

Nd : YLF レーザ高調波によるガラスの微細加工

住友重機械工業株式会社 総合技術研究所

林 健一

Glass Processing by Harmonics of Nd : YLF Laser

Ken-ichi Hayashi

R & D Center, Sumitomo Heavy Industries, Ltd.

1. はじめに

ガラスは古代から使われている非晶質の材料で、マクロ的には均質で硬く透明で電気絶縁性にも優れている。一方で熱や力の衝撃に脆く、研磨や曲げ以外の機械加工性に乏しい。ガラスの加工にエキシマレーザによるアブレーション加工が効果的であることが報告されている¹⁾。

現在、ガラスのレーザ加工としては、主としてマーキングが行われている。マーキングにはCO₂レーザ(波長10.6μm)やArFエキシマレーザ(波長193nm)が用いられている^{2),3)}。CO₂レーザの加工速度は速いが、熱影響によりクラックの発生が避けられない。ArFエキシマレーザでは極めて平滑な加工面が得られるが、レーザ発振器が大きく、装置全体が複雑で大きくなる。なお、加工面の平滑なことを利用して、ArFエキシマレーザを光学面の創成に用いようという試みがなされている⁴⁾。

レーザ光源の開発は、短波長化、大出力・高繰返し化、短パルス化、長寿命・高信頼性、小型化・低コスト化等を目標に進められてき

た。現在、産業用大出力CO₂レーザが各種材料の熱加工等に数多く用いられ、フラッシュランプ励起Nd:YAGレーザが光ファイバーやロボットとの組み合わせに適しているため、溶接・切断などに使われている。紫外域で発振するエキシマレーザは、ポリマー材料の微細加工や半導体製造工程のリソグラフィ技術に実用化されている。装置寿命の短いフラッシュランプの代わりに半導体レーザで励起を行う全固体レーザ技術や赤外域のレーザ光を波長変換して可視光や紫外光の高調波を発生する技術の進歩には、めざましいものがある。全固体レーザの高調波を光源とすれば、装置の小型化・高信頼性等の特徴を生かして微細加工等に広く用いられるものと期待される。

以下には、筆者らが開発した全固体レーザ高調波を用いた加工システム⁵⁾と、それを用いてガラスを微細加工した応用例について述べる。

2. 全固体レーザ高調波を用いた加工システム

開発した装置の基本構成を図1に示す。半導体レーザ励起Nd:YLFレーザの第4高調波を光源とし、ガルバノミラーとfθレンズによるスキャニング光学系を備えている。光源は、

〒254 平塚市夕陽ヶ丘 63-30
TEL 0463-21-8463
FAX 0463-21-8464
E-mail : hayashi_ken@hrt.shi.co.jp

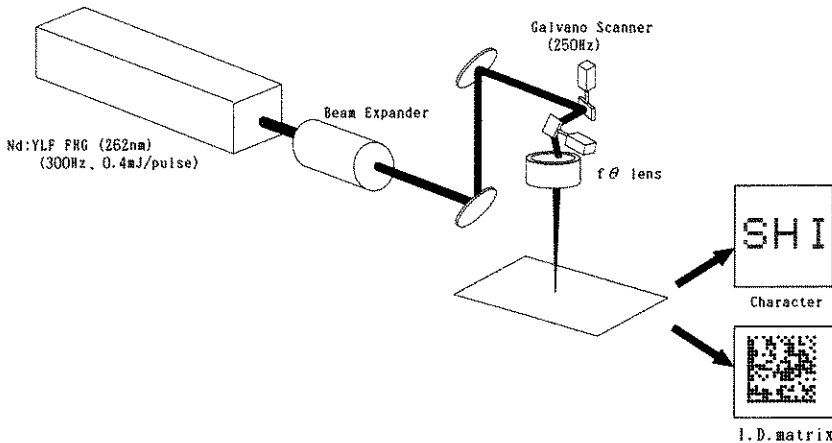


Fig. 1 Laser processing system.

全固体レーザであり、ガスや冷却水などの付帯設備を必要とせず、小型でメンテナンスフリーの運転が出来る。この基本構成の装置は主としてマーキング加工に用いる。また、各種加工目的に合わせて、光源、光学系共にいろいろな組合せで使用出来る。

2-1 レーザ光源

レーザ光源は、半導体レーザ励起 Nd:YLF レーザを基本波に用いた。フラッシュランプに較べて、半導体レーザは寿命が長く最適な励起波長を選択して効率の良い励起が出来るため、レーザロッドに対する熱負荷を大幅に減少出来る。また、Nd:YLF は一般に用いられる Nd:YAG に対して熱伝導率は劣るが負の屈折率温度係数を有し熱レンズ効果を 1/10 程度に押さえられる。これらの効果で、直線偏光で $M^2 = 1.05$ というビーム品質の良い基本波 (1047 nm) のレーザビームが得られている。出力エネルギーはパルスあたり約 3 mJ で、パルス幅は半値全幅で約 20 ns である。繰り返し周波数は 300 Hz 以下で可変出来る。

基本波は赤外波長なので、非線形結晶を使って可視または紫外光に変換する。波長変換には非線形結晶の BBO ($\beta\text{-BaB}_2\text{O}_4$) を 1 個用いて

第 2 高調波 (523 nm) に変換し、さらに 1 個用いて第 4 高調波 (262 nm) を発生させ、次に、基本波と第 4 高調波とを BBO 結晶中で混合し、第 5 高調波 (209 nm) に変換する。第 5 高調波の出力エネルギーはパルスあたり約 40 μJ で、パルス幅は半値全幅で約 12 ns である。

2-2 加工光学系

加工光学系では、まず波長選択を行う。レーザ出射口の直後にエキスパンダを置き、ビームを拡大し、ついで、2 枚の誘電体多層膜ミラーで波長選択を行い、目的の高調波光だけを取り出す。これは、より低次の光によってガラス内部に光学的損傷が生じるのを防ぐためである。例えば、2 枚のミラーで第 5 高調波の波長選択を行った場合、エネルギーの約 90% 以上が第 5 高調波となる。

スキャニング光学系はガルバノミラーと $f\theta$ レンズの組合せを採用している。ガルバノミラーは XY の 2 軸を、レーザ繰り返し周波数に近い 250 Hz の高速で走査応答する。 $f\theta$ レンズは合成石英の焦点距離が 50 mm あるいは 150 mm のものを用いている。

また、スキャニング光学系に XY ステージ

と通常のレンズの組合せも使用できる。この場合、レーザビームは各種の集光レンズ等によりXY ステージに装着されたサンプルホルダ上のガラスに集光される。必要に応じて CCD カメラでの加工モニタも可能である。さらにサンプルホルダの後方でレーザエネルギーを測定出来る。

2-3 加工に用いたガラス

ソーダ石灰ガラスは日本板硝子製の0.7, 1.1, 3.4 mm 厚の3種類を、無アルカリガラスはNH テクノグラス製 NA-35 の0.7 mm 厚を使用した。また、レンズ材料のBK7 および顕微鏡スライドガラス(池田理化 S1112 1.1 mm 厚)を用いた。

3. ガラスのマーキング加工

3-1 表面マーキング

Nd:YLF レーザの第4高調波を光源として用い、開発したマーキング装置でガラス表面をマーキング加工した。加工表面の光学顕微鏡での観察結果を図2に示す。1 mm 平方の大きさに21×21 ドットの2次元コードパターンが描かれている。第4高調波ではガラス表面をレーザアブレーションで除去加工する。レーザを多重照射すると、ソーダ石灰ガラスでは2から3ショットで、無アルカリガラスでも3か

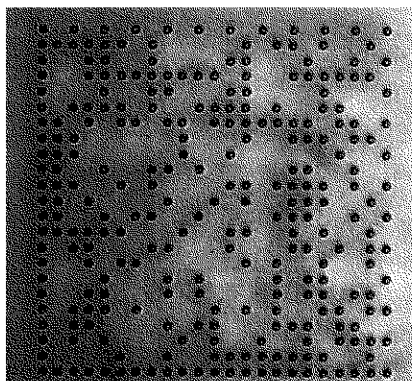


Fig. 2 Surface marking.

ら5ショットで加工部近傍にクラックを生じる。クラックの発生を防止する方法には、多重照射は行わずにドットとドットの間隔を大きくし、冷却ガスの併用が有効であることが分かった。クラック発生の主な原因はレーザ照射時の熱の影響であると考えている。また、表面のマーキング加工ではアブレーション時にデブリーと呼ばれる微細粒子の発生が避けられないので、何らかの除去プロセスが必要である。

3-2 内部マーキング

ガラスは透明材料であり、もし材料内部にマーキングが可能であればデブリーの発生という問題は完全に解消出来る。そこで、ガラスの内部にレーザビームを強く集光させることで内部マーキングを試みた。

レーザビームをレンズなどで強く集光させると電界強度が高くなり、レンズ等の光学材料中では、“Optical Damage”, あるいは、“Optical Breakdown” と呼ばれる現象が発生し、材料中に永久損傷を生じる。この現象は、非線形現象で、レーザ光強度に対する破壊の閾値を持つ。透明な光学材料では、材料の裏面、表面、内部の順で大きな閾値になる。これは、材料表面では微細な凹凸、キズの存在、不純物の吸着などで光エネルギーの吸収がより起こりやすいことによる。このため、内部にのみ損傷を生じさせ、加工を行うにはレーザビームの集光を表面より内部で強くする必要がある。

レーザビームに対して透明な材料であれば加工が可能であり、合成石英ガラスではNd:YAG レーザの第4または第5高調波が、可視域で透明なガラスでは基本波や第2高調波が使用出来る⁶⁾。図3に内部マーキングの結果を示す。

マーキングの各点はそれぞれ図4に示すように微細なクラックの集まりであり、ガラス基板の強度劣化を防ぐためには、クラックの大きさを制御する必要がある。

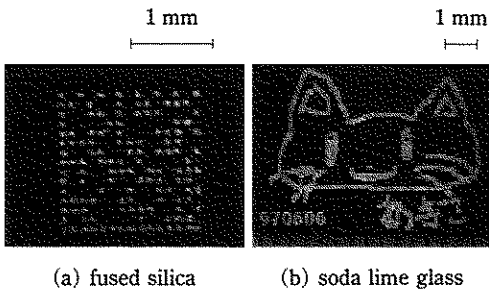


Fig. 3 Inner marking.

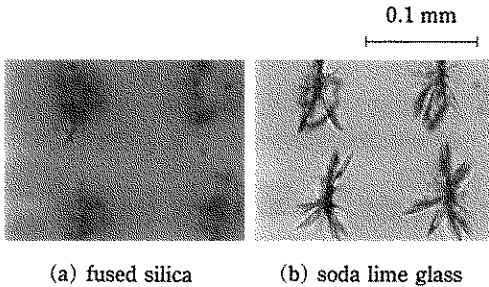


Fig. 4 Cracks of inner marking.

4. ガラスの深穴加工

Nd:YAG レーザの基本波 (1064 nm) によるガラス穴開け加工が報告されている⁷⁾。ガラス内部にレーザビームを集光して、ガラスの裏面から表面に向かって穴開け加工を施すものである。パイレックスおよび石英ガラスを 80 μm 径で長さ 20 mm, アスペクト比 250 の加工が実現出来ている。基本波による穴開け加工は多光子吸収を利用してガラス内部に光学的損傷を生じさせているため、穴を完全なものにするには、機械研磨や熱処理など何らかの後処理が必要である。Nd:YLF レーザの第 4 高調波 (262 nm) ではアブレーションにより、表面から除去加工が行えるが、数回の照射で加工部表面近傍にクラックを生じる。この場合、加工されたガラス基板から破断片が出てくる可能性があり、加工特性上からは望ましくない。KrF エキシマレーザ (248 nm) を用いた場合でも、加工表面は疎面となり、ArF エキシマレーザ (193 nm) の平滑面には及ばない。

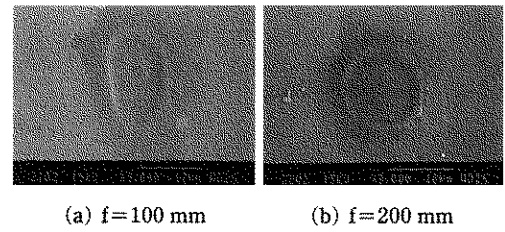
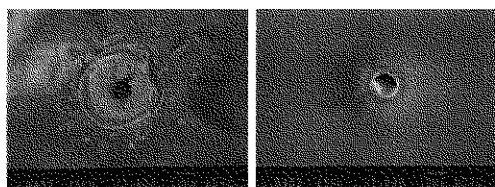


Fig. 5 Processed surface of soda lime glass.

そこで、KrF エキシマレーザよりさらに短波長の Nd:YLF レーザ第 5 高調波 (209 nm) を用いた。まず、クラックの生じないことを確認するために、無コーティング合成石英の平凸レンズによりガラスの表面に集光し、予め決めた所定パルス数だけの照射を行った。レンズの焦点距離を変えてエネルギー密度を変化させ、表面を SEM 観察した結果を図 5 に示す。使用したのはソーダ石灰ガラスである。第 5 高調波では表面にクラックを生じないことが示された。

次に、ガラス基板を Nd:YLF レーザの第 5 高調波でアブレーション加工すると、穴径約 10 μm で、アスペクト比 100 を越える穴開け加工が実現出来た⁸⁾。0.7 mm 厚のガラス基板の穴開けに要する照射回数は、ソーダ石灰ガラスで 2380 ± 25 、無アルカリガラスでは、 3186 ± 20 ショットであった。加工には主として $f=100$ mm のレンズを使用した。穴径は焦点距離に比例して変化する。焦点距離を長くするとエネルギー密度が低下するため、また、焦点距離を短くすると焦点深度が浅くなるため、 $f=100$ mm のレンズほどには高アスペクト比の穴加工は実現できなかった。ソーダ石灰ガラスに 4000 ショット照射し、加工穴を完全に貫通させた後に、レーザビームの入射側及び出射側の表面を SEM 観察した結果を図 6 に示す。

穴径は約 10 μm で、真円ではなく多少いびつな形状をしている。穴の周囲にはデブリの堆積が少し認められるが、クラックは生じていない。また、無アルカリガラスでは出射側の穴径は約 4 μm で入射側より小さくなっていた。



(a) laser inlet

(b) laser outlet

Fig. 6 SEM images of the surface of the processed hole.

5. ま と め

全固体レーザ高調波を光源とした、ガラスの加工結果を示した。

- (1) Nd:YLF 第4高調波 (262 nm) で表面にクラックのないマーキングが可能になった。
- (2) ガラスを透過する波長の高調波をガラス内部に強く集光し、光学損傷により内部マーキングを行った。
- (3) Nd:YLF 第5高調波 (209 nm) によるアブレーションで高アスペクト比の穴開け加工が実現できた。高アスペクト比であるだけでなく高品質な深穴加工が可能となる。

これ以外のレーザ加工として Nd:YAG レーザによる切断などが行われている⁹⁾。また、真空紫外ラマンレーザを用いた多波長同時照射による表面微細加工も試みられている¹⁰⁾。さらに、比較的低いエネルギー密度の CO₂ レーザ

でガラスを照射して、表面にドーム状あるいはピット状の微細な形状変化を起こさせる加工もある^{11),12)}。今後、フェムト秒レーザなどが用いられるようになると、超微細な加工が可能になると期待されている。

参 考 文 献

- 1) B. Braren and R. Srinivasan: J. Vac. Sci. Technol. B6(2) (1988)537.
- 2) 石坂進一: ジョイテック 8 (1992) 34.
- 3) 山中康弘, 加幡博史: 機械と工具 37 (1993) 18.
- 4) 明石朋義, 実野孝久, 徳村啓雨, 中塚正大: 第57回応用物理学会学術講演会予稿 (1996) 8aZQ1.
- 5) 酒井文雄, 林 健一: 住友重機械技報 44 (1996) 29.
- 6) 林 健一, 酒井文雄: 第4回機械材料・材料加工技術講演会論文集 (1996) p. 61.
- 7) 菊地 薫: 機械研ニュース 10 (1995) 6.
- 8) 林 健一: レーザ研究(1997年12月発行予定),(投稿中).
- 9) 黒部利次, 川向徳康, 高尾利幸: 「YAG レーザによるガラスの精密切断」, 材料, 42 (479), (1993) 1004.
- 10) K. Sugioka, et al.: Jpn. J. Appl. Phys. 32 (1993) 6185.
- 11) J. Brannon, A. Tam, P. Baumgart: Proceeding of CLEO '97, CTuX2, (1997).
- 12) G. Staupendahl and P. Gerling: Proceeding of LASER '97, (1997).