

令和 5 年 6 月 22 日現在

機関番号：12701

研究種目：挑戦的研究（開拓）

研究期間：2019～2022

課題番号：19H05519・20K20441

研究課題名（和文）ダイヤモンド量子コンピュータへ向けた光シフト制御万能ホロノミック量子ゲート

研究課題名（英文）Universal holonomic quantum gate with optical shift control for diamond quantum computers

研究代表者

小坂 英男（Kosaka, Hideo）

横浜国立大学・大学院工学研究院・教授

研究者番号：20361199

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 19,900,000 円

研究成果の概要（和文）：集積量子ビットの個別制御を実現するため、本研究ではダイヤモンド窒素空孔（NV）中心を用い、レーザー光で各量子ビットにアクセスする技術を開発した。NV中心にレーザー光を照射して幾何学量子ビットの補助準位を個別に周波数シフト（光シフト）させ、これにマイクロ波を照射し共鳴した周波数シフトを示すNV中心だけを選択的かつ動的にホロノミック量子ゲート操作に成功した。さらに隣接NV間の磁気双極子相互作用を利用した選択的二量子ゲートにより、多量子ビットの任意の操作が可能な万能量子ゲート操作に成功した。これにより、100万個程度の集積量子ビットへの個別の書き込み、ゲート操作、読み出しを実配線なしに可能とした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

光波とマイクロ波の協同効果により、光の回折限界を遥かに上回るナノメートルレベルの局所的な固体中での電子スピン選択量子ゲート操作は、量子情報・量子光学・原子光学・磁気共鳴・スピン物性・量子ドット・格子欠陥などを包含する極めて学際的・独創的な分野を創成する。産業応用上では、量子コンピュータの実現に向けて致命的な課題となっている高密度集積された量子ビットへの個別制御線の問題を根本的に解決するという高い意義を有する。

研究成果の概要（英文）：To realize individual control of integrated qubits, we developed a technique to access each qubit by laser light using diamond nitrogen vacancy (NV) centers. The NV centers showing the resonant frequency shift were selectively and dynamically manipulated by the holonomic quantum gating technique. Furthermore, we have succeeded in manipulating a universal quantum gate that enables arbitrary manipulation of multiple qubits by selective two-qubit quantum gating using magnetic dipole interactions between adjacent NVs. This enables individual write, gate manipulation, and readout of about one million integrated qubits without real wiring.

研究分野：量子情報物理学

キーワード：量子メモリ ダイヤモンド 量子ゲート 光シュタルクシフト ホロノミック 量子ストレージ 量子情報 量子コンピュータ

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

1. 研究開始当初の背景

光、超伝導、シリコン、冷却原子といった様々な量子系による万能量子コンピュータが研究されているが、集積された多数の量子ビットの個別制御が難しいという致命的な問題がある。超伝導量子コンピュータの開発競争が世界中で過熱しているが、現状のスーパーコンピュータの性能を凌駕するために最低限必要とされる 100 万量子ビットを構成するためには、量子ビットを個別制御するための配線問題が深刻な課題である。シリコン量子コンピュータでは、物理的サイズは 10nm 程度と小さいものの、配線だけでなくゲートの微細化も課題である。一方、ダイヤモンド NV 中心は量子状態を長く安定に保持することができ、量子ビットの個別制御により、量子コンピュータや量子ストレージとして理想的なプラットフォームとなることが期待できる。

2. 研究の目的

本研究は安定した量子状態を実現するダイヤモンドの NV 中心をプラットフォームとし、レーザー光で各量子ビットにアクセスする手法により、量子ビットや量子メモリの個別制御問題を根本的に解決する。独自の幾何学量子ビットとこれを用いた量子テレポーテーション転写の基礎技術を応用し、量子ビットの操作そのものは高い忠実度の得られるマイクロ波共鳴を用い、光は量子ビットを個別選択するための局所的かつ動的なナノマグネットとして利用する、前例の全くない独自の手法を新たに提案する。

3. 研究の方法

高密度に集積された NV 中心にレーザー光を照射することにより、独自に考案した幾何学量子ビットの補助準位を個別に周波数シフト（光シフト）させる（図 1）。これにマイクロ波を照射すると、これに共鳴した周波数シフトを示す NV 中心だけが選択的かつ動的にホロミック量子ゲート操作される。さらに隣接 NV 間の磁気双極子相互作用を利用すると、二量子ゲートが得られ、多量子ビットの任意の操作が可能な万能量子ゲートに発展する。これにより、100 万個程度の集積量子ビットへの個別の書き込み、ゲート操作、読み出しを配線なしに可能とする。

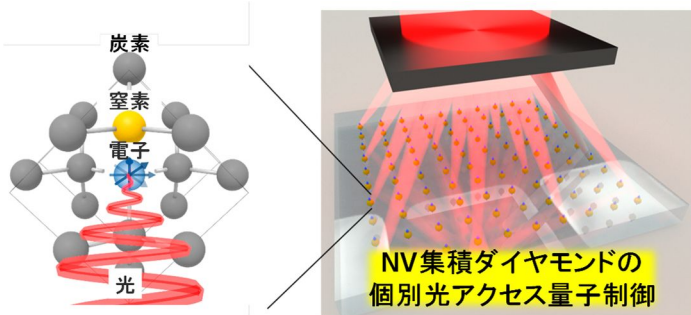


図 1. ダイヤモンド量子コンピュータの概念図。大規模集積された NV 中心の単一電子スピンを光で局所的に周波数シフトさせ、これに共鳴するマイクロ波で個別に量子状態の書き込み、ゲート操作、読み出しを行う。

達成目標と研究計画 ダイヤモンド万能量子コンピュータの実現に向け、光シフトとマイクロ波共鳴の協同効果による集積可能なダイヤモンド NV 中心の個別かつ動的なアクセスが可能な万能量子ゲートの実現を目標とした。本目標達成に向け、以下の要素技術を順次実現した。

- (1) 光シュタルクシフトにより個別に周波数制御された NV 中心の選択的ホロミック単一量子ゲート操作
- (2) NV 中心の選択的な量子状態の書き込み・読み出し
- (3) NV 中心の選択的な二量子ゲート操作による窒素核スピンの個別書き込みと個別読み出し

4. 研究成果

選択的ホロミック量子ゲートの原理

【概要】NV 中心の準位構造を図 2 に示す。NV に局在するスピン 1 の三重項電子が形成する V 型の三準位 ($m_s = \pm 1, 0$) のうち、エネルギー縮退する二準位 ($m_s = \pm 1$) を独自の幾何学量子ビットとし、ゼロ磁場分裂 (2.87GHz) だけ低いエネルギーの補助準位 $|0\rangle_s (m_s=0)$ を介してホロミック (幾何学的) 量子ゲート操作を行った。

【詳細】補助準位 $|0\rangle_s$ を制御光で光シュタルクシフトさせることで、光電場に依存したゲート操作を行う(図 3a)。NV 中心に光が当たっているときには量子ビットが回転し、当たっていないときには量子ビットは元の状態に留まる。光学励起状態にもスピン 0 に対応する状態 $|E_y\rangle$ があり、温度 10K 以下では $|E_y\rangle - |0\rangle_s$ 間にスピン保存のコヒーレントな光学遷移が存在する。 $|E_y\rangle - |0\rangle_s$ 間の光共鳴周波数から離調を加えたコヒーレント光

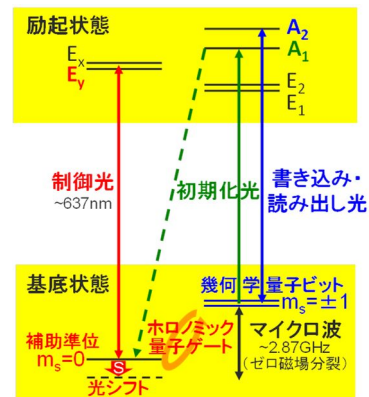


図 2. ダイヤモンド NV 中心の準位構造。E_y 制御光で単一 NV の補助準位を光シフトさせ、そのゼロ磁場分裂に共鳴するマイクロ波で幾何学量子ビットをホロミック量子ゲート操作する。A₁ 初期化光、A₂ 書き込み光で初期化し、書き込み、読み出す。

を NV に印加すると光吸収は抑制され、代わりに $|0\rangle_s$ および $|E_y\rangle$ の両者に光シュタルクシフトが生じる(図 3b)。光シュタルクシフト量は、レーザーの離調 Δ_L とパワー、または、光 Rabi 周波数 Ω_L に依存し、 $\Delta_s = \Omega_L^2/4 \Delta_L$ ($\Delta_L \ll \Omega_L$) で近似される(図 3d)。光シュタルクシフトは量子ビット空間に作用しないため、光シュタルクシフト単体では量子ビットのゲート操作にならない。一方で、明空間のダイナミクスは共鳴周波数のシフトによって光電場に依存する。このとき、単なるマイクロ波の周波数選択による選択的スピン操作が可能だが、高い選択性を得るためにはマイクロ波ラビ周波数 Ω_{MW} は周波数シフト Δ_s より十分に小さくなければならない。しかし、現実的には光吸収を抑制するための $\Delta_L \ll \Omega_L$ の条件を満たす必要があり、周波数シフト Δ_s は大きくできない。また、 $|\pm 1\rangle_s$ には環境核スピンとの超微細相互作用による不均一広がりがあり、 Ω_{MW} を小さくできない。そこで、有限な周波数差でも厳密に回転、静止を切り換えられる位相交代マイクロ波(パルス間で位相シフトし、マイクロ波の振幅を正負反転)を用いたゲートを開発した。光シュタルクシフトがない場合には、 $|B\rangle_s$ はパルスの前半で明空間を大円で大円回転した後、パルスの後半で逆回転して最終的に回転が相殺される(図 3e)。一方で光シュタルクシフトがある場合には、 $|B\rangle_s$ は明空間をショートカットした軌道で回り、 π の字を描いて $|B\rangle_s$ に戻る(図 3f)。結果として $|B\rangle_s$ は辿った経路の立体角に比例した位相を得る。

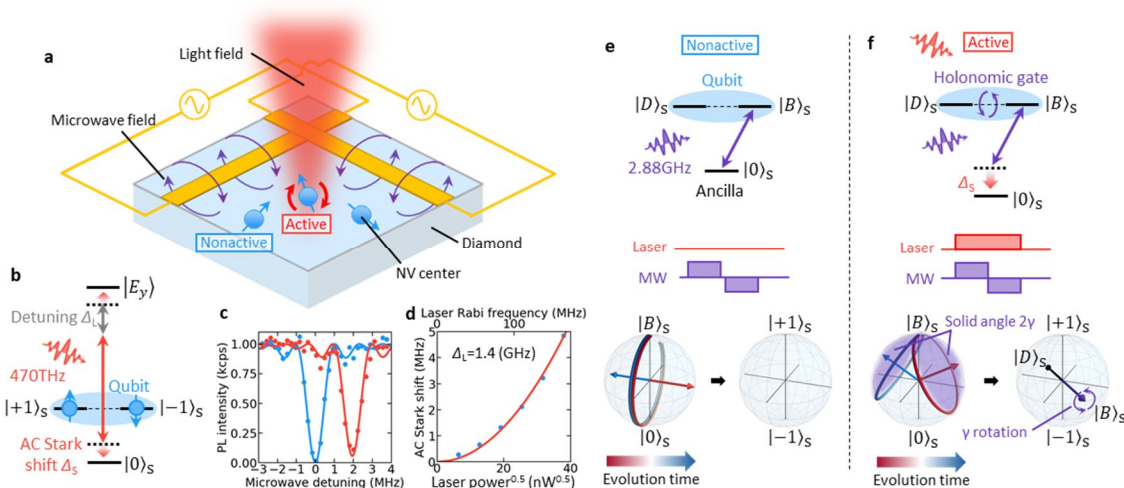


図 3. ダイヤモンド NV 中心の光選択万能量子ゲートの概略。a, 光選択万能量子ゲートの概略図。光電場が印加されている NV 中心のみマイクロ波のゲート操作が活性化する。b, NV 中心の電子構造。磁気量子数 ± 1 準位を量子ビットの基底とする。補助的な $|0\rangle_s$ 準位は離調のついたレーザーによって光シュタルクシフトする。c, 光シュタルクシフトによる ODMR スペクトルの周波数シフト。d, 光シュタルクシフトの軌道ラビ周波数依存性。e, 光電場非印加時のスピンドイナミクス。交代マイクロ波によって明状態は明状態 0 状態間を大円で大円に回転し元の状態に戻る。f, 光電場非印加時のスピンドイナミクス。交代マイクロ波と光シュタルクシフトによって π の字に動いて戻ることによって位相を得る。結果的に量子ビットを明状態回りに π の角度で回転させる。

(1) NV 中心の選択的なホロノミック単一量子ゲート操作

【概要】光照射により補助準位を光シフトさせることでゼロ磁場分裂を変化させ、幾何学量子ビットのマイクロ波共鳴周波数を個別かつ動的に変化させることで、選択した量子ビットだけを共鳴的にホロノミック量子ゲート操作することに成功した。レーザー光を用いた局所的な軌道の光シュタルクシフトを誘起し、これに共鳴するマイクロ波を用いたスピンのホロノミック量子ゲート操作を行うことで、**NV 中心の電子スピンの局所的かつ正確な万能ホロノミック量子ゲートを実現した**。量子ビット空間とは異なる補助空間で特定の軌道を選択し、マイクロ波強度や離調の変動に耐性のある幾何学的量子ゲートを導入することで、高い操作忠実度を実現した。

(2) NV 中心の選択的な量子状態の書き込み・読み出し

【概要】上記と同様の原理を応用し、個別 NV の電子スピンへの量子状態の準備(スピン初期化)書き込み(スピン操作)ならびに読み出し(スピン検出)も実現した。

【詳細】上述の原理に基づいて実装した、光選択された万能ホロノミック単一量子ゲートを評価するため、パウリの X, Y, Z ゲートに対して量子プロセストモグラフィーを行った。パウリの X, Y, Z ゲートは π の回転であるため、 $\Omega_{MW} = 3 \Delta_s$, $t_{MW} = 1/\Delta_s$ を満たす必要がある。ここでは、現状のマイクロ波セッアップに依存するマイクロ波ラビ周波数の制限から、光シュタルクシフト量は 2MHz に設定し、 $\Omega_{MW} = 2 \times 3 \text{ MHz}$, $t_{MW} = 500 \text{ ns}$ とした。レーザーオフ、オンの 2 極化した状況について同じマイクロ波照射での量子プロセスを測定した結果、2 極化状況で 90% 以上の高い忠実度を示した(図 4a,b,c)。また、ゲート操作と同様の位相交代マイクロ波によって**光選択可能な任意量子ビット状態への準備(図 4d)、任意量子ビット状態の読み出し(図 4e)を実証した**。また、光選択可能な初期化が可能であることを示した(図 4f)。さらに、**光選択ゲートを用いてスピネコーによる量子状態の保持を実証した(図 4g)**。

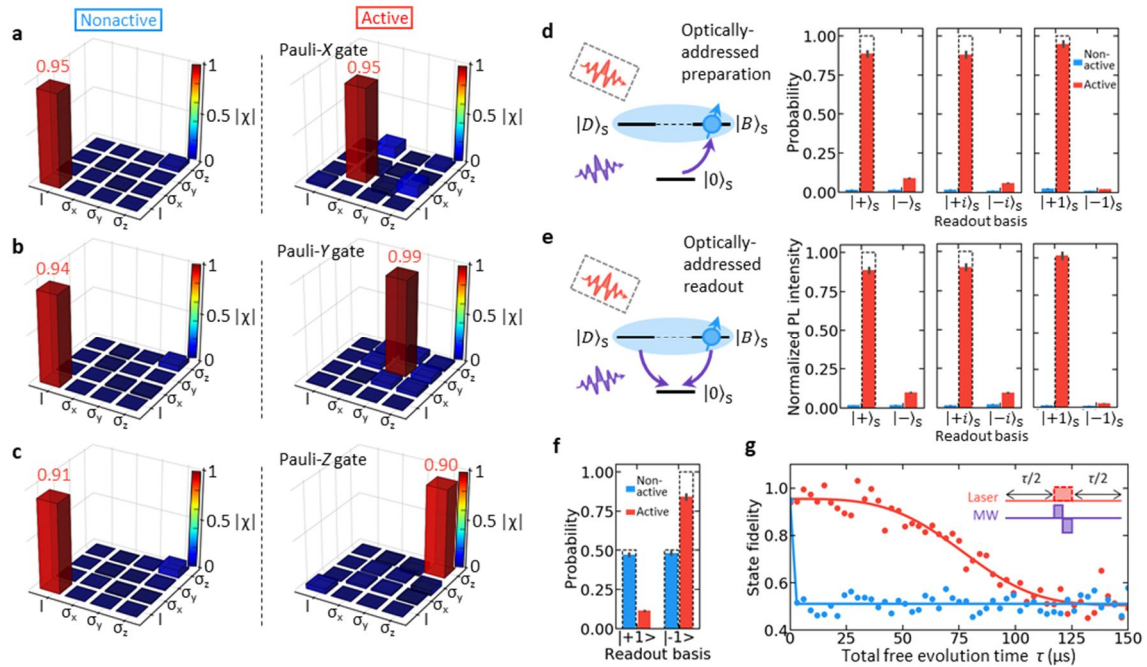


図 4. 光選択ホロノミック単一量子ゲート。a, b, c, 光選択パウリ X, Y, Z ゲート。左にレーザーをオフにしたとき、右にレーザーをオンにしたときの量子プロセスモグラフィーの結果を示す。d, 光選択量子状態準備。e, 光選択量子状態読み出し。f, 光選択量子状態初期化。完全混合状態を用意した後、レーザーをオフ、オンにした場合の初期化シーケンス後の状態分布を示す。g, 光選択パウリ Y ゲートを用いたスピンエコー。右上の挿入図にパルスシーケンスを示す。

(3) NV 中心の選択的な二量子ゲート操作による窒素核スピンへの個別書き込みと個別読み出し

【概要】光アクセスによる個別 NV の窒素核スピンへの量子状態の書き込み、量子ゲート操作、読み出しを行った。窒素 (^{14}N) の核スピン (スピン 1) を電子と同様の幾何学構造 (V 型構造) をもつ量子バッファとすることで、NV の個別書き込みと個別読み出しを可能とした。

【詳細】NV 中心には軌道励起状態に E_x , E_y 以外にも軌道とスピンの混成した A_1 , A_2 準位があり、各々別の目的で利用した (図 2)。最初に A_1 準位に共鳴するレーザー光 (A_1 初期化光) で全ての NV 中心の電子スピンを補助準位 ($m_s=0$) に初期化した。**NV 中心の選択的な窒素核スピンへの個別書き込み**は、 E_y 制御光で光シフトしたゼロ磁場分裂に共鳴するマイクロ波で選択した NV の電子だけを補助準位 ($m_s=0$) から幾何学量子ビット準位 ($m_s=\pm 1$) に遷移、 A_2 準位に共鳴するレーザー光 (A_2 書き込み光) を用いた CPT (コヒーレントポピュレーショントラップ) により、幾何学量子ビットを所望の量子状態に設定、マイクロ波およびラジオ波による磁気共鳴操作により電子スピンから窒素の核スピンへと状態転写、の順で行った。**NV 中心の選択的な窒素核スピンへの個別読み出し**は、光シフトとマイクロ波共鳴で特定の NV だけを選択、窒素の核スピンから電子スピンへと状態転写、 A_2 書き込み光を用いた発光により電子の状態を読み出し、の順で行った。この際、窒素を補助量子とした射影的シングルショット (量子非破壊) 測定により、読み出し効率をほぼ 100% とした。

さらに、NV 中心の選択的な二量子ゲート操作を進化させ、**NV 選択的な窒素と電子の量子もつれ生成**を行った (図 5)。初期状態は $|+1, 0\rangle_{S,N}$ に用意した。上記と同様の手法で光選択的に電子を $|0\rangle_S$ へ移動する。 $|0\rangle_S$ のとき、窒素核スピンは四重極子分裂によって電子と同様に三準位構造を持つため、電子スピン条件付きの窒素核スピンの万能な操作が可能である。窒素核スピンを $|+\rangle_N$ に変えたあと、DCNOT (ダブル CNOT) 操作を行うことでもつれ状態 $|+1, -1\rangle_{S,N} + |-1, +1\rangle_{S,N}$ を生成した。一方、光選択操作が非活性な状況では、電子が $|0\rangle_S$ がないので核スピンの操作も非活性であり、終状態は初期状態と同じである。得られたもつれ状態の忠実度は 85% であった。上記では条件付きの初期状態を使用した。原理的には窒素核スピンが任意状態でもよい。本光選択ゲートセットを利用することで、**NV 中心の選択的な、単一量子ゲート、二量子ゲートを含む全ての万能操作を可能とした。**

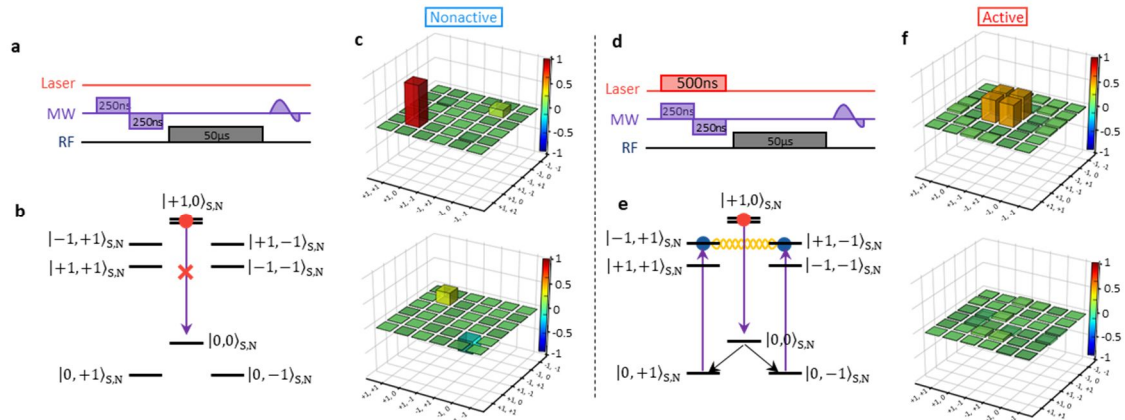


図 5. 選択的量子ゲート操作による量子もつれ生成の実証。a, d, 光選択もつれ生成のパルスシーケンス。初期状態は $|+1, 0\rangle_{S,N}$ に用意し、光選択操作によってもつれを生成する。レーザーがオフの場合には、電子スピンは $|+1\rangle_S$ に留まるため、それ以降の窒素核スピンの操作、2量子ビット操作は作用しない。レーザーがオンの場合には、電子スピンは $|0\rangle_S$ に遷移するため、核スピン操作が可能になる。続く DCNOT によってもつれ状態が生成される。b, e, 電子窒素核スピンのエネルギー準位図と状態の変移。それぞれ、レーザーオフ、オンを示す。c, f, 量子操作後の量子状態トモグラフィー。上が実部、下が虚部を示す。

・光シフト量子ゲートの空間分解能評価

光シフト量子ゲートの空間依存性を調べるために、NV 中心の中心位置からレーザー光の焦点位置を移動させて光シフト量を測定した(図 6)。光シフト量は、移動距離に応じてガウス関数で変化し、レーザー光の強度分布と一致した。本実験より、光シフト量子ゲートの現状での空間分解能は 247nm と見積もられた。さらに、大規模集積化に向け、ダイヤモンドへの窒素イオン注入および超短パルスレーザー照射による NV 中心アレイの形成に成功した。

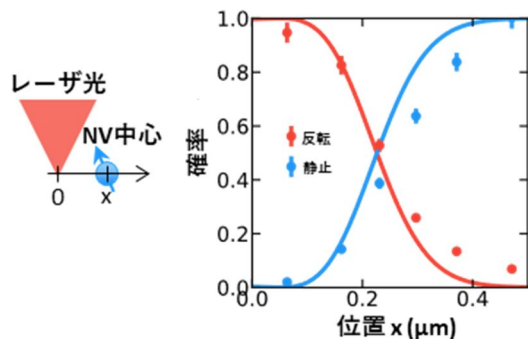


図 6. 量子ゲートの空間分解能。レーザー光の焦点位置が操作したい NV 中心位置と一致する場合には、スピン量子ビットに対して反転操作が正しく行われる。一方で、レーザー光の焦点位置が操作したい NV 中心位置から遠ざかるに従って反転操作の効力は弱まり、スピン量子ビットは静止したままとなる。図は量子ゲートの一つであるビット反転ゲートの位置依存性を示す。

インパクト、独創性、チャレンジ性 本提案は、我々独自の量子ビット構造である幾何学量子ビットの特性を生かすことにより、レーザー光で局所的に誘起された周波数シフトとマイクロ波の共鳴周波数を同期させることで、固体中の電子スピンの光波による回折限界以下の分解能とマイクロ波によるホロノミック万能量子ゲート操作を両立しようとする、全く新しい原理に基づく、斬新な光シフト制御万能ホロノミック量子ゲートを提案する他に例のない独創的な課題である。**国内外における位置づけとインパクト** レーザー光による電子スピン操作は、過去にも数多くの事例があるが、核スピンを含む万能量子操作は本研究が世界初であるだけでなく、NV 中心において世界最高忠実度を達成した。誤り率では、従来手法の1/2に低減した。さらに本手法の空間分解能は、原理的には光の回折限界に制限されないため、将来的にはNV 中心間で相互作用可能な距離である30nm以下に達することができる。NV 中心の最大の課題である拡張性を克服する現実的な手法を示した点で周辺分野に希望をもたらした。実際に、本成果は極めてインパクトの高いNature Photonicsに出版され、さらに世界的なNV 中心の権威であるTim Taminiou氏によってNews & Viewで紹介された。

学術的・産業的意義 光とマイクロ波の協同効果により、光の回折限界を遥かに上回るナノメートルレベルの局所的な固体中での選択的量子ゲート操作は、量子情報・量子光学・原子光学・磁気共鳴・スピン物性・量子ドット・格子欠陥などを包含する極めて学際的・独創的な分野を創成する。産業応用上では、量子コンピュータの実現に向けて致命的な課題となっている、高密度集積された量子ビットへの個別制御線の問題を、根本的に解決するという高い意義を有する。

今後の展望 本提案の光シフト制御万能ホロノミック量子ゲートにより、NV 中心への個別の量子状態書き込み、量子ゲート操作、量子状態読み出しが可能となり、100万規模の集積量子ビットを実配線することなく光アクセスすることが可能となる。補助量子を内蔵した幾何学的量子ビットに誤り耐性をもたせることにより、表面コードを用いた通常の量子コンピュータで必要となる多数の補助量子ビットが不要となり、大規模な万能量子コンピュータ開発への道を開く。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計7件（うち査読付論文 7件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 7件）

1. 著者名 Sekiguchi Yuhei, Matsushita Kazuki, Kawasaki Yoshiki, Kosaka Hideo	4. 巻 16
2. 論文標題 Optically addressable universal holonomic quantum gates on diamond spins	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Nature Photonics	6. 最初と最後の頁 662-666
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1038/s41566-022-01038-3	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -
1. 著者名 Kurokawa Hodaka, Yamamoto Moyuki, Sekiguchi Yuhei, Kosaka Hideo	4. 巻 18
2. 論文標題 Remote Entanglement of Superconducting Qubits via Solid-State Spin Quantum Memories	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Physical Review Applied	6. 最初と最後の頁 064039 1-19
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1103/PhysRevApplied.18.064039	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -
1. 著者名 Reyes Raustin, Nakazato Takaya, Imaike Nobuaki, Matsuda Kazuyasu, Tsurumoto Kazuya, Sekiguchi Yuhei, Kosaka Hideo	4. 巻 120
2. 論文標題 Complete Bell state measurement of diamond nuclear spins under a complete spatial symmetry at zero magnetic field	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Applied Physics Letters	6. 最初と最後の頁 194002 1-7
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1063/5.0088155	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -
1. 著者名 Nakazato Takaya, Reyes Raustin, Imaike Nobuaki, Matsuda Kazuyasu, Tsurumoto Kazuya, Sekiguchi Yuhei, Kosaka Hideo	4. 巻 5
2. 論文標題 Quantum error correction of spin quantum memories in diamond under a zero magnetic field	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Communications Physics	6. 最初と最後の頁 102 1-7
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1038/s42005-022-00875-6	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 Sekiguchi Yuhei, Yasui Yuki, Tsurumoto Kazuya, Koga Yuta, Reyes Raustin, Kosaka Hideo	4. 巻 4
2. 論文標題 Geometric entanglement of a photon and spin qubits in diamond	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Communications Physics	6. 最初と最後の頁 264 1-7
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s42005-021-00767-1	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Tsurumoto Kazuya, Kuroiwa Ryota, Kano Hiroki, Sekiguchi Yuhei, Kosaka Hideo	4. 巻 2
2. 論文標題 Quantum teleportation-based state transfer of photon polarization into a carbon spin in diamond	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Communications Physics	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s42005-019-0158-0	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Sekiguchi Yuhei, Komura Yusuke, Kosaka Hideo	4. 巻 12
2. 論文標題 Dynamical Decoupling of a Geometric Qubit	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Physical Review Applied	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevApplied.12.051001	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

〔学会発表〕 計80件 (うち招待講演 27件 / うち国際学会 9件)

1. 発表者名 小坂英男
2. 発表標題 超伝導量子コンピュータとダイヤモンド量子中継の融合による量子インターネットに向けた挑戦
3. 学会等名 第70回応用物理学会春季学術講演会 シンポジウム「量子コンピューティングデバイス技術の最前線」(招待講演)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 小坂英男
2. 発表標題 超伝導量子コンピュータとダイヤモンド量子中継の融合による量子インターネットに向けた挑戦
3. 学会等名 メタマテリアル第187委員会 2022年度第2回研究会（招待講演）
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 小坂英男
2. 発表標題 From Quantum Repeater Networks to the Quantum Internet
3. 学会等名 QUANTUM INNOVATION 2022（招待講演）（国際学会）
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 毛利駿介、レイエスラウスティン、若松恵大、加藤宙光、牧野俊晴、関口雄平、小坂英男
2. 発表標題 ダイヤモンドNV中心を用いた単一光子干渉による不可分別性の実証
3. 学会等名 日本物理学会2022年秋季大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 レイエスラウスティン、毛利駿介、若松恵大、加藤宙光、牧野俊晴、関口雄平、小坂英男
2. 発表標題 ダイヤモンド量子中継の構築に向けたNV中心単一光子の干渉
3. 学会等名 第83回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 渡辺 幹成、中里 隆也、江川直也、関口雄平、小坂英男
2. 発表標題 ダイヤモンドNV電子のゼロ磁場動的デカップリング
3. 学会等名 第83回 応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 渡辺幹成、江川直也、関口雄平、小坂英男
2. 発表標題 ダイヤモンドNV電子スピンのゼロ磁場動的デカップリング
3. 学会等名 第32回関東量子情報Student Chapter
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 江川直也、田宮志郎、渡辺幹成、小坂英男
2. 発表標題 ゼロ磁場ダイヤモンドNV中心における弱結合核スピン検出・操作手法の研究
3. 学会等名 第18回ナノテク交流シンポジウム
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 中里慎太郎、市川 公善、寺地 徳之、関口 雄平、小坂 英男
2. 発表標題 ダイヤモンドNV スピンの忠実な万能量子操作に関する研究
3. 学会等名 第18回ナノテク交流シンポジウム
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 松木愛美、上牧瑛、小野田忍、牧野俊晴、加藤宙光、関口雄平、小坂英男
2. 発表標題 超短パルスレーザーによるダイヤモンド色中心生成に関する研究
3. 学会等名 第18回ナノテク交流シンポジウム
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 毛利駿介、レイエスラウスティン、加藤宙光、牧野俊晴、関口雄平、小坂英男
2. 発表標題 ダイヤモンドNV中心から発光する単一光子による量子干渉の研究
3. 学会等名 第18回ナノテク交流シンポジウム
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 渡辺幹成、江川直也、関口雄平、小坂英男
2. 発表標題 ダイヤモンドNVスピンのゼロ磁場動的デカップリングに関する研究
3. 学会等名 第18回ナノテク交流シンポジウム
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 山本萌生、黒川穂高、藤井知、牧野俊晴、加藤宙光、関口雄平、小坂英男
2. 発表標題 超伝導光量子インターフェースに向けたダイヤモンドNV中心を用いた音波光波変換
3. 学会等名 第70回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 渡辺幹成、市川公善、寺地徳之、関口雄平、小坂英男
2. 発表標題 同位体制御によるダイヤモンドNV電子スピニコヒーレンスの向上
3. 学会等名 第70回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 レイエスラウスティン、三賢洸介、小林歩夢、上牧瑛、関口雄平、知名史博、三木茂人、加藤宙光、牧野俊晴、小坂英男
2. 発表標題 量子中継器に向けた発光・吸収による遠隔ダイヤモンド間量子もつれ生成の挑戦
3. 学会等名 日本物理学会2023年春季大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 三賢洸介、牧野俊晴、加藤宙光、関口雄平、小坂英男
2. 発表標題 ダイヤモンドNV中心における軌道励起状態操作を用いた高忠実度もつれ生成
3. 学会等名 日本物理学会2023年春季大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 若松恵大、黒川穂高、中里慎太郎、牧野俊晴、加藤宙光、関口雄平、小坂英男
2. 発表標題 ダイヤモンド単一中性電荷NV中心のコヒーレントな軌道操作
3. 学会等名 日本物理学会2023年春季大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 若松恵大、黒川穂高、中里慎太郎、牧野俊晴、加藤宙光、関口雄平、小坂英男
2. 発表標題 ダイヤモンド単一中性電荷NV中心のコヒーレントな軌道操作
3. 学会等名 第33回量子情報関東Student Chapter
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 黒川穂高、山本萌生、関口雄平、小坂英男
2. 発表標題 Remote Entanglement of Superconducting Qubits via Solid-State Spin Quantum Memories
3. 学会等名 The 13th International Symposium on Photonic and Electromagnetic Crystal Structures (PECS-XIII) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 渡辺幹成、中里隆也、江川直也、関口雄平、小坂英男
2. 発表標題 量子メモリ増加に向けた動的デカップリング核子量子ゲート操作
3. 学会等名 第31回量子情報関東Student Chapter
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 関口雄平
2. 発表標題 ダイヤモンド NV 中心を用いた光-スピン量子インターフェイス
3. 学会等名 電子情報通信学会 システムナノ技術に関する特別研究専門委員会主催 第4回研究会 「量子コンピュータの大規模集積化技術」(招待講演)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 関口雄平
2. 発表標題 ダイヤモンドにおける幾何学的スピン制御と量子中継への応用
3. 学会等名 第83回応用物理学会秋季学術講演会（招待講演）
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 関口雄平
2. 発表標題 実験講座5 量子ネットワーク
3. 学会等名 QEdサマースクール2022（招待講演）
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 黒川穂高
2. 発表標題 大規模量子コンピュータ実現に向けた量子インターフェースの開発
3. 学会等名 第32回関東量子情報Student Chapter（招待講演）
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 小坂英男
2. 発表標題 量子計算網構築のための量子インターフェース開発
3. 学会等名 ムーンショット目標6 公開シンポジウム（招待講演）
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 小坂英男
2. 発表標題 「量子コンピュータ」「量子通信」の次に来る、「量子中継ネットワーク」
3. 学会等名 NICT Quantum Camp (招待講演)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 小坂英男
2. 発表標題 量子メモリを用いた量子中継技術
3. 学会等名 第82回応用物理学会秋季学術講演会 (招待講演)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 小坂英男
2. 発表標題 Development of Quantum Interfaces for Building Quantum Computer Networks
3. 学会等名 日米量子ラウンドテーブル (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 小坂英男
2. 発表標題 量子コンピュータネットワークへ向けた挑戦
3. 学会等名 弾性波素子技術コンソーシアム研究会 (招待講演)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 小坂英男
2. 発表標題 量子計算網構築のための量子インターフェース開発
3. 学会等名 ムーンショット目標6 国際シンポジウム (招待講演)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 江川直也、中里隆也、渡辺幹成、関口雄平、小坂英男
2. 発表標題 ダイヤモンドNV中心におけるゼロ磁場下でのホロノミックな電子・炭素間操作の理論
3. 学会等名 日本物理学会第77回年次大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 渡辺幹成、中里隆也、江川直也、関口雄平、小坂英男
2. 発表標題 ダイヤモンドNV中心におけるゼロ磁場下での電子と炭素の動的デカップリングもつれ操作による量子テレポーテーション
3. 学会等名 日本物理学会第77回年次大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 黒川穂高、山本萌生、関口雄平、小坂英男
2. 発表標題 Remote entanglement of superconducting systems using solid-state spin quantum memory
3. 学会等名 APS March Meeting 2022 (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 関口雄平、松下和生、川崎愛大、小坂英男
2. 発表標題 Spatially selective universal quantum operation of a nitrogen-vacancy center in diamond
3. 学会等名 APS March Meeting 2022 (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 中里慎太郎、松木愛美、中里隆也、レイエスラウステイン、関口雄平、小坂英男
2. 発表標題 ダイヤモンドNV中心におけるゼロ磁場下での電子と炭素の排他的もつれ操作
3. 学会等名 日本物理学会2021年秋季大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 山本萌生、申秀成、佐々木遼、黒川穂高、関口雄平、野村政宏、小坂英男
2. 発表標題 量子インターフェースのためのピエゾ-音共振器のシミュレーション
3. 学会等名 日本物理学会2021年秋季大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 レイエスラウステイン、川崎愛大、松田一泰、関口雄平、加藤宙光、牧野俊晴、小坂英男
2. 発表標題 ダイヤモンドNVスピンの高忠実度ホロノミック量子ゲート
3. 学会等名 2021年度量子情報関東・関西合同Student Chapter
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 山本萌生、申秀成、佐々木遼、黒川穂高、関口雄平、野村政宏、小坂英男
2. 発表標題 量子インターフェースのためのピエゾ-音共振器のシミュレーション
3. 学会等名 2021年度量子情報関東・関西合同Student Chapter
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 黒川穂高、山本萌生、申秀成、佐々木遼、関口雄平、野村政宏、小坂英男
2. 発表標題 量子インターフェースの実現に向けたピエゾ-音共振器の電場 歪み場シミュレーション
3. 学会等名 第82回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 小坂英男
2. 発表標題 「量子通信とフォトニクス」
3. 学会等名 フォトニクス分科会ミニセミナー（招待講演）
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 小坂英男
2. 発表標題 「量子コンピュータ」「量子通信」の次に来る、「量子中継ネットワーク」
3. 学会等名 NICT Quantum Camp(NQC)（招待講演）
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 小坂英男
2. 発表標題 「量子通信、量子計算、量子コンピュータネットワークへ向けてQuantum communication and quantum computation toward quantum computer network」
3. 学会等名 ソニーミニセミナー（招待講演）
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 小坂 英男
2. 発表標題 量子インターネットへ向けた量子中継ネットワーク
3. 学会等名 電子情報通信学会 通信方式（CS）研究会「量子情報処理の新展開」（招待講演）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 小坂英男
2. 発表標題 量子インターネットへ向けた量子メモリを用いた量子中継技術の現状と展望
3. 学会等名 応用物理学微小光学研究会（招待講演）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 松下和生, 川崎愛大, 加納浩輝, 関口雄平, 小坂英男
2. 発表標題 「ダイヤモンドNV中心における光シュタルクシフトによる選択的ホロノミック量子ゲート」
3. 学会等名 日本物理学会2020年秋季大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 レイエスラウスティン, 川崎愛大, 松田一泰, 関口雄平, 加藤宙光, 牧野俊晴, 小坂英男
2. 発表標題 「ダイヤモンドNVスピンの高忠実度ホロノミック量子ゲート」
3. 学会等名 日本物理学会2020年秋季大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 三賢洸介, 若松恵大, 川崎愛大, 関口雄平, 小坂英男
2. 発表標題 「一方向量子中継に向けた幾何学量子ビットの完全ベル測定」
3. 学会等名 日本物理学会2020年秋季大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 奥村皐月, 三賢洸介, 関口雄平, 小坂英男
2. 発表標題 「発光吸収型量子中継器プロトコルのビットレート向上に向けた検討」
3. 学会等名 日本物理学会2020年秋季大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 中里隆也, レイエスラウスティン, 今池伸晃, 松田一泰, 関口雄平, 小坂英男
2. 発表標題 「ダイヤモンドNV中心における炭素核スピン量子メモリの完全ベル測定」
3. 学会等名 2020年 第81回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 若松恵大, 三賢洸介, 川崎愛大, 関口雄平, 小坂英男
2. 発表標題 「最小数の量子メモリを用いた量子中継に向けた幾何学量子ビットの完全ベル測定」
3. 学会等名 2020年 第81回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 小坂英男
2. 発表標題 総務省量子中継プロジェクトの今後の運営方針検討会
3. 学会等名 総務省検討会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 小坂英男
2. 発表標題 光・量子飛躍フラッグシッププログラム (Q-LEAP) 第5回領域会議
3. 学会等名 Q-LEAP領域会議
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 レイエスラウスティン, 中里隆也, 関口雄平, 小坂英男
2. 発表標題 ダイヤモンドNV中心における核スピン量子メモリの量子誤り訂正
3. 学会等名 日本物理学会第76回年年次大会 (2021年)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 中里隆也, 倉下滉平, 関口雄平, 小坂英男
2. 発表標題 ダイヤモンドNV中心における光子から炭素核スピンへの伝令付き量子テレポーテーション転写
3. 学会等名 日本物理学会第76回年年次大会(2021年)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 奥村皐月, 小坂英男
2. 発表標題 ダイヤモンド NV 中心を用いた発光吸収型量子中継器プロトコルによるビットレート向上に関する研究
3. 学会等名 量子インターネットタスクフォース講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 若松恵大, 小坂英男
2. 発表標題 ダイヤモンド NV 中心を用いた幾何学量子ビットの完全ベル測定
3. 学会等名 第29回関東量子情報Student Chapter 研究会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 奥村皐月, 小坂英男
2. 発表標題 ダイヤモンド NV 中心を用いた発光吸収型量子中継器プロトコルによるビットレート向上に関する研究
3. 学会等名 第29回関東量子情報Student Chapter 研究会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 三賢洸介, 小坂英男
2. 発表標題 ダイヤモンド NV 中心における軌道励起状態操作を用いたもつれ発光に関する研究
3. 学会等名 第29回関東量子情報Student Chapter 研究会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 山本萌生, 小坂英男
2. 発表標題 ダイヤモンド NV 中心における音響光学素子を用いた選択的量子操作に向けた研究
3. 学会等名 第29回関東量子情報Student Chapter 研究会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 小坂英男
2. 発表標題 ～「量子コンピュータ」「量子通信」の次に来る、「量子中継ネットワーク」～ “難しい”量子情報分野を理解し、今後のリリースの読み方がわかるようになる！
3. 学会等名 メディア向け勉強会 テーマ 『量子中継ネットワーク』（招待講演）
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 小坂英男
2. 発表標題 量子情報処理の最新動向～「量子コンピュータ」「量子通信」の次に来る、「量子中継ネットワーク」～
3. 学会等名 第4回YNU横浜経営者の会（招待講演）
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 小坂英男
2. 発表標題 「量子クラウドメモリーへの量子テレポーテーションによる量子状態転写」
3. 学会等名 第3回ポスト「京」萌芽的課題「基礎科学の挑戦」・「極限マテリアル」合同公開シンポジウム（招待講演）
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Hideo Kosaka, Yuhei Sekiguchi, Hiromitsu Kato, Tokuyuki Teraji
2. 発表標題 Toward quantum internet: A way to build a quantum repeater with geometric qubits on an NV center in diamond
3. 学会等名 Japan-Netherlands Quantum Conference（招待講演）（国際学会）
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 小坂英男
2. 発表標題 Toward quantum internet: A way to build a quantum repeater with geometric qubits on an NV center in diamond
3. 学会等名 応用物理学会新領域量子情報研究グループ研究会（招待講演）
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 小坂英男
2. 発表標題 ダイヤモンド量子セキュリティ
3. 学会等名 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」第4回領域会議（招待講演）
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 小坂英男
2. 発表標題 夢の技術・量子情報がひらく世界
3. 学会等名 NHK文化センター創立40周年記念 横浜国立大学提携講座「知の大学」(招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Hideo Kosaka
2. 発表標題 "Diamond-based quantum repeater for quantum internet"
3. 学会等名 Topical Conference on Quantum Communication and Security 2019(TCQCS 2019)(招待講演)(国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 小坂英男
2. 発表標題 量子ネットワーク関連の研究 動向
3. 学会等名 ムーンショット国際シンポジウム(招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 関口雄平, 安井優貴, 古賀悠太, 鶴本和也, 小坂英男
2. 発表標題 「ダイヤモンドNV中心における幾何学的電子スピンと放出光子のもつれ生成II」
3. 学会等名 日本物理学会2019年秋季大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 鶴本和也, 倉下滉平, 関口雄平, 小坂英男
2. 発表標題 「ダイヤモンドNV中心における光子から炭素核スピンへの選択的量子テレポーテーション転写II」
3. 学会等名 日本物理学会2019年秋季大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 今池伸晃, 川崎愛大, 中里隆也, レイエスラウスティン, 鶴本和也, 倉見谷航洋, 関口雄平, 小坂英男
2. 発表標題 「ダイヤモンドNV中心における炭素核スピンシングルショット測定」
3. 学会等名 日本物理学会2019年秋季大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 倉見谷航洋, 関口雄平, 松下和生, 鈴木智也, 新荻正隆, 加藤宙光, 牧野俊晴, 小坂英男
2. 発表標題 「量子中継システム実験に向けたダイヤモンド量子NV素子の光学的構造最適化」
3. 学会等名 日本物理学会2019年秋季大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Kohei Kurashita, Kazuya Tsurumoto, Yuhei Sekiguchi, Hideo Kosaka
2. 発表標題 "Selective quantum teleportation transfer of a photon polarization state into a carbon nuclear spin state in an NV center in diamond "
3. 学会等名 SSDM2019 (International Conference on Solid State Devices and Materials) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 倉見谷航洋, 関口雄平, 鈴木智也, 新荻正隆, 加藤宙光, 牧野俊晴, 小坂英男
2. 発表標題 「量子中継システム実験に向けたダイヤモンド量子NV素子の光学的構造最適化」
3. 学会等名 ニューダイヤモンドフォーラム第33回ダイヤモンドシンポジウム
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Yuhei Sekiguchi, Yuki Yasui, Hiromitsu Kato, Tokuyuki Teraji and Hideo Kosaka
2. 発表標題 "Quantum entanglement between a photon and a spin in diamond by resonance fluorescence under a zero magnetic field"
3. 学会等名 EU-USA-JAPAN International Symposium on Quantum Technology (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 レイエスラウスティン, 安井優貴, 鶴本和也, 関口雄平, 小坂英男
2. 発表標題 「ダイヤモンドNV中心における共鳴蛍光による光子偏光と電子スピンの量子もつれ生成に関する研究」
3. 学会等名 第15回ナノテク交流シンポジウム
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 笹崎和希, 小坂英男, 関口雄平, 倉見谷航洋
2. 発表標題 「量子情報技術におけるダイヤモンド量子素子の機能向上に関する研究」
3. 学会等名 第15回ナノテク交流シンポジウム
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 中里隆也, 今池伸晃, 松田一泰, レイエスラウスティン, 関口雄平, 小坂英男
2. 発表標題 「ダイヤモンド NV 中心における複合スピン系を用いた 量子誤り訂正に関する研究 」
3. 学会等名 第15回ナノテク交流シンポジウム
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 レイエスラウスティン, 石坂泰一, 今池伸晃, 松田一泰, 中里隆也, 関口雄平, 小坂英男
2. 発表標題 「ダイヤモンドNV中心における量子メモリ大容量化に向けた弱結合炭素のもつれ操作」
3. 学会等名 日本物理学会2020年春季大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 中里隆也, 今池伸晃, 松田一泰, レイエスラウスティン, 関口雄平, 小坂英男
2. 発表標題 「ダイヤモンド NV 中心における核スピン量子メモリの量子誤り訂正 」
3. 学会等名 日本物理学会2020年春季大会
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計7件

1. 著者名 執筆者：60名、技術情報協会	4. 発行年 2023年
2. 出版社 技術情報協会	5. 総ページ数 483
3. 書名 量子技術の実用化と研究開発業務への導入方法	

1. 著者名 小坂英男	4. 発行年 2021年
2. 出版社 日経BP	5. 総ページ数 -
3. 書名 日経クロステック「量子インターネット最大の難所は中継、“ダイヤモンド”が救世主」	

1. 著者名 小坂英男	4. 発行年 2021年
2. 出版社 ニュートンプレス	5. 総ページ数 176
3. 書名 科学雑誌Newton別冊『量子論のすべて 改訂第2版』pp.148-161 “第4章 もっと知りたい！量子論”	

1. 著者名 小坂英男	4. 発行年 2021年
2. 出版社 日経BP	5. 総ページ数 -
3. 書名 日経エレクトロニクス2021年6月号『突発、量子ネット大戦』pp.54-63 “最大の難所は量子中継 有力候補はダイヤモンド”	

1. 著者名 小坂英男	4. 発行年 2020年
2. 出版社 電波新聞社	5. 総ページ数 192
3. 書名 だれにでもできるラジオの製作 記念特大号「未来を拓く量子コンピュータと量子通信」	

1. 著者名 小坂英男、長田 昂大、倉見谷 航洋	4. 発行年 2020年
2. 出版社 日本物理学会	5. 総ページ数 70
3. 書名 日本物理学会誌第75巻第11号「ダイヤモンド中のスピン量子ビットに対する幾何学的量子ゲート」	

1. 著者名 小坂英男	4. 発行年 2019年
2. 出版社 ニュートンプレス	5. 総ページ数 192
3. 書名 科学雑誌Newton別冊「量子論のすべて 新訂版」	

〔産業財産権〕

〔その他〕

<p>横浜国立大学 小坂研究室ホームページ https://kosaka-lab.ynu.ac.jp/</p> <p>総務省委託事業 グローバル量子暗号通信網構築のための研究開発 量子中継技術 https://qurep.ynu.ac.jp/</p> <p>量子計算網構築のための量子インターフェース開発 https://moonshot.ynu.ac.jp/</p> <p>横浜国立大学 先端科学高等研究院 量子情報研究センター https://qic.ynu.ac.jp/</p>

6. 研究組織		
氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------