レーザー切断加工条件導出のために穿孔加工を利用する方法の検討*

—エネルギー効率比の利用—

永野善己** 堀尾健一郎*** 金子順一***

Investigation of Method for Deriving Laser Cutting Conditions by Using Drilling Performance

—Use of Energy Efficiency Ratio—

Yoshiki NAGANO, Kenichiro HORIO and Jun'ichi KANEKO

This study deals with a method of determining suitable cutting conditions without using a database. It involves deriving the cutting conditions from the drilling conditions by considering the energy efficiency. The energy efficiency is the ratio of the supplied energy to the removed volume. This can be used as a parameter to compare drilling with cutting. In addition, the energy efficiency ratio given by the ratio of both parameters is used for analyses. Mild steel was used to examine the relation between the cutting energy efficiency and drilling energy efficiency under various processing conditions. As a result, the relation between the perforation time and the energy efficiency ratio was found. A system used to derive the cutting conditions from this relation was constructed from the drilling data.

Key words : CO₂ laser, laser processing, drilling conditions, cutting conditions, energy efficiency

1. 緒 言

炭酸ガスレーザー加工装置を用いたステンレス・アルミニウム等の汎用的な材料の切断加工は、メーカーの推奨する加工条件をデータベースから選択することで容易に行える。しかし、メーカー推奨の加工条件は、材質や板厚に限られている場合が多い。データベースがなく加工条件が確立されていない未知な材料に対する加工条件の導出には、有効な手段がなく作業者の経験と技量に依存していると考えられる。

従来、レーザー切断加工の加工条件と加工特性値との関係を実験的に解明しようとする研究^{1)~3)}は多く見受けられるが、切断加工の条件導出方法を論じた研究はない。ファジィ数値計画法を適用し切断面粗さなどの加工特性値と利潤率のモデルから最適加工条件を求める研究⁴⁾や切断加工の品質精度を最適化することを目的に走査速度などの加工条件の設定に品質工学を利用した研究⁵⁾があるが、それらの研究は切断加工条件の最適化を探索する方法として論じられており、良好に切断加工ができることが前提にある。そのほかレーザー加工中のAE信号を検出することにより加工状態を監視し良好な切断領域内に加工条件を誘導し設定する研究⁶⁾がある。この方法は、加工条件を再現する場合に有効な方法であるが、予め最適加工条件を求めておく必要がある。このように汎用的な材料の切断加工には、データベースや最適加工条件の導出方法が存在するが、データベースのない未知な材料の切断加工では、加工条件の導出方法が確立されているとはいえない。そこで、データベースがなく加工条件が確立されていない未知な材料に対して、切断加工条件の導出を行うことのできるシステムの構築を目指して検討を行った。

レーザー加工機による材料の切断加工では、貫通穴を切断加工の起点にするなど穿孔加工と共に行われる場合が多い。レーザー加工

において穿孔加工と切断加工は、共に集光されたレーザー光が供試材表面に照射されることにより発熱しアシストガスが熔融金属を強制的に除去する原理であるという共通点がある。未知な材料に穿孔加工と切断加工を行うことを想定すると、穿孔加工の条件導出は、設定された条件での貫通の可否を判断するだけで良いが、切断加工の条件導出は、設定したレーザー照射条件に対して切断加工が可能な走査速度を求める必要がある。

本研究では、データベースがなく加工条件が確立されていない未知な材料に穿孔加工を施し穿孔加工時のレーザー照射条件と貫通時間などの測定結果を利用して限界送り速度を導出するシステムの構築を目指すことを試みた。限界送り速度とは、レーザー照射条件を固定したときの切断速度の最大値である。本報では、限界送り速度の導出システムにおける指標としてエネルギー効率比を利用する方法について検討した結果を報告する。

2. エネルギー効率の導入

2.1 切断加工条件の導出方法の提案と課題

本研究で取り上げる限界送り速度の導出とは、穿孔加工時のレーザー照射条件をそのまま利用し切断加工が可能な最大の走査速度を求めることである。穿孔加工条件と加工結果から限界送り速度を導出する場合、穿孔加工と切断加工に対しレーザー加工状態が比較できる共通の代表値を定め、穿孔加工の代表値から切断加工の代表値を予測する方法が考えられる。本報では、穿孔加工と切断加工の代表値を利用して以下に示す1~6の手順により限界送り速度を導出する方法について考察する。

1. レーザー照射条件の設定
2. 穿孔加工の実施
3. 穿孔加工の評価(貫通時間、穴径)
4. 代表値(穿孔加工)の算出
5. 代表値(切断加工)の予測
6. 限界送り速度の導出

* 原稿受付 平成24年10月31日

** 正会員 高度職業能力開発促進センター(千葉市美浜区若葉3-1-2)

*** 正会員 埼玉大学(さいたま市桜区下大久保255)

2.2 エネルギー効率について

穿孔加工結果から限界送り速度を導出するには、穿孔加工と切断加工の代表値を設定することと、手順5の代表値（切断加工）の予測をすることが重要な課題である。穿孔加工と切断加工は、緒言で述べたように共通の加工原理であるが、穿孔加工は、一定の場所にレーザーヘッドが停止し加工を行うため水平方向に対し固定熱源であり、貫通する過程で溶融金属が供試材表面に排出される。一方、切断加工は切断方向に供試材が移動し加工を行うため移動熱源であり、切断溝裏面から溶融金属が排出される。そのため穿孔加工と切断加工は、レーザーの投入エネルギーに対する加工効率が等しくなるとは考えにくい。

本報では、レーザー加工のために投入されたエネルギー E とそれにより除去された体積 V の比を穿孔加工と切断加工の代表値として取り上げる。そのパラメータをエネルギー効率と呼ぶことにすると、エネルギー効率 α は、式(1)で定義される。

$$\alpha = \frac{V}{E} \quad (1)$$

2.3 穿孔加工のエネルギー効率

穿孔加工のために投入されたエネルギー E はレーザー平均出力を P_a 、貫通時間を t とすると $P_a \cdot t$ で求められる。除去加工された体積を、加工後の表裏の穴径 d_1 と d_2 、板厚 h による円錐台とすると、穿孔加工のエネルギー効率 α_d は式(2)で求められる。

$$\alpha_d = \frac{\pi \cdot h (d_1^2 + d_2^2 + d_1 \cdot d_2)}{12 P_a \cdot t} \quad (2)$$

2.4 貫通時間の測定方法

式(2)を利用して、穿孔加工のエネルギー効率 α_d を求めるためには、貫通時間 t を計測する必要がある。本報では、図1に示すように光センサに光ファイバを取り付け、それを被加工材の供試材の表裏に配置し、供試材へのレーザー照射時に飛散した溶融金属により発生した光を上のセンサで感知し、貫通時に飛散した溶融金属により発生した光を下のセンサで感知し、光を感知した時間差から貫通時間を求めることにした。光センサに感度波長範囲が320nm から1060nm のフォトダイオードを使用したため、炭酸ガスレーザーのレーザー光は感知していない。

本報で使用したレーザー照射条件を表1に示す。アシストガス圧0.05MPaの時にデューティファクタ30%の場合とデューティファクタ100%(CW)の場合に、それぞれレーザー平均出力を変化させて貫通時間を測定した例を図2に示す。図よりレーザー平均出力が2000Wのときに貫通時間は3msと求められるなど、本方法は、短時間で貫通する場合にも測定が可能である。

3. 穿孔加工と切断加工のエネルギー効率の対比

3.1 切断加工のエネルギー効率

切断加工のエネルギー効率を予測するために、実際に各種レーザー照射条件で穿孔加工と切断加工を行いそれぞれのエネルギー効率を対比しその関係について考察することとした。

切断加工のエネルギー効率 α_c は、式(1)を単位時間あたりに考えることにすると供試材表面の切断幅 w 、レーザー平均出力 P_a 、板厚 h 、限界送り速度 v から式(3)で求められる。

$$\alpha_c = \frac{w \cdot h \cdot v}{P_a} \quad (3)$$

本報では、供試材として板厚2mmのSPCC材を利用し、レーザー加工機に最大出力2000Wの炭酸ガスレーザー(三菱電機社製ML20CF

Fig.1 Measuring method

Fig.2 Relationships between average power and perforation time

Table1 Experimental conditions

Processing conditions	
Beam mode	Multimode
Average power W	100 ~2000
Duty factor %	15~100(CW)
Frequency Hz	300
Focal length of lens mm	190.5
Focus	Surface of material
Assist gas	Air
Gas pressure MPa	0.05~0.65
Diameter of nozzle mm	1.5
Nozzle gap mm	1.0

2)を用い、表1に示したレーザー照射条件のもとで穿孔実験と切断実験を行った。

レーザー平均出力を変化させて穿孔加工と切断加工のエネルギー効率を求めた結果を図3に示す。切断加工のエネルギー率は、設定したレーザー照射条件において最速で切断加工が可能な限界送り速度を求め、そのときの切断幅の測定結果より式(3)を利用して計算した。図はデューティファクタが30%、100%(CW)、ガス圧0.05MPaの時に、レーザー平均出力を様々に変化させて実験した結果である。図中の塗りつぶしは穿孔加工のエネルギー率を、白抜きは切断加工のエネルギー率を示している。

穿孔加工と切断加工のエネルギー率は、レーザー平均出力の増加により共に増大する傾向にある。レーザー照射条件が同じ場合でも切断加工のエネルギー率と穿孔加工のエネルギー率は一般に等しくならない。レーザー平均出力が小さな場合は、切断加工のエネルギー率の方が大きく、レーザー平均出力が大きな場合は、穿孔加

工のエネルギー率の方が大きくなっている。

3.2 エネルギー率比の予測

レーザ照射条件が同じ場合に穿孔加工のエネルギー率と限界送り速度における切断加工のエネルギー率を検討した結果、それぞれのエネルギー率は等しくならなかった。さらに両者の関係について検討するためエネルギー率比を考えることにした。エネルギー率比 γ とは、穿孔加工のエネルギー率 α_d と同一レーザ照射条件における限界送り速度での切断加工のエネルギー率 α_c との比であり、式(4)で表すことができる。

$$\gamma = \frac{\alpha_c}{\alpha_d} \quad (4)$$

図3の実験結果をエネルギー率比で表すと図4になる。図には、デューティファクタ 30%, 100%(CW)の場合だけでなく、60%, 90%で実験した場合のレーザ平均出力とエネルギー率比の関係も示した。エネルギー率比は、デューティファクタに関係なくレーザ平均出力の値によって概ね決定されることが分かる。

図4では、レーザ平均出力とエネルギー率比の間に何らかの関係が見受けられたが板厚や材質が異なれば、同じ関係が成り立つとは考え難い。そのため、エネルギー率比を予測するためのパラメータを新たに検討する必要がある。

4. 貫通時間を利用したエネルギー率比の予測

4.1 貫通時間の適用

新たに穿孔加工の貫通時間に着目しエネルギー率比との関係を検討した。その結果を図5に示す。表1に示したレーザ照射条件により174通りの組合せで、穿孔加工を行い、貫通時間、表裏の穴径から穿孔加工のエネルギー率を算出した。次に同一レーザ照射条件での切断加工において限界送り速度を探索し、そのときの切断幅から切断加工のエネルギー率を算出し、エネルギー率比を求めた。エネルギー率比は、穿孔加工の貫通時間が長くなるに従い増大する傾向がみられる。そこで、両者の関係を図中に示す直線で近似し最小二乗法を用いて、貫通時間 t とエネルギー率比 γ_1 の関係を求めると式(5)で表すことができる。

$$\gamma_1 = 10.156t^{0.6397} \quad (5)$$

この穿孔加工の貫通時間とエネルギー率比の関係は、エネルギー率比を予測する手段の候補として考えられる。

4.2 限界送り速度導出のための切断幅の予測

前節の結果、穿孔加工の貫通時間からエネルギー率比を予測することで切断加工のエネルギー率を求めることが可能となった(2.1節の5)。算出した切断加工のエネルギー率から式(3)を用いて限界送り速度を導出する(2.1節の6)には、切断幅を予測する必要がある。そこで、同一レーザ照射条件における穿孔加工の穴径と限界送り速度での切断幅を比較した。その結果を図6に示す。表側の穴径は、裏側の穴径よりかなり大きいため、図は裏側の穴径と切断幅を示している。

切断幅は、穿孔加工の貫通時間が異なる場合でもほぼ一定である。また、裏側の穴径は、貫通時間が0.05s以下や2.0s以上の場合に、ばらつきが大きくなる傾向はあるが、概ね切断幅の大きさに近い。そこで、切断幅の予測に穿孔加工後の裏側の穴径を利用することにした。

4.3 限界送り速度の予測

前節までの結果をもとに穿孔加工のエネルギー率の計算式(2)と穿孔加工の貫通時間とエネルギー率比の関係式(5)から予測した切断加工のエネルギー率に、切断幅の予測値として裏側の穴径

Fig.3 Relationships between average power and energy efficiency

Fig.4 Relationships between average power and energy efficiency ratio

Fig.5 Relationships between perforation time and energy efficiency ratio

Fig.6 Relationships among perforation time, hole diameter and kerf width

を用いると、限界送り速度 v は穿孔加工の貫通時間 t 、加工後の表裏の穴径 d_1 と d_2 から式(6)で予測できることになる。

$$v = \frac{0.846\pi}{t^{0.3603}} \left(\frac{d_1^2}{d_2} + d_2 + d_1 \right) \quad (6)$$

5. 走査速度予測の評価

5.1 限界送り速度の予測値と実測値の比較

前章で述べた限界送り速度の導出方法を利用すると、例えばレーザー平均出力 400W、デューティファクタ 30%、ガス圧 0.05MPa の場合に穿孔加工結果は、貫通時間が 0.2s、表側の穴径が 0.55mm、裏側の穴径が 0.29mm となり、限界送り速度の予測値が、9.2mm/s となった。実測値は、9.0mm/s となり予測値とほぼ同様になった。

限界送り速度の導出方法を評価するため式(6)により求めた予測値を実際の限界送り速度と比較した。その結果を図 7 に示す。図は横軸に穿孔加工の貫通時間、縦軸に限界送り速度の実測値と予測値の比を表す。

実測値と予測値の比は、最大が 2.96 となり最小が 0.29 となった。限界送り速度の予測値は、全く未知な供試材に対して限界送り速度を推測するための指標になると考えられる。

5.2 板厚の影響

これまで、穿孔加工の測定結果から限界送り速度を導出する方法について検討してきた。ここでは、板厚が異なる場合の限界送り速度の予測を試みた。

穿孔加工における貫通時間は、板厚の影響を受けると考えられるので、エネルギー率を予測するパラメータとして貫通速度を用いることにした。貫通速度は、板厚 h 、貫通時間 t より h/t で求められる。式(5)を貫通速度で書き直すとエネルギー率との関係は、式(7)で表される。

$$\gamma_2 = 15.822 \left(\frac{h}{t} \right)^{-0.6397} \quad (7)$$

実験結果により得られたエネルギー率と式(7)により求めたエネルギー率を比較した。板厚 1mm、3mm の SPCC 材と 4mm の SS400 材に対してアシストガス圧 0.05MPa の時に、デューティファクタ 30%の場合と 100%(CW)の場合に、それぞれレーザー平均出力を変化させて穿孔加工と切断加工を行い、その測定結果によりエネルギー率は算出した。周波数などのレーザー照射条件は表 1 に従った。式(7)により求めたエネルギー率と実験結果から式(4)により得られたエネルギー率を比較した結果を図 8 に示す。図は横軸に貫通速度、縦軸にエネルギー率を表す。図中細い破線などは、貫通速度とエネルギー率の関係を板厚ごとに直線で近似したものであり、太い実線は式(7)を示している。

貫通速度とエネルギー率の関係は、板厚に関係なくほぼ同様であると言える。貫通速度とエネルギー率の関係として式(7)を用いると限界送り速度 v は、式(8)で表されることになる。

$$v = \frac{1.3185\pi}{h^{0.6397} \cdot t^{0.3603}} \left(\frac{d_1^2}{d_2} + d_2 + d_1 \right) \quad (8)$$

限界送り速度の導出結果を評価するため、穿孔加工の測定結果と式(8)から限界送り速度を予測した値を、実際に切断加工を行った実測値と比較した。その結果を図 9 に示す。図は横軸に貫通速度、縦軸に実測値と予測値の比を表している。

限界送り速度の実測値と予測値の比は、最大が 3.31 となり最小が 0.35 となった。実測値と予測値の比の値の範囲は、図 7 の板厚 2mm の場合とほぼ同様である。板厚に関係なく、式(8)により限界送り速度が予測できると言える。

5.3 材質の影響

SPCC 材以外の限界送り速度の導出結果を評価するため、板厚 2mm のステンレス材(SUS304)、アルミニウム材(A5052)、チタン材(TP480C)に対し、貫通速度とエネルギー率の関係について

Fig.7 Comparison between real speed and predicted speed

Fig.8 Relationships between perforation speed and energy efficiency ratio

Fig.9 Comparison between real speed and predicted speed

検討した。レーザー照射条件をアシストガス圧 0.05MPa と固定し、レーザー平均出力を変化させた実験結果から式(4)により得られたエネルギー率と式(7)により求めたエネルギー率との比較を行った。デューティファクタ、周波数などのレーザー照射条件は表 1 に従った。その結果を図 10 に示す。図は横軸に貫通速度、縦軸にエネルギー率を表す。図中細い破線などは、貫通速度とエネルギー率の関係を材質ごとに直線で近似したものであり、太い実線は式(7)を示している。

貫通速度とエネルギー率の関係は、材質に関係なくほぼ同様であると言える。貫通速度とエネルギー率の関係として式(7)を用い、式(8)により導出した限界送り速度の結果について評価するため、穿孔加工の測定結果と式(8)から限界送り速度を予測した値を、実際に切断加工を行った実測値と比較した。その結果を図 11 に示す。図は横軸に貫通速度、縦軸に実測値と予測値の比を表している。

Fig.10 Relationships between perforation speed and energy efficiency ratio

Fig.11 Comparison between real speed and predicted speed

限界送り速度の実測値と予測値の比は、最大が 3.21 となり最小が 0.35 となった。実測値と予測値の比の値の範囲は、図 7 の板厚 2mm の場合とほぼ同様である。材質に関係なく式(8)により限界送り速度が予測できると言える。

6. 限界送り速度の導出手順

切断加工の限界送り速度を導出する方法のフローチャートを図 12 に示す。図は、2.1 節に述べた手順 1 から手順 6 の大まかな手順をフローチャートに整理し、実際に穿孔加工結果から限界送り速度を予測する方法を示したものである。

手順 1 のレーザ照射条件の設定では、レーザ平均出力、デューティファクタなどを設定し、手順 2 の穿孔加工の実施では、供試材の貫通の可否を判断し、供試材が貫通しない場合には、レーザ照射条件を再設定する。手順 3 の穿孔加工の評価(貫通時間、穴径)では、穿孔加工の貫通時間と表裏の穴径を測定する。手順 4 の代表値(穿孔加工)の算出では、穿孔加工の貫通速度と表裏の穴径から穿孔加工のエネルギー効率を算出する。手順 5 の代表値(切断加工)の予測では、穿孔加工の貫通速度よりエネルギー効率比を式(7)により予測する。手順 6 の限界送り速度の導出では、切断加工のエネルギー効率と裏側の穴径を用い、式(3)により限界送り速度を導出する。手順 4 以降は、5.2 節で述べたように式(8)により求めることとなる。

7. 結 言

本研究では、データベースがなく加工条件が確立されていない

Fig.12 The method for obtaining the cutting condition

未知な材料に穿孔加工を施し、その測定結果を利用して切断加工の限界送り速度を導出するシステムの構築を試みた。本報では、システム構築の指標としてレーザ加工のために投入されたエネルギーとそれにより除去された体積の比であるエネルギー効率を提案し、それを利用する方法について検討した。その結果を以下に列記する。

- (1) 穿孔加工の貫通速度とエネルギー効率比には相関関係があり、この関係を用いて切断加工の限界送り速度を予測する事ができる。
- (2) 板厚や材質に関係なく貫通速度とエネルギー効率比の関係は、ほぼ同様である。

参 考 文 献

- 1) K.Horio,T.Kasai:Basic Study on Nozzle for Assist Gas System in laser Machining,Proceeding of International Symposium for Electro-Machining, ISEM-9, (1989)203.
- 2) 金岡優：レーザ切断精度におよぼすビーム集光特性の影響，日本機械学会論文集(C編)，56, 531(1990)278.
- 3) 金岡優：軟鋼厚板のレーザ切断面品質に関する研究，日本機械学会論文集(C編)，57, 589(1991)275.
- 4) 布引雅之，小暮徹志，長谷川素由，奥田孝一，仁木努，野波正信：CO₂レーザ加工条件の最適化，精密工学会誌，64, 1(1998)116.
- 5) B.S.Yilbas,S.J.Hyder,MSunar:Taguchi method for determining CO₂ laser cut quality,JOURNAL OF LASER APPLICATIONS, 10,2(1988)71.
- 6) 小西康夫，喜多重昭，石垣博行，長谷川素由：CO₂レーザ切断条件自動設定システムの開発，日本機械学会論文集(C編)，61, 581(1995)299.