

学術論文

ガラスのレーザスクライブにおける板厚の影響

山本 幸司* 羽阪 登** 森田 英毅** 大村 悦二*

Influence of Glass Substrate Thickness in Laser Scribing of Glass

Koji YAMAMOTO, Noboru HASAKA, Hideki MORITA and Etsuji OHMURA

*大阪大学大学院工学研究科 (〒565-0871 大阪府吹田市山田丘 2-1)

**三星ダイヤモンド工業(株) (〒564-0044 大阪府吹田市南金田 1-4-37)

kyamamoto@mitsuboshi-dia.co.jp

(原稿受付 2008 年 5 月 22 日)

The thickness of glass substrate used in liquid crystal displays is ever reducing from its original thickness of 1.1 millimeters for the purpose of down sizing and weight saving. The aim of this research is to clarify the influence of the glass substrate thickness during the laser scribe with crack propagation by the laser heating followed by quick quenching afterward. The laser scribe condition was obtained for soda-lime glass substrate with thickness equal to or less than 1.1 millimeters by laser irradiation experiments. Then two-dimensional thermal elasticity analysis was conducted by a finite element method based on the scribeable conditions obtained in the experiment. As a result, independently of the glass substrate thickness, the laser scribeable condition can be estimated between combination of the upper limit of maximum surface temperature $T_{\max}$ and the lower limit of maximum tensile stress $\sigma_{t\max}$ in the cooling area. There exists a substrate thickness of which the maximum tensile stress $\sigma_{t\max}$ turns out to be extreme largest under each scribe condition. The substrate thickness is obtained at faster scribe velocity for thinner glass substrate and at slower scribe velocity for thicker glass substrate. Owing to these relations, the crack depth also becomes almost the same tendency as $\sigma_{t\max}$.

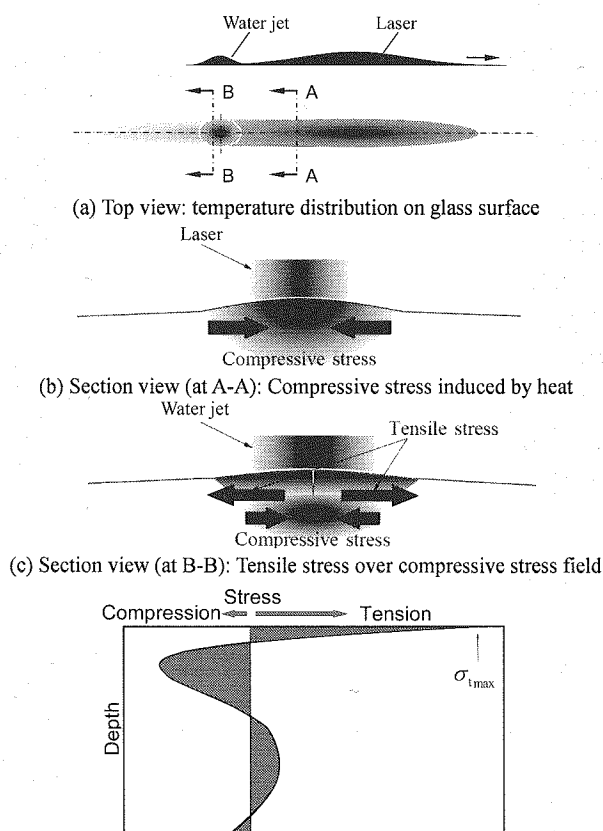
Key words: CO₂ laser, glass, laser scribing, thermal stress, thickness

1. 緒 言

現在, ノート型パーソナルコンピュータや薄型テレビなどの用途に使用される液晶ディスプレイ (以下, LCD) のガラス基板の板厚は, 当初の 1.1 mm から 0.7 mm, 0.6 mm と薄板化されている. 特に, 携帯電話などの携帯される機器においては, 小型, 軽量が望まれるため, 小型 LCD ガラス基板の板厚は, 0.4 mm 以下となり, さらに薄板化が進んでいる. しかしながら, ガラス基板の薄板化が進行するほど, 衝撃や落下などにより, 小型 LCD ガラス基板が割れやすくなると考えられる.

Fig. 1 (a)のように, CO₂ レーザをガラス表面に照射し, 加熱された直後を冷却することにより, 冷却域で, き裂 (以下, 亀裂と書く) を進行させ, スクライブ線を形成する方法がある. この方法をレーザスクライブという. このレーザスクライブを用いると, 機械的なスクライブ法と比べて, ガラスエッジ強度が向上する^{1), 2)}. このような利点から, レーザスクライブは, 薄板ガラスの有効な分断法であると考えられる.

著者ら³⁾⁻⁵⁾は, 板厚 0.7 mm のソーダガラスを用いて, レーザスクライブ実験に基づいた有限要素法による熱弾性解析を行い, 以下のようなレーザスクライブ機構を提唱した. レーザ照射によりガラス表面が加熱され, 表面から内部へ熱が伝わる (Fig. 1 (b)). レーザ加熱直後にウォータージェ



(d) Stress distribution along the central axis at B-B
Fig. 1 Schematic of laser scribing mechanism

ットにより、表層が冷却される (Fig. 1 (c)). これにより、表層で引張応力が発生して亀裂が進行する。表層だけが冷却されるので、内部に高温領域が残存する。これが圧縮応力場となり、表層の引張応力の発生を助長すると考えられる (Fig. 1 (c), (d)). つまり、冷却域で、板厚方向に温度分布が形成され、引張応力が表層に生じることにより、レーザスクライプの亀裂が進行する。

このようなレーザスクライプ機構から推測して、ガラス基板の板厚が薄くなった場合、板厚がレーザスクライプ特性に影響を与えることが考えられる。そこで、本研究では、現在の LCD 用ガラス基板の薄板化を考慮し、板厚 1.1 mm 以下のガラス基板に対するレーザスクライプ可能条件をレーザ照射実験により求めた。次に、レーザスクライプにおける板厚の影響を明らかにするため、実験結果に基づいた有限要素法による二次元熱弾性解析を行った。

2. 実験方法および結果

2.1 実験方法

実験は前報³⁾と同じ装置を用いた。まず、ガラスを真空吸着ステージに固定した。スクライプを開始するガラス端にスクライプの起点となる初期亀裂をカッターホイールで設け、CO₂ レーザをガラス表面で楕円形状となるようにビーム成形した。レーザ光をガラス表面に照射し、レーザ光とガラスに相対的な速度を与えて、スクライプ予定線上を加熱するとともに、レーザ光の後端付近をウォータージェットにより急冷した。このような方法によって、スクライプ方向に垂直亀裂を進行させ、レーザスクライプ線を形成した。Fig. 2 にレーザビームの加熱域とウォータージェットによる冷却域の位置関係を示す。

試料には、サイズ 300 mm × 400 mm のソーダガラス基板を用いた。板厚 h を 1.1, 0.55, 0.4 mm とした。Table 1 にレーザスクライプ条件を示す。スクライプ速度とレーザ出力は代表値を記している。加熱域の大きさは、 $1/e^2$ 長径および $1/e^2$ 短径を用いて示しており、冷却域の大きさは、ノズル径と広がり角、および、ノズルとガラス表面の距離で決まる直径で示した。板厚が変化しても、ビーム形状、冷却条件、および、冷却点距離 d は一定とした。

このようなレーザ照射条件でガラス基板の 300 mm 辺に平行にレーザスクライプした。ガラス中央部と比較して端部では亀裂深さが変化しやすいため、スクライプした 300 mm 長の中央部 200 mm の範囲で亀裂が進行したときスクライプ可とし、この範囲で亀裂進行が停止したときスクライプ不可と判断した。また、ガラス基板に熱的なダメージ⁶⁾が残るとガラスエッジ強度が低下し、加工品質が不適切なのでスクライプ不可と判断した。スクライプ後、ガラス基板を手で分断し、光学顕微鏡を用いて亀裂深さ D_c を測定した。

2.2 実験結果

板厚 0.4, 0.55, 0.7, 1.1 mm のガラス基板におけるレーザスクライプ可能条件を、レーザ出力に対するスクライプ可能速度として求めた。それらの実験結果とそれぞれの条件における亀裂

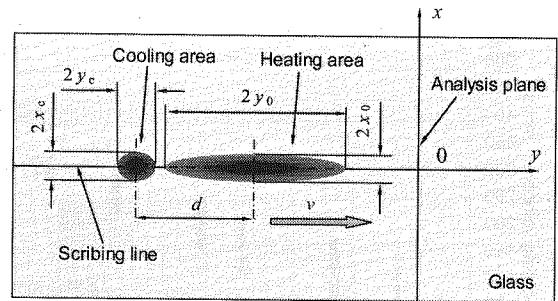


Fig. 2 Definitions and variables of geometry used for heating area, cooling area and each distance

Table 1 Typical condition for experiment

Glass Size	300 mm × 400 mm
h Glass Substrate Thickness	1.1, 0.7, 0.55, 0.4 mm
v Scribing Velocity	200 mm/s
P Laser Power	58.7 W
$2x_0$ Minor Axis of Heating Area	2.1 mm
$2y_0$ Major Axis of Heating Area	22.0 mm
d Cooling Point Distance	10 mm
$2x_e$ Minor Axis of Cooling Area	2.0 mm
$2y_e$ Major Axis of Cooling Area	3.0 mm

深さ D_c を Fig. 3 に示す。板厚 0.7 mm は、前報³⁾の実験結果を再掲した。Fig. 3 (d) (i) の板厚 0.4 mm において、レーザ出力 80.5 W では、実験装置の最高走査速度 500 mm/s でもスクライプ可であった。Fig. 3 (a)～(d) (i) において、高速側の×印はレーザスクライプの亀裂進行が停止した状態を表しており、低速側の×印は熱的なダメージがガラス基板に残った状態を表している。Fig. 3 (a)～(d) (ii) における各レーザ出力に対する亀裂深さ D_c は、その深さが深い方がスクライプ速度の低速側、浅い方が高速側に対応している。

いずれの板厚においても、レーザ出力が増加するにつれ、スクライプ可能速度が高速になる傾向がある。また、熱的なダメージが生じたスクライプ条件 (低速側の×印) は、板厚によらず、ほぼ同じ条件となっている。

板厚 1.1 mm の亀裂進行が停止した条件 (高速側の×印) は、レーザの低出力側でスクライプ可能速度範囲が広いのに対して、高出力側では狭くなって、スクライプ速度 $v = 350$ mm/s 以上ではスクライプ不可となっている。一方、板厚 0.4 mm では、低出力側でスクライプ可能速度範囲が狭く、レーザ出力 $P = 30.4$ W では、すべてのスクライプ速度においてスクライプ不可となっている。それに対して、高出力側のスクライプ可能速度範囲は広く、スクライプ速度 $v = 500$ mm/s でもスクライプ可となっている。つまり、板厚が厚くなるほど、スクライプ速度の高速側でスクライプしにくく、板厚が薄くなるほど、低速側でスクライプしにくくなる傾向がある。

熱的なダメージが生じなかった五つのスクライプ条件の亀裂深さ D_c を、板厚に対して整理した結果を Fig. 4 に示す。亀裂進行が停止してスクライプ不可となった条件を×印で示している。レーザ出力 $P = 71.0$ W、スクライプ速度 $v = 320$

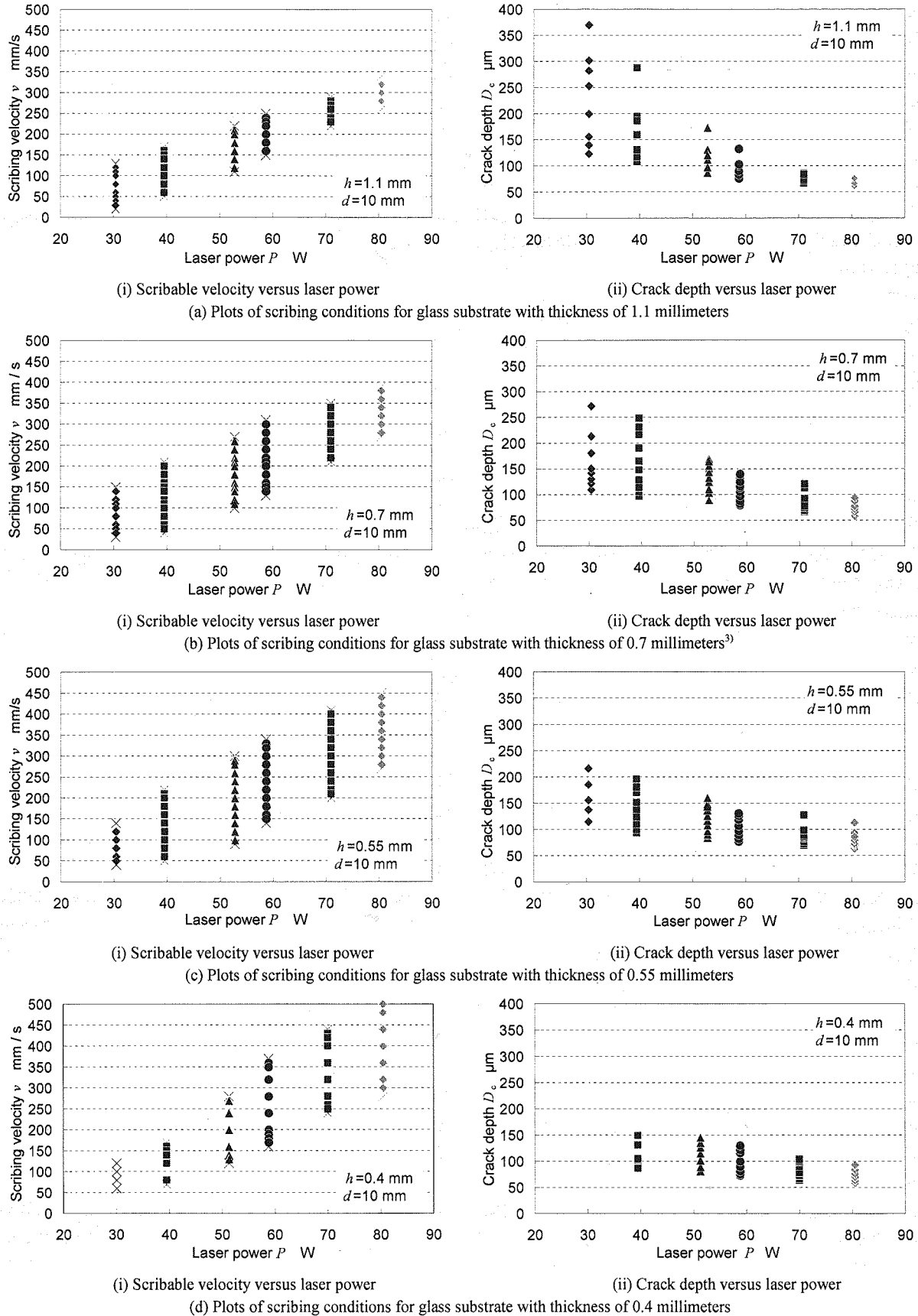


Fig. 3 Domain of laser scribing conditions and crack depth for glass substrate with thickness 0.4, 0.55, 0.7 and 1.1 millimeters, (i) “x” marks at higher velocities represent conditions in which crack progress was arrested and “o” marks at lower velocities represent conditions in which the glass surface was damaged by laser heating, (ii) Deeper crack depth corresponds to lower velocity conditions

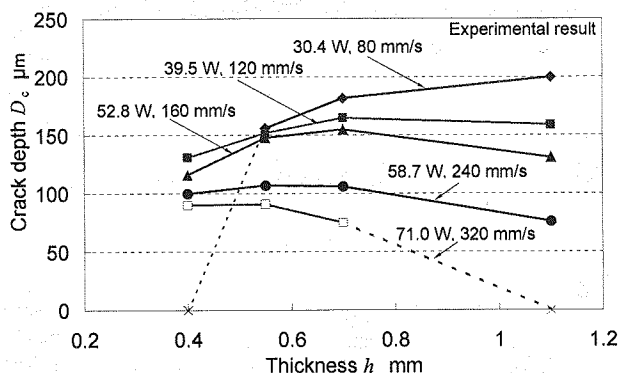


Fig. 4 Relation between crack depth and scribing condition for glass substrate with thickness 0.4, 0.55, 0.7 and 1.1 millimeters

mm/s の条件では、板厚 1.1 mm でスクライプ不可となっており、 $P = 30.4$ W, $v = 80$ mm/s の条件では、板厚 0.4 mm でスクライプ不可となっている。亀裂深さ D_c は、板厚とほぼ無関係に、スクライプ速度が減少するほど増加する傾向がある。

3. 熱応力解析

実験により求めたスクライプ条件に基づいて、以下のよう有限要素法による熱弾性解析を行い、次章において、レーザスクライプ可能条件やレーザスクライプにおける板厚の影響を考察した。

ガラスのレーザ照射面に $x-y$ 座標をとり、 y 軸をスクライプ方向、 z 軸を板厚方向とした。一例として、Fig. 5 に板厚 0.4 mm の FEM 解析に用いた要素分割を示す。対称性を考慮して $0.7 \text{ mm} \times 30 \text{ mm}$ の領域を解析対象とし、ビーム幅方向 (x 軸方向) の分割の最小値を $3.7 \mu\text{m}$ とし、板厚方向 (z 軸方向) の分割の最小値を $2.7 \mu\text{m}$ に分割した。総節点数は 622、要素数は 668 である。ソーダガラスの物性値^{7,9)}には、Table 2 の値を用いた。時間ステップは、 0.25 mm をスクライプ速度 v で除した時間、すなわち、 $0.25 \text{ mm}/v$ [s] とした。加熱、および冷却の大きさは、Table 1 の値をそのまま用い、いずれもガウス分布とした。

$x-z$ 面の二次元熱伝導解析では、レーザビーム中心を $y = -15 \text{ mm}$ の位置から y 軸方向 (紙面の奥から手前) に走査し、加熱・冷却条件を時間とともに変化させた。このとき、光学系の減衰率を計算したところ 0.9793 % となったので、ガラスの反射率の測定値 18.5 % を考慮して、前報^{3,4)}と同様に、レーザ出力を P としてガラスへの入熱量を $0.798 P$ [W] とした。衝突点の熱伝達率 α_0 は、ウォータージェットの流れ (この場合 0.8 ml/min) より算出した¹⁰⁾。ちなみに、水温は 20°C に制御している。実験では、レーザ出力とスクライプ速度が変化してもウォータージェットの流量は変化させないので、 α_0 は常に $10^5 \text{ W/m}^2\text{K}$ とした。

次に、得られた温度場を用いて、 $\sigma_{yy} = \tau_{yx} = \tau_{yz} = 0$ と仮定した平面応力問題として $x-z$ 面の二次元熱弾性解析を行った。レーザ照射側端を x 方向に拘束し、他端を x および z 方向にそれぞれ拘束した。

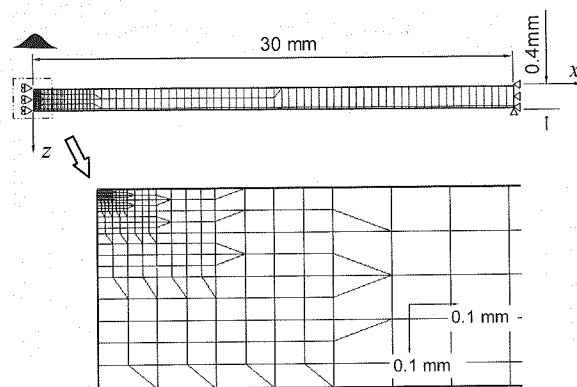


Fig. 5 Mesh geometry for FEM analysis

Table 2 Physical-properties of soda-lime glass

Density ⁷⁾	2520 kg / m ³
Specific Heat ⁷⁾	800 J / kg K
Thermal Conductivity ⁷⁾	1.03 W / m K
Thermal Expansion Coefficient ⁸⁾	$8.7 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$
Young's Modulus ⁹⁾	71.6 GPa
Poisson's Ratio ⁹⁾	0.23
Softening Temperature ⁹⁾	720 ~ 730 $^\circ\text{C}$
Bending Fracture Strength ⁹⁾	49 MPa

以下、前報³⁾と同様に、レーザスクライプ時のガラス基板表面の最高到達温度を T_{max} 、冷却域で発生するガラス基板表面の σ_{xx} の最大引張応力を $\sigma_{t\text{max}}$ とする。

4. 結果と考察

4.1 レーザスクライプ可能条件

前報³⁾では、板厚 0.7 mm のソーダガラスのスクライプ可能条件は加熱域の表面最大到達温度 T_{max} と、加熱後の冷却域で発生する最大引張応力 $\sigma_{t\text{max}}$ で推定できることを明らかにした。ここでも同様にして、板厚 0.4, 0.55, 1.1 mm のスクライプ可能であったレーザ出力とスクライプ速度の実験条件 (Fig. 3 (a)~(d) (i)) のもとで熱弾性解析を行った。その結果を Fig. 6 に示す。ここでも、板厚 0.7 mm の解析結果を再掲した。図中の上側のプロット点群はガラス基板表面の最高到達温度 T_{max} (右縦軸) を、下側のプロット点群はガラス基板表面の最大引張応力 $\sigma_{t\text{max}}$ (左縦軸) を表している。それぞれのプロット点群の高速側の $\times$ 印が、Fig. 3 (a)~(d) (i) でレーザスクライプの亀裂進行が途中で停止した条件に対応しており、低速側の $\times$ 印が、熱的なダメージが生じてスクライプ不可と判断した条件に対応している。

板厚 0.4, 0.55, 1.1 mm において、レーザ出力が一定のとき、スクライプ速度が低速になると T_{max} は増加し、いずれのレーザ出力のときも、 T_{max} の上限値はスクライプ速度に依存せずほぼ一定となっている。したがって、この T_{max} の上限値以下ではガラスに熱的なダメージが生じないといえる。

一方、レーザ出力が一定のとき、スクライプ速度が高速になると $\sigma_{t\text{max}}$ は減少している。これが、Fig. 3 (a)~(d) (ii) において、高速側で亀裂深さが浅くなる理由である。いずれのレーザ出

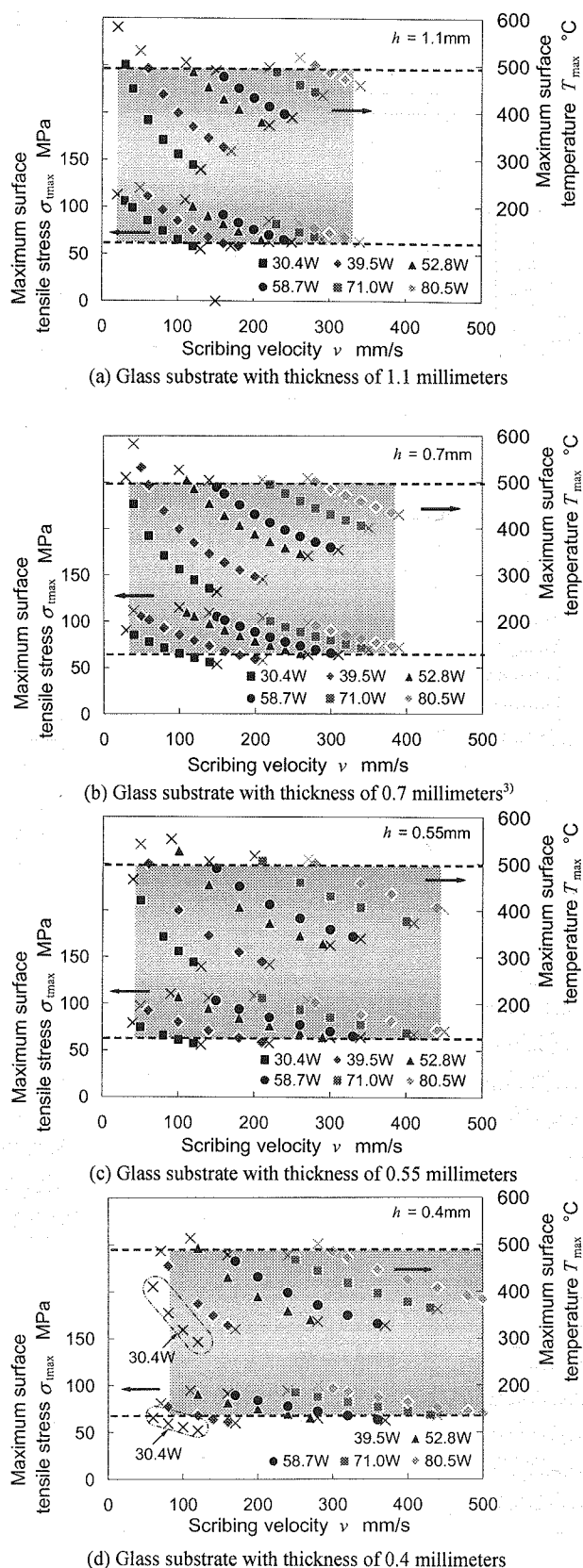


Fig. 6 Analysis results of maximum surface temperature $T_{\max}$ and maximum surface tensile stress $\sigma_{t\max}$ for each glass substrate with thickness 0.4, 0.55, 0.7 and 1.1 millimeters, The “x” marks at higher velocity correspond to the conditions in which laser scribe crack progress was arrested, and “x” marks at lower velocity correspond to the conditions with which there was residual thermal damage, (a) to (d) correspond to Figs. 3 (a) to (d) (i), respectively

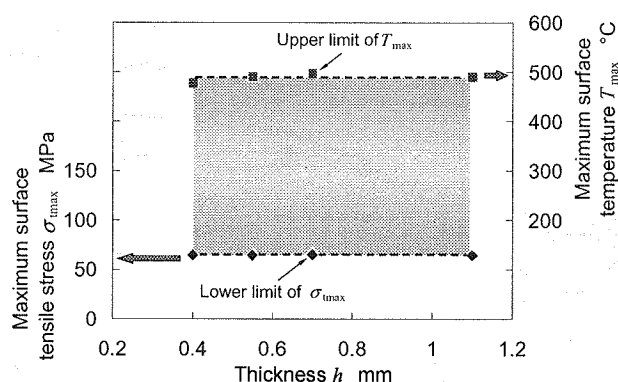


Fig. 7 Maximum surface temperature $T_{\max}$ and maximum tensile stress $\sigma_{t\max}$ for each glass substrate with thickness from 0.4 to 1.1 millimeters

力のときも、 $\sigma_{t\max}$ の下限値はスクライプ速度に依存せずほぼ一定となっている。したがって、この $\sigma_{t\max}$ の下限値以上でレーザスクライプの亀裂が進行するといえる。つまり、前報³⁾と同様に、0.4, 0.55, 1.1 mm の板厚においても、スクライプ可能な表面最高到達温度 $T_{\max}$ の上限値と冷却域の最大引張応力 $\sigma_{t\max}$ の下限値が存在するといえる。

Fig. 7 に、板厚 0.4, 0.55, 1.1 mm と 0.7 mm の最高到達温度 $T_{\max}$ の上限値と冷却域の最大引張応力 $\sigma_{t\max}$ の下限値をまとめて示す。それぞれの板厚の $T_{\max}$ の上限値はほぼ一定となり、その値は約 500 °C となった。一方、 $\sigma_{t\max}$ の下限値もほぼ一定となり、その値は約 65 MPa となった。この値は、Table 2 に示したソーダガラスの破壊応力値 49 MPa より大きい。このように、板厚が 0.4~1.1 mm の場合、熱弾性解析を行えば、板厚に関わらず、実験で得られるレーザスクライプ可能条件を表面最高到達温度 $T_{\max}$ の上限値と冷却域の最大引張応力 $\sigma_{t\max}$ の下限値から推定することができると考えられる。

4.2 レーザスクライプにおける板厚の影響

Fig. 8 に、冷却域の表面最大引張応力 $\sigma_{t\max}$ 発生位置における x - z 面の温度分布と基板の変形状態を示す。Fig. 4 の五つのスクライプ条件から、 $P = 30.4$ W, $v = 80$ mm/s, $P = 52.8$ W, $v = 160$ mm/s, $P = 71.0$ W, $v = 320$ mm/s の三つの条件を選択した。 x - z 面の温度分布は、Fig. 1 (c) のように、冷却直下のガラス内部に高温領域が残存している。スクライプ速度が低速になるほど、内部まで熱が伝わっている。板厚 0.4 mm の $P = 30.4$ W, $v = 80$ mm/s の条件では、裏面が約 200 °C まで温度上昇している。このとき、基板は表面側に凹に変形している。それ以外は、表面側に凸に変形している。次に、Fig. 9 に、Fig. 8 に対応する応力分布を示す。Fig. 1 (d) と同様に、冷却域の表面で引張応力が生じ、Fig. 8 の冷却域直下の高温領域が圧縮応力場となっている。

Fig. 10 に、Fig. 4 に対応した五つの条件の $\sigma_{t\max}$ を、板厚に関して整理して示す。いずれの条件でも、 $\sigma_{t\max}$ は上に凸となり、 $\sigma_{t\max}$ が極大となる板厚は、スクライプ速度が高速になるほど薄い方にシフトし、低速になるほど厚い方にシフトする傾向がある。具体的には、 $P = 71.0$ W, $v = 320$

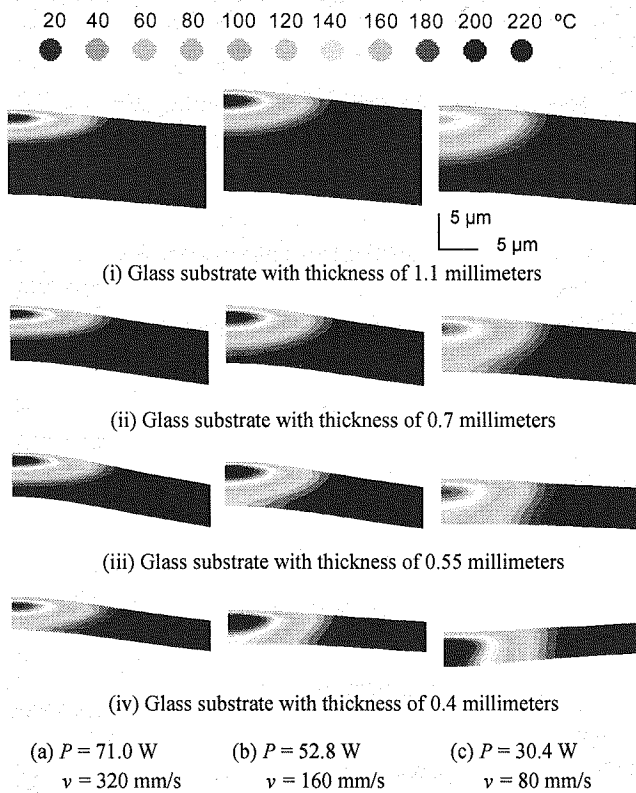


Fig. 8 Temperature distributions on x - z plane and deformation at the time when σ_{tmax} is generated for each glass substrate with thickness of 0.4, 0.55, 0.7 and 1.1 millimeters

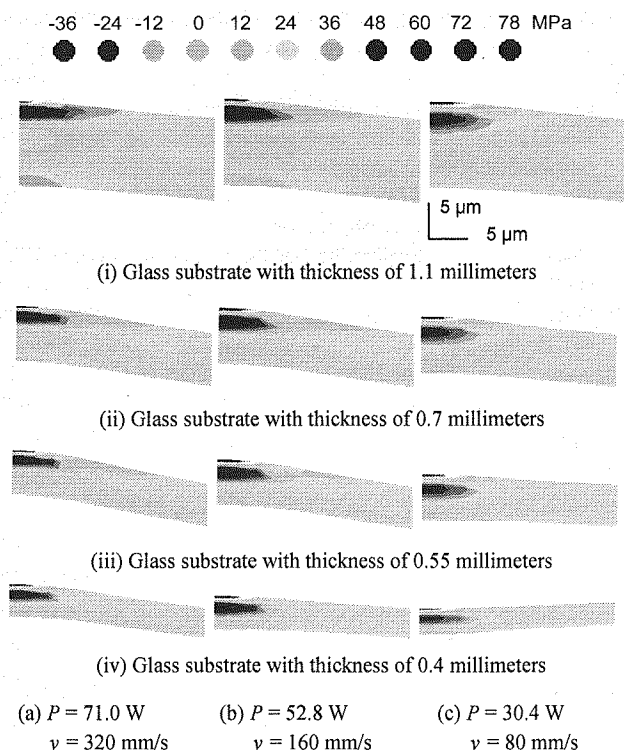


Fig. 9 Stress distributions on x - z plane and deformation at the time when σ_{tmax} is generated for each glass substrate with thickness of 0.4, 0.55, 0.7 and 1.1 millimeters

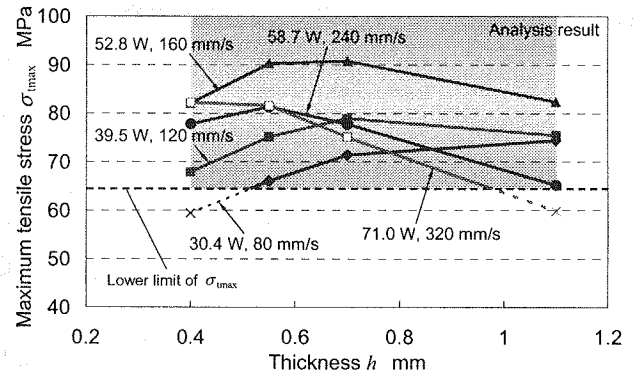
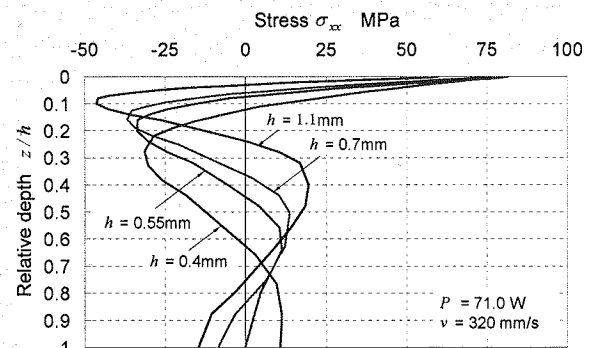
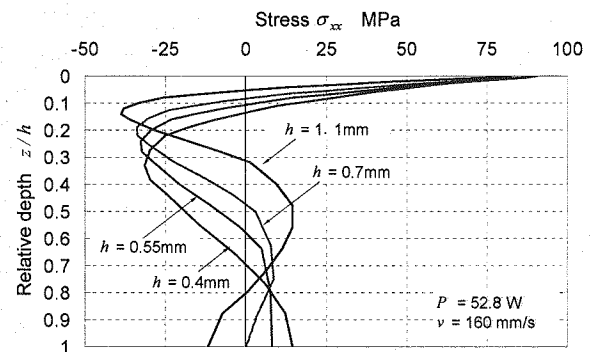


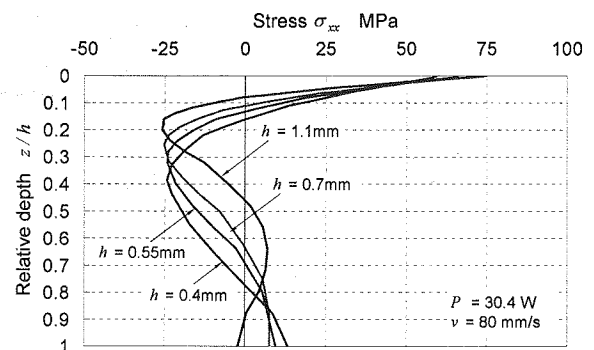
Fig. 10 Maximum tensile stress σ_{tmax} of each laser scribing conditions for each glass substrate with thickness of 0.4, 0.55, 0.7 and 1.1 millimeters



(a) $P = 71.0$ W, $v = 320$ mm/s



(b) $P = 52.8$ W, $v = 160$ mm/s



(c) $P = 30.4$ W, $v = 80$ mm/s

Fig. 11 Stress σ_{xx} distributions along the z -axis at the time when σ_{tmax} is generated for each glass substrate with thickness of 0.4, 0.55, 0.7 and 1.1 millimeters

mm/s の条件において, σ_{tmax} が極大となる板厚は 0.4 mm に近づくので, σ_{tmax} は, 板厚 1.1 mm で前述のスクライプ可能な下限値 (図中, Lower limit of σ_{tmax}) より小さくなる. このため, 板厚 1.1 mm ではスクライプ不可になったと考えられる. 逆に, $P=30.4$ W, $v=80$ mm/s の条件において, σ_{tmax} が極大となる板厚は 1.1 mm 以上となり, σ_{tmax} は, 板厚 0.4 mm でスクライプ可能な下限値より小さくなる. その結果, 板厚 0.4 mm でスクライプ不可となったと考えられる.

Fig. 10 の板厚に対する冷却域の表面最大引張応力 σ_{tmax} の傾向は, Fig. 4 の板厚に対する亀裂深さ D_c の傾向とおおむね一致している. ただし, Fig. 10 において, たとえば, $P=30.4$ W, $v=80$ mm/s と $P=39.5$ W, $v=120$ mm/s のときの σ_{tmax} は, $P=52.8$ W, $v=160$ mm/s のときの σ_{tmax} より小さいにも関わらず, Fig. 4 の亀裂深さ D_c は深くなっている. 他にも, 板厚 0.4mm において, $P=59.7$ W, $v=240$ mm/s と $P=71.0$ W, $v=320$ mm/s のときに, 同様の傾向がみられる. このことは, σ_{tmax} だけでは亀裂深さ D_c の実験結果をすべて説明できないことを意味している.

これまでの研究^{3), 4)}で, 比較的浅い位置に大きな内部圧縮応力場が存在すると亀裂進展が妨げられて, 亀裂が湾曲するが, 内部圧縮応力場がある程度小さくて適度に深くなると, 亀裂は伸びやすくなることを示した. このことを踏まえて, スクライプ条件と内部圧縮応力場, およびその深さの関係を調べた. z の値を板厚 h で除した無次元量 z/h を相対深さとし, 相対深さと応力 σ_{xx} の関係を Fig. 11 に示す. Fig. 11 (a) から Fig. 11 (c) へとスクライプ速度が低速になると, いずれの板厚においても内部圧縮応力が減少している. また, その深さが深くなる傾向がある. これらのことから, 上で例に挙げた条件のように, σ_{tmax} が小さいにも関わらず, 亀裂深さ D_c が深くなったと考えられる.

なお, Fig. 11 において, $P=30.4$ W, $v=80$ mm/s の条件における板厚 0.4 mm の内部圧縮応力場の相対深さが, どの条件よりも深くなっている. その相対深さ z/h は約 0.4 で板厚の中央に近い. このことが, Fig. 8 (c) (iv), Fig. 9 (c) (iv) のように, 基板の表面側に凹に変形する要因の一つになると考えられる.

5. 結 論

板厚 0.4, 0.55, 0.7, 1.1 mm のソーダガラス基板における

レーザスクライプ可能条件を踏まえて, 有限要素法による二次元熱弾性解析を行い, 以下の結論を得た.

- (1) 前報³⁾の板厚 0.7 mm と同様に, 板厚 0.4, 0.55, 1.1 mm においても, レーザスクライプ可能条件では, ガラス基板表面の最高到達温度 T_{max} の上限値と冷却域の最大引張応力 σ_{tmax} の下限値は, レーザ出力とスクライプ速度に依存せずほぼ一定となる. それらの値は板厚にも依存しない.
- (2) したがって, 板厚が 0.4~1.1 mm の場合, 熱弾性解析を行えば, 板厚に関わらず, 表面最大到達温度 T_{max} の上限値と冷却域の最大引張応力 σ_{tmax} の下限値から, レーザスクライプ可能条件を推定できる.
- (3) それぞれのスクライプ条件において, 冷却域の表面最大引張応力 σ_{tmax} が極大となる板厚が存在し, その板厚は, スクライプ速度が高速になると薄くなり, 低速になると厚くなる傾向がある. それに起因して, 亀裂深さについても, ほぼ同様の傾向となる.

参 考 文 献

- 1) Miyake, Y.: Separation technology for FPD glass, J. Jpn. Soc. Abrasive Tech., **47**, (2001) 342. (in Japanese)
- 2) Hermanns C.: Laser Separation of Flat Glass, Proc. 63rd Laser Mater. Process. Conference., Jpn. Laser Process. Soc., (2005) 105.
- 3) Yamamoto, K., Hasaka, N., Morita, H., and Ohmura, E.: Thermal Stress Analysis on Laser Scribing of Glass, Proc. ICALEO'04, (2004) M205.
- 4) Yamamoto, K., Hasaka, N., Morita, H., and Ohmura, E.: Three Dimensional Thermal Stress Analysis on Laser Scribing of Glass, Transactions of the Japan. Society of Mechanical Engineers, Series C, **72**, (2006) 3927. (in Japanese)
- 5) Yamamoto, K., Hasaka, N., Morita, H., and Ohmura, E.: Partial Growth of Crack in Laser Scribing of Glass, Journal of the Japan Society for Precision Engineering **73-8** (2007) 917. (in Japanese)
- 6) Yamamoto, K., Hasaka, N., Morita, H., Ohmura, E.: Crack Extension in Glass by Laser Irradiation along Laser Scribed Line, Journal of the Japan Society for Precision Engineering, **74-11** (2008). (in Japanese, to be published)
- 7) The Japan Society of Mechanical Engineers: JSME Data Handbook, Heat Transfer 4th Ed., (1986) 321. (in Japanese)
- 8) Shand E.B.: Glass Engineering Handbook, 2nd ed., McGraw-Hill, (1958) 4.
- 9) Watanabe N.: Glass Engineering Handbook, Asakura Shoten, (1999) 441. (in Japanese)
- 10) Yamamoto A.: On the Heat Transfer Properties of Cutting Fluids (Part 2), Journal of the Japan Society for Precision Engineering, **26-8**, (1960) 461. (in Japanese).