

第3部

特集3 Quantum Internet

Rodney Van Meter

第1章 はじめに

WIDEプロジェクトでは、2009年にAdvancing Quantum Architecture (AQUA)ワーキンググループを発足させ、量子情報技術の研究開発に取り組んできた。AQUAでの活動は、量子コンピュータならびに量子ネットワークのアーキテクチャの研究開発を中心に、量子情報技術全般に展開している。本稿では、特集として、量子インターネットを中心に扱う。

量子インターネットは、量子データの形で世界中のコンピュータを接続する試みである。量子データは量子情報処理におけるデータであり、量子コンピュータが高速計算を実現できる所以は、量子データの形で処理をおこなっているためである。量子データの処理や記憶には専用の基本単位が用意されており、量子ビットと呼ばれる。量子ビットを実現する素子の研究開発もまた世界中で盛んに取り組まれており、超伝導量子ビットやイオントラップ量子ビットを始めとして、多様な物理系で研究開発が加速している。量子インターネットを利用することで、広域での分散量子情報処理[8、9、10]や、量子暗号通信[11]、量子センサーネットワークによる微弱信号の超高精度検出[12]等が可能になることがわかっている。量子インターネットの技術は量子コンピュータのスケールアウトにも貢献すると見込まれるため、今後重要性がますます増していくと考えられる。

2019年には、WIDEメンバーの永山(WIDEボード2022年3月～)の呼びかけで、同じくWIDEボードのVan Meterやファウンダー村井も協力し、量子インターネットタスクフォース(Quantum Internet Task Force; QITF)を発足させた。WIDEプロジェクトは、量子物理分野の研究開発

も含めた量子情報技術全般の分野横断・分野統合的な研究開発能力を持つQITFと連携して、量子インターネットの研究開発を進めている。また、2022年8月には、JSTムーンショット型研究開発プログラム目標6「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」において量子通信システムを実証するプロジェクトのマネージャーに永山が採択された。このプロジェクトには、永山とVan Meterのほか、佐々木(寿)(東京大学)や大野(金沢大学)らもWIDEプロジェクトから参加している。

第2章 量子インターネットマイルストーン

WIDEプロジェクトでは、上述のプロジェクトと連携して、量子ネットワーク・量子インターネットの統合的・実証的研究開発を、新川崎地域にテストベッドを設置して推進している。スモールスケールのスター型4ノードネットワークから始め、ネットワークの大型化・複雑化を進めていく計画である。(図1)このテストベッドは既存技術から始める。モジュールを置き換えていくことにより、既存技術による低速度・低機能なネットワークを、新技術による高速・高機能なネットワークに発展させていく。この計画の利点は、量子ネットワークの全体像を常に把握できる点、本当に必要な性能への距離を把握できる点、統合化により初めて明らかとなる課題が常に明らかとなる点、新開発モジュールを即時に試せる点、ひいてはアカデミックな課題とインダストリアルな課題に同時に取り組める産学連携体制化における利点である。

従来型のコンピュータネットワークと同様に、量子(コンピュータ)ネットワークにおいても、信号中継が重要である。線形光学技術のみで実現できる確率的(<50%)な量子

中継は以前より実現していたものの、この方式は中継回数に対して通信効率が指数的に下落するため、スケールしない。近年、理論的に確率100%を目指せる量子信号中継の実証がついに実現し、量子ネットワークの実現性がいや増した。現状、量子通信機能を持つ量子メモリの寿命や量子誤り管理がスケラブルな域に達していないため、量子通信は距離・中継回数の両点においてスケラブルではない。とは言え、十分な量子メモリ時間と誤り管理機能の実現も見えており、その後には、コンピュータネットワークシステム面での工学的研究開発課題が顕在化・重要化する。これを見越すと、コンピュータネットワークシステム面での理論的研究開発や、工学の素地を用意する研究開発は、既に喫緊の重要課題である。

WIDEプロジェクトは、QITFと連携して、直面している課題にのみ重点を置くのではなく、先を見越して将来的重要課題にも並行的に取り組む研究開発スケジュールを提唱してきた。量子ネットワークの構成要素を大きく分類すると、ハードウェア・アーキテクチャ/システム・アプリケーションに分けられる。従前の考え方に則ると、この三分類を並列に進める必要がある。

量子コンピュータにも、従来型コンピュータと同様にコンピュータアーキテクチャがあり、分散システムを考えることができる。このような分散量子情報処理システムにおいても、距離や密度による分類が可能で、近距離高密度なネットワークによる分散量子コンピュータや、遠距離低密度なネットワーク、すなわち量子インターネットを考えることができる。分散量子コンピュータの場合、マルチプロセッサシステムとマルチコンピュータシステムの境目は未だ定かではなく、どのような単位を単一量子コンピュータとすべきかも未定義である。単一量子チップでは実用的な計算を実行できないため、複数の量子チップを用いて計算を行うことや、複数の量子チップを用いての1論理量子ビットの符号化(符号化率:1論理量子ビットに対して物理量子ビット数千~数万個)が前提となっていること、これらの程度が物理系によって大きく異なることも、統一的な定義を難しくしている。

WIDEプロジェクトでは、多様な分散型アーキテクチャの理論的研究開発に取り組んでいる。この一環として、量子ネットワークシミュレータQuISPを開発している。QuISPは、Omnet++をベースとすることで、世界で最も

テストベッド構想

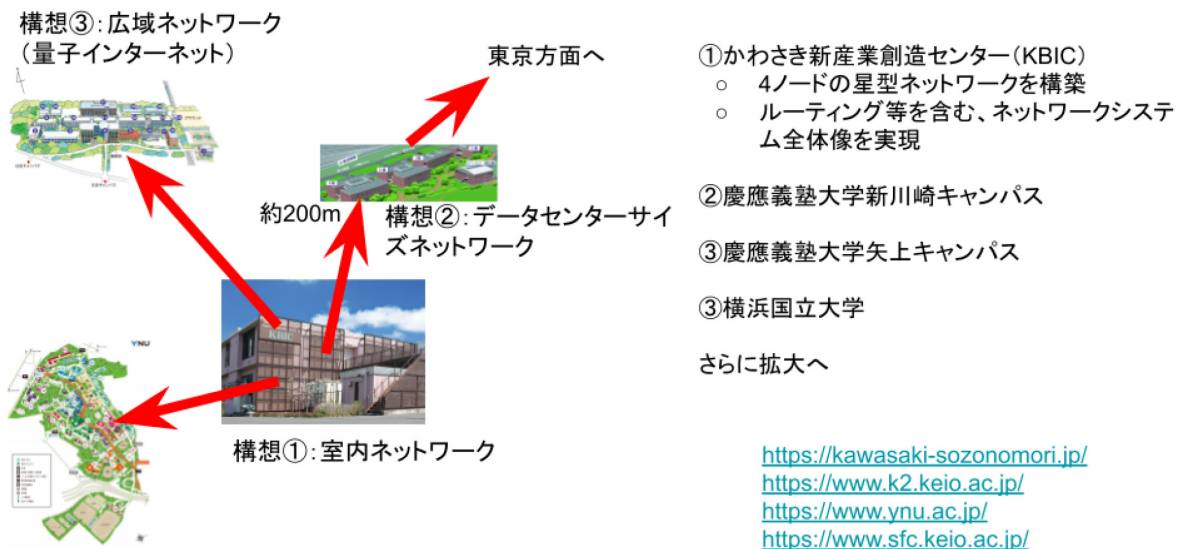


図1 テストベッド構想

巨大な量子ネットワークをシミュレート可能な量子ネットワークシミュレータとなっている。

第4章 「Architectural Principles for a Quantum Internet」はRFCへ

Architectural Principles for a Quantum Internet[13] が、IRTFはQIRGでの初めてのRFCとして、出版される予定となっている。このドラフトの執筆には、WIDEプロジェクトのVan Meterと永山も参加している。このドラフトのIESG承認は得られており、2022年12月現在、最後の編集と確認作業が行われている。このドラフトは、量子インターネットアーキテクチャの設計方針を整理すると同時に、量子技術とネットワーク技術者の垣根を埋め、議論の土台を作ることを目的としている。

第5章 IEEE Quantum Weekでベストペーパー賞

WIDEプロジェクトのメンバーで執筆・投稿したA Quantum Internet Simulation Package[14] が、IEEE Quantum Week (IEEE International Conference on

Quantum Computing and Engineering (QCE))のBest Paper Awardを受賞した。この論文は我々の開発している量子インターネットをシミュレーションするソフトウェアについてです。特に、大規模の量子ネットワークや量子インターネットワークの行動について調べるツールになります。図3がUIです。

第6章 大規模量子ソフトウェアのプログラミングツール

量子ソフトウェア工学は現在、「アプリケーション」より「実験」の様子に見えますが、これから専門家以外が使えるようにならなければならないし、品質が進化させなければならないし、いろいろな開発ツールが必要になります。新しい開発サイクルが生まれ、図4のようになります。または、図5は必要になるツールの一覧です。今年WIDEメンバーは世界初の量子デバッガー向けの第一歩の論文を執筆した。2023年に引き続き、ツールをオープンソースにする予定です。

なお、現在、量子計算機の精度より量子ビットの数が早く上長になっているので、一回の量子計算に使える量子

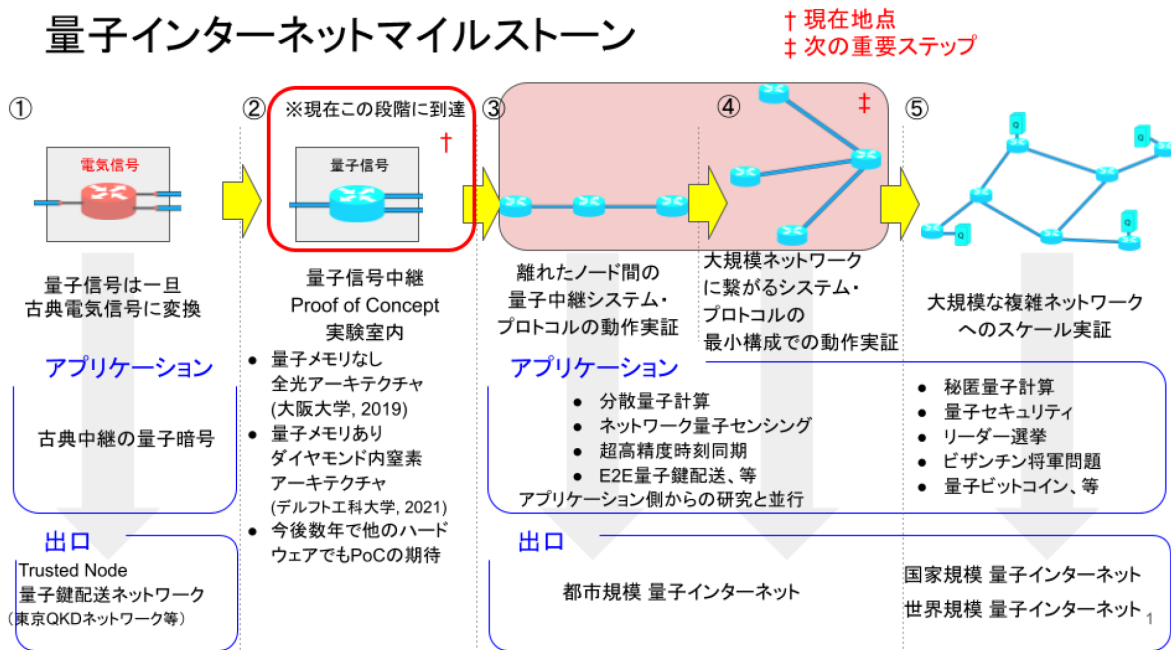


図2 量子通信マイルストーン

ビットの数は限られています。同じ機械に入っている量子ビットを使用しないことはもったいないので、一つのマシン内で複数の独立プログラムを並列で実行できるようになるシステムを開発しました。

ついでに、量子計算のエラーを減少するために、NTT研究所と共同研究で新しい手法の実証実験を実機械で実行しました。なお、大規模の誤り訂正付きプログラムをコンパイルするために、新しい言語やバックエンドは

必要になっています。University of Technology SydneyのSimon Devitt氏が声をかけられて、UTSと米国起業Zapata社と共同開発をはじめました。グラフ理論で新しいコンパイラー手法になっています。図6で示している左側のグラフは量子プログラムを表示していて、右側は誤り訂正型マシンの量子変数置ききの図です。我々の責任はその二つを合わせることで、システムができてから、これは大きな結果になって、誤り訂正の上にソフトの開発の大変化になります。

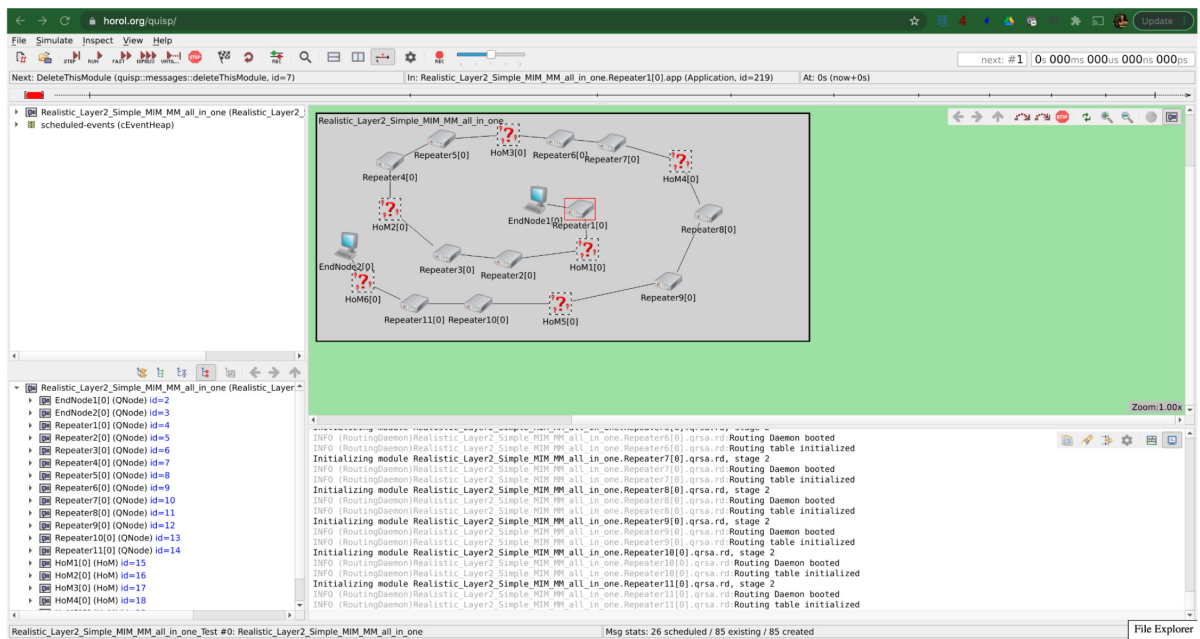


図3 QuISP量子インターネットシミュレーター

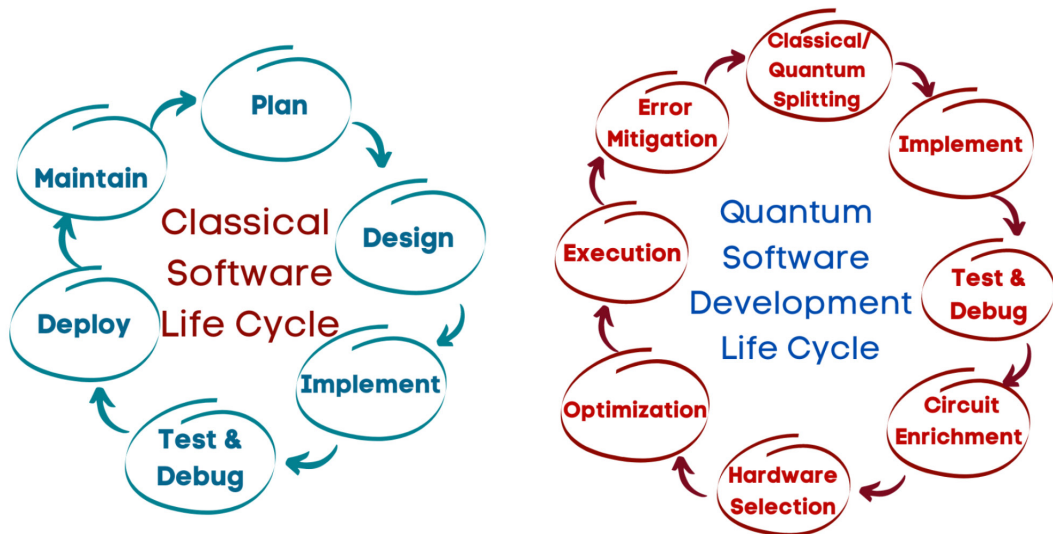


図4 量子ソフトウェア開発の新しいサイクル

第7章 人材育成

AQUAのメンバーは4月、オンライン量子工学カリキュラム「Q-Leap」の2つ目のカリキュラムモジュール「古典光学から量子光学へ」を公開しました。全15課で構成され、ビデオ教材はYouTubeで公開されています。格課は数本のビデオ、45分前後です。AQUAが作成したすべてのコースモジュールと教材は、クリエイティブ・コモンズのCC-

BY-SAライセンスで公開されています。オンラインコースの様子は図7である。

モジュールのアウトラインは以下の通りです。

- 第1回～第4回:波
 - 1 波動
 - 2 波の例
 - 3 フーリエ解析 I
 - 4 フーリエ解析 II

Tools We Need

- Compilers } writing the *application* (quantum kernel + classical application code)
- Software libraries }
- Noise mitigation (both NISQ & FT) } writing the *experiment*
- Data processing (finding signal in noise; parameter adaptation) }
- System-independent runtime (inc. job management) }
- System-dependent runtime } running the experiment
- Lowest-level physical control (e.g. OpenPulse runtime) } (mostly vendor owned)
- Simulators }
- Source code control }
- Debuggers } the future of QSE
- SQA testing tools } how much can we leverage
- Profilers } existing classical tools?
- ...

12

図5 必要になる量子ソフトウェア開発ツールの一覧

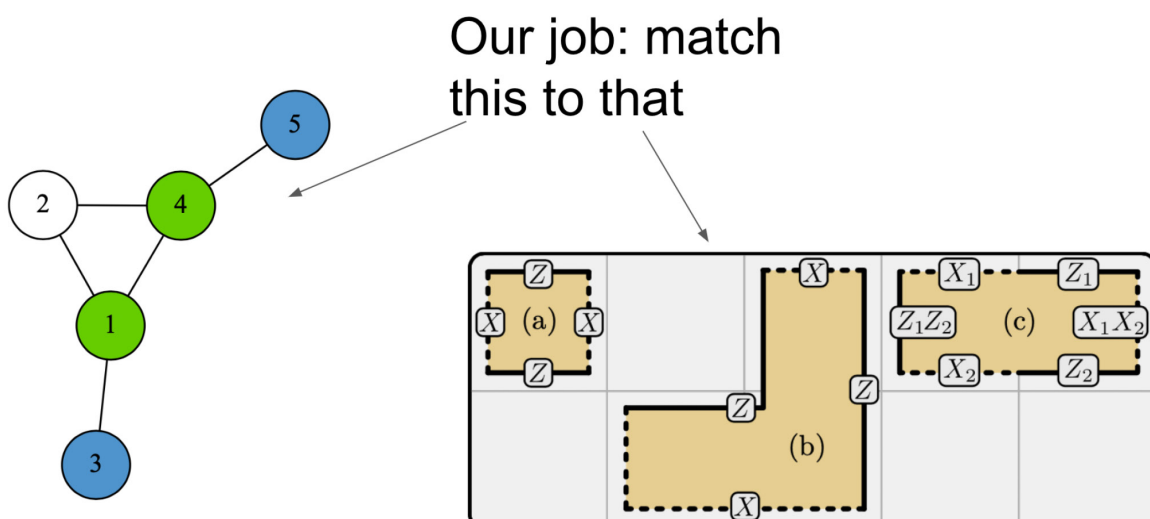


図6 大規模量子誤り訂正型量子ソフトウェアの新しいコンパイラーの手法

- 第5回～第7回:光
 - 5 マクスウェルの方程式 I
 - 6 マクスウェルの方程式 II
 - 7 電磁波
- 第8回～第10回:物質と電磁波放射
 - 8 光媒質の電磁波 I
 - 9 光媒質の電磁波 II
 - 10 光電効果
- 第11回～第13回:量子光
 - 11 量子化された電磁放射
 - 12 単一光子
 - 13 量子光の干渉
- 第14回～第15回:単一光子、シングルモードのその先へ
 - 14 光における重要な状態
 - 15 現実的な単一光子

前提:「量子通信の基礎」、線形代数、確率

前提又は同時履修:微分方程式、偏微分方程式の基礎、量子力学の基礎、古典光学

本モジュールは、2021年に公開した第1弾のモジュール

「量子通信の基礎」に続くものです。次の人材育成コースは「量子インターネット」です。2023年公開予定です。

2021年3月24日にYouTubeのQ-Leap Edu量子通信チャンネルで最初の公開動画を作成してから2022年12月31日までに、動画は85,868回、合計視聴時間は4,430時間と、約380人が1つのモジュールを修了するのに十分な視聴時間を記録しています。

各モジュールは、英語と日本語で同時に公開されています。

総閲覧数の上位6カ国は、順に、インド、日本、米国、ドイツ、英国、台湾です。この6カ国は、それぞれ1,000回以上再生されている唯一の国です。日本は総再生回数、総視聴時間ともに約11%を占めています。

Q-Leap Eduの教材が様々な国で採用されるよう、直接コンタクトを取ったり、教材をいくつかの新しい言語に翻訳したりすることで、その改善に努めています。私たちが直接行っている活動に加え、教材の一部または全部をスペイン語とアメリカ手話(ASL)に翻訳する米国内の団体を支援しています。

Step 1: Module overview

Light is an excellent carrier of information.

Classical networks:

- Required to transmit classical information
- Classical states of light are sufficient
- Module on Overview of Quantum Communication covers the basics of geometric optics

Quantum networks:

- Required to share quantum information (either transmit or create a distributed state)
- Can be achieved only with quantum states of light
- Module on Overview of Quantum Communication introduces basics of quantum communication

その基礎のことを
量子通信の基礎のモジュールで説明しました

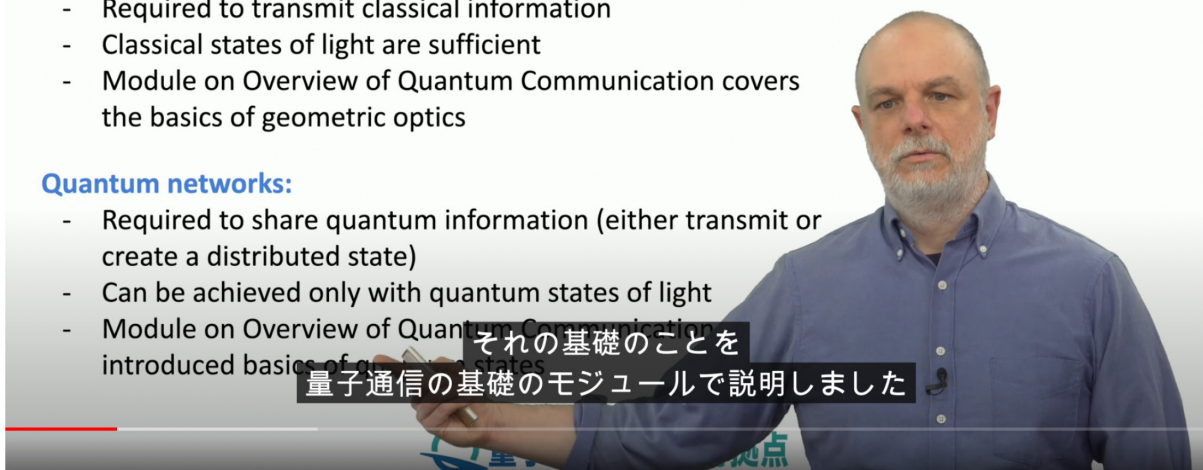


図7 オンラインコースの様子

第 8 章 「IEEE Transactions on Quantum Engineering」 について

2022年4月1日から、Rodney Van Meterは「IEEE Transactions on Quantum Engineering」のエディターインチーフに努めることになりました。歴史は完全に確認していませんが、恐らくWIDEから初のIEEEジャーナルのEiCになっています。一期は3年間ですが、一回再任用になることはあり得ます。

第 9 章 今年度の研究論文

2022年のWIDEメンバーの研究業績の論文は以下の通りです。「A Roadmap for Quantum Interconnects」以外、全ては査読付きです。

1. Qian Xu, Alireza Seif, Haoxiong Yan, Nam Mannucci, Bernard Ousmane Sane, Rodney Van Meter, Andrew N Cleland, Liang Jiang, Distributed quantum error correction for chip-level catastrophic errors *Physical Review Letters* 129 (24), 240502, 2022
2. Ryosuke Satoh, Michal Hajdušek, Naphan Benchasattabuse, Shota Nagayama, Kentaro Teramoto, Takaaki Matsuo, Sara Ayman Metwalli, Poramet Pathumsoot, Takahiko Satoh, Shigeya Suzuki, Rodney Van Meter, Quisp: a quantum internet simulation package 2022 IEEE International Conference on Quantum Computing and Engineering (QCE) pp. 353-364, 2022 (ベストペーパー賞)
3. N Benchasattabuse, T Satoh, M Hajdušek, R Van Meter Amplitude Amplification for Optimization via Subdivided Phase Oracle 2022 IEEE International Conference on Quantum Computing and Engineering (QCE) pp. 22-30, 2022
4. Rodney Van Meter, Ryosuke Satoh, Naphan Benchasattabuse, Kentaro Teramoto, Takaaki Matsuo, Michal Hajdušek, Takahiko Satoh, Shota Nagayama, Shigeya Suzuki, A quantum internet architecture 2022 IEEE International Conference on Quantum Computing and Engineering (QCE) pp. 341-352, 2022
5. S Ayman Metwalli, R Van Meter, A Tool For Debugging Quantum Circuits 2022 IEEE International Conference on Quantum Computing and Engineering (QCE) pp. 624-634, 2022
6. David D Awschalom, Hannes Bernien, Rex Brown, Aashish Clerk, Eric Chitambar, Alan Dibos, Jennifer Dionne, Mark Eriksson, Bill Fefferman, Greg David Fuchs, Jay Gambetta, Elizabeth Goldschmidt, Supratik Guha, F Joseph Heremans, Kent David Irwin, Ania Bleszynski Jayich, Liang Jiang, Jonathan Karsch, Mark Kasevich, Shimon Kolkowitz, Paul G Kwiat, Thaddeus Ladd, Jay Lowell, Dmitri Maslov, Nadya Mason, Anne Y Matsuura, Robert McDermott, Rod van Meter, Aaron Miller, Jason Orcutt, Mark Saffman, Monika Schleier-Smith, Manish Kumar Singh, Phil Smith, Martin Suchara, Farzam Goudeh-Fallah, Matt Turlington, Benjamin Woods, Tian Zhong A Roadmap for Quantum Interconnects Argonne National Laboratory (ANL), Argonne, IL (United States), 2022 <https://doi.org/10.2172/1900586> (査読無し)
7. Y Aono, S Liu, T Tanaka, S Uno, R Van Meter, N Shinohara, R Nojima, The Present and Future of Discrete Logarithm Problems on Noisy Quantum Computers *IEEE Transactions on Quantum Engineering* 3, 2023102021, 2022
8. Y Ohkura, T Satoh, R Van Meter, Simultaneous execution of quantum circuits on current and near-future NISQ systems *IEEE Transactions on Quantum Engineering* 3, 2500210, 2022
9. M Hajdusek, P Solanki, R Fazio, S Vinjanampathy, Seeding crystallization in time *Phys. Rev. Lett.* 128,

080603, 2022

10. P Solanki, N Jaseem, M Hajdusek, S Vinjanampathy, Role of coherence and degeneracies in quantum synchronization, Phys. Rev. A 105, L020401, 2022.
11. Kaito Kishi, Takahiko Satoh, Rudy Raymond, Naoki Yamamoto, Yasubumi Sakakibara, Graph kernels encoding features of all subgraphs by quantum superposition IEEE Journal on Emerging and Selected Topics in Circuits and Systems 12(3) 602-613, 2022
12. Takahiko Satoh, Shun Oomura, Michihiko Sugawara, Naoki Yamamoto, Pulse-engineered Controlled-V gate and its applications on superconducting quantum device IEEE Transactions on Quantum Engineering 3, 3101610, 2022
13. Hiroyuki Tezuka, Kouhei Nakaji, Takahiko Satoh, Naoki Yamamoto, Grover search revisited: Application to image pattern matching Physical Review A 105(3), 032440, 2022

第10章 おわりに

今年度は、ムーンショット量子ネットワークプロジェクトの開始、Best Paper Award at IEEE Quantum Weekの受賞、量子インターネットに関する初RFCの出版など、取組の成果が芽を出す年となった。2023年3月開催予定のIETF116横浜は、WIDEプロジェクトがホストする。Host PlenaryでWIDEプロジェクトにおける量子インターネットへの取り組みを簡単に紹介するほか、Host Speaker Seriesにおいて、直近の研究開発や長期展望について、特にテストベッドでの取り組みを重点的に講演し、インターネットコミュニティによる量子情報技術への貢献のあるべき姿について議論する。来年度の報告書では、テストベッドの本格稼働に向けた取り組みの報告を予定している。