

平成18年度
研究開発成果報告書

航空機の安全航行のための乱気流
レーザーセンシングシステムの開発

委託先： (株)メガオプト

平成19年4月

情報通信研究機構

平成18年度 研究開発成果報告書
(地域中小企業・ベンチャー重点支援型)

「航空機の安全航行のための乱気流レーザーセンシングシステムの開発」

目次

1	研究開発課題の背景	3
2	研究開発の全体計画	
2-1	研究開発課題の概要	4
2-2	研究開発の最終目標	9
2-3	研究開発の年度別計画	11
3	研究開発体制	12
3-1	研究開発実施体制	12
4	研究開発実施状況	
4-1	励起チャンバーの研究開発	14
4-1-1	研究開発内容	14
4-1-2	セラミックロッドの製作と光学評価	14
4-1-3	LDのスペクトルオーバーラップに関する計算	17
4-1-4	励起チャンバー第2試作	18
4-1-5	レーザー発振実験(第2試作:フリーランニング)	19
4-1-6	励起チャンバーの完成	20
4-1-7	まとめ	22
4-2	シード光発生器の研究開発	23
4-2-1	研究開発内容	23
4-2-2	Tm,Hoファイバ光学特性	23
4-2-3	Tm,Hoファイバのレーザー発振と利得確認	24
4-2-4	DFB-LD光のファイバ結合とTm,Hoファイバによる増幅	25
4-2-5	まとめ	26
4-3	主共振器の研究開発	27
4-3-1	研究開発内容	27
4-3-2	設計	27
4-3-3	まとめ	34
4-4	増幅器の研究開発	35
4-4-1	研究開発内容	35
4-4-2	利得見積もりについて	35
4-4-3	増幅器用チャンバーの設計	36
4-4-4	増幅器光学系の設計	36
4-4-5	まとめ	38
4-5	総括	39

5 参考資料・参考文献

5-1 研究発表・講演等一覧

1 研究開発課題の背景

航空機による移動はもはや狭い日本においても必須であり、国内遠隔地や海外への旅行観光客の急速な増加とともに各地に国際空港がオープンし、飛行機の便数も増加している。日本における国内・国際航空旅客者数は年間約1億4千万人（2003年）と、2001年の同時多発テロの影響を受けてもなお、10年前に比べて1.3倍に増加しており、全世界で見ても今後20年間に航空旅客数は倍増するとの予測もある。また航空機そのものも2022年までに総数で約24000機の航空機需要が見込まれている。内訳は400席以上の大型旅客機に限っては1000機近く、100席以上の狭胴機を含めると15000～20000機に達する（いずれも日本航空開発協会調べ）。いよいよ本格的な航空機時代に突入したと言える。

移動手段としての航空機のウェイトが増すにつれ、より高い「安全」が必要になるのは当然である。航空安全という面で考えてみると、時代とともに急成長するエレクトロニクス技術を背景に、外部の航空管制システムとのリンクを行い、また航空機の内部異常を診断して的確な航行を可能にするプログラムは充実してきており、航空機の安全は過去に比べて飛躍的に高まっているといえる。しかしながら、突発的に生じる気象の変化といった航空機に特有の危険に対しては、そうした制御を充実させてなお対応不可能である。2005年3月に発生したエバー航空機が乱気流に巻き込まれて50人あまりが重軽傷を負った事故はまだ記憶に新しいが、これも雲や地形などからも予測することができない、晴天時の乱気流によるものであった。また、離着陸頻度の高い空港の滑走路においても、後続の航空機が直前の航空機によって発生したタービュランスに巻き込まれることも指摘されている。これらは目視ではもちろん、電波レーダーでも捉えることができず、コンピュータ制御の航行システムが整った現在でもこのような事故は回避が難しいといえる。

したがって、航空機エレクトロニクスが充実した今の航空安全にとって最もフォーカスすべき課題は、これまで予期できなかった大気の流れなどの突発現象を事前に捉えて回避する、滑走路近辺に設置あるいは航空機に搭載可能なプロアクティブな安全設備の開発である。これは今自動車の世界で開発が進み、一部市販車への搭載も開始されている、衝突防止や走行レーンの自動追従といったプロアクティブセイフティとも同期する、悲惨な事故を回避するための最も効果的な方法の一つであり、これからの交通機関に不可欠な技術である。

乱気流は、通常は高山周辺や積乱雲などの内部に生じるが、上記の事故の例にもあるように晴天時にも高度に関係なく発生するものがあり、地形や雲から予測することができず危険性が高い。このような大気の流れを遠隔地から計測するために、レーザーを用いたドップラーライダーという手法がある。日本においても風ライダーの開発が行われてきたが本申請のレベルの出力を持つ光源を搭載したものはない。航空機搭載用として高繰り返し周波数の小出力のアイセイフ光源を搭載して実用化手前の段階まで進んだものもある（JAXA）が、出力が弱いために遠距離までの計測が不可能で、近距離の計測あるいはヘリコプターや小型飛行機などの低速機向けにしか使用できない。本申請に記載された長距離測定するための光源としては根本的なテクノロジーを高パルスエネルギーのレーザーに求める必要がある。従って上記の開発における1.5 μ m帯の高繰り返し光源をベースにするのではなく、従来の上記の地上設置用レーザー光源の開発結果を基礎として、より高出力化を推進することが解決の近道となる。国外においては主に米国で開発が進められており、特にコヒーレントテクノロジー社では光源から受信システムまでトータルな開発が行われている。しかしながらやはりレーザーの開発がネックとなり、民間の航空機を対象としたシステムの開発までには至っていない。従って高出力の発信系がこの安全技術を完成させるキーテクノロジーといえることができる。

研究開発対象としてみた 2 ミクロンレーザーは、国内では情報通信研究機構が数 100mJ クラスの発振に成功しているが、大型の装置であることと、コストが高くなっており、実用化のためにはサイズ、価格ともにコンパクトに圧縮する必要がある。この目的のためにもレーザー光源の専門企業である弊社がこのプロジェクトを行う意義がある。一方、海外では最近 NASA のグループがジュールクラスのパルス発振に成功した(Jirong Yu, et al., Opt. Lett. vol.31, 462)。これも研究ベースであるものの、そのような高エネルギーパルスを実現可能であることの証明として意義深いものである。

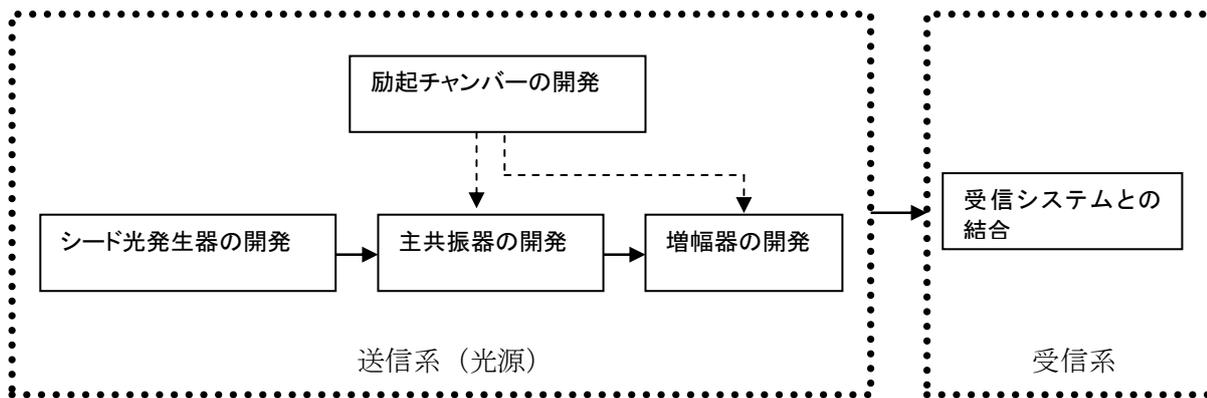
2 研究開発の全体計画

2-1 研究開発課題の概要

a. 総論

本研究開発における課題は、大気の流れを検知するセンシングシステムの開発である。レーザーセンシングシステムは送信、受信、とその制御部に分けて考えることができるが、これまでの関連開発により受信のハードウェア、および送受信制御の部分に関してはあくまで信号プロセッシングであるためすでに目標を達成できる性能・仕様を満たすものが入手可能だが、送信側には従来では到達しえなかった光源を搭載する必要がある。従って本研究開発課題における主題は送信側に搭載する、高出力の光源である。大気の流れを検知する方法には種類があるが、リアルタイムで長距離の測定を行うという前提条件の下では、レーザーを使用しその光の散乱により大気の流れを検地するもの以外には選択肢がない。航空機におけるプロアクティブセイフティを達成するためには、滑走路設置の場合、大型機の国際線用滑走路基準である 4000m の 2 倍程度の距離にわたる情報を取得する必要がある。また航空機搭載型の場合では少なくとも時間にして 1 分前、距離にして 10~20km 先の情報を入手する必要がある。このような要求を満たすためには、これまで風ライダーによるリモートセンシングで行われてきたデータから考えると、パルスエネルギー約 1J、パルス幅数 100ns で単一周波数発振するレーザーが必要とされる。しかも、大気中に光を放出することを考えると、人間の目に対しての安全性の高い、いわゆるアイセイフ領域、すなわち $1.5\mu\text{m}$ よりも長い波長において発振するレーザーが望ましい。また使用される環境からの要請に従い、振動や温度変化に対する耐久性・安定性に関する検討を同時に行う。当該研究開発期間内は既存の受信システムを使用した評価を行い、発信器側の開発に重点を置くことにする。本開発において発信器の性能を実証したのち、適合したシステムを製品化のプロセスにおいて適用する。

本開発課題は、光源となるレーザーの開発を中心にア) 励起チャンバーの開発、イ) シード光発生器の開発、ウ) 主共振器の開発、エ) 増幅器の開発、オ) 受信系との結合の 5 つのサブテーマから構成される。それぞれのサブテーマの関連に関しては以下に図示した通りである。実線はレーザー装置の光の流れ、点線は関連技術を表す。



主共振器と増幅器での共通技術であり、高出力化の最大のポイントである励起チャンバーの開発をまず最初に行い、その結果を利用して主共振器と増幅器の開発を実行する。また単一周波数を達成するための方法として主共振器の内部の波長制御という方法も考えられるが、温度ドリフトや機械的な安定性が周波数に影響を与えるため、周波数制御の部分を別の小出力共振器に持たせ、これをシード光発生器として開発する予定である。

これらについてそれぞれ詳細な説明を以下で行う。

b. (ア) 励起チャンバーの開発

b-1: 技術概要

現代の効率的なレーザーには半導体レーザー励起が必要不可欠であり、これを前提条件として開発をすすめる。アイセイフの波長域において、高エネルギーのパルスレーザーを実現するためには 1) Nd イオンなどを活性種とした 1 ミクロン帯の励起レーザーをベースにした光パラメトリック発振によるダウンコンバージョン、2) レーザー媒質として固体結晶に活性種として Tm ないし Ho イオンを添加した 2 ミクロンレーザー、3) 同様に Er イオンを添加した 3 ミクロンレーザー、が考えられる。それぞれの方式の利点と欠点をまとめたものが下の表である。欠点についてはその理由を簡単に書き示した。

	1) Nd レーザー+OPO	2) Tm/Ho レーザー	3) Er レーザー
エネルギー	△(理論的に蓄積小)	◎	○
平均出力	○	△(廃熱の難しさ)	△(理論的に小)
繰り返し	◎	○	△(理論的に小)
単一周波数	△(複雑化)	○	△(シード光源が困難)
効率	△(非線型変換)	◎	△(ストークス損失大)

1)の場合は、励起レーザーのパルスエネルギーを大きく取れず、また単一周波数動作させるためには装置が複雑化すること、非線型波長変換ステージがあるため効率の低下が考えられる。3)の手法では、レーザーに関与する Er イオンのエネルギー準位上、平均出力に制限があることと、エネルギー効率が物理的に小さいこと、また単一周波数動作のためのシード光源の構築が困難なために共振器が複雑になると考えられる。2)の方式では、平均出力は廃熱の工夫次第で改善ができ、その場合効率は極めて高くできる。従って航空機搭載用途などの効率が重視される応用にはこの方法がもっとも優れている。

2)の方法を採用した場合にもっとも重視されるべき点は上記の表からもわかるとおり、熱のマネジメントである。レーザー結晶からの放熱の効率がレーザーの効率に直接関わる

ため、このサブテーマの中での最大の検討事項である。逆に言えば、結晶からの発熱を効率よく廃棄することができれば、最も有力な候補といえる。しかしながら結晶からの放熱だけでなく、その励起源である半導体レーザーからの光を効率良く結晶に導入する手法の検討も同時に行われる必要がある。極めて小さな体積に対し、光の導入と熱の吸収を同時に行うため、励起・吸熱方式まで含めた開発の必要がある。

またレーザーの効率を決めるもう一つの検討事項が結晶の選定である。結晶は本質的なレーザー発振の特性を決定づけ、またその結晶の熱伝導、熱膨張率、屈折率の温度依存性などは熱マネジメントと相まってトータルの性能を左右する。

b-2：具体的な開発手順

- 1 候補となる結晶材料の選定を行う。高エネルギーパルスレーザーとして使うことを前提とし、試験的にいくつかの材料を入手して試験用の励起チャンバーにて発振実験を行う。材料の物性パラメータを同時に測定する。またこれに平行して T_m と H_o のイオン濃度の最適値を見積もる。結晶パラメータが明らかになれば理論的に最適値を計算することが可能である。
- 2 励起チャンバーの構造を提案して、1 で得られた物性パラメータから温度分布、熱ストレス強度、励起密度などの計算を有限要素法の計算コードを用いてシミュレーションする。最適な構造に併せた機械設計を行い、チャンバーの製作を行う。
- 3 結晶と半導体レーザーを組み込み、シミュレーション結果および仕様との差異を実験的に求める。
- 4 2 と 3 を重ねて行い、冷却効率・励起効率・エネルギー取り出し効率に優れた励起チャンバーを完成させる。

b-3：開発目標

両面フラットミラーの共振器を組み、 Q スイッチや波長選択素子などの挿入されない準連続波のフリーランニング動作において、パルスエネルギー200mJ、繰り返し 20Hz を実現すること。

b-4：体制

励起チャンバーは、レーザー装置全体を通してその効率を決定するキーユニットであり、上記のように極めて多くの検討事項と実験を必要とするため、これを単独のサブテーマとした。現在の日本において T_m あるいは H_o レーザーの構築経験がもっとも豊富である東北工業大学の浅井教授、佐藤講師にこのサブテーマにおける中心的役割を担っていただくことにしている。

c. イ：シード光発生器の開発

c-1：技術概要

通常レーザー結晶はある程度の利得スペクトル幅を持っており、例えば比較的利得スペクトルが狭い Nd:YAG レーザーの最強の発振線である 1064.2nm の発振線では 0.4nm 程度である。これに対し、共振器が許容するスペクトル間隔は通常 pm のオーダーであり従って共振器の内部には一定間隔の周波数を隔てて多数の周波数成分を持つ光が発生する。本開発の結果を用いるドップラーライダーは、わずかな周波数差を元に風の流れを捉えるため、多数のピークを持つレーザーでは測定不可能であり、本開発においても発振スペクトルを限定し、狭いスペクトルを持つ光を 1 本だけ選択する必要がある。主共振器に波長

選択性を持つ分散素子を挿入し、選択したい任意の波長以外に対して損失を持たせることにより、狭い発振スペクトルを達成する方法があるが、周波数基準としての役割を主共振器の外部にシード光発生器として持たせることにより、安定な発振が期待できる。

シード光発生器からの出力はパワー以外のレーザー本体の性能を決定づける。従ってシード光発生器に求められるのは、単一周波数発振はもとより、発振周波数の外部環境の変化に対する安定性、良好なビームプロファイル、低い出力変動や光ノイズ成分などであり、レーザーに対する要求としてはかなり厳しい。これら多数の要求を満足するための回答としてファイバーレーザーを提案する。ファイバーレーザーは固体レーザーと異なり機械的な可動部分を徹底的に減らすことができ、機械的な安定度が増す。また熱マネジメントの点でも発熱部分の体積/表面積比が小さいため容易に温度制御が可能であり、従って効率よい発振、熱的揺らぎの抑制が可能となる。Tm 系の利得ファイバーが入手できるようになり当該 2 ミクロン帯の波長においても発振が得られる。

c-2：具体的な開発手順

- 1 まず Tm ファイバーによる 1.9-2.1 μm の光学特性を得る。チタンサファイアレーザーを評価用レーザーとして用い、ファイバーの基本特性である吸収特性と、増幅自然放出 (Amplified Spontaneous Emission: ASE) の特性を調べる。
- 2 FBG の組み込みを行い実際にマルチモードでの発振実験を行う。このステージでは励起レーザーに必要なパワーの見積もりと、利得ファイバーの最適ドープ率と最適長さの関係についての知見を得る。
- 3 一方で共振器長を極端に短くした共振器を構成した実験を行い、単一周波数発振が得られる共振器長を見積もる。
- 4 短共振器にて高効率な単一周波数発振を得るためには、Tm が高濃度で添加されたファイバーを必要とするため、2、3 で得られた知見を元に、Tm 濃度を決定し、高濃度添加ファイバーの作成をファイバーメーカーに依頼する。
- 5 共振器パラメーターについての知見を得た後、温度制御などによる安定化を行い、シード発生器の開発を完了する。

c-3：開発目標

波長 1900nm~2100nm の間の波長において単一周波数、LP01 モードで発振するシード光発生器の構築。

c-4：体制

ファイバーレーザーはメガオプトにおいて開発実績があるため、メガオプト社内研究員を担当者として主に開発をすすめる。

d. ウ：主共振器の開発

d-1：技術概要

サブテーマ (ア) において開発された励起チャンバーの技術を用いて、2 ミクロン帯のレーザーを発振させる主共振器を開発する。開発設計の重要なポイントとしては、

- ・ 準 3 準位系レーザーに特有の励起体積を外れたビームの吸収損失を低減するため、励起体積とビームモードを一致させること
- ・ シード発生器からの光を取り込むポートを設置する
- ・ 単一周波数発振を阻害しない共振器形態とする

が挙げられる。これらを実現するために、共振器の形態は進行波形のいわゆるリング共

振器とすること、励起チャンバーの設計に合わせた綿密な共振器計算を行うことが要件となる。

d-2：具体的な開発手順

- 1 共振器を組む上で重要な、結晶内部の励起体積と共振器を循環する横モードとを一致させ、 Q スイッチなど損傷に弱い素子上では大きなビーム径を確保できるように、レーザー結晶の熱レンズ効果を考慮したシミュレーションによる共振器の光学素子のパラメータを求める。
- 2 励起チャンバーを実働状態で搭載し、レーザー出力が得られることを確認する。
- 3 シード光発生器からのビームを共振器に導入する。シード光発生器からのビームは共振器内の周回ビームとモードを一致するように整形された後に導入する。発振スペクトルの狭窄化が行われる出力・ビームパラメータなどの条件を見出す。
- 4 Q スイッチを挿入し、ジャイアントパルスモードにて動作確認。再度共振器パラメータを変化させ、もっとも安定でエネルギーが取り出せる共振器を構築する。

d-3：開発目標

シード光発生器の単一周波数を継承するパルスレーザー発振を行う。ジャイアントパルスモードにおける出力 100mJ、繰り返し 20Hz、単一横モードとする。

d-4：体制

2 ミクロンレーザーのシミュレーションなどをこれまで行ってきた東北工業大学が共振器の設計を分担し、固体レーザー一般に造詣の深い理研の指導を受けてメガオプトが製作・実験を担当する。

e. エ：増幅器の開発

e-1：技術概要

サブテーマ（ア）にて開発された励起チャンバーをベースにした増幅器を開発する。1 ステージあたり 2 倍程度の増幅器利得を見込んで、3 ステージ配置、トータルで 10 倍の増幅度とする。3 つの励起チャンバーは基本構造を同一とするが、それぞれのステージで入力・出力エネルギーレベルが異なるため、半導体レーザーの数とレーザー結晶のサイズは異なるものが使用できるように設計する。

e-2：具体的な開発手順

- 1 各ステージで得るべきエネルギーと増幅度から必要な励起パワー、最適なビーム径とレーザー結晶直径の関係を導く。
- 2 熱レンズのシミュレーションにより、発振器～増幅器および増幅器間におけるスムーズなビーム伝播を行い高い増幅度を得るために、励起体積に一致させたビーム体積を見積もる。またその結果を受け、イメージリレー光学系を設計する。
- 3 1、2 で得られた知見をもとに増幅器を設置し、ステージごとに計算と実験結果の検証を交互に行い理想的な増幅度とそれが得られる結晶径、ビーム径、その他の共振器パラメータを実験的に求める。
- 4 ここまでに開発した全ての結果をまとめあげる。

e-3：開発目標

全開発テーマの集積を行うことにより、最終ステージの増幅器後においてパルスエネル

ギー約 1J、繰り返し 20Hz、単一周波数のパルス出力を得る。

e-4：体制

大規模な MOPA (Master-Oscillator Power-Amplifier) 構築の経験がある理研と、2 ミクロン用 MOPA の経験のある東北工業大学の指導の下でメガオプトが開発を進める。

f. オ：受信系との結合

f-1：技術概要

システムとして完成させるため、受信系との結合が不可欠であるが、このセンシングシステムにおいて現在ネックとなっている発信装置を開発することが急務であることに加え、開発課題としても複雑でリソースを必要とすることは上記の提案からも明らかである。従って、当該研究開発期間においては光源開発を最優先に行うこととし、受信系との結合は現在使用可能な装置をもって実験を行い、発信系とあわせた信号授受の確認を持ってシステムの完成とする。

f-2：体制

受信系をレンタルにより入手し、東北工業大学のサポートのもとメガオプトが担当して実験を行う。

2-2 研究開発の最終目標 (平成 19 年 11 月末)

1 以下の仕様を満たす光源の構築

波長：1.5～2.1 μm (アイセイフ波長)

動作モード：Q スイッチパルス

スペクトル：単一周波数 (50MHz 以下)

エネルギー：約 1J

繰り返し周波数：20Hz

各サブテーマにおける目標値

ア) 励起モジュールの開発：準連続波のフリーランニング動作において、パルスエネルギー 200mJ、繰り返し 20Hz を実現すること。投入する半導体レーザーのパワーが 900W、レーザー結晶の上準位寿命を 1.5ms 程度と仮定すればレーザー結晶に蓄積されるエネルギーは 1J 程度となり、フリーランニング動作では励起体積と共振器モードの一致を取りやすいために、マルチモードではあるがスロープ効率にして 30%以上、全効率 20%程度は達成できる。

イ) シード光発生器の開発：波長 1900nm～2100nm の間の波長において単一周波数、LP01 モードで発振するシード光発生器の構築。Tm シリカガラスでは 1900-2100nm に利得を持たせることが可能であり、適当な波長選択素子を使用することにより、単一周波数発振が可能である。短い共振器とすることによりスペクトル幅はフーリエ変換限界から導かれるスペクトル幅に比べ大幅に広がるが、パルスレーザーのシードとしては十分に狭い。ファイバーは最低次モードのみが励起されるシングルモードファイバーを使用するため、LP01 のみが見られる。

- ウ) シード光発生器の単一周波数を継承するパルスレーザー発振を行う。ジャイアントパルスモードにおける出力 100mJ、繰り返し 20Hz、スペクトル幅 50MHz 以下、単一横モードとする。本の主共振器内部に波長選択素子と Q スイッチを挿入する損失を見込んでフリーランニングに比べ出力半分とした。シード光源から導入される狭いスペクトル幅を持つシード光に同調するが、パルス幅 200ns 程度が見込まれるため、フーリエ限界においても 10MHz 程度であるから、50MHz は到達可能と思われる。
- エ) 全開発テーマの集積を行うことにより、最終ステージの増幅器後においてパルスエネルギー約 1J、繰り返し 20Hz、単一周波数のパルス出力を得る。

2 既存受信系との結合試験

- オ) 実験的に 10km 前方における気流変化を観測可能であることを証明する。送信系が十分に仕様を満たせば、これまで行われてきた研究結果から 10km レンジにおける風のプロファイリングは可能である。

2-3 研究開発の年度別計画

金額は非公表

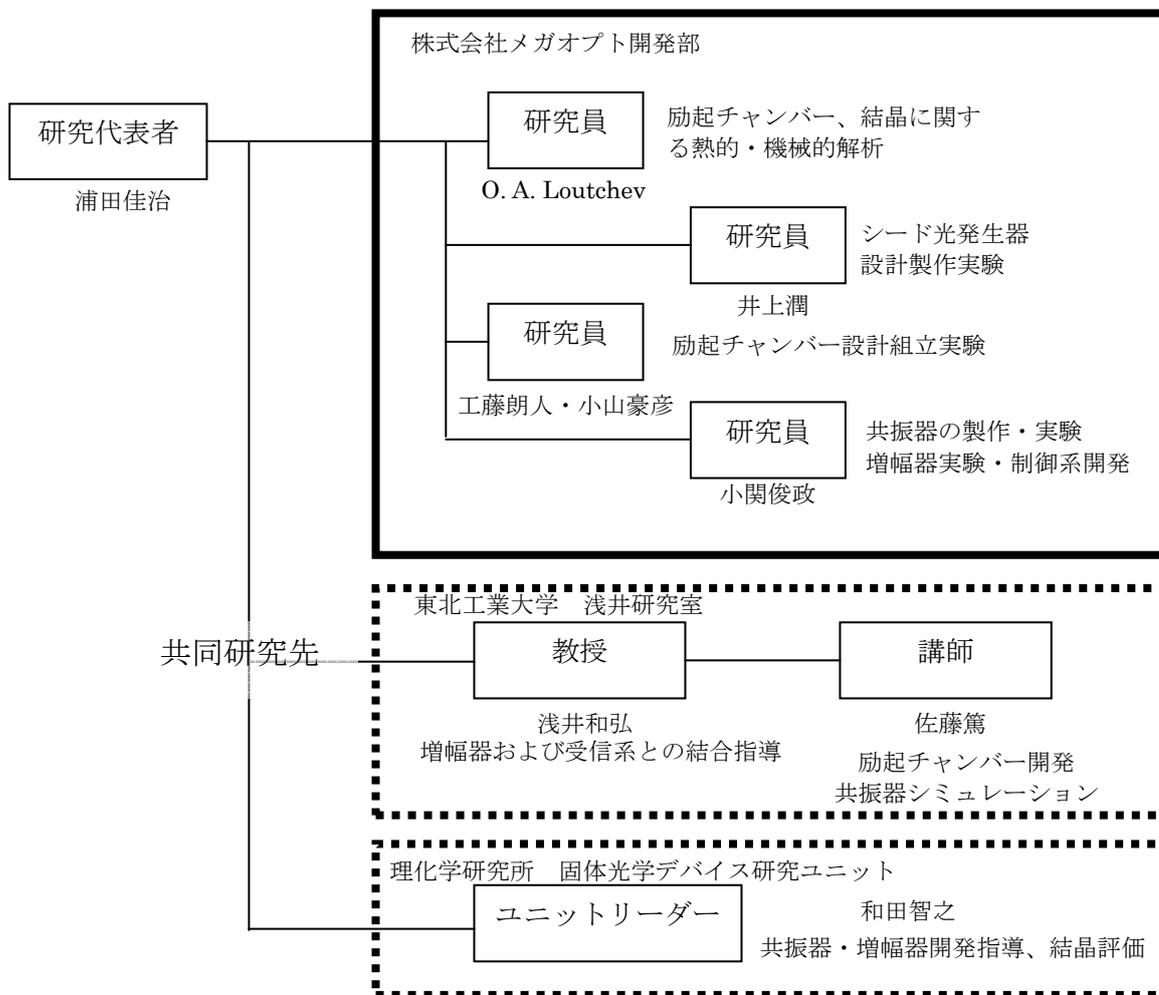
研究開発項目	17年度	18年度	19年度	計	備考
航空機の安全航行のための乱気流レーザーセンシングシステムの開発					
ア) 励起チャンバーの開発	←	→			
イ) シード光発生器の開発	←	→			
ウ) 主共振器の開発		←	→		
エ) 増幅器の開発			←	→	
オ) 受信系との結合				←	→
間接経費額（税込み）					
合 計					

- 注) 1 経費は研究開発項目毎に消費税を含めた額で計上。また、間接経費は直接経費の30%を上限として計上（消費税を含む）。
 2 備考欄に再委託先機関名を記載
 3 年度の欄は研究開発期間の当初年度から記載。

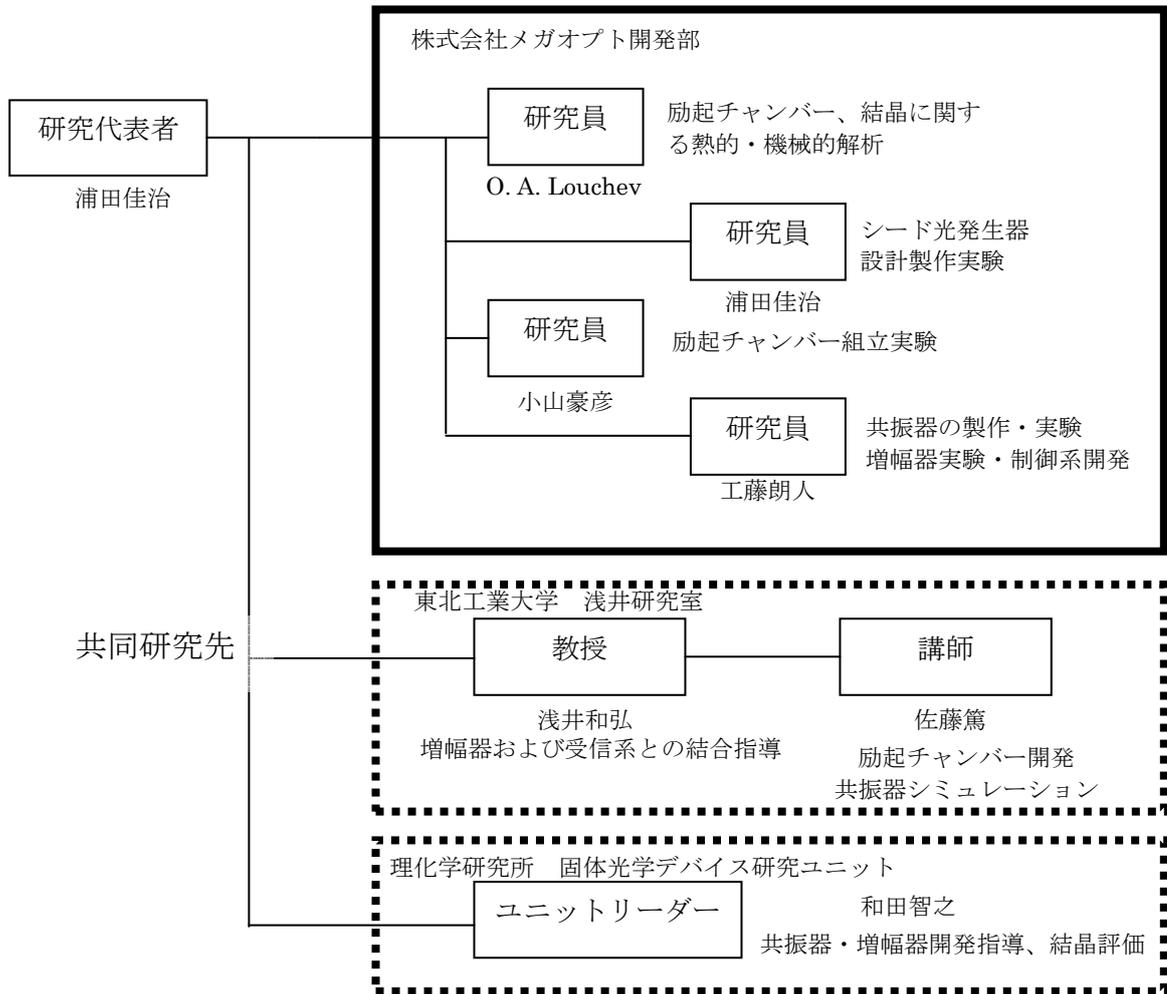
3 研究開発体制

3-1 研究開発実施体制

(2006年4月1日～2007年1月31日の体制)



(2007年2月1日～3月31日の体制)



4 研究開発実施状況

4-1 励起チャンバーの研究開発

4-1-1 研究開発内容

- 1 前年度の成果である第1試作チャンバーの評価をまとめ、より実使用での耐久性、安定性に優れた構造を吟味し第2試作の設計・製作を行う。
- 2 前年度に選定したレーザーロッドの評価として、基本的な光学特性を取得する。
- 3 フリーランニングにてレーザー発振を行う。
- 4 実験結果を受けて最終的な形態のチャンバーを設計・製作。
- 5 フリーランニングにてレーザー発振実験を行う。

目標：

準連続波のフリーランニング動作において、パルスエネルギー200mJ、繰り返し 20Hz を実現すること。

励起チャンバーの完成=本サブテーマの完了。

4-1-2 セラミックロッドの製作と光学評価

第2試作を行う上での基本データを得るために、製作した Tm,Ho:YAG セラミックの特性を取得した。前年度の検討からレーザーロッド材料として YAG を候補として選定した。選定における大きな要因の一つに、YAG は現在、良質な透光性セラミックを作ることが出来ることを挙げた。現実的に、アンドープ YAG だけでなく、1 ミクロン帯における一般的なレーザー活性イオンである Nd および Yb をドープした YAG はセラミックロッドが作成でき、それらはすでに開発フェーズを離れ、いくつかのレーザーメーカーの製品に搭載されている実績がある。

項目	単位	YAG	LuAG	YLF	LuLiF	YVO4	GdVO4
励起波長	nm	785	←	792	←	799	←
発振波長	nm	2097	2080	2050	←	2050	←
上準位寿命	ms	12	10	15	15	3	2?
熱伝導		◎	○?	△	△	△	○?
開発進度		◎	△	◎	○	○	△
結晶入手容易性		◎	△	○	△	○	○
コンポジット		◎	○?	○?	△	△	△
LD入手容易性		△	△	○	○	◎	◎

表 1.2.1 Tm,Hoドープ時の各種ホスト結晶の物理特性とその他の選定要因

我々がこの開発でレーザーを作るにあたり、現在 Tm, Ho 系で高い性能が達成されているフッ化物でなく YAG を選定したもう一つの主要な理由は、コストである。YLF、LuLiF が高性能を発揮することは前年度の報告書でも触れたが、

- ・ フッ化物材料のコンポジットは作成が難しく、非常に高価
 - ・ そもそもフッ化物結晶の供給元が少ないうえに撤退する企業も出ている
- というような現実的な問題から、その他のメリットを考慮してもなお YAG を選定した。

セラミックの利点

Tm, Ho レーザーは発振光を、励起が十分になされていないロッド自らが再吸収して、実効的な利得を低下させる。LD を使用して、本開発のような高エネルギーによる励起を行おうとしたときには面積の広いロッド側面から複数の LD で励起する「サイドポンプ」を用いるのが一般的である。この場合、ロッドの実効長に対して、LD が励起できる範囲は少なくなる。現実的に、ロッドを水冷としたとき、ロッドを固定する構造に必要な長さは 20mm 以上になる。この部分は LD による励起が不可能な領域と言い換えることができる。均一なロッドを使用するとロッド両側で 40mm 以上の再吸収領域ができることになり、利得が大幅に低下することは避けられない。したがってコンポジットと呼ばれる、空間的にイオンの添加濃度を変化させた構造が必要である。具体的に言えば LD が強く励起できる領域にはイオンをドーピングして利得を発生させ、励起がなされない領域は無ドーピングとして再吸収を回避するということである。今回のようなサイドポンプでは、光軸に沿って 1 次元的なイオン濃度変化をつくれればよい(図 1.2.1)。結晶でこのような構造を作ろうとすると、接着をする必要がある。従来的に接着剤を使用した接着は接着剤の強度の問題や、強い光フルーエンスに対する耐性の問題が生じる。そのためディフュージョンボンドという手段が用いられるが、フッ化物に対して安定した十分な強度が得られるかどうかの問題もある上に高価である。セラミックの場合は図 1.2.1 のような構造を容易に製作することが可能である上に、本質的に異種の領域が一体化しているため、構造的な強度についても領域境界が劣ることはない。

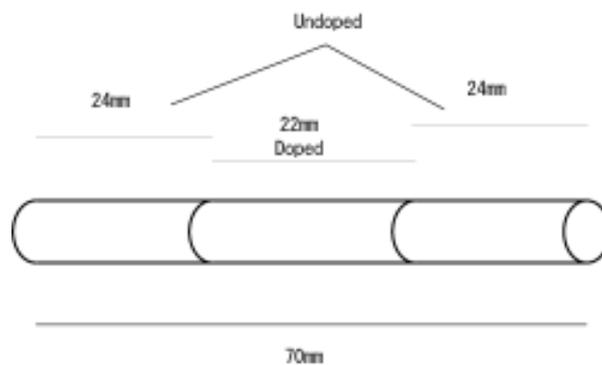


図 1.2.1 セラミックロッドのコンポジット例(本開発で使用した実施例)

Tm,Ho:YAG セラミックの光学特性

Nd, Yb イオン添加のセラミックについては単結晶と匹敵するレーザー特性が得られることが検証されており、一部の機械特性についてはそれを上回るとする報告もある。Tm, Ho:YAG セラミックは本開発において初めて作成されたため、まずその光学特性を取得した。吸収測定には分光光度計を、発光測定には連続波 Ti:sapphire を励起光源として使用し、発光を 50cm の分光器にて分光した後、InGaAs フォトダイオードで検出し、その出力をロックインアンプを経由してデータロガーで PC 取り込みした。発光強度の時間変化については光チョッパーで切り出したパルスを使って同様の系を使って、増幅器付きのフォトダイオードで検出し、光強度の減衰波形をオシロスコープで取り込んだ。図 1.2.2 に今回使用する励起帯である 780nm 近傍の吸収特性を示す。比較のために同程度の Tm ドープ濃度の YAG 単結晶のデータを記載した。分光器の波長ズレに起因すると思われる若干のピーク位置の相違は確認できたものの、スペクトル形状は相似であり、ブロードニングなどは確認できなかった。基本的に Tm 濃度に比例した吸収強度を示した。したがって、LD 波長のチューニングなどは単結晶とまったく同一でいいことがわかった。図 1.2.3 にレーザー発振が期待できる 2100nm を含む、Tm と Ho の発光スペクトルを示す。こちらもスペクトル上に同一濃度のイオン添加がなされた結晶とセラミックで何ら違いはなく、単結晶と同様の発光が期待できる。しかしながらドーピング濃度が異なるセラミック間では発光スペクトルピーク間のバランスが異なることが観察

された。6%添加セラミックのほうがレーザー発振が期待される 2.1 ミクロン帯の発光強度が相対的に高いことがわかった。わずかな Tm/Ho 濃度バランスの相違も考えられるが、より詳細な議論を行うためのデータは本開発では取得不可能であった。図 1.2.4 には発光スペクトルにおける最も高いピーク、2088nm における発光強度の時間変化を示す。これはレーザー発振における上準位の寿命と言い換えてよい。発光強度の時間変化についても単結晶とセラミックに有意な差は確認できなかった。どちらも発光強度が $1/e$ になる時定数が 9.8~10ms であった。以上の結果から、セラミックは単結晶に近い光学特性を有しており、過去の文献に記載されている情報をもとにしたレーザーの構築が可能であると予想できた。

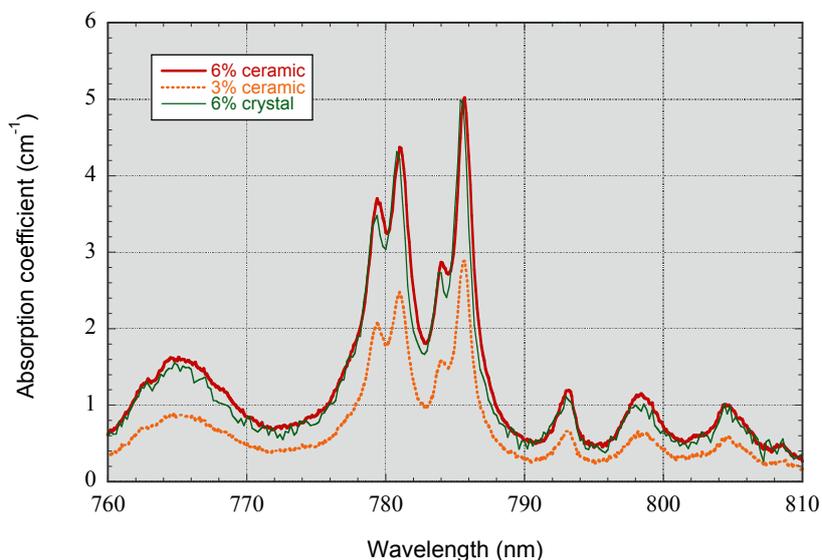


図 1.2.2 Tm, Ho:YAG セラミックと単結晶の吸収スペクトル

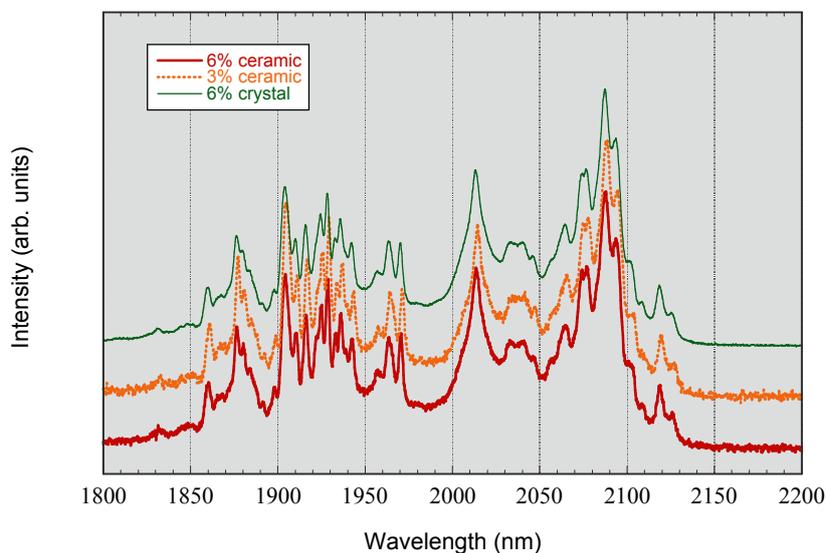


図 1.2.3 Tm, Ho:YAG セラミックと単結晶の発光スペクトル

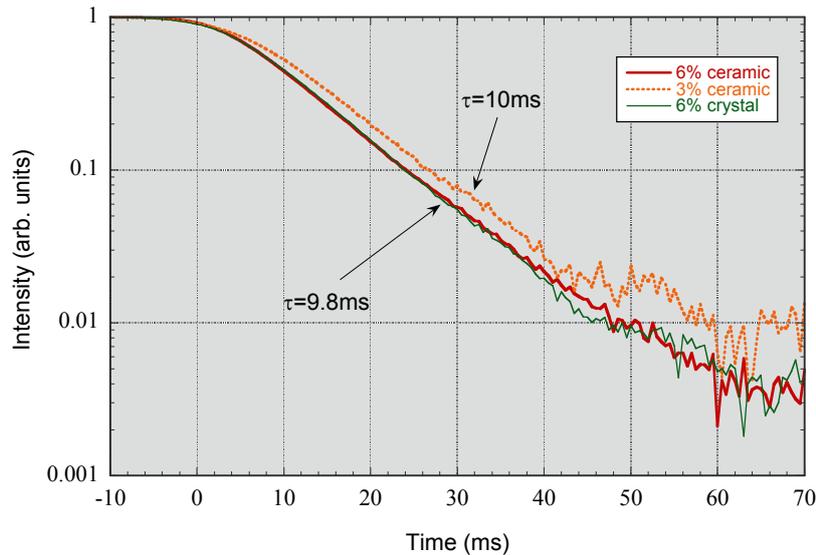


図 1.2.4 2088nm における発光の時間的減衰

4-1-3 LD のスペクトルオーバーラップに関する計算

LD はその動作温度により発光中心スペクトルが変化する。Tm, Ho:YAG の急峻な吸収スペクトルから、LD の温度に対する制限が強くなる可能性があると考え、LD の中心スペクトル揺らぎに対する吸収係数の変化を考察した。

具体的には吸収スペクトルと、発光スペクトルのたたみこみ積分を行えば、実効的な吸収係数が得られるはずである。吸収スペクトルには実験的に得られた上記のデータを使用した。一方 LD の発光スペクトルは Lorentzian 形をしており、線幅(半値全幅)を 3.5nm と仮定して計算をおこなった。その場合、

$$P_{abs}(\lambda_c) = \int P_{LD}(\lambda, \lambda_c) \cdot [1 - \exp(-\alpha(\lambda) \cdot l)] d\lambda$$

$$P_{LD}(\lambda, \lambda_c) = -\frac{1}{2\pi c} \cdot \frac{\Delta\lambda}{(1 - \lambda/\lambda_c)^2 + (\Delta\lambda/2\lambda)^2}$$

$$\Delta\lambda \equiv 3.5 \times 10^{-9} (m)$$

なる式から、各 λ_c における実効的な吸収係数を求めて図示すればよい。

計算結果を図 1.3.1 に示す。横軸が LD の中心波長、縦軸は吸収係数の相対値である。このグラフから見ると、780nm 付近で最大の吸収効率を示すが、そのピークは鋭くなく、ピークの 90%以上の吸収を得られる中心波長の範囲は 7nm にもなることがわかった。これは LD の駆動温度の幅に換算すると 30°C 弱になるため、LD の発振中心波長が 782nm 程度であれば、LD の温度に対してほとんど性能が振れないことを示している。急峻なスペクトルを持つものの、LD のスペクトルがブロードであることが、温度に対してセンシティブでない、実用的なレーザー特性を持たせていることがわかった。

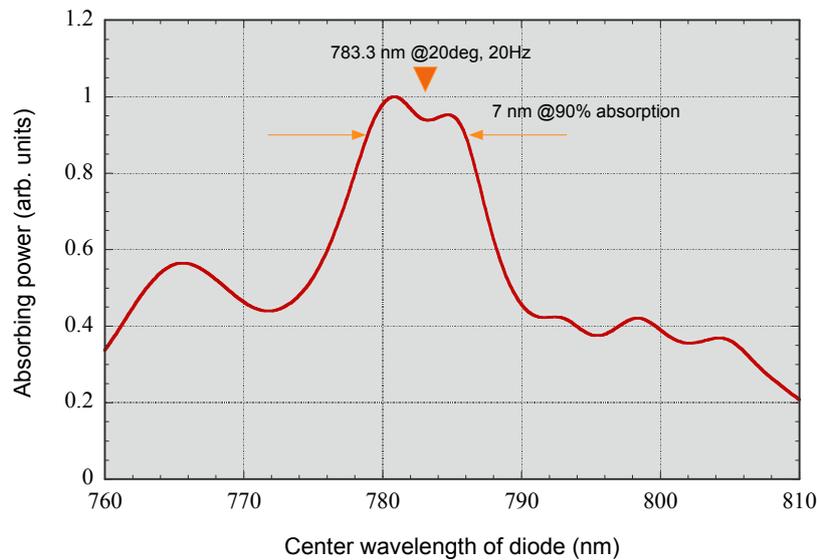


図 1.3.1 TH:YAG のスペクトルオーバーラップの、LD 発光中心波長に対する変化

4-1-4 励起チャンバー第2試作

前記の光学特性から LD の仕様と、ロッドの仕様を固定した。
前年度報告に記載のとおり、波長 785nm 近傍の LD は入手が困難であったが、米国とフランスのサプライヤーに打診をして、結局 Lasertel 社の LD を選定した。仕様は以下のとおりである。

LD 仕様

波長	785nm ± 3nm
ピーク出力	600W
パルス幅	0.5ms
繰り返し	20Hz
動作電流	100A
最大負荷電圧	14V

この LD をロッドの長手方向中央部、120 度の間隔で放射状に配置して励起する前提とした(図 1.4.1)。またレーザーロッドには前記のセラミックロッドを用いるが、LD の発光部分の長さが 10mm であることから、ロッド側のドープ領域を 10mm とした。ロッド全長は 70mm、直径 3mm のロッドに仕上げた。ロッド両端面はレーザーグレードの精密研磨を行った後、2100nm 中心の AR (Anti-reflection) コートをつけた。この LD とロッドを前提に励起チャンバーの第 2 試作を行った。図 1.4.2 に製作した励起チャンバーの写真を示す。この写真中で中央部に 2 つのステンレス製のかたまりが確認できるが、これらがそれぞれ 1 つの励起チャンバーである。励起チャンバーの中には、1 本のレーザーロッドと、3 本の LD が搭載されている。励起エネルギーは LD1 つあたり 300mJ/pulse であり、20Hz で動作させるため、トータル平均投入パワーは $300 \times 3 \times 20 = 18W$ である。このパワーが 3mm φ × 10mm の領域に集中するため、ロッドは冷却される必要があり、また LD の発振波長は使用温度に対して約 0.3nm/°C の割合で変化するため、温度制御が必要である。そのため、励起チャンバーは精密な温度制御を行ったポンプからの冷却水の供給が必須であり、写真に示すとおり複数のチューブで冷却水を供給している。

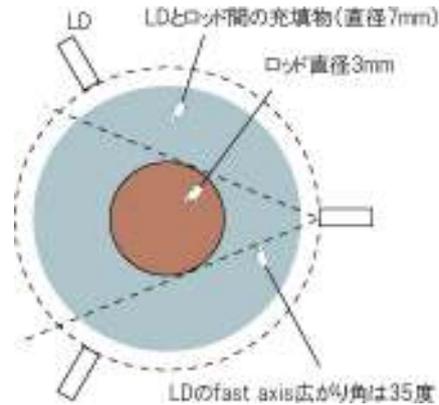


図 1.4.1 光軸線上から見たロッドと LD の配置 (数値は仮置き)

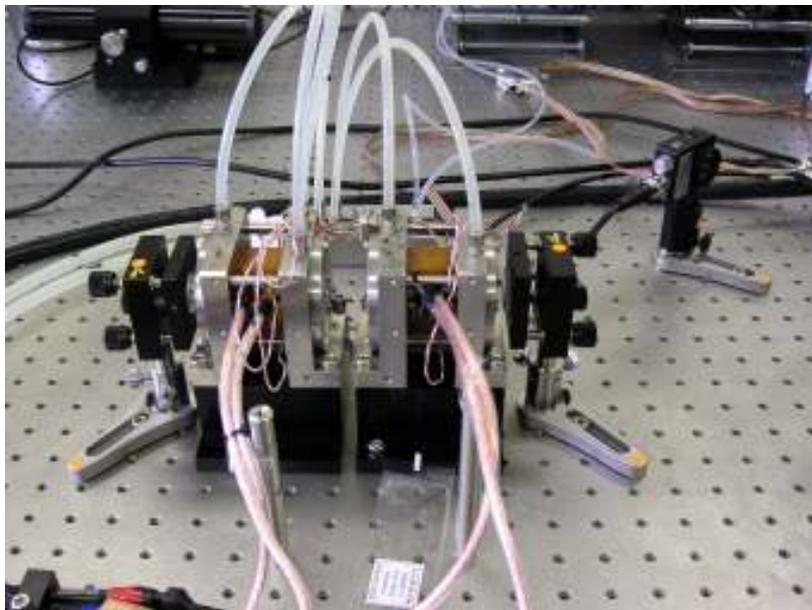


図 1.4.2 製作した励起チャンバー

設計上のポイントとしては、

- LD を可能な限りロッドに近接配置すること
- LD の対抗面はマシンナブルセラミックによる拡散面とすること
- 3つの LD の電極が近接するため、適当な絶縁方法を適用すること

などがあったが、これらを解決して第 2 試作チャンバーとして実験に入った。

4-1-5 レーザー発振実験 (第 2 試作:フリーランニング)

フリーランニング実験のために励起チャンバーを 1 個または 2 個並列に配置して、ファブリーペロー形の共振器を構成した。実験装置を図 1.5.1 に模式的に示す。基本的な共振器構造は同等であり、共振器長、チャンバー数、出力ミラーの反射率を変えている。Q スイッチは本実験では使用しないため取り外した。図 1.5.2 に実験結果を示す。最大の出力が得られた反射率 95%の出力ミラーを用い、冷却水温度を 20°C に固定したとき、繰り返し周波数を 1~20Hz まで変えて取った出力特性である。LD の発振パルス幅は 500 μ s とした。横軸は LD のパルスエネルギーであり、縦軸は

出力された 2 ミクロンパルスエネルギーである。また、パルスエネルギー 900mJ 以下の結果はチャンバーを 1 つだけ使用した場合、それ以上の結果は 2 つのチャンバーを同期して発振させたときの結果をそれぞれ示している。低い繰り返し周波数ではシングルチャンバーで 50mJ/pulse、ツインチャンバーでは 120mJ 以上のエネルギーが取れることがわかった。これに対し 20Hz ではそれぞれ 30mJ、70mJ にとどまり、繰り返し周波数を増加したことによるロッド内の温度上昇が影響していると思われる効率低下が確認された。

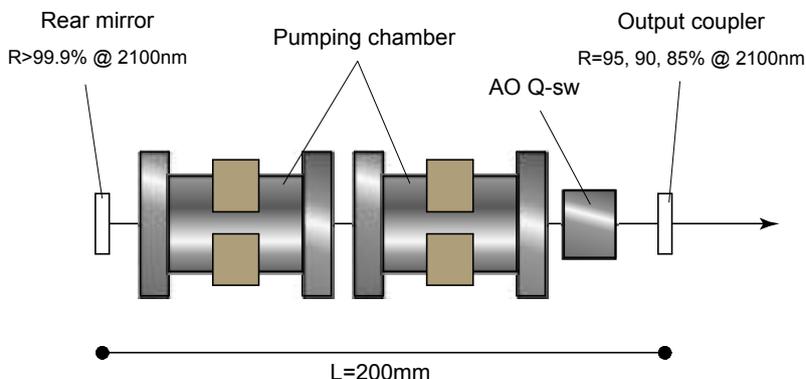


図 1.5.1 第 2 試作チャンバーの動作試験セットアップ

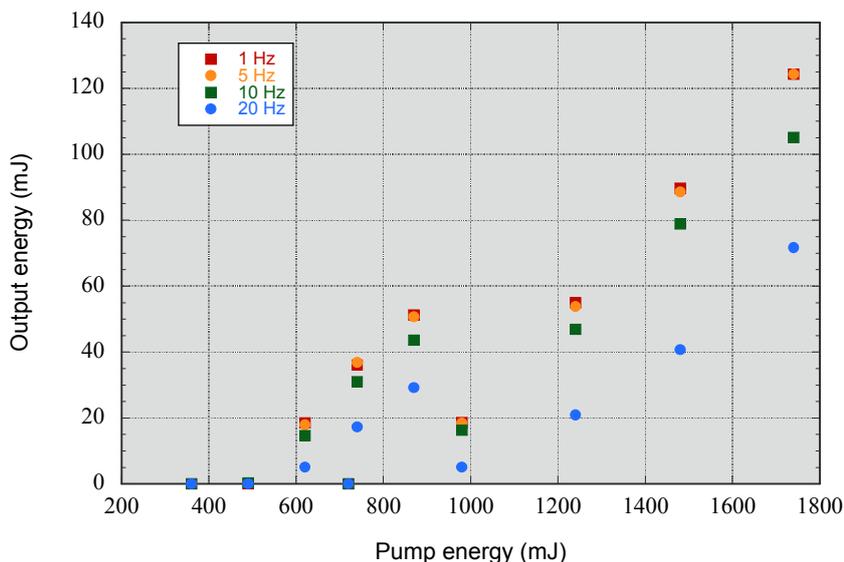


図 1.5.2 各動作周波数における入出力特性

(励起エネルギー 900mJ 以下はシングルチャンバー、それ以上はツインチャンバーにおける結果)

4-1-6 励起チャンバーの完成

LD の取り付け、ロッドへのカップリングなどはこの第 2 試作チャンバーでほぼ問題ないことが確認できたが、

- ・ パルスエネルギーが十分でなく、想定したエネルギーが得られないこと
- ・ 出力ミラーの最適な反射率が高く、Q スイッチの損失による挿入時の著しいパフォーマンス低下が懸念されること
- ・ Q スイッチ発振時のエネルギー取り出し効率が低くなる懸念があること

という点で、より高い利得が得られるように考える必要があった。そこで、チャンバーに搭載できる LD の個数を増やし、高密度な励起を行うことにより利得の増加を試みることにした。

基本的な構成やおおまかな外観は第 2 試作に準ずるが、120 度の角度で対向する LD を 2 列に増やした。すなわち、トータル 6 個の LD を使用している。これにあわせて使用するロッドの形状も、

中心部分 22mm がドープ領域で、全長は 70mm のものに変更した。

図 1.6.1 にこの励起チャンバーを 2 つ用いたときのフリーランニング動作における入出力特性を示す。冷却水温度は 20°C、LD の励起パルス幅は 500 μ s として繰り返し周波数を 1~20Hz で変化させてデータを取得した。出力ミラーの反射率は、最大エネルギーが取れる 90%としてデータを取得した。横軸は LD に投入する電流値となっているが、80A 時に 3.5J/pulse 程度の LD のパルスエネルギーとなっていた。結果より、低繰り返し時は 300mJ/pulse を越えるパルスエネルギーが得られた。20Hz においても 200mJ を超えるパルスエネルギーが得られており、第 2 試作チャンバーにおける数値から比較して、低繰り返し(5Hz)では 125mJ→330mJ、高繰り返し(20Hz)では 70mJ→240mJ と、約 3 倍のエネルギーが取り出されることがわかった。さらに励起パルス幅を 500 μ s 前後で変化させたとこ、図 1.6.2 に示す出力変化を得た。光学特性における上準位寿命の考察でも述べたとおり、T_m,H_o 系の材料は長い寿命を持つため、100 μ s レベルの励起パルス幅においては、パルス幅を伸ばすことは上準位への蓄積エネルギーの増加に極めて効果的であることが理解できる。実験的にも励起パルス幅を 20%伸ばして 600 μ s にすることによりパルスエネルギーを 100mJ に伸ばすことができた。つまり 1mJ/ μ s のスロープで増加した。しきい値の高い 3 準位系での共振器では、エネルギー取り出し効率の向上に役立つことがわかった。

以上により、当初の予定である励起チャンバーの完成と、目標エネルギーの出力を達成した。

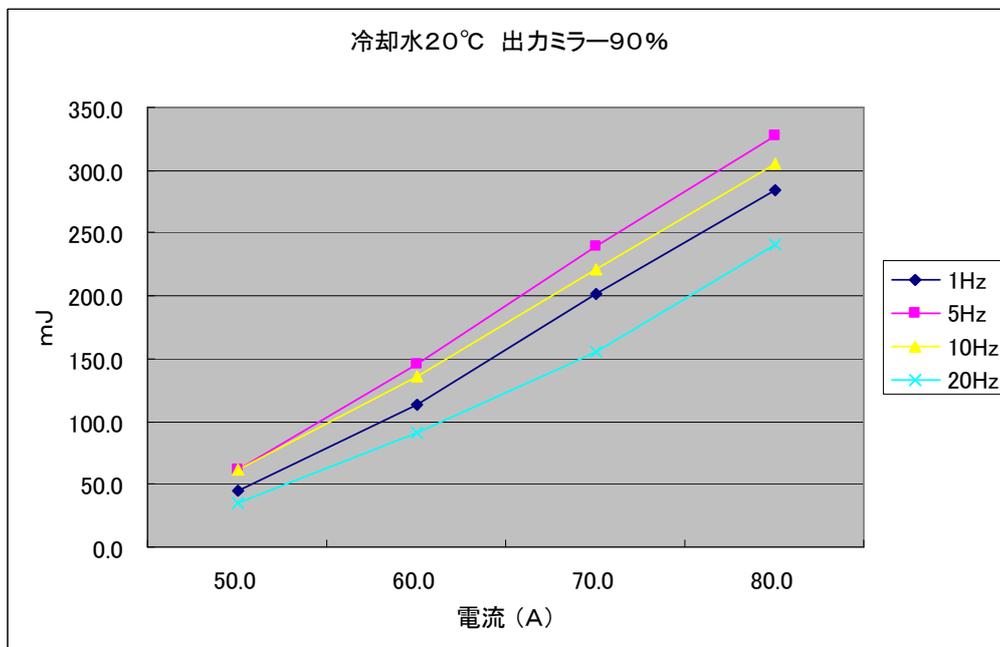


図 1.6.1 6LD チャンバー(ツイン構成)を使用したときの入出力特性

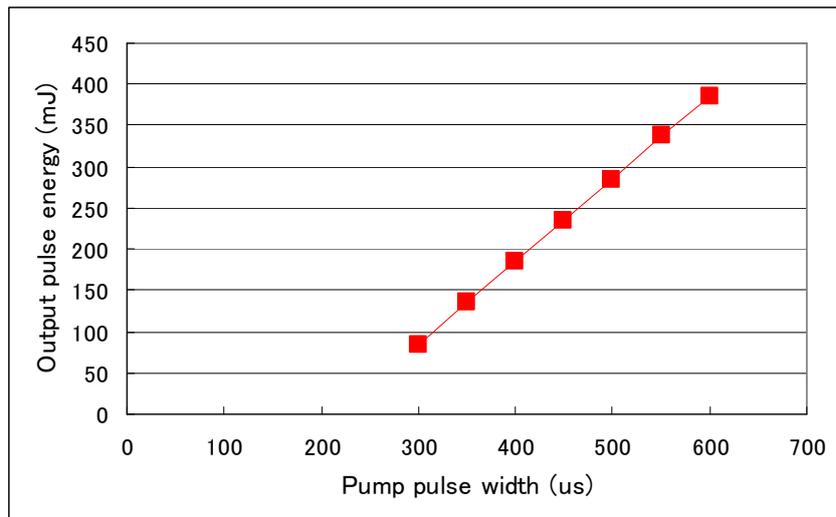


図 1.6.2 パルス幅を 500us 近傍で変化させたときの出力エネルギーの変化

4-1-7 まとめ

前年度の開発結果を引き継ぎ、セラミックレーザーロッドの光学評価を行い、励起チャンバーの改良を行った。セラミックロッドは単結晶のロッドと比較してそんな色ない光学特性を持つことを明らかにした。前年度、第 1 試作として作成した励起チャンバーをセラミックロッドと、新たに購入した LD にマッチするように設計図をひきなおい、セラミックロッドによるフリーランニング発振を行ったところ、高い性能の発振を得ることに成功した。

以上の成果をもって、励起チャンバーの開発サブテーマは完結した。

4-2 シード光発生器の研究開発

4-2-1 研究開発内容

内容と手順

Tm,Ho ファイバの発振を行ってレーザー特性を取得する。シードである DFB レーザダイオード (DFB-LD) の特性を取得することと、ファイバ結合を確認する。上記の知見から、Tm,Ho ファイバ増幅器により DFB-LD の出力を増幅し、最大 20mW クラスのシード出力を得る。

目標

- ・ Tm,Ho シード光発生器のための準備実験 (空間伝播部分を持った Tm ファイバレーザーにおいて、連続波における 2 ミクロン帯発振の確認)。
- ・ DFB-LD 出力の、Tm,Ho ファイバ増幅器による高出力化。最大 20mW の単一周波数出力の確認。本サブテーマの完了。

4-2-2 Tm,Ho ファイバ光学特性

まず Tm,Ho ファイバの特性を取得した。図 2.2.1 に INO 社製ファイバの典型的な吸収スペクトルを示す。吸収帯は 790nm、1200nm 近傍、1400nm 近傍、1600nm 近傍にあるが、このうち容易に高出力光源を得られるのは 790nm (LD) と 1600nm (Er ファイバレーザー) である。790nm の LD はファイバ結合のものが入手困難であるため、ここでは 1600nm 付近で発振する Er ファイバレーザーを第 1 候補とした。一方、光学特性の取得には 790nm 近傍で発振する Ti:sapphire レーザーを使用した。

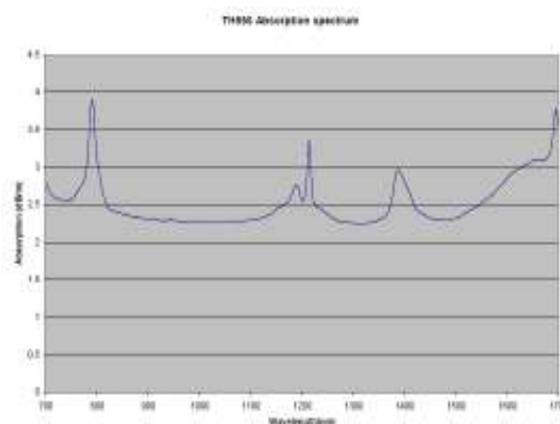


図 2.2.1 Tm,Ho ファイバの吸収スペクトル

図 2.2.2 に実測した Tm,Ho ファイバの発光スペクトルを示す。利得ファイバは INO 社の TH530、35cm 長を使用した。1200nm~2200nm に明確なピークは 3 つ存在し、それぞれ 1500nm 近傍、1900nm 近傍、2000nm 近傍であった。これらはすべて Tm の発光によるものであると考えられる。2020nm 付近の弱いふくらみが Ho 発光によるものと考えられる。一方、使用を前提としている 1560nm の Er ファイバレーザー (EDFL) によって励起したときのスペクトルを図 2.2.3 に示す。ファイバ長数 10cm のとき、ピークは 1900nm 付近にあるが、数 m まで伸ばしたときには自己吸収によって短波長側の利得が失われ、ピークは 2000nm 以上にシフトした。一般的な 3 準位系レーザーは同様の挙動を示すためリーズナブルな結果である。

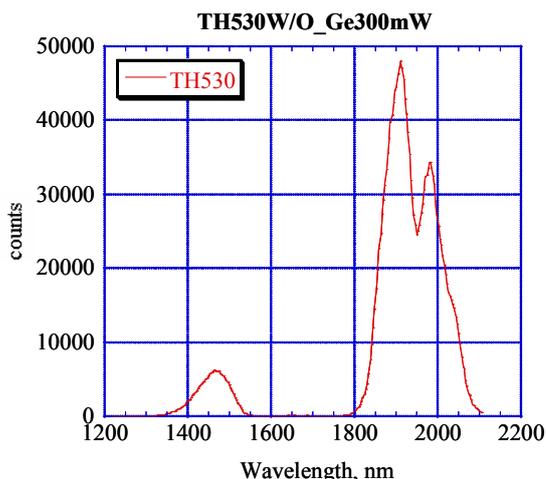


図 2.2.2 Tm,Ho ファイバの発光スペクトル

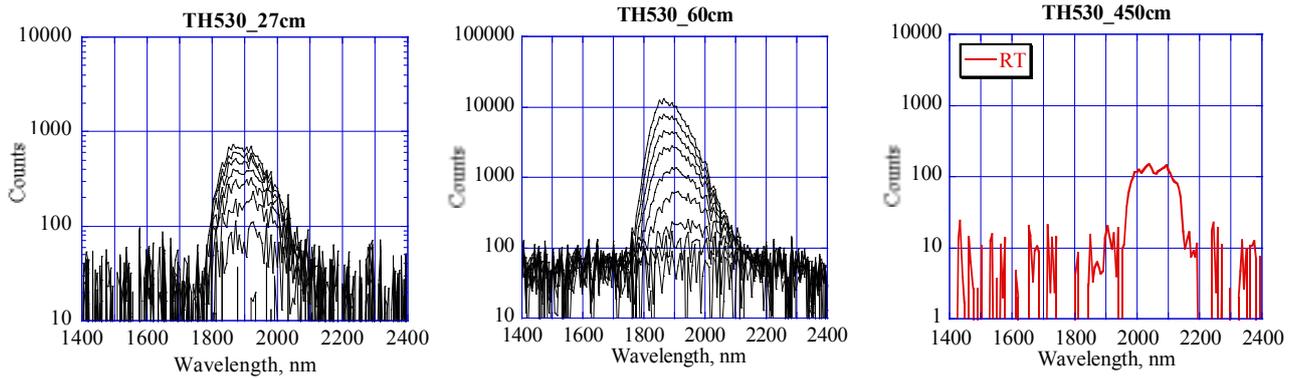


図 2.2.3 ファイバ長の変化に対する発光スペクトルの変化(左から 27cm、60cm、450cm)

4-2-3 Tm,Ho ファイバのレーザー発振と利得確認

Tm,Ho ファイバ (THDF) の長波長域 (2080nm 以上) における利得確認の意味を含め、ファイバレーザーを構築した。図 2.3.1 に THDF を用いたレーザー (THDFL) の構成図と写真を示す。長さ 450cm の THDF を反射率 90% のリアの FBG と同 80% のフロント FBG で挟み、リアエンドから最大出力 2W クラスの EDFL からの励起光を入射した。出力はコリメート後、パワーメータで出力を読み、ファイバ結合型のスペクトルメータでスペクトル確認を行った。図 2.3.2 は 1.8W 励起を行ったときの発振スペクトルである。2000nm をピークとした ASE が見られるが、2080nm に明らかな発振ピークがあり、レーザー発振していることが確認できた。この結果は THDF は我々が必要としている長波長において利得を持ち、DFB-LD の増幅に使用できる可能性を示唆している。

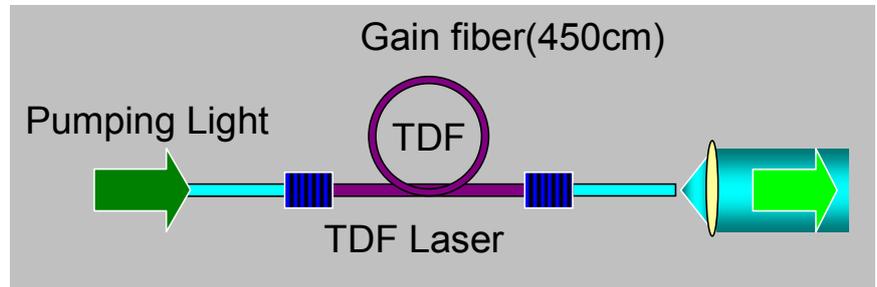


図 2.3.1 THDF レーザーの構成

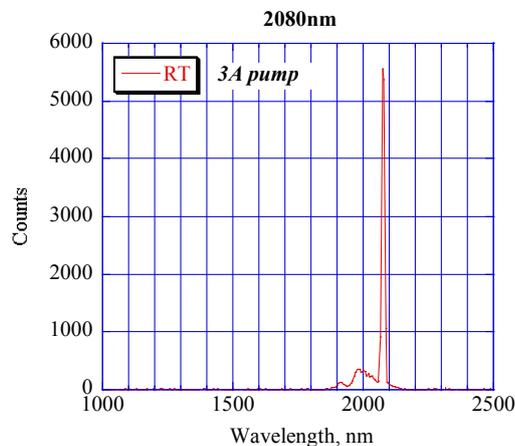


図 2.3.2 THDFL の発振スペクトル

4-2-4 DFB-LD 光のファイバ結合と Tm,Ho ファイバによる増幅

現段階で用意できる単一周波数発振する DFB-LD は空間タイプ(直接自由空間へ発光するタイプ)であるため、これを THDF 増幅器で増幅させようとしたときには適当な結合光学系を用いてファイバ結合させる必要がある。図 2.4.1 のような構成で結合させたときの効率は最大 0.3 程度であった。したがって、2097nm の LD でのシグナルの入力パワーは高々 0.3mW 程度である。

この系を用いて結合した DFB-LD を THDF 増幅器に通したところ、増幅率は図 2.4.2 のようになった。使用した LD は 2097nm のものよりもパワーが大きく、THDF の利得も大きい 2050nm を使用した。コポンプとカウンターポンプでは増幅されたスペクトルが異なるが、いずれも同時に ASE の増幅が確認された。カウンターポンプは増幅率が大きい、ASE が増幅されやすい。コポンプはシグナルを増幅できるものの、励起強度を増すとやはり ASE の増幅が顕著になり、パワーが ASE に流れやすい。したがってこの対応策として必要なのは

- ・ シグナル入力を可能な限り増やすこと
- ・ 低励起のンプを複数段用意し、徐々にシグナル増幅すること

である。

しかしながら 2 ミクロンのシグナルと 1.5 ミクロンの励起光を低損失で結合することができるような WDM カプラーが存在しないため、この方式は非現実的であり、他の方法を検討する必要があると考えている。

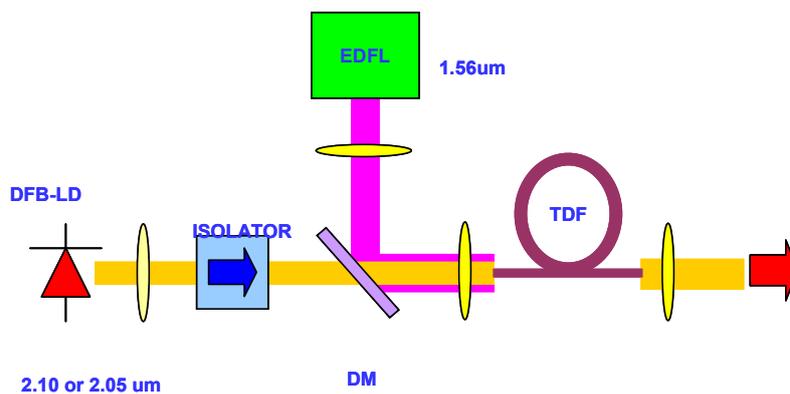


図 2.4.1 空間において LD 光と励起光を結合させる場合の配置

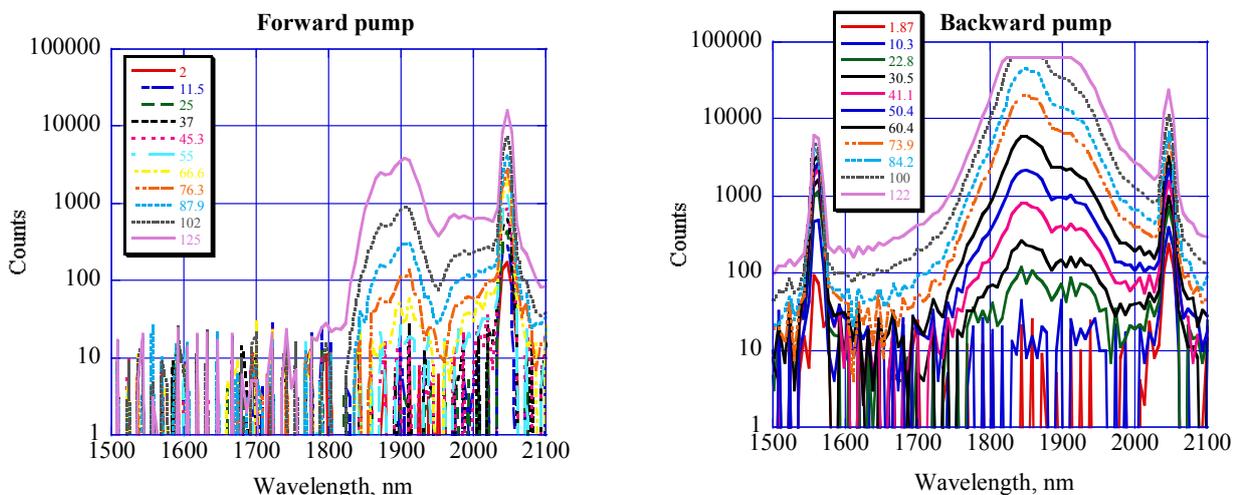


図 2.4.2 励起パワーを変化させたときの増幅後のスペクトル(左:コポンプ、右:カウンターポンプ)

4-2-5 まとめ

Tm,Hoファイバのレーザー発振を行うことにより、2100nmに近い波長域でこのファイバが利得を持つことを確認した。DFB-LDをファイバ結合してTHDF増幅器での増幅を試みたが、ASEの増幅がドミナントになり、シグナル増幅は困難であることがわかった。

目標に対する達成度は以下の通りとなる。

- THDFLによる発振と利得確認→◎
 - DFB-LDの増幅→×
 - シード光発生器としてのエレクトロニクス→×
- 達成度を数値で表現すると30%程度である。

ファイバ増幅が不可能に終わったことの対策として、ファイバ以外の増幅プロセスを確立する方向で検討を進めている。

- LD増幅器
- 固体レーザー増幅器

の2通りを現在検討中である。あわせて共振器の制御エレクトロニクスの開発を進行している。

4-3 主共振器の研究開発

4-3-1 研究開発内容

手順

励起チャンバーの開発終了を受けて、シミュレーションにより最適な共振器パラメータを得る。2 ミクロンにおける実際的な共振器を用いて発振実験を行う。
さらに Q スイッチを挿入したジャイアントパルス発振実験、シード光発生器を組み合わせた単一周波数化の実験を順次行う。

目標

- ・ 2 ミクロンに最適化された共振器構造による発振確認と、パラメータの整理。
- ・ Q スイッチによるジャイアントパルス発振。エネルギー100mJ 程度、パルス幅 100ns 以上のパルス発振を達成
- ・ シード光発生器の組み合わせによる単一周波数発振。本サブテーマの完了。

4-3-2 設計

前年度に引き続き共振器のシミュレーションを行い、必要な光学素子のパラメータを得た。

基本方針：

- ・ パルス幅 200-500ns を達成するため、共振器長は 2m~4m 程度。
- ・ 3mm φ の YAG ロッドに、トータル 3LD×1ms×600W=1.8J、繰り返し 20Hz として 36W のパワーを投入したとして熱レンズ計算
- ・ チャンバーは 2 個 1 組で使用するため、共振器のドライブは 72W。
- ・ 左右対称のリング共振器とする。
- ・ 入出力のカプラーは平面ミラー。
- ・ 凹面鏡を対称位置に配置して、安定共振器を構成する。
- ・ 6 枚ミラー構成

6 枚のミラーでボウタイ型リング共振器を作ると、ミラー間は 300mm~600mm となる。ここではその中間として、約 450mm を基準に考えてみる。

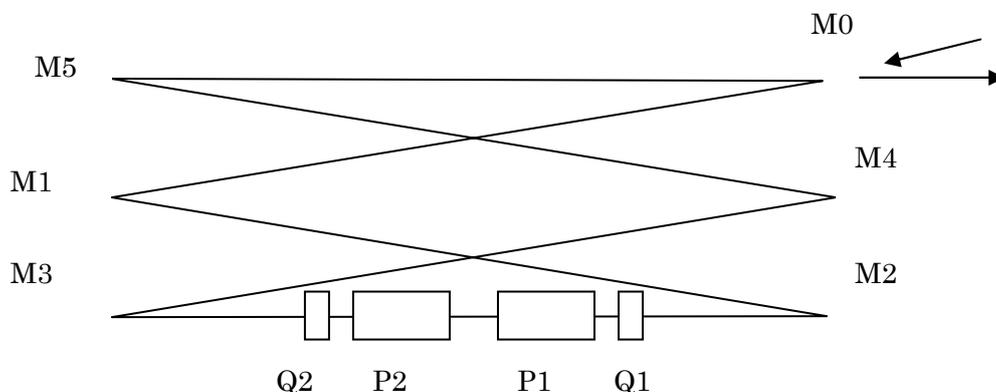


図 3.2.1 共振器の概念図

図 3.2.1 で M0~M5 は入出力カップラーまたは全反射ミラー、Q は Q スイッチ、P は励起チャンバーである。このようなボウタイ型共振器の場合、折りたたみ角にもよるが、M0-M5 間の距離 (=M2-M3 間の距離) を 450mm とすれば、残りの斜めの光路長はいずれも 500mm 程度を想定できる。さて、対称型の安定共振器とすれば、熱レンズを考慮しない場合、M0 と M5、M1 と M4、M2 と M3 のいずれかのペアを凹面鏡にすることになる。ここで最後の組み合わせを凹面鏡にした場合、励起チャンバーの内部でビームが絞れることが簡単に予想できるため除外する。そこでまずは M0 と M5 を凹面鏡にした場合を考える。ここではまず $r=500\text{mm}$ を想定してみる。このとき、入出力カップラーは M1~M4 のいずれかとなる。

Lascad による計算結果を図 3.2.2 に示す。なおその他のパラメータは、

- 波長 2090nm
- ビームの M2=1.5
- 熱レンズ考慮 (励起チャンバーにおける実測値 : $f=300\text{mm}$)

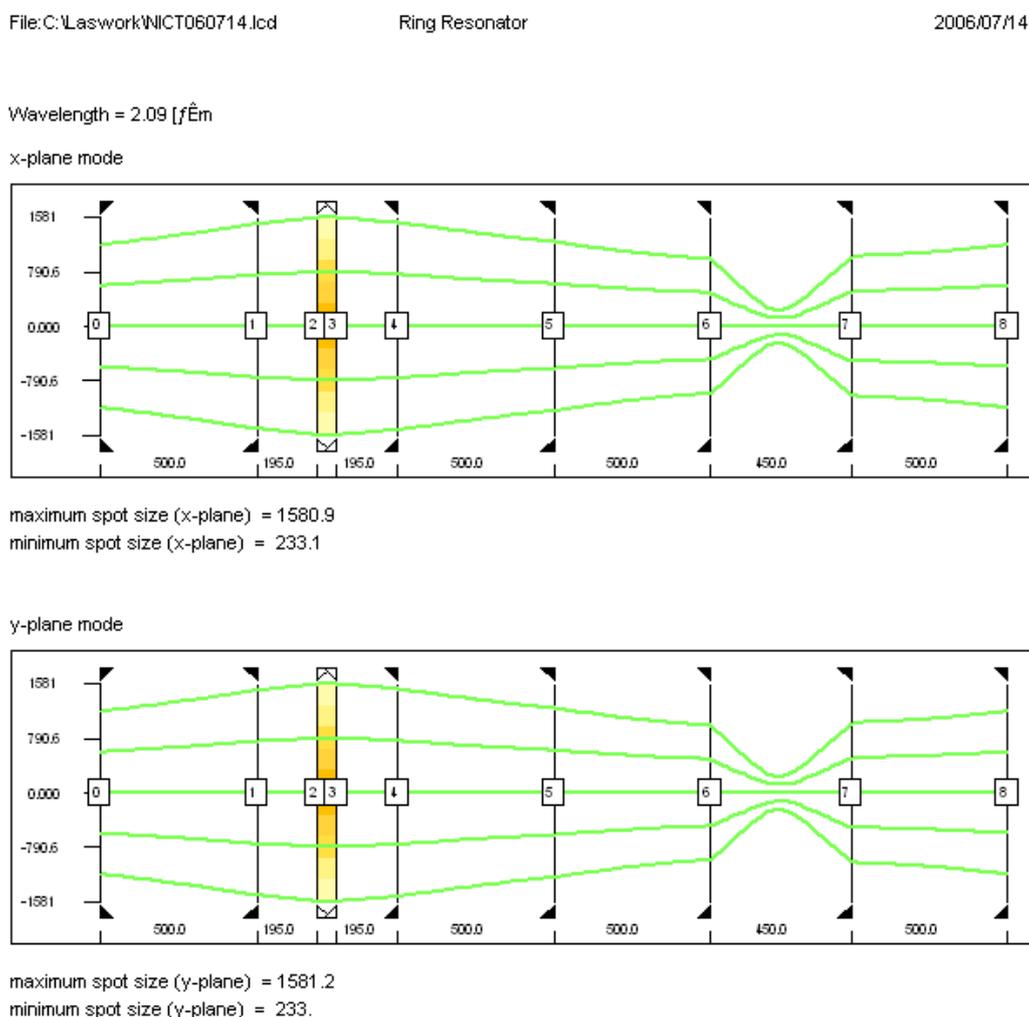


図 3.2.2 長辺 450mm の 6 枚ミラーリング共振器における計算例

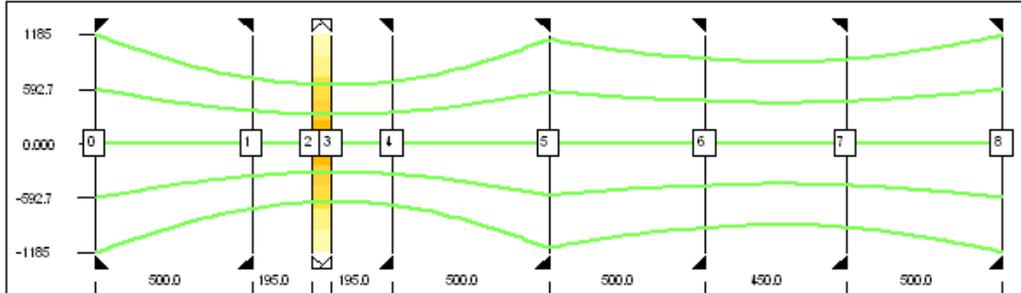
標準的な長さとして M5-M0 間(図 3.2.1 における Surface6-Surface7)を 450mm にした。このときロッド内部でのビーム径は約 3mm でありロッドの外径に一致してしまう。M0、M5 の 2 枚のミラーの曲率半径を固定し、M5-M0 間を変化させることにより、ロッド内の

ビーム径をある範囲で変えることが可能である。図 3.2.2 のセットアップで、他のパラメータを全く変えないとした場合、M5-M0 間は約 380-615mm で変えることができる（共振器が成立する）。380mm のときロッド内のビーム径は 9.2mm であり、一方 615mm のときは 0.8mm である。r=450mm を使った場合、同様に 360mm において約 5.8mm、544mm のとき約 0.66mm である。つまりこのように M5-M0 の距離を変えることによって容易にロッド内のビーム径が制御可能である。

共振器の 1 光路（隣接ミラー間の距離）によって曲率半径は変える必要がある。今回、長辺 450mm の共振器では r=500mm の曲率を適用したが、他のケースでも（凹面ミラー間距離）～（ミラーの曲率半径）となることが予想できる。従って、全長 3m の対称共振器として、隣接のミラーに凹面鏡を用いた場合は曲率半径 600mm 程度がうまく適合すると考えてよい。この光路調整の場合、M5-M0 間の距離を変化させるときには（理想的には）M4-M5 間の距離および M0-M1 間を変えるべきではない。自由度を確保するために M5、M0 における曲げ角、さらには M1、M4 の曲げ角が変化する必要があり、一旦仮置きした光学配置を M5-M0 間の距離だけの变化で変えることは現実的ではなくなる。他の配置を考えたとき、たとえば「隣接しない 2 枚のミラーを凹面とする」の仮定の下でも同様の結果が出る可能性がある。共振器の M1 と M4 を凹面にした場合、他のミラーが全部フラットだとすれば、凹面ミラー間は隣接した場合の約 3 倍となる。図 3.2.2 の共振器の場合では 1400mm となるため、曲率半径 1200mm 程度を適用するとうまくフィットする可能性が高いと考えた。

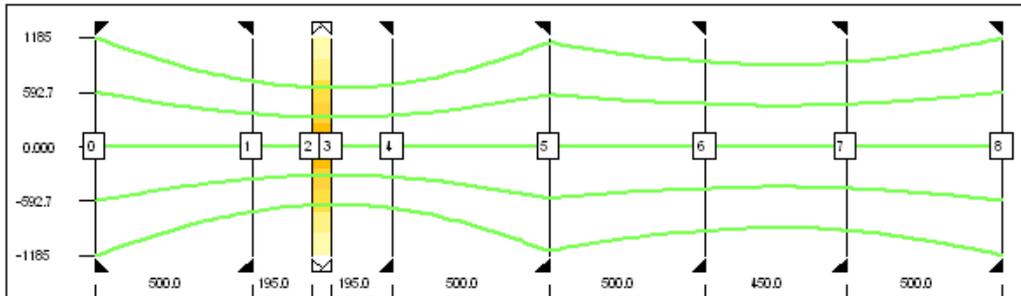
Wavelength = 2.09 [μm]

x-plane mode



maximum spot size (x-plane) = 1185.4
 minimum spot size (x-plane) = 638.01

y-plane mode



maximum spot size (y-plane) = 1185.4
 minimum spot size (y-plane) = 638.07

図 3.2.3 M1 と M4 を $r=1200\text{mm}$ のミラーに置き換えたときの計算例

実際に、M1 と M4 に $r=1200\text{mm}$ のミラーを仮定した（その他はフラット、共振器長も同じ）とき、図 3.2.3 のように安定共振器を構成する。これも隣接凹面鏡と同様に、凹面鏡の間の距離を変化させることにより、ロッド内のビーム径をコントロールできる。またそのほかに、

- 共振器内におけるビームの直径変動が緩やかであり、出力カプラーの位置に関わらずビーム広がり少ない出力が得られる。
- 本質的に M4-M5-M0-M1 の 3 つの光路で距離調整ができるため、光路長調整時、M5、M0 における曲げ角を変化させる必要がない。さらに言えば M4-M5 の光路と M0-M1 の光路の交点と M5、M0 の 2 つの頂点で形成される三角形を相似変化させればいいので、M5、M0 が同時にその法線方向に同時に移動できる機構を設けることにより光軸調整は容易になる。

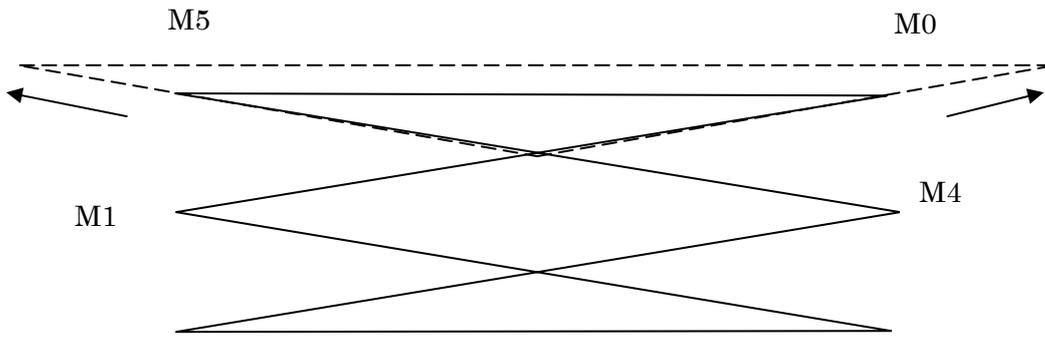


図 3.2.4 ロッド内のビーム径が可変な共振器の例 (図 3.2.1 の発展形)

したがってここまでの共振器配置の場合、M1、M4 の曲率半径は 1200mm 以下程度までは安定だが、 $r=1500\text{mm}$ では (M5-M0 間をどのように変化させても) 成立しないことが計算結果からわかった。逆に M5-M0 間の調整により $r=800\sim 1200\text{mm}$ では適当な距離を見出すことができた。

熱レンズについて

上記の計算では熱レンズをある計算方法によって算出し、その結果を共振器に適用してきた。しかしながら熱レンズのような数値は実験と計算では一致しないことがよくある。ここでは熱レンズが変化したときの共振器のトレランスを評価してみる。

計算された熱レンズの代わりに、ロッド長さだけ離れた両端に同じ焦点距離の単レンズが配置されていると仮定してみる。今、上記で計算した 450mm 長さの 6 枚ミラー共振器 (M1=M4 : 曲率半径 1200mm) を考える。先ほどの熱レンズ結果を使用した場合、M2、M3 上のスポットサイズは 2.37mm であったので、同様に 2.37mm のスポットサイズが得られるような凸レンズをロッド両端の位置に置くものとする、その焦点距離は 4000mm となった。もしも中央部分に 1 枚のレンズを置くとその焦点距離はその半分の 2000mm となった。ここで作られている共振器の、熱レンズの焦点距離に対するトレランスを考える。このばあい、表現は図 3.2.5 のようになる。

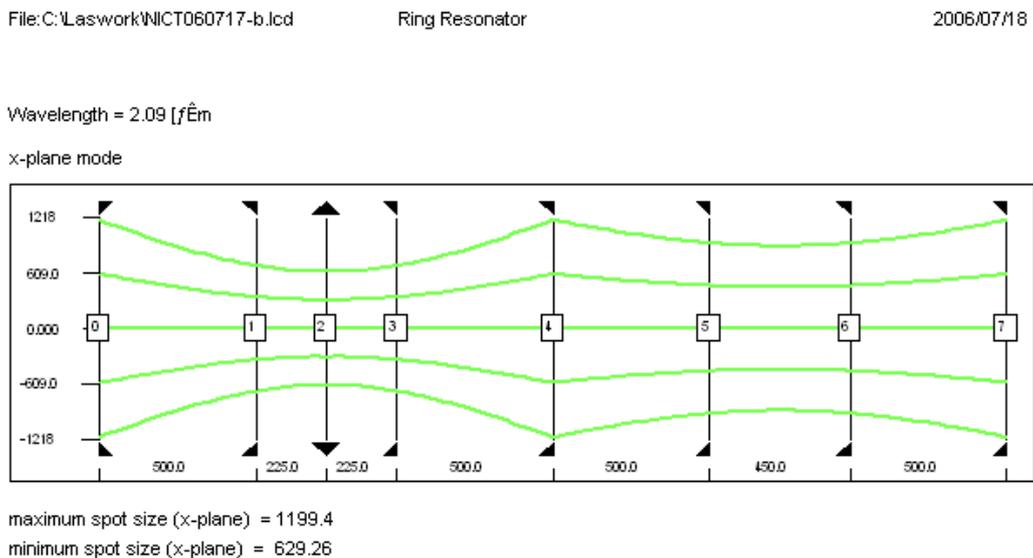


図 3.2.5 M1、M4 の曲率を 1200mm としたときの計算例

一方、M0 と M5 を $r=400\text{mm}$ とした場合の共振器も同様に考えると、図 3.2.6 のとおりになる。

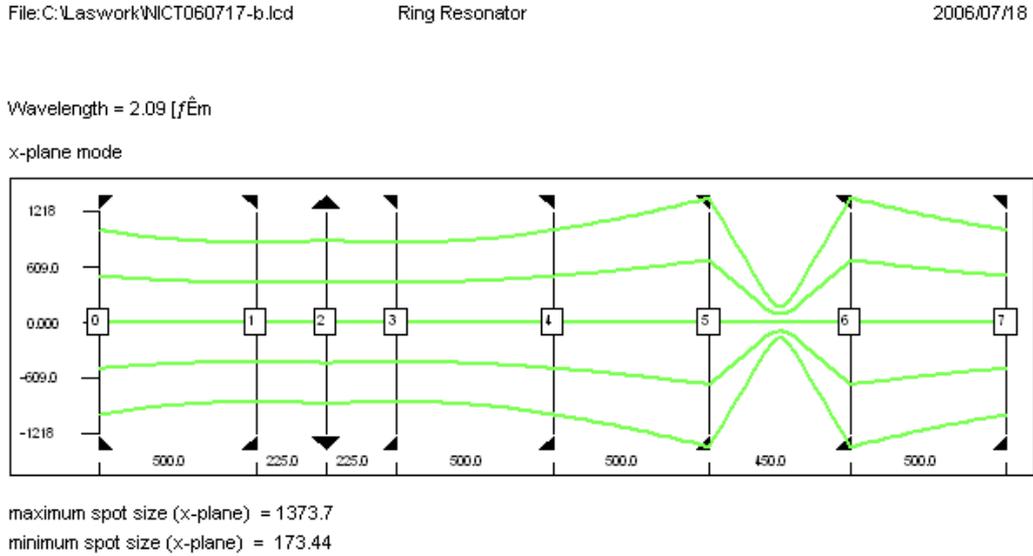


図 3.2.6 M0 と M5 を $r=400\text{mm}$ としたときの計算例

これらの両方について、熱レンズが 2000mm 前後で振れたときにロッド内のビームウェスト径がどのように変化するかを計算したのが図 3.2.7 である。

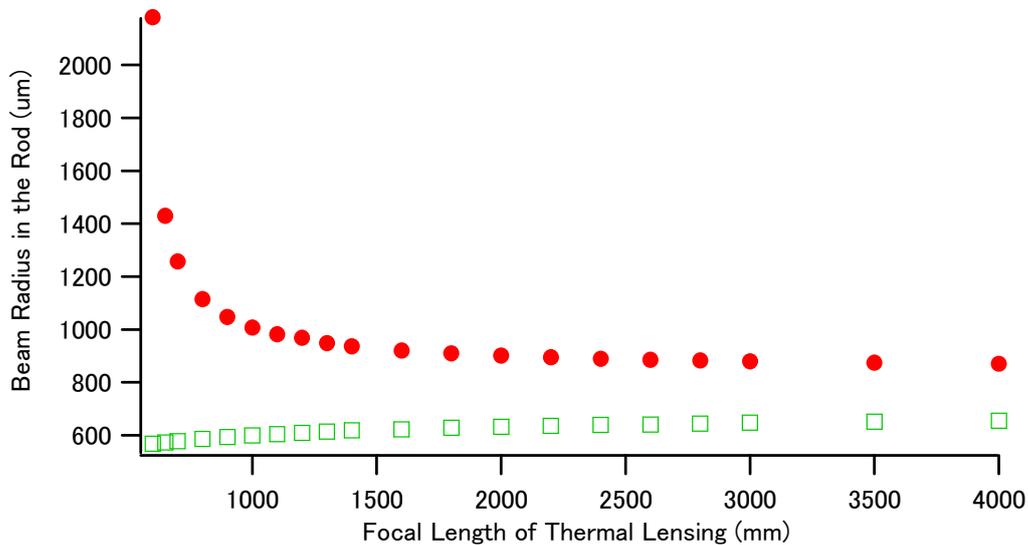


図 3.2.7 熱レンズによる焦点距離の変化に対するロッド内のビーム径の変化

図 3.2.7 において、緑色の四角が図 3.2.5 に相当し、赤い丸は図 3.2.6 に相当するそれぞれ計算値である。いずれも熱レンズが弱い（ロッド位置におけるレンズ焦点距離が長い）うちはビーム径に大きな変化はないが、特に後者は熱レンズの焦点距離が 1000mm 以下になるとロッド内のビーム半径が急激に増加する傾向が見られた。前者はこれとは逆の挙動で、より緩やかな変化を見せた。なお、より強い熱レンズにおいては後者と同じくある点を境にして急激に変化する。ちなみにロッド内のビーム径を大きくとろうとする場合には、M2-M3 の距離を伸ばすことで対応可能である。そうした場合には $r=1500\text{mm}$ の凹面鏡が

使える可能性がある。以上の点を総合的に考えると、M1 と M4 を $r=1000\text{mm}$ 程度の曲率半径を持つ凹面鏡とすることが共振器内部のビーム制御の点、熱レンズに対するトレランスの点から考えて優れていると結論した。必要な凹面鏡の曲率半径は $r=1000\text{mm}$ を中心として $r=750\text{mm}$ から 1500mm 程度まで考えておけばよい。

現実的な共振器配置

現実的な共振器を構成することを考えると、さらに条件を付け加える必要がある。

- ・ ミラーの入射角 30 度以下
- ・ 2 枚の凹面鏡への入射角は等しいこと
- ・ 共振器は 2 つのチャンバーを中心とする対称形とし、中心から 2 枚の凹面鏡までの距離が等しいこと
- ・ チャンバー内部のビーム径の制御を容易にするため、凹面鏡を挟んでチャンバーと反対側の光路長を容易に変えられること

といった点である。

これらを考慮して以下の図 3.2.8 のような共振器を考案した。

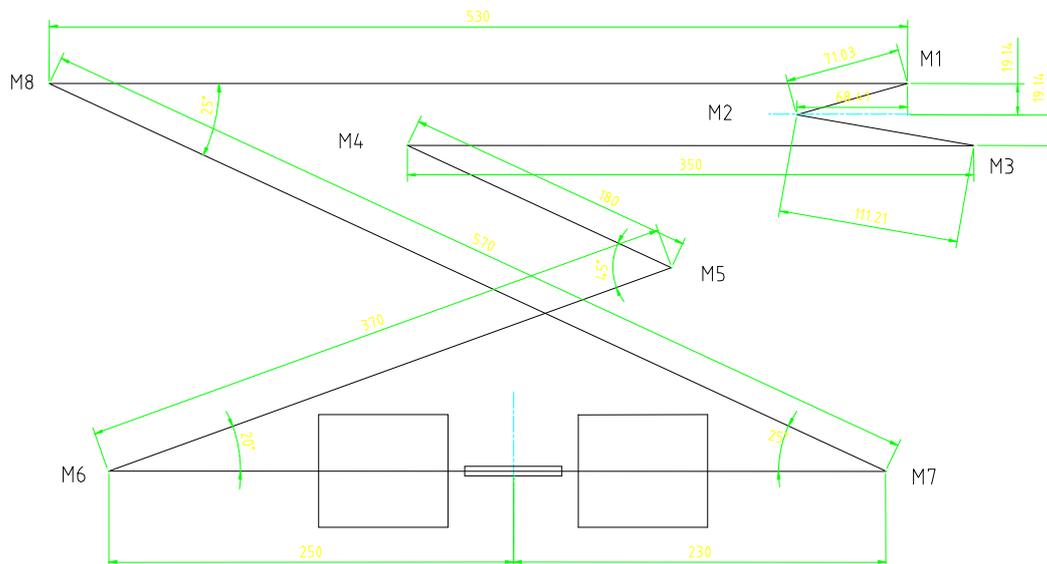
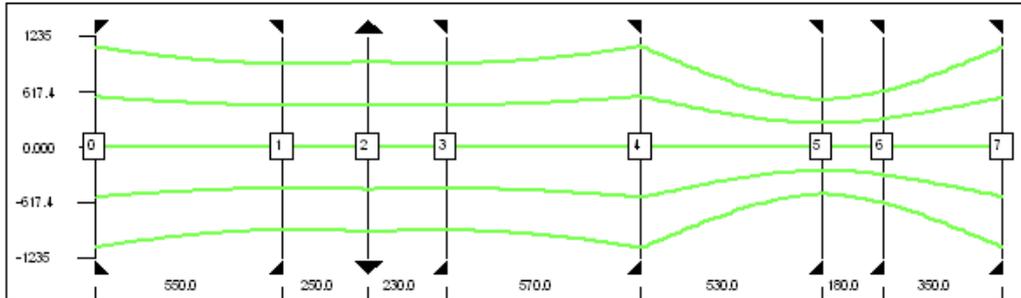


図 3.2.8 実際の共振器配置

図 3.2.8 の最下部にある 2 基のチャンバー間の中心が共振器の中心位置 C である。M4 と M8 は凹面鏡となるが、C-M4 と C-M8 の距離は等しく 800mm である。また M4 と M8 への入射角は等しく 12.5 度である。M1 は C と距離的に正反対に配置されており、C-M4-M1 と C-M8-M1 は等距離である。M1~M3 は一つのベース上にあり、これらの相対位置は固定される。このベースが図の左右方向に移動可能なステージ上に配置され、ステージの移動により M1~M3 を同時に移動させ、M8-M4 間の距離を、アライメントを崩すことなく変化させることが可能であるものとする。今デフォルトの数値として M4 と M8 の曲率半径を 1000mm 、 $M8-M1=M1-M4=530\text{mm}$ 、チャンバーの熱レンズによる焦点距離を 2000mm としたときの共振器計算を示す。また、 $M8-M1=M1-M4=730\text{mm}$ まで変化させたときの結果を示す。

Wavelength = 2.09 [μm]

x-plane mode



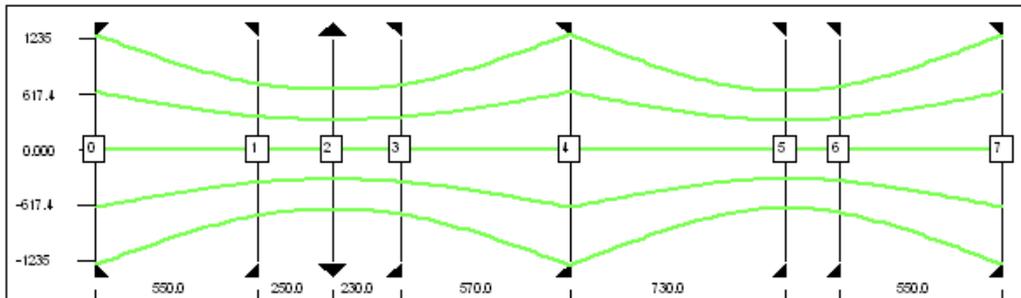
maximum spot size (x-plane) = 1127.2

minimum spot size (x-plane) = 532.46

図 3.2.9 M8-M1=M1-M4=530mm としたときの共振器内ビームの様子

Wavelength = 2.09 [μm]

x-plane mode



maximum spot size (x-plane) = 1292.

minimum spot size (x-plane) = 650.15

図 3.2.10 M8-M1=M1-M4=730mm としたときの共振器内ビームの様子

このように、共振器長はやや変わってしまうものの、ロッド内のビーム径を容易に調整可能な共振器を構成することができる。

4-3-3 まとめ

前年度からの結果を引き継ぎ、シミュレーションにより最適な共振器パラメータを得た。結晶内部のビーム径を調整可能な共振器を設計した。今後は設計終了した励起チャンバーの基本特性を取得した後、この共振器に当てはめて発振実験を行う。さらに Q スイッチを挿入したジャイアントパルス発振実験、シード光発生器の組み合わせを順次行う。

目標に対する達成度を評価すると、次のようになる。

- ・ 共振器設計の完了→◎
- ・ 発振実験→▲

これを数値で表現すると達成度 50%程度と考えられる。部品はすべて揃っていると考えてよいので、励起チャンバーの評価の後、順次実験を進めることで、課題は着々とクリアできると考えられる。

4-4 増幅器の研究開発

4-4-1 研究開発内容

手順

発振器から得られるエネルギーから、増幅器における利得を計算する。これを元に最適なロッド径、増幅器段数を求める。共振器用チャンバー構造のスケーリングにより、増幅器用チャンバーの設計、製作を行う。

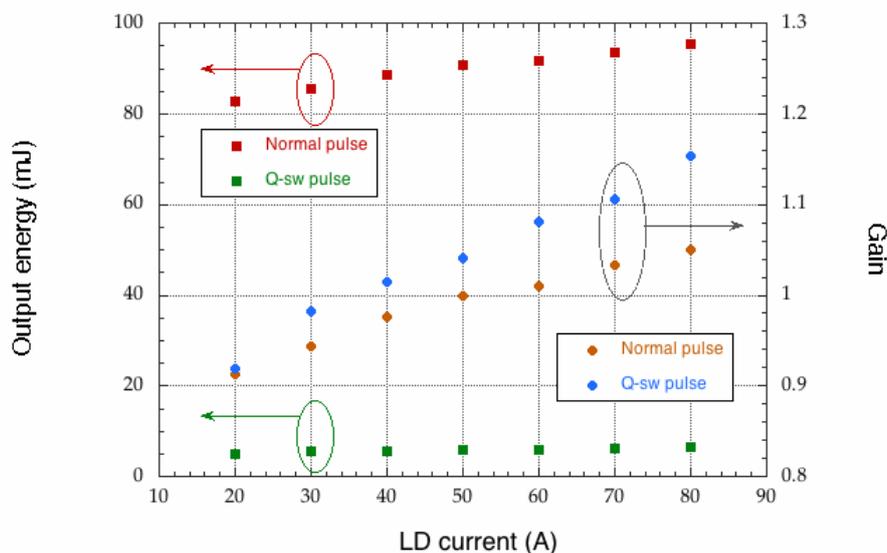
一方、発振器からの出力により、発振器から増幅器におけるリレー光学系の計算を行い、必要な光学系を構築する。共振器との組み合わせ実験を行い、計算結果との照合を行う。

目標

- ・ 増幅器用チャンバーの第 1 試作設計。
- ・ 増幅実験において、利得などを求める。

4-4-2 利得見積もりについて

数値上の見積もりは、励起チャンバーの完成後にスタートするものであり、現在実行中である。途中経過として利得測定したものを図 4.2.1 に示す。発振器のチャンバーと増幅用チャンバーは完全に同期して動作させた。



ノーマルパルス(パルス幅約 $200 \mu\text{s}$ 、パルスエネルギー約 90mJ)と、微弱な Q スイッチパルス(パルス幅 340ns 、パルスエネルギー 5.5mJ)の両方で 3ϕ のロッド入り共振器用励起チャンバーの利得を調べた。LD 電流最大付近でも利得はようやく 1 を超える程度であったが、Q スイッチパルスの場合には利得係数が大きく、 80A では 1.15 程度が得られた。ノーマルパルスの場合、励起途中から発振するため、同期して動作している励起チャンバーでの上準位への励起がなされないうちにパルスの一部が増幅用チャンバーを通過してしまうのに対し、Q スイッチ発振では励起が完了した増幅用チャンバーにパルスが通過することになるため、見かけ上の利得が増えるためと理解できる。利得に関しては今後も各種類のチャンバーにおいて測定して行く予定である。

4-4-3 増幅器用チャンバーの設計

ハードウェア上は、基本的には励起チャンバーの開発と並行して行うことができる。増幅器に必要な専用設計項目として、

- ロッド径の増加(発振器における 3mm→増幅器用として 4mm、および 6mm)
- LD の最大出力の増加(発振器における 600W→増幅器 1000W)

があげられるが、これらは発振器用励起チャンバーの開発時に、数点の部品を入れ替えることによりコンパクトであるように盛り込んだ。したがって励起チャンバー開発終了とともに増幅器のチャンバー設計が終了した。

4-4-4 増幅器光学系の設計

増幅器チャンバーを利用して、図 4.4.1 のような増幅器チェーンを考えた。

共振器の項で述べた、出力ミラーである M1 から出たビームはアイソレータを経て増幅ステージに入力される。搭載を考えているチャンバーは4基ないし6基で、2基で1段を構成する予定である。1基あたり6本のLDを搭載予定であり、初段はピークパワー600W、第2段は1000W、最終段も1000WのLDを搭載することが予定されている。

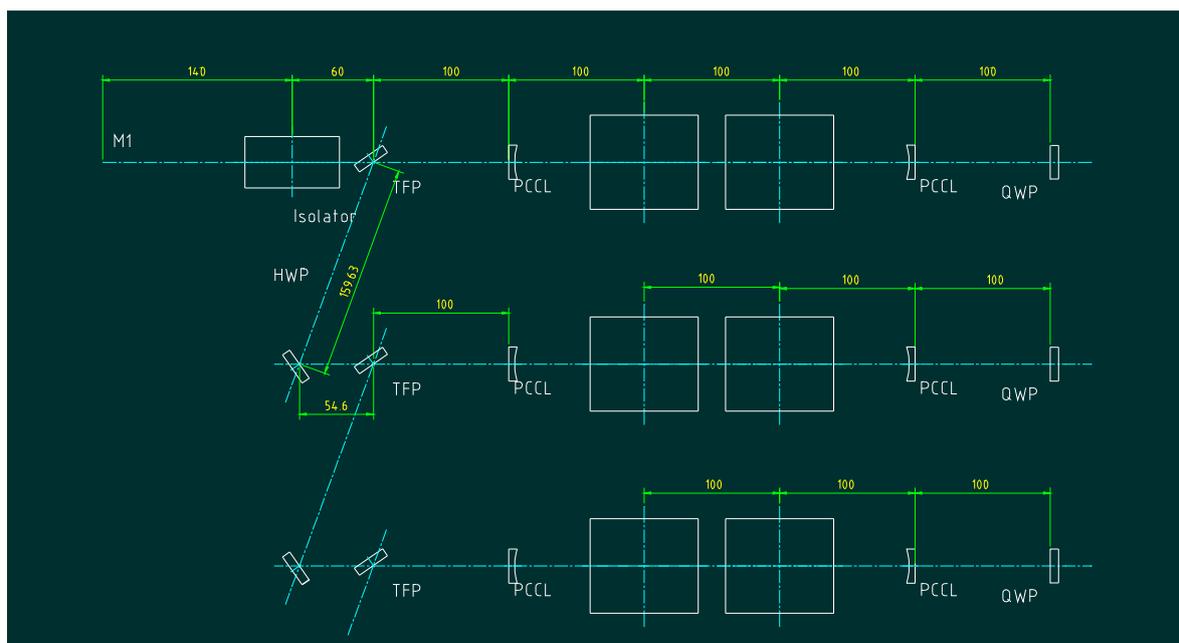


図 4.4.1 3ステージ増幅器の光学系配置

以下の条件を設定して、図 4.4.1 を基にして計算を行った。

- ロッドにそれぞれの段で 3mm φ、4mm φ、6mm φを使用する
- 熱レンズはどの段のチャンバーもチャンバーあたり $f=300\text{mm}$ とする。
- すべての段は偏光回転による折り返しで、ダブルパス
- ロッド中のビーム径がロッド径の約 $2/3$ であること
- 1組のチャンバー内のビーム径がほぼ等しく、折り返しミラーにおいてほぼ平面波となること。すなわち、折り返しミラーを中心にして2回のパスで対称な経路をビームが往復すること。
- ビームの初期条件は、共振器の検討時の出力ビームと同じパラメータを使用する。すなわ

ちビーム直径約 1.5mm、ビーム広がり角 1.5mrad とした。

また、使用するレンズ類は特殊な焦点距離ではなく容易に入手可能なものとした。図 4.4.1 に適当なレンズを当てはめて考えた。素子 0 は共振器の M1 に相当している。素子 1 はこのビームを大まかにコリメートするため、 $f=1000\text{mm}$ のレンズを素子 0 から約 100mm の位置に挿入した。その後、熱レンズ $f=300\text{mm}$ のチャンバーを $f=-250\text{mm}$ の平凹レンズで挟む形に配置した。例えば素子 2～素子 10 は初段増幅器を展開したものであり、素子 2=素子 10=入力側の平凹レンズ、素子 5=素子 7=折り返し側の平凹レンズ、素子 3=素子 9、素子 4=素子 8 でそれぞれ熱レンズを持ったロッドとなっている。増幅器の段と段の間の距離、および平凹レンズとチャンバーの距離を適切にコントロールすることにより、図 4.4.2 のような結果を得ることができた。最終段後の素子 30 は $f=-500\text{mm}$ の平凹レンズである。このとき、それぞれのアンプのロッド内部の最大ビーム径は、初段で 1.9mm、第 2 段で 2.9mm、最終段増幅器で 4.4mm となり、かつペアをなすチャンバーにおいて同程度の最大ビーム径が得られる予測である。

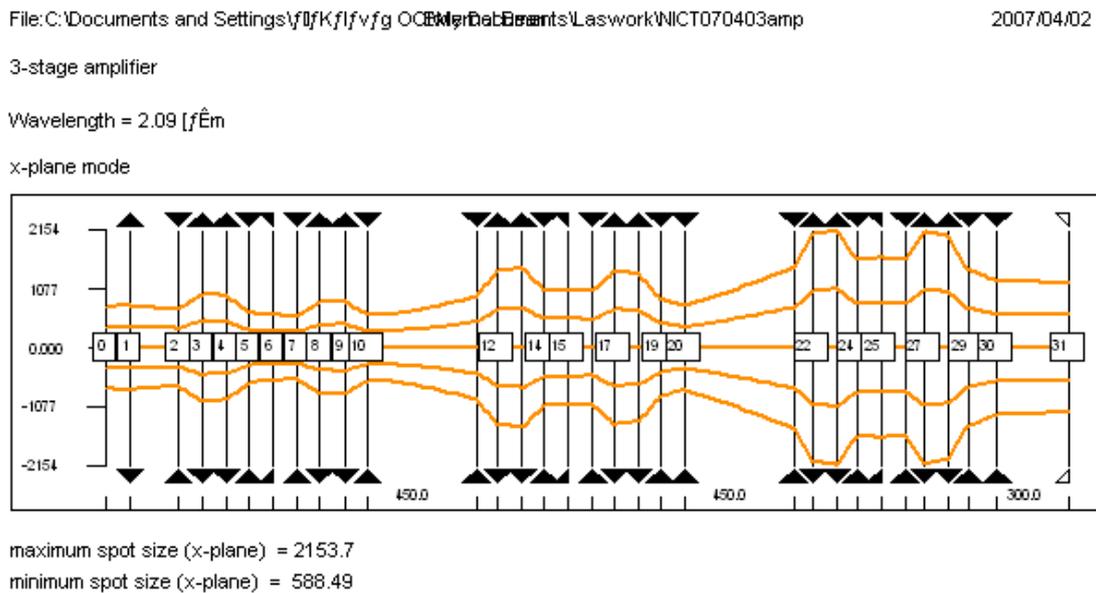


図 4.4.2 3 ステージ増幅器のシミュレーション結果

4-4-5 まとめ

発振器の製作の遅れから、その実験データをフィードバックした計算は実行できていないが、その代わりに先行させた増幅器チャンバーそのものの設計は終了したとしてよい。今後は今回予備的に行った実験的な利得のデータ取得を行う予定である。4φ、6φ のロッドについても熱レンズ、利得の測定を急ぎ、リレー光学系の手直しを行いたい。

進捗状況としては計画の未達分としては実質的にはいくつかのデータ取得とリレー光学系の再計算が残っていること、一方 19 年度の前倒し分として励起チャンバーの完成があるため、差し引きでは 80%以上の達成と考えている。

4-5 総括

入り口から出口に向かって順を追ってまとめる。

シード光発生器

ファイバによる増幅が困難という判断に到達するまでに時間を要してしまい、切り替えが遅れたことが現在の進捗遅れに直結している。しかし、固体あるいは半導体による増幅の手を打っており、2007年7月には増幅器と制御エレクトロニクスが完成できる予定である。このシード光発生器は、励起チャンバー以下の開発と平行して進めることが可能であるため、7月の完成まで別途開発を進め、8月以降に「共振器と組み合わせる(項目3)」ことを考えている。

励起チャンバー

前記の通り完成している。

共振器

励起チャンバーの評価を行うためのショート共振器は実験済みで、また共振器の構成までは計算済み。従って「励起チャンバーを適用した実験を行い、微調整をすること(項目1)」が今後の最初の課題である。

増幅器

増幅器利得と熱レンズなど、増幅器チャンバーに関するパラメータの取得を別途行っておく。そのデータをもとにリレー光学系を再計算する。共振器での実験(項目1)が終了次第計算と合わせるべく「リレー光学系を配置して増幅実験(項目2)」を行う。

カッコで番号を振った実験項目については、その数字の順を追って積み上げることが必要であるが、シード光と共振器との組み合わせを遅くとも8月までには行う予定である。

遅れの挽回のため、共同研究先である理化学研究所との連携を一層深めることで、理研のユニットリーダーとの合意を得ている。

5 参考資料・参考文献

5-1 研究発表・講演等一覧

- Yoshiharu Urata et al., “Characterization of thulium and holmium-doped YAG ceramic laser materials”, Asia-Pacific Remote Sensing Symposium 2006 (Nov. 16, 2006)
- 浦田佳治、「リモートセンシング用全固体 2 μ m レーザーの開発」、第 102 回微小光学研究会 (2006. 12. 1)