより速くできるっていうのは量的な話ですよね。例えば絶対盗聴できないっていうのは質的な転換になっていて。基本はその 2 つだと思います。量的な話っていうのも速くなるというだけじゃなくて、速くなるというのが 1 万年とか 100 万年とかだったら、実質的には質的転換になっていますよね。人類が生きている間、現実的な期間になるので。

森下　セキュリティや暗号化に関して今まで伺ってきましたが、他によく出てくるキーワードとして、1 つは量子コンピュータは**素因数分解**ができるっていう話があると思います[23]。またもう 1 つ、量子コンピュータは**最適化問題**に貢献しうるのではないかみたいな話がよく出てくるんですけど、これらについて教えてもらいたいなと。専門的になりすぎずに話していただくのは難しいかなとも思いますが、いかがでしょうか。

久保　（分かりやすく）素因数分解と言っていますが、素因数分解は周期を求める問題として抽象化することができます。そして**周期を求める問題を、量子コンピュータは速く解けるということが知られています。**

量子コンピュータで速く計算できるというのは、量子コンピュータにとって都合の良い性質を持っている問題の場合、古典コンピュータと比べて速く計算できるということです。素因数分解はその最たる例です。そういう都合の良い性質を持った問題は高速に解けます、というのが一般的な話です。素因数分解と、いわゆる逆行列計算[24]の 2 つがめちゃくちゃ計算速くなる例です。

今はさらに Unified Theory[25]みたいなのがあって、実は全部これに帰着するみたいな話もあったりする。アブストにありますけど、それらのアルゴリズムを超一的見解で、何というか Grand Unification 論文って呼ばれたりするんですけど、実は一つのアルゴリズムで解釈できます、というのがあります。そういう意味でいうと、Grand Unification の話が 1 個あって、グローバー[26]も、ショアも、HHL も、それの特殊な例っていう言い方をすることも最近はたまにあります。

最適化に関して言うと、最適化問題って実は種類がたくさんあって、その中でも量子コンピュータの方が速く解けることが理論的に知られている問題はあります。小さい問題で比較しちゃうとわかりにくいんですけど、めちゃくちゃ大きい問題を考えると、差がどんどん大きくなっていって…

---

[23] 量子コンピュータにより素因数分解を多項式時間で解くアルゴリズムとして、「ショアのアルゴリズム（Shor’s Algorithm）」が有名である（IBM Quantum 2021）。

[24] 量子コンピュータを用いて逆行列を多項式時間で計算するアルゴリズムとしては、「HHL アルゴリズム（Harrow-Hassidim-Lloyd Algorithm）」が有名である（Quantum Native Dojo 2019）。

[25] ジョン・マーティンらによる「量子アルゴリズムの大統合」論文を参照のこと（Martyn et al. （2021））。

[26] 「グローバーのアルゴリズム」。探索アルゴリズムの一種で、基本的な線形探索アルゴリズムの 1/2 乗の計算量で探索できることが知られている。この計算量の減少は対象となる問題が現実的な時間で解けることを保証するものではないが、条件次第では十分に有用であると考えられている。

森下　「大きい」というのは計算量のオーダーが、ということですか？

久保　そうですね。「一桁の数字の因数分解をしろ」っていうタスクは計算ステップ数に差が出ないんですけど、それが何百桁とかになってくるとアルゴリズムによって差が出てくる。だから、アルゴリズムの比較の時には大きい問題同士を比較するんですけど、その場合最適化問題のうちごく一部の問題は量子アルゴリズムで古典コンピュータより速くなるってことが知られています。

一方で、よく世間で「最適化問題」と言っているのは、**組合せ最適化問題**[27]とかだと思うんですけど、あれは古典コンピュータより速くなるっていうことは保証されてないと思います。例えば 0,1 の列があったときに、どの 0,1 の列が一番いいですかっていう、トビトビの値を最適化する離散最適化問題になります。「一番いい 0,1 の並びを教えてください」という組合せ最適化問題を解く古典のアルゴリズムはいっぱいあって、量子のアルゴリズムでそれより速くできるかっていうと、ほんのちょっと速くできるかもしれないけど、基本的にはそんなに速くならない。実際に動かしてみたら速いかもしれないけど、どれぐらいの計算ステップでできるかを示すのは難しい、そういう状態です。

量子アニーリングと似たような感じですね。量子アニーリングもどれぐらいのステップ数で進めるのか、計算量のオーダーが示されてるわけじゃなくて、実際にやってみると速いかもしれないけど、今の実機だと別に速くないっていう感じですね。

森下　量子コンピュータでやったときの理論上の計算量みたいなものは分かっているんですか？

久保　分かっている問題と分かっていない問題があるはずで、ほとんど分かっていないと思います。特に離散最適化問題はそういう構造になっていると思います。

---

[27] 巡回セールスマン問題など、最適化問題のうちでも変数が離散的であるような問題のこと（参考：京都大学工学部情報学科数理工学コース・京都大学大学院情報学研究科数理工学専攻離散数理分野による、理系高校生向けの「組合せ最適化」についての解説資料　https://www-or.amp.i.kyoto-u.ac.jp/files/open-campus-04.pdf）。
なお、「組合せ最適化」は「遺伝子組換え」などと同様、いわゆる業界で厳密に送りがな記法の定まった術語であり、誤った送りがなを用いると文書の信用にかかわる旨の訓示をいただいた。

森下　それは何故わからないんですか？

久保　離散最適化問題を扱うアルゴリズムは、機械学習みたいなもので、すごくいいネットワーク構造を持ってくれれば上手く学習するんですけど、それって試してみないとわからない。量子アルゴリズムの場合も一緒で、すごくいい量子回路を持ってきて、それがうまくはまれば速くなるかもしれないけど、それはやってみないと分からない、そういう構造。

森下　機械学習と一緒で、理屈上ブラックボックスになってしまうってことですか？

久保　ある程度は構造がわかっているはずですけど、ブラックボックスになるといわれればそうな気がします。

永山　最適化問題って結局、別に量子コンピュータが得意だと理論的に示されているわけじゃなく、筋が良いかはわからなかったんですよね。現実的な最適化問題で取り扱うような、データが大きくなってきたときに処理できるかということを考える理論的な比較はできず、今の量子システムでも解ける小さなデータで実際に解いてみての実時間での速さ勝負みたいになってしまった。量子アニーリングもそこで名をあげてきたけど、結局エラー管理ができてないからスケールしないっていうのはコンピュータ屋には見えていて。一方で「〇〇分野では量子技術は古典に勝てる見通しが見えてないからもうやらなくていい」みたいな考え方していると何も生まれないのも確かで、そこは難しいジレンマになるんだと思います。

森下　突然めちゃくちゃ頭のいい人が一般理論を作って解決されるような話だったりしますか？やってみないとわからないという状況は、やることがいっぱいあって面白いという見方もあるかもしれないですけど、やっぱり見通しが悪いと思う人も多いような気がするのですが。

久保　たとえば機械学習でも、機械学習の数理みたいなことを研究している人はいて。それと一緒で、やってみないと分からない部分が多いんですけど、量子計算のときに計算量に対してある程度目安をつけられるようにするような研究自体はあります。

　量子の場合は、「じゃあどういうふうな数学的ツールを使えばいいですか？」というところからやってるところだと思う。古典の機械学習に関しては結構知られている

ことも増えてきているんですけど、量子はまだそこは全然進んでないっていうような感じですね。

永山　ノーフリーランチ定理[28]という定理があって。全てのものを最適化できるアルゴリズムは存在しない、ある問題に対してすごく最適化できるようなアルゴリズムは、別の問題に対しての最適化力が弱くなっている。そういう定理なんですね。

私見ですけど、量子アルゴリズムにしろ古典アルゴリズムにしろ、扱っている問題に対してノーフリーランチの良い部分にうまくはまってるだけみたいな、ちょっと問題変えるとすぐ使えなくなるみたいなところがあるんじゃないかなと思っています。そういう状況なのに競争してしまっている。

森下　何をどこまで速くできるかを明らかにするのは難しいということなんですか？

久保　例えば素因数分解も、古典コンピュータで見つかってないだけで量子と同じぐらいの速さでできる可能性もまだゼロではないので。

森下　アルゴリズムが見つかっていないってことなんですか？

久保　見つかってなくて、もっと速いアルゴリズムが古典にも、量子の側にももしかしたらあるかもしれない。ちょっとそこは何とも言えないですが。

永山　僕らつい最近、なんかできないと思ってたことができちゃったみたいな大きなジャンプを ChatGPT 中で見たばかりでは。

久保　そうなのかな。学習進めると損失関数どんどん減っていくと思いきや急にまた減るみたいな、そういう構造があるっていうのが多分面白いポイント。

どっかでパラメータをめちゃくちゃ増やしたことによって、少数パラメータで起きなかったことが大パラメータの領域では起きる可能性があって、物理でもそういうことがあるんですけど。実は大きいパラメータの時にしかそういう現象は起きなくて、

[28] 機械学習や組合せ最適化に関する定理で、あらゆる問題に対して高い性能を持つ汎用アルゴリズムは存在しないとする定理（Wolpert and Macready 1997）。

少数でやってみるとわからなかったけど、大きい数のパラメータを持ってきたときに知らなかった現象が起きてしまったようなのはある。オーバーパラメトライゼーションという話で、量子でもそういう言及があるんですけど。

ChatGPT みたいな大規模モデルが最近話題なのは、そういうめちゃくちゃモデルをデカくすると知らなかった現象が起きてそれがブレイクスルーになってるという。

森下　それはでも**ハイプ**[29]を集めそうな話で、なんでもできるようになるんじゃないかみたいな話になりそうな話題ですね。

久保　そうですね。言語モデルはまだまだ伸びる余地ありそうな雰囲気を残してます。

森下　面白いと思います。さっきの話に戻るんですが、「周期を求める問題を速く解ける」っていうことをもうちょっと詳しく話せますか。

久保　周期を求める問題がなぜ速くできるかというと、**フーリエ変換**[30]を速くできるからです。フーリエ変換をめちゃくちゃ速くできるっていうのが量子計算の強いところで、最終的にそういう問題に落とし込めればとても速いアルゴリズムが作れるけど、そういう構造を持ってないと別に速くならない。

森下　でも結構汎用性が高そうな話ですね。

久保　そうですね、汎用性は高いですね。線形代数の問題解けるし。

森下　たとえば、〔フーリエ変換を用いるような〕天体や気象の計算などにも応用が考えられていたりしているんですか？

久保　天体は分からないですね。気象ですが、方程式はわかってて、めちゃくちゃ数値計算に大量のコストかけてやってることではあるんですけど、量子コンピュータが解きやすい問題かっていうと、実はそうでもないですね。そのへんはちょっとだけ見てみた

[29] 新しい科学技術に対して集まる過剰な期待のこと。話題 20 を参照のこと。
[30] 連続関数を周波数領域の表現に置き換えることができる変換で、幅広い領域で応用され、実用に供されている。

ことがあるんですが、あまり速くならないと思います。

方程式の性質による感じです。流体力学の方程式は、量子コンピュータでやって速くなる条件を満たしてるものと満たしてないものがあって、もうちょっと理論が進むとその条件をもっと厳しく評価できて、「実はこれは量子計算でいけるクラスだ」っていう話にはできるかもしれないですけど、基本的にはあんまり満たされないだろうって感じです。つまり量子計算で速くならなさそうというような感じです。

研究としては、たとえば速くなる方程式と速くならない方程式の境目はどこですかっていう話は、結構面白いポイントではあると思う。

永山　そっちの流れは、僕もすごくいいと思う。

森下　意外とはっきりしてないってことなんですか？どういう性質だと量子が解けるか、あるいは解けないかというのは、何かある程度はっきりした基準があるんですか？

永山　量子計算って結局古典計算でできることは何でもできるコンピュータークラスなので、できることは確実なんですよ。でも速くなるのかは分からない。

久保　解けないと思っていても、問題の方を変換すれば実はすごく性質のいい問題として見なせるケースがあって、解けないと思った問題のうち、この問題に関してはすごく速く解けるとか、これからいくらでも出てくると思います。

永山　問題の変換って今みたいな数学的な話もそうですし、システム的な話でも結構よく使われる手法で。「こういうシステム上の課題は基本的に考えてみるとこの問題に帰着できる」という解き方ができて、逆に言うと「これが達成できる効率の上限です」みたいな話はよくありますね。

久保　この前、ある研究室のお手伝いをしている競技プログラマの人が、量子の問題を見て「これ実はこの問題に変換できるんじゃないですか」ってグラフ理論の何かを援用してて、実際それがほぼ計算量の下限になっていることを示せたということがあって、なんか面白いなって思いながら見てました。その人は量子が専門じゃない学部生の人で、ただ競技プログラミングがめちゃくちゃ得意。結局それで論文書いて、別に量子の研究室に進むことはなく、就職していくらしいです。

永山　それはもったいない。

岸本　**今の話は量子人材の話とは結びつかない？**

久保　結びつくかもしれないです。その人は情報科学なんで、文系というよりは、すごく古典コンピュータ強い人みたいな感じではあるんですけど。量子のことにそんなに詳しくないけど、めちゃくちゃ量子に貢献してる人ではある。

話題5. SDGs 等への貢献

話題の背景

2015 年に国連で採択された「**持続可能な開発目標（Sustainable Development Goals; SDGs）**」[31]には、2030 年までに達成すべき、持続可能な開発のための 17 のゴールと 169 の達成基準が示されている。

SDGs の目標 7 は「すべての人々の、安価かつ信頼できる持続可能な近代的エネルギーへのアクセスを確保する」ことを掲げており、量子技術はエネルギー利用の改善に貢献する可能性と、量子技術自体によるエネルギー消費・資源利用（たとえば**レアメタル**）の増加への懸念の双方からこの目標と関係している。また目標 2 では「飢餓を終わらせ、食糧安全保障及び栄養の改善を実現し、持続可能な農業を促進する」こと、目標 12 では「持続可能な消費生産形態を確保する」ことをそれぞれ掲げており、量子コンピュータによる**窒素固定**過程のシミュレーションはこの目標に貢献する潜在的可能性があると考えられている。

目標 10 では「国内および各国家間の不平等を是正する」と掲げられているが、これは量子技術の発展が持ちうる潜在的なリスクとして、話題 23 で議論されている。[32]

肥後　**――イギリスで実施された量子技術のパブリックダイアログで、市民の方から SDGs への貢献に関する期待が語られたという話があるんですが、大阪大学の大学生を対象としたフォーカス・グループ・インタビュー[33]では、全然学生からそういう話は出ませんでした。日本国内でも量子で SDGs に貢献するという話は既に出ていますか。**

永山　ひとつ貼りたい URL があって。東大には「**量子イニシアティブ登録プロジェクト**」[34]というウェブサイトがあるんですね。この中で見てみると、どの SDGs 課題に関係す

---

[31] SDGs の詳細については外務省（2023）を参照のこと。

[32] 量子コンピュータのベンチャー企業 QunaSys は、2023 年 7 月 14 日に「量子技術が貢献できる可能性のある持続可能な開発目標」という取り組みを開始したと発表した（QunaSys 2023b）。SDGs の諸目標にむけて量子技術が貢献する道筋を検討する場を提供する試みとしている。

[33] 肥後らにより 2022 年 2 月に実施された、大阪大学の大学生を対象とする量子技術についての印象聞き取り調査のこと。詳細は肥後・長門・鹿野（2022）を参照のこと。

[34] 東京大学未来社会協創推進本部による、東京大学の量子関連研究領域の教育・研究プロジェクトを SDGs の目標ごとに分類するプロジェクト（東京大学 2023）。

るかということが登録されている。

量子も SDGs もバズワードなので、バズワードどうしを繋げたい人たちはいっぱいいます。

岸本　**逆に量子が CO_2 排出に寄与するみたいな話はどこかで出ていますか？AI は両面あって。トレーニングにものすごいエネルギー使って CO_2 だすという話と、AI を使って何か効率化して CO_2 を減らすっていう両面議論されているところがあって。量子も両面あるのかなと。**

永山　ありますね。量子が何に役立つかという話でよく言われるのが、今は化学合成肥料のために窒素固定、むちゃくちゃ大きなエネルギーを使って人類はやってるわけですけど。窒素固定は人類が人類の技術でやるとすごいエネルギーを使うんだけど[35]、微生物はすごい低エネルギーにやってるじゃないかという話がある。でもそのメカニズムがわかっていない。これは量子過程のはずだから、量子コンピュータで分析してそれを人工的に起こせるようになれば、エネルギーにむちゃくちゃ役立つはずだという話がある[36]。

人類の燃料消費の 1~2%をあそこに使ってるらしいんですよね。ちょっと調べていただければそこから記事が出てくると思うんですけど[37]、そういう方法で役に立つという話はある。ただ、量子コンピュータ自体は AI と同様、動作するのにむちゃくちゃエネルギーがかかる。希釈冷凍機[38]でほぼ絶対 0 度まで冷やし続けないといけない。

森下　やっぱり冷却剤が必要なんですね。

永山　ですね。超伝導量子コンピュータの場合ですけども。でなくとも、量子コンピュータ自体動かすのに、現在の古典コンピュータですごいサポートしなきゃいけないって話

---

35 ハーバー・ボッシュ法によるアンモニアの人工合成を指している。

36 IBM が提示する持続可能な未来の目標「5 in 5：テクノロジーが 5 年以内に私たちの暮らしを変える 5 つの方法」のひとつに、量子コンピュータを用いたシミュレーションにより、窒素固定のメカニズムを明らかにし、持続可能な規模で窒素固定を行う革新的なソリューションを生み出すことで人口爆発に対処する、というものがある（IBM Research 2020）。
内閣府ムーンショット型研究開発制度目標 6「誤り耐性型汎用量子コンピュータの実現」においても、人工窒素固定の実現が目標として語られている（JST MOONSHOT 2023）。

37 日経ビジネスの記事「「量子超越性」に突き進む Google の野望」（日経ビジネス 2017）。

38 ヘリウムなどを用いて極低温環境を作り出す装置で、超伝導量子コンピュータの作動に必要とされる。

もあって。それがどのくらいのエネルギー量になるかはちょっとわかんないですけど。スパコンみたいにはなるんじゃないかな。

森下　なるほど。これは前にも尋ねたかもしれないですが、量子コンピュータを作るにあたって特別な材料が必要ということはありますか。レアメタル[39]とか。

永山　超伝導材料や、半導体レーザーなどで使用しています。超伝導量子コンピュータも半導体の上に作ってる、半導体基板の上に作ってるものが多いですよ、量子コンピュータは。

森下　ああ、そうなんですね。そうすると、まあ少なくとも現時点では「古典コンピュータにはこういう材料や金属を使うけど、量子コンピュータになったらいらなくなるよね」っていう材料はあんまりないようなイメージですかね。

永山　いらなくなるよね、はないかもな。結局、古典コンピュータも使って量子コンピュータを作るわけですしね。

エネルギー自体も量子コンピュータをぶん回すためにはすごい使うんですけど、ぶん回すエネルギーを使っている間だけだと思ったら、それ以上の貢献が量子コンピュータの計算結果によって、科学計算によって得られているんだったら、まあいいだろうという考えですね。

森下　差し引きプラスならって事ですよね。

永山　そう。

森下　わかりました。ありがとうございます。量子コンピュータは結局古典コンピュータ的なものが必要になるみたいなところって、人によってはあまりイメージないかもしれません。やっぱり量子コンピュータができるっていうのは、古典コンピュータに完全

[39] 「「地球上の存在量が稀であるか、技術的・経済的な理由で抽出困難な金属」のうち、工業需要が現に存在する（今後見込まれる）ため、安定供給の確保が政策的に重要であるもの」（経済産業省鉱業審議会）として、2014 年時点で 31 種類が定義されている（経済産業省 2014）。

にとって変わるようなイメージを人は持ちがちなんじゃないかという気がするので。

永山　ああ、それよくある勘違いですね。**量子コンピュータにしろ量子インターネットにしろ、結局デジタルコンピューターを駆逐するようなものではない**ですね。

森下　それは大事な話な気がします。

永山　結局得意不得意がどちらにもあるので。情報処理能力的な計算クラスの話になると、量子コンピューティングは古典コンピューティングでできることを全部できるんですけど、それは計算理論上の話で、実際に古典コンピュータでもできる計算を量子コンピュータで行うのって本当にエネルギー的に効率的なのかという話になるわけですよ。そうしたときに全然ペイしないので。

1 量子ビットを扱うのにこんなに苦労しているのに、古典でもできることのために何千万量子ビットを用意してくださいって言われたらなんかみんな泣いちゃう。扱いやすさの種類が全然違ってきちゃうんで、量子コンピュータは常温でほとんど動かないし。

結局、量子コンピュータは古典コンピュータより高コストなので。計算クラス的には良いんだけど、**結局古典コンピュータは圧倒的に安い**から。金銭コスト的にもエネルギーコスト的にも量子ビットで古典ビットの代用は可能っちゃ可能なんだけど、原理的には。

森下　現実的にはちょっとって感じですか。

永山　全然現実的じゃないですね。

カテゴリ 2：量子情報技術の克服すべき課題をめぐる話題

話題6. テストベッド・エコシステムの構築

話題の背景

イノベーションにおけるエコシステムの重要性は、米国競争力評議会における「Innovative America」（通称：パルミサーノ・レポート）[40]の「国家イノベーションエコシステム」（National Innovation Ecosystem）によって指摘されたことで知られる。日本国内でもパルミサーノ・レポート報告を受け、国家イノベーションシステムの構築が課題とされてきた[41]。

量子インターネットタスクフォース（Quantum Internet Task Force; QITF；代表：永山翔太）では量子インターネットのテストベッドおよびエコシステムの構築が目指されている。話題の中では「つながりをつくる人」、すなわちハブ人材[42]の重要性にも触れられている。

森下　――テストベッド・エコシステムの構築についてです。具体的にこういうテストベッドがほしいという話や、こういう環境がほしいというイメージはありますか。

永山　原理実証から技術実証までを一貫してやれる環境を作りたい、と考えています。

久保　技術実証までいい？製品化は？

永山　今量子ネットワーク界隈でテストベッドといったときにはまず原理実証から技術実証あたりまでをターゲットにしており、製品化の前段階までで、製品化は技術実証のあとの段階。

---

40 日本語訳は JST CRDS (2005a)を参照。

41 JST CRDS (2005b)を参照。

42 「スケールフリー・ネットワーク」と呼ばれる構造を持つネットワークは、多数のノード（頂点）を結節するハブとなるノードによって特徴づけられる(Barabási and Albert 1999)。このようなノードが存在することにより、大規模なネットワークであってもノード間距離を短くすることができる。この議論を情報の流通に当てはめると、情報の効率的な拡散においては、ハブとなるノードの役割を果たす人間が枢要な役割を果たしている、といえるだろう。

量子ネットワーク界隈で思っていたのは、各々の構成要素の各自が独立に研究しているということ。量子ネットワークを作りあげるには、それらを全部モジュールにしてまとめあげて検証する必要がある。それをひっくるめてテストベッドと言っている。

森下　つまり統合するプロジェクトが必要ということですかね。

永山　そうですね。ムーンショットも、僕が持っている課題はそういう構成になっている。ひと揃いの量子ネットワークを作る、という。実際にやってみないと動くかどうか分からないし、これをやることで各自がさらに improve していくことができるようになる。

森下　私は分子生物学系の ELSI も担当していますが、あちらでもそういう話を聞いたことがあります。生体材料を使ってロボットを作るプロジェクトなんですが、ロボットの部品ができても、部品を組み合わせたときに動くかは分からない。集まってひとつのプロジェクトを走らせる必要がある、と。

寺元　それができると**エコシステム**になる？

森下　エコシステムというと、もうひとつ大きな話という気もしますが。

永山　作ってみる段階まではベンダー側の都合が強い。ユーザも含めてもいいけど、社会実装的なエコシステムの形成という話まではいきにくい。テストベッドで集まって協力して量子ネットワーク作りました、そこでユーザがついてくれれば商用化する、というのでもいい。そういう発展の仕方も考えられます。実際にそちらの環境で使ってもらいつつ、テストベッドは残して、そっちで improve していく、といったような。

森下　永山さんたちがまとめた**量子インターネット・ホワイトペーパー**[43]には、「量子アニ

[43] 産官学連携研究開発コンソーシアム量子インターネットタスクフォース（Quantum Internet Task Force; QITF　代表：永山翔太）によってまとめられた量子インターネット研究開発についての提言書（QITF 2021: 25）。

ーリングや NISQ 量子コンピュータ[44]の研究開発では、日本は世界に先駆ける研究成果を持っていたものの、開発競争において海外企業に遅れを取ってしまった。この原因の 1 つは、エコシステムが存在しておらず、研究から開発への移行が適切な形でおこなわれなかったことがあると考えられる」とあります。

永山　大学と企業が密に連携する必要がある。ホワイトペーパーで書いているのは、半分くらいは企業批判で。量子アニーリングや NISQ はもっとつっこんでやるべきだった。

久保　でもお金を産めないとやる理由がないよね。

永山　お金にならないならね。お金になるはずのところに突っ込んでいくことをしないのは問題。

寺元　お金が生まれるかどうかを判断する材料次第なところがあって、その技術をどれくらい知っていてどう見ているかによる。どこに投資すればいいか分からない可能性もありそう。それからリスクと責任の回避。

森下　リスクを取らないスタンスだと遅れるのは当然という感じがしますね。

寺元　経済状況にもよるし、企業を巻き込むのは難しいかもしれない。

久保　日本の企業以外からも金を取ってくればいいような気もする。

森下　ステレオタイプ的に考えると、大きい企業は保守的なので、そうしたリスクを積極的に引き受けるスタートアップを巻き込むとか、そういう方法をとっていく必要があるような気もします。

久保　量子は博打を打つための供託金が、ソフトウェアに比べると高いんですよね。

---

[44] 誤り耐性を含まない、ノイズを含む量子コンピュータ（Noisy Intermediate-Scale Quantum Technology）（産業技術総合研究所 n.d.）。近い将来の応用が期待される一方、古典コンピュータに対して計算速度で上回ることの難しさが指摘されている。

森下　小さく始められない、という感じですか。

久保　という気がします。実験器具が必要なので。

寺元　**あとはつなぐ人がいないといけない。金にがめつくない技術者を。**

森下　どういうことですか？

寺元　いい技術を持っている人と、お金を持っている人をつなげる人。すごい技術を持っている人は、お金にあまり興味なかったりして、お金を持っていて投資したい人との接点がなかったりする。

Apple の伝記なんかは典型的で。経営者としてのスティーブ・ジョブズと技術者のスティーブ・ウォズニアック[45]。私もお金に興味なくて、ずっとプログラム書いてられたらなと思っていた。大学 4 年でスタートアップに参加したけれど、その人が投資したい人と接点を作る人だった。よくある話なんだろうなと思ったりする。

森下　つながりを作る人は大事ですね。

永山　アメリカでは研究活動が社会のサイクルに溶け込んでるんじゃないか。日本では研究をする人は世捨て人みたいなイメージがある。研究開発予算が多いのはけしからん、みたいな空気すらある。

森下　量子の話を聞いていると、工学的というよりは理学的という感じがしますね。工学的マインドだと、もっと積極的に製品化して社会の中に実装していこう、となるような気もしますが。

---

[45] スティーブ・ジョブズとともに Apple を立ち上げた創業者の 1 人。Apple の最初期のコンピュータの設計に携わった。「『ぼく〔ウォズニアック〕がすごいものを設計するたび、それでお金を儲ける方法をスティーブが見つけてくれる』自分ひとりだったらコンピュータを売ることはなかったとウォズは言う…そのころウォズはお金がなかった。小切手で残高不足で決済されないことが何度かあり、家賃を毎月、現金で支払うように求められていたほどだ。ジョブズはウォズの操縦方法をよく知っていた。必ず儲かるなどと言わず、絶対におもしろい経験ができる、だからやろうと誘ったのだ。『お金は損するかもしれないけど、自分の会社が持てるよ。一生に一度のチャンスだ』ウォズにとって、これは大きな魅力だった。金持ちになれるかもしれないことより魅力的だった」（アイザックソン 2011 130-131）

永山　その 2 つでいうと、日本の量子は理学マインドが強いのかもしれない。工学みたいに製品にして金にしようという感じは薄いかもしれない。

話題7. 競争か、協力か？

話題の背景

「競争か、協力か？」は科学技術ガバナンスにおいて重要な選択である。**標準化**や**知的財産権・特許権**は、研究者間の協力や競争に対してどのような意味を持つのか。

標準化戦略は現在、国家・国際機関によるイノベーション戦略に組み込まれている。従来、標準化は競争を阻害するためにイノベーションをも阻害するとかなえられてきたが、古典的見解は現在では批判・修正され、標準化と知財・特許戦略との間にはトレードオフのなかで、戦略的に標準化を進めるべきであるという見解が広く合意を得ている[46]。

森下　**――ラボ間あるいは国家間の関係について、競争というロジックだけで考えていいのか、という問題があります。競争ではなく協力関係を結ぶことが重要な場合もあります。**

永山　ソフトウェアの場合、オープンソースソフトウェアみたいに協調路線の話が強くなると思います。ハードウェアだと、特定の研究室しか技術を持っていなかったりして、量子でも特許を取るとかが重要になる。そのせいかクローズドで競争になりやすい。

　ハードウェアの場合、state-of-the-art（最先端）の技術を特定の研究室しか持っていなかったりして、キャッチアップすることも難しい。

森下　キャッチアップの難しさはどういうところにありますか。

永山　製造技術や公開されていない知見なんかがあるところ。

寺元　知見がそこにしかないからキャッチアップが難しいということ？

---

[46] 標準化とイノベーションの関係については標葉（2018）に詳しい。量子技術の標準化動向についてはJST CRDS（2019: 15-17）を参照のこと。

永山　そう。それが競争力の源泉になるので公開しないこともある。そうすると再現実験もままならない。技術としてどうなのと感じることもある。

森下　**特許制度**では解決できないんですか。

永山　特許をとると公開しないといけなくなるので、そういう技術や知見では特許を取らない。コーラの製法[47]と一緒で。

寺元　特許を取るとどういうメリットが？

永山　商用利用されたときにお金を取れる。けど研究開発は商用利用じゃないから。研究成果で圧倒的地位を取りたいと思うと、特許取っちゃうとそれを使って他の人が研究成果を作れる。それが都合が悪いと特許を取らない。

森下　先端科学技術では実験室の中で実験技術を囲い込むのはよく聞く話ですね。再現できなくても誰も分からないという恐ろしさがある。

永山　量子分野ではそういう話をちょくちょく聞きます。他のラボも真似しようと頑張るけどうまくいかずに、博士学生の何年もが無駄になったり。

森下　ちょっと変わっただけで再現できないと。

寺元　そういう製法や知見を公開する動機がないということ？

永山　そう。公開しない動機はある。インセンティヴが働いていない。

森下　バイオではよく聞く話ですね。実験系の繊細さの話とも関係していると思います。量子は物理よりもバイオのウェット系、実験が難しいタイプの科学に似ているような印

[47] 特許を取らないことで競争力を維持している代表的な例として知られている。日本コカ・コーラ株式会社の広報によれば、どの役職の人間がそのレシピを知っているかどうかも明らかにはされていないとのことである（マイナビウーマン 2017）。

象も感じます。

永山　具体的な実験の話が必要だったら、実験家にも話を聞けますよ。

森下　聞いてみたら面白いと思います。

森下　**――量子の研究者の方々は技術的なレベルで、何か協働していますか？一緒にソフトウェアを作るみたいな。**

永山　ケースバイケースですね。そういう協力をしているパターンもあるし、してないパターンもあります。だから車輪の再発明、あっちこっちでいっぱいやってますよ。技術を研究の競争力の原動力にしているというケースもあります。デルフトでダイヤモンドがあれだけ進んでいるのはデルフトにしかない技術があるからだと思います。

森下　デルフトというのは何ですか？

永山　デルフト工科大学[48]は欧州の古い工科系大学です。量子だと結構強いんですよ。量子インターネットでも強いし、量子コンピュータも色々やってるし。

その一例として「ダイヤモンドの中に量子ビットを作ろう」っていうパターンの量子コンピュータがあります。あまり大きなスケールの量子コンピュータ作るのは難しいんですけど。

工作技術みたいな話を考えてもらうとイメージしやすいかな。量子技術でも量子工作技術みたいなものがあって、その技術がないとできない研究みたいなものがあって。

森下　そうなると、やっぱりコミュニティとしては小さくなるって事ですよね？技術をばらまけないと。

永山　そう。そこを競争力の源泉にするとばらまけないから。

---

[48] オランダのロイヤルアカデミーを前身とする工科系大学。量子科学の研究機関 QuTech は、デルフト工科大学とオランダ応用科学研究機構（Nederlandse Organisatie voor Toegepast Natuurwetenschappelijk Onderzoek; TNO）によって共同創設された。

国内でもそういうものはもちろんある。国の政策と繋がる話ですけど、量子インターネットという名目では、もうすでに国としてはサポートしているから充分でしょ、と言われて、違う方式を使っていたとしても少数の研究室しか予算を取れないみたいな時代があったりしたらしく。今はもう量子のサポートむちゃくちゃ手厚いですけど。

森下　なかなかコミュニティの拡大が難しいような感じですか。

永山　拡大が難しいというか・・・基礎研究でそれやる？っていう話ですね。

量子インターネットというプロダクトをつくる上で、いろんな要素、いろんな候補技術があって、「量子インターネット作りましょう」となった時に、その候補技術、既に出来上がった技術中一つ、一番良さそうなのをピックしてきて選ぶっていうんだったら１プロジェクトでもいいのかもしれないですけど、どのぐらいの・どの方式がどういうパフォーマンス出るか全然分からない中で、一つしか選ばないっていうのはナンセンスじゃないかという。

量子に限らず、理系の研究で言われている話ですね。（基礎研究の発展は読めない部分が大きいので、お題目としている例えば量子インターネット以外の発展の可能性もあるわけですし）**まだどんな風な発展の仕方をするかわからない技術だけど、基礎研究の段階で絞っちゃうっていう。それは昔から量子に限らない日本の科学系の政策の課題**です。

森下　それぞれのチームや企業、大学はバラバラに活動していますか。

永山　**FIRST**[49]の頃は、もう少し各大学の間の連携がありました。FIRST に集まったりして。それに比べると、今はバラバラの感じが強いです。まあ、一つのプロジェクトに全員入ることができたというコミュニティのステージの話でもあると思います。

[49] 最先端研究開発支援プログラム（Funding Program for World-Leading Innovative R&D on Science and Technology; FIRST）を指す。2009 年の第 84 回総合科学技術会議において、30 課題が最先端研究開発支援プログラムの中心研究者および研究課題として決定された。そのうちの一つに、国立情報研究所／スタンフォード大学教授（当時）の山本喜久を中心とした「量子情報処理プロジェクト」が採択された（FIRST 2014）。

肥後　会社間や大学間での研究者の移動は激しいですか？引き抜きあいみたいなことはありますか。

永山　移動は普通にあると思います。引き抜きあいというところまで言えるのかな。わからないけど。僕のプロジェクトだって、あっちこっちからみんな来てもらわないといけないのが正直な話です。引き抜きと、普通の人材のサーキュレーションの境目って難しいなと思います。

森下　積極的に囲い込むようなことをしているのか、ということが違いですかね。どれくらい協力的なのか、それとも競争しているのかというのはありますよね。企業の中でやっていることは全部秘密にしているのか、といったことも。

永山　やっぱり競争的な方が強いかな。

森下　適切な協力の枠組みの欠如みたいなところに問題がある気もしますね。

永山　はい、もっとうまいこと協力できるのではないかと思います。例えばアメリカでは、もっと政府が上手く舵を取ってる印象があるんですけど。たとえば**ロードマップ**にしても、各業界の色々な組織や大学から専門家を集めてきて、彼らが著者になってロードマップを発表するじゃないですか。日本ってそんな感じじゃないですよね。

森下　**アクターどうしがどういう風に関係するかとか、協力し合えるところはどこかについて、あまり具体的にイメージできるようなロードマップになっていない。**

永山　そうですね。おっしゃる通りだと思います。

話題8. 標準化の文化：デファクトとデジュール

話題の背景

本文では、標準化プロセスの在り方についての 2 つの文化として、**デファクト**と**デジュール**が紹介されている[50]。デファクト・スタンダードとは「事実上の標準」ともいわれ、合意よりも実際の利用によって定着する、ボトムアップ型の標準である。対してデジュール・スタンダードとは、国家や国際機関の協議によって制定される、トップダウン型の標準であるといえる。

永山　ここに標準化の専門家の小林先生がいます。

小林　いやいやいや・・・

永山　標準化の専門家というか、標準化会議の専門家？

小林　**デファクト**インターネットスタンダードのみ、という感じです。ITU[51]とかわからんです。スーツ着てない、ジーンズの人たちがたくさんいる標準化の方なら。

森下　そういうのが私全然わかってない。そういう標準化のカルチャーの違いみたいなものがあるんですか。

小林　そうですね。よくデジュールとフォーラムとか、デジュールとデファクトって言われたりするんですけど、ITU とかって基本的に国から誰か代表が出て、投票権を持って、投票で決めるみたいな。結構自分たちで仕様を決めて、仕様を決めたらその仕様をレコメンデーションとして、勧告として出して、皆さんこれに従って作ってくださいね、ベンダーの皆さんお願いします、というのが ITU の感じで。最近ちょっとずつ

[50] 標準化のその他の考え方については、標葉（2020：24-25；【コラム 2】標準と標準化）、経済産業省（2021）を参照のこと。

[51] International Telecommunication Union の略。国際電気通信連合。ITU-T は International Telecommunication Union Telecommunication Standardization Sector で、国際電気通信連合の電気通信標準化部門。

変わろうとしているという面もあるんですけど、歴史的にはそういう感じで。

逆に、私とか永山先生とか、寺元さんとかも行ったことあるんですけど、IETF（インターネットエンジニアリングタスクフォース）、国からの代表ではなく、個人として参加できるインターネットの標準化団体というのがあって、そっちは「投票をしない」とか、標準の仕様を作る前に、まずはコードを書いて実装して、「動かないものに意味はない」みたいな感じで。「ラフ・コンセンサス・ランニング・コード」と言います。結構それが ITU の文化と正反対で、ちゃんと投票をして決めるというよりは、大まかな合意をして、とりあえずコードを書いて実際に動かしてみて、実装としてよさそうだったら標準にしましょう、という文化の違いが大きくあったりはします。

永山　僕の感覚からすると、ITU-T とかって利益の配分的な標準化なんですよ。日本のみんなが集まって、ヨーロッパはヨーロッパで自分たちの作っているものをできる限り標準の中に入れたくて。利益の配分を調整している。ITU-T のスーツ着ている人はそんな感じ。ジーンズ着ている人たちはそんな感じじゃなくて、ハッカー文化[52]と言うか、良いものを作りましょうと。良いものをちゃんと作ろうとして動いているものが偉いです、っていう。企業として出てきているのではなくてエンジニアや技術者として出てきて良いものを作りましょうとタイプの標準化をやっているということです。

どっちが良いのかというのは、僕は IETF 側、ジーンズ側の肩持っちゃうけど、向こうは向こうで利益ないと当然回らないと分かるし。

森下　なるほど、ありがとうございます。**デジュール**と**デファクト**それぞれに対応するということですか。

永山　そうですね、**デジュールは権威主義的にこれを使いなさいというタイプの標準**で。ITU-T で標準化するとして政府調達なんかはそれを使わなくちゃいけなくなる。**IETF のジーンズのほうは、使いなさいという権威はないんだけど、「あれいいから使いましょう」みたいな感じになるから、デファクト・スタンダードになる**。強制力を全く

[52] コンピュータ・プログラマの共有する、または理念として存在しているとされる行動様式や価値観の総体を指す（あらゆる情報を無償でオープンに共有する、プログラミングをつうじて創造的な仕事を行い、生活をよりよくすることができる、など）。この文脈におけるハッカーとは、セキュリティを脅かす者（クラッカー）を指すのではなく、ハッカー文化を共有する人びとを（肯定的に）指す語である。

持ってないんですよ。みんな使ってるから実質的な標準っていう。

小林　標準化のドキュメントの名前とかの違いも表れていて。IETF のほうは Request for Comment（RFC）っていって、直訳すると「コメントください」みたいな感じです。やっぱりエンジニアが中心になって進んできた文化がそこに根付いていて、違いがある。ITU だと結構「どこどこの国が・・」みたいな話があったり。でも ITU も最近もうちょっと色々変えていこうという動きがあったりするようなので、今後もずっとその状態かわからないですけど。国として参加してなくても、ワーキンググループに参加してなくても、個人枠で専門家を参加させてあげようみたいな話とか最近考えているというようなことを、聞いたことはあります[53]。

森下　ありがとうございます。ITU-T のドキュメントはどんな名前なんですか。

小林　「勧告」ですかね。英語だと「レコメンデーション」。よく聞く言葉かと思いますが。

[53] Internet Governance Forum (2022)。検討が始まったばかりの話であり、現行のメンバーシップ規定には反映されていない（ITU 2022）。

話題9. ベンチマーク：量子ボリューム

話題の背景

半導体業界における**ムーアの法則**は、集積回路内のトランジスタ数が約 2 年ごとに倍になるという法則である。この法則はもともと経験則として提示されたが、その後この法則に基づいて半導体の長期計画**ロードマップ**が作成され、ムーアの法則は**自己成就的な予言**として機能することになった。

本話題では、量子においてムーアの法則における集積回路密度のような指標（ベンチマーク）がないかということを尋ねている。**量子ボリューム**という指標がこれにあたるとの返答を得て、この指標の特徴について話題にしている。

森下　**――標準化っていうとプロトコルとかの標準化をまずイメージされるかなと思うんですが、それ以外に、その量子技術の発展のベンチマークを作るということも含まれます。たとえば半導体の場合には集積回路がどれぐらい複雑化していくかを数値化した指標とする（ムーアの法則）っていうようなことを行ったわけですけども。量子の場合にムーアの法則のような、発展の指標となり得るものというのは何かあり得るかということが、一つ尋ねたいことです。**

久保　**量子ボリューム**[54]というものがあります。発展の指標みたいなことで言うと、よくあるのは量子ビット、量子計算の計算最小単位が量子ビットなので、その量子ビットをいくつ扱えるかっていうようなのが一つの指標になってますと。分かりやすい指標としてありますと。

で、それだけだと扱いづらいことがあるので、量子回路の幅×深さみたいのが量子ボリュームなんですけど。そういうような指標を作ろうという話はいくつかあります。よく聞くのが量子ボリュームとかですかね。っていう感じです。

永山　そうですね、量子ボリュームは IBM が定義したんですよね。IBM がハードウェアの

[54] IBM が 2019 年に発表した、量子コンピュータの発展を測定する指標のひとつ（Qiskit 2021）。

ベンダーで。自社の量子コンピュータの発展を定量的に定義したかったというのがあると思うんですけど。それで、ムーアの法則をモチーフにしているというところがあるので。だからこれもあれだよね、2 年で 2 倍くらいの発展速度になるように、多分数字調整しているよね。

久保　はい。でも実は超伝導量子ビットだとそうだったりするけど、なんか全然違う、違う素子使ってると全然比較しづらいとかはあったりはします。そういう問題はあります。

永山　そう。結局、自社方式をターゲットに指標を設計しちゃったので一般的にはうまく機能してないかなっていう部分があります。トランジスタの時は純粋にトランジスタの数だけでムーアの法則考えたわけですけど、この場合はどのぐらいエラーに対して強いか、エラーが起こりにくいかみたいな。量子ビットはすぐエラーしていっちゃうので。NISQ はエラー訂正使わずにどのぐらいの計算ができるかというのが勝負になってるっていう話をしたと思うんですけど、エラーが起こる前に計算終えようみたいな発想。なのでエラー訂正使わないの前提にどのぐらいエラーに対して強い、どのぐらいのサイズのプログラムだったら処理できるかみたいなことを考えながら作られてる指標がこの量子ボリュームですね。

　だからムーアの法則とはそもそも出発地点が違うって感じかな。意図的に設計しているという意味で。

森下　聞いている感じだと標準化というよりは、**何かその、つくった IBM の目的に沿ってしまっているという感じ**が。

永山　そうですね。僕はそう思っているという認識が僕の話からは出ちゃったんだけど。どう思う久保君。

久保　いや、まあ割とそういうふうに見られてると思います。

永山　ああ、だよね。さっき久保君が量子回路の量子ビットの数×深さって言ってくれましたけど、量子ビットの数っていうのはもちろん並べた量子ビットの数なんですよ。で、深さっていうのは、エラーがどのくらい、エラー起こっちゃうけどどのくらいの数の量子ゲートだったら行えるかみたいな。もうなんか 100 回ゲートかけるんだったら絶

対エラーしてるから無理。じゃ 10 回はどう？みたいな、そういう発想ですよね。10 回だったらエラー発生しないこともちょいちょいあるから、このぐらいだったら計算使えるかな、みたいな。

森下　深さっていうのは物理的な概念じゃないってことですか？

永山　そうですね。物理的な概念じゃなくて、何回ゲートをかけるかの方ですね。ある意味時間に対応してるといってもいいのかな。ゲート自体でノイズが乗ったりするから、ちょっとそれも妙な表現か。

森下　それは厳密に定義できるものではあるってことなんですか、深さは。

永山　深さは…物理的な話まで入っていっちゃうと基本ゲートをどういうパルスで構成するかみたいな話になっていっちゃうので、なかなか難しい。ケースバイケース。そのチップの設計にも依存したりしますし。

森下　数×深さといったとき、どうやって計算してるんですかってことが気になります。

永山　基本ゲートで考えてるかな。ゲートの作り方、例えば X ゲートをどういう作り方しているかっていうのは、おのおののチップの作り方に依存して違いますけど、Google でも IBM でもその他の企業さんでも。結局 X ゲートした時にどのぐらいエラーが乗るかという指標で見ているという意味では一致していて平等かな。

連続してるゲート全部最適化しちゃって、パルスまとめようみたいなことまで始まったりしているので。久保君はそれに関する研究をやってたりするんですけど。

一概には言いにくいんですけど、基本としては、基本ゲート操作は X ゲートとか Y ゲート Z ゲートみたいな所を基準に評価してますね。

森下　ありがとうございます。久保さん何かさらにおっしゃりたいことがあれば是非。

久保　あとはそうですね、エラー訂正を使うという意味ではフォールトトレラント（**FTQC**）

[55]であれば論理量子ビットが一つ単位になるという話はあるかな。**NISQ** だと物理量子ビットですけど、物理量子ビットを大体 1000 個くらい使った量子ビット、論理量子ビットに使うことになるので、そういう単位もあるなという感じです。

森下　ごめんなさい、ここで FTQC と NISQ の違いがどういう形で効いているかについて、かみ砕いて説明していただけると大変助かるんですが。

久保　はい。**量子ビットって言ったときに、物理量子ビット、例えば実際の超伝導の量子ビットを呼んでるときと、論理量子ビット〔のことを指している場合がある〕**。複数の量子ビットを使って一つのバーチャルな量子ビットをつくってる場合、〔つまり〕後者の場合、それはエラー訂正をするためにそういうのを使ってるんで、複数の量子ビットで構成することでエラー訂正が出来るという。そういうような感じです。

なので、今さっき言った量子ボリュームとかは、あまり論理量子ビットのことは考えてなくて。論理量子ビットの場合にも多分定義はできるとは思うんですけど、もっと小さい量子コンピュータに対する指標になってて。物理量子ビットで数える前提で作ってると思います。という説明でよろしいでしょうか。

森下　はい、非常に、ちょうどよく分からなかったところがすっきりしました。ありがとうございます。さっき「超伝導量子ビットを使っていると」という話があったと思うんですけど、それは今の話と関係してるんですかね。他の素子を使っていると比較がしづらいという話をしていましたが。

久保　他の素子を使っていると何がめっちゃ効いてくるんだったかな。量子ボリューム・・・

何が効いてくるかと言うと。なんなんだろう笑。なんなんだろうという感じですけど。要は量子回路の深さとか幅とかって、例えば、定義が、ちょっと細かい定義があるんですけど、要は繋がってる範囲、一つの量子ビットが他の量子ビットと協調して動くっていうことが必要になるんですけど。それを 2 つの量子ビットが繋がってるという風に表現するとすると、いっぱい繋がってる量子ビット、いっぱい繋がってるようなアーキテクチャを作りやすい素子と、例えば、いっぱいは繋がらないけど、数と

[55] 誤り訂正ありの量子計算（Fault Tolerant Quantum Computing）。藤井(2021)によれば、量子コンピュータの長期目標は FTQC デバイスの実現である。

してはめちゃくちゃ多くなる、量子ビットの数としては 例えば 100 個とかできるけど、あんまり量子ビット間を繋げるのは難しいとか。なんかそういうふうな性質が物理系によって変わってはくるので、そうした時に、量子回路の幅とか深さっていうのを、なんか超伝導量子ビットコンピューター向けに定義してるので、例えばそれがイオンとかだったら、全然、比較したときにどっちがめちゃくちゃおっきく出ちゃうとか。そういうようなことが起きてしまう。

森下　ちなみに超伝導量子ビットはどっちの性質を持っているということはあるんですか。繋がらないか繋がるかみたいなことを、さっきおっしゃっていただいたのだと。

永山　超伝導量子ビットとイオンの比較みたいな話？

森下　そうですね、はい。

永山　シリコン基板上に作ってるんですよね、という話から始まるのかな。超伝導回路作ってそれを量子ビットにしようっていうことなんですけど。

久保　例えばイオントラップする時って、2 次元的に並べるみたいなのは難しいわけで。でも超伝導量子ビットだと 2 次元的に並べていくみたいなのはよくあるパターンで。

永山　チップ上にデザインができるからフレキシビリティがあるかな。

久保　そういう意味でいうと 2 次元的に並べられるのでつながっている量子ビットとしては多くなる。でもイオントラップの方がフィデリティ[56]がいいとそういうような話はある。

永山　**イオントラップ**の方はこれナチュラルな原子なんで全部同じ原子たくさん並べるんですけど、全部反応する周波数、光の周波数とか一緒なんですよね。なので、このイオン、量子ビットに光あてて操作したいのに、ちょっと周り漏れちゃって当たってるとそっちまで一緒に回っちゃうみたいな難しさがあったりして。で、そのトラップの

[56] 51 ページで説明されるように、量子のエラーレートを測る指標（量子状態が想定している量子状態にどの程度近いかを示す指標）のこと。

原理からしても、頑張ってその磁気的・電気的にトラップしてるんで、周りに電極とかたくさんつけまくってて、いいタイミングでむっちゃひっくり返すみたいなことをやりまくってるんですね。で、その結果一つのサイト、イオントラップのサイトの中には結局だから電場とか磁場とかうまいこと調整できる範囲内でしかイオントラップできないということがあって。トラップできる上限数があることがそもそも仕組み上分かってる。

一方**超伝導量子ビット**の場合は、そのチップの上にたくさんデザインして書いてやればいいだけなんで、基板をね。で、その点でまだスケーラビリティはあるし、周波数ずらすこともできるんだけど、逆に言うとその周波数の最適化全部してまわるのが大変だったりとか。あとそのファブリケーションして作るところで、うまくファブリケーション全部できるとは限らないという話とか。

森下　スケールするかどうかの話とも絡んできて、何となくイメージが広がってきて大変ありがたいです。

永山　もうちょっと特徴の話をしておくと。**超伝導量子ビット**のほうは寿命もすごく短いんですけど、ゲート時間もすごい短いっていう特徴があって。メモリの寿命、量子ビットのメモリ寿命ですね。イオントラップの方は寿命もすごく長いんですけど、ゲート時間も長いっていう特徴がある。で、一番現在フィデリティで先行してるのはイオンの方かな。エラーレートの部分ですね。

森下　なるほど。

永山　けど**イオントラップ**は、そもそも仕組み上、さっきのエラー訂正符号とぴったり合致するタイプのデザインができないなっていうのは現状あって。逆に超伝導はエラー訂正符号と合致するデザインつくれるんじゃないかというような話もあり。超伝導量子ビット、綺麗に並んでるじゃないですか、この四角形状で格子状に。

寺元　それ伝わるのかな…。

森下　分からないです笑。

寺元　図をなんか適当に出すからちょっと。

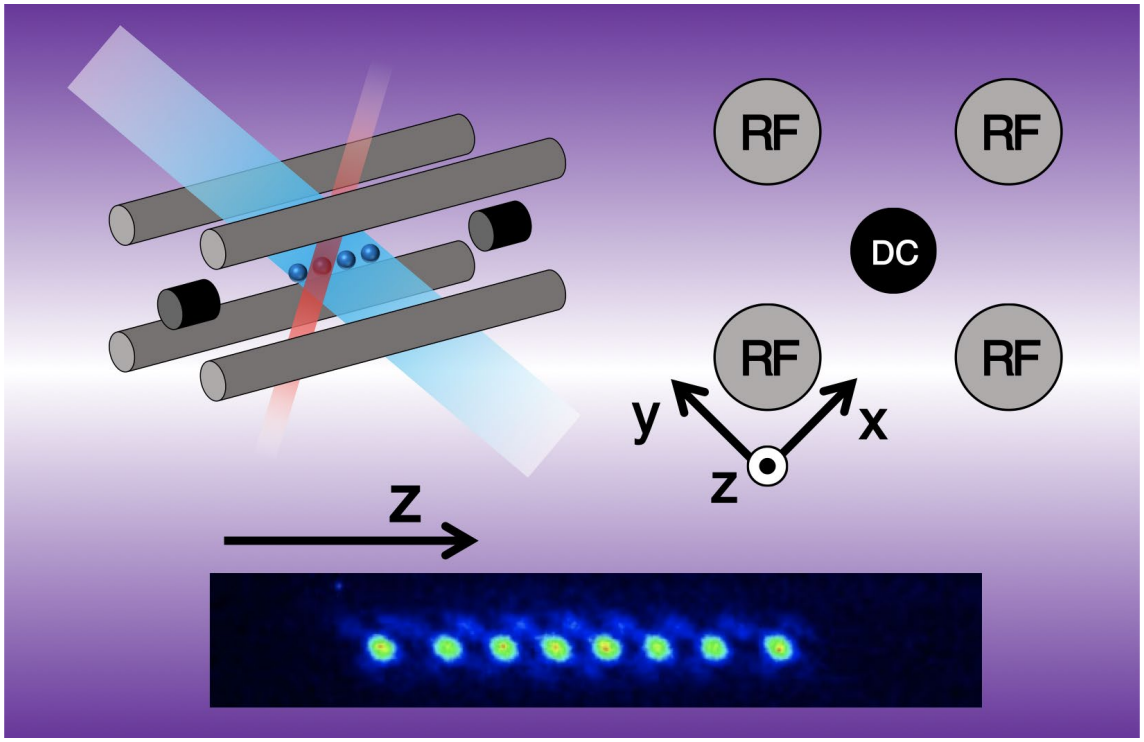

図 2 イオントラップの概念図（QunaSys (2023a)より引用）

寺元　〔イオントラップの概念図（図 2）を見せながら〕まあ、こんな感じで二次元的な回路を組んでいる。イオントラップは、さっき電磁気的に調整してトラップするって言ってたんですけど、これです。真ん中にこうやって止められてるじゃないですか。

永山　超伝導量子ビットの方がエラー訂正を組むのに都合がいいチップデザインにできるとういうのもあるんですけれども。一方でイオントラップの方が寿命長いなとか。で、いま量子ボリュームを調べてみたけど、超伝導量子ビット 256 が 22 年の 6 月か。もっと新しいのがありそうだな。

　イオントラップやってる会社が、うちの量子ボリューム 400 とか 600 とか、うちは 8000 ですよ、とか言い始める。そのぐらいに物理系によってまちまちになってしまうというね。

森下　ありがとうございます、そろそろまとめていきたいんですけど、その寿命とか、要はその量子ボリュームが、性能の単一の指標として必ずしも使われているわけではない

んですかね。さっき言って頂いたようなエラーレートとか、寿命の長さ/短さみたいなこともちろん量子ビットの評価基準の軸として当たり前に使われているっていうような理解でいいですかね。

永山　そうですね。評価軸複数あって、エラーレート、フィデリティと言うんですけどうちの分野ではフィデリティと、あと量子ビットの数と。あたりがよく使われる指標ですね。追加してそのあたりを掛け合わせた、うまいこと調整した量子ボリューム。

森下　でも量子ボリュームも必ずしも完全ではなくて、いろんな他にそこで落ちてるような重要なポイントもいくつかあるっていうようなイメージですかね。

永山　落ちてるポイントがあるわけでは…

久保　いや落ちてるんだと思いますよ。結局積を取るとかなので、情報が落ちてはいるので。多次元の情報を一次元的にまとめて。一次元の指標にしようとすると。

森下　数字としては落ちてるってことですね。もともとの掛け算においては別に落ちてないよっていうことを言ってますか。

久保　はい。

森下　さっきその繋げやすい繋がりにくいみたいなことが、素子によって違うっていう話をされましたけど、そういうものは量子ボリュームという指標から落ちてないって見ていいんですか。

久保　そういうのも入ってはいます。

森下　入ってはいる。

永山　やっぱね、**エラーのことを考えなきゃいけないという時点ですごい厄介**で、古典コンピュータの場合って、エラーは起こらない前提で、数だけで考えることができたっていうのは、 ズルイなという気持ちになる。

量子の場合、まだ発展途上だっていうのは、 如実に出てると思いますね。共通指

標の創り方の難しさには。すべての技術が至っていないので。

古典の場合はまあだからエラー起こらないところまで作り込めることを前提にたくさん並べることの勝負になってましたけど、量子はそもそもエラー起こるしみたいな。たくさん並べる以前にこれも考えなきゃね、みたいな。1 量子ビット単位のメモリ性能とか、1 量子ビット単位のゲート性能、複数量子ビットのときのゲート性能。

森下　要素に還元するのが難しいってこともあるんでしょうか。組み合わせちゃうと変わっちゃうっていう問題もあるんですかね。

永山　そうですね。組み合わせちゃうと、結局、どれか一つだけ抜群に伸ばしたら量子ボリュームが上がるはずでみたいなこともありますよね。

森下　結果役に立たない指標になるという可能性もあるんですかね。

永山　少なくとも現状をイオンと超伝導の間で比較する役には立たないですね。

森下　なるほど、わかりました。ありがとうございました。

話題10.利用しやすいシステムとアーキテクチャの設計

話題の背景

アーキテクチャとは、プログラマ文化における重要かつバナキュラーな概念であり、理論の実装の具体的な方法、あるいは「具現化の形式」を意味する抽象概念である。理論的に分かっている性質や特徴、あるいは目的とする機能を実現するためには、その性質・機能・特徴に応じた設計が必要であり、それ自体がひとつの困難かつ創造的な課題となっている。

本文は、さまざまなレベルのアーキテクチャについてやや整理されていない形で議論されてはいるが、そのことがかえってこの概念が喚起する潜在的な創造性への量子研究者らの期待を表しているように思われたため、あえて整理せずにほとんどそのままの形で載せている。

森下　**――アーキテクチャのことをお聞きできたらなと思っています。ホワイトペーパーの話題はけっこう抽象論的な部分も多かったかなと思うので、抽象的なことがわからない人にもわかるような言葉で話していただけるとありがたいかなと思っています。**

永山　アーキテクチャについては、まっとうなユースケースや、社会インパクトがどんな形であり得るのかというところからバックキャストしないといけないはずです。そのために使いやすいシステムを作るべきだと考えています。

ハードウェアとか基本素子があるじゃないですか。でも基本素子のまま「じゃあこれ使ってください」とか言われても、みんな当然使えないわけで。0 と 1 に繰り返すことができる、このビット単位のメモリを「何十億個あるから好きに使ってください」と突然渡されても、「いや何もできんわ」ってなりますよね。だからそこの間を使いやすく、今極端な話をしていますけど、ユーザにとって使いやすい仕組みとして提供してやるのがアーキテクチャの仕事で。ユーザだけじゃなくて開発者も含みますね。みんな Windows の上が開発しやすいとか、Mac 上が開発しやすいって話があったりするわけですけど、それはオペレーティングシステムのアーキテクチャの設計思想の違いから出てきていたりとか、まあ Windows と Mac だともうそこまで違いないかもしれないけどね。昔むちゃくちゃ大きかったんですよね。80 年代とかはね。いろんな OS の設計思想の違い。

森下　今はどんどん似てきている感じがしますね。

永山　それもどういう仕組みをインターフェースとして提供すればユーザ、開発者がそこでモノ作りやすくて、ユーザも使いやすいのかということがわかってきたからそういう風に流れてきたっていうようなことで。**量子の場合にはそういう「使いやすい」ってどういうことなんだろう？というのが全然まだ未定義**。だから、試行錯誤して使ってみなきゃわかんない部分があるんですよね。ある意味コンピュータインターフェースの話にも感覚的には近い。

古典のアーキテクチャにまんま乗っかってやるってパターンもあるし、QKD、量子鍵配送を使う場合は、古典のアーキテクチャに乗ってやるので結構いいと思って。鍵を提供してくれるという機能、その機能のインターフェースっていうのは一緒なんで。インターフェースは一緒だけど、裏側は量子で動いてますよ、というだけです。

まあ量子コンピュータの場合・・・〔しばし無言〕

久保　量子コンピュータの場合？

永山　いま考えてたのは、まあだから古典計算機の歴史、アーキテクチャっていうよりユーザや開発者にとっての使い方、使いやすさについて考えていたんですけど、昔はアセンブラみたいな低級言語とか、C 言語みたいなメモリを直接意識する必要がある言語を頑張って書かないといけなかったけど、最近どんどん言語の高級化が進んで来て、というところは寺元に話させるとたぶん 3 時間ぐらい平気で話すんだけどさ。

寺元　C 言語は高級言語です。

昔はコンピュータを直に意識しながら使ってましたよね。

森下　昔っていうのは、どのぐらい遡ればいいですか。MS-DOS[57]とかをイメージすればい

[57] Microsoft Disk Operating System。マイクロソフトが Windows 以前に提供していた OS で、直感的に操作可能なグラフィカルユーザインターフェース（GUI）を持たず、コマンドのテキスト入力によって操作する。マッキントッシュは当初よりユーザが OS を意識せずに操作できることを意識しており、初代よりマウスや GUI を備えていたことで知られる。Windows 95 の登場以降、Windows でも GUI による操作が主流となると、両者の差異は相対的に小さくなっていった。

いですか。

寺元　MS-DOS とかはまあわかりやすいですよね。結局コンピュータの事情にすごい引きずられて使っていたじゃないですか。でも今って、当時と比較してコンピュータの事情とか割と気にせずに使えるようになってきた。それとともに人間の考え方もだいぶ変わってきたと思うんですけど。

携帯電話とかも最初はボタンがいっぱいあったじゃないですか。でも iPhone が勝っちゃったじゃないですか。インターフェースがあっちの方向に進化したのはある種、いろんなものを見えなくして、全部ソフトウェアの上できるようになった。タッチパネルの技術的な進化もいろいろありますけど、まぁそういう話だったり、なんか今こうやって、なんかビデオカンファレンスみたいなのが普通にできてて、これって別に、なんでメールじゃなかったのみたいな話なわけじゃないですか。使い方そのものがどんどん変わって、インターフェースがそれによってどんどん進化してきたと思うんですよね。

で、それは何が起きたかっていうと、コンピュータの事情いろいろ気にせずに使えるようになったのが一つあると思うっていう話をたぶん永山はしたいんだと思っていて。**今の量子コンピュータは、さっき「ゲート」って話が出てきましたけど、じゃあゲートをどう配置するっていうところから結局してるわけですよ。あれでどうやってアルゴリズム組むみたいな話をずっとやってるんですけど、「あれインターフェースは？」って話なんですよね。**

そこにつながってくるのが、そこの思想として欲しいのがここでいうアーキテクチャの話。でも、まだ今使いやすいものが何かわかってない、って言ってるんですよ。なので、アーキテクチャにどういうものがふさわしいのかっていうのがスラッと答えられてないのは、そこの方針はまだ別にそんなに立っているわけじゃない。

「ゲート」っていう抽象化も、結局量子ビットにいろんな操作をどういう順番でかけるかっていうのを提示している、というか指示するための表現方法の一つでしかないんですよね。あれもあれで議論がいろいろあって。「ゲート」ってそもそも、じゃあ今みんなそれ使ってなんかやってるけど、それが分かりやすいかっていうことは別にそうでもない。そういう指摘はどっかのブログで読んだけど。

永山　わかった。古典コンピュータって、大昔はプログラミングって配線だったじゃないで

すか？

森下　はい。

永山　そのあと、パンチカードみたいになって。入力して出力するってことをしましたけど、今はそういう入力全部、プログラムも、コンピュータの中のメモリに載っかってて、それでデータ処理で行っている。大きなアーキテクチャの変更がそこであって。量子コンピュータのアーキテクチャはまだ全然定かじゃないですね。

なんとなく量子ゲート操作は、その量子ゲート操作を古典コンピュータのメモリから、メモリ読んで順番にかけていきましょう、ぐらいなことになっている。極めて何となくシンプルに古典コンピュータの延長線上で考えられているということです。

森下　**「何か作っちゃおう」って話ですか**、と聞いたらいいのかな。

永山　あ、そう。なので、「なんか作っちゃおう」なんですよ。それやってるのみんな。アーキテクチャっていうの研究をするって人たちは。理論研究でこんな感じかなーとかいって、よしじゃあとりあえず作ってみよう、みたいな。

森下　何か変わったものができますかっていうことが気になりますよね、そうなると。どういうものを作るんですか？というか、まず具体的に何を作るんですか？あるいは作ってみたいなとか。

永山　任意の量子計算が行える量子コンピュータを作りたいんで、アーキテクチャ…ネットワークのアーキテクチャはすごく分かりやすいんだけど。あ、分散量子コンピュータのアーキテクチャの話が分かりやすいかな。

寺元　この話題、いろんな話が入りすぎていてあかんな。いろんなレイヤーに、いろんなアーキテクチャが存在しうるよね。

永山　アーキテクチャの話、もともとどういう議論してたんだっけ。

寺元　UI に近い意味のアーキテクチャかな。

永山　さっきのパンチカードとか配線でのプログラミングだったみたいな話も結局、ディベロッパーが使いやすいか、使いにくかったわけだよね。だから全部メモリ上にプログラムも存在するタイプのアーキテクチャになったわけで。

森下　だからやっぱり量子技術者のための道具としての・・・

永山　**道具としての洗練**ですね。

森下　それは確かにどんなものが持ちたいかっていうのも含めて気になるところですよね。

永山　今のコンピュータは、パンチカードとか配線じゃないから、ノイマン型コンピュータといわれてて、もしくはプログラム内蔵方式。量子コンピュータはそういうものが定かではなく。

久保　**まあでも古典と同じタスクをやりたいというだけであれば、インターフェースを統一することはできる気はする。高速でやりたくて、バックエンドが量子か古典かはどっちでもいいのであれば、そういうインターフェースを統一することはできる。そうすれば別に古典の今までの資産を使える部分はかなり大きい。量子を意識しなくてもいいという意味ではそういうのはひとつある。**

森下　逆に使えない部分というのがどういうところに出てくるのかっていうところが、やっぱりこういう話だと気になるんですが。どういうところで変わってきちゃって、座りが悪いから「ゲート」の話とかが出てきてるみたいなところがあるんですかねという。すでに古典コンピュータのアーキテクチャを利用している部分もあるのかなと思って聞いているんですが。

永山　ああ、そう。利用している部分あります。で、古典コンピュータのアーキテクチャを利用すると、古典コンピュータのアーキテクチャ上の問題というのはそのまま残ってしまうという問題があり。だから、セキュリティ・バイ・デザインへの話をしているのはそこですよね。

久保　あとは、例えば、数字を入力して返ってくるものが量子状態だった場合は扱えない。量子情報が返ってくる。量子情報が返ってくるって言葉自体もちょっと怪しいんです

けど。

永山　コンピュータからの入出力の話だよね。古典情報を入れて古典情報を返してくるんだったら古典コンピュータの延長上でいいんだけど、量子情報を入力して量子情報返ってくるみたいなパターンとか、量子センサで取ってきた環境の量子データを量子コンピュータに入力して処理してやりたいっていうようなインプットの形もありますし、その処理したものも古典情報として取りたいのか、量子情報としてまた持って別の量子情報処理で使ったりしたいのかっていうのがまた変わってくるでしょうし。ごめん途中から取っちゃったけど、そういう感じでどう、久保君。

久保　はい。量子センサを扱うというのはもう古典の話になるので、実はそんなに問題にならないような気もします。

永山　量子センサっていつまでほんとに古典情報に変換するの？

久保　いや、そうじゃなくて、量子センサを例えば配置しておくとか、量子センサのパラメータ設定するとかは古典情報なので。どう言えばいいのかというとこがあるけど。

そうですね、量子の入出力みたいなのがあったときにどういうインターフェースがいいかというと、うーん、まだそこは難しいような気はします。

森下　時間も少なくなってきたので、そろそろまとめに入りたいんですが。

聞いていて本当にアイディアレベルですけど、スキューモーフィズム[58]の話をちょっと思い返してました。要は他のところからメタファーを借用してきてインターフェースを設計するっていう発想のことで。まあ、つまり、Windows とか Mac だったら「ゴミ箱」とかああいう概念を使って、論理的に表現されているものを生活上の直感に合うものに作り替えていくって言うそういう発想があるわけですけど。やっぱりそうした発想を活用しながらアーキテクチャなり UI なり、インターフェースなりってものを作っていくっていう発想も、ひょっとしたら必要なのかもなという風に聞いて

[58] デザインの代表的な思想のひとつ。スティーブ・ジョブズ時代のアップルが多用したことで知られる。近年ではアップルも含め、フラットデザインと呼ばれるミニマリスティックなシンプルなデザインが GUI に多用される傾向にある。マーク・シェンカー（2018）は、Windows に用いられているフラットデザイン、Google の採用してきたマテリアルデザイン等について紹介している。

いて思った次第です。

寺元　それはやっぱり必要になるんじゃないですか。

永山　そう思います。

寺元　結局 **HCI[59]みたいな分野が非常に発展してそこからいろんなものが得られて、日々に還元されているのがあるので、量子コンピュータが人々の生活に入り込んでいくときにほぼ確実に必要になりますよね。**それがまあ相手が普通の人なのか、研究者なのか、開発者なのか、どれにしても、まあなんかないと扱えないので。そもそも量子状態がそのまま概念としても我々扱えてないので。正確に。そんなに直感的に扱えてないと思いながらいじってるんだけど。

森下　そういうのも実は人文系では研究があるというか、**インターフェースインタラクション研究**っていうのが社会学/人類学系の分野であって。古典的な研究としては GUI を備えたコピー機が出来た時に、それを使うことがどれだけ初めての人には難しいかという研究をやっていて。で、それはもう全然コピーできないんですよね[60]。その失敗のプロセスを見る中でインターフェースを洗練させていくっていうタイプの研究が実際行われていて。なんかそういう応用も効きそうだなと。つまり、量子っていうものの扱いにくさみたいなのを、現場での相互行為を観察して明らかにし、それによってインタラクションを改善していくっていうような研究もできそうだなと、今聞いていて思いました。

寺元　いや、できそうですね。

森下　面白そうだなと思います。

寺元　どうなるんだろうな。

---

[59] ヒューマン・コンピュータ・インタラクション。人間と機械の相互作用を研究する分野。

[60] ルーシー・サッチマン(1999)の古典的著書に言及している。サッチマンは認知科学に「状況論的アプローチ」を導入した人類学者として、インタラクション研究の分野ではよく知られている。

森下　ちょっと躓いているところを観察したり、ビデオで録画したりして。すみません、個人的な感想ですが。

寺元　でも個人的にはめっちゃそこ興味ありますね。

森下　ありがとうございます。

久保　量子状態オブジェクトがコピーできないみたいな。

寺元　直感的じゃない振る舞いがいくらでもあるので。コピーできないというのも直感的じゃない振る舞いなんだよね。

久保　それを、例えばコピーしてなくて、同じのもう 1 回最初から作ってると、実はコピーしたように見えるとかなんか。そういうのはあるかもしれない。

寺元　あと**そもそも、今はなんとなく量子ビットっていうのを古典のビットの概念の延長みたいな感じで言ってますけど、量子ビットって全然ビットじゃないじゃんみたいな気持ちで勉強してました。**

久保　全然ビットじゃないよ。

寺元　なんならそれを理解するためのインターフェースって今はなんか数学がメインじゃない、結局。あれもな、直感が生まれるまでが遠すぎる。

森下　そうなんですね、いや量子ビットと古典ビットの違いについては全然イメージしてなかったので、面白いですね。

久保　その話はでも直感的に対応するものはないっちゃない。そこは難しいポイント。だけど、なんかそれをうまく表現できると面白いというのはある。

寺元　いろんなインターフェースが IBM Quantum とかいろいろな所から出てはいるし、見てなんか分かった気になるんですけど、自分で操作するとぜんぜんその通りに動いてくれないんですよね。こうなるだろうって思ってやってみると、ならなかったりする

んだよな。永山はそういうのが思い通りに動かせるのかもしれないけど。

永山　量子ビット？1 量子ビットは頭の中で動かせる人が、じゃあ 100 量子ビットで動かせるのかって話で。

寺元　そうね、そりゃ無理だ。

永山　じゃ現実的な量子計算で何量子ビットかって話になると、100 万量子ビットって話だからさ。

寺元　確かに。

永山　人類には進化が必要ですな。

話題11.量子の制御にまつわる困難

話題の背景

大阪大学量子フォーカス・グループ・インタビュー（FGI）[61]にて語られた「量子技術は不安定な感じがして制御が大変そう、エラーがおきたときの対処が大変そう」という、量子のイメージに対する学生の感想をきっかけとして、「量子の制御の困難さ」について話した。量子をめぐる「不安定さ」にはさまざまなレイヤーがあることが語られた。

本話題はインタビューの初期に語られた話題であり、量子の物理学的**不安定さ**や、スケールするためには必須とされる**誤り訂正** [62]の考え方など、量子を理解するための基本的かつ重要な論点が紹介されている。

森下　**――以前のミーティングで、量子 FGI における学生の発言に対して「量子の制御自体が難しいというのと、量子を使った通信や計算の失敗した時の処理は別レイヤーの話であることが、伝わればよいかな」とコメントをいただいてますが、よろしければ補足して説明いただけますか。**

久保　はい。FGI での「文系のグループは、懸念について話している時間の方が長めだったが、理系のグループでは懸念の話はほとんどせず、社会実装の際の不安・懸念をきくと、量子技術は不安定な感じがして制御が大変そう、エラーがおきたときの対処が大変そうと話した」という学生の発言内容に対するコメントだったわけですが。

　量子の制御の困難さ自体もあって、それでエラーレートが大きくなるという話もあるんですが、古典的にはエラーが起きても処理できればいいわけで、もちろん量子のほうもエラーを訂正するっていう話もあるんですけど、「エラーが起きた時の対応が

[61] 大阪大学大学生を対象として実施された量子についてのフォーカス・グループ・インタビュー。肥後楽・長門裕介・鹿野祐介(2022)を参照のこと。

[62] エラー訂正とも。ビット（0 と 1）で保存されている情報には、さまざまな理由から一定の確率でエラーが発生する（=0 であるべきデータが 1 になってしまったり、その逆になったりする）。そのため古典的なコンピュータでは、エラーが検知できるような情報を、もとの情報に合わせて入れておく（古典エラー訂正）。量子ビットの場合、量子の重ねあわせ状態の直接観測をすることが原理的に不可能であるため、古典エラー訂正の手法をそのまま用いることができない。スケーラブルな誤り訂正技術の実現は量子情報技術の焦眉の課題となっている。

大変そう」っていうのは、多分そこがごっちゃになってるんだろうなと思いつつ、そういうところが分けられればいいのかなと思った、という話です。

森下　**私たちに全然イメージが湧かないのは「みなさんが量子技術のどのような点を大変だと思っているか」という相場感です。「制御が大変だ」というのは、具体的には何が難しいんですか。**

久保　例えば**量子って言った時には**、電子とか超伝導量子とかそういうものを扱うわけですが、**フィジカルで、かつすごくノイズに弱いものを扱うので制御が難しい**っていう話と、量子ビットをいっぱい使って作ったコンピュータがあって、**量子コンピュータとか量子インターネットの通信網みたいなものがあったとして、それらをうまく協調させて動かすのは難しい**みたいな話と、なんかいくつか話があるかなという感じですかね。

永山　ここで言ってるのは、本当に量子 1 個 1 個の操作の制御は難しいって話をしてるのかなって僕は思ってたんだけど。

久保　そうそう。僕はそうだと思ってて、そういう制御の困難さの話をここでするのか、この「文系のグループは～」っていう学生の発言では、なんかもうちょっと上のレイヤーの話をしてそうだなと思って。その辺が別物というか、この「制御の困難さ」で言うのは量子の 1 個 1 個の難しさっていうようなところかな、という。

寺元　色々なレイヤーで期待しない計算結果が出るんですよね。

1 個 1 個量子ビットをうまく制御して、状態を変えていって正しい計算結果を得られるかどうか、0 を表していた量子ビットを 1 に反転させますみたいなゲート操作も失敗することがあるし。多分ここで言ってるのは「そういうレベルの操作が難しいよね」という話をしていて、でも今後「それででっかい計算して、結果を得て、それを有効に活用しましょう」って言った時に、そのアルゴリズムの実装自体にバグがでてくるかもしれない。

データを読み出したりするときにも失敗するだろうし、通信をしてその量子状態をどっかに移して何かやろうと言ったときにも通信にエラーが乗る可能性があるので、期待しない結果が得られるところがいっぱいあるよっていう話を久保はしたいんだ

と思っていて。

で、「制御の困難」って書いちゃうと、0,1 を反転するゲートにノイズが乗って上手く反転できなかった」とか、低いレイヤーのことしか言ってないように見える。

永山　デジタル技術だと例えば 0V と 3.3V で 0 か 1 かみたいな扱い方をしていて、仮に 3.2V とか出てきたら、3.3V と言いたかったのかということがわかるわけですけど、量子の場合って、もっとむちゃくちゃ小さいんですよね。言ってしまえば 0V と 0.000001V の間でやってるみたいな。そんな差分を制御するって凄い大変で、しかも量子の場合って操作がアナログなので、ちょっとしたずれっていうのがそのままエラーになっちゃう。

それをコントロールするための電気信号を作ったりっていうのもまた難しいですし、そこで量子状態を測定するための装置っていうのもまた難しいですし、とにかく、**制御するために超高精度が必要とされるポイントが多い**んですよね。

色んなベンダーが電気信号を作るための機械を作っていたり、量子ビット自体も作る設計はしてあって、誰かに作ってもらって、またどっか精度高く加工できるところに依頼して作ってもらって…というように、すごいたくさん組み合わせてやっているのが現状で、そこの間の相性みたいなものも出てくるし。

というわけで、いろんなベンダーや研究者が協力して 1 つの量子ビットを作ってるっていうのが現状で。プロダクトを買ってきたりしているのである意味協力してもいる。だから、**「制御の困難さ」の克服ということと社会課題的な話を紐づけるなら、協力できる体制を作るっていうのも一つあってもいいのかもね。水平分業みたいな。**

寺元　たぶん今の話は要素が結構多くて。詳細な話がいくつかあって、そもそもなんか使ってる信号がめちゃくちゃ小さい。0 と 1 だけの古典のデジタル信号ともちょっと違う、複雑だという話。相性問題もいろんなベンダーで加工して組み合わせてるので、相性問題もあるというのが、そもそも小さい制御系の話ですね。

また別のレイヤーで、量子通信が組み合わさったらなんかいろいろ、もっと複雑になってきますねっていう話が今あったかな。アプリケーションレイヤーでも普通にバグが入る可能性があるけど、ここではそんなに取り上げなくてもいいかな。

ぐらいの話が、今永山が言ってくれたということで良い？

永山　水平分業的な協力体制みたいなのを組めると本当はいいんだろうね。いろんなところをやろうとしてるのかもしれないけど、まだこれから。

森下　それは、それぞれ棲み分けられてないっていう感じですか？

永山　そうですね、棲み分けられてない。必要技術の全体像を作らないと、どう棲み分けして良いのかも分からない。

寺元　量子の世界観わかってもらう上では、この話はすごい大事な話。

久保　僕がここで書いたのは、こういういろんなエラーの原因があって。なんか、これで〔FGIの〕「文系のグループは～」っていうところで言うと、量子技術が不安定な感じっていうのは、多分このレイヤーの話をしていて、エラーが起きたときの対処性変化っていうのはアプリケーションレイヤーのバグの話をしていて。その辺が、はっきりわかればいいんじゃないかなという気持ちでした。

森下　それぞれのレイヤーの特性に応じて課題がでてくる。そこのところを見せられると良いかと思います。私たち ELSI の人間にも教えていただけると大変助かります。

話題12.「広く薄くばらまく」段階と「選択と集中」の段階

話題の背景

量子技術は未だ研究開発段階であり、どの技術が実用上のスタンダードになるかが決まっているわけではない。そのような状況では**選択と集中**戦略を取ることはハイリスクである。実際アメリカでもさまざまなシーズに広く薄く予算をつける形で研究が行われており、近年は日本でも同様であると永山は語る。

森下　**――海外と日本の状況の違いを、もうちょっと詳しく知りたいなと思ったんですね。日本の文脈の話は結構していただいた一方、世界との比較みたいなことは、ここでの会話の中であんまり出てこなかったので、もうちょっと世界と比べた日本の状況というのを知りたいなと。**

永山　まず、日本が何年か遅れているという状況はありますね。注力する分野がね。量子インターネットや量子ネットワークも、欧州では 2018 年からテストベッドに向けた予算が付き、アメリカでは 2020 年から予算がついた。それを見て、日本も量子ネットワークのテストベッドに予算が付いたと見ることも出来る感じの時間感覚。だからまあ、向こうではそれだけ早いうちから注目を集めてたんですよね、量子インターネットやネットワーク化による分散量子計算はね。

　他の量子技術もどうかな。世界は注目を集めているが、日本ではあまり…現状はないんじゃないかな。遡って考えると、2014 年ぐらいに Google が取り込んだ UC サンタバーバラのチームが超伝導量子ビットですごい性能を出したころ[63]に、日本は一旦量子情報技術への投資を抑えちゃったんで、国が。その意味ではあの時代は日本だけあんまり、って感じだったんですけど、今となってはそれなりに時期の遅れはあるものの、それなりにちゃんと押さえているんじゃないかな。けっこう、良い研究があるんですよ。日本。

[63] 2014 年に UC サンタバーバラのジョン・マーティニスの率いるチームがグーグルの量子人工知能チームのメンバーとなった。2019 年に 53 個の量子ビットを用いた量子コンピュータで「量子超越性」を実証したと発表された（ITmedia 2019）。

森下　「量子アニーリングや Noisy Intermediate-Scale Quantum〔NISQ〕量子コンピュータの研究開発では、日本は世界に先駆ける研究成果を持っていたものの、開発競争において海外企業に遅れを取ってしまった…この結果、量子コンピュータアーキテクチャや応用、エラー訂正機能を持つフルスペックの量子コンピュータの研究開発など、遅れを取り戻すチャンスはあるものの、ハードウェア開発で一度出遅れてしまったことによるハンディキャップは否めず、苦戦を強いられている」と「量子インターネット・ホワイトペーパー」にありますが[64]、これをもう少し具体的に話せますか。

永山　**ハードウェア開発って人手と時間とお金がかかるものなんですよね。**並行にできるところ、並行にしたいところを、予算が付いてないと一人が順番でやることになったりして遅れていく、みたいな話はありますし。

　たくさん量子ビットを動かすときにはどの量子ビットをどういう周波数で動かすかの最適化が必要だ、みたいな話はさっきちらっとしましたけど、だからうん、研究要素もあるけど、技術要素みたいな部分になってくると、やっぱり技術開発、その部隊の人数とか、使える予算の話がネックになる。で、Google とか GAFA がすごいでかい計算力で AI とかやりまくって。OpenAI も結局すごいでかい計算力でやってるよね。ChatGPT も。ねえ久保君。

久保　はい。

永山　うん。そういうリソースがあるところはやっぱり、こういう場面でも強いだろうなっていうのはあるかな。

森下　うん、なるほど。そうすると、〔そういう海外の動向に〕ついていく感じになるんですかね。

永山　方向は 2 つあって。ついていくことにするか、面白いワン・アイディアで突っ込むか。今、日本も、そんな悪くない状況だとは思うかな。投資の額とか付け方自体はね。「選択と集中」で、この物理系しかやりませんみたいなことになってたら結構悲惨だった

[64] QITF(2021: 25)。

と思うけど、広くつけているので。

森下　なんか一つ尖ったことをやるというのは、何か実際の例とかあったりするんですか。

永山　阪大に高橋〔優樹〕先生がいらっしゃったじゃないですか、イオントラップの。今 OIST〔沖縄科学技術大学院大学〕に異動されましたけど[65]。あの人共振器の中にイオン入れて、イオンの量子通信をすごく効率上げようみたいなことをやっていた。IonQ とかアメリカ、北米のベンチャーのぶいぶい言わせているところ、イオン量子コンピュータ作ろうとしているところとは方針違ってて、将来的にそこで性能を出すという必要がある部分を先取るのが重要だろうなっていうのは思います。目の前で量子コンピュータを作るだけじゃなくてね。将来性能良い量子コンピュータを作るための研究開発を行うという、その言い方が正しいかな。と思っていたら、先週ぐらいにインスブルックから、ヨーロッパの方から似たような共振器にイオンを入れて通信効率を上げましょうみたいな論文が出てきて、そんなに性能が出てない様子ですが、将来必要になることは皆考えていて、日本の仲間たちにも頑張ってもらいたいなと思います。そこまでわかってないんですけど。

森下　なるほど、ありがとうございます。

永山　イオンと超伝導の話もそうだけど、**どの量子ビットが本命になっていくのかっていうのは全然わからない状況で「選択と集中」なんて全然できるはずがなくて。**どれも育てておいて、最初のプロダクトとして良いものを選びましょう、みたいなことをしなきゃいけないと。

海外、アメリカとかは広くつけてそれをやってる訳ですけど、日本もそういうタイプの形になっているので、その研究開発のオーバーオールの方針はそんなに悪くないとは思う。

それはあれだな、様々な領域に目配りできているかどうかな気がする。

森下　なるほど。それは戦略を立てるにあたって、日本もアメリカも、割と特定の利害関係

[65] OIST 量子情報物理実験ユニット（OIST 2020）。

者に絞られることなく広く話を聞けているっていう感じだってことですかね。

永山　なのかなとは思いますね。色々言いたくなる取り組みもあれど、その方針を推している人ももちろんいるんでしょうし。結果全体ではちゃんとそれなりにやっているのかな。でも、量子技術分かる人が少ないっていうのはネックな部分で、結局研究者にその量子技術の社会実装まで考えさせている。でも量子ビットの研究者に量子コンピュータの社会実装を考えろというのは、適材適所を間違っている部分はあるんで。

話題13.ELSI を含む量子情報技術ロードマップの作成

話題の背景

ロードマップの作成は、新しい科学技術を持続的に発展させる有力な方法となる場合がある。半導体技術のケースでは、「**国際半導体技術ロードマップ**」が作成されることにより、「集積回路のトランジスタ数が 2 年で 2 倍になる」という**ムーアの法則**の**自己予言的成就**が可能となったとされる。量子技術の場合は、量子コンピューティング会社 Quantinuum が**量子ボリューム**（話題 9 を参照）を毎年 1 桁増加させるという目標を立てており、2022 年 9 月には量子ボリュームの最高値 8192 を達成したというプレスリリースを発表している [66]。

また国内の動きとして、2022 年 4 月の内閣府統合イノベーション戦略推進会議において、「量子技術イノベーション戦略ロードマップ（改定案）[67]」が示された。内容について確認しながら、ロードマップの作られ方、示されているスケジュールについての見立てなどを伺いつつ、今後新しいロードマップを作る場合に盛り込むべき新たな論点等について検討している。

森下　**――量子技術のロードマップについて。現行のロードマップに ELSI の観点は含まれていませんが、われわれは ELSI の観点を含めたロードマップを作れるんじゃないかという思いがあります。とくに「技術の進展」項目の内容が具体的であるのに比べると、「経済・社会インパクト」項目の部分がやや抽象的であることが気になっています。もうちょっと掘り下げられそうです。**

永山　そうですね。ここが抽象的な理由はシードベースだけ考えてるからですね。世の中、学者が中心になってシードベースでデジタルにどんなインパクトがあるかを考えてる話が多いので、それが反映されてるから薄くなる。結局ベンダー側の論理で動いているので、これを使ったディベロッパーとかユーザの話が入らない。前もどっかで僕言いましたけど、それがここに現れていると思いますね。難しいかもしれないな。

[66] クオンティニュアム株式会社(2022)。
[67] 統合イノベーション戦略推進会議 (2022)

久保　ロードマップの作られ方ってトップダウン、要は最初にこういうインパクトが欲しいから作る方がいいのか、それとも「こういうのがあって、とりまとめるとこんな感じ」みたいのがいいのかっていうと、前者が良さそうに思えるけど、その辺はどうなんですかね。

永山　両側から考えてミートするポイントを探すべきだよね。

久保　なるほど。分解していって、なんかできそうなところを探って…みたいな感じですね。

肥後　人材育成の話題にも繋がるんですけど、そういう狭間というか、**「あいだ」のところを専門に考えられる人がすでにいるのかいないのか**、というところが気になってたんですけど。現段階では「こういう人がいる」みたいな特定の人材であったり、部門みたいなものがあるという状況にはまだ至ってない？

寺元　今「あいだ」と言っているのは、QKD を作るベンダーと使う側の「あいだ」ってことですか？

肥後　ベンダーぐらいの方でも全然ありと思うんですけど、気になっているところとしては、もう少し社会の幅を広げて考える人がここを書いてもいいのではないか、みたいなところが気になっていて。

寺元　「社会の幅を広げる」というのは？

肥後　たとえば経済でいうと、経済的な効果とかインパクトみたいなものは割と書いてあるんですけど、**製品がこういうふうに社会に出るとか、こういう人が使えるものになる、みたいな書き方が大半を占めていて、出たことによって社会に与える影響の言語化が、あまりされてないように見えます。**

ものが社会に出るっていうことは言われてるけど、それが出たことによって、どうなるというか、こういう議論が生起するだろうみたいな話が、ここにはないというのを思って。

永山　**波及効果が見えないんですよね。**

肥後　そうです、**もう少し視野が広がるための、聞くべき人**みたいなところが、どういうふうに今整理されているのかが気になっていました。

永山　という意味だと、やっぱり**そういう人材はいないか、いても足りてない**ですね。

久保　たとえば、量子暗号通信が可能になって何が嬉しいのか、みたいな話？

肥後　そう。そこからどうなるというような、もう一歩踏み込んだインパクトまで書いてあると面白いなと思いました。

久保　確かに。これ経済・社会インパクトかと言われると、その話してないような気がしてきました。

肥後　どっちかというと、技術の方に書いても良いようにも読めるというか。

永山　それはすみません。〔QITF ホワイトペーパーを書いていた頃の〕一年前の僕がそこまで考えられるわけはない。もうわかったんですけど。

肥後　それを考えるのが、同じ人であるべきかどうかというのもちょっと分かんないなと思っていて。**そこは違う専門性を持つ人が一緒に考えてもいいところなんじゃないかと。**

森下　我々がやるべきことですよね。さっき**人材育成の話がありましたけど、どこの段階でどういう人材を育てないといけないか、みたいな話を具体的に書くレベルでも、もうちょっと具体的な話ができるような気もする**んですけど。そこを含めたり、ELSI 的な課題がどこでどういう形で現れうるかを予見して書くことも含めて、こういったものの解像度が上げられても面白いかなという気がしますよね。

　また、ロードマップに示されているタイムスケジュールについて、こんな期間で可能な話なんですか？っていうことがちょっと気になっています。ロードマップには、2025 年とか 2030 年について書いてありますけど。

永山　無茶な事はあんまり言ってないはず。

森下　この 5 年ぐらいは、下の方の融合領域ロードマップとかもいけそうな話が書いてあるんでしょうか [68]。

永山　融合領域ロードマップは、ここ 5 年ぐらいは…やってはいるけどだいぶ期待感を含んでいる部分もあるかな。

久保　（融合領域ロードマップの）「量子 AI 技術」で言うと、少なくともゲート型のところは 2025 年のところまではすでにありそうな話が結構あって。2030 年のところで一気に難しいことやろうっていうように見える。

「指数加速が起こりうる高度な量子機械学習アルゴリズムの構築」っていうのがあって、どういう意味で指数加速と言っているかにもよりますが、これが存在するかどうかすらわからないと思います僕は。

永山　「そこを目指しましょう」という話と「確実にやりましょう」っていう話が混ざっていますが、両方重要です。

寺元　永山が書いてくれたとおり、ちゃんとしたヴィジョンに合わせた強みを創っていくことが大事かな。どんなヴィジョンを描いて進めるべきか。

森下　**将来的にどうあるべきか考えながら進めたほうがいい**と思います。できることだけやっていくとどこに行くのか分からないので、大きくイメージする。グラントをとるときに書くような、この路線でいけば 10 年後にこれくらいのことができるかもということを言語化して。

そのうえで、**それも柔軟に変えられるようにしておかないといけない**、と思います。地震予知なんかは、1960 年代に地震予知が 10 年後に実現すると言ってできずに、その後もずっと予知の看板を下ろせなかった。

---

[68] たとえば「生体ナノ量子センサを用いた細胞のスクリーニングと細胞の品質管理により、バイオ医薬品の効率的生産や再生医療の効率化を実現」「超高感度 NMR/MRI での薬剤スクリーニングが生化学、薬学系研究室・創薬メーカーに普及し、分子構造レベルのエビデンスに基づいた創薬が可能に」「候補物質に対する精密構造解析と生体反応のシミュレーションによる超効率的・低コストの創薬を実現」「嗅覚を模倣・改良した超高感度物質センサによる超早期病気発見等の健康モニタリング」などの項目が並んでいる（統合イノベーション戦略推進会議 2022）。

寺元　実現できると言い切りたくはないですね。

岸本　量子の分野でもそういう予言はあるんですよね。

久保　あります。「量子版ムーアの法則」[69]みたいなのが。

森下　ロードマップを作ったはいいが、それが独り歩きするのは危ない。見直し、改めて確認する、検討するとなったときに、できなかったことをできなかったと言えるようになっていないとまずい。

寺元　現行のプロジェクトを見ていると、そんなに素直になれないんじゃないか。できなかったことを認めるのは難しいですよ。

森下　研究を始める段階では何も分からないが、研究を進めると新しいことが分かってくるので、「思っていたよりも実現が難しい」ということも分かってくる。そういうタイミングで、もともとの目標は将来的には実現するとしつつも、研究の発展によってあらわれた新しい解決すべき話題が出てくるのでそれに取り組む、ということになっていく。

肥後　少しだけ、今後の量子技術のテクノロジーアセスメント（TA）の方向性についてもお聞きしたいのですが。今後、どういう方向性で TA をするのかということを考えたときに、量子技術の経済的・社会的インパクトについてかなりスコープが狭くなっている、そういうところを広げるようなやり方っていうのがまず一つ必要じゃないかと思うのですが、いかがでしょうか。

永山　TA って、アセスメントをする対象が誰かによって強く引っ張られる気がしています。結局みんな自分の専門領域の話をするじゃないですか。だから TA をする側が明確な目的を持っていることがまず必要かな。目的を持たずに、量子の各分野の専門家をたくさん集めても議論が混乱しやすいのかなと思います。

例えば量子コンピュータ作るための TA でどういう人材が必要なのかについてヒア

[69] 話題 9「ベンチマーク：量子ボリューム」を参照のこと。

リングするなら、量子コンピュータを本当に作ろうとしている人、プロジェクトをマネジメントしている人に聞きにいくのがいいのかなと思いますし。全体像が見えない中で、個別具体のトピックの研究者が足りないという話が 100 個あっても、整理できなくて困ってしまう。そもそも問いの立て方が間違っている。分野違いっていうのはそういうことですよね。

寺元　とりあえず分野をちょっと整理して、どういう人欲しいですかって聞いていくしかないってこと？それはそれで骨が折れそうな気もしますが。

永山　まず TA のヒアリング対象をちゃんと検討しなければならないという話です。

カテゴリ 3：量子情報技術の人材をめぐる話題

話題14.量子人材に必要なスキルセット

話題の背景

カテゴリ 3 では、量子情報技術の研究開発者、社会実装に向けたプロセスを並走する人材に関する現状と今後の育成について取り上げる。現在、日本においては量子人材を育成するための拠点[70]や複数の教育プログラム[71]が展開され、量子技術に関するさまざまなスキルを身につけるためのカリキュラムが実施されている。

本文では、実際に量子技術に関する研究開発活動に携わる量子人材となるために、具体的にどのようなスキルセットを獲得することが求められるのか検討している。

森下　**――量子人材に必要なスキルセットの構築についてお聞きします。以前私たちの間で、「量子人材になるために、本当に量子力学が必要か」ということが話題になりました。量子力学以外に何が必要かという点も含めてお聞きしたいのですが。**

永山　**量子情報理論というか量子コンピューティングが分かれば、必ずしも量子力学はいらないと思います。**ただし分野によっては量子力学がもちろん必要です。たとえばアプリケーションの先が量子センサだったら量子力学が当然必要になります。

量子力学が必要なところといらないところがあるはずで、コンピュータとして扱うんだったら量子力学の知識がいらなくなっていく未来もあるんじゃないかと思います。それは抽象化するから。量子の性質は隠蔽されて、今のプログラミング言語がどうやってメモリ１つ１つ操作しているのか見えないのと同じ様に、量子１つ１つがどうやって操作されているかを知らなくても使えるようになると、ハードルが下がってみんなが使えるようになるっていう話ですね。

---

[70] 量子技術高等教育拠点（ https://qacademy.jp ）、東京大学量子ネイティブ育成センター（https://qnec.jp/）など。

[71] 量子技術教育プログラム（Quantum Education For Future Technologies; QEd）（QEd 2021）、量子ネイティブ人材育成プログラム（NICT Quantum Camp: NQC）（NICT 2023）など。

量子コンピュータだとそれは可能ですけど、量子センサで人間を測定しましょう、何かアクティブに当ててその反応を量子センサに取りましょうみたいな話になってくると、やっぱり専門性は必要そうな気はしますけどね。

寺元　アプリケーションが何かということ、そこに連なる、そこを繋ぐインターフェースの出来栄えによってどのぐらい知識が必要か、あるいは必要じゃないかが決まってくるということですね。

森下　ここで言う「量子コンピューティングが分かる」ってどういうことですか？

永山　**ブラ-ケット扱って[72]線形代数回して、計算できるくらいのレベルを想定**しています。

久保　ブラ-ケット記法は線形代数の表現方法なので、要は線形代数が大事ですかね。

寺元　本当にそれだけでいい？

永山　これを基本として、あとは量子技術の中でどこをやるかによる。基本としてミニマムセットの中に量子力学が実は入ってないのではないか、ということです。量子コンピューティング、量子情報の通信応用でセキュリティだと量子力学いらないけど今度はセキュリティの知識は必要になるわけです。

森下　古典力学[73]を飛ばして量子力学を学ぶことができるでしょうか。

寺元　量子力学をやるために古典力学は必要だと思うな。

久保　無いと無理だと思いますね。そして量子計算を実行してその結果がどうなるかを知る上では、線形代数が最低限必要です。線形代数を知らない場合には、実際量子計算した時に何が起こっているのか完全に知らないままやっていることになると思います。

---

[72] ブラ-ケット記法（bra-ket notation）は、ディラックにより考案された、量子力学における量子状態の表記法。

[73]古典力学とは、量子力学・相対論登場以前の力学。マクロで光速より十分に遅い系では近似的に正しい。現在の物理学の標準的なカリキュラムでは、量子力学を学ぶ前にまず古典力学について学ぶ。

森下　ブラックボックスになるって感じですかね。

久保　そうですね。

永山　今のコンピュータを使うのに電磁気学とかを考えながらやっているわけではない。

久保　そことはちょっと違う部分があると思っていて。今のコンピュータを操作するときに電磁気学は要らないというのは確かにそうだと思います。情報科学の理論の枠組みでやってる分には、そこの素子がどういう仕組みで動いてるかは知らなくてもいい。

ただ、量子情報科学と古典の情報科学の間には違いがあるので、そこに何かしら差がでてきそうな気がしている。結局量子アルゴリズムって量子力学の特性を使うので、たとえばこの計算をしたいってときに「それは実際には実行できません」みたいな、シミュレータ上で動かせるかもしれないけど実際には実行できませんという事象が発生する気がする。量子通信でもあるかもしれない。そういうことが結構ありそうな気がします。

寺元　それはインターフェースが整ってないっていう話ではなく？キーとなるインターフェースがあったら〔量子力学や線形代数といった知識は〕要らなくなる。古典コンピュータでは要らなくなった。でも、今でもマイコン（マイクロコンピュータ）をいじろうと思うと、結局簡単な電子回路の話を知らないときついけれども、ただ普通に自作パソコン作りますと言ってパーツ買ってきて組み立てるだけなら、要らないんじゃないですか。

久保　計算量の恩恵受けようと思った時に、たとえばインターフェースが統一されていたとしても、この場合には恩恵受けられるけどこの場合には恩恵受けられないみたいな、そういう話が残りそう。それは常に残る気がするな。

寺元　なるほど。それもインターフェースが未成熟なのでは、と思っちゃうんだけど、そうでもない感じがすると。どんなに綺麗なインターフェースだったとしてもそこの理解無しにはうまく使えない？期待した動きをしないことがあると？

久保　量子計算の場合は結局、量子で動かすことによって計算が速くなる嬉しさがあるわけ

で、ただ、結局インターフェースとしては入力と出力は一緒で、ただ計算が速いかどうかになるわけで、どういう時に速くなってどういう時に速くならないかっていうのは、何というか・・・

森下　**インターフェースが整ってくると、次元の違うリテラシーがそのうち必要になってくるだろう**ということを、今伺っていて思いました。Windows 95 ができたときみたいに、OS がどういう論理構造を想定して動いているかっていうような、OS 自体が持ってる構造についての知識が必要になる。そうしないと、うまく Windows が動かなかった時にどういう部分を触ればきちんと動くのかが分からない。そんなレベルで、ソフトの構造が複雑になるにつれて、新しいリテラシーが必要になる面が出てきそうです。

モノを作っている段階ではまだモノを作るにあたって必要な科学的知識っていう話になりますけど、実際にものが出来てくると、出来上がったものに対する理解が、基礎的な科学的知識とは別に必要になるのかなという気がしました。そうなると、リテラシーの教育みたいなものが新たに発生してくるのかなとも思いました。

寺元　それは確実に必要になりそうで、今すでにあるような気もする。量子力学自体の話とは別に、使ってるシミュレータのインターフェースだったり、実機のインターフェースだったりの理解はやっぱり必要になってくるし、新しいものが出てきたら、そのインターフェースの理解も必要になりそうです。

話題15.人材像の具体化

話題の背景

話題 15 では、人材像の具体化について検討している。量子インターネットのホワイトペーパーには量子インターネット人材育成の必要性が謳われている [74]。「量子技術イノベーション戦略」には人材戦略についての記載があり、「優れた人材の育成・確保」「頭脳循環の推進」「量子ネイティブ」の育成が必要であるとされる [75]。現行の人材育成プログラムとしては NICT による人材育成プログラム「NICT Quantum Camp」[76]や Q-LEAP の各種人材育成プログラム [77]等が存在するが、たとえば裾野の人材、とくに人文社会系の量子人材像の本格的な具体化には至っていない。

本文では、研究機関や企業等、量子技術の研究開発が行われる現場において、現在どのような人材が不足しているのか、そもそも必要とされている人材とは具体的にどのような技能を持つ人物であるのかについて問う。永山は、全ての場面において人材が足りないことを指摘しつつ、どのような技能が求められるのか、現状では量子技術の研究開発がどのような分野の研究室で行われているのかを語る。

森下　——人材育成に関して何が必要か、あるいはどんな人材をイメージするべきかという話をしたいと思います。

寺元　欲しい人材像について明確にしないと話が進まないですね。永山、どんな人が足りないと思う？

永山　まずは実験家が足りないですね。実験家というのは、例えば量子エレクトロニクスのような分野で技術を持っている研究者という意味です。PM からポスドクまで、まずそこが足りていない。研究開発を進めるにあたっては、工学や技術の分野に量子も入ってきていて「たくさん技術者を揃えて、プロジェクト進めた方が勝ち」みたいな感

[74] QITF (2021: 25)。
[75] 内閣府（2020）。
[76] NICT (2023)。
[77] JST (2018a)。

じがある。IBM [78]や Google[79]は、その方法でどんどん研究開発を進めていますね。

ブレイクスルーももちろん必要なので、ちゃんと研究者然とした実験家も必要ですが、いずれにせよやっぱり人数が必要だと思います。**以前から言われているのは、量子のこの分野って、理論研究が実験の 10 年先を進んでいるということです。実験が理論に追いついてない**んですよね。

寺元　確かにそんな感じはする。

永山　ただしこれは量子力学としての研究という話で、「量子コンピュータ作りましょう、量子インターネット作りましょう」みたいな**量子技術の実用化の話になってくると、今度はバックキャストで考えられる人材〔物理よりも情報機器としての姿や、情報分野の中での立ち位置について考えられる人〕も足りなくなる。どういう設計をすべきかみたいな、アーキテクチャ分野の人材です。**僕はそこにうまいことはまって、いろいろやらせてもらっていますが、実際足りてないから困っている。

寺元　逆に（人材が）足りている部分はどこなんだろう。比較的ここは後回しでもいいかというような。

永山　人材が足りている分野はないんじゃないかな。あえて言うなら、QKD の理論や安全性証明のようなニッチな部分はある程度将来性もわかってきていると言えるかと聞いています。

森下　量子分野の中で、専門を移ることができるものですか？ どのくらい応用が効きますか？

永山　QKD の研究で行われている「どれくらい情報が漏れるか」というセキュリティに関する証明は、QKD でずっと積み立てられてきた理論を前提として新しい証明をするので、外から入るのにはハードルが高く、他分野でその理論を生かすのは結構難しいところがあります。

---

78 IBM Quantum for Researchers (IBM 2023)
79 Google Quantum AI (Google 2023)

さっき暗号解読の話がありましたけど、暗号の中にもすごくたくさん種類があって、QKD は共通秘密鍵を作ろうという中のごく一部です。QKD の理論と、共通秘密鍵をどう使うかという話はまた別の分野になりますし、そう考えると暗号技術の中のとても狭いところに人材が集中しています。

森下　今は例えば QKD なら、超優秀な学生であれば、専攻すれば何かキャリアや将来が見えるようなイメージですか？

永山　量子分野の中では一緒なんじゃないかという気がします。ただ、QKD だけは、日本では総務省がずっと（予算的に）支えてきた部分があります。

森下　今はどこから人材を確保していますか？学生が大学院に進学するという形ですか？そのほか、たとえば留学生は、研究開発の現場にどんどん参画しているのでしょうか。

永山　それはもう国によると思います。例えばアメリカは、留学生がどんどんやってきますから。それ以外の国は、やっぱり学生を育てるのが中心かな。

久保　明らかに物理の人、学生が量子情報に行くっていうパターンはとても増えている。僕が修士課程のときには、量子情報をやってる人って見かけたことが全然なかった。今はむしろすごい倍率になってるぐらいだと思うので、そういう意味では注目度自体は上がっている。でも、そもそも研究する人が日本国内で少なくなってるのかもしれないですね。

永山　特に日本の学生は最近将来性をよく見てますから、何も考えずに量子分野に進学していいのかっていうのは結構疑っていて、迷いなく量子分野に進もうという感覚ではないですね。

量子分野の将来性を疑っているというよりも、量子分野をポストを用意する側がどうしていくのか、っていうところです。研究全般そうだと思うのですが、十分な数のポストを保証されてないのにその分野に進めるかという話です。量子分野は 2010 年

代前半に一旦縮小したという流れもあるので。国家プロジェクトが縮小した影響[80]などでポストがなく、量子分野で博士号を取得したけど、結局そちらに進まなかったような、就職に苦労した先輩がいたということです。

森下　**もう少し基本的なことについてもお聞きします。量子技術について現在は物理学部・物理学科の学生が研究しているんですか？**

永山　物理学科や物理工学科の学生は、ハードウェアについては研究しますね。

森下　それ以外の領域の出身者で、量子に関わっている人には、どういう人がいますか？

永山　コンピューターサイエンスでもいますよ。アルゴリズムの研究や、その計算量のような部分について研究しています。

森下　計算系の人たちですね。

永山　僕のカテゴリは計算機工学です。基本はそのあたりの分野かな。国プロ（国家プロジェクト）などの教育プログラムは、座学的な面や量子プログラミングの教育が多いですね。これらがやりやすいというのもあると思います。手に技術を持っている人、量子エレクトロニクスみたいなところのプログラムが現状では足りないなと思っていて、すごく気になります。とりあえず座学で IBM の量子コンピュータとか使ってみるというのは手軽に始められるんですけど、それだけでは分野全体の発展性がないから。

オンラインのサマースクールでしっかり座学の教育をしつつ、インターンでは技術的な領域で実際に手を動かせるようにするのは大切なことだと思います。ちょうどこの間 QEd[81]という国プロで、「座学と実践、両方揃っているプログラム少なくない？インターンで現場にいけるといいね」という議論をしました。僕はあちこちで言って

[80] ImPACT（革新的研究開発推進プログラム（Impulsing Paradigm Change through Disruptive Technologies Program）、量子情報技術の課題：2014 年～2018 年、内閣府）は、 広範な量子技術のプロジェクトに満遍なく予算がつけられた FIRST（最先端研究開発支援プログラム、量子情報技術の課題：2009 年～2013 年、JST）とは異なり、特定の量子技術プロジェクトにフォーカスする形で予算がつけられた。

[81] QEd (2021)

いますけど。

森下　企業には研究者は在籍していますか？

永山　ちょっとずつ増えている感じではあります。でも、足りてはいないですね。自前で研究者を抱える企業はちょっとずつ増えていて、量子コンピュータを作る流れで博士を取った人を採用する企業もあります。でも研究者の数は全然足りていません。

寺元　研究者のポストは足りない？

久保　大学も企業も足りないのでは。どこからやるのがいいんでしょうね。まずはお金があればいいのか、ポストを先に作る方がいいのか。

永山　ポストを作るっていうのはお金と対応するよね。

岸本　AI みたいに企業が高給を出して人材を集めるようになる？

永山　IBM とか海外ではすでにその流れになっていて、獲得競争になってますね。量子人材の人件費は今世界的にすごく高騰しています。有名なのは IBM が量子人材を PhD を取った量子エンジニアを募集して、2500 万出すと言った事例[82]です。皆が皆 IBM に行くわけではなくて、大学に行ったりする人もいるわけですけど。それでも世界では、日本よりは給与高い。日本の経済が弱くなっちゃったっていう話も絡んでくるんですけど、とはいえ大学規定の給与がネックになって、選択肢から日本が外されるみたいなことがやっぱりありますよね。今わかりやすく大学の給与の話をしましたけど、そういう**制度改革の速度みたいなものは必要なんだろうなと思います。**専任教員は大学内での分野間のバランスを考える必要があるとしても、**例えば外部資金の特任雇用なんかはもっと柔軟にできて良いんじゃないかと思います。**

森下　そうですよね。

---

[82] 「年収 2500 万超えも、IBM や東大が量子人材育成に注力するわけ」（日経クロステック 2021）。

話題16.人材のサーキュレーションと日本の研究環境の特殊性

話題の背景

「量子未来社会ビジョン」には、国際共同研究や若手を中心とする研究者の海外派遣、海外からの優秀な研究者の呼び込みなどによる、国際交流、国際流動性の向上が謳われる[83]。国際交流の重要性は認めつつ、一方的に海外に日本の研究者が流出する状況に陥らないために、日本での研究環境の整備やポストの確保を行うことが重要である。

森下　**――人材育成をするために海外と交流したり、人材を獲得する必要があって、それには戦略がいるし、ロードマップもあって欲しいし、教材カリキュラムが必要になってくるし、しかもそれで育った人材を割り当てるポストがあって、そういうキャリアも必要になるよねという話がこの話題です。まず、海外の人とどうやって交流するのか？という話をお聞きしたいのですが。**

永山　人材のサーキュレーションに入るのは重要だけど、サーキュレーションした結果、日本の人材が出ていって向こうで定着するばっかりで、外の人たちは日本に定着してくれませんとなったら困っちゃうよね。だから定着してもらう魅力を作らなきゃいけない。

寺元　日本はもうサーキュレーションの輪の中に入っているっていう認識でいい？

永山　うーん。**言語の壁**もあるんだよね。 入ってると言えば入ってるんだけど、そこまでガッツリ入り込めてない感じだと思う。

寺元　何をやったらそこに入れるの？何が足りてない？

永山　受け入れ側として、海外から研究者に来てもらうための課題は研究の魅力と環境の魅力と両方あると思っていて。一つの課題はコミュニケーションです。やっぱり英語、

[83] 内閣府(2022: 35)

言語の壁かな。これは環境的な課題だね。日本人が日本語しか使わないこと。海外の人たちからすると、ディスカッションしにくいよね。まあちょっと、そこは難しいと言うか。2〜3 年のうちに解決するんですよ。AI によって、と、僕は楽観してるんですけど笑、〔冗談っぽく〕非常に期待しています、AI には。

森下　コミュニティを日本語だけで閉じることが可能だってことなんですか？

永山　そうなんです。大学院の高等教育を母国語でやれちゃうというのは本当にすごい話だと思います。まあ、そのせいでやりにくいことも発生しているという話ですね。

森下　学会発表とかはもちろん海外でやるんですよね？ペーパーはどうですか？そういえばそういう話全然聞いていなかったですよね。日本語で論文書くことってあるんですか？

永山　わざわざ日本語で書きに行こうということはほとんどしない。だから、日本語で、情報処理学会とか物理学会とかで発表するんですけど、最終的にはジャーナル化は海外の英文誌を狙いますね。日本の学会の英文誌に出す例もあるんですけど、そんなに聞かない気がする。あんまりそこを狙っていかないよね。

久保　うん、狙ってはいかないかな。

森下　そういう面では他の理系の分野とは違いはないけれども、**教育とかはわりと日本語で行えてしまうので、そこが…**

永山　**外からの障壁にはなっているでしょうね。**

久保　研究の魅力という意味では、**お金と、日本の大学では事務作業が多いという話**が課題になりそうです。

量子というより、日本の研究の全般の話という気もする。日本の研究の中ではむしろ量子はお金回ってるほうだし、人材も増えているほうだと思いますけど、**そもそも日本の大学に行きたがる人が減ってる気がする。**

森下　日本は米国などと比較して、国と企業の関係が違うなと思うところはありますか。

永山　投資している額なのかな、舞台の作り方なのかな。海外の企業って、Google とか UC サンタバーバラのチームをある意味まるごと買ってきたりとかしたわけですけど、日本はそれをしないですよね。あくまで自社内で、アサインつけて、大学に学ばせてもらいながら一緒にやるみたいなスタイルです。当然取り組んでいる人の経験値が違うので、勝てるわけないよな、みたいな気持ちにはちょっとなります。

寺元　買ってくるのか、自分のところで育てるのかみたいな違いってこと？

永山　そう。専門の人材を、覚悟の上で自社内に抱えようとする。

寺元　日本ではそういった人材が会社の外にいる状態のまま？

永山　大学とか専門家は外にいたうえで、自社内の配置転換とかでチーム作って。それなりに近いことやっている人を連れて来るんだけど、彼らは量子が専門ド真ん中ではない。

森下　そうか、研究職でもそうなんですね。すごいな。

永山　難しい話ではあって。関連分野が、結局学際分野なんで、量子じゃない側から来てるという可能性もあります。とはいえ、関連分野をやりつつ量子情報をやってた人は、元から量子分野を専門でやってきた人には敵わないですよね。ずっと半導体やってて、量子コンピュータ作るために量子の勉強始めますみたいなタイプの人は、結構いるんだと思います。

森下　なるほど。それはいそうですね。

永山　そう。ずっと 20 年半導体やってて、このたび半導体量子コンピュータ始めますみたいな人と、半導体量子コンピュータをずっと 20 年やってましたという人を比較するとなると、やはり差が出てきちゃいますよね。

森下　そうですね。面白いですね。それだから日本の企業の古くからの終身雇用みたいな雇用形態とも関係しているのかもしれないってことですね。

久保　海外の企業でもチームごと買うっていうのは、結構珍しい例な気もする。

永山　そうかもね。

久保　企業の中で配置転換するっていうのは、たぶん海外でもやっていると思うけど、目立たないから全然見かけないだけな気もする。

永山　まあだから、ビッグテックと比べるのはアンフェア感があるんですよね。マイクロソフトにしても、昔からなんだかんだで人材抱えてたんだよな。

久保　金融系の量子の論文とか見てると、JP モルガンとかはチームごと取ってきてというより、中で詳しい人がいて、その人が大学と一緒にやってるんだろうなという感じです。ゴールドマンはチームごと買ってる感じ。多分いろんなパターンがあるけど、**チームごと買うっていうのは結構まあ、少ない例といえば少ない例かもしれないけど、やっぱりお金持ってるところはそういうことができるという話な気もする。**

寺元　お金持ってるのか、リスクテイクしないのかわかんない、っていうところあると思うけど。

森下　日本の金融は量子チームを持っているんですか？

久保　それも企業内で、もともと量子に近いところを専攻してた人がやっているみたいな例をわりとよく見ます。

森下　そうなんですね。

久保　金融機関は物理やっていた人がかなり多いです。それで、そのまま量子系のベンチャー行ったり大学行ったりする人もいる。

永山　応用先分野の知見もあって、量子の知見もある程度あって始める人もいるし、量子情報技術分野に移民的に入ってきてくれるという人ももちろんいてほしいし、重要なんだけど、もっとコアになる人材もまた必要だなって思う。応用分野なので量子金融とかの話は応用先分野の知見がより重要ですよね。

久保　うん。めちゃくちゃ大事。

永山　ハードウェアベンダーみたいなことを考えると、またちょっと事情が違うんだろうなっていう気はする。分野領域ごとに最適な割合、昔から量子情報の一環としてやってましたという人材と、元々応用先の方が専門で量子を始めましたみたいな人の最適な割合っていうのはきっとあるんだろうけども。

企業の批判ばっかりみたいになっちゃいましたけど、アメリカの方行くと大学発ベンチャーもたくさん立ちますよね。さっきの IonQ だって大学発ベンチャーですし、**大学側関係者のマインドも違うんだろうなと思います。**もうちょっと言うとまたお金の話になるんだけど、それをやる余裕がある。

教授の下に、研究するための研究室副社長みたいな人と事業化するための副社長みたいな人を、別個に置けたら回していくことも可能になる。結局そういうところかな。やっぱりあれですね、教員に事務負担やらせている限り進まないっすよ。

森下　それはもう本当に日本の大学全体の問題ですよね。

話題17.人文社会科学系を含めた量子人材の裾野の拡大

話題の背景

2022 年 4 月 22 日に発表された「量子未来社会ビジョン [84]」では、人材の育成・確保について、量子技術の研究開発者育成とともに、創薬・医療、材料、金融等の他分野や AI 等の従来型技術分野と融合したハイブリッド人材の育成が謳われる。また、アウトリーチ活動推進のための施策の一環として、量子と社会をつなぐ人材や、量子技術を活用して新たな価値の創造・提供等を行う起業家・研究者・技術者等のフロントランナー人材の必要性が指摘されている。

本文では、将来的な量子技術の社会実装に向けて、上記のような融合人材や、人文社会科学系の専門知識を持つ人材がどのような場面で必要になるのか、またそれは量子技術分野に特有の事象か、他の先端科学技術でも起こってきた事象なのか、ELSI センターのメンバーも含めて検討している。

森下　**――量子の専門家を増やすことに加えて、人文社会科学系を含めた「周りの人間」が必要だろうというのが一つ焦点になっています。そうした人たちを増やすに当たってどういう方法が必要でしょうか。**

永山　どのぐらい他の技術との違いが出てくるのかという点が、一つ気になるところです。色々な人材が AI などの分野から転向可能であれば、割とスムーズに人材が集まるようにも思います。

AI と量子で性質が似ている部分があると思っていて、それは**量子技術にしろ AI にしろ、基盤技術の系統**だということです。応用範囲が広いという意味では、応用先の分野で人文社会科学系を含めた人材に対応してもらいやすい可能性はあります。応用先でも量子技術や量子の原理についての深い理解が必要だったなら、それはまたハードルが上がりますけど。

久保　**アプリケーションレイヤーで何ができるかということが、特に分野外の人が難しい**と

[84] 内閣府(2022)。

思っているところです。量子アルゴリズムなり、量子インターネットなり、量子技術を何かしら使ってみようとした時には、とても低いレイヤーのものしか基本的には動かせないので、難しいのはその点なんじゃないかなと思います。AI では別に計算機というかコンパイラの知識とか別にいらないし…

森下　〔AI のアプリケーションレイヤーでの実装としては〕ChatGPT みたいなものをイメージしたら良いでしょうか。

永山　分野の成熟度合いの問題ですね。AI のディープラーニングはあれだけ成熟してるから使いやすいインターフェースもできあがっているけど、量子はまだ全然成熟していないので、原理を理解しないと使えない。そういうレベルのものしかまだ存在していないということですね。

久保　**キラーアプリみたいなものが出てきたから AI も一気に発展した**わけです。 2012 年ぐらいに画像認識できるようになり、そこから 10 年ぐらいでより色々な人が使えるようになったという経緯がある。2012 年より以前にも研究自体はされていたはずですが、でもそんな色々な人が使える便利なものでは無かった。量子も、何かしら「これに使えます」みたいなものが出てくる必要があると思います。

森下　ニューラルネットワークみたいもので画像認識できるようになってからが、今でいう AI のようなイメージだということでいいんですかね。

久保　そうですね。

森下　お話を聞いていると、**応用と言った時にインフラ的な部分での応用が現在では見込まれていて、一般ユーザがどういうふうに使うのかというイメージがまだ出てこないという印象があります。**それは分野の成熟の問題なのか、それとも分野の特性の問題なのかという点が気になっているのですが、いかがですか。

永山　量子コンピュータの場合、一番分かりやすい直接的な応用先は量子力学のシミュレーションをするようなところですね。となると、日常生活で量子力学の世界にそこまで触れるわけではなく、一般ユーザが使う必要もないので、一部の研究者や開発者だけが触れればいいという話になる。

量子の特性を用いて量子計算が何をしているかというと、量子力学の式に現実の問題をうまく当てはめて計算しているということになります。今後、日常生活の中でこの計算方法の方がより良い結果を生むような応用先が見つかれば、より幅広い人が使えるわけです。

例えば暗号通信は、そこに親和性があった。測定されると状態が壊れてしまうというのは、セキュリティでは盗聴されると状態が壊れてしまうということになるので、セキュリティとの親和性があったわけです。セキュリティだけじゃなくて、量子 AI みたいな話でもその先が広がっていくと、一般ユーザも使えるようになっていくと思います。

森下　可能性はありそうだけど、まだ具体的な一般ユーザの量子技術の使い方は発見されていないという感じですかね。

永山　そうですね。コンピュータの AI よりも量子の AI の方が良いような応用先がある「可能性はある」というのが正しい言い方だと思います。

寺元　具体的な応用先がないと、量子人材の裾野の拡大は、まだまだ具体的な人物像まで繋がらないかな。

森下　そうですね。先日紹介した世界経済フォーラムの文書[85]でも、「初等教育、中等教育で量子力学を教えよう」という話はしているが、具体的に何をやるのか、まだ想像がつかないですね。

一方つなぐ人材について言えば、先ほど AI と共通する部分もあるという話もありましたけど、AI や量子技術に限らず「新規科学技術一般をつなぐことのできる人材を育成する」というのは一つの方向性としてあり得るのかなと思います。

森下　ELSI センター側からも量子技術に関する人文社会科学系人材について話してみたいことがありますか？たとえば、量子だけに特化した人文社会科学系の人材像を考えるのは難しいのか。

---

[85] Quantum Computing Governance Principles (World Economic Forum 2022)。

寺元　まあ難しいんじゃないでしょうか。

岸本　難しいし、その人のキャリアパスが心配になるな。

寺元　でも、**専門性がどこにあるかにもよりますけど、そういう人材は新しい技術が出てきた時にまた必要とされるんじゃないですか。**

森下　そうですね。法的な話を技術的に実装することの専門家がいたら、きっとどこでもありがたがられるんじゃないかという気がしますね。

岸本　そういう意味では**過去の AI とか、その前だったらバイオとかナノテクとか、そういう分野に関わった専門家は経験が活かされる**んじゃないかな。**さらには量子技術での経験がまた次のエマージングテクノロジーに活かされる。**多分量子だけやってても、人文社会科学系で何かをやるには限界があって、そういう色々な分野での経験がないとやることがあまりないんじゃないかな。

永山　そうですね、そう思います。その上で、量子は情報技術だけの話じゃないというのが量子技術特有の厄介なところですね。例えばインターネットでは生命倫理って関わってこないけど、量子だと生命倫理関わってくるでしょうし。

今の話は、既存の職種の中に新しい分野を扱う人材ができるという話じゃないですか。「飛行機ができたのでパイロットという職業ができた」みたいな、そういう話もあるのかなって思ったんですけど。

鹿野　量子情報通信の分野で活躍できる人文社会科学系人材とは、具体的にどのような専門性を持つ人なのか、もう少し掘り下げられないでしょうか。そもそもどういう人だったら、この枠にあてはまりそうなのか。「こういう能力がある人、今全くいないから欲しいんだよね」、あるいは「今こういう人が人文社会科学系人材として必要だって言われてるけど、実はそこじゃないんだよね」など、もう少し明確に出せないかなと思います。

岸本　たとえば、iPS 細胞やゲノム編集を考えたら、政策とか規制にどうつなげるかっていうところは、ひとつあるでしょうね。それから知財ですね。この辺の分野って、今は

技術のシニアの人が担当することになってるじゃないですか。そこに政策のプロフェッショナルが関われると大きいと思います。

長門　たしかにそうなんですけど、それは新しい職種ができるというよりは、今ある知識を量子に対応できるように、政策立案者や知財の専門家が、その知識のブラッシュアップを行うという方向ですよね。たぶん弁理士や知財の人は、そういう形で AI の時などにブラッシュアップしてきたと思います。これに加えて、量子人材って言った時に、もっと新しい職種ができるようなケースがないでしょうか。

久保　AI の文脈で言うと、例えば ChatGPT を使いこなせる人文社会科学系人材って新しく出てきそうじゃないですか。それはきっと、ChatGPT の技術の詳細を知らない人でもできそうで、そういう人材像が量子の場合でもあれば面白いなと思います。

森下　新しい仕事が量子のテクノロジーによって開発されて、その仕事を作る人は必ずしも量子の技術の開発者ではないというパターンの一例として、たとえば「量子コンピュータ教室の先生」などもありえると思います。アプリケーションありきということには当然なると思うんですが。

久保　僕が挙げた例は、人文社会科学系人材というよりはむしろクリエイターに近いのかもしれません。

森下　「量子人材」って言ってしまうと、想像力を狭くしてしまうような気もしてきました。「量子人材」って言うと、先ほど岸本先生が挙げてくださったみたいな、知財に詳しい人とか制度設計に詳しい官僚とか、そういう人を養成することを考えがちです。

けど、デザインの中に人文系の人が入っていく形で新しい仕事を生み出す、たとえばアプリケーションを作ることでアプリケーションの専門家ができるとか、そういうことも含めて、必ずしも理系の知識を必要としない新しい働き方がでてきそうな気がします。

寺元　やっぱり、**人文社会科学系・自然科学系で区切るよりは、量子力学の知識がいるか、量子コンピュータそのものの仕組みの知識がいるかいらないかで切った方が面白いかもしれない。**

森下　そうですね。私もそう思います。

長門　**名前に注意しないとミスリーディングになるという話は、人材の定義の時に「文系」という名前を下手につけるとすごく意味が狭まってしまうという、しっかりした教訓だと思います。**

大学で色々数学とか情報科学の勉強をさせるんだけど、「実際に業務に必要なのってここだけだから、大学は文系学部でもここだけ勉強すれば SE として投入できる」っていうような発想があるわけですよね。そういうのってやっぱり技術が洗練されて、運用が洗練されてくるからこそ、「この辺は知らなくてもいいだろう」みたいなことがわかってくる。必要最低限のレベルがわかってくるようになるわけですよね。それによって、人文社会科学系人材が参入できることが増えてくるという話はあると思います。

岸本　僕自身の話ですが、経済学博士を取得したのに就職先が化学物質リスク管理研究センターで、化学物質リスク評価をやってたんですよ。要するに、ケミストリーが専門じゃなくても、異分野から来ている人ができる仕事はあるということです。量子力学を専門的に学んでいなくても何かやれる仕事は出てくるかなと思います。

森下　面白いですね。**話していく中でいろんな軸が出てきたような気がしています。一つは人文社会科学系も含めて、専門性を活かす、専門性のある職があり得るのかということ。もう一つは、開発に必要な専門性がなくても関わることのできる仕事の在り方が量子分野に関してあるのかということ。さらに、量子技術が発展してくる中で、新しい仕事ができるのかということ。どれも違う話題で、だけどそれぞれが関連していると思います。**

カテゴリ 4：公共における量子のイメージをめぐる話題

話題18.パブリックダイアログの実施による量子イメージの現状把握

話題の背景

先端的な科学技術である量子技術は、認知の程度、将来の社会実装への関心の度合い、どのような点について期待/懸念が持たれているのかなど、市民からの理解・関心・イメージに関する調査の蓄積が十分ではない。そのため、将来的な社会実装の際に生じる障壁の予測や、それを防ぐためにどのような対応が必要であるか検討することが難しい。

これらの問題意識を踏まえて実施された量子技術に関する市民参加型 ELSI 議題抽出の先駆的な事例として、イギリスで 2017 年に行われた「パブリックダイアログ」が挙げられる。また、ELSI センターでは、市民からの量子技術に対する印象に関する予備調査として、2022 年 2 月に大学生に対してフォーカス・グループ・インタビューを実施した [86]。

本文では、上記の 2 事例を振り返りながら、引き続き量子技術に関するテクノロジー・アセスメントを行うための調査をどのように行うべきか検討している。

森下　**――パブリックダイアログに関して、これまで肥後さん中心に阪大でフォーカス・グループをパイロットテスト的にやってきました。これをもうちょっと拡大して、せっかくなので全国規模でやるというのも良いかなと思ってます。そうすると、ほかの量子の先生方とも緩やかに協力しながら量子技術の ELSI プロジェクトを考えていくこともできそうです。**

**　これまで阪大でやってきたフォーカス・グループ・インタビューの調査と、イギリスで行われてきた先行研究もあるので、それらによって何が分かったのかということを改めて共有したいなと思います。肥後さんからまずお話ししてもらっても良いですか。**

[86] 詳細は肥後・長門・鹿野（2022）。

肥後　はい。ちょうど去年の今頃に大学生に向けてフォーカス・グループ・インタビューを3回やりました。そこで考えたのは、やはり今の市民の方の興味関心や印象についてある程度調査をしながら、一方で**量子技術の研究者の方が市民の方とどういう対話をしたいか、何について聞きたいか、どういうテーマについて話をしたいか**について知らないと、次の段階に進むことは難しそうだということです。

例えば行政の量子技術に関係しているような人など、より幅広いステークホルダーが、何について話題とすべきと考えているのか、それぞれの関心がもう少し見えてこないと、参加型議題共創の場を設計しにくい。イギリスでも、企画者による予備的なワークショップを実施したようです。

だから、「今後何をするか」に対する最初の回答としては、もう少し色々なステークホルダーを対象に、何をテーマに対話の場を設けられるかについての調査を、グループインタビューという形でやっていくというのが次の一手かなっていうのが、今私が思っているところです。

森下　ありがとうございます。英国のパブログ〔＝パブリックダイアログ〕に関しても、何かコメントなどあればお願いします。

長門　かなり準備が必要なものだということを、ご承知いただきたいなと思っていて。〔英国パブログは〕かなり練りこまれたもので、調査会社がしっかり入っていて、事前に実施者も研修をやって、「こういう質問があったら、こういうふうに返してください」みたいなマニュアルを丁寧に作った上で行っているものです。

なので、とりあえずインタビューを受けるインタビュイーをたくさん集めて、適当に話を聞けばいいみたいな感じは全くなくて、かなり練り込まれた仕方で行われたのがイギリスの事例なんですね。

実際に我々もフォーカス・グループという仕方で、かなりの少人数でやってみたんですけど、それですら結構やっぱり難しかったんじゃないかなというふうに私は思ってます。肥後さんそのへんいかがでしょう？

今年中にやるっていうこともありえなくはないんですが、できればもうちょっといろんな、例えば東大とか京大とか筑波大などと連携した上で、できるだけイギリスのものに合わせてやるっていう方が、その後論文を書いたり比較研究したりしやすいん

じゃないかというふうに思っています。

もう一度ちょっと小さめのフォーカス・グループ・インタビューを、大学生以外に対してやってみることは今年度中にできるかと思うんですけど、イギリスと同じ規模のものをやろうと思ったらすごくたくさんの予算と人手が必要になります。

肥後　トライアルとしてではあったけど、一つの現状調査ができた。まずはこの事例を紹介しながら、他の大学であったり、地域が違う方と一緒に何ができるのか考えてみる。小さい一歩かもしれないですけど、その辺りから重ねるのが、良いのではないかと思っています。

長門　そうですね。やり方のパッケージだけ我々が開発して、他のところで色々と実施してみてもらうというのもいいかなと思います。洗練されたパッケージを作るのは、現実味があるかもしれないですね。

森下　ちなみにイギリスのパブログはどれぐらいの規模なんですか？

肥後　参加者が 77 名で実施拠点が 4 つの大学ですね。UNQT[87]で Hub になっている 4 大学がそれぞれに実施しました。

長門　ヨーク、オックスフォード、バーミンガム、グラスゴーですね。

寺元　それでも 77 名なんですね。

長門　いろんなインタビューだけじゃなくて、ラボ見学などもあるので、それぐらいの人数が適切なのかなと思います。参加者は 2 回集まらないといけないし。

肥後　ワークショップのやり方がいろいろあるんですよね。4 拠点ごとに研究所を案内したり、講演会みたいな形もあるし、ちょっと変わるとこもありつつ、全体のパッケージは同じっていう。

[87] UKRI (2023)。

長門　フォーカス・グループ・インタビューをやるのであれば、僕は理系サラリーマンみたいな人たちがどういう風な考え方をしてるのかは気になるところではありますね。エンジニアっぽい人たちとか、あるいは、そういうものに投資をする人たちとか。

肥後　私も**「量子って儲かるの？」と聞かれて**、そういうイメージなの？と思ったことがあって、やっぱり社会人の方に聞いてみるっていうのは、やってみたいなと思います。

森下　何か NFT みたいなもののイメージと重なってってことなんでしょうね。新しい技術に対するハイプで投資が集まってきて儲かるっていう、そういうイメージの枠に量子も含まれているということかなと思っていますが。

どうでしょう？永山さん、寺元さんも今までのところで、「こういうのやってみたい」などあれば教えてください。

永山　**今おっしゃっていた理系サラリーマンも面白いんですけど、逆にこれまでこういうディープテックの社会実装が摩擦を起こしたときに、摩擦が起きた対象の人っていうのはどういう層だったんでしょうか。科学にリテラシーがない層なのかな。そういう人たちがどういうイメージを持っているかというのは興味があります。そういう人が量子をどう思っているのかということは、将来の摩擦を予測する上で重要そうだと思います。**

長門　**すごく面白いですけど、リテラシーがない人ほど学者とかをすごく信用してしまう傾向がある**んですよね。

イギリスでの事例は 4 拠点で実施したと言ったんですけど、オックスフォードの人たちだけは一般市民だけど、リテラシーがあって、「あいつらは信用できない部分もあるよね」とか、「いろんな民間からの投資があって、倫理的なものがおざなりになってるって聞いたことあるぞ」、みたいなことを言ってるのはオックスフォードの人たちだったりするんですよね。

多分自分の家族や親戚に研究者が多い人たち、一般市民だけどそういう人たちが一番猜疑心があるみたいな感じに書いてあったかと思います。日本で言うと、つくばなんかで実施したときにそういうことが起きるんじゃないかっていう感じもありますけどね。

寺元　単純にそういう意味でいくと、イギリスの例と同じような傾向が日本でもあるのかっていうのはちょっと気になりますね。量子関係なしの気がしますけど。

森下　やっぱり、**摩擦ということを考えるとなると、もうちょっとその技術が具体的に絞られている方が多分良い**と思うんですよね。応用先が具体的だと、その摩擦の原因も具体化するというか。

例えば遺伝子組換えだったら、農業応用が考えられた時に、従来の農家さんが持っている「消費者は安全だとわかっているものしか買ってくれない」みたいな、そういう懸念に対して遺伝子組換えをやっている研究者はかなりナイーブに大丈夫だよって言う。必ずしも消費者は合理的に、安心するっていうことを、客観的な安全性に基づいて判断するのは限らないわけで、農家さんはそういうのをすごくよく分かっていて、新しい技術を入れることにかなり慎重になったりするわけですよね。そういう懸念から遺伝子組換えを農業に利用することにすごく消極的だったりするわけですけど。

そういう応用先がはっきりすると、持ってる具体的な懸念みたいなものがはっきりしてきて、どこら辺で摩擦が起きそうかってこともわかるっていう感じがあるので。

岸本　量子の場合、どうなんですかね。反対運動が起こる未来って、あり得るんですかね。

森下　例えば量子コンピュータを作るにあたって、希少金属がものすごく必要になるとか。

岸本　CO_2排出量がめっちゃあるとか、そういう方向から？

森下　冷却用ヘリウムが必要になるんじゃないかとか、コストがかえって高くつくとか、実は環境問題にすごく悪影響を及ぼすんじゃない?みたいなことは、もう既に世界経済フォーラムの方で挙げられていましたね[88]。

岸本　そういう方向から逆風が吹く可能性がありそう？

[88] World Economif Forum (2022: 29)。

森下　　そうですね。

話題19.文学やフィクション等による社会的イメージの形成と普及

話題の背景

文学、映画をはじめとしたフィクションの作品は、科学技術の社会的なイメージの形成に大きな影響力を持っている。フィクションの作品が現実世界の中でテクノロジーへの接点になり、現実世界におけるテクノロジーに対する共有された価値観がフィクションに反映されるというように、科学技術をテーマとしたフィクションと現実の社会とは相互に影響を与え合っていることが指摘されている[89]。

人工知能（AI）やロボットを題材とした作品に比べるとその数は多くはないが、既に量子技術をテーマとしたフィクションの作品は存在する。量子に関する文学作品、映画、アニメ等として、研究者はどのような作品をイメージするのか、何をもって「量子技術がテーマの作品である」と感じられるのかについて整理している。

寺元　次の話題は、文学やフィクションを含めての社会的イメージの形成です。

森下　**これは肥後さんが、文学や映画などの中での量子の典型的なイメージみたいなものがまずよくわからないので、知っている人に共有してほしいということをおっしゃっていたのですが、肥後さん、まず一言話せますか。**

肥後　**イギリスのパブリックダイアログでは、科学番組やフィクションの映画から、量子について連想する人がいた**、ということが書いてあったんですけど、大阪大学の大学生へのフォーカス・グループ・インタビューでは、量子技術をテーマにした具体的な作品名の話題は出てこなくて。

一方で永山さんがフィクションから量子を知ったこともあるという話をされたのを思い出して。量子を取り扱っている SF 映画といえばこれだよね、とか、小説で言うとこの作品だよね、アニメだとこんな作品あるよね、というような、量子をテーマにした作品のイメージについて聞きたいなと思いました。

[89] 川口（2018）。

長門　ちなみに英パブログの中には、『ビッグバン・セオリー』[90]っていうドラマの話が出てきてました。

永山　『ビッグバン・セオリー』ってコメディでしたっけ？

長門　コメディ、大学の研究室のラブコメみたいな作品です。UCLA の人が監修してて、内容が正確だっていうことが言われてました。小ネタに挟まれている量子力学あるあるネタみたいなものも、比較的ちゃんとしているということでしたね。

永山　量子を扱っている作品。有名と言われると困っちゃうけど…

久保　でもあんまりない気がする。

永山　作品はあるんだけど、『君の名は。』[91]的な有名なものは全然ない。

肥後　例えば永山さんが作品名を言った時に、久保さんや寺元さんが「その作品は確かに量子をテーマにしているよね」って思うような、量子技術研究者が共通して「量子を扱った作品」と認知できるものがあるのでしょうか。一般的な認知度が『君の名は』レベルじゃなくとも。

久保　まあでも**『サマーウォーズ』**[92]があるのでは。

永山　『サマーウォーズ』って量子コンピュータだっけ。暗号解読はしているけど。

久保　量子コンピュータのアルゴリズムが作中に出てくるじゃないですか。

---

[90] The Big Bang Theory(『ビッグバン★セオリー ギークなボクらの恋愛法則』)はアメリカの恋愛コメディドラマ。

[91] 2016 年に公開された日本のアニメーション映画（監督：新海誠）(「君の名は。」製作委員会 2018)。国内での歴代興行収入ランキングで当時 4 位を記録（興行通信社 2023）し、国民的ヒット映画となった。

[92] 2009 年に公開された日本のオリジナルアニメーション映画（監督：細田守）(SUMMERWARS FILM PARTNERS 2010)。2010 年以降、日本テレビ系列の映画番組「金曜ロードショー」にて夏期に 2〜3 年に 1 度の頻度で放映されており、夏の地上波放送定番アニメ映画となっている。暗号をクラッキングされることでインターネット上の仮想世界が AI に乗っ取られるという描写がある。

永山　作中に出てくる?冒頭出てきたけど量子コンピュータの上で実行されたんだっけ？

久保　いや、量子コンピュータの上では実行されてないです。だから元ネタぐらいの感じ。

永山　ショアのアルゴリズム[93]がちらっと出てきて、すごい男の子が素因数分解して…

久保　暗算でやってた。

永山　『サマーウォーズ』以外では…『ゼーガペイン』[94]とか『ハロー・ワールド』[95]とか。

森下　ちょっと聞いておきたいこととして、みなさんのおすすめの量子作品をそれぞれいくつか教えてください。

肥後　みなさんがそう捉えている量子作品、定義はなんでもいいです。

永山　『ゼーガペイン』かなー。

久保　僕は『ハロー・ワールド』ですね。

寺元　いやあんまり思いつかないなー。

久保　『量子（りょうこ）の夏』[96]というのがあるな。

永山　なんか量子が出てくるアニメをまとめてくれてる人がいた。「日本アニメに描かれる

---

[93] 素因数分解を多項式時間で解くことのできる有名な量子アルゴリズム。詳細は話題 4 および IBM Quantum(2021)を参照。

[94] 2006 年 4 月から 9 月にかけて放送されたアニメ作品（監督：下田正美）（サンライズ・プロジェクトゼーガ 2022）。

[95] 「HELLO WORLD ハロー・ワールド」。2019 年に公開された日本のオリジナルアニメーション映画（監督：伊藤智彦）（「HELLO WORLD」製作委員会 2019）。

[96] 2018 年に公開された日本の実写 SF 短編映画（監督：近藤勇一）（近藤勇一 2022）。量子コンピュータ内に作られた仮想世界における人間と AI の百合恋愛を描く。

量子情報処理」[97]。

森下　このサイトもやっぱり後半、「シュレーディンガーの猫[98]」〔に言及している作品〕だらけですね。

永山　全然知らないんだけど、よくやるな。

森下　「ディラックの海」[99]とか。

永山　確かに『蒼き鋼のアルペジオ』[100]は量子通信みたいなのが見たら映ってるなぁ。

岸本　**ナノテクノロジーでやったことをちょっとだけシェアしてもいい？当時、「ナノ」っていう CM がいっぱいあったんですよ。**2004 年ぐらいまでそれをまとめてて。ゴルフクラブとか、アニメとか、商標登録。量子もこれをやってみたらいいんじゃないかな。

森下　確かに、言われてみればそういうのいっぱいありましたね。

寺元　確かに最近ナノマシン出てこない気がする。

岸本　〔岸本作成のナノテクノロジーに関するスライド資料を共有しながら〕まず映画、『ミクロの決死圏』[101]はミクロだからちょっと違うんだけど、イメージとしてね。「バー

---

97 生田 (2022)。

98 シュレーディンガーによる有名な思考実験。猫と「1 時間に 50%の確率で放射性崩壊を起こす原子」、および放射線の検知器を箱に入れ、検知器により放射線が検知されたら毒ガスが放出されて猫が死ぬように仕掛けておく。1 時間後の観察前の原子の状態を波動関数で記述すると原子は放射線を放出した状態としていない状態の「重ね合わせ」として記述されることになり、したがって猫の生死も生きている状態と死んでいる状態半々の「重ね合わせ」として記述されることになるが、実際には猫は生きているか死んでいるかのどちらかである、とされる。ミクロな量子の確率的な考え方をマクロな決定論的世界と接続した場合に生じる奇妙な状況を仮想するものであり、量子の反直観性を表現する思考実験としてしばしば引き合いに出される。

99 相対論的量子力学において、ディラック方程式に登場する負のエネルギー状態を解決するためにディラック自身が考案した、真空状態が負のエネルギーを持つ無限の電子に満たされているとする考え方。

100 2009 年より連載中の、Ark Performance による日本の漫画・アニメーション作品（Ark Performance／少年画報社・アルペジオパートナーズ 2017）。

101 1966 年に公開されたアメリカの映画（監督：リチャード・フライシャー）。ミクロな世界を表象する古典映画作品として有名。

チュオシティ」[102]、「スタートレック」[103]、「マイノリティ・リポート」[104]、「スパイダーマン 2」[105]。何となくプラスとかマイナスとか、ナノに対するイメージをまとめています。こんなまとめをしたことがありました。

永山　なるほど。有名どころがいっぱいあって羨ましいなと思いました。

岸本　ここまであるとわかりやすいですよね。**これに比べると量子はまだね、地味なんですよね。でも今からチェックしとくと面白いんじゃないかな。10 年後どうなっているか。**

寺元　調べると量子力学おすすめアニメランキングとか出てくるな。

肥後　何をもって「量子っぽい」となるのかっていうことを、森下さんと話していました。パラレルワールドとか、タイムマシンとか、そういうことで量子映画ってカテゴライズしているのか。今岸本先生が見せてくださったナノテクノロジーは、必殺技の名前とか、作品の中で犯罪に使われた技術にナノという名前がついているということで集めているように見えます。

岸本　**流行ってきたから、ちょっと不思議なことを全部ナノにしてしまう。**まあナノは小さいっていうイメージがあるけど。だから**量子も流行ってきたら、何かちょっとしたトリックを使おうっていう時になんでも量子にしちゃうみたいなことがいずれ起こるんじゃないかな。**

森下　私のイメージだと、**シュレーディンガーの猫**と**多世界解釈**というのが、量子の一般的なイメージの二大巨頭という感覚があったんですが。そういう形で出てくるのか、もうちょっと別のイメージで出てくるのかっていうのは、ひとつ気になってるところで

---

[102] Virtuosity。1995 年公開のアメリカ合衆国の SF アクション映画（監督：ブレット・レナード）。

[103] Star Trek。1966 年以来製作されている、アメリカ合衆国の SF 特撮テレビドラマシリーズ（作者：ジーン・ロッデンベリー）。1991 年のロッデンベリーの死後も関連作品が製作され続けており、長年にわたって親しまれている。

[104] Minority Report。2002 年公開のアメリカ合衆国の SF 映画（監督：スティーヴン・スピルバーグ）。

[105] Spider-Man 2。2004 年公開のアメリカ合衆国のスーパーヒーロー映画（監督：サム・ライミ）。スパイダーマンはマーベル・コミックによるアメリカン・コミックスにおける人気キャラクター。

はありますね。

久保　『シン・ウルトラマン』[106]は素粒子論という文脈で、あれは量子っぽい話だと思うんですけど。阪大の橋本幸士先生が監修してた気がする。

永山　そういえば、『シン・エヴァンゲリオン』[107]では量子テレポーテーションしてなかった？なんとか空間的な。

森下　なんとなくナノテクノロジーと傾向が違いますよね。例えば量子コンピュータを使ってとんでもないことが出来るようになると、それを使った SF もいっぱい出来そうですね。

森下　**量子って普段は、イメージとしてどんな画像を使ってるんですか？社会にパッと量子のイメージをわかってほしい時に、どういうお絵かきをする傾向がありますか？**

例えばナノテクだと、さっきの『ミクロ決死圏』もそうなんですけど、Nanolouse[108]は非常に代表的な画像です。量子はどうしても抽象的な感じになりますよね。

永山　そうそう、Nanolouse のような感じにはならないですね。

寺元　この球体のイメージ〔Telescope Magazine（2021）冒頭に描かれた球面座標系のダイアグラム〕はアリかも。いやでもイメージじゃないな、抽象的だな。

永山　全然わかりにくいと僕も思ってる。

寺元　とりあえず量子コンピュータの画像は出てきますね。かっこいいし。

---

[106] 2022 年公開の SF 特撮映画（監督：樋口真嗣）。日経サイエンスにて「シン・ウルトラマンの物理学」特集が組まれている（日経サイエンス 2022）。

[107] 2007 年～2021 年にかけて公開された、日本のアニメーション作品「新世紀エヴァンゲリオン」の新劇場版（旧劇場版の公開は 1997 年）。全 4 部作（総監督：庵野秀明）（カラー 2023）。

[108] ヴィジュアルメディア作家であるコニール・ジェイによって製作されたナノ・プローブのイメージ画像。2002 年の「ヴィジョンズ・オフ・サイエンス・アワード」科学概念部門受賞作で、ナノテクノロジーにおける典型的な視覚化表現のひとつとして知られる（Ruivenkamp and Rip 2011）。画像は Ottino（2003）の Figure 3 を参照のこと。

森下　**確かに検索するとやっぱりこの IBM の量子コンピュータ（図 3）がたくさん出てくるんですね。おもしろい。**

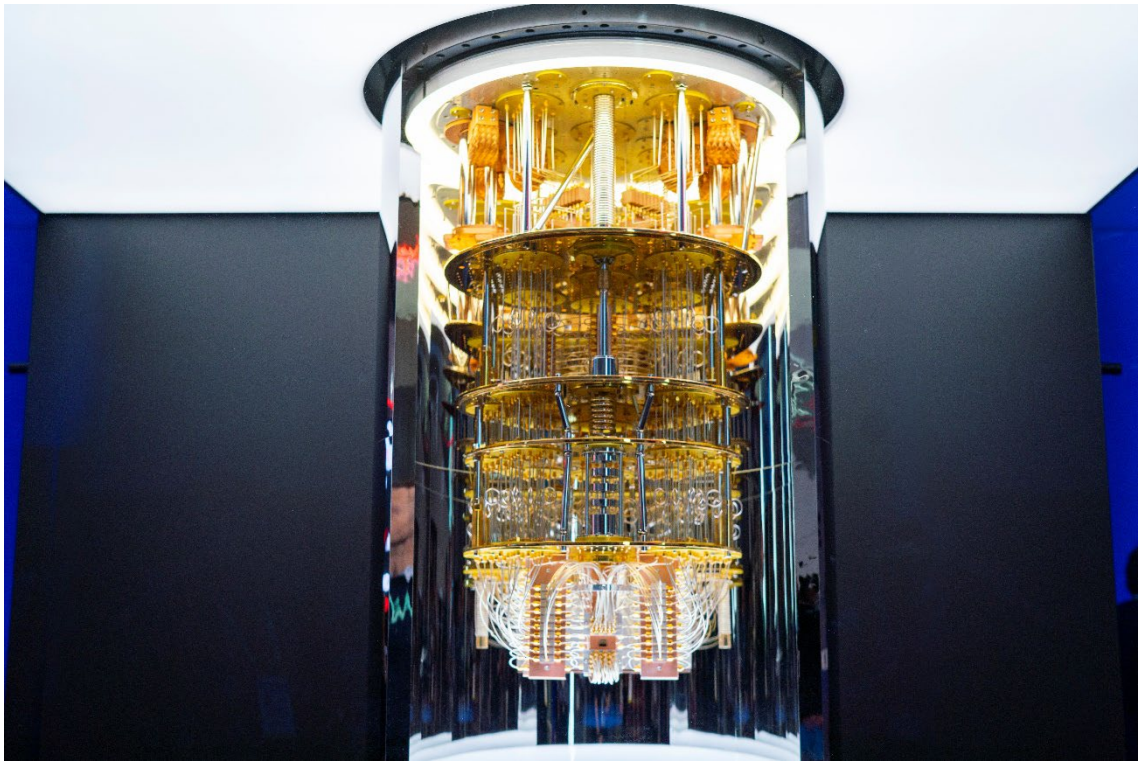

図 3　CES2020 にて展示された、IBM の量子コンピュータ（IBM NewsRoom 2023）

話題20.ハイプ（過剰な期待）とロックイン

話題の背景

ハイプとは過剰な期待のことを、**ロックイン**とはイメージが固定化されることを指す。ハイプには幻滅や失望を生むリスクがあり、対象となる科学技術への印象を悪化させたる可能性がある [109]。ロックインによって特定の領域にのみ手厚い支援策が設けられると、適正な競争が阻害され、分野の成長が損なわれる恐れもある [110]。

ハイプの形成は、科学者の研究環境とも密接に関連している。基礎研究よりも応用と社会変革が重視され、後者に重点的に資金が配分されるような競争的な研究環境においては、基礎研究を志す研究者には将来の応用可能性を過大視するインセンティヴが生じる。このような問題の解決のためには、科学者自身が未来の可能性について無責任に語らないという**社会的責任**を自覚することはもちろん、科学者と社会の双方が、基礎研究段階では応用に関する大きな**不確実性**が伴うことを認識・合意する必要がある。

本文では、**量子アニーリングマシン**の応用可能性をめぐるハイプが話題となっている。量子アニーリングマシンは、**組合せ最適化問題**という特定の問題に特化した計算機であるが、しばしば汎用性のある計算機（こちらは現在では一般に**量子コンピュータ**と呼ばれ、量子アニーリングマシンとは区別されている）と混同されかねないような仕方で広報され、誤解を招く可能性があると業界内からも批判されてきた [111]。同時に、量子アニーリングマシンは**誤り訂正**を組み込む技術が現時点で見通しが立っておらず、スケーリングするかどうかに関して不確実性があるとみられている [112]が、この不確実性が社会に正しく認識されているかという点についても議論がある。

森下　次は、**ハイプ**と**ロックイン**の話です。

---

[109] 科学技術のハイプをめぐる「期待の社会学」の動向については鈴木（2013）を参照のこと。

[110] Mikami(2015)は再生医療を題材に、社会技術的想像力(Jasanoff and Kim 2009)が技術の発展の方向性を固定してしまう事例を検討している。なお社会技術的想像力とインパクト評価の関係については、標葉（2020：196-198）を参照のこと。

[111] Twitter のツイートをサーキュレートするプラットフォーム「togetter」に、量子研究者の議論がまとめられている（togetter 2016）。

[112] 西森 (2022)。

永山　僕、**ずっと量子アニーリングは何でこんなことになっちゃってるんだろうって思ってました。**エラー訂正、エラー管理が入ってないから、スケールするわけないのでは、みたいな。

久保　確かに。

寺元　確かに。そういうのがスケールするわけがないというのは、とうの昔にわかっていたような気もするが。アナログコンピューターの失敗という話もあるので。

永山　そうそう、そういうことよね。

森下　どういうことでしょう。

久保　量子アニーリングで何が起きたかという話を先に。僕はその時代にはいなかったけれど、理論は東工大の先生が作りました。その後急に、カナダのベンチャー[113]が、量子アニーリングマシンを作って、お金をとるようになった。試作品を売って、その資金でさらに開発をすすめる、というサイクル。

永山　コンピュータでは問題のサイズが大きくなると、よりたくさんのビット数使わないといけなくなるじゃないですか。1 ビット 1 ビットちゃんと 0 か 1 か読み取れるとか、0 と 1 を保存できてるっていうのは、エラーをちゃんと管理できているからそれができるわけです。それがないと、ちょいちょいエラーが発生する。100 個に 1 個間違ってますみたいな。「因数分解した答えはこれです。2048bit のうちどれか 20bit 間違ってるんですけどね。どれかは分かりません。」とか言われても困るじゃないですか。誤りを見つける試行回数が指数爆発してしまうと、事実上見つけられない。

森下　〔量子アニーリングに〕エラー管理を入れられないっていうのは、原理的な理由によって入れられないということなんですか？

[113] D-Wave Systems。1999 年創業のカナダの量子系ベンチャー企業（D-Wave Quantum 2023）。2011 年に量子アニーリングマシンを「世界初の商用量子コンピュータ」として発売した。

永山　そうです。

森下　それはなぜですか。

永山　物理現象を直接計算に使ってしまっているからかな。物理現象が思った通りに起こってくれれば良いんですけど、思った通りに起こってくれるとは限らないので。思った通りに動くとは限らないやつが 100 個 1000 個 1 万個となっていけば、どれかは間違いますよね。

森下　なるほど。1 ビットでやっている分には問題にならないんですかね。

永山　結局、古典コンピュータ使った方が正確だし、みたいな話になるかな。

寺元　量子の旨味を得られなくなってしまう。

森下　なるほど。エラー管理も量子でやるっていうことにはならないんですか？

永山　量子アニーリングは、物理現象を計算として使おうということなんで、それができなくて。エラー管理入れて、1 量子ビットずつ間違いを確認しながら量子計算しましょうねっていうのが、いわゆるゲート型の、誤り耐性型量子コンピュータ。

久保　量子アニーリングも誤り訂正ってできないものなんですか？

永山　**実は、誤り管理ではなくノイズ低減により誤りを減らす試みや、量子アニーリング自体の仕組みではなくアプリ側（イジングモデル [114]）にエラー訂正符号を仕込む提案もあったんだけど、望ましい動作はしていない。**量子アニーリングの量子ビットを 10 個ほど使って、エラー訂正符号を実装しようみたいな提案。でも、エラーを潰し切るところまでいかない。実装上、色んな意味でスケールもしなさそう。

[114] 統計力学における、各スピン（bit）間の相互作用等を表現するモデル。この相互作用等に従い、モデル全体での最小エネルギー状態を出力するアルゴリズムのひとつが量子アニーリングである。

久保　理論上は多分頑張れば誤り訂正ありの量子アニーリングができると思うけど、そもそも速くなるのかっていうのは何も言えないので。例えばこれぐらい大きくなった時にこれぐらい速くなるってことは、そもそも言えていないっちゃ言えてない。

永山　そうだね。量子アニーリングは、**使ってるビット数が大きくなれば大きくなるほど、長い計算時間が必要になるっていうのは一つの特徴で。**アニーリングって焼きなましという、熱した金属を冷やしていくっていう名前がついてるんですけど、実際に量子的に冷やしていってる過程なんですよね。で、その冷やす時間をビット数が増えれば増えるほどすごくゆっくりにしていかないと正しい計算結果を得られない。理論上そういう仕組みになってて。

久保　どれぐらいゆっくりすればいいのかっていうのは難しい問題です。十分ゆっくりすればちゃんと解を得られるんですけど、でもその十分ゆっくりというのはどれぐらいですかという問題が残る。

永山　複数の問題があって、エラー管理のついていないコンピュータというのはエラーが発生する前にたくさん終えたいから早く終わりたいんですけど、なんだけど量子アニーリングそもそもゆっくりやらないといけないというところでコンフリクトする。

永山　ハイプの話だったら、ちゃんとゲート型の話をしなきゃいけないと思うな。

森下　それは〔量子業界が〕ゲート型を進めたいってことですか？

永山　**〔量子コンピュータ技術の〕本命はここじゃないですか。**ゲート型ハイプの話はどうなんだろうなぁ。結局、研究者がどこまでやれるかわからないことを明言しつつ、取り組んでいる面があるので。

久保　ハイプほど今期待されているかというと…という気は。

寺元　もうちょっと波はおさまってきた感じはする。

森下　そうなんですね。なんか全然外にいるとわからないので。むしろ、量子アニーリング

が今盛り上がり始めてるんじゃないかぐらいに思っていました。

寺元　**量子アニーリングが盛り上がっているというのは結構古い話の印象。**

森下　ハイプといった時に、やっぱり社会におけるハイプという話があります。基本的なこととして研究者の間でどういうものが盛り上がっているかっていうことと、やっぱり社会の中でどういう風に盛り上がっているかっていうことは基本的には区別して捉えた方がよくて。

永山　そうですね。実際にはそこには関係性があり、本当は別のことがやりたいんだけど、量子アニーリングがとても盛り上がって量子アニーリングの予算公募が出るのでやってるという人もいます。

森下　研究者としては本当は手放したいというところがあるということですか？

永山　うん。人によっては、「〔ほかの技術との〕バランスが悪いだろう」みたいなことを思いつつ。「量子アニーリング、日本初のアルゴリズムだ、日本人が考えたぞ」で盛り上がっているけど、海外では日本ほど盛り上がっていないみたいな。最近はずいぶん状況が変わってきましたが。

森下　結構それも聞く話ですね。他の分野でもありがちな話で、再生医療とかでもそういう話を聞いたりします。

岸本　やっぱりハイプの話はいるよね。再生医療でも iPS 細胞で「寝たきりの人が明日にでも起き上がれるようになるんじゃないか」みたいな過剰な期待を生んで、逆に再生医療学会とかそれを抑えるのにものすごい必死やったっていうのがあって。

　量子は再生医療であったような「過剰な期待」という面もあるかなと思う。遺伝子組換えみたいに消費者が反対運動を起こすかというと、量子の場合あんまり不買運動とかが不買する対象がないかもしれないけれど。逆に、「SDGs に反する」みたいなことで逆風が吹くこともあるかもしれない。両面見る必要があるかな。

永山　量子センサなんかは直接体センシングしようみたいな話もありますし。

岸本　監視社会的な反対運動が起こりえる？

永山　僕が今思ったのは、体に対して悪影響があるんじゃないかとか、そんな反対はありそうかなと思いましたね。監視社会的な懸念からの反対もあるかもしれないけど。

カテゴリ 5：量子情報技術の懸念をめぐる話題

話題21.悪用・ハイリスク利用・デュアルユース

話題の背景

悪用（マルユース）や**デュアルユース**は、萌芽技術一般にかかわる ELSI の論点である。萌芽技術の社会実装には**不確実性**が伴うため、悪用やハイリスクな利用の可能性を完全に排除することは一般に困難である。技術が社会に受容されるかどうかは、技術的な安全の問題であると同時に、技術自体や、これを設計・構築・運用する科学者・技術者に対する**信頼**の問題であるという点も重要である。

森下　**――次の論点は、ハイリスク利用、マルユース、デュアルユースです。マルユースとは悪用のことです。デュアルユースというのは元々は軍事利用も民生利用もできる技術のことを意味する言葉だったんですが、最近もうちょっと広く、良い目的で使おうとしていた技術が悪用されてしまうケースのことを指したりします。マルユースというのは悪用のことですが、何か似たような言葉になりつつある部分もあるというところです。何かそういう量子技術が悪用される可能性に関して教えていただきたいんですが。**

永山　まさに暗号解読は、一番使いやすいと思いますね。量子技術で悪用されること…。

森下　**まず暗号に関して聞きたいこととしては、先回りして対策しようということになっている、ということでいいですか。**

永山　先回りして対策しようということになっています。それは量子暗号の話もそうですし、**PQC（Post Quantum Cryptography）**、耐量子古典暗号もそうですし。

岸本　**今までの暗号を取っといて、後から解読しようっていうのに対しては、もう手の打ち様がないんじゃない？**

永山　もう既にやっちゃった通信についてはそうですね。

岸本　その辺って何とかならんもんなの？

永山　だってもうレコード取られたらどうしようもないじゃないですか。

岸本　そうか。そこはでもまあ、やってるんやろね。解読したい主体は既に。通信をとって、今は解読できんでも将来は解読したろ言うて。

寺元　名前ついてましたよね、この攻撃。

永山　**Store-now-Decrypt-later 攻撃**と言われています。

岸本　まあ文字通りだね。

永山　国家機密でも何十年かで公開するようなものになったりしますし、クレジットカードのカード番号はカード更新まで守れてれば良いみたいな秘密のライフタイムもあったりはするかなという部分もあるけど。もう既に保存されてしまった通信の場合には、原理的にはどうしようもないですね。

森下　国家機密とかは困りそうですよね。

永山　公開となる 30 年までは守れないと困る[115]。

他に悪用か…。コンピュータの悪用とはなんだろうね。基本的に攻撃ですよね。

岸本　逆に悪い人が、違法薬物の売買とかそういうのに使うみたいな、そういう展開は？ダークウェブ的な。

---

[115] 秘密の公文書は最大でも 30 年で公開されるべきとされる原則は「30 年ルール」「30 年原則」などと呼ばれる（米川 2006）。

永山　プラットフォームとして使うという展開は…ダークウェブ、ブラックマーケット。見つけにくくはなるかもしれないですね。プライバシーを守るに役立つというのを裏返せば。

森下　痕跡を残さない通信みたいなこと…

永山　うーん。もしくは匿名化通信。匿名化通信できるかな、量子インターネットで。そこちゃんと議論されていないと思う。

森下　なるほど。それは面白いですね。なぜ議論されないんだろう。

永山　いや、単純に分野として新しいから掘られてないだけ。

永山　古典インターネットを開発する時って、インターネットがここまで大きくなることを想定してセキュリティが考え込まれていなかったというのがあって。それで今色んな問題が起こっている。コンピューターウイルスみたいな話もそうですし。インターネットと、古典コンピュータもかな。将来の使い方の像みたいなのがやっぱり見えてなかったから、根幹の設計に対策を入れられなかったんですよね。ELSI みたいなお話をすると、ドメイン引くところで止めちゃっていいのかとかの議論があって。

森下　ドメインを引く側で止めるっていうのは？

永山　ウェブサイトの URL を IP アドレスに変換するような、ドメインネームシステムというのがインターネットにはあって。このシステムを運用してる人が、例えば漫画村のドメインから IP アドレスへの変換を独断で止めちゃっていいのかとか、その人がダメだと思ったものを全部止めるようになるのは、正しいのかどうか、とか。インフラ事業者が自分の判断で悪を決めて止めることが可能になっていく世界。

　ドメインネームシステムについてもインターネットの設計時、DNS の設計時にそういうことは考えられてなかった。

森下　それは今の SNS とかでも共通する問題になっている感じがします。

寺元　**インフラ事業者が悪を決めていいのか**とか、そこら辺が一番気になるところ？

永山　止めなかったら止めなかったで、「なんで止めないんだ？」って、何もわかってない人たちからいきなり事業者に非難が集まったりして、かわいそうっていう話もある。

長門　**機械的な判断で止めていいかどうかっていうのは、また別の系としてありますね。人間が精査してるんだったらいいけど、機械的判断で止められるのは我慢できないっていうような意見もある**ので。自動検知によって BAN されるのは人間が翻弄するよりもよくないと考える人があり、これは割と ELSI の中の S っぽい問題かもしれないですね。

永山　人間が機械に管理されるのはたまらんっていうことなんですかね。

長門　たまらんっていう人たちは、人間が判断していると言ったらまだマシだけど、理由もなく機械的に網に引っかかったからっていうような想像をしてしまうのであって、「人が見たら自分たちの正当性がわかるはずだ」みたいな気持ちで動いている。そういうことは ELSI の S の領域としては問題になると思う。

久保　**こういう問題があったとき、インターネットをやめろという話にはならない、これはインターネットがないと起こらないリスクではあるけど、それ以上にインターネットは必要なので、これぐらいのリスクは許容しているという捉え方ができるのかなという気がしました。**

量子インターネットを作った時に、例えばダークウェブみたいなことにばっかり使われて、ああいう闇ネットワークばっかりに使われるから量子インターネットやめろ、みたいな話になったりするのかなとか、思いました。

森下　**ベネフィットが上回るからっていう理屈もあると思うんですけど、単に止めるコストの方が高くつくっていうのはあり得る話で。**止めないコストの方が安い。部分的に対処する方がコストが安いので、コストの安い対処法を取り、コストの高い対策を取ることができないことで続いてしまうと。

大企業の信用不安の話のように、**大きくなってしまえば止められない**、みたいなのはやっぱりあるんだと思います。関わる人員が増えすぎてしまうと止められないって

いうのはあるので。

久保　ある意味、中国はウォールみたいなのがあって、部分的に国レベルで止めようとしている。

永山　**僕たち、結構こういう話題、一番目の前のところの話をしてない気がするな。量子コンピューティングがインフラ化したときの利用の仕方。暗号解読に使えちゃうじゃないですか。包丁を使って人を殺す人が悪いみたいな話になってるわけですけど、量子コンピュータ使って暗号解読しちゃっていいのかな。**

久保　できてしまうので。

寺元　法律的には不正アクセス禁止法とかに引っかかりそうな範囲じゃない？止められるかどうか置いといて。

永山　パスワードとか暗号で守ろうとしているものを読みに行ったらダメですよね。パスワードや暗号がいかにボロいものだったかということはさておき。

寺元　隠そうという意図があったら引っかかるわけじゃん。それが、どれだけ止めるだけの実行性があるかどうかは別の問題だと思うんだけど。

岸本　普通に鍵が空いてるから家に入りましたっていうのと同じ理屈になるんじゃない？

長門　この辺の問題、よく問題になるところで、特に悪意がないんだけど技術的に可能だったのでやってしまったら、バグとかバックドアみたいなのが見つかってしまって、「セキュリティにこういう致命的な問題があるよ」と通報したら、その人が逮捕されるみたいなことってあるわけですよね。気の毒な話だとは思いますけど。

森下　基本的にはまあやっぱり社会と一緒に解決しないといけない問題だっていうのが月並みな回答だと思います。技術的にできてしまうようになってしまったものは。

岸本　今の話はわりと個人の話だったけど、国家や大企業の問題になるとまたちょっと違う話になるね。例えば中国ができるようになっちゃったらとか、北朝鮮ができるように

なっちゃったらみたいな。あるいはグーグルでも良いと思うけど。

森下　そうですね。

森下　軍事転用についても聞きたいです。

永山　アメリカは、空軍も海軍も陸軍も、量子に注目して進めてますよ。量子センサと量子通信ネットワーク、量子センサネットワークを作ろうみたいな話とか。量子暗号ネットワークももちろん作りたいし、みたいな。

森下　量子センサについて簡単に教えてもらってもいいですか？

永山　今のステルス技術とかで飛んできているミサイルや戦闘機が見つけにくいのは、量子センサネットワークの感知能力だったら見つけられるだろう、みたいなストーリーで量子センサネットワークの研究がされていたりとか。

他にも今、原子力潜水艦あるじゃないですか。あれって自分の位置把握しながら航行するのって、GPS とか外との連絡とって自分の位置確かめながら進むしかないんですけど。

外との関わり、完全に周りに対して何の探知電波とかも飛ばさずに、ソナーとか使わずに進む方法として、量子センサの活用が考えられていて。量子の感度を持った加速度計とか作ると、今自分がどっちにどのくらい曲がってとどっちにどのくらい進んでみたいなものが、全部高精度にとれるから、外の状況をセンシングせずに進めるんじゃないみたいな期待があり[116]。

そうするとソナーとか使う必要ないから、他の国が撒いてるセンサとかに検知されずに泳いでいけるだろう、そういう発想です。今のセンサの感度だとそれはできない。

今のセンサの感度では、自分がどこにいるかが、僕たち今、目で周り見て自分の位置をつけながら歩いているのと一緒で、光が入ってきてるからじゃないですか。光が直接入ってこないんだったら、こっちから何か出して帰ってくることをやらないといけないんですけど、こっちから出すとかしちゃうと、他の国が撒いているセンサに取

---

[116] Krelina (2021)。日本語での要約について岸本・長門(2022: 16-17)を参照のこと。

られちゃうんですよね。

森下　量子を使うと撒かなくてよいことになるんですか？

永山　量子を使うと外に対するセンシングをするんじゃなくて、自分の中だけでセンサを持ってる、スマホは速度計とかついてて、これは外にセンシングしてるんじゃなく、中だけで自分が動いているかどうか測っているだけじゃないですか。

で、潜水艦も今どっちに何度まがった、その向きの方向にどのぐらい進んだ、みたいな。外からの波とか、ぶつかってきて速度計はどのぐらい動かされたことを検知したのかっていう。

森下　それは海底地形は既知としているということですか。

永山　そう。海底地形は既知として。海底地形さえ知っとけば、自分の位置はもうすべてトレースできるからぶつからずに航行できるみたいな。

森下　センサの感度が高いからってことですよね。

永山　そうですね。センサの感度がむちゃくちゃ高い。感度も高い精度も高いということが実現できればそういうこともできるだろうというわけで。

森下　分かりました。軍事研究はこっちでも見とかないといけないなと思いました。ありがとうございます。

話題22.境界的領域・擬似科学の生成

話題の背景

擬似科学（疑似科学）とは「科学のような外観をまとってはいるが、実際には科学ではない知識や技術」のことである。とりわけ擬似科学が深刻な問題となるのは、これが経済的・身体的・社会的な危害を及ぼしうる場合であり、公教育・医療・商品といった領域に「量子」の名を騙る擬似科学が影響を及ぼす可能性が憂慮される。

量子科学および「波動」の概念は、擬似科学の世界ではいわば「古典」の地位を占めている。量子の古典的直観に反する性質は、人間や生命の神秘性を説明するための擬似科学理論と親和性が高い。量子科学の発展に伴い、新しい量子擬似科学も登場している。本文では森下が、どのあたりからが社会的に許容されない擬似科学でありうるか、について話題にしている。

森下　**――量子の擬似科学については、「波動」[117]っていう概念が、擬似科学の中でかなり伝統芸的な部分があります。**

事例をいくつか集めてるんですが、90 年代に流行ってだんだん下火になってるのかなと思ったら、そんなことは全然なくて、割と最近になってもその手の「波動セラピー」みたいなものがむちゃくちゃ色々あるというのが調べてると分かります。最近だと、この間の参院選で出た政党ですけども、参政党に関わっているアドバイザーの人[118]が医者で、その方が「量子波動器メタトロン」〔という擬似科学的測定装置〕[119]について述べています。

みなさんの身の回りでも聞いたことはありますか？というのを、ひとつ聞いてみたいんですが。

永山　ちょっと面白い。メタトロン。「波動とは波です。専門用語では周波数です。音が聞

[117] 擬似科学（菊池(2006)の用語では「ニセ科学」）における「波動」の概念については菊池(2006)の第 5 節を参照のこと。
[118] 歯科医師の吉野敏明。
[119] DreamScript (2023)。

こえると波です。この場合は波長という言葉が使用されます。」[120]

寺元　何だそれ。ちょっと衝撃です。

永山　これやばいよなぁ。歯医者さんでしょ？それなりの学があると思うんですよ。

森下　それは本当にそうで、お医者さんがひっかかるんですよね。それがやっぱりずっと気になっているところ。

　この件に限らず、お医者さんが引っかかるケースが結構あります。メタトロンに限らず健康を謳う擬似科学商品というのは、お医者さんを一つの媒介として広がっていくようなところがあるので、そんなに珍しい感じではないんですが。個人的にはだからこそ深刻ですねとは思ってます。お医者さんを特に媒介にして広まっていくっていうのは危ういなと思うところです。

　まぁコロナに関してもね、やっぱりなんか消毒薬、特に根拠付けられてない消毒液を売るみたいなのが、割とお医者さん経由で広まったっていうことがあるので。

永山　でも儲かるんだろうな。

森下　「儲かるから」という明確な悪意を持ってやっていれば〔まだ〕いいのでしょうが、〔擬似科学の中には〕当人としては完全に善意のケースも少なくないと思いますね。マルチ商法と合体しちゃってるものとか、神秘主義と合体しちゃってるものとかも。

肥後　「量子○○」の一例として、2017 年に日本で開催されたという「量子音楽フェス」ウェブサイト [121]がありました。

寺元　「2 つの音が同時に存在するシステム」…

永山　タイムテーブルに量子論講座もあるよ。

---

[120] なかの歯科クリニック(2022)の冒頭部分を読み上げている。
[121] Qetic (2017)。フェス本体のウェブサイトは削除されている。

肥後　ヘッドフォンの宣伝もあります。

森下　**擬似科学っていうのは、やっぱり一つの社会を知る窓でもある**ので、どういう形でイメージというものが用いられるかっていうことを知る上では非常に重要な対象でもあると思っています。「そう来るか」っていうケースがたくさんあると思うんですけど。科学が文化として定着していくときに、人が新しい科学をどういうイメージで受容していくか？っていうことの参考になる部分があるので。

もちろん、やばいものは「やばい」って言っていかないといけません。他方、人間を理解するための重要なソースでもあると、私は思っています。あまりメジャーな意見ではないと思いますが。

寺元　**量子音楽フェス自体は、量子力学をモチーフやイメージとして使っていて、世界観を表現してるので、全然いい**ですね。

永山　理解してやってそうな気がする。モチーフとして、「こんにちは、宇宙です」のノリで、「こんにちは、量子です」。

寺元　量子的な状態の表現なんだし、こういうアプローチは全然、すごくいいと思います。

森下　**事実としてではなく、イメージとして使う**ということですね。

肥後　なんか「これは大丈夫そうな感じがする」と、「これはヤバそうな感じがする」と、その境界線、匙加減がどこにあるのかということが、すごく面白そう。

森下　そうですね、どこがその線なのかっていうことですよね。

永山　グラデーションになってると思います。この人にとってはこれは大丈夫だけど、そっちの人にはめっちゃヤバく映るみたいな。

森下　これは私が考えてることですけど、擬似科学を一律に否定するのではなく、どうなったら社会的に悪影響が出て、止めないとまずそうかっていう、その線引きみたいなものを考えたいと思っています。健康に良いですって言って効果のないもの売ってるの

はまずいとか、ガンが治るって言ってたらやばいとか。あと学校教育に入ってきたらやばい、とか。

寺元　それは、よく話題になりますね。

久保　むしろさっきの作品と言ってたのは、多少間違ってもいいから入ってくれてた方が認知につながるんじゃないかという気もする。

森下　そうですね。しかしそれを良しとするかは人による。こういう使い方も嫌だという人もいると思いますね。

寺元　個人的にはこれは良いと思ってしまうかな。それは「表現してる」って言ってるだけで、〔事実であるという主張とは〕明確に境目を引いている気がする。

肥後　これは量子だって言っているというよりは、そこから膨らませられるイメージを。

森下　世界観ですね。

肥後　人間社会や組織論と、量子の考え方を結びつけた感想は、科学絵本のイベント[122]を開催したときのアンケートにも見られました。**新しい知識や事象について、自分の経験や知っている話と紐付けて考えていらっしゃったのかなと思います。**

永山　**さっきの量子音楽が例として良かったのは、モチーフに使おうとしたのにガチの擬似科学が入ろうとしてそうだったこと**ですね。

[122] 量子力学×文学コラボカフェ「デンマークの絵本から見る、量子力学の世界」(2021 年 6 月 20 日開催)（大阪大学社会技術共創研究センター 2021)。

話題23.格差や不平等の拡大

話題の背景

科学の発展は地球規模の格差や不平等の拡大を帰結しうる。量子情報技術についても、莫大な投資を必要とするハードウェアを含め、一部の先進国による技術の独占・寡占が懸念されており、格差を平準化するための再分配の取り組みの重要性が喚起されている。

森下　**――格差不平等の拡大についてです。SDGs と被るんですけれども、もうちょっと負の側面みたいな部分にフォーカスできれば良いかなと思います。**

よくこういう新しい技術で言われるのは、それを作れるアクターが限られるでしょう、っていうこと。結局、一部の先進国、一部の企業だけがそういうものを作ることのできるリソースを持っていて、そういった国や企業がますます栄え、発展途上国と先進国の格差もますます開いていくでしょう、という話があるわけです。量子技術に関してもそうしたことが懸念されているという話もあるんですけれども、これに関してはいかがでしょうか。

永山　僕もそれはフリーアグリーで。AI とかでもそうだったんじゃないですか。明らかに GAFA でしか再現性のない研究が行われているみたいな。

久保　そういう意味では、OpenAI はみんなが使えるようにするみたいな発想ではある[123]。

永山　そうだね。

森下　**プログラマとかのレベルでは、発展途上国のこの国がすごく量子に関するプログラミング盛んにやってるよ、みたいな国ってありますか？全然お金なくてもできる量子研**

[123] OpenAI の公式ウェブサイトには、〔OpenAI の使命は〕「人工知能が全人類に利益をもたらすようにすることです」とある（OpenAI 2023a）。一方近年は、AI の学習データについての詳細をオープンにせず、非公開としてモデルを独占している（カテライ・井出・岸本 2023: 14－15）、大手テックである Microsoft との提携し競争環境に悪影響を与えている（Forbes JAPAN 2023）、グローバル・サウスにおいて労働者を搾取している（カテライ・井出・岸本 2023: 19-20）など、公正性や透明性に関する多くの批判も集めている。

究とかあるのかなってことを聞きたいのですが。

永山　理論研究？

森下　なるほど。かつての日本の素粒子みたいな感じで、理論研究に重点を置くことでプレゼンス高めるみたいなことを戦略として取ることは、理屈としては可能かということですかね。

永山　**理屈としては可能だけど、これはコンピュータの話なんで、やっぱり使えるものを作ってなんぼ。**素粒子はある意味、現実での応用が全然考えられていないから。

久保　そもそも理論研究でもお金がないと研究者は生きていけないので、結局お金があるところがやることにはなる気がします。（理論研究は）相対的には全然お金かからないとはいえ。

森下　既に論争になった独占に関する話題があったりしますか？

永山　独占が問題になったり…。やっぱまだ実用フェーズではないので、そこは話題になってないんじゃないかなって思いますね。

森下　ちなみにハードウェアを途上国に供与すれば、研究が進むようなタイプのものですか？

永山　ハードウェアを途上国に供与しても、専門家が育ってないと活用しようがないと思う。

森下　ハードウェアプラス人材育成ができればって感じですかね。やっぱり開発支援の形でハードウェアを渡して、その上で人材育成に関してもサポートするってことが必要になってくるって感じですよね。

永山　そう思います。今日本が結構 Quantum Native 教育ってやってますけども、それは各

省庁も色々プランやってますよね。文科省の Q-LEAP Education[124]もあるし、総務省の NICT QuantumCamp[125]みたいなものもあるし、経産省系は未踏プロジェクトをやったりしてるんですけど、どこも割と量子ソフトウェア寄りかな。と言うか座学とかコンピューターソフトウェア寄りの教育かな。あんまりハードウェアいじる系の教育になってねーなっていう。

森下　なるほど。**国内的にも大きく課題がある**という感じですね。

永山　まあその辺、〔ハードウェアを準備するより〕始めるハードルが低いですけどね。環境の準備もパソコンにシミュレータインストールしてもらってとかで、あとはインターネットアクセスで IBM が持ってる量子コンピュータ、触りに行きましょうとか。

なので、やっぱハードウェアなのかな。ソフトウェアとかは格差的には教育広げることはまだ早すぎだろうな。

森下　量子技術の開発がこれから進んでいく中で、量子情報技術の開発で遅れてしまうことで生じるリスクってどんなことが考えられますかね。情報技術上の防衛手段を持てなくなるという差などが生まれますか？

永山　そうですね。一つそれはあると思います。**量子暗号解読に一方的に危険にさらされる**みたいな話ですよね。

森下　それ以外にも何かありますか？

永山　**経済競争的にも一方的に使わされる・買わされる側にまわる。**だからインテルや TSMC 等〔＝半導体のトップ企業〕の持っている古典コンピュータの半導体のプロセッシング技術も、どこも誰も追いつけない…相当うまくやらないと差は埋まりにくいというか、狙って追いつくことが不可能な領域に入ってしまったりはしますよね。

森下　そうですね。

---

124 JST (2018b)。
125 NICT (2023)。

参考文献

Ark Performance／少年画報社・アルペジオパートナーズ（2017）「アニメ「蒼き鋼のアルペジオ -アルス・ノヴァ-」公式 HP」 <http://aokihagane.com/>

Barabási, Albert-László and Réka Albert (1999) “Emergence of Scaling in Random Networks” <https://www.science.org/doi/10.1126/science.286.5439.509>

Business Insider（2019）「歩き方、心拍数、お尻…顔認証以外にも研究が進む識別技術」 <https://www.businessinsider.jp/post-201553>

DreamScript (2023) 「DreamScript | 量子波動器メタトロン販売サイト - 量子波動器「メタトロン」正規輸入・販売サポート。導入後のサポートもあんしん。ご購入者の皆様が安心してお使いいただけるよう、メタトロンの第一人者である IPP JAPAN 東海北陸営業所 統括マネージャー、北村が直接レクチャーいたします。」 <https://dream-script.co.jp/>

D-Wave Quantum (2023) 「D-Wave Systems | The Practical Quantum Computing Company」 <https://www.dwavesys.com/>

FIRST 量子情報処理プロジェクト （2014）「プロジェクト概要」 <https://www.nii.ac.jp/qis/first-quantum/overview/index.html>

Forbes JAPAN (2023) 「「生成 AI の独占」を懸念する米 FTC、グーグルや OpenAI らを注視」 <https://news.yahoo.co.jp/articles/b3aa9787f7ab5b650ad906b92e8c54135a384b41>

Google (2023) “Quantum AI” <https://quantumai.google/>

「HELLO WORLD 製作委員会」（2019）「オリジナル劇場アニメ『HELLO WORLD』公式サイト」 <https://hello-world-movie.com/>

IBM (2023) “Quantum for Researchers” <https://www.ibm.com/quantum/researchers>

IBM Newsroom (2023) “IBM - Image Gallery” <https://newsroom.ibm.com/media-quantum-innovation>

IBM Research（2020）「母なる大地のモデリングにより、炭素排出量を削減しながら人口増加に対する食糧問題に対処する」 <https://research.ibm.com/jp-ja/5-in-5/nitrogen-fixation/>

IBM Quantum (2021) “Shor’s algorithm” <https://quantum-computing.ibm.com/composer/docs/iqx/guide/shors-algorithm>

Internet Governance Forum (2022) “IGF 2022 – Conference Room 3” <https://www.youtube.com/watch?v=w3gUA6qrZBM>

ITmedia (2019) 「Google、古典的コンピュータを超える「量子超越性」を実証か」 <https://atmarkit.itmedia.co.jp/ait/articles/1910/25/news117.html>

ITU (2022) “Frequently Asked Questions (FAQ)” <https://www.itu.int/hub/membership/become-a-member/frequently-asked-questions/>

Jasanoff, S. and SH Kim “Containing the atom: Sociotechnical imaginaries and nuclear power in the United States and South Korea”, *Minerva* 47(2): 119–146.

JST (2018a) 「人材育成プログラム 概要説明資料一覧」 <https://www.jst.go.jp/stpp/q-leap/jinzai/pdf/jinzai.pdf>

JST (2018b) 「光・量子飛躍フラッグシッププログラム（Q-LEAP）」 <https://www.jst.go.jp/stpp/q-leap/>

JST CRDS (2005a) 「National Innovation Initiative レポート “Innovate America”の調査・分析」<https://www.jst.go.jp/crds/pdf/2005/XR/CRDS-FY2005-XR-01.pdf>

JST CRDS (2005b) 「～科学技術イノベーション推進のための National Innovation Ecosystem 政策提言の検討～」<https://www.jst.go.jp/crds/pdf/2005/XR/CRDS-FY2005-XR-02.pdf>

JST CRDS (2006) 「科学技術の未来を展望する戦略ワークショップ「ブレイン・マシン・インターフェース（BMI）」分野報告書」 <https://www.jst.go.jp/crds/pdf/2006/WR/CRDS-FY2006-WR-15.pdf>

JST CRDS (2019) 「戦略プロポーザル 量子 2.0 ～量子科学技術が切り拓く新たな地平～」 <https://www.jst.go.jp/crds/pdf/2019/SP/CRDS-FY2019-SP-03.pdf>

JST CRDS (2021) 「中国、天地一体化量子通信ネットワークの建設に成功」 <https://crds.jst.go.jp/dw/20210317/2021031726240/>

JST MOONSHOT (2023) 「2050 年までに、経済・産業・安全保障を飛躍的に発展させる誤り耐性型汎用量子コンピュータを実現」 <https://www.jst.go.jp/moonshot/program/goal6/>

Martin, John M., Z. M. Rossi, A. K. Tan and I. L. Chuang (2021) “A Grand Unification of Quantum Algorithms”, arXiv, <https://doi.org/10.1103/PRXQuantum.2.040203>

Mikami, K. （2015） “State-Supported Science and Imaginary Lock-in: The Case of Regenerative Medicine in Japan”, *Science as Culture* Vol.24 Issue 2: 183-204.

National Cyber Security Centre (2020) “Quantum security technologies” <https://www.ncsc.gov.uk/whitepaper/quantum-security-technologies>

National Institute of Standards and Technology (2023) “Post-Quantum Cryptography Standardization” <https://csrc.nist.gov/Projects/post-quantum-cryptography/post-quantum-cryptography-standardization>

National Security Agency/Central Security Service (n.d.) “Quantum Key Distribution (QKD) and Quantum Cryptography (QC)” <https://www.nsa.gov/Cybersecurity/Quantum-Key-Distribution-QKD-and-Quantum-Cryptography-QC/>

Network Quantum Information Technologies (NQIT) (2018) “Quantum Technologies Public Dialogue Report.”<https://nqit.ox.ac.uk/sites/www.nqit.ox.ac.uk/files/2018-07/Quantum%20Technologies%20Public%20Dialogue%20Full%20Report_0.pdf>

NICT (2023) 「NICT Quantum Camp」 <https://nqc.nict.go.jp/>

NTT Communications (n.d.) “DDoS 攻撃とは？ 意味と読み方、対策方法” <https://www.ntt.com/business/services/network/internet-connect/ocn-business/bocn/knowledge/archive_18.html>

OIST (2020) 「量子情報物理実験ユニット （高橋　優樹）」 <https://groups.oist.jp/ja/equip>

OpenAI (2023a) “About” <https://openai.com/about>

OpenAI (2023b) “Introducing Whisper” <https://openai.com/research/whisper>

Ottino, J. M. (2003) “Is a picture worth 1,000 words?”, *Nature*, 421: 474-476. <https://doi.org/10.1038/421474a>

Pacher, C., A. Abidin, T. Lorünser, M. Peev, R. Ursin, A. Zeilinger and J.-Å. Larsson [2016] “Attacks on quantum key distribution protocols that employ non-ITS authentication”, Quantum Information Processing 15: 327-362.

QEd (2021) 「量子技術教育プログラム：オンラインコース・サマースクール」 <https://www.sqei.c.u-tokyo.ac.jp/qed/>

Qetic (2017)「音楽×アート×量子力学！？野外フェス＜Quantum 2017＞フジロック出演アーティストや SEBASTIAN X の別ユニットも出演決定」 <https://qetic.jp/technology/quantum-170307/238024/>

QITF (2021)「ホワイトペーパー “The” 量子インターネット -この宇宙の物理法則に許されるサイバー空間の極致」 <https://qitf.org/files/20210210_qitf_whitepaper.pdf>

Qiskit (2021)「量子ボリューム (Quantum Volume)」 <https://qiskit.org/documentation/stable/0.25/locale/ja_JP/tutorials/noise/5_quantum_volume.html>

Quantum Native Dojo (2019) “7-2. Harrow-Hassidim-Lloyd (HHL) アルゴリズム” <https://dojo.qulacs.org/ja/latest/notebooks/7.2_Harrow-Hassidim-Lloyd_algorithm.html>

QunaSys (2023a)「イオントラップの原理と冷却イオン量子ビット」 <https://www.qmedia.jp/basic-of-iontrap/>

QunaSys (2023b)「QunaSys、社会貢献のための量子技術活用の取り組みを開始」 <https://qunasys.com/news/posts/230714jp/>

Ruivenkamp, M. and A. Rip (2021) “Entanglement of Imaging and Imagining of Nanotechnology”, Nanoethics 5(2): 185-193.

SUMMERWARS FILM PARTNERS (2010)「映画「サマーウォーズ」公式サイト」<https://s-wars.jp/>

Takagi, A., A. Hirose, T. Nishimura, N. Fukumori, A. Ogata, N. Ohashi, S. Kitajima, J. Kanno “Induction of mesothelioma in p53+/− mouse by intraperitoneal application of multi-wall carbon nanotube”, The Journal of Toxicological Sciences, 33(1): 105-116.

Telescope Magazine (2021)「複雑な問題の最適解を短時間で導く！量子コンピュータとは何か。」 <https://www.tel.co.jp/museum/magazine/report/202112_01/?section=1>

togetter (2016)「「量子コンピュータ」とは何を指す言葉か」 <https://togetter.com/li/1052598>

The White House (2022) “FACT SHEET: President Biden Announces Two Presidential Directives Advancing Quantum Technologies” <https://www.whitehouse.gov/briefing-room/statements-releases/2022/05/04/fact-sheet-president-biden-announces-two-

presidential-directives-advancing-quantum-technologies/>

UKRI (2023) “UK National Quantum Technologies Programme: Our programme” <https://uknqt.ukri.org/our-programme/#hubs>

WIRED（2020）「顔認識だけで犯罪の可能性を“予測”できる？ ある論文が波紋を呼んだ理由」<https://wired.jp/2020/07/09/algorithm-predicts-criminality-based-face-sparks-furor/>

Wolpert, D.H. and W.G. Macready (1997) “No free lunch theorems for optimization”, *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, Vol. 1 Issue 1, <https://doi.org/10.1109/4235.585893>

World Economic Forum (2021) “Quantum Computing Governance Principles” <https://www.weforum.org/reports/quantum-computing-governance-principles>

Wozniak, Steve with G. Smith (2006) *iWoz*, W. W. Norton.

アイザックソン，ウォルター（2011）「スティーブ・ジョブズ Ⅰ」井口耕二訳，講談社, Kindle Edition.

生田力三（2022)「日本アニメ／漫画(ときどきその他)で描かれる量子情報処理に関する話題」<http://ikuta.ocoao.info/misc/Q/Qjapanimation.pdf>

大阪大学社会技術共創研究センター（2021）「量子力学×文学 コラボカフェ「デンマークの絵本から見る、量子力学の世界」」 <https://elsi.osaka-u.ac.jp/contributions/1364>

大阪大学量子情報・量子生命研究センター（2023）「HOME | QIQB: 量子情報・量子生命研究センター 大阪大学 世界最先端研究機構」 <https://qiqb.osaka-u.ac.jp/>

外務省 (2023) 「Japan SDGs Action Platform」<https://www.mofa.go.jp/mofaj/gaiko/oda/sdgs/index.html>

カテライ，アメリア・井出和希・岸本充生（2023）「生成 AI（Generative AI）の倫理的・法的・社会的課題(ELSI)論点の概観」『ELSI Note』No.26. <https://elsi.osaka-u.ac.jp/system/wp-content/uploads/2023/04/ELSI_NOTE_26_2023_230410.pdf>

カブキアン，アン(2011)「Privacy by Design 7 つの基本原則」，M. Horibe 訳，<https://www.soumu.go.jp/main_content/000196322.pdf>

カラー（2023）「エヴァンゲリオン公式サイト」 <https://www.evangelion.co.jp/>

川口悠子（2018）「「フィクションとテクノロジー」特集にあたって」『知能と情報』Vol.30 No.6: 278.

川人光男（2010）「ブレイン・マシン・インターフェース：BMI 倫理 4 原則の提案」『現代科学』No.471: 21-25. <https://bicr.atr.jp/~kawato/Ppdf/gendaikagaku.pdf>

菊池誠（2006）「「ニセ科学」入門」<http://www.cp.cmc.osaka-u.ac.jp/~kikuchi/nisekagaku/nisekagaku_nyumon.html>

岸本充生・長門裕介（2022）「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」『ELSI Note』No.24 <https://ir.library.osaka-u.ac.jp/repo/ouka/all/89731/ELSI_NOTE_24.pdf>

「君の名は。」製作委員会（2018）「映画『君の名は。』公式サイト」<http://www.kiminona.com/>

クオンティニュアム株式会社（2021）「Quantinuum、量子ボリュームで過去最高値である 8192 を達成：よりシンプルに、 より早く、そしてより少ないエラーで。任意角度のゲートで H1 の量子ボリュームを増加」 <https://prtimes.jp/main/html/rd/p/000000007.000104838.html>

経済産業省（2014）「レアメタル・レアアース（リサイクル優先 5 鉱種）の現状（第 26 回 産業構造審議会 産業技術環境分科会 廃棄物・リサイクル小委員会資料 4）」<https://www.meti.go.jp/shingikai/sankoshin/sangyo_gijutsu/haikibutsu_recycle/pdf/026_04_00.pdf>

経済産業省（2021）「標準化の概要」 <https://www.meti.go.jp/policy/economy/hyojun-kijun/katsuyo/business-senryaku/pdf/001.pdf>

興行通信社（2023）「歴代ランキング」 <http://www.kogyotsushin.com/archives/alltime/>

個人情報保護委員会（n.d.）「EU（外国制度）：GDPR（General Data Protection Regulation：一般データ保護規則）」<https://www.ppc.go.jp/enforcement/infoprovision/laws/GDPR/>

近藤勇一（2022）「量子の夏 Ryoko's Qubit Summer」<http://giraffilm.jp/ryoko/index.html>

佐々木寿彦（2022）「量子暗号通信とその安全性」<https://www.imes.boj.or.jp/jp/conference/citecs/22semi_01_docs/seminar_sasaki.pdf>

サッチマン，ルーシー［1999 (1987)］『プランと状況的行為―人間-機械コミュニケーションの可能性―』，佐伯胖（監訳），上野直樹・水川喜文・鈴木栄幸（訳），産業図書.

産官学連携研究開発コンソーシアム量子インターネットタスクフォース(QITF) [2021]「ホワイトペーパー “The”量子インターネット -この宇宙の物理法則に許されるサイバー空間の極致-」, <https://qitf.org/files/20210210_qitf_whitepaper.pdf>

産業技術総合研究所 (n.d.)「量子コンピュータ」 <https://nedo-quantum.aist.go.jp/quantum-computer.html>

サンライズ・プロジェクトゼーガ (2022)「[ZEGAPAIN] ゼーガペイン」 <http://www.zegapain.net/tv/>

シェンカー, マーク (2018)「デザインの主要トレンドとその未来―フラットデザイン、スキューモーフィズム、マテリアルデザイン、ミニマリズム | アドビ UX 道場 #UXDojo」akihiro kamijo 訳 <https://blog.adobe.com/jp/publish/2018/03/19/web-design-trends-101-everything-need-know-flat-design-skeumorphism-minimalism>

標葉隆馬 (2018)「科学技術イノベーション政策と標準化」『自動運転技術の動向と課題：科学技術に関する調査プロジェクト報告書』, 国立国会図書館調査資料 2017-4, 49-66.

標葉隆馬 (2020)『責任ある科学技術ガバナンス概論』ナカニシヤ出版.

鈴木和歌奈 (2013)「希望／期待から見る科学技術」『研究・技術・計画』 Vol.28, No.2: 163-174.

清藤武暢・四方順司 (2019)「量子コンピュータが共通鍵暗号の安全性に与える影響」『金融研究』38(1): 45-72. <https://www.imes.boj.or.jp/research/papers/japanese/kk38-1-4.pdf>

東京大学 (2023)「量子イニシアティブ登録プロジェクト」 <https://www.u-tokyo.ac.jp/adm/fsi/ja/projects/quantum/>

統合イノベーション戦略推進会議 (2022)「量子技術イノベーション戦略ロードマップ改訂」 <https://www8.cao.go.jp/cstp/ryoshigijutsu/roadmap_220422.pdf>

内閣府 (2020)「量子技術イノベーション戦略（最終報告）」 <https://www8.cao.go.jp/cstp/tougosenryaku/ryoushisenryaku.pdf>

内閣府 (2022)「量子未来社会ビジョン」 <https://www8.cao.go.jp/cstp/ryoshigijutsu/ryoshimirai_220422.pdf>

内閣府 (2020)「量子技術イノベーション戦略（最終報告）」

＜https://www8.cao.go.jp/cstp/tougosenryaku/ryoushisenryaku.pdf＞

なかの歯科クリニック (2022)「メタトロンとは？」<https://www.nakanodc.com/2022/03/11/640/>

西森秀稔 (2022)「量子アニーリングの解説」<http://q-annealing.org/QA/q-annealing.html>

日経クロステック (2021)「年収 2500 万円超えも、IBM や東大が量子人材育成に注力する訳」<https://xtech.nikkei.com/atcl/nxt/column/18/01639/00003/>

日経サイエンス (2022)「特集：シン・ウルトラマンの物理学」 <https://www.nikkei-science.com/202210_075.html>

日経ビジネス (2017)「「量子超越性」に突き進む Google の野望」<https://business.nikkei.com/atcl/report/15/061700004/121300243/?P=3>

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』, 18. doi:10.18910/88439

藤井啓祐 (2021)「量子コンピュータの現状と機械学習への応用」<https://www.soumu.go.jp/main_content/000775388.pdf>

マイナビウーマン (2017)「コカ・コーラのレシピは二人しか知らない!?ホントのところを聞いてみました！」 <https://woman.mynavi.jp/article/130717-034/>

毎日新聞 (2008)「カーボンナノチューブ：マウスに中皮腫　形状、がん誘発か－－国立食品研確認」, 東京朝刊, 3 面.

米川恒夫 (2006)「国立公文書館における公文書等の公開」『アーカイブズ』第 23 号 <https://www.archives.go.jp/publication/archives/wp-content/uploads/2015/03/acv_23_p90.pdf>

ELSI NOTE No. 29

「量子の未来」をめぐる 23 の話題：株式会社メルカリ mercari R4D 量子情報技術チームへの重点的グループインタビュー

23 Topics on "The Quantum Future": Intensive Interview with mercari R4D Quantum Information Technology Team, Mercari Inc.

令和 5 年 8 月 17 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