

3-5 超狭線幅クロックレーザーの開発

3-5 Development of an Ultra-Narrow Line-Width Clock Laser

李 瑛 長野重夫 松原健祐 小嶋玲子 熊谷基弘 伊東宏之
 小山泰弘 細川瑞彦

LI Ying, NAGANO Shigeo, MATSUBARA Kensuke, KOJIMA Reiko, KUMAGAI Motohiro,
 ITO Hiroyuki, KOYAMA Yasuhiro, and HOSOKAWA Mizuhiko

要旨

情報通信研究機構 (NICT) 光・時空標準グループは「中性原子の光格子時計」と「単一イオン光時計」を研究開発している。これらの光時計には、1 Hz 以下の線幅と短期・長期にわたり高い周波数安定性を持つクロックレーザーが要求される。クロックレーザー光は高真空、恒温、防音、除振の環境に置いた超低膨脹ガラス製、超高フィネスの光共振器にカップリングされ、Pound-Drever-Hall 法を用いて安定化される。今現在、クロックレーザーの線幅は数 Hz、アラン分散で評価した周波数安定度は 1 ~ 10 秒で 5×10^{-15} 以下である。更に周波数ドリフトを補正した結果として 100 秒以上のアラン分散の値を 3×10^{-15} まで抑えることが出来た。線幅が 1 Hz 以下のクロックレーザーを開発するために振動に影響されにくい光共振器を設計した。本稿では NICT のクロックレーザーの開発状況を報告する。

An optical lattice clock and a single ion optical clock are being developed in National Institute of Information and Communications Technology (NICT). Diode lasers are used for the development of extremely narrow linewidth clock lasers for optical frequency standards. Using the Pound-Drever-Hall technique, the required reduction of linewidth was achieved by locking the laser to an ultrahigh-finesse ultralow-expansion glass (ULE) reference cavity, which is set in the high vacuum chamber with a constant temperature and isolated against environmental noise and vibration. As a result, the laser linewidth is decreased down to several Hz. The Allan deviation is less than 4×10^{-15} at an averaging time over 100 s. A vibration-insensitive optical cavity has been designed, aiming the linewidth below 1 Hz. In this chapter, we report the present status of development of the clock lasers at NICT.

[キーワード]

レーザー周波数安定化, 半導体レーザー, 光共振器, 光時計, 光周波数標準
 Laser frequency stabilization, Diode laser, Optical reference cavity, Optical clock,
 Optical frequency standard

1 はじめに

現在の時間・周波数の標準単位として秒は 1967 年の国際度量衡総会で採用されたセシウム原子の超微細構造遷移に基づいた定義がされており、その確度はおよそ 10 年に 1 桁のスピードで向上し、最近 4×10^{-16} にまで到達した^[1]。しかし、この確度に到達するためには測定の前平均時間が長く、更に高い確度を達成することも困難になってきている。レーザーの発展と共に原子の光学遷移を利

用した光時計の研究開発も進んでいる。特に 1990 年代末に光周波数コムを用いた光周波数の計測手法が開発されてからは^{[2][3]}、現在の秒の定義であるマイクロ波領域の振動数よりも 4 ~ 5 桁以上高い光の振動数を高精度で計測ができるようになったため、光時計の開発は各国間で一層競争が熾烈になった。

不確かさ 10^{-17} 以下を目指す光時計の開発は 2 種類に分けられる。1 つは「魔法波長」の光格子に中性原子を閉じ込める「光格子時計」^{[4][5]}、もう 1

つはイオントラップを使って、単一イオンの量子跳躍を観測するという「単一イオン光時計」[6]である。いずれも非常に狭いスペクトル幅の光遷移を利用した周波数標準器である。情報通信研究機構(NICT)では「ストロンチウム(Sr)光格子時計」と「単一カルシウム(Ca⁺)イオン光時計」を開発している[7][8]。Sr原子を使った光周波数標準のクロック遷移は波長が698 nm、線幅が10 mHzの¹S₀ - ³P₀スピン禁制遷移で、単一Ca⁺イオンを使った光周波数標準のクロック遷移は波長が729 nm、線幅が0.2 Hzの²S_{1/2} - ²D_{5/2}電気四重遷移である。光格子時計、イオン光時計ともにクロックレーザーの狭線幅化、短期・長期の周波数安定化が要求される。したがって、超安定なクロックレーザーの開発は光時計の開発の極めて重要な一環となった。

「Sr光格子時計」のクロックレーザーには半導体レーザーが利用できる。「単一Ca⁺イオン光時計」のクロックレーザーには今までTi:Sapphireレーザーは主に利用されてきたが[9]、ここ数年間量子井戸構造の半導体レーザーの進歩に伴い、729 nm波長での半導体チップが生産されるようになった。Ca⁺イオンの²S_{1/2} - ²D_{5/2}電気四重極子遷移の飽和吸収パワー密度は 5×10^{-7} mW/cm²と低いので、我々は省電力、メンテナンスフリー、小型、安価な半導体レーザーを選んで、クロックレーザーの研究開発を行って来た。「Sr光格子時計」のクロックレーザーの研究開発については別の文献で説明することにし[10]、ここでは「単一Ca⁺イオン光時計」のクロックレーザーの開発を詳しく説明する。

2 クロックレーザーの安定化

2.1 クロックレーザーの構成と制御システム

図1にクロックレーザーの周波数安定化の概略図を示す。従来、Toptica社製の730 nm、5 mWと10 mWの反射防止(AR)コーティング付きレーザーダイオード(LD)を用いて、Littman-Metcalfタイプの外部共振器付半導体レーザー(ECDL)を製作して、クロックレーザーを開発してきたが[11]、2009年Opnext社よりInGaAsP多重量子井戸構造の730 nm帯、75 mA低電流駆動、40 mW出力、縦シングルモードのレーザーダイ

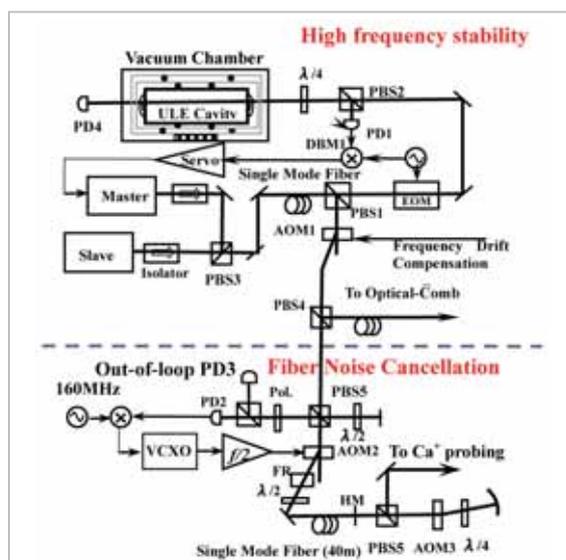


図1 クロックレーザーの周波数安定化の概略図

太い線はレーザー光、細い線は電気制御信号である。PDは光検出器、DBMはミキサー、PBSは偏光ビームスプリッター、EOMは電気光学変調器、λ/2は1/2波長板、λ/4は1/4波長板、AOMは音響光学素子、Pol.は偏光子、FRはファラデー・ローター、HMは半透過ミラーである。

オード(品名HL7301MG)が製造され、我々はこのLDにARコート施して(光伸光学工業株式会社)、出力5 mWのECDLを製作した。更に注入同期法によりスレーブレーザーの出力を40 mWまで増幅し、偏光保持シングルモード(PANDA)ファイバーを使って空間モードをクリーニングした結果、ファイバーの後で最大15 mWのTEM₀₀モード光を得られた。レーザー光の出力の中から100 μWの光を位相変調器(EOM、Linco PM25)で15 MHz変調し、高真空槽内の超高フィネスのFabry-Perot光共振器のTEM₀₀モードにカップリングさせて、Pound-Drever-Hall(PDH)法[12]で安定化することより、極めて狭い線幅と高い安定度が実現される。光共振器からの反射光は光検出器(PD1)で検出し、ミキサーで復調して、増幅を行う。増幅した信号のうち100 Hz以下の成分をマスターレーザーのPZTにFeedbackして、レーザーの共振周波数を制御する。一方、高周波成分はレーザーの駆動電流にFeedbackして、高周波雑音を抑える。制御帯域は1 MHzである。安定化されたレーザー光の一部はPANDAファイバーで我々が開発した光コム[13]に送られて、レーザーの周波数が測定、評価される。残りのレー

ザー光は 40 m の PANDA ファイバーで別室に送られて、音響光学素子 (AOM) で周波数を変化させた後にトラップされた単一 Ca⁺イオンに照射される。

2.2 環境外乱が光共振器に及ぼす影響と光共振器の制御

クロックレーザーの光は光共振器の共振周波数に安定化されるために、光共振器の共振周波数の安定性がクロックレーザーの安定性と線幅を決める最も大きな要因となる。

Fabry-Perot 光共振器は 2 枚のミラーが 1 つのスペーサーを挟んで向かい合っている構造を持つ。光の半波長の整数倍がこの 2 枚のミラーの間隔 (共振器長) に等しい場合、共振周波数となる。従って、共振器長のほんの僅かな変化が、共振周波数を変動させることになる。光共振器長の変化と共振周波数の変化の関係は次式で表される。

$$\Delta\nu/\nu_0 = \Delta L/L \quad (1)$$

ここで、 L は光路長、 ΔL は光路長の変化分、 ν_0 は共振周波数、 $\Delta\nu$ は共振周波数の変化分である。光の波長が 729 nm、屈折率が 1、光共振器長が 10 cm の場合、光共振器長が 1 fm 変化すると共振周波数は 4 Hz 変化する。つまり、1 Hz の線幅を達成するには、光共振器長を 1 fm 以下の精度で制御しなければならないことになる。そのため、共振周波数に影響を与える主要な要因を分析し、極力抑制すると同時に、これらの外乱の影響を受けにくい、あるいは影響をキャンセルするような設計を施す必要がある。

光共振器の共振周波数を変える要因の 1 つは、気圧の変化である。気圧が変化すると、2 つミラー間の屈折率が変化するため、光路長が変わってしまう。これを防ぐためには、光共振器を超高真空の環境に入れ、外気圧の変化が光共振器に影響しないようにする必要がある。

次に、光共振器本体の熱膨張による光共振器長の変化を考慮しなくてはならない。温度の変化がもたらす共振器長の変化は

$$\Delta L = \alpha L \Delta T \quad (2)$$

で表すことができる。ここで α は熱膨張係数、 ΔT は温度変化である。共振器本体の材料としては、熱膨張係数 α が小さいものが好ましい。そのような材料に、サファイアがある。サファイアは 3 ~ 4 K の温度で、 α が 10^{-11}K^{-1} と極めて小さい。しかし、光共振器を液体 He 温度まで冷却することは容易ではない。他には、Corning 社の Ultra-Low-Expansion (ULE) ガラスと Schott 社の Zerodur が考えられる。これらの α はいずれも 10^{-8}K^{-1} であるが、大きな違いに材料のクリープ (Creep) あるいは経年変化 (Ageing drift) と呼ばれる現象がある。クリープとは、ガラスの結晶構造が時間と共に極めてゆっくりと変化することである。この変化は ULE のほうが Zerodur に比べて 1 桁小さい。また、ULE が滑らかに変化してゆくのに対し、Zerodur は不連続な変化を繰り返し変形してゆく [14]-[16]。光共振器の材料として ULE ガラスが良く選ばれる。ULE ガラスは SiO_2 ベースに TiO_2 をドーピングしたもので、ドーピングする量と均質化処理することにより、室温範囲のある温度で α の極性が反転する。したがって、零膨脹率になる温度 (Zero-Crossing 温度) を見つけて、この温度に ULE ガラスの温度調節を行えば、実質的に 10^{-10}K^{-1} 以下の熱膨張係数が可能である。しかし ULE ガラスを Zero-Crossing 近くの温度に維持して、 α を $1 \times 10^{-10} \text{K}^{-1}$ となっても、式 (1) と式 (2) から、10 cm 長の光共振器の温度が 1 mK 変化したら、共振周波数が約 40 ~ 50 Hz ドリフトすることが分かる。実際のところ温度変化を 1 mK 以下に制御することは極めて難しい。

ところで、先ほど述べたように、共振器は真空槽内に設置されている。その場合、真空外と真空内の温度変化をそれぞれ、 ΔT_{out} 、 ΔT_{in} とすると、両者の比は

$$\Delta T_{in} / \Delta T_{out} = 1 / (f\tau) \quad (3)$$

という関係にある [14]。ここで f は温度変化の周波数、 τ は熱伝導の時定数で、熱伝導が低ければ低いほど τ は大きくなる。仮に f が 0.1 Hz、 τ が 24 時間とすると、 $\Delta T_{in} / \Delta T_{out}$ は約 10^{-4} となり、真空チェンバー外の温度変化による真空チェンバー内の光共振器の周波数ドリフトは大きく軽減されることも分かった。

他に、50 Hz 以下の周波数で海岸線に押し寄せる波による振動、及び 50 Hz 以上の人為的な外部環境の振動雑音による光共振器長の変化を考慮しなくてはならない。特に低周波 (0.1 ~ 100 Hz) 領域の振動は光共振器に振動を与え、レーザーの線幅に大きな影響を及ぼす。低周波数領域で有効な除振を達成するには、光共振器を載せる光学台の除振装置の共振周波数をできる限りに低くすることが必要である。除振には、バネ式と振り子式がある。2000 年前後、米国国立標準研究所 (NIST) では約 3 m のゴムチューブで光学台を振り子状に吊って除振を行い (共振周波数は約 0.3 Hz)、サブ Hz 線幅にレーザーを安定化している [17]。最近になって、二重バネ構造で作った実効的に非常に小さなバネ定数の受動防振 MINUS-K 除振台 (Minnus K Technology 社 共振周波数 0.5 Hz) や、共振周波数がないという特徴がある能動防除振台 (Table Stable 社) が販売された。これらは、周波数安定化に対して大変有用である。

我々はミラーとスペーサーがともに ULE ガラス材質の Fabry-Perot 光共振器をアメリカ Advanced Thin Films (ATF) 社から購入した。光共振器は、長さが 10 cm の円柱体で (Free Spectral Range 1.5 GHz)、測定した光共振器にカップリングした光子の寿命は 33 μ s、光共振器のフィネスは 156,000 である。温度、気圧、振動等の変化の影響を抑えるために、ULE 光共振器は、熱伝導率が高く且つ熱輻射を反射する金メッキが施された 2 層の銅パイプに入れて、更に 1×10^{-6} Pa の真空チェンバー内に設置される。光共振器と銅パイプと真空チェンバーの各層の間は、2 枚のバイトン O リングで断熱される。外層の銅パイプと真空チェンバーは、それぞれペルチェ素子で温度制御される。制御温度の揺らぎは 10 mK 以下である。外部振動を遮断するために、我々は、真空チェンバーを低周波で防振効果が高い受動防振台 Minus-K の上に置き、また音響による振動を除くために全体を遮音箱内に設置した。

2.3 レーザー周波数安定化の実験結果

2.3.1 レーザーの線幅

我々は 2.1 で説明した方法でもう 1 台のクロックレーザー (クロックレーザー 2) をフィネス 400,000、共振器長 10 cm の円柱体光共振器に

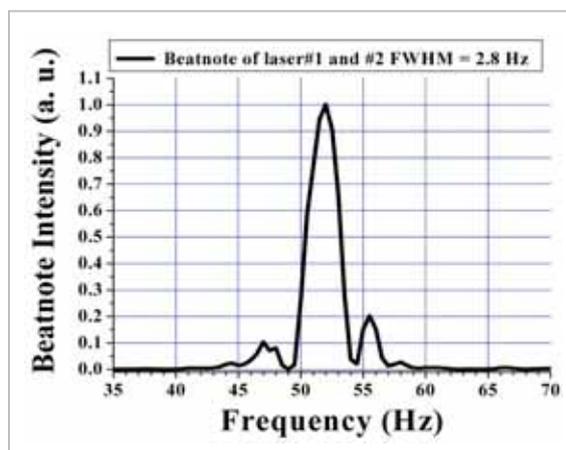


図 2 2つの独立な ULE 光共振器に安定化されたレーザーのビートのスペクトル

掃引時間は 1 秒、スペクトラムアナライザの分解能は 1 Hz である。ビートの線幅は 2.8 Hz であった。

カップリングして、周波数安定化を行った。分解能 1 Hz のスペクトラムアナライザで、2 台の安定化されたレーザーの周波数のビート信号を測定した。図 2 はこのビート信号を示す。中心周波数は 795 MHz、掃引時間 1s、ビート線幅は 2.8 Hz であった。

2.3.2 レーザー周波数の長期ドリフトの抑止

我々は、ULE 光共振器の熱膨張によりレーザーの周波数が変化するのを抑えるために ULE 共振器の Zero-Crossing 温度を探した。真空チェンバーの窓の結露を防ぐためにアルミ真空チェンバーの温度を室温近くの温度 (23 $^{\circ}$ C) に維持し、チェンバー内の銅パイプの温度を制御して、ULE 光共振器の温度を -3 $^{\circ}$ C まで下げた。その後、温度制御を止め、ULE 光共振器の温度が上昇する間、共振器に安定化されたレーザー光の周波数を光コムで測定した。このときの共振周波数の温度依存性を図 3(a) に示す。約 1.8 $^{\circ}$ C の所が、ULE 光共振器の Zero-Crossing 温度である。共振周波数の温度変化曲線を 3 次元多項式で Fitting し、それを微分したものを図 3(b) に示す。図 3(b) より Zero-Crossing 温度から僅かに 0.1 $^{\circ}$ C ずれると周波数の温度依存性が 100 Hz/mK になることが分かる。我々はより精密な Zero-Crossing 温度を調べるために 1 ~ 2 $^{\circ}$ C の範囲で ULE 光共振器の温度を保ちながら周波数の温度依存性を調べた。図 4 にその結果を示す。ULE 光共振器を各温度

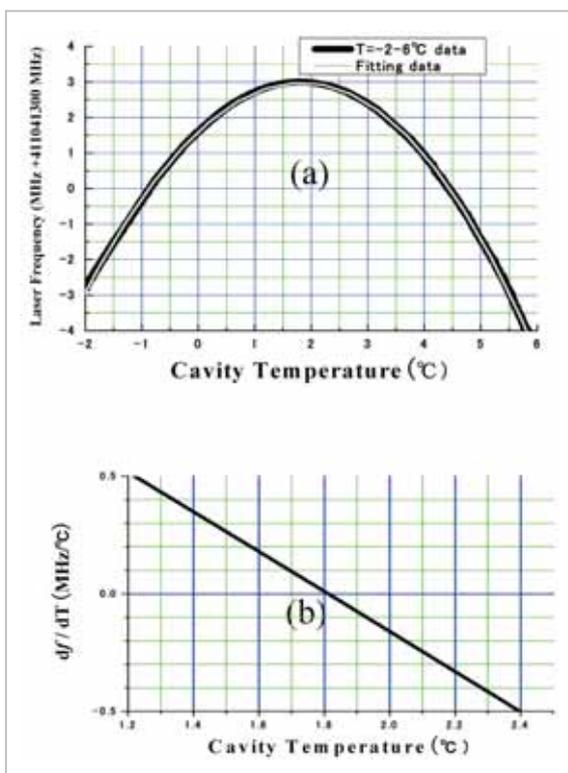


図3 レーザー共振周波数の温度依存性

光共振器の温度掃引範囲は-3 ~ 6 °C。
 (a) の中心周波数は 411041300 MHz。
 (b) は (a) の測定データの 3 次元 fitting 値の微分結果である。

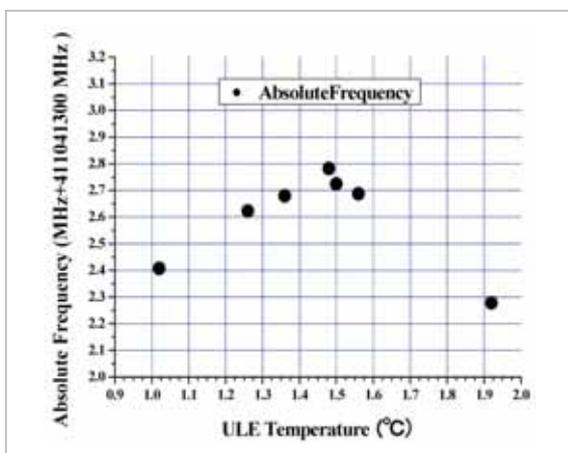


図4 レーザー共振周波数の温度依存性の精密測定

光共振器の温度掃引範囲は 1 ~ 2 °C

に設定するのに数日掛かる。その間に ULE 光共振器はクリープ現象により共振周波数が変化するため、図 3(a) のようなデータの滑らかさは失われている。図 4 に示す通り、Zero-Crossing 温度は 1.49 °C であった。

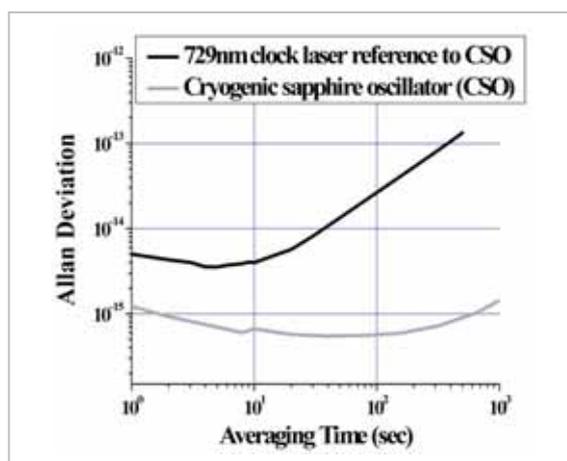


図5 Cryogenic sapphire oscillator (CSO) を基準にした光コムで評価したクロックレーザー1の安定度

黒線はクロックレーザーのアラン分散値、灰線はCSOのアラン分散値である。

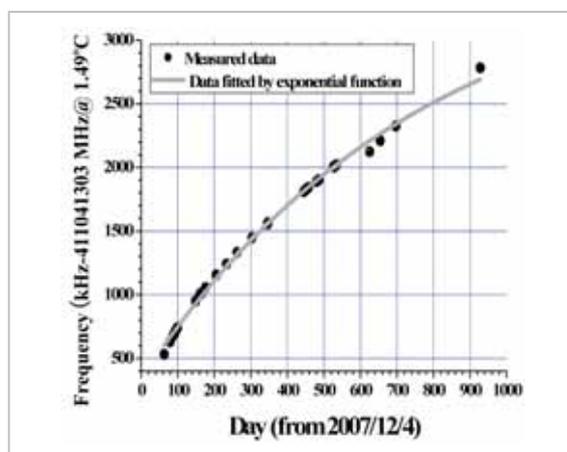


図6 経年変化による ULE 光共振器の共振周波数の変化

光共振器は 2 年以上 1.49 ± 0.02 °C の温度に維持されている。クロックレーザーを光共振器に安定化して、共振周波数を光コムで測定した。灰線はデータを指数関数で Fitting した結果である。

2.3.3 レーザー周波数の安定度の評価

NICT は冷却サファイア発振器の 1GHz 周波数信号を開発した[18]。我々はこの信号を基準にした光コムで、クロックレーザー1の安定度を評価した。図5はその評価結果の一例である。1秒から10秒までのアラン分散は 5×10^{-15} 以下であった。

2.3.4 ULE 光共振器の経年変化

クロックレーザー1の ULE 光共振器の温度を 1.49 °C に維持し、411041303 MHz 付近の共振周波数を 2 年以上観測した。結果を図6に示す。ULE

光共振器の共振周波数は徐々に高くなっている (ULE 光共振器長が縮むことに対応)。経年変化は指数関数的に減少し、最初のドリフトは1日で5~6 kHzであったが、現在はおよそ1日で2~3 kHz、1秒で約0.03 Hzとなっている。

3 長期光周波数ドリフトの補正

2.2 で議論した通り、光共振器の温度を精密に制御しても経年変化により光共振器長は変化し、式(1)に従って共振周波数がドリフトする。より確実に Ca^+ のクロック遷移を検出するためにクロックレーザの長期光周波数のドリフトを補正する。

図7に周波数ドリフトの補正方法を示す。音響光学素子 AOM1 (図1、図7参照) は周波数補正器の役割を担う。AOM1 には、AD9858 直接・デジタル・シンセサイザ (DDS: Direct Digital Synthesizer) からの約 21 MHz の信号と信号発生器 (Synthesizer2) からの信号 101 MHz との差周波信号からなる約 80 MHz の信号が加えられる。クロックレーザは AOM1 を通過する際、AOM1 に加えられた約 80 MHz だけ周波数が変調される。周波数ドリフトの補正は、一定の周期毎にコンピュータを通じて DDS の出力周波数を 21 MHz から光コムで測定したドリフト周波数を引くことで行う。DDS の基準クロック信号には、水素メーザーを基準にしている 100 MHz の信号を使う (このとき DDS の分解能は 0.023 Hz)。出力信号は約 5 分周の 21 MHz を採用した。同様に、信号発生器も水素メーザーを基準にしている。バンドパス・フィルターを通る差周波信号はアンプで 1W まで増幅されて、AOM1 に加えられる。

図8は長期光周波数ドリフトの補正結果である。まず冷却サファイア共振器の 1 GHz 周波数信号を基準した光コムで、共振器に安定化されたクロックレーザの周波数を 2000 秒間測定し、平均ドリフトを求めた。このときのドリフトは +0.0519 Hz/s であった。図8中の丸いマークは補正がないときのクロックレーザのアラン分散のデータ、三角マークは 0.5 秒周期で周波数ドリフトを補正したときのデータを示す。DDS の分解能は 0.023 Hz であるから、1 秒 +0.0519 Hz のドリフトに対して、0.5 秒毎の補正量には -0.023 Hz と

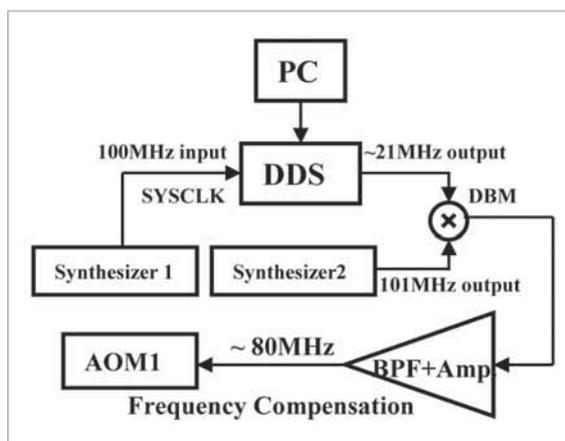


図7 クロックレーザ周波数補正実験の概念図

PCはコンピュータ、DDSは直接・デジタル・シンセサイザ、BPFはバンドパス・フィルター、Amp.は信号増幅器、AOMは音響光学素子である。

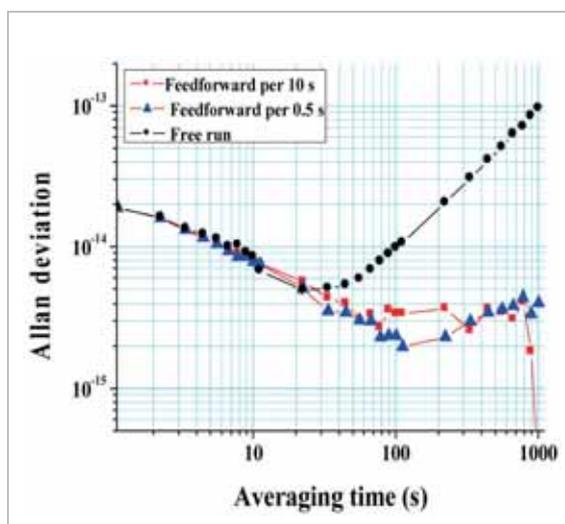


図8 クロックレーザのアラン分散

丸いマークは周波数補正されていないときの ULE 光共振器に安定化されたレーザの値、四角マークは 10 秒毎に 1 回補正したときの値、三角マークは 0.5 秒毎に 1 回補正した時の値である。

-0.046 Hz を適度な割合で用いた。四角マークは、同様の方法で、10 秒周期で周波数ドリフトを補正したときのアラン分散である。この図を見るとクロックレーザのドリフトが補正されているのが分かる。50 秒からのアラン分散は $3 \sim 4 \times 10^{-15}$ 以下であった。

4 光ファイバー伝送で加わる位相変調雑音の補正

Ca⁺イオンのクロック遷移スペクトルを観測するために、このクロックレーザー光は長さ40mのPANDAファイバーで別室に置かれたCa⁺イオン真空チェンバーに伝送される。その際、ファイバーに加わる振動や、温度変化などの影響で伝送したレーザー光の光路長が変わり、位相変調雑音が生じる。結果として安定化されたレーザー光の線幅は広がることになる。

そこで、位相変調雑音をキャンセルするために、図1に示すような機構を設けた。レーザービームをPBS5で2つに分けて、一方を直接ミラーで反射して光検出器PD2に入れる。他方は約80MHzのAOM2で周波数を変調して、光ファイバーに入力する。光ファイバーの後のハーフミラーでは、一部のレーザービームを光ファイバーに戻し、もう一度AOM2で周波数を変調してPD2に入れる。これにより、光検出器PD2では、直接PD2に入力したビームと、ファイバーを往復して2回AOM2で変調されたビームの160MHzの周波数ヘテロダインビート信号が検出される。この信号を、増幅、2分周した後AOM2ドライバーの電圧制御水晶発振器(VCXO)にFeedbackすることによって、位相雑音が除去される。

この効果を評価するために、図1中の光検出器PD3に直接入力したレーザービームとファイバーを往復して2回AOM2で変調されたレーザービームのOut-of-loopのヘテロダインビート信号(160MHz)を検出し、分解能1Hzのスペクトラムアナライザ(Hewlett Packard 8560E)でスペクトルを測定した。実験結果を図9に示す。

図9(a)中の灰色線は位相雑音を除去する前のレーザー光のスペクトル、黒線は位相雑音を除去した後のスペクトルである。ファイバー伝送によるスペクトルの広がりが抑えられているのが分かる。図9(b)は狭い周波数範囲で取ったスペクトルである。ビート信号の-3dBの線幅(半値全幅)は1Hzで、これはスペクトラムアナライザの分解能でリミットされている。図9(b)より光位相雑音は除去され、周波数の制御帯域は2kHzであった。

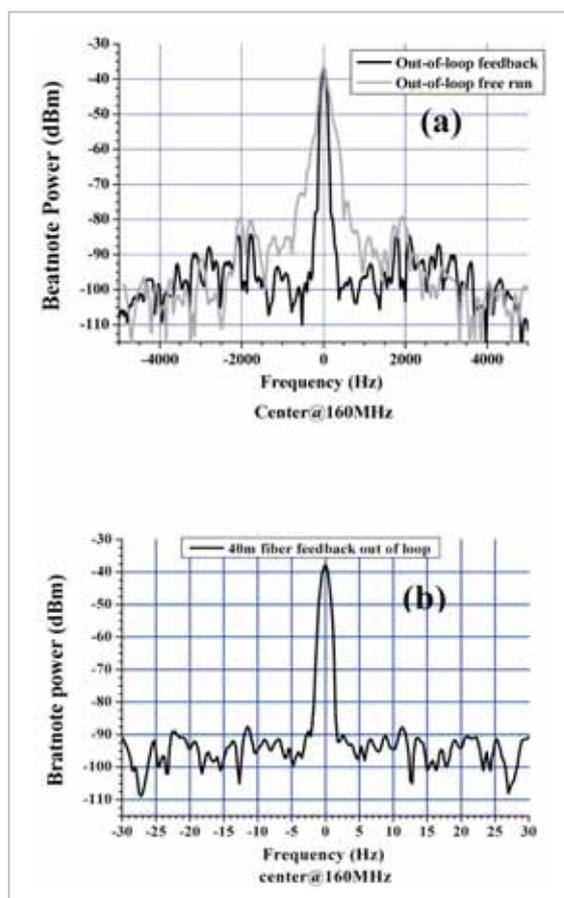


図9 ファイバーを往復する前後のレーザー光のヘテロダインビート信号

中心周波数は160MHzである。(a)より制御帯域は2kHzと分かる。(b)より-3dBの半値全幅は1Hzで、スペクトラムアナライザの分解能でリミットされている。

5 振動に影響されにくい光共振器の設計

これまで述べたように、我々は超狭線幅クロックレーザーの周波数安定化実験を行った。環境外乱が光共振器に及ぼす影響を低減するためにMINUS-K除振台と遮音箱を使った。実験結果は図2と図5で示したように線幅は1Hzより未だ広く、アラン分散の短期安定度は1秒で 5×10^{-15} 以上であった。2.3.1で述べたように、クロックレーザー2のフィネス(400,000)はクロックレーザー1のフィネス(156,000)より高い。しかし光コムで測定したクロックレーザー2の短期安定度はクロックレーザー1の短期安定度と同レベルである。また、両方とも夜間に測定した値は昼間に測

定した値より短期安定度が良くなる。この結果は振動などの影響が線幅 Hz レベルで現れるためと推測される。この影響を除去するには、さらに低周波まで除振することや、より防音する方法も研究しなければならないが、視点を変えて環境外乱に影響されにくい光共振器の設計も1つのアプローチである。そのような研究も幾つか報告されている [19]-[22]。振動に影響されにくい光共振器とは、振動が加えられたとき共振器長が変わらないということである。即ち、共振器全体の形が力を受けて歪もうとも、2つのミラーの中心位置が動かないので、安定な光共振器となる。

光共振器が力を受けたときにどのように変形するかは、光共振器の形状や支持点の位置に依存する。個体を小さい領域に分解し、それぞれの接点にかかる応力と変位を計算するという有限要素法を用いたシミュレーションで、光共振器の形状と支持点を最適化する方法がある。この方法で共振器長が変化を受けにくい構造が実現される。

一般的に振動に影響されにくい光共振器は縦置き光共振器と横置き共振器に分けられる。横置き光共振器は設置が容易なため、我々は図10のようなカットアウト (cut-out cavity) 光共振器 [22] を選んだ。ULE 光共振器の直径を 10 cm、長さを 10 cm として、有限要素法でカットアウトを施す位置と共振器の支持点を変えながら光共振器のミラーの変位をシミュレーションした。結果として、カットアウトを施す場所 (図中 X1、X2) は X1=7.7 mm、X2=44 mm、支える点は光共振器の端面より 10.9 mm 離れたところにあるときにミラーの変位が最も小さかった。図11はこの光共振器に縦方向の加速度 9.8 m/s² (重力加速度 1G) を加えた時の片側ミラーの変位 (ΔL 、単位は mm) を示す。横軸は片側ミラーの中心 (図11で1を示す場所) から上下 1 mm 範囲の変位を示す。図11より、2つのミラーの中心の変位 ΔL は 2.6×10^{-13} m である。ATF 社の光共振器の加工誤差は ± 0.25 mm、この加工誤差を入れてシミュレーションした結果は $\Delta L \sim 1 \times 10^{-12}$ m である。

光共振器が受ける振動の大きさを見積もるために加速度計を使って Minus-K 除振台上の加速度を測定した。実験室内で Minus-K の 0.5 Hz 共振周波数の加速度は数 μ G である。式(1)よりこのミラーの変位に伴い共振周波数変化分 ($\Delta\nu$) は

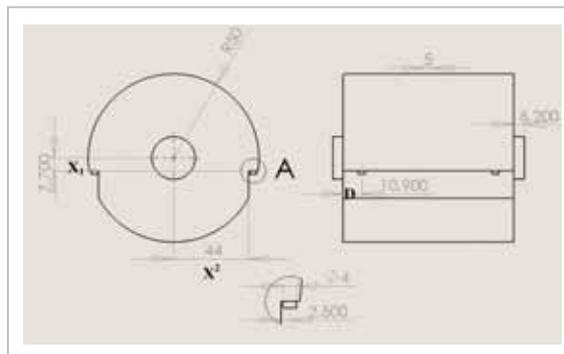


図10 カットアウト共振器

センターからカットアウト位置 X1=7.7 mm、X2=44 mm。サポートパッド (Pad) は $\Phi 4$ mm のバイトン (Viton) ゴム、4つのパッド点の中心は光共振器の片側より D=10.9 mm に離れる。

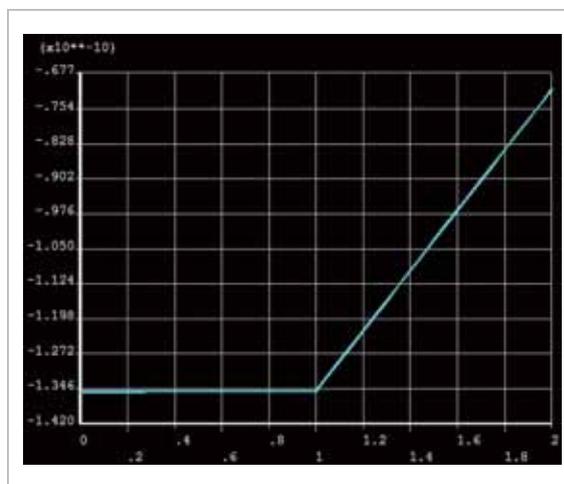


図11 ミラー変位のシミュレーション結果

1 g 重力を光共振器垂直方向に加えるときミラー中心付近の変位 ΔL である。横軸の 1 の位置は鏡の中心、0 は中心から下 1 mm の場所、2 は中心から上 1 mm 鏡の場所である。縦軸は片側鏡の変位、単位は mm である。

0.1 Hz 以下である。これは Ca⁺イオン光周波数標準のクロックレーザーに対する条件を満たす。我々はこの ULE 光共振器を使って、サブ Hz 線幅の 729 nm クロックレーザーを開発する計画である。

更に狭い線幅のクロックレーザーを開発する場合は、外部環境振動の問題だけではなく、ミラーやスペーサーなどが有限温度の熱浴に接することによって生じる熱雑音の問題も出てくる。この熱雑音を低減するには、温度を下げるか、熔融石英などの材料を使って、振動子の機械的な Q 値を上げる方法がある [23]。他に、式(1)により光共振器

長 L が長ければ、共鳴周波数の変化分 ($\Delta\nu$) も小さくなる。この考え方によって、当グループは 30 cm の長い光共振器も設計した^[24]。

6 まとめ

我々は光周波数標準開発の鍵を握る超狭線幅クロックレーザーの開発を行っている。今現在開発したクロックレーザーの線幅は数 Hz、クロックレーザーの安定度を評価するアラン分散値は 1 ~ 10 秒で 5×10^{-15} 以下である。クロックレーザーを零膨脹率温度に維持したときの長期の周波数ド

リフトは 0.03 Hz/s である。音響光学素子を使い、長期光周波数ドリフトを補正した結果は 1000 秒でアラン分散の値を 3×10^{-15} まで抑えることが出来た。

Sr 光格子時計、単一 Ca⁺イオン光時計ともに選んだクロック遷移は 1 Hz より遥かに狭い線幅の遷移であるから、まずクロックレーザーの線幅を更に 1 桁狭くすることを目標とし、研究を進めることに力を尽くす。

有限要素法でカットアウト光共振器をシミュレーションして頂いた楊濤氏 (北京交通大学) に深く感謝します。

参考文献

- 1 T. E. Parker, "Long-term comparison of caesium fountain primary frequency standards," *Metrologia*, Vol. 47, pp. 1–10, 2010.
- 2 T. Udem, J. Reichert, R. Holzwarth, and T. Hänsch, "Absolute Optical Frequency Measurement of the Cesium D1 Line with a Mode-Locked Laser," *Phys. Rev. Lett.*, Vol. 82, pp. 3568–3571, 1999.
- 3 D. J. Jones, S. A. Diddams, J. K. Ranka, A. Stentz, R. S. Windeler, J. L. Hall, and S. T. Cundiff, "Carrier-Envelope Phase Control of Femtosecond Mode-Locked Lasers and Direct Optical Frequency Synthesis," *Science*, Vol. 288, pp. 635–639, 2000.
- 4 H. Katori, "Spectroscopy of Strontium Atoms in the Lamb-Dicke Confinement," in *Proceedings of the 6th Symposium on Frequency Standards and Metrology*, P. Gill, ed. (World Scientific, Singapore), pp. 323–330, 2002.
- 5 M. Takamoto, F. L. Hong, R. Higashi, and H. Katori, "An Optical Lattice Clock," *Nature*, Vol. 435, pp. 321–324, 2005.
- 6 H. G. Dehmelt, "Mono-Ion Oscillator as Potential Ultimate Laser Frequency Standard," *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, Vol. IM-31, pp. 83–87, 1982.
- 7 井戸哲也, 山口敦史, 小出美知, "NICT での Sr 光格子時計開発とクロックレーザー用新型光共振器の設計," *レーザー研究*, Vol. 38, pp. 493–499, 2010.
- 8 K. Matsubara, K. Hayasaka, Y. Li, H. Ito, S. Nagano, M. Kajita, and M. Hosokawa, "Frequency Measurement of the Optical Clock Transition of ⁴⁰Ca⁺ Ions with an Uncertainty of 10⁻¹⁴ Level," *Appl. Phys. Express*, Vol. 1, p. 067011-3, 2008.
- 9 J. Benhelm, G. Kirchmair, U. Rapol, T. Körber, C. F. Roos, and R. Blatt, "Measurement of the Hyperfine Structure of the S_{1/2}–D_{5/2} Transition in ⁴³Ca⁺," *Phys. Rev. A*, Vol. 75, p. 032506-5, 2007.
- 10 山口敦史, 志賀信泰, 長野重夫, 石島博, 小山泰弘, 細川瑞彦, 井戸哲也, "ストロンチウム光格子時計," *情報通信研究機構季報*, 本特集号, 3-3, 2010.
- 11 Y. Li, S. Nagano, K. Matsubara, H. Ito, M. Kajita, and M. Hosokawa, "Narrow-Line and Frequency Tunable Diode Laser System for S-D Transition of Ca⁺ Ion," *Jpn. J. Appl. Phys.*, Vol. 47, pp. 6327–6332, 2008.

- 12 R. W. P. Drever, J. L. Hall, F. V. Kowalski, J. Hough, G. M. Ford, A. J. Munley, and H. Ward, "Laser Phase and Frequency Stabilization Using an Optical Resonator," *Appl. Phys. B*, Vol. 31, pp. 97–105, 1983.
- 13 S. Nagano, H. Ito, Y. Li, K. Matsubara, and M. Hosokawa, "Stable Operation of Femtosecond Laser Frequency Comb with Uncertainty at the 10^{-17} Level toward Optical Frequency Standards," *Jpn. J. Appl. Phys.*, Vol. 48, p. 042301-8, 2009.
- 14 M. Roberts, P. Taylor, and P. Gill, "Laser Linewidth at the Sub-Hertz Level," NPL Report CLM 8, 1999.
- 15 D. Hils and J. L. Hall, "Ultra Stable Cavity-Stabilized Lasers with Sub-Hertz Line width," in *Proceedings of the 4th Symposium on Frequency Standards and Metrology*, A. De Marchi, ed. (Springer-Verlag, Heidelberg), pp. 162–173, 1989.
- 16 J. L. Hall, "Frequency stabilized lasers – a parochial review," in *Proceedings of SPIE*, Vol. 1837, pp. 2–15, 1993.
- 17 B. C. Yong, F. C. Cruz, W. M. Itano, and J. C. Bergquist, "Visible Lasers with Subhertz Linewidths," *Phys. Rev. Lett.*, Vol. 82, pp. 3799–3802, 1999.
- 18 M. Kumagai, H. Ito, S. Nagano, C. R. Locke, J. G. Hartnett, G. Santarelli, and M. Hosokawa, "Synthesis Chains Based on Ultra-Stable Cryogenic Sapphire Oscillator at NICT," in *Proceedings of EFTF2009*, pp. 496–500, 2009.
- 19 M. Notcutt, Long-Sheng Ma, Jun Ye, and John L. Hall, "Simple and Compact 1-Hz Laser System via an Improved Mounting Configuration of a Reference Cavity," *Optics Letters*, Vol. 30, pp. 1815–1817, 2005.
- 20 T. Nazarova, F. Riehle, and U. Sterr, "Vibration-Insensitive Reference Cavity for an Ultra-Narrow-Linewidth Laser," *Appl. Phys. B*, Vol. 83, pp. 531–536, 2006.
- 21 L. Chen, John L. Hall, J. Ye, T. Yang, E. Zang, and T. Li, "Vibration-induced elastic deformation of Fabry-Perot cavities," *Phys. Rev. A*, Vol. 74, p. 053801-13, 2006.
- 22 S. A. Webster, M. Oxborrow, and P. Gill, "Vibration insensitive optical cavity," *Phys. Rev. A*, Vol. 75, p. 011801-4, 2007.
- 23 K. Numata, A. Kemery, and J. Camp, "Thermal-Noise Limit in the Frequency Stabilization of Lasers with Rigid Cavities," *Phys. Rev. Lett.*, Vol. 93, p. 250602-4, 2004.
- 24 M. Koide and T. Ido, "Design of Monolithic Rectangular Cavity of 30-cm Length," *Jpn. J. Appl. Phys.*, Vol. 49, p. 060209-3, 2010.



李 瑛(Ying Li)

新世代ネットワーク研究センター
光・時空標準グループ主任研究員
博士(理学)
光周波数標準、レーザー物理

長野重夫

新世代ネットワーク研究センター
光・時空標準グループ主任研究員
博士(理学)
光周波数標準、精密時空計測



松原健祐

新世代ネットワーク研究センター
光・時空標準グループ主任研究員
博士(理学)
光周波数標準、レーザー分光

小嶋玲子

新世代ネットワーク研究センター
光・時空標準グループ 博士(理学)
イオン光周波数標準



熊谷基弘

新世代ネットワーク研究センター
光・時空標準グループ主任研究員
博士(理学)
原子周波数標準、
光ファイバ周波数伝送

伊東宏之

新世代ネットワーク研究センター
光・時空標準グループ主任研究員
博士(理学)
原子周波数標準、光周波数標準



小山泰弘

新世代ネットワーク研究センター
光・時空標準グループグループリーダー 博士(学術)
宇宙測地、電波科学



細川瑞彦

新世代ネットワーク研究センター
研究センター長 博士(理学)
原子周波数標準、時空計測