

< 1 > 超高密度光子利用実証レーザーシステムの開発

< 1 - 1 > LD を用いた高強度フェムト秒レーザーの開発

サブテーマリーダー：光科学技術研究振興財団 コア研究室 研究リーダー 岡田康光

< 1 - 1 - a > YAG レーザーの開発

小テーマ： 微細加工レーザー装置の開発 (フェーズ)

研究従事者：光科学技術研究振興財団 コア研究室 研究員 松岡伸一、中野文彦、玉置善紀、
瀧口義浩、稲田晴彦

(1) 研究の概要、新規性及び目標

研究の概要

半導体レーザー励起微細加工用 Nd:YAG レーザーの開発を行った。レーザー加工を行う為に必要なビーム品質の向上、第 2 高調波 (波長 : 532nm) の高出力化及びビーム強度の安定化を目的とした。

研究の独自性・新規性

ビーム品質向上化・ビーム強度安定化の為に、共振器長安定化も可能とする光学定盤貼り付け型温度モニター付きヒーターの開発を新規導入すると共に、レーザー媒質の YAG ロッドの水冷却時に発生する振動を低減する効果のある新方式の冷却フランジの開発。

研究の目標

フェーズ : 第 2 高調波 (波長 : 532nm) 出力 10W 以上、パルス幅 (全値半幅) 30ns 以下、長期出力安定性 $\pm 2.0\%$ rms 以内、ビーム品質 (M^2 値) 2 以下。

(2) 研究の進め方及び進捗状況

1 . LD 励起 YAG レーザー構築

1 . 1 . はじめに

LD (Laser Diode) 励起微細加工用 Nd:YAG レーザー (以後、YAG レーザーと称す) の開発を行った。Nd:YAG はイットリウムアルミニウムガーネット ($YAG=Y_3Al_5O_{12}$) 中に不純物として 3 価のネオジウムイオン (Nd^{3+}) を含む結晶である。レーザー遷移は室温において $\lambda = 1.0641 \mu m$ において起こる。

開発したレーザーは、ビーム品質の向上、第 2 高調波 (波長 : 532nm) の高出力化及びビーム強度の安定化を目的としている。これらの開発目標を達成するためには種々条件で実験を行う必要がある。そのためには、光学テーブル (NEWPORT 社製) 上に直接レーザーシステムを配置し、ビーム品質等を評価する必要があると考えられる。

1 . 2 . CW 発振器準備

レーザーを発振するには H.R. (High Reflector) および O.C. (Output Coupler) で Cavity を構成する必要がある。そこで Cavity のアライメントに He-Ne Laser (NEC 社製) を用いた。構成を図 1 に示す。YAG ロッドを設置するセンターライン上にピンホール 1, 2 (Iris、THORLABS 社製、TR25/M) を 2 個設置する。そのピンホール 1, 2 を見ながら He-Ne Laser のビーム光を Silver Mirror (CVI 社製 図中 M1, 2 で表記) で調整する。

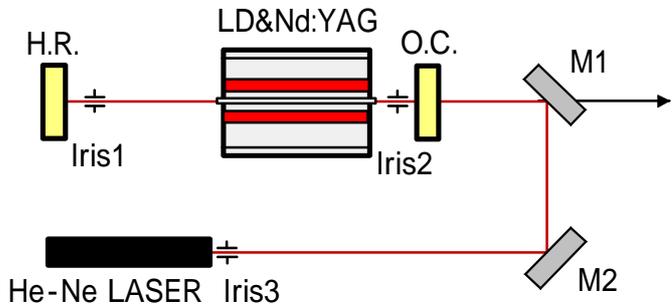


図 1 CW 発振器構成図

Cavity 内で YAG ロッドに入射する光は、寄生発振を防ぐために任意の角度で傾ける必要がある。そこで、He-Ne Laser 出射口付近にピンホール 3 を設置した。YAG ロッド端面からの反射光

を IRIS 面上で確認し、任意の角度になるように M1,2 を動かした。その際、YAG ロッドにレーザー光が正確に入射していることも確認した。入射角度の計算は、あらかじめ YAG ロッド端面からピンホール 3 までの距離を算出した。

また、O.C. は %R = 70 で、H.R. は R = -50mm で行った。YAG ロッド端面からの距離は、それぞれ、30mm および 130mm とした。

1.3. CW 発振最適化実験

チラー冷却水を循環し、LD の電流を上げていったところ、約 22A で発振が認められた。出力パワーはパワーメーター (Molectron 社製 EPM1000) で計測した。出力が微弱だった為、LD の蛍光分布および O.C. の反射率の最適化を行った。それぞれの電流および LD 出力と発振出力を表 1 に示す。LD 出力は 3 つの LD の検査結果グラフより傾きを考慮して算出した。P_{LD} は全 LD 出力、I_{IN} は入力電流を表す。

$$P_{LD} = 22.222 \times I_{IN} - 250.731$$

表 1 LD 入力に対する CW 出力

電流値(A)	LD出力(W)	CW出力(W)		
使用したOutput Coupler、YAGドープ率 (%)		R=60%(LASER COMPONENTS 社)、ウェッジ角 = Flat、Nd:0.8%dope	R=60%(CVI社)、ウェッジ角 = Flat、Nd:1.0%dope	R=70%(CVI社)、ウェッジ角 = Flat、Nd:1.0%dope
電流値(A)	LD出力(W)			
24.0	282.6		20.3	15.9
24.5	293.7		23.9	22.1
25.0	304.8		29.7	28.8
25.5	315.9		29.0	33.0
26.0	327.0	14.2	31.6	38.5
26.5	338.2		37.5	42.9
26.7	342.6		39.1	39.6
26.9	347.0		40.7	36.4
27.0	349.3	25.9		
27.1	351.5			39.8
27.3	355.9			41.4
27.5	360.4	29.6		45.2
27.7	364.8			49.9
27.9	369.3			53.0
28.0	371.5	32.2		
28.2	375.9			56.0
28.5	382.6	32.7		
29.0	393.7	31.9		
29.5	404.8	34.5		
30.0	415.9	38.5		
30.3	422.6	39.5		
30.5	427.0	40.2		

1.4. まとめ

LD 入力に対する出力の関係が、用いる Output Coupler(O.C.)の反射率により異なることが、表 1 より分かった。発振安定性、レーザー出力に対する LD 投入電力効率から、反射率 = 70%・ウェッジ角 = 0° の O.C. を採用し、レーザー媒質として Nd ドープ率 = 1.0% の YAG ロッドを用いることにした。

2. パルス発振器における基本波の安定性

2.1. はじめに

前節で得られた結果をもとに、パルス発振するための更なる位置安定性を得るために共振器を構成する光学部品を調整した。安定性を得るパラメータとして着目した、O.C.のYAG ロッドからの設置距離、光軸安定性用のピンホール設置場所及び、YAG ロッド冷却方式の変更を実験しデータとして取得した。

2.2. YAG ロッド端面からアウトプットカプラー間距離の最適化

YAG ロッド端面から O.C. までの距離を微調整すると、出力光強度の安定性に影響が出ることが実験的に確認されていたので設置場所を変更することで強度安定性およびビーム位置安定性にどのような影響を及ぼすのか実験を行った。下図 2 に測定実験系を示し、YAG ロッド～O.C. 間長さを 120mm、90mm、60mm、30mm とした時のビーム位置安定性の測定結果を図 3 から図 6 に示す。各仕様は、R.M.: r=-50mm(CVI 社製)、O.C.: R=70%、Wedge=30' (CVI 社製)。

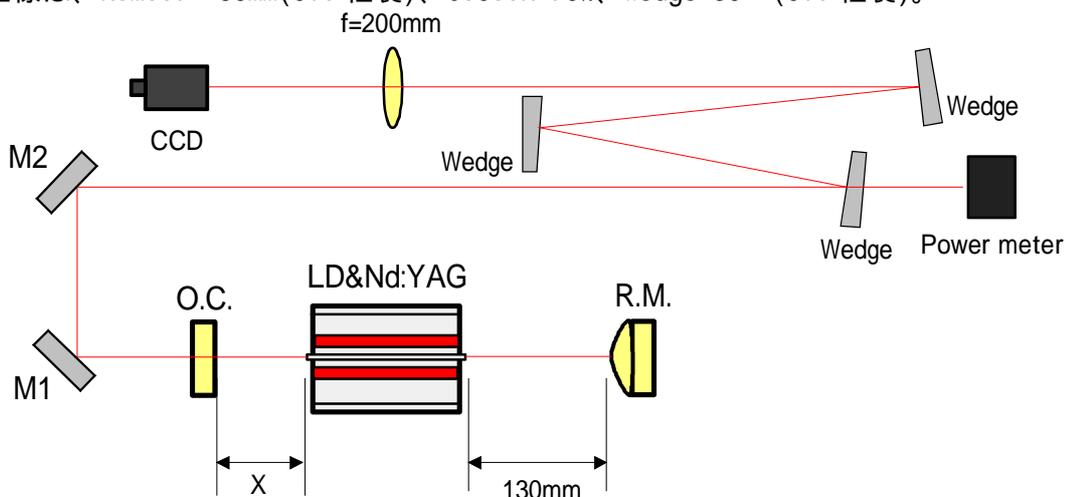


図 2 ビーム位置安定性測定実験系

規格化ピークレスポンスは、CCD カメラ (WATEC 社製、WAT-902A) で観測されたレーザー光をビームビューアナライザ (Coherent 社製) で処理を行いピーク強度分布の平均値を 1 として、その値からどれだけ動いているかパソコンで読み込み、読み込み点数で下記のように計算を行う。

$$\text{規格化ピークレスポンス} = (\text{取り込み画像ごとのピーク強度} \div \text{読み込み点数}) - \text{取り込み画像ごとのピーク強度}$$

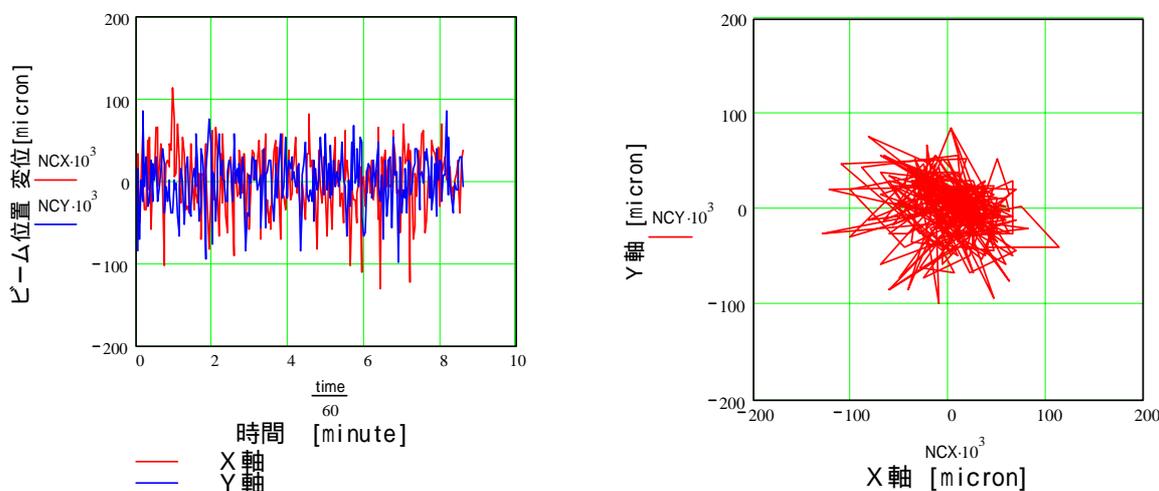


図 3 X=120mm でのビーム位置安定性

(ビーム直径の平均値: X=3.08[mm], Y=3.261[mm] ビーム位置変動: X=1.275[rms%], Y=0.973[rms%] ピークレスポンス = ±9.539%)

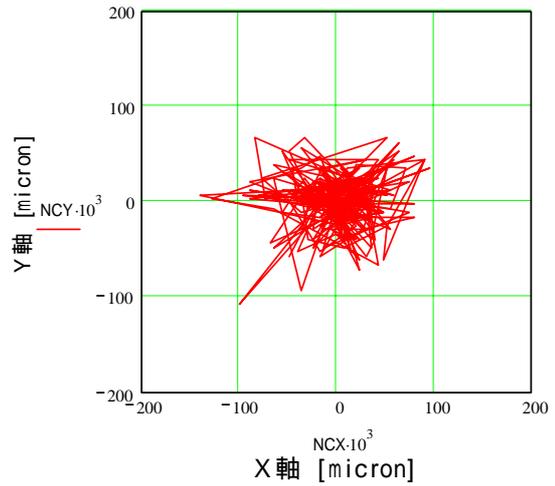
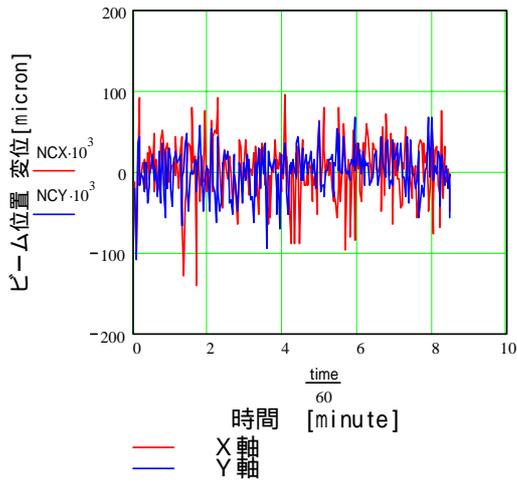


図4 X=90mmでのビーム位置安定性
 (ビーム直径の平均値 : X=3.099[mm], Y=3.278[mm] ビーム位置変動 :
 X=1.181[rms%], Y=0.818[rms%] ピークレスポンス = ±10.208%)

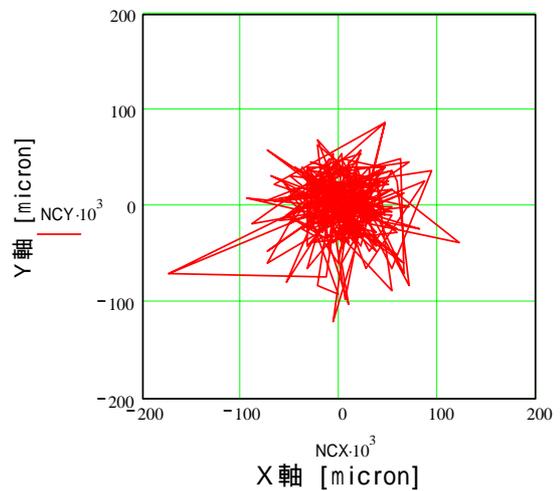
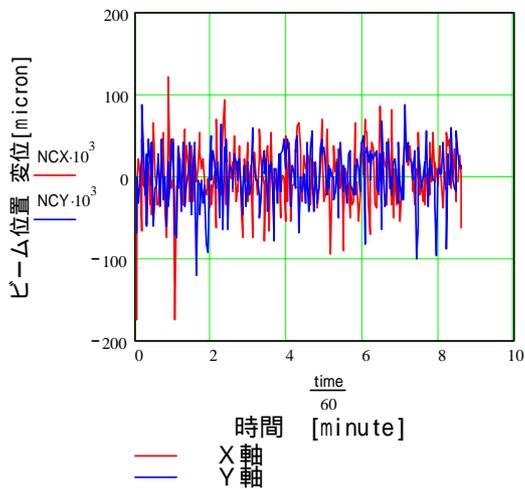


図5 X=60mmでのビーム位置安定性
 (ビーム直径の平均値 : X=3.242[mm], Y=3.502[mm] ビーム位置変動 :
 X=1.139[rms%], Y=0.967[rms%] ピークレスポンス = 6.819%)

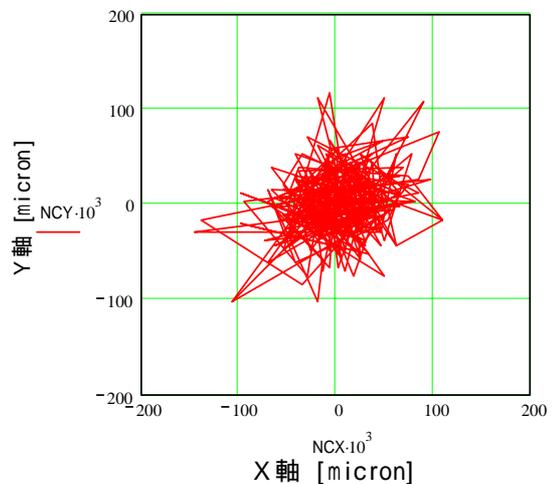
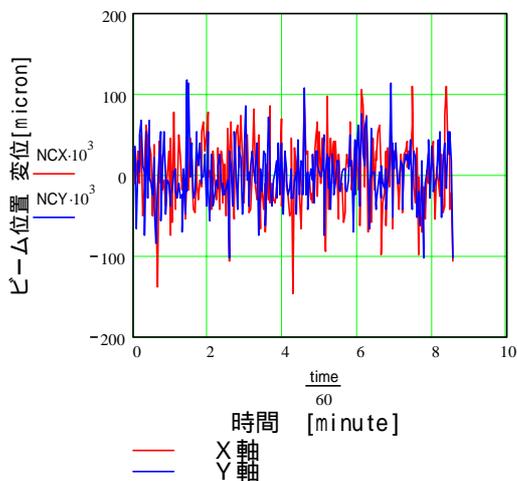


図6 X=30mmでのビーム位置安定性
 (ビーム直径の平均値 : X=3.179[mm], Y=3.439[mm] ビーム位置変動 :
 X=1.336[rms%], Y=1.056[rms%] ピークレスポンス = ±8.74%)

以上の結果より、ビームの位置変動及びピークレスポンスが最も小さい、O.C.から YAG ロッド端面間長さが 60mm を共振器構成として採用することにする。

2.3. ピンホール設置とビームばらつきとの関係

前節までの測定に於いてレーザー光のビームパターンをビームビューアで確認していたところ、ピーク強度に変動が多数見受けられたので、ピンホールを設置し改善を試みた。設置場所は R.M.の手前 14mm の場所で測定実験系は図 2 を用いた。このピンホール設置により主にレーザー光の横モードの不安定発振の除去が、ビームばらつきの低減につながることを期待した。実験結果は図 7a から図 7c に示した。

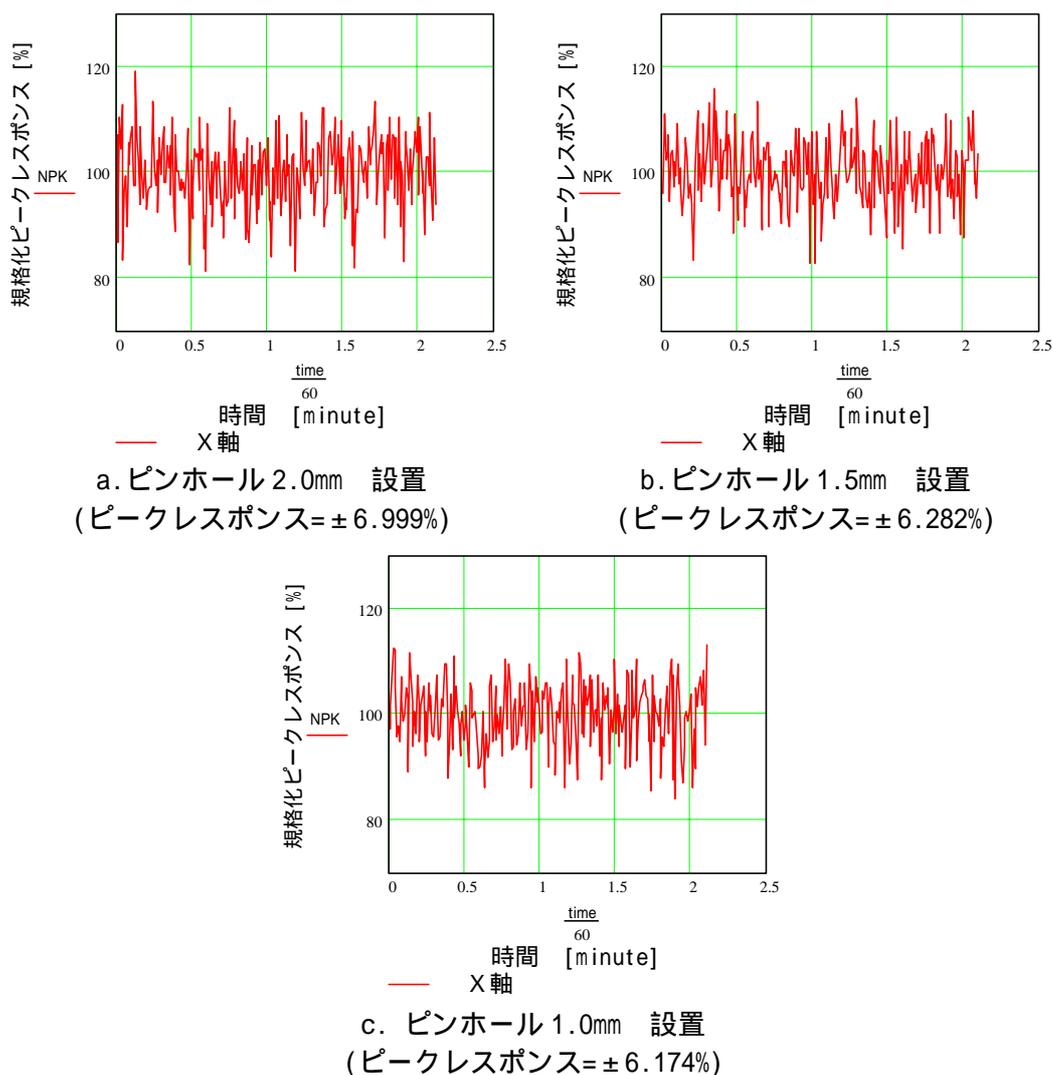


図7 ピンホール設置によるビームばらつきの低減結果

以上の結果から、ピンホールの設置位置を変えることなく、ピンホール径の大きさを变えることでビームのばらつきが低減した。ピンホール径が 2.0mm の時は、ピークレスポンスが 7% 近くあったものが、半分の径のピンホール径 1.0mm にすると、±6.174%となった。これは明らかに、ピンホール設置が安定発振に寄与していると思われる。

2.4. YAG ロッド新冷却方式とビーム出力強度安定性の関係

この節では、YAG ロッドの冷却方式の違いによる発振安定性の違いを説明する。現在、YAG ロッドの冷却方法として、水を循環させる方法を採用している。しかし、水が循環する際、Nd:YAG ロッドに振動を与え、レーザー発振の不安定性を引き起こしていると考えられる。そこで、

Nd:YAG ロッドに直接振動を与えない構造の冷却ジャケット(スパイラル冷却方式)を試作し、従来型との比較実験を行った。比較実験のレーザーは、発振波長が 1064nm のパルス発振である。ビーム強度安定性は、ビームビューアナライザ (Coherent 社) を用いて測定を行った。図 8 に従来型冷却方式、図 9 にスパイラル冷却方式での実験結果を示す。

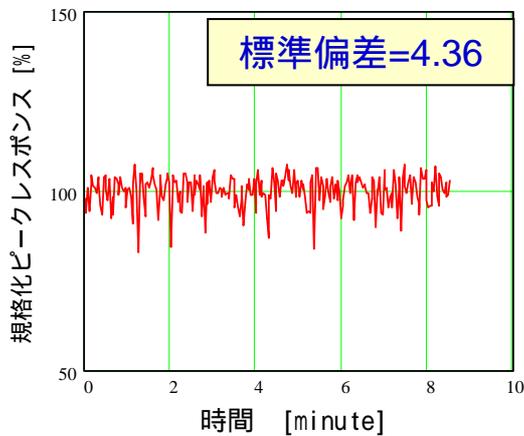


図 8 従来方式のピーク強度安定性

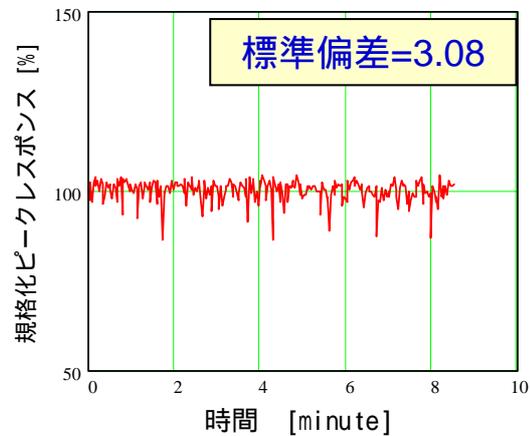


図 9 スパイラル冷却方式のピーク強度安定性

次に、ビーム出射位置から約 1.5m の地点でビーム位置安定性を測定した。測定は、ビームビューアナライザで行い、2 秒間隔 256 点の測定を行った。ビームパターン位置は、面積中心で評価した。ここで表記する位置変動とは、ビーム径に対するビーム位置変動を示す。図 10 に従来型冷却方式、図 11 にスパイラル冷却方式の安定性を示す。

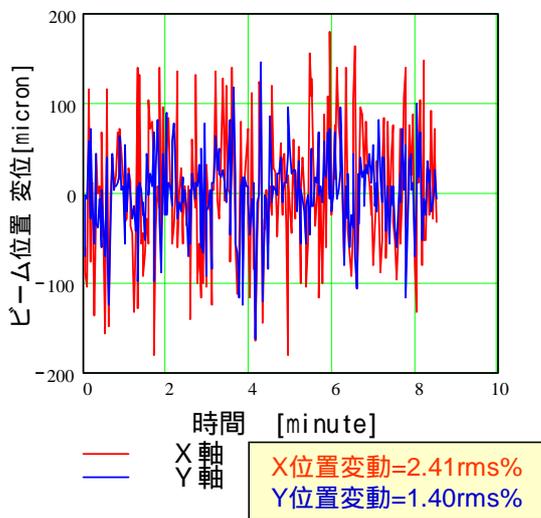


図 10 従来方式の位置安定性

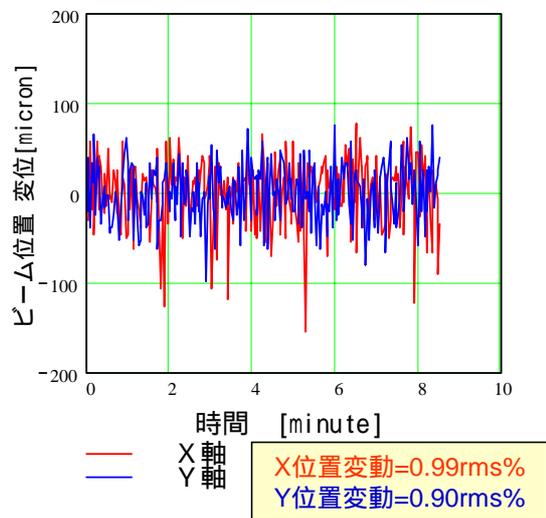


図 11 スパイラル冷却方式の位置安定性

現在までに開発したレーザーのパルス波形は、パルス波高値に不安定が確認できる。パルスの波高値はビーム強度の不安定性に相関があるため、パルス波形の安定性を評価した。測定は、デジタルオシロスコープ (Sony Tektronix 社製) を用いた。表 2 に従来型のパルス波形、表 3 にスパイラル冷却のパルス波形を示す。Peak to Peak の値は、100mV に対しての値で評価した値である。

表2 従来方式のパルス波形安定性

出力	27.3W
パルス幅	27ns
パルス幅 値	1.4 ~ 1.5ns
PK to PK 値	5.3 ~ 8.0mV

表3 スパイラル冷却方式のパルス波形安定性

出力	31.3W
パルス幅	30ns
パルス幅 値	1.3 ~ 1.4ns
PK to PK 値	3.6 ~ 4.0mV

2.5. まとめ

本節では、主に基本波 1064nm をパルス動作させたときの発振安定性の開発についての説明を記載した。まず、共振器の基本構成であるアウトプットカプラー(Output Coupler:O.C.)の設置場所を、位置安定性の測定結果からレーザー媒質である Nd:YAG ロッド端面から、60mm とした。また、ビームのばらつきを低減させるためにピンホール設置場所を、共振器構成から比較的設置に余裕のあるリアミラー(Rear Mirror:R.M.)側に設置し、ビームビューアナライザーで光出力強度の変化を測定して用いるピンホール径の大きさを選定した結果、ピンホール径 = 1.0mm を用いることとした。最後に、従来型の冷却方式からスパイラル冷却方式に変更することにより、ビーム強度安定性、ビーム位置安定性、パルス波形の安定性を改善することに成功した。これらの結果から、このスパイラル冷却方式は安定性に有効な冷却方式だと考えられる。

3. 第2高調波(波長 532nm)発生の最適化

3.1. はじめに

本章においては、第2高調波発生の安定化のために用いたフィルムヒーターの安定発振に与える影響とピンホールを設置したときの光出力強度の安定化及び、微細加工用 Nd:YAG レーザーとしての信頼性試験の結果を示した。ここで第2高調波発生の仕組みを抑えておくことにする。まず、今まで行ってきた 1064nm の基本波を、波長変換結晶を用いて2倍高調波へ変換しなければならない。なぜなら金属加工を例に挙げると、金属は短波長側と長波長側では光吸収効率が異なり熱加工においては吸収効率の良い短波長のレーザー光を用いることが多いからである。現在一般的に用いられている波長変換結晶は、LBO, KTP, KD*P, BBO 等がある。高調波発生の原理は、以下の通りである。もし、マクスウェル方程式で、非線形結晶で伝達する基本波と2倍高調波として解釈するならば、入射する基本波と2倍高調波で発生する出力の割合である。

$$\frac{P_2}{P} = \tanh^2 \left[IK^{\frac{1}{2}} \left(\frac{P}{A} \right)^{\frac{1}{2}} \frac{\sin kl/2}{kl/2} \right]$$

この際、

$P_{2\omega}$: 2倍高調波の出力

P_{ω} : 基本波の出力

l : 波長変換結晶の長さ

A : 基本波ビーム面積

K は係数で

$$K = 2\eta^3 \omega_1^2 d_{eff}^2$$

で表せる。は平面波インピーダンスで、 $=377/n_0$ 、 ω_1 は基本波ビームの周波数、そして d_{eff} は非線形光学定数である。このことから、非線形定数が大きい非線形結晶の選択が必要である。また、基本波ビームの集光強度に対するダメージ閾値および取り扱いの容易さ等も考慮し選択しなければならない。種々非線形結晶の定数を表4に示す。非線形定数およびダメージ閾値を考慮した結果、本実験では LBO での波長変換実験を行う事にした。

表 4 波長変換結晶の性能

Material	Phase-matching type	Effective nonlinear coefficient (10^{-12} m/V)	Refractive index n_0 ()	Damage threshold (GW/cm^2)	Absorption (cm^{-1})
KD*P		0.37	1.49	0.5	0.005
KTP		3.18	1.74	0.5	0.010
LBO		1.16	1.56	2.5	0.005
BBO		1.94	1.65	1.5	0.005
LiNbO ₃		4.7	2.23	0.10	0.002

3.2. ピンホール設置によるビーム出力強度の安定化

O.C.とYAG ロッド端面の間にピンホールを設置して、不安定発振の要因となる折り返しミラーからのYAG ロッド端面への戻り光の除去や、レーザーの横モードの発振を抑えることで、レーザー光のピーク強度安定性向上およびビーム位置安定性の向上を目的としている。設置場所や測定実験系を図12に示し、ピンホール径の違いによるピークレスポンス測定結果を表5に示した。

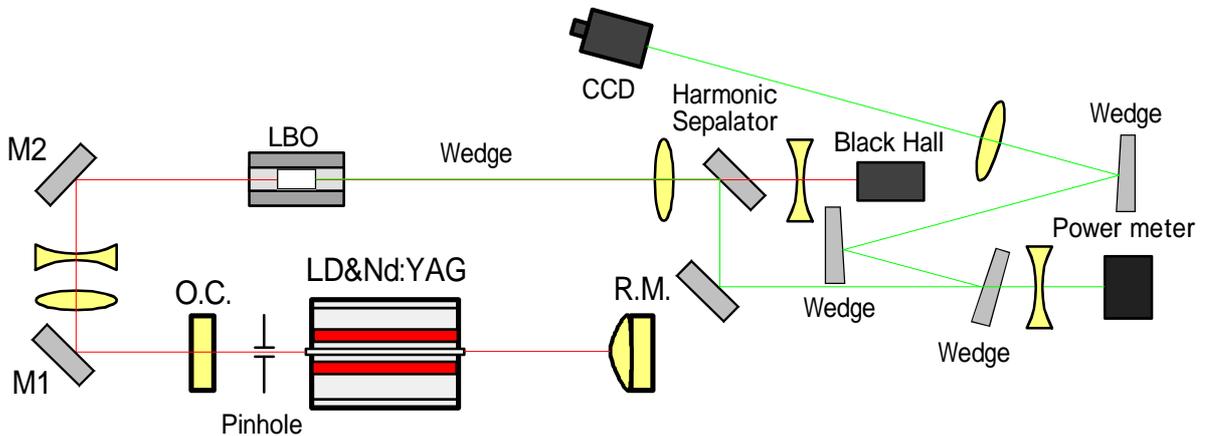


図 12 第 2 高調波光の測定実験系

図 12 に示した測定実験系の説明としては、まず近視野像のビームパターンが悪いのでパターン改善のために LBO 結晶への入射は複合レンズを用いた。Power Meter で受けている波長は 532nm の第 2 高調波であるが、Wedge でビームの一部を極力鋭角に反射させることで、ビームビューアナライザーで測定するビームパターンと実際のビームパターンに差が生じないようにした。

表 5 ピンホール設置によるピーク強度の違い

ピンホール	出力(W)	位置変動(±%)		ピーク強度変動(±%)	Peak to Peak 値(mV)
なし	12.8	X 軸	1.26	3.74	6.89 ~ 8.62
		Y 軸	1.21		
3.0mm	12.8	X 軸	1.12	2.28	5.08 ~ 5.65
		Y 軸	0.91		
2.5mm	12.9	X 軸	1.16	3.47	5.17 ~ 6.90
		Y 軸	1.16		
2.0mm	10.4	X 軸	2.83	3.95	5.88 ~ 6.86
		Y 軸	2.46		

以上の結果より、ピンホール 3.0 および 2.5mm を導入することにより、レーザーピーク強度、位置変動そしてパルス波高値で良好な結果が得られた。

3.3. フィルムヒーター取り付けによる共振器長の安定化及び光学部品の歪み抑止

本節では、共振器長の安定化がレーザー光の安定発振に寄与すると考え、その測定結果などを示した。まず、レーザーシステムの周囲温度が変化することでレーザー共振器を構成する光学素子間の距離が、光学定盤上に堅く固定しているにもかかわらず変化することが次に示す図から分かった。基本波出力の測定結果を図 13 に示した。

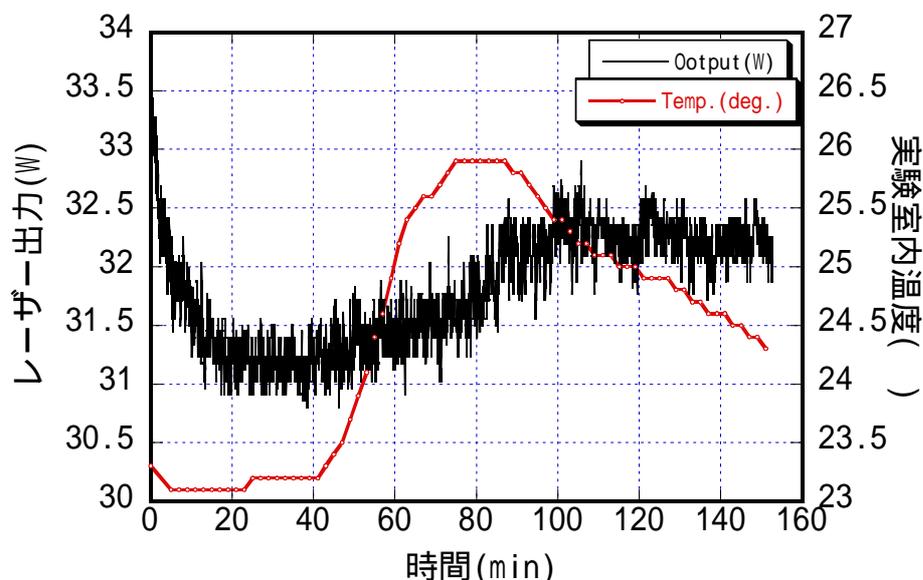


図 13 環境温度と基本波出力の測定結果

上図に示されるように環境温度が約 2℃ 変化するだけで、基本波出力が約 1.5W 変化したことが分かる。これは共振器が載る光学定盤が温度変化に対して膨張・収縮を起こしてしまうからであると考えられる。そこで共振器長の安定化のために、図 14 に示したように光学定盤の下にフィルムヒーター（サンライズ工業社製）を耐熱両面テープで貼り合わせて温度制御できるように加工を行った。

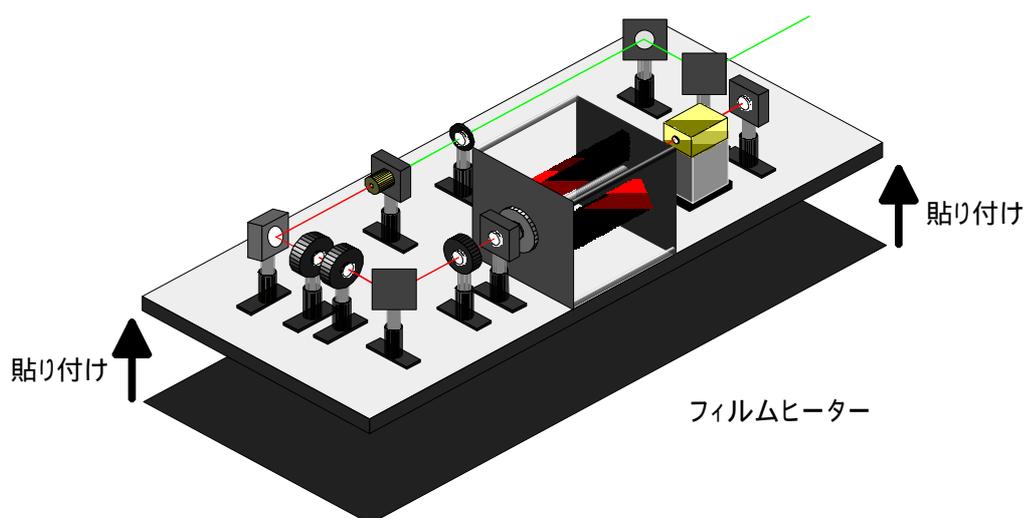


図 14 フィルムヒーターの取り付け

温度制御のため上図のようにフィルムヒーターを取り付け、光学素子を微調整して発振させたときの第 2 高調波出力の測定結果を図 15 に示した。

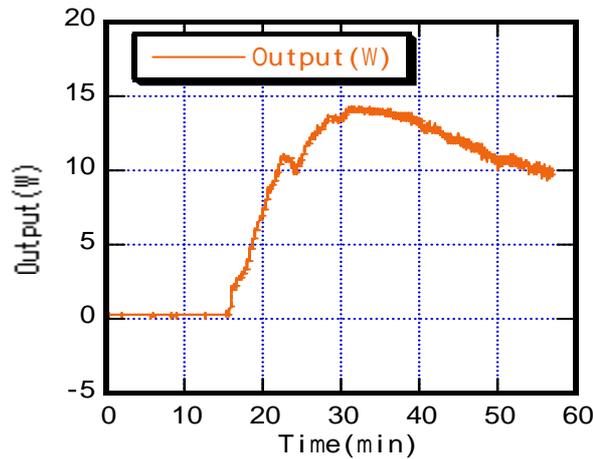


図 15 第 2 高調波(532nm)出力結果

出力測定器の電源を入れるのと同時に、フィルムヒーターの電源を入れて測定を開始した結果を上図に示してある。測定開始後約 30 分後に、最大出力 14.1W を記録したがその後出力が低下し続けてしまう結果となった。温度制御のために貼り付けたフィルムヒーターは、電源を入れてから約 30 分後に温度が一定となる設計となっているが、共振器の調整は光学定盤の温度が一定になる前に行ってしまうために、共振器長が膨張してしまい、出力が低下していたものと考えられる。最適共振器長を構成するために、微調整を温度制御が一定となってから再度行った。その後、短期間の第 2 高調波出力を測定し結果を図 16 に示した。

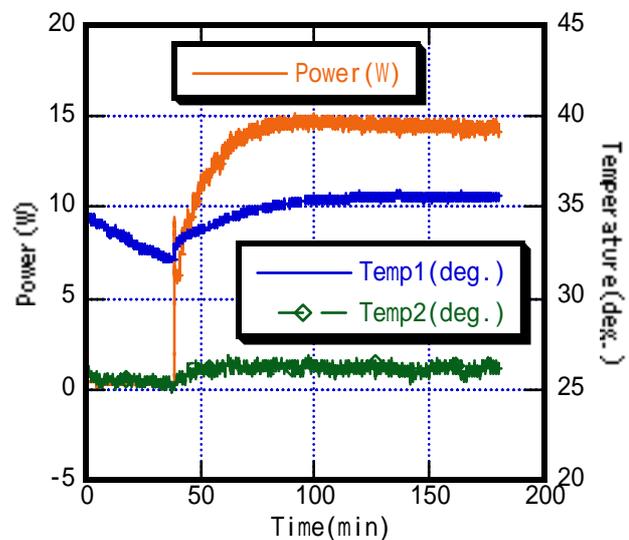


図 16 温度制御テーブル温度一定後再調整した時の第 2 高調波(532nm)出力結果

表 6 短時間出力測定結果

発振経過時間(分)	平均出力(W)	RMS(W)		変動率(%)
30分～終了	14.507	14.509	0.20799	±1.43
60分～終了	14.522	14.523	0.16947	±1.17
波長	パルス幅(ns)	パルス幅 (ns)		Pk-Pk (mV)
基本波(1064nm)	31～33	1.0～1.3		3.1～3.4
2倍波(532nm)	24～25	4～6		5.5～6.0

フィルムヒーターの温度制御や励起光源の LD の輻射光漏れにより、レーザー発振器の筐体内温度が一定になるのが 30 分掛かるのでウォームアップ時間を 30 分以降とした場合、レーザーの短期出力安定性は変動率で ±1.5% を切る事が分かった。前回の測定実験とでは、安定発振が崩れない間に筐体を解放し R.M. の調整のみを行って基本波発振の安定化に努めた為、結果が異なると考えられる。

3.4 第 2 高調波(波長 532nm)発生の長時間安定性

本節では、前節までの結果に基づいてレーザーの第 2 高調波出力長時間安定性を測定した結果を述べる。

動作手順

チラー (20)、フィルムヒーターおよびLB0 温調(150.7)の電源を投入し、30 分放置する。

LD の電源を投入し、27.9A まで電流値を上昇させ、30 分ウォームアップを行う。以上の手順に従って、約 5 時間あまりの測定結果を次に示した。

表 7 レーザー性能表

532nm		
項目	性能	備考
平均出力(W)	13.05	-
LD 電流値(A)	27.9	上昇時間 1A/s
繰り返し周波数(kHz)	5	-
パルス幅(ns)	27	FWHM
パルス幅 値(ns)	4.0~6.0	-
Peak to Peak 値(mV)	6.1~6.9	100mV に対しての値
ビーム径 X 軸(mm)	1.4	1/e ² , 出射口から 1m 地点での測定
ビーム径 Y 軸(mm)	1.5	
ビーム位置安定性 X 軸(%rms)	1.3	図 17
ビーム位置安定性 Y 軸(%rms)	1.1	
ビーム角度安定性 X 軸(μ rad)	13.3	図 18
ビーム角度安定性 Y 軸(μ rad)	25.0	
ピーク強度安定性(%rms)	1.74	図 19
ビーム発散角 X 軸(μ rad)	539	-
ビーム発散角 Y 軸(μ rad)	501	-
出力安定性(%rms)	±1.09	図 20
ビームパターン	ガウシアン	図 21
M ² 値 X 軸	1.3	図 22
M ² 値 Y 軸	1.4	
ウォームアップ時間(min)	30	-
1064nm		
パルス幅(ns)	33	FWHM
パルス幅 値(ns)	1.7~2.5	-
Peak to Peak 値(mV)	2.0~3.1	100mV に対しての値

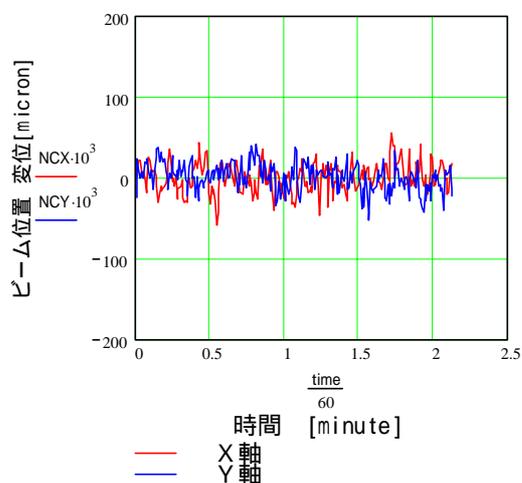


図 17 ビーム位置安定性

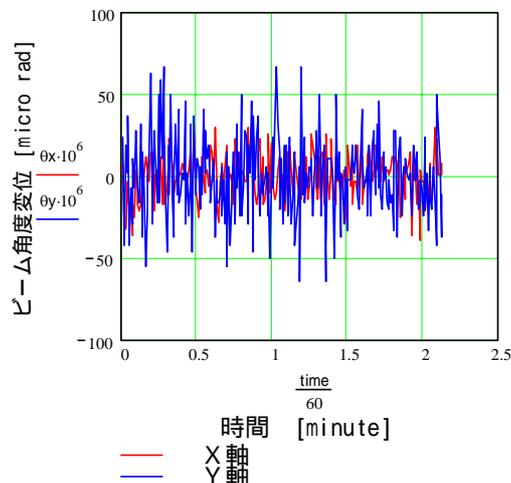


図 18 ビーム角度安定性

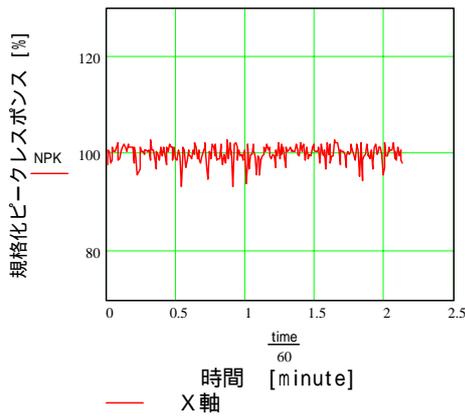


図 19 ピーク強度安定性

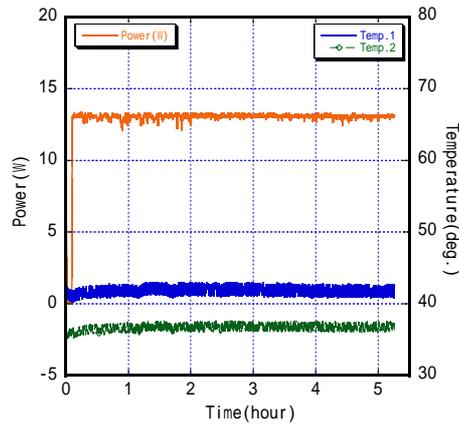


図 20 出力安定性

測定時間 (min)	30 ~ 310
平均値(W)	13.05
変動率 (rms%)	± 1.09
Peak to Peak 変動率(%)	± 4.38

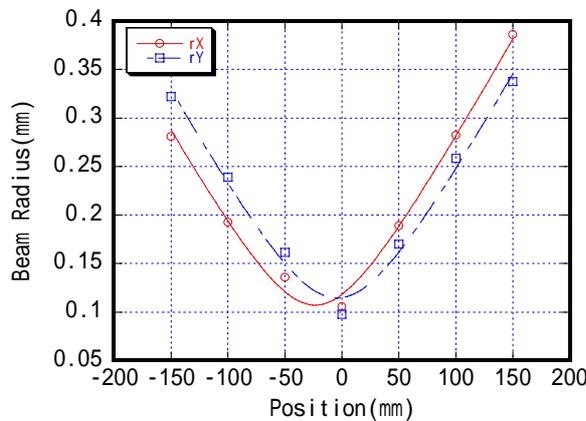
Temp.1 筐体内テーブル温度
Temp.2 筐体内温度



a. 出射口から 1 m地点でのビームパターン

b. F=+400mm レンズでの集光パターン

図 21 ビームパターン



X軸			Y軸		
	値	エラー		値	エラー
m1	0.10717	0.0078416	m1	0.11445	0.010095
m2	1.3354	0.083762	m2	1.4293	0.10612
m3	-23.512	2.486	m3	-4.1159	3.1581
カイ 2 乗	0.00043862	NA	カイ 2 乗	0.00075388	NA
R	0.99614	NA	R	0.99189	NA

図 22 M²値

3.5. まとめ

本節においては、第 2 高調波(波長: 532nm)発生安定性の開発について説明した。側面励起の共振器型レーザーの安定性の開発において、出力安定性に大きく影響を与える共振器長や筐体内雰囲気やそれを制御するということが開発の重点となった。R.M. から O.C. まで形成される共振器は、パルス幅やレーザー出力に大きく関係する要素である。それにも関わらず僅かな温度変化に対しても光学定盤が膨張しレーザーの安定発振が成されない。そこで、筐体内雰囲気温度をレーザー筐体が設置される周囲の環境温度よりも高温にすることで、外部の温度擾乱を受けにくくした。またビーム安定化のために設置したピンホールにより、レーザーの光強度出力安定性が ±1.74% と製品レベルで要求されるような ±2% 以下の安定性をクリアしただけ

でなく、オシロスコープでの測定結果により1パルス毎の出力安定性も10%以下をさらに下回る、7%以下を実現した。これは、光学定盤に貼り付けた温度を一定に保持することの出来るフィルムヒーターの効果であると確信する。また、長時間レーザー出力を保持したままの運転試験においても、ウォームアップ時間30分以降、約5時間強の出力測定においてもrms変動率において±1.09%を示した。しかし、測定結果を表すグラフをよく見てみると、測定初期にはレーザー出力に変動が見られる。これは波長変換素子であるLBO結晶を加熱・保持する温度制御器が設定温度を制御しきれていないために生じたものである。今後レーザーシステムの改良を考えていくときに、波長変換の安定化も視野に入れた開発を行わなければならない。

(3) 主な成果

具体的な成果内容：

開発したレーザーの性能は、第2高調波平均出力13.05W、パルス幅(全値半幅)27ns、長期出力安定性±1.09%rms、ビーム品質(M²値)1.3×1.4であり目標を達成した。これは国産LDを用いた日本初の高出力高ビーム品質グリーンYAGレーザーである。

また、新たに新方式冷却フランジを開発することによって上記のレーザー性能を達成することが可能となった。

(4) 研究成果に関する評価

国内外における水準との対比

このたび開発した微細加工用レーザーは上記に示すように、国外で製造販売されている同様のパルスグリーンレーザーと比較しても、出力及び出力安定性は世界トップレベルであることがわかる。ただ加工を行うにあたりその加工精度を表す指標の一つであるパルス幅が若干長いので、今後改良の余地がある。

名称	微細加工用レーザー	GATOR	CORONA	Q201-HD
メーカー	-	LAMBDA PHYSIK	COHERENT	LIGHTWAVE
発振波長(nm)	532	532	532	532
平均出力(W)	13.05	14	75	12.5
パルス幅(ns)	27	15	150	15
M ² 値	1.4	1.2	マルチ	1.2
繰り返し周波数(kHz)	5	10	10	5
出力安定性(%)	1.09(rms%)	2.5	1	1
幅(mm)	320	276	190	122.4
奥行き(mm)	550	360	640	697
高さ(mm)	210	209	134	86.1
体積(cm ³)	36960.0	20766.2	16294.4	7345.4

実用化に向けた波及効果

開発した本システムが実用化されるにあたり、高出力フェムト秒レーザーのTi:Sapphire発振器励起用CW発振Nd:YAGレーザーへの開発技術に発展していく効果が期待できる。また、産業界からは、鉄・非鉄・ダイヤモンド・超硬材・FRP・テフロンなどの切断・溶接加工や表面処理及び熱処理加工への要望がある。

(5) 残された課題と対応方針について

特になし。