

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 3 年 6 月 24 日現在

機関番号：82626

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2017～2020

課題番号：17K14367

研究課題名(和文)次世代の時刻供給を担う高安定光時計の開発

研究課題名(英文)Development of an optical clock for the next-generation time keeping

研究代表者

小林 拓実(Takumi, Kobayashi)

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

研究者番号：40758398

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,200,000円

研究成果の概要(和文)：光格子時計は高精度化が実現され、次世代の秒の定義の有力候補となっている。秒の再定義を見据えて、いかに高精度な時刻供給を行うかは重要課題である。これには、マイクロ波の水素メーザーに代わる24時間365日稼働する光時計の実現が望ましい。本研究では、まずレーザー周波数ロックの堅牢化に取り組み、ロックが落ちて自動でリロックを行う機構をデジタル回路を用いて実現した。次に、磁気光学トラップの長期稼働の実現のために、加熱窓、エンドキャップファイバー、リモート監視機構などの導入を行い、数力月間安定して原子をトラップすることに成功した。堅牢な光時計の実現に向けて重要な一歩を進んだ。

研究成果の学術的意義や社会的意義

光格子時計の高精度化は実現されているが、長く稼働できないようでは時刻供給に精度が活かせない。そのため、水素メーザーに代わる光時計の開発はこれから益々盛んになると考えられる。本研究では、光時計の実現に向けた重要技術であるレーザー周波数ロックの堅牢化に注力し、論文発表および特許出願を行った。この成果は、本研究で実証した磁気光学トラップの長期稼働のみならず、さまざまな種類の光時計に応用可能である。そのため、将来の秒の再定義に向けた重要な貢献になると考えている。

研究成果の概要(英文)：Optical lattice clocks have achieved high accuracy and are promising candidates for a redefinition of the second. It is essential that optical clocks can be operated continuously for the next-generation time keeping. The objective of this work is to develop an optical clock as an alternative to a hydrogen maser. The main challenge to realize the continuous operation is to stabilize the laser frequency for a long period. So, we developed an automatic relocking scheme for the laser frequency stabilization using a digital circuit. For long-term operation of the magneto-optical trap, we incorporated some techniques including a heated window, optical fibers with end caps, and remote monitoring systems. We achieved the operation of the trap for several months. This work constitutes an important step towards the realization of a robust optical clock.

研究分野：時間標準

キーワード：光時計 原子 量子エレクトロニクス

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

光格子時計は、東京大学の香取教授により提案され、次世代の1次周波数標準器の候補として世界中で研究開発が進められている。トップクラスの光格子時計では 10^{-18} 台の不確かさが実証され、秒の再定義の有力な候補として、注目を集めるようになった。標準研である当グループでは、2009年にYb光格子時計、2013年にSr光格子時計の開発に成功しており、光時計の技術のノウハウを所有していた。

次の重要課題は、光格子時計を用いて高信頼、高安定な時刻を供給することである。時刻供給のためには、光格子時計を24時間365日連続稼働させることが望ましい。光格子時計の長期稼働を目指した研究は、ヨーロッパの標準研を中心に精力的に行われていたが、長くても数週間程度の運転しか報告されていなかった。現在の秒の定義を実現しているCs原子泉型時計では、80%を超える稼働率を年スケールで達成しているが、100%の運転はできていない。1次周波数標準器が断続的な運転にも関わらず時刻を供給できるのは、連続稼働可能なマイクロ波時計である水素メーザーが時刻供給の役割を担っているためである。

秒の再定義を見据えて、水素メーザーに代わる連続稼働可能な光時計を開発することが望ましい。この方向性の研究は歴史が長く、主に3つの先行研究がある。1つ目の例はヨウ素安定化レーザーである。2つ目の例として、Q値の高い光共振器に安定化した狭線幅レーザーが挙げられる。3つ目は、アメリカ標準研NISTで研究が行われているCa原子の熱ビームを用いた光時計である。研究開始当初では、Ca原子時計は 10^{-15} 台の周波数安定度が実証されていた。

2. 研究の目的

大きな長期目標として、水素メーザーに変わる長期稼働可能な光時計を開発する。周波数安定度の目標を 10^{-16} 台とする。

SrまたはYb原子を用いた熱ビーム方式の光時計を開発する。ゼロから開発するのではなく、当グループが保有している光格子時計の真空装置を用いて、実現可能性の検証実験を行う。研究が計画通りに進まない場合の対策として、SrまたはYb原子を用いた磁気光学トラップによる光時計の開発も選択肢に入れる。

レーザー周波数ロックの堅牢化を行う。光時計は原子の共鳴に近い周波数にレーザー周波数をロックしておかないと機能しない。水素メーザーに匹敵する長期連続稼働の実現には、レーザー周波数ロックが堅牢であることが不可欠である。

3. 研究の方法

NISTが熱ビーム方式のCa原子時計で 10^{-16} 台の安定度を実証した[1]。また、実際にNISTを訪ねて、装置を見学した。この研究では、装置全体を箱の中に入れ、温度変動、振動、音響ノイズなどに注意していた。熱ビーム方式の性質上、ビームやレーザーのアライメントがゆらぐと、ドップラーシフトが生じ、周波数安定度が劣化する。当グループの装置の温度のモニターを行ったところ、長期で数程度ゆらぐことが判明した。また、アライメントが温度変化に敏感であることを確認した。装置全体を恒温槽に入れて温度制御をかける必要が生じたが、大きく実験セットアップを変更する必要があり容易ではないと判断した。そのため、磁気光学トラップを用いる方法を採用した。NISTでは長期稼働の実証は行っておらず、本研究では、磁気光学トラップの長期稼働の実現に注力することにした。

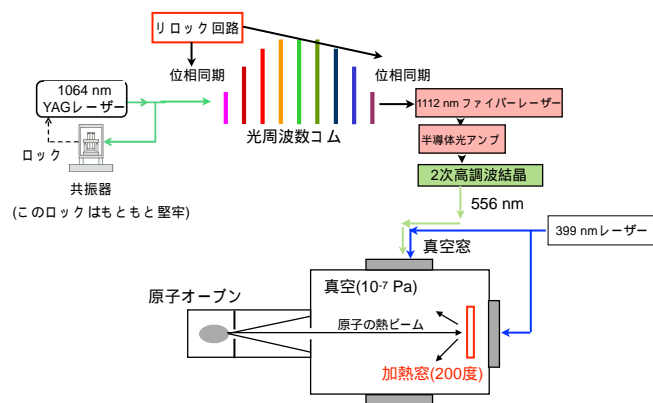


図1: 実験装置概念図

図1に実験装置概念図を示す。まず、Srの狭い689 nm遷移を用いることを検討したが、689 nmの外部共振器半導体レーザーのマルチモード発振の問題に直面し、容易に改善しなかった。そのため、マルチモード発振の問題が生じないファイバーレーザーを使ったYbの狭い556 nm遷移を用いることにした。556 nm光は狭線幅化を行う必要があるが、光周波数コムを用いた線幅転送技術を採用した。マスターレーザーには、高安定光共振器にロックした1064 nm YAGレーザーを用いており、線幅は1 Hz級である。このレーザーは年スケールで周波数ロックが落ちない堅牢なものである。YAGレーザーを基準に光周波数コムを安定化し、安定化された光周波数コムにファイバーレーザーをロックすることで、YAGレーザーの線幅がファイバーレーザーに転送される。

図1に実験装置概念図を示す。まず、Srの狭い689 nm遷移を用いることを検討したが、689 nmの外部共振器半導体レーザーのマルチモード発振の問題に直面し、容易に改善しなかった。そのため、マルチモード発振の問題が生じないファイバーレーザーを使ったYbの狭い556 nm遷移を用いることにした。556 nm光は狭線幅化を行う必要があるが、光周波数コムを用いた線幅転送技術を採用した。マスターレーザーには、高安定光共振器にロックした1064 nm YAGレーザーを用いており、線幅は1 Hz級である。このレーザーは年スケールで周波数ロックが落ちない堅牢なものである。YAGレーザーを基準に光周波数コムを安定化し、安定化された光周波数コムにファイバーレーザーをロックすることで、YAGレーザーの線幅がファイバーレーザーに転送される。

光周波数コムとレーザーのロックは、ビート信号を位相同期法で安定化することで行われる。位相同期は RF 発振器で用いられている成熟した技術であるが、光を用いる技術的な難点は、レーザー周波数が環境擾乱(振動・温度変動)の影響を受けやすく、RF 発振器に比べて安定しない点である。位相同期は、光共振器のロックと比較してキャプチャレンジが数 MHz 程度と比較的狭く、レーザー周波数が環境擾乱の影響を受けて大きく動いたときに、キャプチャレンジを容易に超えてしまう。位相同期が外れた際に、これまで人の手によるリロックを行ってきたが、本研究ではデジタル回路を用いた自動リロック機構を開発し、レーザー周波数ロックの堅牢化を図った。

上述のように、位相同期はキャプチャレンジが狭い。そのため、ロックの状態の判定、およびリロック時の制御の方向に関する情報を得にくい。そこで、遅延線を用いた判定信号を生成することで、この問題を回避した。判定信号は、ビート信号を2つに分岐後、一方に遅延線(2 m)を挿入し、ミキサーで混ぜるだけの簡単な方法で生成できる。ミキサーからは、2つの信号の位相差が出力されるが、位相差はレーザー周波数に依存して変動するため、レーザー周波数がロックポイントからどれだけずれているか情報が得られる。これにより、リロックが可能になる。

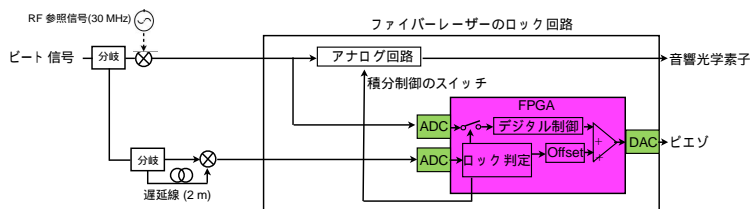


図2: リロック回路概念図

この図は[2]の一部を抜粋・変更し、日本語の説明を加えたもの

図2に開発したリロック回路の概念図を示す。これは、ファイバーレーザーの制御例である。デジタル回路には、FPGA(Field Programmable Gate Array)を用いた。レーザーの制御には、早い制御と遅い制御があるのが一般的だが、デジタル回路が遅い制御、アナログ回路(レーザー制御に一般的に用いられる回路)が早い制御を行うようにした。デジタル回路は、ロックが外れた際にPI制御をストップした後、ダイナミックレンジの広いアクチュエータ(図2の場合はピエゾ)で、ロックポイントを探す。遅延線の判定信号が、ロックポイントに到達したことを知らせると瞬時にロックを再開する。リロックに要する時間はおよそ1秒程度である。

図2に開発したリロック回路の概念図を示す。これは、ファイバーレーザーの制御例である。デジタル回路には、FPGA(Field Programmable Gate Array)を用いた。レーザーの制御には、早い制御と遅い制御があるのが一般的だが、デジタル回路が遅い制御、アナログ回路(レーザー制御に一般的に用いられる回路)が早い制御を行うようにした。デジタル回路は、ロックが外れた際にPI制御をストップした後、ダイナミックレンジの広いアクチュエータ(図2の場合はピエゾ)で、ロックポイントを探す。遅延線の判定信号が、ロックポイントに到達したことを知らせると瞬時にロックを再開する。リロックに要する時間はおよそ1秒程度である。

4. 研究成果

図3に示すように、光周波数コムの位相同期部にリロック回路を導入して、連続運転を行った結果、1週間以上ロックが持続した(リロックしたイベントは2回)。

磁気光学トラップの長期稼働を行い、これまであまり認識されていなかった様々な知見を得た。(a)原子の熱ビームによる窓のコーティングが問題になった。連続で稼働すると1週間に1回くらいの頻度で窓を交換する必要があった。そこで、真空中に約200度に熱した加熱窓を導入した(図1)。これにより、窓の交換の必要がなくなった。(b)399 nm レーザー(図1)による光ファイバー透過率減少の問題に直面した。10日ほど稼働すると光ファイバーを交換する必要があった。これには、エンドキャップファイバーの導入の他、ファイバー長を短く(2 m程度)し、自前のファイバー融着をやめる等の対策を講じた。その結果2ヶ月程度使用しても交換の必要がなくなった。(c)ファイバーレーザーの光を増幅する半導体光アンプ(図1)の出力減少(寿命2ヶ月程度)の問題が生じた。半導体光アンプの温度制御が不完全であったため、改善をした。その後寿命が伸びるのを確認した。

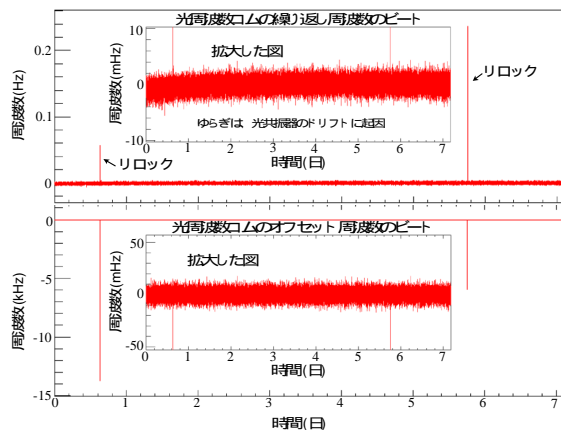


図3: リロック回路によるレーザー長期稼働の実証例

この図は[2]の一部を抜粋・変更し、日本語の説明を加えたもの

24時間を超える長期稼働を行う際に、リモートで装置の状態をモニターすることの重要性が判明した。まず、複数台のネットワークカメラを装置の重要な場所に配備した。次に、原子のトラップに失敗した際に、自動でオペレータにアラートメールを出すようにした。その結果、オペレータの負担が軽減し、長期稼働が可能になった。

自動リロック、磁気光学トラップ装置の改良、リモート監視により、磁気光学トラップシステムの数ヶ月間の安定稼働に成功した。あとは、Yb 原子の狭い遷移を分光し、原子の共鳴線にロックできれば光時計として機能する。本研究で、最終目標の光時計の実現に向けて重要な一歩を進むことができた。

<引用文献> [1] J. Olson *et al.*, Phys. Rev. Lett. **123**, 073202 (2019). [2] T. Kobayashi *et al.*, Rev. Sci. Instrum. **90**, 103002 (2019).

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 4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, 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 -
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 Kobayashi Takumi, Akamatsu Daisuke, Hosaka Kazumoto, Hisai Yusuke, Wada Masato, Inaba Hajime, Suzuyama Tomonari, Hong Feng-Lei, Yasuda Masami	4. 巻 57
2. 論文標題 Demonstration of the nearly continuous operation of an171Yb 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 065021 ~ 065021
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 Hisai Yusuke, Akamatsu Daisuke, Kobayashi Takumi, Hosaka Kazumoto, Inaba Hajime, Hong Feng-Lei, Yasuda Masami	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 015008 ~ 015008
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 -

〔学会発表〕 計13件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 6件）

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 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 2020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 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
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 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 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 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 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 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 2020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〕

-

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

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