YAG レーザによるガラスの精密切断[†]

黒部 利次* 川向 徳康** 高尾 利幸**

Breaking of Transparent Glass Plate by Irradiation of YAG Laser

by

Toshiji KUROBE*, Noriyasu KAWAMUKAI** and Toshiyuki TAKAO**

Cutting of brittle materials such as glass is usually made with a diamond scriber or a rotary roller chisel. It is said that the mechanical cutting of glass using the scriber or the chisel leads to lower cutting quality. A non-contacting cutting method using a CO₂ laser is recently being studied enthusiastically. Precision breaking of glass and other brittle materials, however, has not been made.

Breaking of transparent glass plates with a YAG laser was studied after the surface of the specimen was painted in marker ink (magic ink). Ink was used as an absorber of laser beam. And also, the influence of surface roughness on breaking was investigated. It was found from the experiments that painting of magic ink had a considerable effect on breaking of glass, especially in blue color. Chamfering of the corner of the specimen by lapping yielded easy breaking and it reflected directly to high quality breaking of glass.

Key words: YAG laser, Glass, Marker ink, Breaking, Curve, Waving width

1 緒 言

ガラスやシリコンウエハ等の硬くてもろい材料を精密に切断する場合、一般に超硬の回転ローラチゼルを用いるか薄刃ダイヤモンド砥石等を用いて加工が行われる¹⁾。しかし、これらの加工法は工具を直接加工物に押し当てて切断する加工法であり、切削粉の発生や飛散は避けられず、また、砥石加工にあつてはクーラントの付着がつかまとう。切断品位の上からは、切断縁に微視き裂が残ることが大きな問題となっている。

一方、レーザビームを用いて非接触で硬ぜい材料を切断する加工法が研究されている。実際、炭酸ガスレーザを用いて種々のセラミック材料の切断加工が行われている。しかし、本切断法は基材の熔融・蒸発が基礎となっており、熱ひずみの残留は避けられず切断品位は必ずしも良くない^{2),3)}。

一般に、ガラスやシリコン等のぜい性材料は熱伝導率が悪く、比較的小さな引張り応力によって簡単に破壊を起こす性質がある。この性質を上手く利用することによって意図的に加工物にき裂を誘発させ、そのき裂を進展させることで微小な欠けや熱ひずみの少ない高品位な切断が可能になるのではないかと考えられる。すなわち、レーザを試料表面に照射することによって材料内に急峻な温度勾配をつくり、その熱応力によって割れを誘起させ、それを制御し進展させることに

よって破断(切断)を起こさせるという考えである。

以下に、透明板ガラスについて実験的検討を行ったのでその結果について報告する。

2 実験方法

2・1 実験装置

実験に使用したレーザ装置は、公称出力 100 W の YAG レーザ加工装置 (LAZ-A724 形: 東芝製) である。水平方向へ射出される波長 1.06 μm のレーザ光は、Fig. 1 に示す装置を用いてその光路を鉛直下方に変えて試料に照射される。収束レンズの焦点距離は 50 mm である。収束レンズの下には保護ガラスが備え付けられており、空气中の塵や加工物からの蒸発微粒子の付着を防止している。収束レンズを収納しているホルダーは、焦点外しの影響を調べられるように上下

Fig. 1. Optical system of laser equipment.

[†] 原稿受理 平成4年9月24日 Received Sep. 24, 1992

* 正会員 金沢大学工学部機械システム工学科 〒920 金沢市小立野, Dept. of Mech. Systems Eng., Kanazawa Univ., Kodatsuno, Kanazawa, 920

** 金沢大学大学院 〒920 金沢市小立野, Graduate Student, Kanazawa Univ., Kodatsuno, Kanazawa, 920

Fig. 2. Specimen holder.

方向に $\pm 6 \text{ mm}$ 移動可能となっている。本研究では、試料表面上に焦点を結ばせるジャストフォーカスの状態で実験を行った。焦点径は約 $300 \mu\text{m}\phi$ である。

被切断用ガラス試験片は、Fig. 2 に示す試料保持具に取付けられる。試料の一端は固定され他端は自由端となる片持梁の状態であ空中に保持される。切断は、自由端から固定端の方向に所定の距離入った場所を、板幅方向にレーザ光を走査させることにより行った。切断の際に発生すると思われる下部からの輻射熱の影響を防ぐため、試片下方には YAG レーザ光の吸収率が小さい銅板が敷かれている。固定端において、試料と銅板との間には厚さ 5 mm のアクリル板が挿入されている。Fig. 2 に示す試料保持具は X テーブル上に設置され、ステッピングモータによって $0.4 \sim 9.6 \text{ mm/sec}$ の速度範囲内で駆動させられる。

2.2 試料および実験条件

切断試験に供した試料はソーダ石灰ガラスである。定尺の透明板ガラスからダイヤモンドスクライバを用いて所定の寸法の試験片を切出し、一部はそのままの状態であ切断試験に供した。一方、別の切断実験のために、試験片端部をラッピングにより面取りを行った。面取りは炭化ケイ素砥粒 (SiC: GC #400) を用いて荒ずり機で行った。面取り角度は 45° とした。

3 実験結果および考察

3.1 インク塗布による切断

まずはじめに、透明体のガラス板に何らかの予備加工・前処理を施さずにレーザ光を直接照射してみた。その結果、光は透過してしまうためか切断は全く起こらなかった。そこで切断を起こすには、表面にレーザ光を吸収する何らかの媒体を塗布する必要があるのではないかと考え、マーカインク (市販のマジックインク) の塗布を試みた。実験に際し、黒、緑、青、赤の4色の油性マジックインク (ゼブラ製) を用意し、レーザが照射される試料表面部にインクを塗布した。ペン先の幅は約 5 mm である。色むらを避けるため2回塗りを行った。実験条件を Table I に示す。切断実験は、レーザ光の発振形態を連続発振 (CW) として行った。試料へのレーザ照射は、自由端から 8 mm 固定端側に入ったところで行なされた。

Table I. Experimental condition.

Oscillation form	CW (Continuous Wave)
Feed rate (mm/s)	6.1
Defocusing distance (mm)	± 0 (Just focus)
Specimen size (mm)	L 32×W 15×T 1.7
Cutting point (mm)	8

Fig. 3. Influence of ink color on breaking.

Fig. 3 に切断に及ぼす塗布インクの影響について示す。Fig. 3 は、テーブルの送り速度と切断可能な最小レーザパワーの関係を表している。Fig. 3 から、送り速度とレーザパワーの間には直線関係があることがわかる。送り速度を速くすると切断を起こすためのパワーも上げなければならない。切断は、直線より下の条件の下で常に起こりそれより上では起こらない。Fig. 3 から、黒、緑、青色の順に切断に大きなエネルギーが必要ながわかる。レーザ光の吸収の状態に対応しているものと考えられる。実験に供した4色の色の内、赤色の場合は切断が起こらなかった。

切断面の性状は切断品位に直接係わるものであるため、光学顕微鏡を用いて詳細にその様子を観察した。観察は、レーザを照射した試料表面と切断した断面について行った。観察結果を Fig. 4 に示す。Fig. 4 から、黒、緑、青色の順に切断面の性状が良くなることがわかる。すなわち、黒色の場合は、チッピング (微小な割れや欠け) が激しく、表面のみならず板厚方向にも割れ目が幾筋も入っているのがわかる。一方、緑色の場合は若干の欠けが観察されるものの比較的良好な切断面となっている。青色の場合は、レーザビームの走査方向にチッピングはほとんど見られず、きれいな切断面となっていることがわかる。以上の観察から、最適な切断面を得るには最適な色が存在することが伺われる。

Fig. 4. Optical micrographs of broken surface and cross section.

割断面の状態観察は、先に述べた光学顕微鏡観察だけでは不十分と思われる。断面の立体形状の把握ができないためである。そこで、電気マイクロメータ式の形状測定装置を製作し、切断後の断面の形状について測定を行った。Fig. 5に測定装置の模式図を示す。測定箇所は板厚の中央部とし、試片長手方向にプローブを走査させた。検出器からの信号は増幅の後レコーダに入力し描画させた。形状の変化状態は、Fig. 5に示すうねり幅 W でもって評価した。うねり幅は、切断

Fig. 5. Measuring setup of waviness.

面の板厚中心部を通り試験片長手方向の両端部を直線で結んだその直線からのずれ量でもって定義した。

測定結果を Fig. 6 に示す。Fig. 6 から、レーザーパワーが大きくなるにつれてうねり幅が直線的に減少することがわかる。黒色のうねり幅は、緑、青色に比して著しく大きい。一方、緑、青色のうねり幅はほぼ同じ値となった。この測定結果は、先に Fig. 4 で示した光学顕微鏡写真とも対応しているように思われる。

Fig. 7 に、板厚を 1.7, 4.0 mm と変えた場合のうねり幅の様子を示す。Fig. 7 から、いずれの板厚の場合とも、レーザーパワーの増大に伴って次第にうねり幅が減少することがわかる。うねり幅は板厚 4.0 mm の方が大きい。

3・2 面取りした透明板ガラスの割断

3・1 節で述べたガラスの割断は、表面にレーザー光を吸収させる媒体を塗布して行ったものである。しかし、表面の状態によっては媒体を塗布しなくても割断が可能になるのではないかと考えた。鋼やステンレス

Fig. 6. Influence of ink color on waving width.

Fig. 7. Influence of thickness on waving width.

銅などは、その表面粗さの状態によってレーザの吸収状態が違ふことが知られている。表面粗さが大きいほど吸収の程度も大きい。

そこで、表面を意識的に荒らし、すりガラス状の粗面にした場合にはレーザ光の吸収が良くなるのではないかと考えた。そこでラッピングにより透明板ガラスの表面を粗面にし、その効果を調べることにした。ラッピングは荒ざり機を用いて GC #400 砥粒で行った。試片の大きさは $20 \times 32 \times t1.7 \text{ mm}$ である。

実験に際し、被切断用ガラス試験片は X テーブル上に置かれたメカニカルステージの上に次の状態で配置される。互に適当な距離を隔てて配置された厚さ 20 mm の 2 枚の板ガラスの上に試験片が載置される。試料は空中に浮いた状態で保持される。試験片のガラス板との接触幅 2 mm である。切断に際し X テーブルは、ステッピングモータによって 0.4~9.6 mm/sec の速度範囲内で駆動される。

Fig. 8. Schematic view of crack initiation and propagation.

切断試験は、試験片の中央部を端部からレーザ光を走査させることにより行った。実験の結果、粗面の試料の場合比較的容易に切断できることが明らかになった。

3・2・1 初期き裂の様態観察 試料表面が粗面である場合切断が比較的容易であることから、試片端部を少し粗面にするだけで切断できないかと考えた。そこで荒ざり機を用いてラッピングにより透明板ガラス試験片端部に面取りを施した。端部を粗面にしたわけである。そしてレーザ光をその試料に照射したところ、Fig. 8 に示すように切断はき裂の発生過程と伝播過程の 2 つの過程を経て起こることがわかった。Fig. 9 にき裂の発生過程の光学顕微鏡写真を示す。

き裂の発生様態は、面取り寸法 a の値によって変えられるので、0, 0.1, 0.3 mm と a の値を変えて切断試験をした。実験条件を Table II に示す。20 個の試料について測定した結果を Table III に示す。Table III から、面取り寸法 a を大きくするとき裂の発生が増すことがわかる。しかし、100% の確率でき裂が発生するわけではないことを Table III は示している。そこで、ラッピングした部分にマーカインク（青色）を塗布し切断試験を試みた。実験結果を Table IV に示す。Table IV から、青マジックインクを併用することによってほぼ 100% き裂が発生することがわかる。本実験結果は、試片端部を少しラップし、その部分にインクを塗布するだけで透明なガラスを容易に切断し得ることを示している。

微小な欠けやうねりの少ない高品位な切断面を得るには、き裂の発生の状態が安定していることが必要であると思われる。初期き裂の状態を評価する一つの尺度として、Fig. 8 に示す面取り寸法 a と b の関係が重要であると考え、テーブルの送り速度をパラメータにしてそれらについて調べてみた。その際、面取り角度 45 度、レーザ出力 30 W としている。測定結果を Fig. 10 に示す。Fig. 10 から、 a と b の関係は下に凸

の二次曲線になることがわかる。送り速度が大きいほど極値の値が大きくなる。しかし、極値になる面取り寸法 a は、送り速度に依存せずほぼ同じ値となった。極値となる面取り寸法よりも大きい値の所では、 b の長さは a の値が大きくなるにつれて緩やかに増加する。一方、逆に極値の値よりも小さな値の所では、 b の値が急激に大きくなる。断面の光学顕微鏡観察から、高品位の切断を行うにはき裂の発生域の寸法 a 、 b の値をできるだけ小さな値にすることが望ましい。高品位切断は、 a の値を極値に設定し切断速度を適度に遅くすることで達成される。

3・2・2 き裂の伝ば過程の観察 ガラスの切断過程は、その大部分はき裂の進展過程で占められている。切断品位は、き裂の発生過程の良し悪しばかりでなくこの進展過程も影響する。切断品位を論ずる場合、その断面の評価が必要である。そこで、触針式粗さ計（タリステップ）を用いて切断面の断面プロファイルを測定した。測定は、試片長手方向中央部をその板厚方向について行った。測定針を試料の最下面からレーザ照射面に向って移動させて断面プロファイルの測定を行った。実験に供した試料は厚さ 7.8 mm の板ガラスである。

測定結果の一例を Fig. 11 に示す。切断はレーザ出

Table II. Experimental condition.

Power (W)	40
Table feed rate (mm/s)	1.6
Specimen size (mm)	20 (L)×10 (W)×7.8 (T)
Chamfering	GC #400
Surface treatment	Non treatment
Number of specimen	20

Table III. Experimental results.

Chamfer size (mm)	Crack initiation rate (%)
0	0
0.1	40
0.3	50

Table IV. Experimental results.

Surface treatment	Crack initiation rate (%)
Non painting	50
Blue ink	100

Fig. 9. Optical micrographs of crack initiation mode.

Fig. 10. Relation between chamfer length a and crack length b .

力 40 W で行った。Fig. 11 (a) は、テーブル送り速度を 1.6 mm/s として切断した試料の場合を表し、Fig. 11 (b) は 3.0 mm/s の場合を示す。Fig. 11 の右端はレーザ照射面の位置を表し、左端はその反対側のガラス板底面を示す。Fig. 11 (a) から、送り速度が遅い場合には、表面近傍に凸状の突起が生ずることがわかる。しかし、送り速度が 3.0 mm/s と速い場合には、その突起はほとんどなくなる。極言すれば、完全な平滑平面となる。このことは、条件を的確に選べば板厚表面に垂直なきれいな切断面が得られることを Fig. 11 は物語っている。

4 考 察

レーザを金属材料やセラミックスに照射した場合、

Fig. 11. Profile of broken cross section by Talystep.

一部は表面より反射され残りは試料に吸収される。吸収されたレーザー光は熱エネルギーに変換され、材料の熔融・蒸発が起こる。一方、材料がガラスのように透明物体である場合には、レーザー光はほとんど透過してしまい反射、吸収はわずかしき起こらない。ガラスに熱応力を誘起させ、き裂を発生させるには何らかの方法でレーザー光を吸収させる必要がある。ガラス表面にマーカインクを塗布したり表面を粗面にすることが効果があるのではないかと考えられた。事実、3・2・1項で述べたように著効があった。

しかし、それらの処置を施すことによってどの程度レーザー光を吸収するのかは、何らかの手段で測定する必要がある。ガラスがレーザー光を吸収する真の量を知ることは難しいので、間接的に測定する方法を考えた。Fig. 12 に測定装置の概略図を示す。被試験体ガラス板の裏面に白金-白金ロジウム熱電対を接着する。熱電対の接点は直径 1.1 mm の球状になっている。熱電対の接点上にレーザー光の焦点が合うように設定されている。測定に際し、Fig. 12 に示した装置を X テーブルの上に載置する。X ステージを一定の速度で移動させると、熱電対の接点上にレーザー光が通過することになる。通過の瞬間、熱電対の温度が上昇する。ガラス板を透過するレーザー光を熱電対が温度の形で検知しているわけである。

ガラス板の表面をラッピングにより粗面にし、透過するレーザー光の光量を測定した。測定結果を Fig. 13 に示す。砥粒 (GC) の粒径を変えて表面粗さを調整した。Fig. 13 から、テーブル送り速度が増すと光量が漸次減少することがわかる。また、砥粒番号が小さくなると (表面粗さが増すことに対応)、透過光量が少なくなることがわかる。表面粗さが増すと反射光量も増すと思われるが、吸収される光量も増えることが予

想される。粗面になる程き裂の発生が容易になるのは、このことによる熱応力の増大が原因しているものと思われる。

一方、ガラス板表面をラッピングすることによるもう一つ別の効果として、表面への微視き裂の導入が挙げられる。これらの微視き裂は、例えば熱応力などが

Fig. 12. Setup of heat measurement.

Fig. 13. Influence of surface roughness on absorption of heat.

Fig. 14. Influence of ink color on absorption of heat.

作用すると比較的容易に成長し、巨視き裂へと発展する性質がある。

以上述べた二つの効果が重畳して割断が起こったものと考えられる。

つぎに、Fig. 14 にマジックインクの効果について調べた結果を示す。黒色が最も吸収が大きいことがわかる。この測定結果は、Fig. 3 に示す実験結果と良い対応を示している。これらの測定結果は、レーザ光を何等かの形で効率良く吸収させることで試料内部に急峻な温度勾配をつくり、それによってき裂を容易に発生させ得ることを示している。

Fig. 6 に示すように、うねり幅は黒が最も大きく、緑、青の順に小さくなった。これは次の理由によるものと思われる。黒のマジックインクの場合、吸収が最も大きく、Fig. 4 に示すように表面でチップングを起こす。レーザ照射部位を拡大鏡で子細に観察すると、マジックインクは入熱のために蒸発しており、また、ガラス表面も若干溶融・蒸発しているように見える。これらに関して定量評価は行っていないが、チップングの発生に深く係わる現象と思われる。チップングを起こす要因となる、入熱によるマイクロクラックの発生様態は、ガラス試料表面に塗布するマジックインクの色によって異なる。黒色の場合、レーザ掃引方向に左右対称に、かつ、板厚の深さ方向に斜の角度をなしてマイクロクラックが入る。あたかもそれは、ダイヤモンド圧子でガラス表面を押圧した場合に見られる八字割れ

に似ている。その八字型のクラックの様態はマジックインクの色によって異なる。八字の字の開き角は、青、緑、黒の順に大きくなり、また、その順にマイクロクラックの長さも増大する。レーザ掃引によるガラスの割断は、これらのマイクロクラックの成長・伝播により起こる。八字の開き角が大きい場合、割れは鉛直方向には進まず、斜方向に進展することになる。このことがうねり幅増大の直接的原因になっていると思われる。一方、八字の開き角が小さい場合には、き裂は鉛直方向に近い形で入ることになり、そのためうねり幅が小さくきれいな割断面になるものと思われる。緑、青色の順にそのようになるものと思われる。しかし、これまでの説明は定性的なものであり、移動熱源による熱応力解析を行って理論的に確かめる必要がある。

5 結 論

透明板ガラスに YAG レーザを照射して精密にガラスを割断する実験を行った。その結果、次のような結論が得られた。

- (1) 透明板ガラス表面にマジックインク（マジックインク）を塗布すると、割断が効果的に行える。黒、緑、青色の順に割断品位が良くなる。
- (2) 試験片端部をラッピングすることにより初期き裂が端部に発生する。ラップ部にマジックインクを塗布することにより、端部に効果的にき裂を発生させることができ、表面全面にインクを塗布しなくても割断が可能となる。
- (3) 初期き裂の発生様態は、ラップ長さとレーザパワーに密接に関係する。
- (4) 割断面の品位はレーザパワーとテーブル送り速度に関係し、最適な条件を選べば平滑な高品位な割断面を得ることができる。

(平成 2 年 5 月 25 日 日本材料学会第 39 期学術講演会にて講演)

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) 藤森康朝, “レーザプロセッシング”, p. 230 (1990) 日経産業図書
- 3) 安永暢男, “レーザが変える加工技術”, p. 75 (1992) 海文堂
- 4) 田中統一, “破壊と材料”, p. 81 (1991) 裳華房
- 5) 原 守久, 新聞紀彦, 材料科学, **10**, 1, 34 (1973).
- 6) 難波 進, “レーザと加工”, p. 18 (1983) 共立出版