

令和元年6月11日現在

機関番号：12612

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2017～2018

課題番号：17K14322

研究課題名(和文)デュアルコムを用いたコヒーレント分光法の開発

研究課題名(英文)Development of Coherent Spectroscopic Methods using Dual-Comb

研究代表者

浅原 彰文(Asahara, Akifumi)

電気通信大学・大学院情報理工学研究科・助教

研究者番号：00770091

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,200,000円

研究成果の概要(和文)：デュアルコム(2台の同期した光コム)を用いたコヒーレント分光法の技術開発を目的として行った。光コムの特長である高いコヒーレント制御性を積極的に活用することで、新たな応用可能性を見出した。

初年度(H29年度)は、デュアルコム光源のコヒーレント制御法に関して、制御方式の検討を行った。オフセット周波数 f_{ceo} と繰り返し周波数 f_{rep} という2つの周波数を精密操作することによって、多彩な変調法を実現可能なことを見出した。最終年度(H30年度)は、特に偏光制御技術としての発展性に焦点を当てて研究を遂行した。複屈折材料を測定試料として適用し、光コムによってコヒーレント変調された分光データの取得に成功した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

光コム分光は、これまで精密分子分光や距離測定などの限られた応用が主な研究対象であったが、本研究成果によって、精密な周波数基準という従来の光コムの特徴を大きく越えた、新たなコヒーレント光波制御技術としての応用可能性が提示された。特に「オフセット周波数差の積極的活用によるデュアルコムパルスの相対CEP操作」という考え方は、光コム光源の将来的な幅広い発展性を示す重要な知見の獲得である。

研究成果の概要(英文)：The purpose of this study was to develop a technology of coherent spectroscopy using dual-comb light source, two phase-synchronized optical combs. By actively using the high coherent controllability that is the feature of the optical comb, we found new application possibilities.

In the first year (H29), we examined control methods for coherent control of dual-comb light sources. We found that various modulation methods can be realized by precisely controlling two frequencies of combs, offset frequency, f_{ceo} , and repetition frequency, f_{rep} . In the final year (H30), our research was conducted focusing on the potential as polarization control technology. Birefringent material was applied as a measurement sample, and we succeeded in acquiring spectral data coherently modulated by the optical comb.

研究分野：光計測

キーワード：光コム デュアルコム分光 超高速分光 コヒーレント分光 光波制御

1. 研究開始当初の背景

近年の光科学研究では、光（電磁波）の波長や強度だけではなく、光のコヒーレンス（キャリアエンベロープ位相（CEP））を積極的に活用した研究が、高次高調波発生や量子光学をはじめとした様々な研究対象に対して推進されている。このような CEP 依存現象の観測・制御に関する研究は、幅広い発展性を有することから今後益々その重要性を増すことが予想されており、高度なコヒーレンス制御が可能な光源開発および分光計測技術の発展が強く求められている。

光コム（光周波数コム）は、極限的に高い精密性・コヒーレンス・制御性を有する高品位な次世代光源として、計測学における幅広い革新的応用を実現してきた。一般的に光コムは精密な周波数基準を与える光源として広く知られ、その特長は、特に周波数標準や光格子時計といった高い絶対周波数精度が必要とされる精密計測分野において用いられてきた。しかし、光コムは、同時に非常に高い位相制御性（コヒーレント制御性）を本質的に有している光源である。光コムのいわゆる”周波数ものさし”としての応用と比較すると、こうした特性はこれまで十分に活用されてこなかったといえるが、このような観点から光コム光源を捉え直すことにより、光コムの潜在能力を生かした幅広い分野での極限計測の可能性が拓かれると期待される。これまで研究代表者 浅原らは、光コムが有するこのような特性に着目し、光コムを用いた固体物性評価（A. Asahara, A. Nishiyama, S. Yoshida, K. Kondo, Y. Nakajima, and K. Minoshima, *Opt. Lett.* **41**, 4971 (2016)）や超高速時間分解分光の実証実験（A. Asahara, and K. Minoshima, *APL Photonics* **2**, 041301, (2017)）を行ってきた。これらの先行研究で得られてきた知見をさらに発展させ、光コムの制御性を積極的に活用することで、新たな計測法を開拓できるのではないかと期待し、本研究を遂行した。

2. 研究の目的

本研究では、デュアルコム分光法（2 台の光コムを用いた精密フーリエ分光法）という主に精密分子分光で用いられてきた測定手法を、光コムの特徴である高いコヒーレント制御性を積極的に活用することでコヒーレント分光に応用する。具体的には、2 台の光コムの周波数パラメータを精密に制御することで、超短パルス列のコヒーレント制御を行う。このとき、それらの周波数パラメータの設定によって多彩なコヒーレント変調分光スキームが可能となるが、実際にどのような変調が可能となるか、もしくは種々の観測対象に対してどのような方式が適しているかを検討・体系化し、この新しい分光手法に関する知見をまとめる。さらに、開発手法の測定対象として固体試料等を実際に適用し、開発手法の有用性を実証する。以上の研究を通して、デュアルコム光源を用いたコヒーレント分光法という新計測法の確立と、その先にある研究領域の開拓を目指す。

3. 研究の方法

まずデュアルコム光源のコヒーレント制御方式について検討する。光コムは、2つの制御可能な周波数パラメータとして、オフセット周波数 f_{ceo} と繰り返し周波数 f_{rep} をもつ。これらを制御することで、超短パルス列のコヒーレンス（超短パルスの CEP 変化）を精密に制御することが可能となる。この原理をデュアルコムの場合に拡張し、2 台の f_{ceo} を独立に周波数制御することで、それぞれの CEP 変化を制御する。さらに 2 台の光コムの f_{ceo} の差である Δf_{ceo} 周波数パラメータを利用して、2 台の光コムの相対的 CEP 変化の制御が行えることを示す。

また、検討したコヒーレント制御方式の有用性を示すために、本制御方式を取り入れた光波制御方式の開発、および新しいデュアルコム分光システムの開発に取り組む。そして、開発した実験システムを、実際に固体試料等の観測対象に適用し、その有用性を実証する。

4. 研究成果

(1) デュアルコムのコヒーレント制御方式の検討・開発

光コムの周波数制御に基づく相対 CEP 操作の特性を知るため、デュアルコム分光法における 4 つの周波数パラメータ f_{ceo} ・ f_{rep} ・ Δf_{ceo} ・ Δf_{rep} の制御性について調べた。デュアルコム分光の研究分野では、このような周波数対応を考慮にいれた制御スキームは、”コヒーレント積算”

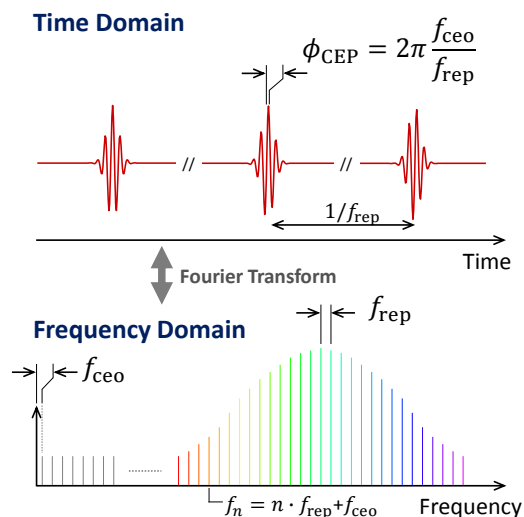


図 1. 光コムの時間領域および周波数領域における概念図。光コムはオフセット周波数 f_{ceo} と繰り返し周波数 f_{rep} を有しており、これらを精密制御することにより、超短パルスの位相 ϕ_{CEP} を操作することが可能となる。

と呼ばれる信号取得法において部分的に活用されている。この手法は、各周波数を適切な整数比に設定することによって、取得される干渉波形（インターフェログラム）の形状を一定に保ち、長時間積算を可能にする技術である。本研究では、その制御性を従来よりも積極的に活用することで、より一般的なコヒーレント積算スキームを提案した。

本研究では、Erファイバークムをベースとしたデュアルコム光源を用いて実験を行った。光コム相対 CEP 制御による影響を確かめるため、 Δf_{ceo} と Δf_{rep} の関係を変えながら、デュアルコム分光におけるインターフェログラムを取得した。測定結果の例を図2に示す。まず、図2(a), 2(c)に示したのは $\Delta f_{\text{ceo}}/\Delta f_{\text{rep}} = 0$ のときで、これは従来のコヒーレント積算条件に対応している。連続的に得られるインターフェログラムの形状は確かに一致しており、正しくコヒーレント積算がなされていることが確認された。続いて、図2(b), 2(d)に $\Delta f_{\text{ceo}} = \Delta f_{\text{rep}}/2$ ($= 60 \text{ Hz}$) のときの測定結果を示す。この条件では、正負が完全に反転したインターフェログラムが交互に観測された。また、その他にもさまざまな周波数対応関係を適用することで、任意変調が可能であることも確認した。以上より、確かに2つの光コム相対 CEP 操作が実験的になされており、一般化したコヒーレント積算の効果が実証できた。本手法は、適切な積算処理を加えることで、共通のノイズ成分を除去したバックグラウンドフリーなインターフェログラム検出などにおいて活用されると期待される。またこの結果は、デュアルコム分光に限らず、さらに広範な応用において、デュアルコム光源を用いた任意の位相シフト法の実現可能性を示唆している。

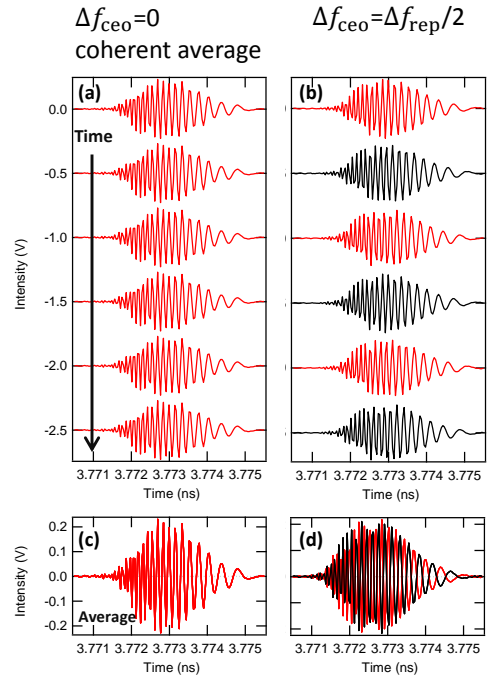


図 2. デュアルコム分光測定において周波数対応関係を変えながら測定したインターフェログラムの(a)(b)時間変化と(c)(d)それらを重ねた波形。

(2) コヒーレントな偏光変調法の開発と光コム分光への応用

検討した光コムのコヒーレント制御性の有用性を示すため、本制御方式を取り入れた偏光変調法の開発および光コム分光法の実証実験を行った。なお、研究開始当初の計画においては、四光波混合などの非線形光学効果への展開を計画していたが、本研究方向性における有用な適用性が期待されたため、本研究では偏光分光への応用を主に遂行した。

偏光の直交した2つの光パルスを重ね合わせると、合成波の偏光は、それらの位相差（リタレーション）に対応して、直線偏光や楕円偏光などさまざまな状態を取る。このとき、2つの光コム位相差を Δf_{ceo} によって制御すれば、その偏光を任意に操作することができる。行った実験では、1台の光コム出力を音響光学素子（AOM）に透過させることで、オフセット周波数 f_{ceo} が異なる2つの光（0次、1次回折光）を発生した。これら2つの光は、繰り返し周波数が同じで、かつ可変な Δf_{ceo} をもつデュアルコム光源として扱うことができる。それら2つの光コム偏光を直交させたのち、空間的・時間的に合わせて波形を合成することで、合成波として、偏光が任意制御された偏光変調光コムを生成した。さらに、繰り返し周波数 f_{rep} がわずかに異なるもう1台の光コムをローカルコムとして導入し、検出方法としてデュアルコム分光測定を適用した。これにより、合計3つの光コムを用いた「偏光変調デュアルコム分光法」を実現した。

図3に $\Delta f_{\text{ceo}} = \Delta f_{\text{rep}}/4$ ($= 250 \text{ Hz}$) という周波数条件に設定し、偏光変調デュアルコム分光法を行ったときの測定結果例を示す。このような条件では、インターフェログラムの検出周期 ($= 1/\Delta f_{\text{rep}} =$

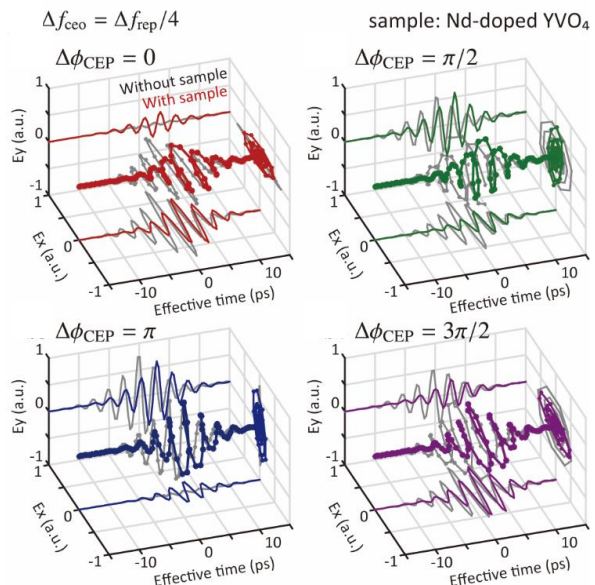


図 3. コヒーレントな偏光変調デュアルコム分光法の Nd:YVO₄ 結晶に対する測定例。

1 ms) ごとに, 4 回周期で合成波の偏光が変化する (灰色波形, 試料なし時の測定結果). この例では, 横偏光, 左回り円偏光, 縦偏光, 右回り円偏光という順序で, 合成波の偏光に特徴的な変調をかけることに成功した. ここではさらに, 固体試料として Nd-doped YVO₄ 結晶を適用した際の観測波形も同時に示した (カラー波形, 試料あり時の測定結果). 試料の屈折率に基づく位相遅れだけでなく, 変調された入射偏光に応ずる複屈折材料特有の偏光変化が観測された. 本研究で示した光コムを用いた偏光制御・検出方法は, 高感度な偏光変調フーリエ分光法の基盤技術としての活用が見込まれる. 偏光状態の動的な制御は, 従来は電気光学素子等を用いて行われてきたが, 今回のように光コムの高い制御性を利用することで, より高速かつ任意な制御が可能となり, 計測精度の向上や計測デザインの自由度の多様化へつながると期待される. これらの成果は, 雑誌論文 (A. Asahara, and K. Minoshima, arXiv: 1710.06098 (2017).) や国際会議 CLEO 等において発表された.

本研究課題において研究を行った光コムによるコヒーレント制御法・分光法は, 偏光制御だけでなく, さまざまな対象への発展が期待される. また本研究においては, その他, 偏光デュアルコム分光法の磁性材料への適用や, 光渦を用いたコヒーレント分光法の開発等に関しても成果を得た. このように光コムを用いた高度な光波制御技術は, 広範な高感度検出, 精密計測における革新的技術として発展していくことが期待される.

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 4 件) (主要項目以外を含めた総件数 8 件)

- ① [A. Asahara, S. Shoji, K. Kondo, Y. Wang, and K. Minoshima, "Coherent spatiotemporal control by combining optical frequency combs and optical vortices," Conference Paper of CLEO:2018, STu4P.3, \(2018\). \(査読無\)](#)
https://doi.org/10.1364/CLEO_SI.2018.STu4P.3
- ② [A. Asahara, and K. Minoshima, "Multi-optical comb metrology using relative envelope phase control and demonstration for arbitrary polarization modulation," arXiv: 1710.06098 \(2017\). \(査読無\)](#)
<https://arxiv.org/abs/1710.06098>
- ③ [A. Asahara, K. Kondo, Y. Wang, and K. Minoshima, "Coherent control of relative carrier envelope phase in dual-comb spectroscopy," Conference Paper of CLEO:2017, SF1C.6 \(2017\). \(査読無\)](#)
https://doi.org/10.1364/CLEO_SI.2017.SF1C.6
- ④ [A. Asahara, K. Kondo, Y. Wang, and K. Minoshima, "Coherent modulation of interference signals in dual-comb spectroscopy," Conference Paper of CLEO-PR:2017, 2-4H-2 \(2017\). \(査読無\)](#)
<https://www.osapublishing.org/abstract.cfm?uri=CLEOPR-2017-s1724>

[学会発表] (計 19 件)

- ① [浅原彰文, 足立拓斗, 小田切雄介, 白川正之, 王月, 石橋爾子, 波多野智, 徳永英司, 美濃島薫, "デュアルコム分光法の磁気光学特性評価への適用拡大," レーザー学会学術講演会第 39 回年次大会, 14aIV.10, 東海大 \(2019\).](#)
- ② [浅原 彰文, 美濃島 薫, "光コムによる多彩な精密位相制御と固体分光応用," 光波シンセシス研究グループ研究会「光の絶対位相制御と分光計測・物質操作への応用」, 東大生産技術研究所 \(2019\).](#)
- ③ (招待講演) [浅原彰文, 足立拓斗, 王月, 美濃島薫, "軌道角運動量分解デュアル光渦コム分光法の開発," 第 66 回応用物理学会春季学術講演会, 9p-M135-1, \(2019\).](#)
- ④ (招待講演) [A. Asahara, and K. Minoshima, "Metrological applications using coherent controllability of optical combs," Conference on Laser and Synchrotron Radiation Combination Experiment 2018 \(LSC2018\), LSC10-2, Yokohama, Japan, April 2018.](#)
- ⑤ [A. Asahara, S. Shoji, K. Kondo, Y. Wang, and K. Minoshima, "Coherent spatiotemporal control by combining optical frequency combs and optical vortices," STu4P.3, Conference on Lasers and Electro-Optics 2018 \(CLEO:2018\), San Jose, America, May 2018.](#)
- ⑥ [A. Asahara, S. Shoji, K. Kondo, Y. Wang, and K. Minoshima, "Coherent control and interferometric detection of lateral beam profile by use of dual-optical vortex comb," Conference Paper of Ultrafast Phenomena:2018, TUE. 2B. 7, Jul 2018.](#)
- ⑦ [浅原 彰文, 白川 正之, 王 月, 徳永 英司, 美濃島 薫, "デュアルコム偏光分光による光学特性評価," 10a-A116-7, 日本物理学会 2018 年秋季大会, 同志社大 \(2018\).](#)
- ⑧ [浅原 彰文, 王 月, 美濃島 薫, "デュアル光渦コム分光による角度軸情報の精密干渉計測," 第 79 回応用物理学会秋季学術講演会, 19p-428-13, 名古屋国際会議場 \(2018\).](#)
- ⑨ (招待講演) [浅原 彰文, 美濃島 薫, "光コムによる時間領域コヒーレント分光," OPJ2018,](#)

- 2pES1, 筑波大学東京キャンパス (2018) .
- ⑩ 浅原 彰文, 美濃島 薫, “光コムと光渦を組み合わせた時空間干渉計測,” 東北大学電気通信研究所 共同プロジェクト研究会, 筑波大学東京キャンパス (2018) .
 - ⑪ 浅原彰文, 庄司暁, 近藤健一, 王月, 美濃島薫, “デュアル光渦コムによる回転光マニピュレーション,” 19p-C303-13, 第 65 回応用物理学会春季学術講演会, 早稲田大 (2018).
 - ⑫ (招待講演) 浅原彰文, 美濃島薫, “光周波数コムによる自在なコヒーレント計測,” 超高速光エレクトロニクス(UFO)研究会, 第 3 回研究会「先端レーザーによる超高速科学」, 東京 (2017).
 - ⑬ 浅原彰文, 近藤健一, 王月, 美濃島薫, “光物性研究に向けたデュアルコムの相対 CEP 制御,” 21pB21-1, 日本物理学会 2017 年秋季大会, 岩手大 (2017).
 - ⑭ (招待講演) 浅原彰文, 美濃島薫, “光コムの位相制御性を生かした新たな応用の展開,” 精密工学会 2017 年度秋季大会, シンポジウム「光コムの革新的応用技術」, 大阪 (2017).
 - ⑮ 浅原彰文, 近藤健一, 王月, 美濃島薫, “光コムによる光渦の精密位相制御と応用,” 6p-S45-10, 第 78 回応用物理学会秋季学術講演会 (2017).
 - ⑯ (招待講演) A. Asahara, and K. Minoshima, “Dual-comb optical synthesizer for arbitrary coherent measurement,” The 24th Congress of the International Commission for Optics (ICO-24), Th2A-04, Tokyo, Japan, August 2017.
 - ⑰ A. Asahara, K. Kondo, Y. Wang, and K. Minoshima, “Coherent modulation of interference signals in dual-comb spectroscopy,” 2-4H-2, CLEO-PR:2017, Singapore Aug. 2017.
 - ⑱ A. Asahara, K. Kondo, Y. Wang, and K. Minoshima, “Coherent control of relative carrier envelope phase in dual-comb spectroscopy,” SF1C.6, CLEO:2017, San Jose, America, May 2017.
 - ⑲ A. Asahara, K. Kondo, Y. Wang, and K. Minoshima, “Application of relative carrier envelope offset frequency for coherent control in dual-comb configuration,” ALPS2-3, ALPS:2017, Yokohama, Japan, April 2017.

[その他]

ホームページ等

研究代表者 浅原彰文 大学研究者ページ

<http://kjk.office.uec.ac.jp/Profiles/70/0006961/profile.html>

研究代表者 浅原彰文 ResearchMap

<https://researchmap.jp/7000019085/>

研究代表者所属研究室 (電通大 美濃島研究室) 研究室ホームページ

<http://www.femto-comb.es.uec.ac.jp/>

6. 研究組織

(1)研究分担者

なし

(2)研究協力者

研究協力者氏名：美濃島 薫

ローマ字氏名：Kaoru Minoshima

※科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。