

光コムを用いた光波の精密制御による高機能光計測技術の進展

美濃島 薫¹

¹電気通信大学 (〒182-8585 東京都調布市調布ヶ丘 1-5-1)

New trends on highly functional optical measurements using precise control of optical waves with optical frequency comb

Kaoru MINOSHIMA¹

¹University of Electro-Communications, 1-5-1 Chofugaoka, Chofu, Tokyo 182-8585

Abstract: Optical frequency comb technology has been successfully used as an "ultraprecise frequency ruler" and revolutionized various science and technology fields based on absolute optical frequency measurements since Nobel Prize in Physics in 2005. However, there are still broad potential application fields open to the comb. In this talk, new trends on highly functional optical measurement applications of optical frequency combs which have been conducted in our group are presented. The topics include dual-comb technique as an optical network analyzer for various materials study and a tool for versatile coherent control of broad light wave properties; one-shot 3D imaging with all-optical signal processing by use of phase controllability of optical frequency comb for instantaneous, high-resolution, and wide-range measurements, which can be applied to ultrafast imaging.

Key Words: Optical frequency comb, Optical synthesizer, Fiber laser, Spectroscopy, Three-dimensional imaging

1. 光コムとは

近年、光周波数軸上の極めて等間隔な光周波数モード列「光コム」（光周波数コムとも言う）技術の進展によって、光波を音のように自由自在に操作する光科学技術者の究極の夢をかなえるツール「光シンセサイザ」の実現に大きく近づいた。それにより光の制御性が大きく高まり、応用光計測の分野においても、多くの可能性が生まれてきている¹⁾。

モード同期レーザーが多数の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できるようになったのは、近年のレーザー発生・制御技術の進展による。光コムという名前は、多数のモードが楕状に等間隔に並ぶ様子からつけられているが、近年、「光コム」と呼ばれて精密計測を始めとする応用の手段として注目されている高精度光は、単なる楕型形状のスペクトルを持つ光ではない。光コムは、1台のレーザーから同時に出力される典型的には数千・数万にも及ぶ多数の光周波数モードが、各々、精密な周波数値と高いコヒーレンスを持つ連続波レーザーに相当すると同時に、それらが相互に精密な位相関係を保つ極限光である。光コムの真髄は広帯域にわたる極めて高い等間隔性であり、かつそれが制御によって高精度に保持されるアダプティブ性である。そのため、楕の歯1本に相当する光モード周波数が、モード間隔周波数 (f_{rep}) の整数倍と、その余りの定数項 (f_{CEO}) の和として、2つのマイクロ波周波数のみの簡単な1次式で高精度に記述される。光周波数は数百 THz の大きな値で直接測定できないが、マイクロ波周波数であれば、カウンタなどの電子機器を用いて測定できる。現在、レーザーの波長（周波数）を定義に従って測定（絶対測定）するためには、時間周波数基準のある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れば容易に実現できる。すなわち、光コムは、周波数が何桁も離れたマイクロ波と光波との間の「周波数のコヒーレントなリンク」であると同時に、秒とメートル間の「単位のコヒーレントなリンク」を実現する。このように、光コムは人類が手にした最も精密な「光のものさし」であり、2005年のノーベル物理学賞につながった。

2. 光コムによる計測技術

しかし、光コム技術の意義は単なる「周波数のものさし」に留まらない。「周波数」は、全物理量の中で最も精密で大きなダイナミックレンジ（広い範囲と高精度）を持ち、かつ成熟したエレクトロニクスの装

置や手法によって扱うことができる。光コムによって、光技術とエレクトロニクス技術の垣根が取り払われ、異なる「科学技術分野のコヒーレントなリンク」が実現された。これにより、光波の位相レベルの制御技術が革命的に進展し、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、圧倒的なダイナミックレンジが利用できるようになった。

特に、周波数軸上の光コムは時間軸上で超短パルス列であるように、その応用上の魅力は多次元性にある。周波数軸上の制御性の利用により、時間軸においても、単独パルスの超短時間性のみならずパルス列としての性質を積極的に用いることが可能となった。これにより、フェムト秒レベルのパルス幅に加えて、間隔時間、キャリア波の位相と周期、さらにはパルスのエンベロープに対するキャリア波の周期という、アト秒からミリ秒以上に及ぶ、広範かつ相互に関係を持つ異なるスケールの量を内包できると同時に、光速を介して高分解能かつ広範囲な空間軸と結びつけることができる。このような超短パルス列の精密性と多重性を利用することにより、時間・空間・周波数の多次元において圧倒的な精密さとダイナミックレンジをもつ制御性を実現し、それを利用することによって従来技術では未踏であった領域の高機能計測が可能となってきた。

光コムの応用では、その特長を生かした利用法が重要となるが、Fig. 1 に示すように、主としてその制御性の観点から以下の3つのカテゴリに分類できる²⁾。

(1) 周波数ものさしとして利用

光コムの周波数制御性を活かして、絶対値を付与された光コムを「光のものさし」、すなわち広帯域かつ高精度な波長計として利用する。近年では、レーザーの波長だけでなく、分光器の広帯域・高精度な校正手段としても注目され、天文分野を画期的に進展させるツール「アストロコム」³⁾としても期待されている。

(2) 光周波数モードを CW 光源として利用

光コムの各周波数モードの制御性を活かして、広帯域の任意光周波数発生「光周波数シンセサイザ」として利用する。繰り返し周波数が 10 GHz 以上の光コムでは単一モードを直接抜き出すことも可能であり、一般的に利用されている繰り返し周波数が 100 MHz 程度の光コムでは、波長可変 CW 光源を同期させ、光コムの高精度を保ったまま、高強度かつ広帯域可変の単一モード出力を得る手法がとられる。光コムに同期することで、走査の範囲拡大と高精度化の両立が可能となり、光や THz 波領域での分光やセンシング、大気中のピコメートル精度を持つ変位計測⁴⁾が実現されている。

(3) 光コム全体を光源として利用

「光コム光源」として、その特徴をフルに生かした利用であり、近年盛んになってきている。さらに細分化すると、①制御された超短パルス列光源として時間軸制御性を利用するもの、②広帯域スペクトル光源、③コヒーレントな多モード制御性を活かした光源として利用するものに分けられる。

① 光コム全体をパルス光源として用いる。光コムが制御された超短パルス列であることを利用すると、ナノ秒などの時間で等間隔に出力されるフェムト秒などの幅の包絡線を持つ超短パルス列の性質と同時に、パルスの包絡線に内包される位相制御されたキャリア波としての性質が利用できる。干渉計測に用いると、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る。制御された光コムでは、モード線幅として 1 Hz 以下が実現されている。パルス間干渉により、低コヒーレンス干渉と任意距離測定を両立する高機能計測が可能である。また、光コムの周波数で光路長を可変・制御できるため、機械的走査が不要となり、高速かつ高精度な計測が可能という大きな利点がある。

② 光コムを広帯域光源として利用する。モード同期レーザー自体が広帯域スペクトルを持つが、さらに、超短パルスの高強度性を生かしてコンティニューム光発生や波長変換などの高効率な非線形光学効果により超広帯域光が利用できる。連続的な広帯域スペクトルを利用すると共に、検出のスペクトル分解能がモード間隔より高分解能になると、一気に各モードの狭線幅を生かして検出分解能を超えることができる。また、分光のみならず、広帯域にわたるスペクトル成分や多数のモードに情報を乗せて同時に扱うことにより、高速性、並列性を活かした計測・情報処理応用の可能性も出てきている。

③ 光コムをコヒーレント多モード光源として、モード間の干渉(モード間ビート)を利用する。同一コム内の多数のモード同士のセルフビート、および、複数のコム間のクロスビートを利用し、RF、マイクロ波、THz から光周波数までの非常に広帯域な合成波長を生成できる。また、広帯域・高精度な変調、ヘテロダイン、ビートダウン手法として用いられ、光周波数とマイクロ波周波数の変換を用いた信号処理・計測が可能である。中でも、繰り返し周波数のわずかに異なる 2 つの光コムのクロスビートで光周波数領域の情報を RF 領域にビートダウンし、多数のモード分解したスペクトル情報を同時に取得するデュアルコム法⁵⁾が盛んになっている。これにより、100 THz に及ぶ広帯域を一度にカバーして、各光周波数モードを分解できる高分解能と周波数絶対値を持つ高精度スペクトルを、ミリ秒程度の高速かつ高感度に取得できるようになり、光コムの応用性が大きく高まった。

本講演では、筆者らの研究を紹介し、以上のような光コムによる光波の極限制御を生かした応用計測分野の広がりについて、いくつかの光源開発と応用の実例を示す。特に、実用的なファイバレーザーによる一体型デュアルコム光源⁶⁾と、光コムの、高精度・広範囲・高速性を同時に実現する特性を活用した応用として、デュアルコム分光によるガスや固体物性の測定技術⁷⁾、空気揺らぎを自動補正する長距離高精度計測技術⁸⁾、光演算によって瞬時3次元形状計測を実現する技術⁹⁾について紹介する。

謝 辞

本講演で紹介する研究は、JST,ERATO 美濃島知的光シンセサイザのもとで行われた。

参考文献

- 1) 美濃島 薫：電子情報通信学会誌 **103** (2020) 1072.
- 2) 美濃島 薫：光学 **37** (2008) 576.
- 3) T. Steinmetz, T. Wilken, C. Araujo-Hauck, R. Holzwarth, T.W. Haensch, L. Pasquini, A. Manescau, S. D'Odorico, M.T. Murphy, T. Kentischer, W. Schmidt, T. Udem: Science **32** (2008) 1335.
- 4) T.R. Schibli, K. Minoshima, Y. Bitou, F.L. Hong, H. Inaba, A. Onae, H. Matsumoto: Opt. Express **14** (2006) 5984.
- 5) I. Coddington, W.C. Swann, N.R. Newbury: Physical Review Letters **100** (2008) 013902
- 6) Y. Nakajima, Y. Hata, K. Minoshima: Opt. Express **27** (2019) 5931.
- 7) A. Asahara, A. Nishiyama, S. Yoshida, K. Kondo, Y. Nakajima, K. Minoshima: Opt. Lett. **41** (2016) 4971.
- 8) K. Minoshima, K. Arai, H. Inaba: Opt. Express **19** (2011) 26095.
- 9) T. Kato, M. Uchida, K. Minoshima: Sci. Rep. **7** (2017) 3670.



Fig.1 Applications of optical frequency comb in terms of its controllability.