

高速度偏光計測を用いたホイール割断時のガラス内部応力場の可視化

千葉大学 ○阿隅結夢 ◎松坂壮太 松本祐一郎 比田井洋史 千葉明 森田昇

要旨

スクライビングホイールを用いたホイール割断は、脆性材料を切断する方法の1つである。本研究では、スクライブ加工時の被加工材の内部応力状態を把握することを目的とし、高速度偏光カメラを用いてガラス内部位相差を基板裏面から計測した。その結果、スクライブ直後のガラス内部応力場の変動を可視化することが可能となった。また得られた位相差情報から、被加工材内部の内部応力状態と割断面形態の関連性について検討した。

1. 緒言

無アルカリガラスはアルカリ酸化物をほとんど含まず、熱膨張率が低いため、液晶パネルのガラス基板として広く用いられている。近年液晶パネルは大型化・薄型化の傾向にあり、それに伴いガラス基板の強度を損なわない加工法が要求されている。

その1つにホイール割断が挙げられる。加工工程はスクライブ工程とブレイク工程の2つからなる。スクライブ工程はホイールを被加工材に押し付けて走査し、材料に亀裂を生成する。ブレイク工程は被加工材に曲げ応力を加えて材料内部に亀裂を進展させ、分離する。ホイール割断は切り代が小さく、加工コストや効率が良い等の利点がある。しかし割断メカニズムは解明されておらず、加工条件は経験則の下で決定されているのが現状である。

こうした背景を受け、ホイール割断に対して光弾性実験を用いた研究が行われている¹⁾。光弾性実験は透明材料の内部応力状態を位相差として取得する計測方法であるため、ガラスの内部応力状態が把握出来れば割断メカニズム解明の一助になると期待できる。

本研究では高速度偏光計測を用いてスクライブ中のガラスの内部応力場を観察した。また、取得した位相差情報から内部応力状態と割断面形態の関連性について調査した。

2. ブレークレスホイールを用いた場合の割断面形態

ブレークレスホイールは外周に多数の凸凹を有しており、スクライブ時亀裂がガラス厚さ方向に短時間で進展するという特徴がある。ブレークレスホイールを用いてホイール割断を行うと、スクライブ条件によって割断面形態が異なることが報告されている²⁾。割断面の例をFig. 1に示す。押し付け荷重6Nではクラックを多く有した鱗状の様相が、12Nでは時縞模様が割断面に生成された。前者はハックルマーク、後者はリブマークと呼ばれる。割断面上のクラックは製品の曲げ強度を低下させるため、工業的にはリブマークが形成されることが望ましい。

3. 裏面からの高速度偏光計測

3.1. 実験方法

割断におけるガラスの内部応力場を動的に観察することを目的とし、ガラス裏面からの高速度偏光計測を試みた。

実験方法をFig. 2に示す。まず、ガラス試料のスクライブ表面に金蒸着を施し、試料の裏面から入射した照明光をガラス表面で反射させて偏光高速度カメラで撮影した。ガラス試料は Corning 1737 (10×30×0.7mm)、ブレークレスホイールは三星ダイヤモンド工業株式会社製の Penett SDX[®]を用いた。次に、位相差出力ソフトを用いて撮影結果から位相差情報を取得した。ソフトは株式会社フォトロン製の PhotronFlameWork を使用した。最後に、ブレークした試料を光学顕微鏡で観察し、全スクライブ長さに対するリブマーク長さの割合を算出した。

3.2. 実験結果

スクライブ後0.5sと5sにおける5N、20Nの位相差結果をFig. 3に示す。位相差結果はカラースケールで表され、位相差0nmで黒色、最大で白色である。また撮影方向のガラス厚さは0.7mmと薄いため、位相差結果は平面応力場と見なすことができる。

Fig. 3より、スクライブ後0.5sの位相差は圧痕から外側に広がる様に分布した。位相差分布の大きさは圧痕から約30 μ mであった。0.5sと5sと比較すると、5Nの位相差に大きな変化は見られなかった。一方、20Nの位相差は時間が経過するにつれて減少した。この時、リブマーク長さ割合は5Nの時0%、20Nの時100%であった。

リブマーク生成条件では亀裂がガラス厚さの8割以上まで進展し、一連の挙動が数秒間で完了することが知られており³⁾、圧痕周りの位相差分布が時間経過とともに減少する原因は、圧痕周りに残留した引張応力が亀裂進展のエネルギーとして消費されたためと考えられる。

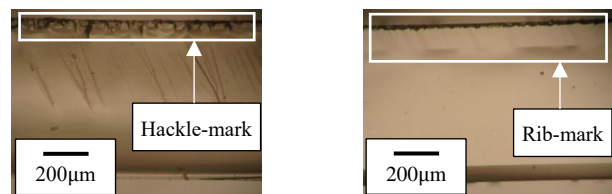


Fig. 1 Comparison of cross sections

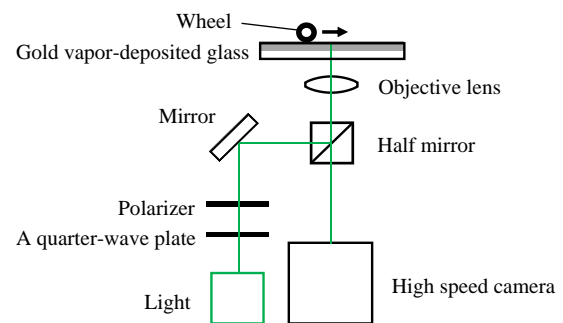


Fig. 2 Experimental equipment

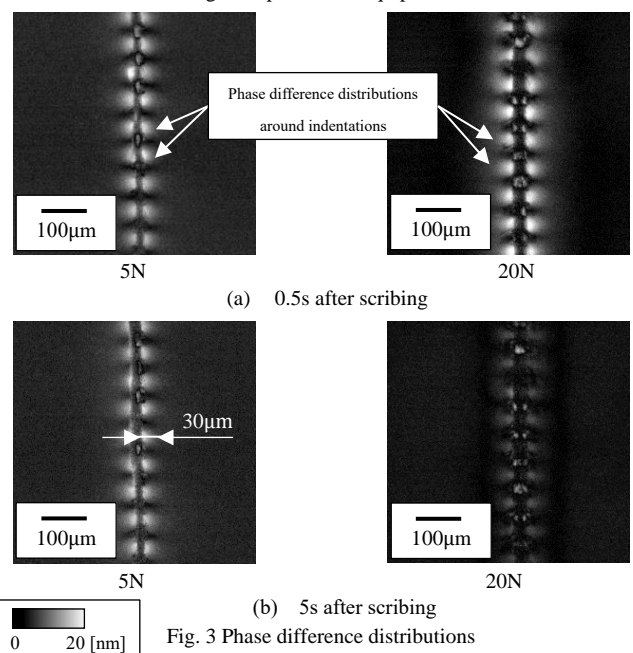


Fig. 3 Phase difference distributions

4. ガラス割断面形態の推定

4.1. 実験方法

圧痕周りの応力と時間の関係を詳細に調査するため、取得した位相差情報から圧痕中心を通る箇所の位相差を抽出し、スクライプ通過開始から 5s までの位相差を 0.02s 間隔で並べて位相差の変動を可視化した。スクライプ経過時間は位相差が 20nm を超えた時点を 0s とした。

4.2. 実験結果

押し付け荷重 5N と 20N の結果を Fig. 4 に示す。5N について、スクライプ後 5s の時点で 10nm 以上の位相差が見られた。10nm 以上の位相差分布の幅は約 20~30 μ m であった。これは Fig. 3 より、圧痕周りの位相差分布の大きさと同程度である。以降、幅約 30 μ m かつ位相差 10nm 以上の位相差分布は圧痕周りの残留応力を反映しているものと判断した。

4.3. 割断面形態と位相差の関係

作成した図をもとに、位相差の最大値が 10nm 未満になった時点を応力開放時間として、応力開放時間とリブマーク長さ割合の関係を調査した。10nm 未満にならない場合は 5s とした。結果を Fig. 5 に示す。5N から 11N について、すなわちリブマーク長さ割合が 90% 未満である時、応力開放時間は 5s 以上であることが分かった。対して 12N から 20N について、12N と 15N を除いて応力開放時間は押し付け荷重が大きいほど減少する傾向にあった。

さらに位相差の最大値の減少率と押し付け荷重の関係について調査した。各時間の位相差の最大値を抽出し、全体での最大値とスクライプ後 5s の時点の最大値を求めた。位相差の最大値の減少率は式 (1) より算出した。

$$(\text{減少率}) = \frac{(\text{全体の最大値}) - (\text{スクライプ後 5s 時点での最大値})}{(\text{全体の最大値})} \times 100 \quad (1)$$

結果を Fig. 6 に示す。押し付け荷重に対し、全体の最大値と減少率は増加傾向にある。一方スクライプ後 5s の最大値は減少傾向にあることが分かった。また Fig. 6 と比較すると、リブマーク長さ割合が 95% 以上である 12N から 20N では減少率が 70% 以上であった。

以上より、押し付け荷重の大きさは圧痕周りの残留応力の大きさに影響し、残留応力が大きいほど亀裂進展が短時間で終了すると考えられる。

5. 結言

本研究では高速度偏光計測を用いてスクライプ中のガラスの内部応力場を観察することで、内部応力状態と割断面形態の関連性について調査した。その結果を以下に示す。

- (1) ガラス試料裏面からの高速度偏光計測により、圧痕周りの残留応力を位相差分布として可視化した。
- (2) 圧痕中心を通る位相差分布を時系列に並べることで、残留応力の緩和挙動と割断面形態に相関が見られた。

6. 参考文献

- 1) 長谷川良平, 松坂壮太, 比田井洋史, 千葉明, 森田昇: 偏光高速度カメラによるガラスのホイール割断時の内部位相差計測 2015 年精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集, (2015)579-580
- 2) 留井直子, 前川和哉, 若山治雄, 富森紘: ブレークレスホイールによるスクライプに関する研究 第一報: 高速度カメラを用いたクラック進展の観察 砥粒加工学会誌, 53, 11(2009)684
- 3) 留井直子, 村上健二, 橋本多市, 北市充, 平野茂和, 福西利夫: セラミックス切断用スクライピングホイールの開発とその切断技術, 砥粒加工学会誌, vol59(2015) No. 12 p. 705-710

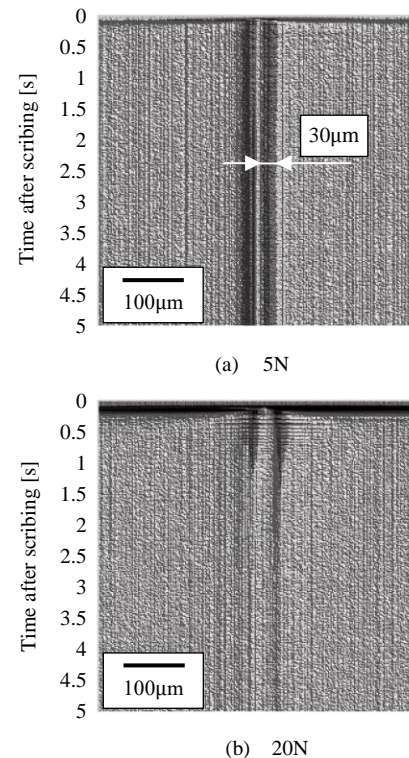


Fig. 4 Change in phase difference distribution around indentation point

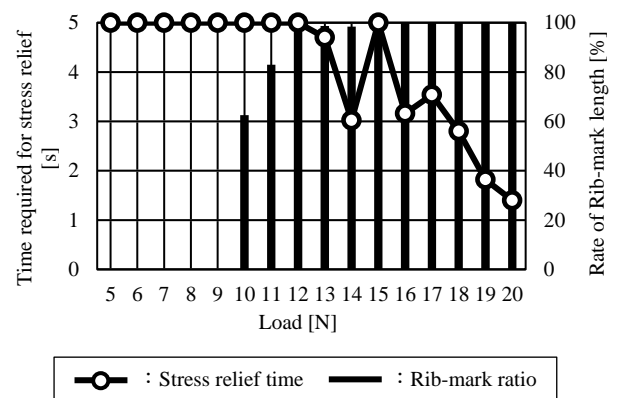


Fig.5 Stress relief time and rib-mark ratio

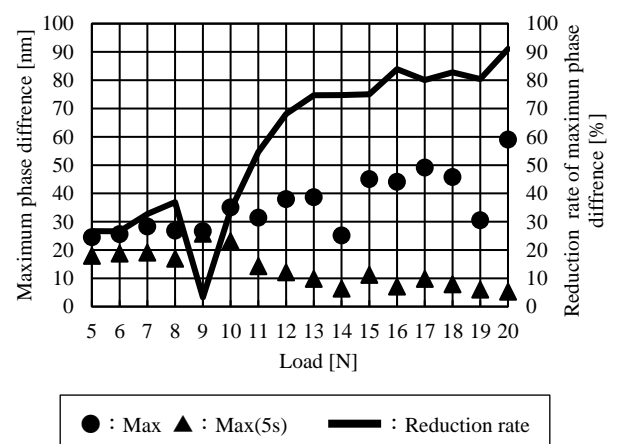


Fig. 6 Maximum phase differences and reduction rate