

|           |                     |
|-----------|---------------------|
| 研究課題名     | 量子情報処理プロジェクト        |
| 中心研究者名    | 山本 喜久               |
| 研究支援担当機関名 | 情報・システム研究機構国立情報学研究所 |

## <研究課題からの報告>

### 1. 研究課題の目的及び意義

20世紀後半に開発されたインターネットやGPSが現代社会を支えるインフラを提供しているように、量子情報処理技術が未来社会を支えるインフラとなり得る。我が国の研究グループは、これまでも、超伝導量子ビット、コヒーレントコンピュータ、光格子時計などの数多くのオリジナル技術を開発し、量子情報処理研究の世界的潮流を形成してきた。

このような情勢の中、本研究課題は、現代のコンピュータや通信網では処理できない膨大な計算や安全な通信を実現する能力を持つ量子コンピュータ、量子シミュレータ、量子通信網を開発する道筋を明らかにすることを目的として研究開発を実施した。

研究課題全体としては、平成 25 年度から「量子情報システム」、「超伝導量子コンピュータ」、「スピン量子コンピュータ」、「量子シミュレーション」、「量子標準」、「量子通信」という 6 つのサブテーマを構成し、具体的な研究目標として、以下を設定した。

- ① 誤り耐性のある量子コンピュータのアーキテクチャを明らかにし、これを実現し得るハードウェア素子からなる小規模なシステムによる実証実験を成功させる。
- ② 将来の量子通信を支える多者間量子通信プロトコルを確立し、これを実現する量子メモリと量子もつれ配信技術を実現する。
- ③ NP 完全問題を含む様々な問題へ応用可能なコヒーレントコンピュータと様々な多体系物理の問題へ応用可能な量子シミュレータの概念を、その実証実験を通して確立する。
- ④ 次世代の時間（秒）の標準技術として光格子時計が採択されるべく、周辺技術も含めシステムを完成させる。また、単一光子の実用的検出器、非古典光や冷却原子を用いた微弱磁場、微小重力や微小位相検出の感度を改善する。

### 2. 研究成果の概要

#### ① 「量子コンピュータ」に関する研究

量子ビットは比較的短い時間で量子情報を失ってしまい、またユニタリ変換には必ず誤動作が生じるので、量子コンピュータの実現には誤り訂正機能の付加が不可欠である。そのため、表面トポロジカルコードを用いた誤り耐性量子コンピ

ュータの階層アーキテクチャを確立し、必要なリソースと計算時間を見積った(図1)。素因数分解と量子化学計算という2つの応用に対して、必要な量子ビット数は $10^8 \sim 10^9$ 、計算時間は約1~10日と見積もられた。この結果は世界に先駆けた成果である。

## ② 「量子中継」に関する研究

量子中継の中核技術であるスピン量子ビットと通信波長帯光子量子ビットの量子もつれ状態の発生に世界に先駆けて成功した。また、スピン量子ビットを保存する量子メモリの開発も順調に進んでいる。光子量子ビットに直接接続できる量子ドット中の電子スピン、ホールスピンの長寿命化、超伝導量子ビットを光子量子ビットへ接続するためのNVセンターとのハイブリッド化、などに成功している。今後は、これらの要素技術の応用例として、多者間量子通信プロトコルを明らかにする予定である。

また、これまでの量子鍵配送プロトコルに比較して本質的に新しいプロトコルを提案し、より実装しやすく秘密鍵生成率及び伝送距離が大きく改善した鍵配送の道を拓いた。

## ③ 「量子シミュレータ、コヒーレントコンピュータ」に関する研究

注入同期レーザーネットワークを用いたコヒーレン

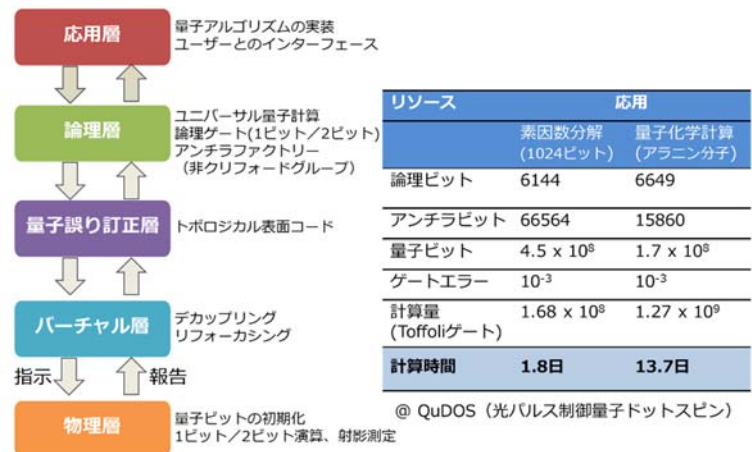


図1. 誤り耐性量子コンピュータのアーキテクチャとリソース見積もり

| 分野       | テーマ  | 比較* | 競合機関1   | 競合機関2   | 競合機関3   |
|----------|--|-----|---|---|---|
| 量子コンピュータ | 誤り耐性量子コンピュータ-アーキテクチャー (表面トポロジカルコードをベースにした階層構造の提案と性能評価) | 1   | UCSB (同じ概念を超伝導量子ビット系に適用して検討中である)                  | MIT/Duke (同じ概念をトラップ・イオン系に適用して検討中である)            | NIST (誤り耐性ではないが、トラップ・イオン量子コンピュータアーキテクチャーを提案)  |
|          | 超伝導量子ビット技術   | 2   | UCSB (位相量子ビットで3~4ビットの結合を実現)                       | エール大学 (電磁共振器を介し2ビットの量子アルゴリズムを実行)                | D-Wave (200ビット程度の量子アニーリング専用機を実現)              |
|          | 量子ドットスピン技術   | 1   | ハーバード大学 (GaAs系2ビットで1ビットを作る技術を確認し、2ビットによるもつれ制御に成功) | デルフト工科大学 (GaAs系ドットで1ビットを作ることに成功。2スピンの読み出し技術を確認) | ウィスコンシン大学 (Si系2ドットで1ビットを作ることに成功)              |
| 量子中継     | スピン-光子量子もつれ状態の発生 (量子ドットスピン-1.5 μm光子で実現)                | 2   | メリランド大学 (トラップイオン-紫外線光子で実現)                        | ハーバード大学 (NVセンター-0.5 μm光子で実現)                    | ETH(チューリッヒ) (量子ドット-0.8 μm光子で実現)               |
|          | 量子メモリ (量子ドット電子スピン/ホールスピンを光パルスで制御)                      | 2   | ハーバード大学 (NVセンター電子スピンをAFMに集積化)                     | UCSB (NVセンター電子スピンをマイクロ波で制御)                     | ヒューレット・パッカード (NVセンター電子スピンを共振器に埋め込む)           |
| 量子シミュレータ | コヒーレントコンピュータ (注入同期レーザーネットワークで実現)                       | 1   | マックス・プランク研究所 (開放系に対する数学的一般論のみ)                    | MIT (量子断熱計算を提案したが、指数発散は抑えられなかった)                | ロスアラモス国立研究所 (量子アニーリングマシンを提案したが、指数発散は抑えられなかった) |
|          | 冷却原子量子シミュレータ   | 2   | ハーバード大学 (量子気体顕微鏡を実現。ただしボース系のみ)                    | マックス・プランク研究所 (量子気体顕微鏡およびゲージ場を実現。ただしボース系のみ)      | ETH(チューリッヒ) (フェルミハバードを提案。ただし量子磁性には到達せず)       |
| 量子標準     | 励起子ポラリトン量子シミュレータ (金属膜トラップで様々な格子構造を実現し、新奇物性を発見)         | 1   | CNRS(フランス) (メサエッチトラップを実現した段階にある)                  | EPFL(ロザンヌ) (均-2次元系の実験にとどまっている)                  | ケンブリッジ大学 (均-2次元系の実験にとどまっている)                  |
|          | 光格子時計 (量子射影ノイズ安定度の達成、遠隔地比較等)                           | 1   | JILA (Sr光格子時計の実現。衝突特性の高精度評価を行なう)                  | NIST (AlイオンQuantum Logic時計。正確さに優れるが、量子射影ノイズ大)   | PTB (原子核時計。正確さに優れる可能性。現在開発中。全固体の可搬型時計の可能性あり。) |

\*比較1. リードしている 2. 競合している 3. キャッチアップしている

表1. 国際的なベンチマーク比較

トコンピュータを用いて NP 困難問題の一つである 3 次元イジングモデルに代表される組合せ最適化問題の近似解を高速で解ける可能性を示した。今後は、小規模な NP 困難問題を実装できるプロトタイプを完成させる予定である。また、光格子にトラップされた Yb (イッテルビウム) 冷却原子を用いた系と金属膜格子にトラップされた励起子ポラリトンを用いて様々な多体系の物性を模擬実験により解明する量子シミュレータを開発し、その有効性を示すことに成功した。

#### ④ 「光格子時計」に関する研究

開発した光格子時計を用いて、積算時間 1,600 秒で  $1 \times 10^{-17}$  の安定度を達成した。これにより、従来のトラップ・イオン光時計に必要な積算時間を 1/50 に短縮することに成功した。今後は、次世代光時計としてのフェージビリティを実験的に評価し、来るべき国際度量衡総会で秒の再定義に向けてアピール、実績作りを行っていく予定である。

国際的なベンチマークとの比較は表 1 のとおりである。なお、Nature 誌、Science 誌、PNAS 誌に 15 報、Nature 姉妹誌に 34 報、Physical Review Letters 誌などの学術レベルの高い論文誌に 72 報の論文が掲載され、このうち、引用回数トップ 1% 論文が 20 報、0.1%論文が 2 報などの成果を上げた。

### <評価小委員会による所見>

#### 1. 研究目標の達成状況

本研究課題は、現在のコンピュータや通信網では処理できない膨大な計算や安全な通信を実現する量子コンピュータ、量子シミュレータ、量子通信網を開発する道筋を明らかにするため、誤り耐性のある量子コンピュータのアーキテクチャの明確化、多者間量子通信プロトコルの確立、コヒーレントコンピュータと量子シミュレータの概念の確立、光格子時計の標準技術の確立の 4 つを掲げ、重要と考えられる要素技術の開発を目指した。

その結果、

- ・ 表面トポロジカルコードを用いた誤り耐性量子コンピュータの階層アーキテクチャ（物理層、バーチャル層、量子誤り訂正層、論理層、応用層）を確立し、必要なリソースと計算時間を明らかにしたこと
- ・ スピン量子ビットと通信波長帯光子量子ビットの量子もつれ状態の発生に成功したこと
- ・ 注入同期レーザーネットワークを用いたコヒーレントコンピュータを用いて NP 完全問題の一つである 3 次元イジングモデルに代表される組合せ最適化問題の近似解を高速で解ける可能性を示したこと
- ・ 開発した光格子時計を用いて、積算時間 1,600 秒で  $1 \times 10^{-17}$  の安定度を達成し

たこと

などの世界トップ水準の成果を上げている。特に、誤り耐性量子コンピュータのアーキテクチャや量子もつれ状態の発生、コヒーレントコンピュータによる NP 完全問題へのアプローチ等は、世界に先駆けた成果であり、他の競合機関との比較においてもリードしている点で高く評価される。

また、6つのサブテーマについては、それぞれのチームが要素技術を確立することにより、全体的な目標への貢献が行われている。サブテーマ間の共同研究により、新しい量子鍵配送方式が開発されるなど、サブテーマ間の相乗効果も認められる。

さらに、この成果は、社会的にインパクトの大きい Nature 誌、Science 誌等の雑誌に発表されるとともに、Physical Review Letters 誌等の学術レベルの高い論文誌にも多数発表されており、学術的にも高い成果を上げたものと考えられる。

なお、実用化に近いと考えられるコヒーレントコンピュータ（コヒーレントイジングマシン）については、グラフの疎密性や速度比較だけでなく、様々な条件下でその優位性を検証するとともに、産業応用に当たって必要となる条件を念頭に検証していくことを期待する。

## 2. 研究推進・支援体制の状況

本研究課題は、どこで大きなブレークスルーが起きるか分からないという発想の下、できるだけ網を広く張って人を育てながら進めようという考え方でチームを構成し、研究が推進された。また、当初、量子計測と理論のテーマを独立に設けていたが、実験結果の創出状況に応じて、理論と実験のコラボレーションを重視して、各実験グループに分散させるチーム構成に体制を変更した。実験と理論の密な連携が行われた結果として、レベルの高い論文の創出に寄与したと考えられる。

研究支援体制については、平成 24 年度に支援体制を見直し、量子情報処理研究に携わってきた研究者を研究支援統括として抜擢した。研究内容に精通した者が支援体制の責任者となったことで支援業務上の負荷の軽減につながったと評価される。

知的財産権に関する取組については、特許出願の動向調査やパテントマップの作成など、中心研究者のイニシアチブにより戦略的な取組が行われたと評価される。

また、若手研究者の育成という観点から、ポスドクや大学院生向けの夏期研修会（4 回）やワークショップ（17 回）が、次世代の研究者育成という観点から、小中高への出張授業や教職員への研修会などが行われた。特に、量子情報処理研究は多岐の学問分野にまたがっており、関係者が一堂に会する 10 日間の夏期研修会という機会を提供したことは、人材の育成という観点から高く評価できる取組である。

## 3. 研究成果の今後の展開

本研究課題の成果のうち、比較的出口が明確化されているもの（量子シミュレータ、コヒーレントコンピュータ、量子通信）については、内閣府の革新的研究開発推進プログラム（ImPACT）において、FIRST 合原課題、FIRST 十倉課題などと連携しながら、研究を進めることとしている。また、その他の成果についても、科学研究費補助金や独立行政法人科学技術振興機構の戦略的創造研究推進事業（ERATO）、独立行政法人情報通信研究機構、独立行政法人理化学研究所などのプロジェクトとして継続的に研究を進めることとしている。

量子情報処理技術の社会への実装には、産業界との協力が不可欠であり、ImPACTにおいては、産業界との対話を進め、産業界が具体的な興味を持てるテーマを提示して研究開発を進めていくことを期待する。

#### 4. 総合所見

本研究課題は、量子コンピュータ、量子シミュレータ、量子通信網を開発する道筋を明らかにすることを目的として研究開発を実施した。その結果、量子情報処理の各研究分野において、どの程度の規模のシステムを開発すれば実用に耐え得るか、その全体像を明らかにしたことは高く評価される。

また、個々の学術的な成果としても、Nature 誌等のインパクトの高い学術誌に数多くの論文が掲載されるとともに、被引用回数トップ1%論文が20報、0.1%論文が2報と、多数の引用が行われていることから高く評価される。

以上のことから、本研究課題は目標を達成しており、世界をリードする世界トップ水準の研究成果が得られたと判断される。

また、量子情報処理分野の人材育成の観点から、若手研究者への交流機会の提供や積極的なアウトリーチ活動が行われたことも評価される。

今後、ImPACT等に引き継がれ研究開発を推進することとしているが、特に量子計算や量子通信が将来的に社会に実装されるためには産業界との連携が重要である。要素技術の研究開発とともに、残された課題が何かを明確化すること、また、産業界が具体的な興味を持てるテーマを提案していくことを期待する。