The University of Osaka
Institutional Knowledge Archive

Title	ガラスのレーザスクライブにおける適正加工条件の推定と亀裂進展解析
Author(s)	八幡, 恵輔
Citation	大阪大学, 2013, 博士論文
Version Type	VoR
URL	https://hdl.handle.net/11094/27587
rights	
Note	

The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA

https://ir.library.osaka-u.ac.jp/

The University of Osaka

工甲16465

博士学位論文

ガラスのレーザスクライブにおける適正加工条件の推定と亀裂進展解析

八　幡　恵　輔

平成２５年１月

大阪大学大学院工学研究科

博士学位論文

ガラスのレーザスクライブにおける適正加工条件の推定と亀裂進展解析

八　幡　恵　輔

平成２５年１月

大阪大学大学院工学研究科

ガラスのレーザスクライブにおける
適正加工条件の推定と亀裂進展解析

目　次

第 1 章　緒　　論 …… 1
1.1　研究の背景 …… 1
1.2　研究の目的と意義 …… 3
1.3　論文の構成 …… 5
参考文献 …… 7

第 2 章　誘導ダメージ発生メカニズムと適正加工条件の推定 …… 9
2.1　緒　言 …… 9
2.2　実験方法 …… 10
2.2.1　レーザスクライブ実験 …… 10
2.2.2　加工状態の定義 …… 11
2.2.3　光弾性実験 …… 13
2.3　実験結果 …… 15
2.3.1　適正加工条件範囲 …… 15
2.3.2　リタデーション測定 …… 15
2.4　二次元有限要素解析 …… 18
2.4.1　解析方法 …… 18
2.4.2　解析結果 …… 20
2.4.2.1　誘導ダメージ発生メカニズム …… 20
2.4.2.2　パルス発振の内部熱応力場への影響 …… 23
2.5　結　言 …… 24
参考文献 …… 25

第 3 章　基板中央付近の準定常亀裂進展解析と亀裂深さの推定 ‥ 28
3.1　緒　言 …… 28
3.2　実験方法および結果 …… 29
3.3　三次元モードⅠ亀裂進展解析 …… 31
3.3.1　解析方法 …… 31
3.3.1.1　有限要素法と境界要素法の組み合わせ …… 31
3.3.1.2　有限要素法による熱応力解析 …… 32
3.3.1.3　境界要素法によるモードⅠ亀裂進展解析 …… 33
3.3.2　解析結果 …… 36
3.3.2.1　温度分布の変化 …… 36
3.3.2.2　応力拡大係数のしきい値の決定 …… 37
3.3.2.3　基板中央での亀裂進展現象 …… 42
3.4　二次元モードⅠ亀裂進展解析 …… 43
3.4.1　解析方法 …… 43
3.4.2　解析結果 …… 45
3.5　結　言 …… 48
参考文献 …… 49

第 4 章　加工開始側基板端付近の過渡的亀裂進展解析 …… 50
4.1　緒　言 …… 50
4.2　実験方法および結果 …… 50
4.3　三次元モードⅠ亀裂進展解析 …… 52
4.3.1　解析方法 …… 52
4.3.2　解析結果 …… 54
4.3.2.1　熱応力解析結果 …… 54
4.3.2.2　貫通亀裂の形成 …… 55
4.3.2.3　貫通亀裂から表面亀裂への変化 …… 55
4.4　結　言 …… 59
参考文献 …… 60

第 5 章　非対称熱応力による亀裂湾曲メカニズムと
亀裂形状の推定 …… 62
5.1　緒　言 …… 62
5.2　レーザスクライブ実験 …… 63
5.2.1　実験方法 …… 63
5.2.1.1　加熱域と冷却域のずれたレーザスクライブ実験 …… 63
5.2.1.2　加熱域中心と亀裂位置の測定 …… 63
5.2.1.3　亀裂の断面形状の測定 …… 65
5.2.2　実験結果 …… 66
5.2.2.1　リタデーション測定による亀裂位置の調査 …… 66
5.2.2.2　分断面形状測定による亀裂の断面形状の調査 …… 68
5.3　解析方法 …… 70
5.3.1　有限要素法による熱応力解析 …… 70
5.3.2　境界要素法を用いた亀裂進展解析 …… 70
5.3.2.1　亀裂進展解析の概要 …… 70
5.3.2.2　初期亀裂の設定と亀裂形状更新方法 …… 72
5.3.2.3　解析領域の設定方法 …… 73
5.4　解析結果 …… 74
5.4.1　初期亀裂深さの決定 …… 74
5.4.2　解析の進行に伴う亀裂形状と応力拡大係数の変化 …… 75
5.4.3　亀裂形状の実験結果との比較 …… 78
5.5　結　言 …… 79
参考文献 …… 80

第 6 章　総　括 …… 81

謝辞 …… 87

本論文に関する研究業績 …… 89

第1章 緒　論

1.1 研究の背景

近年，ノートパソコン，薄型テレビ，携帯電話等，薄型ディスプレイ(Flat Panel Display, FPD)を搭載した電子機器が普及している．液晶ディスプレイやプラズマディスプレイにはガラス基板が用いられ，製造には大きな基板から製品を取り出すための分断工程が不可欠である．ガラスのような脆性材料の分断方法は，スクライブ・ブレイク方式とフルカット方式の二つに大別できる．スクライブ・ブレイク方式は，基板表面に分断の起点となる浅い溝や亀裂を形成し，これに沿って曲げ応力を加えて分断する方法である．溝や亀裂を形成する工程をスクライブ，分断する工程をブレイクという．フルカット方式は，一度の加工で基板を完全分離する方法である．一般に，スクライブ方式はフルカット方式と比べて加工速度が速い利点がある．

現在主流のスクライブ方法は，カッターホイール[1),2)]を用いた機械的な方法である．外周に周期的な溝加工を施したホイールを用いることで，板厚に対して70%程度の深さの亀裂が形成される[3),4)]．その結果，分断工程で加える曲げ応力を低く抑えることができる．しかし，この方法は機械的加工であるため，加工線周辺でのマイクロクラックの発生を避けられず，分断した基板の端面強度の低下を招く．特に携帯機器では，製品の高い端面強度が求められ，マイクロクラックの発生を抑える必要がある．また，パーティクルによって製品や製造ラインが汚染され，パーティクル除去の工程が必要となる．

この機械的な加工法に対し，レーザを利用した非接触のガラス分断方法がある．Lumely[5)]は，レーザ加熱によって生じる熱応力を利用して脆性材料をフルカット方式で分断する方法について報告を行っている．基板をレーザ光によって局所的に加熱し，加熱域周辺に引張応力を生じさせる．引張応力によって亀裂がレーザ走査線に沿って成長し，基板が分断される．Kondratenko[6),7)]は，この方法を改良したスクライブ法を特許出願した．レーザ光とウォータジェットを対にして走査させることで，レー

ザ照射直後を冷却し，基板に一定深さの亀裂を形成する．この方法により，レーザ加熱のみを用いる場合に比べて加工速度が向上され，レーザ走査位置と分断位置のずれを小さく抑えることができる．以下，この加工法をレーザスクライブと呼ぶ．三宅[8]および Hermanns[9]により，レーザスクライブを用いることでパーティクルの発生が抑制され，基板の端面強度が向上することが報告されている．**Fig. 1.1** に，ガラス基板のレーザスクライブ後の分断面写真を示す．図中の上面がレーザ照射面である．加工線周辺にマイクロクラックが生じていないことがわかる．

これらの利点から，レーザスクライブは FPD 用ガラス基板の分断に適しており，製品の製造に適用されてきた．しかし，加工メカニズムが理論的に明らかにされていなかったため，加工状態が安定しないなどの問題が生じても，作業者の経験に基づいた対策を施すに止まっていた．このような状況の中，山本ら[10), 11)]は二次元および三次元熱弾性解析によって，**Fig. 1.2** に模式的に示すようなレーザスクライブの加工メカニズムを明らかにした．レーザ照射によってガラス表面が加熱され，表面から内部へ熱が伝わる．その直後にガラス表面がウォータジェットによって急冷される．表面だけが冷却され，基板内部には高温領域が残存するため，表面には引張応力が生じ，内部には圧縮応力が生じる．この引張応力により，基板端に形成した初期亀裂が進展し，レーザおよびウォータジェットの走査線に沿った亀裂が形成される．一方，基板内部に生じる圧縮応力場が

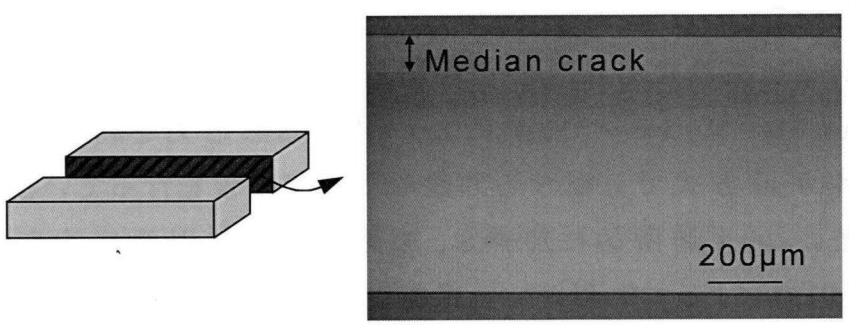


Fig. 1.1 Cutting surface along median crack after laser scribing

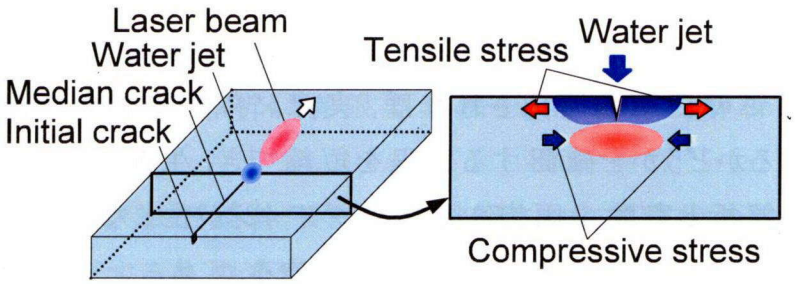


Fig. 1.2 Schematic of principle of laser scribing

亀裂の成長を抑制し，亀裂がある深さで停止する．

1.2 研究の目的と意義

レーザスクライブの利点を活かすには，適切な加工条件を選択する必要がある．一般に，基板への入熱量が小さい場合は亀裂を形成することができない．逆に，入熱量が大きい場合は，加工方向に対して垂直方向のクラックが加工線周辺に生じる．ここでは，このようなクラックをダメージと呼ぶ．ダメージによって基板の端面強度が著しく低下する．山本ら[10), 11)]は，ダメージが生じずに亀裂を形成できる加工条件を適正とし，基板表面の最高到達温度と最大引張応力を調査することで適正加工条件を推定できることを明らかにした．また，この推定方法を板厚[12)]と線膨張係数[13)]の異なるガラスについても適用できることを示している．

しかし，山本らの研究ではダメージ発生のメカニズムについては触れられていない．また，ダメージには，加工後に自然に生じるものと，加工線上に比較的小さな外力を加えると生じるものがある[14), 15)]．本研究では，前者を自発ダメージ(Spontaneous damage)，後者を誘導ダメージ(Stimulated damage)と呼ぶ．製品の使用中に加わる衝撃によって誘導ダメージが生じると，製品の想定外の強度低下を招く．そのため，実用上は，誘導ダメージまで考慮して加工条件を決定するべきであるが，レーザスクライブにおける誘導ダメージに関する報告は見当たらない．そこで，誘

導ダメージの発生メカニズムを解明し，加工後に一定の外力が加わってもダメージの生じない，より信頼性の高い加工条件を推定することを第 1 の目的とした．この目的が達成されれば，実際に外力を加えて誘導ダメージが発生するかどうかを確認する工程を短縮でき，生産性の向上につながる．また，解析と実験の両方から誘導ダメージが生じないことを確認すれば，より信頼性の高い加工条件を選択できる．

入熱量が大きすぎるとダメージが生じるのに対して，入熱量が小さすぎる場合は亀裂を形成できない．山本ら[10), 11)]は，亀裂を含まないモデルを用いた熱弾性解析を行い，基板表面における最大引張応力がしきい値以上であれば亀裂を形成でき，それを利用して加工可能条件を推定できることを示している．亀裂を含まないモデルを用いるため，短時間で加工可能条件を推定でき，この解析は有用である．しかし，この解析では亀裂を含まないモデルが用いられ，加工中の亀裂形状は考慮されていない．後のブレイク工程で必要な曲げ応力は亀裂深さに依存し，亀裂深さは加工条件によって変化する．そのため，様々な加工条件について，亀裂生成の可否だけでなく，亀裂深さまで予測できることが重要である．そこで本研究では，基板中央で形成される亀裂の深さを亀裂進展解析によって予測することを第 2 の目的とした．様々な加工条件下での亀裂深さが予測できれば，必要な亀裂深さを得るための加工方法や条件を調べる工程を短縮でき，生産性の向上につながる．

一方，基板の加工開始側端面近傍では，基板中央とは異なり，亀裂が基板の裏面まで貫通する場合がある．また，加熱域の中心と冷却域の中心がずれた場合には，断面形状が湾曲した亀裂が生成する．そのため，基板端付近での亀裂進展過程や亀裂形状まで含めて亀裂進展現象を予測できることも実用上は重要である．そこで本研究では，基板中央で形成される亀裂とは異なる，これらの亀裂の進展メカニズムを明らかにすることを第 3 の目的とした．

この第 2，第 3 の目的を達成するため，三次元亀裂進展解析を行った．三次元解析において亀裂形状を正確にモデル化するには，一般に多くの要素が必要であり，実用上は解析時間の短い方法が望まれる．応力

集中問題においては，境界要素法を用いることで，有限要素法と比べて少ない要素数で高精度の解が得られることが報告されている[16]．そこで本研究では，熱応力解析に有限要素法を，亀裂進展解析に境界要素法を用いた．

様々な位置や加工条件下での亀裂深さおよび形状の予測が可能となれば，必要とする亀裂を形成するための加工方法や加工条件についての指針が得られる．その結果，様々な製品へのレーザスクライブの普及につながる．

1.3 論文の構成

本論文は第 1 章から第 6 章で構成されている．

第 1 章では，従来のいくつかの研究を例に挙げてガラスの分断方法を説明し，レーザスクライブの利点を述べた．また，研究の目的と意義について述べた．

第 2 章では，誘導ダメージの発生メカニズムを明らかにし，加工後に一定の外力が加わってもダメージの生じない，より信頼性の高い加工条件を推定することを目的とし，まず，実験によって誘導ダメージが発生する加工条件を調べた．その際，確認手段として，ビッカース試験を用いた．また，誘導ダメージの発生メカニズムを検討するため，光弾性実験によるリタデーション測定を行った．これらの実験結果に基づき，二次元熱弾性解析を行った．その結果，レーザ加熱によってガラスに生じる残留応力が誘導ダメージの発生原因であり，最大せん断応力の最大値が一定値を超える場合に誘導ダメージが発生することを明らかにした．誘導ダメージが生じる加工条件を避けることで，より信頼性の高い加工条件を絞り込めることを示した．

第 3 章から第 5 章では，レーザスクライブで観察されるいくつかの特徴的な亀裂について，亀裂進展解析によってそのメカニズムを検討した．

まず第 3 章では，基板中央付近で形成される一定深さの亀裂を対象とし，亀裂深さを推定することを目的として亀裂進展解析を行った．この亀裂進展現象は，レーザスクライブの基本であり，最も重要である．三次

元亀裂進展解析においては，要素数を削減するために境界要素法を取り入れた．有限要素法による熱応力解析結果を基にして，境界要素法によって応力拡大係数を求めた．加工中は，応力拡大係数がある値となる位置に亀裂前縁が位置すると考えて亀裂形状を求めた．その結果，適切な応力拡大係数のしきい値を設定すれば，亀裂深さを推定できることを示した．また，基板中央では亀裂が準定常的に進展する結果，一定深さの亀裂が形成される．そのため，加工方向に対して垂直な断面を対象とした二次元解析によって，より簡便に亀裂深さを求められることを示した．これらの結果から，解析方法と結果の妥当性が示された．また，本解析により，亀裂深さまで考慮して加工条件を絞り込むことができ，解析の有用性も示された．

第 4 章では，加工開始側基板端付近における亀裂進展現象のメカニズムを明らかにするため，まず実験によって亀裂がどのように進展するか調べた．その結果，加工開始側基板端から数 mm の範囲では，亀裂が基板の裏面まで到達し，その後の領域において一定深さの亀裂が形成されることがわかった．つまり，亀裂は，基板端付近での過渡的亀裂進展現象を経て一定深さの亀裂となる．この実験結果を踏まえ，第 3 章と同様の解析手法によって基板端付近での亀裂進展を解析した．基板端がレーザ加熱される際に基板内部に引張応力がはたらく．この引張応力によって初期亀裂が基板の厚さ方向に成長し，貫通亀裂となることを明らかにした．その後，基板端が冷却される際に基板表面近傍に大きな引張応力がはたらく．この引張応力によって基板表面付近の一部で貫通亀裂が進展し，浅い表面亀裂が形成される．この表面亀裂は，冷却域の移動とともに準定常的に進展し，一定深さの亀裂になることを明らかにした．本解析により，加工開始側基板端付近における亀裂進展現象を予測できる．基板端付近での亀裂進展結果が製品の歩留まりに影響する場合もあり，本解析を応用し，様々な加工条件下での亀裂進展解析を行えば，より歩留まりの高い加工方法，条件についての指針が得られる．

第 5 章では，加熱域の中心と冷却域の中心がずれた場合に形成される湾曲した亀裂の形状を推定することを目的とし，まず，実験によって

どのような亀裂が形成されるかを調べた．その結果，基板端から十分離れた位置では，亀裂は準定常的に進展し，断面形状が湾曲することを明らかにした．この実験結果に基づき，非対称応力場内で準定常的に進展する亀裂形状を求める混合モード亀裂進展解析方法を提案した．ここでも，有限要素法による熱応力解析結果を基にし，境界要素法を用いて亀裂進展解析を行った．得られた亀裂形状は実験結果と比較的よく一致し，解析方法と解析結果の妥当性が示された．一般に，直線加工を行う場合は，レーザビームおよびウォータジェットの強度分布を加工線に対して対称にし，真っすぐな亀裂を形成するのが望ましい．本解析により，各製品に求められる加工精度を得るには，加工装置としてどの程度の調整の精度が必要かを，装置の設計段階で見積もることができる．また，本解析の応用により，亀裂の湾曲量を小さくできる加工方法や加工条件の提案につながり，レーザスクライブがより広い分野へ適用されることが期待される．

第 6 章では，本研究で得られた結論を総括した．

参考文献

1) M.V. Swain: Median Crack Initiation and Propagation Beneath a Disk Glass Cutter, Glass Tech., **22**, 5 (1981), 222.

2) 若山治雄，曽山　浩，千代康弘：ガラスカッターホイール，特許第3074143, (2000).

3) 冨森　紘，前川和哉，千代康弘，曽山　浩，若山治雄：ブレークレス・ガラス切り(ペネット®)の開発，2003 年度砥粒加工学会学術講演論文集，(2003).

4) T. Ono, O. Teng, and G. Pai: Breakless Cutting EagleXGTM using Standard Scoring Wheel, Proc. of 14th Int. Display Workshops, (2007), FMC2-2.

5) R.M. Lumley: Controlled Separation of Brittle Materials Using a Laser, Am. Ceram. Soc. Bull., **48**, (1969), 850.

6) V.S. Kondratenko: Method of splitting non-metallic materials. US Patent 3,543,979, (1970).

7) V.S. Kondratenko: Splitting of Non-Metallic Material, PTC WO 93/20015, (1993).

8) 三宅奏明: FPD ガラス基板の切断技術, 砥粒加工学会誌, **45**, 7, (2001), 342.

9) C. Hermanns: Laser Separation of Flat Glass, Proc. 63rd Laser Matter. Process. Conf., Jpn, Laser Process. Soc., (2005), 105.

10) K. Yamamoto, N. Hasaka, H. Morita, and E. Ohmura: Thermal Stress Analysis on Laser Scribing of Glass, J. Laser Appl., **20**, 4, (2008), 193.

11) 山本幸司, 羽阪 登, 森田英毅, 大村悦二: ガラスのレーザスクライブにおける三次元熱応力解析, 日本機械学会論文集 C 編, **72**, 724, (2006), 3927.

12) 山本幸司, 羽阪 登, 森田英毅, 大村悦二: ガラスのレーザスクライブにおける板厚の影響, レーザ加工学会誌, **15**, 4, (2008), 270.

13) 山本幸司, 羽阪 登, 森田英毅, 大村悦二: ガラスのレーザスクライブにおける線膨張係数の影響, レーザ加工学会誌, **15**, 4, (2008), 277.

14) K. Yahata, E. Ohmura, S. Shimizu, and M. Murakami: Dominant factors of suitable processing conditions in laser scribing of glass, Proc. of 6th Int. Conf. on LEM21, (2011), 3374.

15) K. Yahata, E. Ohmura, S. Shimizu, and M. Murakami: Suitable Processing Conditions Determined from the Standpoint of Residual Strain in Laser Scribing of Glass, Proc. of 31st ICALEO, (2012), 1281.

16) A. Portęla: "Dual boundary element analysis of crack growth", (Computational Mechanics Publications, 1993).

第 2 章　誘導ダメージ発生メカニズムと適正加工条件の推定

2.1 緒　言

レーザスクライブは，レーザ加熱および加熱直後の冷却によって生じる熱応力を利用してガラス等の脆性材料基板の表面に一定深さの亀裂を形成する[1), 2)]．加工線周辺にマイクロクラックが発生しないため，分断された基板の高い端面強度が得られる[3)]．しかし，加工条件によっては，加工方向に対して垂直方向のクラックが加工線周辺に生じる．ここでは，このようなクラックをダメージと呼ぶ．ダメージは端面強度を著しく低下させるため，実用上はダメージの生じない加工条件を選択する必要がある．ダメージには，加工後に自然に発生するものと外力を加えることで生じるものがある[4), 5)]．本研究では前者を自発ダメージ(Spontaneous damage)，後者を誘導ダメージ(Stimulated damage)と呼ぶ．

製品の使用中に加わった衝撃によって誘導ダメージが発生すると，製品の想定外の強度低下を招く．加工位置に荷重を加えることで誘導ダメージが発生するかどうかを確かめることはできる．しかし，信頼性を高めるには複数回の試行が必要であり，製品や基板ごとに試験を行うのは容易ではない．そこで本章では，誘導ダメージの発生メカニズムを明らかにし，加工後に一定の外力が加わってもダメージの生じない，より信頼性の高い加工条件を推定することを目的として，レーザスクライブ実験および二次元熱弾性解析を行った．

まず，様々なレーザ出力および走査速度を設定してレーザスクライブ実験を行い，誘導ダメージが生じる加工条件を調査した．このとき，確認方法としてビッカース試験を用い，加工後にビッカース試験を行っても誘導ダメージの生じない場合を適正とした．続いて，光弾性実験によるリタデーションの測定結果から，誘導ダメージ発生メカニズムを考察した．これらの実験結果に基づき，熱弾性解析による適正加工条件の推定を試みた．

2.2 実験方法

2.2.1 レーザスクライブ実験

まず，誘導ダメージ発生条件を調べるために厚さ1.3 mmのソーダライムガラスに対してレーザスクライブ実験を行った．**Fig. 2.1** に実験装置の概略を示す．試料を真空吸着ステージに固定し，スクライビングホイールにより加工開始位置に機械的に初期亀裂を形成した．4 枚の金コートミラーによって伝送された CO_2 レーザ光を 2 枚のレンズによって楕円形状に成形し，試料表面に照射した．同時に，レーザ光の長軸延長線上にウォータジェットを照射した．レーザ光からウォータジェットの方向にステージを一定速度で動かすことで，レーザ光およびウォータジェットを試料に対して速度 v で走査させた．

Fig. 2.2 に，加熱域，冷却域の位置関係を示す．以降，レーザ照射面内でスクライブ方向に直交する方向を x，スクライブ方向を y，基板の厚さ方向を z と定義する．$2\xi_h$ および $2\eta_h$ はそれぞれ加熱域（レーザ照射領域）の長径および短径，$2\xi_c$，$2\eta_c$ は冷却域（ウォータジェット照射領域）の長径，短径である．加熱域の中心から冷却域の中心までの y 方向距離を冷却点距離 d とおき，加工開始側基板端から冷却域中心までの距

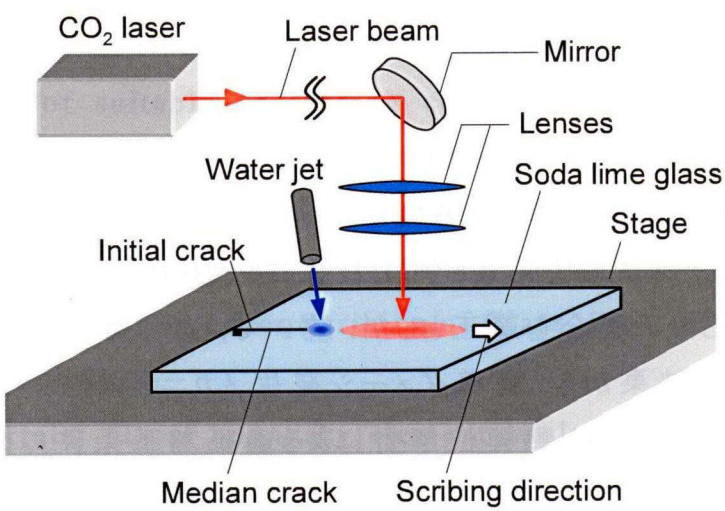


Fig. 2.1 Experimental setup for laser scribing

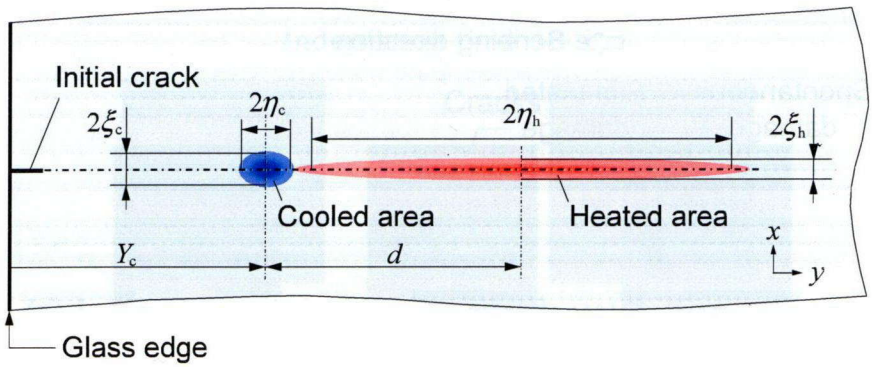


Fig. 2.2 Positional relation of heated and cooled areas

Table 2.1 Processing conditions of experiment

$2\xi_h$	Length of minor axis of heated area	1.3 mm
$2\eta_h$	Length of major axis of heated area	42.8 mm
d	Distance between centers of cooled and heated areas	25.0 mm
f	Repetition frequency	1 kHz
$\overline{P}$	Average laser power	100 – 180 W
v	Scanning velocity	40 – 460 mm/s
$2\xi_c$	Length of minor axis of cooled area	2.0 mm
$2\eta_c$	Length of major axis of cooled area	3.0 mm
	Flow rate of coolant	0.8 ml/min

離を$Y_c(t)$とおく．加工条件を **Table 2.1** に示す．冷却条件，レーザビーム形状，繰り返し周波数を一定とし，様々なレーザ出力$\overline{P}$と走査速度 v を設定して実験を行った．加工後，試料を観察し，亀裂が形成されたか，およびダメージが発生したかを調査した．

2.2.2 加工状態の定義

Fig. 2.3 (a)に，スクライブ後に自然に生じたダメージ(自発ダメージ)の光学顕微鏡写真を示す．**Fig. 2.3**において，加工方向は左から右で，加工位置は各写真の中央である．自発ダメージは，スクライブ線上の複数

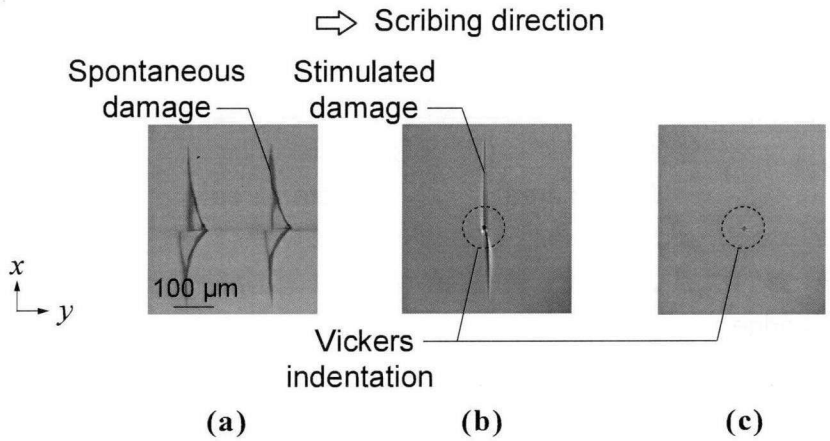
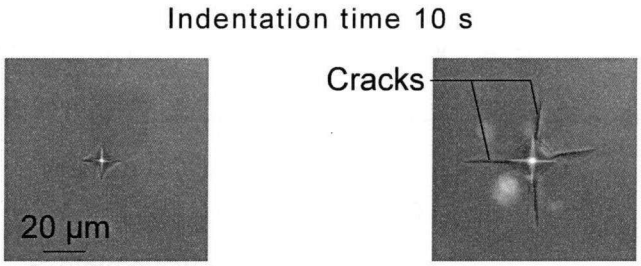


Fig. 2.3 Micrographs of scribed surface under three different processing conditions. **(a)** is the case where spontaneous damage was generated, **(b)** is the case where stimulated damage was generated after the Vickers test, and **(c)** is the case where no cracks were generated after the Vickers test. The processing state shown in **(c)** is defined to be suitable.

の点からスクライブ方向に対して垂直方向に生じた．ダメージの形と大きさ，およびダメージ発生点間の距離は一定ではなかった．**Fig. 2.3 (b)**に，レーザ照射領域に比較的小さい外力を加えると発生したダメージ（誘導ダメージ）の写真を示す．本研究では，スクライブ線上に局所的な一定荷重を負荷する方法としてビッカース試験を用いた．

まず，クラック発生のしきい値となる押し込み荷重を調査するため，未加工のソーダライムガラスにビッカース試験を行った．**Fig. 2.4** に，押し込み時間 10 s，押し込み荷重 100 g，200 g の条件での結果を示す．押し込み荷重 100 g の場合はクラックが生じなかったのに対し，200 g の場合は圧痕の四つの頂点から約 20 μm の長さのクラックが生じた．押し込み荷重 100 g の場合は，押し込み時間を 120 s に設定してもクラックが発生しなかった．これより，誘導ダメージの発生を確認する試験条件を，押し込み時間 10 s，押し込み荷重 100 g とした．なお，ビッカース圧子の対角線と加工線が重なるようにビッカース圧子の向きを設定した．また，加工後 1～2 時間が経過した後にビッカース試験を行った．



(a) Indentation load 100 g　(b) Indentation load 200 g

Fig. 2.4 Results of Vickers test for unprocessed soda-lime glass with different indentation load

Fig. 2.3 (b)に示すように，誘導ダメージは，ビッカース圧痕の頂点のうち，スクライブ線上にない二つの頂点からx方向に発生した．今回の実験では50～150 μmの範囲の長さの誘導ダメージが観察された．つまり，**Fig. 2.4** に示す未加工の試料と比べて，低荷重で大きなクラックが生じた．**Fig. 2.3 (c)**の試料はスクライブ線上にビッカース試験を行った結果，圧痕のみが形成され，ダメージは生じなかった．このように，自発および誘導ダメージが生じずに亀裂が形成された状態を適正(Suitable)と定義した．以下，自発ダメージ(Spontaneous damage)および誘導ダメージ(Stimulated damage)の語は，それぞれのダメージまたはダメージが生じた加工状態を指す．

2.2.3 光弾性実験

ガラスのビッカース試験において，試験前の基板の残留応力によって圧痕の頂点から生じるクラックの長さが変化することが報告されている[6]．今回の実験では，未加工のガラスではクラックが生じない程度の小さな荷重であっても誘導ダメージが発生した．また，誘導ダメージには方向性があり，**Fig. 2.3 (b)**のように x 方向に大きく成長した．これらのことから，誘導ダメージはレーザスクライブによってガラスに生じる残留応力が原因で発生すると考えられる．そこで，光弾性実験によってレーザスクライブ後の基板のリタデーションを測定した．

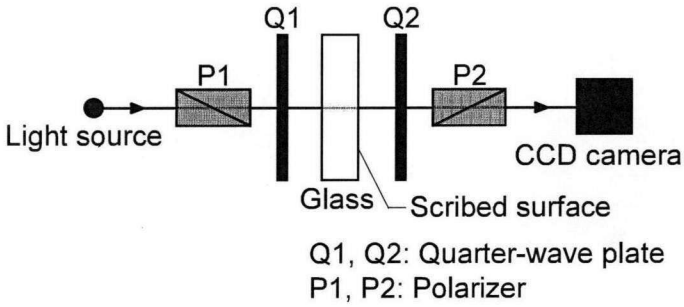


Fig. 2.5 Experimental setup for photoelastic observation

Fig. 2.5 に実験系を示す．主応力 σ_1，σ_2を受ける厚さt_pの弾性体内を波長λの光が通過すると，σ_1およびσ_2の方向に振動する光は，位相δが

$$\delta = \frac{2\pi t_p}{\lambda} C_p(\sigma_1 - \sigma_2) \tag{2.1}$$

だけずれることが知られている [7]．ここで，C_pは光弾性定数と呼ばれ，材料によって決まる．この現象により，**Fig. 2.5** において，ガラス基板が受ける主応力 σ_1，σ_2が光軸方向に一定であれば，検光子 P_2を通過する光の強度 I は

$$I = I_0 \sin^2 \frac{\delta}{2} \tag{2.2}$$

と表わされる [7]．ここで，I_0は試料がない状態でP_2を通過する光の強度である．式(2.1)および(2.2)により，光強度 I およびI_0を測定することで，リタデーション R を

$$R = C_p t_p(\sigma_1 - \sigma_2) = \frac{\lambda}{\pi} \sin^{-1}\left(\sqrt{\frac{I}{I_0}}\right) \tag{2.3}$$

と計算できる．

式(2.3)からわかるように，R は基板が受ける主応力差$(\sigma_1 - \sigma_2)$に比例する．主応力 σ_1，σ_2が **Fig. 2.5** における光軸方向に一定であれば，R をC_pおよびt_pで除算することで主応力差$(\sigma_1 - \sigma_2)$を求められるが，レーザスクライブ後の基板は，光軸方向に一定でない主応力を受けると考えられる．

そこで，リタデーション R により，基板が受ける応力を間接的に評価した．なお，レーザスクライブ後十分時間が経過し，基板全体が室温まで低下した状態で実験を行った．

2.3 実験結果

2.3.1 適正加工条件範囲

Fig. 2.6 に，様々なレーザ出力 $\overline{P}$ と走査速度 v を設定したときの加工状態の分類結果を示す．各 $\overline{P}$ において v が大きくなるにしたがい，加工状態が，自発ダメージ，誘導ダメージ，適正，スクライブ不可と変化した．また，レーザ出力 $\overline{P}$ が高いほど，適正加工条件範囲が高速側へ移行した．各 $\overline{P}$ において，適正加工条件範囲の最低速度は誘導ダメージ発生の有無によって，最高速度は垂直亀裂形成の有無によって決定される．つまり，誘導ダメージの生じない加工条件を適正加工条件とすることで，加工後に一定の外力が加わってもダメージの生じない，より信頼性の高い加工条件を絞り込むことができる．

2.3.2 リタデーション測定

Fig. 2.7 に，光弾性実験によって測定した亀裂周辺のリタデーション

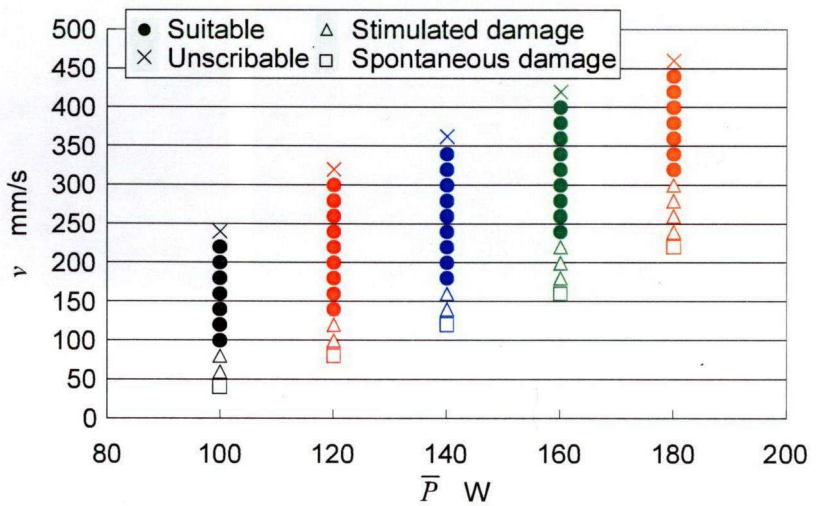


Fig. 2.6 Processing results under a variety of $\overline{P}$ and v

分布を示す．スクライブ方向は横方向，スクライブ位置は図の中央である．**Fig. 2.7 (a)**は自発ダメージ，**(b)**は誘導ダメージ，**(c)**は適正に分類された試料である．どの場合もスクライブ線周辺においてリタデーションが高く，複屈折現象が確認される．ここでは室温下で外力を加えずに観察を行ったため，この複屈折現象は残留応力によると考えられる．**Fig. 2.7 (a)**において，自発ダメージの先端付近では，その周囲と比べてリタデーションが低い．これより，ダメージの発生によって残留応力が解放されたと考えられる．

Fig. 2.7 (a), (b)のように，自発および誘導ダメージは，リタデーションが高い領域で発生した．そこで，リタデーションの値とダメージ発生の関係を調査した．**Fig. 2.8**に，亀裂に対して垂直方向（x 方向）のリタデーションのラインプロファイルを示す．リタデーションはレーザ照射領域の中央で最も大きかった．今回のスクライブ実験ではガウス分布のレーザ光を使用したことから，基板への局所的な入熱量に依存してリタデーションが変化すると考えられる．各加工条件でのリタデーションを比較するため，リタデーションの最大値 R_{max}を調べた．その結果を**Fig. 2.9**に示す．誘導ダメージに分類された加工条件下での R_{max}を△，適正の場合を●，スクライブ

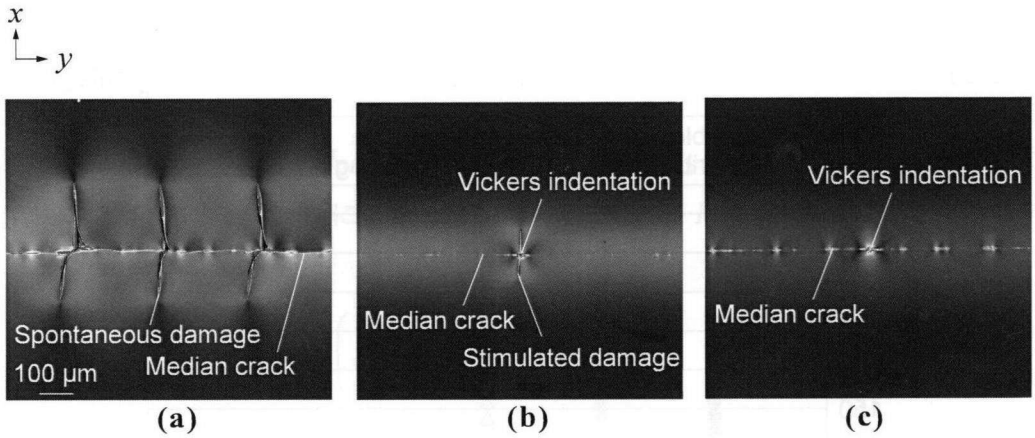


Fig. 2.7 Retardation distribution around a median crack for three processing conditions. **(a)** is the case where spontaneous damage was generated, **(b)** is the case where stimulated damage was generated after the Vickers test, and **(c)** is the case where no cracks were generated after the Vickers test. The processing state shown in **(c)** is defined to be suitable.

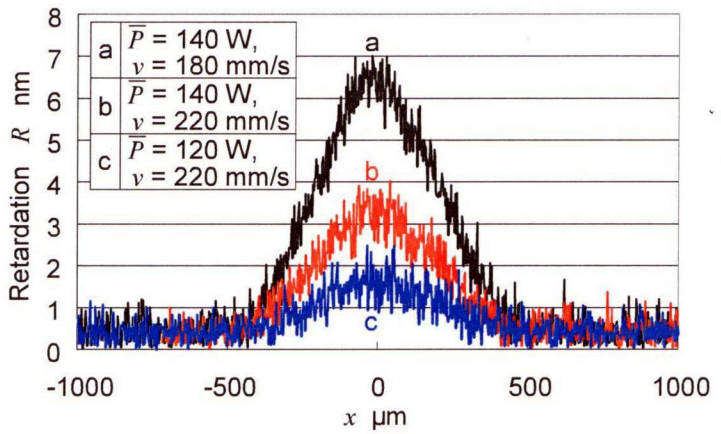


Fig. 2.8 x-line profile of retardation in three processing conditions

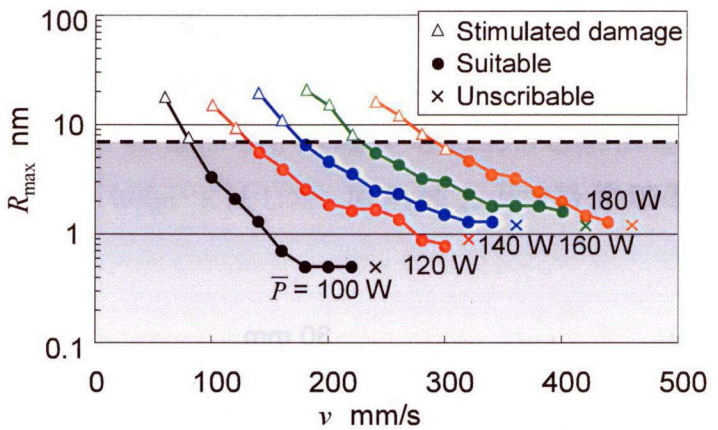


Fig. 2.9 Maximum retardation, R_{max} in each condition shown in **Fig. 2.6**

不可の場合を×で示した．自発ダメージが生じた試料については，測定位置によってR_{max}が大きく変化したため図に示していない．

レーザ出力が高く，走査速度が遅いほどR_{max}が大きかった．適正加工条件に関して，R_{max}に上限値があり，R_{max}が上限値を越える場合に誘導ダメージが生じることがわかる．これより，レーザスクライブ後の残留応力が一定値を越える場合，残留応力によって外力負荷点からクラックが進展

し，誘導ダメージが形成されるといえる．また，リタデーションを測定することで，外力を負荷しなくても誘導ダメージ発生の有無を予測できる．

2.4 二次元有限要素解析

2.4.1 解析方法

実験で調査した適正加工条件を推定することを目的として，有限要素法（Finite Element Method, FEM）による熱弾性解析を行った．ここでは，山本ら[2)]の研究と同様，スクライブ面に対して垂直な断面（$x-z$面）を対象とした二次元解析を行った．

厚さ1.3 mm，幅 60 mmの試料に対し，60 mm辺の中央をスクライブする場合を想定し，**Fig. 2.10** に示すFEMモデルを用いた．ここでは，対称性を考慮して 1/2 モデルを使用した．レーザ照射面と対称線との交点を原点とした．対称線付近をより細かく要素分割し，最小要素は一辺 8 μmの正方形とした．解析に用いたソーダガラスの物性値[8)~10)]を **Table 2.2** に示す．

レーザ光による加熱は，

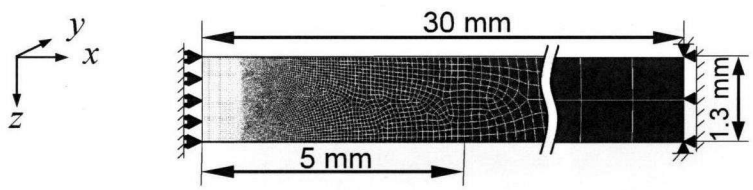


Fig. 2.10 Mesh geometry of analysis model

Table 2.2 Physical properties of soda lime glass

Density	2520 kg/m^3
Specific heat	800 J/(kg K)
Thermal conductivity	1.03 W/(m K)
Thermal expansion coefficient	8.7×10^{-6} K^{-1}
Young's modulus	71.6 GPa
Poisson's ratio	0.23

$$q(x,y,t)=\frac{2P'(t)}{\pi\xi_{\mathrm{h}}\eta_{\mathrm{h}}}\exp\left\{-2\left[\frac{x^2}{\xi_{\mathrm{h}}{}^2}+\frac{(y-Y_{\mathrm{c}}(t)-d)^2}{\eta_{\mathrm{h}}{}^2}\right]\right\} \tag{2.4}$$

で計算される熱流束 q を $z=0$ 面に与えてモデル化した．本研究では，繰り返し周波数 1 kHz のパルスレーザを用いてスクライブ実験を行った．解析において，基板の温度および応力をより詳しく解析するため，繰り返し周波数に合わせてレーザ出力 P を変動させてレーザのパルス波形を考慮した．各出力でのパルス波形を測定し，解析中では **Fig. 2.11** のように近似したパルス波形を設定した．ただし，光学系によるエネルギーの減衰と基板表面でのレーザ光の反射を考慮し，式(2.4)における入熱量 $P'(t)$ を $0.64P(t)$ とした．

ウォータジェットによる冷却は，

$$\alpha(x,y,t)=\alpha_{\max}\exp\left\{-2\left[\frac{x^2}{\xi_{\mathrm{c}}{}^2}+\frac{(y-Y_{\mathrm{c}}(t))^2}{\eta_{\mathrm{c}}{}^2}\right]\right\} \tag{2.5}$$

で計算される熱伝達率 α を $z=0$ 面に与えてモデル化した．ただし，冷却ノズル径および冷却水流量から冷却域中心における熱伝達率 $\alpha_{\max}$ を計算し[11]，$\alpha_{\max}=1.0\times10^5\ \mathrm{W/(m^2\ K)}$ とした．加熱域および冷却域を除くモデル境

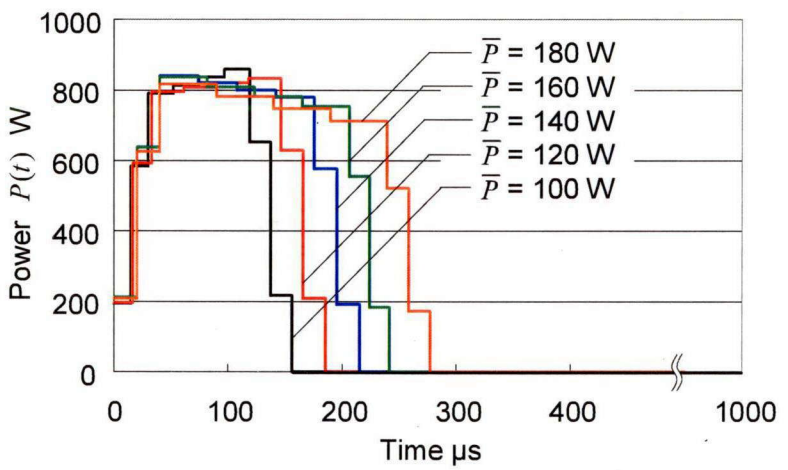


Fig. 2.11 Pulse waveforms for each average laser power in analysis

界は断熱とし，加熱域，冷却域が一定速度 v で y 方向へ移動する際の温度分布の時間変化を求めた．

得られた温度分布の時間変化を基に，平面ひずみ問題として熱応力解析を行った．拘束条件として，対称線（$x=0$）上の節点の x 方向変位を 0 とした．また，$x=30$ mm 上の節点は $x=0$ 近傍の節点に対して変位が十分小さいと考え，$x=30$ mm 上の節点の x および z 方向の変位を 0 とした．

2.4.2 解析結果

2.4.2.1 誘導ダメージ発生メカニズム

2.3.2 項で述べたように，誘導ダメージはレーザスクライブによってガラスに生じる残留応力に起因すると考えられる．ガラスは，せん断流動や高密度化によって残留応力が生じることが知られている [12-14]．せん断流動と高密度化がどの程度起こるかは，ガラスの組成や残留応力を生じさせる加工法によって異なる．Koike ら [12]は，ソーダライムガラスのボールイン

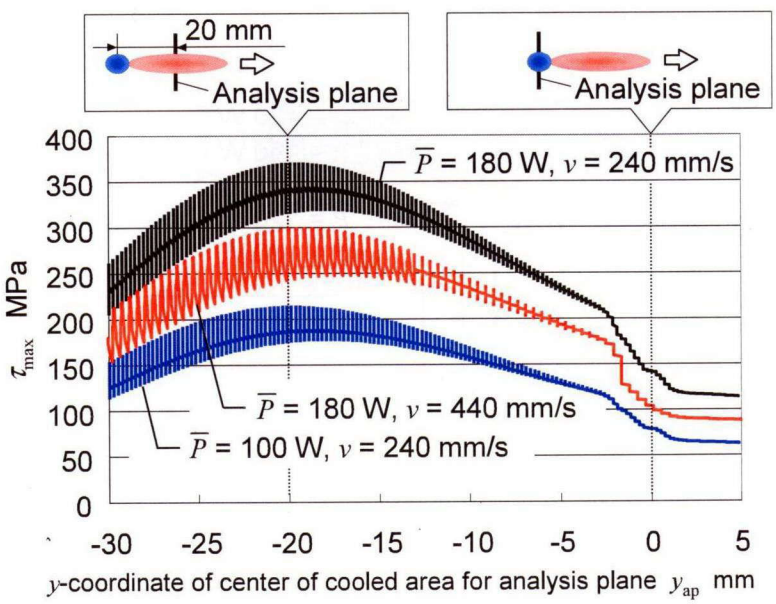


Fig. 2.12 Variation of τ_{max} at original point in three conditions

デンテーション時の変形は，せん断流動が支配的であることを報告している．**Fig. 2.7 (a)**において，自発ダメージの発生によって残留応力の解放が確認されることから，ここでは，熱弾性解析によって最大せん断応力τ_{max}を調べ，せん断流動の影響を検討した．

Fig. 2.12 に，三つの加工条件について，原点におけるτ_{max}の変化を示す．横軸は解析面に対する冷却域中心のy座標y_{ap}であり，時間変化を表す．冷却域中心が解析面上にある状態を$y_{ap}=0$，冷却域の中心が解析面を通過する前を$y_{ap}<0$と定義した．τ_{max}は，$y_{ap}=-20$ mm付近，つまりレーザ光の中心が通過した直後に最大値$\max[\tau_{max}]$をとる．$\overline{P}$が大きく，vが小さいほど$\max[\tau_{max}]$が大きい．

スクライブ後に生じる残留応力の大きさは$\max[\tau_{max}]$に起因すると考え，各加工条件におけるR_{max}と$\max[\tau_{max}]$の関係を調べた．**Fig. 2.13** に結果を示す．適正，誘導ダメージ，スクライブ不可の場合をそれぞれ●，△，×で示した．$\max[\tau_{max}]$が大きいほどR_{max}が大きいことから，大きなせん断応力下で大きな残留応力が生じると考えられる．ここで，レーザ出力$\overline{P}$が低いほど低い$\max[\tau_{max}]$のもとで誘導ダメージが生じることがわかる．この原因について以下のように考えた．張ら[15]は，ビッカース試験において，圧痕下部に塑性変形領域が存在することで除荷時に圧痕を押し上げる力がは

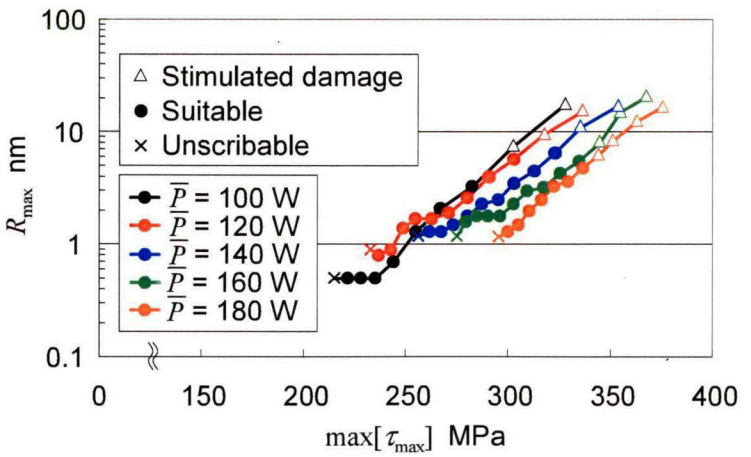


Fig. 2.13 R_{max} versus max[τ_{max}] at z = 0 in each condition shown in **Fig. 2.6**

たらき，圧痕頂点にはたらく引張応力が増加する可能性を指摘している．つまり，基板表面ではなく，基板内部に生じる残留応力が誘導ダメージの発生に影響する可能性がある．そこで，$x=0$上の様々な深さ z での $\max[\tau_{\max}]$と $\log R_{\max}$ の相関係数 r を

$$r=\frac{\sum\left(\tau_{\max}-\overline{\tau_{\max}}\right)\left(\log R_{\max}-\overline{\log R_{\max}}\right)}{\sqrt{\sum\left(\tau_{\max}-\overline{\tau_{\max}}\right)^2}\sqrt{\sum\left(\log R_{\max}-\overline{\log R_{\max}}\right)^2}} \tag{2.6}$$

によって求めた[16]．設定した z に対する r の変化を **Fig. 2.14** に示す．$z=80\,\mu\mathrm{m}$において r が最大となった．$z=80\,\mu\mathrm{m}$のときの $R_{\max}$と $\max[\tau_{\max}]$の関係を **Fig. 2.15** に示す．$R_{\max}$と $\max[\tau_{\max}]$は良い相関を示し，$\max[\tau_{\max}]$がおよそ 220 MPa を超えると $R_{\max}$ が 7 nm を超え，誘導ダメージが生じることがわかる．つまり，$z=80\,\mu\mathrm{m}$における $\max[\tau_{\max}]$を誘導ダメージ発生のしきい値とみなすことができる．

上述したように，誘導ダメージはレーザスクライブ後の残留応力によって生じる．また，**Fig. 2.15** に示すように，適正条件に関して $R_{\max}$ および $\max[\tau_{\max}]$に上限値がある．これより，$\max[\tau_{\max}]$を調べることで，レーザスクライブによってガラス基板に生じる残留応力を間接的に評価できると考えられる．$\tau_{\max}$はレーザ加熱中に最大値 $\max[\tau_{\max}]$をとることから，急速加熱に

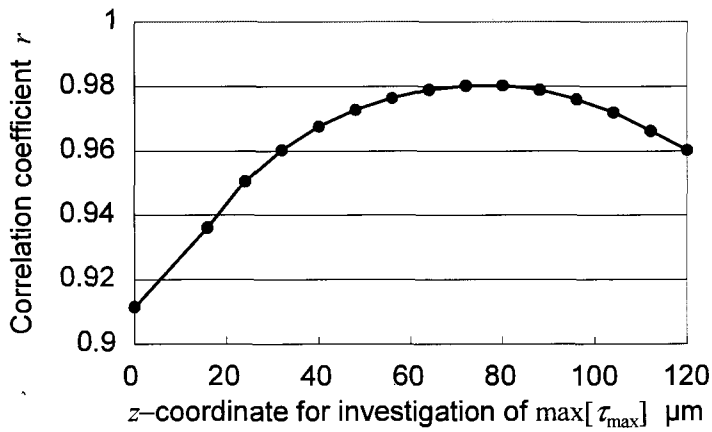


Fig. 2.14 Correlation coefficient between $\log R_{\max}$ and $\max[\tau_{\max}]$ at a various depth

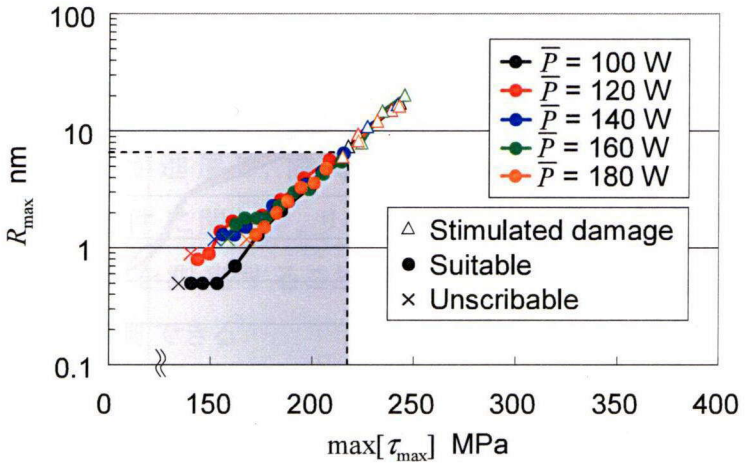


Fig. 2.15 R_{max} versus max[τ_{max}] at z = 80 μm in each condition shown in **Fig. 2.6**

よってはたらく大きなせん断応力が残留応力発生の要因といえる．以上の結果から，誘導ダメージの発生メカニズムを次のように説明できる．レーザ加熱時に生じる大きなせん断応力によってせん断流動が起こり，ガラスに残留応力が生じる．大きな残留応力が生じた基板に外力負荷によってクラック発生の起点が形成されると，残留応力によってクラックが進展し，誘導ダメージが形成される．

2.4.2.2 パルス発振の内部熱応力場への影響

本章では，レーザ加熱中の温度分布および応力分布の変化をより詳しく解析するため，実験に即したパルス波形を考慮して熱弾性解析を行った．**Fig. 2.16** に，$x=0$ 上で深さ z の異なる 3 点における τ_{max} の変化を示す．基板表面（$z=0$）では，パルス発振の影響による τ_{max} の振幅が大きいが，$z=24$ μm の位置では $z=0$ と比べて振幅が小さい．つまり，少なくとも $z \geq 24$ μm の領域では，パルス発振の影響による応力の振動を無視してよいといえる．**Fig. 2.15** における τ_{max} は $z=80$ μm の位置での結果であるため，CW 発振を仮定して解析を行っても同様の結果が得られる．

パルス発振を考慮するにはパルス波形を調べる必要があり，また，時間ステップの間隔をパルス幅より大きくできないことから，CW を仮定した

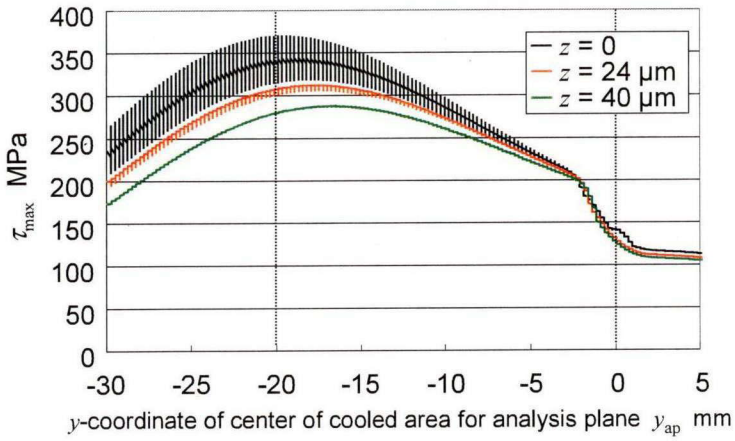


Fig. 2.16 Variation of τ_{max} at various depth on $x = 0$

方が簡易に短時間で解析できるというメリットがある. **Fig. 2.16** の結果から, レーザスクライブにおける亀裂進展を考察する際, 亀裂がある程度深ければ, 亀裂前縁にはたらく応力はパルス発振の影響を受けない. このため, CW 発振を仮定して亀裂進展解析する方が得策といえる. このような理由から, 次章以降の亀裂進展解析では, レーザは連続熱源として取り扱うことにする.

2.5 結　言

ガラスのレーザスクライブにおいて, 加工後に加工線周辺に比較的小さな外力を加えるとダメージが生じる場合がある. 本章では, このようなダメージを誘導ダメージと呼んだ. 誘導ダメージの発生メカニズムを明らかにし, 加工後に一定の外力が加わってもダメージの生じない, より信頼性の高い加工条件を推定することを目的として, レーザスクライブ実験および二次元熱弾性解析を行った. まず, レーザスクライブ後の基板のリタデーション測定結果を基に, 誘導ダメージの発生メカニズムを考察した. 実験結果に基づき, 加工後に外力が加わっても誘導ダメージの生じない, 適正加工条件の推定を試みた. その結果, 以下の結論を得た.

1. レーザ加熱時に生じる大きなせん断応力によってせん断流動が起こり，ガラスに残留応力が生じる．大きな残留応力が生じた基板に外力負荷によってクラック発生の起点が形成されると，残留応力によってクラックが進展し，誘導ダメージが形成される．
2. 適正加工条件に関して，リタデーションの最大値に上限値があり，リタデーションを測定することで誘導ダメージの生じない加工条件を実験的に予測できる．
3. 適正加工条件に関して，最大せん断応力の最大値に上限値があり，最大せん断応力を調べることで誘導ダメージの生じない加工条件を解析的に推定できる．
4. 基板表面の応力は，レーザのパルス波形に応じて大きく振動するのに対し，深さ24 μmの位置ではパルス発振の影響による応力の振動は十分小さい．深さ数十 μm以上の位置での応力場は，CW 発振を仮定した解析によって簡易に求めることができる．

誘導ダメージが生じる加工条件は，自発ダメージが生じる加工条件と適正加工条件の境界に分布する．そのため，誘導ダメージが生じる加工条件を避けることで，加工後に一定の外力が加わってもダメージの生じない，より信頼性の高い加工条件を絞り込むことができる．加工後に荷重を加えることで誘導ダメージが発生するかどうかを確かめることはできるが，製品や基板ごとに複数回の試験を行うのは容易ではない．本章で示した通り，実験（リタデーション測定）と解析（最大せん断応力調査）の両方から誘導ダメージが生じないことを確認すれば，誘導ダメージの発生を確認する工程を短縮でき，また，評価の信頼性が高まる．以上より，本研究はレーザスクライブの信頼性および生産性の向上を図る上で有用である．

参考文献

1) V.S. Kondratenko: Splitting of Non-Metallic Material, PTC WO 93/20015, (1993).

2) K. Yamamoto, N. Hasaka, H. Morita, and E. Ohmura: Thermal Stress Analysis on Laser Scribing of Glass, J. Laser Appl., **20**, 4, (2008), 193.

3) 三宅奏明: FPD ガラス基板の切断技術, 砥粒加工学会誌, **45**, 7, (2001), 342

4) K. Yahata, E. Ohmura, S. Shimizu, and M. Murakami: Dominant factors of suitable processing conditions in laser scribing of glass, Proc. of 6th Int. Conf. on LEM21, (2011), 3374.

5) K. Yahata, E. Ohmura, S. Shimizu, and M. Murakami: Suitable Processing Conditions Determined from the Standpoint of Residual Strain in Laser Scribing of Glass, Proc. of 31st ICALEO, (2012), 1281.

6) K. Zeng, and D.J. Rowcliffe: Vickers indentation in glass – 1. Residual stress fields and iso-stress contour maps, Acta Metallurgica et Materialia, **43**, 5, (1995), 1935.

7) 辻 二郎, 西田正孝, 河田幸三: 光弾性実験法, 日刊工業新聞社, 東京, (1965).

8) 日本機械学会: 日本機械学会 伝熱工学資料 改訂第 4 版 V. 物性編, (1986).

9) E.B. Shand: Glass Engineering Handbook 2nd ed., McGraw-Hill, New York, (1958)

10) 山根正之, 和田正道, 寺井良平, 小川晋永, 安井 至, 国分可紀, 近藤 敬: ガラス工学ハンドブック, 朝倉書店, (1999).

11) 山本 明: 切削液の伝熱性能について(第 2 報), 精密機械, **26**, 307, (1960), 461.

12) A. Koike, M. Tomozawa: IR investigation of density changes of silica glass and soda-lime silicate glass caused by microhardness indentation, J. Non-Cryst. Solids, **353**, (2007), 2318.

13) K.W. Peter: Densification and Flow Phenomena of Glass in Indentation Experiments, J. Non-Crystalline Solids, **5**, 2, (1970), 103.

14) R. Chakraborty, A. Dey, and A.K. Mukhopadhyay: Loading Rate Effect on Nanohardness of Soda-Lime-Silica-Glass, Metallurgical and Materials Transaction A, **41A**, (2010), 1301.

15) 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, **51**, 2, (2007), 30.

16) 河田敬義, 丸山文行, 鍋谷清治: 大学演習 数理統計, 裳華房, 東京, (1962).

第 3 章　基板中央付近の準定常亀裂進展解析と亀裂深さの推定

3.1 緒　言

第 2 章において，レーザスクライブにおける誘導ダメージ発生のメカニズムおよび誘導ダメージが生じない加工条件の推定方法について述べた．結果として，適正加工条件の加工速度の下限は，実験的にはリタデーションの最大値 R_{max} が一定値を超えるかどうかによって，解析的には最大せん断応力の最大値 $\max[\tau_{max}]$ が一定値を超えるかどうかで推定できることを明らかにした．

一方，走査速度が大きすぎる場合は，亀裂を形成することができない．山本ら [1), 2)] は，基板中央付近を亀裂が真っすぐ進む場合を対象とし，基板表面の最大引張応力が一定値を超えれば亀裂を形成できることを示している．すなわち，適正加工条件の加工速度の上限は，基板表面にはたらく最大引張応力がしきい値を超えるかどうかで推定できることを明らかにしている．ただし，山本らの研究では，加工中の亀裂形状までは考慮されていない．

レーザスクライブにおいては，亀裂生成の可否だけでなく，亀裂深さや亀裂形状も重要である．一般に，基板の加工開始側端面近傍で形成される亀裂の深さは，基板中央付近の亀裂のそれとは異なる．また，加熱域の中心と冷却域の中心がずれた場合には，断面形状が湾曲した亀裂が生成する．このように，加工条件によって亀裂深さだけでなく，亀裂形状も異なる．亀裂形状まで考慮して適正加工条件を絞り込むには，亀裂進展解析が不可欠である．しかしながら，レーザスクライブにおける亀裂深さや亀裂形状について理論的な検討を行った報告は見当たらない．そこで本章以降では，レーザスクライブで観察されるいくつかの特徴的な亀裂について，亀裂進展解析によって進展メカニズムを検討する．

本章では，レーザスクライブで最も重要で，基本となる基板中央付近で形成される一定深さの亀裂を対象とした．まず，三次元解析を行い，得られる亀裂深さを実験結果と比較して，解析方法および結果の妥当

性を検討した．次に，二次元亀裂進展解析を行い，より簡便に亀裂深さを求めることを検討した．

三次元亀裂進展解析を行う際は，亀裂のないモデルを用いて得られる熱応力場を基に，亀裂を含むモデルを用いて応力拡大係数を計算した．亀裂を含まないモデルによる熱応力解析には，従来の研究 [2]と同様に有限要素法（Finite Element Method, FEM）を用いた．三次元解析で亀裂形状を正確にモデル化するには，一般に多くの要素が必要であり，実用上，解析時間の短い方法が望まれる．応力集中問題においては，境界要素法（Boundary Element Method, BEM）を用いることで，有限要素法と比べて少ない要素数で高精度の解が得られることが報告されている [3]．そこで本研究では，応力拡大係数の計算には境界要素法を用いた．

3.2 実験方法および結果

レーザスクライブにおいて，基板中央では一定深さの亀裂が形成される [1), 2)]．そこで，亀裂進展解析結果と比較する対象として亀裂深さに注目した．亀裂深さを調べるため，様々な加工条件で厚さ 700 μm のソーダライムガラスのレーザスクライブ実験を行った．光学系および加工方法は第 2 章で述べた通りであるため，説明は省略する．**Table 3.1** に加工条

Table 3.1 Processing conditions in experiment

Laser beam shape		a	b
$2\xi_h$	Length of minor axis of heated area	1.2 mm	2.1 mm
$2\eta_h$	Length of major axis of heated area	26.0 mm	22.0 mm
d	Distance between centers of cooled and heated areas	15.0 mm	8.0 – 26.0 mm
P	Laser power	50 – 90 W	30.4 – 80.5 W
v	Scanning velocity	40 – 440 mm/s	40 – 400 mm/s
$2\xi_c$	Length of minor axis of cooled area	2.0 mm	2.0 mm
$2\eta_c$	Length of major axis of cooled area	3.0 mm	3.0 mm
	Flow rate of coolant	0.8 ml/min	0.8 ml/min

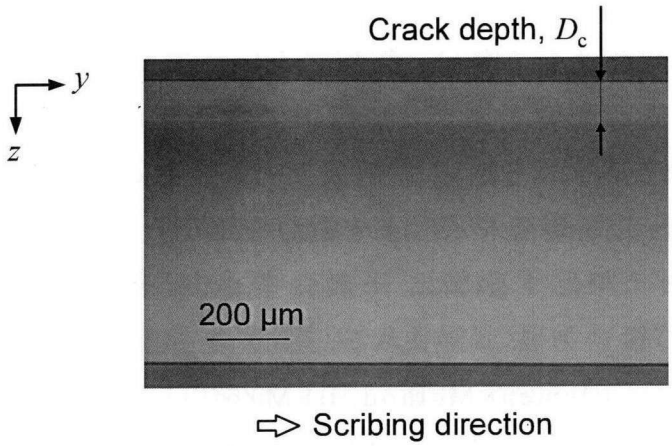
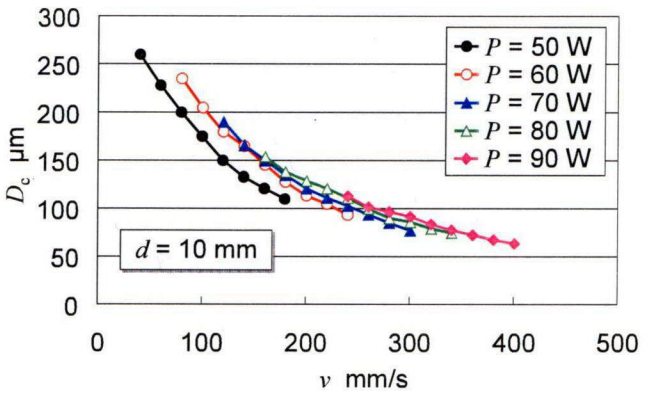
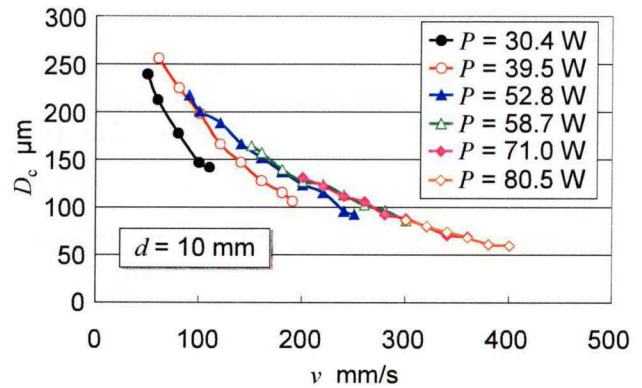


Fig. 3.1 Microscope image of cutting surface at center of scribing line

件を示す．加熱域および冷却域の位置関係は，**Fig. 2.2** に図示した通りである．二種類のビーム形状（ビーム形状 a, b と呼ぶ）のもと，様々なレーザ出力 P および走査速度 v を設定して実験を行った．ビーム形状 b の場合については，冷却点距離 d を一定として様々な P および v を設定する実験と，P および v を一定として様々な d を設定する実験を行った．加工後，亀裂に沿って基板を分断し，分断面を観察した．**Fig. 3.1** に基板中央付近での分断面の光学顕微鏡写真を示す．図中の上面がレーザ照射面である．分断面に観察される境界線が亀裂前縁位置を表す．各加工条件について，亀裂深さ D_c を測定した．**Fig. 3.2** に，ビーム形状 a, b のそれぞれについて，冷却点距離 d を 10 mm とした場合の D_c の測定結果を示す．各加工条件について 5 回の測定を行い，その平均値を示した．ビーム形状 a, b のどちらの場合も，レーザ出力が高く，走査速度が遅いほど D_c が小さかった．ビーム形状 b のもとで d を様々に設定した場合の結果については，3.4.2 項（**Fig. 3.19**）に解析結果と併せて示す．



(a) Laser beam shape a



(b) Laser beam shape b

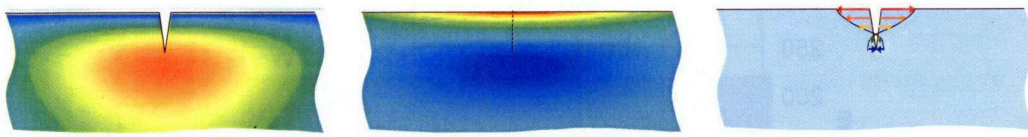
Fig. 3.2 Measured crack shape, D_c, under a variety of P and v for two laser beam shapes

3.3 三次元モードⅠ亀裂進展解析

3.3.1 解析方法

3.3.1.1 有限要素法と境界要素法の組み合わせ

本研究では，レーザスクライブ中の熱応力下における亀裂前縁の応力拡大係数に基づいて亀裂進展解析を行う．三次元解析においては，**Fig. 3.3** に模式的に示すように，重ね合わせの原理に基づいて応力拡大係数を求める．ここでは，**Fig. 3.3 (a)**のように，亀裂のある弾性体内に温度分布が生じ，それによって生じる熱応力下での応力拡大係数を計算する必要がある．そのために，まず亀裂のない弾性体にはたらく熱応力



(a) (b) (c)

Fig. 3.3 Calculation method for stress intensity factor based on superposition principle. (a) represents the problem to be solved. **(b)** represents uncracked problem for stress distribution which is sovled by FEM. **(c)** represents cracked problem for stress intensity factor which is solved by BEM

を求める(**Fig. 3.3 (b)**). 続いて, 得られた熱応力から亀裂表面にはたらく分布力を求め, 応力拡大係数を計算する(**Fig. 3.3 (c)**). **Fig. 3.3 (b)**のモデルは有限要素法によって, **Fig. 3.3 (c)**のモデルは境界要素法によって解く. 境界要素法は二次元要素を用いて三次元解析を行うため, 少ない要素数で亀裂形状を精度良くモデル化できる. 解析には市販のソフトウェアを使用し, 有限要素解析には ANSYS, 境界要素解析には BEASY を用いた.

3.3.1.2 有限要素法による熱応力解析

亀裂を含まないモデルを用いた熱応力解析については, 第 2 章で述べた有限要素法による二次元熱弾性解析を三次元に拡張した. **Fig. 3.4** に用いたモデルを示す. モデルサイズを10 mm×20 mm×700 μmとした. 加工位置を10 mm辺の中央($x=0$)に設定し, $x=0$周辺をより細かく要素分割した. 最小要素を50 μm×50 μm×25 μmの直方体とした. 第 2 章と同様, 実験条件に応じた熱流束および熱伝達率を$z=0$面に与えることでレーザ加熱およびウォータジェットによる冷却をそれぞれモデル化した.

2.4.2 項の第 2 目で述べたように, $z \geq 24$ μmの位置ではパルス発振による応力の振動は十分小さい. **Fig. 3.2** に示したように, 今回の実験で観察された亀裂の深さは60 μm以上であった. このため, 亀裂進展を検討する際, パルス発振を考慮する必要はないと考えられる. そこで, 本章以降

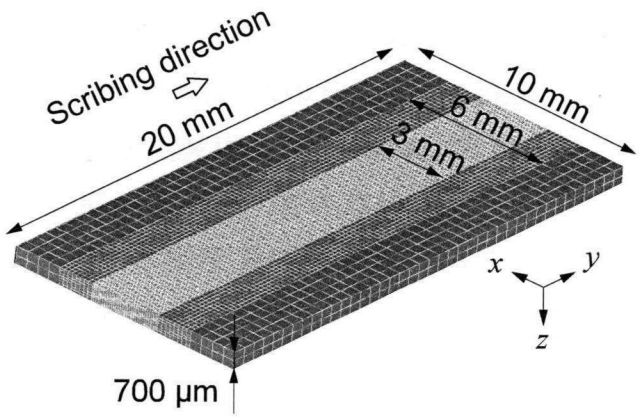


Fig. 3.4 Mesh geometry for three-dimensional thermal stress analysis by FEM

で亀裂進展現象を解析するにあたって，その基となる熱応力解析では，式(2.4)における$P'(t)$を一定とし，CW レーザによる連続面熱源を仮定した．

まず，加熱域および冷却域がy方向に速度vで移動する間の温度分布の時間変化を求め，得られた温度分布を基に熱応力解析を行った．拘束条件として，$x=0$面のx方向変位と，$y=\pm 5$ mmかつ$z=700$ μm上のyおよびz方向変位を0とした．

3.3.1.3 境界要素法によるモードI亀裂進展解析

亀裂進展解析を行うため，有限要素解析で得られた応力分布をもとに境界要素法によって応力拡大係数を求めた．レーザスクライブにおいて，冷却域にはたらく引張応力によって亀裂が進展する[1), 2)]．そこで境界要素解析では，亀裂が進展する可能性のある6 mm×6 mm×700 μmの領域に解析領域を限定した．具体的には，$-3\,\mathrm{mm} \le x \le 3\,\mathrm{mm}$，$Y_c - 2\,\mathrm{mm} \le y \le Y_c + 4\,\mathrm{mm}$の冷却域周辺とし，冷却域の移動に合わせて解析領域をy方向に移動させた．**Fig. 3.5** に境界要素モデルの一例を示す．**Fig. 3.5** の例では，亀裂は，先端から2.8 mmの部分のみが解析領域

に含まれる．解析領域外では亀裂が進展しないため，応力拡大係数を求める必要がない．また，解析領域内に亀裂の一部しか含まれなくても，応力拡大係数は大きく変化しない．そのため，このように解析領域を限定すれば，解析精度を維持して解析時間を短縮できる．

このようなモデルを用いて求めた応力拡大係数に基づいて亀裂進展解析を行う．**Fig 3.6** に示すように，亀裂の変形様式は，亀裂面にはたら

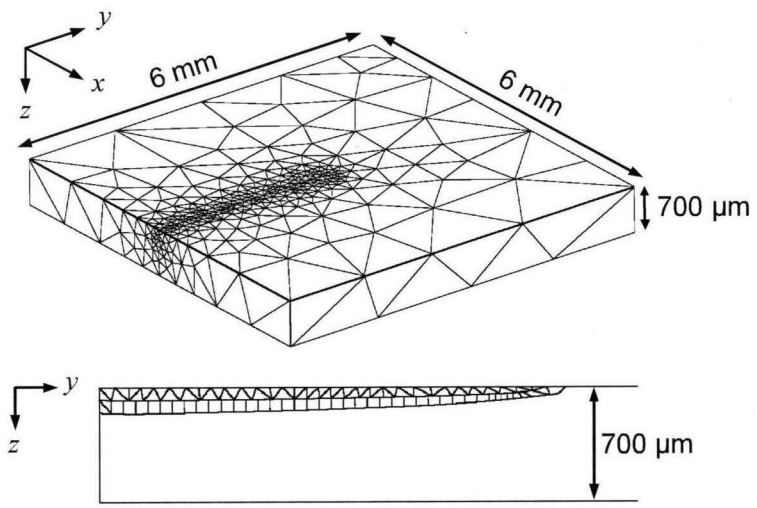
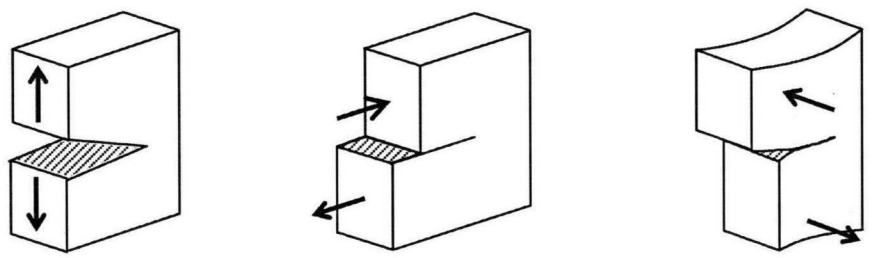


Fig. 3.5 Mesh geometry for three-dimensional crack propagation analysis by BEM



(a) Mode I (Opening) **(b)** Mode II (In-plane shear) **(c)** Mode III (Out-of-plane shear)

Fig. 3.6 Loading modes of a crack

く荷重により，モード I(開口形)，モード II(面内せん断形)モード III，(面外せん断形)の三つに分類され，これらの重ね合わせとして扱うことができる[4]．ここでは，実験において，レーザ光およびウォータジェットの強度分布を亀裂面に対して対称とした．その結果，応力分布は亀裂面に対して対称となり，亀裂面にはたらくせん断応力は十分小さい．そのため，モード I の変形様式のみを考慮する．

亀裂前縁上の各節点について，

$$J_{\mathrm{I}} = \int_{S_\varepsilon} \left(W n_1 - t_j \frac{\partial u_j}{\partial n_1} \right) dS \tag{3.1}$$

によって J 積分を計算し[4]，

$$K_{\mathrm{I}} = \sqrt{\frac{E}{1-\nu_{\mathrm{p}}} J_1} \tag{3.2}$$

によってモード I の応力拡大係数 K_{I}を求めた[4]．ここで，S_ε は亀裂前縁上の節点を中心とする円形の積分領域で，n_1は亀裂面に対する法線ベクトル，u は変位，E はヤング率，ν_{p}はポアソン比である．また，σ を応力，ε をひずみとするとき，$W = \sigma_{ij}\varepsilon_{ij}/2$，$t_j = \sigma_{ij} n_i$ である．i，j については総和規約を適用する．

レーザスクライブにおいて，冷却域周辺の引張応力場の前方には，レーザ加熱による圧縮応力場が存在し，亀裂の不安定成長を防止する．つまり，各時刻において，引張応力場と圧縮応力場の境界付近に亀裂前縁が位置すると考えられる．本研究では，以下の方法で任意時刻 t の亀裂形状を求めた．

まず，引張応力場内に初期亀裂を設定し，時刻 t の応力下での応力拡大係数 K_{I}を求めた．応力拡大係数のしきい値 K_{th}を設定し，K_{I}が K_{th}を超える領域において，亀裂面と同一平面内で亀裂前縁の外向き法線方向に節点を移動させた．これにより，$K_{\mathrm{I}} > K_{\mathrm{th}}$である位置のみ亀裂が成長し，新しい亀裂形状が得られる．新しい亀裂形状に合わせてモデルを改めて要素分割し，同一応力分布下での K_{I}を計算した．これを繰り返せば，亀裂は圧縮応力場へ向かって成長するため，次第に K_{I}が低下する．

亀裂前縁上のすべての節点においてK_IがK_{th}を下回ったときの亀裂形状を時刻 t の形状とした.

一回の亀裂進展量ΔL_{3D}は，$K_I = K_{th}$の場合に$\Delta L_{3D} = 0$となり，K_Iが大きいほどΔL_{3D}が大きくなるように，各節点ごとに

$$\Delta L_{3D} = C(K_I - K_{th}) \tag{3.3}$$

で与えた. 本解析では，設定した初期亀裂をΔL_{3D}ずつ徐々に進展させて，ある応力場に応じた亀裂形状を求める. 解析結果は一回の亀裂進展量ΔL_{3D}に依存し，ΔL_{3D}を十分小さく設定する必要がある. ここでは比例定数 C を5×10^{-11} m$^{1/2}$/Paとした. ΔL_{3D}を式(3.3)のように設定すること，および C の値の妥当性については，3.3.2 項の第 1 目で解析結果に基づいて検討する.

このように，得られた応力拡大係数 K_Iと応力拡大係数のしきい値 K_{th}を比較して亀裂進展解析を行う. 解析結果はK_{th}に依存するため，適切なK_{th}の値を設定する必要がある. 本研究では，亀裂深さに注目し，実験結果との比較によって適切なK_{th}の値を決定し，解析方法および結果の妥当性を検討した.

3.3.2 解析結果

3.3.2.1 温度分布の変化

Fig. 3.7 に，$P = 50$ W，$v = 140$ mm/sの場合について，有限要素解析によって得られた$x = 0$面内の温度分布の変化を示す. 温度分布図の上部および左に，各時刻の加熱域，冷却域の位置を模式的に示した. ただし，Y_cは加工開始側基板端を基準とした冷却域中心の y 座標である. レーザ照射によって基板表面が加熱され，時刻の経過とともに基板内部へ熱が伝わる. 基板表面の温度は，加熱域の中心より遅れて最大値に達する. その直後にウォータジェットによって冷却され，基板表面近傍では温度が急激に低下する. 本解析において，モデル中央付近の領域($5\,\text{mm} \le y \le 15\,\text{mm}$)では，温度場は準定常的に推移した. このような温度分布の変化を基に熱応力解析を行い，得られた応力分布を基に応力拡大係数を求めた.

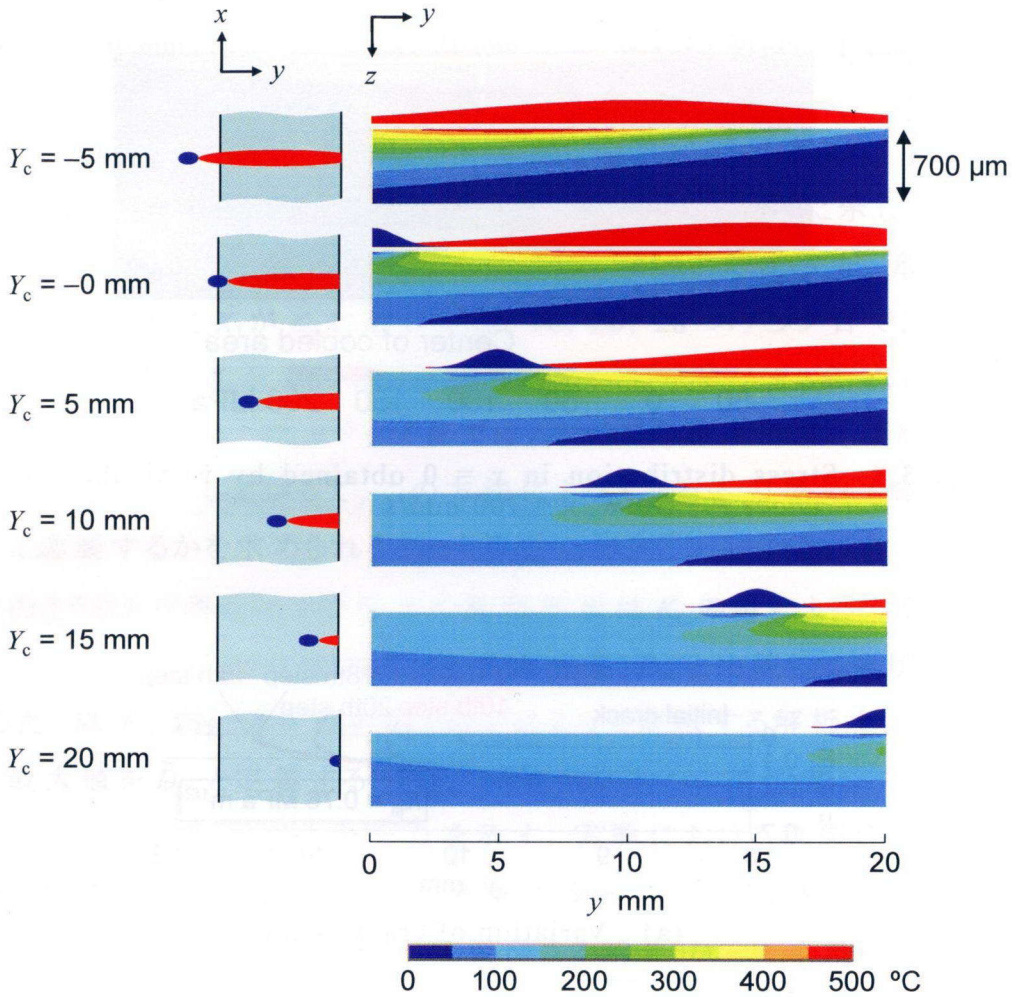


Fig. 3.7 Variation of temperature distribution in plane of x = 0 obtained by FEM analysis

3.3.2.2 応力拡大係数のしきい値の決定

ここでは，ビーム形状 a での実験について解析を行った．解析結果の例として，冷却域中心が有限要素モデルの中心にある（Y_c = 10 mm）時刻について，K_{th} = 0.76 MPa m$^{1/2}$とした場合の結果を説明する．**Fig. 3.8** に，有限要素解析で得られたx=0面内の垂直応力σ_x の分布を示す．本解析は，引張応力場内に設定した初期亀裂を成長させて亀裂形状を求める．**Fig. 3.8** において，σ_x はy=10.6 mmの位置で最大であり，亀裂はこ

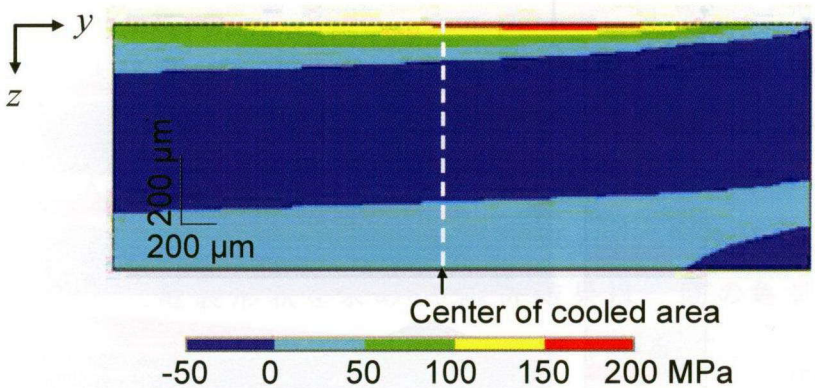
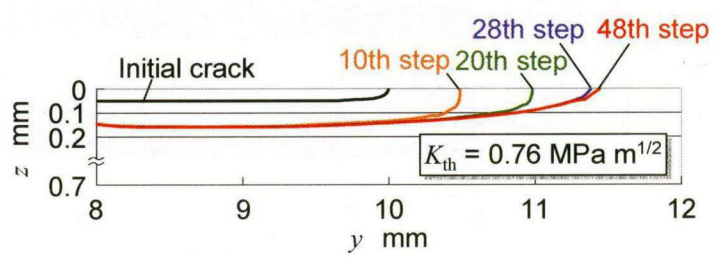
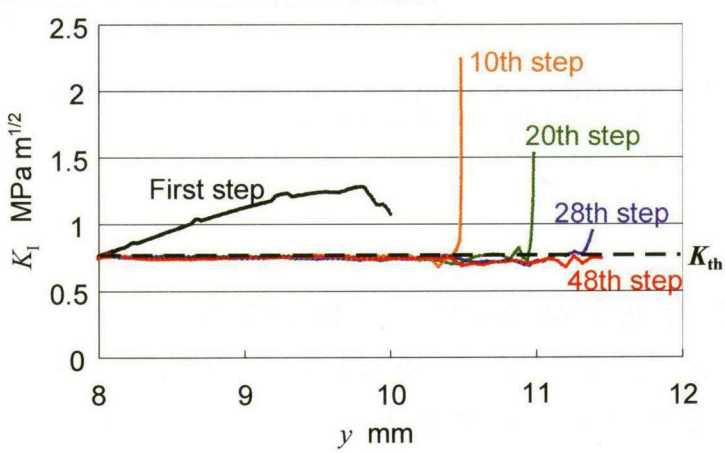


Fig. 3.8 Stress distribution in $x = 0$ obtained by FEM analysis under $P = 50$ W, $v = 100$ mm/s



(a) Variation of crack shape



(b) Variation of stress intensity factor

Fig. 3.9 Variation of analysis results in crack propagation analysis in the case where $P = 50$ W, $v = 100$ mm/s, $Y_c = 10$ mm

の辺りまで成長すると考えられる．そこで，初期亀裂先端の y 座標をこれより小さい 10 mm とした．また，$y=10$ mm では，深さ約 80 μm の位置で $\sigma_x=0$ となる．そこで，初期亀裂深さをこれより浅い 50 μm とした．

Fig. 3.9 に，解析の進行に伴う亀裂形状と K_I の変化を示す．**Fig. 3.9 (a)**のそれぞれの亀裂形状下で得られる K_I を **Fig. 3.9 (b)**に示した．初期亀裂形状のもとでは，すべての節点において K_I が K_{th} を超えた．亀裂を成長させるにつれて K_I が K_{th} に近付いた．10，20，28 ステップ目では，亀裂先端近傍のみで K_I が K_{th} を超え，48 ステップ目にすべての節点において K_I が K_{th} を下回った．48 ステップ目では，すべての節点において K_I が K_{th} とほぼ等しかった．したがって，この方法によってある応力場内で亀裂がどこまで進展するかを求められるといえる．

このようにして得られる解析上の亀裂形状は K_{th} の値によって変化する．そこで，解析で得られた亀裂深さを実験結果 D_c と比較して適切な K_{th} を求めた．以下，**Fig. 3.9 (a)**のように y によって変化する解析上の亀裂深さの最大値を $\tilde{D}_c$ と定義する．**Fig. 3.10** に，三つの加工条件について，K_{th} を様々に設定して得られた $\tilde{D}_c$ を示す．実験における亀裂深さの測定結果 D_c を併せて破線で示した．各加工条件について，K_{th} が大きいほど $\tilde{D}_c$ は単調に低下する．このとき，亀裂深さの誤差 $\left|\tilde{D}_c - D_c\right|$ が最小となる K_{th}

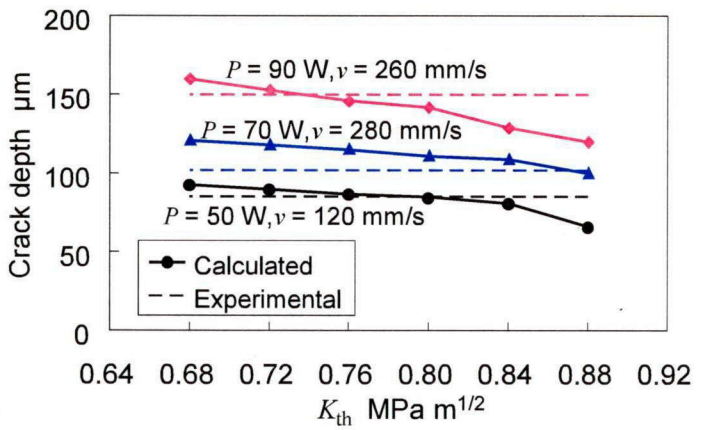


Fig. 3.10 Crack depth obtained by three dimensional analysis for a variety of K_{th}

の値は加工条件によって異なる．そこで，以下の方法により，各加工条件において亀裂深さの誤差が平均的に小さくなるK_{th}の値を調べた．まず，**Fig. 3.2 (a)**中の広い領域から，Pおよびvの異なる以下の九つの加工条件を選択した：(P [W], v [mm/s]) = (50, 80), (50, 120), (50, 160), (70, 160), (70, 220), (70, 280), (90, 260), (90, 320), (90, 380)．続いて，この九つの加工条件において，K_{th}を様々に設定して$\tilde{D}_c$を求め，$\tilde{D}_c$のD_cに対する相対誤差εを

$$\varepsilon = \frac{\left|\tilde{D}_c - D_c\right|}{D_c} \times 100 \tag{3.4}$$

で計算した．それぞれのK_{th}について，九つの加工条件下で得られたεの平均値$\bar{\varepsilon}$を求めた．**Fig. 3.11** に，設定したK_{th}に対する$\bar{\varepsilon}$を示す．九つのεの標準偏差をエラーバーで，それらの平均値$\bar{\varepsilon}$を●で示した．K_{th}が0.76 MPa m$^{1/2}$のとき$\bar{\varepsilon} = 5.5$ %となり，極小かつ最小であった．これより，選択した九つの条件については，$K_{th} = 0.76$ MPa m$^{1/2}$が適切といえる．

続いて，$P = 60, 80$ Wの場合について，$K_{th} = 0.76$ MPa m$^{1/2}$として$\tilde{D}_c$を求め，D_cと比較した．$P = 60, 80$ Wの条件は，K_{th}の決定に使用した九つの条件に含まれない加工条件である．**Fig. 3.12** に結果を示す．図中の19条件

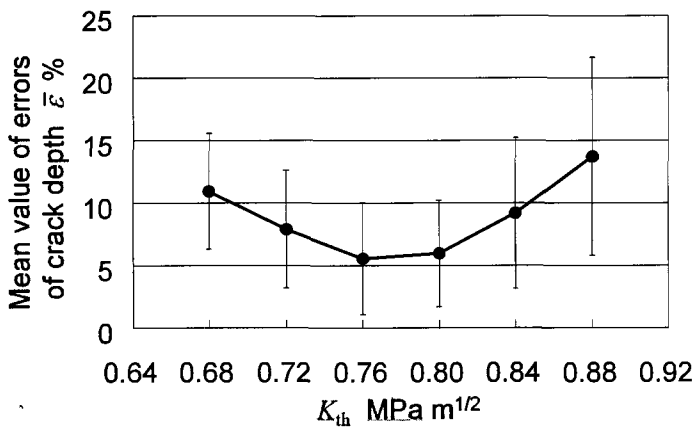


Fig. 3.11 Mean value of nine errors of analysed crack depth for measured one under a variety of K_{th}

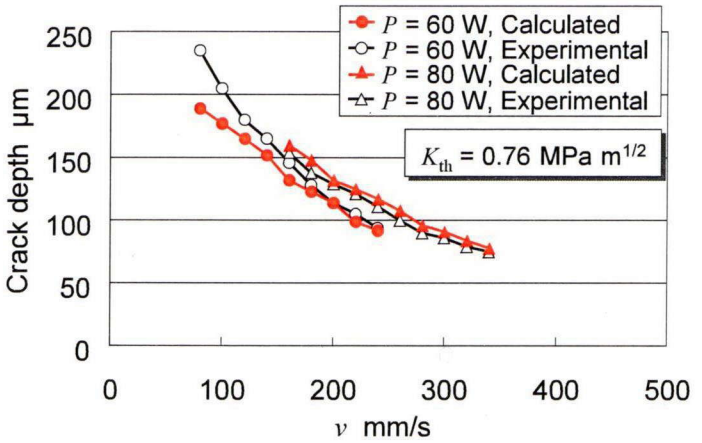


Fig. 3.12 Comparison of measured and calculated crack depth in the case of K_{th} = 0.76 MPa m$^{1/2}$

におけるεの平均値は 6.6 %であった．P=60, 80 Wの場合も，K_{th} = 0.76 MPa m$^{1/2}$とすることで$\tilde{D}_c$がD_cと比較的よく一致することがわかる．

これより，レーザ出力および走査速度が変わっても，適切なK_{th}の値として同じ値を適用できるといえる．したがって，一部の加工条件から適切なK_{th}の値を決定することで，P および v の異なる加工条件での亀裂深さを推定できる．

Fig 3.13 に，亀裂進展距離ΔL_{3D}を式(3.3)によって設定した場合と，K_Iに依存せず一定とした場合の亀裂進展の違いを模式的に示す．**Fig. 3.13**の下部は，進展前後の亀裂形状を表す．白の点は進展前の節点，黒の点は進展後の節点である．白の節点の亀裂形状のもと，**Fig. 3.13**の上部に示すようなK_Iが得られ，節点 A，B，C においてK_Iが K_{th}を下回ったとする．ΔL_{3D}の設定方法に関わらず，進展後の亀裂前縁の勾配は，節点 A，B，C において比較的大きく変化することがわかる．このように，解析上では亀裂前縁を離散化して扱うため，勾配の変化は避けられない．一般に，亀裂進展距離ΔL_{3D}を大きく設定するほど勾配の変化も大きくなる．勾配の変化が大きすぎると，応力拡大係数が適切に求まらない．**Fig. 3.13** から，式(3.3)によってΔL_{3D}を設定した場合の方が節点 D の進展距

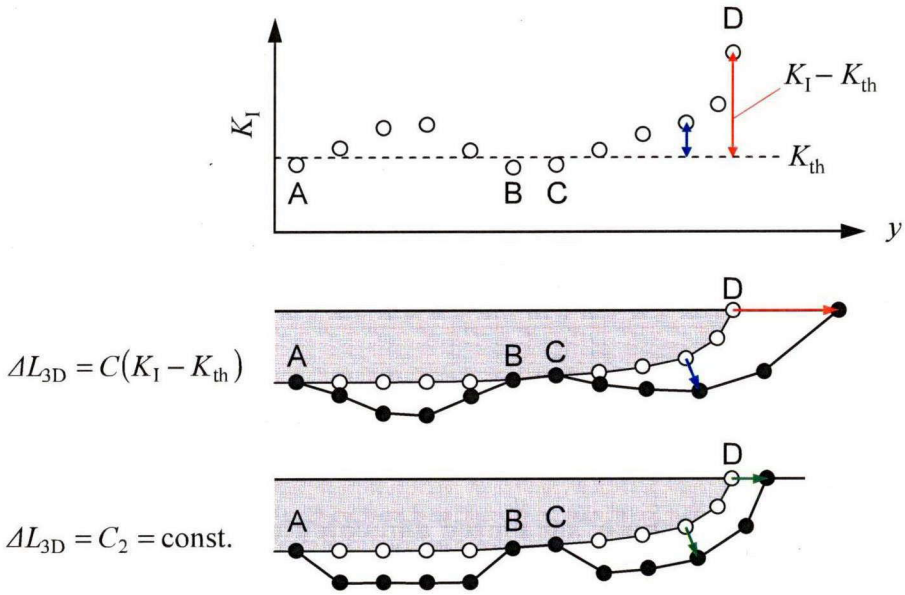


Fig. 3.13 Difference of crack shape depending on crack propagation distance at one step, ΔL_{3D}

離が大きいにもかかわらず，節点 A，B，C における勾配の変化を小さく抑えられることがわかる．このように，式(3.3)を用いることで，勾配の変化を小さく抑えながら ΔL_{3D} をある程度大きく設定できる．その結果，ΔL_{3D} を一定とした場合と比べて，亀裂形状を求めるのに必要な Step 数を削減できる．このため，ここでは式(3.3)によって ΔL_{3D} を設定した．

また，ΔL_{3D} が大きすぎると，$K_I = K_{th}$ となる位置を越えて亀裂が進展し，その結果 K_I が K_{th} より低下する可能性がある．これに対し，本解析の最終ステップ(**Fig. 3.9 (b)**中 48th step)での K_I は，すべての節点において K_{th} とほぼ等しいことから，設定した C の値(5×10^{-11} m$^{1/2}$/Pa)は，妥当な結果を得るのに十分小さいといえる．

3.3.2.3 基板中央での亀裂進展現象

このようにして求めた応力拡大係数のしきい値 K_{th} の値を用い，基板中央での亀裂進展現象について考察した．**Fig. 3.1** のように，基板中央付

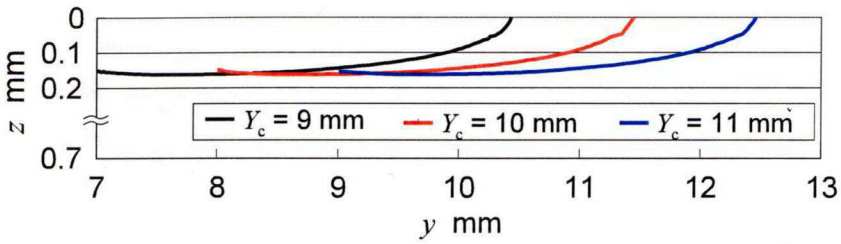


Fig. 3.14 Comparison of crack shapes obtained for three different time steps where Y_c = 9, 10, 11 mm

近では一定深さの亀裂が確認される. **Fig. 3.14** に, 冷却域中心が基板中央付近にある三つの場合 (Y_c =9,10,11 mm) について, 解析で得られた亀裂形状を示す. 三つのすべての場合で亀裂形状はほぼ等しく, 冷却域の移動量と同じだけ亀裂が y 方向へ移動した. つまり, 基板中央付近では亀裂が準定常的に進展した. これより, **Fig. 3.1** に示すような一定深さの亀裂は, 準定常的な亀裂進展の結果形成されたといえ, 3.3.2 項の第 1 目において一つの時刻の静的応力場から亀裂深さを推定できたのはこのためである.

3.4 二次元モード I 亀裂進展解析

3.3.2 項の第 3 目において, 基板中央における一定深さの亀裂は, 準定常亀裂進展の結果形成されることを明らかにした. 準定常現象であれば, $x-z$ 面を対象とした二次元解析によっても解析できると考えられる. そこで, 基板中央における亀裂進展現象をより短時間で解析することを目的とし, 二次元亀裂進展解析を行った.

3.4.1 解析方法

亀裂進展解析の方針は三次元解析と同様である. 亀裂を設けたモデルを用いて応力拡大係数 K_I を求め, K_I が応力拡大係数のしきい値 K_{th} を超える場合, 亀裂を進展させて改めて要素分割を行う. ただし, 二次元解析では亀裂深さのみを考慮する.

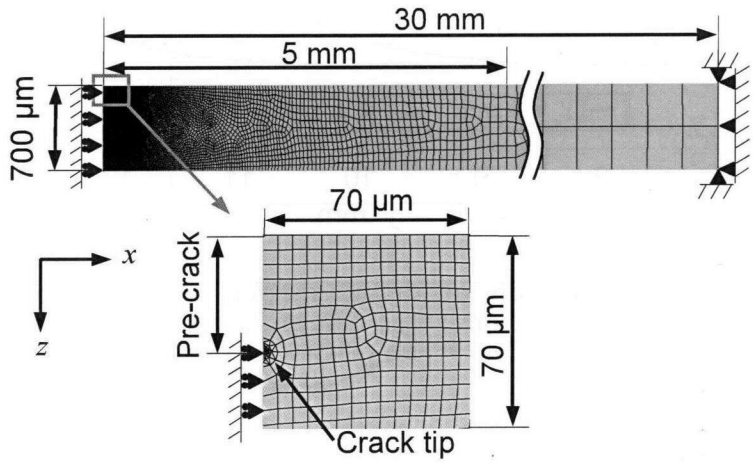


Fig. 3.15 FEM model for two-dimensional crack propagation analysis

二次元亀裂進展解析は有限要素法を用いて行った．まず，第 2 章で述べた方法と同様に，亀裂のないモデルを用いて加工中の温度分布の変化を求めた．得られた温度分布を，亀裂を含むモデルに適用し，応力，変位，応力拡大係数を求めた．**Fig. 3.15** に亀裂を設けた有限要素モデルの一例を示す．亀裂先端には特異要素 [5), 6)]を配した．特異要素は，亀裂先端における特異応力場を表現するための要素で，各辺の中心からずれた位置に中間節点が置かれている．対称線（$x=0$）上において，亀裂部以外の節点は x 方向変位 u_x を 0 に拘束し，亀裂部は必ず $u_x>0$ となるように拘束することで亀裂をモデル化した．また，$x=30$ mm 上の節点は x および z 方向の変位を 0 に拘束した．ここでも，モード I の変形様式を考え，変位外挿法 [7)]を用いて

$$K_{\mathrm{I}}=\lim_{r\to 0}\frac{Gu_x}{2(1-\nu_{\mathrm{p}})}\sqrt{\frac{2\pi}{r}} \tag{3.5}$$

によって応力拡大係数 K_{I} を計算した．ここで，G は横弾性係数，ν_{p} はポアソン比，r は亀裂先端からの $-z$ 方向の距離である．

z 軸に平行で深さ a_{ini} の初期亀裂を設定して時刻 t の温度分布下での応力拡大係数 K_{I} を求め，$K_{\mathrm{I}}>K_{\mathrm{th}}$ であれば亀裂を z 方向に距離 $\Delta L_{2\mathrm{D}}$ 進

展させた．亀裂を進展させる際は，解析領域をリメッシュし，ΔL_{2D}深くなった亀裂先端に改めて特異要素を配した．また，$x=0$上において，亀裂部の節点は$u_x=0$，亀裂部以外の節点は$u_x>0$となるように拘束条件も与え直した．さらに，亀裂をΔL_{2D}深くした後，再度同じ温度分布下でK_Iを計算し，K_IがK_{th}を下回るまでこれを繰り返した．K_IがK_{th}を下回るときの亀裂深さを時刻 t の深さとした．続いて，亀裂深さをそのままにし，時刻$t+\Delta t$の温度分布を適用して同様に亀裂深さを求めた．このようにして加熱域および冷却域が解析面を通過し終わるまで解析を行い，最終的な亀裂深さを$\tilde{D}_c$とした．

得られる亀裂深さ$\tilde{D}_c$の精度は一回の亀裂進展距離ΔL_{2D}に依存するため，結果の精度を考慮してΔL_{2D}を決定する必要がある．ここでは，実験における亀裂深さD_cの測定精度や測定結果のばらつきを考慮し，ΔL_{2D}を5 μmとした．

3.4.2 解析結果

二次元解析においては，ビーム形状 b の場合について，三次元解析と同様，まず亀裂深さ$\tilde{D}_c$を実験結果D_cと比較して適切なK_{th}の値を調べ

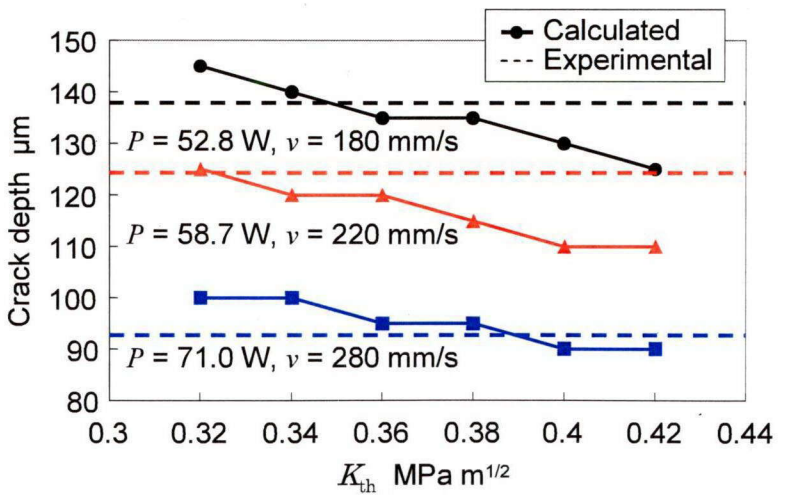


Fig. 3.16 Calculated crack depth under a variety of K_{th} and measured crack depth for three processing conditions

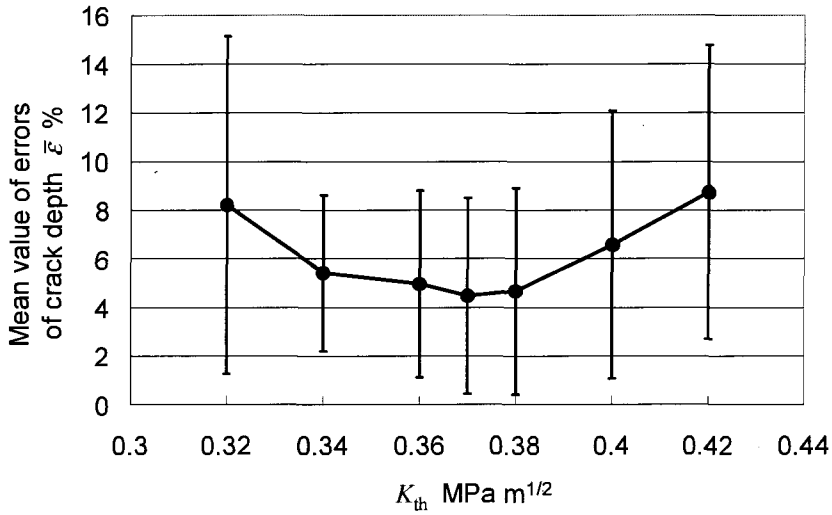


Fig. 3.17 Mean value of eighteen errors of analysed crack depth for measured one under a variety of K_{th}

た. **Fig. 3.16** に, 三つのスクライブ条件について, 様々なK_{th}を設定して求めた亀裂深さ$\tilde{D}_c$を示す. 各加工条件での亀裂深さの測定結果 D_c を破線で示した. **Fig. 3.10** と同様, K_{th}の増加に伴って$\tilde{D}_c$が単調に減少した. そこで, ここでも適切なK_{th}の値を調べるため, まず, **Fig. 3.2 (b)**の中から18個の加工条件を選択し, 様々なK_{th}を設定して亀裂深さ$\tilde{D}_c$を求めた. 各K_{th}について18個のεの平均値$\bar{\varepsilon}$を計算した. 結果を **Fig. 3.17** に示す. $K_{th}=0.37$ MPa m$^{1/2}$のとき$\bar{\varepsilon}$が最小となったため, ここでの適切なK_{th}の値を0.37 MPa m$^{1/2}$と決定した.

Fig. 3.18 および **Fig. 3.19** に, $K_{th}=0.37$ MPa m$^{1/2}$として得られた亀裂深さ$\tilde{D}_c$と測定結果 D_c の比較を示す. **Fig. 3.18** は, 冷却点距離 d を10 mmとし, 様々なPおよびvを設定した場合, **Fig. 3.19** は, Pおよびvを一定とし, 様々なdを設定した場合である. いずれの場合も, $\tilde{D}_c$とD_cは比較的よく一致した. これより, 二次元解析でも三次元解析と同様に亀裂深さを推定できるといえる.

以上の結果から, 応力拡大係数のしきい値K_{th}を設定して, 応力拡大係数K_IがK_{th}を超えると亀裂を進展させる解析法方が妥当であるといえる. 本章では, 基板中央において亀裂が準定常的に進展することから二次

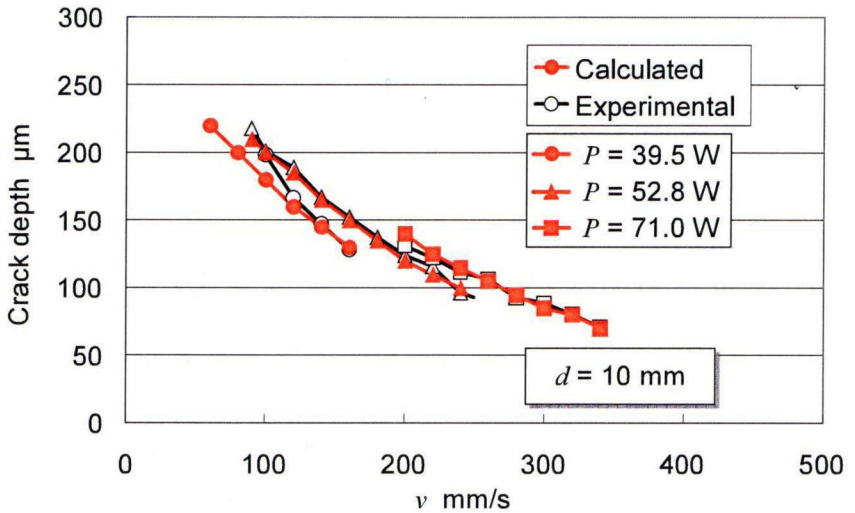


Fig. 3.18 Comparison of calculated and measured crack depth in the cases where d is constant and P, v are variable.

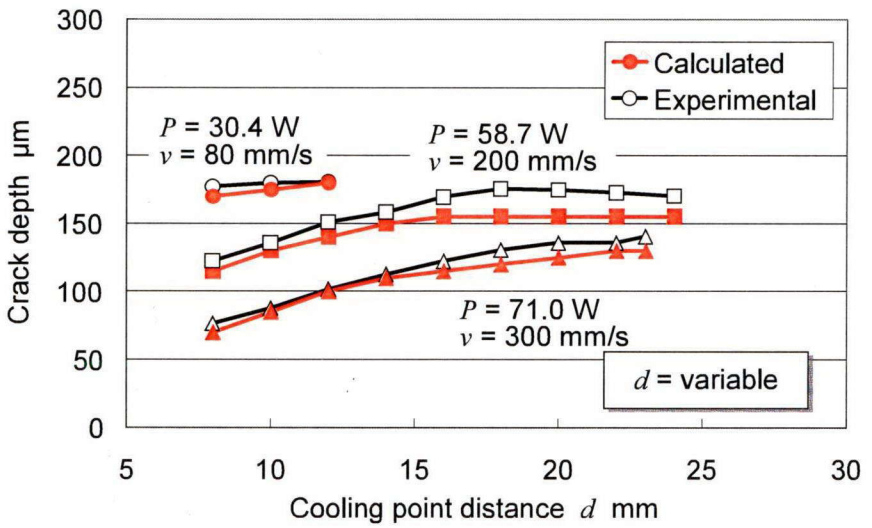


Fig. 3.19 Comparison of calculated and measured crack depth in cases where P, v are constant and d is variable.

元解析も併せて行った．二次元解析では扱える対象が限られるが，基板中央の亀裂進展現象については，短時間で解析できる二次元解析の方が有用である．

3.5 結 言

本章では，レーザスクライブで最も重要で，基本となる基板中央付近で形成される一定深さの亀裂に注目した．この亀裂の深さを推定することを目的として，亀裂深さの測定実験と，二次元および三次元亀裂進展解析を行った．解析において，初期亀裂を設定してモードIの応力拡大係数 K_{I} を求め，K_{I} が応力拡大係数のしきい値 K_{th} を超えると亀裂を進展させた．まず，三次元解析を行い，得られる亀裂深さを実験結果と比較して，解析方法および結果の妥当性を検討した．次に，二次元亀裂進展解析を行い，より簡便に亀裂深さを求めることを検討した．その結果，以下の結論が得られた．

1. 基板中央付近では亀裂が準定常的に進展するので，一定深さの亀裂が形成される．このため，基板中央付近の静的熱応力場を用いて亀裂進展現象を解析できる．
2. いくつかの加工条件から適切な応力拡大係数のしきい値 K_{th} を求めれば，異なる加工条件での亀裂深さを亀裂進展解析によって推定できる．
3. レーザ出力，走査速度，冷却点距離の異なる複数の加工条件における亀裂深さの解析結果は，実験結果とよく一致した．したがって，本解析方法の妥当性が示された．
4. 基板中央付近の亀裂進展は準定常現象であるから，スクライブ方向に対して垂直な断面を対象とした二次元解析によっても亀裂深さを推定できる．二次元解析は扱える現象が限られるが，基板中央での亀裂進展現象に限れば，短時間で行える二次元解析の方が有用である．

本章で示したように，基板中央付近で形成される亀裂の深さは加工条件によって異なる．また，スクライブ後のブレイク工程で必要となる曲げ応力は亀裂深さに依存する．したがって，本解析により，亀裂深さまで考慮して適正加工条件を絞り込むことができる．実験を行えば各加工条件下で形成される亀裂深さを調べられるが，本章で述べた解析を用いれば，

比較的少ない試行回数の実験を系統的に行うことで亀裂深さを推定できるため，生産性の向上を図ることができる．

参考文献

1) K. Yamamoto, N. Hasaka, H. Morita, and E. Ohmura: Thermal Stress Analysis on Laser Scribing of Glass, J. Laser Appl., **20**, 4, (2008), 193.

2) 山本幸司，羽阪　登，森田英毅，大村悦二：ガラスのレーザスクライブにおける三次元熱応力解析，日本機械学会論文集 C 編，**72**, 724, (2006), 3927

3) A. Portela: Dual boundary element analysis of crack growth, Computational Mechanics Publications, Southampton, (1993)

4) 岡村弘之：線形破壊力学入門，培風館，東京，(1976).

5) H.D. Hibbitt: Some Properties of Singular Isoparametric Elements, Int. J. for Numerical Methods in Engineering, **11**, 1, (2005), 180.

6) R.S. Barsoum: Application of Quadratic Isoparametric Finite Elements in Linear Fracture Mechanics, Int. J. Frac., **10**, 4, (1974), 603.

7) 吉村　忍，李　準晟，矢川　元基：三次元き裂の応力拡大係数解析の自動化，日本機械学会論文集，A 編，**61**, 587, (1995), 128.

第 4 章　加工開始側基板端付近の過渡的亀裂進展解析

4.1 緒　言

前章において，応力拡大係数がしきい値を超える領域で亀裂を進展させることで，基板中央部での亀裂の準定常な進展現象を解析し，亀裂深さを推定できることを示した．準定常現象であるため，二次元解析によってより簡易に扱うことができることも示した．実験結果と比較した結果，解析方法と解析結果の妥当性が示された．

本章では，加工開始側基板端付近での非定常亀裂進展現象に注目し，同様の解析によって亀裂進展メカニズムを検討した．加工開始側基板端付近では亀裂が基板を貫通する場合があり，基板中央とは異なる亀裂進展現象が観察される．亀裂が基板中央部で準定常的に進展するに至るには，基板端付近における過渡現象を伴う．したがって，このような基板端付近での過渡現象も含めた亀裂進展のメカニズムを理解することが重要である．そこで，本研究ではまず，基板端から基板中央にかけて，亀裂がどのように進展して一定深さの垂直亀裂に至るかを実験によって調べた．次に，実験結果を踏まえ，第 3 章と同様に，有限要素法による熱応力解析結果に基づいて境界要素法による亀裂進展解析を行った．

4.2 実験方法および結果

レーザスクライブ実験を行うにあたり，形成した初期亀裂の写真を **Fig. 4.1** に示す．これは，初期亀裂形成直後に初期亀裂に沿って基板を分断し，分断面を観察したものである．図中の上面が，スクライブ実験中にレーザ光を照射する面である．初期亀裂の長さは約 1 mm，基板端での深さは約 100 μm とした．

このような初期亀裂を形成した後，レーザスクライブ実験を行って，亀裂がどのように進展して最終的に一定深さの垂直亀裂となるかを調べた．光学系および実験方法は第 2 章で述べた通りである．**Table 4.1** に加工条件を示す．ビーム形状は第 3 章のビーム形状 a と同じである．加工後，

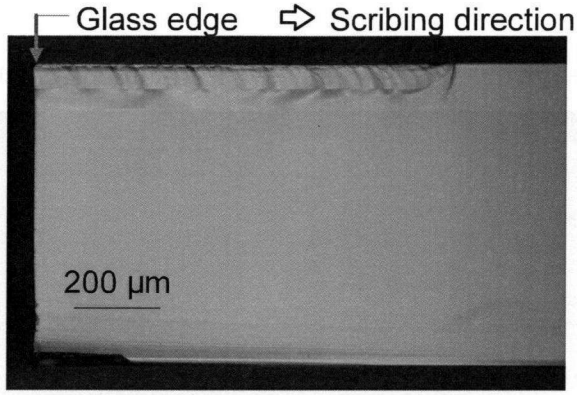


Fig. 4.1 Microscope image of initial crack

Table 4.1 Experimental conditions

	Laser beam shape pattern	a
$2\xi_h$	Length of minor axis of heated area	1.2 mm
$2\eta_h$	Length of major axis of heated area	26.0 mm
d	Distance between centers of cooled and heated areas	15.0 mm
P	Laser power	50 – 90 W
v	Scanning velocity	40 – 440 mm/s
$2\xi_c$	Length of minor axis of cooled area	2.0 mm
$2\eta_c$	Length of major axis of cooled area	3.0 mm
	Flow rate of coolant	0.8 ml/min

亀裂に沿って基板を分断し，分断面を観察して，亀裂がどのように進展したか調査した．

Fig. 4.2 に，レーザスクライブ後の分断面のうち初期亀裂付近の光学顕微鏡写真を示す．ここでも上面がレーザ照射面である．分断面に観察される境界線が亀裂前縁位置を表す．**Fig. 4.2** において，加工開始側基板端に対して位置 A より遠い領域では，基板中央付近と同様に一定深さの表面亀裂が確認される．位置 A において，亀裂前縁を表す境界線が基板の裏面へ到達している．この結果から，基板表面に形成した初期亀裂が貫通亀裂へと成長して位置 A まで進展し，位置 A において貫

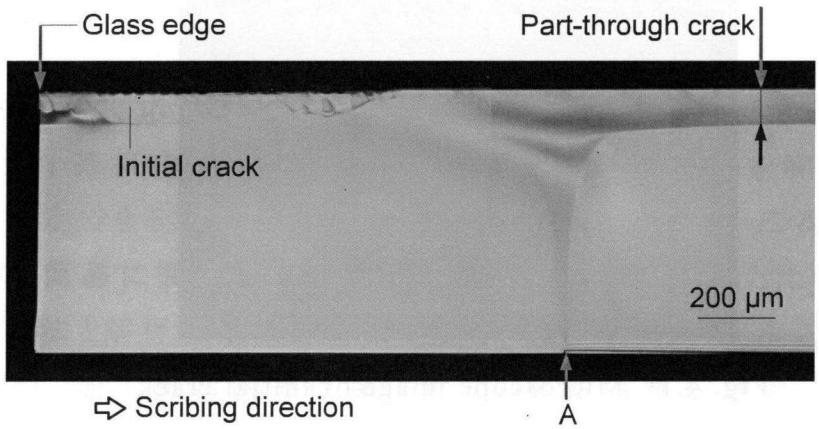


Fig. 4.2 Microscope image of cutting surface at start of processing

通亀裂が一定深さの表面亀裂へと移行したと考えられる．今回観察を行ったすべての場合において，基板端では貫通亀裂が形成され，ある位置で貫通亀裂が表面亀裂へと移行する現象が確認された．

4.3 三次元モードI亀裂進展解析

4.3.1 解析方法

解析方法の概要は第 3 章で述べた三次元解析の通りである．まず，亀裂を含まない有限要素モデルを用い，基板端がレーザ光によって加熱され，その後ウォータジェットによって冷却される間の熱応力分布の過渡的変化を解析した．得られた応力場を基に，境界要素法による亀裂進展解析を行った．解析領域のサイズは，第 3 章と同様に6 mm×6 mm ×700 μmとした．ただし，基板端付近での亀裂進展を扱うため，ここでは解析領域を$-3\,\mathrm{mm} \le x \le 3\,\mathrm{mm}$，$0 \le y \le 6\,\mathrm{mm}$の領域に固定した．これにより，亀裂長さが6 mm以下であれば亀裂全体が解析領域に含まれる．解析モデルの一例を **Fig. 4.3** に示す．この領域内での過渡的亀裂進展を以下のようにして解析した．

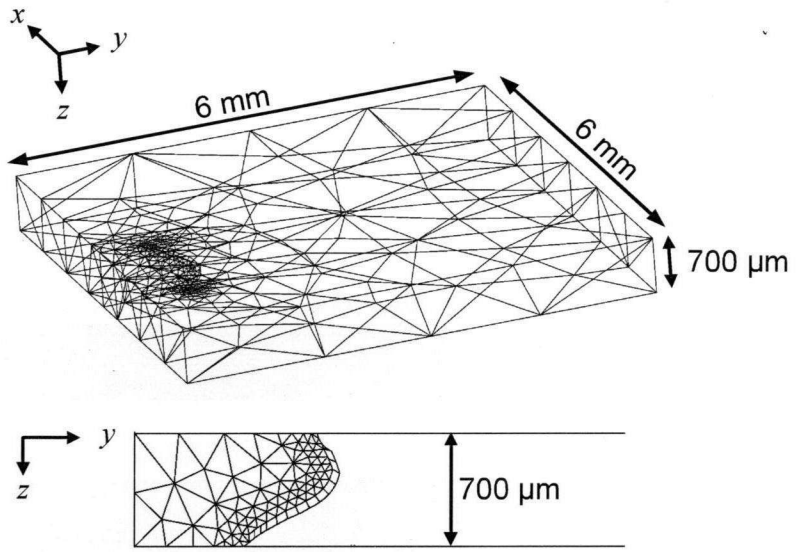


Fig. 4.3 Example of mesh geometry of BEM model for a through crack

まず，実験で用いた初期亀裂（**Fig. 4.1**）と同形の初期亀裂を$x=0$面上に設定した．式(3.1)および式(3.2)により，時刻tの応力分布下での応力拡大係数K_{I}を求めた．応力拡大係数のしきい値K_{th}を設定し，K_{I}がK_{th}を超える領域において，亀裂面と同一平面内で亀裂前縁の外向き法線方向に節点を移動させた．新しい亀裂形状に合わせてモデルを改めて要素分割し，同一応力分布下でのK_{I}を計算した．亀裂前縁上のすべての節点においてK_{I}がK_{th}を下回ったときの亀裂形状を時刻 t の形状とした．過渡的亀裂進展現象を扱うため，ある時刻に得られた亀裂形状を次の時刻の初期亀裂として用いた．

一回の亀裂進展量ΔLは，ここでも第 3 章の式(3.3)を用いて設定し，同じく$C=5\times10^{-11}\ \mathrm{m^{1/2}/Pa}$とした．$K_{\mathrm{th}}$としては，第 3 章で求めた$0.76\ \mathrm{MPa\ m^{1/2}}$を用いた．

4.3.2 解析結果

4.3.2.1 熱応力解析結果

Fig. 4.4 に，有限要素解析で得られた $x=0$ 面内の垂直応力 σ_x の変

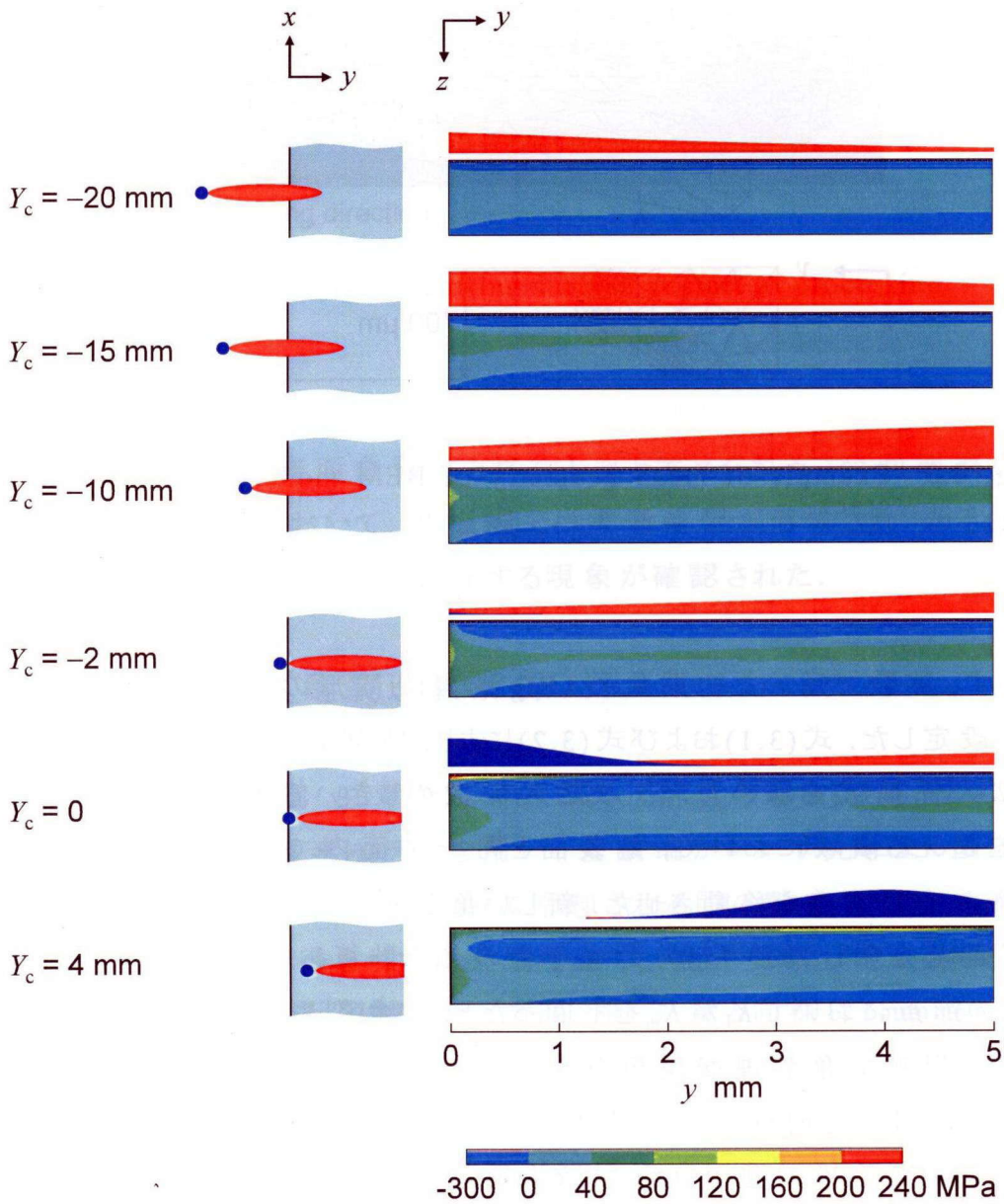


Fig. 4.4 Variation of stress distribution around start of scribing under the condition where P = 90 W, v = 380 mm/s

化を示す．各応力分布図の上部および左に，各時刻の加熱域，冷却域の位置を模式的に示した．ただし，Y_cは加工開始側基板端を基準とした冷却域中心の y 座標である．**Fig. 4.4** において，$-20\,\mathrm{mm} \le Y_c \le -2\,\mathrm{mm}$となる時刻には基板端がレーザ照射によって加熱される．このとき，基板表面近傍には圧縮応力が，基板内部には引張応力がはたらく．続いて，$Y_c > -2\,\mathrm{mm}$となる時刻には，冷却域が基板上を通過する．このとき，基板内部だけでなく基板表面近傍にも引張応力がはたらく．基板内部の引張応力は時刻とともに低下するのに対し，基板表面側の引張応力場は冷却域の移動に伴って y 方向に移動する．このような応力場の過渡的変化に応じた亀裂進展を解析した．

4.3.2.2 貫通亀裂の形成

まず，基板端が加熱される時刻の応力場内で初期亀裂がどのように進展するかを調べた．**Fig. 4.5** に，$P = 90\,\mathrm{W}$，$v = 380\,\mathrm{mm/s}$の場合について，亀裂形状の時間変化を示す．図中の実線が各時刻の亀裂形状を表す．$Y_c = -20\,\mathrm{mm}$となる時刻には，すべての節点においてK_IがK_thを下回り，亀裂は進展しなかった．$Y_c = -19\,\mathrm{mm}$となる時刻に亀裂が進展を始め，z 方向に大きく進展した．$Y_c = -17\,\mathrm{mm}$となる時刻に亀裂が基板の裏面まで到達し，貫通亀裂となった．$Y_c = -16\,\mathrm{mm}$となる時刻には，基板表面近傍では亀裂が進展せず，裏面側で亀裂が進展した．

Fig. 4.5 中のいずれの時刻においても引張応力は基板内部にのみはたらき，基板内部の引張応力の増加に伴って初期亀裂が貫通亀裂へと成長した．これより，基板端が加熱される際に基板内部にはたらく引張応力により，加工開始側基板端で貫通亀裂が形成されるといえる．

4.3.2.3 貫通亀裂から表面亀裂への変化

続いて，貫通亀裂から一定深さの表面亀裂が形成される過程について考察した．上述のように，基板端が加熱される際，基板内部にはたらく引張応力によって貫通亀裂が形成される(**Fig. 4.5**)．その後，冷却域が基板端に到達すると基板表面近傍に引張応力がはたらく(**Fig. 4.4**)．そ

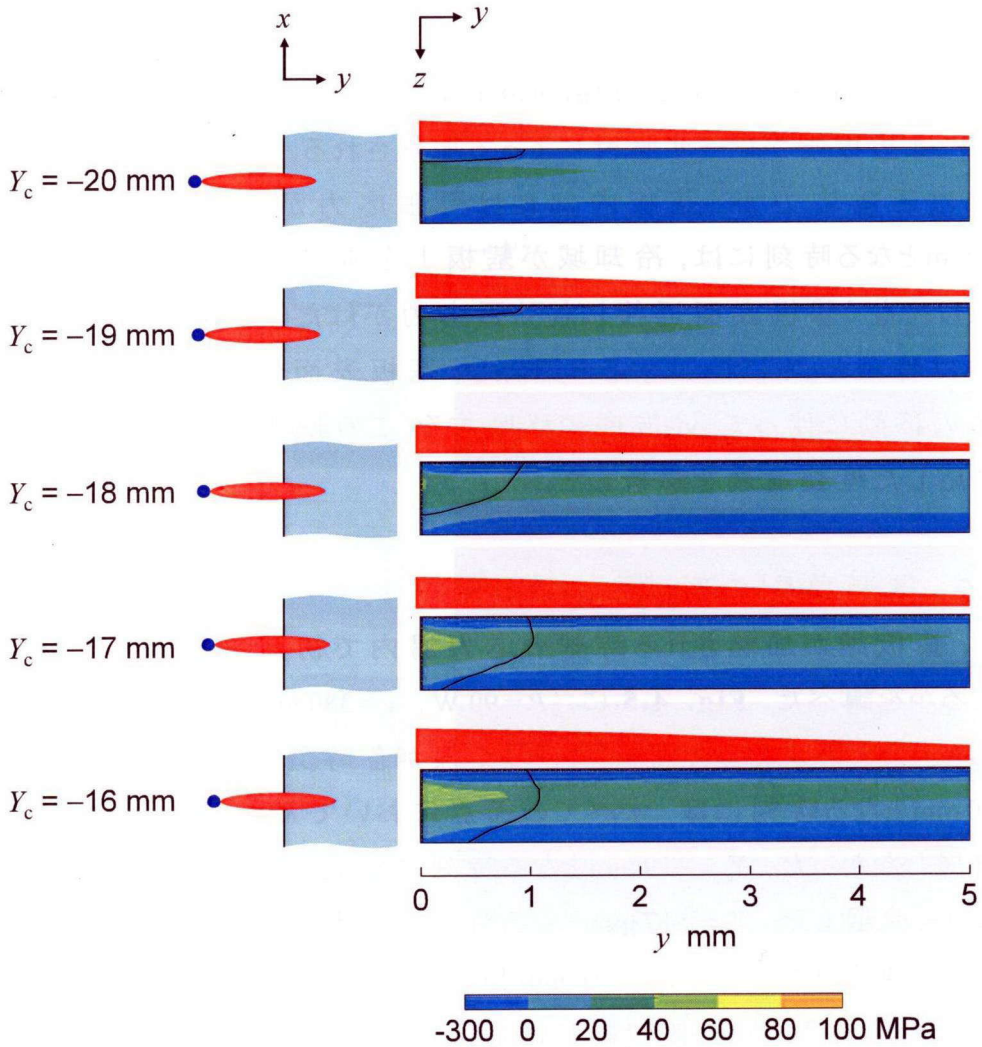
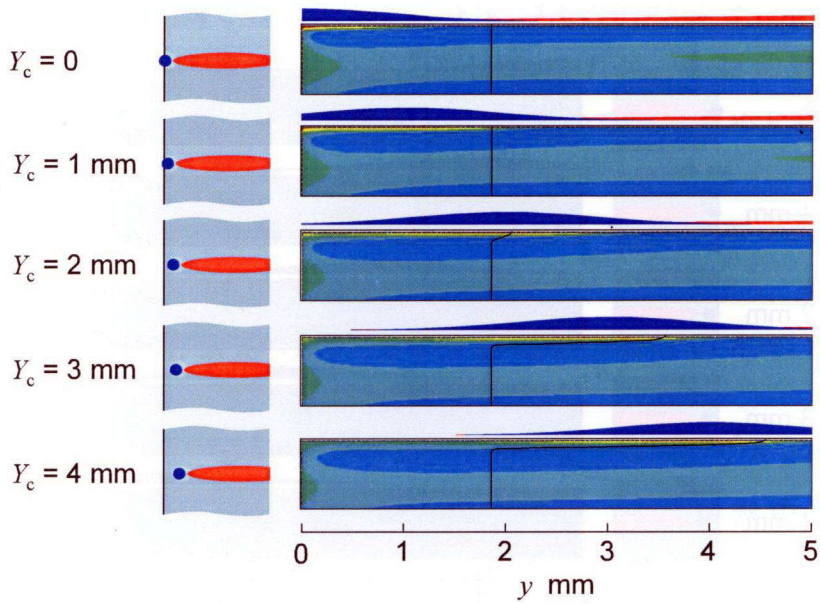


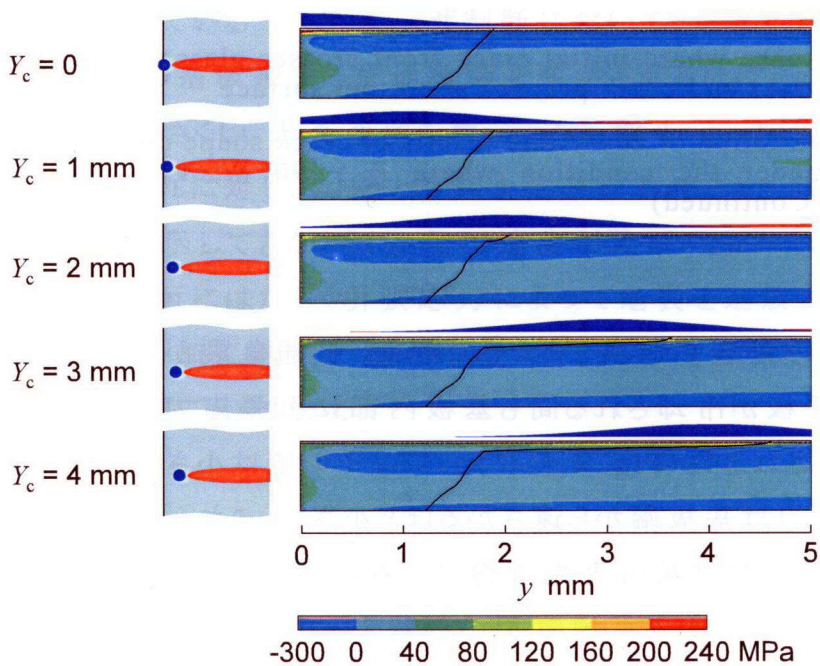
Fig. 4.5 Variation of analytical results of crack shape during heating under the condition where P = 90 W, v = 380 mm/s

こで，貫通亀裂を初期亀裂とし，冷却時の応力場内で貫通亀裂がどのように進展するかを調べた．

まず，長さ2 mmで，亀裂前縁がレーザ照射面に対して垂直な貫通亀裂を設定した．**Fig. 4.6 (a)**に亀裂進展過程を示す．$Y_c = 0, 1$ mmとなる時刻は亀裂が進展せず，$Y_c = 2$ mmとなる時刻に亀裂前縁の表面側のみが進展を始めた．その後，引張応力場の y 方向への移動に伴い，基板表

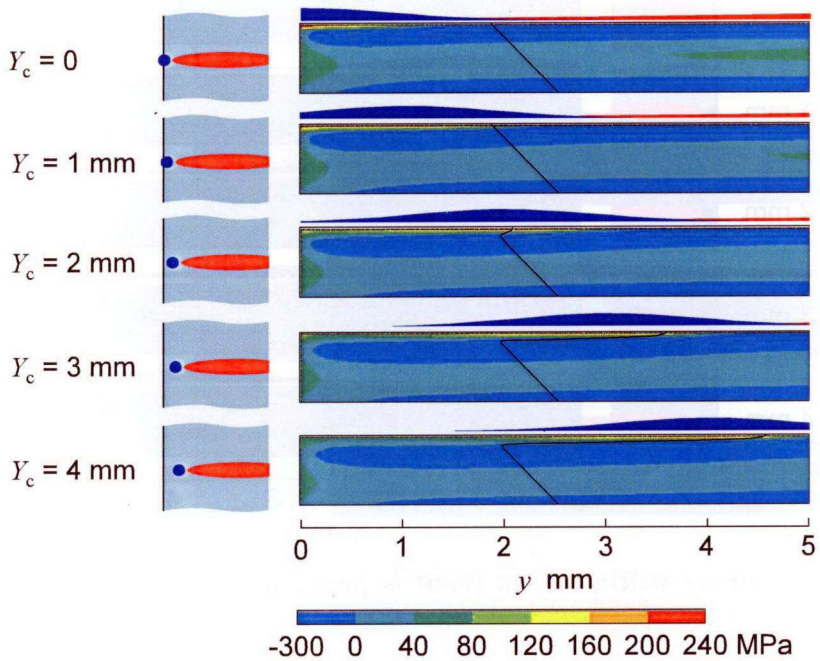


(a) The case where initial crack front is perpendicular to glass surface



(b) The case where initial crack front crosses glass surface at 45 degrees and crack precedes at top surface

Fig. 4.6 Variation of analytical results of crack shape during cooling under the condition where P = 90 W, v = 380 mm/s (Continued)



(c) The case where initial crack front crosses glass surface at 45 degrees and crack preedes at bottom surface

Fig. 4.6 Variation of analytical results of crack shape during cooling under the condition where P = 90 W, v = 380 mm/s (Continued)

面近傍でのみ亀裂が進展した．その結果，貫通亀裂から表面亀裂が形成された．基板が冷却される間も基板内部に引張応力がはたらくが，基板端が加熱される間（**Fig. 4.5**）に比べるとその値は小さい．また，基板内部の引張応力は基板端から遠ざかるほど小さい．これらの理由により，基板が冷却される間は基板表面近傍でのみ亀裂が進展したと考えられる．

加熱時に形成される貫通亀裂の形状として，亀裂前縁がレーザ照射面に対して垂直でない場合も想定される．そこで，亀裂前縁とレーザ照射面が45°を成す二つの場合についても解析を行った．**Fig. 4.6 (b), (c)**に結果を示す．**Fig. 4.6 (b)**はレーザ照射面側で，**(c)**は裏面側で貫通亀裂が先行する場合である．いずれの場合もY_c =1 mmとなる時刻以降は，冷却域の移動に伴って基板表面近傍でのみ亀裂が進展し，貫通亀裂

から表面亀裂が形成された．ただし，**Fig. 4.6 (b)**の場合は，$Y_c=0$となる時刻に基板内部でも亀裂進展がみられた．これは，亀裂前縁が基板端に近く，基板内部にはたらく引張応力の影響を受けたためと考えられる．

Fig. 4.6に示すように，貫通亀裂形状によらず，基板端が冷却される際に貫通亀裂から表面亀裂が形成された．また，冷却域下での表面亀裂の進展は，貫通亀裂の形状に影響されなかった．以上より，冷却時に基板表面にはたらく引張応力によって貫通亀裂から表面亀裂が形成されるといえる．

Fig. 4.5 のように，レーザ加熱のみでも基板に引張応力が生じ，貫通亀裂を形成できる．しかし，本実験の加工条件では，加熱中に大きな引張応力が生じるのは基板端付近のみであり，その結果，**Fig. 4.2** のように，貫通亀裂は加工線上のある位置までしか進展しなかった．レーザ加熱のみの熱応力を利用したガラス基板のフルカットはレーザ割断と呼ばれ，多くの研究が行われている [1)~3)]．レーザ割断において，レーザ走査線に沿って加工終了側の基板端まで貫通亀裂を進展させるには，y 方向の加熱域サイズη_hを小さくし，走査速度を数 mm/s～数十 mm/s まで遅くする必要がある [1)]．これに対し，加熱と冷却を組み合わせたレーザスクライブでは，これまでにも示してきたように，加工速度が数百 mm/s であっても，冷却中に基板表面にはたらく引張応力によって亀裂を進展させることができる．このように，加工速度の観点から，レーザスクライブはレーザ割断と比べて優れていることがわかる．

4.4 結　言

本章では，加工開始側基板端から基板中央にかけての過渡的亀裂進展現象のメカニズムを明らかにすることを目的とし，まず，加工開始側基板端から基板中央付近にかけて亀裂がどのように進展するかを実験によって調べた．その結果，加工開始側基板端から数 mm の領域では貫通亀裂が，それ以降の領域では一定深さの表面亀裂が形成されることを確認した．続いて，有限要素法と境界要素法を組み合わせた三次元亀裂進展解析を行った．解析において，応力拡大係数がしきい値を

超える領域で亀裂を進展させた．応力拡大係数のしきい値は，基板中央での準定常亀裂進展を解析した場合に亀裂深さが実験結果と最もよく一致する値を用いた．その結果，以下の結論が得られた．

1. 基板端がレーザ加熱される際，端面近傍では基板内部に引張応力がはたらく．この引張応力によって初期亀裂が基板の厚さ方向に進展し，貫通亀裂となる．
2. その後，基板端が冷却される際には，基板表面近傍に引張応力が生じる．この引張応力によって基板表面付近の一部で貫通亀裂が進展し，浅い表面亀裂が形成される．この表面亀裂は，準定常的に進展し，その結果一定深さの亀裂となる．
3. 基板中央での準定常亀裂進展を対象として決定した応力拡大係数のしきい値を用いることで，基板端付近での過渡的亀裂進展現象を説明できる．

本章で示した通り，一般に，基板中央と基板端付近では応力場が異なるため，亀裂進展現象も異なる．本解析により，加工開始側基板端付近で亀裂がどのように進展するかを予測できる．レーザスクライブは，加工開始位置に形成した初期亀裂を成長させる加工であるため，初期亀裂がどのように進展するかということは重要な問題である．基板端付近での品質が悪い場合は，基板端から数 mm の領域を捨てる必要も生じ，歩留まりの低下を招く．本解析を応用し，様々な加工条件下での亀裂進展解析を行えば，より歩留まりの高い加工方法，加工条件についての指針が得られる．

参考文献

1) 黒部利次，川向徳康，高尾利幸：YAG レーザによるガラスの精密割断，材料，**42**, 479, (1993), 1004.
2) 木村文孝，今井康文，才本明秀：薄板ガラスの熱応力割断における進展中き裂先端形状のその場観察，日本機械学会論文集，A 編，**75**, 755, (2009), 149

3) J. Jiao, X. Wang, X. Zhang, W. Tang, F. Liu, Y. Lu: Numerical analysis of cutting glass by dual CO_2-laser beams, Proc. of SPIE, **6825**, (2007), 68250G.

第5章　非対称熱応力による亀裂湾曲メカニズムと亀裂形状の推定

5.1　緒　言

第3章において，基板中央付近の準定常亀裂進展を対象とした三次元亀裂進展解析を行い，解析方法の妥当性を示した．第4章では，同様の解析を基板端付近での過渡的亀裂進展現象に適用し，亀裂進展メカニズムを説明した．このとき，実験，解析の両方において，レーザ光およびウォータジェットの強度分布をスクライブ線に対して対称にしたため，モードⅠの亀裂進展を考慮した．一般に，直線加工を行う場合は，レーザビームおよびウォータジェットの強度分布を加工線に対して対称にし，真っすぐな亀裂を形成するのが望ましい．しかし，加熱位置と冷却位置のわずかなずれによって亀裂が板厚方向に対して湾曲する場合がある．レーザスクライブにおける加熱位置と冷却位置のずれによって亀裂がどの程度湾曲するかについて理論的に明らかにした報告は見当たらない．

そこで本章では，加熱位置と冷却位置がずれた場合に形成される湾曲した亀裂形状を予測することを目的とし，まず，実験によってどの位置にどのような亀裂が形成されるかを調べた．続いて，実験結果に基づき，基板中央付近での亀裂進展を対象とした混合モード三次元解析を行った．このとき，基板端からの亀裂の成長を過渡的に解析すれば任意の位置での現象を把握できるが，結果を得たい領域以外の解析に多くの時間が費やされ，効率的ではない．そこで，本研究では，基板中央付近の静的熱応力場のみを用いる解析方法を提案した．本章においても，第3章および第4章と同様に，応力拡大係数がしきい値を超えた領域で亀裂を進展させて亀裂形状を求める．湾曲した亀裂形状を正確にモデル化するには，亀裂の曲率に合わせて要素サイズを決める必要があり，亀裂が真っすぐなときと比べて解析コストが高くなる場合がある．そこで，より少ない繰り返し計算によって亀裂形状を求められるよう，第3章および第4章の解析方法を改良した．

5.2 レーザスクライブ実験

5.2.1 実験方法

5.2.1.1 加熱域と冷却域のずれたレーザスクライブ実験

まず，加熱域と冷却域がずれた状態で形成される亀裂形状を調べるため，板厚 700 μm，スクライブ方向の基板長さ 230 mm のソーダライムガラスに対してスクライブ実験を行った．光学系および加工方法は第 2 章で述べたとおりである．ここでは，第 2 章とは異なる点を説明する．**Fig. 5.1** に，加熱域，冷却域，初期亀裂の位置関係および座標系を示す．加熱域中心に対する冷却域中心の x 方向変位を冷却ずれ量 x_{shift} とおく．冷却域に生じる引張応力によって亀裂が成長するため，初期亀裂位置に大きな引張応力が生じるよう，初期亀裂位置と冷却域中心の x 座標を一致させた．

この位置関係を保ったままレーザ光とウォータジェットを y 方向に走査させ，スクライブを行った．実験条件をまとめて **Table 5.1** に示す．加熱域のサイズ ξ_{h}，η_{h} および冷却点距離 d は，第 2 章のビーム形状 a と同じである．加熱域および冷却域のサイズ，レーザ出力，走査速度を一定とし，x_{shift} を様々に設定して実験を行った．

5.2.1.2 加熱域中心と亀裂位置の測定

本章では，レーザスクライブ後，基板表面での亀裂の位置および基板

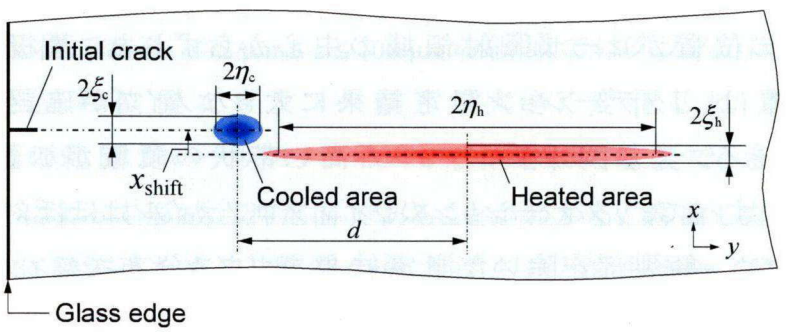


Fig. 5.1 Positional relation of heated and cooled areas and initial crack

Table 5.1 Experimental conditions

Laser beam shape		a
$2\xi_h$	Length of minor axis of heated area	1.2 mm
$2\eta_h$	Length of major axis of heated area	26.0 mm
d	Distance between centers of cooled and heated areas	15.0 mm
P	Laser power	60 W
v	Scanning velocity	100 mm/s
$2\xi_c$	Length of minor axis of cooled area	2.0 mm
$2\eta_c$	Length of major axis of cooled area	3.0 mm
	Flow rate of coolant	0.5 ml/min
x_{shift}	x-shift length of center of cooled area for center of heated area	0, ±200, ±300, ±400, ±600 μm

内部での亀裂形状を調べ，どのような亀裂が形成されたかを特定する．まず，亀裂位置の測定について説明する．

第 2 章で述べたように，レーザスクライブ後，加熱域で複屈折現象が起こり，リタデーションが高くなる．そこで，加熱域の中心に対する亀裂の位置を特定するため，光弾性実験によるリタデーション測定を行った．ただし，加工後十分時間が経過し，基板全体が室温まで低下した状態で観察を行った．**Fig. 5.2** に，レーザスクライブ後の $x-y$ 面のリタデーション分布と x 方向のラインプロファイルを示す．一例として，冷却ずれ量 x_{shift} が 600 μm の場合を示した．**Fig. 2.7** に示す冷却ずれ量 x_{shift} が 0 の場合と異なり，亀裂の位置がレーザ照射領域の中心からずれた．基板表面での亀裂の位置は，リタデーション測定結果に大きなノイズが確認されることから特定できる．一方，リタデーションが高い帯状の領域が加熱域である．本実験ではすべて，リタデーションのラインプロファイルはほぼ対称形であった．このため，亀裂部を除いた測定結果をガウス分布でフィッティングし，ガウス分布の中心を加熱域の中心と定義した．このようにして，各加工条件について加熱域の中心から亀裂位置までの x 方向変位 x_{crack} を求めた．以降，x_{crack} を単に亀裂位置と呼ぶ．

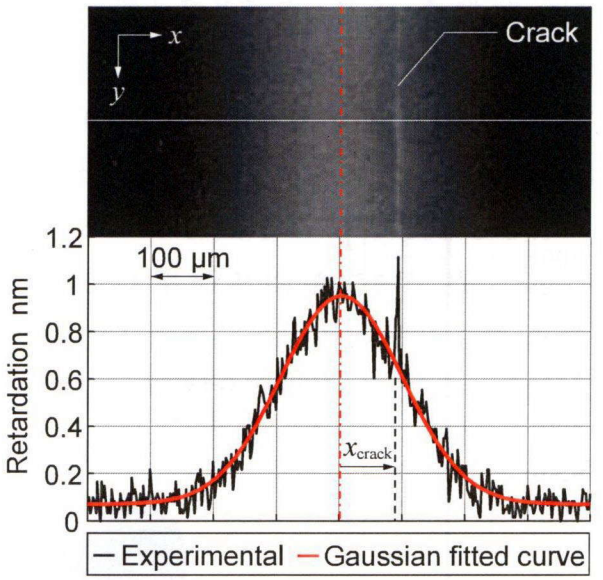


Fig. 5.2 Retardation distribution (upper) and x-line profile (lower) around heated area after laser scribing in the case of x_{shift} = 600 μm

5.2.1.3 亀裂の断面形状の測定

続いて，基板内部での亀裂形状の測定方法を説明する．基板を亀裂に沿って分断すれば，亀裂形状を分断面形状の一部として測定できる．そこで，三鷹光器の非接触三次元測定装置 NH-3SP を使用し，分断面（$y-z$ 面）の形状を z 方向に光学的に測定した．測定結果の一例として，冷却ずれ量 x_{shift} が 300 μm の場合の結果を **Fig. 5.3** に示す．$z=0$ がレーザ照射面である．横軸は，裏面側（$z=700$ μm）の x を 0 としたときの相対的な x 座標である．172 μm $\leq z \leq$ 700 μm の領域ではグラフがほぼ直線であり，$z=172$ μm の位置でグラフの傾きが大きく変化した．これより，$0 \leq z \leq 172$ μm の範囲がレーザスクライブで形成された亀裂で，$z>172$ μm の範囲は分断によって形成された面であることがわかる．湾曲した亀裂の形状を定量的に調べるために，亀裂の最大深さ D_c と湾曲量 x_{curv} の二つのパラメータを定義した．**Fig. 5.3** に示したとおり，D_c はレーザ照射面から亀裂先端までの距離，x_{curv} は亀裂先端から亀裂面上の任意点までの x 方向変位の最大値である．各加工条件について，D_c と x_{curv} を測定した．

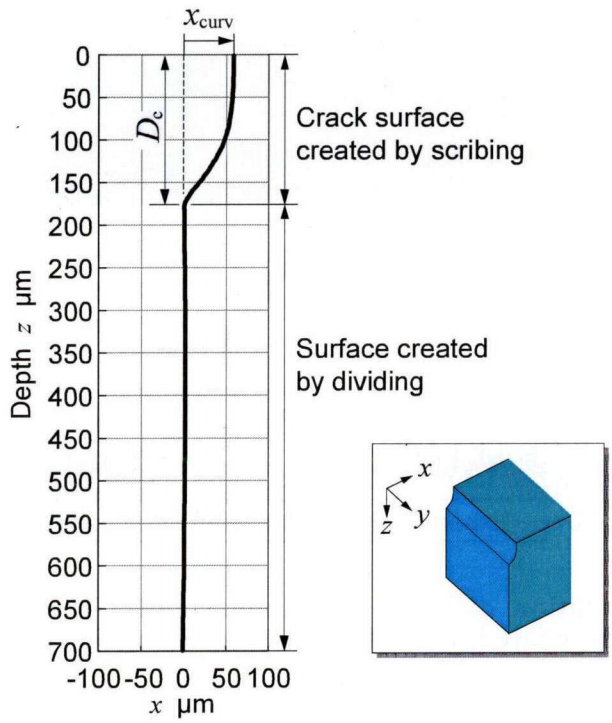


Fig. 5.3 Example of measured cutting surface profile in the case of x_{shift} = 300 μm

5.2.2 実験結果

5.2.2.1 リタデーション測定による亀裂位置の調査

まず，亀裂位置 x_{crack} の測定結果を説明する．**Fig. 5.4 (a)**に，加工開始位置から基板中央にかけてのリタデーション分布の一例を示す．ここでも，冷却ずれ量 x_{shift} が 300 μm の場合を示した．加熱域および冷却域の中心をそれぞれ一点鎖線で示した．**Fig. 5.4 (a)**中の左端の初期亀裂が成長するにつれて，亀裂が加熱域の中心に近づいたことがわかる．そこで，この加工線上の様々な位置で x_{crack} を測定した．**Fig. 5.4 (b)**に，初期亀裂先端からの y 方向距離に対する x_{crack} の変化を示す．結果の近似曲線を実線で示した．x_{crack} は，初期亀裂先端からおよそ 10 mm 以内の領域で大きく変化し，その後は変化が小さかった．この結果から，初期亀裂先端から 10 mm 以上離れた領域では，応力場によって決まる特定の位置で

亀裂が準定常的に進展したと考えられる．本研究では，この準定常亀裂進展現象に注目した．以降，x_{crack}および亀裂形状の測定結果はすべて，初期亀裂先端から100～150 mm離れた位置での結果である．．

Fig. 5.5 に，冷却ずれ量x_{shift}を様々に設定した場合のx_{crack}の測定結果を示す．各x_{shift}について5回ずつ加工と測定を行った．○は各測定結果，●は5回の測定結果の平均値である．$x_{shift}=0$の場合，亀裂はほぼ加熱域の中心に位置した．$x_{shift}\neq 0$のいずれの場合でも，基板表面では亀裂が加熱域の中心と冷却域の中心の間に位置し，$|x_{shift}|$が大きいほど亀裂が加熱域の中心から離れた．

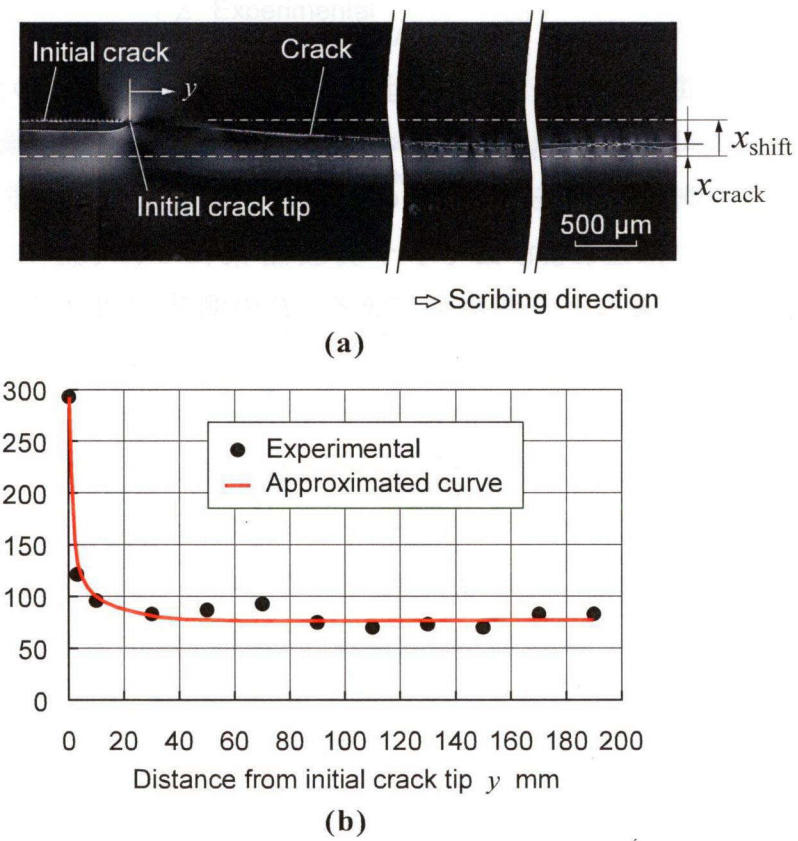


Fig. 5.4 **(a)** Variation of the crack location with the crack propagation seen from the retardation distribution and **(b)** variation of x_{crack} from the initial crack tip to the vicinity of the processing end in the case of x_{shift} = 300 μm

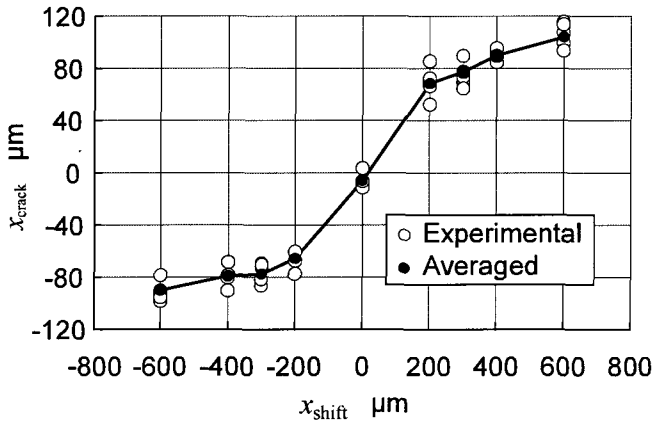


Fig. 5.5 Measured x_{crack} for each x_{shift}

5.2.2.2 分断面形状測定による亀裂の断面形状の調査

続いて，冷却ずれ量 x_{shift}を様々に設定したときの亀裂の最大深さD_cと湾曲量 x_{curv}の測定結果を **Fig. 5.6** に示す．●は 5.4 節で述べる解析結果である．ここでは△および▲で示す実験結果について説明する．△は 5 回の測定結果，▲はその平均値である．D_cの測定結果から，$|x_{shift}|$が大きいほど亀裂が浅くなることがわかる．また，x_{curv}の測定結果からは，x_{shift}の符号を反転させると，亀裂の湾曲する方向も反転することがわかる．$200\,\mu m \le |x_{shift}| \le 400\,\mu m$の場合は$|x_{curv}|$に顕著な差がみられなかったのに対し，$|x_{shift}|$が 600 μm まで大きくなると$|x_{curv}|$が小さくなった．

各 x_{shift}での 5 回の亀裂形状の測定結果のうちの一つを **Fig. 5.7** に実線で示す．ここでは，亀裂部（**Fig. 5.3** の D_c部）の結果のみを示した．図中の●は解析結果であり，ここでは測定結果について説明する．測定結果を図示する際は，それぞれの x_{shift}の場合について，**Fig. 5.5** に示す x_{crack}の平均値を参照して，$z=0$での亀裂座標をその位置に合わせた．x_{crack}は加熱域の中心に対する基板表面での亀裂位置であるため，**Fig. 5.7** における$x=0$は，加熱域の中心を意味する．このようにして，x_{crack}と亀裂形状の測定結果から，どの位置にどのような形状の亀裂が形成されたかを特定した．x_{crack}，D_c，x_{curv}の平均値に対する絶対誤差の最大値は，それ

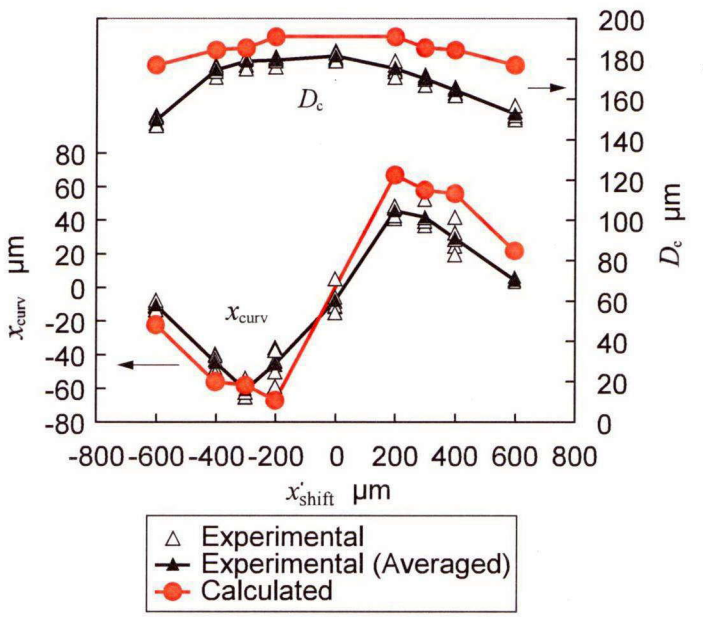


Fig. 5.6 Experimental and calculated results of D_c and x_{curv} for each x_{shift}

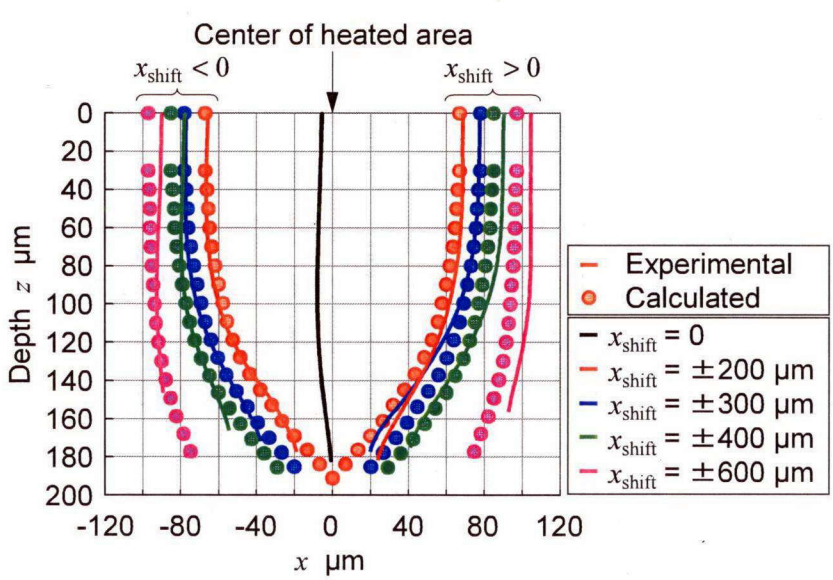


Fig. 5.7 Experimental and calculated results of x-z sectional view of the crack shape

ぞれ17 μm，4.2 μm，14 μm であった．測定結果にこの程度のばらつきはあったが，一般に，亀裂は加熱域の中心側へ湾曲することがわかった．

5.3 解析方法

5.3.1 有限要素法による熱応力解析

このような非対称応力場内での準定常亀裂進展を対象として三次元亀裂進展解析を行った．第 3 章および第 4 章と同様，有限要素法による熱応力解析結果を基に境界要素法によって応力拡大係数を求め，応力拡大係数に基づいて亀裂形状を求めた．

有限要素解析については第 3 章および第 4 章の方法と同様である．モデルサイズを10 mm×20 mm×700 μm とし，加熱域の中心を10 mm 辺の中央（$x=0$），冷却域の中心を$x=x_{\mathrm{shift}}$とした．加熱域および冷却域が y 方向へ移動する間の応力分布の時間変化を求めた．

本研究では，加工開始位置から十分離れた位置での準定常亀裂進展を扱う．本解析において，冷却域がモデル中央付近を通過する間，冷却域周辺の引張応力場は準定常的に推移した．そこで，冷却域の中心が有限要素モデルの中心にある時刻の静的熱応力場を用いて亀裂進展解析を行う．

5.3.2 境界要素法を用いた亀裂進展解析

5.3.2.1 亀裂進展解析の概要

はじめに，亀裂進展解析の方針を概説する．ここでは，亀裂の湾曲について検討するため，**Fig. 3.6** に示したモード I とモード II の混合モード荷重下での亀裂進展を扱う．ここでも，応力拡大係数としきい値 K_{th}を比較して亀裂を進展させる．ただし，混合モードの亀裂進展の基準として，伊藤ら[1]および Sih ら[2]が用いている有効応力拡大係数 K_{eff}

$$K_{\mathrm{eff}}=\sqrt{K_{\mathrm{I}}^{2}+K_{\mathrm{II}}^{2}} \tag{5.1}$$

を採用する．ここで，K_{I}およびK_{II}は，モード I およびモード II の応力拡大係数[3]である．ここでは，節点 A における応力拡大係数を$K_{\mathrm{I}}(\mathrm{A})$のように

書くことにする.

節点 A でK_{eff}が応力拡大係数のしきい値K_{th}を超えると，亀裂面に対して角度$\theta(\mathrm{A})$だけ傾いた方向に亀裂が進展すると考える．以降，θを亀裂進展角度と呼び，Erdogan ら[4)]の方法に従って，

$$\theta(\mathrm{A})=2\tan^{-1}\left\{\frac{1}{4}\left[\frac{K_{\mathrm{I}}(\mathrm{A})}{K_{\mathrm{II}}(\mathrm{A})}\mp\sqrt{\left(\frac{K_{\mathrm{I}}(\mathrm{A})}{K_{\mathrm{II}}(\mathrm{A})}\right)^{2}+8}\right]\right\} \tag{5.2}$$

によって求める.

解析の過程を **Fig. 5.8** に模式的に示す. **Fig. 5.8** の下半分は，解析の進行に伴う亀裂形状の変化を表す. Step 1の亀裂は，設定する初期亀裂である．この初期亀裂をStep 2，Step 3，…と段階的に進展させる．各Stepの亀裂形状図の右に，亀裂の側面図も示した．側面図からわかるように，各 Step において，式(5.2)で計算される角度θだけ亀裂面に対して傾いた方向に亀裂を進展させる．ただし，θは，各 Step における亀裂先端での亀裂面に対する角度である．なお，**Fig. 5.8** において最も濃く塗られている領域が解析領域であり，各 Step では亀裂の一部を解析対象とする．この理由および解析領域の設定方法については5.3.2項の第3目で説明する.

Fig. 5.8 に，求めるべき亀裂形状を赤の点線で示した. **Fig. 3.9 (a)**から，加工中の亀裂は，その先端が引張応力場内の基板表面にあり，y の負の方向に次第に深くなることが予想される．レーザスクライブでは亀裂がある深さまでしか進展しないことから，加工中の亀裂前縁は$K_{\mathrm{eff}}=K_{\mathrm{th}}$となる位置にあると考え，亀裂を徐々に進展させてこの準定常亀裂形状を求める.

第2章および第3章では，最終的に得られる亀裂形状に対して十分小さく設定された初期亀裂を繰り返し進展させて時刻 t の亀裂形状を求めた．亀裂前縁上の各節点について亀裂進展距離$\Delta L_{3\mathrm{D}}$を計算したので，各ステップの亀裂前縁を滑らかにするためには，式(3.3)における係数 C を十分小さくする必要があった．本章では，より少ない Step 数で$K_{\mathrm{eff}}=K_{\mathrm{th}}$となる亀裂形状を求める方法を提案する. **Fig. 5.8** の上半分は，各

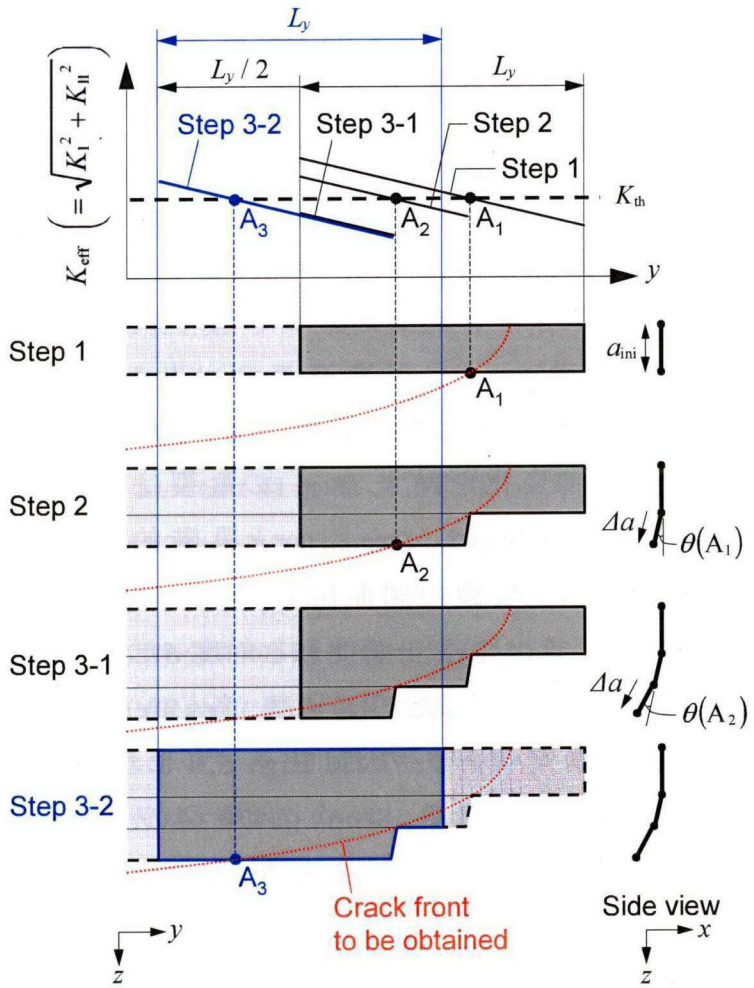


Fig. 5.8 Schematic of variation of K_{eff} (upper) and the crack shape (lower) with the analysis progression

Step の亀裂形状下で得られる有効応力拡大係数 K_{eff} である．以下，**Fig. 5.8** を用い，得られた K_{eff} を基にどのように亀裂を進展させるかを詳述する．

5.3.2.2 初期亀裂の設定と亀裂形状更新方法

Step 1 において，$y-z$ 面に平行で一定深さ a_{ini} の表面亀裂を初期亀裂として設定する．このとき，**Fig. 5.5** の亀裂位置 x_{crack} の平均値を参照して，

初期亀裂の x 座標を定める．つまり，初期亀裂の x 座標を，実験によって調べた亀裂の位置と一致させる．

このように設定した初期亀裂形状下で得られる K_{eff} を **Fig. 5.8** 上部に模式的に示す．**Fig. 3.9 (a)**のように，加工中の亀裂先端（すなわち **Fig. 5.8** の解析領域）は冷却域中心の前方にある．冷却域中心から遠ざかる（**Fig. 5.8** において y が大きい）ほど引張応力が低下し，それに伴って K_{eff} が小さくなると考えられるため，K_{eff} の傾きを負で図示した．Step 1において，$K_{\mathrm{eff}} = K_{\mathrm{th}}$ となる節点を A_1 とし，$K_{\mathrm{eff}} > K_{\mathrm{th}}$ である領域で亀裂を進展させて Step 2に進む．このとき，すべての節点の亀裂進展角度 θ と亀裂進展距離 Δa を一定とする．その理由は，亀裂が準定常的に進展していることを考慮し，Step 2における亀裂の $x-z$ 断面形状が y に依存しないようにするためである．また，Step 1における亀裂前縁上の節点のうち，A_1 は求めるべき亀裂前縁（赤線）上の節点であるが，他はその上にない．このため，ここでの亀裂進展角度 θ は，$K_{\mathrm{I}}(\mathrm{A}_1)$ および $K_{\mathrm{II}}(\mathrm{A}_1)$ から式(5.2)によって計算した $\theta(\mathrm{A}_1)$ とする．

同様に，Step k では，k 段目の深さにある亀裂前縁上で $K_{\mathrm{eff}} = K_{\mathrm{th}}$ となる節点 A_k と進展角度 $\theta(\mathrm{A}_k)$ を求める．そして，$K_{\mathrm{eff}} > K_{\mathrm{th}}$ であるすべての節点を $\theta(\mathrm{A}_k)$ の方向に Δa だけ進展させて Step $(k+1)$ へ移行する．このようにして $K_{\mathrm{eff}} > K_{\mathrm{th}}$ である領域で亀裂を進展させていくと，Step を進めるにつれて K_{eff} が K_{th} に漸近する．なぜなら，**Fig. 3.8** のように，レーザスクライブでは基板表面からの距離が大きいほど引張応力が低く，亀裂を進展させると応力拡大係数 K_{eff} が次第に低下すると仮定できるからである．本解析方法に従えば，最終的には，実験結果と同様な一定深さの準定常亀裂が得られる．

5.3.2.3 解析領域の設定方法

このように，各 Step では節点 A_k の位置と $\theta(\mathrm{A}_k)$ のみを求めればよいので，解析時間を短縮するため，解析領域の大きさを $L_x \times L_y \times L_z$ に限定する．**Fig. 5.8** 中 Step 3のように，Step k の解析領域内に A_k が含まれない場合（Step 3−1）には，解析領域を $-y$ 方向に $L_y/2$ だけ移動させ，新しい解析領

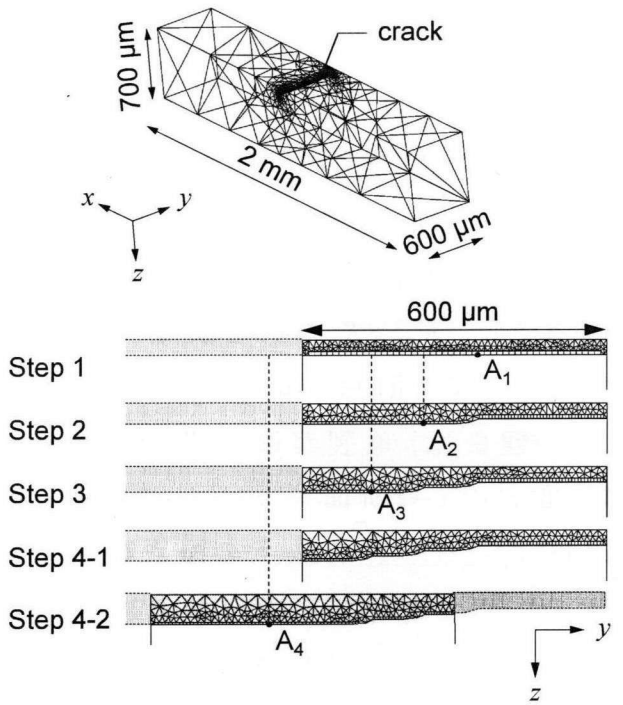


Fig. 5.9 Example of mesh geometry for BEM analysis

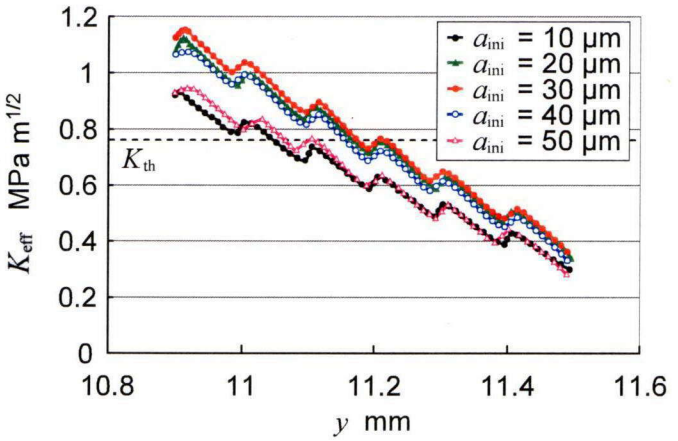
域内でK_{eff}を求める(Step 3−2).

ここでは，解析領域サイズを$L_x \times L_y \times L_z = 2\,\mathrm{mm} \times 600\,\mu\mathrm{m} \times 700\,\mu\mathrm{m}$とし，1 回の亀裂進展距離$\Delta a$を10 μmとした．**Fig. 5.9** に要素分割の例を示す．**Fig. 5.8** の模式図ように，A_k近傍の節点を一気にΔa進展させて，亀裂深さを極端に変えると，応力拡大係数が求まらない場合が生じる．そこで，Step$(k+1)$の亀裂形状を決定する際は，**Fig. 5.9** の下半分に例示するように，A_kから$-y$方向に40 μmの領域で亀裂前縁を滑らかに設定した．また，K_{th}は，第 3 章で求めた値を用い，0.76 MPa m$^{1/2}$とした．

5.4 解析結果

5.4.1 初期亀裂深さの決定

まず，適切な初期亀裂深さa_{ini}を決定するため，a_{ini}を様々に設定して

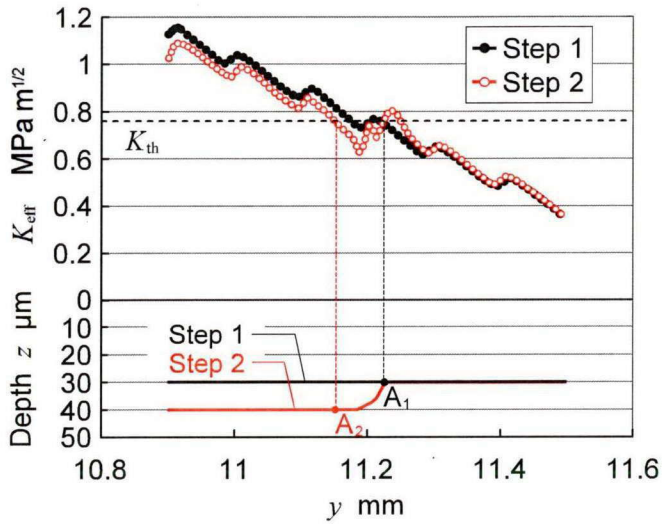


5.10 K_{eff} at Step 1 under a variety depth of the initial crack in the case of x_{shift} = 300 μm

Step 1での有効応力拡大係数 K_{eff}を求めた．以降のStepにおける亀裂進展距離 Δaに対応させて，a_{ini}を10 μmずつ変えてK_{eff}を求めた．結果を**Fig. 5.10**に示す．5.3.2項の第2目で述べたように，本解析方法では，亀裂進展するほどK_{eff}が低下するという仮定に基づいて，$K_{eff} > K_{th}$である領域で亀裂を進展させる．**Fig. 5.10**を見ると，$a_{ini} > 30$ μmでは亀裂が深いほどK_{eff}が小さいものの，$a_{ini} < 30$ μmの場合は亀裂が深いほどK_{eff}が大きい．例えば，a_{ini}を10 μmとした場合，亀裂を進展させて深さが20 μmになると，K_{eff}がK_{th}からさらに遠ざかり，上記仮定に矛盾することになる．そこで，ここでは初期亀裂深さa_{ini}を30 μmとした．

5.4.2 解析の進行に伴う亀裂形状と応力拡大係数の変化

以下，冷却ずれ量x_{shift}が600 μmの場合を例に挙げて，解析結果を詳しく説明する．まず，Step 1およびStep 2でのK_{eff}および亀裂形状を**Fig. 5.11**に示す．Step 1において，y=11.228mmの位置で$K_{eff} = K_{th}$であった．この位置が**Fig. 5.8**中の点A_1に対応する．$K_{eff} > K_{th}$の領域で亀裂を進展させた結果，Step 2ではほとんどすべての節点において，K_{eff}がStep 2のときより低下した．しかし，節点A_1で亀裂前縁形状が滑らかでないため，その近傍のいくつかの節点では，図のように，K_{eff}がStep 1のときより大きくなった．

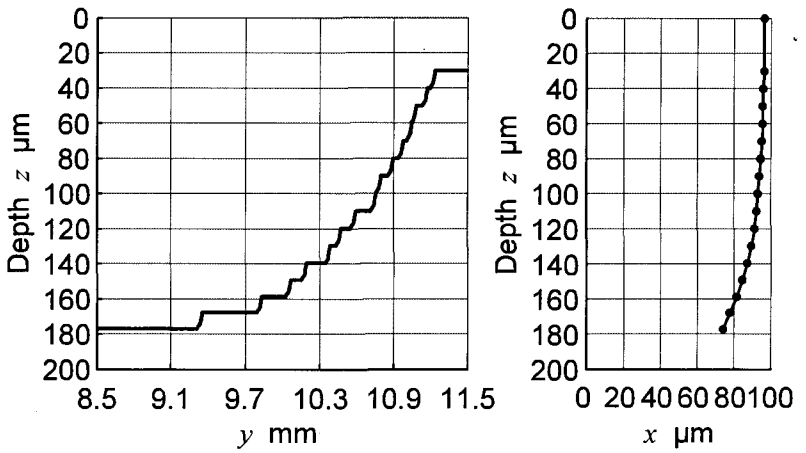


5.11 K_{eff} (upper) and crack shapes (lower) at Step 1 and 2 in the case of a_{ini} = 30 μm and x_{shift} = 600 μm

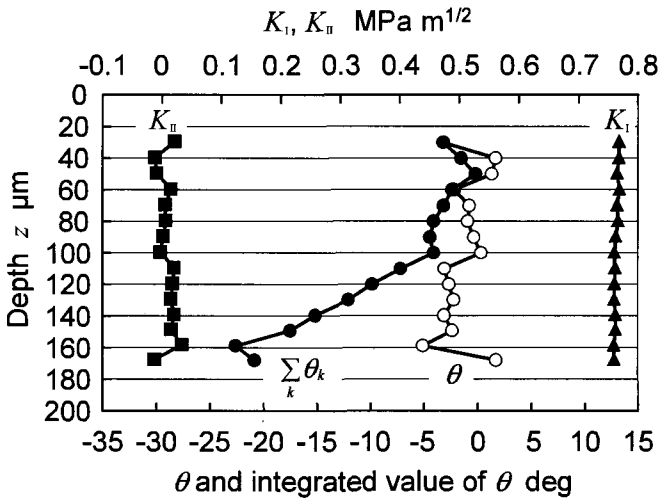
このように本解析では，Step k において，節点 A_1 から A_{k-1} で亀裂前縁が滑らかでないことに起因して，それらの近傍で応力拡大係数が適切に求まらない．そこで，それらの K_{eff} は無視して，K_{eff} が前 Step の値に比べて十分低下した領域において $K_{eff} = K_{th}$ となる位置を A_k とした．**Fig. 5.11** における節点 A_2 はこのようにして求めた．

こうして解析を Step 16 まで進めたときの亀裂形状を **Fig. 5.12** に示す．Step 16 において，$y < 9.3$ mm の領域では K_{eff} が K_{th} を超えなかったため，ここで解析を終了した．**Fig. 5.12** の左図のように，最終的な亀裂前縁には複数の段差が生じる．1 回の亀裂進展距離 Δa を小さくすれば段差を小さく抑えられるが，最終的な亀裂深さまで到達するのに必要な Step 数が増加する．したがって，解析のコストと精度を考慮して Δa を決定すればよい．ここでは $\Delta a = 10$ μm とした結果，亀裂前縁形状を比較的滑らかに補間できる程度に段差を小さくできたといえる．

Step k ($1 \le k \le 15$) における $K_I(A_k)$，$K_{II}(A_k)$ および $\theta(A_k)$ を **Fig. 5.13** に示す．縦軸は A_k の z 座標である．$z = 30\,\mu\text{m}\,(= a_{ini})$ が Step 1 の A_1 での結果であり，z が大きいほど Step が進んだ状態である．亀裂進展角度 θ は，各



5.12 Analysis results of the crack shape in the case of x_{shift} = 600 μm



5.13 $K_{\mathrm{I}}(\mathrm{A_k})$, $K_{\mathrm{II}}(\mathrm{A}_k)$, and $\theta(\mathrm{A}_k)$ at Step k in the case of x_{shift} = 600 μm

Step の亀裂面に対する角度であるため，$\theta(\mathrm{A}_1)$から$\theta(\mathrm{A}_k)$までを積算することで，Step$(k+1)$での亀裂前縁の z 軸に対する角度が得られる．**Fig. 5.13** にθ の積算値も併せて示した．各 Step において$K_{\mathrm{II}}(\mathrm{A}_k)$は 0 に近い値をとり，その結果，$|\theta(\mathrm{A}_k)|$は最大で5.1°であった．ほとんどの Step で$\theta(\mathrm{A}_k)<0$となったため，Step が進むにつれて亀裂面の z 軸に対する傾きが次第に大

きくなり，Step 16では$-21°$となった．

5.4.3　亀裂形状の実験結果との比較

Fig. 5.6 および **Fig. 5.7** に，亀裂の最大深さD_cと湾曲量x_{curv}および亀裂形状の解析結果を●で示す．解析は$x_{shift}>0$の条件でのみ行った．$x_{shift}<0$の条件については，**Fig. 5.6** では$x_{curv}=0$について，**Fig. 5.7** では$x=0$についてそれぞれ対称に折り返して表示した．実験結果と解析結果は比較的よく一致し，5.2.2項の第2目で述べた実験結果の特徴が解析結果にも現れている．以上より，加熱位置と冷却位置がx方向にずれた加工条件下で準定常的に進展する亀裂の形状を推定できるといえ，本解析の妥当性が示された．

一般に亀裂進展解析では，解析が進むにつれて亀裂が長くなり，要素数が多くなる．これに対し，本解析方法では，限定された解析領域を移動させながら繰り返し計算を行い，最終的に準定常状態にある亀裂形状を求めることができる．亀裂長さに依存せず各Stepの要素数を少数に抑えられるため，効率的な解析法であるといえる．たとえば，本解析では，y方向のモデルサイズL_yを600 μm，最小要素サイズをおよそ4 μmとした結果，境界要素モデルの総節点数は4000～5000となった．

また，本章の方法では，一定深さの初期亀裂を設定して，すべての節点を一定距離進Δaだけ進展させるため，各ステップの亀裂前縁の最も深い位置は，Δaの大きさに無関係に常に直線となる．A_kにおいて亀裂前縁が滑らかでないので，A_k近傍の応力拡大係数は適切に求まらないが，A_k近傍の解は用いないため，Δaを比較的大きく設定できる．その結果，少ない繰り返し計算によって亀裂形状を求められる．たとえば，第3章の方法(**Fig. 3.9**)では，一つの亀裂形状を求めるのに48 stepの計算を要したのに対し，本章の方法(**Fig. 5.12**)では，16 stepで亀裂形状が得られた．なお，第3章の方法では必要なStep数が初期亀裂位置と形状に依存する．初期亀裂と求める亀裂の形状が近ければ，それだけ必要なStep数が削減される．しかし，一般には求める亀裂形状は不明であるため，十分小さな初期亀裂を設定する必要があり，その結果，必要な

Step 数が増加する．これに対し，本章の方法では，初期亀裂形状が一意に決まるため，Step 数の削減の観点からは，初期亀裂形状について検討する必要がない．このような理由からも，本章の解析方法は効率的であるといえる．

最後に，本章では非対称応力場内での準定常亀裂形状を求めたが，各 Step での亀裂進展角度 θを 0 として同様に解析すれば，対称応力場内での準定常亀裂形状も求めることができる．

5.5 結　言

本章では，ガラスのレーザスクライブにおいて，加熱域の中心と冷却域の中心がずれた場合に形成される湾曲した亀裂の形状を予測することを目的とし，まず，実験によって亀裂形状を調べた．リタデーション測定から基板表面での亀裂位置を，分断面形状測定から基板内部での亀裂形状を調べ，どのような亀裂が形成されたかを特定した．その結果，加工開始位置から十分離れた位置では亀裂が準定常的に進展することを明らかにした．このとき，亀裂は加熱域の中心と冷却域の中心の間に位置し，基板内部で加熱域の中心側へ湾曲する．

この実験結果に基づき，非対称応力場内で準定常的に進展する亀裂の形状を，基板中央付近の静的熱応力場のみを用いて解析する方法を提案した．まず，実験で測定した亀裂位置と同じ位置に浅い初期亀裂を設定し，有効応力拡大係数 K_{eff}を求める．K_{eff}が応力拡大係数のしきい値 K_{th}を超える領域において，亀裂面に対して角度 θ傾いた方向に亀裂を進展させる．新しい亀裂形状のもとで K_{eff}を求め，これを繰り返して亀裂を段階的に進展させる．

亀裂進展解析に境界要素法を用い，湾曲した亀裂形状を比較的少ない要素数でモデル化した．この解析によって得られる亀裂形状は，冷却位置のずれ量が異なる複数の条件において，実験結果と比較的よく一致し，湾曲した亀裂の形状を推定できることが示された．

一般に，直線加工を行う場合は，レーザビームおよびウォータジェットの強度分布を加工線に対して対称にし，真っすぐな亀裂を形成するのが

望ましい．製品によっては，亀裂の湾曲量を一定値以下にすることが求められる．本解析により，各製品に求められる加工精度を得るには，加工装置としてどの程度の調整の精度が必要かを，装置の設計段階で見積もることができる．その結果，各製品に合わせた適切な加工装置の設計が可能となり，不要なコスト上昇や加工品質低下などの問題を回避できる．また，本解析の応用により，亀裂の湾曲量を小さくできる加工方法や加工条件の提案につながり，レーザスクライブがより広い分野へ適用されることが期待される．

最後に，本解析では，限定された解析領域を移動させながら繰り返し計算を行い，最終的に準定常状態にある亀裂形状を求める．その結果，亀裂長さに依存せず各 Step の要素数を少数に抑えられる．また，各 Step において，亀裂前縁の最も深い位置が直線となるように亀裂を進展させる．その結果，比較的少ない Step 数で一つの亀裂形状を求めることができる．これらの理由から，本解析法は，準定常亀裂形状を求めるための効率的な方法であるといえる．さらに，各 Step での亀裂進展角度 θ を 0 とすれば，対称応力場内での準定常亀裂形状も求めることができる．

参考文献

1) 伊藤洋茂，木村和成，村松正光：応力腐食割れにおける分岐き裂効果の評価，日本機械学会論文集 A 編，**55**, 513, (1989), 1167.

2) X.Q. Sih, X.R. Zhang, and J.H.L. Pang: Determination of interface fracture toughness of adhesive joint subjected to mixed-mode loading using finite element method, Int. J. Adhesion Adhesives, **26**, 4, (2006), 249.

3) A. Portela: “Dual boundary element analysis of crack growth”, (Computational Mechanics Publications, 1993)

4) F. Erdogan, and G.C. Sih: On the Crack Extension in Plates Under Plane Loading and Transverse Shear, J. Basic Eng., **85**, 4, (1963), 519.

第6章 総　括

レーザスクライブは，レーザによる加熱とウォータジェットによる冷却によって生じる熱応力を利用して，脆性材料基板をスクライブする方法である．加工線周辺にマイクロクラックが生じないため，高い端面強度が得られるとともに，パーティクルの発生が抑制されるため，高い歩留まりが得られる．これらの利点から，FPD用ガラス基板の分断に適した加工法である．

しかしながら，加工条件によっては，加工方向に対して垂直方向のクラック(ダメージ)が加工線周辺に生じる．ダメージは端面強度を著しく低下させるため，実用上はダメージの生じない加工条件を選択する必要がある．ダメージには，加工後に自然に発生するものと外力を加えることで生じるものがある．本研究では前者を自発ダメージ(Spontaneous damage)，後者を誘導ダメージ(Stimulated damage)と名付けた．誘導ダメージは製品の想定外の強度低下を招く恐れがあるが，これまでその発生メカニズムは明らかにされていなかった．

ところで，基板中央付近では，冷却域下にはたらく引張応力によって亀裂が進展し，一定深さの垂直亀裂が形成されるという亀裂進展メカニズムが，これまでの研究で明らかにされている．しかし，亀裂深さについて理論的な検討を行った報告は見当たらなかった．基板中央付近では一定深さの亀裂が形成されるのに対し，加工開始側端面近傍では，亀裂が基板の裏面まで進展する場合がある．また，加熱域の中心と冷却域の中心がずれた場合には，断面形状が湾曲した亀裂が生成する．このように，加工条件によって亀裂深さだけでなく，亀裂形状も異なることから，実用上は重要な問題となる．しかし，これらについても学術的な研究はなされていなかった．

そこで本研究では，

(1) 誘導ダメージの発生メカニズムを解明し，発生条件を推定すること，

(2) 亀裂進展解析によって基板中央付近に形成される垂直亀裂の深さを予測すること，

(3) 基板中央付近の亀裂とは異なる，加工開始側端面近傍で形成される亀裂，および，加熱域の中心と冷却域の中心がずれた場合に生成する亀裂，これらの亀裂について，それらの生成メカニズムを明らかにすること，

を研究の目的とした．レーザスクライブ実験を行い，実験結果に基づいて熱応力解析と亀裂進展解析を行った．本論文を概観して，研究を通して明らかとなった事項を以下に示す．

第 1 章「緒論」では，レーザスクライブの加工原理，特徴，利点を説明し，本研究の目的と意義を述べた．

第 2 章「誘導ダメージ発生メカニズムの解明と発生条件の推定」では，加工後に加えた外力によって生じるダメージを誘導ダメージと呼び，誘導ダメージの発生メカニズムを明らかにし，加工後に一定の外力が加わってもダメージの生じない，より信頼性の高い加工条件を推定することを目的として，レーザスクライブ実験および二次元熱弾性解析を行った．まず，レーザスクライブ後の基板のリタデーション測定結果を基に，誘導ダメージの発生メカニズムを考察した．実験結果に基づいて熱弾性解析を行い，誘導ダメージの生じない加工条件の推定を試みた．その結果，以下の結論を得た．

1. レーザ加熱時に生じる大きなせん断応力によってせん断流動が起こり，ガラスに残留応力が生じる．大きな残留応力が生じた基板に外力負荷によってクラック発生の起点が形成されると，残留応力によってクラックが進展し，誘導ダメージが形成される．
2. 適正加工条件に関して，リタデーションの最大値に上限値があり，リタデーションを測定することで誘導ダメージの生じない加工条件を実験的に予測できる．
3. 適正加工条件に関して，最大せん断応力の最大値に上限値があり，最大せん断応力を調べることで誘導ダメージの生じない加工条件を解析的に推定できる．

4. 基板表面の応力は，レーザのパルス波形に応じて大きく振動するのに対し，深さ24 μmの位置ではパルス発振の影響による応力の振動は十分小さい．深さ数十 μm以上の位置での応力場は，CW 発振を仮定した解析によって簡易に求めることができる．

誘導ダメージが生じる加工条件は，自発ダメージ(加工後に自然に生じるダメージ)が生じる加工条件と適正加工条件の境界に分布する．そのため，誘導ダメージが生じる加工条件を避けることで，加工後に一定の外力が加わってもダメージの生じない，より信頼性の高い加工条件を絞り込むことができる．加工後に荷重を加えることで誘導ダメージが発生するかどうかを確かめることはできるが，製品や基板ごとに複数回の試験を行うのは容易ではない．実験(リタデーション測定)と解析(最大せん断応力調査)の両方から誘導ダメージが生じないことを確認すれば，誘導ダメージの発生を確認する工程を短縮でき，また，評価の信頼性が高まる．以上より，本研究はレーザスクライブの信頼性および生産性の向上を図る上で有用である．

第3章「基板中央付近の準定常亀裂進展解析と亀裂深さの推定」では，レーザスクライブで最も重要で，基本となる基板中央付近で形成される一定深さの亀裂に注目した．この亀裂の深さを推定することを目的として，亀裂深さの測定実験と，二次元および三次元亀裂進展解析を行った．解析において，初期亀裂を設定してモードIの応力拡大係数 K_{I}を求め，K_{I}が応力拡大係数のしきい値 K_{th}を超えると亀裂を進展させた．まず，三次元解析を行い，得られる亀裂深さを実験結果と比較して，解析方法および結果の妥当性を検討した．次に，二次元亀裂進展解析を行い，より簡便に亀裂深さを求めることを検討した．その結果，以下の結論が得られた．

1. 基板中央付近では亀裂が準定常的に進展するので，一定深さの亀裂が形成される．このため，基板中央付近の静的熱応力場を用いて亀裂進展現象を解析できる．

2. いくつかの加工条件から適切な応力拡大係数のしきい値 K_{th} を求めれば，異なる加工条件での亀裂深さを亀裂進展解析によって推定できる．
3. レーザ出力，走査速度，冷却点距離の異なる複数の加工条件における亀裂深さの解析結果は，実験結果とよく一致した．したがって，本解析方法の妥当性が示された．
4. 基板中央付近の亀裂進展は準定常現象であるから，スクライブ方向に対して垂直な断面を対象とした二次元解析によっても亀裂深さを推定できる．二次元解析は扱える現象が限られるが，基板中央での亀裂進展現象に限れば，短時間で行える二次元解析の方が有用である．

基板中央付近で形成される亀裂の深さは加工条件によって異なる．また，スクライブ後のブレイク工程で必要となる曲げ応力は亀裂深さに依存する．したがって，第 3 章で述べた解析により，亀裂深さまで考慮して適正加工条件を絞り込むことができる．実験を行えば各加工条件下で形成される亀裂深さを調べられるが，この解析を用いれば，比較的少ない試行回数の実験を系統的に行うことで亀裂深さを推定できるため，生産性の向上を図ることができる．

第 4 章「加工開始側基板端付近の過渡的亀裂進展解析」では，加工開始側基板端から基板中央にかけての過渡的亀裂進展現象のメカニズムを明らかにすることを目的とし，まず，加工開始側基板端から基板中央付近にかけて亀裂がどのように進展するかを実験によって調べた．その結果，加工開始側基板端から数 mm の領域では貫通亀裂が，それ以降の領域では一定深さの表面亀裂が形成されることを確認した．続いて，有限要素法と境界要素法を組み合わせた三次元亀裂進展解析を行った．解析において，応力拡大係数がしきい値を超える領域で亀裂を進展させた．応力拡大係数のしきい値は，基板中央での準定常亀裂進

展を解析した場合に亀裂深さが実験結果と最もよく一致する値を用いた．その結果，以下の結論が得られた．

1. 基板端がレーザ加熱される際，端面近傍では基板内部に引張応力がはたらく．この引張応力によって初期亀裂が基板の厚さ方向に進展し，貫通亀裂となる．
2. その後，基板端が冷却される際には，基板表面近傍に引張応力が生じる．この引張応力によって基板表面付近の一部で貫通亀裂が進展し，浅い表面亀裂が形成される．この表面亀裂は，準定常的に進展し，その結果一定深さの亀裂となる．
3. 基板中央での準定常亀裂進展を対象として決定した応力拡大係数のしきい値を用いることで，基板端付近での過渡的亀裂進展現象を説明できる．

一般に，基板中央と基板端付近では応力場が異なるため，亀裂進展現象も異なる．レーザスクライブは，加工開始位置に形成した初期亀裂を成長させる加工であるため，初期亀裂がどのように進展するかということは重要な問題である．基板端付近での品質が悪い場合は，基板端から数 mm の領域を捨てる必要も生じ，歩留まりの低下を招く．第 4 章で述べた解析を応用し，様々な加工条件下での亀裂進展解析を行えば，より歩留まりの高い加工方法，加工条件についての指針が得られる．

第 5 章「非対称熱応力による亀裂湾曲メカニズムと亀裂形状の推定」では，ガラスのレーザスクライブにおいて，加熱域の中心と冷却域の中心がずれた場合に形成される湾曲した亀裂の形状を予測することを目的とし，まず，実験によって亀裂形状を調べた．リタデーション測定から基板表面での亀裂位置を，分断面形状測定から基板内部での亀裂形状を調べ，どのような亀裂が形成されたかを特定した．その結果，加工開始位置から十分離れた位置では亀裂が準定常的に進展することを明らかにした．このとき，亀裂は加熱域の中心と冷却域の中心の間に位置し，基板内部で加熱域の中心側へ湾曲する．

この実験結果に基づき，非対称応力場内で準定常的に進展する亀裂の形状を，基板中央付近の静的熱応力場のみを用いて解析する方法を提案した．まず，実験で測定した亀裂位置と同じ位置に浅い初期亀裂を設定し，有効応力拡大係数 K_{eff} を求める．K_{eff} が応力拡大係数のしきい値 K_{th} を超える領域において，亀裂面に対して角度 θ 傾いた方向に亀裂を進展させる．新しい亀裂形状のもとで K_{eff} を求め，これを繰り返して亀裂を段階的に進展させる．

亀裂進展解析に境界要素法を用い，湾曲した亀裂形状を比較的少ない要素数でモデル化した．この解析によって得られる亀裂形状は，冷却位置のずれ量が異なる複数の条件において，実験結果と比較的よく一致し，湾曲した亀裂の形状を推定できることが示された．

一般に，直線加工を行う場合は，レーザビームおよびウォータジェットの強度分布を加工線に対して対称にし，真っすぐな亀裂を形成するのが望ましい．製品によっては，亀裂の湾曲量を一定値以下にすることが求められる．第 5 章で述べた解析により，各製品に求められる加工精度を得るには，加工装置としてどの程度の調整の精度が必要かを，装置の設計段階で見積もることができる．その結果，各製品に合わせた適切な加工装置の設計が可能となり，不要なコスト上昇や加工品質低下などの問題を回避できる．また，この解析の応用により，亀裂の湾曲量を小さくできる加工方法や加工条件の提案につながり，レーザスクライブがより広い分野へ適用されることが期待される．

謝辞

本研究は，大阪大学大学院工学研究科　ビジネスエンジニアリング専攻教授　大村悦二博士のご指導のもとで行われたものである．本研究の遂行に際し，終始懇切丁寧なご指導とご討論を賜ったことに対して，深厚なる感謝の意を表します．

また，本論文を完成させるにあたり有益なご助言を賜った大阪大学大学院工学研究科　ビジネスエンジニアリング専攻教授　上西啓介博士，大阪大学大学院工学研究科　生命先端工学専攻教授　伊東一良博士，大阪大学大学院工学研究科　機械工学専攻（接合科学研究所）教授　片山聖二博士，大阪大学大学院工学研究科　ビジネスエンジニアリング専攻准教授　倉敷哲生博士に深厚なる感謝の意を表します．

本研究における二次元亀裂進展解析を行うにあたり，有益な助言を賜った大阪大学大学院工学研究科　マテリアル生産科学専攻教授　平田好則博士に深厚なる感謝の意を表します．

本論文における湾曲した亀裂形状の測定実験にあたり，ご協力いただいた大阪大学大学院工学研究科附属　超精密科学研究センター准教授　山村和也博士，博士後期課程　永野幹典氏ならびに研究室の方々に深く感謝致します．

本研究の機会を与えていただき，支援をいただいた三星ダイヤモンド工業株式会社　代表取締役社長　三宅泰明氏に甚大なる感謝の意を表します．

本研究における実験，解析を行うにあたり，研究の方針を相談させていただき，適切なご助言を賜った三星ダイヤモンド工業株式会社 MDI 研究所部長補佐 清水政二博士，レーザー技術研究課係長 村上正直博士に心から感謝致します．

本研究を行うにあたり，様々な面で支援していただいた三星ダイヤモンド工業株式会社 MDI 研究所部長 平野茂和氏，レーザー技術研究課 主席研究員 林 尚久氏，佐島徳武博士，田中哲平博士，前田憲一氏，在間則文氏，畑 強之博士，福澄允珠氏，レーザーエンジン開発課 主任 藤井昌宏氏，ツール技術研究課 野橋久美子氏，留井直子氏に深く感謝致します．

本論文に関する研究業績

学術論文

1) 八幡恵輔, 山本幸司, 大村悦二, "ガラスのレーザスクライブにおける亀裂進展解析", 日本機械学会論文集, C 編, 75-760, (2009), 3339.
2) Keisuke Yahata, Koji Yamamoto, and Etsuji Ohmura, "Crack Propagation Analysis in Laser Scribing of Glass", Journal of Laser Micro/Nanoengineering, **5**-2, (2010), 109.
3) Keisuke Yahata, Etsuji Ohmura, Seiji Shimizu, and Masanao Murakami, "Boundary Element Analysis of Crack Propagation in Laser Scribing of Glass", Journal of Laser Micro/Nanoengineering. (掲載予定)
4) 八幡恵輔, 大村悦二, 清水政二, 村上政直, "ガラスのレーザスクライブにおける亀裂湾曲メカニズムの解明と亀裂形状の推定", レーザ加工学会誌. (掲載予定)

国際会議論文

1) Keisuke Yahata, Etsuji Ohmura, Seiji Shimizu, and Masanao Murakami, "Dominant Factors of Suitable Processing Conditions in Laser Scribing of Glass", Proceedings of the 6th International Conference on Laser Edge Manufacturing in 21st Century, Saitama, Japan, (2011), 3374.[査読有]
2) Keisuke Yahata, Etsuji Ohmura, Seiji Shimizu, and Masanao Murakami, "Suitable Processing Conditions Determined from the Standpoint of Residual Strain", Proceedings of the 31st International Congress on Application of Laser and Electro-Optics, Anaheim, America, (2012), 1281.

講演論文

1) 八幡恵輔, 山本幸司, 大村悦二, 平田好則, “ガラスのレーザスクライブにおける予亀裂導入モデルによる熱弾性解析”, 日本機械学会第 7 回生産加工・工作機械部門講演会講演論文集, (2008), 145.
2) 八幡恵輔, 大村悦二, 清水政二, 山本幸司, 村上政直, “パルスレーザによるガラスのレーザスクライブにおける熱応力解析”, 日本機械学会 第 8 回生産加工・工作機械部門講演会講演論文集, (2010), 65
3) 八幡恵輔, 大村悦二, 清水政二, 村上政直, “ガラスのレーザスクライブにおけるレーザの繰り返し周波数の影響”, 第 74 回レーザ加工学会講演論文集, (2010), 235.
4) 八幡恵輔, 大村悦二, 清水政二, 村上政直, “ガラスのレーザスクライブにおける境界要素法による三次元亀裂進展解析”, 2011 年度精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集, (2011), 620.

受賞

1) The LPM2011 Outstanding Student Paper Award (Oral) [(社)高温学会 レーザ加工学会]2011 年 6 月
Keisuke Yahata, Etsuji Ohmura, Seiji Shimizu, and Masanao Murakami, “Thermal Stress Analysis Considering Frequency in Laser Scribing of Glass”, The 12th International Symposium on Laser Precision Microfabricvation, Takamatsu, Japan, (2011).
2) LEM21 優秀講演論文表彰[(社)日本機械学会生産加工・工作機械部門]2011 年 11 月
Keisuke Yahata, Etsuji Ohmura, Seiji Shimizu, and Masanao Murakami, “Dominant Factors of Suitable Processing Conditions Range in Laser Scribing of Glass”, Proceedings of the 6th International Conference on Leading Edge Manufacturing in 21st Century, (2011), 3374.

26