

# 光コムによる光周波数メトロロジー

洪 鋒 雷

## Optical Frequency Metrology Using Optical Combs

Feng-Lei HONG

For more than a century, precision spectroscopy has played an important role in the discovery of the laws of quantum physics, in the determination of fundamental constants, and in the realization of standards of time, frequency and length. Recently, the research field of optical frequency metrology is developing rapidly due to the invention of the “optical comb” with its carrier-envelope phase controlled. In this report, we introduce the history and recent activities of optical frequency standards and optical combs. As an example, the frequency measurement of an iodine-stabilized Nd:YAG laser is described. Optical combs based on mode-locked fiber lasers have attracted great attentions due to their capability for long-term and easy operation. The absolute frequency measurement of a Sr optical lattice clock has a great impact on the discussion of the redefinition of the second.

**Key words:** optical frequency metrology, optical comb, optical frequency measurement, optical frequency standard, optical clock

「メトロロジー (metrology)」は、度量衡学や計測学と訳すことができ、科学技術の根幹をなしている。精密分光学は、100 年も前からその歴史が始まり、量子物理学法則の発見、基礎定数の決定、時間や長さ標準の実現に大きく貢献してきた。また、1960 年にレーザーが誕生し、ドップラー・フリーの高分解能分光法が可能となり、光周波数標準研究の幕が開けた。それ以来、イオントラップやレーザー冷却などの手法が次から次へと開発され、光周波数標準の研究は確実に進歩してきた。しかし、レーザーの周波数を測る研究は困難を極め、20 世紀の終わりに発明された「光コム」でようやく暗闇から脱出できた。この光コムの主役はモード同期レーザーであり、超短光パルスのキャリアエンベロープ位相の制御がここで決定的な役割を果たしている。今や、光周波数計測の精度は 15 桁にまで達し、各種精密計測の中で群を抜いている。光コムの誕生による光周波数計測の発展は、さらに光周波数標準の研究にも大きな弾みをつけている。このような光周波数計測・標

準に関する研究の進歩は、基礎定数の時間依存性などの基礎研究のみならず、光通信やナビゲーションなど応用分野にも大きなインパクトを与えている。今は光周波数メトロロジーの研究の全盛期といっても過言ではない。

### 1. 光周波数標準

#### 1.1 光の速さ $c$ を測る

レーザーが発明されてまもなく、1965 年ごろからレーザーの周波数安定化に関する研究も進んだ。その結果、安定化レーザーの周波数変動は  $10^{-10}$ ~ $10^{-12}$  となり、干渉光源の性能としては当時の長さの定義である  $^{86}\text{Kr}$  ランプの性能をはるかに超えることがわかった。そこで、 $^{86}\text{Kr}$  波長標準の代わりに周波数 (波長) 安定化レーザーを基準にしてメートルの定義を行おうという案が出てきた。国際度量衡委員会 (CIPM) で検討した結果、当時すでに何種類かある周波数安定化レーザーの中で決定的な優劣をつけ難いこと、さらに将来より安定度の良い高精度のレーザー波

表1 CIPM 勧告の放射リスト (2003年).

No.*	レーザーおよび安定化基準	周波数	不確かさ
1.1	$^{115}\text{In}^+$ , $5s^2\ ^1\text{S}_0$ - $5s5p\ ^3\text{P}_0$ 遷移	1267402452899.92 kHz	$3.6 \times 10^{-13}$
1.2	$^1\text{H}$ , $1\text{S}$ - $2\text{S}$ , 2光子遷移	1233030706593.55 kHz	$2.0 \times 10^{-13}$
1.3	$^{199}\text{Hg}^+$ , $5d^{10}6s^2\text{S}^{1/2}$ - $5d^96s^2\ ^2\text{D}_{5/2}$ 遷移	1064721609899143 Hz	$1.9 \times 10^{-14}$
1.4	$^{171}\text{Yb}^+$ , $6s^2\text{S}_{1/2}$ - $5d^2\text{D}_{3/2}$ 遷移	688358979309312 Hz	$2.9 \times 10^{-14}$
1.5	$^{171}\text{Yb}^+$ , $^3\text{S}_{1/2}$ - $^2\text{F}_{7/2}$ 遷移	642121496772.3 kHz	$1.6 \times 10^{-12}$
1.6	532 nm Nd:YAG レーザー, $^{127}\text{I}_2$ , R(56)32-0:a <sub>10</sub>	563260223513 kHz	$8.9 \times 10^{-12}$
1.7	633 nm He-Ne レーザー, $^{127}\text{I}_2$ , R(127)11-5:a <sub>16</sub>	473612353604 kHz	$2.1 \times 10^{-11}$
1.8	$^{40}\text{Ca}$ , $^1\text{S}_0$ - $^3\text{P}_1$ , $\Delta m_J = 0$	455986240494150 Hz	$1.1 \times 10^{-13}$
1.9	$^{88}\text{Sr}^+$ , $5^2\text{S}_{1/2}$ - $4^2\text{D}_{5/2}$	444779044095.5 kHz	$2.2 \times 10^{-13}$
1.10	$^{85}\text{Rb}$ , $5\text{S}_{1/2}$ (F=3)- $5\text{D}_{5/2}$ (F=5), 2光子遷移	385285142375 kHz	$1.3 \times 10^{-11}$
1.11	$1.5\ \mu\text{m}$ $^{13}\text{C}_2\text{H}_2$ , P(16) ( $\nu_1 + \nu_3$ ) 遷移	194369569385 kHz	$5 \times 10^{-11}$
1.12.1	$3.39\ \mu\text{m}$ He-Ne レーザー, $\text{CH}_4$ , $\nu_3$ , P(7), $\text{F}_2^{(2)}$ , 分解された超微細構造の中央成分 (7-6)	88376181600.18 kHz	$3 \times 10^{-12}$
1.12.2	$3.39\ \mu\text{m}$ He-Ne レーザー, $\text{CH}_4$ , $\nu_3$ , P(7), $\text{F}_2^{(2)}$ , 未分解の超微細構造の中央	88376181600.5 kHz	$2.3 \times 10^{-11}$
1.13	$10.3\ \mu\text{m}$ $\text{CO}_2$ レーザー, $\text{OsO}_4$ , $^{12}\text{C}^{16}\text{O}_2$ の R(10) レーザー発振と一致する遷移	29054057446579 Hz	$1.4 \times 10^{-13}$

\* ここでは勧告された放射リストの番号をそのまま使用している。

長標準ができる可能性が十分ありうることを考慮し、特定の安定化レーザーよりはむしろ光の速さを基準にしてメートルを定義したほうがよいとの結論が得られた。光の速さ  $c$  は、安定化レーザーの波長  $\lambda$  と周波数  $f$  を、それぞれ  $^{86}\text{Kr}$  波長標準と Cs 原子時計に基づいて測定し、公式  $c = f\lambda$  を使って求められた<sup>1)</sup>。各研究所における精密測定の結果は  $\pm 4 \times 10^{-9}$  の範囲で一致し、その誤差は  $^{86}\text{Kr}$  波長標準の誤差に帰せられ、光の速さ  $c$  の値は、299 792 458 m/s と決められた。1983年の第17回国際度量衡総会において、「メートルは、1秒の299 792 458分の1の時間に光が真空中を伝わる行程の長さである」と再定義された。長さの単位「メートル」は光の速さという基礎物理定数によって定義され、時間の単位「秒」の定義と結びつくようになった。

### 1.2 「周波数チェーン」によるレーザーの周波数計測

光の速さ  $c$  を決めるために、レーザーの周波数が Cs 原子時計に基づいて測定されたが、その実験は非常に困難であった。レーザーの周波数は数百 THz で、Cs 原子時計のマイクロ波周波数と比べて約百万倍も高く、周波数カウンターで直接測定することができない。当時は、レーザーの周波数を測定する装置として、「周波数チェーン」<sup>2)</sup> が用いられていた。周波数チェーンは、多くの安定化レーザー、マイクロ波源、非線形逓倍混合素子を用意して、低い周波数から順次逓倍・混合を繰り返して高い周波数を測定する装置である。制御および測定装置を含めると、かなり大がかりな装置で、その装置を開発するだけでなく運転・維持することもなかなか骨の折れる仕事であった。そのため、1990年代に動作状態の周波数チェーンを維持できて

いたのは、わずか数か国のみであった。

### 1.3 周波数安定化レーザーによるメートルの定義の実現

1983年のメートル定義の改訂に伴い、CIPM はメートルの定義を実際に実現するために、以下の3通りのいずれかによることを勧告した。

- ① 距離  $= ct$  の関係から、時間  $t$  による方法；
- ②  $\lambda = c/f$  の関係から、周波数  $f$  の絶対測定による方法；
- ③ 勧告された放射リストを用いる方法。

現在の GPS システムは①の方法を利用しているが、工業的な測長（長くても数十 m 以下）の場合は光の伝搬時間が非常に短くなるので、①の方法では高精度・高分解能の実現は難しい。また、②の方法に関しては、装置が非常に複雑で現実的ではなかった。最も実用的なメートル定義の実現方法は、③の勧告された放射リストを用いる方法である。放射リストには、周波数再現性および絶対値があらかじめ測定された周波数安定化レーザーが載っており、これは光周波数標準のリストでもある。

表1に、2003年に勧告された最新版の放射リスト<sup>3,4)</sup>を示す。放射リストの中で最もよく利用されているのは、633 nm ヨウ素安定化 He-Ne レーザーである。現在発展途上国も含めて、ヨウ素安定化 He-Ne レーザーによる国際的な波長標準が広く定着している。産業技術総合研究所では先に、長さ標準体系を実現するための高信頼性可搬型ヨウ素安定化 He-Ne レーザーを開発した<sup>5)</sup>。また、より高性能な波長・光周波数標準を実現するために、ヨウ素安定化 Nd:YAG レーザーの開発を精力的に行っている<sup>6)</sup>。さらに、近年目覚ましく発展する光通信帯の各種応用に対

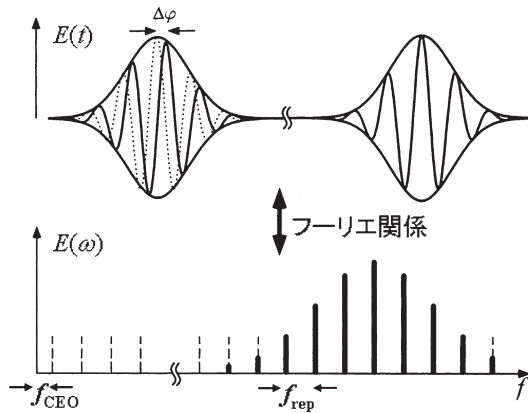


図1 モード同期レーザー光のフーリエ変換。

応するため、 $1.5\ \mu\text{m}$  アセチレン安定化レーザーを開発した<sup>7)</sup>。

表1には、冷却された原子やイオンの遷移を基準に実現された安定化レーザーも多数含まれている。これらのレーザーは、長さの標準にはあまりなじみがなく、高精度な光周波数標準として研究開発されている。

## 2. 超短パルスレーザーがつくる「光コム」

「光コム」は、正確には「光周波数コム」といい、周波数軸上に等間隔な成分（モード）からなる櫛（コム）形のスペクトルをもつ光信号である。モード同期レーザーの光は、周波数軸上でとらえると、等しい周波数間隔で並んだたくさんのレーザー共振器縦モードが位相同期して並んでおり、光周波数コムを実現している。図1に、時間軸上の超短光パルス列と周波数軸上の光周波数コムとの間のフーリエ変換で結ばれる関係を示す。この場合、超短パルスの繰り返し周波数 ( $f_{\text{rep}}$ ) は、光コムのモード間隔となっている。また、光パルスにおいて、電場ピークと包絡線ピークとの位相差がキャリアエンベロープ位相とよばれるが、隣り合うパルスのキャリアエンベロープ位相のずれ ( $\Delta\phi$ ) と、光周波数コムのオフセット周波数 ( $f_{\text{CEO}}$ ) との間に下記の関係で結ばれている。

$$f_{\text{CEO}} = (\Delta\phi/2\pi)f_{\text{rep}} \quad (1)$$

$f_{\text{CEO}}$  は、キャリアエンベロープオフセット周波数とよばれている。繰り返し周波数 ( $f_{\text{rep}}$ ) およびキャリアエンベロープオフセット周波数 ( $f_{\text{CEO}}$ ) を用いると、光コムの  $n$  次モードの周波数  $f(n)$  は、

$$f(n) = nf_{\text{rep}} + f_{\text{CEO}} \quad (2)$$

で与えられる。

超短パルスレーザーを用いた精密測定に関する提案は、

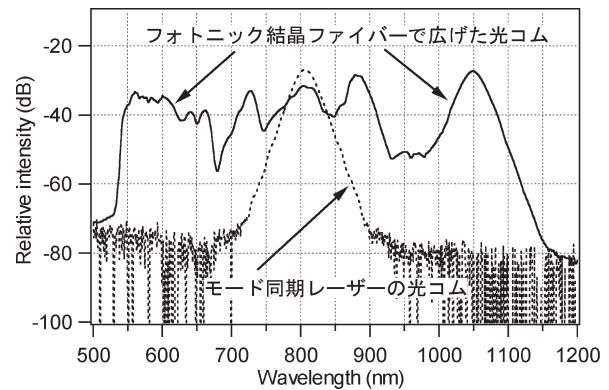


図2 フォトニック結晶ファイバーで広げられた光コムのスペクトル。

1970年代にすでになされていた<sup>8,9)</sup>。ドイツのマックスプランク量子光学研究所 (MPQ) の Hänsch のグループが、モード同期レーザーを用いてはじめて、周波数的に離れた2つのレーザーの周波数差の測定に成功したのは1999年であった<sup>10)</sup>。これがこの研究分野においてきわめて大きな技術革新を起こし、今日の光周波数測定技術の基礎をつかった。

## 3. 光コムによるレーザーの周波数測定

### 3.1 1オクターブの光コムの実現

同じころに超短パルスレーザーの分野では、フォトニック結晶ファイバー<sup>11)</sup>を用いた光コムのスペクトル広帯域化が行われ、1オクターブ以上（数百 THz の周波数領域）に広がる光コムが得られた。この特殊なファイバーは、レンコンのような断面をもち、中心コアのまわりの多くの部分が空気なので屈折率の差が大きく光の閉じ込め効果がある。また、材料分散以外に特殊な構造により構造分散をもつため、設計によって分散制御ができ、チタンサファイアモード同期レーザーの中心波長である 800 nm 付近にゼロ分散を設定できる。したがって、自己位相変調などの非線形効果を増大させることができ、その結果1オクターブに及ぶ光コムが実現した。

図2に、フォトニック結晶ファイバーによって得られた1オクターブに広がる光コムのスペクトルの包絡線を表す。光コムのスペクトルが1オクターブにとどくことは、光周波数計測への応用という観点からみればきわめて重要なことである。つまり、1オクターブのコムが実現されると、あるレーザーの基本波と第二高調波間の周波数差の測定が可能となる。ところが、この測定された周波数差はまさに基本波の周波数そのものであるので、レーザー周波数の絶対測定が実現される。この測定原理を使って、1オクターブ光コムによるヨウ素安定化 Nd:YAG レーザーの

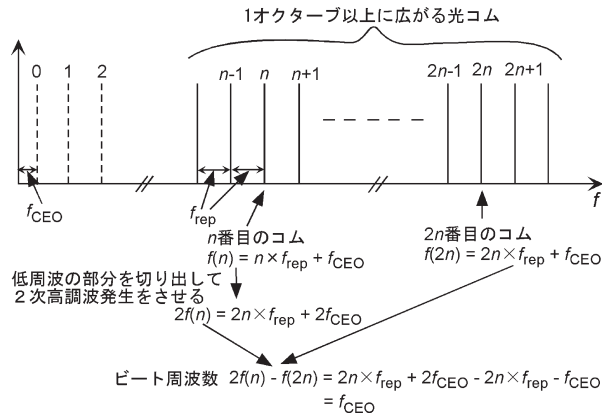


図3 自己参照法によるキャリアエンベロップオフセット周波数 ( $f_{CEO}$ ) の測定原理。

光周波数測定が行われた<sup>12)</sup>。

### 3.2 キャリヤーエンベロップオフセット周波数の検出

式(2)からわかるように、光コムのすべてのモードの周波数が  $f_{rep}$  および  $f_{CEO}$  で決定される。モード同期レーザーの  $f_{rep}$  は容易に測定できるが、 $f_{CEO}$  の測定は困難であった。光コムが1オクターブ以上に広がると、この性質を利用した自己参照法が米国 JILA 研究所の Hall のグループで実現され<sup>13)</sup>、 $f_{CEO}$  が測定可能となった。以下、自己参照法について述べる。

図3に、1オクターブ以上に広がる光コムの周波数軸上のモードを示す。光領域に、周波数的に等間隔 ( $f_{rep}$ ) に並んでいるコムのモードを仮想的に周波数がゼロとなる点の近傍まで伸ばすと、オフセット周波数が存在する。これは、時間軸のパルスで理解するキャリアエンベロップオフセット周波数 ( $f_{CEO}$ ) と同じである。式(2)に従うと、 $n$  番目のモードの周波数は  $f(n) = n f_{rep} + f_{CEO}$  で表すことができる。コムが1オクターブ以上に広がっているので、 $2n$  番目のモードも存在し、その周波数は  $f(2n) = 2n f_{rep} + f_{CEO}$  となる。ここで、 $n$  番目モードの二次高調波発生をさせると、その周波数は  $2f(n) = 2n f_{rep} + 2f_{CEO}$  となることわかる。  $2n$  番目のモードと  $n$  番目モードの二次高調波との間の周波数差が  $f_{CEO}$  であり、ビート周波数を測定することにより  $f_{CEO}$  が観測できる。これは、 $1f-2f$  型の自己参照法とよばれている。

得られた  $f_{rep}$  と  $f_{CEO}$  をそれぞれ原子時計に位相同期されたシンセサイザーなどの基準周波数に基づいて制御することで、光コムを原子時計に安定化することができる。  $f_{rep}$  の制御ポートとしてモード同期レーザーの共振器長が、また  $f_{CEO}$  の制御ポートとしてモード同期レーザーの励起光パワーが使われている。このように安定化されたモード同期レーザーの光コムが「光周波数のものさし」とし

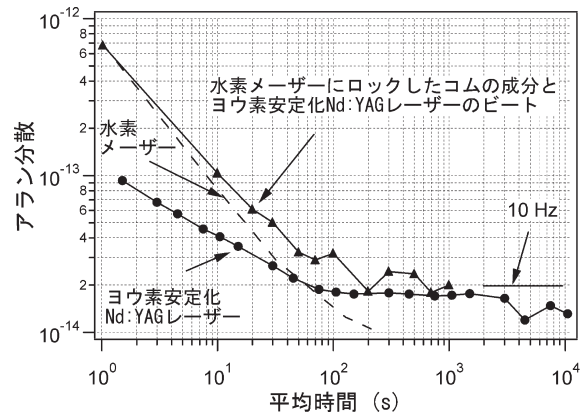


図4 ヨウ素安定化 Nd:YAG レーザーの周波数安定度。

て使える。チタンサファイアモード同期レーザーとフォトニック結晶ファイバーの組み合わせでは、実現される光周波数のものさしの範囲は、約 500 nm から 1100 nm までの波長域である。また、この「ものさし」の比較精度が  $1 \times 10^{-19}$  に達していることが証明された<sup>14)</sup>。

このように、光コムを光周波数のものさしとして使ううえで、キャリアエンベロップ位相の制御が非常に重要な役割を果たしていることがわかる。例外として、筆者らは和周波コムという、キャリアエンベロップ位相の制御なしで赤外レーザーの周波数を測るスキームも開発している<sup>15)</sup>。

### 3.3 光コムによるレーザー周波数の測定例

ここでは、例として、ヨウ素安定化 Nd:YAG レーザーの周波数計測を取り上げよう<sup>16)</sup>。図4の黒い点は、ヨウ素安定化 Nd:YAG レーザーのアラン分散 (時間領域ごとのレーザーの周波数安定度) を示す。レーザーの周波数の相対変動は、1秒の積分時間において約  $1 \times 10^{-13}$  で、積分時間が60秒以上では  $2 \times 10^{-14}$  より小さいレベルまで向上している。  $2 \times 10^{-14}$  の相対変動は 532 nm (563 THz) では約 10 Hz の周波数変動に相当する。

ヨウ素安定化 Nd:YAG レーザーの周波数測定には、モード同期チタンサファイアレーザーによる光コムが用いられた。図4の黒い三角は、水素メーザーに位相同期されたコムのモードとヨウ素安定化 Nd:YAG レーザーの間の周波数ビートから得られたアラン分散を表している。参考のために、水素メーザーの安定度も点線で表示されている。積分時間が50秒以下では、Nd:YAG レーザーのほうがより安定なので、水素メーザーに位相同期したコムの周波数ノイズが観測されている。一方、積分時間が50秒以上では、水素メーザーがより安定なので、Nd:YAG レーザーの周波数変動が観測されている。この結果から、光

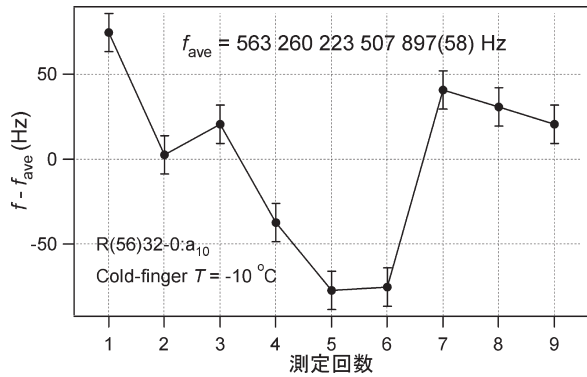


図5 光コムで測定されたヨウ素安定化Nd:YAGレーザーの周波数値。

コムが忠実に水素メーザーに位相同期されていることがわかる。図5に、測定されたヨウ素安定化Nd:YAGレーザーの周波数を示す。産総研のヨウ素安定化Nd:YAGレーザー(Y3)の周波数は、563 260 223 507 897 (58) Hzである。測定の不確かさ(58 Hz)はおもにNd:YAGレーザーの繰り返し再現性によるものである。

#### 4. ファイバーレーザーによる光コム

モード同期チタンサファイアレーザーによる光コムは、固体レーザーの第二高調波を励起光源として使うので、その小型化や低価格化が難しい。そこで、モード同期ファイバーレーザーが注目され、ファイバーベースの光コムの研究が盛んになっている。

まず、周波数的に離れた2つのレーザーの周波数差の測定がファイバーレーザー光コムで行われた<sup>7)</sup>。それから筆者らは、ファイバーレーザー光コムの $f_{\text{CEO}}$ を観測するために、ファイバーレーザーの第二高調波(780 nm)をフォトニック結晶ファイバーでスペクトル拡張を行い、新しい自己参照法の提案および実験を行った<sup>17)</sup>。図6に、四色のモード同期ファイバーレーザーのスペクトルと、フォトニック結晶ファイバーで拡張したコムのスペクトルを示す。520 nm付近で、第三高調波のコムと拡張された第二高調波のコムが重なり合うので、 $2f$ - $3f$ 型の自己参照法で $f_{\text{CEO}}$ の観測ができる。図7(a)は、観測された $f_{\text{CEO}}$ で、コムの位相雑音によって太くなったビート信号(線幅が数MHz)が示されている。1.5  $\mu\text{m}$ の基本波コムにおいては位相雑音が観測されていないため(図7(b))、励起レーザーの振幅雑音がスペクトル拡張の過程で位相雑音に変換されたものと思われる。このファイバーベースの光コムに特有な位相雑音は、後に基本波コム(1.5  $\mu\text{m}$ )を高非線形ファイバーで拡張した通常の $1f$ - $2f$ 型の自己参照法においても観測された<sup>18)</sup>。最近になって、このような位相

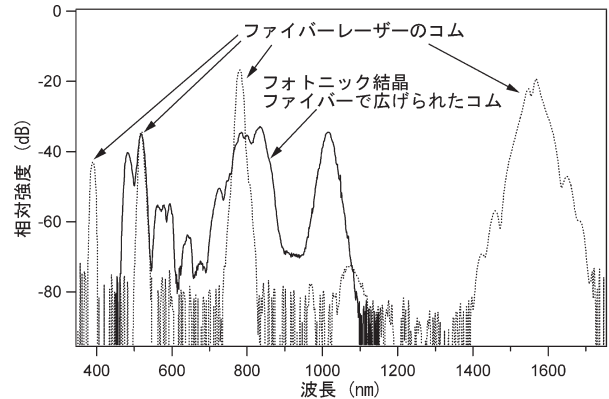


図6 ファイバーレーザー光コムのスペクトル。

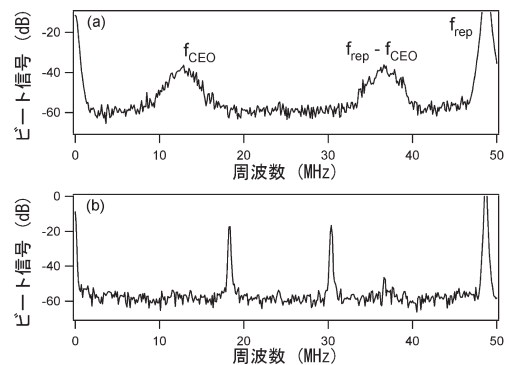


図7 (a) 観測されたファイバーレーザー光コムの $f_{\text{CEO}}$ , (b) 1.5  $\mu\text{m}$ の連続波レーザーとファイバーレーザー光コムのビート信号。

雑音は励起レーザーの振幅雑音の抑制によって軽減でき、線幅が1 Hz以下まで狭窄化できることがわかった<sup>19)</sup>。

一方では、スイッチ1つで長期運転が可能な全ファイバーベースの光コムが開発され<sup>20)</sup>、1週間近くの連続運転が実際にデモンストレーションされた<sup>21)</sup>。筆者らは最近、45 dBの信号対雑音比(バンド幅100 kHzにおいて)の $f_{\text{CEO}}$ をもつファイバーベースの光コムを開発し、1週間以上にわたるヨウ素安定化Nd:YAGレーザーやアセチレン安定化レーザーの連続測定に成功した<sup>22)</sup>。この測定で、ヨウ素安定化Nd:YAGレーザーの長期安定度が $5.7 \times 10^{-15}$ (積算時間が100000秒において)で、 $10^{-15}$ 台に入っていることがはじめてわかった。

### 5. 「光時計」の誕生

#### 5.1 光コムは精密な周波数リンカー

これまで、光コムをCs原子時計などのマイクロ波源に安定化して、光周波数標準を測ることを紹介してきた。逆に、光コムを光周波数標準に安定化して、マイクロ波の周波数をつくり出すこともできる。これは、いわゆる光周波

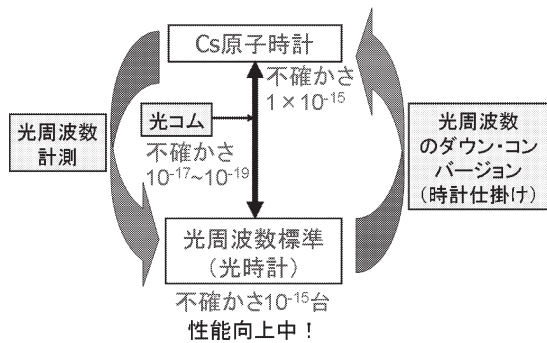


図8 光コムは精密な周波数リンカー。

数の「ダウン・コンバージョン」で、時計仕掛けの重要な部分である。光コムの周波数リンカーとして精度が  $10^{-17} \sim 10^{-19}$  であることを考え、光周波数標準の不確かさがすでに  $10^{-15}$  台でさらに向上中であることを考慮に入れると、いずれ秒の定義はマイクロ波のCs原子時計から光の周波数標準に替わる可能性が出てくる。このように、高精度な光周波数標準と光コムの組み合わせで「光時計」が誕生する(図8)。

今まで、光周波数標準はおもに「イオントラップ」<sup>23)</sup>と「自由落下の冷却中性原子」<sup>24)</sup>の2つのタイプがあったが、それぞれすぐれたところと欠点をもっている。2001年に、St. Andrewsで開かれた周波数標準に関する国際シンポジウムで、東大工学部の香取助教授が新しいタイプである「光格子時計」を提案した<sup>25)</sup>。光格子時計は、イオントラップと自由落下の冷却中性原子の両方のすぐれたところをあわせもっているため、瞬く間に光周波数標準の主役に躍り出た。

### 5.2 Sr光格子時計の周波数計測

筆者らは、東大香取研との共同研究において、これまでSr格子時計の絶対周波数測定を行い、測定精度の向上に努めてきた<sup>26-28)</sup>。図9に、2006年に行われたSr格子時計周波数測定の原理図を示す。筆者らは、光コムと水素レーザーを東大にもち込み、また水素レーザーの周波数校正にGPS搬送波位相方式を導入した。周波数測定は、光コムを光格子時計に安定化し、ダウン・コンバージョンされたマイクロ波の  $f_{rep}$  と水素レーザーに同期したシンセサイザーを比べることで行われた。最終的にSr光格子時計周波数は、国際原子時とつながった形で測定され、 $9 \times 10^{-15}$  の不確かさで決定された<sup>28)</sup>。当時、競い合っていた米国のJILAグループおよびフランスのSYRTEグループの測定値と整合し、かつ最も小さい不確かさを達成した。この研究成果は、9月14日に国際度量衡委員会の諮問委員会のひとつである「時間周波数諮問委員会」に報告され、Sr

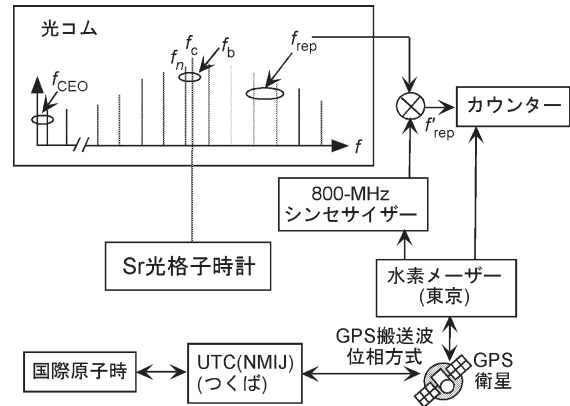


図9 Sr光格子時計周波数測定の実験原理。

光格子時計は秒の再定義の候補である「秒の二次表現」として採択された。同時に3種類のイオントラップ型の光周波数標準も「秒の二次表現」として採択されているので、すぐに秒の再定義が決まるわけではないが、議論は加速しそうだ。

### 6. 将来への展望

光コムに関する研究は、いろいろな応用を目指して広がっている。ひとつの方向性としては、ヘリウムイオンの精密分光などの応用を目指したUVというフロンティアがある。現在、ドイツのMPQグループと米国のJILAグループがUV光コムの開発にしのぎを削っているが<sup>29,30)</sup>、目標達成までまだ課題がたくさん残っている。また、赤外波長域では新しいレーザー光源が開発されるなど光コムのニーズが増え、その先のテラヘルツ領域においてもコムの研究がより充実されると予想される。将来的には、マイクロ波からUVまで途切れることなくコムの利用が可能になるだろう。光コムを利用した光シンセサイザー<sup>31)</sup>とレーザーの制御や線幅比較などの研究が盛んになり、光周波数がより使いやすいものになるとと思われる。

光時計に関する研究は、いよいよ現在の秒の定義であるCs原子時計の精度を超えるので、光時計どうしの比較や光時計による現在の時系のモニタリングが重要な課題となる。また、周波数比較の精度向上を目指して、光ファイバー網を利用した光やマイクロ波の周波数伝送も緊急課題となっている。

最後に、超短パルス研究の恩恵にあずかった光周波数メトロロジーの研究が、逆に超短光パルスの研究に役に立つような研究例を紹介しよう。2台の独立したモード同期レーザーの間に位相同期を施すことにより、合成した2台のレーザー光からより短いパルスが得られた<sup>32)</sup>。本特集の続きでは、時間軸上の応用におけるキャリアエンベロープ

位相制御が紹介されている。

ここで紹介した、ヨウ素安定化レーザーに関する研究は JILA の J. L. Hall 氏および産総研の石川純氏の研究協力によるものである。光コムに関する研究は産総研の大苗敦氏、稲場肇氏、美濃島薫氏、T. R. Schibli 氏、J. Jiang 氏、松本弘一氏、大嶋新一氏、NIST の S. A. Diddams 氏およびアイシン精機(株)の吉田睦氏らの研究協力によるものであり、Sr 光格子時計の周波数計測に関する研究は東大工学部の香取秀俊氏および産総研の今江理人氏、藤井靖久氏との共同研究によるものである。皆様に心より感謝いたします。光コムに関する研究は、文部科学省科学技術振興調整研究費「ブロードバンド光シンセサイザ」の支援を受けて行われた。また、Sr 光格子時計の周波数計測に関する研究は科学技術振興機構 CREST「量子情報処理システムの実現を目指した新技術の創出」の支援を受けて行われた。

## 文 献

- 1) K. M. Evenson, J. S. Wells, F. R. Petersen, B. L. Danielson, G. W. Day, R. L. Barger and J. L. Hall: "Speed of light from direct frequency and wavelength measurements of the methane-stabilized laser," *Phys. Rev. Lett.*, **29** (1972) 1346-1349.
- 2) H. Schnatz, B. Lipphardt, J. Helmcke, F. Riehle and G. Zinner: "First phase-coherent frequency measurement of visible radiation," *Phys. Rev. Lett.*, **76** (1996) 18-21.
- 3) T. J. Quinn: "Practical realization of the definition of the metre, including recommended radiations of other optical frequency standards (2001)," *Metrologia*, **40** (2003) 103-133.
- 4) R. Felder: "Practical realization of the definition of the metre, including recommended radiations of other optical frequency standards (2003)," *Metrologia*, **42** (2005) 323-325.
- 5) 石川 純: "CIPM 勧告準拠 633 nm ヨウ素安定化ヘリウムネオンレーザーの設計を製作", 産総研計量標準モノグラフ, No. 2 (2003).
- 6) F.-L. Hong, J. Ishikawa, J. Yoda, J. Ye, L.-S. Ma and J. L. Hall: "Frequency comparison of  $^{127}\text{I}_2$ -stabilized Nd:YAG lasers," *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, **48** (1999) 532-536.
- 7) A. Onae, T. Ikegami, K. Sugiyama, F.-L. 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** (2000) 181-187.
- 8) Y. V. Baklanov and V. P. Chebotayev: "Narrow resonances of two-photon absorption of super-narrow pulses in a gas," *Appl. Phys.*, **12** (1977) 97-99.
- 9) J. N. Eckstein, A. I. Ferguson and T. W. Hänsch: "High-resolution two-photon spectroscopy with picosecond light pulses," *Phys. Rev. Lett.*, **40** (1978) 847-850.
- 10) T. Udem, J. Reichert, R. Holzwarth and T. W. Hänsch: "Absolute optical frequency measurement of the cesium D1 line with a mode-locked laser," *Phys. Rev. Lett.*, **82** (1999) 3568-3571.
- 11) J. C. Knight: "Photonic crystal fiber," *Nature*, **424** (2003) 847-851.
- 12) S. A. Diddams, D. J. Jones, J. Ye, S. T. Cundiff, J. L. Hall, J. K. Ranka, R. S. Windeler, R. H. Holzwarth, T. Udem and T. W. Hänsch: "Direct link between microwave and optical frequencies with a 300 THz femtosecond laser comb," *Phys. Rev. Lett.*, **84** (2000) 5102-5105.
- 13) 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.
- 14) L.-S. Ma, Z. Bi, A. Bartels, L. Robertsson, M. Zucco, R. S. Windeler, G. Wilpers, C. Oates, L. Hollberg and S. A. Diddams: "Optical frequency synthesis and comparison with uncertainty at the  $10^{-19}$  level," *Science*, **303** (2004) 1843-1845.
- 15) J. Jiang, A. Onae, H. Matsumoto and F.-L. Hong: "Frequency measurement of acetylene-stabilized lasers using a femtosecond optical comb without carrier-envelope offset frequency control," *Opt. Express*, **13** (2005) 1958-1965.
- 16) F.-L. Hong, J. Ishikawa, Y. Zhang, R. Guo, A. Onae and H. Matsumoto: "Frequency reproducibility of an iodine-stabilized Nd:YAG laser at 532 nm," *Opt. Commun.*, **235** (2004) 377-385.
- 17) F.-L. 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** (2003) 1-3.
- 18) B. R. Washburn, S. A. Diddams, N. R. Newbury, J. W. Nicholson, M. F. Yan and C. G. Jørgensen: "Phaselocked, erbium-fiber-laser-based frequency comb in the near infrared," *Opt. Lett.*, **29** (2004) 250-252.
- 19) J. J. McFerran, W. C. Swann, B. R. Washburn and N. R. Newbury: "Elimination of pump-induced frequency jitter on fiber-laser frequency combs," *Opt. Lett.*, **31** (2006) 1997-1999.
- 20) 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.
- 21) F. Adler, K. Moutzouris, A. Leitenstorfer, H. Schnatz, B. Lipphardt, G. Grosche and F. Tauser: "Phaselocked two-branch erbium-doped fiber laser system for long-term precision measurements of optical frequencies," *Opt. Express*, **12** (2004) 5872-5880.
- 22) H. Inaba, Y. Daimon, F.-L. Hong, A. Onae, K. Minoshima, T. R. Schibli and H. Matsumoto: "Long-term measurement of optical frequencies using a simple, robust and low-noise fiber based frequency comb," *Opt. Express*, **14** (2006) 5223-5231.
- 23) W. H. Oskay, S. A. Diddams, E. A. Donley, T. M. Fortier, T. P. Heavner, L. Hollberg, W. M. Itano, S. R. Jefferts, M. J. Delaney, K. Kim, F. Levi, T. E. Parker and J. C. Bergquist: "Single-atom optical clock with high accuracy," *Phys. Rev. Lett.*, **97** (2006) 020801.
- 24) U. Sterr, C. Degenhardt, H. Stoehr, C. Lisdat, H. Schnatz, J. Helmcke, F. Riehle, G. Wilpers, C. Oates and L. Hollberg: "The optical calcium frequency standards of PTB and NIST," *Academie des Sciences, Comptes Rendus, Physique*, **5** (2004) 845-855.

- 25) H. Katori: "Spectroscopy of strontium atoms in the Lamb-Dicke confinement," *Proceedings of the 6th Symposium on Frequency Standards and Metrology*, ed. P. Gill (World Scientific, Singapore, 2002) pp. 323-330.
- 26) M. Takamoto, F.-L. Hong, R. Higashi and H. Katori: "An optical lattice clock," *Nature*, **435** (2005) 321-324.
- 27) F.-L. Hong, M. Takamoto, R. Higashi, Y. Fukuyama, J. Jiang and H. Katori: "Frequency measurement of a Sr lattice clock using an SI-second-referenced optical frequency comb linked by a global positioning system," *Opt. Express*, **13** (2005) 5253-5262.
- 28) M. Takamoto, F.-L. Hong, R. Higashi, Y. Fujii, M. Imae and H. Katori: "Improved frequency measurement of a one-dimensional optical lattice clock with a spin-polarized fermionic  $^{87}\text{Sr}$  isotope," *J. Phys. Soc. Jpn.*, **75** (2006) 104302.
- 29) C. Gohle, T. Udem, M. Herrmann, J. Rauschenberger, R. Holzwarth, H. A. Schuessler, F. Krausz and T. W. Hänsch: "A frequency comb in the extreme ultraviolet," *Nature*, **436** (2005) 234-237.
- 30) R. J. Jones, K. D. Moll, M. J. Thorpe and J. Ye: "Phase-coherent frequency combs in the vacuum ultraviolet via high-harmonic generation inside a femtosecond enhancement cavity," *Phys. Rev. Lett.*, **94** (2005) 193201.
- 31) 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.
- 32) R. K. Shelton, L.-S. Ma, H. C. Kapteyn, M. M. Murnane, J. L. Hall and J. Ye: "Phase-coherent optical pulse synthesis from separate femtosecond lasers," *Science*, **293** (2001) 1286-1289.

(2006年11月30日受理)