

超短光パルスによるガラスの接合

大阪大学大学院工学研究科 物質・生命工学専攻

伊東 一良, 玉木 隆幸

Welding of glass material using ultrashort optical pulses

Kazuyoshi Itoh, Takayuki Tamaki

Department of Material and Life Science, Graduate School of Engineering, Osaka University

1. ま え が き

最近, フェムト秒パルスによるガラスの光加工が注目を集めている^{1)~4)}。海外では5つほど, 日本国内でも6つくらいのグループが研究を進めており, 次々と興味深い成果が挙げられている。フェムト秒パルス光をガラスに集光すると, 以下のようなことが起こることが分かっている。表面には, アブレーションによる1)ミクロン程度の深さの穴があく, 内部には緻密化によると思われる2)数ミクロン径の屈折率変化または, メカニズムはよく分かっていないが, 3)数百ナノから数ミクロン径の微細な泡が生じる。開口数の小さなビームを集光すると, 4)屈折率変化は数ミクロン径, 数百ミクロン長のフィラメント状の変化領域を形成する。表面の穴に何度もパルスを照射すると, 5)穴が深くなる。ウェットエッチングを併用したり, 加工の際に水を利用するなどの工夫を行うと, 穴のアスペクト比を非常に大きく(>100)することや, 3次元的な形状を作ることにも可能である。現在までにこれらを利用したデバイスが幾つも提案されている。例えば, 我々

のグループの成果としては, 1)分岐・結合光導波路⁵⁾, 2)ブラック回折格子^{6),7)}, 3)ゾーンプレート(図1)の作製⁸⁾, 4)水を利用した3次元空孔とその加工の際のデブリの形成⁹⁾などがある。ここでは, 新たに開始した透明体の接合実験について報告する。

ガラスのフェムト秒パルスによる加工は, 1)それ自体光通信・光情報処理の媒体となること, 2)透明体内部の加工がフェムト秒パルスの出現で初めて可能になったこと, により注目され始めているが, フェムト秒パルスによる

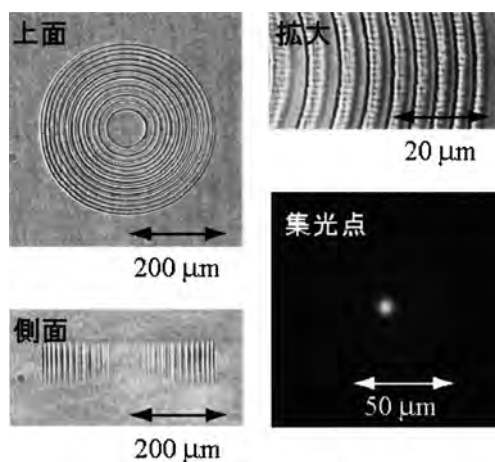


図1 位相型ゾーンプレート

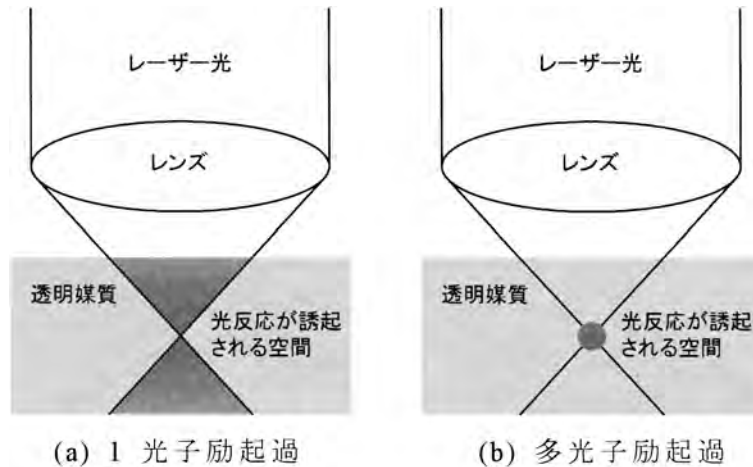


図2 励起過程の違いによる空間選択性

加工の可能性はガラスのような可視光域での透明体に限ったことではない。シリコン結晶など半導体も波長帯域を赤外領域に限定すれば、透明体であるので、上で述べたような、また、次に述べるような光加工が可能である。

2. 超短光パルスと透明媒質との相互作用

透明媒質において、超短光パルスの1光子吸収は起こりにくい。しかし、光パルス強度が十分高い場合、複数の光子を同時に吸収するため電子は価電子帯から伝導帯へ直接励起され、光イオン化する。これを多光子イオン化と呼ぶ。電子が伝導帯に励起されている時間よりも超短光パルスのパルス幅が長い場合、電子は光子を吸収し、加速する。十分に加速した電子は、他の原子に衝撃しイオン化させる。パルスが持続している間、自由電子は加速衝突を繰り返し、自由電子密度（プラズマ密度）を急激に上昇させる。このように、雪崩的に電子が増倍する現象をアバランシェイオン化と呼ぶ。

レーザーを媒質に集光照射した場合、1光子による反応は光の照射された領域全てにおいて起こるため、光の伝播方向に空間選択性をもたせることは困難である。対して、2光子以上の

光子により誘起される多光子励起過程においては、レーザー光強度の高い空間においてのみ光と媒質の相互作用が起こるため、集光点近傍のみに光反応を誘起することが可能となる。つまり、多光子イオン化とアバランシェイオン化により、集光点近傍のみにプラズマを発生させることができる。

3. 超短光パルスによるガラスの接合

2枚のシリカガラスの試料間隙に超短光パルスを集光し、多光子吸収現象を誘起すると、試料間隙においてプラズマが生成し、熱が発生すると考えられる。本実験では、上記多光子吸収過程を利用した試料間の接合実験を行った。

3.1 ガラスの接合実験

ガラスの接合に用いた実験システムを図3に示す。超短光パルス発生装置として、増幅チタンサファイアレーザー（Spectral Physics, Hurricane）を用いた。再生増幅された出力光パルスは、中心波長 800 nm、パルス幅 130 fs、繰り返し周波数 1 kHz、最大出力 700 $\mu\text{J}/\text{pulse}$ 、ビーム径 5 mm（半値全幅）である。試料としては、VAD（Vapor-phase Axial Deposition）法に

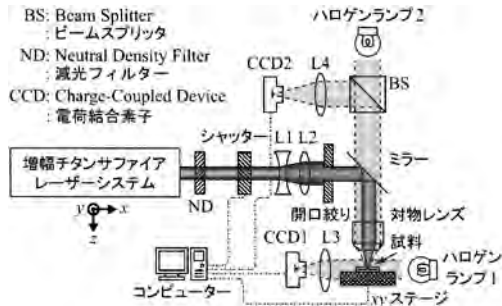


図3 実験システム

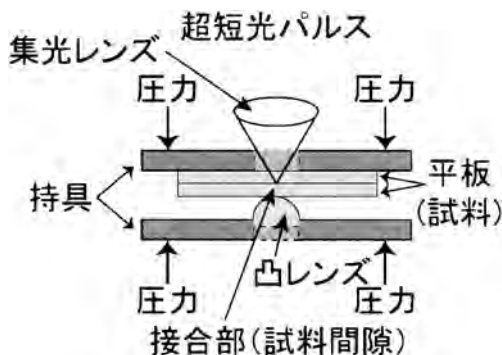


図4 試料固定方法

より生成された無水合成石英ガラス(Sumitomo Ceramics & Quartz co., Ltd., SK-1300)を2面研磨したものを2枚用いた。試料の大きさは、 $1.5\text{ mm} \times 3\text{ mm} \times 20\text{ mm}$ である。2枚の試料は図4に示すように凸レンズを装着した持具により固定されている。今回、試料間隙におけるレーザーアブレーションの発生を避けるために、持具にかかる圧力を変化させ接合部の試料間隙を波長の4分の1程度に調整した。さらに、試料を送り分解能 100 nm の微動 xy ステージ(PI Polytec, V-102)に取り付けた。

フェムト秒レーザーパルスは、ND (Neutral Density) フィルターにより強度を $3.0\text{ }\mu\text{J/pulse}$ に調整され、シャッターにより照射タイミングを制御される。さらに、レーザーパルスは、焦点距離 $f = -60\text{ mm}$ の凹レンズ(L1)と焦点距離 $f = 200\text{ mm}$ の凸レンズ(L2)からなる拡

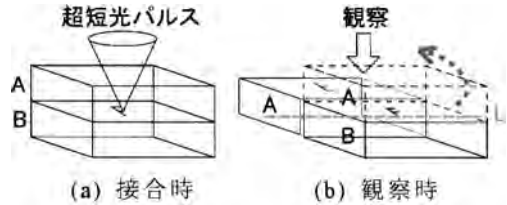


図5 試料観察方法

大光学系によりビーム径を拡大され、開口絞りを通して均一な強度プロファイルに整形される。整形後のパルスレーザーは、開口数0.10の対物レンズ(Olympus, MDPlan 5 $\times$)により、接合部に集光される。 xy ステージを光軸に垂直な方向に $5.0\text{ }\mu\text{m/s}$ の速さで走査し、 $100\text{ }\mu\text{m} \times 100\text{ }\mu\text{m}$ の領域に多光子吸収を引き起こし、接合を行った。

接合前後の試料間隙の変化を調べるために、白色干渉縞の観察を行った。試料をハロゲンランプにより照明すると、試料間隙の大きさに応じて白色干渉縞が形成される。形成された白色干渉縞は、ビームスプリッターおよびアクロマティックレンズ(L3)を通してCCD (Charge-Coupled Device) カメラ (Sony, XC777) 上に結像され、画像入力ボード (Cybertek, CT-3001) を用いてカラー画像としてコンピューターに入力される。

接合後、各試料表面形状および高さを観察するために、図5(a)に示す接合した試料を図5(b)に示すように分離した。観察には、走査型共焦点レーザー顕微鏡 (Olympus, OLS1200) を用いた。

3.2 実験結果

図6に接合前後の白色干渉縞を示す。図6(a)に示す接合前の白色干渉縞では、波長の4分の1以下の隙間である黒い部分が見られないのに対し、図6(b)に示す接合後の白色干渉縞では、矢印で示される部分に、黒く変色した部分が見られる。変色部分は、フェムト秒レー

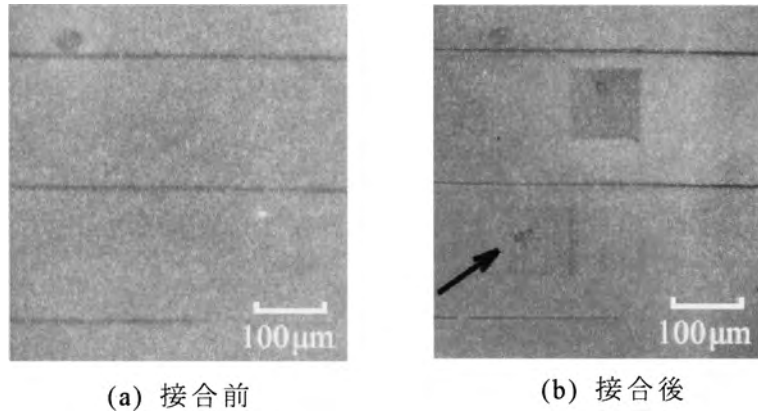


図6 白色干渉縞

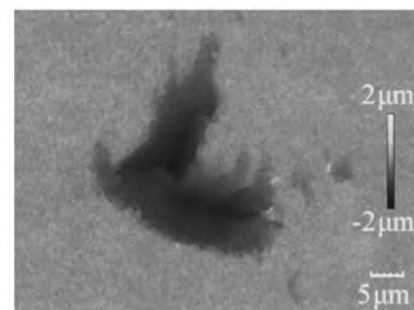
ザーパルスを接合部に集光照射したことにより、接合前よりも接合後の試料間隔が変化したために白色干渉縞に変化が起きたものと考えられる。さらに、変色部分が $25\mu\text{m} \times 25\mu\text{m}$ 程度の正方形程度と大きいことから、試料間隔は波長の4分の1程度以下であると考えるのが適当である。つまり、接合により試料間隔は減少したと考えられる。

次に、接合した試料を分離し、走査型共焦点レーザー顕微鏡にて各試料の表面形状を測定した結果を図7に示す。図7(a)は、上側の平板試料における表面形状であり、図7(b)は、下側の平板試料における測定形状である。図8に各試料の凹凸を視覚的に把握するために、各試料表面の高さを3次元的に表現したものを示す。図8(a)は、上側試料における表面高さである。図8(b)は、下側試料における表面高さである。

図7(a)と図8(a)より、上側平板試料表面の高さが、接合前よりも高くなり、凸形状になっているのがわかる。さらに、凸部分の最大高さは $2\mu\text{m}$ 程度であることがわかる。対して、図7(b)と図8(b)より、下側平板試料表面の高さは、接合前よりも低くなり、凹形状になっているのがわかる。さらに、凹部分の最大深さは $2\mu\text{m}$ 程度であることがわかる。また、上側平板



(a) 上側平板試料



(b) 下側平板試料

図7 各試料の形状

試料と下側平板試料は、線分Lを対称軸として形状が対称となっていることがわかる。加えて、上側平板試料表面の凸部分と下側平板試料の凹部分は、図6において黒く変色した領域

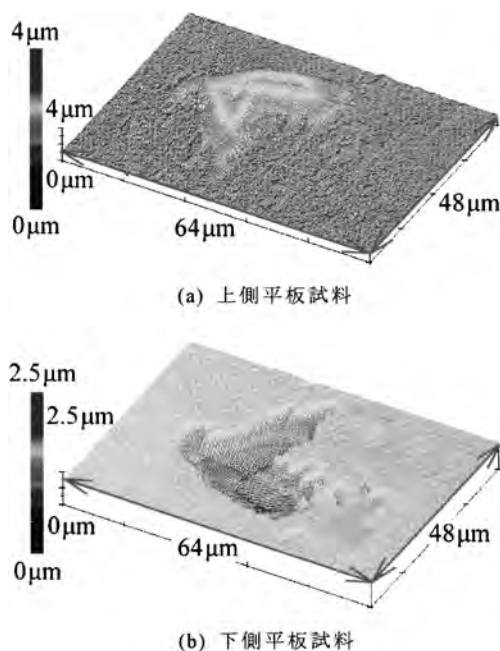


図8 3次元的に表示した各試料形状

に重なることもわかる。

一般的に、同種類の平板試料だけを重ね合わせ、各試料の接合面に凹凸の形状を作り出すことは困難である。しかしながら、本実験においては、上側平板試料表面には凸形状が作り出され、下側平板試料表面には凹形状が作り出されている。凹凸形状が形作られた原因としては、フェムト秒レーザーパルスを試料間隙に集光すると、集光点付近において多光子吸収現象によりプラズマが発生し、プラズマにより発生する熱により試料が溶融し、接合が行われたためと考えられる。結果として、接合された試料を分離した際に、下側平板試料の一部分が上側平板試料に付着し、上側試料表面に凸形状が作られ下側試料表面に凹形状が作られたと考えられる。

4. む す び

超短光パルスで2枚のシリカガラスの試料間隙に集光し、接合を行った。接合メカニズムは、多光子吸収現象により集光点近傍においてのみプラズマが発生し、生成された熱により試料が溶融したためと考えられる。

謝 辞

本研究を遂行するにあたり、試料、有益なご助言を頂きました独立行政法人産業総合研究所関西センターの西井準治氏に感謝いたします。また、走査型共焦点レーザー顕微鏡による観察にご協力頂きましたオリンパス株式会社に感謝いたします。

本研究の一部は大阪大学ベンチャービジネスラボラトリーにおいて行われました。

参 考 文 献

- 1) 伊東一良, 第50回応用物理学関係連合講演会講演予稿集(2003.3 神奈川大学, 29-YE-4) 128.
- 2) K. Itoh and W. Watanabe, "Toward nano-and microprocessing in glass with femtosecond laser pulses," RIKEN Review, No. 50, 90-94 (2003).
- 3) 渡辺 歴, 伊東一良, 「3次元マイクロ光デバイスの光加工」, レーザー研究, Vol. 31, No. 4, 276-281 (2003).
- 4) K. Yamada, W. Watanabe, J. Nishii and K. Itoh, J Appl. Phys, Vol. 93, No. 4, 1889-1892 (2003).
- 5) Wataru Watanabe *et al*, Opt. Lett., Vol. 28, No. 24, 2491-2493 (2003).
- 6) Yan Li *et al*, Appl. Phys. Lett., Vol. 80, No. 9, 1508-1510 (2002).
- 7) K. Yamada *et al*, Jpn. J. Appl. Phys., Vol. 42, No. 11, (2003).
- 8) K. Yamada *et al*, Proc. SPIE (2003) to appear (LPM2003, Munich).
- 9) Y. Iga *et al*, Proc. SPIE (2003) to appear (LPM2003, Munich).