

科学研究費助成事業（特別推進研究）公表用資料
〔平成31(2019)年度研究進捗評価用〕

平成28(2016)年度採択分

令和元(2019)年5月17日現在

研究課題名（和文） **超高精度光格子時計による
新たな工学・基礎物理学的应用の開拓**

研究課題名（英文） Investigation of Novel Engineering and
Scientific Applications of Ultra-Precise
Optical Lattice Clocks

課題番号：16H06284

研究代表者

香取 秀俊 (KATORI HIDETOSHI)

東京大学・大学院工学系研究科物理工学専攻・教授



研究の概要：本邦発の原子時計技術による「秒」の再定義への国際貢献を視野に入れ、前人未
到の相対不確かさ $\Delta\nu/\nu_0 \approx 10^{-19}$ をもつ光格子時計を実現する。このような高精度な時計をプロ
ーブとする新たな工学、基礎物理学への応用的研究の展開を図る。

研 究 分 野：量子エレクトロニクス

キ ー ワ ー ド：原子時計、量子計測、光格子時計

1. 研究開始当初の背景

精密な時間標準は、相対性理論の検証や物
理定数の恒常性の研究など基礎科学において
重要であるばかりか、GPSによる測位計測や
大容量高速通信ネットワークのタイミング制
御等、その応用においても現代社会で極めて
大きなインパクトをもつ基幹技術である。

光格子時計は、本研究代表者が2001年に
提案し、2003年に最初の検証実験、2004年
には初の絶対周波数測定を行った純国産の原
子時計手法である。レーザー冷却によって運
動状態を凍結した多数個の原子を「魔法周波
数」光格子に捕獲し観測することで、原子時
計の精度を18桁台にまで向上させる。2015
年には、提案当初のターゲットであった18桁
精度の光格子時計を実現した。このような高
精度な次世代原子時計の実用化に向けた新た
な応用の開拓が重要な課題となった。

2. 研究の目的

本邦発の原子時計技術による「秒」の再定
義への国際貢献を視野に入れ、(1)前人未
到の相対不確かさ $\Delta\nu/\nu_0 \approx 10^{-19}$ をもつ光格
子時計を実現する。さらに実現された超高精
度原子時計をプローブとする(2)相対論的
測地技術としての工学応用や(3)異種原子
時計比較による物理定数の恒常性の検証を通
じた基礎物理学への貢献等、時計の新たな応
用を開拓する先駆的研究を展開する。さら
に、(4)中空ファイバ中の魔法光格子によ
る超放射レーザーの実現や魔法周波数ガイド
による原子干渉計手法の開発等、新たな魔法
周波数トラップの応用を探索する。

3. 研究の方法

時計の更なる高精度化に向けて、光格子時
計が基礎を置く「魔法周波数」光格子の手法
を再構築する。18桁を超える時計精度を実現
するためには、従来の魔法周波数を定義する
ために考慮された電気双極子相互作用の他に、
多重極および超分極効果によって生じる高次
の効果も考慮する必要がある。そこで、光格
子ポテンシャルの高次の効果を高精度に評価
し、全光格子ポテンシャルの不確かさを 10^{-19}
に抑える実効魔法条件を決定し、18桁を超
える時計精度の実現を目指す。

高精度な原子時計の工学的応用として、時
計を「重力ポテンシャル計」として機能させ
る相対論的測地を検討する。そのために、光
格子時計の可搬化を実現し、時計を用いた相
対論的測地を実証する。また、基礎物理学へ
の応用として、高精度光格子時計群(Sr, Yb,
HgおよびCd原子)を開発し、これらの相互
周波数比較により、物理定数の恒常性を検証
する。

4. これまでの成果

(1) 光格子時計の基礎物理の解明と深化

SrおよびYb光格子時計の高精度化を目指
して、高次の光格子光シフトの評価を行った。
光格子レーザーによる時計遷移の周波数シフ
トを精密に測定し、原子の分極率(E1, M1-E2,
超分極)を高精度に評価した。得られた分極
率をもとに、高次の光格子ポテンシャルの寄
与を抑制するための光格子レーザー強度と周
波数の条件(実効魔法条件)を決定した(図
1(a),(b))(発表論文4,5)。今後、この得られ
た条件に基づき、19桁時計精度の実現を目指

す。また、新規に開発に着手した Cd 光格子時計においても、時計システムを構築し、電気双極子効果までを考慮した魔法波長を決定した。

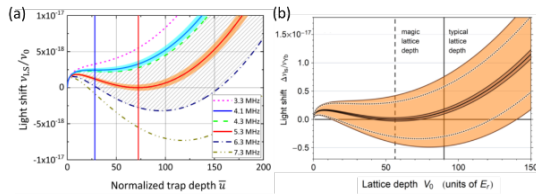


図1 光シフトを最小にする光格子レーザーの実効魔法条件 (a) Sr 原子、(b) Yb 原子

(2) 高精度原子時計の工学的応用の展開

高精度な時計の工学的応用に向けて、可搬型光格子時計の開発と、開発したシステムを用いた相対論的測地の実証実験を行った。東京スカイツリーの地上階 0 m と展望階 450 m に設置した 2 台の光格子時計を光ファイバで繋ぎ、周波数差を計測することで (図 2)、標高差 450 m での一般相対論的效果に相当するおよそ 21 Hz の周波数シフトを観測し、cm レベルの精度で標高差を計測することに成功した。このような時計を利用した測地実験により、光格子時計の相対論的測地技術への応用が有用であることを実証した。

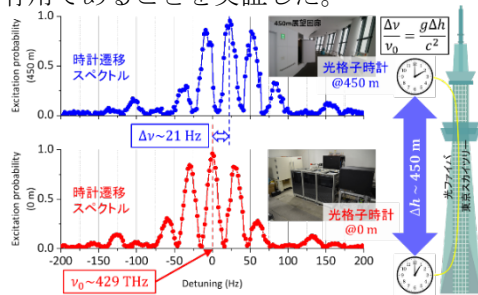


図2 東京スカイツリーの地上階 0 m と展望階 450 m に設置した光格子時計で観測された Sr 原子の時計遷移スペクトル

(3) 高精度周波数計測の基礎物理学への展開

SI 秒の実現精度よりも高精度に光格子時計の周波数を評価するために、Hg, Yb 光格子時計の周波数比の測定を行い、不確かさ 8×10^{-17} で決定した。以前に測定した Sr 光格子時計を基準とした周波数比 $f(\text{Hg})/f(\text{Sr})$, $f(\text{Yb})/f(\text{Sr})$ と合わせて $f(\text{Hg})/f(\text{Yb}) \times f(\text{Yb})/f(\text{Sr}) \times f(\text{Sr})/f(\text{Hg}) - 1 = 0.1(1.2) \times 10^{-16}$ と SI 秒の精度を超える精度で Sr, Yb, Hg 光格子時計の優れた周波数再現性を実証した。この結果は、「秒」の再定義に向けて重要な成果である。また、 ^{87}Sr , ^{88}Sr を用いた光格子時計を開発し、同位体シフトを高精度に測定し (発表論文 1)、時間周波数諮問委員会の勧告値の更新に貢献した。

(4) 魔法周波数トラップの新しい応用の探索

中空ファイバ中の魔法周波数トラップによる超放射レーザーの実現を目指し、時計遷移

への影響の少ない連続ポンピングの実現を試みる。また、魔法周波数ガイドを用いた原子干渉計の開発を行い (発表論文 2)、魔法周波数トラップの重力加速度計としての応用を目指す。

5. 今後の計画

- (1) 光格子ポテンシャルの高次の効果を抑える実効魔法条件を光格子時計に適用し、時計の高精度化を実現する。
- (2) 気温・湿度・気圧などの変化の大きな環境下でも時計精度および長期安定性を担保するより堅牢な時計システムを構築する。
- (3) 異種原子の光格子時計の周波数比較を継続することにより、物理定数の恒常性の検証を行う。
- (4) 中空原子による超放射レーザー、ミニチュア光格子時計等、新しい研究シーズの探索を行う。

6. これまでの発表論文等 (受賞等も含む)

1. T. Takano, R. Mizushima, and H. Katori, Precise determination of the isotope shift of ^{88}Sr - ^{87}Sr optical lattice clock by sharing perturbations, Appl. Phys. Exp. **10**, 072801 (2017). [APEX Spotlights]
2. T. Akatsuka, T. Takahashi, and H. Katori, Optically guided atom interferometer tuned to magic wavelength, Appl. Phys. Exp. **10**, 112501 (2017). [APEX Spotlights]
3. Yanagimoto, N. Nemitz, F. Bregolin, and H. Katori, Decomposed description of Ramsey spectra under atomic interactions, Phys. Rev. A **98**, 012704 (2018).
4. Ushijima, M. Takamoto, and H. Katori, Operational Magic Intensity for Sr Optical Lattice Clocks, Phys. Rev. Lett. **121**, 263202 (2018).
5. N. Nemitz, A. Jørgensen, R. Yanagimoto, F. Bregolin, and H. Katori, Modeling light shifts in optical lattice clocks, Phys. Rev. A **99**, 033424 (2019).

他論文発表 3 件

受賞：第 14 回江崎玲於奈賞、「光格子時計の考案、実証および高精度化」

ホームページ

<http://www.amo.t.u-tokyo.ac.jp/>

http://www.riken.jp/research/labs/chief/qt_m_metrol/

http://www.riken.jp/research/labs/rap/spa_cetime_eng/