

# 精密長さ計測のための光コムによる干渉計測

美濃島 薫

## Interferometry for Precision Length Measurements Using Optical Combs

Kaoru MINOSHIMA

Optical comb technology has been successfully used in frequency metrology, but the potential of the technology in length metrology has not been fully explored. In this article, advantages of comb technology in length metrology is discussed. Several interferometric techniques using optical comb in previous works are categorized. As examples, two previous works by the author's group are reviewed. One is a picometer displacement interferometry. In a frequency scanning interferometer, using an optical frequency synthesizer based on an optical comb as the light source and a reference cavity to compensate environmental instability, long-range precise displacement measurement such as  $10\ \mu\text{m}$  with picometer uncertainty was achieved. The second example is a direct measurement of group refractive index of air. Using interferometer between the adjacent pulses in the mode-locked laser, air-refractive-index was measured without complicated setup using a vacuum reference. Precise interferometric signal was obtained by the change of the pulse repetition frequency. Optical comb technology will be widely used in interferometry.

**Key words:** optical comb, mode-locked laser, length metrology, ultrashort pulse, picometer interferometry, refractive index of air

### 1. はじめに

#### 1.1 光コムについて

超短パルス発生法として広く知られるモード同期レーザーを、光周波数の精密なものさし、すなわち「光周波数コム」として用いる報告がなされてから、早くも10年が経とうとしている<sup>1)</sup>。それは、超高速と超精密という、従来直交して進展してきた技術分野が究極において融合するというドラマチックな出来事であり、その後の両者の技術に革命的な変革をもたらした。

超短パルスモード同期レーザーは時間軸上の短パルス列であると同時に、フーリエ変換の関係で結ばれる周波数軸上においては多数の光周波数モード列となっている。多数のモードが等間隔に並ぶ様子から、光の櫛（光コム、光周波数コムなど）とよばれている（図1）。櫛の歯間隔はパルス列間隔の逆数に相当し、櫛全体の広がり（パルス幅）の逆数に相当する。すなわち、時間軸上で安定な超短パルスを

発生させるための技術的努力は、同時に光周波数コムとしても優秀な光を発生させることにほかならなかったのである。

モード同期レーザーが多数の等間隔な光周波数モードを形成することは数学的にはフーリエ変換の関係として自明なことであるが、実際のモード同期レーザーにおいて、精密計測に利用価値のある高精度なモード列を実現するのは容易なことではなかった。それが近年のレーザー制御技術の進展により、容易に実現されるようになったことが光コムの利用が爆発的に広がった理由である。特に、初期の研究では、スペクトル帯域全域にわたり等間隔でコヒーレントなモードが実現されているのかが懸念されたが、驚くべき精密さで実証された<sup>2)</sup>。さらに、超短パルスレーザーとファイバー技術の融合により、1オクターブに及ぶコヒーレントな広帯域光発生が実現され、セルフリファレンス法というマイクロ波基準のみによる光周波数の制御（絶対制

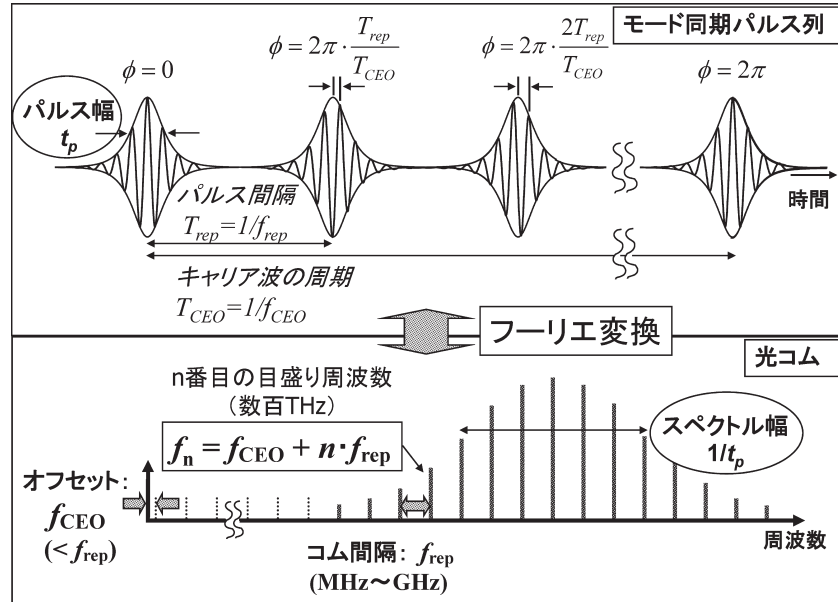


図1 モード同期パルス列と光コムの関係。

御) 法が開発されて、「光のものさし」としての利用価値が一気に高まった<sup>3)</sup>。これらの知見により、数百 THz という高周波である光モードの周波数が、一般に MHz~GHz などのモード間隔周波数 ( $f_{rep}$ : モード同期繰り返し周波数) の整数倍と、その余りの定数項 ( $f_{CEO}$ : キャリヤエンベロープオフセット周波数) の和として、2つのマイクロ波周波数のみの簡単な一次式で高精度に記述されることになったのである (図1中の式)。光周波数は直接測定できないが、マイクロ波周波数であれば、カウンターなどの電子機器を用いて簡単に測定できる。それまで、レーザーの波長 (光周波数) を測定するためには、同種のレーザーを基準としてその比較を行うのが現実的な手段であり、基準となる波長安定化レーザーの波長は、その種類ごとに手間のかかる国際的な比較を経て、おのおの独立に取り決められていた。また、安定な原子・分子の吸収線など実用的な安定化手段のない波長においては、波長安定化レーザーの実現は困難であり、精密な計測において利用できるレーザー波長が限られていた。現在、時間・周波数の標準はマイクロ波周波数であるセシウム原子の発振周波数により定義されている。レーザーの波長 (光周波数) を定義に従って測定 (絶対測定) するためには、マイクロ波と光周波数の何桁ものギャップを埋めなければならず容易なことではないが、光コムの等間隔に続くモードをものさしの目盛りとして用いることで、これらの絶対測定が容易に実現できる。これにより、原理的には任意のレーザー波長を精密に測定できると同時に、任意の波長での安定化レーザーが実現され、光応用技術において、革命的なツールの拡

大が得られたのである。

このように、光コム技術の有効性が明らかになることにより、光波の位相レベルの制御技術が革命的に進展した。その技術は、光周波数計測のみならず、超高速技術、分光技術、精密長さ計測などにおいても画期的な進展をもたらし、従来の光源では実現できなかったレベルの精密さに加え、ダイナミックレンジが実現されるようになってきた。本稿では、干渉計測における光コム技術の効用に焦点を当てて、概観することを試みたい。

## 1.2 干渉計測における光コムの意義

干渉計測における光コムの意義・効用はおもに以下のようなものである。

- 1) 光周波数の絶対測定により、メートルの定義に忠実な測定ができる。現在、物理量「長さ」の基本単位「メートル」は、光速によって定義されている。その実現のためには、周波数を測定して長さの次元である波長を決めるか、時間を測定して光の飛行距離を決めるかのどちらかによるものと定められている。光周波数の絶対値が付与された光源を用いることにより、干渉計測によって定義に忠実な長さ測定が可能となる。
- 2) 周波数計測の手法を干渉計測に適用することにより、測定の高精度化と、ダイナミックレンジの拡大が容易になる。周波数はすべての物理量の中で最も高精度・高ダイナミックレンジが実現されている。光コム技術によって干渉計測において周波数計測の手法を容易に利用することができるようになり、高精度な周波数標準に直結した高精度測定が容易となる。

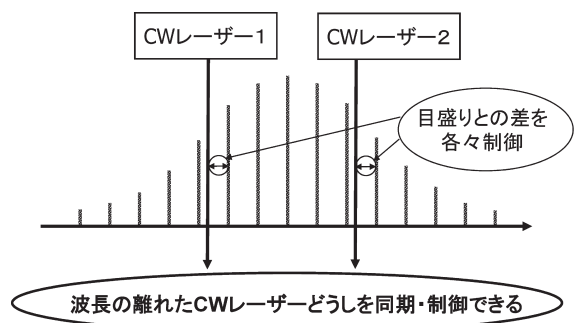


図2 2台のCWレーザーの同期・制御。

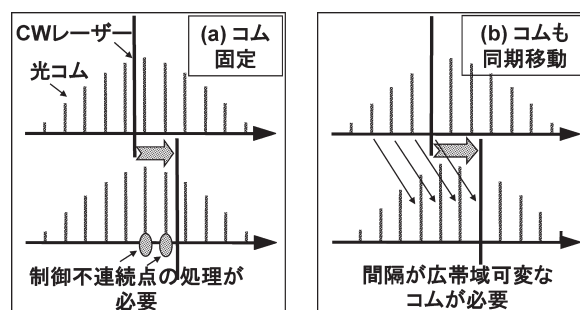


図3 レーザーの光周波数走査。

- 3) global positioning system (GPS) による伝送や通信技術を用いて、遠隔での利用が容易なマイクロ波周波数を基準として用いることができる。これにより、光計測においても、場所や時間の制約を超えて、正確で信頼性の高い測定を容易に実現できる。
- 4) 高精度な多色光や波長可変光の利用が容易になり、測定のフレキシビリティが拡大する。特に、これまで精密な基準のなかった THz や極短紫外などの周波数領域の利用が可能となり、分光・分析などにおいても精密化や高感度化が可能になる。
- 5) 光コムに内包される、マイクロ波から光周波数までの広い周波数レンジにわたる精密な位相関係を利用することにより、高精度な変調やビートなどの周波数軸を積極的に利用した精密な信号取得・処理の手法が活用できる。

### 1.3 光コムの利用例

これらの光コムのポテンシャルは、干渉計測を中心とした長さ計測においてまだ十分利用されているとはいえないが、日本が世界を先導してきており、近年、世界的にも研究が盛んになってきている。これまで光コムを実際に干渉計測、および、その関連技術に用いた例を、大きく以下のように分類した。

- 1) 周波数絶対値を付与した光コムに波長を安定化した、1色もしくは多色のCWレーザーを光源として用いるもの。波長が大きく異なる複数のレーザーを一度に安定化できる利点を生かし、多色光を用いた干渉次数の決定や合成波長の干渉が可能である(図2)<sup>4-6)</sup>。
- 2) 波長走査干渉計において、波長可変光源を光コムに安定化して制御する、もしくは、光コムを用いてその波長を測定するもの。図3に示すように、固定の光コムの上を滑らすようにCWレーザーを走査する方式<sup>7,8)</sup>と、CWレーザーは光コムのひとつのモードに固定したまま、モード間隔を変化させることによって波長を走査させる方式<sup>9)</sup>がある。おのおの図中に示し

たような技術的課題があるが、光コムに同期した連続走査が実現できる。光コムの利用により、波長走査範囲の拡大と高精度な走査の両立ができるため、波長走査干渉計においても変位量の拡大と高分解能の両立が可能となる<sup>10,11)</sup>。

- 3) 光コムをそのままパルス光源として用いるもの。パルスのエンベロープの時間幅、もしくはスペクトル幅で制限されたパルス内キャリア波の干渉が観測される。白色光源による低コヒーレンス干渉とは異なり、パルス列内の異なるパルスが相互に干渉する(パルス間干渉)ため、真のコヒーレンス長は各モードの線幅で決まりシングルモードCWレーザーと同様に長い。パルス間干渉を利用することにより、低コヒーレンス干渉と等光路差を必要としない干渉測定 of 両者の利点を生かした高機能な干渉計測が可能である。また、光路長を周波数で制御できるため機械的走査が不要となり、高速化・高精度化に有利である。これらの特徴を生かした形状測定、長距離測定、空気の屈折率測定が行われている<sup>12-17)</sup>。
- 4) 光コムを広帯域光源として利用するもの。3)と同様だが、特にスペクトル干渉を用いるもの。コヒーレントライダや形状計測に用いられている<sup>18,19)</sup>。究極には、検出のスペクトル分解能がモード間隔を超えると(高分解能になると)、各モードの狭い線幅を生かした測定が可能となる。
- 5) 光コムのモード間の干渉(モード間ビート)を利用するもの。1つのコムのセルフビート、および、複数のコム同士のクロスビートを利用することが可能。マイクロ波から光周波数までの非常に広帯域な合成波干渉とみなすことができ、広帯域・高精度な変調、ヘテロダイン、ビートダウン手法など、光周波数とRF・マイクロ波周波数の高精度な変換を用いた計測が可能<sup>20,21)</sup>(図4)。
- 6) 光コムの各周波数モードをCW光源出力として利用

するもの。現在主流のチタンサファイアレーザーなどにおいてはモード間隔が1 GHz 以下と狭く、また単一モード出力が nW 程度と弱いため、外部 CW レーザーをトランスファー用のレーザーとして用いて、前述の 1) や 2) のようなコムに同期・制御を行うか、またはインジェクションロックにより、実効的に増幅と切り出しを行うのが主流。モード間隔が 10 GHz などと広いモード同期レーザーや変調器型の光コムにおいては、フィルタリングによる単一モード出力が実現されている。このような単一モードごとの位相と強度の制御手法が進むことにより、任意の光波形の合成・発生が可能となり、計測手法のさらなる広がりが期待される。

以下では、これらにあげた測定の実施例を示すために、筆者らのこれまでの研究から典型的な例を紹介する。まず、2) の実施例として、光コムに同期した波長走査光源によるピコメートル変位干渉計測について紹介する<sup>11)</sup>。光コムに常時同期した波長をもつ光源を用いることにより、変位計測において、広範囲の高速計測と高精度計測を両立した。次に、3) の実施例として、異なるパルス間干渉により空気の群屈折率測定を行った例を示す<sup>13)</sup>。パルス間干渉を用いることによって、干渉計の光路長を周波数走査によって変化させることができるため機械的な走査が不要となり、また周波数標準に基づく高精度な測定が実現された。

## 2. ピコメートル変位干渉計測

ナノテクノロジーの技術的進歩に伴い、微細寸法・形状精密計測技術に対する要求が高まっている。特に、ダイナミックレンジの拡大が課題であり、例えば、リソグラフィなどにおいては、マイクロメートルオーダーの変位に対して、サブナノメートルの測定不確かさが求められている。

従来、変位計測にはマイケルソン型干渉計などのレーザー干渉計が広く用いられているが、位相測定の際にサイン波信号の歪みから生じる非線形誤差（周期誤差）が問題であった。それに対し、変位に際して、固定位相を与えるように光源の光周波数を変化させ、その値を測定する原理により周期誤差を解消できる<sup>22)</sup>。ここで、10 μm の変位を 1 pm の分解能で測定する場合、光周波数の測定においても、例えば、100 GHz の可変範囲と 10 KHz の測定分解能という、同様のダイナミックレンジが必要であり、従来法では困難である。われわれは、光コムを用いて広帯域の任意光周波数発生器である光周波数シンセサイザーを構築

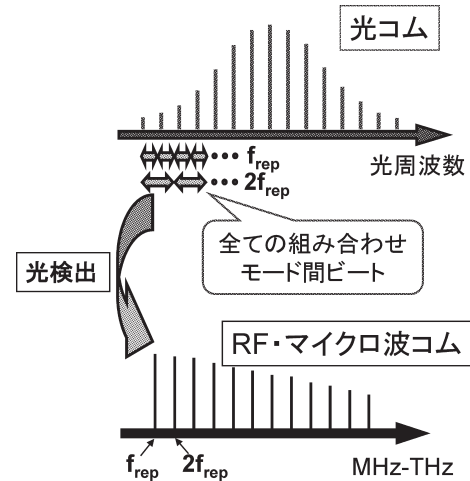


図4 光コムのセルフ・モード間干渉。

し、この問題を解決した<sup>8)</sup>。

光コムとしては、半導体レーザー励起のモード同期 Nd ガラスレーザーを作製し、可飽和吸収ミラーによるモード同期により、中心波長 1055 nm、平均出力 130 mW、パルス幅 170 fs、繰り返し周波数 485 MHz の安定な出力を得た。光周波数値の付与されたヨウ素安定化 Nd:YAG レーザー<sup>23)</sup> (1064 nm) を基準レーザーとして光コムを位相同期し、絶対値のついた光のものさしとして使用した。この光コムと市販の周波数可変 CW ファイバーレーザー (Model Boostik, Koheras A/S, 周波数可変範囲 50 GHz) とのビート信号を検出し、開発したフルディジタルサーボシステムによって高精度な位相同期を保ちながら波長を走査することにより、光コムに同期した任意周波数の光出力を得た。このとき、波長走査には図 3 (a) の方式を用いているが、周波数シフトした 2 種類の制御信号を用いることによって制御不連続点の処理を行い、常時位相同期を保ちながらの広帯域走査に成功した。これらにより、セシウム周波数標準に同期した任意の光周波数出力が得られる、マイクロ波のシンセサイザーと同等な機能を実現した。また、フルディジタル制御の利点を生かし、80 GHz/s を超える高速走査を実現した。走査可能範囲は、使用した CW レーザーの周波数可変範囲で制限されており、50 GHz である。

干渉計としては、2 枚の対向するミラーから構成されるファブリー・ペロー (FP) 干渉計を用いた。干渉計の光源として光周波数シンセサイザーの出力を用い、ファブリー・ペロー干渉計の共鳴周波数を測定する。それにより、ファブリー・ペロー干渉計の対向するミラー間距離（共振器長）を高精度に知ることができる。しかしながら、共振器内の空気屈折率が測定結果に含まれるため、実用的な環

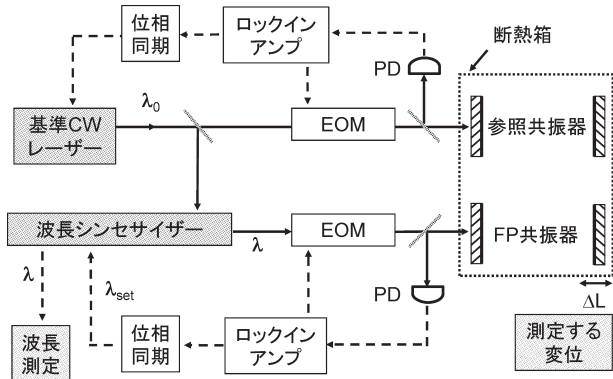


図5 波長シンセサイザによる干渉計の配置図. EOM: 電気光学変調器.

境においては、気温や気圧などの環境変動による空気屈折率の変動を考慮しなければならない。そこで、われわれは、測定用の共振器に加えて、基準となる固定長の参照用共振器を用いて、その影響を補正した。

図5に測定配置図を示す。測定用共振器と参照用共振器は低熱膨張ガラス材（クリアセラム）で構成した。さらに、2つの共振器を安定な断熱ボックス内に並べて配置し、両者の周辺環境が同一になるように配慮した。まず、参照用共振器に基準として用いるCW Nd:YAG レーザーを入射し、空気屈折率を加味した共振器の光路長変化に波長を同期させた。これにより、空気中の波長  $\lambda_0$  が安定化された基準レーザーを構築し、それに対して光コムのひとつのモード周波数が一致するように制御した。空気屈折率が変動した場合、モード間隔  $f_{rep}$  を変化させることにより光コムの該当するモードを追随させ、常に波長  $\lambda_0$  と一致するように制御する。そのとき、光コムの他の ( $m$  番目の) モード波長  $\lambda_m$  は、基準波長  $\lambda_0$  と同期して波長を一定に保つような振る舞いをする。すなわち、多数のモードの波長が環境変動に対して同時に安定化されるので、これにより、空気の屈折率変動を補正した「周波数コム」、すなわち「波長コム」が構築される。

以上のような波長コムを用いて干渉計測を行うことにより、測定環境変動の影響を自動的に補償した高精度な測定が可能となる。図6に、測定共振器に変位を与えない場合の干渉計測の安定性評価結果を示す。上述の参照用共振器を用いた「波長コム」を用いた場合と、参照用共振器を用いずにヨウ素安定化Nd:YAGレーザーを光基準として周波数を安定化させた「周波数コム」を用いた場合について比較した。10時間の連続測定において、「周波数コム」を用いた場合は50 nm程度の変動がみられているのに対し、「波長コム」を用いた場合には300分の1の変動に抑

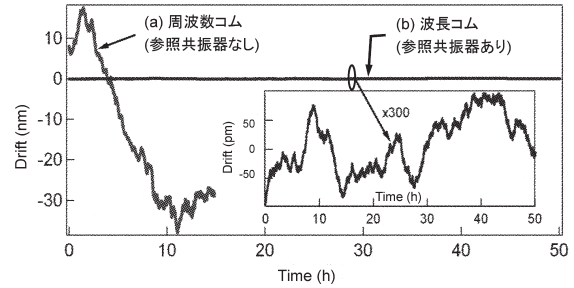


図6 干渉計の長期安定性と参照干渉計の効果<sup>11)</sup>.

えられている。このように、1分間の測定時間に対して約1 pm、30分間で約10 pmという非常に高い安定性が空気中の測定において得られた。

最後に、この方法を用いて実際に変位計測を行った。フアブリー・ペロー干渉計の一方のミラーを、市販の静電容量センサーによってフィードバック制御されたナノポジショニングステージに載せて変位を与えた。12  $\mu\text{m}$  の変位測定を独立に3回行ったところ、再現性は1 nm以下であり、ステージの保証性能と同等であった。また、測定の非線形性は、非線形残差の最大値で8.6 nm ( $\pm 0.036\%$ )であった。これは、同様のセンサーを搭載したステージについて報告されている文献値<sup>24)</sup>と同程度であり、静電容量センサーの性能を正しく評価できているものと考えられる。以上により、本方法がサブナノメートルの変位測定に有効であることが示された。

### 3. 空気群屈折率の直接測定

多くの実用的な干渉計測においては、空気の屈折率が測定精度を決める重要な要因となる。また、広帯域光源や変調光源、パルス光源が広く利用され、空気の群屈折率の高精度測定に対する要求が高まっている。従来、空気の群屈折率は、位相屈折率の測定結果から構築された経験式を用いて計算により求められていた。しかし、必要とされる屈折率精度が高くなるにつれ、空気中に存在する微量ガスによる吸収線の影響などが問題となり、群屈折率の直接測定の必要性が高まっている。また、パルス光源や広帯域光源を用いた実際の応用を考えた場合に、用いる光源のスペクトル幅や波形の違いにより空気中の伝搬の様子が異なってくる可能性がある。そのため、実際の光源を用いた直接測定が重要である。

長さ測定の場合と同様に、光パルスや広帯域光源を用いて、既知の長さだけ伝搬させ、その光路長を測定すれば空気の群屈折率を決定できる。しかしその際、測定光路と参照光路が同じ空気中の場合には、低コヒーレンス干渉計の

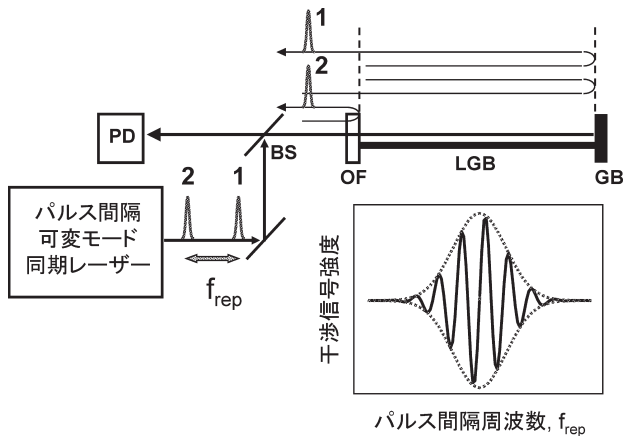


図7 パルス間干渉計による空気の群屈折率測定<sup>13)</sup>。

ような等光路干渉計を用いることはできない。そのため従来法では、屈折率の精密にわかった参照が必要であり、真空セルなどを用いるため装置が大掛かりになっていた。

ここで紹介する研究では、モード同期パルス列の隣り合うパルスを用い、伝搬距離が異なるパルス同士のパルス間干渉信号を測定することでこの問題を解決した<sup>13)</sup>。図7に、測定配置を示す。幾何学的長さが精密に測定された1 m 長のブロックゲージ (LGB) の両端に、光学平板 (OF) と短いブロックゲージ (GB) を光学コンタクトさせ、既知の長さ基準として用いている。モード同期レーザーからのパルス列は、一部が OF で反射され、一部が透過されて GB に到達し反射される。モード同期パルス間隔はほぼ 4 m なので、基準長 1 m を 2 回往復すると、次のパルスとほぼ同時になる。2 つのパルスが同時に検出器 (PD) に入射された場合のみ、パルス間干渉信号が観測される。すなわち、パルス列の繰り返し周波数 ( $f_{rep}$ ) を変化させると、図7のような干渉強度が観測される。干渉強度のエンベロープのピークは、2 つのパルス間隔が基準距離を伝搬する光路長に一致したときに相当するので、空気の群屈折率が求められる。このように、干渉計の光路長を周波数によって変化させることにより、機械的な走査を必要とせず、高速かつ周波数標準に基づく精密な測定を可能としている。この方法を用いて空気の群屈折率を 0.2 ppm の精度で直接測定し、温度や圧力などの環境変動、および波長依存性が正しく測定できることを示した。このような群屈折率直接測定は、空気中の微量吸収線の影響などの検証に発展が期待される。また、同様の方法を用いて、干渉波形のエンベロープと内部のフリンジの同時測定により、群屈折率のみならず位相屈折率の同時測定が可能である。

最近、Zhang らは、光コムを用いて、同様のパルス間干渉計におけるキャリア波の位相測定により、空気の位

相屈折率測定を行っている。マルチパス光路で測定感度を増強するとともに、周波数測定によって光路長を高精度に測定することにより、9桁の測定精度を実現している<sup>15)</sup>。

科学技術や産業において求められる長さ計測技術は、ますます高精度化すると同時に測定レンジの拡大が求められている。また、測定の高感度化、高速化、高機能化などの必要性も高まっている。本稿で述べたように、光コム技術は、これらの要求に応えるポテンシャルをもっている。

光コム技術を活用するうえで重要な要素である光源技術においても、近年の進展は目覚ましい。数年前まで大掛かりなチタンサファイアレーザーなどによってしか実現されなかった性能が、小型の固体レーザーやファイバーレーザーによって実現されるようになり、操作性と同時に安定性が画期的に向上した。特に、Er ドープファイバーレーザーを中心とする光コムにより、光通信帯のデバイス技術の蓄積を生かしたシステム化、それによる長期安定性の向上、波長変換により光通信帯から可視光までの実用的な波長範囲を容易にカバーできるなど、光コムの実用性が大きく向上した<sup>25,26)</sup>。また、光コムが発生技術としては、モード同期レーザーに先行している変調器を用いた光コム発生器は、小型化や GHz 帯の高周波モード間隔が容易に実現できる点にメリットがあり、今後、広帯域化や波長域の拡大が進展すれば応用性が大きく促進されると期待される<sup>27)</sup>。これらの発生技術のみならず、光コムノイズ特性、コヒーレンス特性に関する知見が進み、高精度な制御、検出、伝送、同期など、その利用技術も急速に進展している。

その誕生からほぼ 10 年を迎えた光コム技術であるが、干渉計測など長さ計測への応用は日本が先導しており、これからますますの発展が期待される。

本稿で触れたピコメートル干渉計、屈折率測定に関しては、現在アメリカ JILA 所属のトーマス・シプリ氏、京都府立医科大学山岡禎久氏、東京大学松本弘一氏、産業技術総合研究所稲場肇氏、洪鋒雷氏、大苗敦氏、尾藤洋一氏との共同研究である。経済産業省プロジェクト「フェムト秒テクノロジー」、科学技術研究費 (17360034)、科学技術振興調整費「ブロードバンド光シンセサイザ」の経済的支援に感謝します。

## 文 献

- 1) T. Udem, J. Reichert, R. Holzwarth and T. W. Hansch: "Absolute optical frequency measurement of the cesium D-1 line with a mode-locked laser," *Phys. Rev. Lett.*, **82** (1999) 3568-3571.
- 2) T. Udem, J. Reichert, R. Holzwarth and T. W. Hansch:

- “Accurate measurement of large optical frequency differences with a mode-locked laser,” *Opt. Lett.*, **24** (1999) 881–883.
- 3) 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** (2000) 635–639.
  - 4) J. R. Lawall: “Interferometry for accurate displacement metrology,” *Opt. Photon. News*, **15** (2004) 40–45.
  - 5) J. Jin, Y. J. Kim, Y. Kim and S. W. Kim: “Absolute length calibration of gauge blocks using optical comb of a femtosecond pulse laser,” *Opt. Express*, **14** (2006) 5968–5974.
  - 6) M. Kajima and H. Matsumoto: “Picometer positioning system based on a zooming interferometer using a femtosecond optical comb,” *Opt. Express*, **16** (2008) 1497.
  - 7) J. D. Jost, J. L. Hall and J. Ye: “Continuously tunable, precise, single frequency optical signal generator,” *Opt. Express*, **10** (2002) 515–520.
  - 8) T. R. Schibli, K. Minoshima, F. L. Hong, H. Inaba, Y. Bitou, A. Onae and H. Matsumoto: “Phase-locked widely tunable optical single-frequency generator based on a femtosecond comb,” *Opt. Lett.*, **30** (2005) 2323–2325.
  - 9) B. R. Washburn, S. A. Diddams, N. R. Newbury, J. W. Nicholson, M. F. Yan and C. G. Jørgensen: “Phase-locked, erbium-fiber-laser-based frequency comb in the near infrared,” *Opt. Lett.*, **29** (2004) 250–252.
  - 10) Y. Bitou, T. R. Schibli and K. Minoshima: “Accurate wide-range displacement measurement using tunable diode laser and optical frequency comb generator,” *Opt. Express*, **14** (2006) 644–654.
  - 11) T. R. Schibli, K. Minoshima, Y. Bitou, F. L. Hong, H. Inaba, A. Onae and H. Matsumoto: “Displacement metrology with sub-pm resolution in air based on a fs-comb wavelength synthesizer,” *Opt. Express*, **14** (2006) 5984–5993.
  - 12) T. Yasui, K. Minoshima and H. Matsumoto: “Stabilization of femtosecond mode-locked Ti:Sapphire laser for high-accuracy pulse interferometry,” *IEEE J. Quantum Electron.*, **37** (2001) 12–19.
  - 13) Y. Yamaoka, K. Minoshima and H. Matsumoto: “Direct measurement of the group refractive index of air with interferometry between adjacent femtosecond pulses,” *Appl. Opt.*, **41** (2002) 4318–4324.
  - 14) J. Ye: “Absolute measurement of a long, arbitrary distance to less than an optical fringe,” *Opt. Lett.*, **29** (2004) 1153–1155.
  - 15) J. Zhang, Z. H. Lu, B. Menegozzi and L. J. Wang: “Application of frequency combs in the measurement of the refractive index of air,” *Rev. Sci. Instrum.*, **77** (2006) 083104 1–5.
  - 16) S. J. Lee, B. Widiyatmoko, M. Kourogi and M. Ohtsu: “Ultra-high scanning speed optical coherence tomography,” *Jpn. J. Appl. Phys.*, **40** (2001) L878–L880.
  - 17) S. Choi, T. Shioda, Y. Tanaka and T. Kurokawa: “Frequency-comb-based interference microscope with a line-type image sensor,” *Jpn. J. Appl. Phys.*, **46** (2007) 6842–6847.
  - 18) W. C. Swann and N. R. Newbury: “Frequency-resolved coherent lidar using a femtosecond fiber laser,” *Opt. Lett.*, **31** (2006) 826–828.
  - 19) K. N. Joo and S. W. Kim: “Absolute distance measurement by dispersive interferometry using a femtosecond pulse laser,” *Opt. Express*, **14** (2006) 5954–5960.
  - 20) K. Minoshima and H. Matsumoto: “High-accuracy measurement of 240-m distance in an optical tunnel by use of a compact femtosecond laser,” *Appl. Opt.*, **39** (2000) 5512–5517.
  - 21) I. Coddington, W. C. Swann and N. R. Newbury: “Coherent multiheterodyne spectroscopy using stabilized optical frequency combs,” *Phys. Rev. Lett.*, **100** (2008) 013902.
  - 22) L. Howard, J. Stone and J. Fu: “Real-time displacement measurements with a Fabry-Perot cavity and a diode laser,” *Precis. Eng.*, **25** (2001) 321–335.
  - 23) F.-L. Hong, J. Ishikawa, Y. Zhang, R. Guo, A. Onae and H. Matsumoto: *Opt. Commun.*, **235** (2004) 377.
  - 24) H. Haitjema, P. H. J. Schellekens and S. F. C. L. Wetzel: “Calibration of displacement sensors up to 300  $\mu\text{m}$  with nanometer accuracy and direct traceability to a primary standard of length,” *Metrologia*, **37** (2000) 25–33.
  - 25) T. R. Schibli, K. Minoshima, F. L. Hong, H. Inaba, A. Onae, H. Matsumoto, I. Hartl and M. E. Fermann: “Frequency metrology with a turnkey all-fiber system,” *Opt. Lett.*, **29** (2004) 2467–2469.
  - 26) H. Inaba, Y. Daimon, F. L. 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** (2006) 5223–5231.
  - 27) M. Kourogi, K. Nakagawa and M. Ohtsu: “Wide span optical frequency comb generator for accurate optical frequency difference measurement,” *IEEE J. Quantum Electron.*, **29** (1993) 2693–2701.

(2008年6月9日受理)