

宇宙太陽光発電に向けた太陽光励起レーザー用単結晶の作製・特性評価

鈴木 優紀子^A, 鳥海 陽平^A, 落合 夏葉^A, 田中 徹^A, 長谷川 和男^B 元廣 友美^{B,C},

Fabrication and Characterization System of Single-Crystal Solar-Pumped Lasers for Space Solar Power Systems

Y. Suzuki^A, Y. Toriumi^A, N. Ochiai^A, T. Tanaka^A, K. Hasegawa^B and T. Motohiro^{B,C}

Solar-pumped laser technology has potential applications for the realization of future space solar power systems. We focused on the single-crystal co-doped laser and the compact solar-pumped lasers(μ SPLs) and constructed multiple μ SPL evaluation systems to elucidate the growth characteristics of the single-crystal laser. First solar oscillation was confirmed in Nd, Cr, Ce: YAG single crystals. However, the measured properties were lower than those of ceramic. We will proceed with the analysis of the permeation characteristics and explore the cause of the characteristics.

Keywords: Solar-pumped lasers, Nd, Cr, Ce co-doped YAG, Single-crystal lasers,
Space solar power systems

1 はじめに

NTT 宇宙環境エネルギー研究所では, 将来的な環境負荷ゼロをめざし, 核融合発電や宇宙太陽光発電などの次世代エネルギー創出と, 極端な気候変動や災害などの環境変化に対する耐性の向上の2つの観点から, 地球環境の再生と持続可能な社会の実現に向けた研究を行っている。

宇宙太陽光発電技術とは, 静止軌道上の衛星

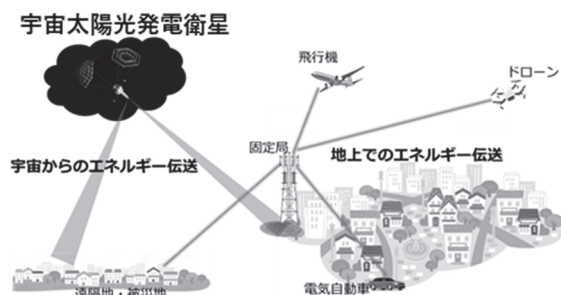


Fig.1 Image of Space Solar Power Systems

で太陽光エネルギーをレーザー光やマイクロ波に変換して地上へ長距離伝送し, 地上で電力や光エネルギーとして活用する構想である。NTT では比較的システムの規模を小型化できることによる技術実証の可能性の高さ及び光-光エネルギー変換効率の期待値の高さの観点から, レーザーを使用した方式にフォーカスしている。また, レーザー方式の宇宙太陽光発電はレーザーの指向性の高さを利用し, 他にも人工衛星や月面で動作する機械への無線給電などにも応用が可能と期待できる。

レーザー方式宇宙太陽光発電の主要課題は大きく【I 宇宙空間で太陽光エネルギーをレーザー光に変換する技術】【II レーザー光を地上へ長距離伝送する技術】【III 地上でレーザー光を受光し, エネルギーとして取り出す技術】の3つであると考えている。

本研究では, 【I 宇宙空間で太陽光エネルギーをレーザー光に変換する技術】の確立をめざし, 宇宙太陽光発電に適したレーザー技術として, 太陽光励起レーザー技術に着目した。太陽光励

著者連絡先 ykk.suzuki@ntt.com

A NTT 宇宙環境エネルギー研究所 (〒180-8585 東京都武蔵野市緑町 3-9-11)

NTT Space Environment and Energy Laboratories (3-9-11 Modori-cho, Musashino-city, Tokyo 180-8585)

B 光産業創成大学院大学 (〒431-1202 静岡県浜松市西区呉松町 1955 番 1)

Graduate School for the Creation of New Photonics Industries (1955-1 Kurematsu-cho, Hamamatsu-city, Shizuoka 431-1202)

C 名古屋大学 (〒464-8601 名古屋市千種区不老町)

Nagoya University (Furo-cho, Chigusa-ku, Nagoya, 464-8601)

起レーザーは広帯域な励起光である太陽光を励起源としてレーザーを直接発振するレーザーであり、従来技術の応用として考えられる、太陽光パネルで発電した電力でレーザーを発振させる方法と比較してシステムの小型・簡略化や、電力を介さないことによるエネルギー変換効率の向上が見込まれ、ロケットによる輸送コストの観点や放熱が難しい宇宙空間で利用する観点において、宇宙太陽光発電に適した技術であると考えている。

太陽光励起レーザー技術については、1960年代に太陽光による直接発振が報告されてから^{[1][2]}、Nd: YAG^[2]やNd, Cr: YAG^[3]、Nd, Ce: YAG^[4]など様々な固体材料に関して検討がなされてきた。中でもNd, Cr: YAGやNd, Ce: YAG媒質は、太陽光への増感剤として作用しレーザー発振に寄与するエネルギー移動をもたらすNd³⁺、Cr³⁺、Ce³⁺元素を共添加した媒質として知られている。Cr³⁺元素は500, 600 nm帯の波長、Ce³⁺元素は400~500 nm帯の波長を吸収し、Nd³⁺にエネルギー遷移し、1064 nmでのレーザー発振に寄与する^[5]。

上記の共添加媒質のほとんどはセラミック製であり、一方で共添加媒質の単結晶は太陽光励起レーザー研究の初期には育成・評価が行われたものの^[6]、現代の高品質な単結晶育成技術で作製された報告は著者らが調べた限りなされていない。単結晶媒質は結晶粒界がないことから耐熱性が高く、将来的な宇宙空間での応用可能性を鑑みて、我々は共添加太陽光励起レーザー媒質としての単結晶の応用可能性について検討を行うことにした。まずは単結晶媒質の特性を明らかにする目的で、太陽光励起レーザーの単結晶の育成および、後述するマイクロロッド型太陽光励起レーザーの発振評価系の構築を行った。

2 共添加太陽光励起単結晶レーザー媒質の育成・加工

2.1 共添加単結晶レーザー媒質の育成

太陽光励起レーザーに用いられる代表的な材質の一つであるNd, Cr: YAG単結晶^(①)および、増感剤としてさらにCe³⁺を添加したNd, Cr, Ce: YAG単結晶^(②)をCzochralski法(Cz法)にて育成した。

また、現有のNd, Cr: YAGセラミック^(③)を既に実績のある媒質として使用し、比較検討を

行った。いずれの媒質もYAGであり、1064 nmのレーザー発振が見込まれる。各媒質の組成を表1に示す。

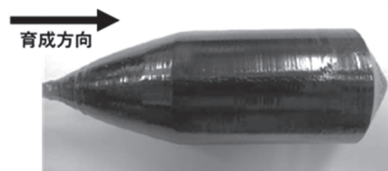


Fig.2 Image of Nd, Cr: YAG single-crystal (as-grown)

Table.1 Summary of the composition of the laser rods used in this study

	名称	組成 (mol%)
①	Nd, Cr: YAG 単結晶	Nd : 1.1 Cr : 0.4
②	Nd, Cr, Ce: YAG 単結晶	Nd : 0.7 Cr : 0.9 Ce : 0.2
③	Nd, Cr: YAG セラミック	Nd : 1.0 Cr : 0.4

2.2 超小型太陽光励起レーザー (μSPL)

太陽光励起レーザー媒質は数cm~10cm級のロッドを用いた報告が多いが、マイクロロッド型太陽光励起レーザー(μSPL)^[7]は1mm×1mm×10mmまたはφ1mm×10mmと小さく、集光パワー密度を高くでき効率よく発振可能な特徴があり、放熱性能の高さから宇宙太陽光発電用途に適している可能性がある。

図3に単結晶をμSPLに加工したものを示す。

①②それぞれの単結晶を加工し、μSPLの構造に合わせ、端面励起が可能なレーザー発振評価系を構築した。

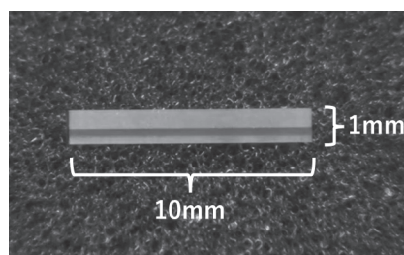
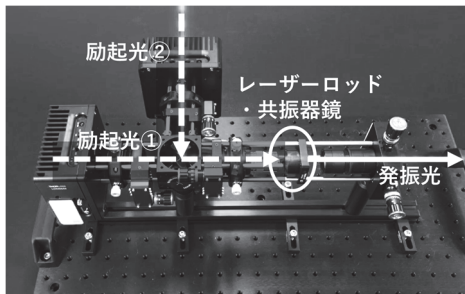


Fig.3 Image of Nd, Cr: YAG single-crystal processed into μSPL

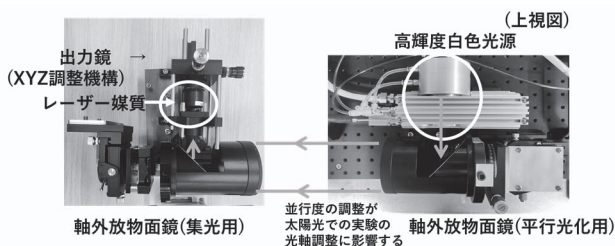
3 レーザー発振評価系の構築

図4に示す3種類の μ SPL用レーザー発振評価系を作製した。

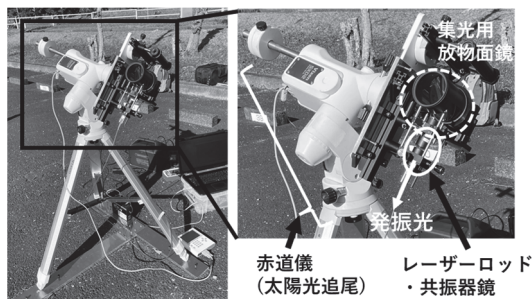
図4(a)はLDによる単色光励起を目的として作製したものであり、レーザーロッドに平行な励起光①の他、中央のハーフミラーを用いてレーザーロッドに垂直な励起光②を90°反射させ、励起光①を透過させることでレーザー光を2光源まで媒質に導入することが可能である。この系は基本的な発振確認のほか、外部ミラー



(a) For monochromatic light incidence



(b) For high brightness white light source incidence



(c) For solar tracking and incidence
Fig.4 Fabricated Laser oscillation and evaluation systems

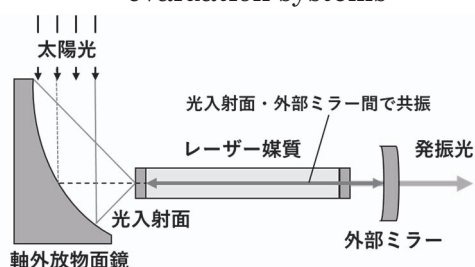


Fig.5 Schematic diagram of solar excited oscillation

の反射率を変化させることで得られる出力をもとに、レーザー媒質の吸収・散乱係数を見積もることも可能である^[8]。

図4(b)は点光源とみなせるプラズマ高輝度白色光源を軸外放物面鏡で平行光化することで太陽光入射を模擬し、再び軸外放物面鏡で集光・媒質に導入することで、屋内で安定した入力光強度・スペクトルで太陽光入射を模擬し、再現性の高い発振を期待できる。

図4(c)は屋外で太陽光を赤道儀で追尾しながら入射させ、レーザー発振・出力測定が可能である。集光鏡は直径76.2mmの軸外放物面鏡を採用しており、放物面鏡の入射口にフィルタを設置することで入射光強度(開口率)を変化させることができる。発振の模式図を図5に示す。軸外放物面鏡でレーザー媒質端面に太陽光を集光し、レーザー媒質の光入射面に施した端面反射加工部分と外部ミラー(反射率95%)間で光共振し、発振光を取り出す仕組みとなっている。いずれの系も基本的な発振構成は同様である。

4 発振特性測定・考察

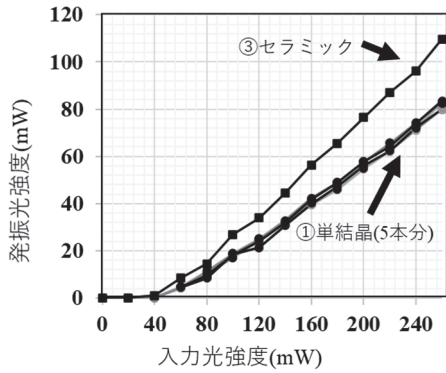
4.1 単色光励起発振測定

まず図4(a)の系を用い、LDを用いてNdの吸収波長である808nmの単色光を導入し、発振測定を行った。得られた出力を図6に示す。

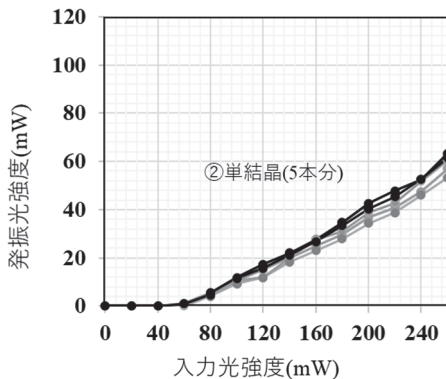
図6(a)は表1①Nd, Cr: YAG単結晶と③Nd, Cr: YAGセラミックの測定結果を、(b)は表1②Nd, Cr, Ce: YAG単結晶の測定結果を示している。単結晶①②からはそれぞれ5本のレーザーロッドを切り出し加工しており、図6(a)の①についてはいずれもほぼ同じ出力に、図6(b)の②については①と比較すると出力に多少の幅が見られるものの、 $\pm 5\%$ 程度に収まっている。

図6(a)(b)の結果より、波長808nmの単色光励起では発振閾値①55mW、②71mW、③49mWがスロープ効率①39%、②30%、③51%、最大出力①76mW、②54mW、③102mWが確認された。(①②の結果は各ロッドの出力の平均値)

以上の結果より、いずれの単結晶も単色光励起で発振が確認できたものの、③Nd, Cr: YAGセラミックの発振特性の方が良好な結果が得られた。



(a) ①Nd, Cr: YAG single-crystals and ③Nd, Cr: YAG ceramic



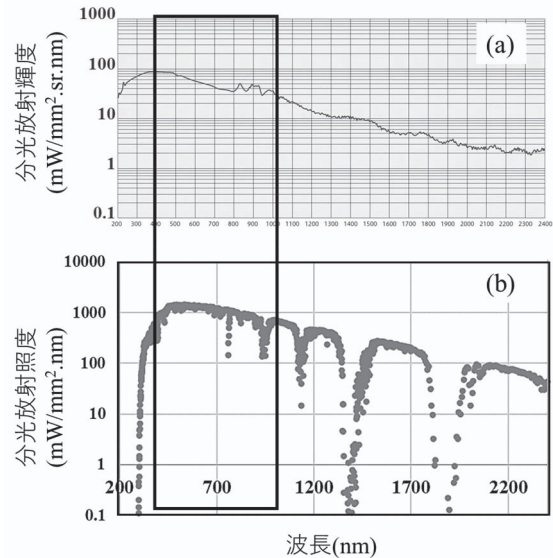
(b) ②Nd, Cr, Ce: YAG single-crystals

Fig.6 Experimentally obtained laser power characteristics (monochromatic light excited)

4.2 高輝度白色光源(模擬太陽光)励起発振測定

図 4(b)の系では模擬太陽光として高輝度白色光源である Energetiq Technology 社の LDLS EQ-77-QZ-S を採用している. 本光源の分光放射照度及び地表面で観測された太陽光スペクトル分布の比較を図 7 に示す(図 7 (a)は分光放射輝度, (b)は分光放射照度であることに注意). 図 7 の黒枠で囲まれた部分が特に本研究の媒質でのレーザー発振を評価する際に注目すべき 400 ~ 1000 nm 帯であり, スペクトル形状が概ね一致していることから, 模擬太陽光として妥当な光源であると考えられる.

集光点での光量は最大 1.9 W と測定され, AM1.5・晴天時の太陽光は直径 76.2 mm 軸外放物面鏡で集光した際に 4.6 W が得られているため, この系は太陽光のピークの約 41%の入力光量が屋内で安定して得られるものと見なせる. 模擬太陽光発振系の集光部分のプロファイルを測定したところ, 長径 0.4 mm × 短径 0.3 mm



(a) High brightness white light ^[9] (b) Solar (AM1.5) ^[10]

Fig.7 Spectral intensity distribution

の楕円状となり, 前述の系での太陽光集光時の集光直径が約 0.5 mm となることから, 太陽光と同程度のサイズに集光ができていくことがわかる.

この系を用いて模擬太陽光励起発振測定を行い, 表 1③ Nd, Cr: YAG セラミックの発振に成功し, 最大出力 4.5 mW, 発振閾値 1.1 W, スロープ効率 0.6%が得られた. 一方, 単結晶は①②いずれも発振を確認することができなかった. 原因として, 発振閾値を超えられなかったこと, 光軸調整の難しさなどが挙げられる. 改善案としては白色光源のさらなる高輝度化, 多軸調整機構の導入などが考えられる.

4.3 太陽光励起発振測定

図 4(c)の系を用いて太陽光入射測定を行った. 測定結果を表 2 に示す. 表 1①②③すべての媒質で太陽光集光励起によるレーザー発振に成功した. 共添加 YAG 単結晶の太陽光励起発振に関しては著者らが調べた限り, 今回が初の報告となる.

測定結果に関して, 発振閾値に関しては①②③でそれほど大きな差は見られなかった. 特に単結晶媒質である①②に関して比較を行うと, ②の方が①より発振閾値が平均して 10%程度低い値となっており, Ce 添加によるレーザー発振に寄与するスペクトル吸収の増加が起きている可能性が示唆される. しかし発振閾値・スロープ効率・出力いずれの指標についても, 4.1

Table.2 Experimentally obtained laser power characteristics (Solar excited)

試料	測定日	時刻	発振閾値 (W)	スロープ効率 (%)	最大出力 (mW)
①	2023/1/10	13:15	3.50	0.35	10.0
①	2023/1/11	9:45	3.50	0.66	7.6
①	2023/1/11	12:06	3.64	0.87	12.1
②	2023/1/10	14:00	3.40	0.32	3.6
②	2023/1/11	10:00	3.12	0.57	9.2
②	2023/1/11	12:33	3.30	0.35	5.9
③	2022/12/12	9:37	2.75	0.88	12.3
③	2022/12/14	12:21	3.33	1.50	18.5
③	2023/1/10	12:50	3.19	1.30	9.5
③	2023/1/11	9:39	3.30	0.82	10.0
③	2023/1/11	11:57	3.21	1.15	21.0

① Nd, Cr: YAG単結晶

...Nd: 1.1%, Cr: 0.4%

② Nd, Cr, Ce: YAG単結晶

...Nd: 0.7%, Cr: 0.9%, Ce:0.2%

③ Nd, Cr: YAGセラミック

...Nd: 1.0%, Cr: 0.4%

項の単色光励起の結果と同様、単結晶媒質の①②よりセラミック媒質の③の方が良好な特性が得られる結果となった。単結晶の出力特性がセラミックより低くなっている原因として、単結晶の組成・屈折率に何らかの問題が生じている可能性が考えられる。現在、分光吸収特性をもとに単結晶及びセラミックの屈折率に関する分析を進めている。分析の中で、Crを添加した単結晶において、Nd, Cr: YAG セラミックと吸収ピークが異なり、 Cr^{4+} に近いピークが現れている可能性があることから、本来 Cr^{3+} となるべきところが何らかの原因で酸化され、一部 Cr^{4+} に変化している可能性が示唆されている。

また、同じ媒質でも特性取得毎に発振閾値・スロープ効率が異なっていた。原因としては、同一の太陽光強度でも直達日射・散乱日射の割合が異なっていること、気温変化や風などの影響で共振器の調整状態が変わってしまうこと、赤道儀の追尾誤差などが可能性として考えられる。

5 まとめ・今後の方針

宇宙太陽光発電への応用可能性を期待し、共添加単結晶レーザー媒質の育成と、 μ SPL レーザー発振評価系として構築した単色光励起・屋内用模擬太陽光白色励起・太陽光追尾励起系による評価実験を行った結果、単色光・太陽光励起で単結晶媒質の発振に成功した。一方、いずれの発振評価系でもセラミックの効率を超え

ることができず、単結晶の特性低下の原因に関して究明を行っていく必要がある。

今後は共添加単結晶媒質に関する特性劣化要因の分析のほか、共添加物質による太陽光励起レーザー内部でのエネルギー移動効率の解明と組成の最適化を行い、さらに単結晶レーザー媒質の熱特性・耐熱性に関する検討を進める。 μ SPL の形状・構造についても改善の余地があり、例えば μ SPL のロッド長を現在の1 cm→2 cm に変更することでエネルギー変換効率向上が期待できることが数値解析を通じて示唆されており^[1]、媒質形状の最適化についても合わせて取り組む。また構築した発振評価系に関しても白色光源のさらなる高輝度化、調整機構の自動化などの改良を行う予定である。

参考文献

- [1] Kiss, Z.J., Lewis, H.R., and Duncan, R.C., Appl. Phys. Lett. 2(5), 93-94 (1963).
- [2] Young, C.G., Appl. Opt. 5(6), 993-997 (1966).
- [3] Yabe, T., Ohkubo, T., Uchida, S., Yoshida, K., Nakatsuka, M., Funatsu, T., Mabuti, A., Oyama, A., Nakagawa, K., Oishi, T., Daito, K., Behgol, B., Nakayama, Y., Yoshida, M., Motokoshi, S., Sato, Y. and Baasandash, C., Appl. Phys. Lett. 90(26), 261120 (2007).
- [4] Vistas, C., Liang, D., Almeida, J., Tibúrcio, B., Garcia, D., Catela, M., Costa, H. and Guillot, E. J., Photonics. Energy 11, 018001 (2021).

- [5] Fujioka, K., Nakatsuka, M., Saiki, T., Motokoshi, S., Imasaki, K., Fujimoto, Y., and Fujita, H., The Review of Laser Engineering 38(3), 207-212 (2010).
- [6] Kiss, Z. J., and Duncan. R. C., Applied Physics Lett 5(10), 200-202 (1964).
- [7] Ito, H., Hasegawa, K., Mizuno, S., Takeda, Y. and Motohiro, T., "Advances in Optics: Reviews" Vol.5, 417-471(2021).
- [8] Findlay, D., and R. A. Clay., Physics Letters 20(3), 277-278(1966).
- [9] HAMAMATSU PHOTONICS LDLS EQ-77-QZ-S
<https://www.hamamatsu.com/jp/ja/product/light-and-radiation-sources/Laser-Driven-Light-Source-LDLS/EQ-77-QZ-S.html>
- [10] National Renewable Energy Laboratory
“Reference Air Mass 1.5 Spectra”
<https://www.nrel.gov/grid/solar-resource/spectra-am1.5.html>
- [11] Motohiro, T., and Hasegawa, K., Optik 284, 170942(2023).