

ナノ秒レーザーによるガラスの内部加工

中央大学 研究開発機構

教授 新井武二

(平成 20 年度天田国際会議等参加助成 AF-2008220)

キーワード：レーザー加工、ナノパルス、ガラスの内部加工

開催日時：2008 年 10 月 20 日～10 月 28 日

開催場所：国際会議 ICALEO '2008, 米国 カルフォルニア州 テメキュラ

ICALEO2008 Conference Proceedings M1105(2008.10)

ICALEO : (International Congress on Application of Laser & Electro-optics)

1. はじめに

ナノ秒レーザーによるガラス内部のマイクロ加工は、まだデータが少ないこともあり必ずしも加工現象が明らかではない。その主な理由は、ガラスは不純物が多く混入していて等方弾性体として取り扱うことのできない不均質材料であることにある。加えて、レーザーをガラスの材料内に照射したときに、材料内での正確な結像点を理論的に求めることが困難であるために、内部加工の始まる起点がどこに位置するかが明らかではないことにある。

本研究ではこれらの問題にひとつの解決を与えるために、高速度カメラを用いて特殊なガラス材料の内部加工時における加工の起点と進行の過程を明らかにした。ガラス内部の加工は、レーザーの入射方向にのみ加工が進行することから、レーザー光に誘起される加工であることが判明した。

2. 実験装置

2.1 加工装置

レーザーはパルス幅がナノ秒で発振する Nd:YVO₄ の第 3 高調波 (Coherent 社製 Model : AVIA 7000) を用いたビーム直下に位置した加工台に置かれた加工材料に対しては、真横の方向から撮影できるようにビデオカメラが設置された。観察のための高速度ビデオカメラには島津製作所製 Hyper Vision (model : HPV-1) を用いた。

2.2 実験材料

実験材料には、測定によって波長吸収特性、構成成分の明らかとなった BK 7 (boro-silicate crown glass) を用いた。 $\lambda = 355\text{nm}$ に対して通常のガラスはほとんど透過する。

しかし、BK 7 はレーザー波長 $\lambda = 355\text{nm}$ に対して約 10 数%ではあるが少量の波長吸収がある。

3. レーザ光の結像

レンズで集光したレーザー光に沿って発光し、結像位置では透明 (写真では黒く) になり、その前後で光はさらに広がり発光する。少なくとも用いた波長 $\lambda = 355\text{nm}$ が材料内で集光し結像することは、この波長のビームによる材料内での焦点位置であることを意味する。

微弱のレーザー光の出力を上げて強力光にすると、目視であるが焦点位置近傍上方で強力な発光が起こったこの場合には材内に材内変質や損傷 (micro-crack and/or void) を残した。これはレーザー光によってガラスが加工されたことを意味する。

集光点近傍のエネルギー密度の等密度線を描くと、集光位置近傍ではその形状はほぼ細長い楕円を呈している。これが集光位置での空洞 (void) 発生の形状を決める根拠となっている。

4. 内部照射による屈折率変化

4.1 入射方向と材料の屈折率変化

レーザーの入射方向と材料内の屈折率変化の方向を確認するため、材料に対してワンショット (One shot) のパルスビームを、異なる 2 方向から入射する実験をおこなった。ひとつは材料に対して上方から真下に入射した場合と、もう一つは材料の右側の横から入射した場合について実験をおこなったところ、共に、ビームを入射した方向に加工

が進行した。その結果、レーザによるガラスの加工は、レーザ光が入射される方向に限られることが明らかとなった。したがって、ガラスの内部加工はレーザ光により誘起（laser induced）される加工（レーザ誘起の材内加工）の一種であることが判明した。

4.2 高速度カメラによる観察

レーザビームが材内で集光すると、材料が非線形光学効果によって局所的にガラスの屈折率が変化する。最新の高速ビデオカメラによる観察をおこなったところ、ガラスの材料内部の加工では、レーザをガラス内部に集中照射すると、集光点でレーザのエネルギー密度が非常に高いため容易に沸点まで高められ、その集光点の上方にプラズマブルーム（Vapor Plume）が形成される。さらに、ほぼ同時に少し下方のエネルギー密度が最大となる焦点位置でクラックが発生し、空洞が形成されることが確認された。一時的な屈折率変化により加工前線（processing front）では、局面に沿って蒸発が起こり、擬似的なレンズ効果が生じる。これによりレーザ光は集光し、その周辺にプラズマ発生を生じさせる。この発生プラズマはレーザ光を吸収してさらに発熱する。発生プラズマは推進力をもつために、材料内部で熱的なトリガーとなって屈折率の変化する領域は上方に押し上げる。この繰り返りで、加工が上方へ進行する。この仮の曲率での発熱によって集光点で高熱の蓄積が起こり、屈折率の曲率が徐々に変化した結果と思われる。

なお、一度パルスレーザによって屈折率が変化し溶融した場所に再度レーザ光を投入しても、冷却により同じ場所ではそれ以上に加工されることはなかった。図1には加工の連続写真の例を示す。

4.3 加工の進行

収束したレーザ光が入射された焦点位置近傍において、初期の段階では、プラズマが発生し同時に加熱・蒸発による圧力波で先端に空洞を形成する。この空洞は、集光による焦点位置の縦方向のエネルギー密度分布に沿ったほぼ楕円状の形状をしている。レーザによって焦点位置近傍で急激に加熱するとエネルギー密度の極めて高い集光位置からの熱圧力波が発生すると考えられる。初期を除く光の進行は、この熱圧力波によって屈折率の変化する波面が構成される。

5. 結論

- 1) レーザによるガラスの加工は、レーザ光が入射される方向に限って加工が進行する。
- 2) 集光点近傍で内部に発生したプラズマは、熱と圧力がトリガーとなって屈折率の変化する領域は上方に押し上げる効果をもたらす。この屈折率変化に伴う曲率波面が上方へ移動することで、この屈折波面が蒸発し、レンズ効果で集光してプラズマ吸収を促し加工は上方へ進行する。なお、仮定した楕円の屈折波面により形成される曲面は、空洞の形状をよく反映している。
- 3) 結像位置をガラス内部に固定した場合のガラス加工の進行速度は、最初は速く徐々に遅くなる。その理由は、上方にゆくに従ってエネルギー密度は低下するためである。

謝辞

本研究は平成 20 年度(財)天田金属加工機械技術振興財団の国際会議助成(AF・2008220)を受けて行われたものであり、同財団に深甚の謝意を表す。

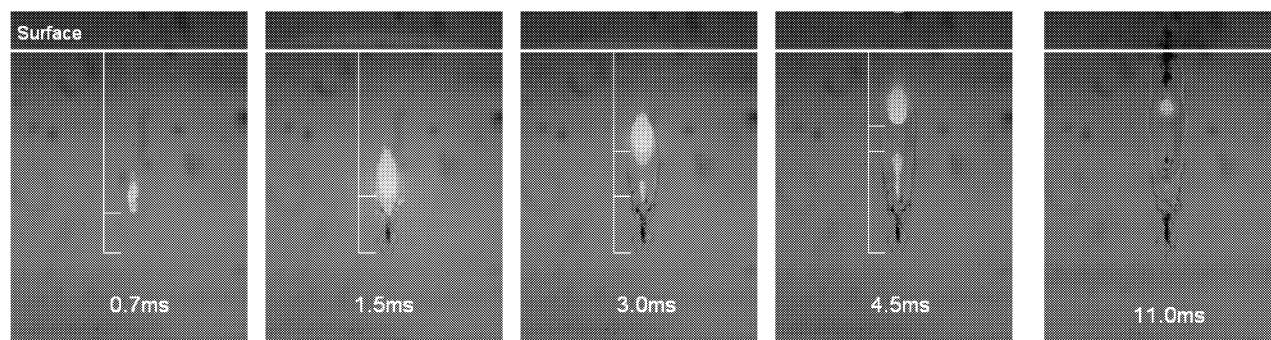


図1 ガラス内部の空洞の発生