Advance Publication by J-STAGE

日本機械学会論文集

Transactions of the JSME (in Japanese)

DOI:10.1299/transjsme.21-00190

Received date : 11 June, 2021

Accepted date : 5 September, 2021

J-STAGE Advance Publication date : 17 September, 2021

ホイール割断における荷重負荷時の亀裂形成に関する研究 (円形亀裂 / 起点クラックの形成メカニズム)

今井健太郎^{*1}, 浅利朋生^{*2}, 松本祐一郎^{*3}, 松坂壮太^{*4}, 比田井洋史^{*4,*5}, 千葉明^{*3}, 森田昇^{*6}

A study of crack generation at loading/unloading process in wheel cleaving (Circular/half-penny crack generation mechanisms)

Kentaro IMAI^{*1}, Tomoki ASARI^{*2}, Yuichiro MATSUMOTO^{*3}, Souta MATSUSAKA^{*4},
Hirofumi HIDAI^{*4,*5}, Akira CHIBA^{*3} and Noboru MORITA^{*6}

^{*1,*3,*4,*6} Department of Mechanical Engineering, Chiba University

1-33 Yayoi-cho, Inage-ku, Chiba-shi, Chiba 263-8522, Japan

^{*2} Department of Mechanical Engineering, Chiba University

Currently, Makino Milling Machine Co., Ltd., 2-3-19 Nakane, Meguro-ku, Tokyo 152-8578, Japan

^{*5} Molecular chirality research center, Chiba University

1-33 Yayoi-cho, Inage-ku, Chiba-shi, Chiba 263-8522, Japan

Abstract

Wheel cleaving is one of the dividing methods of glass substrates, and is widely used in industrial scenes like manufacturing of flat panel displays. However, the crack generation mechanisms are not fully understood and therefore, the processing conditions are determined empirically. In this study, we observed crack generation behaviors during loading/unloading processes of toothed wheels by using highspeed imaging system. Finite element method (FEM) analysis of stress distribution in glass substrates were also carried out. As a result, two types of vertical cracks (circular and half-penny cracks) were observed just below the scribing wheel. Depending on the wheel shapes and applied load, the generation behavior of these cracks varied. Numerical results suggested that the crack generation behavior was determined by whether the tensile stress field was distributed up to the glass surface where some defects existed formed by wheel contact. This means low-height tooth and high applied load conditions produce a compressive stress field at the vicinity of glass surface, and the vertical crack generation is suppressed. To obtain a smooth cleaved surface, the half-penny crack generation during loading process is essential. For this purpose, precise control of indentation depth by optimizing wheel shape (tooth length, height and span) and applied load is necessary.

Keywords : Wheel cleaving, Glass, FEM, High-speed camera, Crack

1. 緒 言

近年、AI やIoT といった情報技術の革新や社会構造の変化に伴い、情報技術と人間のインターフェイスとして液晶ディスプレイの需要が高まっている。液晶ディスプレイが利用される場面もさまざまであり、スマートフォン、テレビ、PC、機械の制御端末、巨大スクリーンなど、大きさや用途も多様化している。液晶ディスプレイは、巨大なマザーガラス上に電極や液晶等を配置したあと、所望の大きさに分断することで大量生産されている（沼上, 1999）。この分断加工の品質は、そのまま製品の耐久性に影響する（Liao et al., 2009）。液晶ディスプレイ基板に代表されるような板ガラスの分断工程に、一般的に用いられる手法がホイール割断である。ホイール割断はス

No.21-00190 [DOI: 10.1299/transjsme.21-00190]

^{*1} 正員, 千葉大学大学院 機械工学コース (〒263-8522 千葉県千葉市稲毛区弥生町 1-33)

^{*2} 千葉大学大学院 機械工学コース (現 (株) 牧野フライス製作所 〒152-8578 東京都目黒区中根 2-3-19)

^{*3} 千葉大学 工学研究院

^{*4} 正員, 千葉大学 工学研究院

^{*5} 正員, 千葉大学 分子キラリティ研究センター

^{*6} 正員, フェロー, 千葉大学 工学研究院

E-mail of corresponding author: matusaka@faculty.chiba-u.jp

クライブおよびブレイクの2つの工程から成る。まず、スクライビングホイールと呼ばれる円盤状の工具をガラスに押し付け、転がすことで亀裂を形成する(スクライブ)。その後、外力により亀裂を進展させることでガラスを分断する(ブレイク)。他の分断手法、例えばレーザ切断やレーザ切断(Yamamoto et al., 2010)、ブレード切断(宮嶋他, 1990)等と比べて、ホイール切断は簡便に高品質な分断が行えることが特徴である。また、熱影響がないこと、乾式での分断加工であることから、ホイール切断は液晶ディスプレイの加工には特に適している。

ホイール切断に関する研究の多くは、効率や加工精度を向上させる目的で行われてきた。留井らは、外周部に多数の凹凸のある新たなスクライビングホイール(ブレイクレスホイールと呼ばれる)を開発した(留井他, 2009)。凹凸のない従来のホイールでは、初期亀裂を与えるために、スクライブ開始時にガラスの角に工具を切り込む必要があり、ガラスの角部に欠けや亀裂が生じ、品質を低下させていた。一方、新たなホイールでは、ガラスの端から離れた表面に工具を押し付けることで初期亀裂が形成され、そこからスムーズにスクライブ(走査)に移行することができる。また、ブレイクレスホイールを用いると、形成される亀裂の深さが従来のホイールよりも著しく大きくなり、ブレイクを容易にすることも報告された。

こうした背景から、近年ブレイクレスホイールの利用が主流になってきているが、その加工メカニズムは未解明な部分も多い。そこで我々は、ブレイクレスホイールを用いた場合の切断加工について、切断加工のメカニズム解明という目的から研究を行ってきた。松坂らは、新生面(切断面)に現れる形態と実験条件の関係を研究した(松坂他, 2015)。特に荷重との相関が顕著であり、高荷重においては滑らかな縞模様を呈するリブマーク(良好とされる切断面形態)が形成される一方、低荷重においては、不規則な段差状の形状であるハックルマークが形成され、深さ方向への亀裂の進展が小さくなることが明らかになった。さらに、スクライブ中の亀裂形成挙動を高速度カメラで可視化し、それぞれの切断面形態が形成される条件における亀裂形成挙動の違いを明らかにした(Imai et al., 2019)。その結果、ホイールを押し付ける際に起点クラックと呼ばれる楕円形状の亀裂が形成されると、スクライブ中に深い亀裂が維持され、リブマークが形成されることが明らかになった。すなわち、ホイール押し付け時における起点クラックの形成の有無が切断面品質を決定する。

そこで本研究では、切断面形態を左右するホイール押し付け時の亀裂形成に着目し、亀裂の形成メカニズムを解明することを目的とした。そのために、有限要素法によるガラス内部の応力解析と、亀裂形成挙動の観察実験を行い、それらを比較した。特に、切断面形成に直結する垂直亀裂に着目した。また、外周部の凹凸寸法が異なるホイールを用いて実験および解析を行うことで、垂直亀裂の形成挙動が変化する要因についても考察した。

2. 実験および解析手法

2・1 切断装置およびスクライビングホイール

図1(a)に切断装置の模式図を示す。本研究では三星ダイヤモンド工業(株)製スクライバー、MM5050A2を用いて実験を行った。Y軸方向に工具取付けヘッドが移動して切断位置を定め、Z軸方向にヘッドが下降しホイールをガラスに押し付ける。そして、X軸方向にステージが駆動することでスクライブを行う。Z軸の移動はサーボモータと空気圧アクチュエータにより制御する。空気圧アクチュエータへの指令値により荷重を負荷し、その状態で試料表面を基準としてサーボモータによりヘッドを100 μm 下方に押し込むことで、ホイールがガラスに押し付けられる。ヘッド先端にはホイールを装着するホルダーが取り付けられている。ホルダーにはスリットとピンを通す穴があり、ピンを介してホイールをホルダーに装着する。ホイールとピン、ピンとホルダーはすきまばめであり、ピンおよびホイールは自由に回転する。ただし、今回はホイール押し付け時の亀裂形成に着目するため、ステージはX軸方向に移動させていない。

スクライビングホイールの外観を図1(b)に示す。本研究では三星ダイヤモンド工業(株)製のブレイクレスホイール、Penett SDXシリーズを使用した。直径2 mmの円盤状で、外周部に鈍角の切れ刃と多数の凹凸を有する。本研究では、稜角は125°で一定とし、凹凸の形状および数が異なるホイールを5種類使用した。各ホイールについて、図中に示した凹凸の寸法を表1に示す。なお、これ以降ホイールの表記は凹凸の数(歯数)と高さから110-10、170-5のように表記する。110-10を基準としたとき、135-10は凸部の長さのみが異なり、140-7、170-5および360-3は凸部の長さに加えて凹凸の高さが異なる。

ガラス試料は、厚さ0.7 mmの無アルカリガラス(Eagle XG, Corning)を使用した。物性値を表2に示す。

Fig. 1 Experimental setup used for the wheel scribing of glass sheet. (a) Schematic illustration of the wheel scriber and (b) scanning electron microscopy image of the scribing wheel notched on the ridge line.

Table 1 Dimensions of scribing wheel.

Teeth number	[-]	110	135	140	170	360
Height	[μm]	10	10	7	5	3
Tooth length	[μm]	23	13	13	12	9
Space	[μm]	36		35	28	8

Table 2 Mechanical properties of glass (Eagle XG).

Young's modulus [GPa]	Shear modulus [GPa]	Poisson's ratio	Density [g/cm ³]
73.6	30.1	0.23	2.38

2・2 亀裂形成挙動の観察

実験方法の模式図を図2に示す。まず、ホイールをZ軸負方向に移動させ、ガラス試料に一定荷重で押し付けた（負荷過程、図2（a））。荷重負荷状態を約12秒間維持した（維持過程、図2（b））後、ホイールをZ軸正方向に移動させ、試料から離れた（除荷過程、図2（c））。この一連の過程において試料内部に生成する亀裂を、透過光を用いて、試料側面方向（Y軸負方向）から、高速度カメラ（Crysta PI-5P, (株) フォトロン）で動的に観察した。負荷荷重は5 N, 15 N, 25 Nとし、負荷および除荷時のホイールZ軸方向移動速度は、ホイールがガラスに接触する際の衝撃の影響を軽減するため、通常加工時（20 mm/s）に比べて低い移動速度である100 μm/sとした。高速度カメラの撮影速度は250 fpsとし、各条件で5回ずつ実験を行った。試料はX30×Y10 mmとし、両端をマスキングテープで固定した。

2・3 有限要素法による応力解析

汎用有限要素法ソフト Marc Mentat（エムエスシーソフトウェア（株））を用いて、静的弾塑性構造解析を行った。本解析では、亀裂の形成は考慮せず、単純な弾塑性解析とした。解析モデルを図3に示す。ホイールの母材は超硬合金（WC, ヤング率200～400 GPa）であるため、ガラスに対して十分に硬いものとみなし、変形を考慮しない剛体として定義した。ガラス部分はX1000×Y500×Z700 μmの直方体とし、四面体一次要素により分割した。メッシュサイズは勾配を設けており、最小サイズはホイールの接触部で1.5 μmとした。また、要素の変形が

Fig. 2 Experimental procedure of wheel load/unload experiment (observed from lateral side). (a) Loading process (1st process), (b) load holding process (2nd process), and (c) unloading process (3rd process).

Fig. 3 FEM analysis model. (a) Overview and (b) enlarged view of contact region. Glass elements set as 1/4 symmetry model by XZ and YZ plane. Wheel regarded as rigid body. Rotation of wheel was fixed at condition where concavity exist just below the rotating axis.

大きくなると解析精度に影響を与えるため、計算途中のデータを保持したままメッシュを再分割するリメッシング機能を利用した。ヤング率およびポアソン比は表 2 と同様の値に定めた。ガラスの塑性変形（永久変形）は高密度化および塑性流動によるものと考えられており（Kato et al., 2012）、厳密には金属のものとは異なるが、Tomei らの先行研究（Tomei et al., 2018）および我々のこれまでの実験結果との整合性から塑性パラメータを決定した。降伏応力を 3.5 GPa とし、加工硬化はしない弾完全塑性体として定義した。ガラス部のモデルは 1/4 対称モデルとし、対称面では法線方向の変位を拘束した。底面ではすべての自由度を拘束した。また、先行研究（Imai et al., 2019）により、ホイール押し付け時の亀裂挙動と断面形態に関連があることが報告されているため、上述のようにスクライブ（ホイールの回転および X 軸並進移動）は考えず、鉛直方向（Z 方向）の荷重負荷と、除荷のみ考慮した。解析時間は全体で 1 s とし、0.5 s かけて荷重を負荷し、さらに 0.5 s かけて除荷するように境界条件を設定した。摩擦係数や滑り挙動に関する数値を変化させても、結果への影響が小さかったため、本解析では摩擦の影響は無視した。

3. 高速度カメラによる亀裂の観察結果

ホイールの外周部には凹凸があるため、凸部が強く押し付けられてガラスに永久変形（圧痕）を形成する。ホイールの押し込み深さは数 μm であり、複数の凸部が同時に接触する。本実験では、大別して 2 種類の亀裂の形成が確認された。すなわち、ホイールの各凸部直下に形成する円形の亀裂と、接触する複数の凸部を横断する大きな楕円形状の亀裂である。

実験結果の一例として、Penett 110-10、荷重 15 N における観察画像を図 4 に示す。負荷過程の途中でホイールの凸部直下に円形の亀裂が生成した（図 4（a））。以後、この亀裂を“円形亀裂（Circular crack）”と呼称する。その後、凸部直下に生成した亀裂が拡大し、負荷過程終了時までには複数のホイール凸部を横断する亀裂が生成した

Fig. 4 Crack observation results from lateral side (Penett 110-10, applied load 15 N). (a): During loading process (0.5 s), (b): after loading process (1.0 s), (c): after holding process (12.0 s) and (d): after unloading process (13.0 s).

Fig. 5 Schematic illustrations of crack generation behavior. (a) generating position of circular cracks. (b) C-E: circular crack occurred under central indentation extends. (c) C-C: Center circular cracks connect each other. (d) O-E: Outer circular crack extends to half penny crack. (e) O-I: Large half penny crack generate instantaneously from outer circular crack. (f) N: No circular cracks occur and half penny crack occurs at unloading process. The colors of cracks vary from pale to dark blue along with time course in (b)~(d). 1st, 2nd and 3rd mean loading, load holding and unloading process, respectively.

(図4 (b)). この亀裂は、先行研究 (留井他, 2008) における起点クラック (Half penny crack) と特徴が一致している。以後、複数の凸部を横断する亀裂を“起点クラック”と呼称する。維持過程では負荷過程で生成した起点クラックの進展が見られ (図4 (c)), 除荷過程でさらに進展した (図4 (d))。

他の条件についても観察を行い、ホイール押し付け時の亀裂形成挙動を、円形亀裂の形成された位置および起点クラックの形成挙動から5種類に分類した。亀裂形成挙動の模式図を図5に示す。ホイール凸部直下の円形亀裂の生成位置について、ホイール押付部の中央に近い2箇所の凸部直下を中央 (Center)、その他の凸部直下を外側 (Outer) とした (図5 (a))。図5 (b~d) では、青色の濃淡で亀裂の進展順序を示している。まず、中央の凸部に円形亀裂が形成される場合、①ひとつの円形亀裂が成長して起点クラックが形成される場合 (図5 (b)) と、②中央の2つの凸部に円形亀裂が形成され、それらが結合して起点クラックが形成される場合 (図5 (c)) が観察された。円形亀裂が拡大する場合を C-E (Center-Extend の意)、円形亀裂同士が結合する場合を C-C (Center-Connect の意) と表記する。次に、外側の凸部に円形亀裂が形成されると、③円形亀裂が成長して内側の凸部に達し、起点クラックを形成する場合 (図5 (d)) と、④円形亀裂を起点に一気に大きな起点クラックが形成される場合 (図5 (e)) がみられた。それぞれ、O-E (Outer-Extend の意) および O-I (Outer-Instant の意) と表記している。最後に、⑤円形亀裂が形成されず、起点クラックのみが形成される場合 (図5 (f)) が観察された。円形亀裂が形成されないことから N (No circular cracks の意) と表記する。表3に、各実験条件において観察された亀裂形成挙動をまとめた。

表3に示すように、110-10のホイールにおいては、中央の凸部に亀裂が形成する C-E および C-C の挙動がみられた。これら2つの挙動が発生する割合はおおよそ等しく、形成された起点クラックの形状も同様であった。135-10のホイールでは、荷重の増加により C-C、O-E、O-I と挙動が変化した。140-7 および 170-5 でも、荷重の増加

により O-E から O-I に変化する傾向がみられる。170-5 の 25N の一部および 360-3 のすべての荷重では、円形亀裂が形成せず、除荷時に起点クラックが形成する N の挙動を示した。全体をまとめると、表 3 の左上から右下にかけて、すなわち荷重の増加および凹凸の数の増加に伴って、C-C/C-E, O-E, O-I, N の順に挙動が変化していく傾向がみられた。

次に、円形亀裂および起点クラックが形成されたタイミングを図 6 に示す。横軸は時間軸である。なお、ホイールがガラスに接触した瞬間を撮影した動画から割り出し、 $t = 0$ s としている。また、円形亀裂が複数形成される場合は最初の 하나가形成された瞬間を記録した。起点クラックは 2 つ以上の凸部にわたる亀裂が形成された瞬間を記録した。ホイールヘッドの移動速度から、荷重の負荷にかかる時間は 1 s 程度であり、そこから 12 s 程度は維持時間である。除荷のタイミングを正確に制御できなかったため試行ごとにばらつきが存在するが、いずれも $t = 12$ s 以降で除荷が開始する。

Table 3 The positions of the first crack generation below the indentation.

	110-10	135-10	140-7	170-5	360-3
5 N	C-E/C-C	C-C	O-E	O-E	N
15 N	C-E/C-C	O-E	O-I	O-E/O-I	N
25 N	C-E/C-C	O-I	O-I	O-I/N	N

※ C-E: Center-Extend, C-C: Center-Connect, O-E: Outer-Extend, O-I: Outer-Instant, N: No circular crack.

Fig. 6 Time chart of crack generation for each wheel shape. (a) 110-10, (b) 135-10, (c) 140-7, (d) 170-5 and (e) 360-3. $t = 0 \sim 1.0$ s is loading process, $t = 1.0 \sim 13.0$ s is load holding process and $t = 13.0 \sim$ is unloading process.

図6より、110-10のすべての荷重と135-10の5Nにおいては、負荷過程に円形亀裂が形成しており、そのタイミングは、110-10は $t=0.5\sim0.6$ s、135-10は $t=0.8$ s付近であった。一方で、それ以外の条件では、およそ $t=2$ s以降、すなわち維持過程において円形亀裂が形成している。したがって、中央の凸部に円形亀裂が形成される場合（C-CおよびC-E）は負荷時に、外側の凸部に円形亀裂が形成される場合（O-EおよびO-I）は維持過程で亀裂が形成された。（図6（a））より、110-10のホイールでは荷重の増加により起点クラックの形成タイミングが早くなっている。5Nでは維持過程で発生しているのに対し、15Nおよび25Nでは負荷過程で発生しているものもある。（図6（b））に示した135-10を用いた場合においても、5Nでは除荷過程で起点クラックが発生するのにに対し、15Nおよび25Nでは維持過程で発生するようになっている。（図6（c））140-7、（図6（d））170-5および（図6（e））360-3のホイールでは、起点クラックは概ね $t=13.0$ s以降の除荷過程で発生している。

また、ホイール形状で比較すると、ばらつきがあるものの円形亀裂については、凹凸の数が増えるほど形成するタイミングが遅くなる傾向がみられる。起点クラックについても、歯数の増加に伴ってタイミングが遅くなっている。ただし、除荷時に起点クラックが形成する場合は、除荷が始まる瞬間に起点クラックが形成するため、条件による差は小さい。

4. 有限要素法解析の結果および考察

亀裂形成のメカニズムとしては、微小な傷や欠けといった欠陥を起点として亀裂が形成されるという考え方が一般的である。ビッカース圧子を用いた研究では、垂直亀裂であるメディアンクラックは、圧子下方の塑性変形領域とその周囲の弾性変形領域の境界部に存在する微小欠陥を起点に形成されると考えられている。このとき、微小欠陥の大きさ（長さ）と負荷する荷重が閾値を超えると、ガラス内部にメディアンクラックが形成される（Lawn and Evans, 1977）。

脆性材料の破壊のモデルには単軸引張りに代表されるモードⅠと、せん断による破壊であるモードⅡ、モードⅢがある。ホイール割断は系がスクライブラインに対して線対称であるため、対称面上に形成される円形亀裂および起点クラックではモードⅠの破壊が生じていると考えられる。したがって、亀裂の起点となる微小欠陥近傍において、モードⅠの破壊にかかわる応力拡大係数がガラスの破壊靱性値を超えたときに、円形亀裂が形成される。しかし、本稿における数値解析では、亀裂や欠陥の存在を考慮していないため、亀裂開口方向の垂直応力分布（Y軸方向垂直応力、 σ_Y ）から亀裂の形成挙動について考察する。

4・1 ホイール押し付けにおける典型的な応力分布と亀裂形成の関係

まず、一例として110-10のホイールに15Nの荷重を負荷した場合の解析結果を図7に示す。これ以降、解析結果については、亀裂形成に影響すると思われる引張応力のみに着色している。カラーバーの範囲外である濃いグレーは圧縮応力状態を示す。図7は、最大負荷時と除荷完了時における最大主応力（ σ_1 ）とY軸方向垂直応力（ σ_Y ）の分布を、俯瞰した図である。ここで σ_Y は、前章で観察された円形亀裂および起点クラックの開口に寄与する応力成分である。なお、解析結果における時間 t_a は、荷重の負荷および除荷の段階を示すものであり、実験

Fig. 7 Overhead view of stress distribution when using 110-10 at an applied load of 15 N. (a) and (b): Maximum principal stress σ_1 at $t_a = 0.5$ s (maximum load) and $t_a = 1.0$ s (unloaded). (c) and (d): Normal stress in Y direction σ_Y at $t_a = 0.5$ s and $t_a = 1.0$ s.

において定義したホイール接触時からの経過時間 t とは一致しないことを明記しておく．図 7 (a) は荷重が最大まで負荷された $t_a = 0.5$ s における最大主応力 σ_1 の分布であり，ホイールの凸部が押し込まれた変形領域（圧痕）の周囲には圧縮応力が作用している．その外側に引張応力が作用し，特に楔状の圧痕の角部と，圧痕の下方に引張応力が集中している．除荷後は，弾性変形の回復により圧痕深さが減少し，圧縮応力領域は縮小している（図 7 (b)）．引張応力はガラス表面の圧縮応力領域の周囲に分布し，圧痕角部および圧痕間で大きな値をとる．図 7 (c) より， σ_Y は圧痕下方に分布していることがわかる．除荷後には，圧痕間の表面で最大値をとる（図 7 (d)）． σ_Y の引張成分は，XZ 対称面から Y 軸方向に 20 μm 程度の範囲に分布していて，かつ最大値は XZ 対称面上に分布する．したがって，これ以降は Y 軸方向から見た XZ 対称面上の σ_Y の分布を示す．

図 8 には 110-10 のホイールに 15 N の荷重を負荷した場合の σ_Y の経時変化を示す． $t_a = 0.1$ s の段階で，すでに中央の凸部直下には 1 GPa 近い引張応力（黄色領域）が作用している（図 8 (a)）．その後，押し込みの進行により圧縮応力場が拡大し，それに伴い引張応力場はその範囲を広げながら下方に押し下げられていく（図 8 (b, c)）． $t_a = 0.5$ s の最大負荷時の応力分布をみると，引張応力領域は圧縮応力領域を回り込むようにして，表面付近まで達していることがわかる（図 8 (c)）．また，ガラス表面の圧痕間は圧縮応力状態になっている．このとき σ_Y の最大値は，外側の凸部直下の要素であった．除荷に転ずると圧縮応力領域が縮小し，それに伴い引張応力領域が表面に向かって上昇する（図 8 (d)）． $t_a = 1.0$ s の除荷後では，圧痕下方の引張応力は減少し，圧痕間の表面で最大値をとる（図 8 (e)）．

実験結果と比較すると，円形亀裂の形成された位置はホイール凸部が接触した下方であり，負荷時において σ_Y の引張成分が分布する位置と一致している．したがって， σ_Y によりモード I の破壊が起こり，円形亀裂が形成されたと考えられる．一方，実験において円形亀裂は，図 8 (b) および (c) で σ_Y の最大値を示した外側の凸部下方ではなく，負荷過程の後半（ $t = 0.6$ s 以降）に中央の凸部下方で形成された．このことは，必ずしも最大の応力が作用している地点で亀裂が形成されるわけではないことを示している．前述の通り，起点となる微小な欠陥近傍の応力拡大係数が破壊靱性値を超えると亀裂が形成されるため，中央の凸部近傍の方が大きな応力拡大係数になっていたと考えられる．モード I の応力拡大係数は，長さ $2a$ の亀裂を含む無限平板に σ_∞ の一様な応力が作用するとき，次式であらわされる．

$$K_I = \sigma_\infty \sqrt{\pi a} \quad (1)$$

すなわち，応力拡大係数は亀裂の大きさの平方根と，応力の値に比例する．実験では亀裂の起点は確認できていないが，中央の凸部の方が深くガラスに押し込まれ，接触する時間も長いので，比較的大きな欠陥が形成した，あるいは元からあった欠陥が成長したことで，応力拡大係数が大きくなった可能性がある．また，複雑な応力場においては，局部エネルギー法や線積分法，全エネルギー法といった，ある領域内の歪エネルギーや応力値の積分によって応力拡大係数を求める手法がとられる（上田，矢尾，1973）．すなわち，蓄えられた歪エネルギーの量が応力拡大係数に影響する．図 8 (c) のように，中央の引張応力場の方が広範囲に分布しているため，より大き

Fig. 8 Transition of Y axis tensile stress distribution on XZ symmetry plane when using 110-10 at applied load of 15N. (a) ~ (c): loading process, (d) and (e): unloading process. Allow mark indicates crack generation point in experiments.

な歪エネルギーが蓄えられており、これにより応力拡大係数が大きくなった可能性も考えられる。今回の実験では、亀裂形成の起点を捉えることはできていないため、その点も含めてより詳細な調査が必要である。

4・2 応力分布や亀裂形成に対する凹凸形状の影響

次に、ホイールの凹凸形状が異なる場合の解析結果の一例として、170-5 のホイールをガラス基板に押し付けた場合の解析結果を図9に示す。図9も図8と同様に、15 Nを負荷した場合における応力分布の経時変化を示している。 $t_a = 0.1$ sでは、110-10の場合と同様に、ホイール凸部が接触している近傍は圧縮応力状態となり、その周囲に引張応力領域が分布している（図9 (a)）。 $t_a = 0.3$ sのようにホイールの凹部が接触すると、その周囲も圧縮応力状態になっていく（図9 (b)）。凸部により押し退けられたガラスの変位が凹部の接触により拘束され、圧縮応力状態になっていると考えられる。 $t_a = 0.5$ sの最大負荷時には、中央凸部の両隣の凹部がほぼすべて接触し、表面一帯が圧縮応力領域になる（図9 (c)）。110-10では圧縮応力領域を回り込んで表面付近まで達していた引張応力領域は、ガラス内部に分布するようになる。また、中央の圧痕下方の引張応力領域は結合し、その中間地点（YZ対称面上）で最大値をとる。除荷に転ずると、表面付近の圧縮応力状態が徐々に解消されてゆき、 $t_a = 0.7$ sでは完全に解消されて、引張応力領域が表面に到達している（図9 (d)）。110-10の場合と同様に、除荷とともに引張応力領域も上昇してゆき、除荷後には圧痕間の表面で最大値をとる（図9 (e)）。

この条件における実験結果はO-EおよびO-Iであり、中央の凸部下方では亀裂が形成せず、維持過程に外側の凸部下方で円形亀裂が形成した。図9 (c)を見ると、亀裂が形成しなかった中央の凸部の両隣は、凹部の接触により表面付近が圧縮応力領域になっているのに対し、亀裂が形成した最も外側の凸部では引張応力が表面まで達している。したがって、凹部の接触により生じた表面付近の圧縮応力領域が亀裂の形成を抑制し、引張応力領域が表出している地点において円形亀裂が形成されるものと考えられる。

他のホイールの凹凸形状における解析結果を図10にまとめた。図10は各ホイールに15 Nの荷重を負荷した場合の、負荷完了時（ $t_a = 0.5$ s）における σ_y の分布である。同時に、各条件における負荷時のホイール押し込み深さ（ Z_1 ）も示している。ホイールの形状は、110-10と135-10は凹部の形状が同様で凸部の長さのみが異なり、また140-7、170-5、360-3は凹部の深さおよび凹凸の間隔が異なる。ホイールの押し込み深さ Z_1 は、135-10で最も大きく、110-10、140-7、170-5、360-3の順に小さくなる。135-10は110-10より凸部の長さが小さいため、小さい面積に荷重が集中することでより深く押し込まれ、その他のホイールは凹部の接触により接触面積が増加することで押し込み量が抑制されている。凹部の接触状態を比較すると、110-10、135-10、140-7、170-5、360-3の順で凹部の接触が大きくなっている。また、凹部を個別にみると、凹部の接触度合いに応じて、引張応力領域が下降していることがわかる。 σ_y の引張応力分布と実験結果を比較すると、引張応力領域の表出と円形亀裂の形成位置がよく対応することがわかった。図10中に、各条件における主な円形亀裂の形成位置を矢印で示している。亀裂が形成される凸部近傍の引張応力は圧縮応力領域を回り込んで表出しているのに対し、凹部が接触している中央付近の凸部では、亀裂の形成が抑制されている。

Fig. 9 Transition of Y axis tensile stress distribution on XZ symmetry plane when using 170-5 at applied load of 15N. (a) ~ (c): loading process, (d) and (e): unloading process. Allow mark indicates crack generation point in experiments.

したがって、円形亀裂の形成は引張応力領域が表面近くまで達する必要があると考えられ、亀裂形成の起点となる欠陥が表面あるいは圧痕付近にあることを示唆している。ホイールの凸部の接触により微小な傷が発生し、起点となっていると考えられる。また、O-E および O-I のように外側の凸部に円形亀裂が形成する場合には、維持過程に亀裂が形成している。これは外側の凸部近傍の歪エネルギーが不十分であるため直ちに亀裂が形成されず、起点となる欠陥が数秒かけてゆっくり成長することで応力拡大係数が増大したためと考えられる。

4・3 応力分布や亀裂形成に対する荷重の影響

押し付け荷重を変更した場合についても、引張応力の表出の有無で円形亀裂の形成挙動を説明できる。押し付け荷重により亀裂形成の挙動が変化した 135-10 と 170-5 のホイールに、25 N までの荷重を負荷した場合の解析結果を図 11 に示す。それぞれ、5 N ($t_a = 0.1$ s), 15 N ($t_a = 0.3$ s) および 25 N ($t_a = 0.5$ s) が負荷された状態の応力分布を記載している。

図 10 と同様に、引張応力領域の表出と図 11 中に矢印で示した亀裂形成位置は一致している。ただし、135-10 の 15 N および 25 N の負荷過程において、5 N の応力状態を経ているにも関わらず中央の凸部に亀裂が形成されないのは、上述のように 135-10 では応力拡大係数が小さいため起点の成長に時間が必要であり、15 N および 25 N では起点が成長する前に凹部が接触し、拘束されたためであると考えられる。

Fig. 10 Comparison of stress distribution on XZ symmetry plane at an applied load of 15 N among various wheel configuration ($t_a = 0.5$ s, after loading). (a) 110-10, (b) 135-10, (c) 140-7, (d) 170-5 and (e) 360-3. Arrow marks indicate generation points of circular cracks. Z_1 is indentation depth after loading.

Fig. 11 Comparison of Y axis tensile stress distribution on XZ symmetry plane among an applied load of 5, 15 and 25 N at $t_a = 0.5$ s (end of loading) when using wheel 135-10 (a ~ c) and 170-5 (d ~ f). Arrow marks indicate crack generation point in experiments.

4・4 起点クラックの形成と応力分布の関係

起点クラックの形成も、ホイール凹部の接触により抑制されると考えられる。特にホイール凹部の接触が顕著な 170-5 の 25 N と 360-3 の 5~25 N では、図 10 (e) および図 11 (f) のように引張応力が表面から離れた位置に分布するため負荷・維持過程に円形亀裂は形成されず、内部に大きな引張応力領域が存在する。そのため、除荷により表面付近の圧縮応力が解消され、引張応力が表出することで一気に起点クラックが形成される N の挙動を示す。次いで凹部の接触が大きな条件では円形亀裂が形成されるものの、凹部が接触することで圧縮応力状態になった部分が亀裂の成長を阻害するため、負荷過程および維持過程に起点クラックが形成されない。除荷により表面付近の圧縮応力が減少すると、その瞬間に接触領域全体にわたって起点クラックが形成されるため、円形亀裂の成長が観測できない O-I の挙動を示す (135-10 25 N, 140-7 15~25 N, 170-5 15~25 N)。表面付近の圧縮応力の影響が小さい条件では、時間経過により円形亀裂が徐々に成長し、2 つの円形亀裂が結合する場合は C-C, 1 つの円形亀裂が成長して起点クラックを形成する場合は C-E および O-E の挙動を示す。

4・5 亀裂形成のメカニズムおよび割断加工への応用

以上の考察から、凸部下方の円形亀裂は、亀裂開口方向の垂直応力を駆動力として、凸部の接触により生じる欠陥を起点に形成されると考えられる。亀裂形成挙動の変化と照らし合わせた結果、①亀裂開口に必要なエネルギーが蓄えられていることと、②引張応力領域が表面付近まで達していることが、円形亀裂が形成される条件といえる。また、表面付近の応力分布はホイール凹部の接触形態により変化することが明らかになった。図 12 にホイールの接触形態と応力分布の関係性を表した模式図を示す。凹部が接触していない場合 (図 12 (a)), 凸部近傍の圧縮応力領域を回り込むようにして、引張応力領域が表面付近まで分布する。ホイールの凹部深さの減少、あるいは荷重の増加により凹部の接触が顕著になることで、図 12 (b) に示すように表面近傍が圧縮応力領域となる。これにより、引張応力領域が亀裂形成の起点である表面付近の欠陥から遠ざかるため、円形亀裂および起点クラックの形成が抑制される。亀裂が形成する閾値未満の条件においても、荷重を負荷したまま維持することで起点が徐々に成長し、亀裂形成条件が満たされ、亀裂が形成される。

緒言で述べたように、ホイール押し付け時における起点クラックの形成は、割断面の品質を左右することがわかっている。実際の割断加工においては、本稿における維持過程の時間はほとんどとられないため、負荷過程に起点クラックが形成される C-C あるいは C-E の挙動が望ましい。よって、凹部が十分に大きなホイールを用い、起点クラックが形成されるのに必要最低限の荷重でホイールを押し付けることにより凹部の接触を抑えることで、起点クラックが安定して形成され、割断面にリブマークが現れる品質の良い割断加工が可能になると考えられる。

Fig. 12 Relationships between contact condition of concavity and stress distribution. Deep color and pale color indicate compressive and tensile stress region, respectively. When concavities do not contact (a), tensile stress reach to glass surface and then circular cracks occur. On the other hand, when concavities contact enough, the region near surface becomes compressive stress and then circular cracks generation is suppressed.

5. 結 言

本研究では、ホイール割断現象について、割断面形態を左右するスクライブ開始時のホイール押し付けに注目し、高速度カメラによる亀裂形成挙動の観察および有限要素法による応力解析を行った。また、工具形状および押し付け荷重を変化させて実験および解析を行い、応力分布と亀裂形成挙動の関係を詳細に調査した。その結果、以下の知見を得た。

- ・ホイール押し付けにより、円形亀裂および起点クラックの2種類の垂直亀裂が形成される。これらは亀裂開口方向の引張応力を駆動力として、ホイール凸部の接触部近傍に発生した欠陥を起点に形成される。
- ・ホイールの凹部が接触することで、周辺が圧縮応力領域になる。これにより、起点となる欠陥が存在する表面から引張応力領域が遠ざかるため、垂直亀裂の形成および成長が抑制される。すなわち、表面付近まで引張応力領域が到達するかどうか、その地点における垂直亀裂の形成に影響する。

本論文では垂直亀裂（円形亀裂および起点クラック）のみに着目したが、ホイール割断では割断加工に不要な亀裂が生じることも問題となっている。そのため、工具開発の際には有用な亀裂の促進と不要な亀裂の抑制を総合的に検討しなければならない。ホイール割断において生じる他の亀裂についても、応力解析および実験による詳細な研究が必要である。

謝 辞

本研究の遂行にあたり、スクライブ装置他をご提供頂いた三星ダイヤモンド工業株式会社に厚く御礼申し上げます。本研究の一部は科学研究費補助金（課題番号：18H03749）の助成により実施されました。深く感謝の意を表します。

文 献

- Imai, K., Saito, M., Matsusaka, S., Matsumoto, Y., Hidai, H., Chiba, A. and Morita, N., Dynamic observation of crack generation during wheel scribing from lateral and back sides using a high-speed camera, *Precision Engineering*, Vol. 60 (2019), pp.421–427.
- Kato, Y., Yamazaki, H., Yoshida, S., Matsuoka, J. and Kanzaki, M., Measurement of density distribution around Vickers indentation on commercial aluminoborosilicate and soda-lime glasses by using micro Raman spectroscopy, *Journal of Non-Crystal Solids*, Vol. 358 (2012), pp.3473–3480.
- Lawn, B. R. and Evans, A. G., A model for crack initiation in elastic/plastic indentation fields, *Journal of Material Science*, Vol. 12 (1977), pp.2195–2199.
- Liao, Y. S., Yang, G. M. and Hsu, Y. S., Effect of geometrical characteristics of a scribing wheel on the bending strength of LCD glass substrates, *Journal of the Society for Information Display*, Vol. 17, No. 3 (2009), pp.287–291.
- 松坂壮太, 溝渕玄太, 比田井洋史, 千葉明, 森田昇, 大沼隼志, ホイールによるガラススクライブ中の亀裂進展観察と内部応力の可視化, *精密工学会誌*, Vol.81, No. 3 (2015), pp.270–275.
- 宮嶋敦, 稲崎一郎, 関家臣二, ダイヤモンドブレードを用いたガラスの精密切断加工, *日本機械学会論文集 C 編*, Vol. 56, No. 521 (1990), pp.212–216
- 沼上幹, 液晶ディスプレイの技術革新史—行為連鎖システムとしての技術, 白桃書房 (1999), pp.51–54.
- 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ビングに関する研究, *砥粒加工学会誌*, Vol. 53, No. 11 (2009), pp.684–689.
- Tomei, N., Murakami, K., Fukunishi, T., Yoshida, S. and Matsuoka, J., Direct observation of crack propagation in a liquid crystal display glass substrate during wheel scribing, *International Journal of Applied Glass Science*, Vol. 9 (2018), pp.105–113.
- 上田幸雄, 矢尾哲也, 応力拡大係数の計算法, *溶接学会誌*, Vol. 42, No. 9 (1973), pp.934–950.
- Yamamoto, K., Hasaka, N., Morita, H. and Ohmura, E., Three-dimensional thermal stress analysis on laser scribing of glass, *Precision Engineering*, Vol. 34, No. 4 (2010), pp.55–61.

References

- Imai, K., Saito, M., Matsusaka, S., Matsumoto, Y., Hidai, H., Chiba, A. and Morita, N., Dynamic observation of crack generation during wheel scribing from lateral and back sides using a high-speed camera, *Precision Engineering*, Vol. 60 (2019), pp.421–427.
- Kato, Y., Yamazaki, H., Yoshida, S., Matsuoka, J. and Kanzaki, M., Measurement of density distribution around Vickers indentation on commercial aluminoborosilicate and soda-lime glasses by using micro Raman spectroscopy, *Journal of Non-Crystal Solids*, Vol. 358 (2012), pp.3473–3480.
- Lawn, B. R. and Evans, A. G., A model for crack initiation in elastic/plastic indentation fields, *Journal of Material Science*, Vol. 12 (1977), pp.2195–2199.
- Liao, Y. S., Yang, G. M. and Hsu, Y. S., Effect of geometrical characteristics of a scribing wheel on the bending strength of LCD glass substrates, *Journal of the Society for Information Display*, Vol. 17, No. 3 (2009), pp.287–291.
- Matsusaka, S., Mizobuchi, G., Hidai, H., Chiba, A., Morita, N. and Onuma, T., Observation of crack propagation behavior and visualization of internal stress field during wheel scribing of glass sheet, *Journal of the Japan Society for Precision Engineering*, Vol.81, No. 3 (2015), pp.270–275 (in Japanese).
- Miyajima, A., Inasaki, I. and Sekiya, S., Precision cut off grinding of glass with a diamond blades, *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series C*, Vol. 56, No. 521 (1990), pp.212–216 (in Japanese).
- Numagami, T., *History of liquid crystal display technology*. Tokyo, Hakutoushobou (1999), pp.51–54 (in Japanese).
- Tomei, N., Maekawa, K., Wakayama, H. and Tomimori, H., A study on scribing with breakless wheel, *Journal of the Japan Society for Abrasive Technology*, Vol. 53, No. 11 (2009), pp.684–689 (in Japanese).
- Tomei, N., Murakami, K., Fukunishi, T., Yoshida, S. and Matsuoka, J., Direct observation of crack propagation in a liquid crystal display glass substrate during wheel scribing, *International Journal of Applied Glass Science*, Vol. 9 (2018), pp.105–113.
- Ueda, Y. and Yao, T., Calculation method of stress intensity factors, *Journal of the Japan Welding Society*, Vol. 42, No. 9 (1973), pp.934–950 (in Japanese).
- Yamamoto, K., Hasaka, N., Morita, H. and Ohmura, E., Three-dimensional thermal stress analysis on laser scribing of glass, *Precision Engineering*, Vol. 34, No. 4 (2010), pp.55–61.