

小坂研究室 研究内容概要

はじめに

超スマート社会(Society 5.0)はビッグデータを処理する超高速のコンピュータと大容量の通信を可能とするインターネットに支えられています。コンピュータは 1946 年の ENIAC、インターネットは 1969 年の ARPANET にそれぞれ端を発するとされます。50 年以上たった今、人類はさらに飛躍的に速い計算能力、絶対的に安全なインターネットへの進化を欲しています。その救世主となるのが量子コンピュータ、量子暗号通信、そしてこれらを統合した量子コンピュータネットワーク、いわゆる量子インターネットです。

量子コンピュータと量子暗号通信システムはそれぞれ独立して開発されているように見えますが、実はこれら二つのシステムは非常に密接な関係にあります。量子コンピュータにより現状の暗号通信の解読・盗聴が可能となります。一方で、量子暗号通信は絶対に盗聴を許さない無条件に安全な暗号通信を可能とします。ところが、現状の暗号通信は 100km 程度の短距離でしか実現できません。これを可能とするのが量子中継ですが、これは実は小型の量子コンピュータそのものです。本節では、量子コンピュータを量子光接続して大規模化するための量子インターフェースの開発、またこれにより実現する量子コンピュータネットワークの開発、さらに量子コンピュータを長距離量子暗号通信システムと接続することで可能となる量子インターネットの実現に向けた活動について解説します(図 1)。

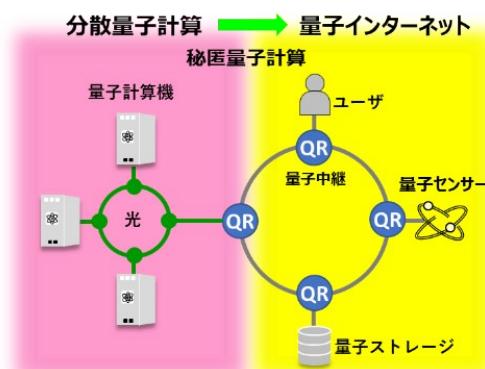


図 1 量子コンピュータを光で量子接続した分散量子計算機と、これを量子中継器を介してユーザ、量子センサー、量子ストレージなどに量子接続した量子インターネットの概略。量子インターネットを介して、分散量子計算や量子暗号通信に加え、秘匿量子計算、クラウド量子計算、クラウド量子センシングなどが可能。

1. 量子コンピュータ

実用的な量子コンピュータの実現には誤り耐性を有する誤り耐性型量子コンピュータ(FTQC)の開発が必要です。2019 年に Google によって量子超越性が実証されたとはいえ、その実用性はいまだ極めて限定的です。現状の量子ゲートの性能では 100 万量子ビット規模でないと実用的な計算ができませんが、1 ゲート当たりのエラー率を 3 衍減らすと物理量子ビット数を 3 衍減らせ、現実的な 1000 量子ビット規模で実用的な量子コンピュータが作れます。そこで我々は、高い誤り耐性を自然に備えた独自のホロノミック万能量子ゲートとそれを生かしたダイヤモンド量子コンピュータを開発しています。ホロノミック量子ゲートとは、ベリ一位相と呼ばれる実数の幾何学位相を量子演算が可能なように可換群(Abelian)から非可換群(Non-Abelian)に拡張したもので、ホロノミーと呼ぶテンソルの形をもつ物理量によって完全(万能)な量子演算を実現します。量子ビットの論理空間と接続した演算空間における周回操作を行うことで、量子ビットの任意基底に任意位相を付与し、環境ノイズや制御エラーに対する高い耐性が得られます。ダイヤモンド中の NV 中心に備わる V 型あるいはΛ(ラムダ)型の縮退3準位系を用い、レーザー光やマイクロ波の偏光という付加的な自由度を利用することで、量子系と制御場の相対的な周波数、位相、操作時間などの誤りに対する高い耐性と高速な

操作を両立する非可換かつ非断熱(Non-adiabatic)なホロノミック万能量子計算の実証に成功しました。従来のホロノミック万能量子計算は幾何学位相のみを使うため、量子計算の基本となる量子フーリエ変換の際に非常に無駄な時間を要しましたが、本手法では動的位相も併用することで最小の時間で実行できます。本手法はダイヤモンド量子コンピュータに限らず、超伝導量子コンピュータにも適用され、世界的に広まっています。完全ゼロ磁場での動作は、量子コンピュータの大規模化にも繋がります。また、一つの NV 中心にスター状に接続した多数の炭素同位体との量子もつれを操作する最適な量子制御波形の探索に、GRAPE 法や機械学習法も導入しています。量子的なランダマイズドベンチマーク試験の結果、99.97%以上の忠実度を完全ゼロ磁場で実証し、現在 99.99%を超えるゲート忠実度と 1GHz を超えるゲート速度を両立する超高精度かつ超高速な万能量子コンピューティングに挑戦しています(図 2)。

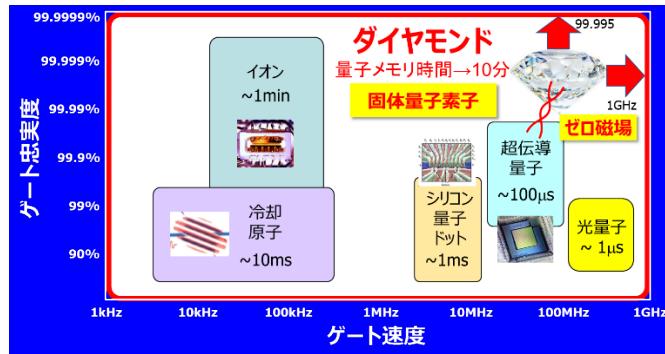


図 2 量子コンピュータを構成する量子ビットの候補と性能指標。開発が先行する超電導量子ビットやイオン量子ビットなどに加え、ダイヤモンドの NV 中心は他の量子系に負けないゲート速度、ゲート忠実度、量子メモリ時間を有し、超伝導量子と光量子との量子接続も可能で、量子インターネットの構築に不可欠な量子インターフェースの最有力候補。

2. 量子ネットワーク、量子中継

量子通信は次世代の情報通信技術で、最初の応用例は量子暗号通信です。これは、一言でいえば「絶対に盗聴されない通信方式」。原子よりも小さな物理現象の最小単位である量子は、「観測される瞬間まで値が確定しない」という奇妙な性質を持ちます。これを暗号技術に応用することで、盗聴を必ず検知・遮断できる通信技術が可能になります。何十年も前から理論的には可能だとされてきた量子通信技術ですが、さまざまな周辺分野の発展や、軍事機密を始めとした重要な情報を狙うサイバーテロの巧妙化を背景に、この 10 年ほどで世界的にも研究が進んできています。量子暗号通信は東芝や NEC などにより事業化が進められているだけでなく、既に韓国の SK テレコムは 5G のネットサービスの一部に量子暗号技術を採用しています。ネットバンキングなどではワンタイムパッド暗号鍵を用いた共通鍵方式が一般的ですが、これは RSA 暗号と呼ぶ 2048 ビット規模の素因数分解の困難性に立脚した条件付きの安全性しか保障せず、近年著しく開発が進む量子コンピュータにより近い将来に解読される脅威にさらされています。一方、量子暗号方式は光子(光を粒に例えたもの)を一つずつ送ることで可能な、量子力学という物理法則に立脚した無条件の絶対的な安全性を保障します。とはいっても、きわめて小さく不安定な量子を、いかに制御し、通信に応用するかは大きな課題です。実用的な量子の中では最も外乱に強い(環境との相互作用が弱い)光子といえども、光ファイバーの伝送損失のために一つの光子を直接配送できる距離はせいぜい 100km 程度。既設光ファイバーの実環境では接続損失のために数 10km と短く、鍵分散などの古典的な手法と組み合わせる必要があります。100km 以上の大規模な量子ネットワークを実現するには、量子の特徴を維持したまま通信をつなぎ合わせる「量子中継器」が必要になります。世界的に開発が進む大規模量子通信ネットワークも、中継部だけは従来の脆弱な古典中継技術のままであります。絶対的な安全性を得るために量子通信を用いるのに、中継部が安全性の穴(抜け道)になっては意味がありません。

量子中継器の実際は、長時間の量子メモリを多数実装した小型の量子コンピュータです。量子中継器の動作原理は E91 プロトコル(Ekert が 1991 年に提案)と呼ばれる量子もつれを利用した量子テレポーテー

ション(あるいは量子スワップ)を原理とし、BB84 プロトコル(Bennett と Brassard が 1984 年に提案)を原理とする量子鍵配達(QKD)の技術とは大きく異なります。量子中継器の構成要素は、遠隔量子もつれ生成、完全ベル測定だけでなく量子誤り訂正機能を備えた高度な量子計算が要求されます。量子中継には大きく分けて光子干渉方式[1-2]、発光吸収方式[3-6]、光子散乱方式[28]の 3 種類の方式があります(図 3)。光子干渉方式では、ビームスプリッターと光子検出器を用いてもつれ生成およびもつれ測定を行います。光子干渉方式はさらに、原子集団などのアンサンブル量子系を用いる DLCZ 方式[1]と、ダイヤモンド中の窒素空孔(NV)中心などの単一量子系を用いる QuTech 方式[2]に大別されます。もつれ生成レートの点では DLCZ 方式が、拡張性(スケーラビリティ)の点では完全ベル測定を行う QuTech 方式が有利です。これらの光子干渉方式はもつれ生成レートが比較的上げやすい反面、もつれ生成レートが高くなると二光子確率が増えて忠実度が劣化し、伝送路全体の位相同期が必要で長距離ネットワークの構築に高い技術が要求されます。これに対し発光吸収方式(YNU 方式)と光子散乱方式(ハーバード方式)では、伝送路の位相同期が不要なため長距離ネットワークの構築が容易で安価なシステム構成が可能となり、もつれ生成レートが高くなても忠実度が劣化しません。発光吸収方式では、ダイヤモンド色中心からの発光と吸収で遠隔もつれを生成し、量子メモリで完全ベル測定を行うことにより、スケーラブルな量子中継を可能となります。一方、光子散乱方式(ハーバード方式)は発光吸収と概念的には同様にダイヤモンド色中心による光散乱を利用して遠隔もつれを生成しますが、実励起を伴わず発光と吸収が同時に起こる散乱の確率をほぼ 100%とする必要があり、フォトニック結晶中に色中心を形成するという高度なデバイス技術が必要となります。また、これらの量子メモリ方式とは別に全光中継方式[7]がありますが、この方式では量子メモリの代わりに大量の多光子もつれを利用し、現状では実現が極めて困難です。

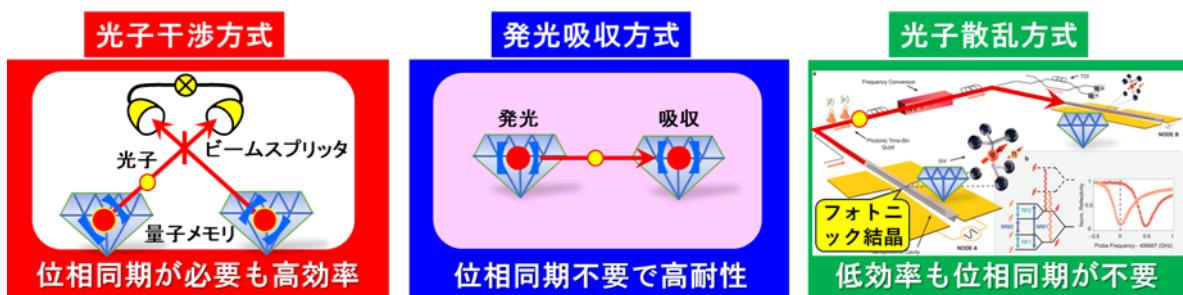


図 3 量子中継の代表的な3方式。光子干渉方式では、ビームスプリッターと光子検出器を用いてもつれ生成およびもつれ測定を行う。量子メモリとして原子集団を用いる DLCZ 方式[1]とダイヤモンド中の色中心を単一量子メモリとして用いる QuTech 方式[2]がある。発光吸収方式(YNU 方式)[3-6]では、ダイヤモンド色中心からの発光と吸収で遠隔もつれを生成し、光子散乱方式(ハーバード方式)[28]では実励起を伴わず発光と吸収が同時に起こる光散乱を利用して遠隔もつれを生成する。

我々は、ダイヤモンド NV 中心を用い、発光吸収方式における量子中継の基本機能の実証に成功しました(図 4)。量子中継器に最低限必要なのは、減衰の速い量子情報を光子が送信先に届くまでの間保持しておく「量子メモリ」の機能です。具体的には、100 km 先に送信するなら少なくとも 1 ミリ秒間、実際のオペレーションを考えると 1 秒間以上量子情報を保持できる素材が必要になります。従来の半導体では、せいぜい 1 マイクロ秒が限界です。量子状態を長時間保持しておけるような構造を持った材料がダイヤモンド中の窒素空孔(NV)中心を代表とする色中心です。現状では、NV 中心の電子スピンで 1 秒、これに付随する炭素核スピンで 1 分程度の量子情報保持が実証されています。炭素原子で構成されるダイヤモンドが持つ独特な原子構造が、量子情報の保存に適しています。試行錯誤の末に、ついに光子の量子情報を炭素原子に転写することに世界で初めて成功したのが 2019 年[3]。その後、量子中継器の実現に不可欠となる①誤り耐性型万能量子ゲートと高精度初期化・読み出し[8-9]、②電子—炭素の量子もつれ[5]と電子—光子の量子もつれ吸収[6]を利用した量子テレポーテーションの原理に基づく光子から炭素への誤り耐性型量子状態転写[3,10-11]、③電子—光子のもつれ生成を行う自発的量子もつれ発光[4]、④完全ベル状態測定[5,12]、⑤量子誤り訂正[13]、⑥量子メモリ長寿命化[14-15]、⑦量子ランダムアクセス[16]の全要素機能の実証に成功

し、これらを組み合わせた吸収光子から発光光子への決定論的量子テレポートーション[27]にも成功しています。各機能は膨大な数の非可換非断熱ホロノミック万能量子ゲートで構成され、量子計算量にして 6 ビット × 数 100 ゲートと、NISQ (Noisy Intermediate-Scale Quantum Computer) のレベルに達しています。

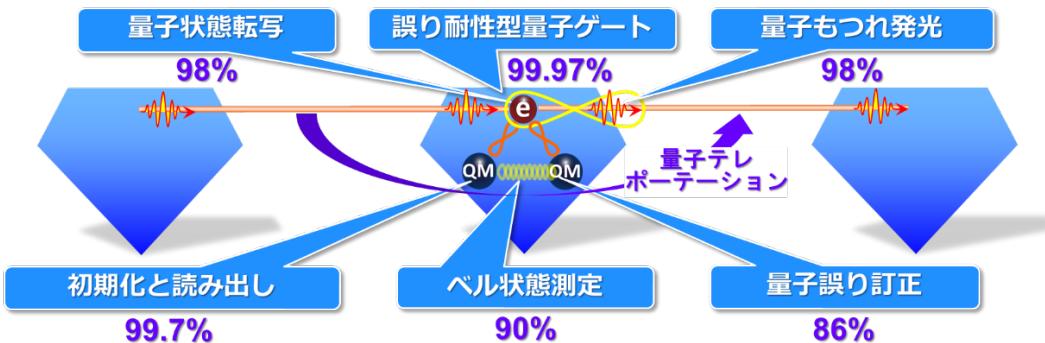


図 4 発光吸収方式の量子中継器を構成する要素機能。ダイヤモンド NV 中心の電子(e)と近傍の炭素同位体(¹³C)を用いた例で説明。送信側では、量子もつれ発光[4]により電子と光子の量子もつれを生成。受信側では、あらかじめ電子と炭素の量子もつれ生成[5]し、量子もつれ吸収[6]により光子の状態を炭素にテレポートーション転写[3,10-11]する。電子と炭素の操作には、万能量子ゲート[8-9]が必要となる。その後、二つの炭素間の量子もつれを完全ベル測定[5,12]することで、吸収光子から発光光子への決定論的量子テレポートーション[27]が可能となる。エラー耐性を持たせるために、量子誤り訂正[13]が必要となる。

3. 量子インターネット

量子コンピュータを使うと、従来のコンピュータでは宇宙の終わりまで計算時間を要するような問題を一瞬で解けるようになりますが、さらに量子テレポートーションを繰り返すことで、量子コンピュータを量子通信でつなぐことで量子インターネットを構築できます。現状のインターネットは古典データを古典的な手段で通信していますが、通信手段だけを量子化するのが量子暗号通信(量子鍵配送)です。これに対し、共有するデータそのものやアプリケーションまでも量子化したものが量子インターネットです。これにより、インターネットが引き起こしたような当初は予測し得なかった破壊的な社会変革を及ぼすと言われています。例えば、秘匿性の高いデータを場所によらず同時に安全かつ排他的に共有できるようになり、金融、経済、政治、医療、教育、娯楽などのあらゆる場面で、量子と AI が連携した予想もつかないブレークスルーをもたらすことが期待されます。

もちろんテレポートーションは SF だけの話であり、実際にはあり得ません。しかしながら、人類は量子テレポートーションと呼ぶ量子情報の瞬間移動には既に 1980 年代に成功しています。このテクノロジーを使って実現できるのが量子インターネットの心臓部である量子中継器です。量子コンピュータを量子ネットワークで量子的に長距離接続したグローバル量子コンピュータネットワーク(=量子インターネット)を構成するために量子中継器は必須の技術です。我々は、ダイヤモンド NV 中心を用い、計算用量子(超伝導量子やシリコン量子など)と量子通信に用いられる通信用量子(光子)を量子的に接続する量子インターフェースの開発を行っています。量子中継のアイデアが生まれた 2000 年ころから今までに、先述の原子集団[1]やダイヤモンド NV[2-6]を用いた量子中継器の開発が行われてきましたが、それらの最高性能は遠隔もつれ生成レート 40Hz、中継ノード間距離 35km、中継ノード数 3 の量子中継に留まっています。(100km 以上の量子中継に見えるツインフィールド方式がありますが、両側から発射される微弱レーザー光を中間のビームスプリッターで光子干渉させるもので、遠隔量子もつれを生成するものではなく、ノード数を拡張することもできないので量子中継とは呼べません。)このような遠隔量子もつれ生成のレート・距離・ノード数の限界を各段に突破するには、近年急激に開発が進む量子コンピュータを量子中継器として利用するしかありません。2015 年に Munro・東・玉木・根本は量子コンピュータを利用した量子中継器の世代進化の過程を表 1 のように整理しました[17-18]。これまでの量子中継器は第 1 世代と呼ばれ、数ビットの量子メモリでベル測定や量子もつ

れ蒸留が可能な段階です。これではもつれ生成レートに限界があるだけでなく、誤り耐性がないので多段接続のスケーラビリティが十分にはありません。一方、第2世代や第3世代の量子中継器では、誤り耐性のある論理量子メモリ(多数の物理量子メモリを表面符号等で符号化した論理的な量子メモリ)を多数保有し、光子損失や量子ビットの操作エラーを量子誤り訂正することが可能なため、多重化による高速化や多段接続によるスケーラビリティ獲得が期待できます。これは、Bennet が 1996 年に証明した「量子もつれ蒸留と 2 方向の古典通信を伴う量子誤り訂正は同一である」という原理に基づいています[19]。第2世代と第3世代の違いは、光子損失を検知する(成功するまで繰り返す)か量子誤り訂正する(論理量子ビットによる量子もつれ蒸留)かの違いです。E91 プロトコルに基づく量子中継では量子もつれの配信までが目的(情報を送るわけではない)なので、生のもつれ生成レート次第では訂正の必要はなく、第2世代と第3世代のどちらを採用するかは最適化の問題になります。超伝導量子やシリコン量子の操作速度(最小クロック)は 100MHz に迫り、技術革新で 1GHz クロックも期待できます。さらに時間多重、空間多重、波長多重を併用することで、1THz 量子ネットワークも夢ではありません。遠隔量子もつれの忠実度も、近年現実的となりつつある符号距離 19 程度(721 量子ビット)の(回転型)表面符号を論理量子ビットとして利用(論理化)することでエラー率を 10^{-12} 程度に抑えることができます。

表 1 量子中継の世代進化の過程[17-18]

エラーの種類	手法	第1世代	第2世代	第3世代
損失エラー	ヘラルドによる量子もつれ生成	✓	✓	
	論理量子ビットによる量子誤り訂正			✓
操作エラー	量子もつれ蒸留(純粹化)	✓		
	論理量子ビットによる量子誤り訂正		✓	✓

我々は、光量子接続された誤り耐性型マルチノード量子コンピュータの開発を目指しています。そのレイアウトは全結合スイッチ型、スター型、アレイ型の 3 種類に大別されます(図 5)。これらのレイアウトは量子インターネットでも同様で、光量子接続された量子コンピュータは第2世代あるいは第3世代の量子中継器そのものです。短距離の量子コンピュータネットワークでは全結合スイッチ型が、長距離の量子インターネットではアレイ型が適していると思われますが、アプリケーションや部品の性能とコストに依存して適切なレイアウトは変化する可能性があります。

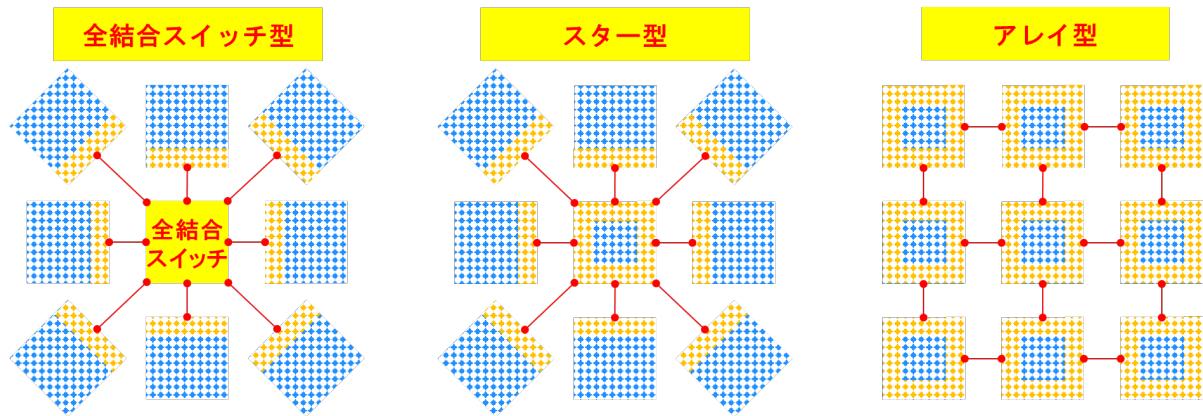


図 5 マルチノード量子コンピュータの 3 種類のレイアウト。量子インターネットも同様のレイアウトとなる。光量子スイッチ以外の四角はノードを、赤線は光リンク(両側の赤丸は量子インターフェース)を表す。各ノードは青色の計算部とオレンジのネットワーク部で構成され、いずれも表面符号などの論理量子ビット(バッファメモリ)を多数内蔵する(ハッシュの 1 点で表現)。論理量子ビット間の量子状態転送は量子テレポーテーション技術で 1 コードサイクルで可能である。光リンクは時間・空間・波長などの自由度で多重化されている。

これらを同時に実現すべく、我々は超伝導量子ビットが放出するマイクロ波格子を通信帯の光子に量子変換(量子メディア変換)するNV中心を利用した量子インターフェース(量子トランステューサ)を開発しています[20-23]。超伝導量子が放出するマイクロ波光子は通信用光子に比べてエネルギー(あるいは周波数)が 5 衍小さく、NV 中心との結合効率が極めて低いのが課題です。本課題を本質的に克服するため、光子の電場を増強するフォトニック結晶共振器と、音子(機械振動の量子)の歪場を増強するオプトメカニカル結晶共振器を同一構造で実現する NV 中心内蔵のダイヤモンドオプトメカニカル結晶共振器を開発しています(図 6)。既に要素部品の開発に成功しており、各共振器の周波数を一致させることで、従来のシリコンオプトメカニカル結晶共振器の最高性能と比較して 4 倍の効率 50%、30 倍の帯域 3MHz を 1/10,000 の光ポンプパワー 30pW で実現できる見込みがあります。また、光ファイバーの伝送損失が通信波長帯($1.55\mu\text{m}$)から NV 中心の吸収波長(637ns)に量子性を維持して波長変換する量子波長変換器(同種量子間の量子メディア変換)も並行して開発しています。

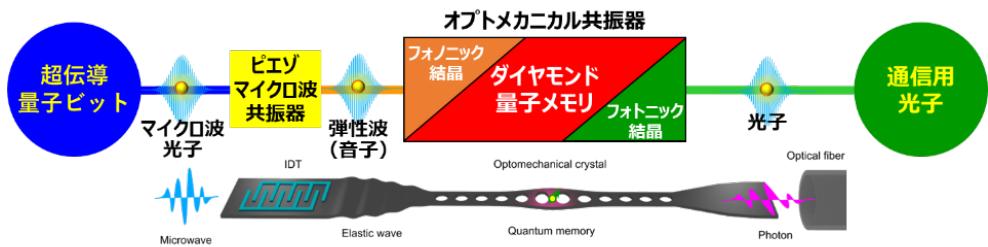


図 6 超電導量子ビットから通信用光子への量子インターフェースの構造概略[20-23]。遠隔地にある量子メモリ(NV 中心)間は通信用光子を介して量子もつれを形成する。量子メモリと超電導量子ビットは、マイクロ波光子、弾性波(音子あるいはフォノン)を介して量子もつれを形成する。その後、量子メモリにおいて完全ペル測定を行うことで、遠隔地にある超伝導量子ビット間に量子もつれが形成される。これを資源として分散量子計算や秘匿量子計算が行われる。

4. ダイヤモンド量子インターネットの最新世界動向

研究室内での量子ネットワークの高度化、都市規模でのフィールド実証、さらには現状の誤り耐性がなく低速な第一世代量子中継から誤り耐性があり高速で実用的な第二(三)世代量子中継(表1)に向け、シリコンと融合した大規模集積化や量子コンピュータ間ネットワーク接続技術開発が大学、大企業、米軍の連携で活発化している。オランダでは、デルフト大学と TNO(オランダ応用科学研究機構)の共同研究機関 QuTech の Hanson らが、2021 年に同一建物内に 3 ノードの NV 中心による量子メモリネットワークを構築[29]、2022

年に中間ノードでのエンタングルメント・スワッピングを介して非隣接ノード間の量子テレポーテーションを実証[2]、2024年に10 km離れた都市間において独立制御された2ノードのNV中心間の量子もつれ生成を敷設ファイバーでフィールド実証した[30]。アメリカでは、ハーバード大学のLukinらがMITと連携し、ダイヤモンドフォトニック結晶共振器を作製して高効率な光結合を実現、2020年にSiV中心による量子中継で直接伝送を上回る伝送レート(量子中継優位性)を実証[31]、2024年に35 kmの敷設ファイバーを介した2ノードのSiV中心間の量子もつれ生成をフィールド実証した[28]。彼らはボストン近郊の米軍研究機関MIT Lincoln labとハーバード大・MITとの間でBoston-Area Quantum Network(BARQNET)を開発している[32]。MITのEnglundらはダイヤモンド量子メモリの大規模集積化に向け、シリコンCMOS上の1024チャンネル規模のダイヤモンド量子メモリ配列の作製に成功した[33]。産業界では、IBMの長年の量子トランジスタ開発[34]に加え、Amazon Quantum傘下のCenter for Quantum Network(AWS CQN)の研究者らが立ち上げたスタートアップ企業Lightsynqが2025年6月にIonQに合流し[35]、量子コンピュータ間ネットワーク接続の非同期量子バッファ可能な量子インターフェースを目指して大規模かつ高歩留まりで製造可能なシリコン上のダイヤモンド集積量子メモリを開発している[36]。ニューヨーク州の米空軍研究所(AFRL)では、超伝導量子コンピュータの量子ネットワーク接続を目指し、マイクロ波帯と光学帯で量子情報を変換する超伝導光ハイブリッドプラットフォーム(量子トランジスタ)など開発がIonQ、IBM、Rigetti、PsiQuantumなどに委託して行われている[37-38]。ワシントンDCの米軍関連研究機関ARL・NRL・NSA・NIST・NASA間の量子ネットワーク接続を目指すDC-QNet(Washington Metropolitan Quantum Network Research Consortium)でもIonQ-AWS連携でダイヤモンド量子インターフェースの導入が想定される[39]。

5. 量子ストレージ

インターネットの普及によりビッグデータや人工知能の発展は留まるところを知りませんが、その発展は大規模ストレージの開発に支えられています。次なる量子クラウドコンピューティングの到来に向け、量子インターネットの開発とともに量子ストレージの開発が望まれます。我々は、ダイヤモンドNV中心を大規模に集積化し、各NV中心と弱く相互作用する炭素同位体の中性子に起因する核スピンを量子ストレージとする研究に世界に先駆けて着手しました。当面の課題は、 $1\mu\text{m}$ 以下に近接したNV中心への個別アクセスです。我々は、レーザー光による局所的な非可換非断熱ホロノミック万能光量子ゲート[8-9]の開発に世界で初めて成功しました。また、さらに高い精度での量子ゲート操作を目指し、局所性に優れたレーザー光と制御性に優れたマイクロ波を同時照射することで、高いコントラストと高い忠実度を同時に満たす光ランダムアクセス量子メモリ(量子DRAM)[16]の開発も行っています(図7)。光を照射したNVだけに周波数のシフト(光シユタルクシフト)が起こり、この周波数に同調させたマイクロ波を照射することで、選択的なホロノミック万能量子ゲートを実現しました。上述の量子テレポーテーション転写と組み合わせることで、量子ストレージとなる核スピンへの量子書き込みが可能となります。とはいえ、核スピンの位相緩和時間(T_2)は電子スピンとの結合によりマイクロ秒からミリ秒のオーダーです。そこで、DRAMのリフレッシュ動作と同様に量子状態を維持する技術が不可欠です。量子状態維持の手法として、我々は幾何学的な動的デカップリング技術[14-15]を開発してきました。しかしながら、核スピンの最大量子ストレージ時間はエネルギー緩和時間(T_1)の10分程度で制限されます。表面符号などの最新の符号化技術で物理量子ビットを束ねて論理量子ビット化することにより、物理量子ビットの T_1 限界を遥かに超えて長寿命化できます。

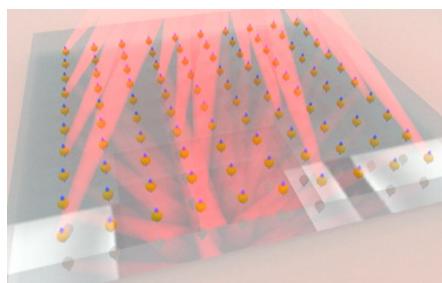


図7 光ランダムアクセス量子メモリ(量子 DRAM)[16]の概念図。アレイ上に配置された NV 中心にレーザー光を照射し、選択的な万能量子ゲート制御を可能とした。量子テレポーテーション転写と組み合わせることで、量子情報を核スピンに長時間記憶させる量子ストレージが可能となる。

6. 量子センサー

ダイヤモンド NV 中心は量子センサーとしても活躍が期待されています。本研究室が世界に誇る非可換非断熱ホロノミック万能量子ゲートは、究極的なセンサー感度を達成できる可能性があります。量子コンピュータの開発には外場に対する低い感受性が要求されますが、量子センサー応用では、逆に外場に対する高い感受性が要求されます。本研究室では、不要な環境スピンに対する感受性を下げるホロノミックデカップリング技術を既に開発しており[8-9]、逆に必要なスピンだけに感受性を持たせる選択的ホロノミックカップリング技術の開発も行っています。本手法では、ラムダ型の3準位で構成される幾何学的量子の縮退部分空間を論理量子ビットとして定義するため、通常の動的スピンとは異なりゼロ磁場で動作します。磁場を遮蔽だけで実現できるゼロ磁場では、磁場を要求する通常の量子センサーで問題となる磁場不均一性による制限を受けないため、磁場・電場・歪み・スピン等の超広域・超高感度・超高解像イメージングが可能と期待されます。このようなホロノミック量子センサーは、量子計算や量子通信における量子超越性と同様に、量子センサーにおける量子超越性にも繋がると期待しています。

おわりに

本節では、グローバル量子暗号通信網の実現に不可欠な量子中継器の開発状況について解説し、これらを量子ネットワークに接続することで可能となる量子コンピュータネットワークあるいは量子インターネットへの応用、そして周辺技術としての量子ストレージ、量子センサーについての技術的課題と将来展望について説明しました。量子コンピュータを使うと、これまでのデジタルコンピュータでは宇宙の終わりまで計算時間を要するような問題に数時間から数日で答えられるようになります。我々は、量子テレポーテーションを繰り返すことで、この量子コンピュータを量子通信でつなぎ量子インターネットを構築しようとしています。現状では、量子コンピュータは NISQ(誤り耐性のない量子コンピュータ)、量子通信は第一世代量子中継器(誤り訂正できない量子中継器)に留まり実用性はありませんが、これらを実用的な FTQC(誤り耐性のある量子コンピュータ)、第三世代量子中継器(誤り訂正のできる量子中継器)に進化させるためには、量子ビットの表面符号などにより論理化し、量子コンピュータを論理モジュール化して光ネットワーク接続することで量子中継器として利用する必要があります。これにより、損失や誤りを訂正して距離的・速度的にも無制限に接続可能な量子インターネットが構築できます。量子インターネットの実現により大量のデータを安全に送受信できるようになり、社会が大きく変わると考えられています。世界に量子インターネットが繋がる瞬間を待ち望んでいます。これらの量子技術は、「量子もつれ」という最新テクノロジーに支えられています[24-26]。

謝辞

本研究開発は、内閣府/JST のムーンショット型研究開発制度/事業「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」(JPMJMS2062)、JST の戦略的創造研究推進事業(CREST)「量子状態の高度な制御に基づく革新的量子技術基盤の創出」(JPMJCR1773) および「先端国際共同研究推進事業 (ASPIRE)」(JPMJAP24C1)、総務省の委託研究事業「ICT 重点技術の研究開発プロジェクト グローバル量子暗号通信網構築のための研究開発 グローバル量子暗号通信網構築のための研究開発」(JPMI00316) および「量子インターネット実現に向けた要素技術の研究開発」(JPMI00316)、文科省の科研費基盤研究(S) (16H0632619, 20H05661, 20K20441, 25H0083050)、挑戦的研究(開拓)(19H0551929)、挑戦的萌芽研究(16K13818)、によって実施した成果を含みます。

参考文献

- 1) L.-M. Duan, M. D. Lukin, J. I. Cirac and P. Zoller: Nature, 414, 413 (2001).
- 2) S. L. N. Hermans, M. Pompili, H. K. C. Beukers, S. Baier, J. Borregaard and R. Hanson: Nature, 605, 663 (2022).

- 3) K. Tsurumoto, R. Kuroiwa, H. Kano, Y. Sekiguchi and H. Kosaka: Commun. Phys., 2, 74 (2019).
- 4) Y. Sekiguchi, Y. Yasui, K. Tsurumoto, Y. Koga, R. Reyes and H. Kosaka: Commun. Phys., 4, 264 (2021).
- 5) R. Reyes, T. Nakazato, N. Imaike, K. Matsuda, K. Tsurumoto, Y. Sekiguchi and H. Kosaka: Appl. Phys. Lett., 120, 194002 (2022).
- 6) H. Kosaka and N. Niikura: Phys. Rev. Lett., 114, 053603 (2015).
- 7) K. Azuma, K. Tamaki and H. K. Lo: Nat. Commun., 6, 6787 (2015).
- 8) K. Nagata, K. Kuramitani, Y. Sekiguchi and H. Kosaka: Nat. Commun., 9, 3227 (2018).
- 9) Y. Sekiguchi, N. Niikura, R. Kuroiwa, H. Kano and H. Kosaka: Nat. Photon., 11, 309 (2017).
- 10) S. Yang, Y. Wang, T. H. Tran, S. A. Momenzadeh, M. Markham, D. J. Twitchen, R. Stohr, P. Neumann, H. Kosaka and J. Wrachtrup: Nat. Photon., 10, 507 (2016).
- 11) D. Ito, Y. Sekiguchi, R. Reyes, T. Fujiwara, T. Makino, H. Kato and H. Kosaka: Opt. Lett., 50, 5073 (2025).
- 12) A. Kamimaki, K. Wakamatsu, K. Mikata, Y. Sekiguchi and H. Kosaka: npj Quantum Inf., 9, 101 (2023).
- 13) T. Nakazato, R. Reyes, N. Imaike, K. Matsuda, K. Tsurumoto, Y. Sekiguchi and H. Kosaka: Commun. Phys., 5, 102 (2022).
- 14) Y. Sekiguchi, Y. Komura, S. Mishima, T. Tanaka, N. Niikura and H. Kosaka: Nat. Commun., 7, 11668 (2016).
- 15) Y. Sekiguchi, Y. Komura and H. Kosaka: Phys. Rev. Appl., 12, 051001 (2019).
- 16) Y. Sekiguchi, K. Matsushita, Y. Kawasaki and H. Kosaka: Nat. Photon. Nature Photonics, 16, 662 (2022).
- 17) W. J. Munro, K. Azuma, K. Tamaki and K. Nemoto: IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron., 21, 1 (2015).
- 18) S. Muralidharan, L. Li, J. Kim, N. Lütkenhaus, M. D. Lukin and L. Jiang: Sci. Rep., 6, 20463 (2016).
- 19) C. H. Bennett, D. P. DiVincenzo, J. A. Smolin, and W. K. Wootters: Phys. Rev. A 54, 3824 (1996).
- 20) H. Kurokawa, M. Yamamoto, Y. Sekiguchi and H. Kosaka: Phys. Rev. Appl., 18, 064039 (2022).
- 21) B. Kim, H. Kurokawa, K. Sakai, K. Koshino, H. Kosaka and M. Nomura: Phys. Rev. Appl., 20, 044037 (2023).
- 22) H. Kurokawa, K. Wakamatsu, S. Nakazato, T. Makino, H. Kato, Y. Sekiguchi and H. Kosaka: Nat. Commun., 15, 4039 (2024).
- 23) H. Kurokawa, S. Nakazato, T. Makino, H. Kato, S. Onoda, Y. Sekiguchi and H. Kosaka: Phys. Rev. Lett., 135, 016902 (2025).
- 24) 小坂英男（監修）：Newton 別冊「量子論のすべて 新訂版」，ニュートンプレス，東京（2019）。
- 25) 小坂英男（監修）：Newton 2024年10月号「もつれる量子」，ニュートンプレス，東京（2024）。
- 26) 小坂英男（監修）：Newton 別冊「量子力学100年」，第5章「もつれる量子」，ニュートンプレス，東京（2025）。
- 27) Raustin Reyes, Yuhei Sekiguchi, Daisuke Ito, Taichi Fujiwara, Kansei Watanabe, Toshiharu Makino, Hiromitsu Kato and Hideo Kosaka, “Quantum teleportation of a photon via absorption and emission for quantum repeater nodes”, <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-5928658/v1>.
- 28) C. M. Knaut, A. Suleymanzade, Y.-C. Wei, D. R. Assumpcao, P.-J. Stas, Y. Q. Huan, B. Machielse, E. N. Knall, M. Sutula, G. Baranes, N. Sinclair, C. De-Eknamkul, D. S. Levonian, M. K. Bhaskar, H. Park, M. Lončar & M. D. Lukin, “Entanglement of nanophotonic quantum memory nodes in a telecom network”, Nature 629, 573 (2024).
- 29) M. Pompili et al., Science 372, 259–264 (2021)
- 30) A. J. Stolk et al., Sci. Adv. 10, eadr4444 (2024)
- 31) M. K. Bhaskar et al., Nature 580, 60–64 (2020)
- 32) https://arxiv.org/html/2307.15696v2?utm_source=chatgpt.com
- 33) L. Li et al., Nature 630, 70–76 (2024)
- 34) https://research.ibm.com/projects/quantum-transduction-research?utm_source=chatgpt.com
- 35) https://investors.ionq.com/news/news-details/2025/IonQ-Announces-Intention-to-Acquire-Lightsynq-Expediting-Quantum-Computing-Quantum-Internet-and-Offering-Clear-Path-to-Millions-of-Qubits/default.aspx?utm_source=chatgpt.com
- 36) D. Riedel et al., arXiv:2508.06675 (2025)
- 37) <https://www.afrl.af.mil/About-Us/Fact-Sheets/Fact-Sheet-Display/Article/3018095/afrlritq-superconducting-and-hybrid-quantum-systems/>
- 38) <https://www.tinker.af.mil/News/Article-Display/Article/3617675/afrl-provides-us-with-robust-future-quantum-computing-networking-capabilities/>
- 39) https://www.nist.gov/news-events/news/2022/06/dc-area-us-government-agencies-announce-washington-metropolitan-quantum?utm_source=chatgpt.com