

キャリアエンベロープ位同期レーザーを用いた 光周波数計測

伊東 宏之・長野 重夫・細川 瑞彦

Measurements of Optical Frequency by Carrier-Envelope Phase Locked Laser

Hiroyuki ITO, Shigeo NAGANO and Mizuhiko HOSOKAWA

In National Institute of Information and Communications Technology (NICT), we are now developing femtosecond optical frequency combs without external wavelength broadening in optical fibers. We evaluate the frequency stability of the comb with frequency stabilized extended-cavity diode laser. Measured frequency stability is 2×10^{-13} at an averaging time of 1 s. This stability is restricted by the frequency stability of the hydrogen maser used for the frequency reference.

Key words: optical frequency comb, absolute frequency measurement, optical frequency standards

キャリアエンベロープ位同期レーザーの開発により高精度な光周波数計測が可能になったため、従来のマイクロ波標準を超える周波数確度をもつ次世代の周波数標準として光周波数標準が近年大きな注目を集めている^{1,2)}。情報通信研究機構（NICT）でも、現在カルシウムイオンを利用した光周波数標準の研究を行っている³⁻⁵⁾。この光周波数標準を実現するための要素技術として、現在筆者らのグループでは、 $^{43}\text{Ca}^+$ の $^2S_{1/2} \rightarrow ^2D_{5/2}$ 遷移を観測するための周波数安定化 729 nm 外部共振器半導体レーザー（ECDL）⁶⁾ と光周波数を高精度に測定するためのキャリアエンベロープ位同期レーザーを開発中である。本稿では、開発中の 729 nm ECDL の光周波数計測を例として、キャリアエンベロープ位同期レーザーを用いた光周波数計測方法について述べる。なお、キャリアエンベロープ位同期レーザーは、周波数軸上に等間隔にモードが並んでいる様子を櫛に見立てて「光コム」とよばれることも多い。本稿では以下、光コムという呼称を使用することにする。

現在 NICT では、フェムト秒モードロック Ti:sapphire レーザー VENTTEON OS (Nanolayers GmbH) を光源として使用した光コムシステムを開発している。VENTTEON OS は出射光のスペクトルが 1 オクターブを超えていることが大きな特徴で、フォトニックファイバーなどの外部波長拡大素子を用いずに自己参照法により $f-2f$ ビート信号

の測定が可能である⁶⁾。レーザーの繰り返し周波数 f_{rep} は約 200 MHz、キャリアエンベロープオフセット周波数 f_{ceo} 安定化のための光学系を追加した状態での平均出力は約 200 mW である。図 1 に、VENTTEON OS を利用した光コムシステムの実験配置を示す。Ti:sapphire レーザーの出力はビームスプリッターで 2 つに分けられる。波長 570 nm および 1140 nm の光はビームスプリッターを透過し、 f_{ceo} 測定のための非線形干渉計へと導かれる。600~1000 nm の光は反射され光周波数測定に使用される。光周波数測定では偏光ビームスプリッターを使用して光コムと被測定レーザーを同軸上に伝送されるようにしたのち、回折格子で分光した光をビート計測用のディテクターに入射させている。

図 2 に、測定結果から求めた 729 nm ECDL の周波数安定度、マイクロ波周波数リファレンスとして利用した水素メーザーの安定度および繰り返し周波数ロック系の周波数安定度を示す。横軸は平均時間である。図からわかるように、729 nm ECDL の周波数安定度は 1 s で約 2.1×10^{-13} となっている。この値は水素メーザーの周波数安定度とほぼ一致することから、筆者らの光周波数計測システムの短期安定度が水素メーザーの安定度で制限されていることがわかる。なお 729 nm ECDL に長期的な周波数ドリフトが存在するため、2 s 以上での安定度計算結果は水素メーザ

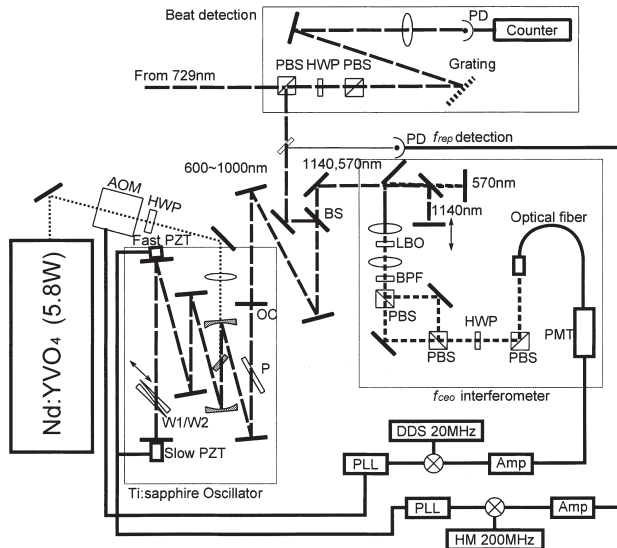


図1 VENTEAON OSを利用した光コムシステムの実験配置。AOM：音響光学変調素子，BPF：バンドパスフィルター，DDS：ダイレクトデジタルシンセサイザー，HWP：半波長板，LBO：LiB₃O₅結晶，HM：水素メーザー，OC：アウトプットカップラー，P：BaF₂板，PBS：偏光ビームスプリッター，PD：高速フォトダイオード，PMT：光電子増倍管，PZT：ピエゾ素子，W1，W2：BaF₂ウェッジ板。

一の周波数安定度よりも悪化している。また、図2に示してある繰り返し周波数ロック系の周波数安定度は、リファレンスとして使用した200 MHz信号と繰り返し周波数検出用ディテクター出力間での周波数安定度を測定したものである。この測定結果は十分安定なマイクロ波周波数リファレンスが存在すれば、筆者らの光周波数計測システムでは平均時間1 sで 3×10^{-14} という非常に安定度の高い計測が可能であることを示している。

次に、絶対周波数の計算について述べる。測定されたビート周波数を f_{beat} とすると、被測定レーザーの周波数 f_{cw} は次式で表される。

$$f_{\text{cw}} = f_n \pm f_{\text{beat}} \quad (1)$$

$$f_n = n \cdot f_{\text{rep}} + f_{\text{ceo}} \quad (2)$$

ここで n は0以上の整数、 f_{rep} はキャリアエンベロープ位同期レーザーの繰り返し周波数、 f_{ceo} はキャリアエンベロープオフセットである。実際に式(1)、(2)からレーザーの周波数を計算するためには、 f_{beat} の測定に加えて、次の2つのパラメーターを決定しなければならない。まず、式(1)に現れる f_{beat} の符号を決定する必要がある。次に、非線形干渉計から得られるビート信号が f_{ceo} または $f_{\text{rep}} - f_{\text{ceo}}$ のどちらであるかを知る必要がある。この2つのパラメーターは、被測定レーザーと光コムとの関係から決めることができる。

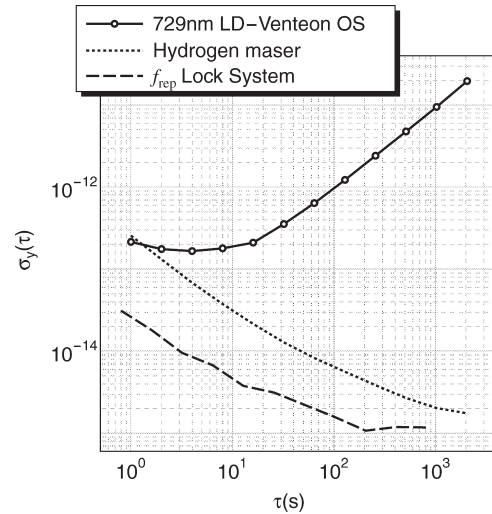


図2 729 nmレーザーと光コム周波数安定度測定結果。点線はリファレンスとして使用した水素メーザーの周波数安定度、破線は光コム繰り返し周波数ロック系の安定度。

まず f_{beat} の符号であるが、これは f_n と f_{cw} の大小関係により決まるため、わずかに光コム繰り返し周波数を変えて f_{beat} を測定することで決定できる。すなわち、繰り返し周波数を Δf_{rep} だけ変化させたとき、被測定レーザーとのビート周波数の変化量 Δf_{beat} には次式のような関係が成り立つ。

$$\frac{\Delta f_{\text{beat}}}{\Delta f_{\text{rep}}} \begin{cases} > 0, f_{\text{cw}} < f_n \\ < 0, f_{\text{cw}} > f_n \end{cases} \quad (3)$$

この関係から f_{beat} の符号を決定することができる。

f_{beat} の符号が決まったら、次に非線形干渉計から得られるビート信号が f_{ceo} と $f_{\text{rep}} - f_{\text{ceo}}$ のどちらであるかを調べるのが可能になる。便宜的に、非線形干渉計から得られるビート信号の周波数を F_{ceo} ($0 < F_{\text{ceo}} < f_{\text{rep}}/2$)と表すことにする。このとき、 f_{ceo} を ΔF_{ceo} だけ変化した場合の f_n の変化は次式で表される。

$$\Delta f_n = \begin{cases} \Delta F_{\text{ceo}}, F_{\text{ceo}} = f_{\text{ceo}} \\ -\Delta F_{\text{ceo}}, F_{\text{ceo}} = f_{\text{rep}} - f_{\text{ceo}} \end{cases} \quad (4)$$

式(4)の結果を利用し f_{beat} の符号を決定したときと同様に考えれば、 Δf_{beat} と ΔF_{ceo} との関係から、 F_{ceo} が f_{ceo} と $f_{\text{rep}} - f_{\text{ceo}}$ のどちらであるかを決定できる。以上をまとめると、 f_{cw} は次式で表されることがわかる。

$$f_{\text{cw}} = \begin{cases} n \cdot f_{\text{rep}} + F_{\text{ceo}} - f_{\text{beat}}, \Delta f_{\text{beat}}/\Delta f_{\text{rep}} > 0 \text{ かつ } \Delta f_{\text{beat}}/\Delta F_{\text{ceo}} > 0 \\ n \cdot f_{\text{rep}} - F_{\text{ceo}} + f_{\text{beat}}, \Delta f_{\text{beat}}/\Delta f_{\text{rep}} < 0 \text{ かつ } \Delta f_{\text{beat}}/\Delta F_{\text{ceo}} > 0 \\ n \cdot f_{\text{rep}} + F_{\text{ceo}} + f_{\text{beat}}, \Delta f_{\text{beat}}/\Delta f_{\text{rep}} < 0 \text{ かつ } \Delta f_{\text{beat}}/\Delta F_{\text{ceo}} < 0 \\ n \cdot f_{\text{rep}} - F_{\text{ceo}} - f_{\text{beat}}, \Delta f_{\text{beat}}/\Delta f_{\text{rep}} > 0 \text{ かつ } \Delta f_{\text{beat}}/\Delta F_{\text{ceo}} < 0 \end{cases} \quad (5)$$

以上の関係がわかれば、 n については、十分な分解能をもつ波長計で被測定レーザーの周波数を計測することによ

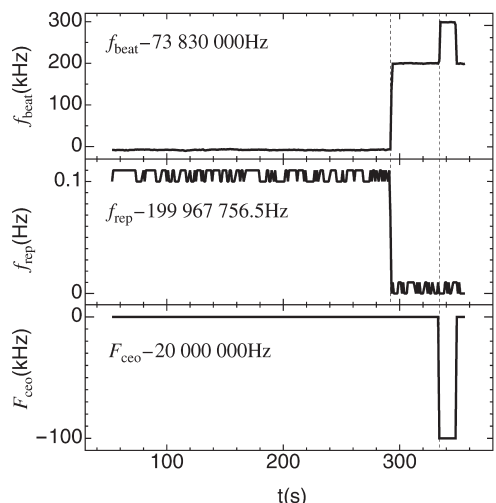


図3 729 nm レーザーと光コムとのビート周波数 (f_{beat}) と f_{rep} , F_{ceo} の測定結果. それぞれオフセットを引いた値をプロットしてある.

り計算できる. これらの結果と f_{beat} の測定値から, 被測定レーザーの絶対周波数を求めることができる.

なお, 求められた絶対周波数の値の確度は, 光コムとの周波数安定化に使用したマイクロ波リファレンスの確度に依存していることに注意する必要がある. 協定世界時 (UTC) を基準とした絶対周波数の値を得るためには, NICT のような標準機関が生成している時系や GPS time との周波数比較が必要になる. GPS time と UTC の時刻差は国際度量衡局から毎月 circular T として発行されている (http://www.bipm.org/jsp/en/kcdb_data.jsp).

絶対周波数計算の具体例として, 729 nm ECDL の絶対周波数計測を示す. 図3は周波数カウンターによる f_{beat} , f_{rep} , F_{ceo} の測定結果を示している. 横軸は測定時間である. 測定のゲート時間は 1 s, f_{rep} のデータにみられる離散的なノイズはカウンターの測定分解能によるものである.

図からわかるように, この測定では $\Delta f_{\text{beat}}/\Delta f_{\text{rep}} < 0$ かつ $\Delta f_{\text{beat}}/\Delta F_{\text{ceo}} < 0$ である. したがって, 式 (5) から 729 nm ECDL の周波数は $f_{\text{cw}} = n \cdot f_{\text{rep}} + F_{\text{ceo}} + f_{\text{beat}}$ となる. また, $f_{\text{rep}} = 199\,967\,756.5$ Hz, $F_{\text{ceo}} = 20\,000\,000$ Hz, $f_{\text{beat}} \sim 74$ MHz であることと波長計から求められた 729 nm ECDL の周波数が約 4.110416×10^{14} Hz であることから, n の値は 2 055 539 となることがわかった. 得られた結果が正しいことは, 別の光コムシステムを用いた測定で同じ f_{cw} が得られたことから確認できた. 光コムシステムが 1 台しかない場合は, 被測定レーザーの周波数安定度が十分よければ f_{rep} を大きく変化させた測定で同じ結果が得られるかどうか確認することによっても, 絶対周波数の計算結果の妥当性を確かめることが可能である.

文 献

- 1) T. Uden, R. Holzwalth and T. W. Hänsch: "Optical frequency metrology," *Nature*, **416** (2002) 233-237.
- 2) R. Santra, E. Arimondo, T. Ido, C. H. Greene and J. Ye: "High-accuracy optical clock via three-level coherence in neutral bosonic ^{88}Sr ," *Phys. Rev. Lett.*, **94** (2005) 173002.
- 3) K. Matsubara, K. Toyoda, Y. Li, S. Uetake, K. Hayasaka, S. Urabe and M. Hosokawa: "Study for a $^{43}\text{Ca}^+$ optical frequency standard," *Proc. Int. Conf. Precision Electromagnetic Measurements* (London, 2004) p. 430.
- 4) M. Kajita, K. Matsubara, Y. Li, K. Hayasaka and M. Hosokawa: "Prospect of optical frequency standard based on a $^{43}\text{Ca}^+$ ion," *Phys. Rev. A*, **72** (2005) 043404.
- 5) Y. Li, H. Ito, K. Matsubara, M. Kajita and M. Hosokawa: "A clock laser for the optical frequency standard of Ca^+ ion," *International Congress of Applied Psychology* (Athens, 2006) p. 238.
- 6) O. D. Mücke, R. Ell, A. Winter, J. W. Kim, J. R. Birge, L. Matos and F. X. Kärtner: "Self-referenced 200 MHz octave-spanning Ti:sapphire laser with 50 attosecond carrier-envelope phase jitter," *Opt. Express*, **13** (2005) 5163-5169.

(2006年9月11日受理)