

ベッセルビームを用いた高アスペクトナノホール加工法の開発

1413006 飯田 浩祐

主任指導教員：米田仁紀 教授

1. 序論

現在、フェムト秒パルスレーザーによる穴加工では、非線形光学吸収過程により光学スポット径よりも小さい直径の加工が得られている。しかし、口径の穴直径の小ささだけではイオンビーム、電子ビーム加工や、リソグラフィなどさらに優れたものがあり、レーザー加工としては、より付加価値が高い加工方法が求められている。最近、レーザーのパルス波形を制御したり、空間位相を調整することで、穴の深さ対口径比が大きな加工が可能なが報告されるようになってきた。特に、ベッセルビームを用いることは、原理的にガウスビームが持つ回折によって決まるレイリー長の制約を回避することが可能で、比較的簡単な光学系でナノメートルサイズの高アスペクト比穴加工が可能になる。

そこで本研究では、アキシコンレンズを用い、超短パルスレーザー光をベッセルビーム化し、縮小光学系によりさらに集光系を減少させた後に非線形吸収の過程を使った高アスペクト加工の最適条件を決定する目的で、実験を行っている。

2. 原理

2.1 自己位相変調(Self Phase Modulation: SPM)

カー効果(Kerr 効果)媒質中のガウス型の強度分布を持つレーザービーム伝播、非線形応答の結果、局所的な屈折率は次の式(9)に従って強度 $I(x, y, z)$ とともに上昇する。

$$n(x, y, z) = n_0 + n_2 I(x, y, z)$$

n_0 は物質特有のものであり、 n_2 はカー係数(Kerr 係数)である。ガウシアンビームでは、強度はビーム中心軸の近くで二乗分布となる。

これにより、自分自身の強度に起因する屈折率変化により、位相がシフトしてしまう現象である。

2.2 非線形イオン化現象

フェムト秒パルスレーザー自由電子を保有しない石英ガラスなどの誘電体に照射した場合、レーザーと物質との相互作用の初期段階において、レーザー光による強電場により多光子吸収が生じ、自由電子が生じる。この自由電子はレーザー光による強電場を受け、逆制動放射により、加速し運動エネルギーを得て、別の束縛電子に衝突をする。この

過程を繰り返すことにより、雪崩崩式(アバランシュ衝突過程)に自由電子が急速に増加する。この結果、初期段階に生成された自由電子が素となり、プラズマが形成され、加工がなされる。

3. アキシコンレンズの特性評価実験

コヒーレンス性の良い He-Ne レーザーを用いて、実際にアキシコンレンズにレーザーを入射することでどのような現象が起こるのかを評価した。本節では、アキシコンレンズによってどの程度非回折ベッセルビームの伝播が可能なのか、位相変化に対する応答はどうかなど実際に加工に使用する前にビームプロファイルがどのような影響を受けるのか計測するために行った。

3.1 実験方法

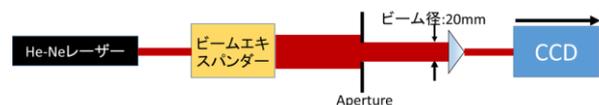


図 3.1-1 実験セットアップ

用いたレーザーは He-Ne レーザー(波長 632.8nm)、ビームエキスパンダーを用いてビーム系を広げコリメートし aperture でビーム径 20mm になるように切り出した。切り出したビームをソーラボジャパン株式会社より購入したアキシコンレンズ (AX2505-B - 0.5°, 650 - 1050 nm AR Coated UVFS, Ø25.4 mm (Ø1") Axicon)に入射した。CCD(ワイドダイナミックレンジ CCD カメラボディ MT V-6 3W 1 N)を用いて光軸方向に掃引しビーム断面プロファイルを測定した。

3.2 結果・考察

図 3.1-2 に伝播距離とビームウェストについて得られた実験結果を示した。なお、ベッセルビーム中心のスポットのビームウェストを計測した。

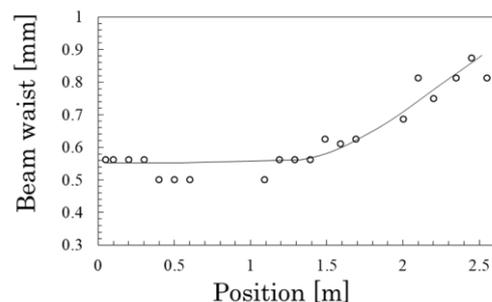


図 3.1-2 伝播距離とビームウェスト

また、ビームウェストが一定区間の位置 0.65m を確認すると

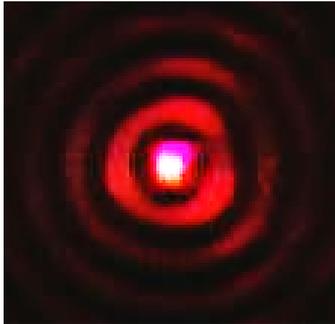


図 3.1-3 位置 0.65m におけるベッセルビーム断面

コヒーレンス性の良い He-Ne レーザーを用いたが図のようにベッセルリングに強弱が現れている。これはアキシコンレンズもしくはその他のオプティクス精度の問題であると考えられる。

4. Ti:sapphire レーザー (1kHz) を用いた加工

パルス励起の Ti:sapphire レーザー (パルス幅: 25fs, 中心周波数: 800nm, 繰り返し周波数: 1kHz) を用いて加工を行った。本節では、試験的な加工試験を行い、まずは加工の際にどのような物質と光の作用が現れるのかを検証した

4.1 実験方法

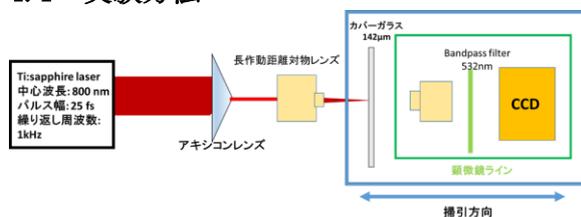


図 4-1. Ti:sapphire レーザー (1kHz) を加工に用いた実験系

レーザーはパルス励起の Ti:sapphire レーザー (パルス幅: 25fs, 中心周波数: 800nm, 繰り返し周波数: 1kHz) をもちいた。オシレーターのみを用いて発振させた。アキシコンレンズは前章に用いたアキシコンレンズと同様である。また、アキシコンレンズ通過後ベッセルビームを縮小光学系に集光した。この際に用いた対物レンズは~である。今回用いたターゲットはカバーガラスであり、142µm の厚さであった。

図 4-1 にて緑色の枠で囲った顕微鏡ラインについて、長作動対物レンズは~をもちい

て、バンドパスフィルターは 532nm のみを通すものをもちいた。CCD についてはワイドダイナミックレンジ CCD カメラボディ MT V-6 3W 1 N を用いた。長作動対物レンズと CCD の間は鏡筒の関係に従い 17cm とした。顕微鏡ラインを光軸方向に掃引しピントをカバーガラス裏面に合わせた。この際には、カバーガラス裏面にガラスカッターで傷をつけて確認した。ピントを合わせたままカバーガラスを固定し、カバーガラスと顕微鏡ラインを同時に光軸方向に掃引し集光スポット近傍での相互作用を確認した。

4.2 結果・考察

ガラスとレーザーによって発生する相互作用 SPM により加工点の位置を確認し、発生区間と加工区間をレーザー出力ごとに確認した。以下にまとめた表を示す。

表 4-1. 囲と加工範囲

Power[mW]	SPM 発生範囲[µm]	加工範囲[µm]
3~4	150	50
5~6	400	200
8~9	300	180

表 4-1 から 5~6mW と 8~9mW における加工範囲はほぼ変わらず、この範囲のレーザー出力では過剰ではないかと考えた。なので、加工に用いるべきレーザー出力は 3~4mW であると考えた。

以上の結果より、加工に用いるべきレーザー出力は 3~4mW あった。しかし、本来 700mW 前後で安定的に出力されるレーザーを 3~4mW ほどで出力させているため 1 パルスごとの強度がとても不安定であった。レーザー出力 3~4mW を用いてカバーガラス裏面に 1 ショットで加工を行った際の SEM 画像を以下に図 4-2 として示した。

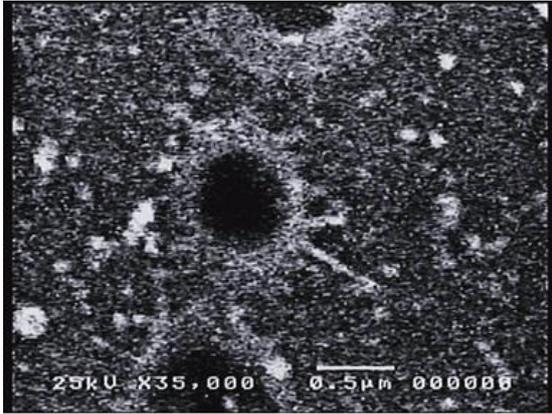


図 4-2. レーザー出力 3~4mW 時の 1 ショットを用いた加工

この条件では 500nm ほどの穴加工ができた。しかし、この画像中心部に映し出された穴加工以外はおおよそ 1 μ m ほどの大きさであった。これは 1 ショットごとのピーク強度が不安定であることを示していると考えられる。

5. Ti:sapphire レーザー (125kHz) を用いた加工

前節でよりパルス励起の Ti:sapphire レーザーを用いた場合には 1 パルスのピーク強度の不均一性により均一な穴加工が行えないことが分かった。そこで CW 励起で高繰り返しな Ti:sapphire レーザーを用いることにより、より均一な穴あけ加工を行った。

5.1 実験方法

これまでの実験により、安定的なレーザーを用いなければならないこと、アキシコンレンズのアライメントを厳密に行いました、ベッセルビーム中心の強度プロファイルを鋭くし加工閾値ギリギリで加工を行わなければならないと考えた。これらを踏まえ実験系を構築し図 5-1 として以下に示した。

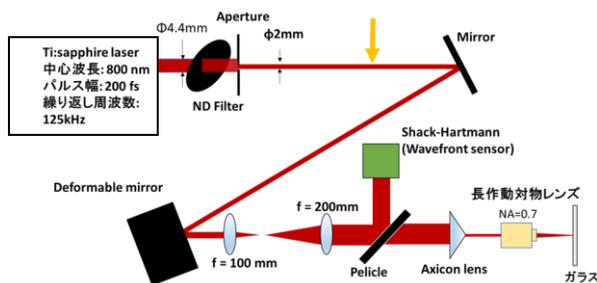


図 5-1. 加工システム

Ti:sapphire レーザー(中心波長:800nm, パルス幅:200fs, 繰り返し周波数:125kHz)から出射されたビーム径は約 4.4mm であった。その後の ND フィルターによってレーザーパワーを変化させ、Aperture 後の Power meter で出力を測定した。その後、Deformable Mirror に入射し波面整形を行い Deformable 反射後の波面を $f=100$ mm と $f=200$ mm のレンズペアを用いて Shack-Hartman 型波面センサーと Axicon レンズに像転送した。また、このレンズペアは像転送するだけでなく焦点距離が異なる二枚のレンズを用いることによりビーム径を広げ、ベッセルビームの集光点の伝播距離を長くする目的もある。アキシコンレンズ通過後のベッセルビームを対物レンズ (NA=0.7) を用いて縮小光学系としよりビーム径を小さくし加工対象であるガラスに加工を行った。ガラスはスライドガラス (1mm) もしくはカバーガラス (142 μ m) を用いた

5.2 結果・考察

Deformable Mirror を手動で変形させたときの、ビーム形の変化を確認した。この時得られたビーム断面強度分布を図 5-2 としてまとめて示した。

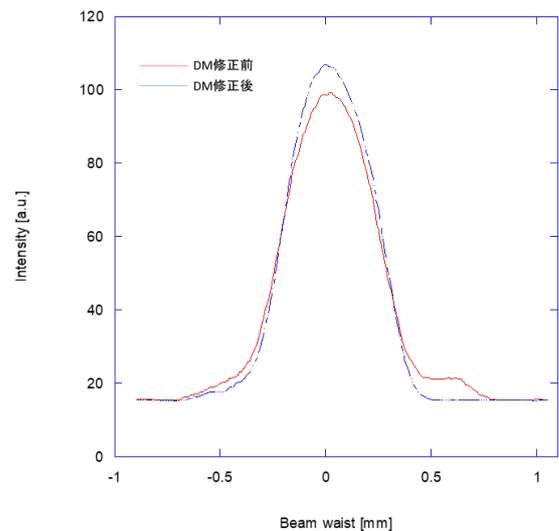


図 5-2. Deformable mirror 動作前後のビームスポット強度分布

半値全幅を算出した。結果、Deformable mirror 動作前は 0.42 mm であり、Deformable mirror 動作後は 0.412 mm であった。またグラフからも半値全幅にほぼ差がないことが分かる。しかし、修正後スポット中心強度は

1割ほど高くなり0.5mm付近に発生していた振動もなくなっている。このことから、DeformableMirrorを手動で印加することによりビーム形を整えることができたように思えるが、図5-3より、ビーム全体の形は崩れてしまっていることが分かる。アキシコンレンズは波面の重なり合わせなので、入射するビームは限りなく円形に近いほどいい。このことから、強度分布のみを見るのではなく、ビーム形も確認しなければならないことが分かった。



図5-3. Deformable mirror 動作後のビームスポット

前述の Deformable Mirror の形状を用いて、掃引加工を行った。レーザーパワーは150~250mWに変化させ、掃引速度は50μm/s~2mm/sまで変化させた。

カバーガラス裏面は150mWでも加工された。以下に120mW時と150mW時のカバーガラス裏面のSEM画像を図5-5、図5-6として示す。またこの時の掃引速度は50μm/sとした。

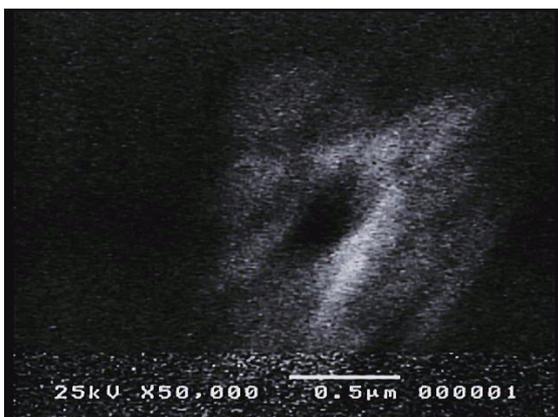


図5-5. カバーガラス裏面のSEMイメージ (レーザー出力:120mW, 掃引速度50μm/s)

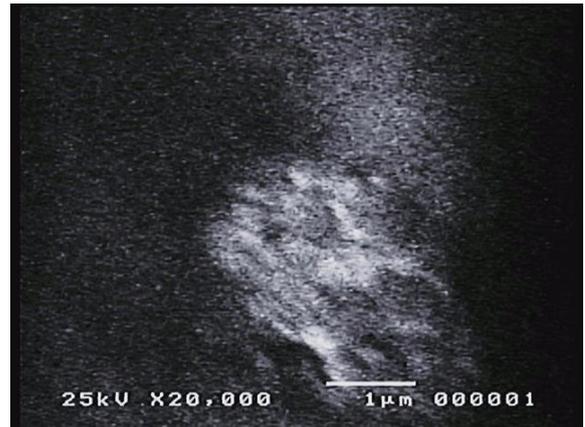


図58. カバーガラス裏面のSEMイメージ (レーザー出力:150mW, 掃引速度50μm/s)

カバーガラスにはテーパ状の穴が開いているのではないかと考えた。カバーガラスを透過する際に無視できないレベルで非線形吸収が発生しているのではないかと考えた。そもそもアキシコンレンズ入射前のビーム中心の強度を落としていないことが問題であると考えた。このことの対策として何かビーム中心の強度を減少させるフィルターをかませるべきだと考えた。

6 参考文献

- [i] ガラスへのマイクロオーダーの微細穴開け加工技術の開発に成功 ~積層半導体部材への応用に向けて~, 旭硝子株式会社,
- [ii] 超短パルス発生技術 渡辺俊太郎 光学 第24巻 第7号 (1995)
- [iii] フェムト秒短パルスレーザー加工を用いた石英ファイバへの機能埋め込み 博士論文 合谷 賢治
- [iv] 電気学会 レーザーアブレーションとその応用 コロナ社(1991)
- [v] P.K.Velpula, M. K. Bhuyan Spatio-temporal dynamics in nondiffractive Bessel ultrafast laser nanoscale volume structuring Laser Photonics Rev. 10, No. 2, 230–244 (2016)