

2 波長レーザを用いたガラス板材の精密割断

金沢大学 理工研究域機械工学系
講師 古本達明
(平成 19 年度一般研究開発助成 AF-2007214)

キーワード: 炭酸ガスレーザ, Er:YAG レーザ, ソーダ石灰ガラス

1. 緒言

液晶やプラズマといった表示用機器や半導体基板など様々な分野でガラス, シリコンウエハなどの薄板状脆性材料が用いられている. これまで, このような薄板状脆性材料の分断は, ダイヤモンドブレードを用いたダイシングやスクライビングで行われていた. しかしながら, 加工液や洗浄液を併用しなければならず後処理が必要で, また, 材料分断面のマイクロクラック発生, 加工歩留まり, 激しい工具摩耗などが解決すべき課題として捉えられていた.

近年, これらの材料を高精度に分断する加工技術の開発が望まれており, 様々な手法が試みられている. そのなかで, 脆性材料にレーザ光を照射してき裂を伝ばさせて分断するレーザ割断は, 取り代が不要である, 切りくずが出ない, 加工時に外力が作用しないなどの特長を有しており, 有力な加工法の 1 つとして注目されている^{1,2)}. これまで, シリコンウエハ³⁾, 液晶ガラス⁴⁾, 炭化ケイ素⁵⁾, シリコンとガラスの 2 層構造など⁶⁾, 各種材料の割断が報告されている. また, 加工精度を改善するための冷凍チャックシステムの提案⁷⁾や, 加工速度を改善するための面熱源を用いた多点同時加熱法の提案⁸⁾など, 割断の特長を活かした実用化への取り組みも報告されている. しかしながら, これらはいずれも厚さが 1mm 以下の薄板状材料を用いており, 厚板材を対象とした割断はほとんど報告されていない. そこで本研究では, 波長の異なる 2 種類のレーザ光を用いて厚板ガラスを割断する手法を検討すると共に, 材料表面に生じる熱影響層の抑制効果を検討した結果について報告する.

2. レーザ割断の原理

薄板状脆性材料のレーザ割断原理を図 1 に示す. レーザ光が材料表面に照射されると, レーザ照射部は急激な温度上昇と共に

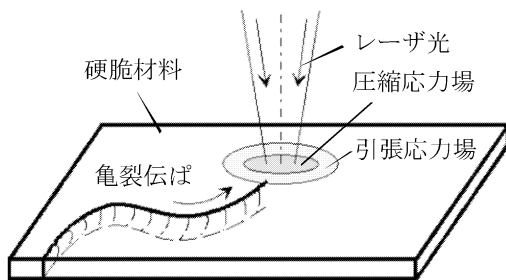


図1 レーザ割断の加工原理

に熱膨張する. このとき, レーザ照射部は周囲の低温部分から拘束されることとなるため圧縮応力場が生じ, その周辺には圧縮応力場とつり合うように引張応力場が生じる. 引張応力場内部では, 応力がレーザ照射部を中心として円周方向に働くため, 引張応力場にき裂の先端が存在すると, き裂はレーザ照射部の中心に向かって進展する. 材料に任意の送り速度を与えてレーザ照射部を移動させると, き裂はレーザ照射位置に追従するように断続的に進展し, き裂が材料終端まで到達すると材料を分断することができる.

3. 実験方法

3.1 実験材料

実験に用いる材料は, 表 1 に示すように厚さの異なるソーダ石灰ガラスである. それぞれ, 試料サイズが 20 mm×40 mm となるようにガラスカッターで切り出して用いた. ビッカース圧子を試料表面に押し込んだときのき裂長さから破壊じん性値を求めたところ⁹⁾, 0.72 - 0.76 MPa·mm^{1/2}であった.

図 2 は, 試料厚さが 0.7mm である無アルカリガラスの分光透過特性を調べた結果である. 0.2-0.9 μm の波長域は高速分光光度計(マクベス社製: MS-2020PL), 0.7-8.3 μm の波長域は近赤外

表 1 実験試料

ガラス種類	ソーダ石灰
試料サイズ	20 x 40 mm
厚さ	t 1.3 - 8.0 mm
ビッカース硬度	5650 - 5700 MPa
破壊じん性値	0.72 - 0.76 MPa·mm ^{1/2}

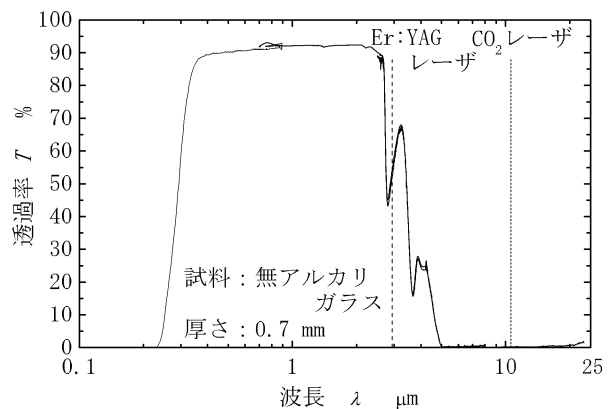


図2 ガラスの分光透過特性

表2 レーザの仕様

(a) CO ₂ レーザ		
レーザー種類		CO ₂
波長	λ	10.6 μm (CW)
ピーク出力	P_c	0 - 13 W
ビーム径	ϕ	1.2-2.8 mm

(b) Er:YAG レーザ		
レーザー種類		Er:YAG
波長	λ	2.94 μm (PW)
パルス幅	τ	0.2 ms
パルス周波数	f	1-20 Hz
レーザーエネルギー	Q	1 J/pulse
ビーム径	ϕ	0.1 mm (フォーカス)

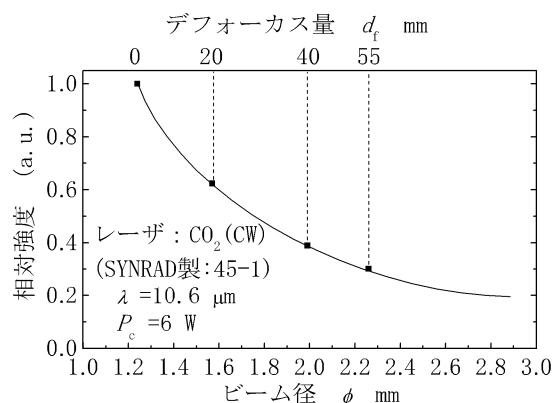


図4 レーザ光の相対強度

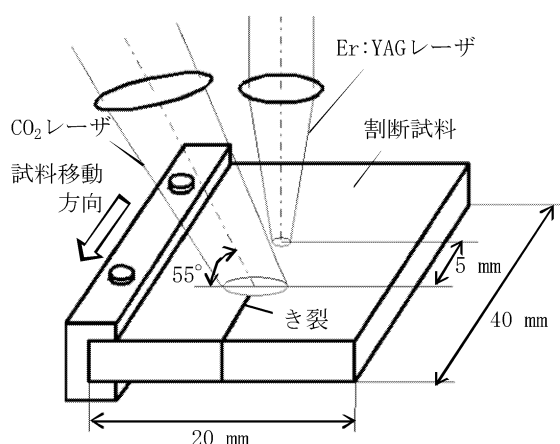


図3 実験装置

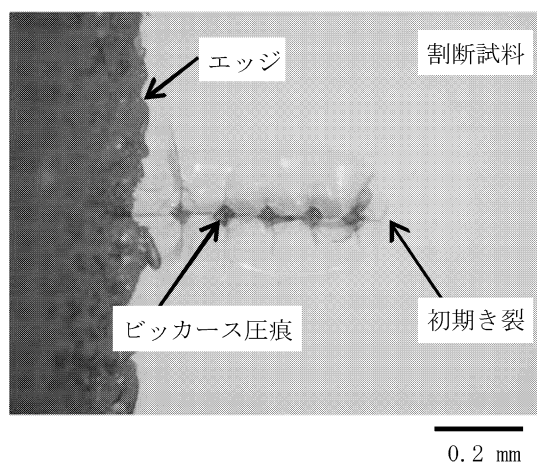


図5 試料端に導入した初期き裂

分光光度計((株)パーキンエルメージャパン製: Spectrum One NTS), 0.7-8.3 μm の波長域はフーリエ変換赤外分光光度計((株)堀場製作所製: FT-730)で測定した。切断実験に用いるソーダ石灰ガラスと、ほぼ同様の分光透過特性を有している材料である。使用する CO₂ レーザの波長 $\lambda=10.6 \mu\text{m}$ では透過率が $T=0.2\%$ 、Er:YAG レーザの波長 $\lambda=2.94 \mu\text{m}$ では $T=54\%$ であった。すなわち、試料表面に各レーザーを照射すると、CO₂ レーザは表面で殆ど全てが吸収されるのに対して、Er:YAG レーザは、試料に吸収されながらレーザー光が深部まで到達することになる。本研究では、このような発振波長の違いによる透過特性の差を用いて、厚板ガラスのレーザー切断を行う。

3.2 実験装置

実験装置の概略を図3に、レーザーの仕様を表2に示す。使用するレーザーは、前述したようにパルス発振型のEr:YAGレーザー(日本赤外線工業(株)製: NE-1010)と連続発振型のCO₂レーザー(Synrad製: 48-1)である。Er:YAGレーザーは、試料表面に対して垂直方向に照射し、ビーム径は $\phi=0.1 \text{ mm}$ で一定とした。CO₂レーザーは、試料表面に対して55°の方向で照射し、短軸方向のビーム径を $\phi=1.2-2.8 \text{ mm}$ で変化させた。図4は、デフォーカス量を

変化させたときのビーム径とピーク出力の関係を示したものである。フォーカス時のピーク出力に対する相対強度で示している。ピーク出力は、デフォーカス量が大きくなるにつれて小さくなり、ビーム径が $\phi=2 \text{ mm}$ のときフォーカス時と比較してピーク出力が40%にまで低下した。ガラスカッターを用いて切り出された試料は、片持ちの試料保持台に固定され、き裂の進行方向に対して各レーザーの位置間隔が5 mmで一定となるように照射を行った。試料保持台に一定の送り速度 v を与えるとき、試料に対して最初にEr:YAGレーザーが照射され、次いでCO₂レーザーが照射されるようにした。なお、試料端には、図5に示すようにあらかじめビッカース圧子を用いて初期き裂を導入している。

実験は、各レーザー条件と切断可否との関係を調べると共に、光学顕微鏡を用いた試料表面や切断面の観察、3次元粗さ計を用いた切断面の表面粗さおよび真直度の測定を行って評価した。表面粗さ R_a は、試料表面に生じる熱損傷の影響を受けていない領域で評価した。また、真直度は、試料長さ40 mmに対して初期き裂の影響を受けていない中央部の26 mmを評価長さ l とした。このとき、加工速度 v とレーザーパワー P_c について、単位長さあたりの入熱量 T_c として $T_c = P_c / v$ と定義して整理した。また、同様の実験をCO₂レーザーのみで行い、Er:YAGレーザーの有無による切断

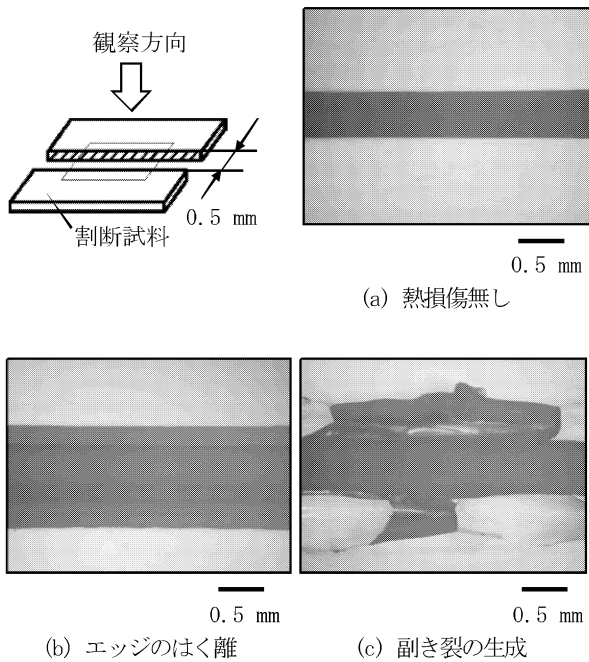


図6 割断面の観察

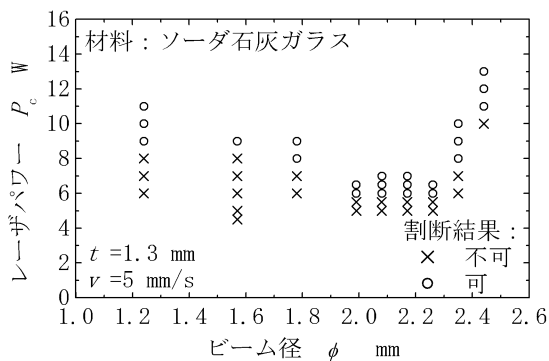


図7 割断可否におよぼすレーザーパワーの影響

性能の違いについて評価した。

4. 実験結果および考察

4.1 試料表面および割断面の観察

各条件で割断した試料を光学顕微鏡で観察した結果を図6に示す。実験後、試料片を0.5 mmの間隔で並べて配し、その上方から撮影を行ったものである。適切な条件で割断を行った場合、図6(a)に示すように試料表面に熱損傷が無い良好な割断が行えていることがわかる。これに対して、照射するエネルギーが過剰な場合、図6(b)に示す試料エッジのはく離や図6(c)に示す副き裂が生じ、さらにエネルギーが大きくなると試料表面が熔融して割断できなかった。熱損傷の有無に関わらず、割断可能な条件下では試料表面の熔融は生じなかった。表面に生じた熱損傷は、レーザー光が吸収されたことで表層部のみが局部的に温度上昇し、これともなって急激な温度勾配が形成されたことに起因していると考えられる。しかしながら、レーザー照射によって材料を

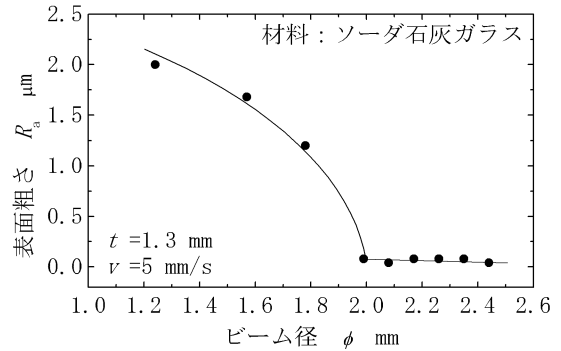


図8 ビーム径の違いによる割断面粗さの変化

割断するためには試料内部に適度な温度勾配が必要なことから、適切な条件設定が必要であるといえる。

4.2 単一波長レーザーによる割断実験

試料厚さが $t=1.3$ mm、加工速度が $v=5$ mm/s のとき、ビーム径やレーザーパワーを変化させて割断可能な条件を調べた結果を図7に示す。前述したはく離や副き裂の有無に関わらず、試料が分断された場合は全て割断可能としてまとめた。図からわかるように、割断に必要な最小のレーザーパワーはビーム径が大きくなるにつれて減少し、ビーム径が $\phi=2.0 - 2.3$ mm の範囲で最小となり、 $\phi=2.3$ mm を超えると再び上昇した。これらの変化は、レーザー照射に起因して試料表面に形成される温度場に影響を受けていると考えられる。ビーム径が小さいとき、レーザーのピーク出力が大きく加熱される領域が狭くなるため照射部近傍の温度勾配が急となり、割断可能な温度場を得るにはより多くのエネルギーが必要となったと考えられる。このとき、照射部中心付近は過度のエネルギー流入によりエッジのはく離や副き裂の生成が確認された。ビーム径が $\phi=2.0 - 2.3$ mm の範囲では、ビーム径の拡大と共にピーク出力が小さくなるため照射部近傍の温度勾配が緩やかとなり、少ないエネルギー流入で割断可能な温度場が得られたと考えられる。このような条件下では、試料表面にはく離や副き裂は認められず高精度な割断が行えることを確認した。さらにビーム径が大きくなると、照射部近傍の十分な温度上昇が得られないため、割断可能な温度場を形成するためのエネルギーが多く必要になったと考えられる。

図8は、各ビーム径で割断が行える最小のピークパワーで実験したときの、割断面の表面粗さを測定した結果である。図からわかるように、ビーム径が大きくなるにつれて表面粗さは小さくなり、ビーム径が $\phi=2.0$ mm を超えると表面粗さは $R_a=0.08$ μm で一定となった。ビーム径が $\phi=2.0$ mm までの条件では、はく離や副き裂が生じていたことが確認され、これらの存在によって面粗度が悪化したと考えられる。得られた結果より、高精度に割断を行うためには適切な条件を選定する必要があり、表面に熱損傷を与えないために試料への流入エネルギーを小さくする必要がわかる。

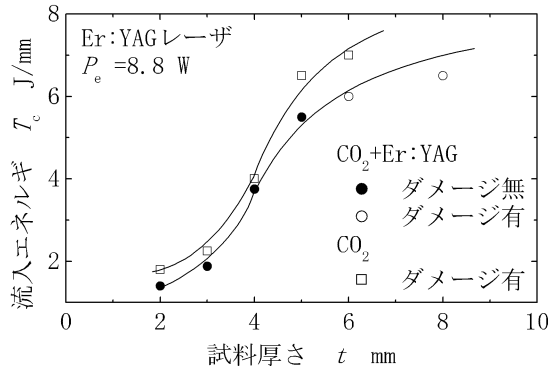


図9 試料厚さと最小流入エネルギーの関係

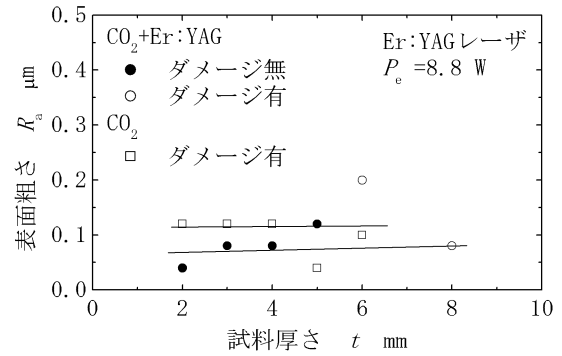


図11 試料厚さが断面粗さに与える影響

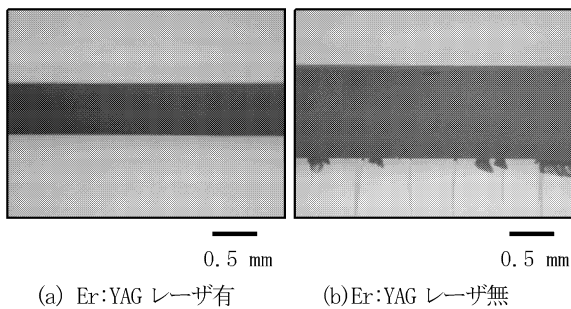


図10 Er:YAG レーザ有無による断面の比較
($t=5$ mm, CO_2 レーザ出力 $P_e=5.5 - 6.5$ W)

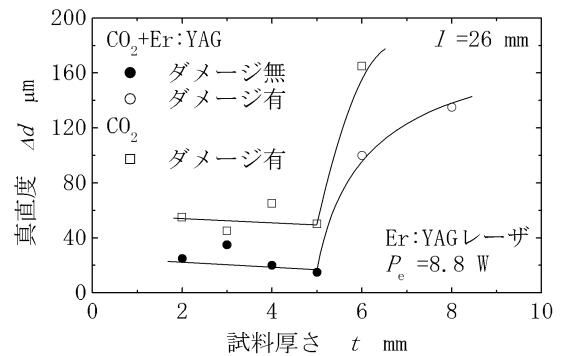


図12 試料厚さが断面真直度与える影響

4.3 2 波長レーザーによる切断実験

試料内部の加熱用として用いる Er:YAG レーザのパワーを $P_e=8.8$ W で一定とし、 CO_2 レーザの出力 P_e を変えながら各厚さの試料を用いて切断実験を行った結果を図9に、試料厚さが $t=5$ mm の切断実験後に試料表面を観察した写真を図10に示す。 CO_2 レーザのビーム径は、各条件で最もレーザーパワーが小さく切断できた結果を示している。また、比較のため、 CO_2 レーザ単独で行った結果も併せて示した。図から、いずれの条件でも試料厚さが厚くなるにつれて必要とする流入エネルギーが大きくなっていることがわかる。また、 CO_2 レーザを単独で用いた実験では、全ての条件で試料表面にはく離や副き裂が生成されたのに対して、Er:YAG レーザを併用した実験では、いずれの条件でも必要とする CO_2 レーザの流入エネルギーが小さく、図10に示すように試料厚さが $t=5$ mm までは熱損傷の無い良好な切断が可能であった。試料厚さが $t=6$ mm を超えると、Er:YAG レーザを併用した場合でも試料表面に熱損傷が生じたが、 CO_2 レーザ単独では切断できなかった $t=8$ mm の条件下でも、Er:YAG レーザを併用することで切断が可能となった。これらの結果の違いは、各レーザー光の吸収特性に起因して、レーザー照射に伴って形成される試料内部の温度場が異なるために生じたと考えられる。 CO_2 レーザを単独で使用する場合、試料表面で殆どのエネルギーが吸収され、試料内部の熱応力場は試料表面付近のみで2次的に形成されるのに対して、Er:YAG レーザを併用することで試料の深さ方向に

してもエネルギーが吸収されて温度場が生じ、き裂の進展をもたらす試料内部の引張応力場が3次的に形成されたためと考えられる。板厚が $t=5$ mm 以下のとき、Er:YAG レーザを併用することで熱損傷が形成されなかったのも同様の理由と考えられる。試料内部の熱応力場を利用して切断する場合、深さ方向に対する温度場の形成が不可欠となるが、 CO_2 レーザのみの使用では照射エネルギーの上昇にともなって照射部中心付近の供給エネルギーが過多となり熱損傷を生じてしまうが、Er:YAG レーザを使用することで深さ方向にも効率的にエネルギー供給が可能となった結果と考えられる。

4.4 2 波長レーザー使用による断面精度の改善効果

Er:YAG レーザのパワーを $P_e=8.8$ W で一定とし、 CO_2 レーザの出力 P_e を変えながら各厚さの試料を用いて切断実験を行い、その断面の粗さ測定を行った結果を図11に示す。図から、断面の粗さはEr:YAG レーザを併用することで CO_2 レーザを単独で使用した結果と比較して僅かながら小さく、表面粗さは $R_a=1$ μm となった。また、Er:YAG レーザ使用の有無に関わらず、試料表面に生じた熱損傷が断面の粗さに与える影響は小さかった。これらの結果から、照射レーザーのエネルギー過多に起因して生じる試料表面の熱影響部は、き裂の進展で形成される断面に対してほとんど影響を及ぼさないことがわかった。

図12は、図11で示した実験で得られた試料について、試料

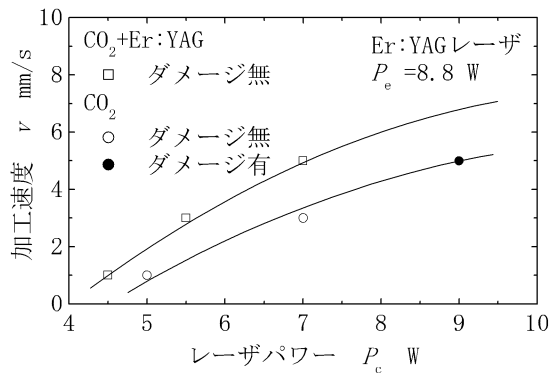


図13 レーザパワーが加工速度に与える影響

厚さと切断面の真直度との関係を調べた結果である。切断面の真直度は、Er:YAG レーザ使用の有無に関わらず、試料厚さが $t=5$ mm 以下の条件ではほぼ一定の値となり、 $t=6$ mm を超えると著しく大きくなった。レーザを用いた切断では、き裂は照射したレーザに追従しながら進展していく機構となるが、試料の厚さが $t=6$ mm を超えると深さ方向に対する熱応力場の影響を受けて、き裂の進展が不安定となったものと考えられる。また、Er:YAG レーザを併用して試料表面に熱損傷が生じない条件下では真直度が $\Delta d=50 \mu\text{m}$ 以下となり、他の条件と比較して著しく小さくなった。これらの結果から、Er:YAG レーザを併用することで CO_2 レーザを単独で使用する場合と比較して、切断面粗さ、真直度共に小さく、切断精度に優れた加工が可能となることが示された。

4.5 2 波長レーザ使用による切断速度の改善効果

Er:YAG レーザの併用が試料の加工速度 v に与える影響を調べるため、厚さ $t=2$ mm の試料を用いて切断可能な最小のレーザ出力と加工速度との関係を調べた。得られた結果を図13に示す。いずれの条件でも、 CO_2 レーザの出力を大きくすると加工速度を速くすることが可能であるが、 CO_2 レーザを単独で使用した場合、レーザ出力が $P_e=9$ W を超えると試料表面に熱損傷が生じた。これに対して、Er:YAG レーザを併用すると切断可能な CO_2 レーザの出力を小さくでき、試料表面に熱損傷を与えない条件範囲が広がることがわかった。各条件について切断面の粗さや真直度の評価を行ったが、本実験の範囲では加工速度の上昇が各精度に影響を及ぼさなかった。Er:YAG レーザの併用により、試料表面の熱損傷が無く加工速度を速くすることが可能であることが示された。

5. 結 言

本研究では、波長の異なる2種類のレーザ光を用いて厚板ガラスを切断する手法を検討すると共に、材料表面に生じる熱影響層の抑制効果について検討を行った。得られた結果を以下に示す。

- (1) 試料表面にはく離や割き裂を生成させることなくレーザ切断するためには、ビーム径、加工速度などの適切な条件選定が必要である。
- (2) CO_2 レーザと Er:YAG レーザを併用することで、試料表面に熱損傷が無く切断面の粗さや真直度に優れた加工が可能となり、板厚が厚くなるにつれてその効果は大きくなる。
- (3) Er:YAG レーザの併用により、熱損傷を生じさせないレーザ条件範囲が広くなり、加工の速度上昇が可能となる。

謝 辞

本研究の一部は、天田金属加工機械技術振興財団の研究開発助成(AF-2007214)によって行われたものである。記して深甚なる謝意を表す。

参考文献

- 1) T. Ueda, K. Yamada, K. Oiso, A. Hosokawa: Thermal Stress Cleaving of Brittle Materials by Laser Beam, CIRP Annals, 51, 1, (2002), 149.
- 2) 福世文嗣: ステルスダイシング技術とその応用, レーザ加工学会誌, 12, 1, (2005), 17.
- 3) 黒部利次, 市川和浩, 永井久司: YAG レーザによるシリコンウエハの切断, 材料, 44, 497, (1995), 159.
- 4) 黒部利次, 松本貴宏: 液晶ディスプレイ表示(STN方式)用基板ガラスのYAGレーザによる切断, 精密工学会誌, 63, 7, (1997), 1018.
- 5) 上田隆司, 田中邦茂, 西岡真吾, 山田啓司, 細川晃: 電子デバイス用ウエハのレーザ切断, 精密工学会誌, 75, 3, (2009), 443.
- 6) 山田啓司, 森田精一, 上田隆司, 細川晃, 田中隆太郎: Nd:YAGレーザによるSiウエハの切断加工に関する研究, 冷凍チャックシステムによる効果, 精密工学会誌, 72, 3, (2006), 393.
- 7) 沢田博司, 今井康文, 才本明秀, 中堀宏亮: 面熱源を用いた多点同時熱応力切断加工法, 精密工学会誌, 70, 3, (2004), 412.
- 8) A.G. Evans and E.A. Charles: Fracture Toughness Determinations by Indentation, Journal of the American Ceramic Society, 59, 7-8, (1976), 371.