

# 研 究 報 告 書

## 「原子位相ロックを用いた究極的時計レーザー安定度の追求」

研究タイプ: 大挑戦型(※延長無／増額有)

研究期間: 平成21年10月～平成27年3月

研 究 者: 志賀 信泰

### 1. 研究のねらい

本研究の狙いは、原子の位相にローカル発振器の位相を合わせる(原子位相ロック)ことにより、原子時計の安定度を飛躍的に高めることである。これまでの手法では、原子の位相は測定するたびにリセットされており、結果として周波数ロックと全く同等な計測となっていた。本研究では弱い測定を用いて原子の位相を測定しつつも原子全体の位相を保持することにより、原子時計の精度を高めることを提案し、実証実験を行った。

通常原子時計の周波数安定度は測定時間  $\tau$  に対して  $\tau^{-1/2}$  のスピードで改善していく。これは、測定を繰り返すと平均値の偏差は測定回数  $N$  に対して  $N^{-1/2}$  のスピードで改善することと対応している。これに対して、原子の周波数の時間積分値である、位相を壊さずに測定し続けることができれば周波数の偏差を  $N^{-1}$  のスピードで改善することが可能になる。測定時間に対しては  $\tau^{-1}$  のスピードで改善することになり、必要な精度に到達するための時間が飛躍的に短くなる。

1回の測定が1秒毎だとすると、従来法では1日の積分が必要だった測定も、5分弱で終わるようになる。この短縮が実現できれば、従来法では測定できないほど微小に1日周期で変動している変動も、この短縮が実現できれば5分毎に微小な変動を測定することができるようになり、測定が可能になる。この手法を(レーザーを基準周波数発振器としている)光原子時計に応用することで、究極的に安定度の高い時計レーザーを実現することができる。

### 2. 研究成果

#### (1)概要

原子位相ロックの実証実験のために、イッテルビウムイオンを周波数の基準原子として用いたイオントラップ型マイクロ波原子時計をまず開発した。そしてラムゼー法を用いて原子の重ねあわせ状態の位相を測定できることを確認した。原子位相ロックを実現するためには、さらに位相を測定しつつ原子の重ね合わせ状態を保持するという問題をクリアする必要がある。その解決のために、1回に位相を測定する原子数を全体の6分の1程度に限定し、原子全体の位相の破壊を部分的にすることで、3回までの位相の連続測定を可能にした。この結果、3回の位相測定の間周波数の分散が  $\tau^{-1}$  のスピードで改善していることが実証できた。これにより、原子位相ロック方式で原子時計の精度を短時間に高めることができることの実証実験に成功した。

#### (2)詳細

##### 研究テーマA「原子位相ロック方式の提案」

時計の進みを、原子の持つ安定な周波数(位相発展)に合わせることで正確な時間を刻むのが原子時計である。原子の位相は、原子の重ね合わせ状態という非常に繊細な状態に現れるため、これまでの原子時計では、時計と原子の位相を比較測定するたびに原子の位相を

壊してしまっていた。そのため、測定を繰り返すと測定誤差が積み上がってしまっていた(この誤差は原子時計の安定度に直結している)。その結果、周波数の誤差の改善スピードは測定時間  $\tau$  に対して  $\tau^{-1/2}$  のスピードで改善するにとどまっていた。

本研究ではこの点に注目して、位相を測定しつつ壊さないように工夫することで誤差がより早い  $\tau^{-1}$  のスピードで改善することを示した。その方策として、原子群に対して「弱い測定」を行うことで原子の位相を保持しつつ測定を繰り返すことができることを提案し、「原子位相ロック」と名づけた。さらに実験的提案として、イオントラップに捕捉した百万個のイオンに対して「ファラデー回転」効果を用いた測定を行うことで、100 回連続で位相差を測定でき、その間誤差が  $\tau^{-1}$  のスピードで改善することをシミュレーション計算により示した(論文発表3)。

### 研究テーマ B「原子位相ロックのマイクロ波実証実験」

原子位相ロックの実証を行うために、まずイオントラップ型のマイクロ波原子時計を作製した(図1)。

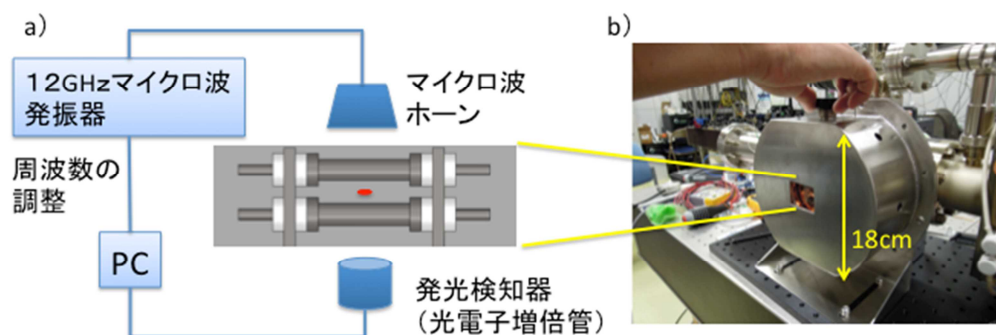


図1 a)イオントラップ型マイクロ波原子時計概略図 b)イオントラップ部写真

我々が開発したイオントラップ型マイクロ波原子時計はイッテルビウムイオンを基準原子として用いており、レーザー冷却と定期的に磁場の測定を行うことで、イッテルビウムイオンを用いるマイクロ波原子時計としては世界最高の精度を達成した(論文発表2、プレスリリース)。

実証実験の準備を進めるうちに、「弱い測定」を現実装置で実現するには時間がかかることが明らかになった。そこで、元々の提案である「弱い測定」を用いる方式ではなく、イオン群の位相を部分毎に測定していく「部分発光」方式を新たに考案した(図2)。

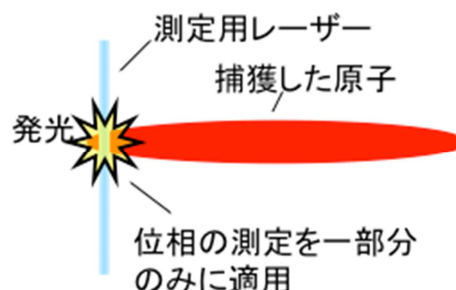


図2 部分発光方式の概念図。1回に位相を測定する原子を部分に限定する。

この方式は、実験装置に大幅な変更を加えることなく直ぐに適用可能であり、全体で 2000 個捕捉したイオンを 350 個ずつ(全体の 1/6 程度)位相測定に用いることで、位相を初期化し直すことなく3回連続的に位相を測定することに成功した。この方式を用いて誤差の測定時間

に対する改善スピードを測定し、3回の連続測定の間  $\tau^{-1}$  のスピードで改善していることを示した。その結果を図3に示す。従来の、測定毎に位相を初期化する方法と比べると、原子位相ロック方式を用いることで  $\sqrt{3}$  倍精度が向上していることが分かる。

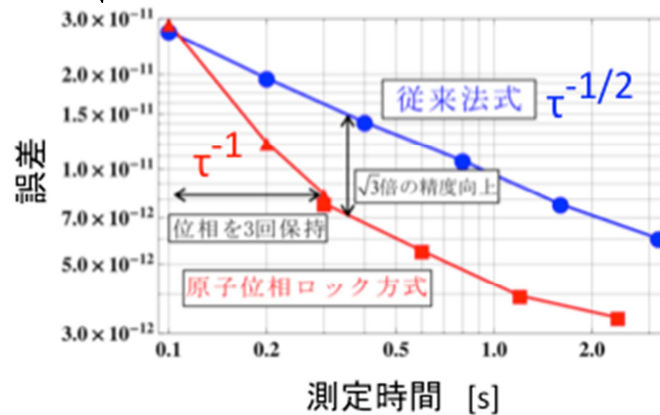


図3 誤差(周波数偏差)の測定時間に対する改善スピード

「弱い測定」は、位相を壊すスピードが遅いメリットはあるが、その分測定の S/N 比が悪い。一方部分測定は「電子棚上げ法」という S/N 比の非常に高い発光測定を用い、イオン全体の位相を保持するために測定するイオンを一部分に限るという方式である。位相を連続測定できる回数は S/N 比と位相を壊すスピードとの兼ね合いで決まる。この部分を検討し、「部分測定」方式は S/N 比が非常に高いために、位相を保持する「弱い測定」方式よりも位相の連続測定回数が増くなり、より優れた方式であることを見出した。

今後、原子位相ロックの実証実験を実用レベルに高めるためには、位相を保持しながら連続測定できる回数を増やす必要がある。そのために、より多くのイオンを捕捉できるイオントラップおよび真空チャンバーを再設計し、製作した。現在このイオントラップを用いた実験を進めている。

#### 研究テーマC「原子位相ロックの光原子時計への応用」

一般的に原子時計は基準周波数の周波数が高い方が精度が良い。マイクロ波原子時計における原子位相ロック技術の実証実験の成功を受けて、この技術の光原子時計への応用を目指すための増額が認められた。現在イオン群に対して光時計遷移に対応したレーザー光を照射して、原子状態の遷移を確認する実験を進めている。

### 3. 今後の展開

今後、原子位相ロック技術を搭載した実用型イオントラップマイクロ波原子時計の開発を行い、次のさきがけテーマである時計同期の技術と組み合わせて情報通信基盤技術へと展開する予定である。ローカルエリアの時刻精度の保持のために、本研究で開発した原子時計が活用される予定である。

#### 4. 評価

##### (1) 自己評価

本研究は、当初の目的であった「原子位相ロック」の実証に成功した。実験を進めるうちに当初提案していた「弱い測定」を用いる方式は、実現に時間がかかることが明らかになった。そこで、簡単に実装可能な「部分発光」という方式を思いつき、実証実験に成功した。しかも、「部分発光」の方式はその高い S/N 比により、「弱い測定」を用いる方式よりも位相の連続測定を行える回数が多いことが後に判明したため、当初の提案よりも優れた方式を作り出すことができた。

原子位相ロックを光時計に適用するために研究費を増額して装置を増やし、現在時計遷移を確認するための準備を進めているところである。光時計遷移に対して原子位相ロックの技術の応用を示すことで応用範囲を大きく広げることができる。

マイクロ波原子時計の実用化にも取り組んでいる。その第一歩として、容易に移動可能な可搬型のイオントラップ型マイクロ波原子時計への改良を進めているところである。既に新たなレーザーとイオントラップを作製し、可搬型のラックに載せた。プロトタイプ完成まであと一歩の所まで来た。

また、今年度から新たに「時計を活用して社会実装する」さががけに採択されたので、これまでの「最新鋭の原子時計を作る」さががけを社会実装へと導く助けにもなるはずである。

##### (2) 研究総括評価(本研究課題について、研究期間中に実施された、年2回の領域会議での評価フィードバックを踏まえつつ、以下の通り、事後評価を行った)。

通常、原子時計の周波数計測精度は測定時間  $\tau$  に対して  $\tau^{-1/2}$  に比例する。精度を上げるには長い計測時間が必要となる。これは、測定を繰り返すと平均値の偏差は測定回数  $N$  に対して  $N^{-1/2}$  に比例することに対応している。

志賀研究者は、位相を定期的に測定してその情報をフィードバックする「原子位相ロック」を提案した。この手法が実現すれば、周波数の偏差を  $\tau^{-1}$  のスピードで改善することが可能になる。これは、測定を繰り返すと平均値の偏差は測定回数  $N$  に対して  $N^{-1}$  に比例することに対応している。志賀研究者は、さががけ研究期間中に、着想を論文で発表し、実証実験に用いる装置開発にも成功して論文を発表、さらには実証実験を成功させて論文を発表するとともにプレス発表を行った。実証実験の準備を進めるうちに、当初の提案した「弱い測定」を用いる方式よりも、イオン群の位相を部分毎に測定していく方式の方が優れていることを見出し、この「部分測定」を用いて3回の連続的位相測定に成功した。

一期生を募集した平成 20 年度に初めて 5 年型が発足し、二期生を募集した平成 21 年度から新たに大挑戦という制度が開始された。志賀研究者は、この制度による 5 年型大挑戦として採用した本研究領域でただ一人の研究者である。研究実施機関が情報通信研究機構で、原子時計に関する情報や技術にアクセスできる環境ではあるが、新しい着想を実験で実証するためには、実証実験を行う装置をゼロから開発する必要がある。着想が正しいかどうか、実証実験装置の開発に成功するかどうか、さらに実証実験に成功するかどうか、という 5 年型の大挑戦にふさわしい提案であると判断して採用した。我が国の時計研究のレベルは高く JST も強くサポートしてきたが、本研究課題はその時計研究に新しい方式を持ち込むチャレンジングな仕事である。結果として、装置の開発過程で、新たなアイデアの着想を得て実証実験に成

功し、当初の目的を達成したことは高く評価できる。

## 5. 主な研究成果リスト

### (1) 論文(原著論文)発表

- |  |
|--|
| 1. N. Shiga, M. Mizuno, K. Kido, P. Phoonthong and K. Okada, "Accelerating the averaging rate of atomic ensemble clock stability using atomic phase lock," <i>New Journal of Physics</i> <b>16</b> , 073029 (2014) |
| 2. P. Phoonthong, M. Mizuno, K. Kido and N. Shiga, "Determination of the absolute microwave frequency of laser-cooled $^{171}\text{Yb}^+$ ," <i>Applied Physics B</i> , (2014)                                     |
| 3. N. Shiga, M. Takeuchi, "Locking the local oscillator phase to the atomic phase via weak measurement," <i>New Journal of Physics</i> , <b>14</b> , 023034 (2012)   |
| 4. N. Shiga, M. Takeuchi, "Overcoming the quantum projection noise (QPN) limit without preparation of the spin-squeezed state," <i>Proc. SPIE</i> <b>8132</b> , 813207 (2011)                                      |

### (2) 特許出願

研究期間累積件数: 2件

1.

発 明 者: 志賀 信泰、竹内 誠

発明の名称: 位相保持型ラムゼー法を用いた基準信号発生器および基準信号発生方法

出 願 人: 情報通信研究機構

出 願 日: 2010/9/1

出 願 番 号: 2010-196254

### (3) その他の成果(主要な学会発表、受賞、著作物、プレスリリース等)

プレスリリース「新しい高精度マイクロ波原子時計の開発・試作に成功～汎用的なルビジウム原子時計の約5倍の精度を実現～」 2014年8月20日