

熱応力解析に基づくき裂進展制御によるぜい性材料のレーザー切断

長岡技術科学大学 ○宮下 幸雄 長岡技術科学大学[院] 長谷川広尊
長岡技術科学大学 武藤 睦治

1 緒 言

機能性材料は、様々な産業分野において、その応用がますます期待されており、実用を考えた場合には、加工技術が重要である。しかし、機能性材料の多くはガラスやセラミックスなど、ぜい性材料であり、難加工材である。例えば、ガラスの切断加工に用いられている、スクライブ法やダイヤモンドツールによる切削加工は、生産性に優れているが、マイクロクラックの発生や切削液・切削粉の飛散、また、任意形状加工が難しいといった問題点がある。他方、レーザー照射により生じる局所的な熱応力を利用し、ぜい性材料を切断する手法が提案されている。この手法によれば、上述のような切削加工における問題がなく、また、理論上、任意形状加工も可能である。しかし、これまでの報告によると、レーザー照射位置と実際のき裂進展経路が大きくずれるため、精密切断には至っていない^{1)~3)}。これは、言い換えると、切断中のき裂進展挙動を制御することができていない、ということの意味している。線形破壊力学に基づけば、とくに、ぜい性材料の場合、き裂の進展挙動は応力拡大係数に支配されており、き裂の進展開始条件や進展方向などを予測することが可能である。本報告では、有限要素法による熱応力解析と破壊力学的な検討に基づき、き裂進展挙動をコントロールし、ぜい性材料を精密切断する手法を提案する。

2 レーザ切断実験

レーザー切断実験には公称最大出力 4kW の YAG レーザ加工機 (iLS-YC-40A, IHI 製) を用いた。出力は安定出力範囲の最低値 0.5kW とし、材料の熔融を避けるためデフォーカスさせた。供試材としてソーダライムガラスを使用した。供試材の機械的性質⁴⁾を Table 1 に示す。YAG レーザの波長は 1.06 μm と短く近赤外光であるためガラスの透過率は非常に高い。レーザー光路中にソーダライムガラスを挿入した時の出力損失分から計算した結果、吸収率は約 5.5%であった。40 \times 20 \times 1.77mm のガラス板を、Fig.1 に示すように治具に固定してレーザー割

Table 1 Physical and mechanical property of glass.

Softening temperature [°C]	730
Thermal conductivity [W/mK]	1.03
Density [kg/m ³]	2520
Thermal diffusivity [mm ² /sec]	0.47
Specific heat [J/kg]	800
Heat transfer coefficient [W/m ² K]	10
Thermal expansion coefficient [$\times 10^{-6}\text{K}^{-1}$]	8.7
Reflectivity [%]	4
Young's modulus [MPa]	7160
Poisson ratio	0.23
Plane-strain fracture toughness [MPa ^{1/2}]	0.83

断実験を行った。実験前にあらかじめ、試験片のレーザー照射開始位置に切欠を導入し、き裂が発生しやすいようにした。レーザーを試験片端部から 10mm 直線状に照射した後、レーザー照射方向 ψ を 0°、30°、60° および 90° と変え、その時のき裂進展経路を調べた。

Fig.2 に例として、 ψ を 90° とした場合の実験結果を示す。き裂は、レーザースポットの後方を追従し進展したが、レーザーの走査方向が変化すると、レーザー走査経路からはずれた。同様に、他の照射方向の場合もき裂進展経路はレーザー走査経路から大きくずれ、また、いずれの場合も、き裂進展経路がレーザーの走査経路からずれ始める位置とレーザースポットとの距離は 1.4mm であった。なお、レーザーを直線状に走査させ、途中でレーザー照射を停止した場合に測定したき裂先端位置とレーザースポットの距離も 1.4mm であった。以上の結果より、本実験の照射条件では、き裂先端はレーザースポットから約 1.4mm 後方にあると考えられ、レーザー照射方向を変えた場合には、き裂先端近傍の主応力方向が変化し、そのため、き裂がレーザー走査経路を追従しなかったと推察される。

3. FEM 解析

き裂進展経路およびき裂進展挙動を解析上で予測した。 K_{I1} 、 K_{II1} の算出には熱応力解析データおよび式(1)、(2)を用いた。ここで σ および τ は、き裂方向に働く垂直応力およびせん断応力、 r はき裂先端からの距離、 a は試験片端部からのき裂長

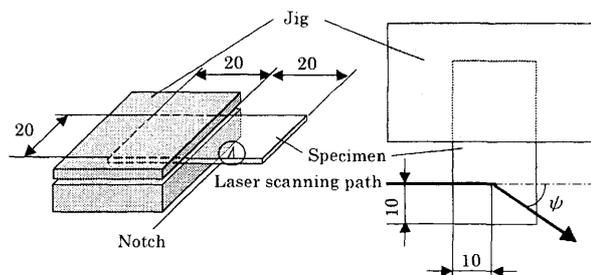
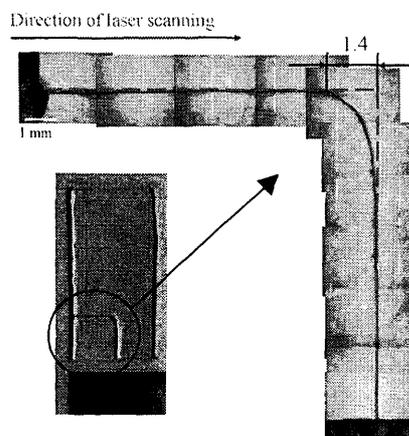


Fig.1 Schematic of laser cutting experiment.

Fig.2 Comparison between laser scanning path and crack growth path at $\psi=90^\circ$.

さである。き裂は Fig.3 に示す σ_θ が最大となる、式(3)の θ_0 方向に進展し、式(4)によって導かれる $K_{\theta_{max}}$ が K_{Ic} に達するときき裂が進展するとした⁵⁾。なお、解析には汎用有限要素解析ソフト ABAQUS を用いた。

$$K_I = \lim_{r \rightarrow 0} \sqrt{2\pi r} \sigma \quad (1)$$

$$K_{II} = \lim_{r \rightarrow 0} \sqrt{2\pi r} \tau \quad (2)$$

$$\theta_0 = 2a \tan \left[\frac{K_I}{K_{II}} - \sqrt{\left(\frac{K_I}{K_{II}}\right)^2 + 8} \right] / 4 \quad (3)$$

$$K_{\theta_{max}} = \cos \frac{\theta_0}{2} \left[K_I \cos 2 \frac{\theta_0}{2} - \frac{3}{2} K_{II} \sin \theta_0 \right] \quad (4)$$

レーザー照射を熱流束として与え、実験と同様に、試験片モデル端部から 10mm 直線状に照射した後、照射方向 ψ を変えた。例として、FEM 解析より求めた $\psi=90^\circ$ におけるき裂進展経路を Fig.4 に示す。 ψ を変える位置でき裂進展経路はレーザー走査経路から大きくずれており、上述の実験結果とほぼ一致した。き裂進展挙動を制御するためには、レーザー走査経路とき裂進展経路とのずれを予め予測し、その分の補正を加えた位置へレーザーを照射する手法が考えられる。しかし、各々の加工条件に合わせたレーザー照射方向とき裂進展方向のずれを予め解析と実験により全て把握することは現実的ではなく、また、レーザー照射位置の修正が複雑になり、任意形状割断はきわめて難しい。本研究では、以下に示すように、より積極的にき裂進展方向を制御する手法を有限要素解析により検討した。

4. ツインビーム

本研究では、任意方向へき裂を進展させるために、2 点熱源、すなわちツインビームの利用を FEM 解析により検討した。Fig.5 に示すように、レーザー照射方向に対して垂直方向に配置するクロスビームと平行方向に配置するインラインビームの 2 種類の手法でツインビームを照射し、照射方向を変えた場合についてき裂進展挙動を検討した。レーザー割断実験と同

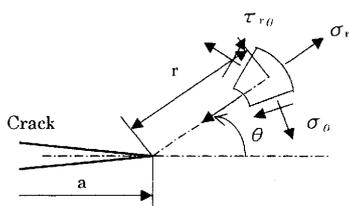


Fig.3 Stress components near crack tip in polar coordinate.

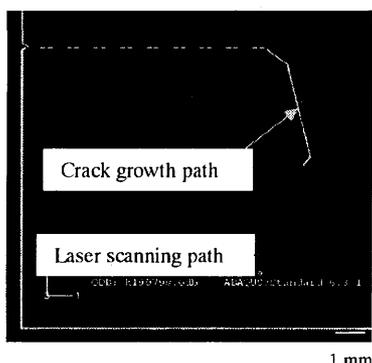


Fig.4 Crack growth path obtained by FEM analysis at $\psi=90^\circ$

様に 10mm まで直線状にレーザーを照射した後、き裂先端を中心にビームの照射方向 ϕ を 30° に変え、同時にツインビームの強度比を変えたときのクロスビームの解析結果を Table 2 に示す。同表より、クロスビームの場合、レーザー照射条件の変化に対して、 θ_0 の変化はほとんど認められず、上述のシングルビームと同様にき裂進展方向を制御することは困難であると推測される。同様に、解析を行ったインラインビームの結果を Table 3 に示す。インラインビームの場合、ツインビームの強度比を調整することにより θ_0 を変化させることが可能であった。各レーザー照射方向 ϕ に対して、き裂進展方向 θ_0 を近づけたときの強度比を Fig.6 に示す。同図より、大きな角度にき裂の進展方向を変化させるためには、後方のビーム強度を大きくすることが有効であることがわかる。以上の結果より、インライン・ツインビームにより、き裂進展方向を制御することが可能であると考えられる。

結言、参考文献；省略。

謝辞 本研究は、文部科学省 21 世紀 COE プログラムに関連して行われた。関係各位に感謝の意を表する。

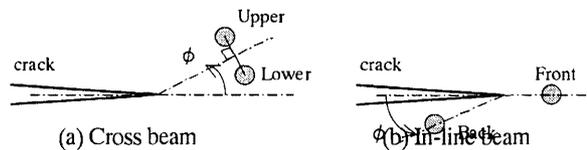


Fig.5 Schematic illustration of twin beam.

Table 2 Intensity ratio of the beams and crack growth direction θ_0 on applying cross beam at $\Phi=30^\circ$.

intensity ratio of beams	K_I	K_{II}	$K_{\theta_{max}}$	θ_0
upper : lower	[MPa \sqrt{m}]			[deg]
1 : 1	1.55	0.23	1.60	16
2 : 3	1.55	0.23	1.60	16
1 : 2	1.55	0.24	1.60	17

Table 3 Intensity ratio of the beams and crack growth direction θ_0 on applying in-line beam at $\Phi=30^\circ$.

intensity ratio of beams	K_I	K_{II}	$K_{\theta_{max}}$	θ_0
front : back	[MPa \sqrt{m}]			[deg]
1 : 1	1.74	1.06	2.41	44
3 : 2	2.07	0.84	2.49	36
2 : 1	2.29	0.70	2.57	30

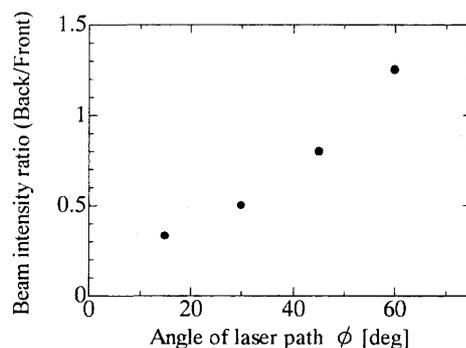


Fig.6 Relationship between intensity ratio and angle of laser path, ϕ .