軸状集光ビーム生成におけるアクシコンの傾きの影響

松岡 芳彦¹, 井上 尚志¹, 木塚 優子¹, 山内 真¹, 丸山 伸吾^{2,†}, 木下 岳司²

¹産業技術総合研究所 (〒305-8564 茨城県つくば市並木1-2-1 産総研東)

²慶應義塾大学 (〒223-8522 神奈川県横浜市港北区日吉3-14-1)

Influence of Axicon Tilt in Axially Condensed Beam Generation

Yoshihiko MATSUOKA,¹ Takashi INOUE,¹ Yuko KIZUKA,¹ Makoto YAMAUCHI,¹

Shingo MARUYAMA,^{2,†} and Takeshi KINOSHITA²

¹National Institute of Advanced Industrial Science and Technology (AIST),

Tsukuba East, Namiki 1-2-1, Tsukuba, Ibaraki 305-8564

²Keio University, Hiyoshi 3-14-1, Kohoku-ku, Yokohama, Kanagawa 223-8522

(Received February 18, 2005)

Axially condensed beams exhibit properties suitable for laser micro-fabrication. The influence of axicon tilt was examined when an axially condensed beam was formed using an axicon. For both types of axicons, conical shape glass lens and binary diffractive optical element (DOE), the ideal axially condensed beam profile is kept below a tilt angle of less than about 5°. The beam generation using an axicon does not need precise alignment. However, with the conical shape glass axicon, the symmetry axis of the cone and the undersurface should be orthogonal within an angle error margin of 1°, for axially condensed beam generation. This is the first report to present laser drill performance using a DOE axicon.

Key Words: Axially condensed beam, Axicon, Diffractive Optical Element (DOE), Beam alignment, Laser drilling

1. はじめに

微細加工の需要が高まるなかで、レーザー加工への期待は益々大きくなってきている。従来の機械的工具による接触を伴う加工は、例えば刃先の形状が加工時間の累積とともに変化していくため(磨耗)、その形状変化が無視できなくなるような微細な加工サイズ領域では、加工の寸法制御が困難となる。また、粗加工から仕上げ加工へと除去量や加工精度が変化するにつれて加工工具を取り換える必要があり、従来の機械的加工では維持管理しなければならない「刃」などの工具は膨大な量である。これに対して、レーザー加工は非接触であるために工具磨耗の問題から解放されるとともに、集光状態やエネルギーの調整によって除去量や加工精度が制御できるために「刃」に相当する工具の取り換えすら不要になる。このようにレーザー加工は微細加工に非常に適した特性を有する。一方で、従来のレーザーによる「熱的」加工で生じる変質や変形といった熱影響や発生するドロスなどは微細加工では無視できなくなり、また利用しようとする集光スポットサイズが波長と比較し得る程度となると集光およ

びその状態の維持が急に難しくなるという問題がある。

微細加工におけるレーザー加工の熱影響の問題は、適切なレーザー発振器の選択を中心に検討が行われている。その一つは、熱として吸収される赤外線レーザーに代えて、材料を構成する元素間の化学結合を直接に切断することができる紫外線レーザー、例えばエキシマレーザーや、Nd:YAGレーザーなどの第3高調波や第4高調波を用いることである¹⁾。また超短パルス幅の光を出力するレーザー発振器、即ちフェムト秒レーザーの選択も効果がある^{2,3)}。材料に照射された光エネルギーは、最初に材料を構成する元素の電子に受け取られ、ピコ秒程度の時間をかけて格子振動(即ち熱)へと姿を変えていく。照射されるレーザーのパルス幅がナノ秒よりも長いと、一つのパルスの終わりの部分が照射される頃には、そのパルスの始まりの部分のエネルギーが照射された材料に熱として現れてしまうために、熱影響を避けることが難しい。一方レーザーのパルス幅がフェムト秒領域となると、照射するエネルギーを加工に必要な量に適切に調節してやれば、照射した光のエネルギーが熱に変わる前に加工は完了し、また余剰のエネルギーが熱に変わることも無い

[†]現在の所属：凸版印刷(株)

ので、熱影響の大幅な低減が期待できる。

光学的に不透明な材料の内部のミクロンサイズの微細加工に、ワークディスタンスの精密制御なしに利用できるビームの検討は、あまりなされてこなかった。我々は、McLeodにより詳細に検討された軸状集光⁴⁾、また軸状集光の一種でありDurninにより非回折ビームとして報告されたBesselビーム^{5,6)}に着目して研究を行ってきており、これまでに、このビームが微小スポットサイズと長焦点深度を両立したレーザー微細加工に適したビームであることを数値計算により示した⁷⁾。またナノ秒パルスのレーザー光源を用いた実験により、ミクロンサイズの点加工およびミクロンサイズの開口径で高アスペクト比の円柱形状のドリル加工を、ワークディスタンスの精密制御なしに、このビームを用いて実施できることを実証した^{8,9)}。

従来の凸レンズ集光は、微細な集光スポットを形成するには高開口数集光である必要があり、そのような場合にはレンズとビームのアライメントに精密さが要求されることが知られている。我々は先の論文で、互いに平行位置関係にある軸状集光素子(アクシコン)の光学軸とレーザービームの中心軸との軸間距離と生成される軸状集光ビームの特性について数値検討し、軸間距離がレーザービーム(ガウシアン)半径の25%程度以内であれば生成される軸状集光ビームの集光スポット径も伝播軸上強度分布も変化せずに安定であることを報告した⁷⁾。本報では、軸状集光ビームの生成におけるアクシコンの傾きの及ぼす影響について、円錐形状レンズと透過型回折光学素子(DOE)の二つの型のアクシコンの場合の実験結果を報告する。またあわせて、円錐形状アクシコンの円錐対称軸と円底面の直交度が軸集光ビームの生成に及ぼす影響、透過型DOEアクシコンを用いて生成した軸状集光ビームによるドリル実験結果も報告する。

2. 透過型DOEアクシコンの試作

円錐形状アクシコン(波長 λ における屈折率 n_a)の円底面にコリメートされたコヒーレント光を垂直に入射させると、光線は円錐面で屈折を受け、伝播軸と角度 θ_0

$$\theta_0 = \theta_a - \arccos(n_a \cos \theta_a / n_0) \quad (1)$$

を成して交わる⁷⁾。ここで、 θ_a は円錐の半頂角、 n_0 は空気の屈折率である。この円錐形状アクシコンと同じ回折機能を有するバイナリーの透過型DOEアクシコンは、ピッチ Λ が

$$\Lambda = \lambda / \sin \theta_0 \quad (2)$$

で、ライン幅およびスペース幅が $\Lambda/2$ である同心円(輪帯)である。

試作したDOEアクシコンは、半頂角が 88° の合成石英ガラス製円錐形状アクシコンと同じ回折機能を有するものであり、波長 $\lambda = 532 \text{ nm}$ 、合成石英ガラスの屈折率 $n_a = 1.46$ として、 $\Lambda = 33.0 \mu\text{m}$ である。合成石英ガラス製平行円平板(25 mm ϕ 、厚さ4 mm)に電子線用ポジ型レジストZEP520A(日本ゼオン社製)を厚さ約400 nmでスピンコー

トし、最外径が6 mm ϕ の同心輪帯パターンを電子線描画(エリオニクス社製電子線描画装置ELS7500H、加速電圧100 kV、ビーム電流0.32 nA、照射量約160 $\mu\text{C}/\text{cm}^2$)した。なお、描画フィールドサイズは600 $\mu\text{m} \times 600 \mu\text{m}$ であり、そのつなぎ精度は40 nm以内である。描画後、現像してDOEアクシコンを得た。試作したDOEアクシコンの光学顕微鏡写真をFig. 1に示す。暗い部分は電子線が照射された部分であり、現像によってレジストが除去されている。理論から示される試作したバイナリー透過型DOEの最大1次回折効率は40.5%であり、溝深さが最適でない場合は回折効率が低下する¹⁰⁾。試作したDOEアクシコンでは、レジストの厚さが少々不足しており、軸状集光ビーム生成に寄与する成分の回折効率は約30%であった。

3. 実験

軸状集光ビームの生成におけるアクシコンの傾きの影響は、光源にHe-Neレーザーを用い、ビームエキスパンダを用いて径を拡大しさらにコリメートしたビームをアクシコンに入射させ、生成した軸状集光ビームの光強度分布を拡大観察光学系を通してビームプロファイラ(浜松ホトニクス製LEPAS-11)で観察した。用いたアクシコンは、合成石英ガラス製円錐形状アクシコン(半頂角 88° 、円錐対称軸と円底面法線のなす角度 $<1^\circ$)と試作したDOEアクシコンである。Fig. 2に示すように、円錐形状アクシコンの場合には円底面側からHe-Neレーザーを入射させ、円底面の法線と入射するHe-Neレーザーの伝播軸のなす角度を入射角 θ_i とした。またDOEアクシコンの場合には回折格子の形成されていない面側から入射させ、入射面の法線と入射ビームのなす角度を入射角 θ_i とした。

円錐形状アクシコンの円錐対称軸と円底面の直交度が軸集光ビームの生成に及ぼす影響は、合成石英ガラス製円錐形状アクシコン(半頂角 87° 、円錐対称軸と円底面法線のなす角度 $2'48''$)の円底面にHe-Neレーザーを垂直に入射させ、生成されるビームの光強度分布を、同様に拡大観察光学系を通してビームプロファイラで観察した。

円錐形状と、DOEアクシコンのレーザーマイクロドリ

Fig. 1 Optical microscope view of DOE axicon.

Fig. 2 Incident angle θ_i to axicon. ((a): DOE axicon, (b): Cone axicon).

ルの比較実験は、合成石英ガラス製円錐形状アクシコン(半頂角 87.5° 、円錐対称軸と円底面法線のなす角度 $<1^\circ$)と試作したDOEアクシコンを用いて、Fig. 3の実験配置で行った。パルス発振Nd:YAGレーザー(パルス幅約5 ns、繰返し周波数10 Hz)の第二高調波(波長532 nm)を光源に用いた。厚さ20 μm のSUS304箔の試料は、x-y-zステージ上に置かれ(大気雰囲気中)、試料表面にほぼ垂直に軸状集光ビームは照射される。Nd:YAGレーザーは実験を通して一定の条件で発振をしており、発振器とアクシコンの間に機械的シャッターと適切なNDフィルターが挿入され、試料へ照射されるレーザー光の強度はNDフィルターによって、照射する光パルス数はシャッターの開放時間により調節する。特に本実験では、虹彩紋りを用いて光源からのビームの中心部の直径6 mm ϕ を切出し、切出したビームの中心をアクシコンの対称中心に一致させてアクシコンの底(裏)面に垂直に入射させた。

4. 結果および考察

円錐形状アクシコン(半頂角 88° 、円錐対称軸と円底面法線のなす角度 $<1^\circ$)および試作したDOEアクシコンの底(裏)面にHe-Neレーザーを、 0° 、 6.5° 、 9° の入射角 θ_i で入射させた場合の、観測された軸状集光部の光強度分布をFig. 4に示す。垂直入射の場合(DOEアクシコン：(a)DOE/ 0° 、円錐形状アクシコン：(d)Cone/ 0°)、どちらも軸状集光ビームの一種であるBesselビーム特有の同心円(輪帯)の

Fig. 3 Experimental setup of laser drilling.

Fig. 4 Change of light intensity distribution at the focal area depending on the incidence angle. (DOE axicon: (a) 0° , (b) 6.5° , (c) 9° . Cone axicon: (d) 0° , (e) 6.5° , (f) 9°).

強度分布が得られている。試作したDOEアクシコンは、ここで比較評価している合成石英ガラス製の円錐半頂角が 88° のアクシコンと同じ集光機能为目标に設計されたが、Fig. 4 (a), (d)の比較から明らかなように同心輪帯の半径の周期が試作したDOEアクシコンの集光部の強度分布の方が短くなっている。このことは屈折率の値が、実際の合成石英ガラスと計算に用いたものとで、0.1 %程度異なっていたことが理由と考えられる。

1954年のMcLeodのアクシコンに関する論文⁴⁾の後、1962年にFujiwaraは点光源の反射型円錐面による結像について理論と実験の両面から検討し、結果を報告している¹¹⁾。Fujiwaraの論文のFig. 6に明確に示されているように、円錐の対称軸上に点光源がある(on-axis)場合は円錐面で反射した後に同心輪帯の光強度分布の結像が得られるが、点光源が円錐の対称軸上に無く(off-axis)、点光源と円錐頂点とを結ぶ線が円錐対称軸となす角度が大きくなるに従い、0次の中心ロブ強度が減衰して1次のサイドロブが輪帯から円周上の等間隔の4つの点へと変化する。更に斜入射の角度が大きくなると、高次のサイドロブも輪帯から複数の点へと変わっていく。

我々が検討しているのは透過型アクシコンへのコリメート光の入射であり、Fujiwaraの論文は反射型アクシコンへの点光源から発した光の入射であるという違いはあるが、Fujiwaraの報告した斜入射角度変化による結像パターンの変化と同様の変化が、我々の結果(Fig. 4)にも現れている。我々の試作したDOEアクシコンの場合、約

6.5°の斜入射で1次のサイドロブが4つの点へと変化し、更に約9°の斜入射で0次の中心ロブがその強度を殆ど失い、高次のサイドロブ(輪帯)も点へと変化している。DOEアキシコンとはほぼ同じ伝播軸との交差角 θ_0 を持つ半頂角88°の円錐形状アキシコンの場合、約6.5°の斜入射でも同心輪帯の強度分布が維持されており、約9°の斜入射でやっと1次のサイドロブが輪帯から点へと変化し始めている。実用において重要であるのは、集光部の光強度分布が同心輪帯に保たれていれば、軸状集光ビームの光強度の高い中心ロブを微細集光スポットとして加工に用いることができることである。Fig. 4から、DOEおよび円錐形状のどちらのアキシコンも、斜入射角度が約5°以内であれば集光部の光強度分布を同心輪帯に保つことができると考えられる。実際において平面への垂直入射は最もアライメントが容易なものであり、適当に行ったとしても5°ものずれは生じない。先の軸ずれの許容に関する検討の報告⁷⁾と本実験結果から、「アキシコンを用いた軸状集光ビームの生成は、微細な集光スポットを形成できるものでありながら、従来の凸レンズ集光のように厳密なレンズと入射ビームのアライメントを要求しない。アキシコン底面への斜入射は約5°程度まで、またアキシコンの軸に平行にビーム(ガウシアン)が入射する場合の両軸のずれは入射ビーム半径の約25%程度まで許容される」とまとめることができる。

DOEアキシコンに用いる基板は、工業的に安定に量産されている平行平板であり、形状の不安定要因とはなり難い。一方、円錐形状アキシコンの場合は、円底面と円錐面の対称軸の直交性が満足されない場合が懸念される。円底面と円錐面の対称軸が直交していないアキシコンの円底面にビームを垂直入射させた場合、入射ビームは円底面を真っ直ぐに通過した後、円錐面に斜入射することになる。Fig. 5に、合成石英ガラス製円錐形状アキシコン(半頂角87°, 円錐対称軸と円底面法線のなす角度2'48")の円底面にHe-Neレーザーを垂直に入射させた場合の、観測された軸状集光部の光強度分布を示す。驚くべきことに、僅か2'48"の角度ずれ(円底面と円錐面の対称軸の直交からのずれ)で1次のサイドロブが4つの点へと変化してしまっている。同様の軸状集光部の光強度分布の変化

Fig. 5 Light intensity distribution at the focal area by cone axicon for which the symmetry axis of the cone and the undersurface is orthogonal with the angle error of 2'48".

は、半頂角77.5°, 角度ずれ2'26"の合成石英ガラス製円錐形状アキシコンなどでも観測された。一方角度ずれを1'以内に抑えた幾つもの円錐形状アキシコン((半頂角74°, 角度ずれ1'00"), (半頂角77.5°, 角度ずれ0'26"), (半頂角77.5°, 角度ずれ0'34"), (半頂角77.5°, 角度ずれ0'52"), (半頂角80°, 角度ずれ0'15"), (半頂角85°, 角度ずれ0'31"), (半頂角87.5°, 角度ずれ0'38"), (半頂角88°, 角度ずれ0'57"))を試作し、円底面へビームを垂直入射させて評価した結果、いずれも同心輪帯の軸状集光部の光強度分布が得られた。従って、微細加工用の軸状集光素子としての円錐形状アキシコンは、円底面と円錐対称軸の角度ずれを少なくとも1'以内に抑える必要がある。

DOEの方が円錐形状よりも斜入射の影響を早くに受けて、集光部の光強度分布が同心輪帯から変化し始める理由、および円錐対称軸と円底面の直交性が満足された円錐形状アキシコンの場合は円底面への約5°にも及ぶ斜入射でも集光部の同心輪帯の強度分布が維持されるのに対して円錐対称軸と円底面の角度ずれは僅か1°程度しか許されない理由は現時点では分からないが、実形状に基づく干渉パターンの入射角依存を数値解析することにより明らかになると思われる。

出力が高い加工用レーザーへの回折型光学素子の集光素子としての適用は、損傷の発生などが懸念され、行われてこなかった。我々は試作したDOEアキシコンにより生成される軸状集光ビームを用いてレーザードリル加工を実施し、その結果を従来の円錐形状アキシコンを用いた結果と比較した(Fig. 6)。試料に厚さ20 μmのSUS304箔を用い、パルスエネルギーを変化させ、貫通に要した照射パルス数を計測した。貫通は、試料裏面からドリルに用いている532 nmの光が漏れ始めたことを目視により確認・判断した。試作したDOEアキシコンの場合は、アキシコンー試料間距離135 mm, 6 mmφの入射ビーム直径で、0.5, 1.0, 2.5 mJ/pulseの3つのパルスエネルギーでそれぞれドリル加工を実施した。円錐形状アキシコンは、試作したDOEアキシコンと集光部の同心輪帯の周期がより近いものとして半頂角が87.5°のものをを用い、アキシコンー試料間距離105 mm, 6 mmφの入射ビーム直径で、0.1, 0.25, 0.5, 1.0 mJ/pulseの4つのパルスエネルギーでそ

Fig. 6 Dependency of laser pulse shot number for drill through hole on irradiation energy density.

れぞれドリル加工を実施した。加工点における軸状集光ビームの中心ロブの $1/e^2$ 直径内の平均エネルギー密度を数値計算し、Fig. 6の横軸に用いた。但し、DOEアクシコンの場合は回折効率を考慮して、入射パルスエネルギーの約30%が軸状集光ビーム形成に利用されたものとした。Fig. 6に示されている、貫通穴形成に要する照射パルス数の照射エネルギー密度依存は、円錐形状アクシコンと試作したDOEアクシコンとでよく一致しており、ほぼ同じ軸状集光ビームが形成できていると考えることができる。どちらも加工点での照射エネルギー密度が高いと貫通に要するパルス数変化は緩やかであり、照射エネルギー密度が小さくなると貫通に要する照射パルス数は急に増加する。

我々が試作したDOEアクシコンはレジストを現像しただけのものであり、従来のレーザー加工の出力領域では直ぐに損傷を受けてしまい実用的でないと考えられてきた。しかしながら、微細加工分野では集光スポットの大きさが $1 \times 10^{-6} \text{ cm}^2$ 程度と極めて小さいので、加工点でレーザーアブレーションに必要な照射エネルギー密度(数 J/cm^2)を達成するために、集光素子に大きな光エネルギーを通過させる必要はない。我々の実験でDOEに入射させた最大のエネルギー密度は約 $16 \text{ mJ}/(\text{cm}^2 \cdot \text{pulse})$ であり、最大エネルギー密度で約6分間(3,600ショット)の入射後も、形成される軸状集光ビームに変化は見られなかった。

5. まとめ

レーザー微細加工用のビームとして高い適性を有すると考えられる軸状集光ビームを、アクシコンを用いて形成する際に許容されるアクシコンの傾きについて、円錐形状と試作したDOEの二つのアクシコンの場合を実験検討した。どちらのアクシコンの場合もアクシコン底面へ

の 5° 程度の斜入射角度が許容されており、凸レンズ集光に比べてアライメントの厳密さを要求されない。

円錐形状アクシコンの場合、円錐対称軸と円底面との直交からのずれが僅か 3° 程度で、軸状集光部の中心ロブの消失が観測された。微細加工用の軸状集光ビームを安定に形成するためには、円錐形状アクシコンの円錐対称軸と円底面の直交からのずれは少なくとも 1° 以内である必要がある。

試作したDOEアクシコンはレジストを現像しただけのものであるが、レーザーマイクロドリル加工実験に適用できた。

謝 辞

円錐形状アクシコンの円錐対称軸と円底面の直交度の評価、および直交度の高い円錐形状アクシコンの試作にご協力いただいた、夏目光学(株)殿に深く感謝いたします。

参考文献

- 1) 杉岡 幸次：レーザー研究 **30** (2002) 226.
- 2) 邱 建榮, 平尾 一之：レーザー研究 **30** (2002) 233.
- 3) 三澤 弘明：レーザー研究 **30** (2002) 239.
- 4) J. H. McLeod: J. Opt. Soc. Am. **44** (1954) 592.
- 5) J. Durnin, J. J. Miceli, Jr., and J. H. Eberly: Phys. Rev. Lett. **58** (1987) 1499.
- 6) J. Durnin: J. Opt. Soc. Am. **A4** (1987) 651.
- 7) 松岡 芳彦：レーザー研究 **32** (2004) 131.
- 8) M. Kohno and M. Matsuoka: JSME Int. J. B **47** (2004) 497.
- 9) 松岡 芳彦, 河野 正道：レーザー研究 **32** (2004) 348.
- 10) 塩野 照弘：「レリーフ型回折光学素子の回折効率」回折光学素子入門(社)応用物理学会日本光学会光設計研究グループ監修(オプトロニクス社, 1997) 63-73.
- 11) S. Fujiwara: J. Opt. Soc. Am. **52** (1962) 287.