次世代加工技術のためのLD 励起高出力パルスレーザー開発

川嶋 利幸, 栗田 隆史, 関根 尊史, 渡利 威士, 竹内 康樹, 水田 好雄,
倉田 将輝, 森田 宇亮, 玉置 善紀, 加藤 義則, 栗田 典夫

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)

Development of Laser-Diode Pumped High Power Pulsed Laser for the Next-Generation Materials Processing Technique

Toshiyuki KAWASHIMA, Takashi KURITA, Takashi SEKINE, Takeshi WATARI, Yasuki TAKEUCHI,
Yoshio MIZUTA, Masaki KURATA, Takaaki MORITA, Yoshinori TAMAOKI,
Yoshinori KATO, and Norio KURITA

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

(Received May 29, 2017)

We started to develop a material processing system using high power pulsed laser. We believe that high pulse energy output from diode-pumped solid-state laser (DPSSL) is critical for the next generation material processing technologies. A conceptual design on 100 Joule class DPSSL is presented using a Yb:YAG ceramics amplifier configuration. We developed a novel high power laser-diode stack with 7.5-kW peak power for pumping the DPSSL. The industrial applications of high pulse energy laser are reviewed in the field of material processing. We demonstrate the potential for surface treatment application using high energy laser pulses and present a preliminary test of laser shock peening for metal material.

Key Words: Laser diode, Diode pumped solid-state laser, High energy laser, Materials processing, Laser peening

1. はじめに

レーザー加工技術は、IoT (Internet of Things) やIndustry4.0といった新たな潮流による産業社会を支える次世代基盤技術として位置づけられ、昨今は省エネルギー、環境対応に向けたモノづくり・製造技術の根幹となるポテンシャルを有するものと認識されている。炭酸ガスレーザー、半導体レーザー(LD)、ファイバレーザーは、加工機とのマッチングがよいことから、自動車産業をはじめとする多くの製造業において普及が進んでいる。

近年、電子デバイスや通信機器の高機能化のため、スマートフォンやタブレットで用いられる強化ガラス、高融点の難加工性材料、CFRPのような複合材料等の高精度加工の要求に加え、航空機や自動車の軽量化のために金属材料の表面改質による高強度化といった要求が高まっている。そこでは高輝度かつ電気から光、光から光への変換が高効率な次世代の高出力レーザー装置とこれによる加工技術の開発の必要性が認識される状況となっている。

そこで本稿では、筆者らが進める次世代高出力レー

ザー技術、特にパルスエネルギーが10 J以上のLD励起高出力パルスレーザー開発の現状と課題を解説する。またパルスエネルギーが数10 - 100 Jを超えるレーザーを用いたレーザー加工はこれまでに前例が無く、筆者らはこれにより新しい産業を創出できると期待しており、高出力パルスレーザー加工の現状の取組についても紹介する。

2. 高出力パルスレーザー装置の開発

2.1 LD励起高出力パルス固体レーザーの動向

1960年のMaiman¹⁾によるレーザーの発明以来、レーザーの出力は米国の国立点火施設(National Ignition Facility: NIF)におけるメガジュール級にまで飛躍的な増加を遂げてきた。フラッシュランプを励起源とした固体レーザーは、現在においても理科学研究用を中心に広く応用されている。一方、1980年代にByer教授(米国スタンフォード大学)により「固体レーザーのルネサンス」²⁾と評されたLDを励起源とした固体レーザー(Diode-Pumped Solid-State Laser: DPSSL)は、1990年代に開発が開始され

た連続光(CW)動作のレーザーが、技術進展を経ることでディスクレーザー等がレーザー加工装置として利用されるに至り、金属加工分野に大きな市場を開拓した。パルス動作のDPSSLは、2000年代に日米欧で10ジュール超級のパルスレーザーの開発が開始され、ジグザグスラブ型Nd:ガラスレーザーにより $21.3 \text{ J} \times 10 \text{ Hz}$ ³⁾、マルチディスク型Yb:S-FAPレーザーにより $61 \text{ J} \times 10 \text{ Hz}$ の出力が達成された⁴⁾。

Fig. 1 に代表的なパルスレーザー装置の出力エネルギーと繰り返し率の関係図を示す。黒はLD励起、グレーはフラッシュランプ励起である。近年、更に高出力なパルスレーザーへの需要の高まりにより⁵⁻⁷⁾、100ジュール級のレーザーの開発が活発化している^{8,9)}。2016年に、英国Rutherford Appleton研究所がマルチディスク型Yb:YAGレーザーにより $100 \text{ J} \times 10 \text{ Hz}$ 動作を達成し⁹⁾、浜松ホトニクスでも2011年より100ジュール級DPSSL技術の開発を先駆けて開始してきた¹⁰⁾。これらのレーザーは、直接材料へ照射する新しい加工用としての応用だけでなく、理科学研究のための1-10 PW級超高強度レーザーの励起用途としても注目されている¹¹⁾。

2.2 高出力パルスレーザーの特徴

10 J以上の高いパルスエネルギーかつ10 Hz以上の繰り返しで動作するレーザー増幅器には、Fig. 1 に表された一般に市販されている1 J以下の低いパルスエネルギーかつ100 Hz以上の高繰り返しで動作するレーザー増幅器とは大きく異なる設計技術が求められる。高いパルスエネルギーを出力する高出力パルスレーザーでは、レーザー媒質における光学損傷を防ぐために種光を入射する面の断面積を大きくする必要がある。この時、入射面の面積を拡大させた場合でもレーザー媒質内に生じる温度分布が変化せず一定であることが重要である。これは、レーザー媒質が熱的に破壊される原因となるレーザー媒質内部の温度条件を一定に保ったまま、パルスエネルギーの拡大を図れることに起因する。

Fig. 2 に、レーザー媒質の冷却方法と種光の入出射方法に関するレーザー増幅器の構成ごとの特徴を示す。こ

Fig. 1 Map of high energy laser developments.

	Rod	Slab	Disk	Active mirror
Energy scaling	×	△	○	○
Seed pulse pass through a coolant	No	No	Pass	No
Optical damage	○	○	○	△
Typical coolant material	Water	Water	He gas	Water

Fig. 2 Comparison of laser amplifiers.

れまで産業用として良く用いられているロッド型では、種光の入出射面の拡大によりレーザー媒質内部の温度差が大きくなるため、高いパルスエネルギーの出力には不向きである。それに対し、スラブ型、ディスク型、アクティブミラー型では、それぞれ板状のレーザー媒質において、種光の入出射面を拡大した場合でも、厚さ変化させないことでレーザー媒質内の温度差を一定に保つことができるため、高いパルスエネルギーの出力に適している。スラブ型は、種光の入出射面と冷却面が別であり、レーザー媒質の入出射面の一边を長くすることで断面積を拡大する。ディスク型は、種光の入出射面と冷却面が共通であり、種光に対し吸収や散乱の影響の少ない冷媒を用いて、ディスク媒質を冷却する。CW出力の産業用レーザーとして用いられているTRUMPF社の方式であるアクティブミラー型は、入出射面と冷却面が別であり、種光の入出射面の反対面から冷却する。

2.3 高出力パルスレーザー装置の概要

筆者らは、「高輝度・高効率次世代レーザー技術開発」委託研究プロジェクト⁷⁾の一環として、次世代のレーザー加工技術の開発を開始した。現在開発しているレーザー装置の構成図をFig. 3 に示す。ファイバ型のレーザー発振器、フロントエンド増幅器、前置増幅器、主増幅器およびブースタ増幅器から構成される。ファイバ発振器は、任意波形整形の機能を有しており、ファイバ増幅器も内蔵し約1 μJを出力する。パルス幅は1 ns～数100 nsまで可変可能である。フロントエンド増幅器以降のレーザー媒質としてYb:YAGセラミクス採用した。Yb:YAGは、冷却温度により誘導放出断面積を制御できる特徴があり、高出力パルスレーザーに最適化した設計が可能である。また、現在のコンポジット化技術を含めたセラミクス技術により、10 cm級の大面積な媒質も製

Fig. 3 System diagram of 100-J Class Laser.

造可能であることから、高出力パルスレーザーに適した材料の一つである。フロントエンド増幅器では、種光のパルス幅の制限となる再生増幅器を用いず、マルチパス方式の増幅器を構成する。更に飽和増幅に伴う波形の崩れを抑制するために、室温動作のYb:YAGセラミクス増幅器により10万倍程度に増幅する。その後、100 K程度の低温に冷却されたYb:YAG増幅器により1ジュール級へ増幅し前置増幅器へ入力する。

前置増幅器は10 J × 10 Hzのレーザーパルスを出力する。前置増幅器は、10 J出力のレーザー装置として市場へ展開することを想定し、クライオ冷凍機で冷却するアクティブミラー型のYb:YAGセラミクス増幅器を開発する。クライオ冷凍機は、液体窒素など大規模なインフラ整備を必要とせず、温度調整も簡便であることから産業応用に適した冷却方式と言える。後段の100ジュール級主増幅器では、より排熱性が高いHeガス循環冷却方式によるマルチディスク型Yb:YAGセラミクス増幅器を採用する。最終的には、LD励起によるキロジュール級レーザーの実現可能性を評価するための500ジュール級のレーザー技術の開発を目指している。

2.4 高出力LDスタックの開発

本レーザー装置において、全ての増幅器で共通する技術となるのが、励起用LDスタックおよびLDモジュールの開発である。Fig. 4に本レーザー装置で使用するLDスタックの外観写真を示す。LDバーを背面から熱伝導により冷却する能動型の冷却方式(背面冷却方式)を採用することで、小型かつ低コスト化を図った。同時に、LDバーの高出力化により7.5 kWのピーク出力を実現した。パルス幅1 ms、繰り返し率10 Hzの駆動により、7.5 J、75 Wの出力が可能である。また、LDからの出力光で、一般に発散角が30°程度となる速軸発散角を抑制するための円筒マイクロレンズをLDバー毎に具備しているため、遠方からレーザー媒質を照射するレーザー増幅器の設計に適している。本レーザー装置では、LDスタックを複数用いて、それぞれのレーザー増幅器に適したビームサイズおよび強度を実現する励起用モジュールの開発を行う。

3. 高出力レーザーによる加工基盤技術の開発

3.1 高出力パルスレーザーの産業応用

レーザー出力の向上により製造業を中心にレーザーが用いられる場面が増えてきた。Fig. 5にレーザー加工の応用マップを示す¹²⁾。CWレーザーはレーザー溶接や切

Fig. 4 Photograph of a LD stack.

Fig. 5 Application map using high power lasers.¹²⁾

断、穴あけなどの工程で自動車業界を中心に用いられている。一方、パルスレーザーにおいては、パルス幅が10ピコ秒以下のレーザーが短パルス性を利用した非熱加工として、半導体プロセスや強化ガラス切断等に広く用いられている。さらにパルス幅の短いフェムト秒レーザーについても微細加工等で多くの応用が考えられるものの、一般にピコ秒レーザーに比べて高価な場合が多いため、パルスエネルギーが100 μJ以上の非熱加工応用で見ればピコ秒レーザーが主流となってきている。

パルス幅がナノ秒～マイクロ秒程度のパルスレーザーについては、加工時の熱影響が生じるため加工品質がそれほど厳密でない場合に用いられることが多い。また、ナノ秒レーザーは比較的短いパルス幅の間に、フェムト秒、ピコ秒では発生が難しいエネルギーレベルを発生させることができるため、世界の研究施設の大型レーザー装置では単発ではあるがキロジュール級～メガジュール級の超高出力パルスレーザーが発生できており、高エネルギー密度科学等の学術研究分野において必要不可欠なレーザーになっている。特に高出力パルスレーザーによる衝撃波を用いた場合、ダイヤモンドアンビルのような静的な高圧発生法では到達できない1千万気圧を超える超高圧を発生させることが可能となっている¹³⁾。そのような超高圧状態では新しい構造や材料の発見につながる事が期待され、近年特に注目されている。しかしながら、産業応用として考えた場合、このような高エネルギーパルスのレーザーは十分に活用されていない。この理由としては、これまでに産業用途に耐える高出力パルスレーザーが無かったこと、フォトンコストが高いため既存技術と比べてメリットが出にくいこと等が考えられる。また一方で、高出力パルスレーザーの高いエネルギーの特徴を生かしたニーズが無かったことも考えられる。したがって、高出力パルスレーザーの技術開発とそれによるニーズ開発を同時に進めることが重要である。

そこで筆者らは、これまでにない100 Jを超える高いエネルギーと繰り返し出力性能を両立する高スループットな次世代の高出力パルスレーザーを材料に照射した場合の加工原理の解明を進め、新しいレーザー加工の基盤技術の開発を開始した。これにより、高出力パルスレーザーによって発生する高圧状態を利用したレーザー加工として、例えば高いエネルギーを生かして金属材料の大

面積を一括して表面処理を行う等の新産業の開拓を目指すこととした。

3.2 高出力パルスレーザーによるピーニング加工

自動車業界や航空業界では燃料消費率の低減とそれに付随するCO₂削減効果を見込んで部品の軽量化が進められている。軽量化を進めるためには、材料自体の機械強度が重要な要素となる。金属材料の機械強度を増加することが出来れば自動車部品や航空部品のみならず、多くの産業分野において極めて大きな波及効果をもたらす。また、選択的に特定箇所の機械強度を高めることが可能になれば、製造工程の簡素化による低コスト化にもつながることが期待できる。金属材料の強化法の1つとして、鉄や非金属の球体を金属表面に衝突させることで金属表面に残留応力を付与するショットピーニング法が従来から行われている。一方、高エネルギーパルスレーザーを照射することで同様の効果を付与するレーザーピーニング法¹⁴⁾は、レーザーパルスの大エネルギー性を上手く利用した産業応用である。これはレーザーの光エネルギーをおよそ1億分の1秒程度に集中させることでレーザーアブレーションに伴う衝撃波パルスを発生させることで材料の表面層に圧縮応力を発生させ、表面から発生しやすい疲れ亀裂の防止効果により疲労強度が向上する表面処理である。金属強度を向上させる場合の表面処理法としては焼入れ、浸炭、窒化等による熱処理があり、熱処理の市場は2010年に883億円、2016年に1067億円と順調に拡大している¹⁵⁾。したがって、これらの市場に非接触・部分加工が可能なレーザー加工法が加わることで、新しい加工ニーズが生まれてくる可能性がある。

3.3 高出力パルスレーザーによるピーニング実験

筆者らはこれまでに数十ジュール級のレーザーを10 Hz程度の繰返し周波数で出力する高平均出力レーザーの開発を進めてきた背景から、金属材料へのレーザーピーニング試験を実施した¹⁶⁾。試験片として通常の焼入れ法が適用できないオーステナイト系ステンレス鋼SUS304を選択した。レーザー条件は波長1053 nm、パルス幅22 ns、繰返し周波数1 Hzのレーザーを異なる照射強度(照射スポットサイズ: 2.0 mm × 0.8 mm)で照射したときの深さ方向の残留応力をX線回折装置により測定した。試料表面には黒色塗料を塗り、レーザー照射部に水をかけながら実施した。レーザー照射無の場合(NLSP01)、照射強度1.3 GW/cm² (28.8 J/cm², LSP01)および10.6 GW/cm² (233.1 J/cm², LSP02)としたときの結果をFig. 6にそれぞれ示す。レーザー強度が10.6 GW/cm²において最大圧縮応力-444 MPaが得られ、深さ500 μm以上にわたって圧縮残留応力層が形成された。

レーザーエネルギーがピーニング効果に与える影響を評価するために、レーザー強度を同じにした場合の応力分布を評価した。レーザー条件は波長1053 nm、パルス幅5 ns、レーザー強度7 GW/cm²とし、1パルス当たりのレーザーエネルギーを2.5 J、0.5 Jとした。レーザーの繰返し周波数は1 Hz、ビームオーバーラップ率75%でス

Fig. 6 Residual stress distribution of SUS304 after laser peening process.

キャンしてピーニング処理を行った¹²⁾。試料はSUS304 (厚み5 mm)を用いた。レーザー照射した試料の外観および照射部分の構成をFig. 7に示す。レーザー強度を一定に保ちつつレーザーエネルギーを変化させた場合には、1照射あたりの加工面積が大きくなることに相当する。したがって集光スポットサイズは1パルス当たりのエネルギーに対応して2.1 mm × 2.9 mm (2.5 J)の場合と1.0 mm × 1.3 mm (0.5 J)となる。この時の残留応力分布をFig. 8に示す。レーザー照射していない領域の応力分布をリファレンスとして示した。レーザー未照射領域の最表面は試料を機械加工して準備したことにより加工硬化が生じていると考えられ-300 MPaの圧縮応力状態であった。一方レーザー照射した領域の最表面は400 - 500 MPaの引張応力が生じた。これはレーザー照射によって表面が瞬間的に高温になり自然冷却する過程で引張応力が生じている。この引張応力は実用上問題となるが、金属箔等のアブレート層を導入することで抑制することが確かめられている。一方、深さ方向の応力状態は2.5 Jの場合で深さ100 μm付近で-100 MPaの圧縮応力を生じており、0.5 Jの場合にはほぼ0 MPa状態となった。この結果から、レーザー未照射領域と比べた場合、パルスエネルギーが大きい方が、すなわち照射面積が大きい方が、圧縮応力の発生が大きいことを示している。したがって、パルスエネルギーが100ジュール級の次世

Fig. 7 Laser peening process with different pulse energies of 2.5 J (Left) and 0.5 J (Right).

Fig. 8 Residual stress distribution of SUS304 after laser peening with different pulse energies but same intensities.

代の高出力パルスレーザーが実現すれば、大きな圧縮応力を深さ方向にわたって付与できる可能性がある。また本プロジェクトではレーザーパルスの時間波形を制御することによるピーニング効果への影響を調べると共に、表面強度を強化するだけでなく、材料内部において特徴的な残留応力状態が形成されることを期待しており、これを新たなシース技術として高出力パルスレーザーによる新しい加工技術へと繋げていきたい。

4. おわりに

本稿では、筆者らが進めているLD励起高出力パルスレーザー開発の現状について、高出力LDモジュールとこれを用いた高出力パルスレーザー開発、および材料加工への応用としてレーザーピーニングの例を紹介した。高出力パルスレーザー加工の産業界への新産業開拓に向けた研究開発は、筆者ら民間企業によるレーザー技術の実用化への取組に加え、基本原理を理解するための知見と高度な先端計測分析技術が必要となる。そこで本プロジェクトでは、筆者らに加え、大阪大学、産業技術総合研究所の3者による産学官連携体制による研究開発を進めていく。具体的には、筆者ら民間企業による高出力パルスレーザーの開発とその実用化開発、大阪大学は、高出力パルスレーザー加工の知見を用いてキロジュール級の単発レーザー加工試験を実施する。産業技術総合研究所は、高出力パルスレーザーによる加工現象のその場計測系の構築・評価を大阪大学と連携して進め、加工材料表面および内部の応力状態変化等の加工メカニズムを明らかにする。これらのメカニズムを元に、産業利用に適

した加工結果となるレーザー条件等を筆者らにフィードバックしてその効果を検証する。さらに、本プロジェクト後半においては、ユーザを巻き込みながらニーズを捉えた取り組みを進めていく予定である。

謝 辞

本研究の一部は、国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)の委託事業「高輝度・高効率次世代レーザー技術開発」により行われたものです。また本NEDO委託事業を実施するにあたり、国立大学法人大阪大学 尾崎 典雅准教授、重森 啓介准教授、河仲 準二准教授、兒玉 了祐名誉教授、国立研究開発法人産業技術総合研究所 三浦 永祐上級主任研究員、黒田 隆之介主任研究員をはじめとする多くの関係者の方々からのご助言に深く感謝いたします。

参考文献

- 1) T. H. Mainman: *Nature* **187**(1960)493.
- 2) R. L. Byer: *Science* **239**(1988)742.
- 3) R. Yasuhara, T. Kawashima, T. Sekine, T. Kurita, T. Ikegawa, O. Matsumoto, M. Miyamoto, H. Kan, H. Yoshida, J. Kawanaka, *et al.*: *Opt. Lett.* **33**(2008)1711.
- 4) A. Bayramian, P. Armstrong, E. Ault, R. Beach, C. Bibeau, J. Caird, R. Campbell, B. Chai, J. Dauson, C. Ebberts, *et al.*: *Fusion Sci.* **52**(2007)383.
- 5) 足立 隆史: *レーザー研究* **42**(2014)462.
- 6) C. M. Brenner, S. R. Mirfayzi, D. R. Rusby, C. Armstrong, A. Alejo, L. A. Wilson, R. Clarke, H. Ahmed, N. M. H. Butler, D. Haddock, *et al.*: *Plasma Phys. Controlled Fusion* **58**(2016)014039.
- 7) NEDO「高輝度・高効率次世代レーザー技術開発」基本計画(平成28年4月)。
- 8) A. J. Bayramian, R. Bopp, M. Borden, B. Deri, R. DesJardin, J. M. Di Nicola, M. Drouin, A. Erlandson, S. Fulkerson, J. Jarboe, *et al.*: *Conference on Lasers and Electro-Optics, OSA Technical Digest*(Optical Society of America, 2016) STu3M.2.
- 9) P. Mason, M. Divoky, K. Ertel, J. Pilar, T. Butcher, M. Manus, S. Banerjee, J. Phillips, J. Smith, M. D. Vido, *et al.*: *Optica* **4**(2017)438.
- 10) T. Kawashima: *Proc. Science Council of Japan, International Symposium on Status and Prospects of High Energy Density Science by Giant Laser* (2015) 136.
- 11) K. A. Tanaka: *The 6th Advanced Lasers and Photonic Source (ALPS'17)* (2017) HEDSj-1.
- 12) T. Watari, T. Kurita, T. Sekine, Y. Takeuchi, Y. Mizuta, Y. Kabeya, and Y. Kato: *The 6th Advanced Lasers and Photon Sources (ALPS'17)* (2017) ALPS3-3.
- 13) 尾崎 典雅: *J. Plasma Fusion Res.* **92**(2016)226.
- 14) Y. Sano, N. Mukai, K. Okazaki, and M. Obata: *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. B* **121**(1997)432.
- 15) 経済産業省 金属加工統計調査(平成28年)。
- 16) NEDO「新産業創出のための高密度フォトン発生基盤技術の研究」平成19年度研究成果報告書。