



量子コンピュータを「つなぐ」技術：量子通信がもたらす計算アーキテクチャの変革

量子コンピュータの研究では、量子ビット数やゲート忠実度といった単体性能に注目が集まりがちです。しかし、事業や社会で意味を持つ規模の計算に近づくほど、単一の装置内で量子ビットを増やすだけでは、配線、冷却、制御、製造歩留まりなどの制約が顕在化します。次の競争軸は、「1台を大きくする」だけでなく、「複数の量子プロセッサを量子もつれでつなぎ、全体を1つの計算機として動かす」アーキテクチャへ広がります。この構成を実現するには、量子もつれをつくり、届け、蓄え、使う一連の量子通信技術が不可欠です。本稿では、量子通信を量子コンピュータのスケールアウトを支える基盤技術としてとらえ、モジュール型量子計算機に必要な要素技術を概説します。

キーワード：#量子通信、#量子もつれ、#分散量子計算

とのむら よしひで かわかみ しゅん
外村 喜秀 / 川上 駿
たにぐち あつし さなり やすゆき
谷口 篤 / 佐成 晏之
みうら ももこ
三浦 桃子 / レイエス ラウスティン

NTT未来ねっと研究所

なぜ量子コンピュータを「つなぐ」のか

古典コンピュータの歴史を振り返ると、性能向上は1台の計算機の中だけで起きたわけではありません。計算機がネットワークで相互に接続され、クラウドやデータセンタとして使われるようになったことで、社会を支える大規模な情報基盤が生まれました。量子コンピュータでも、同じような転換が見込まれます。現在は1台当りの量子ビット数やゲート精度の向上が重要な研究課題ですが、将来的により大きな計算を実現するためには、複数の量子プロセッサをどのようにつなぐかが鍵になります。

量子コンピュータを大規模化すると聞くと、1台の装置の中で量子ビットを増やしていく姿を思い浮かべるかもしれません。しかし、1つのチップ、1つの装置、1つの制御

系の中で量子ビットや光モードを無限に増やすことはできません。素子の大きさ、配線、冷却、制御回路、そして製造歩留まりなど、さまざまな要因がどこかで限界に直面します。これは超伝導方式でも、イオントラップ方式でも、光量子方式でも共通する課題です。

そこで有力な選択肢となるのが、小規模な量子プロセッサを複数接続し、全体として1つの大きな計算機のように利用するモジュール型アーキテクチャです。これは分散量子計算とも呼ばれ、大規模な量子コンピュータを実現するための重要な設計方針として注目されています。

古典コンピュータでは、大きな問題を複数の部分問題に分割し、それぞれを別々の計算機で処理することで計算能力を拡張できます。量子コンピュータでも、複数の量子プロセッサを互いに独立した計算機として利用するだけであれば同様に並列化で

きます。しかし、それでは独立した量子計算を同時に実行できるようになるだけであり、1つの量子計算そのものを大規模化したことにはなりません。

量子コンピュータを「つなぐ」ことの要点は、離れた量子プロセッサ間で量子もつれ^{*1}を共有し、それを利用した量子演算を実現することにあります。量子の世界では、情報は個々の量子の状態だけでなく、量子どうしの関係そのものにも宿ります。量子もつれが生成されると、空間的に離れた量子どうしであっても、個々の状態の単なる集まりではなく、全体として分離できない1つの量子状態として記述されます。

この性質を利用することで、複数の量子プロセッサを1つの大きな量

^{*1} 量子もつれ：複数の量子が互いに強く相関し、全体として分離できない1つの量子状態をなす現象。離れた量子どうしでも一体として振る舞います。

子計算機として利用できると期待されています。例えば、3つのプロセッサがそれぞれ n 量子ビットを持っていたとしても、量子もつれが共有されていなければ3台の独立した量子コンピュータにすぎません。ここで、プロセッサ間で量子もつれを共有できれば、プロセッサをまたいだ非局所的な量子状態や量子演算を扱えるようになり、理想的には全体を1つの $3n$ 量子ビット量子コンピュータとして利用できると考えられます⁽¹⁾ (図1)。このとき、計算に利用できる量子状態の自由度は、単一のプロセッサの 2^n から全体で 2^{3n} へと、指数関数的に増大します。実際の性能は、量子もつれ生成の速度、忠実度、メモリ時間、制御の同期などに左右されますが、ここに量子コンピュータを「つなぐ」ことの価値があります。

同じ構図は、古典計算の世界にすでに現れています。AI（人工知能）向けの計算基盤では、性能を左右するのはプロセッサ単体の能力だけで

なく、多数のGPUを結ぶ高速なインターコネクトになっています。計算機の性能が「つなぐ」技術に規定される時代は、量子コンピュータにも訪れると考えられます。

量子通信は何を運ぶのか

では、量子通信とは、具体的に何を運び、何を共有する技術なのでしょうか。古典通信では、0と1で表された情報を信号として送り届けます。電話やインターネットでは、電気信号や光信号が伝送路を通過して相手へ届け、受信側はその信号を読み取ります。途中で信号が弱くなれば増幅器で再生でき、必要であれば複製して複数の場所へ配ることもできます。

一方、量子通信が扱うのは単なる信号ではありません。量子ビットの状態そのものや、離れた量子どうしの間に形成される量子もつれ、すなわち量子どうしの「関係」を扱います。例えば、量子コンピュータを1

つの大きな計算機として動作させるには、離れた量子プロセッサの間でこの量子もつれ資源を共有しなければなりません。量子通信とは、この量子もつれを生成し、届け、蓄え、必要なときに利用できるようにするための一連の技術です。

しかし、量子状態は古典情報のようには扱えません。未知の量子状態は完全にはコピーできないことが知られており、これはクローン禁止定理^{*2}と呼ばれます。また、通信路で失われた量子状態を、途中の中継器で単純に増幅して補うこともできません。光ファイバを伝搬する光子が失われれば、そこに載っていた量子情報も失われます。

そのため量子通信では、量子状態を量子状態のまま受け渡すための仕組みが欠かせません。その代表例が量子テレポーテーションです。量子テレポーテーションでは、あらかじめ

*2 クローン禁止定理：未知の量子状態を完全に複製することはできないという量子力学の基本原則。

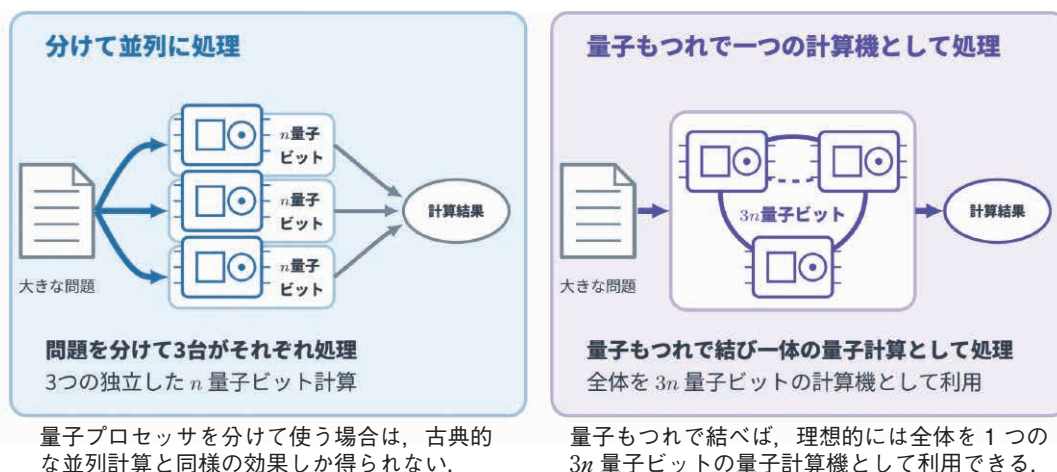


図1 分散量子計算

め共有された量子もつれと古典通信を組み合わせて、量子ビットの担体を物理的に送り届けることなく、未知の量子状態を受け手側の量子系に再現します⁽²⁾ (図2)。ここで、測定結果を伝える古典通信だけでは未知の量子状態を再現することはできず、共有された量子もつれが量子状態の転送を可能にする本質的な通信資源となります。

このとき重要な役割を果たすのが光です。光を量子として見たときの最小単位である光子は、偏光や時間ビン、位相などの自由度に量子情報を載せて伝搬します。さらに周囲との相互作用が比較的小さいため、量子状態を保ったまま運ぶのに適しています。この性質は長距離通信で重要であるだけでなく、短い距離で多数の接続を高速に扱ううえでも大きな意味を持ちます。そのため光子は、量子プロセッサどうしを結ぶ「飛び量子ビット」として有望視されています。

ただし、この「相互作用しにくい」

という長所は、裏を返せば弱点にもなります。光子どうしは互いに素通りするため、量子もつれをつくる、つなぎ替えるといった操作に必要な相互作用を意図的に起こすことは容易ではありません。量子通信の技術的な難しさの多くは、ここに由来します。では、量子もつれを安定して生成・共有するには、どのような技術が必要になるのでしょうか。

量子ネットワークを支える要素技術

モジュール型の量子コンピュータが1つの計算機として働くためには、離れた量子プロセッサの間で量子もつれを安定して共有できなければなりません。これには量子状態を生成し、必要な場所へ届け、必要なときまで保持し、計算や通信に利用するという一連の操作が必要です。

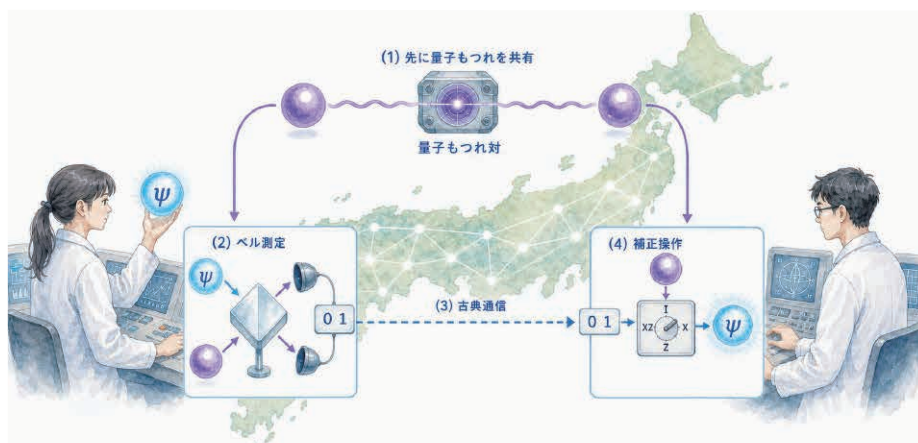
ここで見逃せないのは、これらの処理が直列に一度だけ実行されるわけではないという点です。実際の量

子ネットワークにおいては、あるリンクでは量子もつれの生成に成功し、別のリンクではまだ成功していないという状況が常に生じます。そのため、先に得られた量子もつれ状態を量子メモリに保持しながら、他のリンクで資源生成を繰り返し、必要なタイミングでネットワーク全体の状態へと接続していく必要があります。量子通信とは、このような非同期な量子資源をネットワーク全体で管理し、供給するシステム技術でもあります。

■量子もつれを「つくる」技術

量子通信の基本資源は、二者で共有される量子もつれです。これは、離れた2つの量子ノードの間に、量子力学的な相関をつくる操作に相当します。将来の大規模な分散量子計算では、この二者の共有状態を出発点として、複数のノードをまたぐ量子状態を段階的に組み上げていきます。

ただし、その生成は容易ではありません。単一光子レベルの繊細な操



あらかじめ共有した量子もつれと、ベル測定、および古典通信を用いて、未知の量子状態を受け手側に再現する量子通信の基本操作。

図2 量子テレポーテーション

作を要するため生成は確率的になりやすく、生成レートと忠実度の両立が課題になります。どのような量子もつれ資源を、どの品質と速度で供給できるかが、将来の量子ネットワークや分散量子計算の性能を左右します。

私たちは、二者量子もつれに加えて、より柔軟なネットワーク構成を実現するための多者量子もつれ (GHZ 状態) の生成にも取り組んでいます⁽³⁾ (図 3)。特に三者 GHZ 状態は、3 つの量子ビットを結ぶ基本構造を備えているため、測定型量子計算の土台となるグラフ状態の構成要素として扱いやすく、複数の GHZ 状態を接続することでより複雑なグラフ状態へと発展させることができます。この構造は誤り耐性の向上や処理の安定化にも利用される有用な量子資源です。

■量子もつれを「届ける」技術

量子コンピュータを多数のモジュールで構成する場合、すべてのプロセッサを専用線で結ぶことは現実的ではありません。全対全接続で

は必要な接続数がノード数の二乗に比例して増加するため、必要な量子ノードどうしを必要ときに結び、量子もつれ資源を柔軟に共有できる仕組みが求められます。

古典インターネットでは、交換機やルータが信号を読み取り、複製し、増幅しながら、通信経路を動的に選択して情報を目的地へ届けます。量子ネットワークでは、このいずれもできません。量子状態は途中で観測すると変化し、未知の量子状態は複製も増幅もできないためです。経路の切り替えは量子状態を「見ずに」行う必要があります。途中で失われた光子を補うこともできません。このため、生成・保持・変換・中継のあらゆる段階で量子状態を壊さずに扱う、量子特有のネットワーク技術が求められます。

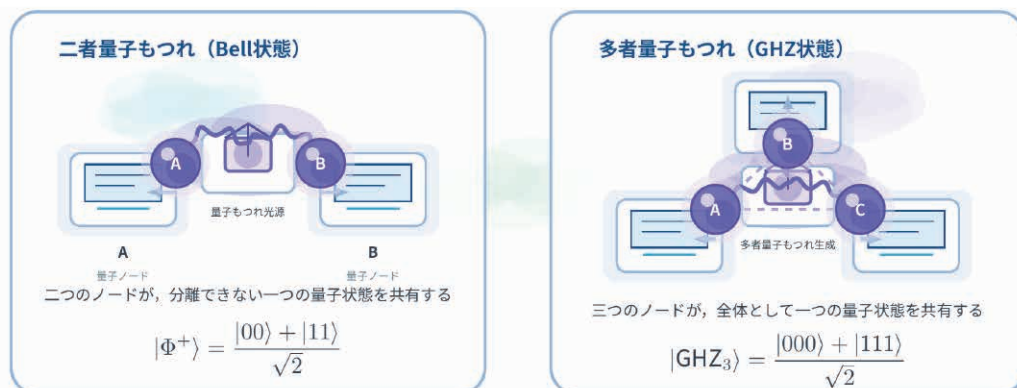
一方で、光スイッチや光ルーティングによって接続先を動的に切り替えられるようになれば、その意味は大きいと考えています。すべてのモジュール間に専用の光学系や配線を用意する必要がなくなり、量子コン

ピュータ全体の装置規模を抑えられます。また、限られた量子もつれ生成資源を、必要なモジュール間に必要なときだけ割り当てることもできるようになります。

その第一歩となるのが、近距離ノード間で量子もつれを高速かつ高忠実度に共有する技術です。チップ間、ラック間、データセンタ内で量子もつれを高速に生成・共有できれば、モジュールをまたぐ量子演算を効率良く実行でき、計算機全体の規模拡大につながります。光量子コンピュータはもともと光を利用して計算を行うため、ネットワーク化しやすい方式とみることもできますが、大規模なクラスタ状態を効率よく構築するためには、量子プロセッサ間をどのような構成で接続するかが課題になります。

■量子もつれを「蓄える」技術

量子ネットワークでは、飛ぶ量子ビットである光だけでなく、量子状態を必要な時刻まで保持する量子メモリが不可欠です。通信で用いられる単一光子の量子もつれ生成は確率



二者のベルペアは 2 つのノードを結ぶ最小単位。 GHZ 状態は 3 つ以上のノードを一度に結ぶ多者量子もつれ。

図 3 量子もつれの生成

的に成功する場合が多く、あるリンクで先に得られた量子もつれ状態を保存できなければ、他のリンクの成功を待ってネットワーク全体の状態へつなぐことができません。量子メモリは、非同期に生まれる量子資源を待ち合わせ、計算や中継に使えるタイミングまで保管するための要素技術です。

一方で、光は遠くまで量子状態を運ぶことに優れますが、そのまま長くとどめておくことは得意ではありません。そこで、光の量子状態をスピンや原子集団などの物質量子系へ写し、必要になったときに再び光へ戻す量子インターフェースが要になります。これは単なる変換器ではなく、異なる量子系を1つのネットワークとして扱うための接点です。

私たちは、ダイヤモンド中のNV中心^{*3}スピン集団を用いて量子系を接続する量子インターフェースの研究をしています(図4)。高い忠実度で書き込み・読み出しができ、物質側で十分なコヒーレンス^{*4}(量子状態が保たれる時間)を確保できれば、量子メモリとしてだけでなく、異なる

方式の量子コンピュータを接続する量子トランスデューサとしても機能します。NV中心スピン集団では、局所磁場や歪みによる周波数のばらつきを抑え、集団的な量子状態を保護することが、実用的なネットワーク部品へ近づく鍵になります。

■量子もつれを「使う」技術

量子もつれは、生成して配送しただけでは価値を生みません。この資源に対して適切な処理を施すことで、通信や計算が実現されます。その中心となるのが量子測定です。

古典的な直感では、測定は結果を読み出す操作です。しかし量子情報では、測定は単なる読み出しではなく、量子もつれを変換し、通信や計算を進める処理そのものになります。量子テレポーテーションではベル測定によって量子状態が転送され、測定型量子計算^{*5}では測定を繰り返すことで計算が進みます。

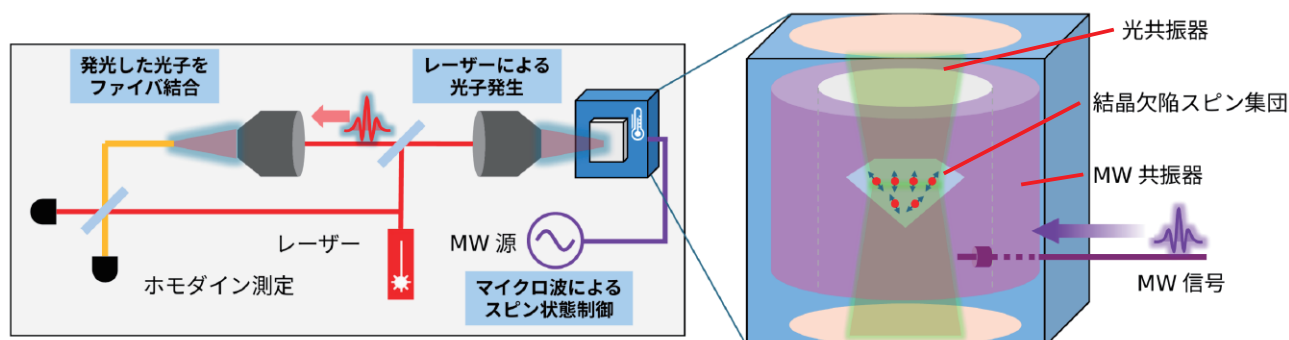
こうした処理を支えるためには、高効率な光子検出器や高精度な時間測定技術が欠かせません。特に、高速に量子もつれを共有するには、光子がいつ到来したかを精密にとらえ、

成功した事象を確実に識別する必要があります。私たちは、常温で高速に動作できるSPAD(単一光子アバランシェフォトダイオード)^{*6}素子による光子検出技術や、ピコ秒精度で毎秒1億回規模の検出に対応する時間測定技術にも取り組んでいます⁽⁴⁾(図5)。

量子通信が変えるコンピュータの姿

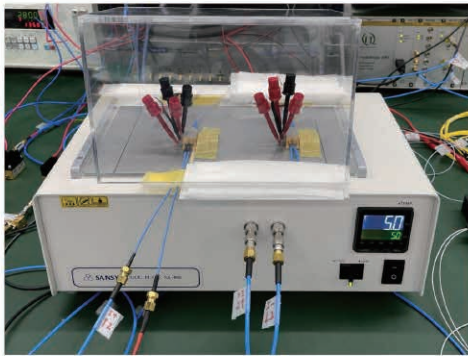
ここまで述べてきたように、量子通信はモジュール型量子コンピュータを1つの計算機として動かすための基盤技術です。とりわけチップ間、ラック間、データセンタ内といった近距離の接続は、量子コンピュータの大規模化に欠かせない技術であり、

- * 3 NV中心：ダイヤモンド中の窒素-空孔中心。スピンを用いて量子状態を保持・操作できる結晶欠陥。
- * 4 コヒーレンス：重ね合わせやもつれといった量子状態が保たれている度合い、またはその保持時間。
- * 5 測定型量子計算：あらかじめ用意したもつれ状態(グラフ状態)に測定を繰り返すことで計算を進める方式。
- * 6 SPAD：単一光子を高感度に検出する半導体素子。



光共振器とマイクロ波(MW)共振器に結晶欠陥スピン集団を結合させ、光の量子状態とスピンの間で量子状態を受け渡す。

図4 量子インターフェースの構成



(a) 常温で高速に動作する SPAD (単一光子アバランシェフォトダイオード) 素子による光子検出器



(b) 高速で高精度な時間間隔測定器 (TIA)

図 5 試作している測定装置

量子コンピュータの実現をめざす限り、その必要性は揺るがないと考えられます。将来の量子コンピュータは、量子もつれという資源をネットワーク全体で生成し、共有し、利用するアーキテクチャへと発展していくでしょう。

一方、都市間のような長距離で量子コンピュータどうしを結ぶことには、まだ確立した答えがありません。ただ、その片鱗は現れ始めています。例えば、量子通信を利用して、計算内容を秘匿したまま遠隔の量子コンピュータに処理を委託する秘匿量子計算^{*7}が提案されています。また、将来は、ネットワーク上で量子情報を交換する新しいかたちの量子AIが生まれる可能性もあります。こうした応用がどこまで育つかを見極めながら、長距離の量子ネットワークは、これから価値を開拓していく段階にあります。

^{*7} 秘匿量子計算：計算内容を秘匿したまま、遠隔の量子コンピュータに処理を委託する方式。

量子もつれをつくり、届け、蓄え、使うという一連の要素技術は、光通信、光ネットワーク、光計測で培われてきた知見と深く結び付いています。量子通信は全く新しい技術分野ではなく、これまでNTTで蓄積されてきた光技術の延長線上にある研究領域です。量子通信は、量子コンピュータの外側に置かれる通信路ではなく、将来の量子コンピュータの構造そのものを支えるアーキテクチャ技術です。その成熟は、計算機の大規模化を支えるだけでなく、将来の量子情報基盤の姿を決定付ける鍵となります。

■参考文献

- (1) C. Monroe, R. Raussendorf, A. Ruthven, K. R. Brown, P. Maunz, L.-M. Duan, and J. Kim: "Large-scale modular quantum-computer architecture with atomic memory and photonic interconnects," Phys. Rev. A, Vol. 89, 022317, 2014.
- (2) A. Furusawa, J. L. Sørensen, S. L. Braunstein, C. A. Fuchs, H. J. Kimble, and E. S. Polzik: "Unconditional Quantum Teleportation," Science, Vol. 282, No. 5389, pp. 706-709, 1998.
- (3) H.-P. Lo, T. Ikuta, K. Azuma, T. Honjo, W. J. Munro, and H. Takesue:

"Generation of a time-bin Greenberger-Horne-Zeilinger state with an optical switch," Quantum Sci. Technol., Vol. 8, 035005, 2023.

- (4) 三浦・谷口・佐成・外村・高杉: "高速量子通信に向けた高カウントレートで低ジッタな TCSPC システムの実装," 電子情報通信学会 量子情報技術研究会 (QIT), ポスター講演 (50), 2026.5.



(上段左から) レイエス ラウスティン/
三浦 桃子/ 佐成 晏之
(下段左から) 谷口 篤/ 川上 駿/
外村 喜秀

量子コンピュータを「つなぐ」技術は、これから大きく発展していく研究分野です。パソコンの父として有名な Alan Kay は「未来を予測する最善の方法は、自ら発明することだ」と語りました。量子コンピュータのその先にある世界を、一緒に発明しましょう。

◆問い合わせ先

NTT 未来ねっと研究所
フロンティアコミュニケーション研究部