金属の穴あけ特性*

—電子ビームによる穴あけ加工—

宮崎俊行** 吉岡俊朗*** 木村達夫†

Drilling Characteristics of Metals

—A Study of Electron Beam Drilling—

Toshiyuki MIYAZAKI, Shunro YOSHIOKA, Tatsuo KIMURA

In electron beam drilling of metals, drilling characteristics depend on physical constants of metals to be drilled and on drilling conditions of pulsed electron beam to be used, i. e., beam power, beam diameter, pulse duration, number of pulses, etc. In the present paper, the drilling characteristics are experimentally studied on various kinds of metals by varying pulse duration and number of pulses. The effects of these conditions on drilled diameter and on drilled depth were obtained. The drilled diameter varied with the pulse duration slightly, but did not vary with the number of pulses used. The drilled depth varied both with the pulse duration and with the number of pulses. The effect of number of pulses on the drilled depth could be explained based on a proposed model of drilling mechanism. Moreover, it has been discovered that various relations between the pulse duration and the drilled depth for individual metals can be summarized to a single general relation between a normalized pulse duration and a normalized depth.

1. 緒 言

電子ビームによる穴あけ加工においては、加工物の材質や所要の穴の寸法、たとえば穴径や穴深さ（あるいは、板の厚さ）に応じた加工条件、すなわちビーム径、ビームパワー、パルス幅、パルス数、パルス周波数が必要である。しかし、従来の実験データを考えると、各種材料に対して、加工が容易であるかどうかの定性的な意味でのデータ¹⁾、あるいは材質を固定し、かつパルス幅もあまり変化させない範囲でのデータに限られている²⁾。

本報告は、本加工法が加熱除去によるものであることを考慮して、熱定数が広い範囲にわたるように試料材質を選び、加工時間（ビームのパルス幅）、加工回数（照射パルス数）と加工特性の関係、特に加工穴深さとの関係を中心として論じたものである。

2. 実験方法および実験結果

2.1 実験方法

実験は、試作した電子ビーム加工機を用いて行った。

* 原稿受付 昭和52年1月26日。昭和50年度精機学会春季大会学術講演会（昭和50年4月5日）にて発表。

** 正会員 理化学研究所（和光市広沢2-1）

*** 正会員 千葉工業大学（習志野市谷津町7-1916）

† 正会員 オリジン電気（株）（東京都豊島区高田1-18-1）

加速電圧は100 kV、ビーム電流は30 mAである。なお、電子銃フィラメントはヘアピン型である。ビームのパルス幅は0.1, 0.2, 0.5, 1.0 ms、照射パルス数は1, 2, 5, 10, 20, 50で、パルス繰返し時間は1 sである。最長パルス幅を1 msとしたのは、装置の容量上の問題からである。

試料材質は、前に述べたように、熱定数を広い範囲にわたって変化させるため、アルミニウム、軟鋼（S15C）、銅、モリブデンを用いた。

試料は、穴あけ後切断し、エッチングを行って加工部の形状を観察した。

2.2 ビーム収束条件の加工に及ぼす影響

加工性は、ビーム収束条件、すなわちパワー密度に大きく依存する³⁾。それゆえ、本試作装置においても、ビーム収束条件が加工に及ぼす影響について調べた。まず試料位置を固定し、レンズ電流を変化（レンズ焦点距離を変化）させ、そのとき得られる加工穴深さ、加工穴径から、その後の実験に用いる収束条件を決定した。加工は、幅1 msのパルス1発で行った。試料としては、前述の材質すべてを用いたが、すべての材質についてはほぼ同じ結果を得たので、その一例のみを図1に示す。図中、横軸は、最大穴深さを得たときのレンズ電流を基準として相対値で示してある。縦軸には、穴深さおよび穴径（試料表面における加工穴の大きさで、その形が円で

はなく、だ円に近い形、短径 A 、長径 B の両者)を示してある。図より明らかなように、穴深さは、最大深さを得る収束条件を軸として、ほぼ対称の曲線で表せる。さらに、穴径が最小となる収束条件と穴深さが最大となる収束条件は、ほぼ一致する。次に、加工穴の形から、最大穴深さを得る収束条件を求めることができるかどうかを調べるため、穴径 A, B の比 A/B を求めた。その結果も図1に示してある。これより、 A/B が最小のとき、穴深さは最大となることが分かる。それゆえ、深い穴を必要とする場合の収束条件は、試料表面上における穴の形状を調べるにより簡単に求めることができる。

次に、試料位置を変位させた場合の影響を考える。これは、穴あけ加工が進行するにつれて、試料表面が移動することになるから、図1で求めた最適条件からのずれが大きき場合は、加工の進行にともない収束条件も変化させる必要が生ずるためである³⁾⁴⁾。図1で用いた試料位置のレンズ中心からの距離は、ほぼ300mmであった。一方、本報告の実験で得られた穴深さは、最大で2mm程度であるから、穴があくことによって生ずる相対的な試料位置の変化は、ビームの収束性にほとんど影響を与えないものと考えられる。それゆえ、以後の実験は、試料位置を固定し、収束条件は、図1の基準値1を用いて行った。

2.3 加工条件の加工穴径に及ぼす影響

加工穴の断面形状は、円筒形ではない。試料表面に近い部分は円すい台に近い形を、その先端では円すい形に近い形をしている⁴⁾。ここでは、最大寸法を示す試料表面における径について調べた。さらに、試料表面におけ

る形状は、図1に示すようにだ円形に近い形、長径、短径の平均値を穴径とした。

穴径に対するパルス幅の効果を調べた結果を図2に示す。パルス数1, 20の場合を同時に示してある。図より、この範囲の幅のパルスでは、穴径の増大はゆるやかであることが分かる。すなわち、パルス幅は穴径に対して大きな効果はもたない。また、パルス数1と20の場合を比較すると、差はないことが分かる。例として、パルス幅0.2msの場合のパルス数と穴径の関係を示したものが図3である。パルス数は、穴径に対して何ら影響を及ぼさないことが分かる。これらの結果より、複数のパルスを用いて穴あけを行うとき、得られる穴径は、ほとんどそのときのパルス幅のみで決まり、パルス数には依存しないといえる。

2.4 加工条件の加工穴深さに及ぼす影響

パルス数が1の場合、パルス幅が短ければ、穴深さはパルス幅にほぼ比例して増加する⁴⁾。本実験条件においても同様の結果であった。しかし、複数のパルス数の場合におけるパルス幅と穴深さの関係は、これとは一致しない。たとえば、パルス数が1と20の場合の関係を示したものが図4である。パルス数1では、穴深さはパルス幅にほぼ比例する。しかし、パルス数20の場合は、比例

図4 パルス幅と穴深さの関係

の関係ではなく、わずかながら飽和の傾向を示していることが分かる。この傾向は、軟鋼、アルミニウムについては顕著であるが、モリブデンについては、まだ比例の領域にある。すなわち、この特性は、材質に依存するものであることが分かる。また、パルス数20の場合、軟鋼の方がアルミニウムより深い穴を得ている。アルミニウム試料の断面を調べると、溶融体が試料の外へ除去されず、穴の途中で凝固している。すなわち、ビームエネルギーが穴の先端へ供給されにくいいため、このように、逆転した穴深さとなったものと考えられる。

さらに、図4の結果から、パルス数の穴深さに対する効果を考えると、パルス数を20倍にしても、穴深さは20倍にはならない。すなわち、パルス数を多くしても、深い穴を得ることは困難であることが推定できる。例として、パルス幅を0.2 msとした場合のパルス数と穴深さの関係を求めた。結果を図5に示す。明らかに、本実験条件では、パルス数を20以上に増加しても、穴深さは一定となり増加しない。これは、試料材質にはよらない。さらに、この穴深さの飽和現象に対するパルス幅の影響を考えると、図4からも明らかのように、パルス幅が長いほど、飽和深さは大きくなることが分かる。

本項と2.3項の実験結果より、小さな径の穴を要求する場合は、短い幅のパルスで加工を行う必要があるが、穴径は大きくとも深い穴を要求する場合は、長い幅のパルスを用いればよいことが分かる。

3. 検 討

以上の実験結果より明らかのように、穴径と穴深さは、加工条件（パルス幅、パルス数）に対して、相反する特性を示す。しかしながら、図2～5より、穴径の加工条件

図5 パルス数と穴深さの関係

に対する依存度は、穴深さの加工条件に対する依存度より小さいことが分かる。それゆえ、ここでは、穴深さに関して検討する。また、図4で示した溶融体が穴の途中で凝固し、ビームが穴先端まで到達できないアルミニウム試料については除くことにする。

3.1 パルス数の増加による穴あけの進行特性

穴あけを行うとき、加工エネルギーを決めるパルス数 n とパルス幅 τ の関係には、

- (1) n : 一定, τ : 変化
- (2) n : 変化, τ : 一定
- (3) n, τ : 変化

がある。本報告の実験で用いた条件(1)、(2)について比較すると、その穴あけの進行特性には、大きな差がある。パルス数20、パルス幅0.2 ms ($n \cdot \tau = 4$ ms)を例にとると、パルス幅を変化させる場合は、穴深さは、図4よりまだ増加の過程にあるが、パルス数を変化させる場合は、図5より、既に飽和の領域にあることが分かる。

パルス幅を変化させた場合の考察は既に報告したので、ここでは、パルス数を変化させた場合の穴深さを考える。特に、パルス数1の場合との比較、検討を試みる。

総パルス幅（加工エネルギーを加工に用いたパルス幅の積算値で代表させ、この語を用いる）を1 msとし、試料を銅とすれば、それぞれの条件における穴深さは、表1に示すようになる。これから、パルス数1、パルス幅1 msによる穴深さが他の条件よりも大きな値をとることが分かる。すなわち、表1、図4の結果より、次のよう

表1 総パルス幅を一定 (1 ms) とした
場合の穴深さ (試料: 銅)

パルス数	1	2	5	10
パルス幅 (ms)	1	0.5	0.2	0.1
穴深さ (cm)	7.3×10^{-2}	5.7×10^{-2}	3.6×10^{-2}	—

に結論できる。ある一定の総パルス幅で加工を行うとき、連続的にビームを照射すれば、すなわち総パルス幅と等しい幅のパルス1発によれば、最大深さの穴を得ることができる。しかし、断続的にビームを照射すれば、穴深さは小さくなり、その上、用いるパルス幅を短くするほど、すなわちパルス数を多くするほど穴深さは小さくなる。

2.2項で示したように、本実験により得られる程度の穴深さでは、ビームの収束状態は変化しないと考えられるから、ビームのパワー密度は一定としてよい。それゆえ、この現象を説明するものとしては、次の事実が考えられる。

(i) 試料を加熱してから溶融体除去が起こるまでには、ある程度の時間 (これを以後、遅れ時間という) が必要である。

(ii) ビームを断続的に照射する場合、常温付近まで冷却した試料を、それぞれのパルスによって再び加熱しなければならない。すなわち、それぞれのパルスによる加工に対して遅れ時間が存在し、パルス数が増えると、当然、遅れ時間の総和は大きくなる。

溶融体除去が起こるまでに、遅れ時間が存在するという事実、図4あるいは表1の銅の場合に顕著に表れている。すなわち、パルス幅 0.1 ms では、溶融領域は認められても、加工穴といえるものは得られなかったが、0.2 ms の場合は、穴が得られている。これから、溶融体除去が生じて、穴があくまでには、少なくとも 0.1 ms より長い幅のパルスが必要であることが分かる。しかしながら、マクロ的には、図4からも明らかなように、幅 0.2 ms 以上のパルスでは、ほぼパルス幅に比例して穴深さは増加している。これは、既に報告したように⁴⁾、次のような現象によるためと考えられる。溶融体の除去は、連続的に発生するものではなく、除去の臨界条件に達するごとに、ある一定量の溶融体が除去される。これらの除去のうち、最初の除去は、常温からの加熱のため比較的長い時間を必要とするが、それ以後は、溶融領域の温度分布が準定常状態になるものと考えられるため、比較的一定間隔で除去が発生する。それゆえ、マクロ的には、除去速度はほぼ一定値、すなわち穴深さはほぼパルス幅に比例する。

図6 穴深さと遅れ時間の関係

図7 穴あけ進行特性
のモデル

さらに、この遅れ時間と穴深さの関係を考える。たとえば、図5の飽和深さの存在は、その深さにおいて、幅 0.2 ms のパルスによっては穴深さは増加しない、すなわち穴あけが生じないことを示している。しかし、図4より明らかなように、この飽和深さ以上の穴あけを行うことは、パルス幅を長くすることにより可能である。これは、飽和深さに等しい深さにおける遅れ時間が、そのとき用いたパルス幅と等しいことを意味している。このようにして求めた穴深さとその深さにおける遅れ時間の関係が図6である。

以上の考察と実験事実に基づいて、パルス数と穴深さの関係をモデル化したものが図7である。穴深さの増加速度は、実験データからも明らかなように、一定値をとるから、ビームを連続的に照射した場合は、(I)に示すように、穴あけが進行していく。しかし、このように一定速度で穴あけが生ずるまでの遅れ時間 τ_1' は、マクロ的なパルス幅と穴深さの関係からは求めることはできない。たとえば、銅については、0.1 ms では穴はあかなくとも、0.2 ms 以上のパルス幅では、穴深さはほぼパルス幅に比例しており、結果的には、 $\tau_1' < 0.1$ ms となるためである。さらに、図6に示すように、遅れ時間は、穴深さが小さい範囲ではほぼ穴深さに比例するため、深さが0の場合、すなわち最初のパルスによる加工では、遅れ時間が非常に小さい値であることは推定できる。

表2 k および α の値

	軟 鋼	銅	モリブデン
k (s/cm)	1.2×10^{-3}	5.0×10^{-3}	1.4×10^{-2}
α (cm/s)	1.1×10^2	8.0×10^1	4.7×10^1

表3 式(4)より得た穴深さ (cm) と
実験で得た穴深さ (cm)
(パルス幅: 0.2 ms)

パルス数	2	5	10
軟 鋼	3.9×10^{-2} (3.6×10^{-2})	8.2×10^{-2} (8.6×10^{-2})	1.2×10^{-1} (1.2×10^{-1})
銅	2.2×10^{-2} (2.8×10^{-2})	3.5×10^{-2} (3.6×10^{-2})	3.9×10^{-2} (4.1×10^{-2})
モリブデン	1.0×10^{-2} (1.1×10^{-2})	1.3×10^{-2} (9.0×10^{-3})	1.4×10^{-2} (1.5×10^{-2})

カッコ内の値は実験値

次に、ビームを断続的に照射した場合の2発目のパルスについては、図に示すように、遅れ時間 τ_2' 以後は、穴深さの増加速度は、パワー密度が一定であるから、(I) の場合と等しい値、すなわち穴深さは、(II) のように (I) に平行で増加していく。

図7を基礎にして、 τ' と D がほぼ比例関係にある範囲についてのパルス数 n と穴深さ D の関係を考える。

パルス数 n は自然数であり、不連続量であるが、ここでは、形式的に微小量 Δn を考える。図7から明らかにように、パルス数 Δn による穴深さの増加量 ΔD は、

$$\Delta D = (\alpha\tau)\Delta n - (\alpha\tau')\Delta n \quad (1)$$

で与えられる。ここで、 α は、後項で述べるように試料材質、ビーム条件によって定まる値であり、図7の(I)、(II)の勾配、すなわち穴深さの増加速度である。 τ はパルス幅である。一方、ここでは、 τ' 、 D の関係は、 k を試料材質、ビーム条件によって定まる比例定数として、

$$\tau' = kD \quad (2)$$

の場合を考えているから、式(1),(2)より、

$$\frac{\Delta D}{\Delta n} = \alpha\tau - \alpha kD \quad (3)$$

を得る。式(3)を、初期条件 $n=0$ で $D=0$ を用いて解き、 $D_s = \tau/k$ とおくと、次式を得る。

$$D = D_s(1 - e^{-\alpha kn}) \quad (4)$$

式(4)で $n \rightarrow \infty$ とした場合の $D (=D_s)$ は、 $\tau' = \tau$ となった場合の穴深さを示すものであり、図5の飽和深さである。図5,6より求めた α, k の値を表2に示す。さらに、 $\tau = 0.2$ ms の場合のパルス数と穴深さの関係を、表2および式(4)を用いて求めた。結果を表3に示す。なお、同時に実験値も示してある。明らかに、飽和するまでの穴

図8 無次元化したパルス幅と穴深さの関係

深さは、式(4)によって表すことができる。これは、パルス数と穴深さの関係は、図7に示したモデルによって説明できることをさらに裏付けるものである。

3.2 試料材質と穴深さ

3.1項で述べたように、パルス数が1の場合、穴深さはパルス幅にほぼ比例するが、パルス数が増加すると、パルス幅と穴深さは比例しない。まず、比例関係にあるパルス数1の場合を考える。穴深さとパルス幅の関係は、次式で与えられる。

$$D = \alpha\tau \quad (5)$$

ここで、 α は、 Q, R, ρ, L_m, c, T_b を、それぞれビームパワー、ビーム半径、試料の密度、融解熱、比熱、除去される溶融体の温度とすれば、式(6)で表せる⁴⁾。

$$\alpha = \frac{Q}{\pi R^2 \rho (L_m + cT_b)} \quad (6)$$

それゆえ、式(5),(6)より、次式を得る。

$$\frac{K(T_b + \frac{L_m}{c})D}{Q} = \frac{\kappa\tau}{\pi R^2} \quad (7)$$

ここで、 K, κ は試料の熱伝導率、温度拡散率である。また、 T_b は除去される溶融体の温度であるから、除去の臨界条件に依存する。すなわち、ビームの加速電圧やビーム径の影響を受けるものと考えられる⁴⁾。しかし、ここでは、式(7)を一般化するため、 T_b として融点を用いることにする。このとき、式(7)の左辺は、ビームパワーおよび試料材質の特性を含む無次元化された穴深さを、右辺は、ビームの大きさおよび試料材質の特性を含む無次元化されたパルス幅を表すことになる。式(7)を用いて実験値を整理した結果が図8である。なお、図においては、ビーム径として、ビームパワー密度が中心の $1/e$ となる半径をエッジ法により求め⁵⁾、その結果得た値(長径と短径の平均値) 4.5×10^{-2} cm を用いた。これ

図9 穴あけに対するパルス数の効果

から, 式(7)によって, 各種材質に対するパルス幅と穴深さの関係を表すことができることが確かめられる。

一方, パルス数が20の場合, 図5に示すように, パルス数と穴深さの関係は飽和領域に入っている。しかし, 式(7)の右辺を20倍し, すなわちパルス幅を20倍にしたと考えると, 図8に同時に示してみた。これから, 飽和領域に入った場合は, すべての試料材質を含めた関係を単純な形で表すことはできないが, 図6に示すように, 飽和深さとそのとき用いたパルス幅の関係がほぼ比例する¹⁾ような材質, すなわちモリブデンについては, パルス数1の場合と同様の関係で表せる。図8を考慮し, 式(7)を変形してこの関係を求めれば, 式(8)となる。

$$\frac{K\left(T_b + \frac{L_m}{c}\right)D}{Q} = f(n) \cdot \frac{\kappa(n\tau)}{\pi R^2} \quad (8)$$

ここで, $f(n)$ は, パルス数 n によって決まる定数であり, たとえば, 図8においては, $f(20) \approx 8 \times 10^{-2}$ である。 n と $f(n)$ の関係を求めた結果が図9である。 $f(n)$ は, パルス数の加工に対する効果を示す係数であり, パルス数を増加させて, 加工エネルギー(総パルス幅)を増加させても, その穴深さに与える効果は, 急速に低下することが分かる。

4. 結 論

電子ビームによる金属の穴あけ加工に関して, 実験および検討を行い, 以下の結論を得た。

- (1) 本実験条件の範囲では, 穴径は, パルス幅, パルス数にあまり依存しない。
- (2) 穴は, パルス幅を長くした方が深くなる。一方, パルス数を増加させると, ある程度は深くなるが, 最終的には一定値となる。
- (3) パルス幅を一定としたときのパルス数と穴深さの関係について考察を加えた。特に, ビーム照射開始

から溶融体除去が起こるまでの時間(遅れ時間)を基礎にして, 穴あけの進行特性に関するモデルを提案し, パルス数と穴深さの关系到合理的な説明を与えることができた。

- (4) 1発のパルスによる穴あけについては, パルス幅, 穴深さを, それぞれ試料材質の熱定数やビーム条件を含めて無次元化すると, 試料にはよらずに単純な関係が成立することを示した。
- (5) パルス数の穴深さに与える効果を数値化し, 例を図で示した。

最後に, 本研究を行うにあたり, 実験に協力いただいた当時千葉工業大学学生浅川良司氏, 植原邦芳氏, 鷺見均氏に感謝致します。

付 記

電子ビーム溶接の溶け込み深さ D_w と溶接速度 V_w の関係も無次元化して与えられている⁹⁾。すなわち, 次元解析により, D_w に関しては, 式(7)と同じ形, V_w に関しては $2V_w R/\kappa$ と無次元化し, さらに実験値より求めた

$$\frac{K\left(T_b + \frac{L_m}{c}\right)D_w}{Q} \propto \sqrt{\frac{\kappa}{2V_w R}} \quad (9)$$

なる関係である。式(9)において, 穴あけ加工のパルス幅に相当するのは, ある点の加熱時間 $\tau_w = R/V_w$ である。すなわち, 式(9)は, 比例定数 C_1 を用いて,

$$\frac{K\left(T_b + \frac{L_m}{c}\right)D_w}{Q} = C_1 \sqrt{\frac{\kappa \tau_w}{\pi R^2}} \quad (10)$$

となる。このように, 溶け込み深さが, 穴深さと異なった形式となるのは, 溶融体の攪拌, さらに, ビームの移動が入り, 現象を複雑化しているためと思われる。

参 考 文 献

- 1) 金谷光一, 橋本達哉, 田中一光: 電子ビーム, 日刊工業新聞社(1970) 140。
- 2) G. Pahlitzsch u. A. Visser: Strahldivergenz und Elektronenstreuung als Ursache für das Aufheizen der Randzonen bei der Elektronenstrahlbearbeitung, VDI-Z, **109**, (1967) 1197。
- 3) G. Pahlitzsch u. G. Kuper: Messung der Stromdichteverteilung im Elektronenstrahl hoher Energiedichte, VDI-Z, **111**, (1969) 83。
- 4) 宮崎俊行: 単一パルス高パワー密度電子ビームによる金属の穴あけ加工, 精密機械, **40**, 11 (1974) 1012。
- 5) 宮崎俊行, 木村達夫: アルミニウム箔の穴あけとパワー密度分布——電子ビームによる穴あけ加工(続報), 精密機械, **42**, 11 (1976) 1067。
- 6) M. H. Hablanian: A Correlation of Welding Variables, Proc. 5th Symp. Electron Beam Technology, Alloy Electronics Corp., Mass., (1963) 262。