



T. Aizawa

## 極短パルスレーザー加工による セラミック型材化技術の開発

相澤 龍彦\*

### 1. まえがき

これまでは「切削」あるいは「除去加工」といえば、エンドミリングなどに代表される機械切削であった。この従来加工で、CAMデータを基に切削工具を3次元・5軸で制御し、複雑形状の難加工材の3次元造形加工を行うことが実現している。一方、微細な複雑形状加工や究極の難加工材であるセラミックスあるいはテフロン加工では、工具形状寸法制約、機械的除去加工上の制約で、機械加工の適用は事実上困難となる<sup>1)</sup>。

レーザー加工は、機械切削同様あるいはそれ以上に加工ビッグデータを必要とする。これは位置制御情報に加え、光学パス情報・レーザーパワー制御情報など付加情報を多く必要とするためである。しかし、基礎となるプラットフォーム技術が確立すると、1) 加工工具を必要としない、2) レーザー集光で決まるサイズの微細加工ができる、3) 多数同時処理も、レーザー発振周波数の高周波数化で可能となるなど、多くの利点が活用できる<sup>2)</sup>。

一般に、レーザー除去加工には、ファイバーレーザー加工に代表されるような熱的効果を利用した加工法と、ピコ秒あるいはフェムト秒レーザーのように、熱的影響なしに直接物質除去を行う加工法がある。また前者であっても、単一レーザー光を利用するだけの加工法から、多集光レーザーを利用する光学制御加工まで、スペクトルの広い加工法が提案されている<sup>3)</sup>。後者においてはさらに、多様な光学制御により、種々の表面マイクロ・ナノテクスチャ加工も実現している<sup>4)</sup>。

ここでは、セラミックへの細孔加工を事例として、アプレーションを駆動力とするレーザー加工法の制御法を示す。加えて、多数個の細孔加工事例より、その形状制御性を実証する。その上でレーザー加工における課題とそのソリューションを述べ、その将来像を示す。

### 2. 実験方法

#### 2.1 ピコ秒レーザー装置

ここ7年間で、世界レベルを議論できる極短パルスレーザーを中核に開発を行ってきた。ここでは、2010年に開発に着手したピコ秒レーザー加工システムを中心に解説する。出力25W・パルス幅8psであり、免振・低熱膨張機構上に位置駆動系・レーザー発振装置および光学系を搭

載したシステムとした。ピコ秒レーザー加工装置の開発途中段階での概要を図1に示す。現在では、より軽量構造化に向け、CFRTPによる制振構造フレーム化も指向している。



図1 ピコ秒レーザー加工システム

#### 2.2 光学系システム構成

この装置の特徴は、最終段でのガルバノによるレーザー光制御と並行して、図2に示すように中間段階でビームローテータを導入し、直線光を回転光に変換している点にある。現行では種々の光路制御・ビーム制御デバイスが考案されており、加工条件に適したレーザー光学系を設置できる。後述するように、ビームローテータは、不安定性除去に有効となる。

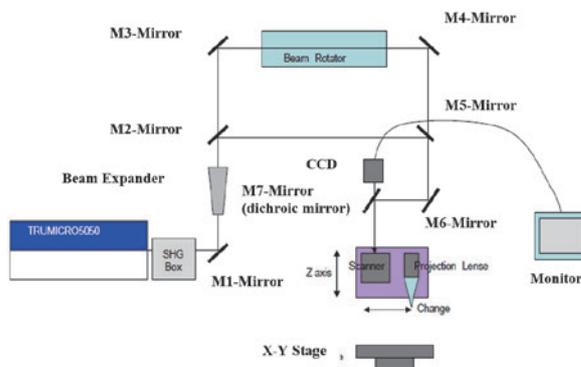


図2 ピコ秒レーザー加工の光学系システム構成の一例。

\* 芝浦工業大学デザイン工学部 教授

### 3. 実験結果

ここでは、細孔加工実験を通じて、ピコ秒レーザー加工について検討する。

#### 3.1 高アスペクト比の細孔加工

レーザー加工に求められる典型は、直径が  $100\mu\text{m}$  以下で深さ/孔径のアスペクト比が大きい細孔加工である。後述するような不安定性を光学系構成で除去すれば、アルミナ基材に図3に示すように細孔を、直径  $50\mu\text{m}$  一定でアスペクト比 100 まで加工することが可能になった。

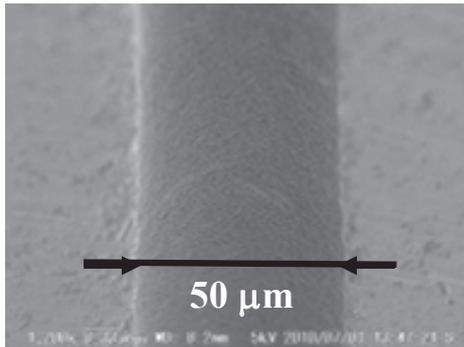


図3 高アスペクト比の細孔レーザー加工事例。

#### 3.2 高アスペクト比での多数孔加工

第2の特徴は、図3の細孔を、位置制御したピッチで所定の場所に連続的に加工できる点にある。図4に示すように、規則的なピッチ配列で高アスペクト比の多数孔をアルミナ基材に加工できた。

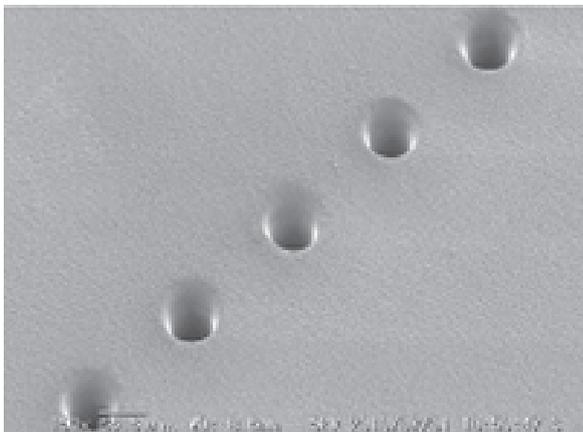


図4 高アスペクト比細孔の多数加工事例。

#### 3.3 マイクロテクスチュア加工とその展開

第3の特徴は、後述するように、セラミック型基材に微細なパターンを3次元テクスチュアとして形成できる点にある。ここでは、アモルファス・セラミック材である、グラッシーカーボン型材へのマイクロ溝加工を例題として、その加工精度を議論しよう。

図5に、25mm 角のグラッシーカーボン基材に、溝幅  $10\mu\text{m}$ 、深さ  $10\mu\text{m}$ 、ピッチ  $35\mu\text{m}$  の多数個のウエッジ加工した事例を示す。ガラス転移点が比較的高い屈折率を

有する光学ガラスに、回折格子などの複雑なマイクロテクスチュアを形成するには、1) 高ガラス転移点を超える成形温度範囲でも軟化しない基材、2) 回折特性を保証する鋭利な形状変化の加工性が不可欠となる。

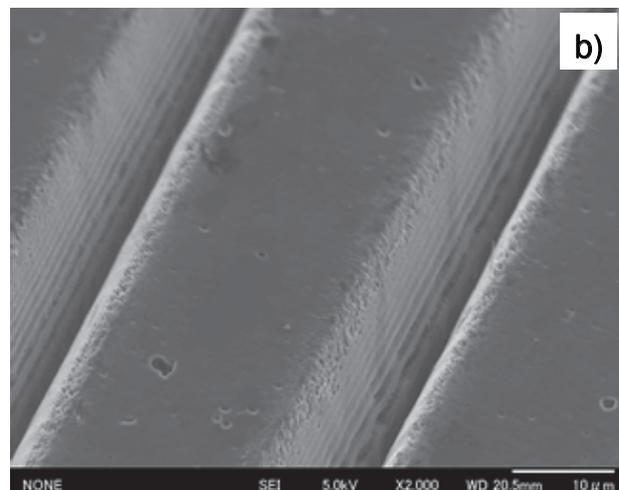
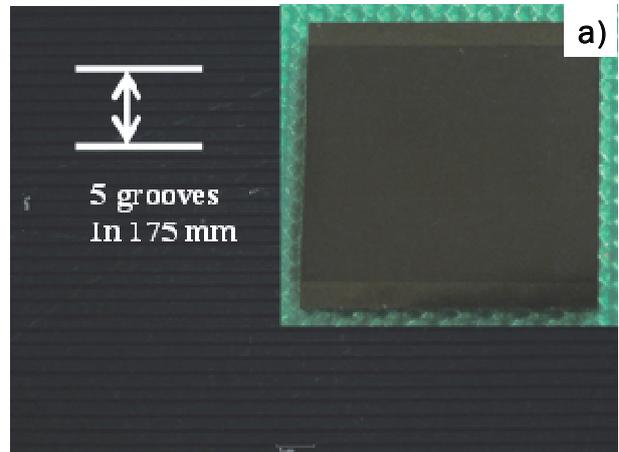


図5 グラッシーカーボン型基材へのマイクロテクスチュア形成事例。a) V字溝加工した型基材全容、b) 加工したV字溝テクスチュアのSEM像。

図5b)のSEM像ならびに図6で示した断面形状から、急峻なV字形状が高精度で形成されていることがわかる。高融点ガラス光学素子においては、マイクロテクスチュアの幅寸法・ピッチ寸法とともに、鏡面性状を呈する表面(グラッシーカーボン表面性状は平均粗さで  $0.05\mu\text{m}$  以下)からの急峻度が重要となる。図6の断面形状は、当該レーザー加工が、上記の型技術要件を十分クリアできるマイクロテクスチュア技術であることを実証している。

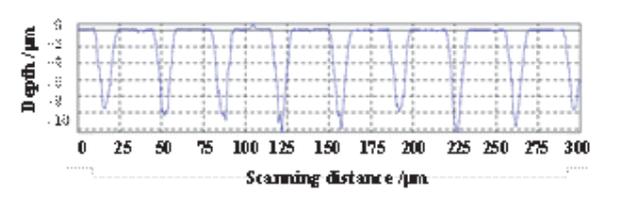


図6 加工したV字溝マイクロテクスチュアの断面形状。

### 3.4 セラミック金型加工とその展開

型技術としての要件とともに、当該レーザー加工技術をガラス光学素子形成用型材化技術として利用するには、モールド成形時の型形状転写性と耐久性が課題となる。ここでは、図5に示したグラッシーカーボン型を用いて、光学プラスチック材であるPMMAへのモールドプレス成形による転写実験を行った。

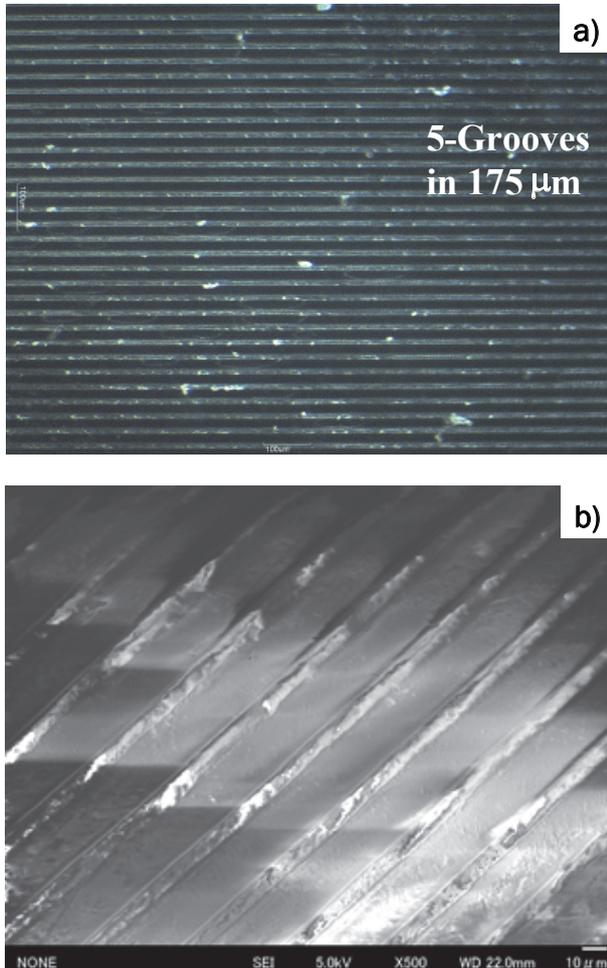


図7 PMMA材にモールドプレス成形により転写されたグラッシーカーボン型材のマイクロテクスチャ。a)転写したV字ピラーパターンの全容、b) V字ピラーパターンのSEM像。

図7にPMMA材に転写成形されたマイクロテクスチャを示す。図5において、グラッシーカーボン型に形成したマイクロテクスチャは、凹型のV字溝形状であり、それに対応してPMMA材に形成されたのは、凸型のV字ピラー形状となる。溝幅 $10\mu\text{m}$ ・深さ $10\mu\text{m}$ に対応して、V字ピラーにおいても幅 $10\mu\text{m}$ 、高さ $10\mu\text{m}$ となっており、高精度の転写形成が可能である。生産段階でのモールドプレス成形を想定したプレス条件を模して成形を行ったが、グラッシーカーボン型ならびにV字マイクロ溝表面への被加工材の付着もないことを確認した。

### 4. 考察

ここでは、レーザー加工時の課題とそのソリューションとともに、レーザー加工固有の加工技術展開力を示す。

高アスペクト比の細孔加工で問題となってきたのが、ビーム径ゆらぎによる不安定性である<sup>1)</sup>。本技術のように、ビームローテータなどを使用せず、そのまま極短パルスレーザー光を加工に利用すると、さまざまな不安定性を誘発する。最初に問題となるのが、細孔入り口形状の乱れである。ビーム出力制御の最適化不良による形状乱れは論外であるが、図8a)のような真円度の乱れは、加工事例として生じやすい。実際、ミラー系による調整を行うと、図8b)のように解消される。

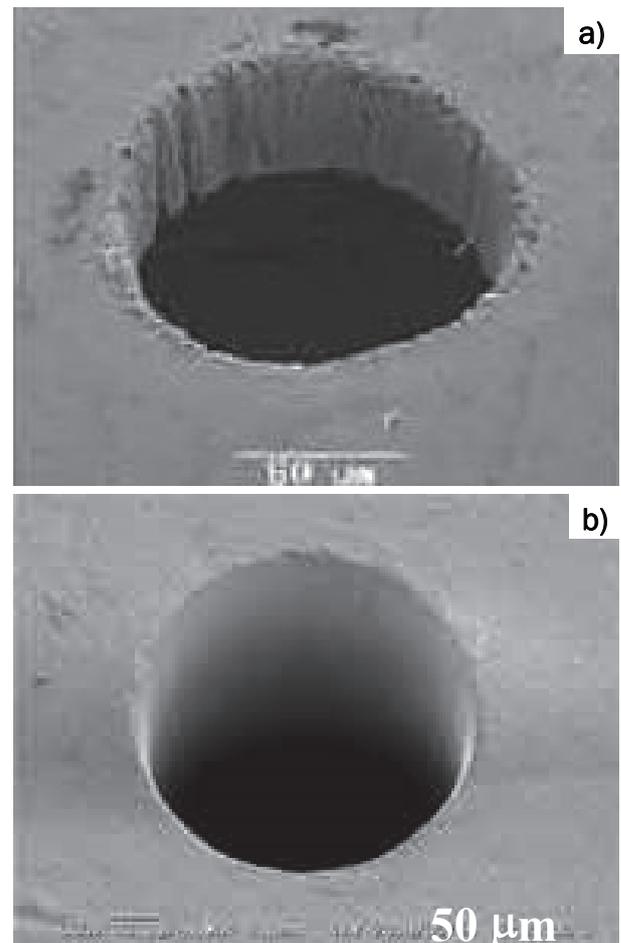


図8 細孔入り口における不安定性の解消。a)真円度制度喪失+形状乱れ、b)ソリューション。

より深刻なのは、細孔加工における孔内部での不安定性である。ビーム制御そのものが不適切な場合には、自然にテーパ状になり、高アスペクト比孔加工にならないケースが頻繁に発生する。さらに問題となるのは、文献<sup>1)</sup>でも参考にしてのように、細孔加工中に孔が分岐し、孔加工が続行できないケースである。これは本質的にレーザービーム形状制御の必要性を示しており、図3、4に示すように、ビーム・ローテータによる制御などを行うことで、

本質的に解消することができる。その上、制御したレーザービームを用いることで、深さ/孔径が 100 に迫るような超高アスペクト比加工に加え、傾斜角度をプラスからマイナスまで制御することで、テーパ細孔加工や逆テーパ細孔加工も実現できる。

光と干渉する微粒子あるいは加工精度に影響を及ぼす温度変化などが、加工雰囲気擾乱を与える主要原因となる。実際、ピコ秒レーザー加工装置開発途上では、特に加工精度への温度変化の影響を重視していた。長時間にわたって温度変動を 0.1K 以下にすることは比較容易であり、現行ではマシニングセンター程度の留意で十分加工雰囲気を安定化できる。今後はむしろ加工に直結する微細加工空間の積極的な制御が重要となる。

レーザー加工がもつ広いスペクトルは、マシニングセンターにおける刃物チェンジャーのように、レーザー光の位相制御により、本論で述べているアブレーションによる加工からポリッシングまでを行うことができる。被加工材料特性に応じて加工量・加工面積を制御できることに加え、製品の加工面性状も制御可能である。さらに表面硬さ制御・表面コーティング・表面プレーティングも利用することで、より高度な複合加工が設計・実現できる。特にガラス製品・光学プラスチック製品など、色彩デザインも重要な製品では、光干渉を利用した彩色もレーザー加工の一貫として付与できる。

## 5. おわりに

これまでの「機械切削+工作機械」の枠組みから、「レーザー加工」x「除去加工システム（必ずしも除去に限定する必要はない）」として、レーザーの持つ多様性をシステムに融合することが、レーザー加工開発の第 1 歩となる。これにより、きわめて特殊なレーザー加工法からユニバーサルレーザー加工まで、工具を必要とせずに、しかも 3 次元（空間）+時間という 4 次元あるいはそれ以上の多次元加工も、視野に入れることができる。特に省エネルギー・省資源から Circulation-Economy に適合した素形材技術が求められる中で、リサイクル材を利用しての同一性能製品の製造、異種材料の接合・分離など、いままでは特

殊加工と思われてきた手法を一般化しなければならない場面で、この新しいレーザー加工法はその威力を発揮する。

ピコ秒・フェムト秒レーザー加工法のさらなる開発成果は、すでに燃費向上を 5%以上向上させるツールとして、あるいは素形材製品表面ぬれ性の制御ツールとして、胎動している。10MHz を超える超高周波発振レーザーも視野に入らる中で、レーザー加工の大きな飛躍と多様化が始まっている。草の根のレーザー加工ツールとして、多様な光学系とレーザービーム発振とを組み合わせる方式で、工具なしの簡易な加工プロセスの開発も萌芽しつつある。ナノ光学加工、すなわち光の近接場内での物質・材料と外場（反応種）との相互作用による除去加工も生産技術として立ち上がっている。

「機械切削+工作機械」で成長してきたわが国も、素形材技術が大量生産様式から安全安心を担保しつつ循環型経済を支持するシステムへと変身する中で、レーザー加工を再考する時期を迎えている。

## 謝 辞

本研究を進めるにあたり、LIPS-Works(株)・井ノ原氏ならびにマイクロテクスチュア研究会構成員の助言協力を得た。この場を借りて深謝する。なお、本研究の一部は、公益財団法人天田財団からの一般研究開発助成により実施した研究に基づいていることを付記するとともに、同財団に感謝する。

## 参考文献

- 1) T. Aizawa, T. Inohara: Proc. 7<sup>th</sup> ICOMM (2012) 66-73.
- 2) 小清水大介・小俣恵一・草野 浩・副田 精次郎・井ノ原忠彦・松岡 芳彦：レーザー研究, 27 (7) (2013) 15-20.
- 3) T. Aizawa, T. Inohara: Proc. 11<sup>th</sup> WCMNM (2017, March, Taiwan) (in press).
- 4) T. Hasegawa, T. Aizawa, K. Wasa, T. Inohara: Proc. 11<sup>th</sup> WCMNM (2017, March, Taiwan) (in press).