

平成30年6月1日現在

機関番号：14401

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15H03705

研究課題名(和文) 間隔の制御されたメソスコピック冷却イオン列の生成

研究課題名(英文) Generation of mesoscopic laser-cooled ion strings with controlled spacing

研究代表者

田中 歌子 (Tanaka, Utako)

大阪大学・基礎工学研究科・講師

研究者番号：20359087

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,200,000円

研究成果の概要(和文)：レーザー冷却された気体原子イオンを用いた量子インターフェース、量子シミュレーション、光時計などの応用では、関与するイオンの個数をいかに増やせるかが性能向上のための重要な課題である。多数個イオンと光との相互作用を一樣にするためにはイオンを等間隔に配列させる必要があるが、従来のイオン捕獲技術では不可能であった。本研究課題では微細加工技術を駆使した特殊な電極を開発し、超高真空中に17個のカルシウムイオンを15 μm 間隔で1列に配列させる電場を発生させた。さらに各々のイオンの位置での実際の電場を高精度に測定する方法を確立し、結果を電極電圧にフィードバックすることによりイオン列の等間隔性の向上に成功した。

研究成果の概要(英文)：In the application of laser-cooled atomic ions to quantum interfaces, quantum simulations, and optical clocks, the issue of increasing the number of ions is an important consideration with regards to performance improvement. An ion string with equal spacing should be utilized to initiate an interaction between a large number of ions and light in an identical manner. However, this has proven to be impossible with conventional ion trap electrodes. In this study, we developed a special microfabricated electrode which generates an electric field that facilitates the alignment of 17 calcium ions with a spacing of 15 micrometers. In addition, we developed a method to precisely measure the electric field strength at each ion position. By applying a feedback signal of the difference between the measured and designed electric fields to the applied voltages, we succeeded in improving the uniformity of the spacing.

研究分野：量子エレクトロニクス

キーワード：量子エレクトロニクス イオントラップ 量子インターフェース 量子シミュレーション 原子時計

1. 研究開始当初の背景

電場によって気体原子イオンを限られた領域に捕獲するイオントラップは、擾乱の少ない理想的な量子系を長時間維持し、且つ、原子イオンの個別操作を可能にする唯一の系である。そのためイオンと電磁場との相互作用を利用する量子インターフェース、量子シミュレーション、光時計など幅広い応用に向けた研究がなされてきた。これらの性能向上に共通に重要なことは、物質（イオン）と電磁場（光）とをいかに効率良く相互作用させられるかである。イオンと電磁場との結合効率は、多数のイオンを用意し、各々のイオンと電磁場との相互作用が同一条件になるようにすれば実効的に良くなる。しかしながら従来の線形イオントラップで多数のイオンを捕獲するとイオン間隔が不均一になり、イオンと電磁場との相互作用が様にならないため、このような目的での多数個への拡張は困難であった。研究開始当初には、従来の線形イオントラップ中の多数個イオンの間隔を制御した例は無く、またそのための最適なポテンシャルや電極形状も明らかではなかった。

2. 研究の目的

イオンと電磁場との相互作用制御を利用する量子インターフェース、量子シミュレーション、光時計などの応用において、多数個イオンを用いて電磁場との相互作用を様にして結合効率を向上させるため、イオントラップ中の多数個イオンの間隔を制御する。本研究では従来型の線形イオントラップよりも微細加工が可能でポテンシャル設計の自由度が高い平面型イオントラップを用いる。メゾスコピック系となる 10^3 個程度までの各オーダーについて段階的に検討していく。それぞれのオーダーにおいて、10 個程度では量子インターフェースの結合効率向上、 10^2 個程度では古典計算機によるシミュレーションを超える量子シミュレーション、 10^3 個程度で超放射を利用した能動的な光時計などの応用が考えられ、どのオーダーについても実現すれば大変有用である。まずイオンが等間隔になるためのポテンシャルを導出する。求めたポテンシャルを生成するためのトラップ電極を設計・作製し、カルシウムイオンを用いた捕獲実験と評価を行う。またイオン間隔の波長オーダーの精度での評価方法についても検討する。

3. 研究の方法

(1) トラップポテンシャルと電極の設計

まず等間隔にイオンが配列するためのポテンシャルをシミュレーションによって求める。イオントラップ中の多数個のイオンは、トラップ電極によるポテンシャルとイオン

間の Coulomb 力との釣り合いによって配置が決まる。また各方向のポテンシャルのバランスによって、1 列に並んだりジグザグ構造になったりする。1 列に等間隔に配列するためのポテンシャルの条件を導出する。

次に、所望のポテンシャルを生成する平面型電極を設計する。平面型トラップ電極の設計では、i) トラップ条件が Mathieu 方程式の安定領域を満たす、ii) トラップポテンシャルが 0.5 eV 程度の深さがある、iii) 交流電場の生成するポテンシャルと直流電場によるポテンシャルの極値の位置が一致している、iv) 配線が必要最小限で電極間隔は絶縁破壊を起こさないスケールである、などの条件を満足しなければならない。線形イオントラップでは i) と ii) のみ考慮すればよく、また ii) も 10 eV のオーダーが容易に得られるのに対して、平面型トラップは考慮すべき点が多い。トラップ電極が生成するポテンシャルの導出には、平面上の電極配置から近似的にポテンシャルを求める解析的手法と、数値計算の 2 通りの方法を使う。解析的手法でおおまかな構造を決め、最終的に数値計算で詳細までチェックすることにより効率良く設計を行う。

(2) 等間隔性評価法の検討

種々の応用のためにはイオンは励起光の波長よりも十分小さい領域に局在させる必要がある。イオンの位置情報は画像計測で評価できるが、波長オーダーでの解像度は得られないため、より高精度に評価する方法について検討する。Bragg 反射を利用してイオン間隔分布を評価する方法や、カルシウムイオンの時計遷移 ($^2S_{1/2}$ - $^2D_{5/2}$, 波長 729 nm) を利用する方法について検討する。

(3) カルシウムイオンの捕獲実験

設計したトラップ電極を超高真空装置内に実装し、カルシウムイオンの捕獲とレーザー冷却実験を行う。レーザー冷却と蛍光観測には電気双極子遷移である $^2S_{1/2}$ - $^2P_{1/2}$ 遷移 (波長 397 nm) と、準安定状態からのリパンプのための $^2D_{3/2}$ - $^2P_{1/2}$ 遷移 (波長 866 nm) の光を用いる。イオン配列はイオンからの波長 397 nm 蛍光をイメージインテンシファイアで観測し、得られた画像によって等間隔性を評価する。

4. 研究成果

等間隔イオン配列を実現するため、環状電極配置と、矩形電極配置の 2 つのトラップ電極を開発した。また矩形電極配置トラップでは、各々のイオンの位置での浮遊電場も含めた電場を高精度に測定する方法を確立し、その測定結果をトラップ電極にフィードバックすることによって等間隔性の向上に成功した。以下にその詳細を述べる。

(1) 環状電極配置トラップ

従来のトラップ電極で生成されるのは調和型(2次関数型)のポテンシャルであり、この場合イオンの配置は中央で狭く、両端で広がる。高次の項を含めたポテンシャルによるイオン配置のシミュレーションによって、4次関数の項が支配的な場合に等間隔性が良いことがわかった。そこでこのようなポテンシャルを実装するためのレイアウトとして環状電極配置のトラップを考案した。図1にその電極を示す。8個の円形のEnd DC電極が環状に配置しており、これらに印加する電圧の組み合わせによって、2次と4次の重ね合わせのポテンシャルを生成することができる。また中央部に8対の補助電極を配置しており、はじめにイオンを捕獲する時には通常の調和ポテンシャルを生成することも可能にした。電極はアルミナ基板に金メッキで作製した。

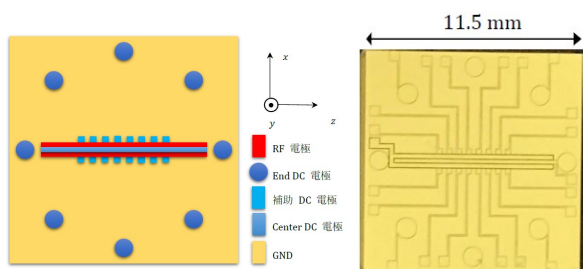


図1 環状電極配置トラップ。(左) 電極レイアウトと(右) 電極写真。イオンは中央部分に捕獲され、z軸方向に配列する。

この電極を用いてカルシウムイオンの捕獲実験を行った。まず補助電極で閉じ込めの強いポテンシャルを生成してイオンを捕獲し、電圧操作によって環状電極による非調和ポテンシャルでの捕獲へ移行したところ、図2のように70個以上のイオンが一行に配列した。調和ポテンシャルの場合は中央の間隔が狭く、端へいくほど広がるが、得られたイオン配列は4次関数を重ね合わせた非調和ポテンシャルの効果が反映されていることがわかる。通常の調和ポテンシャルでは、このような多数個のイオンを捕獲すると、中央のイオン数密度が高い領域ではジグザグ構造になっていく。図2のような1列配列の実

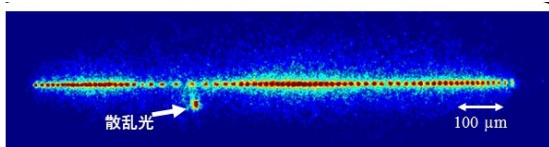


図2 環状電極配置トラップ中に70個以上のカルシウムイオンが一行に並んだ画像。通常の調和ポテンシャルでの捕獲のようにイオン間隔が両端ほど広がっておらず、4次関数の効果が反映された配置になっている。左右非対称なのは浮遊電場の影響と考えられる。

現はz軸方向のポテンシャルの操作によって初めて得られるものである。ただし画像からわかるようにイオン列が左右対称になっておらず、印加電圧による電場以外に浮遊電場が存在していることが考えられる。

(2) 矩形電極配列トラップ

① トラップ電極設計

(1)の環状電極配置トラップでは、2次関数と4次関数の重ね合わせのポテンシャル形状が形成され、それによってイオン間隔を操作できることが確認できたが、印加可能な電圧の上限から形成できるポテンシャルに制約があり、さらにトラップ領域での浮遊電場の補正が必要であることがわかった。加えて、等間隔配列に必要なポテンシャルが、解析的なアプローチによってポリガンマ関数を用いて表されることがJohanningによって報告された(M. Johanning, *Appl. Phys. B*, Vol. 122, 71, 2016)。このポテンシャルを精度よく生成し、また局所的な浮遊電場の補正を行うにはトラップ領域の近くの電極の個数を増やす必要がある。

以上の要件を満たすため、図3のような矩形電極配置トラップを開発した。トラップ領域は $y = 230 \mu\text{m}$ の高さでz軸に平行なトラップ中央の部分である。このトラップ領域にできるだけ近い位置に間隔制御用のDC電極を12対配置した。電極基板の材質はアルミナ、電極は金メッキによって作製している。

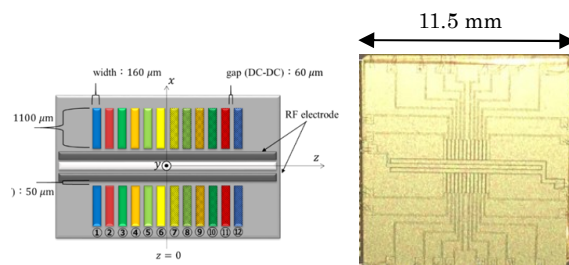


図3 矩形電極配置トラップ。(左) 中央付近の電極レイアウトと(右) 電極写真。

② イオンをプローブとしたトラップ電場の精密測定

浮遊電場の補正のためには、イオンの位置での電場を正確に測定しなければならない。そこで我々はイオンの位置情報からトラップ電場を測定する手法を確立した。あるイオンの平衡配置は、その位置での(印加電圧による電場) + (浮遊電場) + (他のイオンがつくる電場) がゼロになるという条件で決まる。他のイオンがつくる電場は、すべてのイオンの位置を観測し、対象としているイオンと他のイオンとの距離がわかれば計算できる。我々はこの計算から注目しているイオンの位置での実効的な電場(= (印加電圧による電場) + (浮遊電場)) が求まることに着目した。つまり、イオンをプローブとして電場を測定することになる。そこでイオン画像

から電場を求めるシステムを構築した。図4にその結果を示す。図4(a)はイオン画像を長時間連続して表示したものである。③の時間領域では7個のイオンが観測されているが、残留ガスとの衝突などにより②領域では6個に、①領域では5個に減少しており、個数が増減すると平衡位置も変化する。取り込んだ画像から位置情報をガウス関数によるフィッティングによって求め、着目したイオンの位置に他のイオンがつくる電場を計算し、前述の平衡条件から実効的な電場を計算して求めたのが図4(b)である。イオン列が③、②、①と変化しても、得られた電場の結果はなめらかな関数を示しており、高精度に電場が求められたことがわかる。

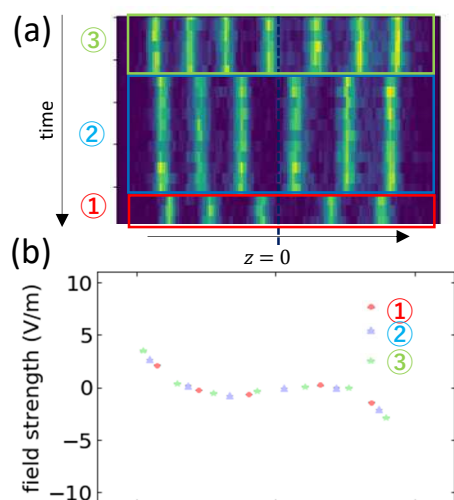


図4 (a) 矩形電極配置トラップに捕獲されたイオン画像の連続表示。③の時間領域では7個、②では6個、①では5個のカルシウムイオンが捕獲されている。(b) 配列したイオンの位置情報から求めたそれぞれのイオンの位置での電場。(a)で③の領域のイオンは緑、②は青紫、①は赤の点で示してある。

③イオン間隔制御結果

測定された実効的な電場と、等間隔配列を実現するための電場の差をDC電極の印加電圧にフィードバックをかけることにより浮遊電場を補正できる。ここでは17個のイオンを15 μm 間隔で配置するようなポテンシャルを計算で求め、まずそのポテンシャルを生成する電圧を印加した。そうして捕獲されたイオン画像からイオンの位置での実効的な電場を導出し、等間隔配列を実現するための電場との差を電極電圧にフィードバックした。そのようにしてイオン間隔を測定した結果が図5の黒い点である。隣接するイオンとの距離をサイトごとにプロットしたもので、一定に近いほど等間隔性がよいことを示す。図5では比較のために調和ポテンシャルの場合のイオンの平衡位置を計算で求めたものを青い点で示してある。こちらは中央でイオン間隔が狭く、端へいくほど広がっているのがわかる。等間隔ポテンシャルを生成しさらに浮遊電場に対するフィードバックを

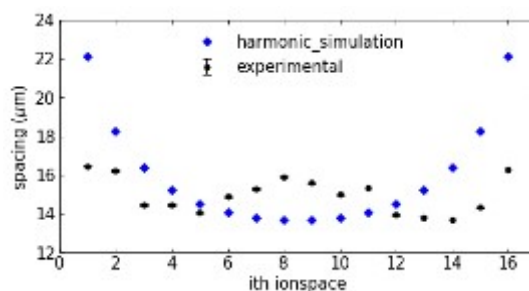


図5 矩形電極配置トラップで17個のイオンを15 μm 間隔で配置するように設定して等間隔ポテンシャルを生成し浮遊電場の補正を行った場合のイオン間隔(黒い点)。縦軸は隣り合うイオン間の距離を示しており一定値に近いほど等間隔であることを表す。比較のために調和ポテンシャルで捕獲した場合のイオン間隔の計算値を青い点で示してある。

行ったことによって、明らかに等間隔性が向上している。

(3) 高精度な等間隔性評価の検討

イオンの画像計測では現実的な光学系の倍率での分解能は数百nm程度が限界である。しかしイオン配列に光共振器を組み込んだ量子インターフェースや超放射への応用では波長以下の精度での制御が求められる。そこでトラップ電極開発と並行して、等間隔性の高精度な評価についての検討と従来型の線形イオントラップを用いた予備実験を行った。

共振器内に定在波を発生させたとき、イオンの蛍光強度によってそのイオン位置での定在波縦モードの電場強度を測ることができれば、イオンの画像計測と組み合わせ、イオンが定在波のどの位置に配列されているかを評価できる。

カルシウムイオンの時計遷移波長729nmの定在波を光共振器内に発生させた場合を考える。時計遷移は弱い遷移であり1秒に1回程度しか蛍光を発しないため直接の蛍光強度観測は不可能である。そこで波長729nmのレーザー強度によって、強い電気双極子遷移($^2S_{1/2}$ - $^2P_{1/2}$, 波長397nm)の蛍光強度の変化の様子を観測した。従来型の線形イオントラップに単一カルシウムイオンを捕獲し、クエンチング用の854nmを照射した状態で729nmレーザー光を一方向から照射し強度を0mWから2mWまで変化させたところ、397nmの蛍光強度が約30%変化することが確認できた。これは進行波による予備実験であるが、画像計測と蛍光強度計測の組み合わせによって波長以下の精度の評価の可能性が示せたとと言える。

(4) 能動的光時計の可能性

10^3 個程度の等間隔イオン配列は超放射を利用した能動的な光時計への応用が考えられる。超放射の起こる条件とその場合の能動的な光時計の精度を解析したところ、 10^3 個以上の等間隔配置したカルシウムイオンを光共振器と結合させてインコヒーレントなポンピングを行うことにより、超放射による超狭

線幅コヒーレント光（線幅 0.2 Hz 以下）発生の可能性が明らかとなった。さらにその実現を阻む最も大きな要因として懸念される電気四重極シフトの不均一性が、等間隔配置ポテンシャルでは厳密に消失することも理論的に明らかとなった。

(5) 予期していなかった新たな知見

当初は等間隔に配列したイオンの光時計への応用は、光共振器を組み込んで超放射を利用する「能動的な光時計」のみを考えていた。しかし等間隔に配列したイオンは、イオンの時計遷移を参照周波数としてレーザー光源を安定化する従来型の光時計にも大きな寄与があることを発見した。単一イオンを用いた光時計では中性原子を用いた光格子時計に比べて、同じ不確かさに到達するための時間がかかることが指摘されているが、複数個イオンを用いて信号の S/N 比を向上させればこの問題は解決する。そのためにはすべてのイオンが同じ時計遷移周波数をもつように条件を整えなくてはならない。しかし複数個のカルシウムイオンの場合、通常の線形リニアトラップでは各イオン位置での電場勾配が異なるため電気四重極シフトが不均一になってしまう。しかし等間隔配列ではこのシフト量が抑制できることがシミュレーションにより確認できた。このことは等間隔イオン配列の新たな応用として有望である。

(6) 国内外における位置づけとインパクト

国内では微細加工技術による平面型イオントラップの開発は他に例がなく、従って間隔制御についても本研究課題が初めての成功例であり、イオントラップ技術の可能性を大いに広げる成果である。また国外でもイオン個数や精度が共に本研究と同程度の報告が 2017 年に 1 件あるだけである。今回得られた等間隔イオン列の量子シミュレーションへの応用や、我々が新たに見出した電気四重極シフトの無い従来型のカルシウムイオン光時計への適用などにより、本研究課題の成果は当該分野に多大なインパクトがあると考えられる。

(7) 今後の展望とまとめ

以上の成果をまとめると次のようになる。

- ① 等間隔イオン配列を実現するため、環状電極配置と、矩形電極配置の 2 つのトラップ電極を開発した。
- ② 環状電極配置トラップでは、70 個以上のイオンについて、非調和ポテンシャルを反映した 1 列配列を実現した。
- ③ より精密な間隔制御には浮遊電場の補正が必要なため、各々のイオンの位置での浮遊電場も含めた電場を高精度に測定する方法を確立した。
- ④ 矩形電極配置トラップでは、17 個のイオンを 15 μm 間隔で等間隔に配置するポテンシャルを生成し、電場測定結果をトラップ電極電圧にフィードバックすることによって等間隔性の向上に成功した。
- ⑤ イオン配列の高精度な評価法として、画像

計測と蛍光強度観測を組み合わせる方法を提案し予備実験を行った。

- ⑥ 等間隔イオン配列ではカルシウムイオンの時計遷移の電気四重極シフトが抑制されることを見出し、等間隔イオン配列の新たな応用の可能性を示した。

今後の展開としては、より多数個で精密な間隔制御を実現するため、浮遊電場がもともと小さいトラップ構造と実装方法の確立、印加電圧の重ね合わせではなく単電圧で等間隔ポテンシャルができる電極レイアウトの探索など、電極のさらなる改良が考えられる。また等間隔ポテンシャル中ではイオンの固有周波数が低くなることを見積もられており、その場合のイオン冷却法も電磁誘導透過を適用するなどして確立する必要がある。また種々の応用に向けてイオン捕獲時間をできるだけ長くするための改良も必要である。

本研究課題では 100 個程度までの等間隔イオン配列を生成する技術を確立した。平面型トラップではこのようなトラップのユニットを配列化することが可能なので、数十個のユニットの一次元的な配列を作成して一つの光電場モードに結合させることにより 10^3 個以上のメゾスコピック領域のイオン列を得ることができると考えられる。

なお次のステップのためのこれらの課題は、科学技術振興機構 CREST プロジェクト(研究領域:「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」、研究課題:「オンチップ・イオントラップによる量子システム集積化」、研究代表者:田中歌子)にて引き続き発展させていく。

以上述べた通り、本研究課題の遂行によって当初の目的である微細加工された平面型トラップによるイオン配列の等間隔性向上が達成され、得られた数々の知見によって次のステップへの展望が開けたといえる。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 5 件)

1. Yuji Kawai, Kenji Shimizu, Atsushi Noguchi, Shinji Urabe and Utako Tanaka, “Surface-electrode trap with an integrated permanent magnet for generating a magnetic-field gradient at trapped ions,” *Journal of Physics B*, vol. 50, 025501 (2017). (査読有)

[学会発表] (計 27 件)

- ① 中村充宏, 「Si 系基板プレーナトラップの特性評価 II」, 日本物理学会第 73 回年次大会, 2018 年 3 月 23 日, 東京理科大学野田キャンパス
- ② 北尾政義, 「プレーナトラップでの Ca⁺イオン等間隔配列動作」, 日本物理学会第 73 回年次大会, 2018 年 3 月 23 日, 京理科大学野田キャンパス
- ③ 早坂和弘, 「複数イオンによるイオン光時計の高安定化」, 第 65 回応用物理学会春季学術講演会, 2018 年 3 月 20 日,

- 早稲田大学西早稲田キャンパス
- ④ Utako Tanaka, “Novel quantum systems using on-chip ion traps,” Workshop on Quantum Control of Trapped Ions and its Applications, 2018/3/9, Osaka University
- ⑤ Mitsuhiro Nakamura, “Characterization of a planar trap fabricated on a SiO₂ substrate,” 10th International Workshop on Fundamental Physics using Atoms, 2018/1/8, Nagoya University
- ⑥ Masayoshi Kitao, “Generation of anharmonic potential for isospaced ionstrings with a planar trap,” 10th International Workshop on Fundamental Physics using Atoms, 2018/1/8, Nagoya University
- ⑦ (Invited) K. Hayasaka, “New Approaches to the Optical Clocks with Trapped Ions,” The 1st Asia-Pacific Workshop on Trapped Quantum Systems (APTQS2017), 2017/12/10, Sun Yat-sen University, Zhuhai campus, Zhuhai, China
- ⑧ Utako Tanaka, “On-chip ion traps for integrated quantum systems,” CREST 第2回公開シンポジウム, 2017年12月8日, 京都大学
- ⑨ Masayoshi Kitao, “On-chip Ion Trap with Rectangular-Electrodes Array for Isospaced Ion Strings,” CREST 第2回公開シンポジウム, 2017年12月7日, 京都大学
- ⑩ K. Hayasaka, “New Implementations of Optical Clocks Using On-Chip Ion Traps,” CREST 第2回公開シンポジウム, 2017年12月7日, 京都大学
- ⑪ 田中歌子, 「マルチウェル型プレーナートラップの開発」, 日本物理学会 2017年 秋季大会, 2017年9月22日, 岩手大学 上田キャンパス
- ⑫ 北尾政義, 「等間隔イオン配列を実現する矩形電極配列プレーナートラップ」, 日本物理学会 2017年 秋季大会, 2017年9月22日, 岩手大学上田キャンパス
- ⑬ 中村充宏, 「Si系基板プレーナートラップの特性評価」, 日本物理学会 2017年 秋季大会, 2017年9月22日, 岩手大学 上田キャンパス
- ⑭ 早坂和弘, 「複数個 Ca⁺への時計レーザー 周波数ロック」, 日本物理学会 2017年 秋季大会, 2017年9月22日, 岩手大学 上田キャンパス
- ⑮ K. Hayasaka, M. Kitao, U. Tanaka, “Collective Coupling of Trapped Ions to a High-Finesse Cavity toward Superradiant Lasing,” The 24th Congress of the International Commission for Optics (ICO-24), 2017/8/23, Keio Plaza Hotel, Tokyo
- ⑯ Utako Tanaka, Generation of isospaced ion strings using a planar trap, 9th international workshop on fundamental physics using atoms, 2017/1/9, Kyoto University, Katsura campus
- ⑰ 紙谷和彦, 「プレーナートラップを用いた ⁴⁰Ca⁺イオンの二次元配列への拡張」, 日本物理学会第72回年次大会, 2017年3月20日, 大阪大学豊中キャンパス
- ⑱ 北尾政義, 「光共振器を用いた等間隔イオン配列プレーナートラップの性能評価法の検討」, 日本物理学会第72回年次大会, 2017年3月20日, 大阪大学豊中キャンパス
- ⑲ 早坂和弘, 「光通信波長帯光源の第二高調波による Ca⁺時計遷移励起」, 日本物理学会第72回年次大会, 2017年3月20日, 大阪大学豊中キャンパス
- ⑳ 早坂和弘, 「超放射観測に向けた Ca イオン準安定状態の寿命測定」, 日本物理学会 2016年 秋季大会, 2016年9月16日, 金沢大学角間キャンパス
- 21 (招待講演) 早坂和弘, 「蓄積イオンの量子状態制御とその応用」, 日本物理学会 第71回年次大会, 2016年3月19日, 東北学院大学泉キャンパス
- 22 増谷賢吾, 「等間隔イオン配列のための環状電極配置プレーナートラップ」, 日本物理学会第71回年次大会, 2016年3月23日, 東北学院大学泉キャンパス
- 23 河合祐爾, 「永久磁石付きプレーナートラップによる Zeeman 遷移の観測実験」, 日本物理学会第71回年次大会, 2016年3月23日 東北学院大学泉キャンパス
- 24 (招待講演) 早坂和弘, 「イオントラップ光時計の現状と未来」, 応用物理学会・量子エレクトロニクス研究会「極限計測の科学と技術」, 2015年12月19日, 東京大学山中寮内藤セミナーハウス
- 25 増谷賢吾, 「⁴⁰Ca⁺イオンの等間隔を実現するプレーナートラップの設計」, 日本物理学会 2015年 秋季大会, 2015年9月19日, 関西大学千里山キャンパス
- 26 早坂和弘, 「レーザ冷却イオン列による超放射発振に関する検討」, 第76回応用物理学会秋季学術講演会, 2015年9月16日, 名古屋国際会議場
- 27 増谷賢吾, 「等間隔イオン配列を実現するプレーナートラップの設計」, 電子情報通信学会第32回量子情報技術研究会, 2015年5月25日, 大阪大学豊中キャンパス
6. 研究組織
- (1) 研究代表者
田中 歌子 (TANAKA, Utako)
大阪大学・大学院基礎工学研究科・講師
研究者番号: 20359087
- (2) 研究分担者
早坂 和弘 (HAYASAKA, Kazuhiro)
国立研究開発法人情報通信研究機構・未来 ICT 研究所・研究マネージャー
研究者番号: 10359086