

平成17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18年4月

情報通信研究機構

平成17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	2
2	研究開発の全体計画	
2-1	研究開発課題の概要	3
2-2	研究開発の最終目標	8
2-3	研究開発の年度別計画	9
3	研究開発体制	
3-1	研究開発実施体制	10
4	研究開発実施状況	
4-1	励起チャンバーの研究開発	11
4-1-1	研究開発内容	11
4-1-2	ロッド材料の選定	11
4-1-3	各種部品の入手	12
4-1-4	励起系シミュレーション	13
4-1-5	励起チャンバーの製作	14
4-1-6	まとめ	14
4-2	シード光発生器の研究開発	16
4-2-1	研究開発内容	16
4-2-2	実施概要	16
4-2-3	DFB-LD～THDFA までの準備	17
4-2-4	EDFL の構築	17
4-2-5	まとめ	19
4-3	主共振器の研究開発	19
4-3-1	研究開発内容	19
4-3-2	シミュレーション	20
4-3-3	まとめ	21
4-4	総括	22
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開発機構が数 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。

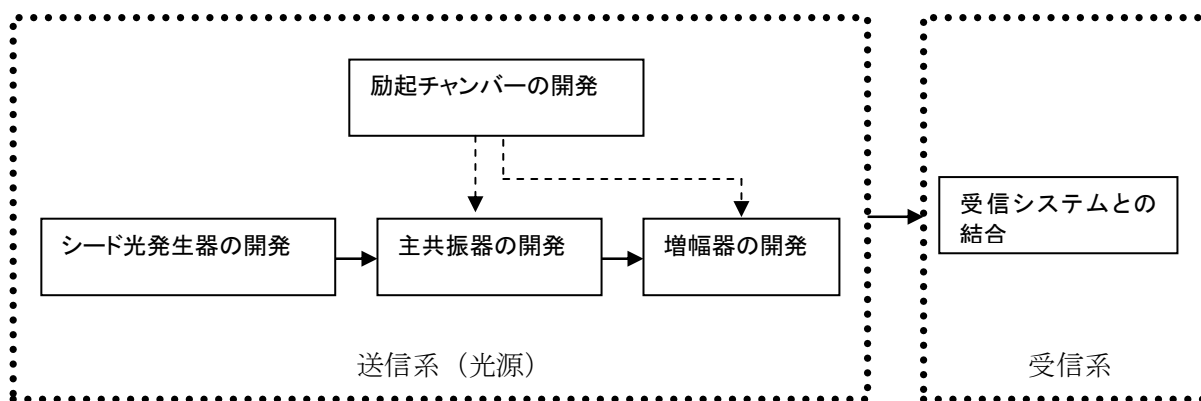
2 研究開発の全体計画

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、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

2 既存受信系との結合試験

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。

2-3 研究開発の年度別計画

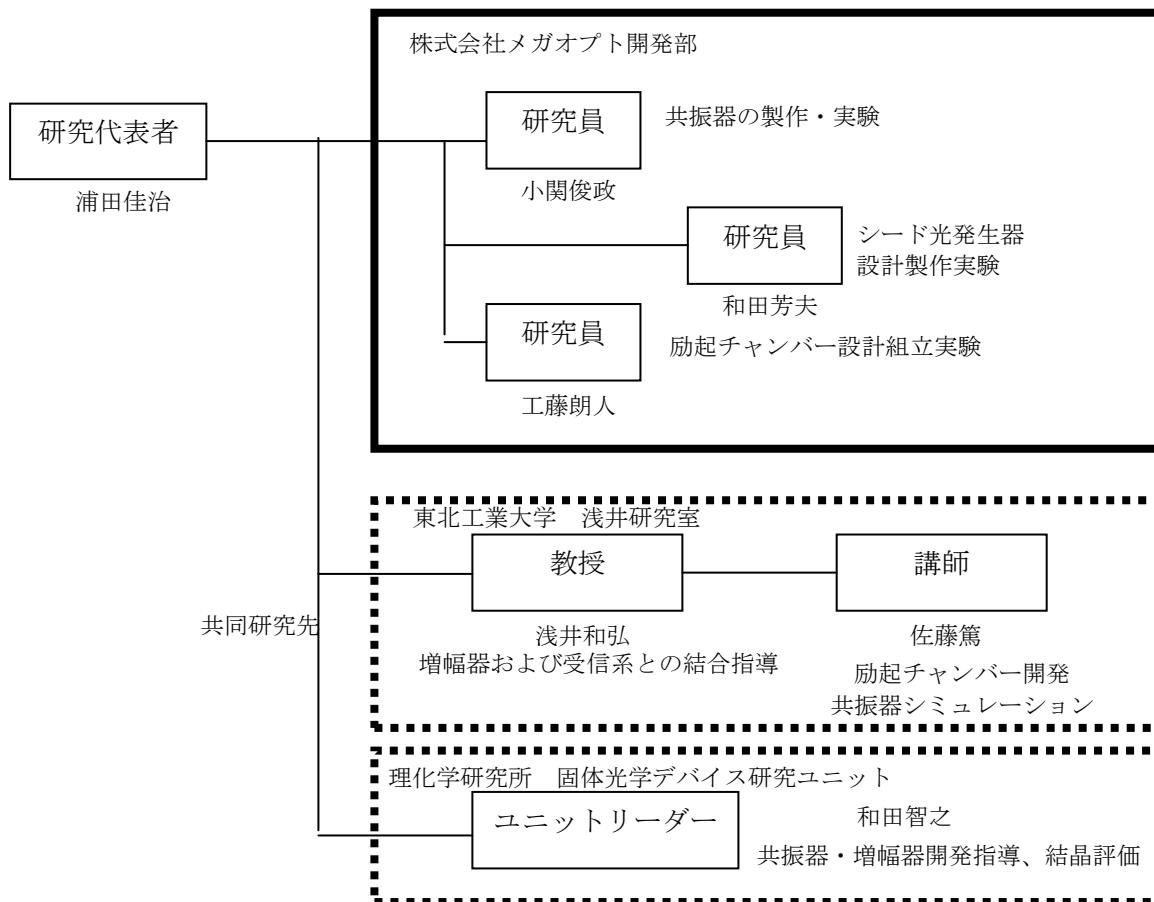
(金額は非公表)

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



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

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 Tm と Ho 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。

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。

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。第1試作チャンバーを製作して評価。

目標

- 概念設計の完了。
- 結晶材料の検討。
- 第1試作の完了(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における動作確認を実現すること。200mJ以上のパルスエネルギーの確認)。

4-1-2 ロッド材料の選定

候補の材料を選ぶにあたり、現在のレーザー活性材料の研究状況、実際に入手する可能性、その他の物性の3つの視点から見て、もっとも現実的な解を求めることにした。LDによる励起のしやすさ、誘導放出断面積の大きさ、発振線の制御性という観点から、TmとHoの複合添加とした。このような方式によれば、Tmイオンが現在高出力LDが入手可能な発振波長において強い吸収を持つため、LD励起が容易であり、かつエネルギー移動により大きな誘導放出断面積を示す活性イオンであるHoが励起されることにより、効率的なレーザー発振が可能になるとされている。

文献調査した結果、次の6つの結晶を選定対象とした。その結果を表1.1にまとめる。酸化物ガーネット系のYAG(Y₃Al₅O₁₂)とLuAG(Lu₃Al₅O₁₂)、フッ化物シーライト系のYLF(LiYF₄)とLuLiF(LiLuF₄)、そしてオルソバナデート系としてYVO₄とGdVO₄(いずれも組成式そのまま)である。ガーネット、シーライト、バナデートはそれぞれ同じファミリーに属している。活性種として添加されるTmおよびHoイオンはいずれの結晶においても希土類元素Y、Lu、Gdを置換する。置換される元素はイオン半径が若干異なるが、同じファミリーの結晶では活性種に影響を与える結晶場は大きく変化しない。従って、ファミリー内では励起波長、発振波長、上準位寿命などの物理的パラメータは大きく変わらないため、どのファミリーを使用するかが選定のポイントといえる。

ガーネット系のYAGは非常によく研究・開発されているため、結晶材料としてもっとも安定しており、入手も容易である。熱伝導もレーザー結晶としては良好な部類に入り高出力レーザー用としてのホストに要求される性能を高い次元で満たしている。しかしながら、Tmイオンの励起波長はこの中で最も短く、LDの入手が困難である。LuAGも近年開発された結晶であるが、同様の資質を持つ。しかしながら実用化の実績の点ではやや疑問であり、入手も必ずしも容易ではない。

シーライト系のYLFはYAGに次いでよく開発された結晶であり、安定な供給が可能だと思われる。励起波長はYAGよりもやや長い792nmであり、一部のLDメーカーの一部の機種では標準的な製品として取り扱われている。問題は熱伝導と水溶性にある。LuLiFも入手しにくいと同様の特性と考えてよい。バナデートのYVO₄はここ10年ほど、注目されている結晶の一つであり、Tmをドープした結晶では、非常にポピュラーな、入手が容易な808nmLDをそのまま適用可能であること

から注目を集めている。しかし、大型の結晶成長は難しく、また上準位寿命の短さから単位体積あたりに蓄積されるエネルギーおよび飽和フルーエンスが小さく、本開発のような高エネルギーパルスレーザーを得るのには向かないと考えられる。

以上の検討から、本開発においては YAG を使用することとした。YAG のもう一つの利点として、コンポジットロッドと呼ばれる、ドープ領域と非ドープ領域を接合したタイプのレーザーロッドを高品質に得られるということが挙げられる。この方式のロッドを用いることにより、レーザー発振の上で損失要因となる、ドープ領域における非励起部分を完全になくすことが可能であり、励起チャンバー設計の自由度を飛躍的に向上できる。

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 1.1 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

4-1-3 各種部品の入手について

入手の困難な LD については開発課題として、米 CuttingEdgeOptronics 社、米 Coherent 社、米 Lasertel 社、および仏 Thales 社の 4 社とコンタクトを行って、下記仕様の半導体レーザーの供給可能性を打診した。供給は米の 3 社から可能である旨の回答を得たが、価格と仕様、納期の点からこのうちの 1 社を選定した。これにより 1 モジュール 1 パルスあたり 300mJ のエネルギー供給が可能となる見通しがついた。

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	70A
最大負荷電圧	18V

一方、YAG のコンポジットロッドについては、価格と、製造の容易さを考えて、セラミックを考えた。レーザー用セラミックについては、世界的に見て日本の技術がトップであるため、セラミックを自社生産しているメーカーに開発依頼をし、Tm,Ho:YAG のセラミックロッドの供給を受けた。

LD の仕様決定に基づき、電源の仕様を決定した。

電源仕様

最大電流	90A
最大電圧	20V
最大デューティ	10%
パルス幅	0.05-0.5ms 可変
繰り返し周波数	最大 100Hz

4-1-4 励起系シミュレーション

本開発で用いる主共振器用励起チャンバーの設計を行うまえに、励起系のシミュレーションを行った。搭載する LD をマルチスタック(アパーチャサイズ 10x2mm を仮定した。円筒形レーザーロッドに対し図のように互いに 120 度離れた 3 方向から LD を照射するものとしたときの、ロッド中央における熱分布を求めた。

その他の計算の仮定は以下の通り。

- LD からの波長は 785nm とし、結晶のこの波長における吸収計数は 2cm^{-1} とした
- ロッド直径は 3mm、屈折率 1.82。
- LD からロッド中心までの距離は 4mm、LD とロッドの間は屈折率 1.5 の直径 7mm の円筒形物質で満たされているとする。励起光は吸収されないとする。
- LD の fast axis に対するビーム広がり角は全角で 35 度とした。
- LD はピーク出力 600W。これをパルス幅 0.5ms、繰り返し周波数 20Hz で動作させるとした。

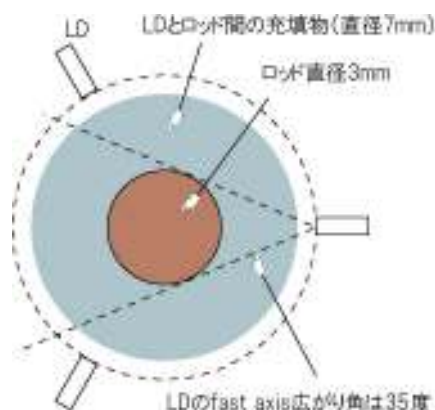


図 1.1 シミュレーションにおけるロッドと LD の配置

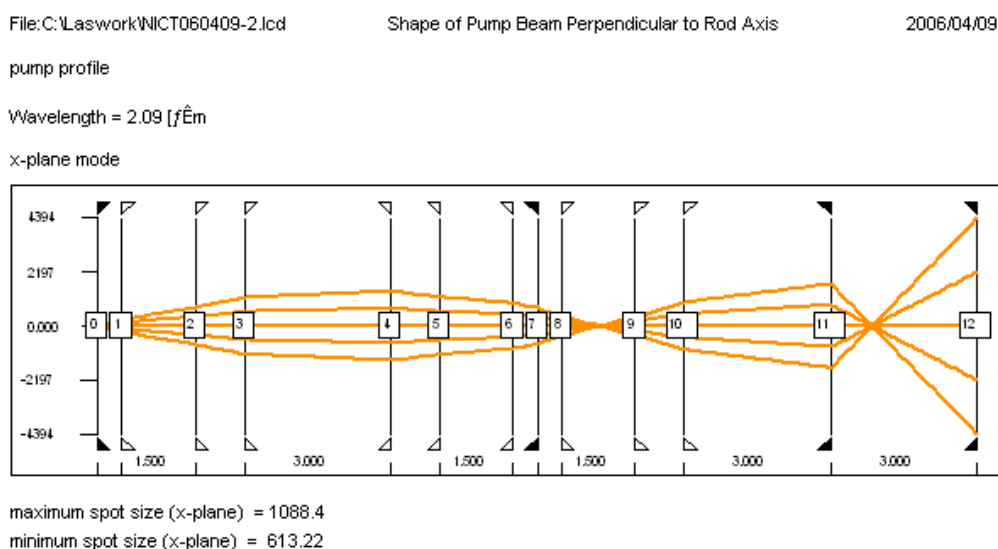


図 1.2 励起 LD のビームトレース。左側が出射位置。エレメント 3 と 4 の間がロッドに相当。その後ろのエレメントはロッド透過後の光の挙動(裏面の反射、ロッド再透過...)を示す。

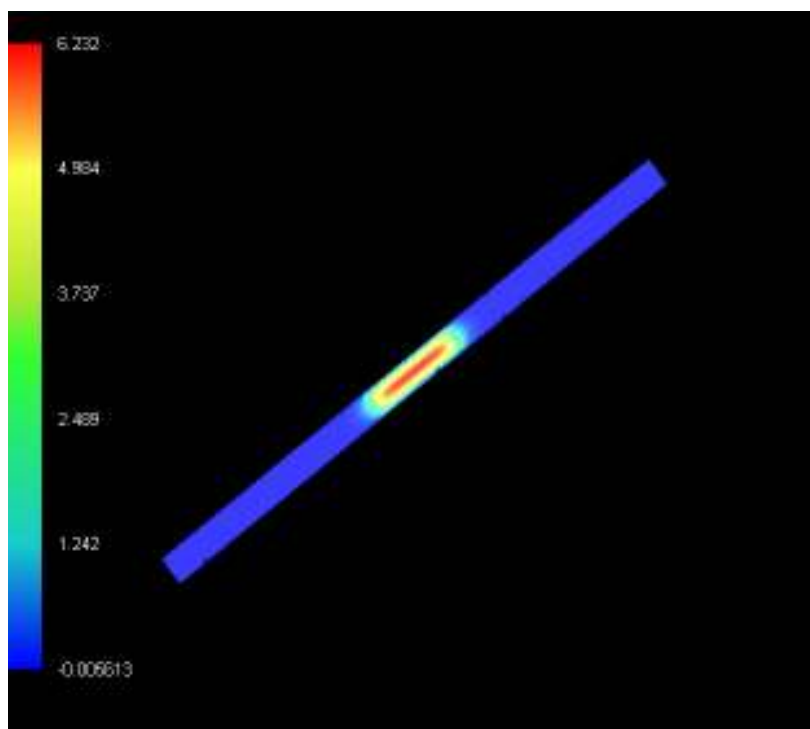


図 1.3 シミュレーションによるロッドの熱分布の例。
 ロッド長 60mm、ロッド径 3mm 時に、計算仮定におけるパワーを投入した場合。

4-1-5 励起チャンバーの製作

上記の結果を元に、励起チャンバーの試作を行った。本試作は第 1 段階であり、LD の到着前の段階で組み立て、近いパッケージの LD とロッドの組み合わせにより、励起効率が十分取れることを実証するために設計されたものである。

図 1.4 に試作された励起チャンバーの写真を示す。

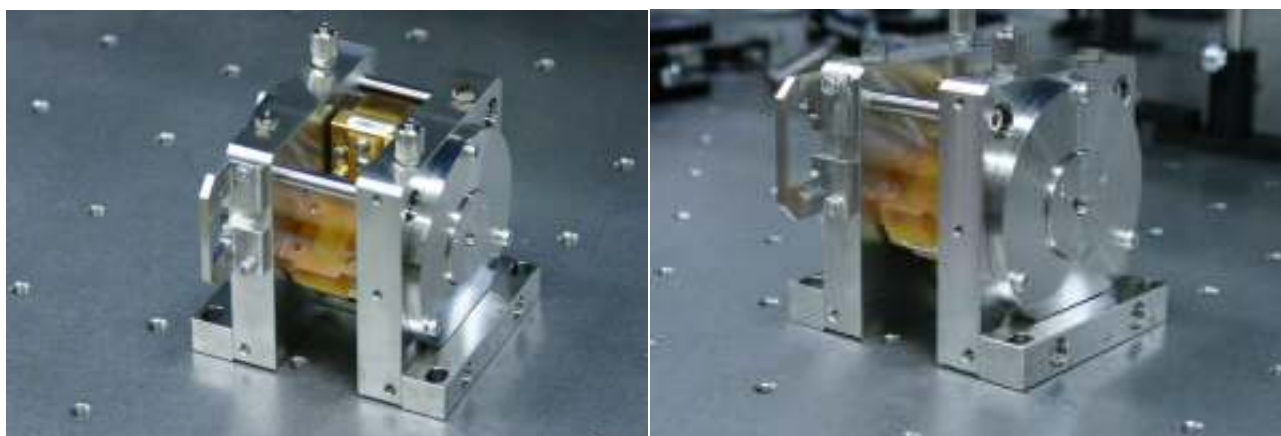


図 1.4 励起チャンバー(第 1 試作分)

4-1-6 まとめ

候補となる結晶材料の選定を主に従来の研究文献からの調査により行い、YAG セラミックを第 1 候補とした。試験的な発振実験は手順からして不可能であったが、当面この課題は見送ることにした。またこれに平行して Tm と Ho のイオン濃度の最適値は参考文献から導き、ロッド開発時に複数のイオン濃度を試作しているため、今後の実験において検証が可能である。

励起チャンバーの構造仮定して、温度分布、熱ストレス強度、励起密度などのシミュレーションを行い、この計算結果に基づいた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った。実際の組み込み実験は、LD、ロッドの入手のためにサプライヤーとの丁寧で慎重な打ち合わせを行ったため、約 3 ヶ月の遅れになる模様。第 1 試作チャンバーは製作終了した。

従って、目標に対する達成度を評価すると、

- ・概念設計の完了→◎
- ・結晶材料の検討→◎
- ・第 1 試作の完了(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における動作確認を実現すること。200mJ 以上のパルスエネルギーの確認)→△(チャンバーのみ製作)

となる。達成度を数値で表現すれば 85%程度と考えてよい。

今後の課題としては、第 1 候補である YAG に平行してバックアップとして走らせる材料を選定しておくべきであると考えている。表 4.1 から見るに、完成された材料で、かつ蓄積エネルギーの大きい YLF を念頭に再度選定作業を行い、バックアップ用の LD などの資材の調達が必要であると考えている。

4-2 シード光発生器の研究開発

4-2-1 研究開発内容

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、ASE の特性を調べる。

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。

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り、次年度のシード光発生器の製作に向けた基本的データを取得する。

目標

- ・ファイバーレーザー調査完了。
- ・概念設計完了。
- ・Tm シード光発生器のための準備実験 (Tm ファイバーレーザーにおいて、連続波における 2 ミクロン帯発振の確認)。
- ・シード光発生器の製作のための基礎データの取得。

4-2-2 実施概要

単一周波数のシードとして、ファイバーレーザーを当初予定していたが、

- ・ファイバーレーザーの単一周波数化(スペクトル狭窄化)は容易でないこと
- ・その発振スペクトルが、外乱によって変化する(中心スペクトルシフト)こと

から、シード光発生器として単一周波数発振する DFB-LD をベースにすることにした。しかし、このタイプの LD は現状では数 mW の出力しか得られず、シード光として出力が不足していることから、THDFA によってこれを増幅することを考えている。考えているセットアップを図 2.1 に示す。THDFA はファイバー中の Tm の吸収帯において励起可能であるため、Er ファイバーレーザーの 1.5 ミクロン周辺の発振を利用して、図 2.2 に示す Tm ファイバーの吸収帯を励起する。

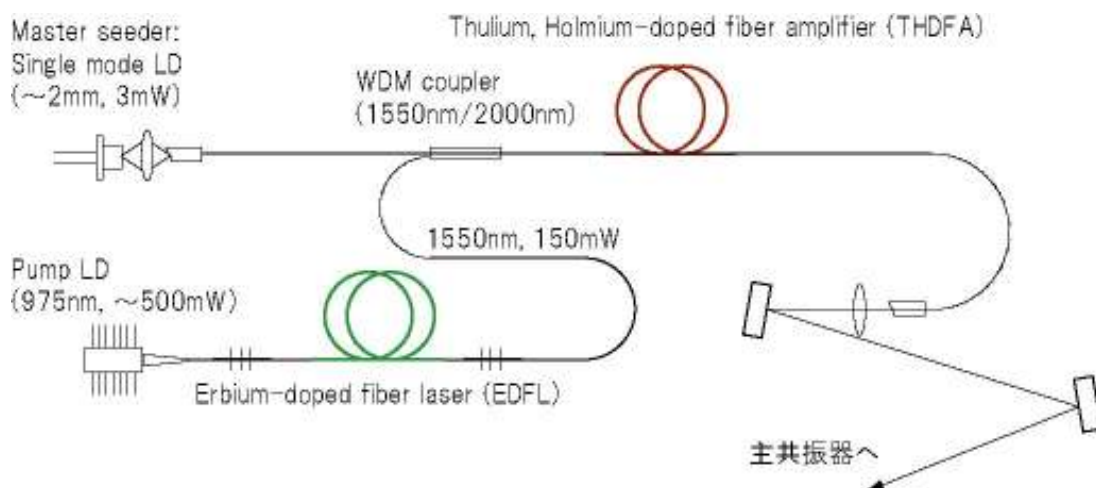


図 2.1 シード光発生器セットアップ(オールファイバー)

開発要素は大きくわけて THDFA の励起光源になる EDFL、DFB-LD と EDFL からの光の合波部分と、THDFA の 3 点になる。部分ごとの進捗を確認すると以下の通りである。

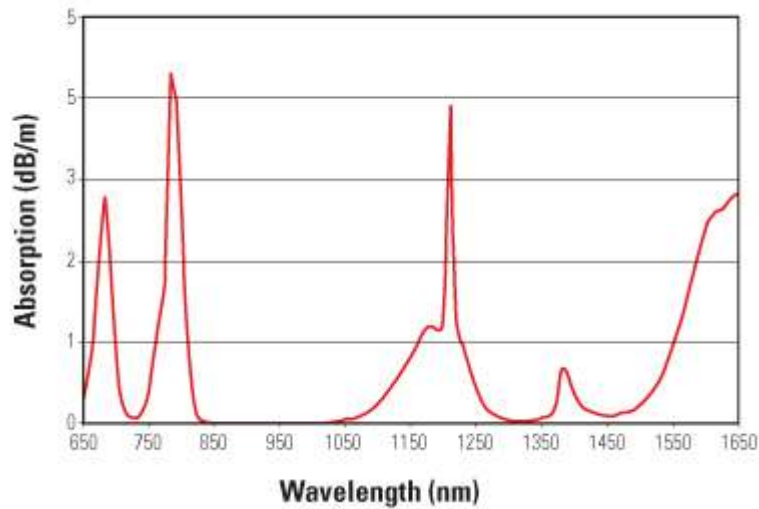


図 2.2 Tmドープファイバーの吸収スペクトル

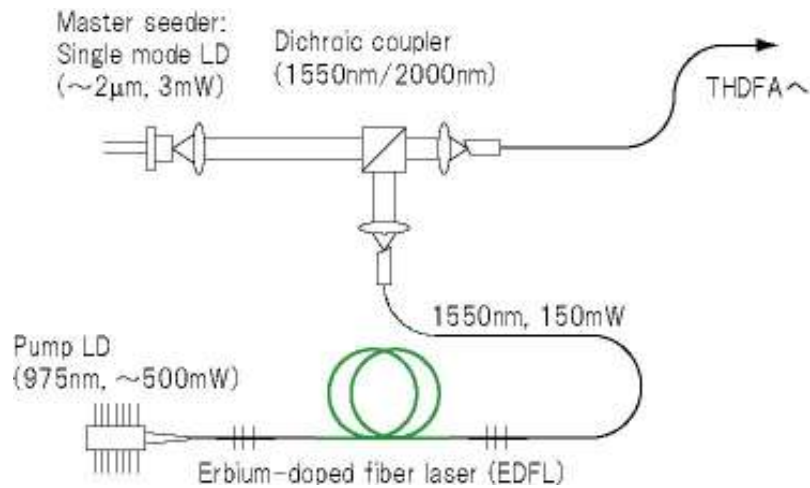


図 2.3 シード光発生器セットアップ (THDFA 励起部分:空間結合)

4-2-3 DFB-LD～THDFA までの準備

- DFB-LDは極めて特殊なLDを国内のLDメーカーから供給してもらい入手した。駆動系と、温度調節による波長制御系のセットアップをおこない、動作確認した。
- 合波部分は図 2.1 ではオールファイバーとして描かれているが、1.5 ミクロン帯と 2 ミクロン帯の WDM カプラーは少なくとも一般には販売されておらず、自由空間における結合系を前提としたセットアップを同時に用意している。これを図 2.3 に示す。この場合、シードの 2 ミクロン光と、THDFA の励起光となる 1.5ミクロン光の両方をコリメートし、2 色性ミラーにて空間結合した後、再度ファイバーに結合させる。この部分に関しても部品選定と調達は終了した。
- THDFA に関しては、THDF の性能評価を行うため、2 ミクロン用のファイバースラッググレーティング (FBG) をカナダのメーカーに開発依頼して入手済みである。これを用いたファイバーレーザーを組、後述の EDFL によって励起して性能確認を行う予定。

4-2-4 EDFL の構築

EDFL は THDFA 励起用光源として出力 150mW 程度を予定して組み立てた。構成は図 2.1 に示

したように、ファイバー結合された励起 LD (975nm、500mW) で Er ドープ単一モードファイバーを励起し、その前後に設置された FBG (反射中心波長 1562nm) によって共振器を組んだものである。図 2.4 に発振している EDFL のスペクトルを示す。

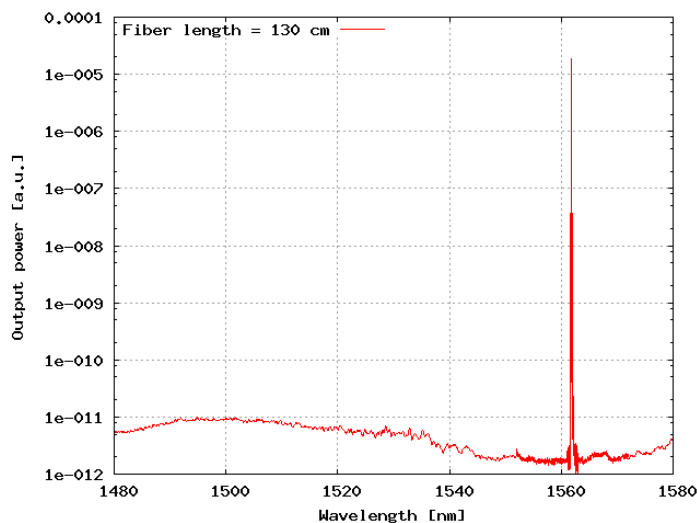


図 2.4 EDFL 発振スペクトル

グラフの縦軸は相対出力、横軸が波長であるが、ASE と思われる 1500nm 近傍の緩い山は発振ピークに対して 6 桁以上低く、十分な SN 比で発振が得られている。レーザー出力を測定したところ 100mW 程度と、想定していた出力よりも若干低いため、ファイバーの長さを変化させて最大出力を測定した。図 2.5 にファイバー長さに対する 1.5 ミクロン光の最大出力を示す。

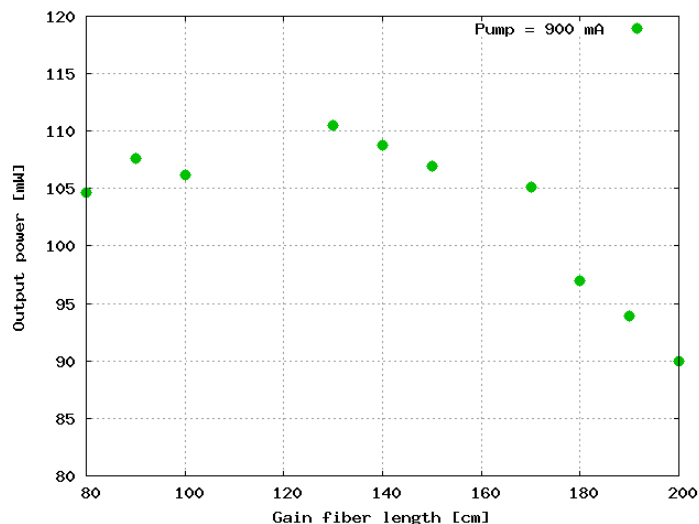


図 2.5 ファイバー長に対する最大出力の変化

当初 150cm からスタートしたが、長くする方向では吸収の影響が増えるためと考えられる出力低下が確認された。一方、ファイバーを短くする方向では、若干出力が増える傾向が見られたものの、130cm をピークに減少傾向が見られた。

図 2.6 にファイバー長さを 130cm にしたときの、励起 LD の電流に対する 1.5 ミクロン出力を示す。特に問題が発生しているようすがなく、線形に出力が伸びていることがわかった。最大出力は 110mW 程度であった。

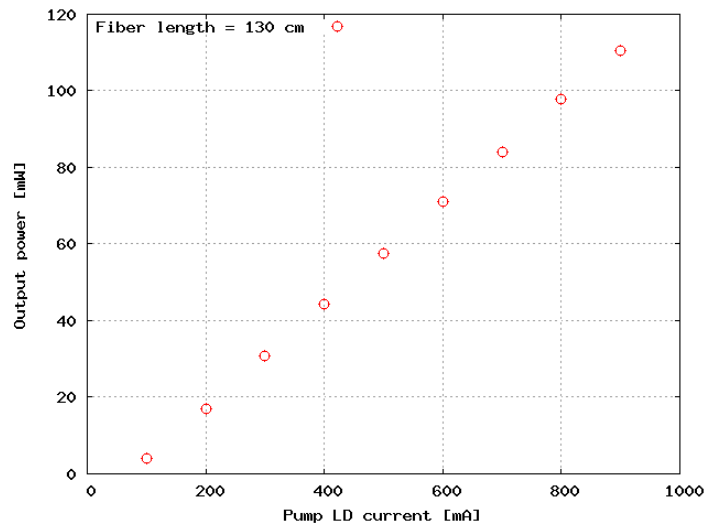


図 2.6 入出力特性

4-2-5 まとめ

当初予定では単一周波数発振を短共振器ファイバーレーザーにて実現する予定であったが、スペクトルの狭窄化、安定化が困難であることから、市場で入手可能なDFB-LDを採用した。従って本質的に単一周波数化が実現されているが、出力の不足を補うための増幅器の設置を行っている。

Tm ファイバーの特性を得るためにチタンサファイアレーザーを使用する予定であったが、弊社が所有する当該レーザーが現在不安定であるため予定を変更して、新規開発のFBGを用いた発振実験を行うことによってファイバー特性を取得することに切り替えた。これは EDFL の完成を待つ必要があるため未達。

目標に対する達成度は以下の通りとなる。

- ファイバーレーザー調査完了→◎
- 概念設計完了→◎
- Tm シード光発生器のための準備実験 (Tm ファイバーレーザーにおいて、連続波における2マイクロン帯発振の確認) →△ (EDFL は完成。その他も準備のみ完了)
- シード光発生器の製作のための基礎データの取得→△ (準備のみ完了)

励起光としての EDFA、シード発振器の発振確認を終了しており、残すところは空間の結合系の実験と、THDFA の特性評価であるので、達成度を数値で表現すると70%程度である。

4-3 主共振器の研究開発

4-3-1 研究開発内容

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 ミクロンレーザーの前準備として、1 ミクロンレーザー用の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。

目標

- ・概念設計の完了。
- ・1 ミクロン用励起チャンバーを用いた発振確認と、パラメータの整理。

4-3-2 シミュレーション

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るとともに、計算の前提条件として、以下の仮定を置いた。共振器の概観を図 3.1 に示す。

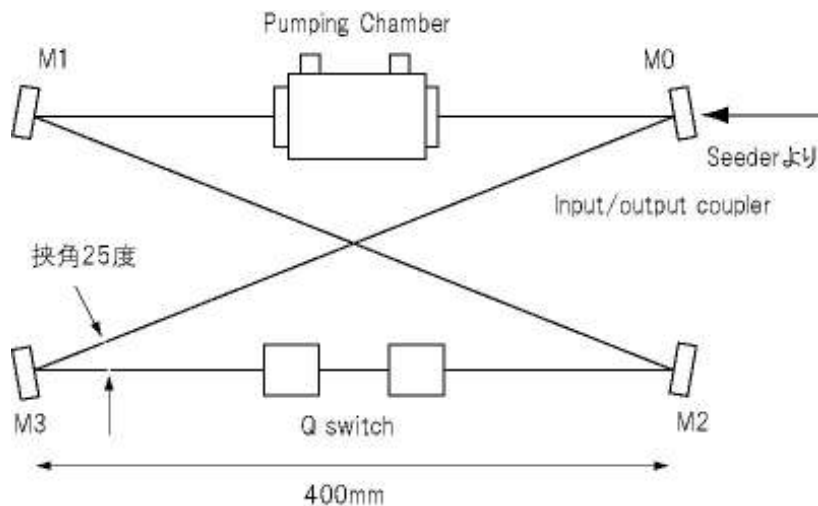


図 3.1 共振器概観(仮定条件)

共振器の形状:ボウタイ型リング共振器

共振器長:1600mm 以上

結晶におけるビーム径:1.5mm

Q スイッチにおけるビーム径:2.0mm 以上

ビーム品質:M2=1.5

発振波長:2.1 ミクロン

また、共振器に導入されるロッドは、4-1 の励起条件において計算された熱分布をもとにロッド内部で発生する熱レンズ効果を持つ物質として考慮される。

シミュレーション結果を図 3.2 に示す。図の上でのエレメント 0~6 は共振器の内部における面を表している。エレメント 0 は入力/出力ミラーで図 3.1 における M0 であり、エレメント 6 と同一である。

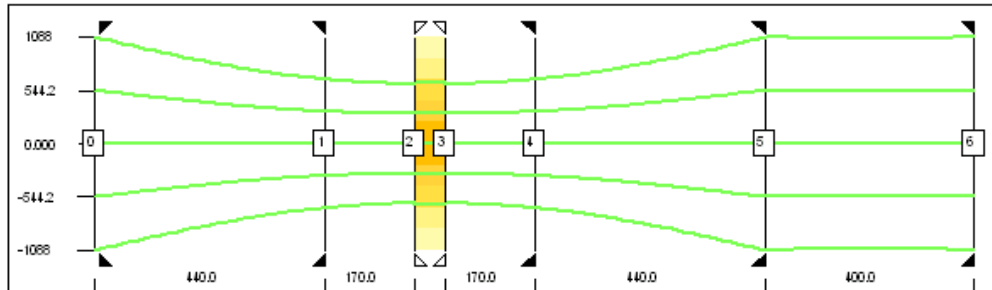
1、4、5 はそれぞれ図 3.1 における M1、M2、M3 に相当する。エレメント 2 と 3 はレーザーロッドの表面に相当し、この 2 つの面の間に、励起チャンバーの項で計算した熱レンズ成分を挿入して計算がなされた。この結果、共振器の左右が対象形であるとすれば、M2 と M3 は同じ曲率半径を持つ凹面ミラーを使用したときに安定条件になり、このときの $r=1500\text{mm}$ である。

今後はこの計算に基づいたパラメーターを持つミラーを準備して実験を進める予定である。

Ring resonator, Tm,Ho:YAG as pump rod. L=1680mm

Wavelength = 2.09 [μm]

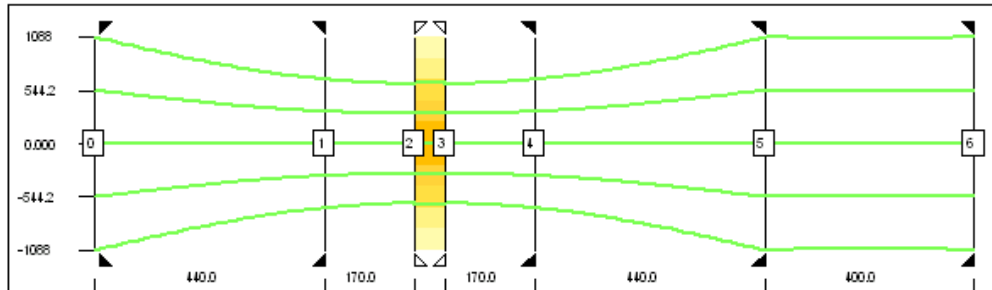
x-plane mode



maximum spot size (x-plane) = 1088.4

minimum spot size (x-plane) = 613.22

y-plane mode



maximum spot size (y-plane) = 1088.5

minimum spot size (y-plane) = 613.17

図 3.2 リング共振器におけるビーム径分布 ($M^2=1.5$ を仮定)
上図は x 平面、下図は y 平面に対するビーム径分布の様子である。

4-3-3 まとめ

適切な条件を仮定して、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た。

前段階の実験である1マイクロンレーザー用の励起チャンバーを実働状態で搭載する実験については未達。

目標に対する達成度を評価すると、次のようになる。

•概念設計の完了→◎

•1マイクロン用励起チャンバーを用いた発振確認と、パラメータの整理→△(部品は選定済みで、実験は部品が揃い次第すぐに実行可能)

これを数値で表現すると達成度 75%程度と考えられる。

今後の課題としては、部品が揃った段階ですぐに実験に取り掛かれるような体制を整えておくことと考えている。

4-4 総括

材料の調査と、それを活用させるための部材の調達、サプライヤとの折衝にかなりの時間と労力を必要としたために、励起チャンバー以外の点では実験上の進展が予定通りに進行しなかった。弊社にとっても 2 ミクロン用の材料を使用した、実使用に耐えうるレーザーの開発自体が初めてであった。そのため、これまで Nd 系など他のイオンを用いたレーザー開発実績があったものの、ことは反省材料である。しかしながら逆に言えばこれらが大きな峠であり、今後の実験は粛々と進めることにより大きく予定を外れることはないと考えられる。

現在、レーザーを構築するための部材はほとんど揃い、18 年 6 月の LD と電源の到着までの間に共振器・結晶など各種のシミュレーションと、チャンバーの改良、ファイバーレーザーの完成を行うことができる予定であり、前途はかなりクリアになりつつある。

特に研究を加速する手段として、リソースの増加を予定している。平成 18 年度は、17 年度のスタッフに加え、寄与度の高いメンバーを揃えて、多くの開発リソースを投入できる体制を整えつつある。現実的に 5 月からさらに 1 名の増加を予定しており、この 4 ヶ月の遅れ分を取り返すことに大きな障害はない。

5 参考資料・参考文献

5-1 研究発表・講演等一覧

なし