溶接時のエネルギー吸収効率に及ぼすツインスポットビーム配置の影響*

—アルミニウム合金のツインスポットビーム溶接の研究 (第3報)—

坂元 宏規**, 岩瀬 孝邦**, 柴田 公博**

Effect of Twin Spot Beam Arrangement on Energy Coupling During Welding — Study of Twin Spot Nd:YAG Laser Welding of Aluminum Alloys (Rep. 3) —

By SAKAMOTO Hiroki**, IWASE Takakuni** and SHIBATA Kimihiro**

Energy coupling rate during welding of Al-Mg-Si alloy by single and twin spot Nd:YAG laser beams was measured calorimetrically at various input energies. Two beams were aligned parallel to welding direction and the distance was varied from 0.36 to 1.0 mm. The coupling rate in single spot beam welding was higher than that of twin spot beam at same power level. However increasing power, both were saturated in the same level at 80%. Energy coupling rate became larger as the beam distance became smaller. Measured coupling rates fit with modified Couffe-Dausinger model that determine coupling rate by penetration depth and focal spot size calculated from twin spot combined lineally. It is considered that modified focal spot size represents the keyhole opening size affects on reflection loss after multi-reflection in the keyhole.

Key Words: Nd:YAG laser, welding, aluminium alloy, coupling rate, twin spot beam

1. 緒 言

レーザ溶接は自動車を構成する鉄鋼材料の溶接技術のひとつとして、変速機や車体への適用が拡大しているが、アルミニウム合金部品への適用例は多くない¹⁾。この理由として、アルミニウム合金が鉄鋼材料に比べてレーザの反射率が高いことから、溶接に必要なエネルギーを材料に投入するためには、より高いレーザ出力が必要とされること、および溶融したアルミニウム合金の粘性が小さいことから安定な溶接が難しいことが挙げられる^{2,3)}。

レーザの反射率の高さを補うため、従来高出力なCO₂レーザを用いた溶接の研究が行なわれていたが^{4,5)}、近年高出力なNd:YAGレーザが工業的に実用化され、CO₂レーザに比べて波長が短くアルミニウムに対する吸収率が高いNd:YAGレーザを用いた溶接に関する研究が盛んに行なわれている。さらに溶接プロセスの安定化を図るために、パルス変調を用いる²⁾、あるいはビームスポットの複数化を図る^{3,6)}など、レーザ照射条件に関する様々な検討がなされている。

このように、レーザ光の波長、照射条件等様々な加工因子の最適化が検討される中で、溶接加工時のエネルギー吸収率に関しては、実験的な測定あるいは数値解析を用いた推定などの研究が行なわれ、エネルギー吸収効率からみた

Nd:YAGレーザの優位性が報告されている³⁾。しかしながら、溶接プロセスの安定化に効果があるといわれるツインビーム溶接に関しては、エネルギー吸収効率の検討はなされておらず、溶接中のキーホール形状との関連を調査した例はない。

本研究では、Al-Mg-Si系アルミニウム合金のNd:YAGレーザによるツインスポットビームを用いて種々の溶接条件で溶接した際のエネルギー吸収効率、即ちカップリングレートおよび溶接中のキーホール形状、溶接後の溶込み形状を調査した。さらに、これまでに報告されているレーザエネルギー吸収モデルと今回のエネルギー吸収率測定結果との比較検討を行ない、ツインスポットビーム溶接におけるエネルギー吸収メカニズムに関して考察を加えた。

2. 実験方法

2.1 カップリングレートの測定

2.1.1 溶接時の吸収エネルギーの定義

Fig. 1に示すように投入エネルギーを E_{in} とすると、そのエネルギーは表面での反射エネルギーを E_r 、材料に吸収されるエネルギーを E_{ab} に分けられる。ここでは、 E_{in} をパワーメータで、 E_{ab} を次項で説明するカロリメトリックな手法で測定し、その比率をカップリングレート (CR) とした。

2.1.2 実験装置

実験装置の概略図をFig. 2に示す。1000系アルミニウム合金製のホルダに高熱伝導性グリースを用いて試験片を密

* 原稿受付 平成14年5月28日 平成13年度春季全国大会で発表

** 正 員 日産自動車(株)総合研究所材料研究所 Member,
Nissan Motor Co., Ltd., Nissan Research Center,
Materials Research Laboratory

Fig. 1 Energy flow in laser welding

Fig. 2 Experimental set up for absorbed energy measurement

Fig. 3 Temperature history curve and definition of DT

着させて溶接を行ない，試験片とホルダの温度上昇から吸収されたエネルギーを求めた．ホルダの温度変化は，異なる2点の測定位置で同様の測定を行ない，それらの平均値を用いた．

試験片とホルダの仕様を Table 1 に示す．試験片に比べてホルダの容積を相対的に大きくし，緩やかに温度降下が起こるようにした⁷⁾．

2.1.3 カップリングレートの算出

レーザ溶接前から溶接後にかけて，ホルダの温度変化を測定した．温度情報は熱電対センサモジュールを介してパソコンに取り込み，以下の方法で吸収されたエネルギーを算出した．

- ① Fig. 3 に示すような，溶接前後にかけての温度履歴曲線を描く
- ② 図から温度上昇中の変曲点を決定する
- ③ 加工後に温度が直線的に下降する領域で最小二乗法を用い，温度下降の近似直線を求める．
- ④ 変曲点を通る垂直線と温度下降の延長された近似直線との交点から，上昇温度 ΔT を求める．
- ⑤ 求めた ΔT を 2.1 式に代入して，カップリングレート (CR) を求める．

$$CR = \frac{E_{ab}}{E_{in}} = \frac{\Delta T \cdot \{(m_{tp} \cdot c_{tp}) + (m_h \cdot c_h)\} \cdot 100}{P \cdot t} \quad (2.1)$$

ここで， m_{tp} ：試験片の質量 (g)， m_h ：ホルダの質量 (g)， c_{tp} ：試験片の比熱 (J/Kg)， c_h ：ホルダの比熱 (J/Kg)， P ：レーザ出力 (kW)， t ：溶接時間 (s)， ΔT ：上昇温度 (℃) である．

2.2 溶接条件

Nd:YAG レーザを用いて，ビードオン溶接を行った．レーザ照射点の模式図を Fig. 4 に，条件を Table 2 に示す．溶接速度を一定にして，出力を変化させることによって投入エネルギーを制御した．2つのビームは溶接進行方向に平行に配置した．ビーム間隔は，ファイバ間距離を変化させることによって変化させ，各々の出力が異なる場合には出力の高い方のビームが先導するような配置として溶接を行った．

Table 1 Specifications of holder and specimen

	Specimen	Holder
Materials	Al-Mg-Si alloy (A6N01-T5)	Industrial pure aluminum (A1050)
Specific heat (J/kg)	0.84	0.93
Weight (g)	22.25 – 22.32	138.52

Table 2 Experimental conditions

		Single beam	Twin beam
Laser power (kW)	Front	2.0 – 3.0	1.0 – 3.0
	Rear		1.0 – 2.0
Welding speed (m/min.)		2.5	
Spot diameter (mm)		0.3	0.3 x 2
Beam arrangement			Parallel to welding direction
Beam distance (mm)			0.36, 0.6, 1.0
Focusing position		Surface of specimen	

Fig. 4 Schematic view of laser focusing point

Fig. 5 Schematic view of cross section

2.4 溶接部の評価

溶接ビード断面写真を撮影し、Fig. 5に示すように試験片表面からの溶込み深さ、および試験片表面から内部の溶込み面積をそれぞれ測定した。

3. 実験結果

3.1 カップリングレートに対するレーザ出力の影響

Fig. 6に、ビーム間距離0.36 mmの場合の、レーザ総出力とカップリングレートとの関係を示す。同じ出力で比較した場合、シングルビームの方が高いカップリングレートを示した。高出力になるほどその差は小さくなり、両者ともおよそ80%で飽和する傾向が見られた。ツインビームでは、2つのビームの出力を等しくしたものよりも、片方のビームをより高い出力とした場合の方がエネルギー吸収率が高かった。

溶接ビードの断面マクロ組織写真から測定した溶込み深さおよび面積とレーザ総出力の関係をFig. 7, Fig. 8に示す。カップリングレートが高いものほどより深く、大きな溶込みが得られていた。Fig. 9は吸収エネルギー E_{ab} と溶込み面積

Fig. 6 Relationship between total laser power and coupling rate

Fig. 7 Relationship between total laser power and penetration depth

Fig. 8 Relationship between total laser power and area of fusion zone

Fig. 9 Relationship between absorbed energy and area of fusion zone

Fig. 10 Relationship between coupling rate and beam distance

の関係を示したものである。すべてのポイントがほぼ同一線上にプロットされ、エネルギー吸収効率および溶込み面積の測定が正確に行なわれたことを示している。

Fig. 11 Relationship between penetration depth and beam distance

3.2 カップリングレートに対するビーム間距離の影響

Fig. 10 は、ビーム間距離とカップリングレートの関係を示したものである。出力はすべて 2 kW と 3 kW のレーザーを組み合わせた総出力 5 kW の条件である。ビーム間距離が最も小さい 0.36 mm の場合が最もカップリングレートが高く、0.6 mm および 1.0 mm の場合はほぼ同じ値となった。Fig. 11 はビーム間隔と溶込み深さの関係を示したものである。ビーム間隔 0.36 mm と 0.6 mm では大きな差はなかったが、1.0 mm になると溶込みが大きく減少した。

4. 考 察

溶接条件とカップリングレートの関係に関して、ビームスポットサイズと溶込み深さおよびレーザー光の材料に対する吸収率によって予測できるとするモデル (Gouffe-Dausinger モデル) が Dausinger らによって報告されている (3, 8, 9)。このベースとなった Gouffe のモデルは、円錐の底面から入射された光のうち円錐内で吸収される割合が、Fig. 12 に示すように円錐形の頂点を中心とし底面を内接する球体との幾何学的な関係から、4.1 式で表されるとしたものである。

$$CR = A \frac{1 + (1-A) \left(\frac{o}{O} - \frac{o}{O_K} \right)}{A \left(1 - \frac{o}{O} \right) + \frac{o}{O}} \quad (4.1)$$

ここで、 O_K は円錐の高さを半径とする球体の表面積、 O は円錐の側面の表面積、 o は円錐の底面の面積、 A は定数である。ここで、 O_K 、 O 、 o はそれぞれ

$$O_K = 4\pi r^2 \quad (4.2)$$

$$O = s\pi \frac{d_f}{2} \quad (4.3)$$

$$o = \pi \left(\frac{d_f}{2} \right)^2 \quad (4.4)$$

であり、かつ球体の半径 r が円錐の母線の長さ s と等しい

Fig. 12 Schematic of Gouffe-Dausinger model

Fig. 14 Relationship between d_f and energy coupling rate calculated according to Gouffe-Dausinger model and measured by experiments Fig. 13 Relationship between d_f and energy coupling rate calculated according to Gouffe-Dausinger model and measured by experiments

ことから、4.1式は4.5式のように円錐の底面の直径 d_f と、円錐の母線の長さ s の比を用いて表される。

$$CR = A \frac{1 + (1-A) \left(\frac{d_f}{2s} - \left(\frac{d_f}{4s} \right)^2 \right)}{A \left(1 - \frac{d_f}{2s} \right) + \frac{d_f}{2s}} \quad (4.5)$$

Dausingerらは、レーザの波長や材料に依存する定数 A を求めることにより4.5式からカップリングレートを算出している。一方でDausingerらはキーホール内の多重反射やプラズマ吸収を考慮し、キーホール内で起こっているエネルギーカップリング現象を忠実に再現した光線追跡法による数値計算モデルによるカップリングレートの推定も行なってお

Fig. 15 Modification of d_f for twin beam arrangement

り、両者の結果はほぼ同じであったとしている8)。

Fig. 13は、今回の実験結果を、Gouffe-Dausingerモデルから求められる値に合わせてプロットしたものである。ここで、シングルビームの d_f はビーム径をそのまま使い、ツインビームに関しては単純に2つの直径 d_f のスポットの合計の面積を有する一つの円の直径に換算したときのスポット径を用いた。また、 s には溶接ビード断面のマクロ組織から溶込み深さを測定した値を用いた。

その結果、シングルビームについてはGouffe-Dausingerモデルと良い一致を示すものの、ツインビームは実験値の方がやや低い値となった。これは、単純なビーム径の和では、Gouffe-Dausingerモデルにおける d_f の物理的意味を反映していないためであると考えられる。

Fig. 14は、Fig. 15に示すように2つのビームを連結され

Fig.16 Relationship between d_f and energy coupling rate calculated according to Gouffe-Dausinger model and measured by experiments of various beam distance

たひとつの異形ビームととらえ、その溶接進行方向に平行な方向の長さを d_f^* と定義しなおして、カップリングレートとの関係をプロットしたものである。その結果、Gouffe-Dausinger モデルと良い一致を示し、ツインビームの d_f を定義しなおすことによって、このモデルをツインビーム溶接に拡大して適用できることがわかった。このことは、Gouffe-Dausinger モデルにおける d_f は、レーザスポットサイズそのものよりも、キーホール開口部の大きさの代用特性としての意味をもっているものと考えられる。

Fig. 16 はビーム間距離の異なる条件での実験結果を Gouffe-Dausinger モデルから求められる値と合わせて示したものである。ビーム間距離が 0.6 mm の場合は、Fig. 15 に示した結果と同様に、ツインビームにおける d_f を定義しなおすことによって良い一致を示したが、ビーム間距離が 1.0 mm の場合はむしろ単純に 2 つのビーム径を足した値を d_f として用いた方が良い一致を示した。このことは、ビーム間距離が小さい場合には開口部が一つであるが、ある程度以上に大きい場合は溶接中に開口部が独立しているためであると考えられる。柴田らによる溶接現象の直接観察によれば¹⁰⁾、アルミニウム合金の溶接において、ビーム間距離が 1.0 mm の場合には、溶融池表面において 2 つの輝点、すなわちキーホール開口部が観察されたとしている。このことから、ビーム間隔がある程度以上に大きい場合は、単一ビームが単純に組み合わせられたものとして取り扱うことが合理的であると考えられる。

5. 結 論

Nd:YAG レーザを用いて、ツインビームを含む種々のレーザ照射条件でアルミニウム合金の溶接を行ない、溶接時のエネルギー吸収率の測定を行なった結果、以下の結論を得た。

- ①出力で比較した場合シングルビームの方が高いエネルギー吸収率を示したが、5kW 程度の高出力域ではツインビームも約 80% の値に飽和しほとんど差がなくなった。
- ②レーザ照射条件とエネルギー吸収率の関係は、ツインビームにおけるビーム径をキーホール開口部の大きさが反映されるように定義しなおすことによって、Gouffe - Dausinger モデルと良い一致が見られた。

参 考 文 献

- 1) W. Leiterman, J. Christlein: The 2nd-generation Audi Space Frame of the A2: A trendsetting all-aluminum car body concept in a compact class car, Seoul 2000 FISITA World Automotive Congress (2000), F2000G360.
- 2) N. Seto, S. Katayama, A. Matsunawa: Porosity formation mechanism and suppression procedure in laser welding of aluminum alloy (in Japanese), 本会論文集, 18-2 (2000), 243-255.
- 3) J. Rapp, F. Dausinger, H. Huegel: Laser beam welding of aluminum alloys, Proceedings of the 6th European conference on laser treatment of materials Vol. 1 (1996), 97.
- 4) H. Sakamoto, K. Shibata, F. Dausinger: Welding of different aluminum alloys by CO₂ laser, Proceedings of 4th European conference on laser treatment of materials (1992), 125-130.
- 5) 山岡, 結城, 土屋: The study of prevention of solidification cracking in laser weld metal of Al-Mg-Si alloy (in Japanese), 本会論文集, 18-3 (2000), 422-430.
- 6) T. Iwase, H. Sakamoto, K. Shibata, B. Hohenberger, F. Dausinger: Dual focus technique for high power Nd:YAG laser welding of aluminum alloys, Proceedings of SPIE, High power lasers in manufacturing, Vol. 3888 (1999), 348-358.
- 7) F. Dausinger, J. Shen: Energy coupling efficiency in laser surface treatment, ISIJ International Vol. 33 (1993), 925
- 8) F. Dausinger: Strahlwerkzeug laser: Energieeinkouplung und Prozesseffektivitaet, B.G. Teubner Stuttgart (1995), 86
- 9) A. Gouffe: Rev. Optique 24 (1945), 1
- 10) 柴田, 岩瀬, 坂元, 松縄, 瀬渡, F. Dausinger, M. Mueller, B. Hohenberger: アルミ合金のツインビーム溶接の研究 (第 2 報) —キーホール形状とプロセス安定性の関係—, 本講演概要 第 68 集 (2001), 22-23.