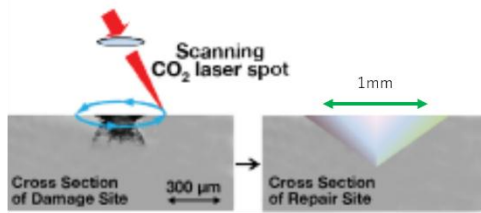


1. はじめに

本論文研究の目的は、高強度レーザーで最近になって導入されつつある、光学素子の損傷問題に対し、早期発見と損傷部を広げないようにする局所加工を組み合わせたダメージマネージメントの手法を確立することである。本研究では、高繰り返しレーザーでも起きている光学素子損傷の問題を、その早期発見と損傷部の保護をできる手法の開発を目的とした(図1参照)。



M. L. Spaeth, P. J. Wegner, "OPTICS RECYCLE LOOP STRATEGY FOR IF OPERATIONS ABOVE UV LASER-INDUCED DAMAGE THRESHOLD", LLNL-JRNL-658260 (2016).

図1.ダメージマネージメントの概念図

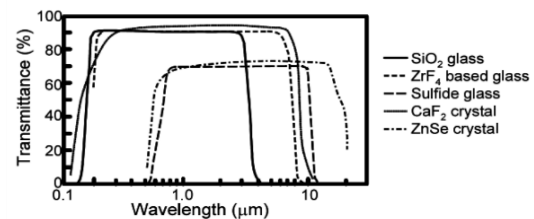
具体的な研究内容としては、①光学損傷部分の損傷発展を停止させる目的で、ガラスに高い吸収を示すCO₂高繰り返しレーザーを選択し、その損傷部への照射システムを開発する、②この照射システムで鍵となる集光点が円周運動する駆動装置を、1つの回転軸で可能とするミラーホルダーの設計・試作・試験を行う、③石英ガラスにパルスレーザーを用いたダメージ付加の観察と耐久テストを行う、④光学損傷痕の微細加工の円周方向へのスキャンスピードでの最適値を決定する、ことになる。

2. CO₂レーザーとガラスの光学的特性

ガラスの透過スペクトルを図2に示す。

ある標本をレーザーによって加工するためには、その標本がレーザーの波長に吸収を示している必要があるが、石英ガラスの場合約0.4~4μmの、またSulfide glassに関しては約~10μmの透過スペクトルを持ち、多くのレーザーの波長ではガラスに吸収されない。そこで長い発振波長を持ち、かつ安定的な高出力を実現するレーザーとして考えられるのがCO₂レーザーである。

CO₂レーザーは発振波長10.6μmのレーザーであり、透過スペクトルの広い大部分のガラスに対しても線形吸収を示すため、ガラスの加工に適していると考えられる。



Kohei Kadono, "Optical Properties of glasses I.", NEW GLASS Vol.24 No.1 2009

図2.ガラスの透過スペクトル

3. ガラスの赤外吸収

赤外領域でのガラスの電磁波の吸収は、ガラスを構成するイオン間振動が励起されることにより起こる。イオン間の振動の振動数 μ は結合を調和振動子として、

$$\nu = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{\mu}}$$

であらわされ、さらに μ は換算質量、すなわち陰イオン、陽イオンの質量それぞれ m_a 、 m_c として次のようになる。

$$\frac{1}{\mu} = \frac{1}{m_a} + \frac{1}{m_c}$$

この ν について、陽イオンが酸化物イオンからハロゲン化物イオンに変化すると価数が減ることで結合強度、および力の定数 k が減少し、 ν も小さくなる。また、硫黄以下のカルコゲン元素、塩素以下のハロゲン元素に置き換わることによっても m_a が大きくなるため同様に ν が小さくなる。赤外域の吸収端は、ガラスの最大振動エネルギーの伸縮振動も含めて他の伸縮振動、および変角振動など複数モードの振動が励起される多フォノン吸収により決まり、その大きさに比例して長波長側にシフトする。

赤外域に大きな吸収をもつシリカなどのガラスだが、今日では赤外線カメラやセンサなどの赤外域での活用もあり、それに必要な $10\mu\text{m}$ 以上の遠赤外線に透過性を示すガラス系を使用する。すなわちその用途では、フッ化物以外のハロゲン化物ガラス、セレン、テルルを主成分としたカルコゲン化物ガラスに限られる。

4. ダメージの拡大観察

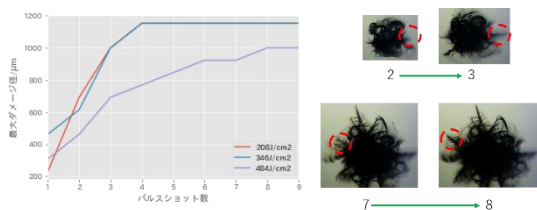


図 3. レーザーダメージの拡大図

パルスレーザーをスライドガラス (SiO_2) に当て、その表面にダメージが付加、及び拡大していく様子を観察したデータを図 3 に示す。パルスのショット数によってダメージが拡大していくが、ダメージは主に初期

ダメージの楔の先端に当たる部分から拡大している様子が確認できた。つまりこれは曲率半径の大きな箇所から損傷が拡大しているということを示している。したがって曲率半径の小さな滑らかな穴を開ける必要があると予想し、滑らかなテーパ穴を開けることを考える。

5. CO_2 レーザーのビームプロファイル

CO_2 レーザーを照射してダメージマネジメントに適した穴形成を行うためにはレーザーのビームプロファイルを知ることが重要になる。そこで今回はシングルモード発振の CO_2 レーザーを 130mm の焦点距離を持つレンズで絞った最小スポット点において以降、ガラス表面への照射を行うこととし、この点でのレーザービームプロファイルをナイフエッジ法により計測した(図 4 参照)。

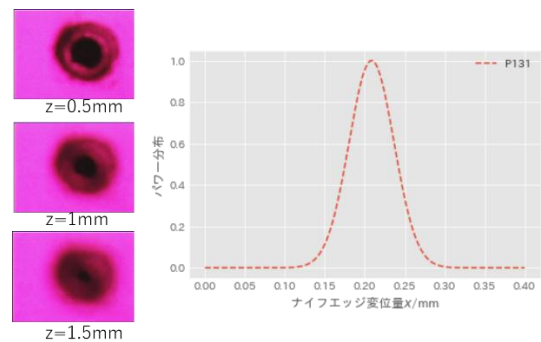


図 4. CO_2 レーザーのビームプロファイルとその加工穴

計測データからこの CO_2 レーザーが滑らかなガウスビームプロファイルを持っていることを確認した。 CO_2 レーザーの波長域に対してガラスが線形吸収を示すことからその蒸発により形成される穴もガウスプロファイルに従ったテーパ形状になるものと予想し、実際に 1 点照射を行ってみた。形

成された穴を深さ方向に数点分観察したところ、この穴表面がテーパ形状を取っていることを確認した。

6. デブリフリーの条件

レーザー照射による形成穴が深さ方向にテーパ形状を確認したが、次に加工表面がレーザーのパラメータによってどう変化するかを調査するために、実際にCO₂レーザーの最小スポットをパルス幅、出力、照射時間等を変えながら石英ガラスの表面の1点に照射した(図5参照)。

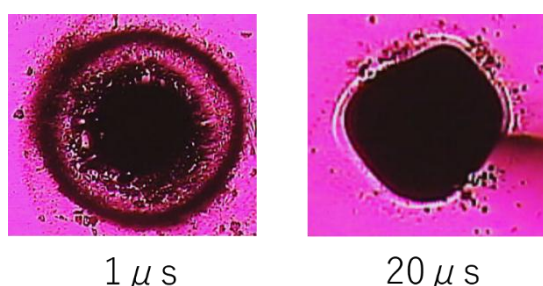


図5.デブリのパルス幅依存性

するとあるパルス幅の条件によりCO₂レーザーの照射により蒸発したガラスのごみ(デブリ)が加工穴表面に付着してしまうことを確認した。デブリの付着は加工後2次表面での多段反射を起こすためガラスに高負荷を与えることになる。そのためこれを取り除くことがダメージマネジメントでは必要となるが、本研究では臨床的なドライプロセスでマネジメントをすることを目指しているため、エッチングなどの化学処理はできない。したがってデブリフリーとなるCO₂レーザーの照射条件を求めた。

この時のパルス幅が1 μ sであったが、ここからパルス幅を大きくしていき、20 μ sを超えたところからデブリが照射表面に付着しなくなった。

7. ガウスビームの加工特性

ダメージマネジメントに必要な加工穴の形状を曲率半径の大きな箇所のない緩やかなテーパ穴だとしたが、CO₂レーザーのプロファイルはシングルモードの滑らかなガウス分布になっているため、これをダメージ点の一点に照射すれば求める穴が形成できるものと予想し、先述のデブリが付着しない(デブリフリーの)条件でCO₂レーザーを1点に照射したときの加工特性を調査した(図6参照)。

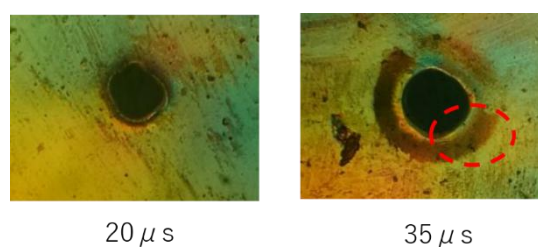


図6.ガウスビームの加工特性

するとレーザーのパルス幅を大きくするにしたがって照射点の周囲のガラス表面に一樣な蒸発跡が確認されるようになった。この理由として考えられるのは、CO₂レーザーは高出力なガウスビームプロファイルであるために、広い範囲に微小な出力をしめしているということである。すなわちある時間以上で照射し続けると、そのガウスビームの微小部分による寄与が加工に現れてくるものと考えられた。したがってCO₂レーザーでガラス表面のダメージマネジメントをする場合は、その微小面あたりの勝者時間が微小出力域による表面蒸発が起きないスピードでビームをスキャンする必要があると考えられる。そのためレーザーの照射時間とパルス幅、およびパルス周期によって決まるアブレーション時間を定義

し、ダメージマネージメントに求められるアブレーション時間を調査した。

すると、パルス周期 $1000\mu\text{s}$ 、パルス幅 $20\mu\text{s}$ の設定で 5 秒以内の照射を行うと照射周囲のアブレーションが見られなくなることが分かった。したがって、微小面あたりのアブレーション時間は $0.1\text{s}(=5 \times 20/1000)$ 以内である必要がある。

8. CO₂レーザーの円周スキャン

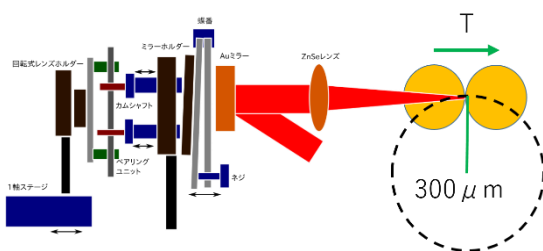
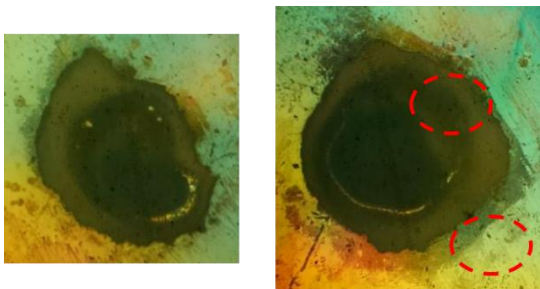


図 7.レーザースキャナー装置の設計

CO₂ レーザーを円周方向にスキャンできる装置を作成した。微小面あたりの照射時間 $T=66\mu\text{m}/(300\mu\text{m} \times \pi/s)=700\text{ms}$ となるように設計した(図 7.参照)。



20 μs

35 μs

図 8.レーザー円周スキャンによる形成穴

ガウスビームを 1 点照射したときと同じ条件でガラス表面に CO₂ レーザーを円周スキャンして照射したところ、どのデータでもデブリフリーかつ照射周囲の蒸発のない任意の範囲でのアブレーションができていることを確認した(図 8.参照)。このアブレ

ーション時間は $0.028\sim 0.112\text{s}$ でおおよそ求めたアブレーション時間以内に収めている。 0.112s でも周囲のアブレーションが見られないのは、円周スキャンはある微小面を 2 度通過してその正味のアブレーション時間が上記に示されている時間であり、1 度の通過時のアブレーションだけが照射周囲への影響に寄与しているためだと考えられる。したがってここから速いスピードで円周方向に何度もスキャンさせる照射方法を用いれば、デブリフリーかつ周囲への影響を防ぐという条件をクリアした上で、任意のダメージの大きさに対応できるダメージマネージメントを行うことができると言える。

9. まとめ

本研究ではダメージ拡大プロセスの観察からダメージマネージメントに求められるレーザーによる加工形状を見積もり、デブリフリーと照射周囲への蒸発等の影響を防ぐ条件を求めた。そしてレーザーを円周スキャンさせる装置を設計し、円周スキャンがそれらの条件をクリアして任意のダメージ形状に対応したレーザーダメージマネージメントに適していることを示した。

しかし今回のスキャナー装置よりも速いスピードでのスキャンが必要であることは、ダメージの大きさ($\sim 300\mu\text{m}$)に対して現状の CO₂ レーザー穴が深すぎる、遅いスピードのスキャンでは照射部に局所的な吸収の偏りが生じてしまう、などの理由で考えられている。したがって以降はスキャナーの改良、および穴の形状評価、石英ガラス以外のガラスへの実験、などを行う必要があると考えている。