

化学強化ガラスのレーザ切断に関する研究 (表面応力層によるき裂周辺応力分布の変化)

金沢大学 ○川邊智也, 金沢大学 ◎古本達明, 橋本洋平, 扇子悠, 小谷野智広, 細川晃

要旨

CO₂レーザを熱源とする化学強化ガラスの熱応力切断に対して、応力層の有無や、応力層の深さが、き裂周辺の応力分布に与える変化を明らかにする目的で、熱-応力連成解析を行った。解析モデルにき裂を導入し、き裂先端付近に円形熱源を与えて解析を行った。解析の結果、き裂深が圧縮応力層深さを超えていれば切断が可能となること、応力層の有無によって、き裂の進展様式が変化することが分かった。

1. 緒言

化学強化ガラスは、ガラス表面に圧縮応力層を与えた機械的強度の高いガラスである。そのため化学強化ガラスは割れにくく、タッチパネルや航空機用風防ガラス等に用いられている⁽¹⁾。化学強化ガラスは、その強度の高さ故に機械的に加工することが難しい。そこで、ガラス表面にレーザを照射した時に生じる熱応力を利用し、あらかじめ導入したき裂を進展させることでガラスを分断加工するレーザ切断が注目されている。レーザ切断を行う場合、初期き裂の導入が必須となる。これまでの研究で、化学強化ガラスをレーザ切断する場合、初期き裂の深さが圧縮応力層の厚さを越えている必要があることが確認されている⁽²⁾。

本研究では、有限要素法を用いてレーザ照射時に生じるき裂周辺の応力分布を検討し、また、応力層の有無がき裂進展に及ぼす影響を調べたので、以下に報告する。

2. 化学強化ガラスの表面応力層のモデル化

有限要素法解析ソフト ANSYS を用いて解析を行う。解析モデルを図 1 に、解析モデルの物性値を表 1 に示す。作成したモデルは、切断面の応力分布を評価するため、切断面に対する面対象モデルとする。また、面対象部のエッジにき裂を導入した。き裂先端が圧縮応力層の外部にある場合と、内部にある場合を比較するため、き裂寸法が 0.1×0.09 mm であるモデル A と、0.1×0.04 mm であるモデル B の 2 種類を設定した。図中に示す黒色部は、そのき裂を表している。また、モデルに与える材料物性値は表 1 に示すように、温度依存性を考慮しない一定値とした。応力-ひずみ曲線は弾性域と塑性域を 2 直線で近似し、塑性域の直線の傾きは 0 とした。解析に使用するメッシュは 16 節点六面体要素とし、メッシュサイズは 0.025 mm と 0.05 mm とした。

2・1 解析方法

ガラス表面の圧縮応力層は以下の行程でモデル化した。解析条件を表 2 に示す。まず、図 2 に示す解析モデルの上部と下部に、表 2 に示す冷却荷重を与えた。そして、モデル全体の垂直方向変位と平行軸周りの回転を拘束して応力解析を行い、モデル全体に塑性ひずみを発生させた。このとき、冷却荷重を与えたモデル上部と下部には、引張の塑性ひずみが生じることとなる。次に、塑性ひずみが生じたモデル全面の垂直方向変位と平行軸周りの回

転を拘束して、再び応力解析を行うことで、モデル上部と下部に圧縮応力層を生じさせることができる。本解析では、2 種類のき裂深さを考慮するため、各き裂深さで同じ圧縮応力層を作成できるように条件を検討した。表 2 に示すのは、検討して得られた条件である。

2・2 解析結果

モデル内部に生じた垂直方向の応力分布を、化学強化ガラスで実測した内部応力分布と併せて図 2 に示す。図から分かるように、解析で得られた応力分布と実測値とが良く一致している。したがって、この行程によって、モデル表面に圧縮応力層が付与できていることが分かる。圧縮応力の最大値、引張応力の最大値、圧縮応力層深さは、それぞれモデル A で 795 MPa, 58 MPa, 0.057 mm となり、モデル B で 776 MPa, 55 MPa, 0.044 mm となった。

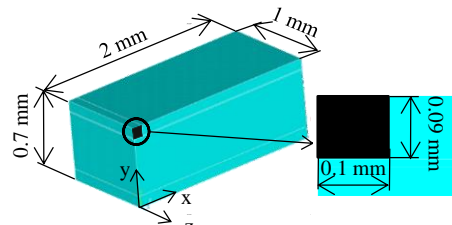


Fig.1 Analysis model

Table 1 Mechanical properties

Density	[kg/m ³]	2.3 × 10 ³
Young's modulus	[GPa]	69.3
Poisson ratio		0.22
Fracture toughness	[MPa·m ^{1/2}]	0.66
Thermal expansion coefficient	[K ⁻¹]	75.8 × 10 ⁻⁷
Thermal conductivity	[W/m·K]	0.75
Specific heat	[J/kg·K]	783

Table 2 Analysis conditions for making stress layer

Model	A	B
Type of element	Solid186	Solid186
Initial temperature [K]	293	293
Cooling temperature [K]	-8227	-7727
Yield stress [MPa]	800	800

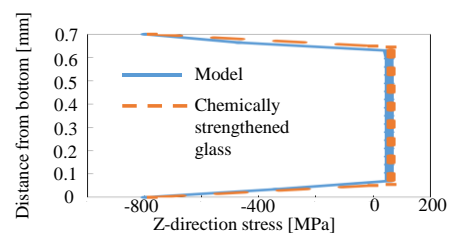


Fig. 2 Stress profile in model and chemically strengthened glass

3. レーザ切断時に生じるき裂周辺の熱応力分布解析

3・1 解析方法

レーザー照射時にガラス内部で生じる応力分布を求めるため、まず試料表面にレーザーを照射した際の温度分布を伝熱解析によって求め、得られた温度分布からき裂周辺に生じる応力分布を求めた。解析条件を表3に示す。伝熱解析では、試料表面に照射するレーザー径を600 μm とし、その内部に温度荷重を付加した。また、対流熱伝達はモデル上面とモデル側面に与えた。そして、伝熱解析を行い、得られた温度分布を温度荷重としてモデルに付加し、熱-応力連成解析を行った。このとき、き裂部を除いた面対象部の垂直方向変位を拘束した。圧縮応力層の有無による応力分布の変化を観察するため、表面応力層を付与した場合としない場合で上記の解析を行った。

3・2 解析結果及び考察

モデルに応力層を付加して、熱-応力連成解析を行ったときに得られたモデル全体の熱応力分布と、き裂部周辺の熱応力分布を図4に示す。き裂先端が圧縮応力層の外部にあるモデルAでは、き裂周辺の、圧縮応力層を超えた部分に引張応力が生じている。一方き裂先端が圧縮応力層の内部にあるモデルBでは、き裂周辺に引張応力は生じていない。これらの結果から、き裂が圧縮応力層の外部まで達している場合、き裂が先端から進展し、切断が可能であるということが分かる。また、き裂が圧縮応力層の内部にとどまっている場合、ガラスにレーザーを照射しても、き裂周辺に引張応力は生じず、切断できないことが分かる。

モデルAに圧縮応力層を付加せずに、熱-応力連成解析を行ったときに得られたモデル全体の熱応力分布と、き裂周辺の熱応力分布を図5に示す。図4と図5を比較すると、圧縮応力層の有無により、き裂周辺の応力分布に変化が生じていることが分かる。そこで、モデルAに対して、応力層の有無によるき裂底辺の熱応力分布を比較した結果を図7に、き裂右辺の熱応力分布を比較した結果を図8に示す。応力層の有無に関わらず、き裂底面でも最も高い引張応力値が生じた箇所はエッジ部であり、その値はほぼ同じであった。応力層がある場合、エッジ部からき裂先端部まで、引張応力値が一定値であるのに対し、応力層が無い場合は、エッジ部からき裂先端部にかけて、引張応力値が低下した。一方、き裂右辺では、応力層の有無により熱応力分布は大きく異なった。応力層がある場合、応力層内部では、圧縮応力が生じた。圧縮応力値はモデル上面で最も高い値であり、深さ方向に低下した。応力層を超えると引張応力が生じ、き裂先端で引張応力値が最も高い値になった。一方、応力層がない場合、モデル上面で最も高い引張応力値が生じ、モデル上面からき裂先端部にかけて引張応力値は低下した。これらの結果より、応力層の有無でき裂進展の開始位置が異なることが示唆される。応力層がない場合、き裂底辺のエッジ部に最も高い引張応力が生じるため、き裂はその点から進展を始めると考えられるが、応力層がある場合、き裂周辺の応力層を超えた部分にほとんど等しい値で引張応力値が分布しているため、き裂はき裂下部で同時に進展し始めると考えられる。

4. 結言

化学強化ガラスのレーザー切断に対して熱応力解析を行った。以下に、得られた結果を示す。

- (1) き裂深さが圧縮応力層深さを越えている場合、レーザー切断を行うことができる。
- (2) 応力層の有無によって、き裂進展の開始位置が異なる。

5. 参考文献

- (1) 山根正之他, “ガラス光学ハンドブック (普及版)”, pp.414-417.
- (2) Hisashi Ogi, Tatsuaki Furumoto, Tomohiro Koyano, Akira Hosokawa, “Study on Thermal Stress Cleavage of Chemically Strengthened Glass by CO₂ Laser Beam”, Procedia CIRP, Volume 42, 2016, Pages 460-463

Table 3 Analysis conditions for thermal-structure interactive analysis

Type of element	Solid90, Solid 186	
Initial temperature	[K]	293
Heat source temperature	[K]	573
Heat transfer coefficient	[W/m ² ·K]	9.3

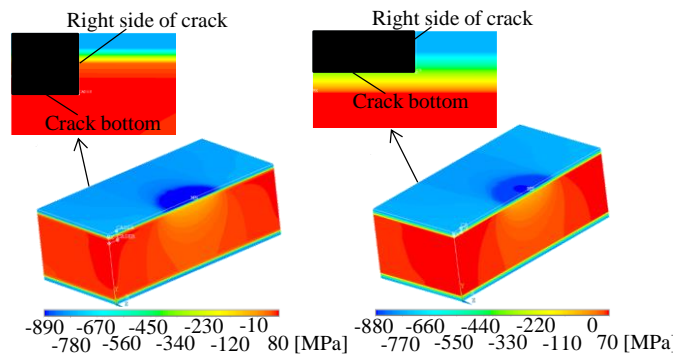


Fig. 3 Comparison of stress distribution at the position of crack tip

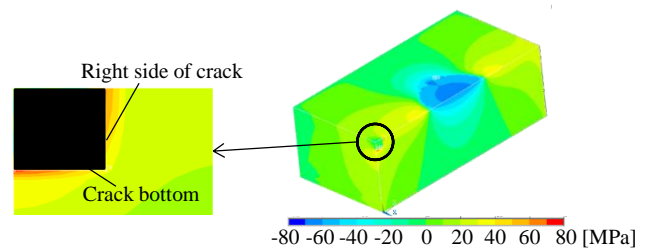


Fig. 4 Stress distribution at the crack tip of model without stress layer

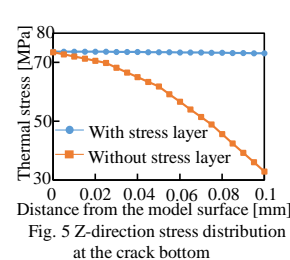


Fig. 5 Z-direction stress distribution at the crack bottom

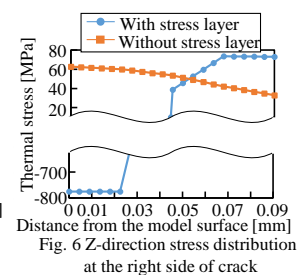


Fig. 6 Z-direction stress distribution at the right side of crack