

令和元年6月14日現在

機関番号：82626

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2015～2018

課題番号：15K21669

研究課題名(和文) 長期連続運転可能で極めて高い周波数安定度を有する原子泉の開発

研究課題名(英文) Development of an atomic fountain operational in a long term with extremely high frequency stability

研究代表者

高見澤 昭文 (Takamizawa, Akifumi)

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：50462833

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)：原子泉を長期間連続的に運転するために、数ヶ月以上周波数ロックをかけ続けられる外部共振器半導体レーザーを開発し、原子泉のシステムに実装した。このレーザーでは、アライメントに鈍感なキヤッツアイ配置の共振器を、機械的な不安定性を生む要因となる位置微調器具を使わずに構築した。また、筐体で密閉し、大気圧変動による周波数ドリフトを抑制した。

原子泉においては、光モラセスや光ポンピングの光学系を改善することにより冷却原子の数を増大させ、周波数安定度を $7 \times 10^{-14}/\tau(1/2)$ (τ : 平均時間(s))まで向上させた。また、不確かさを 6.1×10^{-16} と評価した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

セシウム原子泉は16桁の精度で時間周波数の標準を実現するが、基本的には秒の長さを決めるものであり、時刻を刻む時計として用いるには長期間連続的に動作させることが必要となる。本研究では、超高精度のセシウム原子泉のさらなる高精度化と時計としての安定した動作を実現するために、時計の精度に直結する周波数安定度の向上と長期連続運転を両立させ、原子泉の総合的な性能を向上させた。また、長期連続運転のために開発した外部共振器半導体レーザーは、原子泉だけでなく原子重力計や原子磁気センサなどのレーザー冷却や原子分光を利用した実験装置を将来実用化する際に、極めて有用なレーザー光源となりうる。

研究成果の概要(英文)：For continuous long-term operation of an atomic fountain, I developed external cavity diode lasers whose frequency could be locked during more than several months, and implemented in the optical system of an atomic fountain. In this laser, the cavity insensitive to misalignment with a cat's eye configuration was made without any position adjusters for high mechanical robustness. Moreover, the housing for the laser was sealed from outside to suppress frequency drift by variation in atmosphere pressure.

In an atomic fountain, the number of cold atoms was increased by modifying the optical configuration for optical molasses and optical pumping. Consequently, the frequency stability was improved to $7 \times 10^{-14}/\tau(1/2)$ (τ : averaging time (s)). Moreover, the systematic uncertainty was evaluated to be 6.1×10^{-16} .

研究分野：時間周波数標準

キーワード：原子泉一次周波数標準器 外部共振器半導体レーザー

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

余分な熱エネルギーが排除された冷却原子を打ち上げ、マイクロ波と相互作用させる原子泉により、セシウム原子の基底状態間の共鳴周波数(9.2 GHz)で定義される秒の単位が最も正確に決められている。その不確かさは本研究開始当初で世界最高のもので 1×10^{-16} に到達しており、他の物理量の標準と比べて圧倒的に小さい。また、近年開発が進んでいる光時計(光領域における周波数標準器)では不確かさはより小さくなるが一日程度しか動作しなかった。それに対して、原子泉は当時から不確かさの小ささと概ね1ヶ月弱の長期運転性を両立していた。

国家計量機関の我々も原子泉 NMIJ-F2 を開発してきた。本研究開始当初(および現在)における世界の他の原子泉と比較した NMIJ-F2 の長所は、通常の vapor-loading による光モラセスを用いながらも周波数安定度(測定値の統計的なばらつき)が $8.3 \times 10^{-14} \tau^{-1/2}$ (τ : 平均時間(s))と極めて高いことである。液体ヘリウムを補充する必要のない、1 s で 10^{-15} 台の周波数安定度を持つ冷凍機方式冷却サファイア発振器を局所発振器として世界で初めて適用するとともに、光ポンピングなどを利用して原子数を増やすことによりこの周波数安定度を達成した。本研究開始当初はフランスの原子泉 SYRTE-FO2 が単発的に出した $1.6 \times 10^{-14} \tau^{-1/2}$ が他を圧倒していたが、ローディング方法を変えてさらに原子数を高めれば、NMIJ-F2 が周波数安定度で世界のトップに立つと期待される。

また、連続運転の観点からは、原子の共鳴周波数にロックされたレーザーのモードホップをいかに減らすかが重要である。この問題を解決するため、位置微調器具を持たないために機械的にロバストな外部共振器半導体レーザーを独自に開発してきた。

2. 研究の目的

本研究では、一年程度の連続運転と $10^{-15} \tau^{-1/2}$ のオーダーの周波数安定度を両立した原子泉を作製することを目的とした。そのためにはレーザー光源と原子数の両方が非常に重要となる。

図1を用いて、原子泉の実験系を説明する。まず、セシウムの蒸気を導入した超高真空装置内に3次的に6方向から負離調の冷却光を照射して光モラセスを形成し、温度 $1 \mu\text{K}$ 程度の冷却原子群を生成する。その後、上下方向の冷却光の周波数をわずかにずらすことにより原子に上方向の力を与えて、上基底状態 $F = 4$ を占有する原子を打ち上げる。その直後に $F = 4 - F' = 4$ に同調する π 偏光のレーザーパルスを照射することにより、 $F = 4, m_F = 0$ に光ポンピングする。そして、弱磁場下での状態選択共振器におけるマイクロ波 π パルス照射と、上方からの共鳴光照射による上基底状態の原子の除去により、下基底状態の磁気副準位 $F = 3, m_F = 0$ を占有する原子を用意する。その後、原子はラムゼー共振器において上昇時と下降時に $\pi/2$ パルスを受け、上基底状態 $F = 4, m_F = 0$ に遷移する。そして、検出部において、上基底状態に共鳴するレーザーの照射による蛍光観測により、上基底状態の原子の数 n_U を測定する。その後、再び蛍光観測に基づき、下基底状態の原子の数 n_L を見積もる。遷移確率 $n_U/(n_U+n_L)$ は原子の共鳴周波数において最大となり、共鳴線の半値全幅 Δf は2回のパルス間のインターバルの逆数によって与えられる。遷移確率が最大となるようにマイクロ波の周波数をロックする。

ここで、周波数安定度は、 $\sigma_y(\tau) \propto \Delta f / [f_0(S/N)\tau^{1/2}]$ とかける。ただし、 f_0 は共鳴周波数、 S/N は信号対雑音比である。信号対雑音比を上げることにより周波数安定度の向上を図る。信号対雑音比の原理的な制限は量子雑音限界により $n^{1/2} (n = n_U + n_L)$ で与えられる。すなわち原子数の増大が必要になる。そこで、本研究では、4方向からの負離調の円偏光と、中心軸上でゼロになる四重極磁場を用いる2次元磁気光学トラップにより冷却原子ビームを生成し、光モラセスに高効率に原子を送り込む。これにより、vaper-loading の場合に比べて2桁の原子数の向上が期待される。典型例として、光モラセス中の冷却原子の数を 1×10^9 個とし、検出領域への到達効率や状態選択を考慮すると $n = 4 \times 10^7$ になり、周波数安定度の原理的な限界は $6 \times 10^{-15} \tau^{-1/2}$ に達すると期待される。この値は前述の原子泉のトップデータを超え、単一イオントラップ光時計の周波数安定度に匹敵する。

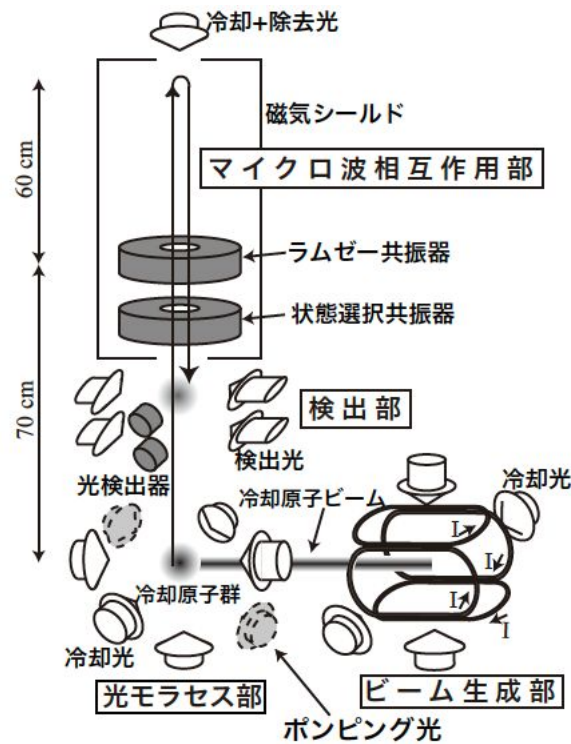


図1 研究開始当初に予定していた原子泉の実験配置

レーザ光源に関しては、本研究開始前から進めていた外部共振器半導体レーザの研究をさらに進展させ、モードホップの原因となる機械的な安定性や周波数ドリフトなどを丹念に調べながら一つ一つ解決し、モードホップなく運転できる期間を伸ばしていく。

3. 研究の方法

外部共振器半導体レーザの開発、および2次元磁気光学トラップによる冷却原子ビームの形成の2つの研究を並行して進める。前者に関しては、これまでに開発してきた、キャッツアイ配置の光共振器を位置微調器具を使わずに構成する外部共振器半導体レーザを改善する。筐体の密閉性を高めて大気圧変動の影響を抑制することにより、周波数ドリフトを長期間ロックングレンジ内に収める。後者に関しては、まずテスト用の真空チャンバを用意し、2次元磁気光学トラップによる冷却原子ビームとそれを捕える光モラセスに関する実験パラメータの最適化と評価を行う。そして、外部共振器半導体レーザと冷却原子ビームを原子泉NMIJ-F2に実装し、原子の打ち上げや $F = 4, m_F = 0$ への光ポンピングの実験条件を最適化する。その後、冷却ファイバ発振器との周波数比較によって原子泉の周波数安定度を評価する。この結果を元にさらに改良を加え、長期連続運転性と周波数安定度が極めて優れた原子泉を実現する。

4. 研究成果

(1) 外部共振器半導体レーザの開発

図2に外部共振器半導体レーザを示す。半導体レーザ素子から出射したレーザ光を2枚のレンズでそれぞれコリメートおよび集光し、焦点の位置に部分反射ミラーを配置して、アライメントのずれに鈍感なキャッツアイ配置の外部共振器を構成する。バンドパスフィルタを用いて波長選択し、セシウム原子のD2線に共鳴する852 nmのレーザ光を出力する。外部共振器半導体レーザの基板は、機械的な安定性を高めるため、一塊の銅のブロックを切り出して作製される。また、キャッツアイ配置がミスアライメントに鈍感であることを活かし、微調ネジやピエゾ素子などの位置微調器具を使わずに外部共振器を構成し、さらに機械的な安定性を向上させた。外部共振器半導体レーザでは通常部分反射ミラーをピエゾ素子で微動させて共振器長を変えることにより周波数を変化させて原子の共鳴線にロックするが、本レーザでは半導体レーザ素子の注入電流を変化させてレーザ周波数を調整する。周波数の連続掃引範囲は820 MHzであった。ビート信号を取って線幅(半値全幅)を評価した結果、裾のローレンツ関数にフィットする部分で30 kHz、中央のガウス関数にフィットする部分で400 kHzであった。

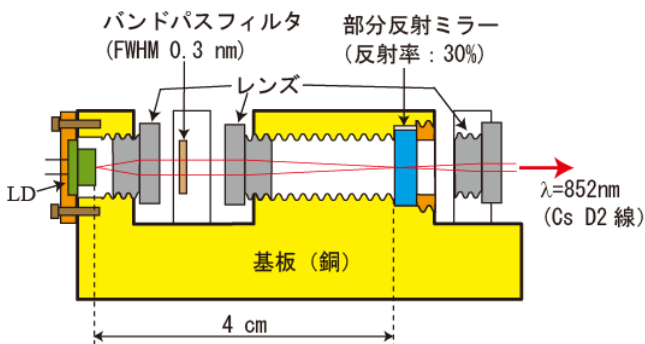


図2 外部共振器半導体レーザ

外部共振器の機械的な安定性を高めることにより、振動等による周波数変動がかなり除去された。しかし、数日の時間スケールで変動する周波数変動が残っていた。調べた結果、周波数変動の主要因は大気圧変動であり、 -66.6 MHz/hPa の比で変動することが分かった。気圧が変わると空気の屈折率が変わって実効的な共振器長を変化させる。

そこで、大気圧変動による影響を除去するため、外部共振器半導体レーザを筐体で密閉した。ここで、筐体として真空デシケータを用いた(密閉のためであり、真空にはしていない)。セシウム原子のD2線に1ヶ月間ロックし続けておき、半導体レーザ素子への注入電流を測定した。そして、予め測定しておいた注入電流の変化とレーザ周波数の変化量の関係を用いて、周波数ロック時の注入電流の変化を、レーザをフリーランで動作させた場合の周波数変動に変換し、周波数ドリフトを評価した。

図3の黒い線はフリーランでのレーザ周波数変動を示す。1ヶ月間での周波数変動は275 MHz以内に抑えられていることが分かる。ここで、室温とレーザ周波数を比較すると、周波数に明らかな室温依存性があり、特に18日付近のピークは室温が約1℃上昇したことに起因している。図3の赤い線は、室温による変動を補償したレーザ周波数変動を示す。つまり、室温を安定させるか筐体に温調を施すかすれば、図3の赤い線で示す周波数変動まで抑えられることを示している。

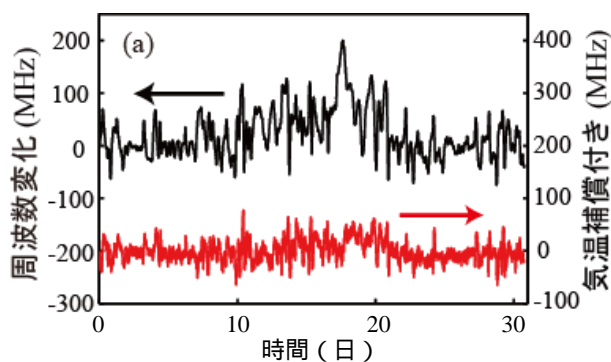


図3 周波数変動

図4は、レーザ周波数変動のアラン偏差を平均時間の関数として示す。ただし、黒い線および赤い線はそれぞれ室温の補償がない場合およびある場合を示している。どちらの場合も、平均時間に比例するリニアドリフトは見えていないことが分かる。最も平均時間の大きい点から、リニアドリフトは室温補償がない場合には <100 Hz/s、ある場合には <40 Hz/sである。この周波数ドリフトの最大値と連続掃引範囲から、110日以上周波数ロックが可能であると期待される。

このレーザを原子泉 NMIJ-F2 の光学系に実装した。レーザ冷却や原子検出に問題なく使えており、周波数ロックが外れることは1年に2回程度しかない。

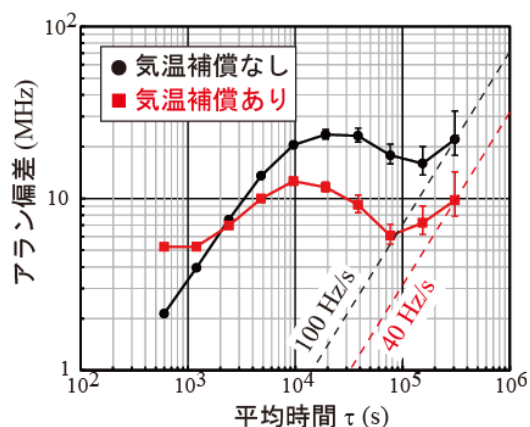


図4 周波数変動のアラン偏差

(2) 原子泉の周波数安定度向上と不確かさ評価

まず、周波数安定度に関しては、これまでの vapor-loading による光モラセスのまま、光学系を改善することにより冷却原子の数を増大させ、周波数安定度を $8.3 \times 10^{-14} \tau^{-1/2}$ から $7.0 \times 10^{-14} \tau^{-1/2}$ に向上させた。光モラセスの冷却光ビームの調整により冷却原子の温度が下がったことや、光ポンピングのためのレーザを偏波保存ファイバへ入射する方法を改めることによりポンピング効率が上がったことが、冷却原子の数が増えた主な要因である。

また、磁場による2次ゼーマンシフトや黒体輻射シフトなどの周波数シフト要因を調べ、不確かさを 6.1×10^{-16} と評価した。様々なシフト要因について評価したが、ここではマイクロ波パワー依存シフトについて示す。これは、共振器からのマイクロ波の漏れなどによって生じる、マイクロ波パワーに依存した周波数シフトである。マイクロ波のパルス面積を $m\pi/2$ としたとき、シフト量は $\Delta f_p = A \sin(m\pi/2)$ と表される。実験では、マイクロ波のパルス面積 $\pi/2, 3\pi/2, 5\pi/2, 7\pi/2$ において周波数を測定し、プロットして上述の式をフィッティングすることにより $A(\pi/2$ パルスでの周波数シフト量) を算出した。図5に周波数をマイクロ波パワーの関数として示す。この測定結果から、 $A = (+1.4 \pm 1.7) \times 10^{-16}$ と評価される。ここで、 10^{-16} 台の周波数シフトを見積もるためには安定した基準に対して周波数を測定する必要があり、この実験では国際原子時を基準とした。国際原子時は5日平均の値しか発表されないため、4点のデータを取るためには20日間ほぼ連続で原子泉を運転する必要がある。したがって、この実験は長期連続運転のための光源開発の恩恵を強く受けている。

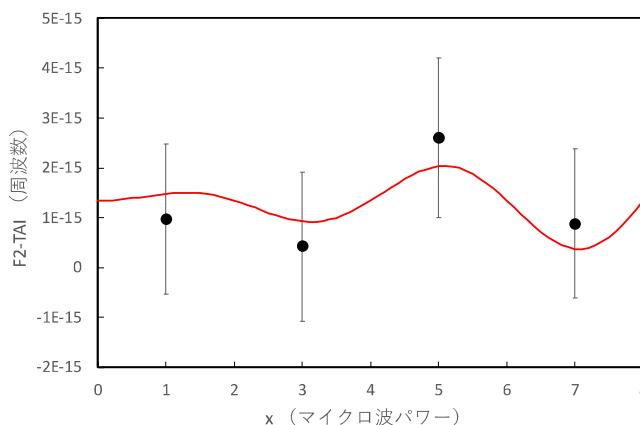


図5 マイクロ波パワーに対する原子泉の周波数

(3) 冷却原子ビームの生成

互いに垂直な4方向から精密に周波数を制御された円偏光のレーザを照射するとともに、長方形のコイル4つを組み合わせて四重極磁場を生成し、2次元磁気光学トラップを生成した。ここで、セシウム気体原子源として、レーザの照射により加熱してセシウムを放出させるタイプのセシウムディスペンサーを利用した。ディスペンサーは約1 mmのサイズで、2次元磁気光学トラップ用のガラスセル内に予め入れておけばセシウムアンプル等のセシウム源を取り付ける必要がないため、真空装置がコンパクトになり、現状スペースに余裕がない原子泉 NMIJ-F2 の装置に適すると考えた。実験の結果、2次元磁気光学トラップによる細長い冷却原子の集団はCCDカメラではっきりと確認され、冷却原子ビームが生成されているのは疑いないが、ディスペンサーが発生するセシウム原子の量が1週間程度で減少してしまい、冷却原子ビームのフラックスや速度分布を評価する段階には至っていない。セシウム原子を安定的に供給すれば、高フラックスの冷却原子ビームが生成できると期待される。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文](計8件)

“External cavity diode laser with very-low frequency drift”, Akifumi Takamizawa,

Shinya Yanagimachi, and Takeshi Ikegami, Applied Physics Express **9**, 032704 (2016). 査読有

DOI: 10.7567/APEX.9.032704

“Preliminary evaluation of the cesium fountain primary frequency standard NMIJ-F2”, Akifumi Takamizawa, Shinya Yanagimachi, Takehiko Tanabe, Ken Hagimoto, Iku Hirano, Ken-ichi Watabe, Takeshi Ikegami, John G. Hartnett, IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, **64** (9), 2504-2512 (2015). 査読有

DOI: 10.1109/TIM.2015.2415015

“External cavity diode laser with frequency drift following natural variation in air pressure”, Akifumi Takamizawa, Shinya Yanagimachi, Takeshi Ikegami, and Ryuzo Kawabata, Applied Optics, **54**(18), 5777-578 (2015). 査読有

DOI: 10.1364/AO.54.005777

〔学会発表〕(計 10 件)

“Recent Progress of Development of Cesium Fountain Primary Frequency Standard NMIJ-F2”, Akifumi Takamizawa, Shinya Yanagimachi, Ken Hagimoto, Iku Hirano, Takeshi Ikegami, The European Frequency and Time Forum, Turin, April 2018.

“Toward the full evaluation of the cesium fountain NMIJ-F2”, A. Takamizawa, S. Yanagimachi, K. Hagimoto, I. Hirano, K. Watabe, T. Ikegami, J. G. Hartnett, 8th Symposium on Frequency Standards and Metrology, Potsdam, October 2015.

〔産業財産権〕

出願状況 (計 1 件)

名称：ガスセル、原子時計および原子センサ

発明者：柳町真也、池上健、高木秀樹、高見澤昭文、倉島優一

権利者：国立研究開発法人産業技術総合研究所

種類：特許

番号：特願 2016-198702

出願年：2017 年 9 月 21 日

国内外の別： 国内

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。