

(千葉大学審査学位論文)

ホイール割断における加工メカニズムの
解明および光弾性CT法の開発

2022年2月

千葉大学大学院融合理工学府

基幹工学専攻機械工学コース

今井 健太郎

A study of processing mechanism in wheel cleaving and development of photoelastic computed tomography

Kentaro IMAI

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. This method consisted of two processes, i.e., a crack formation by rotating scribing wheel (scribing process) and a crack propagation by bending force (breaking process). Recently, the glass size and thickness become larger and thinner, and therefore, more precise and high quality separation techniques of glass sheet are strongly demanded because even invisibly small defects on fracture surfaces can severely degrade the bending strength of glass sheets. At present, a scribing wheel with notches on the ridge line named as 'break-less wheel' is widely used for the glass separation because this wheel enables the rapid and deep crack formation without bending force. However, it is well-known that the break-less wheel provides two kinds of fracture surface morphologies depending on the applied loads; hackle-mark with irregular cracks and rib-mark with periodic stripe patterns. In addition, break-less wheel also generates needless cracks on the surface scribed by notched edge.

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 by using highspeed imaging system. Finite element method (FEM) analysis and photoelastic experiment were also carried out to visualize stress distribution in the glass substrate. As a result of in-situ observation, median, radial and lateral cracks were observed during scribing process (Section 3). According to FEM results, tensile stress regions corresponding to these cracks were discovered. Relationships between tensile stress and crack generation were confirmed even when wheel shape or applied load changed (Section 4). Fractured surface morphology (hackle and rib marks) and its generation mechanism are discussed in Section 5. We suggested mechanisms that median and radial cracks directly formed fractured surfaces. Photoelastic experiment was carried out to visualize stress relaxation after scribing at Section 6. As a result, it was revealed that stress relaxation occurred with median crack extension. This result suggested that median crack extension toward depth direction spent residual stress around indentations. The mechanism of processing of wheel cleaving using break-less wheel was discussed through these sections.

In this study, photoelastic computed tomography (PECT) method was also considered as a new experimental method for stress distribution analysis (Section 7). PECT method can reconstruct 3D stress distribution from phase difference images taken by photoelastic experiment from some direction, like a x-ray CT method. We proposed stress reconstruction method using deep neural network. Simulation on the computer and verification experiment using actual machine were carried out. As a result, PECT method was embodied, and potential to 3D stress reconstruction was indicated. On the other hand, problems were also revealed by this challenge.

Keywords: wheel cleaving, glass, crack, FEM, high-speed imaging, photoelastic method

目次

第1章 緒 論.....	1
参考文献.....	5
第2章 ホイール割断の概要および実験装置.....	7
2.1 緒言.....	7
2.2 ホイール割断の概要.....	7
2.2.1 ホイール割断の工程.....	7
2.2.2 工具（スクライビングホイール）.....	7
2.3 実験試料.....	11
2.4 実験装置.....	11
2.4.1 ガラス割断装置.....	11
2.4.2 観察システム.....	13
2.5 光弾性実験法.....	15
2.6 有限要素法解析.....	17
参考文献.....	18
第3章 スクライブ中の亀裂形成挙動.....	19
3.1 緒言.....	19
3.2 加工条件と割断面品質の関係.....	19
3.2.1 実験装置および方法.....	20
3.2.2 実験結果.....	21
3.3 亀裂形成挙動の観察.....	22
3.3.1 実験方法.....	22
3.3.2 実験結果.....	22
3.4 考察.....	25
3.5 結言.....	27
参考文献.....	29
第4章 各亀裂の形成メカニズム.....	31
4.1 緒言.....	31
4.2 メディアクラック.....	31
4.2.1 実験および解析方法.....	32

4.2.2	高速度カメラによる亀裂の観察結果.....	32
4.2.3	有限要素法解析の結果および考察.....	36
4.3	ラディアルクラック.....	44
4.3.1	スクライブ表面の観察.....	44
4.3.2	高速度カメラによる亀裂形成挙動の観察.....	46
4.3.3	有限要素法解析の結果および考察.....	49
4.4	ラテラルクラック.....	56
4.4.1	実験および解析手法.....	56
4.4.2	ホイール押し付け/除荷による亀裂形成の観察と応力解析の結果.....	58
4.4.3	スクライブ時にラテラルクラックがメディアンクラックに及ぼす影響.....	60
4.5	結言.....	67
	参考文献.....	69
第5章	割断面形成メカニズム.....	71
5.1	緒言.....	71
5.2	実験方法.....	71
5.2.1	割断面形態の調査方法.....	71
5.2.2	ホイール近傍における亀裂形成挙動の観察.....	72
5.2.3	ホイール通過後の亀裂伸展挙動の観察.....	73
5.3	実験結果および考察.....	73
5.3.1	割断面形態の詳細観察.....	73
5.3.2	高速度カメラ観察.....	75
5.3.3	ハックルマークおよびリブマークの形成メカニズム.....	78
5.4	凹凸形状が異なるホイールにおける検証.....	80
5.4.1	リブマーク形成割合.....	80
5.4.2	割断面の顕微鏡観察.....	81
5.4.3	亀裂形成挙動の観察.....	81
5.4.3	考察.....	83
5.5	結言.....	84
	参考文献.....	86
第6章	二次クラック伸展メカニズム.....	87
6.1	緒言.....	87

6.2	実験方法	87
6.2.1	裏面からの位相差計測実験	87
6.2.2	亀裂深さの計測	89
6.3	実験および解析結果	89
6.3.1	位相差計測および解析の結果	89
6.3.2	亀裂伸展挙動の観察結果	94
6.4	考察	95
6.5	結言	97
	参考文献	98
第7章	光弾性CT法の開発	99
7.1	緒言	99
7.2	光弾性CT法の概要および課題	100
7.3	深層学習プログラムの開発	101
7.3.1	3次元応力分布の計算	102
7.3.2	投影像の光学計算	102
7.3.3	DNNモデルの構築	105
7.3.4	推定結果の評価手法	107
7.3.5	開発したプログラムの動作試験	108
7.4	実験装置の製作	109
7.5	実機による検証実験	111
7.6	今後の課題	113
7.7	結言	115
	参考文献	116
第8章	結 論	117
付録	新たなホイール形状の提案	120
A.1	緒言	120
A.2	新たなホイール形状の指針	120
A.3	提案するホイール形状	121
A.4	有限要素法解析による評価	122
A.4.1	六角Penettの結果	122
A.4.2	六角APIOの結果	125

A.5 結言	126
参考文献	127
謝辞	128

第1章 緒 論

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などを配置したあと、所望の大きさに分断することで大量生産されている¹⁻¹⁾。この分断加工の品質は製品の耐久性に影響する¹⁻²⁾。ガラスの分断加工には、亀裂を進展させる方法が一般的である。

そもそも亀裂は、材料の強度を低下させ、破壊の原因となる。硬脆材料の破壊においては、材料の表面や内部に存在する微小な傷や亀裂といった、欠陥を起点として亀裂が生じると考えられている。亀裂の形成、伸展を理論的に明らかにするため、ガラスにビッカース圧子を押し付け/除荷し、発生した亀裂を評価する研究が数多く行われている。形状や発生するタイミング等により亀裂はいくつかに分類され、それぞれのメカニズムが提唱されている^{1-3)~1-6)}。また、亀裂が発生する傾向は、材料により大きく変化することも報告されている¹⁻⁷⁾。破壊した物体の破面を詳細に観察することで、破壊の原因や亀裂伸展の履歴を推測する“形態学 (Fractography)”という手法も、古くから行われている¹⁻⁸⁾。破壊の形態もさまざまであり、引き裂かれたような荒れた断面を生じる場合や、逆に非常に滑らかな破断面を生じる場合もあることがわかっている。近年では、有限要素法や分子動力学といったシミュレーションを用いた研究も行われており^{1-9), 1-10)}、亀裂のメカニズム解明は現在でも重要なテーマである。

さて、亀裂による破壊現象は、ガラスのような硬脆材料にとって重大な問題点ではあるが、亀裂を制御することで分断加工に応用する手法がホイール割断である。ホイール割断はス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)。ガラスを分断する他の手法、例えばレーザー割断^{1-11)~1-13)}やレーザー切断^{1-14), 1-15)}、ブレード切断¹⁻¹⁶⁾等に比べて、ホイール割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、ホイール割断は液晶ディスプレイの加工には特に適している。

ホイール割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¹⁻¹⁷⁾。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、ブレー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（二次クラック）、ブレークを容易にすることも報告された。

こうした背景から、近年ブレー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、ブレー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（以下切断面と呼称する）に現れる形態と実験条件の関係を研究した¹⁻¹⁸。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。また、有限要素法による応力解析を行い、従来のホイールとブレークレスホイールで応力分布が異なることを示した¹⁻¹⁹。また、Hasegawaらは光弾性実験によりスクライブライン近傍の応力分布を可視化し、切断面形態と応力分布の相関を示した¹⁻²⁰。しかし、いずれもマクロな視点からの考察であり、ホイールの凹凸が亀裂形成に影響を及ぼす具体的なメカニズムには触れられてこなかった。

ブレークレスホイールの外周部の凹凸が亀裂を形成するメカニズムが明らかになれば、それをもとに工具形状や工程を工夫することで、さらなる生産性や加工品質の向上につながる。そこで本論文では、未解明のまま運用されているホイール切断の加工メカニズムの解明を目的とする。特に、ブレークレスホイール外周部の凹凸近傍のミクロな領域に焦点を当て、ブレークレスホイールに特有の現象が引き起こされるメカニズムを明らかにする。ブレークレスホイールを用いた切断加工において工具近傍で生じる現象の模式図を図1.1に示す。ブレークレスホイールの凹凸がガラスに接触すると、ガラスが永久変形し、凸部と同じ形状の圧痕が形成される¹⁻²¹。その周囲には弾性変形領域が分布する。ホイールが通過した後方では弾性変形領域が回復するが、永久変形領域が弾性回復を妨げるため、大きな残留応力が生じる。これらの変形機構により、ホイール直下と後方でガラスに亀裂が形成される。スクライブ表面に対して垂直な亀裂（メディアンクラック）は、ホイール直下で形成され、ホイール後方で深さ方向にさらに伸展する（二次クラック）¹⁻¹⁷。メディアンクラックによって新生面が形成され、ブレークにより切断面形態として表出する。また、スクライブ表面やガラス

内部に割断には、不要な亀裂（ラディアルクラック，ラテラルクラック）が形成される^{1-17), 1-21)}。このようなホイール割断で生じる現象を明らかにするために、有限要素法および光弾性法による応力解析，高速度カメラを用いた加工中の亀裂形成・伸展挙動の観察，光学顕微鏡およびレーザ共焦点顕微鏡を用いた加工後試料の観察を行った。脆性材料への亀裂発生については，ビッカース圧子を材料に押し込み，発生した亀裂を観察する先行研究が行われている^{1-3)~1-7)}。その結果，形状や形成のタイミングが異なる亀裂が報告されている。これらの文献を参考にホイールの押し込みにより発生した亀裂を分類し，その発生メカニズムを応力分布の観点から考察した。また，加工中に発生した亀裂が最終的な断面形状を形成するメカニズムを推測した。

本論文のもう一つのテーマは，新たな実験的応力解析手法である光弾性CT法の開発である。加工現象のメカニズムを解明するにあたり，加工中の材料内部の応力状態の把握は重要な要素である。近年，応力解析には有限要素法に代表されるシミュレーションを用いることが一般的になっている。しかし，シミュレーションにより実際に生じている全ての物理現象を再現することは困難であるため，実験的応力解析手法と組み合わせて用いることが有効であると考えられる。本論文においても，光弾性法と有限要素法を合わせて評価することで，妥当性を検証するとともに多角的な分析を行っている。

実験的応力解析手法として，ひずみゲージを用いた穿孔法¹⁻²²⁾や応力弛緩法¹⁻²³⁾，X線回折を利用したX線応力測定法¹⁻²⁴⁾など，様々な手法が提案されているが，それぞれ制約が大きく適用範囲は限られる。本論文で使用する光弾性法も，対象が透明材料であれば簡単に実施することができるものの，2次元弾性応力状態に限り定量評価が可能のため，3次元応力分布に対して適用した場合，得られた結果の評価は困難である。

加工現象の応力解析を行うには，3次元の応力分布を動的に把握する必要があるが，現在までにそれを実現できる実験的応力解析手法は，実用化されていない。これを実現できる可能性のある手法が光弾性CT法である。光弾性CT法は，複数の方向から光弾性実験を行い，得られた結果から測定対象の3次元応力分布を再構成する手法である。光弾性CT法は古くから概念としては提唱されてきたが¹⁻²⁵⁾，6成分の応力テンソルを再構成することができず，実現してこなかった。近年，X線CTで用いられる手法を用いる研究¹⁻²⁶⁾や，既知の初期状態から少しずつ段階的に推定を重ねていく手法の研究¹⁻²⁷⁾がなされているが，6成分の応力分布を推定する手法として実用化するには至っていない。そこで，著者は新たなアプローチとして，応力を再構成する回帰関数としてディープニューラルネットワークを用いる手法を考案した。本論文では，まずディ

ープニューラルネットワークの構築および学習を行うプログラムを作成し、計算機上で本手法の実現可能性を探った。その結果、ある程度3次元応力分布の再構成が可能であったため、実験装置の製作および実機実験にて検証を行った。

本論文は本章の緒論の後、2章にて実験方法等の説明を行い、3章ではスクライブ中に発生する亀裂の観察について述べる。4章では3章で観察された亀裂をメディアクラック、ラディアルクラックおよびラテラルクラックの3つに分類し、それぞれについて亀裂形成挙動の観察と応力解析の結果から発生メカニズムについて考察する。5章では切断面形態が形成されるメカニズムについて4章で論じた亀裂との関連から考察する。6章では、ブレークレスホイールを使用した際に垂直亀裂が深く伸展する二次クラックの伸展について、亀裂の伸展と応力分布の減衰の関連に着目してメカニズムを考察する。7章では光弾性CT法の開発について、手法の説明および現在までに得られている成果について述べる。8章では、本研究により得られた知見を総括し、今後の課題や展望について述べる。

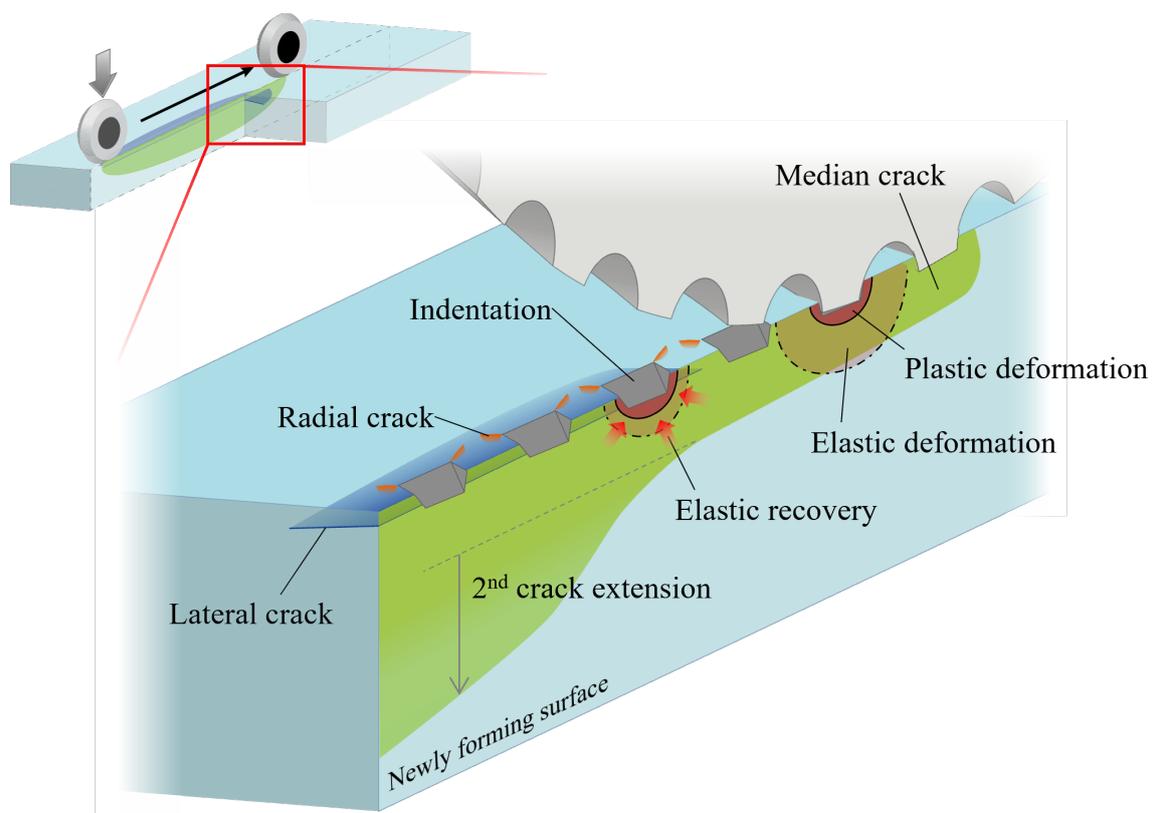


FIGURE 1.1 Schematic illustration of crack generation phenomena during scribing process when using break-less wheels.

参考文献

- 1-1) 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.
- 1-2) 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.
- 1-3) Lawn B. R. and Evans A. G., A model for crack initiation in elastic/plastic indentation fields, *Journal of Materials Science*, Vol. 12 (1977) pp.2195–2199.
- 1-4) Lawn B. R., Evans A. G. and Marshall D. B., Elastic/plastic indentation damage in ceramics: The median/radial crack system, *Journal of the American Ceramic Society*, Vol. 63, No. 9–10 (1980) pp.574–581.
- 1-5) Marshall D. B., Evans A. G. and Lawn B. R., Elastic/plastic indentation damage in ceramics: The lateral crack system, *Journal of the American Ceramic Society*, Vol. 65, No. 11 (1982) pp.561–566.
- 1-6) Perrott C. M., Elastic-Plastic Indentation: Hardness and Fracture, *Wear*, Vol. 45 (1977) pp.293–309.
- 1-7) Cook R. F. and Pharr G. M., Direct observation of indentation cracking in glasses and ceramics. *Journal of American Ceramics Society*, Vol. 73 (1990) pp.787–817.
- 1-8) Quinn D. G., *Fractography of ceramics and glasses*, National Institute of Standards and Technology, (2016).
- 1-9) Luo J., Vargheese D., Tandia A., Hu G. & Mauro C. J., Crack nucleation criterion and its application to impact indentation in glasses, *Scientific Reports*, DOI: 10.1038/srep23720, (2016).
- 1-10) 張冰, 吉岡正人, 平晋一郎, ガラスに対するビッカース圧子押し込み場の応力解析, 砥粒加工学会, Vol. 51, No. 2 (2007) pp.100–105.
- 1-11) 黒部利次, 川向徳康, 高尾利幸, YAGレーザーによるガラスの精密切断, *材料*, Vol. 42, No. 479 (1993) pp.1004–1010.
- 1-12) 山本幸司, 羽阪登, 森田英毅, 大村悦二, ガラスのレーザースクライブにおける熱応力解析, *精密工学会誌*, Vol. 71, No. 9 (2005) pp.1157–1162.
- 1-13) 中村洋介, 高出力超短パルスレーザーを用いた高速ガラス切断技術“TOP Cleave”の産業活用, *NEW GLASS*, Vol. 32, No. 122 (2017) pp.21–24.
- 1-14) 池野順一, 真杉豊, 堀内宰, 河西敏雄, 小林昭, 結晶化ガラスのクラックフリー・3次元レーザー加工, *精密工学会誌*, Vol. 64, No. 7 (1998) pp.1062–1066.

- 1-15) 尾崎仁志, レーザ切断現象の可視化に関する取組み, スマートプロセス学会誌, Vol. 6, No. 2 (2017) pp.69–73.
- 1-16) 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.
- 1-17) 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) pp.684–689.
- 1-18) 松坂壮太, 溝渕玄太, 森田昇, 比田井洋史, 千葉明, ホイールによるガラススクライプ中の亀裂伸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.
- 1-19) 松坂壮太, 溝渕玄太, 森田昇, 比田井洋史, 千葉明, スクライピングホイールを用いたガラスの切断加工に関する研究, 砥粒加工学会誌, Vol. 58, No. 2, (2014) pp.109–114.
- 1-20) Hasegawa R., Matsusaka S., Hidai H., Chiba A., Morita N. and Onuma T., In-process estimation of fracture surface morphology during wheel scribing of a glass sheet by high-speed photoelastic observation, Precision Engineering, Vol. 48 (2017) pp.164–171.
- 1-21) 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プ挙動の観察, 精密工学会誌, Vol. 84, No. 7 (2018) pp.634–639.
- 1-22) 河合真二, 永井卓也, 岡野成威, 深穴穿孔法, 溶接学会誌, Vol. 88, No. 6 (2019) pp.485–488.
- 1-23) 岩田光正, 小川潤一郎, 新しい残留応力測定技術 (I), 溶接学会誌, Vol. 64, No. 6 (1995) pp. 432–436.
- 1-24) 田中啓介, 2次元検出器を用いた $\cos\alpha$ 法によるX線応力測定 その1 測定の基礎, 材料, Vol. 66, No. 7 (2017) pp.470–478.
- 1-25) 梅崎栄作, 光弾性法による応力分布測定技術の現状と展望, 精密工学会誌, Vol. 79, No. 7 (2013) pp.607–611.
- 1-26) 磯部浩巳, 原圭祐, 超音波振動研削によるガラス加工の特性改善—第一報 光弾性法による内部応力分布の測定とCTによる再構成—, 2017年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集 (2017) pp.7–8.
- 1-27) Wijerathne M. L. L., Oguni K. and Hori M., Stress field tomography based on 3D photoelasticity, Journal of the Mechanics and Physics of Solids, Vol. 56 (2008) pp.1065–1085.

第2章 ホイール割断の概要および実験装置

2.1 緒言

本章ではホイール割断の概要および本研究で用いた実験方法について述べる。ホイール割断に用いる工程および工具について第2節に示す。また、本研究で行った割断実験について、第3節に実験試料、第4節に実験装置の詳細を述べる。応力解析について、実験的手法である光弾性実験法について第5節に、有限要素法によるシミュレーションについて第6節に示す。

2.2 ホイール割断の概要

ホイール割断とは、スクライビングホイールと呼ばれる工具を用いて亀裂を導入し、外力により亀裂を進展させることで新生面を創出する分断手法である。

ホイール割断の工程

ホイール割断による分断加工の模式図を図2.1に示す。まず、スクライビングホイールと呼ばれる外周部に稜線を持つ円盤状の工具を、材料に接触させて転がし亀裂を導入する。この工程をスクライブと呼ぶ。ホイールに荷重を負荷することで、ガラスにホイールを食い込ませながら走査する。亀裂はスクライブを行った表面に対して垂直に発生する。その後、外力を加えて亀裂を伸展させ、材料を分断する。この工程をブレイクと呼ぶ。したがって、スクライブを先に複数の経路に実施し、ブレイクを後でまとめて行うことで、効率的に分断することができる。なお、ブレイクにより現れる新生面を割断面と呼称する。

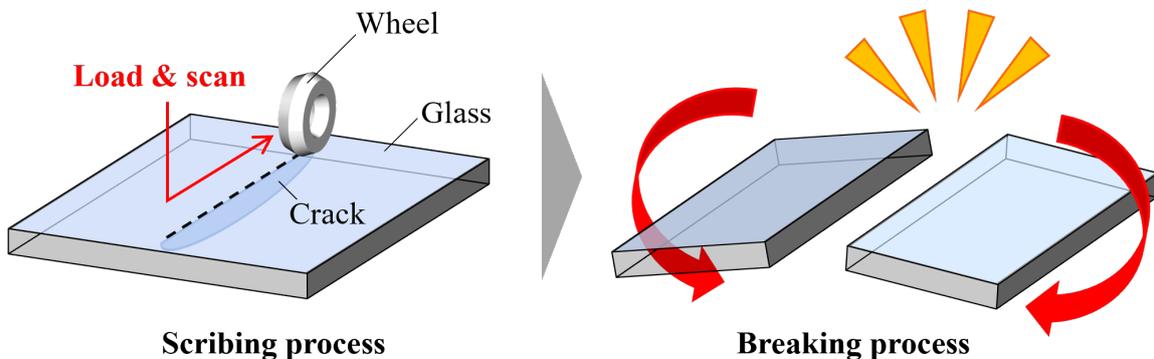


FIGURE 2.1 Procedure of wheel cleaving. At first, wheel is indented to glass and scanned on glass surface (scribing). Then, glass is divided by applying bending force (breaking).

工具（スクライビングホイール）

スクライビングホイールの形状を図2.2 (a) に示す。スクライビングホイールは円盤の外周部に鈍角の稜線（稜角，Ridge angle）を有する工具である。中央部にはホイールを支持する軸を通す穴があり、この軸によりホイールとホルダが結合される。ホイールの支持機構を図2.2 (b) に示す。ホルダにはホイールが入る溝と軸が通る穴があり、軸をホルダおよびホイールの穴に通すことでホイールを支持する。ホイールー軸、軸ーホルダのはめあいは、h9クラスのすきまばめであるため、ホイールは軸およびホルダに対して自由に回転する。

本研究では三星ダイヤモンド工業（株）製のスクライビングホイールを用いた。直径2 mm、厚さ0.65 mmで、ホイール支持用の穴径は0.8 mmである。材質は多結晶ダイヤモンドである。スクライビングホイールは外周部の形状によって分類され、外周部に凹凸のないホイールをノーマルホイール、外周部に一定の間隔で溝を形成したものをブレイクレスホイールと呼ぶ。ホイール外周部の刃は半径1 μm 程度の丸みを有する。

2.2.2.1 ノーマルホイール

ノーマルホイールの走査型電子顕微鏡（SEM）による観察像を図2.3 (a) に示す。ノーマルホイールを用いる場合、スクライブ時に外切り法（Edge-crash method）と呼ばれる手法を用いる。外切り法の模式図を図2.3 (b) に示す。ガラスに接触しない位置にホイールを降下し、走査を開始する。それによりホイールがガラスのエッジに衝突し、初期亀裂が導入される。スクライブ中は定圧でガラスにホイールを押しつけながら走査する。外切り法を用いてスクライブを行ったガラス試料のエッジ部分は、ホ

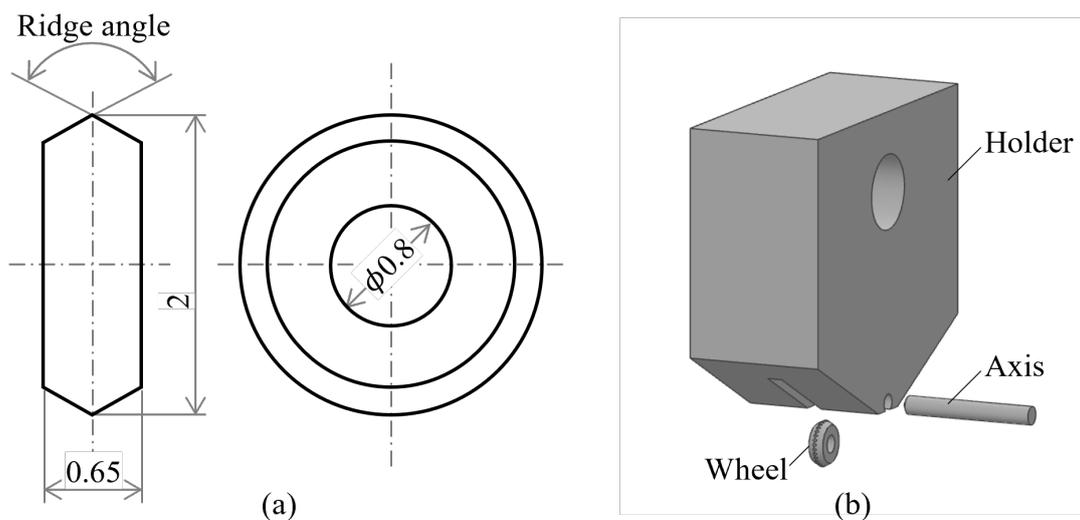


FIGURE 2.2 (a) Dimension of scribing wheel and (b) schematic illustration of wheel holder. Scribing wheel has a hole and set in the slit of holder by axis.

ホイールの衝突により不要な亀裂や欠けが生じる。

2.2.2.2 ブレークレスホイール

ブレークレスホイールは外周部に凹凸をもつスクライビングホイールの総称であるが、凹凸の形状が異なる製品が多数開発されている。代表的な2種類についてSEMによる観察像を図2.4 (a) に示す。本研究では、円柱状の溝のあるPenettシリーズと、小さな三角柱の溝のあるAPIOシリーズを使用した。Penettシリーズは深い垂直亀裂を形成することから、液晶ディスプレイの分断に一般的に用いられるホイールであり、豊富な凹凸形状の製品があるため本研究で使用することとした。APIOは本研究室での実験によりPenettとは異なる亀裂形成挙動がみられ、特にラテラルクラック(後述)の形成が比較的起こりやすいことから関連する章において使用した。ブレークレスホイールを用いる場合には、内切り法(Set-down method)と呼ばれる手法でスクライブを行う。内切り法の模式図および断面の観察像を図2.4 (b) に示す。ブレークレスホイールでは、外周部の凹凸により接触部の先鋭化とともに接触面積が減少する。その結果、ホイールをガラスに押し付けることで、ホイールがより深くガラスに食い込み初期亀裂が形成される。初期亀裂形成後はホイールに一定の圧力を負荷したまま走査する。外切り法のようにガラスのエッジ部分にホイールが衝突しないため、エッジ部分に欠陥が発生しにくいという特徴がある。

本研究においては、ホイール形状を変化させて実験および解析を行うことで、ブレ

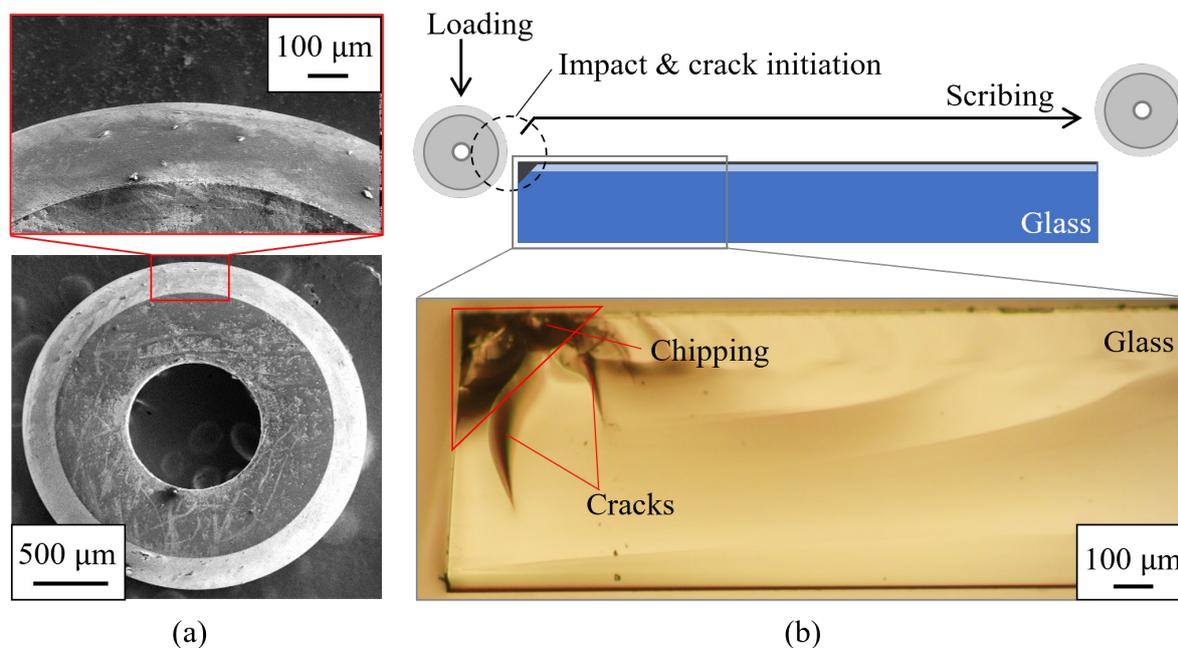


FIGURE 2.3 (a) Scanning electron microscopic image of normal wheel. (b) Schematic illustration of edge crash method and its fractured surface observed by optical microscope.

ークレスホイールの凹凸が加工に及ぼす影響を明確化する。そこで、Penettシリーズからは、凹凸の数（歯数と呼称する）が異なる5種類のスクライビングホイールを用いた。エッジ部の角度（稜角）はすべて125°のホイールを用いた。歯数が増えるとともに、凹凸の形状も変化する。表2.1に各ホイールの形状の寸法を示す。歯数および歯の高さから、110-10や170-5のように記述する。110-10, 135-10, 140-7および170-5は、円柱状の溝部の曲率半径（Radius）は約20 μmで等しく、溝の深さ（Tooth height）および歯数（Number of teeth）が変化している。それに伴い歯の長さ（Tooth length）や

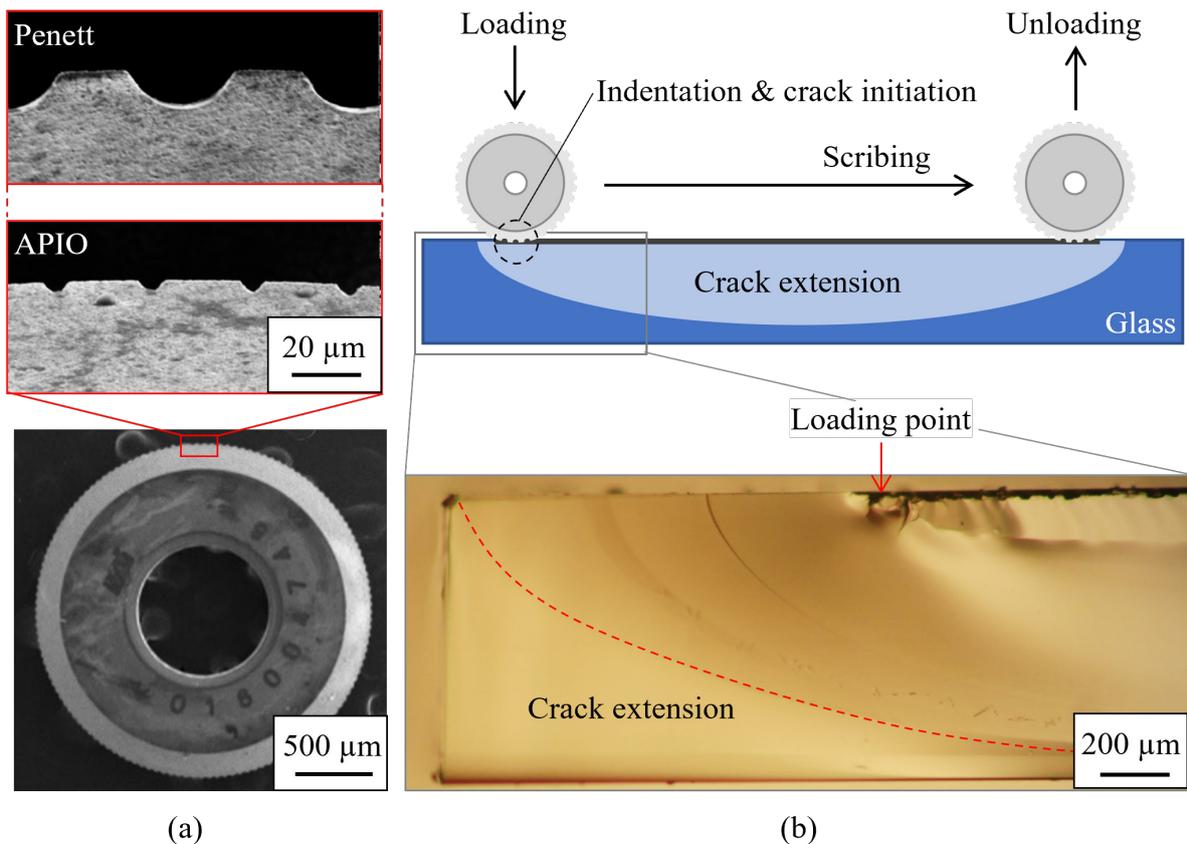
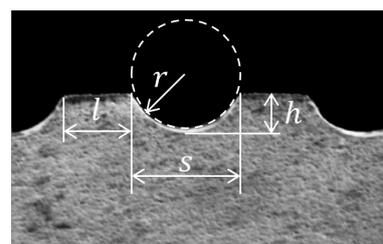


FIGURE 2.4 (a) SEM image of break-less wheel. Shape of tooth is different between APIO and Penett. (b) Schematic illustration of set-down method and its fractured surface observed by optical microscope. Chippings or needless cracks is not observed because indentation of wheel generate initial crack.

TABLE 2.1 Dimensions of scribing wheel (Penett SDX).

Number of teeth	[-]	110	135	140	170	360
Height (h)	[μm]	10	10	7	5	3
Tooth length (l)	[μm]	23	13	13	12	9
Space (s)	[μm]	36		35	28	8
Radius (r)	[μm]	20				5



間隔 (Space) が変化している。360-3のホイールは溝部の曲率半径が5 μm と小さく、凹凸のないノーマルホイールに近い形状となっている。4.4節で使用するAPIOシリーズは、歯数は200で統一し、稜角が115°と125°のホイールを用いた。こちらも360-3と同様溝部が小さい。

これらのホイールは、割断に必要な垂直亀裂や、表面亀裂やラテラルクラックといった割断に不要な亀裂の発生について、特徴が異なる。そのため、使用するガラス種 (組成) やガラスの厚さに応じて使い分けるのが一般的である。

2.3 実験試料

実験試料には、液晶パネルのガラス基板に用いられる、無アルカリガラス (コーニングジャパン (株), Eagle XG) を用いた。表2.2にEagle XGの材料特性を示す。無アルカリガラスは一般的なガラスには含まれているナトリウムやカリウムといったアルカリ成分を含まないガラスである。特徴としてソーダ石灰ガラスに比べ熱膨張率が低いことが挙げられ、耐熱性に優れているとされている。一般的に液晶ディスプレイ用のガラス基板に用いられる。本研究では90×90×0.7 mmの板ガラスを、実験によって所望のサイズに切り分けて使用した。

2.4 実験装置

本研究で用いたガラス割断装置および観察系等について述べる。

ガラス割断装置

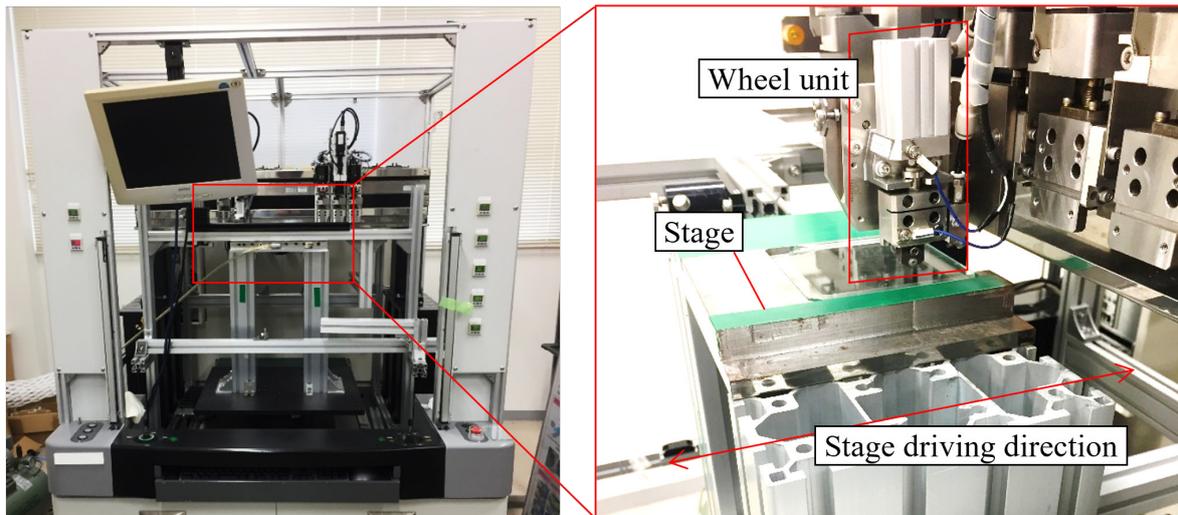
本研究では割断装置を用いてスクライブを行う。割断装置はホイールホルダを把持するスクライブヘッド、ステージ、制御用PC等から構成される。スクライブヘッドにはホイールを押しつけるため、空気圧アクチュエータとサーボモータが設置されている。

TABLE 2.2 Mechanical and optical properties of Eagle XG.

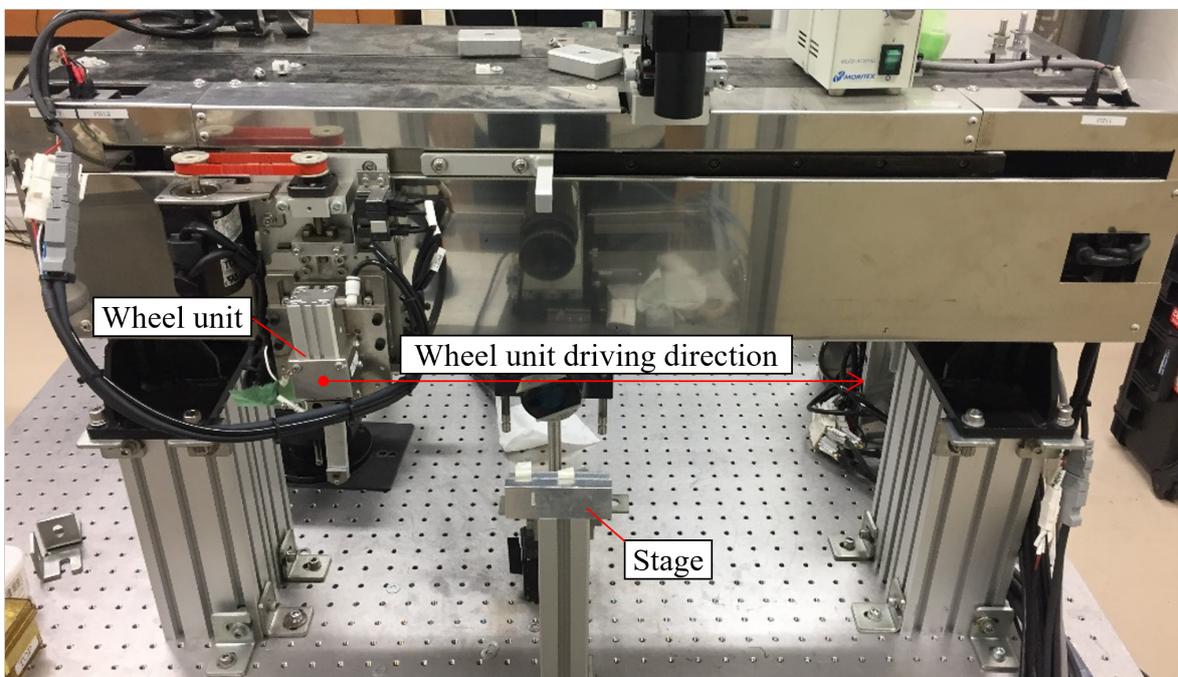
Density	[g/cm³]	2.38
Young's modulus	[GPa]	73.6
Shear modulus	[GPa]	30.1
Poisson's ratio	[-]	0.23
Vickers hardness	[-]	560
Coefficient of thermal expansion	[/K]	31.7×10^{-7}
Birefringence constant	[(nm/cm)/(kg/mm²)]	331

る。ホイールの押しつけは、サーボモータでスクライブヘッドを下降させ、空気圧アクチュエータにより一定荷重を負荷する。ステージとスクライブヘッドの相対運動によってスクライブを行う。

本研究では三星ダイヤモンド（株）社製の切断装置，MM5050A2および刃先出荷検査装置を用いた。各装置の外観写真を図2.5に，駆動機構の模式図を図2.6に示す。ここで，スクライブ加工に対し，座標系を定義する。スクライビングホイールを走査する



(a)



(b)

FIGURE 2.5 Photographs of scribing machines: (a) MM9050A2 and (b) Tool Edge Inspection Machine.

方向をスクライブ方向と呼び、X軸の正方向とした。また、鉛直上方向をZ軸とし、右手系に従いY軸の正方向を定めた。図2.6 (a) に示したMM5050A2は、スクライブヘッドがY軸方向に動くことで切断位置を制御し、Z軸方向に下降することでホイールをガラスに押し付ける。そして、ステージがスクライブ方向（X軸方向）に駆動することでスクライブを行う。一方、図2.6 (b) に示した刃先出荷検査装置では、ステージは動かず、スクライブヘッドがX軸方向およびZ軸方向に動くことで、スクライブを行う。高速度カメラを用いて観察を行う場合、高速度カメラは基本的には空間に固定する。そのため、ステージが駆動するMM5050A2の場合（図2.6 (a)）には視野内をステージおよびガラス試料が移動していく。すなわち、スクライブの間、ホイールを視野内にとらえ続けることができる。刃先出荷検査装置を用いた場合（図2.6 (b)）には、ホイールが視野内を通過する様子を、ガラス試料の定点に注目して観察することができる。また、MM5050A2ではステージの下方にスペースが設けられているため、下方からの観察（後述）ではMM5050A2を用いる。

観察システム

スクライブ中の亀裂形成挙動を可視化するため、光源、カメラ、鏡筒およびレンズからなる観察システムを構築した。透過光により観察する水平観察システムと、反射光により観察する垂直観察システムを用いた。それぞれの観察システムの模式図を図2.7に示す。

ホイールの凹凸の大きさは数十 μm 程度であり、スクライブにより亀裂が形成され

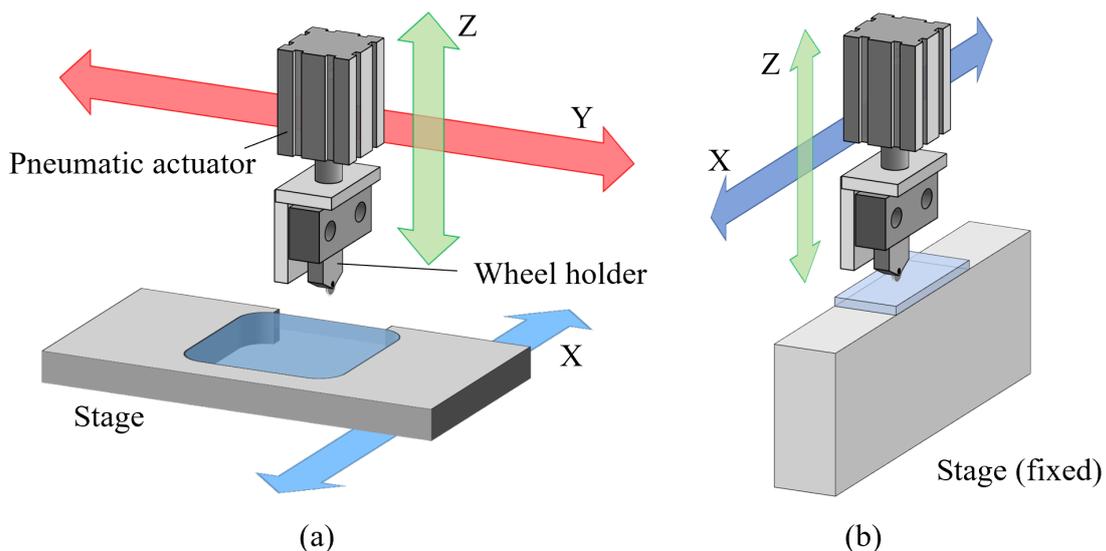


FIGURE 2.6 Schematic illustration of scribing machines. (a) shows scribing system of MM9050A2. Stage move toward X direction for scribing. (b) shows Tool Edge Inspection Machine scribing head move toward X direction.

るのに要する時間は非常に短い。そのため、本研究ではスクライブ時の亀裂形成挙動の観察に偏光高速カメラ（(株) フォトロン, FASTCAM MC2.1）を用いた。FASTCAM MC2.1は空間的解像度が512×512ピクセルの場合には時間的分解能が最大2000 fps, 空間的解像度が512×96ピクセルの場合には時間的分解能は最大155万fpsで撮影を行うことができる。亀裂の形成を可視化するには、本カメラの特徴である偏光状態を検出する機能（後述）は用いず、高速撮像機能のみを使用した。

水平観察システムは、留井ら²⁻¹⁾により提案された手法を参考に、透過光を用いてガラス内部の亀裂を可視化する。鏡筒および対物レンズとして、鏡筒部に0.57~9.2倍の可変倍率機構および絞を備えたレンズシステム（ライカマイクロシステムズ（株）, Leica Z16 APO）を用いた。倍率が2倍の対物レンズと組み合わせることで、最大倍率は18.4倍になっている。ステージの表面で入射光が反射することによる影響を抑制するため、ガラス試料の幅と同じ10 mmの幅のステージを作製して使用した。スクライブを行う位置は、ガラス端面に近いほど亀裂を明瞭に撮影することができる。しかし、スクライブ位置をガラス端面に近づけすぎると、亀裂が曲がったり端部が欠けたりと実験結果に影響を及ぼす。そこで、端面の影響を抑えつつ亀裂を観察できる位置として、端面から1 mm内側をスクライブした。

垂直観察システムは、先行研究²⁻²⁾によって行われた実験手法を参考にした。長谷川らは、上方から光を入射し、透過光をステージ下方に設置したカメラで観察している。ただし、同じく上方から押し付ける工具との干渉を避けるため、ホイールから離れた地点での観察、すなわちホイールが通過して数秒後の観察となっていた。本研究にお

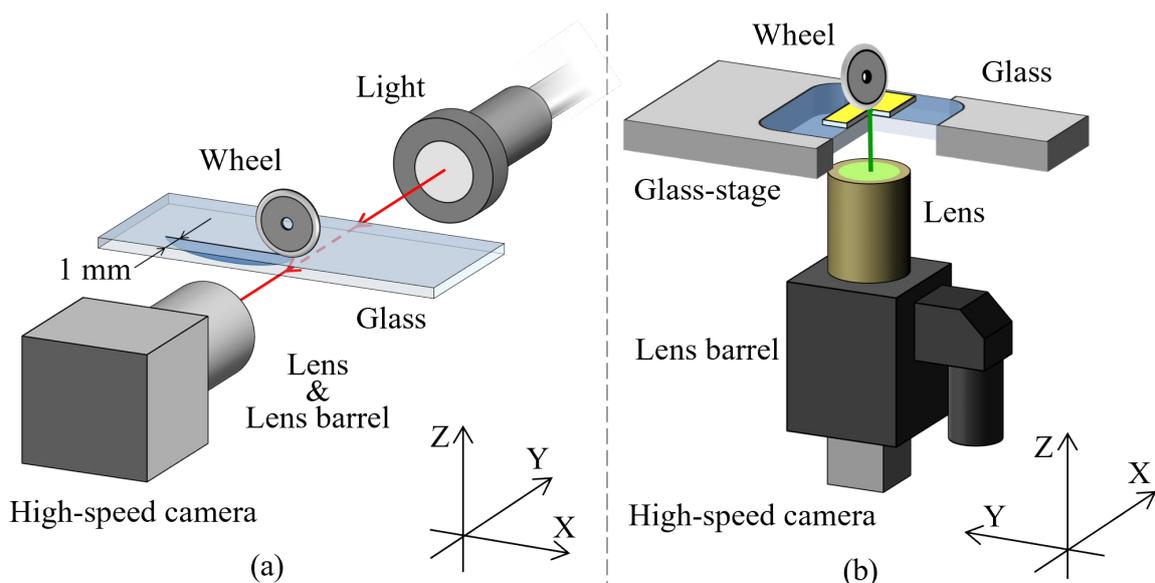


FIGURE 2.7 Schematic illustrations of camera positions for high-speed observations. (a) lateral-side and (b) back-side observations.

ける垂直観察システムでは、同軸照明によってガラス裏面から光を入射し、ガラス表面で反射した像を撮影する。この場合、工具との干渉は考慮する必要がないため、工具の直下の挙動を可視化することができる。対物レンズおよび鏡筒は、明視野用対物レンズ（(株) ミットヨ, M Plan Apo）およびマイクロスコープユニット（(株) ミットヨ, VMU）を用いた。VMUは落射照明用のポートを備えており、取り付けた対物レンズから照明を発生し、その反射光による観察を可能とする。M Plan Apoは光学倍率が10倍のものをを用いた。ステージの中央部はガラス窓になっており、その上にガラス試料をマスキングテープで固定して実験を行った。

光源には、波長が521 nmの単色光源（(株) アイテックシステム, LED照明ライティングボックスTLBC1）を用いた。なお、次節で述べる光弾性実験の際には、直線偏光板と1/4波長板が組み合わさったフィルムを光源に取り付け、円偏光を入射させた。

2.5 光弾性実験法

内部応力状態の把握に用いる光弾性実験法は、平面応力状態における主応力差を複屈折位相差として取得する手法である。光弾性実験法の模式図を図2.8に示す。光がガラスのような等方性材料を透過する場合、入射光と透過光で偏光状態は変化しない。一方、等方性材料に力が加わると負荷方向に応じて屈折率が変化するため、透過光の偏光状態が変化する。平面応力状態において、材料に加わる応力と光路差には式(2.1)のような比例関係があることが知られている²⁻³⁾。ここで δ は位相差、 C は光弾性係数、 t は試料厚さ、 σ_1 、 σ_2 は主応力である。

$$\delta = Ct(\sigma_1 - \sigma_2) \quad (2.1)$$

光弾性係数は材料に固有の定数であり、ガラスの組成により決定される²⁻⁴⁾。

偏光計測では円偏光を測定対象に透過させ、偏光状態の変化を取得することが多い。円偏光は互いに1/4波長ずれた、直交する2つの振動成分の合成であり、振幅が方向によらず一定である。一方、円偏光が異方性材料を通過すると複屈折により位相差が生じ、振動成分の合成は楕円偏光となる。視野内全域の位相差の算出には、位相シフト法が用いられることが一般的である。位相シフト法は、物体を透過した後に通過する直線偏光子を回転させながら計測を行い、得られた複数の偏光成分の光強度分布を組み合わせることで、位相差を算出する²⁻⁵⁾。本実験で使用した偏光高速度カメラ（(株) フォトロン, FASTCAM MC2.1）では、測定対象を透過した照明光が、0から135度まで45度ごとに4つの方位を有する直線偏光子（検光子）を介して検出器に入射する構

成となっている²⁻⁶⁾。この検光子は撮像素子の4画素上にフォトニック結晶によって実装されており，従来の回転検光子のような駆動部を有しないため，高速での撮影が可能である。4方向の直線偏光子を介した光強度 I_0 ， I_{45} ， I_{90} および I_{135} から，入射光強度 I_{in} 位相差 δ および主軸方位 ϕ を次式により算出することができる。

$$I_{in} = \frac{I_0 + I_{45} + I_{90} + I_{135}}{2} \quad (2.2)$$

$$\delta = \sin^{-1} \frac{\sqrt{(I_{90} - I_0)^2 + (I_{45} - I_{135})^2}}{I_{in}} \quad (2.3)$$

$$\phi = \frac{1}{2} \tan^{-1} \frac{(I_{90} - I_0)}{(I_{45} - I_{135})} \quad (2.4)$$

位相差の算出には解析ソフト（(株) フォトロン，PhotronFlameWork）を使用した。

ホイール割断はガラスの脆性破壊を利用した加工法であり，スクライプ中のガラス内部には割断に有効な亀裂ばかりでなく，様々な大きさ・方向の亀裂が発生する。また弾性領域において発生した歪みは，ホイールによる切り溝や亀裂を起点として3次元方向に発生する。さらに，式(2.1)で示したように，位相差は主応力差に比例するに過ぎず，主応力値そのものを示すものではない。

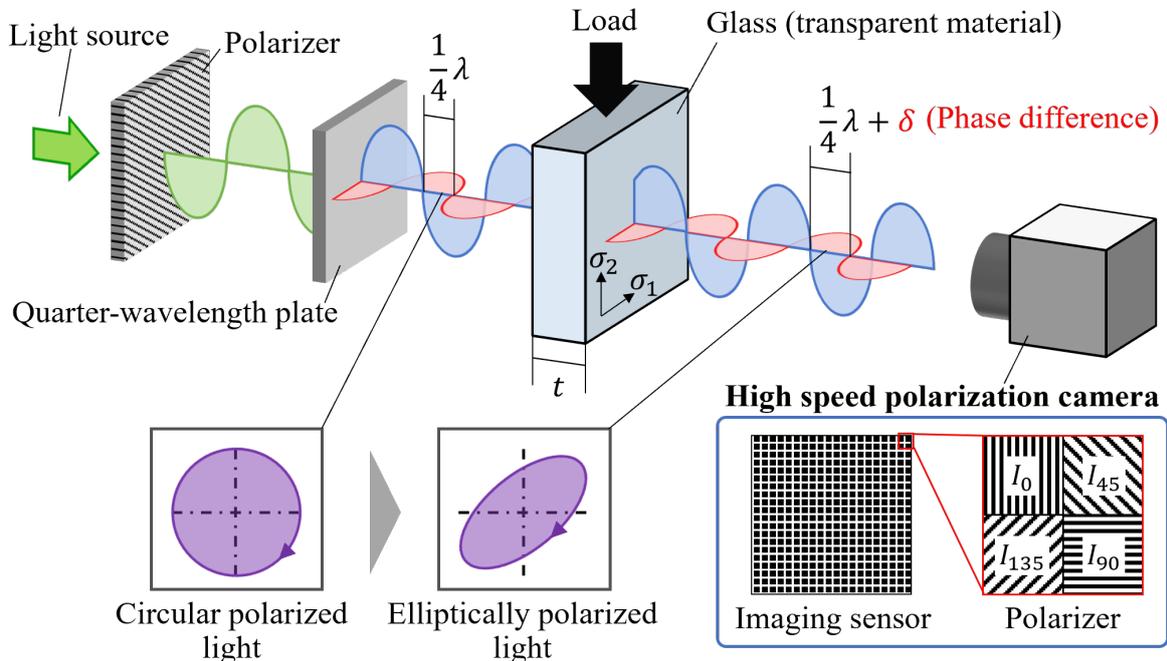


FIGURE 2.8 Schematic illustration of photoelastic method. Electromagnetic wave passed through specimen with strain has propagation delay due to anisotropy of refractive index. In this study, circularly polarized light is used as input. Polarization changes from circular to elliptical polarization because of phase difference δ .

2.6 有限要素法解析

汎用有限要素法ソフト（エムエスシーソフトウェア（株），Marc Mentat）を用いて，陰解法による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2.9に示す．ホイールの母材は焼結ダイヤモンド（ヤング率700～900 GPa）であるため，ガラス（ヤング率73.6 GPa）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 $X1000 \times Y500 \times Z700 \mu\text{m}$ の直方体とし，四面体一次要素により分割した．幅（Y方向寸法）および厚さ（Z方向寸法）は実験試料と同様である．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 $1.5 \mu\text{m}$ とした．また，要素の変形が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2.1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²⁻⁷⁾，厳密には金属のものとは異なるが，Tomeiらの先行研究²⁻⁸⁾を参考に，ホイールの押し込み深さや除荷後の圧痕深さが実験結果とおおよそ一致するように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．スクライブ（ホイールのころがり移動）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．ビッカース圧子を用いて同様の解析を行った先行研究においても摩擦の影響は無視しても問題ないとされている^{2-9), 2-10)}．

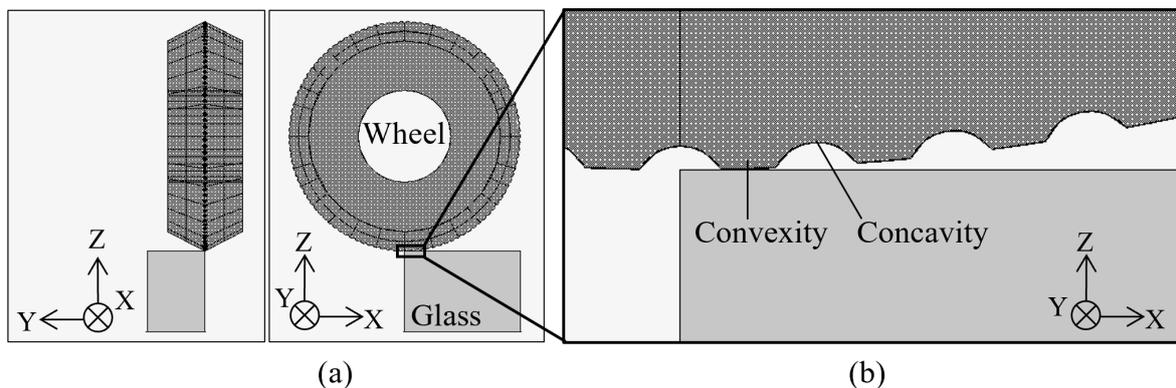


FIGURE 2.9 FEM analysis model. (a) Overview and (b) enlarged view of contact region. Glass elements set as 1/4 symmetry model by XZ and YZ plane. Wheel regarded as rigid body. Rotation of wheel was fixed at condition where concavity exist just below the rotating axis.

参考文献

- 2-1) 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ブに関する研究 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) pp.684–689.
- 2-2) Hasegawa R., Matsusaka S., Hidai H., Chiba A., Morita N. and Onuma T., In-process estimation of fracture surface morphology during wheel scribing of a glass sheet by high-speed photoelastic observation, Precision Engineering, Vol. 48 (2017) pp.164–171.
- 2-3) 辻二郎, 西田正孝, 河田幸三, 光弾性実験法, 日刊工業新聞社, (1965).
- 2-4) 横田良助, 光弾性定数とガラス構造との関連性, 窯業協会誌 Vol. 87, No. 11 (1979) pp.571–575.
- 2-5) 梅崎栄作, 光弾性法による応力分布測定技術の現状と展望, 精密工学会誌, Vol.79, No.7 (2013) pp.607–611.
- 2-6) 大沼隼志, 大谷幸利, サブミリ秒の時間分解能をもつ動的2次元複屈折計測装置の開発, 精密工学会誌, Vol. 78 (2012) pp.1082–1086.
- 2-7) 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.
- 2-8) 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.
- 2-9) 張冰, 吉岡正人, 平晋一郎, ガラスに対するビッカース圧子押し込み場の応力解析, 砥粒加工学会誌, Vol. 51, No. 2 (2007) pp.100–105.
- 2-10) 張冰, 吉岡正人, 平晋一郎, ガラスの連続圧子押し込みによるクラック発生・会合のメカニズム, 砥粒加工学会誌, Vol. 51, No. 9 (2007) pp.541–546.

第3章 スクライブ中の亀裂形成挙動

3.1 緒言

先行研究により、スクライブ中の垂直亀裂の形成挙動を可視化された³⁻¹⁾。その結果、ブレークレスホイールを用いた場合、ノーマルホイールを用いた場合と比較して、ホイール直下で垂直亀裂が深く形成され、ホイール通過後に深さ方向にさらに伸展する様子が観察された。また、割断条件による加工結果の違いを調査した先行研究より、条件によって全く異なる割断面形態が現れることが示された^{3-2), 3-3)}。また、それぞれの割断面形態が現れる場合において、深さ方向への亀裂伸展挙動が全く異なることも明らかになった。一方、スクライブを行った表面に発生する亀裂に着目した先行研究では、加工条件とその発生形態の関係について調査した。その結果、ブレークレスホイールを用いると、ガラス表面に割断に不要な亀裂が生じ、加工品質を低下させることが指摘されている³⁻⁴⁾。このように、ブレークレスホイールの利用により、深い亀裂を得ることができるという利点がある一方で、荒れた断面や不要な亀裂が発生するという、欠点も存在する。こうしたブレークレスホイールに特有の現象を生み出すのは、外周部の凹凸の存在であるが、これまでにホイールの凹凸近傍の亀裂形成に着目した研究は少なく、割断加工に対する凹凸の影響は明らかになっていない。今後、ホイール割断の技術をさらに向上させるために、こうした現象のメカニズムを解明することは有効であり、そのためには、スクライブ中に発生する亀裂の挙動を明らかにする必要がある。

そこで本章では、スクライブ中の亀裂形成・成長挙動を、側面と裏面の2方向から高速度カメラを用いて観察した。2節では再現性の確認および観察条件の選定のため、荷重を変更しながらスクライブを行い、割断面形態を観察した。3節では異なる割断面形態が得られる荷重における高速度カメラによる観察の結果を述べる。4節では、ビッカース圧子を用いたガラスにおける亀裂形成に関する基礎研究を参考に、観察された亀裂について考察する。

3.2 加工条件と割断面品質の関係

先行研究³⁻²⁾により、ブレークレスホイールを用いた割断加工では、2種類の断面が得られることがわかっている。それぞれの割断面と表面の断面曲線を図3.1に示す。1つはハックルマークと呼ばれ、図3.1 (a) に示すようにうろこ状の模様と多数の亀裂が特徴的である。割断面には比較的大きな凹凸があり、スクライブライン付近で約20 μm の高低差がある。もう1つはリブマークと呼ばれ、図3.1 (b) に示すように規則的

な縞模様が特徴的である。リブマークの断面の凹凸は5 μm程度と小さく、滑らかな断面であるといえる。

こうした特徴に加え、リブマークが形成される場合は亀裂がガラス板厚の80~90%の深さまで伸展するのに対し、ハックルマークが形成される場合には亀裂の伸展が比較的小さくなることから³⁻³⁾、リブマークが現れる割断面が良好であるとされている。また、得られる割断面形態は、加工条件の中でも負荷荷重の影響を強く受けることが報告されている³⁻⁴⁾。

本章では、それぞれの割断面形態が形成される条件において、亀裂形成挙動を観察する。その観察条件を選定するため、本節では条件を変化させながら割断加工を行い、得られた割断面を調査した。

実験装置および方法

本実験ではPenett 110-10のホイールを用いた。90×90 mmのガラス試料に対して、80 mmのスクライブを等間隔に9本行った。その後、手で曲げを加え割断し、光学顕微鏡を用いて割断面品質を確認した。スクライブ長さに対するリブマークが形成された長さをリブマーク形成割合として算出した (式3.1)。

$$\text{リブマーク形成割合} = \frac{\text{リブマークが形成した長さ}}{\text{全スクライブ長さ}} \quad (3.1)$$

実験条件を表3.1に示す。松坂らの研究³⁻²⁾により、スクライブ速度が形成される割断

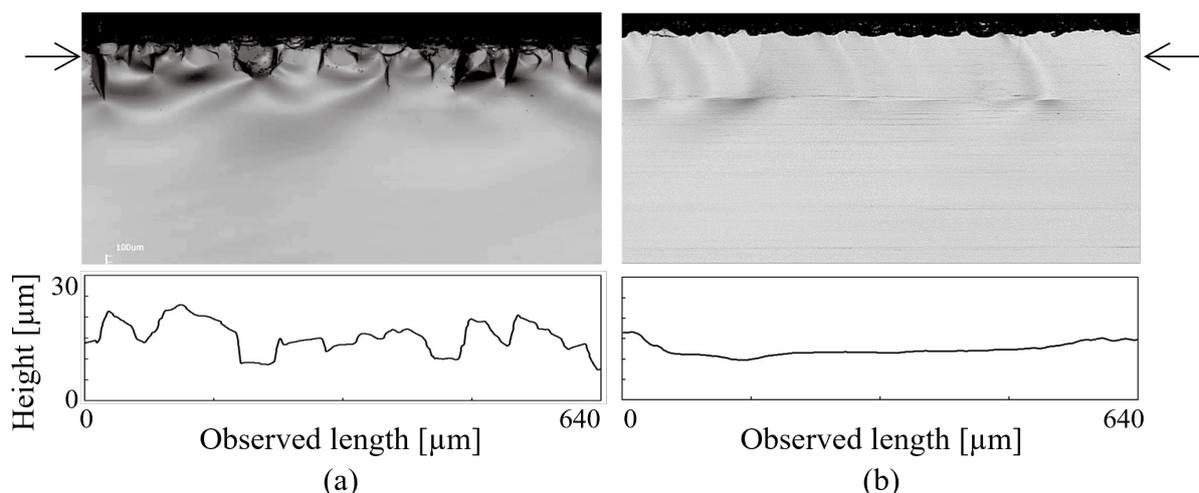


FIGURE 3.1 Typical cleaved surfaces obtained with applied loads of (a) 7 N and (b) 15 N. Surface roughness curves between the two black arrows are also shown. At the lower load, many irregular cracks appeared near the scribed surface (hackle-mark). Periodic stripe lines were observed at the higher load (rib-mark).

面の形状に及ぼす影響は小さいことが報告されている。本実験では、後述の高速度カメラを用いた実験と条件をそろえるためスクライブ速度は15 mm/sとした。負荷荷重は類似した実験を行った留井ら³⁻¹⁾、松坂ら³⁻²⁾の文献を参考に5~20 Nの範囲で1 N毎に設定した。

実験結果

各荷重におけるリブマーク形成割合を図3.2に示す。12 N以上では100%、8 N以下では0%となっており、高荷重でリブマークが、低荷重でハックルマークが形成されることがわかる。9~11 Nの負荷荷重では、ハックルマークのみが形成される割断面とリブマークのみが形成される割断面、そしてハックルマークからリブマークに遷移する割断面が観察され、荷重の増加に伴ってリブマーク形成割合が増加する傾向が見られた。この傾向は先行研究³⁻²⁾と一致するものであり、実験結果の再現性が確認された。また、この結果から、以後の実験では、ハックルマーク形成時、リブマーク形成時、ハックル-リブマーク遷移時について、それぞれ7 N、15 N、9 Nの荷重で観察実験を実施した。

TABLE 3.1 Experimental condition in section 3.2.

Scribing wheel		Penett 110-10
Applied load	[N]	5 ~ 20 N, (Step: 1 N)
Scribing speed	[mm/s]	15
Scribing distance	[mm]	80 × 9 lines

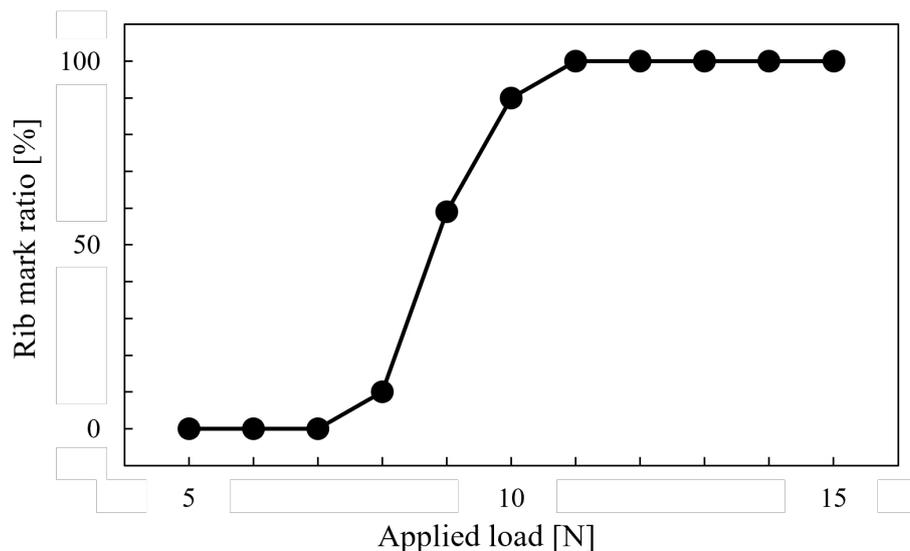


FIGURE 3.2 Effect of the applied load on the rib-mark ratio, which is the rib-mark length divided by the total scribing length.

3.3 亀裂形成挙動の観察

亀裂形成挙動と形成される割断面形態の関係に着目し、前節において観察された3種類の割断面を生じる実験条件の下で割断を行い、高速度カメラを用いてスクライブ中の亀裂形成挙動を撮影した。

実験方法

2章で述べた水平観察システムと垂直観察システムを用いて、ガラス試料の側面方向と裏面方向から観察を行うことで、3次元的な亀裂形成挙動の把握を試みた。側面観察では、撮影時間と光量の関係から時間分解能2000 fps、解像度512×256ピクセルとして撮影を行った。裏面からの観察では、試料ガラス表面での反射率を増加させるため、スクライブを行う表面に金蒸着を施したガラス試料を作製し、使用した。ガラス試料の寸法は10×30 mmである。実験条件を表3.2に示す。スクライブ速度は高速度カメラで観察しやすいよう15 mm/sとした。押し付け荷重は前述の通り7, 9, 15 Nとした。スクライブ後ただちにブレイクを行い、光学顕微鏡で割断面を観察した。

実験結果

3.3.2.1 側面からの観察結果

図3.3に側面撮影により可視化した亀裂形成挙動（図3.3 (a~c)）と、光学顕微鏡による割断面の観察像（図3.3 (d~f)）を示す。高速度カメラによる観察は、ホイールが動き始める瞬間を $t = 0$ sとした。

図3.3 (a) は7 Nの押し付け荷重でスクライブを行った観察結果である。ホイール押しつけ時 ($t = 0$ s) には、小さな円形の亀裂（円形亀裂, Circular crack）がホイール凸部の下方に形成されている。スクライブ中には、円形亀裂はホイールの後方でお互いに結合し ($t = 0.0705$ s)、徐々に深さ方向に伸展する。すなわち、亀裂はホイールの通過後に伸展する。7 Nでスクライブを行った割断面は図3.3 (d) に示すように、ハックルマークを呈した。押し付け荷重が15 Nの場合を図3.3 (b) に示す。円形亀裂よりも大きな半円形の亀裂が $t = 0$ sの時点で形成されている。スクライブが始まると、亀

TABLE 3.2 Experimental condition in section 3.3.

Scribing wheel		Penett 110-10
Applied load	[N]	7 N, (Hackle mark condition)
		9 N, (Hackle and rib mark condition)
		15 N, (Rib mark condition)
Scribing speed	[mm/s]	15
Scribing distance	[mm]	80

裂が前方および深さ方向に伸展する．この結果は，ブレークレスホイールを用いたスクライブを観察した先行研究と一致する³⁻¹⁾．先行研究にならい，ホイール押し付け時に形成される半円形の亀裂を起点クラック（Half-penny crack）と呼称する．15 Nにおける割断面には，図3.3 (e) のようにリブマークが現れている．図3.3 (c) はハックルマークからリブマークに遷移した場合である． $t = 0.0740$ sでは7 Nの場合と同様に起点クラックは形成されず，圧痕の直下に円形の亀裂が形成されている． $t = 0.0765$ sにおいてホイールの直下に起点クラックが形成され，その後はリブマーク形成時と同様の挙動が観察された．この試料の割断面は図3.3 (f) のように，スクライブ中に起点クラックが形成された地点を境にハックルマークからリブマークに遷移していた．また，図3.3 (e) に示したリブマークの深さは約 $140\ \mu\text{m}$ であり，図3.3 (b) のホイール直下の亀裂深さと一致することがわかった．

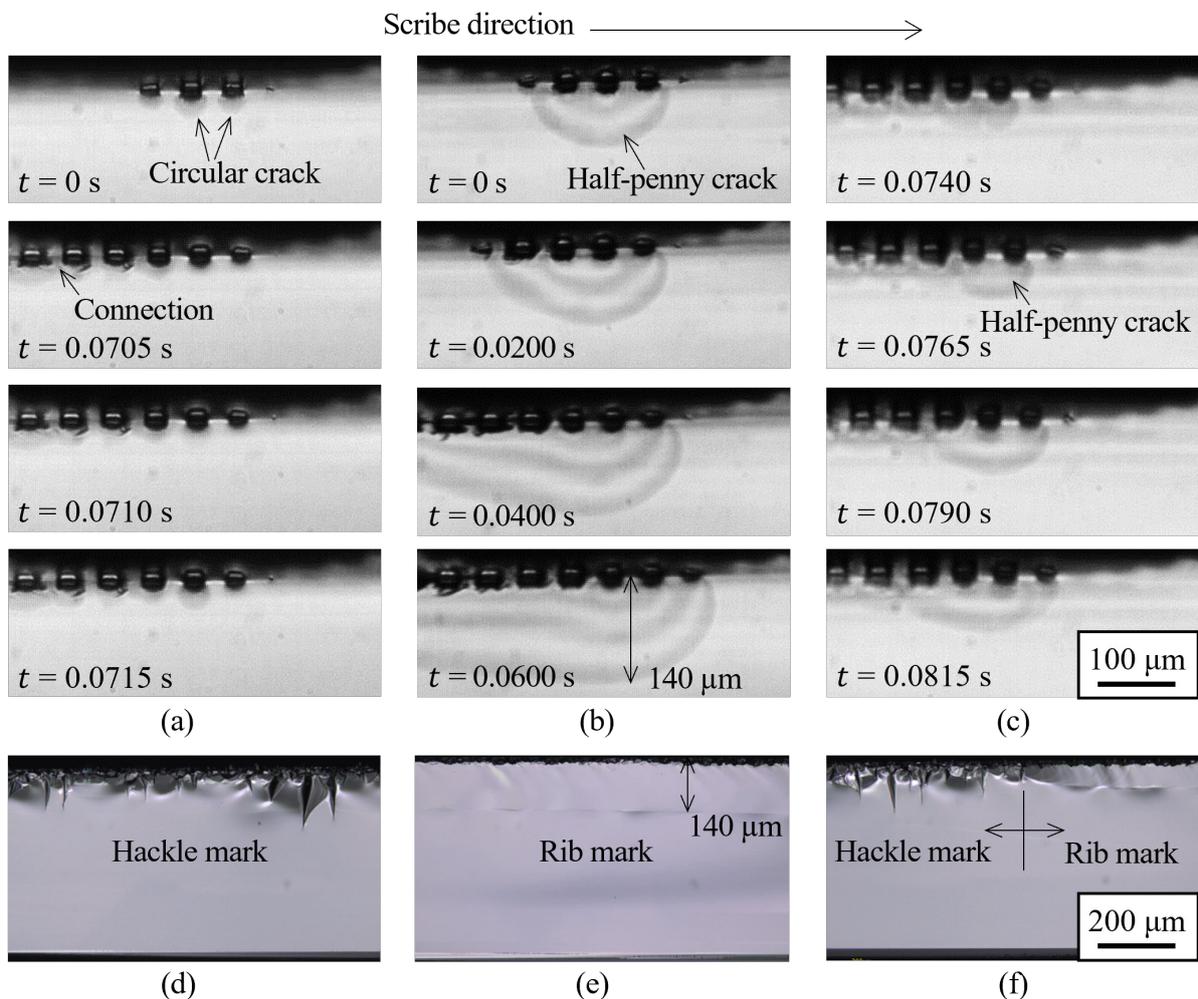


FIGURE 3.3 Images of crack propagation behavior in the glass substrate captured in the high-speed lateral observation ((a)–(c)), and the fracture surface under each scribing condition ((d)–(f)). The applied load was 7 N in (a) and (d), 15 N in (b) and (e), and 9 N in (c) and (f).

3.3.2.2 裏面からの観察結果

スクライブ中の亀裂形成挙動を裏面方向から撮影した画像を図3.4に示す。図中の白点線は、ホイールの回転軸の位置を示している。長方形の黒色部は、ガラスとホイールの凸部が接触してできた塑性変形領域（以下圧痕と呼ぶ）である。圧痕の周囲や圧痕間には多数の亀裂がみられる。

図3.4(a)は押し付け荷重7Nの画像である。ホイール直下では圧痕同士は結合せず、ホイール通過後に亀裂が形成されている。圧痕間の亀裂の位置は不規則である。一方、15Nの場合には(図3.4(b)), 圧痕の列の中央を貫くような亀裂が見られる($t = 0$ s)。これは起点クラックであると考えられ、起点クラックはガラス表面と垂直に発生していることを意味する。その後は、圧痕の列を貫く1本の亀裂がホイール中央軸の前方で伸展する様子が観察された。図3.4(c)にハックルマークからリブマークに遷移する場合を示す。 $t = 0.0735$ sでは7 Nと同様ホイール後方で亀裂伸展であるが、 $t = 0.0775$ sでホイール直下に大きな垂直亀裂が形成し、その後ホイール前方で亀裂伸展するようになる。この試料における切断面も、亀裂形成挙動が変化した地点を境にハックルマークからリブマークに遷移していた。これらの結果は、側面からの観察結果とよく一致している。さらに、圧痕の四隅から放射状に小さな亀裂が発生する様子が、すべての荷重において観察された。これらの亀裂は側面からの観察では見られなかったことから、ガラス表面から10 μm 以内のごく浅い領域に存在していると考えられる。

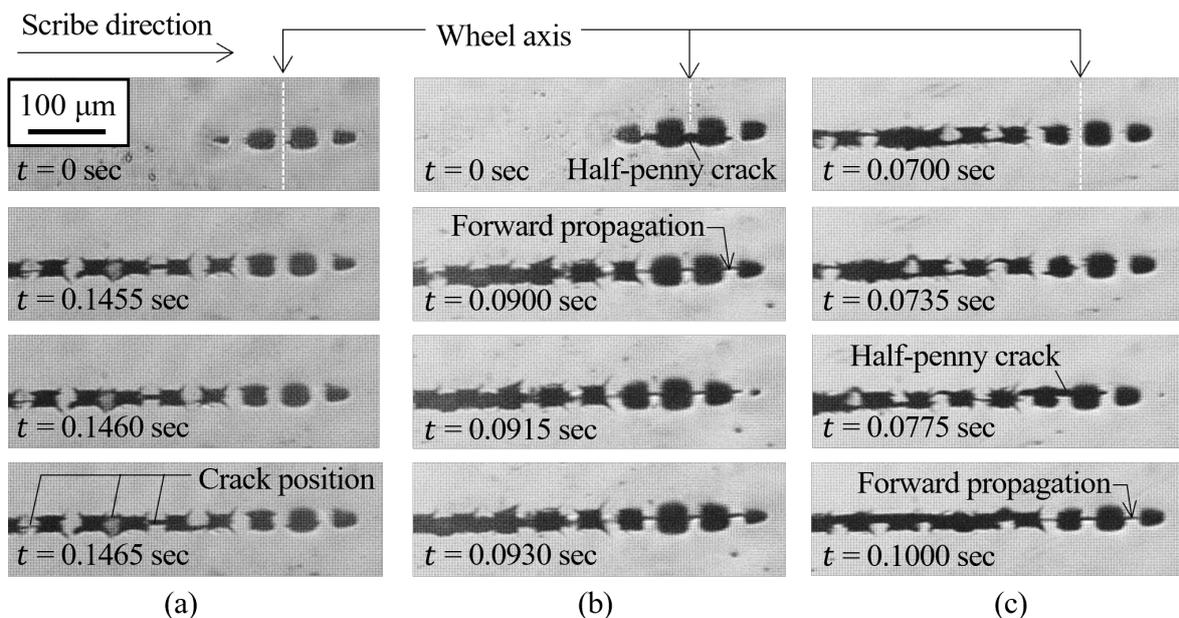


FIGURE 3.4 Images of the crack propagation behavior in the glass substrate captured in the high-speed back-side observation. The applied load was (a) 7 N, (b) 15 N, and (c) 9 N.

3.4 考察

ガラスを含む脆性材料の破壊現象に関しては、ビッカース圧子を用いた数多くの研究が行われている^{3-5)~3-14)}。ビッカース圧子は四角錐形状の圧子であり、それを脆性材料に押し付け、除荷すると表面や内部に亀裂が生じる。Cookら³⁻¹²⁾は、ビッカース圧子押し付けによって発生する亀裂を分類し、それらの発生および成長はガラスの化学的組成に強く依存すると指摘している。その中で分類された亀裂の模式図を図3.5に示す。表面と垂直に発生する亀裂のうち、負荷時に圧子の下方に発生する円形の亀裂をメディアクラックとして定義している(図3.5 (a))。また、同じく表面と垂直に発生する亀裂で、圧子が押付けられて生じる塑性変形領域(圧痕)の四隅から発生する、

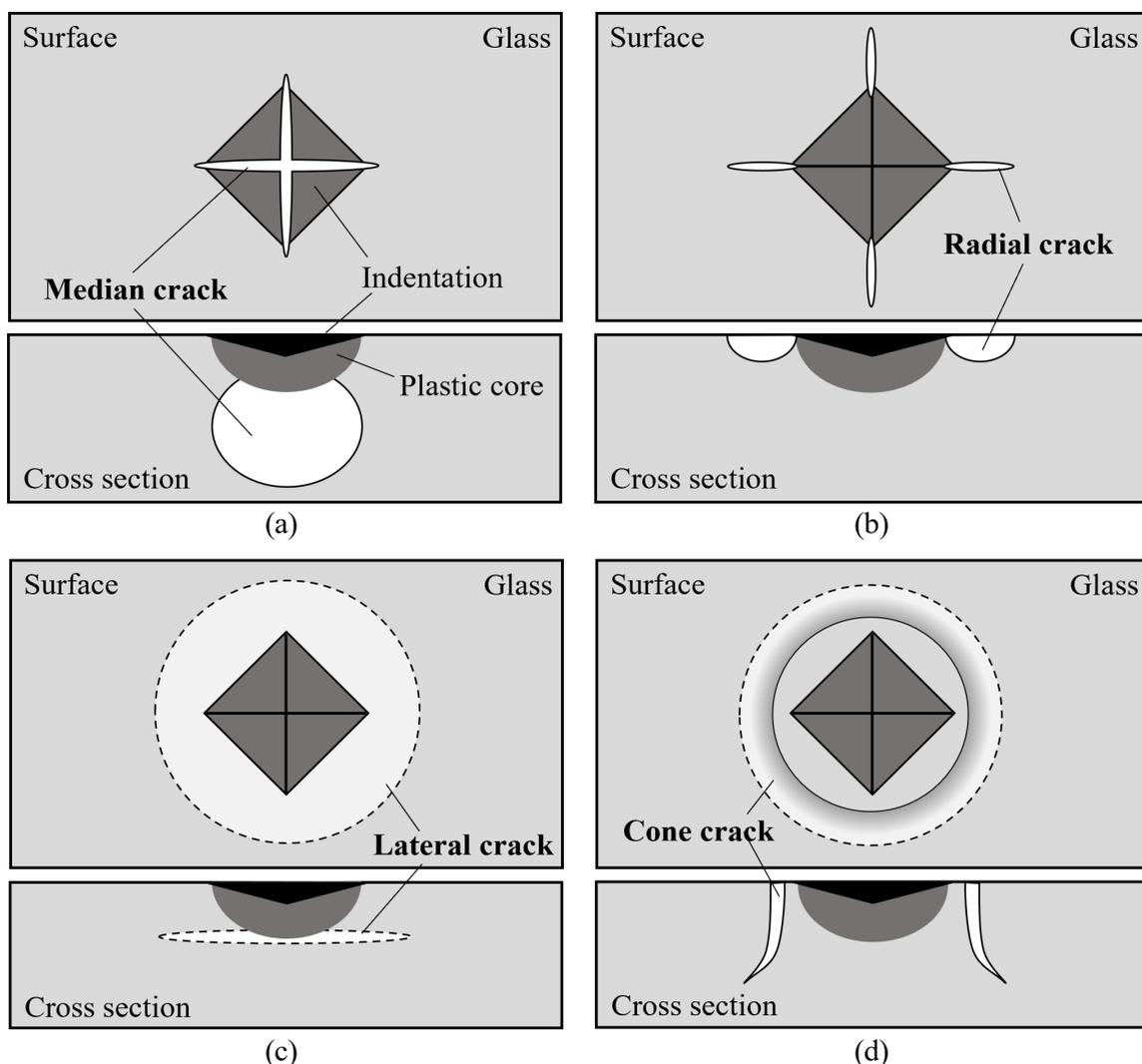


FIGURE 3.5 Schematic illustrations of crack in Vickers indentation. (a) Median crack occur under ridge line of indentation. (b) Radial crack appears at corner of indentation near surface. (c) Lateral crack is located under plastic core zone. (d) Cone crack is generated from surface around indentation.

表面付近の亀裂をラディアルクラックと呼ぶ (図3.5 (b)). また, ガラス内部に表面と水平に発生する亀裂をラテラルクラック (図3.5 (c)), 圧痕の周囲の表面から円錐状に広がるようにして発生する亀裂をコーンクラックなどとして分類している (図3.5 (d)). メディアンクラックは, 圧子を押し付けた際に生じる塑性変形領域と, その周囲に分布する弾性変形領域の境界部を起点に, 圧子の稜線に沿って形成される. この特徴は円形亀裂と一致している. また, 荷重との関連では, コーンクラック, ラディアルクラック, ラテラルクラックは, 比較的低い荷重を負荷した場合にも発生する. 一方, メディアンクラックは比較的大きな荷重が負荷されないと発生しないとされ, そのしきい値はIshikawaら³⁻¹³⁾の研究により, 様々なガラス基板に対し調査されている. Ishikawaらが示した, ビッカース圧子押し込みの場合のメディアンクラックが発生する荷重のしきい値は9.1 Nであるが, ホイール割断によって押し込まれる工具の領域は, ビッカース圧子を用いた場合よりも小さくなる. したがって, 狭い領域に応力が集中すると考えられるため, 図3.3でホイールの凸部の下方に発生した垂直亀裂 (円形亀裂, 起点クラック) は, 負荷荷重の大小にかかわらずメディアンクラックであると考えられる. また, メディアンクラックは負荷の増大により, さらに成長する. そのため, ホイール割断において荷重が増加すると隣接する円形亀裂同士が接近し, 結合して起点クラックが形成される.

ホイールの後方で圧痕の四隅から放射状に生じた亀裂は, 除荷中に圧痕角部から発生するという特徴がラディアルクラックに一致する. スクライブ後, ガラス試料の上方向から表面を観察した結果を図3.6に示す. 確かに圧痕の4隅から亀裂が伸び, 場合によっては亀裂で囲まれた部分が剥離している様子が観察された (図3.6 (a)). また, ブレークした後の表面は, 図3.6 (b) のように圧痕間がラディアルクラックに沿って欠けている. したがって, ラディアルクラックは加工後の表面の形状に影響を及ぼしている.

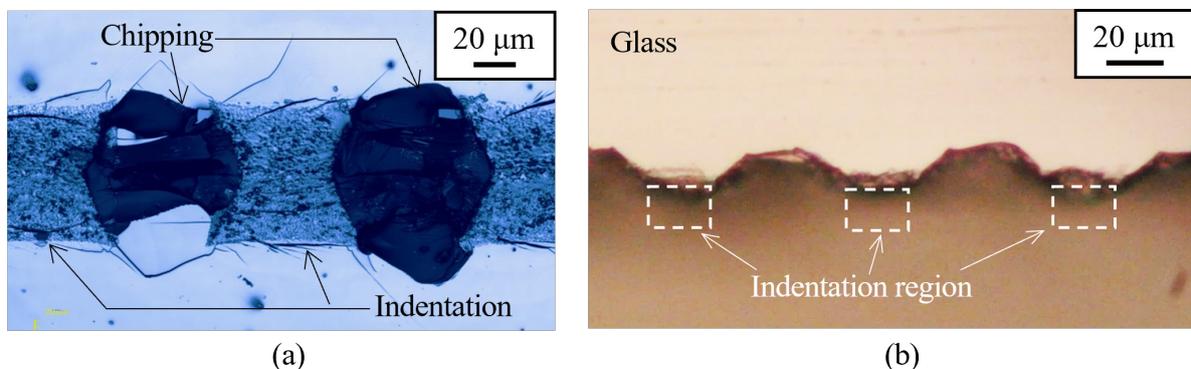


FIGURE 3.6 Surface morphology of the scribed glass. (a) before breaking as observed by a confocal microscope and (b) after breaking as observed by an optical microscope.

先行研究により、スクライブ時にはガラス表面と水平に発生するラテラルクラックの形成も報告されている³⁻¹⁾。したがって、ホイール割断時にはメディアンクラック、ラディアルクラックおよびラテラルクラックが形成されることが明らかになった。これらの亀裂が形成するメカニズムについて、さらに詳しい調査が必要である。

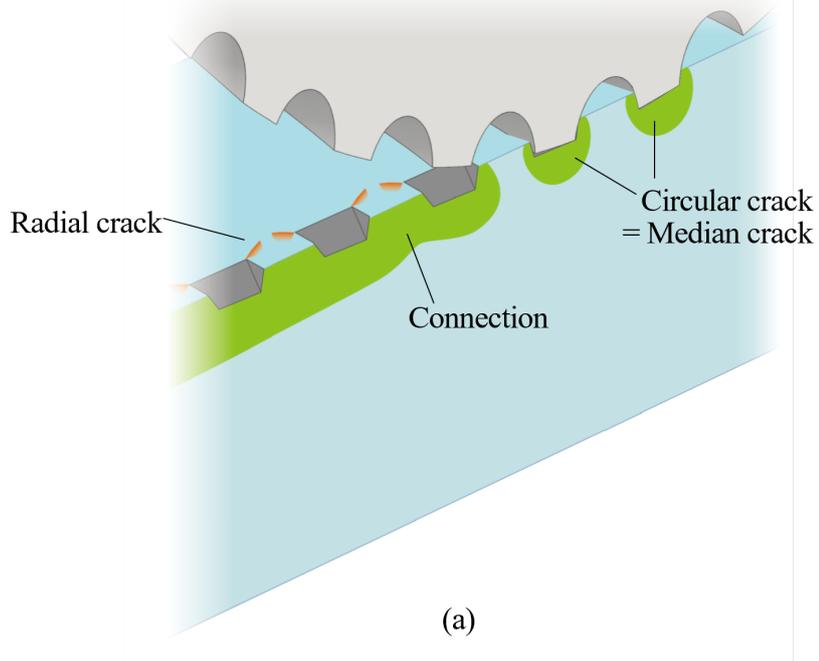
結言

本章では、高速度カメラを用いた観察により、ホイール割断のスクライブ中に形成される亀裂を可視化した。押し付け荷重を変化させて実験を行い、以下の結果を得た。

- (1) ホイール割断のスクライブ中には、凸部の下方に発生する円形の垂直亀裂（メディアンクラック）と、圧痕の角部から放射状に発生する垂直亀裂（ラディアルクラック）が観察された。それぞれメディアンクラックおよびラディアルクラックと特徴が一致する。
- (2) ハックルマーク形成時には、ホイール凸部の下方で円形のメディアンクラック（円形亀裂）が形成され、ホイール通過後に成長する。ホイール後方では圧痕間をつなぐ亀裂が形成する。
- (3) リブマーク形成時には、ホイール直下の円形亀裂が拡大し、互いに結合して起点クラックが形成される。起点クラック形成後は、ホイールの走査に追従して起点クラックが前方に進展する。
- (4) スクライブの途中で起点クラックが形成すると、その地点からはリブマークが形成される。すなわち、起点クラックが形成するかどうかはリブマーク形成の要因である。
- (5) ホイール後方では、圧痕の四隅からラディアルクラックが形成する。ラディアルクラックはガラス表面から浅い位置に存在し、加工後の表面の欠けを誘発する。

ブレークレスホイールを用いたスクライブにおいて、観察された亀裂の発生位置の模式図を図3.7に示す。

Hackle mark condition



Rib mark condition

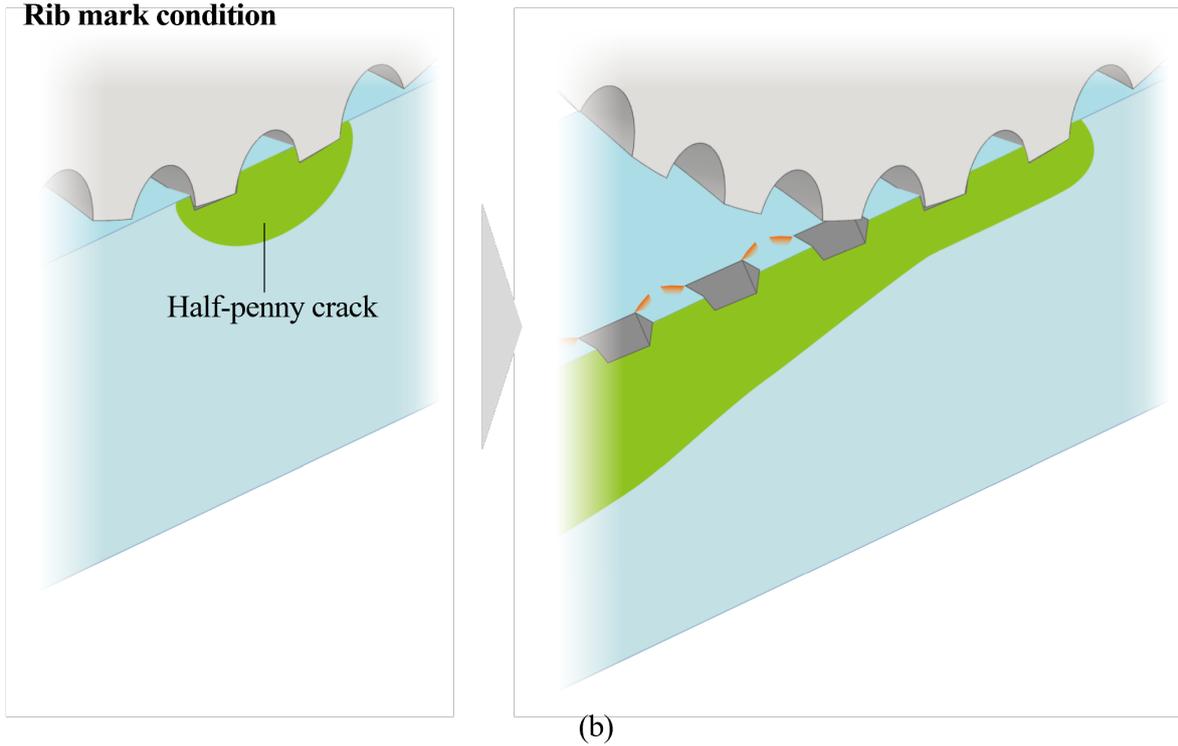


FIGURE 3.7 Schematic illustration of crack generation behavior during scribing process when (a) hackle mark and (b) rib mark are appeared on fractured surfaces..

参考文献

- 3-1) 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) pp.684–689.
- 3-2) 松坂壮太, 溝渕玄太, 森田昇, 比田井洋史, 千葉明, ホイールによるガラススクライプ中の亀裂伸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.
- 3-3) Hasegawa R., Matsusaka S., Hidai H., Chiba A., Morita N. and Onuma T., In-process estimation of fracture surface morphology during wheel scribing of a glass sheet by high-speed photoelastic observation, Precision Engineering, Vol. 48 (2017) pp.164–171.
- 3-4) 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プ挙動の観察, 精密工学会誌, Vol. 84, No. 7 (2018) pp.634–639.
- 3-5) Hagan J. T., Micromechanics of crack nucleation during indentations, Journal of Material Science, Vol. 14 (1979) pp.2975–2980.
- 3-6) Kato Y., Yamazaki H., Yoshida S. and Matsuoka J., Effect of densification on crack initiation under Vickers indentation test, Journal of Non-Crystal Solids, Vol. 356 (2010), pp.1768–1773.
- 3-7) Lacondemine T., Rethore J., Maire E., Celarie F., Houizot P., Roux-Langlois C., Schleputz C. M. and Rouxel T., Direct observation of the displacement field and microcracking in a glass by means of X-ray tomography during in situ Vickers indentation experiment, Acta Materialia, Vol. 179 (2019) pp.424–433.
- 3-8) Lawn B. R. and Evans A. G., A model of crack initiation in elastic/plastic indentation fields, Journal of Materials Science, Vol. 12 (1977) pp.2195–2199.
- 3-9) Ziemath E. C. and Herrmann P. S. P., Densification and residual stresses induced in glass surfaces by Vickers indentations, Journal of Non-Crystalline Solids, Vol. 273 (2000) pp.19–24.
- 3-10) 吉岡正人, 澤哲郎, ガラス表面への押込みによるクラック形成過程の動的観察—硬ぜい材料の微視的破壊機構に関する研究(第1報), 精密工学会誌, Vol. 60, No. 8 (1994) pp.1154–1158.
- 3-11) 吉岡正人, 澤哲郎, 室井邦雄, 圧子形状による押込みクラック形成機構の相違—硬ぜい材料の微視的破壊機構に関する研究(第3報), 精密工学会誌, Vol. 61, No. 4 (1995) pp.566–570.
- 3-12) 張冰, 吉岡正人, 平晋一郎, ガラスに対するビッカース圧子押込み場の応力解析, 砥粒加工学会, Vol. 51, No. 2 (2007) pp.100–105.

- 3-13) Cook R. F. and Pharr G. M., Direct observation of indentation cracking in glasses and ceramics. *Journal of American Ceramics Society*, Vol. 73 (1990) pp.787–817.
- 3-14) Ishikawa H, Shinkai N. Critical load for median crack initiation in Vickers indentation of glasses. *Journal of American Ceramics Society*, Vol. 65 (1982) pp.C124–C127.

第4章 各亀裂の形成メカニズム

4.1 緒言

前章の高速カメラを用いた亀裂形成挙動の観察から、スクライブ中にメディアンクラックおよびラディアルクラックが発生することが明らかになった。また、留井ら⁴⁻¹⁾によると、高荷重においては、スクライブによりラテラルクラックが発生することが報告されている。メディアンクラックは割断面を形成する亀裂であり、その挙動によって割断面の品質が大きく変化することが前章にて示された。一方、ラディアルクラックおよびラテラルクラックは、割断面の形成には直接的には寄与しない。しかし、Liaoら⁴⁻²⁾によるとラディアルクラックはスクライブ後の表面に残留し、端面強度を低下させる。また、ラテラルクラックが発生すると、表面付近が大きく剥離するほか、メディアンクラックの伸展を抑制することが報告されている⁴⁻³⁾。したがって、ラディアルクラックおよびラテラルクラックの形成は抑制されることが望ましい。

これらのメディアンクラック、ラディアルクラック、ラテラルクラックの発生メカニズムは、主にビッカース圧子を用いた研究が多くなされてきた^{4-4)~4-7)}。これに対し、ブレークレスホイールを用いたホイール割断は工具がガラスに押し込まれる点では共通しつつも、工具形状はもちろんのこと、複数の凸部が同時に接触する点や、工具を走査する点も異なっている。したがって、亀裂形成の基本的なメカニズムは同じくするものの、その後の亀裂伸展挙動は大きく異なると考えられ、より詳細な検討が必要である。ブレークレスホイールに関しては、亀裂伸展挙動の観察実験や応力解析が行われてきたが^{4-8)~4-11)}、いずれもマクロな視点からの研究であり、ブレークレスホイールの凹凸形状がどのように影響して亀裂を形成しているのか、明らかにされてこなかった。

そこで本章では、ホイール割断において発生するこれら3つの亀裂について、より詳細な対照実験と応力解析を行うことで、形成メカニズムを解明することを目的とする。第2節ではメディアンクラック、第3節ではラディアルクラック、第4節ではラテラルクラックについて、それぞれ亀裂形成挙動および形成メカニズムを考察した。

4.2 メディアンクラック

ビッカース圧子を用いた脆性材料の研究において、メディアンクラック(図3.5(a))は圧子の稜線に沿ってガラス内部に発生する、円形の垂直亀裂である⁴⁻⁵⁾。メディアンクラックは、圧子を押し付ける負荷過程において、圧子下方の塑性変形領域と弾性変形領域の境界部を起点にガラス内部に発生する。

第3章では、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、それぞれの割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。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メディアンクラックが形成されると、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割断面品質を決定する。

そこで本節では、割断面形態を左右するホイール押し付け時のメディアンクラックの形成に着目し、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、それらと比較した。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、メディアンクラックの形成挙動が変化する要因についても考察した。

実験および解析方法

実験方法の模式図を図4.1に示す。ビッカース圧子を用いた押し付け/除荷試験⁴⁻³⁾に倣い、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4.1 (a)）。荷重負荷状態を約12秒間維持した（維持過程、図4.1 (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4.1 (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、高速度カメラを用いて動的に観察した。ホイールは表2.1に示した5種類のPenettを用いた。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 $\mu\text{m/s}$ 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。試料の寸法は30×10 mmとし、両端をマスキングテープで固定した。解析手法は第2章で述べた通りである。

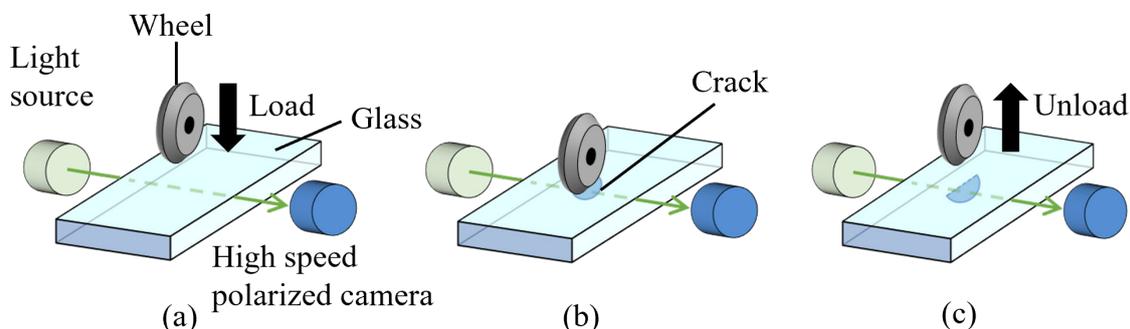


FIGURE 4.1 Experimental procedure of wheel load/unload experiment (observed from lateral side). (a) Loading process (1st process), (b) load holding process (2nd process), and (c) unloading process (3rd process).

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。本実験でも、第3章と同様に、円形亀裂と起点クラックが観察された。

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4.2に示す。負荷過程の途中でホイールの凸部直下に円形亀裂が生成した（図4.2 (a)）。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起点クラックが生成した（図4.2 (b)）。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4.2 (c)）、除荷過程でさらに進展した（図4.2 (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4.3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4.3 (a)）。図4.3 (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

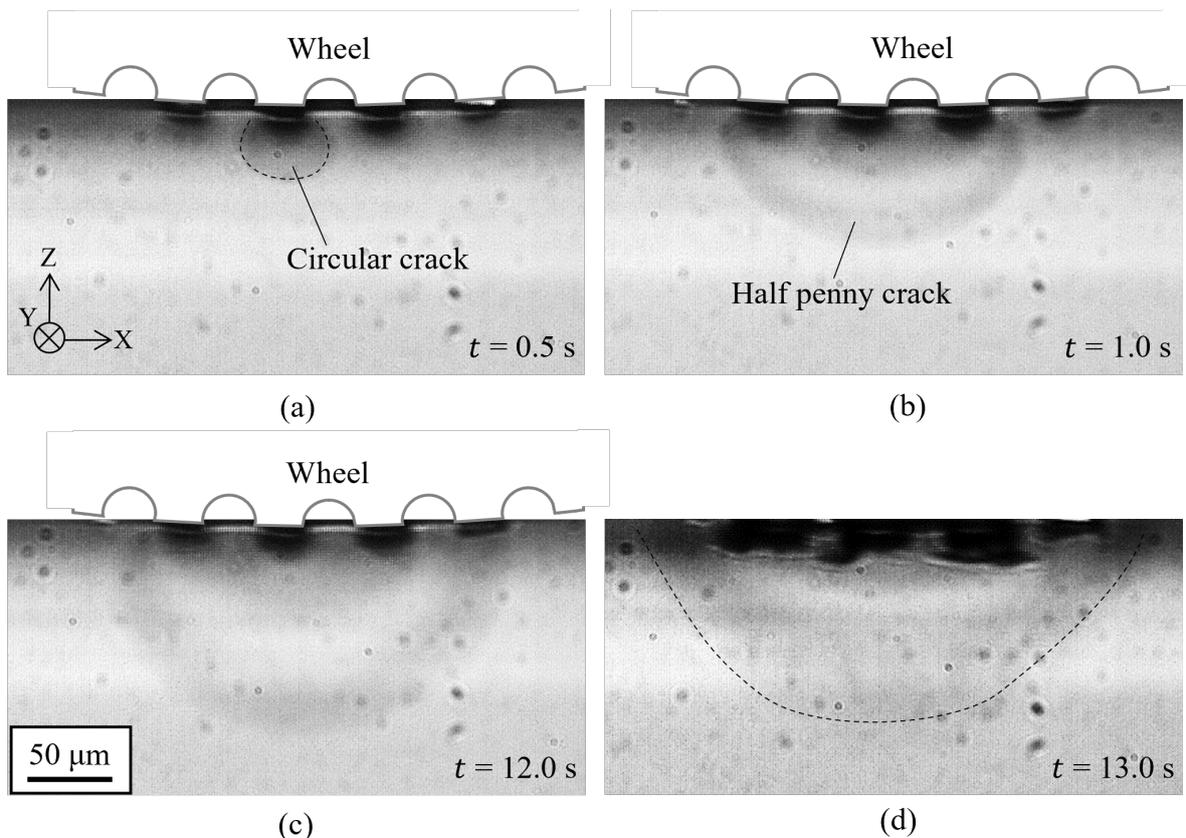


FIGURE 4.2 Crack observation results from lateral side (Penett 110-10, applied load 15 N). (a): During loading process (0.5 s), (b): after loading process (1.0 s), (c): after holding process (12.0 s) and (d): after unloading process (13.0 s).

長して起点クラックが形成される場合（図4.3 (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4.3 (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4.3 (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4.3 (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）

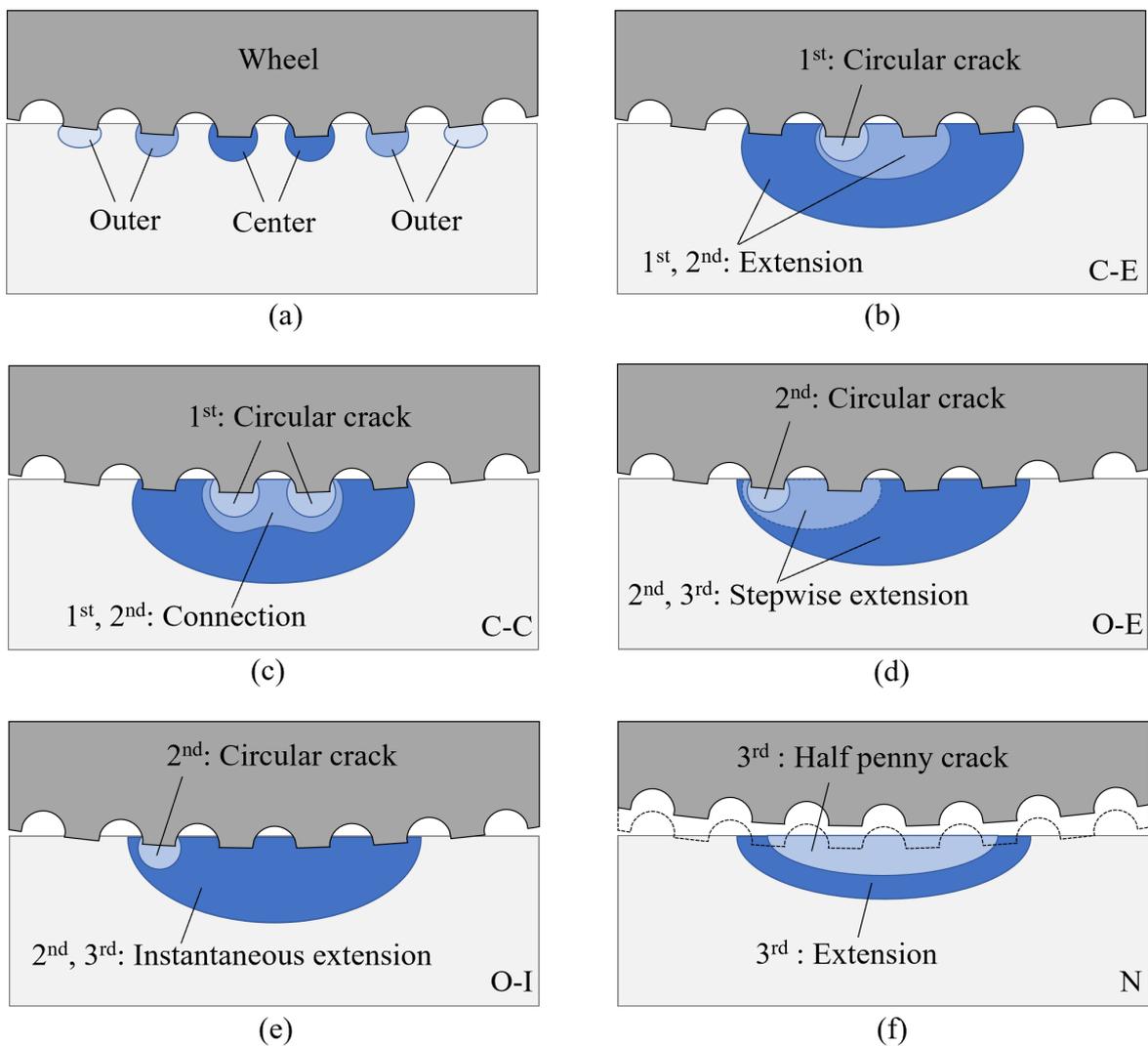


FIGURE 4.3 Schematic illustrations of crack generation behavior. (a) generating position of circular cracks. (b) C-E: circular crack occurred under central indentation extends. (c) C-C: Center circular cracks connect each other. (d) O-E: Outer circular crack extends to half penny crack. (e) O-I: Large half penny crack generate instantaneously from outer circular crack. (f) N: No circular cracks occurs 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 means loading, load holding and unloading process, respectively.

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4.3 (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4.1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4.1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4.4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、 $t = 0 \text{ s}$ 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一つが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 $t = 12 \text{ s}$ 以降で除荷が開始する。

図4.4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 $t = 0.5 \sim 0.6 \text{ s}$ 、135-10は $t = 0.8 \text{ s}$ 付近であった。一方で、それ以外の条件では、おおよそ $t = 2 \text{ s}$ 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4.4 (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。5 Nでは維持過程で発生しているのに対し、15 Nおよび25 Nでは負荷過程で発生している場合もある。図4.4 (b)

TABLE 4.1 Crack generation behavior of median crack 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.

に示した135-10を用いた場合においても、5 Nでは除荷過程で起点クラックが発生するのに対し、15 Nおよび25 Nでは維持過程で発生するようになっている。140-7 (図4.4 (c)), 170-5 (図4.4 (d)) および360-3 (図4.4 (e)) 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、凹凸の数が多くな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。

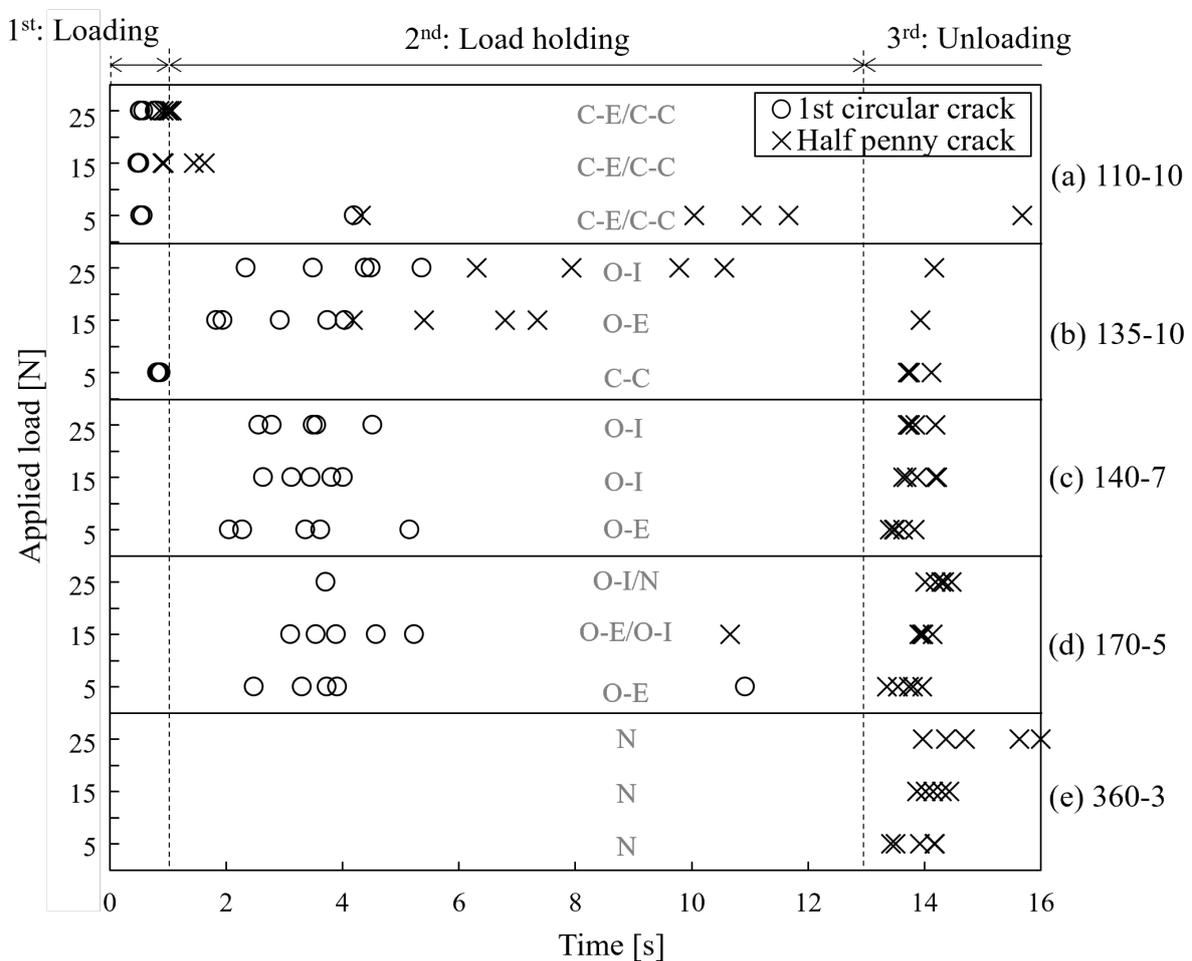


FIGURE 4.4 Time chart of crack generation for each wheel shape. (a) 110-10, (b) 135-10, (c) 140-7, (d) 170-5 and (e) 360-3. $t = 0 \sim 1.0$ s is loading process, $t = 1.0 \sim 13.0$ s is load holding process and $t = 13.0 \sim$ is unloading process.

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^{4,4)}。

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^{4,12)}。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、本論文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。

4.2.3.1 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15 Nの荷重を負荷した場合の解析結果を図4.5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4.5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 とは同一ではないことを明記しておく。図4.5 (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4.5 (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4.5 (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4.5 (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4.6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4.6 (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4.6 (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4.6 (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4.6 (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4.6 (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4.6 (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

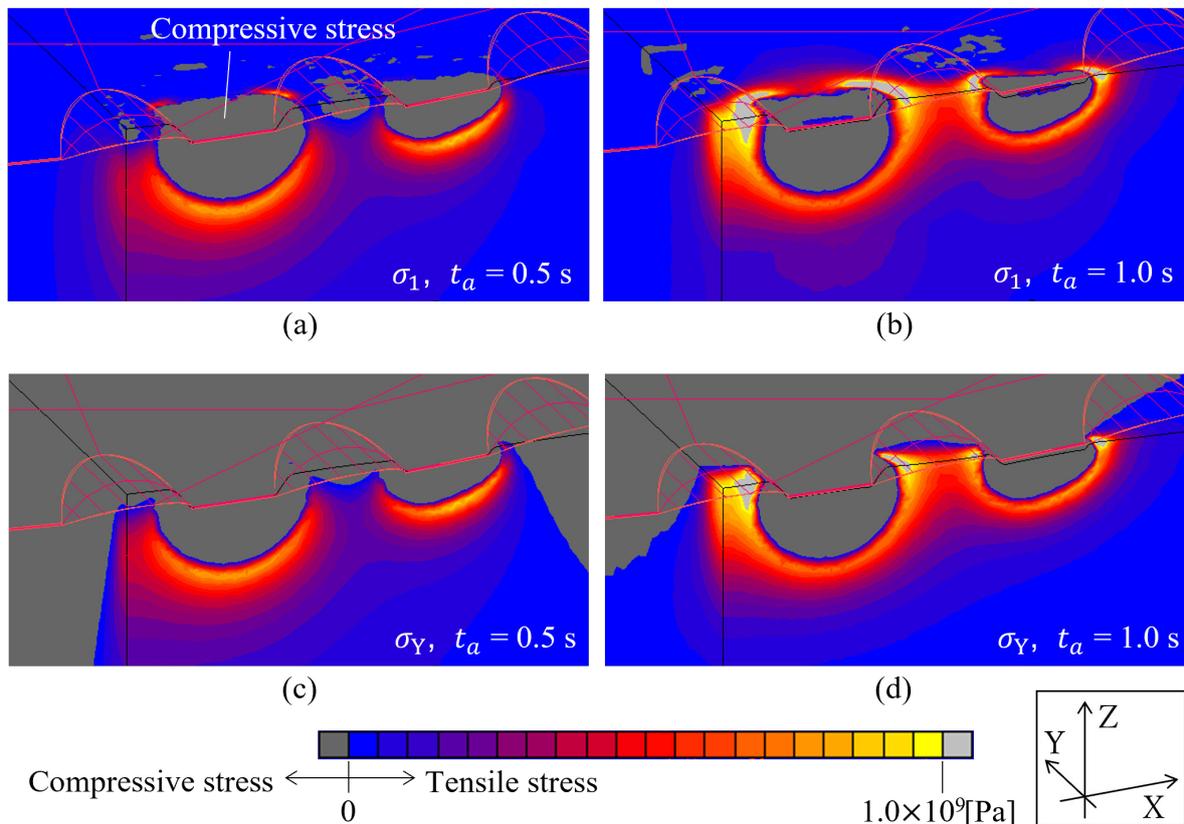


FIGURE 4.5 Overhead view of stress distribution when using 110-10 at an applied load of 15 N. (a) and (b): Maximum principal stress σ_1 at $t_a = 0.5$ s (maximum load) and $t_a = 1.0$ s (unloaded). (c) and (d): Normal stress in Y direction σ_Y at $t_a = 0.5$ s and $t_a = 1.0$ s.

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_∞ の一樣な応力が作用するとき、次式で表される⁴⁾¹³⁾。

$$K_I = \sigma_\infty \sqrt{\pi a} \quad (4.1)$$

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、中央の凸部の方が外側の凸部よりも深くガラスに押し込まれ、接触する時間も長いため、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⁴⁾¹²⁾。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4.6 (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。

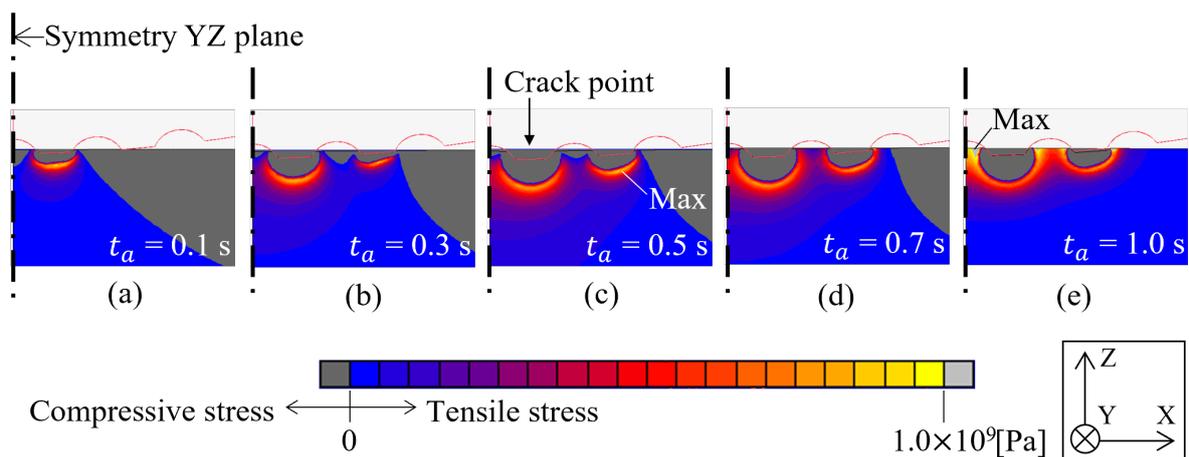


FIGURE 4.6 Transition of Y axis tensile stress distribution on XZ symmetry plane when using 110-10 at applied load of 15N. (a) ~ (c): loading process, (d) and (e): unloading process. Allow mark indicates crack generation point in experiments.

4.2.3.2 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4.7に示す。図4.7も図4.6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4.7 (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4.7 (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4.7 (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4.7 (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4.7 (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4.7 (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。

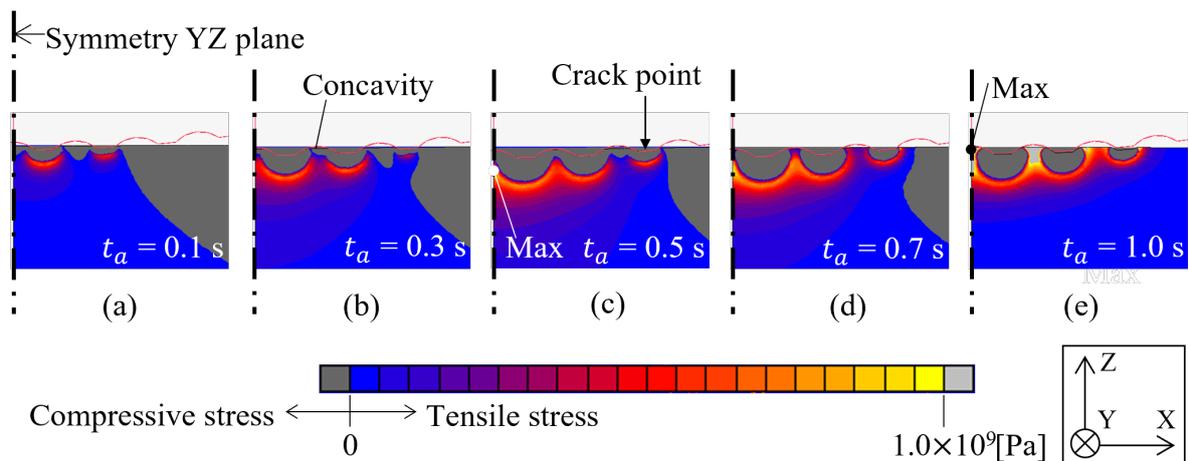


FIGURE 4.7 Transition of Y axis tensile stress distribution on XZ symmetry plane when using 170-5 at applied load of 15N. (a) ~ (c): loading process, (d) and (e): unloading process. Allow mark indicates crack generation point in experiments.

他のホイールの凹凸形状における解析結果を図4.8にまとめた。図4.8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に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。図4.8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。 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。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。

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。

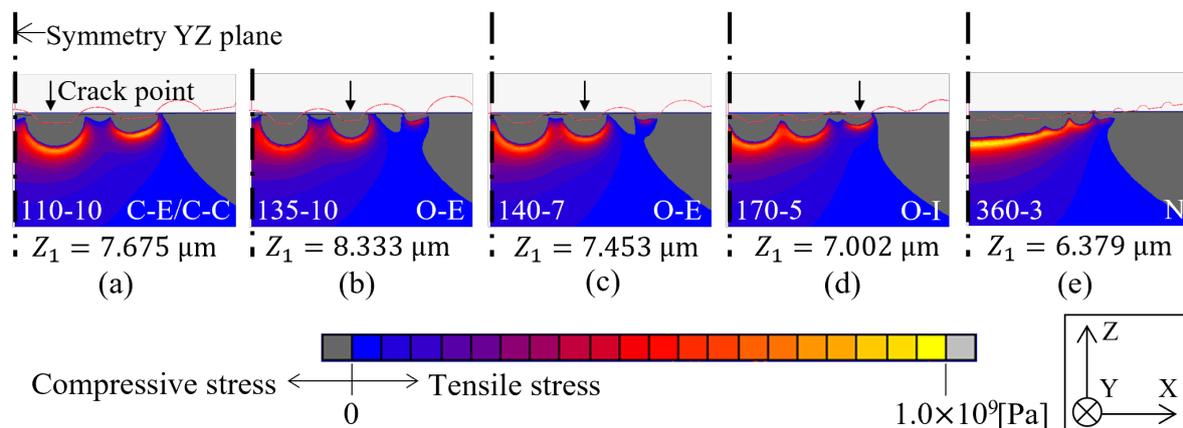


FIGURE 4.8 Comparison of stress distribution on XZ symmetry plane at an applied load of 15 N among various wheel configuration ($t_a = 0.5$ s, after loading). (a) 110-10, (b) 135-10, (c) 140-7, (d) 170-5 and (e) 360-3. Arrow marks indicate generation points of circular cracks. Z_1 is indentation depth after loading.

4.3.3.3 応力分布や亀裂形成に対する荷重の影響

前項の考え方を裏付けるため、荷重を変化させて解析を行った。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4.9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4.8と同様に、引張応力領域の表出と図4.9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、前述のように135-10では凸部下方における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。

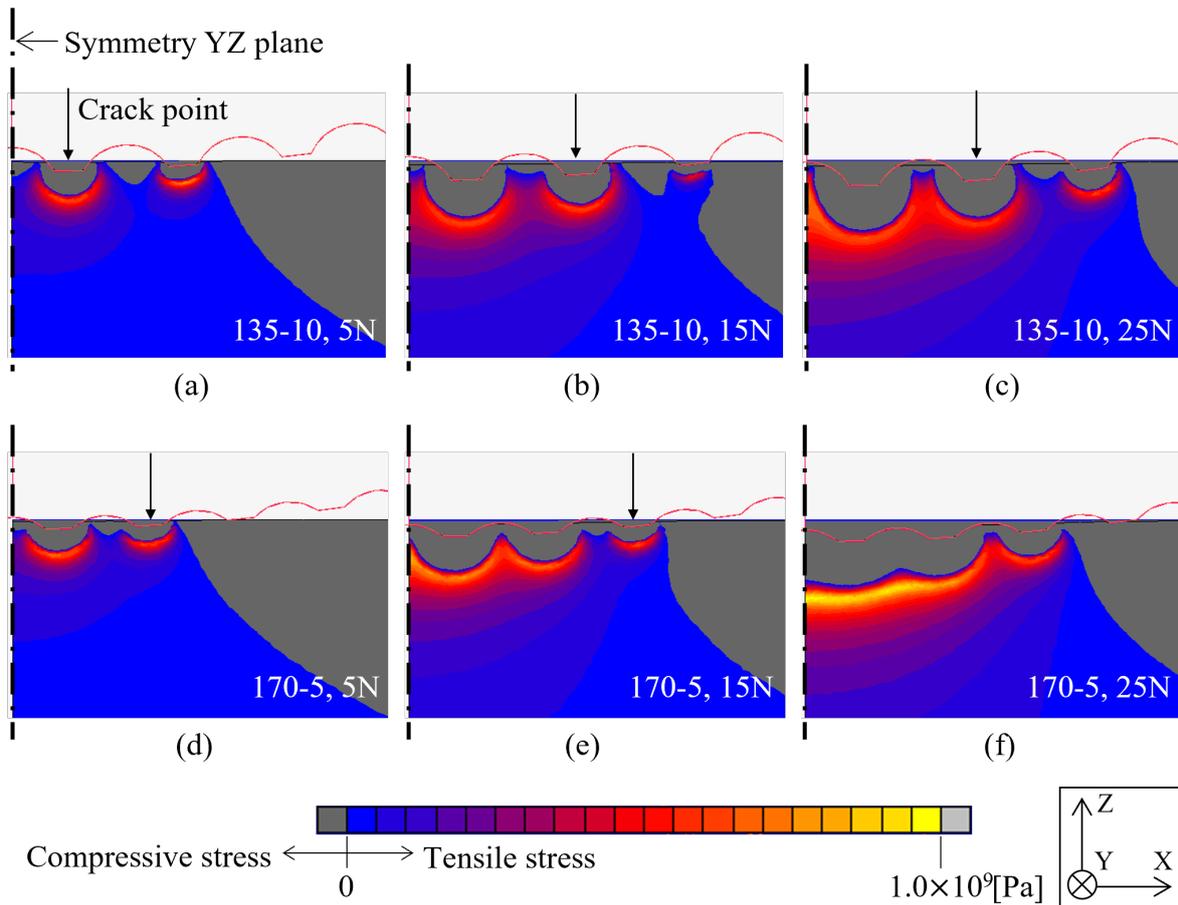


FIGURE 4.9 Comparison of Y axis tensile stress distribution on XZ symmetry plane among an applied load of 5, 15 and 25 N at 0.5 s of analysis time (end of loading) when using wheel 135-10 (a ~ c) and 170-5 (d ~ f). Arrow marks indicate crack generation point in experiments.

4.2.3.4 起点クラックの形成と応力分布の関係

以上の結果から、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4.8 (e) および図4.9 (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。比較的凹部の接触面積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。

4.2.3.5 亀裂形成のメカニズムおよび切断加工への応用

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4.10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4.10 (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

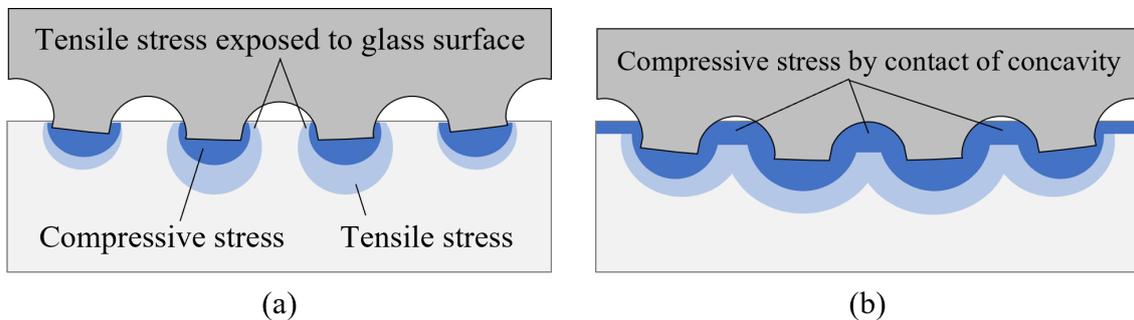


FIGURE 4.10 Relationships between contact condition of concavity and stress distribution. When concavities do not contact (a), tensile stress reach to glass surface and then circular cracks occur. On the other hand, when concavities contact enough, the region near surface becomes compressive stress and then circular cracks generation is suppressed.

重の増加により凹部の接触が顕著になることで、図4.10 (b) に示すように表面近傍全域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。

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、本論文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。

4.3 ラディアルクラック

3章の亀裂形成挙動の観察より、ブレークスホイールを用いた割断加工では、ホイール外周部の凹凸によりガラス表面には楔型の圧痕が形成される。そして、圧痕の四隅からは放射状に小さな亀裂が形成される様子が観察された。ビッカース圧子を用いた基礎研究においても、四角錐の圧痕の4隅から同様の亀裂の発生が認められ、ラディアルクラックと呼ばれている^{4,5)}。ラディアルクラックは表面からごく浅い領域に発生するとされるが、前節で述べたメディアンクラックと同一の面内に発生する垂直亀裂であるため、メディアンクラックが成長すると結合して一つの半円形の亀裂を形成することもある。

ホイール工具を用いた研究では、齊藤らは走査型電子顕微鏡 (SEM) 内部でスクライブを行う様子を撮影し、ホイールの凹凸形状によりラディアルクラックの形成が変化することを報告している^{4,14)}。ホイール割断において、ラディアルクラックはメディアンクラックと同一面内に形成されないため割断に不要な亀裂であり、割断後もスクライブ表面に残り加工品質に悪影響を及ぼすことが指摘されている。また、Liaoらはノーマルホイールを用いた研究ではあるが、ガラス端部の欠けや亀裂が曲げ強度を低下させることを明らかにした^{4,2)}。そのため、ラディアルクラックの発生は抑制されることが望ましい。

ラディアルクラックの形成メカニズムと凹凸形状との関係を明らかにするため、本節でも前節と同様、応力解析および亀裂可視化実験を実施した。そして、得られた結果からラディアルクラックを含む表面亀裂の形成について考察した。

スクライブ表面の観察

ホイール割断時の表面亀裂に関しては、齊藤により先行研究が行われている⁴⁻¹⁵⁾。齊藤により撮影されたスクライブ後の表面の顕微鏡観察の結果を引用し、**図4.11**に示す。まず、すべてのホイールにおいて、荷重が大きくなると表面亀裂が大きくなり、その発生頻度も増加していることがわかる。110-10では、圧痕間の欠け（黒色部）が頻繁に発生している。5 Nおよび10 Nでは、ラディアルクラックに沿うように、圧痕の幅よりも大きな多角形形状に欠けが発生している。一方、15 Nおよび20 Nではラディアルクラックはスクライブラインと平行に近づき、欠けの幅が圧痕の幅より小さくなっている。高荷重の結果、特に140-7の結果には、圧痕の側方にスクライブ方向にとがった亀裂がみられる。以後“羽クラック (Wing crack)”と呼称する。歯数が多くなる、すなわち圧痕が小さくなると、発生するラディアルクラックは小さくなっている。170-5の結果を見ると、5 Nでは圧痕の角部から小さなラディアルクラックが発生しているが、10 N以上では角部ではなく、長方形の圧痕の短辺から亀裂が形成し、圧痕同士をつないでいることがわかる。360-3の5 Nおよび10 Nでも同様の形態を示している。360-3の15 Nおよび20 Nでは圧痕間の距離が近づき、圧痕側方からスクライブ進行方向に亀裂が形成している。この亀裂はラディアルクラックと形状が類似しているが、発生形態がスクライブの前後に非対称であり、発生メカニズムが異なることが予想さ

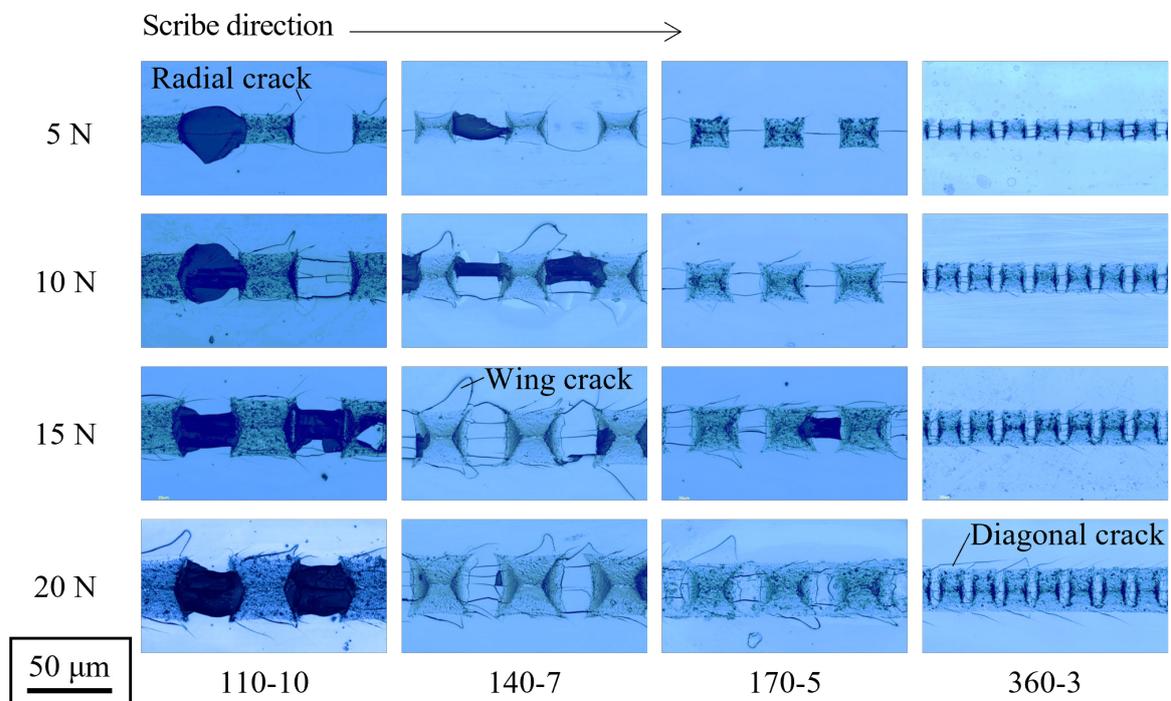


FIGURE 4.11 Microscopic images of scribed surfaces using various wheels and applied loads. Radial cracks occurred at corner of indentations. Radial cracks connect indentations. At higher load, wing cracks and diagonal cracks appear beside indentations.

れる。そのため、ここではラディアルクラックとは区別し、スクライブラインに対して斜めに発生していることから“斜めクラック (Diagonal crack)”と呼称する。

高速度カメラによる亀裂形成挙動の観察

高速度カメラを用いて、裏面方向からラディアルクラックの形成挙動を観察した。実験方法は3.3節と同様の、垂直観察システムを用いた。110-10のホイールを用いてスクライブを行った際の観察結果を図4.12に示す。押し付け荷重は7Nであり、ハックルマークが形成される条件である。0.005 sごとの画像を表示しており、図中の矢印は同一の圧痕を示している。矢印で示した圧痕に注目すると、ホイールの直下ではラディアルクラックは形成していない (図4.12 (a, b))。ホイールの凸部が離れると、圧痕の四隅から放射状にラディアルクラックが形成している (図4.12 (c))。その後、ラディアルクラックは成長し (図4.12 (d, e))、隣接する圧痕のラディアルクラック同士が結合して圧痕間が剥離する様子 (図4.12 (f)) が観察された。

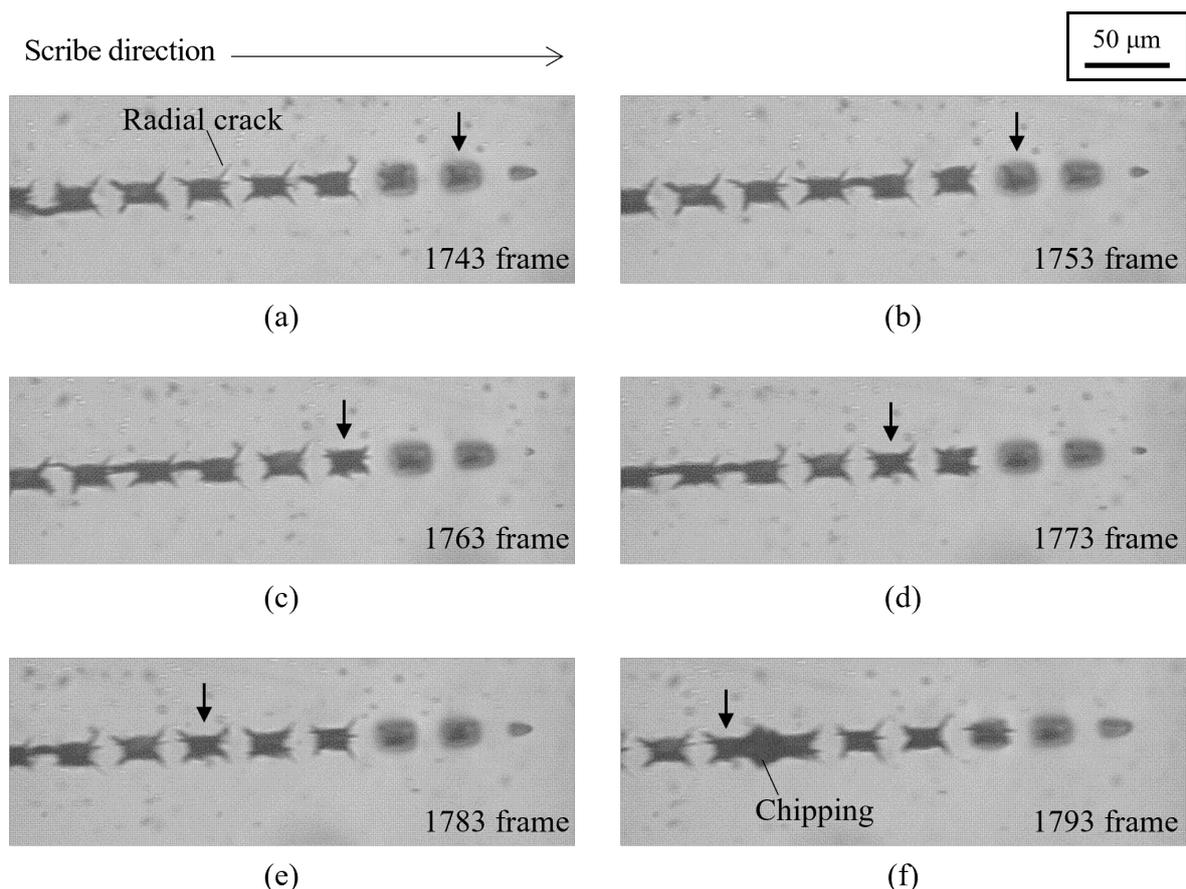


FIGURE 4.12 Radial crack generation behavior observed by high-speed camera from back side of glass (110-10, 7 N). Allow mark indicate same indentation. Radial cracks occur behind wheel contact region. Cracks glow with time and connect each other (c). Sometimes, polygonal region surrounded by radial cracks are chipped (f).

図4.13には、押し付け荷重とホイール形状を変更した場合の観察結果を示す。荷重はハックルマークが形成される7 Nとリブマークが形成される15 Nで比較し、ホイールは110-10, 140-7および170-5を用いた。図4.13 (a) は110-10の結果を示したものであり、放射状のラディアルクラックと圧痕間の欠けがみられる。図4.13 (b) は荷重が15 Nの場合であり、リブマーク形成時の特徴であるメディアンクラックがみられる。スクライブ進行方向側の圧痕角部から図4.13 (a) よりも大きなラディアルクラックが形成し、後ろ向きに発生するラディアルクラックは視認できないほど小さくなっている。圧痕間の欠けは、圧痕の幅とほぼ同程度の欠けが多く、欠けの発生頻度が高くなっている。140-7および170-5のホイールでは、110-10に比べてラディアルクラックが小さく、歯の高さが小さい170-5の7 Nではほとんど視認できない（図4.13 (e)）。また、ラディアルクラックがスクライブラインと平行に近づき、図4.13 (c) および (e) の7 Nでは圧痕間をつなぐ亀裂も直線的になっている。圧痕の長方形がゆがんで台形になっており、羽クラックが形成された様子も観察された。羽クラックの部分も黒い影として映っていることから、亀裂は観察面 (XY面) に対して傾いていることがわかる。170-

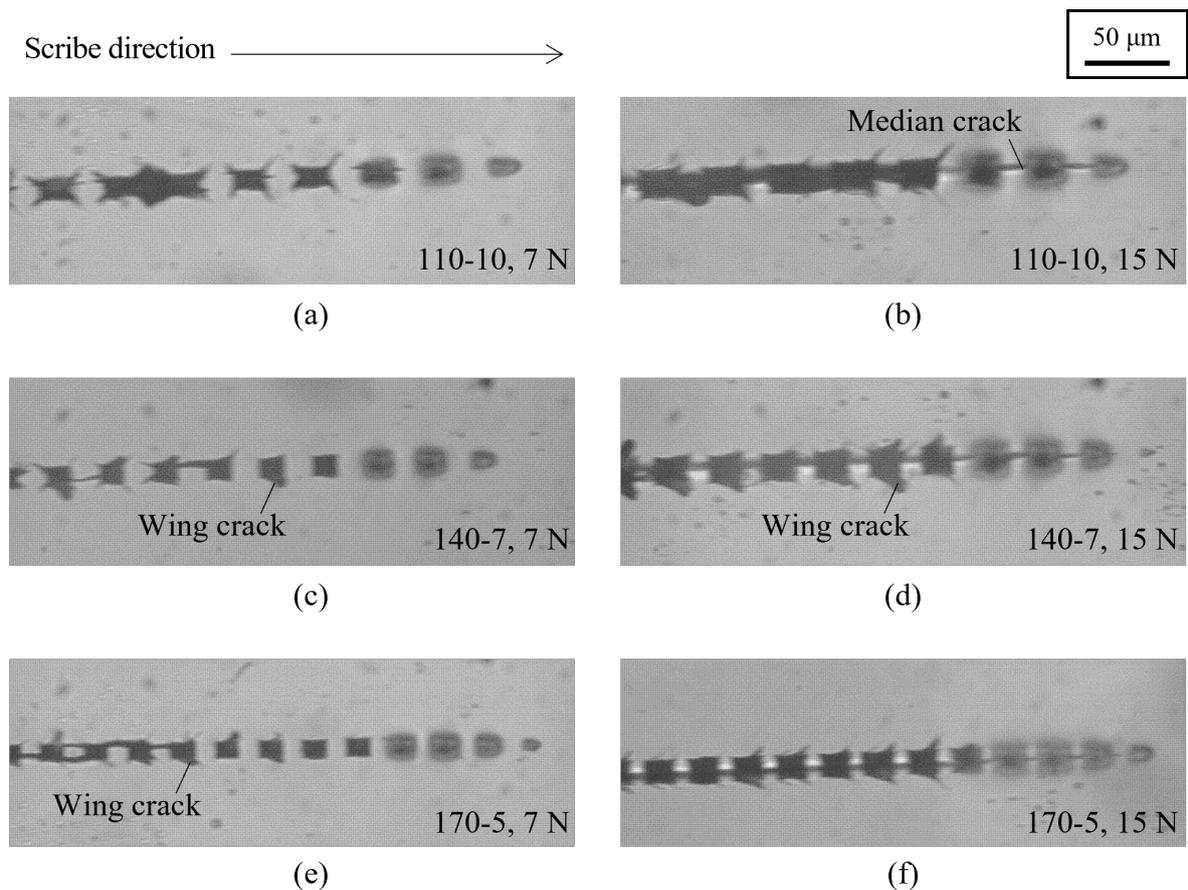


FIGURE 4.13 Radial crack generation behavior at (a, c, e) 7 N and (b, d, f) 15 N. Wheels are (a, b) 110-10, (c, d) 140-7 and (e, f) 170-5.

5の15Nでは、圧痕の後方側の角から、斜めクラックが形成されている（図4.13 (f)）。こちらは細い線として映っていることから、スクライブ表面に対して垂直な亀裂であると考えられる。羽クラックが形成される挙動を図4.14に示す。ホイールは140-7、押し付け荷重は15Nである。矢印で示した圧痕に注目すると、図4.14 (b) のように圧痕の中央部に黒い影が現れる。その影が徐々に拡大し羽クラックと類似した形状になる（図4.14 (c~f)）。

これらの結果から、表面亀裂の発生形態を整理する。スクライブにより表面に現れる亀裂を、ラディアルクラック、メディアンクラック、羽クラック、斜めクラックの4種類に分類した。表面亀裂形成の模式図を図4.15に示す。ラディアルクラックは圧痕の四隅から放射状に発生する。そして、ラディアルクラックの先端同士が近づくとつながって、ラディアルクラックと圧痕で囲まれた領域が剥離する（図4.15 (a)）。荷重が増加する、あるいはホイールの凹凸が小さくなると、ラディアルクラックの向きはスクライブ方向と平行に近づき、亀裂が発生する位置もスクライブライン寄りに変化する。リブマーク形成条件では、圧痕間でメディアンクラックが表出する。その場合、

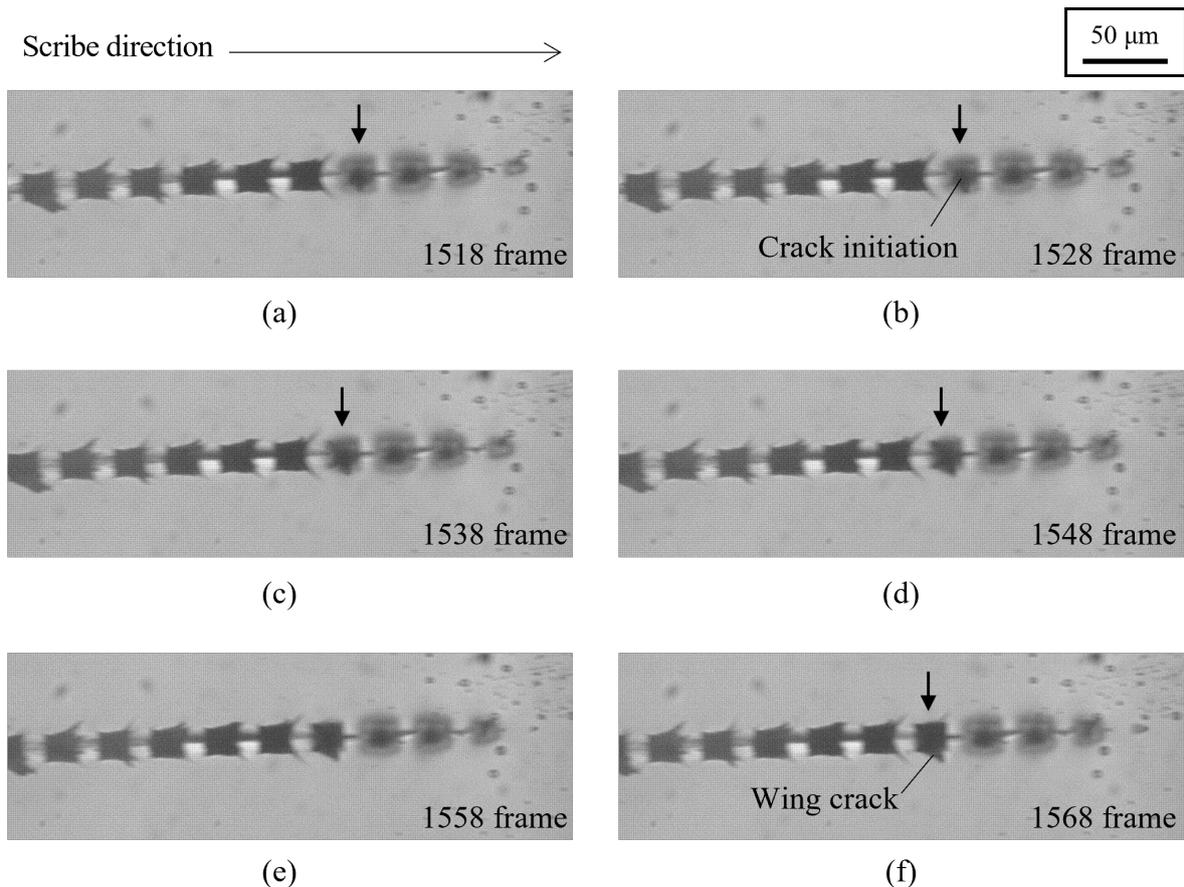


FIGURE 4.14 Radial crack generation behavior observed by high-speed camera from back side of glass (140-7, 15 N). Allow mark indicate same indentation. Crack generate under wheel (a) and glow to outside (c ~ f).

メディアクラック (=スクライブライン) とラディアルクラック, 圧痕に囲まれた領域が剥離することもある (図4.15 (b)). 羽クラックは圧痕の側方に発生する, 三角形に近い形状の亀裂である. ホイールが接触している圧痕の中央付近で起点が形成され, 外側に向かって成長する (図4.15 (c)). 圧痕の下方から発生し, 圧痕の側方で表出していることから, スクライブ表面に対して傾いた亀裂であることがわかる. 斜めクラックは, 圧痕の側方から, スクライブラインに対して斜め方向に形成される. 発生する角度はスクライブラインに対してほぼ一定である (図4.15 (d)). 荷重が小さい場合には圧痕の角部近傍から発生するが, 荷重が増加しホイールとガラスの接触部が大きくなると, 斜めクラックの発生する位置が不規則になる.

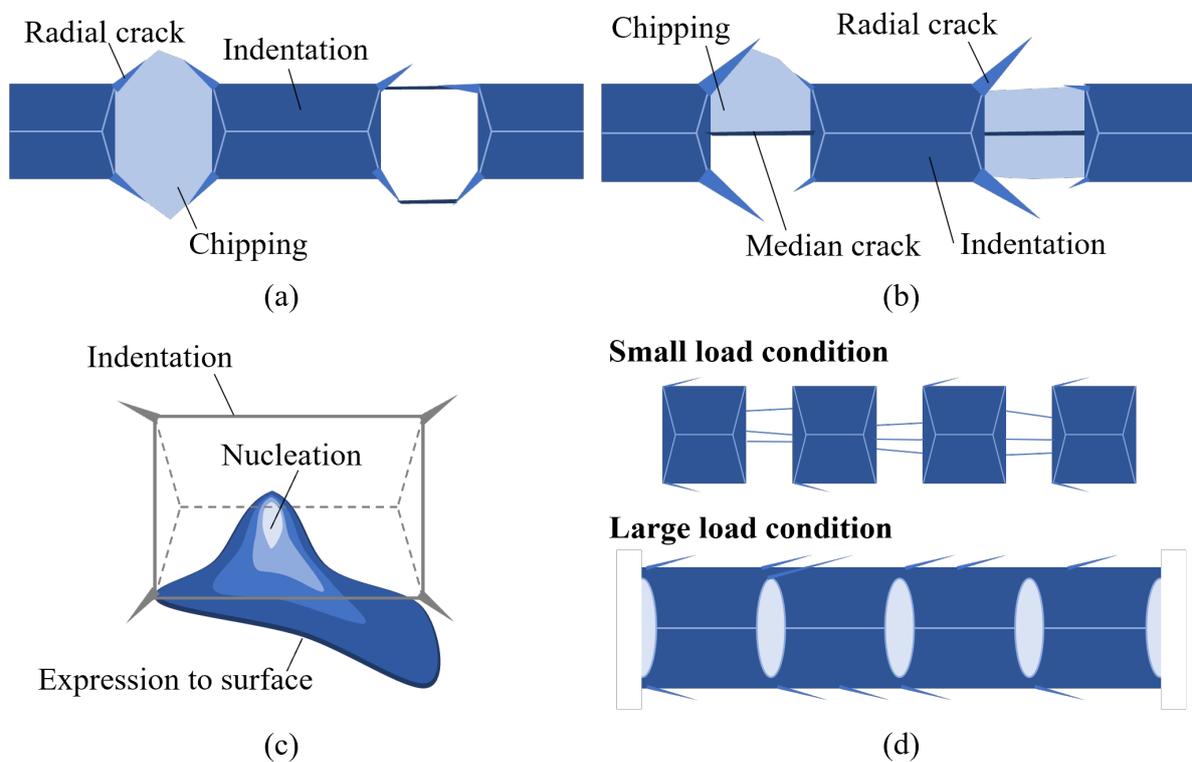


FIGURE 4.15 Schematic illustration of surface crack generation behavior. (a) Radial crack occurs at corners of indentations. Radial cracks connect each other, and the region surrounded by radial cracks and indentations is taken away (Chipping). (b) Median crack reach to surface when rib mark generated. Chipping sometimes occur at the region surrounded by radial cracks, indentations and median crack. (c) Wing crack is nucleate under central area of indentation. The nucleus grow toward outside and appear on surface as wing crack. (d) Diagonal cracks are perpendicular to surface and occur from corner of indentation, as same as radial cracks. Their angles against scribe direction are almost constant. When indentation depth increase like a result of 360-3 (Figure 1), diagonal cracks appear at irregular positions.

有限要素法解析の結果および考察

4.2節と同様、有限要素法による解析結果を用いて、表面亀裂の発生メカニズムについて考察する。

ラディアルクラック

有限要素法による押し付け/除荷解析の結果の一例として、第一主応力の分布を図4.16に示す。ホイールは110-10、荷重は15Nである。4.2節と同様、引張成分に着色し、圧縮成分は濃いグレーで表現している。左列（図4.16 (a, c, e)）は対称面とスクライブ表面が同時に見えるように俯瞰した図、右列（図4.16 (b, d, f)）はスクライブ表面

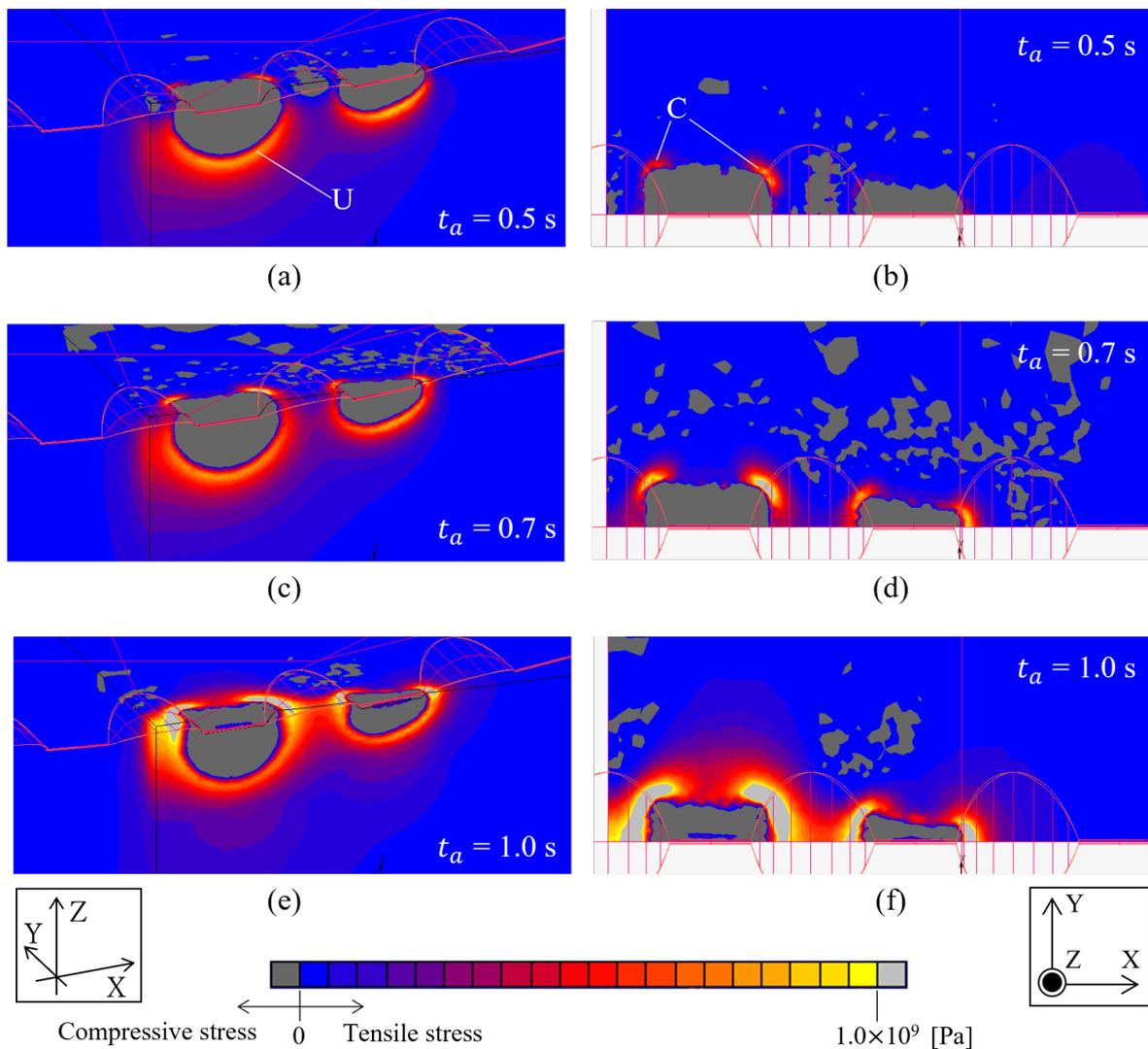


FIGURE 4.16 Distribution of maximum principal stress after loading (a, b), during unloading (c, d) and after unloading (e, f). Tensile stress regions locate under indentations (U) and at the corner of indentations (C) (a, b). Tensile stress region U move toward surface with unloading (c, e). Tensile stress region C enlarge with unloading (d, e). Finally, tensile stress distribute on the surface around indentations by combination of U and C (f).

をZ軸方向から見た図である。図4.16 (a) および (b) は押し付け完了時の応力分布である。圧痕の近傍は圧縮応力領域となっている。XZ対称面では、圧痕の下方に引張応力が分布している (図中のUの位置)。スクライブ表面では、圧痕の角部に引張応力が集中している (図中のCの位置)。これらの応力の作用する方向は、圧痕下方ではY軸方向、圧痕角部は圧痕を中心とした楕円の円周方向である。除荷が始まると、圧縮応力領域が縮小し、圧痕下方の引張応力領域はスクライブ表面に向けて上昇する (図4.16 (c))。また、圧痕角部の引張応力領域は大きくなる (図4.16 (d))。除荷完了時には、Y軸方向の引張応力領域はスクライブ表面まで上昇し (図4.16 (e))、圧痕角部の応力集中もさらに大きくなる (図4.16 (f))。その結果、圧痕角部の近傍からスクライブラインにかけて、圧痕を取り巻くように引張応力領域が分布する。その作用する方向は、圧痕を中心とした円周方向になっている。

この結果と実験結果を比較すると、圧痕角部に発生する引張応力が、位置、タイミング、方向すべてにおいてラディアルクラックの形成に対応することがわかる。したがって、除荷による弾性回復が塑性変形領域により妨げられることで残留応力が発生し、それが圧痕の角部に集中することで、ラディアルクラックが形成すると考えられる。

次に、ホイール形状および押し付け荷重を変更して応力解析を行った場合の応力分布を図4.17に示す。ホイール形状は図4.11と同様の4種類とし、荷重は変化を明瞭にするため、15 Nと25 Nとした。除荷完了時の第一主応力分布をZ軸方向から見た図を示す。まず、ホイール形状を変化させた場合を比較する (図4.17の左列)。110-10では、図4.16と同様であり、圧痕の角部からスクライブライン方向にかけて応力集中している (図4.17 (a))。140-7では、圧痕角部の応力集中部がやや減少し、スクライブライン近傍に応力がより集中している (図4.17 (c))。また、圧痕と圧痕の間隔が小さくなったこともあり、圧痕間ではスクライブライン近傍で引張応力の大きい領域が圧痕同士をつなぐように分布している。170-5では、同様の変化がさらに顕著になっている (図4.17 (e))。圧痕角部の引張応力領域は、圧痕の幅より外側 (Y軸正方向) に広がらず、大部分が圧痕と圧痕の間に分布している。360-3では、スクライブ表面の引張応力の値も小さくなっており、圧痕間と圧痕の側方に分布している (図4.17 (g))。ホイールの凹凸が小さくなるほど引張応力領域が大きい部分 (薄いグレー部) がスクライブラインに近づき、圧痕角部近傍の応力集中が小さくなる傾向がみられる。図4.11に示したように、実験において圧痕の四隅から放射状に発生するラディアルクラックの大きさは $110-10 > 140-7 > 170-5 > 360-3$ となっており、解析結果とよく一致する。また、ラディアルクラックの減少に伴い、圧痕間の亀裂がスクライブライン近傍に発生するよう

になることも、応力分布の変化から説明できる。

次に、押し付け荷重を変化させた場合について比較する。110-10について図4.17 (a)の15 Nと図4.17 (b)の25 Nを比較すると、25 Nではホイールがより深く押し込まれたことで、圧痕が大きくなっている。引張応力の大きな薄いグレーの領域に注目すると、

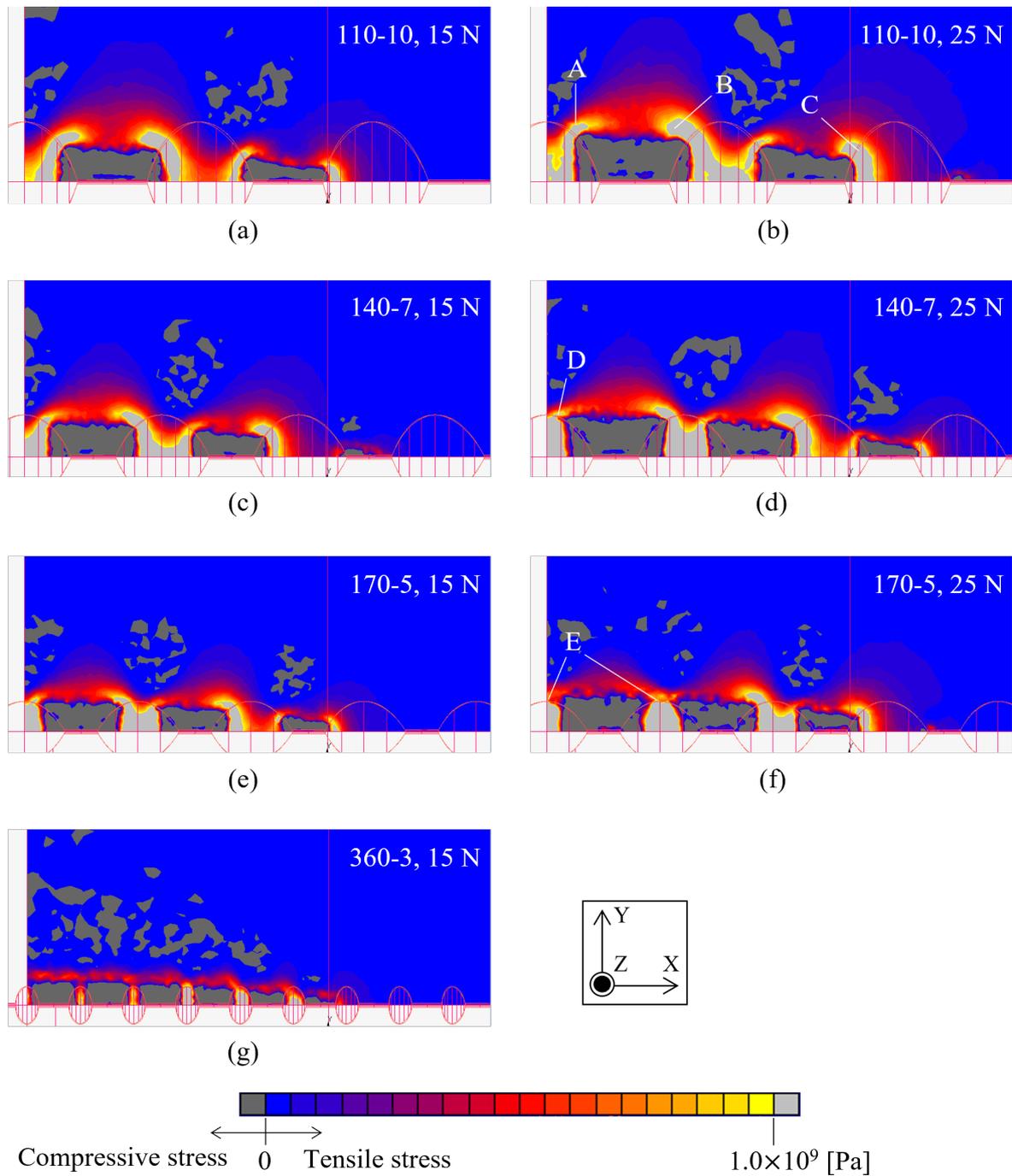


FIGURE 4.17 Comparison of stress distribution on surface after unloading when applied load and wheel shape varied. (a, b) 110-10, (c, d) 140-7, (e, f) 170-5 and (g) 360-3. Left column (a, c, e and f) shows 15 N, and right column (b, d and f) shows 25 N.

ホイール中央に近い圧痕角部近傍では面積が小さくなっており (図中A), その外側の圧痕角部の高引張応力領域の面積はほぼ変わらず (図中B), さらに外側の圧痕の角部近傍では領域が大きくなっている (図中C). このことは, 凸部の押し込みが大きくなると圧痕角部の応力集中は大きくなるが, それには上限があり, それを超えると角部の応力集中は小さくなることが推測される. 一方で, 荷重が増加するとスクライブライン近傍で応力値が大きくなっている. 同様の傾向は140-7および170-5でもみられる. 図4.17 (d) 中の地点D, (f) 中の地点Eでは, 圧痕角部の応力集中はなくなり, 圧痕間のみ引張応力が分布するようになっている.

これらの応力分布の変化を引き起こす原因として, 圧痕形状の変化が考えられる. ホイールの形状が変化した場合の, 圧痕形状の模式図を図4.18に示す. 特に凹部により形作られる三角の面 (以後X側面と呼称) に注目すると, 110-10ではスクライブ表面に対して垂直に近い角度であるのに対し, 140-7および170-5では浅い角度になる (図4.18 (a)). これらのホイールは, 110-10のホイールから凹部の曲率を変化させずに凹部の深さのみを変化させているためである. また, 荷重が増加して凹部の接触が大きくなることによって, X側面とスクライブ表面の角度は浅くなっていく (図4.18 (b)). ホイール通過後には, 弾性回復により圧痕が押し上げられることで, 圧痕角部に応力が集中する. このとき, X側面と表面のなす角が小さいほど, 応力の集中は小さくな

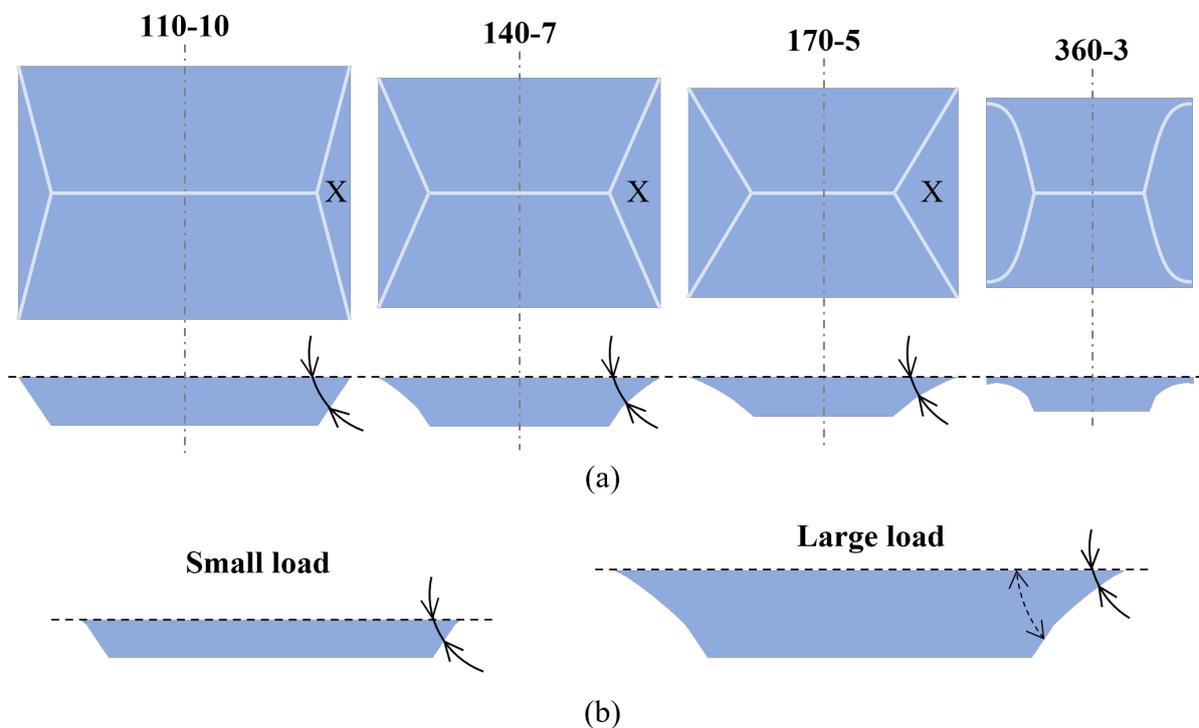


FIGURE 4.18 Schematic illustrations of indentation shape. The angle between ridge line and surface vary depending on wheel shape (a) and applied load (b).

ると考えられる。したがって、圧痕角部の応力集中は、圧子形状の影響を大きく受けている。

一方、スクライブライン近傍の応力集中は、荷重の増加にともなって値が大きくなる。これは図4.16で説明したように、ホイール押し付け時に圧痕下方に生じたY方向垂直応力が、除荷に伴ってスクライブ表面まで上昇したものである。これは4.2節で触れたように、楔状の凸部が押し込まれることにより発生する応力成分である。したがって、押し込む力が大きいほど、作用する応力も大きくなる。

このように、圧痕角部とスクライブライン近傍で異なる機構により表面付近の引張応力領域が形成されるため、ホイール形状および押し付け荷重が変化したときにラディアルクラックの挙動が変化したと考えられる。

4.3.3.2 その他の表面に現れる亀裂（メディアン、羽、斜めクラック）

メディアンクラックについては、Tomeiらによりノーマルホイールをモデルとした応力解析が行われている。それによると、除荷後の表面付近は圧縮応力領域となっており、メディアンクラックは表出しないと結論付けられている⁴⁾¹⁵⁾。一方、ブレークスホイールを用いる場合には、3章および4.2節で述べたように、凹部が存在することで除荷時に引張応力が表面付近まで上昇する。それによりメディアンクラックが表出すると考えられる。

羽クラックの起点は、ホイール凸部の下方で発生する。図4.14のように、ホイールの中心より後方で発生していることから、負荷から除荷に転じたタイミングといえる。解析結果から、除荷が始まったタイミングである $t_a = 0.6$ sにおける、6成分の応力分布を図4.19に示す。上段（図4.19（a～c））は垂直応力の3成分である。凸部周辺は圧縮応力となっており、また圧痕下方に分布する σ_y は開口方向と合致しないため、羽クラックの起点となる応力成分は見当たらない。下段（図4.19（d～f））はせん断応力の3成分の分布である。せん断応力は、圧痕のすぐ近くに分布しているが、 τ_{xy} は圧痕角部の表面、 τ_{zx} は圧痕の両脇で大きな値をとり、亀裂の位置と異なる。 τ_{yz} はホイールと接する圧痕表面と、ガラス内部に分布している。図4.14では、起点からY軸方向に亀裂が伸展しているように見えることから、起点となる亀裂はYZ面に近い角度で生じていると考えられる。YZ面の亀裂形成に関係する応力成分は σ_x 、 τ_{xy} および τ_{zx} であるが、図4.19からは原因となる応力分布は見られない。したがって、今回実施したホイール押し付け/除荷解析からは原因を特定できなかった。羽クラックの形状および形成挙動はスクライブの前後方向で非対称であるため、スクライブによる工具の並進移動および回転の影響や、ホイールとガラスの間の摩擦の影響を受けていると考えられる。

斜めクラックについては、ノーマルホイールを用いた場合のガラス表面にも表れる。

図4.20にノーマルホイールに15 Nの荷重を負荷した場合のスクライブ痕の観察結果を示す。図4.11と同様の斜めクラックの形成がみられる。図4.11より、斜めクラックは170-5や360-3といった凹凸の小さなホイールで荷重が大きい場合に発生している。荷重の増加により押し込み深さが大きくなると凹凸の大部分がガラスに埋まり、ガラスとホイールの接触面積が増加する。すなわち、接触状態が凹凸のないノーマルホイールに近づいたため、斜めクラックが形成されるものと考えられる。斜めクラックもスクライブの前後方向に非対称に発生することから、ホイールの回転や、ホイールとガ

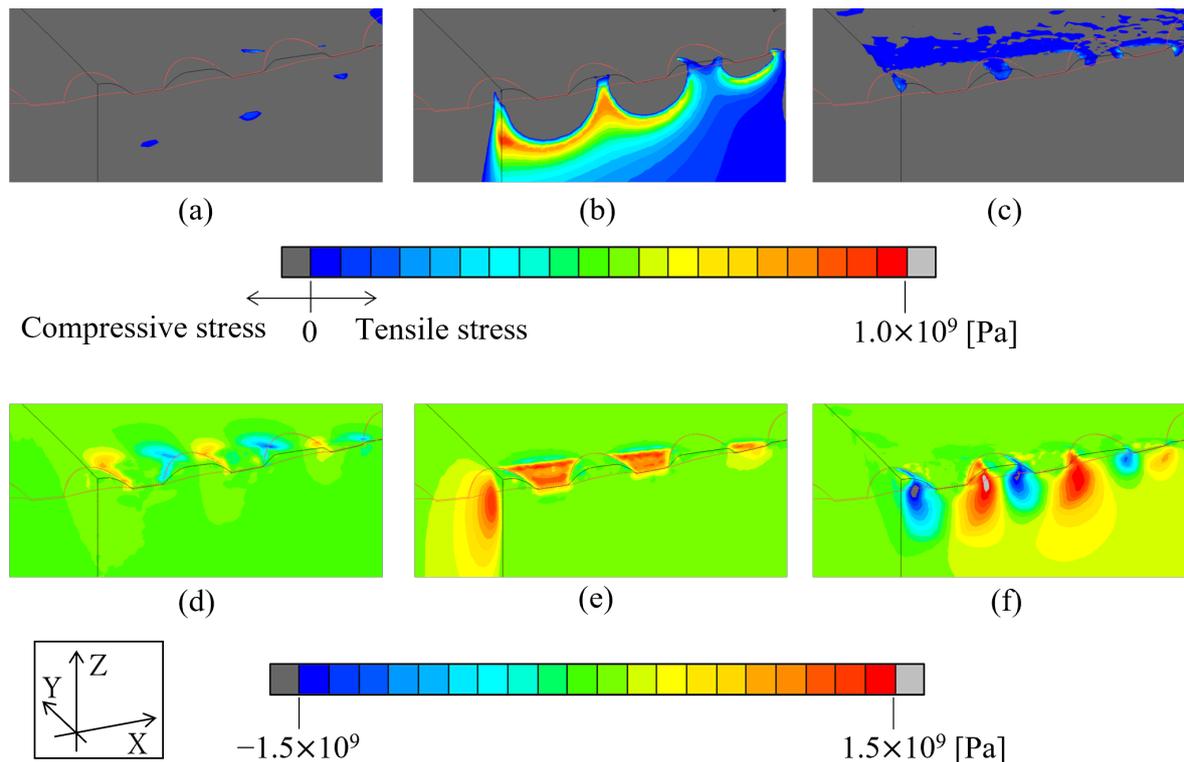


FIGURE 4.19 Stress distributions at $t_a = 0.6$ s. Wheel: Penett 140-7, applied load: 15 N. (a) σ_x , (b) σ_y , (c) σ_z , (d) τ_{xy} , (e) τ_{yz} and (f) τ_{zx} .

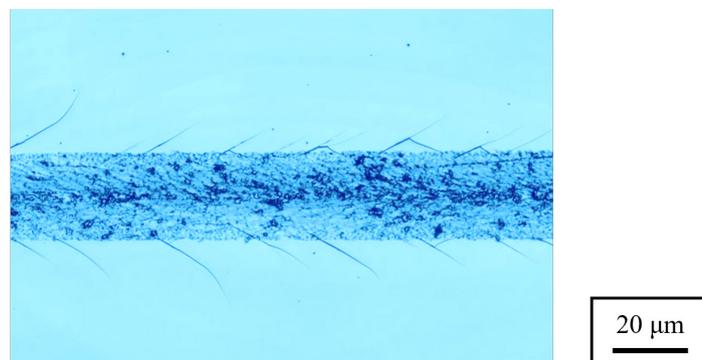


FIGURE 4.20 Microscopic image of surface scribed by normal wheel at applied load of 20 N. Continuous scribed line was formed, and diagonal cracks occurred on both sides of scribed line.

ラスの接触部の摩擦の影響が考えられる。これらの影響についての考察には、ホイールの回転および並進運動と、摩擦を考慮した数値解析も必要とされるため、今後の課題である。

4.4 ラテラルクラック

ホイール割断は、断面の品質を向上させることに加え、ブレークに要する力を小さくすることも求められる。Onoらは垂直亀裂の長さやブレークに要する力の関係を定量的に調査した⁴³⁾。その結果、押し付け荷重が大きくなると形成される垂直亀裂が深くなり、また垂直亀裂が深いほど小さい力でブレークが可能になることを明らかにした。その一方で、押し付け荷重が大きくなると、ガラス内部に、スクライブ表面と水平方向の亀裂であるラテラルクラックが形成されやすくなる⁴¹⁾。ラテラルクラックの発生により、ブレーク時に必要な曲げ応力が増大することや、表面が剥離することにより加工品質が低下することが報告されている⁴³⁾。したがって、ラテラルクラックの発生は抑制することが求められる。

本節では、ホイール割断におけるラテラルクラックの発生形態およびそのメカニズムの解明を目的とした。そのために、偏光高速度カメラを用いた動的観察と、有限要素法によるガラス内部の応力解析を行った。また、スクライブ中における亀裂形成挙動を2方向から観察することで、ラテラルクラックの発生がメディアクラックの進展に及ぼす影響について考察した。

実験および解析手法

4.4.1.1 ホイール押し付け/除荷時の亀裂形成挙動の観察および光弾性実験

実験方法の模式図を図4.21 (a) に示す。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。荷重負荷状態を約10秒間維持した後、ホイールをZ軸正方向に移動させ、試料から離れた。ガラス試料の寸法は4.2節および4.3節と同様10×30 mmとし、試料の短手を撮影方向であるX軸方向に向けて設置した。入射光は1/4波長板を用いて円偏光状態にし、高速度撮影と同時に光弾性実験法を用いた位相差および主軸方位を測定した。負荷および除荷時のホイールZ軸方向移動速度は100 μm/s、ホイールはラテラルクラックが形成しやすい稜角125°のAPIOを用い、負荷荷重は25 Nとした。高速度カメラの撮影速度は250 fpsとした。

解析方法は第2章で述べた通りである。

4.4.1.2 スクライブ時の亀裂形成挙動の観察

スクライブ中の亀裂形成挙動の観察方法の模式図を図4.21 (b) に示す。側面と裏面方向の2方向から観察を行った。ガラス試料の長手をX軸方向に向けて設置した。側面からの観察では、押し付け/除荷時の観察と同様の観察方法を用いて、Y軸方向から撮影した。一方、裏面からの観察では、ガラス試料上面での反射光によりガラス内部の亀裂を可視化した。反射率を向上させるため、ガラス試料上面に金蒸着を施して実験を行った。なお、金蒸着の有無により実験結果が大きく変化しないことを確認している。スクライブ速度は5 mm/s、スクライブ長さは10 mmである。本実験ではラテラルクラックを観察するため、スクライブ時にラテラルクラックが形成されやすい115-APIOを用いた。

本実験ではスクライブ中のホイールを追従する視野による観察と、試料に対し視野を固定する定点観察を行った。ホイールに追従する視野による観察では、固定されたホイールおよび観察系に対してステージを駆動させ、ホイールの周辺の亀裂をスクライブの全長にわたって撮影した。高速度カメラの撮影速度は2000 fpsとした。一方、試料に対する定点視野観察では、観察系を駆動するステージに対し固定し、視野内をホイールが通過する様子とその後の変化を観察した。側面観察系は装置と干渉するため、裏面観察のみとした。撮影速度と撮影時間はトレードオフの関係にあるため、スクライブ後の挙動も把握できるように、撮影速度は1000 fpsとし、最大撮影時間を延長した。

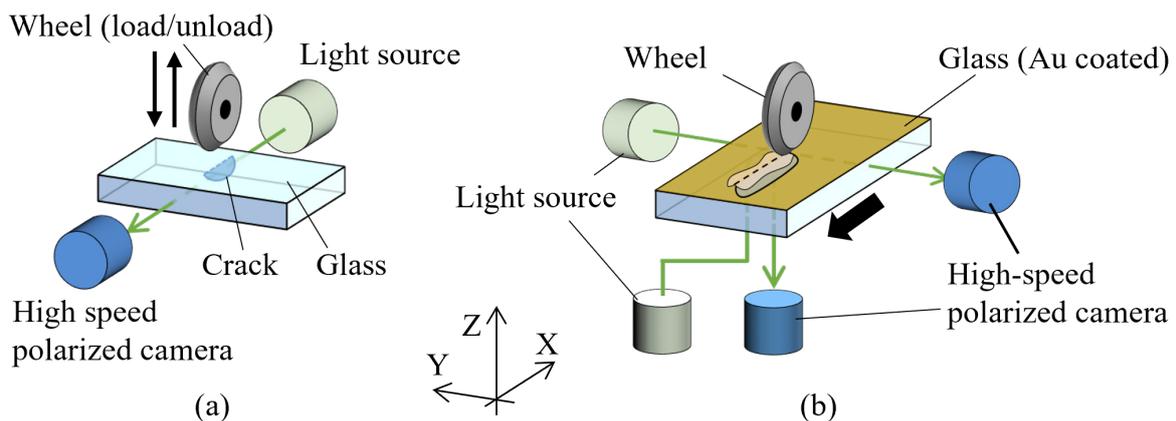


FIGURE 4.21 Schematic illustration of the observation of the crack propagation behavior by using high-speed polarized camera. (a) shows experimental set up of load/unload observation from X axis direction. High-speed polarized camera catch transparent light emitted from light source. (b) shows experimental set up of crack observation during scribing from Y and Z axis directions. Wheel and cameras are fixed at same position and stage moves to X direction. Reflected light is observed in Z axis observation. Glass surface is coated by thin Au layer in order to enhance reflected light.

4.4.1.3 スクライブ後におけるメディアン/ラテラルクラックの長さ計測

実験方法の模式図を図4.22に示す。10×30 mmのガラス試料裏面の短手方向に、浅い亀裂を生成する第1スクライブを行う（図4.22 (a)）。続いて、ガラス試料表面の長手方向に、計測対象となる亀裂を生成する第2スクライブを行う（図4.22 (b)）。その後、第1スクライブ線に沿ってブレイクを行い（図4.22 (c)）、ブレイクによって露出した新生面側（X軸負方向）から、第2スクライブで生成した亀裂を観察した（図4.22 (d)）。第2スクライブでは115-APIOを用い、スクライブ速度5 mm/s、スクライブ距離20 mmとした。荷重は、ラテラルクラックの形成されない10 Nと、異なるラテラルクラックの形成挙動が見られた15 Nおよび17 Nとした。また、各荷重で5回スクライブおよび計測を行った。なお、本手法における第1スクライブおよび第1スクライブ線に沿ったブレイクが、第2スクライブで生成する亀裂に及ぼす影響については、荷重に対する亀裂長さの傾向が、第1スクライブおよびブレイクを行わない場合と同一であることを実験により確認している。

ホイール押し付け/除荷による亀裂形成の観察と応力解析の結果

4.4.2.1 ホイールの負荷/除荷のX軸方向観察

まず、ホイールに荷重を負荷し、その後除荷した場合のメディアンクラックおよびラテラルクラックの形成挙動を、X軸方向から偏光高速カメラを用いて観察した。125-APIOを用いて25 Nの負荷荷重において実験を行ったところ、メディアンクラックが除荷過程中に形成され、ラテラルクラックは除荷が完了する直前に発生した。図4.23に、メディアンクラックが形成された状態（図4.23 (a, b)）と、ラテラルクラックが形成した状態（図4.23 (c, d)）における、除荷後の偏光高速カメラの輝度画像（図4.23 (a, c)）と、算出した位相差像（図4.23 (b, d)）を示す。図4.23 (a) では、長さが約30 μm のメディアンクラックが形成され、ラテラルクラックは形成されていない。

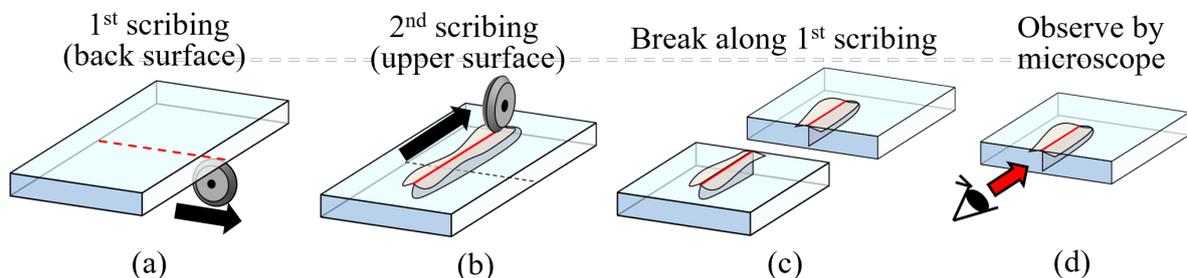


FIGURE 4.22 Schematic illustration of static observation of median and lateral cracks from vertical surface of scribing direction. (a): Scribe to create observation plane (1st scribing), (b): scribe to create observation cracks (2nd scribing), (c): break along the 1st scribing line and then (d): observation using confocal laser microscope.

そのときの位相差は、表面付近とメディアクラックの周囲に集中している（図4.23 (b)）。これは、ホイールの凹凸の接触によりガラス表面に永久変形領域が形成されることで、除荷後に残留応力が表面付近に分布することを示している。一方、ラテラルクラックは、除荷終了の直前に深さ約10 μm の内部から発生している（図4.23 (c)）。その時の位相差（図4.23 (d)）は、ラテラルクラックの上方、表面付近に集中しているものの、ラテラルクラックより下方では0 nmに近い値（青色）となっている。すなわち、ラテラルクラックの形成により、表面付近の残留応力の影響が遮断されている。

先行研究によると、スクライブ時には除荷後にメディアクラックが深さ方向に伸展する様子が報告されている⁴⁾。ラテラルクラックが形成していないときには、位相差がメディアクラックの周辺に分布していることから（図4.21 (b)）、残留応力がメディアクラックの周辺に作用することで、除荷後もメディアクラックが伸展すると考えられる。一方、ラテラルクラック形成時には、図4.23 (d) に示したように残留応力の影響がメディアクラックに及ばなくなることが予想され、メディアクラックの伸展が抑制される可能性がある。

4.4.2.2 有限要素法による応力解析の結果

実験と同様に、ホイールをガラスに押し付け、除荷する挙動を有限要素法により再現し、応力解析を行った。解析時間 $t_a = 0 \sim 0.5 \text{ s}$ が負荷（押し付け）、 $t_a = 0.5 \sim 1.0 \text{ s}$ が除荷である。図4.24にZ方向の垂直応力の分布を示す。ホイールの凸部の中央を通るYZ面に平行な断面（YZ対称面からX方向に23 μm 平行移動した平面）上の応力分布を示している。 $t_a = 0.5 \text{ s}$ の負荷完了時には大部分が圧縮応力であり、引張応力は表面か

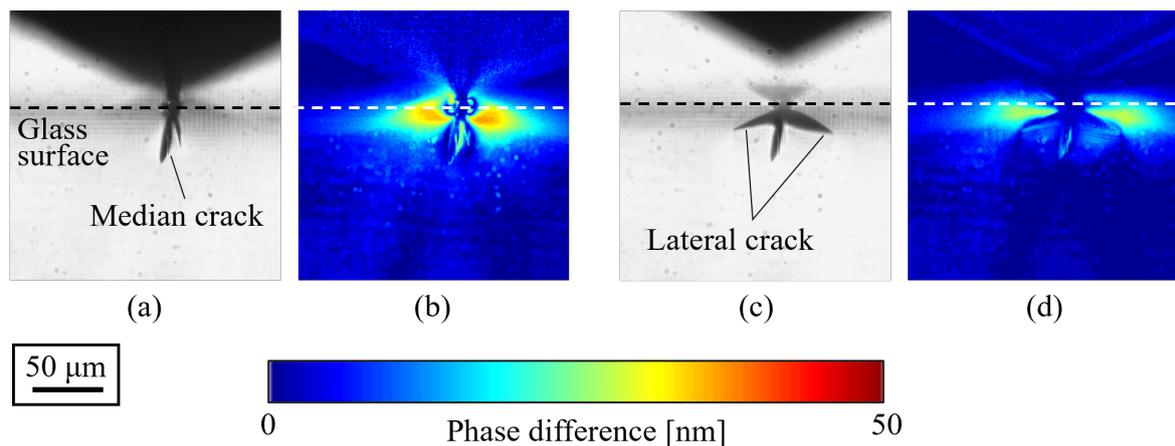


FIGURE 4.23 Results of photo-elastic experiment when using 125-APIO at 25 N. (a) and (b) show results during unloading. (c) and (d) show results after unloading. (a) and (c) are brightness images. (b) and (d) are phase difference images. Median crack occurs during unloading (a). Phase difference concentrate near surface and around median crack at that time (b). After unloading, lateral crack is appeared (c). Phase difference exist only near surface and absent under lateral crack (d).

ら約10 μm の位置に分布する (図4.24 (a)). その後, 除荷の進行とともに引張応力は増大し (図4.24 (b)), 特に除荷が完了する $t_a = 1.0\text{ s}$ において急激に大きくなっている (図4.24 (c)). これは実験においてラテラルクラックが除荷完了付近のタイミングで形成したと合致する. また, 最大値は表面から15 μm の深さに位置しており, こちらも実験結果 (図4.21) とおおよそ一致している. したがって, ラテラルクラックを形成する原動力は σ_z であり, その破壊形態はモードIによるところが大きいと結論付けられる. 除荷中に σ_z が徐々に大きくなり, 完全除荷後に著しく大きくなることから, 弾性回復を塑性変形領域が妨げることにより σ_z は生じるが, 除荷過程ではホイールの接触 (負荷) により大部分が相殺されていると考えられる.

図4.25には, 除荷後に σ_z の引張応力が作用している領域を可視化して示している. 上段はZ軸方向から, 下段はY軸方向から見た図であり, 左列はスクライブ表面および切断予定面 (XZ対称面) 上の分布を示し, 右列はしきい値 ($5 \times 10^8\text{ Pa}$) 以下の要素を透明にすることで, 引張応力の大きい領域のみを可視化している. 引張応力の大きい領域は, ホイールの凸部が接触した塑性変形領域 (圧痕) の周囲に分布していることがわかる. その大部分は表面から10 μm ほど内部に分布している. また, このホイールでは圧痕間の間隔が短いため, 隣接する引張応力領域が近接しており, スクライブ時にはガラス内部に帯状の引張応力領域が分布することが推察される.

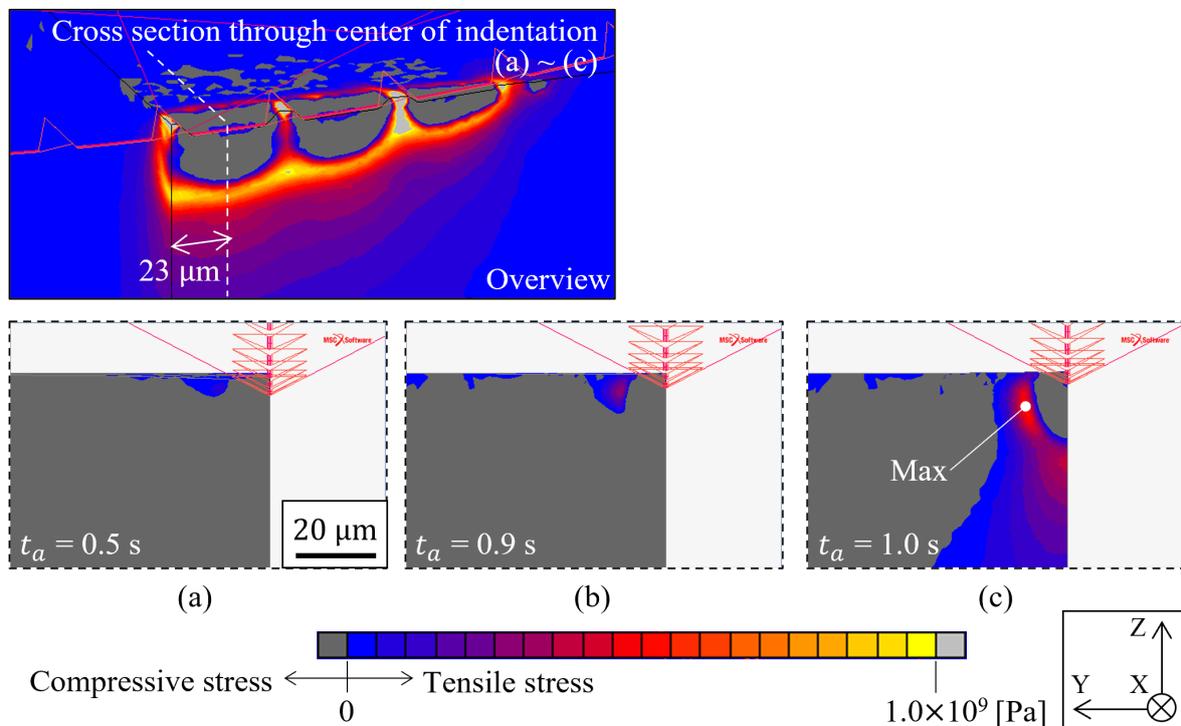


FIGURE 4.24 Change of normal stress of Z direction (σ_z) for 125-APIO at 15 N. (a) $t_a = 0.5\text{ s}$, (b) $t_a = 0.9\text{ s}$ and (c) $t_a = 1.0\text{ s}$. At (e) $t_a = 1.0\text{ s}$, tensile stress of σ_z occur beside indentation.

スクライブ時にラテラルクラックがメディアンクラックに及ぼす影響

前項において、ラテラルクラックの形成がメディアンクラックの進展を抑制する可能性が示された。そこで、スクライブ中におけるメディアンクラックおよびラテラルクラックの形成挙動を高速度カメラにより観察した。

4.4.3.1 ラテラルクラックとメディアンクラックの相互影響

まず、メディアンクラックとラテラルクラックの相互関係を調べるため、メディアンクラックとラテラルクラックをそれぞれ可視化できる、側方（Y方向）と下方（Z方向）から同時に観察を行った。一例として稜角 115° のAPIOを用いて17Nの荷重を負荷した場合の観察結果を図4.26に示す。ホイール押付け後、ホイールが動き出した瞬間を $t = 0$ sとしている。スクライブ距離10 mmに対しスクライブ速度は5 mm/sであるから、スクライブは約2 sで完了する。 $t = 1.7$ sでは、ラテラルクラックは形成されておらず、ホイールの後方ではメディアンクラックが深くまで伸展していることがわかる（図4.26 (a)）。一方、 $t = 1.9$ sでは、ラテラルクラックが形成されており、メディアンクラックは深さ方向に伸展せず一定の深さになっている（図4.26 (b)）。側面からの観察を行った留井らの先行研究⁴⁻¹⁾においても、同様の亀裂伸展挙動が観察されている。それにならい、ホイール直下の亀裂伸展を“一次クラック（1st crack）”，ホイール後方での亀裂伸展を“二次クラック（2nd crack）”と呼称する。

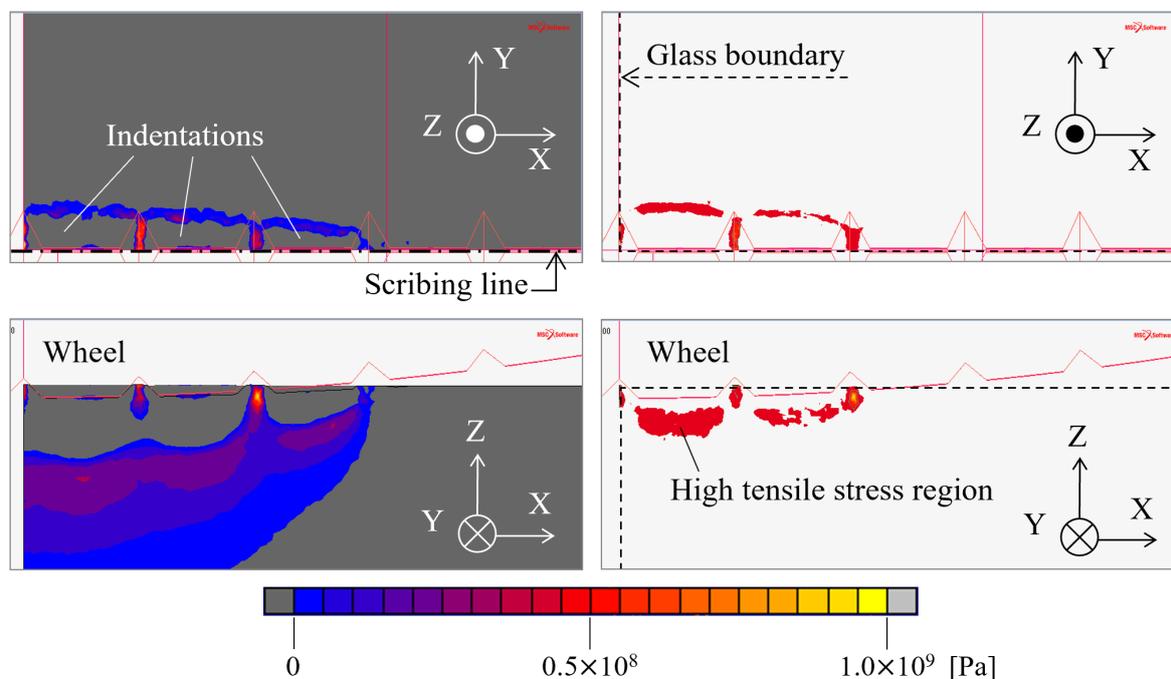


FIGURE 4.25 Distributions of normal stress of Z direction after unloading using 125-APIO at 15 N. Right side images shows high tensile stress regions above threshold value of 5.0×10^8 Pa. Tensile stress regions exist around indentations.

また、図4.26に示した観察結果について、高速度カメラの動画から0.1 sごとに亀裂長さを計測したタイムチャートを図4.27に示す。ホイール直下 (=ホイール通過後0.0 s) (実線/黒塗) とホイール通過後0.2 sの地点 (=ホイールの後方1 mm) (破線/白塗) における、メディアクラック (○) およびラテラルクラック (□) の亀裂長さをプロットしている。横軸がスクライブ開始地点から亀裂長さ測定地点までの距離 x 、縦軸が亀裂長さを示している。例えば、図4.26 (a) は $t = 1.7$ sであるため、スクライブ速度5 mm/sより、ホイールは図4.27における $x = 8.5$ mmの位置にあり、黒塗りのプロットはこの地点の亀裂長さを示す。一方白塗りのプロットは、その後方1 mmの地点における亀裂長さであるから、図4.26 (a) のタイミングでは $x = 7.5$ mmの地点となる。

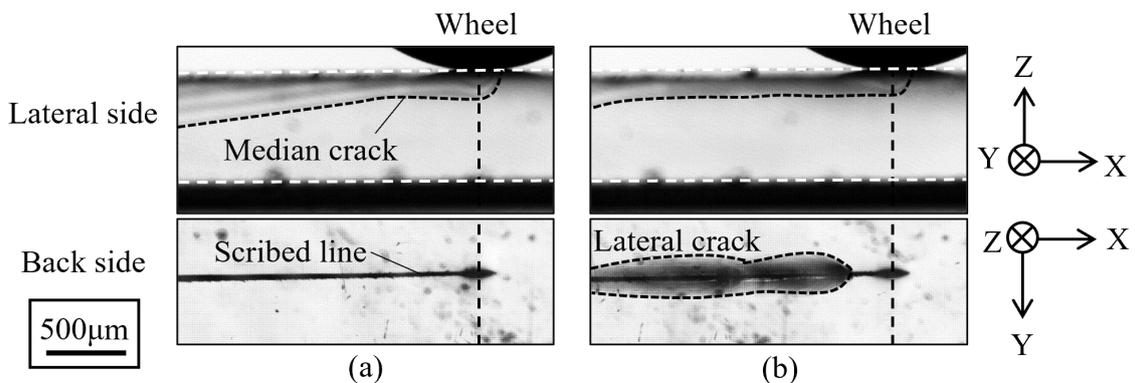


FIGURE 4.26 Simultaneous observation of crack propagation using APIO-115 from Y and Z axis direction. An applied load was 17 N. (a): $t = 1.7$ s, (b): $t = 1.9$ s. Median crack propagation was suppressed when lateral crack occurred (b).

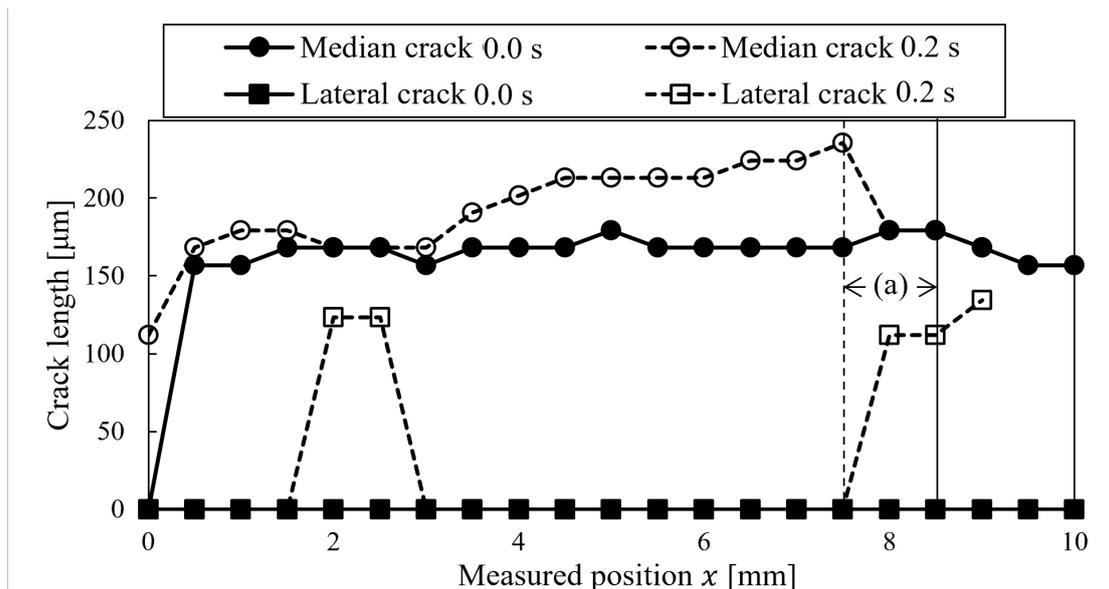


FIGURE 4.27 Relationships between measured position and crack length using 115-APIO at an applied load of 17N. Solid and dashed lines indicate crack length just under wheel (0.0 s) and behind wheel (0.2 s), respectively. Lateral crack occurs after wheel passing. At the point, median crack propagation was suppressed.

なお、ラテラルクラックは図4.26 (b) で見られるようにスクライブ線からY軸の正負両方向に生じるが、スクライブ線と正負両方向のラテラルクラック先端までの距離の平均をラテラルクラック長さとしている。

ホイール直下では、スクライブ全体においてラテラルクラックは生成せず、メディアクラック長さは150~170 μm でおよそ一定であった。ホイール通過後0.2 sのプロットを見ると、 $x = 2 \text{ mm}$ と $x = 8 \text{ mm}$ 地点でラテラルクラックが形成されており、その地点ではメディアクラック深さはホイール直下から進展していないことがわかる。したがって、ラテラルクラックが形成されることで、その地点のメディアクラックの進展が抑制されることが示された。また、ラテラルクラックが発生していない地点ではメディアクラックの伸展がみられることから、ラテラルクラックの発生頻度が低い場合にはその影響はラテラルクラックの近傍に限定されることも示された。

4.4.3.2 ラテラルクラック形成挙動がメディアクラックの伸展に及ぼす影響

試料に対して高速度カメラの視野を固定し、試料の下方からホイール通過後のラテラルクラックの挙動を観察した。ここでは、ラテラルクラックが発生しなかった10 Nと、異なるラテラルクラックの挙動がみられた15 Nおよび17 Nについて比較する。観察結果を図4.28に示す。視野の端にホイールが到達した瞬間を $t = 0 \text{ s}$ としている。10 Nではラテラルクラックは発生しなかった (図4.28 (a))。15 Nでは後方からラテラルクラックが進展してきて ($t = 0.3, 2.0 \text{ s}$)、その後 $t = 5.0 \text{ s}$ のようにスクライブラインの左右に広がっていく (図4.28 (b))。17 Nでは $t = 0.3 \text{ s}$ でスクライブラインの全体にラテラルクラックが形成し、その後左右に広がっている (図4.28 (c))。

そこで、15 Nと17 Nにおいて、スクライブ中のホイールに追従する視点観察を行った。観察結果を図4.29に示す。注目するラテラルクラックが形成される瞬間を $t = 0 \text{ s}$ としている。どちらの場合も、まず楕円形のラテラルクラックが形成される ($t = 0 \text{ s}$)。15 Nの場合には、その後ラテラルクラックは形成されなかったが (図4.29 (a))、17 Nでは発生したラテラルクラックを起点として、断続的に前方に進展していく様子が観察された (図4.29 (b))。図4.26の結果と合わせて考えると、15 Nの場合には発生した楕円形のラテラルクラックがスクライブライン上に独立して点在しており、それが時間をかけて成長し、やがて互いの距離が近づくと結合すると考えられる。一方、17 Nの場合にはホイールのすぐ後方でラテラルクラックが進展していくため、スクライブの全長にわたって、ホイール通過後0.3 s以下の早いタイミングでラテラルクラックが形成される。ラテラルクラックは荷重が大きいほど形成されやすくなることが報告されており⁴⁾、荷重によりラテラルクラックの発生頻度が変化するため、15 Nと17 Nでラテラルクラック形成挙動に違いが現れたと考えられる。

次に、スクライブ後試料のメディアクラックとラテラルクラックの長さ計測実験を、荷重を変化させて実施した。結果を図4.30に示す。縦軸はラテラルクラック長さ、横軸はメディアクラック長さであり、10 N、15 Nおよび17 Nの結果をプロットしている。10 Nはラテラルクラックが形成しなかった条件であり、メディアクラックが650 μm の深さまで伸展している。15 Nおよび17 Nはラテラルクラックが形成された条件である。15 Nのほとんどは10 Nと同様メディアクラックが深く伸展した一方、17 Nにおけるメディアクラックは100 μm 程度となっている。これらの結果から、17 Nのようにラテラルクラックが頻繁に形成する場合には、メディアクラックの進展が抑制されると考えられる。

4.4.3.3 ラテラルクラックがメディアクラックに影響を及ぼすメカニズム

以上の結果から、スクライブ時におけるラテラルクラックとメディアクラックの

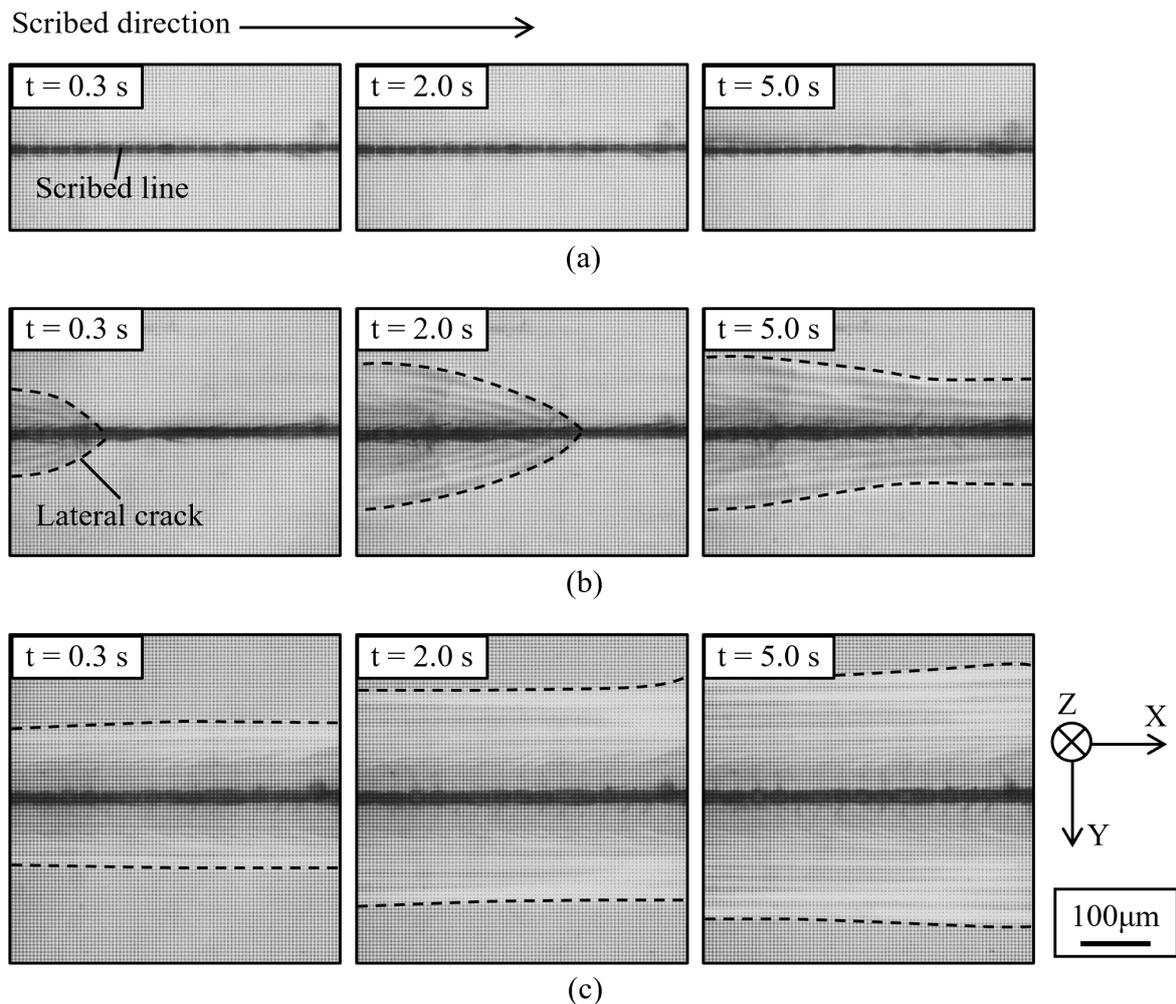


FIGURE 4.28 Lateral crack observation from back side using 115-APIO at an applied load of (a) 10 N, (b) 15 N and (c) 17 N. The moment that wheel appears at left edge of image is set as $t = 0.0 \text{ s}$.

関係について考察する。図4.26および図4.27に示した高速度カメラの観察結果より、ラテラルクラックが形成されない場合には、ホイール後方1 mm地点 (=ホイール通過後0.2 sの時点) では二次クラックはすでに進展している。一方、ラテラルクラックはホイールの後方数十 μm の位置で発生することから、二次クラックの伸展よりも早いタイミングで発生する。図4.31に15 Nと17 Nで見られたラテラル/メディアンクラックの挙動の模式図を示す。青色で亀裂を示し、色の濃淡が時間経過を表現している。ラテラルクラックの発生頻度が高い17 Nの条件では、二次クラックが進展する前にラテラルクラックがスクライブラインの大部分で発生するため、駆動力である表面付近の

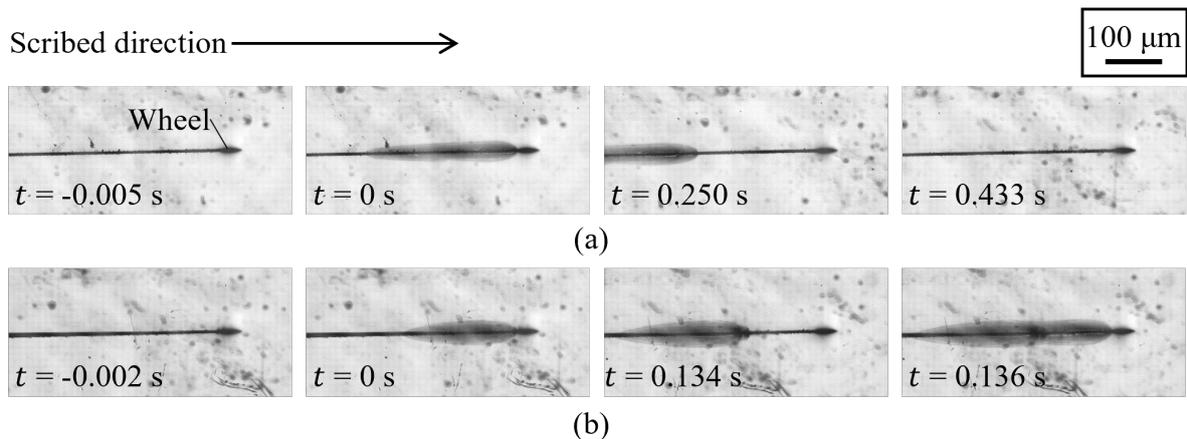


FIGURE 4.29 Lateral crack observation from back side using 115-APIO at an applied load of (a) 15 N and (b) 17 N. A single elliptical lateral crack occurs on the scribing trajectory at 15 N (a). On the other hand, at 17 N (b), lateral crack extend intermittently from existing one. The moment of lateral crack generation is set as $t = 0.0$ s.

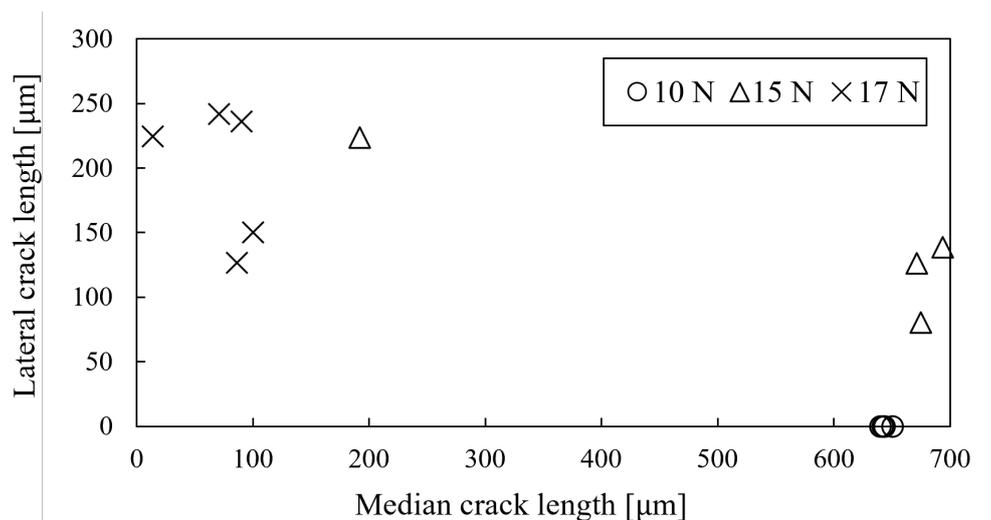


FIGURE 4.30 Relationships between median and lateral cracks using 115-APIO. No lateral crack occurred at an applied load of 10 N. Median cracks become shallower in all samples of 17 N and one of 15 N. At 15 N, except one sample, median cracks grew to almost same depth as thickness of glass substrates (700 μm).

残留応力がガラス内部まで伝達されず、スクライブラインの全域にわたって二次クラックの進展が妨げられる (図4.31 (b)). 一方, 15Nの場合には, ラテラルクラックの発生頻度が低く, スクライブ全長のうちラテラルクラックが発生している割合が少ない (図4.31 (a)). ラテラルクラックが形成した部分では二次クラックの進展が抑制されるものの, その影響は全体から見ると限定的である. また, この場合, ラテラルクラックの進展は比較的低速で進行するため, ラテラルクラックがスクライブの全長にわたって形成される前に二次クラックが十分に進展すると考えられる.

以上のことから, ラテラルクラックはホイールの押し付け/除荷により生じる永久変形領域 (圧痕) の周囲に発生する鉛直方向引張応力 (Z軸方向垂直応力, σ_z) を駆動力としてガラス内部に発生し, ラテラルクラックの発生によりメディアンクラックの伸展が抑制されることが明らかになった. 実際のホイール割断加工ではメディアンクラックが深く伸展することが望ましいため, ラテラルクラックが形成しないことが求められる. σ_z がラテラルクラックを形成することは明らかになったが, σ_z が発生するメカニズムに関する考察は不十分である. また, 先行研究から押し付け荷重が大きくなる, あるいはホイールの稜角を小さくするとラテラルクラックが発生しやすくなることがわかっているが⁴⁻¹⁾, そのメカニズムに関する考察は十分になされていない. 今後, ホイール形状や条件を変更して実験および解析を行い, ホイールの寸法諸元や実験条件が応力分布および亀裂形成に及ぼす影響を明らかにすることで, ラテラルクラックをより効果的に抑制できるホイール形状や加工方法の提案が可能になると考えられる.

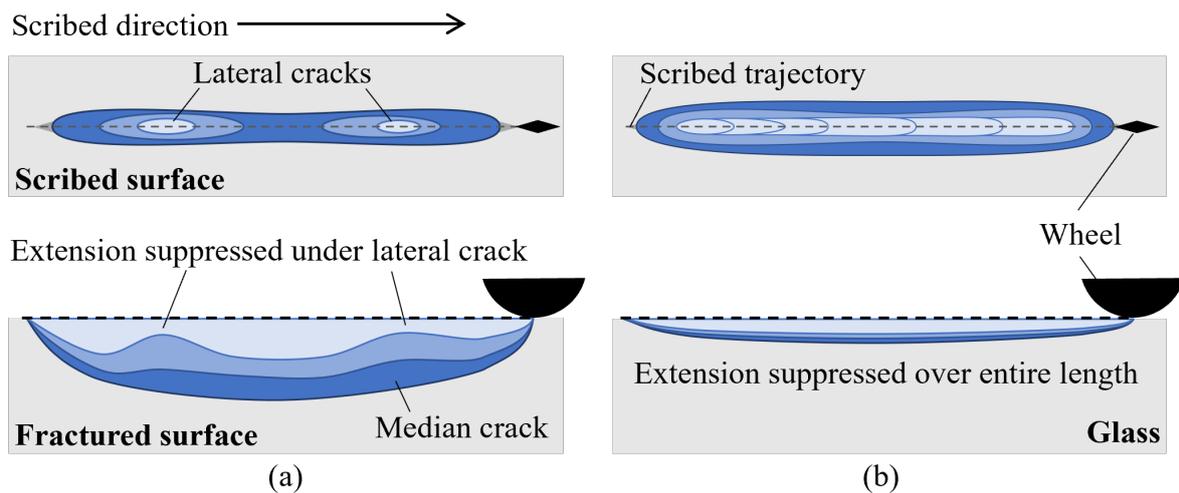


FIGURE 4.31 Schematic illustration of effect of lateral crack generation against median crack extension in the case of (a) separate and (b) intermittent lateral crack generation behavior represented by 15 N and 17 N, respectively. Time goes from pale to deep color. Although lateral crack has effect suppressing median crack extension, median crack extend deeper in (a) condition because its effect is limited.

4.5 結言

本章では、ホイール割断のスクライブ時に発生する亀裂について、高速度カメラによる亀裂形成挙動の観察と有限要素法による応力解析を行い、形成メカニズムを考察した。その結果、以下の知見を得た。

メディアクラック

- (1) 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。
- (2) 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。

ラディアルクラック

- (3) ブレークスホイールを用いたスクライブでは、ガラス表面には、ラディアルクラック、メディアクラック、羽クラックおよび斜めクラックの4種類の亀裂が現れる。
- (4) 除荷後に圧痕角部に引張応力が集中し、ラディアルクラック形成の駆動力となる。ホイール凸部の形状および押し付け荷重が変化すると押し込み深さが変化し、圧痕の形状が変化する。圧痕角部の稜線とガラス表面のなす角が小さくなると、圧痕角部の応力が小さくなり、ラディアルクラックが抑制される。
- (5) 羽クラックおよび斜めクラックは、スクライブ前後方向に非対称に発生することから、スクライブによるホイールの移動および回転の影響で発生していると考えられる。

ラテラルクラック

- (6) ラテラルクラックは、塑性変形領域である圧痕の周囲に分布するZ方向垂直応力 (σ_z) を駆動力として発生する。 σ_z の分布は、除荷時に弾性回復が塑性変形領域により妨げられることに起因する。
- (7) ラテラルクラックの発生により、圧痕付近の残留応力の影響が遮られ、ラテラルクラックより下方では応力が解放される。これにより、メディアクラックの進展が抑制される。
- (8) スクライブにおいては、ホイールが通過した後にラテラルクラックが発生・進展

する。メディアクラックの進展に先んじてラテラルクラックが発生する場合には、メディアクラックの進展が抑制される。

本章の結果により、スクライプ時に発生する主要な亀裂である、メディアクラック、ラディアルクラック、ラテラルクラックの形成について、メカニズムが明らかになった。今後これらの知見から、割断に必要な亀裂を促進しつつ、不要な亀裂を抑制するホイール形状や、加工条件を提案してゆくことが可能となる。一方、本章では応力解析の結果を定性的に評価しており、亀裂形成のしきい値となる応力値や、亀裂伸展量といった定量的な検討はできていない。今後、応力解析の精度を向上させ、また破壊力学の理論等を組み入れていく必要がある。

参考文献

- 4-1) 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ブに関する研究—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, Vol. 53, No. 11 (2009) pp.684–689.
- 4-2) 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.
- 4-3) Ono T. and Tanaka K., Effect of scribe-wheel dimensions on the cutting of AMLCD glass substrate, Journal of the Society for Information Display, Vol. 9, No. 2 (2001) pp.87–94.
- 4-4) Lawn B. R. and Evans A. G., A model for crack initiation in elastic/plastic indentation fields, Journal of Materials Science, Vol. 12 (1977) pp.2195–2199.
- 4-5) Lawn B. R., Evans A. G. and Marshall D. B., Elastic/plastic indentation damage in ceramics: The median/radial crack system, Journal of the American Ceramic Society, Vol. 63, No. 9–10 (1980) pp.574–581.
- 4-6) Marshall D. B., Evans A. G. and Lawn B. R., Elastic/plastic indentation damage in ceramics: The lateral crack system, Journal of the American Ceramic Society, Vol. 65, No. 11 (1982) pp.561–566.
- 4-7) Perrott C. M., Elastic-Plastic Indentation: Hardness and Fracture, Wear, Vol. 45 (1977) pp.293–309.
- 4-8) 羽田篤史, 森田昇, 山田茂, 高野登, 薄板ガラス用スクライビングホイールのころがり摩擦挙動と割断現象に関する研究, 砥粒加工学会誌, Vol. 56, No. 4 (2012) pp.250–255.
- 4-9) 松坂壮太, 溝渕玄太, 森田昇, 比田井洋史, 千葉明, スクライビングホイールを用いたガラスの割断加工に関する研究, 砥粒加工学会誌, Vol. 58, No. 2, (2014) pp.109–114.
- 4-10) 松坂壮太, 溝渕玄太, 森田昇, 比田井洋史, 千葉明, ホイールによるガラススクライプ中の亀裂伸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.
- 4-11) Hasegawa R., Matsusaka S., Hidai H., Chiba A., Morita N. and Onuma T., In-process estimation of fracture surface morphology during wheel scribing of a glass sheet by high-speed photoelastic observation, Precision Engineering, Vol. 48 (2017) pp.164–171.
- 4-12) 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.

- 4-13) 金沢武, 破壊力学の理論と応用, 溶接学会誌, Vol.42, No. 9 (1973) pp.907–923.
- 4-14) 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, Vol. 84, No. 7 (2018) pp.634–639.
- 4-15) 齊藤雅裕, ガラスのホイール切断時に工具接触部近傍に生じる微小欠陥に関する研究, 千葉大学大学院融合理工学府修士論文 (2018).
- 4-16) 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, No. 9 (2018) pp.105–113.

第5章 割断面形成メカニズム

5.1 緒言

ガラスの破壊に関する研究では、破面の形態から破壊の起点や亀裂伸展の様子を推定する手法が一般的に用いられる^{5-1)~5-3)}。本論文で用いてきたリブマークおよびハックル（マーク）という割断面形態の呼称は、本来、脆性材料の破面に現れる形態のひとつとして用いられる用語である。ハックルは衝撃などによる激しい破壊が生じた際に破面に現れる、亀裂進行方向に平行な筋状の模様であり、切り刻んだような凹凸がある。一方、リブマークは比較的穏やかな衝撃による破壊が生じた際に破面に現れる、肋骨のような弧状の模様である。リブマークにはハックルのような明確な凹凸はなく、滑らかな表面である。

ブレイクレスホイールを用いたホイール割断については、条件によって破面に多数の亀裂を含む荒れた形態と、縞模様を呈する滑らかな形態が現れることが報告され、それぞれハックルマークおよびリブマークと呼称されている^{5-4)~5-7)}。松坂らは加工条件と形成される割断面形態の関係を調査し、荷重が大きいほど、またスクライブ速度が小さいほどリブマークが形成されやすくなることを明らかにした⁵⁻⁵⁾。垂直亀裂の伸展についても観察し、リブマーク形成時には垂直亀裂が数秒以内に深くまで伸展する一方、ハックルマーク形成時には同じだけ伸展するのに数十分かかることも明らかにした。Hasegawaらは光弾性実験をそれぞれの条件で行い、位相差の減少が割断面形態により異なることを発見した⁵⁻⁶⁾。本論文の3章では、リブマークおよびハックルマークのそれぞれが形成される条件において亀裂形成挙動を観察し、起点クラックが形成されるとリブマークが形成されることを明らかにした。このように、ハックルマーク形成時とリブマーク形成時では、その形態に加えて亀裂伸展挙動も大きく異なり、加工の品質や効率にも大きく影響する。本論文の4章では、メディアンクラックやラディアルクラックといった亀裂の分類にしたがって、その形成メカニズムについて考察した。

本章では、割断面の形態および亀裂の伸展挙動をより詳細に観察し、ここまでの研究で明らかになった事柄をもとに、ハックルマークおよびリブマークが形成されるメカニズムについて考察する。

5.2 実験方法

割断面形態の調査方法

3.2.1項と同様の方法を用いて、リブマークの形成割合を導出した。また、ハックル

およびリブマークの形状を詳細に把握するため、レーザ共焦点顕微鏡(Olympus, LEXT)を用いてそれぞれの切断面を観察した。

ホイール近傍における亀裂形成挙動の観察

高速度カメラを用いた亀裂形成挙動の観察方法の模式図を図5.1に示す。側面と裏面の2方向から同時に観察を行った。側面からの観察では透過光を用いてガラス内部の亀裂形成挙動を可視化した。一方、裏面からの観察ではガラス試料上面での反射光により亀裂を可視化した。観察倍率はどちらも10倍とした。撮影速度は2000 fpsである。本実験では、固定されたホイールおよび観察系に対してステージが駆動するため、視野はホイールに追従する。したがって、ホイール周辺の亀裂をスクライブの全長にわたって撮影する。スクライブ速度は5 mm/s、スクライブ長さは10 mmである。押しつけ荷重は、ハックルマークおよびリブマークが形成される7 Nおよび15 Nとした。

なお、本実験では亀裂をより明瞭に可視化するため、側面からの観察結果に画像処理を施している。亀裂は非常に短い時間に発生するため、動画の1フレームの間に現れる。そこで、高速度カメラによって撮影した画像から、連続する2フレームの画像の差分をとることで、1フレーム間の変化のみを抽出した。その後、2値化処理により鮮

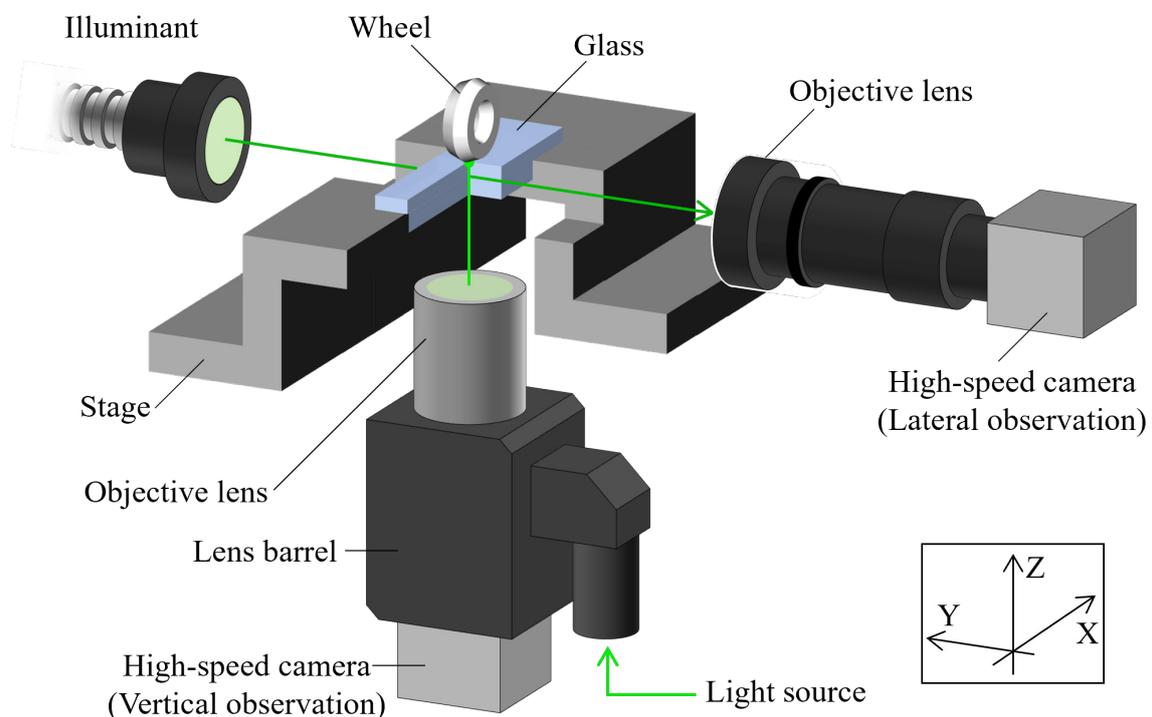


FIGURE 5.1 Schematic illustration of simultaneous observation system from lateral and vertical direction. Foreground $\frac{1}{4}$ of stage in the illustration is cut down. In lateral observation, cracks are visualized by transparent light. In vertical observation, high-speed camera capture reflected light at glass surface.

明化し，フィルタリング処理によりノイズを取り除いた．フィルタには 3×3 の移動平均フィルタを使用した．

ホイール通過後の亀裂伸展挙動の観察

ホイールが通過した後の亀裂伸展挙動を可視化するため，試料および観察系を固定し，ホイールを走査する実験系において観察を行った．模式図を図5.2に示す．実験条件は前項と同様である．本実験系では試料に対して視野が固定されているため，ホイール通過後の経時変化を観察するのに適している．ホイール通過前(1フレーム目)の画像と各時間における画像の差分を取ることで，亀裂が伸展した部分に変化量として抽出され，2値化処理により白く表示される．前項と本項の画像処理の違いを図5.3に示す．前項の手法では亀裂発生の瞬間が明瞭化されるのに対し，本項の手法では亀裂伸展の様子を可視化することができる．

5.3 実験結果および考察

まず，110-10のホイールを用いて実験および観察を行い，ハックルマークおよびリブマークの形成メカニズムを考察した．

割断面形態の詳細観察

ハックルマークおよびリブマークを共焦点顕微鏡により観察した結果を図5.4および図5.5に示す．図5.4 (a) は荷重7Nでスクライブを行い形成されたハックルマークの観察写真であり，図5.4 (b~d) のグラフは図5.4 (a) 中の (b) ~ (d) の線上の断面曲線を示している．図5.4 (a) の画像上部がスクライブを行った表面であり，左から右

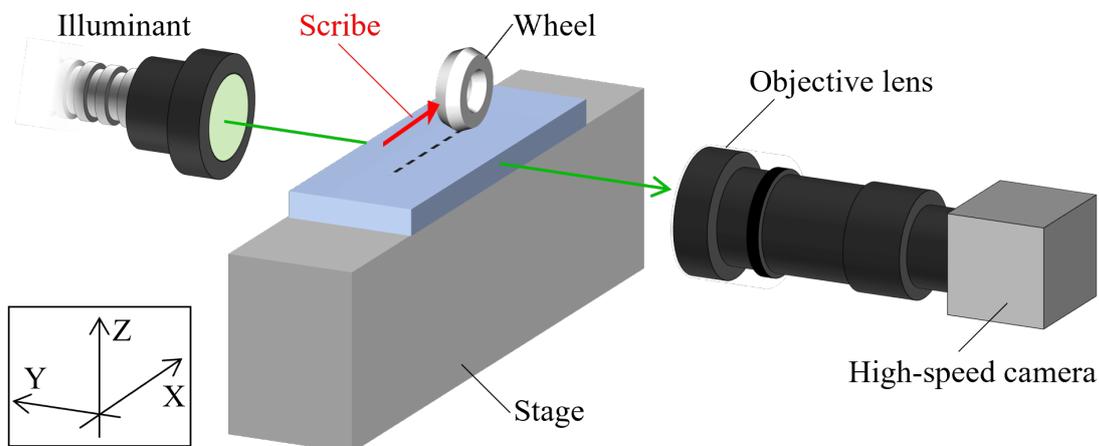


FIGURE 5.2 Schematic illustration of lateral observation system fixed to stage and glass substrate. Wheel crosses observation site of high-speed camera.

へスクライブしている。スクライブ表面近傍に、半円形の模様および黒い線が多数みられる。図5.4 (b) の断面曲線より、半円形の模様は平坦部、黒い線は段差であることがわかる。平坦部の高さは不規則であり、約20 μm のばらつきがある。段差は画面下方向に向かって徐々に解消されてゆき、約50 μm の深さで段差はなくなり連続的な面を形成している。図5.4 (b) および (c) の断面曲線は、それぞれ異なる半円形模様を通るように取得したものである。グラフ中の点線に挟まれた領域が半円部にあたる。これらを比較すると、半円形の平坦部の傾きも異なっている。ほかの半円部についても同様に、不規則に傾いていた。このことから、半円形の平坦部は、スクライブラインに対して左右の位置と傾きが不規則に生じていて、それらの面が段差となっていることがわかった。

図5.5はリブマークが形成される15 Nの荷重でスクライブを行った断面の観察結果である。本研究で使用した共焦点顕微鏡は、光路差から表面の微小な凹凸を可視化で

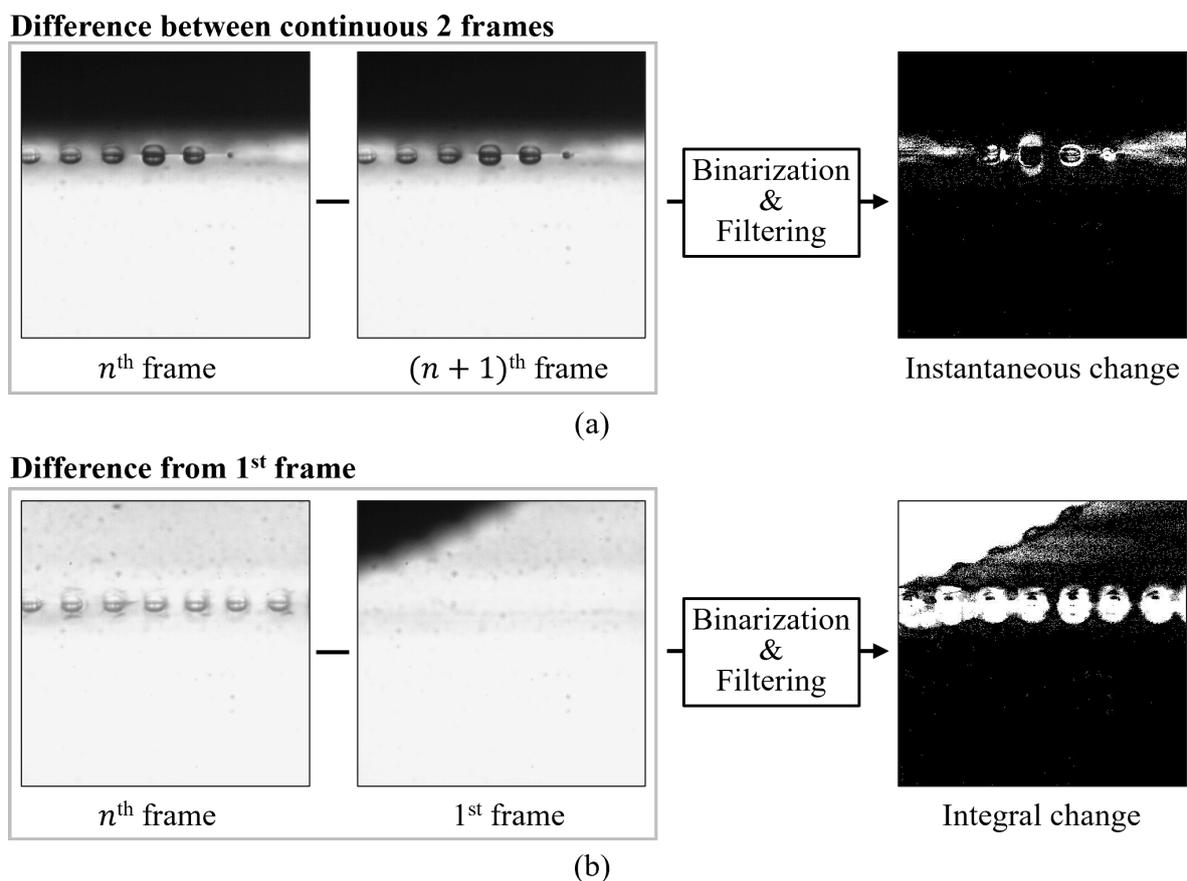


FIGURE 5.3 Procedures of image processing for high-speed observation. Crack generation/extension behavior was clarified by subtraction of two images. (a) shows a method of difference between continuous 2 frames. As a result, instantaneous change like crack generation is visualized. According to difference from initial frame (b), crack extension appears as a integral change from initial frame.

きる微分干渉観察モードを搭載している. 図5.5 (a) は微分干渉観察モードを使用しない通常観察モードで観察した像と断面曲線であり, 図5.5 (b) は微分干渉観察モードで観察した結果である. 図5.5 (a) には, スクライブ表面から約100 μm の深さにわたり斜線状の縞模様がみられる. その部分の断面曲線は滑らかであり, 凹凸は5 μm 程度とハックルマークに比べて小さい. 図5.5 (b) の微分干渉観察では, 斜線縞模様とは直交するような弧状の縞模様が見られる. 拡大図に示すように, 弧状の縞模様は形状が周期的に変化しており, その周期は約60 μm である. 共焦点顕微鏡の各観察モードの特性から考えると, リブマークにはサブミクロンサイズの斜線状縞模様と, それと直交する微小な弧状縞模様が存在することがわかった.

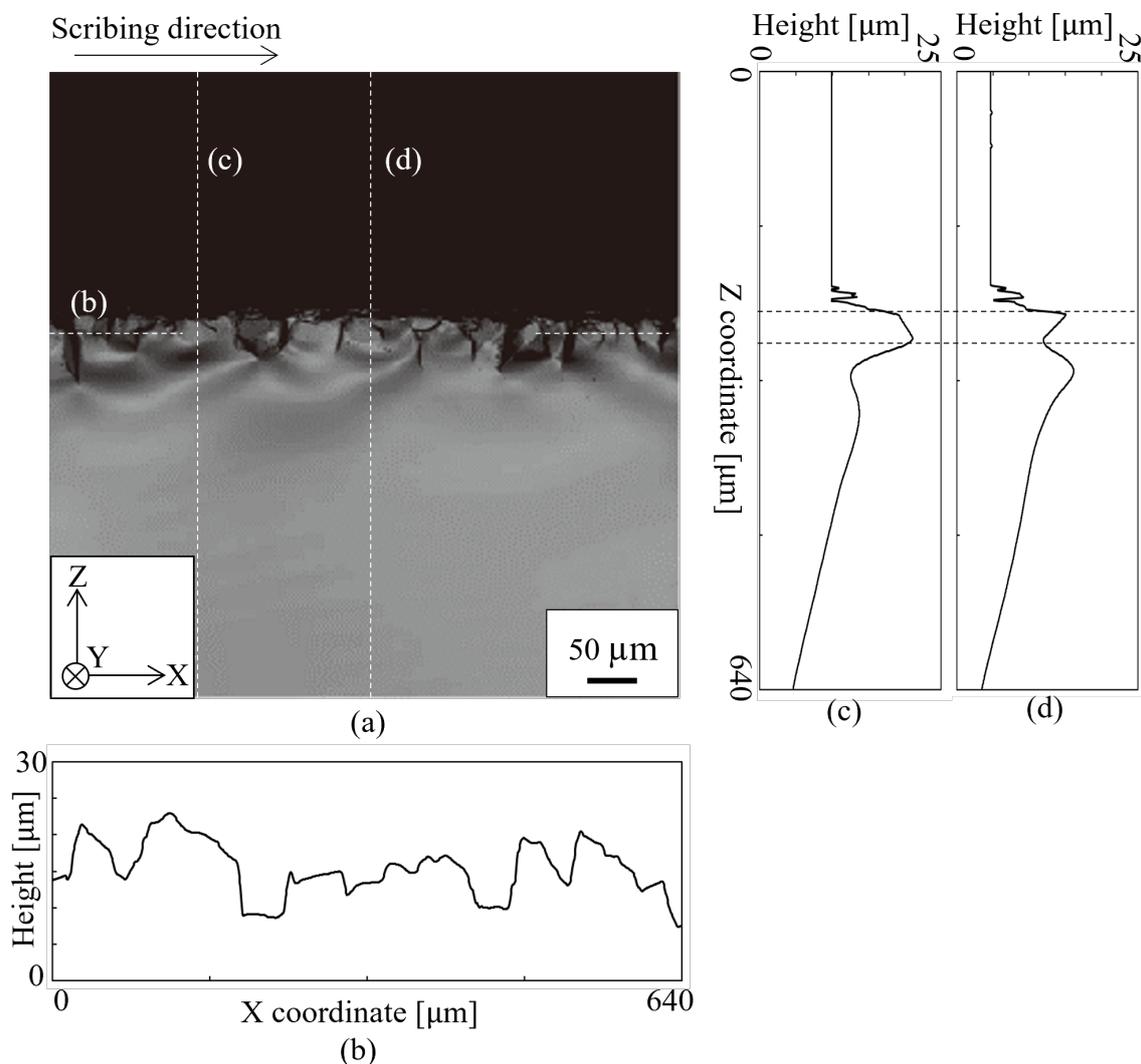


FIGURE 5.4 Fractured surface morphology of hackle mark observed by laser confocal microscope. (a) shows surface image of hackle mark. (b), (c) and (d) are surface profiles on the line (b), (c) and (d) in (a), respectively. Hackle mark has semicircular marks and steps between them (a, b). Semicircular marks tilt individually (c, d) and make one plane with extension toward depth direction.

高速度カメラ観察

第3章では110-10のホイールを用いた場合の亀裂形成挙動を報告した。その中では、別々の実験系により側面および裏面の2方向から観察を行ったが、本章では2方向同時に観察を行った。まず、ハックルマークが形成される荷重7 Nの場合の亀裂形成挙動を図5.6に示す。図中の時間表示は、ホイールに荷重が負荷されてガラスに押し込まれた後、ホイールが動き出す直前を $t = 0$ sとしている。図5.6 (a~c) はスクライプ中における連続した3フレームの側面観察像、図5.6 (a' ~c') は対応する裏面方向からの観察像である。本実験ではガラスに金蒸着をしていない。そのため、ホイールの凹部が凹面鏡のように集光させた光が、裏面からの観察像において圧痕の間に白い線として映っている。図5.6 (a) に矢印で示すように、圧痕の下方には、円形亀裂が形成される。裏面からの観察では、メディアクラックは圧痕の影になり見ることができない(図5.6 (a'))。ホイール後方 (= 除荷後) では圧痕角部からラディアルクラックが形成している。ラディアルクラックの一部は、ホイール後方で圧痕同士をつなぐように進展する。図5.6 (b') から (c') の間では、前方から数えて4つ目と5つ目の圧痕の間で、ラディアルクラックが進展し圧痕間が結合されている。この様子は、側面観察像(図5.6 (b, c)) では確認が困難であったため、画像処理によってフレーム間の変化を鮮明化した。図5.6 (a) と (b) の差分画像を図5.6 (d)、図5.6 (b) と (c) の差分画像を図5.6 (e) に示す。図5.6 (d) と比較すると、図5.6 (e) では圧痕間に該当する箇所が白く強調されており、1フレーム間の変化、すなわち亀裂の形成が可視化されている。圧痕間の亀裂は表面から20 μm 程度の浅い範囲に形成されており、ラディアルクラックの特徴と一致することが明らかになった。

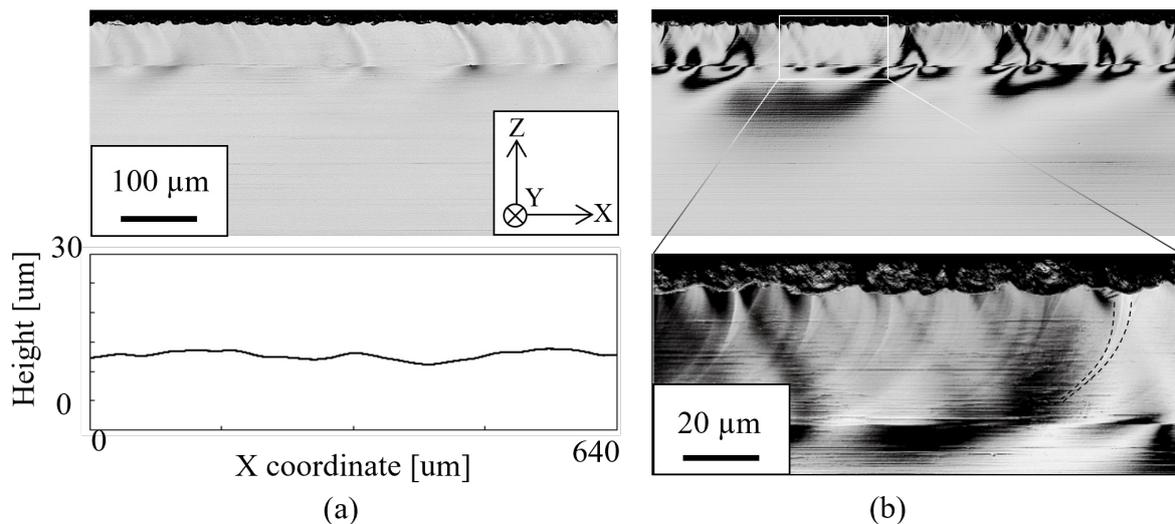


FIGURE 5.5 Fractured surface morphology of rib mark observed by laser confocal microscope. (a) shows image shot by general view and its surface profile. (b) shows differential interference contrast (DIC) view which can visualize smaller surface structure.

図5.7には5.2.3節で述べた定点観察の結果を示す. ここでは画像の端にホイールの中心が到達したタイミングを $t = 0$ sとして定義し, $t = 0$ sの画像との差分画像を示している. ホイール通過時にはホイールの影が映り込み, 差分処理が適切に行えないため, 図5.7 (a) は $t = 0.0900$ sの画像を示している. 同図はホイール通過直後であり, 各圧痕の下方に円形亀裂が形成されており, 圧痕間の一部では表面付近にも亀裂が形成されている. 図5.7 (b~d) では, 矢印で示した位置の圧痕間に, ラディアルクラックが伸展してゆく様子を捉えている. その後, 各々の亀裂が深さ方向に伸展しながら, 一つの亀裂に結合してゆくことがわかる (図5.7 (e, f)).

リブマークが形成される条件である, 荷重15 Nにおける亀裂の観察結果を図5.8に示す. 図5.8 (a) $t = 0$ sのホイール押しつけ時には, 隣接する圧痕下に形成したメディアアーククラックが結合し, 起点クラックが形成されている. 図5.8 (a') の下方からの観察でも起点クラックの形成がみられる. その位置は, 圧痕の中央よりも上方寄りに発生している. 何度か実験を行ったところ, 起点クラックが形成する位置は圧痕の幅の中で不規則であった. スクライブが始まると, ホイールの進行に伴って起点クラックが前方に伸展する. その際, 亀裂前縁の形状はホイールの凸部の接触挙動と同期して

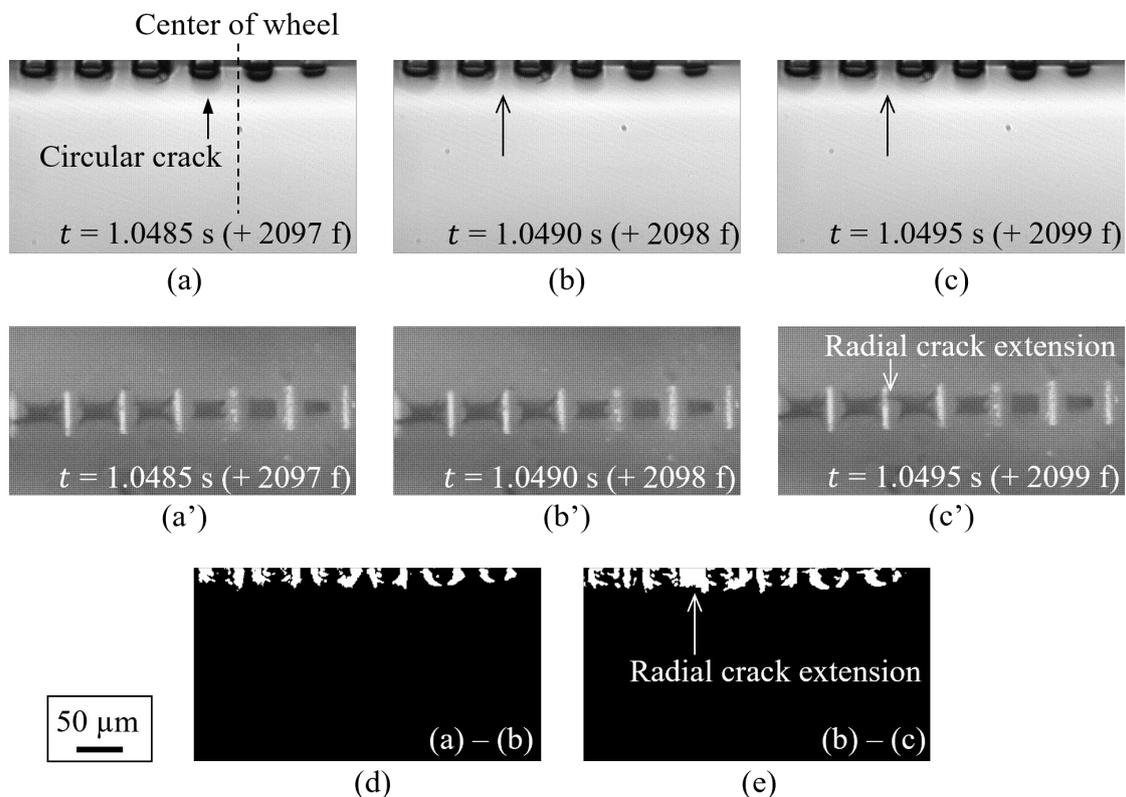


FIGURE 5.6 Crack generation behavior at applied load of 7 N when using wheel 110-10. (a), (b) and (c): lateral view. (a'), (b') and (c'): back side view. (d) and (e): differential image between continuous two frames.

周期的に変化する．図5.8 (c) では亀裂が表出する位置は図5.8 (b) と同じであるが，内部では亀裂前縁が前方へと伸展しており，亀裂前縁の形状が変化している．ホイール直下では亀裂深さは約100 μm であり，ホイールが通過した後方では下方にも伸展し，数秒でガラス厚さの80 %にまで達する．スクライブ中のメディアクラックは，図5.8 (b') のように圧痕の列のほぼ中央を貫くように伸展する．

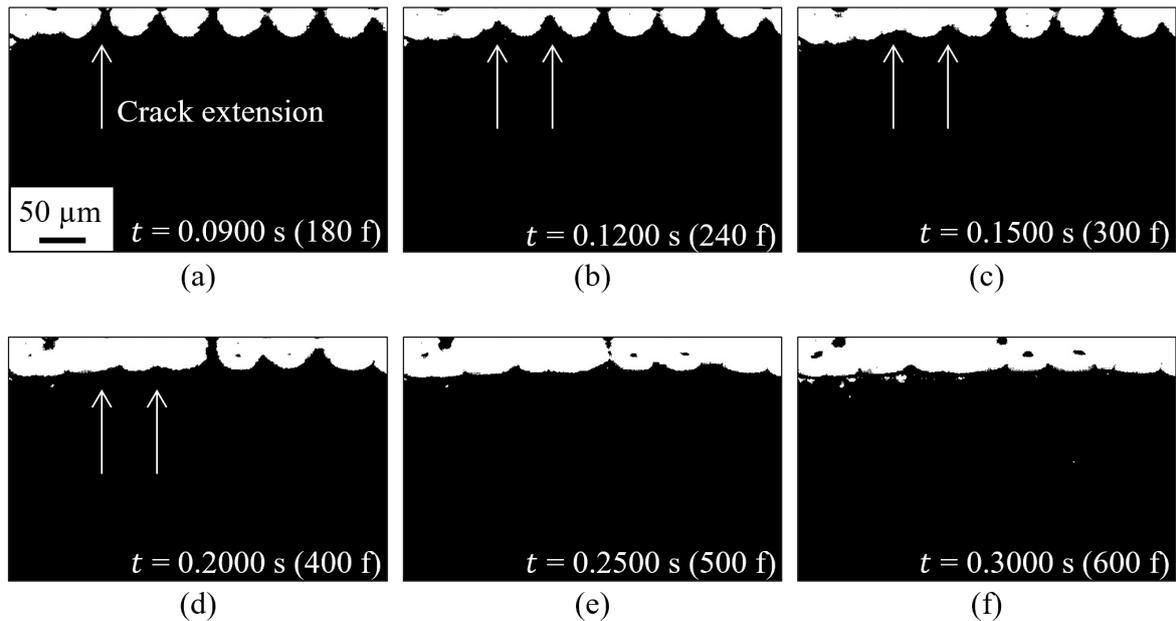


FIGURE 5.7 Crack generation behavior after scribing at applied load of 7 N when using wheel 110-10. Difference image from 0 frame ($t = 0$ s) when center of scribing wheel reach to left edge of observing site.

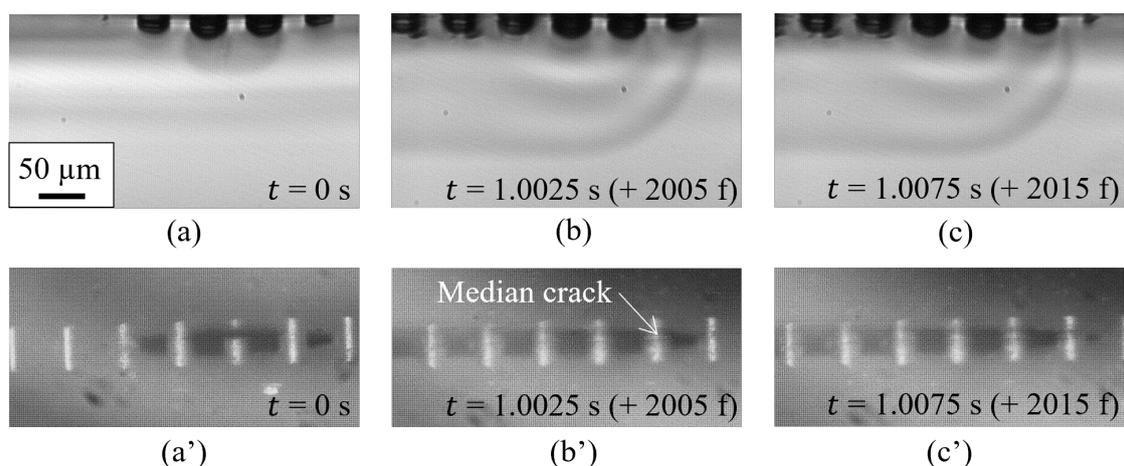


FIGURE 5.8 Simultaneous two ways high-speed camera observation during scribing at rib mark condition (Wheel: Penett SDX 125-110, Load: 7 N, Scribing speed: 5 mm/s). (a), (b) and (c): Lateral observation. (a'), (b') and (c'): Back side observation.

ハックルマークおよびリブマークの形成メカニズム

以上の結果から、割断面形態の形成メカニズムについて考察する。メカニズムを模式図として図5.9に示す。まず、ハックルマークの形成メカニズムについて、図5.9 (a)に示す。(1) ホイール直下の凸部下方には、円形のメディアクラックが形成する。4章で述べた通り、これは圧痕下方に生じる引張応力により形成される。ただし、形成される位置は圧痕の幅のなかで不規則であり、傾きも個々に異なる。(2) ホイール後方では圧痕角部からラディアルクラックが発生し、その一部は圧痕間をつなぐように進展する。このように、メディアクラックおよびラディアルクラックはスクライブラインに対して左右にばらつくため、表面付近は段差形状になっている。(3) その後、残留応力によりメディアン/ラディアルクラックは深さ方向に進展する。進展に伴い段差が徐々に解消される。このようなプロセスによって、表面付近に半円形の模様と段差形状を呈するハックルマークが形成される。

衝撃等によって破壊されたガラス破面に現れる“ハックル”は、衝撃によるエネルギーが一枚の亀裂面で解放できなくなった結果、複数の亀裂面が作られる。一方、ホイール割断のハックルマークは、独立した亀裂が多数発生し、伸展することで形成される。したがって、似たような形態であっても、その形成メカニズムは大きく異なる。

図5.9 (b) にはリブマークの形成メカニズムを示す。4章で述べたように、荷重が増加すると圧痕下方の引張応力の作用が大きくなり、メディアクラックは成長する。隣接するメディアクラック同士の距離が十分近くなると、結合し起点クラックが形成される。その後、ホイールの走査と同期して起点クラックが前方へと進展する。こ

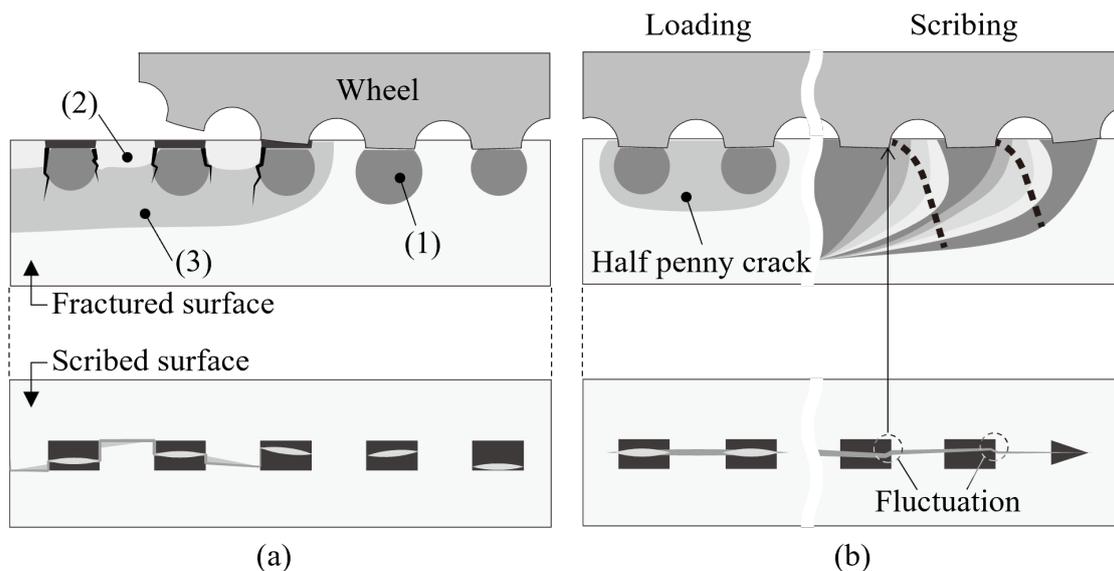


FIGURE 5.9 Schematic illustrations of mechanisms for fractured surfaces generation. (a) hackle mark and (b) rib mark case.

のホイール直下の垂直亀裂の深さとリブマーク深さはほぼ一致することが明らかになっており⁵⁻⁵⁾、この起点クラックの伸展によって創出される面が、そのままリブマークとなる。したがって、垂直亀裂の挙動によりリブマークの縞模様が形成されていることになる。

リブマークは肋骨状の模様と定義されるが、形成メカニズムによりいくつかに分類される⁵⁻³⁾。リブマーク形成時の亀裂前縁の周期的変化は、割断面の弧状縞模様と周期および形状が一致する。したがって、弧状縞模様は亀裂の進展が一時停止した際に亀裂前縁の形状が刻印される“アレストライン”であると考えられる。一方、斜線状縞模様は弧状縞模様（＝亀裂前縁）の形状と直交することから、亀裂の進展に伴って表面から深さ方向に向かって凹凸が押し出されたものと考えられる。したがって、破壊の弾性波などにより亀裂の進行方向がわずかに揺らぐことで生じる“ウォルナーライン”と考えられる。斜線縞模様の周期も、一部ではホイールの凹凸と一致する。また、図5.8に示したように、起点クラックの形成位置が圧痕の中央からはずれていても、スクライブの進行により亀裂は圧痕の中央を通るように修正される。このことは、スクライブ中には亀裂の位置を圧痕の中央に修正する力が働くことを示唆している。したがって、断続的なホイール凸部の衝突により亀裂の進行方向が矯正されることで、表面付近の亀裂伸展に微細な揺らぎが生じ、それが深さ方向に伸展することでウォルナーラインが現れると推測できる。ただし、凹凸のないノーマルホイールを用いた場合にもリブマークは形成し⁵⁻⁷⁾、ウォルナーラインが現れる。したがって、ホイールの凹凸の有無にかかわらず亀裂伸展の微細な揺らぎは生じているが、ブレークレスホイールを用いる場合には、凹凸が接触するタイミングで強制的に亀裂伸展方向が矯正されると考えられる。

5.4 凹凸形状が異なるホイールにおける検証

前節で提示した割断面形成メカニズムについて、妥当性の検証のためホイール形状を変化させて実験を行った。

リブマーク形成割合

110-10, 140-7, 170-5および360-3の4種類のホイールを用いた際のリブマーク形成割合を図5.10に示す。360-3のホイールでは、すべての荷重でリブマークのみが形成された。これはノーマルホイールを用いた場合と同様の結果といえる。一方、110-10, 140-7および170-5のホイールでは、低荷重ではハックルマークが形成され荷重が増加するとリブマーク形成割合も向上する傾向がみられる。110-10では11 N以上でリブマーク

形成割合が100 %となっており、低い荷重でもリブマークが形成されやすくなっている。140-7、170-5と歯数が増加すると、低荷重でリブマーク形成割合が小さくなっている。また、170-5のホイールを用いた場合、荷重が十分に高くなりリブマークの形成が主になっても、ハックルマークの形成が散見された。

割断面の顕微鏡観察

それぞれのホイールを用いて得られた割断面を、レーザ共焦点顕微鏡で観察した。押し付け荷重は7 Nおよび15 Nとした。図5.11に観察結果を示す。まず、7 Nの観察像を比較すると、110-10に比べて140-7および170-5では半円部が小さくなっている。15 Nの観察像を比較すると、まずリブマークの深さが異なることがわかる。110-10が最も大きく約150 μm 、次いで140-7で約130 μm であり、170-5は約110 μm 、360-3は約100 μm となっている。また、縞模様の間隔を比較すると、こちらも110-10が最も大きく、360-3で最も小さくなっている。特に、360-3の縞模様が非常に細かくなっていることからわかるように、ホイールの凹凸の大きさに応じた間隔になっている。

亀裂形成挙動の観察

異なる凹凸形状のホイールを用いた場合でも、ハックルマークが形成される際には

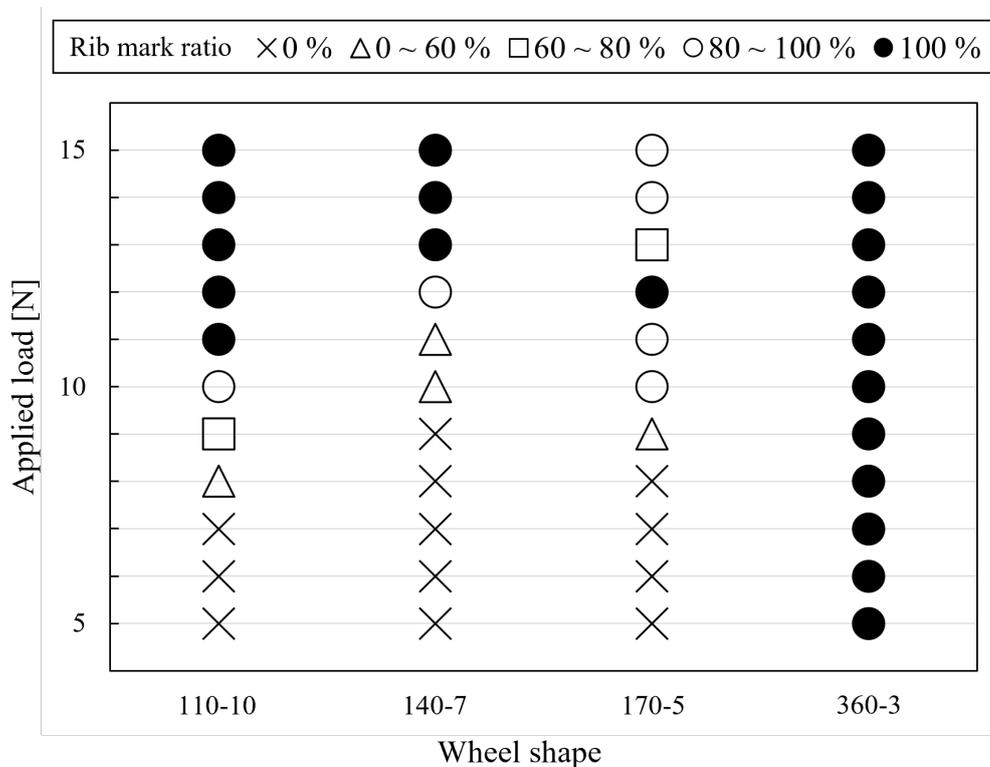


FIGURE 5.10 Relationship between rib mark ratio and applied load when using wheel 110-10, 140-7, 170-5 and 360-3.

円形亀裂が、リブマーク形成時には起点クラックが形成される様子が観察され、おおむね110-10と同様の亀裂形成挙動が認められた。ここで、特にハックルマークが形成されやすい170-5のホイールに注目する。荷重7 Nにおける亀裂の観察結果を図5.12に示す。図5.12 (a~c) の側面観察像では、メディアンクラックの形成は確認できないが、差分処理を施した図5.12 (d) および (e) を見ると、矢印で示した圧痕の下方に、ごく小さな亀裂の形成が確認できた。110-10のホイールにおける半円亀裂と比較すると大きさは小さく、亀裂は図中に点線で示したホイールの中心よりも歯1つ分後方で発生している。図5.12 (a'~c') には、ホイール後方でラディアルクラックが形成し、圧痕間をつなぐように進展する様子も見られる。しかし、その大きさも110-10の場合に比べて小さくなっている。荷重15 Nにおいて、リブマークが形成した場合の観察結果を図5.13に示す。図5.13 (a) のホイール押しつけ時には亀裂は形成していないが、

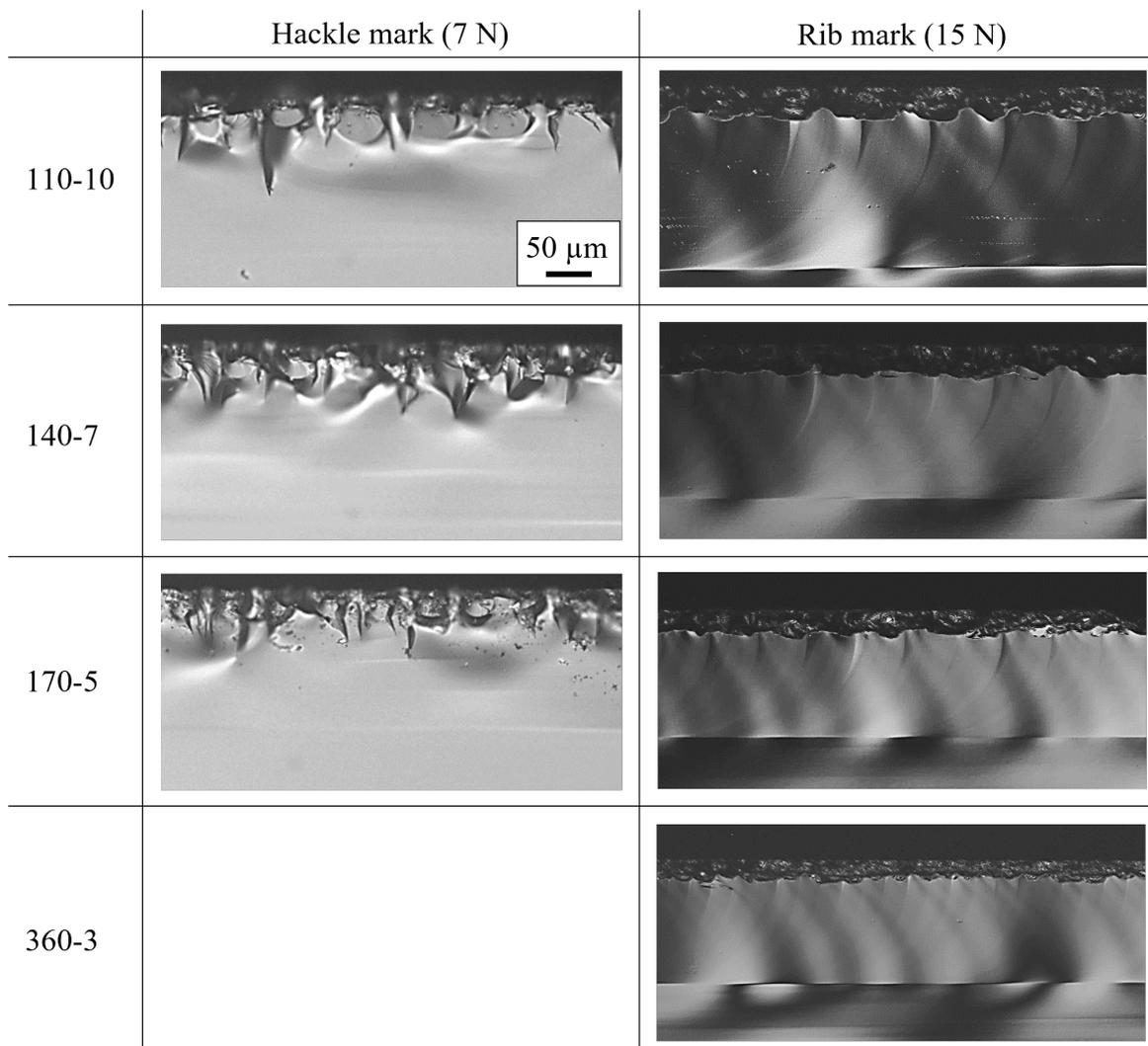


FIGURE 5.11 Fractured surface images at applied load of 7 and 15 N when using wheel 110-10, 140-7, 170-5 and 360-3.

ホイールが動き出した直後（図5.13（b））に，起点クラックが形成された．その後，起点クラックが進展する様子は110-10の場合とおおむね同様であった（図5.13（c,d））．また，スクライブ中における垂直亀裂の深さは約110 μm であり，割断面のリブマークの深さと一致している．

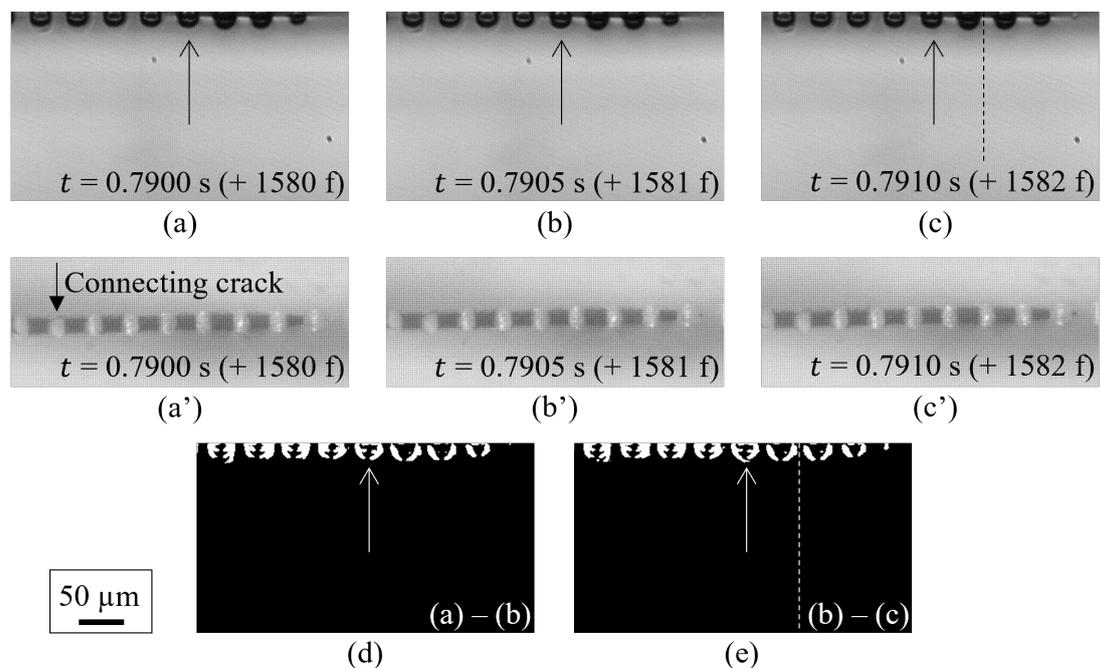


FIGURE 5.12 Crack generation behavior at applied load of 7N when using 170-5. (a), (b) and (c): lateral view. (a'), (b') and (c'): back side view. (d) and (e): differential image between continuous two frames.

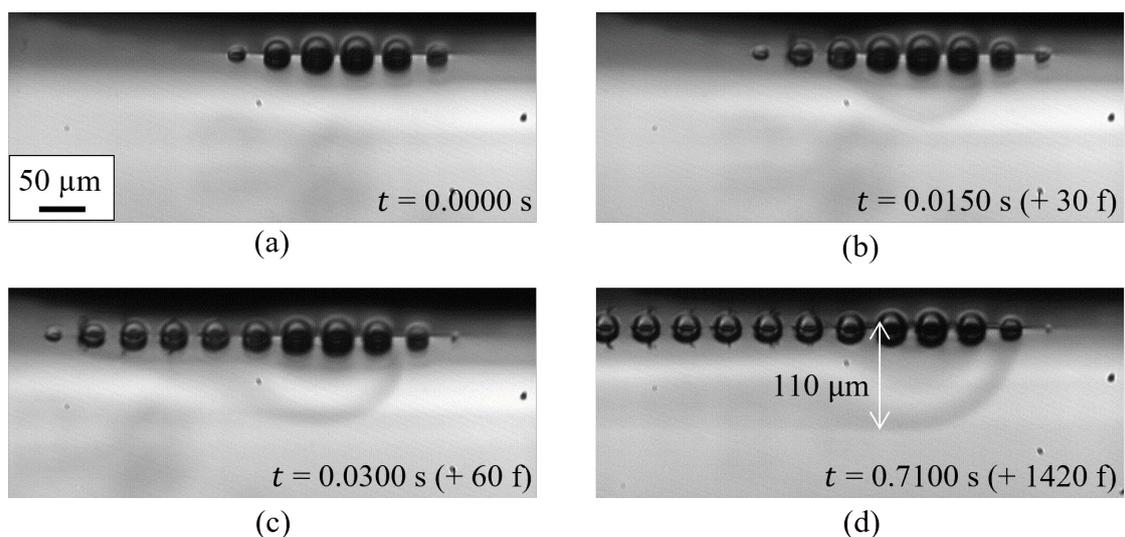


FIGURE 5.13 High-speed camera observation during scribing at rib mark condition (Wheel: Penett 170-5, Load: 15N, Scribing speed: 5mm/s).

考察

ホイールを変更した実験を行った結果、4.2節で明らかになった起点クラックの形成とリブマークとの関連が改めて示された。すなわち、ホイール押し付け時に起点クラックが形成されない140-7および170-5のホイールではリブマーク形成割合が小さくなっている。これらのホイールでは、リブマークが形成される条件では、ホイールが走査を開始した直後に起点クラックが形成される。4.2章で考察したように、押し付け/除荷実験においては、起点クラックを含むメディアンクラックは表面付近に引張応力が到達した地点から発生する。スクライブにおいてはホイールの後方で凸部が離れる地点で除荷される。そのため、140-7および170-5のホイールでは、ホイールが動き出した後に後方から起点クラックが形成されると考えられる。起点クラック形成の前駆体である円形亀裂の形成位置は、ホイールの歯数が多くなるほど、すなわち凹部の高さが小さくなるほどホイールの中心から離れることが4.2節の実験で示され、本章でも同様の傾向がみられた。起点クラックの形成がホイール後方の円形亀裂を起点とし、接触している凸部の最前部まで伸展することを考えると、ホイール中心から離れた後方で発生するメディアンクラックほど起点クラックを形成しにくく、その結果170-5ではリブマークが特に形成されにくい結果となったと考えられる。一方、360-3のホイールでは、4.2節の押し付け実験において、円形亀裂が形成せず、除荷時に一気に起点クラックが形成していた。凹凸が小さくノーマルホイールに近い形状であるため、亀裂の形成についてはほかのホイールよりも不利である。しかし、円形亀裂は形成されず、ラディアルクラックの形成も非常に小さいため、エネルギーが消費されず蓄積される。そのため、スクライブが開始したあとは他のホイールよりも起点クラックが形成されやすくなっており、その結果、低荷重でもリブマークが形成されたものと考えられる。

また、ハックルマークの半円部の大きさは高速度カメラによる観察結果と対応し、リブマークの縞模様の間隔はホイールの凹凸が接触する間隔と一致している。これらのことから、5.3節で提唱した割断面形成メカニズムは、形状の異なるホイールでも適用できるものと考えられる。

5.5 結言

本章では、高速度カメラによる亀裂形成挙動の観察および画像処理による亀裂の鮮明化を行い、割断面の形成メカニズムを考察した。また、ホイール形状を変化させて検証および考察を行った。その結果、以下の知見を得た。

- (1) ハックルマーク形成時には、メディアクラックおよびラディアルクラックがそれぞれ不規則な平面上に発生し、それらが深さ方向に伸展しながら結合してゆく。その結果、多数の半円形の平たん部と段差形状を呈するハックルマークが形成される。
- (2) リブマーク形成時には、複数の歯にまたがるメディアクラックである起点クラックがホイール直下に形成され、スクライブに追従して前方へと伸展する。メディアクラックの前縁の形状が円弧状の縞模様として打刻される（アレストライン）。また表面における亀裂伸展方向の微妙な揺らぎが亀裂伸展とともに深さ方向に伝播することで、斜線状の縞模様（ウォルナーライン）が形成される。
- (3) ホイール形状が変化した場合、ホイール押し付け時における起点クラックの形成挙動が、リブマーク形成割合に直結する。押し付け時に起点クラックが形成されないホイールでは、スクライブ開始直後に起点クラックが形成される。

参考文献

- 5-1) Quinn G. D., Fractography of ceramics and glasses, National Institute of Standards and Technology (2016).
- 5-2) 菊田雅司, 水野幸四郎, 都甲英俊, 山内辰夫, ガラス破壊時における破損パターンと破壊応力との関係, 窯業協会誌, Vol. 93, No. 3 (1985) pp.144–150.
- 5-3) 上部隆男, ガラス製品の破壊事故解析, NEW GLASS, Vol. 23, No. 3 (2008) pp.19–24.
- 5-4) 松坂壮太, 溝渕玄太, 森田昇, 比田井洋史, 千葉明: スクライビングホイールを用いたガラスの割断加工に関する研究, 砥粒加工学会誌, Vol. 58, No. 2, (2014) pp.109–114.
- 5-5) 松坂壮太, 溝渕玄太, 森田昇, 比田井洋史, 千葉明, ホイールによるガラススクライブ中の亀裂伸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.
- 5-6) Hasegawa R., Matsusaka S., Hidai H., Chiba A., Morita N. and Onuma T., In-process estimation of fracture surface morphology during wheel scribing of a glass sheet by high-speed photoelastic observation, Precision Engineering, Vol. 48 (2017) pp.164–171.
- 5-7) 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ブに関する研究—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, Vol. 53, No. 11 (2009) pp.684–689.

第6章 二次クラック伸展メカニズム

6.1 緒言

3章でも述べたように、ブレークレスホイールを用いた場合、スクライブ中に形成された垂直亀裂は、スクライブ後にも深さ方向に大きく伸展する。これは、留井らの先行研究^{6-1)~6-3)}でも報告されており、スクライブ中に形成される亀裂を一次クラック、スクライブ後に伸展する亀裂を二次クラックと呼称している。外周部に凹凸のないノーマルホイールを用いた場合には、一次クラックのみが形成され、二次クラックの伸展は見られない。ブレークレスホイールを用いた場合、二次クラックの伸展は割断面形態によっても大きく異なる。松坂らは、荷重を変化させて割断加工を行い、亀裂伸展の様子を高速度カメラで観察した⁶⁻⁴⁾。その結果、二次クラックの伸展速度は押し付け荷重が大きいほど大きく、特にリブマーク形成時とハックルマーク形成時では10倍以上の違いが生じることが明らかになった。リブマーク形成時には数秒以内に二次クラックが深くまで伸展し、厚さ0.7 mmのガラス試料の8割近い深さまで到達する。一方、ハックルマークが形成される条件では、スクライブ後数秒間の亀裂伸展は100 μm 程度と小さく、スクライブ後十数分かけて400~500 μm の深さに達する。Hasegawaらは光弾性法による応力分布の可視化により、スクライブ後数秒間の残留応力の経時変化を捉えた⁶⁻⁵⁾。その結果、割断面にハックルマークが形成される条件では、スクライブ後の圧痕周辺に位相差 (= 残留応力) が分布したままであるのに対し、リブマークが形成される条件では位相差が小さいことが報告された。これらのことから、二次クラックの伸展はスクライブによって生じた残留応力を消費して伸展していることが予想される。ただし、これまでの亀裂の伸展と応力緩和を直接的に結びつける証拠は得られていない。

そこで、本章では、有限要素法によるシミュレーションにより具体的な残留応力の分布を明らかにし、また光弾性法による応力解析により残留応力と亀裂伸展の関係を定量的に明らかにする。

6.2 実験方法

解析手法は、2章にて記述した通りである。本節では実験手法について記述する。

裏面からの位相差計測実験

本実験ではホイール直下でのガラス内部位相差を計測することを目的としているため、ガラス裏面からの高速度偏光計測を試みた。実験方法を図6.1に示す。ガラス試

料は片側の表面に金蒸着を行い，蒸着面を上にしてガラスステージ上に固定した．光源から出射された照明光は，偏光子，1/4波長板により円偏光となり，ミラーとハーフミラーによって裏面側から試料に入射する．ガラス表面の蒸着膜で反射した光はハーフミラーを介して高速度偏光カメラに入射する．本実験では，ステージの支柱に観察系を固定することで，ガラス試料上の一点を定点観察するようにした．スクライブ条件はホイール移動速度を5 mm/sで固定し，押し付け荷重は5~20 Nの範囲を1 N間隔でそれぞれ3回ずつ計測を行った．計測箇所はスクライビングホイールの通過痕（以後，スクライブラインと呼ぶ）の中央付近とした．これはスクライブライン両端の影響を避けるためである．スクライブ長は20 mm，フレームレートは50 fpsとした．ホイールが計測点を通過する瞬間，ホイール直下で圧痕が形成され始め，亀裂先端の引張応力が最大となると考えられる．そこで計測開始のタイミングは，圧痕周辺で計測される位相差が最大となる瞬間を $t = 0$ sとし，そこから5秒間の位相差計測を行った．

一方，位相差の経時変化を以下のように定量化した．まず，圧痕周りの位相差の変化から，各時点での最大値を抽出した．次に $t = 0$ s時点の位相差の最大値を100%として，各時点の最大値を規格化した．ここで位相差を規格化した理由は，ガラス表面の金蒸着膜の影響を低減するためである．本実験の位相差計測は反射光を利用して行っ

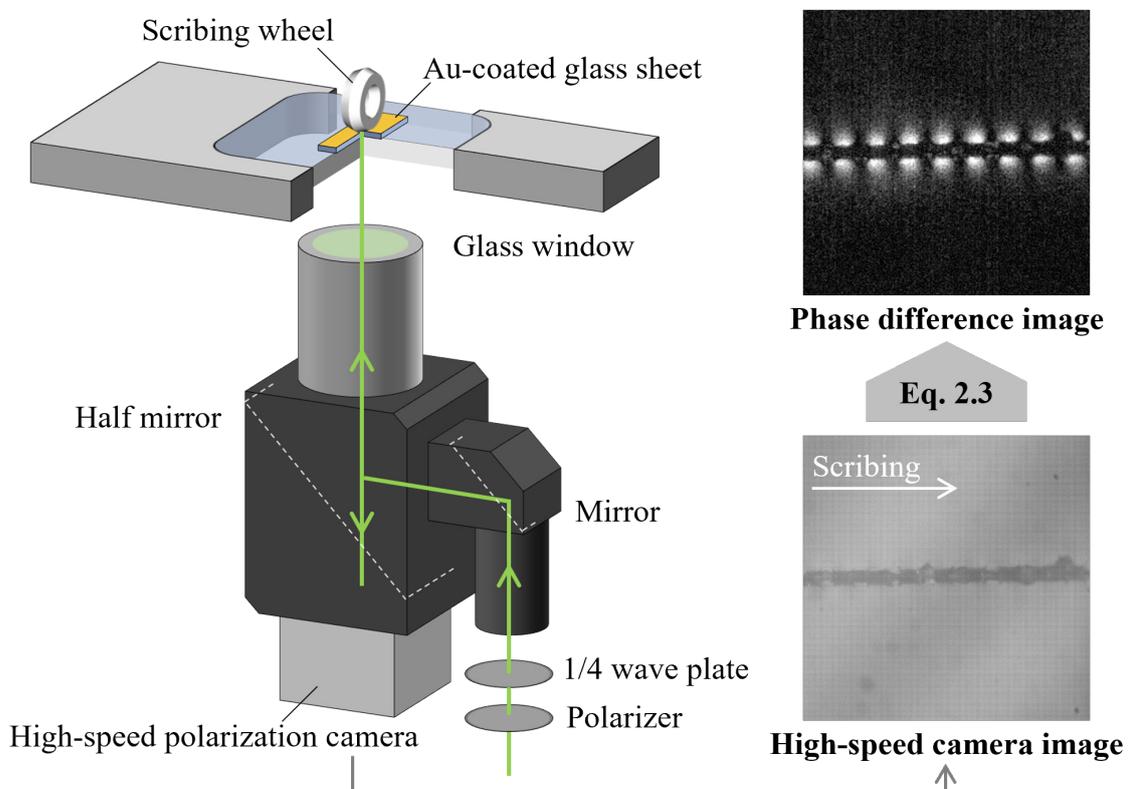


FIGURE 6.1 Schematic illustration of experimental equipment. Phase difference images are calculated from high-speed camera images by equation 2.3.

ているため、金蒸着面の反射率によって、カメラに入射する光量が変化する。そのため、用いるガラス試料によって計測される位相差が異なる可能性がある。そこで、同一試料の $t = 0$ s時点の位相差を基準として用いることによって、蒸着面の影響を低減し、より正確な応力緩和現象を表現できるものと考えた。

亀裂深さの計測

ホイール直下での亀裂進展挙動と位相差変動との関係を明らかにするため、まず先行研究^{6-1), 6-4)}と同様の方法により進展中の垂直亀裂の深さを計測した。実験方法を図6.2に示す。テーブル上に固定されたガラス試料に対して、ホイールの側方に高速度カメラを設置し、ガラス端面から1 mmの位置をスクライブした。本観察系では、ガラス基板を挟んでカメラの反対側に光源を設置しており、亀裂の影を観察することになる。フレームレートは1000 fpsとした。スクライブ条件は前節と同様である。ホイールが計測点（視野の中央）を通過する瞬間を $t = 0$ sとして、同じ位置での亀裂深さを0.1 s間隔で $t = 5$ sまで計測し、各荷重における3回の平均を亀裂進展深さとした。

6.3 実験および解析結果

位相差計測および解析の結果

まず、Penett 110-10のホイールを用いた位相差計測の結果について、押込み荷重が5 N、20 Nの場合のスクライブライン近傍の位相差分布を図6.3に示す。スクライブ後の経過時間は $t = 0.5$ および5.0 sである。位相差の計測結果はグレースケールで表され、位相差が0 nmで黒色、20 nm以上で白色である。試料の断面を光学顕微鏡で観察し

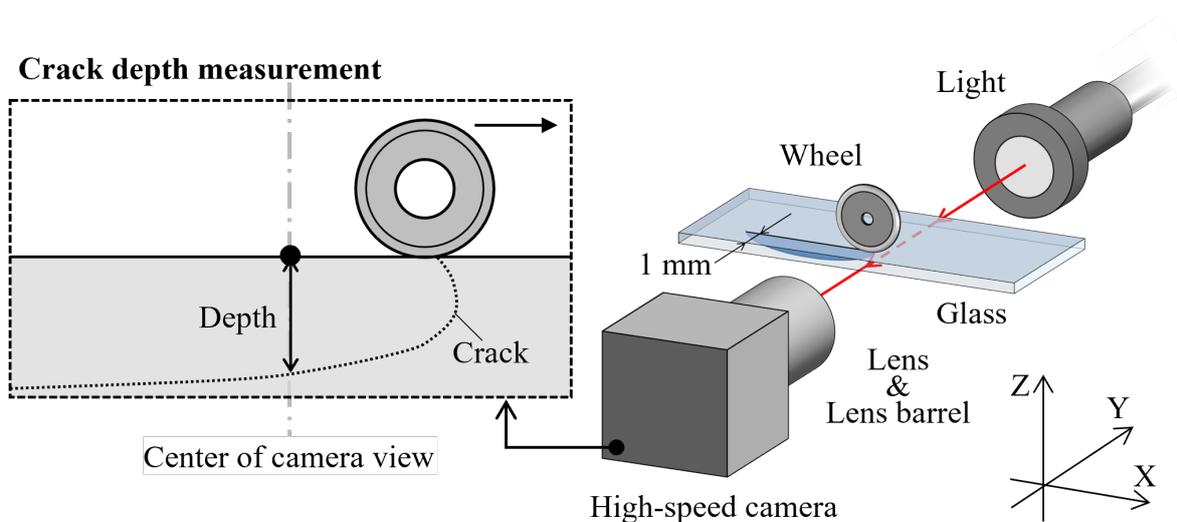


FIGURE 6.2 Experimental equipment and measurement of crack depth on high-speed camera image at center of camera view.

た結果、5 Nでは全域にわたりハックルマーク、20 Nではリブマークを呈していた。図6.3 (a) および (b) より、位相差はホイール凹凸によって形成された圧痕から外側に広がるように分布していることが分かる。位相差の値は異なるものの、分布には大きな変化は見られず、分布の広がりや圧痕から片側約20~30 μm であった。図6.3 (a) と (c) を比較すると、5 Nの場合は時間が経過しても位相差の顕著な変化は確認されない。図6.3 (b) と (d) を比較すると、20 Nの場合は時間経過により位相差が減少する様子が観察された。

次に、有限要素法による応力解析から得られた、除荷後の残留応力分布の計算結果を図6.4に示す。110-10のホイールを凹部が中心軸上に位置する姿勢で固定し、15 Nの荷重を負荷した結果である。最大主応力と、垂直応力およびせん断応力の6成分を図

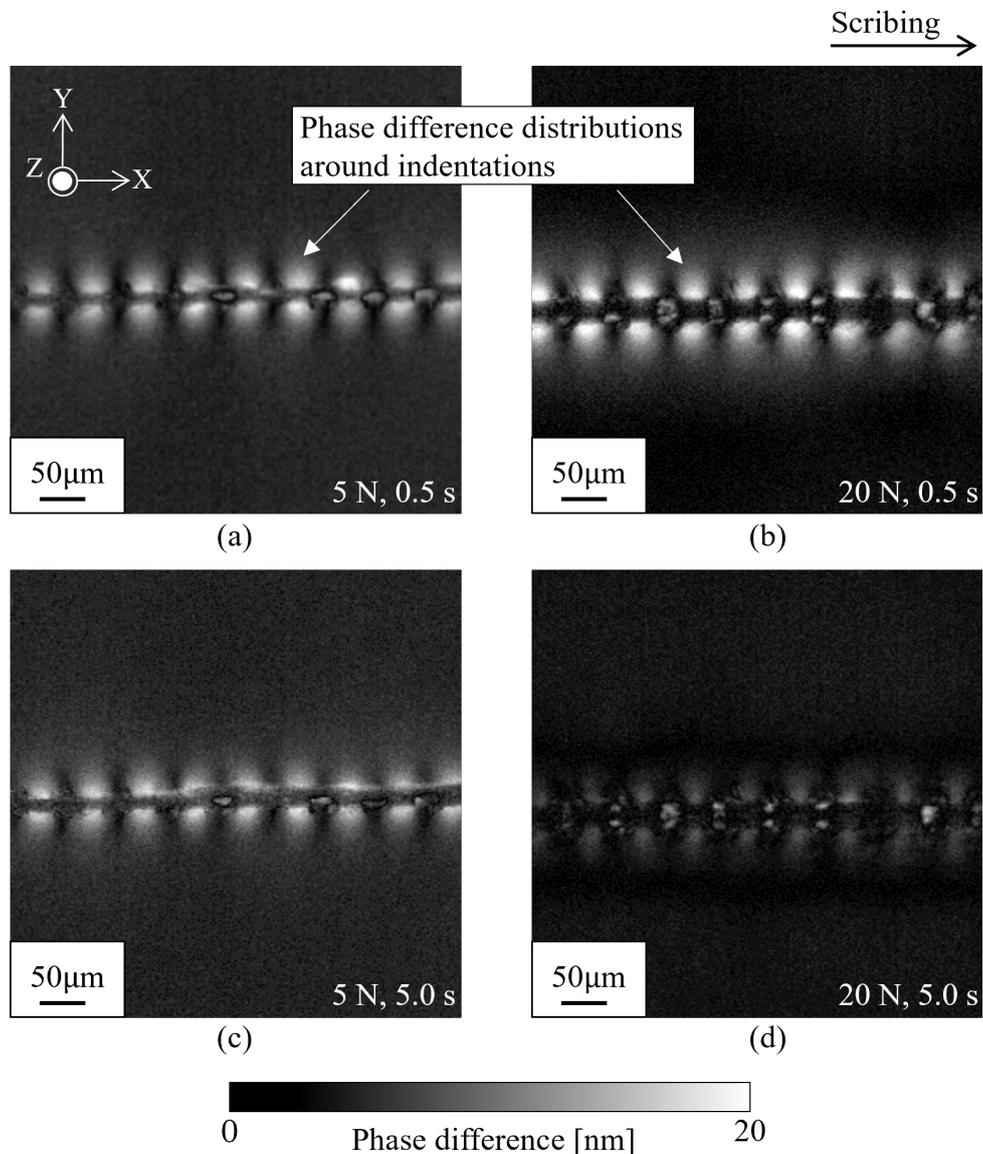


FIGURE 6.3 Phase difference images of 5 and 20 N at 0.5 s (just after scribing) and 5.0 s.

6.4に示す．青は圧縮応力，赤は引張応力を示す．垂直応力の分布をみると，圧痕の周囲が圧縮領域であり，その周囲に引張応力が作用していることがわかる．応力の6成分のうち，Z軸方向からの位相差測定では，XY面内の応力成分である σ_x ， σ_y および τ_{xy} から次式のように位相差 δ_z が生じる．

$$\delta_z = Ct\sqrt{(\sigma_x - \sigma_y)^2 - 4\tau_{xy}^2} \quad (6.1)$$

図6.4に示した応力分布から，式(6.1)に従って位相差を計算した．解析結果からホイール接触部近傍の一辺200 μm の立方体領域を抽出し，領域内の節点の応力値を計算に用いた．光路に沿って位相差を計算するプログラムをプログラミング言語Pythonにより作成した．本論文ではY軸方向からの位相差計測を行っていないが，XZ面内の応力により生じる位相差 δ_y も同様に算出した．

計算により得られたZ軸方向およびY軸方向から見た位相差像を図6.5に示す．有限

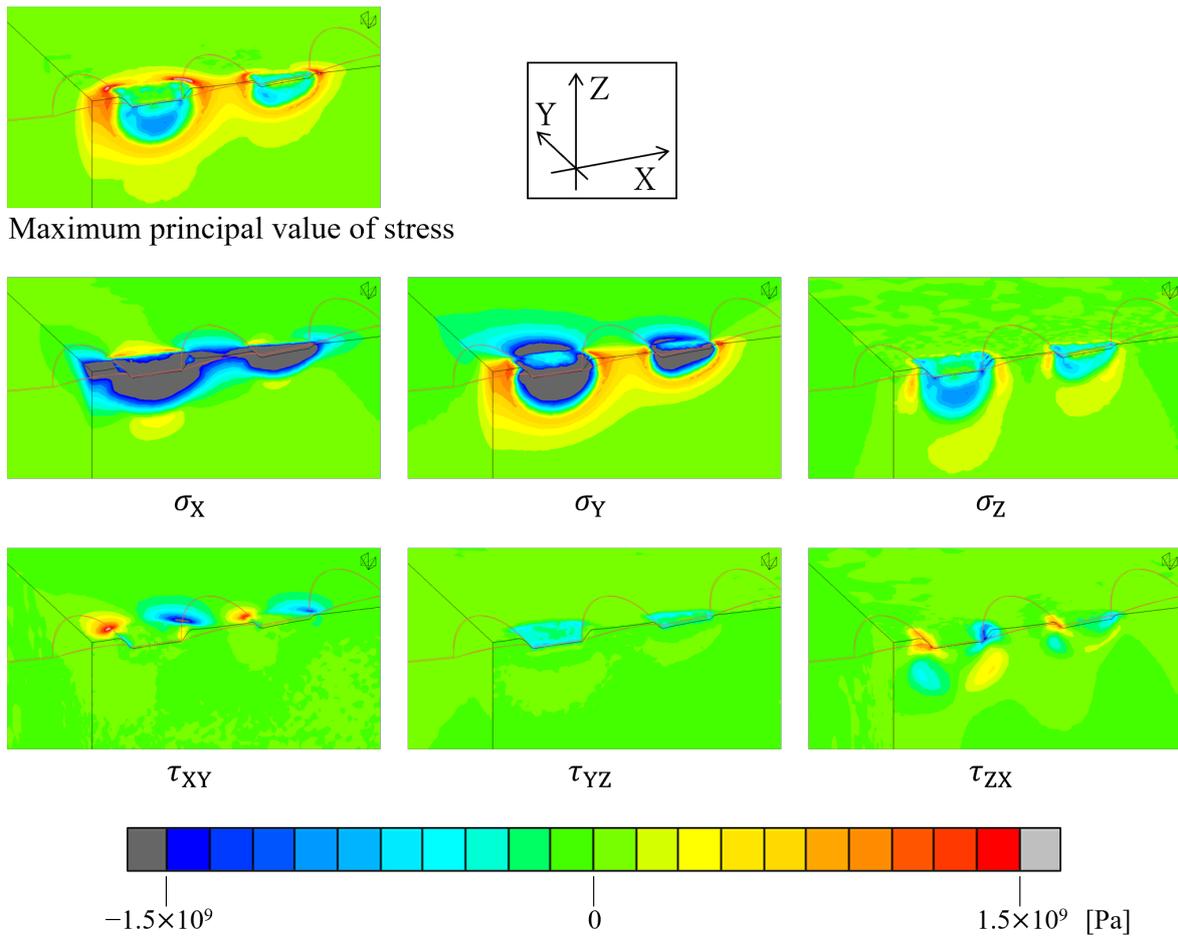


FIGURE 6.4 Results of wheel indentation/unloading analysis (same as Section 4). Stress distributions of $t_a = 1.0$ s (after unloading).

要素法解析は1/4対称モデルで実施しているため、赤線で囲った領域が計算により得られた像であり、図6.5では反転させた画像を組み合わせることで実際の観察像と同じように表示している。それぞれ、負荷時および除荷後の位相差を示す。まず、Z軸方向からの位相差（図6.5 (a, b)）を見ると、ガラス表面に4つの圧痕が形成されており、圧痕の周囲に位相差が分布していることがわかる。圧痕間では位相差が小さくなっているため、圧痕の両側に円形に分布している。負荷時と除荷後では、分布に顕著な変化はなく、除荷後に値が小さくなっている。図6.5 (c) に示した負荷時におけるY軸方向からの位相差分布は、ホイールの直下に赤と青で示された位相差の大きな領域と小さな領域が繰り返される部分（位相差変動領域）が存在し、その周囲に同心円状の緑色の位相差領域が分布している。松坂ら⁶⁴⁾は、ブレークレスホイールを用いたスクライブ

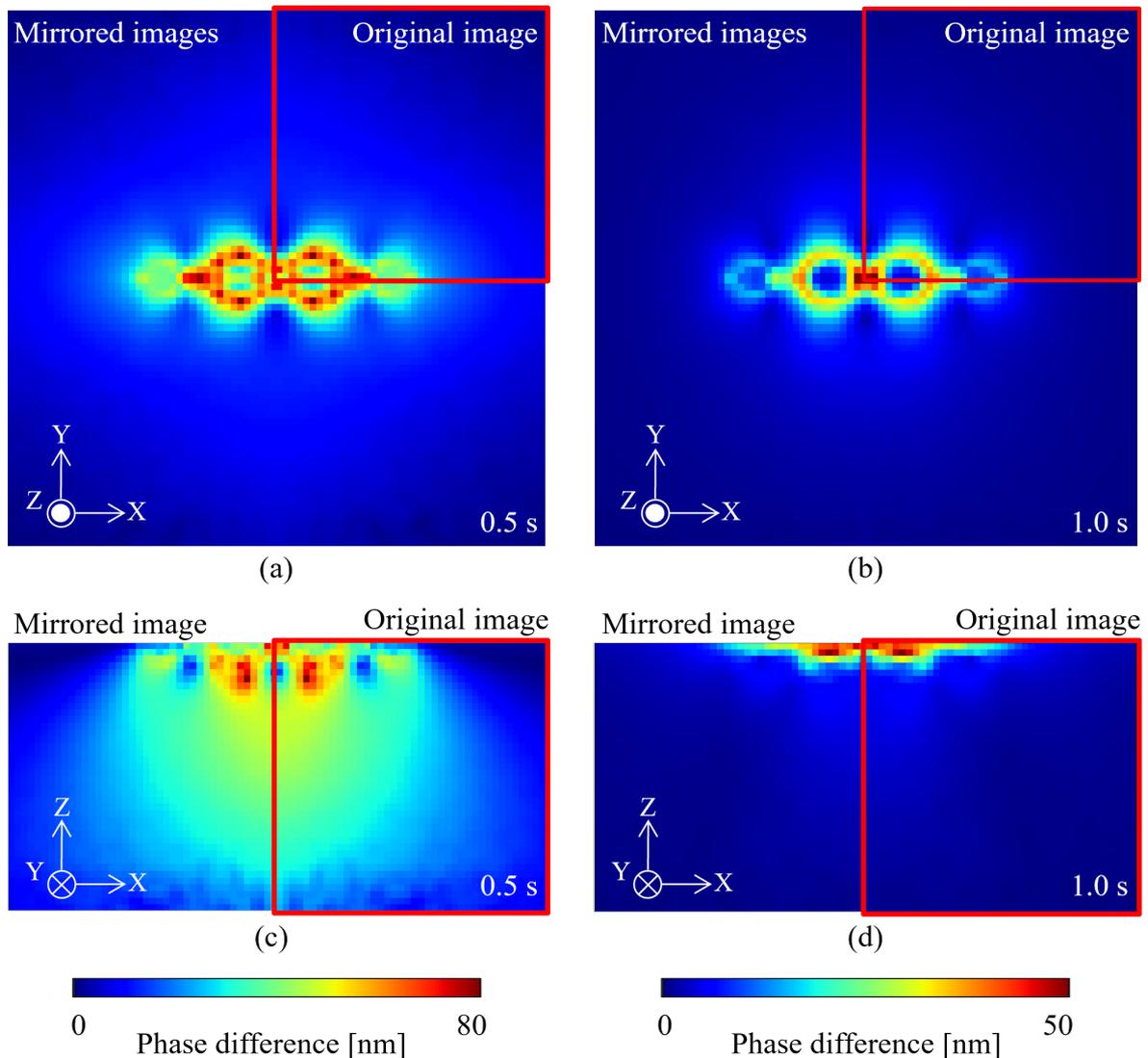


FIGURE 6.5 Procedure of wheel cleaving. At first, indent wheel to glass and scanning on glass surface (scribing). Then, divide glass by applying bending force (breaking).

中にY軸方向から位相差計測を行っている。その結果は、表面と裏面に大きな位相差が生じ、ホイールの直下には図6.5 (c) と類似した大小の位相差が繰り返される領域が生じていた。また、比田井ら^{6,6)}はガラスに楔状圧子を押し付け、位相差計測を行い、負荷時に圧子を中心として同心円状に位相差が分布することを明らかにした。これらのことから、図6.5 (c) に示した負荷時の位相差分布は、ホイール直下に発生する大小の位相差の変動領域と、圧子を押し付けた際に発生する同心円状の位相差が重ねあわされた状態を再現していると考えられ、応力解析の結果と実験結果との整合性を裏付けている。Y軸方向の位相差は、除荷後には図6.5 (d) に示すように表面付近にのみ分布する。これは、観察方向は異なるが4.4節のラテラルクラックを観察した際に撮影した位相差分布と同様の傾向である。

除荷後の位相差像 (図6.5 (b)) から圧痕一つ分の領域を切り出し、繰り返すつなぎ合わせることで、スクライプの観察結果 (図6.3) と同様に圧痕が一系列に並ぶ様子を再現したものを図6.6に示す。図6.3の実験結果と比較すると、圧痕の両側に円形に位相差が分布する様子が一致している。図6.6では圧痕間に大きな位相差が生じているのに対し、図6.3では圧痕間の大部分は位相差が小さな青い領域になっている。これは、実験において、特にリブマークが形成されるような大きな荷重においては圧痕間に欠け

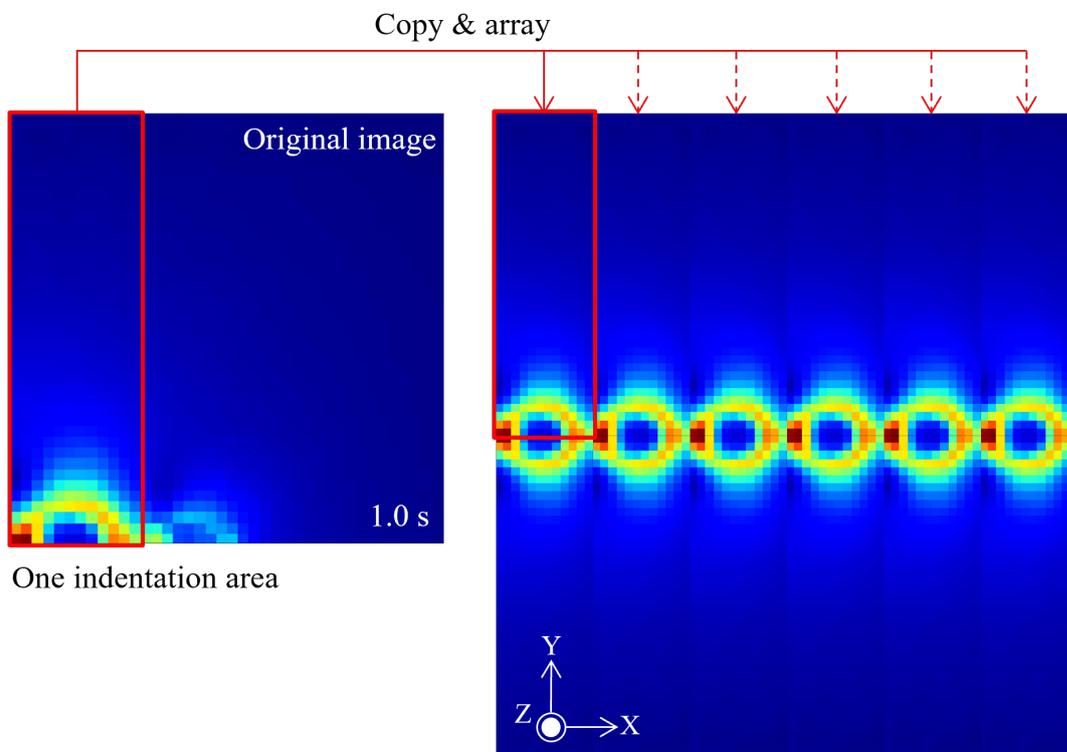


FIGURE 6.6 Extract a part of phase difference image and array like high-speed camera image.

が発生するためであると考えられる。したがって、解析から得られた位相差像(図6.6)は実験結果(図6.3)とよく一致していると考えられ、図6.4の残留応力の分布が実験時の応力分布を再現していると結論付けられる。解析では亀裂の形成を考慮していないにもかかわらず実験と位相差像が一致するという事は、スクライブ時に発生した亀裂の存在により残留応力分布は大きな影響を受けないということを示している。また、ハックルマークが形成する荷重である5 Nとリブマークが形成する20 Nの、ホイール通過直後の位相差像(図6.3 (a, c))は、位相差の値と範囲は荷重の大きな20 Nの方が大きい。分布に大きな違いは見られない。このことから、亀裂形成挙動に大きな違いがあっても残留応力分布に及ぼす影響は小さいことが示唆される。

以下では、位相差の減衰をより詳細に見ていく。押し付け荷重5, 10, 15, 20 Nにおける位相差の減衰率の経時変化を図6.7に示す。同図から分かるように、いずれの場合もホイール通過 ($t = 0$ s) 直後に、位相差は60 %程度まで減少する。15, 20 Nではその後も位相差は時間とともに減少するが、5, 10 Nの場合の変動は小さい。断面には5 Nおよび10 Nではハックルマークが形成され、15 Nおよび20 Nではリブマークが形成されていたことから、断面形態の違いにより位相差の減衰に顕著な変化が現れることが明らかになった。

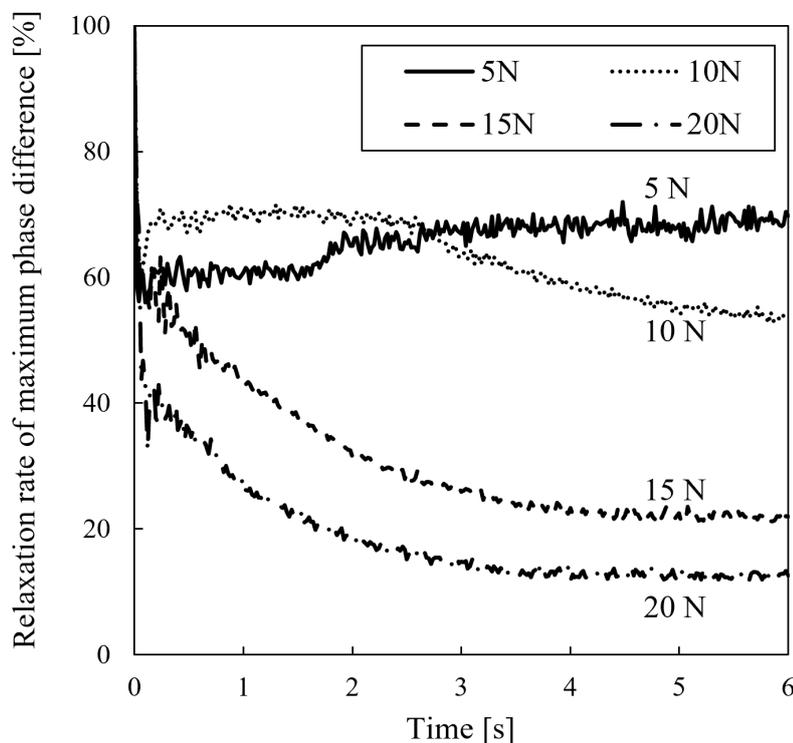


FIGURE 6.7 Time chart of phase difference relaxation. Fractured surfaces of glass substrates scribed at 5 and 10 N exhibit hackle mark. Maximum phase difference of them remain higher (around 60 %) for 5 s. On the other hand, results of 15 and 20 N that exhibits rib mark dramatically decrease in short time about 1 ~ 3 s.

亀裂伸展挙動の観察結果

押し付け荷重が10, 15, 20 Nの場合の垂直亀裂深さの時間変化を図6.8に示す. なお5 Nの場合は, 亀裂深さが小さく, 映像から読み取ることができなかつたため, ここには記載していない. 図6.8より, 押し付け荷重が大きいほど亀裂進展が大きいことが分かる. 15 Nおよび20 Nで $t = 0$ sの亀裂深さが90 μm となっているのは, ホイール直下に起点クラックに端を発する垂直亀裂が生じていることを示している. 10 Nの場合, ホイール通過後0.5 sで約100 μm の深さまで伸展し, その後はほぼ横ばいである. 15 Nの場合には数秒で亀裂は約540 μm の深さまで到達し, それ以降は一定となる. 20 Nでは亀裂伸展速度がさらに早く, $t = 0.5$ sで400 μm の深さに達している. $t = 3$ sでは約560 μm に達し, それ以降伸展が停止している. 図6.7の位相差の減衰を示したグラフと図6.8を比較すると, 亀裂の伸展と位相差の減衰が非常によく一致している.

6.4 考察

前章で述べたように, ハックルマークが形成される場合とリブマークが形成される場合では, ホイール直下での亀裂の挙動が大きく異なる. それに加え, 本章では, 二次クラックの伸展も, ハックルマークよりリブマークの方が早く大きいことが明らか

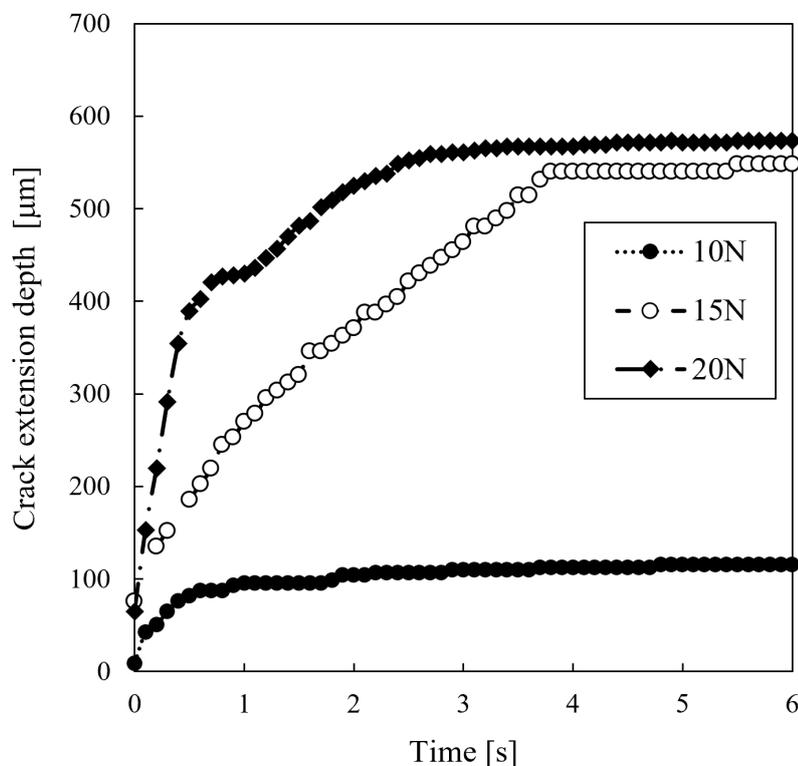


FIGURE 6.8 Time chart of crack extension depth. Extension behavior is different between hackle mark condition (10 N) and rib mark condition (15, 20 N).

になった。この二次クラックの伸展と、表面付近の残留応力の減少も対応することから、二次クラックの伸展に表面付近の残留応力、すなわちひずみエネルギーが消費されていることは明らかである。ここで、二次クラックが伸展しないノーマルホイールを用いて6.3節と同様の光弾性実験を行った結果を図6.9に示す。ブレークレスホイールであるPenettを用いた結果（図6.3）と比較すると、位相差が非常に小さく、残留応力が小さいことが推測される。このことから、ブレークレスホイールの凹凸により楔型の圧痕が断続的に形成された結果、大きな残留応力が表面に残り、二次クラックを伸展させると考えられる。

次に、ハックルマーク形成時に二次クラックの伸展量が小さくなった原因について考察する。ハックルマーク形成時でも、スクライブ後数十分放置すると、亀裂はリブマーク形成時と同程度まで伸展することがわかっている^{6.4)}。したがって、ハックルマーク形成時は、二次クラックの伸展深さが小さくなるというより、亀裂進展速度が著しく遅くなっているといえる。図6.3に示したように、ホイール通過直後（0.5 s）の位相差分布に、ハックルマーク時とリブマーク時で大きな違いがないことから、亀裂形成挙動が異なっても残留応力の分布は大きく変化しないと考えられる。また、ハックルマーク形成時は、時間がかかるものの、リブマーク形成時と同程度の深さまで亀裂が伸展することから、亀裂伸展のエネルギーは十分に蓄えられていると考えられる。さらに言えば、同一荷重においてハックルマークとリブマークが形成された場合（10 NなどのH-R混合領域）でも、ハックルマーク形成時の亀裂伸展は遅く、リブマークの

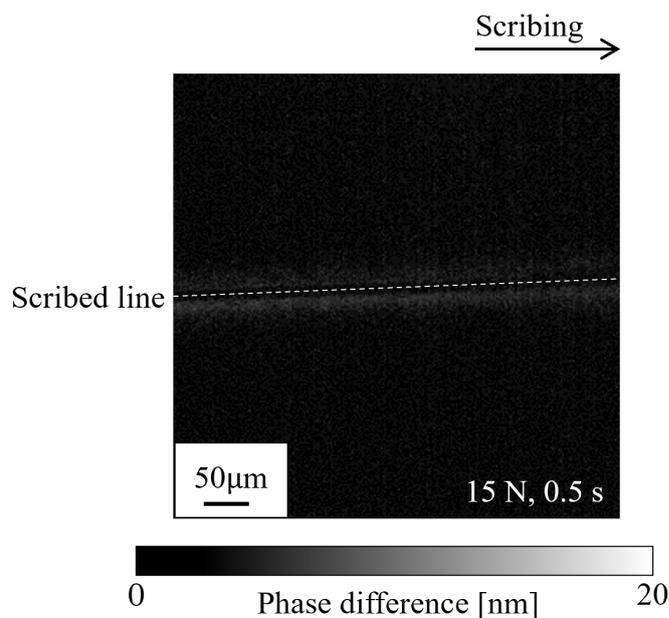


FIGURE 6.9 Phase difference image of normal wheel at 15 N and 0.5 s. Value of phase difference is smaller than result scribed by Penett (Figure 6.3).

亀裂伸展は早い。したがって、ハックルマークおよびリブマークの形成に関わるホイール直下での亀裂形状、すなわち一次クラック領域に原因があると考えられる。5章で述べた通り、ハックルマーク形成時には円形亀裂が不規則な位置に生じ、その結果、割断面の表面付近は段差形状になっている。この段差状の断面が互いにかみ合うことで亀裂の開口が妨げられるため、亀裂伸展が抑制されると考えられる。ただし、これは仮説にすぎないため、今後さらなる調査が必要である。

6.5 結言

本章では、二次クラックの伸展についてメカニズムを解明するため、光弾性法により位相差分布の時間変化を調査し、高速度カメラにより二次クラックの伸展挙動を計測した。その結果、以下の知見を得た。

- (1) スクライブ後、圧痕の両側に円形の位相差が分布する。これは表面付近に発生した残留応力が可視化されたものである。位相差（＝残留応力）は二次クラックの伸展に伴って減少する。したがって、表面付近の残留応力が二次クラック伸展の駆動力である。
- (2) ノーマルホイールでは、スクライブにより生じる残留応力が非常に小さいため、二次クラックが伸展しない。
- (3) ハックルマーク形成時には、二次クラックの伸展速度が著しく遅くなる。ハックルマークに特有の表面付近の段差形状がお互いにかみ合うことで、亀裂の開口が妨げられ、二次クラックの伸展を遅らせている可能性がある。

参考文献

- 6-1) 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, Vol. 53, No. 11 (2009) pp.684–689.
- 6-2) 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, Vol. 59, No.2 (2015) pp.705–710.
- 6-3) 留井直子, 村上健二, 橋本多市, 福西利夫, スクライプによる硬脆材料の亀裂伸展挙動, 砥粒加工学会誌, Vol. 62, No. 9 (2018) pp.473–478.
- 6-4) 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プ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.
- 6-5) Hasegawa R., Matsusaka S., Hidai H., Chiba A., Morita N. and Onuma T., In-process estimation of fracture surface morphology during wheel scribing of a glass sheet by high-speed photoelastic observation, Precision Engineering, Vol. 48 (2017) pp.164–171.
- 6-6) 比田井洋史, 長谷川良平, 堀江勇太, 千葉明, 松坂壮太, 大沼隼志, 森田昇, ガラスへの圧子押込みにおける応力状態とクラック進展過程の動的観察—くさび形圧子押込みによる2次元的な観察—, 精密工学会誌, Vol. 83, No. 4 (2017) pp.381–386.

第7章 光弾性CT法の開発

7.1 緒言

ホイール割断のメカニズム解明および技術向上のためにも、亀裂の形成・伸展に影響を及ぼす内部応力分布の把握は必要不可欠である。応力分布を推定する手法としては、有限要素法による応力解析が用いられることが一般的であり、これまでの研究でもシミュレーションを行ってきた。しかし、ごく短時間で接触、局所大変形、弾塑性変形、亀裂形成を生じるような複雑な現象を、有限要素法により正確に解析することは困難である。本研究では変形を準静的なもののみとし、亀裂形成を考慮しない弾塑性解析にとどまっている。

そこで、実際の現象に即した内部応力分布を推定することのできる、実験的な応力解析手法とシミュレーションを組み合わせる用いることが有効である。実験的な応力解析手法としては、穿孔法⁷⁻¹⁾や局部弛緩法⁷⁻²⁾といったひずみゲージを用いる手法があげられる。これらは材料の一部を切除し、応力の作用により切除部やその周囲が変形する量をひずみゲージで測定することで、応力分布を推定する。非破壊の測定法としては、X線応力測定法⁷⁻³⁾があげられる。X線を材料に入射すると、Braggの回折条件を満たす結晶面で回折する。回折する角度は結晶面の格子間隔に依存することから、応力により格子間隔が変化すると回折光も変化する。この変化を検出することで応力を推定する。同じく非破壊の応力測定法として、本論文でも用いてきた光弾性法がある。前述の通り、光弾性法は透明材料内部を透過した光を測定するため、物体内部の応力状態を反映しているが、定量的な応力推定は2次元弾性応力場に限定される。そのため、実験モデルを2次元に落とし込んだり、2次元応力状態である物体表面の応力を測定して内部応力を推定したりといった手法が用いられることもある^{7-4), 7-5)}。また、熱処理により内部応力状態を固定できる材料を用い、モデルを薄くスライスすることで2次元光弾性法を行う応力凍結法⁷⁻⁶⁾や、シート状の光を入射し、材料内部で散乱した光を観察する散乱光弾性法⁷⁻⁷⁾といった手法により、静的応力分布であれば2次元の光弾性法を繰り返すことで3次元応力分布を推定することができる。しかし、加工や多数の段取りを要するため、どちらの手法も動的な応力分布の推定には適していない。

ホイール割断を含む機械加工において、多くは3次元的な加工が行われ、3次元応力が作用する。しかし、3次元かつ動的な応力分布を推定する実験的手法は、実用化されておらず、シミュレーションに頼らざるを得ないのが現状である。本論文でも光弾性法をホイール割断に対して適用しているが、定性的な評価にとどまっている。加工現象の評価やメカニズムの解明のために、応力解析は必須であり、それを実験的に行え

ることへの需要は大きく、加工技術の高度化に大きく貢献できる。

そこで、動的な3次元応力分布を推定する手法として、光弾性CT法⁷⁻⁸⁾に着目した。光弾性CT法は複数方向から光弾性法を行い、得られた位相差像から測定対象の3次元応力分布を再構成する手法である。この撮影に偏光高速度カメラを用いることで、3次元かつ動的な応力分布を推定できるようになる。光弾性CT法の発想のもととなったX線CTでは、多方向からの透過像にフィルタ処理を施し、重ね合わせることで密度などの分布を再構成する解析的手法と、適当な分布の初期値から反復計算により再構成する逐次近似法が用いられる⁷⁻⁹⁾。しかし、スカラー量を再構成するX線CTとは異なり、光弾性CT法では応力の6成分を再構成するため、上記の手法で再構成することは困難である。X線CTと同様の観察系と再構成ソフトウェアを用いた光弾性CT法の研究⁷⁻¹⁰⁾では、測定から再構成まで、スムーズに再構成処理を行えるが、“位相差というスカラー量”の再構成にとどまり、応力の6成分の再構成には至っていない。また、内部応力と位相差の関係式から逆解析的に再構成を試みる研究⁷⁻¹¹⁾では、既知の応力状態から微小に変化させながら、逐次的に応力分布を再構成する手法（Load incremental approach）が提案されている。ただし、既知の応力状態からスタートするため、適用範囲が限定される。

これに対し、複雑な関係性を推定する回帰関数としてディープニューラルネットワーク（DNN）を用いる手法⁷⁻¹²⁾に着眼した。ディープニューラルネットワークを用いた光弾性CT法では、深層学習により位相差画像と3次元応力分布を直接対応させるモデルを構築することにより、ある一瞬の位相差画像のシリーズから3次元応力分布を直ちに再構成可能となる。またディープニューラルネットワークとの親和性が高い、画像処理技術や知能化技術との融合も期待でき、多種多様な応用、発展の可能性を秘めている。

本章では、新たな応力解析手法として考案したディープニューラルネットワークを用いた光弾性CT法について述べる。2節では光弾性CT法の概要と課題について、3節では深層学習を行う自作プログラムについて述べる。また、実験装置を製作し、実機実験を行った成果を4節および5節に、今後の課題を6節にまとめた。

7.2 光弾性CT法の概要および課題

光弾性CT法の概要図を図7.1に示す。2次元光弾性実験法と同様の光学系を複数用意し、測定対象を取り囲むように配置する。複数の方向から得られた投影像（位相差画像）を撮影し、計算機を用いて元の3次元応力分布を推定する。このとき、撮影に偏光

高速度カメラを用いることで、動的な現象の位相差像を得ることができ、それをもとに動的な3次元応力分布を推定することが可能となる。静的な応力分布であれば、測定対象あるいは観察系を回転させて位相差像を撮影することで、一つの観察系のみで実施可能である。

ディープニューラルネットワークを用いた光弾性CT法の概要図を図7.2に示す。光弾性実験によって得られる投影像と元の3次元応力分布の関係性を、ディープニューラルネットワークに深層学習させる。複数方向から撮影した投影像を入力すると、3次元応力分布を出力するモデルを構築し、教師ありの回帰学習により学習させる。実際に運用するときは、投影画像を学習済みのディープニューラルネットワークモデルに入力すると、ただちに3次元応力分布が出力される。

7.3 深層学習プログラムの開発

DNNモデルの深層学習には、入力と正解となるデータが大量に必要となるが、光弾性実験を実際に行い、それを用意するのは現実的ではない。そこで、深層学習に用い

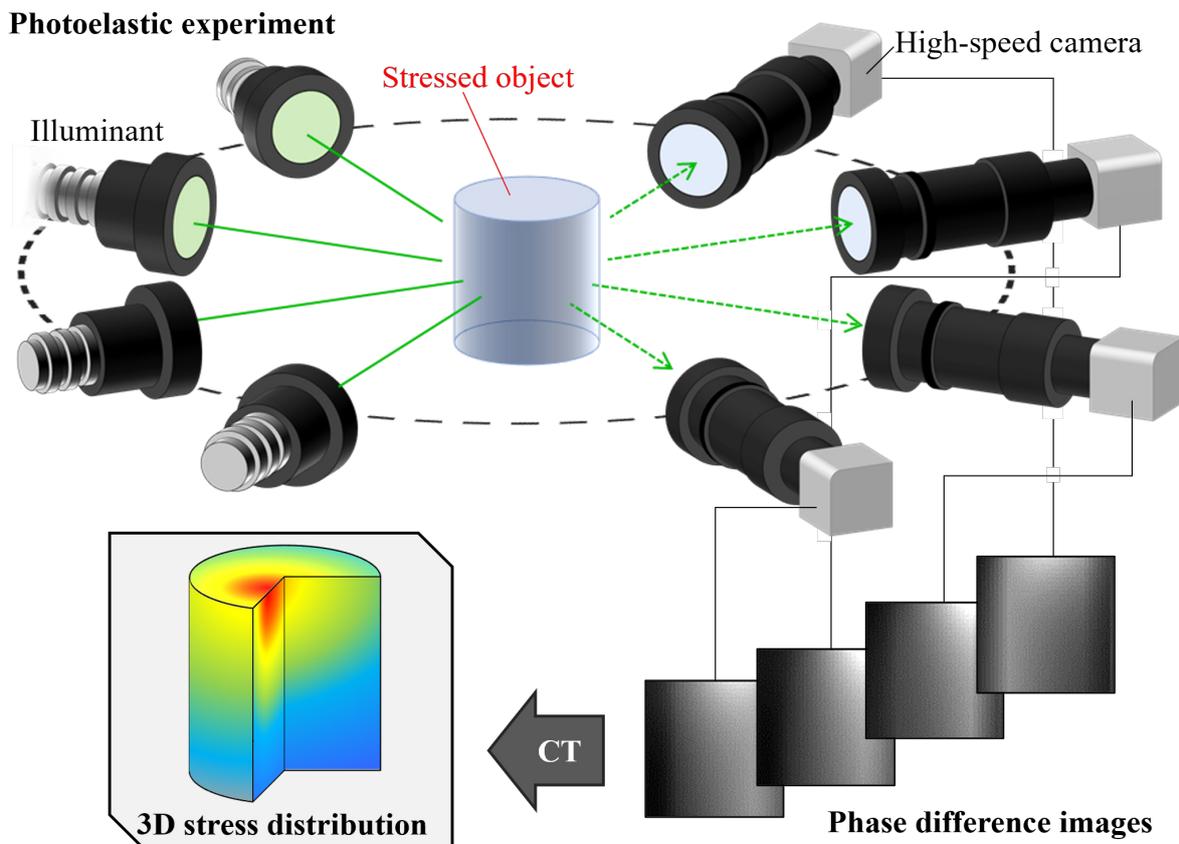


FIGURE 7.1 Schematic illustration of photo-elastic CT method. By using several high-speed cameras, 3D dynamic stress distribution can be estimated.

るデータセットは計算機上で作成することとした。深層学習を行うプログラムの概要図を図7.3に示す。プログラミング言語は深層学習関連のライブラリが充実しているPythonを使用した。

3次元応力分布の計算

まず、有限要素法ソフトMarc Mentatを用いて、3次元応力分布を作成する。物体（変形体）は立方体とし、それぞれの辺について64分割するように、六面体メッシュで等分割した。解析結果はテキストファイルとして出力した。

投影像の光学計算

これ以降はPythonによる処理である。解析結果を読み込み、ジョーンズ計算法⁷⁻¹³により投影像を算出した。光の進行方向をz軸としたとき、x方向とy方向の電場成分は式(7.1)のように表される。

$$\begin{pmatrix} E_x(t) \\ E_y(t) \end{pmatrix} = E_0 \begin{pmatrix} E_{0x} e^{i(kz - \omega t + \phi_x)} \\ E_{0y} e^{i(kz - \omega t + \phi_y)} \end{pmatrix} = E_0 e^{i(kz - \omega t)} \begin{pmatrix} E_{0x} e^{i\phi_x} \\ E_{0y} e^{i\phi_y} \end{pmatrix} \quad (7.1)$$

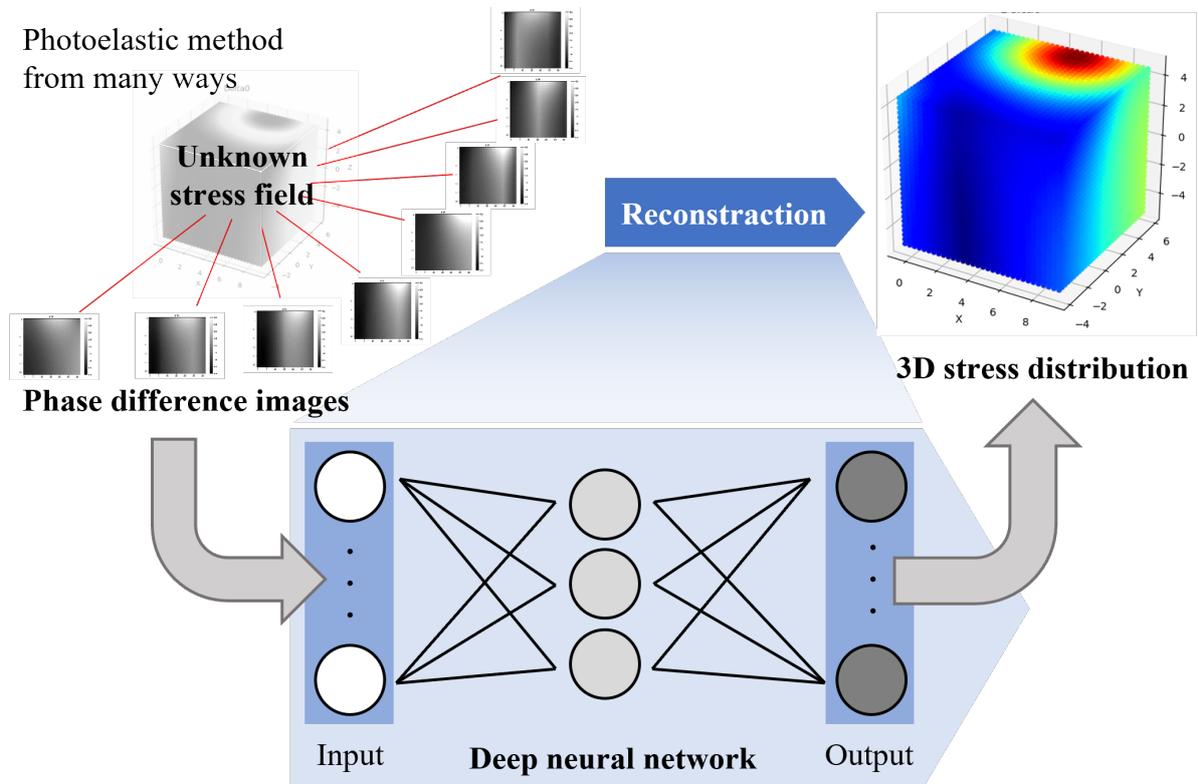


FIGURE 7.2 Estimation of stress distribution by photo-elastic CT method using deep neural network. Stress distribution is outputted via deep neural network using phase difference images as input data.

右辺に現れるベクトルをジョーンズベクトルといい、光の偏光状態を示す。 ϕ_x および ϕ_y は位相の遅れを表す。ジョーンズベクトルは正規化して表示されることが一般的であり、直線偏光であれば $(1 \ 0)^T$ 、円偏光であれば $1/\sqrt{2}(1 \ -i)^T$ と表される。このジョーンズベクトルに左からジョーンズ行列をかけることで、光路上の様々なイベントによる偏光状態の変化を積算してゆく。ジョーンズ行列は 2×2 の行列であり、光学素子ごとに定義されている。本研究の光弾性実験法では、入射光に円偏光を用い、物体内を透過した光は高速カメラの画素上に実装された直線偏光子を介して検出される。したがって入射光 E_{in} は式 (7.2) となる。

$$E_{in} = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 1 \\ -i \end{pmatrix} \quad (7.2)$$

偏光高速カメラには、 0° 、 45° 、 90° 、 135° の4方向の直線偏光子が実装されている。それぞれ偏光子のジョーンズベクトルは式 (7.3) で表される。

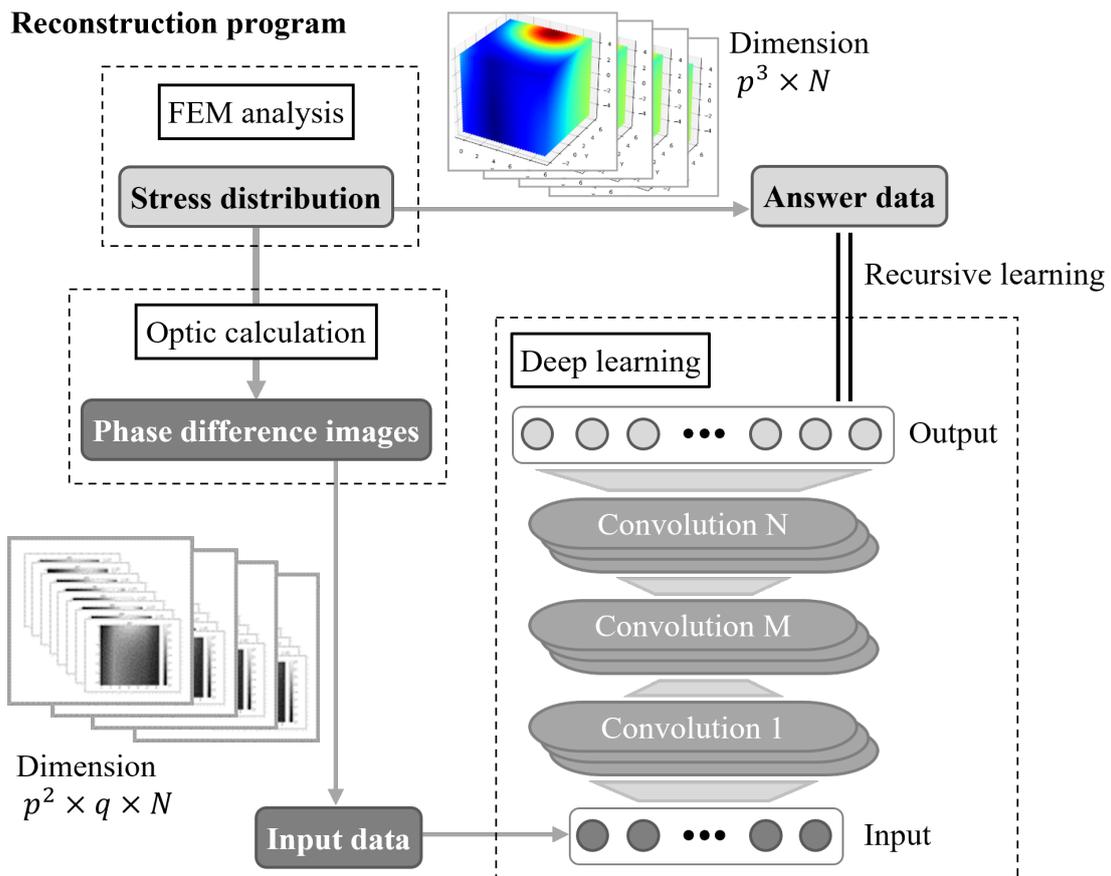


FIGURE 7.3 Framework of DNN reconstruction program. Stress distribution is calculated by FEM analysis. Phase difference images which are generally taken by experiment are prepared by optical calculation from stress distribution for input data of deep neural network. Stress distribution is also used as answer data for recursive learning.

$$P_0 = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix}, \quad P_{45} = \frac{1}{2} \begin{pmatrix} 1 & 1 \\ 1 & 1 \end{pmatrix}, \quad P_{90} = \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}, \quad P_{135} = \frac{1}{2} \begin{pmatrix} 1 & -1 \\ -1 & 1 \end{pmatrix} \quad (7.3)$$

この直線偏光子の角度を α とし、式(7.3)のジョーンズ行列を P_α と表現することとする。光弾性により、応力の作用した物体内部では光の屈折率に異方性が生じ、その結果光の位相が遅れる。その場合、 xy 平面内の応力成分、すなわち σ_x 、 σ_y および τ_{xy} の影響を受ける。関係式は式(2.1)に示したものであり、 σ_x 、 σ_y および τ_{xy} を用いて書き直すと式(7.4)のようになる。

$$\delta = Ct(\sigma_1 - \sigma_2) = Ct\sqrt{(\sigma_x - \sigma_y)^2 - 4\tau_{xy}^2} \quad (7.4)$$

C は光弾性係数、 t は光路長である。六面体の要素に対して垂直方向に光路がとられる場合、各要素における t は一定であるが、要素に対して斜め方向に光路がとられる場合、要素ごとに t は変化する。ジョーンズベクトルでは、位相差 δ を生じさせる波長板のような素子は式(7.5)のように定義される。

$$D_\delta = \begin{pmatrix} e^{-i\delta/2} & 0 \\ 0 & e^{i\delta/2} \end{pmatrix} \quad (7.5)$$

本章における光学計算では、光路上にある要素は光に位相差を生じさせる波長板として考える。光路上に n 個の要素が存在するとし、通過する順番に番号をつけ D_n のように表記すると、測定対象を通過した際のジョーンズ行列 D は式(7.6)のようになる。

$$D = D_n D_{n-1} \cdots D_2 D_1 \quad (7.6)$$

したがって、測定対象および直線偏光子を通過してカメラの検出器に到達するジョーンズベクトル E_{out} は、式(7.7)のように表される。

$$E_{out} = D P_\alpha E_{in} \quad (7.7)$$

ただし、 E_{out} は直線偏光子の角度 α によって4通りの値をとる。それぞれを $E_{out \alpha}$ と表記する。光の強度は、ジョーンズベクトルの各成分の二乗和の平方根で算出される。各検出器における光強度 I_α は式(7.8)のように表せる。

$$I_\alpha = \sqrt{(E_{out \alpha x})^2 + (E_{out \alpha y})^2} \quad (7.8)$$

得られた4方向の偏光成分の光強度から、位相差 Δ および主軸方位 Φ を式(7.9)およ

び式 (7.10) のように算出する.

$$\Delta = \sin^{-1} \frac{\sqrt{(I_{90} - I_0)^2 + (I_{45} - I_{135})^2}}{I_{in}} \quad (7.9)$$

$$\Phi = \frac{1}{2} \tan^{-1} \frac{(I_{90} - I_0)}{(I_{45} - I_{135})} \quad (7.10)$$

DNNモデルの構築

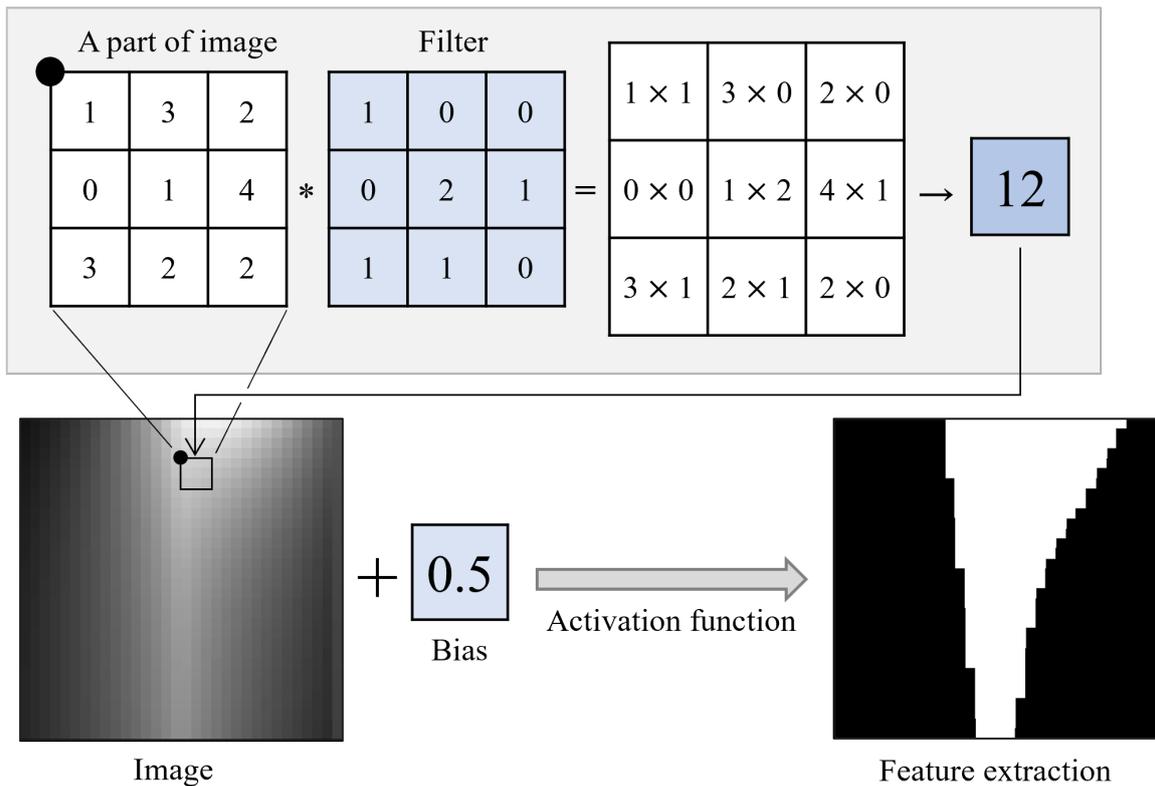
ニューラルネットワークの構築および学習には、PythonのライブラリであるTensorflowを利用した。ニューラルネットワークは、入力に対して様々な演算処理（“層”と呼称する）を施し、最終的に任意の次元の出力を得る。演算を行う層の総称を中間層という。中間層には膨大な“変数”があり、出力が正解となる教師データに近づくように変数を更新していくことを“学習”と呼ぶ。学習が適切に行われると、モデルは入力に対して適切な出力を応答するようになる。光弾性CT法であれば、投影像を入力すると3次元応力分布が出力されるようになる。本研究では、一般的な画像処理で用いられる畳み込み層、プーリング層、ドロップアウト層および全結合層を組み合わせるニューラルネットワークモデルを構築した。図7.4に各層の処理を模式的に示す。畳み込み層では、画像に対して任意のサイズ ($l \times m$) の行列（フィルタ）を走査し、画像とフィルタの対応する位置の値の積を足し合わせてスカラー値を算出する処理を行う。画像の j 行 l 列を基点とした場合の畳み込み処理を数式で表現すると式 (7.11) のようになる。

$$\sigma \left(b + \sum_{l=0}^l \sum_{m=0}^m w_{l,m} x_{j+l,k+m} \right) \quad (7.11)$$

$x_{u,v}$ は画像の u 行 v 列の値を表し、 $w_{l,m}$ はフィルタにおける l 行 m 列の値である。 b はバイアスと呼ばれ、スカラー値である。 σ は活性化関数を表し、括弧内の値に応じて返す値を制御する。 w および b が変数であり、チューニングされる。プーリング層では、任意の範囲内の値から最大値や平均値、中央値といったスカラー値を算出し、画像データを縮小する機能がある。全結合層は、次のノード数を設定し、直前の全てのノードと次の全てのノードを結合する層である。数学的には、直前のノード数を n 、次のノード数を m としたとき、 m 行 \times n 列の行列と n 次元ベクトル（直前のノード）の内積に相当する（式 (7.12)）。

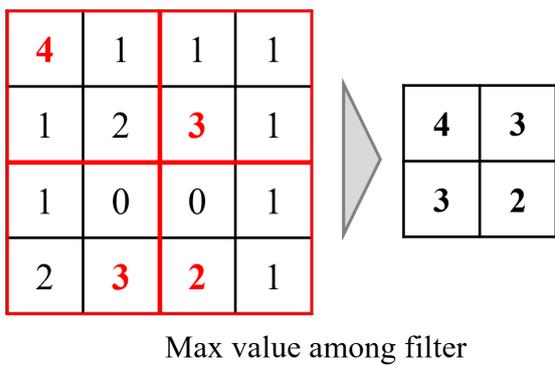
$$\begin{pmatrix} y_1 \\ \vdots \\ y_m \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} k_{11} & \cdots & k_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ k_{m1} & \cdots & k_{mn} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_1 \\ \vdots \\ x_n \end{pmatrix} \quad (7.12)$$

Convolution layer



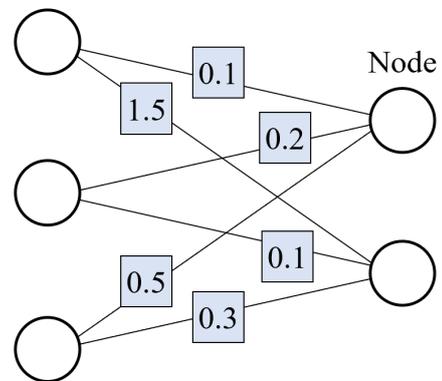
(a)

Pooling layer



(b)

Fully connected layer



(c)

FIGURE 7.4 Schematic illustration of layers of neural network. (a) convolution, (b) Pooling and (c) Fully connected layer.

構築したニューラルネットワークモデルの模式図を図7.5に示す。3層の畳み込み層，2層のプーリング層，2層の全結合層を組み合わせモデルを構築した。ドロップアウト層は，過学習を防ぐために有効な層であるとされる。過学習とは，学習に用いたデータに対して過剰に適応した結果，学習範囲外のデータに対する汎用性を失うことを指す。ドロップアウト層では一定の割合で変数の更新を無効にすることで，学習データに対する過学習を抑制する。

Experimental (Calculation) result

Phase difference images

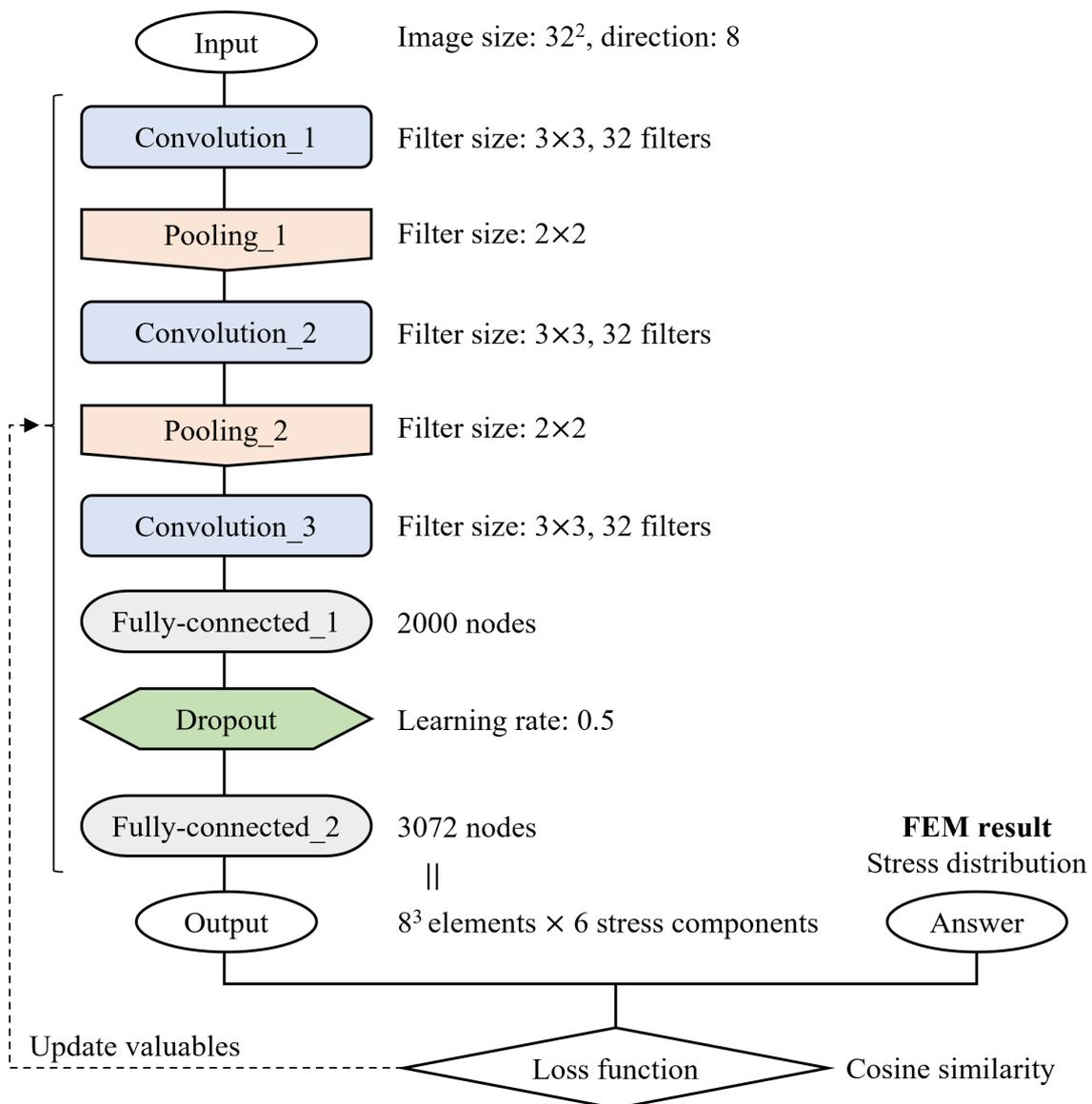


FIGURE 7.5 Flowchart of neural network. 3 convolution layers, 2 pooling layers, 2 Fully-connected layers and a dropout layer are concatenated. Cosine similarity is used as a loss function.

推定結果の評価手法

深層学習は、ニューラルネットワークモデルの出力と、正解となるデータの差（距離）、すなわち損失関数を0に近づけるように変数を更新していく。このとき、出力の次元が大きい場合、様々な距離の取り方が可能となる。最も一般的な距離はユークリッド距離と呼ばれるもので、対応する成分同士の差を、二乗して総和を取る。2次元、3次元空間では2点間の直線距離に相当する。

光弾性CT法では、3次元応力分布を出力とし、その分布の傾向が一致していることが重要である。そこで、コサイン類似度という指標を損失関数として用いることとした。コサイン類似度とは、多次元量がどれだけ似ているかという類似度を示す指標である。ベクトル \boldsymbol{v}_1 と \boldsymbol{v}_2 のコサイン類似度は、式(7.13)のように表される。

$$s_{cos} = \frac{\boldsymbol{v}_1 \cdot \boldsymbol{v}_2}{|\boldsymbol{v}_1| |\boldsymbol{v}_2|} \quad (-1 < s_{cos} < 1) \quad (7.13)$$

3次元空間ではベクトル同士の内積（＝コサイン）に相当し、ベクトルの向きが近いほど1に近い値をとる。しかし、損失関数として使用するためには、両ベクトルが完全に一致したときに0の値をとる必要があるため、式(7.14)のように変形して使用した。

$$S_{cos} = \left| \frac{s_{cos} - 1}{2} \right| \quad (0 < S_{cos} < 1) \quad (7.14)$$

開発したプログラムの動作試験

①有限要素法による応力解析

モデルは一辺20 mmの立方体とし、一辺を64要素に分割した。底面の自由度を完全拘束し、集中荷重を数か所に設定して解析を行った。

②データセットの作成

有限要素法の解析結果として、各節点の応力値を読み込む。一辺64要素の立方体から、一辺16要素の立方体を抽出し、一つのデータとした。このデータをもとの大きな立方体の様々な位置から抽出することで、最大で $(64 - 16)^3 = 157464$ 個のデータを用意することができる。ここでは、データ同士が類似してしまうことを避けるため、ある程度間隔を空けて抽出を行い、4096個のデータセットを用意した。それぞれのデータに対してジョーンズ計算法による光学計算を行い、投影像を算出した。投影方向は 180° の範囲で8方向とした。

③深層学習

計算した投影図をニューラルネットワークモデルに入力し、投影図の算出に用いた

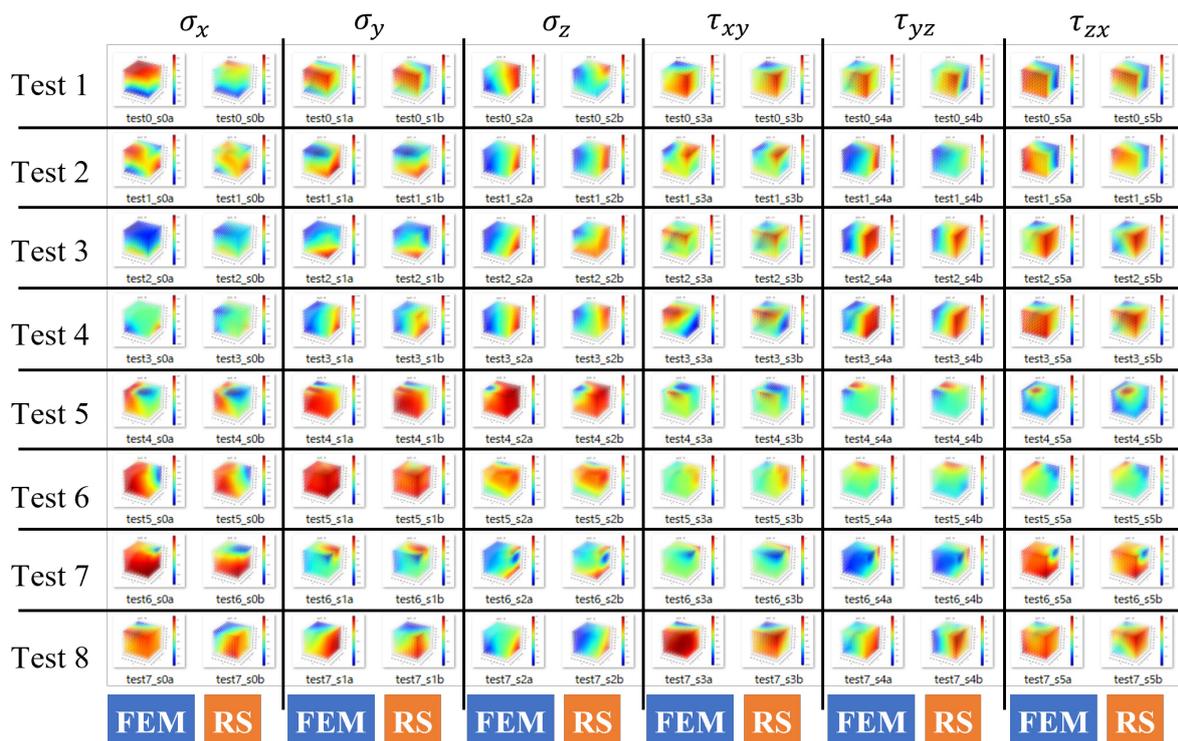
応力分布を正解として学習を行わせた。損失関数にはコサイン類似度を用い、損失関数の値が収束した時点で学習を終了するように設定した。

④学習済みモデルの評価

学習が終了したモデルに対し、適当な入力を与えて出力（応力分布）の妥当性を検証した。学習に用いたデータセットの中からランダムに8個のデータを選び、ニューラルネットワークに入力した。出力された応力分布を、元の応力分布と比較した結果を図7.6に示す。元の応力と再構成された応力で一致しない部分も一部あるが、大部分で元の応力に近い応力分布が再構成できている。

7.4 実験装置の製作

光弾性CT法の実機による検証実験を行うため、実験装置を製作した。実験装置の模式図を図7.7に示す。測定対象を回転させながら、位相差計測を行う。実験では、立方体のガラスを用いる。そのため、ガラスを回転させるとガラス界面で屈折および反射が生じ、位相差計測に支障をきたす。そこで、水槽の中に屈折率がガラスと同じ液体



※FEM: Stress distribution by Finite Element Method, RS: Reconstructed Stress distribution

FIGURE 7.6 Results of stress reconstruction by neural network using FEM stress distributions and phase difference images calculated from them. Validation test carried out for 8 patterns of stress distribution. Almost all components of reconstructed stress correspond to FEM stress (Answer data).

を満たし，その中でガラス試料を回転させることで界面影響を除去することにした．ガラス試料は一辺20 mmの立方体のホウ珪酸ガラス（SCHOTT社，TEMPAX）を用いた．物性値を表7.1に示す．屈折率は1.4程度である．立方体の側面4面を研磨した試料を使用した．高屈折率の液体として，ヨウ化ナトリウム（NaI）水溶液を用いた．ヨウ化ナトリウム水溶液は，ヨウ化ナトリウムの濃度により，屈折率を最大で1.5まで向上させることができる．ヨウ化ナトリウムの濃度を増加させながら，ガラスを適宜水溶液に沈め，最も水溶液内でガラスが透明になるように，水溶液の濃度を調整した．その結果，本研究で用いたヨウ化ナトリウム水溶液の濃度は64.1%であった．ガラス試

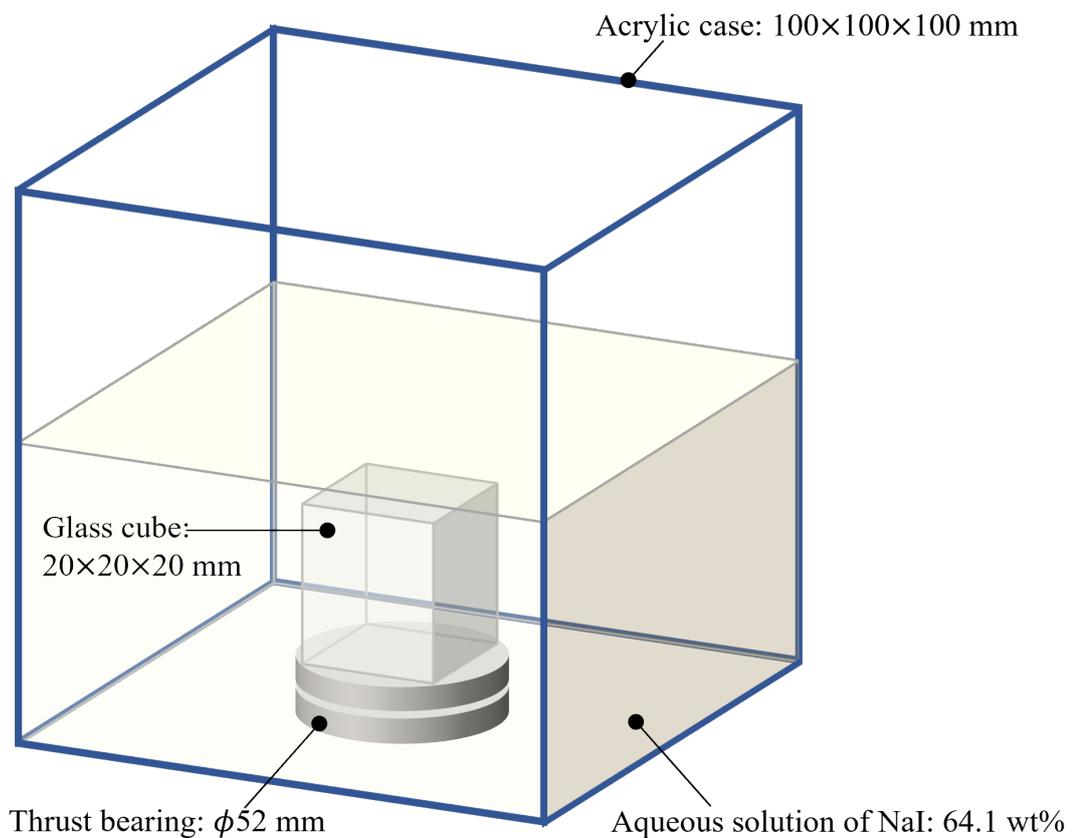


FIGURE 7.7 Schematic illustration of experimental equipment of photoelastic CT method. Refraction index of aqueous solution of NaI is adjusted as same as that of glass cube. Glass cube put on thrust bearing to rotate arbitrary angle.

TABLE 7.1 Mechanical and optical properties of TEMPAX.

Density	[g/cm³]	2.23
Young's modulus	[GPa]	64
Poisson's ratio	[-]	0.2
Refractive index (546.1 nm)	[-]	1.47311
Birefringence constant	[(nm/cm)/(kg/mm²)]	392

料を設置する回転試料台には直径52 mmのベアリングを用いて、手動でベアリングおよび試料台を回転させた。なお、本装置には外力を負荷する機構は設計していないため、ガラスに何らかの形で応力分布を生じさせる必要がある。

7.5 実機による検証実験

作製した実験装置を用いて、検証実験を行った。実験系の写真を図7.8に示す。応力分布を生じさせるため、ガラス試料の上端を、M4のボルトとナットで締め付けた(図7.8 (a))。図7.8 (b) は水槽にヨウ化ナトリウム水溶液を注いだ状態の写真である。ガラスとヨウ化ナトリウム水溶液の屈折率が一致したため、ガラスの境界が不可視化されていることがわかる。水槽の前後に、光源と高速度カメラを設置した。

まず、実験系と同様の条件において応力解析を行い、その応力分布を用いてニューラルネットワークの深層学習を実施した。応力解析のモデルを図7.9に示す。ワッシャを模した剛体平面に、1 μm の強制変位を設定した(図7.9 (a))。図7.9 (b)には、位相差計測を行う8方向からモデルを見た図を示す。各図の白枠で示した4 mm四方の範囲が実験での観察範囲である。ガラス試料の中央の、上端から4 mmの位置を観察範囲とした。したがって、応力分布を推定する領域は、XY平面における試料中央、表面から4 mmの深さにある一辺4 mmの立方体領域である。図7.9に示した有限要素法の解析

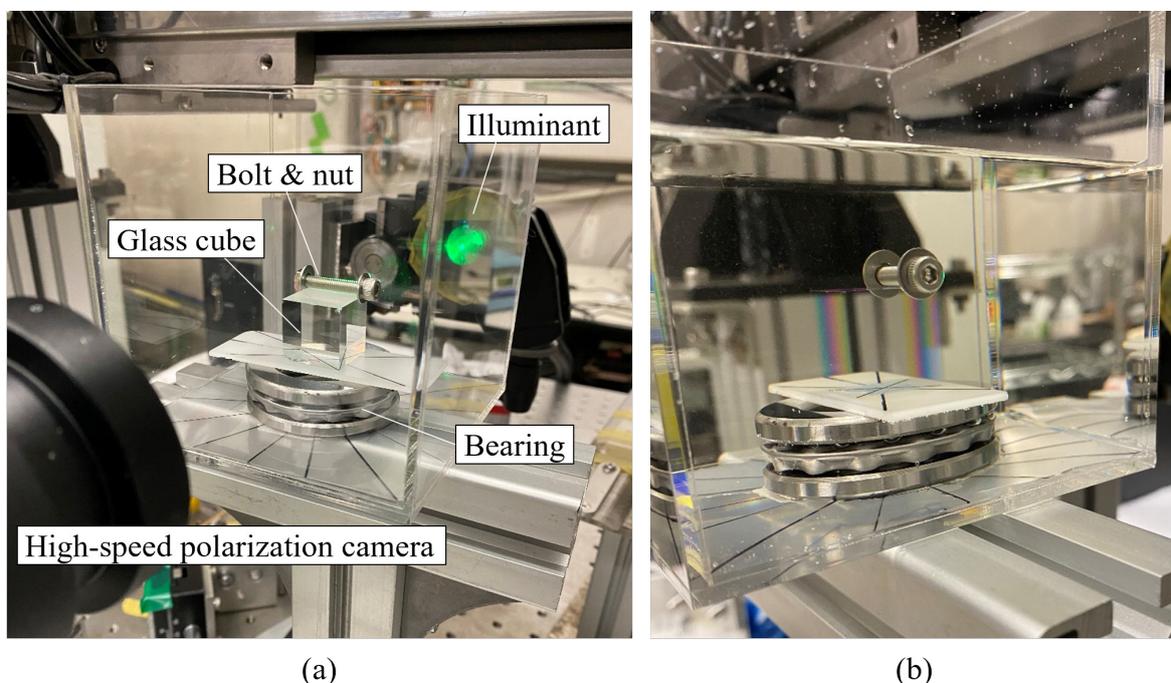


FIGURE 7.8 Photo image of experimental equipment. Stress field is generated by crumpling upper edge of glass with bolt and nut (a). Glass become transparent in NaI aqueous solution (b).

結果を用いて学習を行ったモデルについて、7.3.5項と同様の手法で評価した結果を図7.10に示す。プログラムの動作試験時と同様、大部分で一致した結果を得られた。コサイン類似度の平均は0.326であった。

実際の光弾性実験において、8方向から位相差計測を行った結果を図7.11に示す。67.5° ~ 112.5°の位相差像は、位相差の値が全体的に小さく、計測にミスが生じている

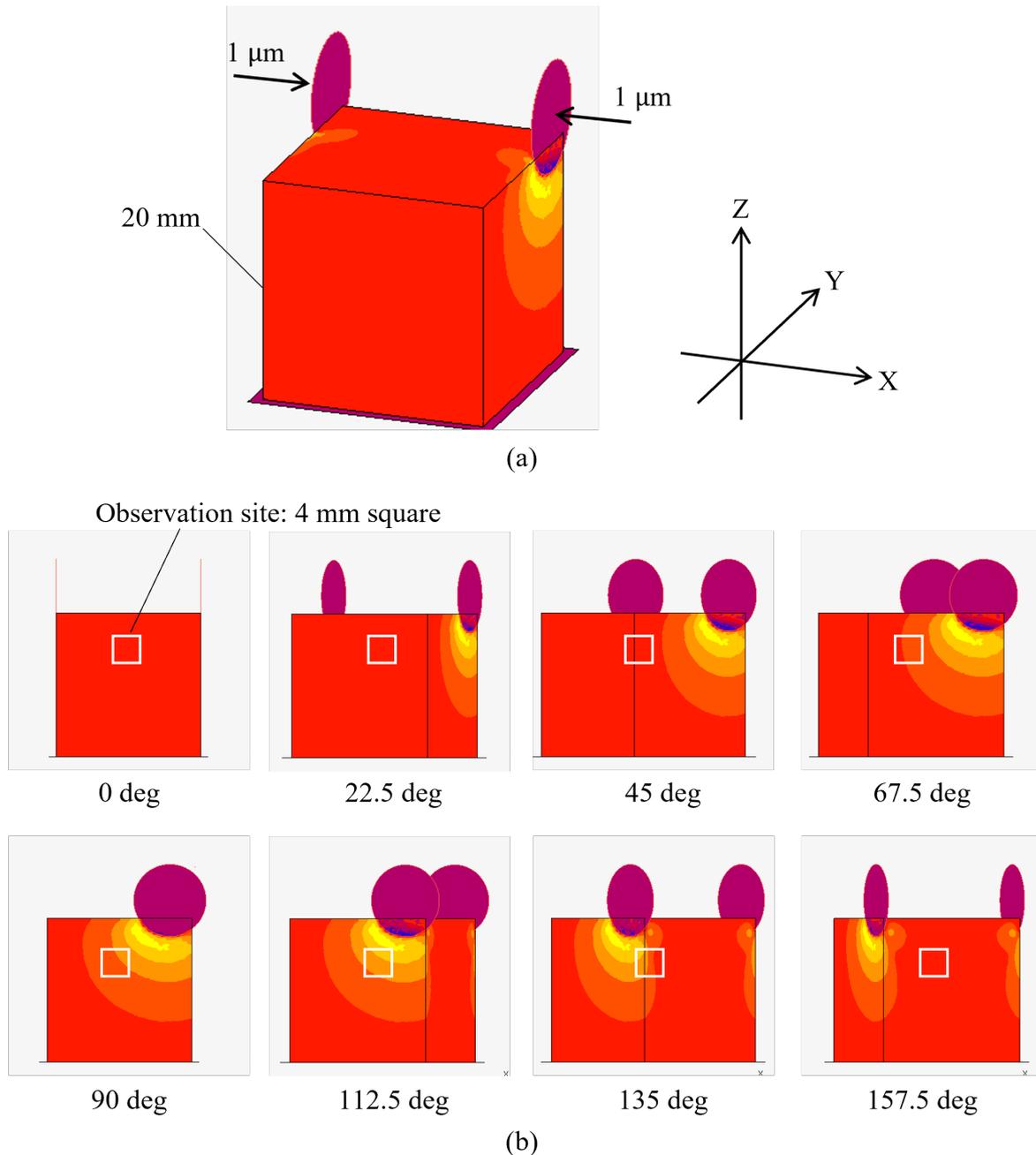
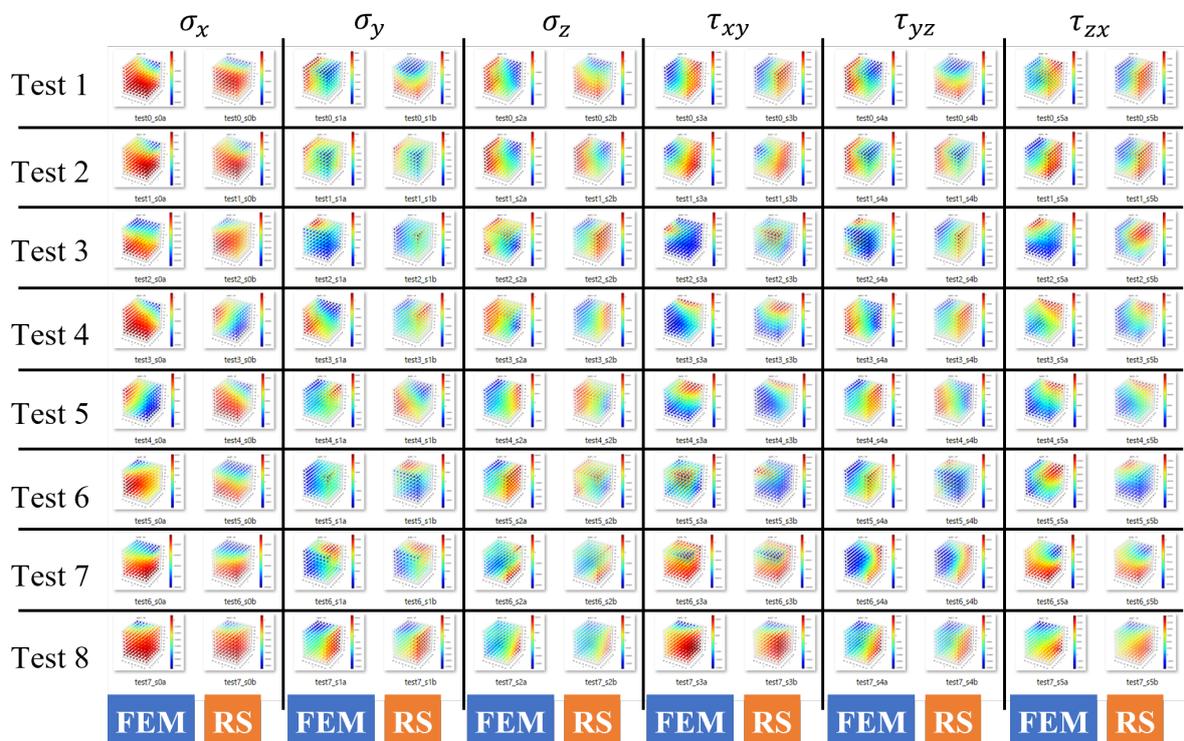


FIGURE 7.9 FEM analysis model (a) and observation site from 8 direction (b). Bolt and nut are expressed as circular surface. Forced displacement of 1 μm set to the surfaces. Observation site in experiment is located at center of sample in X direction and 4 mm depth from upper surface.

可能性も考えられる。他の角度からの位相差像は、角度に応じて位相差分布が変化しており、ニューラルネットワークへの入力データとして利用可能な位相差像が得られた。この位相差像を学習済みのディープニューラルネットワークモデルに入力し、3次元応力分布を出力した。有限要素法によって得られた応力分布と、再構成された応力分布を比較した結果を図7.12に示す。 σ_x のみ傾向が一致したが、他の成分では一致しなかった。コサイン類似度の平均は0.665であった。モデルの構築および学習が不十分だった、実験結果の精度が不十分であった等の原因が考えられ、今後改善が必要である。

7.6 今後の課題

まず、ディープニューラルネットワークの最適化を進め、推定システムの精度を向上させる必要がある。今回の検証では、学習に用いたデータと同じデータの一部を用いてテストを行い、それでも推定結果を完全に一致させることはできていない。本来、ディープニューラルネットワークを用いた推定手法は、学習範囲外のデータに対する適応（汎化）が強みである。学習範囲内のデータでさえ推定できない現状は、応力解



※FEM: Stress distribution by Finite Element Method, RS: Reconstructed Stress distribution

FIGURE 7.10 Validation test of learned neural network model using FEM data indicated in Figure 7.9. Many components of reconstructed stress correspond to FEM results.

析手法として不十分である。ニューラルネットワークを最適化し、また質の良い学習用データを大量に用意することで、モデルを汎化させることが求められる。

また、実機実験においては、多方向からの位相差測定が精度よく行えなかった。現在、試料の設置や回転は手作業で行っており、正確な制御ができていない。また、光学系にも改善の余地がある。より正確な実験が行えるよう、実験装置の見直しが必要である。実験装置の改善案を図7.13に示す。まず、(1) 任意の荷重を負荷できる機構を実装する。回転を制御するため、(2) 自動回転ステージを用いる。その際、荷重負

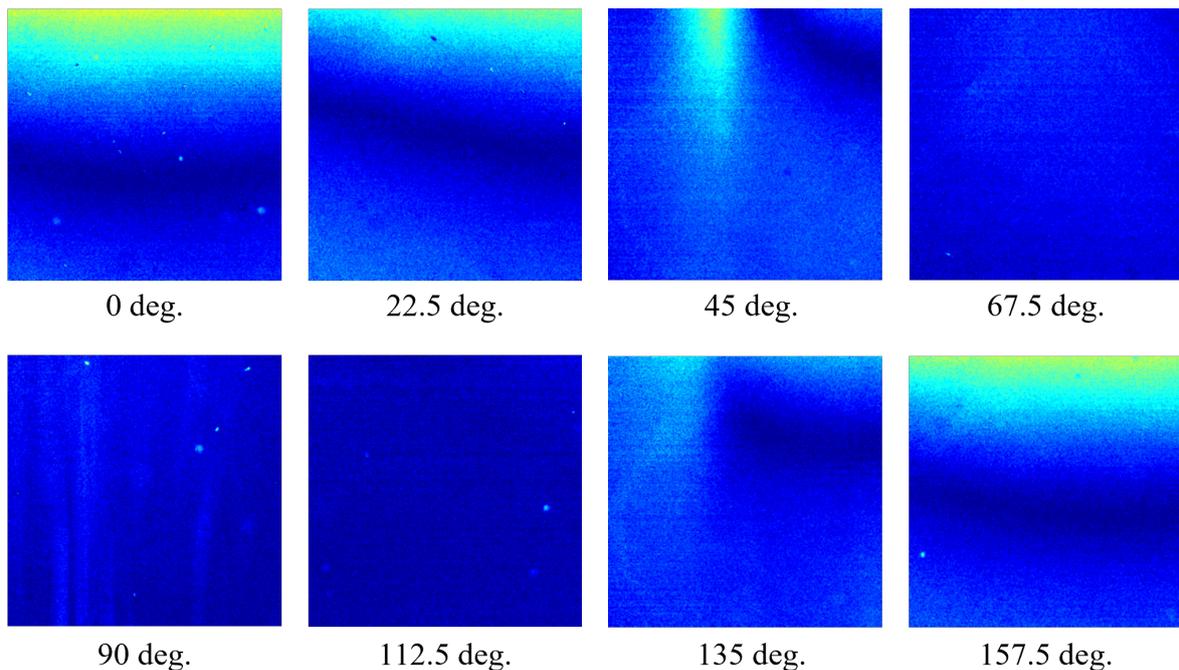


FIGURE 7.11 Phase difference images taken by experiment. Images vary depending on observing direction.

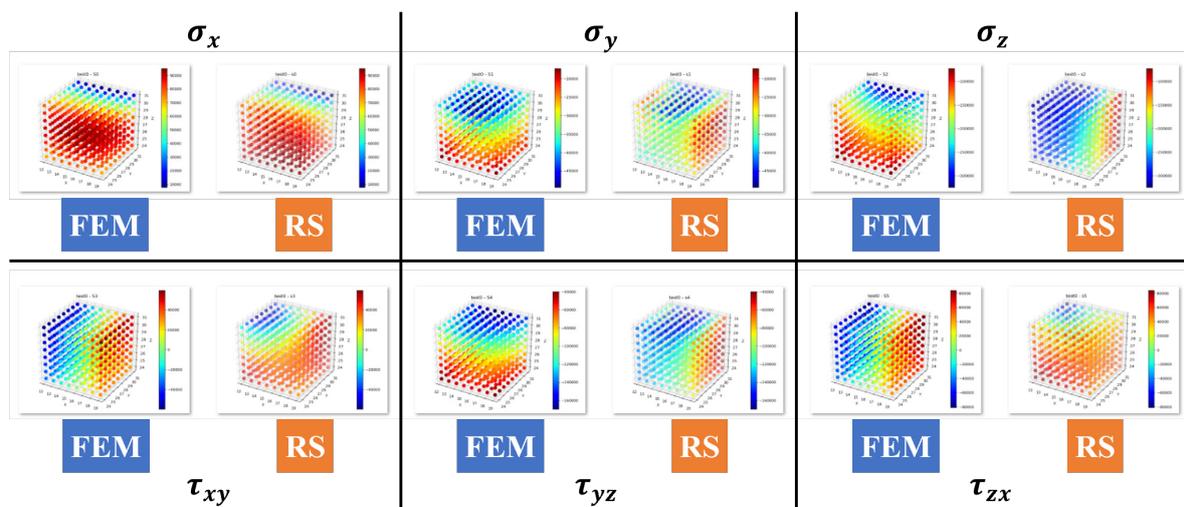


FIGURE 7.12 Results of reconstructed stress distribution by photoelastic CT method using neural network.

荷機構と同時に回転させる必要があるため、装置の上下に2つの回転ステージを設置し、同期して制御する。また、試料中心を回転中心と合わせる調心機構として、(3) 2軸ステージを取り付ける。水槽外から自動ステージの回転を伝達するため、(4) 非接触式カップリングを用いる。これらの改良を加えることで、実験の精度を向上させる。

7.7 結言

本章では、ディープニューラルネットワークを用いた光弾性CT法の開発について、その概要と進捗状況について記述した。まず、ディープニューラルネットワークモデルを構築するプログラムを開発した。有限要素法による解析結果を利用して、深層学習およびシミュレーションを行った結果、位相差像から元の3次元応力分布を推定できる可能性を示した。また、実験時において問題となる、観察系の回転による影響を解消する実験装置および手法を考案し、実験手順を具体化した。作製した実験装置を用いた検証実験の結果、一部の応力成分について分布を再構成することができ、光弾性CT法による3次元応力分布推定の可能性を示した。一方で推定精度や汎化能力などに関する課題も明らかになった。今後、実験手法および推定システムの精度向上を進める必要がある。

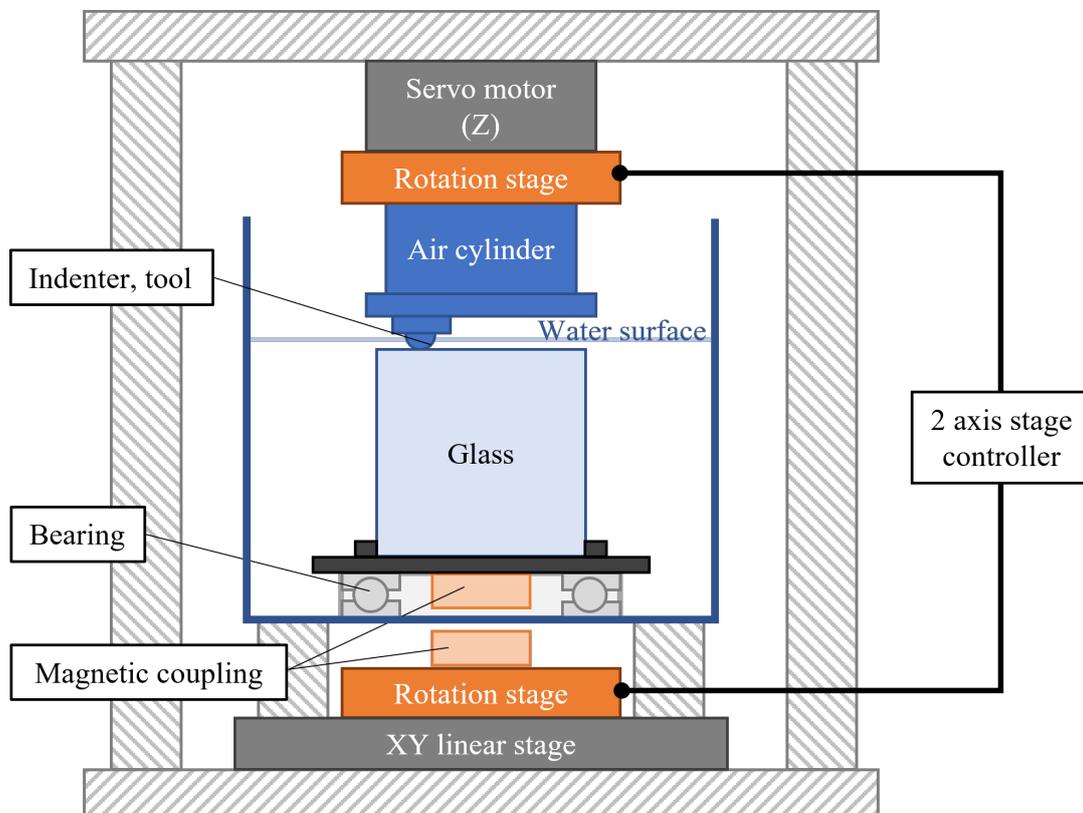


FIGURE 7.13 Improvement idea of experimental equipment.

参考文献

- 7-1) 河合真二, 永井卓也, 岡野成威, 深穴穿孔法, 溶接学会誌, Vol. 88, No. 6 (2019) pp.485–488.
- 7-2) 岩田光正, 小川潤一郎, 新しい残留応力測定技術 (I), 溶接学会誌, Vol. 64, No. 6 (1995) pp. 432–436.
- 7-3) 田中啓介, 2次元検出器を用いた $\cos\alpha$ 法によるX線応力測定 その1 測定の基礎, 材料, Vol. 66, No. 7 (2017) pp.470–478.
- 7-4) 黒崎公絵, 右近晋一, 伊東俊光, 自見忠, 平安亮造, 福田重久, 荷重下における支台歯およびその支持組織の応力分布について (2次元光弾性実験), 日本補綴歯科学会雑誌, Vol. 17, No. 4 (1973) pp.394–400.
- 7-5) 柴原正雄, 上田哲司, 動光弾性被膜と超高速カメラによる衝撃曲げ挙動の解析, 光弾性学論文集, Vol. 5, No. 1 (1984) pp.15–24.
- 7-6) 前崎信孝, 江角務, 蜂谷將史, 応力凍結法による股関節症治療の術後経過に関する実験的検討, 日本機械学会論文集 (A編), Vol. 71, No. 703 (2005) pp.500–506.
- 7-7) 湯浅亀一, 岩崎光雄, 散乱光法による光弾性応力の解析, 日本機械学会論文集, Vol. 21, No. 111 (1955) pp.804–811.
- 7-8) 梅崎栄作, 光弾性法による応力分布測定技術の現状と展望, 精密工学会誌, Vol. 79, No. 7 (2013) pp.607–611.
- 7-9) 浦部洋史, 森川琴子, 尾川浩一, SPECTにおける逐次近似的画像再構成法の比較, MEDICAL IMAGING TECHNOLOGY, Vol. 18, No. 1 (2000) pp.84–92.
- 7-10) 磯部浩巳, 原圭祐, 超音波振動研削によるガラス加工の特性改善—第一報 光弾性法による内部応力分布の測定とCTによる再構成—, 2017年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集 (2017) pp.7–8.
- 7-11) Wijerathne M. L. L., Oguni K. and Hori M., Stress field tomography based on 3D photoelasticity, Journal of the Mechanics and Physics of Solids, Vol. 56 (2008) pp.1065–1085.
- 7-12) 小泉悠馬, 深層学習に基づく音源強調と位相制御, 日本音響学会誌, Vol. 75, No. 3 (2019) pp.156–163.
- 7-13) Ramesh K., Digital Photoelasticity - Advanced Techniques and Applications, Springer-Verlag Berlin Heidelberg GmbH (1999).

第8章 結 論

本論文では、まずホイール割断の加工メカニズムの解明と光弾性CT法の開発を目的として研究を行ってきた。まずは3章以降の各章の内容を以下にまとめる。

3章 スクライブ中の亀裂形成挙動

まず、スクライブ中の亀裂形成・成長挙動を明らかにするため、側面と裏面の2方向から高速度カメラを用いて観察した。その結果、垂直亀裂と表面亀裂が可視化され、ビッカース圧子を用いた先行研究にならい、それぞれメディアンクラックおよびラディアルクラックと断定した。メディアンクラックの挙動は、割断面にハックルマークが現れる条件とリブマークが現れる条件で大きく異なることが明らかになった。ハックルマーク形成条件ではホイール凸部の下方に円形亀裂が形成し、それがホイール通過後に各々成長する様子が観察された。リブマーク形成条件では、ホイール押し付け時に円形亀裂同士が結合して楕円形の起点クラックを形成し、スクライブに伴って起点クラックが前方へ伸展する様子が観察された。スクライブの途中で起点クラックが形成され、挙動が変化した場合には、割断面もそれに対応してハックルマークからリブマークに変化した結果から、起点クラックの形成の有無がリブマークとハックルマークを分ける支配要因であることが明らかになった。

4章 各亀裂の形成メカニズム

3章の結果と先行研究から、ホイール割断におけるスクライブ中には、主としてメディアンクラック、ラディアルクラックおよびラテラルクラックが発生することがわかった。そこで、応力解析の結果と亀裂形成挙動の観察結果から、それぞれの亀裂が形成するメカニズムについて考察した。有限要素法により得られた応力分布より、亀裂が形成する位置には、対応する開口方向の垂直応力が作用していることが明らかになった。これらの応力分布は、ホイールの形状、特に凹部の寸法とその接触形態に依存して変化し、それに対応するように亀裂形成挙動が変化することが示された。また、ラテラルクラックが発生することでメディアンクラックの伸展が抑制されることが明らかになった。一方で、表面に発生する亀裂には、羽クラックや斜めクラックといった、ラディアルクラックとして説明できない亀裂の存在も確認され、これらの形成メカニズムについては今後の課題である。

5章 割断面形成メカニズム

3章および4章の成果を受けて、ハックルマークおよびリブマークが形成されるメカ

ニズムを考察した。割断面を詳細に観察し、ハックルマークの3次元的な形態やリブマークの縞模様の特徴を把握した。また、高速度カメラ観察に画像処理を施すことで、割断面形成に関わる亀裂の挙動を明確化した。その結果を踏まえ、ハックルマークの段差形状およびリブマークの縞模様が形成されるメカニズムを提唱した。ハックルマークは圧痕の下方に発生する円形亀裂と、圧痕間の表面付近に発生するラディアルクラックにより形成される。その際に円形亀裂が形成される位置および傾きが不規則であり、またラディアルクラックが形成される面とも異なるために、表面付近が段差状の形状となることが明らかになった。また、リブマークには弧状と斜線状の縞模様がみられ、弧状の縞模様は亀裂前縁の形状が転写されるアレストライン、斜線状の縞模様は亀裂伸展方向の揺らぎが亀裂伸展とともに引き延ばされて生じたウォルナーラインであると考えた。さらに、これらの割断面形成メカニズムは、異なるホイール形状においても適用できることを示した。

6章 二次クラック伸展メカニズム

ブレークレスホイールの通過後に亀裂が再伸展する二次クラック伸展について、応力分布と亀裂伸展の関係性から考察した。裏面からの光弾性実験により位相差の経時変化を計測した結果、割断面にハックルマークとリブマークが形成される条件で位相差の減衰挙動に顕著な違いがみられた。また、それぞれの条件の亀裂伸展挙動と位相差の減衰挙動を比較すると、亀裂が伸展すると位相差が減衰することが示された。ブレークレスホイールを用いると、ホイール通過後の残留応力が圧痕周辺の表面付近に分布する。このひずみエネルギーにより二次クラックが伸展することが明らかになった。

7章 光弾性CT法の開発

光弾性CT法における3次元応力分布の再構成にディープニューラルネットワークを用いる手法を提案し、実現のため手法や手順の具体化を試みた。ニューラルネットワークのモデルを構築し、学習を行うプログラムを開発した。また、有限要素法の結果から位相差像を光学計算により算出するプログラムも作成することで、まずは計算機上で光弾性CT法のシミュレーションを行った。その結果、適切に学習をさせることができれば、3次元応力分布を再構成できる可能性が示された。それを受けて実験装置を作製し、実機による検証実験も執り行った。結果は応力の6成分のうち1成分のみ類似した応力分布が得られ、他の成分では一致しなかった。ただし、検証実験により実験手法や学習モデルにおける課題が明らかになり、今後の研究の道筋が示された。

本研究により、ホイール割断ではブレークスホイールの外周部の凹凸が接触することにより生じる応力分布が明らかになり、ブレークスホイール使用時に特有の亀裂形成の原因が示された。凹凸の形状のうち、特に凹部の接触が重要であることがわかり、工具設計の指針の一つとなると考えられる。ただし、本研究で行った有限要素法シミュレーションは亀裂および摩擦を無視した押し付け/除荷解析であるため、スクライプ中に生じている影響については考慮できていない。スクライプや摩擦、亀裂の影響を考慮したシミュレーションを行うことができれば、本研究では解明できなかった部分についても考察が進むと考えられる。

ディープニューラルネットワークを用いた光弾性CT法については、全くの概念でしかなかった応力解析手法を、精度や再現性に問題はあるものの具体化し、課題を明らかにすることができた。今後さらに研究を続け、推定精度や汎用性を向上させることで、実用化が可能になると考える。

付録 新たなホイール形状の提案

A.1 緒言

ここでは、第3章から第6章で得られたホイール割断のメカニズムに関する知見から、新たなスクライビングホイールの形状を提案する。

A.2 新たなホイール形状の指針

ブレークスホイールを用いてガラスを割断すると、二次クラックが深く伸展する一方、表面に圧痕や不要な亀裂が発生することが報告されている。したがって、垂直亀裂を深く伸展させる特徴を保ったまま、スクライブ表面のダメージを軽減することが求められる。

そこで、新たなホイールに求める性能として、以下の4点を設定する。

- (1) 割断面に安定してリブマークが形成される。
- (2) ラテラルクラックが形成しない。
- (3) ラディアルクラックの形成を抑制する。
- (4) 二次クラックが伸展する。

リブマークが安定して形成されるためには、ホイール押し付け時に起点クラックが形成される必要があることが第3章および第4章で示されている。起点クラックはホイール凸部の下方に発生する円形亀裂を起点に形成される。円形亀裂の形成のためには、ホイール下方に垂直亀裂の亀裂開口方向の垂直応力が作用し、引張応力領域が表面付近まで接近する必要がある。

ラテラルクラックは、圧痕の側方、ガラス表面から数十 μm の深さに分布する鉛直方向の垂直応力成分が駆動力である。これは押し付け荷重の増大やホイールの稜角の減少によりホイールが深く押し込まれ、塑性変形領域が増大すると応力が大きくなりラテラルクラックが形成されやすくなる。一方で、ホイールの押し込み深さの増大は、垂直亀裂の開口方向の応力成分を増大させる。したがって、垂直亀裂の形成・伸展を促進するために無制限に荷重を増大させたり稜角を減少させたりすることは、ラテラルクラックの抑制という観点からは望ましくない。ラテラルクラックの形成については、留井らの研究^{A-1)}より、稜角 115° のPenettを用いた場合、24 N以上で発生することが報告されている。そこで、本章では負荷時の押し込み深さを、10~15 Nの荷重域における押し込み深さに相当する7 μm に設定し、稜角を 125° に統一することで、ラテラルクラックは形成しないものと仮定する。

ラディアルクラックは除荷後に圧痕角部に応力が集中することで生じる。4.3節の実

験および解析の結果、ホイール凹部の接触が顕著になると、応力集中が緩和されラディアルクラックが抑制されることが示された。このことは圧痕形状を変化させることで応力集中を緩和できる可能性を示唆している。

二次クラックの進展はブレークスホイールが凹凸を有することでノーマルホイールよりも大きく塑性変形し、より大きな残留応力を生じさせることが原因であると考えられる。

これらのことから、ブレークスホイールの特徴である凹凸を保持し、垂直亀裂の形成および伸展を促進させつつ、形成される圧痕形状を制御することでガラス表面の圧痕角部における応力集中を緩和しラディアルクラックの形成を抑制することを目標とする。

A.3 提案するホイール形状

まず、現在一般的に用いられているブレークスホイールであるPenettの形状を図A.1に示す。凹部は、ホイールの回転軸と平行な円柱を外周部から取り除いた形状であり、等間隔に凹凸が形成されている。Penettを用いた場合、楔型の圧痕が形成される。圧痕はガラス表面では長方形になっているため、除荷後に四隅に応力が集中し、ラディアルクラックが形成される。この角部の応力を緩和し、スクライブライン上に応力集中させるため、圧痕の表出形状は笹の葉のようなスクライブライン上のみに角をもつ形状がよいと考えられる。しかし、そのような立体形状を持つ工具の設計は困難であるため、笹の葉型に近い六角形の圧痕を形成できる形状を考案した。図A.2に新たな工具形状（以下六角Penettと呼称）を示す。Penettはホイール回転軸に対して水平な円柱溝を有するが、六角Penettはホイールの両側から角度をつけた円柱領域を除去することで溝を形成する。これにより、従来のPenettと同様凹凸を有しつつ、圧痕形

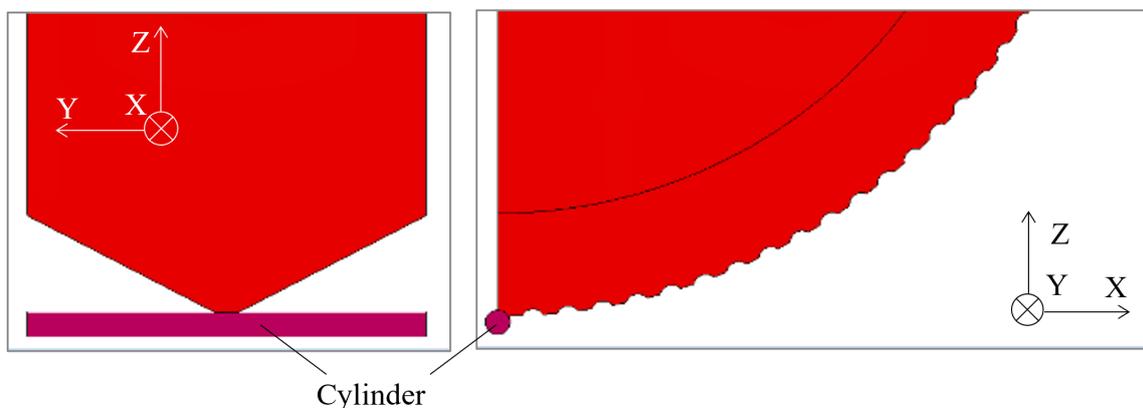


FIGURE A.1 Quarter model of ordinary Penett. Cylinders are subtracted from edge of scribing wheel.

状は六角形に近い形状となる。円柱の角度、半径、溝の深さ、歯数（凹凸の数、間隔）を変化させることで、凸部形状を制御する。このホイールはPenettの形状を元に、六角形の圧痕を形成することから、以後、六角Penettと呼称する。

次に、円柱ではなく三角柱を除去する形状を考案した。この場合、六角Penettと同様六角形の圧痕が形成されるが、圧痕の形状がより平面的になる。三角柱の角度、溝深さ、歯数に加え、三角柱をホイールの円周方向に拡大する“拡大率”をパラメータに設定することで、凸部形状を制御する。このホイール形状は、三角柱形状の凹部を有するAPIOと類似しており、六角形の圧痕を形成することから六角APIOと呼称する。六角Penettおよび六角APIOのパラメータについて、模式図を図A.3に示す。

A.4 有限要素法解析による評価

前節で設定したパラメータを変更させて、4章と同様の有限要素法解析を行い、応力分布を評価した。本節では、六角Penettと六角APIOについて、それぞれ最も良い結果を得られた条件における結果を述べる。

六角Penettの結果

従来のPenettと六角Penettの形状で有限要素法解析を行った結果を比較する。六角Penettの除去される円柱領域の角度は、ホイール回転軸に対して20度とした。円柱の半径は30 μm 、溝深さは10 μm 、歯数は90である。また、どちらにもZ方向に7 μm の強制変位を与え、元の位置まで戻すように境界条件を与えた。まず、Z方向の変位を図A.4に示す。上段のスクライブ表面をZ軸方向から見た図では、従来のPenettでは圧痕が長方形であるのに対し（図A.4 (a)）、六角Penettではスクライブ方向（X方向）に長い六角形の圧痕が形成されている（図A.4 (b)）。次に、ラディアルクラックの形成

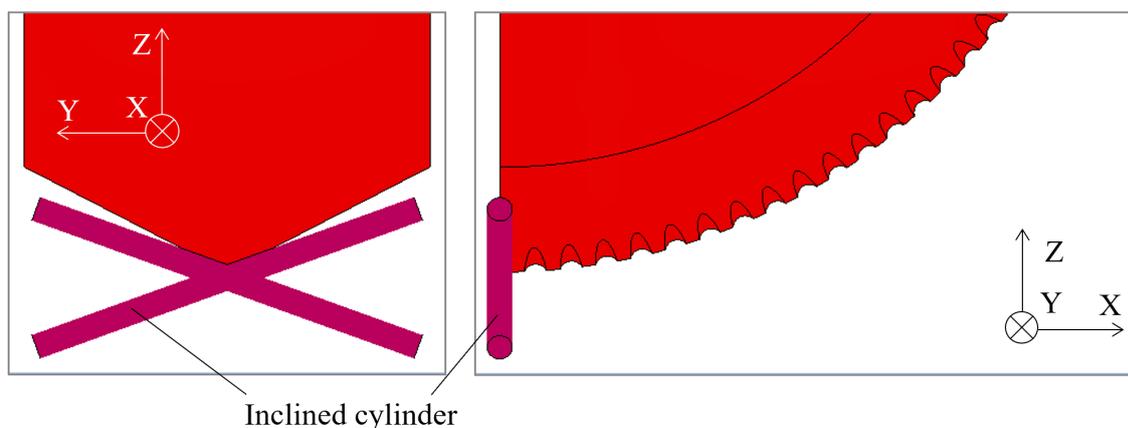


FIGURE A.2 Quarter model of Hexagonal Penett. Cylinders are inclined and subtracted from both sides of scribing wheel.

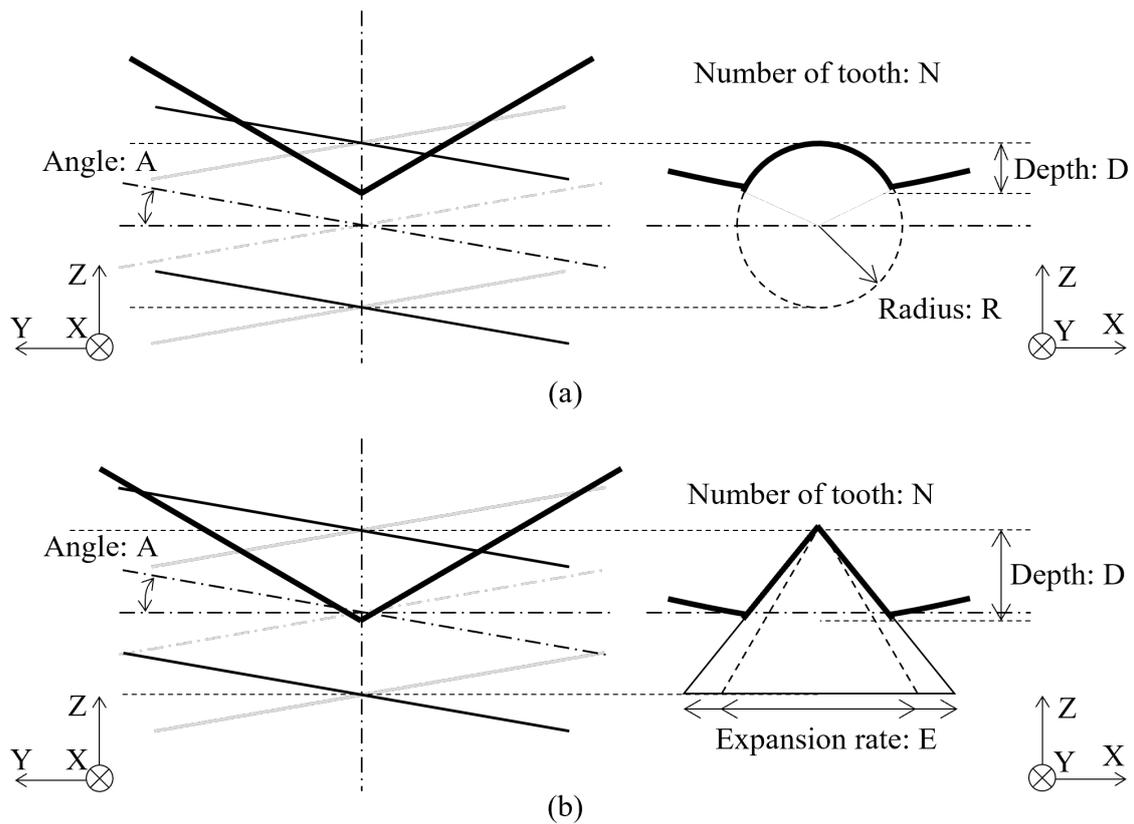


FIGURE A.3 Schematic illustration of parameters of new wheels: (a) Hexagonal Penett and (b) Hexagonal APIO.

に関わる圧痕角部の応力集中を比較する。スクライブ表面の最大主応力分布を図A.5に示す。従来のPenett（図A.5 (a)）と六角Penett（図A.5 (b)）の結果を比較すると、圧痕角部の応力集中には、大きな違いは見られない。ただし、六角Penettではスクライブライン上にも角部が生じているため、図A.5 (b)のようにスクライブライン上にも応力が集中している。図A.6では、垂直亀裂に対応するY方向垂直応力の分布を比較している。どちらも圧痕の周囲が圧縮応力領域となり、その周囲に引張応力領域が分布する特徴は一致している。また、引張応力の値を比較すると、同程度の応力が生じていることがわかる。ただし、従来のPenettと異なり凹部もスクライブラインに沿って鈍角の切れ刃となっているためか、図A.6 (b)では引張応力領域が図A.6 (a)よりも表面付近まで回り込んで分布している。これまでの研究から、スクライブラインに沿って発生する垂直亀裂は、ガラス表面付近の傷を起点に形成されていることが示唆されている。したがって、六角Penettを用いると垂直亀裂の形成が促進され、より小さな荷重で垂直亀裂を形成できる可能性がある。小さな荷重で亀裂を導入できれば、表面に残るダメージも減少するため、表面の不要亀裂の抑制につながる可能性もある。

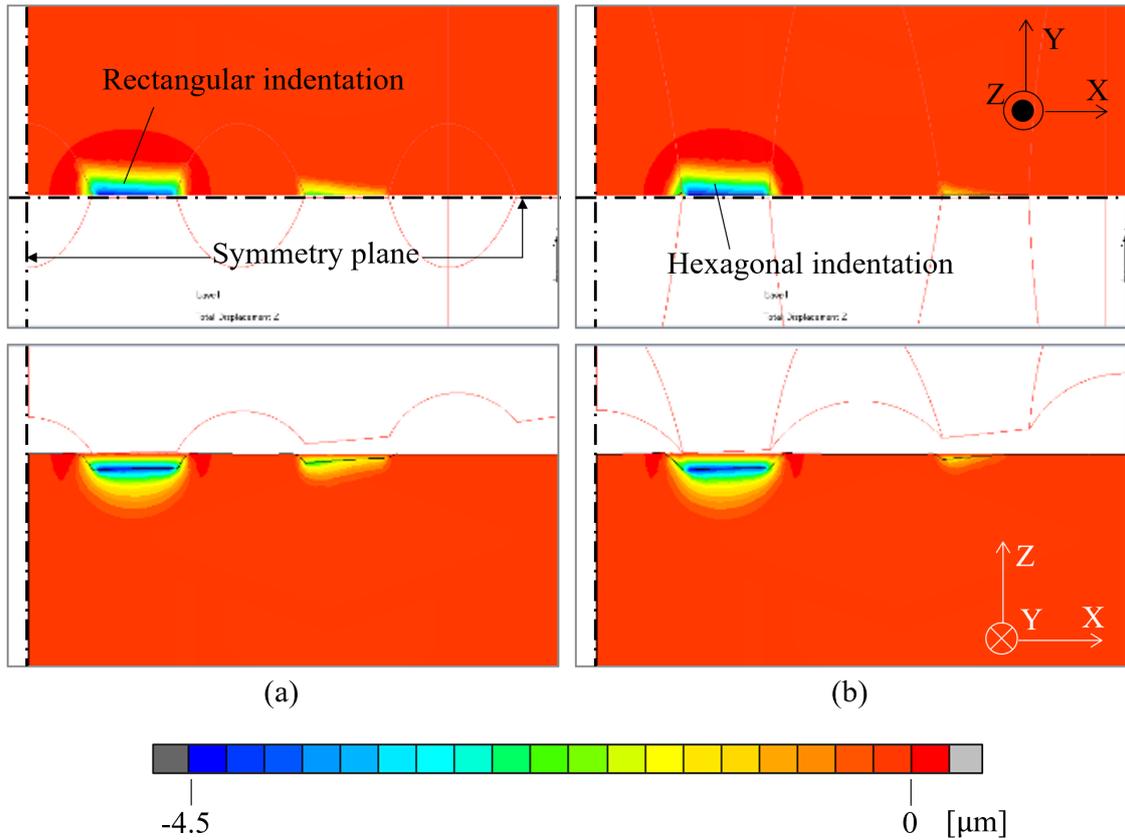


FIGURE A.4 Indentation shape when using (a) ordinary Penett and (b) Hexagonal Penett.

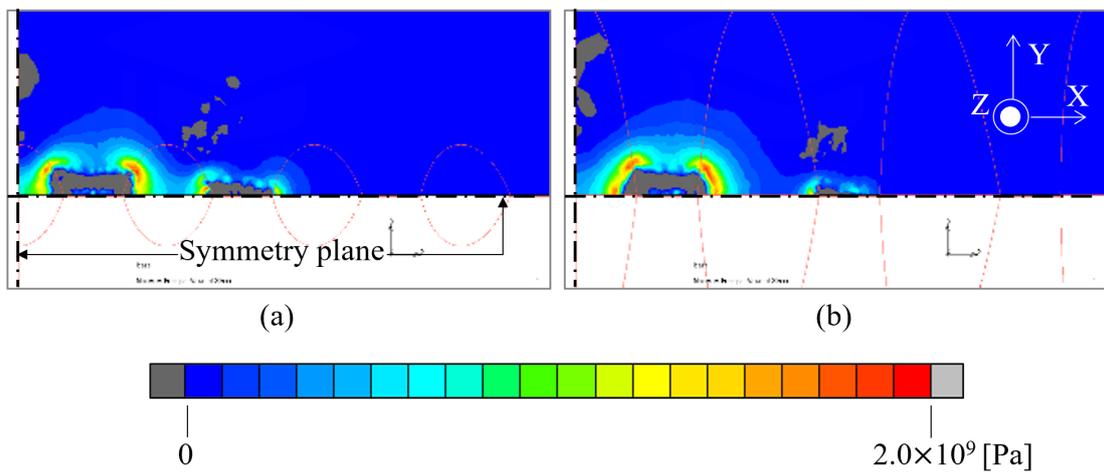


FIGURE A.5 Distribution of maximum principal stress (σ_1) on indented surface by (a) ordinary Penett and (b) Hexagonal Penett.

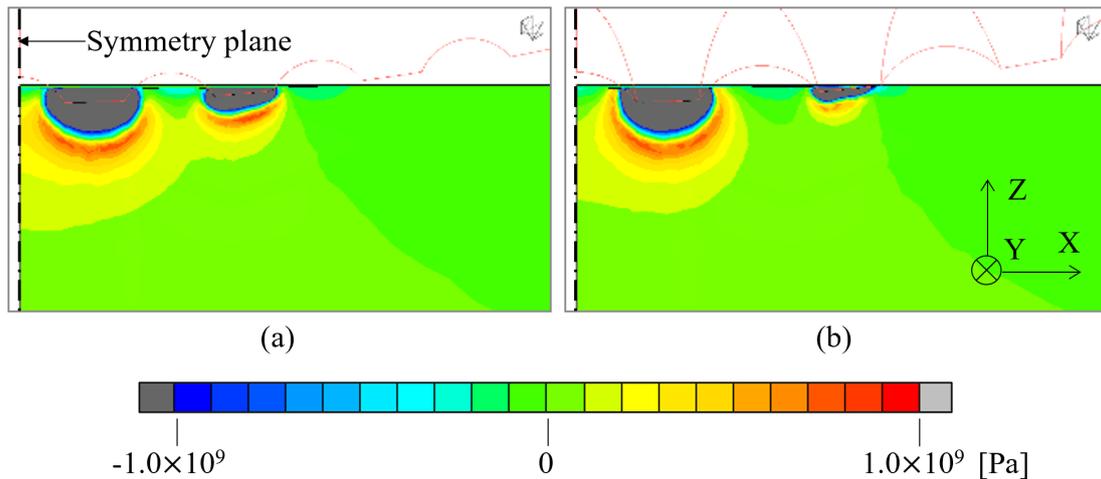


FIGURE A.6 Distribution of normal stress of Y axis (σ_Y) on cleaving surface by (a) ordinary Penett and (b) Hexagonal Penett.

六角APIOの結果

六角Penettにおける解析結果を図A.7に示す。歯数110，三角柱の角度は 20° ，溝深さは $10\ \mu\text{m}$ ，拡大率は1.8である。図A.7 (a) および (c) は除荷後のZ方向の変位であり，圧痕形状を示している。図A.7 (a) はZ方向から見た図であり，圧痕形状が六角形になっていることがわかる。図A.5の六角Penettと比較すると，X方向の突出部が大きくなっている。図A.7 (c) はY方向から見た様子である。圧痕が直線的になっていることがわかる。図A.7 (b) は，最大主応力の分布をZ方向から見た図である。六角形の圧痕の各角部に応力が集中していることがわかる。最も大きな応力が集中しているのはスクライブライン上の角部である。図A.7 (d) は負荷時におけるY軸方向垂直応力の分布である。圧痕の周囲が圧縮応力領域となり，その周囲に引張応力領域が分布している。

六角Penettと比較すると，垂直亀裂の形成に関わる σ_Y については分布，大きさともに同様の結果を示しており，従来のPenettに対して垂直亀裂の形成を促進する効果があると考えられる。その原因も六角Penettと同様，凹部にも稜線が形成されたことであると考えられる。また，ラディアルクラックに関わる最大主応力 σ_1 の分布を比較すると，六角Penettでは六角形の各角部の応力集中が同程度であったのに対し，スクライブライン上の角部で最も大きな応力集中が生じている。これにより，スクライブライン上にラディアルクラックが優先的に形成され，結果的にブレイク後に残留するラディアルクラックを抑制できると考えられる。

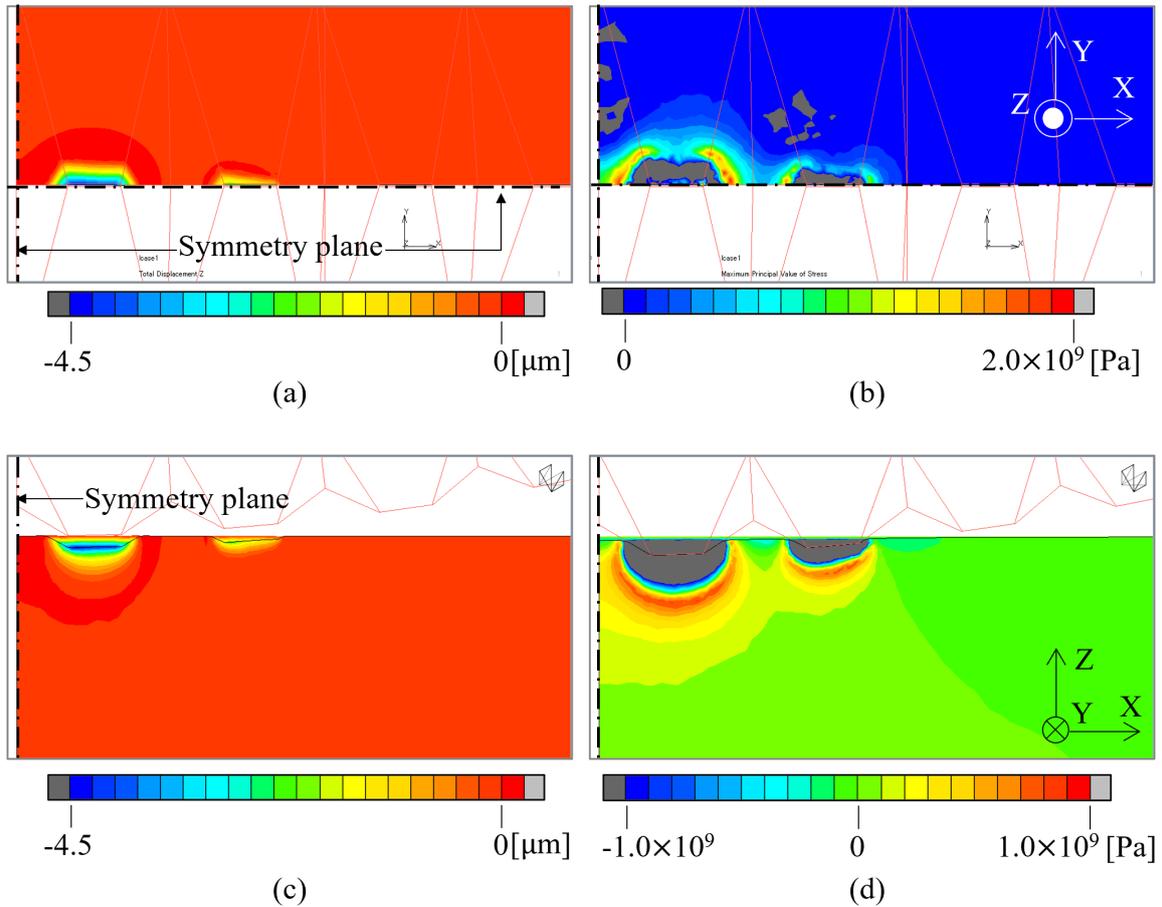


FIGURE A.7 FEM results of Hexagonal APIO. Z displacement (a, c), maximum principal stress on indented surface (b) and normal stress of Y axis on cleaving surface (d).

A.5 結言

本章では、これまでに行ってきたホイール割断のメカニズム解明に関する研究により得られた知見から、垂直亀裂を促進し不要な亀裂を抑制することを目的とした新たなホイール形状を提案した。特に、圧痕形状に着目しラディアルクラックの抑制を目標とし、六角Penettと六角APIOという2種類のホイール形状を提案した。その結果、どちらのホイール形状も垂直亀裂を促進させ、特に六角Penettではラディアルクラックを抑制する可能性が示された。

参考文献

- A-1) 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ブに関する研究—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, Vol. 53, No. 11 (2009) pp.684–689.

謝辞

本研究を行うにあたり、多くの先生方にご指導、ご鞭撻を賜りました。深く御礼申し上げます。指導教官である松坂壮太准教授には、学部4年からの6年間ご指導をいただきました。研究に関する指摘はもちろんのこと、進路や人生設計についてもさまざまなご助言をいただき、6年間の研究生活を全うする糧となりました。また、研究室の学生たちを的確に教え導く姿は、私が教育職を志すきっかけとなりました。深く感謝いたします。森田昇教授には、節目で叱咤激励をいただき、6年間を温かく見守っていただきました。心より御礼申し上げます。比田井洋史教授には、ゼミや中間発表といった場で多様性に富んだご指摘をいただきました。自ら精力的に実験を行う姿勢からは研究者としてのメンタリティを学ばせていただきました。また進路に関する相談にも乗っていただき、博士課程の進学と就職活動で迷っていた私の背中を押していただきました。心より感謝いたします。中本剛教授には、学部のころは学年担任として、研究室配属後は中間発表や卒業論文、修士論文、博士論文と、本当にたくさんのご指導をいただきました。心よりお礼申し上げます。本論文を審査していただいた大窪先生には、いくつもの御助言、御教示を賜り、今後の研究の視野を広げることができました。厚く御礼申し上げます。松本祐一郎氏、千葉明氏には、専門家の立場からのご助言や、仕事の進め方など社会人としての心得といったアドバイスをいただきました。心から感謝を申し上げます。

本研究の実験を進めるにあたり、実験装置やガラス試料をご提供いただきました三星ダイヤモンド工業株式会社、高速度カメラをご提供いただきました株式会社フोटロンに厚く御礼申し上げます。

一学年上の先輩として常に規範となってくださった西岡宣泰氏と佐藤俊氏に心から感謝申し上げます。全力で研究を行いながら、後輩たちとも積極的に交流する様は、まぶしく憧れとして映り、少しでも近づきたいという活力となりました。また、博士課程でともに切磋琢磨した川村拓史君、徳永大二郎君に感謝申し上げます。ホイール切断研究にともに挑戦した卒業生の齊藤雅裕君、浅利朋生君、染野凌太君、阿隅結夢さん、高林滉君、在学生の朝緑紗希さん、小川佑太君、大宮裕太君、石鍋葵君、駕谷孝洋君、横山悟君、齊藤百香さん、川名隼平君におかれましては、共同研究や投稿論文への協力や、ディスカッションに付き合ってください深く感謝申し上げます。

最後になりましたが、みなさまの今後益々の発展を祈願し、謝辞とさせていただきます。ありがとうございました。

令和4年2月 今井健太郎