

通信帯光周波数の校正法とその不確かさ

大 苗 敦*

(平成18年6月6日受理)

Calibration method of “Optical Frequency in Telecom Region” and its uncertainty

Atsushi ONAE

1. はじめに

通信容量の増加に伴い波長分割多重 (WDM) 通信方式などが導入され光通信帯における波長管理のニーズが大きくなっている。今まで、光通信帯での高精度な波長測定は、波長633 nmの可視領域の波長基準である、よう素安定化He-Ne レーザに基づく干渉計測により行われてきた。ところが、近年各種の光周波数コム技術が確立され、波長比較ではなく光ビート計測などによる光周波数測定が行われるようになった。光周波数測定では回折や屈折率の効果による不確かさの原因を排除できるのでより高精度な測定が可能になる。また、アセチレン分子の振動回転遷移線に周波数安定化された半導体レーザ標準器の研究・開発が進み、メートル条約の長さ諮問委員会において、1 mを実現する安定化レーザのリスト (CIPM勧告値) の中に通信帯の標準としてアセチレン安定化レーザが採用されるに至った (2001年)。

一方、通信帯の光部品メーカやシステム設計者から、一部の高品位の場合に限られるものの、通常の波長計の不確かさ (6桁程度) を超えた標準の必要性が聞かれるようになった。こういった技術状況、産業界ニーズを受けて、産業技術総合研究所では2004年度末からアセチレン安定化レーザを基準とし光周波数コム技術を利用した、今までの波長計とはまったく異なる方式による通信帯Cバンド (1530 nm～1565 nm) の安定化レーザの光周波数 (波長) 校正の依頼試験を開始した。不確かさは通常の波長計の1000倍向上された (9桁)。より正確に値付けされた安定化レーザを利用した事業所内校正などで、製品管理に使用する波長計をより高精度に活用できるように

なる。本報告では依頼試験の校正方法及びその不確かさについて述べる。

2. 光周波数標準の体系 (トレーサビリティ)

長さの単位である「メートル」は、「光が真空中を1/299782458秒間に進む行程の長さ」として定義されている。この定義に最も忠実に長さ計測を行うためには、まず、干渉計などの基準として用いる波長安定化レーザの光周波数を、Cs原子周波数標準をもとに測定して光周波数を求め、さらに定義となった光の速さを求められた光周波数で割り真空波長を求め、使用する条件に合わせて屈折率の補正をして現実の長さ計測を行わねばならない。光周波数コム技術の出現前は波長安定化レーザの光周波数を絶対測定することがなかなか手間のかかることであったので、周波数安定化レーザの光周波数値が、その使用条件とともに「1 mを実現するための安定化レーザのリスト (CIPM勧告値)」の中に掲載され長さの2次標準としてそのまま使用することが承認されている。

この安定化レーザのリストは研究の進展や技術の進歩により時折改訂されているが、2001年に行われた改定の際、光通信帯の波長標準としてアセチレン安定化レーザが承認された¹⁾。「通信帯光周波数」の依頼試験では、対象となる校正器物は波長安定化レーザであり、測定される量は光周波数 (真空波長) である。トレーサビリティの根拠は、このリスト (CIPMの勧告値) の中のアセチレン安定化レーザ (本校正サービスのシステムではアセチレン安定化レーザ標準器と呼ぶ) である。現在、この勧告値は光周波数コムによる光周波数測定をベースに決められているので、そのトレーサビリティは最終的にはCs原子の周波数標準にさかのぼることができる。メートルの定義や光周波数コム技術の発展により、近年時間・周波数の標準と長さ標準は技術的に融合した形になってき

* 計測標準研究部門 時間周波数科

本論文は当所における校正証明書等の不確かさ算出における一般的な考え方を記述したものであり、個別の校正証明書等に記載される不確かさ評価とは必ずしも一致しているわけではありません。

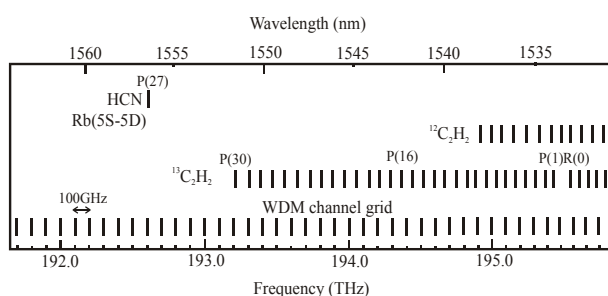


図1 ITU-Tの 100 GHz グリッド とアセチレンの吸収線

ていることをふまえて、本校正業務の種類を、既存の「長さ」の中の「レーザ波長」としてではなく、「周波数」の中の新設の種類「光周波数」とした。これは光周波数測定による高精度な校正器物の値付けの実態を明確にする意味もある。

図1にアセチレン安定化レーザのいくつかの振動回転線の光周波数と、ITU-Tで承認されている波長分割多重(WDM) 通信方式のチャンネルとすべき100 GHzきざみのグリッドの配置の様子を示す。これからも通信帯の波長基準としてアセチレン安定化レーザが非常に有用であることがわかる。

3. 校正の方法

(校正の原理) アセチレン安定化レーザ標準器は、アセチレン分子が特定の周波数の光を吸収する性質を利用してレーザの周波数を安定化したものである。校正は、基本的には下の図2に示したように、アセチレン安定化レーザ標準器を基準として光周波数コムで通信帯Cバンドの範囲に多数の側帯波を発生させ、その中の適当な側帯波を基準光として、校正器物との周波数差を測定することにより実施する。

アセチレン安定化レーザの周波数は、アセチレン分子

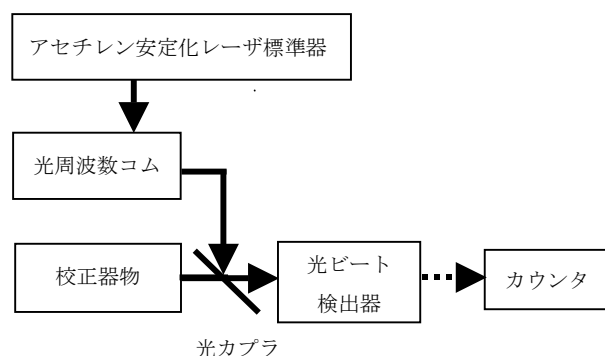


図2 アセチレン安定化レーザ標準器を用いた校正のブロック図

の量子力学的性質により決定されるので、原理的な差は存在しない。しかしアセチレン分子による光の吸収を検出し、それをもとにレーザ周波数の安定化を行う過程において、その機構の不完全さに起因するレーザ周波数の差が発生する。産業技術総合研究所のアセチレン安定化レーザの周波数測定値は、2001年国際度量衡委員会(CIPM) 長さ諮問委員会(CCCL)において、中川ら(当時東工大)の報告した値とともに、アセチレン安定化レーザの絶対周波数値を決定する値として採用されている¹⁾²⁾。この標準器と校正器物の周波数差を光周波数コムにより測定し、校正器物である安定化レーザの光周波数を推定し、CIPM勧告値の不確かさを含む測定の不確かさとともに表す。

(校正の手順) 図3に校正システムを示す。校正作業では同等な2台のアセチレン安定化レーザ標準器を使用する。カウンタや光周波数コムの外部参照信号端子へは、当所の時間・周波数標準の基準となっている時系であるUTC (NMIJ) にトレーサブルな基準周波数が接続されている。まず、2台のアセチレン安定化レーザ標準器の出力を波長計に入れてその波長を測定し、波長計の仕様にある不確かさ(確度)の範囲でCIPMの勧告値と一致しているか確認する。これは、波長計が正常動作していること、およびアセチレン安定化レーザ標準器がP(16)などの回転線に正しく安定化されていることの確認である。

次に、2つのアセチレン安定化レーザ標準器のうち一方を、参照標準器としてアセチレン分子($^{13}\text{C}_2\text{H}_2$)の $\nu_1 + \nu_3$ 振動バンドのP(16)回転線に安定化させ、他方を模擬校正器物に見立ててP(16)以外の回転線に安定化させる。周波数測定を行い、模擬校正器物の安定化レーザの周波数がCIPM勧告値の不確かさ(100 kHz)以内になっていることを確認する。これは、2台のアセチレン安定化レーザ標準器が正しく動作していることを含めレ

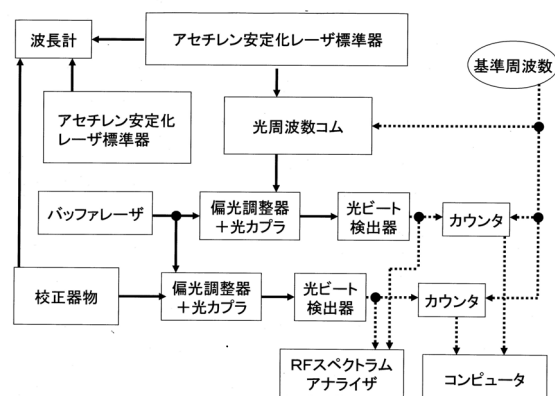


図3 校正システムの全体図

ーザ周波数校正装置の全体が正しく動作していることの確認になる。

その後、受け入れた校正器物の波長（光周波数）を波長計で測定し、光周波数コムのどの次数 N （光周波数コムの中心からの周波数の高低にしたがい±も含む形で示す）の側帯波とのビートを観測するかを決定する。光周波数コムの間隔は6.25 GHz、波長計の不確かさ（確度）は500 MHz程度であるのでこの操作で確実に次数 N の決定ができる。

校正器物の出力（光ファイバ出力）を、偏光調整器をとおりて光カプラの入力端子の1つへ接続する。校正器物の仕様（安定化光周波数、変調幅、出力など）によっては、充分なビート信号のS/Nを確保するなどのために、光周波数コムのあとにバッファレーザを介在させる必要がある。それぞれの光ビート検出器で観測される2つのビート信号（光周波数コムとバッファレーザの光ビート信号、バッファレーザと校正器物の光ビート信号）を順次RFスペクトラムアナライザに入れて、それぞれのビート信号を観測しながら、偏光調整器でバッファレーザ、校正器物の偏光方向の最適化を行う。ビート信号のS/Nがともに、300 kHzのバンド幅で30 dB以上、信号レベルが -5 dBm以上 +5 dBm以下であることをRFスペクトラムアナライザで確認する。

校正器物の光周波数 f (DUT) は、アセチレン安定化レーザ標準器の光周波数 f (C_2H_2)、光周波数コムの変調周波数 (f (MW) = 6.25 GHz)、波長計測定で得られた光周波数コムの側帯波の次数 N 、光周波数コムとバッファレーザの光ビート周波数 f (comb-buffer)、バッファレーザと校正器物の光ビート周波数 f (buffer-DUT) を使い次のように表される。

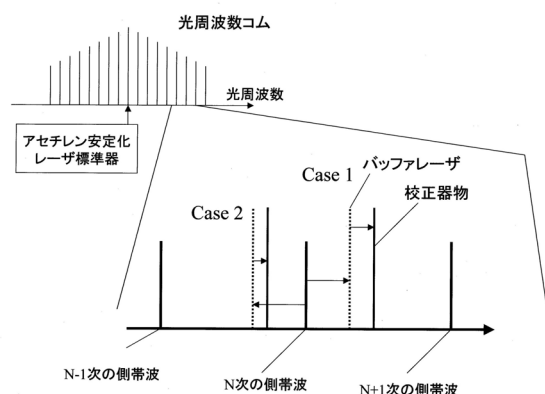


図4 式(1)に現れる周波数の値の関係を説明。

例えば、Case 1 の場合2つの複号はともに+をとる。

Case 2 の場合は、 $\dots -f(\text{comb-buffer}) + f(\text{buffer-DUT})$ となる。

$$f(\text{DUT}) = f(\text{C2H2}) + N \times f(\text{MW}) \pm f(\text{comb-buffer}) \pm f(\text{buffer-DUT}) \quad (1)$$

(1)式の複号は図4で示すように光周波数コムの N 次の側帯波、バッファレーザ、校正器物それぞれの周波数の位置関係により決まるビート信号の向きで決定する。ビート信号の向きは、バッファレーザの周波数をわずかに変化させたとき、それぞれのビート信号の周波数が増減するのを観測することで知ることができる。光周波数コムとバッファレーザのビート周波数 f (comb-buffer)、バッファレーザと校正器物のビート周波数 f (buffer-DUT) を外部トリガで同期された2つのカウンタで10秒のゲート時間で100点測定する。2つのカウンタからデータの取り込みを行い上記の式(1)の計算を行う。参照標準器となるアセチレン安定化レーザ標準器は、CIPM勧告値に挙げられているP(16)回転線に安定化させているが、それと同等な他の回転線を基準として使用することもできる。

4. 校正の不確かさ

4.1 不確かさの要因

通信帯光周波数校正における不確かさの要因は表1に示した4種類に分類される。

(1) アセチレン安定化レーザの不確かさ u_1

アセチレン安定化レーザの周波数不確かさ ($k=1$) は、100 kHzであることが国際的に合意されている。産業技術総合研究所のアセチレン安定化レーザの周波数測定値は、2001年国際度量衡委員会 (CIPM) 長さ諮問委員会 (CCL) において、中川ら (当時東工大) の報告した値とともに、アセチレン安定化レーザの絶対周波数値を決定する値として採用されている。このときアセチレン安定化レーザの絶対周波数値 (CIPM勧告値) を決めるに当たって、この2つの報告および通信業界のニーズを考慮に入れて、勧告値の不確かさ ($k=1$) を100 kHzと定めた。産業技術総合研究所のアセチレン安定化レーザに関しては、その後UTC (NMIJ) にトレーサブルな光周波数コムによる絶

表1 不確かさの要因

要因分類	タイプ (註)
アセチレン安定化レーザの不確かさ	B
光周波数コムの不確かさ	B
周波数カウンタの不確かさ	B
ビート周波数測定結果の不確かさ	A

(註) Aタイプの不確かさ：一連の測定値の統計的解析による不確かさ。

Bタイプの不確かさ：一連の測定値の統計的解析以外の手段による不確かさ。

対周波数測定が行われて、その正しさが再確認されている^{3),4)}。また、海外の他の標準研でも同様な光周波数コムによる測定がなされており^{5),6)}、NMIJも含めた3カ国の測定値がCIPM勧告値に一致していることを確かめている。

以上により、アセチレン安定化レーザ標準器自体の持つ不確かさを、 $u_1=100$ kHzとする。

(2) 光周波数コムの不確かさ

光周波数コムは、入力光をマイクロ波周波数で駆動された電気光学変調器で変調をかけ約5 THzのスペクトルの幅の中に多数の側帯波を発生させる装置で、側帯波の周波数間隔は基準周波数外部入力端子から入力される基準周波数により決定される⁷⁾。この基準周波数にはUTC (NMIJ) にトレーサブルな信号を接続する。原子時計の信号の相対不確かさは 10^{-12} 以下であるので、最終的に光通信帯での光周波数測定に影響を与えるのは、 $10^{-12} \times 5 \text{ THz} = 5 \text{ Hz}$ となりアセチレン安定化レーザの周波数不確かさ (100 kHz) の0.005 %以下となり、その影響は無視できる。

(3) 周波数カウンタの不確かさ

周波数カウンタの基準周波数外部入力端子にもUTC (NMIJ) にトレーサブルな信号を接続する。原子時計の信号の相対不確かさは 10^{-12} 以下で、カウンタ内部での不確かさの原因と併せて、カウンタの不確かさは例えばビート周波数 (約100 MHz) に対して 0.013 Hz以下と見積もられる*。従って、カウンタの不確かさは、アセチレン安定化レーザの周波数不確かさ (100 kHz) に比べ充分小さく、その影響は無視できる。

この他に、周波数カウンタに入力するビートの信号の状態が不適切なために発生する不確かさが存在する。校正手順で示した光ビート信号のS/Nと信号強度の条件「300 kHzのバンド幅で30 dB以上、信号レベルが -5 dBm以上 + 5 dBm以下であること」がRFスペクトラムアナライザで確認できれば、この種類の周波数カウンタの不確かさもアセチレン安定化レーザの周波数不確かさ (100 kHz) に比べ充分小さく無視できることが確認されている。

(4) ビート周波数測定結果の不確かさ u_2

校正器物の数時間～数日にわたる周波数ドリフトなどの影響で、ビート周波数測定結果に不確かさ u_2 が現れると予想される。

4.2 測定の不確かさの算出

要因別の不確かさから見積もられた通信帯光周波数校正における標準不確かさは次の通りである。

$$\text{合成標準不確かさ} : u_c = [(100 \text{ kHz})^2 + u_2^2]^{1/2}$$

$$\text{拡張不確かさ} : U = k u_c \quad (k = 2)$$

(この不確かさ U は、正規分布にもとづく包含係数 $k = 2$ から決定された拡張不確かさであり、約95 %の信頼の水準をもつと推定される。)

5. おわりに

産業技術総合研究所で2004年度から開始された、通信帯Cバンドの波長安定化レーザの波長校正サービス「通信帯光周波数」についてその概要を説明した。光周波数コム技術の出現とその後の研究の進展で安定化レーザの光周波数を時間・周波数標準を基準に正確に測定することが原理的に簡単明瞭に行えるようになった。しかし、世界的に見てこのように高い精度で通信帯の波長校正のサービスをしている標準研はまだない。この標準供給が、日本の通信帯関連の部品メーカーや計測器メーカーにとって新しい技術に対応した製品を開発・販売していくときの有利な材料 (競争力) になれば幸いである。今のところCバンドに限っている校正器物の安定化波長の範囲の拡大 (LバンドやSバンド) についても技術的な検討を行っているところである。また、モード同期ファイバレーザ光コムの研究開発が急ピッチで進んでおりこのような新しい技術を取り入れたサービスの高度化、簡便化も視野に入れて研究・業務を進めているところである。

参考文献

- 1) T. J. Quinn: Practical realization of the definition of the meter (2001), Metrologia **40** (2003) 103-133.
- 2) A. Onae et al.: Optical Frequency Standard at 1.5 μ m Based on Doppler-Free Acetylene Absorption, Proceedings of the 6th Symposium Frequency Standards and Metrology 2001, World Scientific (2002) 445-452.
- 3) F. -L. Hong et al.: Absolute frequency measurement of an acetylene-stabilized laser at 1542 nm, Opt. Lett., **28** (2003) 2324-2326.
- 4) J. Jiang et al.: Frequency measurement of acetylene-stabilized lasers using a femtosecond optical comb without carrier-envelope offset frequency control, Opt.

* Agilent 社 HP5313A/132A ユニバーサルカウンタ 操作ガイド

- Express, 13 (2005) 1958-1965.
- 5) C. S. Edwards et al.: Absolute frequency measurement of a 1.5 μ m acetylene standard by use of combined frequency chain and femtosecond comb, Opt. Lett., 29 (2004) 566-568.
- 6) A. Czajkowski et al.: Absolute frequency measurement of acetylene transitions in the region of 1540 nm, Appl. Phys. B, 79 (2004) 45-50.
- 7) T. Udem et al.: Accuracy of optical frequency comb generators and optical frequency interval divider chains, Opt. Lett., 23 (1998) 1387-1389.