

イッテルビウム光格子時計の長期 運転の実現にむけて

小林 拓実
Kobayashi Takumi

1. 背景

時間の単位である「秒」は、現在セシウム原子のある準位間の遷移に共鳴するマイクロ波の周波数を用いて定義されているが、近年、マイクロ波よりも4-5桁程度周波数の高い光を用いた光格子時計が注目されている¹⁾。周波数の高い光の原子遷移を用いれば、より細かく時間を分割でき、精度向上が可能である。セシウム原子時計は、現在の秒の定義を約15桁の精度で実現しているが、光格子時計は約18-19桁にまで向上することが可能であることが、アメリカのJILA (Joint Institute of Laboratory Astrophysics), NIST (National Institute of Standards and Technology) と日本の(国研)理化学研究所で実証された。これまでパリの国際度量衡局で開催されたメートル条約関連会議で、新しい秒の定義の候補が議論されてきたが、8種類の新しい原子時計が候補に挙がっている。その中でも、(国研)産業技術総合研究所が世界に先駆けて開発に成功したイッテルビウム原子を使った光格子時計(イッテルビウム光格子時計)は、有力な候補の1つとなっている²⁾。

最近では秒の再定義に向けて、世界各国の研究機関で光格子時計の研究開発が盛んになっている。こういった背景を踏まえて、メートル条約関連会議で、秒の定義改定に向けた要求精度等の条件が具体的に設定されるようになった³⁾。その条件の1つに、新しい原子時計による国際原子時(世界の標準時)の定期的な校正が挙げられた。国際原子時は、これまでセシウム原子時計を使って校正がされてきたが、将来、光格子時計に置き換えたときにうまく機能する必要がある。この条件を可能にするためには、長期運転が可能な光格子時計の開発が必要である。し

かし、光格子時計は多数のレーザ光源を必要とする複雑な装置であり、これまで長期間安定して動作することが困難であるとされてきた。今回、産業技術総合研究所では、将来の長期運転の実現に向けたイッテルビウム光格子時計を開発した(写真1)。本稿では、その研究の一部を紹介する。

2. イッテルビウム光格子時計の装置概要

原子時計を含め、あらゆる時計は、a) 振動子、b) 基準、c) 周波数カウンターという3個の基本要素から構成されている。振子時計では、a) は振子、b) は地球の自転、c) は文字盤である。光格子時計では、a) はレーザ、b) は原子の遷移周波数、c) は光周波数コムを含む光周波数計測システムである。光周波数コムは、ノーベル物理学賞に輝いた装置であるが、約500 THzの非常に高い光周波数の測定を可能

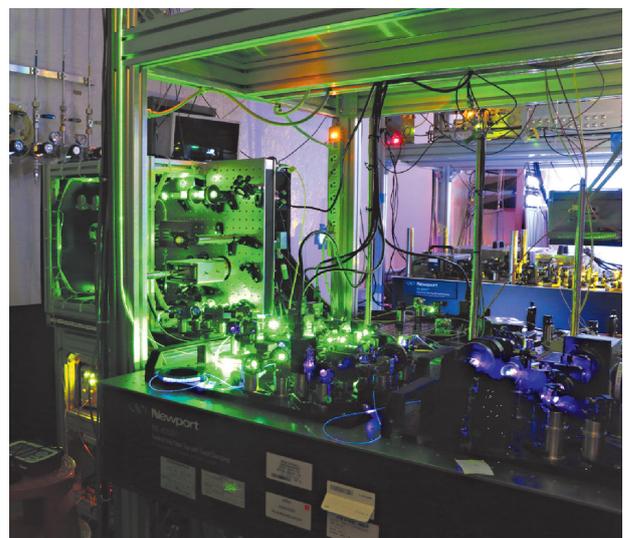


写真1 イッテルビウム光格子時計

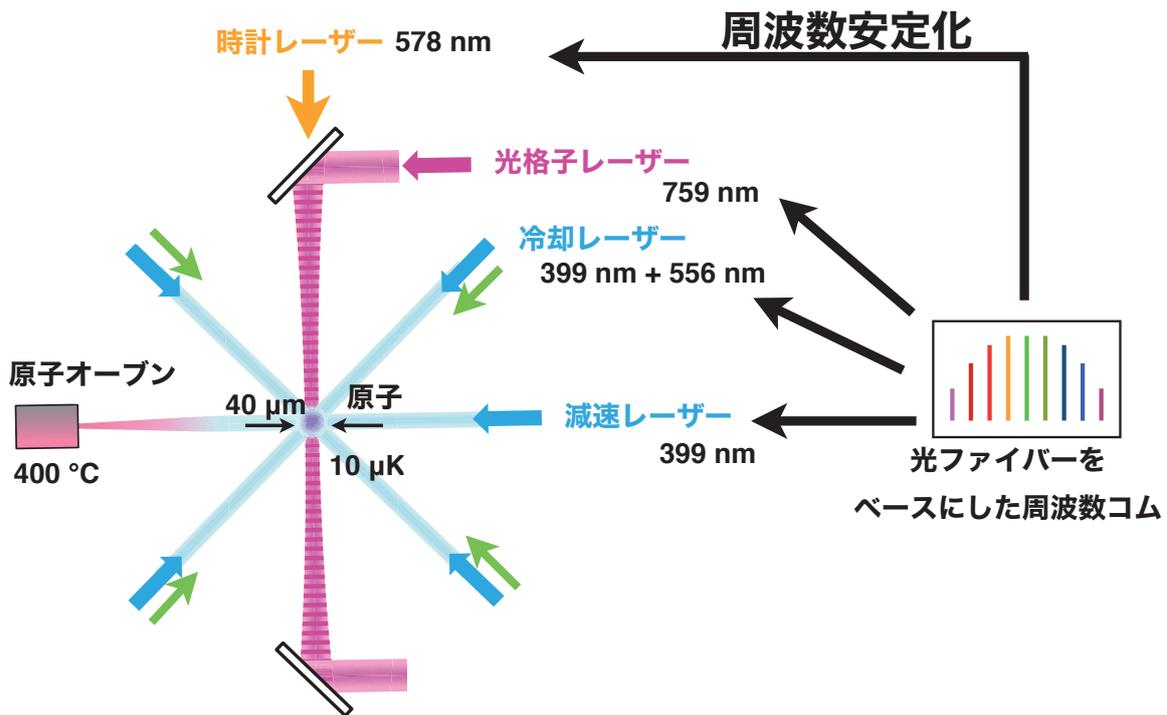


図1 イッテルビウム光格子時計の装置概要

にした。産業技術総合研究所では、光ファイバーをベースとした光周波数コムを独自に開発し^{4,5)}、長期間安定に動作し、周波数雑音の極めて小さい装置の開発に成功した。光周波数コムは周波数計測のほかに、信頼性の高い光周波数基準として用いることができる。今回の研究では、光格子時計の動作に必要なすべてのレーザー周波数を光周波数コムに安定化するシステムを開発したところに新規性がある。

光格子時計の動作に必要なレーザーについて、光格子時計の動作原理に基づいて説明する。図1にイッテルビウム光格子時計の装置概要を示す。光格子とは、レーザー光を重ね合わせたときにできる定在波であり、この定在波の腹（電場強度が極大の位置）に原子を捕獲することで、原子の動きを止める。原子の動きを止める理由は、原子が動くことによって生じるドップラーシフトを消すためである。光格子の作るポテンシャルの深さは、温度に換算して約50 μKと極めて浅いものであるが、イッテルビウム原子はオーブンで約400℃に加熱し気体蒸気にして生成するため、このようにして得られる原子をすぐに光格子に捕獲することはできない。そのため、オー

ブンからの原子ビームに対向する減速レーザー（波長399 nm）、3軸から原子の動きを封じ込める冷却レーザー（波長399 nm及び556 nm）を照射することで約10 μKに冷却する。その後、波長759 nmのレーザーで作った光格子に原子を捕獲する。光格子に捕獲された原子にa) 振動子の役割を果たすレーザー（時計レーザーと呼ぶ。波長578 nm）を照射し、原子のある遷移の共鳴信号が最大になるようレーザー周波数をチューニングすることで、高精度な時計の信号が得られる。今回、これらすべてのレーザーの周波数を光周波数コムで安定化することで、長期間安定に動作できることを確認した。実際に、イッテルビウム光格子時計を数か月の実験期間内において定期的に運転したところ、積算して60時間以上の運転を実現した。

3. イッテルビウム光格子時計の系統誤差の評価

国際原子時を校正する際に、イッテルビウム光格子時計の精度がどの程度であるか報告することは必須であり、時計の系統シフトを評価した。光格子に捕獲された原子の遷移周波数は、時計の運転に不可

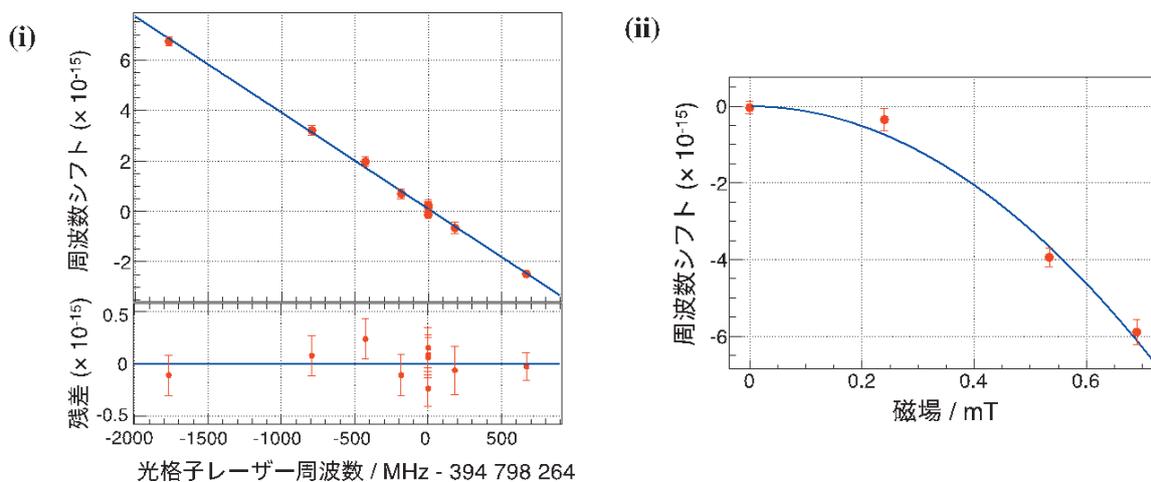


図2 イッテルビウム光格子時計の系統シフトの評価の例

(i) 光格子レーザー周波数と、(ii) 外部磁場に依存したイッテルビウム光格子時計の遷移周波数のシフトの測定結果
 点は測定値、線は理論予測に基づき、(i)で1次関数、(ii)では2次関数によるフィッティングを行った結果である。

避なさまざまな外的要因により、極めて微小な系統シフトが生じる。そこで、外的要因に対する遷移周波数のシフトを精密に測定することで、時計の系統誤差を見積もった。外的要因はさまざまなものがあるが、ここでは例として、(i) 光格子を作るレーザーの光周波数と、(ii) 外部磁場強度に対する遷移周波数のシフトの測定結果を示す(図2)。それぞれの測定点の相対的な誤差は 10^{-16} 台前半であるが、このレベルの精度において理論予測とよく合っており、信頼性の高い測定ができていていることを示している。こういった測定を他のずれを生じる要因についても行い、今回開発したイッテルビウム光格子時計の周波数の相対誤差は 3.6×10^{-16} 、つまり9,000万年に対して1秒程度の誤差であることが確かめられた⁶⁾。

4. 今後の展望

今後は、イッテルビウム光格子時計の安定性と信頼性を更に向上させて、国際原子時へ定期的に校正することを目標とする。国際原子時は5日ごとに計算される時刻であり、最低5日の期間内において、光格子時計の高い稼働率の達成が望ましいが、今回

開発した光格子時計では十分可能であると考えている。時計の誤差は、装置の改良により小さくことが可能であり、将来的には 10^{-18} 台を目指している。

参考文献

- 1) イッテルビウム光格子時計の開発に成功
https://www.aist.go.jp/aist_j/new_research/2009/nr20090729/nr20090729.html
- 2) イッテルビウム光格子時計が新しい秒の定義の候補に
https://www.aist.go.jp/aist_j/new_research/2012/nr20121101/nr20121101.html
- 3) F. Riehle, *et al.*, "The CIPM list of recommended frequency standard values: guidelines and procedures," *Metrologia* **55**, 188 (2018)
- 4) モード同期ファイバーレーザーを用いた広帯域光コム
https://www.aist.go.jp/Portals/0/resource_images/aist_j/aistinfo/aist_today/vol08_01/vol08_01_p29.pdf
- 5) 「長さの国家標準」が新方式に
https://www.aist.go.jp/aist_j/press_release/pr2009/pr20090716/pr20090716.html
- 6) T. Kobayashi, *et al.*, "Uncertainty Evaluation of an ^{171}Yb Optical Lattice Clock at NMIJ," *IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr. Freq. Control.* **65**, 2449 (2018)

((国研)産業技術総合研究所 物理計測標準研究部門)