パルス YAG レーザの溶接に関する研究 (第1報)*

——反射光による加工現象の観察と溶接のモニタリング——

石 田 修 一** 下 井 泰 典**

Study of Pulsed YAG Laser Welding (1st Report)
—Observation of Laser Welding Processes and
Monitoring of Laser Welding with
Reflected Laser Light—

Shuichi ISHIDA and Yasunori SHIMOI

Laser light reflection in pulsed YAG laser welding and a monitoring method of laser welding are investigated. Pulsed YAG laser welding involves several processes such as surface melting, beam-hole forming, beam-hole vanishing, and solidification. During a pulse, the reflectivity changes with each process. The reflectivity of a cold rolled plate is about 40% of the polished surface. The molten surface reflectivity is about 80% of the polished one. In the cold rolled plate, reflection of laser

light increases with the surface melting. Laser light comes to be absorbed efficiently when the beam-hole is formed. By observing the change of the reflected light intensity, it is possible to detect a timing when the beam-hole is formed. By using the time from laser irradiation to the beam-hole forming, power density of irradiated laser beam can be estimated. In the lap joint, when the beam-hole has penetrated an upper plate, transient increase of the reflected light is observed. A gap malfunction in the lap joint can be detected by the excessive increase.

Key words: pulsed YAG laser, reflected laser light, laser welding processes, reflectivity, monitoring, power density, gap of lap joint

1. 緒 言

パルス YAG レーザ溶接は、非接触な加工であり、自動化しやすく、多くの工業分野において利用されている。特に電子部品の組立技術としての普及にはめざましいものがあり、高度に自動化された装置が生産ラインにおいて稼動している¹⁾。現在、パルス YAG レーザ溶接技術に要求されているのは、生産性と信頼性を高めることと、今後予想される無人運転に対応できる技術確立することである。このような技術的要求を満たしていくには、溶融効率を向上させるためのレーザ発振波形の最適化や、溶接の良否の判断をリアルタイムに行うモニタリング等の技術開発が必要である。このためにはパルス YAG レーザ溶接における加工現象を明確に把握することが重要である。しかし、パルス YAG レーザ溶接は、溶融・蒸発・凝固といった一連のプロセスが数 ms の短時間に完結する現象であるために、高速度カメラを用いてもその加工現象を把握することはむずかしい。加工現象を観察する一つの方法として、試料表面からのレーザの反射光に着目し、反射率の変化と表面状態について検討した報告はいくつかあるが²⁾³⁾、加工現象とこの関係に関し

ては十分な検討がなされていない。

本研究は加工現象に関する情報源として加工中の反射光、金属蒸気の発光、加工音等の変化に着目し、パルス YAG レーザ溶接における加工現象およびモニタリング方法について検討するものである。本報では、反射光より得られる情報をもとに、加工現象と反射光によるモニタリングの可能性について検討した結果を報告する。

2. 実験装置と方法

レーザ発振器としては、東芝製のパルス YAG レーザ加工機 LAY 508 型を使用した。出力波形はパルス幅 8 ms のノーマルパルス発振波形である。

加工中の反射率の時間変化を測定した装置の構成を図 1 に示す。反射率は、レーザ光と試料からの反射光のパワーを 5 μ s 間隔で同時に測定し、両者の強度比より算出していった。試料は照射光の光軸に対して 45° 傾け、加工用の集光レンズの焦点位置に配置した。反射光の全光量を集光するために大口径のレンズを使用し、受光素子面における反射光の空間的な強度分布を平均化するために拡散板を使用した。照射レーザ光の出力を検出する光学系においても同じく拡散板を使用した。なお、両者の途中の光学系の違いについては、試料の代わりに基準ミラーを用いて補正した。受光素子としては受光部の直径が 10 mm の PIN フォトダイオードを使用した。

* 原稿受付 昭和 58 年 12 月 10 日。昭和 55 年度精機学会春季大会学術講演会 (昭和 55 年 3 月 29 日) にて発表

** 正 会 員 (株)東芝 (横浜市磯子区新杉田町 8)

Fig. 1 Reflectivity measuring apparatus

Fig. 2 Apparatus for monitoring reflected laser light and light of vapor plume

反射光による溶接のモニタリングを検討した時の実験装置の構成を図 2 に示す。図 1 の光学系とは、照射光が試料に垂直に入射し、照射光と光軸を同じくする反射光を検出している点が異なっている。モニタリングにおいて検出光学系の与える空間的な制約はその実用性を決定する重要な因子であり、図 2 の検出光学系は、加工光学系に制約を与えないという点ですぐれている。

実験においては、反射率の変化と加工現象の対応を求めるために、加工中に発生する金属蒸気の発光の検出を行った。この発光により蒸発現象の発生時期を知ることができる。図 2 には発光の検出光学系も示してある。レーザー光のエネルギーは、光路上に色ガラスフィルタを挿入して変化させた。試料としては、反射率の変化を観察した実験には、表面状態の異なる 4 種類の純鉄の板を使用し、モニタリングの実験には数種類の材質の冷間圧延された金属板を使用した。

3. 反射率の時間変化の観察による加工現象の検討

3.1 反射率と加工現象の関係

表面を鏡面に仕上げた純鉄を用いて、Ar ガス雰囲気

Fig. 3 Change of reflectivity R during a pulse
Energy: 2 J, Atmosphere: Ar gas, Material: iron (mirror polished, thickness: 1 mm)

中でレーザー光を照射した時の反射率の時間変化（以下、単に反射率の時間変化と記す）を図 3 に示す。加工条件は適正溶接条件に対応するものである。鏡面状態の試料を用いたのは、試料表面の酸化皮膜の影響をなくするためであり、Ar ガス中で加工を行ったのは、加工中の表面の酸化を防ぐためである。反射率は固相の未加工状態における値を 1 とした相対値 R で示してある。なお、使用した純鉄の固相鏡面状態における反射率の測定値は 65 % である。反射率の変化は次の 5 つの区間に分けることができる。

区間 1: 初期の反射率が維持される区間

区間 2: 反射率が初期値より 20% 程度低下する区間

区間 3: 反射率が急速に低下し、初期値の 10% 程度の値を維持する区間

区間 4: 反射率が上昇し、初期値まで復帰する区間

区間 5: 初期値と同程度の反射率が維持される区間

区間 1 と区間 5 においては固相における反射率が維持されることにより、区間 1 が表面未溶融過程に、また区間 5 が凝固完了過程に対応することは明らかである。レーザー加工において反射光の減少を伴う現象としては、表面酸化・溶融・ビーム孔の形成の 3 つの現象を考えることができる。特に、蒸発の反動力により溶融部にビーム孔が形成される時、レーザー光はビーム孔内での多重反射により効率良く吸収されることが知られている⁴⁾。加工

Fig. 4 Change of reflectivity R at melting threshold energy

Energy; 0.7 J, Atmosphere; Ar gas, Material; iron (mirror polished, thickness; 1 mm)

雰囲気不活性ガスの場合、表面酸化の効果は無視できるため、区間2を試料表面の熔融過程、区間3をビーム孔の形成過程とし、区間4をビーム孔の消失と凝固の進行していく過程と考えるのが妥当と思われる。

この推察の妥当性を検討するために、加工中の蒸発現象および熔融限界エネルギーにおける反射率の変化を観察を行った。熔融限界エネルギーは加工後、試料表面に熔融の痕跡が認められる最小の照射エネルギーと定義するもので、熔融限界エネルギーでの加工現象としては試料表面の熔融のみを考えることができる。図4に熔融限界エネルギーにおける反射率の変化を示す。レーザ照射後0.5～1 msの区間において区間2と同程度の反射率の低下が認められる。その後、反射率は初期値まで復帰し表面は固相状態にあることがわかる。この熔融限界エネルギーにおける反射率の低下現象は試料表面の熔融によるものであり、区間2が試料表面の熔融過程に対応していることがわかる。

加工中の蒸発現象を観察した結果を図5に示す。加工は空気中で行った。空気中で加工を行ったのは、Ar中では金属蒸気の酸化の効果が小さく、十分な光量の発光を得ることができないためである。図5において反射率はAr中で加工を行った場合とほぼ同様な変化を示し、区間1～5に対応する変化が認められる。しかし、区間5における反射率はAr雰囲気における値よりも著しく低いものとなっている。これは、区間4と区間5において酸化が進行しているためと思われる。発光波形に着目する時、区間3は強い発光の観察される区間に一致し、区間4は発光の消失過程に一致することがわかる。このことは、区間3が試料表面からの蒸発の著しい過程に対応し、区間4が蒸発の減少停止していく過程に対応することを示している。これらは、区間3においてビーム孔が形成され、区間4において消失していくことを裏づけるものである。

3.2 加工過程におけるレーザ光の吸収現象の検討

前節において述べた結果より、鏡面仕上げした試料の熔融状態における反射率は固相における値の80%と高く、レーザ光は主にビーム孔の形成過程において吸収されて

Fig. 5 Relation between change of reflectivity R and vaporization

Energy; 2 J, Atmosphere; air, Material; iron (mirror polished, thickness; 1 mm)

いることがわかる。しかし、これは鏡面仕上げした試料を用いて得られた結果であり、通常の溶接に用いられる試料においてはその吸収現象が異なっていることが予測される。そこで、この差異を検討するために、表面状態の異なる試料を用いてその反射率の時間変化を観察した。試料としては、材質が純鉄で、鏡面仕上げをしたもの ($0.1 \mu\text{m } R_{\text{max}}$) のほかに、#1500のエメリー紙で研磨したもの ($0.4 \mu\text{m } R_{\text{max}}$)、圧延材でさびの形成の認められないもの ($2 \mu\text{m } R_{\text{max}}$: 以下、通常の圧延材と記す)、圧延材でさびの形成の認められるもの ($3 \mu\text{m } R_{\text{max}}$) を使用した。加工は図3と同一条件で行った。各試料における反射率の時間変化を図6に示す。鏡面仕上げした試料とほかの試料における反射率の変化には、加工初期において大きな差異が認められる。すなわち、鏡面仕上げをしていない試料においては、ビーム孔の形成過程以前に反射率の上昇が認められる。

各試料の加工初期における反射率の変化を、時間を拡大して図7に示す。エメリー紙で研磨した試料における反射率の変化に着目すると、反射率は上昇後、鏡面仕上げの試料の熔融時の値と一致している。これは、反射率の上昇の原因が表面熔融にあることを示すものである。すなわち、表面に凹凸のある試料においては、熔融により表面が平滑化され反射率は上昇することがわかる。通常

Fig. 6 Change of reflectivity R on various surface conditions
Energy; 2 J, Atmosphere; Ar gas, Material; iron

Fig. 7 Change of reflectivity R on various surface conditions

の圧延材における変化も同様のものであり、圧延時に生じる試料表面の凹凸が溶融により平滑化されていることがわかる。しかし、さびの形成されている圧延材における時間変化は、エメリー紙で研磨したものや通常の圧延材における変化と異なり、反射率の上昇過程において通常の圧延材の初期値に近い値を維持する過程（図7の区間a）が存在している。これは、さびの層がレーザの加熱により蒸発し、通常の圧延材に近い状態の表面があらわれていることを示すものである。区間a以後の上昇過程は、通常の圧延材と同じく、溶融時の平滑化によるものと思われる。以上のことより、試料表面を鏡面仕上しない場合、レーザ光による酸化皮膜の除去作用や表面溶融時の平滑化のために、溶融時の反射率は初期値より上昇することがわかる。すなわち、表面溶融により吸収率が高くなることはない。空气中でも同様な結果であった。

次に、図7の各試料の表面溶融時における反射率に着

Fig. 8 Oscillogram of reflected laser light obtained by monitoring optics
Energy; 3.5 J, Atmosphere; air, Material; iron (cold rolled, thickness; 1 mm)

目すると、酸化皮膜の存在する場合、表面溶融時の反射率は初期状態における酸化皮膜が厚いほど低い値となっている。これは、初期酸化皮膜が十分に除去されずに溶融部表面に残存しているためと思われる。しかし、いずれの試料においても、凝固後の反射率は固相鏡面状態の値まで復帰しており、溶融時に残存している酸化皮膜はビーム孔の形成過程の蒸発により、除去されていることが推測される。

4. 反射光による溶接のモニタリングの検討

前章において、反射光には表面溶融・ビーム孔の形成等の数多くの加工現象に関する情報が含まれていることが明らかとなった。本章では、図2に示すモニタリング用光学系を用いて、反射光の強度変化により検出可能な諸情報について検討する。

4.1 ビーム孔形成過程の検出

モニタリング用光学系において得られる反射光波形を金属蒸気の発光波形とともに図8に示す。試料は純鉄の圧延材で、加工雰囲気は空気である。反射光は蒸発の開始とともに急激に減少し、低い値を維持した後、蒸発の減少とともに再び増加する。反射光が急激に減少するのは、蒸発により溶融部にビーム孔が形成されるためであり、その後、反射光が増加するのはビーム孔が消失していくためである。すなわち、モニタリング用光学系を用いて得られる反射光の強度変化から、ビーム孔が形成されるまでの時間 t_1 とビーム孔の形成期間 t_2 を検出できることがわかる。しかし、反射光の観察からはビーム孔が形成されている状態と凝固後加工部が穴あきとなっている状態を識別することが困難なため、反射光より求める t_2 は、ビーム孔の形成期間を検出する量としては不適性なものである。

照射エネルギーを変化させてパワー密度を変化させた場合の各種材料における t_1 の変化を図9に示す。試料はすべて圧延材であり、加工雰囲気は空気である。試料

Fig. 9 Relationship between t_1 and energy
Atmosphere: air

Fig. 10 Oscillogram of reflected laser light on the lap joint
Energy: 6.8 J, Atmosphere: air, Material: SUS 304 (cold rolled, thickness: 0.13 mm, 1 mm)

の材質に関係なく t_1 は照射エネルギーの増大（パワー密度の増大）に伴い減少していく。 t_1 は、加工量を支配する照射エネルギーよりも加工速度を支配するパワー密度に依存するものであり、図9における t_1 の変化は、 t_1 がパワー密度のモニタ量として良好な特性を有していることを示すものである。また、各材料において認められる差は、材料の反射率、熱伝導率等の物性の違いにより生じるもので、レーザー加熱の難易度を示すものと考えることができる。

4.2 重ね継手のギャップの検出

重ね継手における反射光の変化を図10に示す。図10の下方の波形は上下部材間が溶融により接触した時点を表している。材質はステンレス鋼で、加工雰囲気は空気である。重ね継手の場合、ビーム孔の形成過程、特に上部材溶融部が下部材と接触する時点において一時的な反射光の増大現象が認められる点が異なっている。この反射光の一時的な増大現象は、上部材を貫通したビーム孔を介して未溶融状態の下部材表面からの反射光が検出されるために生じるものである。このため、この増大現象におけるピーク値は、下部材表面の反射率や貫通時のビーム孔の開口径の影響を受ける。開口径は

Fig. 11 Relationship between peak value P and gap of lap joint G
Energy: 6.8 J, Atmosphere: air, Material: SUS 304 (cold rolled, thickness: 0.13 mm, 1 mm)

上下部材間のギャップにより変化し、このピーク値をモニタすることによりギャップの異常を検出することが可能である。ピーク値とギャップの関係を図11に示す。ピーク値 P はギャップの増大とともに大きくなり、過大なギャップに対しては飽和する特性を有している。ばらつきが大きいためギャップの測定手段としては不十分なものであるが、ギャップの過大を検出する手段としては有効なものである。

5. 結 言

加工中の反射率の時間変化よりパルス YAG レーザ溶接における加工現象を検討し、反射光の強度変化により溶接のモニタリングの可能性を検討した結果、次の結論を得た。

- (1) パルス YAG レーザ溶接は、酸化皮膜の破壊・表面溶融・蒸発・ビーム孔の形成・ビーム孔の消失・凝固といった一連のプロセスを経て完結する現象である。
- (2) 表面溶融時の反射率は試料の初期表面状態により異なるが、表面を鏡面に仕上げた場合を除き、初期の固相における反射率よりも高い値となる。これは、初期表面に存在する凹凸が溶融により平滑化され、酸化皮膜がレーザーの加熱により加工されるためである。パルス YAG レーザ溶接においては、試料表面を鏡面に仕上げた場合を除き、表面溶融時に吸収率は高くない。レーザーのパワーはビーム孔が形成されることによって初めて効率よく吸収されるようになる。
- (3) 反射光の強度変化により、ビーム孔の形成・消失過程を検出することができる。ビーム孔の形成開始に要する時間は、パワー密度の増大に伴い単調に減少していき、パワー密度をモニタする量として適し

ている。

- (4) 重ね継手において検出される反射光では、ビーム孔が上部部材を貫通した時点において、下部部材表面からの反射光による一時的な増加現象がある。この増加現象におけるピーク値は、上下部材間のギャップにより変化するため、ギャップの異常検出量として適している。

文 献

- 1) Y. Shimoi, N. Hoshina, K. Ushimi, K. Konno and

A. Kobayashi: Laser Welding in Automatic Assembly Line for Color-CRT Electron Gun, Ann. CIRP, **32**, 1, (1983) 135.

- 2) M. V. Allmen, P. Blaser, K. Affolter and E. Stürmer: Absorption Phenomena in Metal Drilling with Nd-lasers, IEEE J. Quantum Electronics, **QE-14**, 2, (1978) 85.
3) A. M. Bonch-Bruевич, Ya. A. Imas, G. S. Romanov, M. N. Libenson and L. N. Mal'tsev: Effect of a Laser Pulse on the Reflection Power of a Metal, Soviet Physics, **13**, 5, (1968) 640.
4) 吉田寿夫, 荒井伸治: レーザによる加工, 電気加工学会誌, **7**, 13 (1974) 1.

情 報

科技厅, 超軽量省エネ航空機開発

科学技術庁は、62年度までに開発の終わる STOL (短距離離着陸機) に次ぐ次世代航空機として 63 年度から 10 年計画で超軽量省エネルギー航空機の開発プロジェクトに着手する方針を固めた。この計画は新 YX (次期民間輸送機) 計画に次いで 1995 年ごろにも表面化するとみられる民間航空機の国際共同開発プロジェクトに参加するための技術力を養うとともに、次世代コンピュータ (短距離輸送機) の自主開発につなげようというものである。

それによると、①空力技術、②軽量化技術、③電子制御技術——の研究を中心に、ターボファンジェットエンジンに近い高速性能をもつ高速プロペラエンジン (ターボプロップ) の開発を進め、最終的に現在のジェットエンジンに比べ約 50% の燃料で飛行できる省エネ飛行機 (実験機) を開発することになっている。

ところで、超軽量省エネルギー航空機プロジェクトはポスト STOL として構想が持ち上がったものである。

STOL はすでにエンジン、機体とも完成し、今年度末から 62 年度までは飛行実験を行うことにしている。

軽量省エネルギー航空機プロジェクトは、飛行実験を含めた STOL プロジェクトがすべて終了するのを待って立ち上がることになるが、科技厅では今後 STOL 関係予算が急速に減少に向かうことから、早ければ 61 年度から基礎研究に入る考えである。このため、科技厅航空宇宙技術研究所では所内に省エネルギー技術研究チーム (グループリーダー・神谷信彦氏) を発足させた。

超軽量省エネルギー航空機実現のポイントとなるのは

空力技術、軽量化技術、電子制御技術、エンジン技術の 4 つである。空力技術では、いかに空気抵抗の少ない翼、胴体をつくるかが課題である。

軽量化技術では、新材料の開発と複合材料の適応がポイントである。現在の航空機の機体はアルミニウム合金 (ジュラルミン) だが、これにリチウムを加えるなどの方法を採用することによって強度を増し、結果として軽量化を実現するアイデアや、カーボンファイバなど網状の繊維を複合材料として使用する場合、力のかかる方向を予測して、それに合わせた繊維の埋め込み方を考慮して軽量化を図るなどの考えが示されている。

また、電子制御技術を応用する場合のねらいは、いかにして翼を小さくするかに焦点がある。一般に航空機は翼を小さくすると安定性がなくなるが、水平尾翼や垂直尾翼を精密にコントロールすることによって、翼が小さくても動的安定 (飛行中の安定性) は得られるようになる。そのためには空気量、風速などのデータを計算して即時に対応する電子制御技術が必要になるというわけである。

一方、エンジンの研究については、既存のターボファンエンジンの性能アップと同時に、高速プロペラエンジンの開発にも乗り出す。プロペラは、その先端の回転速度が音速を超えると衝撃波が発生するため、スピードを増すには限界があり、YS-11 クラスで音速の 50% 程度のスピードしか出せなかった。今回の研究では、これをジェット旅客機に近い 80% までアップさせようというものである。

(服部 敏夫)