

令和5年度新規研究開発課題に係る基本計画書概要

量子インターネット実現に向けた要素技術の研究開発

研究開発の背景・目標

背景

量子状態を維持した通信を可能とする量子ネットワークの究極の形である量子インターネットは、セキュアな通信や複数の量子コンピュータの接続による量子ビット数の大規模化・分散コンピューティング、量子センサのネットワーク接続など様々な量子技術の利活用の基盤をなす通信技術として実現が期待されている。他方、量子インターネットは従来の光通信と異なり、きわめて微弱な単一光子レベルの制御や量子状態を維持するための特殊な原理の中継方式の検討が必要であることが技術的な課題となっている。

政策目標(アウトカム目標)

量子情報(量子ビット)の流通及び量子通信ならではの機能・精度を可能とする量子インターネットの実現に寄与するとともに、研究開発成果の国際標準化・知財化等を推進し、我が国の量子通信技術の国際的な競争力を強化する。

研究開発目標(アウトプット目標)

光通信波長帯への量子波長変換を可能とする量子もつれ光源・波長変換技術、及びミリ秒オーダーの量子状態の保存を可能とする量子メモリを開発し、光ファイバ上で3ノード計20km以上の量子もつれスワッピングを実証する。

また、光時計等を利用した高精度な位相同期技術と組み合わせることで、量子通信の安定化・高度化を図るとともに、多者間量子通信や量子の性質を利用した認証技術等の量子通信プロトコルの基本検討を行い、従来の光通信では実現できない機能を可能とする量子インターネットの実現のための基礎技術を確立する。

技術課題

○課題(1) 量子中継長距離化技術

長時間・高効率な量子情報の保存と高い通信レートの高立を可能とする周波数多重量子メモリ技術及び、単一の量子ビット操作や量子ゲートへの接続を可能とする量子メモリ技術、量子波長変換等のインターフェース技術等を確立する。

○課題(2) 量子もつれ配信高度化技術

周波数分割多重化や多者間通信等を可能とする量子もつれ光源の高度化技術を確立し、複数ノード間における量子もつれ配信・量子もつれスワッピングを実証する。

○課題(3) 高精度時空間同期技術

量子通信を安定的に実現するため、通信路上の各量子デバイスに対して光時計等による標準時刻を安定供給することにより、高精度な位相・時刻同期を可能とする技術を確立する。

○課題(4) 量子インターネット構築基礎技術

多者間量子通信を活用した情報理論的に安全な認証等の新たな量子通信プロトコルを開発し、原理検証を行う。また、(1)～(3)の各技術を統合し、基本動作を実証する。

到達目標

○課題(1) 量子中継長距離化技術

従来数十km程度が限界の量子もつれを100km程度へ延長するため、ファイバ損失分を補償する十分な通信レート向上とミリ秒オーダーの量子状態の保持を実現可能な周波数多重化技術を導入した量子メモリ技術を確立し、基本動作を実証する。

○課題(2) 量子もつれ配信高度化技術

繰り返しレート1GHz以上の量子もつれ光源を開発し、検出レート10kHz以上での量子もつれ配信を実証する。さらに、2対の量子もつれ光子対による量子もつれ交換が可能な実証システムを構築し、量子もつれスワッピングによる量子中継等を実証する。

○課題(3) 高精度時空間同期技術

従来時刻標準として用いられているGNSSと比較し2桁以上の高精度化(10⁻¹⁵秒程度)及び敷設ファイバ上への標準時刻の安定供給を実証する。さらに、開発した技術を既存量子鍵配送プロトコル(CV-QKD、TF-QKD等)と組み合わせ、鍵生成レート、通信距離等の向上等を実証することにより効果検証を行う。

○課題(4) 量子インターネット構築基礎技術

複数ノードに分配した量子もつれ状態を用いる多者間量子通信プロトコルや、中継ノードにおける高精度位相・時刻情報を活用した情報理論的な認証技術等を開発し、光ファイバ上で基本動作を実証する。さらに、(1)～(3)で検討した各要素技術を検証可能な量子通信テストベッドを敷設ファイバ上に構築し、ベル測定による実フィールドでの量子もつれスワッピングを実証する。

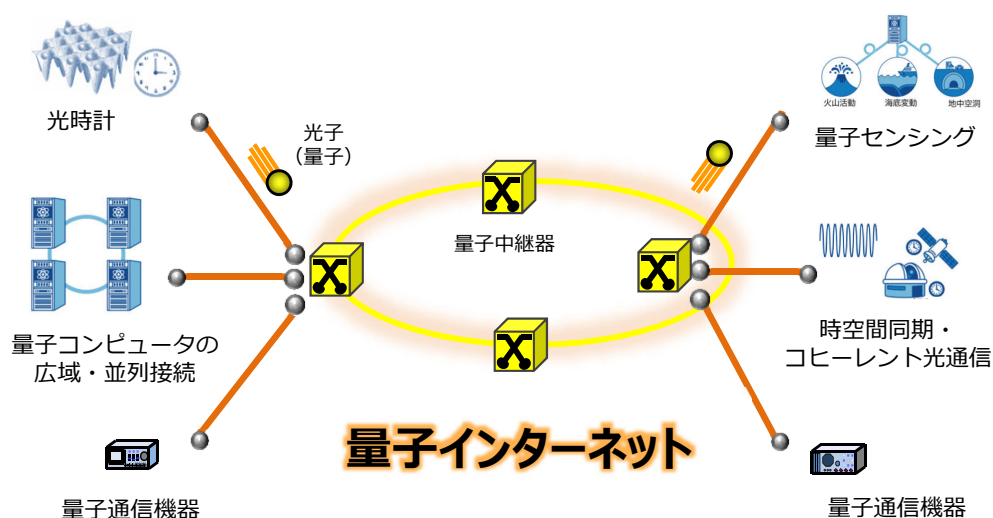
(参考)量子インターネット実現に向けた要素技術の研究開発

【事業概要】

量子情報(量子ビット)を生成・処理する量子コンピュータ・センサ等を接続する量子インターネットの実現に向けて、量子通信基盤として量子状態を維持した安定的な長距離通信を可能とするために必要な要素技術を確立。

- ・量子状態の長距離伝送に必要な量子メモリや光通信波長帯への波長変換等に対応するための「量子中継長距離化技術」
- ・量子状態を配信するために必要な量子もつれ光源の高度化や将来の量子通信の高速化等に資する「量子もつれ配信高度化技術」
- ・光周波数標準を各量子デバイス等に配信することで高精度な位相同期・周波数安定化を可能とする「高精度時空間同期技術」
- ・多者間量子通信等、量子特有の性質を利用した量子通信プロトコルの基本検討等に資する「量子インターネット構築基礎技術」

量子インターネットの簡易イメージ



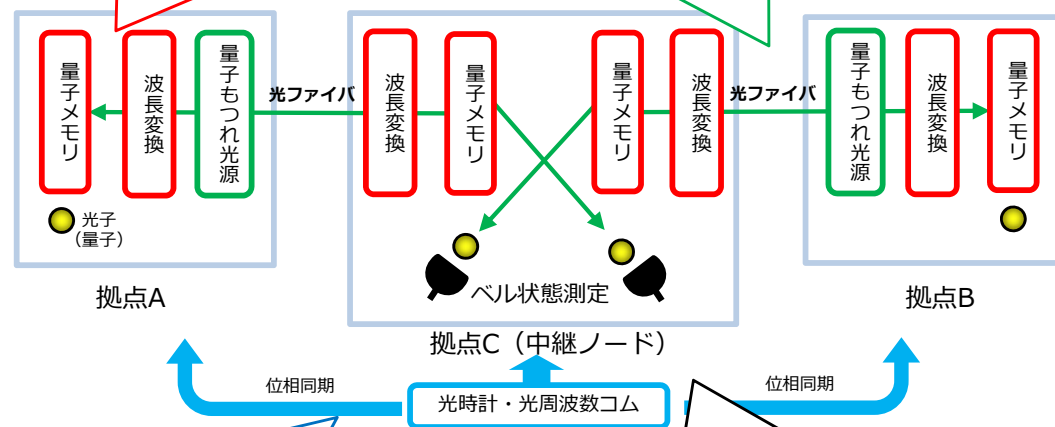
研究開発内容の概略

量子中継長距離化技術

- 量子メモリの高度化
- 周波数分割多重への対応
- 量子波長変換

量子もつれ配信高度化技術

- 量子もつれ光源の高度化
- 複数ノードへの量子もつれ配信



高精度時空間同期技術

- 光時計による位相同期
- ファイバノイズの補正

量子インターネット構築基礎技術

- 量子通信プロトコルの開発
- 実フィールドでの原理検証

所要経費 10.0億円(令和5年度)

研究開発期間 令和5年度～令和9年度

(参考) 課題 (1) : 量子中継長距離化技術

研究開発内容

長時間・高効率な量子情報の保存と高い通信レートの両立を可能とする周波数多重化や、量子ゲートへの接続性等を確保する量子メモリ技術、量子波長変換等のインターフェース技術等を確立する。

到達目標

- メモリ保持時間ミリ秒以上、多重度10以上を可能とする周波数分割多重量子メモリを開発・実証する。
- メモリ保持時間100マイクロ秒以上、量子ゲートへの接続が可能な量子メモリに関する基礎技術を確立する。
- 光通信波長帯への量子波長変換が可能なインターフェース技術を開発し、基本動作を実証する。

技術的ポイント

■ 課題

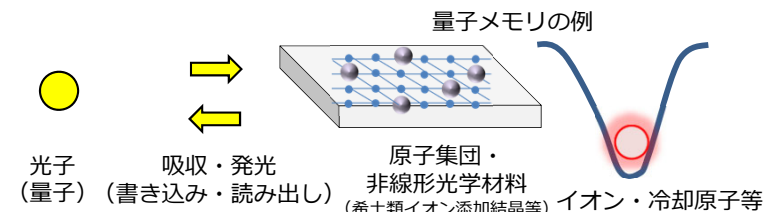
- 量子状態の長時間保持と通信レートの両立
- 単一量子ビットの操作性や量子ゲートへの接続性の確保
- 量子メモリと光ファイバ間の結合

■ 本研究開発における取組

- 量子中継を実現するために必要な量子メモリに関する基礎技術として、ミリ秒以上の量子状態の保持を可能とする方式を確立し、基本動作を実証する。
- 単一の量子ビットの操作、量子ゲートへの接続が可能な量子メモリに関する基礎技術を確立。
- 光通信波長帯(1.5 μ m帯)への量子波長変換技術等のインターフェース技術を確立。

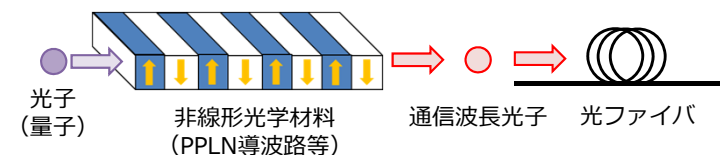
量子メモリ技術

量子状態の長時間保持に加え、通信レート向上に必要な多重化や量子ゲートへの接続性の確保に対応した量子メモリ技術を開発



量子波長変換技術

量子メモリの動作に必要な波長帯から光ファイバベースの通信波長帯へ変換するインターフェース技術を開発



(参考) 課題 (2) : 量子もつれ配信高度化技術

研究開発内容

周波数分割多重化や多者間通信等を可能とする量子もつれ光源の高度化技術を確立し、複数ノード間における量子もつれ配信・量子もつれスワッピングを実証する。

到達目標

- 繰返しレート1GHz以上の量子もつれ光源を開発し、量子もつれ配信、量子中継を実証する。
- 多重度10以上の周波数多重量子もつれ光源を開発し、もつれ共有レート向上を実証する。
- 複数ノード間で量子もつれの共有を可能とする量子光源及び量子通信プロトコルの実装方法を提案し、基本動作を実証する。

技術的ポイント

■ 課題

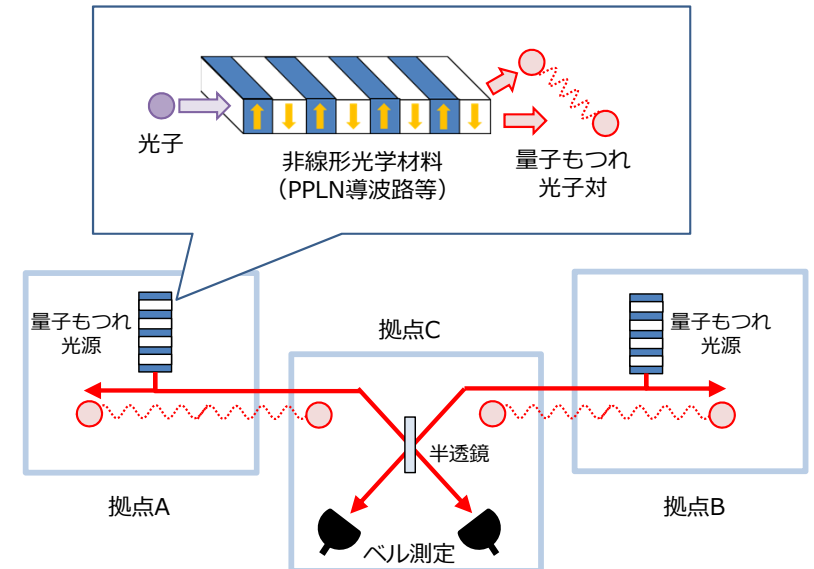
- 量子もつれ光源の高度化(高レート化、周波数分割多重化等)
- 多者間での量子もつれ共有の方法が未確立

■ 本研究開発における取組

- 通信レート向上のため、繰返しレート1GHz(従来比5倍)の量子もつれ光源技術を確立し、量子もつれ中継を実証する。
- 周波数分割多重化技術を導入した量子もつれ光源を開発し、課題(1)で開発した量子メモリ等の技術を統合して周波数分割多重量子もつれ光子配信システムを構築・実証する。
- 多光子の量子もつれを高効率に発生可能な量子光源や量子もつれ光子のルーティング、マルチパーティ量子通信プロトコルを開発し、光ファイバネットワーク上で実装するための手法を検討する。

量子もつれ配信高度化技術

量子もつれ光源の高度化及び各拠点への量子もつれ配信技術を確立し、量子中継(量子もつれスワッピング)を実現



(参考) 課題 (3) : 高精度時空間同期技術

研究開発内容

量子通信を安定的に実現するため、通信路上の各量子デバイスに対して光時計等による標準時刻を安定供給することにより、高精度な位相・時刻同期を可能とする技術を確立する。

到達目標

- GNSSと比較し2桁以上の高精度化(10⁻¹⁵秒程度)及び敷設ファイバ上への標準時刻の安定供給を実証する。
- 開発した技術を既存量子鍵配送プロトコル(CV-QKD、TF-QKD等)と組み合わせ、鍵生成レート、通信距離等の向上等を実証することにより効果検証を行う。

技術的ポイント

■ 課題

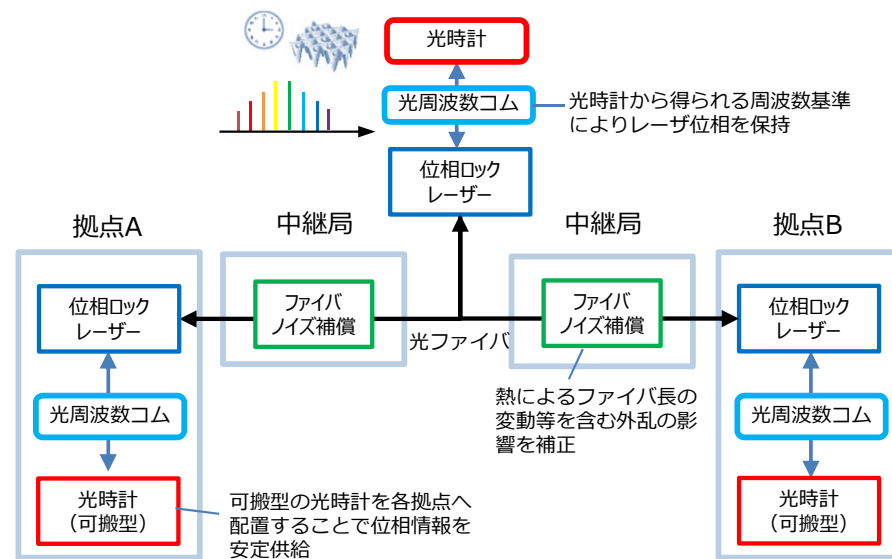
- 量子中継を安定的・効率的に実現するためには各拠点間の精密な位相・時刻同期が不可欠
- 光時計は連続運転が困難であるため、ネットワークへの周波数(時間)基準の安定供給に課題
- 光ファイバに加わる外乱(温度変動や振動)の影響

■ 本研究開発の取組

- 敷設光ファイバ上へ高精度な周波数(時間)基準を安定供給可能な手法※及び光ファイバ上の外乱をリアルタイムで補償する基本技術を確立する。
(※例:複数拠点へ設置可能な可搬型の光時計の開発等)
- 供給された高精度な標準時刻を活用し、既存の量子鍵配送プロトコルに適用することで量子通信の性能向上のための効果検証を行う。

高精度時空間同期技術

光時計の高精度な周波数基準を用いてNW全体の位相・時刻同期を実現



(参考) 課題 (4) : 量子インターネット構築基礎技術

研究開発内容

多者間量子通信を活用した情報理論的に安全な認証等の新たな量子通信プロトコルを開発し、原理検証を行う。また、(1)～(3)の各技術を統合し、基本動作を実証する。

到達目標

- 量子通信テストベッドを敷設ファイバ上に構築し、実フィールドでの量子もつれスワッピングを実証する。
- 複数ノードに分配した量子もつれ状態を用いる多者間量子通信プロトコルや、高精度位相・時刻情報を活用した情報理論的な認証技術等を開発し、光ファイバ上で基本動作を実証する。

技術的ポイント

■ 課題

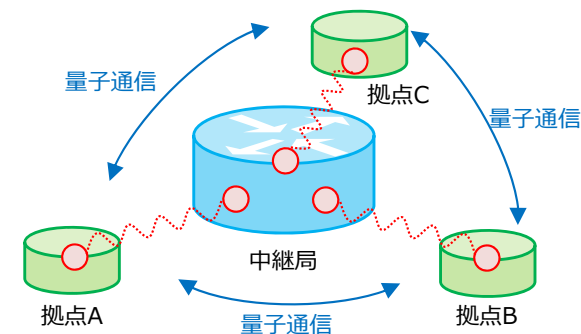
- 実フィールドでの量子通信は量子メモリやもつれ光源、位相同期、量子通信プロトコル等の様々な技術を統合する必要があるため、技術的に高いハードル
- 多者間での量子もつれの共有や、それを利用した認証技術等、量子通信ならではの機能の実現

■ 本研究開発の取組

- 課題(1)～(3)で開発した各要素技術を量子通信システムとして敷設ファイバ上に統合・構築し、ファイバ内の損失や外乱等の影響を補償しつつ実フィールドで量子中継・量子通信を実現可能な技術を確立する。
- 従来の光通信では実現できない量子特有の性質を利用した量子通信プロトコルを開発し、原理検証を行う。

量子インターネット構築基礎技術

- ・各課題の要素技術を統合し、実フィールドで量子通信ネットワークを実現
- ・多者間量子通信のプロトコル開発、原理検証等を実施



多者間量子通信のネットワーク構成(イメージ)

(参考) 量子インターネットの要素技術について

- 量子インターネットを実現するためには、ハードウェアから、ネットワークアーキテクチャ・プロトコル、アプリケーションまで、システム全体の研究開発が必要。特にハードウェアにおいては、世界的に要素技術の研究開発フェーズであり、技術領域は多岐に渡っている
- 我が国の量子技術における高い国際競争力を維持するため、量子コンピュータ等の他の量子領域の研究開発マイルストーン等との整合性も考慮しつつ、今後5年間のコア要素技術の早期確立を目指して重点化

原理

量子中継の長距離化技術

送信距離に応じて減衰（崩壊）してしまう量子を長距離でも送信可能とするため、量子状態を維持しつつ中継するための技術

量子もつれ配信高度化技術

相互に量子もつれ状態にある量子対を高純度かつ高い生成レートで生成し、量子中継の成功率を大幅に向上させるための技術

高精度時空間同期技術

送信側・受信側間で量子の送受信タイミングがずれないように時刻を高精度に同期させ、通信を安定化させるための技術

量子インターネット構築基礎技術

現状のインターネットとは全く異なる量子情報の中継の振る舞いに基づき、送受信器と量子中継器の通信動作を連携させ、複数の拠点間で量子状態を送受信するための技術

多地点化技術

複数拠点間での量子状態の同時配信・共有、長距離の多段中継等、より広範囲・多地点で量子通信を実現するための技術

量子インタフェース技術

量子中継器内の量子メモリに量子を一時保存するために、高精度で量子を出し入れできるようにするための技術

単一光子検出器の高度化技術

量子中継機が量子（単一光子）を受信した時に、その検出成功率を2桁以上向上させるための技術

光回路・システム技術

量子中継器内の複雑かつ大規模な光学系処理を、小型かつ安定的に動作可能な一つのチップとして実現するための技術

完全ベル測定技術

量子中継成立のための複雑な制約（デバイス/条件依存性）を完全に排除し、量子中継の成功率を大幅に向上させるための技術

量子中継器モジュール化技術

量子中継器内の各種デバイス間の接続インタフェースを規定し、中継器内で多様な組合せを容易に検証できるようにするための技術

ルーティング・アドレッシング技術

送信元と宛先が決まった場合に、どの量子中継器を経由させて中継すべきかを一意にかつ短時間で決められるようにするための技術

デバイス

システム

本施策で取り組む要素技術

アウトカム目標の達成に向けた総務省の取組について

政策目標の達成に向けた取組方針

○研究開発期間中

- ・ 運営委員会において、学識経験者や有識者の助言をもとに研究開発全体の方針を調整
- ・ 情報通信研究機構のテストベッド等を活用した研究連携支援を実施
- ・ 海外の研究開発動向調査及び国際標準化活動を支援
- ・ 量子インターネットの早期実現に向けた技術開発に必要な予算獲得等を検討
- ・ 将来の量子インターネットの在り方に関する議論や導入ロードマップの検討・策定

○研究開発期間終了後

- ・ 国際会議、展示会等を通じた国際標準化活動の促進及び国際競争力の強化
- ・ 追跡調査・評価を通じて成果展開状況を確認し、本研究開発成果の情報発信を推進
- ・ 本研究開発成果を踏まえたさらなる応用展開のために必要な支援施策等を立案