

# 周動ベッセルビームを用いたセラミック，ガラス等の 微細長穴加工

有明工業高等専門学校 電気工学科

教授 出来恭一

(平成 19 年度一般研究開発助成 AF-2007207)

キーワード：ベッセルビーム，Nd:YAG 高調波レーザ，ウエッジ回転

## 1. 研究の目的と背景

先端の半導体デバイス製造検査に用いられるプローバの触針電極ガイド穴やバイオ関連分析装置として注目されているマイクロ total analysis system ( $\mu$ -tas) におけるガラス基板などにはアスペクト比の非常に高い長穴(直径数十ミクロン以下) 微細加工が要求されている。これらの加工には機械式ドリルの刃(ダイヤモンド刃) などの従来技術を用いるのでは、段取り換え、ランニングコストの点などで実用上困難を来している。これらデメリットを解消する有力手段として、短波長、短パルスレーザによる微細加工法があるが、加工溝、加工穴が小さければ小さいほど深さ方向に制約があることは通常のレーザビームの性質上避けられないことであると考えられてきた。しかし、近年ベッセルビームとよばれる、ビームの自己干渉効果を利用して発生するビームは直径数ミクロンで、その径を維持する光軸方向距離が数ミリから数センチにわたることが報告され、金属表面のレーザ加工の分野で実験の報告があった<sup>1)</sup>。そこで、本研究においては、微細長穴加工を中心に、ベッセルビームのもつ性質、即ち光軸方向距離が数ミリの長い範囲にわたり細いビーム径を維持する特性が微細長穴加工にどのような効果を及ぼすかの観点から、Nd:YAG レーザを基本波として波長変換し、紫外波長でのナノ秒パルス(5~15ns) で、繰り返し周波数 10Hz, 1kHz の多岐にわたる条件で、通常光学系を用いた集光による微細穴加工と比較実験を行うこととした。

## 2. 実験

### 2. 1 ベッセルビーム光学系

ベッセルビーム発生には、アキシコンレンズによる干渉光ためのビームがベッセルビーム周辺に存在することが必要となる。また、真円度の高い加工穴形状を得るため、ビームが試料上で微小円形の周に沿って動く、周動(簡易トレパニング) 光学系が必要である。通常、市販の穴あけ加工機では、ガルバノミラー2個を一对として、電子的に制御することによりこれを達成しているが、ここでは、より安価、手軽な方法として、ウエッジ回転法を採用した。従って、ベッセルビームを用いた加工実験の基本光学系は図1のようになる。ウエッジ回転に関しては、シングルウエッジ法、ダブルウエッジ法を使い分けた。ダブルウエッジの場合、ビームの周動半径が、シングルウエッジに比べ、ウエッジ-試料間距離の依存性が小さい。図2にダブルウエッジの詳細を示す。ビームの円運動半径  $r$  はスネルの法

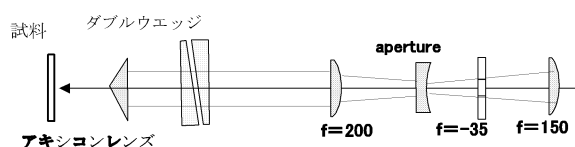


図1 ベッセルビームを用いた穴あけ加工のための基本光学系

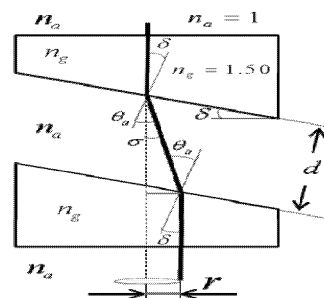


図2 ダブルウエッジの詳細

則より、

$$r = \frac{d \cos \delta}{\cos \theta_a} \sin(\theta_a - \delta) \quad (1)$$

で与えられる。ここで、

$$\theta_a = \sin^{-1} \left( \frac{n_g}{n_a} \sin \delta \right) \quad (2)$$

ウェッジ角  $\delta = 0.5^\circ$  ,  $n_g = 1.5, n_a = 1$  であるので、例えば、ウェッジ間隔を 1mm とすると、円運動半径  $r$  は、 $4.4 \mu\text{m}$  と計算される。ベッセルビームを発生するアキシコンレンズの直前に、円運動半径が数  $\mu\text{m}$  のウェッジ挿入することでアキシコンレンズ通過後の干渉ビームの中心部がどの程度変位するかについては、実験的に確認することとした。なお、ダブルウェッジはシグマ光機製 SGSP-60YAW-0B 回転ステージを用いて回転させた。

## 2. 2 短波長化の方法

用いた基本波レーザーは、自作の Nd:YAG レーザ (3mJ/pulse, パルス幅 10-20nsec), 市販品である Continium 社製 Nd:YAG レーザ (Surelite-10: 約 100mJ/pulse, パルス幅 5nsec), および Ti:sapphaier フェムト秒システム (rep.rate 10Hz, 中心波長 800nm, パルス幅 100fs, 最大エネルギー 約 2mJ/pulse, 日本原子力研究開発機構, 関西光科学研究所所有) を用いた。なお、フェムト秒システムでの実験に際しては、集光光学系、照射試料を関西光科学研究所に持ち込み、施設共用利用制度によって実験を遂行した。以上、基本的に 3 種類のレーザー装置を基本波として非線形結晶による波長変換により短波長化を行った。具体的には、Nd:YAG の基本波である 1064 nm に対しては、第 2 高調波発生 (以下 SHG と略す, 532nm) を Type I LBO で、第 3 高調波 (以下 THG と略す, 355nm) を Type II LBO で前段で得られた SHG と基本波との和周波として発生させ、第 4 高調波 (以下 4HG と略す, 266nm) を Type I CLBO で前段で得られた SHG を入力とした引き続く SHG によって発生させ、第 5 高調波 (以下 5HG と略す, 213nm) を Type II CLBO で、前段で得られた 4HG と基本波との和周波混合として発生させた。なお、LBO による SHG 発生には、波長変換後のビーム品質劣化を防げる Non-critical 位相整合法 (温度 Tuning 法) を用いた。また、THG 発生の実験過程で、LBO やその他の結晶を用いた Type I と Type II とで温度特性に大きな差異が認められたので、別途本研究

の副産物として公表した<sup>2)</sup>。

## 2. 3 試料

試料は顕微鏡スライドガラスや PDP パネルとして用いられる青板ガラス (吸収端約 300nm, 厚さ 1.3~1.7mm), 電子材料として半導体基板製造などによく用いられるポリイミド (厚さ 125  $\mu\text{m}$ ), および集積回路の電気特性検査のためのプローブカード用基板材料である厚さ 900  $\mu\text{m}$  のポリイミドとした。

## 2. 4 ベッセルビーム (355nm) とポリイミド (125 $\mu\text{m}$ )

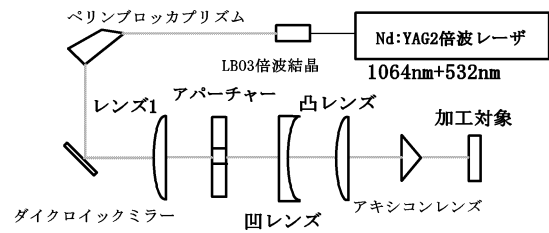


図3 Surelite THG での実験系 (ウェッジなし)

図3に Surelite-10 および LBOtype II THG を用いた実験系を示す。第一段階として、簡易トレパニングのない、すなわちビームの円運動を行わない場合、どのような加工痕となるか実験した。試料は厚さ 125  $\mu\text{m}$  ポリイミドである。

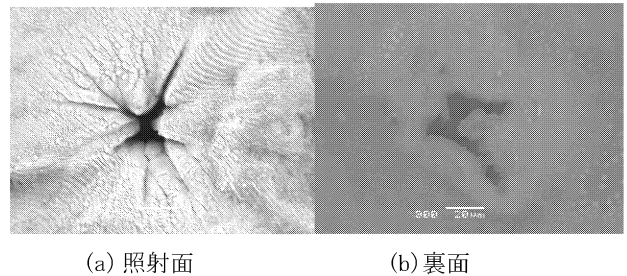


図4 パワー : 355nm, 5nsec, 7mJ/pulse, rep.rate 10Hz, 照射時間 : 3分, 125  $\mu\text{m}$  ポリイミド

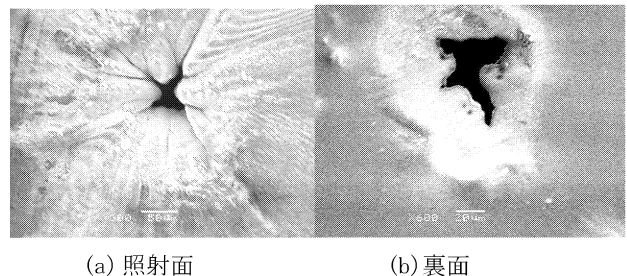


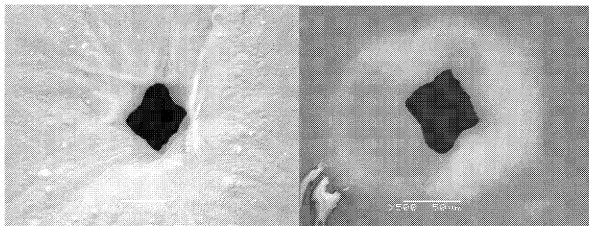
図5 パワー : 355nm, 5nsec, 7mJ/pulse, rep.rate 10Hz, 照射時間 : 5分, 125  $\mu\text{m}$  ポリイミド

図4, 5に実験結果を示す。図より明らかなように、照射面は非対称で、いびつな形状を呈した。ただし、穴形状は

およそ  $50\mu\text{m}$  以下と認められるが、3分間照射の場合には、裏面まで貫通していない。5分照射で貫通し、照射面、裏面ともほぼ同じ大きさの加工痕となっている ((a), (b)でスケールが異なる点に注意)。厚さは  $125\mu\text{m}$  に過ぎないが、ベッセルビームの特長である、光軸方向の長距離にわたる集光特性を窺わせる。なお、加工痕周辺には、アキシコンレンズによる干渉縞による2次的加工痕も認められる。

## 2.5 ベッセルビームと簡易トレパニング

次に、ダブルウェッジによるビーム回転を加え、その効果を調べた。ウェッジ挿入位置はアキシコンレンズの手前とした。結果を図6,7に示す。ウェッジ回転なしに比べ



(a) 照射面 (b) 裏面

図6 シングルウェッジによるビーム回転有り  
355nm, 6.7mJ/pulse, 照射時間: 100sec, rep.rate



(a) 照射面 (b) 裏面

図7 シングルウェッジによるビーム回転有り  
355nm, 6.7mJ/pulse, 照射時間: 160sec, rep.rate  
10Hz, 22.5sec/回転

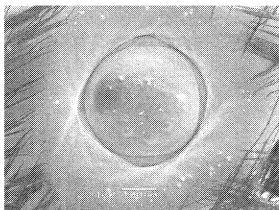


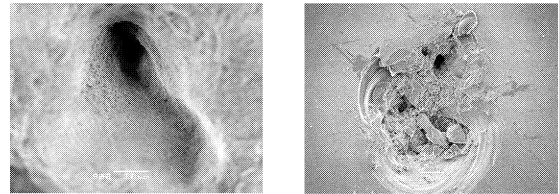
図8 ビーム回転半径を大きくした場合

スムーズな形状となっている。また照射時間が長いほど、より円形に近い形状となっているが、真円からは遠い。念のため、円運動の半径が十分大きくなると想定される条件

で実験すると、図8に示す結果が得られた。ビームの動き自体は真円に近いことが認められる。円運動半径が小さい場合には、ベッセルビーム自体の形状が加工痕に強く影響すると考えられる。

## 2.6 ベッセルビームによるガラス加工

図3の実験系にダブルウェッジを追加した実験系で、厚さ  $1.7\text{mm}$  の青板ガラスの加工を試みた。図9に結果を示す。



(a) 照射面 (b) 裏面

図9 ベッセルビームによる加工(3倍波) 8mJ/pulse,  
13回転, 照射時間 286sec, 全投入エネルギー23J

ウェッジ回転を行ったにもかかわらず、穴形状が円形とは程遠く、裏面も明確な穴形状が確認できなかった。これは、ベッセルビームの特性の一つである、ビームは細くなるが、中心部の光エネルギーが1パルスの全エネルギーの  $1/1000$  以下と非常に小さくなるのが原因であると考えられる。THG出力は  $8\text{mJ/pulse}$  であったからである。

そこで、同じレーザ装置 Surelite-10 を用いて、基本波、2, 3倍波の全てをアキシコンレンズに投入し、加工実験を行った(合計エネルギー  $96\text{mJ/pulse}$ ,  $1064\text{nm}:62\text{mJ}$ ,  $532\text{nm}:16\text{mJ}$ ,  $355\text{nm}:18\text{mJ}$ )。ビームは拡大コリメートされ、 $\phi 4\text{mm}$  のアパーチャで整形、中央部のビーム品質のよい部分を取り出し、ダブルウェッジ、アキシコンレンズに導光した。サンプルは顕微鏡用スライドガラス(厚さ:  $1.3\text{mm}$ , ソーダライム)である。実験系を図10に、結果を図11に示す。

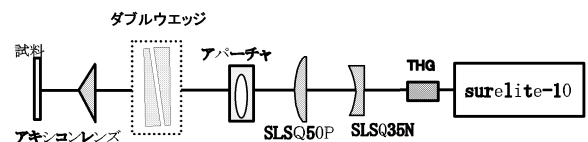


図10 基本波, SHG, THG を投入した実験系

ビームの円運動半径はアキシコンレンズに入射前で  $2\mu\text{m}$  としたが、結果の加工穴径は  $\phi 100\mu\text{m}$  程度であった。図9に比べほぼ円に近い形状で、裏面に到達している。しかし照射面、裏面とも加工穴周辺部には大きなクラックが認め

られる。THGにより溶解，解離した物質と光強度の大きい基本波，2倍波と相互作用した結果の熱作用によると思われる。

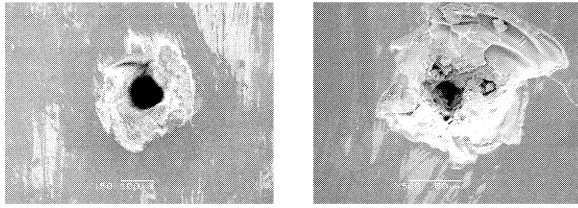
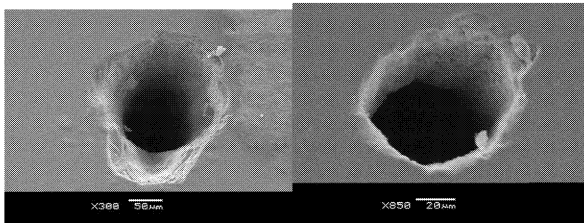


図 11 ベッセルビームによる加工(Nd:YAG 基本波+SHG+THG) ウエッジ26回, 照射時間:572秒 1064nm:62mJ, 532nm:16mJ, 355nm:18mJ(計 96mJ), 照射面平均直径:100 $\mu$ m, 裏面平均直径:25 $\mu$ m, 表/裏比:約 4

## 2. 7 通常集光光学系でのガラス加工 (THG)

次に，これらベッセルビームによる加工と比較するため，上記と同じ基本波光源(Surelite-10)の3倍波を通常の集光光学系を用いて集光し，同一サンプルに照射し，穴あけ実験を行った。用いたのは3倍波のみで，エネルギーは2.3mJ/pulseであった。結果を図12に示す。図11に比べ，照射面，裏面ともにクラックが大きく減少している。1パルスあたりの投入エネルギーが約1/42に減少したこ



(a) 照射面 (b) 裏面

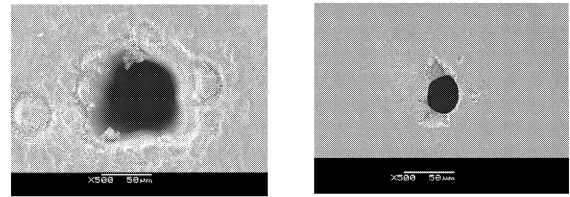
図 12 通常光学系の集光ビームによる加工，集光レンズの焦点距離： $f=150\text{mm}$ ，3倍波のみ，照射時間1800秒，ウエッジ回転数:50回，照射面平均直径:162 $\mu$ m，裏面平均直径:71 $\mu$ m，表/裏比:2.3

と，エネルギーの集中度合いがベッセルビームに比べ非常に大きいことによると考えられる。なお，貫通孔が形成されているが，表/裏比はおおよそ2.3である。また，理論円運動半径を7 $\mu$ mに設定したが結果の平均直径は162 $\mu$ mであった。

## 2. 8 通常集光光学系でのガラス加工 (4HG)

青板ガラス(ソーダライム)の吸収端は300nmであり，Nd:YAGの3倍波である355nmは完全に吸収されず70%前後の透過を示す。波長効果を調べるため，Nd:YAGの4HG

(266nm)をCLB0を用いて発生させ，通常の集光光学系と組み合わせて実験を行った。実験結果を図13に示す。こ



(a) 照射面 (b) 裏面

図 13 通常光学系の集光ビームによる加工，集光レンズの焦点距離： $f=150\text{mm}$ ，4倍波(266nm)のみ，照射時間627秒，ウエッジ回転数:57回，照射面平均直径:80 $\mu$ m，裏面平均直径:34 $\mu$ m，表/裏比:2.3 試料厚さ:1.3mm，アスペクト比:約 22

で，加工穴形状の真円に近い度合いを数値で表わすため，以下のように楕円率(真円度)を定義した。

$$\pm \frac{a-b}{D_{\text{ave}}} \times \frac{1}{2} \times 100[\%] \quad (1)$$

ここで， $a$ は穴形状の最大直径， $b$ は最小直径， $D_{\text{ave}}$ は平均直径とした。また，アスペクト比は

$$\text{アスペクト比} = \frac{t}{D_{\text{ave}}} \quad (2)$$

と定義した。ここで $t$ は試料厚さである。

図12，13いずれの場合もベッセルビームを用いた場合より真円度が改善されている。一方，THGと4HGとの比較では，同一の集光レンズ，ほぼ同一のビーム回転数にもかかわらず，4HGの場合の方がより小さな穴加工が可能となっている。波長効果によるものであると考えられる。通常集光位置におけるビームスポット半径 $w_f$ は，よくコリメートされたビーム(半径 $w_0$ )を焦点距離 $f$ のレンズで集光する場合，近似的に，

$$w_f = f \cdot \frac{\lambda}{\pi w_0} \quad (3)$$

で与えられ，より波長の短いレーザー光を用いることによりより小さなスポットに絞り込むことが可能だからである。

## 2. 9 ポリイミド(800 $\mu$ m)の長穴加工

2.4，2.5節の試料厚さ125 $\mu$ mのポリイミドでのベッセルビームの加工実験の項で示したように，ベッセルビーム中心部に集中するエネルギーが小さく，中心部の穴形成の

ために、照射時間を長くとり、簡易トレパニングを行いつつレーザーパルスを深さ方向に重ね打つやり方ではどうしても、高次の自己干渉波が加工周辺部に影響し、中心部も大きな加工痕となり、高アスペクト比の加工には不向きと判断された。しかし、産業の現場、例えば、ICプローバの触針電極ガイド穴形成すべき、ポリイミド基板では、直径数10 $\mu\text{m}$ 、厚さ800 $\mu\text{m}$ レベル、アスペクト比にして20~40が要求されている。通常の集光光学系でアスペクト比が高い穴加工を行うには焦点深度に着目することが基本で、焦点深度が大きいほど集光エネルギーが集中する光軸方向距離が長いことを意味する。焦点深度として、レーザー加工の分野では、レーリー長ではなく、ビームウエスト位置でのパワー密度が90%に低下するまでの距離Zの2倍を焦点深度とするべきことが指摘され<sup>3)</sup>、実目的目安として用いられ、

$$\text{レーザー加工の焦点深度} = \frac{2}{3} \cdot \frac{\pi w_0^2}{\lambda} \quad (4)$$

で与えられる。すなわちレーリー長のちょうど2/3がレーザー加工分野での焦点深度である。式(3)で与えられる焦点深度が波長に逆比例する。すなわち短波長化することにより焦点深度が増大する。また、短波長化は、以下の点でも有利となる。表1にポリイミドを形成する種々の分子結合エネルギーを示す。これら分子結合エネルギーより大きい光子エネルギーを持つ波長のレーザー光を用いることによりアブレーション作用がより一層強調され加工部周辺への熱影響が回避され、より小さな穴径となり、アスペクト比が高められると考えられる。これら分子結合エネルギー

表1 ポリイミドに関連する結合エネルギー

結合種	結合エネルギー (eV)	換算波長 (nm)
C-H	3.50	354
C-C	3.67	338
C-O	3.68	337
C-N	3.16	392
C=C	6.59	188

を波長換算した数値からわかるように、C=C結合を除き337nm~392nmにあり、Nd:YAGのTHG波より、4HGや5HG波を使用する方が有利であると判断できる。図14に

Nd:YAG 5HG (213nm) レーザとそれを用いた穴加工用集光光学系を示す。集光レンズの焦点距離はこれまでと同様、f

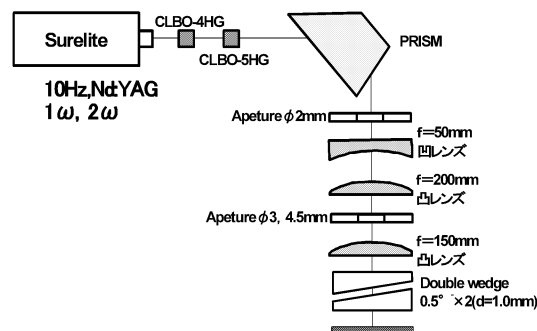
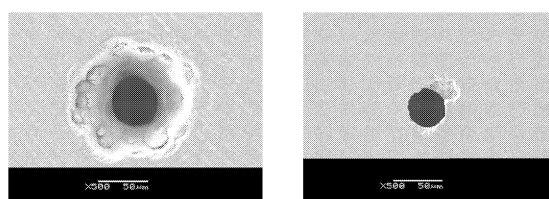


図14 Nd:YAG5HG光源装置と集光光学系



(a) 照射面 (b) 裏面

図15 Nd:YAG5倍波レーザーでの加工 (t=800 $\mu\text{m}$ )

表2 Nd:YAG 5HG (213nm) を用いた照射条件

Energy [ $\mu\text{J}/\text{pulse}$ ]	ウエッジ回転周期 [sec/rot]	照射時間 n [sec]	全投入エネルギー [mJ]
50	11	770	385

表3 加工結果のまとめ

照射面		裏面	
平均直径 [ $\mu\text{m}$ ]	真円度 [%]	平均直径 [ $\mu\text{m}$ ]	楕円率 [%]
47	3.7	38	1.5

=150mmとした。結果を図15に示す。また、照射条件を表2に、加工結果のまとめを表3に示す<sup>4)</sup>。真円に近い加工が得られ、アスペクト比約19が得られた。しかし、レーザー光照射面と裏面とでは、加工径が1.4倍異なる。式(3)を用い、集光半径(ビームウエスト半径)を20 $\mu\text{m}$ とすると、Nd:YAG 5HGにおける焦点深度は3.9mmとなり試料厚さ、最大800 $\mu\text{m}$ より十分大きい。この差異は焦点位置決めずれが主因と考えられる。なお、周辺部の白い盛り上がり部のほとんどの部分はデブリである。

## 2. 10 光軸方向自動送りの実験

前節で266nmを用いることにより、高アスペクト比(19)の加工が可能であることがわかったが、照射面と裏面とで

は、加工径が 1.4 倍異なり、焦点位置決めの問題が浮上した。そこでレーザ照射中試料の光軸自動送りを考えた。これを導入することにより、ウェッジ回転を考慮すると焦点は 3 次元的に螺旋運動を行い、照射面と裏面での加工穴径の相違が解消されると考えた。実験系を図 16 に示す。光源は出力の安定な Nd:YAG THG(355nm) を選択し、また、

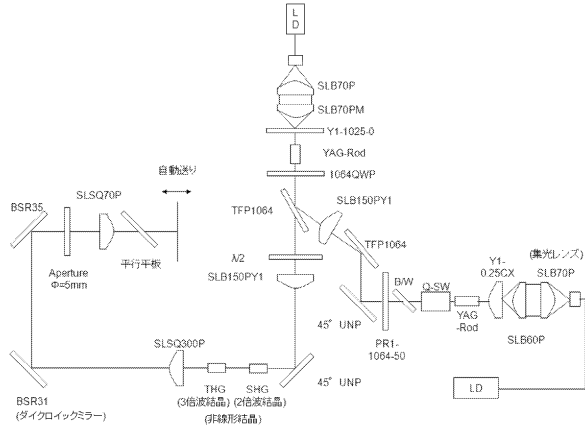
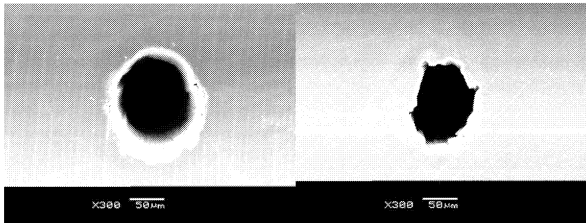


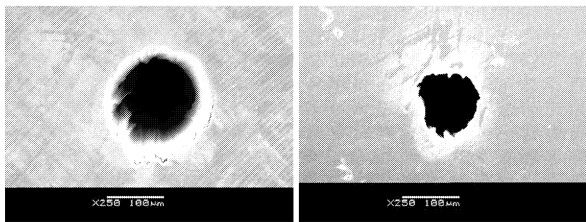
図 16 高繰り返しレーザ (355nm) での実験系



(a) 照射面

(b) 裏面

図 17 自動送りのない場合の Nd:YAG THG での加工  
照射面平均直径：128  $\mu\text{m}$  (楕円率：17%)、裏面平均直径：97  $\mu\text{m}$  (楕円率：14%)、表/裏比：1.3



(a) 照射面

(b) 裏面

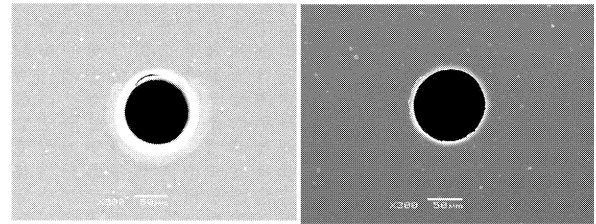
図 18 自動送りのある場合の Nd:YAG THG での加工、照射面平均直径：124  $\mu\text{m}$  (楕円率：9.1%)、裏面平均直径：98  $\mu\text{m}$  (楕円率：6%)、表/裏比：1.3、70  $\mu\text{J}/\text{pulse}$ 、照射時間 108sec、送り速度 38.5  $\mu\text{m}/\text{sec}$ 、ウェッジ周期：36sec/rot

ウェッジ回転に対し照射パルス数を多くし、真円度を高める目的で、高繰り返し周波数動作が可能な自作の光源装置

(繰り返し周波数:1kHz) とした。照射時間中に試料は焦点を中心に前後に約 5 往復させた。厚さ 800  $\mu\text{m}$  のポリイミドで、自動送りのない場合の結果を図 17 に、ある場合のそれを図 18 に示す。自動送りのない場合に比べ、ある場合の方が裏面の楕円率(真円度)が改善されており、自動送りの効果があると考えられる。しかし、一層短波長である 5HG(213nm) を用い、自動送りのない場合での結果(図 15)よりは真円度が劣っている。繰り返し周波数、パルスエネルギー、照射時間すべてが異なるので優劣の評価は難しい。実用面を考えると、高繰り返し 5HG(213nm) レーザで、自動送りがある状態にし、再度実験し評価する必要がある。

### 2. 1.1 その他の実験結果

高繰り返し THG レーザを厚さ 125  $\mu\text{m}$  のポリイミドに照射した場合、自動送りなしでも楕円率 0% (真円) の結果を得ている(図 19)。焦点深度範囲内にある厚さの試料のため、穴径の照射面/裏面の比率もほとんど 1 であった。



(a) 照射面

(b) 裏面

図 19 355nm、パルスエネルギー：10  $\mu\text{J}/\text{pulse}$ 、繰り返し周波数：1kHz、照射時間：72sec、ウェッジ回転周期：36s/rot

また、波長 800nm、パルス幅 100fs のフェムト秒システムでのポリイミド( $t$ :125  $\mu\text{m}$ ) の穴あけ加工を行った。実験系を図 20 に、結果を図 21 に示す。35mm 凹レンズ、100mm 凸レンズの組み合わせによる拡大コリメート後、 $f$ =25mm の非球面レンズ、対物レンズ ( $\times 20$ ) を用いてサンプルに集光した。対物レンズによる集光であること、および超短パルスであることにより、長波長にもかかわらず、真円に近い加工で、これまで示した穴径の内、最小径  $\phi$  25  $\mu\text{m}$  となっている。しかし、100fs のパルス幅とはいえ、加工部周辺には熱影響と見られる白色に変色した部位が認められる。通常レーザ光が物質に照射されて、電子振動から格子振動に移行するのに数ピコ秒程度必要で、それ以下のパルス幅の照射であれば、完全に非熱的加工と考えられ

ているが、必ずしもそうとは断言出来ない結果であると考えられる。

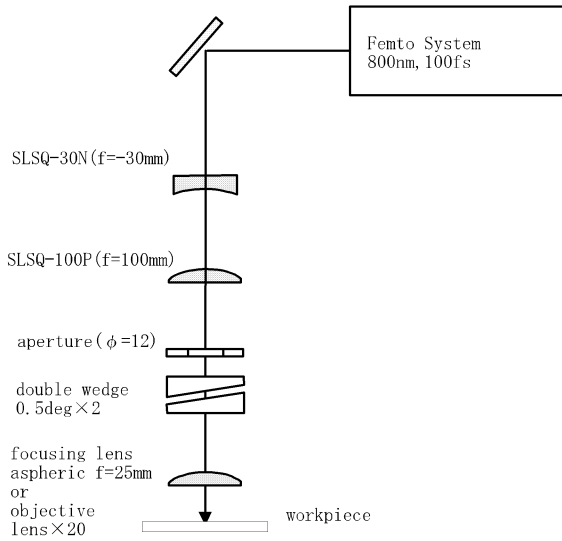
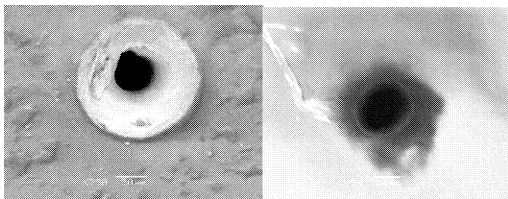


図 20 フェムト秒レーザーでの実験系



(a)照射面

(b)裏面

60 μJ, 100fs, 10Hz, 対物レンズ×20, wedge 速度: 12(sec/round), 3回転; ポイイミド(125 μm)

図 21 のフェムト秒レーザーでの穴あけ加工

### 3. まとめ

Nd:YAG レーザを基本波とした波長変換にて、その第 3, 4, 5 高調波を発生させ、低繰り返し周波数(10Hz)で比較的高パルスエネルギーの紫外線光源、および高繰り返し(1kHz)で低パルスエネルギーの紫外線光源を主に用いてポリイミド(厚さ 125 μm, 800 μm), 青板ガラス(厚さ 1.7mm, 1.3mm)に照射し、穴あけ加工実験を行った。照射方法として、アキシコンレンズを用いて発生させたベッセルビーム、および通常の光学系と集光レンズによる集光ビームを用いた。さらに穴加工の真円度を向上させるためウエッジ回転によるビームの微小円運動、焦点近傍での自動試料送り機構を導入し実験を行った。その結果、

(1)ベッセルビームと回転ウエッジの組み合わせで、

・青板ガラス (t=1.3m)に平均アスペクト比 21 の貫通長

穴加工が可能であった。但し Nd:YAG 基本波, SHG, THG すべてのパルスエネルギーを投入した。加工部周辺に多数のクラックが認められた。

・ポリイミド (t=125 μm) 照射面, 裏面ともほぼ同一径の貫通穴加工が得られたが、ウエッジによるビーム回転を導入したにもかかわらず真円度の悪い結果であった。また、加工部周辺にベッセルビームの高次自己干渉パターンが形成された。

(2)通常の集光光学系と回転ウエッジの組み合わせで、

・Nd:YAG THG のみの照射で、青板ガラス (t=1.3m) に貫通孔が形成され、ベッセルビームを用いた場合より表/裏比が改善された(4→2.3)。

・Nd:YAG 4HG のみの照射で、青板ガラス (t=1.3m) に貫通孔が形成され、Nd:YAG THG を用いた場合より小さな穴径 (φ80, φ34 μm) であった。ただし表/裏比は改善されなかった。

・Nd:YAG 5HG のみの照射で、ポリイミド (800 μm) に楕円率 1.5%の真円に近い貫通穴が形成された。アスペクト比は約 19 であった。

以上の結果を得た。今後は高次干渉の効果が少ないと考えられるガラス材料と適切な波長とを組み合わせ、ベッセルビームによる一層の高アスペクト比を目指した穴加工実験に興味を持たれる。また、通常の集光光学系を用いる場合、Nd:YAG 5HG を超えるさらなる短波長光源の実現により一層の高アスペクト比加工が可能となると考えられる。

### 謝辞:

実験にご協力頂いた(独)日本原子力研究開発機構関西光科学研究所西村昭彦博士、島田幸洋氏に深甚なる謝意を表明します。

### 文献:

- 1) 河野正道, 松岡芳彦; 日本機械学会誌 Vol.109 No.1046 (2006) p.61
- 2) 江崎圭佑, 出来恭一; レーザー学会学術講演会第 28 回年次大会
- 3) L.Marshall; Laser Focus, April(1971) p.26.
- 4) 角田淳他; 第 70 回レーザー加工学会講演論文集 p.211 (2008)