加工限界パワー密度と材料特性*

——レーザーによる薄膜加工の研究(第2報)——

中山 了** 斎藤保直** 高本喜一**

Threshold Power Density Required for Machining and Material Properties

——Study on Laser Machining of Thin Films (2nd Report)——

Satoshi NAKAYAMA, Yasunao SAITO, Kiichi TAKAMOTO

Based on the heat analysis and the experiment carried out by Q-switched YAG laser, the relations between the material properties and the threshold power density are studied. The results obtained are as follows.

- 1) A hole is enlarged by the cohesion of a molten film due to surface tension, although the central part in a hole is removed by evaporation and ejection.
- 2) The portion holed by the cohesion increases with the decrease of an irradiated power. In some cases, a film is holed only by the cohesion.
- 3) The threshold power density required for machining is nearly equal to the power density required for melting a film. In case of the film less than 1μ in thickness, it has linear relations to the melting point and the reflectance of a material to be machined.
- 4) The influences of material properties and film thickness on the hole diameter can be expressed by a nondimensional equation.

1. 緒 言

蒸着膜などの金属薄膜に数 μ 以下の穴やみぞを加工するのに、レーザー加工法は非常に有効な方法であることはよく知られている¹⁾。しかしながら、加工特性と各種要因の相互関係が十分に解明されていないため、最適な加工装置構成や加工条件の設定、加工限界の把握などが容易でなく、再現性、精度、微細度などの点に問題を生じている。

このようなことから前報²⁾では、照射するレーザービームはガウス型のパワー密度分布をもち、それによって除去される範囲は被加工材料の加工限界パワー密度以上照射される部分であるというモデルを考えた。これに基づいて集光ビームのパワー密度分布と加工径の関係を解析し、加工半径 R 、中心のパワー密度 P_c 、加工限界パワー密度 P_m 、ビーム半径 w の間には

$$\frac{R}{w} = \frac{1}{\sqrt{2}} \left(\log_e \frac{P_c}{P_m} \right)^{1/2} \quad (1)$$

の関係があることを導いた。ここで、ビーム半径 w は、

$$w \doteq f \theta_e \quad (2)$$

で与えられる^{1),3)}。 f は集光レンズの焦点距離、 θ_e はレーザー装置の構造によって定まる常数である。さらにガラス基板上のCr膜をQスイッチYAGレーザーを用いて加工し、集光レンズの焦点距離によって w を種々に変えても式(1)が成立していることを確かめた。これにより加工径に対するビームおよび集光系特性の影響は明らかになったが、加工限界パワー密度によって表わされる材料特性や膜厚さの影響については未検討であった。

実際に式(1)を用いて加工条件を設定するには、各種の材料の熱的および光学的性質あるいは膜厚さなどと加工限界パワー密度の相互関係を明らかにしておく必要がある。そこで本報では、QスイッチYAGレーザーにより広く材料と膜厚さを変えて穴あけ加工し、加工径と照射出力の関係、加工状態の観察、一次元熱伝導論による解析などから、加工限界パワー密度の物理的意味、材料特性との関係などを求めた。

2. 温度上昇と材料特性の関係

レーザー照射による薄膜の除去は必ずしも蒸発のみによるものでなく、熔融物の飛散や凝集にも依存している²⁾。したがって、単にある温度、たとえば沸点に達すれば除去されると考えることはできない。しかし、照射による薄膜の温度上昇は除去機構のもっとも基本的なものであ

*原稿受付 昭和46年2月10日。昭和45年度精機学会秋季大会学術講演会(昭和45年10月6日)にて発表。

**正会員 日本電信電話公社電気通信研究所(武蔵野市緑町 3-9-11)

り、薄膜が加工されるかどうかは、薄膜の温度がどの程度に上昇するかにかかっている。したがって、材料特性が加工特性にどのような影響を及ぼしているかを知るためには、まず温度上昇と材料特性の関係を明らかにすることが必要である。そこでまず、半無限体上にある薄膜表面に、一様な平面熱入力がある場合の温度上昇について考えてみる。この場合、実際の集光ビームはガウス型のエネルギー分布であり、また材料の熱的性質も温度により変化するので、得られる結果は実験事実と正確には一致しない。しかし、材料特性が温度上昇とどのような関係にあるかは定性的に評価できる。

v, v' をそれぞれ薄膜 および半無限体における温度、 K, K' を熱伝導率、 k, k' を温度伝導率、薄膜の厚さを l とすれば、熱入力 F_0 、時間 t のとき、半無限体表面を原点として表面からの距離 x を深さ方向に正にとり、

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} - \frac{1}{k^2} \frac{\partial v}{\partial t} &= 0, & -l < x < 0, & t > 0 \\ \frac{\partial^2 v'}{\partial x^2} - \frac{1}{k'^2} \frac{\partial v'}{\partial t} &= 0, & x > 0, & t > 0 \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

の微分方程式が成立する。ここで境界条件および初期条件は

$$\left. \begin{aligned} -K \frac{\partial v}{\partial x} &= F_0, & x = -l, & t > 0 \\ K' \frac{\partial v'}{\partial x} &= K \frac{\partial v}{\partial x}, & x = 0 \\ v &= v', & x = 0 \\ v &= v' = 0, & t = 0 \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

である。したがって薄膜の表面温度 $v_{x=-l}$ は

$$v_{x=-l} = \frac{2F_0\sqrt{kt}}{K} \left\{ \sum_{n=0}^{\infty} \alpha^n \left(\operatorname{ierfc} \frac{nl}{\sqrt{kt}} + \alpha \operatorname{ierfc} \frac{(n+1)l}{\sqrt{kt}} \right) \right\} \quad (5)$$

で与えられる。ここで

$$\alpha = \frac{K\sqrt{k'} - K'\sqrt{k}}{K\sqrt{k'} + K'\sqrt{k}}$$

$$\operatorname{ierfc}(z) = \frac{1}{\sqrt{\pi}} e^{-z^2} - z(1 - \operatorname{erf} z)$$

である。

半無限体の熱常数にバイレックスガラスの値を用いて、 $t = 0.35 \mu\text{s}$ のときに薄膜の表面温度が融点に達するのに必要な F_0 を計算した結果を図 1 に示す。ここで、図中の括弧内の数字は熱伝導率の値を示す。膜厚さ 0.1μ では表面温度を融点まで上げるのに必要なパワー密度は、融点の高さと一次的な関係にあって、熱伝導率などによらないことがわかる。膜厚さ 0.6μ あるいは 1μ で熱伝導率などによる影響が見られ、材料によって所要パ

図 1 融点と所要パワー密度の理論的關係

ワー密度の増加量が相違するが、その程度は小さい。10 μ の膜厚さになると Ag, Al のような熱伝導率の大きい材料で所要パワー密度は著しく増加する。

以上から、1 μ 以下の薄膜を取扱う場合、温度上昇とパワー密度の関係は一次的であり、熱入力が同一ならば温度上昇量は薄膜材料によらずにほぼ同一となる。したがって、ある温度たとえば融点で薄膜が加工されるとするならば、加工に必要なパワー密度は融点の高さに比例する。

3. 実験装置と方法および試料

使用した回転ミラー型 Q スイッチ YAG レーザ装置の基本的構造は前報²⁾と同様であるが、構造体の剛性、回転鏡の動つりあいなどの点を改良している。固定鏡の透過率は 1%、曲率半径は固定、回転鏡とも 1 m とした。YAG 結晶 (3 mm ϕ $\times$ 75 mm) は前報と異なるものを使用し、最高出力は約 1 kW、発振時間は半値幅で約 350 ns とほぼ同一の出力特性を得ている。出力制御には色ガラスフィルタを用い、焦点距離 16.5 mm のレンズにより焦点面上に位置した試料に集光照射する。このときの焦点面におけるビーム半径 w は約 21 μ である*。

実験試料はガラス基板 (バイレックス, 厚さ 0.8 mm) 上に蒸着した金属膜で, Al, Ag, Ta, Cr など熱的および光学的性質が広範囲にわたるように選んだ。これら試料の材料特性を表 1 に示す。ここで反射率は、試料が加工されない程度の出力 (約 2 W) をもつ連続発振の YAG レーザビームを照射し、反射ビームの出力をカロリメータで測定して求めた。照射角度は 5~45° で、その範囲

*測定方法などは別に報告する予定。

表 1 材料の種類と物理的性質

材 料	融 点 (°C)	沸 点 (°C)	熱伝導率 (cal/s· cm·°C)	比 熱 (cal/ °C)	反射率 (波長 1.06μ)
Ta	2850	5300	0.130	0.034	0.63
Cr	1800	2327	0.2	0.118	0.62
Mn	1250	2027	0.05	0.121	0.53
Cu	1084	2663	0.938	0.0931	0.93
Ag	960	2212	1.02	0.057	0.95
Al	660	2270	0.534	0.224	0.92
Pb	330	1740	0.084	0.0309	0.66
Sn	232	2190	0.158	0.0544	0.60
バイレックス ガラス	(軟化点) 840	—	0.003	0.17	—

では角度による反射率の相違は認められない。

4. 実験結果とその考察

4.1 加工状態

照射出力を変えたときの加工状態の変化を図2に示す。膜が完全に除去された開孔部のまわりに溶融金属が凝集して盛上がった部分があり、照射出力の高い場合には、その外側に飛散した溶融物が付着しているのが観察される。

開孔部は高出力では不規則な形状をしているが、出力が低下するに従い円形に近づく。しかし、その様子は材料によって相違する。たとえば Cu は 1400 W でも円形に近いが、Mn ではこれに相当する形状は 200 W で得られる。同一出力で比較すると、加工に高出力を要する材料ほど加工穴の真円度がよい。これは出力を下げると円形に近づくのと同じ理由によるもので、ビームのパワー密度分布のうちの高次モードの発生に起因する不規則な部分が材料によっては加工限界パワー密度以下になるためである。加工形状に及ぼすビームの不規則なパワー密度分布の影響は材料特性によって相違するのがわかる。

図3に Al 膜の厚さを変えたときの加工状態を示す。0.05μ および 0.2μ の厚さでは、照射出力が高くても溶融物の飛散は非常に少ないが、0.6μ 以上になると著しくなる。放射線状の痕跡は 0.6μ では比較的太いが、1.3μ, 3.0μ と厚くなるに従い細い線状で飛散し、爆発力が膜厚さに依存することを示している。したがって溶融物飛散によって除去される量は膜厚さによって異なる。

図4は穴周縁の盛上りを顕微干涉計で観察した例である。盛上がり部分の高さや幅は 0.2μ 厚さの Al 膜が 0.05μ の Al, 0.1μ の Ta 膜よりもかなり大きく、膜厚さや材料によって盛上がり量が変わる。

図5に盛上がり部分の開孔部に対する体積比を加工径について目盛ったものを示す。Al 膜の場合、加工径 10μ 以下では、盛上がり部分の体積は開孔体積にほとんど

図 2 各材料の加工穴形状

図 3 Al の膜厚さによる加工状態の変化

図4 加工穴の干渉顕微鏡写真

図5 加工径と壁上がり量の関係

等しい。照射出力を増して加工径を大きくすると、壁上がり部分の体積比は減少するが、 30μ の加工径でも 50% の値を示す。Cr あるいは Ta は Al よりも壁上がり部分の比は小さいが、それでも加工径 10μ で 80%, 30μ で 20~30% である。これから、開孔部のかなりの部分が溶融後に穴の周縁に凝集することがわかる。

膜が溶融した場合、溶融部の中心のごく小さい範囲でも蒸発や飛散、あるいはガラス基板から発生するガス圧力で開孔すると、溶融金属のガラスに対する接触角は固相金属に対するよりも大きく、かつ 90° 以上であるため、大部分の溶融金属は表面張力によって固相部に凝集する。中心部がまったく開孔しなければ、このような凝集は起こらないはずである。しかし、実際には凝集を生じさせないようにレーザ照射で膜を溶融させることは非常に困難である。ほとんどの場合、融液状態における熱伝導率と反射率の値は明らかでないが、電気伝導度は、たとえば銅の場合、融液になると融点近傍の固相に比して $1/2$ 以下と急激に低下する⁴⁾。一方、金属の自由電子

図6 照射パワー密度分布と加工径の関係

論によれば、電気伝導率は熱伝導率、反射率と相関関係をもつことが明らかにされているので⁶⁾、熱伝導率、反射率も融液になると急激に低下すると推定できる。したがって融液状態では局部的な過熱が生じやすく、中心部の開孔に連なるものと考えられる。

以上の加工状態から、レーザビーム照射による開孔の機構として図6に示すようなモデルを考えることができる。照射出力が低い図(a)の場合、照射の中心部のほとんど無視できる量が蒸発や飛散によって除去され、開孔は主として、溶融に必要なパワー密度以上に照射された部分の溶融、凝集によって生じる。したがって、加工径は融点以上に加熱された範囲に相当する。一方、照射出力が高い場合、図(b)に示すように中心部では高パワー密度のため蒸発や爆発的な飛散によって、かなりの部分が開孔される。しかし、その周辺では必ず溶融し、かつ飛散されない部分があるから、その凝集によって開孔部はさらに広がる。

以上のモデルに基づけば、加工径は溶融部の直径に等価であるといえる。したがって、式(1)の加工限界パワー密度 P_m は膜材料を溶融させるのに必要なパワー密度であり、2項で述べた結果から、それは融点の高さと一次的な関係にあることが予測できる。

4.2 加工径と照射出力

図7は Al 膜について厚さを変えて加工径と照射出力の関係を示したものである。照射出力を低下させると加工径も小さくなり、加工が行なわれる限界出力は厚さ 0.05μ で約 40 W、 1.3μ で約 300 W と膜厚さによって

増加するが、一次的には比例していない。関係曲線は膜厚さによってほぼ平行に移動し互いに交差することがない。この点が前報で述べたビーム半径を焦点距離によ

図 7 照射出力と加工径の関係の膜厚さによる相違

図 8 膜厚さを変えた場合の出口比と R/ω の関係

図 9 照射出力と加工径の材料による相違

図 10 材料を変えた場合の出口比 R/ω の関係

て変えた場合と相違する。加工限界における照射出力を基準に出力比をとると、その値は P_c/P_m に等しいので、これらの関係曲線を式(1)による無次元的な関係に書き直すことができる。図 8 はその結果で、各膜厚さにおける実験値は実線で示す理論曲線とよく一致している。したがって、膜厚さが相違することは無次元式(1)における加工限界パワー密度 P_m が相違するとみることができる。

つぎに、膜厚さを 0.1μ と一定にして材料を変えた場合の照射出力と加工径の関係を図 9 に示す。加工が行なわれる限界出力は、Cu で約 100 W と比較的高く、Pb では約 2 W と非常に低くなるなど材料による相違が大きい。しかし、膜厚さを変えた場合と同様に、これらの関係曲線は互いにほぼ平行である。したがって、図 10 に示すように無次元関係に書き直せば、各材料の実験値は実線で示す理論曲線とよく一致する。これから、材料の相違も加工限界パワー密度の相違と等価であるとみなすことができる。

以上によって、加工径に及ぼす膜厚さ、材料特性の影響は、加工限界パワー密度が材料特性などどのような関係にあるかの問題に帰着する。この関係が明らかになれば、式(1)によって所望の加工径に対する照射条件などを容易に設定することができる。

4.3 加工限界パワー密度

図 9 から各材料について、加工限界における照射出力 $P_{0,m}$ を求めることができる。このときの中心点におけるパワー密度は

$$P_{c,m} = \frac{2P_{0,m}}{\pi\omega^2} \quad (6)$$

で与えられ²⁾、加工限界パワー密度 P_m に等しい。しかし、このようにして求めた値は見かけの値で、実際に加工に有効な値ではない。一般に、金属は YAG レーザの波長 1.06μ に対して高い反射率をもち、加工に利用される照射出力はごく一部に過ぎない。そこで、各材料について実測した反射率から反射損失を求めて得た実効の加工限界パワー密度を、見かけの値などとともに表 2 に示す。

反射損失を含む見かけ上の加工限界パワー密度は、Ag, Al のような反射率の高い材料で大きく、Pb のような反射率の低い材料で小さく、熱伝導率、融点などの熱的性質との関係がみられない。これに反して、実効の加工限界パワー密度は融点と一次的に比例している。

図 11 は 0.1μ 厚さの各材料について、加工限界パワー密度の実効値と融点の関係を示したものである。ここで、点線は式(5)から求めた膜の表面温度を融点まで上昇させるのに必要なパワー密度である。実験値は計算値の

表 2 加工限界パワー密度

材 料	融 点 (°C)	反射率 (%)	加工限界パワー密度	
			見かけの値 (W/cm ²)	実効値 (W/cm ²)
Ta	2850	63	4.5×10^6	1.7×10^6
Cr	1800	62	3.9×10^6	1.5×10^6
Mn	1250	53	2.6×10^6	1.2×10^6
Cu	1084	93	1.3×10^7	8.8×10^5
Ag	960	95	1.1×10^7	5.4×10^5
Al	660	92	6.8×10^6	5.4×10^5
Pb	330	66	4.9×10^5	1.7×10^5
Sn	232	60	3.5×10^5	1.4×10^5

$$\omega = 21 \mu$$

図 11 融点と加工限界パワー密度の関係

ほぼ 2 倍になっているが、融点に対するパワー密度の増加の傾向は両者とも同一で、融点とパワー密度は一次的な関係にある。したがって、4.1 項における加工状態の観察結果を考えあわせて、加工限界パワー密度は薄膜温度を融点まで上昇させるに必要なパワー密度であると結論される。熱伝導率などの他の材料特性が加工限界パワー密度に大きな影響は及ぼさないことは、前述の温度解析の結果である図 1 から説明することができる。また実験値と計算値の定量的な相違は、熱伝導の解析においてガウス型熱入力を一様な面熱源とするなどの仮定を置いているためと思われる。また常温における反射率を用いても、実験値が計算値と定性的に一致することは、反射率の温度係数が材料によって大きくは変わらないことを意味している。Chun ら⁶⁾ は加工穴の内壁による多重反射によって吸収量が上昇し、穴が生じないかぎりには反射量の変化は小さいことを示している。薄膜の場合、多重反射を生じるような穴は加工されないので反射量の変化

図 12 膜厚さと加工限界パワー密度の関係

は小さいと考えられる。

図 12 は Al についての膜厚さと加工限界パワー密度の関係である。ここで、点線は式(5)より求めた膜を融点まで加熱するのに必要なパワー密度である。膜厚さが 0.1μ 以下では加工限界パワー密度はほぼ一定であるが、 0.3μ 以上から膜厚さによって急激に加工限界パワー密度は増加し、膜厚さと一次的な関係にはない、これらの傾向は点線で示した計算値におけるものと同一である。したがって、膜厚さを変えた場合からも、加工限界パワー密度は膜を溶融させるのに必要なパワー密度であることが裏付けられている。

5. 結 言

Q スイッチ YAG レーザによる薄膜加工において、一次元熱伝導論による解析、加工状態の観察、加工径と照射出力の関係などから、加工限界パワー密度の物理的意味、材料特性との関係などを検討し、以下に要約する結果を得た。

- 1) 蒸発や溶融物の飛散によって一部が除去され、さらに残存の溶融物が表面張力によって凝集することにより薄膜は開孔する。
- 2) 凝集によって開孔される割合は、加工径が小さいほど大きく、ほとんど凝集によってのみ開孔する場合もある。
- 3) 加工限界パワー密度は膜を溶融させるのに必要なパワー密度に等しく、膜厚さ 1μ 以下では、反射率と融点に一次的に関係する。
- 4) 材料や膜厚さを変えることは、式(1)における加工限界パワー密度 P_m を変えることに相当する。

おわりに、レーザ加工装置の設計にご指導をいただいた柏原稔氏、有益なご議論をいただいた同室の諸氏に深く感謝します。

引用文献

- 1) M. Cohen: Laser Machining of Thin Films and Integrated Circuits, Bell Systems Technical J., **47**, 3 (1968) 385.
- 2) 中山 了, 柏原 稔: Qスイッチ YAG レーザの集光照射特性, 精密機械 **30**, 10 (1970) 40.
- 3) S. Nakayama et. al., Bulletin of the Japan Society of Precision Engg., (to be published).
- 4) J. Stanley: Electrical and Magnetical Properties of Metals, American Society for Metals, (1963) chap 2.
- 5) たとえば T. Hutchison: 工業物性学要論, アネグ (1964) 10 章.
- 6) M. Chun, K. Rose: Journal of Applied Physics, **41**, 2 (1970) 614.

—表紙説明—

FTN 35C-I 形数値制御タレットフライス盤

<マシニングセンタ>

ユーザにご満足のいただける新しい
NC タレットフライス盤……

数値制御でフライス削り, 穴明け, ねじ立て, リーマ仕上げ, 中ぐり加工を行なう, 8 軸タレットタイプの本機は, 8 インチのフライスカッタによる重切削が可能な, 強力高剛性立形フライス盤であります。

特長

1. 強力高剛性

主軸駆動系は電動機より主軸まで一体化されたギヤボックスに納められ, 変速はギヤの自動油圧シフトにより行なわれ, 動力伝達を有効に活用できる剛性ある構造になっています。また, 主軸は 80 mm のベアリングを使用し, 軸端は ASA 50 となっているため, 中ぐり・穴あけ・リーマ仕上げ・ねじ立て加工はもちろん直径 200 mm の大形フライスによる重切削加工もできます。

2. MAS 標準ホルダの採用

MASBT-50 (規格番号 MAS-403-1969) ホルダの採用によりマシニングセンタのホルダと共用が可能で, 工場内の工具管理上有利です。

3. 合理的な主軸構成

高速軽切削, 低速重切削用に考慮されたベアリング構成を採用し, 目的にあわせて使い分けられます。

標準仕様

機械仕様

加工の種類		フライス削り, 穴あけ, ねじ立て, リーマ仕上げ, 中ぐり
制御対象軸		3 軸 (同時 1 軸)
テーブル寸法	mm	1,600×500
テーブル移動距離 (X 軸)	mm	1,000
サドル移動距離 (Y 軸)	mm	500
ヘッド移動距離 (Z 軸)	mm	400
主軸中心からコラム面までの距離	mm	500
送り速度 (3 軸とも)	mm/min	※ 5~1,200 (F1 桁コード)
早送り速度 (3 軸とも)	mm/min	※ 4,800
主軸数	本	8
主軸回転速度	rpm	45~2,000 (12 段自動変速)
主軸端形状		ASA 50
主軸用電動機	kW-P	AC 7.5-4/6/8 P
油圧ポンプ用電動機	kW-P	AC 7.5-6 P
総所要床面積	mm	4,200×4,200
正味重量	kg	7,500

制御装置仕様

ご希望に応じ各種制御装置に対応できます。

制御の種類		位置決めおよび直線切削
制御の形式		インクリメンタルまたはアブソリュート
最小設定単位	mm	0.01
入力形式		EIA 標準コード 8 単位 せん孔テープ
テーブルリダ形式能力		※光電式 200 ch/sec テープリールなし
送り速度指令		※ F 1 桁コード
主軸速度指令		※ S 2 桁コード
補助機能指令		※ M 2 桁コード
電源仕様		※ AC 200 V ± 10% 50/60 Hz ± 1 Hz

※印は制御装置によって変わります。

豊田工機株式会社

本社・工場
岡崎工場
東京出張所
大阪出張所
九州営業所
北陸営業所
広島営業所

愛知県刈谷市朝日町1丁目1番地
愛知県岡崎市市場町桐山8番地
東京都中央区八重洲6丁目1番地 (日東紡ビル)
大阪府南区塩町通り4丁目18番地 (大阪豊田ビル)
福岡市長浜2丁目5番109号 (港ビル)
金沢市尾張町36番地 (三田ビル)
広島市基町5番44号 (商工会議所ビル)

電話 (0566) 22-2211 番 ☎ 448
電話 (0564) 48-2321 番 ☎ 444-35
電話 (03) 281-1741 番 ☎ 104
電話 (06) 252-0671 番 ☎ 542
電話 (092) 76-6948 番 ☎ 810
電話 (0762) 31-4463 番 ☎ 920
電話 (0822) 21-8363 番 ☎ 730