

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 26 日現在

機関番号：13102

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2010～2013

課題番号：22360060

研究課題名(和文)超短パルスレーザー加工におけるパルス累積効果の新しい可視化方式による解明

研究課題名(英文)Effects of multiple-pulse irradiation in ultra-fast pulse laser processing studied through a newly developed visualization technique

研究代表者

伊藤 義郎 (ITO, YOSHIRO)

長岡技術科学大学・工学部・教授

研究者番号：60176378

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 14,700,000円、(間接経費) 4,410,000円

研究成果の概要(和文)：短パルスレーザー加工における累積照射パルス数の影響について、高繰返し短パルスレーザーを光源とする高速度ビデオ撮影法、高速度レーザーstroboスコピックビデオ撮影法を開発、これによる可視化、解析を行った。加工屑の堆積挙動や粒子状の加工屑の間欠的な排出などの観察に成功した。パルスエネルギーやレーザー走査速度によって加工形状だけでなく、加工屑の形状や堆積挙動、堆積範囲などが変化した。加工パラメーターの影響の解明には、さらに系統的な研究が必要である。

さらに、この手法を液中でのレーザー誘起衝撃現象におけるキャビテーションバブルの寄与や、液中での金属ナノ粒子生成現象の解明に応用する事が出来た。

研究成果の概要(英文)：We have developed a new, high-speed video system with high time-resolution for visualizing multiple-pulse irradiation effects in ultra-fast pulse laser processing. The technique, named as high-speed laser stroboscopic videography technique, has successfully applied to observe the laser-induced phenomena during a groove and a hole drilling by a femtosecond laser on cemented tungsten carbide samples. Effects of laser pulse energy and scan speed on developments of machined features and deposition of debris were analysed. Observed results indicate that these effects were rather complicated and demand further systematic researches.

The developed technique has been successfully applied in dynamical studies on laser ablation in liquids. Effects of laser-induced cavitation bubbles on laser shock processes have been analysed. Nano-particle generation by laser ablation in liquids have been studied through the technique.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学・生産工学・加工学

キーワード：特殊加工 レーザー加工 超短パルスレーザー 可視化 高速度ビデオ パルス累積効果

1. 研究開始当初の背景

(1) フェムト秒からピコ秒のパルス幅の超短パルスレーザーによる加工は、熱影響のない加工技術として注目されている。特に、難加工性材料の微細加工に適した先端加工技術として注目を集めており、その研究は、世界的にも盛んに行われている。しかし、超短パルスレーザー加工では、加工パラメーターが多数あるにもかかわらず、各種の材料に対する加工条件は、もっぱら経験的に求められており、しかも、報告されている加工結果や条件は、互いに一致してはいない場合が多い。

我々も、難加工材料である超硬などのフェムト秒レーザー加工について研究をしてきた。その結果、パルスエネルギーなどが同じであっても、レーザーの走査速度や走査経路により、加工速度や表面粗さ、堆積物の生成やその残留量などの加工品質が極端に変動することが分かった。このような変動が生じる原因の一つとして、パルスの累積効果が挙げられる。加工に用いられている超短パルスレーザーの多くは 1kHz~MHz の高繰返しであるため、試料の同一箇所にも多数のレーザーパルスが照射される。この累積パルス数の増加につれて、照射部に熱の蓄積や照射により生成した欠陥、歪の蓄積などが生じ、レーザー光の吸収やその後の加工現象が変化していく。また、加工により照射部の表面性状や幾何学的な形状も変化し、これによって、レーザー光の反射、散乱や、加工屑（ブルーム・デブリ）の排出、堆積状況も変化するはずである。超短パルスレーザー加工を信頼性の高い、安定した加工技術とするためには、このような累積パルスの影響を、十分理解する必要がある。そのためには、加工現象を動的に観察し、そのパルスの累積による変化を調べなければならない。

(2) パルスレーザーによる加工現象は、フェムト秒 (10^{-15} 秒) からミリ秒 (10^{-3} 秒) という非常に短い時間で生じる、変化の大きな現象である。そのため、加工現象の詳細を解明するには、高時間分解能を有する可視化技術が必要になる。短パルスレーザー加工の場合には、単発照射の現象を、撮影時間を変えながら繰返し撮影し、時系列に並べて動的変化を可視化することが行われてきた。しかし、この方法では、レーザーの照射間隔は非常に長くなってしまふ。累積パルスの影響を調べるためには、1 から 1000 を越えるパルス数までを、実際の加工条件と同じ繰返し速度で、連続的に照射しながら観察する必要がある。しかし、この要求を満たす観察手法は存在しなかった。そのため、累積パルス数効果の動的な研究は、全く未開拓であった。

2. 研究の目的

(1) 本研究では、超短パルスレーザー加工における、同一箇所に照射されるパルス数、すなわち累積パルス数の影響によって、加工現象がどのように変化するかを、照射中の加工部を直接可視化し観察する事によって、詳細に検討することを目的とした。そのためにパルスレーザー光源と高速度ビデオカメラを組み合わせた、新しい可視化方式の開発が研究期間前半での目標であった。

(2) この新しい可視化方式を、連続照射した際の累積パルス数の影響の可視化に応用することを試みた。これによって、加工速度や加工品質に大きく影響する、レーザーの走査速度や経路の役割について明らかにし、加工プロセスの最適化への指針を得る端緒を得ることを目的とした。

(3) さらに、開発した新可視化手法をレーザーピーニングや液中レーザーアブレーション現象などの短パルスレーザー加工のダイナミクスの研究に展開する事も、目的の一部とした。

3. 研究の方法

(1) 高速度カメラの各フレームで、時間変化だけではなくパルス数による変化をもとらえる、という発想の転換に基づく、新しい可視化手法を開発した。加工現象の時間変化は、加工レーザーと照明レーザー（カメラのシャッターに相当）との時間間隔と繰返し周波数を変えて撮影を行う事で、パルス数の効果と同時に観察出来るようにした。その概要を、以下にまとめる。

① ビデオ撮影の照明に、パルスレーザー光を用いる。録画はレーザー光のみで行うため、これにより高い時間分解能と解像度の達成、プラズマの妨害の除去ができる。

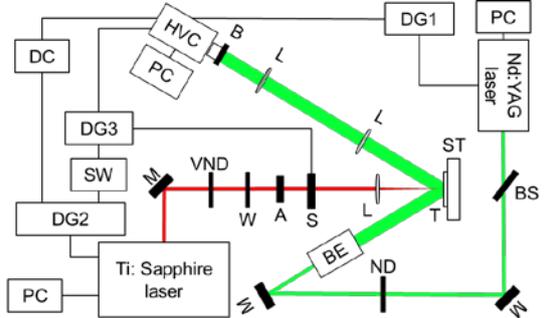
② カメラ/照明レーザーの繰返し周波数は、加工用の超短パルスレーザーより高く設定できる。このため加工パルス毎に複数の画像が録画され、カメラの記録可能な画面数までであれば、加工現象の時間変化が累積パルス数によってどのように変化するかを直接に記録する事が出来る。

③ 現象のさらに高速な時間変化は、両パルスのディレイ、すなわち加工レーザーと照明レーザーとの時間間隔を変えて撮影する事で、観察する。

④ この可視化手法は、3つの撮影手法、(a) 通常の反射光による像、(b) 透過光によるシャドウグラフ、(c) 透明試料を用いた光弾性法、に対して応用でき、加工部の表面形状の変化、ブルーム・デブリの挙動の変化、レーザー誘起応力の変化を観察する。それらの結果から、超短パルスレーザー加工における累積パルス数の影響の3つの面、① 幾何学的

な影響, ② 熱の蓄積の影響, ③ 欠陥・歪の蓄積の影響, を検討する.

(2) 累積パルス数の影響の研究では, 加工用レーザーとしてフェムト秒レーザー (波長 785nm, パルス幅 150fs, 繰返し周波数 1kHz) を使用した. 高速度撮影には, 高速度ビデオカメラを使用し, 照明用レーザーとしては波長 532nm の2つのパルスレーザー, パルス幅 70ns, 繰返し周波数 3k~100kHz のものとパルス幅 35ps, 繰返し最大 1MHz のものを使用した. 図1に高速度レーザーstrobo撮影法の概略図を示す. このシステムを用いて撮影速度 50000fps で1秒間撮影を行った. 照明用レーザーはカメラの撮影フレームと同期させ, 50kHz で発振させた. 加工用レーザーは 1kHz で発振させた. カメラの撮影間隔は 20 μ s であり, 加工用レーザーは 1kHz であるので, 50 枚ごとに次のパルスによる加



HVC : High-speed Video Camera, DC : Down Counter, W : $\lambda/4$ wave plate
VND : Variable Neutral Density, ND : Neutral Density, BE : Beam Expander
B : Band pass filter, BS : Beam Splitter, DG : Delay Generator, A : Aperture
M : Mirror, ST : Stage, T : Target, S : Shutter, L : Lens, SW : Switch

図 1. 高速度レーザーstrobo撮影システム概略図

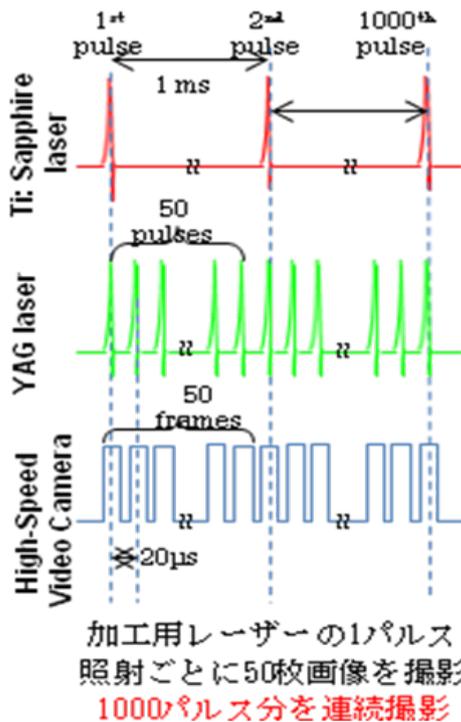


図 2. 高速度撮影の際の加工レーザー, 照明用レーザー, 高速度ビデオカメラのタイミング図.

工現象が撮影されることになる. 焦点距離は感熱紙を使用し, スポットサイズが最も小さい値の位置として求めた. 焦点を試料表面にあわせ, $\lambda/4$ 波長板を用いてレーザーの直線偏光を円偏光に変換した. 試料には, 超微粒子超硬合金 (KD20) を使用した. また, 光学顕微鏡により加工後の観察を行った. 図2に撮影の際のタイミング図を示す. この場合は加工用レーザー1パルス毎に50枚の画像が 20 μ s 間隔で撮影され, 加工パルスの1発目から1000発目までの加工現象を連続して撮影可能である. 撮影間隔を大きくすれば, より多くの累積パルス数の影響を観察できる.

(3) 上述の方法で実験を開始したが, 累積パルス数の増加につれて, 加工レーザーと照明レーザーとのタイミングのずれが生じることが判明した. これは, 照明レーザーと加工レーザーの繰返しをそれぞれのレーザーの内部クロックで制御していたため, それぞれのクロックの微小な差が累積して現れたためであることが分かった. そのため, カメラのフレーム信号を用いて照明レーザーを駆動し, これを電気回路で1kHz まで分周した信号を加工レーザーの外部信号として用いることにした. このようにシステムを改良することで, 累積パルス数の影響を可視化することが可能になった.

(4) レーザーピーニングや液中レーザーアブレーションへの開発した撮影手法の応用では, エポキシ樹脂の試料を液中におき, ナノ秒のパルスレーザーを照射, 光弾性法での撮影により, レーザー誘起現象の可視化を行った.

4. 研究成果

(1) 超硬のパーカッション穴あけの際の試料表面の形状変化について, パルスエネルギーや繰返し率の影響を検討した. さらに, 粒子状の加工くずが間欠的に放出される様子の観察に成功し, 複数の撮影結果を統計的に処理, 粒子の排出は累積パルス数がある程度以上になってから起こること, そのパルス数はパルスエネルギーが高いほど小さくなる傾向であること, など加工ごとに変動のある現象についての知見を得ることが出来た. これは, これまで報告例のない, 新しい結果である. また, 側面方向からの撮影にも成功し, 衝撃波やプルームの挙動が照射パルス数によってどのように変化するのか, についても観察できた. シャドウグラフと合わせてシュリーレン法によるによる動画撮影も行ったが, 得られた画像は鮮明度の改善が必要である.

照射点が固定されているパーカッション加工だけではなく, 試料を走査することで, 溝加工における走査速度の影響を観察すること

が出来た。この場合にも、粒子状の加工屑が間欠的に放出される様子が観察された。ビームを回転させるトレパニング加工については、観察点の変動がピントのずれになって画質に悪影響を与えており、ビームを走査するのではなく試料を回転させる事で撮影場所を固定するなどの更なる改善が必要である。

(2) パルスエネルギーを 0.1mJ, 走査速度を 0.5mm/s として、溝加工を行った。図 3 にある加工用レーザーパルス照射後、0, 20, 40 および 980 μ s 後の時間で撮影した画像を示す。このような画像が各照射パルス毎に得られ、加工途中の現象変化を観察する事が可能になった。レーザーの照射位置を固定し、試料を右方向に走査して溝加工を行っているので、照射部は画像中央であり、右側に加工された溝が写っている。ラインの周囲には堆積物と思われる筋状の模様が規則的に現れた。この模様はレーザー照射部の前方から発生し、側方で一定の幅まで広がっている。筋の間隔は 50~100 μ m 程度であり、走査速度から逆算すると 100~200 パルスで 1 つの筋が形成されていることになる。一つ一つの筋の成長過程も撮影動画から観察する事が出来た。

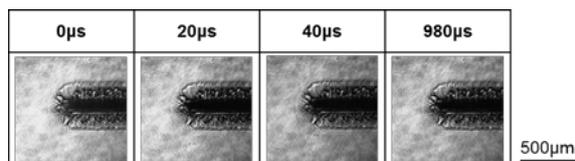


図 3. 溝加工中のあるパルス照射から、0, 20, 40 および 980 μ s 後の撮影画像

また、0 μ s, すなわち加工レーザーパルス照射時の画像では、レーザー照射部が少し白くなっている。これはレーザー照射で発生したプラズマが画像に写っているためである。一方、その後の画像ではプラズマが写っておらず、さらに加工形状の変化もないことから、各パルスでの加工は照射後 20 μ s でほぼ終了していると思われる。

溝周囲の筋状の模様は、試料をアセトンに浸けて超音波洗浄を行った後の観察では消失しており、加工溝の周囲に付着した堆積物であると考えられる。

(3) パルスエネルギー、走査速度が加工に及ぼす影響を調べるため、パルスエネルギー 0.2, 0.05mJ, 走査速度 5, 0.05mm/s の各条件で撮影を行った。

図 4 に各条件での加工中の撮影画像を比較したものを示す。これらの画像は加工用レーザー照射時を撮影したもの(図 3 の 0 μ s に相当)である。パルスエネルギーが増加するにつれて、加工溝の幅および周囲の堆積物が付着する領域が広くなり、レーザー照射時に発生するプラズマの発光強度は、パルス

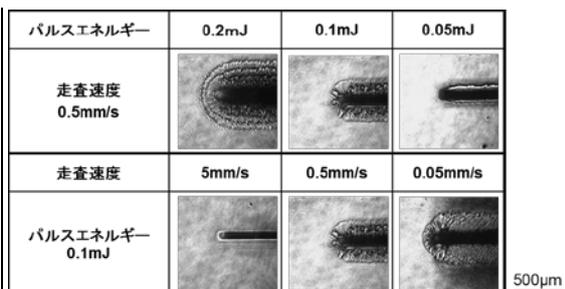


図 4. 溝加工中、レーザーパルス照射時の観察画像。走査速度とパルスエネルギーの影響を示す。上段は走査速度 0.5mm/s でパルスエネルギーを変えた場合、下段はパルスエネルギー 0.1mJ で走査速度を変えた場合の比較を示す。

エネルギーが増加するにつれて強くなった。

走査速度を変えた場合、5mm/s では、加工溝の周囲に堆積物の付着は観察できなかった。0.05mm/s では、加工溝の周囲の筋状の堆積物に加えて、粉末状の堆積物がより大きな堆積幅で観察された。筋状の堆積物がレーザー照射部前方にも観察できるのに対して、粉末状の堆積物はレーザー照射部の側方のみで観察され、排出挙動に差がある事がわかった。

(3) 加工中に、径 10 μ m 程度ある大きな粒子状のデブリが、間欠的に放出される事を見いだした。その一例を図 5 に示す。加工条件はパルスエネルギー 0.1mJ, 走査速度 0.5mm/s である。加工用レーザー照射後、0 から 120 μ s までの推移を表している。40 μ s 以降の画像中で丸で囲んで示した 2 つ並んだ小さな陰が、飛散していくデブリである。照明用レーザーを斜め上方から照射しているため、1 つのデブリの影が 2 つに映っている。画像から求めたこのデブリの大きさは 7 μ m 程度であった。このような一組のデブリの画像からデブリの 3 次元の軌跡と移動速度を求める事が出来た。デブリの大きさは 1~10 μ m 程度のものまで様々であった。

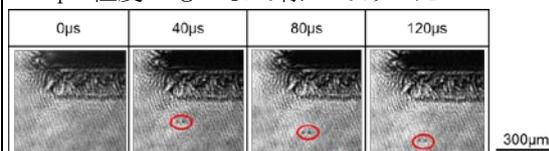


図 5. 飛散するデブリの様子

(4) 同様の観察を穴あけ加工についても行った。溝加工では走査速度によって 1 つの場所にレーザーが照射されるパルス数、オーバーラップ数が増える。走査加工との対比を調べるため、同一箇所を繰り返しレーザー照射を行うパーカッション穴あけ加工における累積パルス数の影響を調べた。図 6 にパルスエネルギー 0.1mJ, 走査速度 5, 0.5, 0.05mm/s で溝加工を行ったときのオーバーラップ数と同じパルス数(6, 61, 612 pulses)

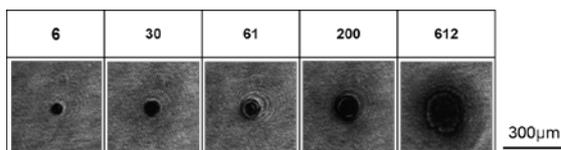


図 6. パーカッション穴あけ加工における累積パルス数の影響

における撮影画像を示す。穴径と対応する溝加工の幅を比較すると、溝幅の方が若干大きくなっていった。

累積パルス数の増加による穴径と溝幅の変化を今回の条件で比較すると、穴あけ加工ではオーバーラップ数の増加によって穴径が大きくなるのに対して、溝加工では溝幅は大きく変わらなかった。また、穴あけ加工でもデブリの放出が観察できたが、その数は極めて少なく $10\ \mu\text{m}$ 程度の比較的大きなものであった。

(5) 本研究で開発、確立した高速度レーザーストロボスコープビデオ撮影技術は、加工用レーザーと適切に組み合わせる事で、これまで解明が進んでいなかった累積パルス数の影響の解明に有効な手段になる事を示す事が出来た。撮影結果は、レーザー加工現象では多くの加工パラメーターが相互に関連し複雑に影響している事が、改めて示された。現在、本手法を活用して系統的な研究を進めている。

(6) 本撮影手法を、液中レーザーアブレーション現象の解明にもきわめて有効である事が分かった。エポキシ樹脂の試料を液中におき、ナノ秒のパルスレーザーを照射、光弾性法で最速で $1\ \mu\text{s}$ 間隔の高速度ビデオ撮影を行った。レーザー誘起応力波、衝撃波の固体試料中および液中への伝播挙動、レーザー誘起キャビテーションバブルの生成と崩壊、崩壊に伴う 2 次衝撃波の発生とその強度評価、引き続き 2 次バブルの生成等の複雑な現象を、高い時間分解能で明瞭にとらえる事が出来た。レーザーピーニングや液中レーザー照射によるナノ粒子生成現象の解明などの研究を進めており、これらの分野でもユニークで有効な研究手段として、高く評価されている。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 7 件)

1. R. Tanabe, T. T. P. Nguyen and Y. Ito: Dynamical Visualization of Laser-Induced Shock Phenomena in Liquid; The Review of Laser Engineering, 査読有, **42** (6) 448-451 (2014)
 2. T. T. P. Nguyen, R. Tanabe and Y. Ito: Influences of Focusing Conditions on the Dynamics of Laser Ablation at a Solid-Liquid Interface; Applied Physics Express, 査読有, **6** 122701-1-4 (2013)
 3. T. T. P. Nguyen, R. Tanabe and Y. Ito, Effects of an absorptive coating on the dynamics of underwater laser-induced shock process; Applied Physics A, 査読有, (Published on-line) (査読有) (2013) D. O. I 10.1007/s00339-013-8193-2
 4. T. T. P. Nguyen, R. Tanabe and Y. Ito: Laser-Induced Shock Process in Under-Liquid Regime Studied by Time-Resolved Photoelasticity Imaging Technique; Applied Physics Letters **102** 124103-1-4, (2013)
 5. Khai Xuan Pham, Rie Tanabe, Yoshiro Ito: Trepanning Drilling of Microholes on Cemented Tungsten Carbide Using Femtosecond Laser Pulses; Journal of Laser Applications 査読有, **24** (3) 032007-1-6 (2012)
 6. 田辺里枝, 伊藤義郎: レーザーを光源とする高時空分解能可視化法の開発と放電加工、レーザー加工への応用、電気加工技術, 査読無, Vol. **36**, No. 114, 28-33 (2012)
 7. Rie Tanabe, Yoshiro Ito, Naotake Mohri, Takahisa Masuzawa: Development of peeling tools for micro-EDM; CIRP Annals -Manufacturing Technology, 査読有, **60**, 277-230 (査読有) (2011)
- 〔学会発表〕(計 18 件)
1. Rie Tanabe, Kenso Tamura, Thao T. P. Nguyen, Takahiro Sugiura, and Yoshiro Ito: Bubble dynamics in laser ablation in liquid studied through high-speed laser stroboscopic videography, ANGEL 2014, 3rd Conference on Advanced Nanoparticle Generation and Excitation by Lasers in Liquids (19-21, May 2014, Matsuyama, Japan)
 2. 田村謙宗, 勝部孝行, 田辺里枝, 伊藤義郎: 液中レーザーアブレーションによる金属微粒子生成ダイナミクス-高速度レーザーストロボビデオ撮影によるキャビテーションバブル内部の観察-, 2014 年度精密工学会春季大会学術講演論文, 167-168 (2014) (東京大学 2014. 3. 18)
 3. 片岡祐太郎, 田辺里枝, 伊藤義郎: フェムト秒レーザーによる超硬合金の微細加工の時間分解観察, 2014 年度精密工学会春季大会学術講演論文集, 175-176 (2014) (東京大学 2014. 3. 18)
 4. T. T. P. Nguyen, T. Sugiura, R. Tanabe and Y. Ito: Laser Ablation under Liquid Studied through Fast Laser Stroboscopic Videography: Dynamics of

- Cavitation Bubbles and Shock Waves, COLA2013-12the International Conference on Laser ablation, (6 - 11, October 2013, Hotel Continental Terme, Ischia, Italy)
5. T. T. P. Nguyen, R. Tanabe and Y. Ito: Effects of focal position and liquid properties on under-liquid laser-induced shock process studied by time-resolved photoelasticity imaging technique, proceedings of LAMP2013 - the 6th International Congress on Laser Advanced Materials Processing, (朱鷺メッセ, 新潟 2013. 7. 23)
 6. T. T. P. Nguyen, R. Tanabe and Y. Ito: Dynamics of Laser-Induced Cavitation Bubble Studied by High-Speed Laser Stroboscopic Photoelasticity Videography, (ETS de Ingenieros Industriales, Universidad Politecnica de Madrid, SPAIN, 2013. 5. 7)
 7. 杉浦隆浩, 田村謙宗, 田辺里枝, 伊藤義郎: 液中レーザーアブレーションによる微粒子生成ダイナミクスの高速度レーザーstroボビデオ撮影による観察, 2013 年度精密工学会春季大会学術講演論文集, 571-572 (2013) (東京工業大学 2013. 03. 14)
 8. 菊地勇氣, 岸野友哉, 田辺里枝, 伊藤義郎: フェムト秒レーザーによる超硬材料のパーカッション加工の動的観察, 2012 年度精密工学会春季大会学術講演論文集, 23-24 (2012) (首都大学東京 2012. 03. 14)
 9. Rie TANABE, Yuki KIKUCHI and Yoshiro ITO: Micro-hole Drilling by Ultrafast Laser Pulses Studied through High Speed Movies, Proceedings of LPM2012 - the 13th International Symposium on Laser Precision Microfabrication (Washington D.C. 2012. 6. 12)
 10. Khai Xuan Phan, Rie Tanabe, and Yoshiro Ito: Formation of LIPSSs in Ultrafast Laser Trepanning Drilling of Microholes on Cemented Tungsten Carbide, Proceedings of LPM 2012 -the 13th International Symposium on Laser Precision Microfabrication, Catholic University of America, Washington DC, USA, 13 June 2012
 11. Rie Tanabe, Hiroimi Isobe, Yukio Miyashita and Tsutomu Takahashi: Visualization of high-speed phenomena and progress in dynamical study on machining processes , International Symposium on Global Multidisciplinary Engineering 2011, (ニューオータニ長岡 2011. 01. 24)
 12. Thao Nguyen, Rie Tanabe and Yoshiro Ito: Dynamics of Laser Induced Under Liquid Ablation Studied by Photoelasticity Technology, Proceedings of LPM 2011 -the 12th International Symposium on Laser Precision Microfabrication, #11-003 (Th3-0-2, A#0086), (かがわ国際会議場 & サポートホール高松 2011. 06. 09)
 13. T. T. P. Nguyen, R. Tanabe, and Y. Ito, Time-resolved Investigation of Laser Induced Shock Process using Photoelasticity Imaging Technique: Effects of Sacrificial Coating and Liquid Overlay, The 3rd International Conference on Laser Peening and Related Phenomena (大阪国際会議場 2011. 10. 13)
 14. Yoshiro Ito, Rie Tanabe, Masayuki Kato, and Yuki Kikuchi: Dynamics of percussion drilling by ultrafast laser through fast imaging system, 11th International Conference on Laser Ablation-COLA11, (13-19, November 2011, Playa del Carmen, Mexico)
 15. 加藤雅之, 菊地勇氣, 田辺里枝, 伊藤義郎: 超硬のフェムト秒レーザー加工の高速イメージング観察, 121-122 (東洋大学白山キャンパス 2011. 03. 15 発表会中止)
- [図書] (計 0 件)
- [産業財産権]
 ○出願状況 (計 0 件)
 ○取得状況 (計 0 件)
- [その他]
<http://mcweb.nagaokaut.ac.jp/~itoy/>
6. 研究組織
- (1) 研究代表者
 伊藤 義郎 (Ito Yoshiro)
 長岡技術科学大学 機械系 教授
 研究者番号 : 60176378
 - (2) 研究分担者
 田邊 里枝 (Tanabe Rie)
 長岡技術科学大学 機械系 助教
 研究者番号 : 70432101
 - (3) 研究分担者
 磯部 浩已 (Isobe Hiroimi)
 長岡技術科学大学 機械系 准教授
 研究者番号 : 60272861