

「光通信帯での光周波数標準とその応用」解説小特集号によせて

大苗 敦

産総研 計測標準研究部門 (〒305-8563 茨城県つくば市梅園1-1-1つくば中央第3)

Preface to the Topical Papers on Optical Frequency Standard and Its Applications at the Telecommunication Region

Atsushi ONAE

National Metrology Institute of Japan (NMIJ) / AIST, Tsukuba Centra 13, 1-1-1 Umezono, Tsukuba, Ibaraki 305-8563

(Received May 6, 2003)

1. はじめに - 光周波数を測るには -

つい最近まで、光の周波数(例えば500 THz)を正確に測定することは、マイクロ波(例えば100 GHz)などの場合と違い非常にむずかしいことだった。遠赤外、赤外領域で発振する多くのガスレーザーやクライストロンなどのマイクロ波源、それらの電源や制御装置、MIMダイオードと呼ばれるポイントコンタクトの光ミキサー、光ビートの周波数を測定しそれらを解析する周波数測定系などからなる「周波数チェイン」と呼ばれる、かなり大がかりな装置が必要であった。ところが、20世紀も終わろうとする1999年ごろから、ドイツと米国のグループで、モード同期超短パルスレーザーを用いた光周波数計測の提案がなされ、短期間のうちに極めて大きな技術革新が起こった<sup>1,2)</sup>。日本の計量研究所(現産総研)でもほぼ同時期にモード同期レーザーを利用した光周波数の計測技術の開発が行われ、20世紀中にこの新しい方法で光周波数計測ができたのはドイツ、米国、日本の3か国だけであった。(計量研/産総研での光周波数計測の様子については<sup>3)</sup>参照。)

モード同期レーザーからの超短パルス光は、光の周波数軸上で考えると、等しい間隔で並んだ多数のモードの位相がそろって連続的に光っている状態と考えられる。周波数軸上での非常に多くのモード(連続光)の重ね合わせにより、時間軸で非常に鋭いパルスとなっている。多くのモードがたっているこの状態を「櫛の歯」に見立てて「光周波数コム(Comb)、光コム」と呼ぶことがある。(Fig. 1)これは周波数軸上での「光の(周波数の)ものさし」とも考えられる。例えば、Fig. 1に示すように2つの安定化レーザーの周波数( $f_1, f_2$ )を考えてみる。2つの周波数の差は、安定化レーザーと超短パルスにより生じる2つのビート周波数と、ものさしの目にあたるモード間隔(=パルスの繰り返し周波数)を測定することで、Fig. 1中の式で表せるように

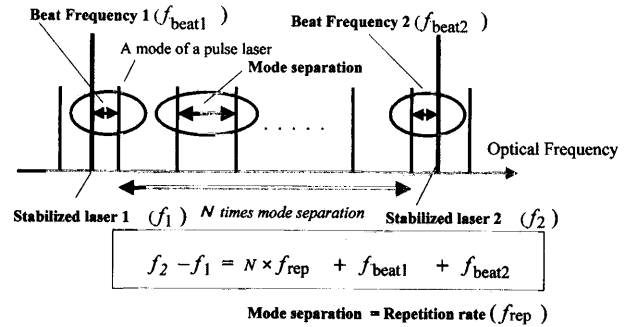


Fig. 1 Optical frequency - difference measurement using an optical frequency comb.

簡単に測定することができる。ただし、間にものさしの目がいくつあるか( $N$ )は、繰り返し周波数を変化させて、ビート周波数の変化を詳しく調べるか、事前に高精度の波長計などで見積もっておく必要がある。ここでもし、この光のものさしが充分広く、1オクターブ以上にわたって存在すれば、Fig. 1の2つのレーザーを基本波( $f$ )とその第2高調波( $2f$ )とすることができるので、2つのレーザーの光周波数「差」、 $2f - f = f$ 、すなわち基本波の光周波数そのものが直接測定できることになる。これが1オクターブ以上スペクトルの広がった光コムによる光周波数計測の簡単な原理である。

2. 光周波数コムの制御

モード同期レーザーのある1つのモード( $n$ 番目)の周波数は、ものさしの目にあたる繰り返し周波数 $f_{rep}$ と、このものさしを仮想的に周波数ゼロの方へ外挿したとき、分散の効果で現れるオフセット周波数 $f_0$ という2つのパラメータを使い、

$$f(n) = n \times f_{rep} + f_0 \quad (1)$$

と表すことができる。この式はすでに極めて高い精度で成り立つことが知られている。繰り返し周波数やオフセット周波数は高々～1 GHz程度の周波数であるので、 $n$ は50万程度の数となる。これは、モード同期レーザーがマイクロ波(1 GHz)と光(500 THz)を結びつける次数50万の周波数マルチプライヤであることを示す。

以下、多くの実験が行われているチタンサファイアレーザーの場合を例にして、この2つのパラメータを実際の装置でどのように制御するかについて説明する。繰り返し周波数 $f_{rep}$ は、レーザーからの出力を高速の光検出器で受ければ簡単に測定でき、レーザー共振器長を、例えば圧電素子(PZT)などで調整することで制御できる。次に、オフセット周波数 $f_0$ を測定するためには、チタンサファイアレーザーからの超短パルスをフォトニック・クリスタル・ファイバ(PCF)へ導入しスペクトルが1オクターブ以上になるようにする必要がある。PCFは、ファイバのコアのまわりに大きな空気層があり閉じこめ効果が大きく、またファイバの断面の形状をデザインすることで構造分散によりゼロ分散波長を制御できる特殊なファイバである。その中でおこる強い非線形性(自己位相変調など)を利用してスペクトルを1オクターブ以上広げることができる。オクターブ以上に広がったスペクトルの低周波側から光コム成分を取り出し非線形結晶を用いて2倍波の光コムを発生させると、それは2倍のオフセット周波数の成分を持つ。そこで、もとの光コムの高周波側成分と重ね合わせて光ビート信号を観測すると、2つのコムの周波数差はFig. 2に示すようにオフセット周波数 $f_0$ になるのでビート信号として検出することができる。このオフセット周波数はレーザー共振器中の分散の状態を強く反映するので、超短パルスレーザーの利得媒質であるチタンサファイア結晶を光励起している励起レーザーの強度を光音響(AOM)素子などで調整することで制御できる。

これで、繰り返し周波数 $f_{rep}$ 、オフセット周波数 $f_0$ についてそれぞれ検出と制御ができるようになったので、これらをマイクロ波のシンセサイザを参照信号として周波数、位相を安定化することができる。式(1)の関係から、モード同期レーザーのすべてのモードについて光周波数が決められることになる。このようにして光コムの各

モードの光周波数を決定する方法を「自己参照法」と呼ぶ。値付けされたこの「光のものさし」を使って光周波数計測を行うことができる。任意の安定化レーザーの光周波数は、安定化レーザーのビームと超短パルスレーザーのビームを空間的に注意深く重ねて光検出器で受光することで、この光コムの周波数軸で近傍にあるある成分とのビート信号が観測され、そのビートの周波数測定から極めて高精度に求めることができる。

### 3. 光周波数計測がもたらすもの

光周波数計測分野におけるこの大きな技術革新は、例えば水素原子の $1s-2s$ 遷移の超高精度分光などをおして、リュドベグ定数の決定など基礎科学の進展に大きく貢献している。また度量衡(メトロロジー)の世界にとっては、長さの単位「1 m」をSI単位系に忠実に実現するために必要な安定化レーザー群(よう素分子に安定化したHe-Neレーザーなど)の光周波数の値付けがより現実的なものになったという意味がある。実際、2001年の秋にパリで開かれた、メートル条約が承認する「安定化レーザーのリスト」作成のために開かれたワーキング・グループでは、この新しい光周波数計測手段の出現による多くの光周波数計測の成果が議論された。産総研からは、よう素安定化He-Neレーザー(波長633 nm)、よう素安定化YAGレーザー(532 nm)などについての周波数測定結果が報告され、安定化レーザーの周波数値の決定に大きく貢献することができた<sup>4)</sup>。一方、超短パルスの周波数軸上での制御が、時間軸上での超短パルスの光電場の位相を制御するために使えることから、フェムト秒領域での分光技術にも、最近幅広く取り入れられてきている。「超短」パルスを使うことで「超安定」であるレーザーの周波数を測るという、一瞬トリッキーな響きの背後には、フーリエ変換で結ばれた、超短パルスレーザーの物理とレーザーの安定化技術の分野での進展があり、それぞれ一見別のものとして発展していた両領域が、「究極の制御」をするためには実は互いに非常に関連深いものであると理解されるようになった経緯がある。

式(1)は極めて簡単な形をしているため、この技術が開発されてすぐに、この装置を逆に働かせて光周波数領域での周波数標準から、マイクロ波の周波数標準を作る技術が提案された。「ダウンコンバージョン」と呼ばれるこの技術は、セシウム原子時計に代わる次世代の周波数標準を実現するために必須の技術として、日本も含め多くの国立標準研究所で研究・開発が精力的に進められている。光領域での周波数標準(optical clock)の候補としては、水銀イオン、イッテリビウムイオンなどイオントラップ中のシングルイオンの他、カルシウムやストロンチウムなどのレーザー冷却された中性原子などを利用するものが挙げられている(文献4)の他の特集号参照)。

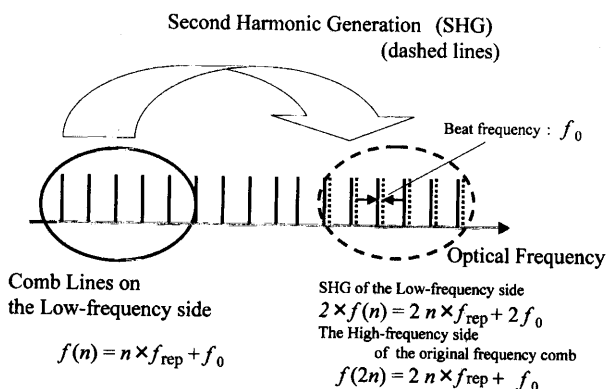


Fig. 2 Self-referencing technique (to determine an offset frequency  $f_0$ ).

#### 4. 通信帯への応用 —波長計測から光周波数計測へ—

ここで紹介した新しい光周波数計測技術は、干渉計による従来の波長測定技術に置き換わるものである。市販の高精度な波長計はおよそ6桁の精度を持つが、最近の高密度波長多重通信(DWDM)システムが要求する光部品の製造現場での評価などにおいて、近い将来6桁の精度では不十分な場合もあり得るという。基礎科学、度量衡、精密長さ計測の分野について、光周波数(波長)の精度管理に厳しい通信帯の分野も、この技術革新の影響を大きく受けるものと思われる。さらに通信帯においては、モード同期ファイバレーザーなど非常に洗練された技術に支えられた高品位の光コムがすでに数多くある。通常、通信帯の光周波数コムのスペクトルは、近赤外領域とは違い1オクターブまで届いていないため、前述のような自己参照法は使えないが、基準として例えばアセチレン分子に安定化された標準器と組み合わせることにより、被測定対象と基準レーザーの差周波数測定(Fig. 1参照)により、高精度な光周波数測定が可能である。さらに、通信帯の光は石英ファイバ中を極めて低損失で伝搬するために、光周波数の基準や、通信帯の光周波数コムそのものを、光ファイバを使って遠隔地へ伝送し、ファイバアンプ、非線形効果や光フィルタを併用することで、長さの基準となる可視光(3倍波)を供給したり、通信帯の基準、高精度なミリ波やマイクロ波を送り届けることができそうである。産総研と東北大では、「光ファイバによる物理量の伝送」についての技術開発のプロジェクトが始まっている。Fig. 3にその概略の一部を示す。

本特集では、光コムを利用した光周波数標準・計測・制御技術を波長1.5 μmの通信帯へ応用した最新の研究が

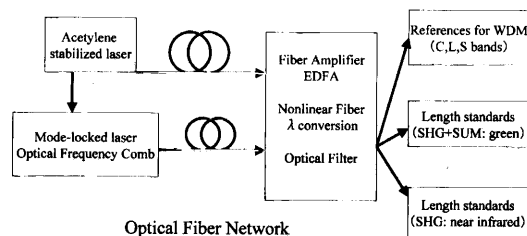


Fig. 3 Delivery of optical frequency (wavelength, length) standard using an optical fiber.

ら、アセチレン安定化レーザー、電気光学変調器ベースの光周波数コム、半導体モード同期レーザーと非線形ファイバの組み合わせによる光周波数コム(SCコム)、モード同期ファイバレーザーからの超高安定なクロックの発生と伝送、ファイバによるミリ波の伝送の実現を目指すフォトニックローカル技術について、それぞれご専門の先生方に最新の状況、成果について解説をお願いした。信頼度が高くバリエーションに富む通信帯のフォトニクス技術(日本のお家芸)と光コムを使った新しい光周波数計測技術の融合により、今後もこの分野では数多くの面白い研究が進展するものと思われる。

#### 参考文献

- 1) Th Udem, J. Reichert, R. Holzwarth, and T. W. Haensch: Phys. Rev. Lett. **82** (1999)3568. R. Holzwarth, Th. Udem, T. W. Haensch, J. C. Knight, W. J. Wadsworth, and P. St. J. Russell: Phys. Rev. Lett. **85** (2000)2264.
- 2) S. A. Diddams, D. J. Jones, J. Ye, S. T. Cundiff, J. L. Hall, J. K. Ranka, R. S. Windeler, R. Holzwarth, Th. Udem, and T. W. Haensch: Phys. Rev. Lett. **84** (2000)5102. D. J. Jones, S. A. Diddams, J. K. Ranka, A. Stentz, R. S. Windeler, J. L. Hall, and S. T. Cundiff: Science **288** (2000)635.
- 3) 杉山 和彦: 日本物理学会誌 **58** (2003) 175.
- 4) 洪 鋒雷他: 光学 **31** (2002) 856.