YAG レーザー溶接におけるモニタリング手法の検討とその適用*

—YAG レーザー溶接におけるモニタリング技術の研究 (第1報)—

上向 賢一**, 井上 尚志***, 安田 耕三****, 室 幹雄*****, 中林 督博****, 松縄 朗*****

Development of A Monitoring Method in YAG Laser Welding*

—A Study of the Monitoring for YAG Laser Welding (Report 1)—

by KAMIMUKI Kenichi**, INOUE Takashi***, YASUDA Kouzou****, MURO Mikio*****,
NAKABAYASHI Tokuhiko**** and MATSUNAWA Akira*****

In laser welding, monitoring is an important measure to assure the reliability of welding. Various monitoring methods have been proposed in CO₂ laser welding. However, the research of monitoring methods in YAG laser welding is still few. We propose here a monitoring method in YAG laser welding. This monitoring method is based on an idea that Ar⁺ laser irradiates keyhole or molten pool and the intensity of the reflected Ar⁺ laser is measured by monochromator. The authors investigated the proper irradiation condition of Ar⁺ laser in this monitoring method. As a result, the signal of reflected Ar⁺ laser showed the size and oscillation of molten pool under the proper condition. Keyhole behavior was also observed by high speed camera at the same time. By analyzing the high speed video pictures, keyhole profile was detected under the various welding conditions. According to these results, this method is useful to monitor the YAG laser welding.

Key Words: YAG laser, monitoring, Ar⁺ laser, keyhole, reflection light

1. 緒 言

レーザー溶接は、深溶込みで高速溶接が可能であり、また熱歪みが少ないという特徴を持っていることから、注目されている溶接法である。しかし、レーザー溶接の信頼性が十分でないことから、インプロセスでモニタリングする技術の確立が望まれている。これまでCO₂レーザー溶接におけるモニタリングの研究は多く行われており¹⁾、自動車産業における薄板のCO₂レーザー溶接ではモニタリングの適用例が報告されている²⁾。一方、YAGレーザー溶接に関するモニタリングの研究報告はまだ少ない³⁾。これは、これまで大出力のYAGレーザー発振器がなかったことによるところが大きい。しかし、最近YAGレーザー発振器の大出力化が急速に進んできている。YAGレーザーではファ

イバー伝送が可能であること、またCO₂レーザーに比べ金属に対する反射率が低いことから、YAGレーザー溶接への関心が高まってきている。

そこで本研究では、YAGレーザー溶接におけるモニタリング手法の検討を行った。従来CO₂レーザー溶接で行われてきたモニタリング手法⁴⁾を採用するとともに、キーホール挙動を観測するため、キーホール部にプローブビームを照射しその反射光を計測する手法を考案した。これは、ポロシティ等の欠陥生成とキーホール挙動との関係が報告されており⁵⁾、本モニタリング法によりキーホール挙動を観察し欠陥検出を行うことを目標としている。そこで、これを用いて溶接条件を変えた場合の変化、突合せ溶接におけるギャップや目違い等の欠陥に対する検出を調査するとともに、欠陥防止法としてサイドガス等を用いたキーホール安定化を検討した。さらに、このときの信号挙動等についても調査した。本報告では、このプローブビームを用いたモニタリング法について適正な計測条件を調査し、本モニタリング法の有効性について検討を行った。

2. 実 験 方 法

定格出力4kWのYAGレーザーを用い、1mm径のファイバーによりレーザービームを伝送し、焦点距離65mmのレンズにてワーク上に集光した。実験は、ビードオンプレート溶接にてTable 1に示す溶接条件にて行った。

*原稿受付 平成12年4月3日 平成11年度秋季全国大会で発表

**正 員 ㈱レーザー応用工学研究所 (現: 川崎重工業㈱)
Member, Applied Laser Engineering Research
Institute (Present Address: Kawasaki Heavy
Industries, LTD)

***正 員 ㈱レーザー応用工学研究所 Member, Applied
Laser Engineering Research Institute

****正 員 川崎重工業㈱ Member, Kawasaki Heavy
Industries, LTD

***** 川崎重工業㈱ Kawasaki Heavy Industries, LTD

*****正 員 大阪大学接合科学研究所 Member, Joining and
Welding Research Institute, Osaka University

出力は加工点でほぼ最大出力となる3.5 kW とし、シールドガスとしてアルゴンをレーザービームと同軸に40 l/min 供給した。このときのノズル径は8 mm ϕ 、ノズル高さは10

mm とし、焦点はずし距離は0 mm とした。また、供試材として SUS304 を用い、本 YAG レーザー装置で十分貫通溶接が可能な板厚 6 mm とした。以上の溶接条件にて、溶接速度を0.25~6 m/min 変化させて実験を行い以下に述べる Ar⁺ レーザーの照射条件の最適化を行った。

次に、溶接現象をモニタリングするための実験装置の配置図を Fig.1 に示す。Ar⁺ レーザーを図中に示すように YAG レーザーと同軸に導光し、その反射光を分光器にて計測した。ここで、この方法を採用した理由については3項に詳述する。また、このときの Ar⁺ レーザー反射光挙動および溶接現象観察するために、図の様に Ar⁺ レーザーの波長514.5 nm を中心波長とし半値幅10 nm のフィルターを配置し高速度カメラ(18,000コマ/s)にて溶接部真上より

Table 1 Experimental conditions of laser welding.

Power	3.5kW
Welding speed	0.25~6m/min
Shielding gas	Ar 40 l/min
Nozzle diameter	8mm
Stand off	10mm
Defocusing distance	0mm
Test piece	SUS304(6mmt)

Table 2 Experimental conditions of Ar⁺ laser.

	Diameter	Position
Condition 1	1mm	-1mm
Condition 2	1mm	0mm
Condition 3	1mm	1mm
Condition 4	2mm	0mm

Fig. 2 Coordinates of Ar⁺ laser position.

Fig. 1 Schematic illustration of measuring system.

撮影した。信号はオシログラフィックレコーダーによりサンプリング周波数20 kHzで記録した。

本実験における Ar^+ レーザーの照射条件をTable 2に示す。モニタリングに有効な Ar^+ レーザーの照射条件を調べるために、まず照射位置による信号挙動を調べた。照射径を1 mm、照射位置を-1, 0, 1 mmとし、それぞれの照射条件下で溶接速度を変化させた実験を行った。ここで、照射径とはワーク表面での Ar^+ レーザーの直径であり、照射位置はFig. 2に示すようにキーホールを0とし、溶接進行方向を+としている。次に、照射径による信号挙動を調べるために、照射位置を0 mmとして照射径を1, 2 mmとし、それぞれの照射条件下で溶接速度を変化させて実験を行った。これらの実験結果から、モニタリングに最適な Ar^+ レーザーの照射条件を選定した。

3. 本モニタリング法の基本概念

Ar^+ レーザーを用いるモニタリング手法は、キーホールの大きさや安定性を検出する信号として考案した。松縄ら^{6,7)}は溶接欠陥の代表であるポロシティ発生はキーホール挙動に起因していることを明らかにしている。そこで、キーホールの挙動、特にキーホールの安定性をモニタリングすることが重要であると考え本手法を考案した。つまりこの方法では、Fig. 3(a)に示すようにキーホールが安定しているときは、照射された Ar^+ レーザーはキーホール内に入ってしまい、その反射光はほとんどかえらないのに対して、Fig. 3(b)のようにキーホールが不安定な状態ではその

反射光も不安定になり、またキーホールが形成されていない状況では、反射光が多く返ってくることを想定している。

さらに、Fig. 1の加工・計測光学系での Ar^+ レーザーが光ファイバーより出射されて平行光にするレンズの位置を変えることにより加工点での集光径が、またYAGレーザーと Ar^+ レーザーを合成するミラーへの Ar^+ レーザーの入射角度を変えることにより照射位置が、YAGレーザーとは独立に変えることができ、照射条件によってキーホールのみならず溶融池の情報も得ることができ、上述のキーホールの安定性についてより幅広い考察が加えられることも考えられる。さらに、溶融池の動きの情報をより的確に得るためには、照射位置をキーホールの位置からずらした方がよいことも考えられる。YAGレーザー溶接のモニタリング方法として、YAGレーザーの反射光を計測する方法が報告されており³⁾⁸⁾、その方法は簡便で有効なモニタリング方法ではあるが、我々の提案したプローブビームを用いる手法は任意に照射条件を変えることができるため、必要に応じて種々の情報を得られると考え、この手法を採用することとした。

4. 実験結果および考察

4.1 Ar^+ レーザー照射条件による信号特性

4.1.1 照射径による信号挙動

Ar^+ レーザー照射条件として、照射位置を0、照射径を

Fig. 3 Schematic illustration on the concept of this monitoring method.

Fig. 4 Reflected Ar⁺ laser signals by changing spot size of Ar⁺ laser. Fig. 5 High speed video pictures correspond with two spot sizes of Ar⁺ laser.

1, 2 mm とし、それぞれの条件において溶接速度を変化させたときの結果を Fig. 4 に示す。また、Ar⁺ レーザーの照射条件を変えたときの溶接部真上から見た高速度撮影画像を Fig. 5 に示す。Fig. 4 より照射径 1 mm では、信号の平均値、振幅値とも大きな変化はみられず、また信号強度も小さい。これは、Fig. 5 の高速度撮影画像から反射光がほとんど観察されていないことから、照射された Ar⁺ レーザーのほとんどがキーホール内に入ってしまったため信号が弱くなったものと考えられる。このときのキーホール径は、4.3 の高速度カメラによる観察で述べるが、0.5~1 mm 程度であり、なおかつ Fig. 5 の照射径 2 mm で溶接速度 0.5 および 2 m/min での高速度カメラ画像例で示すように反射光が観察される領域はキーホール開口部近傍よりもその外周部での頻度が多かったことから上述の結果が得られたと考えられる。

次に、照射径を 2 mm とすると、Fig. 5 の高速度撮影画像からも反射光が観察され、信号強度も大きくなっている。

このとき信号の平均値は、溶接速度が速くなると大きくなった。また、信号の振幅値は溶接速度が速くなると減少した。信号の平均値が大きくなるのは、高速度撮影画像から高速度域では溶融池の幅が小さくなっており、Ar⁺ レーザーが母材部分にも照射されるため、その反射光が検出されたためである。母材部は平滑であるので母材部に照射された Ar⁺ レーザーはその全てが安定して信号として検出されるのに対して、溶融池に照射された Ar⁺ レーザーは溶融池の振動により信号として検出される垂直に反射される光量は母材部よりも少なくしかも変動している。これは、Fig. 5 の高速度撮影画像からも明らかである。信号の振幅値については、高速度カメラ観察から低速度域ほどキーホールを含めた溶融池が激しく動揺しており、それが信号に表れたものである。以上のことから、照射径が 1 mm の場合、熱伝導型の溶接ではなくキーホールが形成されていると、照射された Ar⁺ レーザーの大部分はキーホール内に入り、反射光はほとんど検出されないことがわかった。一

方、照射径を 2 mm の場合は、信号の平均値から溶融池の幅がモニターでき、信号の振幅値からはキーホールおよび溶融池の動揺がモニターできることがわかった。

4.1.2 照射位置による信号挙動

Ar⁺ レーザー照射条件として、照射径を 1 mm、照射位置を -1, 0, 1 mm とし、それぞれの条件において溶接速度を変化させたときの結果を Fig. 6 に示す。Fig. 6 より、照射位置 -1 mm では信号の平均値はほとんど変化しないが、振幅値は溶接速度が遅くなると大きくなった。これは、溶接速度が遅いほど溶融池の動揺が大きくなっていることを示している。また、照射位置 0 mm では上述したように

Ar⁺ レーザーのほとんどがキーホール内に入ってしまうために信号強度は小さく、顕著な傾向は得られていない。照射位置 1 mm では、信号の振幅値は -1 mm の時と同様に溶接速度が遅いほど大きくなる傾向があり、溶融池の動揺を表しているが、信号の平均値は溶接速度が速くなると大きくなった。このときの高速度撮影画像を Fig. 7 に示す。この高速度撮影画像からわかるように、溶接速度が速くなるとキーホール前面の溶融池が小さくなり、Ar⁺ レーザー照射領域の中に母材部が含まれるようになるために、反射光が大きくなることに起因したものである。このことから、照射位置を 1 mm とすることにより信号の平均値からはキーホール前面の溶融池の大きさが、信号の振幅値から溶

(a) Position of Ar⁺ laser: -1 mm

(b) Position of Ar⁺ laser: 0 mm

(c) Position of Ar⁺ laser: 1 mm

Fig. 6 Reflected Ar⁺ laser signals correspond with irradiating positions of Ar⁺ laser.

Fig. 7 High speed video pictures correspond with three irradiating positions of Ar⁺ laser.

(a) Diameter : 2 mm, Position : 0 mm

(b) Diameter : 1 mm, Position : 1 mm

Fig. 8 Effect of bead width on reflected Ar⁺ laser signal.

融池の動揺がモニターできることがわかった。この結果は、前述の照射径 2 mm としたときと同じ傾向であるが、この照射条件では Ar⁺ レーザーはキーホールには入らないため、その信号強度は、照射径 2 mm, 照射位置 0 mm のときよりも大きくなっていった。

4.2 Ar⁺ レーザー反射光信号と溶込み形状の関係

これまでの結果から、Ar⁺ レーザーの照射条件が①照射径 2 mm, 照射位置 0 mm, ②照射径 1 mm, 照射位置 1 mm の 2 条件においてビード幅と相関性がありそうであることがわかった。そこで、この 2 条件において YAG レーザー出力を変化させた場合のデータも加えて Ar⁺ レーザー反射光信号の平均値とビード幅の関係について調べた。その結果を Fig. 8 に示す。これより上述の照射条件①では、照射径 2 mm と同じビード幅以上では信号はほとんど変化し

ないが、ビード幅が照射径 2 mm 以下ではビード幅が狭くなると信号は大きくなった。一方、照射条件②ではビード幅が大きくなると信号が小さくなり、照射条件①より両者の相関性が良いことがわかった。これは、前述しているように Ar⁺ レーザーの母材への照射量によるものであり、照射条件①においてビード幅 2 mm 以上で信号が変化しないのは全て溶融池に Ar⁺ レーザーが照射されるためである。

以上より、ビード幅をモニタリングするには Ar⁺ レーザーの照射径 1 mm, 照射位置 1 mm が適していることがわかった。

4.3 高速度カメラによるキーホール開口部の観察

キーホールの大きさを観察するため、Ar レーザーの照射径 2 mm, 照射位置 0 mm における高速度撮影画像を重ね

Fig. 9 Detecting areas of reflected Ar^+ laser by changing welding conditions
 Black: detecting area
 White: not detecting area.

合わせ、反射光の返ってくる領域を調べた結果を Fig. 9 に示す。図中の白いところが反射光がほとんど返ってこない領域である。その領域は溶接速度が遅いほど、また出力が大きいほど大きくなった。これは、溶接速度が速いとキーホールが細くなることが考えられ⁹⁾、図中の白い領域はキーホールの開口部を表しているものと推察される。また、このことは 3 項で述べたキーホールに Ar^+ レーザーが入ると反射光が検出されないという考えと合っている。以上のことから、図中(a)~(c)の溶接条件におけるキーホール径は、それぞれ(a)0.5 mm (b)1 mm (c)0.6 mm となり、本実験方法を用いると画像解析によりキーホール径を観測することができることがわかった。

5. 結 言

YAG レーザー溶接のモニタリング法として Ar^+ レーザーを用いた手法を提案し、その適正な計測条件について検討した。さらに、高速度カメラによるキーホール観察から以下の結果が得られた。

(1) YAG レーザー溶接のモニタリング手法として、 Ar^+ レーザーをキーホールおよび溶融池に照射し、その反射光を計測する手法を提案した。

(2) Ar^+ レーザーの照射径および照射位置を変化させてモニタリングに適正な照射条件を調べたところ、照射径 2 mm、照射位置 0 mm としたとき、キーホールおよび溶融池の幅と大きさとその動揺を捉えられ、また照射径 1 mm、照射位置 1 mm としたとき、キーホール前面の溶融池の大きさと動揺を捉えることができる。この動揺の信号としては、後者の方で顕著に現れることがわかった。

(3) Ar^+ レーザー反射光信号よりビード幅の検出が可能であることがわかった。特に、 Ar^+ レーザー照射条件を照射径 1 mm、照射位置 1 mm としたときにその検出がより顕著にできることがわかった。

(4) Ar^+ レーザーの照射条件を、照射径 2 mm、照射位置 0 mm としたとき、キーホール真上からの画像を解析することにより、キーホールの有無や大きさが観察できることがわかった。

6. 謝 辞

本研究開発は通産省工業技術院産業科学技術研究開発制度に基づく「フォトン計測・加工技術」の一環として、新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）から製造科学技術センター・フォトンセンターへの委託事業により行われたものであることを記し、謝意を表す。

参 考 文 献

- 1) 例えば、宮本，森：プラズマ発光の脈動成分解析による貫通検知，レーザー研究，Vol. 24，No. 10 (1996)，p. 1107-1113.
- 2) 森：テラードブランク溶接へのインプロセスモニタリング技術の開発と適用，溶接技術，Vol. 45，No. 11(1997)，p. 92-97.
- 3) 例えば，坪田，石出，長島，宮本，小島，池田：YAG レーザ溶接のインプロセスモニタリング方法の開発（その1），溶接学会全国大会講演概要，No. 64 (1999)，p. 46-47.
- 4) M. Watanabe, H. Okado, T. Inoue, S. Nakamura and A. Matunawa: Features of Various In-Process Monitoring Methods and Their Applications to Laser Welding, Proc. of ICALEO '95 (1995), p. 553-562.
- 5) 瀬渡，金，片山，松縄：X線透過映像法によるポロシティ生成挙動のリアルタイム観察—レーザー溶接時の欠陥生成機構の解明と防止（第3報）—，溶接学会全国大会講演概要，No. 60 (1997)，p. 74-75.
- 6) S. Katayama, N. Seto, J.-D. Kim and A. Matsunawa: Formation Mechanism and Reduction Method of Porosity in Laser Welding of Stainless Steel, Proc. of ICALEO '97 (1997), Section G p. 83-92.
- 7) S. Katayama, N. Seto, J.-D. Kim and A. Matsunawa: Formation Mechanism and Suppression Procedure of Porosity in High Power Laser Welding of Aluminum Alloys, Proc. of ICALEO '98 (1998), Section C p. 24-33.
- 8) H. Tsukihara, E. Ichikawa, E. Kojima and S. Kimura: An Approach to Monitor YAG Laser Welding Process Using Its Reflected Laser Power, Proc. of ICALEO '98 (1998), Section C p. 93-102.
- 9) 瀬渡，片山，松縄：高出力 YAG レーザ溶接時のポロシティ生成機構の解明，溶接学会全国大会講演概要，No. 65 (1999)，p. 242-243.