

4-5 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

4-5 *Frequency Comparisons and Generation of a Time Scale with the Strontium Optical Lattice Clock at NICT*

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
Nils Nemitz 大坪 望 早坂和弘 中川史丸 花土ゆう子 井戸哲也

Hidekazu HACHISU, Miho FUJIEDA, Motohiro KUMAGAI, Shigeo NAGANO, Tadahiro GOTOH, Kensuke MATSUBARA, Ying LI, Nils NEMITZ, Nozomi OHTSUBO, Kazuhiro HAYASAKA, Fumimaru NAKAGAWA, Yuko HANADO, and Tetsuya IDO

次世代周波数標準の実現に向けて、情報通信研究機構 (NICT) ではストロンチウム光格子時計 NICT-Sr1 の研究開発を進めている。我々は究極の周波数標準を目指してその精度を追求し続ける一方で、2018 年 11 月には時間・周波数分野の国際作業部会から二次周波数標準の認定を取得し、国際原子時の校正に貢献するなど、NICT-Sr1 は既に実用的な周波数標準としての機能を果たし始めている [1]。本稿では、この国際認定取得の際、NICT-Sr1 に十分な信頼を与えた研究室内外の様々な光周波数標準との周波数比較について報告する。また、より高精度な日本標準時実現に向け、世界に先駆けて実証した光周波数標準を用いた高精度な時系実信号生成について報告する。

NICT has been developing the optical lattice clock NICT-Sr1 as a next generation frequency standard. In addition to ongoing development towards even greater accuracy, the clock is already in practical service as a frequency standard. NICT-Sr1 has been examined by the responsible international working group and was recognized as a secondary frequency standard in 2018. It now contributes to the calibration of International Atomic Time (TAI) [1]. In this paper we show various direct frequency comparisons between NICT-Sr1 and other clocks inside or outside our institute by optical fiber link or by satellite, which are the results that support the performance of NICT-Sr1 as a frequency standard. Additionally, we report on the first use of an optical frequency standard to generate a precise time scale. The results inspire confidence towards a similar steering of the next generation Japan Standard Time.

1 まえがき

測定は「ある量を、基準として用いる量と比較し、数値または符号を用いて表すことである」[2]。時間・周波数標準の分野では、セシウム 133 のマイクロ波遷移で定義されている SI 秒 (国際単位系の時間の単位) を基準にした周波数測定のことを絶対周波数測定と呼んでいる。

光周波数は数 100 THz で、秒の定義であるおよそ 9.2 GHz (セシウム 133 のマイクロ波遷移周波数) に比べて 4-5 桁高い。一方、通常の周波数計測器の帯域は高々 1 GHz であるため、光周波数を計測するには周波数の下方変換 (ダウンコンバート) が必要である。そこで、光周波数標準の絶対周波数測定には、以前は周波数チェーン [3] と呼ばれるいささか大掛かりな方法が用いられていた。この方法による測定は限られた

標準研究所でしか実現できなかったが、1990 年代後半に周波数軸上のものさしの役割をする光周波数コム [4] が普及してからは、以前に比べて簡便に測定できるようになった。

各機関で光周波数標準が開発されると、その性能を示すために共通の信頼できる SI 秒を基準にした絶対周波数を測定するのが一般的であった。これにより、各機関で開発された光周波数標準を、SI 秒を共通の基準とする絶対周波数を經由して間接的に比較することもできた。

現在では光周波数標準の精度が飛躍的に進歩し、秒の定義を最も正確に現示*するセシウム一次周波数標準の精度を上回る光周波数標準が実現されている。こ

* 現示：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。

のような状況を踏まえて、現行の定義を、光周波数標準を実現する原子の光学遷移で再定義することが検討されている。その議論の中では、高い精度の周波数標準を実現できたとしてもそれを共有できないと標準としては機能しないため、秒の再定義にはセシウムよりも精度の高い周波数標準の実現とともに、十分な精度で互いの周波数を評価できることが求められている [5]。

このように光周波数標準が高精度化してくると、絶対周波数を經由した間接比較では仲介に用いた SI 秒の現示精度に比較精度が制限されてしまうため、近年では光周波数標準を直接比較し、より高精度に相対評価するようになった。

同程度の周波数の光周波数標準間の比較であれば、お互いのヘテロダイナミットの周波数計測や、お互いの周波数差を補う音響変調光学素子 AOM (Acousto-Optic Modulator) の周波数を計測すればよい。一般的に同一の研究室内ではこの方法により直接比較されている。

一方で、現在有望な光周波数標準の方式には、単一イオン光時計と光格子時計があり、それぞれの方式に対して様々な原子遷移 (現在では光格子方式には ^{87}Sr , ^{171}Yb , ^{199}Hg など、単一イオン方式には $^{27}\text{Al}^+$, $^{40}\text{Ca}^+$, $^{87}\text{Sr}^+$, $^{171}\text{Yb}^+$, $^{115}\text{In}^+$ などが使われている) が採用されているため、周波数の離れたこれらの周波数比較では光周波数コムを周波数の橋渡しにして、直接周波数比較している。このように多数の標準周波数があるため、いくつもの周波数比の組合せが考えられる。ある周波数比 (例 :A/B) が正確に決まっていれば、一方の研究室にしかない標準周波数 (A) によって、もう一方の標準周波数 (B) を得ることができ、新しい秒の定義と共にそのような周波数比の取り扱いについての検討も今後の重要な課題となっている [5]。

遠隔地にある周波数標準間の比較や、標準周波数の共有には、何らかの周波数伝送が必要である。このようなとき、お互いの周波数を結び付けていることから、時間・周波数分野では、周波数伝送や比較のことを周波数リンクと呼んでいる。現在では、光ファイバや人工衛星を利用した方法が主流である。光ファイバリンクは高精度な周波数リンクが実現できるため、光ファイバをつなぐことのできる比較的近距離の研究室間の周波数リンクでは光ファイバが採用されており、リンク精度で劣化されずに周波数標準そのものの不確かさでの比較が実現されている。このように光ファイバリンクは有効な周波数リンク法であるため、近年欧州の国々では光ファイバ網が張られ始めている。一方で、島国である日本では他国との周波数リンクには人工衛星や電波星を使った方法が現実的である。大陸間でも

高精度な周波数リンクを実現するために、NICT では光ファイバリンク方式に併せて、これらの方法を用いた周波数リンクの開発にも取り組んでいる。人工衛星を用いる方法では、これまでは GPS や通信衛星を仲介する群遅延を利用した比較方法が一般的であったが、NICT では通信衛星の搬送波を直接用いることで短期安定度を一桁改善した周波数比較を実現している [6]。これに加え、電波星を用いた超長基線電波干渉計 (VLBI) による周波数比較方式の開発にも取り組んでいる [7]。絶対的な基準となるリンク方法は存在しないので、独立な周波数リンク方式でお互いを相互評価することは重要である。

遠隔地の周波数比較の手段として、この他に可搬型周波数標準を用いた比較方法もある。NICT では 1960 年代から 1980 年代までは、アメリカ海軍天文台 (USNO) の可搬型周波数標準を經由して USNO が生成する標準時系 UTC (USNO) と NICT が生成する標準時系 UTC (NICT) を比較していた [8]。この場合、可搬型周波数標準がいつでもどこでも同じ周波数を生成できるか、あるいは、その周波数補正を十分正確に実現できるかどうかの検証が必要である。

グローバルな金融取引や第 5 世代移動通信システム (5G) 等、現代社会では正確な時刻情報が重要である。将来の 6G では更にその重要度が高まると考えられる。より高精度な時刻を供給できるように、NICT では時刻生成に光周波数標準を利用する取組を進めている。2018 年 11 月に NICT のストロンチウム光格子時計 NICT-Sr1 は時間・周波数分野の国際作業部会から一次周波数に準ずる二次周波数標準に認定され、国際的な標準時系である国際原子時 TAI (International Atomic Time) の歩度校正に寄与し始めた [1][9][10]。このような国際的な貢献と並行して、次世代の高精度な日本標準時実現を視野に入れ、光周波数標準を基にした高精度な時系生成にも取り組んでいる [11]。

本稿では、これまで行ってきた NICT-Sr1 と国内外の他の周波数標準との相互比較及び標準時系生成への取組を紹介する。

2 単一イオン光時計との直接周波数比測定

高精度な周波数比測定には、絶対周波数を經由しない直接比較が必要とされるのは **1** に書いたとおりである。我々は単一カルシウムイオン ($^{40}\text{Ca}^+$) 光時計とストロンチウム (^{87}Sr) 光格子時計の直接周波数比較を実施 [12] し、高精度に異種原子光学遷移間の周波数比を測定した。

図 1 のように、NICT の ^{87}Sr 光格子時計 NICT-Sr1 の $^{87}\text{Sr} \ ^1\text{S}_0 - \ ^3\text{P}_0$ 遷移に周波数安定化したレーザー (周

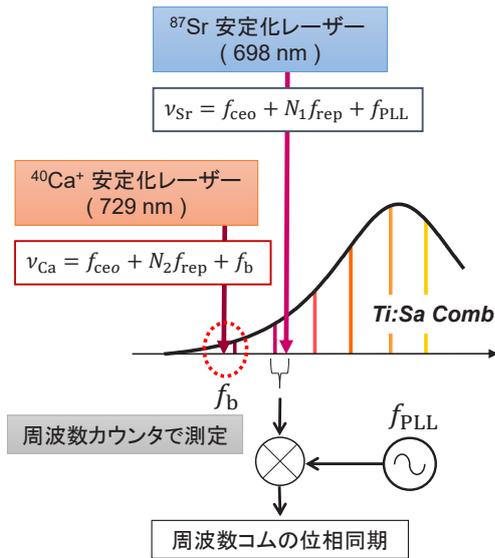


図1 光周波数コムを用いた NICT-Sr1 と ⁴⁰Ca⁺ 光時計の周波数比測定
 ν_{Sr} と ν_{Ca} はそれぞれ NICT-Sr1 と ⁴⁰Ca⁺ 光時計の周波数、 f_{rep} と f_{ceo} はそれぞれ Ti:Sa コムの繰り返し周波数とオフセット周波数、 N_1 、 N_2 はコムのモード番号で Ti:Sa コムの何番目の信号かを表している。 ν_{Sr} とこの周波数に一番近い Ti:Sa コム成分の間のヘテロダインビート信号を周波数 f_{PLL} の外部参照信号に位相同期することで、Ti:Sa コムを ν_{Sr} に位相同期する。 ν_{Sr} に位相同期した Ti:Sa コムと ν_{Ca} の間のビート周波数 f_b を周波数カウンターで計測する。

波数 $\nu_{Sr} \approx 429$ THz が、NICT-Sr1 が生成する標準周波数 (Ti:Sa コム) [13][14] を位相同期する。Ti:Sa コムの1つの成分を ν_{Sr} に位相同期することで、全ての光周波数コム成分が位相同期される [15]。そこで、⁴⁰Ca⁺ 光時計の ⁴⁰Ca⁺ ²S_{1/2} - ²D_{5/2} 遷移に周波数安定化したレーザー (標準周波数 $\nu_{Ca} \approx 411$ THz) [16] とこの周波数に最も近い Ti:Sa コム成分の間の周波数差 f_b を周波数カウンターで計測し、次式のように周波数比を測定した [12]。

$$\frac{\nu_{Ca}}{\nu_{Sr}} = \frac{N_2}{N_1} + \frac{(1 - N_2/N_1)f_{ceo} - (N_2/N_1)f_{PLL} + f_b}{\nu_{Sr}} \quad (1)$$

ここで、 f_{rep} と f_{ceo} は Ti:Sa コムの繰り返し周波数とオフセット周波数、 N_1 、 N_2 は Ti:Sa コムの何番目の信号かを示すコムのモード番号、 f_{PLL} は Ti:Sa コムを光周波数標準に安定化するために必要な外部参照発振器の周波数を表している (図1)。ターゲットは、当時の光周波数標準の不確かさ相当の16桁での周波数比測定だった。(1) 式の右辺第1項は不確かさ無しに正確に決まり、第2項はその分子が光周波数計測で利用するマイクロ波帯 10^8 - 10^9 程度で分母が光周波数の 10^{14} 程度であることから 10^{-6} - 10^{-5} 程度である。計測の不確かさはマイクロ波でも12桁程度はあるので、Ti:Sa コムを含めた計測系の精度は16桁の測定を実現するには十分である。得られた相対安定度 (アラン標準偏

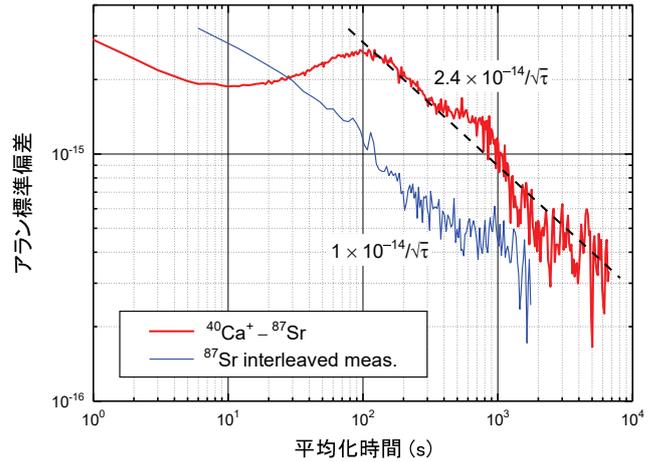


図2 周波数比測定の安定度 (アラン標準偏差)
 赤線は周波数比 ν_{Ca}/ν_{Sr} を測定した際の ⁴⁰Ca⁺ 光時計と NICT-Sr1 の相対安定度。青線は NICT-Sr1 の安定度を表している。

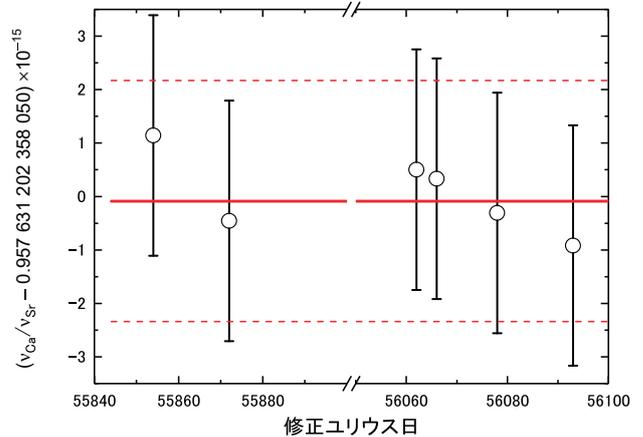


図3 半年間の周波数比 ν_{Ca}/ν_{Sr} 測定結果
 横軸の修正ユリウス日は 1858 年 11 月 17 日 0 時 0 分 0 秒 (世界時; 地球の自転に基づく時刻) からの日数を表す。赤太線と赤破線はそれぞれ重み付き平均と全不確かさを表している。 1×10^{-15} よりも良い再現性があることが分かる。

差) は 1000 s で 16 桁台に到達した (図2)。計6回の測定結果を図3に示す。図中の赤実線と赤破線はそれぞれ重み付き平均と全不確かさを表している。このときの NICT-Sr1 と ⁴⁰Ca⁺ のそれぞれの系統不確かさ 5×10^{-16} と 2.5×10^{-15} 及び統計不確かさ 1.8×10^{-16} を考慮し、以下のように周波数比 ν_{Ca}/ν_{Sr} を不確かさ 2.5×10^{-15} で決定した。

$$\nu_{Ca}/\nu_{Sr} = 0.957\ 631\ 202\ 358\ 049\ 9\ (2\ 3) \quad (2)$$

この結果は、2012年に開催された国際度量衡委員会傘下の時間・周波数諮問委員会 CCTF2012 (Consultative Committee for Time and Frequency) に報告された。2012年頃には光格子時計の直接周波数比較はあったものの、異なる原子遷移及び単一イオン光時計と光格子時計の異なる二方式をまたがる直接周波

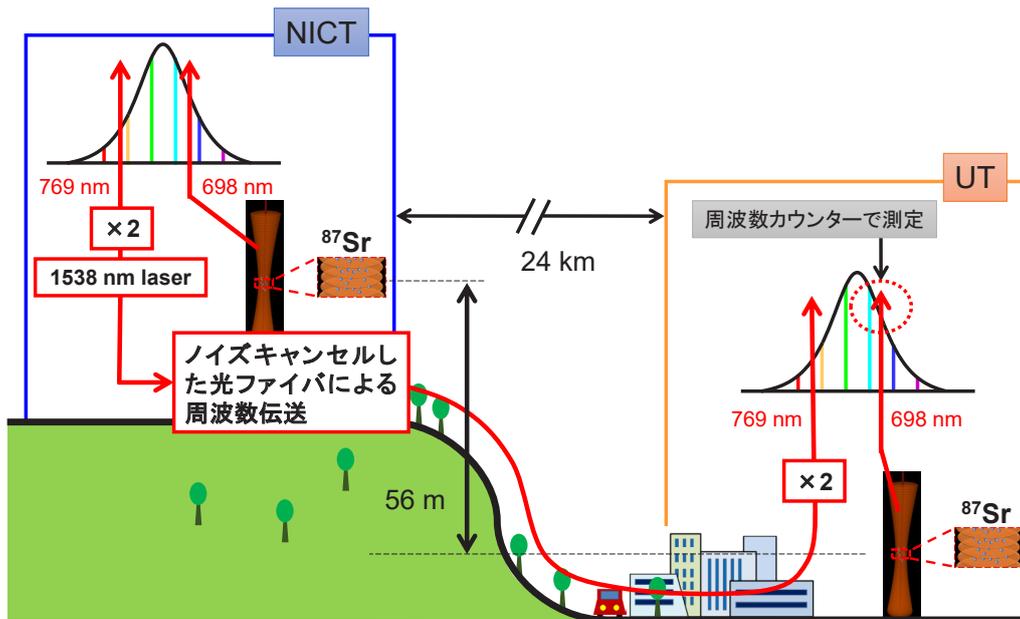


図4 NICT—UT間の光ファイバリンクを用いた直接周波数比較の実験配置

NICTから、NICT-Sr1に安定化された波長1.5 μm 帯のレーザーをUTに伝送し、このレーザーとUTの ^{87}Sr 光格子時計との間の周波数差を測定する。

数比測定の報告はなかった。その後のCCTFでは各機関は絶対周波数に加えて、周波数比も報告するようになった。

$^{40}\text{Ca}^+$ 光時計では、イオントラップしている電極などからの黒体輻射BBR (Black Body Radiation)に起因する周波数シフト(BBRシフト)を評価するために、トラップ電極の空間温度分布を慎重に評価する必要がある。この効果は確度を追求していく際に障害となる。一方で、イオン光時計に元々BBRシフトが小さい原子遷移[17]を採用できれば、その分だけ確度向上が期待できる。NICTでは、BBRに対する感度が小さいことに加え、複数イオンで精密な周波数測定が可能であることから[18]、確度と共に高安定度化への展開が期待できるインジウムイオン $^{115}\text{In}^+$ を用いた光時計の開発を進めている[19]。現在、単一 $^{115}\text{In}^+$ 光時計では $^{115}\text{In}^+ \ ^1\text{S}_0 - \ ^3\text{P}_0$ 遷移に周波数安定化したレーザー(標準周波数は1.27 PHz)の生成を実現し、現在、NICT-Sr1との間で周波数比測定に取り組んでいる。この取組については、本特集の[19]に記載されている。

これまでに報告されている光格子時計同士の直接周波数比測定としては、 ^{88}Sr と ^{87}Sr [20]、イッテルビウム(^{171}Yb)と ^{87}Sr [21]、水銀(^{199}Hg)と ^{87}Sr [22]などがある。また、本研究以外の単一イオン光時計と光格子時計の周波数比については、我々の知る限り論文化された結果はまだない。

3 光ファイバリンクを用いた遠隔地光格子時計の直接周波数比較

2011年頃は、遠隔地にある ^{87}Sr 光格子時計の周波数一致は各機関が報告した絶対周波数を經由した検証のみであり、その一致度は15桁程度であった。周波数一致をより高精度に検証するため、我々と東京大学(UT)香取研究室は研究室間を光ファイバで結び、伝送する光のキャリア周波数を用いて ^{87}Sr 光格子時計の直接周波数比較を実現した[23][24]。

図4に示したように、基線長24 kmのNICT本部(小金井)と東京大学本郷キャンパス間を長さ60 kmの光ファイバで結んだ。NICT—UT間の光ファイバリンクについての詳細は文献[25][26]に記載されている。NICTでは、NICT-Sr1の安定化レーザー(標準周波数429 THz)にTi:Saコムを位相同期した。次に、このTi:Saコムに光伝送用通信波長帯(波長1538 nm)の外部共振器付半導体レーザーの第二高調波(波長769 nm)を位相同期した。このように、波長変換とTi:Saコムを經由して、NICT-Sr1に位相同期された波長1538 nmのレーザーは、位相ノイズを除去した光ファイバ[26][27]中を通して東京大学香取研究室に伝送された。同研究室では、この伝送されたレーザーの第二高調波(波長769 nm)にTi:Saコムを位相同期した。光ファイバリンクを介してNICT-Sr1に安定化された香取研究室のTi:Saコムと同研究室の ^{87}Sr 光格子時計の光ビート周波数を周波数カウンターで計測した。取得したデータから求めたアラン分散を図5に示す。この時の短期安定度はNICT-Sr1の局部発振器で

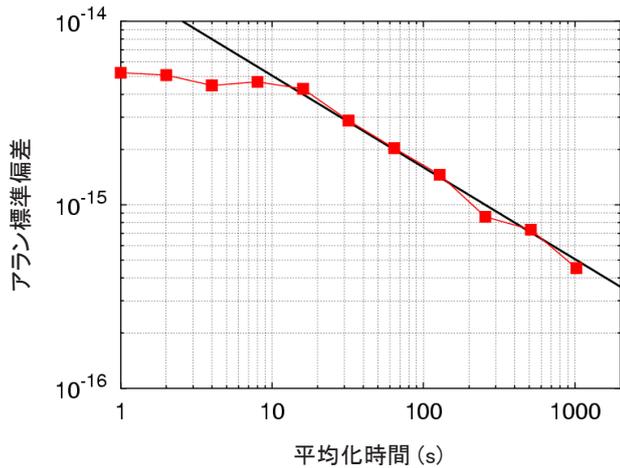


図5 2台のSr光格子時計の相対安定度(アラン標準偏差)
このときの短期安定度はNICTの時計レーザーの安定度で決まっていた。

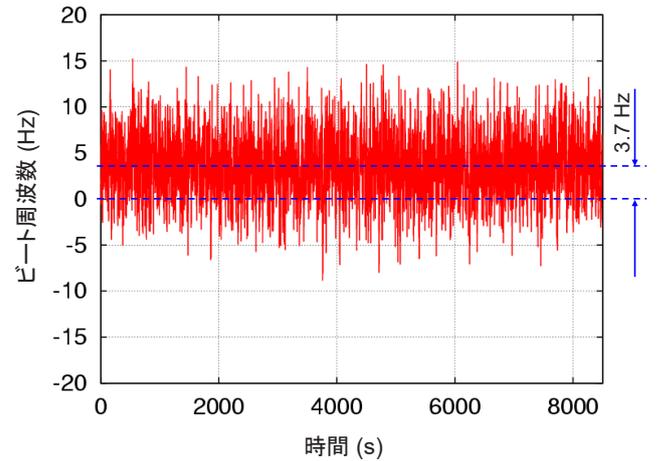


図7 遠隔地の2台のSr光格子時計の周波数差の時間変化
3.7 Hzの周波数差は重力シフト(重力赤方偏移)による2.6 Hzと両周波数標準の異なる条件での動作による周波数補正量の差に起因する。

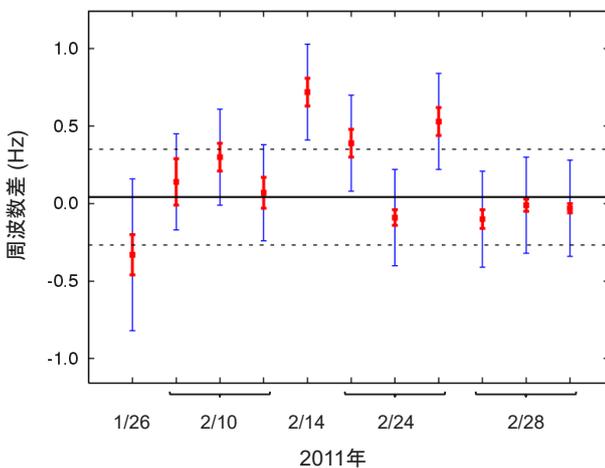


図6 2台のSr光格子時計の周波数差
両光格子時計の外場の擾乱による周波数シフトは補正している。赤と青のエラーバーはそれぞれ、統計不確かさと系統不確かさを表す。黒実線と黒破線は、それぞれ重み付き平均と全系統不確かさである。

ある光共振器安定化レーザー(時計レーザー)の安定度で決まっていた。図6に計11回の周波数差測定結果を示す。各点は900-12 000 sの平均値であり、両光格子時計の外場の擾乱による周波数シフトは補正済みである。赤と青のエラーバーはそれぞれ統計不確かさと系統不確かさを表している。この当時の両光格子時計の確度(系統不確かさ) 5×10^{-16} を考慮し、 $(1.0 \pm 7.3) \times 10^{-16}$ で周波数の一致を確認した。図6の黒実線と黒破線はそれぞれ標準誤差を基に求めた重み付き平均と全系統不確かさを表している。この測定では、周波数リンクで比較精度は劣化せず、周波数標準そのものの不確かさでの比較を実現した。以上のようにして、本研究では世界に先駆けて遠隔地にある光周波数標準の直接周波数比較を実施し、これまで不確かさ15桁にとどまっていた周波数一致の確認を16桁台ま

で改善した。

高精度な周波数リンクは時刻・周波数の共有など標準としての役割以外の応用も期待されている。一般相対性理論によれば、重力の影響によって時間の進み方が異なる。実際、NICT—UT間の直接周波数比較では、お互いの重力ポテンシャルの大きさの違いにより、時間の進み方が違うことが短期間で測定された。図4に示すように、NICT本部は武蔵野台地にあり、NICT-Sr1は東京大学本郷キャンパスの ^{87}Sr 光格子時計よりも56 m標高が高いため、時間が早く進む。つまり、歩度である1 sが短い、あるいは1 Hzが高いということである。図7に周波数差の時系列データをプロットした。磁場や黒体輻射などに起因する両光格子時計間の周波数シフト差と56 mの標高差に相当する重力シフト差がはっきりと見て取れる。地下に空洞や鉱脈があれば、重力環境が変わるので、重力環境の違いを光周波数標準の周波数差として検出できることを利用して、将来地下を探索できるようになるかもしれない。

実際に、近年では測地への応用を視野に入れて、光ファイバを用いた周波数比較が行われている。2016年には、670 km離れた仏国パリのLNE-SYRTE(パリ天文台)と独国ブラウンシュヴァイクのPTB(ドイツ物理工学研究所)の間の光ファイバリンク(光ファイバ長1415 km)により、不確かさ 5×10^{-17} で ^{87}Sr 光格子時計の周波数一致が報告されており、そこでは測地への応用についても言及されている[28]。また、同年には15 km離れた東京大学本郷キャンパスと理化学研究所和光キャンパス間の光ファイバリンク(光ファイバ長30 km)で、 ^{87}Sr 光格子時計の周波数比較を基に不確かさ5 cmで両拠点の光格子時計の標高差の測定が報告されている[29]。そして、2018年には、

4 原子周波数標準

仏国と伊国の国境近くのアルプスに運んだPTBの可搬型 ^{87}Sr 光格子時計と伊国トリノに位置するINRIM(イタリア計量研究所)のイッテルビウム(^{171}Yb)光格子時計の間の光ファイバリンク(光ファイバ長150 km)で行った周波数比測定を基にした1000 mの標高差の検証も報告されている[30]。

4 衛星双方向搬送波位相比較法による遠隔地光時計の直接周波数比較

4.1 NICT—PTB リンク

本研究ではNICTが世界を先導して開発を進めている搬送波位相を用いることで短期安定度を改善した衛星双方向比較法TWCP[6][31]を用いて、およそ9000 km離れたNICTとPTB間で光周波数標準の直接周波数比較を世界に先駆けて実現した[32][33]。

図8のように、NICT本部ではTWCPで比較する水素メーザー HM_{NICT} (周波数 $f_{\text{HM}}^{\text{NICT}}$)にTi:Saコム[13][14]を位相同期した。このTi:SaコムとNICT-Sr1の安定化レーザー(周波数 $\nu_{\text{Sr}}^{\text{NICT}}$)の間のビート信号を周波数カウンターで計測し、NICT-Sr1を基準とした HM_{NICT} の周波数変動($f_{\text{HM}}^{\text{NICT}}/\nu_{\text{Sr}}^{\text{NICT}}$)を測定した。PTBでも同様に光周波数コムを介して[34]、TWCPに用いる水素メーザー HM_{PTB} (周波数 $f_{\text{HM}}^{\text{PTB}}$)の ^{87}Sr 光格子時計(周波数 $\nu_{\text{Sr}}^{\text{PTB}}$)を基準にした周波数変動($f_{\text{HM}}^{\text{PTB}}/\nu_{\text{Sr}}^{\text{PTB}}$)を測定した。TWCPでは、東経 80° の静止衛星AM2を利用した。1日あたりの計測時間はAM2の運用時間に

制限され10:05 UTC(協定世界時)から22:59 UTCの13時間程度であった。両局のAM2との送受信信号の搬送波周波数は、それぞれおよそ14 GHzと11 GHzであった。送信信号は両局の水素メーザー10 MHzを参照周波数にしており、受信信号の周波数はこれらの水素メーザーに対して測定された。TWCPでは以上のようにして、水素メーザーの周波数比 $f_{\text{HM}}^{\text{NICT}}/f_{\text{HM}}^{\text{PTB}}$ を測定した。

直接周波数比較では両局の光周波数標準が同時に通常動作している必要がある。一方で、光周波数標準は周波数や強度の安定化された複数のレーザーで構成されており、どれもがその安定化を維持している必要があるため、日々改善されてはいるものの連続運用し続けることは現在でも難しい。そこで、NICTとPTBの間で同時に光周波数標準が運用している時間(オーバーラップ時間)を可能な限り延長するために、PTBでは ^{87}Sr 光格子時計に加えて、イッテルビウムイオン($^{171}\text{Yb}^+$)の八重極遷移 $^2\text{S}_{1/2}(F=0) - ^2\text{F}_{7/2}(F=3)$ を用いた単一 $^{171}\text{Yb}^+$ 光時計も同時に運用した。また、PTBの ^{87}Sr 光格子時計と $^{171}\text{Yb}^+$ 光時計の確度はそれぞれ、 4×10^{-17} と 7×10^{-17} であり、お互いの周波数比($\nu_{\text{Sr}}^{\text{PTB}}/\nu_{\text{Yb}}^{\text{PTB}}$)は17桁の不確かさで測定されていた[35]なので、Ti:Saコムを用いて $^{171}\text{Yb}^+$ 光時計を基準とした HM_{PTB} の周波数変動($f_{\text{HM}}^{\text{PTB}}/\nu_{\text{Yb}}^{\text{PTB}}$)も測定し、 $^{171}\text{Yb}^+$ 光時計を仲介周波数標準に用いた。以上の測定から、次の2式を利用して光格子時計の周波数比 $\nu_{\text{Sr}}^{\text{NICT}}/\nu_{\text{Sr}}^{\text{PTB}}$ を求めた。

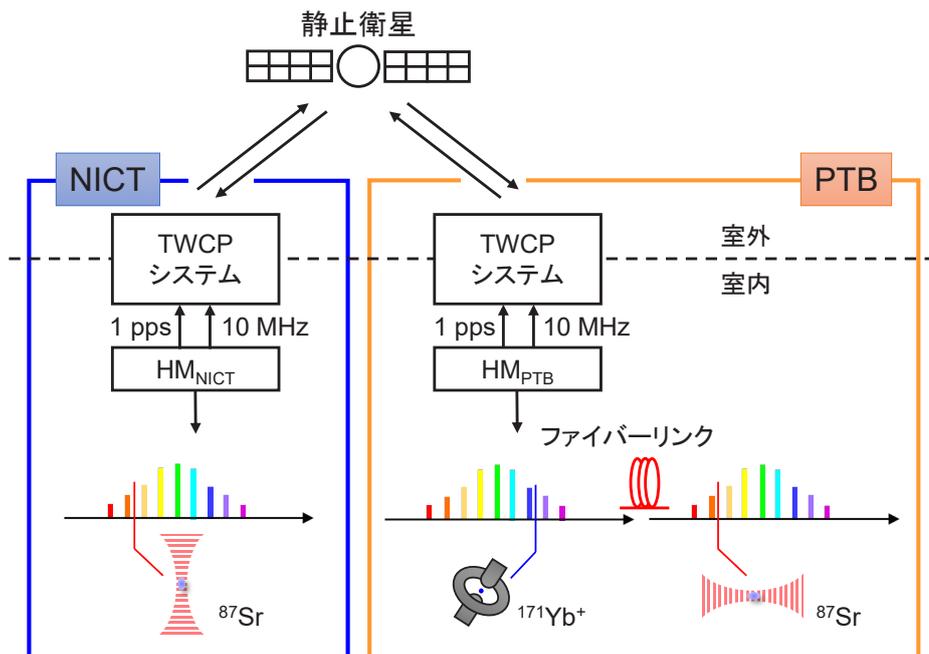


図8 TWCPによるNICT—PTB周波数リンク

各光周波数標準はTWCPの参照信号である水素メーザーの周波数を評価する。一方、TWCPでは両局の水素メーザーを比較する。両局の光周波数標準の動作しているオーバーラップ時間を長くとれるようPTBでは ^{87}Sr 光格子時計の他に仲介周波数標準として $^{171}\text{Yb}^+$ 光時計も運用した。

$$\frac{\nu_{\text{Sr}}^{\text{NICT}}}{\nu_{\text{Sr}}^{\text{PTB}}} - 1 = \frac{\nu_{\text{Sr}}^{\text{NICT}}}{f_{\text{HM}}^{\text{NICT}}} \cdot \frac{f_{\text{HM}}^{\text{NICT}}}{f_{\text{HM}}^{\text{PTB}}} \cdot \frac{f_{\text{HM}}^{\text{PTB}}}{\nu_{\text{Sr}}^{\text{PTB}}} - 1 \quad (3)$$

$$\frac{\nu_{\text{Sr}}^{\text{NICT}}}{\nu_{\text{Sr}}^{\text{PTB}}} - 1 = \frac{\nu_{\text{Sr}}^{\text{NICT}}}{f_{\text{HM}}^{\text{NICT}}} \cdot \frac{f_{\text{HM}}^{\text{NICT}}}{f_{\text{HM}}^{\text{PTB}}} \cdot \frac{f_{\text{HM}}^{\text{PTB}}}{\nu_{\text{Yb}}} \cdot \frac{\nu_{\text{Yb}}}{\nu_{\text{Sr}}^{\text{PTB}}} - 1 \quad (4)$$

(3) 式は PTB の ^{87}Sr 光格子時計が通常通りに動作していた場合、(4) 式は PTB の ^{87}Sr 光格子時計が止まっていて、かつ $^{171}\text{Yb}^+$ 光時計が通常動作していた場合である。NICT-Sr1 と PTB の ^{87}Sr 光格子時計のオーバーラップ時間は 69 840 s であったが、 $^{171}\text{Yb}^+$ 光時計を含めることでオーバーラップ時間は 83 640 s に延長された。

NICT と PTB からの AM2 の仰角は、それぞれ 16.0° と 3.7° と非常に低いため、電離層による遅延の時間的な変動が大きい。この点が長基線の衛星リンクの不利な点であるが、電離層のデータを利用してこの遅延を補正した。4 日間測定した内の 1 日分の測定結果を図 9 に示す。図の各点は 60 s 平均であり、光周波数標準の系統的な周波数シフトと電離層による効果は補正されている。衛星リンクの統計不確かさは、4 日間の全データのラン標準偏差(図 10)をオーバーラップ時間まで外挿して 1.2×10^{-15} と評価した。ここに、それぞれの周波数標準の確度と、GPS 搬送波位相解析との間で相対評価した TWCP の系統誤差 1.0×10^{-15} [31] 及び両拠点の重力赤方偏移による周波数シフト差の不確かさ 1.0×10^{-16} を考慮し、周波数一致を $(1.1 \pm 1.6) \times 10^{-15}$ と結論づけた。今後さらに高精度な周波数比較を実現するために、信号送受信部の温度環境の向上や今回の水素レーザーに相当する参照周波数発振器の安定度改善、より良い電離層遅延の時間変動の評価などシステムの改善に努める。

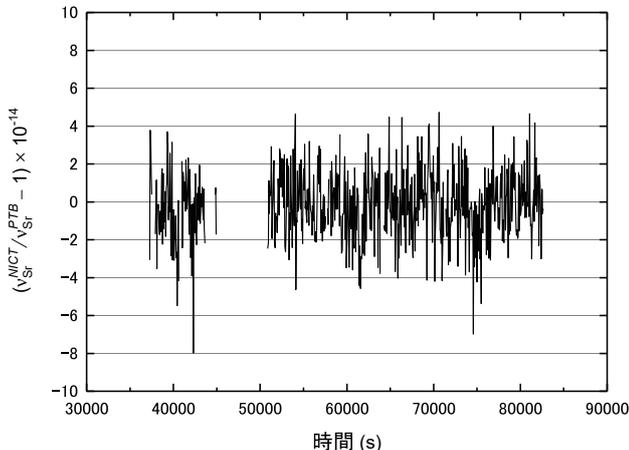


図 9 TWCP による NICT と PTB の光格子時計の周波数比の時間変化
各点は 60 s 平均で、両周波数標準の系統的な周波数シフトと電離層による効果は補正されている。全 4 日間のうちの 1 日分の測定結果。

4.2 高安定な仲介周波数標準を使わない TWCP

人工衛星を利用した周波数比較には、比較を行う両局に標準時系や水素レーザー、セシウムやルビジウム原子時計など周波数リンクの仲介となる安定なマイクロ波周波数標準が必要である。そのため、人工衛星を利用した周波数リンクは通常は限られた標準研究所でしか実現できない。そこで、この仲介周波数標準の代わりに周波数比較を行う光周波数標準から生成したマイクロ波を利用して、高安定な仲介周波数標準を使わない周波数リンクに着目した。同時に、本研究では TWCP に可搬型システムを用いた。

可搬型 TWCP のシステムと Yb 添加光ファイバコム (Yb コム) を NICT 本部に設置し、Yb コムを介して NICT-Sr1 から生成した 10 MHz を可搬型 TWCP システムの参照信号とし、標準時系 UTC(NICT) を参照信号とした TWCP 固定局との間で周波数リンクした。このリンクにより、NICT-Sr1 を基準に UTC(NICT) を測定した結果 (周波数比 $f_{\text{UTC(NICT)}}/\nu_{\text{Sr}}$) は BIPM が報告する時刻差 UTC - UTC(NICT) から求めた周波数比 ($f_{\text{UTC(NICT)}}/f_{\text{UTC}}$) と、UTC - UTC(NICT) のリンク不確かさ 2×10^{-15} の範囲で一致した。このときの NICT-Sr1 の系統不確かさは 9×10^{-17} であったので、Yb コムを含む周波数変換システムと TWCP システムの不確かさを 15 桁前半と評価した。この可搬型 TWCP システムと Yb コムを大阪大学豊中キャンパスに持ち込み、Yb コムを用いて同大学占部研究室の単一 $^{40}\text{Ca}^+$ イオン光時計からマイクロ波 10 MHz を生成した。TWCP により、このマイクロ波と NICT 本部で生成する UTC(NICT) を周波数比較し、400 s で 3×10^{-15} の安定度を得た [36]。以上より、仲介周波数

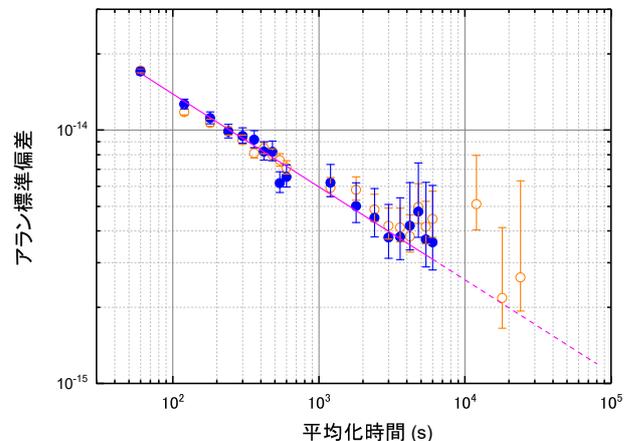


図 10 NICT—PTB 間の光格子時計の周波数比較の相対安定度
青とオレンジはそれぞれ最終日 (1 日分) の安定度と 4 日間全てのデータを用いた安定度。周波数比較の安定度は TWCP のリンク安定度によって制限されていた。周波数比較の統計不確かさはアラン標準偏差を 4 日間のオーバーラップ時間まで外挿して評価した。

4 原子周波数標準

標準を使わない TWCP を利用して、遠隔地にある光周波数標準の UTC(NICT) を基準にした周波数測定が可能であることを実証した。これにより、安定なマイクロ波周波数標準を持たない一般の研究所や大学、フィールド実験のような施設外でも、TWCP によって高精度な周波数リンクが期待できる。また、将来的には、TWCP の両局で光周波数コムを用いて光標準周波数から参照マイクロ波を生成することで、TWCP の短期安定度が制限されている要因のひとつとして挙げられる参照周波数の短期安定度の改善も期待できる。

4.3 NICT—KRISS リンク

TWCP を用いて、NICT 本部からおよそ 1100 km 離れた韓国テジョンに位置する KRISS の ^{171}Yb 光格子時計 [37] と周波数比測定を実施した [38]。図 11 のように NICT—PTB リンクと同様な実験であったが、違いは周波数比測定であることと、比較的近距离での TWCP の周波数リンクであった。NICT では Yb コムを用いて NICT-Sr1 から生成した 100 MHz と水素メーザー HM(NICT) の 100 MHz を比較し、NICT-Sr1 を基準とした周波数変動 $(y_{\text{HM(NICT)}} - y_{\text{Sr}})$ を測定した [39]。ここで、 y は $y(t) = [v(t) - v_0]/v_0$ を表しており、時刻 t に測定した周波数 $v(t)$ の設定周波数 v_0 からの差を v_0 で除した無次元量である。ここでは規格化周波数偏差と呼ぶことにする。KRISS では、光周波数コムを介して ^{171}Yb 光格子時計の光標準周波数と KRISS が生成する韓国の標準時系 UTC(KRIS) との間で周波数変動 $y_{\text{UTC(KRIS)}} - y_{\text{Yb}}$ を測定した。TWCP には、

静止衛星 Eutelsat 172 A を利用した。この衛星に対する両局の送受信信号の搬送波周波数はそれぞれ 14 GHz と 11 GHz であった。そして、TWCP により、HM(NICT) と UTC(KRIS) の周波数変動 $(y_{\text{UTC(KRIS)}} - y_{\text{HM(NICT)}})$ を測定した。以上の測定から、次式を利用して、 $v_{\text{Yb}}/v_{\text{Sr}}$ を求めた。

$$\frac{v_{\text{Yb}}}{v_{\text{Sr}}} \approx \left\{ 1 + (y_{\text{HM(NICT)}} - y_{\text{Sr}}) + (y_{\text{UTC(KRIS)}} - y_{\text{HM(NICT)}}) - (y_{\text{UTC(KRIS)}} - y_{\text{Yb}}) \right\} \cdot \frac{\bar{v}_{\text{Yb}}}{\bar{v}_{\text{Sr}}} \quad (5)$$

ここで、 \bar{v}_{Sr} と \bar{v}_{Yb} は規格化する周波数で、それぞれの絶対周波数を用いた。

本研究では、3 日間で正味 12 時間の測定を実施した。それぞれの日に得られた測定結果を図 12 (a) と (b) に示す。詳細は文献 [38] に譲るが、各日の統計不確かさの平均を $\sqrt{3}$ (イベント数の平方根) で除して、3 日間の統計不確かさとした。TWCP の系統不確かさは通常の GPS 搬送波位相解析とそれを改善した IPPP[40] による周波数リンクを相互比較して 1×10^{-16} とし、このときの NICT-Sr1 と ^{171}Yb 光格子時計のそれぞれの確度 5×10^{-17} と 1.2×10^{-16} 、両局の重力ポテンシャル差による周波数シフト差の不確かさ 4×10^{-16} を考慮し、周波数比 $v_{\text{Yb}}/v_{\text{Sr}}$ を下記のように不確かさ 5.8×10^{-16} で決定した。

$$R = v_{\text{Yb}}/v_{\text{Sr}} = 1.207\,507\,039\,343\,337\,90\,(70) \quad (6)$$

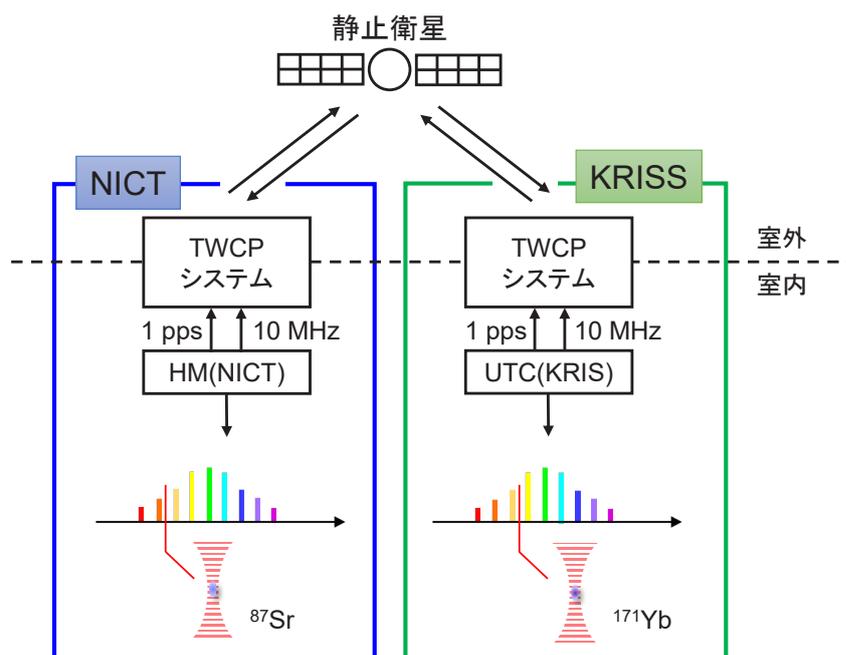


図 11 TWCP による NICT—KRISS 周波数リンク
両局では、TWCP の参照信号である水素メーザーの周波数を各光周波数標準で評価する。一方、TWCP で両局の水素メーザーを比較する。

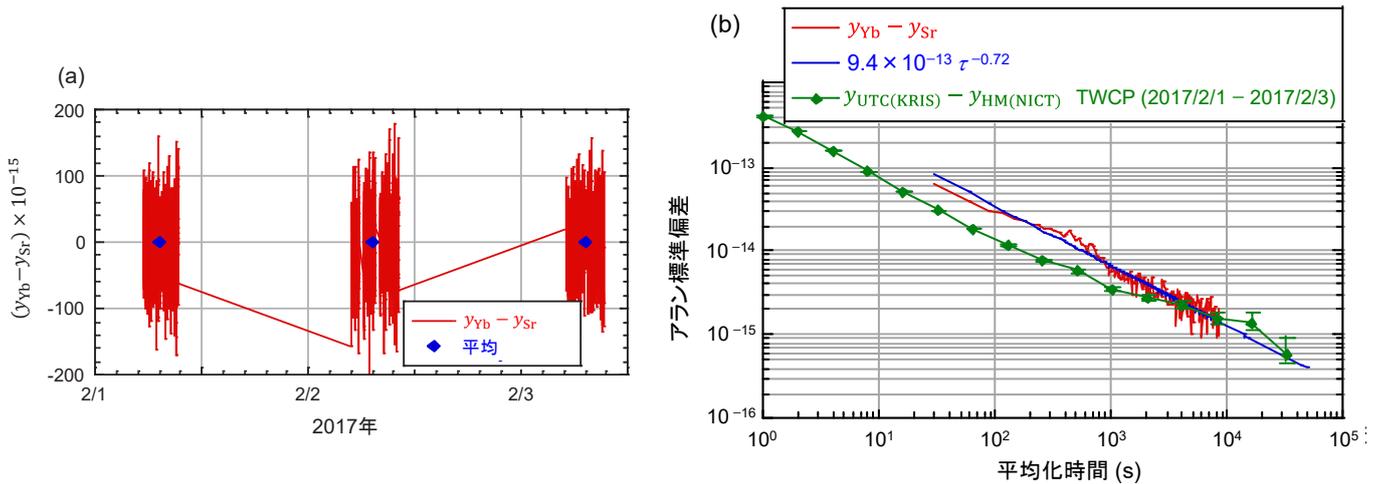


図 12 (a) 3日間の周波数差 $y_{Yb} - y_{Sr}$ の測定結果

(a) 赤点と青点はそれぞれ 30 s 平均と各測定日の平均値。(b) 赤線と緑線はそれぞれ全測定データを用いた $y_{Yb} - y_{Sr}$ と仲介周波数標準の周波数差 $y_{UTC(KRIS)} - y_{HM(NICT)}$ のアララン標準偏差。青線は赤線のフィッティング。 $y_{Yb} - y_{Sr}$ が $y_{UTC(KRIS)} - y_{HM(NICT)}$ の安定度よりも劣化しているのは、このときの HM (NICT) の実験室間の伝送系が原因であった。

図 13 に示すように、この結果は先行結果と整合性が取れていた。本研究では、衛星周波数リンクでありながらわずか 12 時間の測定で 16 桁半ばの周波数比較を実現した。

NICT の人工衛星を介した直接周波数比較の活動としては、2006 年に衛星双方向時刻周波数比較によりアジア—ヨーロッパ間では初めての NICT と PTB の一次周波数標準 (NICT-CsF1 と PTB-CSF1) の直接周波数比較があった [44]。そして、2013 年には本稿で紹介した NICT—PTB 間の TWCP リンクで、光周波数標準の国際直接周波数比較、とりわけ大陸間直接周波数比較を世界に先駆けて実施している。

2016 年には、英国 NPL と PTB の間で GPS を用いた $^{171}\text{Yb}^+$ 光時計の直接周波数比較 [45] が報告されているが、NICT 以外で TWCP を用いた光周波数標準の比較はこれまでにない。そこで、より多くの研究機関がこの方法を導入できることを期待し、TWCP 用のモデムを製品化した。今後、多くの機関が TWCP を導入し、より高精度な衛星周波数リンク網が実現し、多くの機関と高精度に光標準周波数を比較できるようになることを望んでいる。我々は、これと併せて BIPM の Petit 博士らが進めている IPPP を利用した周波数比較にも積極的に取り組んでいる。

5 Sr 光格子時計を用いた時系実信号生成

UTC には実信号が無いので、各機関では独自の方法で時系実信号を生成している。NICT では 18 台の商用セシウム原子時計から成る平均原子時を参照して、標準時系の局部発振器 (原振) に採用した水素メーザーの周波数を調整して実信号の標準時系 UTC (NICT) を

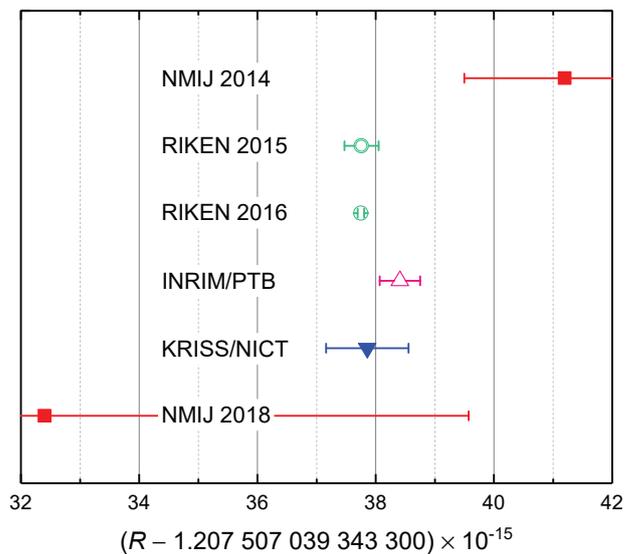


図 13 本研究結果 ν_{Yb}/ν_{Sr} とこれまでに報告されていた ^{171}Yb と ^{87}Sr の周波数比 (NMIJ2014 [41], RIKEN2015 [42], RIKEN2016 [21], INRIM/PTB [28], NMIJ2018 [43])。NMIJ と RIKEN の結果をそれぞれ赤四角と緑丸、INRIM と PTB の結果をピンク三角、本研究結果を青三角で示している。

生成している。これを 9 時間進めることで日本標準時を生成し、国内に供している [46]。我々は日本標準時の高精度化を狙い、高精度な光周波数標準である NICT-Sr1 を用いた時系実信号を生成した [39][47]。

この実信号生成実験までに、NICT と PTB ではマイクロ波原子時計の周波数を光格子時計で事後校正することで、光格子時計に基づく時刻指標の作成を試みていた [47][48]。特に我々は、連続運用に適したマイクロ波原子時計を高精度な光周波数標準で間欠的に評価することで双方の特性を生かした「光マイクロ波ハ

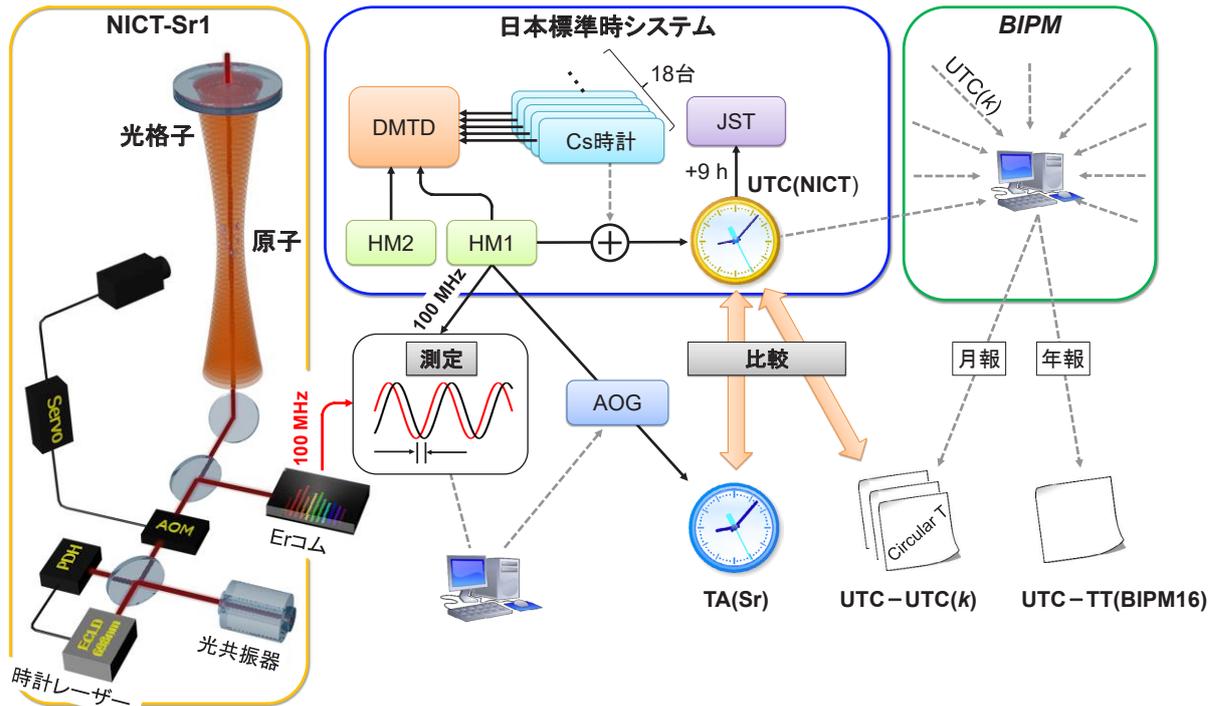


図 14 光マイクロ波ハイブリッド方式による時系実信号生成の実験配置

原振の水素メーザー周波数は NICT-Sr1 により評価される。その評価に基づいて、周波数調整器 AOG により水素メーザーの周波数ドリフトを抑えるように周波数を調整する。生成した時刻 TA (Sr) は UTC (NICT) を経由して、UTC や TT (BIPM16) と比較される。

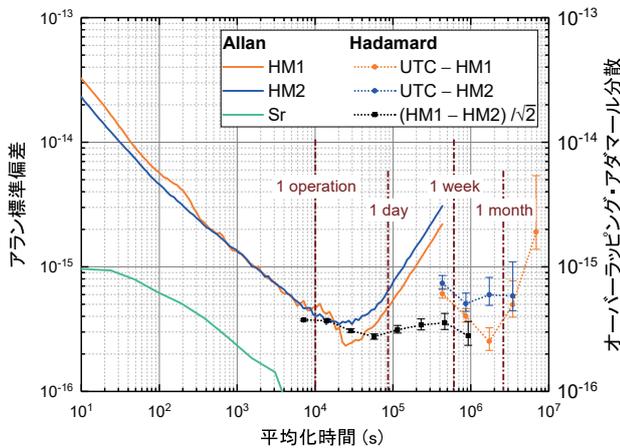


図 15 各周波数標準の安定度

水素メーザー HM1 と HM2 のアラン標準偏差をそれぞれオレンジ線と青線で、またそれぞれのオーバーラッピング・アダマール分散をオレンジ点線、青点線で示している。黒点線は HM1 または HM2 のオーバーラッピング・アダマール分散である。緑線は NICT-Sr1 のアラン標準偏差を示している。

イブリッド方式」を提案してきた [47]。

光マイクロ波ハイブリッド方式による時系実信号生成の実験配置を図 14 に示す。NICT-Sr1 の光標準周波数に対して Yb コムを位相同期し、100 MHz マイクロ波信号を生成した。このマイクロ波信号を参照して原振の水素メーザー 100 MHz を評価した。

図 15 に各 (規準) 周波数標準の安定度を示す。原振の水素メーザーの周波数安定度 (HM1: オレンジ) から、周波数一次ドリフトの影響が大きいことが見て取れる。

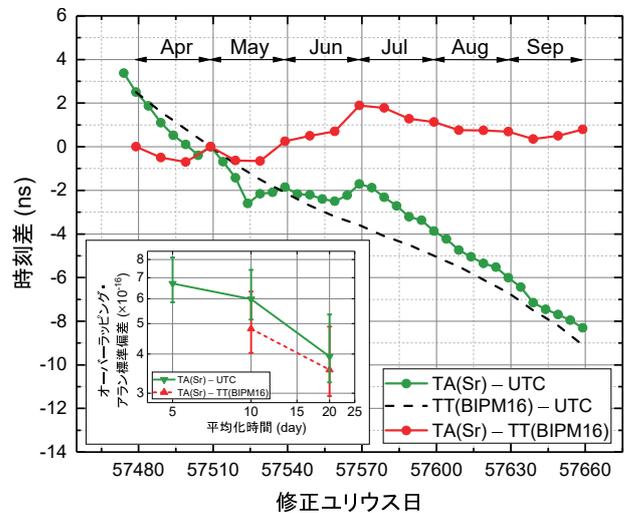


図 16 TA(Sr) と UTC、TA(Sr) と TT (BIPM16) の時刻差

黒破線は、TT (BIPM) と UTC の時刻差。挿入図には TA (Sr) と UTC、TA (Sr) と TT (BIPM16) の時刻差の相対安定度 (オーバーラッピング・アラン標準偏差) を緑実線と赤破線で示している。

また、光周波数標準の安定度 (Sr: 緑) は水素メーザーの安定度よりも十分に高く、水素メーザーの安定度を損なわずに、10 000 s 程度 (~3 時間) の測定時間で 16 桁の精度の評価ができる。また、オーバーラッピング・アダマール分散 (3-サンプル分散) の結果から、周波数一次ドリフトを除去した水素メーザーの安定度は少なくとも 1 週間は 16 桁を維持できると予想し、3 時間程度の水素メーザー評価を 1 週間に 1 度以上の

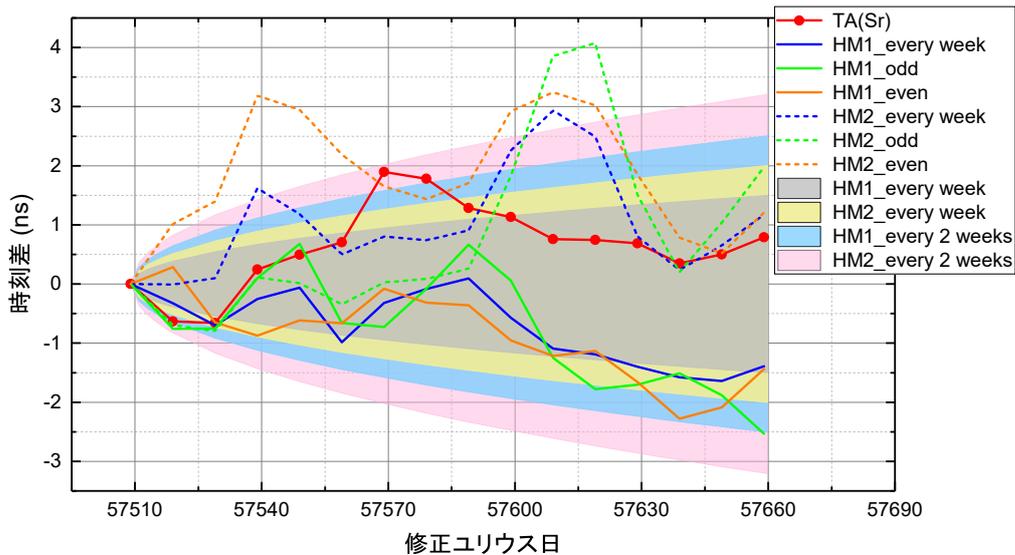


図 17 実信号 TA(Sr)と実信号データを用いたシミュレーション及び解析結果

TT (BIPM16)との時刻差として示している。実際に生成した信号 TA(Sr)を赤点とガイドの赤実線で示す。HM1とHM2が原振の場合のシミュレーション結果をそれぞれ実線と破線で表している。1週間ごとあるいは2週間ごとに各原振(水素メーザー)をNICT-Sr1で評価したと仮定した場合の結果である。影は解析的に計算した時刻差の広がり。実信号及び実データを用いたシミュレーションと解析結果が良く一致している。詳細は [39] 参照。

頻度で実施した。過去 25 日分の評価結果を基に今後の水素メーザー周波数変動を一次フィッティングで予想し、その変動分を打ち消すように周波数調整器 AOG で周波数を調整した。

このような手順で、光周波数標準を利用した高精度な時系実信号 TA(Sr)の生成に世界に先駆けて成功し、これを 5 か月間継続した。TA(Sr)と UTC の時刻差を図 16 の緑点で示す。目安に各点を実線で結んでいる。2016 年の 4 月から生成開始し、最初の 1 か月間はその後の水素メーザーの周波数変動を予想するための調整期間とし、5 月の初めに UTC との時刻差をゼロに調整した。この時刻差は次第に大きくなり、5 か月後には 8 ns にまで広がった。一方で、UTC よりも定義の秒 (SI 秒) に近い歩度で時を刻んでいる BIPM 地球時 TT (BIPM16) との間の時刻差は、5 か月間 2 ns 以内に収まった (図 16 の赤点とガイドの赤実線)。つまり、この期間限定ではあるが、我々は UTC よりも SI 秒に近い歩度で時を刻む時系の生成に成功したことになる。

今回生成した実信号 TA(Sr)のデータを用いて異なる水素メーザーを原振とした場合のシミュレーションも行った。日本標準時では、各原子時計間の位相を常時計測しているため、原振を異なる水素メーザーに置き換えた場合の後処理の時系も計算できる。シミュレーションで得られた時系と TT (BIPM16)との時刻差を図 17 に示す。原振となる水素メーザーの違いにより差異が出たため、個体差に依存する偏りを減らすべく条件を変えた評価方法をシミュレーションに取り入れた。詳細は文献 [39] に譲るが、水素メーザーの周

波数ノイズ成分が白色周波数ノイズとフリッカー周波数ノイズから成っていると仮定し、ある頻度で水素メーザーの周波数が分かると仮定した場合の位相逸脱による時刻の時間変動を図 17 の影の部分で示す。結論として、実信号及び実データを使ったシミュレーションと簡単な仮定を入れた解析解の結果は良く一致していた。この結果から、生成する時系信号の目標精度を設定し、どの原振をどの頻度で評価すれば目的の時系信号を実現できるか設計できる。

近年では米国 NIST も我々の提案する光マイクロ波ハイブリッド方式と同様な時系生成を過去のデータを用いて後処理で計算したシミュレーション結果を報告している [49]。

6 あとがき

TAI の校正に寄与し国際的な周波数標準として機能し始めた NICT-Sr1 を NICT 内外の他の周波数標準と比較する取組は、光標準周波数の一致度検証や、将来の時刻・周波数の共有及び供給方法の精度向上につながり、秒の再定義の国際的な議論で必要となるデータを提供するうえで重要である。これまでに我々が既の実施した周波数リンクと現在取り組んでいる周波数リンク、さらには今後予定している周波数リンクを図 18 と表 1 に示す。

欧州宇宙機関 ESA (European Space Agency) 主導の下で進めている人工衛星ミッション ACES (Atomic Clock Ensemble in Space) では、高精度原子時計を国際宇宙ステーションに搭載して、世界に配置した地球

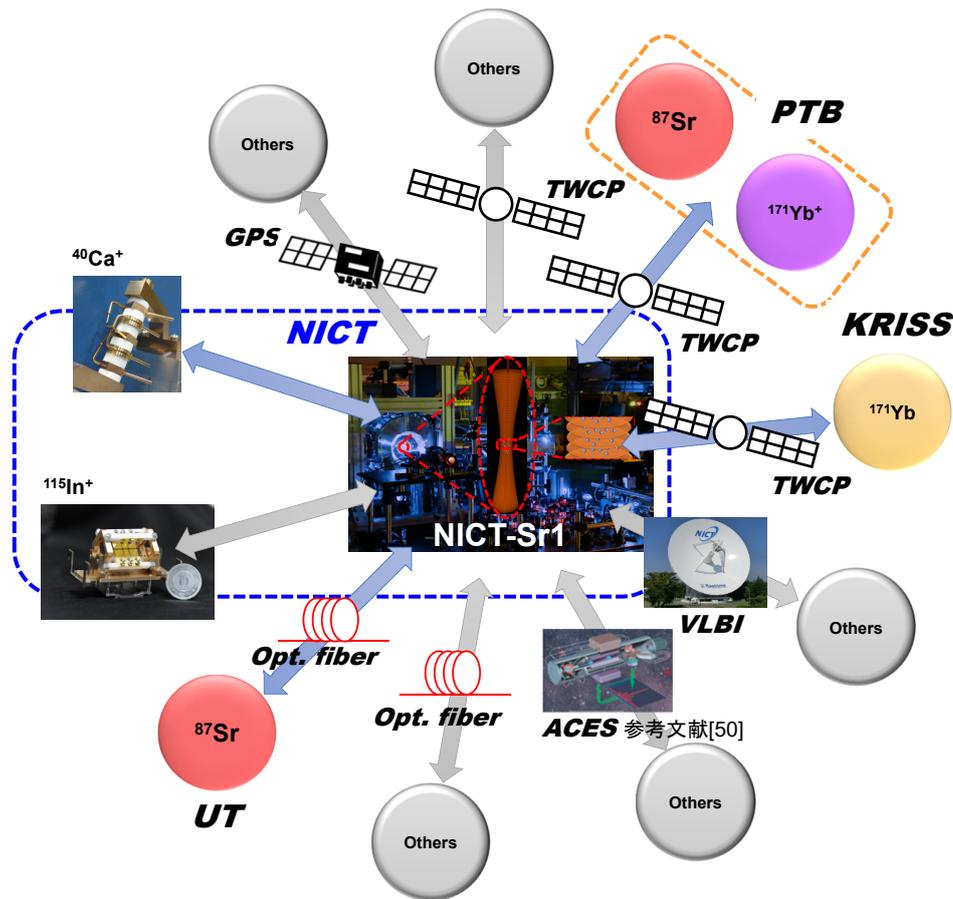


図 18 これまでに実施した周波数比較と今後の予定
 矢印の青色と灰色はそれぞれ既に実施された周波数リンクと現在進行中及び今後計画されている周波数リンク。

局と高精度に周波数リンクすることが計画されている。

表 1 NICT-Sr1 の周波数リンク実績と今後の予定

比較相手	拠点	リンク方法	不確かさ
⁴⁰ Ca ⁺ 光時計	NICT	光コム	2.5×10^{-15}
⁸⁷ Sr 光格子時計	東京大学	光ファイバ	7.3×10^{-16}
⁸⁷ Sr 光格子時計	PTB	TWCP	1.6×10^{-15}
¹⁷¹ Yb ⁺ 光時計	KRISS	TWCP	5.8×10^{-16}
¹¹⁵ In ⁺ 光時計	NICT	光コム	評価中
		VLBI	評価中
		GPS with IPPP	評価中
		ACES	実施予定

現在、地球局は世界各地に7か所設置される予定で、NICT にアジア・オセアニアで唯一となる地球局が設置される予定である。これにより、日本国内の光及びマイクロ波周波数標準が光ファイバリンクや TWCP で NICT 地球局にリンクし、これを介して ACES プロジェクトに貢献可能となる。

このような周波数リンクは、標準時系の構築のみならず種々の応用も期待されている。3 で紹介した新しい重力センサへの適用はその一例である。この他に、高精度な周波数標準の比較は、微細構造定数や陽子・

電子の質量比の時間変動の検証 [51]、ローレンツ対称性の検証 [52] など自然のより深い理解に貢献し始めている。

このような比較には、高精度な基準周波数が必要不可欠である。我々は標準研究機関として、ローカルには光周波数標準を用いた高精度な時系の実現、グローバルには TAI 校正に貢献していく一方で、このような時刻・周波数標準としての役割にとどまらず、自然の不思議を解明するために、必要なときにいつでもどこでも利用できる高精度な基準周波数を供給することも、我々が将来果たすべき役割のひとつと考えている。

謝辞

本稿では本研究に携わった現在在籍する研究者を共著者に迎えた。研究に参加して下さった過去に在籍されていた多くの研究員や技術員の方々、またサポートして下さった皆さまに、この場をお借りしてお礼申し上げたい。また、光周波数標準の比較実験は東京大学、PTB、大阪大学、KRISS、BIPM と共同で行った。ここで感謝の意を示したい。

【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 “物理学辞典,” 三訂版, 培風館, 2005.
- 3 H. Schnatz, B. Lipphardt, J. Helmcke, F. Riehle, and G. Zenner, “First Phase-Coherent Frequency Measurement of Visible Radiation,” *Phys. Rev. Lett.* 76, 18 (1999). <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.76.18>
- 4 S. A. Diddams, “The evolving optical frequency comb,” *J. Opt. Soc. Am. B* 27, B51, 2010. <https://doi.org/10.1364/JOSAB.27.000B51>
- 5 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>
- 6 藤枝美穂, 田淵良, 相田政則, 後藤忠広, “TWCP—搬送波位相利用衛星双方向比較—,” 情報通信研究機構研究報告, vol.65, no.2, 5-2, 2019.
- 7 M. Sekido, K. Takefuji, H. Ujihara, T. Kondo, M. Tsutsumi, Y. Miyauchi, E. Kawai, H. Takiguchi, S. Hasegawa, R. Ichikawa, Y. Koyama, Y. Hanado, K. Watabe, T. Suzuyama, J. Komuro, K. Terada, K. Namba, R. Takahashi, Y. Okamoto, T. Aoki, and T. Ikeda, “An Overview of the Japanese GALA-V Wideband VLBI System,” *IVS 2016 General Meeting Proceedings “New Horizons with VGOS,”* Edited by D. Behrend, K. D. Baver, and K. L. Armstrong, NASA/CP-2016-219016, pp.25-33, 2016.
- 8 赤塚耕輔, “ロラン C による原子時の国際比較と公表業務,” 電波研究所季報, vol.29, pp.201-211, 1983.
- 9 蜂須英和, N. Nemitz, 李瑛, 石島博, 井戸哲也, “NICT におけるストロンチウム光格子の開発,” 情報通信研究機構研究報告, vol.65, no.2, 4-3, 2019.
- 10 N. Nemitz, H. Hachisu, F. Nakagawa, H. Itoh, T. Gotoh, and T. Ido, “TAI calibration with an optical standard,” 情報通信研究機構研究報告, vol.65, no.2, 4-4, 2019.
- 11 NICT プレスリリース, “光格子時計を利用した高精度な時刻標準の生成に成功,” March, 2018. <http://www.nict.go.jp/press/2018/03/15-1.html>
- 12 K. Matsubara, H. Hachisu, Y. Li, S. Nagano, C. Locke, A. Nogami, M. Kajita, K. Hayasaka, T. Ido, and M. Hosokawa, “Direct comparison of a Ca⁺ single-ion clock against a Sr lattice clock to verify the absolute frequency measurement,” *Opt. Express* 20, 22034, 2012. <https://doi.org/10.1364/OE.20.022034>
- 13 長野重夫, 伊東宏之, 李瑛, 熊谷基弘, Clayton R. Locke, John G. Hartnett, 細川瑞彦, “フェムト秒レーザー—光周波数コムによる精密周波数計測,” 情報通信研究機構季報, vol.56, nos.3/4, pp.145-159, 2010.
- 14 S. Nagano, H. Itoh, Y. Li, K. Matsubara, and M. Hosokawa, “Stable Operation of Femtosecond Laser Frequency Combs with Uncertainty at the 10⁻¹⁷ Level toward Optical Frequency Standards,” *Jpn. J. Appl. Phys.* 48, 042301, 2009. <https://doi.org/10.1143/JJAP.48.042301>
- 15 A. Yamaguchi, N. Shiga, S. Nagano, Y. Li, H. Ishijima, H. Hachisu, M. Kumagai, and T. Ido, “Stability Transfer between Two Clock Lasers Operating at Different Wavelengths for Absolute Frequency Measurement of Clock Transition in ⁸⁷Sr,” *Appl. Phys. Express* 5, 022701, 2012. <https://doi.org/10.1143/APEX.5.022701>
- 16 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.
- 17 M. S. Safronova, M. G. Kozlov, and C. W. Clark, “Precision Calculation of Blackbody Radiation Shifts for Optical Frequency Metrology,” *Phys. Rev. Lett.* 107, 143006, 2011. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.107.143006>
- 18 K. Pyka, N. Herschbach, J. Keller, and T. E. Mehlstäubler, “A high-precision segmented Paul trap with minimized micromotion for an optical multiple-ion clock,” *Appl. Phys. B* 114, pp.231-241, 2014. <https://doi.org/10.1007/s00340-013-5580-5>
- 19 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.
- 20 T. Akatsuka, M. Takamoto, and H. Katori, “Optical lattice clocks with non-interacting bosons and fermions,” *Nature Phys.* 4, 954, 2008. <https://doi.org/10.1038/nphys1108>
- 21 N. Nemitz, T. Ohkubo, M. Takamoto, I. Ushijima, M. Das, N. Ohmae, and H. Katori, “Frequency ratio of Yb and Sr clocks with 5 × 10⁻¹⁷ uncertainty at 150 seconds averaging time,” *Nature Photon* 10, 258, 2016. <https://doi.org/10.1038/nphoton.2016.20>
- 22 K. Yamanaka, N. Ohmae, I. Ushijima, M. Takamoto, and H. Katori, “Frequency Ratio of ¹⁹⁹Hg and ⁸⁷Sr Optical Lattice Clocks beyond the SI Limit,” *Phys. Rev. Lett.* 114, 230801. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.114.230801>
- 23 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>
- 24 NICT プレスリリース, “6500 万年にわずか 1 秒の誤差！光格子時計の精度を世界で初めて光ファイバで結び実証,” Aug., 2011. <http://www.nict.go.jp/press/2011/08/04-1.html>
- 25 藤枝美穂, 熊谷基弘, 長野重夫, 井戸哲也, “光ファイバ周波数伝送,” 情報通信研究機構季報, vol.56, nos. 3/4, pp.193-201, 2010.
- 26 M. Fujieda, M. Kumagai, S. Nagano, A. Yamaguchi, H. Hachisu, and T. Ido, “All-optical link for direct comparison of distant optical clocks,” *Opt. Express* 19, 17, 2011. <https://doi.org/10.1364/OE.19.016498>
- 27 L.-S. Ma, P. Jungner, J. Ye, and J. L. Hall, “Delivering the same optical frequency at two places: accurate cancellation of phase noise induced by an optical fiber or other time-varying path,” *Opt. Lett.* 19, 1777, 1994. <https://doi.org/10.1364/OL.19.001777>
- 28 C. Lisdat, G. Grosche, N. Quintin, C. Shi, S. M. F. Raupach, C. Grebing, D. Nicolodi, F. Stefani, A. Al-Masoudi, S. Dörscher, S. Häfner, J.-L. Robyr, N. Chiodo, S. Bilicki, E. Bookjans, A. Koczwara, S. Koke, A. Kuhl, F. Wiotte, F. Meynadier, E. Camisard, M. Abgrall, M. Lours, T. Legero, H. Schnatz, U. Sterr, H. Denker, C. Chardonnet, Y. Le Coq, G. Santarelli, A. Amy-Klein, R. Le Targat, J. Lodewyck, O. Lopez, and P.-E. Pottie, “A clock network for geodesy and fundamental science,” *Nat. comm.* 7, 12443, 2016. <https://doi.org/10.1038/ncomms12443>
- 29 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,” *Nat. Photon.* 10, pp.662-666, 2016. <https://doi.org/10.1038/NPHOTON.2016.159>
- 30 J. Grotti, S. Koller, S. Vogt, S. Häfner, U. Sterr, Ch. Lisdat, H. Denker, C. Voigt, L. Timmen, A. Rolland, F. N. Baynes, H. S. Margolis, M. Zampaolo, P. Thoumany, M. Pizzocaro, B. Rauf, F. Bregolin, A. Tampellini, P. Barbieri, M. Zucco, G. A. Costanzo, C. Clivati, F. Levi, and D. Calonico “Geodesy and metrology with a transportable optical clock,” *Nat. Phys.* 14, pp.437-441, 2018. <https://doi.org/10.1038/s41567-017-0042-3>
- 31 M. Fujieda, D. Piester, T. Gotoh, J. Becker, M. Aida, and A. Bauch, “Carrier-phase two-way satellite frequency transfer over a very long baseline,” *Metrologia* 51, pp.253-262, 2014. <https://doi.org/10.1088/0026-1394/51/3/253>
- 32 H. Hachisu, M. Fujieda, S. Nagano, T. Gotoh, A. Nogami, T. Ido, St. Falke, N. Huntemann, C. Grebing, B. Lipphardt, Ch. Lisdat, and D. Piester, “Direct comparison of optical lattice clocks with an intercontinental baseline of 9000 km,” *Opt. Lett.* 39, 4072, 2014. <http://dx.doi.org/10.1364/OL.39.004072>
- 33 NICT プレスリリース, “9,000 km 離れた日独の光格子時計が 625 兆分の 1 の精度で一致!,” May, 2014. <http://www.nict.go.jp/press/2014/05/27-1.html>
- 34 H. R. Telle, B. Lipphardt, and J. Stenger, “Kerr-lens, mode-locked lasers as transfer oscillators for optical frequency measurement,” *Appl. Phys. B* 74, 1(2002). <https://doi.org/10.1007/s003400100735>
- 35 St. Falke, N. Lemke, C. Grebing, B. Lipphardt, S. Weyers, V. Gerginov, N. Huntemann, Ch. Hagemann, A. Al-Masoudi, S. Häfner, St. Vogt, U. Sterr, and Ch. Lisdat, “A strontium lattice clock with 3 × 10⁻¹⁷ inaccuracy and its frequency,” *New J. of Phys.* 16, 073023, 2014. <https://doi.org/10.1088/1367-2630/16/7/073023>
- 36 M. Fujieda, T. Ido, H. Hachisu, T. Gotoh, H. Takiguchi, K. Hayasaka, K. Toyoda, K. Yonegaki, U. Tanaka, and S. Urabe, “Frequency Measurement System of Optical Clocks Without a Flywheel Oscillator,” *IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr., Freq. Control.* 63, 2231, 2016. <https://doi.org/10.1109/TUFFC.2016.2615119>
- 37 H. Kim, M.-S. Heo, W.-K. Lee, C. Y. Park, H.-G. Hong, S.-W. Hwang, and D.-H. Yu, “Improved absolute frequency measurement of the ¹⁷¹Yb optical lattice clock at KRISS relative to the SI second,” *Jpn. J. Appl. Phys.* 56, 050302, 2017. <https://doi.org/10.7567/JJAP.56.050302>
- 38 M. Fujieda, S.-H. Yang, T. Gotoh, S.-W. Hwang, H. Hachisu, H. Kim,

4 原子周波数標準

- Y. K. Lee, R. Tabuchi, T. Ido, W-K. Lee, M-S Heo, C. Y. Park, D-H Yu, and G. Petit, "Advanced Satellite-Based Frequency Transfer at the 10^{-16} Level," IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr., Freq. Control. 65, 973, 2018. <https://doi.org/10.1109/TUFFC.2018.2821159>
- 39 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>
- 40 S. Petit, A. Kanj, S. Loyer, J. Delporte, F. Mercier, and F. Perosanz, " 1×10^{-16} frequency transfer by GPS PPP with integer ambiguity resolution," Metrologia 52, pp.301-309, 2015. <https://doi.org/10.1088/0026-1394/52/2/301>
- 41 D. Akamatsu, M. Yasuda, H. Inaba, K. Hosaka, T. Tanabe, A. Onae, and F.-L. Hong "Frequency ratio measurement of ^{171}Yb and ^{87}Sr optical lattice clocks," Opt. Express 22, 7898-7905 (2014); erratum 22, p.32199, 2014. <https://doi.org/10.1364/OE.22.007898> <https://doi.org/10.1364/OE.22.032199>
- 42 M. Takamoto, I. Ushijima, M. Das, N. Nemitz, T. Ohkubo, K. Yamanaka, N. Ohmae, T. Takano, T. Akatsuka, A. Yamaguchi, and H. Katori, "Frequency ratios of Sr, Yb, and Hg based optical lattice clocks and their applications," C. R. Phys. 16, 489-498, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.crhy.2015.04.003>
- 43 D. Akamatsu, T. Kobayashi, Y. Hisai, T. Tanabe, K. Hosaka, M. Yasuda, and F.-L. Hong, "Dual-Mode Operation of an Optical Lattice Clock Using Strontium and Ytterbium Atoms," IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr., Freq. Control. 65, 1069, 2018. <https://doi.org/10.1109/TUFFC.2018.2819888>
- 44 M. Fujieda, T. Gotoh, D. Piester, M. Kumagai, S. Weyers, A. Bauch, R. Wynands, and M. Hosokawa, "First comparison of primary frequency standards between Europe and Asia," Proceedings in IEEE International Frequency Control Symposium Joint with the 21st European Frequency and Time-Forum, pp.937-941, 2008. <http://dx.doi.org/10.1109/FREQ.2007.4319217>
- 45 J. Leute, N. Huntemann, B. Lipphardt, C. Tamm, P. B. R. Nisbet-Jones, S. A. King, R. M. Godun, J. M. Jones, H. S. Margolis, P. B. Whibberley, A. Wallin, M. Merimaa, P. Gill, and E. Peik, "Frequency Comparison of $^{171}\text{Yb}^+$ Ion Optical Clocks at PTB and NPL via GPS PPP," IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr., Freq. Control. 63, 981, 2016. <https://doi.org/10.1109/TUFFC.2016.2524988>
- 46 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.
- 47 T. Ido, H. Hachisu, F. Nakagawa, and Y. Hanado, "Rapid evaluation of time scale using an optical clock," Journal of Physics: Conference Series 723, 012041, 2016. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/723/1/012041>
- 48 C. Grebing, A. Al-Masoudi, S. Dörscher, S. Häfner, V. Gerginov, S. Weyers, B. Lipphardt, F. Riehle, U. Sterr, and C. Lisdat, "Realization of a timescale with an accurate optical lattice clock," Optica 3, pp.563-569, 2016. <https://doi.org/10.1364/OPTICA.3.000563>
- 49 J. Yao, T. E. Parker, N. Ashby, and J. Levine, "Incorporating an Optical Clock Into a Time Scale," IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr., Freq. Control. 65, pp.127-134, 2017. <https://doi.org/10.1109/TUFFC.2017.2773530>
- 50 L. Cacciapuoti and Ch. Salomon, "Space clocks and fundamental tests: The ACES experiment," Eur. Phys. J. Special Topics 172, pp.57-68, 2009. <https://doi.org/10.1140/epjst/e2009-01041-7>
- 51 N. Huntemann, B. Lipphardt, Chr. Tamm, V. Gerginov, S. Weyers, and E. Peik, "Improved Limit on a Temporal Variation of m_p/m_e from Comparison of Yb^+ and Cs Atoms Clocks," Phys. Rev. Lett. 113, 210802, 2014. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.113.210802>
- 52 C. Sanner, N. Huntemann, R. Lange, Chr. Tamm, E. Peik, M. S. Safronova, and S. G. Porsev, "Optical clock comparison for Lorentz symmetry testing," Nature 567, 204, 2019. <https://doi.org/10.1038/s41586-019-0972-2>



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

藤枝美穂 (ふじえだ みほ)

電磁波研究所
時空標準研究室
主任研究員
博士(理学)
精密時刻比較、光ファイバ周波数伝送



熊谷基弘 (くまがい もとひろ)

電磁波研究所
時空標準研究室
主任研究員
博士(理学)
原子周波数標準、光ファイバ周波数伝送、
テラヘルツ周波数標準

長野重夫 (ながの しげお)

電磁波研究所
時空標準研究室
主任研究員
博士(理学)
周波数標準

後藤忠広 (ごとう ただひろ)

電磁波研究所
時空標準研究室
主任研究員
博士(工学)
時刻比較、精密軌道決定



松原健祐 (まつばら けんすけ)

電磁波研究所
時空標準研究室
研究マネージャー
博士(理学)
周波数標準、標準時、レーザー分光



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



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



大坪 望 (おおつぼ のぞみ)

電磁波研究所
時空標準研究室
研究員
博士(学術)
量子エレクトロニクス、光周波数標準



早坂和弘 (はやさか かずひろ)

未来 ICT 研究所
量子 ICT 先端開発センター
研究マネージャー
博士(理学)
量子エレクトロニクス、量子光学、
光周波数標準



中川史丸 (なかがわ ふみまる)

電磁波研究所
時空標準研究室
主任研究員
博士(理学)
時間周波数標準、時刻比較

花土ゆう子 (はなど ゆうこ)

電磁波研究所
上席研究員
博士(工学)
時刻・周波数標準、高精度計測



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