

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 4 年 6 月 22 日現在

機関番号：82626

研究種目：基盤研究(A)（一般）

研究期間：2017～2021

課題番号：17H01151

研究課題名（和文）光周波数標準を用いた光時系の実現

研究課題名（英文）The realisation of an optical time scale based on optical frequency standards

研究代表者

保坂 一元（Hosaka, Kazumoto）

国立研究開発法人産業技術総合研究所・計量標準総合センター・副研究部門長

研究者番号：50462859

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 35,750,000円

研究成果の概要（和文）：光格子時計の発展は目覚ましく、幾つかの研究グループでは $10^{-18}$ 程度の不確かさを達成している。これは、原子泉方式セシウム一次周波数標準器の不確かさと比較して2桁程度小さい。しかしながら、光格子時計の堅牢性は、連続運転により国際原子時に貢献している一次周波数標準器には及ばない。時間周波数諮問委員会では、秒の再定義に向けて達成すべき必須条件を規定するためにワーキンググループを立ち上げたが、ここでは、「光時計による国際原子時への定期的な貢献が可能になること」が条件の一つとして定められた。本研究では、Yb光格子時計を用いて半年間の運転で80%の稼働率を達成し、国際原子時への貢献を開始した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

光格子時計をはじめとする光時計の進歩は目覚ましく、近年、秒の再定義を目指した活動が活発に進められている。これまでは、光時計の不確かさを小さくする事、絶対周波数測定を精度良く行う事等にリソースが投入されてきたが、光時計を如何に定常的に運用するか、実用に適した光時計は何かを明らかにする事が、秒の定義改定を目指すうえでの新たな研究テーマとして浮上した。秒の定義改定に向けた議論を進めるためには、光格子時計の長期連続運転を成功させ、マイクロ波時計と比較して遜色のない実用性を示す必要があった。本研究では、世界で最も安定に稼働する光格子時計を開発し、国際原子時への貢献を開始するなど大きな成果を上げた。

研究成果の概要（英文）：Optical lattice clocks have been rapidly improved and some of the research groups have succeeded in developing optical clocks with uncertainties of  $10^{-18}$  region, which is about two orders of magnitude smaller than that of caesium fountain atomic clocks. However, the robustness of optical lattice clocks has not yet reached a level comparable to that of caesium fountain clocks which contribute to International Atomic Time (TAI) by the nearly continuous operation. The Consultative Committee for Time and Frequency has set-up a working group, which worked to define a number of mandatory criteria to be achieved before changing the definition. One of the mandatory criteria states that optical standards should regularly contribute to TAI. Towards the redefinition of the SI second and the realization of an optical time scale, we have achieved the long-term operation of an ytterbium optical lattice clock with a coverage of 80% for half a year operation and started contributing to TAI.

研究分野：原子分子物理学、レーザー工学、レーザー分光

キーワード：時系 光格子時計 時間周波数標準 国際原子時 協定世界時

## 1. 研究開始当初の背景

本研究の計画を作成したのは2016年であるが、それから5年以上経過した今日もなお、私たちは秒の定義改定に向けた道中にあり、再定義に向けた議論が継続して行われている。2016年に国際度量衡委員会傘下の時間周波数諮問委員会において、秒の定義改定に向けたロードマップが作成され、このロードマップをもとに本研究計画が立てられた。このロードマップ中で、以下の5つのマイルストーンが示されている。

- 1)  $10^{-18}$ 程度の相対不確かさの光時計が3つ以上出現すること。
- 2) 3つ以上の異なる研究所において  $10^{-18}$ 程度の相対不確かさで、光時計の同等性を確認できること。
- 3) 原子泉方式セシウム一次周波数標準器との比較において、 $3 \times 10^{-16}$ 以下の相対不確かさで、周波数が決定出来ること。
- 4) 異なる光時計の周波数比が2つ以上の研究機関で  $5 \times 10^{-18}$ の以下の相対不確かさで測定されること。そして、このような周波数比の測定の実績が5つ以上になること。
- 5) 国際原子時(TAI)への定期的な貢献が可能になること。

このロードマップにおいて、これらのマイルストーンは2021年頃の達成を目指すとしてきたが、2022年の現在でもこのマイルストーンの多くが達成されておらず、野心的な目標であったことが伺える。当時、光時計の不確かさを小さくする事(上述のマイルストーン1),2)、絶対周波数測定を精度良く行う事(同じく3))を目標に多くのリソースが投入され、光周波数標準の研究が推進されていた。光時計の不確かさが既存のマイクロ波の周波数標準と比較して2桁以上小さい事が明らかになったが、当時、光時計を如何に定常的に運用するか(同じく5)、実用に適した光時計は何かを明らかにする事が、秒の定義改定を目指すうえでの新たな研究テーマとして浮上した。

そのような背景のもと、私たちは、光時計をまず実用レベルに引き上げなくてはならないことを強く意識した。当時、光時計はその装置の複雑さゆえに、長時間安定して稼働させることは容易ではなく、実験室において数時間稼働させてデータを取得するのが一般的であった。しかしながら、定常的に長時間安定して稼働させることが出来なければ、光時計がマイクロ波の時計にとって代わることはない。秒の定義改定に向けた議論を進めるためには、光格子時計の長期連続運転を成功させ、マイクロ波時計と比較して遜色のない実用性を示す必要があった。

## 2. 研究の目的

本研究課題の申請時、光格子時計を長期的に、あるいは定期的に運用し、マイクロ波周波数帯で運用されている既存の時系と比較してステアリングを実施することで、高精度な時系を構築する事を目標とした。

この目標を達成する為に、以下の3つのサブテーマを設定した。

- A) 長期連続運転可能な光格子時計の開発
- B) 長期周波数安定度に優れた超狭線幅レーザーの開発
- C) 水素メーザーのステアリングのシミュレーション

先に述べたように、光格子時計は複雑な装置であり、長期連続運転は容易ではない。連続運転時間は、複数のレーザーの周波数安定化の堅牢性に依存する事から、周波数安定化レーザーの堅牢性の向上、自動運転システムの構築を行う事とした。また、システムの小型化と省電力化を行い、メンテナンスが容易な装置の開発も並行して行う事にした。

超狭線幅レーザーについては、光格子時計が何らかの原因で停止し復旧するまでの間、十分な周波数安定度を保持できるかを検討し設計する必要がある。つまり、停止している時間が短ければ要求される長期周波数安定度の要求は緩和される。水素メーザーのステアリングに関しては、当然水素メーザーの周波数ノイズ特性が大きく影響する。また、ここでも光格子時計がどのくらい連続運転が可能かによって、必要となるステアリングの頻度等が決定される。そのため、私たちはまず、光格子時計がどこまで連続運転が可能であるかを徹底して検討することにした。つまり、仮に光格子時計が稼働率100%で長期間運転できれば、光格子時計だけで時系を作ることが出来るからである。

## 3. 研究の方法

まず、私たちはイッテルビウム(Yb)光格子時計の長期連続運転が可能になるように装置の改造に取り組んだ。光格子時計には様々な周波数安定化レーザーが用いられるので、連続運転のためには、すべてのレーザーが長時間安定に動作し続ける必要がある(図1)。言い換えれば、光

格子時計の連続運転可能な時間は、レーザーの正常な動作時間によって制限される。長期連続運転を考えた場合、周波数安定化レーザーの堅牢性の向上、自動周波数安定化システムの構築、メンテナンスが容易な光源の開発は不可避である。

各種レーザーの周波数安定化に光周波数コムを用いた。具体的には、マスターレーザーとなる線幅 1 Hz 程度の超安定化レーザーに光周波数コムを位相同期させ、光周波数コムのすべてのモードにマスターレーザーの線幅を転送する。次に、Yb 光格子時計で必要となる様々なレーザーをこの光周波数コムの最も近いモードにそれぞれ位相同期させることで、複数のレーザーの周波数を同時に安定化させることに成功した。

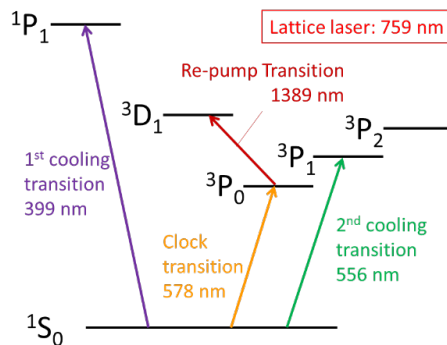


図 1 Yb 原子の主な遷移

レーザーの堅牢な位相同期（周波数安定化）を実現するためには、十分な制御帯域を確保し時定数の短い周波数変動に対応する必要がある。その一方で、時定数の異なる複数のレーザーの

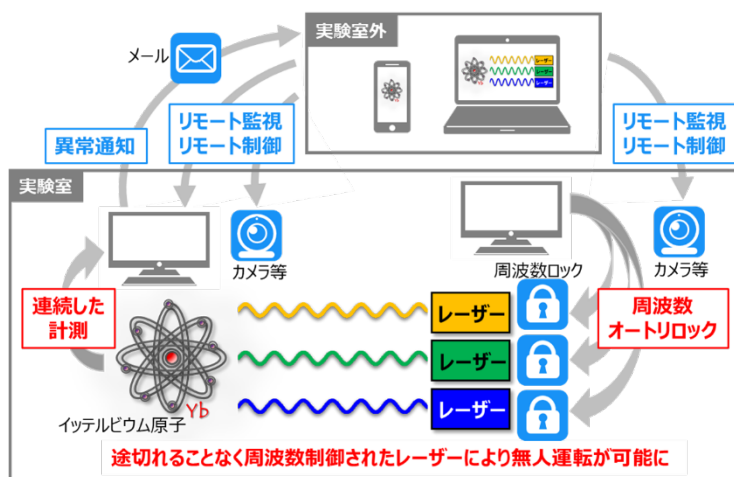


図 2 Yb 光格子時計の周波数オートリロック機能の概念図

制御機構を組み合わせ、十分なダイナミックレンジを実現しなくてはならない。堅牢な周波数安定化機能が実現したとしても、何らかの理由でフィードバック機能が停止してしまうことがあるため、自動周波数安定化（周波数オートリロック）システムを独自に開発した。それでもなお装置が停止した際には、研究者にメールが送信されるシステムとなっており、連絡を受けた者は、リモートで装置の再起動などの復旧作業を出来るようにした（図 2）。

冷却原子を捕獲する真空装置として、出来るだけ小型かつ省電力で動作できる装置の開発を行った。具体的には、原子オープン、ゼーマン減速器、磁気光学トラップ用コイル、において小型化・省電力化を実現し、地磁気補正コイルを含んだ、装置の大きさは、0.5 m<sup>3</sup> 程度を目標とし、可搬型のフレームに搭載した。

研究結果の章で述べるように、先ず Yb 光格子時計の連続運転に注力した結果、他の研究機関を圧倒する長期にわたる高稼働率運転に成功した。その結果、「長期周波数安定度に優れた超狭線幅レーザーの開発」の優先順位を下げた。「水素メーザーのステアリングのシミュレーション」に関しては、デッドタイムに起因する Yb 光格子時計の不確かさの計算において詳細を検討した。

#### 4. 研究成果

2019 年の 10 月から約半年間にわたり Yb 光格子時計の準連続運転を実施し、Yb 光格子時計を用いて、時間周波数国家標準 UTC(NMIJ) の周波数を測定した。水素メーザーを原振とする UTC(NMIJ) は連続稼働しており、人工衛星の信号を介して TAI と比較することが出来る（図 3）。UTC(NMIJ) と TAI の周波数の関係は、国際度量衡局で計算され、1 ヶ月に 1 度発行されるレポート (Circular T) に掲載される。当グループで測定した Yb 光格子時計と UTC(NMIJ) の関係と、Circular T の情報を合わせることで、Yb 光格子時計を基準にした TAI の周波数(校正値)が得られる。Circular T には、他機関の Cs 原子時計による TAI の校正値も掲載されており、当グループの Yb 光格子時計の校正値と、他機関の校正値が一致することを確認した。この結果をメートル条約関連会議傘下の周波数標準作業部会に提出した。数ヶ月に及ぶ厳正な審査の後、周波数標準作業部会は、当グループの Yb 光格子時計が TAI の校正を行うことを承認した。

TAI の校正は、秒の 2 次表現として採用されている Yb 光格子時計の勧告値を用いて行う。勧告値は定義値ではなく、 $5 \times 10^{-16}$  の不確かさがあり、新しい測定を行うと更新されるものである。当グループの半年間の TAI の校正は、Cs 原子時計を基準とした絶対周波数計測とみなすことができ、絶対周波数値を算出できる。半年間の測定から、Yb 絶対周波数を不確かさ  $5 \times 10^{-16}$  で決定した。この結果を時間周波数諮問委員会に報告し勧告値の更新に貢献した。

Yb 光格子時計の半年間の準連続運転を行っている傍ら、当グループで以前に開発していた Sr 光格子時計を稼働し、Yb/Sr 周波数比を測定した。近年、光格子時計の不確かさが Cs 原子時計を凌駕するようになっており、光格子時計どうしの直接比較である周波数比の情報は勧告値の

決定において重要である。そのため、先に示したマイルストーンでも明らかのように、異なる遷移周波数比の測定は、秒の再定義に向けた研究の中でも重要な課題に位置付けられている。Sr 光格子時計は、不確かさの再評価を行い、コイルの振動に起因するドップラーシフトをアクティブにキャンセルする系を導入するなどして不確かさの低減を進め測定を行った。その結果、Yb/Sr 周波数比を不確かさ  $4 \times 10^{-16}$  で決定することに成功した。

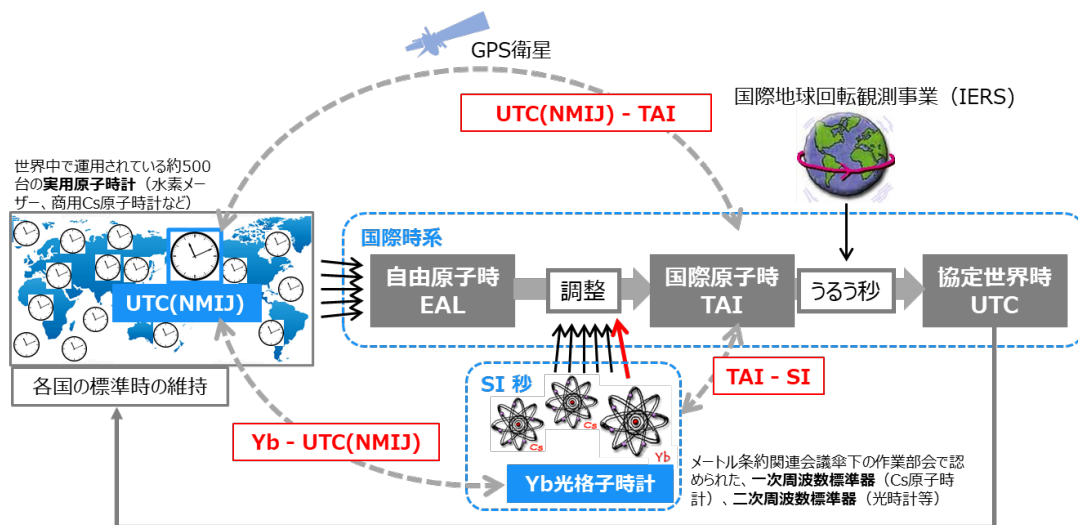


図3 協定世界時(UTC)、国際原子時(TAI)と一次・二次周波数標準器との関係。本プロジェクトで開発した Yb 光格子時計は二次周波数標準器として承認され、TAI の校正に貢献を開始した。

2019 年から 2020 年にかけて、本プロジェクトを遂行する上で最もハードルの高かった光格子時計の連続運転に成功し(世界で初めて半年間で稼働率 80 %以上の運転に成功(図4))、メートル条約関連会議の周波数標準作業部会において TAI の校正を承認されたが、実用という意味ではさらなる実績を積み必要があった。2021 年には、TAI のリアルタイム校正をスタートした。(リアルタイム校正とは、前月の校正結果を翌月 3 日までに国際度量衡局に提出することである。リアルタイムで TAI の計算に反映され、寄与率が上がる。他機関の校正結果を参照できないブラインド校正ともいえる。)

TAI の校正は、周波数標準作業部会で承認された一次および二次周波数標準器によって行われる。Yb 光格子時計は二次標準器であり、まだ秒の定義ではないため、不確かさ付きの勧告値を用いて行う(不確かさは  $5 \times 10^{-16}$ )。現在、光格子時計を用いて TAI の校正を承認された研究機関は世界で 6 機関のみであるが、TAI の高精度化にむけて積極的に校正に参加することが推奨されている。2021 年、私たちは平均で 90 %以上の稼働率を達成し、7 回分の TAI のリアルタイム校正に寄与した。

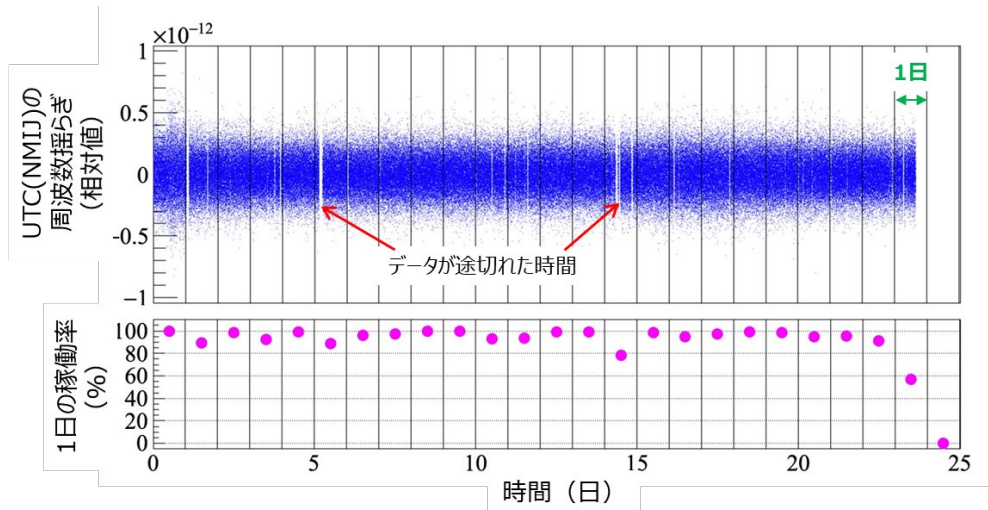


図4 Yb 光格子時計の高稼働率運転データの一例(25日間の測定)。上図：縦軸はイッテルビウム光格子時計の相対周波数と時間周波数国家標準 UTC(NMIJ)の相対周波数の差(6.8秒平均)を表す。白い筋に見える部分はデータの欠損部分。下図：一日毎の稼働率を示す。

本研究において、光格子時計の不確かさの低減にも取り組んだ。その結果、光格子時計の系統不確かさを $1 \times 10^{-16}$ に低減した。これまで、不確かさは黒体輻射による影響で制限されており、特に、約200度に加熱した真空窓からの輻射の影響による不確かさが大きかった。アイリスを挿入することで、窓の立体角を小さくし、次に、モンテカルロシミュレーションで、窓の実効立体角を見積もった。「実効」と書いた意図は、黒体輻射光子が真空チェンバーの壁を反射しながら原子に到達するため、幾何学的立体角よりも考慮すべき立体角が大きくなることを意味する。シミュレーションでは、現実の真空チェンバーに近いジオメトリを構築し、チェンバーの放射率、表面粗さの情報を適切に反映させた。表面粗さについては、針触式粗さ計を用いた測定により評価した。

当グループの光格子時計の稼働率は既に、Cs原子時計に匹敵するレベルであり、光時計の中では世界トップである。今後も光格子時計の継続的な運転を行い、TAIに定期的な貢献を継続することが、秒の定義改定にむけた国際活動を推進する上で重要である。現状で稼働率を制限している主な要因は、1ヶ月程度の時定数で光格子に捕獲される原子数が減少してしまうことである。現状では、部品の交換やアライメントの再試行により対処しているが、将来的にはこの作業が不要になることが望ましい。

また、光格子時計の系統不確かさを低減する努力を続け、将来的には $10^{-18}$ 台の不確かさを達成したい。この目標に向け、主に黒体輻射シフトの不確かさ低減、狭線幅レーザーの周波数安定度の高安定化を進める予定である。黒体輻射シフトについては、今年度にモンテカルロシミュレーションによる実効立体角の評価が可能になった。次のステップとしては、米国JILAの研究を参考に、真空中に温度計を置くことで、チェンバーからの輻射による温度の計測を行う。これにより、シミュレーションの妥当性を確認する。狭線幅レーザーの開発は、このプロジェクトにおいて優先度を下げたが、将来の光格子時計の不確かさのさらなる低減と、水素メーザーを用いることなく光だけで生成する真の光時系の構築を見据え、新規開発に着手している。これは、熱雑音の影響の少ない結晶コーティングミラーを用いた光共振器に安定化したレーザーであり、現状より1桁程度の周波数安定度向上が期待される。現時点で1台目がほぼ完成したため、次は2台目のレーザーを開発し、周波数安定度の評価を行う。狭線幅レーザーの高安定化は、光格子時計の精密な不確かさ評価に必須である。また、高稼働率運転可能な光格子時計と高安定狭線幅レーザーの組み合わせにより、水素メーザーなどのマイクロ波時計では達成できない超高精度な光時系の構築が可能になると期待される。

本プロジェクトで開発したYb光格子時計は圧倒的な高稼働率で長期運転に成功し、光格子時計が実用的にも優れていることを示すことが出来た。また、この光格子時計を用いて実際にTAIの校正に寄与したことは、秒の再定義に向けた議論をまた一歩前進させることになったと思われる。秒の定義改定に至る道のりはまだ続くが、大きなインパクトを与える研究成果につなげていきたい。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計7件（うち査読付論文 7件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Takumi Kobayashi, Daisuke Akamatsu, Kazumoto Hosaka, Yusuke Hisai, Masato Wada, Hajime Inaba, Tomonari Suzuyama, Feng-Lei Hong, and Masami Yasuda	4. 巻 57
2. 論文標題 Demonstration of the nearly continuous operation of an 171Yb optical lattice clock for half a year	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Metrologia	6. 最初と最後の頁 65021
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1088/1681-7575/ab9f1f	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Yusuke Hisai, Daisuke Akamatsu, Takumi Kobayashi, Kazumoto Hosaka, Hajime Inaba, Feng-Lei Hong, and Masami Yasuda	4. 巻 58
2. 論文標題 Improved frequency ratio measurement with 87Sr and 171Yb optical lattice clocks at NMIJ	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Metrologia	6. 最初と最後の頁 15008
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1088/1681-7575/abc104	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Daisuke Akamatsu, Takumi Kobayashi, Yusuke Hisai, Takehiko Tanabe, Kazumoto Hosaka, Masami Yasuda, and Feng-Lei Hong	4. 巻 65
2. 論文標題 Dual-mode operation of an optical lattice clock using strontium and ytterbium atoms	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control	6. 最初と最後の頁 1069-1075
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1109/TUFFC.2018.2819888	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Takumi Kobayashi, Daisuke Akamatsu, Yusuke Hisai, Takehiko Tanabe, Inaba Hajime, Tomonari Suzuyama, Feng-Lei Hong, Kazumoto Hosaka, and Masami Yasuda	4. 巻 65
2. 論文標題 Uncertainty Evaluation of an 171Yb Optical Lattice Clock at NMIJ	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control	6. 最初と最後の頁 2449-2458
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1109/TUFFC.2018.2870937	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Yusuke Hisai, Daisuke Akamatsu, Takumi Kobayashi, Sho Okubo, Inaba Hajime, Kazumoto Hosaka, Masami Yasuda, and Feng-Lei Hong	4. 巻 27
2. 論文標題 Development of 8-branch Er: fiber frequency comb for Sr and Yp optical lattice clocks	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Optics Express	6. 最初と最後の頁 6404-6414
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1364/OE.27.006404	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Yusuke Hisai, Yoshiki Nishida, Hiroshi Miyazawa, Takumi Kobayashi, Feng-Lei Hong, and Daisuke Akamatsu	4. 巻 61
2. 論文標題 Generation of 116 mW output power at 461 nm in a periodically poled lithium niobate waveguide	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Japanese Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 20701
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.35848/1347-4065/ac4a05	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Takumi Kobayashi, Daisuke Akamatsu, Kazumoto Hosaka, and Masami Yasuda	4. 巻 90
2. 論文標題 A relocking scheme for optical phase locking using a digital circuit with an electrical delay line	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Review of Scientific Instruments	6. 最初と最後の頁 103002
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/1.5111935	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計23件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 13件)

1. 発表者名 和田 雅人、小林 拓実、赤松 大輔、安田 正美、稲場 肇
2. 発表標題 光時計-UTCリンクのための18桁級光周波数計測
3. 学会等名 レーザー学会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 和田 雅人、小林 拓実、赤松 大輔、安田 正美、保坂 一元、稲場 肇
2. 発表標題 光時計の周波数計測の不確かさを低減
3. 学会等名 応用物理学会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 小林拓実、赤松大輔、保坂一元、久井裕介、稲場肇、鈴山智也、洪鋒雷、安田正美
2. 発表標題 Nearly continuous operation of an Yb optical lattice clock towards contribution to the International Atomic Time
3. 学会等名 IEEE IFCS-ISAF (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 小林拓実、赤松大輔、保坂一元、久井裕介、稲場肇、鈴山智也、洪鋒雷、安田正美
2. 発表標題 Development of an operational Yb optical lattice clock towards contribution to the International Atomic Time
3. 学会等名 CPEM (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 小林拓実、赤松大輔、保坂一元、久井裕介、和田雅人、稲場肇、洪鋒雷、安田正美
2. 発表標題 Yb光格子時計の半年間にわたる準連続運転と国際原子時への貢献
3. 学会等名 日本物理学会
4. 発表年 2021年



1. 発表者名 久井裕介、赤松大輔、小林拓実、保坂一元、稲場肇、洪鋒雷、安田正美
2. 発表標題 Sr optical lattice clock assisted by optical frequency combs for contribution to International Atomic Time
3. 学会等名 CLEO (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 久井裕介、赤松大輔、小林拓実、保坂一元、稲場肇、洪鋒雷、安田正美
2. 発表標題 産総研におけるYb/Sr時計周波数比計測の不確かさ低減
3. 学会等名 日本物理学会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 久井裕介、赤松大輔、小林拓実、大久保章、稲場肇、保坂一元、洪鋒雷、安田正美
2. 発表標題 An 8-branch optical frequency comb for laser frequency stabilization and measurement in optical lattice clocks
3. 学会等名 Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 小林拓実、赤松大輔、久井裕介、田邊健彦、稲場肇、鈴山智也、洪鋒雷、保坂一元、安田正美
2. 発表標題 Development of an ytterbium optical lattice clock at NMIJ
3. 学会等名 European Frequency and Time Forum (EFTF) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 小林拓実、赤松大輔、久井裕介、洪鋒雷、保坂一元、安田正美
2. 発表標題 国際原子時への貢献を目指したSrおよびYb光格子時計の改善
3. 学会等名 日本物理学会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 久井裕介、赤松大輔、小林拓実、大久保章、稲場肇、洪鋒雷、保坂一元
2. 発表標題 Development of an 8-branch optical frequency comb for laser frequency stabilization
3. 学会等名 Conference on Lasers and Electro-Optics Pacific Rim (CLEO PR) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 小林拓実、赤松大輔、西田好毅、田邊健彦、安田正美、洪鋒雷、保坂一元
2. 発表標題 A compact light source at 399 nm using a periodically poled LiNbO3 waveguide for laser cooling ytterbium
3. 学会等名 Union Radio-Scientifique Internationale (URSI) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 小林拓実、稲場肇、赤松大輔、大久保章、保坂一元
2. 発表標題 A narrow linewidth laser system for strontium and ytterbium optical lattice clocks
3. 学会等名 Union Radio-Scientifique Internationale (URSI) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 久井裕介、赤松大輔、小林拓実、大久保章、稲場肇、保坂一元、 洪鋒雷、安田正美
2. 発表標題 周波数安定化のための8ブランチ光周波数コムの開発
3. 学会等名 日本物理学会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 赤松大輔、小林拓実、久井裕介、田邊健彦、保坂一元、洪鋒雷、安田正美
2. 発表標題 Yb/Srデュアル光格子時計による時計遷移周波数比の測定2
3. 学会等名 日本物理学会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 小林拓実、赤松大輔、久井裕介、田邊健彦、稲場肇、鈴山智也、洪鋒雷、保坂一元、安田正美
2. 発表標題 産総研におけるYb光格子時計3号機
3. 学会等名 日本物理学会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 小林拓実、赤松大輔、久井裕介、田邊健彦、稲場肇、鈴山智也、洪鋒雷、保坂一元、安田正美
2. 発表標題 Status report on an 171Yb optical lattice clock at NMIJ
3. 学会等名 Joint Conference of the IEEE International Frequency Control, Symposium and European Frequency and Time Forum (IFC/EFTF) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 小林拓実、赤松大輔、久井裕介、田邊健彦、稲場肇、鈴山智也、洪鋒雷、保坂一元、安田正美
2. 発表標題 Recent research activities on optical lattice clocks at NMIJ, AIST
3. 学会等名 URSI-Japan Radio Science Meeting (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 赤松大輔、小林拓実、久井裕介、田邊健彦、稲場肇、鈴山智也、洪鋒雷、保坂一元、安田正美
2. 発表標題 Recent Progress of Optical Lattice Clocks at NMIJ
3. 学会等名 Asia Pacific Workshop on Time and Frequency (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 小林拓実、赤松大輔、保坂一元、久井裕介、稲場肇、鈴山智也、洪鋒雷、安田正美
2. 発表標題 国際原子時への貢献を目指したYb光格子時計の連続運転の実証
3. 学会等名 日本物理学会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 赤松大輔、小林拓実、保坂一元、久井裕介、稲場肇、洪鋒雷、安田正美
2. 発表標題 連続運転Yb光格子時計を利用した精密な時系の構築
3. 学会等名 日本物理学会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 小林拓実、赤松大輔、保坂一元、久井裕介、和田雅人、稲場肇、田邊健彦、洪鋒雷、安田正美
2. 発表標題 Progress report of the 171Yb optical lattice clock NMIJ-Yb1
3. 学会等名 IEEE EFTF-IFCS (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 小林拓実、赤松大輔、保坂一元、久井裕介、西山明子、川崎瑛生、和田雅人、稲場肇、田邊健彦、洪鋒雷、安田正美
2. 発表標題 Contribution to International Atomic Time by the nearly continuous operation of an Yb optical lattice clock
3. 学会等名 Asia-Pacific Time and Frequency (ATF) (国際学会)
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔出願〕 計1件

産業財産権の名称 位相同期回路	発明者 小林拓実、赤松大輔、安田正美	権利者 国立研究開発法人産業技術総合研究所
産業財産権の種類、番号 特許、特願2019-083313	出願年 2019年	国内・外国の別 国内

〔取得〕 計0件

〔その他〕

<p>【プレスリリース】 産総研プレスリリース 「長期間運転可能なイッテルビウム光格子時計の開発」 (2018/9/21)、 産総研プレスリリース 「光格子時計の半年間にわたる高稼働率運転を世界で初めて達成」 (2020/11/03)</p> <p>【国際原子時の校正期間】 &lt;Circular T 392&gt; 2019年9月28日-10月23日 (25日間、稼働率90.1 %), 2019年10月28日-11月27日 (30日間、稼働率77.8 %), 2019年11月27日-12月27日 (30日間、稼働率80.4 %), 2019年12月27日-2020年1月31日 (35日間、稼働率72.7 %), 2020年1月31日-2月15日 (15日間、稼働率82.9 %), 2020年2月20日-2月25日 (5日間、稼働率90.6 %), 2020年2月25日-3月31日 (35日間、稼働率92.6 %), 2020年3月31日-4月30日 (30日間、稼働率 87.2 %) &lt;Circular T 396&gt; 2020年4月30日-5月30日 (30日間、稼働率84.2 %), 2020年5月30日-6月29日 (30日間、稼働率69.8 %), 2020年11月16日-11月26日 (10日間、稼働率 78.9 %), 2020年11月26日-12月11日 (15日間、稼働率93.3 %) &lt;Circular T 404&gt; 2021年7月29日-8月28日 (30日間、稼働率94.5 %) &lt;Circular T 405&gt; 2021年8月28日-9月7日 (10日間、稼働率94.3 %) &lt;Circular T 406&gt; 2021年10月12日-10月27日 (15日間、稼働率95.3 %) &lt;Circular T 407&gt; 2021年10月27日-11月11日 (15日間、稼働率91.8 %) &lt;Circular T 408&gt; 2021年11月26日-12月21日 (25日間、稼働率90.6 %) &lt;Circular T 410&gt; 2022年2月19日-2月24日 (5日間、稼働率89.2 %) &lt;Circular T 411&gt; 2022年2月24日-3月16日 (20日間、稼働率97.0 %), 2022年3月21日-3月31日 (10日間、稼働率92.4 %)</p>
---

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	小林 拓実  (Kobayashi Takumi)  (40758398)	国立研究開発法人産業技術総合研究所・計量標準総合センター・主任研究員   (82626)	
研究分担者	赤松 大輔  (Akamatsu Daisuke)  (90549883)	横浜国立大学・大学院工学研究院・准教授   (12701)	
研究分担者	稲場 肇  (Inaba Hajime)  (70356492)	国立研究開発法人産業技術総合研究所・計量標準総合センター・研究グループ長   (82626)	
研究分担者	鈴山 智也  (Suzuyama Tomonari)  (30359111)	国立研究開発法人産業技術総合研究所・計量標準総合センター・主任研究員   (82626)	
研究分担者	洪 鋒雷  (Hong Feng-Lei)  (10260217)	横浜国立大学・大学院工学研究院・教授   (12701)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関			
	英国	National Physical Laboratory	Cesky Metrologický Institut	Central Office of Measures