

平成 30 年 6 月 2 日現在

機関番号：32612

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2016～2017

課題番号：16K13701

研究課題名(和文) 偏光コム分光法の創出

研究課題名(英文) Development of the polarization-sensitive dual comb spectroscopy

研究代表者

渡邊 紳一 (Watanabe, Shinichi)

慶應義塾大学・理工学部(矢上)・准教授

研究者番号：10376535

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,900,000円

研究成果の概要(和文)：本研究課題では高速・高精度近赤外デュアルコム偏光分光計測装置の開発を行った。特に、研究代表者オリジナルのアイデアとして、デュアルコム分光装置と回転補償子を組み合わせることによって「デュアルコム信号の間に偏光情報をのせた新しいコムラインを作る」という手法を提案し、その装置開発を進めた。開発の結果、光周波数コム光源を構成する一つの光周波数成分について、その偏光情報を決定することに成功した。また、計測の不確かさを小さくするための計測法・解析法の提案を行い、その評価を行った。さらに光周波数コムの開発環境を整え、今後の応用展開への足がかりを築いた。

研究成果の概要(英文)：In this project, we developed a high speed, high precision polarization-sensitive dual comb spectroscopy system in the near infrared spectral region. We proposed the original idea of the system as a combination of dual-comb spectroscopy and rotating compensator polarimetry to generate new comb lines with polarization information as the frequency sidebands of each comb tooth. We constructed the system and succeeded in determining the polarization information for each optical frequency component constituting the optical frequency comb light source. We also proposed a measurement method and an analysis method to reduce measurement uncertainty. Furthermore, we constructed the original system for future application of the proposed polarization-sensitive dual comb spectroscopy.

研究分野：光物性物理学

キーワード：光周波数コム デュアルコム分光法 ファイバーレーザー

### 1. 研究開始当初の背景

研究開始当初、光周波数コムを応用したデュアルコム分光法の開発が盛んにおこなわれるようになり、従来のフーリエ変換赤外分光法を圧倒的に凌ぐ速度と精度での赤外分光計測が可能になった。その結果、開発当時から現在に至るまで、分子振動スペクトル計測技術の飛躍的な進歩が期待されている。これまでに、デュアルコム分光法の応用として、原子・分子分光や測距など多岐にわたる事例が示されてきた。一方で、研究開始当初、生体分子の振動円偏光二色性計測など、偏光情報を積極的に活用したデュアルコム分光計測の応用事例はほとんど報告されていなかった。

### 2. 研究の目的

本研究では、デュアルコム分光計測に偏光計測のファンクションを加えた高速・高精度近赤外デュアルコム偏光分光計測の技術開発を行うことを目的とした。特に、「デュアルコム信号の間に偏光情報をのせた新しいコムラインを作る」という、研究代表者オリジナルのアイデアを提案し、その装置開発を進め、さらに応用事例を示すことを目的とした。

### 3. 研究の方法

本研究課題では、以下の戦略で開発を進めた。

- (1) 連携研究者の保有する既存のデュアルコム分光装置を用いて、研究代表者のアイデアである「偏光デュアルコム分光法」のデモンストレーションと性能評価を行うこと。
- (2) 応用展開を図るために独自のデュアルコム分光装置を開発すること。
- (3) 開発した装置を用いて、応用計測展開を図ること。

二年間の開発期間で、項目(1)(2)をほぼ達成し、項目(3)への足掛かりを築くことができた。以下、項目(1)、(2)それぞれについて、その研究方法を記述する。

#### (1)「偏光デュアルコム分光法」のデモンストレーションと性能評価

図1に、実験セットアップを示す。同装置は繰り返し周波数( $f_r$ ,  $f_r - \Delta f_r$ )が約48 MHzである二台の周波数コム光源で構成されている。二台の周波数コム光源の繰り返し周波数の差は、 $\Delta f_r = 69$  Hzである。二つの周波数コム光源をビームスプリッター(図中“BS”)で重ね合わせ、計測対象の試料(図中“Sample”)を透過した後、検出器へと導く。本研究開発のポイントは、光が試料を透過し

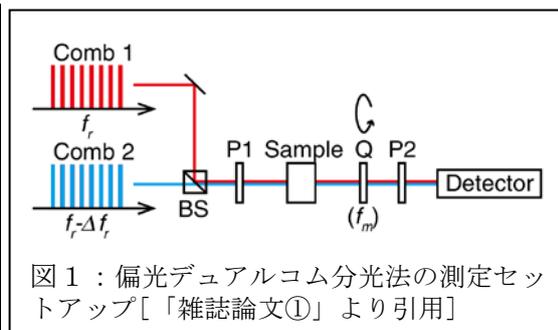


図1：偏光デュアルコム分光法の測定セットアップ[「雑誌論文①」より引用]

た後に、回転周波数 $f_m$ が正確に $f_m = (6/5)\Delta f_r = 83$  Hzである波長板(図中“Q”)を透過することによって、検出信号に変調を加えることである。変調を加えた光信号を解析することで、光周波数コムを構成する各周波数成分の光の偏光状態を精度よく計測することが可能になる。

実際の計測事例については、4. 研究成果の項目で述べる。

### (2) デュアルコム分光装置の開発

偏光デュアルコム分光法の応用計測を行うために、実験場所の関係で新たな計測系を立ち上げる必要性が生じた。そのために、開発期間の後半は、独自のデュアルコム分光装置の設計および作製を行った。

### 4. 研究成果

#### (1)「偏光デュアルコム分光法」のデモンストレーションと性能評価

##### ① 計測事例

本項では、実際の計測事例を示しながら、偏光デュアルコム分光法の内容を説明する。図2は、図1のSampleの位置に、半波長板を置いた時の、光検出信号の様子を示している。図2(a)は、実際の計測データである。14.5 ミリ秒の間隔で鋭いピークが現れている。図2(b)は、この鋭いピークについて、時間幅を拡大して表示したものである。これは、二台の周波数コム光源から出射されたパルス光の干渉波形を表している。また、鋭いピーク間の時間間隔は $1/\Delta f_r$ である。この間隔で、二台の周波数コム光源から出射されたパルス光の到達時間が一致する。ここで、図2の5つの鋭いピークの大きさが異なることに注目する。これは、波長板Qを回転した効果によるものである。また、波長板Qを正確に $(6/5)\Delta f_r$ の周波数で回転しているため、5回に一回、同じ強度のピークが現れる。このピークの高さの現れ方に、試料透過後の光周波数コム光源の偏光情報が反映される。

光周波数コム光源の一つ一つの周波数成分の偏光情報は、図2(a)をフーリエ変換した周

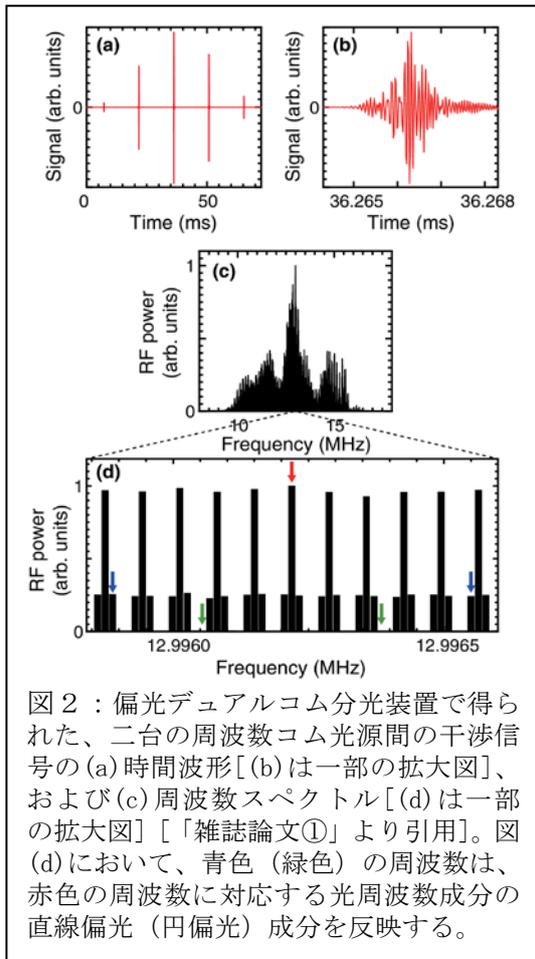


図2：偏光デュアルコム分光装置で得られた、二台の周波数コム光源間の干渉信号の(a)時間波形[(b)は一部の拡大図]、および(c)周波数スペクトル[(d)は一部の拡大図] [「雑誌論文①」より引用]。図(d)において、青色(緑色)の周波数は、赤色の周波数に対応する光周波数成分の直線偏光(円偏光)成分を反映する。

波数スペクトルに特徴が反映される[図2(c)(d)]。例えば、モード番号  $n$  で指標付けされた、以下の周波数成分を考える。

$$n \times f_r + f_{1,CEO}$$

ただし、 $f_{1,CEO}$ は一つ目の周波数コム光源のキャリアエンベロープオフセット周波数である。偏光デュアルコム分光法では、上記の周波数成分の直線偏光成分、円偏光成分の情報は、それぞれ

$$n \times \Delta f_r + f_{1,CEO} - f_{2,CEO} \pm 4f_m \quad (\text{直線偏光})$$

$$n \times \Delta f_r + f_{1,CEO} - f_{2,CEO} \pm 2f_m \quad (\text{円偏光})$$

の電気信号成分に現れる ( $f_{2,CEO}$ は二つ目の周波数コム光源のキャリアエンベロープオフセット周波数である)。ここで、 $f_m = (6/5)\Delta f_r$ と設定したため、すべての電気信号は周波数軸上で分離して計測される。

図2(d)の事例では、半波長板透過後の直線偏光の光を計測しているため、円偏光成分の情報を反映する  $n \times \Delta f_r + f_{1,CEO} - f_{2,CEO} \pm 2f_m$  の電気信号成分(緑色の矢印)は現れない。一方で、直線偏光成分の情報を反映する  $n \times \Delta f_r + f_{1,CEO} - f_{2,CEO} \pm 4f_m$  の電気信号成分(青色の矢印)には信号強度がある。以上のように我々は、波長板 Q を一定速度で回転させる

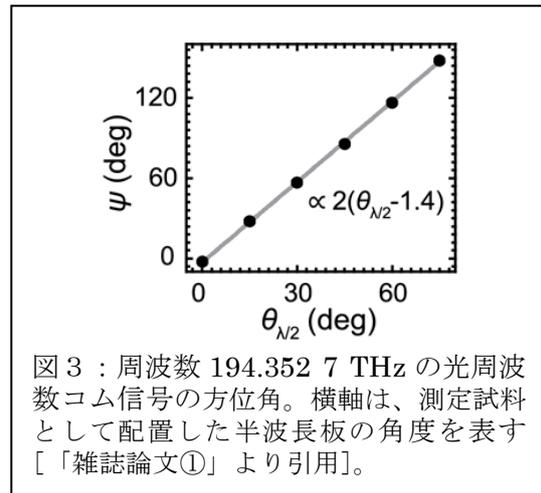


図3：周波数 194.352 7 THz の光周波数コム信号の方位角。横軸は、測定試料として配置した半波長板の角度を表す [「雑誌論文①」より引用]。

によって、光コムの成分 1 本 1 本に対してその偏光状態を表す新しい光コム成分が出現することを見いだした。

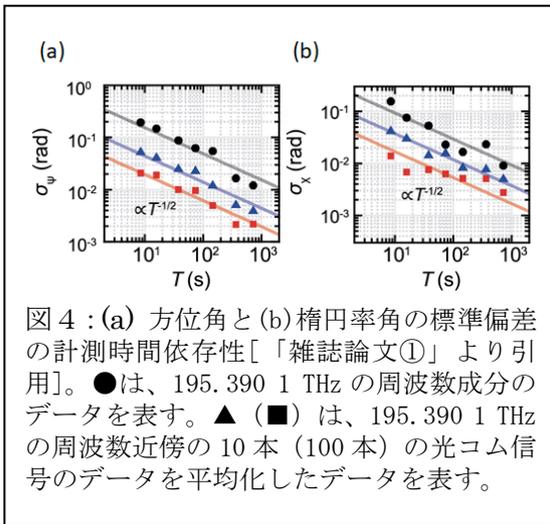
### ② 直線偏光成分の偏光方向解析

図2(d)の直線偏光の成分を表す  $n \times \Delta f_r + f_{1,CEO} - f_{2,CEO} \pm 4f_m$  の電気信号成分(青色の矢印)の位相を解析すれば、直線偏光の偏光方向を解析することができる。このことを証明するために、図1の試料の位置に置かれた半波長板を回転させて周波数コム光源の偏波面を回転させながら、 $n \times \Delta f_r + f_{1,CEO} - f_{2,CEO} \pm 4f_m$  の電気信号成分の位相解析を行った。

図3は、横軸に半波長板の角度をとり、縦軸に位相解析の結果得られた周波数コムの一つの周波数成分についての方位角を表示したものである。方位角が半波長板の角度の二倍で変化しており、確かに半波長板を透過した直線偏光の光の偏波面を再現できている。このように、図2(d)の周波数スペクトルを解析することで、光周波数コム光源の偏光情報が正しく解析できることが示された。

### ③ 計測信号の不確かさの解析

次に、計測信号の不確かさを調べるために、試料位置に何も置かずに(すなわち直線偏光の光源に対して)複数回計測を行い、計測された信号の方位角と楕円率角の標準偏差を解析した。図5は、横軸に計測時間を取り、縦軸に特定の周波数コム信号についての方位角と楕円率角の標準偏差を示したものである。積算時間  $T$  を増加させることで、その平方根に反比例して測定データの標準偏差は小さくなる結果が得られた。また、特定の周波数のデータ近傍の光コム信号を平均化して解析することで、さらに標準偏差が小さくなることを示した。このように、測定時間を長くするか、あるいは、周波数分解能を犠牲にしていくつかの光コム信号のデータを平均することで、不確かさの小さい計測が実現することを示し



た。

## (2) デュアルコム分光装置の開発

項目(1)で開発した偏光デュアルコム分光装置の応用展開を図るため、新しいデュアルコム分光装置の開発を行った。デュアルコム分光装置を実現するためには、キャリアエンベロープオフセット周波数  $f_{\text{CEO}}$ 、および安定な連続波光源との間のビート周波数  $f_{\text{Beat}}$  を一定の周波数に固定する(周波数ロック)ことが必要である。

$f_{\text{CEO}}$ の周波数ロックについては、連携研究者の技術を用いて以下の内容で行った。リング共振器で構成されたフェムト秒ファイバレーザを、ファイバ増幅器で強度を増幅し、増幅した光を高非線形性光ファイバに通すことで、波長が1000 nmから2000 nm以上まで、1オクターブ以上に広がった帯域を持つ白色光を生成した。生成した白色光を分極反転ニオブ酸リチウム結晶に集光することで、自己参照法によって  $f_{\text{CEO}}$  を検出した。検出した  $f_{\text{CEO}}$  信号をフィードバック制御によって一定の周波数にロックした。

$f_{\text{Beat}}$ の周波数ロックについては、限られた予算で開発を行うために、「ポケットクランプ型ピエゾ変調素子」の開発を進めた。これは、ファイバレーザを構成する光ファイバの一部を、共振周波数の高いピエゾ素子に貼り、さらに機械共振を押さえるために光ファイバをゴム板で押さえた構造である[参考文献:L. C. Sinclair *et al.*, Rev. Sci. Instr. **86**, 081301 (2015).]. 同素子を導入することで、周波数コム光源と連続波光源との間のビート周波数を一定の周波数に固定(ロック)することに成功した。このように、ポケットクランプ型ピエゾ変調素子の導入によって、安価で光周波数コム光源を実現することに成功した。

## (3) 今後の応用研究に向けて

本課題では、光源開発に時間を要したため、応用計測事例を示すところまでには至らなかった。一方で、「デュアルコム分光を用いた新しい偏光分光分析技術の確立」としては十分な成果が得られた。今後は、本課題で開発した装置を用いた応用分光計測を積極的に推進する。

## 5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計1件)

- ① K. A. Sumihara, S. Okubo, M. Okano, H. Inaba, and S. Watanabe, "Polarization-sensitive dual-comb spectroscopy," J. Opt. Soc. Am. B **34**, 154-159 (2017), 査読有, <https://doi.org/10.1364/JOSAB.34.000154>

[学会発表] (計2件)

- ① K. Sumihara, S. Okubo, M. Okano, H. Inaba, and S. Watanabe, "Development of Precise Polarization Measurement System Using Dual-comb Spectroscopy," 2016 Light, Energy and the Environment Congress, Fourier Transform Spectroscopy (FTS), Leipzig, Germany, (Nov. 14-17, 2016).
- ② 住原 花奈, 大久保 章, 岡野 真人, 稲場 肇, 渡邊 紳一, 「デュアルコム分光法を用いた高精度偏光計測装置の開発」 第77回応用物理学会秋季学術講演会(朱鷺メッセ) 15p-C32-3(2016年9月14日).

[図書] (計0件)

[産業財産権]

○出願状況 (計0件)

○取得状況 (計0件)

[その他]

ホームページ等

## 6. 研究組織

(1) 研究代表者

渡邊 紳一 (WATANABE, Shinichi)  
慶應義塾大学・理工学部・准教授  
研究者番号: 10376535

(2) 研究分担者

なし

(3)連携研究者

稲場 肇 (INABA, Hajime)  
国立研究開発法人産業技術総合研究所・研究  
グループ長  
研究者番号：70356492

大久保 章 (OKUBO, Sho)  
国立研究開発法人産業技術総合研究所・研究  
員  
研究者番号：30635800

(4)研究協力者

なし