

光コムって、何？ (2005年ノーベル物理学賞)

安井 武史

徳島大学ポスト LED フォトニクス研究所 (〒 770-0813 徳島県徳島市南常三島 2-1)

What is Optical Comb? (The Nobel Prize in Physics 2005)

Takeshi YASUI

Institute of Post-LED Photonics (pLED), Tokushima University, 2-1, Minami-Josanjima, Tokushima 770-8506

(Received June 12, 2023)

Optical frequency combs (OFCs) were recognized by the Nobel Prize in Physics in 2005. Despite an increasing number of researchers engaged in related studies, the practical utilization of OFCs as light sources in optical metrology remains limited. In this article, we overview the research conducted thus far on them to elucidate their essence, characteristics, and potential applications. We hope that this article fuels interest in OFCs in the fields of optics and photonics and encourages the exploration of new application avenues.

Key Words: Optical comb, Optical frequency metrology, Spectroscopy, Dual-comb spectroscopy, THz comb

1. はじめに

2005年, “for their contributions to the development of laser-based precision spectroscopy, including the optical frequency comb technique (光周波数コム技術を含む, レーザー精密分光法の開発)” に対して, John L. Hall 氏および Theodor W. Hänsch 氏にノーベル物理学賞が授与された^{†1}. それでは, 光周波数コム (光コム)^{1,2)} とは, 何か? ひと言で言うと, レーザーの一種である. しかし, 従来のレーザーとは異なるユニークな特徴を有することから, 次世代レーザーとしての利用が期待されている.

本解説では, 光コムを可能な限り噛み砕いて説明し, 使い方を併示することにより, これまで光コムと馴染みのなかった方々が, 光コムを身近に感じて頂ければ幸いです.

2. 歴史

光コム研究が始まった背景の1つに, 光周波数の絶対測定に関する要求があった. これは, 光周波数信号が極めて高周波で, 既存のエレクトロニクスでは直接計測が困難であったことに起因する. そこで, 極めて正確に周

波数が値付けされている電気周波数標準 (セシウム原子時計, 周波数 9.2 GHz) を起点として, 中間周波数局部発振器群 (マイクロ波発振器, レーザー) を介して, 周波数が 4 桁近く異なる可視光レーザー光 (波長 657 nm, 周波数 456 THz) に接続する周波数チェーン³⁾ が開発された. しかし, 極めて大がかりな装置を必要とする上に, 各発振器群の不確かさが累積される. そこで, 電気周波数と光周波数を正確かつ簡便に接続可能な「周波数の物差し」が求められていた.

光コムの先駆的研究には, 実は日本の研究グループが貢献している. 一定周波数の正弦波で単一モード光を位相変調すると, 変調周波数間隔のサイドバンドが発生するが, その光スペクトル帯域は数十 GHz 程度に制限される. 1972年に阪大の小林哲郎氏らが, 位相変調器を光共振器に配置することで, その変調効率を大きく向上することを示した⁴⁾. 更に, 1993年に東工大の大津元一氏らが, 上記のファブリ・ペロー型電気光学変調器の最適化により数十 THz まで広帯域化したものを「光コム発生器」と名付け, 光周波数計測に利用できることを示した⁵⁾. この光コム発生器は周波数チェーンの一部として利用可能であり, Hänsch 氏や Hall 氏の研究グループでも, この光コム発生器を用いた研究を実施している^{6,7)}.

^{†1} <https://www.nobelprize.org/prizes/physics/2005/summary/>

上述の光コム発生器のスペクトル帯域を1オクターブ以上まで拡大するのは技術的に容易でないため、その代替法として注目されたのが、超短パルス光の発生に用いられてきたモード同期レーザーである。従来のモード同期レーザーでは、超高速時間分解測定(ポンプ・プローブ法)で単一パルス時間特性のみが注目されていた。しかし、それを拡張して、モード同期超短光パルス列という見方をすると、フーリエ変換の関係にある光周波数領域においては、多数の光周波数モード列が等間隔で櫛の歯状に立ち並んだ光スペクトル(光コム)を示すと解釈できる。Hänsch氏らは、このような考えに基づき、大きく離れた二つのレーザーの光周波数を一気に比較する手段として利用することにより、光コムが「光周波数の物差し」として利用できること実証した⁸⁾。

光コムを正確な光周波数の物差しとして利用するためには、後述するように、2つの自由度であるモード間隔(f_{rep})とキャリア・エンベロープ・オフセット周波数(f_{ceo})を安定化制御する必要がある。 f_{rep} に関しては、モード同期レーザー光を光検出器で検出し、それに基づいて共振器長制御を行えば良く、これは技術的に容易である。一方、 f_{ceo} は直接計測が困難な仮想的な物理量である。Hall氏らは、1オクターブに及ぶ超広帯域光コムを発生できれば、その第2高調波成分光と光干渉を用いて、 f_{ceo} を直接計測可能なことを示した(自己参照法あるいはf-2f干渉計)⁹⁾。これにより、光コムを構成する全ての光周波数モード列に電気周波数標準と同等の不確かさで絶対値を付与することが可能になり、光コムを「光周波数の物差し」として利用するための技術が確立された。光コムは、周波数チェーンと比較すると、極めて簡便な構成である上に、周波数不確かさを損ねること無く、電気周波数から光周波数へ転送することが可能になり、長年の夢であった光周波数の絶対計測が実現された。

3. レーザーと光コム

レーザー共振器は、2枚の共振器ミラーとそれらに挟まれた利得媒質から構成されている(Fig. 1(a))。励起状態の利得媒質から放射されたルミネッセンスは、共振器内を往復しながら利得媒質を通過する毎に誘導放射を繰り返し、最終的に定在波の波長成分のみが共振器内で発振状態となる。ここで、一方の共振器ミラーを光が一部透過できるようにすると、レーザー共振器内の光を外に取り出すことが可能になり、これがレーザー光となる。共振器内に単一の定在波のみが存在する単一波長レーザーでは、光周波数領域において、単一モードの光スペクトル信号が観測される。時間領域では、光周波数で振動した時間波形となるが、高速過ぎて光検出器では波が見えず、その時間平均である直流信号が観測される。

定在波を共振器内に複数存在させることも可能で、例えば2つの定在波が存在する2波長レーザーでは、周波数領域において、2モードの光スペクトル信号が観測さ

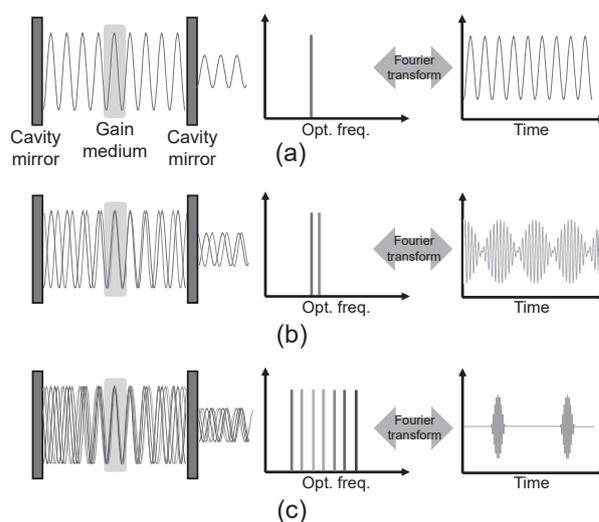


Fig. 1 Laser and optical comb. (a) Single-mode laser, (b) Two-mode laser, and (c) optical comb.

れる(Fig. 1(b))。時間領域では、光周波数の振動は見えないものの、両者の光のうなり(光ビート)は光検出器で観測できる。更に多くの定在波が存在する複数波長レーザーも可能であり、この場合のモード間隔は一定となる。

共振器内の存在する定在波の数(モード数)は、利得媒質の帯域スペクトル幅に依存する。光コムは、広帯域な利得媒質を利用することにより、数万の定在波が共振器内に共存する数万波長レーザーであると言える(Fig. 1(c))。但し、上述の2波長レーザーや複数波長レーザーとの大きな違いは、モード同期と呼ばれる機構を用いることにより、全ての定在波(光コム・モード)の光位相が同期していることである。時間領域では、位相同期した光コム・モードの全てがあるタイミングで瞬間的に強め合う干渉するので、超短光パルス列が観測され、その繰り返し周波数は光コム・モード間隔に等しい。

4. 光コムの使い方¹²⁾

4.1 光周波数の物差し

光コムは、位相同期した多数の光周波数モード列が等間隔で櫛の歯状に立ち並んだ超離散マルチ・スペクトル構造を有している(Fig. 2)。あるいは、等しい光周波数間隔で位相が揃った数万の単一波長レーザーの集合体と捉えることができ、広帯域スペクトル特性と狭線幅モード特性を併せ持っている。光コムを構成する個々の光周波数モード列(ν_m)とモード間隔(f_{rep})の関係は、以下の式で与えられる。

$$\nu_m = f_{ceo} + mf_{rep} \quad (1)$$

ここで、 f_{ceo} はキャリア・エンベロープ・オフセット周波数、 m はモード次数である。 f_{rep} と f_{ceo} はMHzオーダーの光RF周波数信号として検出できるので、式(1)は左辺の光周波数と右辺の電気周波数が等号関係で結べること

¹²⁾ <https://www.youtube.com/watch?v=FKHV9iPM2Ao>

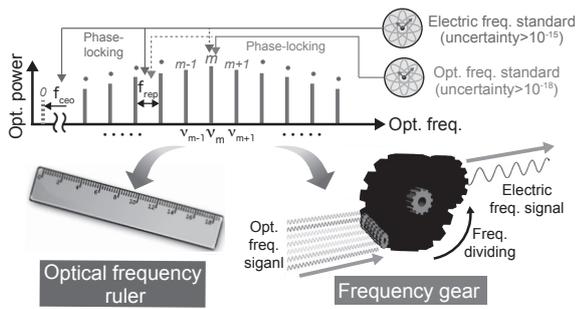


Fig. 2 Optical frequency ruler and frequency gear based on optical comb.

を示している。例えば、 f_{rep} と f_{ceo} をレーザー制御によって電気周波数標準(周波数不確かさ $\sim 10^{-15}$)に位相同期すれば、周波数標準の不確かさを v_m に転送することが可能となる。これは、光コムが電気周波数標準で担保された「光周波数の物差し」として利用可能であることを示している (Fig. 2 左下)。光コムを用いると、光周波数や波長を最大 15 桁で正確に読み取れる。

問題は、光コムが極めて高周波かつ精緻な光周波数目盛りを有するが故に、通常の分光計(分散型分光計、フーリエ変換型分光計)では読み取ることが出来ないことである。個々の光コム・モードがスペクトル分解された光スペクトルを取得できなければ、単なるコヒーレント広帯域光と等価となり、光コムの特徴が損なわれる。その問題を解消するのが、デュアル光コム分光法(DCS)¹⁰⁾である (Fig. 3)。DCS では、計測用の光コムと、光ビートダウン用の光コムを光干渉させることにより、光 RF ビート信号の 2 次的な周波数コムを生成する。これにより、光コムモード間隔(例えば、100 MHz)が正確に縮小された光コムレプリカ(例えば、1 kHz)を生成し、電気周波数(RF)スペクトルとして読み出す。その結果、分光計フリー、高分解能・高精度、高速、光振幅と光位相のスペクトル同時計測が可能といった特徴を付与できる。

4.2 光から電気への周波数ギア(歯車)

近年、電気周波数標準よりも桁違いに高性能な光周波数標準(周波数不確かさ $\sim 10^{-18}$)に関する研究開発が進ん

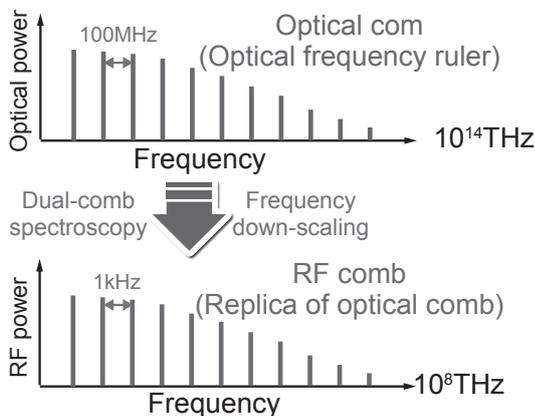


Fig. 3 Dual-comb spectroscopy.

でいる。もし、光コムモード v_m をレーザー制御によって光周波数標準に位相同期すれば、式(1)を介して、光周波数標準の優れた周波数不確かさを電気信号(f_{rep})に転送することが可能になる (Fig. 2)。これにより、電気周波数標準の周波数合成では到達できない極めて高安定な電気周波数信号の生成が可能になる。すなわち、光コムは、光周波数と電気周波数という桁が大きく異なる周波数信号の変換器(周波数ギア)としても機能する (Fig. 2 右下)。

4.3 物理量の物差し

光コムは、これまで、「光周波数の物差し」や「光から電気への周波数ギア」として利活用されてきたが、これら以外の特徴も潜在しているはずである。我々は、光コムの新奇特徴として、「次元変換光コム」を提案している。ここでは、光コムを「膨大な離散チャンネルを有する光キャリア」と見立て、「次元変換」と融合すると、様々な物理量の一括・高速測定が可能になる (Fig. 4)。被測定物理量を、次元変換を介して光周波数(波長)へ変換すると、膨大な量の被測定物理量を、独立かつ離散的に個々の光コム・モードにスペクトル重畳できる。そして、DCS を用いると、高速かつ正確にモード分解光コムスペクトルを取得可能であるので、次元変換された被測定物理量を、モード分解光コムスペクトルから読み出すことにより、大量の情報を高速に一括取得できる。この次元変換光コムでは、多種多様な次元変換の利用で各種物理量の計測が可能になるので、光コムを「光周波数の物差し」から「物理量の物差し」に拡張することが可能になる。例えば、波長/空間変換を用いたデュアル光コム顕微鏡¹¹⁾や波長/角度変換を用いた光分度器が実現されている¹²⁾。

5. 光コムの種類

5.1 モード同期レーザー光コム

当初は、中心波長 800 nm 帯で広帯域スペクトルを発生光可能な、モード同期チタン・サファイアレーザーを用いて、光コムに関する研究が行われた^{8,9)}。モード同期レーザーでは、超高速な「光のシャッター」を共振器内に配置することによってモード同期光パルス列を生成する。チタン・サファイアレーザー光コムでは、カーレンズ効果を用いて、光増幅媒質であるチタン・サファイア結晶を、超短パルス光でのみ開閉可能な「光のシャッター」と

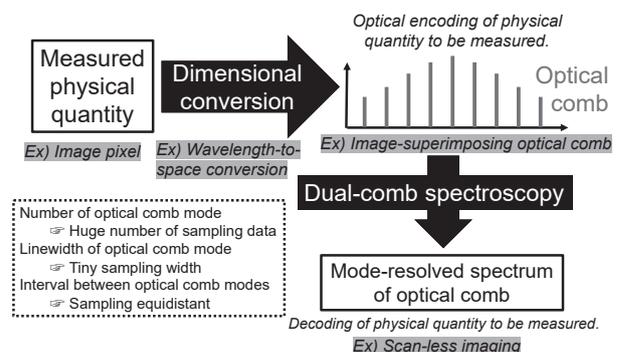


Fig. 4 Dimensional-conversion optical comb.

している。高ピークパワー特性を活かして、フォトニック結晶ファイバによるスペクトル広帯域化を行うことにより、可視光をフルカバー可能な光コムの生成が可能である。 f_{rep} は数十 MHz から数 GHz の範囲内である。

チタン・サファイアレーザー光コムの課題として、装置が大型・複雑・長期不安定性・高価格などがある。このような課題を解決するため、モード同期ファイバレーザー光コム¹³⁾が開発された。装置サイズは、30 cm 四方サイズぐらいまで小型化可能で、ターンキー動作も可能である。モード同期には、非線形偏波回転、可飽和吸収、非線形増幅ループミラーなどが使われる。光増幅媒質としてエルビウム添加ファイバを用いると波長 1550 nm 帯、イットリウム添加ファイバを用いると 1060 nm 帯で、 f_{rep} が数十 MHz ~ 数百 MHz の光コムが生成可能である。前者はオールファイバ共振器構成が利用可能で技術的にも成熟しているのに対し、後者は高出力性に優れている。

5.2 電気光学変調器型光コム

電気光学変調器型光コムでは、マイクロ波シンセサイザーを変調信号源とするファブリ・ペロー型電気光学変調器⁵⁾やマッハツェンダー光変調器¹⁴⁾を用いて、単一周波数レーザー光を位相変調することにより、光コムを発生する。光通信波長帯(中心波長 1550 nm)において、 f_{rep} が GHz オーダーの光コムが発生可能である。成熟した光通信コンポーネントを利用可能である一方で、モード同期レーザー光コムと比較するとスペクトル広帯域性に難がある。これは、高 f_{rep} が故に、パルスピークパワーが低くなり、スペクトル広帯域化に利用する非線形光学効果が効率的に利用出来ないからである。

5.3 マイクロ光コム

近年、シリコン・フォトンクス技術の進展と共に、注目されているのが、微小光共振器を用いたマイクロ光コム¹⁵⁾である。 Si_3N_4 のような非線形光学材料を用いた光導波路で微小リング光共振器を構成し、単一モードレーザー光をカップリングすることにより、安定なソリトン光コムを波長 1550 nm 帯で生成可能である。共振器サイズが大幅に小型化されることにより、 f_{rep} は数十 GHz ~ 数 THz まで高周波化され、電気周波数標準の周波数合成では到達できない極めて高安定なミリ波¹⁶⁾やテラヘルツ波¹⁷⁾の発生が可能になる。また、微小光共振器は半導体プロセスで一括生産可能なため、小型・安価・単純とした特性を光コムに付与できる。また、シリコン・フォトンクスやシリコン・エレクトロニクスとの親和性も高いので、将来的にはデバイス化された光コムとしての利用が期待されている。

6. まとめ

光コムのコヒーレント周波数リンクと波長多様性という観点から、本稿をまとめてみたいと思う (Fig. 5)。光コムは、マイクロ波周波数標準の不確かさを、THz 領域や

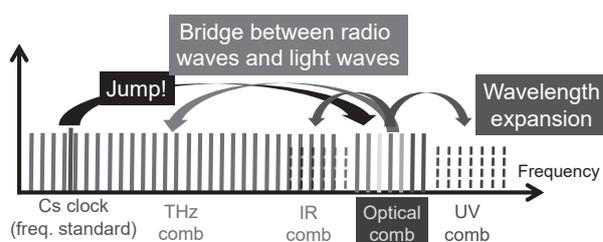


Fig. 5 Coherent link of frequency via optical comb.

赤外領域を飛び越えて、直接、近赤外・可視領域に持ち込むことを可能にした。また、最近では、非線形波長変換に基づいた赤外コム¹⁸⁾や紫外コム¹⁹⁾により、光コムの波長帯域拡大が進められている。更に、THz コム²⁰⁾は、THz 領域から近赤外領域までフルカバー可能なポテンシャルを有している。すなわち、電波~THz 波~光波という極めてワイドレンジな電磁波領域に共通した『周波数』という物理量をコヒーレントに一元化でき(コヒーレント周波数リンク)、各電磁波領域の境界を超えて、周波数を同一精度で論じることが可能になる。その結果、様々な波長領域において、確かな信頼性に基づいた周波数トレーサビリティの確立を可能にする。このことは、光コムの応用が、周波数普遍性を担保しながら、国内外に幅広く普及させていくことが可能であることを意味する。

謝辞

本稿で紹介した研究成果の一部に関しては、内閣府・地方大学・地域産業創生交付金事業【徳島県「次世代“光”創出・応用による産業振興・若者雇用創出計画】、総務省「電波資源拡大のための研究開発」(JPJ000254)の「無線・光相互変換による超高周波数帯大容量通信技術に関する研究開発」、徳島県地方大学・地域産業創生事業補助金の支援を受けた。

参考文献

- 1) T. Udem, R. Holzwarth, and T. W. Hänsch: Nature **416** (2002) 233.
- 2) J. L. Hall: Rev. Mod. Phys. **78** (2006) 1279.
- 3) H. Schnatz, B. Lipphardt, J. Helmcke, F. Riehle, and G. Zinner: Phys. Rev. Lett. **76** (1996) 18.
- 4) T. Kobayashi, T. Sueta, Y. Cho, and Y. Matsuo: Appl. Phys. Lett. **21** (1972) 341.
- 5) M. Kourogi, K. Nakagawa, and M. Ohtsu: IEEE J. Quantum Electron. **29** (1993) 2693.
- 6) Th. Udem, J. Reichert, T. W. Hänsch, and M. Kourogi: Opt. Lett. **23** (1998) 1387.
- 7) J. L. Hall, L.-S. Ma, M. Taubman, B. Tiemann, F.-L. Hong, O. Pfister, and J. Ye: IEEE Trans. Instrum. Meas. **48** (1999) 583.
- 8) T. Udem, J. Reichert, R. Holzwarth, and T. W. Hänsch: Phys. Rev. Lett. **82** (1999) 3568.
- 9) D. J. Jones, S. A. Diddams, J. K. Ranka, A. Stentz, R. S. Windeler, J. L. Hall, and S. T. Cundiff: Science **288** (2000) 635.
- 10) I. Coddington, N. Newbury, and W. Swann: Optica **3** (2016) 414.
- 11) E. Hase, T. Minamikawa, T. Mizuno, S. Miyamoto, R. Ichikawa, Y.-D. Hsieh, K. Shibuya, K. Sato, Y. Nakajima, A. Asahara, et al.: Optica **5** (2018) 634.
- 12) Y. Shimizu, H. Matsukuma, and W. Gao: Appl. Sci. **10** (2020) 4047.
- 13) H. Inaba, Y. Daimon, F.-L. Hong, A. Onae, K. Minoshima, T. R.

- Schibli, H. Matsumoto, M. Hirano, T. Okuno, M. Onishi, *et al.*: *Opt. Express* **14** (2006) 5223.
- 14) A. Parriaux, K. Hammani, and G. Millot: *Adv. Opt. Photonics* **12** (2020) 223.
- 15) T. J. Kippenberg, A. L. Gaeta, M. Lipson, and M. L. Gorodetsky: *Science* **361** (2018) eaan8083.
- 16) J. Li, H. Lee, T. Chen, and K. J. Vahala: *Phys. Rev. Lett.* **109** (2012) 233901.
- 17) N. Kuse, K. Nishimoto, Y. Tokizane, S. Okada, G. Navickaite, M. Geiselmann, K. Minoshima, and T. Yasui: *Commun. Phys.* **5** (2022) 312.
- 18) A. Schliesser, N. Picqué, and T. W. Hänsch: *Nature Photon.* **6** (2012) 440.
- 19) I. Pupeza, C. Zhang, M. Högner, and J. Ye: *Nature Photon.* **15** (2021) 175.
- 20) T. Yasui, S. Yokoyama, H. Inaba, K. Minoshima, T. Nagatsuma, and T. Araki: *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.* **17** (2011) 191.