

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 24 日現在

機関番号：82626

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2011～2013

課題番号：23560048

研究課題名(和文)高安定光共振器による光周波数コム絶対線幅狭窄化

研究課題名(英文)Absolute linewidth narrowing of optical frequency comb using an ultrastable cavity

研究代表者

稲場 肇(Inaba, Hajime)

独立行政法人産業技術総合研究所・計測標準研究部門・主任研究員

研究者番号：70356492

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,300,000円、(間接経費) 1,290,000円

研究成果の概要(和文)：高速に制御可能な光コムを用いて、レーザーのスペクトル線幅を他波長に転送する「線幅転送」により、時計遷移波長である578 nm用の高安定光共振器を用いることなく、光格子中にあるYb原子の時計遷移分光することに世界で初めて成功した。また、光コムを介して2台の異波長の高安定レーザー(波長1535 nmおよび1064 nm)の「ビート」を観察し、線幅および周波数安定度を測定した。その結果、平均時間1秒で $2 \times 10^{-5}$ の周波数安定度、1 Hz以下の線幅が得られていることを確認することができた。

研究成果の概要(英文)：Laser linewidth transfer is a technique to transfer a laser spectral linewidth to other wavelengths using a high-speed controllable optical frequency comb. We have firstly succeeded in observing the clock transition spectra of  $^{171}\text{Yb}$  atoms in an optical lattice without an ultrastable optical cavity for the clock wavelength (578 nm). We also observe a beat note between two lasers at different wavelengths. As a result, we were able to obtain  $2 \times 10^{-5}$  at 1-s averaging as the frequency instability and less than 1 Hz as the laser linewidth.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：応用物理学・工学基礎、応用光学・量子光工学

キーワード：量子エレクトロニクス

## 1. 研究開始当初の背景

光周波数コム(光コム)は、それまで世界最先端のグループが大プロジェクトを組んで限定された期間行うものだった光周波数計測を、各国が定常に行える技術に変えた画期的なものである。モード同期レーザーの出力は時間軸上で観察すると光パルス列であり、一つ一つのパルスの時間幅はフェムト秒級である。この出力のスペクトルは時間波形のフーリエ変換となり、多数のモードが等しい周波数間隔で並んだコム(櫛)となる。その周波数間隔は分散の影響を受けず波長依存性がないため、その間隔周波数(繰り返し周波数)とオフセット周波数を安定化するだけで、光周波数の「ものさし」として利用することができる。そして、非線形ファイバーなどで広帯域化された光コムを用いれば、可視～近赤外域の光周波数計測が可能である。これにより光周波数標準(光時計)が現実味を帯び、現在熾烈な研究競争が繰り広げられている。この光時計では、高安定共振器に安定化された線幅 1 Hz 級の連続発振レーザー、いわゆる狭線幅化レーザーが時計遷移観察用レーザーとして必要である。

その後、光コムの発生源として当初用いられていたモード同期 Ti:sapphire レーザーに代わり、信頼性や長期稼働性で圧倒的に優れるモード同期ファイバーレーザーによる光コムが我々のグループを中心として開発された。光コムの位相雑音(線幅)についても研究が進み、光コムの各モードが持つ線幅の大部分は、モード同期レーザーで決定される繰り返し周波数およびオフセット周波数由来であることがわかってきた。直接繰り返し周波数を低雑音化することは難しいので、繰り返し周波数を制御して狭線幅化レーザーに光コムの 1 つのモード成分を位相同期することで、全てのコム成分を狭線幅化する方法が提案された。これにより狭線幅化レーザーを基準とした光コムの狭線幅化が報告されるようになってきた。しかし独立なレーザー同士の位相同期には広い制御帯域が必要で、通常の電歪素子による繰り返し周波数制御ではビート信号の狭線幅化は難しく、分周するなどして辛うじて同期できても不安定で、かつ比較的大きな残余位相雑音が残る。

そこで我々はこれまでに、モード同期ファイバーレーザーの共振器中に電気光学変調

器(EOM)を挿入し、高速に共振器長(繰り返し周波数)を制御できる広帯域光コムを開発して基準レーザーに位相同期し、その相対線幅(線幅を転送できる能力)が図1に示すように、30 mHz 以下であることを示している。

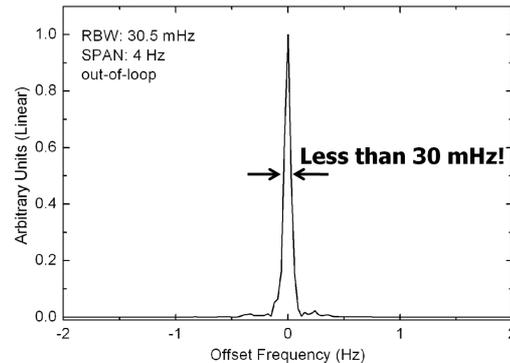


図1 2 台の光コムの相対線幅(共通のレーザーにロックしたコム同士のビート)

## 2. 研究の目的

光周波数コムはレーザーの周波数を計測するだけでなく、制御するための優れた道具でもある。例えば線幅 1 Hz 級の高安定レーザーの線幅をほとんど劣化させることなく他波長に転送することができる。本研究の目的は、高安定共振器を用いて狭線幅化された連続発振レーザーの線幅を、光コムを介して別な波長に転送すること、および系を単純化して性能と信頼性を向上させるべく、連続発振レーザーを介さずに直接光コムを高安定共振器に安定化して狭線幅化された広帯域光コムを実現することである。

## 3. 研究の方法

既存の高速制御型光コム、および狭線幅化レーザー(1064 nm)を用いて、Yb 光格子時計の時計遷移波長 578 nm への線幅転送実験を行う。次に、高安定共振器(1550 nm 用)の分散特性の評価を行い、共振器へのロックに用いる光コムの帯域幅を粗く決定する。続いて実際に光コムを高安定共振器(1550 nm 用)へ直接安定化し、光コムを広帯域化して既存の狭線幅化レーザー(1064 nm)を用いて光コムの線幅を評価することで、各パラメータを最適化する。

## 4. 研究成果

平成 23 年度、まず光コムを安定化するための高安定共振器を調達した。本研究の趣旨

から、共振器として光コムの高帯域性に対応するため、波長 1550 nm において、分散値  $5 \text{ fs}^2$  以下、フィネス 25 万以上の低分散・高フィネス仕様のものを選定した。また、できるだけ短時間で成果を出すため、ヒーターのみの温調ができるように膨張率のゼロ点温度は 25 ~ 33 保証とした。次に、線幅転送を行うための光コムを製作した。光コム的高速制御のための電気光学変調器として、モード同期の始動特性、およびジャイアントパルス等による破損に対する耐性を重視して、バルク型を採用した。光コムは約 46 MHz を中心にディレイラインにより 200 kHz 程度可変出来る仕様とし、共振器の縦モード間隔 (約 2 GHz) の整数分の一に調整できるようにした。製作した光コムについては、光増幅器の製作、およびキャリア・エンベロープ・オフセットビートの観察を行い、80 dB/HzRBW 程度の S/N、および 10 - 30 kHz の線幅など、良好な特性を得た。

平成 24 年度には、連続発振の半導体レーザーを高安定光共振器に安定化した。半導体レーザーの波長としては、共振器の設計ゼロ分散波長である 1535 nm を選び、レーザー光を共振器の TEM00 モードに結合させ、LD の電流、および温度に帰還制御することにより、波長安定化を行った。次に、高速制御型光コムを用い、既存の高安定レーザー (波長 1064 nm) とのビート信号を観察し、周波数安定度および線幅を測定した。その結果、周波数安定度として平均時間 1 秒において、約  $1 \times 10^{-14}$ 、そして 10 Hz 以下の線幅を得た。また、この方法を用いて光格子中の Yb 原子の時計遷移分光実験を行い、約 20 Hz の線幅の観察に成功した。これは本課題の目標の一つ「線幅転送」であり、世界で初めて線幅転送による光時計の時計遷移分光に成功した。さらに、光コムを高安定光共振器に直接安定化するため、オフセット周波数をゼロにするための周波数シフターを準備し、半導体レーザーの出力を共振器に結合させるための光学系を構築した。

平成 25 年度には、1535 nm の高安定光共振器を音響遮蔽箱に格納し、既存の 1064 nm 高安定レーザーとのビート周波数を観察し、図 2 のようなアラン偏差が得られた。平均時間 1 秒において、約  $2 \times 10^{-15}$  の周波数安定度が得られており、これは 2 つの光共振器の熱

雑音限界と推定される。一方で、高安定光共振器に結合している連続発振の半導体レーザーを光コムに置き換え、光コムを共振器に導入した。透過光および誤差信号の観察を試みているが、今のところ信号は得られていない。既存の低フィネス共振器への導入など予備実験を重ね、引き続きを安定化のための作業を行っている。

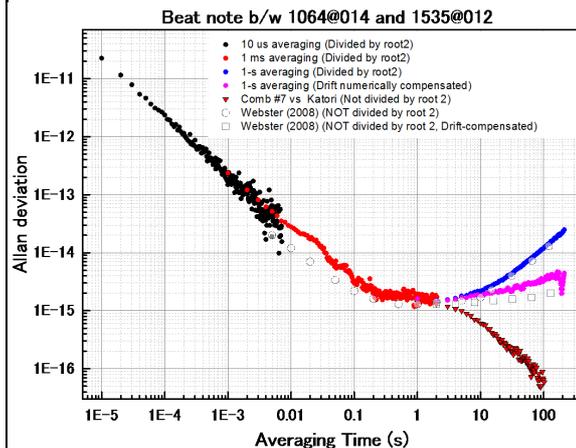


図 2 光コムを介して測定された、1535 nm 高安定レーザーと 1064 nm 高安定レーザーのビートから算出されたアラン偏差

## 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 4 件)

稲場肇、メトロロジにおけるファイバーコム、分光研究 (講座) 62 巻 5 号、238 ~ 245 頁、2013 年 10 月

H. Inaba, K. Hosaka, M. Yasuda, Y. Nakajima, K. Iwakuni, D. Akamatsu, S. Okubo, T. Kohno, A. Onae, and F.-L. Hong, Spectroscopy of  $^{171}\text{Yb}$  in an optical lattice based on laser linewidth transfer using a narrow linewidth frequency comb, Optics Express, 査読有, Vol.21, 2013, pp.7891 ~ 7896

K. Iwakuni, H. Inaba, Y. Nakajima, T. Kobayashi, K. Hosaka, A. Onae, and F.-L. Hong, Narrow linewidth comb realized with a mode-locked fiber laser using an intra-cavity waveguide electro-optic modulator for high-speed control, Optics Express, 査読有, Vol.20, 2012, pp.13769 ~ 13776

稲場肇、中嶋善晶、保坂一元、大苗敦、洪鋒雷、光コムによる精度 19 桁級の周波数合成、レーザー研究、査読有、39 巻、819-824 頁、2011

〔学会発表〕(計 4 件)

保坂一元、大久保章、稲場肇、赤松大輔、安田正美、大苗敦、洪鋒雷、光格子時計用狭線幅化レーザー光源の開発、第 61 回応用物理学会春季学術講演会、2014 年 3 月 17 日、青山学院大学、神奈川県相模原市

稲場肇、光の周波数と位相を自由に制御できる光シンセサイザー：光コム -概要と計測への応用-、中部レーザ応用技術研究会 第 89 回研究会(招待講演)、2014 年 2 月 21 日、名古屋大学、愛知県名古屋市

稲場肇、モード同期ファイバーレーザーによる光周波数コム、インターオプト最先端の光・レーザ技術勉強会(依頼講演)、2013 年 10 月 16 日、パシフィコ横浜、神奈川県横浜市

Hajime Inaba, Yoshiaki Nakajima, Kana Iwakuni, Kazumoto Hosaka, Atsushi Onae, Masami Yasuda, Daisuke Akamatsu, and Feng-Lei Hong, Fiber-based frequency comb with relative frequency stability of 10-20 level, SPIE Optics + Photonics 2011, 2011/8/24, サンディエゴ国際会議場(カリフォルニア州、アメリカ)

〔図書〕(計 0 件)

なし

〔産業財産権〕

出願状況(計 0 件)

なし

取得状況(計 0 件)

なし

〔その他〕

なし

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

稲場 肇 (INABA HAJIME)

独立行政法人産業技術総合研究所・

計測標準研究部門・主任研究員

研究者番号：70356492

### (2) 研究分担者

保坂 一元 (HOSAKA KAZUMOTO)

独立行政法人産業技術総合研究所・

計測標準研究部門・主任研究員

研究者番号：50462859