レーザによる微細穴加工*

Laser Microdrilling

比田井洋史**

Hirofumi HIDAI

Key words laser, microdrilling, high-aspect-ratio, optics, ablation, deep hole

1. はじめに

1960年にメイマンらによってレーザ発振器が発明された後、最初に応用されたのがカミソリの刃への穴あけ、といわれており、レーザによる穴あけは約50年の歴史をもつ。

切断などの他のレーザ加工と同様に、穴あけもレーザ光により被加工材が局所的に加熱され、溶融、蒸発、飛散することで実現される。さらに急加熱による衝撃波の生成や、飛散した被加工材のプラズマ化、穴内部でのレーザ光の反射などが大きく影響する場合もある。

このような現象がフェムト秒からミリ秒といった幅広い時間スケールで起こり、さらに照射条件によって支配的なプロセスが異なることから、統合的に述べることは難しい。しかし、穴あけにおいて難しいのは、エネルギーを穴底部まで到達させ、穴底部で除去をおこなうことである。そこで本稿では、穴底部にエネルギーを到達させる上で重要な集光条件を中心に説明をするとともに最近の研究成果を紹介する。金属を対象とし炭酸ガスレーザを使った場合のようなキーホール生成を伴う穴あけの場合は、キーホールの生成が非常に重要な要素となり、状況が大きく異なるため本稿においては対象としない。

2. 穴底部へのビームの到達

2.1 光の伝搬¹⁾²⁾

レーザ光の空間的な強度分布にはガウス分布、フラットトップなどがある。小さなスポットに焦点を結ぶのに有利であることからガウス分布のレーザ光が広く使われる。ガ

ウス分布のレーザ光が集光して照射された場合の焦点近傍での強度分布を図示したのが図1である。

ビームの断面(図1では r 方向)は、ガウス分布となり、中心からの距離を r とすると、中心から離れるにつれ以下の式で表されるように強度減少する。

$$F(r) = F_0 \exp\left(-\frac{2r^2}{\omega^2}\right) \quad (1)$$

ここで、 F_0 は中心部分でのレーザ光のフルエンス(単位面積あたりの強度)、 ω はビーム半径と呼ばれ中心部分のレーザ強度から $1/e^2 \cong 0.135$ 倍に低下する点で定義することが一般的である。レーザ光が減衰しない場合では、 z 軸に垂直な断面を通過するエネルギー P (すなわちレーザ光の全パワー)が一定であることから、

$$2\pi \int_0^\infty r F(r) dr = F_0 \pi \omega^2 / 2 = P \quad (2)$$

となる。

またビーム径 ω は双曲線状に広がり、以下の式で表される。

$$\omega = \omega_0 \sqrt{1 + \left(\frac{z}{z_R}\right)^2} \quad (3)$$

ここで、 ω_0 は焦点でのビーム径、 z_R はレイリーレンジと呼ばれ、焦点におけるビーム径に対して、その場所におけるビーム径が $\sqrt{2}$ 倍になる点までの距離である。この ω_0 と z_R は集光条件と波長によって決まり、

$$\omega_0 \cong \frac{\lambda f}{\pi d} \quad (4)$$

図1 焦点近傍での強度分布

*原稿受付 平成24年3月12日

**正会員 千葉大学大学院工学研究科(千葉県千葉市稲毛区弥生町1-33)

比田井洋史

1998年東京工業大学工学部卒業後、1999年東京工業大学大学院理工学研究科中途退学。1998年東京工業大学工学部助手、2006年カリフォルニア大学バークレー校客員研究員を経て2010年より現職。千葉大学大学院工学研究科准教授。

図2 レーザ加工したシリコン表面のAFM像 Reprinted with permission from ref. 3). Copyright 2006 American Institute of Physics.

図3 フルエンス一定となる領域

$$z_R \cong \frac{\pi \omega_0^2}{\lambda} \cong \frac{\lambda}{\pi} \left(\frac{f}{d} \right)^2 \quad (5)$$

と表される。ここで、 λ : 波長、 f : 焦点距離、 d : レンズに入射するビームの半径である。深さを考えなくてよければ、(4) 式から、なるべく焦点距離の短いレンズと波長の短いレーザ発振器を用いればよい。さらに熱影響を小さくできるフェムト秒レーザを用いて、加工閾値をわずかに上回るように照射すれば小径の穴あけが実現できる。シリコンを加工した例³⁾を図2に示す。直径がレーザ光の半波長程度の穴が得られる。

しかし実際にはある程度の深さが要求されることがほとんどである。ここで、焦点距離 f を変えた場合では、スポット径は焦点距離に比例し、レイリー長は焦点距離の2乗に比例するため、例えば、焦点距離が半分のレンズを使うと、スポット径が半分になるが同時にレイリー長が1/4となりすぐにビームが広がってしまい、穴も浅くなる。

そこで、図1のようなエネルギー分布をもつビームが照射され、あるフルエンス以上の点が除去されると仮定する。すなわち図1である高さ以上の部分が除去されると考えるとどのような形状になるであろうか。図1の等高線は、(1) ~ (3) 式から求められ、あるフルエンス F を満たす r は

$$r = \sqrt{-\frac{\omega_0^2}{2} \left[1 + \left(\frac{z}{z_R} \right)^2 \right] \ln \left[\frac{F}{2P\pi\omega_0^2} \left[1 + \left(\frac{z}{z_R} \right)^2 \right] \right]} \quad (6)$$

図4 PET樹脂に穴をあけた穴, Reprinted with permission from ref. 4). Copyright 2000 Elsevier.

図5 波長を変えた場合のフルエンス一定となる領域

と表される。さまざまなフルエンス F の場合を描いたものが図3であり、瓢箪形となる。この図からわかるように、深さによって穴の太さが変わってしまう。

さらに厳密に考えるためには、穴側壁へのビームの入射角度なども考慮する必要がある。この入射角度も含めビームの集光条件を最適化することで、樹脂に対してアスペクト比約600の深穴をあけた例⁴⁾(図4)がある。

2.2 波長の影響

ここで、代表的な波長において焦点部分でのビーム径が同じになるように、集光レンズの焦点距離を変えて図3と同様に同じフルエンスとなる形状を計算したのが図5である。

図からわかるように、太さは同じでも波長が短くなるほど、 z 軸方向に長くなり、同じ太さで深い穴あけが可能となる。このような短波長のレーザを用いて小径かつ深穴を実現した例としては、著者らによるホウ珪酸ガラスに対する穴あけの例(図6)^{5)~9)}がある。

さらに、熔融飛散した試料がレーザ光を吸収してプラズマ化することがある。このプラズマは逆制動放射により光吸収し、その吸収率は波長が長くなるほど大きくなる¹⁰⁾¹¹⁾。したがって、波長が小さいほどプラズマによる吸収が小さくなり、より多くのエネルギーが穴の底まで届くため、この点からも波長が短い方が小径穴あけに有利である。

2.3 壁面での反射

穴内面で多重反射することで、穴底部まで多くのエネルギーが到達することがMatsumuraら¹²⁾や著者ら⁶⁾から報告されている。しかし、壁面での反射率はフレネルの式¹³⁾によって決まり、偏光方向により異なる。直線偏光を用いた

図6 (a) ホウ珪酸ガラスにあけた穴, (b) (a) の形状のプロット

場合では、この反射率の違いによって、円状のスポットとなるようなレーザ光を照射し、入り口部分では丸い穴があいていても、穴が深くなるに従って、穴断面が円形状ではなくなる¹³⁾。そこで、円偏光を使ったり¹⁴⁾、偏光板を回転させ、直線偏光の偏光面を回転させることで穴の深い部分でも丸い穴をあける手法が行われている。

3. 熱 の 影 響

3.1 パルス幅

レーザによる除去加工は加熱により除去されるため熱の影響は避けられない。アブレーションは非熱加工と説明されることも多いが、熱の影響が少なくできる、ということで、熱の影響を全くなくすることは難しい。この熱の影響により穴自体が大きくなったり、熱影響層 (HAZ: Heat affected zone) が形成されたりする。

相変化などを無視し十分に厚い材料にレーザ照射し表面でエネルギー吸収された場合では、熱拡散長 l は

$$l \approx \sqrt{\alpha \tau} \quad (7)$$

と表される¹⁵⁾。ここで α は熱拡散率、 τ は加熱時間 (すな

図7 繰り返し周波数を変えた際の得られる穴の深さ

図8 ダブルパルスによる穴の形状の向上 厚さ 914 μm の SUS304 に波長 533 nm のレーザ照射により直径 40 μm の穴をあけた結果の比較, 左: パルス幅 4 ns, パルスエネルギー 2.4 mJ のレーザを 10000 パルス/s で照射. 照射時間 0.8 s. 右: パルス幅 4 ns, パルスエネルギー 1.2 mJ の 2 パルスを 70 ns 間隔で照射し, この 2 パルスを毎秒 10000 組照射. 照射時間 0.2 s. Reprinted with permission from ref. 17). Copyright 2005 American Institute of Physics.

わちパルス幅) である。熱拡散長 l とは、表面での温度に比べ、温度が $1/e$ となる位置までの距離であり、同じ表面温度であれば、加熱時間すなわちパルス幅を短くすることで、熱影響層を小さくできる。

しかし、短いパルス幅の光源を使っても、多くのエネルギーを投入し表面での温度を高くしてしまうと熱影響を受ける部分が厚くなる。エネルギーを小さくしてしまうと加工速度が低下するため、この熱影響の厚さ、加工速度などのバランスから近年はピコ秒レーザが着目されている。

3.2 パルス間隔

前述したようにレーザによる加工では加熱により除去されることが多いため、融点・沸点までの温度上昇が重要となる。このため、高繰り返しのレーザ光を用い、前のパルスで加熱された部分が温度低下する前に、次のパルスを照射することで下降閾値の低下により、加工速度の向上¹⁶⁾やより深い穴あけ⁹⁾が実現 (図7) できる。

同様な効果を使った例として、ナノ秒のレーザ光を 100 ns 程度の間隔で 2 つのパルスを照射して、加工速度の高

速化と熱影響の低減を実現した報告¹⁷⁾ (図 8) がある。これは、2 つめのパルスが前のパルスで熔融蒸発した飛散物に照射され、除去をより効率的に実現している。

4. そ の 他

4.1 トレパニング、ヘリカルスキニング¹³⁾¹⁸⁾

レーザによる穴あけでは通常、先端が細くテーパ状になる。そこで、焦点をガルバノスキャナなどを使って、円状に回転させるトレパニング、さらに深さ方向にもずらし、螺旋状の軌跡を描くヘリカルスキニング¹⁴⁾、と呼ばれる手法で、直径が一定な穴あけが実現されている。さらに、入り口が細く、出口側の直径が太くなる逆テーパ状の穴あけも可能となる。しかし、この方法ではレーザ光を走査するため、走査しない方法と比べて小径化には限界がある。

4.2 アキシコンレンズ

通常使われる球面レンズの代わりに、円錐形状のアキシコンレンズを使って集光することで、焦点深度が大きくなる。球面レンズと比べて、テーパの小さい穴を実現した結果が報告されている¹⁹⁾。

5. ま と め

レーザによる微細穴加工法について、光の伝搬を中心に、近年のさまざまな試みなどを概説した。穴内部では観察が難しく、プロセスの解明が容易ではないこと、さまざまな現象が関連していること、等の理由で条件の選定も難しい。

近年、レーザ媒質の固体化が進み、安定性が向上したことから、高調波結晶をつかった短波長レーザ、フェムト秒、ピコ秒といった短パルスレーザといった光源が普及してきた。電子産業を中心に応用も広がりつつある。加工現象のモデル化、加工条件のデータベース化などがより一層の普及に重要だと考えられる。

参 考 文 献

- 1) D. Baeuerle: Laser Processing and Chemistry—3rd Edition—, Springer, New York, (2000) 82.
- 2) 根本承次郎, レーザ工学, 培風館, (2001) 25.
- 3) D.J. Hwang, C.P. Grigoropoulos and T.Y. Choi: Efficiency of Silicon Micromachining by Femtosecond Laser Pulses in Ambient Air, J. Appl. Phys., **99**, 8 (2006).

- 4) V.N. Tokarev, J. Lopez and S. Lazare: Modelling of High-aspect Ratio Microdrilling of Polymers with UV Laser Ablation, Appl. Surf. Sci., **168**, 1-4 (2000) 75.
- 5) H. Hidai, S. Itoh and H. Tokura: High-aspect-ratio Microdrilling with UV Laser Ablation III. —Influence of Pulse Width on Hole Profile—, J. Jpn. Soc. Precis. Eng., **76**, 12 (2010) 1383.
- 6) H. Hidai, S. Itoh and H. Tokura: High-aspect-ratio Microdrilling with UV Laser Ablation II. —Influence of Beam Parameters on Hole Profile—, J. Jpn. Soc. Precis. Eng., **76**, 11 (2010) 1266.
- 7) H. Hidai, S. Itoh and H. Tokura: High-aspect-ratio Microdrilling with UV Laser Ablation V. —Drilling in Ceramics, Metals and Semiconductor—, J. Jpn. Soc. Precis. Eng., **77**, 12 (2011).
- 8) H. Hidai, S. Itoh, H. Tokura, S. Nagawasa and S. Tachikawa: High-aspect-ratio Microdrilling with UV Laser Ablation. I—Drilling Holes with an Aspect-ratio of 190 in Borosilicate Glass—J. Jpn. Soc. Precis. Eng., **76**, 10 (2010) 1161.
- 9) S. Itoh, H. Hidai and H. Tokura: High-aspect-ratio Microdrilling with UV Laser Ablation IV. —Effect of Heat Accumulation—, J. Jpn. Soc. Precis. Eng., **77**, 7 (2011) 694.
- 10) D. Baeuerle: Laser Processing and Chemistry—3rd Edition—, Springer, New York, (2000) 206.
- 11) D. Breitling, H. Schittenhelm, P. Berger, F. Dausinger and H. Hugel: Shadowgraphic and Interferometric Investigations on Nd:YAG Laser-induced Vapor/plasma Plumes for Different Processing Wavelengths, Proc. SPIE, **4184** (2001) 534.
- 12) T. Matsumura, T. Nakatani and T. Yagi: Deep Drilling on a Silicon Plate with a Femtosecond Laser: Experiment and Model Analysis, Appl. Phys. A, **86**, 1 (2007) 107.
- 13) S. Nolte, C. Momma, G. Kamlage, A. Ostendorf, C. Fallnich, F. Von Alvensleben and H. Welling: Polarization Effects in Ultrashort-pulse Laser Drilling, Appl. Phys. A, **68**, 5 (1999) 563.
- 14) C. Fohl and F. Dausinger: High Precision Laser Drilling with Ultra Short Pulses—Fundamental Aspects and Technical Applications, PICALO 2006 Conf. Proc., (2006) 281.
- 15) C.P. Grigoropoulos, Transport in Laser Microfabrication: Fundamentals and Applications, Cambridge University Press, Cambridge, UK, (2009) 14.
- 16) A. Ancona, F. Roser, K. Rademaker, J. Limpert, S. Nolte and A. Tunnermann: High Speed Laser Drilling of Metals Using a High Repetition Rate, High Average Power Ultrafast Fiber CPA System, Opt. Express, **16**, 12 (2008) 8958.
- 17) A.C. Forsman, P.S. Banks, M.D. Perry, E.M. Campbell, A.L. Dodell and M.S. Armas: Double-pulse Machining as a Technique for the Enhancement of Material Removal Rates in Laser Machining of Metals, J. Appl. Phys., **98**, 3 (2005) 033302.
- 18) R. Giedl, H.J. Helml, F.X. Wagner and M.J. Wild: Geometrical Aspects of Laser-drilled High Precision Holes for Flow Control Applications, Proc. SPIE, **5063** (2003) 389.
- 19) Y. Matsuoka, Y. Kizuka and T. Inoue: The Characteristics of Laser Micro Drilling Using a Bessel Beam, Appl. Phys. A, **84**, 4 (2006) 423.