新エネルギーサイクルに向けた高効率太陽励起レーザーの開発

船津 貴行¹, 矢部 孝^{1,2}, 吉田 國雄², 内田 成明², 大久保 友雅¹, BAGHERI Behgol¹,
大石 剛弘¹, 大東 和也¹, 石岡 学¹, 安永 記士¹, 佐藤 雄二², BAASANDASH Choijil²,
加藤 洸³, 柳谷 高公⁴, 岡本 義昭⁵

¹東京工業大学 (〒152-8552 東京都目黒区大岡山2-12-1)

²Entropia レーザー Initiative (〒152-8552 東京都目黒区大岡山2-12-1)

³千歳科学技術大学 (〒066-8655 北海道千歳市美々758-65)

⁴神島化学工業(株) (〒769-1103 香川県三豊市宅間町香田80番地)

⁵(有)岡本光学加工所 (〒235-0008 神奈川県横浜市磯子区原町8-34)

Development of Solar Pumped Laser for New Energy Cycle

Takayuki FUNATSU,¹ Takashi YABE,^{1,2} Kunio YOSHIDA,² Shigeaki UCHIDA,² Tomomasa OHKUBO,¹
Behgol BAGHERI,¹ Takehiro OISHI,¹ Kazuya DAITO,¹ Manabu ISHIOKA,¹ Norihito YASUNAGA,¹ Yuji SATO,²
Choijil BAASANDASH,² Kiyoshi KATO,³ Takagimi YANAGIDANI,⁴ and Yoshiaki OKAMOTO⁵

¹Department of Mechanical Sciences and Engineering, Tokyo Institute of Technology, 2-12-1 O-okayama, Meguro-ku Tokyo, 152-8550

²Entropia Laser Initiative, Tokyo Institute of Technology, 2-12-1 O-okayama, Meguro-ku, Tokyo 152-8552

³Chitose Institute of Technology, Bibi 758-65, Chitose, Hokkaido, 066-8655

⁴Konoshima Kagaku Co. Ltd., 80 Koda, takumachou, Miyoshi, Kagawa, 769-1103

⁵Okamoto Optic Co, 8-34 Haramachi, Isogo-ku, Yokohama, Kanagawa, 235-0008

(Received September 26, 2008)

A new type of solar-pumped laser system characterized by high efficiency and low cost was developed using a newly designed Fresnel lens and a Cr codoped Nd:YAG ceramic laser medium. A 4-m² Fresnel lens was designed to collect wavelengths in the visible range of sunlight (400 to 900 nm). A solar chamber was designed to efficiently couple the collected sunlight to a rod-shaped laser medium. Laser output of about 80 W has been achieved with a combination of the Fresnel lens and solar chamber. The maximum output from a unit area of the Fresnel lens was 20 W/m², which is 2.8 times larger than the previous results with a mirror type concentrator.

Key Words: Solar pumped laser, Fresnel lens, Nd YAG, Cr Nd:YAG ceramic, Energy cycle

1. はじめに

化石燃料に代わる新しいエネルギー源の開発は差し迫った問題である。枯渇の心配がなく地球環境への影響が最小となる再生可能エネルギーの活用が望まれる。再生可能エネルギーの中で最大のものは太陽からの直接光エネルギーである。例えば、数万km²に注ぐ太陽光パワーは全世界の電力消費に匹敵する。しかしながら、太陽エネルギーはパワー密度が低く、不安定性が問題であり完全な太陽光エネルギー社会を実現する上で課題となっている。さらに、太陽光が利用できるのは晴天の日中だけであるため、基幹エネルギー源として成立するためには大規模電力貯蔵システムが必要不可欠である。

そこで、著者らは太陽エネルギーを金属マグネシウムの形で貯蔵し、必要に応じて燃料として利用するサイクルを提案している¹⁾。この新エネルギーサイクルでは、

水とマグネシウムの反応などから水素と熱エネルギーが生成され、燃料電池や熱機関などに応用できる。マグネシウムの賦存量は地殻中では8番目、海水中の金属としては2番目(1.8×10¹⁵ tons)と膨大である。またエネルギー密度も化石燃料と同程度であり燃料として有利である。反応後のマグネシウムは酸化マグネシウム(MgO)として固体のまま手元に残るので、炭酸ガスのように大気に拡散して地球環境に影響を及ぼす心配がない。MgOを還元(製錬)してマグネシウムに再生することによりエネルギーサイクルが完結する。しかしながら、MgOを効率よく還元するには4000 Kの高温が必要であり、その実現には10⁵ W/cm²程度のパワー密度が必要である²⁾。この条件を満たし、かつ、自然エネルギーを用いるには、太陽励起レーザーが最適である。この化石燃料を使用しないエネルギーサイクル実現のためには、0.5–1 kWの太陽励起レーザーユニットの開発で十分であ

る。太陽光を基幹エネルギーとして利用するためには、このユニットを必要数並べてマグネシウム還元工場を建設すればよい。

太陽励起レーザー研究の歴史は古く、1965年に米国のC. G Young によって初めて報告された³⁾。彼らは、太陽光をパラボラ反射鏡で集光してロッド型レーザー媒質より1.3 Wの連続波(cw)レーザー発振に成功している。その後、現在まで様々な方式による太陽励起レーザーの発振が報告されている⁴⁻⁶⁾。V. Krupkin *et al.* はNd:YAG(yttrium aluminum garnet)レーザー媒質と660 m²の集光鏡を用いてレーザー出力、500 Wを達成している⁷⁾。しかしながら、鏡へ入射した太陽光から1064 nmの変換効率は0.1%以下と低い。このように、従来の太陽励起レーザーは全て、集光装置に放物面鏡やヘリオスタットなどの反射光学系が用いられている。これらの装置は大量の熱を集積する太陽熱利用の施設や望遠鏡を援用したもので、必ずしもレーザー励起に適したものではない。太陽励起レーザーシステムを大規模なエネルギーサイクルの中で考えると、「適当な大きさのユニットレーザー装置をアレイ状に配置したプラント」という考え方が有効である。

一方、太陽光は可視域波長をピークに持つ幅広いスペクトルをもつので、レーザー媒質にはこの可視域波長の光を有効に利用することが求められる。太陽および類似のランプ光源のスペクトルを幅広く吸収して、レーザーへの変換効率を改善するためNd:YAGにCr³⁺イオンをドーパントとして加える指摘は以前よりあったが、従来の結晶成長の技術では困難であった⁸⁾。Ikesueらはセラミック技術を用いてCrドーパNd:YAGレーザー媒質の開発に成功した⁹⁾。実際の太陽光を用いた実験では、実験室内では考えられない困難に遭遇する。屋外では、風によって常に装置全体が揺れ動いたり、大気中の散乱や屈折によって、太陽光パワーが時々刻々と変化する。著者らはこうした悪条件の中で、世界で初めてCr:Nd:YAGセラミックレーザー媒質(以下、Cr:Nd:YAG)を用いたレーザー発振に成功した^{2,10)}。

著者らは安価で軽量のフレネルレンズを用いて、高効率で経済的な特長を持つ新しい太陽励起レーザーシステムを開発している。これまでに、1.3 m²のフレネルレンズを用いてレーザー出力24.4 Wを得ている。このときの装置の太陽光受光面積に対する最大出力は18.7 W/m²である¹⁰⁾。

本論文では、レーザー媒質やフレネルレンズについて本実験で実現した太陽励起レーザーの特徴を記述する。次に、更なるレーザー出力の向上を目指した4-m²のフレネルレンズを用いたレーザー発振の結果を示す。この実験結果から、現状のレーザーのパワーに寄与している吸収の特性について検討を行なったので報告する。

2. フレネルレンズを用いた太陽励起レーザーの開発

2.1 Cr:Nd:YAG媒質の吸収スペクトル

Cr:Nd:YAGは太陽光スペクトルに適した吸収スペクト

ルを有し、発振波長も近赤外領域にあるため高い光変換効率が期待できる。また、固体レーザーの特徴である高い活性イオン種密度によりコンパクトなレーザー装置が実現可能で、大量のエネルギー変換を行うプラントの要素デバイスとして適している。Fig. 1に太陽光スペクトルとNd:YAG結晶、Cr:Nd:YAGの吸収係数を示す。太陽光スペクトルは、地上に到達する直達パワー強度を、波長1 nmごとに示している¹¹⁾。太陽は可視域波長をピークに持つ幅広いスペクトルである。Nd:YAG(ドーパ濃度Nd: 約1%)結晶とCr:Nd:YAG(ドーパ濃度Cr: 0.1%, Nd: 1%)セラミックの吸収係数は分光光度計(JASCO-V-530)を用いて測定した結果である。400-500 nm, 600-650 nmの波長域でCr:Nd:YAGの方がNd:YAG媒質に比べて大きな吸収が見られる。Cr添加による可視域の吸収が1064 nmの蛍光に寄与していることが報告されており、太陽光全体のスペクトルからの寄与を積算するとCrドーパによりNdのみの場合の約2倍の蛍光強度を持つことがわかっている¹⁰⁾。これらの結果より、太陽光の可視域波長を有効にレーザーへ変換できる媒質として、Cr:Nd:YAGは優れた材料であることがわかる。

2.2 フレネルレンズの特徴

従来の太陽励起レーザーの集光装置は、放物面鏡やヘリオスタットなどの反射型光学系を使用している。しかし、反射型光学系は重量が重く、光学面の研磨や蒸着が必要であり製作コストが高い。一方、フレネルレンズの断面はFig. 2に示すように微小プリズムを並べた構造を持ち、球面レンズの斜線部を除去した形状になっていることと、型押し成型で大量生産が可能であるため、安価で軽量である。一般的には、灯台、画像プロジェクターやリアプロジェクションテレビに利用されている。単純な屈折型集光素子は色収差を持つため太陽光の集光には不利とされてきたが、太陽光の集光系では色収差は

Fig. 1 Absorption coefficient of Nd:YAG & Cr:Nd:YAG, and the solar spectrum.¹¹⁾

Fig. 2 Cross section of a conventional plano-convex lens: (a) and the Fresnel lens: (b).

10 %程度の影響に留まり無視できる。

Fig. 3に石英ガラス(SiO₂), BK7, Poly methyl methacrylate (PMMA)の透過率を示す。このPMMAは、我々がフレネルレンズに採用したアクリル樹脂板(三菱レーヨン(株): アクリライト#001)である。PMMAの透過率はレーザー発振に有効な350 nmから900 nmの波長域でSiO₂と同等の90 %以上の透過率を有していることがわかる。さらに、BK7は250 nm以下の紫外域波長を吸収するのに対し、PMMAでは350 nm以下を吸収するため、レーザー媒質のソラリゼーション防止に有効である。また、PMMAはプラスチック材料であるため、大量生産が可能である。フレネルレンズにPMMAを採用した場合、PMMA自身の紫外線による劣化が懸念されるが、我々が使用したPMMAは紫外線吸収剤によって耐光性を向上させたアクリル樹脂板であり、実際に晴天の日に1年以上屋外で使用していても集光パワーへの影響は無かった。これらの結果より、フレネルレンズの材料にPMMAは有効である。

3. フレネルレンズによる集光特性

高効率な太陽励起レーザーの開発には、集光系に入射する太陽光パワーとレーザー媒質へ集光される光強度を高める必要がある。集光系に入力される太陽光パワーを高めるには、レンズの面積を大きくすればよいが、集光された光強度を上げるには F 値 $=f/D$ (f : 焦点距離, D : レンズ直径)を小さくする必要がある。しかしながら F 値の小さなレンズは光の入射角が大きくなり反射損失が増大する。そこで、本論文では F 値=1の2つのフレネルレンズを用いて、太陽励起レーザーの発振を実証した。1つは、市販されているリアプロジェクション用の投影レンズ, Fresnel lens (a): FL(a) である。大きさは 1.4×1.05 m, 焦点距離 $f=1.2$ mで日本特殊光学樹脂(株)製である。もう一方は、著者らが設計してレンズを大型化したFresnel lens (b): FL(b)である。大きさは 2.0×2.0 , $f=2.0$ mのレンズである。ここでは両者を比較しながら、設計のコンセプトと実際に太陽光を集光させたときのレンズの特性について述べる。

Fig. 3 Transmittance of the SiO₂, BK7 and PMMA (The thickness of samples is 2.0 mm).

3.1 平面入射フレネルレンズの特徴

一般に使われているフレネルレンズはリアプロジェクションTVに用いられるように、点光源を平行化するように設計されている。よって、Fig. 4(a)に示すように、集光用にフレネルレンズを用いる場合、凸面から太陽光を入射させるため、図に示した斜線部では損失(shadow loss)が生じる。また、このようなレンズの平面側から太陽光を入射させると、 F 値が約1.15以下であると全反射が生じる。FL(a)はこのタイプであるので、太陽光を凸面から入射させるとshadow lossが生じ、平面側から入射させるとレンズの外周部は全反射によって集光できない部分が存在する。近年ではフレネルレンズを用いた太陽光集光の研究は盛んになっており、Fig. 4(b)に示すような、レンズの平面側から太陽光を入射させるフレネルレンズが採用されている¹²⁻¹³⁾。そこで、レンズの平面から太陽光を入射して集光するレンズの透過率を検討した。 F 値をそれぞれ変化させ、凸面入射と平面入射のレンズ透過率を計算により比較した(Fig. 5)。平行光をレンズに入射させた場合を想定し、幾何光学とフレネル反射の公式を用いて反射損失と前述のshadow lossの F 値依存性を計算した。太陽パワーのピーク波長を考慮し、460-600 nmに対応するPMMAの屈折率1.49を使用した。

Fig. 4 Concept of 2 types of Fresnel lens, (a) Conventional Fresnel lens, (b) Fresnel lens for solar light concentration.

Fig. 5 Comparison of calculated transmittance the conventional Fresnel lens with the Fresnel lens of solar light concentration by changing F -number.

反射損失はP偏光とS偏光の平均値とした。この結果、透過率は凸面入射に比べて平面入射が常に反射損失が低く、 F 値=1のとき平面入射型では透過率が漸近値90%にほぼ達しており、本研究のフレネルレンズも F 値=1で作製した。

3.2 集光径の測定

前述のように太陽励起レーザーの集光レンズには F 値を小さくする必要があるため色収差の影響を光線追跡法により評価した。まず、評価の基準となる理想的なレンズから得られる無収差の太陽像は次のように求められる。太陽は有限の大きさを持っており、集光像も有限の大きさを持つ。この理想的な集光像の直径は式(1)で表すことができる。

$$D_{\text{focus}} = D_{\text{sun}} \times \frac{f}{L} \quad (1)$$

ここで $D_{\text{sun}} = 1.39 \times 10^9 \text{ m}$ は太陽の直径、 $L = 1.50 \times 10^{11} \text{ m}$ は太陽と地球の距離を表す。レンズの焦点距離 $f = 2.0 \text{ m}$ とすると $D_{\text{focus}} = 18.5 \text{ mm}$ である。一方、太陽の大きさと地球との位置関係からフレネルレンズ側から見ると太陽光は4 mradの広がり角を持つ。この光線の広がり角を考慮した光線追跡によるレンズの焦点でのパワー分布をFig. 6に示す。レーザー媒質に吸収される400-850 nmの波長範囲を10 nm毎に分割し、各波長に対して25000本の光線ベクトル方向を太陽光の広がり角内でランダムに分布させフレネルレンズに入射させ光線追跡を行った。計算の結果、FL(b)の集光点でのパワー分布の半値全幅(FWHM)は20 mmとなり、 D_{focus} との比較により色収差1.5 mm程度と判明した。

Fig. 7にフレネルレンズの集光点で測定した太陽光スポットの強度分布を示す。測定には水冷式の $\phi 3 \text{ mm}$ のAl製アパーチャーを付けたサーモパイル型のパワーメータを使用した。パワーメータを集光面に沿って2 mm毎に20秒ずつ走査させて測定した。アパーチャーが水冷式であるのは、集光されたパワーによりアパーチャーが加熱され、その輻射によりパワーメータが影響を受けることを防ぐためである。フレネルレンズの集光径はFWHMで約21 mmであり、計算によるフレネルレンズの焦点での集光スポットの大きさとほぼ一致している。

Fig. 6 Power distribution at the focal point of FL(b) by ray tracing simulation.

Fig. 7 Focused sunlight power distribution at the focal point of FL(b) measured by thermopile-type power meter.

3.3 集光効率の測定

FL(a)およびFL(b)の集光効率と集光パワーの測定を行った。太陽光の入射方向はそれぞれのレンズの設計通り、FL(a)は凸面から太陽光を入射させ、FL(b)は平面側から入射させる。Fig. 8に測定方法を示す。フレネルレンズの焦点位置にパワーメータを設置して、集光パワーを測定する。同時に、フレネルレンズ表面に入射したパワーを直達日射計を用いて測定する。フレネルレンズは0.35-1.6 μm の波長域で約70-90%の透過率を持ち、太陽光は1.6 μm 以下の波長域で全体の90%程度のパワー密度を占める。直達日射計は(株)プリード製CH2(受光感度波長0.3-2.8 μm)、パワーメータはOPHIR製のL1500W(受光感度波長0.19-20 μm)を使用した。集光効率と集光パワーの結果をTable 1に示す。集光点におけるパワーの測定面積は、集光した太陽像のサイズが各レンズの焦点距離に応じて変化することを考慮しなければならない。そこで、FL(b)の集光パワーの測定面積はFig. 7に示した集光位置でのパワー分布を十分に測定できる $\phi 80 \text{ mm}$ とした。FL(a)については集光パワー分布を考慮し $\phi 50 \text{ mm}$ とした¹⁰⁾。その結果、FL(a)の集光効率は64%であるのに対し、FL(b)の集光効率は47%であった。一方、直達太陽光パワー密度が922 W/m^2 の時、FL(a)の集光パワーは867 Wであった。FL(b)を用いた時は989 W/m^2 の時、1860 Wを得た。これらのパワー値を実測できた集光パワーの最大値とした。太陽光パワーは日時によって異なるため、それぞれのレンズの効率を考慮し、1000 W/m^2 の直達太陽光パワー密度を仮定した時の集光

Fig. 8 Setup of measuring the concentration efficiency of Fresnel lens.

Table 1 Concentration efficiency and maximum power at focal point of each Fresnel lens.

Fresnel lens	Concentration efficiency	Max power at focal position	Direct solar intensity
FL(a)	64%	867 W	922 W/m ²
FL(b)	47%	1860 W	989 W/m ²

パワーを比較すると、FL(b)が1880 W、FL(a)が940 Wとなり、2倍の差があるのでレーザーの出力パワーの増加が期待できる。新たに製作したFL(b)の集光効率がFL(a)より低い原因として、レンズの成型時に生じたレンズ表面の凹凸が考えられ、現在改良を試みている。

4. 太陽励起レーザーの発振特性

4.1 実験装置図

Fig. 9に太陽追尾装置の写真を示す。Setup:IにFL(a)、Setup:IIにFL(b)が搭載されている。Setup:Iは赤道儀方式、Setup:IIは経緯台方式の追尾装置である。これらは仰角、方位角をそれぞれ制御して太陽を追尾する。レーザー発振器はフレネルレンズの集光位置に設置されている。Setup:Iは片方のレンズでレーザー発振、もう1つでレーザー増幅をすることが可能である。本論文では片方だけを使用してレーザーを発振させている。太陽の追尾方法は、方位角方向が自動、仰角方向は手動である。Setup:IIはラフォーレエンジニアリング(株)製の太陽光採光システム「ひまわり」にフレネルレンズを搭載できるように改良した。このシステムでは搭載されたフォトセンサーを用いたフィードバック自動追尾が可能である。また、FL(b)は2 m角のレンズであるが、自重のたわみを軽減するため4分割して搭載されている。

Fig. 10にレーザー発振器の概念図を示す。フレネルレンズの焦点に設置された励起チャンバー内に直径9 mm、長さ10 cmのCr:Nd:YAG媒質が保持されている。チャンバー内面は円錐型の反射鏡となっており、レーザー媒質は集光レンズからの直接光とチャンバー内で反射された間接光により励起される。チャンバーはレーザー媒質自身とSiO₂製の太陽光入射窓により密閉されており、その中を冷却水が循環する。また、太陽光入力側のレーザー

Fig. 9 Solar pumped laser on sun tracking system (Left: Setup:I, FL(a), 1.4 × 1.05 m, f: 1.2 m, Right: Setup:II, FL(b), 2.0 × 2.0 m, f: 2.0 m).

Fig. 10 Schematic view of laser head.

媒質端面には高反射コーティングが、出力側には無反射コートが施されている。出力ミラーは励起チャンバーの外側に設置し、種々の条件(反射率、曲率、発振器長)でレーザー発振実験を行った。

4.2 高効率太陽励起レーザー

Fig. 11にキャビティに入力する太陽光パワーとレーザー出力の関係を示す。3-3項で示したようにレンズ側面に設置した直達日射計は集光点での太陽光パワーと校正されており、変動する太陽光に対して常時入射パワーとレーザーパワーを同時に計測している。スロープ効率などの測定のため入力太陽光のパワーはフレネルレンズ上にレンズ光軸に対称な減光マスクを被せて変化させた。現状の励起パワー密度におけるレーザー出力ミラーの反射率はおおよそ95%が最適値である。FL(a)では、入力太陽光パワー867 Wの時、最大で24.4 Wを得た¹⁰⁾。著者らが設計したFL(b)を用いた場合では、入力太陽光パワーが1860 Wの時、78.9 Wを得た。この時の、太陽光からレーザーへの光変換効率は約4.2%である。次節で述べる定常状態での4準位レーザーのモデル計算で求めた動作特性を実線で示す。

4.3 レーザー出力パワーと励起状態の検討

太陽励起レーザーの発振効率を向上させるために、集光レンズや励起チャンバーの改善が必要である。そこで、これらの集光特性を加味してレーザー媒質の励起状態を分析する。実験から得られた励起チャンバーへの入力光パワーとレーザー出力パワーから、モード体積に寄与する「有効長」 L_{effect} を算出し、FL(a)とFL(b)の励起状

Fig. 11 Dependency of laser output on incident sunlight power and the slope efficiency.

態について検討を行った。本研究で用いた励起チャンバー内に配置したレーザー媒質にはその軸方向に分布した励起光が吸収されると考えられる。この場合、媒質中に十分な励起強度が実現しない領域も含まれる可能性がある。解析では媒質中で発振に有効な励起強度が実現されている長さを有効長と定義した。この有効長を用いた計算による実験値データ再現性の確認により解析モデルの妥当性を検証し、理想的な励起条件におけるレーザーパワーを見積もる。

計算には定常状態の4準位レーザーの解析モデル¹⁴⁾を使用した。透過率 T_1 と T_2 の鏡で組まれた共振器に対して、 T_2 側のレーザー出力パワー P_{out} は出力ミラーの損失 $-\ln(1-T_2)$ 、共振器内の光子数 ϕ を用いると次式で表される。

$$P_{\text{out}} = \frac{-\ln(1-T_2)}{2L_{\text{opt}}} Chv\phi \quad (2)$$

L_{opt} は共振器の光学的距離 $L + (n-1)L_m$ (L は共振器長、 n は媒質の屈折率、 L_m は媒質長さ)であり、 C は光速である。また、共振器内の光子数 ϕ は次式で表される。

$$\phi = V_a \tau_c (R_p - \frac{\gamma}{\sigma L_{\text{effect}} \tau}) \quad (3)$$

ここで V_a 、 R_p 、 σ はそれぞれ、媒質のモード体積： $L_{\text{effect}} \times A$ (A ：媒質の断面積)、励起密度、誘導放出断面積である。 τ_c は共振器内の光子寿命であり次式で表される。

$$\tau_c = \frac{L_{\text{opt}}}{\gamma C} \quad (4)$$

ここで γ は共振器内の片道あたりの光子の損失割合であり、1064 nmに対する媒質の損失係数を α_{1064} とすると次式で表される。

$$\gamma = \frac{-\ln(1-T_1)(1-T_2)}{2} + \alpha_{1064} L_m \quad (5)$$

また、式(2)と(3)より媒質断面積を励起断面積と仮定した場合のモード体積の長さ、有効長 L_{effect} は下記のように表せる。

$$L_{\text{effect}} = \frac{1}{R_p} \left(\frac{2L_{\text{opt}} P_{\text{out}}}{-\ln(1-T_2) Chv A \tau_c} + \frac{\gamma}{\sigma \tau} \right) \quad (6)$$

この式の未知数はレーザー出力 P_{out} と励起密度 R_p である。 P_{out} は実験値を使用する。そして、 R_p は以下に述べるようにレーザー媒質に到達する太陽励起光強度から求めることができる。

まず、媒質の吸収長を d とした時の吸収効率 $\eta_{\text{abs}}(\lambda)$ は式(7)のように算出できる。

$$\eta_{\text{abs}}(\lambda) = 1 - \exp(-\alpha(\lambda)d) \quad (7)$$

ここで $\alpha(\lambda)$ はFig. 1に示したレーザー媒質の波長依存吸収係数である。吸収効率 $\eta_{\text{abs}}(\lambda)$ と、レーザー出力時にチャンバー内に入力した太陽光パワー $P_{\text{sun}}(\lambda)$ を用いて、

吸収された光子数 $\phi_{\text{abs}}(\lambda)$ を算出する。吸収された光子がレーザー上準位に遷移する確率 $\eta_Q(\lambda)$ を一定値95%⁸⁾として $\phi_{\text{abs}}(\lambda)$ に掛けることにより、レーザーに寄与する光子数の合計 ϕ_{sun} は式(8)となる。

$$\phi_{\text{sun}} = \eta_Q \int \phi_{\text{abs}}(\lambda) d\lambda = \eta_Q \int \frac{\eta_{\text{abs}}(\lambda) P_{\text{sun}}(\lambda)}{h\nu} d\lambda \quad (8)$$

これまでの研究で、熱電対を用いて励起チャンバー内の媒質の軸方向に対する相対的なパワー分布を報告している¹⁷⁾。パワー分布は、太陽光の入射側である前方部にフレネルレンズによる集光で得られるピークと、レーザー出力側に近い後方部に励起チャンバーによって再集光されるピークがあり、これらの2つのピークが励起に主に寄与していると考えられる。また、これらのピークの高さはほぼ同一であるため、光強度は前方のフレネルレンズによって集光された集光パワー密度を用いる。集光パワー密度は、Fig. 7に示したフレネルレンズの集光位置での光強度分布の最大値に対応することにより求めた。この光強度分布を用いて太陽光がレーザー媒質に入射する割合を求め、媒質の吸収長($d=1$ cm)を考慮することにより媒質内の励起密度 R_p を計算することができる。FL(a)についても、これまでに報告した集光分布¹⁰⁾から同様に R_p を計算した。

実験で得られたレーザー出力パワーと入射太陽光パワーから算出した R_p を用いて、式(6)より有効長 L_{effect} を算出した。励起密度の計算結果および、レーザー出力の解析時に使用した値をTable 2に示す。さらに、入力太陽光パワーを変化させた場合の R_p を算出し、それに対応するレーザー出力を計算した結果をFig. 11に実線で示した。

Table 2に示すように、FL(b)の励起密度が 4.3×10^{20} 個/cm³ sであるのに対し、FL(a)は 5.7×10^{20} 個/cm³ sとFL(a)でより強い励起が行われている。一方、レーザー出力を比べると、FL(b)で78.9 Wが得られており、FL(a)の24.4 Wより大きい。FL(b)で大きなレーザー出力が得られているのは、励起有効長がFL(a)で1.94 cmに対してFL(b)では4.6 cmと二倍以上長いことから、励起チャンバーの2次集光によって媒質のより多くの部分が有効に励起されているためと考えられる。以上の結果から、フレネルレンズの集光パワーとレーザー出力パワーを用いて、レーザーの励起状態の評価ができた。今後は、更なる高効率化を目的として、この評価手法に基づき励起チャンバーなどの改良を行い、媒質全体に亘って有効励起を実現することが重要である。

FL(b)について、励起チャンバーやCrドープ濃度の改善等を行い、入力したパワー全てをレーザー媒質に、均一に吸収できた場合を想定する。入力パワーは、フレネルレンズの成型時に生じた凹凸を改善することによって、FL(b)の集光効率がFL(a)の64%と同等になると約2500 Wとなり、最大光強度は465 W/cm²と予想できる。ここで、励起パワーの密度が高くなった時の熱応力に耐える媒質半径を考慮する。ロッド型のYAGの熱衝撃係数 $R_s = 7.9$ W/cmと媒質長さ l を用いて、破壊に耐えられ

Table 2 Optical parameters.

Common parameters				Reference
Refractive index	n	1.82	-	
Loss coefficient	α	2.00×10^{-3}	cm^{-1}	[15]
Life time of Nd ion	τ	230	μsec	[16]
Stimulated emission cross section (Nd:YAG)	σ	2.80×10^{-19}	cm^2	[8]
Quantum efficiency (Nd:YAG)	η_Q	95.0	%	[8]
Transmittance of HR	T_1	0.28	%	
Transmittance of O.C	T_2	5.00	%	
Length of medium	L_m	10.0	cm	
Resonator length	L	10.5	cm	
Cross section of medium (Excitation)	A	0.64	cm^2	
Absorbed length	d	1.00	cm	

Optical parameters				
Fresnel lens		FL(a)	FL(b)	
Direct solar intensity		922	989	W/m^2
Input solar power	P_{sun}	0.87	1.86	kW
Area of FL distribution	a	1.87	5.37	cm^2
Maximum solar intensity at focal point	$I_{sun}=P_{sun}/a$	465	347	W/m^2
1064 nm photons	ϕ_{sun}	1.1×10^{21}	2.3×10^{21}	Photon/s
Photon density (Pumping rate)	R_p	5.7×10^{20}	4.3×10^{20}	Photon/ $\text{cm}^3 \text{ s}$
Effective length	L_{effect}	1.94	4.60	cm
Mode volume	V_a	1.24	2.94	cm^3
Laser power	P_{out}	24.4	78.9	W

る最大吸収パワーは $P_{total} = 8\pi R_s l W$ と表す事ができる⁸⁾。破壊に耐えられる最大パワー密度 Q_{th} は、媒質半径 r とすると $Q_{th} = 8\pi R_s l / \pi r^2 l = 8R_s / r^2 \text{ W/cm}^3$ と表す事ができる。例えばフレネルレンズの透過率を100%と想定した場合の媒質単位長さに入射する励起パワー密度(1000 W/cm^3)に耐えうるロッド径は5 mm程度となる。有効長を媒質の全長 $L_{effect} = 10 \text{ cm}$ と仮定して出力ミラーの反射率を変化させた時のレーザー出力パワーを算出した。出力ミラーの反射率を90%, 80%, 70%とそれぞれ変化させた時の計算結果をFig. 12に示す。理想的な励起状態が実現した場合、入力した太陽光パワーが2500 Wの時、出力ミラーの反射率80%が最適で約370 Wのレーザー出力が期待される。

Fig. 12 Laser power of calculated on ideal pumping condition.

4.4 Total area performance: TAP

レーザー集光装置の受光面積に対するレーザー出力パワーの割合：TAPは、太陽励起レーザー実用化のために重要な評価指標である。本研究ではFL(a)とFL(b)を用いた場合にそれぞれ 18.7 W/m^2 と 20 W/m^2 のTAPを実現している。これらの値はFig. 13に示すように従来研究の最大値であるM. Lando et al. の 6.7 W/m^2 ⁵⁾の2.8倍であり、Cr:Nd:YAGとフレネルレンズを用いた高効率な太陽励起レーザーの実現に近づきつつある。

5. まとめ

世界で初めてフレネルレンズとCr:Nd:YAG媒質を用いて、高効率で経済的な特長を持つ新しい太陽励起レーザーシステムを開発した。Nd:YAG結晶とCr:Nd:YAG

Fig. 13 Total area performance.

(ドープ濃度Cr : 0.1 %, Nd : 1 %)の吸収係数を測定し, 400–500 nm, 600–650 nmの波長域でNd:YAG媒質に比べてCr:Nd:YAGが大きな吸収を持つ事を確認した. 太陽光集光用に開発した4-m²フレネルレンズによる集光像の半値全幅は21 mmであり, 色収差を含まない理想的な集光系による太陽像の大きさとの差が2.5 mmである. このレンズを用いてレーザー発振を行った結果, 入力太陽光パワー1860 Wに対して最大で78.9 Wを得た. 太陽光からレーザーへの光変換効率は約4.2 %である. 太陽光受光面積に対する割合が20 W/m²となり, 従来の最大値である6.7 W/m²の2.8倍である. また, レーザー媒質の吸収と入射太陽光のパワーを考慮した四準位レーザーモデルによりレーザー出力の実験値を計算によって再現し, レーザー出力時の励起状態を推定した. その結果, 市販レンズにより太陽光を集光した場合には, 長さ10 cmのレーザー媒質のうち励起有効長が1.94 cmに対し, 新たに設計したフレネルレンズでは4.6 cmと励起状態が優れている事が明らかとなった. フレネルレンズの集光効率の改善, 及び媒質が全ての入力パワーを吸収する場合を仮定し計算を行なった結果, 太陽光パワーが2500 Wの時, 直径5 mm長さ10 cmのCr:Nd:YAG媒質では出力ミラーの反射率が80 %で約370 Wになると見積もった. 数百Wクラスの太陽励起レーザーユニットが完成すれば, レーザーを集光することによってMgOの還元が可能となり, 新しいエネルギーサイクルを構築できる.

謝 辞

太陽励起レーザー実験場の設立に関して, 様々なご支援を頂いた北海道千歳市に感謝の意を表します. また太

陽励起レーザーの開発に関して技術な協力を頂いた(株) ティス, ラフォーレエンジニアリング(株)に感謝します.

参考文献

- 1) T. Yabe, S. Uchida, K. Ikuta, K. Yoshida, C. Baasandash, M. S. Mohamed, Y. Sakurai, Y. Ogata, M. Tuji, Y. Mori, et al.: Appl. Phys. Lett. **89** (2006) 261107.
- 2) 矢部 孝, 内田 成明: レーザー研究 **6** (2006) 408.
- 3) C. G. Young: Appl. Opt. **5** (1966) 993.
- 4) M. Lando, Y. Shimony, R. M. J. Benmair, D. Abramovich, V. Krupkin, and A. Yogev: Opt. Materials. **13** (1999) 111.
- 5) M. Lando, J. Kagan, B. Linyekin, and V. Dobrusin: Opt. Comm. **222** (2003) 371.
- 6) 湯上 浩雄; 内藤 均, 嵐 治夫: レーザー研究 **24** (1995) 1308.
- 7) V. Krupkin, Y. Kagan, and A. Yogev: Proc. SPIE **2016** (1993) 50
- 8) W. Koechner: Solid-State Laser Engineering 6th ed. (Springer, 2006)
- 9) A. Ikessue, K. Kamata, and K. Yoshida: J. Am. Ceram. Soc. **78** (1995) 2545.
- 10) T. Yabe, T. Ohkubo, S. Uchida, K. Yoshida, M. Nakatsuka, T. Funatsu, A. Mabuti, A. Oyama, K. Nakagawa, T. Oishi, et al.: Appl. Phys. Lett. **90** (2007) 261120.
- 11) ASTM : 米国材料試験協会G173-03 Reference Spectra Derived from SMARTS v. 2.9.2
- 12) Y. M. Han, R. Z. Wang, Y. J. Dai, and A. H. Xiong: J. Opt. A: Pure Appl. Opt. **9** (2007) 988.
- 13) C. Sierra and A. J. Vazquez: J. Mat. Sci. **40** (2005) 1339.
- 14) O. Svelto: Principles of Lasers 4th ed. (Plenum Press, 1998).
- 15) T. Saiki, K. Imasaki, S. Motokoshi, C. Yamanaka, H. Fujita, M. Nakatsuka, and Y. Izawa: Opt. Comm. **268** (2006) 155.
- 16) M. Nakatsuka, H. Yoshida, Y. Fujimoto, K. Fujioka, and H. Fujita: J. the Korean Phys. Soc. **43** (2003) 607.
- 17) T. Yabe, B. Bagheri, T. Ohkubo, S. Uchida, K. Yoshida, T. Funatsu, T. Oishi, K. Daito, M. Ishioka, N. Yasunaga, Y. Sato, C. Baasandash, Y. Okamoto, and K. Yanagitani: J. Appl. Phys. **104** (2008) 083104.