

科学研究費助成事業（学術研究助成基金助成金）研究成果報告書

平成 25 年 5 月 30 日現在

機関番号：82626

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2011～2012

課題番号：23740313

研究課題名（和文） 光励起型原子泉方式実用セシウム原子時計の開発

研究課題名（英文） Development of atomic Cs fountain using clock transition excited by laser beams

研究代表者

柳町 真也 (YANAGIMACHI SHINYA)

独立行政法人産業技術総合研究所・計測標準研究部門・研究員

研究者番号：70358216

研究成果の概要（和文）：本研究は、原子泉方式を適用し Cs 原子のラマン遷移を用いることで現用の高安定実用原子時計（水素メーザー等）の周波数安定度を超える原子時計の実現を主目的としている。Cs 原子の D2 線を利用したラマン遷移に電気光学変調器により作製した 2 週波レーザーを 0.4 秒間照射することで約 1.8Hz の半値全幅をもつ蛍光信号を観測した。また、原子時計多重化に必須となる位相差測定器の開発にも成功した。これは、デジタルシグナルプロセッシングと離散的フーリエ変換を用いて既存技術より用意に多数の原子時計間の位相差を精度良く観測できるもので、1 秒の観測時間で 10^{-14} 台の分解能を有する。

研究成果の概要（英文）：In this research, the purpose is that the achievement of the atomic clock with higher stability than the Hydrogen maser for practical use, by applying the atomic fountain method and using the raman transition of the Cs atom. The fluorescence signal with FWHM of 1.8 Hz was obtained by irradiating laser beams having two frequency generated by EOM. Furthermore, it was successful in developing the phase meter to measure the phase difference between multi-atomic clocks. This technique is necessary to develop the time scale with highly stability. The obtained result shows the 10^{-14} order resolution as good as the existing phase meter.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
交付決定額	3,600,000	1,080,000	4,680,000

研究分野：数物系

科研費の分科・細目：物理学、原子・分子・量子エレクトロニクス

キーワード：原子・分子

1. 研究開始当初の背景

1967 年の秒の定義の改訂以来、Cs 原子を用いた時間標準は 10 年に一桁の割合で性能が向上し、不確かさは 3×10^{-16} に到達している。また、次世代候補として光の電磁波を用いた時間標準（光周波数標準）の開発が世界的に進んでおり、 $\sim 10^{-18}$ 台の不確かさが期待されている。これまで時間標準が進化を続け、全地球測位システム(GPS)の精度向上等に寄与し、

我々の生活を一変させたことは疑いようが無い。今後も GPS の更なる精度向上や、基礎科学分野（一般相対論の検証、基礎物理定数の時間変化検出等）から時間標準の進化が求められている。現在の時間標準は、確度を追求するため断続的な運用となる一次周波数標準器と、その値を保ち続けるために、周波数安定度を重視して連続運転する実用原子時計により実現されており、確度と周波数安

定度の最良値はそれぞれ $\sim 10^{-16}$ と同程度を保っている。近い将来、光周波数標準の確度を 10^{-18} と想定した場合、現在の实用原子時計の周波数安定度は2桁不足している。時間標準を維持する世界的な体制から判断して、30日以内の平均時間で 10^{-18} 位の周波数安定度($< 2 \times 10^{-14} \tau^{-1/2}$)が得られる实用原子時計が必要である。もしこれが実現できなければ、一次周波数標準器の国際整合性の確認や、基礎科学研究に利用される時間標準の精度が实用原子時計の周波数安定度で制限されるという事態になる。

2. 研究の目的

本研究では、現用の高安定实用原子時計(水素メーザー等)の周波数安定度を超える原子時計の実現を最終目的とする。これまで、实用原子時計の性能向上においてはジェット推進研究所(JPL)の ^{199}Hg +イオントラップを利用したものや、米国立標準研究所(NIST)の冷却Ca原子を利用したものが提案・開発されている。それぞれ、深遠宇宙の探査や、光周波数の測定に利用されて、成果を挙げている。しかし、多数台のレーザーが必要であったり、原子を操作する技術の難易度が高いため長期に渡った準定期的な運用までには至っておらず、TAIの維持には参加していない。現状では、むしろ、従来からある水素メーザーの性能改善や、管理する時計の数を増やし、時系アルゴリズムを改良して、徐々に安定度を向上させている。しかし、平均時間が数日以上になると、フリッカーノイズ、もしくはランダムウォークノイズの特性を示すため、周波数安定度の最良値は良くならず根本的な解決が待ち望まれている。

3. 研究の方法

数年前より世界各国の原子泉方式Cs一次周波数標準器の稼働率が向上している。周辺技術の成熟により運用の難易度が低下したため、当所においても申請者が中心になって開発を行った一次周波数標準器一号機(NMIJ-F1)が稼働しており、2005年から2009年にかけてトータル425日(約10000時間)の運用実績がある。この貢献度はフランスについて世界第2位で、近年はほぼ定常運用に移行しつつある。原子泉方式Cs一次周波数標準器のノイズ特性は白色周波数雑音であるため、平均時間が長いほど周波数安定度は向上し、その最良値は $\sim 10^{-17}$ に到達することが実験的に確認されている。理想的には世界各国で複数台の一次周波数標準器が实用時計として稼働すればTAIの周波数安定度も改善し、上記問題は解決される方向へ進む。しかし、現実には補正量を見積もるための不確か

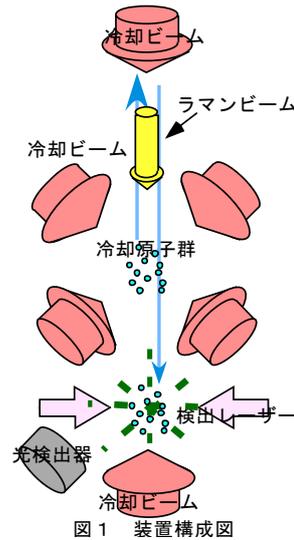


図1 装置構成図

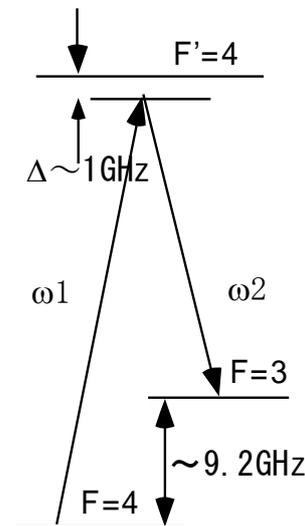


図2 Cs原子準位図

さ評価で運用が中断したり、十分なレーザーパワーが得られず利用できる原子数が制限され、周波数安定度が犠牲になることもある。現在、周波数安定度は最高で $2 \times 10^{-14} \tau^{-1/2}$ (ほぼ量子雑音限界)であるが、各国の通常の実績では $(1 \sim 3) \times 10^{-13} \tau^{-1/2}$ と一桁性能が劣化する。それゆえ、原子泉方式Cs一次周波数標準器を最高性能で实用時計として運用することは不可能と考えられる。本研究では、ラマン遷移を用いることで原子泉方式Cs一次周波数標準器の構成を簡素化しつつ、利用する原子数を増やし、周波数安定度 $2 \times 10^{-14} \tau^{-1/2}$ 以下で連続運転可能な实用原子時計を実現する。

本方式では装置下方でモラセスにより原子冷却をする(図1)。モラセス状の原子を捕らえ、ムービングモラセスにより上方へ打ち上げる。原子準位(F=3)の初期化後、時計遷移用のラマンパルスと約1秒間、1回(もしくは2回)相互作用し、ラビ共鳴(ラムゼー共

鳴)を起こす。その後、初期化とは異なる準位に共鳴する検出レーザーを原子に照射し、時計遷移に対するローカルオシレータのずれを算出する。このラマンパルスは同方向に進行する 2 周波のレーザーから構成され(図 2)、基底状態の 2 つの超微細遷移と励起状態 $F' = 4$ 間の共鳴周波数から約 1GHz(Δ)で負離調した周波数(ω_1 、 ω_2)を持つ。これら 2 つのレーザーの周波数差 $\omega_1 - \omega_2$ が約 9.2GHz となる。

また、単体の原子時計の開発のほか、原子時計を実時間で多重化する手法も検討する。これは、デジタルシグナルプロセッシング(DSP)と離散的フーリエ変換(DFT)を用いて、容易に多数の原子時計間の位相差を高精度に測定可能になる。1 台の実用原子時計で得られる性能が限界に差し掛かった場合には、多重化の技術が重要となる。

4. 研究成果

本研究では第一に NMIJ-F1 を用いて、ラマン遷移の観測を目指した。図 3 にその測定結果を示す。原子は約 3.5m/s で打ち上げられた。原子集団の大きさは約 3cm である。レーザーは約 0.4 秒間照射され、電気光学変調器(EOM)を用いて基底状態 $F=4$ と $F=3$ の遷移をコヒーレントに励起するための 2 周波を作り出している。EOM に印加するマイクロ波の周波数(横軸)を掃引するにしたがって蛍光強度が変化していることがわかる。共鳴線の幅は約 100Hz が得られた。この幅はほぼ、レーザーが相互作用する際にもつ原子の速度(3m/s)で決定されており、原子時計に応用するためには除去する必要がある。そこで原子とレーザーが相互作用している 0.4 秒間にドップラーシフトを補正するようマイクロ波の周波数を一定速度で変化させた。その結果得られた信号を図 4 に示す。図 3 で観測されたようなドップラー幅が補正された結果、時計周波数付近(9192631770Hz)で線幅約 1.8Hz の共鳴信号の観測に成功した。

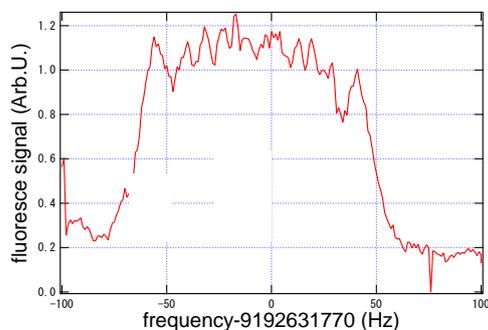


図 3 ドップラーシフトを含むラマン遷移からの信号

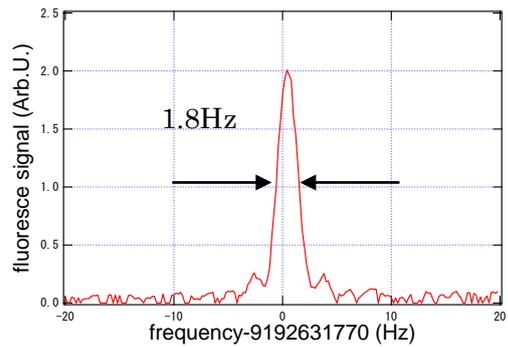


図 4 ドップラーシフトを補正した場合のラマン遷移からの信号

この結果は、マイクロ波を直接原子に照射すること無しでレーザーのみで得られる信号でも十分に高精度な原子時計を構成可能であることを示す。さらに、マイクロ波領域で得られた線幅としては世界最高レベルである。

一方で、共鳴信号の中心周波数はドップラーシフトを補正するマイクロ波掃引の起点と原子を打ち上げるタイミングの相対的な関係により決定される。これは、このタイミングジッターが原子時計の周波数安定度に影響を及ぼすことを意味する。そのため、このタイミングジッターの大きさを測定した。図 5 が測定結果である。付加雑音として $\sigma_y(\tau) = 2 \times 10^{-12} \tau^{-1/2}$ の上記タイミングジッターが存在することがわかった。また、平均時間 1000 秒程度までは白色周波数雑音の特性を示しているが、それ以上の領域になるとフリッカー雑音として観測された。このことから、タイミングジッターの原因は原子の打ち上げが起因していると推察される。タイミングジッターの大きさは 1 秒の平均時間で約 $100 \mu\text{s}$ であった。

次に、主要なノイズと予想される AC シュタルクシフトについて調べた。図 6 は 2 週波レーザーの強度比を約 2 : 1 ($F=4 \rightarrow F'=4$: $F=3 \rightarrow F'=4$)として、トータルレーザー照射パワーを変化させたときの共鳴スペクトルを示す。この場合相互作用時間は約 0.4 秒であ

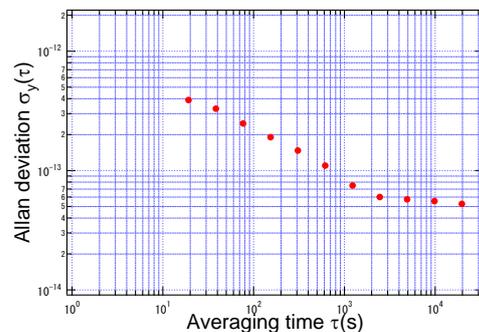


図 5 タイミングジッターによる付加雑音

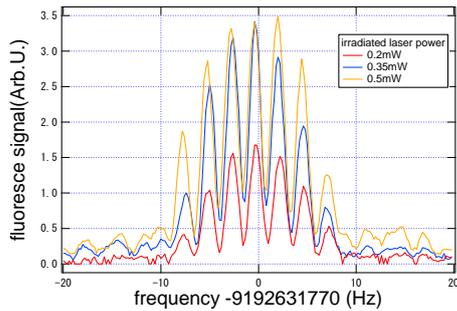


図 6 照射するレーザー強度を変化した場合のラムゼーフリンジ

るが、パルスの照射方法は2分割されている。そのため、共鳴スペクトルはラムゼー信号となって現れる。レーザーパワーが強く、照射する時間が長くなるほど自然放出が増え、計測に利用できる原子数は減少する。本観測では上記現象を回避するため2分割方式を用いた。測定結果はレーザーパワーが異なる3つの事例に対して、ラムゼーフリンジの中央がほぼ同一の周波数で観測されている。これはACシュタルクシフトがほぼ、打ち消されている状態を示す。実際、2週波レーザーの強度比をこの状態からわずかにずらすと、レーザーパワーの変化に対して共鳴周波数のシフトが正方向、負方向となる事例も観測された。これらのことから、ACシュタルクシフトを打ち消すある強度比を持った2週波レーザーが存在することが確認された。最大の懸案であったACシュタルクシフトが打ち消される条件が存在することが確認された意義は大きい。

最後に原子時計の多重化に必須となる多重位相計の性能を調べた。本装置の測定技術は申請者が独自に考案、実現したものである。図7はその測定限界値を示しており、およそ $7 \times 10^{-13} \tau^{-1}$ の特性が得られた。これらの技術は、デジタルシグナルプロセッシング(DSP)と離散的フーリエ変換(DFT)を用いて、容易に多数の原子時計間の位相差を高精度に測定可能にする。1台の原子時計の性能に限りがあることを考えると、今後は効率よく多数の原子時計を運用する方法を考案する必要がある。

今後は本方式の有用性をさらに確認するために、1次ドップラーシフトに関連するノイズを除去する方法を考案する必要がある。具体的には時計遷移を分光するレーザーを原子の運動方向に対して垂直に照射することが考えられる。あるいは、ラムゼーフリンジを取得する際に照射する2分割のレーザーパルスを順次反対方向に照射することも可能であろう。また、マイクロ波共振器を用い

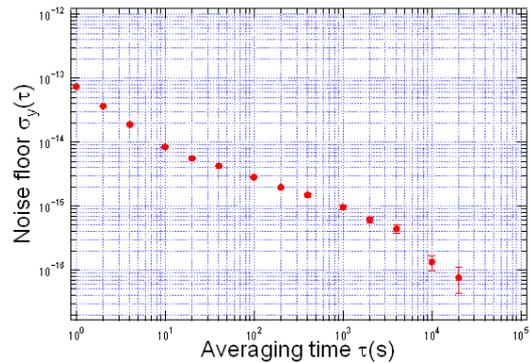


図 7 DSP と DFT を用いた多重位相計の測定限界値

ていないので極力装置は小型化が可能である。原子打ち上げに関するジッターを克服する手立てが見つければ、装置の小型化等に組み込むことでより将来への展望が開けてくるであろう。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計1件)

- ① Shinya Yanagimachi, Ken Hagimoto, Takeshi Ikegami, Analysis of Truncation Error for Dual-Mixer Time-Difference Measurement System Using Discrete Fourier Transformation, Japanese Journal of Applied Physics, 査読有, Vol 52(2013)036601, <http://dx.doi.org/10.7567/JJAP.52.036601>

[学会発表] (計1件)

- ① Shinya Yanagimachi, Dual-Mixer Time-Difference measurement System using Discrete Fourier Transformation, 2013 IEEE-UFFC and EFTF joint symposia, 2013年7月22日~25日(発表予定)

[その他]

ホームページ等

<https://www.nmij.jp/~time-freq/time-std>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

柳町 真也 (YANAGIMACHI SHINYA)

独立行政法人産業技術総合研究所・計測標準研究部門・研究員

研究者番号：70358216