

令和元年9月13日現在

機関番号：12612

研究種目：若手研究(A)

研究期間：2014～2018

課題番号：26707021

研究課題名(和文)真空場を利用した単一光子スイッチ

研究課題名(英文)Single-photon switch using electromagnetic vacuum

研究代表者

鈴木 はるか(丹治はるか)(Tanji-Suzuki, Haruka)

電気通信大学・レーザー新世代研究センター・准教授

研究者番号：40638631

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 18,500,000円

研究成果の概要(和文)：光共振器中の真空場(光子を含まない電磁場)を用いた全光型単一光子スイッチの動作の根幹をなす光パルスの遅延の増大に向け、高反射ミラーを用いた光共振器を構築し、先行研究の3倍程度の強さの原子と光の相互作用が得られることを確認した。また、共振器中において高い位置精度で高密度な原子の配置を可能にするホログラフィック光トラップを構築することにより、原子と光の相互作用の強さに対する高い制御性を実現した。さらに、光共振器の安定化に用いるレーザー光が原子に与える影響を最小化するために、参照共振器を介した間接的な安定化法の実装を行った。以上により、単一光子によるスイッチング効果の観測の目途が立った。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究の成果により実現に大きく近づいた、真空場による群遅延を用いた単一光子スイッチは、光の吸収に依存する従来の方法とは全く異なる原理に基づくものであり、特に、非破壊的なスイッチングにより光子の量子状態が保持されることと、スイッチングの結果が異なる時間モードとなるため単一光子光路スイッチとして利用できることが特色である。この単一光子スイッチは、光ネットワークにおける高速・大容量化のみならず、量子情報通信技術においても重要な鍵を握るものとなることが期待される。従って、本研究の成果は今後の情報通信技術の躍進に大きく寄与し、情報通信に重度に依存した現代社会に対して重大なインパクトを与えると考えられる。

研究成果の概要(英文)：We have aimed to realize an all-optical single-photon switch using a process called vacuum-induced transparency (VIT) that utilizes the resonator vacuum field. We have constructed a high-finesse optical resonator in order to increase the group delay of light pulses in VIT, which is estimated to provide us with a three-fold enhancement in the maximum atom-photon coupling strength compared to the previous work. We have also obtained a high degree of control over the position of a holographic optical trap, which should enable precise positioning of high-density atoms within the resonator mode, thus enabling precise control over the strength of atom-photon interaction. Moreover, we have implemented an indirect method of resonator stabilization using a transfer resonator in order to minimize the effects on the atoms of a laser field used for the stabilization. All together, these achievements constitute a large step towards the realization of an all-optical single-photon switch.

研究分野：原子物理学、量子光学、共振器量子電気力学

キーワード：共振器量子電気力学 少数光子非線形光学効果

1. 研究開始当初の背景

近年、光ファイバー通信網の発達に伴い、情報通信媒体の中心が電気から光に移行しつつある。そのような中で、光ネットワークの更なる高速・大容量化に向け、情報処理用電子デバイスに置き換わる光デバイスの研究開発が急ピッチで進められている。特に、電気信号を介することなく光制御のみで動作する全光型デバイスは、周囲の電気ノイズに影響されず、また大幅な省電力化や高速動作が可能となるという特長を持ち、実用化した場合の社会への波及効果が絶大であることから多大な注目を集めている。中でも情報の高速伝送の鍵を握る要素技術の一つが全光型光路スイッチである。これまでも $\sim 10^{-16}$ J の極低光エネルギーでスイッチングする全光型スイッチの実証実験などが行われている(引用文献)が、究極的には、エネルギーの最小単位である単一光子($\sim 10^{-19}$ J)を用いたスイッチの開発が望まれる。

一方、ムーアの法則の限界を打ち破るための全く新しい情報処理技術として期待されている量子情報処理技術は、理論と実験の両側面から目覚ましい進歩を遂げている。とりわけ光子を量子ビットとして用いた量子暗号通信技術は、東京 QKD ネットワーク(引用文献)に代表されるように実用化に向けた実装が飛躍的に進んでいる。将来的に量子情報通信網が張り巡らされる場合には、単一光子に載せられた量子ビット値に応じて別の光子の光路や位相を操作する必要性が生じると予想される。上述のように、単一光子による光スイッチをはじめとする少数光子同士の相互作用を自由に扱うことのできる技術革新が、次世代通信技術にとって必要不可欠である。しかしながら、光子同士は直接相互作用できず、また一般的な非線形媒質を介しても、少数光子のように光強度が非常に弱い場合には微弱な相互作用しか生じない。そこで、いかにして少数光子で強い非線形光学効果を引き起こすか(すなわち、いかにして少数光子同士を強く相互作用させるか)ということが重要な研究課題の一つとなっている。

2. 研究の目的

本研究では、非常に反射率の高い2枚のミラーから構成される高フィネス光共振器の真空場(光子を含まない電磁場)中の冷却原子集団を用いて、全光型スイッチの究極的な形である単一光子による全光型量子スイッチの実現を目指す。このスイッチは、真空場誘起透明化(VIT)(引用文献)という現象において、光パルスの群速度が含まれる光子の数に依存して変化するという性質を利用する。スイッチングを起こす光子の有無によって系の全光子数が変化するため、スイッチされる側の光子が出力される時刻が変化することを利用してスイッチングを行う。本提案によるスイッチの手法では、スイッチされる側の光子のみならず、スイッチングを起こす光子もその量子状態を保持したまま取り出すことができるため、量子情報処理の要である量子ゲートとしての応用も期待できる。

3. 研究の方法

先行研究(引用文献)で観測された真空場誘起透明化(VIT)による群遅延は極めて小さいもの($1.7 \mu\text{s}$ のパルス幅に対して 25 ns)であったため、全光型単一光子スイッチの実現に向けては、まず群遅延を増大させることが必要である。群遅延は光共振器と原子の結合強度の増強および原子集団の光学深度の向上により増大させることが可能となる。そこで、本研究では、まず高フィネス光共振器を構築し、さらに、光共振器モード中に高密度な ^{87}Rb 原子の原子集団を準備する。続いて、VITの観測を通じて各種パラメータの最適化を行い、単一光子による単一光子のスイッチングの観測を試みる。

(1) 高フィネス光共振器の構築と安定化

光共振器と原子の結合強度の増強については、共振器中の電磁場強度の増強、すなわち、より高反射率の鏡を用いるか、または共振器の横モードの径を小さくすることにより実現可能である。そこで、できるだけ高い反射率を持つ鏡を用い、かつ共振器を共中心配置に近づけることでモード径を小さくする。この時、鏡の反射率が高すぎると、技術的な制約から不可避である、鏡表面での散乱損失の方が鏡の透過よりも有意になり、共振器中の光子を共振器外部に取り出すことが困難となる。この点と、原子と光子との相互作用をできるだけ増強するという要請を踏まえて、最適な共振器の設計を行う。設計に基づき作製した高フィネス光共振器について特性評価を行い、想定通りの性能が得られているかどうかを確認する。

VITの観測のためには、光共振器横モード(モード径 $\sim 20 \mu\text{m}$)中に捕捉された原子集団に対して強く集光した(ビーム径 $\sim 2 \mu\text{m}$)光を入射する必要がある。そのため、共振器の横モードの中心と、入射光の集光位置が重なっていることが必須である。そこで、共振器モードに直交する入射光を共振器モードの中心で集光できるように、高開口数のレンズを共振器マウントに精度よく設置する。

続いて、光共振器とレンズの一体型マウントを超高真空チャンバー中に導入し、原子の共鳴周波数に対する共振周波数の安定化を行う。VITの観測のためには、共振器の共振周波数を原子の共鳴周波数と一致させる必要がある。しかし、原子に共鳴したレーザー光を直接安定化のため用いると共振器内部の原子に影響を受けるといった問題がある。そこで実験共振器とは別に、非

共鳴光と共鳴光を相対的に安定化させるための参照共振器を作製し、原子の共鳴周波数のレーザー光（波長780 nm）に対して安定化させた上で、非共鳴光（波長760 nm）を参照共振器に対して安定化させ、さらに実験共振器を非共鳴光に対して安定化させることで、実験共振器を間接的に原子の共鳴周波数に安定化させる（図1）。

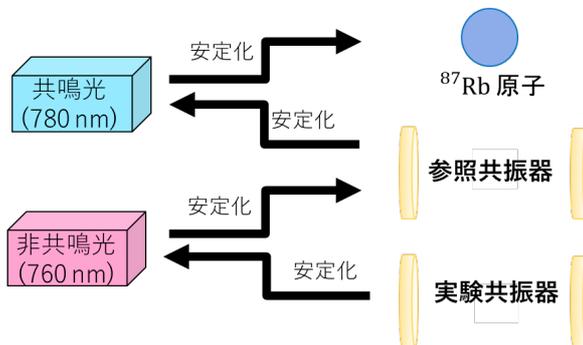


図 1：参照共振器を介した実験共振器の安定化機構

(2) 原子集団の光学深度の向上

原子集団の光学深度の向上については、磁

気光学トラップに捕捉した原子を、空間光位相変調器 (SLM) を用いたホログラフィック原子トラップ (引用文献) に移行し、高密度微小原子集団を作製する。この時、原子トラップのビーム形状を精密に制御することにより、原子を、光共振器の定在波の中で、任意の共振器との結合強度を持つ位置に選択的にトラップすることができる。そこで、まずはトラップ形状を最適化するようなホログラムを設計し、それを用いて原子トラップを作製する。さらに、原子トラップに原子を実際に捕捉し、捕捉された原子集団の大きさおよび密度を評価する。続いて、ホログラフィック原子トラップに捕捉した原子集団を共振器モード中の一次元光格子に移行し、原子と共振器モードとの結合強度を評価する。

(3) VITおよび単一光子スイッチングの観測

原子集団の内部状態に対して適切な始状態への光ポンピングを行い、まずは単一の入射光によりVITの観測を行うことで、系に印加する磁場の向きや大きさ、入射光の偏光状態等のパラメータの最適化を行う。さらに群遅延の測定を行い、十分に大きな遅延が得られているかどうかを確認する。続いて、入射光を2本に増やし、スイッチ光の有無による、非スイッチ光パルスの群遅延の変化の観測を試みる。

4. 研究成果

(1) 高フィネス光共振器の作製および超高真空中への導入

高フィネス光共振器については、まずプロトタイプマウントを作製し、ミラーの反射率と共振器中でのビーム径を評価した (図 2)。さらに、スイッチ光と非スイッチ光を入射させるための光学系の準備にあたり、1枚のレンズを用いて原子集団中に2本の独立なレーザー光を集光した際の空間的な分離の可能性を検討した結果、108 μm 離れた位置に、1.6 μm のビーム径で2本のレーザー光を集光することが可能であることを確認した。これらの知見をもとに真空中に導入するための共振器マウントを設計・加工し、組み立てを行った。続いて、大気中で実験共振器の光軸を合わせた後にリングダウン測定法 (引用文献) により ^{87}Rb 原子の共鳴光である波長 780 nm のレーザー光に対するフィネスを測定し (図 3) 58000 \pm 9000 という値を得た。さらに、この共振器を超高真空中に導入して再び同様のフィネスを評価したところ 47000 \pm 6000 であり、誤差の範囲内で大気中での測定結果と一致した。これらの結果、原子と光子の相互作用の強さを表す単一原子協働パラメータは 21 \pm 4 となり、先行研究と比べて3倍程度大きくなっていることが明らかになり、単一光子スイッチ実現のために共振器と原子を強結合させるには十分大きな値が得られた。

(2) ホログラフィック光トラップを利用した原子・

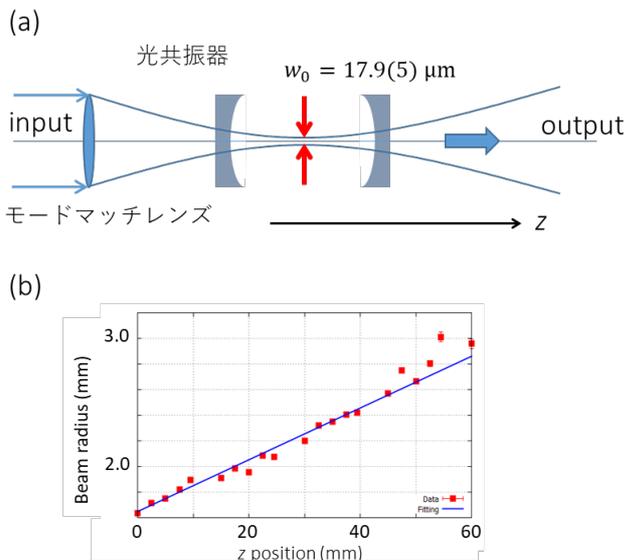


図 2: 共振器内におけるビーム径の測定。(a)実験系、(b)ビーム径の位置依存性。

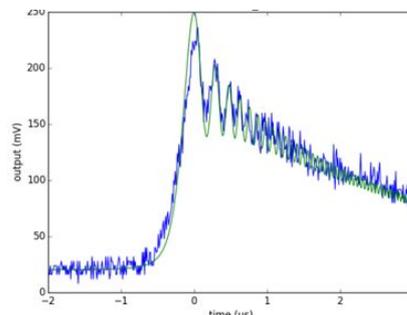


図 3: 共振器モードからの出射光のリングダウン波形。

光子結合強度可変機構の構築

まず、超高真空チャンバー内に作製した冷却原子集団を共振器モード中に捕捉するための一次元光格子を構築するために、波長 860 nm の光格子用レーザーおよびそれを安定化させるための電子回路を作製し、共振器に対して安定化させることに成功した。さらに、この一次元光格子とホログラフィック光トラップを組み合わせることにより、共振器と原子の結合強度を可変にする機構の開発を行った。この際、ホログラフィック光トラップの制御アルゴリズムに改良を加えた結果、高精度な制御が可能となった。具体的には、双極子トラップの形状を決定するホログラムの作製に際し、当初使用していた位相回復アルゴリズムに加え、CMOS カメラで撮像した実際のビーム形状を元に位相回復のターゲットに修正を加えるフィードバックを行った。その結果、原子と共振器モードとの結合強度が変化する周期 ($0.39 \mu\text{m}$) を下回る $0.15 \mu\text{m}$ のトラップ位置精度が実現した (図 4)。また、トラップビーム径については回折限界に近い $2.0 \mu\text{m}$ が得られた。これらにより結合強度が最大および最小の領域では結合強度の誤差が 30% 程度の範囲に収まると見積もられ、透過率や周波数シフト等の結合強度による変化が観測可能になる見込みとなった。これにより、単一光子スイッチの基盤となる VIT についてより詳細な解析が可能になると期待される。

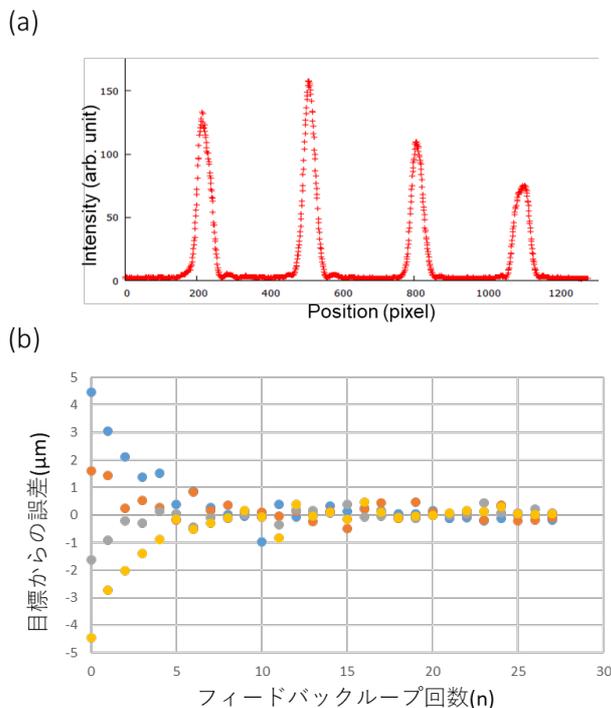


図 4 : (a) 27 回のフィードバックループ後に得られたホログラフィック光トラップのビーム形状、(b) 異なるフィードバックループ回数におけるトラップ位置の目標値からの誤差。

(3) 参照共振器の作製および高フィネス光共振器安定化機構の実装

参照共振器については、フィネス、構造等について試作を繰り返し、最終的には、中程度のフィネスと機械的安定度を高めた一体型の構造を採用し構築した。さらに、温度による共振器長の変化を防ぐための温度安定化機構を構築した。この参照共振器について、波長 780 nm の共鳴光と実験共振器の安定化に用いる波長 760 nm の非共鳴光における線幅を評価した。その結果、それぞれ 870 kHz と 620 kHz という値が得られた。さらに、波長 760 nm における実験共振器の線幅を評価した結果、95 kHz となった。

参照共振器を介した実験共振器の安定化に用いるレーザーの線幅は、実験共振器の線幅と同程度かそれ以下でなければならない。そこで、光ファイバーを用いた光フィードバックにより、共鳴および非共鳴のレーザー光の線幅の狭窄化を行った。その結果、共鳴光に関しては当初 1.2 MHz 程度であった線幅を 300 kHz 程度、非共鳴光については、当初 13.4 MHz ものを 440 kHz 程度まで狭窄化することができた。しかしながら、狭窄化を行うとレーザー発振が安定しなくなるという問題が新たに生じた。そこでその原因を探った結果、狭窄化を行う光フィードバック系に予期せぬ場所からの戻り光が存在していることが判明した。そこで不要な戻り光の除去を行い、安定的な発振を実現した。さらに、狭窄化の過程で室温変化に起因する中心周波数の長期安定性の低下が見られたため、光フィードバック系の温度安定化を行い、その温度変化を室温変化の $1/10$ 程度に抑えることに成功した。これにより光路長変化がピエゾ素子により補正可能な範囲に抑えられた。以上により、単一光子スイッチの実現において中心的な役割を果たす実験共振器の安定化機構が大幅に改良され、今後円滑に安定化を行える見通しが立った。

また、レーザー線幅狭窄化の結果を、従来から用いていたファブリペロー共振器の透過光を用いる方法よりもさらに高精度に評価するた

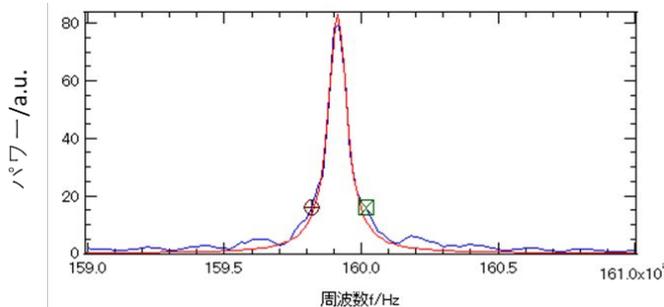


図 5 : 自己遅延ヘテロダイン法を用いた、狭窄化後の共鳴光の線幅測定結果。

めに、自己遅延ヘテロダイン法による測定系を構築した。その結果、共鳴光は 50 kHz 以下(図 5)、非共鳴光は 440 kHz という線幅の測定値がそれぞれ得られた。これらの値と実験共振器および参照共振器の線幅から最終的に得られる、原子の吸収線に対する実験共振器の共振周波数の安定度を算出したところ 1.5 MHz となり、この方法を用いることで実験共振器を ^{87}Rb 原子の自然幅 (6 MHz) よりも狭い領域に安定化できることが明らかとなった。

(4) K 原子を利用した共振器安定化機構の開発

上記のような、参照共振器を介した実験共振器の安定化を行うためには、原子の吸収線に対して共鳴光を、共鳴光に対して参照共振器を、参照共振器に対して非共鳴光を、非共鳴光に対して実験共振器をそれぞれ安定化することが必要となり、それら全てを同時に実現した状態を長時間維持することは困難であることが予想される。そこで、参照共振器による安定化と並行して、新たによりシンプルな方法として、別の原子(具体的には K 原子)を利用した実験共振器の安定化の方法を考案し、その実現可能性について検討した結果、十分な安定性が得られることが分かったため、その実験系の構築に着手した。

真空装置の不具合や共振器安定化機構の改良の必要性等が生じた結果、研究期間内に光パルスの群遅延増大の観測にまでは至らなかったが、上記の研究成果により技術的な困難はおおむね解消され、VIT の原理を用いた単一光子スイッチングを観測するための目途が立った。

この VIT による群遅延を用いた単一光子スイッチは、光の吸収に依存する従来の方法とは全く異なる原理に基づくものであり、他に例を見ない。このスイッチは、異なる時間モードに光子パルスを振り分けるものであるが、異なる時間モードを異なる空間モードに焼き直すことは技術的に比較的容易であるため、光路スイッチとしての応用も見込める。さらに、この手法による光スイッチは、単なる古典的なスイッチを超えた性能を持ち合わせる。すなわち、スイッチングを起こす光子も最終的にはその量子状態を保ったまま原子集団を透過するため、光子を量子ビットとみなした場合の量子情報操作への応用も期待できる。まず、スイッチ光の光子の有無により被スイッチ光パルスの時間モードが変化するため、被スイッチ光の到達時間を測定することは、それ自体がスイッチ光の光子の有無に対する量子非破壊測定となっている。また、共鳴付近で屈折率が周波数に対して急峻に変化するという VIT の特徴により、被スイッチ光が共鳴からややずれている場合には、スイッチ光パルス中の光子の有無によって被スイッチ光の位相が大きく変化することになり、量子位相シフトゲートとして利用できる可能性がある。以上のことから、本研究の成果により実現することが期待される光スイッチは、光ネットワークにおける高速・大容量化のみならず、量子情報通信技術においても重要な鍵を握るものとなることが期待される。そのため、本研究の成果は今後の情報通信技術の躍進に大きく寄与し、情報通信に重度に依存した現代社会に対して重大なインパクトを与えると考えられる。

< 引用文献 >

- K. Nozaki *et al.*, Nature Photonics 4, 477 (2010)
- M. Sasaki *et al.*, Opt. Express 19,10387 (2011)
- Haruka Tanji-Suzuki *et al.*, Science 333, 1266-1269 (2011).
- R. Newell *et al.*, Opt. Lett. 28, 1266 (2003)
- J. Poirson *et al.*, J. Opt. Soc. Am. B 14, 2811 (1997)

5 . 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 1 件)

丹治はるか、" 光共振器により増強される冷却原子の少数光子非線形効果 "、光学、査読有、44、463-468 (2015) .

[学会発表] (計 10 件)

山崎直樹, 高山泰征, 田中貴大, 丹治はるか、" 少数光子非線形効果の観測に向けた光共振器安定化用光源の開発 "、日本物理学会第74回年次大会、九州大学伊都キャンパス、2019年3月17日

H. Tanji-Suzuki et al., "Inducing photon-photon interaction with ultracold atoms in an optical cavity," The Irago Conference 2017, The University of Electro-Communications, Japan, November 1, 2017.

Motoki Kamihigashi, Masato Koashi, and Haruka Tanji-Suzuki, "Three-dimensional control of optical dipole trap positions for maximizing photonatom coupling strength in an optical cavity," The fourth MIPT-LPI-UEC Joint Workshop on Atomic, Molecular, Optical Physics, The University of Electro-Communications, Japan, March 27, 2017.

Haruka Tanji-Suzuki, "Few-photon nonlinearity in a cavity QED system with an atomic ensemble," The fourth MIPT-LPI-UEC Joint Workshop on Atomic, Molecular, Optical Physics, The University of Electro-Communications, Japan, March 27, 2017.

上東幹, 丹治はるか, 小芦雅斗, " 空間光位相変調器を用いた原子トラップの3次元位置制御 "、

日本物理学会第72回年次大会、大阪大学 豊中キャンパス、2017年3月18日
丹治はるか、「単一光子による光のスitchング」、第1回コンテナポラリーオプティクス研究会 光導波路技術の新展開、電気通信大学、2016年10月05日
上東幹, 岩田悠平, 鈴木泰成, 丹治はるか, 小芦雅斗、「空間光位相変調器を用いた原子と光共振器との結合強度の制御」、日本物理学会2016年秋季大会、金沢大学 角間キャンパス、2016年9月13日
Haruka Tanji-Suzuki, “Manipulating photons with a photon,” CEMS Topical Meeting on Cold Atoms, RIKEN Center for Emergent Matter Science (CEMS), Japan, June 10, 2016.

〔その他〕

ホームページ等

<http://www.ils.uec.ac.jp/~tanji/>

6 . 研究組織

(1) 研究分担者

なし

(2) 研究協力者

研究協力者氏名：鈴木 泰成

ローマ字氏名：(SUZUKI, yasunari)

研究協力者氏名：上東 幹

ローマ字氏名：(KAMIHIGASHI, motoki)

研究協力者氏名：山崎 直樹

ローマ字氏名：(YAMAZAKI, naoki)

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、研究者個人に帰属されます。