

香取量子計測研究室  
Quantum Metrology Laboratory

主任研究員 香取 秀俊 (工博)  
KATORI, Hidetoshi (D. Eng.)



キーセンテンス：

1. 低温動作ストロンチウム光格子時計による超高精度光格子時計の実現
2. イッテルビウム原子を用いた超高精度光格子時計の実現
3. 水銀原子・カドミウム原子を用いた超高精度光格子時計の実現
4. 異原子種時計比較による物理定数の恒常性の探索

キーワード：

量子エレクトロニクス、原子時計、レーザー冷却、極低温原子衝突、量子縮退原子気体、量子計測、量子情報、光格子時計、魔法波長

研究目的

原子スペクトル計測の極限的精度の追求は、量子力学の誕生や現代物理学の発展に大きく貢献してきた。この成果として実現される高精度原子時計は、GPSによる測位や超高速大容量通信ネットワークのタイミング制御など、現代生活を支える基幹技術となっている。我々は2001年に新たな原子時計手法「光格子時計」の概念を提案した。これが実現すれば、原理的には1秒の計測時間で18桁の精度で時間計測が可能になる。このような人類未踏の領域での高精度周波数比較をツールとして、基礎物理定数の恒常性の検証、相対論的な時空の歪みを測地学へ応用する相対論的測地学など、最先端の時間計測に基づく基礎物理の探究とその工学的応用を目指す。これと並行して、「光格子時計」をプラットフォームとした、量子フィードバック手法の検討や量子シュミレータ・コンピュータの研究、また、固体原子デバイス（アトムチップ）の開発など、極低温原子を用いる量子情報技術、量子計測の研究を展開する。

1. 低温動作ストロンチウム光格子時計による超高精度光格子時計の実現（高本、牛島、Das、香取）

本研究では、不確かさの主要因であった黒体輻射の影響を抑える低温動作型ストロンチウム（Sr）光格子時計を開発し、2台の時計（図1）を比較して18桁の精度で一致していることを確認した。このストロンチウム光格子時計を基準として、異種原子を用いた光格子時計との周波数比較を行い、精密な周波数比の測定を行なっていく。2015年度には、Sr光格子時計と後述するYb光格子時計との周波数比測定を行い、異原子種時計比較としてはこれまでの最高精度で周波数比を測定することに成功した。また、19桁精度のストロンチウム光格子時計の実現を目指し、最も大きな不確かさ要因である光格子由来の高次の光シフトの評価を行っている。

2. イッテルビウム原子を用いた超高精度光格子時計の実現（Nemitz、大久保、香取）

イッテルビウム（Yb）原子は、原子の内部状態（遷移周波数、遷移強度）および、飽和蒸気圧等のパラメータがストロンチウム原子と類似しているため、同一の真空装置、光学系を用いて光格子時計システムを構築することができる。本研究では、低温動作型Sr光格子時計システムを、Sr/Yb原子で共用する光格子時計として動作するように再構築し、Yb原子用のレーザー光源を新たに開発して、低温動作型Yb光格子時計を実現する。また、<sup>171</sup>Yb同位体は核スピンの1/2であり、核スピンの9/2であるSr原子よりもシンプルな準位構造を有し、より少ない光源で時計を構築できる利点がある。

2015年度は、前年度までに開発したYb原子用時計システムを本格稼働させて、Yb光格子時計の不確かさ評価を行い、17桁の精度が実現されていることを確認した。さらに、光周波数コムを用いてYb/Sr時計の周波数比較を行い、SI秒の定義の実現精度を遥かに超える17桁の不確かさで周波数比を測定することに成功した。これまでに単一イオン時計の比較で実現された周波数比測定の記録を上回る最高精度が実現された。このような異種原子の時計周波数の比の値は、用いる原子種から一意的に決まる普遍的な値であり、いっどこで測定しても同じ値になるはずである。そのため、このような異種原子時計の周波数比は、時計の再現性を確認する上で重要な指標となる値である。この時計の周波数比が、世界各地で現行の「秒」の精度を上回る高い精度で再現されれば、「秒」の再定義の議論はさらに加速される。

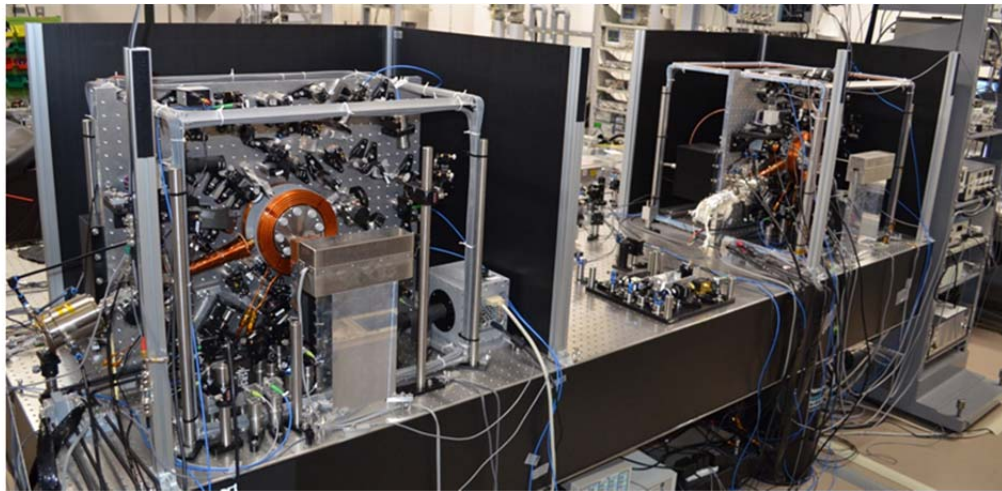


図 1：開発した 2 台の低温動作型光格子時計。左側の装置は、Sr/Yb で共有した時計システム、右側は Sr 用の時計システムであり、Sr/Sr、Yb/Sr の時計比較が切りかえられるようになっている。

### 3. 水銀原子・カドミウム原子を用いた超高精度光格子時計の実現（大前、Puruttivarasin、山口、香取）

黒体輻射シフトを抑えるもう一つの方法は、黒体輻射に対する感度の小さな原子を用いることである。その有力な候補となる原子種は、水銀 (Hg) 原子とカドミウム (Cd) 原子であり、Sr 原子や Yb 原子に比べて黒体輻射に対する感度がおよそ 1 桁小さいため、低温環境を用意することなく、室温においても 18 桁精度が実現できる。そこで本研究では、水銀原子とカドミウム原子を用いた光格子時計の開発を進めている。これらの原子種では、原子の状態操作に必要な遷移周波数が、主に紫外光領域にあるため、原子の冷却、トラップ、時計遷移分光には、安定な紫外光源の開発が不可欠である。我々は、半導体レーザーとその非線形波長変換、光周波数コムを利用した周波数合成等の様々な技術を駆使して高安定な紫外レーザー光源の開発を行った。

水銀原子光格子時計では、2015 年度は、前年度に実現した 16 桁超の時計精度をさらに改善するため、相互比較用の 2 台目の水銀光格子時計の開発を行った。この装置では、高次の光シフトを精密に測定するために、真空槽内にパワー増強用光共振器を作成し、精密な測定をするための十分な光強度を実現した。

カドミウム原子光格子時計では、2015 年度は、カドミウム原子の許容遷移、禁制遷移による磁気光学トラップに初めて成功した。現在、光格子への導入および時計遷移分光に着手している。

### 4. 異原子種時計比較による物理定数の恒常性の探索（高本、Das、牛島、大前、Puruttivarasin、Nemitz、大久保、山口、香取）

物理学の基礎は、「物理定数は定数」という暗黙の仮定のもとに成り立ってきた。例えば、微細構造定数  $\alpha (= e^2/4\pi\epsilon_0\hbar c)$  の恒常性は、原子時計がその構成原子種に依らず同じ時を刻み続けることを保障する。上記テーマで開発しているストロンチウム-水銀-イッテルビウム-カドミウム光格子時計を用いた原子時計の精密比較を行うことによって、物理定数の恒常性の検証を行うことを計画している。

2014 年度に実現した 16 桁超精度の水銀/ストロンチウムの時計周波数比の測定に続いて、2015 年度には、17 桁精度でイッテルビウム/ストロンチウムの時計周波数比の測定を実現した。今後さらなる精度向上とともに、周波数比の測定を長期にわたって繰り返し監視することによって、物理定数の恒常性・時間変動の検証実験を行う。

#### Key Sentence:

1. Development of optical lattice clocks with strontium atoms in a cryogenic environment
2. Development of optical lattice clocks with ytterbium atoms
3. Development of optical lattice clocks with mercury atoms
4. Investigation of the constancy of fundamental constants

#### Key Word:

Quantum electronics, atomic clock, laser cooling, ultracold collisions, quantum degenerate atomic

gases, quantum metrology, quantum information, optical lattice clock, magic wavelength, relativistic geodesy

### **Purpose of Research:**

The quest for superb precision in atomic spectroscopy contributed to the birth of quantum mechanics and the progress of modern physics. Highly precise atomic clocks, which are one of the outcome of such research, are a key technology that supports our modern society, such as navigation with GPS and synchronization of high-speed communication networks. In 2001, we proposed a new atomic clock scheme, the “optical lattice clock,” which should allow us to access the 18-digit-precision in time/frequency in a measurement time of seconds. Armed with such high-precision atomic clocks, we investigate fundamental physics such as the constancy of fundamental constants and their coupling to gravity, as well as the application of such clocks to relativistic geodesy. In parallel, we explore quantum information technology and quantum metrology using “optical lattice clocks” as platforms to investigate the quantum feedback scheme and quantum simulator/computation.

#### 1. Development of optical lattice clocks with strontium atoms in a cryogenic environment (Takamoto, Ushijima, Das, Katori)

The fractional uncertainty of optical lattice clocks based on strontium (Sr) atoms in a cryogenic environment has reduced to  $10^{-18}$  with suppressed blackbody-shift uncertainty. Frequency comparison of two such clocks shows an agreement between them with an uncertainty of  $10^{-18}$  (Fig. 1). Using Sr clocks as a reference, we plan to measure frequency ratios of clocks with different atomic species. In fiscal year 2015, we have demonstrated precise measurement of frequency ratio between cryogenic Sr and Yb clocks with a new record of accuracy as described in the following sections. We have also started the evaluation of higher order lattice light shift to target a 19-digits clock accuracy.

#### 2. Development of optical lattice clocks with ytterbium atoms (Nemitz, Ohkubo, Katori)

As ytterbium (Yb) atoms have similar properties to strontium atoms in transition wavelengths, dipole moments for cooling transition, and the saturated vapor pressure, this allows the realization of optical lattice clocks compatible with Sr and Yb atoms by sharing the vacuum chamber and optics. In this research, we rebuilt Sr/Yb compatible clock system based on a cryogenic Sr optical lattice clock and developed laser sources for cooling, trapping and spectroscopy of Yb atoms. And moreover,  $^{171}\text{Yb}$  atoms have a nuclear spin of 1/2, which enables a simple clock operation with smaller number of laser sources.

In fiscal year 2015, we have finished modification of a cryogenic Sr clock to be compatible with an Yb clock and started its operation. The uncertainty of the Yb clock was evaluated with 17-digits accuracies. We have also demonstrated the frequency comparison of the Yb clock with the Sr clock using an optical frequency comb. The obtained accuracies of frequency ratio Yb/Sr are 17-digits accuracy, which exceeds the accuracy defined by the SI “second” and better than the best accuracies thus far obtained by comparison between two single-ion clocks. The ratio of clock frequencies based on different atomic species is solely dependent on the atomic species and should be universal, even if it is measured anytime and anywhere. Therefore, the ratio with different atomic species is an indicator to confirm the reproducibility of clocks. If the frequency ratio is reproducible far beyond the accuracy of current “second” around the world, the discussion for the redefinition of the “second” will be accelerated.

#### 3. Development of optical lattice clocks with mercury and cadmium atoms (Ohmae, Puruttivarasin, Yamaguchi, Katori)

Another approach to reduce the uncertainty of BBR shifts is to use the atomic species that have smaller sensitivity to the BBR. As mercury (Hg) and cadmium (Cd) atoms have an order of magnitude smaller sensitivity to the BBR than Sr and Yb atoms, we have started the development of optical lattice clocks with Hg and Cd atoms, which may allow achieving 18-digits uncertainty even in a room-temperature environment. The main challenge in realizing the Hg and Cd clocks lies in the development of laser sources. As the main transitions are in the ultraviolet (UV) region, UV lasers with high power and stability are necessary for cooling, trapping and spectroscopy. For the development of stable laser sources in the UV region, laser technologies such as frequency doubling

of master oscillator and power amplifier (MOPA) system and the frequency synthesis with optical frequency combs are exploited.

In fiscal year 2015, we have developed a second Hg-clock setup for more accurate evaluations of systematic errors and reproducibility. The second system has an in-built lattice power build-up cavity inside the vacuum chamber, to increase the intra-cavity power for precise evaluation of higher-order lattice light shifts.

In the development of Cd optical lattice clocks, we have succeeded in cooling and magneto-optical trapping of Cd atoms on the 1<sup>st</sup> stage and 2<sup>nd</sup> stage cooling transitions. Currently, experimental preparations for loading the trapped atoms into the lattice and spectroscopy on the clock transition are in progress.

4. Investigation of the constancy of fundamental constants and relativistic geodesy using optical lattice clocks (Takamoto, Das, Ushijima, Ohmae, Puruttivarasin, Nemitz, Ohkubo, Yamaguchi, Katori)

The foundations of physics and atomic clocks implicitly assume the time and space invariance of fundamental constants. Among these is the dimensionless quantity known as the fine structure constant  $\alpha (= e^2/4\pi\epsilon_0\hbar c)$ . Atomic clocks should keep the same time regardless of their constituent elements if  $\alpha$  is constant, but the constancy of  $\alpha$  is still a debatable issue. Precise comparisons of atomic clocks support such challenges; testing the coupling between electromagnetic constants (such as  $\alpha$ ) and gravity and the constancy of the fundamental constants. Through the frequency comparison of Sr, Yb, Hg and Cd based optical lattice clocks at  $10^{-18}$  uncertainty, we plan to explore the constancy of fundamental constants.

In fiscal year 2015, we realized the frequency ratio measurement between Yb and Sr clocks with the fractional frequency uncertainty of  $10^{-17}$ . Further improvement and long-term operation of ratio measurement will provide more stringent limit on the temporal variation of fundamental constants.

### ***Principal Investigator***

香取 秀俊      Hidetoshi Katori

### ***Research Staff***

高本 将男      Masao Takamoto  
山口 敦史      Atsushi Yamaguchi  
ダス マンジ      Manoj Das  
赤塚 友哉      Tomoya Akatsuka  
ニルス ネミツ      Nils Nemitz  
タネ プルティバラン      Thaned Puruttivarasin  
牛島 一朗      Ichiro Ushijima

### ***Students***

大久保 拓哉      Takuya Ohkubo  
岡場 翔一      Shoichi Okaba  
佐藤 洋介      Yousuke Sato  
吉田 征宏      Masahiro Yoshida  
小峯 祐介      Yusuke Komine  
大森 遼      Ryo Ohmori  
岡田 悟      Satoru Okada  
高橋 忠宏      Tadahiro Takahashi

### ***Assistant and Part-timer***

小林 恵      Megumi Kobayashi

### ***Visiting Members***

大前 宣昭      Noriaki Ohmae  
高野 哲至      Tetsushi Takano