



HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	レーザ加工の研究（続報）：微小穴あけ過程の高速度撮影と各種材料の加工特性
Author(s)	勇田，敏夫；佐藤，敏一
Citation	北海道大學工學部研究報告，107，45-56
Issue Date	1982-01-30
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/41716
Type	departmental bulletin paper
File Information	107_45-56.pdf



レ ー ザ 加 工 の 研 究 (続報)

—微小穴あけ過程の高速度撮影と各種材料の加工特性—

勇 田 敏 夫* 佐 藤 敏 一*

(昭和 56 年 9 月 30 日受理)

A Study of Laser Machining (2nd Report)

—On the Observation with the High speed Camera Technique in the process
of Micro Drilling Machining and the Characteristics
of Machining in variety of Work Materials—

Toshio YUHTA and Toshikazu SATOH

(Received September 30, 1981)

Abstract

In order to clarify the mechanism of the drilling by laser machining, an experiment was carried out for a large variety of work materials by observations with a high speed camera technique.

The results are as follows. First, the relations of the depth of the drilling hole and the machining time are obtained. Next, when the focus point of the laser beam is on the inside the work material, the relation can be represented by a parabolic equation, and when the focus point is on the surface and the outer of the work material, the relation equation is the same shape but has some time delay.

Second, the relation of the maximum depth of the hole and the distance from the focus to the surface point of the work material is obtained. This relation would depend on the characteristics of material and, generally, as it approaches the surface, it was found that the shallower the depth of the hole is the higher melting point of material is. Lastly, we can classify them into two groups, namely metal and non-metal. It was shown that the relation of the depth of the hole and the thermal conductivity is, the depth of the hole of the metal group is more affected by the thermal conductivity than the non-metal group.

1. 緒 言

1960 年, 米国の Maiman がルビーレーザーの発振に成功して以来, 各分野にわたってレーザーの応用が研究され, 特に最近のレーザー加工機やその周辺技術ならびにレーザー応用技術の進歩に目覚ましいものがある。⁽¹⁾⁽²⁾

集光されたレーザーにより微小面積に約 10^9Watt/cm^2 に到る高エネルギー密度⁽³⁾が得られるため, レーザ加工は, 加工単位の小ミクロ加工に適しており, 高融点材料や難削材の加工に適して

*精密工学科 精密加工学第二講座

いる。現在これらのレーザの特性を利用して、金属材料というにおよぼす各種材料の切断、みぞ切り、溶接加工から穴あけ加工に到るまで、広範囲な加工に使用され、すでに生産ラインに組込まれているものもある。レーザによる穴あけ加工については、古くからダイヤモンドダイスの下穴加工や時計用軸受に用いられる人造ルビーの穴あけに実用化されており、その他回路基板用アルミナセラミック、プラスチック、ゴム、紙に到るまで、種々の材料について穴あけ加工が採用されており、レーザによる穴あけ加工の重要性が増している。

したがって本報は、ルビーパルスレーザによる穴あけ加工機構について調べるため、穴あけ過程を高速度カメラで撮影観察し、さらにレーザ加工のように熱的除去加工では、加工材料の熱的性質により影響を受けるため、熱的性質の異なる数種の金属並びに非金属材料の穴あけ加工特性について実験検討した結果について報告する。

2. 実験装置と実験方法

2. 1 実験装置

2. 1. 1 レーザ加工装置 実験に使用したレーザ加工装置は、東京芝浦電気株式会社製(LAR-107型)であり、主な仕様は表1に示す。

2. 1. 2 高速度写真撮影装置 撮影に用いたカメラは BECKMAN & WHITNEY 社の 16 mm 高

表1 LAR-107型ルビーレーザ加工装置の性能

レーザヘッド	ルビーロッド	15mm ϕ × 150mm Cr ³⁺ 濃度0.05%
	Xeフラッシュランプ	直線型 FT-5,000 定格入力 5,000 Joule
主な性能	発振光波長	6,943Å
	出力エネルギー	Max, 15 Joule
	ビーム拡がり角	7~15mrad
	パルス幅	0.5msec, 1.0msec
	エネルギー蓄積用コンデンサー	1,200 μ F
	電源	AC200V 50Hz

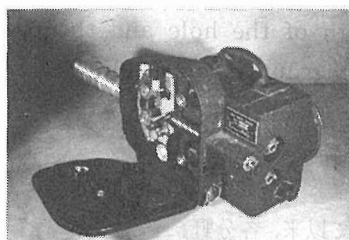


図1. 高速度カメラ

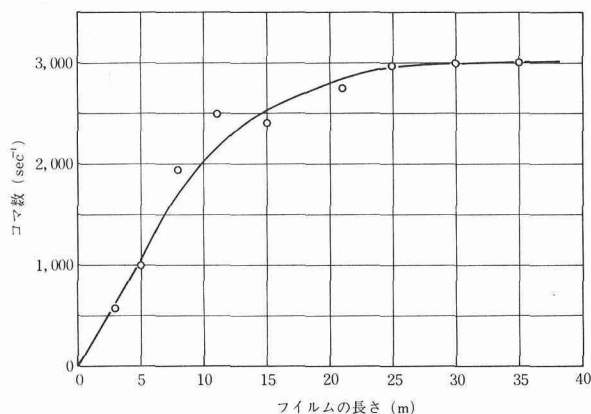


図2. 高速度カメラの速度特性

速度カメラで(図1), 最高速度毎秒 3,000 コマまで上昇させる事が出来る。なおこのカメラの駆動装置は可変抵抗連動方式により, 回転数が漸増した後一定速度になるため, 定常速度で撮影するには, 図2に示すように助走期間が必要である。図2は撮影済みフィルムを使用してコマ数とフィルム長さの関係を求めたグラフで, フィルムが 25 m 以上になると最高速度毎秒 3,000 コマで一定になる。

2. 2 実験方法

2. 2. 1 高速度撮影 使用した BECKMAN & WHITNEY 社製の高速度カメラは最高撮影コマ数 3,000 コマ/秒であり, レーザによる穴あけ過程の分解写真を撮るためには, レーザ加工機 LAR-107 型で可能な限りの最長発光時間で加工する必要がある。したがって本実験ではパルス幅 1 msec (実際に測定すると約 2 msec の発光時間があったので, 以後 2 msec とする), 実測時間 2 msec を使用し, 出力は 4 Joule を使用した。また 2 msec のような長発光時間のレーザ光は, 実際の加工に使われる有効発光出力が低下するので, 穴あけ過程が明瞭に観察されるためには, 容易に穴あけされる材料すなわち低融点材料を使用しなければならない。したがって本実験では, ハンダ(組成: Sn 67%, Pb 33%: 融点 $T_m = 182^\circ\text{C}$)と鉛(組成: Pb 99.9%: $T_m = 327^\circ\text{C}$)を使用した。

高速度カメラの操作は, レーザ光焦点とレンズ先端の距離を約 150 mm の位置に据えつけ, ファインダーの視度調整をして距離を合わせた。絞りは 5.6 である。

試料は前述の材料を $5 \times 10 \times 20$ (mm) の直方体に整形した後, 図3に示されるように試料をエポキシ系埋込樹脂で埋込み, A, B 面をバフ研磨した後載物台に試料を固定し, レーザ加工機に内蔵されているレーザー光焦点合わせ用照明光のピントが C 点(試料面の一边と埋込樹脂との境界線上の点)にくるように, 付属の X, Y, Z 方向に位置決めマイクロメータで調節した。つぎに高速度カメラのピントを試料面と埋込樹脂との境界面上の D 点にあわせてセットした。照明として表2に示される特性を持つ, 東芝フラッシュバルブ 3N を使用し試料面 D を照明した。この東芝フラッシュバルブ 3N はスイッチを閉じた後約 2~3 msec 経過して発光を開始する。一方レーザの発光はスタートと同時に殆ど時間遅れなしに起るため, 適切な撮影出来るようにリレー回路

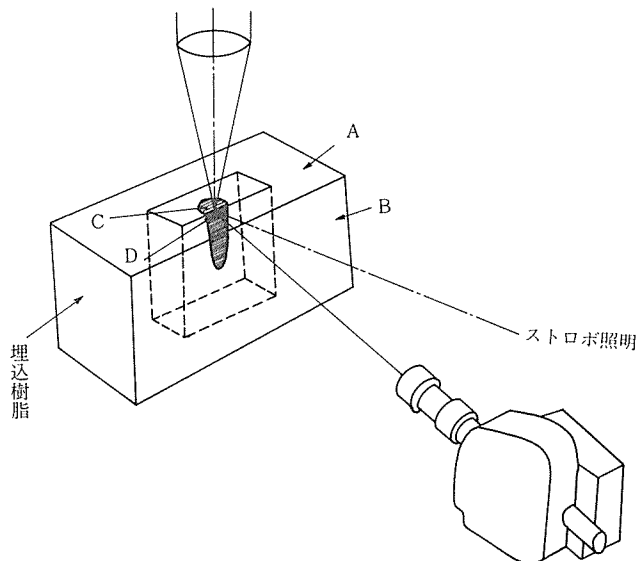


図 3. 試料と光学系の概略図

表2 フラッシュバルブの特性

発光時間	20msec
ピークまでの時間	15msec
光量	18,000ルーメン/sec

表3 実験条件

レーザ光照射回数	焦点はずし距離
一回照射	$\ell = -0.5(\text{mm})$
	0
	+0.5
	+1.0
二回照射	$\ell = 0(\text{mm})$

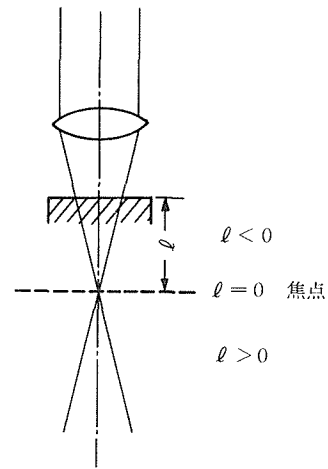


図4. 試料面位置と焦点はずし距離の関係

を用いてレーザの発光を遅らせて撮影した。使用したフィルムは KODAK Tri-X NEGATIVE 16 mm フィルムで、昼光で ASA 320, タングステン光で ASA 250 の感度を有する。図2から明らかにカメラの送りコマ数が最高で安定になるのは、フィルム送りで約 25 m 以降であるから、リードフィルムとして長さ 27 m の使用済フィルムに未使用フィルム 4 m を接続し一巻として用いた。現像液は D-76 を使用した。

加工実験は各材料に対してそれぞれレーザ光照射回数と焦点はずし距離を変化させて行なった(図4)。実験条件は表3に示す。

2. 2. 2 加工特性 実験は載物台の光軸上に加工物を固定し、レーザ光を照射して行なった。レーザ光の照射は、単一照射による加工とくり返し照射による加工と二通り行なった。

試料は表4に示される熱的性質を持つ材料を用いた。試料寸法は 10×20 (mm) (厚さ 10 mm) とし、加工面を研削仕上げして、その平行度は $5 \mu\text{m}$ におさえた。

つぎに測定する物理量として、加工穴径、加工穴深さを測定した。加工穴径はオリンパス工具顕微鏡を用いて、穴の形状が楕円に近いため、長径と短径を測定した。また穴の真円度の一つの

表4 各種材料の熱的性質

	融点(℃)	熱伝導率(cal/cm·sec·℃)
亜鉛	419	0.27
アルミニウム	659	0.49
七三黄銅	950	0.27
銅	1,084	0.93
S 35 C	1,450	0.18
ニッケル	1,455	0.14
フォスフェライト	1,885	0.008
アルミナ磁器	2,050	0.01
ベリリア磁器	2,527	0.04

表示として、長径と短径の比をとって偏平率を求めた。加工穴の深さも工具顕微鏡を用いて測定した。各量の測定値はそれぞれ同一条件における 10 個の実験値の相加平均値をとった。

3. 実験結果と考察

3. 1 穴あけ過程の高速度撮影

ルビーレーザによる穴あけ過程を高速度カメラで撮影した結果の代表例について述べると、図 5 (a) は鉛材料で、 $\ell = -0.5 \text{ mm}$ 、出力 $P=4 \text{ Joule}$ の場合の高速度写真で、同図 (b) は (a) から測定された加工穴深さと加工経過時間の関係である。コマ間隔は $1/3 \text{ msec}$ である。図から明らかなように発光開始後 $1/3 \text{ msec}$ ですでに加工されており、以後加工は漸次加工時間とともに、ほぼ放物線状に進んでいる。また大気中への材料の噴出状態は $2/3 \text{ msec}$ から激しくほぼ垂直に噴出しており、噴出は発光停止まで観察された。

つぎに図 6 はハンダ材料で、 $\ell = 0 \text{ mm}$ 、 $P=4 \text{ Joule}$ の場合で、発光開始後 $1/3 \text{ msec}$ までの間

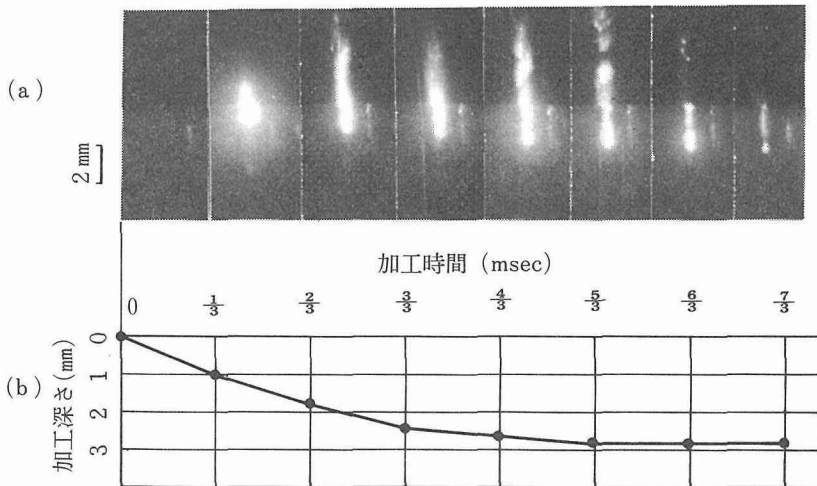


図 5. レーザによる穴あけ過程の高速度写真と加工深さ特性(鉛, $\ell = -0.5 \text{ mm}$)

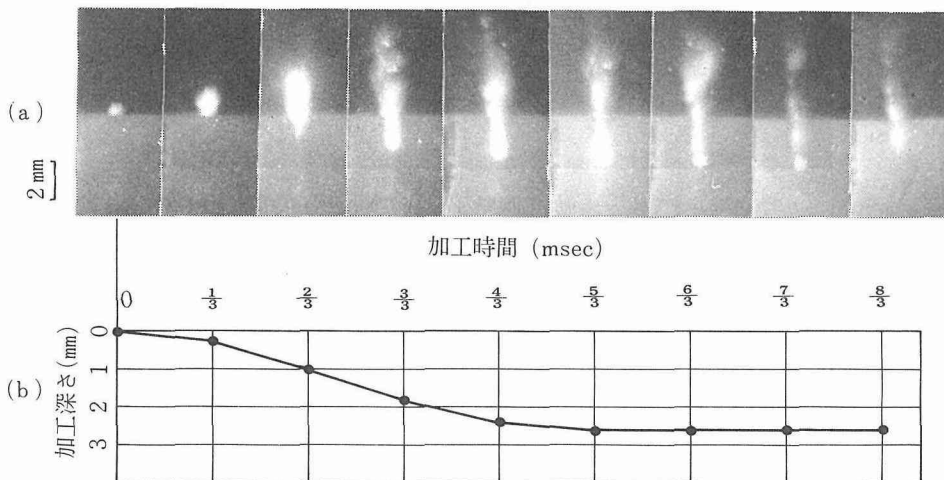


図 6. レーザによる穴あけ過程の高速度写真と加工深さ特性 (ハンダ, $\ell = 0 \text{ mm}$)

は加工穴の深さはほとんど進行せず、 $1/3 \sim 2/3$ msec 付近から穴があき始め $2/3 \sim 3/3$ msec 間で急速に加工が進み、その後漸次加工が進み $5/3$ msec で飽和に達している。加工が急速に進行している $3/3$ msec における材料の大气への噴出は激しく、加工の後半に入ると噴出が弱まり、発光が停止しても噴出が観察された。また噴出角度は約 25° と $\ell = -0.5$ mm の場合に比べると開いている。

図 7 は鉛材料、 $\ell = +1.0$ mm, $P=4$ Joule で発光開始後 $2/3$ msec までは穴あけされないが、 $2/3 \sim 3/3$ msec から穴があき始め以後はほぼ直線的に増加しており、 $6/3$ msec で加工穴深さが飽和している。また噴出物は $\ell \leq 0$ に比べて勢いが弱く、角度は約 25° で $\ell = 0$ の場合とほぼ等しい。

図 8 は鉛材料、 $\ell = 0$ mm, $P=4$ Joule のレーザ 2 回照射による穴あけ過程の高速度写真である。発光開始後漸次加工が進み、 $4/3$ msec で飽和に達しており、噴出は一回照射より激しくない。

上述した現象は各々他の材料においても同様な傾向が観察された。

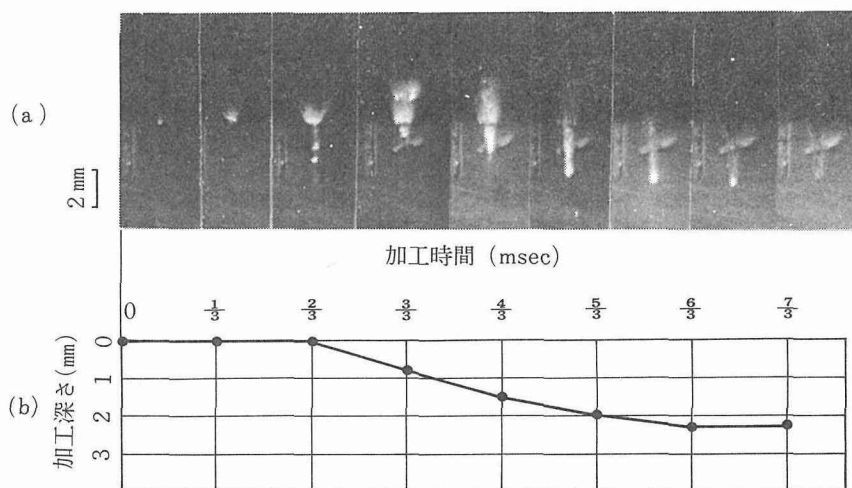


図 7. レーザによる穴あけ過程の高速度写真と加工深さ特性(鉛, $\ell = +1.0$ mm)

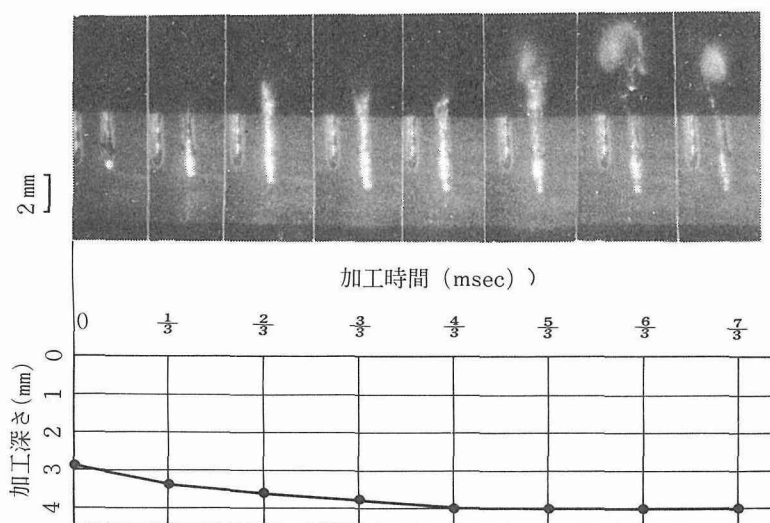


図 8. レーザの 2 回照射による穴あけ過程の高速度写真と加工深さ特性(鉛, $\ell = 0$ mm)

以上一連の焦点はずし加工で、はずし距離により穴あけ加工過程が異なるのは、つぎのように考えられる。

加工面がレーザ光焦点の内側にある場合 ($\ell < 0$)、エネルギーの蓄積時間がほとんどなく、レーザ光の強度の高い中心部が先に熔融、蒸発し穴があきはじめる。同時に穴の底に表面より強く聚焦されたレーザ光が照射されるため、加工が急速に進み焦点付近では最も加工速度が大である (図 5 (b) 0~1/3 msec 間の勾配が最も大きい)。焦点をすぎるとレーザ光のエネルギー密度が小さくなってゆくとため、加工速度が漸次小さくなる。

つぎに加工面がレーザ光焦点の外側にある場合 ($\ell \geq 0$)、材料が熔融、蒸発に必要なエネルギーの蓄積時間を経て加工されるが、 $\ell < 0$ と異なって内部に入るほどレーザスポットが大きくなり、エネルギー密度の小さなレーザ光が照射されるため、加工速度は $\ell < 0$ の場合より小さいと考えられる。

3. 2 各種材料の穴あけ加工特性

3. 2. 1 単一照射による加工 レーザ加工はレーザビームを加工物に照射すると、そのエネルギーが材料表面で熱エネルギーに変わり、熔融、蒸発が起り、⁽⁴⁾⁽⁵⁾さらに熔融物が噴出除去される⁽⁶⁾熱加工である。したがってレーザの穴あけ加工機構について検討するには、加工時に影響する種々の要因 (例えば材料の熱的性質など) の効果について調べる必要がある。

図 9 はレーザ出力 $P=6.6$ Joule における各種材料による、加工穴深さと焦点はずし距離の関係

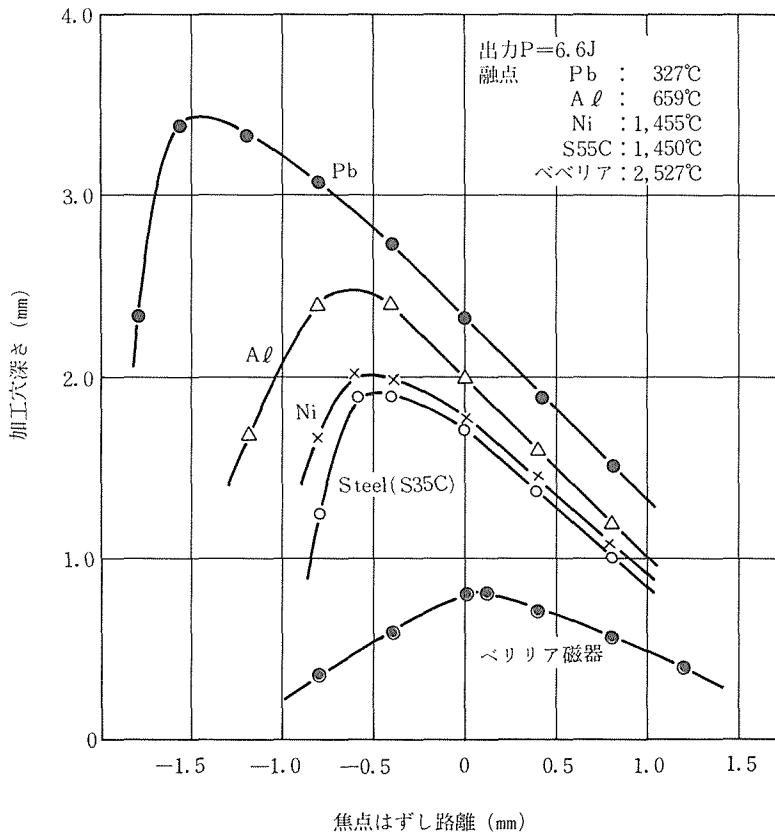


図 9. 加工穴深さと焦点はずし距離

で、加工穴深さを最大にする焦点はずし距離は加工物の材質により異なっている。最低融点を持つ鉛はルビー側に最も偏った位置で最大値を持っており、その他の材料は融点が高くなるに従って焦点面に移動して、加工穴深さも漸次減少している。最大融点を有するベリリヤ磁器(融点 2527°C) はほぼ焦点位置で最大値を示しており、その値は他の材料中最も小さい。

このように各種材料の熱的性質の相異によりレーザの穴あけ加工状態が異なっている。レーザ光が加工物表面に照射されるとレーザ光の浸入深さが非常に浅いため⁽⁷⁾、材料表面で吸収される光

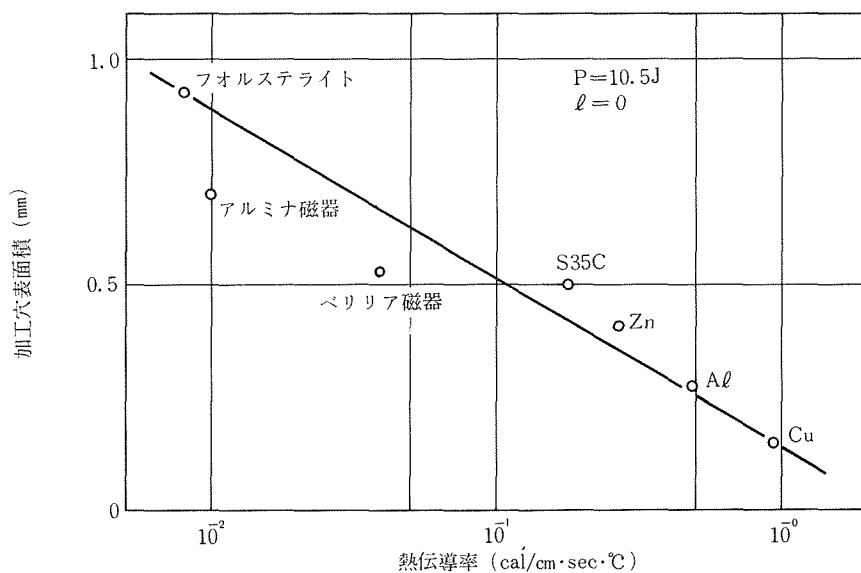


図 10. 加工穴表面積と熱伝導率の関係

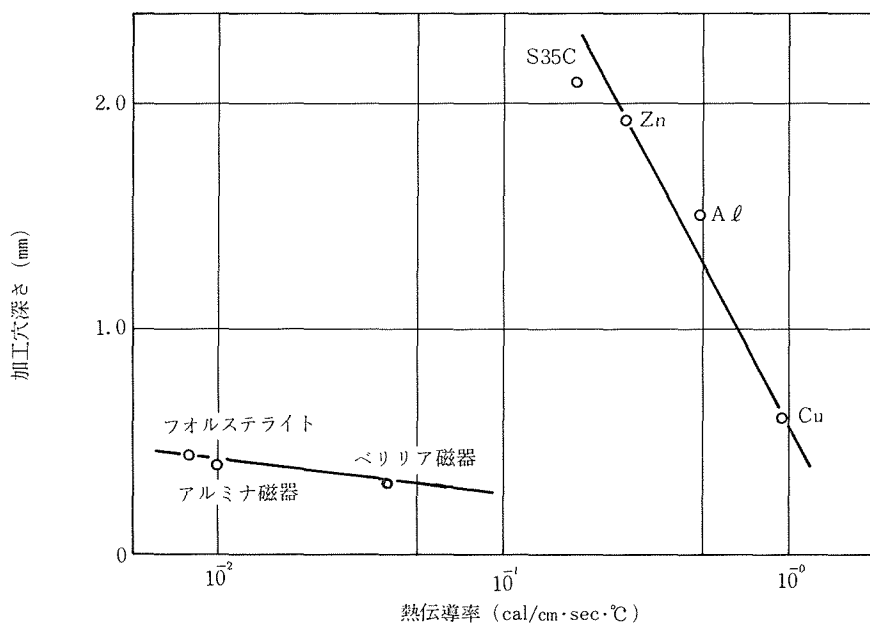


図 11. 加工穴深さと熱伝導率の関係

エネルギーは薄い層で熱エネルギーに変わり、材料表面の温度が上昇する。表面が融点を経て沸点に達し穴があきはじめるが、照射エネルギーの大部分が穴径方向と材料内部に伝達され、内部温度が上昇する。したがって材料の熱伝導率が穴あけ過程において重要な要因の一つになる。

図 10 は加工穴表面形状を楕円と仮定して求めた加工穴表面積と熱伝導率の関係を示している。金属、非金属の区別なく同じ傾向を示しており、材料の熔融に必要な熱量の相

異などを考慮すると、大体熱伝導率の低い材料ほど、加工穴表面積は大きくなると考えられる。

図 11 は加工穴深さと熱伝導率の関係で、金属グループと非金属グループの二群の間では大きな差が出ているが、熱伝導率の大きい金属では、熱伝導率の増加に対して加工穴深さの減少率が著しい。これに対して非金属は加工穴深さの減少が金属に比べて著しく小さい。これは金属に比べて非金属の熱伝導率が非常に小さく、また融点や沸点が高いため除去に必要な溶融、蒸発量が少ないため穴あけ量が少ないと考えられる。金属は熱伝導率が大きくなると、伝導による熱の散逸が大きく、材料内部が融点に達しないため加工穴深さが減少する。また非金属に比べると 10~100 倍の熱伝導率のためその影響が大きく現われると考えられる。

図 12 は加工穴短径とレーザ出力との関係で金属グループと非金属は大きな相異がある。金属グループの出力に対する短径の増加率はフォルステライトに比べると小さい。これは材料による熱伝導率の違いと考えられる。すなわち熱伝導率の低い材料では加工穴表面に熱をためやすく、それが有効に加工に寄与すると考えられる。また熱伝導率の高い金属グループでも出力が高くなると短径の増加率が上昇しているが、これはレーザ出力の増加に伴い発光パターンが大きくなる効果であろうと考えられる (図 13)。

つぎに前報で材料が S 35 C の場合加工穴の偏平率(短径と長径の比)は、レーザ出力に無関係に一定であると報告しているが、⁽⁶⁾ 各種材料について詳細に検討すると、出力の増加に伴い偏平率は増加している(図 14)。これはフォルステライトのように熱伝導率の小さい材料の方が円に近いことから考えると、熱伝導率が小さく熱をためやすい状態にある方が、

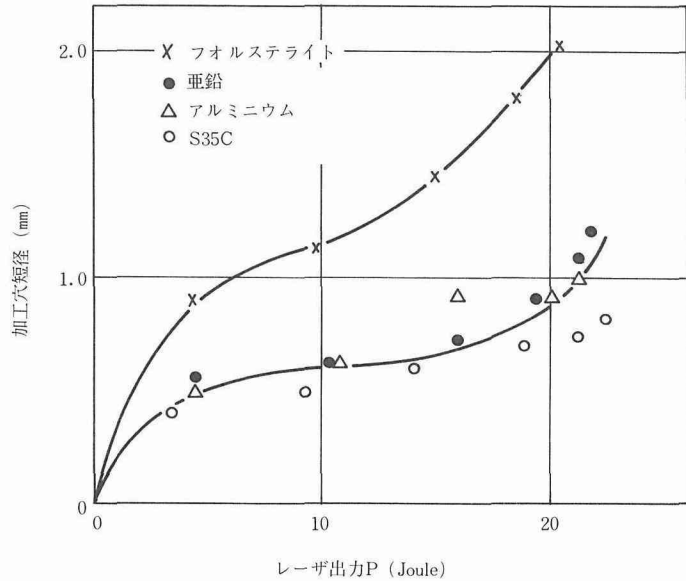
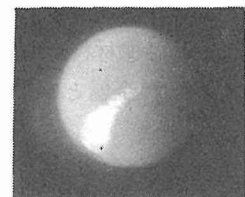
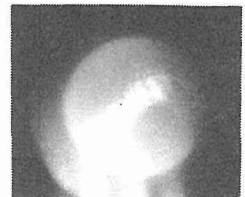


図12. 加工穴短径とレーザ出力の関係



0.9J



1.6J



3.2J

図13. 出力による発光パターンの変化

レーザ発光パターンの影響を受けにくく、加工穴表面形状を均一化して円に近づく傾向にあると考えられる。

3.2.2 くり返し照射による加工 加工物にレーザをくり返し照射させると、パルス数の増加に伴い加工穴深さが増大するが、金属材料ではパルス数が10回前後で加工穴深さは一定となり、それ以後パルス数を増加しても加工深さは増大しない（前報⁶⁾でS35Cについても同様な結果を得ている）。これに対してセラミックスはパルス数16～24回位になっても依然として加工穴深さは増大している。

ま、パルス数 n 回目の時の加工穴深さとパルス数1回目の加工穴深さの比を加工穴深さの増加率として、各種材料について加工穴深さの増加率とパルス数の関係を求めたのが図15である。これらの傾向は金属とセラミックスの熱伝導の相異から説明出来ると考えられる。すなわちパルス数

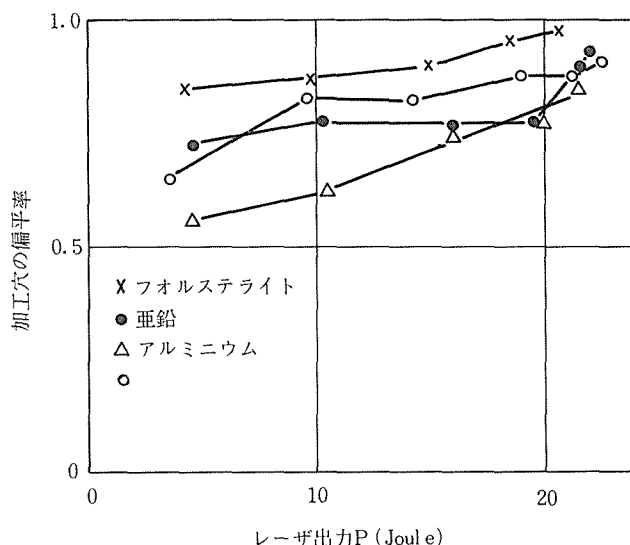


図14. 加工穴の偏平率とレーザ出力の関係

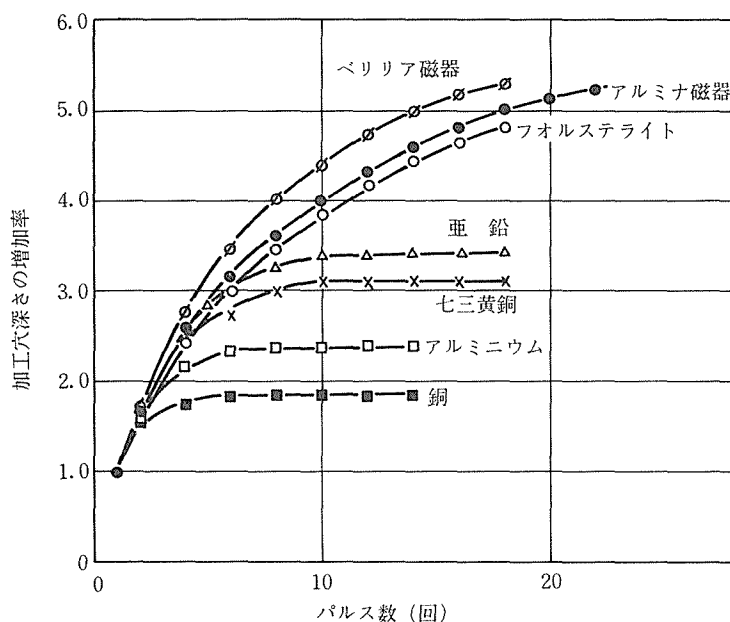


図15. 加工深さの増加率とパルス数の関係

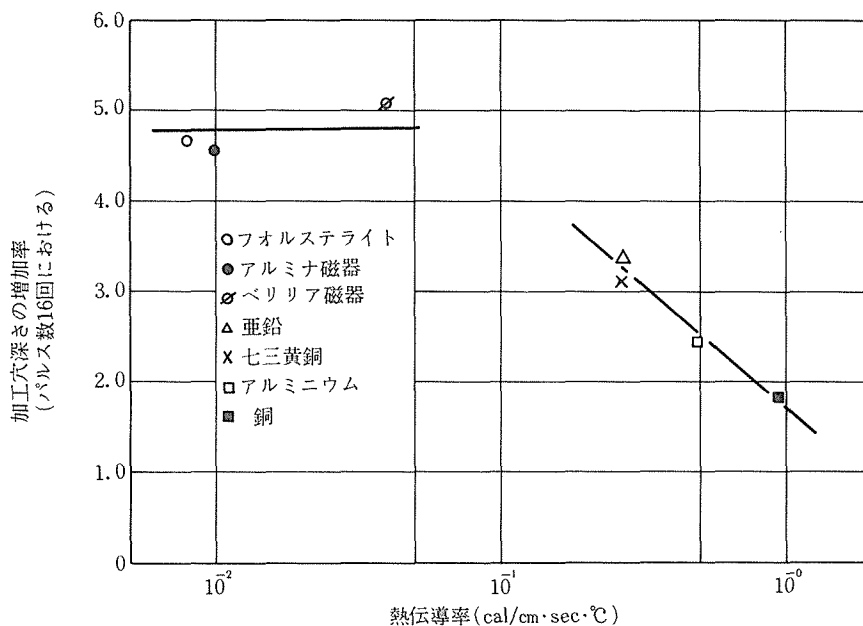


図16. 加工深さの増加率と熱伝導率の関係

が少ない時、各材料ともエネルギーが有効に使われて加工穴深さが増大するが、加工穴深さが深くなるにつれてレーザ光が多重反射をして加工穴の底部に達するがエネルギーが小さくなる。金属材料の場合熱伝導率が大いので、レーザ光のエネルギーが小さくなると加工に有効に使われる前に熱伝導でエネルギーが散逸してしまうが、セラミックスのように熱伝導率が小さいと、熱エネルギーをたくわえて少ないエネルギーでも加工に対して有効に使われるため、パルス数が多くなっても加工穴深さが増大するものと考えられる。

つぎにパルス数 16 回目の各材料の加工穴深さ増加率と熱伝導の関係を求めたのが図 16 である。セラミックスは熱伝導率に関係なくほぼ一定であるが、金属は熱伝導率の増加に伴い加工穴深さの増加率は減少している。

4. 結 論

本研究はルビーパルスレーザによる微小穴あけ加工を行ない、穴あけ加工過程を高速度カメラで撮影観察し、さらに各種材料の加工特性について実験的に検討した結果、つぎのような結論が得られた。

(1) レーザ光が加工物内部に焦点を結ぶ位置 ($l < 0$) で加工した場合、発光後直ちに加工が開始され、加工穴深さと加工時間の関係はほぼ放物線である。また大気中への材料の噴出物はほぼ垂直の方向に激しく噴出する。

(2) レーザの焦点が加工物表面または外部に結ぶ位置 ($l \geq 0$) で加工した場合、発光後加工物表面にエネルギーを蓄える時間をおいた後、加工が開始される。噴出物は $l < 0$ より激しくなく、噴出角度は約 25° である。

(3) 加工穴深さを最大にする焦点はずし距離は、加工物の材質により変わる。融点の低い材料ほど最大値を生ずる位置は材料内部にあり、融点が高くなるに従い材料表面に移動して加工穴

深さは漸次減少する。

(4) 加工穴深さと熱伝導率の関係は、金属グループと非金属グループの二群に分かれ、金属は非金属より熱伝導率の影響が大きい。

終りに、実験の遂行に協力された高橋義美技官、元教官草薙典子女史、並びに本学卒業生増田敏氏に厚く御礼申し上げます。

参 考 文 献

- (1) 小林昭；レーザ加工（1973）開発社
- (2) 小林昭；機械の研究，30（1978）5，583.
- (3) 谷口紀男；機械の研究，22（1970）1，1.
- (4) E. T. Maloney and S. R. Bolin；SME Tech. Paper, MR74-956.
- (5) S. R. Bolin and E. T. Maloney；SME Tech. Paper, MR75-571.
- (6) 草薙典子，勇田敏夫，佐藤敏一；北大工学部研究報告，53号（1969）31.
- (7) A. Visser；機械と工具，13（1969）5，45.