



NICT
イノベーション デザイン イニシアティブ
活動報告（2020-R1）

はじめに

イノベーションデザインイニシアティブ（Innovation Design Initiative: IDI）は、情報通信研究機構（NICT）における経営および研究開発方針の検討に資するため、理事長直属のシンクタンク機能として、2020 年 4 月に設置されました。

ICT に関する国内外の研究開発、政策および産業の動向などの情報収集および分析を行い、その結果をもとに、中長期的視点に立った ICT 戦略のデザインや提言を行っていきます。

「NICT イノベーションデザインイニシアティブ活動報告」では、IDI の活動内容をまとめて、随時発行していく予定です。

本書「2020-R1」では、量子 ICT に関する 5 件の調査結果（2020 年 4 月～6 月に実施）をまとめました。調査の元となる文献も各レポートの最後に掲載しておりますので、詳細についてはそちらを御参照ください。

目次

量子インターネットに関わる IRTF の動向	1
量子技術に関する特許分析	10
欧州における量子技術戦略	12
中国における量子通信関連企業	19
米国の量子 ICT・量子人材育成	22

量子インターネットに関わる IRTF の動向

菅野 敦史

経営企画部企画戦略室 プランニングマネージャー /

ネットワークシステム研究所ネットワーク基盤研究室 研究マネージャー

1. はじめに

量子情報通信技術の研究開発が非常に活発です。量子コンピュータ・量子計算機分野では、古典計算を質的に超える「量子超越性」の実現が報告されるなど、新たなフロンティアの開拓と実装を目指し、学术界だけでなく産業界も一体となって研究開発が進められています[1]。一方、量子情報をやり取りする量子通信の分野の研究開発も活発です。情報理論的な安全性を担保する量子暗号通信の中でも、量子鍵配送(Quantum Key Distribution; QKD)の分野においては、すでに ITU 等での国際標準化が進められており、日本のみならず中国欧米においても装置開発やテストベッドの構築が進んでいます[2][3]。また、量子通信のユースケースはセキュア通信の実現のみにとどまりません。例えば、量子計算機を相互接続することで並列化による実効量子ビット数の増加が期待されています。量子計算機・量子ノードの量子ネットワークを接続することで、量子インターネットを構築することが可能になります。情報通信の新たなパラダイムを拓く量子インターネットの研究開発は未だ開始されたばかりで、デバイス・装置だけでなくアルゴリズムにもミッシングピースが多い状況です。そこで、先駆けて量子インターネットに関する研究開発動向調査を実施することが、NICT の今後の研究開発を実施する上でも重要です。

本調査では、量子インターネットの研究開発を標準化研究の観点から調査しました。特に、インターネットの標準化を推進しているフォーラム標準団体インターネット技術標準化委員会(Internet Engineering Task Force; IETF)の姉妹団体である、研究に特化した委員会 Internet Research Task Force (IRTF)に設置された Quantum Internet Research Group (QIRG)の動向を調査しました[4-6]。IETF/IRTF では Internet Draft (I-D)という標準化技術文書を発行していますが、その策定状況や会合での報告の調査を通じて、量子インターネットの研究開発の現状を俯瞰します。また、参加機関のサーベイを通じて、量子インターネットの研究開発にアクティブな機関を浮き彫りにしました。

2. 調査内容

2.1 IRTF-QIRG とは

IRTF-QIRG は2018年11月に設立され、今までに IETF 本会合3回、中間会合6回、全9回の会合を開催しています[7]。現在の QIRG チェアマンは慶応大学 Rodney Van Meter 教授、デルフト工科大 QuTech Wojciech Kozlowski 教授です。QIRG の設立趣意(Charter)で規定されているゴールは「量子インターネットの設計・構築手法についての取り組み」で、具体的な課題として①ルーティング・中継、②リソース分配、③接続確立、④相互運用性（インターオペラビリティ）、⑤セキュリティ、⑥API 設計が挙げられています。また量子インターネットの応用事例などについても議論しています。

会合ではドラフトの議論だけでなくイベントの報告や技術紹介などもなされます。また、中間会合では主に IETF 本会合に向けたドラフトの調整などが行われています。各会合において提出された文書は下記の通りです。

■ IETF-103 会合（2018年11月8日バンコク）

[プレゼンテーションスライド] Six stages of evolution of a quantum network

[プレゼンテーションスライド] draft-kaws-qirg-advent-00

[プレゼンテーションスライド] Draft charter

[プレゼンテーションスライド] Advertising Entanglement Capabilities in Quantum Networks

■ IETF-104 会合（2019年3月25～26日プラハ）

[プレゼンテーションスライド] Tutorial on Quantum Repeaters

[プレゼンテーションスライド] Architectural Principles for a Quantum Internet

[プレゼンテーションスライド] The Link Layer Service in a Quantum Internet

[プレゼンテーションスライド] Connection Setup in a Quantum Network

[プレゼンテーションスライド] "Quantum ping" and Hackathon report

[I-D 草案]Advertising Entanglement Capabilities in Quantum Networks

[I-D 草案]The Link Layer service in a Quantum Internet

[I-D 草案]Architectural Principles for a Quantum Internet

[I-D 草案]Connection Setup in a Quantum Network

■ 2019年第2回中間会合（2019年10月14日オンライン開催）

[I-D 草案] Architectural Principles for a Quantum Internet 改訂稿

■ IETF-105 会合（2019年11月19日モンテリオール）

[プレゼンテーションスライド] Architectural Principles for a Quantum Internet

[プレゼンテーションスライド] Link layer for quantum networks

[プレゼンテーションスライド] Connection Setup in a Quantum Network

[プレゼンテーションスライド] QKD in OpenSSL

[I-D 草案]The Link Layer service in a Quantum Internet 改訂稿

[I-D 草案]Architectural Principles for a Quantum Internet 改訂稿

[I-D 草案]Connection Setup in a Quantum Network 改訂稿

■ 2020 年第 1 回中間会合（2020 年 4 月 8 日オンライン開催）

[プレゼンテーションスライド] SimulaQron 紹介

[プレゼンテーションスライド] QuNetSim 紹介

[プレゼンテーションスライド] QuISP 紹介

[プレゼンテーションスライド] NetSquid 紹介

[I-D 草案]Applications for Quantum Information Network 改訂稿

[I-D 草案]Architectural Principles for a Quantum Internet 改訂稿

[I-D 草案]Applications and Use Cases for the Quantum Internet 提案

■ 2020 年第 2 回中間会合（2020 年 6 月 9 日 Web 開催）

[I-D 草案]Applications for Quantum Information Network 改訂稿

2.2 現在公開されている技術文書

現在の I-D として公開されている文書は以下の通りです。

■ Architectural Principles for a Quantum Internet（2020 年 7 月現在 version 03）

量子通信を構成する基本要素（量子ビット qubit やベルペア、エンタングルメントなどの概念）及びネットワークアーキテクチャの基本要素（概念モデルやネットワーク境界、量子メモリ寿命など）について記述しています。現在のインターネット・ネットワークとの比較も行われています。量子インターネットとはなにか、を知るための手引書のようなものです。本 I-D にて示されている量子インターネットの概念モデルを図 1 に示します。エンドノード間は、qubit を伝送する量子チャネル(Quantum channel)および制御信号等を伝送する古典チャネル (Classical channel; 通常のインターネット網等を利用したもの) で接続され、伝送距離の延伸化のために量子中継器(Quantum repeater)が挿入されます。量子中継器の機能として以下の項目

- エンタングルメント・ベルペアを生成し他方へ転送する機能
- 「蒸留」により fidelity を確保する機能
- ルーティングを含むネットワークを管理する機能

が具備されます。

また、ネットワーク内におけるノード・中継の種類として以下が挙げられています。

- 量子ルータ(Quantum router)
制御層を流れる制御信号等により制御可能な量子ノード。エンドツーエンドでの交換ベルペアを決める等の機能を持ちます。

- 自動量子ノード(Automated quantum node)
データ層(量子チャネル)のみを中継するノード。量子チャネルを延伸化するための機能を持ちます。
- エンドノード(End node)
エンタングルメントペアの受信を行います。量子メモリ等を持たず、qubit 受信後すぐに処理を始めます。
- 非量子ノード(Non-quantum node)
古典チャネルの制御を行います。

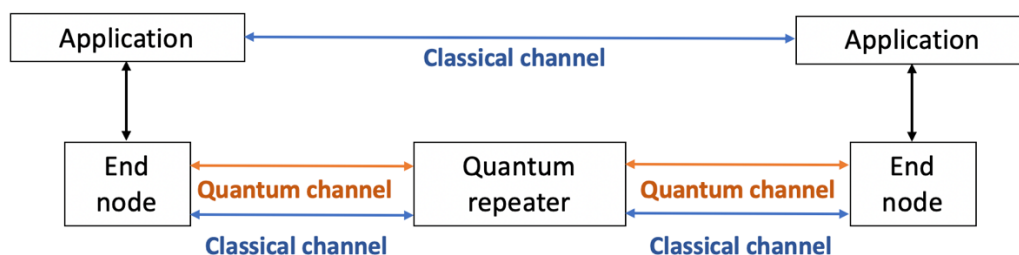


図1 量子インターネットの概念モデル

■ Applications and Use Cases for the Quantum Internet (2020 年 7 月現在 version 00)

量子インターネットの応用先についてユースケースとともに記述しています。応用先として以下の3つが挙げられています。

- 量子暗号応用
 - ・ 複数のエンドノード間における暗号鍵配送を実現するセキュア通信構成[8]
 - ・ ブロックチェーンや分散コンピューティングの妥当性を担保する高速なビザンチン・フォールトトレラント性の実現（ビザンチン将軍問題・障害の高速な解決）[9]
- 量子センサー応用
 - ・ 世界中に分散する原子時計を量子インターネットで接続し同期することで超高精度な原子時計を実現[10]
- 量子計算応用
 - ・ 遠隔の量子コンピュータを相互接続し協同動作させることで計算リソースの大きい量子計算を実現する分散量子コンピューティング[11]
 - ・ 個人情報等ソースデータを保護しつつ遠隔の量子コンピュータで計算処理を行うプライバシー保護量子計算[12]

また量子インターネットのユースケースとして、セキュア通信構成（図2）、分散量子コンピューティング（図3）、プライバシー保護セキュア量子計算（図4）が挙げられています。

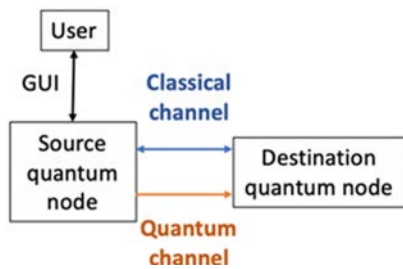


図 2 セキュア通信構成例

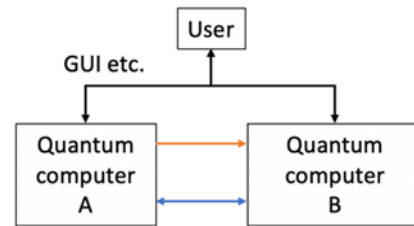


図 3 分散量子コンピューティング構成例

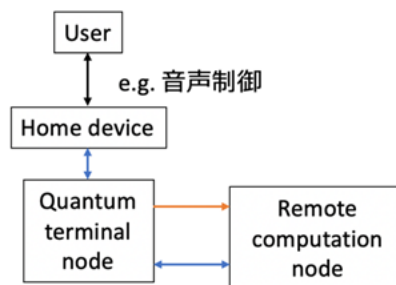


図 4 プライバシー保護量子計算構成例

2.3 各会合における主な議論

各会合で報告されたイベントや技術の議論は下記の通りです。

■ "Quantum ping" and Hackathon report (IETF-104 会合 (2019 年 3 月 25～26 日プラハ))

メルカリ・永山氏より、量子インターネットにおける「ping (ネットワーク到達性を検証するためのツールのひとつ)」についてのハッカソン開催についての報告です。量子インターネットの中継に用いられるエンタングルメント交換等のベルペアのコストが(寿命としても生成確率としても) 高いため、通常のインターネットで用いられる Ping のように到達性を確認するのではなく、中継等でのエンタングルメント交換の成否により判断すべきではないか、という提案があったとのこと。

■ Quantum Key Distribution in OpenSSL (IETF-105 会合 (2019 年 11 月 19 日モンテリオール))

RIPE Labs・Rijsman 氏より、RIPE Labs が開催した Pan-European Quantum Internet Hackathon (2019 年 11 月 5～6 日) 内で実施したハッカソンの報告です。ETSI (欧州電気通信標準化機構) が策定した QKD API を利用して、HTTPS や SSH などにも用いられているオープンな Secure Sockets Layer (SSL)実装の OpenSSL へ QKD アルゴリズムを実装する試みで、ディフィー・ヘルマン(DH)鍵共有プロトコル実装を援用した OpenSSL への実装は Github で公開しているとのこと。

■ 各種量子ネットワークシミュレータの紹介（2020 年第 1 回中間会合（2020 年 4 月 8 日 Web 開催））

各機関が開発している量子インターネットのシミュレータの紹介がされました。デルフト工科大 QuTech が開発している SimulaQron は量子計算にも用いられる量子命令セット QASM をネットワーク用に改良した NetQASM をコアにしたものです。ミュンヘン工科大学が開発している QuNetSim は、量子チャネル・古典チャネルの両方をシミュレーションできるオープンソースのシミュレータで、ルーティングプロトコルの試験等もできプロトタイピングに適しています。慶応大学/WIDE プロジェクトが開発している QuISP はオープンソースの量子インターネットシミュレータパッケージで、プロトコルテストやスケラビリティの試験に適しています。デルフト工科大 QuTech が開発している NetSquid は物理レイヤ（ベルペア生成方法など）モデルからの構成を実現するシミュレータで、物理層から制御層、アプリケーション層までのシミュレーションができるものです。これらのシミュレータが QIRG 会合において紹介されました。

2.4 各会合における参加者の統計

これまでの会合の参加者リスト(Blue Sheets)から得られた参加機関統計について、全 9 回会合を積算した延べ参加者（図 5）、参加人数が最多であった IETF-104 会合 Session1（図 6）および Web 開催で技術紹介があった 2020 年第 1 回中間会合（図 7）についてグラフで示します。IETF/IRTF は国・機関での参加ではなく、IEEE と同様の個人としての参加になるため、所属未記入の方も多く参考情報として掲載します。

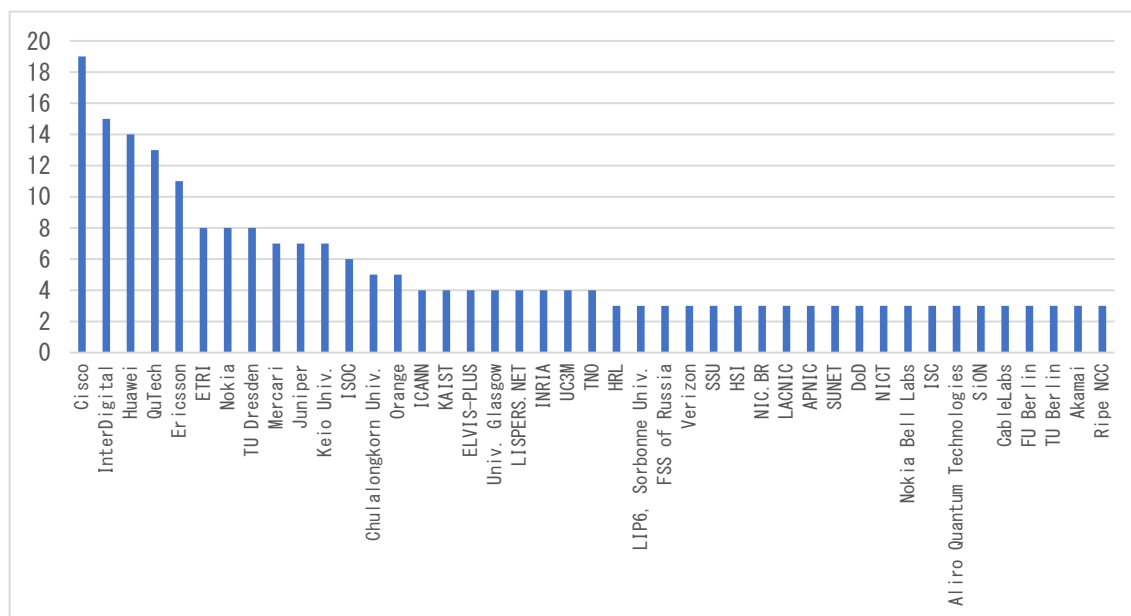


図5 個人・不明を除く、のべ3回以上参加の機関別統計
（2020 年 7 月 10 日時点全 9 回、延べ参加者数 467 名）

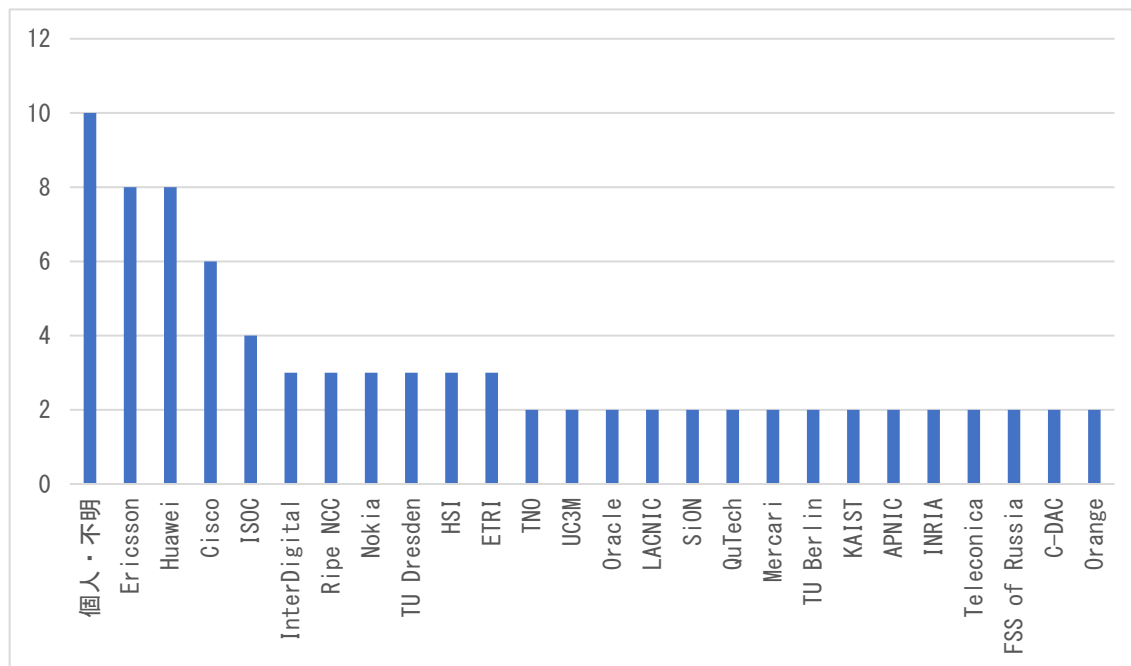


図6 IETF-104 Session1（参加者数 155 名）における 2 名以上参加の機関別統計

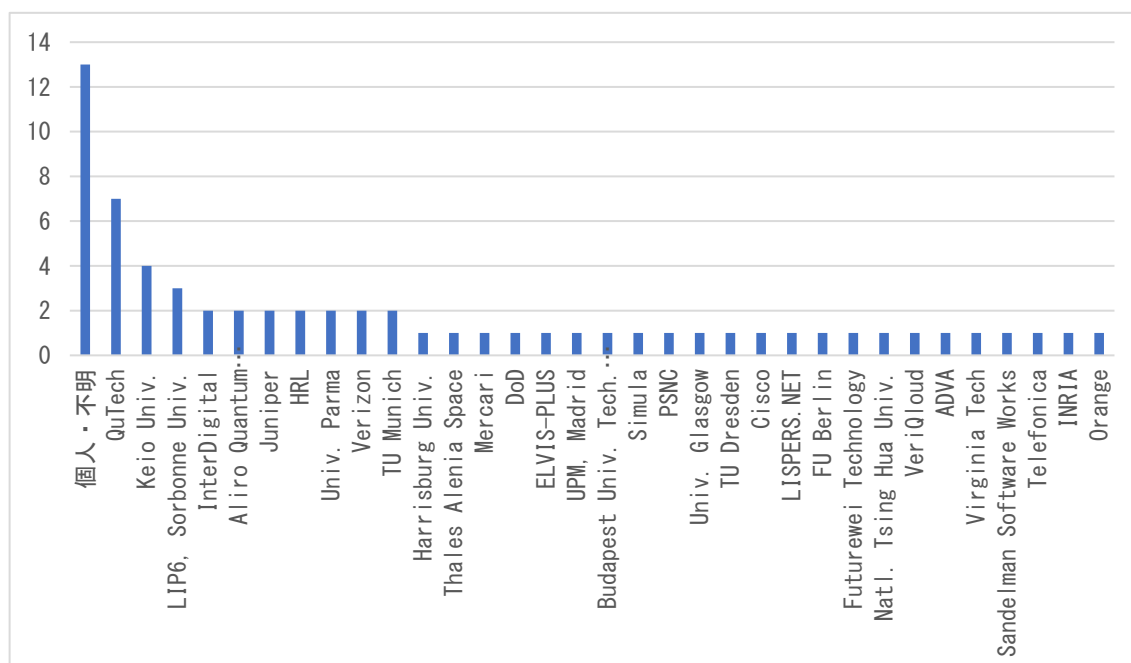


図7 2020 年第1 回中間会合（参加者数 64 名）に参加の機関別統計

3. 参加者統計による分析結果

各会合の Blue Sheet から参加機関の統計を俯瞰しました。現地開催があった IETF-103（バンコク）、104（プラハ）および 105（モントリオール）本会合においては、開催した現地の大学・機関の参加が増える傾向にありました。これは IEEE や ITU 等の他の標準化会議でもみられる傾向です。また IETF-104（プラハ）の 1 日目である Session1（図 6）は他会合と比較して参加者数が多く算出されました。これは、標準化会議に限らず国際学術会議でも同様ですが、参加するセッションが時間スロットとして開催されていない参加者が「量子インターネット」の動向について様子を見に参加しているのではないかと推測されます。そのため、QIRG の実働アクティビティを俯瞰するには、オンライン開催の中間会合が適していると考えられます。2020 年第 1 回中間会合（図 7）では、量子ネットワークシミュレータの紹介もあったため、研究機関の参加が多くみられました。特に、シミュレータ紹介プレゼンテーションを実施した機関（デルフト工科大 QuTech、慶応大学、ミュンヘン工科大学）だけでなく、ソルボンヌ大 LIP6、パルマ大学の参加が見られます。ソルボンヌ大のコンピュータサイエンス部門である LIP6 は欧州委員会が策定した研究・イノベーション枠組計画である Horizon2020 で実施している Quantum Internet Alliance に参画しています（デルフト工科大 QuTech も同様に参画しています）[13]。パルマ大学には Quantum Information Science コースが開設されており、その中で量子計算回路や量子ネットワーク用ソフトウェアの開発を行っています[14]。

また、IETF という標準化団体の性格もありますが、Cisco Systems や Huawei Technologies、Juniper Networks、ICANN、HRL、InterDigital Inc. などネットワークベンダやレジストラなどネットワーク関連企業の参加が多い状況が見てとれます。特に InterDigital Inc. の Chonggang Wang 氏は Applications and Use Cases for the Quantum Internet の提案・改訂を行うなど積極的に関与しています[15]。しかしながら、量子計算・ネットワーク関連のベンチャー企業や中小企業 (Small and Medium Enterprise; SME) のアクティビティが少ないことがわかります。加えて、物理層を担う QKD 等のベンダ（NEC、東芝、スイス ID Quantique 等）は参加しておらず、IETF・IRTF がターゲットとするレイヤ 2 以上の議論そのままの構図となっています。

I-D 提案や改訂、プレゼンテーションなど実効的なアクティビティ等による直接的な寄与は少ないながらも、大学・研究機関・オペレータ・政府機関が QIRG に参加しウォッチしている状況です。例えば韓国電子通信研究院 ETRI や中国清華大学、英国グラスゴー大学から参加が増えている状況です。また、政府機関としてロシア連邦保安庁 (FSS of Russia) や米国国防総省 (DoD) とみられる参加者も定期的に出席しています。

以上、QIRG への参加機関を俯瞰してみましたが、現時点ではアカデミアからの寄与が多く調査研究の段階を出ていないといえます。しかしながら、参加機関が増加傾向にあり、かつ、ネットワークベンダ・オペレータ等の各種機関がウォッチしている状況にあるため、今後も動きを注視していく必要があるといえます。

4. まとめ

IRTF-QIRG の動向について調査しました。I-D の策定・改訂状況や量子ネットワーク関連のイベント報告、量子ネットワークシミュレータの報告など技術的側面からは、ネットワークの概念モデルとその基本要素をどのように構築するかという基本的な課題が明らかになりました。また、ネットワークシミュレータの開発を通して、構築した場合のネットワークの fidelity やスケーラビリティを検証する取り組みも各機関で行っていることが明らかとなりました。しかしながら、IETF・IRTF という標準化団体の性格上、物理層やデバイスなどについてのサーベイは表には出てきておらず、QKD 機器ベンダの参加もみられませんでした。参加機関は固定化されつつあるものの、参加機関数の増加傾向もみられ、アカデミア・ベンダ・オペレータが興味を持って注視していることがわかりました。以上のことから、新規参加機関の性格を注視しつつ動向をウォッチしていく必要があります。

引用文献：

- [1] F. Arute et al., "Quantum supremacy using a programmable superconducting processor," *Nature* 574, pp. 505–510 (2019) doi: 10.1038/s41586-019-1666-5.
- [2] ITU-T Rec. Y.3800, "Overview on networks supporting quantum key distribution," Oct. 2019.
- [3] 「国際標準化機関 ITU-T で初の量子鍵配送ネットワークに係る勧告が成立」 NICT プレスリリース, 2 July 2019.
- [4] Internet Engineering Task Force: <https://ietf.org/>
- [5] Internet Research Task Force: <https://irtf.org/>
- [6] Quantum Internet Research Group: <https://irtf.org/qirg>
- [7] IETF Data Tracker on IRTF-QIRG: <https://datatracker.ietf.org/rg/qirg/about/>
- [8] R. Renner, "Security of Quantum Key Distribution", arXiv:quant-ph/0512258 (2006).
- [9] M. Fitzi, N. Gisin, and U. Maurer, "A quantum solution to the Byzantine agreement problem," *Phys. Rev. Lett.* 87, 217901 (2001) doi: 10.1103/PhysRevLett.87.217901.
- [10] P. Komar, E. M. Kessler, M. Bishof, L. Jiang, A. S. Sørensen, J. Ye, M. D. Lukin, "A quantum network of clocks," arXiv:quant-ph:1310.6045 (2013).
- [11] S. Wehner, D. Elkouss, and R. Hanson, "Quantum internet: A vision for the road ahead," *Science* 362, eaam9288 (2018) doi: 10.1126/science.aam9288.
- [12] J. Fitzsimons, "Private Quantum Computation: An Introduction to Blind Quantum Computing and Related Protocols," *npj Quantum Inf.* 3, 23 (2017) doi: 10.1038/s41534-017-0025-3.
- [13] Quantum Internet Alliance <http://quantum-internet.team/>
- [14] Quantum Information Science @UNIPR <http://www.qis.unipr.it/index.html>
- [15] InterDigital Inc. <https://www.interdigital.com/>

量子技術に関する特許分析

井出 真司

総務部 統括 / 経営企画部 統括

1. はじめに

量子技術の研究開発及び産業化に向けた状況を把握するため、欧州委員会共同研究センター（JRC：Joint Research Centre）が公表している量子技術に関する特許分析に係る報告を調査しました。同報告書は、欧州特許庁（EPO：European Patent Office）のデータベースを活用し、量子コンピュータ、量子鍵配送、量子もつれ等の主要技術動向を調査しています。なお、同報告書は2019年に公表されていますが、分析には2016年までのデータが使用されています。今回、主に特許出願件数に着目し、ポイントをまとめました。なお、グラフは引用元の原本[1]を参照ください。

2. 調査内容

2.1 量子コンピュータ

2016年時点で、量子コンピュータについては、国別では、米国（約500件）、日本（約200件）、カナダの順となっており、米国が圧倒的に多く2位の日本の2倍程度の出願件数となっています。組織別では、アニーリング型のDWAVE社、ゲート型のIBM出願件数が多いです。

組織別では、アニーリング型のDWAVE（140件）、ゲート型のIBM（60件台）が出願件数が多い状況です。また、日本は東芝（約40件）、NTT（約40件）、日立的の順で出願件数が多い状況です。6件以上の特許を持つ34の組織が、この分野における特許の3分の2を占めています。

出願傾向としては、量子コンピュータの基礎技術（超伝導回路、半導体材料、イオントラップ、量子ドット等）のほか、アニーリングマシンのアプリケーション（金融ポートフォリオ最適化、腫瘍治療のための量子ベースの機械学習等）に関する特許も出願されています。

2.2 量子鍵配送（QKD：Quantum key distribution）

2016年時点で、量子鍵配送については、国別では、中国（約450件）、米国（約250件）、日本（約200件）の順となっており、中国が2位の米国の出願件数を大きく引き離しています。傾向として、2013年頃から中国の出願件数が急激に伸びています。

組織別では東芝、NECの出願件数が最も多く、世界の1位・2位を日本企業が押さえています。その他、三菱電機（9位）、NTT（31位）などがあります。日本は総合電気メーカーが中心となって

出願をしていますが、中国では量子専門企業（安徽問天量子科技（4 位）、Anhui quantum communication Tech（8 位）、浙江九州量子情報技術（QTEC）（10 位）、広東国盾量子（QuantumCTek）（13 位）、IT 企業のアリババ（11 位）・大学（華南師範大学@広州市、5 位）、上海交通大学（14 位）など多数の組織から特許出願されており、国別の特許出願数の累計では中国が 1 位（2 位米国の約 2 倍）となっています。

出願傾向としては、特許の大部分は QKD 技術であるが、モバイルコマー্স、インフラ保護（送電網）、支払い認証、ビデオ会議システムなどのユースケースに関する出願があります。

2.3 量子もつれ

2016 年時点で、量子もつれについては、国別では、米国（約 120 件）、中国（約 90 件）、日本（80 件台）の順となっており、出願件数は上述の技術領域ほど大きな差はありません。出願傾向としては、基礎技術（約 130 件）とアプリケーション（約 200 件）の 2 パターンがあり、前者は量子光源、量子リピーター、量子メモリなど量子中継関連の出願があります。アプリケーションでは、約 110 が通信セキュリティ。アプリケーション例として、中国及び米国の軍関係からの出願として、量子レーダーとターゲット検出技術（中空軍士官学校）、量子イメージング（米海軍）、衛星測距（中空軍アカデミー）、その他顕微鏡やセンシングアプリなどがあります。また、日本の特許数が減少傾向にあるのに対して、中国の特許数が伸びています。

3. 分析・まとめ

量子鍵配送について、中国では既に銀行・インフラなどの分野で利用されており、「量子」を社名に関する企業が複数あるなど、量子鍵配送については中国が各国をリードしています。2016 年時点で日本は東芝・NEC が特許の出願件数で最上位を占めていますが、中国は企業・大学など複数の組織から特許が出願されており、産業界・学術界のすそ野が広く、今後特許の出願件数が伸びてくると考えられます。また、特許出願件数の多い中国の「国盾量子」が上海証券取引所に開設された科学技術関係の株式市場「科创板（STAR）」に 2020 年 7 月に上場したところ、取引初日に株価が約 10 倍に上昇し、同市場の上昇率記録を塗り替えたとの報道[2]もあり、中国における量子通信産業に対する期待の高さがうかがえます。

量子もつれの技術について、米国、中国から様々な分野での活用を想定した特許が出願されています。日本も世界第 3 位と健闘していますが、中国の特許出願件数が伸びており、この傾向が続けば、中国が 1 位の米国を追い越す日も遠くないと考えられます。

引用文献

- [1] <https://ec.europa.eu/jrc/en/publication/patent-analysis-selected-quantum-technologies>
- [2] <https://www.bloomberg.co.jp/news/articles/2020-07-09/QD6ZUTT0G1L701>

欧州における量子技術戦略

井出 真司

総務部 統括 / 経営企画部 統括

1. はじめに

欧州委員会では、欧州における量子技術に関する研究戦略「The Strategic Research Agenda (SRA) on Quantum technologies」を2020年3月に公表[1]しました。この戦略では、4つの研究分野（量子通信、コンピューティング、シミュレーション、センシング・計測）及び基礎研究、社会展開、国際協力、人材育成等の推進戦略や次の3年間及び6～10年先のロードマップをまとめています。

本戦略の究極のゴールを「量子インターネット」とし、欧州委員会がHorizon 2020で実施しているプロジェクト「Quantum Flagship」のための「野心的だが達成できる目標」を定めています。具体的には、研究開発成果の社会展開（産業化）を強く意識した内容となっており、産学官連携、ベンチャー育成、研究成果の産業化、知財・標準の確保等の方向性をまとめています。さらに、人材育成については、研究成果の産業化を進めるエンジニアや若手起業家の育成を謳い、量子技術の早期産業化を目指しています。

2. 調査内容

2.1 エグゼクティブサマリー

本戦略のエグゼクティブサマリーでは、下記のとおり量子技術の産業化に向けた方策がまとめられています。

- 産学官連携（ステークホルダーの巻き込み／創造のエコシステム確立）
 - 戦略の実施に当たっては、官民双方から多額の投資が必要。
 - 研究から産業化に円滑に移行するため、民間セクターにおいて量子産業と従来産業が緊密に連携し、ユースケースを特定し、ソリューションを開発することが必要。
 - 欧州委員会及び欧州の各国政府は、研究開発投資のほか、研究リソース、政策などを調整するほか、エンジニアと業界とを緊密に連携させる取り組みを進める。
- 持続可能な量子産業の構築に向けた成長への資金配分（ベンチャー育成）
 - 持続可能な量子産業の構築のために資金調達の仕組みを構築する必要がある。米国の資金ではなく欧州の投資銀行ベンチャーキャピタルなどを通じて、量子ベンチャー企業が資金

調達をできるようにすることが必要（米国西海岸のベンチャーキャピタリストに株式の過半数を取られないように）。

■ 研究室から市場へ（インフラ整備）

- 商業化を目指して量子技術分野全体を発展させるためには、量子通信、量子コンピュータとシミュレーション、量子センシング・計測などに関する量子インフラへの投資が必要。
- これによって量子技術への業界の関わりを強め、サプライチェーンの構築、量子人材の育成に貢献。早期の段階での産業界の巻き込みは、国際的なパートナーとの業界標準の策定に必須。

■ 欧州における知財・標準の確保

- 欧州における利益確保のため、知財・標準化戦略が重要。欧州特許庁と連携してこの分野における知財の動向を把握し、標準化団体とも連携が必要。

■ 人材育成

- 量子に関する労働力のほか、量子技術の社会受容性を高めるための、学校から労働までのあらゆるレベルでの教育システムが必要。
- 短期的には、量子のエンジニアリングに関する専門家の育成を行い、研究から産業への流れを作ることが重要。スタートアップを通じて量子技術を市場に投入するために、若手起業家・学生の育成。

2.2 目標と構成

本戦略では、究極のゴールを「量子インターネット」とし、そのための4つの研究分野等の研究開発課題について、推進戦略・ロードマップをまとめているほか、産業化に向けた取り組み、国際協力、ジェンダーバランス、人材育成についてもとりまとめています。ここでは量子通信分野（Communication）、イノベーション、国際連携にフォーカスして報告します。その他の分野については文献[1]を参照してください。

■ 究極のゴール：量子インターネット

- 量子インターネット：量子コンピュータ、シミュレータ、センサーなどが量子ネットワークで相互に接続され、情報や量子もつれなどが送られるネットワーク。
- ヨーロッパ市民にセキュアな通信とデータ保存、より良い医療や情報処理を提供。

■ 4つの研究分野+基礎研究

- ①Communication, ②Computing, ③Simulation, ④Sensing & Metrology, 及び Basic Research の推進戦略／ロードマップ（3年/6-10年）を特定。

2.3 量子通信分野の推進戦略及びロードマップ

量子通信分野の推進戦略として、地上系・衛星系の量子ネットワーク（量子メモリを備えた中継ノードやプロトコル等）の研究開発・実証を推進するとともに、ベンチャーやイノベーターが製品・サービスの開発・検証を行うことができるテストベッド「欧州量子通信インフラ（EuroQCI）」を構築することの重要性を述べています。このほかにも量子セキュリティの社会展開に向けたプログラムとしての重要性や、量子技術産業を育成するための人材育成や量子デバイスを製造するための施設を進めることとしています。

2.3.1 量子通信分野における推進戦略

- 量子ネットワークに関する研究開発の推進
 - ・ 分散した量子プロセッサ/センサーネットワークへの接続を含む、将来の長距離/エンドーエンドの量子通信を実現する量子ネットワーク技術に関する研究開発。
- 量子セキュリティの社会展開に向けたプログラム
 - ・ 量子セキュリティのエコシステムを確立するため、民生・政府の利用を想定した商用化に向けた実証に係る投資が必要。また、量子セキュリティを広く展開するためのプログラムが必要。
- QKD テストベッド／欧州量子通信インフラ（EuroQCI）の構築
 - ・ QKD 技術やその先の量子インターネットの実現に向け、研究機関、ソフト/ハード開発者、インターネット／セキュリティ産業のイノベーターが、製品・サービスの開発・検証を行うテストベッド構築が必要。これにより、新たな標準、手法、プロトコル、セキュリティポリシーなども検証することが可能になる。
- サプライチェーン構築／人材育成／ベンチャー育成
 - ・ 量子技術産業を育成するためのサプライチェーンの構築が必要。具体的には、量子 SME の創出・支援のため、量子デバイス製造のための製造施設の利用などを可能とするインフラが必要。また、量子技術に通じた労働者を確保するため、大学・産業界（経営者）を対象とした教育・訓練プログラムが必要。

2.3.2 参考：EuroQCI（Quantum Communication Infrastructure）について

EuroQCI は、欧州委員会の量子技術に関するプロジェクト「Quantum Flagship」（10 年間で 10 億ユーロ）の一つのプロジェクトとして、2018 年 10 月に開始された欧州域内の拠点を QKD ネットワークで結ぶ量子通信の大規模テストベッドプロジェクトです。

QCI は、光ファイバネットワークを活用した地上ネットワーク（国内外の戦略拠点を結ぶ）と長距離をカバーする衛星ネットワーク（EU やその他の大陸を結ぶ）から構成されます。後者は、欧州

委員会と欧州宇宙機関（ESA: European Space Agency）と MoU（2019 年 4 月）により、地上ベースでは達成できない、衛星量子鍵配送ネットワークを目指しています。

QCI は、まずは QKD のテストベッドとして構築され、将来的には、量子コンピュータ、センサーなども接続し、セキュアな情報配信を可能とする欧州の量子インターネットのバックボーンとなることが想定されています。初期のユーザーは、機密情報を送信するために高度なセキュリティを必要とする政府機関や加盟国・EU 当局であり、将来的には QCI のアプリケーションとして、金融、安全保障、医療分野の機微な情報の通信やデータの長期保存などへの活用が想定されています。オランダ、イタリアなどの欧州各国においてそれぞれ量子通信ネットワークを構築が始まっています。

2019 年 6 月、欧州 7 개국（ベルギー、ドイツ、イタリア、ルクセンブルク、マルタ、オランダ、スペイン）は、「量子通信インフラ（QCI）」を 10 年以内に開発・構築するための議論（explore）することに合意[2]しました。2020 年 2 月には欧州 24 かが合意[3]しています。

2.3.2 量子通信分野における研究ロードマップ～次の 3 年～

量子通信分野の次の 3 年に実施する研究ロードマップをまとめています。

- 地上ネットワーク（ノード技術・ネットワーク技術）
 - メモリを備えた少なくとも 2 つの量子ノードで構成される量子ネットワークでの、プラットフォームに依存しないソフトウェアとネットワークスタックのデモ。
 - プラットフォームに依存しないソフトウェア内の少なくとも 2 つの量子プロセッサノードのネットワーク上のプロトコルを含む、アプリケーションプロトコルのデモ。
 - 将来の量子リピーターのビルディングブロックとしての基本リンクのデモンストレーション。
 - 暗号化とネットワークアプリケーションの関連性のパラメーターベンチマークに対応する、デバイスとコンポーネントのパフォーマンスの向上。
- 衛星ネットワーク（量子暗号）
 - QKD プロトコルと信頼されたノードとのネットワークを使用して、世界中で安全な鍵配布を行うための衛星ベースの量子暗号の開発。
 - 衛星ベースの通信の重要なコンポーネントのデモ。衛星 QKD の開発に必要なコンポーネントの ESA/EU レベルでの調整されたアクションと、標準化された QKD 衛星および地上局コンポーネントの準備。
- テストベッド：欧州量子通信インフラストラクチャ（EuroQCI）
 - ユースケースとビジネスモデル、都市間および都市内のコスト効率が高くスケーラブルなデバイスとシステム、およびコンテキスト内のエンドツーエンドのセキュリティのためのキー管理とアプリケーションインターフェイスを含むソフトウェアスタックの開発。
 - ネットワークパフォーマンス、アプリケーション、プロトコル、及びソフトウェア用のテストスイートの開発。

■ 標準・認証・相互運用

- 標準（TRL の低いデバイスとシステムの場合でも）と、EURNG、ETSI、CEN-CENELIC、DIN などの利害関係者との契約において、QRNG と QKD の広範な採用、認証方法を採用する手段。
- QKD、QRNG、および量子安全認証システムの進歩は、重要なインフラストラクチャ、IoT、5G への準備が整っていることを実証するはずで、ファイバー、フリースペース、衛星リンクの信頼できるノードのネットワーク機能と相互運用性。EU 諸国間の信頼されたノードを介したエンドツーエンドのセキュリティ。

■ 人材育成

- 古典的なセキュリティやネットワークの実務者、量子通信を含む量子技術の修士課程を対象とした教育活動を、ヨーロッパ中の大学で開始。

2.4 イノベーション

イノベーションの推進戦略として、量子技術の産業化、人材育成、教育・トレーニング、標準化・知財確保をまとめています。

■ 量子技術の産業化（ユースケース、ロードマップ、産学連携ワークショップ、スタートアップ支援）

- 量子技術の製品・サービス化に向けたユースケースの特定。
- ステークホルダー（金融・政府・製造業者・ゲーマー・セキュリティ・防衛）による会議・ワークショップの開催やフラッグシッププロジェクトの QSA (Quantum Technologies and Support Action) の充実。
- 産業界の指針となるロードマップの作成、量子デバイスの KPI 及び標準の作成。
- SME やスタートアップによる量子関係製品の開発・製造を支えるインフラ・設備（計測装置・クリーンルーム等）開発、ベンチャーのプロトタイプ（100-1000 ロット）試作の支援。

■ 教育・トレーニング

- 量子業界と産業界をつなぐ高度な専門化（橋渡し人材）の育成と、そのための産業界主導の会議の開催（特にスタートアップ向け）やハッカソン・オープンチャレンジ・企業訪問の実施。

■ ファundingと投資

- ヨーロッパにおける量子技術への投資強化（米国に比べると投資家が少ない）。投資家への関心を高めるため、短期的には利益は出ないが、長期的には大きな市場が期待されることを示すことが重要であり、そのため研究者と投資家との結びつきを生み出すことが必要（フラッグシッププログラムでも実施）。

■ 標準化

- 標準化は研究から産業界へ移行する際の重要な活動。ETSI や CENELEC において量子技術に関する標準化活動を推進。

■ 知財

- 量子技術を保有する者に対して知財保護の重要性を喚起。知財確保・営業秘密・契約などを使い分け。欧州特許庁との連携による量子関連技術の戦略的な知財ポートフォリオの確保。
- 技術移転の円滑化に係る国際的なベストプラクティスの調査やガイドラインの提供。

2.5 国際連携

本戦略では、国際連携の重要性に認識し、欧州域内の連携・諸外国との連携方針をまとめています。国際連携を進めるにあたり、欧州が連携する他国以上に利益を得られるよう戦略的な連携を進めること言及しており、特に、強大な米国・中国を警戒（産業化・人材流出）するとともに、国際連携の候補として、アメリカ、カナダ、日本が挙げられています。また、国際標準化については携帯電話で成功したように、欧州を中心として量子技術の標準化作業が行われるよう、欧州全体を最も進んだ技術レベルに保つことの重要性についてまとめています。

■ 域内連携

- 欧州委員会の量子技術に関する研究開発支援は製品・サービス創出に貢献。欧州研究コミュニティの支援はヨーロッパの競争力に非常に大きなインパクトがある一方で、知財などの付加価値を保護する責務がある。

■ 諸外国との連携

- 不適切な障壁を設けて欧州が孤立することは欧州にとってマイナスであり、国際連携は重要。
- 競争相手は、米国、中国、日本、カナダ、オーストラリア。特に強大な米国、中国には注意。連携ターゲットは米国、カナダ、日本。
- 知財、人材の流出に気を付けつつ、基礎科学ベースでの連携を進める。
- 国際連携にあっては、少なくとも連携する他国以上に欧州が利益を得られるようにすべき。
- 連携基準としては、
 - 国際協力なくして研究開発速度や目標が達成できない場合、
 - 欧州と相手国が同じレベルで力を合わせることで目標が達成できる場合（ただし欧州が産業化で遅れないよう注意）、
 - 課題解決・加速のために目標を共有する場合 など。

■ 国際競争への備え

- 量子技術に関する国際競争に備え、欧州では以下の取り組みを進める。
 - 知財・ノウハウの保護、研究者・技術者・利用者の人材育成、技術移転とスタートアップの支援、サプライチェーンの構築、規制と標準の開発、政府調達、ユースケースの開発 など。

■ 知財・標準化

- 欧州域内での円滑な技術移転・特許活用を可能とする知財戦略を進める。
- 携帯電話と同様、実装に向けた技術標準の国際的なワーキンググループに向けて、欧州全体を最も進んだ技術レベルに保つことが重要。

3. 分析・まとめ

欧州においては欧州委員会のリーダーシップのもと、本戦略を指針として、Horizon2020 における Quantum Flagship Project などの予算を活用しながら研究開発を進めるとともに、産業化に向けたエコシステムの確立、テストベッドの整備、標準化・認証の推進、人材育成などを強力に進めていくことがうかがえます。

日本でも量子インターネットの実現を目指して、NICT が取り組んでいる量子通信技術の研究開発や国際標準化の強力な推進のほか、産業化に向けたテストベッド整備やエコシステムの確立、さらには国際連携などを戦略的に進めていく必要があります。

引用文献

- [1] <https://ec.europa.eu/digital-single-market/en/news/new-strategic-research-agenda-quantum-technologies>
- [2] <https://ec.europa.eu/digital-single-market/en/news/future-quantum-eu-countries-plan-ultra-secure-communication-network>
- [3] <https://ec.europa.eu/digital-single-market/en/news/austria-bulgaria-denmark-and-romania-join-initiative-explore-quantum-communication-europe>

中国における量子通信関連企業

井出 真司

総務部 統括 / 経営企画部 統括

1. はじめに

欧州委員会共同研究センター（JRC）の報告において、中国は量子鍵配送技術に関する特許出願を多数行っている旨記載されており、動向把握のため同報告に記載されている中国の量子通信関連企業の情報をインターネットにて調査しました。

2. 調査内容

2.1 中国における量子通信関連企業

中国では“量子”を社名にいた企業が複数社存在しており、国盾量子、九州量子、問天量子の3社は量子鍵配送の通信装置などの製品を販売しています。また、中国においては量子技術に関する創業5年程度の企業もあるなど、様々な企業が量子通信でビジネスを行っています。以下は、これら企業の概要です。

■ QuantumCTek Group（国盾量子）[1]

- QuantumCTek Co., Ltd.（国盾量子）は、中国の先駆者であり、商業化された量子情報技術（QIT）のリーダーであり、現在、QIT 対応の ICT セキュリティ製品およびサービスの世界最大のメーカーおよびプロバイダー。
- 同社は、通信インフラストラクチャ、エンタープライズネットワーク、クラウドコンピューティング、ビッグデータテクノロジーとサービスにおいて、量子技術を使ったソリューションを提供。
- 既に、同社の製品、サービスは、政府、金融、エネルギー業界などで使用されている。これまでに、1,000 を超える量子製品が製造され、6000 km 以上の通信リンクを実現。
- なお、同社は、国内の量子技術に関連する団体等をリードする立場。また ITU 等の国際会議のセクターメンバー。

■ QTEC : ZHEJIANG QUANTUM TECHNOLOGIES CO., LTD（九州量子）[2]

- QTEC : ZHEJIANG QUANTUM TECHNOLOGIES CO., LTD（九州量子）は、量子通信技術の研究開発、製造、販売などを行う量子通信の専門企業。科学者と起業家の連携をコアにした技術集団。清華大学などとも連携し、量子ネットワークに関するトレーニングを行う共同ラボを設立。

- 2017 年、同社は中国国内に量子乱数生成器（Quantum Random Number Generators : QRNGs）や QKD の開発・サービス提供のために、IDQ 社（スイス）とジョイントベンチャーを設立している。
- Anhui Qasky Quantum Technology Co., Ltd.（安徽問天量子）[3]
- Anhui Wentian Quantum Technology Co., Ltd.（安徽問天量子）は中国科学技術大学と投資会社が共同で 2009 年に設立した量子情報通信に関する企業。中国政府の国家暗号管理局によって認定された商用暗号製品の指定生産者・ライセンス販売者。
 - 同社は、地方の量子セキュリティ工学技術研究センター、アカデミアンワークステーション、合肥研究所、量子情報共同イノベーションプラットフォームと他の量子情報研究開発プラットフォーム、およびその子会社である合肥 Liangxin Technology Co., Ltd.を設立。国内特許により、量子情報セキュリティシステムの独立制御可能なトータルソリューションを提供でき、国際的な主導的地位を占めている。
- Zhejiang Shenzhou Quantum Communication Technology Co., Ltd.（浙江神州量子通信技術）[4]
- 浙江神州量子通信技術有限公司は、2015 年 11 月 10 日に設立された浙江省嘉興市（かこうし）に本社を置く企業。同社はコンピュータシステムデザイン及び関連サービスの事業を行っている。

2.2 量子鍵配送のユースケースと中国の動向

中国企業は、自社 HP に量子鍵配送技術のユースケースを掲載しています。例えば、公共（政府：防衛・警察）、金融（銀行間のネットワーク）、通信、データセンタ、医療向けのユースケースが例示されています。なお、Web 上の記事によれば、銀行（中国人民銀行（PBC）、中国工商銀行（ICBC）、徽商銀行（Huishang Bank）等）[5][6]、電力会社、新華社通信は既に量子通信を活用しているものと考えられます。

3. 分析・まとめ

中国では量子通信は既に銀行ネットワークやインフラなどで活用されており、量子通信では世界をリードしています。また、製品やサービスを提供するに当たっては、大学や外国企業とも連携し産業化を加速しており、日本においても国内外の企業・大学との連携を強化し、量子通信産業の育成を加速する取り組みが必要と考えられます。

引用文献

- [1] <http://www.quantum-info.com/English/>
- [2] <http://www.qtec.cn/>
- [3] <http://www.qasky.com/en/>
- [4] <https://www.dingtalk.com/qiye/ding1e6f2e316676cfec?token=2c5606a36c5463751d4877f4263439fb&orgName=%E6%B5%99%E6%B1%9F%E7%A5%9E%E5%B7%9E%E9%87%8F%E5%AD%90%E9%80%9A%E4%BF%A1%E6%8A%80%E6%9C%AF%E6%9C%89%E9%99%90%E5%85%AC%E5%8F%B8>
- [5] "Huishang Bank turns to quantum communication", DIGFIN, April 24, 2019, <https://www.digfingroup.com/huishang/>
- [6] <https://www.newscientist.com/article/2229673-china-has-developed-the-worlds-first-mobile-quantum-satellite-station/>

米国の量子 ICT・量子人材育成

佐々木 明彦

グローバル推進部門 統括 / 北米連携センター センター長

1. はじめに

米国では、トランプ政権下において、量子科学技術をはじめとする「将来産業」における米国のリーダーシップを確保・維持するため、当該分野の研究開発を予算の優先事項として、様々な施策を推進しています[1][2]。特に、2018年後半以降、量子科学技術の研究開発に関する政策文書を打ち出すほか、当該分野における米国のリーダーシップを継続・確保するための法律が定められ、関係政府機関は、産学とも連携した取り組みが進められています。

このレポートでは、全米科学財団（NSF）における人材育成・基礎研究やエネルギー省（DoE）による量子インターネットの構築に向けた取組を中心に米国の最新動向をご紹介します、そこから見える米国の狙い、機構に対する提言をご報告いたします。

2. 調査内容

2.1 政策文書・法律

トランプ政権では、まず、2018年9月に、国家科学技術会議が「国家量子情報科学戦略展望」を公表しました[3]。ここでは、米国が目指す政策目標として、「サイエンスファーストなアプローチ」として基礎研究の継続・推進、人材育成、産学官連携を図るコンソーシアムの形成や研究センターへの投資拡大による技術移転、国立研究所を介したエンドユーザ・テストベッドの確立等が提言されています。その上で、同年12月には、「国家量子イニシアティブ法」[4]が制定され、同法により、量子科学技術分野について、人材育成等を通じた研究開発支援、省庁間連携や産官学協力、国際標準開発等が推進されることとなりました。

同法は、具体的には、以下の内容を柱としています。

- ① 大統領府による「国家量子イニシアティブプログラム」の実施（5か年戦略の策定、「国家量子調整室」等の体制整備含む。）
- ② 米国標準技術研究所（NIST）による産学官ステークホルダーからなるコンソーシアム¹設立（産業化ニーズと研究の間のギャップ特定、議会報告）、研究開発支援等
- ③ NSFによる基礎研究・教育プログラムを通じた人材育成、「学際量子研究・教育センター」

¹ 量子経済開発コンソーシアムは、150以上の組織（113の企業、26の大学・高等研究機関、6の国立研究所、6のNGO）から構成（2020年6月現在）され、米国の量子産業の確立・成長をミッションとしています。

(2～5ヶ所、最大1,000万ドル／年度)を通じた学術機関の研究支援

- ④ DoEによる基礎研究プログラムを通じた研究・訓練の提供、「国立量子情報科学研究開発センター」(2～5ヶ所、最大2,500万ドル／年度)における研究開発

科学技術政策の推進・調整役を担う大統領府科学技術政策局(OSTP)の下に置かれた国家量子調整室は、国家量子イニシアティブ法が求める連邦政府の投資増と連携を通じた研究開発の加速化を図るため、2020年2月、「米国の量子ネットワーク戦略的ビジョン」を定めました[5]。同ビジョンは、国防総省国防高等研究計画局(DARPA)が創設を後押ししたARPANETが現在のインターネットにつながったように、政府が新しい技術に早期から投資することで、将来の米国産業とセキュリティに大きな恩恵を生み出すことを期待して、次の目標を掲げ、量子インターネット構築に向けた研究開発を推し進めることとしています。

- 5年以内に、米国の企業及び研究所は、量子ネットワークを実現するための基礎科学及び主要技術(量子相互接続、量子リピーター及び量子メモリからハイスループット量子チャネル、大陸横断距離を通じた宇宙ベースでの量子もつれ配送まで)を実証すること。
また、商業的、科学的、公衆衛生、国家安全保障上の利益のために、当該システムの潜在的な影響及び改善されたアプリケーションを特定すること。
- 20年以内に、量子もつれが果たす役割への理解を深めつつ、ネットワークで接続された量子機器を通じ、量子インターネットにより、古典物理に基づく技術では不可能だった新たな機能を実現すること。

また、産学の有識者から構成される大統領の専門的助言機関である大統領科学技術諮問会議(PCAST)は、2020年7月、「将来産業における米国のリーダーシップの強化に関する報告書」を発表し、政府に対し、以下の提言などを勧告しました[6]。

- 量子インターネット及びイントラネットで世界をリードすること
量子ネットワーク構築を通じて、量子リピーターなどの要素技術開発に係るテストベッドや、量子ネットワークプロトコル、量子暗号、量子もつれ配送などを実証する仕組みを提供する。
- 市場化の前段階における研究提携関係の構築
複数機関の研究者を支援する企業の取組を組み合わせ、ハードウェアの長期的開発に影響を与える研究を活かす。量子経済開発コンソーシアム¹による5か年プログラムを想定。
- 量子労働力の教育
全米の高等教育機関は、官民連携を通じて、学部生、大学院生、ポスドク及び教員向けに、量子科学技術教育を進めるための新しいカリキュラムと訓練プログラム(業界で認められ、スキルベースの資格を念頭に置いた教育プログラムを含む。)を作成する。

さらに、今後の動きとして、マイケル・クラツィオス連邦CTOは、2020年夏を目途に量子科学技術に係る「国家戦略」を策定する方向で動いている旨発表しています[7]。

2.2 各政府機関による具体的施策

前項で紹介した政策文書・法律を受け、現在、NSFでは量子人材育成や基礎研究開発支援、DoEでは量子インターネット構築に向けた研究開発の取組が進められています。

2.2.1 NSF等による量子人材育成支援

NSFは、国家量子イニシアティブ法にも規定されている通り、これまでも学部生や大学院生や博士、ポスドク向けに様々な分野・フェーズに応じた教育訓練プログラムを助成しています。

(参考) NSFが助成する量子人材育成プログラムの例

- 量子サマースクール (QS³) : NSF等からの助成金により、MIT、ジョンズホプキンス大学、コーネル大学、ペンシルバニア州立大学、UCサンタバーバラ校が、2017年から2020年まで、大学院生、博士、ポスドクを対象に、量子コンピューティング、マテリアル、デバイス等について講義、演習する夏季講座。
- 量子情報科学・工学ネットワーク (QISE-NET) : NSFからの助成金により、シカゴ大学とハーバード大学が「学生」「大学」「企業・研究機関」の三者間の橋渡しをするため、大学のアドバイザーや産業・研究機関のメンターの指導協力による学生の研究・活動支援。

また、最近では、早期から量子科学技術に親しんでもらい、将来の実践的な研究・労働力を確保することを目指した取り組みも行われています。2020年3月、ハーバード大学は、NSFやOSTPの支援を受けてワークショップを開催し、小・中・高校生が量子情報科学に関わり、将来拡張していくためのフレームワークとして、「将来の量子情報科学学習者のための9つのキーコンセプト」を発表しました[8]²。このほか、NSFは、2020年4月から2021年3月まで、中学・高校教師向け量子情報科学プログラムを構築するプロジェクトに約10万ドルの助成金を供与しています[9]。

さらに、NSFでは、「学際量子研究・教育センター」設立に向け、

- ① 12か月間のコンセプトモデル形成プロジェクト助成 (10～15万ドル)
- ② ①のうち優れたものに対する5年間の運営助成金 (最大500万ドル) 供与

という2段階のコンペを公募することとしています。すでに、18件のコンセプトモデルを選定し、今後、2021年には、②のコンペが実施される予定となっており、後述する「量子インターネット」をはじめとする、量子科学技術の研究開発、産業化で世界を牽引する人材を輩出すべく注力しています。

² ワークショップでは、OSTP や NSF のほか、大学教授、IBM、物理教師協会や公立学校の教師なども参加しました。

2.2.2 DoE等による量子インターネット構築に向けた研究開発等の取組

量子科学技術関係の研究開発に関して、トランプ政権では、2022年度の研究開発予算を2020年度比で倍増させることを目標に掲げていますが、特に、国立研究所を所管するDoEは、量子科学技術の研究開発の柱とされています。「国家量子イニシアティブ法」において、DoEは、基礎研究のほか、量子通信やデバイス、センサー、コンピューティングなどのミッション主導型の研究を行うこととされており、2021会計年度予算では、DoE科学技術局の量子関係予算として、総額約2億3,700万ドル（テストベッドやエミュレーターなどの早期段階の量子インターネットの研究開発予算約6,600万ドルを含む。）が要求されています。

DoEは、2020年2月、初の全国的な量子インターネットを構築するためのロードマップを定めることを目的に、産官学のステークホルダーが参加する中、「量子インターネット・ブループリント・ワークショップ」を開催し、有益な技術や障壁について議論しました[10]。ワークショップでは、量子ネットワークの先端技術の評価や複数組織からなるコミュニティ形成が図られたほか、4つの優先的研究領域、5つのロードマップ中間目標が特定されました。

<優先的研究領域>

1. 量子インターネットの土台の構築： 何が量子インターネットの鍵となる土台か、満たすべき要件は何か
2. 複数の量子ネットワークデバイスの統合： ネットワークに統合する際の物理的障壁をどう克服するか
3. 量子もつれリピーター、スイッチ、ルータ生成： 全国規模の基本ネットワーク機能をどう構築するか
4. 量子ネットワーク機能のエラー訂正の実現： フォールト・トレラント・ネットワーク機能をどう実現するか

<中間目標>

0. 多組織からなるエコシステムの構築 【分野横断的目標】
 - DOE、NSF、NIST、DoD、NSA、NASAなど量子ネットワークに関し実質的なポートフォリオを有し、主要なミッションニーズを持つ機関との間の相互作用が重要。
1. ファイバネットワーク上の安全な量子プロトコル検証 <量子ネットワーク準備測定>
2. キャンパス間及び都市内の量子もつれ配送 <量子もつれ配送ネットワーク>
3. 量子もつれスワッピングを用いた都市間量子通信 <量子メモリネットワーク>
4. カスケード量子リピーターを用いた州間量子もつれ配送 <ネットワーク接続>
 - 古典的ネットワーク及び量子ネットワーク技術の統合。
 - 量子リピーターの連結の成功並びに大陸規模の距離での損失及び運用エラーに係る量子エラー訂正通信の成功
 - 長距離をカバーする量子もつれ配送ネットワークの道の開拓、初の量子インターネットの構築の実現。

DoEによると、既に2020年2月には、シカゴでアルゴンヌ国立研究所が52マイルに及ぶ量子通信ネットワークが構築されており、今後これを拡張する方向にあるとされています[11]。またこのほか、ブルックヘブン国立研究所では、ニューヨーク州立大学ストーニーブルック校を結ぶ11マイルの光ファイバ・ケーブルで、もつれ状態の光子を伝送する実験も行われているとのこと[12]。

DoEは、こうした研究成果をもって、今後、量子もつれネットワークで全国各地に所在する国立研究所をつなぎ、ARPANETのような国のバックボーンとなるネットワークを構築し、大学や民間企業にも早期に開放することを目指しています。このため、DoEでは、「量子インターネット・ブループリント・ワークショップ」での議論を踏まえ、今年夏にも会議を開催し、米国のブループリントとなる「量子インターネット・ロードマップ」を発表することを予定しています。

3. 分析・まとめ

以上紹介してきましたように、トランプ政権では、全体としては科学技術研究予算等を削減する一方、量子科学技術などについては、経済成長・国家安全保障の柱として、矢継ぎ早に政策文書や法律を整備し、予算も拡充するなど重点的な取組が進められています。特に、「国家量子情報科学戦略展望」でも指摘されていますように、従来、各政府機関や民間組織が個別に研究開発等に取り組んできたり、また、学際的な研究が不足してきたりといった反省から、様々な組織を巻き込んだ裾野の広い取り組みを進めていると考えられます。また、量子人材育成に当たっても、学部生や院生だけでなく、将来を見据え、小・中・高校生やそれを教える教師も含めた息の長い取り組みも併せて行っています。

我が国においても、今後、分野横断的な視点に立ち、国内外の様々なステークホルダーと連携した裾野の広い活動が必要となってくるのではないかと考えられます。

引用文献

- [1] <https://www.whitehouse.gov/wp-content/uploads/2018/07/M-18-22.pdf>
- [2] <https://www.whitehouse.gov/wp-content/uploads/2019/08/FY-21-RD-Budget-Priorities.pdf>
- [3] <https://www.whitehouse.gov/wp-content/uploads/2018/09/National-Strategic-Overview-for-Quantum-Information-Science.pdf>
- [4] <https://www.congress.gov/115/plaws/publ368/PLAW-115publ368.pdf>
- [5] <https://www.whitehouse.gov/wp-content/uploads/2017/12/A-Strategic-Vision-for-Americas-Quantum-Networks-Feb-2020.pdf>
- [6] https://science.osti.gov/-/media/_/pdf/about/pcast/202006/PCAST_June_2020_Report.pdf

- [7] https://science.osti.gov/-/media/_/pdf/about/pcast/PCAST-Feb-3-4-2020-Meeting-Summary.pdf
- [8] <https://qis-learners.research.illinois.edu/>
- [9] https://www.nsf.gov/awardsearch/showAward?AWD_ID=2009351
- [10] https://science.osti.gov/-/media/ascr/ascac/pdf/meetings/202004/Quantum_Internet_Blueprint_Update.pdf
- [11] <https://www.anl.gov/article/argonne-and-uchicago-scientists-take-important-step-in-developing-national-quantum-internet>
- [12] <https://www.bnl.gov/newsroom/news.php?a=213229>



NICT イノベーションデザインイニシアティブ活動報告 (2020-R1)

2020 年 9 月発行

ISBN978-4-904020-10-4

国立研究開発法人情報通信研究機構

〒 184-8795 東京都小金井市貫井北町 4-2-1

E-mail IDI_sec@ml.nict.go.jp

URL <https://www2.nict.go.jp/idi/>

掲載されている論文の一部または全部を著作権法の定める範囲を超え、
無断で転写、複製、転載することを禁じます。

