Fracture Analysis of Reinforced Glass Plate under Impulsive Laser Heating

正 本村 文孝 (長崎大) ○学 近藤 豪仁 (長崎大院) 正 才本 明秀 (長崎大)

Fumitaka MOTOMURA, Nagasaki University, bunkyomachi 1-14, nagasaki-shi, Nagasaki
Takehito KONDO, Nagasaki University, Akihide SAIMOTO, Nagasaki University

Key Words: Fracture Analysis, Impulsive Laser Heating, Reinforced Glass, EDEM, FEM

1. 緒言

携帯電話等の液晶ディスプレイの基板ガラスには、板厚 1mm 以下の強化ガラスが用いられている。強化ガラスには熱強化ガラスと化学強化ガラスの 2 種類があり、携帯電話には後者が用いられているようである。熱強化ガラスはガラス製造過程においてガラス表面に圧縮応力が残留するように温度制御することで得られる。一方、化学ガラスはイオン交換法などにより表面層近傍に異質強化層を生成させ、表面改質の性質が強い。図 1 には(a)ソーダライムガラスと、(b)化学強化ガラスであるコーニング社製「ゴリラ」ガラスの表面にマイクロビッカース圧子を押込んだときの圧痕写真を比較している。圧痕対頂部を起点とし、板厚方向へ半円状のき裂初生のあるソーダガラスに対して、化学強化ガラスからのき裂初生は確認されなかった、いずれの圧痕深さも $5\mu\text{m}$ 程度であった。化学強化ガラスの強化層の深さ等の材料物性は公開されていないが、耐表面損傷性の高さは顕著である。

現在、「ゴリラ」ガラス等の強化ガラスの加工法として、レーザ加工が注目されている。本研究室では、炭酸ガスレーザ等の連続照射による薄板ガラスのフルボディカットに関して FEM 解析等によるき裂伝ば解析¹⁾をおこなってきた。寸法効果の大きな熱応力割断ではあるが、板厚 1mm、小寸法のガラス板の分断であれば、実用レベルの割断効率が期待される。また板厚方向に貫通させるのではなく、片側表面のみに連続した表面き裂を生成するレーザスクライブ法(局所加熱源と局所冷却源を併用して移動させることで、き裂を挿引する方法)を強化ガラスに適用することも検討されている。さらにディスプレイ製造業界では、ピコ秒等の超短パルスレーザを強化ガラスに照射する穴あけ加工のニーズがある。このレーザアブレーションによる穴あけ加工は携帯電話のカメラレンズ取付け穴の加工法としても注目されている。

本研究の最終目的はレーザアブレーションを用いた強化ガラスの穴あけ加工をする際の加工条件を数値解析によって明らかにすることである。その手始めとして、非連続体解析の可能な DEM に注目し、DEM に間隙ばねを付加することで連続体解析に拡張した拡張個別要素法(EDEM)²⁾を用いる。EDEM では、き裂の発生および進展を間隙ばねの切断により表現し、間隙ばねの破壊基準として、引張破断ひずみ(モード I)およびモール・クーロンのせん断破壊基準(モード II)を適用することで、熱衝撃および衝撃現象のシミュレーションが可能と考えられる。熱衝撃への EDEM の適用は海津ら^{3,4)}の提案にならった。またレーザアブレーションについては大村ら⁵⁾⁻⁸⁾によるシリコン等の非晶質材に対する分子動力学解析手法を参考にした。大村らは蒸発を伴う溶融現象の熱流体解析において、レーザ照射による表面形状過程の主要因子として蒸発反跳力を評価している。現在、この蒸発反跳力⁹⁾の EDEM への取り込み手順を検討中である。

本講演では EDEM によるレーザ照射を受けるガラスのき裂進展解析について説明する。

(a) Soda-lime glass

(b) Chemical toughened glass

Fig.1 Crack generation and shape of indentation induced by Micro-Vickers Hardness

2. EDEM による解析方法

始めに、EDEM による粒子モデルについて説明する。EDEM では母材を表す粒状要素に作用する接触力を評価する要素ばね(Element-Spring)に加えて、粒状要素間を満たすような間げき物質が粒状要素に作用する力を評価するために、間げきばね(Pore-Spring)を導入している。要素間の力学的な相互作用は弾性ばね、ダッシュポット、スライダを用いて表現される。図 2 に示すように、要素ばねと間げきばねは法線方向と接線方向に独立した状態で配置している。また各ばねにおいて、弾性ばねとダッシュポットは並列配置している。図 2 中の“×”の記号は引張限界ひずみに達した間げきばねが破断することで、要素間にき裂が生じることを示し、“=”は要素同士が接触時のみ力の伝達が起こることを示している。また、接線方向では摩擦力も考慮することができ、せん断破壊基準に法線方向の力の寄与を取り入れるために、モール・クーロンの条件を用いている。ばね定数およびダッシュポットの粘性定数の決定には弾性波を利用した方法を用いた。ダッシュポットの役割はおもに要素間の接触時の振動を取り除くために使われるようである。

(a) Normal direction (b) Tangential direction
Fig.2 EDEM model

次に、レーザ照射による粒状要素の温度上昇を考慮するために、海津らの提案⁴⁾にならった。レーザ照射域内にある粒状要素に与える単位時間当りの熱量から粒状要素の温度変化を求めることができる。温度変化により生じる熱ひずみを粒状要素の直径の変化量とすることで、要素間には熱膨張および熱収縮が生じる。これにより、要素間の熱応力を評価することになる。また要素間の熱量は接触した要素間のみにおいて熱伝導される。ただし要素配列の配置方法によって、要素間の接触面積に用いる接触幅が異なるので注意を要する。本解析では、ソーダガラスに対する二次元解析の例として、図3のような等径要素四角形配置を採用し、厚さ1mmの円柱要素を用いた。数値計算例として、板厚1mm、一辺の長さ20mmの正方形板の中央部に照射直径2mm（レーザ加熱密度一定）、吸収される全照射熱量1Wにて、レーザ連続照射したときのき裂進展解析をおこなう。なお、解析には常温でのソーダガラスの材料物性および熱物性を用い、諸物性の温度依存性は無視した。

強化ガラスに関しては三次元解析となり、板厚方向に粒球要素を配置し、残留ひずみに相当する初期ひずみを与えることになる。

Fig.3 Analytical model

3. 数値計算例

図4は図3のEDEM数値計算例と同様の解析条件において、レーザ照射時間とx軸方向のき裂先端位置を変化させたときの応力拡大係数(K_I)の変化を示している。図4より、ソーダガラスの破壊靱性値(K_{IC})を $0.75\text{MPam}^{0.5}$ としたときに、任意のき裂先端位置に対して、き裂が進展するまでのレーザ照射時間を算出でき、き裂先端位置がレーザ照射域に近くなると、き裂は短い照射時間にて照射中心に向かって進展することになる。また照射熱量が大きくなるほど、き裂はごく短い照射時間で進展する。このFEM解析の結果を踏まえて、EDEM解析では図4のFEMのき裂進展条件を満足するように、引張破断ひずみ（モードI）を決定することになる。因みに、照射熱量が等しければ、照射面積による K_I の値に極端な違いは見られない。

Fig.4 K_I contour map for variation of a crack tip location and heating duration

4. 結言

レーザ照射を受けるガラスの破壊解析に有限要素解析により得られた破壊基準を反映させることで、拡張個別要素法におけるき裂伝ぱシミュレーションの解析精度の向上が期待される。

文 献

- 1) 才本明秀, 今井康文, 本村文孝, 熱応力割断におけるき裂導入時の不安定現象, 材料力学部門講演会講演論文集(2002), pp.653-654.
- 2) 伯野元彦, 破壊のシミュレーション, 森北出版, 第1版(1997), pp. 10-55.
- 3) 徳永仁夫, 海津浩一, 池田清彦, 小堀修身, 拡張個別要素法による熱強化ガラスの衝撃破壊解析, 日本機械学会論文集 (A編), 71-711 (2005), pp. 1560-1566.
- 4) 海津浩一, 末吉圭太郎, 木之下広幸, 池田清彦, 拡張個別要素法による動的熱応力解析, 日本機械学会論文集 (A編), 73-731 (2007), pp. 814-820.
- 5) 大村悦二, 福本一郎, 宮本勇, 金属を対象とした改良型分子動力学法の開発, 溶接学会論文集, 17-3 (1999), pp. 382-386.
- 6) 大村悦二, 石坂有里, 福本一郎, 宮本勇, シリコン単結晶のレーザアブレーションの三次元分子動力学シミュレーション, 溶接学会論文集, 19-4 (2001), pp. 649-655.
- 7) 大村悦二, 福本一郎, 宮本勇, ピコ秒パルスレーザアブレーションにおける微粒子の飛散シミュレーション, 溶接学会論文集, 20-3 (2002), pp. 355-362.
- 8) 大村悦二, レーザアブレーションによる穴あけ加工のシミュレーション, エレクトロニクス実装学会誌, 9-5(2006), pp.399-404.
- 9) 水谷正海, 片山聖二, 松縄朗, CW レーザキールホール溶接時に発生する蒸発反跳力の電子天秤による測定, 高温学会誌, 27-4(2001), pp.15.