

量子インターネット実現に向けた要素技術の研究開発

基本計画書

1. 目的

量子コンピュータや量子センシング等の量子技術は、従来型（古典）技術と比較して性能の飛躍的な向上が見込まれており、創薬・医療、材料、金融、エネルギー、生活サービス、交通、物流、工場、安全・安心などの幅広い分野において、産業の成長機会の創出や社会課題の解決への貢献が期待されており、近年、世界各国で開発競争が激化している。こうした中、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によるインターネットと異なり、きわめて微弱な単一光子レベルで通信を行うため、長距離の量子通信を行うためには損失耐性・誤り耐性等を考慮した量子状態を維持するための特殊な原理の中継方式を検討する必要があることから、技術的な課題となっている。現在、量子インターネットを実現するために必要な量子中継等の要素技術については様々な手法・方式が検討されている。欧米等の諸外国では短距離ながらも拠点間のフィールド実証成功の報告がなされており、複数拠点間を量子中継により接続する研究開発計画が政府主導で打ち出されるなど、世界的にも量子中継技術の開発が加速している状況である。このような背景の下、量子通信の分野では1ホップ・10km以上の量子中継を実フィールドにおいて実現することが非常に重要なマイルストーンとなっており、これを達成することにより世界的にも大きな技術的優位性を獲得でき、将来の量子インターネットの実現・実用化に向けた道筋を開くことができる。

そこで、本研究開発では、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を可能とする量子インターネットの実現に向けた要素技術を確立し、我が国の量子通信技術の国際的な競争力を強化するとともに、最先端の量子技術を社会経済システム全体に取り込むための基盤として我が国の産業の成長機会の創出・発展に貢献することを目的とする。

2. 政策的位置付け

「統合イノベーション戦略 2022」（令和4年6月3日閣議決定）において、量子技術が戦略的に取り組むべき主要分野とされているところ、その個別戦略である「量子技術イノベーション戦略（最終報告）」（令和2年1月21日）に基づき、我が国の産業

の成長機会の創出や社会課題の解決のために量子技術を活用し、未来社会を見据えて社会全体のトランスフォーメーションを実現するため、「量子未来社会ビジョン ～量子技術により目指すべき未来社会ビジョンとその実現に向けた戦略～」(令和4年4月22日)が定められている。同ビジョンにおいて、量子インターネットの開発に向けたロードマップに基づき、将来の量子コンピュータの大規模化を実現する技術基盤や量子暗号通信の高度化等を実現する量子通信基盤として量子インターネットの要素技術の研究開発に着手する、とされている。

「新しい資本主義のグランドデザイン及び実行計画」(令和4年6月7日閣議決定)において、量子技術は多くの社会的課題解決の可能性を秘めるとともに新時代の競争力の源泉ともなりえる主要技術であり、特に量子通信技術については、現状の量子暗号通信における中継方式は電気信号への変換を伴うためセキュリティの低下が懸念されることを踏まえ、量子状態を保ったまま通信できる量子ネットワーク技術の開発を進める、とされている。また、「新しい資本主義実行計画・フォローアップ」(令和4年6月7日閣議決定)において、量子暗号通信網の構築や量子インターネット実現に向けた要素技術の研究開発とともに、早期の社会実装に向けたテストベッドの整備等に取り組む、とされている。

「デジタル社会の実現に向けた重点計画」(令和4年6月7日閣議決定)において、実用的で大規模な量子コンピュータが実現することによる既存の暗号技術の危殆化を想定しつつ、耐量子計算機暗号や量子暗号通信、量子インターネット等に関する先進的な研究を推進する、とされている。

「経済財政運営と改革の基本方針 2022 新しい資本主義へ ～課題解決を成長のエンジンに変え、持続可能な経済を実現～」(令和4年6月7日閣議決定)において、社会課題を経済成長のエンジンへと押し上げていくためには、科学技術・イノベーションの力が不可欠であり、特に、量子、AI、バイオものづくり、再生・細胞医療・遺伝子治療等のバイオテクノロジー・医療分野は我が国の国益に直結する科学技術分野である、とされている。

3. 目 標

(1) 政策目標 (アウトカム目標)

量子コンピュータや量子センサ等の様々な量子デバイスを利活用するための基盤として、量子状態を維持した通信を可能とする量子インターネットを実現するためには、量子メモリや量子もつれ光源等の性能の向上に加え、中継ノードにおいて高効率な量子もつれスワッピングを可能とするための高精度な位相・時刻同期を含めた各要素技術及び量子通信システムとして統合するための技術が必要である。また、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ならではの機能をどのように実現し、多様化を行うかが理論的な課題となっていることから、多者間量子通信や認証技術等の量子通信プロトコル等についても検討を行う必要がある。

そこで、本研究開発では、量子状態を維持して長距離の通信を可能とするための(1)

量子中継長距離化技術、将来的な量子通信高速化のための（２）量子もつれ配信高度化技術、量子中継に必要な複数拠点間での高精度の時刻同期を実現する（３）高精度時空間同期技術、及び量子通信プロトコルの基本方式の検討等を含めた（４）量子ネットワーク構築基礎技術を確立することにより、量子状態（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定義とその実現に寄与する。

また、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。

（２）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、及びミリ秒以上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。

実証にあたっては、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、量子通信プロトコル等の基本検討を行い、多者間量子通信や量子の性質を利用した認証技術等、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。

4. 研究開発内容

（１）量子中継長距離化技術

① 概要

量子状態を維持して長距離の通信を可能とするため、周波数分割多重量子メモリ技術や光通信波長帯への量子波長変換技術等を開発する。

② 技術課題

量子状態（量子ビット）の長距離伝送を行う上では、量子もつれ光子の光強度やファイバ内での減衰等により100km以上の伝送は技術的に困難であるため、量子インターネットのネットワーク構成は、数十kmごとに量子中継を行う中継ノードを配置する形となる。各中継ノードにおいて、効率よく量子もつれ状態の交換を行うために、量子状態を長時間かつ高効率に保存可能な量子メモリが求められる一方、量子通信において一定の通信性能を確保するための周波数分割多重化への対応や、量子コンピュータや量子センサ等の各種量子デバイスに接続するための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等、複数の要件への対応が必要となる。また、光ファイバベースの量子通信を行う上では、光通信波長帯と結合可能な量子波長変換等のインターフェースが必要となる。

③ 到達目標

量子中継を実現するための量子メモリに関する基礎技術を確立する。量子メモリ保持時間に関しては、原理的にミリ秒以上を可能とする方式を確立し、その基本動作を実証する。また、現状数十 km 程度が限界のメモリ間もつれを 100km 程度に延長するためには最低 10dB のファイバ損失分を補償する通信レート向上が必要であることから、周波数分割多重化技術を導入し、多重度 10 以上を目標とする。加えて、量子もつれ光源や光通信波長帯 (1.5 μm 帯) への量子波長変換等のインターフェース技術と組み合わせることにより光ファイバベースの結合システムを構築し、その基本動作を実証する。

さらに、単一の量子ビットの操作及び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。量子ゲートへの接続を容易にし、単位時間あたりの伝送効率を従来比 10 倍とするため、メモリ保持時間 100 μsec 以上を達成する。

(2) 量子もつれ配信高度化技術

① 概要

量子インターネット上で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技術や、将来の量子通信の高速化に必要な周波数分割多重もつれ光子配信技術等を開発する。

② 技術課題

量子インターネットを構築する上では、各ノード間において量子もつれ光子対を高速・高効率で生成・共有するための量子もつれ光源の高度化が必要不可欠である。一般に、量子もつれ光子対の生成については自発的パラメトリック下方変換等の非線形光学効果を利用することが多く、その生成効率は励起レーザ強度に比例するが、励起レーザ強度を上げると 2 対以上の光子対が発生し、量子もつれの品質が低下してしまうといった技術的な問題があった。この課題は励起レーザの繰り返し周波数を上げる手法により改善が期待されるが、従来手法ではその繰り返しレートは 200MHz 程度にとどまるため、量子通信への応用に向けては、さらなる高レート化や量子もつれ光子対の周波数分割多重化等の対応が求められる。そこで、量子もつれ光子対を高速生成可能な量子もつれ光源の高度化、高密度な周波数分割多重が可能な量子もつれ光源及び光周波数の精密制御等の技術が必要となる。

また、多者間で量子もつれの共有を行い、量子通信に活用するためには、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等を開発するとともに、それらを光ファイバネットワーク上 (光通信波長帯) で実装するための手法を検討する必要がある。

③ 到達目標

繰り返しレート 1 GHz 以上の量子もつれ光源を開発し、3 ノード間 (各ノード間の光ファイバ長 10km) で、検出レート 10kHz 以上で量子もつれを配信できることを実証する。さらに、独立生成した 2 対の量子もつれ光子対による量子もつれスワッピングが可能な実証システムを構築し、ベル状態測定により検出レート 0.1Hz で量子もつれ

スワッピングを実現し、量子もつれ中継を実証する。

周波数分割多重量子もつれ光源については、多重度 10 以上を目指す。周波数分割多重量子メモリ及び光周波数の精密制御デバイス等の技術を統合して周波数分割多重もつれ光子配信システムを構築し、光源の多重度に応じたもつれ共有レート向上を実証する。さらに、マルチパーティ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、その基本動作を実証する。

(3) 高精度時空間同期技術

① 概要

光時計等から得られる位相情報を量子通信路上の複数拠点へ配信することにより各光源や量子デバイス等の高精度な位相同期・周波数安定化を可能とする高精度時空間同期技術を開発する。

② 技術課題

量子通信を安定的に実現するためには、通信路上の各拠点に配置された各量子もつれ光源や量子メモリに対して高い精度で位相・時刻同期を行う必要がある。非常に高い精度の周波数（時間）基準が得られる光時計等については、量子通信に求められる高精度な位相・時刻同期への応用が期待されているが、連続運転が困難であるためにネットワークへの定常的な標準時刻の供給を行うことができないといった技術的な課題がある。さらに、温度変動や振動により光ファイバに加わる外乱をリアルタイムで補正し、光時計等による標準時刻の光ファイバ上への安定供給を可能とする高精度時空間同期技術が必要となる。

③ 到達目標

従来のインターネットにおいて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、将来の実利用を想定した検証として、開発した高精度時空間同期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。特に TF-QKD では我が国の主要都市間に相当する伝送距離 500km でも安全な鍵生成を可能とする実装方法を提案し、性能検証のための敷設ファイバを用いた実証を行う。

(4) 量子インターネット構築基礎技術

① 概要

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、量子中継長距離化技術、量子もつれ配信高度化技術、高精度時空間同期技術

等を統合し、各要素技術を実証する。

② 技術課題

(1)～(3)を量子通信システムとして統合するためには、現実的な利用形態を想定した量子通信プロトコルが必要である。特に、実フィールドにおいて、ファイバ内の損失や外乱等の影響まで考慮したプロトコル設計が課題となっている。設計にあたっては、ファイバへの熱・圧力の通信性能への影響を明らかにし、それを踏まえた補償技術が必要となる。

さらに、従来の光通信では実現できない量子通信ならではの機能を実現するため、複数ノードに量子もつれ状態を分配するための多者間量子通信プロトコルや量子特有の性質を利用した認証技術等が必要となる。

③ 到達目標

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、ベル状態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。

5. 研究開発期間

令和5年度から令和9年度までの5年間

6. その他 特記事項

(1) 特記事項

提案者は、下記課題(1)、(2)、(3)、(4)のいずれか又は複数の課題に提案することができる。なお、いずれの研究開発の受託者も相互に連携、協力して研究開発を行うこと。

また、原則、課題(4)の受託者が本研究開発課題全体のとりまとめを行うものとする。ただし、別の課題((1)、(2)、又は(3))の受託者が本研究開発課題全体のとりまとめを行うとする提案も可とする。

- (1) 量子中継長距離化技術
- (2) 量子もつれ光子配信高度化技術
- (3) 高精度時空間同期技術
- (4) 量子インターネット構築基礎技術

(2) 提案及び研究開発に当たっての留意点

- ① 提案に当たっては、基本計画書に記されているアウトプット目標に対する達成度を評価することが可能な具体的な評価項目を設定し、各評価項目に対して可能な限り数値目標を定めること。また、アウトカム目標の達成に向けた適切な研究成果（アウトプット等）の取扱方策（研究開発課題の分野の特性をふまえたオープン・クローズ戦略を含む）について提案すること。
- ② 成果展開については、量子インターネット及び関連技術に関するこれまでの国内外の研究開発動向を記載の上、その点を踏まえて、成果展開に至るまでの段階を明示した取組計画等を記載し、提案すること。
- ③ 目標を達成するための具体的な研究方法、実用的な成果を導出するための共同研究体制又は研究協力体制について研究計画書の中にできるだけ具体的に記載すること。複数機関による共同研究を提案する際には、分担する技術間の連携を明確にし、インターフェースを確保すること。
- ④ 研究開発の実施に当たっては、関連する要素技術間の調整、成果の取りまとめ方等、研究開発全体の方針について幅広い観点から助言を頂くと共に、実際の研究開発の進め方について適宜指導を頂くため、学識経験者、有識者等を含んだ研究開発運営委員会等を開催する等、外部の学識経験者、有識者等を参画させること。なお、本件について不明点がある場合は、本研究開発の担当課室まで問い合わせること。

(3) 人材の確保・育成への配慮

- ① 研究開発によって十分な成果が創出されるためには、優れた人材の確保が必要である。このため、本研究開発の実施に際し、人事、施設、予算等のあらゆる面で、優れた人材が確保される環境整備に関して具体的に提案書に記載すること。
- ② 若手の人材育成の観点から行う部外研究員受け入れや招へい制度、インターンシップ制度等による人員の活用を推奨する。また、量子インターネットに関する課題は本研究開発成果をもとに今後より発展的に取り組むべきものであることから、学会誌の解説論文等での本研究開発概要の公表や、将来の人材育成に向けた啓発活動（例えば、学生に対する出張講義やサマースクール、企業研究者を対象としたセミナー等）の実施を奨励する。これらの取組予定の有無や計画について提案書において提案すること。

(4) 研究開発成果の情報発信

- ① 本研究開発で確立した技術の普及啓発活動を実施すると共に、実用に向けて必要と思われる研究開発課題への取組も実施し、その活動計画・方策については具体的に提案書に記載すること。
- ② 研究開発成果については、原則として、総務省としてインターネット等により発信を行うとともに、マスコミを通じた研究開発成果の発表、講演会での発表等により、広く一般国民へ研究開発成果を分かりやすく伝える予定であることから、当該提案書には、研究成果に関する分かりやすい説明資料や図表等の素材、英訳文書等

を作成し、研究成果報告書の一部として報告する旨の活動が含まれていること。さらに、総務省が別途指定する成果発表会等の場において研究開発の進捗状況や成果について説明等を行う旨を提案書に記載すること。

- ③ 本研究開発終了後に成果を論文発表、プレス発表、製品化、Web サイト掲載等を行う際には「本技術は、総務省の「量子インターネット実現に向けた要素技術の研究開発」（令和5年度一般会計予算）による委託を受けて実施した研究開発による成果です。」という内容の注記を発表資料等に都度付すこととする旨を提案書に明記すること。