液晶ディスプレイ表示 (STN 方式) 用基板ガラスの YAG レーザによる割断*

黒 部 利 次** 松 本 貴 宏***

Precision Breaking of a Liquid Crystal Display Panel (STN Type) by YAG Laser

Toshiji Kurobe and Takahiro Matsumoto

This paper describes some experiments for breaking a liquid crystal display panel using YAG laser. Popular mechanical cutting of the glass panel using small diamond wheel is not always high quality which brings lower productivity of the panel. Precise breaking of the panel with non-contact method using CO₂ laser, is recently conducted enthusiastically. The excellent results, however, have not been obtained. Present experiments focus on high quality breaking of the display panel of STN liquid crystal in which some lenses of different focus are used. Breaking tests are performed in air under an ambient temperature using different size of specimens including the notched ones. It is found that effective spot size of laser on the surface of specimen increases with the usage of longer focus lens which is related closely to the breaking quality of the glass. The lens with shorter focal length elevates the breaking rate of the glass plate and also improves the breaking quality of it. The experiments show that the rate of breaking is independent upon the size of the plate, but it is dependent on the shape of notch made at edge of the specimen. The choice of optimum condition for the breaking yields less meandering main crack and non-branching cracks which deteriorate the breaking quality of the glass plate.

Key words : YAG laser, liquid crystal display panel, precise breaking, breaking rate, breaking quality

1. 緒 言

映像機器の一つである液晶ディスプレイには高品質のガラス基板が使用されている。ガラス基板には電子回路が描画され、種々の処理が施された後所定の寸法に切断され、液晶パネルとして組み立てられる¹⁾。ガラス基板の切断は、超硬のローラ形回転チゼルを用いるか薄刃ダイヤモンド砥石を用いて行われる。しかし、これらの機械的加工法は、工具を直接加工物に押し当てて加工するため微細な切粉の発生や飛散は避けられず、切断縁に微視的割れが残ることが問題となっている。製品の歩どまり低下の原因の一つともなっている。このため、機械式切断法に代わる切断法が求められている。

その方法の一つとして、レーザビームを用いて非接触で切断する加工法が検討されている。炭酸ガスレーザを用いる切断法がよく知られているが、それは、基材の熔融・蒸発が切断の基礎となっており、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⁾。最近、YAGレーザを用いて硬ぜい性材料を切断(割断)する加工法が研究されており、液晶基板ガラスへの適用が検討されている。YAGレーザによる方法は、熱応力誘起を利用した切断法であって、炭酸ガスレーザによる方法とは原理は全く異なる。切断品位も炭酸ガスレーザの場合に比べて比較的良好^{3, 4)}。しかし、レーザ切断の実用化に当たっては種々検討すべき課題も多い。

本報は、STN方式の液晶基板ガラスをYAGレーザを用いて切断加工することを試みたものである。レーザ切断の実用化の観点からは、高品位にして高速な切断加工が望まれるが、ここでは、切断加工の高品位化についてまず検討を行った。

2. 実 験 方 法

2.1 実験装置

割断試験に使用したレーザ装置は、公称出力100WのYAGレーザ加工機(LAZA-A724型; 東芝製)である。本装置の発振モードはマルチモードである。水平方向に射出される波長1.06μm、ビーム径約φ6mmのレーザ光は光学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。

本実験では、焦点距離の異なる収束レンズを種々使い、切断加工に及ぼす焦点距離の影響について検討を行った。収束レンズとしては、焦点距離が30, 40, 50, 80mmの4種類のレンズを用いた。収束レンズを収納しているホルダは、焦点外しの影響を調べられるように上下方向に±6mm移動可能となっている。しかし、本実験は主としてジャストフォーカスの状態でを行った。

2.2 試 料

割断試験に供した試料は、STN方式の液晶表示用基板ガラスである。表1にその物理的性質を示す。

実験に際し、超硬合金製の回転ローラ形チゼルを用いて、厚さ1.1mmの幅広板より試験片を切り出し、その後アセトン液中に試験片を浸漬し超音波洗浄した。割断試験は、板幅を20mm一定とし、試験片の長手方向(レーザ掃引方向)の値を種々変え

+複数メーカーからの私信による。

* 原稿受付 平成8年11月11日

** 正 会 員 金沢大学工学部(金沢市小立野2-40-20)

*** 学生会員 金沢大学工学部

Table 1 Physical properties of STN glass panel

Softening temperature	720-730℃
Heat conductivity	0.75W/m・K (0℃)
Expansion coefficient	$8.5 \times 10^{-6}/K$ (20-350℃)
Hardness	6.5Mohs
Young's modulus	71.5GPa
Bending fracture strength	49MPa
Reflectivity	4%
Penetrability (1.1mmt)	$\geq 92\%$ (at $\lambda = 1.06 \mu m$)
Refractive index	1.52

Fig.1 Specimen hold setup in air

て行った。

被割断試験片は、図1に示すジグの上に載置され、空气中に浮かされた形で保持される。試験片の直下には、レーザ光を乱反射させるアルミナ板が敷かれ、反射レーザ光の影響を少なくするように配慮している。アルミナ板から試験片までの高さは34mmである。レーザは試験片中央部に照射し、往路の1回だけの照射とした。き裂はレーザ光に追尾する形で伝播する。

2.3 ノッチ導入装置

割断試験は、平滑試験片とノッチ付き試験片の2種類の試料について行った。ここで、平滑試験片とは幅広板より所定の寸法に切り出したままの試験片をいう。一方、ノッチ付き試験片とは試験片長手方向の試験片端部（レーザ照射側面）の片側にノッチを付与した試験片を指す。

ノッチの導入は図2に示す装置を用いて行った。本装置は、試験片を載置するステージ、ステージを駆動する駆動部、ノッチを付与する天びん形荷重装置から成っている。ステージ上にはストッパが設けられており、試験片長手方向のノッチの長さが同一(1mm)になるように配慮されている。負荷荷重を変えることによって、試験片厚さ方向のノッチ深さを制御する。

ノッチを付与する超硬合金製回転ローラ形チゼルには、ダイヤモンドコンパクトホイールチップ（三星ダイヤモンド工業製）を用いた。ホイールチップの直径は2.6mm、厚みは0.65mm、刃の先端のチップアングルは130°である。ノッチ付与に際して、図2に示すようにダミーの板ガラスを試験片と接して配置し、試験片端部が欠けないように配慮した。ノッチ付与速度は1mm/sとした。

3. 実験結果及び考察

3.1 割断に及ぼすレンズ焦点距離の影響

レンズ焦点距離を変化させた場合、割断能率や割断品位がどのように変化するか調べた。加工条件を表2に示す。実験は、特に断らない限り試験片端部にノッチを付与しない試料について行った。実験では、レンズの焦点距離 f を30, 40, 50, 80mmと変えて、レーザ出力と割断可能な最大送り速度（テーブル送り速度）の関係を求めた。

実験結果を図3に示す。図3は、割断可能な臨界条件を示し

Fig.2 Notch making apparatus

Table 2 Experimental condition

Pass number	1
Focus	± 0 (Just)
Focal length	30mm
Specimen	20mm×20mm
Thickness	1.1mm
Laser power	60W
Table feed rate	0-5mm/s

Fig.3 Effect of focal length of lens on breaking

ている。直線右下の条件下では常に割断が可能であり、それより上の条件の下では割断はできない。図3から、レーザ出力が大きくなるにつれて、割断可能な最大送り速度が直線的に増加することがわかる。また、レンズの焦点距離が短い（スポット径が小さい）方が割断能率は高くなる様子がわかる。これは次の理由によると考えられる。

スポット径 d は、 $d = 2f\theta$ （ θ ：ビームの開き角）で表され、また、パワー密度 F は、 $F = 4P/\pi d^2$ （ P ：レーザパワー）で表記される⁵⁾。したがって、これらの関係式から焦点距離の短いレンズを使用した場合の方がパワー密度も大きくなり、割断能率が高くなったものと考えられる。

ガラスパネルの光（波長 $1.06 \mu m$ ）透過率は、表1に記すように92%以上と大きく、レーザの吸収率が低い。このため、低いパワー密度では熱膨張は起こりにくい。焦点距離の短いレンズではスポット径が小さくパワー密度も大きいため、長焦点のレンズに比べて熱応力が大きくなり、応力勾配も急峻なものになると考えられる。加工能率が焦点距離の短いレンズで向上したのは、このことが原因しているものと思われる。

レンズの焦点距離を変えた場合、割断様態がどのように変化するか調べた。多くの観察から、割断の様態は図4に示す模式図で表されることが考えられる。割断品位は、図中の W_L 、 W_0 、

Fig.4 Schematic view of crack growth mode

Table 3 Measurement results of breaking mode (60W, Maximum feed rate)

f mm	R_a μ m	W_L μ m	W_D μ m
30	1.58	90	13
40	1.69	115	12
50	1.87	97	12
80	1.83	100	5

R_a の諸量で主として表される。ここで、 W_L はレーザ掃引線と主き裂（割断に至らしめるき裂）のずれ量を、 W_D は貫通した主き裂線とレーザ掃引線とのずれ量を表している。 R_a は割断面の表面粗さを表す。ここで、ずれ量を以後うねり幅と呼ぶことにする。

表3に、割断面の断面性状の測定結果を示す。割断試験は、レーザ出力60W、各レンズのテーブル送り速度を最大にして行った。表3から、レンズの焦点距離が長くなると、割断面粗さ R_a の値が大きくなるのがわかる。一方、 W_L 、 W_D の値は幾分ばらつくがほぼ一定の値であることがわかる。

R_a の値が、レンズの焦点距離が長くなるにつれて大きくなるのは次の理由によるものと思われる。先に記したように、レンズの焦点距離が長くなるとスポット径も大きくなり、熱応力場の広がりも大きくなる。しかし、熱応力の値は小さく応力勾配も緩やかである。このため、レーザ掃引後の冷却の収縮過程で生じる引張り応力の分布状態も広がったものとなる。また、レーザの照射は表面のみであるので、熱勾配も試料の厚さ方向で異なったものになる。割断面の創成プロセスにこれらの応力状態が密接に関係して、 R_a の値が変化したものと考えられる。

一方、 W_L 、 W_D の値がレンズの焦点距離によってあまり変わらないのは、次の理由によるものと思われる。き裂は、き裂に先行して走行するレーザ照射熱源が作る応力場の大きさに規定されて伝播する。しかし、ガラスはYAGレーザの吸収能が小さく、見かけ上応力の変動（ゆらぎ）が小さいと考えられる。このため、 W_L 、 W_D の値がほぼ一定になったものと推察される。

以上の実験から、焦点距離の短いレンズを使用した方が、割断能率・割断品位ともに良くなることがわかる。このため、以後の実験においては $f=30$ mmのレンズを使用して実験を行うことにした。

3.2 送り速度の影響

レーザ出力を60W一定にして送り速度を0~5mm/sと変化させ、割断確率の変動と割断品位について調べた。実験に際し、各送り速度ごとに10枚の試験片を供した。実験後、割断した試験片数を数え割断確率を求めた。

実験結果を図5に示す。図5から、割断確率曲線はほぼ左右対称な上に凸の二次曲線をなすことがわかる。割断確率の最大値はテーブル送り速度が2.5~3mm/sの間に存在する。このことから、テーブル送り速度を最適に選べば、割断は確実に行えることがわかる。

割断確率が二次曲線を描くのは次の理由によるものと思われる

Fig.5 Relationship between breaking probability and table feed rate

Fig.6 Schematic view of the crack growth mode

Fig.7 Relationship between thermal damaged layer and table feed rate

る。テーブル送り速度をピークの位置の速度よりも大きな速度にすると、レーザ掃引速度が速くなり過ぎるため表面での熱の蓄積が十分伴わなくなり、割断に要する熱応力の値が小さくなる。このため、割断能率が次第に小さくなったものと考えられる。一方、ピーク値より小さい速度域では入熱量が逆に大きくなり過ぎ、ガラスが軟化・熔融し、き裂の発生が難しくなることが原因していると思われる。実際、ガラスは軟化温度が720℃と低く高温域で軟化・熔融が比較的起こりやすいと考えられる。

図6に、レーザ出力60Wとし、テーブル送り速度を1mm/sとして割断した試験片の光学顕微鏡写真の模式図を示す。図6から、テーブル送り速度が1mm/sと極めて遅い場合には、レーザ照射面には熱影響層（うすずみ部分）が残る。これはトレース痕と呼ばれる。また、サブき裂（主き裂から枝分かれしているき裂）も激しく派生し、主き裂が大きくうねる。割断面は非常

Fig.8 Effect of specimen size on breaking

に荒れた面となる。また、表面直下には熱損傷域が残る。しかしながら、テーブル送り速度を約2mm/sと速くすると熱影響層幅(図7)は全く見られなくなる。しかし、この速度域ではまだサブき裂は幾分残る。

テーブル送り速度を約2.5mm/sとさらに速くすると、サブき裂や深さ方向に形成される熱影響層も全く見られなくなる。また、切断面粗さや切断方向うねり、深さ方向うねりに関する値は、テーブル送り速度を約3mm/s以上にするとほぼ最小の値に収束する。例えば、深さ方向うねりに関しては10 μ m程度の値になる。テーブル送り速度が3mm/s以上と速い場合の切断面の様態は、前節の図4に示す模式図のようになる。

現用の回転ローラ形チゼルによるガラスの切断の場合には、サブき裂(図6)の発生を阻止することはできないといわれている^{*}。しかし、YAGレーザによる切断の場合には、切断条件を適切に選べばサブき裂の発生を抑止することができ、この点で機械式切断法の場合よりも優れているといえる。

3.3 試験片寸法の影響

これまでの実験は、20mm×20mmの大きさの試験片について行った。しかしながら、実用上の観点からは長寸法の試験片について検討を行う必要がある。ここでは、試験片の幅を20mm一定として長手方向(レーザ掃引方向)の寸法を20, 50, 100mmと変化させて切断実験を行った。

実験結果を図8に示す。図8は切断可能な臨界条件を示す。図8から、切断能率は切断寸法にほとんど依存しないことがわかる。これは、レーザ切断がどのような機構によって営まれるのかを知ることによって理解し得ると思われる。いま、レーザ光を試験片長手方向に掃引すると、試験片端部にまず初期き裂が発生する。その後、そのき裂がレーザビームに追従する形で伝播し他端に至る。切断は、この初期き裂の発生と伝播によって営まれる。

ここで、レーザ光に数mmの一定距離を隔てて追従・伝播するき裂について考える。それが伝播する駆動力は、レーザ光の吸収によって生じる誘起熱応力である。走行するレーザ光は動的な移動熱源であり、レーザ光が作り出す誘起熱応力域も移動形である。このため照射点を中心とする応力域の広がりも小さいと考えられる。すなわち、き裂の伝播はレーザ光を中心とする数mmの応力域の状態によって規定され、試料の大きさには影響を受けないと考えられる。このことが原因して切断能率が切断寸法にほとんど依存しなかったものと推察される。

3.4 ノッチ付与試験片の切断特性

先にも記したように、レーザ照射によるガラスの切断は、初

Fig.9 Effect of notch on breaking

Table 4 Measurement results of breaking mode (60W, Maximum feed rate)

	Ra μ m	WL μ m	WD μ m
Notched	1.26	79	9
Non-notched	1.58	90	13

期き裂の発生とその伝播によって起こる。しかし、レーザ切断を安定的かつ正確に行うためには、初期き裂を精密かつ確実に試験片に発生させる必要がある。これまで、レーザ光の強度(レーザパワー)を制御して初期き裂を発生させていたが、よりスムーズに初期き裂を発生させるためには、試験片にノッチを付与するのも効果があるのではないかと期待される。そこで、ノッチ付き試験片について切断実験を行った。ノッチは、試験片左端部から約1mmの距離にわたる範囲に入れた。ノッチを付与する荷重は5, 10, 20, 30Nの4通りに変えた。レーザは、ノッチ上を通るように制御しジャストフォーカスで照射した。

20Nの荷重でノッチを入れたノッチ付き試験片とノッチを入れない平滑試験片の測定結果を図9に示す。図9は切断可能な臨界条件を示す。図9から、ノッチを付与するとノッチを付与しない場合に比べて切断能率が上がることがわかる。このことは、初期き裂をレーザ照射のみで発生させるよりも、ノッチを付与して発生させた場合の方がより有効であることを物語っている。しかし、レーザ出力が高くなるとノッチの効果が次第に小さくなっていく。これは次の理由によるものと考えられる。

初期き裂の発生とその後の伝播の様態は、力学的には応力拡大係数 K の値によって決まる⁶⁾。モードI(開口型き裂)の場合、 K の値は、

$$K = \sigma \sqrt{\pi a} \quad (1)$$

で表される。ここで、 a はき裂長さ、 σ は熱応力の大きさである。

き裂が発生・進展する条件は式(1)によって規定されるが、式(1)からそれはレーザ照射によって生じる熱応力の大きさと、試験片表面に先在するき裂の大きさのかね合いによって決まる。図9に見られるように、レーザ出力が高くなるにつれてノッチの効果が次第に小さくなっていくのは、式(1)から熱応力の大きさ(レーザパワー)が増すと、 K の値が大きくなり見かけ上き裂長さの K 値に寄与する効果が減少するように見えるためと思われる。

表4に、ノッチを付与した場合としない場合の試料の切断様態の測定結果を示す。表4から、ノッチを付与すると切断面粗

*複数メーカーからの私信による。

Fig.10 Effect of applied load

さ R_s の値は小さくなり、また、切断方向うねり W_L 、深さ方向うねり W_D の値とも小さくなることから、これは、初期き裂がスムーズに創成されるため、初期き裂切断面の粗さやうねりも小さな値となり、その後のき裂の進展も滑らかに行われたためではないかと考えられる。

図10に、ノッチ付与荷重を変えた場合の測定結果を示す。これから、ノッチ負荷荷重が増えるにつれて切断能率が増すことがわかる。これは、ノッチの長さが一定であっても、負荷荷重が増えるにつれてノッチの深さも大きくなり、初期き裂が容易に生成されるためと思われる。

4. 結 論

液晶表示（STN方式）用基板ガラスをYAGレーザを用いて精密切断する実験的検討を行った。その結果、次のような結論が得られた。

- (1) レンズの焦点距離が短くなると、切断能率・切断品位ともに向上する。
- (2) 切断確率曲線は上に凸の二次曲線を描く。切断には最適なテーブル送り速度が存在する。
- (3) 切断能率は切断寸法に依存しない。しかし、切断寸法が大きくなると切断品位は若干低下する。
- (4) 試験片にノッチを付与すると切断能率・切断品位が向上する。ノッチ負荷荷重が大きいと切断能率が向上する。

参 考 文 献

- 1) 岡野光治, 小林駿介: 液晶, 培風館, (1990) 52.
- 2) 藤森康朝: レーザプロセッシング, 日経産業図書, (1990) 230.
- 3) 黒部利次, 川向徳康, 高尾利幸: YAGレーザによるガラスの精密切断, 材料, 42, 479, (1993)1004.
- 4) 黒部利次, 永井久司, 川向徳康: YAGレーザによるガラスの曲線切断, 材料, 43, 492, (1994) 1147.
- 5) 難波 進: レーザと加工, 共立出版, (1983) 14.
- 6) 田中紘一: 破壊と材料, 裳華房, (1991) 81.