

# 高品位な光ファイバー結合を実現した高出力波長変換型全固体レーザーシステム

長 野 強

## High Power Harmonic Conversion Diode Pumped Solid State Laser System Featuring High Quality Fiber Coupling

Tsuyoshi NAGANO

The diode pumped solid state (DPSS) laser system is one of the best light sources with high peak power and a narrow wavelength width; these properties increase harmonic conversion efficiency and widen its possible application in a number of fields. With the advance of technology, the DPSS laser system has now moved from its R&D stage and is being used in industry, where optical fiber beam handling is an increasingly essential feature.

**Key words:** DPSS (diode pumped solid state) laser, harmonic conversion, optical fiber

レーザーダイオードでレーザー媒質を励起し誘導放出によりコヒーレント光を得る全固体レーザーには、レーザー媒質が繊維状のファイバーレーザーと、棒状や円盤状のレーザーがあるが、本稿では後者を、前者と区別して全固体レーザーとよぶ。ファイバーレーザーは堅牢で耐環境性に優れており、普及が進んでいるが、全固体レーザーに比べて非線形光学効果の発生を抑制しなければならず、ピークパワーの高い光が得られない。さらに、原理的に波長幅の狭い光が得られにくいいため、可視光や紫外光に波長変換できる効率が低い。本稿では、われわれの開発した全固体レーザー<sup>1)</sup>を取り上げ、その基本的な技術を紹介するとともに、その射出光の光ファイバー結合について解説する。

### 1. レーザーシステムの比較

レーザーシステムにはさまざまな種類が存在し、それぞれに一長一短がある。代表的なものを表1に示す。金属の溶接や切断など、きわめてハイパワーなレーザー光が求められる用途にはCO<sub>2</sub>レーザーが用いられるが、精緻で微細な加工が求められる場合にはYAGレーザーが用いられる。近年、ファイバーレーザーのハイパワー化が進み、現

在では、ランニングコストなどの優位性からYAGレーザーの置き換えが進んでいる。レーザーダイオードの射出する光でレーザー媒質を励起する代わりに、そのままワークを加工するシステムも現れてきているが、光線を束ねる技術が難しく、発展の途上にある。

本稿で全固体レーザーとよぶレーザーシステムは、表1ではYAGレーザーもしくはYAG高調波レーザーになるが、ファイバーレーザーが強力なライバルである。しかし、ファイバーレーザーでは原理的に、光ファイバーの非線形光学効果により高いピークパワーが得られない。また、波長変換できるように波長幅を狭めると、高いパワーが得られない。

### 2. 全固体レーザーの構造

#### 2.1 基本波タイプの全固体レーザー

全固体レーザーでは、従来のランプの代わりにレーザーダイオードを用いてレーザー媒質を励起する。レーザー媒質に励起光を照射する“集光器”の例を図1に示す。この集光器では、中央に配置されたレーザー媒質の周囲に9本のレーザーダイオードバーが放射状に配置され、レーザー

表1 レーザーシステムの比較.

	波長	レーザー媒質	パワーレンジ	発振効率	メリット
CO <sub>2</sub> レーザー	10.6 μm	気体 (CO <sub>2</sub> -N <sub>2</sub> -He 混合ガス)	500 W ~ 45 kW	10%~20%	高出力化容易
YAGレーザー	1064 nm	固体 (Nd <sup>3+</sup> :Y <sub>3</sub> Al <sub>5</sub> O <sub>12</sub> ガーネット等)	50 W ~ 12 kW	1%~4% (ランプ励起) 10%~20% (LD 励起)	光ファイバー伝送可 分岐容易
YAG高調波レーザー	第2: 532 nm 第3: 355 nm	YAGレーザーに 同じ	数 W ~ 数百 W	数%	光ファイバー伝送可 金属吸収性大 光化学反応可
レーザーダイオード	950 nm ~ 800 nm	固体 (Al(In)GaAs, InGaAsP 等)	10 W ~ 10 kW	30%~60%	高効率
ファイバーレーザー	1090 nm 1050 nm	ファイバー (Yb <sup>3+</sup> :SiO <sub>2</sub> 等)	100 W ~ 20 kW	20%~30%	光ファイバー伝送可 高効率

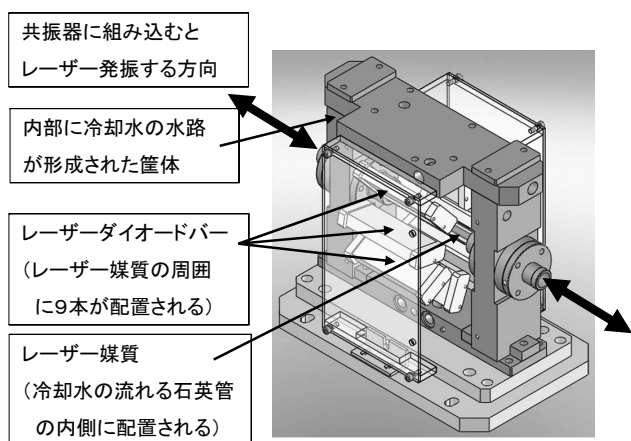


図1 集光器の例.

媒質はレーザーダイオードバーの放射する光子エネルギーの高い光で側面から励起される。レーザー媒質の両端面から放射された光子エネルギーの低い光(蛍光)は、集光器を挟むように配置された図示しない2枚のミラーの間を往復する間に誘導放出により増幅され、コヒーレントな光として発振する。

レーザー媒質としてはYAGやYLF, YVO<sub>4</sub>などが使われるが、所望のレーザー光のパワーや変換効率、パルス発振させた場合の繰り返し周波数の大小で、適切なものが選ばれる。NdがドーピングされたYAGの場合には、波長809 nmの光で励起することで、波長1064 nmのレーザー光が得られる。レーザーダイオードバーは、AlGaAs半導体をヒートシンクで挟んだ20 Wのアレイレーザーダイオードが6個で構成される。

励起されたレーザー媒質を2枚のミラーで挟むと、連続的にレーザー発振(CW発振)するようになるが、高いピークパワーを得るためには、共振器の損失を一時的に増

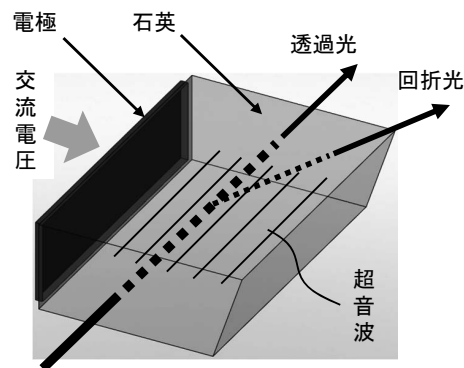


図2 Qスイッチの模式図.

加させることで誘導放出を抑制し、レーザー媒質にエネルギーが蓄積されたところで一気に損失を低下する、という過程を繰り返し、パルス発振させる必要がある。この制御には、例えば、音響光学効果を利用したQスイッチが使われる。Qスイッチの模式図を図2に示す。石英の端面に形成した電極に数十MHzの交流電圧を印加すると、石英の内部に超音波が伝搬し、ボリュームグレーティングが形成され透過率が低下するが、反対に交流電圧を遮断すれば、ボリュームグレーティングが消滅し、瞬時に透過率が回復する。

## 2.2 高調波タイプの全固体レーザー

### 2.2.1 波長変換の方法

一般的な誘電体は、入射面から射出面に向けて順次、電気双極子が光の電界と同じ周波数で振動していくことで、入射された光と同じ波長の光を射出する。ところが、非線形光学結晶とよばれる誘電体は電気双極子で振動が歪み、分極Pが電界Eに比例しないため、入射光とは異なる波長の光を発生させる。しかし実際には、この電気双極子で発生したさまざまな波長の光の大半は、射出面に向けて伝

搬する間に打ち消し合い、熱に変わる。分極  $P$  を電界  $E$  で級数展開すると、

$$P = \epsilon_0 \chi^{(1)} E + \epsilon_0 \chi^{(2)} E E + \epsilon_0 \chi^{(3)} E E E + \dots \quad (1)$$

と書ける<sup>2)</sup>。ここで、 $\epsilon_0$  は真空中の誘電率であり、 $\chi^{(1)}$ 、 $\chi^{(2)}$ 、 $\chi^{(3)}$ … は各次数の効果を表す非線形感受率である。非線形感受率は非線形光学結晶の方位ごとに異なる値を呈し、テンソルで表される。電界  $E$  もテンソルで表し、両者を乗算すると、方位ごとの分極  $P$  がテンソルで求められる。電気双極子で発生したさまざまな波長の光を有意なパワーで射出させるためには、大きな非線形効果が得られる向きに入射光の偏光を向けることはもちろん、電気双極子で発生した光が打ち消し合わないよう、位相を整合せなければならない。屈折率は多くの場合、波長が短いほど高いため、基本波に比べて高調波では位相が遅れてしまうが、非線形光学結晶は多くの場合屈折率が等方ではなく、光学軸に対して適切な角度で基本波を伝搬させることで、高調波の位相と整合させることができる。

高調波のパワーは、基本波のパワーのべき乗に比例し、より集光することでより高い変換効率が得られるため、非線形光学結晶には高い耐光性が望まれる。また、基本波の波長幅が広いと、中心波長から外れた波長では位相の整合が取れなくなり、トータルの変換効率が低くなるので、基本波には狭い波長幅が求められる。

基本波の光子 2 個から第二次高調波 (second harmonic generation; SHG) の光子 1 個を得る波長変換以外に、基本波の光子 3 個から第三次高調波 (third harmonic generation; THG) の光子 1 個を得る波長変換、基本波の光子 1 個と SHG の光子 1 個から THG の光子 1 個を得る波長変換などが可能であるが、 $\chi^{(3)}$  は  $\chi^{(2)}$  よりも相当に小さく、THG は工業的には基本波と SHG の合成で得ている例が多い。一般的な波長変換の方法を図 3 に示す。波長 1064 nm の基本波には、大きな二次の非線形性を有する LBO (LiB<sub>3</sub>O<sub>5</sub>) 結晶が好適で、SHG の波長変換にも THG の波長変換に

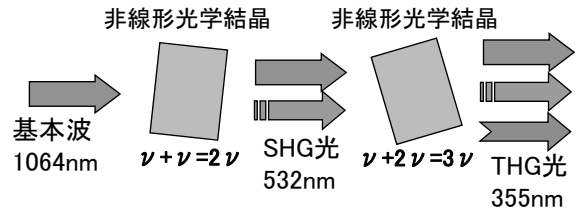


図3 一般的な波長変換の方法。

も、結晶の角度を変えることで利用できる。ただ実際には、端面に直角に入出射できるように波長変換の種類ごとに結晶の切り出し角を変え、また反射防止コーティングも、前者には二波長コーティング、後者には三波長コーティングをそれぞれ施す。

### 2.2.2 波長変換を実現する光学系

全固体レーザーの SHG タイプの光学系を図 4 に示す。エンドミラーと 2 波長ミラーで左右の端面を挟んだ YAG ロッドを、図示しないレーザーダイオードバーで側面から励起することで、基本波を発振させる。YAG ロッドの左右に配置された Q スイッチは、例えば 8 kHz でオンとオフを繰り返すことで、基本波をパルス発振させる。左右の Q スイッチは、光軸周りに互いに直交した角度で固定されており、左側は水平方向に、右側は垂直方向に超音波が伝搬する。Q スイッチを 2 つ設けることで、オンとオフのときの共振器の利得の差が倍増する。

YAG ロッドに照射された励起光のほとんどは熱に変わり、基本波として取り出せる割合はたかだか 20% 程度であるが、熱は YAG ロッドの屈折率分布をロッドレンズのように変化させ、YAG ロッドの励起とともに基本波のビームウエストを前後させる。安定した発振を実現するため、エンドミラーや二波長ミラーに節を、YAG ロッドに腹をもつモードが立つようにレンズを配置する。SHG レーザーでも THG レーザーでも、LBO 結晶はモードの腹になる位置に配置するが、それは過度な集光によるダメージを防ぐためである。発生した高調波は分離ミラーで共振

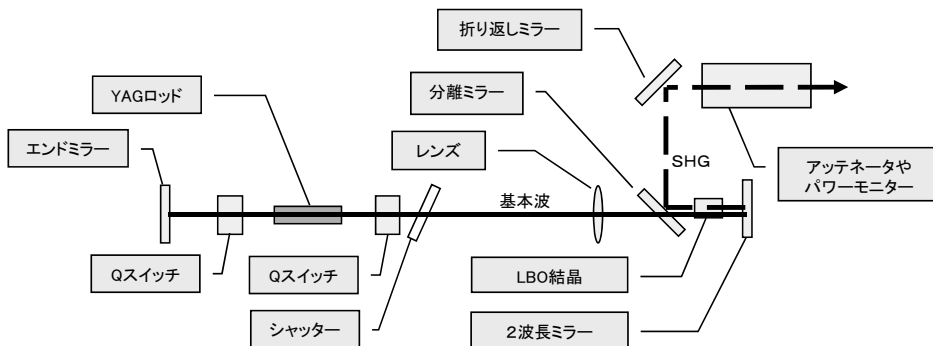


図4 全固体レーザーの SHG タイプの光学系。

表2 全固体レーザーの仕様の例.

	基本波	SHG	THG
発振波長 (nm)	1064	532	355
繰り返し周波数 (kHz)	5 ~ 50	5 ~ 20	6 ~ 15
アベレージパワー (W)	400 220	110	50
パルス幅 (ns)	70 ± 30		
M <sup>2</sup> 値	≤ 30	≤ 40	

器から取り出され、アッテネーターやパワーモニターに至る。

### 3. 全固体レーザーの特性

われわれの開発した全固体レーザーの仕様を表2に示し、光ファイバー結合器を取り付けたSHGタイプの全固体レーザーの写真を図5に示す。レーザーヘッドを中心に、右側にはコントローラーが、左側にはチラーが設置されている。コントローラーは、レーザーダイオードバーには駆動電流を、QスイッチにはRF電力を供給してチラーの動作を監視しており、チラーの異常を検知するとただちにレーザーヘッドの動作を停止させる。チラーは、ヒートシンクを擁したレーザーダイオードバーやQスイッチのみならず、YAGロッドにも冷却水を供給する。水で直接冷却するYAGロッドの汚れを防ぐため、冷却水には電気伝導率の低い純水を使う。図6にパワーと繰り返し周波数の関係を示す。全固体レーザーによれば、ファイバーレーザーでは比較にならないような高いピークパワーの光が得られる。

### 4. 全固体レーザーの光ファイバー結合

光の集光性を表す指標として、M<sup>2</sup>値とよばれる値がある。

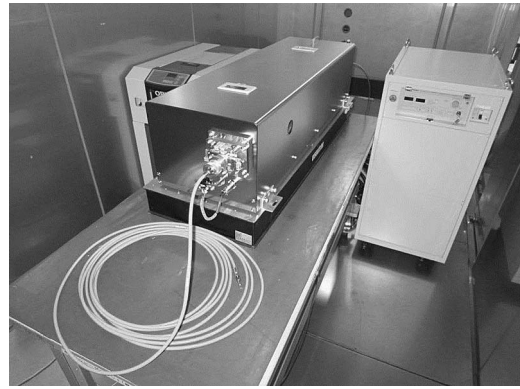


図5 SHGタイプの全固体レーザー.

$$2\lambda M^2 = \pi\Phi\theta \quad (2)$$

ここで、 $\lambda$ は波長 (nm)、 $\Phi$ はビームウエスト直径 ( $\mu\text{m}$ )、 $\theta$ は収束半角 (mrad)である。われわれの開発した全固体レーザーにおけるM<sup>2</sup>値とアベレージパワーの関係を図7に示す。SHGレーザーの場合、アベレージパワーが110Wの条件では、M<sup>2</sup>値は27になる。ゆえに、例えばコアが175  $\mu\text{m}$ 角の光ファイバーに結合させるためには、マージンなしにコアと同じサイズにビームに集光する場合でも、収束半角は53 mrad以上が必要になる。

M<sup>2</sup>値が16のSHGの光をコアが175  $\mu\text{m}$ 角の光ファイバーに結合させたときの透過率、ならびに射出NAと入射NAの関係を図8に示す。アパーチャーなどでビームの外周を遮ると、ビームプロファイルにおいてメインローブの外側にサイドローブが立ち、纯粹に入射NAだけを変化させたことにならないため、ここではさまざまな焦点距離のレンズを使用することで入射NAを変化させた。入射NAを減少させていくとコアに集光しきれなくなり、逆に入射NAを増加させていくとコアとクラッドの界面で全反射し

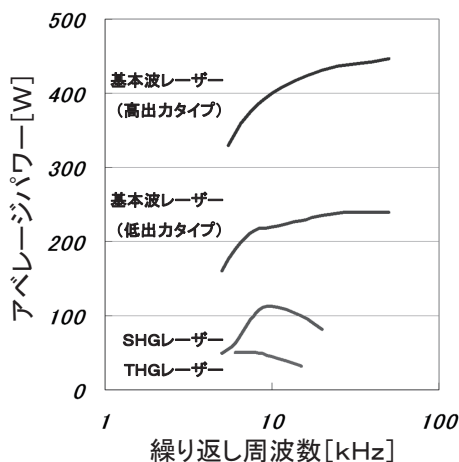
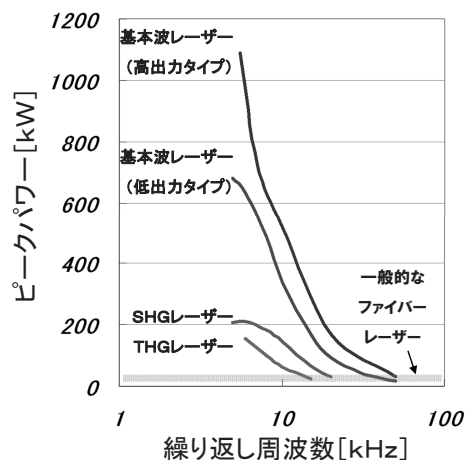


図6 パワーと繰り返し周波数の関係.





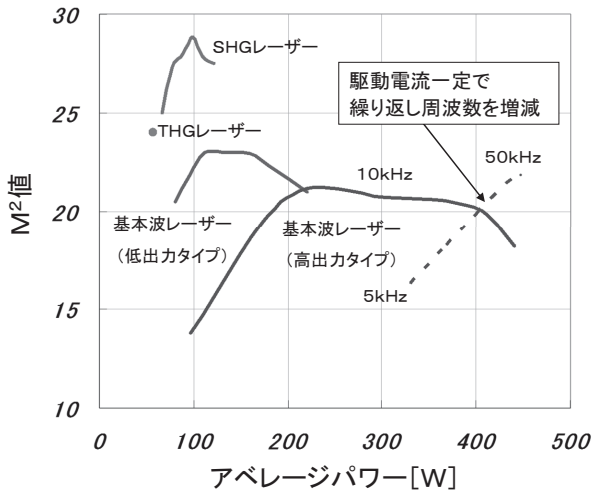


図7 M<sup>2</sup>値とアベレージパワーの関係。

にくくなるため、光ファイバーに結合させられる入射 NA の範囲は 0.035~0.070 の範囲に限られる。

光ファイバーの NA は、マルチモードファイバーの場合にはコアとクラッドの屈折率の比だけで決まり、さらにハイパワー用ファイバーの場合、コアには純粋な合成石英、クラッドにはドーピングした合成石英がそれぞれ用いられるため、ドーピングの濃度だけで決まる。本来なら、光ファイバーの NA が大きければそれだけ全反射を満たす角度の範囲が広いはずで、小さな NA の光ファイバーよりも、許容される入射 NA の範囲は大きくなるはずであるが、この測定の結果ではそうではなく、ドーピングの濃度以外にも適正な入射 NA を決める要因が存在していると考えられる。また、光ファイバーを伝送するとコアとクラッドの界面で多重反射を繰り返す、射出するときには光ファイバーの NA の全域に NA が広がりそうなものであるが、

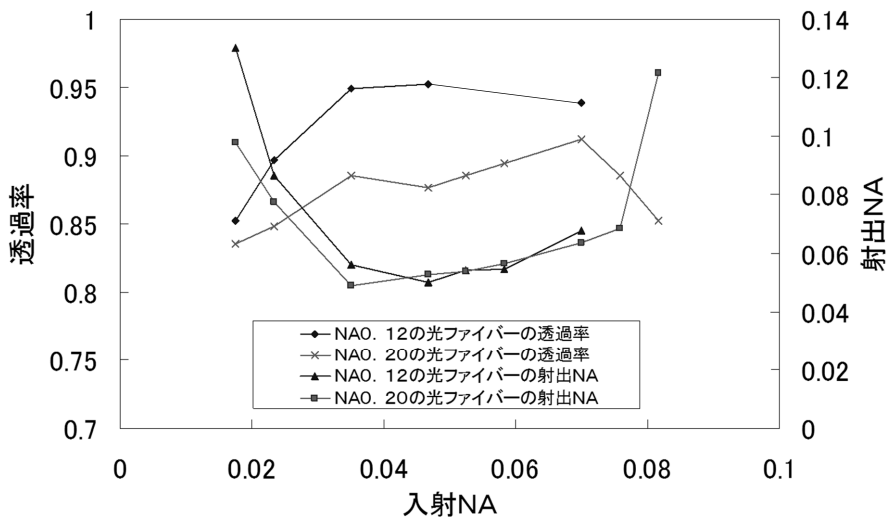


図8 透過率ならびに射出 NA と入射 NA の関係。

レーザー加工装置で用いる長さが数メートルの光ファイバーでは、射出 NA は入射 NA に比例している。

M<sup>2</sup> 値を減少させることで光ファイバーに結合させられる入射 NA の範囲は拡大するが、光ファイバーの射出光に発生する“スペックル”は増加する。波長が 1 μm の種々のレーザーシステムを用意し、コアが 350 μm 角の光ファイバーに入射させ、光ファイバーの射出光のビームプロファイルを観測した。図9に M<sup>2</sup> 値とスペックルの関係を示す。M<sup>2</sup> 値が大きくなるほど、スペックルは小さくなる。用途にもよるが、トップハットビームにパワー密度の平坦性を求める用途では、M<sup>2</sup> 値として 25 前後が適当であると考えている。

スペックルの大小は、M<sup>2</sup> 値のみならず、波長や光ファイバーのコアのサイズにも依存する。M<sup>2</sup> 値が 25 前後のレーザー光を光ファイバーに導波させることで得たビームプロファイルを図10に示す。同じ 350 μm 角のコアを導波

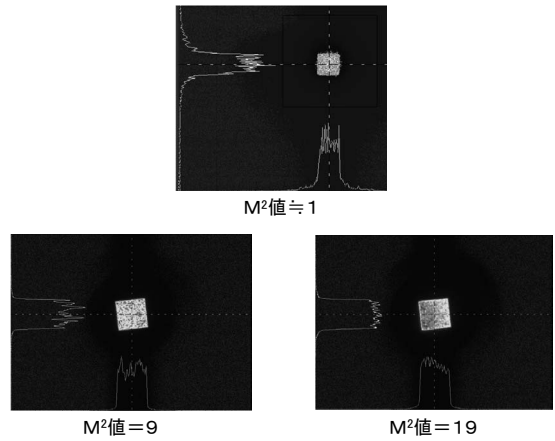


図9 M<sup>2</sup> 値とスペックルの関係。

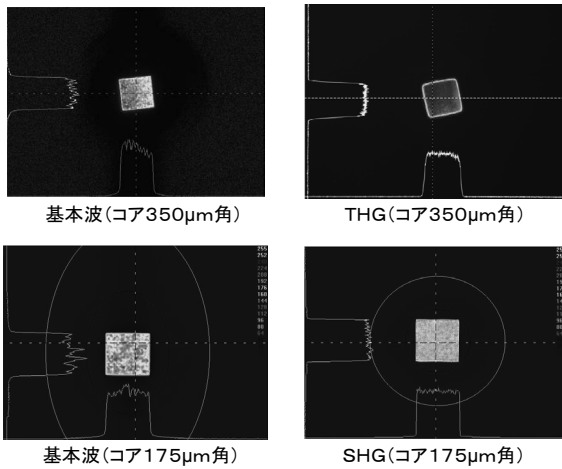


図10 波長やコアサイズとスペックルの関係。

させても、THG では基本波に比べて明らかにスペックルが減少し、また、同じ基本波を導波させても、175 μm 角のコアでは 350 μm 角のコアに比べて明らかにスペックルが増加している。

NA 0.06 で入射させれば、光ファイバーを経ても、NA はほとんど変わらない。ゆえに、収束半角 60 mrad で集光したときに得られるビームスポットより、ひとまわり大きなコアの光ファイバーを伝送させれば、伝送の前後で  $M^2$  値はほとんど変わらない。したがって、要求仕様に対して光ファイバーを射出した光に観測されたスペックルが過大であれば、要求仕様を満足するまで全固体レーザーの  $M^2$  値を増加させ、それに伴いコアを拡大させるというプロセスを繰り返すことで、最適なレーザーシステムを構築できる。

## 5. 全固体レーザーの耐環境性

全固体レーザーの用途が理化学用途から工業用途に移り変わるにつれ、設置される環境も、当初のクリーンルームから一般的な生産現場に変わりつつある。高度に管理されていた環境が夏と冬で激しく変化する環境に変わることを想定し、環境温度変化に対する耐性を評価した。

38°C ~ 12°C の間で 2 回、40°C ~ 5°C の間で 2 回、環境温度を変化させた結果を図 11 に示す。温度の高い領域でも、安定度は 2% を超えていない。40°C で 2 時間、最大光出力で稼働させ、全固体レーザーが最高温度に到達したところで電源を落として再始動させ、さらに、電源を落とし

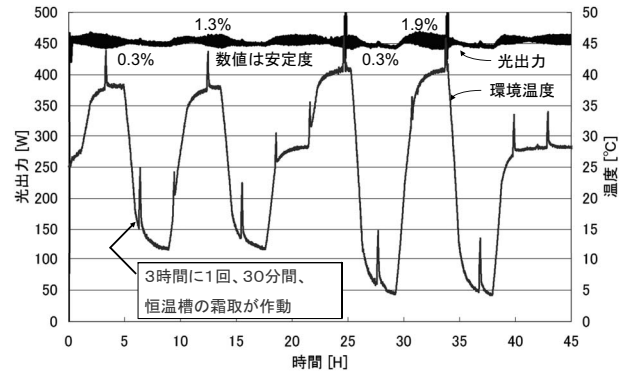


図11 基本波レーザーの温度サイクル試験の結果。

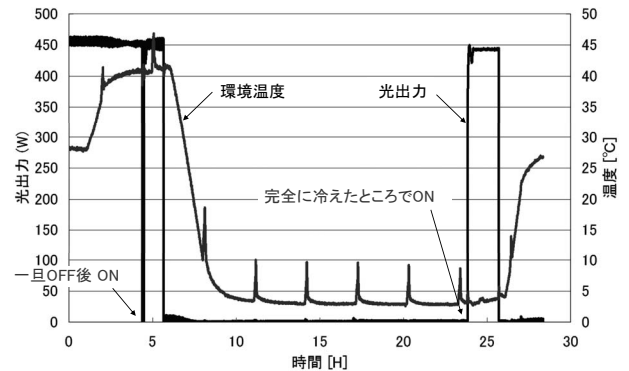


図12 基本波レーザーの高低温スタート試験の結果。

た状態で 3°C で 12 時間放置し、全固体レーザーが最低温度に到達したところで再始動させた結果を図 12 に示す。支障なく動作することが確認できた。

全固体レーザーは、短波長化や高出力化が積極的に進められてきた。しかしながら、産業界で生産ツールとして使われるようになるにつれ、使い勝手のよさが当たり前のこととして求められるようになってきている。本稿では、われわれの開発した全固体レーザーについて、その基本的な技術を紹介するとともに、その射出光の光ファイバー結合について解説した。

## 文 献

- 1) 森田浩之：“200 W 超級 SHG 発振器と加工応用”，レーザー研究, **34** (2006) 636-639.
- 2) 小山次郎, 西原 浩：光波電子工学, 初版 (コロナ社, 1989) pp. 286-293.

(2012 年 7 月 5 日受理)