

# 高速レーザー加工のための 高出力繰り返しパルスレーザーの開発

大阪大学 レーザー科学研究所  
助教 荻野 純平

(2020年度 奨励研究助成 (若手研究者枠) AF-2020242-C2)

キーワード：高出力レーザー，低温冷却 Yb:YAG レーザー，レーザー加工

## 1. 研究の目的と背景

日本における社会資本は、高度経済成長期に集中的に建設され、特に道路、トンネル、鉄道などの社会インフラについては、今後急速に老朽化が進むことが懸念されている。今後 20 年間で、建設後 50 年以上を経過する社会インフラの割合が加速度的に増加する見込みである。老朽化を原因とした事故は、世界各国で多発しており、橋の崩落、トンネルの天井落下、鉄道線路の破断など人命にかかわるようなものも多くみられる。老朽化する社会インフラの保守・メンテナンスには、莫大な費用が掛かることが試算されており、国土交通省の調査によると世界規模で 200 兆円、日本国内でも 5 兆円以上に上る。そのため、今後は、社会インフラの老朽化に対する、低コストで持続的かつ戦略的な、保守・メンテが求められている。老朽化する社会インフラにおいて、特に老朽化の原因となる部分は、金属構造材であることが多い。鉄筋コンクリート内の鉄筋、水道配管、鉄道・レール、橋梁はそのものが金属構造材である。このため、金属の老朽化に対する耐久すなわちは長寿命化を図ることが社会インフラの抱える課題を解決する一つの方法である。本研究では、金属構造材を長寿命化する方法として「レーザーピーニング」に着目している。金属の長寿命化とは、金属の疲労割れに対する耐力「疲労強度」を高めることであり、金属の疲労割れは、荷重が繰り返し負荷されることにより、材料表面に割れが生じる現象である。「レーザーピーニング」は、パルスレーザーにより金属表面にプラズマを発生させ、その圧力で部材に衝撃波を生じさせ残留応力を与える手法である。レーザーピーニングにより、付加できる残留応力は、圧縮応力であるためその硬度を高め疲労強度を高めることが可能である。金属の疲労強度を高める手法としては、無数の粒子を金属表面に衝突させ、表面に塑性変形を形成し、部材内部に圧縮残留応力を発生させる「ショットピーニング」と呼ばれる手法もある。この手法は、加工速度が速い一方、騒音・粉塵などの環境問題や処理可能な材料が限られるなどの問題や加工物の形状に制限があり、社会インフラへの応用は難しい。一方、レーザーピーニングは、騒音・粉塵は発生せず、レーザーのパラメータを調整することで、様々な材料の加工が可能であり、レーザーによる加工であるため加工物の形状の制限が緩いという特徴を持つ。また、発生する圧力は、ショットピーニングよりはるかに高い、数 GPa 以上であ

り、これにより数百  $\mu\text{m}$ ~mm オーダーの領域に残留応力を付加可能である。ショットピーニングが、表面の変形により応力を付加するのに対し、レーザーピーニングは、プラズマによる衝撃波により応力を付与するため、表面の状態の変化も少なく後処理にかかるコストも少なく済むという特徴もある。このように、レーザーピーニングは、金属材料の疲労強度高める能力や環境性能、局所処理の操作性なども優れており、古くから研究されている[1-4]。近年では、様々な材料で疲労強度の向上が見られることが分かっている[4-8]。しかしながら、その応用例は、航空機産業や、原子力産業などの付加価値の高いものが主流であり、社会に広く実用化されるには至っていないのが現状である。これは、レーザーピーニングの初期コストが高いことと、加工速度がショットピーニングと比較して遅いことが大きな問題である。加工速度が遅い原因は、ショットピーニングに使用されるレーザーのスペックにある。プラズマを励起するためには、レーザー強度は  $10^9 \text{ W/cm}^2$  以上が必要であり、産業応用において十分なスループットを確保しようとするレーザーのエネルギーとしては必然的に J クラスのレーザーが必要となる。レーザーピーニングにおける加工速度は、レーザーの繰り返し周波数に依存するが、市販されているこのクラスのレーザーの繰り返し周波数は、高いものでも 10 Hz 程度であり、産業応用を考えた場合では十分ではない。レーザーピーニングのみならず、J 級で高繰り返し、簡便なレーザーが実現すれば、様々なレーザー加工において、大面積を高速に処理可能であり産業の発展に大きく貢献できると予想される。

本研究では、パルスエネルギーを  $>1\text{J}$ 、繰り返し周波数を 100 Hz を目標とし、産業応用での利用が容易なロッド型レーザーにおいて、将来的にさらなる高出力化を望める固体レーザーの新技术の確立を目指し、低温 Yb:YAG を用いた、高効率かつコンパクトなレーザーシステムの開発を行った。

## 2. 実験方法

### 2.1 概要

レーザーのパルスエネルギーの限界は一般に寄生発振・ASE (増幅自然放出) と熱により決まる。励起により生じる熱を排熱する手法は様々あるが、エネルギーが J 級となると必然的にレーザーの口径が大きくなり、一般的にデ

ディスク型のレーザー方式となる場合が多い。ディスク型レーザーにおける寄生発振は、径方向に発生するため、利得媒質の形状を工夫するか、蛍光を吸収する媒質(クラッド)を使用することで寄生発振を抑制することが一般的である。クラッドとしては、一般的に界面での反射を防ぐために屈折率マッチの取れた固体や液体が用いられる。Yb:YAG が利得媒質の場合、Cr:YAG クラッドを接合したコンポジット媒質が用いられるが、これは製造にコストがかかる上、Cr:YAG で発生した熱が Yb:YAG を温めてしまうという欠点がある。この問題は、より大口径のディスクとすることで、励起領域とクラッド間の距離を離すことで、ある程度抑制可能であるが、コンパクトなレーザー設計を目指すという観点や、利得媒質の製造限界を考慮するとスケリングの限界を決める要因となることから重要な設計事項と言える。寄生発振の抑制については種々様々であり、中国の Tinghao Liu らのグループでは、利得媒質とエッジクラッドの間にすき間を作り、そのすき間に水を流すことでエッジクラッドから利得媒質への熱流を減少させている手法を用いている[9]。また、エッジクラッドを用いずに利得媒質の形状を変化させ蛍光をディスク外部に放出する工夫を施したレーザーも存在する[10, 11]。また、ディスク形状は、排熱能力は高いが、波面制御の難しさと、吸収長を長くできないため、励起システムが複雑になるという問題がある。そこで本研究では、増幅方式をロッド型とし、利得媒質を低温冷却することで熱的現象を低減し、インクを用いた超薄型クラッドを用い、寄生発振を抑制する新しいタイプの低温 Yb:YAG 増幅器を提案した(図 1)。このクラッドの外側から大きな面積で直接伝導冷却する

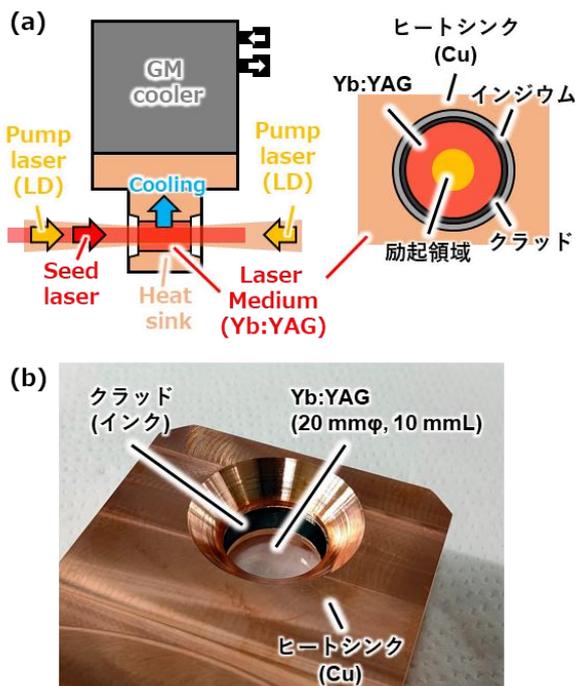


図 1 本研究で構築した低温 Yb:YAG 増幅器の (a) 構造図、(b) 写真

ことで吸収層の熱を効率的に排熱し、高い蓄積エネルギーと温度上昇の抑制を実現する手法である。

## 2・2 実験装置

図 2 に、本研究で構築した、J 級、100 Hz のレーザーシステムの概要図を示す。信号光源は、中心波長 1029.5 nm、最大パワー 5 mW の CW 単一縦モードファイバ発振器 (Koheras ADJUSTIK, NKT Photonics) を用いた。この出力を、EO パルスサイザーにより、パルス幅 10 ns、繰り返し 100 Hz に切り出す。パルス波形形状は、任意波形ジェネレーター (AWG, AWG70002A, Tektronics) により制御され飽和増幅によるパルスフロントのピークパワー上昇を防ぐように調整した。切り出されたパルスは低温冷却 Yb:YAG 再生増幅器によりパルスエネルギー約 3 mJ に増幅される。利得媒質は、スターリングエンジン冷凍機 (SC-UF01, Twinbird) により 77 K まで冷却される。励起には波長 940 nm パルス幅 1 ms のファイバカップルの半導体レーザー(LD) を用いた。出力ビームはガウシアンビームプロファイルで  $1/e^2$  直径で約 1 mm である。この出力を拡大光学系により直径 7 mm ( $1/e^2$ ) まで拡大し、低温冷却 Yb:YAG マルチパス増幅器によってパルスエネルギー約 1 J に増幅する。利得媒質は、直径 20 mm、厚さ 15 mm の単結晶 Yb:YAG を用い Gifford- McMahon (GM) 冷凍機 (AL300, CRYOMECH) によって 77 K 以下に冷却する。利得媒質の側面を市販のマジックペンで塗ることでごく薄い吸収層を形成した。励起には波長 940 nm パルス幅 0.5 ~ 0.7 ms、ピークパワー 2.5 kW のファイバカップルの LD 2 台を用いた。増幅光路は、4 パスまたは 6 パスのボウタイ型光路で構成した。

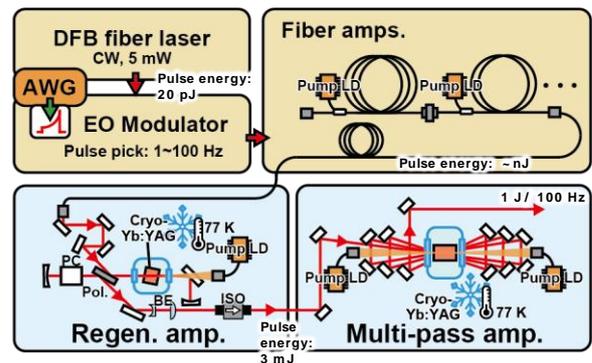


図 2 構築したレーザーシステムの概略図

## 3. 実験結果

### 3・1 寄生発振抑制

インクを用いた超薄型クラッドの性能を確認するために、クラッドのない利得媒質と、クラッドを付けた利得媒質を用意し、LD でパルス幅 1 ms の励起を行い、蛍光をペンダイオードで測定し、寄生発振の有無を観測した。図 3 にクラッドがない場合とある場合の蛍光測定結果を示す。クラッドが無い場合は、励起エネルギー 2.5 J において寄

生発振が起こり、蛍光パルスの形状が変化していることが分かる。一方、クラッドを用いた場合は、励起エネルギー 2.5 J でも蛍光パルスの形状に変化が無く、今回用いた LD の最大励起エネルギー 5 J まで寄生発振が起きないことが確認できた。

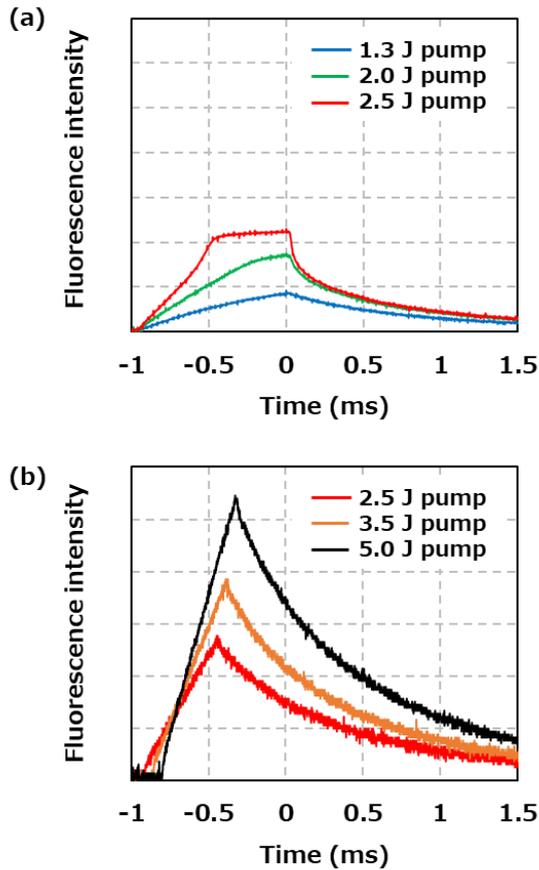


図3 蛍光測定結果  
(a)クラッドなし、(b)クラッドあり

### 3・2 増幅特性・出力安定性

図4に、Yb:YAG マルチパス増幅器の出力特性を示す。入力信号は再生増幅器からの中心波長 1029.5 nm、パルス幅 10 ns、繰り返し周波数 100 Hz、パルスエネルギー 3 mJ のパルスを用いた。増幅パス数 6 パスで励起エネルギー 2.4 J、励起パルス幅 0.5 ms のとき、増幅利得 380 倍で、パルスエネルギー 1.1 J、光光変換効率 35%を得た。また励起エネルギー 2.4 J、励起パルス幅 0.7 ms のとき増幅利得 522 倍、パルスエネルギー 1.15 J を得た。

図5に、Yb:YAG マルチパス増幅器の出力安定性を示す。励起パルス幅 0.7 ms、パルスエネルギー 1.15 J、繰り返し 100 Hz での出力エネルギーの推移を測定した。1 時間での出力低下は 5%以下、最後 10 分間の RMS 誤差は 0.47%であった。

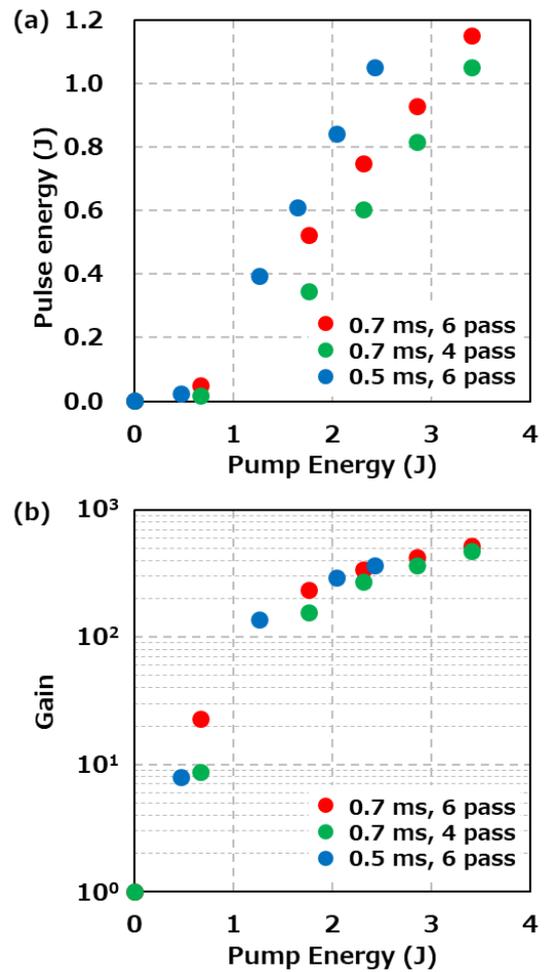


図4 Yb:YAG マルチパス増幅器の出力特性  
(a)増幅エネルギー、(b)増幅利得

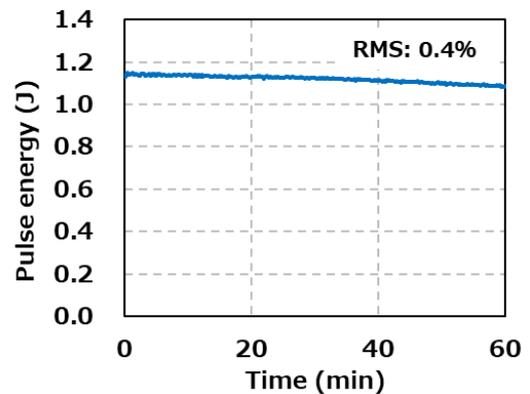


図5 Yb:YAG マルチパス増幅器の出力安定性

## 4. まとめ

本研究では、レーザーピーニングなどのレーザー加工に適したレーザー技術の確立として、ロッド型の低温冷却 Yb:YAG 増幅システムの開発を行った。パルスエネルギー

表1 他のJ級高繰り返しレーザーとの比較

	ILE, Osaka univ. (2015) [10]	MBI (2015) [12]	Colorado SU (2020) [13]	DESY (2019) [11]	This-work
Laser amp. method	Active-mirror	Thin-disk	Active-mirror	Thin-disk	Rod
Laser medium number of disk and thickness	0.8mm, 4disks	0.75mm, 2disks	7mm, 2disks	1mm, 1disk	15mm, 1rod
Cooling method	LN cooler	Room Temp.	LN cooler	LN cooler	GM cooler
Parasitic oscillation suppression method	Large cap	none	Cr:YAG clad	Parabolic cap	Ink clad
Pulse energy	1 J	1.07 J	1.1 J	1 J	1.1 J
Rep. rate	100 Hz	100Hz	1000 Hz	500 Hz	100 Hz
Opt.-Opt. efficiency	20%	5.80%	36%	50%	35%
Gain	114	3.3	22	20	380

>1J、繰り返し 100 Hz で、1時間動作の出力安定性<5%の高エネルギー・高繰り返しを高安定で達成した。表1に、他のJ級のパルスエネルギーの高繰り返しレーザーとの比較を示す。ドイツの、Max Born Instituteのグループ[12]や、DESYのグループ[11]ではThin-diskレーザーを、我々のグループ[10]とアメリカのコロラド州立大のグループ[13]ではアクティブミラーレーザーを用いてそれぞれ、>1J、>100 Hzを達成している。それぞれ寄生発振の抑制の手法、冷却方式、冷却温度が異なるが、本研究のシステムは、利得が高いこと、レーザーシステムのフットプリントが、0.5 m×1.5 m程度であることから、このクラスの出力を持つレーザーシステムとしては非常に高効率、コンパクトなシステムであると言える。

高効率・コンパクトな高エネルギー・高繰り返しレーザー技術を確立したことにより、レーザーピーニングのみならず、レーザー加工機のスループット向上など広く産業の発展に貢献できると期待される。

## 謝 辞

本研究の一部は、公益財団法人天田財団の2020年度奨励研究助成(若手研究者枠)AF-2020242-C2のご支援を受けて実施しました。ここに謝意を表します。研究の実施に当たり、ご協力いただいた名古屋大学の北島将太郎先生に感謝申し上げます。

## 参考文献

- 1) J. A. Vaccari: "Laser shocking extends fatigue life, American Machinist", American Machinist, **62** (1992).
- 2) P. Peyre, R. Fabbro, P. Merrien, and H. P. Lieurade: "Laser shock processing of aluminum alloys. Application to high cycle fatigue behavior" Materials Science and Engineering, **A 210**, 102 (1996).
- 3) M. Obata, A. Sudo, and J. Matsumoto: Proc. 6th Int. Conf. on Shot Peening (ICSP6), San Francisco, 24 (1996).
- 4) 佐野雄二, 須藤亮, 宮野廣: 東芝レビュー**53**, 49 (1998).
- 5) Y.Sano: "Laser peening for extending service life of

components", Journal of The Surface Finishing Society of Japan, **60**, 698 (2009).

- 6) Y.Sano: "Improving fatigue strength with laser peening", Processing of National Symposium on Welding Mechanics and Design 2006, **2**, 605 (2006).
- 7) J. K. Gregory, H. J. Rack, and D. Eylon (eds.): "Surface Performance of Titanium", TMS, Warrendale, PA., **217** (1996).
- 8) I. Altenberger, Y. Sano, I. Nikitin and B. Scholtes, 9th Int. Fatigue Congress (FATIGUE 2006) (Atlanta, Georgia, May 2006).
- 9) T. Liu, Z. Sui, L. Chen, Z. Li, Q. Liu, M. Gong, and X. Fu: "12 J, 10 Hz diode-pumped Nd:YAG distributed active mirror amplifier chain with ASE suppression," Opt. Express **25**(18), 21981–21992 (2017).
- 10) M. Divoky, S. Tokita, S. Hwang, T. Kawashima, H. Kan, A. Lucianetti, T. Mocek, and J. Kawanaka: "1-J operation of monolithic composite ceramics with Yb:YAG thin layers: multi-TRAM at 10-Hz repetition rate and prospects for 100-Hz operation", Opt. Lett. **40**(6), 855–858 (2015).
- 11) L. E. Zapata, H. Lin, A. L. Calendron, H. Cankaya, M. Hemmer, F. Reichert, W. R. Huang, E. Granados, K. H. Hong, and F. X. Kartner: "Cryogenic Yb:YAG composite-thin-disk for high energy and average power amplifiers", Opt. Lett. **40**(11), 2610–2613 (2015).
- 12) R. Jung, J. Tümmeler, T. Nubbemeyer, and I. Will: "Thin-disk ring amplifier for high pulse energy", Opt. Express **24**(5), 4375–4381 (2016).
- 13) H. Chi, C. M. Baumgarten, E. Jankowska, K. A. Dehne, G. Murray, A. R. Meadows, M. Berrill, B. A. Reagan, and J. J. Rocca: "Thermal behavior characterization of a kilowatt-power-level cryogenically cooled Yb:YAG active mirror laser amplifier", J. Opt. Soc. Am. B **36**(4), 1084–1090 (2019).