

数値計算を用いた太陽光励起レーザーの高効率な集光系の設計

Numerical Simulation to Design an Effective Pumping Cavity for Solar-Pumped Laser

東京工科大学大学院 工学研究科サステイナブル工学専攻 光・エネルギー（大久保）研究室

越地 駿人¹⁾, 下山 拓海²⁾, 長井 健²⁾, 金子 正基²⁾, 福田 遥菜²⁾

指導教員 大久保 友雅^{1), 2)}, 松永 栄一²⁾

1) 東京工科大学大学院 工学研究科 サステイナブル工学専攻 2) 東京工科大学 工学部 機械工学科

キーワード：再生可能エネルギー，太陽光エネルギー，数値計算，サステイナブル，固体レーザー

1. 太陽光励起レーザー

サステイナブル社会の実現に向けた新しい太陽光エネルギーの利用方法として，太陽光励起レーザーが期待されている．太陽光励起レーザーとは，太陽光を励起源としてレーザーを発振するものである．太陽光は様々な波長の光を含み，平行度が低いことから直接加工などに利用することが困難であるが，レーザーは単一の波長かつ平行度が高く，レンズを通して極限まで小さく集光し高いパワー密度で加工ができたり，遠くまで伝送できたりするなど，様々な活用が見込める．

太陽光励起レーザーそのものは1965年に実現されている^[1]．さらに2012年にはDinhらにより，4 m²の巨大なフレネルレンズを用いたシステムにより，当時世界最高効率の30 W/m²のレーザー発振が実現された^[2]．しかし，このシステムは大型のため一次集光系の精度が低く，その集光効率が42%と低い．そこで本研究では850 × 850 mmの小型なフレネルレンズを用いた．このシステムでは58.5%の集光効率が達成され，3DプリンタによるABS樹脂製の二次集光系(励起キャビティ)を用いた際に最大2.43 Wのレーザー出力を得た^[3]．

2. 太陽光励起レーザーの仕組みと数値計算

太陽光励起レーザーの概要を図1に示す．一次集光系であるフレネルレンズにより太陽光を二次集光系である励起キャビティ内に集光する．集光

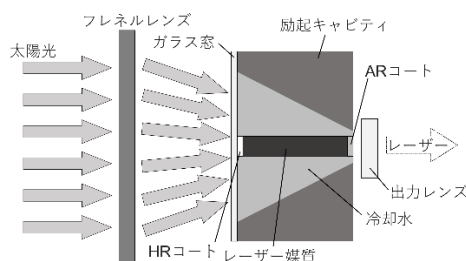


図1 太陽光集光システムの概要

された光を励起キャビティ内で繰り返し反射させ，励起キャビティの中心にあるレーザー媒質に吸収させる．レーザー媒質にエネルギーを吸収させることにより，レーザーが発振する．

そのため，太陽光励起レーザーの出力を向上させるには，励起キャビティの形状を工夫し，いかに多くの太陽光をレーザー媒質に吸収させるかが重要となる．そこで，本研究室で開発した数値計算コードにより，励起キャビティ内に集光された太陽光がどれだけレーザー媒質に吸収されたかを評価した．

この数値計算コードは以下の数式を用いて光線追跡を行い，光の反射，屈折，吸収の計算を行う．

$$\mathbf{e}_{reflect} = \mathbf{e}_i - 2\mathbf{n}(\mathbf{n} \cdot \mathbf{e}_i) \quad \dots (1)$$

$$\mathbf{e}_{refract} = \frac{n_1/n_2 (\mathbf{e}_i - \mathbf{n}(\mathbf{n} \cdot \mathbf{e}_i)) + \sqrt{1 - (n_1/n_2)^2 (1 - (\mathbf{n} \cdot \mathbf{e}_i)^2)}}{1} \quad \dots (2)$$

$$P_{absorb} = P_{in}(1 - \exp(-\alpha L)) \quad \dots (3)$$

$\mathbf{e}_{reflect}$, \mathbf{e}_i , \mathbf{n} , $\mathbf{e}_{refract}$ はそれぞれ，反射光線の方向，入射光線の方向，各材料の表面の法線，屈折し

た光線の方向の単位ベクトルであり， n_1 ， n_2 ， P_{in} ， P_{absorb} ， α ， L はそれぞれ，入射側の屈折率，受光側の屈折率，入射パワー，吸収パワー，レーザー媒質の吸収係数，レーザー媒質内の光線透過距離である．これらを考慮し，フレネルレンズによって集光され，励起キャビティで再集光された太陽光のパワーがどれだけレーザー媒質に吸収されたかを評価した．

本研究では図 2 に示す，直行型(図 2 中 A)，コーン型(図 2 中 B)および花瓶型(図 2 中 C)の 3 種類の形状の励起キャビティを比較した．

3. 数値計算結果

直行型およびコーン型の励起キャビティについて，太陽光が入射する側の口径を 10 mm から 100 mm まで 10 mm ごとに変化させて数値計算を行った．それぞれの場合にレーザー媒質に吸収されたパワーの数値計算結果を図 3 に示す．

直行型は入射口径の大きさによらず吸収パワーの大きさに変化が見られなかった．一方，コーン型は入射口径の大きさにより吸収パワーが大きく変化し，入射口径が 50 mm の時に吸収パワーが最大となった．

次にコーン型と花瓶型の励起キャビティを比較した．それぞれの入射口径を 50 mm とした時，それぞれの吸収パワーはコーン型が 171 W，花瓶型が 174 W であり，大きな差は見られなかった．しかし，図 4 に示すレーザー媒質の各位置での吸収パワー密度は，花瓶型のピークがより小さく，その分布も緩やかであることが分かった．これはレーザー媒質が局所的な熱的負荷を受けにくく，レーザー媒質の高寿命化に寄与すると考えられる．

4. まとめ

本研究により以下のことが明らかとなった．

- 直行型励起キャビティは入射口径の大きさによらず吸収パワーが変化せず，有用でない．
- コーン型励起キャビティは入射口径が 50 mm の時，吸収パワーが最大となった．
- 花瓶型はコーン型と比べ，吸収パワーは同程

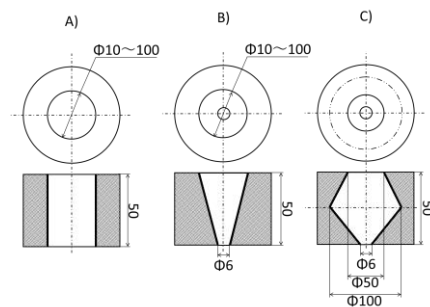


図 2 3 種類の励起キャビティの形状

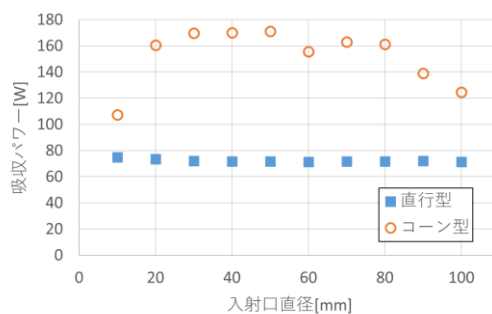


図 3 直行型およびコーン型励起キャビティの入射口径と吸収パワーの関係

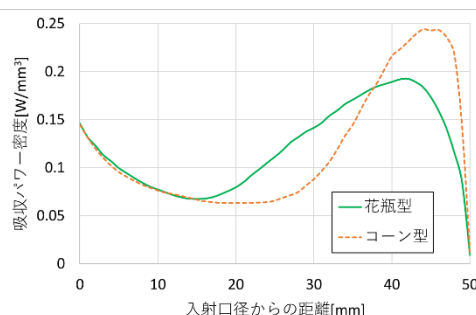


図 4 花瓶型とコーン型励起キャビティの吸収パワー密度分布

度であるが，吸収パワー密度のピークが低く分布が緩やかであることが分かった．

謝辞

本研究の一部はトランスコスモス財団による研究助成により実施された．

参考文献

- [1]. C. G. Young w, et al., Appl. Opt. (1966).
- [2]. T. H. Dinh, et al., Opt. Lett. (2012)
- [3]. 大久保友雅ら，レーザー学会研究会 (2019)