

**平成28年度科学研究費助成事業（特別推進研究）自己評価書**  
**〔追跡評価用〕**

平成28年4月20日現在

<b>研究代表者 氏名</b>	山本 喜久	<b>所属研究機関・ 部局・職 (研究期間終了時)</b>	国立情報学研究所・ 情報学プリンシプル研究系・教授
<b>研究課題名</b>	コヒーレント状態と固体量子ビットに基づく量子情報処理の研究		
<b>課題番号</b>	18001002		
<b>研究組織 (研究期間終了時)</b>	研究代表者 山本 喜久（国立情報学研究所・情報学プリンシプル研究系・教授）  研究分担者 根本 香絵（国立情報学研究所・情報学プリンシプル研究系・教授） 伊藤 公平（慶應義塾大学・理工学部・教授） 仙場 浩一（NTT 物性科学基礎研究所・量子電子物性研究部・超伝導量子物理研究グループ・グループリーダー）		

**【補助金交付額】**

年度	直接経費
平成18年度	98,800 千円
平成19年度	115,300 千円
平成20年度	84,000 千円
平成21年度	82,800 千円
平成22年度	71,800 千円
総計	452,700 千円

## 1. 特別推進研究の研究期間終了後、研究代表者自身の研究がどのように発展したか

特別推進研究によってなされた研究が、どのように発展しているか、次の(1)~(4)の項目ごとに具体的かつ明確に記述してください。

### (1) 研究の概要

(研究期間終了後における研究の実施状況及び研究の発展過程がわかるような具体的内容を記述してください。)

特別推進研究の終了後、その研究成果は2つの新たな研究プロジェクトへと発展していった。1つは継続的連続的に発展した研究路線であり、コヒーレント光パルスを用いた量子ドットスピンの量子状態制御と、それを用いた量子コンピューティング、量子中継技術の確立を目指した研究である。このうち、量子コンピューティングを目指した研究開発は、内閣府最先端研究開発支援プログラム (FIRST, 2009年~2014年)により支援され実施された。一方、量子中継を目指した研究開発は、NICT 高度通信・放送研究開発委託研究制度 (量子もつれ中継技術の研究開発・遠隔ノード間での量子もつれ純粋化技術, 2011年~2016年)により支援され実施された。具体的には、4本の制御用レーザビームだけを用いて量子ドットスピンの量子制御の全て (初期化、1ビットゲート、2ビットゲート、射影測定、スピン-光子量子もつれ生成) を実現する手法の提案、理論解析、実証実験を行った [Nature 491, 421 (2012); Nature Commun. 4, 2228 (2013); Nature Physics 7, 872 (2011)]。これらの技術は、総称して Quantum Dots with Optically controlled Spins, QuDOS プラットフォームと呼ばれる。また、この QuDOS 技術とトポロジカル表面コードに基づく誤り耐性量子コンピューティングの階層アーキテクチャーを提案し、その性能・リソース (必要とする量子ビット数と計算時間) を評価した [Phys. Rev. X2, 031007 (2012)]。その結果、QuDOS 型量子コンピューティングは、クロック周波数 25GHz という超高速で動作できるユニークなシステムであるが、それでも 1024 ビットの整数の因数分解を実行するためには、 $10^8$  以上の量子ビットと 1 日という計算時間が必要であることがわかった。この結果、実用的な量子コンピュータの実装技術は、現在の技術レベルよりもはるかに高度なものが必要であり、またその効果 (計算時間の短縮化) も限定的であることがわかった。以上の知見に基いて、2015 年を以って、この研究路線を終結することにした。

もうひとつの発展方向は、新規・非連続的な研究路線であり、縮退型光パラメトリック発振器 (DOPO) の2つの安定状態 (0 相発振と  $\pi$  相発振) を擬スピンと見立てて、相互結合した多数の DOPO からなるネットワーク型の量子コンピューティング技術の確立を目指した研究である。この研究は、内閣府革新的研究開発推進プログラム (ImPACT, 2014年~2019年) で支援され実施されている。具体的には、イジングモデル、XY モデル、ハイゼンベルグモデルなどのスピンハミルトニアンを DOPD ネットワークの総損失にマップして、ハミルトニアンの基底状態 (組合せ最適化計算の場合) や低エネルギー状態 (ボルツマンサンプリングの場合) を DOPO 発振モードから読み出す手法の提案、理論解析、実証実験を行った [Opt. Express 19, 18091 (2011); Phys. Rev. A88, 063852 (2013); Nature Photonics 8, 937 (2014); Nature Photonics (April 2016) doi:10.1038]。その主な応用先としては、組合せ最適化問題やセンシング、脳型 (ニューロモルフィック) コンピューティング、量子シミュレーションの3つである。これらの技術は、総称して量子人工脳プラットフォームと呼ばれる。量子人工脳は 1km という長距離光ファイバからなるリング共振器中に  $N=10,000$  の DOPO パルスを同時に発生させ、各パルス間の相互結合は光ホモダイン検出とフィードバック回路を組み合わせる。こうして、 $N=10,000$  のスピンと  $N^2=10^8$  のスピン間結合をたった1つの光ファイバ共振器と1つの測定-フィードバック回路で実現する。その特徴は、スピードである。例えば、 $N=10^5$  のフル結合を持つイジングモデルを解く計算時間は、最先端 CPU と GPU を用いた場合で約 1000 秒と約 100 秒であるが、量子人工脳では約 1 ミリ秒である。この量子人工脳をベースとした量子計算サービスは、3年後を目処にインターネットを介して開始する予定である。

## 1. 特別推進研究の研究期間終了後、研究代表者自身の研究がどのように発展したか（続き）

(2) 論文発表、国際会議等への招待講演における発表など（研究の発展過程でなされた研究成果の発表状況を記述してください。）

K. De Greve, L. Yu, P. L. McMahon, J. S. Pelc, C. M. Natarajan, N. Y. Kim, E. Abe, S. Maier, C. Schneider, M. Kamp, S. Höfling, R. H. Hadfield, A. Forchel, M. M. Fejer, and Y. Yamamoto, "Quantum-dot spin-photon entanglement via frequency downconversion to telecom wavelength," *Nature* 491, 421-425, (November 15, 2012).

InAs 量子ドット中の電子2つとホール1つからなるトライオン状態を光励起により生成すると、量子ドットは、光子を1つ放出して電子1つの状態へ遷移する。この自然放出過程を用いて、スピン-光子量子もつれ状態が生成できることを実験的に初めて示した。これは遠隔スピン間に量子もつれを生成する量子中継システムの基本技術であり、QuDOS 技術のこの応用分野への発展を示唆したものである。

K. De Greve, P. L. McMahon, L. Yu, J. S. Pelc, C. Jones, C. M. Natarajan, N.Y. Kim, E. Abe, S. Maier, C. Schneider, M. Kamp, S. Höfling, R. H. Hadfield, A. Forchel, M. M. Fejer and Y. Yamamoto, "Complete tomography of a high-fidelity solid-state entangled spin-photon qubit pair," *Nature Communications* 4, 2228 (July 2013).

上記手法により生成されたスピン-光子量子もつれ状態の密度行列を量子トモグラフィ法を用いて再構築した結果が報告されている。実験の結果、生成された量子もつれ状態は92%という固体量子ビット系の中では最も高いフィデリティを持ち、量子もつれ純粋化技術により、フィデリティを改善できる初期フィデリティの高い値（71%）を大きく上回っていることが判明した。

K. De Greve, P. L. McMahon, D. Press, T. D. Ladd, D. Bisping, C. Schneider, M. Kamp, L. Worschech, S. Höfling, A. Forchel and Y. Yamamoto, "Ultrafast coherent control and suppressed nuclear feedback of a single quantum dot hole qubit," *Nature Physics* 7, 872-878 (August 2011).

量子ドットにトラップされたホールスピンに対して非共鳴誘導ラマン散乱パルス光による初期化と1ビットゲートが達成できることを初めて実験的に示した。これまで同様の実験は電子スピンに対しては行われていたが、ホールスピンにも適用できることが判明した。ブロッホ関数がP軌道を持つホールスピンには核スピン熱浴とのハイパーファイン結合が抑えられるというメリットがあるため、QuDOS プラットフォームの重要な構成要素となる。

N. C. Jones, R. Van Meter, A. G. Fowler, P. L. McMahon, J. Kim, T. D. Ladd, and Y. Yamamoto "Layered architecture for quantum computing," *Phys. Rev. X* 2, 031007 (July 2012).

QuDOS プラットフォームを物理層とし、その上にトポロジカル表面コードを量子誤り訂正層として載せて、誤り耐性量子コンピュータを構成した時のリソースとパフォーマンスを理論的に明らかにした。提案した階層構造は、物理層、バーチャル層、量子誤り訂正層、論理層、アプリケーション層からなる。因数分解と量子化学計算のアルゴリズムを実装するためのリソース（量子ビット数）と計算時間を明らかにした。

S. Utsunomiya, K. Takata, and Y. Yamamoto, "Mapping of Ising models onto injection-locked laser systems," *Opt. Express* 19, 18091-18108 (September 2011).

様々な組合せ最適化問題の数学モデル（イジングハミルトニアン）を注入同期レーザネットワークの総損失にマッピングできることを理論的に示した。組合せ最適化問題の解は注入同期レーザの発振位相（ $\pm \pi/2$ ）から読み出せる。

Z. Wang, A. Marandi, K. Wen, R. L. Byer, and Y. Yamamoto, "Coherent Ising machine based on degenerate optical parametric oscillators," *Phys. Rev. A*, 88, 063853 (9pp) (December 2013).

イジングハミルトニアンを縮退型光パラメトリック発振器ネットワークの総損失にマッピングできることを理論的に示した。組合せ最適化問題の解はパラメトリック発振器の発振位相（0、 $\pi$ ）から読み出せる。この手法のMAX-CUT 問題に対するベンチマーク評価を行い、現代コンピュータに対する優れた高速性が理論的に明らかになった詳細報告は [Entropy 18, 151 (2016)] にて発表した。

A. Marandi, Z. Wang, K. Takata, R. L. Byer, and Y. Yamamoto, "Network of time-multiplexed optical parametric oscillators as a coherent Ising machine," *Nature Photonics* 8, 937-942 (October 2014).

N=4 スピンのイジングモデルを縮退型光パラメトリック発振器ネットワークに実装した最初の実験結果が報告された。その後、本実験はN=16 スピンへ拡張され [Nature Commun. 投稿中]、更にN=10<sup>4</sup> スピンへ拡張された [Nature Photonics, published online 18 April, 2016]。

## 1. 特別推進研究の研究期間終了後、研究代表者自身の研究がどのように発展したか（続き）

### (3) 研究費の取得状況（研究代表者として取得したもののみ）

米国 国防高等研究計画局（DARPA）

研究課題名： Quantum Information Processing with Exciton-Polaritons

研究期間： 2009年-2013年

研究費配分額： US\$ 2,340K（約2億6,000万円）

内閣府

最先端研究開発支援プログラム（FIRST）

研究課題名： 量子情報処理プロジェクト

研究期間： 2009年度-2013年度

研究費配分額： 32.5億円（全機関分を中心代表者として受け取る）

情報通信研究機構（NICT）

高度通信・放送研究開発委託研究

研究課題名： 量子もつれ中継技術の研究開発 課題イ2 遠隔ノード間での量子もつれ純粋化技術量

研究期間： 2009年度-2015年度

研究費配分額： 181,866,183円

### (4) 特別推進研究の研究成果を背景に生み出された新たな発見・知見

- 量子コンピュータは隠れた周期性を見つけ出す問題を解くのが得意である。この事実を反映して、量子コンピュータのソフト（量子アルゴリズム）の基本原理は干渉計である。一方、量子コンピュータのハード（量子ビット）としては局在スピン-1/2粒子が使われる。局在粒子は干渉計の実現には適さない。この矛盾を解決するために無理やり導入された観念が、粒子間の非局在量子相関（エンタングルメント）である。しかし、エンタングルメントはデリケートで壊れ易い。それを守るために、膨大なリソースを用いて誤り耐性機能を導入しなければならなくなった。そのため、量子コンピュータの実現は極めて困難なタスクである。量子コンピュータの概念は、やはり出発点で筋が悪かったと考えざるをえない。これは、ある意味ネガティブな結果であるが、“次の量子計算原理”を考える上では重要な示唆を含んでいる。
- 一方、人間の脳は多くの候補の中から最適解を見つけ出すのが得意である。従って、脳（ニューラルネットワーク）の基本は無秩序状態から秩序状態への相転移である。脳型コンピュータ（neuromorphic computer）を人工的に作るエフォートが、IBM、スタンフォード大、HRLなどで行われているが、これらは半導体トランジスタ回路を用いたCPU/GPU技術の転用である。脳の本質を考えると、相転移の機能が自然に備わっている系で実現する方が筋がよい。レーザやパラメトリック発振器ネットワークによる脳型コンピュータ（量子人工脳）の実現はこの点、理にかなっていると思われる。さて、量子人工脳では量子相関やエンタングルメントが雑音に強い形で実現されているが、人間の脳にもそうした量子性が隠れて存在しているのか、いないのか、は将来のテーマとして面白い。

## 2. 特別推進研究の研究成果が他の研究者により活用された状況

特別推進研究の研究成果が他の研究者に活用された状況について、次の(1)、(2)の項目ごとに具体的かつ明確に記述してください。

### (1) 学界への貢献の状況（学術研究へのインパクト及び関連領域のその後の動向、関連領域への関わり等）

国立情報学研究所・山本教授のグループ

特別推進研究で開発した量子ドットを用いた単一光子／エンタングル光子対の発生技術が、世界の多くの研究機関で取り上げられ、フォローアップの研究が現在も発展している。2(2)項にリストアップした文献(2)(3)(7)の論文引用数がこの事実を物語っている。また、同じく特別推進研究で開発した量子ドットスピンの光パルス制御技術（QuDOS）も世界の多くの研究機関で取り上げられ、追試の研究が現在も行なわれている。2(2)項にリストアップした文献(1)(5)の引用数がこの事実を裏付けている。

国立情報学研究所・根本教授のグループ

特別推進研究の理論研究からの研究成果は、学界への貢献上2つの点で大きな貢献があった。1つは、量子情報におけるシステム概念の導入とスケラビリティ概念の確立である。量子情報システム概念とそのスケラビリティの重要性が本研究課題によって理論的に明らかになったことで、量子コンピュータや量子通信などの大規模なシステムにおいて、必須の概念として定着した。その後の量子コンピュータの実現化研究においては、米国のGoogleが主導する量子コンピュータ開発など各国が進める量子コンピュータ開発においても、スケラビリティ概念が必須として進められていることがわかる。国内においても、2009年からはじまった最先端研究開発支援プログラム「量子情報処理プロジェクト」などの量子情報処理や量子通信に係る実現化研究で、スケラビリティに基づいた研究が行われるようになった。

2つめは量子系のハイブリッド化である。理論が主導で始まった量子系と組み合わせでハイブリッド化する考え方が、本研究課題を通して様々な物理系の実証研究に広がり、新しい量子情報研究の展望を開いた。終了時では、実験的なレベルでのハイブリッドの実証はまだ難しい部分もあったが、本特別推進研究終了後に、様々な系をハイブリッドとして、その長所を取り出したり、組み合わせることで新しい量子系を生み出す方法が大きく進展した。量子コンピュータや量子通信などでの応用だけでなく、現在注目を集めている量子強結合や量子巨視系での新しい物理、また量子センサーや量子トランスジューサーへの応用など、幅広く新しい研究潮流を生み出した。国内では平成27年度より開始された新学術領域研究「ハイブリッド量子科学」で、新しい量子科学の地平へと昇華し、スピン・電荷・フォノン・フォトンといった様々なハイブリッドを、それを支える材料も含めて新しい量子科学の可能性を開拓するに至っている。

慶應義塾大学・伊藤教授のグループ

特別推進研究で開発され、ドナーアンサンブルのコヒーレンス延長に高く貢献した慶應義塾大学のSi-28安定同位体操作技術が、研究期間終了後、シリコン中の単一リンドナーに対しても非常に有効ということがわかった。その結果、シリコン量子計算を開発する世界中の研究者が慶應義塾大学からSi-28単結晶を取得することを希望するようになった。慶應のシリコン同位体は、すでに英UCL、蘭デルフト工科大学、米プリンストン大学、米ウィスコンシン大学、コペンハーゲン大学、豪ニューサウスウェールズ大学、東大などで用いられていて、現時点では二つの電子を並べて、初期化・操作・読み出しを行ったシリコン2量子ビット演算まで成功している。

NTT物性科学基礎研究所・量子電子物性研究部・超伝導量子物理研究グループ（仙場氏）

特別推進研究で開始された、超伝導量子回路を使い可能となった共振器量子電磁力学実験(回路QED)や、異なる量子系間でのハイブリッド量子系の実験は、仏CEA-Saclay研、ウィーン工科大、デルフト工科大、シカゴ大、オックスフォード大、MIT、メリーランド大、ハーバード大、豪RMIT大、東京大学、中国科学技術大学、理研の研究者らによって活用され、量子系間の結合強度の増大やハイブリッド量子系の物理の多様性を広げる事に貢献した。これらはまた、量子コンピュータあるいは量子通信で必要とされる量子メモリの研究を刺激する事にもつながった。超伝導磁束量子ビットのデコヒーレンスに関する研究は、研究期間終了後、量子ビットのコヒーレンス寿命を1桁以上改良することに貢献した。

## 2. 特別推進研究の研究成果が他の研究者により活用された状況（続き）

(2) 論文引用状況（上位10報程度を記述してください。）

## 【研究期間中に発表した論文】

No	論文名・著者名・発行年・ページ数等	日本語による簡潔な内容紹介	引用数
1	D. Press, T. D. Ladd, B. Zhang, and Y. Yamamoto, "Complete quantum control of a single quantum dot spin using ultrafast optical pulses," Nature 456, 218-221 (November 2008).	非共鳴誘導ラマン散乱光パルスにより、量子ドットスピンの初期化、1ビットゲート、測定ができることを示した実験を報告した。	405
2	S. Kako, C. Santori, K. Hoshino, S. Gotzinger, Y. Yamamoto and Y. Arakawa, "A gallium nitride single-photon source operating at 200 K," Nature Materials 5, 887-892 (November 2006).	励起子の束縛エネルギーの大きなGaNの量子ドットから、高温でも単一光子を発生できることを示した実験結果を報告した。	239
3	D. Press, S. Goetzinger, S. Reitzenstein, C. Hofmann, A. Löffler, M. Kamp, A. Forchel, and Y. Yamamoto, "Photon antibunching from a single quantum dot-microcavity system in the strong coupling regime," Phys. Rev. Lett. 98, 117402 (March 2007).	単一量子ドットとマイクロキャビティの強結合下での単一光子発生を実現した実験を報告した。	216
4	A. M. Tyryshkin, S. Tojo, J. J. L. Morton, H. Riemann, N. V. Abrosimov, P. Becker, H.-J. Pohl, T. Schenkel, M. L. W. Thewalt, K. M. Itoh, and S. A. Lyon, "Electron spin coherence exceeding seconds in high-purity silicon," Nature Materials 11, 143-147 (December 2011).	シリコン中で電子スピン量子ビットを用いた量子計算を実行する場合、電子スピンのコヒーレンスがどれほど保たれるか？を調べた。特に慶應が作製したSi-28安定同位体単結晶を用いれば、量子計算の実行に十分な数秒ものコヒーレンスが保たれることを示した。	165
5	D. Press, K. De Greve, P. L. McMahon, T. D. Ladd, B. Friess, C. Schneider, M. Kamp, S. Höfling, A. Forchel, and Y. Yamamoto "Ultrafast optical spin echo in a single quantum dot," Nature Photonics 4, 367-370 (April 2010).	量子ドットスピンのデコヒーレンス時間が、コヒーレント光パルスを用いたスピンエコー法により、1 nsec から $3\mu\text{sec}$ へ改善されたことを示した実験を報告した。	135
6	T. D. Ladd, P. van Loock, K. Nemoto, W. J. Munro, and Y. Yamamoto, "Hybrid quantum repeater based on dispersive CQED interactions between matter qubits and bright coherent light," New Journal of Physics 8, 184 (September 2006).	コヒーレント光を用いた量子通信の新しい方法の提案について、具体的な系を用いて理論的に検証した。	103
7	D. Englund, A. Faraon, B. Zhang, Y. Yamamoto, and J. Vuckovic, "Generation and transfer of single photons on a photonic crystal chip," Optics Express, 15, 5550 (April 2007).	フォトニック結晶に埋め込まれた単一量子ドットからの単一光子の発生と伝送を実証した実験を報告した。	103
8	K. Kakuyanagi, T. Meno, S. Saito, H. Nakano, K. Semba, H. Takayanagi, F. Deppe, and A. Shnirman, "Dephasing of a superconducting flux qubit," Phys. Rev. Lett. 98, 047004 (January 2007).	ハーンエコー測定より、磁束量子ビットの位相緩和率 ( $1/T2_{\text{echo}}$ ) がバイアス磁場に比例して増大することが判った。これは、磁束量子ビットのデコヒーレンスの主因は磁束の $1/f$ 揺らぎであることを強く示唆する。	102
9	F. Deppe, M. Mariantoni, E. P. Menzel, A. Marx, S. Saito, K. Kakuyanagi, H. Tanaka, T. Meno, K. Semba, H. Takayanagi, E. Solano, and R. Gross, "Two-photon probe of the Jaynes-Cummings model and controlled symmetry breaking in circuit QED," Nature Physics 4, 686 - 691 (June 2008).	強くドライブされた磁束量子ビット・マイクロ波共振器系に関する1光子および2光子遷移の測定からパリティ対称性の破れが観測された。これは、原子系と同様に、人工原子回路QED系でも選択則や対称性の議論が成り立つことを示す結果である。	96
10	H. Wu, R. E. George, J. H. Wesenberg, K. Molmer, D. I. Schuster, R. J. Schoelkopf, K. M. Itoh, A. Ardavan, J. J. L. Morton, and G. A. D. Briggs: "Storage of multiple coherent microwave excitations in an electron spin ensemble," Phys. Rev. Lett. 105, 140503 (September 2010).	シリコン中のリンドナーアンサンブルにマイクロ波パルストレインを照射し、その情報をアンサンブルのリンで保存し、その後、スピンエコーによって同様のパルストレインを読み出すことに成功した。	95

## 【研究期間終了後に発表した論文】

No	論文名	日本語による簡潔な内容紹介	引用数
1	X. Zhu, S. Saito, A. Kemp, K. Kakuyanagi, S. Karimoto, H. Nakano, W. J. Munro, Y. Tokura, M. S. Everitt, K. Nemoto, M. Kasu, N. Mizuochi, and K. Semba, "Coherent coupling of a superconducting flux qubit to an electron spin ensemble in diamond," Nature 478, 221-224 (October 2011).	超伝導磁束量子ビットとダイヤモンドの NV 中心スピン集団の系で、単一エネルギー量子のコヒーレントな交換振動（真空ラビ振動）の観測に成功した報告。その後、同種でない複数の量子系の間での「ハイブリッド量子系」の研究が世界的に盛んになるきっかけとなった論文の一つである。	161
2	K. De Greve, L. Yu, P. L. McMahon, J. S. Pelc, C. M. Natarajan, N. Y. Kim, E. Abe, S. Maier, C. Schneider, M. Kamp, S. Höfling, R. H. Hadfield, A. Forchel, M. M. Fejer, and Y. Yamamoto, "Quantum-dot spin-photon entanglement via frequency downconversion to telecom wavelength," Nature 491, 421-425 (November 2012).	InAs 量子ドット中の電子2つとホール1つからなるトライオン状態から、光子を1つ放出して電子1つの状態へ遷移する過程を用いて、スピン-光子量子もつれ状態が生成できることを実験的に初めて示した。	112
3	K. De Greve, P. L. McMahon, D. Press, T. D. Ladd, D. Bisping, C. Schneider, M. Kamp, L. Worschech, S. Höfling, A. Forchel, and Y. Yamamoto, "Ultrafast coherent control and suppressed nuclear feedback of a single quantum dot hole qubit," Nature Physics 7, 872-878 (August 2011).	量子ドットにトラップされたホールスピンに対して非共鳴誘導ラマン散乱パルス光による初期化と1ビットゲートが達成できることを初めて実験的に示した。	102
4	C. Schneider, A. Rahimi-Iman, N. Y. Kim, J. Fischer, I. G. Savenko, M. Amthor, M. Lerner, A. Wolf, L. Worschech, V. D. Kulakovskii, I. A. Shelykh, M. Kamp, S. Reitzenstein, A. Forchel, Y. Yamamoto, and S. Höfling, "An electrically pumped polariton laser," Nature 497, 348-352 (May 2013).	マイクロキャビティ中の励起子ポラリトン凝縮体を電流励起で実現できることを示した実験を報告した。	100
5	J. T. Muhonen, J. P. Dehollain, A. Laucht, F. E. Hudson, R. Kalra, T. Sekiguchi, K. M. Itoh, D. N. Jamieson, J. C. McCallum, A. S. Dzurak, and A. Morello, "Storing quantum information for 30 seconds in a nanoelectronic device," Nature Nanotechnology 9, 986-991 (October 2014).	研究期間中のシリコン中の電子スピン研究はすべてアンサンブルであったが、この論文では単一リードナーの電子スピンの初期化・操作・読み出しを行い、特に Si-28 ウエハーを用いることで、コヒーレンスが 30 秒以上に伸ばせることを示した。	57
6	N. C. Jones, R. Van Meter, A. G. Fowler, P. L. McMahon, J. Kim, T. D. Ladd, and Y. Yamamoto "Layered architecture for quantum computing," Phys. Rev. X 2, 031007 (July 2012).	QuDOS プラットフォームを物理層とし、その上にトポロジカル表面コードを量子誤り訂正層として載せて、誤り耐性量子コンピュータを製作した時のリソースとパフォーマンスを理論的に明らかにした。	57
7	M. Veldhorst, J. C. C. Hwang, C. H. Yang, A. W. Leenstra, B. de Ronde, J. P. Dehollain, J. T. Muhonen, F. E. Hudson, K. M. Itoh, A. Morello, and A. S. Dzurak, "An addressable quantum dot qubit with fault-tolerant control-fidelity," Nature Nanotechnology 9, 981-985 (October 2014).	Si-28 ウエハー上に微細加工技術によりアルミナ絶縁膜や金属電極の位置を制御し、金属ゲート電極の下に反転層として溜め込まれたたった一個の電子スピンを用いて量子計算が実行できることを示した。	47
8	N. C. Jones, J. D. Whitfield, P. L. McMahon, M-H. Yung, R. Van Meter, A. Aspuru-Guzik, and Y. Yamamoto, "Faster quantum chemistry simulation on fault-tolerant quantum computers," New J. Phys. 14, 115023, (November 2012).	誤り耐性量子コンピュータで、量子化学計算を行なうためのアーキテクチャーを理論的に提案し、この性能を評価した。	26
9	S. Utsunomiya, K. Takata, and Y. Yamamoto, "Mapping of Ising models onto injection-locked laser systems," Opt. Express 19, 18091-18108 (September 2011).	イジングモデルを注入同期レーザネットワークにマッピングするプロトコルを提案した。	17
10	J. S. Pelc, Q. Zhang, C. R. Phillips, L. Yu, Y. Yamamoto, and M. M. Fejer, "Cascaded frequency upconversion for high-speed single-photon detection at 1550 nm," Optics Letters, 37, 476 (February 2012).	波長 1,5 $\mu\text{m}$ の単一光子を低雑音で効率よく測定する周波数変換技術を実現した。	16

### 3. その他、効果・効用等の評価に関する情報

次の(1)、(2)の項目ごとに、該当する内容について具体的かつ明確に記述してください。

#### (1) 研究成果の社会への還元状況（社会への還元の程度、内容、実用化の有無は問いません。）

量子コンピュータ技術は、特別推進研究終了後5年が経過した現在でも、未だに基礎研究段階にあり社会実装に至っていない。この点は、大変遺憾なことであり、反省しなければならない。一方、特別推進研究の発展形として出現した量子人工脳に関しては、実機開発に目処が立ち、3年後にはインターネットを介した量子計算サービスを開始できると期待している（国立情報学研究所・山本）。

丸善ライブラリー（新書）「ようこそ量子」の出版や、インターネット上での量子情報研究のアウトリーチを続け、研究成果の意義を解説することで、量子情報科学・技術に関する社会的なリテラシーの向上に努めた。「量子」に関する国民の関心は確実に上がってきており、ラジオなどのメディアでも「量子」が注目されるようになってきている（国立情報学研究所・根本）。

### 3. その他、効果・効用等の評価に関する情報（続き）

#### (2) 研究計画に関与した若手研究者の成長の状況（助教やポスドク等の研究終了後の動向を記述してください。）

国立情報学研究所の山本教授のグループにおいては、博士課程大学院生 8 名および海外共同研究員 11 名が参加した。博士課程大学院生の進路は、国研研究員 1 名、企業の基礎研究所研究員 1 名、企業 4 名、国家公務員 1 名、および起業 1 名である。海外共同研究者の進路は、准教授 1 名、研究員 4 名、博士研究員 4 名、企業 1 名、起業 1 名である。

国立情報学研究所の根本教授のグループにおいては、日本人 1 名を含む研究員 6 名が参加した。海外からの内訳は、英国 1 名、米国 1 名、豪州 2 名、シンガポール 1 名（日本人）、カナダ 1 名であった。進路はそれぞれ、大学の研究員 1 名、助教 2 名、企業の基礎研究所シニア研究員 1 名、政府アナリスト 1 名、高校教師 1 名（その後特任准教授に就任）である。また、研究に参加した大学院生（国費留学生） 1 名の博士修了後の進路は、理研の研究員であった。

慶應義塾大学の伊藤教授のグループにおいては、研究員 1 名、博士課程大学院生 5 名が参加した。研究員 1 名の進路は大学の助教、博士課程大学院生の進路は、大学の助教 3 名、大学の研究員 1 名、産総研の研究員 1 名である。

NTT 物性科学基礎研究所の仙場氏率いる量子電子物性研究部・超伝導量子物理研究グループにおいては、日本人 5 名を含む研究員 10 名が参加した。海外からの内訳は、スウェーデン 1 名、ドイツ 2 名、中国 2 名であった。進路はそれぞれ、大学教授 5 名、国研研究員 1 名、企業の基礎研究所研究員 3 名、企業 1 名である。また、研究に参加した大学院生 1 名の博士修了後の進路は、大学助教であった。

以上、本研究計画に関与した若手研究者は、本研究計画を通して確実にスキルアップを達成し、キャリアのステップアップを行ったと考えることができる。