電子ビーム加工の研究*

—グリーンシート加工時のビームデフォーカス現象—

寺 林 隆 夫** 堀 尾 健 一 郎***

Study on Electron Beam Machining
—Beam Defocusing Phenomenon in Drilling of Alumina Green Sheet—

Takao TERABAYASHI and Kenichiro HORIO

This paper deals with a high speed drilling of alumina green sheet with a fine focused electron beam. Some experiments to drill many holes in a $16 \times 16 \text{ mm}^2$ area by means of single pulse beam scanning with beam deflection were performed and the following results were obtained. (1) The diameter increase is observed during machining when the time interval of beam pulses is short. This diameter increase is due to upward focal movement of an electron beam focused on the workpiece surface by the influence of the gas which is generated by the thermal degradation of organic binding material in the green sheet. (2) The increment in diameter decreases logarithmically according to the increase in time interval of beam pulses and also decreases somewhat according to the increase in distance between holes. (3) The diameter increase can be compensated by a dynamic focus control which cancels the actual focal movement in a machining.

Key words: electron beam machining, drilling, alumina, green sheet, beam defocusing, dynamic focus control

1. 結 言

セラミックスは硬ぜい材料で加工が難しいため、アルミナのように常圧焼結可能な材料では焼結前のいわゆるグリーン（生）状態で加工されることが多い。しかしながら、グリーン状態といえども大量のセラミック粒子を含んでいるため、通常の機械的な加工では著しい工具摩耗を生じる。したがって、微細穴を大量に加工するような場合には非接触加工が可能なビーム加工が有利である。そこで、原理的に高速加工が可能な電子ビーム加工に着目し、それによるアルミナグリーンシートの微細穴あけ加工の研究を行ってきた。ところで、グリーンシートにテーパが小さくかつ熱影響の少ない穴を加工する場合、短いパルス幅のビームによるマルチパルス加工が不可欠である。しかしながら、マルチパルス加工においてデューティファクタが大きいと蒸発物質の影響によるビームの広がりにより穴形状が悪化するためデューティファクタを1%以下と、

非常に小さくとる必要があることを明らかにした¹⁾。

ところで、電子ビーム加工の最大の利点は加工パラメータがすべて電氣的に制御できることに基づく高速加工性と微細加工性であると思われる。しかるに、低デューティファクタで加工するということはビームパルス間隔が長くなることであり、そのため加工速度を著しく犠牲にすることになる。

本報では、上記の問題点を解決する一手段としてビームの高速偏向位置決めを利用したシングルパルスビームの多重走査方式の高速穴あけ法およびその際に生じるビームデフォーカス現象について述べる。

2. 実験方法および実験条件

2.1 実験方法

マルチパルス方式により大量の穴を加工する場合、一つの穴に複数個のビームパルスを投入して貫通穴を形成した後、次の穴を加工するのが通常の方法である。しかしながら、図1に示すようにデューティファクタが大きくなるに従って、同一加工条件でも入口径が増大した結果として穴テーパが増大し、円筒度劣化が生じる。そこで、見かけ上デューティファクタが小さくしかも高速加工が可能な方法として次に述べるシング

* 原稿受付 昭和63年1月8日。昭和62年度精密工学会春季大会学術講演会（昭和62年3月29日）にて発表

** 正 会 員 （株）日立製作所（横浜市戸塚区吉田町292）

*** 正 会 員 埼玉大学工学部（浦和市下大久保255）

Fig. 1 Influence of duty factor on hole diameter and taper

Fig. 2 Experimental method

ルパルスビームの多重走査方式の穴あけ法について検討した。

図2に実験方法を示す。(a)は実験に用いた装置の収束コイル、偏向コイルおよび被加工物の配置を示す。被加工物上の1正方形領域(ブロックと呼ぶ)に偏向コイルのみによる位置決めを用いてビーム照射することにより複数個の穴を高速で加工する。(b)は1ブロック内の穴あけ順序を示したものであり、パルスビーム走査方式の穴加工法概念を表している。シングルパルスビーム照射と偏向位置決めの繰返しにより図に示した順序で合計 N 個の穴を加工する。このビーム走査過程を複数回繰返し返せば貫通穴を加工することができる。この場合、個々の穴について見てみれば、ひとつのパルスを照射してから次のパルスが照射されるまでには1ブロックのビーム走査が行われるため、かなり長い時間間隔がある。したがって、見かけ上極めて小さいデューティファクタで加工していることになる。

2.2 実験条件

Table 1 Experimental conditions

Workpiece	Alumina green sheet
Acceleration voltage	120 kV
Beam current	4 mA
Number of pulse	1 pulse/hole
Pulse duration	30 μ s
Beam pulse interval T_p	1.2-20 ms
Hole distance p	0.5-1.6 mm
Focusing condition df	0, +10, -10, -20, -30 mm
Working distance	300 mm
Initial vacuum rate	0.04 Pa

Fig. 3 Focusing conditions

表1に実験条件を示す。今回の実験には、板厚0.25 mmのアルミナグリーンシートを用いた。この材料は、アルミナ粉末、有機結合材、有機溶剤、可塑剤および若干の無機物などから成る複合材料であり、見かけは粘土状であるにもかかわらず高硬度アルミナ粒子を多量に含有しているため機械的な加工により穴あけすると著しい工具摩耗を引き起こしたり、またシートの塑性変形が生じて高精度化が難しい。この板厚のアルミナグリーンシートに対し、電子ビームにより表1のビーム条件で加工する場合、完全な貫通穴を形成するためには4パルス必要である。しかし、前述のパルスビーム走査方式の加工では1回走査した時の加工特性を明らかにすれば、後は全く同じ走査過程を4回繰返すだけで良い。したがって、今回の実験ではパルス走査を1回だけ行った時の加工特性について検討した。この際、1回のビーム走査での加工穴数 N は基本的には441個(21列×21行)としたが、実験に用いた加工機の偏向コイルの能力上、大きな穴間隔では21列21行の穴加工ができない。そこで穴間隔の影響を見る実験においては、すべての種類の穴間隔での実験について穴数を一定にするため、穴数を121個(11列×11行)とした。なお、収束条件 df の定義は図3に示す通りである。

3. 実験結果および考察

図4は前述の方法で加工した時の1ブロック内の各穴あけ位置における穴直径を示したものである。ビー

Fig. 4 Diameter change during machining

μパルス間隔 T_p を 20 ms と十分長くにとって加工すると、1 ブロック内のすべての穴について直径は一定である。しかしながら、 $T_p=1.2$ ms と短くすると、穴あけの初期において急激な穴直径の増大が見られ、穴数が 50 を超えたあたりからほぼ一定値になる。ここで、ブロック全体にわたって直径変化のないパルス間隔で加工した時の穴直径とそれより短いパルス間隔で加工した時の穴直径との差を直径増加量 ΔD と定義する。図 5 はこの時の 1 ブロック内の穴形状を示したものである。 $T_p=20$ ms の場合には、穴形状はブロック全体にわたって真円に近い良好な形状を保っているが、 $T_p=1.2$ ms の場合には、加工の進行につれて穴形状がいびつになる。この原因としては、(1) 隣接穴の熱影響、(2) 蒸発物によるビームの散乱、(3) ビーム焦点移動などが考えられる。このうち、(1) に関しては薄板中に瞬間熱源があるという仮定のもとに熱伝導計算²⁾を

行った結果、この穴間隔と時間間隔では隣接穴の熱影響は無視できるほど小さいことが判明した。また、(2) の場合について見てみると、蒸発物による単なるビームの散乱であればその広がり等は等方的であると考えられることから加工の進行と共に形状変化が生じることは説明できない。したがって、(3) の可能性が強い。そこで、次にこの原因をさらに詳しく調べるため、収束条件を変化させた実験を行った。

図 6 は加工穴径の変化に及ぼすビーム焦点位置の影響を示したものである。 $df=+10$ mm のオーバフォーカス状態から加工を開始すると $df=0$ mm の場合と同様に開始直後から穴径の増大が見られ、100 個目位からはほぼ一定値をとる。これは傾向的には $df=0$ mm の場合と同じであるが、この場合の方が寸法ばらつきが大きく、真円度劣化も著しい。一方、 $df=-10$ mm のアンダフォーカス状態から加工を開始した場合は初期にわずかに穴径が減少した後、再び増加し一定値に近づく。次に、 $df=-30$ mm から開始すると、穴径は指数関数的に減少した後一定値に落ち着く。そして、アンダフォーカス状態から加工を開始した方がオーバフォーカス状態からよりも寸法ばらつきが小さい。

以上の結果から、加工中にビーム焦点位置の上方への移動、すなわち収束作用の強化が生じていることがわかる。この焦点位置変化の原因としては、正イオンによる空間電荷の中和現象が考えられる³⁾⁴⁾。これは、入射電子と蒸発物との衝突によって生じたプラズマ中の正イオンによって電子ビーム中の電子の負電荷が中

Fig. 5 Change of hole shape during machining ($df=0$ mm)

Fig. 6 Diameter change during machining (Effect of focusing condition)

和された結果、電子同志の反発作用が弱まり収束作用が強まるというもので、結果的に焦点位置の上方への移動が生じる。図5の $T_p=1.2$ ms の場合に真円度劣化が生じたのは焦点移動により被加工物表面において非点収差が大きくなり、ビームの真円度劣化が生じたためである。

図7は加工中の被加工物表面近傍の状況を示したものである。これは図2(b)に示した経路で穴あけをしている過程を写真撮影したもので、露出時間が長いと複数のパルスによる発光が同時に示されている。写真において、パルス間隔 T_p が1.2 ms と小さい時は被加工物の表面近傍にのみ強い発光が見られるが、 T_p が20 ms と大きくなると各ビームパルスに対応した長いスプラッシュが認められる。(a)に見られる発光は実際には薄紫色をしており、表面付近に密度の高いプラズマが生成されていることが推察される。一方、(b)においても表面付近に薄紫色の発光が認められるがその程度は(a)に比べると軽微であり、また、スプラッシュの部分は淡いオレンジ色である。この理由としては、パルス時間間隔が小さい時には被加工物からの熱分解ガスが拡散しない状態で入射電子と衝突するため表面近傍にのみ密度の高いプラズマが生成されるが、パルス時間間隔が長くなると、蒸発ガスが広い範

Fig. 7 Luminescence during machining

囲に拡散したところに入射電子が来るため、プラズマは生成されるが、焦点移動を生じるほどその密度は高くない。すなわち、(b)において見られる長いスプラッシュもまたプラズマではあるがかなり低密度のものであると考えられる。電子ビームは元来負電界を持っており、特にビーム中心は周辺に比べて低電位にあるためプラズマ中の正イオンはビーム中心に集まりやすく、したがって、空間電荷の中和効果が起こりやすくなる³⁾。以上のことから、ビーム照射点近傍に高密度のプラズマが生成されないような条件で加工すれば穴寸法形状変化が生じないことがわかる。その最も簡単な方法は、パルス時間間隔を長くとることである。図8は直径増加量 ΔD とパルス時間間隔 T_p の関係を示したものである。 T_p 増加に対して ΔD は対数的に減少し、 T_p が約7 ms において $\Delta D \approx 0$ となり、プラズマの影響が見られなくなる。

次に、プラズマの影響を少なくするもうひとつの方法として穴間隔を大きくすることが考えられる。すなわち、プラズマの生成範囲外にビーム照射ができれば前記のような焦点移動現象は生じないはずである。この考えのもとに穴間隔の影響を調べた。図9は直径増加量 ΔD と穴間隔 p の関係を示したものである。間隔 p が増加すると、 ΔD は急に減少するが、 p が1 mmを超えると一定になる。言い換えれば、隣接穴を順次加工するのではなく、数ビッチ飛ばしながら穴あけすれば、焦点移動現象が多少緩和されることがわかるが、本質的な解決にはならない。

Fig. 8 Relation between beam pulse interval and diameter increase

Fig. 9 Relation between hole distance and diameter increase

4. 動的焦点制御による焦点移動の補正

以上のことからわかるように、パルス走査方式では原理的には高速加工が可能であるが、ビーム焦点移動現象を解決しなければ逆に通常のマルチパルス加工方式よりも遅くなる。しかしながら、直径増加が単なるビームの散乱ではなく焦点移動によることから、これを補正することが可能である。すなわち、図4における穴直径増加の傾向を相殺するように焦点位置を動的に移動させることにより補正できる。

図10に動的焦点制御の概念を示す。(a)は原理、(b)はそのための装置構成を示したものである。(a)においてジャストフォーカス状態から加工を始めると制御がなければ加工中に焦点位置が(A)のように動くのに対して、収束コイルにより焦点位置を(B)のように移動制御すれば(A)と(B)が互いに相殺され、焦点位置は見掛け上(C)に示すように変化しないという

Fig. 10 Concept of focal control

Fig. 11 Diameter change under focal control (Time constant 20 ms)

ものである。図5および図6の結果から見て、現実の現象が単純な指数関数で近似できると考えられることから、収束コイルの制御パターンとしては指数関数制御を採用した。ところで、ここで問題になるのは制御の程度と制御速度である。制御の程度に関しては図6の結果から考えて30 mm程度焦点が動かされれば十分である。また、図4でわかるように穴数にして50穴、時間に換算すると約60 ms程度で飽和する現象であることから、収束コイルとして数十msの時定数を持つものが必要になる。本実験に用いた加工機の収束コイルは焦点を大きく動かすように設計されているため巻数も多く、高速で焦点を動かすためには応答性が良くないことから、ここでは、(b)に示すようにこの収束コイルとは別に焦点移動量は少ないが、高速応答性を持つ補助収束コイルを設け、それによって焦点位置を動的に制御した。

図11~13に補助収束コイルを各種時定数で制御した時のコイルの電流制御パターンとその時の1ブロック内の穴径変化を示す。補助収束コイルを時定数20 msで制御した場合(図11)には穴数にして25穴程度までの間に直径が一度急激に増加した後再び減少し、

Fig. 12 Diameter change under focal control (Time constant 40 ms)

Fig. 13 Diameter change under focal control (Time constant 60 ms)

50 穴目付近から一定になる傾向を示す。これは補助収束コイルによる焦点移動制御の方が実際の焦点移動現象よりも速かったため、初期において収束条件がアンダフォーカス状態になり、そのため、直径増加が生じたものである。そこで、時定数を若干大きく 40 ms としたのが図 12 の結果である。全加工域にわたって穴直径はほぼ一定値をとっていることがわかる。次に、時定数をさらに大きく 60 ms とすると図 13 のようになる。穴直径は初期にゆるやかに増加した後一定値に落ち着く。これは補助収束コイルの制御時定数が大きすぎたため、図 11 の場合とは逆に実際の焦点移動現象に制御が追いつかず、加工の初期において収束条件が

わずかにオーバフォーカス状態になることによる。

以上述べたように、グリーンシートの高速穴あけ時の直径変化はビーム焦点位置を単純な指数関数に基づいて動的に制御することにより補正可能である。しかしながら、この制御の程度および速度は加工中に生成されるプラズマの密度に依存することは明らかであるため、加工条件、真空室の容積および真空度などに応じた制御を行う必要がある。

5. 結 論

パルスビーム走査によるアルミナグリーンシートの高速穴あけに関して実験的に検討し、以下の結論を得た。

- (1) ビームパルス照射間隔が短い時、加工の進行と共に穴径が指数関数的に増加する。この穴径増加は材料中に含まれる有機物からの熱分解ガスの影響によりビーム焦点位置が被加工物表面から上方へと移動することにより生じる。
- (2) 初期穴径に対する穴径増分はパルス時間間隔の増加と共に対数的に減少する。
- (3) 穴間隔が広いと穴径増分は小さくなるが、零にはならない。
- (4) この穴径増加は、それを相殺するように焦点位置を加工中に移動させるよう収束コイルを制御することにより補正可能である。
- (5) 上記焦点移動は、熱分解ガスの電子ビーム衝撃により生じたプラズマ中の正イオンによる空間電荷の中和作用による。

参 考 文 献

- 1) 堀尾健一郎、寺林隆夫：電子ビーム加工の研究——アルミナグリーンシートの穴加工特性，昭和 60 年度精機学会秋季大会学術講演会講演論文集（1985）391。
- 2) H. S. Carslow and J. C. Jaeger : Conduction of Heat in Solids, Oxford University Press, (1959) 258.
- 3) E. G. Linder and K. G. Hernqvist : Space-Charge Effect in Electron Beams and Their Reduction by Positive Ion Trapping, J. Appl. Phys., **21**, (1950) 1088.
- 4) M. A. Sturans and W. W. Koste : Kinetic Focusing Requirements for Precision E-beam Machining of Unfired Ceramic Material, J. Vac. Sci. Technol., **15**, 3, (1978) 1060.