超短パルスレーザーによるガラス溶接*

Glass Welding by Ultra Short Pulsed Laser

中村洋介**

Yosuke NAKAMURA

Key words laser welding of glass, femto second laser, optical contacting, modification, heat accumulation

1. はじめに

ルビーレーザーの開発から60年近くが経過し、レーザー発振器は目覚ましい進化を遂げてきた。特に金属材料の切断や溶接加工に使用される連続波レーザーは、既に産業界においては必要不可欠な加工ツールとなっている。そしてレーザー発振器は、ガラスという金属とは特性が大きく異なる材料の加工に対しても、重要な加工ツールとしてその有用性を示し始めている。ガラス材料は、多くの種類のレーザー光を高い透過率で透過する特徴をもつため、今までは加工することが非常に困難であったが、パルス幅がピコ秒やフェムト秒といった、非常に高いピークパワーをもつ超短パルスレーザーの産業レベルでの製品化の実現により、超短パルスレーザーにとっては加工可能な材料となった。既にスマートフォンに代表される平面ガラスの切断の生産現場では、機械的なダイシングより高速かつ高品質であるため、多くの超短パルスレーザー発振器が活用されている。トルンプが提案する高速ガラス切断技術であるTOP Cleave（図1）は、パルス幅10ピコ秒未満の高出力

図1 TOP Cleaveにより切断されたガラス

IRピコ秒レーザーであるTruMicro 5070と自社製加工ヘッドを組み合わせることで、2.8m/秒という高速ガラス切断を実現している。

このように既にガラス切断を産業レベルで実現している超短パルスレーザーは、ガラスどうしの溶接も同様に実現できる可能性を示唆し始めている。超短パルスレーザーの登場以前のレーザーによるガラス溶接は、CO₂レーザーを用いた技術であった。CO₂レーザーの波長は10.6μmであるため、非常に高い吸収率でガラスに吸収されることで発熱し、金属材料と同様の溶接が可能である。しかしながら、CO₂レーザーによるガラス溶接は、レーザー光が照射されるとガラスの表面からレーザー光の吸収が始まりその熱を利用する加工であるため、レーザー照射部とその周辺は熱影響により変形し、ガラス材料はその大きな特徴である高い平面度を維持することが困難となる。IoTによる電子部品の多様化と市場の拡大にともない、ガラスの高い平面度を利用したアプリケーションは拡大しつつある。そのため、レーザー照射部と溶接部分周辺の熱影響を極力抑えることが可能な、超短パルスレーザーによるガラスどうしの溶接技術には、大きな期待がもたれている。超短パルスレーザーによるガラスどうしの溶接に必要な重要要素は、溶接の起点の発生と、ガラスどうしの溶接に必要なガラスの熔融温度の極所発生である。前者については、ガラス内部で多光子吸収を発生させるための十分なピークパワーが必要であり、後者については十分なパルス数のバーストモードを高い繰り返し周波数で照射することが必要となる。

2. 使用機器

実験に使用したトルンプ製TruMicro 2020（図2）は、パルス幅が500fs未満の超短パルスレーザーである。リニアアンプによるCPA方式の特徴を活かしたバーストモードは、20nsのパルス間隔で最大で8パルスの発振が可能である。このバーストモードはマルチパルスモードと称されており、すべてのパルスが、高い安定性で発振される。これに加え、非常に高いビーム品質であるため、レー

*原稿受付 平成30年2月26日

**トルンプ株式会社レーザー事業部レーザー技術部 インダストリーマネジメントグループ（横浜市緑区白山1-18-2）

図2 TruMicro 2020

図3 ガラス溶接レーザー照射概要

レーザー光の照射部以外への熱影響を極力抑えるとともに、強く安定したガラスどうしの溶接を実現する。

この TruMicro 2020 から発振された超短パルスのレーザー光は、焦点距離 11 mm の集光レンズで直径約 $3.6\ \mu\text{m}$ に集光される。本実験では厚さ 1 mm と 6.35 mm の石英ガラスを使用した。図3に本実験のガラス溶接のためのレーザー照射光学系の概要を示す。

3. 実験結果¹⁾

3.1 ガラス内部の改質部とレーザーパラメータの関係

初めに、ガラス材料の改質状態について、レーザーパラメータをもとに分析した結果を示す。超短パルスレーザーの照射によって発生する改質部の体積は、バースト発振時のパルスの数が増えると増大する。繰り返し周波数 200 kHz で 1 パルスだけの照射では、非常に小さな改質部しか発生させることはできないが、バースト発振時のパルス数を増やすことにより、改質部を劇的に大きくすることが可能である。これは、パルス数増加にともなう平均出力の増加と、20 ns 間隔で照射されるレーザー光によって発生する微小な熱が蓄積するためである。改質部の大きさは、パルスエネルギーの大きさとレーザー光の走査速度によってもコントロールすることが可能である。図4に示すとおり、最大の改質部の大きさは TruMicro 2020 が平均出力 8 W で発振し、レーザー光を 1 mm/秒で走査した場合に形成され、その大きさは $450\ \mu\text{m} \times 160\ \mu\text{m}$ となった。このような巨大な改質部は、レーザー照射時の焦点位置の調整を広い範囲で許容できるという利点がある。最大パル

図4 改質部の大きさとパルスエネルギー、走査速度の関係

図5 超短パルスレーザーによるガラス内部の溶融部

スエネルギーである $10\ \mu\text{J}$ で 4 パルスのバースト照射を、1 mm/秒で走査する場合には、図4内の左図のような欠陥がほぼない、均一に溶融した改質部を確認することができた。

改質部の形成は、十分なピークパワーをもつ超短パルスレーザーがガラス内部に照射されることで発生する多光子吸収によって開始される。この非線形加工によるイオン化により発生する電子をもとに線形吸収が起こり、その結果、レーザー照射部の温度上昇により自由電子が発生する。続いてレーザー光の吸収位置は、光軸に沿って集光レンズに向かって移動し、図5のような楕円形の改質部を形成する。このような加工プロセスであるため、超短パルスレーザーを用いたガラス溶接において、レーザーの焦点位置は常に下部のガラス内部に位置するように調整することが必要である。オプティカルコンタクトをせずにガラスどうしを接合するため、溶融したガラスを界面の隙間を埋めることと熱伝導に利用する。

3.2 ガラス表面に現れる改質部

ガラス表面へ改質部が及ぼす影響を理解するため、ガラス内部のレーザーの焦点位置を変えた実験を行った。ガラス表面とレーザー照射により発生した改質部との距離が近くなると、ガラス表面に隆起した部分が発生した。さらにガラス表面と改質部との距離を近づけると、改質部はガラス表面に到達し、溶融したガラスはガラス表面から飛び出すことが確認された。凝固後、直径数 μm 程度で長さ数百 μm の線状ガラスと半球状の隆起が図6のように確認できた。

図6 ガラス表面に発生した凝固後の線状ガラスと隆起

図7 ガラス表面に発生した隆起の高さ

この半球状の隆起の高さは、レーザー照射時の焦点位置とその際のレーザーパラメータにより決定される。図7のようにガラス表面に発生した隆起を側面から観察すると、その高さは最大で15 μm になることが確認できる。

3.3 オプティカルコンタクトされていないガラスどうしの溶接

次にガラス表面から飛び出したガラスや隆起したガラスを利用して、オプティカルコンタクトがされていない隣接した2枚のガラス板の隙間を埋める可能性について実験を行った。図8(a)に示すように、ドライエッチングを用いて段階的に隣接する2枚のガラス板の隙間を加工した。約220 nmの段差で、最大2.3 μm の隙間を準備した。段階的にエッチングされた隙間と2枚のガラス板の間に微小な隙間が存在することは、図8(b)のように干渉縞から確認することが可能である。また、エッチング処理がされていない部分の2枚のガラスの隙間は最大で1 μm 程度である。

本ガラス溶接に使用したレーザーの平均出力は8 Wで、走査スピードは1 mm/秒であった(4パルスのバーストモードを200 kHzで照射し、その時の各パルスエネルギーは10 μJ)。溶接ラインは200 μm ごとに平行に加工し、最初の溶接ラインは隣接する2枚のガラスの界面から600 μm 下に焦点位置を合わせ、以降は溶接ラインごとに3 μm 焦

図8 オプティカルコンタクトされていないガラスどうしの溶接

点位置を上に移動させて加工を実施した。図8(c)のように、ほぼすべての焦点位置で、界面にある隙間を閉じることに成功した。2枚のガラスを溶接することができなかった界面の隙間は、最大の隙間である3.3 μm (エッチング処理で発生した最大隙間の2.3 μm と、元々ガラス界面に存在する1 μm の隙間の合計)であることが、図8(c)の干渉縞の有無から確認できる。これより隣接する2枚のガラスの隙間が3 μm までであれば、その隙間を埋めてガラスどうしの溶接が可能である。図8(c)の右側の干渉縞が確認できる部分は、2枚のガラスが非常に近い距離の関係にあることを示す。これより、超短パルスレーザーによって2枚のガラスの界面の隙間を閉ざすことに成功した部分は、上下のガラスが溶接シームによって引き出されたことで、隙間を埋めることができたと推測することができる。これより、ガラス板の界面に存在する隙間は、溶融したガラスの脱出と、そのガラスの再凝固の収縮により周囲のガラスが結果的に引き寄せられることの二つの異なる効果により閉じられると結論づけられる。湾曲したガラスは、その剛性により薄いガラス材料のみ溶接が可能である。図9は、隣接するガラス界面の隙間が超短パルスレーザーによるガラス溶接により閉じたことを示す。使用したガラスの厚みはどちらも1 mmであり、その界面の最大隙間は約4 μm である。焦点位置は図中左から光軸に沿って集光レンズ側に段階的に移動させた。そのため、レーザー照射の焦点位置の違いによって、二つの異なる効果を個別に確認することができる。図9左側には、界面に隙間が存在しており、ガラスはレーザー照射による改質部のみによってつながっている。図9右側はガラスの界面の隙間は完全に閉ざされている。

3.4 超短パルスレーザーにより溶接されたガラスの破壊強度測定

最後に、オプティカルコンタクトをせずに超短パルスレ

図9 焦点位置の違いにより変化する隣接するガラス界面の空間

図10 オプティカルコンタクトをせずに超短パルスレーザーによって溶接した溶融石英板の破壊試験 (a) 溶接前の重ね合わさった2枚の溶融石英板と干渉縞 (b) 異なる溶接間隔で溶接された溶融石英板

レーザーによって溶接した石英ガラスの破壊試験を行った。使用した石英ガラスの厚みは6.35 mmである。まず2枚の石英ガラスを、圧力を加えずに置くと、図10 (a) のように最大20本程度の干渉縞を確認することができた。この干渉縞の本数は、2枚の石英ガラスの界面には少なくとも3 μm の隙間があることを示す。超短パルスレーザーによる溶接後には図10 (b) のように、干渉縞はすべて確認できなくなった。これより石英ガラスどうしが直接接合されたことが証明された。

この実験で使用したレーザーの平均出力は8 Wで、走査スピードは10 mm/秒であった。溶接の接合強度への影響を確認するため、レーザーによる溶接ラインの間隔を50, 80, 100, 125 μm として溶接を行った。石英ガラス内部に加工された溶接シームによる屈折率の変化のため、この溶接ライン間隔で加工された改質部には白濁が確認された。さらには図10 (b) のように、溶接ライン間隔が異なると白濁の強弱も異なる。

超短パルスレーザーで溶接された石英ガラスを長さ4 mmの棒状に切断し、3点曲げ試験による破壊強度試験を実施した。異なる溶接ライン間隔の破壊強度試験の結果を、図11 (a) にワイブル分布に従った形で示す。オプティカルコンタクトをしていない状態でのレーザーガラス溶接ではあるが、その破壊強度は桁外れであった。溶接ライ

図11 超短パルスレーザーで溶接された溶融石英板の3点曲げ試験による破壊強度試験 (a) 溶接ライン間隔が50 μm と100 μm の破壊強度試験の結果 (b) バルク材と異なる溶接ライン間隔ごとの破壊強度

ンの間隔が100 μm のときに、破壊強度の最大値は72.91 MPaに達した。これはバルク材料の強度の約85%に当たる。溶接ラインの間隔を狭くすると破壊強度が下がる原因としては、多くの溶接ラインのガラス内部への溶接シームの加工が応力の増加につながる可能性が考えられる。より溶接ラインの間隔が広い125 μm において破壊強度が下がる原因は、2枚の石英ガラスを接合する溶融した石英の体積が小さいことだと考えられる。すべての測定データは、ワイブル分布に従い図11に示す。

オプティカルコンタクトにより接合された2枚の石英ガラスに、同様の溶接ライン間隔で超短パルスレーザーによるガラス溶接を実施したサンプルでも同様の破壊強度試験を行ったところ、最大破壊強度は76.6 MPaであった。これはバルク材の強度の約90%に当たる。

4. 結 論

超短パルスレーザーを用いた石英ガラスどうしの溶接は、オプティカルコンタクトをせずに高強度で実現できることが示された。本実験に使用したトルンプ製超短パルスレーザーであるTruMicro 2020は、バースト発振時のパルス間隔が20 nsと短く、その際の各パルスエネルギーは最大で10 μJ である。このバーストモードは、非常に大きな体積の石英を溶融することが可能である。レーザーの焦点位置を界面に近づけることで、改質部の上部がガラスの表面に到達する。その後、溶融したガラスはガラス表面から飛び出しガラス表面に堆積する。この溶融し表面に堆積したガラスが2枚のガラスの界面に存在している隙間を埋め、2枚のガラス間の熱伝導を可能とする。その結果として、改質部は両方のガラス内部に形成され、元々あった隙間も閉じられるのである。技術的には3 μm の隙間が界面に存在する2枚の溶融石英板も、超短パルスレーザーによる溶接は可能である。3点曲げ試験による破壊強度試験の結果は、超短パルスレーザーによる溶接は一部のみの接合のような溶接ではなく、安定して非常に高い強度を実現していることを示している。その破壊強度は72.9 MPaに達し、実にバルク材の約85%の強度を実現するに至る。

図 12 超短パルスレーザーによって溶接されたカバーガラス（側面）

図 13 カバーガラスの溶接部

5. 今後の展望

超短パルスレーザーによるガラスどうしの溶接技術の利点は、ガラスの平面度を維持したまま、接着剤等を用いずに高強度でガラスを接合できることにある。これは、接着剤の強度や耐久性、使用環境による劣化対策が高いレベルで要求される製品に対して、非常に有効な解決策となり得る。既にトルンプ社内では、自社の高出力ディスクレーザーのレーザー光の伝送に使用する光ファイバーのカバーガラスにレーザー溶接技術を活用している。このカバーガラスには数 kW の連続波レーザーが透過することになるため、透過率の高いカバーガラスであっても非常に大きな熱量に対しての耐久性が求められる。このような厳しい使用環境においては、接着剤を使わずガラスの平面度を維持することを可能とする超短パルスレーザーによるガラス溶接は、非常に有効である。図 12 には光ファイバー、図 13 には先端のガラス溶接部の画像、図 14 には光ファイバー

図 14 光ファイバーケーブル

の画像を示す。図 13 で確認できるように、複数の溶接ラインをカバーガラスの外周に同心円状に加工することで、接着剤よりも強度の高い接合を実現している。

このように強度や加工状態は非常に良好であるが、産業において活用されるための課題もある。本稿内に記載があるとおり、加工スピードは 10 mm/秒程度であり、高速化のためには、超短パルスレーザーにはさらなる高出力化や高繰り返し周波数化が求められる。既に TruMicro 2020 の後継機は、平均出力が 20 W に達し、4 パルスのマルチパルスモードで 500 kHz での発振を実現している。超短パルスレーザーの目覚ましい進化のスピードは、近年中にも超短パルスレーザーによるガラスどうしの溶接を生産ラインの一部として実現する可能性が十分あると期待している。

参考文献

- 1) S. Richter, F. Zimmermann, D. Sutter, A. Budnicki, A. Tünnermann and S. Nolte: Ultrashort pulse laser welding of glasses without optical contacting, Proc. SPIE 10094, Frontiers in Ultrafast Optics: Biomedical, Scientific, and Industrial Applications XVII, 1009411 (2017) ; doi: 10.1117/12.2250389

中村 洋介

2004 年中央大学理工学部精密機械工学科卒業。同年キヤノン販売(株) (現・キヤノンマーケティングジャパン(株)) 入社。半導体露光装置関連業務に従事。2015 年トルンプ(株)入社。現在に至る。