

# 究極の連続波光源を求めて

## 光パラメトリック発振器で発生する任意波長の光

「光周波数シンセサイザ」の実現を目指し、広帯域周波数可変光源としての連続波光パラメトリック発振器 (cw-OPO) の開発を進めている。酸化マグネシウムを5%ドープしたニオブ酸リチウム結晶を用いた777 nmから1687 nmにわたる1オクターブ以上の光の発振が得られた。またCs-D<sub>2</sub>線(852.357 nm)からのドップラー効果で広がった蛍光を観測することで、一般に同調が難しいと考えられてきたcw-OPOを必要とされる波長に正確に同調できることを確認した。今後の課題は、光コムに位相同期したcw-OPOを行い、さらに超高分解能の分光を行うことである。

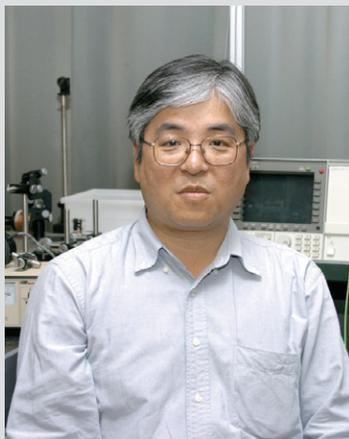
We are developing a continuous-wave (cw) optical parametric oscillator as a tunable cw light source used in an optical frequency synthesizer. The tuning range from 777 nm to 1687 nm was obtained with a 5% MgO doped LiNbO<sub>3</sub> as a nonlinear crystal. The Doppler broadened fluorescence profile of the Cs-D<sub>2</sub> line (852.357 nm) was observed and we could demonstrate the tunability to arbitrary wavelength. The next target is the high-resolution spectroscopy of atoms and molecules with a cw-OPO phase-locked to an optical comb.

池上 健 Takeshi Ikegami

t.ikegami@aist.go.jp

計測標準研究部門  
時間周波数科 時間標準研究室 室長

1987年に工業技術院計量研究所に入所して以来、光ポンピング方式によるセシウム原子周波数標準器、半導体レーザーの周波数安定化、セシウム原子のレーザー冷却、原子泉方式の周波数標準器、高出力Nd:YAGレーザー、連続波光パラメトリック発振器と光周波数コム発生器を利用した光周波数計測などに従事してきた。将来は、原子周波数標準器、極低位相雑音サファイア発振器、光コム、連続波光パラメトリック発振器をすべて組み合わせることで初めて実現可能となる「光周波数シンセサイザ」を武器として、超高分解能分光技術により基礎物理定数の決定・物理法則の検証などに寄与していくのが夢である。



モード同期レーザーや光結晶ファイバー技術の進歩により、1オクターブ以上にわたる広い帯域で周波数の絶対値が確定した櫛(コム)状のスペクトル、すなわち光コムを発生することができるようになり、光周波数の絶対計測に使われるようになった<sup>1, 2)</sup>。しかし、光コム1本当たりのパワーはnW(ナノワット)程度であるため、各コムを連続波(Continuous-wave, cw)レーザーとして用いることは困難である。もし、光コムと同程度のスペクトル域にわたって周波数が可変で、その周波数を一本の光コムに位相同期できるcw光源があれば、より広範な光コムへの応用も可能になる。このような、精密な光コムとその1本を抽出して増幅する連続波光源からなる安定なシステムが実現できれば、「光周波数シンセサイザ」または「光スイープジェネレーター」などと呼

ぶことができるだろう<sup>1)</sup>。

こうしたシステムができれば、学術的には多様な原子・分子の分光・操作や基礎物理定数の決定、また、周波数標準、長さ標準や光パワー標準などの標準への応用、より実用的には大気中の極微量のガスや汚染物質の計測などさまざまな精密計測への応用も可能となり、現在、多種多様なレーザーを用いて実現されている精密計測用光源を単一の原理に基づく光源システムに置き換えることができる。

最近では特に、半導体レーザー励起ヤグ(Nd:YAG)レーザーの進歩が著しく、きわめてスペクトルの線幅が狭く、出力が大きなものが市販でも入手できるようになってきた。その一方で、高出力の光を照射しても損傷を受けにくい高品質な非線形光学結晶が次々と開発され、光の第2高調波の発

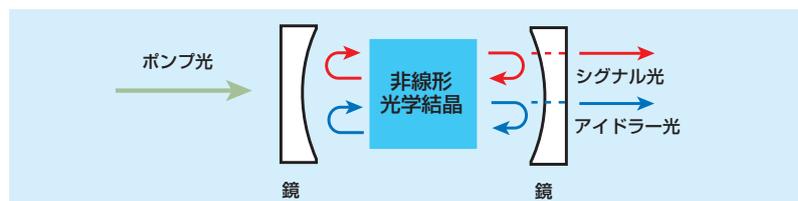


図1 連続波光パラメトリック発振器の原理

鏡を向かい合わせた共振器の内部に非線形光学結晶を設置し、ポンプ光(周波数 $\nu_p$ )を結晶に照射すると、 $\nu_p = \nu_s + \nu_i$ を満たす2つの周波数(それぞれシグナル光とアイドラー光と呼ばれる)で発振する。

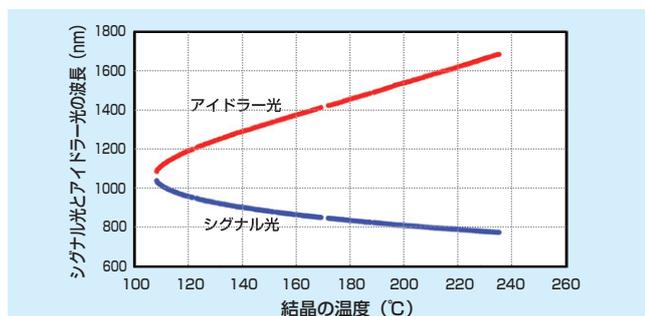


図2 連続波光パラメトリック発振器の温度同調曲線

結晶温度を108℃から235℃まで変化させることで、777 nmから1687 nmの1オクターブ以上にわたる光を発生させることができた。ある温度においてシグナル光（青色の線）とアイドラー光（赤色の線）と一緒に発振する。

生、和周波数の発生、差周波数の発生など、光の周波数変換が非常に効率よく行えるようになってきている。これらを考えると、レーザー光源としては1064 nmで発振する高品質のNd:YAGレーザーあるいはその第2高調波である532 nmの光だけを用い、それ以外の波長は非線形光学結晶を用いた波長変換で出せばいいのではないかという考えが浮かんでくる。

このような発想から、われわれは連続波光パラメトリック発振器（Continuous-wave Optical Parametric Oscillator=cw-OPO）の研究を進めている。

OPOの原理を図1に示す。非常に広い波長域で反射率の高い鏡を向かい合わせた「共振器」の中に非線形光学結晶を設置し、ポンプ光（波長 $\lambda_p$ 、周波数 $\nu_p=c/\lambda_p$ 、 $c$ は光速）を結晶に照射すると、2つの波長で光の発振が起きる。発振する2つの波長の光のうち波長の短い方はシグナル光（ $\nu_s$ ）、長い方はアイドラー光（ $\nu_i$ ）と呼ばれる。発振波長は結晶の種類、温度、方向で選択され、 $\nu_p=\nu_s+\nu_i$ が成り立つ。これがエネルギー保存則を表すことは両辺にプランク定数をかけてみると分かる。

最近では、疑似位相整合（Quasi Phase-Matching）という技術を利用したPPLNやPPKTPといわれる分極反転結晶が多く用いられているが、われわれは主に周波数や位相の制御に重点を置き、結晶そのものは

通常の複屈折で位相整合を取るバルク結晶を用いて、実験を進めてきた。図2に示すように5%MgOドープLiNbO<sub>3</sub>結晶を用いて、結晶温度を108℃～235℃まで変化させることで、1個の結晶で発振波長を777 nmから1687 nmまで1オクターブ以上も変化させることができた。われわれの共振器は、シグナル光とアイドラー光の2波を共振器で共振させるDRO（Doubly-Resonant OPO）と呼ばれるものであり、複合共振器と似た特性をもつため同調特性が複雑であるが、ポンプ周波数と温度を合わせて変えることで、共振器の長さで決まる自由スペクトル域（Free Spectral Range）である3 GHz（波長に換算すると7 pm）の不確かさで、発振波長を希望の波長に追い込むことができる。

実際に発振波長を出したい波長に同調できることを実証するために、手元にあるRb（ルビジウム）およびCs（セシウム）ガスセルを使って蛍光の観測を試みた。すでに説明したとおり、ポンプ周波数と温度の同調により希望の波長の $\pm 3$  GHz以内まで追い込むことができるので、あとは残された6 GHzを何らかの方法で連続的に同調す

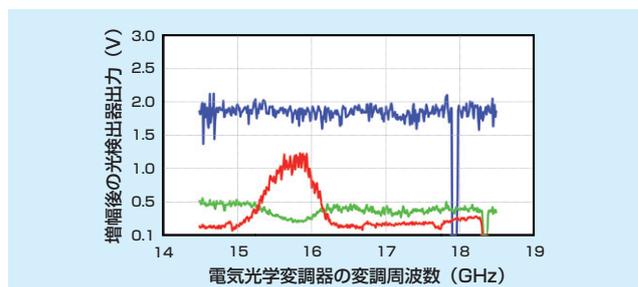


図3 観測されたCs-D<sub>2</sub>線（852.357 nm）からの蛍光と吸収信号のドップラープロファイル

基底状態の全角運動量 $F=4$ の超微細準位から励起準位への遷移を観測したものである。周波数連続同調には電気光学変調器を用いた。青色はOPOの出力パワー、緑色はガスセルを透過した光強度、赤色がセルからの蛍光強度を表している。後半17.9 GHz付近と18.3 GHz付近のへこみは検出器のゼロレベルを確認するために光を遮ったところである。

ることで正確に原子の吸収線に同調できると考えられる。今回の連続同調は、電気光学変調器を用いて側帯波を立て、片側側帯波だけを回折格子で空間的に切り出すことで行った。この方法で、約12 GHzにわたって周波数の連続同調ができた。図3にCs-D<sub>2</sub>線（852 nm）を観測した例を示す<sup>3)</sup>。この時、OPOは共振器長、周波数、強度のいずれも制御していないフリーランニング状態である。同様にして、Cs-D<sub>1</sub>線（894 nm）、Rb-D<sub>1</sub>線（794 nm）からの蛍光の観測にも成功した。環境分子である炭酸ガス（CO<sub>2</sub>）やメタン（CH<sub>4</sub>）などのガスセルがあれば、アイドラー光を用いて、これらの分子の1.5 μm～1.7 μm帯にある吸収線の観測も可能と考えられ、実際にこのような長波長側の能力の検証も行う予定である。

今後の課題としては、位相同期したOPOによる、より高分解能な観測、より一般的なQPM結晶を用いた波長域の拡大やパワーの増大、安定動作のための単一共振化（Singly-Resonant OPO）などがあり、さらにcw-OPOを各種の応用分野で用いることなどが挙げられる。

#### 関連情報

- 共同研究者：稲場 肇、大嶋新一、洪 鋒雷、大苗 敦、美濃島 薫、松本弘一（計測標準研究部門）。
- <sup>1)</sup> 稲場 肇：AIST Today Vol.3, No.10, p.12（2003）。
- <sup>2)</sup> H. Inaba et al., IEEE J. Quantum Electron., Vol.40, No.7, pp.929-936（2004）。
- <sup>3)</sup> T.Ikegami et al., Proc.ATF2004, pp.160-164（2004）。