レーザーオリジナル

レーザー加工形状の数値解析 (第3報)

—レーザー加工時の反射, 通過及びプルーム透過後のレーザー光の観察—

渡部武弘*・吉田嘉太郎*・志茂主税**

(1987年11月19日 受理)

Numerical Calculation of Shapes Machined with Pulsed
YAG Laser (3rd Report)—Observations of Reflected Laser Light, Passed Laser Light and
Laser Light Transmitted through the Plume during Laser Machining—

Takehiro WATANABE*, Yoshitaro YOSHIDA* and Chikara SHIMO**

(Received November 19, 1987)

Construction of machining mechanism with laser beam is useful for deciding the algorithm in case of calculating the machined shapes. In the former paper, melting and removing processes were investigated through machinability of various metals with laser beam. In this paper, the mechanism was investigated through observations of various phenomena in laser machining. The results obtained are as follows. (1) The reflectivity of laser beam at the work surface decreased gradually with increasing the temperature of workpiece and rapidly with generation of a keyhole in the molten pool. (2) The diameter and the penetration speed of the keyhole were estimated by observations of laser light passing through the workpiece. (3) The speed decreased with an increase in the machined depth, and was influenced mainly by thermal diffusivity of the workpiece and melting point in case of low and high power density, respectively. (4) The plume produced with laser irradiation was observed by high speed photograph and the transmissivity of the plume was estimated by observations of laser light transmitting through the plume. (5) About 20% of laser beam energy was absorbed by the plume in pure aluminum and about 38% in stainless steel (SUS304) when the laser beam was irradiated with power density of 12.0MW/cm² and pulse duration of 4.5ms.

Key Words: Mechanism, Laser machining, Keyhole, Laser plum, Reflectivity.

1. 緒言

レーザー加工形状を数値解析により求める場合, アルゴリズムを決定するためにもレーザー加工のメカニズムは必要となる。レーザー加工

のメカニズムを解明する方法の一つに加工現象を詳細に観察し, 分析, 検討することがある。溶融・除去加工領域における加工現象としては, 材料内外でのレーザー光の挙動, 固相表面での加熱状態から溶融, 蒸発への相変化, 材料内部で

*千葉大学工学部機械工学科 (〒260 千葉市弥生町1-33)

**千葉工業大学経営工学科 (〒275 習志野市津田沼2-17-1)

*Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Chiba University (1-33, Yayoi-cho, Chiba, 260)

**Department of Management Engineering, Chiba Institute of Technology (2-17-1, Tsudanuma, Narashino, 275)

の溶融物質の挙動とスプラッシュ現象、キーホールの発生とその挙動、及び、ブルームの発生などが挙げられる。ここでスプラッシュとは、溶融層の中央部付近が更に加熱され、蒸発により発生した圧力により周囲の溶融物質を吹き飛ばす現象である。又、気化物質がレーザー光を吸収し、イオン化した低温プラズマ状態をブルームと呼んでいる。これらを観察し、測定する方法として、反射レーザー光や通過レーザー光の観察、高速度撮影によるスプラッシュやブルームの発生挙動、及び、レーザー光に対するブルームの透過率測定が考えられる。

反射レーザー光については、試料表面の溶融と溶融層中へのキーホールの形成により反射レーザー光が大きく減少することが示されている²⁻⁴⁾。試料裏面からの通過レーザー光については、溶接時⁵⁾や穴あけ時⁶⁾の観察結果が報告され、レーザー加工のメカニズムを解明する上での貴重な情報を提供している。レーザー加工時には高温を伴った現象が高速で発生するため、高速度撮影による手法も有効な手段で、これにより、スプラッシュの挙動^{7,8)}やブルームの発生挙動^{9,10)}も検討されている。

以上、加工現象については多くの観察結果が報告され、個々には多くの成果が示されている。しかし、反射や通過といったレーザー光の挙動や溶融、除去プロセスを総合し、加工メカニズムとの関係で検討したものは見当たらない。又、試料表面に到達するレーザーエネルギーも十分には算定されていない。

前報¹⁾では、レーザー加工のメカニズムを解明するために、熱定数の異なる各種金属に種々の条件の下にYAGレーザー光を1パルス照射し、形成された加工形状の変化より、溶融・除去の進行過程を明らかにした。

本報では、レーザー加工のメカニズムを解明する立場から加工現象を検討する。まず試料表面からの反射レーザー光の挙動を観察し、試料表面での状態変化を検討する。次いで、試料裏面からの通過レーザー光の観察により、キーホールの進行状態を明らかにする。更に、レーザ

ー加工に特有のブルームの発生挙動について、高速度撮影により観察するとともに、試作した光学系を用いてブルームの透過特性についても検討する。そして、以上の結果より試料表面に到達するレーザーエネルギーの算定を行い、吸収されるレーザーエネルギーを正確に把握する。

2. 実験装置及び方法

Fig. 1 は実験に用いた測定系の概略を示したもので、レーザー光はノーマルパルス発振するYAGレーザーである。検出器Ⅰはレーザー発振波形を、検出器Ⅱは試料裏面からの通過レーザー光を、検出器Ⅲは試料表面からの反射レーザー光を、そして、検出器Ⅳはブルームからの透過レーザー光を観察するものである。各検出器の前面には感度調整用の色ガラスフィルタと $1.06\mu\text{m}$ 光以外の光をカットするためのNBF(Narrow Band Filter)が設置されている。

測定結果に大きな影響を与える受光素子(SPD-111), NBF, コールドミラーの波長特性をFig. 2に示す。高パワー密度領域においては試料温度は高温になり、熱放射による各種測定波形への影響を防ぐため、NBFの特性は特に

Fig. 1 A system for measuring irradiated laser beam, passed, reflected and transmitted laser lights.

Fig. 2 Spectral sensitivities of silicon photo-diode (SPD-111), narrow band filter and cold mirror.

重要である。

実験用試料として SUS 304 と A ℓ (A1050) を用いた。集光レンズの焦距は 50mm であり、焦点位置は試料表面とした。

3. 実験結果及び考察

3.1 状態変化に伴う反射レーザー光の変化

Fig. 3 は試料表面での状態変化に対する反射レーザー光の変化を示したものである。同図(a)には用いたレーザー光の発振波形 (上段)と 100 % 反射レーザー光波形 (下段) を示す。同図(b)は 0.63 MW/cm² の低パワー密度でレーザー照射した場合の波形変化を示す。顕微鏡観察により表面に熔融層を生じない場合の変化を示したものである。レーザー照射初期においては発振波形とほぼ同様の变化を示しているが、レーザ

ー照射開始後約 1 ms 付近から反射レーザー光はゆるやかに減少している。これは、一般に言われているように、試料表面での温度上昇と酸化膜の形成により吸収率が増加したためである。

パワー密度を 0.73 MW/cm² に上げレーザー照射した場合の結果を同図(c)に示す。表面写真や断面写真により、試料表面のごく薄い層が熔融していることがわかる。このように、試料表面の熔融により、反射レーザー光は大きく減少することが確認された。

同図(d)はパワー密度を 1.22 MW/cm² にした場合の結果である。レーザー照射開始後、約 0.3 ms で試料表面が熔融し始めるとともに熔融層内にキーホールが形成され、反射レーザー光は急激に減少したことを示している。

更に、パワー密度を上げ 1.89 MW/cm² とし

Fig.3 Influence of machining situation on reflectivity (Material: Al050).

て照射した場合の結果を同図(e)に示す。レーザー照射開始直後に試料表面は溶融するとともにキーホールと除去層の形成により反射レーザー光は急激に減少している。そして、反射エネルギー

も非常に小さい値となっている。

以上のように、加工状態により反射レーザー光が変化することから、加工状態を常時モニタする手段に利用できるものと思われる。例えば、

Fig. 4 A definition of time in reflected and passed laser lights.

表面溶融を嫌う変態硬化のしきい値として反射レーザー光を利用することができる。

3.2 溶融開始時間とキーホール形成開始時間

Fig. 4 は通過レーザー光も含めて、反射レー

ザー光の時間変化を上記の検討から模式的に示したものである。 T_1 は試料表面が溶融し始める時間、 T_2 は溶融層中にキーホールが形成された時間を示す。 T_3 は試料裏面が溶融し、そこにキーホールが到達し、通過レーザー光が観察される時間、 T_4 はキーホールが閉じて通過レーザー光が観察されなくなる時間である。

Fig. 5 はパルス幅 τ を 2.5 ms、板厚 t を 0.6 mm、ディフォーカス量 Def を 0 mm とし、レーザー光を照射した場合のパワー密度による反射レーザー光（上側）と通過レーザー光（下側）の変化を示したものである。下段は反射レーザー光部分のみを10倍の時間軸で示したものである。Al, SUS 304 共に、レーザー照射開始と同時に反射レーザー光は増大し、レーザー光照射開始後約 $40 \mu\text{s}$ で最大値を示す。この時間 t_1 で試料表面の溶融が開始した事を示している。その後、反射レーザー光は急激に減少し、時間 t_2 で一定値となり、溶融層表面にキーホールが形成されている。

Fig. 5 Influence of power density on reflected and passed laser lights.

3.3 試料板厚による通過レーザー光の変化
 実験に用いた測定系 Fig.1において、試料を取り除いた状態でレーザー光を照射し、その時の波形高さ(検出器Ⅱからの出力)を発振波形(検出器Ⅰからの出力)の高さと一致するように調節し、これを100%通過の場合の値とする。そして、試料を置いてレーザー照射し、

得られた通過レーザー光の高さや、波形の面積により、種々の検討を行う。

Fig.6は試料板厚を変えた場合の通過レーザー光の波形をAlとSUS 304について示したものである。板厚0.1mmのAlにレーザー光を照射した場合、レーザー照射開始後0.2msでキーホールが試料裏面に到達する。その後は

Oscillated laser wave form
 (100% Transmissivity)

0.5ms/div

Fig. 6 Influence of plate thickness on passed laser light.

発振波形とはほぼ同様の变化を示し、ほとんど全てのレーザー光が通過していることがわかる。板厚が0.2 mmになると、レーザー照射開始後0.25 msでキーホールは試料裏面に到達する。その後の通過レーザー光中に認められる細かい変化はキーホールの径が拡大、縮小を繰り返しているものと推定される。レーザー照射開始後、約1 ms後に通過レーザー光は滑らかとなり、完全な穴あき状態になっていることを示す。

板厚が増加するとレーザー光通過開始時間は長くなり、変化の周期は大きく、通過レーザー光の強度差も大きくなっている。したがって、熔融金属は非常に大きな動きをしているものと思われる。板厚が1.0 mmになると通過レーザー光が零になる期間が存在し、キーホールの閉塞と開口を繰り返している。

一方、SUS 304 の場合には板厚が0.4 mm位までは、発振波形とはほぼ同様の变化を示している。これは、レーザー照射初期の0.2~0.4 ms間に貫通穴が形成され、その後はこの貫通穴を通してレーザー光が通過したためである。試料板厚が増加すると穴の貫通開始時間は遅くなっている。

Fig. 6 のAlとSUS 304の通過レーザー光波形の比較により、Alの場合は大きな振幅の変化を示し、SUS 304では滑らかに変化していることがわかる。SUS 304の場合には、一度形成された貫通孔は、熔融金属の表面張力が大きいので、常に開口したままの状態となっている。一方、Alでは、板厚の小さい場合、熔融金属が除去され、完全な穴あき状態となり、通過レーザー光変化は滑らかとなっている。しかし、板厚が増加すると熔融金属の加工穴内壁への付着量も増加する。熔融層中に形成された大きな径のキーホールも、表面張力の小さいAlでは、板厚上部の熔融金属は下方へ動き、キーホール径を小さくするため、通過レーザー光は減少する。キーホール径が減少し、レーザー光が照射されると、再び熔融金属は加熱され、蒸気圧力によってキーホールは拡大し、通過レーザー光も増加する。このような現象が短かい周

Fig. 7 Time needed for passing through a plate by the keyhole.

期で繰り返されるため、通過レーザー光の振幅に大きな変化が現れるものと推定される。

3.4 キーホールの進行速度

Fig. 7 はキーホールが試料の各板厚を貫通するのに要する時間 ($T_3 - T_2$) を示したものである。AlとSUS 304のいずれの場合にも、板厚とともに貫通に要する時間は増加している。そして、その増加傾向はSUS 304の場合の方が顕著で、板厚の増加とともにキーホールは通りにくくなっていることを示す。

そこで、各加工深さにおけるキーホールの進行速度を次に検討する。Fig. 8 は各板厚の差をそれに対応する所要時間の差で割った値を、その間のキーホールの平均進行速度とし、試料板厚とともに示したものである。板厚の増加、つまり、加工深さの増加とともに、キーホールの

Fig. 8 Penetrating velocity of the keyhole at each depth.

進行速度は減少していることがわかる。これは加工深さの増加とともに、加工穴側壁で吸収され、熱伝導により失われるエネルギーが増加すること、金属蒸気や溶融金属によりレーザー光の進行が妨げられ、加工点でのパワー密度が減少するためと考えられる。

Fig. 9は板厚を 0.6 mm一定とし、パワー密度を変えてレーザー照射した場合の実験結果より、板厚間でのキーホールの平均進行速度を求めたものである。パワー密度とともにキーホールの進行速度は増加する。特に、Alの場合はその増加傾向は顕著である。パワー密度が4.0 MW/cm²以上ではSUS 304の方がキーホールの進行速度は大きくなっている。これはSUS 304の熱拡散率はAlに比べ非常に小さいため、局部的に温度上昇し、沸点に達する。ここで発生した蒸発圧力により周囲の溶融金属を除去しながらレーザー光が進行していく。しかし、Alの場合には熱拡散率が大きいため、局部的に温度上昇しにくく、融点が高いにもかかわらず、キーホールの進行速度は小さくなっている。

しかし、パワー密度が4.0MW/cm²以上になると、そのパワー密度で低融点のAlを溶かすことができる。更に、熱拡散率が大きいため、溶融層の形成も速く進行する。ところがSUS 304の場合には、熱拡散率が小さいため局部的

に高温になり、ほとんどが除去層となっている。つまり、除去層を形成しながらの進行速度となり、Alの溶融層の成長速度よりは小さくなっている。

このように、レーザー光が試料板厚を通過するのに要する時間から求めたキーホールの進行速度は材料の物性値によって異なった意味を持つ。低融点、高熱拡散率のAlの場合、キーホールの進行速度は溶融層中に形成される速度である。一方、高融点、低熱拡散のSUS 304の場合は、除去層を形成しながらの進行速度であり、穴あけ加工における加工速度と考えることができる。実際に、この速度は穴あけ加工実験から求められた加工速度¹⁾とほぼ一致する。

3.5 キーホール径の変化

前項の通過レーザー光の観察において、通過レーザー光中の波形の変化はキーホール径の変化に対応していることを述べた。ここではそのキーホール径の変化を検討する。

実験に用いたレーザー光の強度分布はFig. 10に示すような裾のカットされたガウス分布¹¹⁾で示される。そこで、中心軸のまわりに回転したガウスビームの体積を V_0 、半径 r_1 までの回転体の体積を V_1 とすると両体積の比 A は次式で示される。

$$A = \frac{V_1}{V_0} = \left[1 - \exp\left(-\frac{n \cdot r_1^2}{r_0^2}\right) \right] / (1 - e^{-n}) \quad (1)$$

体積 V_0 はレーザー光が100%通過した場合の通過レーザー光の高さとする、体積 V_1 はその瞬間においてキーホール径 r_1 を通ったレーザー光の高さに相当する。したがって、通過レーザー光の高さと100%通過レーザー光の高さの比が A に相当するから、式(1)によりキーホール径 r_1 が求められる。これらの関係を示したのがFig. 11である。通過割合 A_1 が波形高さの比から求まると、その時のキーホール径 r_1 はFig. 11からも求まる。一方、式(1)を変形すると次式になる。

Fig. 9 Influence of power density on penetrating velocity of keyhole.

Fig.10 A method for calculating keyhole diameter based on profile of laser beam.

$$r_1 = \left[-\frac{r_0^2}{n} \ln \{1 - A(1 - e^{-n})\} \right]^{1/2} \quad (2)$$

この式を用い、通過レーザー光の高さと入射レーザー光の高さの比 A より r_1 を求めることもできる。

Fig. 12 は試料板厚を変えた場合のキーホール径と試料裏面での溶融径を示したものである。同図 (a) は Al の結果を示したもので、板厚の増加によりキーホール径は減少し、レーザー光は材料深部に到達しにくくなっていることがわかる。同図 (b) は SUS 304 の結果を示したもので、板厚の増加によりキーホール径は減少している。また、加工穴内壁に付着している溶融層の厚さは小さく、通過レーザー光の強度変化も小さいことを示している。

Fig. 13 はパワー密度とキーホール径や試料裏面での溶融径との関係を示したもので、パワー密度とともにキーホール径は増加している。こ

Fig.11 Relationship between diameter of keyhole and transmissive ratio.

れらの図によっても、Alの方がSUS 304より溶融層の厚さが大きいことがわかる。以上のキーホール径はレーザー照射中の波形変化から求めたものである。これは、試料の下に黒化印画紙を置き、得られたバーンパターンの径とほぼ同じ値になっていた。

3.6 溶融・除去特性との対応

加工実験から求めた溶融層、除去層の時間変化と本項で求めた反射レーザー光と通過レーザー光との対応を検討する。Fig. 14 はパワー密度 5.44 MW/cm^2 で板厚 0.6 mm の Al 板にレー

(a) Aluminum (Al050)

(b) Stainless steel (SUS304)

Fig. 12 Relationship among keyhole diameter, melt zone diameter and thickness of plate.

ザー照射した場合の結果である。同図(a)は、加工実験の断面形状変化より求めた溶融層と除去層の深さ変化を示したもので、二点鎖線が、深さ0.6 mmの位置を示している。

同図(b)は試料板厚0.6 mmのAl板にレーザー照射した場合の反射レーザー光と通過レーザー光で、同図(c)は反射光部分のみを時間軸で10倍に拡大して示したものである。レーザー照射開始後、約0.03 msで試料表面は溶融している。その後、溶融層を形成しながらキーホールが進行し、レーザー照射後約0.4 msで試料裏面に到達している。これは同図(a), (b)の両方から認められる。その後は厚さ約0.3 mmの溶融層を通してキーホール径の拡大、縮小が繰り返されている。

以上のように、波形の変化は加工の進行過程と概ね対応していることから、通過レーザー光

(a) Aluminum (Al050)

(b) Stainless steel (SUS304)

Fig. 13 Relationship among keyhole diameter, melt zone diameter and power density.

の測定により、加工の進行状態をある程度、把握できるものと思われる。

3.7 プルールの発生挙動

一般に、高パワー密度領域でのレーザー加工ではプルーフが発生し、加工効率を低下させると言われている。そのため、試料表面に到達するレーザーエネルギーを正確に算定するためにも、プルーフの発生挙動とレーザー光に対する透過特性を検討する必要がある。そこで、プルーフの発生挙動を高速撮影により観察し、材料の物性値との対応を検討する。次に、プルーフの1.06 μm 光に対する透過特性を調べるために試作した光学系を用いて実験を行い、材料物性値やパワー密度との関係を検討する。

Fig. 15はSUS 304にパワー密度2.44 MW/cm²でレーザー照射した場合の結果である。レーザー照射開始後、約0.05 msで試料表面

Fig.14 Relationship between growing processes of melt and removed depth, and reflected and passed laser lights.

は溶融し、キーホールが形成され、反射レーザー光は急激に減少する。同時に、自発光の中にブルームが発生し、初め急激に成長するが、その後は複雑な挙動を示しながら、ゆっくりと成長する。レーザー照射開始後 0.8 ms 付近で試料表面にキーホールが到達し、レーザー光が通過すると、ブルームは減少し始める。その後、ブルームの減少とともに溶融体除去によるスプラッシュが観察される。レーザー照射開始後約 3 ms でキーホールは閉塞している。

0.6 ms 付近ではブルームの成長は急激で、濃いブルームが形成されているものと思われる。濃いブルームに吸収され、試料面に到達するレーザーエネルギーが低下するため、試料からの金属蒸気の供給が減少し、ブルームも減少し始める。0.8 ms 付近からは試料裏面からのレーザー光通過により、更に金属蒸気の供給は減少し、ブルームは消滅するものと思われる。

Fig.15 Growing process of laser plume, and reflected and passed laser lights

3.8 プルームの透過特性

レーザー加工においては試料表面でレーザー光が吸収され、熱源となり、加工が進行する。熱伝導方程式を用い、加工形状を数値解析により求める場合には、試料表面で吸収されるレーザーエネルギーを正確に把握する必要がある。照射されたレーザーエネルギーのうち、試料表面からの反射エネルギーとブルームによる吸収を除いた部分が試料表面で吸収される。反射エネルギーについては反射レーザー光をモニターすることにより、比較的容易に求めることができる。しかし、ブルームにより吸収されるエネルギーについての系統的な研究は余りなされていない。そこで、ブルームの YAG レーザー光に対する透過特性を求めるために試作した光学系を用い、得られた測定値を高速撮影の結果、

プルームからの放射エネルギー変化、及び、試料裏面からの通過レーザー光と比較することにより、プルームの透過特性を検討する。

Fig. 1 に示した測定系において、ダイクロイックミラーからのわずかの透過光をハーフミラーにより更に分割し、プルームの透過特性を測定するためのレーザー光とする。ピンホール P_1 によりレーザー光を細く絞り、測定位置の分解能を高める。ピンホール P_2 はプルームからの熱放射エネルギーを極力押さえるものである。 P_1 と P_2 を通過したレーザー光の強度変化を検出器IVにより測定し、試料を置かずにレーザー光を照射した場合のレーザー発振波形の変化と比較することにより、レーザー光に対するプルームの透過率を検討する。その他の検出器によるレーザー光波形の測定と同時に、側面からの高速度カメラによるプルームの撮影及び、放射温度計によるプルームからの放射エネルギーの測定を行う。

Fig. 16 は板厚 1.0 mm の A1050 にパワー密度

を変えてレーザー照射した場合の実験結果である。①検出器Iからの入射レーザー波形、②検出器IVからのプルームを透過したレーザー波形、③検出器IIによる試料裏面からの通過レーザー波形を併記した。波形①と②のスケールを合わせて比較すると、両曲線間のドットで示した部分がプルームにより吸収されたエネルギーとなる。

放射温度計を用いて温度を測定する場合、被測定物からの放射率が必要になる。ところが、プルームからの放射率が不明であるため、放射エネルギーから温度へ変換することは不可能である。そこで、④は放射温度計からの出力をそのまま示した。 $H=3\text{ mm}$ はプルームによるレーザー光の吸収を測定するための $\phi 1.6$ のピンホールの高さで、波形②は試料表面から 3 mm の高さにおける透過状態を示すことになる。

パワー密度が 12.1 MW/cm^2 と大きい場合には、レーザー照射直後からプルームによるレーザー光の吸収が起り、約 0.37 ms で試料裏面にキ-

Fig.16 Influence of power density on various wave forms measured.

Fig.17 Influence of height from the surface of testpiece on various wave forms measured.

ホールが達した後もプルームによるレーザー光の吸収は続く。しかし、レーザー照射開始後約 1.5 ms でプルームによるレーザー光の吸収は終了する。パワー密度が低下すると吸収開始時間も遅くなり、吸収割合及びプルームからの放射エネルギーも減少する。

Fig. 17 はパワー密度を 12.0 MW/cm^2 一定とし、Al050にレーザー照射した場合での、試料表面からの高さ (H) による吸収特性の時間変化を示したものである。試料表面近傍においては、レーザー照射開始直後に大きな吸収傾向を示し、プルームからの放射エネルギーも非常に大きな値となっている。しかし、試料裏面にキーホールが到達し、レーザー光が通過し始めるとプルームによる吸収割合は急激に減少する。試料表面から離れるに従って、レーザー光の吸収開始時間は遅くなり、プルームによる吸収割合及びプルームからの放射エネルギーも減少する。

以上のことから、高パワー密度のレーザー光をAlに照射した場合、高エネルギー状態のプルームが形成され、レーザー光を吸収しながら上方へ移動することがわかる。

次に、透過レーザー光波形の面積を発振波形の面積で割り、プルームの透過率を求める。

Fig. 18 は試料表面からの高さ変化によるプルームの透過率を示したものである。試料表面からの各高さにおいて、Alの場合はSUS 304に比べ、高い透過率を示している。しかし、全体としてはほぼ類似の傾向を示し、表面からの高さとともに透過率は増加し、Alでは試料表面からの高さが10 mm付近で、SUS 304の場合は約20 mmで透過率は100 %となる。

Fig. 19 は $H = 3 \text{ mm}$ における透過率とパワー密度との関係を示したものである。パワー密度の減少とともにプルームの透過率は増加し、Alでは約 5.0 MW/cm^2 、SUS 304では約 1.5 MW/cm^2 で透過率はほぼ 100 %となる。

Fig.18 Influence of height from the surface of testpiece on transmissivity of laser plume.

Fig.19 Influence of power density on transmissivity of laser plume.

以上は一定の高さにおけるプルームの透過率変化を示したものである。次に、レーザー光路全体でのプルームに対するレーザー光の透過率を概算する。Fig. 20 はレーザー光路とプルームとの関係を模式的に示したものである。同時に、Fig. 18 で示された透過率変化を併記した。光路中の小円は測定用レーザー光を通すピンホール径 $\phi 1.6$ を示したものである。前図までの測定結果はこれら小円内でのレーザー光の透過率を示している。

プルーム下方では、ピンホール径はレーザー光路をほぼカバーしている。一方、プルーム上方では、ピンホール径はレーザー光路をカバーしきれないが、透過率はほぼ100%に近いことから、形状差による誤差は少ないものと考えら

Fig.20 An estimating method of total transmissivity of laser plume in a laser path and the results.

れる。又、レーザー光を吸収するプルームは集光レンズにより形成されるレーザー光路中でのみ形成され、レーザー光路をはずれると透過率はほぼ100%になることが本実験中に確認されている。

そこで、光路全体でのプルームを透過するレーザー光の割合は各点での透過率の積として求められる。このようにして透過率を求めると、Alの場合には入射レーザー光の約20%が、SUS 304の場合には約38%のレーザー光がプルームに吸収されたことになる。

4. 結 言

レーザー加工のメカニズムを解明するための基礎試料を得るために、レーザー加工時の諸現象を観察、検討した。最初に、試料表面の状態変化を反射レーザー光により検討した。次いで、試料裏面からの通過レーザー光の観察結果より

キーホールの挙動を検討した。最後に、レーザー加工に特有のブルームの発生挙動とその透過特性について検討し、得られた結果をまとめて次に示す。

- (1) 試料表面の温度上昇とともに反射率は徐々に減少する。
- (2) 溶融層中にキーホールが形成されると反射率は急激に減少する。
- (3) 溶融層中のキーホール径を実験結果を基に推定することができた。付着している溶融層厚さが大きい場合には、その径の変動も大きい。
- (4) 試料内部でのキーホールの進行速度は深さの増加とともに減少し、同じ深さではAlの方がSUS 304より進行速度は大きい。
- (5) キーホールの進行速度を左右する主因子は、低パワー密度では熱拡散率、高パワー密度では融点である。
- (6) ブルームの形成には多量の金属蒸気が関与している。主として溶融体で除去される材料や金属蒸気が多く発生しない低パワー密度領域では、加工に影響を与えるブルームは形成されない。例えば Al では、 5.0 MW/cm^2 、SUS 304 では 1.5 MW/cm^2 以下ではブルームの透過率は100 %となっている。
- (7) ブルームの透過率を求めることができた。

例えば、パワー密度 $W=12.0 \text{ MW/cm}^2$ 、照射時間 $\tau=4.5 \text{ ms}$ で1パルス照射した場合、Al では約20 %、SUS 304 では約38%のレーザー光がブルームに吸収されている。

本研究を遂行するに当たり、貴重な御助言をいただいた東京大学生産技術研究所第2部教授佐藤壽芳博士、工業技術院電子技術総合研究所電子加工研究室長池田正幸博士に、厚く御礼申し上げます。最後に、実験に協力いただいた千葉大学卒業生森田 昇、青木 康、田代芳夫、和田政也の各氏に感謝いたします。

参 考 文 献

- 1) 渡部, 吉田, 志茂: レーザー研究, **15**, (1987) 1073.
- 2) T.E. Zavecz et al.: Appl. Phys. Lett. **26** (1975), No. 4, 165.
- 3) M.V. Allmen et al.: IEEE J. Quantum Electronics **QE-14**, (1978) 85.
- 4) C.T. Walter: SPIE **198** (1984) 109.
- 5) 吉岡, 宮崎, 宮部: 千葉工業大学研究報告理工編. (1973) 41.
- 6) J.S. Pearlman et al.: Appl. Opt. **16**, (1977) 2328.
- 7) 加藤, 高増, 大園, 植村: 精機学会秋季大会学術講演論文集. (1983) 105.
- 8) T. Miyazaki et al.: Annals of the CIRP.
- 9) R.L. Stegman et al.: J. Appl. Phys. **44** (1973) 3675.
- 10) 有安, 鱈, 松縄, 片山: レーザー研究, **15** (1987) 721.
- 11) 渡部, 吉田, 志茂: レーザー研究, **14** (1986) 965.