

106 J × 10 Hz 出力低温ヘリウムガス冷却マルチディスク Yb:YAG レーザー増幅器における熱波面歪みの解析

森田 宇亮, 関根 尊史, 村松 侑輝, 幡野 佑真, 玉置 善紀,
池谷 有貴, 加藤 義則, 川嶋 利幸

浜松ホトニクス株式会社 中央研究所 産業開発研究センター (〒 431-1202 静岡県浜松市西区呉松町 1820)

Demonstration of 106 J, 10 Hz Operation and Analysis of the Thermal Characteristics of a Cryogenic Helium Gas-Cooled LD-Pumped Yb:YAG Ceramics Laser Amplifier

Takaaki MORITA, Takashi SEKINE, Yuki MURAMATSU, Yuma HATANO, Yoshinori TAMAOKI,
Yuki IKEYA, Yoshinori KATO, and Toshiyuki KAWASHIMA

Industries Development Laboratory, Central Research Laboratory, Hamamatsu Photonics K. K.,
1820 Kurematsucho, Nishi-ku, Hamamatsu, Shizuoka 431-1202

(Received April 10, 2023)

We demonstrated a 106 J, 10 Hz laser performance by an LD-pumped Yb:YAG ceramic laser with cryogenic helium gas cooling. To evaluate the laser amplifier's performance with a helium gas cooling scheme, we are developing a 10 Hz operation with 250 J output. In our 106 J, 10 Hz output experiment, each laser amplifier was cooled with a helium gas mass-flow rate of 87 g/s for several kilowatts of pump power. As a result, a focusing property was affected by thermal wavefront distortion. We evaluated the temperature distribution of the laser medium to the flow rate of the cooling gas from experimental and thermal calculations.

Key Words: Diode-Pumped Solid State Laser, High energy laser, Yb:YAG ceramics, Helium gas cooling

1. はじめに

数十ジュールからキロジュール超級の高いパルスエネルギーを有するレーザーは、レーザー核融合研究¹⁻³⁾やレーザー衝撃圧縮による高エネルギー密度科学⁴⁾、レーザー粒子加速による粒子線生成やその応用⁵⁾など様々な研究分野で、その重要性が高まっている。さらに、産業分野への応用として金属材料への応力付与を行うレーザーピーニング法⁶⁾やレーザー光の高い自由度と機械学習を組み合わせた次世代の加工技術⁷⁾での利用も期待されている。高エネルギーレーザーの実用化に向けて、100ジュール超級の高いパルスエネルギーを有し、数Hz以上の高い繰り返し周波数で動作するレーザーとして半導体レーザー(Laser diode: LD)を励起源に用いた固体レーザー(Diode-Pumped Solid State Laser: DPSSL)による高平均パワーレーザーの研究開発が行われている⁸⁻¹²⁾。2016年には、英国とチェコのグループにより105 J, 10 Hzの平均パワー1 kWを越えるレーザーパルス出力が世界で初めて実証され⁹⁾、2020年にはそれを上回る146 J, 10 Hzの出力が報告された¹⁰⁾。我々の研究グループにおいても、2021年にNEDOプロジェクト^{†1)}において低温ヘリウ

ムガス冷却・高出力LD励起Yb:YAGセラミクスレーザーを開発し、DPSSLとして1パルスあたりのエネルギーとして世界最高の253 J, 0.2 Hzの出力を達成した¹²⁾。将来のレーザー核融合用ドライバへのマイルストーンである1 kJ, 10 Hzのレーザーパルス出力の実現に向けて、10 Hz動作による250 J出力の要素技術研究を進めている。

100 J超級の高出力レーザーでは、主に板状のレーザー媒質を複数用いたマルチディスク方式が採用されている。強励起によってレーザー媒質で発生する熱をディスクの大面积を活かし、効率的な冷却ができる利点がある。その一方で、レーザー媒質の面方向の温度分布によって生じる熱波面歪みの抑制が課題となっている。我々は、レーザー媒質にYb:YAGセラミクスを用いたマルチディスク方式にて、低温ヘリウムガス冷却による高効率冷却と熱波面歪みの抑制に向けて増幅器の熱特性を評価した。

2. LD励起低温Yb:YAGセラミクスレーザーの開発

本節では、250 J, 10 Hz出力を目指し研究開発を進めるレーザーの概要を記す。本レーザーシステムは、発振器

^{†1)} NEDO「高輝度・高効率次世代レーザー技術開発」: https://www.nedo.go.jp/activities/ZZJP_100124.html

を含むフロントエンドと3台の主増幅器から構成される¹²⁻¹⁴⁾。主増幅器は、レーザーエネルギーを100 J級へ増幅する主増幅器1および2と250 J超級へ増幅する主増幅器3の主に2種類の低温ヘリウムガス冷却のマルチディスク増幅器を用いた。主増幅器のレーザー媒質に用いたYb:YAGセラミクスは、Nd系の他の媒質に比べストークス効率や飽和フルエンスが高く、蛍光寿命が長いメリットから、レーザーシステムの小型化や低コスト化を可能とする。主増幅器1および2に用いたレーザーヘッドの概略図をFig. 1に示す。150 Kの低温ヘリウムガスにてYb:YAGセラミクスを冷却するため、冷却チャンバーを真空チャンバーで断熱する構造とした。励起源には、4基のLDモジュールを用い、1基あたり最大エネルギー約110 J(パルス幅1 ms)、合計440 Jで上下斜め4方向から励起した。レーザー媒質には、円形の外径 $\Phi 120$ mm厚さ10 mmで、側面にCr:YAGセラミクスがコンポジット接合されたYb:YAGセラミクス(神島化学工業株式会社製)を増幅器1台当たり6枚用いた。ヘリウムガス循環装置は、7 kW以上の冷却能力を有し、冷却されたヘリウムガスを主増幅器1および2に分岐して供給する。主増幅器3は、LDモジュールを8基用い、上下斜め方向の8方向から主増幅器1の2倍以上となる最大励起エネルギー1 kJで励起が可能である。レーザー媒質には、外形が四角形120 mm、厚さ10 mmで側面にCr:YAGセラミクスがコンポジット接合されたYb:YAGセラミクスを10枚用いた。主増幅器1および2とは別にヘリウムガス循環装置を用いて主増幅器3を冷却する構成とすることで、励起パワー10 kWにおいても十分な冷却が可

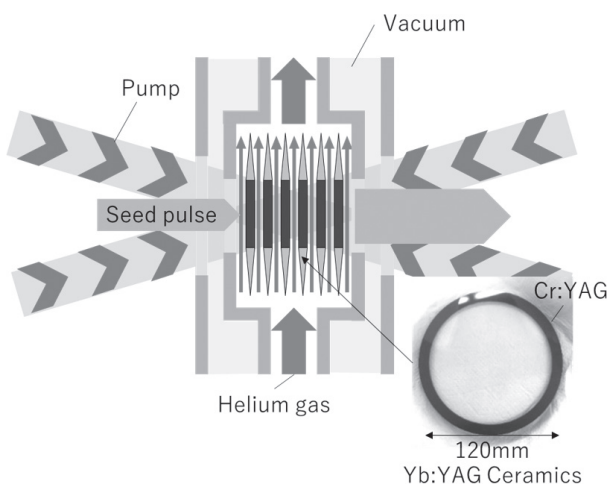


Fig. 1 Schematic of laser head in main amplifier 1 and 2.

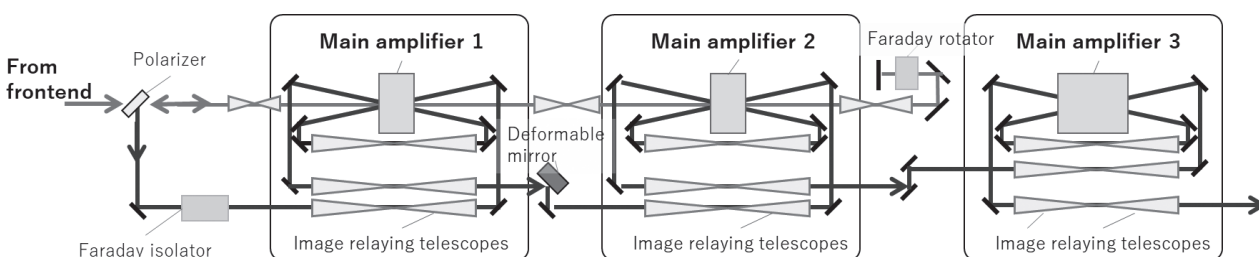


Fig. 2 Experimental setup for 100 J, 10 Hz demonstration.

能となる設計とした。

3. 100 J, 10 Hz 出力実験

3.1 実験セットアップ

本主増幅器における蓄積エネルギーの抽出実験を行った。実験時の増幅構成をFig. 2に示す。フロントエンドからの四角形、約30 mm×30 mmの出力光を主増幅器1および2の2台のレーザーヘッドを伝搬後、45度ファラデーローテーターと0度反射ミラーによる2パス増幅を行った。その後、拡大光学系により四角形の約60 mm×60 mmのビームに拡大し、主増幅器1において入射角度を変えた角度マルチパス方式による2パス増幅を行い、主増幅器2についても同様の2パス増幅を行った。角度入射による2パスでは、波面歪みの補償のため、空間フィルタを兼ねた像転送系を組み、主増幅器1および2の間に可変形鏡を設置した。主増幅器3では光学素子の損傷を防ぐため、フルエンスの上限を5.0 J/cm²と設定し、四角形の約72 mm×72 mmのビームサイズに拡大し、主増幅器2から主増幅器3へレーザーヘッド間を像転送し入射した。主増幅器3についても角度入射による2パスと像転送を行った。

各増幅器の実験条件を順に記す。主増幅器1および2のYb:YAGセラミクスの冷却条件は、温度150 Kの低温ヘリウムガスを合計循環量として質量流量84 g/s、圧力0.5 MPa(各増幅器への質量流量約42 g/s)とした。繰り返し周波数10 Hz動作における主増幅器1の励起パワー3.5 kW、主増幅器2の励起パワー3.8 kWに対し熱平衡状態が確認され、この時のそれぞれの主増幅器の小信号利得(Small signal gain: SSG)は、主増幅器1では、励起エネルギー355 J時にSSG2.8倍、主増幅器2では、励起エネルギー380 J時にSSG3.2倍であった。フロントエンドから主増幅器1への入力エネルギー43 mJに対し、主増幅器1および2での増幅後の出力エネルギーは23.2 Jであった。主増幅器3では、低温ヘリウムガスの温度150 K、循環質量流量87 g/s、圧力0.5 MPaで冷却を行い、励起エネルギー644 Jで励起した。この時のSSGは、4.4倍であった。この実験条件におけるエネルギー抽出実験を行った。

3.2 主増幅器3のエネルギー抽出実験

主増幅器3における2パス増幅時の入出力特性をFig. 3に示す。入力エネルギー23.2 Jの時に、出力エネルギーとして平均106.1 J、最大出力111 J、繰り返し周波数

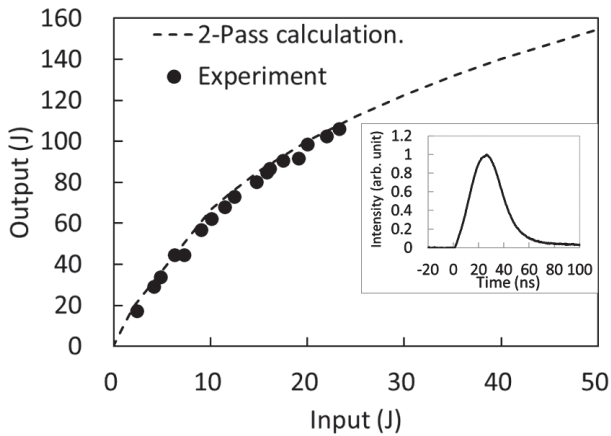


Fig. 3 Characteristic of energy extraction in main amplifier 3 at double-pass and temporal pulse shape at a 106 J output.

10 Hz を得た。増幅実験の結果は、主増幅器 3 の SSG4.4 倍を用いたフランツ・ノドヴィックの増幅計算の値と良い一致を示した。106 J 出力時の主増幅器 3 の光-光変換効率は、12.9%であった。また、増幅後のパルス波形は、入力波形の半値全幅 30 ns のガウス波形に対し、半値全幅 29.1 ns の良好なガウス波形を確認した (Fig. 3)。Fig. 4 に約 30 分間の出力安定性の結果を示す。入力エネルギー 22.0 J に対する出力エネルギーは、平均 101.6 J、標準偏差は 2.5%であった。この出力が不安定な原因の 1 つは、主増幅器 3 に供給される冷却ガスの温度揺らぎに起因する。ガス冷却器の温度安定性のフィードバック制御が不十分であり、約 7 分の周期で約 1.6% の温度揺らぎが発生し、増幅率に影響を与えた。

Fig. 5 に 106 J 出力時の近視野像および遠視野像を示す。近視野像におけるビームサイズは、72 mm × 72 mm であり、Yb:YAG セラミクス上のフルエンスは約 2.0 J/cm²であった。遠視野像は、焦点距離 1700 mm のレンズで集光した際のパターンで、回折限界サイズの 5 倍に当たる X 軸方向 300 μm、Y 軸方向 300 μm であった。この集光特性の劣化原因となる波面歪みは、レーザーシステム内の光学素子などによる収差に加え、主に各増幅器において後述の 4 章で論ずるレーザーヘッドの熱分布に

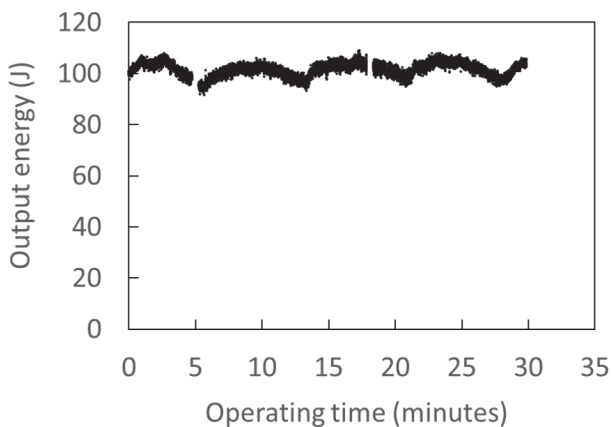


Fig. 4 Stability of output energy at 10 Hz operation. (about 17000 shots)

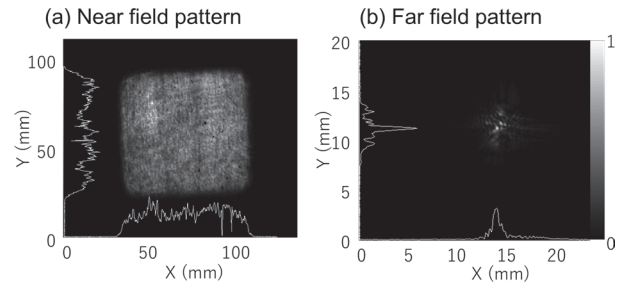


Fig. 5 Beam profile with 106 J, 10 Hz output. (a) Near field pattern and (b) far field pattern.

よる熱波面歪みに起因すると考えられる。本 100 J, 10 Hz 出力の実験では、主増幅器 1 および 2 で合計 7.3 kW の励起パワーに対し、ヘリウムガスの質量流量の合計 84 g/s で冷却し、主増幅器 3 で 6.4 kW の励起パワーに対し 87 g/s のヘリウム循環量で冷却した。低温ヘリウムガス冷却の Yb:YAG レーザーにて 100 J, 10 Hz 以上の出力を達成した英国とチェコのグループは、4 kW から 5 kW 程度の励起パワーに対し、質量流量 180 g/s のヘリウムガスを循環させたことで非常に良い集光特性が報告されている^{9,15)}。この点からレーザー媒質の面内の温度分布の均一化のためには、5 kW クラスの励起パワーに対し少なくとも 100 g/s 以上のヘリウムガスの質量流量が必要であり、我々の実験条件におけるガス循環量では不十分であることが分かった。そこで、主増幅器のヘリウムガスの冷却条件によるレーザー媒質の温度分布について実験と熱シミュレーションから評価を行った。

4. 主増幅器 1 における温度分布の評価

我々の開発したレーザーヘッドは、Fig. 1 に示すように低温ヘリウムガスを下から上へ流す構造であるため、ヘッド内の Yb:YAG は厚さ方向だけでなく、上下方向に温度分布が発生し、それに応じた熱波面歪みが生じる。主増幅器 1 において励起パワー 4.4 kW、冷却条件として温度 150 K、質量流量 43 g/s、圧力 0.5 MPa で動作させた時の特性試験の結果を基に熱シミュレーションを行い、ヘリウムガスの循環量と Yb:YAG の温度分布の評価を行った。上記条件における実験では、Yb:YAG の中心温度は、誘導放出断面積の温度依存性¹⁶⁾により小信号利得の実験値から 167 K と試算された。シャックハルトマン波面センサ (HASO4, Imagine Optic) で計測した熱による波面歪み量は、Peak to valley 値で 3.8 μm であった。その位相変化量から熱光学係数 dn/dt ¹⁷⁾ を用い計測範囲の温度差を 5.4 K と求めた。Fig. 6 に熱シミュレーションによる YAG セラミクスの温度分布の計算結果を示す。熱シミュレーションでは、主増幅器 1 の発熱量を励起パワー 4.4 kW を基に設定し、Yb:YAG の発熱量はストークス効率 9% を考慮し約 0.4 kW (6 枚の合計) とした。クラッド部の Cr:YAG の発熱量は、幾何学的な配置から Yb:YAG の蛍光の約 50% が Cr:YAG に到達し、そのうち 60% の約 1.3 kW が発熱したと仮定し、熱シミュレーションを行った。Fig. 6(a) に示した実際の実験条件の質量流量 43 g/s

(a) Mass-flow rate: 43g/s

(b) Mass-flow rate: 95 g/s

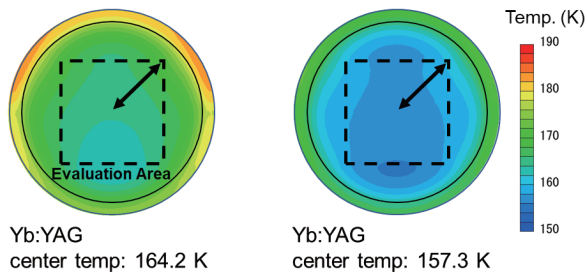


Fig. 6 Thermal calculation result in main amplifier 1. Temperature distribution of laser medium (a) at a cooling gas mass-flow rate of 43 g/s and (b) mass-flow rate 95 g/s.

における計算結果では、Yb:YAGの中心温度は、164.2 Kであり、外周部のCr:YAGの発熱が顕著な計算結果となった。透過するビームサイズ四角60 mm × 60 mmの計測領域(Fig. 6(a)の点線内)において、媒質中心と温度の高い上部の角の位置(Fig. 6(a)の矢印の間)の温度差は、6.4 Kであり、実験値と近い計算結果が得られた。一方、Fig. 6(b)に示した質量流量を上昇させ95 g/sとした場合では、Yb:YAGの中心温度は157.3 KとなりYb:YAG全体が冷却され、さらにFig. 6(b)の矢印の間の温度差も3.3 Kと温度分布も約半分に軽減できることを確認した。この熱シミュレーションの結果によりヘリウム循環量を上げることで効果的な冷却が可能であることが確認された。また、ヘリウムガス循環量に対する計測領域の位相変化量の実験結果と熱シミュレーションの結果をFig. 7に示す。位相変化量は、計測領域の中心と上部の角の温度差から熱光学係数を用い試算した。熱シミュレーションを通して、冷却ガスの循環量の上昇は、熱波面歪みやその原因となる温度分布の緩和に一定程度の効果があることが分かった。ただし、その減少量は僅かに飽和傾向を示す結果となった。この飽和傾向は、クラッド部の発熱の影響と考えられる。そのため、100 J、10 Hz級のレーザーヘッドにおける熱波面歪みのさらなる改善のためには、クラッド層の発熱を抑制することが重要であることが分かった。

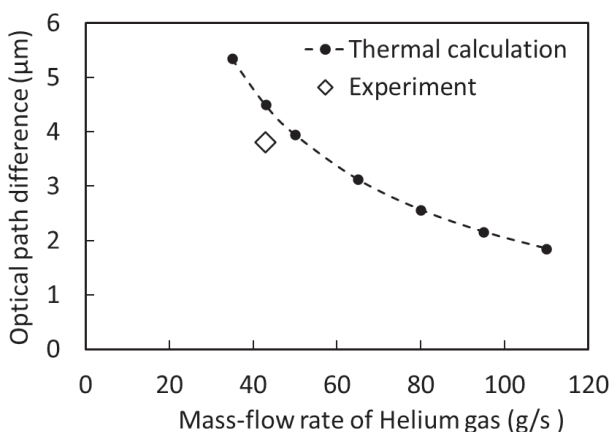


Fig. 7 Maximum value of optical path difference in evaluation area to mass-flow rate of helium gas.

5. まとめ

本稿では、最大レーザーパルス出力250 J、10 Hzを目標としたマルチディスク方式の低温ヘリウムガス冷却・高出力LD励起Yb:YAGセラミクスレーザーの研究開発において、繰り返し動作10 Hzにおける100 J出力実験について報告した。主増幅器3において、励起エネルギー644 J時に、入力エネルギー23.2 Jにて、106 J、10 Hz出力を確認した。回折限界の5倍程度の集光特性に対し、冷却ヘリウムガスの循環量を2倍に増加させることで、レーザー媒質の熱による波面歪みを約半分に低減が可能であることを確認した。

今後、低温ヘリウムガスの循環量を増やす改良を行うことで冷却性能の向上と熱波面歪みの軽減を図り、また主増幅器2および3の間に可変形鏡を増設して波面補正性能を高める対策を行う。その後、励起エネルギーを上昇させ250 J、10 Hzの出力試験を行う予定である。

謝辞

本レーザー開発において栗田隆史氏、倉田将輝氏、竹内康樹氏、井口琢斗氏(浜松ホトニクス株式会社)の多大な貢献に深い感謝の意を表します。

参考文献

- 1) S. L. Pape, L. F. B. Hopkins, L. Divol, A. Pak, E. L. Dewald, S. Bhandarkar, L. R. Benedetti, T. Bunn, J. Biener, J. Crippen, *et al.*: *Phys. Rev. Lett.* **120** (2018) 245003.
- 2) S. Fujioka, Y. Arikawa, S. Kojima, T. Johzaki, H. Nagatomo, H. Sawada, S. H. Lee, T. Shiroto, N. Ohnishi, A. Morace, *et al.*: *Phys. Plasmas* **23** (2016) 056308.
- 3) Y. Kitagawa, Y. Mori, O. Komeda, K. Ishii, R. Hanayama, K. Fujita, S. Okihara, T. Sekine, N. Satoh, T. Kurita, *et al.*: *Phys. Rev. Lett.* **114** (2015) 195002.
- 4) Y. Inubushi, T. Yabuuchi, T. Togashi, K. Sueda, K. Miyamishi, Y. Tange, N. Ozaki, T. Matsuoka, R. Kodama, T. Osaka, *et al.*: *Appl. Sci.* **10** (2020) 2224.
- 5) S. Steinke, J. V. Tilborg, C. Benedetti, C. G. R. Geddes, C. B. Schroeder, J. Daniels, K. K. Swanson, A. J. Gonsalves, K. Nakamura, N. H. Matlis, *et al.*: *Nature* **530** (2016) 190.
- 6) Y. Sano, N. Mukai, K. Okazaki, and M. Obata: *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. B* **121** (1997) 432.
- 7) Y. Kobayashi, K. Bamoto, K. Shimahara, T. Endo, H. Tamaru, K. Sakaue, H. Sakurai, and S. Tani: *Rev. Laser Eng.* **50** (2022) 683 (in Japanese).
小林 洋平, 場本 圭一, 島原 光平, 遠藤 翼, 田丸 博晴, 坂上 和之, 櫻井 浩之, 谷 峻太郎: *レーザー研究* **50** (2022) 683.
- 8) J. Ogino, S. Tokita, S. Kitajima, H. Yoshida, Z. Li, S. Motokoshi, N. Morio, K. Tsubakimoto, K. Fujioka, R. Kodama, and J. Kawanaka: *Opt. Cont.* **1** (2022) 1270.
- 9) P. Mason, M. Divoky, K. Ertel, J. Pilar, T. Butcher, M. Hanus, S. Banerjee, J. Phillips, J. Smith, M. D. Vido, *et al.*: *Optica* **4** (2017) 438.
- 10) M. Divoky, J. Pilar, M. Hanus, P. Navratil, O. Denk, P. Severova, P. Mason, T. Butcher, S. Banerjee, M. D. Vido, *et al.*: *Opt. Lett.* **46** (2021) 5771.
- 11) C. L. Haufnter, A. Bayramian, S. Betts, R. Bopp, S. Buck, J. Cupal, M. Drouin, A. Erlandson, J. Horáček, J. Homer, *et al.*: *Proc. of SPIE* **10241** (2017)1024102-1.
- 12) T. Sekine, T. Kurita, Y. Hatano, Y. Muramatsu, M. Kurata, T. Morita, T. Watari, T. Iguchi, R. Yoshimura, *et al.*: *Opt. Express* **30**

- (2022) 44385.
- 13) T. Sekine, M. Kurata, Y. Hatano, Y. Muramatsu, T. Morita, Y. Kabeya, Y. Takeuchi, T. Iguchi, K. Kawai, T. Kurita, *et al.*: Reports on The 533rd Topical Meeting of The laser Society of Japan **RTM-19-13** (2019) 41 (in Japanese).
関根 尊史, 倉田 将輝, 幡野 佑真, 村松 侑輝, 森田 宇亮, 壁谷 悠希, 竹内 康樹, 井口 琢斗, 川合 一希, 栗田 隆史, *et al.*: レーザー学会第 533 回研究会報告 **RTM-19-13** (2019) 41.
- 14) T. Sekine, T. Kurita, M. Kurata, T. Morita, Y. Hatano, Y. Muramatsu, T. Watari, Y. Kabeya, T. Iguchi, R. Yoshimura, *et al.*: High Energy Density Phys. **36** (2020) 100800.
- 15) S. Banerjee, P. Mason, J. Phillips, J. Smith, T. Butcher, J. Spear, M. D. Vido, G. Quinn, D. Clarke, K. Ertel *et al.*: High Power Laser Sci. Eng. **8** (2020) e20.
- 16) S. Tokita: Rev. Laser Eng. **36** (2008) 538 (in Japanese).
時田 茂樹: レーザー研究 **36** (2008) 538.
- 17) R. Yasuhara, H. Furuse, A. Iwamoto, J. Kawanaka, and T. Yanagitani: Opt. Express **20** (2012) 29531.