

令和 5 年 5 月 26 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2020～2022

課題番号：20K05357

研究課題名(和文)系外惑星探査のための長期安定Yバンド固体天文コムの開発

研究課題名(英文)Development of Y-band solid-state astro-comb with long-term stability for exoplanet search

研究代表者

吉岡 孝高 (Yoshioka, Kosuke)

東京大学・大学院工学系研究科(工学部)・准教授

研究者番号：70451804

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：超高繰り返しチタンサファイアフェムト秒光周波数コムを用いたフィルタ共振器の性能条件緩和機構により、コンパクトかつ安定な天文コムを実現した。岡山天体物理観測所188cm反射望遠鏡の高分散分光器HIDESを用いて可視光領域における天文コムの各光周波数の分離観測を実現し、我が国ではじめて天文台における高分散分光器の校正を行うことに成功した。また、フィルタ共振器の分散の最小化や真空容器の導入を通じた空気の分散の影響の除去により、近赤外領域のYバンドにおける広帯域かつ高い校正能力を有する、長時間観測に適用可能な天文コムを実現した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

地上の天文台における恒星の観測を超高精度化することで、地球に類似のハビタブル惑星の存在が可能となる。この高精度化を実現するのが、絶対周波数が定まった光周波数の校正器である光周波数コムを用いた高分散分光器の校正である。実観測に資する性能や長期安定性を天文台の環境で実現するのは困難な状況が続いていたが、本研究でこれを解決する方法を提示するとともに、実際に国内の天文台での実証実験を成功させた。また、軽い質量が想定されるハビタブル惑星の検出を実現しうる波長帯域の広いYバンドのコムを実現し、実際の惑星探査研究への利用の道筋をつけた。

研究成果の概要(英文)：By employing a mechanism for relaxing the performance requirements of a filter resonator using an ultra-high repetition rate titanium-sapphire femtosecond optical frequency comb, we have achieved a compact and stable astro-comb. Using the HIDES high-dispersion spectrograph of the Okayama Astrophysical Observatory's 188cm reflector telescope, we successfully conducted separated observations of each optical frequency of the astro-comb in the visible light range. This marked the first successful calibration of a high-dispersion spectrograph at an observatory in Japan. Furthermore, through minimizing the dispersion of the filter resonator and introducing a vacuum chamber, we realized an astronomical comb capable of wideband and highly calibrated measurements in the Y-band of the near-infrared region. This comb is suitable for long-duration observations.

研究分野：レーザー光学

キーワード：フェムト秒光周波数コム 天文コム 系外惑星探査 Yバンド

## 様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

近年、大型望遠鏡を用いた高分散分光( $R=\lambda/\Delta\lambda>50,000$ )によって恒星の大気吸収線の波長を精密に観測することで視線速度の時間変化を測定し、その周りをまわる惑星(系外惑星)を探索する観測が世界的に大規模に行われ、地球質量から木星質量におよぶ多様な系外惑星が発見されている。しかしながら、水が液体で存在できる、いわゆるハビタブルゾーンに存在する地球型系外惑星の検出では、非常に小さい視線速度の変化(0.5 m/s 以下)を統計的に決定する必要がある。特に、低質量星の探索を近赤外線、いわゆる Y バンド(980 nm-1080 nm)において高分散分光観測を行うことが重要と現在考えられている。重要な課題は、広い波長域に亘って、きわめて高い精度かつ長期的に運用可能な校正法を確立することである。従来の、輝線光源や光路中のヨード吸収セルによる校正法では決して到達できない精度の基準が必要となっていた。

これを実現しうる光源として最近注目されてきたのが、高分散分光器で縦モードを分解可能な超高繰り返し光周波数コム(いわゆる天文コム)である。フェムト秒光周波数コムは、数百万本の光周波数が厳密に等間隔に用意され、オフセット周波数  $f_0$ 、繰り返し周波数  $f_{rep}$  の 2 つの周波数を測定することで  $f_n=f_0+n\times f_{rep}$  ( $n$  は整数)と全縦モードの周波数が正確に定まるため、星の光と同時に分光器に導入すれば星大気にみられる多数の吸収線の波長のすべてを正確に校正することが出来る。分光器によってコムの縦モードを分離して観測するには、コム単体の繰り返し周波数より桁違いに高い 20 GHz 程度が最低限必要であるが、2008 年には光周波数コムの縦モードを小型の Fabry-Perot 共振器によって間引く方法が提案され近赤外域の天文コムが報告された[T. Steinmetz et al., Science 321, 1335 (2008), C.-H. Li et al., Nature 452, 610 (2008)]。しかし現在、天文観測に必要な年単位の長期的運転に耐える再現性を確保できていない現状であった。また、このような観測を行う最先端の望遠鏡の大部分は高い透過率や安定した大気環境を実現するため、標高数千メートル以上の高地に設置されている。このような環境で長期運転可能な光周波数コムは、気圧の低さや環境の大きな温度変化に対して堅牢であることが必要であった。

### 2. 研究の目的

恒星の視線速度の変化による極僅かな光のドップラーシフトを捉えハビタブルゾーンの地球型系外惑星を観測するための、Y バンド(980 nm-1080 nm)におけるコンパクトかつ長期安定な天文コムを実現する。超高繰り返しチタンサファイア光周波数コムに基づく繰り返し周波数 1.6 GHz の光周波数コムを、世界で初めて気圧・気温に関わらず長期的に再現性良く使用できる堅牢なシステムとして進化させる。その上で、当該波長域における超低分散な共振器ミラーによる広帯域なモードフィルタリングの実証を通じてモード間隔 40 GHz 以上の世界で最も小型かつ高性能な天文コムシステムを完成させる。国内の大型望遠鏡における高分散分光器にこれを搭載し、超高精度波長校正光源としての実地試験を行うことを第一の目的とした。

この上で、長期の安定制御が容易な、1 対のみの超低分散ミラーによるフィルタ共振器によって、縦モード間隔 40 GHz 以上で使用可能帯域 100 nm 以上の Y バンドでの広帯域な天文コムを完成させる。チリ・アタカマに建設中の 6.5 m 赤外線望遠鏡(標高 5,640 m)に搭載される高分散分光器の高精度校正光源として、ハビタブルゾーンを含む系外惑星探索に挑戦するためのシステムに仕上げることを第二の目的とした。

### 3. 研究の方法

超高繰り返し(1.6 GHz)モード同期チタンサファイアレーザーをベースにした光周波数コムを、低い気圧や気温の変化に対応するため温度管理した真空容器を本予算で導入して長期安定動作を実現する。なお、オフセット周波数はRb原子時計に同期した高周波発振器に位同期し、繰り返し周波数は、周波数コムの縦モードのうち1本を、87RbのD2線の飽和吸収を基準に安定化することで、光周波数領域において線幅10 kHz程度の光周波数コムを実現する。このようにして完成させた超高繰り返し光周波数コムの、長期安定性(特に平均パワー、スペクトル、ポインティング、ビーム形状)の調査を行う。

Yバンドに対応した2枚の超低分散ミラーを用いたFabry-Perot共振器をコムの整数倍の繰り返し周波数になるよう制御し、40 GHz以上の繰り返し周波数にする。実験室環境においては光スペクトラムアナライザを用いて、周波数通倍動作の広帯域性(100 nm以上)を確認する。また、光周波数の安定化すべての電氣的制御を遠隔操作可能とし、レーザーの専門家が現地に常駐せずとも安定に運用できるシステムを実現する。光学系は寸法600 mm×800 mmのブレッドボード上に構築し可搬型に仕上げる。また、可視光領域における天文コム構築における超高繰り返し光周波数コムの有用性を示すため、ミラーによる分散を小さくすることが難しい緑色領域においてもフィルター共振器を用意し40 GHz以上の繰り返し周波数となるように実装する。本研究で構築する天文コムの概要を図1に示す。

岡山天体物理観測所において、188cm望遠鏡に設置し高分散分光器HIDES(0.36-1.0  $\mu\text{m}$ )における天文コムの観測を行い、実稼働の状況から必要な改善を施しシステムとして完成させる。実験室環境外での安定動作の検証、波長分解能100,000での比較的近傍の明るい星の高分散観測を比較的短期的に行う。その上で、近赤外線に特化した分光器であるTARdYS(0.9-1.15  $\mu\text{m}$ )での観測に向けた最適か否かを検討していく計画とした。

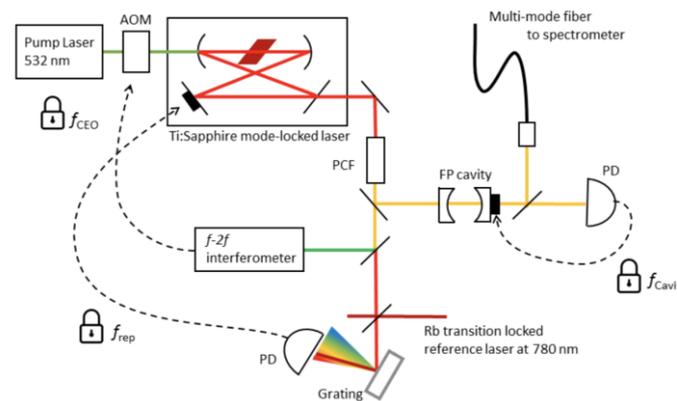


図1. 本研究で構築するYバンド用天文コム。フォトニック結晶ファイバー(PCF)で得られるスーパーコンティニューム光から、Yバンドの波長帯を取りだし、ただ1つの超低分散Fabry-Perot(FP)共振器によって縦モード間隔を40 GHz以上とする。

#### 4. 研究成果

自作の超高繰り返し(1.6 GHz)モード同期チタンサファイアレーザーをベースにした光周波数コムについて、高標高の天文台における低い気圧や気温の変化に対応し長期安定動作を実現するため、レーザー格納容器とレーザー結晶の温度制御機構を組み合わせたセットアップを構築した。その上で、本セットアップがフェムト秒光周波数コムとして正しく動作することを確認し、平均パワーやスペクトル等の性能に関する長期安定性の確認を行った。なお、オフセット周波数はルビジウム原子時計を基準として発生した高周波源に対して安定化した。繰り返し周波数については、コムの1本の光周波数と、ルビジウムの電子遷移に対して安定化した単一縦モード半導体レーザーの光周波数とを比較することによって安定化した。

繰り返し周波数約 1.6 GHz の光周波数コムのうち、535-550 nm のスペクトル成分に対して最適な分散設計となるようなファブリー・ペロー共振器によってモードフィルタリングを施し、繰り返し周波数が 27 倍となる 43.2 GHz の繰り返し周波数のコンパクトな可搬天文コムを実現した。これを岡山天体物理観測所 188cm 望遠鏡に搬送し、高分散分光器 (HIDES) を用いて観測して視線速度変化観測のための校正光源としての性能評価を実施した。この結果、現状の比較的狭帯域な天文コムとファイバー入射分光器の組み合わせの場合、視線速度の精度として 1.4 m/s を達成可能であることが分かった。これは従来の校正方法による視線速度の精度を桁違いに更新するものであり、利用可能帯域のさらなる広帯域化によって国内での高感度な系外惑星探査が可能であることを示している。この実験をもとに、より広帯域な天文コムとして動作させ視線速度の精度向上を実現するために必要な、チャープミラーの性能要求値や、天文台の分光器に光を導くマルチモードファイバーに起因する、モダルノイズの影響等について議論を行った。これらの結果についてまとめ、論文出版を行った。

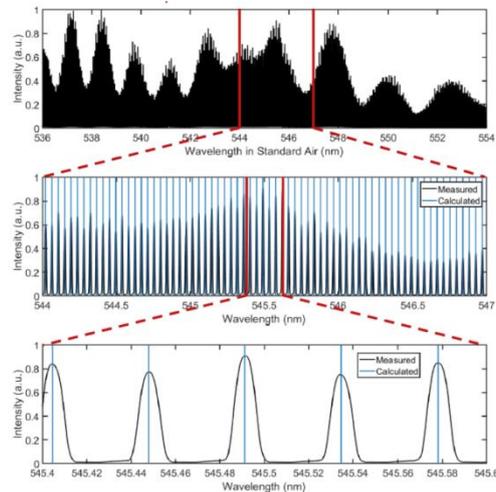


図 2. (左) 岡山天体物理観測所 188cm 望遠鏡に設置した緑色波長領域の天文コム。  
(右) 高分散分光器 HIDES において観測した天文コムの各縦モード。

続いて、Y バンドの広帯域・高精度な天文コムの構築を進めた。まず、入手が比較的容易であったいわゆるゼロ分散ミラーを製作し、上述の可視光領域の実験と同様繰り返し周波数が 27 倍となるようなフィルタ共振器を構築し能動制御を施したところ、図 3 のように、光スペクトラムアナライザを用いて Y バンド領域の天文コムの光周波数を分離観測することができることが分かった。この実験結果は Y バンドの帯域のおよそ半分程度の波長域が天文コムとしてフィルタ共振器を通過していることを示しているが、これがミラー製作上の残留分散と空気の分散

の影響を考慮した計算結果と合致することがわかり、必要な天文コムの性能を実現する分散設計が可能となった。そこで、Yバンドの大半を網羅し、サイドモード除去比が地球型系外惑星探査に必要とされる  $10^{-4}$  となるようミラーの分散設計と製作を行った。さらに、そのような超低分散ミラーによって構成したフィルタ共振器に対する空気の影響を除去するため、共振器長を能動制御したファブリー・ペロー共振器を真空容器内に設置することで、所望の特性を実現できることを確かめた。これによって、Yバンドにおける系外惑星探査に必要な波長帯域にわたってサイドモード除去比の要求性能を満たす、縦モード間隔 43.2 GHz の天文コムを安定的に発生させることが可能となった。また、天文コムの繰り返し周波数とオフセット周波数は、研究期間当初に想定していたの光周波数領域での安定化ではなく、GPS 参照可能なルビジウム原子時計を基準とする RF 周波数に対する安定化を施した。また、長期的安定動作の試験として、環境温度や、レーザー結晶の冷却温度の設定の関数として光周波数コムのスペクトルや繰り返し周波数、オフセット周波数の記録を行い、数ヶ月以上の安定動作を阻害する原因の特定を進めた。この比較的簡便かつ環境の擾乱に対して堅牢な構成によって、天文コムとして必要十分な光周波数の安定度を達成可能とした。

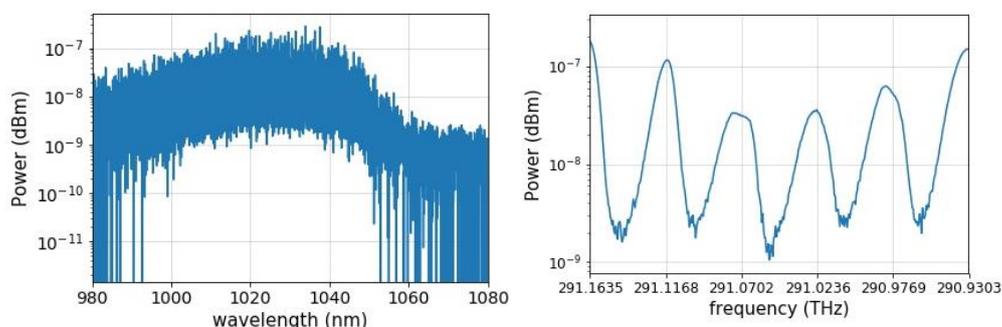


図 3. (左) 光スペクトラムアナライザを用いて観測した、ゼロ分散ミラーを用いた Y バンド天文コムの試作機の広域スペクトル。(右) スペクトルの一部を拡大し、横軸を周波数表示に変更したもの。フィルタ前と比較して 27 倍の繰り返し周波数が確認できる。

本研究によって、Y バンド波長帯における軽質量のハビタブル系外惑星探査を実現する精緻な校正光源が完成した。天文台における高分散分光器を用いた近赤外波長域での試験運転は研究期間内に実施できなかったものの、可視光領域における試験運転の結果を鑑みて、校正光源としての使用に問題がないものと判断できる。この結果、実際の系外惑星探査での誤差要因は、恒星の光をガイドする光ファイバーでのモードノイズや、分光器における補正関数の最適化で支配される状況であり、天文コムの光周波数の精度や安定度の影響は、これらと比して何桁も小さなものとなっている。十分な実際の観測実験では、高標高環境下で年単位の日数をかけた使用となるため、日々の運転において想定外の問題が発生するか否かは実運転を通じた評価が必要である。また、本研究で構築した近赤外波長域から可視波長域までを網羅できるコンパクトかつ光学実験環境外でも安定動作する可搬光周波数コムは、加速器施設等における精密遷移周波数測定等に容易に展開可能である。今後、天文学のみならず高エネルギー物理学等多彩な分野との精密レーザー分光学との融合型研究を可能とする技術であり、今後の積極的な活用を考えている。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 4件/うち国際共著 3件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Takashi Sakamoto, Kosuke Yoshioka	4. 巻 46
2. 論文標題 Chirped pulse amplification of an ultrahigh-repetition-rate Ti:sapphire frequency comb using a tapered semiconductor amplifier	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Optics Letters	6. 最初と最後の頁 4642 ~ 4645
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1364/OL.428466	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Eunmi Chae, Eiji Kambe, Kentaro Motohara, Hideyuki Izumiura, Mamoru Doi, and Kosuke Yoshioka	4. 巻 38
2. 論文標題 Compact green Ti:sapphire astro-comb with a 43 GHz repetition frequency	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of the Optical Society of America B	6. 最初と最後の頁 A1 ~ A6
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1364/JOSAB.419078	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 K. Yamada, Y. Yamada, T. Murayoshi, X. Fan, A. Ishida, T. Namba, S. Asai, M. Kuwata-Gonokami, E. Chae, K. Shu, K. Yoshioka	4. 巻 16
2. 論文標題 Theoretical Analysis and Experimental Demonstration of a Chirped Pulse-Train Generator and its Potential for Efficient Cooling of Positronium	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physical Review Applied	6. 最初と最後の頁 014009-1 ~ 14
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevApplied.16.014009	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Eunmi Chae, Kota Nakashima, Kosuke Yoshioka	4. 巻 30
2. 論文標題 Dual optical frequency combs with ultra-low relative phase jitters from 550 nm to 1020 nm for precision spectroscopy	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Optics Express	6. 最初と最後の頁 18703 ~ 18712
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1364/OE.458735	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 該当する

〔学会発表〕 計3件（うち招待講演 2件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 Takashi Sakamoto, Kosuke Yoshioka
2. 発表標題 Chirped Pulse Amplification of 1.6 GHz Ti:Sapphire Frequency Comb Using a Tapered Semiconductor Amplifier
3. 学会等名 2021 Conference on Lasers and Electro-Optics/Europe - European Quantum Electronics Virtual Conferences (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 吉岡 孝高
2. 発表標題 超高繰り返し光周波数コムの現状
3. 学会等名 可視赤外線観測装置技術ワークショップ2021 (招待講演)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 吉岡 孝高
2. 発表標題 超高繰り返しモード同期固体レーザーによる可視・近赤外天文コムの構築
3. 学会等名 超高速光エレクトロニクス研究会 (招待講演)
4. 発表年 2022年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

東京大学吉岡研究室 <a href="http://www.fs.t.u-tokyo.ac.jp/">http://www.fs.t.u-tokyo.ac.jp/</a>
--

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
--	---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関			
韓国	Korea University			