

< 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： Ti:Sapphire 励起用 CW グリーンレーザーの開発 (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、玉置善紀、吉井健裕、加藤義則

(1) 研究の概要、新規性及び目標

研究の概要

高強度フェムト秒レーザーの開発において、Ti:sapphire 励起用の CW LD 励起 Nd:YAG レーザーを安定発振出力するための開発が重要である。本研究開発では 2 倍波(波長：532nm)で CW(連続)発振を行うので、波長変換素子(LBO 結晶)を共振器内部に配置した内部共振器型のシステムとなっている。

研究の独自性・新規性

3 方向均一側面励起を行なうことで、熱複屈折の低減を図り Ti:sapphire を励起する際に必要となる高いビーム品質を達成することを可能とする。

研究の目標

Ti:Sapphire の励起に必要な、出力 3W 以上、ビーム品質を表す M^2 値 2 以下および規格化ピーク強度安定性(CCD パターンのピーク強度安定性) 0.4%rms を目標とする。

(2) 研究の進め方及び進捗状況

1. CW レーザーの構築

1064nm 反射コーティングの凹ミラーを用いて、基本波で出力、ピーク強度安定性の予備実験を行う。共振器構成は、図 1 に示す。用いたリアミラーの曲率半径は $r=+50\text{mm}$ から $r=+200\text{mm}$ であり、それぞれに特性評価を行なった。

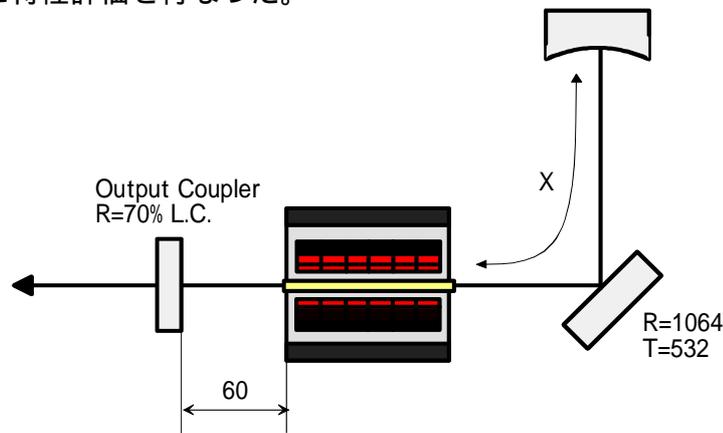


図 1 CW レーザーの共振器配置図

凹ミラー曲率半径 +200mm を現在所持していないため、凸-200mm を用いた。実際に凹ミラーを導入する際は、現在の共振器長 +200mm が目安となる。ロッド端面から凸ミラー間の距離 X を 250mm から 300mm まで変化させた。各共振器長で電流値を変化させた際に、種々のパターン変化が観測できた。電流値とパターン変化を図 2 に示す。

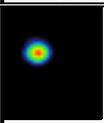
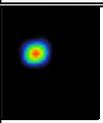
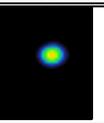
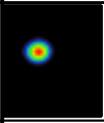
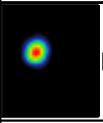
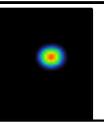
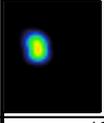
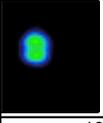
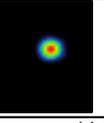
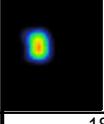
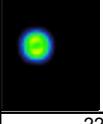
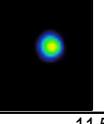
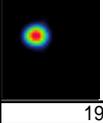
ロッド端面～リアミラー	250mm	リアミラー	150mm	
電流値(A)	パターン	パターン	パターン	
16.5A	 不安定	 不安定	 不安定	
出力(W)	7.2	10.1	6.8	
17.0A	 安定	 比較的安定	 安定	
出力(W)	12.5	18.9	11.6	
17.5A	 不安定	 不安定	 安定	
出力(W)	16.0	18.9	14.1	
18.0A	 不安定	 不安定	 不安定	
出力(W)	18.8	22.8	11.5	
18.5A		 不安定		
出力(W)		26.7		
19.0A		 不安定		
出力(W)		19.8		

図2 電流値によるビームパターン特性

パターンに着目し、YAG ロッド端面から凸ミラーまでの距離 X、出力およびピーク強度の関係を測定した。測定結果を表 1 に示す。

表1 パターンによる諸条件での測定結果

距離 X(mm)	出力(W)	電流値(A)	ピーク強度安定性(rms%)	備考
250	18.9	19.0	4.819	不安定(楕円パターン)
255	16.8	18.0	2.242	
260	16.7	17.9	1.858	
265	17.1	17.8	2.000	
270	17.7	17.6	2.046	
275	17.4	17.5	2.071	
280	16.6	17.3	2.206	
285	15.1	17.1	1.804	
290	16.2	17.1	1.532	調整範囲が広い
295	15.6	17.1	1.515	調整範囲が広い
300	17.0	17.1	1.834	調整範囲が広い

YAG ロッド端面から凸ミラーまでの距離が 290mm 以降になると、調整範囲が広くなり、ピーク強度安定性が増す結果となった。しかし、出力は 17W 前後と高くなっているため、安定発振している距離 X=290mm の条件で、パターンの発振特性を調査した。最適電流値およびリアミラーの微調整を行った結果を表 2 に示す。

表 2 パターン での最終値

距離 X(mm)	290
電流値(A)	16.5
出力(W)	13.3
M2 値 X 軸	1.40
M2 値 Y 軸	1.51

ここまで、曲率半径 50mm~200mmの凹ミラーを設置し、最適電流値、出力およびピーク強度安定性の調査を行った。各凹ミラー設置時の特性を表 3 に示す。

表 3 各曲率半径の凹ミラー設置時の特性

曲率半径(mm)	電流値(A)	出力(W)	ピーク強度安定性(%rms)	M2 値		備考
				X 軸	Y 軸	
+ 50	-	-	-			
+ 75	20.8	18.7	-			不安定発振(X=240mm)
+ 100	20.2	22.2	± 1.337	1.7	2.0	ビーム形状不良 (X=265mm)
+ 150	18.6	22.7	± 1.153	1.7	1.8	(X=370mm)
+ 200	16.5	18.6	± 1.002	-	-	(X=480mm)

1.1 まとめ

目標値として、10W以上の基本波出力に対して、出力13.3W・規格化ピーク強度安定性±1.002%・ビーム品質は解説限界値 $M^2 = 1$ に対して $M2 < 1.5$ を達成した。

2. 2倍波変換システムの構築

2.1 L型共振器内部波長変換 CW グリーンレーザーシステムの構築

M2 値、出力およびピーク強度安定性を考慮し、凹面ミラー曲率半径 $r=+200\text{mm}$ の条件で波長変換実験を行った。SHG 結晶は一般的に非線形光学定数が高い KTP、ダメージ閾値が高い LBO 等が用いられる。KTP 結晶は、2倍波変換に際し内部波長変換型構造にすると、縦モード結合によって生じる "green problem" の問題が生じるため、今回の実験では LBO(Type 60, Type 150)を用いた。また、70%反射のアウトプットカプラーは 1064nm 全反射ミラーに交換した。

実験は LBO 結晶の最適回転角度、凹ミラーからの最適な距離等を調査しながら行った。その結果、LBO Type (4×4×20mm)を用いた際、16.4A 時に最大出力 1.42W の出力が得られた。その際のビームパターンを図 3 に示す。

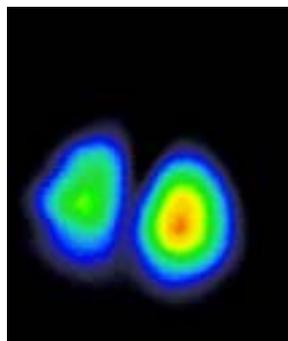


図 3 2倍波変換時のビームパターン

次に Type LBO を用いた 2 倍波変換実験を行った。内部エネルギー密度を向上させるため、凹ミラー曲率半径 $r=+150\text{mm}$ の構成に変更し、SHG(2 倍波変換発生)結晶は、LBO Type ($4 \times 4 \times 15\text{mm}$) を用い、最適の回転角度を調査して実験を行った。その結果、18.2A, LBO 温度 149.0 の際、3.5W の 2 倍波出力が得られた。

2.1.1 まとめ

凹ミラーの曲率半径を $+50\text{mm} \sim +200\text{mm}$ まで変化させた結果、安定性や 2 倍波出力の関係から $+150\text{mm}$ もしくは、 $+200\text{mm}$ を用いると良いことが分かった。特に、曲率半径が $+200\text{mm}$ の場合ピーク強度安定性が $\pm 1.002\%$ となり、安定性は曲率半径が大きくまた、共振器長が長いほど安定であることが実験から分かった。また、2 倍波変換の効率化を考えた場合共振器内部のエネルギー密度上昇が重要な要素となるので、リアミラーの曲率半径を $+150\text{mm}$ のものに変えて実験を行ったところ、電流値が 18.2A のとき SHG 出力は 3.5W となった。また、2 倍波変換効率が当初の予想より低いのは、L 型共振器を構成する折り返しミラーから基本波の一部のエネルギーが透過してしまい変換効率の低下を招いていると考察する。このため同時に不安定発振を引き起こしていると考えられる。

2.2 Z型共振器内部波長変換CWグリーンレーザーシステムの構築

次に、共振器内部設置した 45° 反射ミラーにおいて、異なる偏光によって生じる反射率の差は、反射ミラーを 0° に近づけることによって改善出来る。これにより、Z 型共振器による CW グリーンレーザーシステムの構成を行なった。その構成図を図 4 に示す。まず初めに、構成としては、リアミラーに曲率半径 $+150\text{mm}$ を設置し、LBO 結晶を除いた基本波発振実験を行った。Nd:YAG ロッド端面からリアミラーまでの距離を 420mm にした際、LD 入力電流 17.6A(励起入力 160.6W)時に 21.2W の基本波出力(波長 1063nm)安定発振が得られた。この際の CCD カメラで取り込んだ規格化ピーク強度安定性は $\pm 2.0\%$ であった。

この規格化ピーク強度安定性というのは、CCD 取得画像毎の空間的ピーク強度分布の最大値を取得画像のピーク強度の平均値で割った値で、平均値を基準にしてどれだけ変動しているかを標準偏差で表した数値である。

次に共振器内に LBO 結晶の Type- を設置し、グリーン光出力実験を行った。その結果、半導体レーザー入力電流 17.5A(励起入力 158.6W)時に、4.7W の出力が得られた。その際の発振パターンを図 5 に示す。

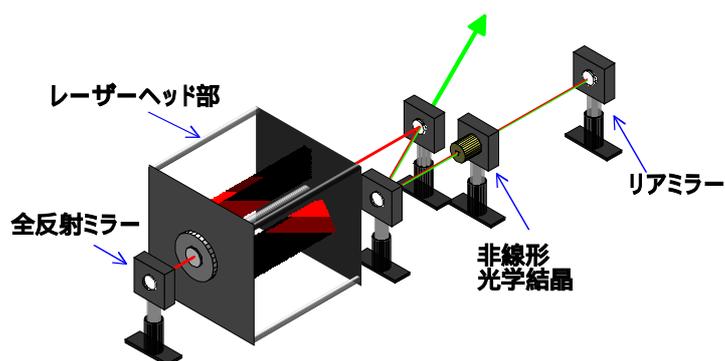


図 4 Z 型内部 2 倍波発生共振器構成図

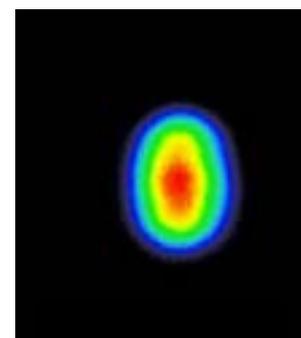


図 5 2 倍波変換時の
ビームパターン

Z 型共振器の構成で、発振されたグリーン光のビームパターンは楕円形であった為、ビーム品質向上を目的に、共振器内にセラミック製ピンホールの設置を行った。ピンホールの設置位置を図 6 に示す。LBO からピンホールまでの距離 X を 3mm 間隔、 $45 \sim 62\text{mm}$ の範囲で動かし、レーザー性能を調査した。ピンホール径は 1.0mm で行った。

実験結果を図 7 に示す。ピンホール位置 57mm の際に、出力 4.41W 、規格化ピーク強度安定

性は $\pm 1.988\%$ rms の結果が得られた。

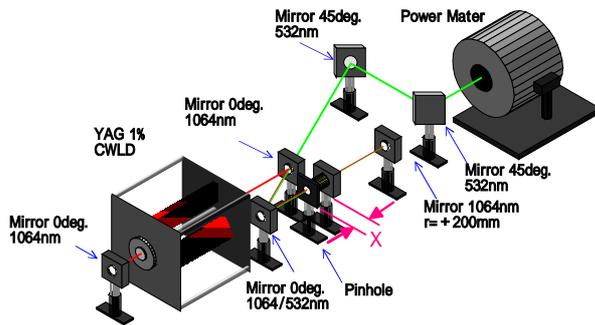


図 6 ピンホール設置位置構成図

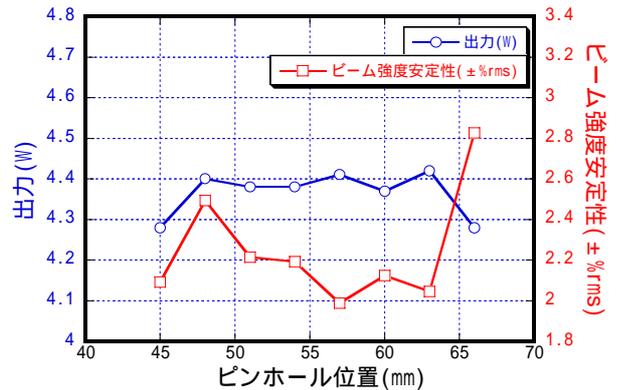


図 7 1.0mm のピンホール導入結果

1mm のピンホール 1 を設置した状態で、YAG ロッド端面から 1064nm/532nm 分離ミラー間に、ピンホール径 2.5 および 2.0mm を設置し、レーザー出力および強度安定性の測定を行った。実験結果を図 8 および図 9 に示す。この際、ピンホールの移動範囲は、ロッド端面から 42~85mm である。また、LD の入力電流値は 16.5A、LB0 温度は 151.7 である。

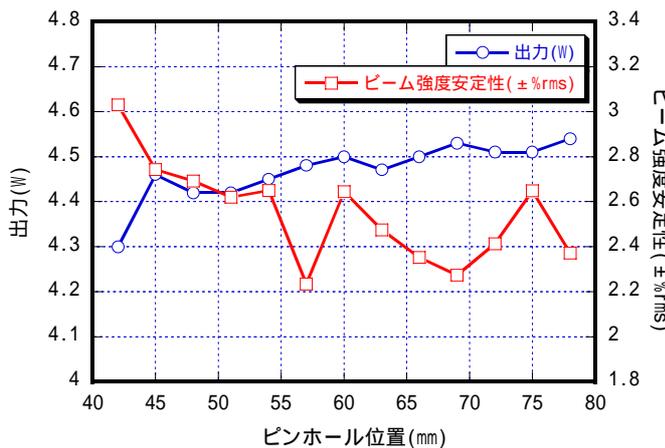


図 8 ピンホール 2.5mm の導入結果

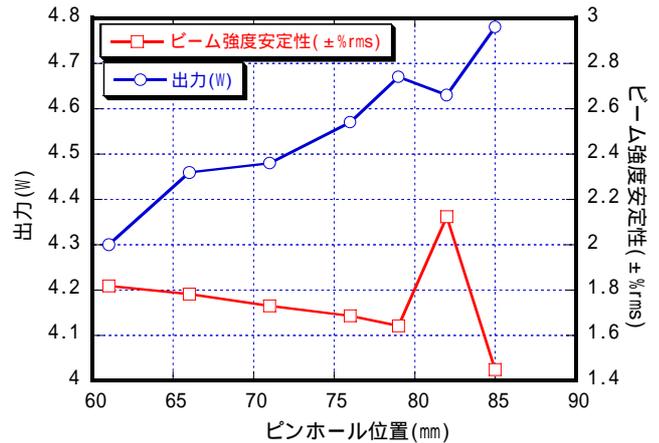


図 9 ピンホール 2.0mm の導入結果

ピンホール 2.0mm をロッドからの距離 85mm に設置した際に、出力 4.78W、規格化ピーク強度安定性は $\pm 1.4\%$ が得られた。ピンホールの最適化を行うことにより、出力および安定性の向上が実現した。出力は、ピンホールを設置することにより、高周波成分がカットされビーム品質が向上した結果、波長変換効率が向上したと考えられる。ピンホール径の選定およびピンホール位置の最適化を行うことにより、更なる安定化が期待できるが、ピンホール設置位置範囲が限られているので、現状では不可能である。

2.2.1 まとめ

開発した CW グリーンレーザーのビームパターンを CCD カメラで計測を行った。この際のビームパターンを図 10 に示す。同時にビーム品質を表す M^2 値の測定も行い、X 軸 1.3、Y 軸 1.4 の結果が得られた。測定結果のグラフを図 11 に示す。

しかし、チタンサファイアレーザー発振器の励起用 CW グリーンレーザーの安定性として、規格化強度安定性値 0.4% rms 程度 (Coherent 社 Verdi (5W) 相当) が要求される。しかし、開発した CW グリーンレーザー (LB0 結晶、ピンホール使用) の安定性は、 $\pm 1.4\%$ rms (2 倍波

出力パワー(4.78W)である。従って、安定性の更なる改善が要求される。

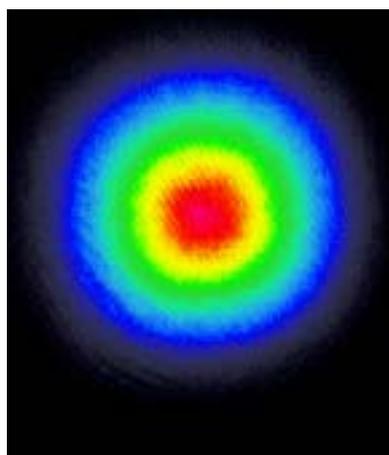


図 10 2倍波変換時のビームパターン

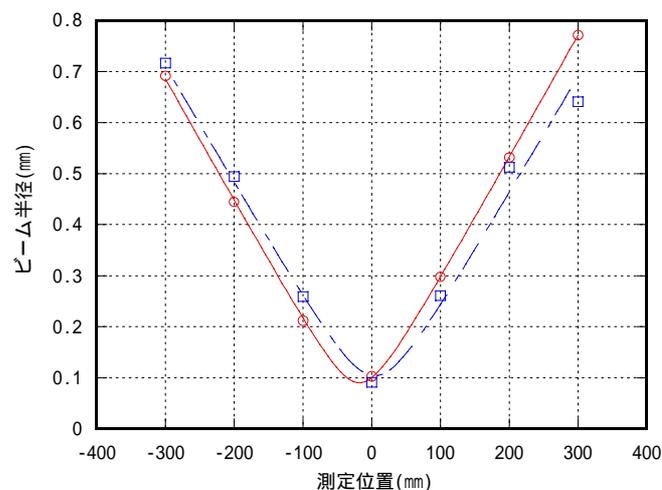


図 11 ビーム品質 M^2 値測定結果

2.3 小径シングルロッドによる V 字型内部波長変換 CW グリーンレーザーシステムの構築

次に更なる安定性と高いビーム品質を得るために、Nd:YAG のロッドを 3mm から 2mm に変更しシングルロッドによる V 字型共振器 CW グリーンレーザーシステムの構築を行なった。共振器構成を図 12 に示す。

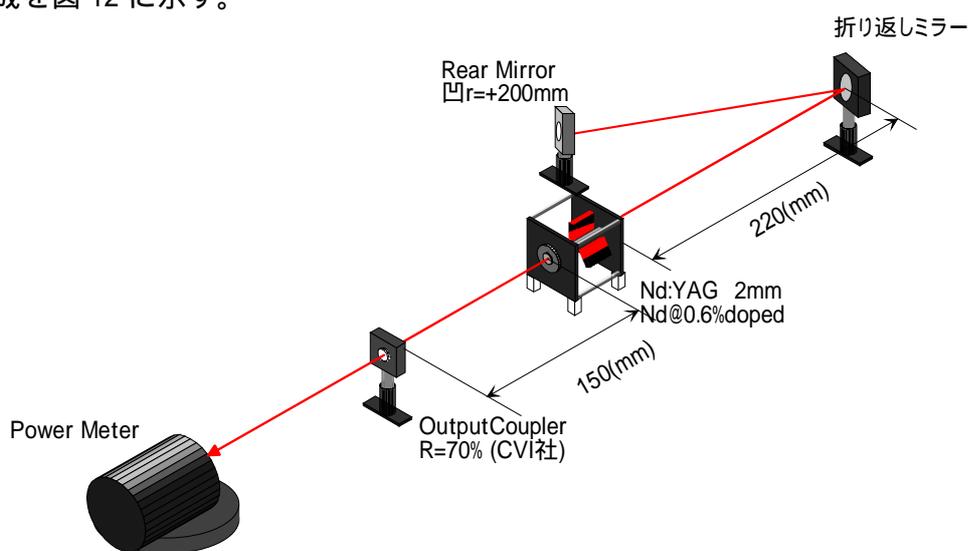


図 12 基本波発振時の V 字型共振器構成図

直線型共振器よりも V 字型共振器構成のほうが若干ではあるが、規格化ピーク強度安定性を $\pm 0.44\%$ まで改善することが出来た。この時の基本波ビーム品質 M^2 を測定し、ビーム品質 M^2 は 1.64×1.72 と実験的に求まった。

2.3.1 V 字型共振器のビームウェスト測定

図 13 のような共振器配置を行い、1mm ピンホールの位置を共振器内の光学軸に沿って移動させることでビームの絞れている位置を確認し、効率良く波長変換を行えるようにした。その測定結果を図 14 に示した。

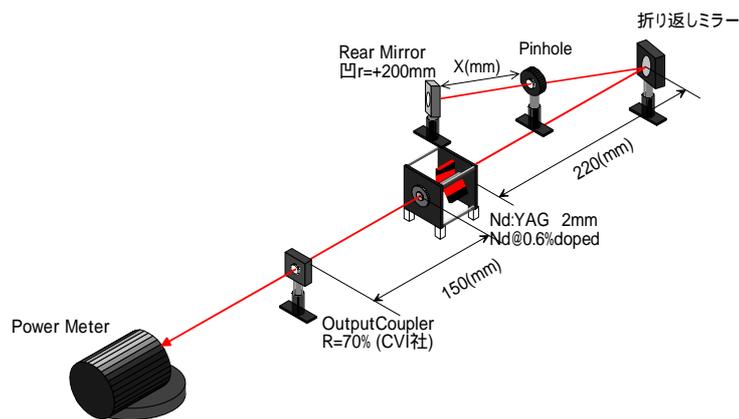


図 13 V 字型共振器のビームウェスト位置測定概観図.

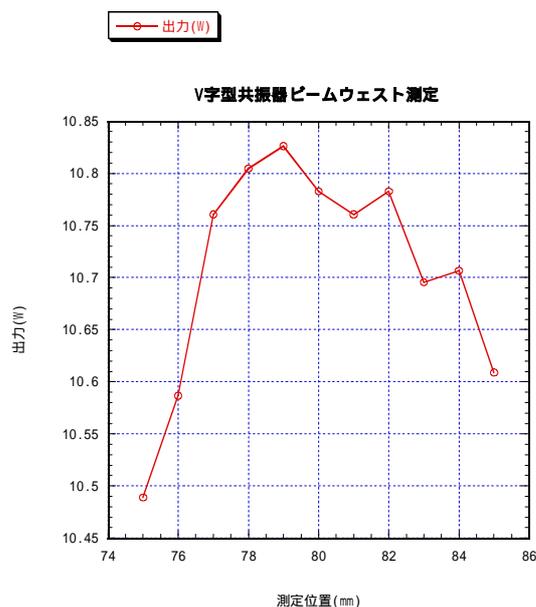


図 14 V 字型共振器ビームウェストの測定結果

以上のように、V 字型共振器構成の場合のビームウェスト位置は、リアミラーから 79(mm) 離れた位置ということが求まった。

2.3.2 2 倍波変換実験

次に、前節の結果に基づいて、波長変換結晶 KTP(Type II) をビームウェスト位置に設置し 2 倍波変換を行った。その結果を表 4 に示した。

表 4 LBO 結晶を共振器内ビームウェスト位置に設置したときの 2 倍波出力

電流(A)	2 倍波出力 (W)	備考
24	0.321	光強度変動が大きい
25	0.797	光強度変動が大きい
26	1.365	光強度変動が大きい
27	2.543	光強度変動が大きい
28	3.11	光強度変動が大きい
29	2.87	光強度変動が大きい

KTP の設定温度を 80 で保持したが ± 1 以上の温度触れ幅があったために出力が不安定性になったものと思われる。次に、波長変換結晶を LBO(NCPM Type 1)に交換して、同じように共振器内のビームウェストに設置をし、調整を試みたが 260mW くらいの出力しか確かめることが出来なかった。今までの 2 つの実験において判明していることは、NCPM の結晶を用いていたために出力安定性が不安定になっていたと考えたので、NCPM の結晶では無い CPM Type 1 の LBO 結晶を用いて同様に実験を行った。まず、O.C.の反射率を R=90%として出力を確認してみる。その結果を、表 5 に示した。

表 5 波長変換出力測定結果

設定温度()	電流値(A)	基本波出力(W)	2 出力(mW)
室温	24	1.35	20
	25	2.36	65
	26	3.53	130
	17	5.38	238
	28	6.91	307
	29	LBO結晶に熱が発生。発振しなくなる。	
	29.6		
40	24	1.01	10
	25	1.87	36
	26	2.82	65
	17	3.89	112
	28	5.10	173
	29	6.41	192
	29.6	7.04	196
45	24	1.11	12
	25	1.99	26
	26	3.40	69
	17	4.80	137
	28	6.50	228
	29	8.78	313
	29.6	9.40	340

室温動作で波長変換を行うと、結晶内で熱が発生し位相整合角に角度調整したにもかかわらず、波長変換しなくなってしまう。そこで LBO 結晶温度を変化させたところ、45 に調整したときに熱的影響を受けにくくなった。O.C.の反射率が 90%のときに、2 倍波出力 340mW を出力した。

次に、O.C.の反射率を 100%に交換して 2 倍波変換を行った。測定結果を表 6 に示した。

表 6 2 倍波出力測定結果(LBO 結晶温度 45)

電流値(A)	2 倍波波出力(mW)
24	23
25	75
26	153
27	290
28	408
29	676
29.6	LBO 温度を調整しきれず

表 6 に示すように、O.C.の反射率を 100%に交換しても出力は大きく向上することはなかった。最大出力は、29A の時、676mW となった。

2.3.2 まとめ

KTP (Type-II) 結晶では、28A で最大 SHG 出力 3.11W となった。また、常温 LBO 結晶において、最大 SHG 出力は、29A の時、676mW となった。シングルロッド共振器では、最大でも 3.11W の SHG 出力は得られたが、当初の目標であった規格化ピーク強度安定性 $\pm 1\%$ 以下は達成することが出来なかった。

2.4 タンデムロッド型内部波長変換 CW グリーンレーザーシステムの構築

次に発振安定性の改善を図るため、レーザー媒質のロッド径をなるべく小さくし、ロッド内で生じる熱複屈折効果の補償が可能な 90° ローテーターを用いたタンデムロッド構成とした。そこで、共振器構成をロッド内で生じる熱複屈折効果の補償が可能な 90° ローテーターを共振器内部に用いたタンデムロッド構成とし、ロッド径を 3mm から 2mm に変更した構成とし共振器の構築を行なった。

2.4.1 熱レンズの測定

Nd:YAG ロッドを励起する LD を、ある一定の電流で励起した時に励起光が熱に変換され熱レンズが生じ、今後の共振器設計時の重要な要因になることから、図 15 に示す光学素子配置で熱レンズの焦点距離を測定した。測定は、プローブ光に CW の He-Ne レーザーを用い、Nd:YAG ロッド熱レンズと焦点距離 750mm および 400mm のレンズとの合成レンズによって生じる焦点位置変位量から、Nd:YAG ロッドで発生する熱レンズ焦点距離を求めた。焦点位置測定は CCD カメラを光軸上でスライドさせて行った。また、Nd:YAG ロッドの径が 2mm と小さいので、He-Ne レーザー光の発散角を制御する目的で、1:1 のコリメートを行った。

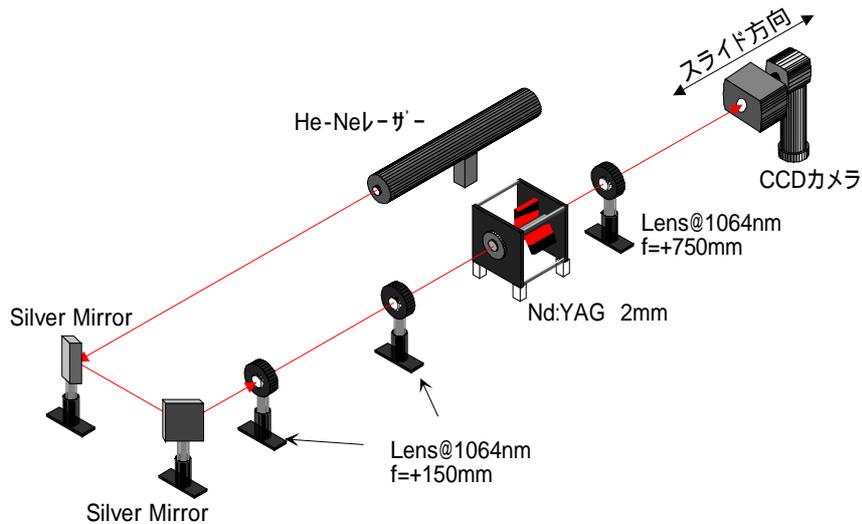


図 15 熱レンズ測定光学素子配置図

次に測定結果を表 7 および図 16 に示した。図中の r および θ は、接線方向、円周方向における熱レンズの計算値である。f=750mm のレンズを用いた測定では、集光点位置の判断が明確に出来ず、 $\pm 25\text{mm}$ 程度の誤差が生じ焦点変位量の精度に信頼性が得ることが出来なかった。

表 7 光出力と熱レンズ特性

電流値 (A)	LD 光出力 (W)	熱レンズ焦点距離 (m)	
		f=750mm	f=400mm
0	0	-	-
10	14.34	5.43	3.55
15	48.54	1.88	0.99
20	82.74	0.86	0.50
25	116.94	-	0.34

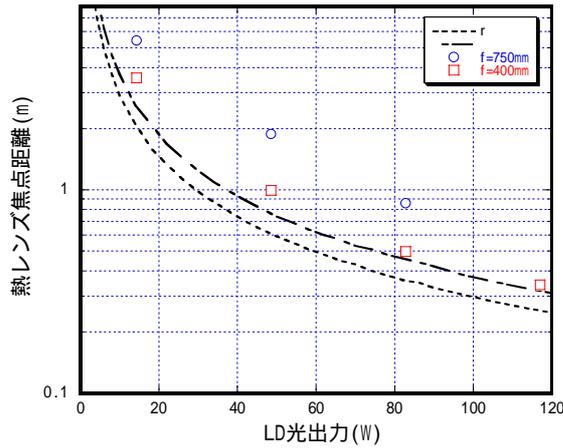


図 16 光出力と熱レンズ特性

2.4.2 熱複屈折効果の補償について

タンデムロッド共振器を構築する時、安定発振領域拡大および偏光成分の移行が引き起こす安定性劣化の改善を目的に、ロッド内で生じる熱複屈折効果を補償する必要がある。一般に熱複屈折効果の補償にはタンデムロッド共振器構成間に 90° ローテーターを設置する。ここでは熱複屈折効果の補償が成されているかを実験的に確認した。また 90° ローテーターを設置せずに熱複屈折損失を調べるとともにポライザーの有無による効果の比較を行った。実験配置図を図 17 に示した。ここで熱複屈折が完全に補償されたならば、P 偏光で入射した光は完全な S 偏光となりポライザーによって熱複屈折効果損失無く出力される。測定結果を表 8 に示した。

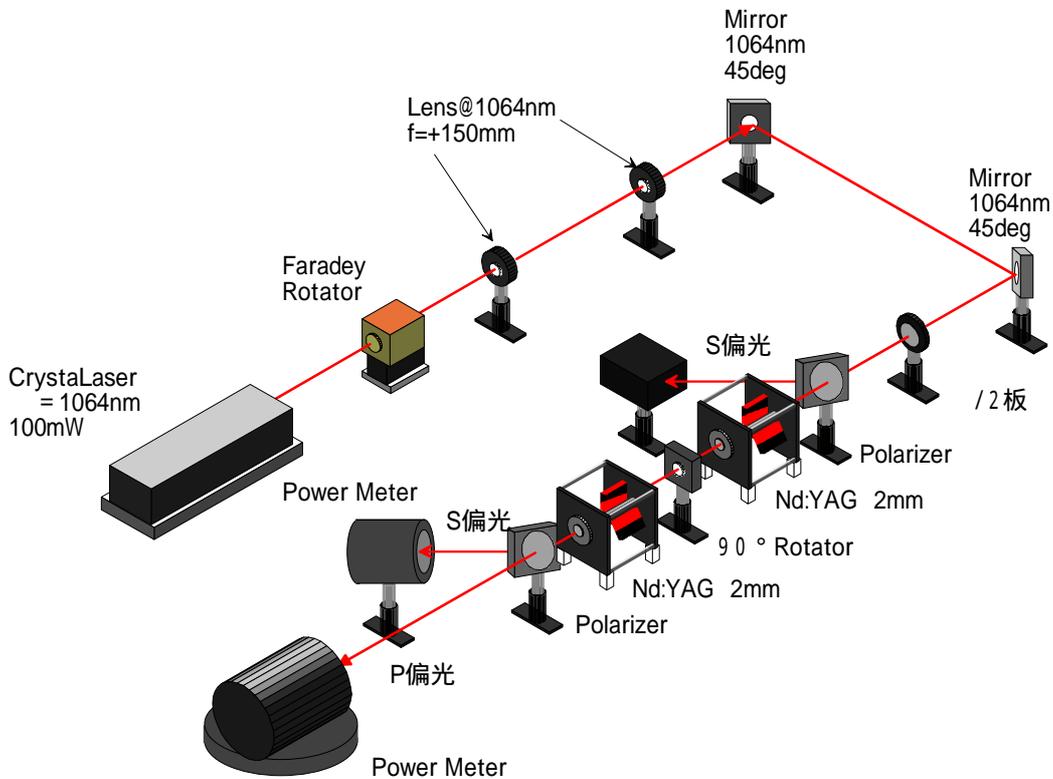


図 17 熱複屈折損失補償測定光学配置図

表 8 熱複屈折損失量測定結果

ローテーターあり			ローテーター無し	
電流(A)	S 偏光(mW)	P 偏光(mW)	S 偏光(mW)	P 偏光(mW)
0	55	1.7	6	65.4
5	55	1.4	5	64.7
10	59	1.5	5	70.1
15	76	2.0	8	90.8
20	100	3.0	14	115.8
25	133	4.8	22	153.7

表 8 に示すように、ローテーターを設置することで偏光成分を補償することが可能であることが分かる。ローテーター無しの際における P 偏光出力に対する熱複屈折損失量である S 偏光出力の割合が、電流を 25A に設定した時、ポライザーの透過率を 95% とすると計算で求めた熱複屈折損失割合の 12% に近い、13% に達したことが分かる。それに対し、ローテーターを共振器内に設置することで損失割合が、3.46% となり熱複屈折効果により生じた偏光をある程度補償できていることが分かった。

2.4.3 小信号利得の測定と検討

タンデムロッド共振器を構築するのに用いる Nd:YAG ロッドの小信号利得を、中心波長 1064nm の CrystaLaser を用いて増幅試験を行ってみた。実験配置図を図 18 に、測定結果を表 9 に示す。

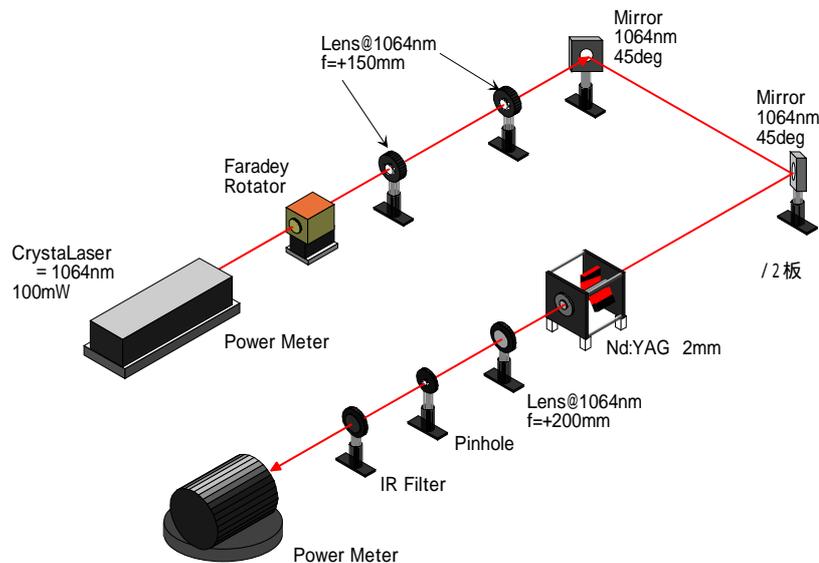


図 18 小信号利得測定光学配置図

表 9 小信号利得測定結果

電流(A)	出力(mW)	小信号利得
0	63.6	1.00
5	63.5	1.00
10	66.4	1.04
15	76.6	1.20
20	88.8	1.40
25	101.8	1.60

測定光学配置において、CrystaLaser の出射端出力は 100mW であるが Nd:YAG ロッドへの入射出力は、75mW 近くまで落ち込んでいる。また、増幅試験の結果、小信号利得は 1.6 と求まった。この結果を踏まえて、タンデムロッド共振器を構築した。次に、集光器 1 台での小信号利得の測定から、Nd:YAG における吸収パワーおよび励起効率を求めた。吸収パワー P_{ab} は、吸収された励起光パワー P_{LD} の内、レーザーロッドで吸収される光量を示し、(式 1.1)で表せる。

$$P_{ab} = \eta_t \cdot \eta_{ab} \cdot P_{LD} \quad (1.1)$$

ここで、 η_t は伝達効率、 η_{ab} は吸収効率を示す。また、吸収パワー P_{ab} は式(1.2)に示す小信号利得 G_0 計算式を変形し、実験から得られた電流値に対する小信号利得を代入することにより求めることができる。

$$G_0 = \exp\left(\frac{P_{ab} \cdot \eta_{qd} \cdot \eta_q}{A \cdot I_s}\right) \quad (1.2)$$

ここで、 η_{qd} は量子ディフェクト、 η_q は量子効率、 A はレーザーロッドの断面積、 I_s は四準位レーザーの飽和光強度を示し、式(1.3)で与えられ、 h はプランク定数、 ν_0 は発振振動数、 σ_{21} は誘導放出断面積および、 τf は蛍光寿命を示す。

$$I_s = \frac{h \cdot \nu_0}{\sigma_{21} \cdot \tau f} \quad (1.3)$$

式(1.2)から求められた励起パワー P_{ab} を、式(1.1)に代入することにより、伝達・吸収効率が得られ、式(1.4)により、励起効率 η_p を求めることができる。

$$\eta_p = \frac{P_{ab} \cdot \eta_q \cdot \eta_{qd}}{P_{LD}} \quad (1.4)$$

集光器 1 台および 2 台における LD パワーと小信号利得の関係を、図 19 に示す。集光器 2 台の小信号利得は、実測を行っていないことから計算値である。また、上式から求めた、集光器 1 台時の伝達・吸収効率および励起効率を図 20 に示した。

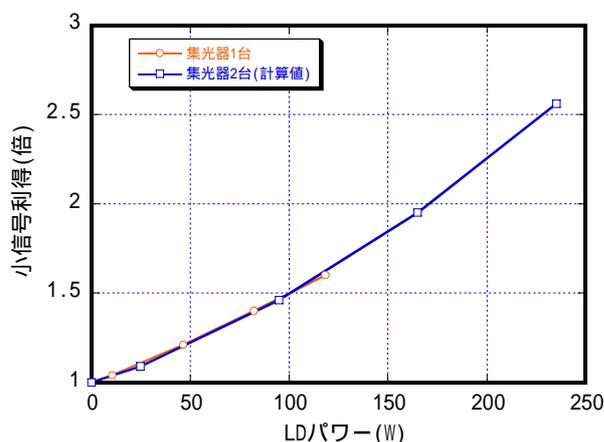


図 19 LD 投入電流と小信号利得の関係

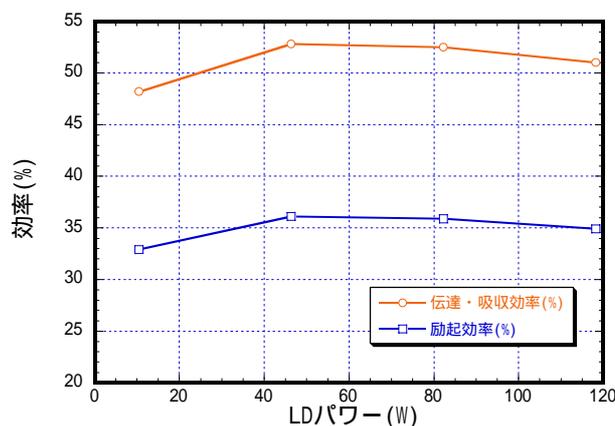


図 20 集光器 1 台における効率

表 10 集光器 1 台における励起効率

電流(A)	小信号利得	LD パワー(W)	伝達・吸収効率(%)	励起効率(%)
0	1	0	-	-
10	1.04	10.5	48.2	32.9
15	1.21	46.4	52.8	36.1
20	1.40	82.3	52.5	35.9
25	1.60	118.3	51.0	34.9

実験的に伝達効率だけを計測することが出来ないため、表 10 では伝達効率と吸収効率を掛け合わせた値を示した。前項で Nd:YAG ロッドへの LD 励起は均一に行われていることは確認できているので LD からの光入力に対する発振出力への変換効率を、CW タンデムロッドの発振器最適化を行ってから、計算した励起効率と比較して求めていくことにする。

2.4.4 アウトプットカプラーの最適化

図 21 に示すようなタンデムロッド共振器構成として、安定な TEM₀₀ モードのレーザー光を発振する為、まずアウトプットカプラーの反射率を 40% から 80% まで変化させ、実験的に最適化を行った。測定結果を図 22 および反射率の違いによる規格化ピーク強度安定性の違いを表 11 に示した。

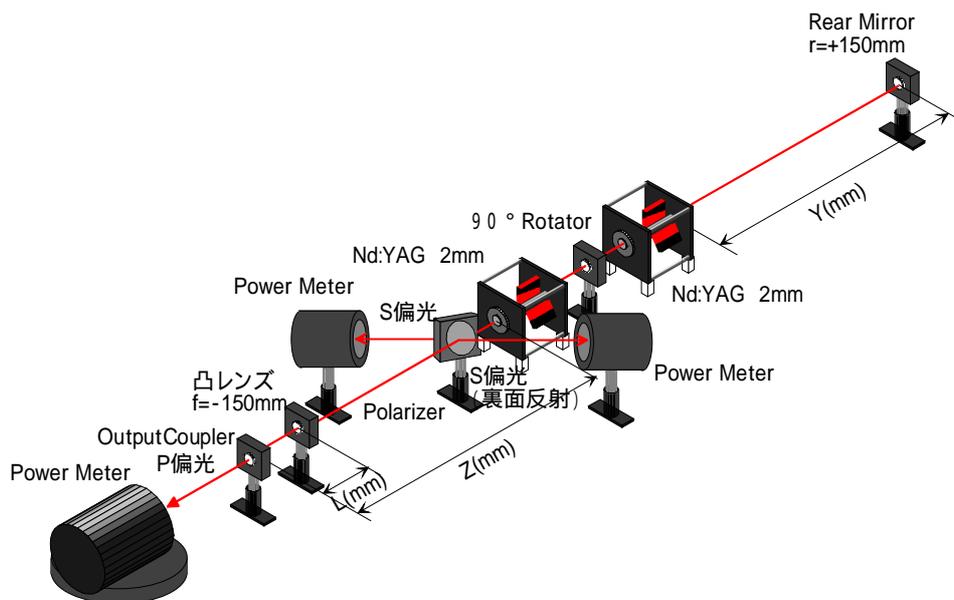


図 21 タンデムロッド共振器構成図

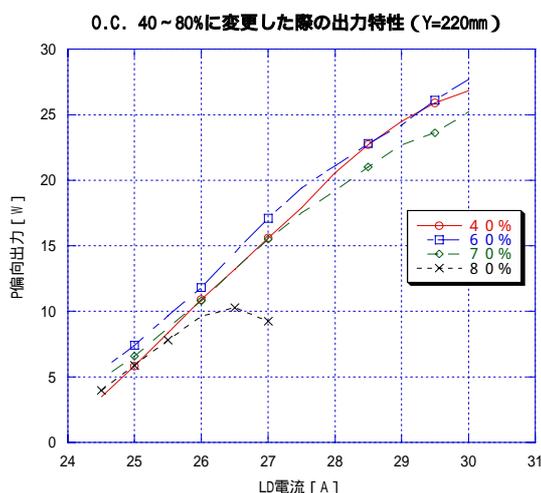


図 22 O.C. の反射率を変化させた時の出力特性

表 11 O.C. の反射率を変化させた時の規格化ピーク強度安定性の違い

O.C.の反射率	ピークレスポンス
40%	± 1.122%
60%	± 1.008%
70%	± 0.895%
80%	± 1.341%

実験結果より、反射率 60% の O.C. を使用した場合に最も出力が高く 30.1W となり、ピークレスポンスも小さい結果が得られた。また、40% ~ 80% のすべての O.C. において、ビームパターンに点滅と揺らぎがみられた。LD 電流を変化させても、ビームパターンの点滅と揺らぎが生じた。反射率 50% の O.C. は、ウェッジがついており、アラインメントが困難なため、今回の実験には使用しなかった。以上の結果を踏まえて、O.C. の反射率は 60% を採用した。

2.4.5 共振器長の最適化

・左右非対称共振器での実験

R.M.とNd:YAG ロッド端面間の距離のみを変化させ、出力特性とピークレスポンスを測定した。結果を図 23 および表 11 に示した。

・測定条件：ポラライザー有り、ポラライザーとロッド端面の距離 63mm、O.C.とロッド端面の距離 220mm、O.C.の反射率 60%、O.C.と f=-150mm レンズの距離 20mm

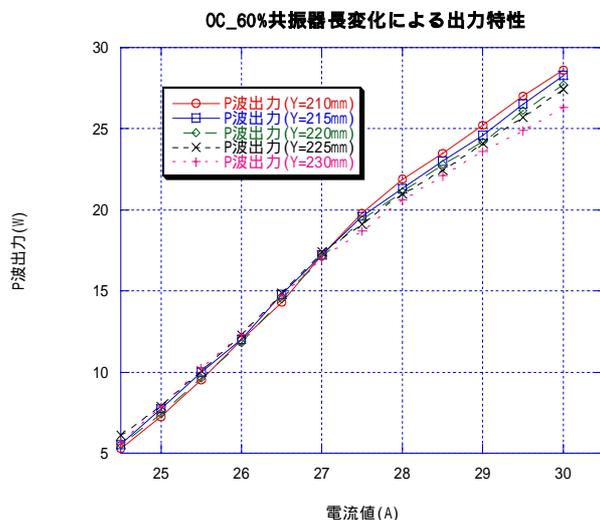


図 23 共振器長変化による出力特性

表 11 共振器長変化によるピーク強度安定性特性 (30A 駆動時)

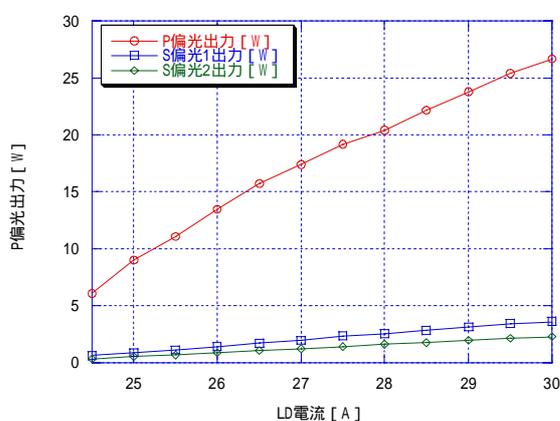
R.M. ~ Nd:YAG ロッド端面の距離 [mm]	ピークレスポンス
210	± 1.01%
215	± 1.00%
220	± 1.01%
225	± 1.11%
230	± 0.93%

以上の実験結果より、出力は R.M. とロッド端面の距離 210mm のとき電流値 30A で最大基本波出力 $28.6\text{W} \div 0.92$ (ウェッジ損失) = 31.1W となり、規格化ピーク強度安定性も ± 1.01% となった。しかし、ビームパターンが不安定だった。また、230mm としたときのピークレスポンスは ± 0.93% となったが、出力は電流値 30A で最小の 28.6W となった。安定に発振することの出来る共振器構成を考えると、R.M. とロッド端面の距離 230mm の時が他の長さの共振器長より安定的に発振していることが分かったので、共振器長として採用した。

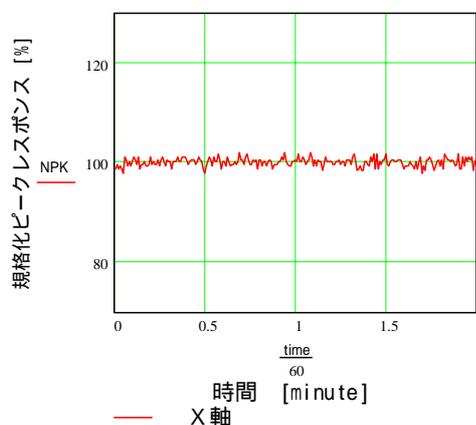
・左右対称型安定共振器での実験

次に、R.M. のみを移動させて共振器長を変化させるのではなく、左右対称型タンデムロッド共振器構成とする為に、O.C. と直前に設置している凹レンズ (f=-150mm) も 90° ローテーターを中心に同時に移動させて共振器長を伸ばしていく実験を行った。その実験結果を図 24 に示した。

・測定条件：ポラライザー有り、O.C.の反射率 60%、O.C.と f=-150mm レンズの距離 4.5mm、O.C.とロッド端面の距離 230mm、R.M.とロッド端面の距離 230mm



(a) 出力特性



(b) 規格化ピーク強度安定性 (± 0.837%)

図 24 左右対称型共振器特性. ((O.C.とロッド端面の距離) = (R.M.とロッド端面の距離) = 230mm)

図 24 において、S 波出力と裏面反射による S 波出力の比が 3 : 2 となっており、共振器内に設置したポライザーのプリースタ角度が適当でないことが考えられたので、再度角度を微調整し直して実験を行った。

・測定条件：ポライザー有り、O.C.の反射率 60%、O.C.と f=-150mm レンズの距離 4.5mm、O.C.とロッド端面の距離 230mm、R.M.とロッド端面の距離 230mm

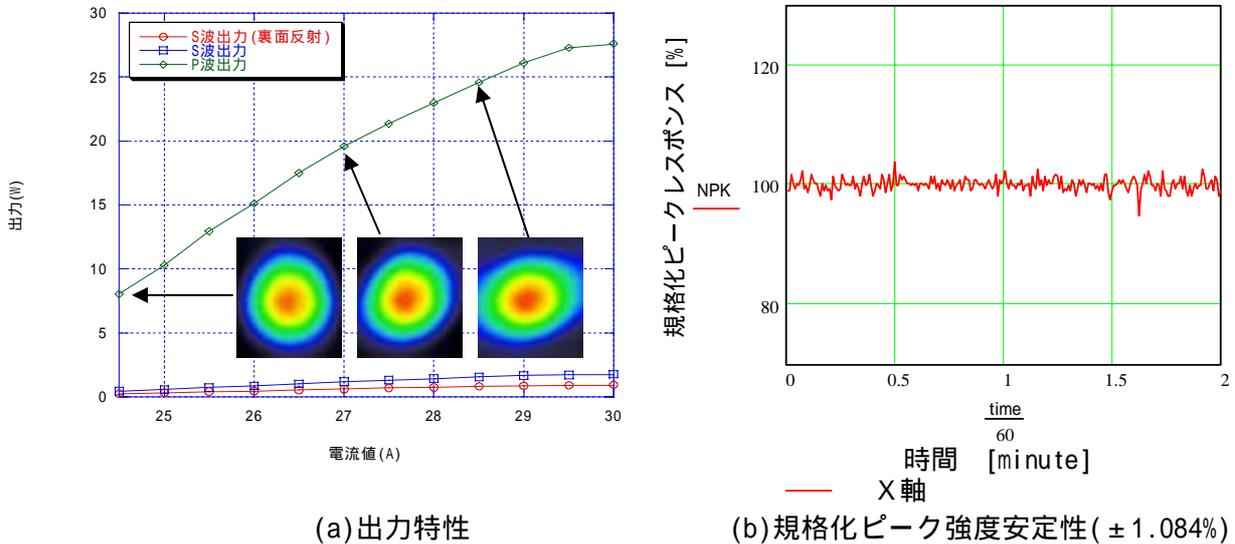


図 25 左右対称型共振器特性. ((O.C.とロッド端面の距離) = (R.M.とロッド端面の距離) = 235mm)

ここでは、ポライザーの角度を最適なプリースタ角度にタンデムロッド共振器内に設置するため回転ステージに設置しなおした。結果、S 波出力と S 波の裏面反射出力の比が 2 : 1 へと改善され、S 波の抜け出力が電流値 30A で 3.67W あったものが、1.75W まで減少し、P 波出力が 29W から 30W に上昇した。更に共振器長を 10mm 伸ばしてみた。その結果を、図 26 に示した。

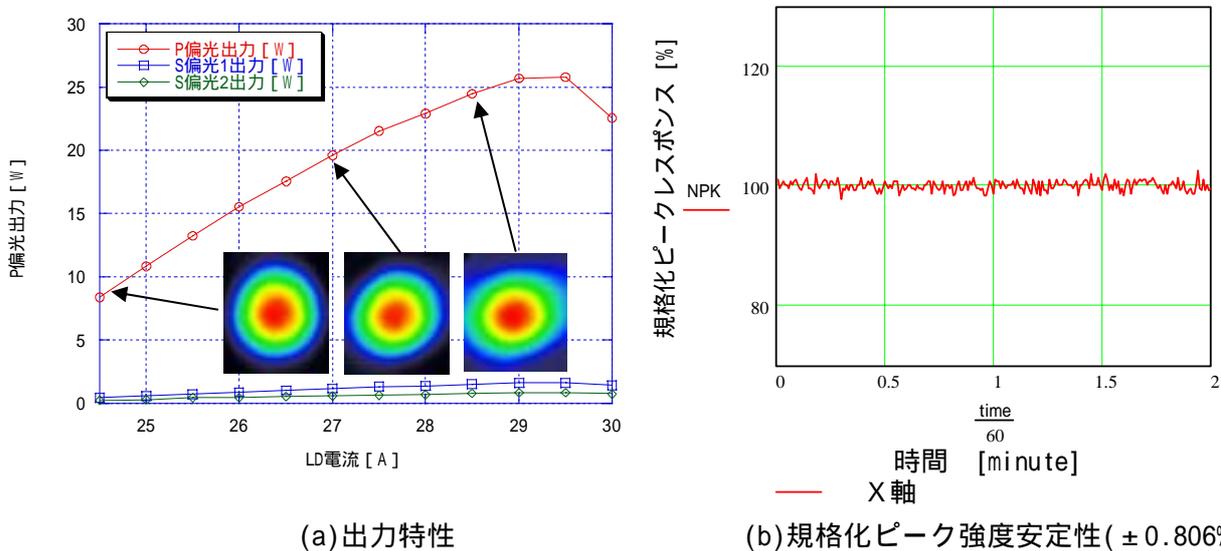


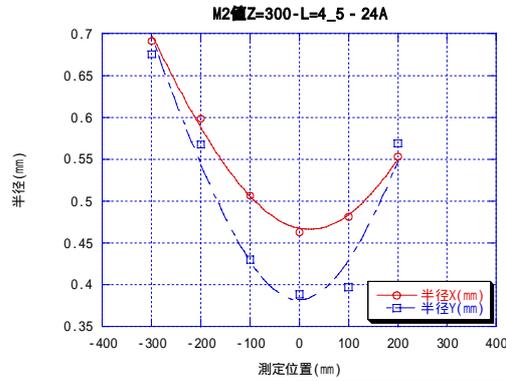
図 26 左右対称型共振器特性. ((O.C.とロッド端面の距離) = (R.M.とロッド端面の距離) = 240mm)

共振器長を更に 10mm 伸ばすことで、ピークレスポンスが $\pm 1.08\%$ から $\pm 0.81\%$ まで減少した。また R.M.と O.C.及びレンズの位置を変更して左右対称の共振器を構成した場合、最も基本波出力が高くなったのは距離を 235mm に設定した場合での 30W であった。しかし、出射端以後のレーザー光パターンに改善は見られなかった。

2.4.6 Polarizerの有無による発振特性の違い

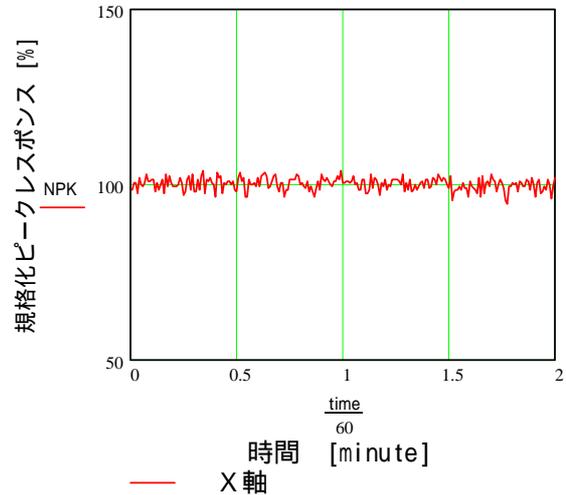
前節において、対称型安定共振器構成として共振器長を 90°ローテーターを中心に伸ばしたがピークレスポンスの大きな改善やレーザー光の集光点以降のパターン改善には至らなかった。そこで本節では、R.M. ~ Nd:YAG ロッド間長さ = 0.C. ~ Nd:YAG ロッド間長さ 300mm として共振器長を伸ばして、ポライザーの設置有無の違いによる発振特性の違いを実験的に求めた。その結果を、図 27 に示した。

・測定条件：(R.M. ~ Nd:YAG ロッド間長さ) = (0.C. ~ Nd:YAG ロッド間長さ) = 300mm、電流値 24A、(0.C. ~ 凹レンズ f=-150mm の長さ) = 4.5mm、ポライザー設置、出力 6.9W

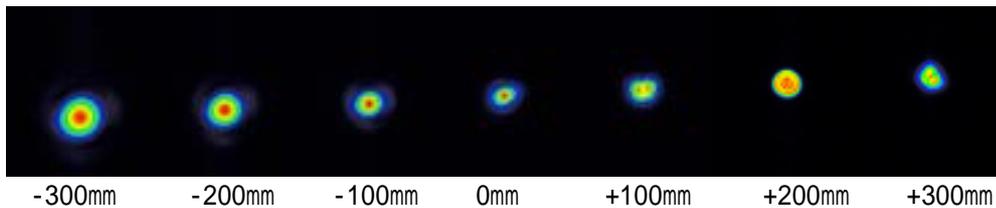


y = m1*sqrt(1+(m2*1064e-6*(m...))			y = m1*sqrt(1+(m2*1064e-6*(m...))		
	値	エラー		値	エラー
m1	0.46613	0.0053402	m1	0.38208	0.020006
m2	2.2368	0.053155	m2	2.1959	0.11388
m3	20.349	5.6986	m3	-1.1189	11.68
カイ2乗	0.00021153	NA	カイ2乗	0.0026066	NA
R	0.99711	NA	R	0.98065	NA

(a) M² 値測定結果



(b) CW 光の規格化強度安定性 (±1.77%)

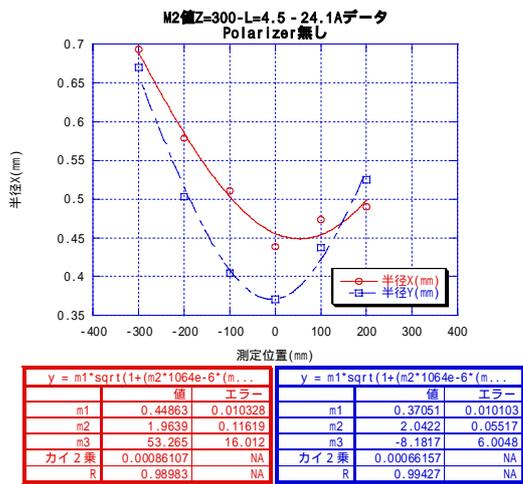


(c) 凸レンズ f=+400mm で絞った後のレーザーパターン

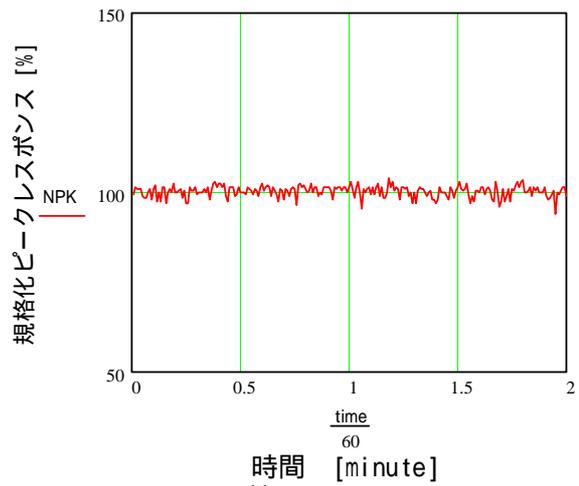
図 27 ポライザーを設置した時の CW 光特性

共振器を伸ばしてみたが、M² 値 2.2 × 2.2、規格化ピーク強度安定性 ±1.77% と目標値である M² 値を 2 以下とすることやピークレスポンスを ±1% 以下にするまでには至らなかった。また、共振器の調整方法として今までのように、R.M.のみを調整するのではなく O.C.も同時に調整を行った。しかし、凸レンズ f=+400mm の集光点以後のレーザー光パターンに中抜けパターンが生じて再度絞れてしまう現象の改善には至らなかった。次に、ポライザーを設置しない時の特性を実験した。

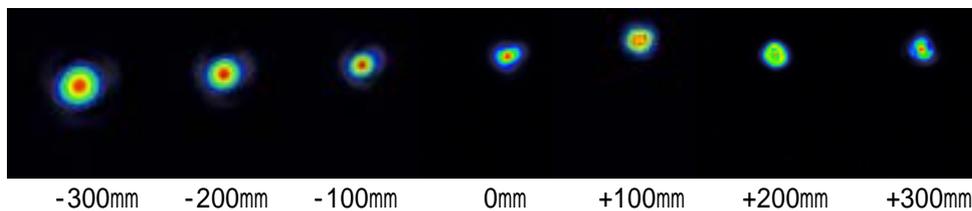
・測定条件：(R.M. ~ Nd:YAG ロッド間長さ) = (0.C. ~ Nd:YAG ロッド間長さ) = 300mm、電流値 24.1A、(0.C. ~ 凹レンズ f=-150mm の長さ) = 4.5mm、ポライザー未設置、出力 7.3W



(a) M²値測定結果



(b)規格化ピーク強度安定性(±1.613%)



(c)凸レンズ f=+400mm で絞った後のレーザーパターン

図 28 ポラライザーを設置し無かった時の CW 光特性

同じ共振器長を持った共振器構成で、M² 値 1.9×2.0、ピークレスポンス±1.61%となりポライザーの有無によるレーザー光パターンの改善や規格化ピーク強度安定性の改善とはならなかった。

2.4.7 タンデムロッド型内部共振器波長変換

前節までの実験結果をふまえて、2 倍波変換結晶 KTP(Type)を共振器内部に設置して高調波変換を行なった。その共振器構成図を図 29 に示す。またその時の出力特性を図 28、図 29 に示す。

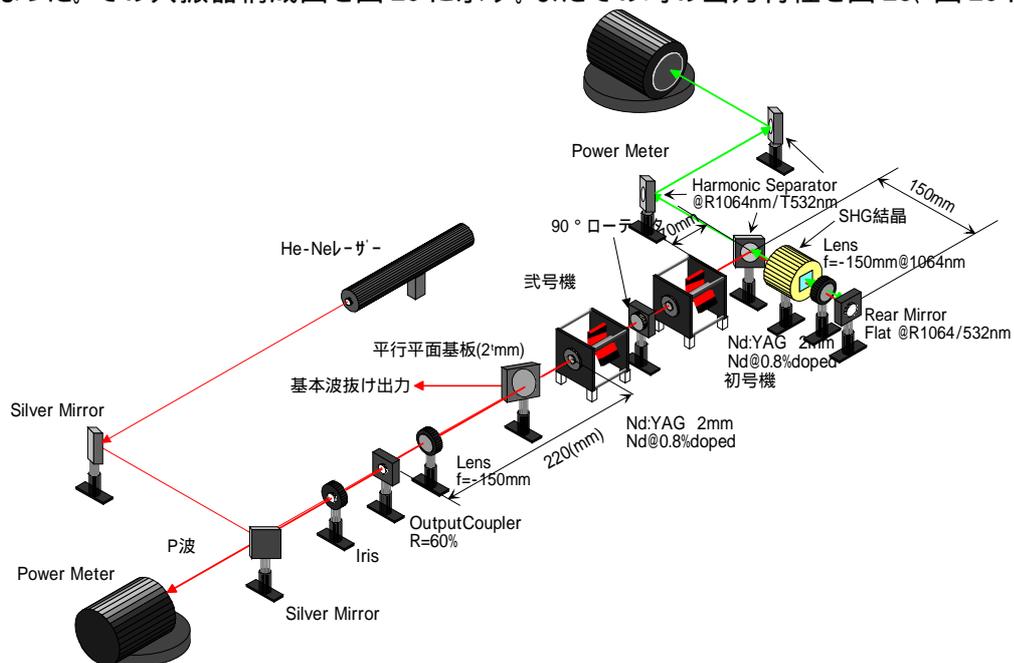
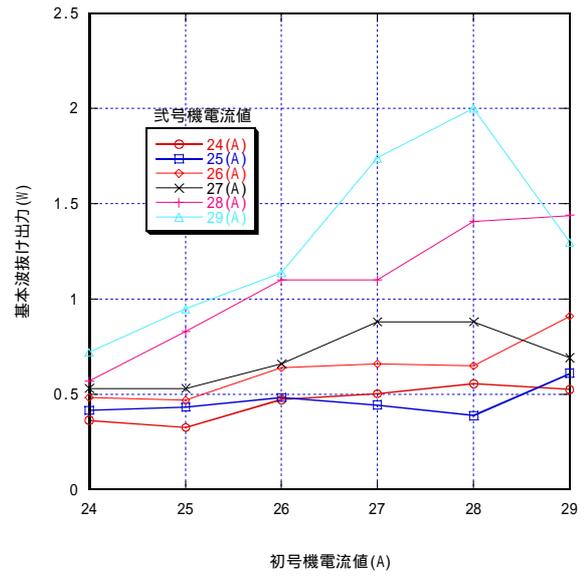
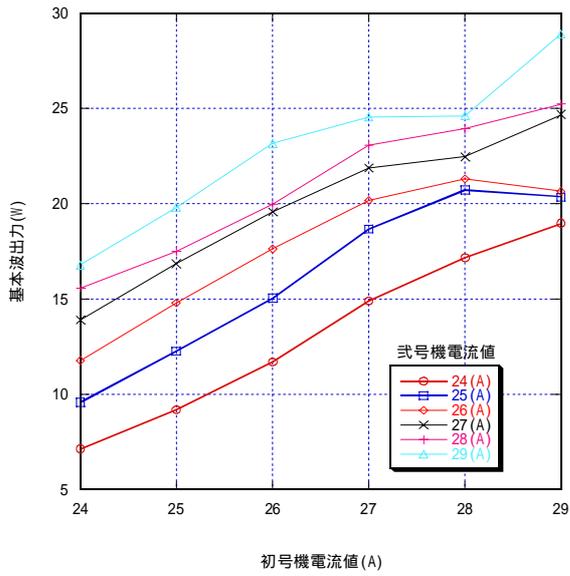


図 29 タンデムロッド共振器グリーンレーザー概観図



(a) P 偏光出力 (b) プリースタプレートの抜け出力
 図 30 プリースタプレートを用いたタンデムロッド共振器の出力特性

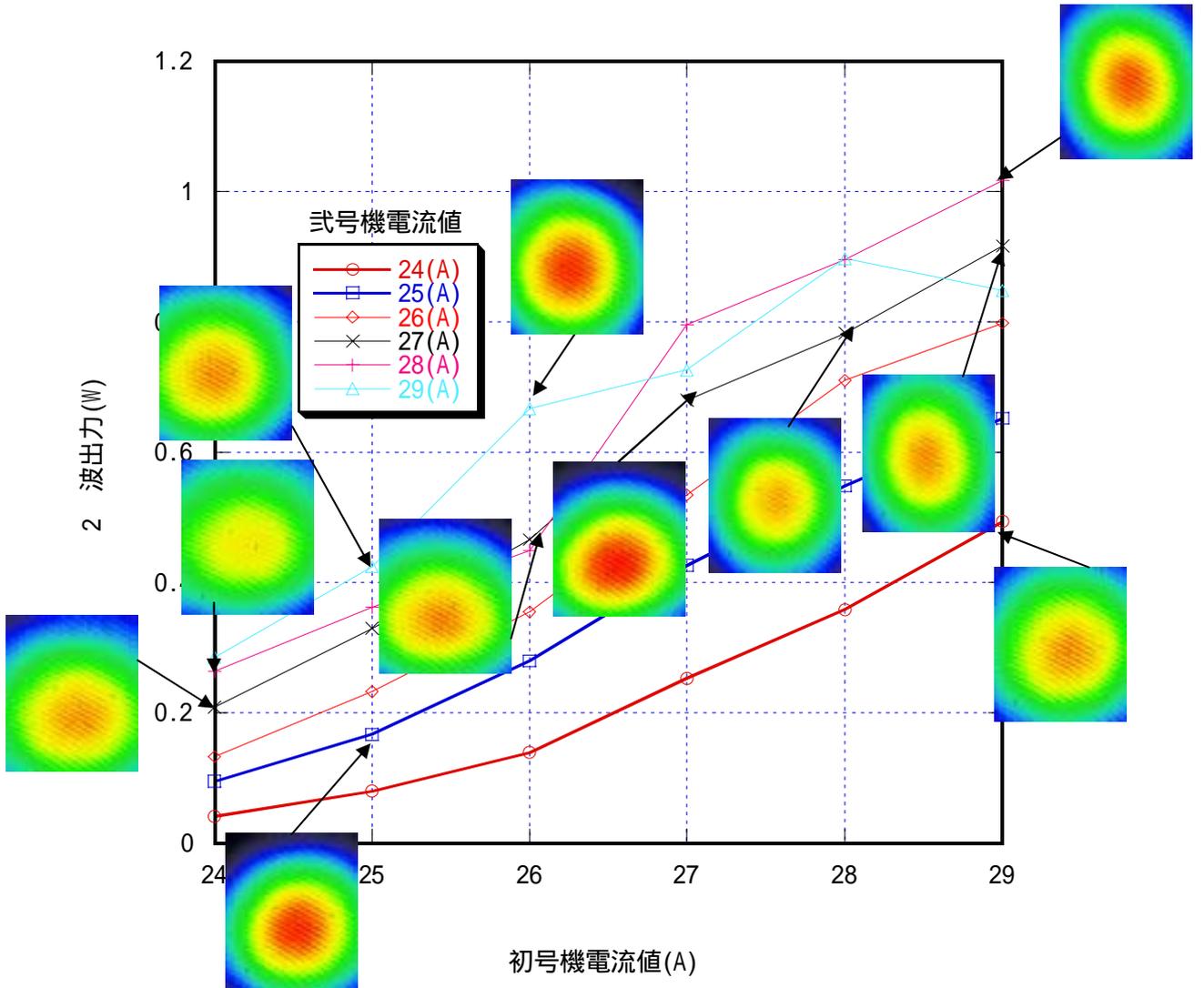


図 31 2倍波変換出力特性およびビームパターンの変化

以上の結果から、反射率 60%の O.C.を用いたので基本波出力を確認しながらの 2 倍波変換を行なったが、Type の KTP を内部に設置する内部波長変換共振器であるため Green Problem を考慮して /4 板を R.M.側の折り返しミラーと初号機の集光器の間に設置し実験を行なった。基本波出力のみ出力する共振器では最大で 31W の基本波出力をしたがこの実験では、基本波出力 28.9W を出力し 2 倍波出力 848mW を出力した。しかし、最大電流時におけるビームパターンが不安定であるために 2 倍波出力は最大とはならず、初号機電流値 29A・弐号機電流値 28A で最大 2 倍波出力 1.02W となった。図 30 を見ても分かるように、電流が大きくなるに従いパターン安定性が崩れ、パターン安定性の悪いものは 2 倍波出力が効率良く変換しにくかった。しかし、反射率 60%の O.C.では参考にしかならないので、反射率を 90%、100%に段階的に変更して 2 倍波出力特性を実験的に求めてみた。

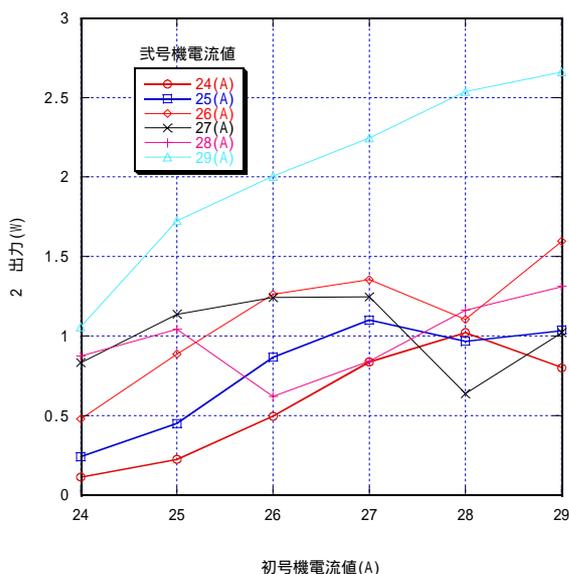


図 32 2 倍波出力特性測定結果

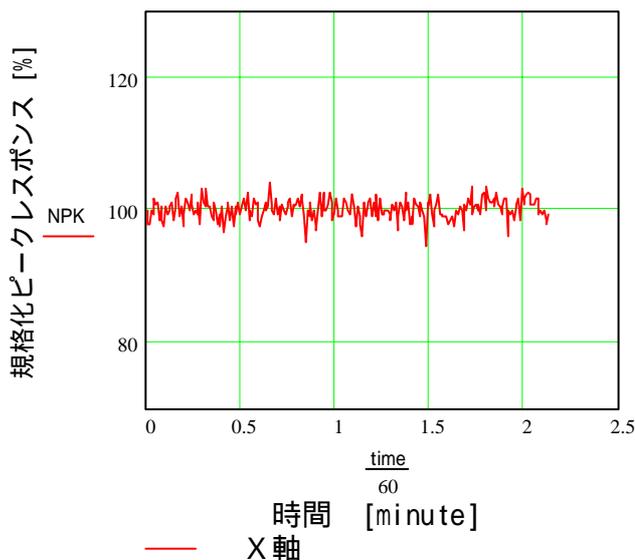


図 33 2 倍波の規格化ピーク強度安定性

2 倍波出力を図 32 に、図 33 に 2 倍波出力の規格化ピーク強度安定性の測定結果を示す。反射率 90%の O.C.に交換すると、基本波の発振が不安定となるのでビームパターン安定性が低下し、プリースタプレートからの抜け出力が増加した。またその影響で、2 倍波出力も不安定さが増した。図 32 から分かるように、弐号機電流値(R.M.側集光器)を 24A ~ 28A ではどれも出力が安定的に調節することが出来なかったが、29A の電流を流したときは、パターンは TEM₀₀ モードでは無かったが、楕円形でビームパターンの揺らぎがさほど無く 2 倍波出力 2.66W となった。またその時の規格化ピークレスポンスは ±1.542% となった。

次に、反射率 100%としたときの出力特性を図 34 及び図 35 に示す。

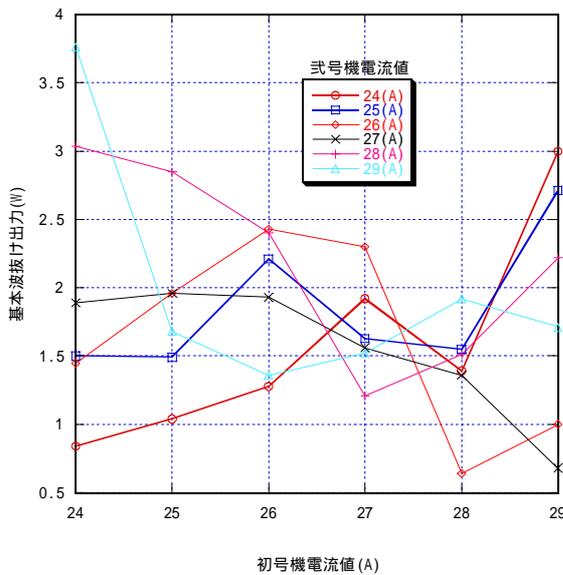


図 34 ブリュースタプレートからの基本波抜け出力

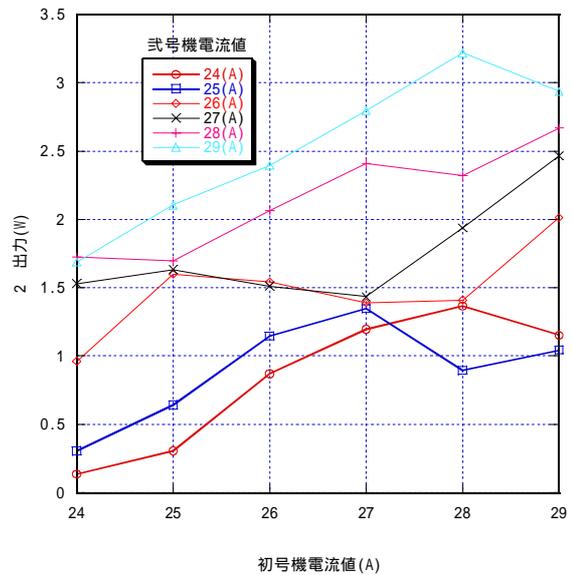


図 35 2倍波出力特性

出力は初号機電流値 28A・式号機電流値 29A の時に、最大 3.2W と測定された。しかし、集光器の電流値が両方共に 29A の時のビームパターンが TEM₀₀ モードに見えるにも拘わらず出力が減少したのは、マルチモード発振のために KTP 結晶での変換効率が低下したからだと思われる。また、変換効率の低さは共振器長が少し長いため共振器内のエネルギー密度の低さが原因の一つと考えられるので、そのエネルギー密度を高くするため、現状より短い共振器長で安定発振が可能となる領域を探す計算を行なった。

2.4.8 計算機による共振器長の最適化

複屈折効果によるブリュースタプレート(平行平面基板をブリュースタ角度に共振器内に設置)からの基本波抜け出力が、以前として 100mW 以上出力として測定されているので、改めて計算機シミュレーションにより、より安定に発振する共振器構成を求めてみることにした。手法としては、従来通りの ABCD Matrix 法を用いた安定性判別を当てはめてみることにした。熱複屈折媒体となる Nd:YAG の計算機上における各種パラメータの当てはめ方は、図 36 のように仮定した。

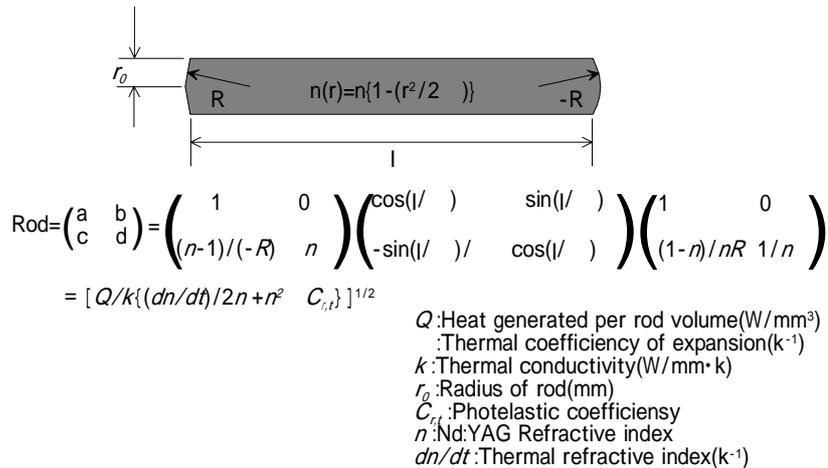
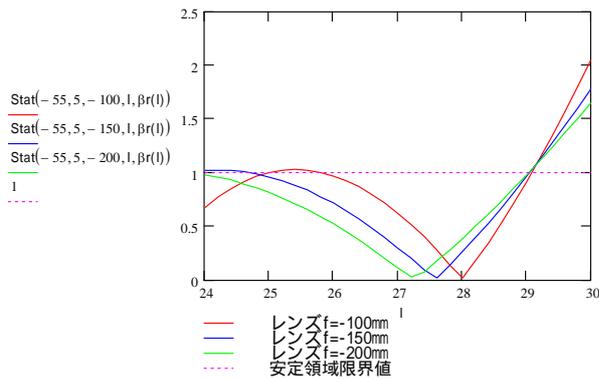
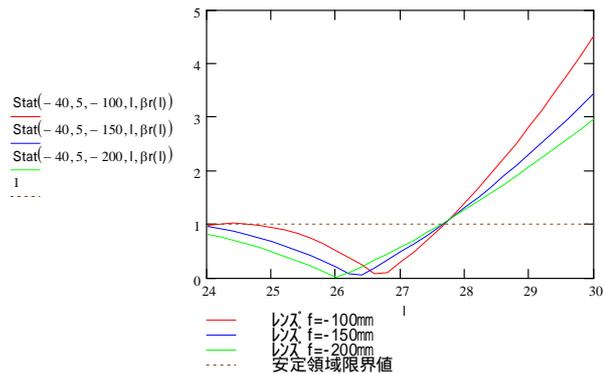


図 36 プログラム上の Nd:YAG ロッドと各種パラメータ



(a) 共振器長を現状より 110mm 短くしたときの安定性変化
(O.C. & R.M. を共に 55mm 共振器長が短くなるようにした。)

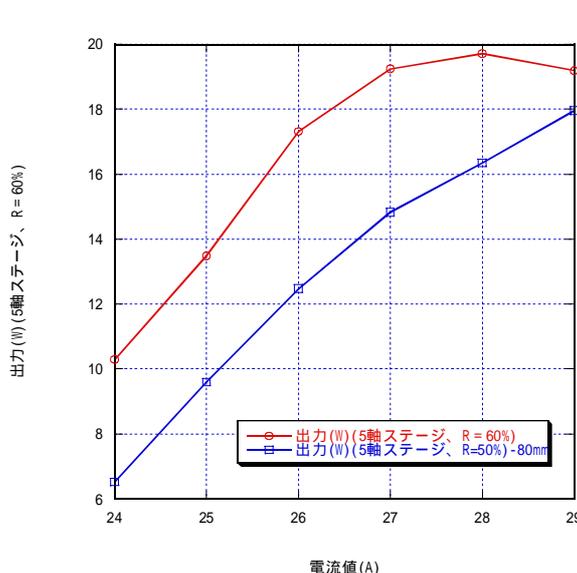


(b) 共振器長を現状より 80mm 短くしたときの安定性変化
(O.C. & R.M. を共に 40mm 共振器長が短くなるようにした。)

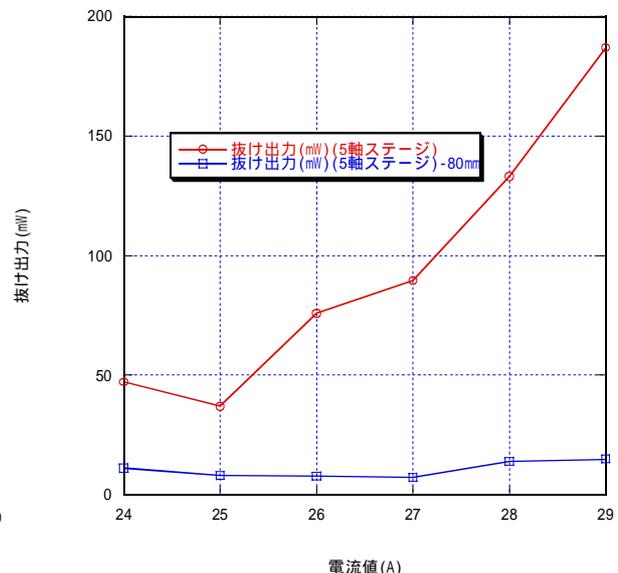
図 37 計算シミュレーションによる安定性の判別

Nd:YAG ロッドを二乗屈折率分布を持つ媒質とおき、LD からの励起光の 1/3 が熱に変換されるとして現在の共振器構成から得られた各種パラメータを ABCD Matrix に当てはめて計算を行なった。その計算結果を図 37 に示した。

このように、現状の共振器長よりも 80mm 以上短くしたところに、安定に発振できる安定領域があることが計算から求められた。この結果を基に、80mm 共振器長を短くしたときの基本波出力特性を測定した結果を図 38 に示す。



(a) 基本波出力特性



(b) 基本波抜け(S波)出力特性

図 38 従来よりも 80mm 共振器長を短くしたときの基本波出力特性

計算によって求められた安定に発振が可能な共振器長に設置し直した結果、基本波出力では内部共振器エネルギー密度が上昇するのでアウトプットカプラーの反射率を 50%に下げた。このために少し出力が減少したが、高い電流値まで安定的に発振をした。また、熱複屈折効果による基本波抜け出力の特性は、高い電流値である 29A まで電流値を上昇させても低くなった。前節では 100mW(式号機電流値 24A のとき)近くあった抜け出力が、計算によって求めた共振器長にした結果、最大 15mW 以下に抑えることが出来た。

2.4.9 まとめ

・CWレーザーの構築

レーザー媒質にNd:YAGを用いてこれを3方向から均一励起を行なっているか測定を行なう。

次に、本研究開発は内部波長変換型CWグリーンレーザーシステム構築にあるので、波長変換を行なう前の基本となるレーザー光、波長1064nmの安定且つ高出力のCWレーザーを構築した。目標値として、10W以上の基本波出力に対して、基本波(波長1064nm)出力13.3W・規格化ピーク強度安定性 $\pm 1.002\%$ ・ビーム品質は解説限界値 $M^2 = 1$ とすると $M^2 < 1.5$ を達成した。

・L型共振器内部波長変換CWグリーンレーザーシステムの構築

実験の結果、LD レーザー入力電流 16.4A (励起入力 136.7W)時に、1.42W のグリーン光が得られた。また、LB0 結晶を Type- (結晶サイズ $4 \times 4 \times 20\text{mm}^3$)から Type- (結晶サイズ $4 \times 4 \times 15\text{mm}^3$)にすることで、LD 入力電流 18.2A(励起入力 172.6W)時に 2 倍波出力 3.43W の出力が得られた。この際の発振ビームパターンは、楕円形になっておりビーム品質が悪く、ビーム強度安定性も CCD カメラで観測を行うと非常に不安定であった。これは、発振する波長 1064nm のレーザー光がランダム偏光になっており、反射ミラーが 45° なので、縦偏光(S 偏光)と横偏光(P 偏光)での反射率が若干異なることから、不安定要因を引き起こしていると考えられる。

・Z型共振器内部波長変換CWグリーンレーザーシステムの構築

次に、共振器内部設置した 45° 反射ミラーにおいて、異なる偏光によって生じる反射率の差は、反射ミラーを 0° に近づけることによって改善される。これにより、Z 型共振器による CW グリーンレーザーシステムの構成を行なった。LD 入力電流 17.6A(励起入力 160.6W)時に波長 1064nm では 21.2W の安定発振が得られた。この際の C 規格化ピーク強度安定性は $\pm 2.0\%$ であった。次に共振器内に LB0 結晶の Type- を設置し、CW グリーンレーザー光出力の実験を行った。その結果、半導体レーザー入力電流 17.5A(励起入力 158.6W)時に、4.7W の出力が得られた。同時にビーム品質を表す M^2 値の測定も行い、X 軸 1.3、Y 軸 1.4 の結果が得られた。しかし規格化ピーク強度安定性は、 $\pm 1.4\% \text{rms}$ (2 倍波出力 4.78W) である。従って、安定性の更なる改善を行なうことが要求される。発振不安定性を招く原因として、熱複屈折効果がある。この効果によって偏光が回転すると、 r 偏光から r 偏光へ又は r 偏光から r 偏光へ移行する成分が生じ、これが安定性の劣化を招くと考えられる。従って、安定動作領域の幅を広くすると共に、安定性の改善を図るためには、基本波モード径を小さくするのに伴いロッド径をなるべく小さくし、且つ、熱複屈折の補償が不可欠であると考えられる。

・小径シングルロッドによる V 字型内部波長変換 CW グリーンレーザーシステムの構築

次に更なる安定性と高いビーム品質を得るために、Nd:YAG のロッドを 3mm から 2mm に変更しシングルロッドによる V 字型共振器 CW グリーンレーザーシステムの構築を行なった。この構成により波長 1064nm ではピークレスポンスを $\pm 0.44\%$ まで改善することが出来た。この時の回折限界値を示すビーム品質 M^2 値を測定し、 M^2 値は 1.64×1.72 と求まった。CW グリーン出力を得べく波長変換結晶 KTP (Type II) をビームウェスト位置に設置し 2 倍波変換を行った。結果、3.11W の CW グリーン出力を得たが、KTP の設定温度において ± 1 以上の温度振れ幅があったために出力が不安定になるという結果を得た。

・タンデムロッド型内部波長変換CWグリーンレーザーシステムの構築

次に発振安定性の改善を図るため、レーザー媒質のロッド径をなるべく小さくし、ロッド内で生じる熱複屈折効果の補償が可能な 90° ローテーターを用いたタンデムロッド構成とした。そこで、共振器構成をロッド内で生じる熱複屈折効果の補償が可能な 90° ローテーターを共振器内部に用いたタンデムロッド構成とし、ロッド径を 3mm から 2mm に変更した構成とし共振器の構築を行なった。結果、共振器の O.C. の反射率を 60% として基本波出力は 7.5W ~ 31.5W を出力した。非対称型共振器構成では、ピークレスポンスが最小で $\pm 0.93\%$ となったが、集光点以後において TEM_{00} モードで発振することが出来なかった。また共振器長を同距離ずつ伸ばしていく対称共振器構成では、ピークレスポンス $\pm 1.771\%$ 、 M^2 値 2.2×2.2 となり改善できなかった。これを集光器ごとに電流値を制御することで、出力 16.7W の時に規格化ピーク強度安定性は $\pm 1.22\%$ まで改善した。2 倍波変換においてビームパターンは TEM_{00} モードでは無かったが楕円形のビームパターンで、2.66W の 2 倍波変換出力を得た。またその時

の規格化ピーク強度安定性は $\pm 1.54\%$ を得た。出力は初号機電流値 28A・弐号機電流値 29Aの時に、最大 3.2W の 2 倍波出力を得た。

(3) 主な成果

Z 型内部波長変換 CW グリーンレーザーシステムにおいて、CW グリーン出力 4.78W・回折限界を示す M^2 値は 1.4 を、規格化ピーク強度安定性は $\pm 1.4\%$ rms を得た。

(4) 研究成果に関する評価

国内外における水準との対比

レーザーヘッド体積は、ほぼ同等の大きさである。側面励起方式 CW グリーンレーザーでは世界トップレベルの回折限界に近い、高いビーム品質を得た。

実用化に向けた波及効果

Ti:sapphire 発振器の励起光源に限らず、各種欠陥計測や溶接への応用が考えられる。

(5) 残された課題と対応方針について

5W クラスを越える CW グリーン出力と高い出力安定性を確保するために、熱複屈折による不安定発振を取り除くために、最適な励起出力と更なる均一励起を目指す必要性がある。