

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 16 日現在

機関番号：12605

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26286057

研究課題名(和文) 周波数可変な広帯域マルチギガヘルツコムによる分光計測法の研究

研究課題名(英文) Spectrograph based on frequency-variable multi-GHz-comb

## 研究代表者

黒川 隆志 (Kurokawa, Takashi)

東京農工大学・工学(系)研究科(研究院)・名誉教授

研究者番号：40302913

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 12,400,000円

研究成果の概要(和文)：本研究の目的は、広モード間隔の広帯域コム全てのモードを一括して周波数シフトできる周波数可変なコム光源を開発することにある。この周波数可変コム光源を用いて、広帯域性と高分解能を併せ持つ分光技術を開拓する。パルス整形で生成した4 psの短光パルス(繰り返し12.5GHz)を単側波帯変調器によりMHz精度で周波数シフトできることを確認した。このパルスを圧縮・増幅したのち高非線形ファイバに入射して、1100-1700 nmに及ぶ広帯域かつ周波数可変なコムを生成することに成功した。このコム光を回折格子分光器に入射し、低圧ガスやファブリペローフィルタのスペクトルを1 MHzの分解能で得ることに成功した。

研究成果の概要(英文)：The purpose of this study is to develop a frequency-variable comb generation technology, which enables frequency shift of all modes of broadband comb with wide mode interval at once. In addition, we explore a novel spectroscopy with broad bandwidth and high resolution introducing the frequency-variable laser comb to a spectrograph. We confirmed that optical short pulse with 4-ps pulse width and 12.5-GHz repetition rate generated by pulse shaping was frequency-shifted with MHz precision by using a single sideband modulator. After the compression and amplification of the pulse, it was incident on a highly-nonlinear fiber, and we successfully generated a broadband and frequency-variable laser comb ranging from 1100 to 1700 nm. The frequency-variable laser comb was input into the diffraction grating spectrometer and the spectra of low pressure gas and Fabry-Perot filter were obtained with a resolution of 1 MHz.

研究分野：フォトンクス

キーワード：光周波数コム 分光

### 1. 研究開始当初の背景

研究開始当初の状況として、レーザー分光や周波数コム光源の発展が著しく、広帯域かつ高分解能を併せ持つ汎用的なコム分光技術への期待が高まっていた。しかしながら、光周波数コムの研究は盛んであったにもかかわらず、分光応用を考えた場合2つの問題があった。

一つは10 GHz オーダーの広いモード間隔をもつ広帯域なコムが得られていないことであった。一般に100 MHz 間隔以下の広帯域なコムを発生することは容易だが、10 GHz オーダーになるとポンプパルスのピークパワーが低くなるため広帯域化が難しい。分光器やフィルタの分解能は数 GHz なので、一つのモードを抽出するためには、10 GHz オーダーの広モード間隔のコムが重要である。

二つめは、広帯域かつ周波数可変なコムがないことであった。モード一つ一つはレーザー光と同じと考えることができ、周波数可変なコム光源ができれば極めて広帯域の波長可変レーザーを手にしたことになる。

以上の2点の課題がクリアされれば、広帯域かつ周波数可変な広モード間隔のコム光を分光系の光源とすることによって、広帯域かつ高分解能のレーザー分光を開発できる。すなわちこのようなコム分光系では、一本一本のモードを取り出して利用できること、かつそのモードが周波数可変であることが重要である。

### 2. 研究の目的

本研究の第1の目的は、広モード間隔(12.5 GHz)で広帯域、かつ周波数可変なコム光源の開拓である。我々は、すでにパルス整形で合成した高繰り返しパルスから、広モード間隔で広帯域なコムの発生に成功している。本研究では、このコムの全てのモードを一括して MHz 精度で周波数シフトする技術に挑戦する。

本研究の第2の目的は、周波数可変な広帯域コム光源を回折格子分光系と組み合わせ、500nmの広帯域性と MHz の高分解能を併せ持つ近赤外域分光技術を新たに開拓することである。基礎科学から産業応用まで、汎用性に優れた広帯域・高分解能分光技術を実現する。

### 3. 研究の方法

本研究の主な課題は、

(1) コムの全てのモードを MHz 精度で周波数シフト(掃引)する技術、

(2) 上記コム光源と回折格子分光系を組み合わせた広帯域・高分解能な分光技術、の開拓である。

次のような計画と方法で進めた。

[初年度]我々はパルス整形で合成した高繰り返しパルスから、広モード間隔で広帯域なコムの発生に成功している。本研究では、このコム生成法に対して、全てのモードを一括

して周波数可変にできる方法を検討した。全てのモードを一括して MHz 精度で周波数シフト(掃引)する条件を検討した。目標として、モード間隔 12.5 GHz、帯域 50 nm 以上のコムに対して、MHz で高速掃引可能な周波数可変技術を確立した。

[2年目]周波数可変なコム光源と回折格子分光系を組み合わせ、スペクトルを MHz 精度で分光するための基本構成を検討した。[最終年度]周波数可変なコムの広帯域化(500 nm 以上)およびこれを用いた広帯域かつ高分解能(MHz)分光技術を開発した。

### 4. 研究成果

初年度(H26年度)は、パルス整形に基づく独自のマルチ GHz コムの発生技術により、コムの一括周波数シフトを実現するための技術の確立など、要素技術の性能向上を進めた。さらに高非線形ファイバについても検討を進め、周波数帯域が約 60 nm、コム周波数間隔 12.5 GHz のコム光を発生し、このコムの周波数掃引に成功した。

2年目(H27年度)は、分光系と組み合わせるコム分光への応用検討をおこなった。可変な周波数コム光を光スペクトラムアナライザに入射し、分光応用の原理確認をおこなった。周波数掃引したコムを HCN ガス(10 Torr)に透過して分光をおこなった。その結果、1525~1565 nm に涉って、約 50 本の吸収線を分解能 90 MHz で測定することができた。

最終年度(H28年度)は、高非線形ファイバを改良して、モード間隔 12.5 GHz の 1100-1700 nm に及ぶコムを生成することに成功した。また全域で 3.5-16.5 GHz の周波数シフトを確認でき、モード間隔以上の波長掃引に成功した。

この周波数可変なコム光を回折格子分光系に入射して分光実験をおこなった。測定用試料としてファブリペローフィルタ(FPF:FSR:12.5 GHz、フィネス:約 200)を用いた。その結果、FPFの透過スペクトルの測定に成功し、半値幅が約 60 MHz、FSRの変動は 1 MHz 以下であることを確認することができた。

### 5. 主な発表論文等

[雑誌論文](計 6件)

Ken Kashiwagi, Satoshi Seki, Hiroyuki Tsuda, Hirokazu Takenouchi, Takashi Kurokawa, "Differential processing for frequency chirp measurement using optical pulse synthesizer", *Optics Communications*, **387**, 135-140, 2017. DOI:10.1016/j.optcom.2016.11.054 査読あり

黒川隆志「系外惑星探査のためのレーザー周波数コム光源の開発」*応用物理*, **85** (12), 1032-1036, 2016. 査読あり

T. Kokubo, T. Mori, T. Kurokawa, K. Kashiwagi, Y. Tanaka, T. Kotani, J. Nishikawa, and M. Tamura, "12.5-GHz-spaced laser frequency comb covering Y, J, and H bands for

Infrared Doppler instrument,” Proc. SPIE **9912**, 99121R (2016). doi:10.1117/12.2232221 査読あり

Ken Kashiwagi, Takashi Kurokawa, Yasushi Okuyama, Takahiro Mori, Yosuke Tanaka, Yoshinori Yamamoto, and Masaaki Hirano, “Direct generation of 12.5-GHz-spaced optical frequency comb with ultrabroad coverage in near-infrared region by cascaded fiber configuration”, Optics Express, **24**, (8), 8120-8131, 2016. DOI:10.1364/OE.24.008120 査読あり

黒川隆志, 柏木謙, 小谷隆行, 西川淳, 田村元秀「パルス整形による広帯域マルチギガヘルツコム発生と天文分光への応用」光技術コンタクト, 53 巻 10 号, 32-41, 2015 年 10 月 査読なし

Azusa Hasegawa, Ken Kashiwagi, Yosuke Tanaka, Takashi Kurokawa, “Temporal imaging of optical asymmetric waveform pulses with a time lens”, IEEE Photonics Journal, **7** (4), (Article#: 6802711) pp.1-11- August 2015, DOI: 10.1109/JPHOT.2015.2464078, 査読あり

〔学会発表〕(計 16 件)

今村 翔悟, 黒川隆志, 田中洋介「変調器を用いた光周波数コム生成とファイバセンシングへの応用」2017 年 電子情報通信学会総合大会, C-3-28, 名城大学 (愛知県名古屋), 2017 年 3 月 25 日.

郡場 元太, 小久保宰, 森貴宏, 田中洋介, 黒川隆志, 塩田達俊, 柏木謙「波長可変な広帯域コムの生成と精密分光への応用」第 64 回応用物理学会春季学術講演会 講演予稿集 17p-418-6, パシフィコ横浜(神奈川県横浜市), 2017 年 3 月 17 日.

小久保, 森, 黒川, 田中, 小谷, 西川, 田村「近赤外ドップラー装置の偏光特性と偏波解消器の開発」日本天文学会 2017 年春季年会, V233a, 九州大学(福岡県福岡市), 2017 年 3 月 17 日.

菅野 光成, 黒川隆志, 塩田 達俊, 田中洋介「変調器を用いた光パルスと周波数コムの生成」平成 28 年度電子情報通信学会東京支部学生会研究発表会, 99, 東海大学高輪キャンパス(東京都品川区), 2017 年 3 月 9 日.

Takahiro Mori, Tsukasa Kokubo, Takashi Kurokawa, Yosuke Tanaka, Ken Kashiwagi, Takayuki Kotani, Jun Nishikawa, Motohide Tamura, “12.5-GHz-spaced laser frequency comb covering over 100 THz and frequency shift of all individual lines for calibration of infrared Doppler instrument”, MF1.4, 2016 IEEE Photonics Conference, Waikoloa, Hawaii, Oct. 3, 2016.

Hiroaki Sugimoto, Mitsutaka Ito, Motohiro Koriba, Satoshi Seki, Tatsutoshi Shioda, Yosuke Tanaka, Ken Kashiwagi, Takashi Kurokawa, “High-resolution spectroscopy using a frequency-variable comb light source”, MF1.1,

2016 IEEE Photonics Conference, Waikoloa, Hawaii, Oct. 3, 2016.

森貴宏, 小久保宰, 奥山康志, 柏木謙, 田中洋介, 黒川隆志, 小谷隆行, 西川 淳, 田村元秀, 「IR ドップラー観測用光周波数コムの特性評価」, 日本天文学会 2016 年春季年会, V217a, 首都大学東京 南大沢キャンパス(東京都八王子市), 2016 年 3 月 14 日.

(招待講演)黒川隆志, 柏木謙, 小谷隆行, 西川淳, 田村元秀「系外惑星探査に向けた IR ドップラー観測装置の開発～光コムによる超高精度光周波数計測で宇宙の神秘に迫る～」(招待講演) 日本学術振興会光エレクトロニクス第 130 委員会「光の日」公開シンポジウム, 東京理科大学 森戸記念館(東京都新宿区), 2016 年 3 月 8 日

森貴宏, 奥山康志, 柏木謙, 田中洋介, 黒川隆志, 小谷隆行, 西川淳, 田村元秀, 「IR ドップラー観測用光周波数コムの特性評価」日本天文学会 2015 年秋季年会, V237a, 甲南大学(兵庫県神戸市), 2015 年 9 月 11 日.

(Invited) Ken Kashiwagi and Takashi Kurokawa, "Photonic Arbitrary Waveform Generation Using Optical Pulse Synthesizer and Its Applications," Progress In Electromagnetics Research Symposium (PIERS 2015), TOP HOTEL Prague, Prague, Czech Republic, Jul. 2015.

森貴宏, 奥山康志, 柏木謙, 田中洋介, 黒川隆志, 小谷隆行, 西川淳, 田村元秀, “IR ドップラー観測用光周波数コムの広帯域化,” 2015 年 第 62 回応用物理学会春季学術講演会, 12p-A15-8, 東海大学 湘南キャンパス(神奈川県平塚市), 2015 年 3 月 12 日.

(招待講演)黒川隆志, 柏木謙, 小谷隆行, 西川淳, 田村 元秀, “系外惑星探査のための近赤外ドップラー分光と光周波数コム,” 2015 年 第 62 回応用物理学会春季学術講演会, 12p-B3-2, 東海大学 湘南キャンパス(神奈川県平塚市), 2015 年 3 月 12 日.

奥山康志, 柏木謙, 黒川隆志, 小谷隆行, 西川淳, 田村元秀, “系外惑星探査のための広帯域マルチギガヘルツコムの発生,” 2014 年 第 75 回応用物理学会秋季学術講演会, 20a-C2-9, 北海道大学 札幌キャンパス (北海道札幌市), 2014 年 9 月 20 日.

関智史, 塩田達俊, 柏木謙, 田中洋介, 黒川隆志, “波長可変なコム光源を用いた広帯域精密分光法の提案,” 2014 年 第 75 回応用物理学会秋季学術講演会, 18a-S8-8, 北海道大学 札幌キャンパス(北海道札幌市), 2014 年 9 月 18 日.

(Invited) Tatsutoshi Shioda, Takashi Kurokawa, "High-resolution Spectroscopy with Single-sideband Optical Modulator and Optical Frequency Comb," Progress In Electromagnetics Research Symposium (PIERS2014), Guangzhou, China, August 25-28 (2014).

(招待講演)柏木謙, 崔森悦, 塩田達俊, 田中洋介, 黒川隆志, “合成パルスによるマル

チギガヘルツコムの計測応用,” 第 53 回光波センシング技術研究会, LST53-11, 東京理科大学 森戸記念館(東京都新宿区), 2014 年 6 月 18 日.

〔図書〕(計 1 件)

J. Nishikawa, M. Oya, N. Murakami, M. Tamura, T. Kurokawa, Y. Tanaka, T. Kotani, "Low-contrast pre-coronagraph for extra contrast of dark-hole," Astronomy in Focus, edited by Piero Benvenuti, Proceedings of the International Astronomical Union, Volume 11, Issue A29A, pp. 213-213 (Oct. 2016, Cambridge Univ. Press, London) DOI: 10.1017/S1743921316002854

## 6. 研究組織

### (1)研究代表者

黒川 隆志 (KUROKAWA, Takashi)

東京農工大学・大学院工学研究院・名誉教授

研究者番号：40302913

### (2)研究分担者

塩田 達俊 (SHIODA, Tatsutoshi)

埼玉大学・理工学研究科・准教授

研究者番号：10376858

### (3)研究分担者

田中 洋介 (TANAKA, Yosuke)

東京農工大学・大学院工学研究院・准教授

研究者番号：20283343