

光周波数コムと系外惑星探査への応用について

稲場 肇・中嶋 善晶・大苗 敦・美濃島 薫・洪 鋒雷

産業技術総合研究所

Optical frequency combs and its application for astronomical observations

Hajime INABA, Yoshiaki NAKAJIMA, Atsushi ONAE, Kaoru MINOSHIMA, and Feng-Lei HONG

Abstract

Optical frequency combs provide an absolute, repeatable wavelength scale defined by a series of laser modes equally spaced across the spectrum, which is suitable for astronomical observations. The train of femtosecond pulses from a mode-locked laser generates a frequency comb equally spaced by the pulse repetition rate, f_{rep} . Therefore, in the frequency domain, the frequency of the pulses can be written as a simple equation. The precision in each mode's absolute frequency is basically dominated by the reference clock.

We have developed mode-locked, erbium-doped fiber-laser-based frequency combs (fiber combs) because of their robustness, compactness, and cost effectiveness in recent years. In this presentation, basics and a proposal of the comb used for the astronomical observations are described.

Key Words: Optical frequency comb, Mode-locked laser,

1 背景

光の速さは、その周波数と波長の積である。光を正弦波として考えることのできるレーザー、特に波長(周波数)安定化レーザーの発明以降、マイクロ波帯の周波数標準を基準として光周波数を計測することは、古くは光の速さの測定のために必要なテーマであり、光の速さが定義となった現在では、波長(長さ:メートル)の定義の実現のために必要な技術である。しかしながら、可視～近赤外光の周波数は、数百THzと極めて高いため、直接電気信号に変換する受光器はなく、信号を処理する電気的素子もない。光の周波数を計るためにには、電気的に扱える周波数まで分解する必要がある。周波数を分解する方法として、近い周波数を混ぜると発生するうなりを利用して差周波数を検出する「ビート」、周波数を整数倍にする「倍増」と、整数分の一に割る「分周」などがあり、基本的に周波数計測とは、周波数の加減乗除によって基準周波数と比較することである。1999年頃までは、レーザーの周波数を測定する装置として、「周波数チェイン」[1, 2, 3]が用いられていた。これはセシウム周波数(約9.2 GHz)を基点として、倍増を基本に何段もの局部発振器を仲介させて光周波数を合成するものであった。その技術的難易度とコストの高さから、動作状態の周波数チェインを維持できていた機関はなく、断続的に測定を行っていたのもわずか数カ国のみであった。

1990年代末にフェムト秒モード同期レーザーの性能向上とともに、フォトニック結晶ファイバー(以下PCF)という特殊な非線形ファイバーが開発され、ドイツと米国のグループにより「光コム」を用いた光周波数絶対計測の提案がなされた[4, 5]。これは標準をはじめとする多くの分野において極めて大きな技術革新であり、この成果により2005年のノーベル物理学賞が米Hall博士と独Hänsch博士に贈られた。光周波数計測は1台のレーザーと1人の研究者で扱える技術となり、世界の各研究機関が独自に光周波数計測を行うことが可能になった。光コムの登場により、光周波数領域で周波数標準を実現しようという、それまで絵に描いた餅だった「光時計」が現実味を帯び、現在世界中で熾烈な競争が繰り広げられている。既にその周波数標準としての能力はセシウムによるマイクロ波周波数標準を超えており、2019年に開催予定の国際度量衡総会において、秒の定義がマイクロ波周波数から光周波数に変わる可能性が高い。

本稿では、光コムを用いた光周波数計測の原理、光コムの主流になりつつある「ファイバーコム」、そして光コムの系外惑星探査への応用について述べる。

2 光周波数コムを用いた絶対光周波数計測

フェムト秒モード同期レーザーが発生する光は、時間軸上で観察すると光パルスが規則正しく並んだものであり、パルス列として観察できる領域で見るとほぼ

光周波数コムと系外惑星探査への応用について

δ 関数列に近いものである。パルスが単独で存在する場合、そのスペクトルは連続的になるが、モード同期レーザーのようにパルス列で存在すると、図1に示すように、繰り返し周波数 (f_{rep}) で決まる間隔を持った細いスペクトル成分の列となる。このスペクトル列は、形状が櫛に似ていることから、「光コム(Comb)」と呼ばれる。

光コムは光周波数領域のみに存在し、その間隔は分散の影響を受けず、どの波長においても一定である[6]。その光コムを、周波数軸上で現実には存在しない低周波数方向に向かって仮想的に拡張させていくと、ちょうどゼロ周波数にはならず（図1）、キャリアエンベロープオフセット周波数(以下 f_{ceo})と呼ばれるオフセット周波数が存在する。仮想的なコムも含めて周波数の低い方から数えてN番目のコムの周波数 $f(N)$ は次式で与えられる。

$$f(N) = f_{ceo} + N \cdot f_{rep} \quad (1)$$

ここで、 N は整数であり、モードロックレーザの繰り返し周波数や波長帯により N の値は異なるが通常20万～1000万といった大きな整数となる。光コムをマイクロ波領域の周波数と光領域の周波数を式(1)で結びつける周波数リンク装置を考えることができる。繰り返し周波数 f_{rep} がマイクロ波側の入出力ポートであり、光コムの光周波数 $f(N)$ が光周波数側の入出力ポートである。このリンク装置を光周波数計測装置として使う場合、装置を特徴づける2つのパラメータ f_{rep} と f_{ceo} はマイクロ波領域の周波数であり、 f_{rep} と f_{ceo} を観測し制御す

ることができれば、光コムの光領域での周波数は一意に決まることがわかる。

オフセット周波数の f_{ceo} がなぜ存在するかについて説明する。時間軸上に並ぶ各パルスを拡大してみると、パルスのパワーを決めている包絡線(Envelope)の内部に、光の搬送波(Carrier)が存在している。もし、搬送波の位相が包絡線内で常に同じであれば、搬送波の周波数は光パルスの繰り返し周波数 f_{rep} の整数倍となる。しかし、実際には図2に示すように、パルス一つごとに、Carrier envelop offset phaseと呼ばれる位相量 ϕ_{ceo} だけずれていく。これを周波数に換算すると、時間 $1/f_{rep}$ に位相 ϕ_{ceo} 進むので、

$$f_{ceo} = \left(\frac{\phi_{ceo}}{2\pi} \right) f_{rep} \quad (2)$$

となる。このような理由から、光コムは繰り返し周波数の整数倍から、 f_{ceo} だけずれて存在している[5]。

3 モード同期ファイバーレーザを用いた光周波数コム

広帯域光コムの光源はモード同期レーザーであり、当初はほとんど固体レーザーであるTi:sapphireレーザーが用いられていた。Ti:sapphireレーザーは高出力、広帯域かつ低雜音という優れた特性を持ち、その発振波長(800 nm)がPCFのコア径を小さくしたときのゼロ分散波長と近いという幸運もあり、光コムの広帯域化とそれを用いた絶対光周波数計測が早い時期に行われた。しかしながら、Ti:sapphireレーザーは定期的な調整や清掃といったメインテナンスを要し、24時間を超

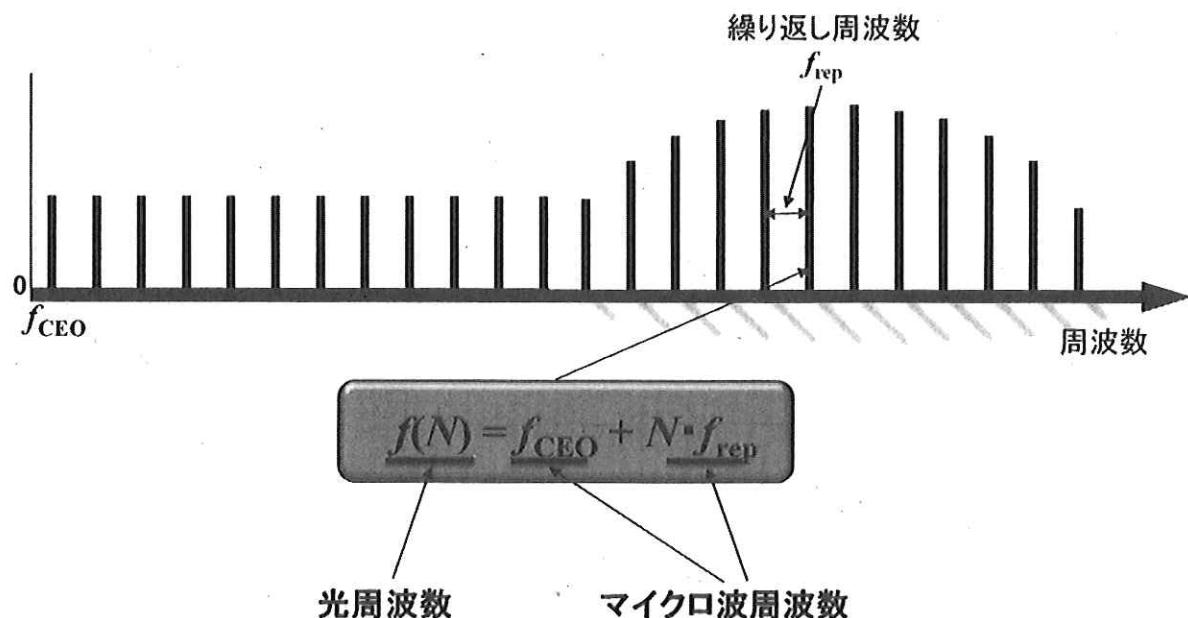


図1. 光コムのスペクトル：影のある線は実在する光コムのモード群で、その他は仮想的に拡張させたモード群

えるような長期連続測定は困難である。また、大型で高価な励起レーザーが必要であり、小型化やモジュール化は難しい。

エルビウム添加光ファイバー(EDF)を増幅媒体としたモード同期ファイバーレーザー（以下ファイバーレーザー）は、100フェムト秒以下の超短光パルスを発生し[7]、半導体レーザーによる励起が可能である。また、メインテナンスの必要がほとんどなく、広帯域化のための高非線形ファイバーと直接融着することもできる。そのため長時間連続で光周波数計測を行うことができ、小型・安価な広帯域光コム用光源として主流になりつつある。ファイバーレーザーによる広帯域光コム（以下ファイバーコム）については、これまでに産総研をはじめとして多くの研究機関がその潜在能力を引き出すための研究を行ってきている。まず、2000年に産総研において世界初のファイバーレーザーを用いた光周波数計測が行われた[8]。2003年には、ファイバーレーザーによる光コムが広帯域化され、ファイバーコムのfCEO信号が検出された[9, 10]。これらの研究により、ファイバーコムの研究は一気に加速し、2004年に世界初の絶対光周波数計測[11]、可視レーザーの周波数測定[12]といった研究が報告された。2005年になると2つのファイバーコムの比較が行われている[12]。そして2006年には、1週間という長時間連続の光周波数計測[13]が行われている。

モード同期Ti:sapphireレーザーはPCFにより広帯域化され、500 - 1100 nm程度の可視～近赤外域に拡がる広帯域光コムを発生する。それに対し、ファイバーコムは高非線形ファイバー(HNLF)により広帯域化され、950 - 2200 nmの近赤外域に拡がっている。Ti:sapphireレーザーによる光コムとファイバーコムとは、波長帯は異なるものの、被測定レーザーや光コムの第二高調波発生により、どちらの光コムでも可視～

近赤外のレーザーの光周波数を測定することが可能である。

図2は産総研で開発したファイバーコムシステムの例である。レーザー発振器、増幅器、HNLFおよびビート検出光学系からなっており、HNLF以外の部品は光通信あるいは実験用デバイスとしてごく一般的に市販されているものである。レーザー発振器には可飽和吸収体を用いたものと非線形偏波回転効果を利用したものに大別される。非線形偏波回転を利用するとモード同期のために偏光の調整が必要である一方、特殊デバイスである可飽和吸収体が不要であり自作しやすいメリットがある。産総研で行われた初期の研究[8, 10, 11]では可飽和吸収体を用いたファイバーレーザーが利用され、それ以降の研究では非線形偏波回転を利用したファイバーレーザー[13]が用いられている。

ファイバーレーザーは一般的には出力が1 - 10 mWと小さく、そのままでは高非線形ファイバーによるスペクトル拡大が起こらないため、光増幅器が必要である。とはいえ、EDFを用いた光増幅器(EDFA)はごく一般的なもので自作も容易である上、パルス増幅にも適している。さらに励起レーザーが小型で安価であることもあり、シンプルな装置で十分な特性が得られる。一方、EDFAが使えることでオシレーター出力を二分岐化[14]もしくは多分岐化することが可能である。すると、 f_{rep} およびfCEO信号の検出系と、被測定レーザーとの光ビート検出系を独立に調整することができ、それぞれの検出系において高い信号雑音比（以下S/N）のビート信号が得やすい。オシレーターからの出力は2分岐され、増幅器までのSMF長を変化させることにより光パルスのチャープ量を最適化した後、増幅器へ入射する。増幅器からの出力光パルスは、断熱的光パルス圧縮[15]によりスペクトルが1500 - 1600 nm程度に広帯域化する。このように増幅された光パルスはその後の

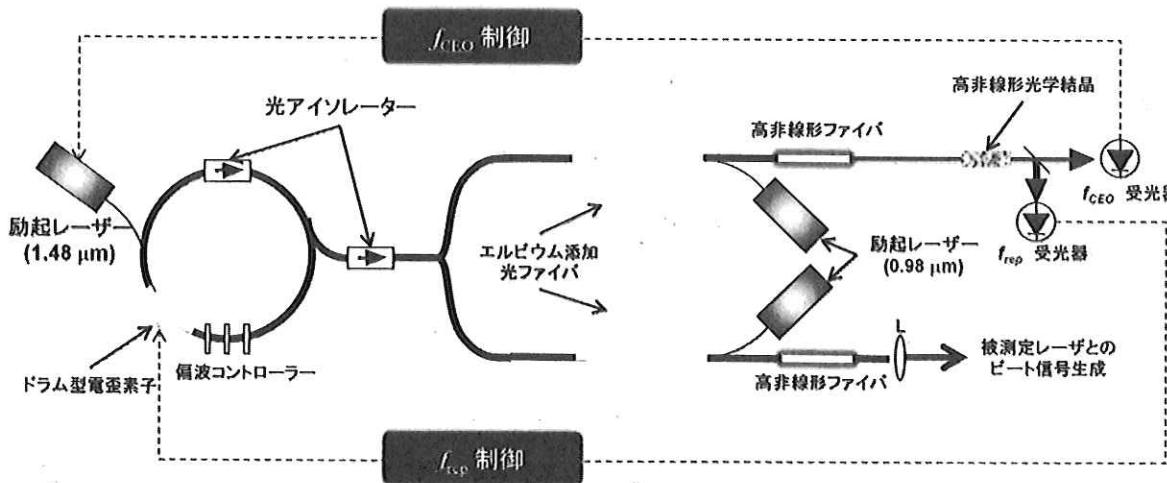


図2. ファイバーコムのシステム図

光周波数コムと系外惑星探査への応用について

HNLFによる広帯域光コム発生に適している。分散補償された後、高非線形ファイバーに入射され、1000・2000 nmを超えて広帯域化される。広帯域化された光コムはビート検出光学系に導かれる。また、初期の研究ではファイバーコムの f_{ceo} 信号には100 kHz程度、またはそれ以上の線幅があり、Ti:sapphireレーザーよりコヒーレンスが劣ると言われた時期もあったが、現在では共振器分散の調整などによりTi:sapphireレーザーと全く変わらない線幅が得られている[16]。むしろ、フリーラン状態での共振器長揺らぎによるジッターはTi:sapphireレーザーより小さく、コヒーレンスの点でも優れていると考えている。

4 光周波数コムの系外惑星探査への応用とまとめ

これまで述べてきたように、光周波数コムは16桁を裕に超える正確さを持つとともに、ファイバーコムの台頭により扱いやすく、入手も容易になりつつある。そのため、近年、コムがさまざまな分野で応用されるようになってきている。系外惑星探査への応用もその一つである。系外惑星探査は、分解能の高い分光器（高分散分光器）を用いて星からの光を分光し、輝線波長のドップラーシフトを検出することにより行われる。しかし、分光器の機械的不安定性や光学系の不完全性により、その分解能を完全に活かすことは難しい。そこで、光周波数コムにより高分散分光器を較正し、その測定限界を実質的に向上させるのが狙いである。光周波数コムの波長の正確さは分光器の分解能と比べて十分に良く、またコムは常時発光しているため、分光器によるスペクトルに輝線を追加する形で常時波長較正することが可能である。ガスセルによる較正と比べ、精度が高い上、スペクトルの変形などがないなどの利点がある。昨年ドイツのグループにより報告された論文[17]では、得られたデータに統計処理を加えれば9 m/sの視線速度に相当する光周波数のドップラーシフトを検出している。しかしながら、システムを天文台において長期連続で運転させつつ、さらに高い分解能を実現するためには、以下のようないくつかの課題が予想される。

1. 光周波数コムを長時間、かつメンテナンスフリーに近い状態で動作させるにはファイバーコムを使用する必要があるが、ファイバーコムは繰り返し周波数がたかだか250 MHzと低く、分光器の分解能より十分広い間隔のコムにするため、これを何本かおきに抽出する「抜き出し」を行う。

2. 前述した抜き出し、および波長較正が必要な波長域を明確にし、実際にシステムの設計・製作を行う。抜き出しに当たっては、コムのモード次数が特定でき

る手法を考案する。

3. 高分散分光器を光周波数コムで較正する際の光軸ずれなどによる不確かさを見積もり、低減する。

4. 実際に作製した光周波数コムシステムを天文台で運用し、望遠鏡、高分解能分光器などと組み合わせて観察を行う。

上記は、光周波数コムを専門とする立場からの課題の予想であり、高分解能分光器、望遠鏡、および統計処理など、異なる視点で見ればより多くの課題があるだろう。高い精度で、かつ定的な観測への道筋はそれほど平坦でない可能性もある。しかしながら、課題の多さは研究要素の多さでもある。また、光周波数コムに関する限り、いずれの課題についても、解決できそうである。また、より大きなブレークスルーが隠されている可能性も高い。光周波数コムを惑星探査に適用する研究は始まって日が浅く、ここ1、2年に観測を軌道に乗せることができるかどうかが重要である。分野間の情報交換と人的交流が成否の鍵を握るだろう。

参考文献

- [1] K. M. Evenson et al., *Appl. Phys. Lett.* **22**, 4, 192 (1973)
- [2] Y. Miki et al., *Jpn. J. Appl. Phys.* **33**, 1655 (1994)
- [3] H. Schnatz et al., *Phys. Rev. Lett.* **76**, 18 (1996).
- [4] Th. Udem et al., *Phys. Rev. Lett.* **82**, 3568 (1999).
- [5] D. J. Jones et al., *Science* **288**, 635 (2000).
- [6] J. Stenger et al., *Physical Review Letters* **88** (2002).
- [7] K. Tamura et al., *Optics Letters* **18**, 1080 (1993).
- [8] A. Onae et al., *Optics Communications* **183**, 181 (2000).
- [9] F. Tauer et al., *Optics Express* **11**, 594 (2003).
- [10] F. L. Hong et al., *Optics Letters* **28**, 1516 (2003).
- [11] T. R. Schibli et al., *Opt. Lett.* **29**, 2467 (2004)
- [12] P. Kubina et al., *Optics Express* **13**, 904 (2005).
- [13] H. Inaba et al., *Optics Express* **14**, 5223 (2006).
- [14] F. Adler et al., *Optics Express* **12**, 5872 (2004).
- [15] M. Nakazawa et al., *Applied Physics Letters* **57**, 653 (1990).
- [16] J. J. McFerran et al., *Applied Physics B-Lasers and Optics* **86**, 219 (2007).
- [17] T. Steinmetz et al., *Science* **321**, 1335 (2008)
- [18] A. Bartels et al., *Science* **326**, 681 (2009)

(2009年12月21日受付、2010年1月15日受理)