

ガラス基板のレーザー切断加工における応力分布逐次観察法の開発

広島大学大学院 工学研究科

教授 山田 啓司

(平成 28 年度 一般研究開発助成 AF-2016215)

キーワード：レーザー切断，光弾性，熱応力

1. 研究の目的と背景

レーザーを熱源とした熱応力切断加工（以下、レーザー切断加工と呼ぶ）は、レーザー照射点周りの熱応力を利用して初期き裂を進展させ、所望の形状に硬脆材料基板を分断する方法である。レーザー切断加工は、カーフロスが小さく、基板の汚染がなく、高速加工が可能である等、原理上の利点を持ち、薄刃砥石による切断加工に置換されれば生産性への貢献は大きい¹⁾。

上記の加工原理によれば、基板にき裂を進展させ続けるに十分な熱応力を継続的に生じさせることが求められる。このために、レーザー照射と同時に基板の一部を冷却したり²⁾、与圧を付する³⁾等の対策を講じて熱応力を高めたり、切断は初期欠陥の導入のみに限定的に利用し、外力をかけて基板を切断する⁴⁾等の後工程が追加されている。

さらに、加工原理によれば、基板中を進展するき裂を制御して精度の高い加工を実現するためには、基板に生ずる熱応力分布を制御しなければならないが、基板端面近くを切り落とすトリミング加工において生ずる応力分布の不均衡⁵⁾のため、精度の低下が起り、現在も課題となっている。

このため、レーザー切断中のき裂周辺に注目して応力分布を理論解析した研究事例は多い⁶⁾。応力分布を発生させる温度を得るためにはレーザー光吸収率推定値を必要とするが、照射部温度の上昇に伴って、この吸収率が変動することが正確な温度場を計算することを困難にしている。このため、温度場を乱さない非接触な方法を用いて、照射部温度を測定することで吸収率の温度依存性を考慮し、応力分布を理論解析した研究事例もある⁷⁾。しかしながら、いずれの理論的解析手法においても、事前に最適な加工条件を予測することは可能であるが、加工中に生じる予期しない外乱によって誘発される応力分布の乱れに対しては有効ではなく、加工中に随時加工条件を制御するなどすることで加工誤差を修正して加工品質を維持することはできない。

そこで、本研究においては、ガラス基板を対象としたレーザー切断加工において、加工中に応力分布をリアルタイム観測する実験システム開発するとともに実験手法を確立し、これを適用してガラス基板の切断加工の精度向上に資することを目的とする。

2. 実験方法

2・1 レーザー切断加工の原理

図1には、レーザー切断加工の基本原則を示している。硬脆材料基板にレーザー光を照射、一定速度で走査するとレーザースポットと共に周囲の熱応力分布も一定速度で移動する。この応力分布は、スポット中心付近では熱膨張のために圧縮応力場となっており、その周囲には円周方向の引張応力場を形成している。基板に導入した初期欠陥を通過するようにレーザースポットを走査すれば、円周方向の引張応力によってき裂は開口してスポット中心に向かって進展する。固体中を進展するき裂の速度は、音速に近いといわれていることから、レーザースポット走査速度よりもはるかに高く、進展したき裂はスポットに追いついてしまう。ただし、スポット中心部の圧縮応力場に妨げられるため、スポットを追い越して進展することはない。したがって、き裂はレーザースポットの後方を追従して間欠的に進展することとなり、曲線状に走査すれば硬脆基板を曲線状に切断することができ、端部に近い箇所を切断すればトリミング（切り落とし）加工が可能となる。

き裂を進展させるためには、き裂先端における応力拡大係数が基板材料の破壊靱性値に達する必要がある。たとえば、図2には、シリコンウエハを切断加工した際のAE信号（上段）、レーザースポット中心温度（中段）、応力拡大係数（下段）の変化を示している⁷⁾。レーザー照射開始から

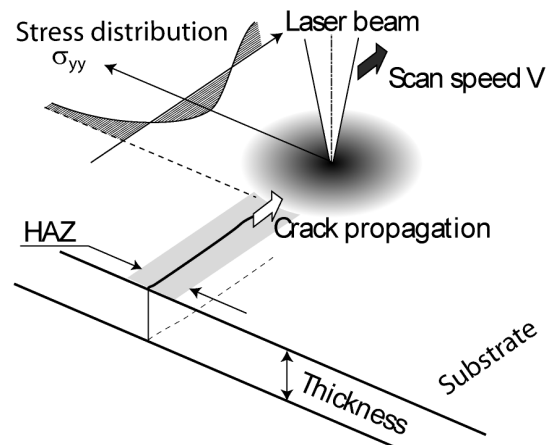


図1 レーザー熱応力切断加工の原理

スポット温度は急速に上昇し、これに伴って応力拡大係数 K_I も上昇していることが分かる。そして、この条件下では、照射開始から 1.1ms 後、スポット温度が 396°C に達したときに AE 波が観察され、き裂が進展している。このときのき裂先端の応力拡大係数は、Si ウエハの破壊靱性値であ

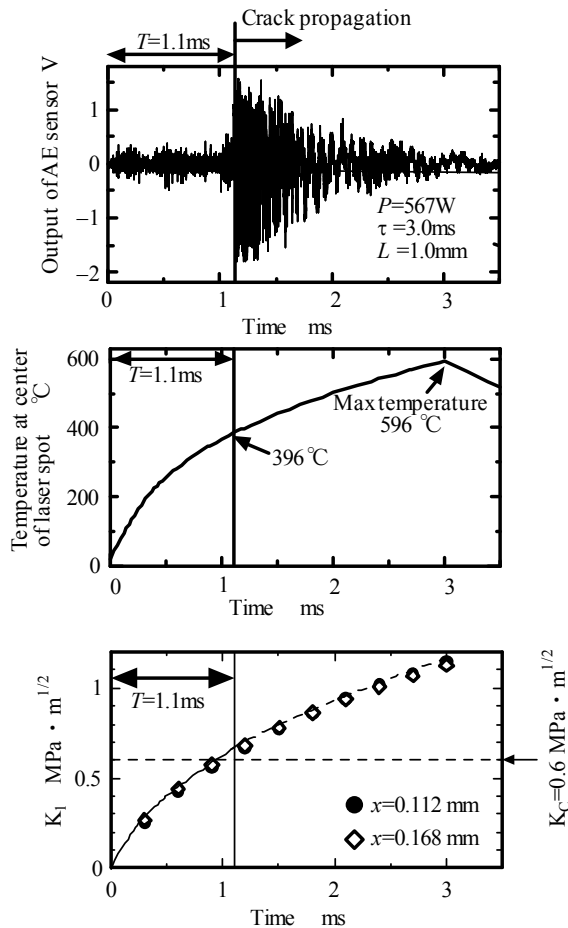


図 2 レーザ切断加工中のき裂先端における応力拡大係数 (Si ウエハ, Nd:YAG レーザ) ⁷⁾

る $K_{Ic}=0.6\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ によく一致しており、前述の機構が妥当なものであることがわかる。したがって、レーザ加熱が不十分で熱応力が低い場合にはき裂先端の応力拡大係数も低く、き裂は進展しない。一方、レーザ出力が過大であると照射部は熔融してしまい、再凝固時に不規則な微小き裂を生じさせる⁸⁾。これら微小き裂は切断部のチッピング (欠け落ち) の原因となるほか、切断部に残存した場合には、加工後の基板強度信頼性を低下させてしまう。したがって、加工品質としてはき裂の進展直線性のほかにも、微小き裂、熱影響部 (HAZ: Heat Affected Zone) がしばしば評価項目となる。

2・2 光弾性観察実験装置の概略

基板中に発生している応力分布をインプロセスで貸し出す手段として、本研究では光弾性観察法を採用した。図 3 には、実験装置の平面偏光器の基本構成を示している。光源 S から発せられた光のベクトル $A_1 = A \sin \omega t$ が、偏光軸が互いに直交している偏光子 P_1, P_2 、およびガラス基板を透過する。基板透過時に光弾性現象によって偏光を生じると、透過光の強度は次式のようになる。

$$I = A^2 \sin^2 2\phi \sin^2 \frac{\delta}{2} \quad (1)$$

ここで、 ϕ は X 軸から任意の傾き角 θ を与えた偏光軸 P_1 と主応力方向 σ_1 がなす角 (図 3 右)、 δ は光弾性現象による相対的位相差を示す。式(1)から、 $\phi = 0, \pi/2$ および、 $\delta = 2n\pi (n = 0, 1, 2, \dots)$ にて強度はゼロとなり暗黒点を生じ、この点を結ぶと等傾線が得られる。等傾線観察では任意に設定した θ 方向に主応力方向が一致する点にて暗黒点が生じ、暗線を形成するので、基板上の任意点における主応力 (σ_1, σ_2) の方向が観察できる。また、図示した装置に一对の 1/4 波長板を追加して円偏光器とすれば、等色線が得られる。等色線は主応力差 ($\sigma_1 - \sigma_2$) の等しい点を結んでおり、最大せん断応力 ($2\tau_{\max} = \sigma_1 - \sigma_2$) 分布を観察できる。

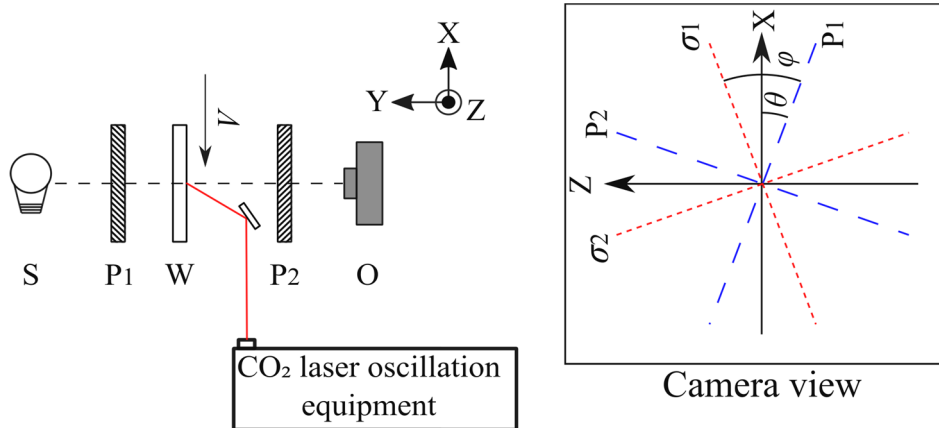


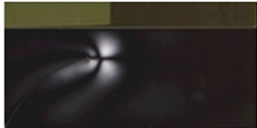
図 3 レーザ切断加工における光弾性観察の概略

本研究では、偏光器内におかれたガラス基板に CO₂ レーザ光を照射し、き裂を進展させるため基板は一定速度の送りを与えられて切断加工実験を行っている。ガラス基板 ($t=1.2\text{mm}$) の端部には、1mm 長の初期欠陥を導入しており、同欠陥を含むパス上をレーザスポットが所定の速度 V で走査される。実験は表 1 に示す照射条件下で実施した。

レーザ切断加工中の主応力方向の分布は、種々の角度 θ (偏光子の偏光軸と X 軸とのなす角) における等傾線から得る。図 4(a) に示す画像は、 $\theta=0^\circ$ における実験で撮影されたものであり、同図から等傾線を抽出した結果が図 4(b) である。等傾線上の各点は暗黒点 ($\phi=0, \pi/2$) であるから、主応力方向が θ に一致していると同定できる。したがって、偏光子を回転させて角度 θ を変化させて同様の作業を繰り返せば、種々の方向の主応力が生じている点分布が明らかとなり、主応力方向分布図が得られる。

表 1 レーザ照射条件

パルス周波数	(Hz)	20
平均出力	(W)	4.2
スポットサイズ	(mm)	3×2



(a) 撮影画像



(b) 等傾線

図 4 光弾性観察結果の一例

3. 実験結果

3.1 切断加工面品位と主応力方向分布

前述のように、き裂先端における応力拡大係数 K_I が基板材料の破壊靱性値 K_{Ic} に達した際にき裂が開口、進展することが切断加工の基本機構である。しかしながら、レーザ走査パスに対して非対称な応力分布が生ずると、き裂先端には開口以外の変形モード (II: 面内せん断, III: 面外せん断) が起こり、き裂が走査パスから逸脱したり、き裂面のねじれ (切断面の倒れ) が生じてしまう^{6,9)}。

本研究では、基板下端に導入した初期欠陥から円弧状に切断加工を行い、主応力方向分布と切断品位との関係を調べた (図 5)。走査パスの曲率半径: $\rho=21.9\text{mm}$, 切断部の長さ: $L=40\text{mm}$, 走査速度: $V=100\text{mm/min}$ の条件下で加工を行い、このとき、パス中央部では、パスは基板の下端から 13mm 離れていることとなる。

図 6 には、レーザスポットが走査パスの中央部に達した時点で主応力方向分布図 (図 6(a)) と、スポットが基板下端から照射開始した直後の分布図 (図 6(b)) を示している。図中には、破線でスポット走査パスも記載しており、丸印はスポット中心位置、▲がき裂先端を表している。図 6(a) からわかるように、パス中央部では、き裂先端における主応力方向はレーザ走査パスと直角をなしており、き裂が開口されてレーザ走査線に沿う方向へ進展するよう主応力が作用していることがわかる。この結果、き裂は走査パスに追従して進展した。しかし、図 6(b) に示した基板下端の近傍では、き裂先端の主応力方向はレーザ走査線に対して斜めに傾いており、応力分布に非対称性が生じている。これは、基板の下端が自由境界であるために熱流が制限されること、材料の熱膨張が拘束されていないことが原因であると考えられる。

3.2 レーザ走査速度の主応力分布への影響

一方、図 7 には走査パス中央部の切断面を詳細に観察した結果を示している。上述のように走査パス中央部ではパスに沿ってき裂は進展した。しかしながら、切断面にはねじれ (切断面の倒れ) が観察された。切断面のねじれとは、

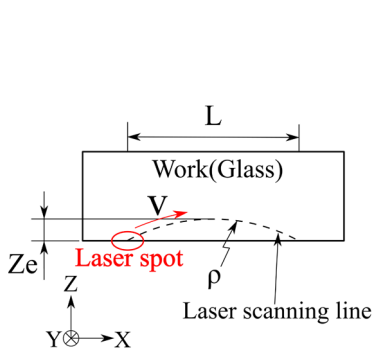
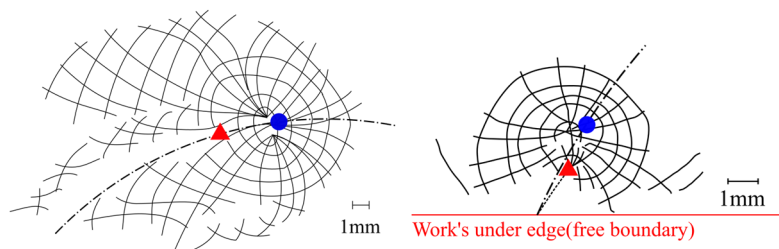


図 5 曲線切断加工実験概略

- Cleavage line
- Lines of principal stress ● Center of a laser spot
- - - Laser scanning line ▲ Crack tip



(a) パス中央部

(b) 自由端近傍

図 6 曲線切断加工における主応力方向分布

模式図 (図 7(a)) に示すように、基板のレーザー照射面側と裏面 (非加熱面側) とでき裂の進展位置が異なる状態である。詳細な観察から、この” 切断面倒れ” は裏面においてき裂進展が外側にずれることで生じていることが確認された。図 7 (b) に示すように、基板表裏のき裂進展位置のずれ Δ を調査すると、レーザー走査速度が $V=50\text{mm/min}$ と低いときには $\Delta=0.23\text{mm}$ と進展位置のずれが小さいのに対して、走査速度が $V=50\text{mm/min}$ と高くなるとずれは $\Delta=0.54\text{mm}$ と大きく切断面のねじれが顕著となった。

そこで、異なる走査速度下における同一位置の主応力方向の分布図を比較検討した結果を図 8 に示す。レーザースポット走査速度 $V=50, 100\text{mm/min}$ の 2 条件下の切断加工時の同一位置における主応力方向の分布図を示している。分布図に重ね、照射面側のき裂先端位置を ▲ で、スポット中心位置を ● で示すとともに、き裂先端—スポット中心間

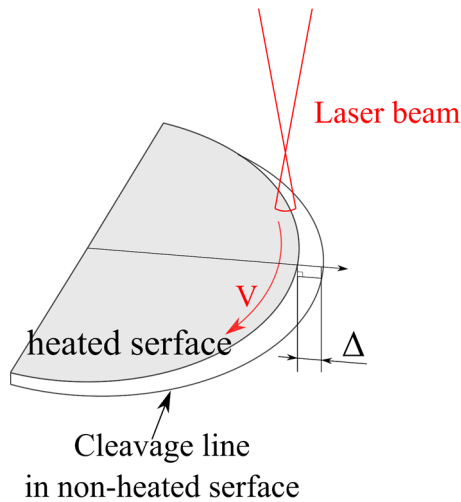
距離 d を図中に記載した。

主応力方向の分布をみると、高走査速度 ($V=100\text{mm/min}$) においても、き裂先端における主応力方向は大きくは乱れていない。しかしながら、走査速度 V が高くなるほど、き裂先端—スポット中心間距離 d は増大し、 $V=50\text{mm/min}$ では $d=1.74\text{mm}$ であるのに対し、 $V=100\text{mm/min}$ では $d=3.60\text{mm}$ と倍以上に広がった。前述したように、レーザーが照射される時間内に、き裂先端は間欠的に進展するが、本研究条件下の観察においては、レーザースポット走査速度とき裂先端—スポット中心間距離 d の間には相関を見出した。き裂を進展させるのはレーザースポットを中心とした周方向引張応力であるが、高速度では主応力線が楕円形となってしまう、き裂先端を中心に向かって進展させる作用が低下したと考えられる。これが原因となってき裂のスポット追従性が悪化し、とくに非照射面では顕著となってズレ Δ が増大したと考えられる。

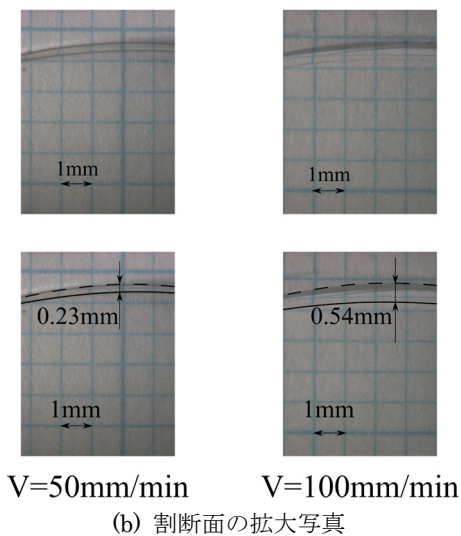
4. 結言

本研究においては、レーザー切断加工において、加工中に応力分布をリアルタイム観測する実験システムを開発するとともに実験手法を確立し、これを適用してガラス基板の切断加工の精度向上に資することを目的としている。

今回は、 CO_2 ガスレーザーを使用したガラス基板の切断加工における加工精度の向上、加工損傷の抑制を実現する最適条件を探索するとともに、応力分布の実験的解析によって精度低下や損傷増大をもたらす要因について明らかとすべく、非対称な応力分布を生ずることが以前から指摘されている曲線状切断加工を試み、提案手法によって主応力方向分布について検討した。得られた結果を以下にまとめる。



(a) 模式図



(b) 切断面の拡大写真

図 7 切断面のねじれ (倒れ)

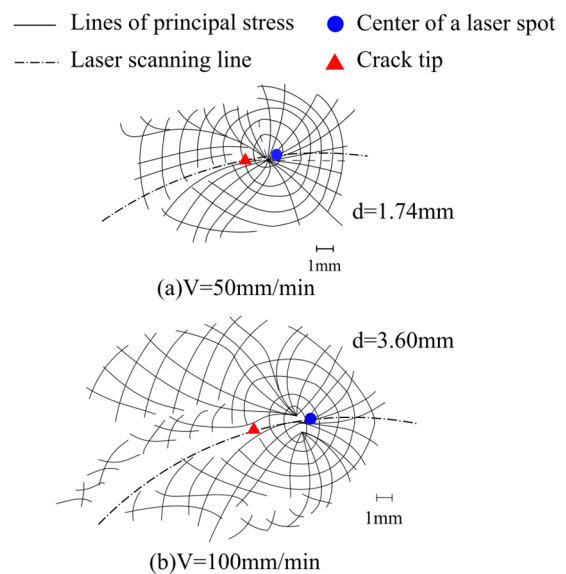


図 8 主応力方向分布への走査速度の影響

- (1) 基板下端から曲線状切断を開始した直後は、基板の下端が自由境界であるために熱流が制限され、さらに熱膨張が拘束されていないために応力分布に非対称性が生じ、レーザ走査パスからのき裂進展の乖離が観測された。
- (2) 曲線切断において切断面のねじれが観測され、これは走査速度が高くなるにつれて顕著になることが確認された。このとき、き裂先端とレーザスポット中心との間の距離は拡大し、き裂の走査パスへの追従性が低下していると考えられる。

謝 辞

本研究は公益財団法人天田財団の一般研究開発助成(AF-2016215)の支援を受けて行われたものであり、深く感謝の意を表す。レーザ切断実験に際しては、広島大学大学院工学研究科博士課程前期の福島一樹君ならびに中嶋祐基君の協力を得て実施した。深く感謝の意を表す。また、光弾性実験装置の開発、および光弾性実験結果の解析については、金沢大学自然科学研究科岩井智明先生にご指導を賜った。深甚なる感謝の意を表す。

参考文献

- 1) 沖山俊裕, “レーザ切断”, 精密工学会誌, V60, No. 2 (1994), pp. 196.
- 2) 山本幸司・羽坂登・森田英毅・大村悦二, “ガラスのレーザクロスクライブにおける熱応力解析”, 精密工学会誌, V74, No. 9(2008), pp. 937-943.
- 3) C-W. Tsai・B-C. Lin, “Laser cutting with controlled fracture and pre-bending applied to LCD glass separation”, International Journal of Advanced Manufacturing Technology, V32(2007), pp. 1155-1162.
- 4) M. Kumagai et al., “Advanced Dicing Technology for Semiconductor Wafer - Stealth Dicing”, IEEE Transactions on Semiconductor Manufacturing 20(2007), pp. 259.
- 5) C-W. Tsai・C-J. Chen, “Application of iterative path revision technique for laser cutting with controlled fracture”, Optics and Lasers in Engineering, V41, No. 1(2004), pp. 189-204.
- 6) 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切断”, 日本機械学会論文集 (A編) V68, No. 670(2002), pp. 993-998.
- 7) 山田啓司・西岡真吾, 細川晃, 上田隆司, “パルスYAG レーザによる脆性材料の切断加工 —Si ウエハ切断における熱応力解析—”, 精密工学会誌, V69, No. 1 (2003), pp. 120-124
- 8) 山田啓司・大磯桂一・細川晃・上田隆司, “パルスYAG レーザによる Si ウエハの切断機構に関する研究”, 精密工学会誌, V67, No. 11 (2001), pp. 1861-1865.
- 9) 本村文孝・今井康文・才本明秀, “レーザ切断における切断面の傾き”, 2003 年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集 (2003), pp. 407.