汎用 Nd:YAG レーザの低エネルギーロングパルスの特性を生かした高エネルギー効率レーザ穴開け加工法の構築

島根大学大学院　自然科学研究科
准教授　辻　剛志
（2022 年度 一般研究開発助成 AF-2022219-B3）

キーワード：レーザアブレーション，金属加工，プラズマ

１．研究の目的と背景

レーザ加工は、金型やドリルによる機械加工が困難な硬い材料（例えばアモルファス合金）に対する優れた加工法である。しかしながら、レーザ加工が機械加工に比べて加工速度が低いことにより、機械加工に置き換わるようなレベルには普及していない。レーザ加工の速度を向上させるための最も簡単な方法はレーザのエネルギーを高くすることであるが、これは消費エネルギーの増加に加えて発生する熱による材料の変質という負の影響をもたらすことが多い。エネルギーを抑制しながら加工速度を向上させる、すなわち加工効率を向上させることは、レーザ加工における最も重要なテーマであると言える。

加工効率を向上させるための条件としてレーザパルスの時間幅に着目すると、一般的にパルス幅が短くなるほど熱拡散の影響が小さくなり、加工効率が向上する考えられている。実際、フェムト秒レーザを利用すれば、低エネルギーで加工速度を向上できることはよく知られている。しかしながら、フェムト秒レーザの加工現場への普及には導入コストによって時間がかかると考えられる。

そのような中、我々は比較的普及が進んでいる汎用 Nd:YAG レーザの低エネルギーロングパルス（図 1b 参照）を用いると、ナノ秒パルスを用いた場合よりも飛躍的に穴あけ加工の効率を向上させられることを見いだした[1]。具体的には、数十ミリジュールのエネルギーのナノ秒パルスをアモルファス金属箔に照射した場合の穴の深さは数ミクロンであるのに対し、ロングパルスを用いると数ミリジュールのパルスで数十ミクロンの穴あけが可能である。つまり、数十ミクロンの厚さの金属箔に対しては、1 パルスで貫通孔を形成できる。特に、数ミリジュールというエネルギーで加工が可能であることによって、装置コストや材料のダメージの抑制が期待出来る。

一方、ロングパルスによる穴開け効率がナノ秒レーザに比べて高い理由は明らかになっていない。上に述べたように、熱拡散の影響を考えた場合、ロングパルスは加工に不利なはずである。そこで、以前の研究で我々が考えた因子の一つがプラズマ遮蔽である。プラズマ遮蔽とは、パルスの前半部によるアブレーションによって発生した電子、原子、イオンを含むプラズマによって、パルスの後半部分の光が吸収または散乱され、ターゲットに到達する強度が低下する現象である。プラズマの影響を推定した理由は、レーザ照射を行ったときに発生する発光の強度が、ロングパルスに比べてナノ秒パルスの方が高かったからである。しかしながら、実際にプラズマ遮蔽がどの程度起こっているのかは不明であった。そこで本課題では、ナノ秒パルスとロングパルスそれぞれに対するプラズマの影響を、プラズマ発光の観察やポンプ-プローブ法[2,3]によるレーザ光とプラズマを含むターゲットからの噴出物との干渉の観察によって解析した[4]。

また、ロングパルスを用いた液中レーザアブレーションによる穴開けを試みた。以前の研究により、ナノ秒パルスを用いた場合、液中レーザアブレーションを行うと、気相中よりも深いクレーターが生じることが明らかになっている[5]。これは、液中ではレーザ照射部に発生するキャビテーションバブルの圧力によって穴開けが促進されるからであると考えられている。今回の研究ではこの効果がロングパルスの場合にも観察されるかを検証した。

２．実験方法

2・1　基本的なレーザ穴開けシステムの構成

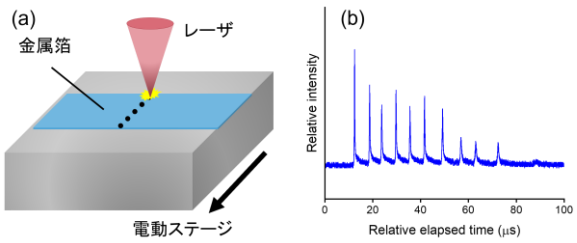


図 1：(a)レーザ穴開けのレイアウトと(b)用いたロングパルスの時間プロファイル。

図 1a に、基本的な金属箔のレーザ穴開けの光学系のレイアウトを示す。レーザアブレーションには Nd:YAG レーザ(GCR-200; Spectra-Physics)から出力される波長 1064 nm、繰り返し周波数 10 Hz のパルスを用いた。このレーザは Q スイッチを動作させた場合は約 8 ns、Q スイッチを動作させない場合は、図 1b に示す時間プロファイルのロングパルスを出力する。1 つのロングパルスは、幅約 200 ns の複数のサブパルスで構成されており、サブパルスの間隔は 3～7 μs である。これを電動ステージ上に設置したターゲットに焦点距離 100 mm のレンズで集光して照射した。今回

の実験では、主に厚さ 25 μm のニッケル箔をターゲットに用いた。

加工痕の観察には、SEM(JCM-6000Plus; JEOL)および 3 次元白色干渉顕微鏡(VS1800; Hitachi High-Technologies)を用いた。

レーザアブレーションによって生じるプラズマ発光のスペクトルは、発光をファイバーによってマルチチャンネル型分光器(PMA-10; Hamamatsu Photonics)に取り込んで測定した。さらにナノ秒パルスの場合は、発光の時間変化を ICCD 検出器(CD; DH334T, Andor Technology)によってゲート幅 10 ns で観察した。一方、ロングパルスの場合は、パルスの発生時間には数 μs の範囲のジッターがあり、パルスと ICCD のゲートを同期できなかったため、発光の時間変化は観察出来なかった。

2・2 ポンプ-プローブシステム

プラズマ遮蔽は図 2 に示したポンプ-プローブ法によって観察した。つまり、ポンプ光（アブレーションレーザ）で発生した物質の噴出を、プローブ光の噴出物質との干渉による強度変化によって観察する、というものである。

今回の観察では、2 つのポンプ-プローブシステムを用いた。図 2a では、Nd:YAG レーザの出力をハーフミラーで分岐し、一方をアブレーションレーザ、一方をプローブ光に用いた。この方法では、プローブ光はアブレーションレーザパルスと同じタイミングのパルスであるため、アブレーションレーザがプラズマから受ける影響とほぼ同じものを観察することができる。一方、図 2b では、プローブ光には波長 1064 nm の半導体レーザ(MIL-S-1064-B; CNI laser)を用いた。この方法では、図 2a では観察出来ない、レーザパルスと重ならない物質の噴出についても情報を得ることができる。

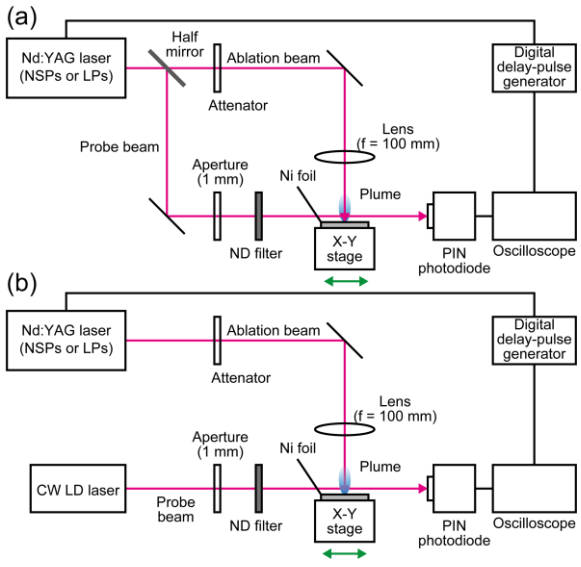


図 2：プラズマ遮蔽の観察のためのポンプ-プローブシステムのレイアウト。(a)アブレーションレーザの一部をプローブ光に用いたシステム。(b)半導体レーザをプローブ光に用いたシステム。

図 2a、b どちらのシステムにおいても、プローブ光は、噴出物と干渉するようにアブレーション部の直上を通過させた後、オシロスコープに接続したフォトダイオードで強度を測定した。

2・3 液中レーザアブレーション

水中に設置したニッケル箔に対して、ナノ秒パルスとロングパルスでレーザアブレーションを行った。アブレーション後のニッケル箔に形成された加工痕を SEM および 3 次元白色干渉顕微鏡で観察した。

3．結果

3･1 ニッケル箔に対するナノ秒パルスとロングパルスの穴開け効率の比較

図 3 に厚さ 25 μm のニッケル箔に対して、強度 5 および 10 mJ のナノ秒パルス(NSP)とロングパルス(LP)を照射したときに形成された加工痕の SEM 像を示す。また、表 1 にはそれぞれの条件で得られた加工痕の深さを示した。クレーターの深さは白色干渉顕微鏡を用いて測定し、

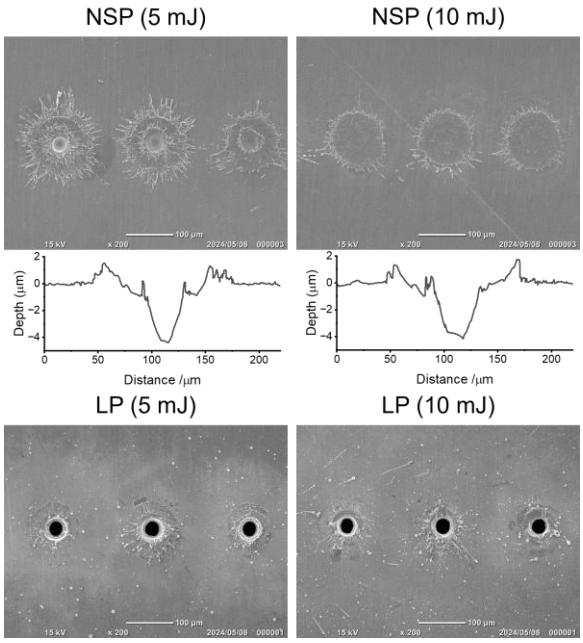


図 3：厚さ 25 μm の Ni 箔にナノ秒パルス(NSP)およびロングパルス(LP)を照射したときに形成された加工痕。

表 1：ナノ秒パルスおよびロングパルスによって得られた加工痕の深さとエネルギー効率（エネルギー辺りの深さ）

Laser energy mJ	Depth μm		Energy efficiency μm/mJ	
	NSP[1)]	LP[2)]	NSP	LP
	5.0 ± 2.3	180 ± 25	1.0	36
10	3.7 ± 0.9	284 ± 27	0.4	28

貫通孔の深さは、数枚重ねたニッケル箔に対してレーザ照射を行ったときの貫通孔が得られたニッケル箔の枚数から見積もった。図 3、表 1 に示すように、ナノ秒パルスの場合は深さ数 μm のクレーターしか形成されなかったのに対して、ロングパルスの場合は数百 μm の貫通孔が得られた。つまり、表 1 に示したように、ロングパルスのエネルギー効率は、ナノ秒パルスより数十倍高いことが示された。これらの傾向は、以前観察したアモルファス合金箔の結果と同じである。一方、エネルギー効率のレーザ強度依存性を比較すると、どちらのパルスにおいてもエネルギーが高いほど効率が低いことが分かった。

3・2　プラズマ発光の観察

図 4 には、レーザ照射時に発生するプラズマ発光のスペクトルを示す。発光強度は、ナノ秒パルスの方がロングパルスに比べて高く、また、レーザ強度が高い程高い。つまり、表 1 に示した穴開け効率は、発光強度が高い程低くなっていることを示している。この結果は、穴開け効率にはプラズマの発生が影響を及ぼしていることを示唆している。

さらに、発生したプラズマとレーザパルスとの干渉の可能性を調べるために、プラズマの発生時間の測定を行った。図 5 にナノ秒パルスで発生したプラズマ発光の時間変化を示す。発光はほぼレーザパルスと重なって増加し、約 100 ns まで継続した。このことは、レーザパルスの前半部分で発生したプラズマが、パルスの後半部分と干渉する可能性を示している。

3・3　プラズマ遮蔽の観察

これまでに示した結果は、レーザアブレーションで発生したプラズマとレーザ光との干渉、すなわちプラズマ遮蔽が穴開け効率に影響を与えている可能性を示唆している。そこで、ポンプ-プローブ法を用いた、プラズマ遮蔽の観察を行った。

まず、図 2a のシステムを用いて、レーザパルスとプラズマとの直接の干渉を観察した。図 6a に示すように、ナノ秒パルスの場合、アブレーションレーザを照射したときに、レーザ強度 5 mJ のときは約 30%、10 mJ のときは約 60%と、プローブ光の強度の著しい低下が観察された。一方、ロングパルスの場合（図 6b）は、レーザ強度 5 mJ のときは約 15%、10 mJ のときは約 20%のプローブ光強度低下が観測された。これらの結果は、ナノ秒パルスの方

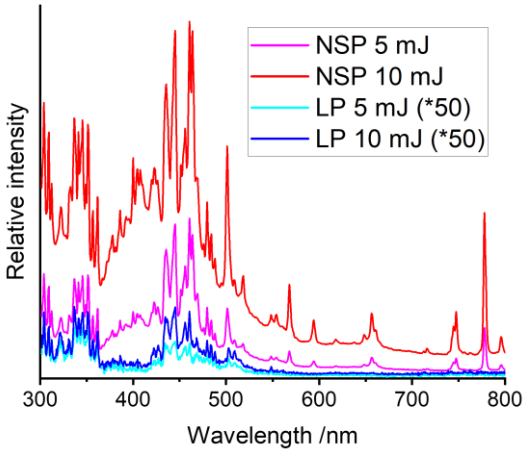


図 4：Ni 箔にナノ秒パルス、ロングパルスを照射したときに観察されたプラズマ発光のスペクトル。

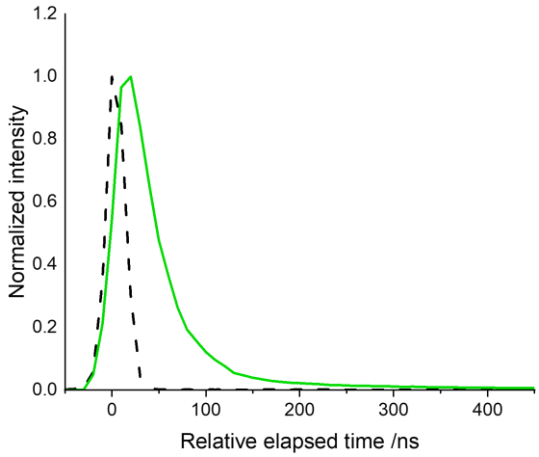


図 5：図 4 の波長 450 nm の発光の時間プロファイル。

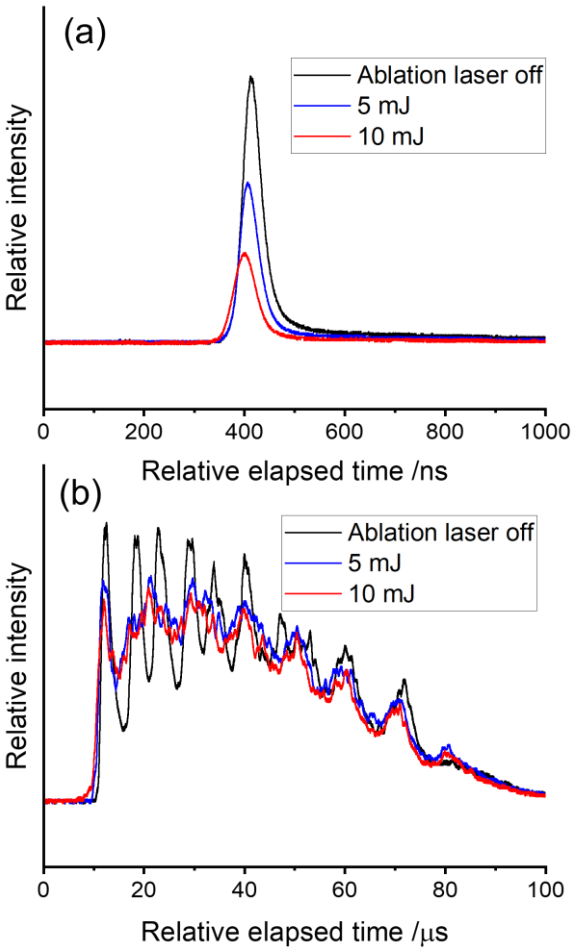


図 6：図 2(a)のポンプ-プローブシステムを用いて測定したプローブ光のアブレーションレーザの有無による強度変化。(a)ナノ秒パルス、(b)ロングパルスを用いた場合。

がロングパルスに比べてより高い割合でプラズマ遮蔽が起きていることを示している。別の言い方をすれば、ロングパルスの穴開け効率がナノ秒パルスに比べて高いのは、プラズマ遮蔽の程度が低いからであると言える。

一方、レーザアブレーションでは、プラズマの他に、蒸発物や液滴などが噴出し、これらがレーザパルスと干渉する可能性がある。このような様々な噴出物とレーザ光との干渉について調べるために、図 2b のシステムを用いて観察を行った（図 7）。ナノ秒パルス照射の場合は、レーザパルスの照射直後に鋭いディップが表れ、その後数十マイクロ秒以上に渡ってブロードなディップが見られる。以前の報告に基づくと、前者はプラズマによるもの、すなわち図 6a で観察されたプローブ光の減衰と同じ要因で起きたと考えられる。一方、後者はターゲットからの蒸発物によるものであると考えられる[6]。つまり、図 6a では観察出来なかったが、今回の系でも数十マイクロ秒の時間スケールで、蒸発物の噴出が起きていることを示している。

ロングパルスを照射した場合は、個々のサブパルスに対応する鋭いディップは観察されず、サブパルスと重なる数十マイクロ秒の範囲に広がるブロードなディップのみが観察される。ナノ秒パルスの場合に行った帰属に基づくと、この結果は、図 6b で観察されたプローブ光の減衰は、正確にはプラズマ遮蔽ではなく、主に蒸発物の干渉によるものであることが示唆される。また、このブロードなディップはナノ秒パルスの場合に観察される鋭いディップよりも浅いことは、ロングパルスの方がナノ秒パルスに比べて噴出物の干渉が小さいことを示しており、図 6 の結果と一致している。

一方、図 6、7 で観測されたナノ秒パルスとロングパルスのプラズマ遮蔽の程度の違いは、図 3 および表 1 で示した両者の穴開け効率の違いと比べると小さい。その原因の一つは、今回用いたプローブレーザがプラズマプルームに対して横方向から透過していることであると考えられる。今回観察されたプラズマプルームの形状は、縦長である（図 8）。したがって、プラズマプルームを縦方向に透過する実際のアブレーションレーザは、観察に用いたプローブ光よりも噴出物の干渉を強く受けている可能性がある。

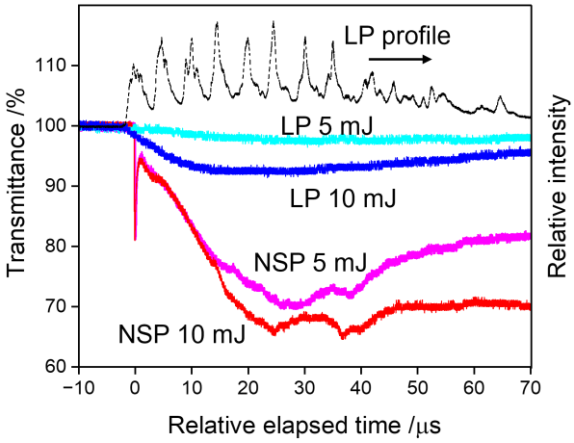


図 7：図 2(b)のポンプ-プローブシステムを用いて測定したプローブ光のアブレーションレーザの有無による強度変化。(a)ナノ秒パルス、(b)ロングパルスを照射した場合。

また、図 7 に見られる蒸発物によるディップの深さを比較すると、アブレーションで発生する蒸発物の量もロングパルスの方がナノ秒パルスよりも少ないことを示している。一方、ロングパルスの穴開け速度がナノ秒パルスに比べて高い、すなわちロングパルスの方がアブレーションによって噴出する物質の量が多いことを示している。この矛盾の原因としては、ロングパルスを照射した場合には、液滴として噴出する物質の量が多いことが考えられる。蒸発物よりも質量が大きい液滴は蒸発物よりも遅い時間に噴出するため、ロングパルスとも干渉しない。実際、両パルスで発生するアブレーションプルームのカメラ画像を比較すると（図 8）、ナノ秒パルス照射ではガス状のプルームが観察されるのに対して、ロングパルス照射では、溶融金属の液滴のようなものが観察される。さらに、これらの液滴状の物質は、ガス状のプルームが垂直方向に噴出しているのとは異なり、アブレーションおよびプローブレーザとは干渉しない横方向に噴出しているように見える。つまり、ロングパルスによる高い穴あけ効率は、液滴の生成、すなわち熱的な過程によってももたらされていると考えられる。

3・4　液中レーザアブレーションの利用

図 9 に水中に設置した Ni 箔に 10 mJ のロングパルスを照射した際に形成された加工痕を示す。空気中でレーザ照射を行った場合と異なり、深さ 10 μm 以下のクレーターが形成されるのみであった。このような液中での穴開け効率の著しい低下の要因としては、液中でレーザアブレーションを行った際に発生するキャビテーションバブルによるレーザ光への干渉と、液体への熱拡散が考えられる。まず、キャビテーションバブルによる干渉については、以前の研究で、キャビテーションバブルはレーザパルス照射後約 1～300 μs の時間でアブレーション部位から発生、成長

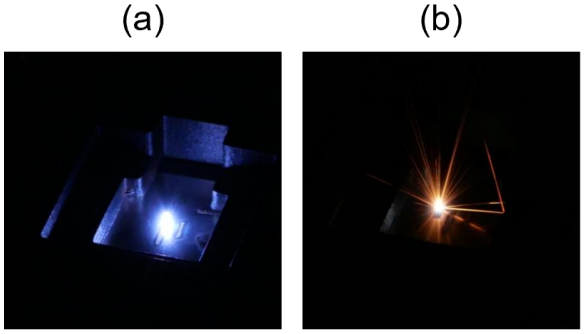


図 8：Ni 箔へのレーザアブレーションで発生したプルームの写真(a)ナノ秒パルス、(b)ロングパルスを照射した場合。

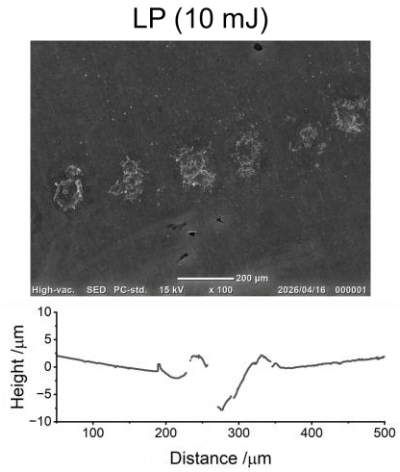


図 9 : 水中に設置した Ni 箔にロングパルスを照射したときに形成された加工痕。

するのが観察されている [7]。すなわち、ロングパルスのサブパルスと重なる時間帯である。したがってロングパルスはキャビテーションバブルによる著しい干渉を受けると考えられる。一方、熱拡散の影響については、上に述べたように、ロングパルスによる穴開けは、主にターゲットを熱的に溶融することによって進行すると予想される。したがって、アブレーション部位が液体に接触していると、熱拡散によってエネルギーが失われると考えられる。このことは、ロングパルスを、Ni よりも熱伝導率が高い、Cu や Ag に照射した場合は穴開け効率が著しく低いことをも辻褄があう。以上の結果は、ロングパルスは水中レーザアブレーションには不向きであることを示していると同時に、ロングパルスを有効に利用するためには、熱拡散の影響が小さい条件を選択すべきであることを示している。

謝　辞

本研究は、公益財団法人天田財団の 2022 年度一般研究開発助成（AF-2022219-B3）の支援を受けて実施された。ここに深く感謝の意を表する。

参考文献

1) T. Tsuji, S. Yamamoto, S. Ikemoto, H. Hara, M. Ohta,D. Nakamura: Efficient drilling of amorphous alloy foils using low-energy long pulses of a Nd:YAG laser, Int. J. Adv. Manuf. Technol., **120**, 4139 (2022).

2) X. Mao,R. E. Russo: Observation of plasma shielding by measuring transmitted and reflected laser pulse temporal profiles, Appl. Phys. A, **64**, 1, 1 (1996).

3) S. Nammi, N. J. Vasa, B. Gurusamy,A. C. Mathur: Single laser based pump-probe technique to study plasma shielding during nanosecond laser ablation of copper thin films, J. Phys. D: Appl. Phys., **50**, 35, (2017).

4) T. Tsuji, I. Yamada,D. Nakamura: Comparative Study of Plasma Shielding in Nanosecond Pulse And Long Pulse Laser Ablation Using Pump-Probe Techniques, J. Laser Micro Nanoeng., **20**, 3, 186 (2025).

5) T. Tsuji, T. Kakita,M. Tsuji: Preparation of nano-size particles of silver with femtosecond laser ablation in water, Appl. Surf. Sci., **206**, 1-4, 314 (2003).

6) S. H. Jeong, R. Greif,R. E. Russo: Shock wave and material vapour plume propagation during excimer laser ablation of aluminium samples, J. Phys. D: Appl. Phys., **32**, 19, 2578 (1999).

7) T. Tsuji, Y. Okazaki, Y. Tsuboi,M. Tsuji: Nanosecond time-resolved observations of laser ablation of silver in water, Jpn. J. Appl. Phys. Part 1., **46**, 4A, 1533 (2007).