

平成22年6月24日現在

研究種目：基盤研究（C）
 研究期間：2007 ～ 2009
 課題番号：19560739
 研究課題名（和文）
 レーザを活用した脆性材料の高速切断技術の開発
 研究課題名（英文）
 Development of high-speed cutting technology of brittle materials by laser
 研究代表者
 原 要一郎（HARA YOUICHIRO）
 佐世保工業高等専門学校・機械工学科・教授
 研究者番号：70099886

研究成果の概要（和文）：

近年、ガラス表面に加熱形状が楕円のレーザで加熱直後を急冷することで得られる熱応力を利用し、表面にスクライブ線を発生させる加工方法が実用化されている。

しかし、この方法には加熱形状の加工が困難であること、高額な外国特許の使用料が発生するなどの問題点がある。

そこで本研究では、これらの問題を回避する焦点形状が円のレーザを2点に分けて加熱するスクライブ加工法を新たに提案し、最適な成立条件についての検証を行った。

研究成果の概要（英文）：

The scribing process is necessary for cutting glass, and a wheel cutter is used for it. Recently, however, the scribing process that guides a crack only on the surface is using the thermal stress generated by laser irradiation. Compared with the conventional method, there is no micro crack and flatness in a cross section.

Furthermore, since the chips of glass are not generated, it is the method whose manufacturing efficiency is high. This research describes about the laser scribing method using the new heating point by CO₂ laser, experiments the laser scribing processing in this method, and examines the possibility of a new laser scribe process based on the result.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
19年度	2900,000	870,000	3,770,000
20年度	500,000	150,000	650,000
21年度	200,000	60,000	260,000
年度			
年度			
総計	3,600,000	1,080,000	4,680,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目： 分科：材料工学 細目：材料加工・処理

キーワード：レーザ加工，スクライブ加工，熱応力切断，脆性材料

1. 研究開始当初の背景

現在、産業界の広い分野において、歩留まりの大きい脆性材料の加工法が必要とされている。特にフラットパネルディスプレイ (FPD)用ガラス基板の需要拡大に伴い、ガラスの切断方法の高効率化が強く求められている。従来のガラスの加工法には、ホイールカッタによるスクライブ加工やレーザーによる熱応力割断などの方法がある。しかし、ホイールカッタによる方法は切り屑が発生し、切断面にマイクロクラックが発生する、熱応力割断では加工速度が遅い、クロスカットができないという短所がある。

これらの要求に応える手段として、材料表面を焦点形状が楕円のレーザーで加熱した直後にウォータージェットノズルによる急冷却を施し、急激な温度差から生じる熱応力によってガラス端面に設けた初期き裂を深さとレーザー進行方向に誘導させ、材料表面に浅いスクライブ線が発生させた後、機械的に曲げ応力を作用させ分断する Kondratenko¹⁾らの方法が実用化されている。この方法では、上記に挙げた短所を改善できることができる。しかし、この方法には、レーザー焦点形状が楕円であるために、材料特性などの加工条件に合わせた焦点形状の変更が困難であり、さらに日本国内において使用する場合には高額な外国特許の使用料が発生するため、コストがかかるという欠点がある。

2. 研究の目的

(1)前述のような問題点を改善する方法として、本研究では Kondratenko¹⁾らの特許に抵触せず、かつ加工条件に合わせた条件設定が簡便な平行光で焦点形状が円のレーザーによる2点加熱の方法で、ガラスのレーザースクライブ加工が成立する最適な条件についての検証を行った。

(2)レーザースクライブ加工においては冷却条件が加工成立に大きく影響する。これまで同様な研究において冷却熱量の評価²⁾は、平均熱伝達率から行っていた。しかし、冷却面積や実際の温度測定はあまり行われていないため、より正確な冷却の効果を検証する必要がある。そのためには、計算と実験との整合性を取る必要がある。そこで、冷却直後のガラス表面の温度測定を行い、その冷却効果をシミュレーションに反映させ、最適な冷却条件についても検証を行った。

3. 研究の方法

(1)2点照射のレーザースクライブ加工実験

Fig.2 に実験装置概略図を示す。また、Table 1 に実験に用いたレーザーの仕様、Table 2 にガラス材の物性値を示す。

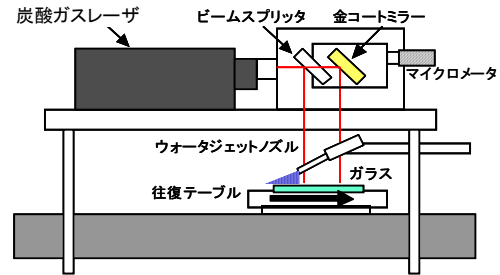


Fig.2 レーザスクライブ加工実験装置概略図

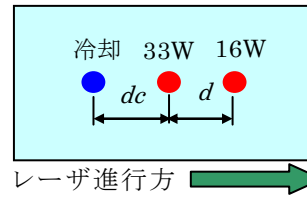


Fig.3 レーザ2点間距離と冷却位置の関係

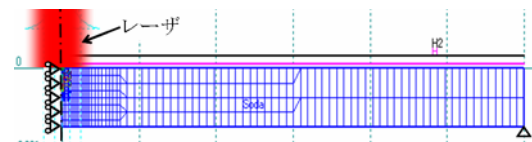


Fig.4 熱弾性解析モデル

Table 1 CO₂ レーザ仕様

波長 [μm]	定格出力 [W]	ビーム径 (1/e ²) [mm]
10.57~10.63	40	2
冷却方式	偏光	ビーム拡がり角 (全角) [mrad]
強制空冷	直線 (水平)	7

Table 2 ガラス物性値³⁾⁻⁵⁾

熱伝導率 [W/mK]	密度 [kg/m ³]	比熱 [J/kgK]	熱膨張係数 [K ⁻¹]
1.03	2520	800	8.7×10 ⁻⁶
軟化点 [°C]	破壊応力 [MPa]	横弾性係数 [MPa]	ポアソン比
720~730	49	71.6	0.23

Table 3 スクライブ実験条件

レーザー出力 [W]	冷却水流量 [l/min]	冷却位置 d_c [mm]
33, 16	0.03	2

CO₂ レーザから照射されたレーザー光は、45°に傾けて設置したビームスプリッタにより反射2、透過1の出力比に分けられる。透過したレーザー光は、金コートミラーによって水平方向に動く往復テーブル上に置かれたガラスに照射される。

レーザービーム照射直後を、冷却ノズルから放出される冷却水によって冷却する。冷却ノズルの位置は、自由に調節することができ、噴水量は0.03l/minで行った。

またこの装置は、金コートミラー部をマイクロメータによって水平方向に移動させることができ、これによりガラスに照射されるレーザーの2点間距離を変更することができる。実験はレーザー出力、往復テーブル速度、レーザー2点間距離の設定をおこなった後、加热点の中心軸調整を行い、冷却位置の調整を行う。次に、ガラス端にヤスリで無数の微小欠陥をつくり、これを初期亀裂のかわりとする。この初期き裂線上に、CO₂ レーザを走査させ、前述の方法でスクライブ加工実験を行う。今回の実験では、これまでにスクライブ加工が成立した条件内で断面の評価を行い、最適な加工条件と本方法でスクライブ深さを制御できる可能性について検証を行った。冷却水流量、冷却位置は一定で、スクライブ加工速度、レーザー出力、レーザー2点間距離を変更パラメータとし、併せてその時の熱応力解析も行い、スクライブ加工最適条件と加工面の評価を行った。Fig.3にレーザー2点間距離 d と冷却位置 d_c の関係を示す。

また、実験はTable 3 に示す条件を一定条件とし、使用したガラス材は50×90mm、厚さ0.7mmのものである。また、実験パラメータとして、レーザー2点間距離、スクライブ速度を変化させ実験を行った。

①レーザー2点間距離

Table 3 に示す実験条件下で、レーザー2点間距離 d を2mm、4mm、6mm、8mmと変化させ実験を行った。

②スクライブ速度

Table 3 に示す実験条件下で、スクライブ速度を80mm/sから110mm/sまで2mm/sずつ上

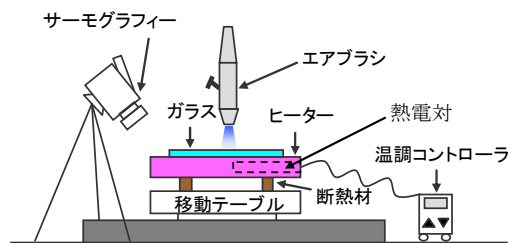


Fig.5 冷却評価実験装置概略図

Table 4 実験条件

冷却水流量 [l/min]	空気圧 [psi]	冷却水温度 [°C]
0.004616	23.5	20

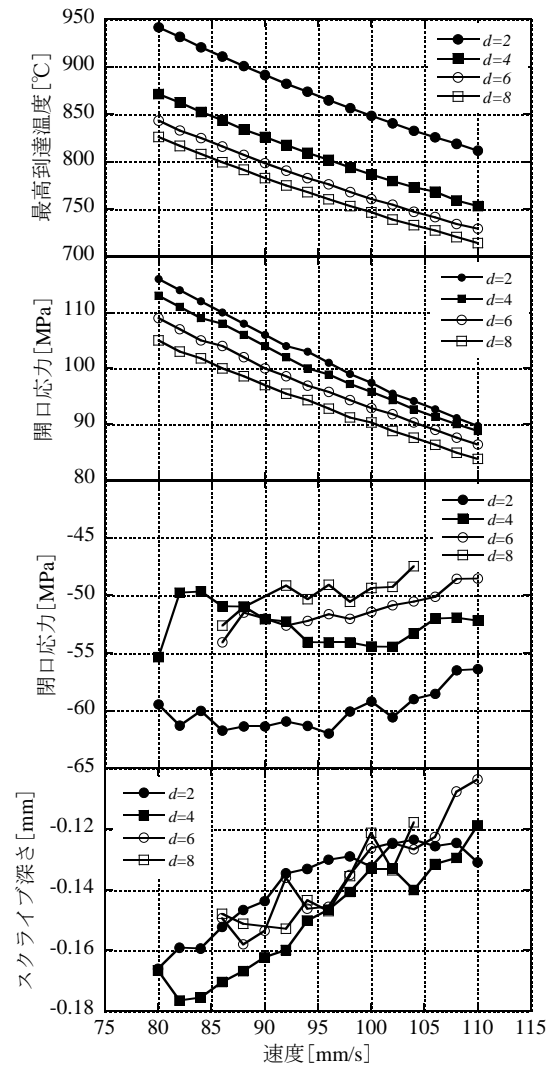


Fig.6 レーザ走査速度と温度、応力およびスクライブ深さの関係

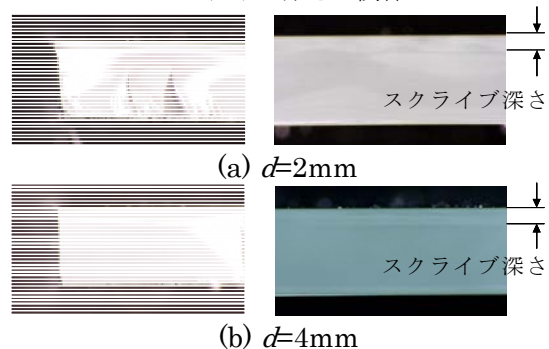


Fig.7 スクライブ加工断面

昇させ実験を行った。

③スクライブ面の評価

スクライブ加工が成功する範囲において、顕微鏡によりスクライブ深さの測定と、スクライブ面のそりについて評価を行った。

④熱弾性解析

実験結果ごとのFEMによる熱弾性解析を行い、温度と応力の解析を行った。Fig.4には

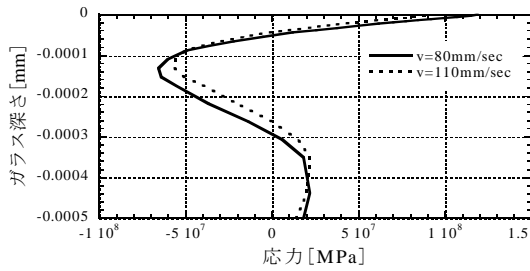


Fig.8 スクライブ深さと応力の関係 ($d=2\text{mm}$)

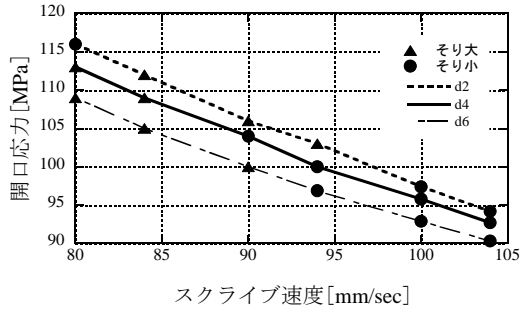


Fig.9 断面のそりと開口応力

熱弾性解析のモデルを示し、固定条件は左端を x 軸固定し、右端下を y 軸固定しておりレーザーは左端上を奥行き方向 (z 方向) に移動する。

(2)冷却評価実験装置および実験方法

Fig.5 に実験装置概略図を示す。移動テーブルの上にヒーターとガラスが置かれ、ガラス表面温度を測定するためにサーモグラフィカメラが配置されている。ヒーターは熱電対によって加熱され、温度は温調コントローラによって調節することができる。また、冷却にはエアブラシを用いており、ガラスとエアブラシ間の距離は 3mm で固定した。

実験は温調コントローラによって、 180°C に調節されたヒーター上にガラスを置き、サーモグラフィによってガラスの温度を確認しながらガラスがヒーターと同じ 180°C になるまで加熱する。ガラスの温度が 180°C まで上昇したら、移動テーブルを速度 $v=80\text{mm/s}$ で移動させながら、エアブラシによって霧状の水を噴射しガラスを急冷する。このときサーモグラフィによってガラス表面の温度変化を撮影する。撮影された画像からガラス表面の温度分布、冷却のガウス半径を測定し、これらから冷却の評価を行う。

また、冷却の評価実験は Table 4 に示す条件下で行った。

4. 研究成果

(1)レーザースクライブ加工実験

①レーザー2点間距離の影響

Fig.6 には横軸にスクライブ速度、縦軸に温度、最大引張応力、閉口応力、スクライブ深さを取ったグラフを示す。また、スクライブ深さの実験値は4回計測した平均の値を示している。Fig.6 より2点間距離が狭いと最高到達温度が高く、最大引張応力が大きくなるこ

Table 5 解析条件

レーザー出力 [W]	レーザーガウス半径 [mm]	レーザー2点間距離 [mm]
33, 16	1.15	4.0
冷却熱量 [W]	移動速度 [mm/s]	
0.174	80	

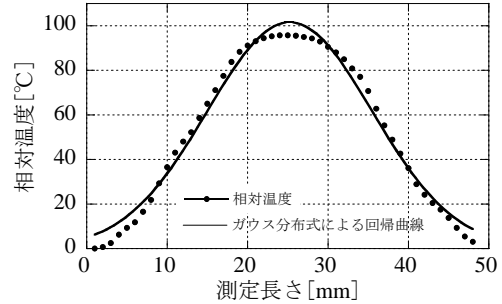


Fig.10 冷却のガウス分布

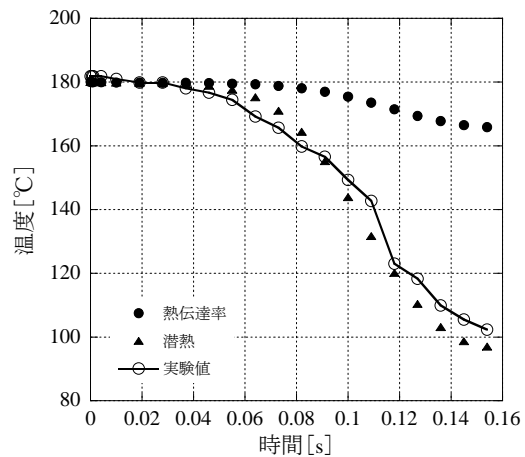


Fig.11 冷却熱量計算式の違いによる温度変化の比較

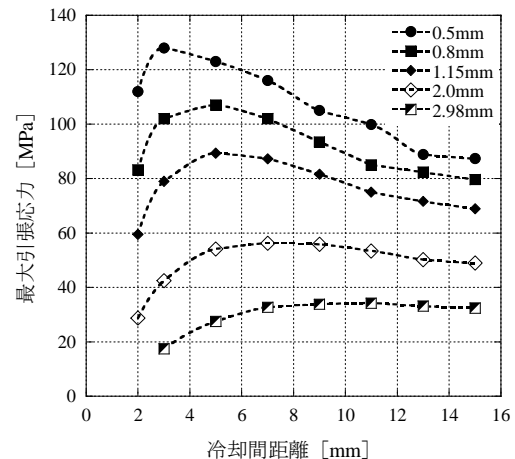


Fig.12 加熱点と冷却点間の距離と最大引張応力の関係

とがわかる。また、2点間距離に関わらずほぼ一定の閉口応力 (スクライブが止まった地点の応力) になっていることも分かる。スクライブ深さについては2点間距離が広いほ

うがスクライブ深さは深くなる傾向があるように見えるが $d=8\text{mm}$ の結果のように二点間距離を離しすぎるとその深さは不安定である。このことから二点間距離によって圧縮応力場の深さは変化することがわかる。

②スクライブ加工速度の影響

Fig.6 よりスクライブ加工速度が速くなるほど最高到達温度および最大引張応力が減少していることが分かる。これは速度が速くなることによってガラスを熱する時間が短くなるために、冷却する際の温度差が変わるためだと考えられる。

また、スクライブ加工速度に関係なく閉口応力の値はほぼ -50MPa と一定であることがわかる。

③スクライブ面の評価

スクライブ加工成功時のスクライブ深さを、マイクロSCOPEにより測定した。Fig.7 にスクライブ加工断面、Fig.8 にスクライブ深さと応力の関係を示す。Fig.8 に示されるように加工速度が遅いとスクライブ深さは深くなり、速度が速くなるにつれて浅くなっていることがわかる。このとき閉口応力は -50MPa でほぼ一定であることから、スクライブ深さは開口応力と圧縮応力場の位置に関連性があることがわかる。また、Fig.6 から2点間距離が狭い 2mm や 4mm のときは加工速度による深さの変化が安定している傾向が見られるが、2点間距離が離れている 6mm や 8mm のときの深さの変化は不安定である。

また、Fig.9 にスクライブ面の直進性と開口応力の関係について示す。マイクロSCOPEを用いてスクライブ断面の角度を観察し、角度が 5° 以上のときはそりが大きく 5° 以下のときはそりが小さいものとして分類した。Fig.7 よりスクライブ加工速度が速いときは圧縮応力場がガラス表面から近いところに行けることがわかる。深さ方向の亀裂は圧縮応力場に沿って進展するため、速度が速くなり圧縮応力場がガラスの浅いところに生じると、そりが発生すると考えられる。

④熱弾性解析結果

Fig.6 に示すように熱弾性解析を行った結果として、スクライブ加工が成立するために必要な最大引張応力は 90MPa 以上、閉口応力は -50MPa 程度ではないかと考えられる。さらに今回の実験結果から $d=6\text{mm}$, 8mm では最大引張応力が 100MPa 以上となるような加工条件にするとスクライブ加工が成立せずフルカットになってしまった。

また、スクライブ深さについては最大引張応力が大きく、圧縮応力場が深いほどスクライブは深くなり、最大引張応力が小さく、圧縮応力場が浅いほど、スクライブは浅くなる傾向が見られた。

(2)冷却評価実験

①冷却ガウス半径の評価

Fig.10 には温度分布をもとに作成した冷却ガウス半径を計測するためのグラフを示す。Fig.10 において実線は実験値を(1)式に示すガウスの式を用いて最小二乗法で求めたものである。

$$y = \frac{P}{\pi R^2} \cdot \exp\left\{-\frac{(x-x_0)^2}{R^2}\right\} \quad (1)$$

グラフからエアブラシを用いた霧状の冷却はガウス分布を持つことが分かった。今回の冷却評価実験データの平均から冷却ガウス半径は 2.98mm であることが分かった。

②熱弾性解析における冷却の影響

現在、熱弾性解析においての冷却熱量を求める式として一般的に用いられているのは、ニュートンの冷却法則式を用いたものである。これまでは²⁾の平均熱伝達率⁶⁾を用いた方法で求めていた。しかし、実際には冷却水は完全に蒸発してしまうため、水への熱伝達の影響よりも潜熱による吸熱の効果が大きいと思われる。そこで、本実験では冷却水を霧状に改良し、蒸発しやすい状態として冷却の評価を行った。その結果、得られたガウス半径と水の潜熱を利用して評価を行ったところ、実験値の温度と近い値を得ることができた。結果を Fig.11 に示す。

また、 100°C での水の潜熱は 2260J/g であり、これから冷却熱量を求めたところ、冷却熱量は 0.174W であった。

実験ではガラス温度が 180°C から 101°C まで変化した。解析結果を見てみると、これまでの方法ではガラス表面温度は 165°C までしか低下しなかった。一方、潜熱を用いた新しい冷却の評価法ではガラス温度が 97°C まで低下し、実験結果とほぼ同じ温度となった。このことから潜熱を用いた新しい冷却の評価法は有効であると考えられる。

③冷却間距離の影響

Table 5 に示す解析条件の下で熱弾性解析を行った。Fig.12 に冷却間距離 d_c と最大引張応力の関係を示す。Fig.12 から冷却間距離が変化すると最大引張応力の値も変化することが分かる。

また、冷却のガウス半径が変化することによっても最大引張応力の値が変化することが確認できる。ここで、各冷却ガウス半径で最大の最大引張応力を得る距離のことを最適冷却距離とすると、冷却ガウス半径が変化することによって最適冷却距離も変化することが確認できる。

冷却間距離が近すぎると最大引張応力が低下するのは冷却水がレーザーのエネルギーを奪ってしまいガラス表面の加熱が弱くなってしまいうためだと考えられる。また、冷却間距離が離れすぎると冷却水があたるまでに熱が散逸してしまい、冷却時に与える温度差が小さくなるために最大引張応力も低下

すると考えられる。

④冷却幅の影響

Table 5 に示す解析条件で、Fig.13 に示すようにレーザ 2 点間距離を 4mm、冷却間距離を 5mm、進行方向の冷却ガウス半径を 1.15mm で一定とし、ガラス幅方向の冷却ガウス半径 (b mm) を変化させ冷却幅が与える影響について解析を行った。結果を Fig.14 に示す。Fig.14 より冷却幅が変化することで最大引張応力も変化することが分かった。冷却幅が広くなると、冷却面積が広がってしまい単位面積当たりの冷却エネルギーが低下してしまうため、十分な冷却効果が得られず最大引張応力が低下していくと考えられる。一方、冷却幅が狭くなりすぎる最大引張応力が低下する傾向が見られた。これは冷却面積が小さくなりすぎるため、加熱面積に対して十分な冷却ができなかったためではないかと考えられる。

よって、今回の解析条件の場合では幅方向のガウス半径が 0.6mm の場合が最適な冷却幅であると言える。

(3) 結言

①2 点加熱のレーザスクライブ加工について
実験結果及び熱応力解析結果から、レーザ 2 点加熱によるガラスのレーザスクライブ加工の最適な成立条件およびスクライブ深さの制御について、以下のようなことが分かった。

- 1) スクライブ加工に必要な最大引張応力は約 90MPa 以上であるが、100MPa を超えるとフルカットになってしまう場合がある。
- 2) 閉口応力は -50MPa 程度である。
- 3) 二点間距離が離れすぎるとスクライブ深さや成功率が安定しない。
- 4) スクライブ加工が成功したものでも加工断面にそりが生じる場合がある。

②冷却の評価

実験結果及び熱応力解析結果から、冷却の評価について以下のようなことが分かった。

- 1) エアブラシによる冷却面はガウス分布を持つ。冷却水が蒸発するような条件の場合では、潜熱による冷却の評価方法が有効である。
- 2) 冷却間距離および冷却幅のガウス半径が変化することにより最大引張応力の値が変化し最適な距離が存在する。

参考文献

- 1) Kondratenko, V.S.: Splitting of Non-Metallic, PCT WO93/20015 (1993)
- 2) 山本幸司, 羽坂登, 森田英毅, 大村悦二: ガラスのレーザスクライブにおける熱応力解析, 精密工学会誌, 73, 9 (2005), 1157
- 3) 日本機械学会 伝熱工学資料, 改訂 4 版, V. 物性編, 日本機械学会, (1986) 556
- 4) Shand, E. B., Glass Eng. Handbook, 2nd ed, (1958), 4

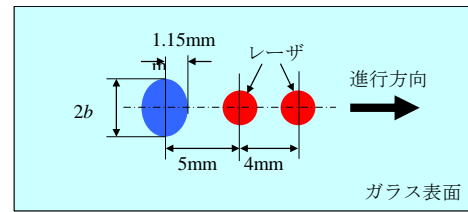


Fig.13 位置関係と冷却面形状

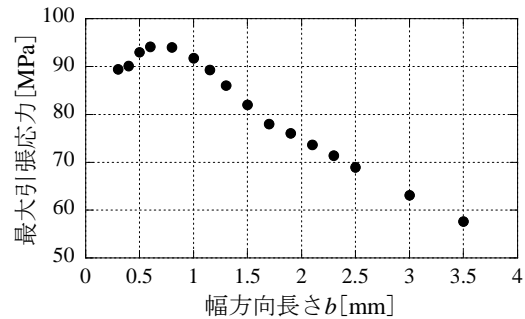


Fig.14 冷却面幅と最大引張応力の関係

5) 渡部紀夫: ガラス工学ハンドブック, 朝倉書店, (1999), 441

6) 山本明: 切削液の伝熱性能について 第 2 報, 精密機械, 26, 8 (1960) 461

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)

[学会発表] (計 2 件)

① 高祖守道, 森田英俊, 原要一郎, 2 点加熱によるガラスのレーザスクライブ加工, 日本機械学会 2008 年度年次大会 (2008 年 8 月), 横浜国立大学

② 淵上智之, 森田英俊, 原要一郎, 2 点加熱法によるガラスのレーザスクライブ加工法, 日本機械学会九州学生会第 40 回卒業研究発表講演会 (2009 年 3 月), 九州工業大学

[産業財産権]

○ 出願状況 (計 1 件)

名称: スクライブ加工装置及びスクライブ加工方法

発明者: 原要一郎, 森田英俊

権利者: 国立高等専門学校機構

種類: 特願

番号: 2009-21956

出願年月日: 平成 21 年 2 月 2 日

国内外の別: 国内

6. 研究組織

(1) 研究代表者

原 要一郎 (HARA YOUICHIRO)

佐世保工業高等専門学校・機械工学科・教授

研究者番号: 70099886

(2) 研究分担者

(3) 連携研究者