

学術論文

ガラスのレーザスクライブにおける線膨張係数の影響

山本 幸司* 羽 阪 登** 森 田 英 毅** 大 村 悦 二*

Influence of Thermal Expansion Coefficient 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)

Alumino silicate glass with relatively lower thermal expansion coefficient is used for the glass substrate of liquid crystal display whereas soda lime glass is generally used for such as window. This research is aimed to clarify the influence for the thermal expansion coefficient of the glass substrate during the laser scribe with crack propagation by laser heating followed by quick quenching afterward. Comparison of the laser scribe conditions between alumino silicate glass and fused silica were obtained by laser irradiation experiments. Then two-dimensional thermal elasticity analysis was conducted by a finite element method based on the experimental results. As a result, the laser scribe condition of alumino silicate glass can be estimated from combination of the upper limit of maximum surface temperature and the lower limit of maximum tensile stress in the cooling area. The tensile stress generated in the cooling area decreases inversely as the thermal expansion coefficient decreases. Therefore, fused silica whose thermal expansion is much lower than alumino silicate glass is rarely applicable for the laser scribe for separation.

Key words: CO₂ laser, glass, laser scribing, thermal stress, thermal expansion coefficient

1. 緒 言

現在、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)の生産工程では、生産効率を高める一つの手段として、パネルの取り数を増加させるため、分断するガラス基板を大面積化している。LCD の生産工程には、ガラス基板を高温にして成膜する工程があり、ガラス基板が大面積化すると、貼り合わせによる位置ずれ等の問題が生じる。よって、LCD 用ガラス基板には、一般的に窓ガラス等に使用されるソーダガラス(線膨張係数 $\alpha = 8.7 \times 10^{-6}$ K⁻¹)と比較して、線膨張係数が小さいアルミノシリケートガラスが使用される。

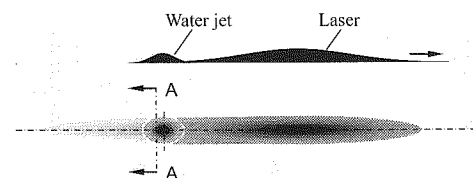
一方、ガラスを分断する手法として、CO₂ レーザの照射した直後を冷却することにより、冷却域で、き裂(以下、亀裂と書く)を進行させ、スクライブ線を形成する方法がある。この方法をレーザスクライブという。その後、スクライブ線に曲げ応力を付加し、ガラスを分断する。レーザスクライブを用いると、分断エッジにマイクロクラックが生じにくいので、機械的なスクライブ法と比べて、ガラスエッジ強度が向上するなどの利点^{1,2)}があり、ガラスの有効な加工法といえる。

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。

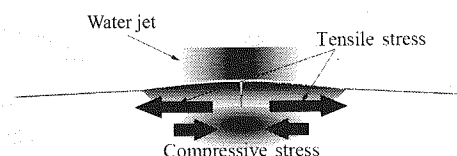
Fig. 1 (a)は、ガラス表面の温度分布の模式図を示している。

レーザ照射による加熱域では、表面から内部へ熱が伝わり、その直後の冷却域では、Fig. 1 (b)のように表層だけが冷却される。これにより、表層で引張応力が発生して亀裂が進行する。このように、レーザスクライブは熱応力を用いた加工法であるので、線膨張係数の影響を受けやすいと推測される。

本研究では、線膨張係数が異なるソーダガラス、アルミノシリケートガラス、石英ガラスを用いて、レーザ照射実験を行った。次に、レーザスクライブにおける線膨張係数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。



(a) Top view: Temperature distribution on glass surface



(b) Section view (at A-A): Tensile stress over compressive stress field

Fig. 1 Schematic of laser scribing mechanism

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。スクライブを開始するガラス端にスクライブ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、スクライブ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、スクライブ方向に垂直亀裂を進行させ、レーザスクライブ線を形成した。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、前報³⁾の板厚 0.7mm、サイズ 300 mm×400 mm のソーダガラス(旭硝子社製 AS)に対して、板厚 0.7 mm、サイズ 360 mm×460 mm のアルミノシリケートガラス(コーニング社製 1737)と板厚 0.6 mm、サイズ 150 mm×150 mm の石英ガラス(旭硝子社製 AQ)を用いた。Table 1 にレーザスクライブ条件を示す。スクライブ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。ガラス材質が変化しても、ビーム形状、

冷却条件、および、冷却点距離 d は一定とした。このようにレーザ照射実験を行って亀裂が進行したときスクラ

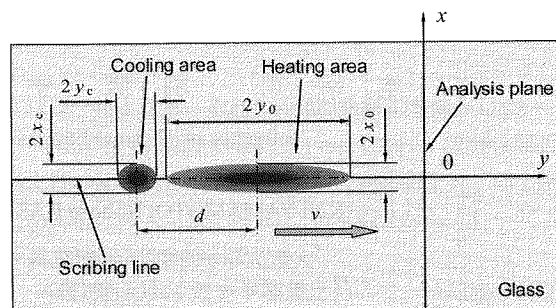
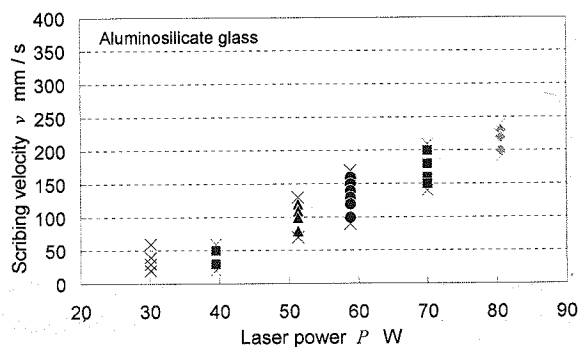


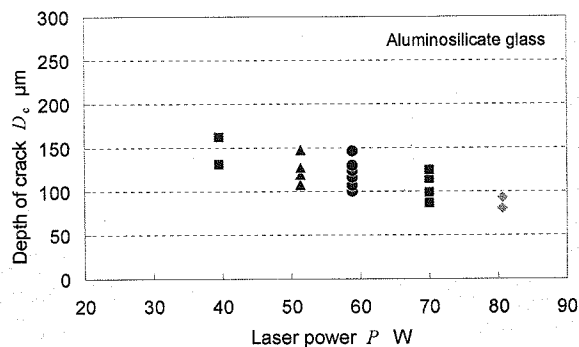
Fig. 2 Definitions and variables of geometry used for heating area, cooling area and each distance

Table 1 Typical condition for experiment

v	Scribing Velocity	150 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
$2x_c$	Minor Axis of Cooling Area	2.0 mm
$2y_c$	Major Axis of Cooling Area	3.0 mm

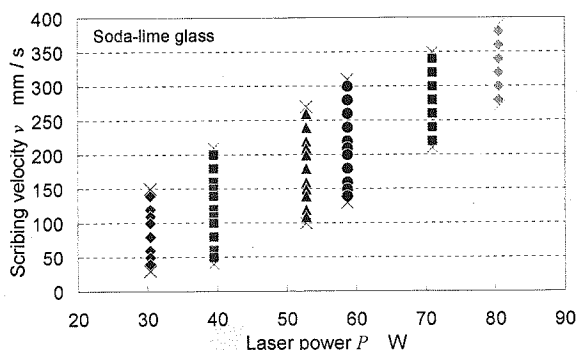


(i) Scribable velocity versus laser power

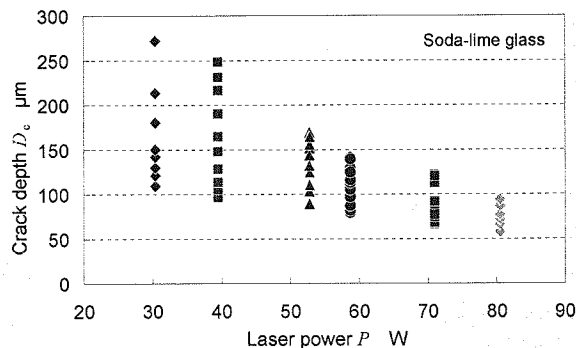


(ii) Crack depth versus laser power

(a) Plots of scribing conditions for substrate of aluminosilicate glass



(i) Scribable velocity versus laser power



(ii) Crack depth versus laser power

(b) Plots of scribing conditions for substrate of soda-lime glass³⁾

Fig. 3 Domain of laser scribable conditions and crack depth of aluminosilicate glass and soda-lime glass, (i) Crossing marks at higher velocities represent conditions in which crack progress was arrested, and crossing marks at lower velocities represent conditions in which the glass surface was damaged by laser heating, (ii) Deeper crack depth corresponds to lower velocity condition.

Table 2 Physical-properties of glass substrates

	Soda-lime	Ref.	Alumino silicate	Ref.	Fused silica	Ref.
Density	2520 kg / m ³	7)	2540 kg / m ³	11)	2200 kg / m ³	12)
Specific heat	800 J / kg K	7)	707.5 J / kg K	11)	730 J / kg K	13)
Thermal conductivity	1.03 W / m K	7)	0.9085 W / m K	11)	1.3 W / m K	13)
Expansion coefficient	$8.7 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$	8)	$4.2 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$	11)	$0.6 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$	12)
Young's modulus	71.6 GPa	9)	70.9 GPa	11)	73.4 GPa	12)
Poisson's ratio	0.23	9)	0.23	11)	0.17	12)
Softening temperature	720 - 730 °C	9)	975 °C	11)	1600 °C	12)
Critical stress intensity factors (N ₂ 300 K)	0.76 MPa m ^{1/2}	10)	0.91 MPa m ^{1/2}	10)	0.79 MPa m ^{1/2}	10)
Fracture surface energy (N ₂ 300 K)	3.9 J / m ²	10)	4.7 J / m ²	10)	4.4 J / m ²	10)
Reflectance	18.5 %		12.7 %		12.83 %	14)

イブ可とし、亀裂進行が停止したときスクライプ不可とした。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するので、このような場合は不適切と判断した。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

アルミノシリケート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。その実験結果とそれぞれの条件における亀裂深さ D_c を Fig. 3 (a) に示す。線膨張係数による差異を比較するため、前報³⁾のソーダガラスの実験結果を Fig. 3 (b) に再掲する。Fig. 3 (a) (i), Fig. 3 (b) (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) (ii), Fig. 3 (b) (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。なお、石英ガラスは、アルミノシリケートガラスのスクライプ可能条件ではスクライプできなかった。

アルミノシリケートガラスにおいても、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。レーザ出力に対する熱的なダメージが生じたスクライプ速度(低速側の×印)と亀裂進行が停止したスクライプ速度(高速側の×印)は、Fig. 3 (b) のソーダガラスと比較して、どちらも低速になった。

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、有限要素法による二次元熱弾性解析を行って、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線膨張係数の影響を考察した。

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。Fig. 4 に、一例として、アルミノシリケートガラスの 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 769、要素数は 721 である。各試料の物性値には、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

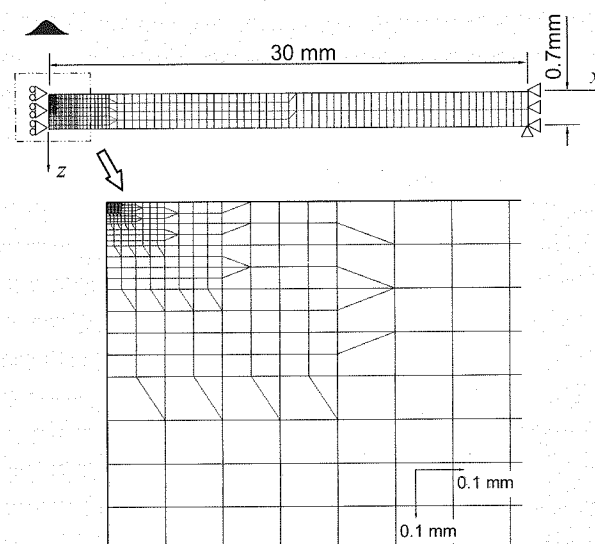


Fig. 4 Mesh geometry for FEM analysis

で除した時間、すなわち、 $0.25 \text{ mm} / v [\text{s}]$ 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、どちら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、Table 2 の反射率を考慮して、ガラスへの入熱量を求めた。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 m/min)より算出した¹⁵⁾。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れ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。

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 σ_{tmax} とする。

4. 熱応力解析結果と考察

4.1 レーザスクライプ可能条件

前報³⁾では, ソーダガラスのスクライプ可能条件は表面最大到達温度 $T_{\max}$ と冷却域の最大引張応力 $\sigma_{t\max}$ で推定できることを明らかにした. 線膨張係数の差異によるスクライプ可能条件を比較するため, ソーダガラスの解析結果を Fig. 5 (a)に再掲する. ここでも同様に, アルミノシリケートガラス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のもとで熱弾性解析を行った. その結果を Fig. 5 (b)に示す. 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冷却域の最大引張応力 $\sigma_{t\max}$ (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×印が, Fig. 3 (a) (i), Fig. 3 (b) (i)の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×印が熱的なダメージが生じて不適切と判断した条件に対応している. また, Fig. 5 (c)は, 石英ガラスのスクライプ不可であった条件の解析結果である.

Fig. 5 (b)のアルミノシリケートガラスにおいて, 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, その値は約 700 °C となった. この値は, ソーダガラスの $T_{\max}$ の上限値 (約 500 °C) より高い. これは, Table 2 に示したように, ソーダガラスの軟化点が 720~730 °C であるのに対して, アルミノシリケートガラスの軟化点が 975 °C と高いことに起因していると考えられる. いずれにしても, この $T_{\max}$ の上限値以下ではアルミノシリケートガラス表面に熱的なダメージが生じないといえる.

一方, Fig. 5 (b)において, $\sigma_{t\max}$ に着目すると, 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 $\sigma_{t\max}$ は減少している. これが, Fig. 3 (a) (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り, その値は約 60 MPa となって, ソーダガラスの $\sigma_{t\max}$ の下限値 (約 65 MPa) とほぼ等しい値となった. これは, Table 2 の各試料の表面エネルギーに大きな差がないことによると考えられる. いずれにしても, この $\sigma_{t\max}$ の下限値以上であれば, レーザスクライプの亀裂が進行するといえる.

つまり, ソーダガラスと比較して, 線膨張係数が $4.2 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ と小さいアルミノシリケートガラスにおいても, スクライプ可能な $T_{\max}$ の上限値と $\sigma_{t\max}$ の下限値が存在するといえる. これより, 熱弾性解析を行えば, 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.

なお, Fig. 5 (c)から, 石英ガラスでも, 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 $T_{\max}$ と $\sigma_{t\max}$ は増加する傾向があることがわかる.

4.2 レーザスクライプにおける線膨張係数の影響

線膨張係数が減少したときのレーザスクライプへの影響を

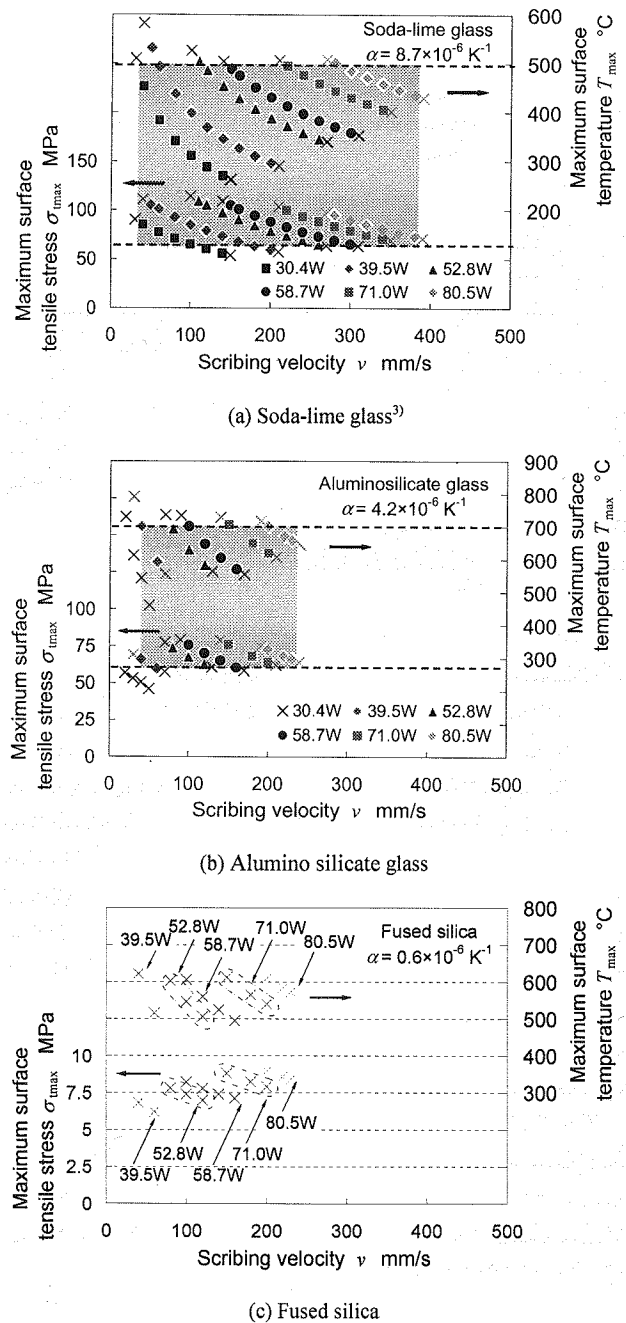
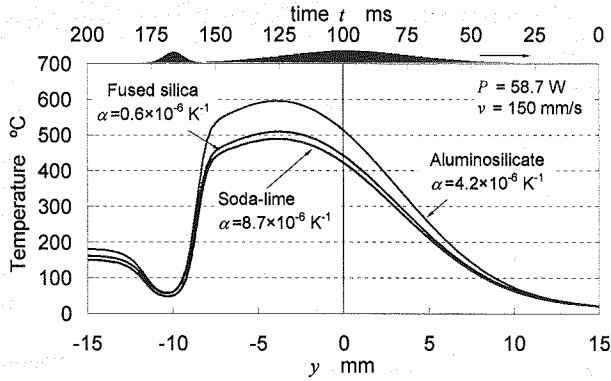
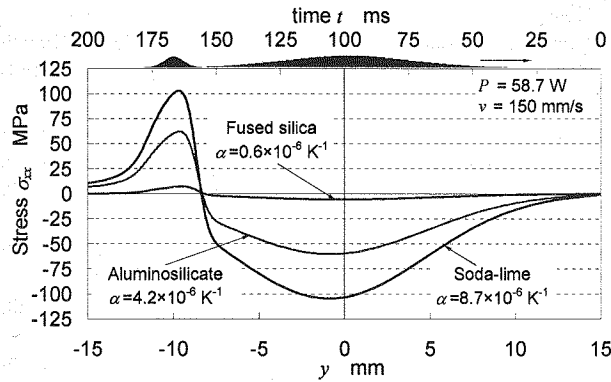


Fig. 5 Analysis results of maximum tensile stress $\sigma_{t\max}$ and maximum surface temperature $T_{\max}$ of soda-lime glass, aluminosilicate glass and fused silica. The “x” marks at higher velocity correspond to the conditions in which laser scribe crack progress was arrested, and “x” marks at lower velocity correspond to the conditions with which there was residual thermal damage; (a) and (b) correspond to Figs. 3 (a) (i) and 3 (b) (i), respectively

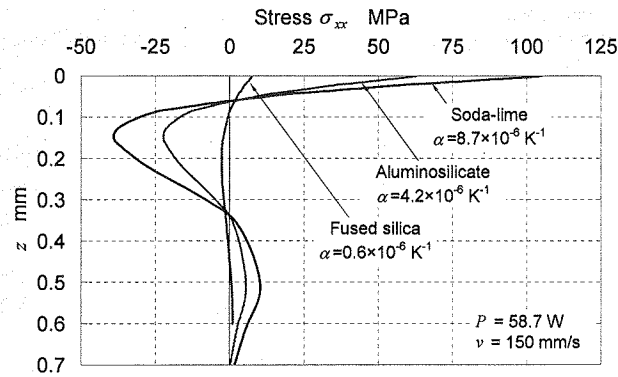
把握するため, レーザ出力 $P = 58.7 \text{ W}$, スクライプ速度 $v = 150 \text{ mm/s}$ のスクライプ条件におけるスクライプ線上の温度と応力 σ_{xx} の時間変化を求めた. また, 冷却域の表面最大引張応力 $\sigma_{t\max}$ 発生時の z 軸上の σ_{xx} の応力分布を求めた. その結果を Fig. 6 に示す. Fig. 6 (a), Fig. 6 (b)において, 時刻 $t = 100 \text{ ms}$ がレーザビームの中心位置に対応し, 時刻 $t =$



(a) Time variations of glass surface temperature



(b) Time variations of surface stress σ_{xx}



(c) Stress distributions along the z -axis at the time that σ_{tmax} is generated

Fig. 6 Temperature and stress distributions of σ_{xx} for soda-lime glass, aluminosilicate glass and fused silica ($P = 58.7$ W, $v = 150$ mm/s)

167 ms が冷却域の中心位置に対応している。

Fig. 6 (a)では、表面最高到達温度 T_{max} に約 100 °C の差があるものの、ほぼ同じ温度分布の形状となっている。この温度差は、各試料の熱物性値が異なることによる。Fig. 6 (b), および、Fig. 6 (c)でも、ほぼ同じ応力分布の形状になっている。しかしながら、発生応力に大きな差が生じている。冷却域の表面最大引張応力 σ_{tmax} は、線膨張係数が減少すると急激に減少している。ここで、各試料の表面エネルギーに大きな差がないことから (Table 2), 石英ガラスの σ_{tmax} の下限値をアルミノシリケートガラスと同じ約 60 MPa と仮定する。

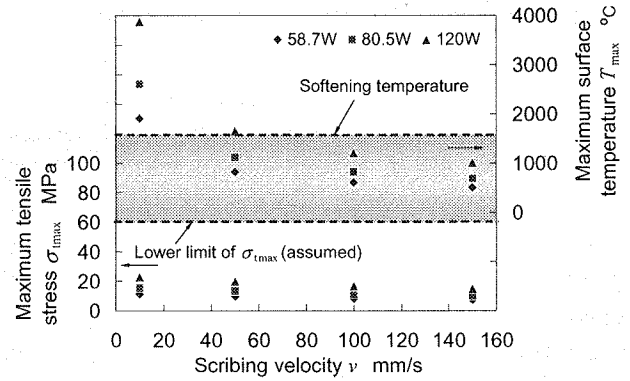


Fig. 7 Analysis results of maximum surface temperature T_{max} and maximum tensile stress σ_{tmax} of fused silica with lower scribing velocity and higher laser power compared with Fig. 5 (c)

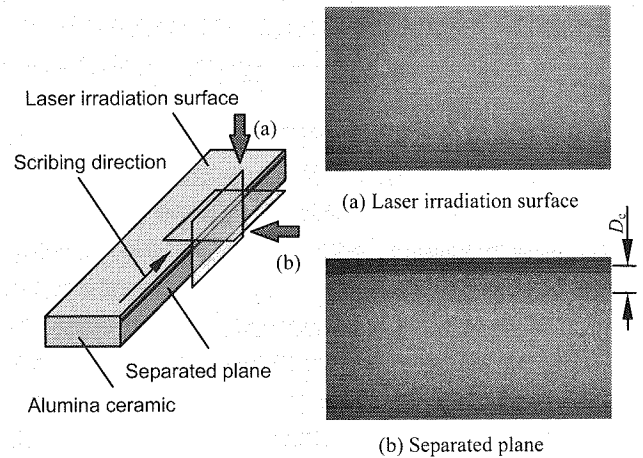


Fig. 8 An example of a separated plane of alumina ceramic (Al_2O_3) scribed by laser

ソーダガラスの σ_{tmax} は 103 MPa であるのに対して、石英ガラスでは、 σ_{tmax} が 7 MPa まで減少し、仮定した σ_{tmax} の下限値以下となっている。このことが、アルミノシリケートガラスのスクライプ可能条件で石英ガラスがスクライプできなかった理由として考えられる。

線膨張係数が小さく、冷却域の最大引張応力 σ_{tmax} が発生しにくい石英ガラスにおいても、Fig. 5 (c)から、スクライプ速度を減少させ、また、レーザ出力を増加させることにより、 σ_{tmax} を増加させることができる。そこで、スクライプ速度 v を、150, 100, 50, 10 mm/s と減少させ、レーザ出力 P を 58.7, 80.5, 120 W と増加させたときの表面最高到達温度 T_{max} と冷却域の最大引張応力 σ_{tmax} を求めた。その結果を Fig. 7 に示す。図中に、仮定した石英ガラスの σ_{tmax} の下限値約 60 MPa と、石英ガラスの軟化点 1600 °C を示している。

Fig. 7 において、 $P = 120$ W, $v = 10$ mm/s の条件で、 σ_{tmax} は 23 MPa まで増加した。しかしながら、この値は、仮定した σ_{tmax} の下限値約 60 MPa よりはるかに小さい。しかも、この条件における T_{max} は約 3900 °C となり、石英ガラスの軟化点 1600 °C 以上に加熱されている。よって、亀裂は進行せず、

表面に熱的なダメージが発生すると推測される。このような理由により、石英ガラスは、通常、レーザスクライプできないといえる。

この結果から推測して、線膨張係数がアルミノシリケートガラス以上で、軟化点がアルミノシリケートガラスと同程度以上のガラス、または、耐熱温度がそれより高い硬脆材料であれば、Fig. 2 に示す方法でレーザスクライプが可能であると考えられる。そこで、線膨張係数 $\alpha = 約 7 \times 10^{-6} K^{-1}$ 、板厚 0.635 mm のアルミナセラミック基板 (京セラ社製 A476T¹⁶⁾) を用いて、レーザ照射実験を行った。その結果、アルミナセラミックにおいてもレーザスクライプが可能であった。手で分断した断面の光学顕微鏡写真を Fig. 8 に示す。レーザスクライプで形成された亀裂が確認でき (Fig. 8 (b))、表面に熱的なダメージも生じていない (Fig. 8 (a))。ちなみに、アルミナセラミックの耐熱温度は 1500 °C 以上で、アルミノシリケートガラスの軟化点 975 °C より高い。この実験結果は、先述の推測を実証した一例といえる。

5. 結 論

線膨張係数の異なるガラス材質におけるレーザスクライプ条件を踏まえて、有限要素法による二次元熱弾性解析を行った。本研究で得られた結論は、以下の通りである。

- (1) 前報^{3,5)}と同様に、線膨張係数がソーダガラスより小さいアルミノシリケートガラスにおいても、レーザスクライプ可能条件では、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。
- (2) したがって、実験結果に基づいて熱弾性解析を行えば、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、アルミノシリケートガラスのレーザスクライプ可能条件を推定できる。
- (3) 線膨張係数が $\alpha = 0.6 \times 10^{-6} K^{-1}$ と小さい石英ガラスは、通常、レーザスクライプは不可能である。
- (4) 線膨張係数 $\alpha = 4.2 \times 10^{-6} K^{-1}$ 以上で、軟化点や耐熱温度が 975 °C 程度以上の硬脆性材料であれば、レーザスクライプができる可能性がある。ちなみに、線膨張

係数 $\alpha = 約 7 \times 10^{-6} K^{-1}$ で、耐熱温度 1500 °C 以上のアルミナセラミック基板はレーザスクライプ可能であった。

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. Processing Conf., Jpn. Laser Processing. Soc., (2005), 105.
- 3) Yamamoto, K., Hasaka, N., Morita, H., Ohmura, E.: Thermal Stress Analysis on Laser Scribing of Glass, Proc. ICALEO'04, (2004) M205.
- 4) Yamamoto, K., Hasaka, N., Morita, H., 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., Ohmura, E.: Partial Growth of Crack in Laser Scribing of Glass, Joournal 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, (submitted), (in Japanese)
- 7) The Japan Society of Mechanical Engineers ed.: JSME Date 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) Wiederborn S. M.: Fracture Surface Energy of Glass, J. Amer. Ceram. Soc., **52**, (1969), 99-105.
- 11) Corning® 1737 AMLCD Glass Substrate Material Information, (2004).
- 12) <http://www.agc.co.jp/quartz/sq4.html>
- 13) http://www.roymech.co.uk/Useful_Table/Prop_Solids.htm
- 14) Kitamura R., Pilon L. and Jonasz M.: Optical constants of Silica glass from extreme ultraviolet to far infrared at near room temperature, Applied Optics, Optical Society of America, **46-33**, (2007), 8118-8133.
- 15) 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).
- 16) <http://www.kyocera.co.jp/prdct/fc/product/pdf/material.pdf>