光通信帯の光周波数標準の現状

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)

Optical Frequency Standards at the Telecommunication Region

Atsushi ONAE

National Metrology Institute of Japan (NMIJ)/AIST, Tsukuba central 3, 1-1-1 Umezono, Tsukuba, Ibaraki 305-8563

(Received October 23, 2006)

We have developed accurate optical frequency standards based on acetylene absorption lines in the telecom region (C-band) and have measured their optical frequencies using several kinds of optical frequency combs. Based on these results, in 2004 we started optical frequency (wavelength) calibration service for stabilized C-band lasers at National Metrology Institute of Japan (NMIJ). We also have the preliminary results of our experiments in transferring wavelength standards via optical fiber networks.

Key Words: Optical frequency standard, Optical frequency measurement, Optical frequency comb, Acetylene stabilized laser, Telecom wavelength calibration service

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波長1.55 μm の光通信帯における波長管理、光周波数管理のニーズが年々大きくなってきている¹⁾。測定現場の空気の屈折率の影響を受ける精密長さ計測の場合と違い、ファイバ中の光に限定される通信帯分野では、「波長」より不確かさの小さい形で議論できる「光周波数」が適している。実際、WDMのチャンネルの枠組みを規定するITU-Tのグリッド²⁾も周波数ベースで定義されている。

以前、光通信帯での高精度な波長測定は、波長633 nmの可視領域の波長標準である、ヨウ素安定化He-Ne レーザーに基づく大型干渉計により行われてきた³⁾。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、波長測定の場合に問題になる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、より不確かさの小さい測定が可能になる。また、アセチレン分子の振動回転遷移の飽和吸収をベースにした安定化レーザー標準器の研究・開発が進んだことを受けて、メートル条約の枠組みの中の組織であり、波長標準の設定に責任をもつ長さ諮問委員会において、1 mを実現する安定化レーザーのリスト(CIPM勧告値)の中に、2001年以降、通信帯の標準としてアセチレン安定化レーザーが採用されるに至った⁴⁾。一方、通信帯の光部品

メーカーやシステム設計者からは、一部の高品位の場合に限られるものの、市販の波長計の不確かさ(5~6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と産業界のニーズを受けて、産総研では2004年度末から、アセチレン安定化レーザーを基準とし、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)の安定化レーザーの光周波数(波長)校正の依頼試験を開始した¹⁾。不確かさは通常の波長計と比較し1000倍向上され相対値で 10^{-9} となった。このサービスにより、例えばより正確に値付けされた安定化レーザーを参照標準として事業所内校正を行うことで、製品管理などに使用する製造現場の波長計などをより有効に活用できるようになる。

2003年のレーザー研究31巻7号では「光通信帯での光周波数標準とその応用」として特集が組まれ、アセチレン安定化レーザー標準器については中川氏の解説がある。これは、波長同調性が良く、1 MHz程度の狭い発振線幅の外部共振器型半導体レーザーを光源とし、数mW程度のレーザー光強度を光共振器の利用で100倍程度増強し、この共振器の内部に配置されたアセチレン分子セルの飽和吸収信号を観測する分光計である。得られる飽和吸収信号(1 MHz程度の線幅)を利用して電氣的なサーボにより外部共振器レーザーの周波数を安定化させることで標準器としている。安定度がよく不確かさの極めて小さいこの標準器の開発経緯はその解説を参照して頂くこととし、本解説ではその後の急速な光コム技術の進展、各種の光コム

^{†1} <http://unit.aist.go.jp/genadm/legal/kitei/iraishiken.html#1>

によりアセチレン安定化レーザーの周波数計測が行われた様子、その結果を受けて国際標準としてのアセチレン安定化レーザーの不確かさが改善されていった経緯、そのような展開を受けて産総研において開始された通信帯における光周波数(波長)の標準供給の概要などについて紹介する。

2. アセチレン安定化レーザーの周波数計測

モード同期Ti:Sapphireレーザーからの超短光パルスは、光周波数軸上で考えると等間隔に並んだ多数のモードが同じ位相で発振しており、その姿が櫛の歯に似ていることから光周波数コム(comb)と呼ばれる。この光コムの n 番目のモードの光周波数 $f(n)$ は、

$$f(n) = n \times f(\text{繰り返し}) + f(\text{オフセット}) \quad (1)$$

と表すことができ、パルスの繰り返し周波数、 $f(\text{繰り返し})$ とオフセット周波数、 $f(\text{オフセット})$ の2つのパラメータを制御することで光周波数の“ものさし”として利用できる。(詳しくは本特集、杉山氏の解説を参照)。この光コムのスペクトル(ものさし)は、波長範囲でおよそ500 nm から1100 nmの広い範囲をカバーするものの、残念ながら通信帯には届いていない。そこでアセチレン安定化レーザーの光周波数計測を行うためには工夫が必要であり、いくつかの方法がある。まず第1はアセチレン安定化レーザーの光を増幅し、非線形光学結晶を使いSHG光を発生させ、2倍の周波数(半分の波長)の光をこの光コムで測定する方法である。

Fig. 1は産総研で行われたアセチレン安定化レーザーの周波数計測の実験装置を示す⁵⁾。モード同期Ti:Sapphireレーザーは、繰り返し周波数とオフセット周波数が制御され、光周波数の絶対値を与える光の“ものさし”を実現している。周波数を制御したり計測したりする場合のシンセサイザや周波数カウンターはすべて産総研の原子時計(水素メーザー)からの参照信号を外部基準として使用している。“ものさしの目”に対応するパルスの繰り返し周波数(周波数軸でのモード間隔)は792 MHzである。一方、アセチレン安定化レーザーからの出力(波長1542 nmの通信帯)はエルビウム添加ファイバ増幅器(EDFA)により200 mWまで増幅され、リチウムナイオベート分極反転結晶(PPLN)により135 μ WのSHG光(波長 771 nm)が発生させられる。この光は分岐比50% : 50%のファイバカプラー

Fig. 1 Schematic diagram of the experimental setup.

により光コムと合波される。安定化レーザーのSHG光約20 μ Wは光コムの1つのモード成分(約35 nW)と高速光検出器(APD)に入射され光ビート信号が検出される。この測定により産総研のアセチレン安定化レーザー(アイソトープのアセチレン $^{13}\text{C}_2\text{H}_2$, $v_1 + v_3$ 振動モード, P(16)回転線)の光周波数の値は、

$$f = 194\,369\,569\,383.6 \text{ (1.3) kHz}$$

と求まった。ここで()で囲まれた最後の数字1.3 kHzはアセチレン安定化レーザーの再現性で決まる測定の不確かさである。光コムも含めて光周波数計測の不確かさは十分に小さく無視できる。Fig. 2は以前の測定も含め、今回の測定結果をまとめたものである。1996年の測定⁶⁾では、まだ光周波数測定の不確かさが大きな割合を占めていた。2001年の測定⁷⁾では、近赤外領域(波長778 nm)の仲介標準器が利用されたが、その周波数計測は光コムを利用したもので不確かさは十分に小さかったが、仲介標準器とアセチレン安定化レーザーの再現性が不確かさを決めていた。(31巻7号, 433ページ)今回の測定はゲート時間1秒の周波数カウンターで行われたが、得られた時系列データからはこの安定化レーザーの安定度の評価も行える。ゲート時間 τ が1秒から1000秒までの間で、安定度の目安となるアラン偏差 $\sigma_y(\tau)$ は、

$$\sigma_y(\tau) = 1.2 \times 10^{-11} / \tau^{1/2}$$

と表せることが明らかになった。1000秒で 4×10^{-13} 、約200 THzの光周波数に対して80 Hz程度の安定度となる。

産総研のこの測定のあと、英国とカナダの標準研(National Physical Laboratory(NPL)とNational Research Council(NRC))からも光コムを使って、アセチレンの飽和吸収に安定化したレーザーの周波数測定結果が発表されたが^{8,9)}、3者はお互いの測定不確かさ(安定化レーザーの再現性)の範囲でよく一致していた。これを受けて、2003年、パリの国際度量衡局で行われた長さ諮問委員会傘下の安定化レーザーのリストを検討する作業部会において、アセチレン安定化レーザーの不確かさとして10 kHzが採択された⁴⁾。2001年の同様の会議でアセチレン安定化レーザーが初めてこのリストに承認されたときの不確かさが0.1 MHzであったことを思い出すと、たった2年間で10倍向上したことになる。その後、光コム技術を利用し

Fig. 2 Absolute frequency and reproducibility of the acetylene stabilized laser.

たアセチレン安定化レーザーの特性、再現性の研究が進み、最新のリストを作成した2005年の同じ会議では、アセチレン安定化レーザーについて、方式・レーザー出力・アセチレン封入圧力・信号を得るためレーザー周波数にかける変調の大きさなどに関して所定の条件を満足すれば、再現性による不確かさは5 kHzとできることが承認された。また、この会議では、アセチレンのP(16)回転線以外の振動回転遷移についてもほぼ同様の不確かさで周波数標準として使用できることが確認され承認されている。

産総研ではこのほかにも通信帯の光周波数計測の実験を行ってきた。第2の工夫の方法は、モード同期Ti:Sapphirレーザーからの光コムが、スペクトルとして500 nm (600 THz) から1100 nm (270 THz) の広い範囲をカバーし、その帯域の中に通信帯のキャリアの光周波数約 200 THzを含んでしまっていることを利用するものだ。非線形光学結晶を用いて光コムの800 nm (375 THz)の成分とアセチレン安定化レーザー(195 THz)との和周波数光(SFG: 570 THz)を発生させ、もとの光コムの527 nm (570 THz)の成分と干渉させることで光ビート信号を検出し、アセチレン安定化レーザーの周波数を測定するものである。2つの光コムの差をとることになるので、式(1)の光コムの f (オフセット)がキャンセルされ、その制御が必要ないこの方式は長時間の測定にも適しており、アセチレン安定化レーザーの10,000秒で安定度を初めて評価できた。詳細は文献を参考にされたい¹⁰⁾。この他の方法として、光の“ものさし”自身を通信帯の領域で作れば測定システムはいっそう簡単になる。これが第3の方法である。高非線形ファイバを利用して通信帯で発振するモード同期ファイバレーザーをベースにした広帯域光コムが開発され、波長1000 nm以下 から2000 nm以上にわたる1オクターブ以上のスペクトル範囲がカバーされるようになった^{11,12)}。ファイバレーザーの光コムの周波数計測システムは小型で安定性がよく非常に信頼性が高い。最近、1週間以上にわたる連続測定が行われ、アセチレン安定化レーザーの長期安定性の評価が行われたと同時に、このファイバ光コム・システムの信頼性の高さが実証された¹²⁾。

3. 産総研における光通信帯の光周波数校正システム

この章では、アセチレン安定化レーザーと電気光学効果を利用したもうひとつのタイプの光コムの組み合わせによる光周波数計測システムを紹介する。通信帯の光周波数(波長)の校正業務で通常要求される不確かさは、最高のものでも200 kHz (相対不確かさ 10^{-9})程度である。その場合、前節で述べたような1オクターブ以上のスペクトルを持ち、絶対周波数が原子時計からの参照信号で校正された光コムを用いなくても、安定化レーザー(再現性10 kHz~100 kHz)と、要求される通信帯のバンドをカバーする光コムの組み合わせで光周波数を測定し、被測定対象を校正することができる。特に、電気光学効果を利用する光コム¹³⁾では、入力した周波数の基準光に対して光コムを駆動するマイクロ波周波数の間隔でサイドバンドを

たてるもので、光の“ものさし”を構成するために周波数に関するサーボを必要としないためにシステムとして非常に簡単にでき、信頼性が高いことが魅力である。

Fig. 3に測定の原理を示す。被測定対象(device under test; DUT)の周波数値によっては、ちょうど光コムのモードと重なってしまい光ビート信号の周波数がほとんどゼロになり測定しにくい場合があるので、光コムの“ものさし”を参照するバッファレーザーを導入している。この図から明かなように被測定レーザー(DUT)の周波数 $f(x)$ は次のように表される。

$$f(x) = f(C_2H_2) + N \times f(MW) + f(\text{beat1}) + f(\text{beat2}) \quad (2)$$

ここで、 $f(C_2H_2)$ は基準となるアセチレン安定化レーザーの周波数値、 N は光コムのものさしで何番目のサイドバンドかを表す整数で光コムの次数と呼ばれる。 $f(MW)$ は電気光学変調器を駆動しているマイクロ波の周波数(例えば今回の実験では6.25 GHz)である。このマイクロ波の周波数は、市販の波長計の不確かさ(例えば200 MHz)に比べて十分に大きいので、被測定対象の周波数をあらかじめ波長計で測定することで、次数 N を間違いなく決定することができる。 $f(\text{beat1})$ は N 次の光コムの成分とバッファレーザーとのビート信号の周波数、 $f(\text{beat2})$ はバッファレーザーと被測定レーザーのビート信号の周波数でいずれも測定されるものである。これにより電気光学変調器のつくる光コムのスペクトルの範囲であれば任意の周波数をもつ被測定レーザーの周波数を精度よく測定することができる。この場合の不確かさは主に基準としているアセチレン安定化レーザーの周波数再現性による。レーザー間のビート周波数の符号については、2つのレーザー周波数の大小関係で符号+、-が生じるが、これはバッファレーザーの発振周波数をわずかに上下にずらしたときのビート信号の周波数の増減の方向で区別することができる。式(2)のビート周波数の前の符号は、Fig. 3の状況に対応している。

このシステムを評価するために市販の安定化レーザーを被測定レーザーとして実験を行った。なお、この実験で使用するアセチレン安定化レーザーは、電通大と産総

Fig. 3 Principle of frequency measurement using an acetylene stabilized laser and an optical frequency comb.

研での研究成果をもとにネオアーク(株)が開発した市販品(型番:C2H2LDS-1540)である。また、電気光学効果を用いる光周波数コムは、オプトコム(株)の市販品(型番: BK-SM625C)である。Fig. 4に測定系を示す。P(16)回転線に安定化されたアセチレン安定化レーザーの出力はエルビウム添加ファイバ増幅器(EDFA)をととして光コム(OFCG)に入力される。これにより通信帯Cバンド領域で光の“ものさし”が発生する。一方、パッファレーザーとして波長可変な外部共振器型レーザーが用意され、この出力光は同様にEDFAで出力を十分なレベルに調整されたのち2つの経路に分けられる。ひとつは先ほどの光の“ものさし”と検出器で混合され、光ビート信号が検出される。もう一方は、校正されるべき被測定レーザーとやはり混合され、そのレーザーとの光ビート信号が検出される。それぞれのビート信号の周波数は2つのカウンターで同じゲートタイミングで測定される($f(\text{beat1})$, $f(\text{beat2})$)。今回の模擬校正において使用された被測定レーザーは横河電機製、HCN安定化レーザー(型番: 3290S-04)である。この製品は安定化の基準として線幅の狭い(約1 MHz)飽和吸収でなく通常の線形吸収(ドブラー幅で約500 MHz)を利用しているので、我々の安定化レーザーよりも安定度や不確かさでは劣るが、コンパクトでロバスト、スイッチを入れるだけで十分な安定度の基準光を発生できる非常に優れた市販品である。5時間程度の連続測定の結果をFig. 5に示す。この模擬校正で使われたレーザーについては中心周波数の公称値からたった数百kHz程度の偏差があるだけであり、仕様にある波長確度10 MHzは十分に満たされていることが確認された。また同様に数百kHz程度のばらつきが見られるが、被測定レーザーの安定度によるものである。このばらつきが我々の周波数計測システムによるものでないことを示すために、もう1台のアセチレン安定化レーザー標準器を準備し、基準とは別の遷移P(18)に安定化してこれを見立てて同様に実験を行った結果もFig. 5の中に示した。値については重ならないように0.3 MHzほど低くずらして表示している。ばらつきが非常に小さく、この図ではほぼ太い線のようにしか見えないが、これがシステムノイズであり1 kHz程度の大きさである。このようなデータ(10秒間隔で分解能1 kHz、絶対周波数の不確かさ100 kHz)は市販の高精度波長計では決して得

Fig. 4 Experimental setup for frequency measurement of the DUT: EDFA, erbium doped fiber amplifier; OFCG, optical frequency comb generator; Det., detectors.

Fig. 5 Results of frequency measurements at the telecom C-band region. The upper trace shows results of frequency measurement of the DUT, while the lower trace (a thick line on -0.3 MHz) shows the system noise.

られないものであることを強調しておきたい。

4. 通信帯光周波数の標準供給(現状と将来の夢)

産総研では、3章で説明した光周波数校正システムを使って2004年度末より、通信帯Cバンド(波長1530 nm～1565 nm)における光周波数の標準供給を開始した。不確かさは現在基準として使用している市販のアセチレン安定化レーザーの再現性(100 kHz)で決まっている。前節で説明した技術的な根拠に加えて、標準供給に必要な品質システムを立ち上げ、依頼試験としての校正証明書が発行できるようになった¹⁾。また、この証明書が国際的に通用することをより明確に示すために、海外の研究所の研究者によるピアレビューを受け、製品評価技術基盤機構(NITE)による試験所認定ASNITE-NMIを取得した。現在、国際相互承認(MRA)の枠組みに従い校正測定能力(CMC)登録の手続きを行っているところである。

この校正サービスでは、校正のためにユーザーに被測定対象を産総研に持ち込んで頂く必要がある。一方、ファイバを極低損失で伝送するという光通信帯の光の特長を生かした新しい標準の供給形態も考えられ、その実用可能性を見極めるための基礎的な研究も行われた。まだすべてのユーザーと産総研をファイバで結ぶことは技術的、制度的にむずかしいが、例えば、通信帯の部品製造メーカーの事業所内において、標準室と実際の製造ラインにある波長計をファイバでつなぎ常時波長計を校正する場合を考えることができる。このためには、数km程度の伝送路で6桁から7桁の光周波数(波長)標準が伝送できるかを確かめる必要がある。新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)の計量器校正情報システム技術開発(e-trace)プロジェクトにおいて、光ファイバ網を使って電気信号だけではなく、物理量としての波長や周波数標準を伝送する方式について、東北大の中沢研究室と共同で行った研究のうち、産総研が分担した波長標準(光周波数標準)の伝送について以下に紹介する。

実験室においてドラムに巻かれた10 kmの光ファイバを使って伝送された基準の光周波数(波長)がどの程度伝送に

Fig. 6 Experimental setup for the wavelength standard transfer through a 10 km single mode fiber in a laboratory.

より変化するかを定量的に評価した。実験装置をFig. 6に示す。これは、前項でシステムノイズを評価するために行った実験系を2系統作り、その一方に10 kmのシングルモード光ファイバ経路を挿入して2つの結果を並列に測定し比較したものである。Fig. 7に観測された光ビート信号の例を示す。300 kHz バンド幅のスペクトラム・アナライザで観測したところ、信号対雑音比(S/N)50 dB近くの非常に良好な信号が観測された。得られた2つの周波数データの差を取ることで、光ファイバによりどの程度光周波数(波長)がずれるかを非常に精密に評価することができる。4時間弱の期間にわたる周波数比較のデータをFig. 8に示す。この結果、伝送されている約200 THzの光周波数に対して、サブHzと極めて小さいことがわかった。温度環境のよい実験室で数10 kmほどの経路では、ファイバの伸縮などによる波長標準の伝送前後での周波数の差は、実用上まったく問題にならないことがわかった。

次に、産総研と20 kmほど離れた場所にある実験室をつなぐ、外部に敷設(全長のうち9割が架空)された2系統の光ファイバ経路での安定化レーザーの波長(光周波数)伝送実験を行った。伝送長は相手側の実験室で折り返し往復40 kmである。波長標準としてアセチレン安定化レーザーを利用した。今回も40 kmのファイバ伝送路の系統と、実験室内での短い伝送路の系統の2系統を比較する形になって

Fig. 7 Observed beat note signal (about 108 MHz) between a P(18) stabilized laser radiation and the nearest component of the comb, transferred through a 10 km fiber, by a RF spectrum analyzer. The signal to noise ratio of 50 dB is confirmed with 300 kHz resolution bandwidth.

Fig. 8 Comparison between two beat signal frequencies: two beat frequencies between the P(18) stabilized laser and the nearest component of a comb with a 0 km-delay and 10 km-delay, respectively.

いる。屋外敷設のファイバ40 kmと室内の短い伝送路での周波数変化をそれぞれ検出するために参照用としてもとの波長標準を光音響(AOM)素子で80 MHzずらした光も別途2系統用意した。それぞれにおいて、伝送した光と参照用の80 MHzずらした光の光ビート信号を検出する。得られた2つのビート周波数(それぞれ約80 MHz)をカウンターの比測定モードで測定した。ほぼ1日間のデータをFig. 9に示す。この図で縦軸に“1”とあるのが、光周波数のずれがない場合である。比が1より大きいのは40 kmの伝送の結果、光周波数が高くなっていることを示している。夜遅くからあくる日の夜までのデータである。夜中のうちは1よりも少し大きい値になっている。これは光ファイバが夜間の温度低下に伴い徐々に縮んでいるために起こる現象であると解釈できる。日の出と同時に、気温が急速に上昇しそれに合わせて周波数が急速に下がる(1から大きく減少する)ことが見て取れる。また、夕方には日没に伴う気温の下降の影響が出ている。得られた生データにはスパイク状に1を大きく下回るデータがいくつか含まれていたが、ここでは周波数変動のうち比較的ゆっくりとした成分と気温変化との対応を見るために、それらのスパ

Fig. 9 Frequency ratio of two beat note signals with 0 km and 40 km fiber transfer, respectively. Data point below (above) “ratio 1” means that the frequency has been shifted lower (higher) after 40 km fiber transfer.

イク的なデータを抜き取り移動平均により細かい構造をならしたあとのデータを用いている。図からわかるように周波数比の偏差は、 3×10^{-5} 程度である。測定周波数 80 MHz, 伝送している光周波数 200 THz を考えに入れると、光周波数(波長)に換算して 10^{-10} (10桁)の相対不確かさには充分対応できることがわかる。この程度であれば光ファイバの経路に対して環境の温度変化などの補正サーボをかけなくても標準伝送時の不確かさを確保できそうであることがわかった。より不確かさの小さい伝送のためには文献14)にあるようなファイバ長についての制御が必要になる。時おり現れたスパイク状信号の原因はまだ特定できていない。この現象も含めてシステム全体での光周波数(波長)伝送の不確かさ評価を行うことは今後の課題である。

5. おわりに

産総研計測標準研究部門で行われている光通信帯における光周波数計測の実験と、その成果を受けて最近開始された通信帯における光周波数(波長)の標準供給サービスについて紹介した。また、実際に敷設されているファイバ経路を利用した光周波数(波長)標準の伝送についての予備的な実験結果も紹介した。すでに、通信帯の領域で1オクターブのスペクトル広がりをもつモード同期ファイバレーザーが実現され、Cs原子標準の不確かさと同じレベルまで光周波数を設定できるようになってきている。しかし、分光学やレーザー制御技術の観点から、またコンパクトな波長標準の製品化を目指す意味から、アセチレンなどに安定化された通信帯の安定化レーザーの諸性能の改良、高度化は今後も興味ある課題として研究されていくだろう。分子の飽和吸収の信号強度をもとに計算される安定度の理論限界はまだずっと先にあり¹⁵⁾、現状の10倍以上よくなるはず、との指摘もある。このあたりの事情を突き詰めて究極の性能を達成できるようにしておけば、もし分子の並進運動制御技術が原子での場合のように成熟してきたとき、分子の振動回転遷移に基づく近赤外遷移は非常に魅力的な周波数標準の候補になる可能性がある¹⁶⁾。光源としてもファイバレーザーなど線幅の狭いレーザーで同調特性の良好な製品も出回るようになってきている。一方、光ファイバ網を利用して波長や周波数などのより高精度な標準伝送の可能性をさぐる研究もますます活発になるものと思われる。光通信帯での

光周波数標準の研究は、今後も活発に続けられ、多くの興味深い成果が得られるだろう。

謝 辞

共同研究者である産総研の松本 弘一氏、美濃島 薫氏、洪 鋒雷氏、稲場 肇氏、電通大の中川 賢一氏に深く感謝いたします。アセチレン安定化レーザーの製品化についてネオアーク(株)の李 容哲氏、波多野 智氏に感謝いたします。

本解説で紹介した内容のうち、モード同期レーザーの光コムでの周波数計測については、JSTの科学技術振興調整費「ブロードバンド光シンセサイザの開発」の成果であり、標準供給システムとファイバによる波長標準の伝送に関してはNEDOの「e-trace」プロジェクトの成果である。

参考文献

- 1) 大苗 敦, 池上 健, 中川 賢一, 古賀 正文, 手島 光啓: 電気学会論文誌 **C119** (1999) 765.
- 2) ITU-T Recommendation G.692: *Optical interfaces for multichannel systems with optical amplifiers* (1998).
- 3) J. Ishikawa and H. Watanabe: IEEE Trans. Instrum. Measur. **IM42** (1993) 423.
- 4) T. J. Quinn: Metrologia **40** (2003) 103; R. Felder: Metrologia **42** (2005) 323.
- 5) F. -L. Hong, A. Onae, J. Jiang, R. Guo, H. Inaba, K. Minoshima, T. R. Schibli, and H. Matsumoto: Opt. Lett. **28** (2003) 2324.
- 6) K. Nakagawa, M. de Labachellerie, Y. Awaji, and M. Kourogi: J. Opt. Soc. Am. **B13** (1996) 2708.
- 7) A. Onae, K. Okumura, K. Sugiyama, F. -L. Hong, H. Matsumoto, K. Nakagawa, R. Felder, and O. Acef: *Proceedings of the 6th Symposium on Frequency Standards and Metrology*, 2001, ed. P. Gill, World Scientific, (2002) p. 445.
- 8) C. S. Edwards, H. S. Margolis, G. P. Barwood, S. N. Lea, P. Gill, G. Huang, and W. R. C. Rowley: Opt. Lett. **29** (2004) 566.
- 9) A. Czajkowski, J. E. Bernard, A. A. Madej, and R. S. Windeler: Appl. Phys. **B79** (2004) 45.
- 10) J. Jiang, A. Onae, H. Matsumoto, and F. -L. Hong: Opt. Express **13** (2005) 1958.
- 11) T. R. Schibli, K. Minoshima, F. -L. Hong, H. Inaba, A. Onae, H. Matsumoto, I. Hartl, and M. E. Fermann: Opt. Lett. **29** (2004) 2467.
- 12) H. Inaba, Y. Daimon, F. -L. Hong, A. Onae, K. Minoshima, S. R. Thomas, H. Matsumoto, M. Hirano, T. Okuno, M. Onishi, and M. Nakazawa: Opt. Express **14** (2006) 5223.
- 13) K. Imai, M. Kourogi, and M. Ohtsu: IEEE J. Quantum Electron. **QE34** (1998) 54.
- 14) M. Musha, Y. Sato, K. Nakagawa, K. Ueda, A. Ueda, and M. Ishiguro: Appl. Phys. **B82** (2006) 555.
- 15) C. Ishibashi, J. Ye, and J. L. Hall: *Proceedings of SPIE* **4634** (2002) 58.
- 16) M. Kajita: Phys. Rev. **A74** (2006) 035403.