

平成 30 年 6 月 6 日現在

機関番号：12501

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15H03898

研究課題名(和文)超高速光弾性応力撮像法によるガラスの機械的割断機構の解明と動的割断理論の構築

研究課題名(英文)Elucidation of mechanical scribing mechanisms of glass sheet by ultrahigh speed photoelastic stress imaging technique, and development of dynamic scribing theory

研究代表者

森田 昇(Morita, Noboru)

千葉大学・大学院工学研究院・教授

研究者番号：30239660

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 12,900,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、薄板ガラスのホイール割断を対象として、ガラス内部応力場、亀裂生成・進展挙動と割断面品質の関係を検討した。走査型電子顕微鏡内部で動作する小型割断装置を用いたホイール直下での亀裂生成挙動の観察、およびスクライプ中の亀裂生成・進展挙動の高速度観察を実施し、割断面品質がホイール直下に生成するクラックの進展挙動に依存することを明らかにした。また、高速偏光計測法を用いてスクライプ直後のガラス内部位相差を測定し、亀裂進展と残留応力との関係を明確化した。さらにこれらの結果を利用して、スクライプ直後にリアルタイムで割断面を推定可能なモニタリング手法を開発した。

研究成果の概要(英文)：We investigated the relationship between internal stress fields, crack propagation behaviors and fracture surface qualities during wheel scribing of glass sheets. For this purpose, a wheel scribe that can operate in scanning electron microscope was developed. In addition, we tried to visualize the crack propagation behavior using a high-speed camera. These observation results showed that the fracture surface morphology depended on whether the penny cracks which appeared under the wheel were connected with each other. We also measured the phase difference distributions in glass sheets just after scribing using a high-speed polarization camera. As a result, it was found that the measured phase difference distribution included information about the crack propagation behavior, and this information could be used for the estimation of the fracture surface morphology. An in-process estimation method for the fracture surface morphology was therefore developed.

研究分野：生産工学・加工学

キーワード：ガラス ホイール割断 高速偏光計測 位相差情報 内部応力場 割断面品質 走査型電子顕微鏡

1. 研究開始当初の背景

割断とは、ガラス・シリコン等の硬脆材料に対して、その表面或いは内部に形成した亀裂を、機械的・熱的応力によって進展させ、分割する技術である。割断はカッター等による切断に比べて、切り代が小さい、高速施工が可能である、高品質な断面が得られる等の特長から産業界にも広く普及している技術である。しかし、製造工程における割断条件は、今も実験的・経験的に決定されることが多く、割断面の品質を十分に予測・制御する手法は確立されていないのが現状である。特に今後は、携帯情報端末向け化学強化ガラスや車載用パワーデバイス向け SiC 基板等の、従来技術では割断が困難とされる材料に対しても割断技術の適用が広がると予想され、材料内部の応力状態、亀裂の生成・進展挙動、割断面品質の関係を明確化することが最重要かつ喫緊の課題と考えられる。

2. 研究の目的

上記のような背景から、本研究では最も一般的かつ基本的な「ガラスのホイール割断」に着目し、その割断メカニズムを実験的に明らかにした上で、材料や手法を問わず適用可能な革新的・普遍的割断技術へ展開することを目的とした。

3. 研究の方法

ホイール割断は図1に示すように、スクライビングホイールと呼ばれる算盤玉状工具を被加工材に押し付けながら移動させ、亀裂を形成する過程(スクライブ)と、曲げ応力によって亀裂を進展させて破断する過程(ブレイク)からなる。本研究では、いずれの実験においても、図2に示すスクライビングホイール((株)三星ダイヤモンド工業, Penett SDX)と無アルカリガラス基板(Corning 1737, 板厚: 0.7 mm)を用いた。

上述のように、本研究では亀裂の生成・進展挙動を詳細に調査する必要があるため、主として以下の3点に関する研究を実施した。

(1) 走査型電子顕微鏡(SEM)によるホイールとガラス接触部近傍での亀裂生成挙動の微視的観察

図3に本研究で開発したSEM内観察用小型割断装置を示す。押し込まれたホイール工具に対してガラス試料が移動してスクライブを行うステージ駆動型とした。実験に先立ち、一般的な産業用割断装置と同条件でスクライブを行い、本装置によっても同様の割断面が得られることを確認した。なおSEM内での本装置の最大傾斜角度は約15度である。

(2) 高速度カメラによるホイールとガラス接触部近傍での亀裂進展挙動の動的観察

図4にスクライブ中のホイールとガラスの接触点近傍における亀裂進展挙動の観察システムの模式図を示す。ガラス窓を設けた試料台上に設置したガラス基板に対し、ホイールの側方および下方から偏光高速度カメラ

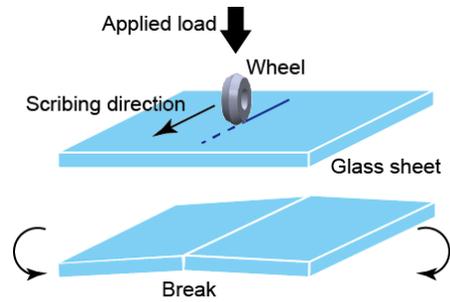


図1 ホイール割断の模式図

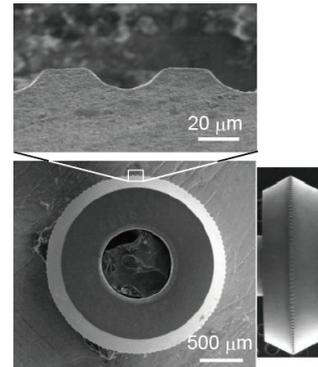


図2 スクライビングホイールの外観

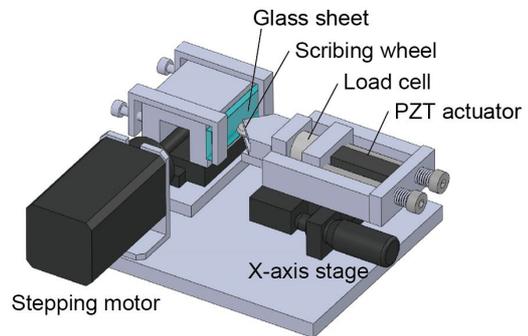


図3 SEM内観察用小型割断装置の模式図

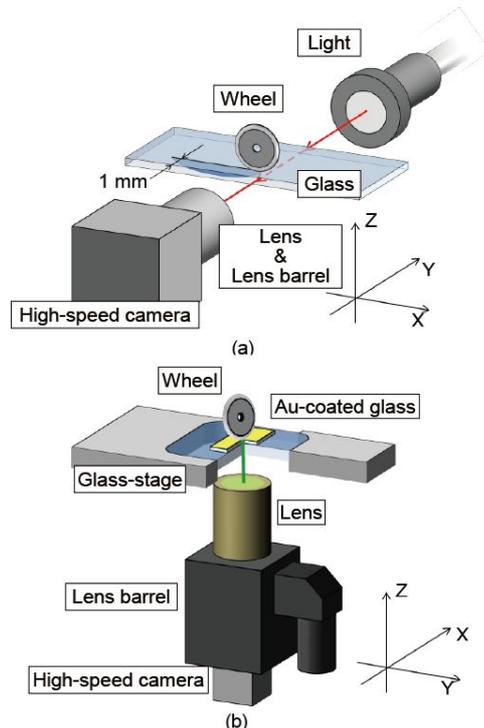


図4 亀裂生成・進展挙動の観察方法。(a) ホイール側方および(b) 下方から。

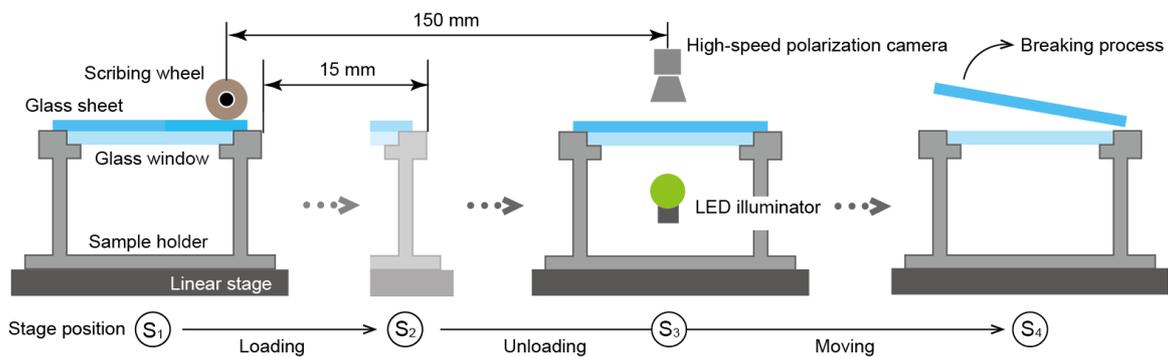


図5 高速偏光計測方法の模式図

((株)フォトロン, Crysta PI-5P, 時間分解能: 2000 fps, 通常モード)で内部を進展する亀裂を撮影した。なお, 下方からの撮影に際しては, ガラス裏面から入射した照明光がガラス上面で反射した戻り光をカメラに入射させた。ガラス表面での反射率を増加させるため, 金蒸着を行ったガラス基板をスクライブに供したが, 金蒸着膜の有無が実験結果に及ぼす影響は十分に小さいことを事前に確認した。

(3) 高速偏光計測法によるガラス内部応力場の可視化と位相差情報を用いた割断面品質推定手法の確立

図5に高速偏光計測方法の模式図を示す。同図に示すように, スクライブ後のガラス基板が照明光源と高速度カメラ(同上, 偏光計測モード)の間を通過する際に位相差測定を実施した。なお, 計測される位相差は光弾性理論により, 透過光軸に垂直な面内での主応力差に比例することが知られている。

4. 研究成果

(1) SEMによる亀裂生成挙動の観察

ホイールの押し込み荷重を6および15 Nとした場合の, ホイール先端近傍のガラス表面SEM写真を図6に示す。図6(a)は, 6 Nでスクライブしたガラスの表面写真であり, ホイール凸部が接触した箇所に圧痕が確認できる。また圧痕間には特に変化が認められず, 圧痕がそれぞれ独立していることが分かる。一方, 図6(b)は15 Nでの観察結果であり, ホイール凸部接触部の圧痕, および圧痕間に黒色の亀裂らしきものが認められた。この黒色部の形状を特定するため, ガラス表面のスクライブ痕を光学顕微鏡により観察した。結果を図7に示す。なお, 図6および図7はそれぞれ同じガラス試料の同じ箇所を観察しており, 両図中の圧痕に付与した番号同士が対応している。図7(a)は6 Nでのスクライブ痕であり, 各圧痕の四隅から隣同士の圧痕をつなぐように亀裂が生成していることが確認できる。図6(a)に示したように, SEM内で観察した際には, このような亀裂は観察されず, 大気中への取出しによって亀裂が表出したものと考えられる。この原因として, 亀裂への大気の流れによる亀裂の進展・表出や大気中の水分による応力腐食が考えられる。一方, 図7(b)は15 Nでのスクライブ痕であり, 各圧

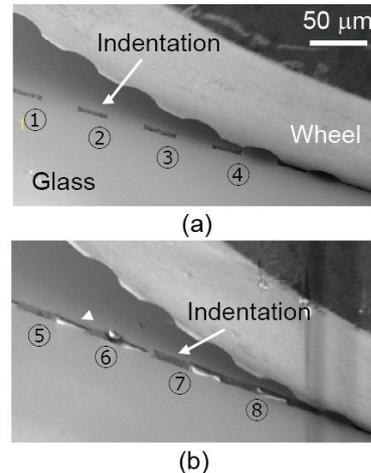


図6 ホイール接触点近傍のSEM写真。(a) 6 N, (b) 15 N.

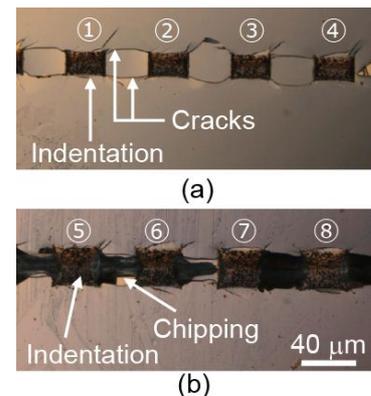


図7 ガラス表面のスクライブ痕。(a) 6 N, (b) 15 N.

痕間に, 圧痕より少し幅の狭い割れや剥離が生じていることが分かる。したがって図6(b)のSEM観察像において黒色を呈していた箇所は, 圧痕間の割れ, あるいは剥離部分であると考えられる。なお, ここでは示していないが, 15 Nにおけるホイールの押し込み深さはホイールの歯高より小さいことから, ホイール凹部が強く押し付けられたためにガラス表面が破壊され, 剥離したものと推察される。したがって, 図7(a)の場合と同様に, 圧痕間に形成された亀裂がガラス内部で接続し, その上部が剥離したものと推察される。

以上の結果から, 押し込み荷重を変化させた場合, 圧痕間での亀裂生成挙動が異なることが明らかとなった。

(2) 亀裂進展挙動の動的観察

図8に本ホイールを用いた場合によく見られる2種類の断面パターンを示す。図8(a)は押し込み荷重が7Nの場合であり、ハックルマークと呼ばれる不規則な割れや欠けが認められる。一方、図8(b)は押し込み荷重が15Nの場合であり、リブマークと呼ばれる周期的な縞模様が形成されている。切断後のガラス基板の曲げ強度の点から、工業的にはリブマークを有する基板が良品とされている。ここで全スクライプ長に対するリブマーク長の割合をリブマーク率と定義し、荷重の影響を検討した。結果を図9に示す。同図から、8N以下では全ての断面がハックルマークを、11N以上では全ての断面がリブマークを呈することが分かった。なお、9~10Nではハックルマークからリブマークに遷移する箇所が認められた。図9の結果は、断面の形態が、特定の荷重閾値(本実験では9~10N)を超えると急激に変化することを示している。

そこで、これら3つの荷重帯における亀裂進展挙動を側方および下方から高速カメラによって観察した。側方からの観察結果を図10に、下方からの結果を図11に示す。図10から分かるように、低荷重条件ではホイールを押し込んだ時点($t=0$ s)で、個々のホイール凹凸の直下に半円状の小さな亀裂の形成が認められる。それぞれの小さな亀裂はホイールの後方、すなわちホイールが通過した後($t=0.0705$ s)に連結して板厚方向への進展を開始している。これに対して、高荷重条件ではホイール押し込み時点で既に3~4つの凹凸直下の亀裂が連結して半円状の大きな亀裂を形成している(本稿ではこの亀裂を起点クラックと呼ぶ)。その後、起点クラックはホイールの進行に伴って途切れることなく深さ方向にも成長している。また、押し込み荷重を9Nとした場合、ホイール直下では連結していなかった小さな亀裂が、スクライプ中のある時点で突然連結し、起点クラックの形成に至る事例が認められた。

一方、図11から分かるように、低荷重条件では、ホイールの直下での亀裂を介した圧痕の連結は認められず、ホイールの後方で連結していることが分かる。また圧痕同士を連結する亀裂の発生位置は圧痕ごとに異なり、圧痕の中央や両端にランダムに形成されている。一方、高荷重条件では、ホイールを押し込んだ時点で、圧痕間に亀裂の形成が認められる。その後もホイール前方への亀裂進展が観察された。また圧痕間を連結する亀裂は圧痕の中央部に位置しており、亀裂がガラス表面に垂直な1枚の面内に存在していることが示唆される。これらの結果は、図10に示した側方からの観察において、亀裂進展が大きかった結果に対応している。また、9Nの場合、 $t=0.0735$ sまではホイール前方の圧痕間に亀裂の形成が認められないが、 $t=0.0775$ sでは、圧痕から前方に進展する亀裂の存在が認められる。その後、この亀裂は

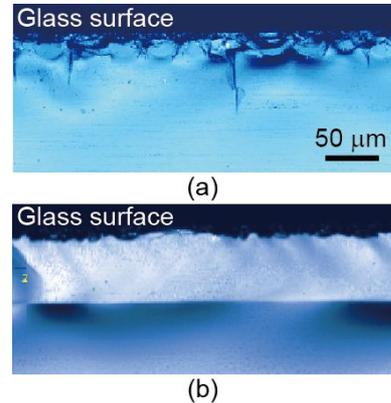


図8 よく見られる断面の例。
(a) 7 N, (b) 15 N.

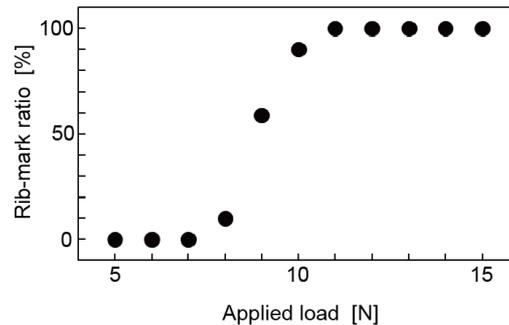


図9 リブマーク率に対する荷重の影響

$=0.10$ sで進行方向の先端の圧痕まで到達している。以上の結果は、前項で得られたSEM内での観察結果とも整合している。

これらの観察結果と、断面パターンを比較すると、以下のような断面形成メカニズムが推察される。すなわち、荷重が大きく、各圧痕から伸びる亀裂同士がうまく連結する場合、押し込みによって投入されたひずみエネルギーを消費しながら、亀裂はスムーズに成長して起点クラックとなり、ホイールの移動とともに進展してリブマークを形成する。一方、荷重が小さい場合、各圧痕から伸びる亀裂は隣同士で連結できるほど成長せず、ひずみエネルギーの蓄積によって圧痕周辺の任意の位置に徐々に亀裂を生成する。ホイールの移動と除荷による亀裂進展により、同一面内には複数の亀裂が連結することにより、半円形亀裂の名残である鱗模様と、それに交わる多数の亀裂からなるハックルマークが出現する。

(3) スクライプ直後のガラス内部応力場の可視化と断面推定手法の提案

前項で示されたように、スクライプ直後のガラス内部には、荷重条件によって異なる応力場が存在するものと考えられる。そこで、高速偏光計測によるガラス内部応力場の可視化を試みた。ホイール接触から5s後における位相差の計測例を図12に示す。同図から分かるように、押し込み荷重によって位相差像は大きく異なる。すなわち、低荷重条件では、スクライプ線の両側に半円状の位相差分布が認められるのに対して、高荷重条件ではそのような分布は認められなかった。この計

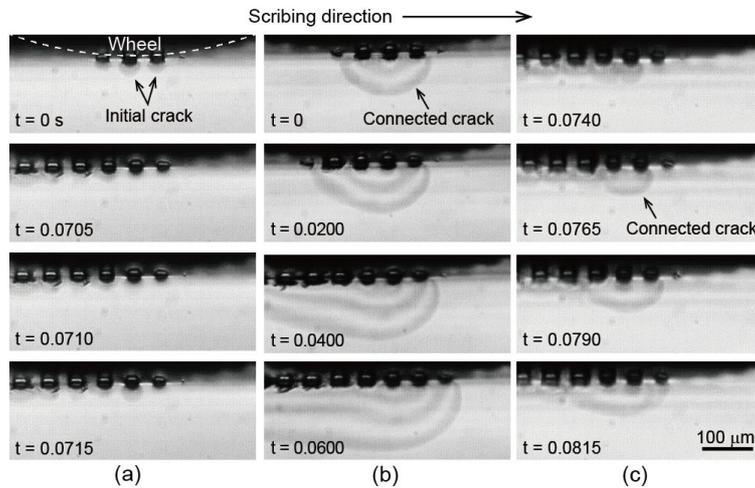


図 10 ホイール側方から見た亀裂進展挙動 . (a) 7 N, (b) 15 N, (c) 9 N.

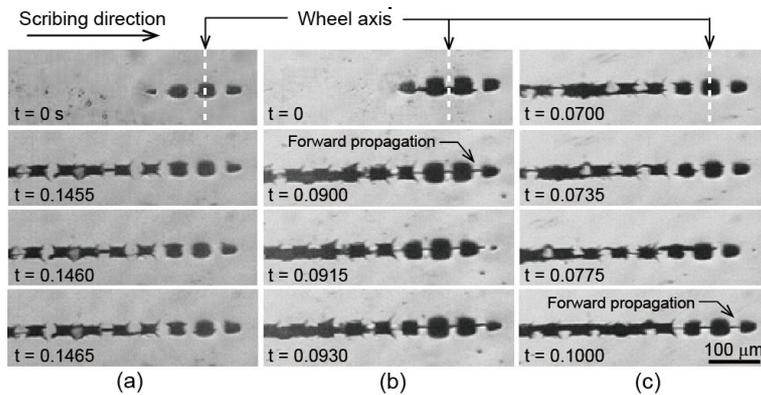


図 11 ホイール下方から見た亀裂進展挙動 . (a) 7 N, (b) 15 N, (c) 9 N.

測結果は低荷重の場合に、スクライブ線近傍に残留応力が生じていることを示している。なお、ここでは示していないが、同じ箇所を1時間後に撮影した位相差像において、低荷重の場合の半円状の位相差分布が消失していたのに対して、高荷重の場合の位相差分布はスクライブ直後と顕著な差が認められなかった。前項の結果を考え合わせると、低荷重の場合の位相差の緩やかな消失は、亀裂進展に伴う残留応力の開放に対応するものと推察される。高荷重の場合に位相差分布が変化しなかったのは、今回の実験において、ガラス基板がホイール直下から位相差計測点に至るまでの約5秒間に亀裂が十分に進展し、計測時点で既に応力が解放された結果と考えられる。

ここまでで得られた(1)~(3)の結果から、ガラスをホイールスクライブした場合、亀裂生成・進展挙動の違いにより、切断面の品質が異なること、また亀裂進展挙動の差異はスクライブ直後に計測される位相差分布にも顕著な違いをもたらすことが分かった。したがって、位相差情報を利用すれば、スクライブ直後に非破壊で切断面の品質を推定することが可能になると考えられる。ここでは、各計測条件における位相差分布の拡がりに着目し、その大小によって残留応力の有無を判定するとともに、切断面品質の推定を行った。

図 13 は切断面の全域にわたってハックル、

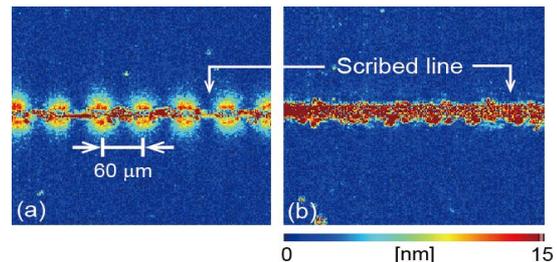


図 12 スクライブ 5 s 後の位相差計測結果 .

(a) 6 N, (b) 16 N.

リブマークが出現する場合、およびスクライブ途中でハックルからリブマークに遷移する場合の切断面の光学顕微鏡写真と、それらに対応した位置で計測した位相差分布を示したものである。同図から分かるように、ハックルマークの生じた(a)では位相差分布の広がり幅が大きく、リブマークの生じた(c)では小さくなっている。また、同図(b)では、位相差分布の広がり幅を定義するための判断基準として、7.5 nm の位相差を示した領域を白線で示している。同図から分かるように白線で囲まれた位相差の広がり幅の縮小と、切断面品質の変遷は良い一致を示している。これらの結果は、スクライブ直後に計測される位相差情報を用いて亀裂進展挙動や切断面品質を高い時間分解能で把握できることを示している。

このような品質推定手法は、切断加工に限定されるわけではなく、応力の作用する透明

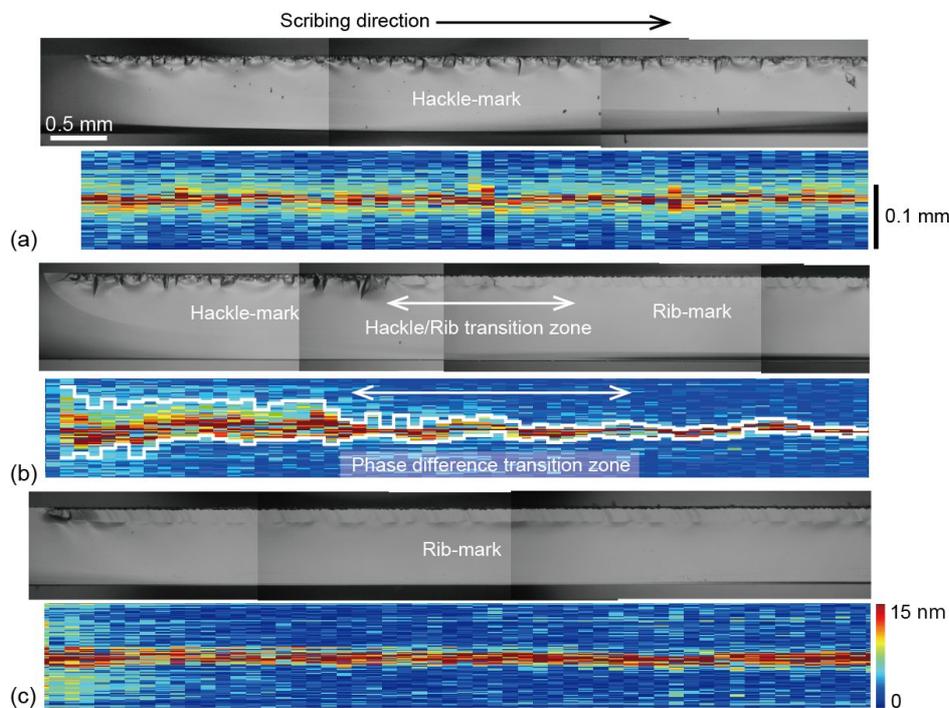


図 13 押込み荷重を変化させた場合の切断面形態と対応位置での位相差像。(a) 9 N, (b) 10 N, (c) 18 N.

材料の加工全般に応用可能である。今後は化学強化ガラス、サファイア、ダイヤモンド等の難加工材料の各種加工に対して本システムの適用を図る予定である。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 3 件)

(1) 齊藤雅裕, 今井健太郎, 松本祐一郎, 松坂壮太, 比田井洋史, 千葉明, 森田昇, 「走査型電子顕微鏡(SEM)を用いたガラスのホイールスクライブ挙動の観察」, 精密工学会誌, 印刷中。(査読有)

(2) R. HASEGAWA, S. MATSUSAKA, H. HIDAI, A. CHIBA, N. MORITA and T. ONUMA, "In-process estimation of fracture surface morphology during wheel scribing of a glass sheet by high-speed photoelastic observation", *Prec. Eng.* **48**, 164-171 (2017). (査読有)
(doi: 10.1016/j.precisioneng.2016.11.017).

(3) A. CHIBA, H. HIDAI, S. MATSUSAKA and N. MORITA, "Two-Dimensional Dynamic Stress Behavior of Sheet Glass caused by a Continuous Step Input from a Cylindrical Loader", *Intl. J. Automation Technol.* **10**, 401-410 (2016). (査読有)

〔学会発表〕(計 5 件)

(1) K. IMAI, S. MATSUSAKA, H. HIDAI, A. CHIBA, N. MORITA, "Observation of Crack Formation Using High-speed Camera During Wheel Scribing of Glass Sheet", 2018 Intl. Conf. Smart Sci. (ICSS2018), 京都(平成 30 年 4 月).

(2) 齊藤雅裕, 松本祐一郎, 松坂壮太, 比田井洋史, 千葉明, 森田昇, 「走査型電子顕微鏡(SEM)を用いたガラス基板のスクライブ加工プロセスの観察」, 2017 年度砥粒加工学会学術講演会, 福岡(平成 29 年 9 月).

(3) 今井健太郎, 齊藤雅裕, 松本祐一郎, 松坂壮太, 比田井洋史, 千葉明, 森田昇, 「薄板ガラスのホイール切断における亀裂形成挙動の観察」, 2017 年度砥粒加工学会学術講演会, 福岡(平成 29 年 9 月).

(4) 長谷川良平, 今井健太郎, 松本祐一郎, 松坂壮太, 比田井洋史, 千葉明, 森田昇, 「薄板ガラスのホイール切断における亀裂生成・進展挙動に関する研究」, 2017 年精密工学会春季大会, 神奈川(平成 29 年 3 月).

(5) 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薄板ガラスのホイール切断時の位相差計測」, 2016 年度砥粒加工学会学術講演会, 兵庫(平成 28 年 8 月).

〔その他〕

ホームページ等

<http://www.cats-lab.com/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

森田 昇 (MORITA, Noboru)

千葉大学・大学院工学研究院・教授

研究者番号: 30239660

(2) 研究分担者

比田井 洋史 (HIDAI, Hirofumi)

千葉大学・大学院工学研究院・教授

研究者番号: 60313334

松坂 壮太 (MATSUSAKA, Souta)

千葉大学・大学院工学研究院・准教授

研究者番号: 30334171

(3) 研究協力者

千葉 明 (CHIBA, Akira)

千葉大学・大学院工学研究院・研究員