

# 波長変換による レーザーの使い方

サイバーレーザー(株)  
佐久間 純

## 1 はじめに

第3回目となる本稿では、波長変換を取り上げる。波長変換とは、文字通りレーザー光の波長、平たく言うと色を変換する技術であり、レーザーの応用範囲を拡大する点で非常に重要な技術である。本稿で言う波長変換とは、2次の非線形光学効果を利用して、レーザーの波長(周波数)を変える非線形波長変換技術を示す。こう記すと実用には無縁な学問的イメージが湧くかもしれないが、Nd:YAG レーザー装置から発せられる不可視の近赤外レーザー光が、僅か数mm角の結晶を通過するだけでグリーンの光に変換される状況(図1)を初めて見ると、そのイメージは軽減されるであろう。以下、波長変換の必要性、重要性に関する一つの見方から述べてみる。

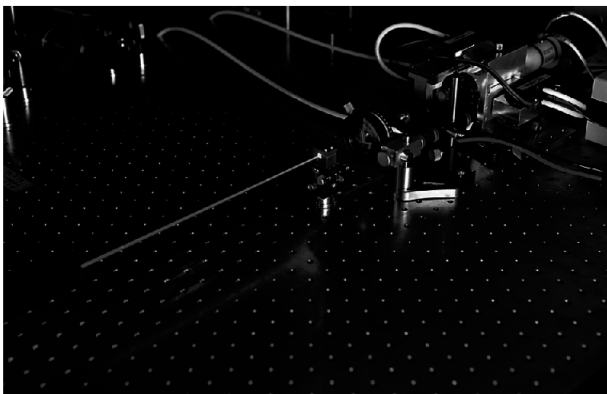


図1 QスイッチNd:YAGレーザーによる第2高調波発生

## 2 波長変換の必要性と特徴

レーザーは、特定の波長において極めて帯域の狭い光、実質的に単色の光を発するという、光源としては際立った特徴を有する。この単色性というレーザーの特徴は、レーザーを応用する際に非常に大きな役割を果たす。そもそもレーザーに限らず人工的な光源は、その光が作用対象である物質に照射されて吸収、ないし反射されること、即ち物質との相互作用により利用価値が具現化されるものである。「光と物質の相互作用」という言葉をWEB等で調べると、Maxwell方程式をはじめとした難解な内容に行き当たり、レーザー応用としても、核融合、同位体分離、原子冷却といった一般生活に縁遠い応用が挙げられている。しかしもっと身近な応用、例えば金属、樹脂等に対する切断、穴あけ、溶接、マーキング等の加工応用も、レーザー光と物質の直接的な相互作用を利用した応用例である。レーザーメス、近視矯正、皮膚のしみ取り等の医療応用も、光と物質の相互作用に拠るものである。また、光通信においてレーザー光が検出器に作用してパルス状の電気信号を作り出して情報を伝達したり、レーザーショーにおいて、可視レーザー光が大気中のチリに散乱されて見る人の目に飛び込み、網膜、視神経を介して脳に信号を生じるのも、広い意味で光と物質の相互作用と言えるであろう。

そこで一つ重要なことは、どういう波長のレーザー光を適用すれば、目的とする作用を生じさせる効率が高まるかということである。レーザー光は単色光であるが故

に、その確率ないし効率の良い波長だけが選択できる。その端的な例として前回、レーザーダイオード励起の固体レーザーについて言及されている。しかし逆説的に言うと、レーザーの単色性は、その応用範囲を限定し、汎用性を失わせる弱点でもある。どんなに大出力なレーザーでも、相互作用の効率が低ければ、その応用にとっては無用のツールである。極端な言い方をすると、10 kWの大出力赤外レーザーは、レーザーポインター用としては1 mWの可視レーザーに敵わないのである。一方、レーザー光の単色性故に物質との相互作用が少なくなる状況を活かす応用もある。大気吸収の少ない波長を用いてのレーザーレーダーや、水に対する吸収の少ない青緑レーザーを水中用に用いる等の例がある。光通信においてファイバーの零分散となる1.55 μmレーザーを用いるのも、レーザー光の単色性を活かした例である。

以上、相互作用の大きさを活かす場合、小ささを活かす場合、いずれにおいても、光の波長（周波数）というものが、相互作用を決定づける重要なパラメータであるということを述べた。要するに、レーザーを使う際は、いかなる応用においても、目的とする相互作用を起こす確率の波長依存性を踏まえて、その波長を選択することが求められる。現状市販されているレーザー装置が発する光の波長は、実験レベルは別とすると、F<sub>2</sub>レーザーによる157 nmから、CO<sub>2</sub>レーザーの10.6 μm（アイソトープを用いたものを除く）がそれぞれ、最短、最長波長であり、いずれもガスレーザーである。その他のレーザーが発する光の波長は、この真空紫外から赤外の間において、色素レーザーのような波長可変レーザーは例外として離散的に点々と存在しているが、目的とする応用に対して最適な発振波長のレーザーが存在するとは限らない。波長変換は、そのギャップを埋め、レーザーの種類、バリエーションを2倍、3倍にも増やす技術と言っても外れてはいないであろう。それ以上に、既存のレーザーに対して小型化、波長可変性等の付加価値を有する場合も少なくない。もし波長変換技術が生まれていなかったと仮定するならば、レーザーの応用範囲、市場は、現状よりかなり小さいものであったはずである。

ところで、レーザーには単色性という特徴に勝るとも劣らない可干渉性（コヒーレント）という重要な特徴が

ある。これは、その位相面が揃った光ということであり、レーザー光が真っ直ぐに進む高指向性という特徴の源である。非線形波長変換は、このコヒーレント光としての性質も殆ど損なうことなく実現されるということが重要である。波長変換によるコヒーレント光は、レーザーという言葉の語源に含まれる誘導放出による発光ではないが、一般に高輝度、直進性等、レーザー光と同様の特性、取扱性を有する。また装置の主たる構成要素が基本波発生用のレーザー発振器という点もあって、広義にレーザー光と呼ばれることも多い。例えば、図1のNd:YAGレーザー第2高調波をグリーンレーザーと称する人もいる。

レーザー、およびその波長変換光は、単色性、可干渉性という特徴を活かして様々な分野で利用されている。このような光源としては、チップサイズの半導体レーザーから建物を占有するような巨大システムまで様々なスケールがあるが、本稿では加工等の産業用途や理科学実験に適したテーブルトップ程度のレーザー装置を対象とすることを断りして次章に進む。

### 3 波長変換による光の発生方法

#### 3.1 変換光の波長

波長変換による最もポピュラーな例は、図1にも示した第2高調波発生（または2倍波発生、SHG：Second Harmonic Generation）である。SHGによる光発生装置の基本構成例を図2に示す。発生波長等に依存した位相整合と呼ばれる条件を満足する状態（結晶軸角度、結晶温度）で配された2次非線形光学性を有する結晶に、高ピークパワーのパルスレーザー光を入射させるだけで、その半分の波長の光（第2高調波）が発生する。これは、結晶内で空間的に重なり合っている一般に3つの波長

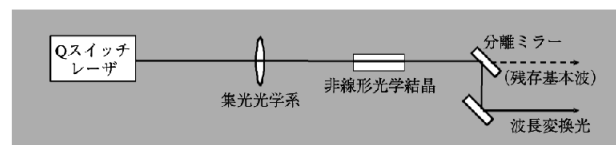


図2 外部変換による第2高調波発生の概略構成

(以下 $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ と記す)の光が、物質に作用して生じる2次の非線形誘導分極を介して、その相互間の光エネルギーが交換し合う3波混合という物理的現象を利用している。波長変換される光の波長には常に以下の関係が成り立つ。

$$\frac{1}{\lambda_1} + \frac{1}{\lambda_2} = \frac{1}{\lambda_3} \quad (\lambda_1, \lambda_2 > \lambda_3)$$

これは、フォトン間のエネルギー保存則に対応する。左辺から右辺へエネルギー移動は短波長光への変換であり、その過程を一般に和周波混合(SFM: Sum frequency mixing)ないし和周波発生(SFG: Sum frequency generation)と呼ぶ。上記Nd:YAGレーザー光のSHGの場合は、入射光が $\lambda_1 = \lambda_2 = 1.064 \mu\text{m}$ という特殊なSFMに相当し、発生光が $\lambda_3 = 0.532 \mu\text{m}$ である。このような変換は多段階続けて行うことが可能であり、例えばSHG結晶の後段に設置される第2の結晶により3倍波発生(THG: Third Harmonic Generation)が可能である。THGは入射する2つの光は赤外光( $\lambda_1 = 1.064 \mu\text{m}$ )と可視光( $\lambda_2 = 0.532 \mu\text{m}$ )で、発生する3倍波は $\lambda_3 = 0.355 \mu\text{m}$ の紫外光となる。

これらとは逆に、上式の右辺から左辺への変換である長波長化も可能である。例えば $\lambda_3 = 0.355 \mu\text{m}$ の紫外光をTHG用の結晶に入射させると、前述の例とは逆向きの変換が生じて、 $\lambda_1 = 1.064 \mu\text{m}$ 、 $\lambda_2 = 0.532 \mu\text{m}$ の2つの長波長の光を発生させられる。ただし、短波長化よりは利得が低いため、光共振器を併用することが多い(図3)。この変換のもう一つ重要な特徴は、結晶の温度や角度を変化させると、位相整合条件が変化し、発生光の波長を可変させることができることである。この一般に波長可変性を有する長波長光への変換技術は光パラメトリック発振(OPO: Optical Parametric Oscillator)と呼ばれてい

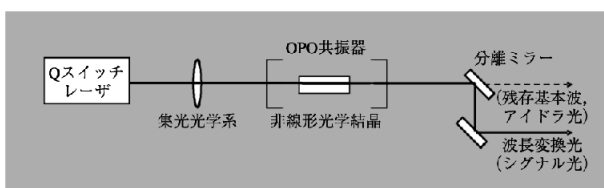


図3 光パラメトリック発振器の概略構成

る。また、弱いシグナル光を注入して増幅させることを目的とした光パラメトリック増幅(OPA: Optical Parametric Amplifier)、共振器を使わずに $\lambda_3$ と $\lambda_2$ の波長の光を入射させて $\lambda_1$ の光を発生させる差周波発生(DFG: Difference frequency generation)等の技術もある。

### 3.2 変換効率

このような波長変換を利用した光源としては、変換前の光に対する変換光のエネルギー割合、すなわち変換効率になるべく高いことが望ましい。変換効率は、非線形光学結晶の特性、作用長、光の強度等に依存するが、実用的な変換出力を得るには、通常 $\text{MW}/\text{cm}^2$ オーダーの光強度が必要なため、Qスイッチ発振、ないしモードロックによる高ピークパワーのパルスレーザーが波長変換の基本光源として多く用いられる。当然変換された光もパルス光となる。最適化されたSHGの場合、50%以上が比較的容易に達成させられる。変換用結晶を基本波発生用レーザー共振器内に配した内部共振器型変換(イントラキャビティ型変換)では、実質100%の変換効率が可能な場合もある。逆に、変換効率が1%にも満たないような波長変換光源もあるが、応用に対するメリットとのトレードオフで光源の価値は論じられるべきであろう。

一方、連続出力レーザー光の場合も、非線形光学結晶を光共振器内に設置して、共振による干渉効果を利用することで実用的な波長変換が可能である。これは大別して、前述した内部変換型と、基本波としては単一縦モード発振のレーザーを用いて、独立に構成した共振器内に変換用の結晶を設置して変換させる外部共振器型がある。後者の場合、干渉を生じさせるため、共振器長を光波長より微小な精度で精密に制御する機構も必須であるが、多段階の変換も可能であり、主に紫外光発生に用い

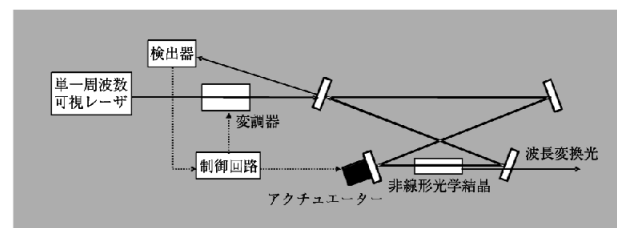


図4 外部共振器によるCW波長変換の概略構成

られる。図4に示すように、その構成はやや複雑となるが、変換効率に関しては、パルスレーザーによる変換よりむしろ高効率な変換が可能となる場合も少なくない。

### 3.3 変換光の特性

波長変換は、入射光が透過する領域で生じ、変換されたビームもほぼ入射したビームの強度、位相分布、 $M^2$ 値等を反映した単色性、直進性等の特徴を受け継いだコヒーレント光として発生する。しかし、変換の非線形性、結晶の波面精度、ウォークオフ効果等により、概してビーム質 ( $M^2$ 値) はやや低下する。また、その出力変動は、例えば和周波発生の場合、入射光の出力の積に依存するので、一般に安定度も低下する。また、非線形光学結晶の損傷も変換光の特性を劣化させる。このような物理的現象、技術課題に対する深い理解と、それに対する対策が光源メーカーの腕の見せ所でもある。

### 3.4 非線形光学結晶

当然ながら、波長変換用の結晶は、入射光と発生光の全てに対して透明であることが必要である。更に位相整合が満足されることが必要である。位相整合は、結晶内で進む入射光と発生光の位相が揃うことで効率良く変換される状況を意味し、コヒーレント光なればこそ実現し得る。通常は、結晶内の各波長に対する屈折率に対する要請を示す以下の式で表される。

$$\frac{n_1}{\lambda_1} + \frac{n_2}{\lambda_2} = \frac{n_3}{\lambda_3} \quad (\lambda_1, \lambda_2 > \lambda_3)$$

これは、複屈折性を用いる等して波長の違いによる分散を補償することで可能となり、複屈折性が大きいほど短波長光の発生に適用できる。単位長さ当たりの変換効率は入射光強度に比例するので、限られた結晶長で最大の変換効率を得るために、通常入射光はレンズ等で集光させられる。しかし、結晶のダメージや複屈折性が逆に仇となるウォークオフと呼ばれる現象等の制限があり、これらと変換効率とのトレードオフの観点から最適設計が成される。このような波長変換光発生装置が産業用等に「使える」ためには、非線形光学結晶に対して次のような点が求められる。

- ①実用的な変換出力、変換効率を可能とする (十分な有効非線形光学定数、サイズの結晶)。
- ②結晶温度やビームの角度変化に対する出力依存性が小さい。また出力光ビームパターンに極端な歪み等が生じない (広い温度許容幅、角度許容幅、均一な品質、大きい熱伝導率)。
- ③入射および発生光により結晶が加工されにくい (高い損傷閾値、低吸収)。
- ④結晶が変質、劣化しにくい (化学的、機械的に安定)。
- ⑤環境に優しい (有害物質等を含まない)。
- ⑥安価である。

一般に、非線形定数、角度許容幅等は、使用する結晶に依存する固有特性であり、これらの値が大きいかつ低吸収の結晶育成の研究開発が大学、結晶メーカー等で推進されている。近年では、結晶組成の追求に限らず、結晶構造として積極的に上記特性を満足させる擬似位相整合に関わる開発が進んでおり、ウォークオフフリーで高効率な波長変換デバイスとして応用範囲が拡大している。ドメイン周期  $\Lambda$  と波長、屈折率の関係は次式で表される。

$$\frac{n_1}{\lambda_1} + \frac{n_2}{\lambda_2} - \frac{n_3}{\lambda_3} = \frac{1}{\Lambda} \quad (\lambda_1, \lambda_2 > \lambda_3)$$

一方結晶を利用する側からは、その能力を最大限に引出しつつ実用的な変換出力特性と結晶寿命確保の観点から、高性能な基本波レーザーの開発、変換方式、結晶表面処理、保持方法等に関する工夫等が進められている。

## 4 波長変換による光源の種類と特徴

以下、固体レーザーベースの波長変換による主な光源の現状について述べる。波長変換によるコヒーレント光源を応用しようと考えられている読者の一助になれば幸いである。光源選定のポイントを挙げる。

- ①波長 (紫外, 可視, 赤外, 波長可変)
- ②発振形態 (パルスかCWか)
- ③スペクトル (単一縦モードが必要かどうか)
- ④出力特性 (平均出力, 繰返し数, 安定性, パルス幅,  $M^2$ )

⑤装置サイズ（水冷か空冷か）

⑥信頼性（部品寿命等）

#### 4.1 Nd:YAG (YVO<sub>4</sub>, YLF) レーザー第2高調波

前章でも述べたが、波長1.064 μmの近赤外光の第2高調波として得られる波長532 nmのグリーン光は、波長変換による光源の代表である。mW級の小型空冷の装置から、パルスでは100 W弱、CWでも10 W級の高出力装置まで様々な光源が市販されており、加工、印刷、医療、エンターテイメント等、広範な分野で応用されている。技術的には、kHz以上の高繰返し、ないしCWの場合では、内部変換型が適用されている場合が多い。変換用の結晶としては、小出力では主にKTPないしPPLN（周期反転型LiNbO<sub>3</sub>）、高出力ではKTPかLBOが用いられる。また、発振波長947 nmのNd:YAGレーザー-SHGによる473 nm、914 nmのNd:YVO<sub>4</sub>レーザー-SHGによる457 nmのブルー光は、グリーン程の高出力化は困難であるが、印刷、計測等で広く用いられている。

#### 4.2 Nd:YAG (YLF) レーザー第3高調波

THGは、SHGにより発生する第2高調波と残存する基本波を、第2の非線形光学結晶において和周波混合する構成が一般的であり、Nd:YAGレーザーベースの全固体紫外光源としては比較的信頼性の高い装置の構築が可能である。応用として、光造形、マーキング、プリント基板のビアホール加工等に適用されている。現状、穴径50 μm未満のビアホール加工用として出力3～10 W級のTHG光発生装置が用いられており、出力15～20 W級装置の実用化も近いと考えられる。THG用結晶としてはLBOが広く使われているが、BBO、CLBO、GdYCOB、CBO等の結晶も適用可能である。GdYCOBは、その組成比の最適化によりLBO以上に角度許容幅の広い動作が可能な結晶である。なお、この第3高調波は外部共振器変換によりCW発振も可能で、ディスクマスタリング等に有用である。

#### 4.3 Nd:YAG (YLF) レーザー第4高調波

1 μm帯レーザー光の2段階の周波数通倍（グリーンレーザーのSHG）による第4高調波発生（FHG：Fourth

Harmonic Generation）では波長262～266 nmの紫外光が得られ、THGより短波長の特性による高性能な加工用光源との期待から盛んに開発が進められている。現状使われている紫外光発生用結晶は、BBO、KDP、CLBO等であり、現状市販されている装置は最大3～4 Wである。BBO結晶は、外部共振器を用いてのCW第4高調波発生に多く適用されており、出力200 mW程度の装置が半導体検査光源用等として実用化されている。

#### 4.4 Nd:YAG (YLF) レーザー第5高調波

上記1 μm帯レーザー光FHGにおいて第4高調波と基本波を和周波混合する第3の結晶を配置した構成により第5高調波発生（FIHG：Fifth Harmonic Generation）が成され、波長209～213 nmの深紫外光が発生する。第5高調波の出力としてはCWで0.4 W、100 Hzで4 W等が学会等では報告されているが、市販品は少ない。結晶はやはりBBOないしCLBOであるが、FHG以上に結晶寿命等の課題がある。かつてエキシマレーザーに代る半導体露光用光源としての適用を模索する動きもあったが、ArF波長193 nmに周辺技術が同調された結果、その論議は現状殆ど成されていない。しかし、今後の光源と応用開拓が強く期待される光源である。

#### 4.5 チタンサファイアレーザー高調波

チタンサファイアレーザーは、700～1000 nm程度で発振可能な波長可変光源であり、そのSHGにより350～500 nm、更にTHGにより240～330 nmではほぼ任意の波長の光発生が可能である。チタンサファイアレーザー自体が励起レーザー（通常Nd:YAGレーザーのSHG）を必要とするため、装置が比較的複雑化し、分光等の特殊用途にどうしても必要な場合に用いられることが多い。

#### 4.6 波長200 nm未満の深紫外光源

波長200 nmを切る深紫外域は、特に半導体露光用として193 nm、157 nmという波長が選定されていることから、その周辺技術の各種応用に小出力、狭帯域の光源が波長変換技術により開発が進められている。発振波長773.6 nmに同調されたチタンサファイアレーザー、アレキサンドライトレーザー光の第4高調波としてArFエキ

シマレーザー波長 193.4 nm を発生させる装置は市販されている。ただし、その第2高調波 (386.8 nm) を直接周波数低倍できる実用的な非線形光学結晶は現状存在しないため、いったん第3高調波 (257 nm) を発生させ、それと基本波をBBOにより和周波混合する3段階の変換過程が必要となる。一方、深紫外発生にCLBO結晶を用いた和周波混合では、概して装置構成が複雑となるものの、100 mW を超える高出力も可能であり、半導体関連企業等で開発が進められている。近年は、よりカットオフ波長の短いKBBF結晶も期待されている。

#### 4.7 Nd:YAG(YLF)レーザーによるパラメトリック発振器

##### ①Nd:YAGレーザー基本波励起OPO

波長 1.5 ~ 3 μm の中赤外光源である。パルス発振の場合の平均出力は数 10 W 級も可能で、理科学、医療、計測等の他、軍事分野にも応用されている。結晶としてはKTP, PPLN, PPLT等が用いられる。

##### ②Nd:YAGレーザー第2高調波励起OPO

LBO, KTP等の結晶を用いて波長 0.7 ~ 2.5 μm の近赤外域の波長可変光源が実現されるが、主にチタンサファイアレーザーでカバーされない 1 μm 以上の近赤外光源として有効である。

##### ③Nd:YAGレーザー第3高調波励起OPO

主に波長 0.5 ~ 0.7 μm の可視域の波長可変光源として有効であり、医療、理科学用途に用いられる。結晶はBBOないしLBOがよく用いられる。

#### 4.8 Ho:YAG(YLF)レーザーによるパラメトリック発振器

波長 2 μm の上記レーザーを励起源として、主に波長 3 ~ 5 μm の赤外光源が構成される。分光の他、レーザーレーダーや軍事応用として主に米国で盛んに開発されているが、今後はバイオ、医療分野への応用も期待される。結晶は、ZnGeP<sub>2</sub>, AgGaSe<sub>2</sub>等の半導体結晶が用いられる。

表1 Nd:YAGレーザーをベースとした波長変換光源の例

	波長変換種類	入射・発生波長の組み合わせ例			
		入射光①	入射光②	発生光①	発生光②
短波長化	第2高調波発生(SHG)	1064		532	—
		947		473	—
	第3高調波発生(THG)	1064	532	355	—
	第4高調波発生(FHG)	532		266	—
	第5高調波発生(FIHG)	1064	266	213	—
	和周波発生(SFG)	213	2100	193	—
長波長化		ポンプ光	シグナル光	シグナル光	アイドラ光
		355	—	410~710	710~2600
	光パラメトリック発振(OPO)	532	—	670~1064	1064~2600
		1064	—	1570~2128	2128~3300
	光パラメトリック増幅(OPA)	1064	3300	3300(増幅)	1570
	差周波発生(DFG)	532	810	1550	—

## 5 まとめ

非線形波長変換による光源について概説した。特に全固体構成の波長変換光源の性能、信頼性は向上し続けており、理科学、産業用ツールとして実用化が進んでいる。今後、更なる信頼性向上、高出力化、短波長化等の研究開発が進むとともに、応用範囲も拡大するものと考えられる。

### How to use coherent light sources by optical frequency conversion

Jun Sakuma

Senior Researcher, Cyber Laser Inc.



サクマ ジュン

所属：サイバーレーザー㈱ 主席研究員

連絡先：〒223-8522 横浜市港北区日吉3-14-1

慶応義塾大学先端科学技術センター14-505

Tel. 045-560-6644 Fax. 045-562-2318

E-mail: sakuma@cyber-laser.com

経歴：東京大学教養学部卒。東芝生産技術研究所、

ウシオ総合技術研究所を経て、現在サイバーレ

ザー㈱主席研究員。固体レーザー、波長変換技術

等の研究開発に従事。趣味はマラソン（最近は時間が無いが）。