



Title	レーザー加工の研究 : 微小穴あけ加工特性について
Author(s)	草薙, 典子; Kusanagi, Noriko; 勇田, 敏夫 他
Citation	北海道大學工学部研究報告, 52, 31-46
Issue Date	1969-03-20
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/40929
Type	departmental bulletin paper
File Information	52_31-46.pdf



レーザー加工の研究
—微小穴あけ加工特性について—

草 薙 典 子*

勇 田 敏 夫*

佐 藤 敏 一*

(昭和43年11月26日受理)

A Study of Laser Machining
—On Micro Drilling Characteristics—

Noriko KUSANAGI

Toshio YUTA

Toshikazu SATO

(Received November 26, 1968)

This paper describes some experiments on drilling by laser machining using steel as the specimen. The results obtained are as follows :

1. When the work surface is set inside of the focal plane, the drilled hole resembles a cone, and when set on the focal plane or outside of it, the hole resembles a cylinder. As regards the depth of the hole, the former was deeper than the latter.
2. When a single laser pulse is repeated to the same working point in a sequence, the hole becomes deeper, and the depth reaches a certain limit.
3. When the work surface is set close to the focal plane, the depth and the mass removal increase with the increase in the output energy, but the hole diameter on the surface remains almost constant.
4. The thickness of the hardened surface layer caused by laser machining varies with the output of energy and the number of pulses.

目 次

1. 緒 言	32
2. 実験装置と実験方法	32
2. 1. レーザー加工機	32
2. 2. 実験方法	34
3. 実験結果と考察	34

* 精密工学科 精密加工学第二講座

3. 1. 焦点に対する試料面位置と加工状態	34
3. 1. 1. 加工形状	35
3. 1. 2. 加工穴の径と深さおよび加工量	35
3. 1. 3. 加工変質層	38
3. 2. レーザー出力と加工状態	39
3. 3. くりかえしレーザー照射による加工状態	42
3. 4. 考 察	42
4. 結 言	45

1. 緒 言

最近の電子工業，宇宙工業などの発展に伴って，特殊材料についての特殊加工法の必要性が増大している。電子顕微鏡のレンズ絞り，カラーテレビのブラウン管シャドウマスク，電子銃グリッド，放射線スリット，極細線製造用ダイス，化学繊維噴出ノズルなどの微小孔加工もその一環であり，それらは材料的にも寸法的にも，従来のドリルによるせん孔加工法では不可能または非常に困難な場合が多い。微小孔は穴径と深さとの比が大きく，ドリル加工では切屑の排除や真直度の確保が困難であり，一方薄板の穴あけでは，推力に伴う材料の変形，貫通側のまくれ，かえり，欠損などが生じ易い。また難削材料の加工や異形穴の加工など，ドリルでは達成できない問題が多い。

微小穴あけ加工のこれらの諸問題に対して，近年急速に進歩した電解加工，放電加工，超音波加工，電子ビーム加工，レーザー加工などの特殊加工法が次第に重要視され，すでに実用化されているものもある。特に電子ビーム加工やレーザー加工は，高エネルギーを加工物の微小部分に容易に集中できるため微小加工に適している。

レーザー加工は，電子ビーム程の微小加工ができない事や，ビームの方向のコントロールが難しいなどの欠点を持つが，電子ビーム以上の高エネルギー密度が容易に得られ，大気中で加工できることや非電導性の物質にも加工できるなどの利点を持っている^{1),2)}。最近では微小溶接への研究が行われている³⁾が，エネルギー密度や照射時間などの点で穴あけ加工と関連している部分も多い⁴⁾。しかし，レーザー加工は電子ビーム加工より歴史が新しく，開発途上にあり，加工機構，応用面など検討すべき点が多い。

そこで本研究は，レーザー光による微小穴あけ加工を行ない，最適加工条件を求めるために，穴あけ加工特性を支配する要因を実験的に検討した。

2. 実験装置と実験方法

2. 1. 実 験 装 置

2. 1. 1. レーザー加工機 本実験に用いられたレーザー加工機(図1)は東京芝浦電気株式会社製のLAR-107型であり，主な仕様は次のとおりである。

発振光波長	6943 Å
出力エネルギー	Max. 15 Joule
ビーム拡がり角	7~15 m rad.
パルス幅	0.5 m sec.
ルビー	15 mmφ × 150 mm Cr ³⁺ 濃度 0.05%
Xe フラッシュランプ	直線型 定格入力 5000 Joule
エネルギー蓄積用コンデンサ	1200 μF
加工用集光レンズ	f = 20 mm 15 mmφ 石英製

2. 1. 2. 発光模様 レーザー光はルビーの端面全体からでるのではなく、中心附近の一部に限ることが多い。そしてその direct pattern, near field pattern, および far field pattern により、レーザー光のコヒーレンシーの良否が異なり、また加工に際しての集束スポット径と形に影響を与える^{3),6)}。そこで、ルビーの発光状態を知るために direct pattern を撮影した。(図2)

撮影条件 出力 約 1.5 J
フィルム ネオパン F
光共振器からの距離 約 20 cm

写真から明らかなように、ルビーの発光は端面全体からではなく、中央部のまゆ状の部分だけが発光している。なお、この direct pattern は出力の極めて小さい時のものであるが、出力が 4 Joule 程度の時も、模様の形としては似た傾向を示した。

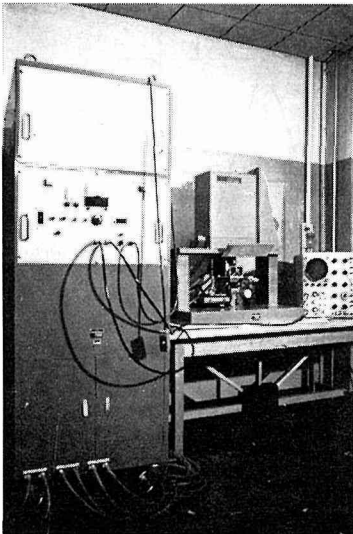


Fig. 1. Laser machining device.

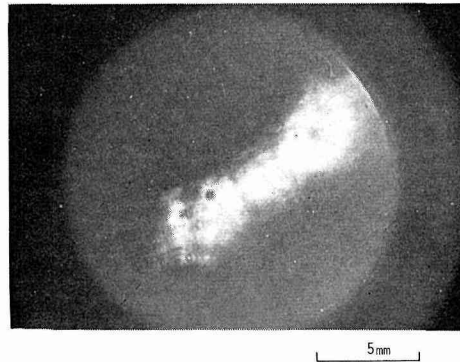


Fig. 2. Direct pattern, output 1.5 Joule.

2. 2. 実験方法

実験は、図3に示される載物台の光軸上に加工物を固定し、レーザー光を照射して行った。加工の際に加工物から除去される蒸発物や溶融物が、集光レンズの表面に付着するのを防ぐため、加工物とレンズの間に2枚のレンズ保護用ガラスを取りつけ、そのうちの加工物側のガラスはレーザー照射ごとにとりかえた。焦点に対する加工面の位置は、集光レンズ枠の端面を基準としてブロックゲージとダイヤルゲージを用い、任意に設定した。なお実験回数は、同一条件に対して20個行った。レーザー光の出力エネルギーの調節は入力電圧を変えて行い、校正曲線からエネルギーを求めた。

試料は構造用炭素鋼 S 35 C であり、加工面積を $10\text{mm} \times 20\text{mm}$ (厚さ 10mm) にとった。加工面を研削仕上げし、その平行度は加工面の位置決めのため 5μ におさえた。

次に加工穴径の測定は、表面に付着する溶融固着物をエメリー紙 #1000 で注意深く研磨した後、オリンパス工具顕微鏡で行った。穴の形状が楕円に近い場合、長径と短径を測定しそれぞれの20個の相加平均値をとった。又、穴の真円度の一つの表示として、長径と短径の比をとった扁平率を求めた。加工穴の深さの測定も工具顕微鏡で行ったが、穴の途中がふさがっている場合はこれを除いたものの平均値をとった。加工量の測定は、加工前の試料の重量と加工後の重量の差で求めたが、加工後試料の表面上に飛散した部分は取り除いてから測定した。この加工量とは別に、表面上に飛散した部分をそのままにした加工前後の重量の差を消耗量となぜけた。

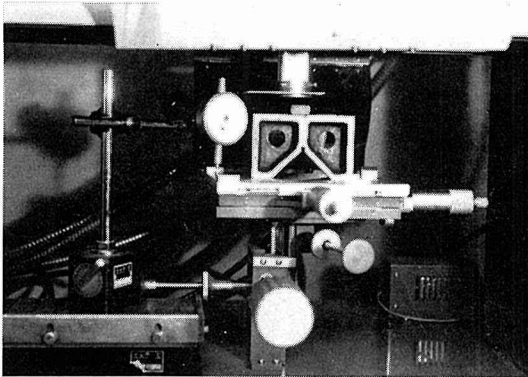


Fig. 3 a. Working table.

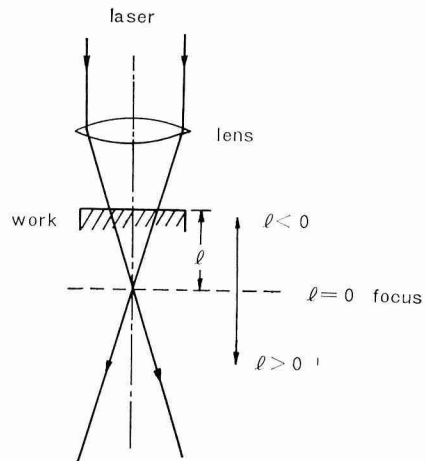


Fig. 3 b. Position of work surface.

3. 実験結果と考察

3. 1. 焦点に対する加工面位置と加工状態

加工面にレンズの焦点を結ばせレーザー光を照射すると、図4に示されるような加工穴が得られる。写真から観察されるように、溶融した金属が噴出して穴を形成すると共に表面上にも飛散する。図5は加工後のレンズ保護ガラスの状態を示すが、このように蒸発、飛散した金

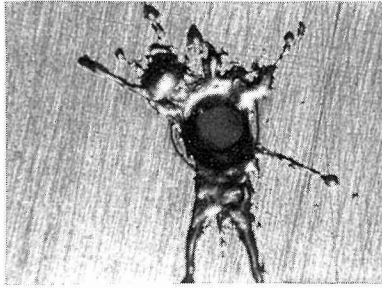


Fig. 4. Plane view of worked hole.
output 6.3 Joule $\ell=0$ mm

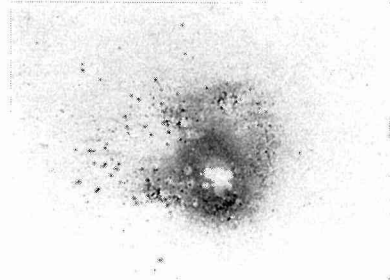


Fig. 5. Dispersion on a cover glass.

属が付着している。このようにレーザー加工はビームを光学レンズで集光して加工面にエネルギーを集中し、熔融、蒸発させる熱加工であるから、加工面の、焦点からの位置により加工状態が大いに影響される。

3. 1. 1. 加工形状 図6はレーザー光出力を 6.3 J に一定とし、加工面の位置を焦点から任意に変えて加工した表面写真である。写真から明らかなように、焦点附近では穴あけ加工されるが、加工面が焦点よりはなれるに従い、表面に熔融痕が残るだけで穴あけはされない。しかし、図7と図8に示されるように、表面観察では熔融痕しか観察されないが縦断面をとると穴あけされている場合がある。この状態は加工面が焦点の外側の位置にある場合多く観察されるので、これは、穴の底部附近に達するレーザーのエネルギーが小さい場合、加工された物質を穴の外部まで飛び出させるだけのエネルギーを持たないためと考えられる。また加工穴の表面における形状は完全な円ではなく、楕円に近い形をしているが、これはダイレクトパターンから観察されるように(図2)、ルビーの発光模様が円形でなくまゆ状をなしているためと考えられる。穴の真円度の一つの表示として、穴を楕円と見なし短径と長径の比をとり、焦点に対する加工面の位置との関係を求めたのが図9である。加工表面における穴の形状は、加工面の位置が焦点よりわずかに内側にある時最も発光模様の影響が少なくなる。

次に、穴の縦断面をとり深さ方向の穴の形状を観察し、スケッチすると図10のようになる。加工面が焦点の内側にある時円錐状に穴けられる。焦点面に位置する場合ほぼ一様な径に穴けられるが、中太の傾向にある。焦点の外側では、中太の位置が表面に近づいている。(図10c) 穴の任意の深さにおける横断面形状を観察すると(図11)、内部に入るに従い一度扁平率が大きくなるが、再び円形にもどり、中太の部分はほとんど真円に近づいている。

3. 1. 2. 加工穴の径と深さおよび加工量 図12は加工表面で測定した穴径と焦点に対する加工面位置との関係で、長径、短径いずれも焦点面で最小値を示し、焦点からはずれるに従い増大している。図13は加工深さと焦点に対する加工面位置との関係を示す。 $-0.6 \leq \ell \leq +0.8$ では ℓ の減少とともにほぼ直線的に増加するが、 $\ell < -0.6$ では急激に浅くなっている。次にレーザー加工により除去される量と加工面位置の関係を求めると図14のようになる。加工面

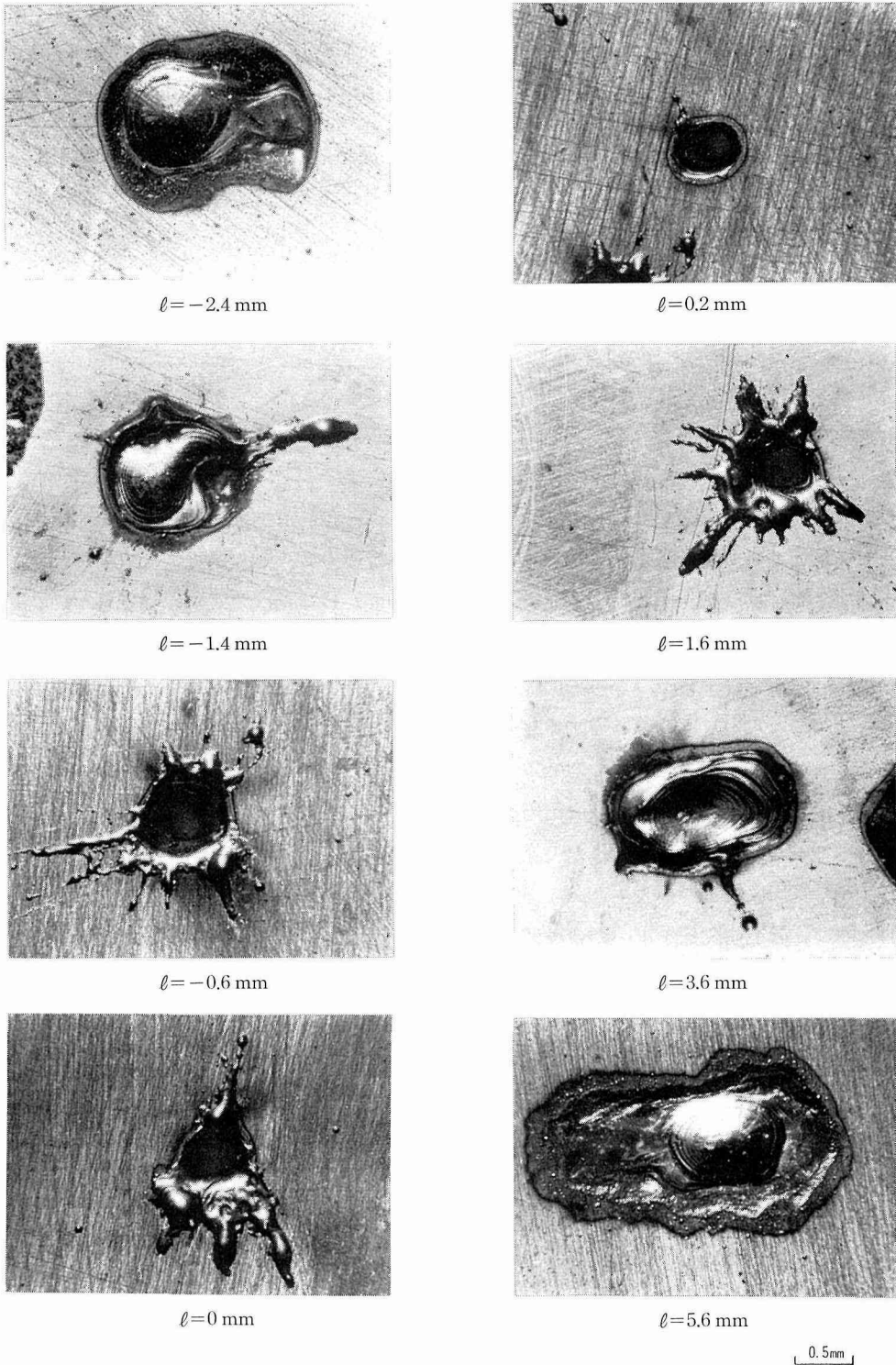


Fig. 6. Plane view of holes versus position of work.



Fig. 7. Plane view of hole closed halfway.
output 6.3 Joule
 $\ell=0.2$ mm

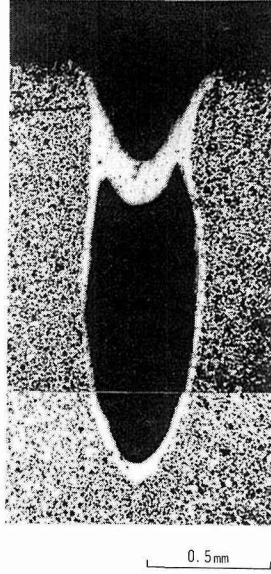


Fig. 8. longitudinal section of hole closed halfway.
output 6.3 Joule
 $\ell=0.2$ mm

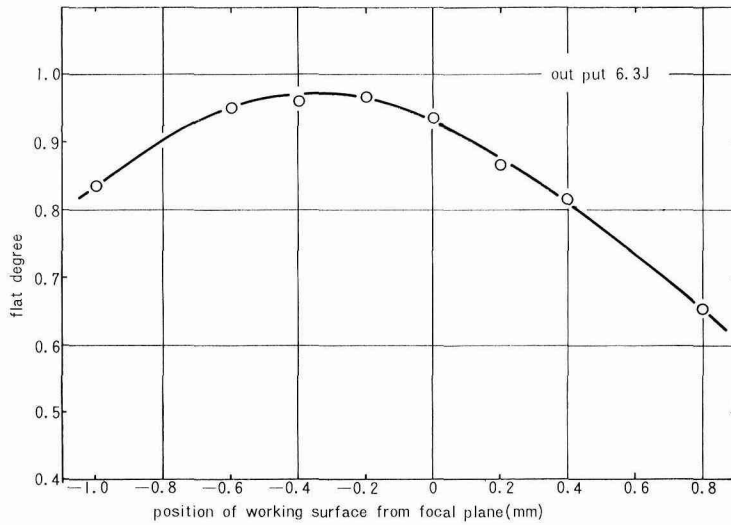


Fig. 9. Relation between position of work surface and flat degree.

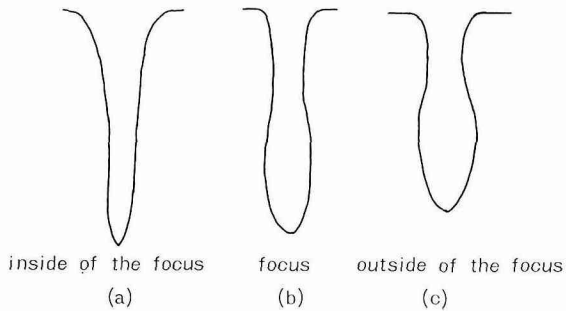


Fig. 10. Longitudinal section versus position of work.

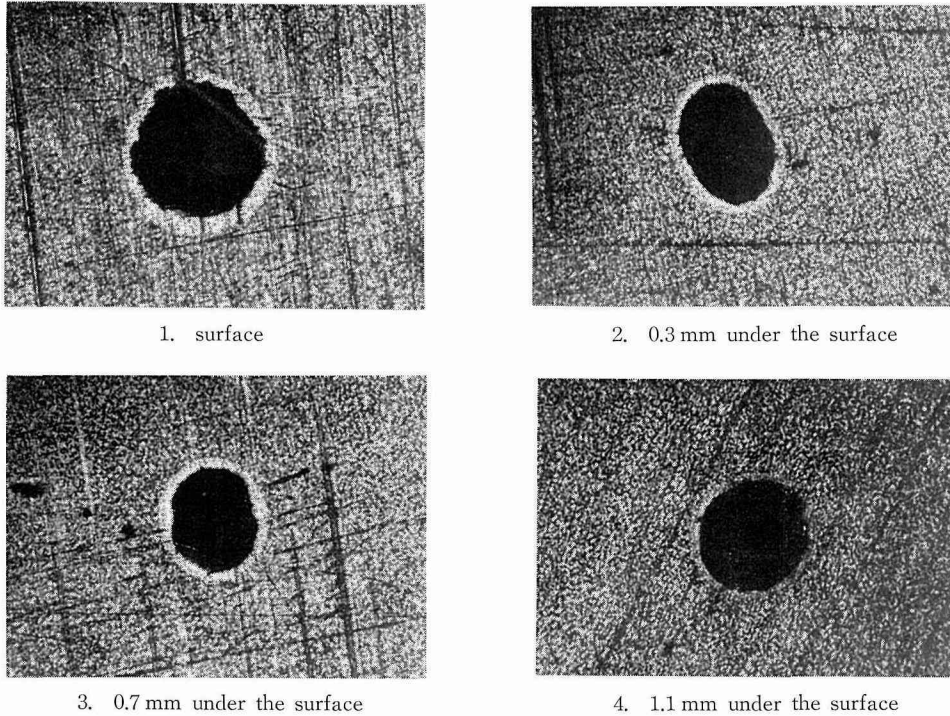


Fig. 11. Cross section of a holes.
output 6.3 Joule $\ell = -0.2$ mm

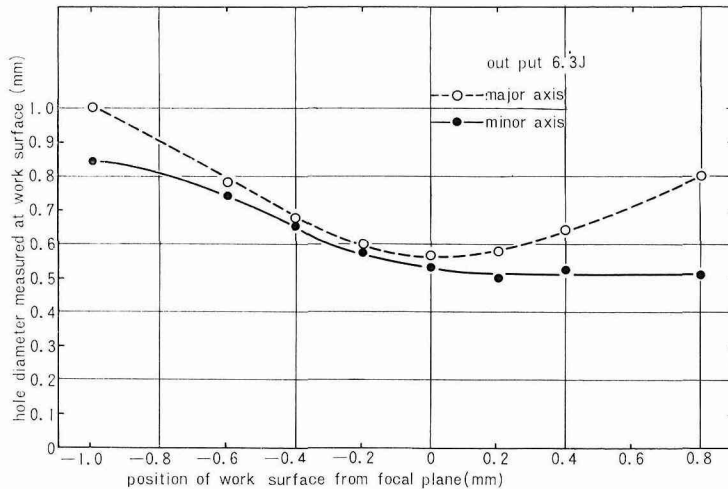


Fig. 12. Relation between hole diameter and position of work surface.

の位置が焦点に近づくに従い急増して、焦点の内側 0.2 mm の位置が最大を示し、焦点の外側にはなれるに従い漸次減少している。

3. 1. 3. 加工変質層 レーザー加工は微小部分に高エネルギーを集中して熱加工するため、急熱急冷による変質層が生ずる。図 15 は $\ell = 0$ mm, 出力 6.3 Joule の加工条件の縦断面写真

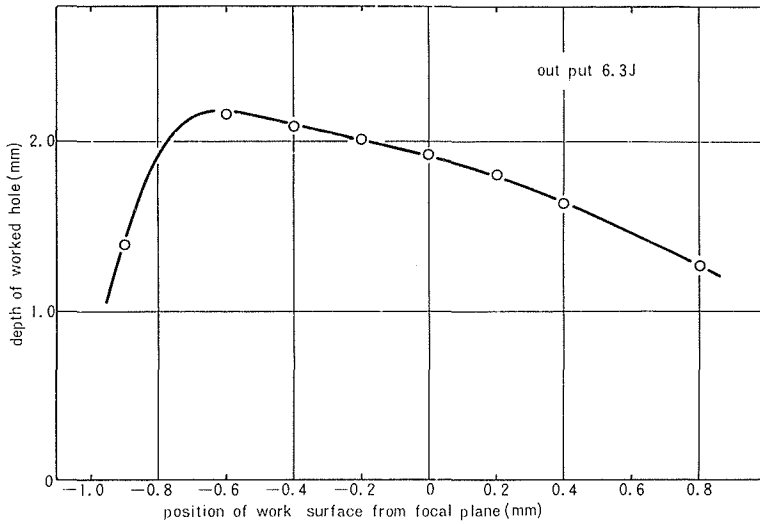


Fig. 13. Relation between hole depth and position of work surface.

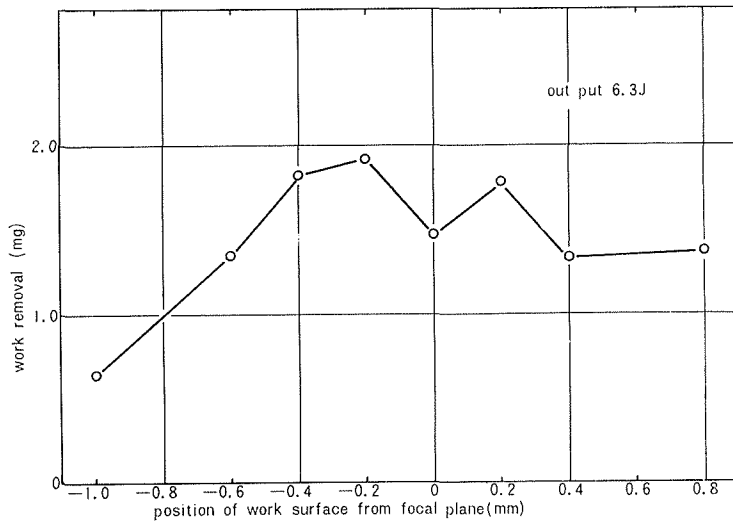


Fig. 14. Variation of work removal due to position of work surface.

で、穴の形状どおりほぼ一様な厚さで加工変質層が生じている。加工面の位置と加工変質層の厚さとの関係を探ると、加工変質層の厚さは、加工面位置によらずほぼ一定であり、その厚さは $40\sim 50\ \mu$ であった (図 16)。なお厚さの測定は加工穴の縦断面から求めたが、穴の入口から $0.5\ \text{mm}$ 、穴の底から $0.3\ \text{mm}$ を除いた部分について、各穴 4 点ずつ求めた最大値と最小値である。加工変質層の性状を調べるため微小硬度計による硬度を測定したが、内部素地 $Hv\approx 190$ に対し、加工変質層は、 $Hv\approx 700$ と高い硬度を示している。

3. 2. レーザー出力と加工状態

図 17 は、加工面の位置を焦点附近 ($l = -0.2\ \text{mm}$) にとり、レーザー出力を変えて加工し

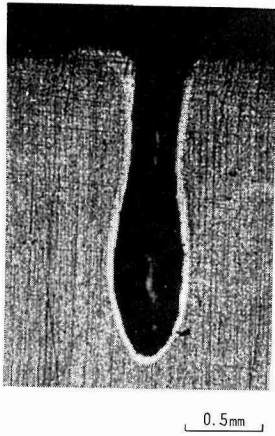


Fig. 15. Surface layer caused by laser machining. output 6.3J $\ell=0.0$

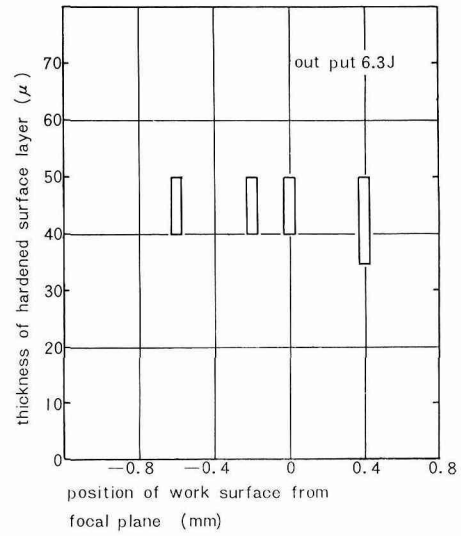


Fig. 16. Thickness of surface layer versus position of work surface.

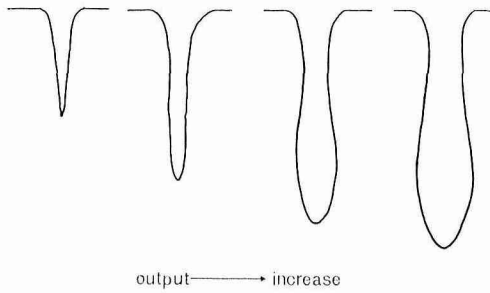


Fig. 17. Longitudinal sections versus output energy.

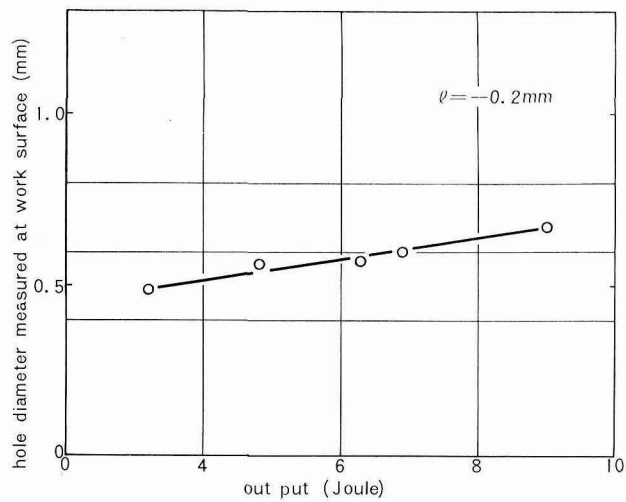


Fig. 18. Relation between hole diameter and output.

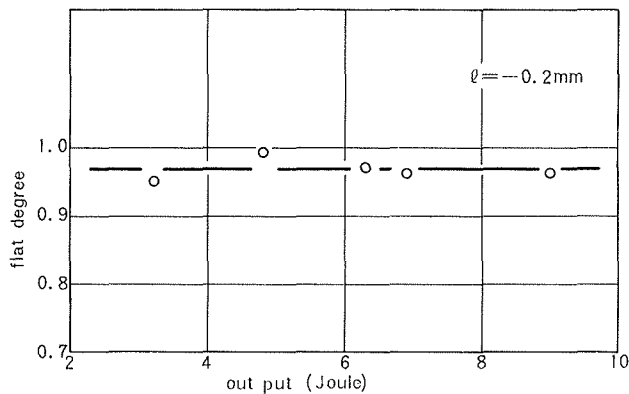


Fig. 19. Flat degree versus output.

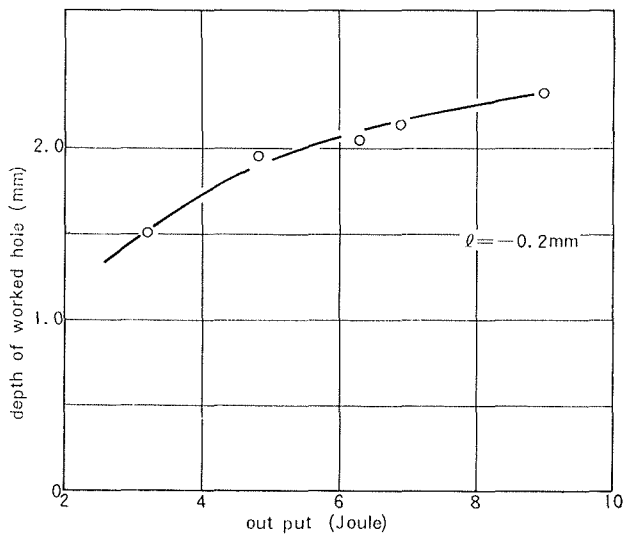


Fig. 20. Relation between hole depth and output.

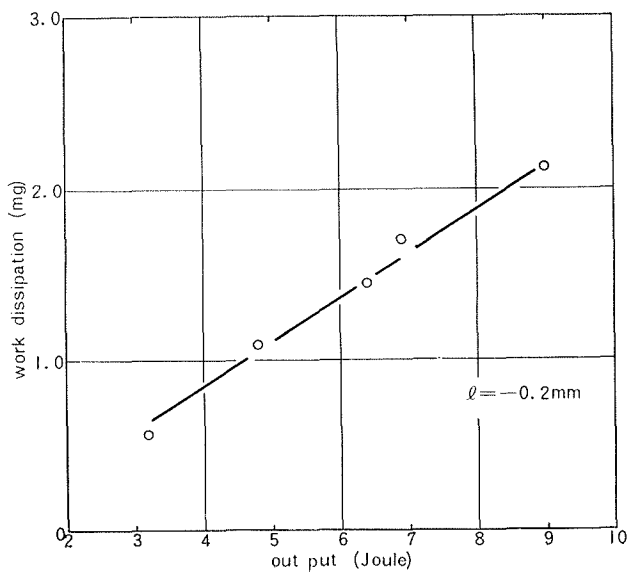


Fig. 21. Relation between dissipation and output.

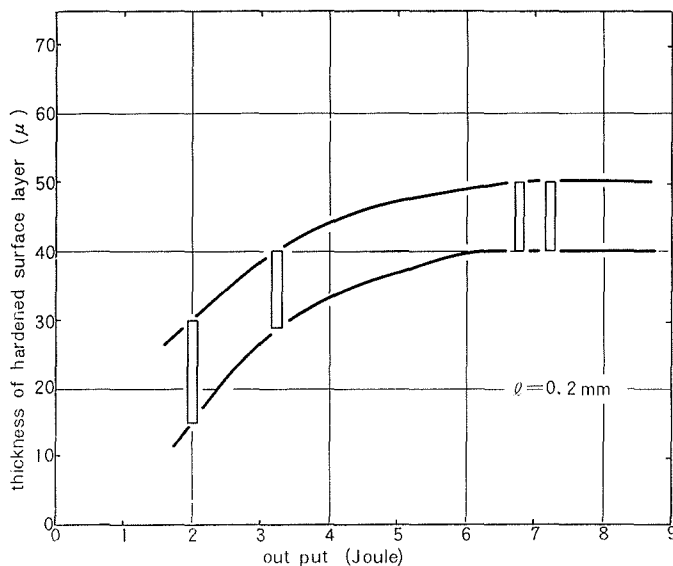


Fig. 22. Thickness of surface layer versus output.

た場合の縦断面の模型図で、出力が小さい場合は円錐状であるが、出力が増大するに従い、中太から円筒状になっている。次に出力と加工穴径の関係は、図 18 に示すようにほぼ直線的に増加しているがその増加率は小さい。また表面における穴の横断面形状も、図 19 に示されるように出力にほとんど影響されない。これに対し穴の深さは出力に影響され、図 20 に示されるように増加している。また試料の消耗量も出力の増加とともに直線的に増加する。次に、レーザー出力が大きい程加工物内部にまで熱加工の影響がおよぶため、加工変質層が厚くなっている。(図 22)

3. 3. くりかえしレーザー照射による加工状態

前節までは、ただ一回のレーザー照射による穴あけ加工を行った結果であるが、同一加工穴にくりかえしてレーザーを照射した場合には図 23 で示されるように、穴の表面での径はほとんど変化しないが、穴の形状は、レーザー照射のくりかえし回数が増える程中太の部分が円筒状に深く伸び、加工深さが深くなる傾向にある。加工深さとレーザー照射のくりかえし回数との関係を求めると図 24 のようになる。図から明らかなように、くりかえし回数が少ない間はくりかえし回数とともに穴が深くなるが、くりかえし回数が増えるとほとんど穴の深さは変化しなくなる。加工変質層の厚さを調べると、壁面では図 25 のように初め増加するが回数が大きくなると一定となり、底部では図 23 に見られるように著しく厚くなっている。

3. 4. 考 察

以上の結果から、レーザー加工による穴あけ加工機構について定性的に次のことが考えられる。

レーザー光は、実際には一回の照射時間中多数のスパイク状発振が起っているが^{7),8)}、近似的に連続光として考えることができる⁹⁾。レーザー光の照射により穴あけ加工される場合、

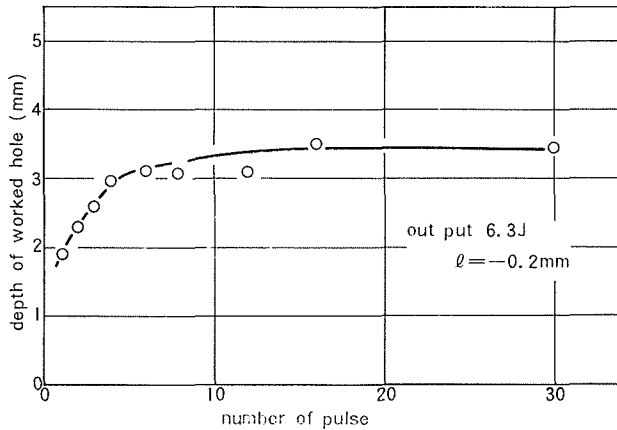


Fig. 24. Relation between hole depth and number of pulse.

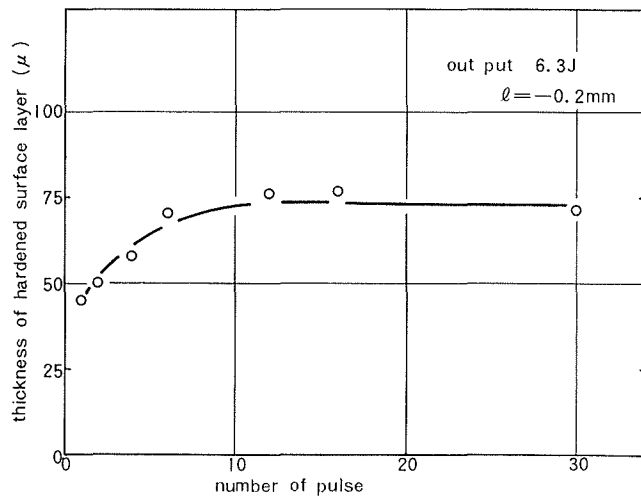


Fig. 25. Relation between thickness of surface layer and number of pulse.

焦点をすぎるとレーザー光のエネルギー密度はだんだん小さくなり、壁面に妨害されてビームスポットも小さくなるために径は細くなる。一方穴の表面付近では、弱いレーザー光ではあるが発振時間中を通して照射されるので、径は徐々に広がる(図 27)。加工面が焦点にある場合、穴あけの過渡的現象と、レーザー光が直接照射されることにより、焦点面における穴の径は、上述の場合より幾分広がるであろう。穴あけが進むにつれてスポットが大きくなりエネルギー密度の小さなレーザー光が照射されるため、深さ方向の加工速度が上述の場合より小さくなり、壁面方向の熱伝導と重なって、深さがやや浅く内部の径のやや大きな加工穴となる。加工面が焦点の外側にある場合も同様に考えられるが、レーザー光のエネルギー密度が小さいので、加工された穴は深さが浅く、全体的に径の大きな穴となる。

微小穴あけ加工の際に望まれる一般的な形状としては、真円であること、円筒状であること、径に対して深さが大きいことなどであるが、実際に穴あけ加工する場合必ずしもこれらの条件を全部満足させる必要はなく、これらのうちのいくつかが特に要求される場合が多い。

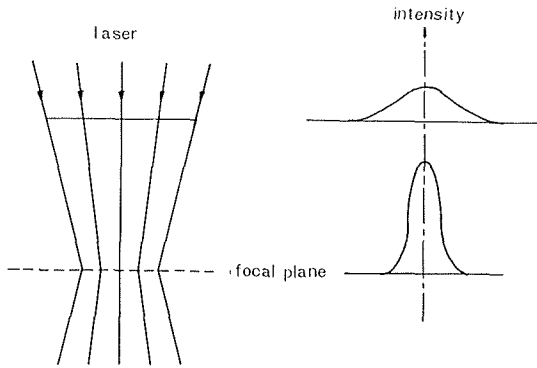


Fig. 26. Distribution of laser intensity.

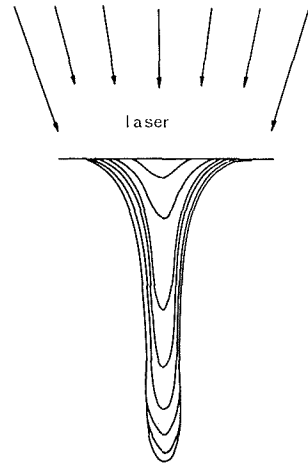


Fig. 27. Situation of worked holes with proceeded depth of cut.

レーザー加工では、レーザーの出力および加工面の位置により加工穴の形状が上述のように大きく異なってくるので、要求される条件に適する加工条件を任意に選ぶことができる。例えば、穴の形状よりも、大きな深さを必要とする穴あけ加工には、出力を大きくし加工面を焦点の内側へ設定すればよく、また薄板に真円度の大きな円筒状の穴を必要とする場合には、薄板の両側を他の薄板ではさんだ上、焦点面附近で加工すればよい。

4. 結 言

レーザービームによる微小穴あけ加工を行ない穴あけ加工特性を検討した結果、次のような結論が得られた。

(1) 加工穴の形状は焦点に対する加工面の位置により影響される。すなわち、加工面が焦点の内側にある場合、加工穴は入口で広く奥へ入ると狭くなり、加工面が焦点近くでは円筒状に近くなり、また焦点の外側の位置では入口のくびれた中太の加工穴となる。

(2) レーザーの出力が一定の場合、加工穴の深さは、加工面の位置が焦点より若干内側にある場合最大となり、また表面における穴の径は焦点附近で最小となる。

(3) レーザー出力の増加にともない、加工穴の深さと加工量とはともに増大するが、表面における加工穴の径はほぼ一定の傾向を示す。

(4) 同一個所に対してレーザーの照射回数を増加してゆくと、照射回数が少ない間は深さと加工変質層の厚さは増大するが、回数が多くなると飽和に近づく傾向がある。しかし加工穴の径はほとんど変化しない。

最後に、実験の遂行に協力された山本正興氏、高橋義美氏、並びに卒論学生一戸俊朗君に厚くお礼申し上げます。

文 献

- 1) 難波 進: エンジニア, (1962), 9, p. 40.
- 2) 難波 進: 金属, (1966), 3, p. 48.
- 3) K. J. Miller, and J. D. Ninnikhoven: (1965), 8, p. 120.
- 4) 中山・井田・朝川: 電気通信研究所調査資料, (1965), 86, p. 5.
- 5) 花田・朝倉: 応用物理, 32 (1963), 7, p. 454.
- 6) 龍岡静夫: 応用物理, 32 (1963), 7, p. 478.
- 7) 難波・金・日置・益田・高橋: 理化学研究報告, 39 (1963), 3, p. 131.
- 8) 日本物理学会: 量子エレクトロニクス, (1967), p. 129, 朝倉書店.
- 9) 中山・浅川・柏原・中島: 電気通信研究所成果報告, (1967), 3264.
- 10) David L. Williams: SAE Journal, (1964), 5, p. 60.