

ピコ秒レーザー加工による光学素子モールド成形用 セラミック型材化技術の開発

芝浦工業大学 デザイン工学部
教授 相澤 龍彦
(平成 23 年度一般研究開発助成 AF-2011202)

キーワード：ピコ秒レーザー加工、セラミックス、グラシーカーボン、光学素子、モールド型、モールドプレス

1. 研究の目的と背景

レーザー加工技術は、生産技術の一手段として定着しつつあるが、なお CO₂ レーザー・エキシマレーザーあるいは $\mu\text{s} \cdot \text{n s}$ オーダーの固体レーザーが主流である。すでに文献 1) で評価しているように、この種のレーザーは高エネルギー利用には適しているが、加工時の熱影響が大きく、微小孔加工においてすら、粉末のデポジットあるいは孔まわりの変形は避けられない。ここに、熱影響はほとんどない、ノンサーマルあるいはコールドレーザー加工の必要性がある。ピコ秒レーザーに代表される極短波長レーザーでは、すべての加工工程がアブレーションのみで生じ、アブレーション時の物質流動とレーザー光とが空間・時間軸上で干渉しないために、上記の熱影響はほとんど発生しない。加えて、光路制御による多様な加工を実施できるため、通常では不可能な微細加工や多次元加工が可能となる。さらに、光の空間干渉の利用、位相差制御などを活用することで、機械的な除去加工では想定すらできない加工方法を開発することができる²⁻⁴⁾。

DOE(Diffractive Optical Element)に代表される光学素子は、それぞれの素子機能・回折効果に応じて、その表面に微細パターンを転写形成させる。また共鳴構造・半波長構造の光学素子では、光の空間干渉を利用するため 3 次元微細パターン構造を作成する必要がある。これらは、形状急峻度・パターンユニットの高アスペクト比など、従来の切削加工・熱レーザー加工では実現はほとんど不可能であり、ここにもピコ秒あるいはフェムト秒レーザー加工の必要性がある。

ここでは、光学素子モールドプレス成形用のセラミック金型への、自在なマイクロテクスチャ形成を行う多次元レーザー加工技術の確立を最終目標に、まずセラミック材へのレーザー加工実験を行い、その寸法精度を詳細に検討する。特に 2 次元テクスチャの配列性について調査し、その精度を考察する。その上で、モールド成形用型材として、グラシーカーボンを選択し、レーザー加工によるテクスチャ形成とモールドプレスによる転写成形実験を行い、レーザー加工による型材作製の有用性を実証する。さらにピコ秒レーザー加工における不安定性現象とその解決法についても言及し、これからの短波長レーザー加工のあるべき方向性を示唆する。

2. 実験方法

2・1 レーザー加工システム

精密機械切削と同様に、精密な位置制御を基本とするレーザー加工システムでは、グラナイト製の定盤上に加工システムを構築する。(株)リプワークスと共同で開発したピコ秒レーザー加工システムの外観を示す。



図 1 開発したレーザー加工システムの外観。

採用したレーザーは、基本波出力が 50 W、パルスエネルギーが 1 パルスあたり 250 μJ で、実測パルス幅が 8-10 ps である。この発振条件をベースに、事前のマイクロパターン加工試験結果などを考慮し、後述するように試料の高精度位置制御、レーザービーム制御に加えて、ビーム回転機構を搭載することで、光学系を含むシステムを構築した。そのダイアグラムを図 2 にまとめて示す。

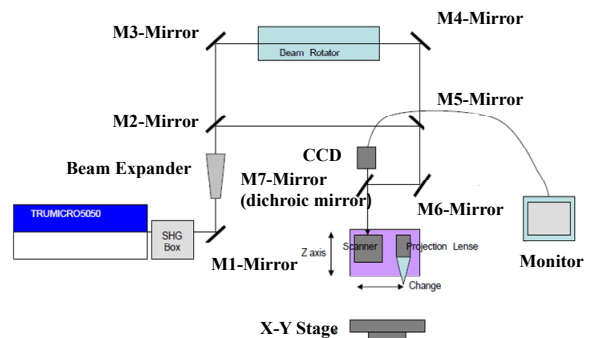


図 2 当該レーザー加工装置の光学系システム。

2次高調波（SHG）への変換装置、ビーム拡大装置を常備するとともに、ビーム回転制御機構を設置することで、エネルギー分布の少ない高品位のレーザーパルスを、スキャナーを介して、被加工物に照射できる。加えて、レーザー光の入射角度を制御することで、高アスペクト比を有するパターンの形成にも対応する。後述するように、高品質のレーザービームを照射するためには、レーザー加工パスとともにビーム品質の制御が不可欠となる。最後に、図2に示したビームラインでのレーザーパワーの伝送率を求める。図2より推察されるように、各ライン間・後述するビーム・ローテータおよび集光レンズなどにより、レーザーパワーロスが生じる。パワーメータで測定すると、基本波で21%、SHGで39%のロスが生じる。基本波でのロスがより小さいのは、図2におけるビーム反射コーティングなどが、基本波に準じて設計されているためと考えている。

2・2 レーザービーム制御

多次元マイクロパターン転写形成加工を行うには、後述する加工パスの制御性に加えて、レーザービームの高品位化をはかる必要がある。ここでは、光学部品を搭載したスピンドルをサーボモータで高速回転させる、レーザービームローテータを開発した。この装置の動作メカニズムを図3に示す。

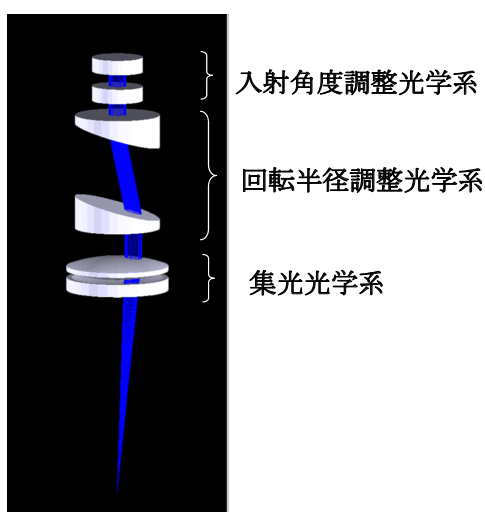


図3 ビームローテーションによる制御例。

同図において、回転中に任意の角度、任意の回転半径に調整することで、熱影響部を最小にとどめ、高精度の加工を実現する。実際、低速領域（停止状態）から高速状態（5000rpm）まで変化させた場合、静止時ならびに共振周波数域を除き、最大振幅は $0.35\mu\text{m}$ 以下であり、加工状態を乱さずに、レーザービームのみを制御できることを実証した。その上で、静止時との加工状態を比較すると、静止時には明瞭な熱影響部が観察されるのに対して、回転時にはほとんどその領域が検出できないことがわかった。

2・3 レーザー加工パスデザイン

多次元マイクロパターン形成加工パスを設計する場合には、加工ステージの位置制御系ならびに回転制御系について最適化を行う必要がある。リニアモータ駆動のX-Yステージでは、フルストローク（600mm x 450mm）において、実測した繰り返し位置決め誤差は $0.5\mu\text{m}$ 以下であった。特に光学系に関しては、無収差光学レンズとして、屈折率分布を内部に有しているクラディウムレンズを用い、後述する1次元マイクロパターン形成実験で、高精度化のための収差補正に利用した。

上記の制御系を基礎として、図4に示す加工パスを標準として採用した。この加工パスでの精度評価を1次元マイクロパターン転写形成実験で行い、それを2次元マイクロパターン転写形成実験に応用した。

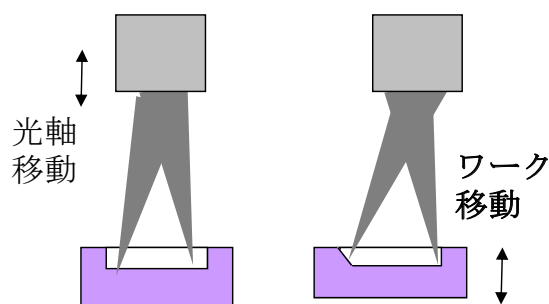


図4 標準的なレーザー加工パスデザイン。

2・4 レーザー加工環境

超精密機械切削加工と同様に、除去加工時のレーザー加工環境に影響を与える、除去加工時の温度環境効果について述べる。一般に、環境温度が 1°C 変化すると、 $1\mu\text{m}$ の形状変化が生じると考えられる。実際の加工環境では、装置剛性の基準である定盤を中心とした加工雰囲気温度変化が問題となる。

ここでは、長期的な安定性を実証するため、装置の各所に温度センサーを取り付け、清浄装置稼働下での温度履歴を測定した。加工ステージ近傍では、センサーの許容誤差内にとどまり、ほぼ $0.2\text{--}0.3^\circ\text{C}$ 以内の変動であった。24時間の連続運転時におけるすべての温度センサーの最大変動幅は最大 1°C であり、加工環境下での温度変動の影響は十分に除去できたと考えている。

3. 実験結果

ここでは、各種セラミック材料を対象に、円孔レーザー切削加工を行い、その精度に関して種々の角度から検討を行う。特にマイクロパターン形成で重要な繰り返し加工精度について考察し、本レーザー加工の基礎的データとした。さらに、グラッシーカーボンへの光学素子用マイクロパターンへの形成と光学プラスチック材への転写成形により、本技術が型材形成技術として有用であることを実証する。

3・1 孔加工における高精度転写形成

レーザービーム形状が真円であれば、収差は生じないが、実際のレーザーには P 波と S 波の成分があるため、それぞれの焦点位置が異なることによる、照射領域形状誤差が生じる。このレーザー発振装置固有の非点収差は、加工までの伝送光学系、特に反射ミラーの面精度により制御できる。実際、反射ミラーの面精度が相対的に低下すると、焦点位置を挟んで上下位置で照射領域形状が、X 方向と Y 方向で変化する。反射ミラーの面精度を向上させると、基本波・SHG とともに形状誤差はほとんど観察されなくなる。すなわち、発信器から加工端までの光学補正により、レーザービームの高品位化を行い、形状制御性が促進されることがわかった。この点を実証するために、反射ミラー面精度の異なる条件で、高純度アルミナの真空中レーザー加工実験を行った。

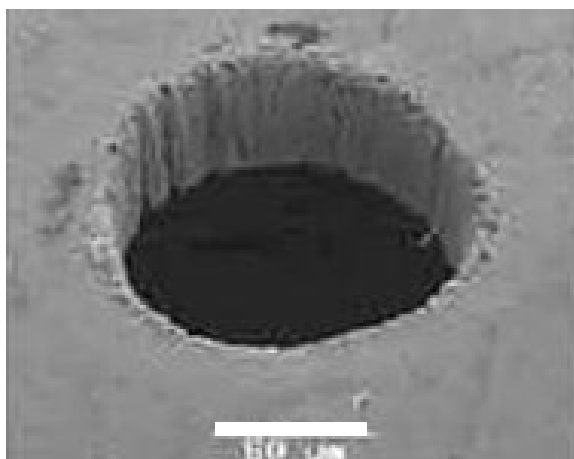


図 5 通常の反射ミラー面精度における加工例。

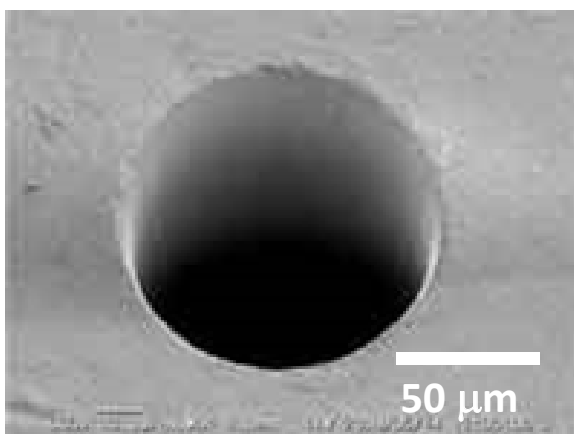


図 6 面性状を向上させた反射ミラーを用いた 1 次元パターン加工例。

図 5 に示すように、形状不整の影響を受けやすい、孔周囲が激しい凹凸状となり、アブレーションに伴う堆積物も観察される。一方、反射ミラー面性状を向上させると、図 6 に示すように、同一径の孔形状において、孔周囲形状も孔内面も清浄化され、良好な細孔加工を行えることがわかる。

3・2 孔加工における高品質形状創成

レーザービーム入射側では、最初に被加工物質へのエネルギー投入する際に生じるアブレーション時のプラズマの拡がりの影響を受け、図 7 に示すような寸法不整(以下、ダレ)を生じる。

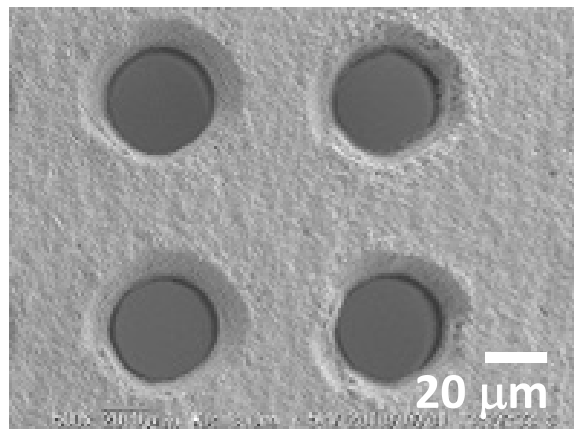


図 7 被加工材入射側の寸法不整の例。

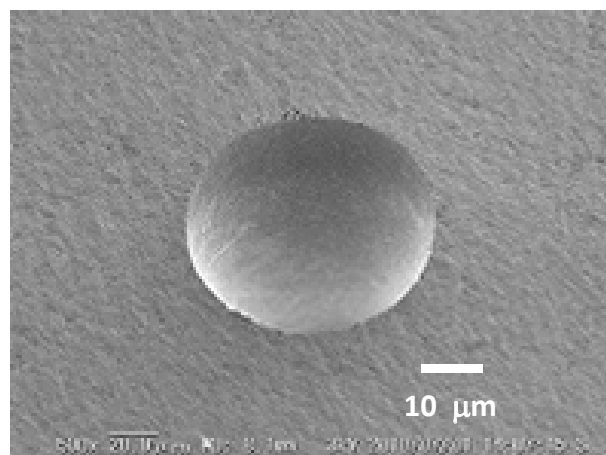


図 8 犠牲コーティング法による 1 次元パターン形成。

ここでは、1つの対策として犠牲コーティング法を用い、犠牲フィルムを介してマイクロパターン化することで、入射側の寸法不整を解消する方法を提案する。図 7 と同様に、SiC サンプルを用い、犠牲コーティング法による 1 次元パターン転写形成を行った。図 8 に示すように、ダレは解消し、形状寸法ともに不整のほとんどない孔加工なども実現でき、従来の機械的除去加工と同等あるいはそれ以上の精度で転写形成できることがわかる。

3・3 種々のセラミックスのレーザー加工性

レーザー加工が被加工材のアブレーションにより進行するため、材質により加工条件は変化する。ここでは、これまでと同様に、 $\Phi 50 \mu\text{m}$ の 1 次元加工を行った場合のレーザー出力の時間変化をパラメータに、4つのセラミック材(アルミナ (Al_2O_3), 窒化アルミ (AlN), 炭化ケイ素 (SiC), マシナブル・セラミックス)のレーザー加工性を比較した。この中で、マシナブル・セラミックスは複合

セラミックスであり、粒界周辺がアブレーションしやすいと考えられるため、ほかのセラミックスと比較して、低出力でのレーザー加工が可能であると推察される。

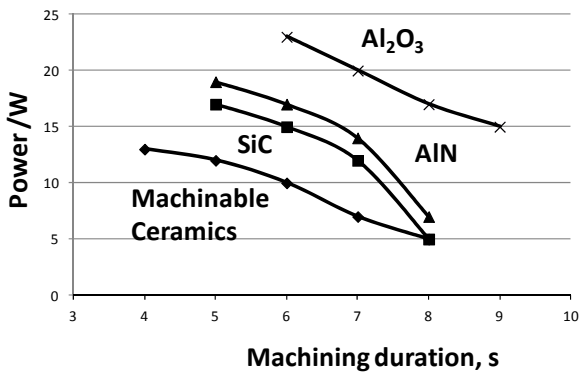


図9 各種セラミック材のレーザー加工性比較。

図9に示すように、ガラス系・複合セラミックス系<共有結合系<イオン結合系の順に、投入パワーも加工時間も長くなるのがわかる。これには、セラミック材への光エネルギーの吸収、アブレーション時におけるプルーム形成能などが反映しており、今後、計装化した加工装置を用いて、実時間で評価を行う考えである。すなわち、アブレーションとして蒸発していく物質が材質により大きく変化するため、それを直接計測することで、レーザー加工状態を診断することが求められる。

3・4 2次元配列制御性

円孔などの1次元パターンユニットを2次元配列することではじめて、マイクロパターン転写形成となる。したがって、その配列制御性が最終的なマイクロパターンの精度を決定する。ここでは、マシナブル・セラミックス(板厚:0.25mm)を用い、Φ30μmの孔をパターンユニットとして、2次元配列パターンニング加工を行った。図10に、パターンニングの加工パス数に対して計測した、形状誤差の変化を示す。

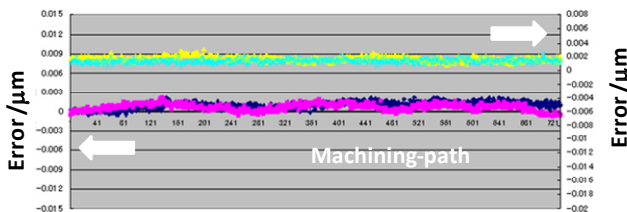


図10 2次元配列における各種誤差の変動。

例えば、真円度に関しては、その誤差は約1μm程度であり、2次元配列時の変動はほとんど見られない。その他の寸法変動も0.5μm以下であり、パターンユニットの高精度を担保しておけば、2次元配列時の誤差拡大はほぼゼロであると考えてよい。

3・5 セラミック型材作製

光学素子のモールド成形では、型への2次元あるいは3次元マイクロパターン形成が求められる。ここでは、その第1段階として、深さ方向の加工パターン制御を行い、かつ2次元配列を行う。具体的には、グラッシー・カーボン型材(GC材)へのV字マイクログループ形成を対象にして、ピコ秒レーザー加工特性について考察する。GC材は前述したように、高温耐熱性に優れているが脆性材であり、機械的な除去加工はきわめて困難である。このため、この種の炭素系素材を型材として利用するためには、当該レーザー加工技術は不可欠である。

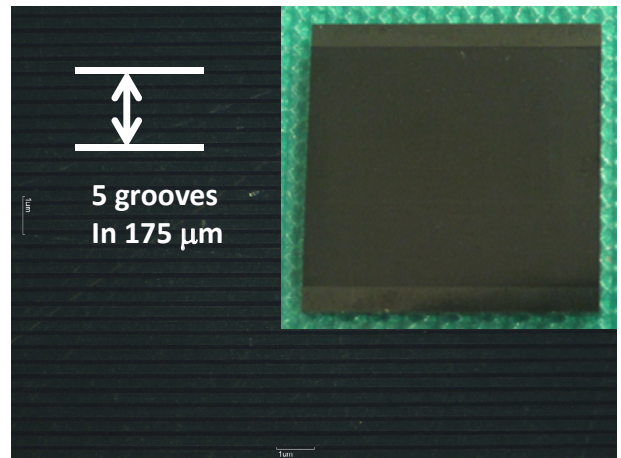


図11 GC材上に転写形成したV字マイクログループパターン。

図11に、GC材上にV字形状グループのパターンユニットを形成したサンプルを示す。挿入図はGC型材全体の光学顕微鏡像であり、上下の平滑面の間にレーザー加工を施した。設計パターンユニットは、V字グループ幅が10μm、深さ10μm、ピッチが35μmであり、幅・ピッチともに精度良く加工できていることがわかる。より詳細に分析するために、レーザー反射プロファイル計(三鷹光器製・NP-3S)を用いて深さ分布を求めた。

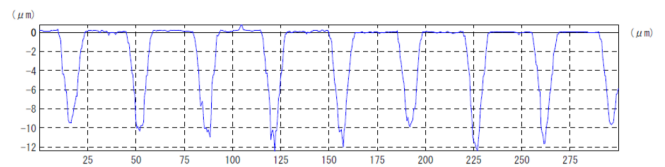


図12 マイクロパターンニングの深さ方向分布。

図12において、深さ方向の誤差は、目標深さに対して、最大で+2μm、最小で-1μmの範囲で加工されている。また形状は目標のV字形状を保持している。

次に、レーザー出力、加工パスは一定で、目標の加工深さを変化させてマイクロパターンニングを行い、設計加工深さと実測のV字成形グループの深さとを比較した。図13に示すように、平均実測深さはほぼ目標値と一致するが、

アスペクト比（V字グループ深さをV字グループ幅で除した値）を大きくするにつれて、実測深さが目標値より小さくなる。これは、加工制御できる範囲での到達深さは、ほぼレーザー出力で決定されることを示唆している。したがって、前述のようなビーム制御とともに、レーザー出力制御も行うことで、高アスペクト比でのマイクロパターン形成が可能となる。微小ポンチによる精密せん断プレスでは、アスペクト比が1.0程度であることと比較すると、レーザー加工によるマイクロパターン形成技術により、高アスペクト比のマイクロ加工が実施できることがわかる。

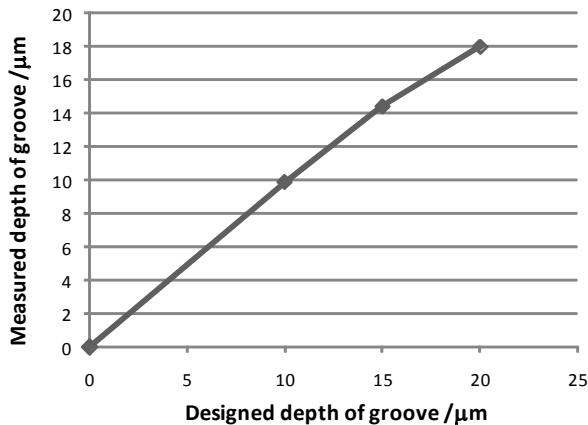


図 13 アスペクト比の増加に伴う目標深さと実測深さとの関係。

3・6 光学プラスチック材へのモールドプレス成形

光学素子のモールド成形では、型への2次元あるいは3次元マイクロパターン形成が求められる。ここでは、レーザー加工により2次元パターン形成したGC材を型材として利用し、そのパターンを光学プラスチック材に転写成形した。

GC材は室温では脆性材料であるが、優れた高温強度を有しており、本実験で用いる光学プラスチック材以外にも、酸化系ガラス材などへのマイクロパターン転写成形用の型材として利用できる。特に、従来の金属型材ではモールドプレス成形が困難な、成形温度が700℃を超える温度領域での型材として有望である。

このモールドプレス成形型材としての可能性を実証するために、研究者が開発してきたCNC制御モールドプレス成形装置ならびに成形方法⁵⁾をベースとし、新たに開発した真空モールドプレス成形装置を用いて、転写成形実験を行った。

実験では、PMMA (Poly-Methyl-Meta-Acrylate) を光学プラスチック素材として用い、図11、図12で示した、微小V字パターン転写成形したGC材を、型として利用した。標準成形条件（負荷荷重：1 kN；温度：ガラス転移点直上；保持時間：60 s）で転写成形したPMMA材の高倍率光学顕微鏡写真を、図14に示す。

図11に示したGC型材のマイクロV字パターンを、図14の転写成形したPMMA材の微細パターンと比較する

と、両者は高精度で対応する凹凸関係を呈している。このことから、本成形装置により、微細パターンの高精度の転写成形ができることが実証された。以上より、型技術としてピコ秒レーザー加工を用いて、機械除去加工では加工の困難なセラミック型材に2次元マイクロパターン・マイクロテクスチャを形成し、それをCNC制御モールドプレス装置により、金属シート材・光学プラスチック材・光学ガラス材に高精度転写成形することで、種々の光学機能素子を創成することができる。

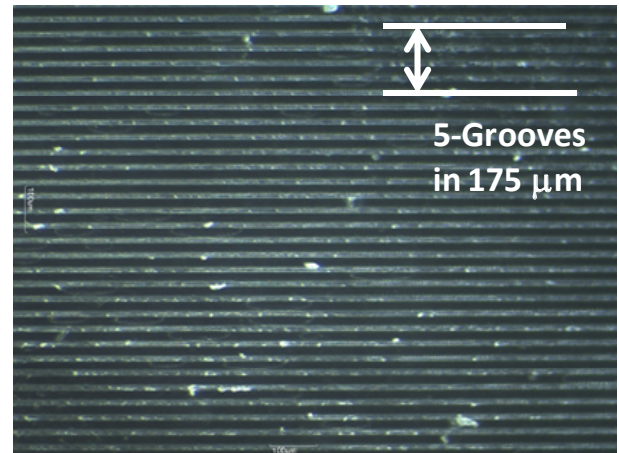


図 14 CNC 制御モールドプレスで転写成形したPMMA材（厚さ：1mm）の高倍率光学顕微鏡写真。

4. 考察

機械的除去加工のような工具を用いない、レーザー切削加工では、レーザービームの照射条件・除去物質挙動（アブレーション挙動）などにより、加工挙動が支配される。特に1次元パターン加工の典型である孔加工においては、加工初期には厳格にコントロールされているレーザー加工環境も、加工先端が深くなるにつれて不安定化することが知られている^{6,7)}。実際、シリコンを用いた直接観察実験によれば、図15に示すように、一定パワーで光学系を制御せずに、パルス数を単調に増加させて、深孔加工を行った場合、所定のアスペクト比で制御不能になり、不安定化する。これは、レーザーフォーカス位置がわずかに左右にぶれるため、アブレーションが無制御状態で進行するために生じることによる。

この現象を回避するためには、前述したように、パルス入射角度、レーザービームの焦点制御などの光学系の制御が重要となる。特に、ビーム・ローテータのように、パルス照射位置・入射角度などを実時間で制御できる機構が有効となる。ここでは、研究者以外の実施例として、文献8)における光学制御系による高アスペクト比の孔加工例を参照する。この論文では、光学系制御のレーザー孔加工精度への影響を検討しており、孔径が本研究よりも大きい孔加工の入口・出口の形状不整もほとんどなく、図15で観察された不安定性も抑制され、均一な孔加工が実施できたことを報告している。

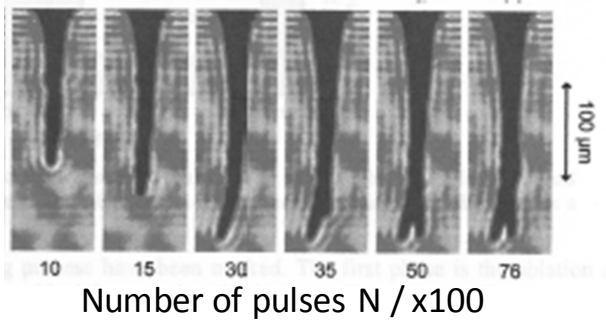


図 15 深孔加工におけるレーザー加工の不安定性.

文献 9) に詳細に述べたように、本実験では、前述したレーザー加工による 1 次元孔配列に対して、シリコン樹脂を流入させ、固化したシリコン樹脂を加工孔のレプリカとして用い、上記不安定性の発生ならびに孔加工精度について検討した。

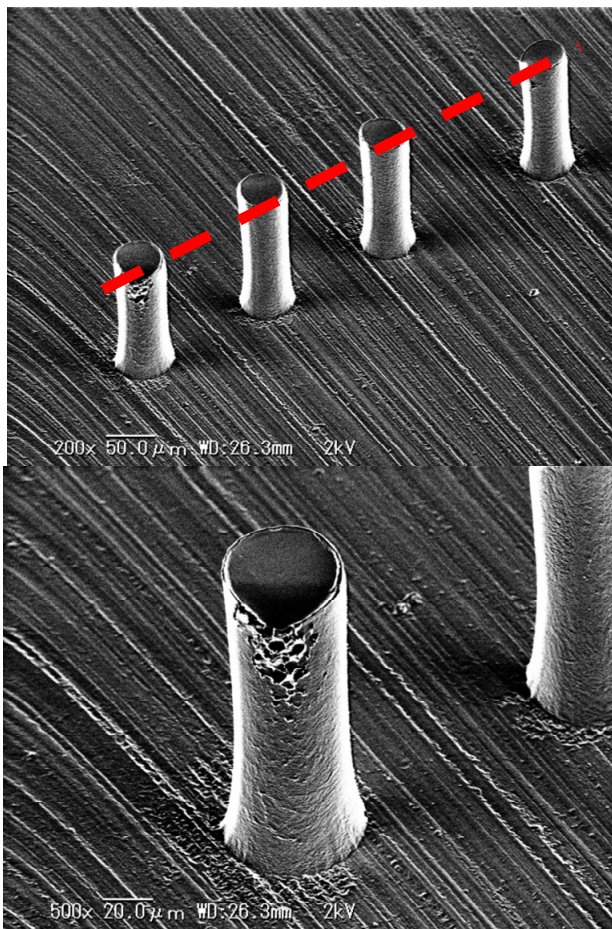


図 16 当該レーザーマイクロテクスチュア法における孔加工精度を評価するシリコンレプリカ.

図 16 に示すように、一定の条件で連続 1 次元孔加工を行っても、孔深さは一定を保持し、側面形状も良好であることがわかる。

以上より、本研究における 1 次元パターンニング加工の結果からも推察されるように、ビーム・ローテータによるレーザービーム制御が、高アスペクト比でのレーザー加工中

に生じる無制御アブレーション現象を抑制し、形状・寸法不整を解消する有効な手段となることが理解された。特に、文献 6-8) で対象としている、比較的大きな孔径よりも、本研究のように、1 次元パターンニングで扱う小径グループでは、この不安定性が顕著になると想定される。しかし、上述のように全く不安定性は観測されず、高い孔加工精度を示したことは、したがって、パルス時間で限定される理論限界値にまで微細な 1 次元パターンニングを行うには、光学系の多様な制御が必須となることを実証している。

5. 結論

本研究開発により、セラミック型材へのレーザー加工による多次元マイクロパターン技術の基礎を確立した。この基礎に立って、次世代光学素子用の多次元マイクロパターン形成を目指し、サブピコ秒レーザー加工・フェムト秒レーザー加工の研究開発も着手している。特に、レーザー加工中に、深さ方向に出現する新生面・新稜線のシャープネスに留意し、ホログラム技術を利用した光学系制御方法とレーザー加工パスの最適化を行い、位相制御レーザー加工技術の開発を急いでいる。

レーザーテクスチュア技術は、すでに摩擦摩耗低減あるいは接合強度向上など、手面的な応用を進めており、本研究成果を今後とも十分に活用していきたい。

謝 辞

レーザー加工実験では、芝浦工業大学・黒住氏、伊藤君、佐藤君、(株)リプスワークス・井ノ原氏、小侯氏、三本松氏、古守氏の協力を得た。ここに深謝を述べる。

参考文献

- 1) 相澤龍彦・井ノ原忠彦: 芝浦工業大学研究報告理工学編, 56-1 (2012) 17-26.
- 2) T. Aizawa, K. Itoh, T. Inohara: Proc. 6th ICOMM Conference (2011) 77-82.
- 3) 相澤, (株)リプスワークス: 特願 2011-212046 (2011).
- 4) T. Aizawa, T. Inohara: 7th ICOMM Conference (2012) 66-73.
- 5) T. Aizawa, K. Itoh, T. Fukuda: Proc. 10th ICTP Conference (2011) 1097-1102.
- 6) S. Doering, Soeren Richter, S. Nolte, A. Tuennermann: Optics Express 18 (2010) 20395-20400.
- 7) S. Doering, Soeren Richter, S. Nolte, A. Tuennermann: Proc. SPIE 7925 (2011) 792517-1 - 8.
- 8) D. Ashkenasi, N. Mueller, T. Kaszemeikat, G. Illing: JLMN-J. Laser Micro / Nano-engineering. 6 (19) (2011) 1-5.
- 9) 経済産業省: 戦略的基盤技術高度化事業報告書 (2012) .