

# 炭酸ガスレーザによる薄板ガラスの熱応力割断に関する研究

長崎大学大学院生産科学研究科

本村文孝

本研究の目的の一つは、今まで熟練作業者の勘と経験に頼っていたガラス等のぜい性材料の割断加工条件の設定に、割断対象材の材料物性値および熱物性値、レーザ熱源の加熱量や移動速度、レーザ熱源形状等の加熱条件を取り込み、加工条件を定量的に求めることである。レーザ割断における加工条件の決定に、二次元弾性論および線形破壊力学に基づく破壊パラメータである応力拡大係数を用いることが、ガラス等のぜい性材料の破壊条件やき裂の進展条件に対して有効であることを確認している。また有限要素法等の数値解析プログラムを用いることで、工業的に用いられる有限幅の板材に対する熱応力解析がおこなわれ、二次元解析に関しては、効率的に加工条件を推定できる環境が整いつつあり、割断作業の標準化は近いと考える。

ところで、レーザを加熱源とした熱応力割断は一度の工程で済む板厚方向に貫通したフルボディカットと、高速割断の可能な板厚方向のき裂深さが浅く効率的ではあるが、分断工程の必要なレーザスクライビングに大別される。炭酸ガスレーザを熱源に用いる場合、ガラスに対する炭酸ガスレーザの吸収特性のため、レーザスクライビングおよびフルボディカット共に、板厚内のき裂進展挙動は三次元的となることを割断実験により確認しており、割断作業の標準化に際し、三次元解析の必要性の有無を確認する必要があると考える。以上のような観点から、本研究では、解析解の導出が困難な有限板の三次元非定常熱応力場について、有限要素法による三次元熱応力解析をおこなった。また板厚 1 ミリ以下のガラス板に対する二次元熱応力解析の有効性について検討した。

第 1 章では、研究に至る背景と目的について述べた。

第 2 章では、炭酸ガスレーザを用いた板厚 1 ミリのソーダガラスの熱応力割断の実験結果を示した。透明なガラス材料内部を進展する板厚貫通き裂を観察するために、光学的手法を用いたその場観察可能な実験装置を開発した。レーザ照射熱量 8 W の元、12.5mm/s 前後の熱源移動速度に対して、レーザ熱源中心と一定距離を保ちながら進展するき裂先端形状を撮影し、そのときのき裂開口量を、光干渉法により撮影された干渉縞より算出した。

き裂開口量を精度よく評価するために、離散的フーリエ変換と最大エントロピー法によるデジタル画像処理を施し、き裂開口量より得られた応力拡大係数 ( $K_I$ ) の板厚分布は、常温時のガラスの破壊靱性値 ( $K_{IC}$ )  $0.75\text{MPam}^{1/2}$  に対して、 $0.67\text{MPam}^{1/2} \sim 0.77\text{MPam}^{1/2}$  の値を得ることができた。実験から得られた  $K_I$  は板厚内でほぼ一様とみなせるが、板厚内部から自由表面にかけて微増する傾向を示すことを明らかにした。

第3章では、板厚内で任意形状をしたき裂先端の応力拡大係数 ( $K_I$ ) の板厚分布を評価するために、第2章の熱応力割断における炭酸ガスレーザ照射を加熱面側の表面発熱とみなした有限要素法による三次元熱応力解析をおこなった。任意のき裂先端形状をした  $K_I$  の板厚分布を精度よく評価するために、本学工学部今井康文教授が提案した（仮想）き裂閉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を用いた応力拡大係数の評価法を適用した。10mm/s～15mm/s の熱源移動速度に対して、準定常状態にある進展中のき裂は、き裂先端の  $K_I$  がほぼ一様分布となるようにき裂先端形状を変化させることを明らかにした。また板厚 1mm 程度の薄板ガラスに対して、板厚中央部付近をき裂先端と見なした二次元解析結果は三次元解析の近似解として有効であることを確認した。

第4章では、曲げ剛性の低下に伴う面外変形が無視できない板厚  $50\mu\text{m}$  と極薄なガラス板に対する熱源移動速度 100mm/s の熱応力割断において観察された不安定なき裂進展を改善し、安定したき裂進展が見込まれるガラス板の支持条件を得るために、種々の面外変形を拘束した三次元有限要素解析をおこなった。解析結果は、面外変形の拘束が応力拡大係数 ( $K_I$ ) の大きさにほとんど影響しないことを示し、極薄なガラスに対して吸着ステージ等によるガラス板の支持が安定したき裂進展に有効であることを示した。また強制的に板表面からの放熱を増やすことで、進展中のき裂先端位置が熱源中心に近づき、安定したき裂進展に寄与することを示す解析結果を二次元有限要素解析より得た。

第5章では、前章までの開口型の応力特異性( $K_I$ )のみが生じる対称割断とは異なり、面内せん断型の応力特異性( $K_{II}$ )を考慮する必要がある混合モード下のき裂進展挙動の解析例として、矩形板ガラスの縁落し加工を選び、直線縁から垂直距離 5mm と平行な割断線を得るために、き裂先端の  $K_{II}$  が常にゼロとなるような加熱条件を二次元有限要素解析により決定した。提案した加熱方法は3種類あり、割断中の熱源経路が割断予定線と異なる単一円熱源を用いた場合、熱源経路を固定した2つの熱源間の加熱量の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する長方形熱源を用いた場合である。第6章では以上の研究内容を総括した。