

太陽光励起レーザーの高効率動作とその応用

佐伯 拓*

Highly Efficient Lasing Action of Solar-Pumped Laser and Its Applications

Taku SAIKI

1. はじめに

近年、世界的規模で自然環境保護の意識が高まりを見せている。地球温暖化防止のため、二酸化炭素を極力排出しない省エネルギー化や再生可能エネルギーの生産や利用に注目が集まっている。低炭素社会実現のための手段として、太陽エネルギーの有効利用が挙げられる。ここでは、その中の1つの利用方法である太陽光励起レーザーについて紹介する。この技術は、近年の固体レーザー技術の著しい進展により実用化レベルへと大きく近づいた。太陽光励起レーザー用のレーザー媒質として用いられているNd/Cr:YAGセラミックスの高効率動作特性やその各応用について、特に、宇宙空間での太陽エネルギーを地上へ送る宇宙太陽光発電システムや太陽エネルギーを金属に化学的エネルギーとして貯蔵して再生可能エネルギーとするマグネシウムサイクル等について述べる。

2. 太陽光励起レーザー¹⁾

太陽光強度は、宇宙空間では1.4kW/m²程度、地上では大気の影響があるため1kW/m²程度である。地上に降り注ぐ太陽光のエネルギーは、地上で人類が消費するエネルギーの8000倍以上である。また、地上と宇宙空間を比較すると、宇宙空間では天候や昼夜がないため地上での10倍の利用率の差が生ずる。図1に太陽光スペクトル強度とアークランプ光スペクトル強度の比較を示す。基本的にこれらのスペクトル分布は、黒体放射の法則に従う。

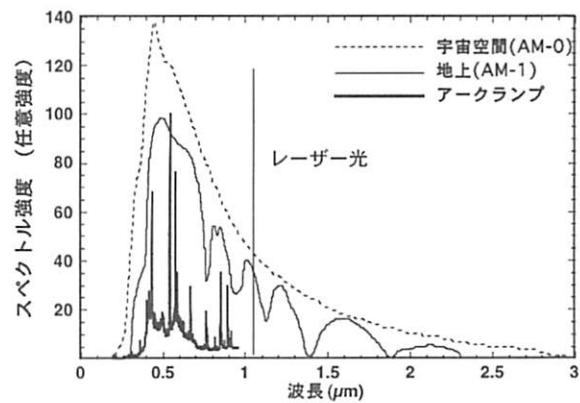


図1 太陽光スペクトルとレーザー

一般的な太陽エネルギーの利用方法として、太陽電池や熱利用等が挙げられる。その一方、太陽光からレーザーへの変換に関する研究が古くからあり、それはレーザーが開発された1960年代までさかのぼる。従来、太陽光エネルギーをレーザーへ変換する場合、太陽電池を用いて電気を発生し、蓄電池からレーザーダイオード(LD)を発光させてレーザーを励起する方式が提案されてきた。しかし、この方法では装置が複雑となり、電気-光変換効率も数%と低くなってしまふ。図2に太陽光(直接)励起レーザーの概念を示す。太陽光励起レーザーでは、それとは異なり太陽光をミラーやレンズ等で集光し、太陽光の500-3000倍程度のパワー密度を保ちながらレーザー媒質に照射・吸収させることでレーザー媒質を光励起してレーザー光発生を行い、インコヒーレント光である太陽光からコヒーレントなレーザー光へ直接的に光-光過程で変換する。図1のスペクトルで言うと、広い太陽光スペクトルを狭い単一波長に変換する。

原稿受付 平成22年9月7日

*システム理工学部 電気電子情報工学科 准教授

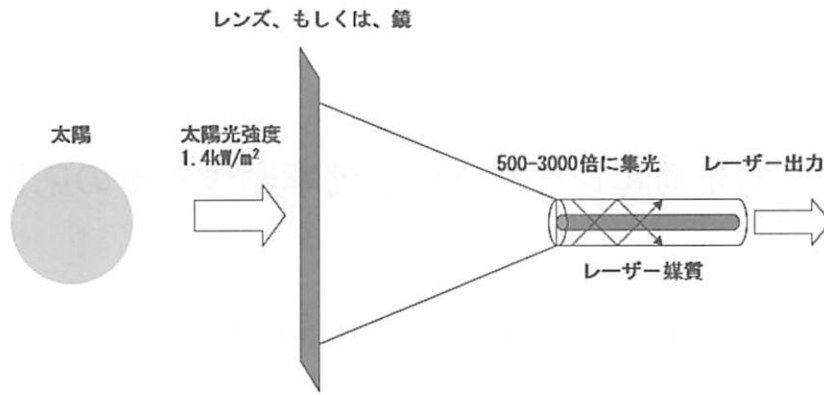


図2 太陽光励起レーザーの概念

レーザー媒質としては、Nd:YAG、アレキサンドライト、チタンサファイヤ等の固体媒質、分子ガス等の気体、半導体、色素等、様々な媒質が提案されている。太陽光の直接利用では不可能であった超高温や高電界の発生が実現可能となる。太陽光を集光して物体に照射しても発生する温度は高々3000K程度であり、太陽光の表面温度である6000Kを超えることはできない。これは、熱力学第2法則であるエントピー増大の法則に従う。太陽光のコヒーレント光への変換は、熱力学で言うとエントロピー縮小の変換であると言える。つまり、太陽光表面のエネルギーは、一度、エントロピーが0の光に変換される。レーザー媒質により、質の高いコヒーレント光へと変換され、物体に照射されるときに元の太陽光表面よりもエントピーは小さくなる。

太陽光の集光強度はミラーやレンズにより集光しても1 kW/cm²が限界であるのに対して、連続波やパルスレーザーでは周知のとおり波長程度まで集光することができるため1 GW/cm²を超える光強度が実現できる。連続波では4000K、パルスレーザーでは5万K以上の高温の発生が容易である。

レーザーを発生させる方式として、発振器方式と増幅方式がある。発振器方式では、媒質の励起光源として用い、レーザー発振を行う。一方、増幅方式では、別の品の良いレーザー発振器を用意し、太陽光で励起したレーザー媒質に種レーザーを注入することで増幅して媒質からエネルギーを取り出す。従来のレーザーと比較して、励起用電源を必要とせず、励起光学系等のシステムが簡便となる。

海外では、屋外での太陽光励起レーザー実験が多数行われたが、レーザー出力は100m級の膨大な集光鏡を使用しても数100W級であり、光-光変換効率は数%以下と低く、実用域には達していなかった。これまで、主に用いられてきたのは、Nd:YAG結晶であった。我々は、太陽光励起レーザーとして有望であるNd/Cr:YAGセラミックを用いて宇宙太陽光発電(SSPS)

用太陽光直接励起連続波レーザーと併行して新物質創成のための高温発生用太陽光励起パルスレーザーを開発している。ここでのNd/Cr:YAGセラミックとは、Cr⁴⁺でなくCr³⁺を純粹に含んだセラミックYAGを指す。我々は、2002年、Nd³⁺/Cr³⁺:YAGセラミックレーザーを世界で初めて開発し、レーザー発振に成功している²⁾。2003年ロッド型Nd/Cr:YAGセラミックレーザーと擬似太陽光(ランプ光源)を用い光-光変換効率43%(世界最高)を得た³⁾。SSPSでの遠方へのエネルギー伝送のため、アクティブミラー型増幅器を用いた多段多重増幅レーザーシステムでシングルモードレーザー発生実験を継続している。現在、レーザー出力は200W級である。また、屋内実験のみでなく屋外の太陽光を用いて実験行っている。図3に実太陽光励起レーザー実験装置を示す。駆動用電力は太陽電池としている。駆動方式は、赤外線二軸逐次追尾方式を採用している。プラスチック製の30cm各のフレネルレンズを用いている。縦横高さが全て50cm以内の小型可搬レーザー装置である。パルスレーザーの増幅に関して、実効的飽和フルエンスは、励起されたCrイオンからのエネルギー移譲のため、Nd:YAGの場合と異なり100mJ以下となる。しかし、Nd:YAGと比較して最大で4倍程度の蓄積エネルギーが得られる利点がある。模擬ランプ光源と実際の太陽光を用いた場合の同励起強度下で比較を行った。その結果、パルスレーザーの増幅特性は、全く同一であった。変換効率は、模擬太陽光と実際の太陽光とは同じであることが明らかとなった。パルス増幅の場合、エネルギーとして矩形1.2cm²のビーム断面積で、入力140mJに対し、出力180mJであり、40mJが抽出できた。励起光強度からレーザー小信号利得は3倍と評価された。パルス幅については、Qスイッチレーザーの短いパルス60nsとフリーランニングによるパルス増幅実験の比較では、ほぼ特性は同じであった。図4に実際に太陽光増幅後のカーボン入りプラスチックのレーザーアブレーション



図3 太陽光励起レーザー実験装置



図4 太陽光励起レーザーによるレーザーアブレーションの写真

ン写真を示す。繰り返しは3 Hz、出力エネルギーは80mJであった。アブレーション発生による2 cm長の火炎コラムを観測した。パルス幅を数10nsにすれば、光強度は 10^9 W/cm²を超え、鉄、アルミ等の金属加工が可能となる。太陽光励起パルスレーザーの開発は過去イスラエルで行われたが、パルスエネルギーは1 mJ程度で数kHzの高繰り返しであった。太陽光励起でこのようなフレーム状のアブレーションを起こした実験は世界で初めてである。一方、太陽光励起CWレーザーで東工業大学グループが鉄の薄板切断に成功している。レーザーパルスの高繰り返しの増幅実験も行い特性を明らかにした。低繰り返しのパルスレーザーの増幅では、励起光がCWであるのでレーザー媒質に蓄積されたエネルギーの抽出効率が数%と低い。繰り返しを上げれば、蛍光増幅光によるエネルギー散逸も少なくな

り、高効率なレーザー動作が可能となる。レーザーパルスの繰り返しが上昇すると変換効率が高くなる。我々は10-100kHzが繰り返しの理想であると考えている。実験的には、模擬ランプ光源を用いて100kHzの高繰り返しパルスレーザーの開発を行った。理論計算上50%に光-光変換効率に近づき変換効率は連続波レーザーと同程度の43%を達成している。

3. レーザー高効率動作特性

太陽光励起レーザーを用いた各種の応用を実用レベルまで引き上げるために最も重要なことは、太陽光からレーザーへの変換効率である。図5にNd/Cr:YAGセラミックレーザーのエネルギーダイアグラムを示す。

先ほど述べたロッド型Nd/Cr:YAGセラミックレー

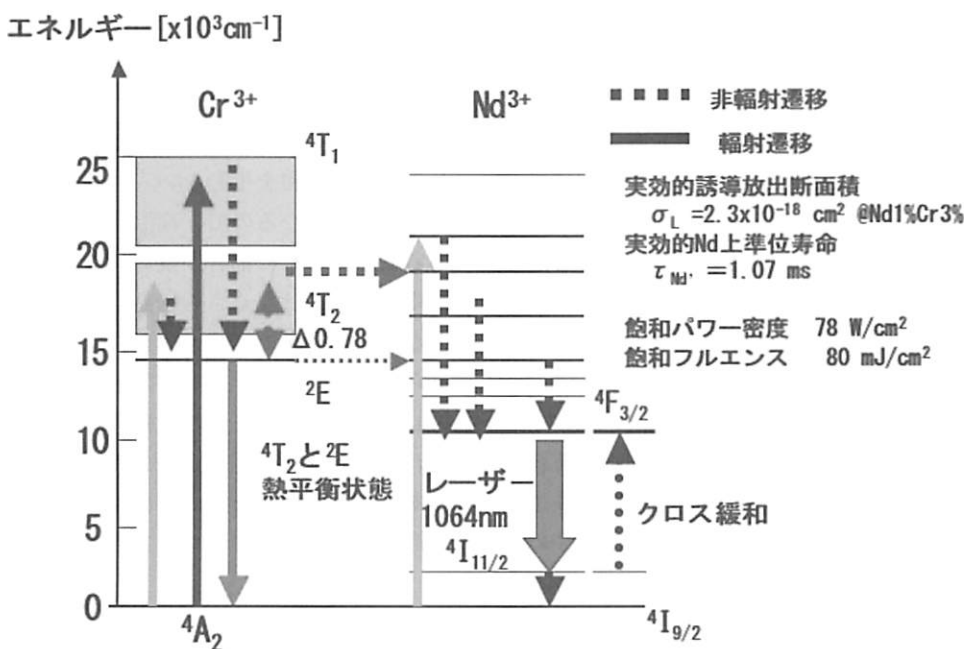


図5 Nd/Cr:YAGセラミックレーザーのエネルギーダイアグラム

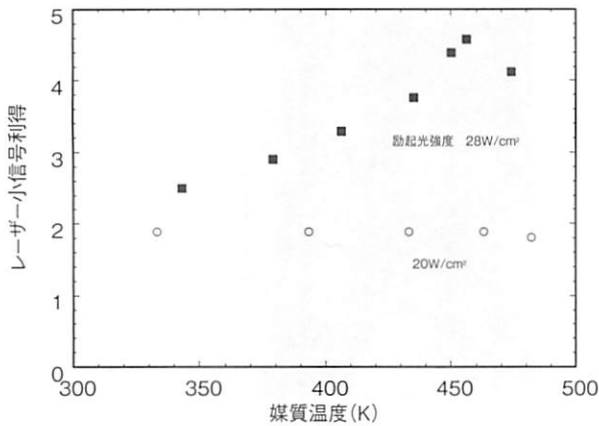


図6 レーザー小信号利得の温度依存特性
Cr0.1% 添加 Nd:YAG セラミック

レーザー変換効率に関して、従来の1フォトン注入1フォトン励起を仮定したレーザー発生理論を構築する場合、40%の変換効率が限界である。この実験では、発振実験でのスロープ効率は最大で50%であった。実験で計測されたレーザー利得から計算される変換効率も同様に高い。

レーザー高温動作実験で、励起光強度がある値を超えると200℃の高温領域でレーザー利得が増大する現象をレーザー媒質の開発当初から確認している。図6にレーザー増幅実験結果を示す。励起光強度が高い場合、レーザー小信号利得が媒質温度に対して指数関数的に増加してゆく。この現象は、他の媒質では観測されていない。通常、媒質温度の上昇に伴い、レーザー小信号利得が低下する。この原因は、主に4単位系レーザーの弱点であるボルツマン分布による下単位数密度の上昇であり、固体のレーザー媒質を必ず冷却しなければならない理由の一つである。固体レーザーを知るものならば、この結果は非常に特異である。通常、4単位レーザーでは、誘導放出断面積や蛍光寿命が温度上昇によって減少するので、単純に反転分布の増加である。

さらに、図7に蛍光寿命の温度依存特性に関する計測結果を示す。励起光源は、パルス幅10 μ s時間幅のフラッシュランプである。励起光は広帯域の白色光である。蛍光ピーク波長の1064nmを観測している。Cr³⁺:YAGの850nm付近での蛍光寿命は1.8msである。Nd:YAGの蛍光寿命は、Nd添加濃度が1%の場合0.23msである。計測の結果、Crの増感効果により1ms近いNd蛍光寿命が観測されている。Nd:YAGの蛍光寿命は、通常、温度上昇により単調に減少する。しかし、Nd/Cr:YAGセラミックでは、35℃付近でNdの蛍光寿命が1.1msから1.8ms付近まで上昇した。この原因として、温度上昇に伴い反転分布が増加して

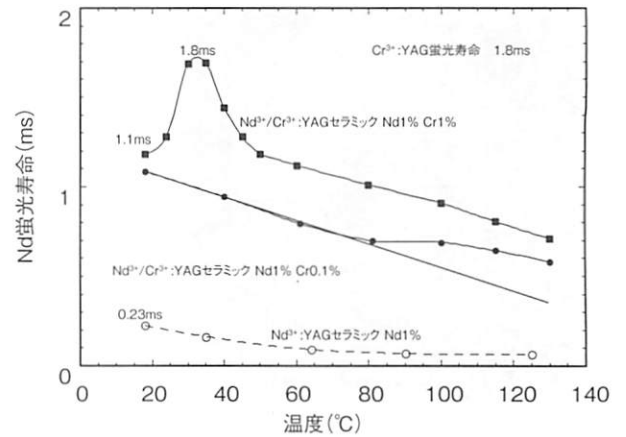


図7 Nd 蛍光寿命の温度依存特性

いるためと考えられる。上の2つの実験事実、1) 温度に対するレーザー小信号利得の増大、2) Nd 蛍光寿命の増大、から励起光強度、媒質温度、Nd 濃度の条件が重なってクロス緩和効果が生じていると判断される。太陽光を吸収したCrは励起され、励起されたCrはNdへ高効率にエネルギーを移すが、その際、クロス緩和が生じる⁴⁾。クロス緩和では、1フォトンの励起光注入に対して2フォトンの励起が生ずる。この場合、Crにおけるフォノンと電子エネルギー準位が結合し、Ndの高エネルギー準位との間でエネルギー移譲が生ずるためである。熱により基底準位から下単位に励起されたNdがクロス緩和により上単位に励起され、反転分布密度が通常よりも増大する。さらに、クロス緩和が起こるとフォノンがエネルギー遷移を媒介しているため、出力光子エネルギーが入力光子エネルギーを上回り、熱エネルギーがレーザー光に変換されることも理論的に予測される。このNd/Cr:YAGセラミック媒質は、高温状態ではTm:YAGと同等のクロス緩和動作レーザーを行うと考えられる。ちなみに、Tm:YAGは、極低温の100K付近でしかクロス緩和を生じない。通常、励起をすれば必ず媒質は高温となるので、高温状態で高効率動作可能であることは非常に都合が良い。このため、40%の変換効率が限界ではなくさらに高い変換効率が実際の限界となる⁴⁾。現在まで40%が変換効率の限界であると考えられていたのは、ランプ励起レーザーの開発や米国のレーザーSSPS関連の研究者の主張が始めにあり、それが一人歩きして固定概念のようになっていたためである。この理論を用いた計算結果で前述のロッドでの高効率発振実験のスロープ効率も説明できる。

4. 応 用

我々は、SSPS実現を目的として過去研究を続けてきたが、それ以外の各種応用に関して紹介する。太陽

光励起レーザーの特徴として、従来のレーザーよりも格段に低フォトンコストであることが挙げられる。装置が単純であるため低製造コスト、太陽光のみ利用するため低運転コストであり、二酸化炭素を極力出力しない。

連続波レーザー光の応用に関して、人工衛星間、飛行機、船、車等の移動体へのエネルギー伝送、植物工場等、が挙げられる。品質の良いレーザー光は太陽光と異なり直進性が非常に良いので、宇宙空間のような長距離光伝送、すなわち、光通信やエネルギー伝送に有効である。レーザーを電力に変換する技術について、レーザー対電力で70%の変換効率が達成されている。今後の課題は、製造コストの削減と高温動作可能な高出力用光電変換素子の開発、レーザー光から電気への変換効率の向上である。パルスレーザーの応用では、レーザー推進、スペースデブリ除去、レーザー加速等が挙げられる。金属・非金属ナノ材料量産、水素生成、加工、医療等にも応用可能である。

SSPSについて、日本の宇宙航空研究開発機構(JAXA)が米国、ヨーロッパに先駆けて研究を行っている⁵⁾。その研究・検討の概要としては、宇宙の静止軌道にkm級の集光ミラーを持つ人工衛星を配置し、太陽光を集めてレーザー光に変換する。人工衛星と地上までは、36000kmほど離れている。従来、マイクロ波方式によるエネルギー伝送が提案されているが、地上のレクテナの規模を数kmにしなければならない。レーザーの方がマイクロ波より波長が3-4桁短いので、レーザー方式の場合、数100mの施設規模でレーザーが受光可能である。太陽光をレーザーに変換するシステムについては、本紙で取り上げた太陽光直接励起レーザーが期待されている。

一方、地上での応用に関して、東京工業大学の矢部氏は、太陽エネルギーの貯蔵・利用方法としてマグネシウムサイクルを提案している⁶⁾。地上での既存の電力網に接続して電力として太陽エネルギーを利用する形態が一番望まれる。通常、太陽電池で発電した電力の蓄電は、現在提案されている方法では、スーパーキャパシターで行うが、問題となるのは製造コストであると考えられる。具体的なマグネシウムサイクルのしくみを以下に述べる。純粋な金属は、化学的ポテンシャルエネルギーを持つ。600°Cの水蒸気とマグネシウムを反応させると水素が得られる。マグネシウムを直接電池として電力として使用する方法も提案されている。それらの反応で生成された酸化マグネシウムは、連続波太陽光励起レーザーで2万K相当の温度を発生させ還元することで元のマグネシウムへと戻す。これによりマグネシウムのリサイクルが行われ、再生可

能エネルギーとして成立したことになる。実際、再生可能エネルギーとして成立させるためには、還元剤を用いないで酸素とマグネシウムを完全に乖離させる必要がある。還元剤を生産すること自体、莫大なエネルギーを消費するためである。今後の課題は、海水からのマグネシウムの確保であろう。従来のレーザー装置でマグネシウム還元を行うことを考えてみる。電気からレーザーを発生させる変換効率の高いファイバーレーザーでさえ電気-光変換効率は25%しかない。電源は主として火力発電所であることを考えると、ただ電力を消費するのみでとてもコスト的に見合うことはできない。薬品を使用する化学的方法やCVD、プラズマ法でさえも同様である。蓄積エネルギー密度では、燃料電池車搭載の700気圧圧縮水素ボンベが4.3GJ/m³である。マグネシウム等の金属を使えば、43GJ/m³と1桁高いので省スペース化に有効である。

太陽光励起レーザーを用いたナノ粒子生成も可能である。ナノ粒子は、様々な可能性を秘めている。現在の問題点は、先ほど触れたようにその生産コストの高さである。太陽光励起パルスレーザーを用いれば、輻射や熱伝導損失を低減させ、集光点で約5000°Cの高温状態の発生と急速冷却を行う事が可能であり、酸化金属の直接還元とナノサイズ化を行う事ができる。金属ナノ粒子を水と反応させることで、低温状態で水素製造が可能である。現在、我々のグループと(財)レーザー技術総合研究所は、再生可能エネルギー生産やその他を目的とした酸化/純金属ナノ粒子の生成実験を進めている。

全てに共通する事項で、大出力、かつ、高効率のレーザーシステムの開発が今後の課題である。

5. ま と め

固体レーザー技術の著しい進展により可能となった太陽光励起レーザー用媒質として用いられているNd/Cr:YAGセラミックの特異な高効率動作特性について示した。太陽光からレーザーへの変換効率が従来考えられていた40%よりも遥かに高いことを明らかにした。この結論は、各種応用の実用化を考える上で非常に有益である。

宇宙太陽エネルギーを地上へ送る宇宙太陽光発電システムや太陽エネルギーを金属に化学エネルギーとして貯蔵し再生可能エネルギーとするマグネシウムサイクルの方法と今後の課題、ナノ粒子生成について述べた。

今後、実用化に向けてkW級高効率太陽光励起レーザーの開発とその応用に関する研究の進展が期待される。

本研究の一部は、宇宙航空研究開発機構（JAXA）の委託研究として行われた。高濃度レーザーセラミックスの試作をしていただいた神島化学(株)の柳谷博士、八木博士に感謝します。

参考文献

- 1) 佐伯 拓、今崎一夫、中塚正大、“太陽光直接励起レーザーの現状と将来”、レーザー研究37 (2009) pp.120-126.
- 2) T. Saiki, K. Imasaki, S. Motokoshi, and C. Yamanaka, H. Fujita, M. Nakatsuka, and Y. Izawa, “Disk-type Nd/Cr : YAG ceramic lasers pumped by arc-metal-halide-lamp”, Opt. Comm. 268 (2006) pp.155-159.
- 3) T. Saiki, S. Motokoshi, K. Imasaki, H. Fujita, M. Nakatsuka and C. Yamanaka, “Nd/Cr:YAG Ceramic Rod Laser pumped by arc-metal-halide-lamp”, Jpn. J. Appl. Phys. Vol.46 (2007) pp.156-160.
- 4) T. Saiki, M. Nakatsuka, K. Imasaki, M. Nakatsuka, “Highly Efficient Lasing Action of Nd³⁺/Cr³⁺ : YAG ceramics Based on Phonon-Assisted Cross Relaxation Using Solar Light Source”, Jpn. J. Appl. Phys. Vol.49 (2010) pp.082702-1-8.
- 5) 藤田辰人他、“JAXA における宇宙エネルギー利用システム (SSPS) 研究の現状”、電気情報通信学会 信学技報 SPS2008-01 (2008-04) pp.1-4.
- 6) 日本プラズマ核融合研究 Vol.83 No.6 (2007) pp.578-582.