

「液晶空間光変調器を利用した 高効率レーザー加工システムの開発と応用」

京都大学産官学連携本部

坂倉 政明, 下間 靖彦

“Development and application of high efficient laser processing system with a liquid-crystal spatial light modulator”

Masaaki Sakakura, Yasuhiko Shimotsuma

Kyoto University Office of Society-Academia Collaboration for Innovation

1. はじめに

精密で有用な加工が可能でも、時間がかかれば産業で使われることはない。ガラス内部のフェムト秒レーザー加工は長い間このような評価を受けてきたと筆者らは感じている。1995年に平尾・三浦らがガラス内部にフェムト秒レーザーを集光することによってひび割れを生じさせることなく集光点のみで構造変化を誘起できることを発見し、¹⁾ ガラス内部に三次元の光導波路を描画できることを示してから、フェムト秒レーザー加工が一躍脚光を浴びた。²⁾ しかし、実現可能な三次元光回路の複雑さに対応できないスループットの低さが問題視された。通常、レーザー加工のスループットを向上するために、加工対象やレーザースポットを高速でスキャンする。例えば、ガルバノスキャナを用いてレーザースポットを高速でスキャンする技術を用いると、1秒間に1000個の穴を金属板に開けられることが報告されている。³⁾ 一方、フ

ェムト秒レーザーを用いて光導波路や回折光学素子をガラス内部に作製する場合、必要な屈折率差を得るために同じ場所での照射時間が必要であるため、高速スキャンによって効率を上げることができない。そのような照射時間が律速になるような加工では、1つのレーザー光から複数の光スポットを作り、同時に異なる場所で光励起を起こせば、光スポットの数だけ効率が向上する。筆者らは、NEDO「三次元光デバイス高効率製造技術プロジェクト」において、空間光変調器 (SLM)⁴⁾ によって多数の集光点を作る技術をフェムト秒レーザー加工に応用することで、高効率フェムト秒レーザー加工機を開発してきた。⁵⁾ この技術によって、フェムト秒レーザー加工の産業応用への道が開けると期待されている。本稿では、その加工技術の基礎原理、開発した加工システムの概要、応用例について紹介する。

2. 原理と方法

この加工システムにおける液晶空間光変調器の役割は、レーザー光の空間位相分布を制御することである。液晶 SLM では印加する電圧によって液晶の屈折率を制御することができる。

〒615-8510 京都府京都市西京区京都大学桂
TEL 075-393-3851
FAX 075-393-3861
E-mail: msakakura@saci.kyoto-u.ac.jp

高屈折率の媒質中では光が遅れるため、各ピクセル毎に印加する電圧を変えると、レーザー光の波面、つまり空間位相分布を制御することができる。波面が均一な光を凸レンズに通すと波長程度の広がりを持った1点に集束されるが、波面が歪んだ光は干渉により複雑な強度パターンになる。そこで生じる強度パターンと波面との関係を知ることができれば、任意の光強度分布を空間内に形成することができる。その光強度分布として多数の集光点を選ぶことによって、多数の点で同時にレーザー加工を行える。問題は、望みの強度分布を生じる位相分布を得ることであるが、強度分布は光の位相の情報を失っているため、それから直接位相分布を計算することができない。その問題を解決するために多くの計算アルゴリズムが開発されている。詳しくは参考文献⁶⁾で丁寧にまとめられているが、ここでは、そのいくつかを簡単に紹介する。1つはフーリエ反復法と呼ばれるものである。⁷⁾この計算法では、光伝播と逆伝播の計算と望みの強度分布の代入を繰り返して行い、その計算を自己矛盾が起こらなくなるまで続けるというものである。他に、望みの集光点での光強度の合計が大きくなるような位相変化を繰り返す方法 (Optimal Rotation Angle 法)、⁸⁾ランダムに位相を変えて望みの光強度分布に近づけていく方法 (直接探索法)⁶⁾などがある。そのようにして得た位相分布を入力したSLMにレーザー光を通した後、集光すると望みの光強度分布を得ることができる。開発した加工システムの概要を図1に示した。フェムト秒レーザーパルス (パルス幅 120 fs, 中心波長 800 nm, Coherent, Mira-Legend) が液晶空間光変調器 (浜松ホトニクス製, LCO-S-SLM) で反射された後、縮小光学系を通り、対物レンズによって加工対象内部に集光照射した。多数の集光点を同時に形成できる空間範囲は集光レンズなどで制限されるため、試料を動かすステージが必要である。広範囲に様々なパターンを加工するために、1台のコンピュータを用い

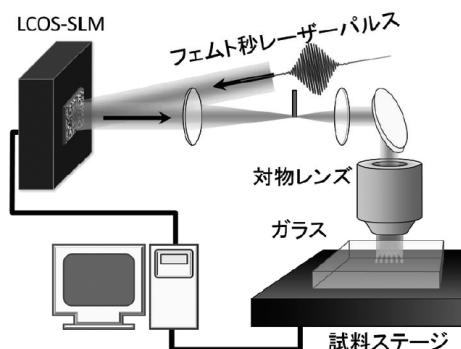


図1 開発したレーザー加工システム

て試料ステージの駆動, LCOS-SLM へのデータ入力, レーザー光の ON/OFF を行った。

3. 加工例

①ガラス表面への大面積パターン形成⁹⁾

本加工システムでは、強度パターンを形成できる領域が $1\text{ mm} \times 1\text{ mm}$ 以下であるため、多くのアプリケーションに対応するためには試料ステージの駆動と組み合わせる必要がある。同時に、加工データ作成でも形成したいパターンの処理が必要になる。例えば、図2 (a) に示すようなパターンを形成したい場合、強度パターンが形成できる大きさの領域でパターンを分割し、それぞれの領域の強度パターンに対応する多数のホログラムを計算する。加工したパターンの光学顕微鏡像を図2 (b) に示した。このようなパターンを描画するのに従

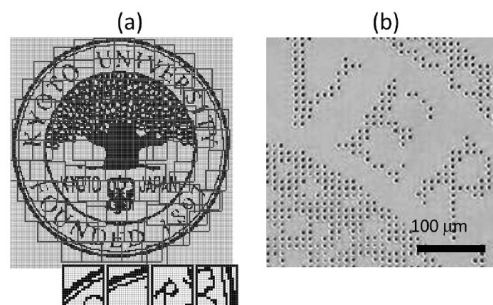


図2 ガラス表面へのパターン形成

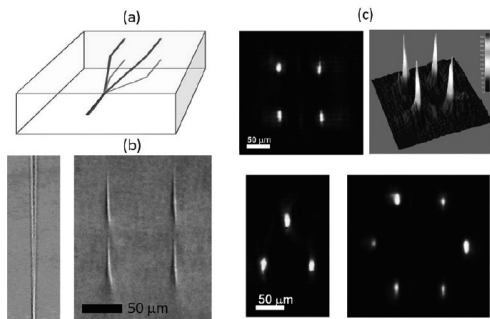


図3 同時描画によってガラス内部に作製した立体分岐導波路

来法では数十分の加工時間が必要であったが、本手法では、1分以内に描画することができた。このようなパターン形成は表面のみならず内部にも適用可能である。

②ガラス内部への三次元光導波路形成⁵⁾

筆者らは本加工システムを用いて曲げ導波路や立体分岐導波路などの作製を行った。光導波路描画では、集光点に対して試料を動かすことにより光励起によって生じた屈折率変化領域を線状にして光導波路を形成する。曲げ導波路や分岐導波路を描画する時には、導波路の描画中に集光パターンが変化するように位相パターンを切り替えて導波路形成位置を変化させればよい。作製した立体4分岐導波路を図3に示した。図3(a)が導波路の概念図、(b)が分岐部分と終端の光学顕微鏡像、(c)が伝播光のニアフィールドパターンである。分岐部分を描画するには単に1つの集光スポットを徐々に2つに分けていけばよいと思われるが、光の干渉性で2つの集光スポットが打ち消しあってしまう

ため、そのようなホログラムを得ることは非常に困難である。ここでは集光スポットを空間的に分離することで干渉の効果を受けないようにして滑らかな分岐部分の描画に成功した [図3(b)左]。図3(c)にも示すように4分岐以外にも様々な導波路を描画することができる。現在、さらに多くの光分岐を実現するために研究を進めている。

4. おわりに

液晶空間光変調器を用いた高効率フェムト秒レーザー加工システムの原理と応用例を紹介した。このような加工方法の報告は国際学会誌においても徐々に増え始めている。そのような状況から、本加工システムが産業応用されるの間近であると思われる。これから多くの研究者・技術者に本加工システムに興味を持っていただき、さらなる発展を期待したい。

参考文献

- 1) K. M. Davis ら Opt. Lett. (1996) 21, 1729 ; 三浦清貴 ら Appl. Phys. Lett. (1997) 71, 3329.
- 2) 平尾一之, 邱建榮編：フェムト秒テクノロジー—基礎と応用, 化学同人 (2006)
- 3) 例えば, 八木重典氏「レーザー加工の現状と将来」レーザー誕生 50 周年記念シンポジウム 平成 22 年 2 月 2 日
- 4) 伊藤晴康ら, オプトロニクス, (2009) 328, 218
- 5) 筆者ら Jp. J. Appl. Phys. (2009) 48, 126507. ; Opt. Express (2010) 18, 12136–12143.
- 6) R. D. Leonardo ら Opt. Express (2007) 15, 1913.
- 7) J. R. Fienup, Appl. Opt. (1982) 21, 2758
- 8) J. Bengtsson, Appl. Opt. (1994) 33, 6879
- 9) 平尾一之監修「先端ガラスの産業応用と新しい加工」第二編第二章 (シーエムシー出版, 2009 年)