

## 4-3 NICT におけるストロンチウム光格子時計の開発

### 4-3 $^{87}\text{Sr}$ Optical Lattice Clock at NICT

蜂須英和 Nils Nemitz 李 瑛 石島 博 井戸哲也

Hidekazu HACHISU, Nils NEMITZ, Ying LI, Hiroshi ISHIJIMA, and Tetsuya IDO

NICT では次世代の周波数標準として、ストロンチウム光格子時計 (NICT-Sr1) の研究開発を行っている。近年の光周波数標準の発展は目覚ましく、秒の定義を最もよく現示するセシウム一次周波数標準の精度を既に凌駕している。これを受け、国際単位系における秒の再定義が検討されている。この再定義前後で秒の長さの連続性を維持するには、候補である光周波数標準の絶対周波数 (現在の定義を基準にした周波数) を精度良く測定することが必要不可欠である。本稿では、国際的な標準時系である国際原子時 (TAI) を利用した NICT-Sr1 の絶対周波数測定について報告する。この TAI は一次周波数標準によって定期的に校正されているが、TAI の維持及び高度化には高精度な光周波数標準がこの校正に参加することが求められる。これに貢献するには、周波数標準としての国際認定を取得する必要がある。2018 年 NICT-Sr1 はこれを取得し、既に TAI 校正に寄与し始めている [1]。本稿ではこの認定取得についても報告する。

A strontium-87 optical lattice clock has been developed at NICT (NICT-Sr1) as a next generation frequency standard. Recently, optical frequency standards have dramatically improved and surpass cesium primary frequency standards in accuracy and stability. This triggered considerations in the Time-and-Frequency community of redefining the SI second. For any replacement candidate, a precise measurement of the absolute frequency in terms of the SI second is essential to maintain continuity before and after the redefinition. Here, we explain our absolute frequency measurement using International Atomic Time (TAI). We also report on the international certification for contributing to the calibration of TAI, which is regularly performed by the microwave primary and secondary frequency standards. Following the certification, NICT-Sr1 has now started to contribute to the calibration [1].

#### 1 まえがき

時間の単位である秒は、国際単位系 (SI) の 7 つの基本単位の 1 つである。1967 年に秒が暦表秒からセシウム  $^{133}\text{Cs}$  原子の基底状態のマイクロ波遷移で再定義されて以来、既に 50 年が経過した。この定義を現示する\* のがマイクロ波領域の Cs 原子時計である。近年ではマイクロ波よりも高周波である光領域の原子時計 (光周波数標準) の研究開発が精力的に進められている。光周波数標準の主な方式には、欧米発の単一イオン光時計と東京大学香取秀俊教授が考案した日本発の光格子時計がある。NICT のストロンチウム  $^{87}\text{Sr}$  光格子時計 [2] (NICT-Sr1) を含め、Cs 原子時計の精度を凌駕する光周波数標準が既に報告されており、複数の光周波数標準で 18 桁以上の精度が実現されている [3]-[7]。これを受け、光周波数標準を実現す

る原子の光学遷移で秒を再定義することが国際度量衡委員会傘下の時間・周波数諮問委員会 CCTF (Consultative Committee for Time and Frequency) で検討されている [8]。

NICT では、より高精度な日本標準時 JST (Japan Standard Time) [9][10] 及び国際的な標準時系である協定世界時 UTC (Coordinated Universal Time) の維持・高精度化を目的に、郵政省電波研究所 (RRL) の頃より次世代周波数標準の基礎研究を行っている。2004 年からは単一カルシウムイオン ( $^{40}\text{Ca}^+$ ) 光時計の開発 [11] を開始し、2006 年からは  $^{87}\text{Sr}$  光格子時計の開発 [12]、そして 2011 年からはインジウムイオン ( $^{115}\text{In}^+$ ) 光時計の開発 [13] を始めている。

\* 計量標準の分野では、実現や具現化することを“現示する”と表現する。

## 4 原子周波数標準

秒の再定義前後で、秒の長さ(歩度)が不連続であっては不便である。この連続性を維持するために、新しい定義の候補を現行の定義を基準に測定することは重要である。実際に、暦表秒からCsのマイクロ波遷移に秒が再定義された際には、3年程度かけて暦表秒を基準にCsのマイクロ波遷移を評価した。定義の秒(SI秒)を基準にした周波数を絶対周波数と呼んでいる。各研究機関では光周波数標準を開発すると、その性能評価のひとつとして、絶対周波数を報告している。本稿では、国際原子時TAI(International Atomic Time)を利用したNICT-Sr1の絶対周波数測定について紹介する。

また、我々は究極の周波数標準の実現を目指してNICT-Sr1の精度を追求する一方で、これを実用的な周波数標準として機能させ始めている。NICT-Sr1は2018年11月にCCTFの国際作業部会から二次周波数標準に認定され、現在では実際にTAIの校正に貢献し始めている。本稿では、二次周波数標準の国際認定取得についても報告する。

### 2 NICT-Sr1

光周波数標準の構成を図1に示す。局部発振器として、光共振器に周波数安定化したレーザー(以下、「時計レーザー」とする)を利用する(文献[14]にNICTで開発した単一 $^{40}\text{Ca}^+$ 光時計用時計レーザーについての記述がある)。光共振器筐体の材質には、温度によつ

て共振器長が変わらないように熱膨張係数の小さいものが選ばれる。近年ではULE(Ultra Low Expansion)ガラスが広く使われている。また、ミラー基板の材質の選定も同様に大切である。このように元々温度変化の影響が小さい共振器を、温度調節機能を備えた真空槽に入れて、環境温度を一定に保ち、熱による共振器長の変化を抑制している。この他、振動によって共振器が変形し、共振器長が変化することを抑制するために、筐体の形状や保持の仕方も工夫している。このようにして周波数安定化した時計レーザーをプローブ光にして、イオントラップや光格子の手法によって捕獲した原子を分光する。レーザーの周波数が原子の共鳴周波数に同調すると、原子はレーザーをよく吸収する。この吸収強度の周波数依存を利用して、時計レーザーの周波数を原子の特定の光学遷移に安定化することで、安定度と確度が共に高い周波数を得ている。光周波数標準のことを慣習的に光時計と呼ぶことも多いが、上記のように“光時計”よりも“光周波数標準”の表現の方が的を射ている。単一イオン光時計と光格子時計の違いは、分光サンプルの原子の捕獲方法の違いである。どちらの方式でも、さらにどの原子遷移を採用するかという違いがある。

次に光格子時計の原理を紹介する。詳細は文献[15]に譲り、ここでは大まかな手順を紹介する。我々は光格子時計の原子光学遷移にストロンチウム $^{87}\text{Sr}$ の $^1\text{S}_0 - ^3\text{P}_0$ 遷移を採用した。実験の手順は以下のとおりである。

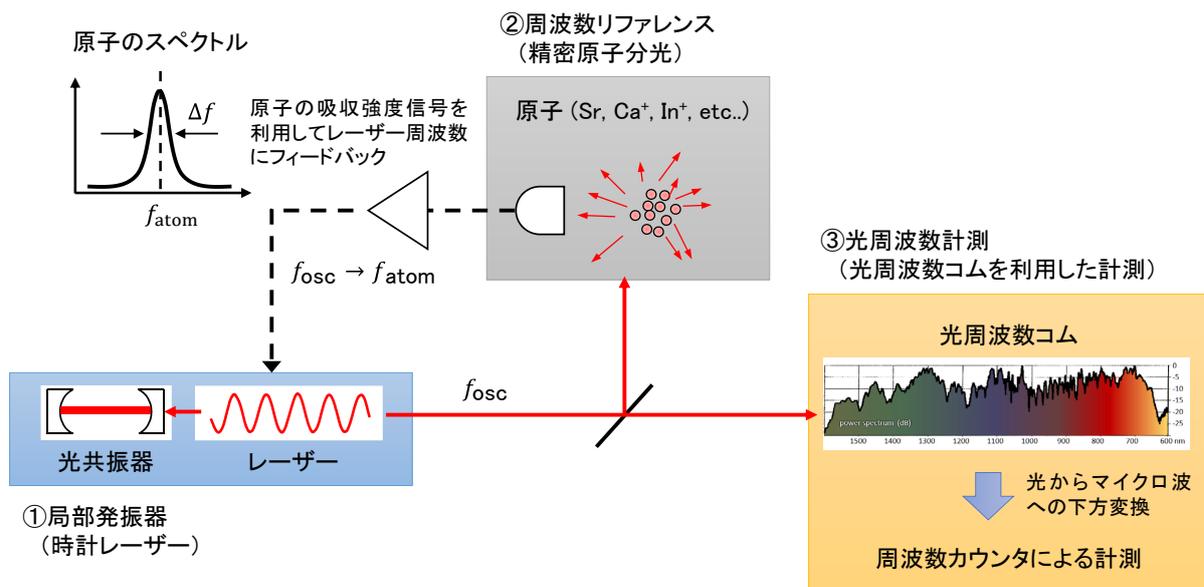


図1 光周波数標準の構成

光共振器に周波数安定化したレーザー(周波数 $f_{osc}$ )を原子に照射し、吸収強度の周波数依存を利用して、 $f_{osc}$ を原子の共鳴周波数( $f_{atom}$ )に調整することで、原子に周波数安定化した光周波数標準を生成している。この標準周波数を光周波数コムで下方変換し、周波数カウンタなどで周波数を計測する。

## (1) レーザー冷却及び捕獲

真空槽の中で 500 °C 以上に加熱した Sr 金属片から原子線を生成する。この原子線に対向するように Sr 原子の遷移強度の大きいスピン許容遷移  $^1S_0 - ^1P_1$  に相当する波長 461 nm のレーザーを照射して、数 100 m/s の原子を減速する。次に、3 軸の 6 方向から適切な周波数と偏光を調整したレーザーを照射して、減速の時と同じ  $^1S_0 - ^1P_1$  遷移を利用したレーザー冷却法により原子を数 10 cm/s に相当する数 mK まで冷却しながら捕獲する。そして、より低温に冷却するのに適した遷移強度の小さいスピン禁制遷移  $^1S_0 - ^3P_1$  に相当する波長 689 nm のレーザーを用いたレーザー冷却に切り替えてさらに原子をおよそ 1 cm/s に相当する数  $\mu$ K まで冷却しながら捕獲する。これを 1 s 足らずで行っている。

## (2) 光格子による原子の捕獲

適切な周波数を選ぶと原子は光強度の強いところに集まる性質があるため、これを利用して数千個から数万个の冷却原子を光の定在波(光格子)に捕獲する。原子のエネルギー準位は、光格子を構成するレーザーの周波数や偏光、強度に依存する。そこで、光格子を適切な条件に調整すると、特定の遷移に対して、あたかもレーザー光が無い時と同様な分光ができる。このときの光格子の波長(周波数)を魔法波長と呼んでいる [16]。

## (3) 分光

原子を分光する前に、スピン偏極という方法で適切な初期電子状態を準備する。その後、自然線幅が数 mHz の Sr の時計遷移  $^1S_0 - ^3P_0$  に相当する波長 698 nm (周波数 429 THz) の時計レーザーによって原子を分光する。

## (4) 状態検出

時計レーザーにより原子が励起状態  $^3P_0$  に遷移していれば、遷移強度の大きいスピン許容遷移  $^1S_0 - ^1P_1$  に相当する検出レーザーを照射しても、原子は光を吸収・放出しない。反対に、 $^3P_0$  に遷移していなければ、検出レーザー光を吸収・放出するため、高感度カメラなどでその放出光を検出できる(量子シェルピング法 [17])。これを利用して、原子の状態を検出する。

## (5) 時計レーザーの周波数を調整

分光結果を利用して、音響変調光学素子 AOM (Acousto-Optic Modulator) の周波数を調整することで、時計レーザーを原子の時計遷移周波数に安定化する。

実際の時計動作では、時計レーザーの周波数を時計遷移に相当する周波数から少だけ周波数シフトさせて、励起率が 50 % 程度になる原子スペクトルの肩に相当する周波数に調整している。スペクトルの両肩を

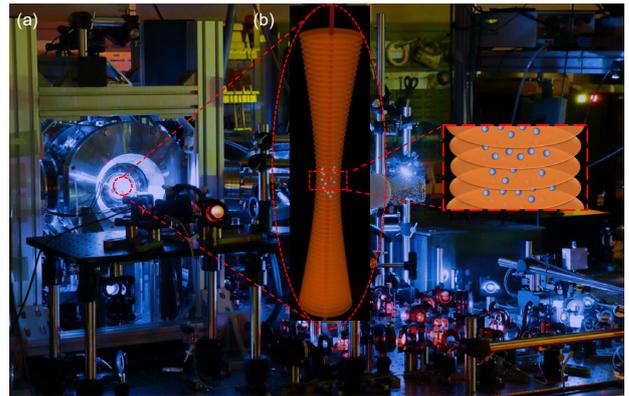


図2 (a) NICT-Sr1の真空装置と光学系の一部 (b) 光格子の概念図  
パンケーキ状に並んだトラップ領域に複数の原子を捕獲する。捕獲した原子に光格子の光軸方向から時計レーザーを照射する。

分光すれば、時計遷移の中心周波数からどちらにどれだけずれているかが分かるので、これを時計レーザーの周波数安定化に利用している。環境(温度や磁場、捕獲する光格子の条件など)によって、時計遷移の周波数は無摂動の周波数からシフトする。可能な限りシフトが小さくなるように設計しているが、完全にシフトを除去することはできないため、実験的あるいは理論的に可能な限り正確に補正する。この補正量の不確かさが、その周波数標準の確度である。3で紹介する NICT-Sr1 (図2) の絶対周波数測定の際に評価した補正量の不確かさを表1に示す [2]。詳細は文献 [2] に譲るが、このときの NICT-Sr1 については、原子を捕獲するための光格子、真空槽内の原子が受ける室温の黒体輻射、原子間衝突によるシフトが主な不確かさ要因であり、その確度は  $5.7 \times 10^{-17}$  であった。

### Intermittent 評価法 (光周波数標準の 間欠運転によるマイクロ波周波数標準 の評価法)

絶対周波数測定には大きく分けて2つの方法がある。1つは、ローカルの一次及び二次周波数標準を基準にして周波数決定する方法で、もう1つは世界中の一次及び二次周波数標準が校正している TAI の歩度を利用して周波数を決定する方法である。ローカルな周波数標準を基準にした測定では、マイクロ波周波数標準の統計不確かさが十分小さくなるまで測定する。そして、近年ではマイクロ波周波数標準の系統不確かさで決まる測定が実現されており、高精度な一次及び二次周波数標準を有する機関ではこの方法で高精度な絶対周波数測定を実現している。一方で、TAI を利用した測定では、TAI をローカルに現示する各機関独自の標準時系 UTC(*k*) や水素メーザーなどのマイクロ波周波数標準を仲介周波数標準として GNSS (全球測位

## 4 原子周波数標準

表1 NICT-Sr1の周波数シフトとその不確かさ

単位は  $10^{-17}$ 。無摂動状態の光学遷移周波数を得るために、複数の要因による周波数シフトを評価し、補正する。その時の不確かさが周波数標準の精度。このときのNICT-Sr1の精度は  $5.7 \times 10^{-17}$  であった。

| シフト要因                 | シフト    | 不確かさ |
|-----------------------|--------|------|
| 黒体輻射                  | -511.1 | 2.0  |
| 光格子による光シフト(スカラー/テンソル) | -2.7   | 3.8  |
| 光格子による光シフト(4次)        | 0.2    | 0.11 |
| 光格子による光シフト(E2/M1)     | 0      | 0.5  |
| 時計レーザーによる光シフト         | -0.1   | 0.1  |
| dc シュタルクシフト           | -0.12  | 0.16 |
| 二次ゼーマン                | -52.2  | 0.3  |
| 原子間衝突                 | -4.1   | 2.8  |
| 残留ガス衝突                | 0      | 1.8  |
| ラビ引き込み                | 0      | 0.1  |
| サーボエラー                | 0      | 1.5  |
| 計                     | -570.1 | 5.7  |

衛星システム)や通信衛星を利用した時刻・周波数比較(衛星リンク)を経由してTAIを基準とするため、衛星リンクの統計不確かさが十分小さくなるまで、測定時間を積算する必要がある。光周波数標準はマイクロ波周波数標準に比べて安定度が高いため、一般的にはこの方法では衛星リンク不確かさや仲介マイクロ波周波数標準に起因する不確かさが主な不確かさ要因になる。ここまでは、TAIを基準に光周波数標準を評価する場合の話であったが、この反対に光周波数標準を基準にTAI評価する場合も同様に、衛星リンク不確かさや仲介周波数標準の安定度に制限された測定になる。

そこで我々は、光周波数標準とTAIを仲介するローカルな周波数標準を、間欠運転する光周波数標準で効率よく評価(Intermittent評価法)し、衛星リンクの平均化時間を延ばすことでリンク不確かさを抑制し、光周波数標準とTAIの間のリンク不確かさを改善する方法を提案している[18]。本節では、このIntermittent評価法について紹介する。

まず標準時系の生成方法を通して、NICT-Sr1とTAIの関係を整理しておく。国際度量衡局BIPM(Bureau international des poids et mesures)は、世界中の標準研究所などから400台以上もの原子時計の情報を集め、それらの加重平均から自由原子時EAL(Échelle Atomique Libre)を計算する。BIPMは、世界に10数台の国際認定を受けた一次及び二次周波数標準によるEALの歩度評価を集め、周波数を校正し、標準時系TAIを決定している。そして、TAIと地球の自転に基づく時系のひとつである世界時UT1との時刻差の絶対値が0.9sに収まるように $\pm 1$ sステッ

プでうるう秒調整した国際的な標準時系がUTCである。したがって、TAIとUTCの歩度(周波数)は正確に同じである。

TAI及びUTCはBIPMが算出する時刻であり、実際の時刻信号は存在しないため、このままでは実生活で利用するには不便なため、各国の標準研究所などでは、自局の原子時計を利用するなどして、UTCを実信号としてローカルに現示した標準時UTC(k) (“k”は機関名の略称)を生成している。毎月BIPMが発行する月報Circular Tで、前月のUTCとUTC(k)の5日ごとの時刻差UTC - UTC(k)が1か月分報告される[19]。ちなみに、Circular Tでは修正ユリウス日MJD(Modified Julian Date)の下1桁が、4か9の日の時刻差が報告される(例えば、2019年7月10日に対応するMJD58674など)。そのため、TAIを利用した光周波数標準の評価では、この5日間を1つの単位としている。

図3はIntermittent評価法による5日間の評価を示している。図3の縦軸は適当な周波数 $\nu_0$ からの偏差を $\nu_0$ で除した無次元量(ここでは「規格化周波数偏差」とする)横軸は時間である。図3(a)は仲介マイクロ波周波数標準にUTC(k)を採用した場合である。NICT-Sr1とUTC(k)、TAIをTAIの歩度で規格化した周波数偏差をそれぞれ $y_{Sr}$ 、 $y_{UTC(k)}$ 、 $y_{TAI}$ とする。次式で示されるように、斜線部の面積AはUTC(k)とTAIの5日間の時刻差の変化量を表している。

$$A = \int_{\text{Day0}}^{\text{Day5}} (y_{UTC(k)} - y_{TAI}) dt = [UTC(k) - UTC]_{\text{Day5}} - [UTC(k) - UTC]_{\text{Day0}} \quad (1)$$

BIPMはCircular Tで5日ごとの時刻差を報告するが、この5日の間は $y_{UTC(k)}$ の $y_{TAI}$ に対する周波数揺らぎは分からない。この5日間にNICT-Sr1を連続的に運用して、NICT-Sr1とUTC(k)の時刻差( $y_{Sr}$ と $y_{UTC(k)}$ の間の面積)を測定することは、マイクロ波標準で従来から実施されている方法であり、我々もNICT-Sr1の連続運用によって時刻差を評価した実績がある[1]。一方で、我々はIntermittent評価法を適用してNICT-Sr1のより短い運用時間で効率よくUTC(k)を評価することを提案している。図3(a)に示したように、この5日間にNICT-Sr1の数時間の測定を間欠的に3度行って、 $y_{Sr}$ を基準に $y_{UTC(k)}$ を評価することを考える。この測定結果から、NICT-Sr1とUTC(k)5日間の平均周波数差を見積もる場合には、測定していない間の $y_{UTC(k)}$ の周波数の揺らぎに起因する不確かさ(デッドタイム不確かさ)を考慮する必要がある。これに対し、図3(b)のように、5日間にNICT-Sr1の数時間測定をより多く、かつ等間隔に実施することを考える。Intermit-

tent 評価法では、デッドタイム不確かさを考慮して仲介周波数標準の平均周波数を評価するが、測定回数が多くなれば、それだけ連続運転に近付き、デッドタイム不確かさが小さくなるため、より正確に仲介周波数標準の周波数を評価できるのは明らかである。しかしながら、TAI への衛星リンク不確かさ相当の評価ができれば、それ以上運用時間及び頻度を増やして仲介周波数標準の周波数の見積もり不確かさを小さくしても効果は小さい。そこで、Intermittent 評価法では、効率的に衛星リンクの不確かさ相当で仲介周波数標準の周波数を評価することを考える。図 3 (b) では仲介周波数標準 LTO (Local Transfer Oscillator, 規格化周波数偏差  $y_{LTO}$ ) として水素メーザーを考慮する。NICT の日本標準時システムでは常時 UTC (NICT) と水素メーザーの位相差を DMTD システム [20] によって測定しているため、面積 B は (1) 式と同様にして求められる。UTC (NICT) は時々 UTC に合わせる調整を入れるため、水素メーザーよりもこの時間スケールで周波数変動が大きい。そこで仲介周波数標準に水素メーザーを使うと、デッドタイム不確かさを抑制でき、より正確に仲介周波数を評価することができる。同じ回数の間欠運転でも、図 3 (b) のように適切な仲介周波数標準を採用し、光周波数標準の運用間隔を等間隔に設計することでデッドタイム不確かさを抑制することができる [18][21]。

#### 4 Intermittent 評価法による TAI を利用した絶対周波数測定

ここでは Intermittent 評価法を用いて TAI の歩度である TAI 秒を利用した絶対周波数測定について紹介する [2]。この手法では、光周波数標準を仲介周波数標準で評価し、衛星リンクを介して仲介周波数標準を TAI 秒で評価することで、TAI 秒に基づいて光周波数標準を評価する。ここで注意が必要なのは TAI 秒が SI 秒からずれ得ることである。一次及び二次周波数標準は定常的に TAI 秒を評価しており、評価した翌月に前月の TAI 秒の SI 秒からのずれが分かる。そのため、光周波数標準を評価した期間の TAI 秒のずれを後で補正して、SI 秒に基づく絶対周波数を決定する。これを式で示すと、下記のとおりである。

$$\frac{y_0(\text{Sr})}{y_0(\text{SI})} = \frac{y_0(\text{Sr})}{y(\text{LTO})} \frac{y(\text{LTO})}{y(\text{UTC}(k))} \frac{y(\text{UTC}(k))}{y(\text{TAI})} \frac{y(\text{TAI})}{y_0(\text{SI})} \quad (2)$$

ここで、 $y_0(\text{Sr})$ ,  $y(\text{LTO})$ ,  $y(\text{UTC}(k))$ ,  $y(\text{TAI})$ ,  $y_0(\text{SI})$  はそれぞれ NICT-Sr1 と LTO, UTC (k), TAI 秒, SI 秒の規格化周波数偏差を表している。2016 年に実施した TAI を利用した絶対周波数測定の手順を示す。

- (1) Circular T が報告する日程 (MJD の下一桁が 4 と 9 日) を参考に、NICT-Sr1 を評価する 10 (5 × 2) 日間を決める。この間の時刻差 UTC - UTC (k) から平均周波数比  $y(\text{UTC}(k); 10\text{days})/y(\text{TAI}; 10\text{days})$  を求める (UTC と TAI の歩度は同じであることに注意)。
- (2) Intermittent 評価法で NICT-Sr1 と水素メーザーのこの期間の平均周波数比  $y_0(\text{Sr})/y(\text{LTO}; 10\text{days})$  を測定する。NICT-Sr1 による水素メーザーの評価系を図 4 に示す。NICT-Sr1 から生成する光標準周波数 429 THz に Er 添加光ファイバコム (Er コム) を位相同期する。このときの NICT-Sr1 の周波数は 2015 年に測定した絶対周波数 429 228 004 229 872.97 Hz [22] と設定した。Er コムを使って NICT-Sr1 の標準周波数を 100 MHz に下方変換 (ダウンコンバート) し、これと水素メーザー 100 MHz の位相差を測定する。図 5 に示すように、NICT の水素メーザーは 10 000 s (~3 時間) で 16 桁に到達する安定度があり、NICT-Sr1 の安定度はそれに比べて十分高いので、3 時間程度で 16 桁の精度で評価ができる。この評価を 10 日間毎日行った。その結果を図 6 に示す。縦軸は NICT-Sr1 を基準にした水素メーザーの規格化周波数偏差、横軸は評価期間である。このプロットを一次フィッティングして 10 日間の NICT-Sr1 と水素メーザーの平均周波数比  $y_0(\text{Sr}; 10\text{days})/y(\text{LTO}; 10\text{days})$  を求める。ここで考慮する不確かさは、フィッティングエラーに相当する統計不確かさとデッドタイム不確かさである。水素メーザーの周波数ノイズはフリッカー周波数ノイズ  $\sigma_F$  が大きな寄与をしている。このような場合のデッドタイム不確かさは、NICT-Sr1 を運用していない時間を  $\tau$  とすると、 $\tau\sigma_F/\sqrt{\ln 2}$  で見積もることができる [23]。詳細は [2] に記載されているが、

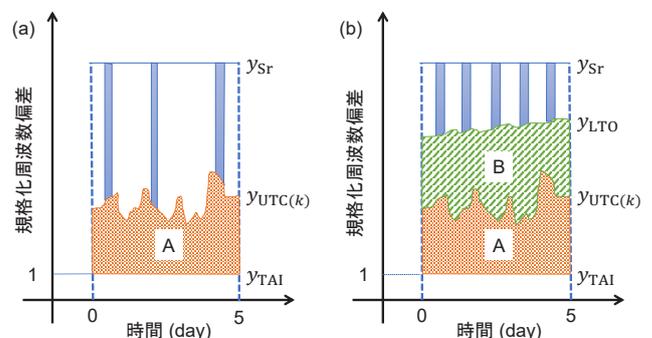


図 3 5日間の Intermittent 評価方法

(a) 5日間に光周波数標準で仲介周波数標準の UTC (k) を 3 回評価した場合。このとき測定間隔は考慮していない。(b) 5日間に光周波数標準で仲介周波数標準の水素メーザーを 5 回評価した場合。評価期間にわたって等間隔に評価すること、仲介周波数標準に安定度の高いものを利用することで、より効率よく正確な周波数測定を実現している。

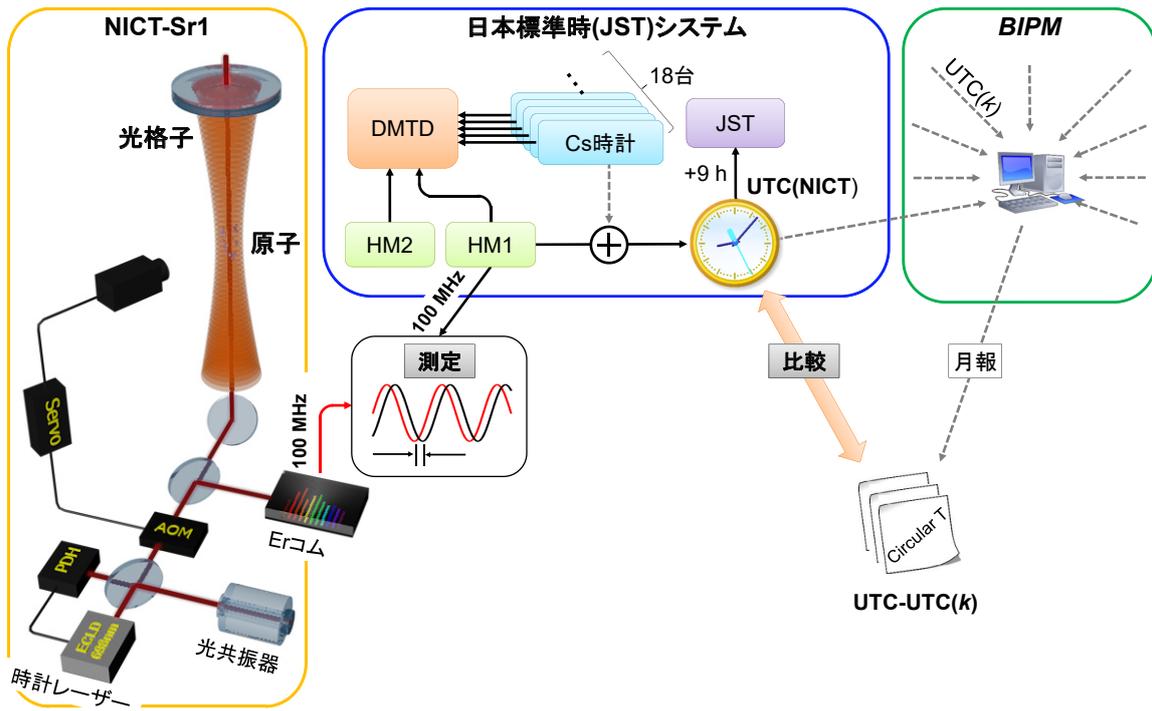


図4 Intermittent 評価法による水素メーザー周波数測定及び標準時系の関係

NICT-Sr1 から生成した 100 MHz で水素メーザー 100 MHz を評価。日本標準時システムでは、この水素メーザーと UTC(NICT) の位相差が定期的に測定されている。BIPM が報告する時刻差 UTC - UTC(NICT) や TAI 秒の SI 秒からの校正値を利用して、NICT-Sr1 の絶対周波数を決定する。

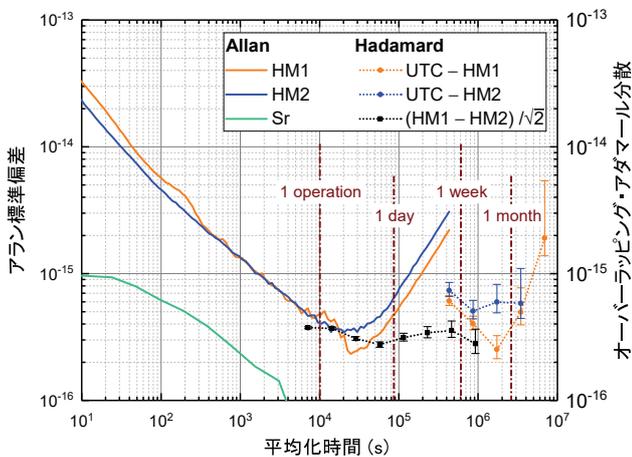


図5 水素メーザーと NICT-Sr1 のアラン標準偏差及びオーバーラッピング・アダマール分散

オレンジと青実線は 2 つの水素メーザー HM1 と HM2 のアラン標準偏差、オレンジと青点線は HM1 と HM2 のオーバーラッピング・アダマール分散。黒点線は、HM1 と HM2 のオーバーラッピング・アダマール分散。HM1 と HM2 はともに 10 000 s で 15 桁以下の安定度に到達する。NICT-Sr1 の安定度 (緑線) は水素メーザーよりも十分に高い。

オーバーラッピング・アダマール分散から  $\sigma_F$  を見積もり、運用していない期間のフリッカー周波数ノイズによるデッドタイム不確かさを評価した。これにランダムウォークノイズも考慮して、10 日間の測定キャンペーン中のデッドタイム不確かさを見積

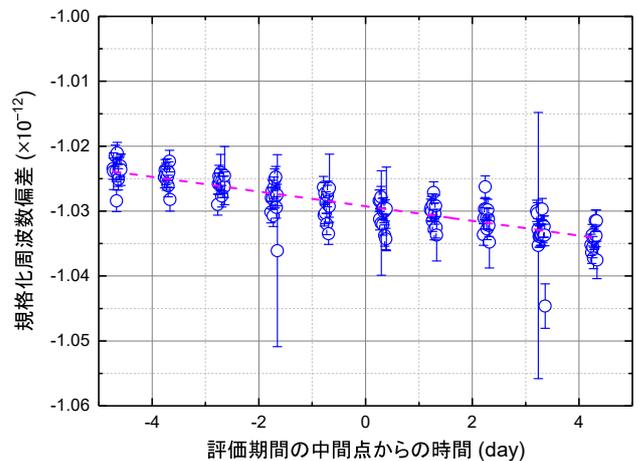


図6 Intermittent 評価法を用いた水素メーザーの周波数測定 1日3時間の測定を10日間行った。これをフィッティングして、デッドタイム不確かさを考慮し、この期間の平均周波数を見積もる。

もった。また、水素メーザーが予測不能な挙動をしたときに、それを判断できるように、複数の水素メーザーの平均を仲介周波数標準に用いた。この場合複数の水素メーザーによる平均化の効果も期待できる [2][24]。

(3) 日本標準時システムで測定している UTC (NICT) と水素メーザーの位相差から、 $y(\text{LTO}; 10\text{days})/y(\text{UTC}(k); 10\text{days})$  を取得する。

(4) Circular T にはおよそ 1 か月間の TAI 秒の校正值も報告されるため、この期間の平均周波数比  $y(\text{TAI}; 30\text{days})/y_0(\text{SI}; 30\text{days})$  を得られるが、この校正值を使うには NICT-Sr1 で評価していない間の TAI の周波数揺らぎに起因する不確かさ(これもデッドタイム不確かさ)を考えなければならない。そこで、BIPM の Petit 博士が我々の測定した 10 日間での平均周波数比  $y(\text{TAI}; 10\text{days})/y_0(\text{SI})$  を計算し、本評価ではこれを採用した。10 日間の平均値では 30 日から 10 日へ平均化時間が短縮されるため、統計不確かさが大きくなるが、その一方で、デッドタイム不確かさを考慮する必要はなくなる。

以上により、(2) 式を使って最初に設定した NICT-Sr1 の周波数の SI 秒からのずれ  $y_0(\text{Sr})/y_0(\text{SI})$  を評価し、絶対周波数を決定した。このような測定キャンペーンを 3 回 (10 日 × 3 回) 実施して、各キャンペーンの不確かさを重みとした平均から絶対周波数を決定した。この測定で考慮した不確かさを表 2 に示す(詳細は文献 [2] に譲る)。一次周波数標準による TAI 秒の校正では、一次周波数標準の系統不確かさも考慮される。ここでは、NICT-Sr1 の測定期間に TAI を評価していた複数の一次周波数標準のお互いに相関のない不確かさが平均化される [22] ことを利用している。このようにして、不確かさ  $4.3 \times 10^{-16}$  で絶対周波数を決定した。CCTF2012 会議以降に報告された各機関の  $^{87}\text{Sr } ^1\text{S}_0 - ^3\text{P}_0$  の絶対周波数を図 7 に示す。仏国 LNE-SYRTE と独国 PTB の  $^{87}\text{Sr}$  光格子時計は、各機関が持つ世界最高精度級の一次周波数標準を基準にして、光格子時計を連続運用して絶対周波数を決定した。私たちの結果は彼らの結果と 16 桁台の不確かさで一致している。これらの結果を踏まえ、2017 年に行われた CCTF2017 会議において秒の定義の二次表現である同遷移の推奨周波数値が  $\nu_{2017}(\text{Sr}) = 429\,228\,004\,229\,873.0\text{ Hz}$  に更新された(図 7 のオレンジの線から青の線に更新)。TAI を利用した絶対周波数測定のひとつのメリットは、TAI は多数の周波数標準を基に決定されることから、特定の周波数標準に依存しないため、我々はより確からしい絶対周波数が得られると考えている。

現在、我々と同様の Intermittent 評価法を用いて、英国 NPL では単一イッテルビウム ( $^{171}\text{Yb}^+$ ) 光イオン時計の八重極遷移  $^2\text{S}_{1/2} - ^2\text{F}_{7/2}$  の絶対周波数 [32] を、米国 NIST ではイッテルビウム光格子時計の  $^1\text{S}_0 - ^3\text{P}_0$  遷移の絶対周波数 [33] をそれぞれ報告している。

表 2 2016 年に実施した NICT-Sr1 の絶対周波数測定の不確かさ 3 回の測定キャンペーンのうちの一つ (# 2) と全測定の不確かさを示す。

|                 | キャンペーン #2 ( $10^{-17}$ ) | 計 ( $10^{-17}$ ) |
|-----------------|--------------------------|------------------|
| NICT-Sr1        |                          |                  |
| 統計              | 2                        | 1                |
| 系統              | 6                        | 6                |
| 重力シフト           | 2                        | 2                |
| 水素メーザー          |                          |                  |
| フィッティング         | 18                       | 10               |
| デッドタイム          | 10                       | 6                |
| UTC - UTC(NICT) | 49                       | 28               |
| UTC - SI second | (50)                     |                  |
| 系統              | 15                       | 14               |
| ランダム部分          | 48                       | 26               |
| 計               | 73                       | 43               |

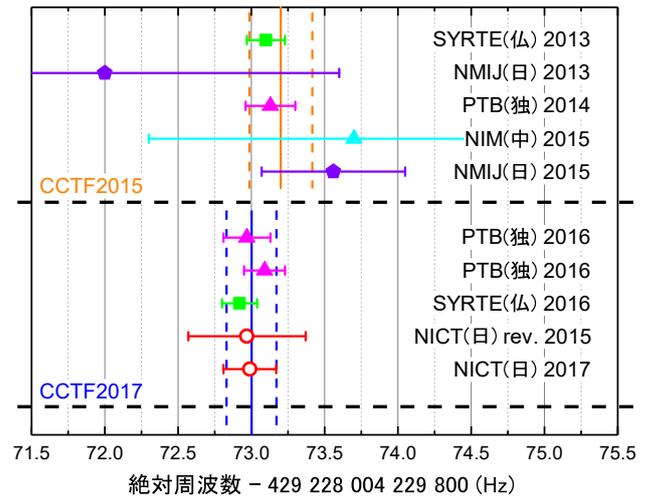


図 7 CCTF2015 及び CCTF2017 で更新した推奨周波数をそれぞれオレンジと青の実線で示す。また、それぞれの不確かさは  $5 \times 10^{-16}$  と  $4 \times 10^{-16}$  であり、破線で示している。(SYRTE2013[25], NMIJ2013[26], PTB2014[27], NIM2015[28], NMIJ2015[29], PTB2016[30], SYRTE2016[31], NICT rev.2015[22], NICT2017[2])

## 5 NICT-Sr1 の二次周波数標準の認定

世界の十数台のセシウム一次周波数標準及び LNE-SYRTE のルビジウム二次周波数標準は、定常的に TAI 秒の校正に寄与している。現在この校正への貢献には CCTF の一次及び二次周波数標準作業部会 WG-PSFS (Working Group on Primary and Secondary Frequency Standards) からの校正資格の承認が必要である。これまでの一次及び二次周波数標準は、マイクロ波帯の原子遷移に基づく周波数標準である。我々は 2016 年の 4 月から 9 月までの半年間と 2018 年 2 月

## 4 原子周波数標準

の1か月間の計7か月間にわたり TAI 秒を評価し、結果の確証を得るために所内の光-マイクロ波リンク系(Er コムを含む光からマイクロ波への変換、水素レーザー信号の日本標準時システムから NICT-Sr1 の実験室までの伝送に起因する不確かさ)に関する詳細な検証を済ませた後、WG-PSFS に報告書を提出した。その審査の結果、2018 年 11 月に光周波数標準としては LNE-SYRTE の  $^{87}\text{Sr}$  光格子時計に続いて 2 例目となる二次周波数標準の認定を取得した。そして、その翌月の 12 月に実施した TAI 評価結果が BIPM に採択され、光周波数標準としては世界で初めて BIPM が行う直近の TAI 歩度校正値決定に貢献した [1]。その後も 3 回の TAI 校正に参加している。

WG-PSFS に提出した報告書には、NICT-Sr1 で TAI 秒を評価した結果と共に、NICT-Sr1 の周波数標準としての信頼性を示すために、これまでに行ってきた絶対周波数測定と本特集 [34] の他光周波数標準との直接周波数比較や高精度時系実信号生成についても報告した。これまでのマイクロ波一次及び二次周波数標準や LNE-SYRTE の  $^{87}\text{Sr}$  光格子時計による TAI 秒評価では、評価する期間中それらの周波数標準をほぼ連続運用する方法を採用していた。採用していたというよりは、これを常識としていた。一方で、私たちは、光周波数標準の Intermittent 評価法による TAI 秒評価を提案し、この方法で従来の一次及び二次周波数標準相当の TAI 秒評価ができることを実証した [35]。Intermittent 評価法では、周波数標準の間欠運転を基に TAI 秒を評価するため、運用しない間に周波数標準の系統不確かさの評価やシステムのメンテナンス、あるいは改良、さらにはこの間に周波数標準を他の実験へ適用することも可能である。

評価方法は、絶対周波数測定と同様に TAI 秒と光周波数標準の相対評価である。絶対周波数の時と異なる点は、3 時間程度の測定を毎日ではなく、1 週間に 1 度行ったことである。つまり、対象とする 1 か月あたりの TAI 秒の評価には 4 回または 5 回の測定結果を利用した。もう 1 つの違いは、NICT-Sr1 を国際的な周波数標準として利用するため、NICT-Sr1 の周波数に CCTF2017 会議で更新された秒の二次表現としての  $^{87}\text{Sr } ^1\text{S}_0 - ^3\text{P}_0$  遷移の推奨周波数 429 228 004 229 873.0 Hz [8] [36] を適用したことである。

図 4 のように、Er コムを用いて NICT-Sr1 から精度の高い 100 MHz を生成し、これと水素レーザー 100 MHz を位相比較する。このとき、絶対周波数測定と同様に平均化と異常検出のために複数の水素レーザーの平均を利用した。その結果を図 8 に示す。縦軸は水素レーザー群の規格化周波数偏差、横軸は評価期間である。この期間では 5 回分のデータを一次フィッ

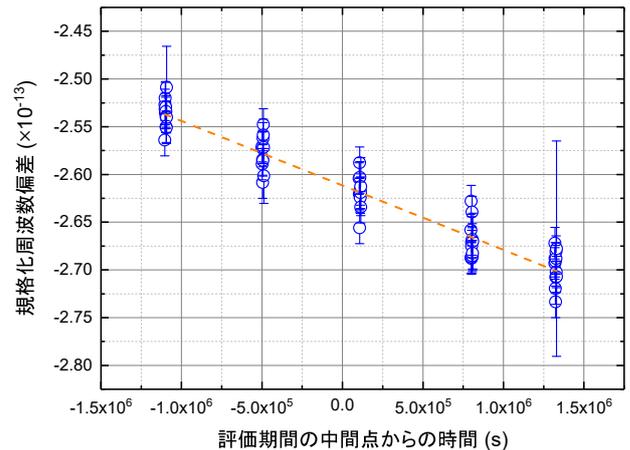


図 8 Intermittent 評価法による 1 か月間の水素レーザー平均周波数評価

ティングして、1 か月間の水素レーザーの平均周波数を得た。日本標準時システムの水素レーザー群と UTC(NICT) の時刻差データ及び Circular T に報告される時刻差 UTC - UTC(NICT) を利用して、1 か月間の TAI 秒と NICT-Sr1 の平均周波数比を評価した。Circular T には、一次周波数標準などが定常的に行っている TAI 秒の評価結果も掲載される。この表記法に従って、審査申請時に提出した 7 か月分の TAI 秒評価のうちから 1 か月分の不確かさを例として表 3 に示す。ここで、 $u_{A/Sr}$  は NICT-Sr1 自身の統計不確かさで、NICT-Sr1 の安定度  $1 \times 10^{-14}/\sqrt{\tau}$  に正味の測定時間を考慮して評価している。 $u_B$  は NICT-Sr1 の系統不確かさ、 $u_{1/Lab}$  は NICT-Sr1 で水素レーザーを評価する際の不確かさである。従来の TAI 秒校正では周波数標準を連続的に運用しているため、 $u_{1/Lab}$  は統計的な不確かさのみで十分である。一方、我々が提案する Intermittent 評価法では、測定のために周波数コムなどの測定系を立ち上げ、1 日の間でほぼ同じ時間帯に測定するため、システムの温度均一化効果による系統不確かさも含めた方が良くと判断した。現在の Circular T では、統計不確かさと系統不確かさはまとめられて 1 つの不確かさ  $u_{1/Lab}$  で報告されるが、私たちは将来の必要性を見越してこの 2 つを分けて報告している。 $u_{1/Lab}$  の内訳は、水素レーザーの周波数評価で行う一次フィッティングの不確かさ HM(フィッティング)とデッドタイム不確かさ HM(デッドタイム)、計測系の不確かさ DMTD を統計的な不確かさと考慮し、一方で、Er コムを含む光-マイクロ波リンク系の不確かさを系統不確かさとして計上した。本特集 [24] にあるように、現在では光-マイクロ波リンク系の不確かさは 10 日間連続運用でより精密に評価されている。Intermittent 評価法では、HM(デッドタイム)による不確かさを十分に検討する必要がある。このノイズを抑制するために NICT-Sr1 の運用を TAI

表3 Intermittent 評価法による NICT-Sr1 を基準にした1か月間のTAI秒評価

| 効果                | 不確かさ<br>( $10^{-16}$ ) | $u_A$ |       | $u_B$ |       | $u_{i/Lab}$ |       |
|-------------------|------------------------|-------|-------|-------|-------|-------------|-------|
|                   |                        | $u_A$ | $u_B$ | $u_A$ | $u_B$ | $u_A$       | $u_B$ |
| $u_{A/Sr}$        | 0.31                   | ✓     |       |       |       |             |       |
| $u_B$             | 0.70                   |       | ✓     |       |       |             |       |
| HM (フィッティング)      | 2.60                   |       |       |       |       | ✓           |       |
| HM (デッドタイム)       | 1.76                   |       |       |       |       | ✓           |       |
| DMTD              | 0.45                   |       |       |       |       | ✓           |       |
| 光-マイクロ波比較/マイクロ波伝送 | 1                      |       |       |       |       |             | ✓     |
| $u_{i/Tai}$       | 1.96                   | -     | -     |       |       | -           |       |
| Circular T の表記    |                        | 0.31  | 0.70  |       |       | 3.3         |       |
| 計                 | 3.9                    |       |       |       |       |             |       |

表4 Intermittent 評価法による NICT-Sr1 を基準にした7か月間のTAI秒評価 表中の不確かさの単位は  $10^{-16}$  である。

| 評価期間<br>(MJD)            | 57474       | 57504       | 57539       | 57569       | 57599       | 57629       | 58149       |
|--------------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
|                          | -           | -           | -           | -           | -           | -           | -           |
|                          | 57504       | 57539       | 57569       | 57599       | 57629       | 57659       | 58174       |
|                          | 2016年<br>4月 | 2016年<br>5月 | 2016年<br>6月 | 2016年<br>7月 | 2016年<br>8月 | 2016年<br>9月 | 2018年<br>2月 |
| $u_A$                    | 0.30        | 0.28        | 0.30        | 0.30        | 0.27        | 0.30        | 0.29        |
| $u_B$                    | 0.82        | 0.75        | 0.76        | 0.64        | 0.61        | 0.60        | 0.73        |
| $u_{i/Lab}$              | 3.63        | 3.14        | 3.10        | 3.05        | 3.27        | 3.47        | 2.93        |
| $u_{i/Tai}$              | 1.96        | 1.70        | 1.96        | 1.96        | 1.96        | 1.96        | 3.08        |
| 計                        | 4.2         | 3.7         | 3.8         | 3.7         | 3.9         | 4.0         | 4.3         |
| $u_{Srep}$               | 4           | 4           | 4           | 4           | 4           | 4           | 4           |
| 計<br>(incl. $u_{Srep}$ ) | 5.8         | 5.4         | 5.5         | 5.4         | 5.6         | 5.7         | 5.9         |

秒評価期間で偏らないように等間隔に測定し [18]、絶対周波数測定の時と同様にして、デッドタイム不確かさを評価した。表3には、BIPMに提出する実際のTAI秒評価報告には必要ないが、目安のためにTAIとUTC(NICT)の時刻・周波数比較の不確かさ  $u_{i/Tai}$  も含めている。 $^{87}\text{Sr}$ の光学遷移は秒の二次表現なので、TAI校正では二次周波数標準に付加される不確かさ  $u_{Srep} = 4 \times 10^{-16}$  を考慮する必要があるが、現行の一次周波数標準の不確かさと比較するために表3には含めていない。この二次周波数標準の不確かさを除いて、この期間では他の一次周波数標準と同等な  $3.9 \times 10^{-16}$  でTAIを評価できることが示せた。同様に7か月間のTAI秒の評価結果を表4に示す。ここでも目安のためにUTC - UTC(NICT)の不確かさを含めている。この不確かさは2016の4月から9月は0.3 ns、2018の2月は0.4 nsであった。また、ここでは  $u_{Srep}$  を含めた場合も示している。この期間を通して、不確かさ  $4 \times 10^{-16}$  程度で評価できている。この一連の結果を独仏の一次周波数標準PTB-SF2とSYRTE-FO2によ

る評価と共に図9に示す。このプロットにも、 $u_{Srep}$  は含めていない。このようにして、NICT-Sr1が一次周波数標準と整合性ある評価ができることを実証した。

## 6 あとがき

秒の再定義前後でSI秒の連続性を保つことは重要課題のひとつである。そのため、光周波数標準の絶対周波数の精度や再現性を追求することは秒の再定義に不可欠となっている。この要求に応えるため我々は、特定の一次周波数標準に依存しない、より多くの一次周波数標準などで校正されたTAIを利用して絶対周波数を測定している。この一方で、NICTが運用する一次周波数標準NICT-CsF1 [37]を基準に絶対周波数を測定することで、衛星リンクによる不確かさの影響を受けない、より不確かさの小さい測定も計画している。このように異なるアプローチで絶対周波数を評価することで、値の信頼性を確保し、再定義の際の周波数値決定に貢献できるよう努めていく。

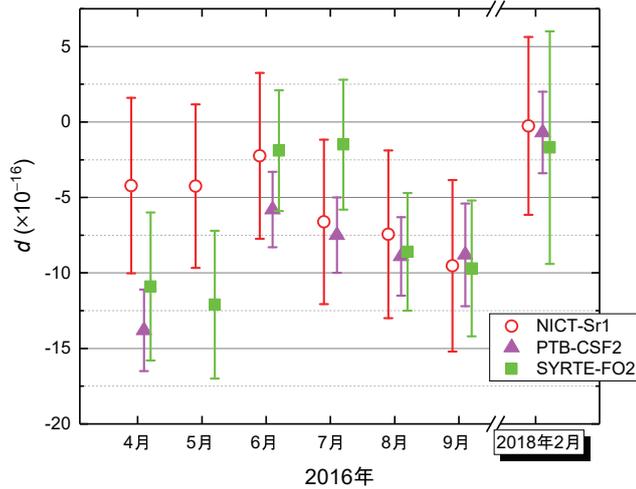


図9 NICT-Sr1 (白抜き赤丸)、PTB-CSF2 (ピンク三角)、SYRTE-FO2 (緑四角) を基準にした7か月間のTAI秒評価

我々は、NICTで開発を進めている<sup>115</sup>In<sup>+</sup>光時計の絶対周波数決定も、NICT-Sr1の役割のひとつと考えている。マイクロ波周波数標準を利用した絶対周波数測定には、TAIを利用する場合も、ローカルな一次周波数標準を利用する場合も、数日から数十日の平均化時間を要する。一方で、光周波数標準同士の測定では、短期安定度が良いため、要求される積算時間は数時間程度である。NICT-Sr1を基準にした光周波数標準の絶対周波数測定では、秒の二次表現としての不確かさ $u_{\text{Srep}}$ を必ず計上しなければならないが、短時間で絶対周波数を測定できるため、実験のフィードバックが容易になる。この例のように、グローバルな周波数標準として、TAIの維持及び高精度化に寄与していく一方で、ローカルな周波数標準としての役割も果たしていきたい。

NICT-Sr1と他の光周波数標準との比較や、NICT-Sr1を用いた高精度時系実信号生成[34]は、本稿の絶対周波数測定やTAI校正と並んで、秒の再定義の検討や将来の高精度時刻・周波数標準の供給を実現するうえで重要な取組である。これら周波数標準としての役割と併せて、高精度周波数計測に基づく空間検出(光ファイバリンクを用いたNICT-Sr1と東京大学の<sup>87</sup>Sr光格子時計の周波数比較による重力ポテンシャル差検出については文献[34]及び[38]参照)や、ポーランドのグループ主導で欧米のグループと協力して進めている、光周波数標準を構成する原子系と光共振器の暗黒物質への感度の違いを利用した暗黒物質の探索[39]など、高精度周波数標準を用いた自然のより深い理解にも貢献していきたい。

【参考文献】

- 1 NICT プレスリリース, “世界で初めて光時計が直近の協定世界時の一秒の長さを校正,” Feb. 2019. <https://www.nict.go.jp/press/2019/02/07-1.html>
- 2 H. Hachisu, G. Petit, F. Nakagawa, Y. Hanado, and T. Ido, “SI-traceable measurement of an optical frequency at the low  $10^{-16}$  level without a local primary standard,” *Opt. Express* 25, 8511 (2017). <https://doi.org/10.1364/OE.25.008511>
- 3 T. Takano, M. Takamoto, I. Ushijima, N. Ohmae, T. Akatsuka, A. Yamaguchi, Y. Kuroishi, H. Munekane, B. Miyahara, and H. Katori, “Geopotential measurements with synchronously linked optical lattice clocks,” *Nature Photon* 10, 662–666 (2016). <https://doi.org/10.1038/NPHOTON.2016.159>
- 4 T. Bothwell, D. Kedar, E. Oelker, J. M. Robinson, S. L. Bromley, W. Tew, J. Ye, and C. J. Kennedy, “JILA SrI optical lattice clock with uncertainty of  $2.0 \times 10^{-18}$ ,” accepted in *Metrologia* (2019). <https://doi.org/10.1088/1681-7575/ab4089>
- 5 W. F. McGrew, X. Zhang, R. J. Fasano, S. A. Schäffer, K. Bely, D. Nicolodi, R. C. Brown, N. Hinkley, G. Milani, M. Schioppo, T. H. Yoon, and A. D. Ludlow, “Atomic clock performance enabling geodesy below the centimetre level,” *Nature* 564, pp.87–90 (2018). <https://doi.org/10.1038/s41586-018-0738-2>
- 6 N. Huntemann, C. Sanner, B. Lipphardt, Chr. Tamm, and E. Peik, “Single-Ion Atomic Clock with  $3 \times 10^{-16}$  Systematic Uncertainty,” *Phys. Rev. Lett.* 116, 063001 (2016). <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.116.063001>
- 7 S.M. Brewer, J.-S. Chen, A.M. Hankin, E.R. Clements, C.W. Chou, D.J. Wineland, D.B. Hume, and D.R. Leibbrandt, “<sup>27</sup>Al<sup>+</sup> Quantum-Logic Clock with a Systematic Uncertainty below  $10^{-18}$ ,” *Phys. Rev. Lett.* 123, 033201 (2019). <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.123.033201>
- 8 F. Riehle, P. Gill, F. Arias, and L. Robertsson, “The CIPM list of recommended frequency standard values: guidelines and procedures,” *Metrologia* 55, 188, 2018. <https://doi.org/10.1088/1681-7575/aaa302>
- 9 松原健祐, 中川史丸, 伊東宏之, 蜂須英和, N. Nemitz, 藤枝美穂, 後藤忠広, 成田秀樹, 水野道明, 有村智, 齊藤春夫, 今村國康, 花土ゆう子, 井戸哲也, “日本標準時の維持と運用,” 情報通信研究機構研究報告, vol.65, no.2, 3-1, 2019.
- 10 中川史丸, 花土ゆう子, 伊東宏之, 小竹昇, 熊谷基弘, 今村國康, 小山泰弘, “日本標準時システム概要と高度化,” 情報通信研究機構季報, vol.56, nos.3/4, pp.17–27, 2010.
- 11 松原健祐, 李瑛, 長野重夫, 小嶋玲子, 梶田雅稔, 伊東宏之, 早坂和弘, 細川瑞彦, “カルシウムイオン光周波数標準,” 情報通信研究機構季報, vol.56, nos.3/4, pp.121–133, 2010.
- 12 山口敦史, 志賀信泰, 長野重夫, 石島博, 小山泰弘, 細川瑞彦, 井戸哲也, “ストロンチウム光格子時計,” 情報通信研究機構季報, vol.56, nos.3/4, pp.135–143, 2010.
- 13 大坪望, 李瑛, 松原健祐, N. Nemitz, 蜂須英和, 石島博, 早坂和弘, 井戸哲也, “インジウムイオン光周波数標準,” 情報通信研究機構研究報告, vol.65, no.2, 4-6, 2019.
- 14 李瑛, 長野重夫, 松原健祐, 小嶋玲子, 熊谷基弘, 伊東宏之, 小山泰弘, 細川瑞彦, “超狭線幅クロックレーザーの開発,” 情報通信研究機構季報, vol.56, nos.3/4, pp.161–171, 2010.
- 15 H. Katori, M. Takamoto, V. G. Palchikov, and V. D. Ovsiannikov, “Ultra-stable Optical Clock with Neutral Atoms in an Engineered Light Shift Trap,” *Phys. Rev. Lett.* 91, 173005, 2013. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.91.173005>
- 16 M. Takamoto, F.-L. Hong, R. Higashi, and H. Katori, “An optical lattice clock,” *Nature* 435, 321, 2015. <https://doi.org/10.1038/nature03541>
- 17 W. Nagourney, J. Sandberg, and H. Dehmelt, “Shelved Optical Electron Amplifier: Observation of Quantum Jumps,” *Phys. Rev. Lett.* 56, 2797, 1986. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.56.2797>
- 18 H. Hachisu and T. Ido, “Intermittent optical frequency measurements to reduce the dead time uncertainty of frequency link,” *Jpn. J. Appl. Phys.* 54, 112401, 2015. <https://doi.org/10.7567/JJAP.54.112401>
- 19 BIPM, “Circular T,” available at <https://www.bipm.org/jsp/en/TimeFtp.jsp>
- 20 F. Nakagawa, M. Imae, Y. Hanado, and M. Aida, “Development of multichannel dual-mixer time difference system to generate UTC (NICT),” *IEEE Trans. Instr. Meas.* 54, 829, 2005. <https://doi.org/10.1109/TIM.2004.843382>
- 21 D. Yu, M. Weiss, and T. E. Parker, “Uncertainty of a frequency comparison with distributed dead time and measurement interval offset,” *Metrologia* 44, 91, 2007.
- 22 H. Hachisu, G. Petit, and T. Ido, “Absolute frequency measurement with

- uncertainty below  $1 \times 10^{-15}$  using International Atomic Time," *App. Phys. B* 123, 34, 2017. <https://doi.org/10.1007/s00340-016-6603-9>
- 23 D. W. Allan, "Time and frequency (time-domain) characterization, estimation, and prediction of precision clocks and oscillators," *IEEE Trans. Ultrasonic, Ferro. Freq. Control UFFC* 34, 647, 1987.
- 24 N. Nemitz, H. Hachisu, F. Nakagawa, H. Itoh, T. Gotoh, and T. Ido, "光周波数標準のTAI校正への貢献," *情報通信研究機構研究報告*, vol.65, no.2, 4-4, 2019.
- 25 R. Le Targat, L. Lorini, Y. Le Coq, M. Zawada, J. Guéna, M. Abgrall, M. Gurov, P. Rosenbusch, D. G. Rovera, B. Nagórny, R. Gartman, P. G. Westergaard, M. E. Tobar, M. Lours, G. Santarelli, A. Clairon, S. Bize, P. Laurent, P. Lemonde, and J. Lodewyck, "Experimental realization of an optical second with strontium lattice clocks," *Nat. Commun.* 4, 2109, 2013. <https://doi.org/10.1038/ncomms3109>
- 26 D. Akamatsu, H. Inaba, K. Hosaka, M. Yasuda, A. Onae, T. Suzuyama, M. Amemiya, and F. -L. Hong, "Spectroscopy and frequency measurement of the  $^{87}\text{Sr}$  clock transition by laser linewidth transfer using an optical frequency comb," *Appl. Phys. Express* 7, 012401, 2014. <https://doi.org/10.7567/APEX.7.012401>
- 27 St. Falke, N. Lemke, C. Grebing, B. Kipphardt, S. Weyers, V. Gerginov, N. Huntemann, Ch. Hagemann, A. Al-Masoudi, S. Hafner, S. Vogt, U. Sterr, and Ch. Lisdat, "A strontium lattice clock with  $3 \times 10^{-17}$  inaccuracy and its frequency," *New J. Phys.* 16, 073023, 2014. <https://doi.org/10.1088/1367-2630/16/7/073023>
- 28 Y. Lin, Q. Wang, Y. Li, F. Meng, B. Lin, E. Zang, Z. Sun, F. Fang, T. Li, and Z. Fang, "First evaluation and frequency measurement of the strontium optical lattice clock at NIM," *Chin. Phys. Lett.* 32, 090601, 2015. <https://doi.org/10.1088/0256-307X/32/9/090601>
- 29 T. Tanabe, D. Akamatsu, T. Kobayashi, A. Takamizawa, S. Yanagimachi, T. Ikegami, T. Suzuyama, H. Inaba, S. Okubo, M. Yasuda, F. -L. Hong, A. Onae, and K. Hosaka, "Improved Frequency Measurement of the  $^1\text{S}_0\text{-}^3\text{P}_0$  Clock Transition in  $^{87}\text{Sr}$  Using a Cs Fountain Clock as a Transfer Oscillator," *J. Phys. Soc. Jpn.* 84, 115002, 2015. <https://doi.org/10.7566/JPSJ.84.115002>
- 30 C. Grebing, A. Al-Masoudi, S. Dörscher, S. Häfner, V. Gerginov, S. Weyers, B. Lipphardt, F. Riehle, U. Sterr, and Ch. Lisdat, "Realization of a timescale with an accurate optical lattice clock," *Optica* 3, 563, 2016. <https://doi.org/10.1364/OPTICA.3.000563>
- 31 J. Lodewyck, S. Bilicki, E. Bookjans, J. Robyr, C. Shi, G. Vallet, R. Le Targat, D. Nicolodi, Y. Le Coq, J. Guena, M. Abgrall, P. Rosenbusch, and S. Bize, "Optical to microwave clock frequency ratios with a nearly continuous strontium optical lattice clock," *Metrologia* 53, pp.1123-1130, 2016. <https://doi.org/10.1088/0026-1394/53/4/1123>
- 32 C. F. A. Baynham, R. M. Godun, J. M. Jones, S. A. King, P. B. R. Nisbet-Jones, F. Baynes, A. Rolland, P. E. G. Baird, K. Bongs, P. Gill, and H. S. Margolis, "Absolute frequency measurement of the  $^2\text{S}_{1/2} \rightarrow ^2\text{F}_{7/2}$  optical clock transition in  $^{171}\text{Yb}^+$  with an uncertainty of  $4 \times 10^{-16}$  using a frequency link to International Atomic Time," *Journal of Modern Optics* 65, pp.585-591, 2018. <https://doi.org/10.1080/09500340.2017.1384514>
- 33 W. F. McGrew, X. Zhang, H. Leopardi, R. J. Fasano, D. Nicolodi, K. Beloy, J. Yao, J. A. Sherman, S. A. Schäffer, J. Savory, R. C. Brown, S. Römisch, C. W. Oates, T. E. Parker, T. M. Fortier, and A. D. Ludlow, "Towards Adoption of an Optical Second: Verifying Optical Clocks at the SI Limit," *arXiv:1811.05885*, 2018.
- 34 蜂須英和, 藤枝美穂, 熊谷基弘, 長野重夫, 後藤忠広, 松原健祐, 李瑛, N. Nemitz, 大坪望, 早坂和弘, 中川史丸, 花土ゆう子, 井戸哲也, "ストロンチウム光格子時計の周波数比較及び時系生成への応用," *情報通信研究機構研究報告*, vol.65, no.2, 4-5, 2019.
- 35 H. Hachisu, F. Nakagawa, Y. Hanado, and T. Ido, "Months-long real-time generation of a time scale based on an optical clock," *Sci. Rep.* 8, 4243, 2018. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-22423-5>
- 36 BIPM, "Recommended values of standard frequencies for applications including the practical realization of the metre and secondary representations of the definition of the second (2017)," available at <http://www.bipm.org/en/publications/mises-en-pratique/standard-frequencies.html>
- 37 M. Kumagai, H. Ito, M. Kajita, and M. Hosokawa, "Evaluation of caesium atomic fountain NICT-CsF1," *Metrologia* 45, 139, 2003. <https://doi.org/10.1088/1681-7575/aaa302>
- 38 A. Yamaguchi, M. Fujieda, M. Kumagai, H. Hachisu, S. Nagano, Y. Li, T. Ido, T. Takano, M. Takamoto, and H. Katori, "Direct Comparison of

Distant Optical Lattice Clocks at the  $10^{-16}$  Uncertainty," *Appl. Phys. Express* 4, 082203, 2011. <https://doi.org/10.1143/APEX.4.082203>

- 39 P. Wcisło, P. Ablewski, K. Beloy, S. Bilicki, M. Bober, R. Brown, R. Fasano, R. Ciuryło, H. Hachisu, T. Ido, J. Lodewyck, A. Ludlow, W. McGrew, P. Morzyński, D. Nicolodi, M. Schioppo, M. Sekido, R. Le Targat, P. Wolf, X. Zhang, B. Zjawin, and M. Zawada, "New bounds on dark matter coupling from a global network of optical atomic clocks," *Sci. Adv.* 4, eaau4869, 2018. <https://doi.org/10.1126/sciadv.aau4869>



**蜂須英和** (はちす ひでかず)

電磁波研究所  
時空標準研究室  
主任研究員  
博士(工学)  
光周波数標準、光格子時計とその応用



**Nils Nemitz** (にるす ねみっつ)

電磁波研究所  
時空標準研究室  
主任研究員  
Dr. rer. nat.  
光周波数コム、光周波数標準、標準時



**李瑛** (り いん)

電磁波研究所  
時空標準研究室  
有期研究技術員  
博士(理学)  
光周波数標準、レーザー物理



**石島博** (いしじま ひろし)

電磁波研究所  
時空標準研究室  
有期研究技術員



**井戸哲也** (いど てつや)

電磁波研究所  
時空標準研究室  
室長  
博士(工学)  
光周波数標準、光周波数計測