

令和 6 年 6 月 25 日現在

機関番号：34419

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2021～2023

課題番号：21K03423

研究課題名（和文）NMR量子コンピュータの手法による開放系の研究

研究課題名（英文）Study on Open System with NMR Quantum Computer

研究代表者

近藤 康（Kondo, Yasushi）

近畿大学・理工学部・教授

研究者番号：40330229

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,800,000円

研究成果の概要（和文）：NMR量子コンピュータの手法を応用して開放系（緩和機構）の理解を深めた。開放系の理解に関連して、通常は望ましくない環境との相互作用（ノイズ）を逆用した情報のエンコーディングや緩和を積極的に制御することによる測定対象の初期化（冷却）の提案を行った。また、実験を行うための超低磁場NMR装置開発を通じて、NMR量子コンピュータの開発も進めた。環境からのノイズに耐性を持つ複合量子制御（CQG）の研究も行った。Off Resonance Errorに耐性をもつCQGの幾何学的性質やPulse Length Errorに耐性をもつCQGの最短実行時間に対する知見などを得た。

研究成果の学術的意義や社会的意義

量子コンピュータや量子センサなどの高度に量子状態を制御する量子デバイスの応用が注目されている。これらは常に環境と望ましくない相互作用をしており、その活用のためには開放系（環境と相互作用する系）の理解が不可欠である。本研究により、その理解を深めることができた。また、量子技術人材の育成にも活用できるNMR量子コンピュータの開発も進めることができた。環境との相互作用は量子デバイスを誤動作させるノイズと捉えることができる。それらのノイズに耐性を持つ複合量子制御に関する我々が得た知見は、広く精密な量子デバイスを活用する上で有用である。

研究成果の概要（英文）：We deepened our understanding of open systems (relaxation caused by the environment) by applying NMR quantum computer techniques. We considered interaction with the environment to be noise, and then we proposed encoding information using this noise and initializing (cooling) targets to be measured. We also progressed in developing an NMR quantum computer for educational use. About this understanding, we researched composite quantum gates (CQGs), which are robust against that noise. We obtained knowledge about the geometric properties of CQGs that compensate for off-resonance errors and the shortest execution time of CQGs that are robust against pulse length errors.

研究分野：量子情報

キーワード：開放系 量子情報 NMR 複合量子ゲート

### 1. 研究開始当初の背景

量子コンピュータや量子センサなどの高度に量子状態を制御する量子技術の応用が注目されている。これらの機器は単体で存在するのではなく常に環境と(通常は望ましくない)相互作用しており緩和する。したがって、これらを有効に活用するためには環境と相互作用する系(=開放系)の理解が不可欠である。開放系の理論研究は古くから行われてきたが、実験研究は BEC 凝縮を起こす冷却原子系やイオントラップ中のイオンなど環境から近似的に孤立した系を作ることができるようになった最近に大きく発展するようになった。本研究でも、等方的な溶媒中の溶質分子のスピンの系が近似的に孤立系と見なせることに着目し、溶液 NMR 量子コンピュータの手法を用いて開放系の研究を行う。本研究のような NMR を実験手法とした開放系の研究は世界的に例がなく、開放系に関する興味深い実験を行うことができ、他の手法による開放系の研究を補完する知見が得られると期待される。

### 2. 研究の目的

開放系が熱平衡状態に変化していく緩和現象は、マクスウェルの時代から熱力学や統計力学の問題として、研究されてきた。しかしながら、理論的な研究が主で、実験的な研究はごく最近に活発になってきた。例えば、マクスウェルの悪魔が最初に実現されたのは、2010 年である。よくわからないことは環境の効果であると見なされるのが通常である。そのことからわかるように、制御された環境を準備することは難しく、実験的研究は進まなかった。制御された環境を準備するためには、近似的な孤立系を用意して、

(1)その孤立系と環境の相互作用を強くしていく、あるいは

(2)その孤立系の中に擬似的な環境もつくる、

の二つのアプローチがある。どちらにしても、近似的に孤立系を準備することが必要である。近年、冷却原子系、イオントラップ中のイオン、光子、そして極低温下の電気回路において近似的な孤立系が準備できるようになり、実験的な開放系の研究が発展してきた。本提案では、等方的な溶媒中の溶質分子の原子核からなるスピン系も、縦緩和時間( $T_1$ )より十分短い時間スケールでは、近似的に環境と相互作用しない孤立系と見なすことができる点に着目して研究を行う。

本研究課題の核心をなす学術的な「問い」は、「緩和とは？」である。この「問い」は上記のように古くから問われてきた。しかしながら、量子コンピュータや量子センサなどの高度に量子状態を制御する量子技術において緩和現象がその実現を阻む最大の要因の一つである。緩和現象の研究は、学問的だけでなく実用的な観点からも近年重要になってきた。様々な緩和のダイナミクスを示す開放系のモデルを提案し、それを NMR 量子コンピュータの手法を用いて実現し、この「問い」に対する理解を深めることを目指すのが本提案であった。溶質分子によって高感度なセンサーや量子コンピュータが構築できるとは考え難いが、本研究で得られる知見は緩和機構の理解を深めることを可能にし、量子コンピュータや量子センサなどの実用性のある開放系を考察する上での基礎を与えるものとなる。また、冷却原子などによる開放系の研究を補完する興味深い研究が行えると期待される。

### 3. 研究の方法

緩和現象を環境との相互作用による開放系から環境への情報の流れ(漏れ)と捉えて、

(1)その情報の流れの詳細と

(2)様々な開放系(系、環境、そして、その間の相互作用の組み合わせ)が、どのような情報の流れを示すか、

についての知見を NMR 量子コンピュータ(量子情報)の手法を用いて実験的に得る。

具体的には、

(1)マルコフ的な緩和から非マルコフ的な緩和へのクロスオーバーを決定する要因、

(2)熱平衡状態へ至る過程の詳細な観測、

(3)ある系が「環境」としてはたらくために満たすべき条件、や

(4)開放系における情報の流れの詳細、

などを研究の対象とした。環境との望ましくない相互作用による情報の漏れは量子センサーの高感度化や量子コンピュータの実現を阻むものであり、その理解を深めることは重要である。例えば、ある種の緩和ではバンバン制御や量子ゼノン効果によって緩和の抑制が可能であるが、どのような緩和ならば抑制可能だろうか。等方的な溶媒中の溶質分子の核スピンの縦緩和時間( $T_1$ )が、1 秒を遙かに超えることがあることはよく知られている。この長い  $T_1$  をもつ分子のスピンの系を近似的に環境の影響を受けずに量子力学に従った時間発展を行う孤立系と捉えたのが溶液 NMR 量子コンピュータの実験であった。本研究の独自性は、溶媒中の溶質分子のスピンの系が環境の影響を受けない孤立系と近似できることに着目した点である。このような溶質分子を含む溶液に Fe(III)のような磁性不純物を溶かすと、ランダムに運動する磁性不純物はその大きな磁気

モーメントによって、溶質分子のスピンをランダムに反転する。言い換えると、磁性不純物は図 1(a)における System I (溶質分子) に対するマルコフ的な環境の役割を果たす。次に、図 1(b) のように一つの分子を二つの部分に分けて、System I および II としよう。System I は II に完全に囲まれているので、磁性不純物の直接的な影響をほとんど受けない。しかしながら、System II を媒介として磁性不純物の影響を受ける。このような System I と II は、図 1(c) の内挿図のような Tetramethylsilane 分子を用いて実現できる。(System I は Si の核スピンで、II は水素の核スピンである。) しかもデカップリングと言われる NMR 技術によって、実効的に水素原子の核スピンを on/off することができる。そして、実効的に図 1(a) や (b) の系を実現でき、環境の違いに応じて図 1(c) (指数関数的) や (d) (非指数関数的) のような緩和を起こすことができる。このように、自然が提供する様々な量子系 (すなわち、分子) を用いて大学や研究所には必ず備えられている高分解能 NMR 装置による研究を行うことも本研究のユニークな点である。多くの研究者が装置開発の困難さを回避して、アイデアを重視した開放系の実験を行うことができる。本研究はその先駆となるものである。

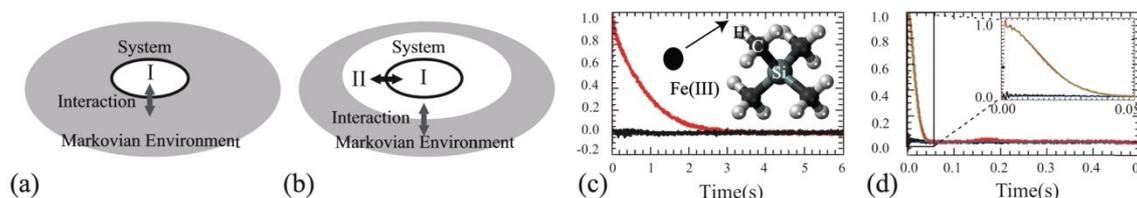


図 1

(a) 緩和する系 (System I) と環境の関係。(b) System I と環境の間に System II を挿入して、System I に対する環境の効果を制御する。(c) 環境を制御することによって、指数関数的な緩和を実現した。内挿図は実験に使用した分子の構造式である。(d) 環境を制御することによって、非指数関数的な緩和を実現した。

本研究の申請から採択の間も人工的な環境の中のシステムの振る舞いの研究を行った。図 1 (b) における System I と II の間の相互作用の強さを制御する機構を考案し、相互作用の強さに依存した緩和の振る舞いを理論と実験両面から調べた (図 2 参照)。相互作用の強さの制御は、NMR 由来のテクニック (dynamical decoupling) を用いている。System II に与える外場の強さに応じて変化する System I の振る舞いを解析的に導出し、実験とよい一致をみた。

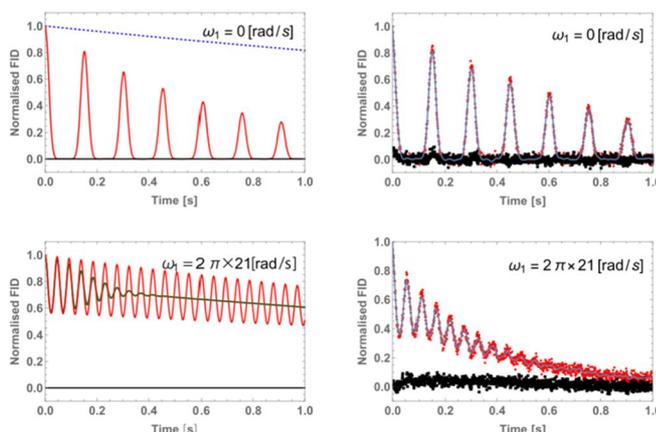


図 2

#### 4. 研究成果

量子コンピュータや量子センサなど高度に量子状態を制御する量子技術の理解を深め、応用のための基礎的な知見を得るためには、それらデバイスのモデルである開放系の研究は欠かせない。それが我々の研究の動機となっている。研究期間を通じて上に述べた環境との相互作用による緩和現象 (開放系) の研究だけでなく、環境との相互作用をノイズと捉え、そのノイズを有効に利用した情報のエンコードや逆にノイズに耐性を持つ量子制御の研究も行ってきた。また、付随して行った超低磁場 NMR 装置開発の副産物として、量子技術者育成のための教材 (NMR 量子コンピュータ) 開発の道筋も見えてきた。

System I と II (人工的な環境) の相互作用を制御した場合の緩和の変化。左側は理論で、右側は実験である。 $\omega_1$  が大きくなると実効的な相互作用は弱くなる。

##### 4.1 人工的な開放系の実現と緩和の応用

緩和は量子状態を壊すために、量子デバイスにとって害のあるものと捉えることが多い。しかしながら、初期化を行う際に緩和現象を用いることも多く、緩和現象なしでは現実のデバイスは動作しない。本研究では、より積極的に緩和現象を活用する提案も行った。また、緩和現象の理解のために、より良い (本当の緩和に近い) シミュレーションを行うことができる人工的な環境の構築を進めた (投稿中)。

- $N$  このセンサを協動的に使用することによって、感度の向上を図ることができる。独立したセンサの感度の向上は  $\sqrt{N}$  倍にしかならない (標準量子限界, Standard Quantum Limit = SQL)

が、エンタングルしたセンサの感度の向上は  $N$  倍になる（ハイゼンベルグ限界，HL）ことが知られている。しかしながら，エンタングルしたセンサは，緩和によって状態が破壊され，通常的环境下では HL に到達することはないと考えられていた。我々は，図 3 に示すようにセンサ全体におこる緩和を情報のエンコーディングに用いることによって，ローカルな緩和の外乱に打ち勝って，HL に到達し得ること示した[S1]。

- 緩和現象を積極的に制御することによって，電子スピンの冷却を行う提案を行った。この冷却によって偏極率が向上し，ESR の感度向上を行うことができ，様々な物性測定に有用である。NTT グループによって超伝導量子ビットを用いて ESR が行われていた。その超伝導量子ビットを測定に用いるだけでなく（図 4 参照），それを媒介とした緩和（冷却のための熱の流れ）のパスを作ることによって，電子スピン単体では得られない低温まで冷却する方法を提案した[S2]。
- 擬似的な孤立系の中に注目するスピント（擬似 = 人工）環境を作ることによって，開放系の研究を進めた。その経緯を以下に示す。令和 3 年度には，開放系のモデルとなる分子として，シリコン原子が中心にあり疑似環境とみなすことができる様々な側鎖を持つ多種類のシリコン化合物を試料とした実験を行った。 $^{13}\text{C}$  化合物を用いる必要がないので，様々な側鎖をもつ多種類のシリコン化合物を膨大な市販の試薬リストから選ぶことができ，10 種類以上の分子を用いて擬似開放系の振る舞いを実験的に調べることができた。令和 4 年度にはその成果を秋と春の物理学会で発表した。秋の学会の発表（NMR 実験を用いた人工的な緩和現象のモデル化）では，モデルに基づいた人工的な緩和の理論計算について発表した。擬似環境の自由度を大きくするために，弱結合近似が適用できない低磁場における複雑な環境（ハミルトニアン）における実験を提案した。春の学会の発表（緩和モデルの NMR による実現）は，秋の学会で議論した理論計算に基づいて新たに実験を行った。令和 6 年 5 月末に掲載決定となった[S3]。「系が複雑な（自由度が大きい）周囲と相互作用すれば，緩和が起こる」という誰でもが思っていることを図 5 に示すように理論的かつ実験的に示した。

#### 4.2 量子技術人材の育成

量子技術人材の育成が必要とされており，早い時期に量子コンピュータに学生が触れる機会を作る必要がある。真の量子コンピュータとは考えられていないが，大学の学部レベルで使用できる NMR 量子コンピュータは，量子技術人材の育成に有用である。

- 擬似環境における緩和の実験のために，回転波近似が適用できない低磁場における複雑なハミルトニアン（環境）における実験を提案し，そのための NMR 装置の開発も進めた。その副産物として，15 mT の超低磁場で NMR を行うことができる NMR 用の磁石を開発した（投稿 準備中）。
- 近畿大学で 3 年生の学生実験に用いている市販の卓上 NMR 装置を用いて Deutsch の量子アルゴリズムの実装を行い，令和 5 年春の物理学会で発表した（学生実験用 NMR 量子コンピュータ）。論文としてまとめたものが電気学会論文誌に掲載される[S4]。

#### 4.3 精密な量子ゲートの実現

1 量子ビット制御の際に問題になるエラーは，2 種類ある。ひとつは Off Resonance Error (ORE, Detuning Error と呼ばれる) で，量子ビットの共鳴周波数（エネルギー）の校正のエラーに

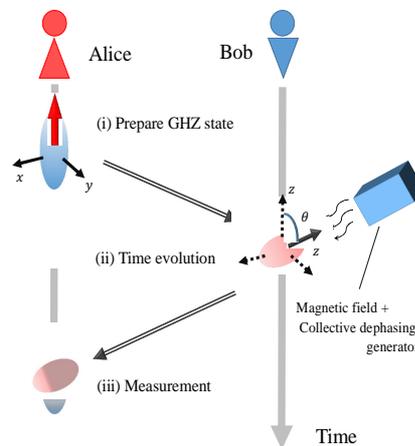


図 3

緩和をエンコーディングに使用するプロトコルの概念図。詳細は[S1]を参照。

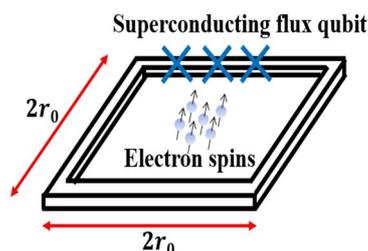


図 4

超伝導量子ビットを用いた電子スピンの冷却の概念図。詳細は[S2]を参照。

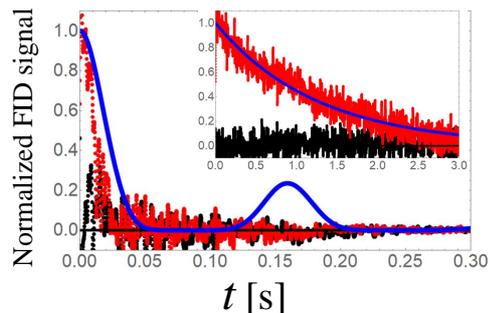


図 5

tetraethylsilane 分子中の Si 原子の Free Induction Decay 信号を 60MHz という低磁場で測定した。それによって，擬似環境の自由度を大きくし，より緩和らしい「擬似緩和」を実現できた。

起因している。もうひとつは、Pulse Length Error (PLE, Amplitude Error と呼ばれる) で、制御場の校正のエラーが原因である。これらのエラーは時間的にランダムに変動する。したがって、校正を頻繁に行うという対策には限界があり、エラーがあっても精密な制御を行える(我々は、その「エラーに対してロバストである」と表現)ことが必要である。そのような制御を実現するために、複数の制御を組み合わせることでお互いのエラーを相殺する複合量子制御 (Composite Quantum Gate, CQG) という手法がある。我々は、この CQG に対して以下の成果を得た。

- ORE ロバストな複合 CQG が満たす幾何学的な性質を発見した。ここで得られた知見は、ORE ロバストな CQG を新たに開発する上で有用である[S5]。
- ORE と PLE の両方に対してロバストな新しい CQG (SCROBUTUS と命名)を開発した。この CQG は、今まで知られていた両エラーに対してロバストな CQG よりも短い時間で実行でき、しかも図 6 に示す様に PLE と ORE に対する耐性も大きい。短い時間で実行できることは、環境との望ましくない相互作用による緩和の効果を減らすためにも有利である[S6]。
- 3 個の基本的な量子ゲートから構成される対称な ORE ロバストな CQG について、詳細に調べた。ORE ロバストな CQG は今まで CORPSE と Short-CORPSE しか知られていなかった。しかしながら、この研究によって無数の ORE ロバストな CQG が存在することがわかった[S7]。
- CQG は複数の制御を組み合わせるために、その実行時間は長くなってしまふ。環境との望ましくない相互作用を減らすために、その実行時間は短い必要がある。本研究では、PLE ロバストな CQG の実行時間の理論的な下限を幾何学的な考察から導出した[S8]

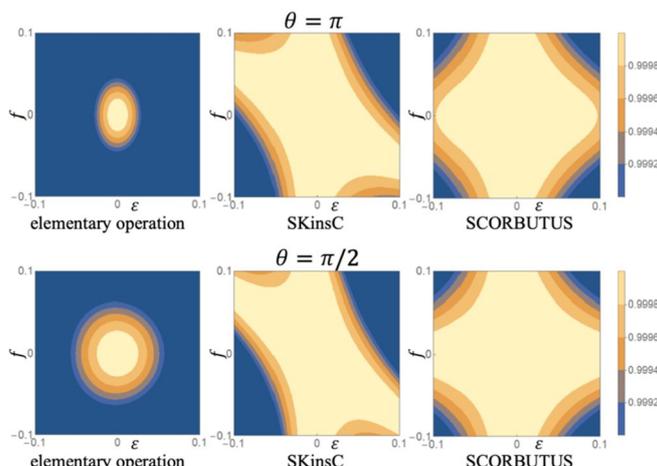


図 6

基本ゲートと 2 種類の複合量子ゲートの PLE ( $\epsilon$ ) と ORE ( $f$ ) に対する忠実度の依存性。我々が提案した SCORBUTUS の方が知られていた SKinsC よりも実行時間が短く、しかも忠実度の高い領域が広い。は量子ビットの回転角である。

## 研究成果

- [S1] Kukita Shingo, Matsuzaki Yuichiro, and Kondo Yasushi, “Heisenberg-Limited Quantum Metrology Using Collective Dephasing”, Phys. Rev. Applied **16** (2021) 064026-1~16.
- [S2] Kukita Shingo, Ookane Hideaki, Matsuzaki Yuihiro, and Kondo Yasushi, “Polarizing electron spins with a superconducting flux qubit”, Phys. Rev. A **105** (2022) 012613.
- [S3] Kukita Shingo, Kiya Haruki, and Kondo Yasushi, “Artificial Relaxation in NMR experiment”, <https://arxiv.org/abs/2404.03937>, Journal of the Physical Society of Japan で掲載決定。
- [S4] 日比野 良彦, 西田 翔, 木屋 晴貴, 久木田 真吾, 菅原 賢悟, 近藤 康, “卓上型 NMR 装置を利用した教育用量子コンピュータ”, 電気学会論文誌 **144** (2024) 252.
- [S5] Kukita Shingo, Kiya Haruki, and Kondo Yasushi, “Geometric property of off resonance error robust composite pulse”, Scientific Reports, **12** (2022) 1~10.
- [S6] Kukita Shingo, Kiya Haruki, and Kondo Yasushi, “Short Composite Quantum Gate Robust against Two Common Systematic Errors”, Journal of the Physical Society of Japan **91** (2022) 104001-1~6.
- [S7] Kukita Shingo, Kiya Haruki, and Kondo Yasushi, “General off-resonance-error-robust symmetric composite pulses with three elementary operations”, Phys. Rev. A **106** (2022) 042613-1~13.
- [S8] Kukita Shingo, Kiya Haruki, and Kondo Yasushi, “Lower bound on operation time of composite quantum gates robust against pulse length error”, Journal of Physics A: Mathematical and Theoretical, **56** (2023) 485305~485305.

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計8件（うち査読付論文 8件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Kukita Shingo, Matsuzaki Yuichiro, Kondo Yasushi	4. 巻 16
2. 論文標題 Heisenberg-Limited Quantum Metrology Using Collective Dephasing	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physical Review Applied	6. 最初と最後の頁 064026-1-16
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1103/PhysRevApplied.16.064026	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Kukita Shingo, Ookane Hideaki, Matsuzaki Yuichiro, Kondo Yasushi	4. 巻 105
2. 論文標題 Polarizing electron spins with a superconducting flux qubit	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Physical Review A	6. 最初と最後の頁 012613-1-12
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1103/PhysRevA.105.012613	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 日比野 良彦, 西田 翔, 木屋 晴貴, 久木田 真吾, 菅原 賢悟, 近藤 康	4. 巻 144
2. 論文標題 卓上型NMR装置を利用した教育用量子コンピュータ	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 電気学会論文誌	6. 最初と最後の頁 252-257
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1541/ieejfms.144.252	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Kukita Shingo, Kiya Haruki, Kondo Yasushi	4. 巻 56
2. 論文標題 Lower bound on operation time of composite quantum gates robust against pulse length error	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Journal of Physics A: Mathematical and Theoretical	6. 最初と最後の頁 485305 ~ 485305
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1088/1751-8121/ad0804	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Kukita Shingo, Kiya Haruki, Kondo Yasushi	4. 巻 12
2. 論文標題 Geometric property of off resonance error robust composite pulse	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Scientific Reports	6. 最初と最後の頁 1-10
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41598-022-13207-z	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 Kukita Shingo, Kiya Haruki, Kondo Yasushi	4. 巻 91
2. 論文標題 Short Composite Quantum Gate Robust against Two Common Systematic Errors	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of the Physical Society of Japan	6. 最初と最後の頁 104001-1-6
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7566/JPSJ.91.104001	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Kukita Shingo, Kiya Haruki, Kondo Yasushi	4. 巻 106
2. 論文標題 General off-resonance-error-robust symmetric composite pulses with three elementary operations	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Physical Review A	6. 最初と最後の頁 042613-1-13
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevA.106.042613	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Kukita Shingo, Kiya Haruki, Kondo Yasushi	4. 巻 93
2. 論文標題 Artificial Relaxation in NMR Experiment	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 Journal of the Physical Society of Japan (掲載決定)	6. 最初と最後の頁 074003-1-10
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7566/JPSJ.93.074003	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計9件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 久木田 真吾, 木屋 晴貴, 近藤 康
2. 発表標題 NMR実験を用いた人工的な緩和現象のモデル化
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 木屋 晴貴, 久木田 真吾, 近藤 康
2. 発表標題 Pulse Length Error とOff-Resonance Error 両方に耐性を持つ複合 量子ゲートの最短所要時間のしらみつぶしの探索
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 久木田 真吾, 木屋 晴貴, 近藤 康
2. 発表標題 パルス長エラー耐性を持つ複合量子ゲートの所要時間の下限
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 木屋 晴貴, 久木田 真吾, 近藤 康
2. 発表標題 緩和モデルのNMRによる実現
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 西田 翔、木屋 晴貴、久木田 真吾、近藤 康
2. 発表標題 学生実験用NMR量子コンピュータ
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 木屋 晴貴、久木田 真吾、近藤 康
2. 発表標題 PLE に耐性を持つ 1 量子ビットゲートと球面上の幾何
3. 学会等名 日本物理学会秋期大会 (16aB204-1)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 久木田 真吾、木屋 晴貴、近藤 康
2. 発表標題 オフレゾナンスエラーに耐性を持つ複合量子ゲートの時間最適化
3. 学会等名 日本物理学会春季大会 (20aA1-7)
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 Yasushi Kondo
2. 発表標題 Model Open System realized with Molecules in Solvent
3. 学会等名 Physics of Open Systems & Beyond (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Yasushi Kondo, Haruki Kiya, Shingo Kukita
2. 発表標題 Model Open System realized with Molecules in Solvent
3. 学会等名 1st International Workshop on Quantum Information Engineering (国際学会)
4. 発表年 2023年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

教員・研究員紹介 近藤康 <a href="https://www.kindai.ac.jp/science-engineering/education/teachers/detail/02_kondo_yasushi.html">https://www.kindai.ac.jp/science-engineering/education/teachers/detail/02_kondo_yasushi.html</a>
---

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
研究協力者	久木田 真吾  (Kukita Shingo)		
研究協力者	松崎 雄一郎  (Matsuzaki Yuichiro)		
研究協力者	菅原 賢悟  (Sugahara Kengo)		

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
---------	---------