

レーザー照射による薄板ガラスの精密切断加工

関東職業能力開発大学校 伊藤 昌樹
 静岡職業能力開発促進センター 羽賀 馨
 大分職業能力開発促進センター 江守 真
 小高 勝

Precision Cutting of Plate Glass by Laser Fissuring Method

Masaki ITO, Kaoru HAGA, Makoto EMORI and Masaru KODAKA

要約 シリコンウエハや薄板ガラスなどに代表される硬脆材料の加工は直接接加工のために二次加工が余儀なくされている。非接触加工が可能になれば後工程が簡略化でき、メリットは大きい。

本研究では非接触加工であるレーザー加工を薄板ガラス加工に適用するものである。これまで硬脆材料加工にレーザー加工を用いた例はあまりなく、とりわけ YAG レーザを用いた報告は少ない。YAG レーザを熱源とした Laser Fissuring 加工法を提案し、薄板ガラス加工に適用することにより薄板ガラス加工の可能性を検討した。特に YAG レーザでの加工特性を出力・焦点・アシストガスについて実験的に検討した結果、適切な条件を選択することにより加工が可能であることを実証した。とりわけ Laser Fissuring 加工は熱応力を利用するという特徴から加工にはアシストガスの影響が大きいこと、特に精密切断加工を実施するためにはアシストガスの種類、吹きつけ圧力が影響を持つことを明らかにした。

はじめに

エレクトロニクスや光学部品をはじめとする、さまざまな分野で、精密で高品質な薄板ガラスが要求されている。これらの加工には古くはダイヤモンドスクライバ、超硬合金のローラ型チゼルが、近年ではダイヤモンドブレードダイシング、ワイヤソーなどが使用されている⁽¹⁾。しかし、これらは材料に直接接触する加工方法であるために、異物の付着や汚れなどの問題、さらに加工端面には硬脆材料特有の微細な割れや欠けなどが多く発生する問題があり、このため二次加工が不可欠である。また、高精度・高能率な加工の要求に対して対応が難しいことが指摘されている。さらにこれらは直線加工であり、近年ニーズが高まってきている曲線形状や任意の形状加工には対処できていない。最近これらの問題に対応するための1方法として、レーザーを用いることが検討されている⁽¹⁾⁽²⁾⁽³⁾。レーザー

加工は非接触加工であるために二次加工の必要はない。また、高精度・高能率加工が期待でき、さらに曲線加工や任意形状加工の可能性⁽⁵⁾⁽⁶⁾⁽⁷⁾も無視できない利点である。本稿では低出力 YAG レーザを用い、筆者たちが開発してきた Laser Fissuring 加工 (LF 加工と略す) を用いて薄板ガラス加工に適用した結果について、出力・焦点・アシストガスの影響を中心に報告する。

LF 加工の特徴

LF 加工はレーザー加工特有の溶融・蒸発・気化といった熱エネルギー加工とは異なる。LF 加工は材料端面に存在する微細亀裂に、熱源としての低出力なレーザー光を照射することで照射部に熱応力を発生させ、その熱応力で亀裂を成長させ進展方向を制御する加工方法⁽⁸⁾である。図1に LF 加工中の写真を示す。

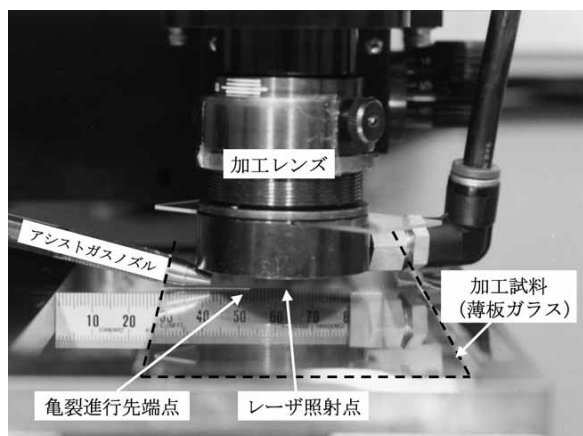


図1 Laser Fissuring 加工

LF 加工は従来の割断とイメージ的には同じではあるが、加工方向を制御できる点で明らかな違いがある。

LF 加工の特徴をまとめると以下ようになる。

利点

1. 非接触加工である
2. 加工音が静粛である
3. 切断幅が狭い(約 1 μm)
4. 切断面が平滑である
5. 切断粉が発生しない
6. 直線・曲線加工ができる
7. 低出力で加工ができる
8. 熱影響層が少ない

問題点

1. 加工の安定性
2. 加工精度(形精度)の向上
3. 加工速度(切断速度)の向上
4. 材料内面からの加工が難しい

加工原理

LF 加工は硬脆材料の加工手段に適応が考えられる。硬脆材料は熱伝導率が低く比較的小さな引張応力で簡単に破壊する特徴がある。材料に破壊しない程度の低出力のレーザー光を照射すると、照射点付近では圧縮応力そして周辺部には引張応力の熱応力が発生する。もし、材料に微細な亀裂が存在していたならばレーザー光を照射したときに発生する熱応力は亀裂を成長させ材料を破壊に導くことになる。このとき、レーザー光を移動しながら照射を続けると発生する熱応力で亀裂は成長しながらレーザー光の軌跡を追従していく。この亀裂を切断加工に利用するのが LF 加工である。

図2はLF加工の概要であるが、図に示すように、

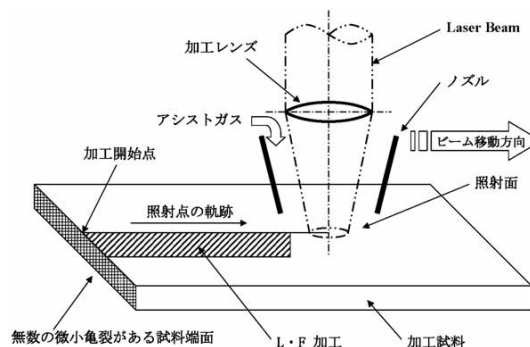


図2 Laser Fissuring 加工の概要

一定速度でレーザー光を移動させながら材料端面に存在する微小亀裂を成長・進展させることにより、目的形状に材料を切断することが可能になる。

実験方法

実験ではパルス YAG レーザ加工機(東芝製・LAY 864型)出力300W、波長1.06μmを使用した。図3に加工装置の構成を示す。加工装置は YAG レーザ発振器、光学装置、X-Y テーブル、モニタ TV、アシストガス供給装置から構成されている。X-Y テーブル上には試料(基板ガラス)を透過したレーザー光の反射の影響がでないように、十分な高さの穴ぐりをした治具を固定してある。また、アシストガスはレーザー光と同軸方向から材料表面に吹き付けられるようになって

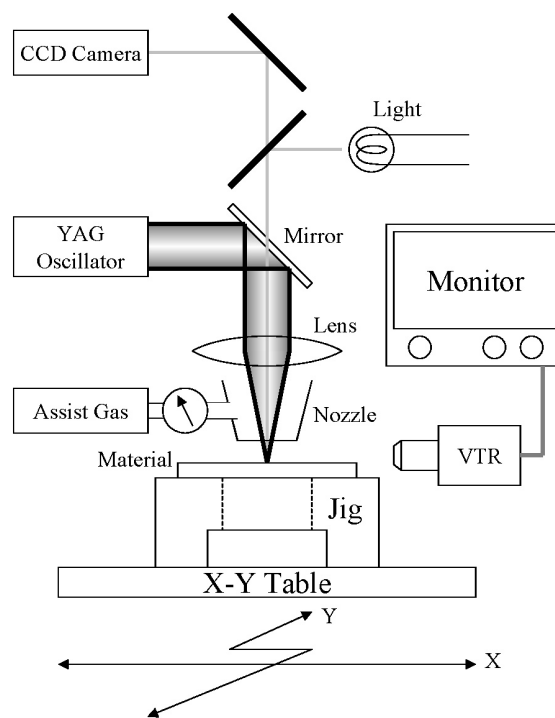


図3 加工装置構成

表 1 板ガラスの組成

種類	成分 (%)	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	SO ₃	計
窓ガラス (無色)		72.0	1.3	-	8.2	3.5	14.3	0.3	0.3	99.9
" (青)		71.7	0.2	0.1	9.6	4.4	13.1	-	0.4	99.5
板ガラス		71.6	1.0	-	9.8	4.3	13.3	-	0.2	100.2

表 2 LF 加工条件

加工条件項目	直線 LF 加工	曲線 LF 加工
パルス幅 (msec)	2.0	2.0
繰り返し数 (pps)	70	150
平均出力 (W)	28	45
ピーク値 (kW)	0.20	0.15
焦点位置 (mm)	-2.0 ~ +2.0	±0
送り速度 (mm/sec)	0.5	0.5
加工半径 (mm)	-	1 ~ 500

いる。試料は光ディスク基板に用いられている基板板ガラス (100mm × 100mm × 1.75mm) を用いた。表 1 に板ガラスの組成を、表 2 に LF 加工条件を示す。

加工特性

1 出力の影響

基礎実験で LF 加工を行った結果、15W 前後の低出力では試料が熱を帯びるだけで切断加工には至らなかった。また 100W 以上の出力では試料が瞬時に破壊して加工にはならないことが分かった。LF 加工可能な平均出力は 28 ~ 48W の範囲であった。図 4 に一定出力 (42W・送り速度 0.5mm/sec) で LF 加工を行ったとき、パルス幅と繰り返し数の切断面性状に及ぼす影響を示した。図 5 には LF 加工を行ったときの試料の加工断面 (切断面) と表面性状の顕微鏡写真を示す。図 4 に示すように繰り返し数が少ない (~ 10 pps) と加工音を伴ったブルームが発生し、スプラッシュが激しいことが観察された。その結果試料表面にはチッピング (微小な割れ・欠け) が多く発生している。また加工断面は図 5 - に示すようにかき氷状のザクザクした面になっている。図 5 - のダイヤモンドスクライバで切断した断面と比較しても荒れが激しく、クラックが発生していることが分かる。

この状態は実験したパルス幅全体で見られた。これらから、繰り返し数が少ないとピーク値が高くなるため加工面上の入熱量が多くなり面が荒れることが分かった。繰り返し数を増やすと加工断面は次第に滑らかになり、パルス幅が 0.7msec から 2.0msec では 70 pps から 200pps の範囲で良好な LF 加工が可能であった。図 5 - は良好な LF 加工が行えたときの写真を

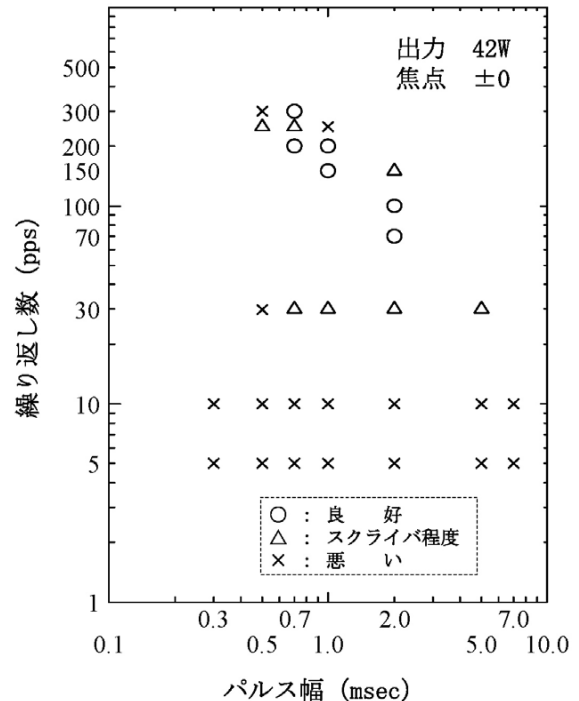


図 4 パルス幅と繰り返し数の関係

示している。加工断面は大変平滑な面になっていることが分かる。また、材料表面にもチッピングの発生は観察されず最適な切断加工が行われている。これらの範囲が LF 加工を行うための最適な熱量であることが分かる。さらに、繰り返し数を増やすと図 5 - に示すように加工断面にはクラックが発生し面が荒れ、材料表面にもチッピングが発生している。これは繰り返し数が増えると熱エネルギーが蓄積されやすくなる結果、材料が破壊し易くなるためと考えられる。これらの結果から、LF 加工を行うには適切な出力 (熱量) が存在するとともにピーク値の影響があることが分かる。

2 焦点の影響

LF 加工におよぼす焦点の影響を調べるために一定出力で焦点を上下に振りながら LF 加工を行った。試料表面を基準として試料表面上側を + 方向とした。図 6 は焦点位置と面粗さの関係である。図に示すように焦点の広い範囲 (-2.0mm ~ +2.0mm) で全て直線 LF 加工が可能であった。このことから LF 加工には

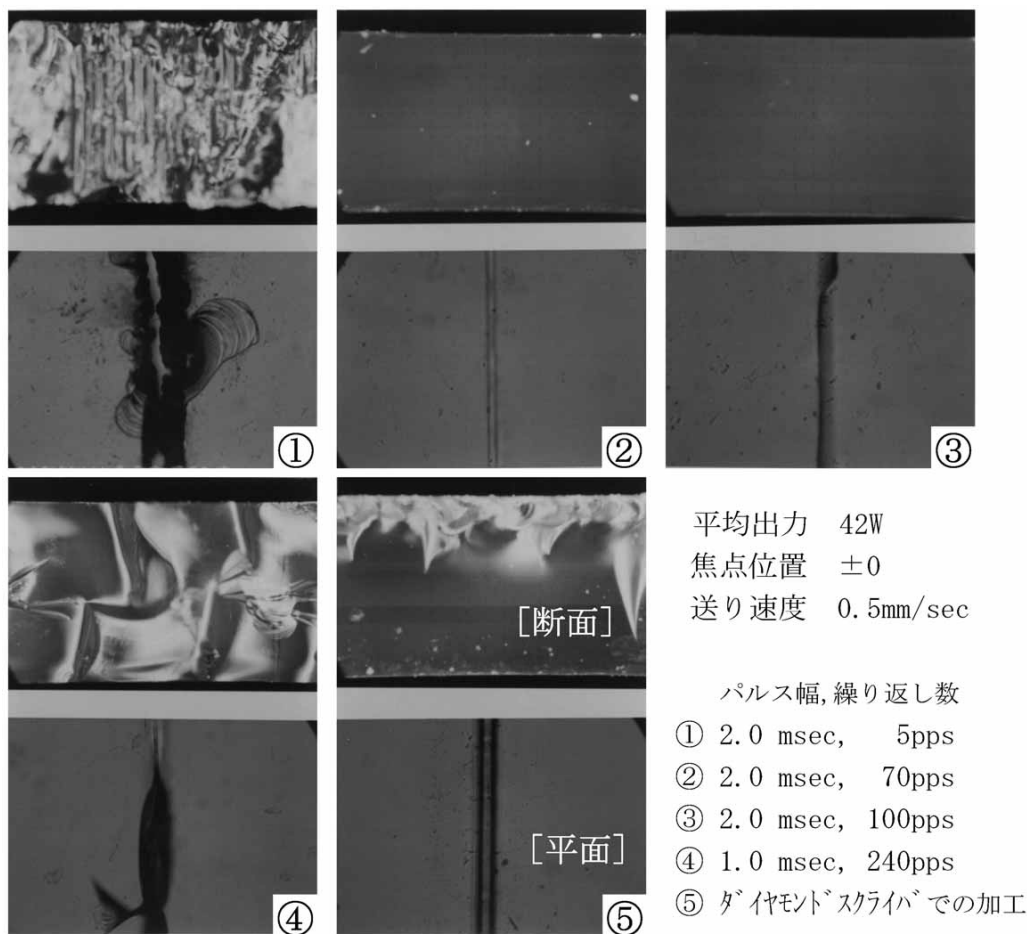


図5 LF加工面の顕微鏡写真

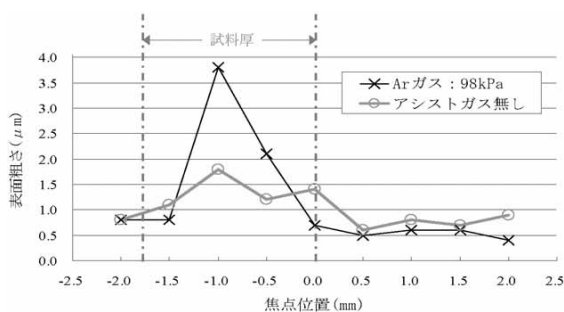


図6 焦点位置と表面粗さの関係

焦点位置の影響は少なく、温度傾斜があれば可能であることが分かった。切断面粗さを測定すると、焦点が試料表面上側 (+側) では平均的に0.5μm (Rmax) 程度のかなり良好で平滑な面が得られている。

試料内部に焦点位置を置くと面は荒れ材料内部中心付近が最も粗く3.5μm程度の粗さになっている。試料裏面側 (-側) では0.8μm程度の良好な面が得られていることが分かった。これらのことから、焦点の位置は面粗さに影響を与えることが分かった。また、試料外部に焦点があると良好な面粗さが得られる事が

分かった。これらは熱の拡散速度の違いが面粗さに影響を与えるため、急峻な温度傾斜を設定することがLF加工には必要であると考えられる。面粗さの良好なLF加工を行うためには、試料表面上側 (+側) に焦点位置を設定する事が大切である。

3 アシストガスの影響

3-1) アシストガスの種類

LF加工が比較的良好的出力、焦点範囲で曲線加工(φ65の円加工)を試みた。しかし、最後まで亀裂の成長を継続させることは難しく、円加工を行うことはできなかった。亀裂の進展が途中で止まる現象が観察された。亀裂先頭のエネルギー値を上げる目的で出力を上げると材料表面にチッピングが増加し、試料が破壊に至ってしまう。これは、直線加工以上に曲線・形状加工を行うと試料表面および内部に熱が蓄熱されやすくなるため温度傾斜を作ることが難しくなるためであると考えられる。このため試料を冷却する目的でアシストガスをレーザー光と同軸方向から吹き付けてLF加工を試みた。図7には4種類のガス(ドライエアー、

アルゴンガス、窒素ガス、ヘリウムガス)を用いたときの曲線 LF 加工の結果を写真で示す。図 7 に示すように、アシストガスを用いると亀裂をより持続させることが可能になることが分かった。ドライエアではチッピングの発生が見られるとともに、最終までは亀裂を持続させることはできていない。アルゴンガスを用いると円加工を最後まで完了することができる。さらに、チッピングの無い良好な LF 加工ができてい。窒素ガスでは亀裂の成長・持続はドライエアと同じ位であるがチッピングは発生しない。ヘリウムガスを用いると亀裂は成長せず、LF 加工そのものができることが分かった。これらのことから、アシストガスの冷却の有効性と共に、種類によって LF 加工は大きく影響を受けることが分かった。これは、気体の熱伝導率の相違が影響していると考えられる。ドライ

エアと窒素ガスの熱伝導率は近似しているために LF 加工では同様な結果を得る。また、ヘリウムガスは他のガスよりも気体の熱伝導率が大きいため、冷却が進み過ぎて、亀裂を発生・助長させるだけのレーザーによるエネルギー供給ができず LF 加工が進展できなかったと考えられる。これらのことから、LF 加工には適度な温度傾斜を作ることが必要なことが分かった。

3 - 2) アシストガスの吹きつけ圧力

曲線 LF 加工を行うと形状に対して寸法誤差(ズレ量)が発生する傾向が観察された。図 8 はアシストガスを用いない時と使用した時の効果の違いを示したものである。写真から分かるようにアシストガスを用いないとズレ量が発生し、円弧半径が小さくなる程ズレ量は大きくなっている。円弧半径が大きくてもズレ量は発生しているが、アシストガスを使用するとズレ量が少なくなっている。このことから、アシストガスの有効性が確認される。図 9 は曲線 LF 加工の円弧半径とその時発生した最大ズレ量との関係を示したものである。アシストガス圧が低いとズレ量は発生しているが、アシストガス圧が高くなるとズレ量の無い加工が可能になったことが分かった。98kpa のガス圧の時、半径 25 mm 以上の円ではズレ量のない精密な曲線加工ができてい。これらのことから、アシストガスを用いるとズレ量の発生を抑えることが可能になり、加工精度を保つために有効なことが分かった。材料を吹き飛ばさない程度の圧力でアシストガスを吹き付けることでズレ量の無い加工が可能になる。

3 - 3) ズレ量と遅れ量の関係

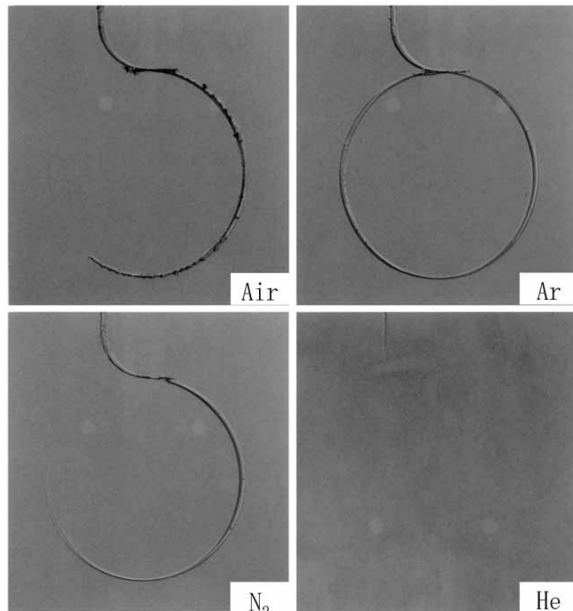


図 7 LF 加工におけるアシストガスの種類の影響

半径 2.5 mm		半径 25 mm	
アシストガス 無	アシストガス 有	アシストガス 無	アシストガス 有

図 8 アシストガスの効果

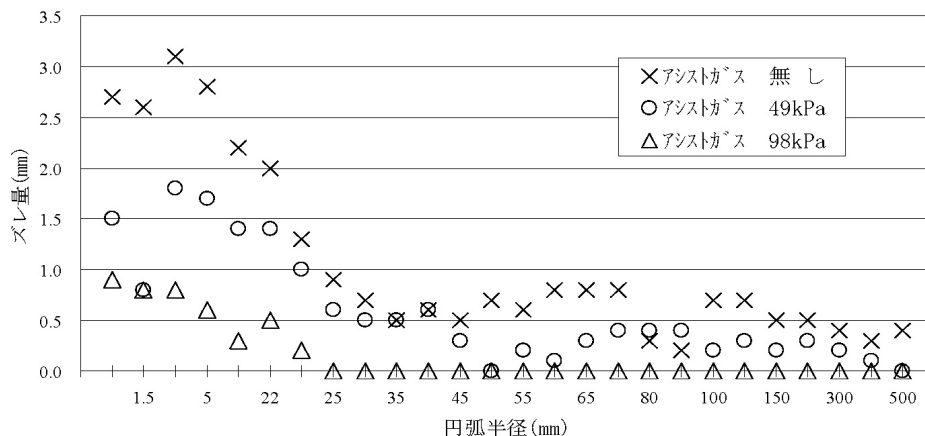


図9 円弧半径とズレ量の関係

LF 加工の加工状態を観察しているとレーザ照射点と亀裂の進行先端点が一致していないことが分かる。即ちレーザ照射点と亀裂進行先端点との間に一定の間隔(遅れ量)が発生している。アシストガスを用いたときには遅れ量が減少する。LF 加工状態をモニター TV で観察することで、この遅れ量を測定するとアシストガスを用いない時とアシストガスを使用した時では 1/2 以下に減少していた。図10にアシストガス圧と遅れ量の関係を示す。図から、アシストガス圧を増

加していくと遅れ量は大きく減少するが49kpa 以上では減少は少なくなっている。それ以上ガス圧を上げても遅れ量にはあまり変化が現れていない。したがって、遅れ量はアシストガスを用いることで一定量減少させることができるが、無くすることは難しいことが分かった。これらの事から熱応力が伝播し、亀裂が成長するまでにはある一定の時間が必要であり、この時間が遅れ量と関係していると考えられる。遅れ量はアシストガスを使用すると減少すること、そ

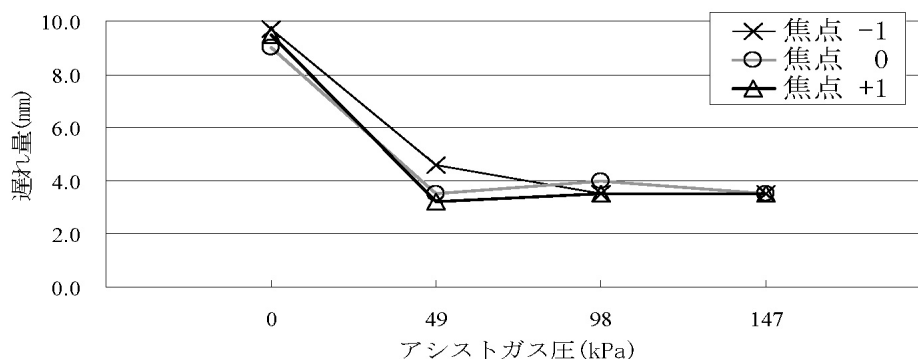


図10 アシストガス圧と遅れ量の関係

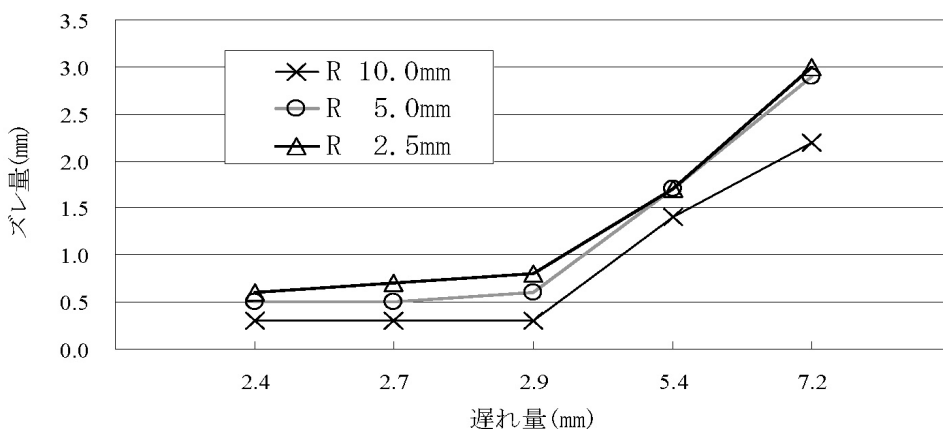


図11 遅れ量とズレ量の関係

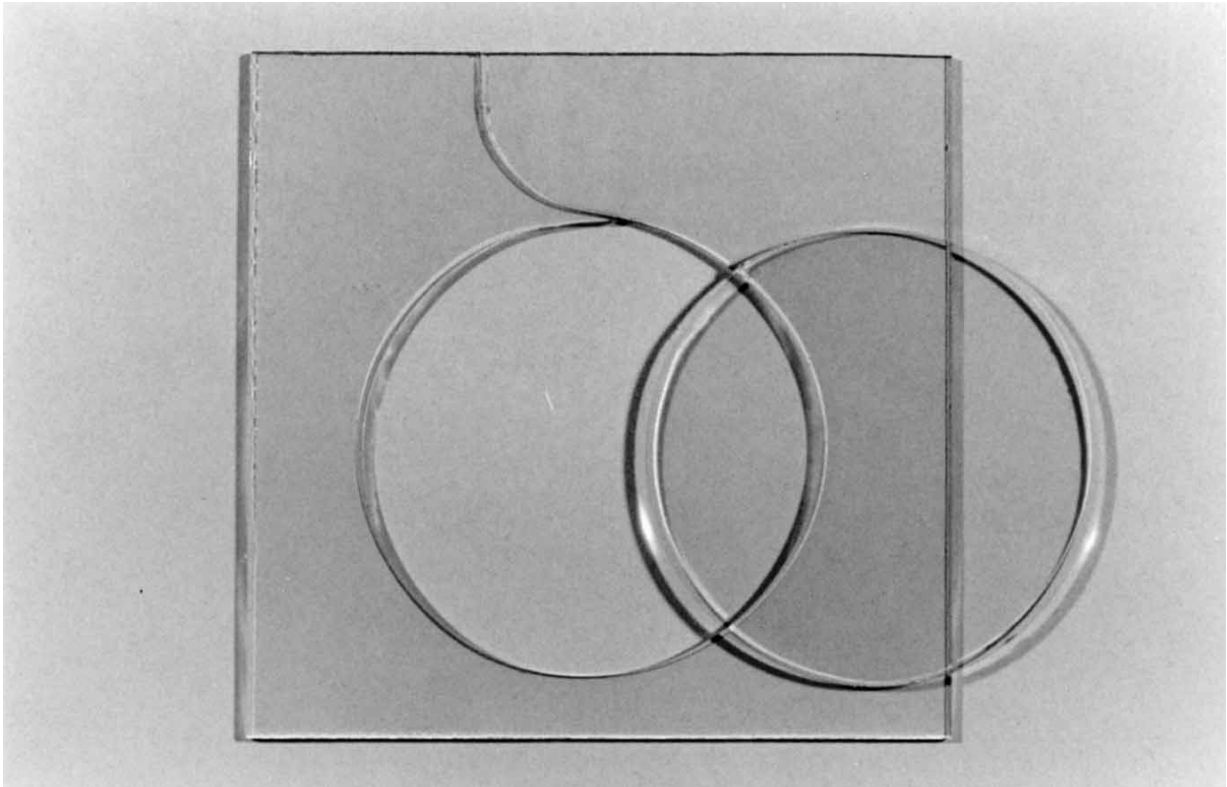


図12 薄板ガラスの円加工 (φ60)

してズレ量はアシストガスを使用すると減少していることから、遅れ量とズレ量の間には何らかの関係があると考えられる。図11は曲線 LF 加工したときの遅れ量とズレ量の関係を示したものである。図から円弧半径を変化させても、いずれの条件でも遅れ量が大きいときはズレ量も大きく、遅れ量が少なくなるとズレ量が少なくなっていることが分かる。このことから、加工中に遅れ量を観察することで形状の寸法誤差であるズレ量の発生や精度を推定することが可能になると考えられる。高精度加工するためには遅れ量を少なくする条件を検討することが大切になってくる。図12にこれらの最適加工条件を適用して薄板ガラスの LF 加工を行った写真を示す。薄板ガラスから直径65mm の円板が加工できていることが分かる。

まとめ

薄板ガラスに Laser Fissuring 加工法を適用して精密加工を行なった結果、次のことが分かった。

- (1) 薄板ガラスに LF 加工法の適用は可能である。
- (2) 加工には薄板ガラスが破壊しない程度の出力設定が大切で、ピーク値が影響を及ぼす。
- (3) 焦点位置は切断面粗さに影響を及ぼす。特に試料表面上に焦点を位置すると切断面粗さが良くなる。
- (4) アシストガスは加工特性に影響を及ぼす。
- (5) 薄板ガラスを精密加工するためには、遅れ量を少なくする加工条件を選択することが大切である。

謝辞

本稿をまとめるにあたり終始適切なご助言を賜った関東職業能力開発大学校 久保紘校長ならびに発表の機会を与えて下さいました関東職業能力開発大学校 福村英俊能力開発統括部長に感謝の意を表します。

[参考文献]

- (1) 木下正治、表面界面の超精密創成・評価技術、P 96 (1991) サイエンスフォーラム
- (2) 安永暢男、硬脆材料のレーザー加工技術、P 8 (1988) NEW DIAMOND
- (3) 池田正幸ほか、板ガラスのレーザーブレーキングに関する研究 (第1法) 精密工学会誌、vol62.No 3 (1996) 438 - 445
- (4) 池野順一・小林昭ほか、溶液を用いた石英ガラスの YAG レーザ加工、精密工学会誌、P300 - 305、vol 55、No 2 (1989)

- (5) 今井康文ほか、ぜい性材料の熱応力による割断加工の可能性、日本機械学会論文集、No88 - 0157B (1989 - 1) 147
- (6) 沢田博司ほか、線熱源による帯び板の熱応力割断、精密工学会誌、P302 - 306、vol .64、No 2、(1998)
- (7) 伊藤昌樹ほか、YAG レーザ照射による板ガラスの任意形状精密加工の試み⁽¹⁾、精密工学会秋季大会学術講演論文集、(1991) 629 - 630
- (8) 伊藤昌樹、IT 部品に応用できるガラスのレーザ切断、レーザ協会誌、P120 - 130、vol 22、No 4 (2000)