

# 通信の大容量化に対応する「長さ」の国家標準

## — ファイバー型光周波数コムの開発 —

稲場 肇\*、大苗 敦、洪 鋒雷

光周波数コムは、可視～近赤外波長域において、等しい周波数間隔でモードが並ぶ光周波数のものさしであり、光とマイクロ波領域の周波数とを精密に比較するなど、大きな技術革新を起こした。しかし、当初用いられていた、固体レーザーを用いた光周波数コムは、大型・高価で、かつ長時間安定に動作させることが困難だった。我々はファイバーレーザーを用いた光コムに早くから着目して研究開発を進めてきた。特に、レーザーも含めた光コムシステムの産総研内での開発に成功してからは、通信帯波長におけるレーザー周波数の校正をはじめ、長さの国家標準、そして次世代光周波数標準のための新しいレーザー制御技術を開発するなど、独自性のある成果を挙げている。

キーワード: 光周波数コム、ファイバーコム、光周波数計測、長さ標準、光通信帯波長、波長安定化レーザー、モード同期レーザー

## National length standard supporting high-capacity optical fiber communication systems

### – Development of fiber-based optical frequency combs –

Hajime INABA\*, Atsushi ONAE and Feng-Lei HONG

Optical frequency comb is a collection of laser modes with equal frequency intervals in the visible to near-infrared regions that enables direct comparison of optical frequencies with the microwave atomic frequency standards. Traditional solid state laser-based frequency comb systems were large, expensive and very difficult to operate for long periods of time during experiments. From the early stage of development, we proposed fiber lasers as a feasible means for achieving a reliable frequency comb. After we succeeded in developing an in-house fiber-based frequency comb at AIST, we made further advances, including calibration of optical telecommunication band, establishment of national standards of length, and development of a narrow-linewidth comb for optical lattice clocks.

**Keywords:** Optical frequency comb, fiber-based frequency comb, optical frequency measurement, length standard, optical telecommunication band, wavelength-stabilized lasers

### 1 はじめに

光周波数コムが発明される以前は、光領域の周波数計測は極めて困難であった。測定装置として多くのマイクロ波発振器、特殊な非線形通倍混合素子、波長（周波数）安定化レーザー（以下、安定化レーザー）を用意して、セシウム原子周波数標準器の発生するマイクロ波周波数 9,192,631,770 Hz を基準に、順次通倍・混合を繰り返して光領域の周波数とリンクする「周波数チェーン」<sup>[1][2]</sup> が用いられていた。これは非常に大がかりな装置であり、開発だけでなく、測定の実施に膨大なコストと人的資源を必要とした。さらに、この装置は 1 種類のレーザーの周波数しか測ることができず、別の波長のレーザーには異なる周波数チェーンを構築する必要があった。

このような事情から、国際度量衡委員会は実用的なメー

トル定義の実現のために、周波数チェーンで測定されたレーザーの周波数を基に、安定化レーザーのリストを作成し、これらを波長標準（長さ標準）として用いることを勧告<sup>[3]</sup>している。各国の標準研究所で作られた安定化レーザーは、同等性を確認するために持ち寄って、国際的な周波数比較（国際比較）を行う。国際比較されたレーザーは、その国における長さ計測のための基準レーザーのおおもととなる。そして、実際に国際比較が行われるのは、ほとんどが波長 633 nm ヨウ素安定化ヘリウムネオンレーザーである。日本においても、長さ計測のトレーサビリティの頂点である国家標準（特定標準器）は、2009 年まで産総研が保有するヨウ素安定化ヘリウムネオンレーザー<sup>[4]</sup>であった。

光領域の周波数計測には長さ標準以外にも多くの応用分野があり、社会的に最も重要な分野が光ファイバー通信

である。1990年代から、大容量化に向けた波長多重伝送の導入が始まり、いずれ高精度な光周波数管理が必要となることが予想された。そのため波長 1.5 μm 帯の安定化レーザーを周波数標準として勧告リストに追加すること、および光通信波長帯のレーザー周波数測定技術の開発が求められていた。また、日本ではヨウ素安定化ヘリウムネオンレーザーが特定標準器となっていたため、光通信帯の安定化レーザーがこの特定標準器ヘトレーサブルであることも求められていた。

これまでの周波数チェーンを用いた光周波数計測の困難を打破する最初のブレイクスルーは 1999 年にやってきた。ドイツと米国のグループがモード同期レーザーを用いた「光周波数コム」(以下、光コム)を用いてレーザー周波数の絶対計測を実現し<sup>[5][6]</sup>、この分野において極めて大きな技術革新が起こった。光コムは大きな成功を収め、レーザーの周波数をセシウム原子周波数標準の精度(平均時間や発振器の種類により 11 ~ 16 桁)で測ることが可能になった。一方、光コムにより(比較的手軽に)光周波数とマイクロ波周波数が繋がったことは、セシウム原子時計に代わる次世代周波数標準としての「光時計」の研究にも大きな弾みをつけた。光コムの発明に関わったホール(J. L. Hall)とヘンシュ(T. W. Hänsch)は、「光周波数コム技術を含む、レーザーを使った精密分光の発展への貢献」が評価され、2005 年度のノーベル物理学賞を受賞した。

しかし、ホールとヘンシュが開発した光コムによりすべての問題が解決されたわけではない。光コムを実用的なツールとして種々の分野に応用するためには、当時の光コムに用いられてきたモード同期レーザーであるチタンサファイア

(以下 Ti:S) レーザーやフォトニック結晶ファイバーに関わる問題を克服する第 2 のブレイクスルーが必要であった。Ti:S レーザーは大型であり、高価で電力消費の大きい励起レーザーを必要とした。また、装置が複雑であるため、光コムとして動作させるには、専門知識を有するオペレーターが必要であった。このため、製品化はいうまでもなく、実験室であっても、長時間にわたり連続動作させることさえ困難であり、実用化には多くの課題を残していた。

この研究は、上述した第 2 のブレイクスルーに関わるものであり、これまでの Ti:S レーザーを用いた光コム(以下 Ti:S コム)に代わる、信頼性に優れた光ファイバー型周波数コム(以下、ファイバーコム)の開発がその主体である。この論文では、まず光周波数コムの原理を簡単に説明し、Ti:S コムの問題点について述べる。次に、これらの問題を解決するためのファイバーコムの概要、およびその製作も含めた研究開発の経緯について説明し、さらに開発の結果得られた代表的成果を 3 つ紹介する。すなわち、光通信帯レーザーの周波数計測、国際的活動も含めた長さの国家標準、および次世代光周波数標準のための高速制御型光コムについて述べる。

## 2 光コムについて

光コムを理解するためには、時間軸上の波形と周波数軸上のスペクトルの両方について考える必要がある。図 1 に示すように、光コムは時間軸上で観察すると、一つ一つが数~数 100 フェムト秒の時間幅を持つ光パルスが等間隔で並んでいる超短光パルス列である。一方、周波数軸上ではそのフーリエ変換となり、等周波数間隔で並んだ線スペク

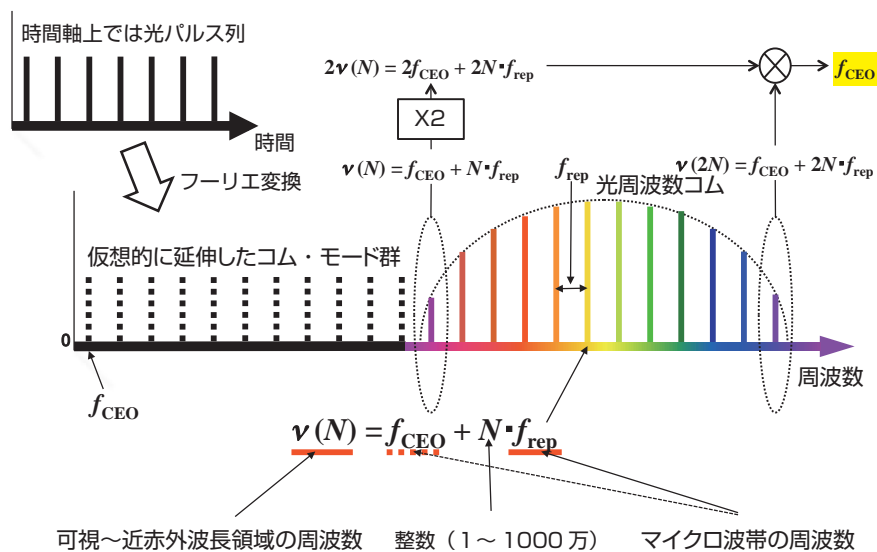


図1 光周波数コムの概念図

時間軸上で観測される超短光パルス列は、周波数軸上ではフーリエ変換され光コムとして観測される。モード間隔が波長によらず一定なので、仮想的にコム・モードを実在するコム・モードの外側に延伸することに意味がある。RF である  $f_{\text{rep}}$  と光周波数である  $\nu(N)$  を一意に繋いでいる。また、1 オクターブ以上に広がることで、比較的容易に  $f_{\text{CEO}}$  信号が検出できる。

トルの集合として観察される。周波数軸上でのスペクトルの拡がりモード間隔は、それぞれ時間軸上での光パルスの鋭さ（時間幅）と光パルス列の間隔時間の逆数である。そして、これら周波数軸上の各線スペクトルは連続光であり、それらの位相が同期して全体として光パルスを形成していると考えられることもできる。

光コムのもっとも重要な特徴は、線スペクトルの周波数間隔が波長に依らず一定であることである。例えばファブリー・ペロー共振器に代表される光共振器の縦モードは、光コムに良く似たスペクトルを有しているが、その縦モード間隔  $c / 2nL$  ( $c$  は光の速さ、 $n$  は位相屈折率、 $L$  は共振器長) は大気や共振器の分散の影響により変化してしまう（波長に伴い  $n$  が変化する）。これに対し、光コムモード間隔はモード同期により等間隔になるため、波長に依らず一定である。そのため、図 1 に示すように、ゼロから数えて  $N$  番目の、光領域のコム・モード周波数  $\nu(N)$  は

$$\nu(N) = f_{\text{CEO}} + N \cdot f_{\text{rep}} \quad (1)$$

と記述できる。ここで  $f_{\text{rep}}$  は隣り合うコム・モード間の周波数間隔であり、時間軸上の超短光パルス列の繰り返し周波数に等しい。 $N$  は数万～数百万の整数である。また  $f_{\text{CEO}}$  は、光コム各モードの  $N \cdot f_{\text{rep}}$  から一様なオフセット周波数である。この式から、数 10 MHz～数 100 MHz（以下、マイクロ波周波数）である  $f_{\text{CEO}}$  および  $f_{\text{rep}}$  を決めれば、180～600 THz（近赤外～可視波長に相当）である  $\nu(N)$  が一意に決まることがわかる。特に、マイクロ波周波数である  $f_{\text{rep}}$  が整数倍（通倍）されて光周波数領域の周波数になっていることが重要であり、光コムはマイクロ波周波数と光周波数を繋ぐ周波数通倍器（または分周器）と考えることもできる。

数百テラヘルツの光周波数に比べて、 $f_{\text{CEO}}$  の値は極めて小さい。しかし、 $f_{\text{CEO}}$  は光領域の周波数とマイクロ波領域の原子による標準からの周波数を関係づける重要なパラメータである。 $f_{\text{CEO}}$  を検出するためには、光コムスペクトルが「1 オクターブ」、すなわち周波数で  $\nu \sim 2\nu$ （波長では  $2\lambda \sim \lambda$ ）以上の拡がりを持つことが重要である。図 1 に  $f_{\text{CEO}}$  観測の方法を示す。スペクトル拡がり  $\nu$  が 1 オクターブを超えることは、 $N$  番目と  $2N$  番目のモードが実在することと等価である。 $N$  番目のモードの第二高調波と、 $2N$  番目のモードとの差周波数が  $f_{\text{CEO}}$  となることから、 $f_{\text{CEO}}$  を実験的に観測することができる。

モード同期レーザーの出力スペクトルは光コム状であるが、通常その拡がり  $\nu$  は 1 オクターブに届かない。そこで、フォトニック結晶ファイバーや高非線形ファイバー等の大きな非線形光学効果を持つ媒体<sup>[7][8]</sup>を用いて光スペクトルを広帯

域化する。その際、元々のコム・モードは自己位相変調、四光波混合、ラマン増幅等といった非線形光学効果により、周波数間隔を保ったまま外側に拡がっていく。この、光周波数領域で 1 オクターブもの拡がりを持つ「周波数のものさし」には、周波数の計測・標準分野をはじめとして多くの応用がある。

### 3 Ti:Sレーザーによる光コム課題とファイバーコムによる解決

初期の光周波数コムは、モード同期レーザーとして Ti:S レーザー、そして、広帯域化にはフォトニック結晶ファイバーという非線形媒質を用いていた。これらは光コムを実現し、大成功を収めたものではあるが、実用化に多くの課題が残されていた。ここでは、その中でも解決しなければならない重要な課題と、ファイバーコムでそれがどのように解決されるかについて述べる。

#### 3.1 励起レーザーが大型かつ高価であること

Ti:S コムの概要図を図 2 に示す。Ti:S レーザーの励起には高出力の固体レーザーを使用し、市販されている典型的なレーザーヘッドと制御装置は、写真のように比較的大きなものである。また、励起レーザーおよび Ti:S レーザー本体には水冷装置が必要である。さらに、光コム用の Ti:S レーザーに使われる出力 5-10 W の励起レーザーは非常に高価であり、定期的に必要となる消耗品交換もまた高価である。

一方、ファイバーコムシステムの場合、図 3 に示された概要図の通り、励起光源として右下の写真のようなバタフライ型パッケージに組み込まれた小型の半導体レーザーが使用される。その制御装置も固体レーザー用のものよりかなり小型であり、システムとして Ti:S コムよりも遙かに小型化し得る。価格的にも Ti:S レーザーの励起用固体レーザーの 1/100 程度である。また、モード同期ファイバーレーザーは水冷装置を使う必要がない。

#### 3.2 長期連続稼働の困難さ

Ti:S コムは、長期連続運転させるのが難しい。理由はいくつかあり、一つには光コム広帯域化に用いるフォトニック結晶ファイバーへの光結合の不安定性である。フォトニック結晶ファイバーはコア径が約 2  $\mu\text{m}$  と小さいため（通常のシングルモードファイバーのコア径は約 10  $\mu\text{m}$ ）、温度変化などによるレーザー光とファイバーコアの相対位置の変動が生じやすい。その上、大型の励起レーザーはそのビームポインティングが不安定であることが多く、Ti:S レーザーのビームポインティングも不安定になりがちである。その結果、レーザー光のファイバーへの結合効率は時間と共に変化し、光コム安定化に欠かせないオフセット周波数、お

よびレーザーとのビート信号のS/Nが低下し、制御不能に陥る。また、Ti:S レーザー自体、空間レーザーであることから防塵が難しく、長時間運転していると光強度が大きい結晶付近に微小な埃が付着するなどして動作が不安定になる。これらのことから、Ti:S コムを用いて24時間以上連続で光周波数計測を行うことは難しい。

一方、ファイバーコムの場合、モード同期ファイバーレーザー～光増幅器～高非線形ファイバー間はすべて光ファイバー系であり、ファイバー同士の融着接続が可能である。空間光学系に必須である精密なアライメントが不要になり、一本の光ファイバーですべて接続できる効果は大きく、上述した Ti:S コムの欠点はほぼ完全に解決する。

#### 4 ファイバーコムの開発

上述したように、ファイバーコムが実現した際の長所は明らかであった。我々はまず「ファイバーコムの初期の評価」を行い、それが実現可能であることを確かめた。そして、「モード同期ファイバーレーザーの設計・製作」、「増幅器の設計・製作」、「高非線形ファイバーの評価」、「高速制御型光コムを開発」といった要素技術を開発すれば、堅牢で低雑音なファイバーコムを自家製作できると考えるに至り、それが実現できれば「光通信帯波長のレーザー校正」、「国家標準器の開発」、「光格子時計への応用」などの目標を一挙に達成できる光コムおよびその開発技術が得られる。さらにこれらの研究成果の企業や大学への技術移転を行

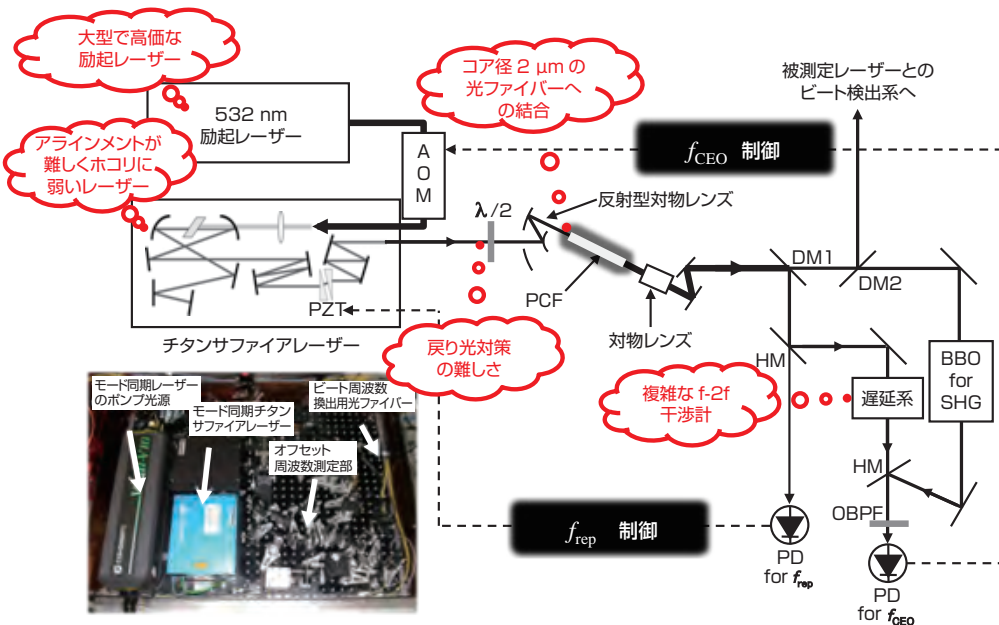


図2 チタンサファイアレーザーによる光コムシステムの概要図  
基本的に空間光学系であり、長時間連続運転は難しい。写真は、コンパクトにまとめられたシステム例。PZT：電歪素子、AOM：音響光学変調器、 $\lambda/2$ :1/2 波長板、PCF：フォトニック結晶ファイバー、DM：二波長鏡、HM：半透過鏡、OBPF：光バンドパスフィルター、BBO： $\beta$ バリウム・ボレート結晶、SHG：第二高調波発生、PD：受光器。

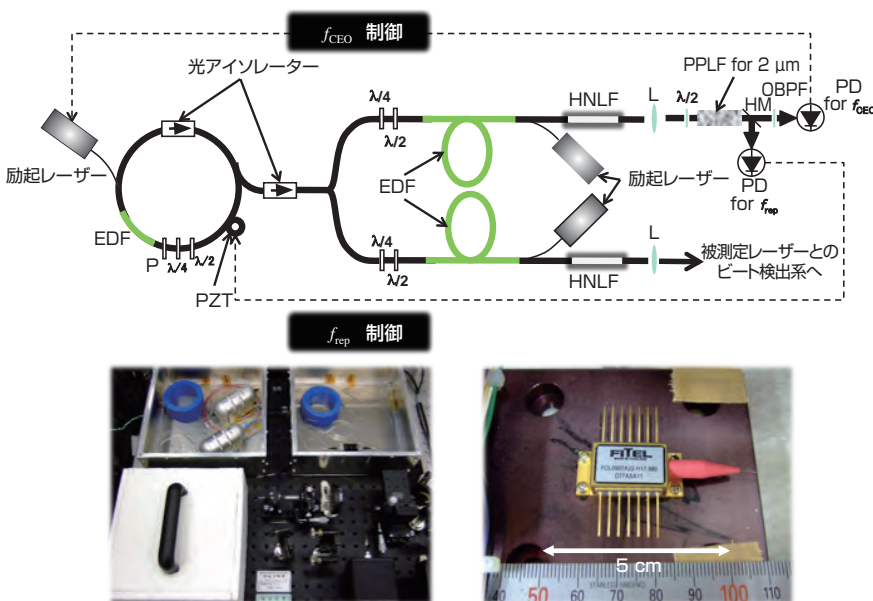


図3 ファイバーレーザーによる光コムシステムの概要図  
左側のファイバリングが、非線形偏波回転を利用したモード同期ファイバーレーザーである。その出力は2～4分岐され、それぞれ必要に応じて増幅、広帯域化して使われる。不安定になりがちな部分がすべて光ファイバー光学系であり、長時間連続運転が可能である。写真は、国家標準として用いている光周波数コム装置のレーザー～光アンプ部（左）、および励起レーザー（右）。EDF：エルビウム添加光ファイバー、PZT：電歪素子、P：偏光子、 $\lambda/2$ :1/2 波長板、 $\lambda/4$ :1/4 波長板、HNLF：高非線形ファイバー、L：レンズ、PPLN：周器分極反転リチウムナイオベート、HM：半透過鏡、OBPF：光バンドパスフィルター、PD：受光器。

い、最終的には時間周波数・長さ標準の信頼性向上に寄与したいと考えた（図4）。

しかし、当時ファイバーコムが Ti:S コムと同等の性能が得られる保証はなかった。実際にファイバーコムを開発し、Ti:S コムを置き換えるまでには、いくつかの研究ステップを踏む必要があった。ここでは光コムの開発初期に企業と行っていた共同研究の段階から、システム全体を産総研内で製作する体制への移行、そして製作ノウハウを確立していく過程について述べる。

#### 4.1 オフセット周波数の検出から絶対周波数計測へ—企業との共同研究

モード同期 Ti:S レーザーは波長 800 nm 帯で、モード同期ファイバーレーザーは波長 1550 nm（光通信帯波長）帯でそれぞれ発振する。また、Ti:S レーザーの出力と光パルスの時間幅がそれぞれ 300-800 mW、10-30 fs であるのに対し、ファイバーレーザーではそれぞれ 1-10 mW、100 fs 程度である。このように特性が大きく異なるパルスのスペクトルを広帯域化する条件を見つけなければならなかった。また、Ti:S レーザーでは 800 nm 付近にゼロ分散波長を持つフォトニック結晶ファイバーを用いて広帯域化するが、波長 1.5 μm 帯で発振するファイバーレーザーには直接利用できない。当時共同研究を行っていた企業はモード同期ファイバーレーザーで世界有数のシェアを持ち、最先端の開発品でありながら信頼性に優れたレーザーを産総研に提供した。我々はそのレーザーを用いて波長 778 nm と 1556 nm の周波数リンク<sup>[9]</sup> など、モード同期ファイバーレーザーとしては世界初の周波数計測を実現した。さら

に、このレーザーの第二高調波をフォトニック結晶ファイバーで広帯域化することで  $f_{\text{CEO}}$  信号検出を目指した。Ti:S レーザーの場合と比較して長いフォトニック結晶ファイバーを用いても、広帯域化された光コムのスペクトル拡がりは 1 オクターブに満たなかったが、レーザーの第三高調波と、フォトニック結晶ファイバーにより広帯域化された光コム成分を波長 520 nm 帯で干渉させる、新しい自己参照法を開発し<sup>[10]</sup>、世界で初めてファイバーコムの  $f_{\text{CEO}}$  信号を観測することに成功した。そしてほどなく、1.5 μm 帯にゼロ分散波長を持つ高非線形ファイバーにより、1 オクターブに拡がった光コムが得られるようになった。制御系も含めたシステムについても企業と共同で開発し、ファイバーコムを用いた安定化レーザーの絶対周波数計測に世界で初めて成功した<sup>[11]</sup>。

#### 4.2 自家製作への移行から長期連続動作へ

ファイバーコムによる絶対周波数計測が可能になると、次の段階として「目的や用途に応じた仕様のカスタマイズ」「異なる用途のために複数の装置を準備」などの要求が生じた。そのためには企業からレーザーシステムの提供を受けるのではなく、自身で部品から組み立てるのが早道であろうとの結論に達した。幸い、波長 1550 nm 帯用のファイバー部品や光学部品は大きな産業分野である光通信で用いられるため、安価で優れた製品が多い。また、我々はコムの研究に従事する以前に CW ファイバーレーザーの研究開発にも携わっており、ファイバー光学系について技術的な知見があった。そこで、ファイバーコムシステムを所内で製作すること（以下、自家製作）が次の目標となった。

2004 年末頃、自家製作を開始するに当たり、上述した

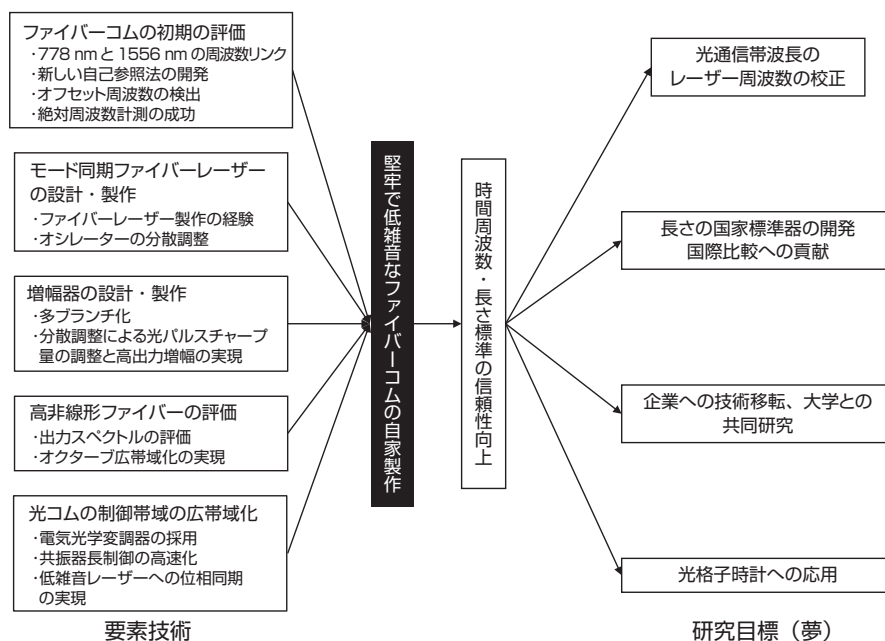


図4 ファイバーコムを自家製作するための要素技術から、研究目標へのシナリオ

要求から、目的や用途に不都合な機構は省き、製作しやすいシンプルで堅牢な構成を目指した。例えば、過飽和吸収体のように入りにくい特殊なデバイスの使用を避けて、モード同期機構を非線形偏波回転に変更し、空間光学系をできるだけ排除したファイバー中心の構成とした。とはいえ、自身でモード同期レーザーから製作するのは初めてのことであり、試行錯誤の連続であった。コムを広帯域化の鍵となる、波長1~2 μm帯で機能する高非線形ファイバーについては、(現時点でも)広帯域化において最高性能のファイバーが同じ時期に入手できた。このような経緯により、自家製作を開始してから約1年という速さで、モード同期ファイバーレーザー、超短光パルス増幅器の設計・製作、高非線形ファイバーによる光コム広帯域化、オフセット周波数信号の検出、堅牢性確保のためのファイバー系の配置・固定、および位相同期や温調等の制御系構築まで行うことができた。2006年初頭には、1週間連続の光周波数計測<sup>[12]</sup>という、Ti:S コムでは無論のこと、ファイバーコムであってもそれまで報告されたことのなかった長時間測定を実現した。このような堅牢性は、モード同期ファイバーレーザーの全ファイバー化、高いビート信号のS/Nを得るための光増幅部のブラン化構成(図3)、および目的波長の光コム発生に最適な高非線形ファイバーの選定、などといった独自のレーザーシステムにより得られたものであり、自家製作による成果である。

長期連続測定はすぐに実質的な発見をもたらした。我々は、高い周波数安定度を持ち堅牢性にも優れた、波長532 nm ヨウ素安定化 Nd:YAG レーザーを開発してきた<sup>[13]</sup>。保有している数台のレーザーのうち、1台の周波数が次第に

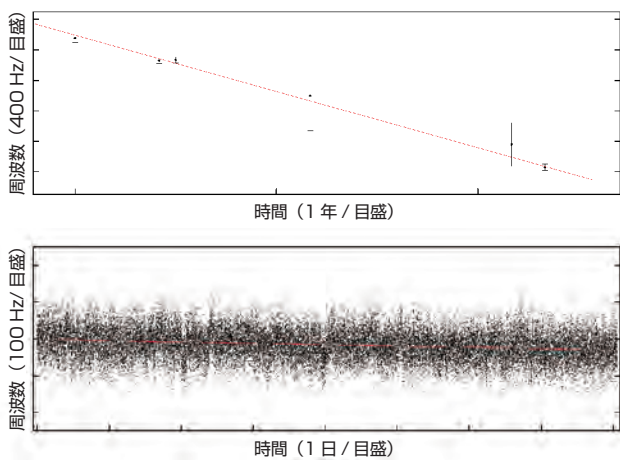


図5 我々が開発した波長532 nm ヨウ素安定化 Nd:YAG レーザーの周波数変化  
Ti:S コムにより2年半にわたり断続的に測定された結果(上)、およびファイバーコムにより1週間連続で測定された結果(下)。どちらの結果も変化率は約-20 Hz/週であることを示している。

下がってきている現象が長期的な測定によって観測されていた(図5上)。ファイバーコムを用いた長期連続測定により、同じペースでの周波数減少(約-20 Hz/週)が観察され(図5下)、周波数変化が断続的なものではなく、連続的なものであることが明らかとなった<sup>[12]</sup>。このように、長期連続測定はこれまで見えなかった現象を観察することができる。今後実用化される光周波数標準等への適用においても、連続測定できる堅牢性は実質的に必要な性能の一つである。

#### 4.3 波長分散調整の重要性—製作ノウハウの確立

1台目の自家製ファイバーコムシステムが完成し、連続測定には成功したが、その後何台かのモード同期ファイバーレーザー(発振器)および超短光パルス増幅器を製作する過程で、超短光パルス増幅器からの出力やスペクトル、および高非線形ファイバーによる広帯域化の再現性が乏しいという問題点があった。光パルス増幅器へ入射する平均およびピークパワー、偏光依存性等の検討を行ったが、発振器と増幅器を繋ぐ光ファイバーの分散に起因する、光パルスのチャープ量の違いがその原因であった。

オシレーターの分散調整、増幅器~高非線形ファイバー間の分散調整の必要性はよく知られていたが、オシレーター~増幅器間の分散調整についてはそれほどよく知られていなかった。これまで実験結果として報告されていたのは、増幅器前で正か負どちらかに大きくチャープさせて光パルスのピークパワーを下げ、増幅した後に逆にチャープさせてパルス圧縮を行うチャープドパルス増幅法<sup>[14]</sup>くらいであった。我々は、オシレーター~増幅器間の光ファイバー長を変えて増幅器に入射する光パルスのチャープ量を変化

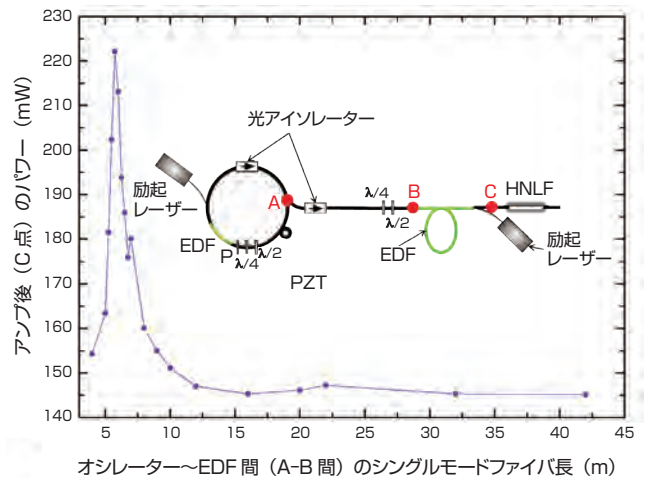


図6 オシレーター出力(A点)~光アンプ入力部(B点)間のシングルモードファイバー(SMF)長を変えたときの光アンプ出力部(C点)での光パワーの変化  
出力がピークとなるSMF長が存在し、それが広帯域光コム発生の最適値である。

させると、増幅器からの平均出力が最大となる光ファイバー長が存在することを発見した(図6)<sup>[15]</sup>。この条件では光パルスはチャープ補償で圧縮されながら増幅され、高い光パルスのピークパワー、狭い光パルスの時間幅、広いスペクトル、および高い平均出力が得られる。これは1990年に「断熱圧縮」として報告<sup>[16]</sup>された条件と一致し、スペクトル拡大等は報告されていたが、出力の増大を伴うことは知られていなかった。出力が増大する理由はまだ明らかではないが、利得の不均一拡がりを持つエルビウムイオンが、スペクトル拡大により多数個寄与できるようになるためではないかと考えている。

またこの条件で増幅した光パルスは、高非線形ファイバーによるスペクトラムの広帯域化に適しており、同じ光パワーであっても、この条件以外で増幅した光パルスと比べ、遙かに広帯域化しやすい特性を持っていることがこの研究により明らかになった。この発見により、出力やスペクトラムの再現性は大きく向上し、その後の研究室でのファイバーコム「量産」のための重要な礎となった。また、この方法および装置は特許出願し、2013年1月に特許登録(登録番号5182867)された。

#### 4.4 高速制御型光コムの開発・・・性能と実用性を兼ね備えた光コムへの進化

ファイバーコムは当初、実用的で堅牢ではあるが、位相雑音がTi:Sコムより大きいと言われており、ファイバーコムには特有の比較的大きな位相雑音が観察されていた<sup>[10]</sup>。フリーランニング時のTi:Sレーザーでは $f_{CEO}$ の線幅は100 kHz以下であるが、ファイバーコムでは数MHzまで大きくなる場合があり、ファイバーコムの最大の欠点としてしばらく議論の対象になっていた。位相雑音の起源は光パルス増幅器や高非線形ファイバーではなく、モード同期ファイバーレーザー(発振器)にあることが明らかになっている。その後、共振器の分散調整<sup>[17]</sup>を含むオシレーターの製作ノウハウの蓄積により、位相雑音の面でTi:Sコムに劣ることはなくなった。

位相雑音に関して、問題を完全に解決するばかりでなくTi:Sコムを凌駕する決め手になった重要な性能が高速制御性である。光コムの周波数値には二つの自由度がある。例えば光周波数計測では、 $f_{rep}$ と $f_{CEO}$ をそれぞれ独立に制御する必要がある。多くの場合、 $f_{CEO}$ はモード同期レーザーの励起光強度を変化させて制御し、 $f_{rep}$ は共振器長を変化させて制御する。励起光強度は、Ti:Sレーザーでもファイバーレーザーでも比較的高速に制御することができるが、共振器長の高速制御は難しい。どちらのレーザーでも、普通は電歪素子(PZT)を用いてミラーやファイバーを動かすことで変化させる。しかし、この場合の制御帯域は数100

表1 モード同期レーザーの種類による光コムの特徴

	Ti:Sコム	Erファイバーコム	Ybファイバーコム
出力(平均パワー)	~1 W	~200 mW(増幅後)	~10 W(増幅後)
光パルス幅(チャープ補償後の典型値)	数フェムト秒	数十フェムト秒	数十フェムト秒
波長(オシレーターの中心波長典型値)	780 nm	1550 nm	1030 nm
波長領域(広帯域化後の典型値)	400-1200 nm	900-2500 nm	900-2500 nm または 700-1400 nm
フリーランニング時のCEO信号のスペクトル線幅	数十kHz~数MHz	数十kHz~数MHz	数十kHz~数MHz
制御帯域(共振器長)	~数十kHz	~数MHz	~数MHz
励起レーザー	主に固体レーザー	主に半導体レーザー	主に半導体レーザー
長時間動作、および堅牢性	△(空間光学系、励起レーザーの不安定性)	◎	○(分散補償用の空間光学系が必要)

Hz~数10 kHzに制限される。 $f_{rep}$ をマイクロ波周波数基準に位相同期する場合は、キャリア周波数が低く位相雑音の絶対量が小さいため、この制御帯域の狭さはほとんど問題にならない。しかし、共振器長を制御して光コムのモードの一つを光周波数基準(安定化レーザー)に位相同期する場合、周波数が高いために周波数安定度が同じであっても位相雑音の絶対量が大きく、制御系の利得と帯域が不足して、位相雑音の低減は難しい。残留する位相雑音が多ければ、光コムの相対線幅は改善されない。相対線幅を改善するためには、二つのパラメーターの高速制御が必要である。我々は、モード同期ファイバーレーザーの共振器中に電気光学変調器(EOM)を挿入した高速制御型光周波数コムを開発し<sup>[18]</sup>、両方ともに帯域1 MHz程度の制御を実現した<sup>[19]</sup>。EOMを挿入したモード同期レーザーは今のところファイバーレーザーでしか報告がなく、モード同期ファイバーレーザーの長所となっている。

#### 4.5 これまでのTi:Sコム、Yb添加光ファイバーを用いたファイバーコムとの比較

光コムの光源としてモード同期ファイバーレーザーを採用し、本章で述べてきたような開発を経て、これまで主流であったTi:Sコムの欠点の多くが克服された。また、我々が開発してきたファイバーコムは、波長1.5 μm帯に利得を持つエルビウム(Er)添加光ファイバーをレーザー媒質としたものであるが、波長1 mm帯に利得を持つイッテルビウム(Yb)添加光ファイバーを用いたファイバーコムもいくつかのグループで開発されている。

表1はTi:Sコム、Erファイバーコム、およびYbファイバーコムの特徴についてまとめたものである。

これら3タイプの光コムを比較すると、我々が採用したErファイバーコムの優れた点はパワーやパルス幅といった、時間軸上での光パルスとしての性能ではなく、低雑音(狭線幅)性、信頼性や高速制御といった、周波数軸上での

光コムとしての性能であることがわかる。

Ti:S コムや Yb ファイバーコムには出力が高い、波長が短い、光パルス幅が狭いなどの長所があるため、紫外領域への展開や時間軸上での高分解能性が重要である分野では、これらの光コムでなければ対応できない分野も多いだろう。しかし、可視領域より長い波長での周波数メトロロジーに限って言えば、Er ファイバーコムは最も性能・実用性に優れた光コムであると言える。

## 5 ファイバーコムの展開

ファイバーコムを自家製作できるようになったことで、堅牢で使いやすく、かつ高性能な光コムシステムを目的に合わせて使えるようになった。当初のもくろみ通り、光コムを研究や業務で展開していくことは必然の流れであった。グループ内で今までにファイバーコムシステムとして完成させたものだけでも 15 台を超える。ここでは、その中でも特に重要な「光通信帯波長レーザーの校正」「長さの国家標準」および「高速制御型光コムの開発」について述べる。

### 5.1 光通信帯波長レーザーの校正

光通信の伝送容量に対する要求は着実に増加しており、その増加率は年率数十%に及ぶ。通信波長を多重化し、チャンネル数を増やすことでこの状況に対応することは大容量化に有効であるが、現在広く使われているシングルモードファイバーが伝送できるパワー、および伝送損失が低い波長範囲は限られているため、通信チャンネルを設定するには周波数管理が必要である。このような波長多重技術のプラットフォームとして、通信帯 C バンドのキャリア周波数 193.1 THz を中心に、12.5 GHz、25 GHz、50 GHz、100 GHz 間隔で周波数グリッド (ITU-T G694.1) が設定されている。近年は急速にデジタルコヒーレント (無線分野で実用化されているデジタル信号処理を光通信に応用・発展させた技術) の実用化が進み、シングルモードファイバーの能力の限界近くまで波長多重の高密度化が進んでいる。フレックスグリッド (6.25 GHz 間隔のチャンネル) への対応を考えると、周波数管理技術、すなわち周波数計測の不確かさ低減がますます重要になってきている。

光計測器や光デバイス関連メーカー等において、光スペクトルアナライザーや波長計に 7~8 桁の精度が必要な場合、分子等の吸収に安定化された光源が使用される。これは 9 桁程度の精密さを持ち、我々は光コムが登場する以前から、このようなニーズを見越して波長 1.5  $\mu\text{m}$  帯における波長標準を開発してきている。我々の開発した波長 1542 nm アセチレン安定化レーザー<sup>[20]</sup>は、国際度量衡委員会により 1.5  $\mu\text{m}$  帯唯一の波長標準として勧告されている。そして、このレーザーの出力をサイドバンド型光コ

ム<sup>[21]</sup>により広帯域化することで、波長 1510-1570 nm におけるレーザー周波数の校正が可能になった。しかし、まだ課題が残されていた。第一に、安定化レーザーとサイドバンド型光コムによる校正の場合、基準周波数である安定化レーザー自身の国際比較や光コムによる校正が求められる。次に、波長の国家標準が波長 633 nm ヨウ素安定化ヘリウムネオンレーザーであったため、ダブルスタンダード状態となりかねないことである。一方で、光コムは周波数標準を基準に周波数 (波長) を測定するため、安定化レーザーを介することなく、633 nm と 1.5  $\mu\text{m}$  帯の両波長を直接 SI に繋ぐことができる。また、今後他の波長でのトレーサビリティ確保が求められた際の対応も容易である。とはいえ、初期の Ti:S コムでは、広帯域化してもそのスペクトル帯域は 500-1100 nm であり、光通信帯波長への適用は困難であった。被測定レーザーは CW 光であるために第二高調波発生の効率が低いからである。

ファイバーコムは波長 1~2  $\mu\text{m}$  において動作し、光通信帯波長をすべてカバーしている。今後ますます細密化される通信グリッドに対応する光源や光フィルター等の部品の製造には、より高精度な波長計や光スペクトルアナライザーが要求され、これらの測定器の参照標準として、光通信帯波長におけるさまざまな波長の安定化レーザーが必要になっている。この波長帯にはアセチレン分子やシアン化水素分子等波長標準として好適な遷移が多く存在しており、それらの安定化レーザーを校正するためにも、ファイバーコムは最適と言える。さらに光コムはパルス光であるために第二高調波発生の効率が高く、可視波長帯にも適用できるため、Ti:S コムを置き換えることも期待できる。

### 5.2 長さの国家標準

長さの国家標準を原子時計 (周波数標準) + 光コムにすることができれば、両波長についてのトレーサビリティ体系をよりシンプルにまとめることができる (図 7)。また、メートルの定義により忠実に長さ標準を実現することができる。これまでの国家標準である波長 633 nm ヨウ素安定化ヘリウムネオンレーザーは、コンパクトかつ不確かさが  $2.5 \times 10^{-11}$  と小さく、長さ標準として完成されていた。しかし、国家標準として課題がいくつか残されていた。一つには、安定化レーザーであるが故に、光コムによる定期的な校正、あるいは国際比較が必要である。共振器アライメント等で周波数値が変化してしまう恐れがあるため、複数台の同等な装置の群管理を行い、個々の装置が正常動作していることを確認することも必要である。また、登録事業者が持つ特定二次標準器 (国家標準である特定標準器が直接校正する機器) もヨウ素安定化ヘリウムネオンレーザーであり、特定標準器と性能差がないため、校正結果は被



測定器物の性能を正しく評価できているとは限らない。特定標準器と特定二次標準器が同じ不確かさを持つ場合、校正結果の不確かさはそれぞれの $\sqrt{2}$ 倍になってしまう。すると、本来特定標準器と同じ不確かさであるはずのものが、実際よりも低い能力であると見積もられてしまう。そのような不確かさの劣化を避けるため、周波数比較を行って正常範囲にあれば、国家標準と同等であるとして、特定標準器と同じ不確かさであるとする運用が行われていた。さらに、ヨウ素安定化ヘリウムネオンレーザー同士と比較においては、周波数差ゼロでは計測できないため、4本の吸収線にレーザーをそれぞれロックして計6組の差周波数測定により本来の差周波数を推定する方法（マトリクス法）が採られており、校正には手間と時間を要した。その上、ヨウ素安定化ヘリウムネオンレーザーは振動や音に敏感であり、産総研の装置はその点強化されているが、それでもややデリケートである。

我々の開発したファイバーコムはこれらの課題をすべて解決する。光コムの基準周波数は国際原子時に同期した周波数標準であり、定期的な校正は必要ない。本質的にマイクロ波周波数合成系（図3中の「 $f_{rep}$ 制御」の部分に含まれる）の不具合くらいしか値がずれる心配はなく、それも測定時に検知できるので、群管理は不要である。不確かさは特定二次標準器の1/300であるため、校正結果はおよそ完全に被校正器物の性能を示す。そのため周波数値と校正の不確かさを校正証明書に明記できるようになった。さらに、ロック時の堅牢性も高く、1週間程度連続で動作させることは容易であるとともに、被校正器物の校正では、本来ロックすべき吸収線にロックされたレーザーの周波数値を測れば良く、手間と時間が大幅に圧縮された。かつて数日を要していた校正作業も、2009年7月の国家標準変更後は、半日から1日で終了している。

### 5.3 安定化レーザーの国際比較

国際的な同等性確認も重要である。各国の標準研究所が持つ安定化レーザーの同等性を確認するために、一同に持ち寄って国際比較を行う必要がある。これまでは、国際度量衡局の研究者が可搬型のヨウ素安定化ヘリウムネオンレーザーを各地域に持ち運び、そこで集まった地域各国のヨウ素安定化ヘリウムネオンレーザーと周波数比較を行っていた。これにより、世界中のヨウ素安定化ヘリウムネオンレーザーの同等性を確認してきた。しかし、国際度量衡局の業務内容の見直しにより、安定化レーザーの新たな国際比較制度（CCL-K11）が2007年から始まり、国際比較は各地域の計量標準組織ごとに行われることになった。まず全体を仕切るパイロット・ラボがあり、次にAPMP等大小9つに分かれる各地域の地域計量組織に対し、地域を仕切る「ノード・ラボ」を設置する。ノード・ラボは光コムを用いて、ヨウ素安定化ヘリウムネオンレーザーの周波数測定を定期的に行う。各国の標準研究所は地域のノード・ラボにレーザーを持って集まり、周波数を測定して同等性を確認する。ノード・ラボ間の周波数計測の同等性は、ノード・ラボが維持する協定世界時、および光コムのCMC登録によって担保される。APMP地域では2010年時点で日本、中国、韓国、シンガポール、オーストラリアが光コムを保有しており、うち数カ国はファイバーコムを保有しているが、日本以外は市販化された装置を購入したものであり、産総研は製作から行うなど関連技術の高さが評価され、APMPのノード・ラボとなっている。2010年4月に産総研で行われたヨウ素安定化ヘリウムネオンレーザーの国際比較は、我々のファイバーコムの威力を示す象徴的なイベントであった。アジア・オセアニア地区内の8ヶ国の標準研が633 nmヨウ素安定化ヘリウムネオンレーザーをノード・ラボである産総研に持ち寄り、開発されたファイバーコムを利

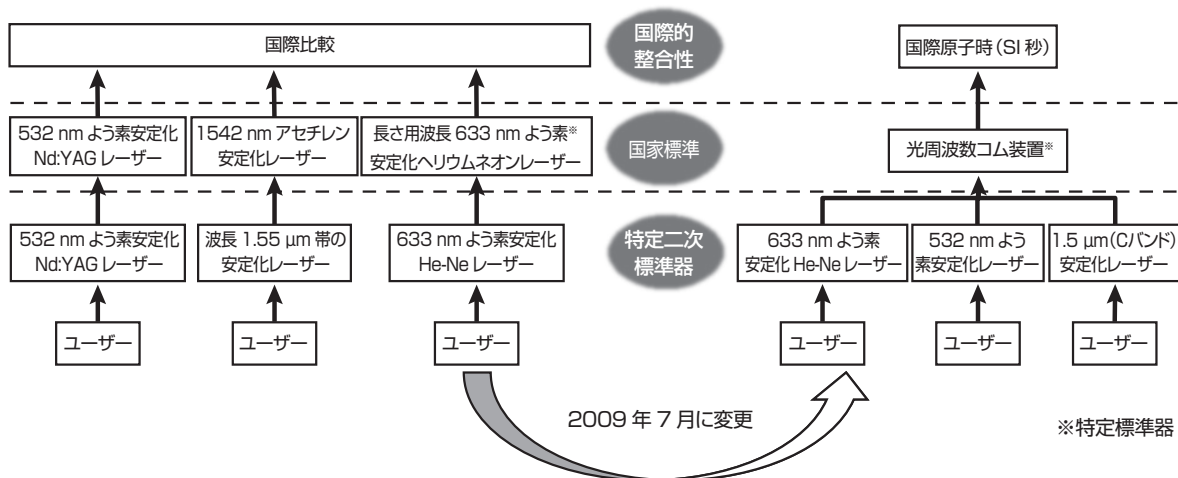


図7 新旧長さ計測のトレーサビリティ体系（SI～特定二次標準器）  
光周波数コムを国家標準に据えることにより、すべての波長域でシンプルなトレーサビリティ体系を実現している。

用してレーザーの周波数比較を行った。我々のファイバーコムは堅牢かつ正確であり、前述した通り測定もシンプルであるため、測定は極めて順調に行われ、およそ1日ですべての測定が終了した。さらに、各研究所の希望で行った周波数安定度の測定には時間がかかるのだが、夜中でもファイバーコムの無人運転に不安はなく、すべての安定化レーザーに対して性能評価の一助となる長期周波数安定度測定を行うことができた。8ヶ国のレーザーの測定結果は、すべて国際度量衡委員会勧告リストの不確かさ範囲内に入っており、安定化レーザーの同等性が確認された<sup>[22]</sup>。それらのレーザーは各国において長さの国家標準の役割を担っている。すなわち、これら8ヶ国において、長さのSIへのトレーサビリティを考えたとき、産総研のファイバーコムを必ず通っていることになる。

#### 5.4 高速制御型光コムの光格子時計への適用

我々のグループでは、次世代の周波数標準を目指した「光格子時計<sup>[23]</sup>」を開発している。光格子時計に代表される、光周波数領域の時計遷移を基準とした「光時計」においては、その遷移の周波数幅が極めて狭く、また遷移確率が低いため、時計遷移観察用レーザーのスペクトル線幅を狭くする必要がある。そのようなレーザーを実現するため、フィネスが高く、熱膨張率の低い共振器を真空中で温調して高度に安定化し、その共振器の透過モードにレーザーを安定化する方法が採られている。我々はYbおよびSr、二種の光格子時計を開発しており、時計遷移波長はそれぞれ578 nm、および698 nmである。それぞれの時計遷移波長用に高安定共振器を用意するのが一般的な方法であるが、我々は高安定共振器を時計遷移波長とは異なる波長1064 nmで用意し、高速制御可能な光コムを用いてその周波数安定度や線幅を578 nmおよび698 nmに転送する「線

幅転送」(図8)を提案・実現する<sup>[24]</sup>に至っている。

この方法の利点には、①堅牢かつ高性能なレーザーが用意できる波長(例えば1064 nm)用の共振器を利用でき、かつ高安定共振器は一つ用意すれば良いため、信頼性の高い高安定レーザーシステムを構築できる。②二つの光格子時計の周波数比を測定する際、基準となる高安定レーザーの周波数揺らぎを相殺でき、この方法以外では実現できない高い周波数安定度が得られる。③高安定共振器の縦モード間隔(通常2 GHz程度)よりも光コムのモード間隔(40-200 MHz)は小さく、時計遷移周波数へ橋渡しするための音響光学変調器の選択に自由度が増す。などがあり、複数の光時計システムを運用する上で重要な技術となるだろう。

#### 6 まとめ

どこまで分解して自家製作するか、または市販品で済ませるかは難しい問題だが、我々の場合、モード同期ファイバーレーザーおよび超短光パルス増幅器の自家製作化はもくろみ以上の大成功であった。元々我々が得意とする光学系の設計と構築、レーザー制御、および周波数計測といった技術を活かしやすいようにレーザー、増幅器系を最適化して設計・製作することができ、仕様変更も迅速に行えるため、開発スピードが飛躍的に向上した。その結果、短時間だけ使える光周波数計測器、またはデモンストレーションの道具であった光コムが、光通信帯波長の校正に対応し、長さの国家標準の置き換えを実現するだけでなく、光格子時計のレーザーシステム等で実戦配備されるようになったことは、光コムを実用的な装置にするための第2のブレークスルーであったと言えるだろう。

国家標準について、我々は早くから光通信帯での校正

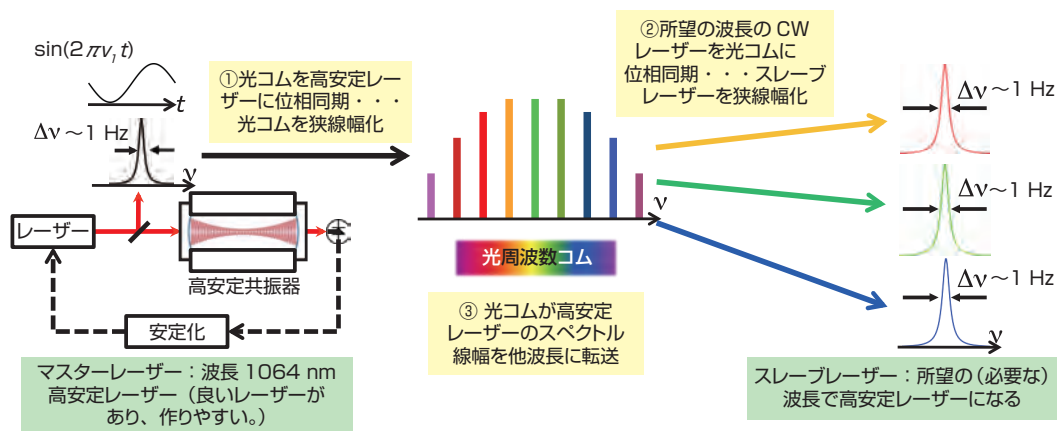


図8 光周波数コムを用いた「線幅転送」

任意波長の狭線幅化マスターレーザーに光コムの一モードを位相同期して狭線幅化し、同時に $f_{\text{CEO}}$ も高速制御により狭線幅化することにより、広帯域光コムのすべてのモードが狭線幅化される。この方法により、マスターレーザーの線幅や周波数安定度を、所望の波長のレーザーに転送することができる。この方法を実現するには、「①光コムを高安定レーザーに位相同期」を可能とする「高速制御型光コム」が必要である。

サービスの重要性を認識し、トレーサビリティ体系の整備、および校正業務について、常に先手を打って運用を行ってきた。最近では、依頼試験の件数が着実に増えてきており、光通信帯に光のものさしを持つことの戦略的意義の大きさが実証されたと考えている。8ヶ国という大規模な国際比較が短時間で完了できたのは思わぬ副産物であったが、ファイバーコムの実力を象徴する実例となった。

ファイバーコムは高い信頼性と比較的シンプルな構成を持つが、他分野への応用や製品化を考えれば、より高いレベルでの信頼性向上とよりシンプルな構成が必要である。そのためには企業との協力が必要である。これまで、NEDO 産業技術研究助成事業等を活かした複数企業との共同研究や技術研修を通じて技術移転を行っている他、ファイバー光学系や制御系を分割してモジュール化することにより、高性能ファイバーコムの製品化も目指している。ファイバーコムの小型化・製品化・低価格化が実現されると、光通信分野では、校正のみならずグリッド波長に厳密に対応した信号光をそのまま発生させるなど、通信技術そのものに入り込む可能性が出てくるだろう。また、長さ標準分野においては、登録事業者が光コムを持つようになり、最終的にはヨウ素安定化ヘリウムネオンレーザーを持ち運ぶ必要がなくなる。光通信技術、国内でのトレーサビリティ体系、および安定化レーザーの国際比較 CCL-K11 のスキームも時代と共に変貌し、より合理的になっていくことが予想され、我々のファイバーコムがその一助となることを期待している。

### 用語の説明

用語 1: モード同期レーザー：縦モード間隔に近い周波数で、損失や屈折率の変調が共振器に加わると、縦モード間隔が変調周波数に引き込まれて等しくなる。これをモード同期といい、外部から変調を加えることでモード同期する場合を強制モード同期 (active mode-locking)、外部から変調を加えず、共振器内の光パワーの変動によってモード同期する場合を受動モード同期という。

用語 2: 高非線形ファイバー：モード同期レーザーの出力のスペクトルを1オクターブ以上に広帯域化するために使われる、高い非線形係数を持った光ファイバー。800 nm付近にゼロ分散波長を持つフォトニック結晶ファイバーも高非線形ファイバーではあるが、通常は1.5 μm帯にゼロ分散波長を持つものを指す。

用語 3: サイドバンド型光コム：モード同期レーザーによる光コム以前に用いられていた光コム的一种。共振器内に電気光学変調器を挿入し、縦モード間隔周波数に近い変調周波数を与えることで、入力するCWレーザーに比較

的広帯域にわたる多数のサイドバンドが得られる。非常に高いモード間隔周波数が得られ、1モード当たりのパワーも大きい。CEO信号が得られたという報告は今までになく、モード同期レーザーによる光コムの台頭後は周波数計測用にはあまり用いられなくなっている。

用語 4: APMP (Asia Pacific Metrology Programme) : アジア太平洋計量計画。1980年に発足し、APEC (アジア太平洋経済協力会議) 傘下でのメートル条約に基づくメトロロジー (計量) 活動における地域計量組織として、各国の標準器の国際比較や技術協力等の活動を行う。世界にはAPMPの他、北アメリカのSIM、ヨーロッパ大陸を中心としたEUROMET、およびその他大小6つの地域計量組織があり、相互に協力関係にある。

用語 5: CMC (Calibration and Measurement Capability) : 校正・測定能力。メートル条約に基づき、国際的に審査を経て認められた、各国の国家標準が持つ測定の不確かさ。

用語 6: 光格子時計：光周波数に時計遷移周波数をもつ「光時計」のうち、高い正確さと周波数安定度とを両立できることから、次世代の周波数標準として最も有力といわれる方式。東京大学の香取教授により提案された方法で、提案からわずか10年程度で世界中の有力標準研究機関で研究開発されるようになった。

### 参考文献

- [1] H. Schnatz, B. Lipphardt, J. Helmcke, F. Riehle and G. Zinner: First phase-coherent frequency measurement of visible radiation, *Phys. Rev. Lett.*, 76 (1), 18-21 (1996).
- [2] Y. Miki, A. Onae, T. Kurosawa, Y. Akimoto and E. Sakuma: Frequency chain to 3.39-μm CH<sub>4</sub>-stabilized He-Ne-laser using Josephson point-contact as harmonic mixer, *Jpn. J. Appl. Phys. Part 1*, 33, 1655-1658 (1994).
- [3] T. J. Quinn: Practical realization of the definition of the metre, including recommended radiations of other optical frequency standards (2001), *Metrologia*, 40 (2), 103-133 (2003).
- [4] 石川純: 誰でも作れて携行できる長さの国家標準器, *Synthesiology*, 2 (4), 276-287 (2009).
- [5] T. Udem, J. Reichert, R. Holzwarth and T. W. Hänsch: Absolute optical frequency measurement of the cesium D<sub>1</sub> line with a mode-locked laser, *Phys. Rev. Lett.*, 82, 3568-3571 (1999).
- [6] 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*, 288 (5466), 635-639 (2000).
- [7] T. Okuno, M. Onishi, T. Kashiwada, S. Ishikawa and M. Nishimura: Silica-based functional fibers with enhanced nonlinearity and their applications, *IEEE J. Sel. Top. Quant. Electron.*, 5, 1385-1391 (1999).
- [8] J. K. Ranka, R. S. Windeler and A. J. Stentz: Optical properties of high-delta air silica microstructure optical fibers, *Opt. Lett.*, 25, 796-798 (2000).
- [9] A. Onae, T. Ikegami, K. Sugiyama, FL. Hong, K. Minoshima, H. Matsumoto, K. Nakagawa, M. Yoshida and

S. Harada: Optical frequency link between an acetylene stabilized laser at 1542 nm and an Rb stabilized laser at 778 nm using a two-color mode-locked fiber laser, *Opt. Commun.*, 183, 181-187 (2000).

[10] FL. Hong, K. Minoshima, A. Onae, H. Inaba, H. Takada, A. Hirai, H. Matsumoto, T. Sugiura and M. Yoshida: Broad-spectrum frequency comb generation and carrier-envelope offset frequency measurement by second-harmonic generation of a mode-locked fiber laser, *Opt. Lett.*, 28 (17), 1516-1518 (2003).

[11] T. R. Schibli, K. Minoshima, FL. Hong, H. Inaba, A. Onae, H. Matsumoto, I. Hartl and M. E. Fermann: Frequency metrology with a turnkey all-fiber system, *Opt. Lett.*, 29 (21), 2467-2469 (2004).

[12] H. Inaba, Y. Daimon, FL. Hong, A. Onae, K. Minoshima, T. R. Schibli, H. Matsumoto, M. Hirano, T. Okuno, M. Onishi and M. Nakazawa: Long-term measurement of optical frequencies using a simple, robust and low-noise fiber based frequency comb, *Opt. Express*, 14 (12), 5223-5231 (2006).

[13] FL. Hong, J. Ishikawa, ZY. Bi, J. Zhang, K. Seta, A. Onae, J. Yoda and H. Matsumoto: Portable I<sub>2</sub>-stabilized Nd : YAG laser for international comparisons, *IEEE T. Instrum. Meas.*, 50 (1), 486-489 (2001).

[14] D. Strickland and G. Mourou: Compression of amplified chirped optical pulses, *Opt. Commun.*, 56 (3), 219-221 (1985).

[15] Y. Nakajima, H. Inaba, FL. Hong, A. Onae, K. Minoshima, T. Kobayashi, M. Nakazawa and H. Matsumoto: Optimized amplification of femtosecond optical pulses by dispersion management for octave-spanning optical frequency comb generation, *Opt. Commun.*, 281 (17), 4484-4487 (2008).

[16] M. Nakazawa, K. Kurokawa, H. Kubota, K. Suzuki and Y. Kimura: Femtosecond erbium-doped optical fiber amplifier, *Appl. Phys. Lett.*, 57, 653-655 (1990).

[17] L. Nugent-Glandorf, T. A. Johnson, Y. Kobayashi and S. A. Diddams: Impact of dispersion on amplitude and frequency noise in a Yb-fiber laser comb, *Opt. Lett.*, 36 (9), 1578-1580 (2011).

[18] Y. Nakajima, H. Inaba, K. Hosaka, K. Minoshima, A. Onae, M. Yasuda, T. Kohno, S. Kawato, T. Kobayashi, T. Katsuyama and FL. Hong: A multi-branch, fiber-based frequency comb with millihertz-level relative linewidths using an intra-cavity electro-optic modulator, *Opt. Express*, 18 (2), 1667-1676 (2010).

[19] K. Iwakuni, H. Inaba, Y. Nakajima, T. Kobayashi, K. Hosaka, A. Onae and FL. Hong: Narrow linewidth comb realized with a mode-locked fiber laser using an intra-cavity waveguide electro-optic modulator for high-speed control, *Opt. Express*, 20 (13), 13769-13776 (2012).

[20] A. Onae, K. Minoshima, J. Yoda, K. Nakagawa, A. Yamaguchi, M. Kourogi, K. Imai and B. Widiyatomo: Toward an accurate frequency standard at 1.5 μm based on the acetylene overtone band transition, *IEEE T. Instrum. Meas.*, 48, 563-566 (1999).

[21] M. Kourogi, K. Nakagawa and M. Ohtsu: Wide-span optical frequency comb generator for accurate optical frequency difference measurement, *IEEE J. Quant. Electron.*, 29, 2693-2701 (1993).

[22] M. Matus, P. Balling, P. Kren, P. Mašika, FL. Hong, J. Ishikawa, H. Inaba, K. Hosaka, M. Yasuda, D. Akamatsu, A. Onae, RH. Shi, JL. Peng, E. Howick, J. Qian, XY. Liu, M. Ranusawud, A. Tonmuanwai, S. L. Tan, ZX. Chao, KH. Yeoh, N. Mat Daud, T. K. Chan, R. Fira, O. Stalder, K. Tomanyiczka and L. Robertsson: The CCL-K11 ongoing key comparison: final report for the year 2010, *Metrologia*, 48 (2011).

[23] M. Yasuda, H. Inaba, T. Kohno, T. Tanabe, Y. Nakajima, K. Hosaka, D. Akamatsu, A. Onae, T. Suzuyama, M. Amemiya and FL. Hong: Improved absolute frequency measurement of the <sup>171</sup>Yb optical lattice clock towards a candidate for the redefinition of the second, *Appl. Phys. Express*, 5 (2012).

[24] H. Inaba, K. Hosaka, M. Yasuda, Y. Nakajima, K. Iwakuni, D. Akamatsu, S. Okubo, T. Kohno, A. Onae and FL. Hong: Spectroscopy of <sup>171</sup>Yb in an optical lattice based on laser linewidth transfer using a narrow linewidth frequency comb, *Opt. Express*, 21 (7), 7891-7896 (2013).

### 執筆者略歴

稲場 肇 (いなば はじめ)

1993年北海道大学大学院工学研究科応用物理学専攻修士課程修了。同年工業技術院計量研究所入所。連続発振ファイバーレーザーの開発に従事。2001年より産業技術総合研究所計測標準研究部門主任研究員。2004年博士(工学)(北海道大学)。以後、光コム の発生、制御、そして光周波数標準関連技術への応用の研究に従事。2008年文部科学大臣表彰。2012年市村学術賞。この研究においては、ファイバーコムの自家製作、国家標準化、および狭線幅化で主導的役割を果たした。



大苗 敦 (おおなえ あつし)

1988年東京大学大学院理学系研究科物理学専攻博士課程中退。同年工業技術院計量研究所入所。1990年理学博士(東京大学)。アセチレン分子を用いた光通信帯での波長標準器の開発、およびその評価のための光周波数計測技術の研究に従事。現在、産業技術総合研究所計測標準研究部門上級主任研究員。2003年応用物理学会・光・量子エレクトロニクス業績賞。2008年文部科学大臣表彰。この研究では、光通信帯波長における技術開発(安定化レーザー開発、および光コムを用いた周波数計測)で主導的役割を果たした。



洪 鋒雷 (こう ほうらい)

1992年東京大学大学院理学系研究科物理学専攻博士課程修了。92年理化学研究所基礎科学特別研究員。94年より工業技術院計量研究所入所、現在産業技術総合研究所計測標準研究部門時間周波数研究科長。高分解能レーザー分光、光コムと光周波数計測の研究に従事。2008年文部科学大臣表彰。2012年市村学術賞。この研究においては、ファイバーコム黎明期の学術的成果、ファイバーコムの国家標準化、および波長安定化レーザーの国際比較で主導的役割を果たした。



### 査読者との議論

#### 議論1 全般

質問・コメント(小林 直人:早稲田大学研究戦略センター)

この論文は、光周波数コムの発生に関して、従来行われていた固体レーザーによるコム発生に関する数々の欠点を、ファイバーレーザーを利用することにより克服し、光通信周波数領域における標準等に結びつけて優れた性能を実証したものであり、優れた構成学の論文であると言えます。

質問・コメント（土田 英実：産業技術総合研究所）

Hall、Hänschらによる光周波数コムの基本原理解明をベースとして、より実用的な装置に仕上げるための研究開発と位置づけられます。ファイバーコム自体の開発に関しては、目標が明確であり、目標達成までの道筋も詳細に記述されています。

## 議論2 標題について

質問・コメント（土田 英実）

標題が「通信の大容量化に対応する長さの国家標準」となっていますが、光通信で必要とされるのは「長さ」標準ではなく、「光周波数」標準です。論文の趣旨と合致した標題、例えば、「光通信の大容量化を支える光周波数の国家標準」などのように変更することは可能でしょうか。

回答（稲場 肇、大苗 敦、洪 鋒雷）

通信帯波長への対応はもちろん重要なミッションであり、校正技術の確立において我々は常に先手を打ってきました。ただ一方で、長さ標準の実現技術もまた我々の重要なミッションであり、SIメートルを実現する国家標準の運用を長きにわたって行ってきました。歴史的にも、長さ標準の実現はより古くから行われており、光周波数標準が必要になったのは21世紀に入ってからですので、説明としては長さ標準→光周波数標準の順番にさせて頂きたいと存じます。また、そのような理由により、表題についても変更なしでご了承願えれば幸いです。

## 議論3 光ファイバーコムの応用分野

質問・コメント（土田 英実）

光ファイバーコムの主要な応用分野として、光通信に重点を置いていることは、標題から理解できますが、5章の内容は、光通信から長さ標準、国際比較、高速制御等多岐に渡っており、発散している印象を受けます。長さ標準に関わる内容を記載してもよいと思いますが、光通信の部分をもう少し膨らませることはできないでしょうか。光通信で規定されている周波数グリッド、周波数計測技術に対する要求、光ファイバーコムが産業界でどのように利用されているかなどの記述があれば、理解が一層深まると思います。

回答（稲場 肇、大苗 敦、洪 鋒雷）

今回解説したファイバーコムの成果では、「いろいろな応用ができた」ことも重要なポイントと考えていました。しかし、ご指摘のとおり発散しているという印象を持たせないよう、光通信の記述を充実させるために5章の冒頭に追記を行いました。

## 議論4 ファイバーコム開発の動機や予測

質問・コメント（小林 直人）

この論文によると、ファイバーコムにより固体レーザーコムの欠点をほとんど克服し、非常に高精度の光コムを作ることができたことですが、2点ほど質問があります。(1) ファイバーコムを開発しようという動機ですが、論文によると共同研究企業が高性能ファイバーレーザーを提供してくれたからとの記述がありますが、ファイバーコムを開発すれば高性能コムになりそうだとこの予測は始めからあったのでしょうか。(2) ファイバーコムを自作したことが今回の大きな開発要素となったとの記述がありますが、そうすることによって始めからうまくいく予測があったかどうかをお聞きしたいと思います。

回答（稲場 肇、大苗 敦、洪 鋒雷）

2002～2004年の科学技術振興調整費プロジェクト「ブロードバンド光シミュライザー」で、ある企業との共同研究が実現しました。その会社のモード同期ファイバーレーザーは信頼性が高く、非線形結晶

を内蔵するなど波長800nm帯の光コムも発生できるなど、優秀なレーザーでした。2004年には高非線形ファイバーと組み合わせた絶対光周波数計測も実現して、ファイバーコムの開発は一段落しました。

しかし、レーザーシステムはその会社が開発したものですから、例えばビート信号のS/Nが低くてもコム発生部には手を入れられず、他にも制御系等に不満がありましたが、改造はその会社に依頼しなくてはなりません。また、光コムを使って行いたい研究はたくさんあり、多数の光コムが必要でした。それらのことから、その後の改善、そしてツールとして研究を展開していくためには、モード同期ファイバーレーザーから増幅系、非線形ファイバ(HNLF)の選定など、すべてのシステムを自作することが重要だと考えました。

コムの製作については、Ti:Sコムおよびメーカ製ファイバーコムでの経験、CWファイバーレーザー製作の経験などがありましたので、超えなければならない課題は多いと思いましたが、少なくとも周波数計測できるシステムは自作できるだろうと思っていました。自作のシステムが最も使いやすく、高い性能のものになるという自信まではありませんでしたが。

しかし、現在、市販のコムシステムを見る機会がたまにありますが、気に入らない仕様があっても、自分で改造しにくい構造になっていて、それを自分が使わなければならないとしたら辛いな、と思います。

## 議論5 光コムとしての高性能の実現

質問・コメント（土田 英実）

4.1節の始めに、Ti:Sレーザーとファイバーレーザーの性能（出力、パルス幅）を比較した記述がありますが、光コムとして動作させるために、どのようにして性能の差を克服したのか明確には記載されていません。用いた手法（光増幅、パルス圧縮等）と、性能差がどこまで小さくなったかを具体的に記載して下さい。

回答（稲場 肇）

光コムの広帯域化においては、出力やパルス幅といったレーザー側の性能を上げることも有効ですが、高非線形ファイバーの選定やCEO信号検出方式の工夫といったレーザー以外の最適化も必要でした。今回は、例えば、波長帯域が1オクターブに満たないコムのCEO信号を2f-3f干渉計で検出したり、最適な高非線形ファイバーを見つけて適用したりすることにより、CEO信号を検出することができました。4.5節にも加筆しましたが、レーザーの自家製作以降も、Ti:Sコムと比較したとき、パワーやパルス幅といった時間軸上での性能差は特に小さくなっておりません。我々がめざし、開発したのは高速制御による低い雑音性能、および堅牢性を持つ、周波数軸上で高性能かつ実用的なファイバーコムです。

## 議論6 光コムとしての高性能の実現

質問・コメント（土田 英実）

4.3節に分散制御の必要性が詳しく記述されていますが、光ファイバー通信や超短光パルスに関わる研究者にとっては、常識的な内容に思われます。また、平均パワーとピークパワーの区別が明確ではなく、スペクトル拡がりとの関係も理解しにくくなっています。出力増大を伴う原因も含めて、わかり易い記述に改めて下さい。

回答（稲場 肇）

平均パワー、ピークパワーについては、ご指摘の通り区別いたしました。また、出力増大に伴う原因についても、仮説ではありますが加筆致しました。分散制御について4.3で述べた、光アンプへの入射光パルスのチャープ量を適正に調整すると、出力光の平均パワーが増大する現象は、論文、および特許として認められたオリジナルな成果ですので、ご了承いただければ幸いです。