

田中 歌子

大阪大学大学院基礎工学研究科  
講師

## オンチップ・イオントラップによる量子システム集積化

### § 1. 研究成果の概要

本プロジェクトでは、気体原子イオンを電場の方で空中に長時間捕獲するイオントラップ電極に、微細加工技術を取り入れることでオンチップ化し、(1)集積化した量子システムを基盤にした可搬型光クロックの開発、(2)微細加工電極がつくる特殊なトラップポテンシャルによる新奇量子システムの実装、(3)高性能なトラップデバイス作製のための研究開発を行っている。

2018 年度は可搬型光クロック開発の原理実証に大きな進展があった。我々の提案は複数個イオンを用いて信号の S/N 比を向上させ、これまで不可欠とされてきた大がかりな光共振器を不要にして可搬化を図るものである。従来の単一イオンの場合と異なり、複数個イオンを光クロックとして動作させるためには多くの新しい技術開発を必要とする。具体的には、全てのイオンが同じクロック周波数を持つための等間隔なイオン配置の実現や、個々のイオンに対して量子状態を測定しクロック遷移のスペクトルを取得するシステムなどである。NICT 神戸グループでは、複数個イオンの画像を高速に処理することで個々のイオンの量子状態を計測する方法を開発した。そして  $N=3$  から 20 のイオンを用いて、フリーランニングのクロックレーザーをスペクトルの中心周波数に 1 時間以上ロックできることを確認し(図1)、世界に先駆けて基準光共振器無しで、イオン列へのクロックレーザー周波数のロック動作を実証した。

このプロトタイプの評価は従来型のリニアトラップ電極で行ったもので、イオンの位置制御が行えないためクロック周波数が個々のイオンによって異なる。大阪大学グループでは、12 対の微細矩形電極をもつオンチップ・イオントラップを動作させて 17 個のイオンの位置制御を行い等間隔性の向上を確認している。さらに電極形状の最適化を行い、 $N=20$  のイオンのクロック周波数のばらつきが 1 Hz 以内におさまるようなトラップ電極を設計した。このオンチップ・イオントラップとクロックレーザーのロックシステムを統合すれば  $10^{-14}$  の精度で可搬型の光クロックが実現できる。

デバイス開発では、NICT 小金井グループがオンチップ・イオントラップによる光クロックを長時間安定に動作させるために重要な、材質の探索および技術開発を行った。一般にイオン

トラップでは、トラップ電極を構成する絶縁体部分の帯電や、原子ビームの電極表面への付着による接触電位が経時変化の要因になる。オンチップ・イオントラップの場合、絶縁体部分の影響を抑えるには電極間隔をできるだけ狭くすればよいが、狭すぎると絶縁破壊を起こすというトレードオフがある。そこで電氣的耐圧特性に優れた材質の探索のための評価実験を行った。この評価実験では種々の Si 基板材質の耐圧特性についての新たな知見が得られており、電氣的耐圧特性に優れ、かつ機能拡張性にも優れた Si 基板が作製可能である見通しを得た。また原子ビーム付着の影響をなくすための、原子ビーム導入用の貫通穴をもつ電極開発についても加工方法を開発した。こうして得られた結果をオンチップ・イオントラップに反映することにより、高精度で可搬型、かつ、長時間安定に動作する光クロックが可能となる。

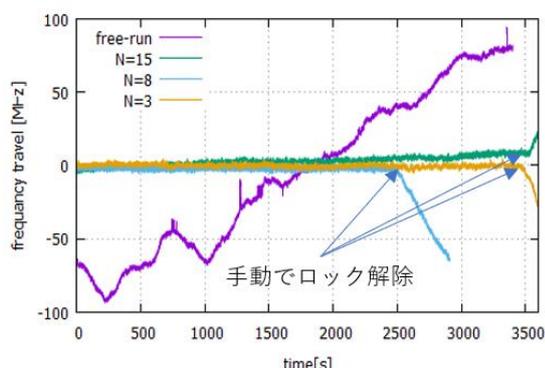


図 1 複数個イオンのスペクトルにロックしたクロックレーザー周波数の時間変化。比較のためにフリーランニングの場合も示してある。基準光共振器無しで1時間以上のロックが確認できている。

## § 2. 研究実施体制

### (1) 大阪大学グループ

- ① 研究代表者: 田中 歌子  
(大阪大学大学院 基礎工学研究科、講師)
- ② 研究項目  
・オンチップ・イオントラップによる新奇量子システムの実現

### (2) NICT 小金井グループ

- ① 主たる共同研究者: 関根 徳彦  
(情報通信研究機構 未来 ICT 研究所フロンティア創造総合研究室、研究マネージャー)
- ② 研究項目  
・高性能オンチップ・イオントラップデバイスの研究開発

### (3) NICT 神戸グループ

- ① 主たる共同研究者: 早坂 和弘  
(情報通信研究機構 未来 ICT 研究所量子 ICT 先端開発センター、研究マネージャー)
- ② 研究項目  
・オンチップ・イオントラップによる小型光クロックの研究開発