

フェムト秒レーザーによる超硬製微細金型加工技術の開発

長岡技術科学大学 機械系

教授 伊藤義郎

(平成 21 年度一般研究開発助成 AF-2009217)

キーワード：フェムト秒レーザー，超硬，微細加工，LIPSS

1. 研究の目的と背景

金型は、塑性加工はじめ多くの生産加工技術において、必須とされており、「産業の米」と称されるほどである。金型には、耐久性などから高硬度材料が用いられる場合が多いが、これらの材料は、加工が難しく、製作に時間がかかるため、コスト上昇の要因となっている。

高硬度金型材料の中でも特に超硬材料は、加工が難しく近年の先端加工法開発の重要な対象の一つとなっている。従来技術としては、放電加工があるが、工具電極の作成が必要であること、加工速度が遅いこと、加工表面粗さが粗くまた熱影響層が生じるため、研磨などの仕上げ加工が必要となる場合が多いこと、などの問題点を抱えている。

フェムト秒レーザーなどの超短パルスレーザーによるアブレーション加工は、熱影響の極めて少ない微細加工が、高硬度・脆性材料に対しても可能である。近年では、超硬材料に対するフェムト秒レーザー加工の研究が行われており、切削加工や放電加工に替わる直接加工法として期待される。

そこで、本研究では、以下の点を目的として研究を始めた。

- (1) フェムト秒レーザーによる超硬へのアブレーション加工について、加工条件と、加工特性、加工品質との相関について、実験的に調べる。加工現象を、レーザーを光源とする高速撮影法で観察し、パラメータの相互関係を明らかにする。
- (2) レーザー光の偏光、走査方法が、形状精度に与える影響について、検討する。また、超硬の性質が加工条件にどのように影響するかについても、検討する。
- (3) レーザー光の照射角度や偏光方向の制御により、加工部側壁のテーパを除去する、あるいはオーバーハング形状に加工する方法を開発する。

本研究において、(1)については、短パルス高繰り返しレーザーを照明に用いた、超高速ビデオ撮影の手法を開発し、照射パルス数の増加による加工現象の変化を、はじめて連続的に捉えることに成功した。(2)(3)については、円偏光のほうが一様な形状が加工されることを示した。また、加工穴側面の詳細観察によって、加工穴内壁面に微細な周期構造、Laser Induced Periodic Surface Structure (LIPSS)、が形成されることを見出し、その周期や方向がレーザーの偏光によって変化することを明らかにした。

2. 実験方法

2-1. 穴あけ加工と加工穴表面の観察、LIPSS¹⁻³

パルス幅 150fs、波長 785nm、繰り返し 1kHz のフェムト秒レーザーを用いて、厚さ 0.5 及び 1mm の超硬板に直径 300 μ m の円形の穴開け加工を行なった。ビーム走査には、ガルバノスキャナーを用い、焦点距離 80mm のレンズで試料表面に大気中で集光し、加工した。パルスエネルギーを 0.8mJ として、焦点位置、レーザーの走査速度と、加工速度、加工形状精度、加工面粗さなどの相関を調べた。加工した穴の中心を通る位置で試料を切断し、走査型電子顕微鏡 (SEM) によって断面を観察、加工穴形状と内壁面の表面性状を調べた。

2-2. レーザーを光源とする超高速撮影システム⁴

加工条件の相互の関連性を調べるために、加工現象の可視化を試みた。照明光として、短パルスレーザー光を用いた、高速度ビデオカメラによる超高速撮影システムを開発した。このシステムの特徴は、レーザー光の波長のみで撮影することでプラズマ発光の影響を低減できること、また、比較的簡単な光学系で、拡大観察が可能なこと、さらに、撮影の時間分解能が、カメラのシャッター速度ではなく、レーザーのパルス幅によって決まるので、ns はもちろん、レーザーを選べば ps あるいは fs オーダーの撮影が可能な

ことである。

図 1 に、今回用いたイメージングシステムの概略図を示す。撮影には、フォトロン社製の高速カメラ、Fastcam SA1.1 を用い、照明には、Spectra-Physics 社製の Q-スイッチ Nd:YAG レーザー、Y70S-532Q を用いた。この場合には、撮影速度が速くなると画像の解像度が低下するため、空間分解能が劣化してしまう問題がある。このため、撮影速度の限界は 50kHz となった。その際の、各レーザーパルスとカメラ撮影のタイミングチャートを図 2 に示す。フェムト秒レーザーの 1 パルス目から 1000 パルス目までのそれぞれに対して、パルス照射毎に 20 μ s 間隔で 50 枚の連続写真が撮影でき、照射パルス数によって加工現象がどのように変化していくのかを観察することが可能になった。

3. 実験結果と考察

3-1. トレパニングによる超硬の穴あけ加工¹⁻³

ガルバノスキャナーを用いた場合の集光径はおおよそ 30 μ m であったので、300 μ m 径の貫通丸穴を超硬の板に

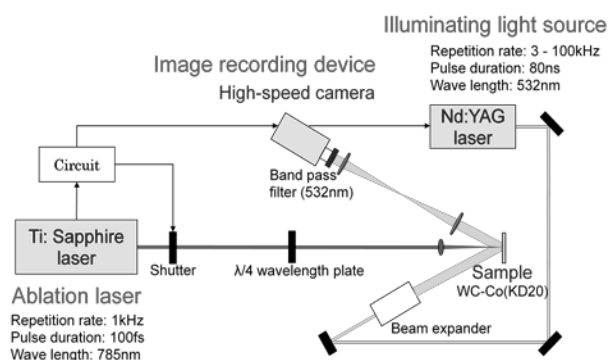


図 1 高速連続イメージングシステム概略図

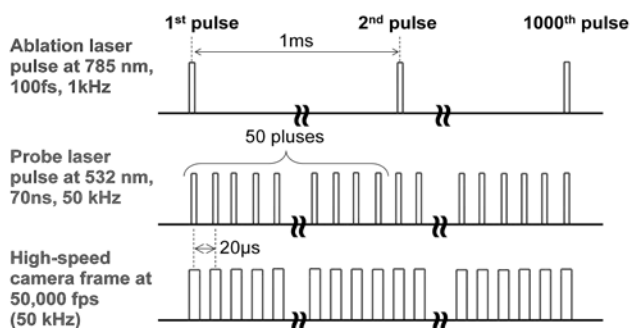


図 2 撮影速度 50kHz の場合の、ポンブレザー（上段）とプローブレザー（中段）およびカメラのシャッター（下段）のタイミングチャート。

あけるために、ビームの走査径を 260 μ m に設定した。この条件では、加工部中心にはレーザー光は照射されないで直接は加工されず、円筒形に残る。このコアの部分は、穴が貫通する直前に、レーザー照射側に飛び出てくるか、あるいは、抜け落ちるのが観察された。

レーザー光の偏光の影響を調べた。直線偏光のまま加工を行うと、穴の出口側の形状は円形にはならず偏光方向に延びた楕円形になってしまった。ビームの走査径（加工穴径）を小さくすると、扁平度は大きくなり、コアが出来ない 60 μ m の走査径では、変形した十字型になった。一方波長板を用いて直線偏光を円偏光に変え加工を行ったところ、入口側、出口側ともに円形の加工穴が得られた。これらの結果を図 3 に示す。直線偏光の場合、トレパニング操作によって照射位置が移動すると、位置によって偏光方向が加工壁面に対して変化し、p-偏光と s-偏光の成分比が変化する。壁面への入射角が大きいので、p-と s-偏光成分の吸収率（反射率）に大きな差が生じ、これが加工穴形状の変形に関係している、と考えられる。円偏光の場合には、このような位置による成分の変動が起こらないので、均一に加工が進展し、円形の加工穴が得られる。加工穴のテーパは円偏光の場合が小さく、直線偏光の場合は図 4 に示すように、偏光方向と垂直方向の断面で大きく、平行方向の断面では、円偏光の場合と同じ程度に小さかった。

図 5 に、円偏光で加工した場合の、走査速度による加工の進展状況を、同一の照射エネルギー量で比較した結果を示す。走査速度が 0.035mm/s¹ と遅い場合と 15mm/s¹ と速い場合を比較すると、走査速度が速い方が加工の進展は

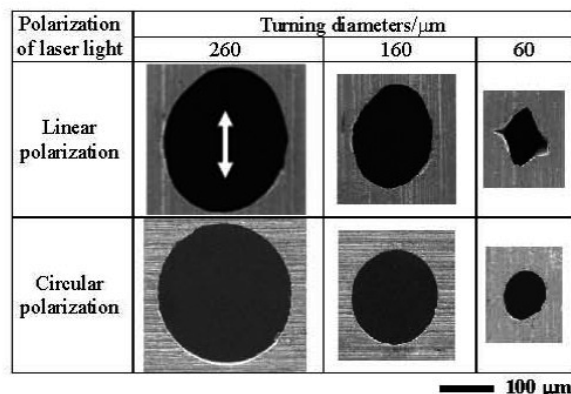


図 3 直線偏光（上段）と円偏光（下段）でトレパニング加工した貫通穴の裏面（出口側）の形状。加工穴径は左からそれぞれ 300, 200, 100 μ m である。

速いがテーパは大きくなった。焦点位置は、試料表面に合わせた方が、試料内部あるいは表面手前に合わせた場合と比べて、加工速度が大きく、かつテーパの小さい良好な形状の穴加工が出来た。

3-2. 加工穴側壁面への LIPSS の形成³

加工穴の側面を詳しく観察したところ、規則的な周期構造が全面に形成されていることが、わかった。これは、フ

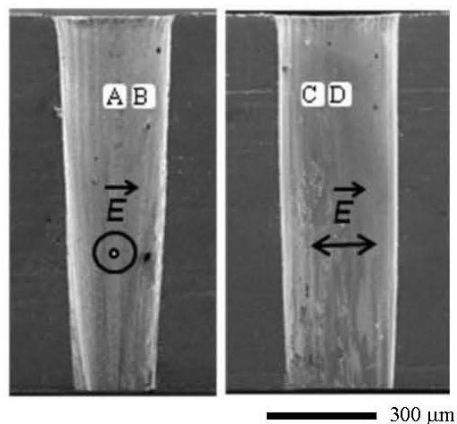


図4 直線偏光で加工した300 μm 径の貫通穴の断面写真。テーパは偏光方向と垂直方向の断面（左側）で大きく、平行方向の断面（右側）では、小さい。

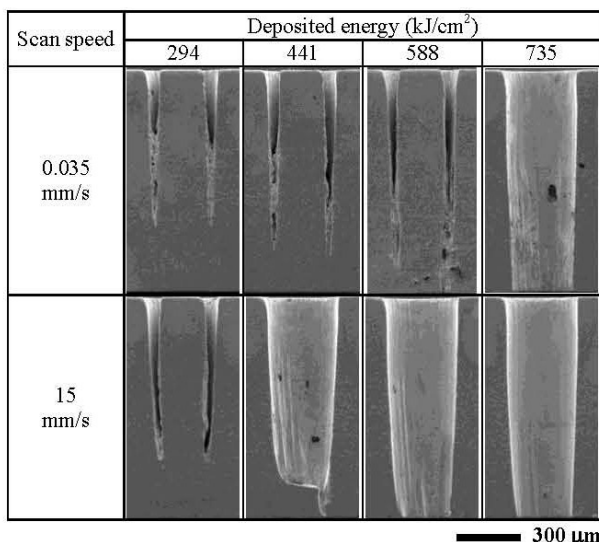


図5 円偏光の場合の、走査速度による加工の進展状況の比較。同一の照射エネルギー量での断面観察結果。走査速度が 0.035mm/s と遅い場合（上段）と 15mm/s と速い場合（下段）では、速い方が加工の進展も速いがテーパは大きくなる。中心のコア部は貫通時まで残る。下段の $441\text{ kJ}/\text{cm}^2$ のコア部は断面を磨いている際に欠落した。

ェムト秒レーザー照射によって、多くの物質の表面に形成されることが知られている Laser Induced Periodic Surface Structure, LIPSS あるいは ripple と同様の表面構造である。周期構造の間隔は、レーザー波長より小さい場合が多く、レーザーを用いた表面へのナノ構造付与技術として注目され、様々な研究がおこなわれている。多くの場合、レーザーを試料表面に対して垂直に照射して周期構造を形成し、その性状や形成メカニズムについて議論されている^{5,6}。我々が今回見出したような、加工穴側壁での LIPSS 形成は、銅に対する加工で報告があるが、詳細な検討は行われていない⁶。

図6に、円偏光を用いた場合に、加工穴内壁面に形成された LIPSS の走査顕微鏡（SEM）写真を示す。LIPSS の方向は試料表面に平行（レーザー照射軸に対して垂直）方向で、加工穴内壁の全面にわたって、均一に形成された。その間隔は約 300nm で、レーザー波長の半分以下である。SEM 写真では、LIPSS は超硬の WC 粒子の表面にのみ形成され、バインダーである Co は、欠落しているように見える。Co は WC と比べて融点が低いので、加工過程で優先的に蒸発したものと考えられる。

直線偏光を用いた場合に、偏光方向と照射位置での入射面とのなす角 α を、図7のように定義すると、 α はトレパニングの過程で連続的に変化する。加工穴内壁面に形成された LIPSS の SEM 写真を図8に示す。LIPSS の方向は、 α によって変化する、 $\alpha=0^\circ$ の場合の水平方向（円偏光の場合

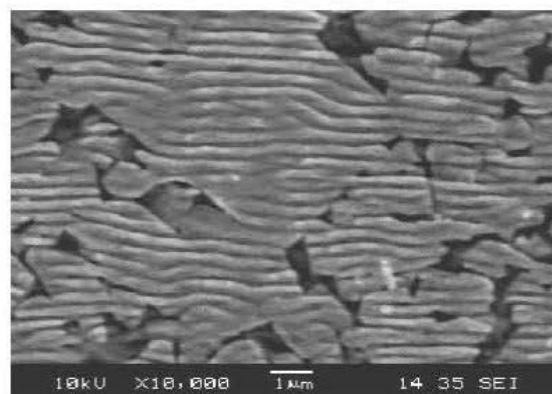


図6 円偏光を用いて加工穴内壁面に形成された LIPSS の走査顕微鏡（SEM）写真。LIPSS の間隔は約 300nm で、レーザー波長の半分以下である。周期構造の方向は試料表面に平行（レーザー照射軸に対して垂直）で、加工穴内壁の全面にわたって、均一に形成された。

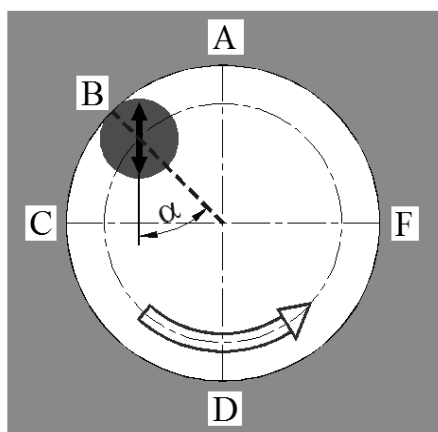


図 7 直線偏光（黒の 2 重矢印）と穴側面への入射面とのなす角 α の定義。位置 A,D では $\alpha=0^\circ$, C,F では $\alpha=90^\circ$ になる。 α はトレパニングの過程で連続的に変化する。

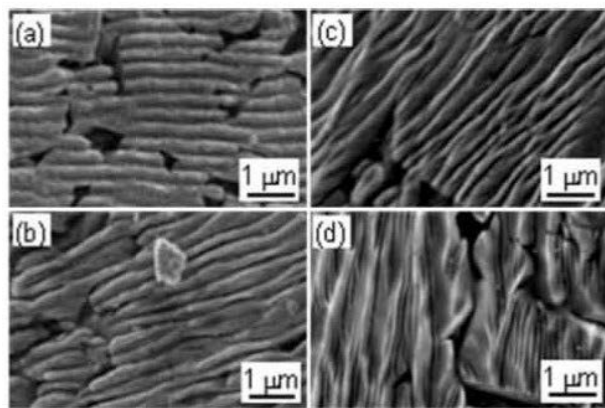


図 8 直線偏光を用いて加工穴内壁面に形成された LIPSS の走査顕微鏡 (SEM) 写真。(a) $\alpha=0^\circ$, (b) $\alpha=30^\circ$, (c) $\alpha=60^\circ$, (d) $\alpha=90^\circ$ である。LIPSS の間隔は(a)では約 300nm であるが (d) では長い周期と短い周期の 2 種類の構造が認められる。

合と同じ) から、 $\alpha=90^\circ$ の場合の垂直方向まで、連続的に変化した。また、間隔は、 $\alpha=0^\circ$ では約 300nm と円偏光の場合と同じであるが、 α が 60° 以上になると長い周期と短い周期の 2 種類の構造が認められ、 $\alpha=90^\circ$ では長い周期はレーザー波長と同程度にまでなった。 α による周期の変化を図 9 に示す。 α が 60° より大きくなると 2 つの周期構造が認められ、短い周期は約 120nm と波長の 6 分の 1 以下になるが、長い周期は α が 90° に近いほど長くなった。これまでの研究でも Low Spatial Frequency LIPSS (LSFL) と呼ばれる長い周期構造と High Spatial Frequency LIPSS (HSFL) という短い周期構造の存在が報告されている⁷⁻¹¹、これらは異なる照射条件下で形成さ

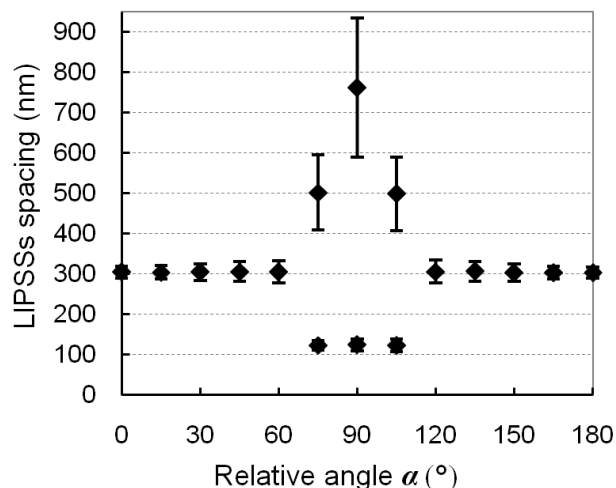


図 9 周期構造の間隔の、偏光方向と照射位置での入射面とのなす角 α による変化。

れると報告されており、今回のように同時に形成される例はない。周期構造の間隔については、今後さらに検討する必要がある。

LIPSS の方向もまた、 α によって変化する。LIPSS の方向角 β を図 10 のように定義し、 β を α の関数として示すと、図11のようになった。一般に LIPSS は偏光の電場ベクトルと垂直の方向にできるとされている。しかし、図11の結果は、入射レーザーの偏光方向からだけでは、再現できなかった。そこで、我々は3-1で示したような p-成分と s-成分の影響の結果を踏まえて、大きな入射角の場合の p-成分と s-成分の吸収率の差を考慮に入れ、LIPSS が吸収された光電場の方向と垂直方向に形成されるというモデルを作り、それに基づいて β の α による変化を計算した。その結果を図 11 に示す。入射角を 82° とした場合に、実

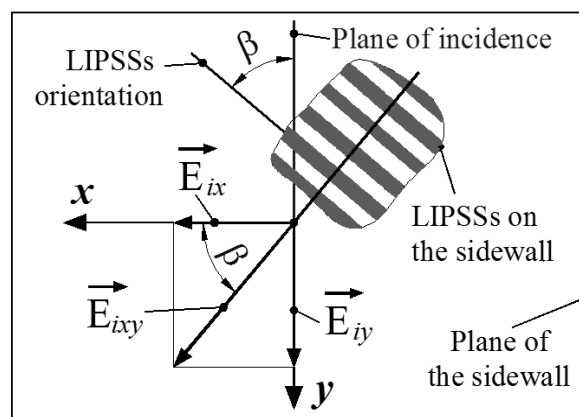


図 10 LIPSS の方向角 β の定義

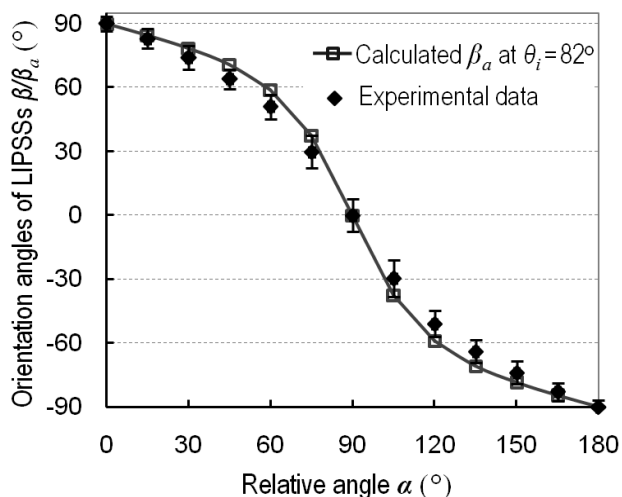


図 11 LIPSS の方向角 β の α による変化。実線は我々のモデルに基づいて入射角 82° で計算した場合の計算値。実験値とよく一致している。

験結果を再現できた。この入射角はレンズの焦点距離などから考えて、妥当な値である。この結果は、トレパニングの際に、ビームの位置に合わせてレーザーの偏光方向を制御すれば、加工穴内壁面に、望む方向にそろった微細な溝を形成できることを示している。このようなナノスケールの微細構造は、表面特性の制御に非常に有効であり、今後一層の展開を図っていきたい。

3-3. 高速度撮影による加工過程の時間分解観察：照射パルス数による変化

フェムト秒レーザーによる加工は、多数のパルスを連続的に照射しながら、アブレーションによって所望の形状を作り出すものが多い。この場合、同一個所に複数のパルスを重ねて照射することになり、それまでに照射されたパルスによって形状等が変化した場所に、次のパルスが当たることになる。したがって、加工現象は照射パルス数によって変化するはずである。フェムト秒レーザー加工において、レーザーの走査速度や走査経路によって加工特性が変化することがあるが、これは、このようなパルス累積の効果が影響していると考えられる。我々は 2-2 で述べた超高速撮影システムを用いて、超硬のパークッション穴あけ過程を、1 パルスから 1000 パルス目まで撮影し、加工現象の累積パルス数による変化を連続して観察した。図 12 に 1 から 1000 発までの、レーザー照射と同時に撮影した画像を一部抜き出して示す。中心の白い部分はレーザー誘起ブ

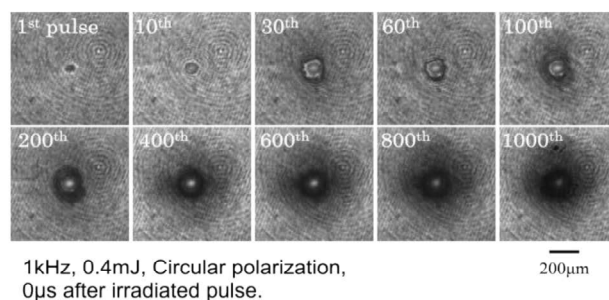


図 12 超硬をフェムト秒レーザーでパークッション加工した際の 1 発目から 1000 発目までの照射部の変化。パルス照射と同時に撮影した画像。中心の白い部分はプラズマ、周囲の黒色部が堆積したデブリの部分。

ラズマ、周囲の黒色部が堆積したデブリの部分である。デブリの堆積範囲がパルス数とともに徐々に広がっていくのがわかる。この黒変部は超音波洗浄によって除去されるので、微細な粉末状のデブリが表面に堆積している範囲であると考えられる。

ビデオ画像の中に、間欠的に粒子状のデブリが加工穴から放出される様子が撮影されているのが、見つかった。図 13 にその例を示す。最上段に示した 202 発目の照射後の画像に、白丸で囲った 2 つの黒点のペアが移動していく様子が写っている。これは加工部から粒子が放出され移動していく様子を撮影したものである。黒点がペアで写っているが、これは撮影配置の幾何的な効果で、ひとつの粒子が撮影用レーザー光を入射時と反射時の 2 回遮ることになるためである。この 2 つの黒点の位置から、簡単な 3 角法で粒子の移動速度や方向を求めることができる。次の 203 発目のパルス照射後の画像にはこのような黒点は写っていないので、このような粒子の放出は、不規則に間欠的に起こることがわかる。例えば、992 パルス後の画像にも黒点のペアが認められるが、その速度は 202 発目と比べてかなり遅くなっている。照射パルス数と粒子の放出頻度の関係を、6 回の撮影から統計的にまとめた結果を棒グラフにして図 14 に示す。図には別に求めた加工穴深さのデータも示した。照射パルス数が 200 から 300 の範囲で放出粒子数が一番多かった。加工過程で不規則に生起する現象を捉え、統計的に検討することができた。このような観察は、走査速度と走査経路が加工特性に与える影響を検討する上で有効である。

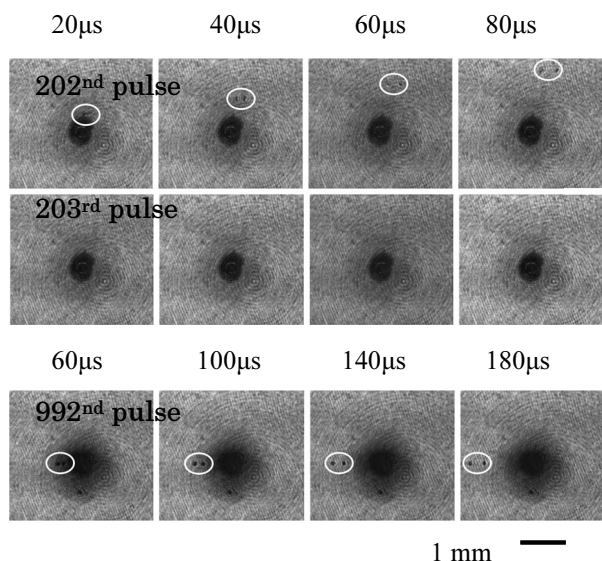


図 13 加工部からの粒子の放出を撮影した画像。最上段の 202 発目の照射後の画像に、白丸で囲った 2 つの黒点のペアが移動していく様子が写っている。次の 203 発目の画像（中段）ではこのような点は認められない。同じような黒点の像は下段に示した 992 発目でも観察された。

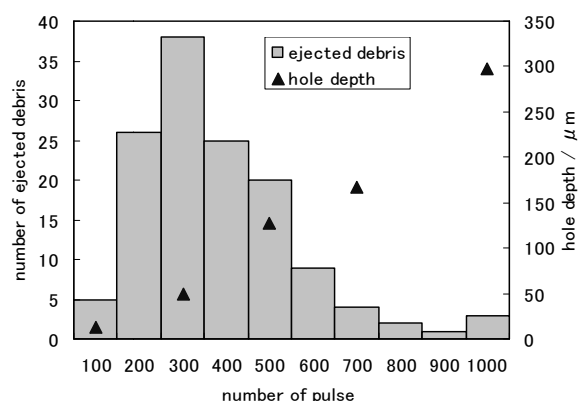


図 14 照射パルス数と粒子の放出頻度のヒストグラム。
6 回の撮影結果を統計的にまとめた。

4. まとめ

フェムト秒レーザーを用いた超硬の微細加工について、検討した。

- (1) トレパニングによる穴開け加工において、円偏光の場合にテーバが少い均一な形状の加工がおこなえた。焦点位置は試料表面にある場合が、加工速度、形状ともに優れていた。
- (2) 加工穴内壁面に、LIPSS の形成が認められた。LIPSS の方向と間隔はレーザーの偏光に大きく依存し、

円偏光では水平方向に 300nm 間隔で全面にわたって形成された。直線偏光の場合には LIPSS の方向、間隔ともに、偏光方向と照射位置での入射面とのなす角 α に依存して変化した。

- (3) レーザーを光源とする超高速ビデオ撮影法を開発し、パーカッション加工過程を撮影、累積パルス数の増加に伴う加工部の変化を観察した。また、加工部から粒子の放出が間欠的に発生していることを観察、統計的な解析を試みた。

今後、加工穴内面の LIPSS の機能の検討、形状加工における走査速度や経路と加工品質の関係についての検討を進めていく計画である。

5. 謝 辞

本研究は、天田金属加工機械技術振興財団平成 21 年度一般研究開発助成 AF-2009217 の他、科学研究費補助金基盤研究(B) 22360060 の支援を受けて行われた。

参考文献

- 1) K. X. Pham, R. Tanabe, and Y. Ito, J. Laser Appl. **24**, 032007 (2012)
- 2) K. X. Pham, K. Saginawa, R. Tanabe, and Y. Ito, Proc. 29th ICALEO, LIA Pub#613, Vol.103, 1270-1275
- 3) K. X. Pham, R. Tanabe, and Y. Ito, (to be submitted)
- 4) R. Tanabe, Y. Kikuchi and Y. Ito, Proc LPM2012 (in preparation) (2012)
- 5) A. Y. Vorobyev, V. S. Makin, and C. Guo, Phys. Rev. Lett. **102**, 234301 (2009)
- 6) A. Weck, T. H. R. Crawford, D. S. Wilkinson, H. K. Haugen, and J. S. Preston, Appl. Phys. A **89**, 1001 (2007)
- 7) J. Bonse, A. Rosenfeld, and J. Kruger, Appl. Surf. Sci. **257**, 5420 (2011)
- 8) R. Le Harzic, D. Dorr, D. Sauer, F. Stracke, and H. Zimmermann, Appl. Phys. Lett. **98**, 211905 (2011)
- 9) G. Miyaji and K. Miyazaki, Opt. Express **16**, 16265 (2008)
- 10) Costache, M. Henyk, and J. Reif, Appl. Surf. Sci. **186**, 352 (2002)
- 11) O. Varlamova, F. Costache, M. Ratzke and J. Reif, Appl. Surf. Sci. **253**, 7932 (2007)