レーザ照射を用いた熱応力割断による 矩形板ガラスの縁落し加工*

本 村 文 孝** 今 井 康 文*** 才 本 明 秀***

Using Laser-Based Thermal Stress Cleaving to Trim the Edges of Rectangular Glass Plates

Fumitaka MOTOMURA, Yasufumi IMAI and Akihide SAIMOTO

When trying to trim the edges of a rectangular glass plate using thermal stress cleaving, the resulting crack path does not typically remain straight but will bend towards the nearby edge --- even though the path of the moving heat source lies parallel to the edge. This effect is brought about by the formation of a mode II stress singularity at the crack tip. Two dimensional finite element analysis of the transient thermal stress field shows that the mode II stress intensity factor varies according to the relative position of the heat source with respect to the cleaving line. Based on this analysis, three types of heat source profile are proposed to keep the cleaving path straight and parallel to the edge: a circular heat source, double circular heat sources, and a rectangular heat source.

Key words: thermal stress cleaving, finite element analysis, mixed mode stress singularities, body force method

1. 緒 言

ガラス薄板のような脆性材料の切断に熱応力割断は有利であり、矩形板の対称線上を割断する場合、熱源を直線的に移動させると、き裂は熱源中心移動線上を進展し、高い直進性と高い破面強度が得られる。しかし矩形板の縁落し加工では、割断予定線が極端に端面に近い場合、熱源を端面と平行に移動させても、き裂は端面側へ湾曲する。これは線形破壊力学における混合モード下のき裂進展により説明され、せん断型の応力特異性を考慮する必要があることが示されている。端面近傍の熱応力割断においては、冷熱源を併用した割断経路の制御に関する研究¹⁾がある。

本論文では熱応力割断における縁落し加工を対象とし、矩形板から端面と平行な割断面を得るための加熱方法を検討するため、二次元熱応力有限要素解析をおこなった。加熱方法として、単一円熱源、複数円熱源、単一長方形熱源の3種類を選び、せん断型の応力特異性を打ち消すような加熱条件を提案した。

2. 割断線の湾曲

単一の炭酸ガスレーザを熱源に用い、矩形板ガラスの端面近傍を端面と平行に移動させたときの割断形状を図1に示す。図1は板長×板幅×板厚(300mm×400mm×1mm)のソーダガラスの、縁落し加工後の切れ端であり、レーザ照射熱量30W、照射直径3mm、熱源移動速度15mm/sの元、板幅400mmに対して5mmの位置を板長300mmと平行に、熱源中心が移動したときである。割断経路は熱源中心移動線よりも下端面側に湾曲した。割断開始直後から下端面側にずれ始め(図1(a))、板長の間部分では下端面とほぼ平行に進展した(図1(b))後、終端面に近づくにつれ熱源中心移動線に近づき、割断面は全体として弓なり形となった。湾曲の度合いはガラス寸法における割断予定線の位置によって異なり、対称割断における割断経路を湾曲無しとして、下端面に近づくほど、湾曲の度合いも大きくなった。ただし縁落し幅の最小部が板厚より細くなるような割断は困難であった。また照射直径や熱源移動速度などのレーザ照射条件によっても、割断経路は異

Fig.1 Trimming of an edge in thermal stress cleaving

なることが観察された。本論文では湾曲という現象に注目し、割断位置およびレーザ照射条件を固定して、数値解析をおこなった。

3. 特異応力場の有限要素解析

3.1 要素分割と応力拡大係数の評価

き裂進展経路が湾曲するのは、き裂先端に生じるせん断型の応力特異性がゼロとなるようにき裂が進展経路を選択しているためと考えられる。

応力拡大係数について簡単に説明する。き裂進展方向を x 軸とした直交座標系にて、き裂先端近傍では応力場に $r^{-1/2}$ の特異性 (r はき裂先端からの距離) が現れ、各応力成分は応力拡大係数により、次式のように表される。

$$\sigma_x = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} \left(1 - \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3\theta}{2} \right) - \frac{K_{II}}{\sqrt{2\pi r}} \sin \frac{\theta}{2} \left(2 + \cos \frac{\theta}{2} \cos \frac{3\theta}{2} \right) \quad (1)$$

$$\sigma_y = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} \left(1 + \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3\theta}{2} \right) + \frac{K_{II}}{\sqrt{2\pi r}} \sin \frac{\theta}{2} \cos \frac{\theta}{2} \cos \frac{3\theta}{2} \quad (2)$$

$$\tau_{xy} = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} \sin \frac{\theta}{2} \cos \frac{3\theta}{2} + \frac{K_{II}}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} \left(1 - \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3\theta}{2} \right) \quad (3)$$

ここで、 θ はき裂延長線上から反時計回りを正とする角度である。また K_I はモード I (開口変形)、 K_{II} はモード II (せん断変形)

* 原稿受付 平成 21 年 2 月 12 日

** 正 会 員 長崎大学 (長崎県長崎市文教町 1-14)

*** 長崎大学

形)の応力拡大係数と呼ばれ、き裂進展の開始や進展方向の目安となる破壊パラメータである。

混合モードの特異熱応力場を解析するために、有限要素法による二次元熱弾性解析をおこなった。解析に用いた要素分割を図2に示す。モデル寸法は300mm×400mm×1mmであり、割断予定線は下端面から5mm上方である。均一加熱密度を有する熱源が、図中の左側面 $x=0$ mmより熱源移動速度15mm/sにて、板長の半分 $x=150$ mmまで移動したときであり、総要素数は10,075、総節点数は30,666である。解析では直径3mmの単一円形、複数円形、細長比 b/a (短辺 a mm, 長辺 b mm)の単一長方形の3種類の移動熱源によって生じる非定常温度場を熱源形状によらず、同じ要素分割にて計算し、任意の熱源中心位置に対する熱応力場を算出した。要素分割は応力拡大係数を精度良く評価できるように、き裂先端の要素サイズは1.0mmの正方形と細かくし、熱源後方の任意位置にき裂先端があるときの応力拡大係数 K_I 、 K_{II} を評価した。また非定常温度場の計算における時間差分では、温度分布が発散しないようにタイムステップを細かくした。

解析に用いたソーダガラスの室温における熱物性値および材料物性を表1に示す。解析では諸物性の温度依存性は無視した。熱的境界条件として、板表面からの自然放熱は考慮したが、き裂面は断熱境界とした。二次元熱応力有限要素解析には8節点アイソパラメトリック要素を用いた。応力拡大係数の算出には仮想き裂閉口積分法(VCCM)²⁰⁾を用いており、き裂先端前後の要素寸法を揃える必要性から、き裂進展方向に広い範囲で等分割した。また熱弾性問題にVCCMを用いる場合、得られた熱弾性変形に対して、き裂先端前後の2要素のみを使って、剛性方程式を再構築し、き裂前縁の節点力を評価した。エネルギー解放率の評価に際しては、節点力から温度上昇による初期ひずみの寄与分を差し引く必要がある。

3.2 単一円熱源により割断線を直線に保つ加工法1

図3は割断予定線が $y=5$ mmであり、加熱量30W、熱源直径3mm、熱源移動速度15mm/sの単一円熱源の元、熱源中心が割断予定線上の $y=5$ mmにあり、 $x=150$ mmまで移動したとき、熱源後方任意の位置にき裂先端があるときの応力拡大係数である。き裂先端が熱源中心の極近傍にあるとき、 K_I は負となり、き裂はこれ以上熱源に近づくことができない。き裂先端が熱源から離れた位置にあれば、 K_I は増加し、熱源後方7mmにて極大値となった。進展中のき裂先端は K_I が破壊靱性値 K_{IC} を越える範囲にあると考えられ、き裂先端は K_I 極大値の右側、 $K_I=K_{IC}$ となる位置にある。一方 K_{II} はゼロとならず、き裂先端位置に関わらず常に正值となった。き裂は K_{II} がゼロとなるように進展すると仮定すると、このような熱源中心とき裂先端の位置関係は実在しないといえる。以降、熱源中心の移動軌跡を熱源経路と呼ぶことにする。この熱源経路にて移動させた場合の割断経路は熱源経路よりも、下端面側にあることになる。

次に熱源中心がき裂延長線上ではなく、下端面から $y=6$ mm上にある場合の応力拡大係数を図4に示す。加熱条件は図3と同じである。図3と比べ、加熱源近傍にあるき裂先端の K_I のレベルは下がるが、 K_{II} はほぼゼロとなるき裂先端位置が存在する。 K_{II} がゼロとなる範囲で、 K_I が K_{IC} 以上であればき裂進展が可能である。本加熱条件の元、熱源を割断予定線より1mm下端面と反対側にシフトして移動させることで、下端面と平行な割断線が得られると予想される。以下、割断予定線上をき裂が進展するための割断予定線から熱源中心までの y 方向への垂直距離をオフセット量と呼ぶことにする。オフセット量は加熱源直径や熱源移動速度

等の加熱条件や割断予定線の位置およびモデル寸法によっても異なり、さらに割断中の熱源中心位置によって変化する。割断経路が下端面と平行となる熱源経路を求めるためには、移動する熱源中心毎に K_I と K_{II} を評価する必要がある。しかし熱物性等の温度依存性を無視することで、応力拡大係数と加熱量の比例関係を用いることができるので、 $K_{II}=0$ となる熱源のオフセット量は加熱量には影響されない。なぜなら、 K_{II} がゼロとなるき裂先端の位置は加熱量に無関係であり、 K_I のレベルは加熱量の増減で調整できるからである。

Fig.2 Element division for the FEM analysis

Table 1 Thermal and mechanical properties of soda lime-glasses at room temperature

Fracture toughness K_{IC} MPam ^{1/2}	0.75
Thermal Conductivity λ W/(m K)	1.04
Thermal Diffusivity κ 10 ⁻⁶ m ² /sec	0.497
Heat Transfer Coefficient h W/(m ² K)	60
Young's Modulus E GPa	70.2
Coefficient of Linear Thermal Expansion α 10 ⁻⁶ /K	3.73
Poisson's Ratio ν	0.24

Fig.3 Stress singularities of a crack on $y=5$ mm line when a heat center is $x=150$ mm and $y=5$ mm

Fig. 4 Stress singularities of a crack on $y=5\text{mm}$ line when a heat center is $x=150\text{mm}$ and $y=6\text{mm}$

図5はオフセット量の導出手順の説明図である。図3と同様の加熱条件のもと、き裂先端の座標 $(x, y) = (150, 5)$ にある場合である。このとき熱源中心座標を (α, β) とし、 $150\text{mm} \leq \alpha \leq 160\text{mm}$ 、 $5.0\text{mm} \leq \beta \leq 7.5\text{mm}$ の範囲で、熱源中心位置が変化したときのき裂先端における応力拡大係数 (K_I , K_{II}) を (α, β) の座標上にプロットした等強度分布を示している。 K_I は $0.65 \text{ MPa}\sqrt{\text{mm}} \leq K_I \leq 0.85 \text{ MPa}\sqrt{\text{mm}}$ の範囲で、 K_{II} は $-0.05 \text{ MPa}\sqrt{\text{mm}} \leq K_{II} \leq 0.05 \text{ MPa}\sqrt{\text{mm}}$ の範囲のみを表示した。 $K_{II}=0$ かつ $K_I=K_{IC}$ となる熱源中心座標は $(156.6, 6)$ となっている。これよりオフセット量 1mm にて、熱源が $x=156.6\text{mm}$ まで移動したとき、き裂先端は $x=150\text{mm}$ 、 $y=5\text{mm}$ にあると推定される。

図6は図5の手順に従い、熱源移動に伴い、き裂先端位置毎に変化するオフセット量を求め、推定された熱源中心位置を結んでおり、図中の●で示す。図中の○は推定された熱源中心とき裂先端の水平距離であり、 d とする。割断開始部と終端部でのオフセット量はほぼゼロとなり、板長の間中部付近でのオフセット量はほぼ 1mm の弓なり形となった。また d は板長の間中部にて最大となった。ここで、図1の熱応力割断による割断形状と比べてみると、熱源を下端面と平行に移動したときに得られた割断形状は図6の熱源経路を割断予定線に対して、上下対称とした形状に非常に近いことがわかった。

そこで体積法によるき裂伝ば解析ソフトを用いたシミュレーション⁴⁾⁵⁾をおこなった。解析範囲は熱源中心位置が $x \leq 30\text{mm}$ と、オフセット量の変化が大きな範囲である。図7(a)は割断予定線を熱源が移動した場合のき裂進展経路の解析結果である。このき裂伝ば経路を割断予定線に対して上下対称にすると、図7(b)中の■ (flip) のようになり、これを熱源経路として用いると、き裂進展経路の解析結果は図7(b)中の□ (flip) で示すようになった。また、図6のFEM解析によるオフセット量を用いると、熱源経路は● (estimated) で表され、き裂進展経路の解析結果は○ (estimated) に示すようになった。解析条件として、初期き裂長さ 1mm 、初期熱源中心位置は $x=3\text{mm}$ 、 x 方向の熱源移動速度を 15mm/s と揃え、タイムステップ 0.2s にて移動する熱源中心位置毎に得られる温度分布を用いて、逐次進展するき裂先端の応力拡大係数を評価し、局所対称基準 ($K_{II} \geq K_{IC}$ かつ $K_{II}=0$) によりき裂伝ば経路を求めた。結果として、□ (flip) の方が○ (estimated) よりもき裂進展初期における下端面側への湾曲が抑えられ、割断予定線に近いき裂伝ば経路となり、熱源が下端面と平行に移動したときに得られる割断経路を適用した熱源経路が有利であること

Fig. 5 Contour map to estimate the heat center position which gives $K_{II}=0$ and $K_I=K_{IC}$

Fig. 6 Offset value and distance, d between a heat center and a crack tip to obtain a straight crack path

(a) Crack path for a straight heat path

(b) Crack paths for modified heat paths

Fig. 7 Estimated crack path by the body force method

がわかった。しかし FEM 解析によるオフセット量を利用した場合のき裂伝ば経路の湾曲はわずかであり、湾曲が顕著なのはき裂先端位置が $x \leq 20\text{mm}$ の範囲であった。この湾曲の理由として、有限要素解析において各熱源中心位置に対して得られた応力拡大係数は、熱源が $x=0$ からオフセット量一定として移動した場合であり、オフセット量に変化する範囲に熱源中心位置がある場合は y 方向の移動を考慮する必要があるためと考えられる。次節以降ではオフセット量の変化に伴う不具合を解消する加工法について述べる。

3.3 割断線を直線に保つ加工法 2 (複数の円熱源を用いた場合)

割断中の熱源中心位置を割断予定線からずらす方法以外にも、割断線を直線に保つ方法が考えられる。ただし、これ以降も熱源が板長の中間部付近まで移動したときに限定して議論するが、板長の中間部付近まで熱源中心が移動したとき、熱源中心とき裂先端の水平距離は割断中の熱源中心位置に対して最大となり、板長の中間部付近にき裂進展条件が満足されれば、モデル全長にて割断可能であると言える。

図 8 は加熱量 30W 、熱源直径 3mm 、熱源移動速度 15mm/s の元、単一の円熱源について、 $x=150\text{mm}$ まで移動した熱源中心の後方 7mm にき裂先端があるとき、 y 方向の熱源中心位置を 5mm から 8mm まで変化させたときの K_I 、 K_{II} の分布である。ここでは K_{II} の分布に注目する。図中の A 点 ($y=5\text{mm}$) は割断予定線上に熱源がある場合であり、 K_{II} は約 $1.2\text{MPa}\sqrt{\text{mm}}$ である。B 点 ($y=6\text{mm}$) で K_{II} がゼロになり、単一の熱源を用いる場合 B 点

Fig.8 Variation of stress singularities at a crack tip. Heating position changes between $y=5\text{mm}$ and $y=8\text{mm}$.

Fig.9 Stress singularities at a crack tip for double circular heat sources

に熱源中心があればよかった。さらに熱源中心位置が y 方向に移動すると、 K_{II} は負の値を示すようになる。そこで 2 個の円熱源を用いた割断経路の制御を考える。例えば C 点 ($y=7\text{mm}$) に熱源を置くことで、A 点にある熱源によって生じる正の K_{II} を打ち消すことができる。2 点を同時加熱することによって生じる K_{II} を足し合わせてゼロとすればよい。

図 9 は y 方向の熱源中心位置を A 点 ($y=5\text{mm}$) と C 点 ($y=7\text{mm}$) に固定し、全加熱量 30W の元、A 点と C 点の K_{II} の総和がゼロとなるように加熱量を $Q_A=8.7\text{W}$ 、 $Q_C=21.3\text{W}$ と定めたときの、熱源後方のき裂先端における応力拡大係数である。 K_I が熱源近傍側から極大値となるき裂先端の範囲で、 K_{II} はほぼゼロとなった。この加熱方法は熱源の y 方向位置を固定しているので、単一加熱源のような割断開始部および終端部におけるオフセット量の変化に伴う不具合は生じず、割断中の各熱源中心位置に対して、加熱比を連続的に変化させればよい。

3.4 割断線を直線に保つ加工法 3 (長方形熱源を用いた場合)

複数の円形熱源による同時加熱以外にも K_{II} をゼロとすることができる。図 8 のハッチングのように、 K_{II} によってできる面積の総和がゼロとなるような領域を加熱すればよい。図 8 より求められた加熱領域は 2.5mm である。この加熱領域は円形熱源に対して得られた応力拡大係数であり、熱源形状として長方形を用いる場合、オフセット量と加熱領域中心は異なってくると考えられるので、厳密には熱源寸法の決まった長方形熱源に対する応力拡大係数から見積もる必要がある。ここでは短辺 $a=1\text{mm}$ に対して長辺 b を加熱領域より短辺分だけ伸ばした長方形熱源とすることで、熱源直径 3mm の円形熱源に近づけ、熱源形状の影響を減じた。

Fig.10 The shapes of rectangular heat source

Fig.11 Stress singularities for a rectangular heat source whose center of rotation is $x=150\text{mm}$ and $y=5\text{mm}$

図 5 からわかるように、 K_{II} がゼロとなるオフセット量は K_I が K_{IC} を超える範囲で熱源とき裂先端の距離 d に影響されずほぼ一定であり、図 10 に示す 3 種類の長方形熱源のように、オフセット量を加熱領域の半分である 1.25mm に揃えれば、どのような熱源形状でも構わない。短辺 a mm、長辺 b mm の長方形熱源に対して、長方形熱源の細長比 b/a と割断予定線上と熱源中心線の交点を中心とした回転角 θ の 2 つのパラメータを変えることで、複数熱源を用いた場合と同じような効果を示すと考えられる。

図 11 は図 10 の $\theta=90^\circ$ 、 60° 、 30° の 3 種類の長方形熱源について、各熱源の割断予定線上の回転角中心が $x=150$ mm まで

Fig.12 Stress singularities for a rectangular heat source whose center of rotation is $x=20$ mm and $y=5$ mm

Fig.13 Heating image using the rotating rectangular heat source to achieve a straight crack path

移動したときの応力拡大係数である。長方形熱源を用いても、 K_I が K_{IC} を超える範囲で、 K_{II} がほぼゼロとなる範囲が存在することが確認できた。 K_{II} がゼロとなる加熱領域はき裂が進行方向のどの位置まで移動したかでも変わる。図 12 は割断予定線上の回転角中心が $x=20$ mm と、熱源移動距離が短い場合である。図 11 と比べて、加熱領域は 1mm、オフセット量は 0.5mm と小さくする必要があり、 $a=1$ mm にて $b=4$ mm のとき、 $\theta=20^\circ$ となる。移動する熱源中心位置に応じて、回転角を連続的に変化させることで、下端面と平行な直線割断が可能となる。

図 13 は長方形熱源を用いて、下端面と平行に割断するときの加工想定図である。割断開始直後の回転角 θ がゼロの状態から、熱源移動にともない回転角を増やし、中間部にて $\theta=90^\circ$ 、中間部から終端部にかけては回転角をさらに増やし、 $\theta=180^\circ$ にて初期形状に戻る。図中の割断方向に対して、回転方向を反時計回りにとり、長方形熱源の細長比を決めるとよいと考える。

4. 結 言

二次元熱応力有限要素解析をおこない、せん断型の応力特異性 K_{II} がゼロとなるようにき裂が進展したと考えることで、き裂進展経路をうまく説明できることを確認した。また矩形ガラスの縁落し加工における加熱方法として、熱源経路の変化を伴う単一円熱源を用いた場合、2 つの熱源間の加熱量比を変化させる複数円熱源を用いた場合、熱源の細長比と回転角を制御パラメータとする長方形熱源を用いた場合の 3 種類について提案した。

参 考 文 献

- 1) 今井康文, 才本明秀, 本村文孝: 移動熱源による自由縁近傍の熱応力割断, 日本機械学会論文集 (A), **68**, 670 (2001) 993.
- 2) 町田賢司, 菊池正紀, 松島保明: 混合モード三次元き裂のき裂先端特異場の研究 (第 1 報, 変位外挿法, J 積分, き裂開口積分法による応力拡大係数, J 積分の比較), 日本機械学会論文集 (A), **61**, 581 (1995) 1.
- 3) 今井康文, 才本明秀, 本村文孝: き裂開口積分法における零のき裂進展量によるエネルギー解放率の評価, 日本機械学会論文集 (A), **72**, 719 (2006) 1003.
- 4) H. Nisitani et al.: Versatile Method of Analysis of Two-Dimensional Elastic Problem by Body Force Method, Proceedings of the First International Conference on Computer-Aided Assessment and Control of Localized Damage. Vol.3, (1990) 33.
- 5) 西谷弘信, 陳耿珩, 才本明秀: 体積法による二次元応力解析汎用プログラム (パソコン・WS 用プログラム BFM2D.FOR 解説), 培風館 (1994).