

## 科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成24年 4月30日現在

機関番号：15301

研究種目：若手研究（B）

研究期間：2009～2011

課題番号：21760100

研究課題名（和文） ガラスの高品位マイクロ接合を可能とする超短パルスレーザー溶接法の開発

研究課題名（英文） Development of Micro-welding by Ultra-short Pulsed Laser to Perform High-quality Joint of Glass

研究代表者

岡本 康寛（OKAMOTO YASUHIRO）

岡山大学・大学院自然科学研究科・助教

研究者番号：40304331

研究成果の概要（和文）：ガラス材料に超短パルスレーザーを照射することで集光点の微小領域を熔融し、ガラスを微細接合する技術を確認するために溶接特性や機械強度評価を行った。その結果、レーザー光走査速度は熔融部の大きさに、パルス繰り返し数はマイクロバブルやクラックの発生に大きく影響することが明らかとなった。また、レーザー光走査速度が小さく、比較的大きなパルス繰り返し数を選択すれば、レーザー光照射によって熔融された領域であっても母材と同程度の機械強度が得られた。

研究成果の概要（英文）：The welding characteristics and evaluation of molten zone were investigated in order to realize the high reliable micro-joining process of glass material by ultra-short pulsed laser. Molten zones created by the ultra-short pulsed laser in a glass material were experimentally investigated. The laser scanning speed influenced the molten zone size of glass welding, while the pulse repetition rate had the direct influence on the generation of crack and micro bubble. The strength of molten zone was almost equal to the base material, and high strength could be obtained at the low velocity and the high pulse repetition rate condition.

交付決定額

（金額単位：円）

|        | 直接経費      | 間接経費      | 合計        |
|--------|-----------|-----------|-----------|
| 2009年度 | 1,500,000 | 450,000   | 1,950,000 |
| 2010年度 | 1,100,000 | 330,000   | 1,430,000 |
| 2011年度 | 800,000   | 240,000   | 1,040,000 |
| 総計     | 3,400,000 | 1,020,000 | 4,420,000 |

研究分野：特殊加工

科研費の分科・細目：「工学」・「生産工学・加工学」

キーワード：材料加工，処理機械工産工学，精密部品加工，超短パルスレーザー，微細接合

## 1. 研究開始当初の背景

近年、光通信用や IT 機器用デバイスの需要が増大しており、関連製品の微細化が進んでいる。そのため、それらに用いられるマイクロ部品やディスプレイデバイスに用いられているガラス部品を精密に接合するための技術開発が求められている。従来、ガラス部品の接合にはガラス部品間に接着剤を用

いる手法が一般的である。しかし、この手法では使用環境が制限されたり、凝固にともなう接着剤の収縮量が不安定なために固定位置に誤差が生ずる点が問題となっていた。一方、YAG レーザを用いた手法として、接合界面に予め塗布した吸収剤にレーザー光を吸収させるとして2枚のガラス板を接合する手法が提案されている。しかし、これも吸収剤を塗

布することが必要となることから使用環境に制限がともなう。また、熔融領域が数百  $\mu\text{m}$  程度であり、クラックの発生が顕著となる。

一方、最近では、予め吸収剤などを塗布することなく、フェムト秒やピコ秒オーダーの超短パルスレーザーを用いた局所的熔融現象を利用しようとする試みが始められており、高 N.A. レンズで集光することでレーザー光の集光径よりも大きな熔融領域を形成することが可能となる。しかし、この場合は熱伝導現象による熱拡散をとまなうことから、その熔融条件の詳細な検討や材料の物性的特性が及ぼす影響は明らかになっていない。そのため、超短パルスレーザーによるガラスの接合技術を確立するためには、ガラス熔融部および接合部の機械的強度を評価することが重要となる。

## 2. 研究の目的

レーザーによる熔融接合法は接着剤や中間層を用いず、熱影響層を減少させることができ、精密な接合が可能である。また、レーザープロセスを適正化することで高い信頼性が得られ、非接触の加工プロセスであり、低コスト化も期待できることから、ガラスの接合に有望な技術であると考えられる。近年では、このガラスの接合に超短パルスレーザーを用いた加工法が注目されている。超短パルスレーザーを用いた接合技術は、要求される接合面のみを選択的に接合できる。また、プロセス速度が大きく、熱変形が極めて小さいことなどが特徴としてあげられる。しかし、超短パルスレーザーを用いたガラスの接合であっても、入熱と冷却のサイクルを有することから、超短パルスレーザーによるガラスの接合技術を確立するためには、接合部の評価が重要となる。

実用化を検討する上で、クラックの発生しないレーザー光照射条件を明らかにすることは学術上も重要であり、そのメカニズムを明らかにすることで、より信頼性の高いガラスの接合法を確立することができるものと考えられる。さらに、そのようなクラックの発生を避けることができるレーザー光照射条件においてガラス熔融部および接合部の機械強度評価を行い、超短パルスレーザーによるガラスの高信頼性直接接合法の確立を目指して検討した。

## 3. 研究の方法

レーザー発振器には波長1064nm、パルス幅10psのピコ秒レーザーを用いた。熔融部を観察するために図1に示すようにガラス板内部に様々な条件でレーザー光を照射した。発振器から出力されたレーザー光をN.A. 0.55のレンズによって集光した。ガラス試料には厚さ1.0mmの熔融石英と厚さ1.1mmのホウ珪酸ガラス(Schott社製D263)を用い、焦点位置をマイクロメータによって適切に調節した。

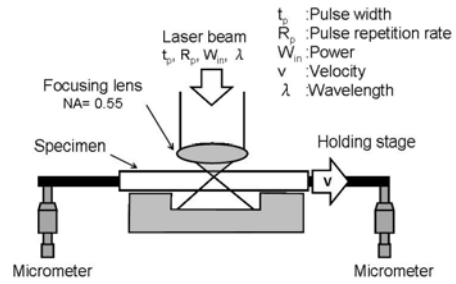


図1 実験方法

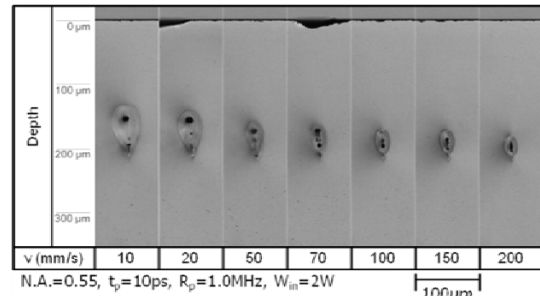


図2 各送り速度における熔融部

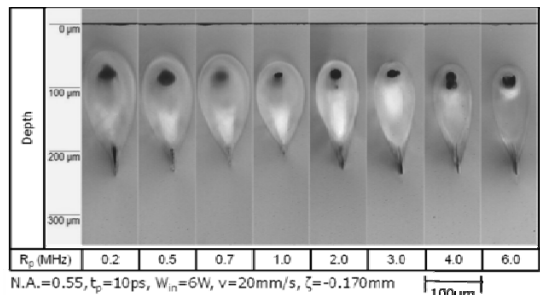


図3 各パルス繰り返し数における熔融部

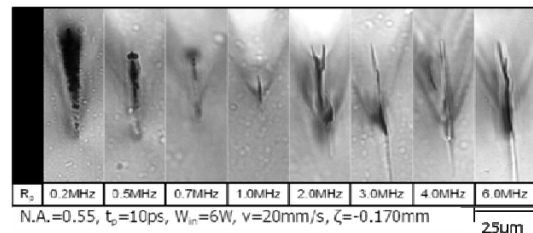


図4 熔融部下部の状態

## 4. 研究成果

### (1) ビード断面の観察結果

図2は各走査速度における熔融石英の熔融部形状を示したものである。熔融部は走査速度が大きくなると、徐々に小さくなった。また、熔融部内部には気泡が発生しており、その大きさや位置は走査速度によって異なっていた。

図3はパルス繰り返し数による熔融石英の熔融部形状変化を比較したものである。また、図4は図3に示した熔融部の下部を拡大した

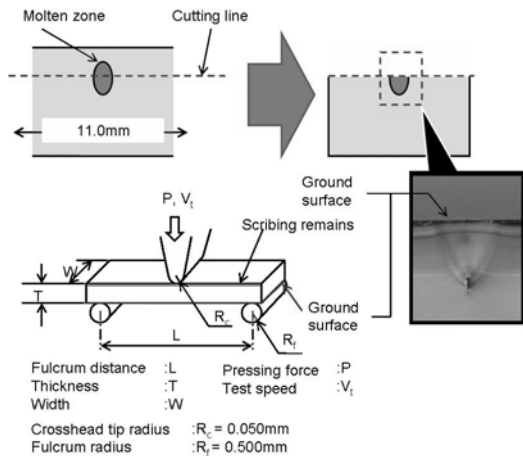


図5 三点曲げ試験方法

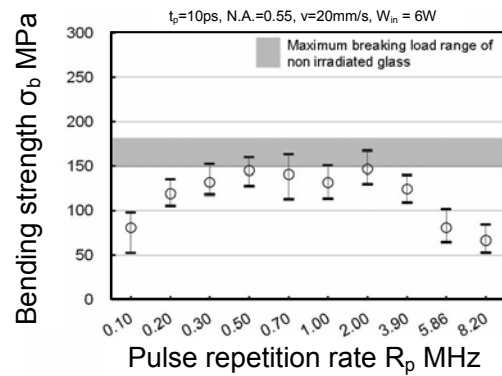
ものである。パルス繰り返し数が小さいとき、マイクロバブルが熔融部下部に見られる。一方、パルス繰り返し数が大きくなると、マイクロバブルは減少し、パルス繰り返し数1MHz以上では確認できなくなった。しかし、パルス繰り返し数2MHz以上になると熔融部下部にクラックが発生するようになり、さらにパルス繰り返し数が大きくなると、そのクラックはレーザー光軸方向に長くなった。

以上のように、走査速度は熔融部の大きさに、パルス繰り返し数はマイクロバブル、クラックの発生に大きく影響することが明らかとなった。熔融部の大きさは走査速度によって単位長さ当たりの入熱量が異なるためと考えられる。また、クラックの発生は熔融部が加熱、冷却により膨張と収縮を繰り返すことで、内部に応力分布が生じることが要因として考えられる。この応力分布は、レーザー光走査条件によって変化することから、更なる検討が必要である。

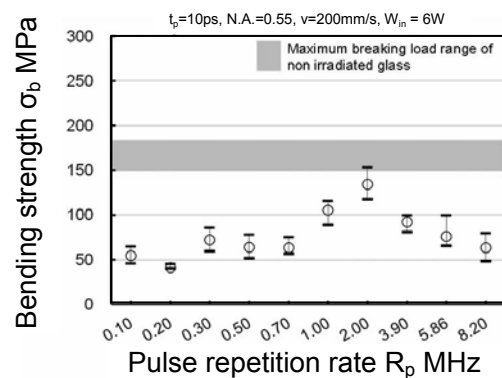
## (2) 熔融部曲げ強度の評価

熔融部の強度を評価するために、まず熔融石英の三点曲げ試験を行った。曲げ試験の試料は、図5に示すようにレーザー照射後、幅1.5mm、長さ11.0mmに切断し、上面を熔融部の中央まで研磨した。その後、研磨面を下にし、上から荷重を与え、試料が破壊するまでの強度を測定した。

図6は走査速度が20 mm/s、200mm/sでパルス繰り返し数を0.10MHzから8.20MHzまで変化した場合における熔融石英の三点曲げ試験結果を示したものである。レーザー光を照射していない試料の曲げ強度は図中のグレーラインで示す150MPaから180MPaであった。図6(a)に示す走査速度20mm/sにおいてパルス繰り返し数0.5MHzから2.0MHzでは、レーザー光照射を行っていない試料と同程度の曲げ強度が得られた。しかし、パルス繰り返し数が小さい領域と高い領域では曲げ強度が小さくなっ



(a)  $v=20\text{mm/s}$



(b)  $v=200\text{mm/s}$

図6 三点曲げ強度

た。これは図4に示すようにマイクロバブルやクラックが熔融部下部に発生していることから、強い内部応力が影響したためと考えられる。一方、走査速度が大きい200mm/s(図6(b))では、高い曲げ強度が得られるパルス繰り返し数の範囲が走査速度の低い場合と比較して狭く、ほとんどのパルス繰り返し数で母材よりも曲げ強度は小さくなった。これは、走査速度が大きいと熱源の移動も速いことから、走査速度が小さい場合よりも急激な温度変化が生じたためと考えられる。以上のように適切なレーザー光照射条件を選択すれば、レーザー光照射によって熔融された領域であっても母材と同程度の曲げ強度が得られた。

## (3) セン断強度の評価

良好な接合状態を得るためには2枚の平板ガラスの間隙を小さくすることが重要であり、接合面を清浄な状態として試料を準備することが必要となる。平坦度や面粗度に優れずガラス板同士を重ね合わせた場合、その界面からの反射光がほとんど得られず、境界を認識できない状態(以降オプティカルコンタクトと称す)を得ることができる。この様に準備された試料に対して溶接ビードを形成し、せん断強度を評価しようとしても、オプティカルコンタクトを破壊するために大きな加重を要し、接合部の強度を適切に評価することは

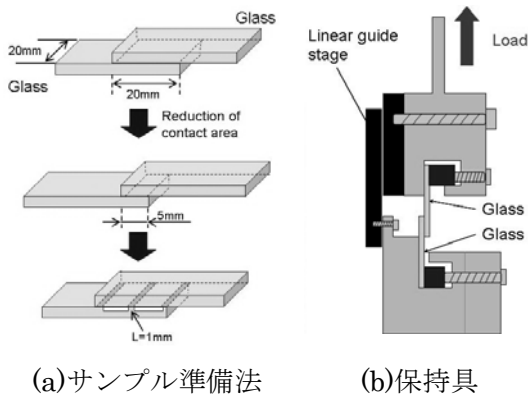


図7 せん断試験方法

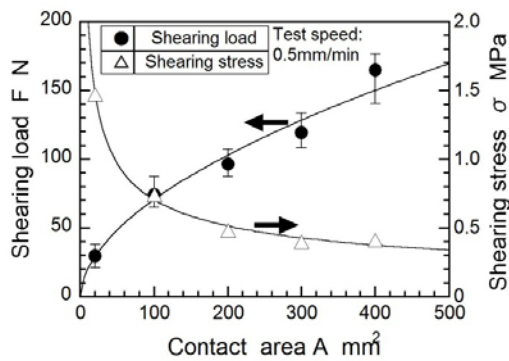


図8 オプティカルコンタクト力

難しいと考えられる。そこで、図7(a)に示すように厚さ1.1mm、幅20mmの試料を用いて重ね合わせの試料を準備し、ガラス同士が接触する面積を変化させた。接触部分の幅が20mm、長さが各々5mm、10mm、15mm、20mmとなる試料に関しては、ガラス平板の接触面を清浄な状態とし、そのままの状態を重ね合わせた。一方、接触部分の長さ1mmの試料に関してはフッ酸によるエッチング処理を用いて接触面以外の厚さを減らすことにより重ね合わせ試料を得た。これらの試料をせん断試験する場合は、図7(b)に示すような保持具を用いた。加重荷重時のねじれ等の影響を少なくするためにリニアガイドを用いた。また、強度評価を行う場合は、保持具の摩擦抵抗により生ずる加重を減じた値とした。なお、以降のせん断強度の評価においては厚さ1.1mmのホウ珪酸ガラス(D263)を用いた。

図7(a)に示すようにして準備した試料に対して、溶接ビードを形成すること無しに、オプティカルコンタクトを破壊する場合のみの荷重を測定し、接触面積に対してそのせん断加重とせん断強度をまとめた結果を図8に示す。測定は各々5回行い、その平均値とばらつきの範囲を図中に表している。接触面積が減少するにしたがって、オプティカルコンタクト力が減少していることがわかる。したがって、接触部分が20×20mm、接触面積が400mm<sup>2</sup>

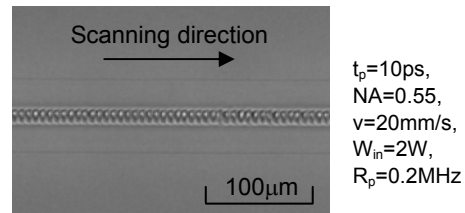


図9 重ね合わせ継ぎ手の溶接ビード

程度の重ね合わせ試料を用いた場合、オプティカルコンタクト力を破壊するだけで150N程度と大きな加重を必要とする。仮に溶接ビードのせん断時における破断加重がこれよりも小さい場合、その強度評価を行うことは困難となる。一方、接触面積を20mm<sup>2</sup>程度とすることで、オプティカルコンタクトを破壊する加重は30N程度となり、これよりも十分に大きな加重により溶接ビードが破断する場合は、その強度を適切に評価することが期待できる。ところで、オプティカルコンタクトを破壊するせん断強度は、接触面積が減少するにともなう増大していることがわかる。これは接触面積が大きいときは接触状態が不均一であり、領域によって接触状態が異なることを示していると考えられる。すなわち、大きな接触面積を有するオプティカルコンタクト領域の試料を用いて接合部のせん断強度を評価した場合、破断荷重のばらつきがより増大することが懸念される。したがって、オプティカルコンタクトが得られる接触領域を十分に小さくして溶接ビードの強度評価を行うことが、測定精度向上のためにも重要と考えられる。

図7(a)に示すように幅20mmの平板ガラスを重ね合わせ、接触部分の面積20mm<sup>2</sup>となる重ね合わせ試料を準備した。そして、その接触界面に長さ15mmの溶接ビードを形成し、矢印方向へ荷重を負荷することでせん断強度の評価を試みた。なお、試料にはホウ珪酸ガラス(D263)を用い、接触界面において熔融領域が最大となるように界面から光軸方向に焦点位置をずらして溶接ビードを形成した。図9はその時の溶接ビードの光学顕微鏡写真を示したものであり、試料上面からガラス基板を通して撮影した。クラックを生ずること無く、安定した溶接ビードが形成されている。

同一条件 ( $t_p=10ps$ ,  $NA=0.55$ ,  $v=20mm/s$ ,  $W_{in}=2W$ ,  $R_p=0.2MHz$ ) で溶接ビードを形成した5点の試料に対してせん断試験を実施した結果を図10に示す。破断荷重にばらつきはあるものの安定してせん断試験が行えていた。破断加重はオプティカルコンタクト力を破壊する加重と比較して十分に大きな値が得られており、これら5点の試料の平均せん断強度は65.6MPaと母材と同程度であった。以上のように、オプティカルコンタクト力の影響を小さくすることで、せん断強度を適切に評価できた。

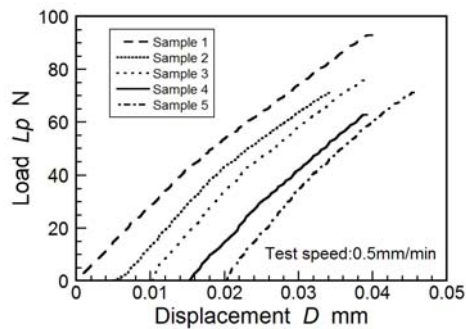


図10 同一条件におけるせん断試験結果

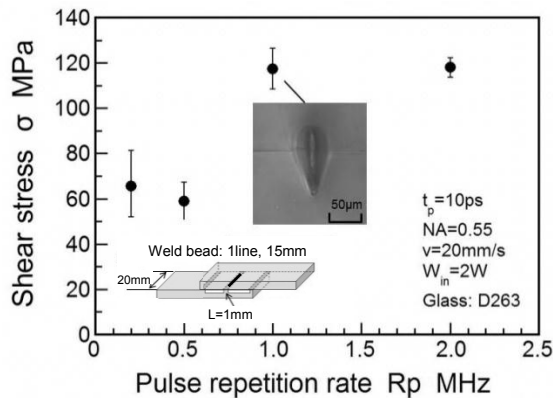


図11 各パルス繰り返し数でのせん断強度

図11に各パルス繰り返し数におけるせん断強度を示す。パルス繰り返し数が大きくなるにしたがってせん断強度は増大し、パルス繰り返し数1MHz以上で100MPa以上と高い値が得られた。以上のように、オプティカルコンタクト力の影響を低減し、接合部の機械強度を評価するための手法を確立できた。それにより適切なレーザー光照射条件を選択すれば、レーザー光照射によって熔融された領域であっても母材と同程度の機械強度が得られることが明らかとなり、本手法を実用展開する上での指針となる知見が得られた。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計2件)

- ① 岡本康寛, 高橋健太, 宮本 勇, K. ツベチェック, M. シュミット, 岡田 晃, 超短パルスレーザーを用いたガラスの微細溶接法-熔融領域の評価-, 第18回エレクトロニクスにおけるマイクロ接合・実装技術シンポジウム論文集, 査読有, 18巻, 2012, pp. 327-330.
- ② Isamu Miyamoto, Kristian Cvecek, Yashuhiro Okamoto, Michael Schmidt and Henry Helvajian, Characteristics of laser absorption and welding in FOTURAN glass by ultrashort laser pulses, Optics Express, 査読有, Vol. 19, No. 23, 2011, pp. 22961-22973.

〔学会発表〕(計4件)

- ① 山本敬史, 岡本康寛, 宇野義幸, 宮本 勇, K. ツベチェック, M. シュミット, 超短パルスレーザーを用いたガラスの微細溶接法—熔融領域の強度評価—, 第74回レーザー加工学会 2010年12月6日, 東京.
- ② Isamu Miyamoto, Yashuhiro Okamoto, Krischan Cvecek and Michael Schmidt, Laser-matter interaction in fusion welding of glass using ultrashort laser pulses -Formation mechanism and prevention of weld defects-, The 11th International Symposium on Laser Precision Microfabrication, 2010.6.9, Stuttgart.
- ③ 宮本 勇, K. ツベチェック, M. ウォルフ, 岡本康寛, M. シュミット, 超短パルスレーザーによるガラスの熔融溶接技術, 第73回レーザー加工学会, 2010年5月26日, 大阪.
- ④ Zazuli Bin Mohid, Yasuhiro Okamoto, Keishi Yamamoto Yoshiyuki Uno, Isamu Miyamoto, Kristian Cvecek, Michael Schmidt and Peter Bechtold, Evaluation of Molten Zone in Glass Welding Using Ultra-short Pulsed Laser, 5th International Conference on Leading Edge Manufacturing in 21st Century, 2009.12.3, Osaka.

〔図書〕(計0件)

該当無し

〔産業財産権〕

○出願状況 (計0件)

該当無し

○取得状況 (計0件)

該当無し

〔その他〕

該当無し

## 6. 研究組織

(1) 研究代表者

岡本 康寛 (OKAMOTO YASUHIRO)

岡山大学・大学院自然科学研究科・助教  
研究者番号: 40304331

(2) 研究分担者

該当無し

(3) 連携研究者

該当無し