

平成21年 5月29日現在

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2006～2008

課題番号：18560812

研究課題名（和文）コニカルミラー光共振器を利用した薄ディスク太陽光励起固体レーザー

研究課題名（英文）Solar-pumped, thin-disk solid-state laser using conical mirror optical resonator

研究代表者

遠藤 雅守 (ENDO MASAMORI)

東海大学・理学部・准教授

研究者番号：60317758

研究成果の概要：

薄ディスク媒質とコニカルトロイダルミラー光共振器を組み合わせた太陽光励起固体レーザーを提案した。シミュレーションにより出力 100kW のレーザーが良好なビーム品質で発振することを示した。媒質の候補として数種類の Cr/Nd コドープセラミック YAG の光学特性を計測した。その結果 Cr 濃度 0.1% が適当であることを明らかにした。直径 10mm, 厚さ 1mm のディスクを作成, 模擬太陽光励起で発振を試みたが成功しなかった。

交付額

(金額単位:円)

	直接経費	間接経費	合計
2006年度	1,100,000	0	1,100,000
2007年度	1,000,000	300,000	1,300,000
2008年度	500,000	150,000	650,000
総計	2,600,000	450,000	3,050,000

研究分野:工学

科研費の分科・細目:総合工学・エネルギー学

キーワード:太陽光励起レーザー, セラミック YAG, コニカルミラー, エネルギー変換

## 1. 研究開始当初の背景

無尽蔵の太陽エネルギーを直接レーザー光に利用する「太陽光励起レーザー」のコンセプトはレーザーの実現とほぼ同時に考案されたものと言われている。そして 1966 年には早くも発振の報告<sup>1</sup>があるほどその歴史は古い。レーザー媒質に Nd と Cr をコドープした GSGG 結晶が吸収帯域の広さから太陽光励起には最適で、10% のスロープ効率が得られている<sup>2</sup>。地上における太陽光は強度が安定でないためレーザーの励起光限としての魅力には欠けるが、宇宙空間においては太陽光直接励起はエネルギー供給の安定性に比べ、構造が簡単のため長寿命、メンテナンスフリーと言った非常に魅力的な特性

を持つため、衛星間光通信やレーザーエネルギー伝送と言った応用に向けた研究が行われて来た。

従来報告されて来た太陽光励起レーザーはほとんどが伝統的なロッド媒質を採用しているが、集光光学系の簡素化、冷却の高効率化、それによって期待される発振効率とビーム品質向上を考えれば拡散冷却薄ディスク型の構成が望ましい。一方で薄ディスク型媒質は従来から半導体励起大出力レーザーとしての興味が持たれ研究が行われているが、ディスク半径方向に伝搬する ASE(amplified spontaneous emission)の問題、大口径ゆえの高ビーム品質達成困難といった問題を持っている。

1. C. G. Young, Appl. Opt. 993-997, 1966.
2. Y. Noter et al., Proc. SPIE 1038, pp. 512-520, 1984.

## 2. 研究の目的

上述のような背景の中、本研究は太陽光励起固体レーザーに薄ディスク型媒質と本研究で提案する独自の光共振器を組み合わせ、簡素で合理的な構造を持ちつつ高効率、高ビーム品質の発振を可能にするシステムを提案、実証し、宇宙における太陽エネルギー利用を推進するものである。従来の太陽光励起レーザーは、研究の中心が 1. レーザー結晶に光を集中する集光光学系 2. レーザー媒質となる結晶 の二つで、光共振器に関するものは皆無と言って良い。しかし、裏を返せば、集光光学系が研究対象になるのは、レーザー媒質と光共振器の配置が伝統的なロッド媒質と球面ミラーという前提に立っているからである。この前提を崩してしまえば集光光学系の設計は劇的に簡略化される。本研究は、太陽光励起レーザー媒質として従来のロッド型ではなく、円盤状の薄ディスクを使うことを提案するものである。しかし、通常の LD(レーザーダイオード)励起では実績のある薄ディスクレーザーも、太陽光励起にそのまま使うには励起密度が低く、円盤の厚み方向に発振可能な利得を得ることはできない。そこで本研究では、この薄ディスク媒質に独自の conical-toroidal 光共振器を組み合わせ、比較的低い励起密度でも発振可能な利得を得ることを可能とし、結果として薄ディスク型太陽光励起レーザーの実現を可能ならしめることを提案する。本研究で提案するこの conical-toroidal 光共振器は太陽光励起に限らず、現在盛んに研究が行われている半導体レーザー励起薄ディスクレーザーのビーム品質向上にも寄与できるものであることを指摘したい。

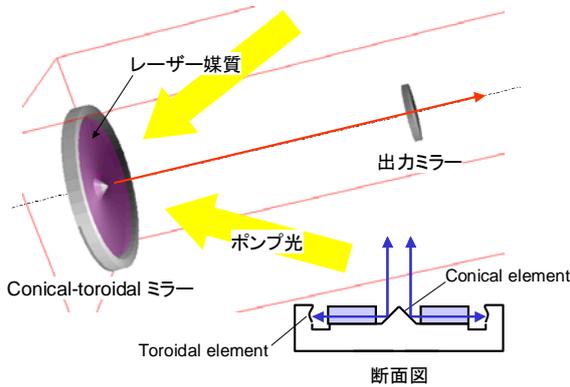


図 1: Conical-toroidal 型光共振器

本研究で提案するレーザーシステムは図 1 に示すように中央に穴の空いた薄ディスク型媒質を取り囲むリング状(toroidal)ミラーとディスク中心の円錐(conical)ミラー、そして出力鏡よりなる特

殊な構成である。この構成の意図は以下のように要約される。

1. ディスク型媒質は冷却効率と媒質内屈折率分布均一化に優れ、高効率、高ビーム品質に貢献する。
2. ディスク半径方向のスケール則があるため大出力化が容易である。
3. 従来ディスク型媒質が共振器をディスク厚み方向に光を伝搬させるのに対し、ディスクの径方向に伝搬させることにより太陽光励起という不利な条件でも充分な利得を稼げる。
4. conical element により低次 Laguerre-Gaussian モードに発振モードを制限でき、良好なビーム品質が期待できる。
5. ロッド型と異なり励起光は大面積のディスクを照射すればよいので太陽光集光光学系の設計が容易である。

以上のように、conical-toroidal 光共振器型太陽光励起薄ディスクレーザーは宇宙エネルギー応用に適した数々の特徴を持っている。

## 3. 研究の方法

研究は大きく三つのパートに分けられる。以下、各パートについて研究手法を述べる。

### (1) 光共振器の理論計算

本研究のアイデアが実行可能である事を証明するため、また小型デモ装置の設計指針を得るため光共振器シミュレーションを開発した。シミュレーションの基本構造はレーザー媒質を含む Fox-Li タイプ繰り返し伝搬コードであるが、光線が放射状に伝搬する部分があり、しかも媒質中は導波路モード伝搬となるためモデル化は一般的な Fabry-Perot タイプ光共振器より難しい。

モデル概念図を図 2 に示す。モデルは 4 つの領域に分けられ、それぞれ異なる手法で伝搬計算を行った。

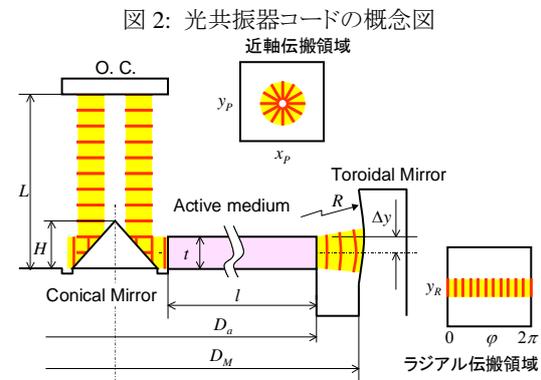


図 2: 光共振器コードの概念図

### ① 近軸領域 = 回折積分

自由空間の近軸伝搬はよく知られた Fresnel-Kirchhoff 回折積分にて計算可能である。

② Conical element = 幾何光学的変換  
近軸領域の電場を放射状領域に変換するのは幾何学変換マップを利用する。

③ 放射状自由空間 = 回折積分  
自由空間の伝搬であるが、今や光ビームは軸上を伝搬するのではなく放射状に伝搬している。したがってこの領域の計算は、Fresnel-Kirchhoffの伝搬公式をリマップされた二次元アレイに対して施すことで計算可能である。ここで離散フーリエ変換の一軸を  $0 \sim 2\pi$  の角度にリマップすることにより、自動的に「角度方向の周期境界条件」が満足されることを利用している。

④ レーザー媒質 = 導波路モード回折積分  
レーザー媒質の内部の伝搬は、導波路モードの伝搬である。本研究では導波路モードの伝搬を「折り返し全反射重ね合わせ」でモデル化している。概念図を図3に示す。幾何光学近似においては、導波路内の伝搬は光ビームが全反射を繰り返し、ジグザグ光路を進むことで表現される。これが波動光学近似でも成立する、と考えたのが本モデルである。いま、光電磁場がプレーン  $n$  からプレーン  $(n+1)$  へ導波路内を伝搬することを考える。光ビームは、2枚の「合わせ鏡」の間を伝搬するわけだが、これは光ビームの立場で見れば無限に広い空間内を伝搬するのと変わらない。実際には光ビームは反射をくり返して導波路壁に挟まれた空間を伝搬するわけだが、そのふるまいはプレーン  $n$  からプレーン  $(n+1)$  まで自由に伝搬したビームを折り返し、重ね合わせることで実現される、というのがモデルの基本的アイデアである。アイデアの基本的成立性は、同モデルを拡散冷却型  $\text{CO}_2$  レーザーに適用し、実機と同等の計算結果を得ることで確認されている。

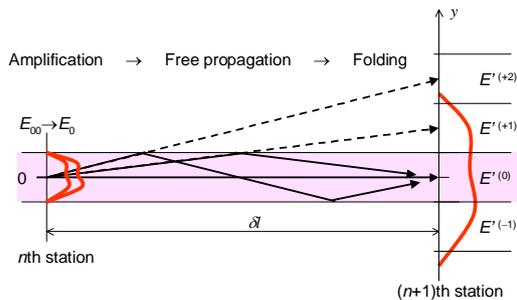


図3: 折り返し全反射重ね合わせモデル

以上のモデルを組み合わせ、任意の条件における Conical-toroidal 光共振器の性能を予測できるシミュレーションが構築された。

## (2) セラミック YAG の特性測定

本研究のもうひとつの要は最近開発されたセラミック YAG を太陽光励起レーザー用の媒質として使うための基礎評価試験である。従来、固体レーザーの媒質はほぼ例外なくある種の結晶で、半導体と同じく「単結晶引き上げ法」という非

常にデリケートな技術で作られていた。そのため用途に応じた特性、例えばドーピングするイオン濃度の制御や大型化に本質的な困難を抱えていた。

ところが1995年、池末がセラミック焼結の技術で結晶と遜色ない光学特性のレーザー媒質を作成したことから<sup>3</sup> 固体レーザーの媒質作成法に革命的变化が訪れた。本研究はこの YAG セラミックに注目し、太陽光励起レーザー媒質としての特質を調査する研究を行った。

Nd: YAG レーザーは 808nm 近辺の比較的狭い吸収バンドしか励起に利用できないため、白色光である太陽光で励起するとエネルギー変換効率が極端に低い。しかし、ここに  $\text{Cr}^{3+}$  イオンをコードープすると、可視の幅広いスペクトルに吸収を呈するようになる。 $\text{Cr}^{3+}$  に吸収されたエネルギーは  $\text{Nd}^{3+}$  に効率よく移乗するため、結果として Nd: YAG レーザーの吸収バンドが著しく増大したような効果を生む。

もちろん、結晶成長法でも Nd/Cr コードープの YAG を作ることは可能だが、 $\text{Cr}^{3+}$  イオンは  $\text{Nd}^{3+}$  とイオン半径が大きく異なるため均一分散が困難で、しかも熔融状態では容易に  $\text{Cr}^{4+}$  に変化するため特性の良いレーザー媒質を得ることは困難だった。サブミクロンの粒状結晶を熔融点未満の温度で焼結するセラミック法なら均一分散の問題も、 $\text{Cr}^{4+}$  の問題も回避できるため任意のドーピング濃度で均質な媒質が製造できる。

Cr/Nd コードープセラミック YAG を媒質とした先行研究は幾つか有り、媒質の特性評価も行われている。公表されている結果によると、飽和強度は同じドーピング濃度の YAG 結晶と比べ小さいという特異な性質を示している<sup>4</sup> がまだ広く認められていない。その点も、今後の太陽光励起レーザー媒質選定に当たり非常に重要なポイントであるため、独自に調査する必要を感じた。

本研究は日本でほぼ独占的にセラミックレーザー媒質を商用製造している神島化学工業(株)より Cr0.1%/Nd1.0%, Cr3.0%/Nd1.0% のセラミックを入手してその基礎特性を計測した。この媒質は先行研究で使われたものと同等のものである。

## (3) レーザー発振実験

光共振器コードの開発、セラミック YAG の評価が終わったら小スケールの装置を構築して実際にレーザー発振をデモンストレーションし、本研究の提案が実現可能であることを実験的に確認する。光共振器の設計には開発したコードを使い、媒質はテストした複数の媒質の中から最も好ましいものを選択する。光源である模擬太陽光の出力が限られることからデモ装置のスケールは可能な限り小さいものを想定した。

3. A. Ikesue, J. Am. Ceram. Soc. 78 (1995), pp. 1033-1040.
4. T. Saiki, Jpn. J. Appl. Phys. 47 (2008), pp.

## 4. 研究成果

## (1) 光共振器の理論計算

はじめに, feasibility study を目的に 100kW の出力が可能なシステムの設計を行った. レーザー媒質としては光学・熱などの諸特性性質がよく研究されている Nd: GGG を仮定した. 媒質ディスク直径の限界は, 本研究で提案した構造なら半径方向に光を伝搬する構造なので従来の薄ディスク媒質に比べ遥かには大きく許容出来るが, 製作上の困難から数十 cm が限界となろう. 一方, ディスク厚さはポンピング強度と熱応力破壊限界から決まる. 詳しい計算方法は Vetrovec により示されており<sup>5</sup>, それを元に 100kW 出力が可能なディスクの諸元を見積ると表 1 の様になる. このレーザー媒質に適する光共振器を組み合わせ, レーザー出力およびビーム品質を予測する計算を行った.

表 1: 100kW レーザー媒質の諸元

媒質結晶	Nd: GGG
Nd <sup>3+</sup> 濃度	1at%
飽和強度	6kWcm <sup>2</sup>
吸収係数	0.1%/cm
直径	34cm
厚さ	7.2mm

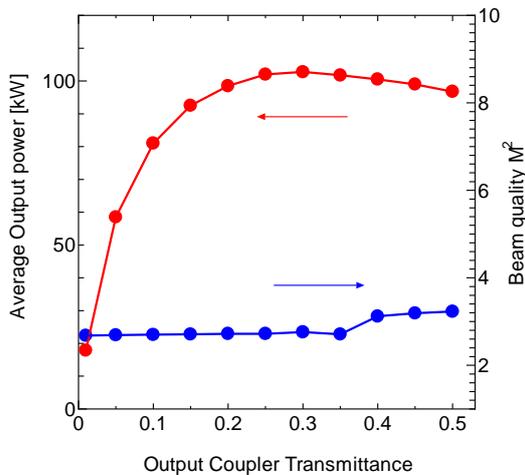


図 4: 100kW 級レーザーの出力およびビーム品質の計算結果

計算結果を図 4, 図 5 に示す. 図 4 は出力ミラーの透過率の関数で表したレーザー出力およびビーム品質である. 100kW を越えるレーザー出力が  $M^2 < 3$  の良好な品質で得られることが示された. 図 5 はレーザー出力の near-field および far-field のパターンである. 出力が薄ディスクエッジからなされる特異な構造のおかげで, 100kW のレーザーが直径 10mm 程度のビームとして取り出し可能である. 媒質熱歪みの影響は形状が薄ディスクであるため最小限にとどめられている.

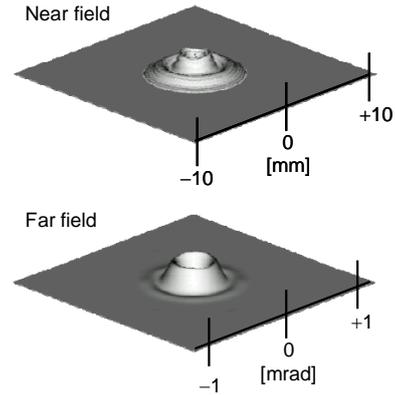


図 5: 100kW 級レーザーの near-field と far-field パターン計算結果

以上のように, conical-toroidal 光共振器に薄ディスクを組み合わせたシステムは 100kW までは無理なくスケールアップが可能で, 良好なビーム品質のレーザー光を出力できることが明らかになった.

続いて, (3) で製作する予定の小型デモ装置の設計を行った. 設計指針としては, アイデアの成立性を示すのが目的なので大きさは小さくとも構わないものとした. しかし, レーザー媒質をドーナツ状に研磨し, しかもその側面を光学精度で磨く技術が困難で, システムの寸法は媒質の加工可能な最小寸法で決まることとなった.

レーザー媒質の直径を 10mm, 厚さを 1mm と決め, その媒質に最適な conical-toroidal ミラーを設計した. 設計に基づき製作したミラーを図 6 に示す. ミラーは diamond turning で切削した後金をコーティングして反射率を増強した.

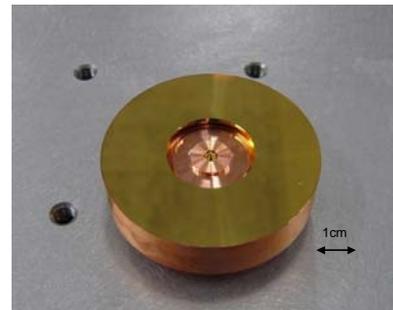


図 6: 製作した conical-toroidal ミラー

## (2) セラミック YAG の特性測定

神島化学工業より Cr0.1%/Nd1.0% と Cr3.0%/Nd1.0% のセラミック YAG を入手, それに Castech 社製 1.0%Nd: YAG 結晶を加えて光学特性の比較を行った. 実験装置を図 7 に示す.

評価方法は本研究で開発した double Rigrod analysis 法を用いる. レーザー媒質の特性を評価するには, 一般に評価対象のレーザー媒質で発振を行い, 光共振器の結合効率を変えて出力の変化を計測する方法が用いられる. しかし太陽光励起レーザーにこの方式を適用するに

は、太陽光(あるいは模擬太陽光)で発振し、しかも共振器結合効率を変えられるほど利得が大きいシステムを構築する必要があり、新たな開発要素が伴う。一方、本研究で開発した方法はLD励起で発振している YAG レーザーの光共振器の中にプリズム角で試料を挿入、それを太陽光励起することで試料の特性を計測する。この方法なら試料の大きさは5mm角程度、必要な模擬太陽光のパワーも数十 W で済む。

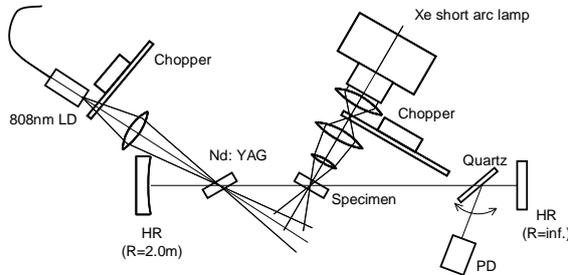


図 7: Double Rigrod analysis による媒質の評価

模擬太陽光として、スペクトルが太陽光に近い Xe ショートアークランプをレンズで集光して利用した。直径3mmのスポットに太陽光の1000倍までの強度の集光が可能である。試料に模擬太陽光を照射している状況を図8に示す。

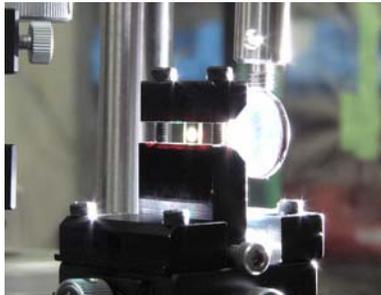


図 8: 模擬太陽光に照射される Cr0.1%/Nd1.0% コドープ YAG セラミック

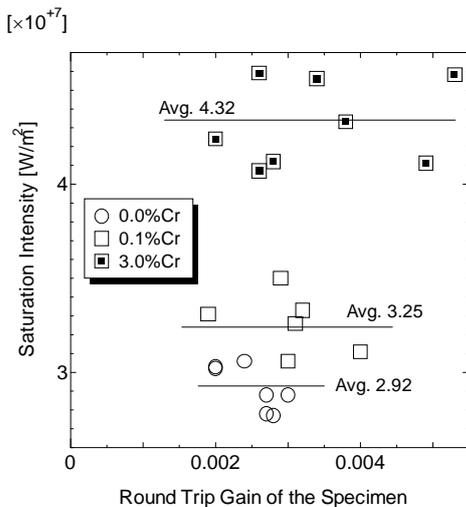


図 9: 飽和強度計測結果

図9は計測された3種のサンプルの飽和強度を比較したものである。Nd: YAG 結晶の飽和強度計測値が一般的な値、 $2.9\text{kW/cm}^2$  と一致していることから開発した方法の信憑性は保証される。Cr3.0%のサンプルは薄いため利得が小さく計測値のばらつきが大きかった。しかし、YAG 結晶(Cr0.0%), Cr0.1%にくらべ明らかに飽和強度は大きい。原因についてははっきり分かっていない。Cr0.1%/Nd1.0%のサンプルは YAG 結晶にくらべわずかに飽和強度の増大が見られた。

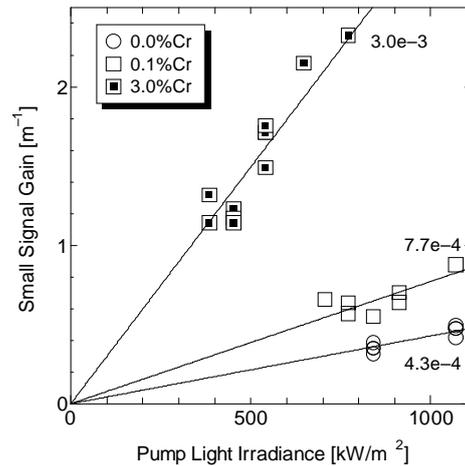


図 10: ポンプ光強度と小信号利得の関係

ポンプ光(模擬太陽光)強度の関数で表した小信号利得の比較を図10に示す。Cr3.0%のサンプルは他の二つに比べ可視の吸収が多いため太陽光励起に適するという結果を得た。しかし、同サンプルは以下の二つの計測結果が Cr0.1%に劣るため、予測されるレーザー発振効率は低い。

図10の結果とポンプ光に含まれる光子濃度、媒質の光吸収係数から Cr→Nd エネルギー移乗の効率を計算することができる。結果を表2に示す。

表 2: サンプルの光吸収係数および量子効率

	Cr0.0%	Cr0.1%	Cr3.0%
$\alpha_p[\text{m}^{-1}]$	28	53	340
$g_0[\text{m}^{-1}]$ (@ $10^3\text{kW/cm}^2$ )	0.43	0.77	3.0
$I_s[\text{kW/cm}^2]$	2.9	3.2	4.3
$\eta_a$	---	$0.88\pm 0.09$	$0.67\pm 0.08$

Cr0.1%のサンプルは約90%の高い量子効率を示したが、Cr3.0%の量子効率は太陽光励起レーザーをエネルギー変換装置として活用するには不十分と言える。これらの値はかつて測定されたことが無く本研究が貴重な先例を提供する(論文は現在投稿中)。

試料の透過損失も double Rigrod analysis の結果から計算することができる。試料を挟んだ場合の最大出力と試料を挟まない場合の最大出力の比率から小信号損失を計算し、表3の結果

を得た。

表 3: サンプルの透過損失

	Cr0.0%	Cr0.1%	Cr3.0%
損失[m <sup>-1</sup> ]	0.1±0.05	0.2±0.05	5.2±0.5

Cr3.0%の損失は他のものに比べ 1 桁以上大きい。理由をメーカーに問い合わせたところ、Cr を高ドープしたセラミックは結晶ほどではないにしても Cr<sup>3+</sup>から Cr<sup>4+</sup>への転化が避けられないとのことであった。

以上の測定結果から、大型の太陽光励起レーザーに利用するレーザー媒質には Cr0.1%/Nd1.0%のセラミック YAG が好ましいことが明らかになった。

### (3) レーザー発振実験

レーザー発振試験は Cr3.0%/Nd1.0%のセラミックを用いて試みた。上述の特性計測から大型の装置には Cr0.1%が好ましいことは明らかだが、小型の装置にはなにより弱励起時に大きな小信号利得が得られること、すなわち図 10 のグラフの傾きが最優先されるためである。レーザー全景の写真を図 11 に示す。



図 11: レーザー発振実験装置の全景

はじめに、共振器単体での発振成立性を見るためレーザー媒質を Conical-toroidal 反射鏡型の外に置いて発振を試みた。発振は容易に実現し、光共振器の成立性は示された。しかし、レーザー媒質をミラーに載せたときはドーナツ形状の同心度、エッジ面の並行度が波長オーダーでなくては共振が成立しないことが判明した。これを補償するために、図 12 の様に中央のコンカルミラーを独立して可動とした新たなアライメント機構を組み込んだがやはり発振はできなかった。レーザー媒質研磨法の見直し、レトロフレクター構造の採用によりレーザー発振が実現するものと見込まれる。

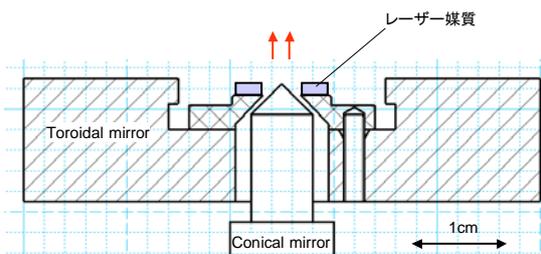


図 12: アライメント機構を組み込んだ conical-toroidal ミラー

特に、レトロフレクター構造を採用することにより、光線がレーザー媒質の対向する2箇所を1回ずつ通過するため、研磨面の平行度、倒れに関する誤差が自動的に補償される。レトロフレクター構造を採用したコンカルミラー型光共振器は著者の発明で、炭酸ガスレーザーにおいて既に実現している<sup>6</sup>ので原理的優位性は確立している。

5. J. Vetrovec, Proc. SPIE 4270 (2001), pp. 45-55.

6. M. Endo, Opt. Lett. 33 (2008), pp. 1771-1773.

5. 主な発表論文等  
〔雑誌論文〕(計 1件)

1. Masamori Endo, "Feasibility study of a conical-toroidal mirror resonator for solar-pumped thin-disk lasers." Opt. Express 15, pp. 5482-5493, 2007. (査読あり)

〔学会発表〕(計 2件)

1. 小原智, 田口桂基, 遠藤雅守, 「太陽光励起固体レーザーにおける光-光変換効率の上限に関する研究」, 第68回応用物理学会講演会講演会(2007年9月, 北海道)
2. 田口桂基, 小原智, 遠藤雅守, 「太陽光励起Nd/Cr:YAGセラミックレーザー媒質の基礎研究」, 第8回レーザー学会東京支部研究会(2008年3月, 神奈川)

〔その他〕

研究成果 web ページ:

<http://teamcoil.sp.u-tokai.ac.jp/kenkyu/Resonator/SolarPumped/index.htm>

6. 研究組織

(1)研究代表者

遠藤 雅守(Endo Masamori)

東海大学・理学部・准教授

研究者番号:60317758