

光周波数コム技術

興 梶 元 伸

Technology of Optical Frequency Comb

Motonobu KOUROGI

Technology of optical frequency comb and a business of our company are explained. The process in the development of a waveguide type optical frequency comb generator is shown. Optical frequency counter, one of applications of the optical frequency comb generator is presented.

Key words: optical frequency comb, optical frequency counter, venture company

筆者がなぜ起業したかという点、学生時代から続けてきた研究を実用化したいという一点につきる。学位論文¹⁾の中で、筆者は光の周波数や位相を精密に制御する研究を行っていた。その中で光周波数コム技術のアイデアが出た。光周波数コムは現在でこそ有名になったのだが、当時はまだ誰もその技術を研究している人はおらず、異端の研究だった。しかし、このアイデアは「光で光を計る」という新しいコンセプトに基づき、非常にシンプルで美しかった。筆者はこの光周波数コム概念に無限の可能性を感じたのである。これを事業に結びつけ、役に立ちたい、ついでにちょっとだけお金持ちになりたい、という理由で2002年に起業した。昨年(2005年)のノーベル物理学賞は、光周波数コムが物理学の基礎定数の超高精度測定に結びついたことに贈られた。筆者の美意識は間違っていないと思う。

光周波数コムとは、スペクトルが正確に等間隔で並ぶコム(comb=櫛)状のモードをもつことから、その名前がついた。この光周波数コムは、光のスペクトル上に超低位相雑音のマイクロ波の発生にも使用可能な正確な光周波数の目盛りを提供することができる。物理学の分野では、モードロックレーザーを用いて光周波数コムを発生し、超高精度分光を行うことが可能になった。そして、基本物理定数の有効桁数を数桁も向上することが可能になった。通常

の原子時計よりも何桁も高精度な光原子時計が開発されつつあり、1秒の定義自体も変わろうとしている。こうした成果に対してノーベル物理学賞が贈られたのである。一方、筆者の光周波数コム発生方式はニオブ酸リチウムをベースとしたファブリー・ペロー変調器²⁾を用いた方法である。ファブリー・ペロー変調器はフェムト秒パルスを発生できる外部変調器として唯一の方法である。これを用いると小型、簡便、廉価な光周波数コムを発生できる。筆者は、光周波数コムの高精度という特徴を事業に結びつけ、小型、簡便、廉価であるこのファブリー・ペロー変調器を用いた発生方式の特徴を生かせれば、起業に成功する可能性は十分にあると考えたのだ。

さて、起業の経緯を説明する。1999年、最初は科学技術振興機構(JST)の「プレベンチャー事業」制度を利用して、製品開発を行った。そして、2002年会社を立ち上げた。最初に製品化に成功したのは「バルク型光周波数コム発生器」である。バルク型とはニオブ酸リチウム結晶を削りだして加工を行い、空間で光の入出力を行う形式の光周波数コム発生器である。しかし、消費電力が大きく、小型という特徴があまり生かされなかった。したがってユーザーは研究者に限定された。そこで、会社設立後も開発を続け、現在はより一般の人にも使用できるように通信波長帯に特化した「導波路型光周波数コム発生器」をJSTの

(株)光コム (〒152-8550 東京都目黒区大岡山2-12-1 東京工業大学インキュベーションセンター204) E-mail: kourogi@optocomb.com



図1 導波路型光周波数コム発生器。

「新技術開発委託」制度により開発した。これは小型、簡便、廉価という特徴を実現することとなった。そして、昨年この「導波路型光周波数コム発生器」を活用した「光周波数カウンター」を、新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）の産業技術実用化開発費補助事業で開発し製品化した。この装置は光技術を知らない人でも超高精度で光周波数を測定できるように作られた。

本稿では「導波路型光周波数コム発生器」と「光周波数カウンター」の技術について述べ、今後の事業展開を3章で述べたいと思う。

1. 導波路型光周波数コム発生器

「導波路型光周波数コム発生器」の研究は会社を立ち上げる前から行われていた^{3,4)}。しかし製品化のハードルを越えるのに多くの時間がかかった。それは、研究の完成度だけの問題ではなく、信頼性の高い製品を開発するには実装等の広範囲のものづくりのノウハウの蓄積が必要であったからだ。したがって、すでに量産を長年手がけてきたベンダーの協力が必要だった。しかし、会社立ち上げ前は光通信バブルの時期にあり、ベンダーが量産を優先するため、試作を受け入れてくれなかった。現在はその一時のバブルもはじけ、ベンダーは市場の方向をあらゆる分野の可能性から探るため、協力してくれるようになった。こうして昨年誕生したのが「導波路型光周波数コム発生器」(図1)である。図2にこのデバイスで発生した光コムの例を示す。

導波路型光周波数コム発生器は電気光学効果を発する結晶に導波路を作製し、その両端に鏡を付けることで光共振器としたものである。一言でいえば簡単だが、製品化するには高品位の光共振器を実現、結晶の長さの高精度化、高

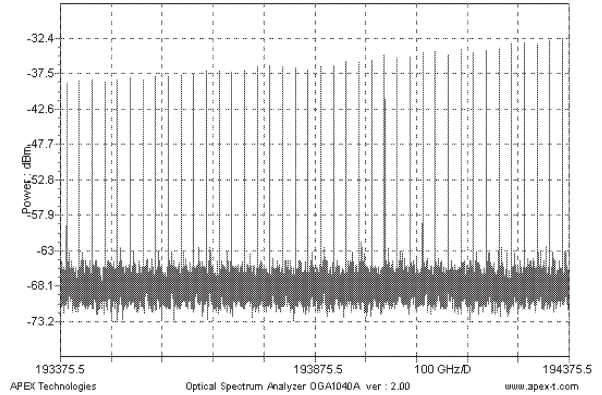


図2 導波路型光コム発生器により発生した光コムのスペクトル。

効率な変調を可能にする電極を量産に耐える方式で実現すること等を解決する必要があった。これらの問題を解決して特許化⁵⁻⁷⁾するとともに、開発の詳細を学会で発表した⁸⁾。

この光コム発生器は、従来のバルク型の光周波数コム発生器に比べて小型で高い安定性を持ち、振動に影響されることはない。また低電力での駆動が可能である。そして初期の研究成果³⁾と比較しても、より広いスパンの光周波数コムを発生させることができる。また、従来は加工精度の問題で変調できる周波数がばらついていたが、今回は設計で決めた正確な周波数の変調が可能であり、ゆえに正確な周波数の光コムの発生が可能である。発生範囲は通信波長帯域のC~Lバンドに相当する100 nmである。

2. 高分解能光周波数カウンター

さて、キーデバイスはできたとして、アプリケーションは何であろうか。まずはWDM通信マーケットにアピールするために最初のターゲットアプリケーションは多波長光源とした。「導波路型光周波数コム発生器」を搭載した最初のデモ器として50 GHz間隔、50波長の多波長光源を製作した(図3)。1チャンネルあたり、およそ1 mWを出力する。波長間隔の精度は 10^{-6} である。ところが、通信市場が徐々に回復基調といってもまだまだのようで、海外において引き合いがあるが、現在この製品は日本国内での反応は全くない。現在の主流は既存技術の範囲でのWDM光源の小型化、省電力化、低価格化に向かっており、当面は多波長光源というソリューションは念頭がないようである。

しかしながら、波長間隔が狭くなり、隣り合うチャンネル間の影響を考慮しなければならなくなると少なくとも測定器そのものの高精度化は必要になる。そこで光周波数コム



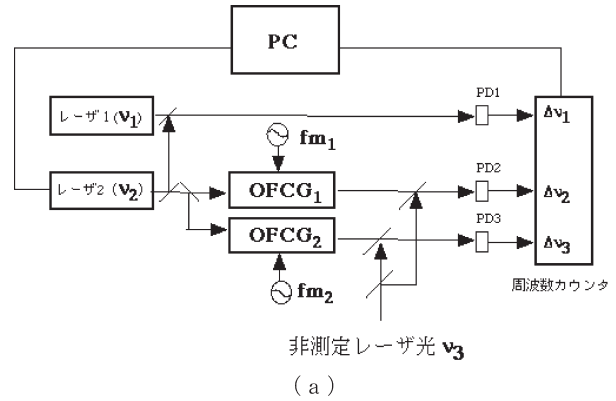
図3 導波路型光周波数コム発生器を用いた多波長光源。

の高精度性を最も単純に示すことのできる製品，光周波数カウンターを開発することにした⁹⁾。この光周波数カウンターは波長計と全く違う原理を用いて光の周波数そのものを直接測ることのできる世界で初めての全自動の装置である。

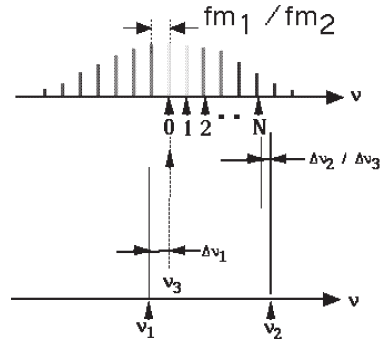
光周波数カウンターの構成図を図4 (a) に示す。光周波数カウンターはレーザー1，レーザー2の2台のレーザー(DFBレーザー)を用いている。レーザー1はガスセルを基準にした安定化レーザーである。ただし，このレーザーを光周波数コムに変換するのではなく，レーザー2を光周波数コムに変換する。ここで，レーザー2とレーザー1の周波数差はビートにより監視され，レーザー2の周波数は制御されるが，役割は不感帯の防止である。不感帯とは，例えば被測定レーザーと光コムモードとの周波数が重なった場合や，モードとモードの間に位置した場合である。

レーザー1とレーザー2の出力の一部はビームスプリッターで合波され，その間の差周波数($\Delta\nu_1$)に等しい周波数のビートは光検出器PD1で検出され，マイクロ波の周波数カウンターにより周波数を測定する。一方，レーザー2の出力はビームスプリッターで分岐され2台の光周波数コム発生器に入力される。周波数(ν_3)の被測定レーザーは，これら2台の光周波数コム発生器からの出力と重ね合わせられ，それぞれ N 番目の変調サイドバンドとの間の差周波数 $\Delta\nu_2$ および $\Delta\nu_3$ に等しい周波数のビートも光検出器PD2およびPD3で受光され周波数がカウントされる。

PCが行う仕事は，レーザー2の周波数 ν_1 を制御し不感帯をさけ，さらに感度のよい範囲を選択するようにレーザー2の周波数を制御する。こうして， $\Delta\nu_1$ ， $\Delta\nu_2$ および $\Delta\nu_3$ はすべて滞りなく計測される。また，それぞれ変調周波数 f_m を異にする2台の光周波数コム発生器を用いて光

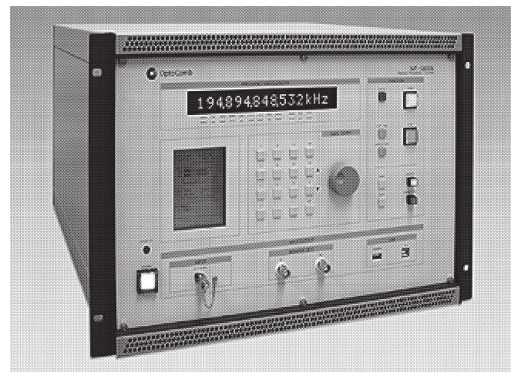


(a)



$$\nu_3 = \nu_1 + \Delta\nu_1 + \Delta\nu_2 + f_{m1} \times N$$

(b)



(c)

図4 周波数カウンター。(a) 構成図，(b) 周波数関係説明図，(c) 外観図。

コムとのビート $\Delta\nu_2$ と $\Delta\nu_3$ を計測することで，次数 N が明らかになる。

こうして周波数測定の精度は安定化レーザーの精度で決定され，周波数測定範囲はC~Lバンドにかけて測定できる。精度は安定化レーザーの精度に制限されるが，最低でも1 MHzの精度が保障できる。そして，この装置の最も特徴的なのは内部のレーザー制御が完全に自動化されているので，誰でも簡単に光周波数が高精度に計れることである。

以上のような複雑な仕組みであるが，安定な動作が可能

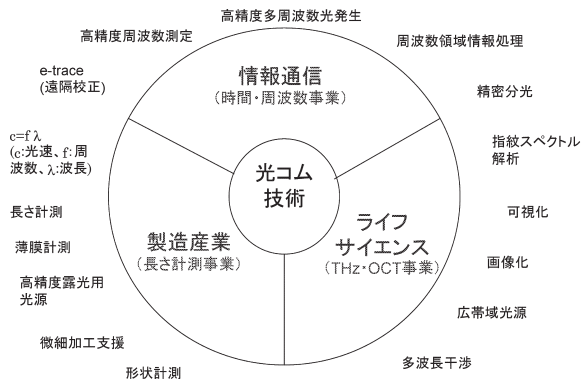


図5 事業分野。

になったのは「導波路型光周波数コム発生器」の実現によるものが大きい。今後の光周波数の取り回しの部品としての可能性をみてほしいと思う。

3. これからの事業展開とまとめ

現在、導波路型光周波数コム発生器、光周波数カウンターともに販売を開始している。すでに、研究所、大学レベルでは購入された実績がある。応用分野はまちまちであり、光計測、光通信、物理計測など多岐にわたる。

今後の事業展開としては、導波路型光周波数コム発生器、光周波数カウンターの技術を展開するだけでなく、筆者らの技術集団がもつ技術、例えば光共振器の技術、高周波技術、レーザー制御技術、デジタル技術など、これらを統合する技術をも含めて事業展開を行ってゆく予定である。

すでに、複数の共同で開発をするプロジェクトも動きはじめている。ここでは、それら新しい製品開発および、共同で開発をするプロジェクトに関しては発表できないので、曖昧ではあるが、事業分野を図5にまとめた。

最後に、これからの会社のあり方について述べたいと思

う。もともと、筆者の理念はこれまで述べたように完全にシーズ指向の考え方に偏ったものである。しかしながら、実用化し、企業として成功を収めるためにはニーズとマッチした製品・サービスを提供しなければ話にならない。また当初人員も資金も少ないこともあって、一人二役三役をこなすような体制であった。これでは発展が難しいと思うようになった。企業において客観的な判断を下すには、ニーズとシーズがはっきりしない状態や専門でない仕事をやっていると、自然と判断が曖昧になって非効率的である。小さい企業であっても、研究、特許、経営、営業、生産等の専門性をもったプロフェッショナル集団でなければやってゆけない。そこで研究、経営、営業に重点を置き、各分野の専門家を外部アドバイザーとして取り込みながらプロフェッショナル集団を構築する。外部専門会社を活用し、全体として働く構造にしてゆきたいと思う。なお今後、技術者等の人員を拡充してゆくつもりである。

文 献

- 1) 興梠元伸：“超高コヒーレント光周波数シンセサイザに関する研究”，平成4年度東京工業大学学位論文（1993）。
- 2) T. Kobayashi, T. Sueta, Y. Cho and Y. Matsuo: “High-repetition-rate optical pulse generator using a Fabry-Perot electro-optic modulator,” *Appl. Phys. Lett.*, **21** (1972) 341-343.
- 3) T. Saitoh, M. Kouroggi and M. Ohtsu: “A waveguide-type optical-frequency comb generator,” *IEEE Photonics Technol. Lett.*, **7** (1995) 197-199.
- 4) 興梠元伸：特許第 3756959 号。
- 5) 興梠元伸：特開 2005-326802。
- 6) 興梠元伸：特開 2006-71431。
- 7) 興梠元伸：特開 2005-148390。
- 8) K. Imai, B. Widiyatmoko and M. Kouroggi: “High finesse waveguide cavity optical frequency comb generator,” *European Conference on Optical Communication, WE4.P.044* (2004)。
- 9) 興梠元伸：“光コムジェネレータ”，第36回光波センシング技術研究会予稿集（2005）LST36-2。

（2006年8月16日受理）