



フェムト秒レーザーにより ガラスに機能を持たせる

はじめに

私の研究室は明治時代からセラミックスやガラスをずっと扱っている伝統のある研究室です。本稿では特にガラス材料に何か機能を持たせることはできないか? そのような試みについて、今のような研究を行なっているかを説明します。ガラス材料は透明なので内部を加工することができます。特に我々が保有するフェムト秒レーザーによる加工には有効です。ガラス内部の局所構造改質とは? またガラス材料への応用はどういうものがあるか? そして、最後に3次元ホログラムを利用して一括でその内部加工ができるのか?ということをご紹介させていただきます。

液晶基板サイズは2006年から2007年に2.4m×2mであったものが、現在のG10世代では3m×3mの大きさで厚さ0.5mm、つまり1mmより薄いものを作製できるようになっています。また、透明セラミックスと同じように熔融ガラスでも、元々の成分を非常に純化し、粒径を揃えたパッチとして炉に入れて攪拌し、真空にひいたり、温度調整したりした後、樋のような白金容器からダウンドロー法で直下に引くことによって、泡のない、薄く大きいサイズのガラスパネルを研磨なしで作ることができます(図1)。現在、このあたりの技術は日本が一番強く、薄型ガラスは多方面で使われ始めようとしています。20μm以下の厚さのガラスも作られています。これはフレキシブルで割れないだけでなく、光ファイバーの径と同じぐらいの厚さですので、ガラスシートとして光を閉じこめることもできます。

ガラス内部の局所構造改質とは?

このようにして作製したガラス内部にレーザーを当てるとどのような現象が起きるのでしょうか? 例えば、ナノ秒レーザーを内部に照射すると、熱膨張のため内部にクラックが発生します。照射されたレーザーのエネルギーを解放するために表面積を増やすクラックが発生するわけです。一方、図2に示すフェムト秒レーザーはパルス幅が極端に小さく瞬時に大きいエネルギーをガラスに与えるので照射されたそのエネルギーは熱に変わることなく、強電場を与え分子レベルで化学結合を切断します。つまり、非熱プロセスなのでクラックを発生させないこととなります。

パルス幅が非常に短いと、瞬間的に強い電場を発生しますから、電離し、イオン化し、分子が切断されます。非熱過程による分子切断を学生に説明するには、図3に示すようなタマネギの細胞をフェムト秒レーザーで切る実験をする事にしています。ナノ秒のレーザーを照射すると細胞は蒸発してしまうのですが、フェムト秒レーザーでは切断メスのように細胞壁を切ることができます。酸化物ガラスへの照射では酸素とケイ素結合から電離して生じた電子はガラス中に溶けている様々な金属イオンを攻撃する、いわゆる還元反応をおこすのでガラス内部にいろいろな金属を原子として析出できます。図4にありますがAu³⁺イオンを溶解させたガラス内部にレーザーを照射すると、照射部で還元反応が起こりAu³⁺イオンは金微粒子として析出します。図4の一番左

にあるバラは赤色を示していますが、これは金(Au)ナノ粒子が析出したものでプラズモン吸収の赤色を呈します。加熱すると金ナノ粒子が成長し、左から2つ目に示されるような金色を呈します。以上のように、ナノ秒レーザー照射だとクラックができ、白い色を呈する彫刻ができてしましますが、フェムト秒レーザーで照射することにより、ガラス内部にいろいろな色模様を入れることができます。

私は材料化学分野に属していますから、これまで種々のセラミックスやガラスの作製をゾルゲル法、気相反応法等いろいろな方法で無機材料合成をしてまいりました。材料内部の好みの位置に思いのままに構造や機能を誘起するといったことがやりたくて40歳になったときから、フェムト秒レーザーを主装置として、研究を続けました。ただ、いくらフェムト秒レーザーでいろいろな加工をしてもそれを応用にまで持っていけないという悩みはつきまといました。加工に対するフェムト秒レーザー装置自体のコストが高すぎるのです。数多くの試行錯誤の結果、一括で面照射すれば一回の照射に必要なフォトンコストを下げることができるのではないかと考えました。あとで紹介させていただきますが結果としてガラス中に空間変調器を通してフェムト秒レーザーを一括で面照射することができ、3次元メモリの製作が可能となりました。

生じている現象のメカニズムを図5を用いて簡単に説明しましょう。フェムト秒レーザーで励起すると、ガラス内部で電離した電子同士が衝突し、高圧プラズマが発生し、それが動的圧縮状態、すなわち衝撃波を発生させ、粘性流動を起こします。ガラスは液体のようなものですから、ガラス構造が中心から押し広げられます。ところがそのレーザー照射が終わったときには(1kHzだと1ミリ秒間隔)弾性拘束により中心部に向かって圧縮応力が発生し、傾斜的な高密度領域がガラス内部で形成されます。いろいろな構造が形成されますが、特に高密度化が起きます。

ガラス材料への応用はどういうものがあるか?

さらに照射エネルギーを上げていくと内部がより高密度化されます。最終的にはきれいな真球の孔が空くという状況に達します。照射エネ

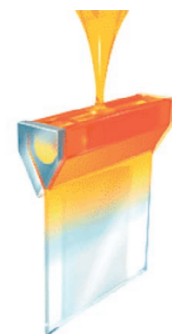


図1 ダウンドロー法による薄型ガラス作製

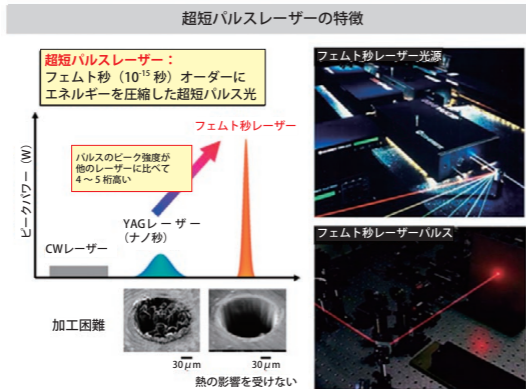


図2 フェムト秒レーザーの特徴

〇生細胞に対する加工

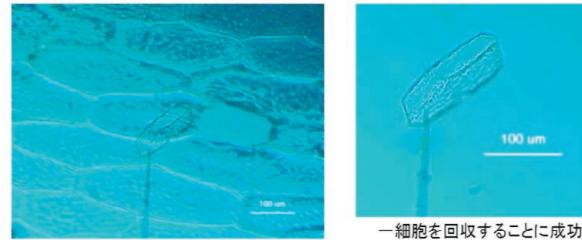


図3 フェムト秒レーザーの加工実験

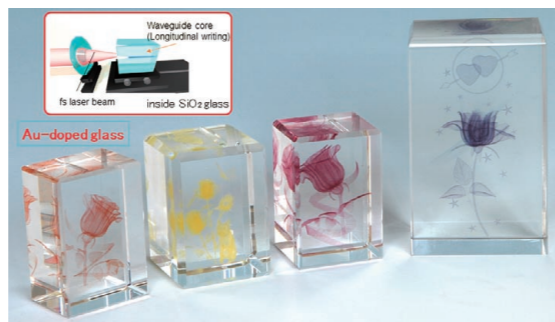
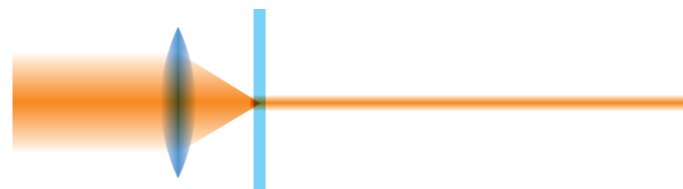


図4 フェムト秒レーザーによる3Dカラー 彫像

シリーズ

材料の素顔に迫る

京都大学大学院工学研究科教授 平尾 一之



ルギーとしては1μJから3μJぐらいです。焦点をレーザー方向に垂直又は平行に走査すると光ファイバーと同様の内部構造を持った光導波路が形成されます(図6)。

このようにして作製された、いくつかのデバイス例を図7に示します。扱っている材料はガラスですからいろいろな元素を均一にドーピングすることもできます。

3次元ホログラムを利用して一括でその内部加工ができる

しかしながら、応用デバイスへの展開となると、生産性を向上させなくてはならないという課題が立ちはだかります。様々な方法を検討しましたが、やはり液晶空間変調器を使い、多点で照射する方法に変えていかなければならないのではないかとということになりました。

ところが液晶空間変調器を用いると液晶がフェムト秒レーザーで破壊されてしまうこととなります。したがって、耐フェムト秒レーザーにすぐれた空間変調器を作らねばなりません。試行錯誤の結果、多層反射膜を工夫することにより、反射率ほぼ100%のミラーができました。その結果、パソコンで照射したい模様をホログラムパターンとして作り、そのパター

ンを液晶に与え照射することにより、フェムト秒レーザー光の位相分布や方向を変え、面加工ができました。これらは、浜松ホトニクスと共同で行い、フェムト秒高強度レーザーに対して10Wぐらいまで耐えうる空間変調器を作製することができました(図8)。

具体的な方法は、NEDO「三次元光デバイス高効率製造技術」プロジェクトの成果報告書に記載されています。

おわりに

このような空間変調器による高精度光制御技術と、光の持つ超並列性や超高速性を生かした超短パルス光制御システムはようやく産業用に実用化され始めています。

腫瘍除去への応用や、光導波路やマイクロレンズ、マイクロリアクター用TAS (Total Analysis Systems) 作製に使うなどいろいろ考えられますが、もしこのようなことにご興味がある方があれば、是非図9の京大イノベーションプラザ棟でご見学頂きたいと思います(先端光加工プロジェクトURL: <http://www.laserprocessing.jp>)。

これまでフェムト秒レーザーで三浦清貴教授、下間靖彦准教授、坂倉政明准教授、兼平真

悟助教をはじめとしてNEDOやJSTプロジェクトに関わってきた多くの研究者が行ってこられた成果を紹介させていただきます。

<参考文献>

- 1) 平尾一之編, フェムト秒テクノロジー【基礎と応用】(化学同人)(2006)
- 2) K.Hirao et al., Active Glass for Photonic Devices: Photoinduced Structures and Their Application (Springer)(2000)



図9 京都大学大学院工学研究所イノベーションプラザ棟内(桂地区)

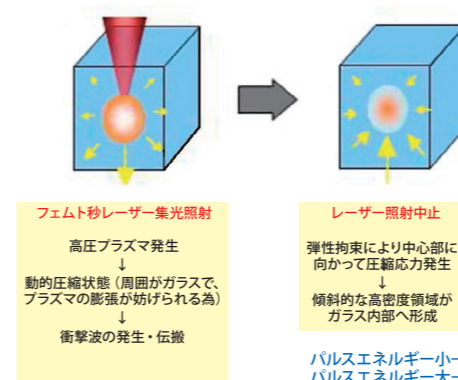


図5 ガラス内部に永久的な高密度領域形成メカニズム

Femtosecond laser direct writing

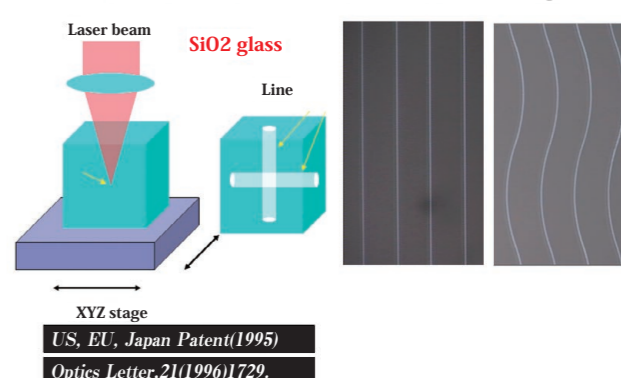


図6 光導波路形成への応用

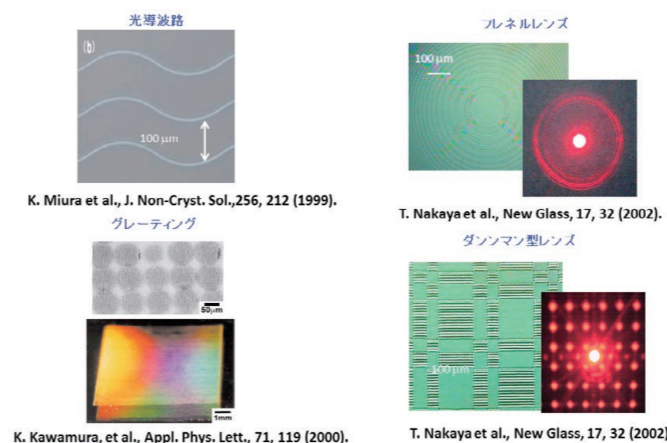


図7 フェムト秒レーザーによる光デバイス

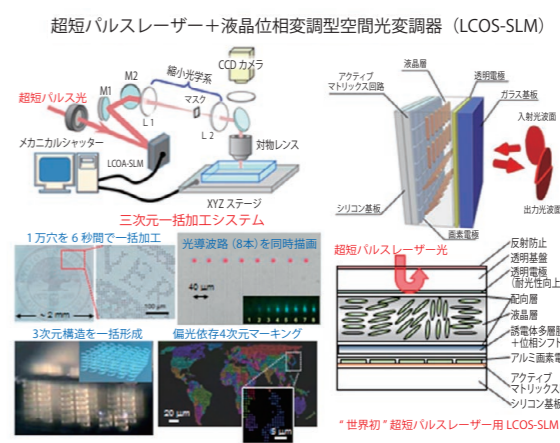


図8 世界初の空間変調器を用いたフェムト秒レーザー照射一括システム