レーザーオリジナル

大出力CO₂レーザービームの強度プロファイル とアクリルバーンパターンの比較 —アクリルバーンパターンの変形の原因—

若田 仁志*・小川 周治**・久場 一樹*・田中正明*

(1985年7月29日 受理)

Comparison of the Intensity Profile with the Acrylic Burn Pattern on High Power CO₂ Laser Beam

Hitoshi WAKATA*, Syuji OGAWA**, Kazuki KUBA*
and Masaaki TANAKA*

(Received July 29, 1985)

The accuracy of the acrylic burn pattern method, widely used for observing a beam intensity profile of high power CO₂ laser, has been studied by comparing the burn patterns with corresponding beam intensity profiles measured by the computer controlled pinhole scan method. It is found that the shape of burn pattern is determined by beam irradiation time, beam intensity and beam size, owing to the differences in reflectivity at various incident angles and in threshold energy for evaporation of acrylic plastics. Thus, it is considered that the acrylic burn pattern method is not reliable and that a more accurate method, such as the pinhole scanning method, must be used for studying precise beam qualities.

1. はじめに

大出力CO₂レーザーを用いた加工が盛んになるに従い、レーザービームの品質、例えば、ビームの強度分布の対称性や、均一性、あるいはビームの集光性が加工能力に影響を与えること

が明らかになり、より質の良いレーザービームが求められている。

一方、レーザービームの質はレーザーの励起空間や、共振器、あるいは伝送路に発生する光学的な歪に左右されており、これらとレーザービームのプロファイルとの相関関係を正しく知

* 三菱電機応用機器研究所 (〒661 尼崎市塚口本町8-1-1)

** 三菱電機名古屋製作所 (〒461 名古屋市東区矢田南5-1-14)

* Product Development Laboratory, Mitsubishi Electric Corporation (8-1-1, Tsukaguchi honmach, Amagasaki 661)

** Nagoya Works, Mitsubishi Electric Corporation (5-1-14, Yadamnami Higashiku Nagoya 461)

ることがビームの良質化を計るために必要となる。

ところで、現在、大出力CO₂レーザーのプロフィールを知る手段として、アクリル板に、レーザービームを短時間照射して焼けあと（バーンパターン）を得る方法が広く行なわれている¹⁾。この方法が多用されているのは、アクリルの熱伝導率の悪さと、蒸発しやすさのために、レーザービームが照射された部分だけが蒸発し、バーンパターンはビームの強度プロフィールを良く反映すると考えられていることと、大出力レーザー用のビームプロフィール測定装置が開発されていなかったこと、また、バーンパターンは場所を選ばず手軽に得られるためであろう。

しかし、ビームを照射する時間や、ビームの強度、あるいは燃焼を防ぐために吹きつけているガスの流量や、その吹きつけ方法等により、アクリルバーンパターンの形状は著しく異なることが知られており、バーンパターンの形状がビームの強度プロフィールを正確に反映しているかどうかには疑問があった。

そこで、本報告では大出力CO₂レーザーの強度プロフィールを精度良く測定するために開発した装置を紹介するとともに、この装置により得られたレーザービームの強度プロフィールとアクリルバーンパターンの形状を詳細に比較し、簡易測定法としてアクリルバーンパターンを用いる際の問題点を調べた。

2. ビームプロフィール測定装置

2.1 測定装置の構成

Fig.1 に装置の構成を示す。この装置はピンホールをビームと直交する面内で移動させることにより、ビームプロフィールを得る方法を採用している。本装置のピンホールは内径 120 mm の円筒状でアルマイト処理された光吸収部と、金メッキされたろうと状の反射部からなる大型のパワーダンパーの底にもうけられている。(Fig.1 断面図)。パワーダンパーに入射したレーザービームの大部分は反射部で反射された後、水冷された光吸収部で吸収される。一方、直径

Fig.1 Structure of the beam profile analyser.

1 mmのピンホールを抜けてくるビームのパワーはセンサーにより計測される。このパワーダンパーは最大20KWのレーザービームに耐えるように設計した。パワーダンパーを設け、大出力のビームを直接受けられる構造としたのはビーム伝送系（ミラー、半透鏡、チョッパー等）を簡単にし、そこに発生する光学的な歪²⁾の影響を少なくして、より正確なビームプロフィールを得るためである。

パワーダンパーは可動範囲が200×200mmのXYテーブル上に設置されており、後で述べるようにパーソナルコンピュータの指示によってパワーダンパーごとピンホールを移動させることができる。

2.2 信号処理系

本装置はピンホールの制御やパワーの測定、及び、データの蓄積をすべてパーソナルコンピュータにより行なうことを特長としている。信号処理回路の概念図をFig.2に示す。図中のセンサーはレーザービームのパワーを測定するためのもので、コヒーレント社の210型(1mV/W)を用いている。また、エンコーダはXYテーブルに内蔵され、ピンホールの位置の変化を電気信号に変換するためのものである。(0.1V/mm, リニアリティー±0.5%)

これらの信号はマルチプレクサによって、いずれかが選択された後、12ビットのA/D変換器

Fig.3 Block diagram of signal processing circuit.

によってデジタル量のデータとなる。

このデータはインタフェースにより³⁾ パーソナルコンピュータに取り込まれ、各種の情報処理、例えば、3次元表示や、断面表示が行なわれる。一度に取り込まれるデータ数はパーソナルコンピュータの記憶容量によって制限され、本実験では、1万点分のピンホールの位置とレーザーパワーのデータが取り込まれる。

一方、このインタフェースは、コンピュータからの指示によって、XYテーブルを駆動しているモータの回転方向の切り換えや、回転、停止を行なわせることができ、パーソナルコンピュータに測定範囲や、測定開始点等を指示してやれば、レーザービームの3次元強度分布の測定が自動的に行なわれる。

3. 実験及び結果

3.1 実験

アクリルバーンパターンによるレーザービームの強度プロファイルの測定における問題点を明らかにするため、前章で紹介したビームプロファイル測定装置により得られたレーザービームの強度プロファイルと、同時に得られたアクリルバーンパターンの形状との比較を行なった。この実験に用いたCO₂レーザーは三菱電機が製作しているもので、(ML10E2) 500Wレベルのシングルモードビームを出すことができる。Fig.3は実験の様子を示す写真で、左はレーザー発振器であり、中央右の棚にセットされているのはビームプロファイル測定装置である。この装置により自動計測が行なわれた結果は、図中

Fig.3 Experimental arrangement.

のCRTに表示される。

比較実験はレーザー発振器のビーム取り出し窓より、3 m、及び、10 mの位置において、レーザー出力を200 W、及び400 Wとして行なった。測定中、レーザー出力を発振器に付属しているパワーメータによりモニターし、出力変動のない事を確かめている。また、プロファイル測定装置による測定と並行して、同じ位置と出力で、アクリル板へのビームの照射時間のみを変え(1~15秒)、アクリルバーンパターンを取得した。

3.2 プロファイル測定装置の出力例

まず、ビームプロファイル測定装置によって得られた例をFig.4、に示す。この例は、500

Fig.4 Example of beam intensity profile.
SD CO₂ laser 500 W

Fig.5 Comparison between Gaussian profile and normalized beam intensity profile measured by our CO₂ laser.

WシングルモードのCO₂レーザーの強度プロフィールをCRT上に3次元表示したもので、測定領域は30×30mmである。

得られたプロフィールの断面形状をFig.5に示す。図中の実線は次式で与えられるガウシアンプロフィールにおいて、 $2\omega=8.6$ としたもの

である。

$$I = (2Q/\pi\omega) \exp(-2r^2/\omega^2) \quad (1)$$

上式で、 I はパワー密度、 Q はレーザーのパワー、 r はビームの中心からの距離、 ω はビームの半径である。実線で示されたガウシアンプロフィールと、200W、及び、500Wとした時の測定結果がよく合うことから、本実験に用いたレーザービームはガウシアンプロフィールを持ち、しかも、出力によるプロフィールの変化がないことがわかる。

3.3 アクリルバーンパターンの形状

Fig.6はアクリルバーンパターンの変化を示す例である。この写真は、400WのCO₂レーザービームをアクリル板に1～15秒照射した時にできたバーンパターンにシリコンゴムを流し込み、レプリカを取ったものである。写真より明らかであるが、照射時間が長くなるとレプリ

Fig.6 Replica of acrylic burn pattern Laser power; 400W Irradiated time; 1~10sec.

力は順次高くなる。しかし、同一のビームを照射しているにもかかわらず、その形は本来のガウシアンプロフィールからずれている。特に、レーザー強度の強いところに対応するレプリカ

の頂点付近は裂け目等の著しい変形が見られる。

このアクリルバーンパターンの断面形状をFig. 7に示す。この図はアクリルバーンパターンを自動走査ハイトゲージによりなぞったものである。図より、アクリルへの照射時間が長くなると、バーンパターンの形状は歪み、正しいビームプロフィールを反映していないことがわかる。

Fig. 7 Cross section of acrylic burn pattern
Laser power; 400W
Irradiated time; 1 ~ 10sec.

Fig. 8 Comparison of intensity profile with acrylic burn pattern in a normalized form.

3.4 ビームプロフィールとアクリルバーンパターン

アクリルバーンパターンの変形のし方を明らかにするため、Fig. 8では、プロフィール測定装置によって得られた正確なビームプロフィールにバーンパターンの断面形状を規格化して重ねたものを示す。図より、アクリルバーンパターンの変形は次の3つの傾向を持つことがわかった。

- (ア) レーザーを照射する時間が長くなると、ビームの強度プロフィールの胴にあたる部分の径が太くなる。
- (イ) レーザービームの強度プロフィールが急峻で中心の強度が高い時 (Fig. 8のa, b), バーンパターンの径は実際より太くなる。
- (ウ) レーザービームの強度プロフィールがなだらかで中心の強度が低い時 (Fig. 8のc, d), バーンパターンの径は実際より細くなる。

以上の様にアクリルバーンパターンは実際のビームの強度プロフィールと食い違い、しかもレーザービームのプロフィールによって、両者の差のあらわれ方に特徴があることが判明した。

次章では、強度プロフィールとアクリルバーンパターンの形状変化の原因を検討する。

4. アクリルバーンパターンの変形についての検討

4.1 入射角度の影響

アクリルはCO₂レーザービームのような赤外線をよく吸収する材料であるが、入射角度が大きくなると、レーザービームの一部は反射され、アクリルに吸収される割合が低下する。Fig.

Fig. 9 Angle of incidence vs reflectivity of acrylic plastic (From Ref.1).

Fig. 10 Relation between total input energy (PT) and the depth of acrylic burn pattern (D) at various points of a beam.

9 はアクリルへの入射角度と反射率の関係を文献¹⁾より引用したものである。図より明らかに入射角度が 70° 以上になると、反射率が急増している。

アクリルにレーザービームを垂直に入射させた場合でもアクリルが掘れるに従い、入射角度が 70° をこえることは容易に起こり得る。その場合、アクリルの吸収が減少して、蒸発する量が減少する他、反射光はバーンパタンの側面にあ

たるため、斜面が急になるのを助長し、アクリルパターンと実際のビームプロファイルとの間に差が生ずる。

次に、実際のバーンパタンの形状のデータを用いて、入射角度の影響を見る。Fig. 10は横軸に単位面積当りにアクリル板に投入されたレーザーのエネルギーをとり、縦軸には対応する点のバーンパタンの深さを示したものである。図中、アクリル板の同一点のデータは同じプロットで示した。また、図中の実線はアクリルに投入されたレーザーエネルギー密度と、アクリルバーンパタンの深さの間に次式のような比例関係があるとして、同じグラフ上に記入したものであり、特に $K=3.6 \times 10^{-3}$ と $K=1.4 \times 10^{-3}$ の場合について示している。

$$D(x) = K(x) \cdot P(x) \cdot T \quad (2)$$

式において、 D はバーンパタンの深さ、 x はアクリル板上の測定点、 K は比例係数、 P はレーザーのパワー密度、 T は照射時間、 PT の積は照射時間中にアクリル板の単位面積当りに投入された全エネルギーである。

図より、2つの事がわかる。1つは同じ点のアクリルの掘れ方はほぼ(2)式に従うということである。例えば、e点では $K=3.6 \times 10^{-3}$ とすれば(2)式の関係が成り立つ。他の一つは異なる点間においては K のとりべき値がばらつくということである。図において、 K の値は2倍以上の差が見られる。この K の値が測定点の関数となり、その結果、アクリルの掘れる深さ D も、測定点の関数となる。このことがアクリルバーンパターンが実際のレーザーの強度分布と食い違う原因となる。

さて、Fig. 10の例において K の値の変化の傾向を見ると、ビームのすそ部分、図中e点では K が 3.6×10^{-3} で最大となり、投入されたエネルギーの割にはアクリルの掘れ込み方が速いことを示している。そして、 K の値はビームのすそから中心に向うに従って(e→d→c→b)小さくなり、ビームの中心(a点)では再び大きくなる。そして、この傾向は、アクリルがいくら

か掘れた時の各測定点で観測される入射角の大きさと関係づけられる。例えば、図中の模式図に示したように、b, c, d点へのレーザービームの入射角はa, e点にくらべて大きくなっている。従って、前者の点での反射率は後者の点よりも大きくなり、レーザービームのエネルギーは反射によって失われ、アクリルの蒸発に寄与するエネルギーが減少する。そのため、b, c, d点では投入されたエネルギーの割にアクリルの掘れた深さが浅く、 K の値が小さくなる。

入射角度の影響にあられる例をもう一つ、Fig. 11に示す。図はビーム径が異なる場合について、ビーム中央でのアクリルの掘れ方を示したものである。この時、(2)式の K の値はビーム径が大きい方が大きい。この原因は、ビーム径が小さいと、バーンパターンの斜面は短い時間内に急になり、入射角度が増して、反射される割合が増し、蒸発する量が減少する他、反射光はバーンパターンの側面にあたるため斜面が急になるのを助長する。

以上のように、アクリルバーンパターンは、レーザービームの入射角度の影響を受ける。

Fig. 11 Relation between total input energy (PT) and depth of acrylic burn pattern (D) for various beam diameters.

4.2 しきい値の影響

ビームの強度プロフィールがなだらかで、中心の強度が低い時、バーンパターンの径は実際のビーム径より細い傾向があるが、これはアクリルの蒸発が始まるエネルギーにしきい値が存在するためである。たとえば、Fig. 12には、アクリル板が20 μ m掘れた点に相当するレーザービームの強度をしきい値として示したが、この図より次のような事がわかる。まず、しきい値が、レーザービームの照射時間とともに減少していること、さらに、しきい値にもビーム径の影響があらわれることである。図の例ではビーム径の太い時(図中白ヌキのプロット)しきい値が高い。この場合ビームのすそ付近のアクリルが蒸発しないため、バーンパターンの径は実際のビーム径より細くなる。

しきい値に上記のような傾向が生じるのは、アクリル板の温度がレーザーの照射時間とともに上昇すること、及び、円板の表面に同一パワーの熱源があるとする、熱源の径が小さいほど、温度上昇が大きく、蒸発しやすい状態となり、アクリルの蒸発のしきい値がみかけ上変化するためと考えられる。

4. おわりに

レーザービームの良質化の研究に用いるため、レーザービームプロフィール測定装置を開発した。この装置はピンホールをスキャンすること

Fig. 12 Variation of threshold power.

によりレーザービームの強度プロファイルを精度良く測定でき、得られたデータはパーソナルコンピュータにより解析することができる。

この測定装置により得られたビームの強度プロファイルのデータとアクリルバーンパターンとを比較したところ、入射角度、吸収、温度上昇、しきい値等の影響により、バーンパターンの形状が実際のプロファイルとずれることが明らかになった。特に、長時間照射した場合や、ビームのプロファイルがなだらかな場合には上述の影響が大きく、バーンパターンの形状は実際のビームの強度プロファイルから大きくずれる。アクリルバーンパターンをビームの評価に用いるとすれば文献¹⁾の様に、集光スポットの測定のようなビーム径が小さくて急峻なために、しきい値が無視でき、しかも、径のみを問題とする場合や、ビームの強度プロファイルの大雑

把な様子を知る場合に限られる。また、その場合でも、ビーム径が大きく異なる時は、プロファイルをくらべることができない。

ビームの良質化を計ったり、加工性能を議論できるデータを得るには、上述のような測定装置が必要である。

最後に本研究を進めるにあたり、有益な助言を下された当グループマネージャー永井治彦氏と、当部長の田畑則一氏に深く感謝します。また、実験に協力して下さった三菱電機名古屋製作所の臼井明氏、諸橋信孝氏や他の方々にも感謝の意を表します。

参 考 文 献

- 1) I. Miyamoto et al.: 3rd CIS FFEL (Lyon), (1983) 1.
- 2) C. A. Klein: Proc. Int. Conf. Lasers 78 (1978) 283.
- 3) トランジスター技術 July (1983) 236.
- 4) 竹内: "熱応力" 日新出版.