光コムの多次元特性を生かした新規応用への展開

美濃島 薫

電気通信大学(〒182-8585 東京都調布市調布ヶ丘1-5-1)

JST, ERATO 美濃島知的光シンセサイザ(〒182-8585 東京都調布市調布ヶ丘1-5-1)

New Trends Towards Applications of Optical Frequency Comb Using Its Multi-Dimensional Controllability

Kaoru MINOSHIMA

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

JST, ERATO MINOSHIMA Intelligent Optical Synthesizer, 1-5-1 Chofugaoka, Chofu, Tokyo 182-8585

(Received March 12, 2018)

Optical frequency comb technology has been successfully used as an ultra-precise frequency ruler in frequency metrology, but it also provides powerful tools in broad areas. By precisely controlling the frequency and the phase of optical frequency combs, metrology applications with ultra-high accuracy with ultra-wide dynamic range, multi-dimensionality, and versatile controllability can be achieved. This paper presents the development of various metrology applications of optical frequency combs using such attractive features. First, we extended the dual-comb technique to the time-domain and the coherent spectroscopy of solids and developed a versatile spectroscopy technique for the rapid, high-precision, wide-dynamic range measurements as well as the full characterization of a broad range of materials. Next, using a rapid and highly accurate dimensional conversion based on an optical frequency comb, a novel method for ultrafast one-shot 3D imaging with high-accuracy and wide-range is presented. With versatile multi-dimensional controllability, broad application fields remain open to the comb.

Key Words: Optical frequency comb, Mode-locked fiber laser, Spectroscopy, Interferometer, Imaging

1. はじめに

20世紀終わりに光コムによる光周波数絶対計測が実証され¹⁻³⁾, 周波数標準・計測技術は革命的に進展を遂げた。しかし, 光コムの意義は, 単に光周波数を測る精密な「周波数ものさし」に留まらない⁴⁾。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, 光とエレクトロニクス技術の垣根が取り払われ「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, 光波のあらゆる性質の精密かつ自在な制御ツール「光シンセサイザ」が現実のものになってきた。特に光の制御性において, 応用上の魅力はその多次元性にある。Fig. 1 に示すように, 周波数軸上の光コムは時間軸上で超短パルス列であり, その周波数軸上の圧倒的な制御性は他の次元に変換され, 時間軸においても, 単独パルスの超短時間性のみならず, 相互に高い関係性を持つ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超短パルス幅に加えて, 正確な時間間隔, キャリア波の位相と周期, 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ように, アト秒からミリ秒以上に及ぶ, 広範なスケールの軸

Fig. 1 Multi-dimensional controllability in ultrashort pulse train and optical frequency comb.

を同時かつ自在に制御できることになった。さらに、このような超短パルス列の精密性と多重性は、光速を介して高分解能かつ広範囲な空間軸に変換されると同時に、パルスとしての強度軸を生かして種々の非線形光学現象を活用することができる。このように、光コムによって、時間・空間・周波数の多次元における圧倒的な精密さとダイナミックレンジをもち、強度軸をも加えた相互の軸変換による多彩な制御性を生かした応用が可能となった⁵⁻¹⁰。さらに、この光コムの制御性を生かした次元変換ツールとしての特性は他の物理量にも拡張可能であり、実際に偏光、空間パターン、制御、物性やイメージングへの応用など、多くの可能性が広がってきている^{11,12}。以下では、これらの多次元性を生かした応用例として、筆者らの研究から、高速・高精度の固体物性評価と、瞬時3次元イメージングについて紹介する¹²⁻¹⁵。

2. 固体物性評価・時間分解分光・コヒーレント制御

2.1 デュアルコム分光の固体物性研究への応用

2台の光コムを用いて従来法を凌駕する精密・高速測定を可能にするデュアルコム分光法^{16,17}は、気体分子の精密分光を中心に発展してきたが、近年、非線形分光などへと発展し^{18,19}、その有用性を生かした新たな極限計測技術の創出に期待が集まっている。我々は光コムの時間軸特性を生かした固体物性評価に注目して研究を行った。

固体物性研究のために開発したデュアルコム分光システムの概略をFig. 2に示す¹³。デュアルコム分光は、繰り返し周波数 f_{rep} が異なる2台の光コムによって干渉計を

Fig. 2 (a) Dual-comb spectroscopy system for solid material study. (b) Experimental result of direct spectroscopy of complex optical properties of Er:YAG.

構築し、相対的なパルスの遅延時間が高速に掃引されることを用いた干渉分光法である。機械的遅延のない高精度かつ高速な干渉計測によって、光波の振幅と位相情報を独立に用いた高精度・高速・広帯域な複素分光が可能となる。光源としては、高精度に位相制御された2台のErファイバコム($f_{\text{rep}} \approx 56$ MHz, $\Delta f_{\text{rep}} \approx 120.6$ Hz)を用い、狭線幅CWレーザーを介した精密な位相制御によって十分な相対コヒーレンスを実現した²⁰。また、干渉光路の位相ゆらぎ補正として、試料を透過しない参照光路(Ref. path)を設けて基準とすることにより、試料の抜き差しを含む絶対光路差測定を高精度に実現し、高精度な屈折率評価を可能とした。

実際に、レーザー媒質として知られるEr:YAGセラミクス試料の測定結果を示す(Fig. 2)。試料透過後のSignalコムのインターフェログラム(IGM)をフーリエ変換し、フレネル反射を考慮した簡単な解析を行うことで、試料の複素屈折率スペクトルを導出した。その結果、希土類元素に特有の微細なスペクトル構造が明瞭に得られ、開発手法の有用性を示した。ここでは 10^4 個のIGMを平均化した結果を示したが、全スペクトル領域が10 ms程度で取得できるので、所望のSN比に応じてさらに平均化することも実用的な測定時間で十分可能である。本手法の特長は、複素屈折率の実部と虚部がKramers-Kronig変換等を介さずに直接導出できること、スペクトル情報が高速取得され動的対象に適用できること、さらに、多重反射光(エコー信号)の時間軸情報を利用し、本測定のみから屈折率と厚みを同時分離取得できることである。

次に、レーザー媒質や光学デバイス開発において重要な複屈折測定法の開発を行った。まず、レーザー媒質としてよく用いられるNd:YVO₄結晶(厚み: 0.60 mm)に適用した。試料を回転させながら測定を行うと、結晶の方位角に応じたダブルパルス状のIGMが観測され、同様の解析で複屈折率を導出したところ、文献値²¹と測定不確かさの範囲内で一致した。さらに、非線形光学材料として用いられるニオブ酸リチウム結晶(Mg:SLN)の群屈折率と分散の精密測定に応用した結果、既知のセルマイヤー方程式²¹と 10^{-3} の測定不確かさで一致した。

現在の測定精度は、主に環境ゆらぎによるシステムの位相不安定性に起因しており、さらなる向上が可能である。本手法は、固体結晶の迅速かつ再現性の高い光学特性評価(群屈折率、位相屈折率、複屈折、厚みなど)に適用でき、レーザー開発等の広い応用において有用なツールとして期待される。

2.2 時間分解デュアルコム分光法

デュアルコム分光の多次元計測への拡張を目指した時間分解手法を開発した¹⁴。従来のデュアルコム分光に加え、Signalコムに同期したもう一つの光コム(Pumpコム)を導入し、遅延時間を掃引しながら測定を行うことで、複素スペクトルの時間発展をフェムト秒時間スケールで追跡できる。これは従来のデュアルコム分光にポンプ・プローブ法を導入した新しい時間分解干渉分光に相当し、時間・周波数の複素2次元スペクトルの高速測定を

可能にする。

試料として波長1.5 μm 帯用の透過型InGaAs可飽和吸収体を用い、半導体における光励起キャリアの緩和ダイナミクスを観測した結果、光励起によるIGMの過渡応答が得られた。振幅は 10^{-3} オーダーのステップ状の増加を示し、従来のポンプ・プローブ吸収測定で得られる結果と整合した。一方、位相には光励起によって生じる ~ 10 mradの微小な瞬時応答と、数psの緩和成分が観測された。ここで時間分解能はパルス幅で決まる60 fsである。このように時間分解デュアルコム分光によって試料の振幅・位相スペクトルの過渡応答の分離測定に成功した。

デュアルコムによる多次元分光は、複数のPump・Probe光を自由に組み合わせ、電場時間波形を直接、高速にサンプリング可能な点が大きな強みである。ここでは、PumpとProbeは一つのコムを分離して生成し、機械ステージを用いて遅延時間を掃引したが、わずかなシステム構成の変更で、2つのコムをPumpとProbeに用いる非同期光サンプリング法(ASOPS)に適用できる。実際に、ナノ秒の全時間領域にわたりフェムト秒データ間隔でフェムト秒分解能を有する過渡応答をミリ秒で取得するという、広時間ダイナミックレンジを有する高速Pump-Probe測定を実現した。さらに3つの光コムを用いることで、これらの2つの手法を融合し、機械ステージを全く排除した、多彩な非線形分光を行う自由度の高い実験が可能である。本手法は、固体試料の複素光学特性を、高い時間・周波数分解能を両立しながら測定できる強力な物性評価ツールとして期待される。

2.3 マルチ光コムのコヒーレント制御性の活用

光コムは、非常に高い位相制御性(コヒーレンス制御性)を本質的に有しているが、いわゆる“周波数ものさし”としての応用と比較すると、その性質はこれまで十分に活用されてこなかった。この特性を積極的に活用すれば、光コムは単なる安定化された光源としてではなく、自在なコヒーレント制御が可能な高機能光源として用いることが可能となる。さらに、複数の光コム(マルチコム)を位相同期して、ひとつの光源システムとして扱うことにより、「コヒーレンス・シンセサイザ」としての多彩な応用が生まれる。マルチコム光源では制御する周波数パラメータが増加し、オフセット周波数や繰り返し周波数、およびそれぞれの差に相当する Δf_{ceo} や Δf_{rep} を適切に設定することで多彩なコヒーレント変調を活用した高機能計測が実現される。特に Δf_{ceo} は、2つの光コムにおけるパルスペア間の位相差(相対CEP)に関連しており、それが周波数によって任意変調できることを意味している。

本研究では任意の偏光変調コムの生成・検出実験を行った¹²⁾(Fig. 3)。まず音響光学素子(AOM)を用いて、ひとつの光コムから f_{rep} が等しく、かつ可変な Δf_{ceo} をもつデュアルコム光源を生成し、続いてこれらの偏光を直交させて空間的・時間的に重ね合わせることで、偏光が Δf_{ceo} に依存して任意変調されたパルスを合成し、新規な

Fig. 3 Schematics of (a) experimental system for polarization modulation, (b) frequency shift imposed by AOM, and (c) polarization interference between the 0th and 1st order light emitted from AOM. (d) Experimental results for $\Delta f_{\text{ceo}} = \Delta f_{\text{rep}}/4$.

シンセサイザ光源を生成した。このように Δf_{ceo} で任意変調された光は、その周期に同期した変調分光法と組み合わせることで有効に活用される。そこで、繰り返し周波数が Δf_{ceo} (= 1 kHz)だけ異なるもう1台の光コムをローカルコムとして導入し、従来のデュアルコム分光測定を適用することで、コヒーレント検出実験を行った。

Fig. 3 に $\Delta f_{\text{ceo}} = \Delta f_{\text{rep}}/4$ (= 250 Hz)に設定したときの結果を示す。IGMの検出周期(= $1/\Delta f_{\text{rep}}$)ごとに、構成する2つの光コムの位相差が $\pi/2$ ずつシフトし、合成波の偏光が変化する。その結果、特徴的な偏光変調が順次明瞭に示され、デュアルコム光源の Δf_{ceo} 制御により偏光変調光コムが生成できることが実証された。さらに、周波数パラメータ条件を変更すると多彩な偏光の変調やスイッチングが実現される。例えば、 $\Delta f_{\text{ceo}} = f_{\text{rep}}/2$ (= 25 MHz)とすると、パルス列の繰り返し周期 f_{rep} での偏光変調、すなわち25 MHzで直交偏光間をスイッチするような超高速偏光変調が実現される。ここで示した光コムの高制御性を利用した偏光制御・検出法によって、従来法では困難であった広い波長域にわたり同時に高精度制御できるような高速・任意な偏光状態の動的制御が可能となり、高感度・高精度・多彩な対象の偏光変調分光など、高度な応用の実現が期待される。

本研究ではさらに、光コムの位相制御性を用いた新たな応用として、軌道角運動量をもち特徴的な空間位相分布を有する光として近年注目されている光渦の制御にも光コムを適用した。光渦に光コムの精密な位相制御技術を組み合わせることで、空間と時間双方で位相制御がなされた高機能光源、“光渦コム”技術を確立すること目指して研究を行っている。

3. 無走査瞬時3次元計測への応用

3.1 背景

光コムの高い制御性とコヒーレンスを用いることで、

距離計測の計測精度とダイナミックレンジが飛躍的に向上した^{5-7,22)}。一方、多くの分野で高精度な瞬時3次元計測手法への展開が切望されている。しかし既存法では、瞬時計測と広範囲・高精度を両立することは困難で、高精度なレーザー測距法においても対象面の掃引が必要となるため、静止対象物に限定される。我々は1994年に、超短パルス光の応用技術の先駆けとして、チャープした超短パルス光を用いた空間・時間・周波数軸(色)の瞬時多次元情報変換原理を開発し、瞬時3次元形状計測法に適用した²³⁾。しかし、単一パルスを利用する手法では測定範囲に限界があるほか、非線形光学効果をイメージ取得に用いていたため大型の大出力光源が必要で、実用性と測定精度が制限されていた。そこで本研究では、実用性に優れたモード同期ファイバレーザによる光コムを光源とし、パルス間スペクトル干渉による、広範囲・高精度・超高速な瞬時3次元イメージング法を開発した¹⁵⁾。

3.2 瞬時3次元計測の原理

Fig. 4に、チャープした光コムによるスペクトル干渉を用いた距離イメージング法の原理を示す。チャープパルスを被測定物に照射すると、その反射光に被測定物の段差に応じた遅延時間が発生する。それをチャープフリーパルスと干渉させると、得られたスペクトルにはパルスが重なるタイミングに依存する一様でない干渉パターンが観測される。スペクトル干渉縞を面的に取得し、それぞれの干渉縞周波数が最も低くなる波長(最低干渉縞周波数を与える波長)を求めれば、遅延時間すなわち被測定物との距離を測定することができる。このような波長分布をイメージ検出することにより、多点の距離イメージング、すなわち瞬時3次元形状計測が可能となる。

3.3 原理実証実験と結果

まず、提案手法による同時多点計測の原理検証実験を行った。モード同期Erファイバレーザによる、パルス幅65 fs、中心波長1.55 μm 、繰り返し51.06 MHzの光コムを用いた。プローブ光を、3.8 mのシングルモードファイバ中を伝搬させ、パルス幅5.7 psのチャープパルスを生成した。その後測定対象に照射し、奥行き形状に対応する遅延分布を与えた。リファレンス光に固定の遅延を与

Fig. 4 Principle of one-shot three-dimensional imaging method using chirped frequency comb.

えたのちにプローブ光と重ねあわせ、回折格子で分光してInGaAsカメラで撮影した。ここで、リファレンス光とプローブ光の光路差は約6 mで、隣り合うパルス同士の光コム干渉縞を検出しており、これによって光コムの f_{rep} を可変にすることにより、機械ステージの移動を伴わずに遅延時間の高精度な調整が可能である^{24,25)}。

対象としては、鏡面の既知の段差形状を測定した。ブロックゲージをガラス基板に光学接着させ、高精度な段差480 μm を形成した。Fig. 5左に撮影した画像を示す。横方向が波長、縦方向に空間情報を持っており、1行が異なる場所でのスペクトル干渉を表している。同時に、この分光画像1枚から求めたブロックゲージの段差形状を示すが、平らな各段差プロファイルが瞬時に明確に得られた。さらに、段差の値が $479.1 \pm 1.3 \mu\text{m}$ と得られたことから、本手法によって、瞬時に形状情報がマイクロメートル精度で計測可能であることが示された。

3.4 計測精度を犠牲にしない瞬時測定範囲拡大

次に、光コムのコヒーレンスと等間隔性を生かして、数メートル以上の大きな物体の形状計測技術を開発した。光コムの異なるパルス同士の干渉縞を取得するパルス間干渉^{24,25)}を利用する(Fig. 6)。このとき計測距離は、パルスの個数とパルス間隔を乗じたものと、干渉計測による位相測定結果の和となるが、光コムのパルス列間隔が十分高精度なため、パルス個数分は計測の不確かさに寄与しないため、メートル以上の物体であっても、ミリメートルの物体と同様の不確かさで測定できる。よって、光コムを用いることで、不確かさを犠牲にせずに測定範囲拡大が可能な、計測のトレードオフ解消原理が示された。実際に、多点計測によって、パルス1個分に当たる3 m離れた段差形状の同時計測を行い、ミラー面形状($< \mu\text{m}$)、段差間隔(980 μm)がそれぞれ $1 \pm 3 \mu\text{m}$ 、 $980 \pm 2 \mu\text{m}$ と得られ、設計値と一致する結果を得た。注目すべきは、それぞれの面は3 m離れているが同時に両者の形状が測定できた点である。互いの位置関係はパルス間

Fig. 5 Experimental results for a one-shot profile measurement of step structure made of gauge blocks.

Fig. 6 Principle of extension to trade-off-free high-precision measurement of a large object with pulse-to-pulse interferometer.

隔より特定できるので、高アスペクト比の3次元形状を無走査に描画することが出来た。以上より、3 mの面間隔と各面の分布形状において、マイクロメートルレベルの高精度同時測定を実証した。

本研究では、ここで示した反射物体だけでなく、実際に粗面物体、動体、デバイスの内部構造の計測などに適用し、サブマイクロメートルの奥行精度が実証されている。本手法は、顕微から大型物体、高アスペクト比、超高速現象の計測など幅広い対象に適用できる計測手法として発展が期待される。

4. まとめ

光コム技術は、光周波数の精密ものさしとして誕生したが、同時に、時間、空間をはじめとしたヘテロな物理量をつなぐ多次元性を持ち、単なる「ものさし」に留まらず、光波の自在な制御を可能にする基盤技術として急速な進展を遂げている。その結果、従来実現できなかったレベルの精密に加え、圧倒的なダイナミックレンジをもつ光波の自在な制御を用いて、広範な分野における革新的な応用を実現する可能性が拓けてきている。現在の科学技術や産業において求められる光技術は、一層の高精度化と同時に、測定レンジの拡大、高感度化、高速化、高い制御性、応用や環境に応じた適応性や、マルチモード、オンデマンド性などが求められ、ますます高機能化しているが、光コム技術は、これらの要求に応える高いポテンシャルを持っている。本稿で紹介したのは、そのうちのごく一部の例示である。近年、光コム光源は多様化しており、実用技術の進展も著しく²⁶⁻³⁰⁾、それらと呼応して発展することにより、今後ますますの応用拡大が期待される。

謝 辞

本稿で紹介した研究は、電気通信大学 美濃島研究室 特任助教の浅原 彰文、加藤 峰士、中嶋 善晶、研究員の西山 明子、卒業生の吉田 悟、大学院生の近藤 健一、内田 めぐみ、田中 優理奈、王 月、および中央大学 庄司 一郎教授との共同研究である。JST、ERATO 美濃島知的光センササイザプロジェクト(JPMJER1304)の助成を受けた。

参考文献

- 1) Th. Udem, J. Reichert, R. Holzwarth, and T.W. Haensch: *Phys. Rev. Lett.* **82** (1999) 3568.
- 2) 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.
- 3) K. Sugiyama, A. Onae, T. Ikegami, S. N. Slyusarev, F. L. Hong, K. Minoshima, H. Matsumoto, J. C. Knight, W. J. Wadsworth, and P. J. Russell: *Proc. SPIE* **4269** (2001) 95.
- 4) 美濃島 薫編：レーザー研究 **35** (2007)。
- 5) K. Minoshima and H. Matsumoto: *Appl. Opt.* **39** (2000) 5512.
- 6) J. Ye: *Opt. Lett.* **29** (2004) 1153.
- 7) S. W. Kim: *Nat. Photonics* **3** (2009) 313.
- 8) T. Steinmetz, T. Wilken, C. Araujo-Hauck, R. Holzwarth, T. W. Haensch, L. Pasquini, A. Manescau, S. D'Odorico, M. T. Murphy, T. Kentscher, *et al.*: *Science* **321** (2008) 1335.
- 9) M. J. Thorpe, D. Balslev-Clausen, M. S. Kirchner, and J. Ye: *Opt. Express* **16** (2008) 2387.
- 10) T. M. Fortier, M. S. Kirchner, F. Quinlan, J. Taylor, J. C. Bergquist, T. Rosenband, N. Lemke, A. Ludlow, Y. Jiang, C. W. Oates, *et al.*: *Nat. Photon.* **5** (2011) 425.
- 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) A. Asahara and K. Minoshima: arXiv: 1710.06098 (2017)
- 13) A. Asahara, A. Nishiyama, S. Yoshida, K. Kondo, Y. Nakajima, and K. Minoshima: *Opt. Lett.* **41** (2016) 4971.
- 14) A. Asahara and K. Minoshima: *APL Photonics* **2** (2017) 041301.
- 15) T. Kato, M. Uchida, and K. Minoshima: *Sci. Rep.* **7** (2017) 3670 1.
- 16) S. Schiller: *Opt. Lett.* **27** (2002) 766.
- 17) I. Coddington, W. C. Swann, and N. R. Newbury: *Phys. Rev. Lett.* **100** (2008) 013902.
- 18) T. Ideguchi, S. Holzner, B. Bernhardt, G. Guelachvili, N. Picque, and T. W. Hansch: *Nature* **502** (2013) 355.
- 19) B. Lomsadze and S. T. Cundiff: *Opt. Lett.* **42** (2017) 2346.
- 20) A. Nishiyama, S. Yoshida, Y. Nakajima, H. Sasada, K. Nakagawa, A. Onae, and K. Minoshima: *Opt. Express* **24** (2016) 25894.
- 21) S. Nuki, D. Gunji, I. Shoji, T. Fukui, and Y. Furukawa: *Nonlinear Optics (NLO) 2013*, NW4A28.
- 22) K. Minoshima, K. Arai, and H. Inaba: *Opt. Express* **19** (2011) 26095.
- 23) K. Minoshima, H. Matsumoto, Z. G. Zhang, and T. Yagi: *Jpn. J. Appl. Phys.* **33** (1994) L1348.
- 24) Y. Yamaoka, K. Minoshima, and H. Matsumoto: *Appl. Opt.* **41** (2002) 4318.
- 25) Y. Nakajima and K. Minoshima: *Opt. Express* **23** (2015) 25979.
- 26) T. R. Schibli, K. Minoshima, F. L. Hong, H. Inaba, A. Onae, H. Matsumoto, I. Hartl, and M. E. Fermann: *Opt. Lett.* **29** (2004) 2467.
- 27) L. C. Sinclair, I. Coddington, W. C. Swann, G. B. Rieker, A. Hati, K. Iwakuni, and N. R. Newbury: *Opt. Express* **22** (2014) 6996.
- 28) M. Kourogi, K. Nakagawa, and M. Ohtsu: *IEEE J. Quantum. Electron.* **29** (1993) 2693.
- 29) M. Endo, I. Ito and Y. Kobayashi: *Opt. Express* **23** (2015) 1276.
- 30) P. Del'Haye, A. Schliesser, O. Arcizet, T. Wilken, R. Holzwarth, and T. J. Kippenberg: *Nature* **450** (2007) 1214.

レーザワード

位相同期 (phase lock)

電気信号やレーザー周波数の高精度制御に用いられる手法。厳密な定義は分野によるが、基準信号に対するフィードバック制御によって、被制御信号が波の位相レベルの精度で制御されているという意味で、平均的な周波数が一定に制御されていることを意味する周波数同期に比べ、高精度、低ノイズの制御である。高精度な周波

数測定や、位相レベルの精度を必要とする波のコヒーレンスを利用した応用においては必須な技術。その実現には、広い周波数帯域にわたるノイズ低減が必要であり、信号特性や目的に応じた広い制御帯域を持つ制御系が必要である。位相同期の確認には、アラン偏差や位相ノイズ測定の手法が用いられる。
(美濃島 薫)

干渉分光 (interferometric spectroscopy)

フーリエ分光に代表される、広帯域スペクトルを持つ光波の干渉計を構築し、干渉信号の位相と振幅から波長依存のスペクトル情報を得る手法。干渉計の光路に測定試料を配置することにより、試料の吸収、屈折率等の分光情報を得ることができる。干渉計の構成や検出手法は、目的によりいろいろなタイプが可能である。中でもフーリエ分光は、広帯域な波長にわたる干渉信号を一度に検出し、フーリエ変換によって干渉縞を解析して分光

情報を得る手法のため、検出感度が向上するメリットがあるが、高分解能に波長情報を得るためには、光路長差を広範囲かつ高精度に走査する必要がある。一般的な干渉計に用いられる機械的走査手法では適用に限界がある。これに対し、光コム、特に繰り返し周波数の異なる2つの光コムを用いるデュアルコム分光の利用により、機械的走査の不要な高速・高精度・広帯域フーリエ分光の実現が可能となった。
(美濃島 薫)

チャープした光コム (chirped optical frequency comb)

チャープは、時間とともに瞬時周波数に変化する現象。超短光パルスは広帯域の光周波数成分がコヒーレントに合成されて生成されているが、このときパルスを構成する周波数成分どうしの位相が同時にゼロにならない(そろわない)と、ひとつのパルスの包絡線内で時間とともに瞬時周波数に変化していくため、チャープしたパルスとなる。チャープはパルスが分散媒質中を伝搬することによって生成・制御され、その度合いは媒質の特性と伝搬するパルスの時間幅や波長などのパラメータに依存

して定まる。光コムは、時間軸上においては超短パルス列としてみなされ、特に互いにコヒーレントなチャープパルス列によって構成されている光コムを、チャープした光コムと呼ぶ。その利用によって、各パルス内のチャープ特性により定まった時間・周波数・位相関係を積極的に用いると同時に、パルス列間においても関係が定まっていることを利用して、計測・制御等のダイナミックレンジを拡大した応用が可能となる。

(美濃島 薫)