

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 15 日現在

機関番号：17301

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2012～2014

課題番号：24560138

研究課題名(和文) 貼り合わせ強化ガラスのレーザスクライプ割断

研究課題名(英文) Laser scribe processing of laminated tempered glass

研究代表者

本村 文孝 (MOTOMURA, Fumitaka)

長崎大学・工学研究科・助教

研究者番号：40274625

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：貼り合わせ強化ガラスのレーザスクライプによる最適なスクライプ加工条件を効率的に設定するために破壊力学に基づく数値解析手法を確立し、スクライプ実験における優位性を確認した。またレーザスクライプに不可欠な均一な初期傷の形成として有望なレーザ加工技術である超短パルスレーザによるレーザアブレーションについても、アブレーション加工条件を設定するための数値解析手法を確立し、アブレーション実験による有効性を確認した。レーザ光とガラスの相互作用による破壊メカニズムの解明と破壊現象を利用したレーザ加工への応用に寄与した。

研究成果の概要(英文)：Analytical technique based on fracture mechanics was established to set the optimum scribe processing condition with laser scribing method for laminated chemically tempered glass. Superiority of laser scribing experiment using scribing condition obtained from numerical analysis was confirmed. In addition, as a processing method to generate flaw that is indispensable for a laser scribe processing, laser ablation which is laser processing technique with ultra-short pulsed laser will be applied. About ablation processing, analytical technique to get ablation processing condition was established, and effectiveness by laser ablation experiment using analytical result was confirmed. We elucidated fracture mechanism by interaction of laser beam and glass and contributed to application to laser processing using a fracture phenomenon.

研究分野：生産工学・加工学

キーワード：レーザスクライプ レーザアブレーション 貼り合わせ強化ガラス 有限要素解析 破壊力学

## 1. 研究開始当初の背景

(1) スマートデバイス等の液晶画面の基板材料として用いられているガラスはアルミノシリケート系であり、ガラス表面に傷が付き難いように化学強化層が形成されている。数十枚単位で大判の液晶ガラス元板に構築された液晶パネル群から液晶パネルを切り離すための個片化技術が必要とされていた。チップングレス、無洗浄、切り代不要の加工法であるレーザスクライプ法は局所的な熱応力を利用してガラス表面に深さ制御可能なスクライプ(き裂)線を形成でき、スクライプ線が交差するクロススクライプの可能性も含めてガラス分断法の効率化が望まれていた。また、液晶基板は2枚のガラス板に挟まれたサンドイッチ構造にあり、それぞれのガラス板を大判の元板から切り離す分断技術も必要であった。分断面の研磨などの後工程を必要としないほど、マイクロクラックレスで、抗折強度の高い切断面が得られるレーザスクライプ法は板厚の薄い脆性材料(シリコンやサファイア)等への応用も期待されたエネルギー効率の高い加工である。

(2) レーザスクライプ法においては、破壊の起点となる傷が必要となる。耐傷性を向上させた強化ガラス表面に均一な初期傷を付ける加工法が望まれるが、チップングの生じるスクライピングホイールは接触式のためにホイール摩耗による傷のばらつきが避けられない。そこで研究開始当時、日本での生産が本格化したピコ秒パルスレーザを用いて、非接触かつ微細加工に有利な超短パルスレーザを用いたレーザアブレーション加工が注目されるようになった。本加工法は高出力の超短パルスレーザをガラス表面に集光させ、プラズマ化させることで、表面除去しようとするもので、ミクロンレベルの微細欠陥から数ミリの穴あけ加工まで適用可能であり、今後レーザ加工法の主流として有望視されているが、除去メカニズムに不明な点が多く破壊メカニズムの解明が必要となっている。

## 2. 研究の目的

(1) 大判の液晶基板ガラスの元板から液晶パネルを個片化する加工技術の構築に寄与する。レーザスクライプ条件(スクライプ速度、レーザ強度、ビームウエストなど)を効率的に設定するためには、種々のレーザスクライプ条件に対して形成の可能なスクライプ深さを定量的に評価できる有限要素解析プログラムを開発することが有効と考える。開発した有限要素解析プログラムにより、種々の接着条件下にある貼り合せ化学強化ガラスに対してスクライプの可能なレーザスクライプ条件を推定し、再現性の高い加工条件の設定に寄与する。

(2) レーザスクライプ法に必要不可欠な初期傷の導入法が必要である。化学強化ガラスを対象として、超短パルスレーザを用いた表

面欠陥(クレータ)を生成するために、所望のクレータ深さを有するレーザアブレーション条件(レーザフルエンス、ビームウエスト、パルス周波数など)を最適化し、再現性の高いスクライプ加工を実現する。

## 3. 研究の方法

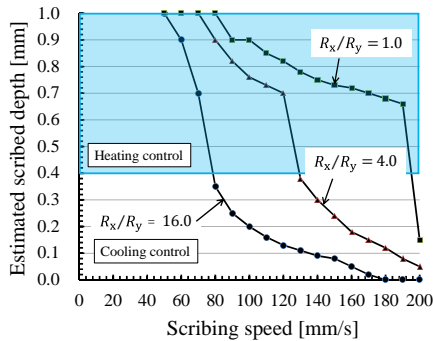
(1) レーザスクライプ法による最適なスクライプ条件を推定するために有限要素プログラムを開発した。移動するレーザ照射とミスト冷却を受ける貼り合せ化学強化ガラスの解析手順として3ステップがあり、非定常温度場解析: ガウシアン型のレーザ強度を有するレーザ光の表面吸収を熱流束により、またミスト冷却による表面吸熱を強制熱伝達とみなし、熱伝導の支配方程式に代入することで非定常温度場が得られる。熱弾性解析: ステップ から得られた温度変化に比例する熱ひずみを初期ひずみとして、また化学強化によってガラス板厚方向に分布する残留応力を初期応力として荷重ベクトルに代入し、剛性方程式を解くことで、強化ガラス内に分布する弾性応力場が得られる。き裂解析: 弾性問題におけるき裂は、き裂面に相当する要素面の応力自由の条件を、また貼り合せ面の変位拘束の条件を設定することで、貼り合せによって変形を拘束されたガラスの内部を進展するき裂進展挙動が得られる。以上のステップを種々のスクライピング条件について解析することで、スクライプ深さ(表面き裂深さ)を定量的に求めることができる。解析結果から得られるスクライプ加工条件を初期条件として、レーザスクライプ加工装置による検証および修正をおこなう。

(2) 化学強化ガラスに均一な表面傷を付ける加工法として有効な超短パルスレーザによるレーザアブレーション加工におけるアブレーション条件を設定するために、レーザアブレーションによる表面欠陥(クレータ)を推定する数値シミュレーションプログラムを構築した。超短パルスレーザをマルチショットチャンネルでガラスに照射した際に得られるクレータの時間変化のための解析手順としては3ステップがあり、電場解析: 誘電体とみなしたガラスに、時空間的にガウシアン型のレーザ強度を有する可視光レーザが吸収されることで誘電体内部に形成される電場を近軸ヘルムホルツ方程式より求める。電場とレーザ強度の量子化の関係を前提としたプラズマモデルによる自由電子密度の時間発展: パルスレーザの非線形吸収と固体(誘電体)の相互作用を表す速度方程式を構築し、励起状態にある自由電子密度の増減の時間変化およびレベルにより、イオン化した領域を求める。アブレーション閾値: 臨界自由電子密度を閾値して、イオン化したアブレーション領域、光学物性が変化した損傷領域、未損傷領域を判別する。損傷領域については、複素誘電関数に基づき屈折率と吸収係数を修正する。この操作をパルス

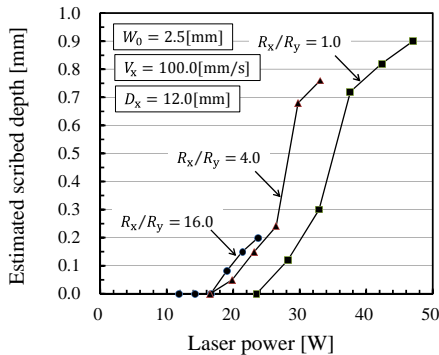
レーザのショット毎におこなうことで、マルチショット時のクレタ形状を推定することができる。このシミュレーション結果を強化ガラスのレーザアブレーション実験の結果と比較検討する。

#### 4. 研究成果

(1) レーザスクライブ加工におけるスクライブ速度とスクライブ深さの関係：レーザ熱源の最適な形状は、レーザエネルギー優先、およびスクライビング速度優先によって傾向が異なる。レーザエネルギーを抑えたい場合は紡錘形のレーザ熱源を、加工時間を短くしたい場合は円形のレーザ熱源を採用することで、より深いスクライビングが可能となる。図1はレーザ形状を変えた場合のスクライブ速度とスクライブエネルギーに対するスクライブ深さの変化を示している。またスクライビング速度に対する貫通き裂から表面き裂へのき裂進展挙動の遷移メカニズムを明らかにした。



(a) vs スクライブ速度[mm/s]



(b) vs レーザ出力[W]

図1 推定されたスクライブ深さ

(2) レーザスクライブ加工における貼り合せ化学強化ガラスのスクライブ深さ：接着層による変位拘束、およびガラス表面に残留圧縮応力が作用することで、スクライブ深さが確保できることがわかった（図2参照）。これは、表面層近傍に分布する圧縮応力領域を含むように表面き裂が生成されると応力が解放され、それまで解放された圧縮応力と釣り合っていた引張応力がき裂先端近傍の未解

放領域を中心に再分配され、き裂進展を助長するためと考えられる。十分な深さの初期傷を有する強化ガラスの変位拘束はレーザスクライブに有利に作用することがわかった。

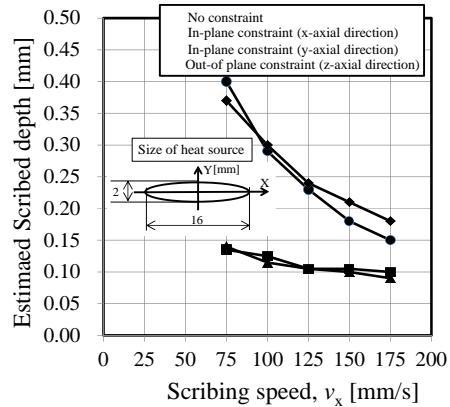
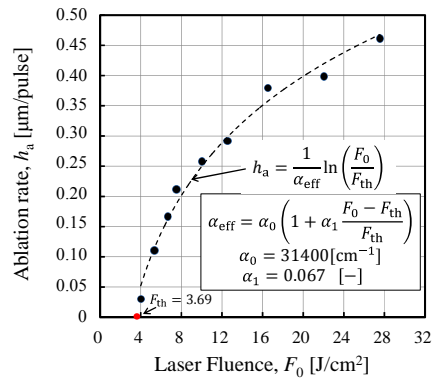
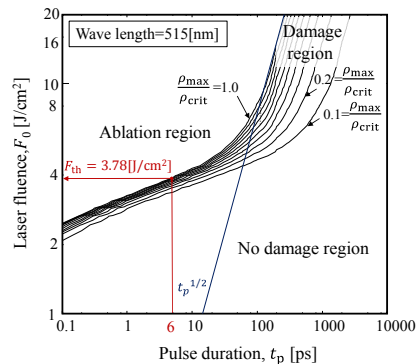


図2 貼り合せ化学強化ガラスの推定されたスクライブ深さ

(3) レーザアブレーション加工におけるアブレーション閾値：レーザスクライブにおける初期傷の均一性はとても重要である。そこで強化ガラスに対するレーザアブレーション閾値の実験値とよく一致する解析モデルを構築した。図3は、実験に用いられたピコ秒パルスレーザに対して得られた閾値フルエンスと解析結果を示している。



(a) 閾値フルエンス（実験値）



(b) 閾値フルエンス（解析値）

図3 アブレーション閾値の比較

アブレーション閾値の解析的な算出ができたことで、化学強化ガラスに対して均一な表面欠陥(クレータ)を形成する加工条件を設定できるようになった。

(4) まとめ: 貼り合せ強化ガラスのレーザスクライプ加工条件の設定における効率化、再現性を確保するための工学的アプローチ手法を確立した。レーザスクライプおよびレーザアブレーションについて構築した解析手法は種々の脆性材料に適用可能であり、汎用性が高い。経験則が先行するレーザ加工分野において、破壊の観点からのメカニズムの解明は今後も必要と考える。最近、国内外でスマートデバイス関連の加工技術として注目されている超短パルスレーザによる微細加工をサファイア、シリコン等の脆性材料やプラスチックなどへ適用することが検討されている。本解析手法がガラス以外のワイドバンドギャップ材料に適用される機会も今後増えるものと期待される。

#### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計1件)

Fumitaka Motomura, Micro Drilling Simulation of Ultra-short Pulsed Laser Ablation For Glasses, International journal of automation technology, 査読有、Vol.9-No.4, 2015, in press

[学会発表](計5件)

Kouta Fukumi, Fumitaka Motomura, Yasuhiko Ougiya, Akihide Saimoto, Marry Lawn, Numerical Analysis for Individual Pieces of Laminated Glass Plates on Laser Scribing Processing, JSST2015, 2015年6月8日、長崎大学文教キャンパス(長崎県・長崎市)

Fumitaka Motomura, Simulation of ultra-short pulsed laser ablation for glass cutting, ICPE2014, 2014年7月24日、ホテル日航金沢(石川県・金沢市)

本村 文孝, 疋田 将士, 超短パルスレーザによるマイクロドリルの数値シミュレーション, M&M2014 材料力学カンファレンス, 日本機械学会, 2014年7月20日、福島大学(福島県・福島市)

本村 文孝, ピコ秒レーザによるガラス切断シミュレーション, Photonix2013(6<sup>th</sup> Laser & Applications Expo), 2013年4月11日、東京ビックサイト(東京都・江東区)

Ryuuta Iwabuchi, Fumitaka Motomura, Evaluation of thermal stresses in hardened glass plates under temperature field supporting a laser scribe process, JSSUME2012, 2012年8月25日、やすらぎ伊王島(長崎県・長崎市)

[図書](計0件)

[産業財産権]

出願状況(計0件)

取得状況(計0件)

[その他]

#### 6. 研究組織

(1) 研究代表者

本村 文孝(MOTOMURA, Fumitaka)

長崎大学・工学研究科・助教

研究者番号: 40274625