

学術論文

# 純チタンのマイクロ突合せ溶接における インプロセスモニタリングと適応制御 (第1報)

— パルスレーザ照射中の急峻なパワー変化における  
溶接プロセスのインプロセスモニタリング —

川人 洋介\*, 鬼頭 昌之\*, 片山 聖二\*

In-Process Monitoring and Adaptive Control in Laser Micro Butt Welding of Pure Titanium (First Report)  
— In-Process Monitoring of Welding Phenomena Induced by Change in Laser Peak Power during Pulsed Laser Spot Welding —

KAWAHITO Yousuke, KITOU Masayuki and KATAYAMA Seiji

\*大阪大学 接合科学研究所 (〒567-0047 大阪府茨木市美穂ヶ丘 11-1)  
kawahito@jwri.osaka-u.ac.jp

(原稿受付 2005 年 9 月 27 日)

In-process monitoring and adaptive control have been increasingly expected as one of the useful procedures in order to produce sound welds stably. However, few studies have been tried to obtain the fundamental knowledge of in-process monitoring for adaptive control. The objectives of this research are to evaluate the monitoring abilities of heat radiation or reflected light in the butt micro-welding of pure titanium rods with a pulsed Nd:YAG laser beam, and to investigate the welding phenomena caused by a 150  $\mu$ s-rapid increase or decrease of laser peak power during laser irradiation in order to utilize adaptive control effectively. It was revealed that the reflected light intensity represented the remarkable change of the surface condition during the formation of a molten pool, and the heat radiation signal had the clear correlation to the molten pool size or the penetration depth for respective laser powers. Moreover, the heat radiation had high reproducibility in spite of the surface difference made by the overlapped rate of 1/3, 1/2 and 2/3. It was also found that the heat radiation intensity had a quick response to the rapid change of laser peak power, and then the correlation between the heat radiation and the molten pool size was kept in the designed laser power. These experimental results suggest that the heat radiation signal should be desirable signal for the input of adaptive control.

**Keywords:** in-process monitoring, heat radiation, reflected light, butt micro-welding, pure titanium

## 1. 緒 言

レーザ溶接において、高速で高品質・高機能な接合部を常時作製するためには、インプロセスモニタリングと適応制御は有効な手法のひとつであり、近年報告がなされている<sup>1)~6)</sup>。たとえば、著者ら<sup>1)</sup>はアルミニウム合金薄板のパルスレーザによる重ね溶接において、レーザ照射中の溶接部からの反射光や熱放射光を計測し、それらの情報を基に、プロセス状態を判断してレーザパワーと照射時間を制御し、インプロセスで穴あきを補修し、常時良好な接合部を作製できることなどを報告した。しかしながら、インプロセスモニタリングと適応制御に関する基礎的な知見については、十分には明らかにされてはいない。たとえば、パルスレーザの突合せ溶接において、溶接現象をどの程度モニタできるのか、溶接中のレーザパワー制御が、溶接プロセスにどのような変化を与えるのかなど、調査すべき点がある。

そこで、本研究では、比強度(強度/比重)と耐食性に優れた材料として利用されている純チタンに、パルスNd:YAGレーザ照射による突合せ溶接を行い、溶融池からの反射光と熱放射光の計測および溶融池の高速度画像観察から溶接現象を明らかにした上で、インプロセスモニタリングでどの程度までモニタできるのかを調査した。具体的には、熱放射光および反射光のモニタ信号と表面の溶融池との相関、溶込み深さモニタの可能性および連続パルス溶

接時におけるモニタ信号の再現性について検証した。さらに、レーザ照射中に、溶融池が形成された状態で、適応制御時に実施される急峻なレーザパワーの増加あるいは減少を行い、その時の熱放射光強度と溶融池径の応答から、溶接プロセスを考察した。

## 2. 供試材料および実験方法

本実験では、Fig. 1 に示すように適応制御型基本波パルスNd:YAGレーザから、レーザ光をファイバ径300  $\mu$ mで伝送し、集光レンズでスポット径150  $\mu$ mに絞り、斜め方向から酸化防止のArガスを40 l/minで吹きかけながら突合せ溶接を試みた。また同時に、照射部からの反射光と熱放射光のYAGレーザ同軸方向からの計測と、斜め方向からの溶融池の高速度画像観察も行った。特に、画像観察に関し

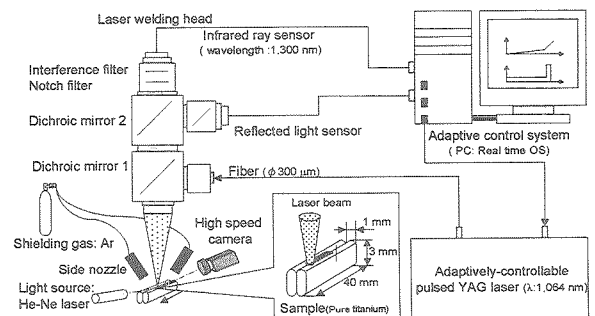


Fig. 1 Schematic experimental set-up of in-process monitoring and laser adaptive control system.

て、溶融表面の変化が数百 $\mu\text{s}$ 程度の速い溶融表面の変化に追従するために、22 mW の He-Ne レーザを撮影用背光として、1 秒間に 20,000 コマの高速度画像観察を行った。その他のモニタリング計測・観察方法の詳細については、従来の報告<sup>2)</sup>と同様である。また、供試材料は、純チタン JIS2 種の焼鈍線材をプレス加工後切断し、厚さ 1 mm, 幅 3 mm, 長さ 30 mm の細長い板状のサンプルを作成し、Fig. 1 に示すようにサンプルのプレスされた面を突き合せて使用した。

### 3. 実験結果および考察

#### 3.1 純チタンのマイクロ突合せスポット溶接結果

サンプルの突合せ部の表面が集光レンズの焦点位置にるように設置し、基本波パルス YAG レーザを用い、ピークパワー 0.4 kW で照射時間 15 ms, 0.8 kW では 5 ms, 1.6 kW では 2 ms の 3 種類の矩形パルス波で、各 5 サンプルずつ突合せ溶接を試みた。Fig. 2 に各ピークパワーにおける代表的な表面状態と突合せ面での断面形状の一例を示す。ピークパワー 0.4, 0.8 kW の表面溶融状態は、ほぼ円形で溶融部径は 0.6 mm 程度あったが、ピークパワー 1.6 kW では、融液が溢れ出たような溶融部形状が見られた。この溶接状況では、スパッタが発生する可能性があるため、注意が必要である。溶込み深さについては、パワーの増加に伴い深さが増し、ピークパワー 1.6 kW では 0.9 mm 程度の溶込み深さを得ることができた。しかしながら、溶融部の中央あるいは最深部には大きなポロシティが発生した。

以上の結果、本溶接条件下で深溶込みの溶接部を得るには、ピークパワー 1.6 kW を使用すれば可能であることが判明した。しかしながら、溶接部内部のポロシティやスパッタの発生に注意する必要があることがわかった。

#### 3.2 突合せ溶接におけるインプロセスモニタリング

3.1 節において、0.4 kW のレーザパワーで突合せ溶接を実施したサンプルについて、基本波 Nd:YAG レーザの出力波形、溶融池からの熱放射光と反射光の計測結果、および溶融状態の高速度ビデオ観察結果の一例を Fig. 3 に示す。上のグラフは、横軸は照射開始時を基準とした時間であり、縦軸は、レーザピークパワー、反射光強度、熱放射光強度である。下のグラフは、溶融池の高速度観察結果から算出

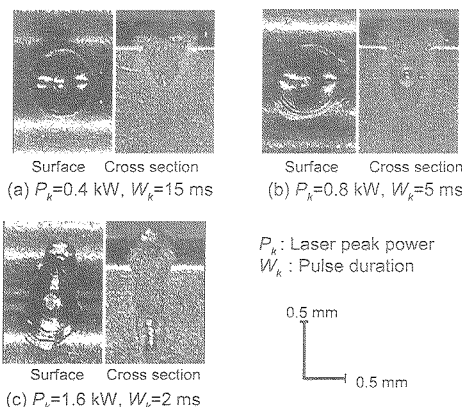


Fig. 2 Surfaces and cross sections of micro butt welding of pure titanium with pulsed Nd:YAG laser beam.

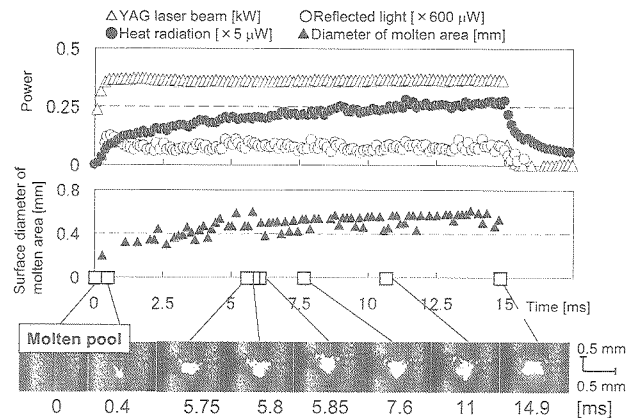


Fig. 3 Monitoring results of typical butt weld of pure titanium, showing laser pulse shape, reflected light and heat radiation signals, and high-speed observation images of spot molten pool.

した突合せ方向の溶融池径である。グラフ下の写真は、斜め 45 度方向から観測した溶融池表面の高速度画像を示す。表面の写真のスケールは、斜め方向から観測した場合の縦横比を考慮したスケールを採用した。なお、溶融池は高速観察画像中央の白色領域として示され、その径は、溶融していると判断される白色領域の幅から求めた。高速度カメラによる観測から、溶融池は、照射開始 0.4 ms 後に形成が確認でき、照射が進むにつれて成長した。また、溶融池が成長する過程で、溶融表面が、数 kHz の周期で揺れ動いた。たとえば、5.75, 5.8, 5.85 ms の連続撮影画像を比較すると、溶融池が突合せ方向に広がり、次の 50  $\mu\text{s}$  の間にその広がった溶融部分が消失することが観測された。これは、溶融池表面の融液が大きく揺れ、吹きこぼれそうになる状況に相当すると考えられる。また、11 ms では溶融池の端に凹凸があり、その部分が陰として観測されるので、溶融池全体を認識するのが難しい状況が現れた。この凹凸は、溶融池表面の大きな揺れが観測された結果と考えられる。したがって、グラフの溶融池径は、レーザパワーの増加とともに、溶融池表面状態の影響を受け、値が上下に変動しながら増大した。

熱放射光に関しては、溶融池の成長とともにその強度が増加することが認められた。そこで、溶融池の表面状態と熱放射光の関係を、観測画像およびその前後の画像比較から、溶融池の表面状態を 3 種類に分類し、詳細に調査した。①7.6 ms での溶融表面のように、溶融池径が全体認識できるタイプ A, ②11 ms の溶融池のように、溶融池の一部に陰の部分ができて、溶融池全体が認識できないタイプ B, ③5.75 ms からの連続観測画像が示すように、150  $\mu\text{s}$  以内に広がった溶融部分が消失するタイプ C の 3 種類の溶融表面状態に分類した。その結果を Fig. 4 に示す。横軸は溶融池径、縦軸は熱放射光強度である。分類したタイプ A の溶融池径と熱放射光強度には明瞭な比例傾向が見受けられた。また、熱放射光強度のモニタから、各タイプの表面状態を明瞭に区別することは難しいことも判明した。これについては、モニタ信号が 1.6 kHz のローパスフィルタを通じた信号処理を行っているため、タイプ B やタイプ C に観測される溶

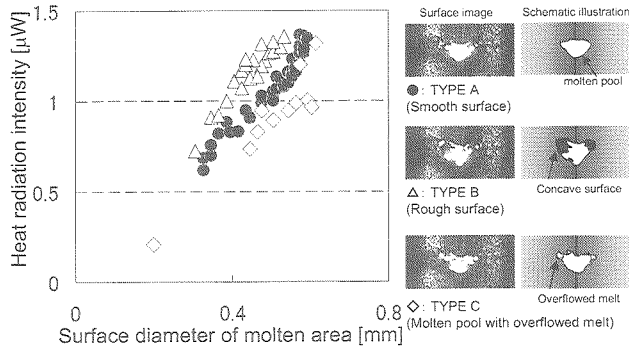


Fig. 4 Relationship between surface diameter of molten area and heat radiation for three typical surfaces.

融表面の揺れの情報がモニタ信号に反映するかは検討が必要であった。実験結果からは、熱放射光の溶融池径モニタの精度を大幅に下げる方向に働いているので、現状のモニタ計測法では、溶融表面の揺れまでは、反映できていないと考えられる。したがって、本実験下では、画像観察モニタに関しても、信号処理が必要であることが判明した。今後はタイプ A を選定し、溶融池径を求めることとした。

さらに、各レーザーパワーにおける溶融池径と熱放射光との相関を求めた。その結果を Fig. 5 に示す。横軸と縦軸は Fig. 4 と同様である。レーザーパワー毎に区別可能な相関が存在し、同じ溶融池径では、レーザーパワーの高い方が、熱放射光強度が大きくなる傾向が得られた。これは、熱放射光には温度情報や、熱放射面としての溶融サイズの情報が含まれるため、溶融池径が同じ場合、レーザーパワーが高い方が、溶融池全体の温度が高くなることが反映された結果であると考えられる。

次に、溶接結果である溶込み深さと熱放射光との関係についても調査を行った。具体的には、ピークパワー0.4 kW で照射時間 6 - 16 ms の溶接結果、0.8 kW では 3 - 8 ms の溶接結果、1.6 kW では 1.6 ms の溶接結果から得られた溶込み深さと熱放射光強度との関係を求めた。その結果を Fig. 6 に示す。横軸は溶込み深さで、縦軸は熱放射光強度である。結果として、レーザーパワー毎の溶込み深さと熱放射光強度との相関が確認できた。これは、Fig. 2 に示すように、溶込み深さに関しては、レーザーパワーの違いによる影響が顕

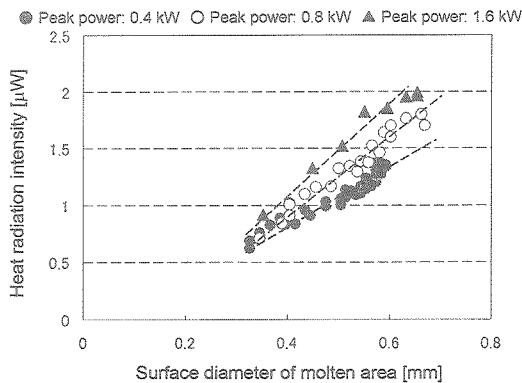


Fig. 5 Relationship between diameter of surface molten area and heat radiation for each laser peak power.

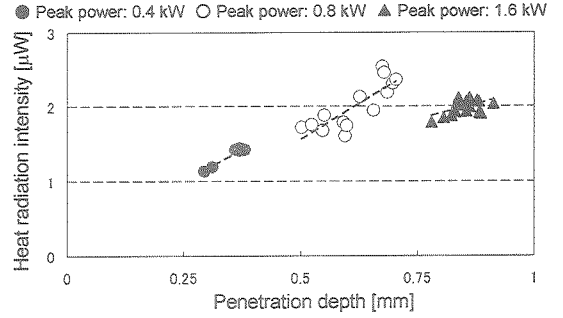


Fig. 6 Relationship between penetration depth and heat radiation for each laser peak power.

著であることを示していると考えられる。

一方、反射光は、溶融池が確認できる 0.4 ms から、ほぼ一定の値を示した。これは、Fig. 7 (a) に示すように突合せ面が凹形状であるため、YAG レーザと同軸方向には強い反射光が戻らず、Fig. 7 (b) のように小さな溶融池が形成された後に反射光が戻り、その後の溶融池が成長する過程では、反射光強度に反映される顕著な変動がなかったためであると考えられる。したがって、反射光強度は溶融表面の存在という顕著な変化をモニタするには適していると考えられる。もう少し詳細な溶融表面形状との関係を調べるため、上述の溶融表面状態のタイプ A, B, C に分けて調査した結果を Fig. 8 に示す。横軸は溶融池径、縦軸は反射光強度である。分類した表面状態に対し、反射光との明瞭な関係は見受けられなかった。これについては、先に熱放射光で述べたが、溶融表面が非常に複雑に、高速で変化しているためであると考えられる。しかし、それだけでなく、反射光強度の値という一指標では溶融表面をモニタしきれないことも考えられる。

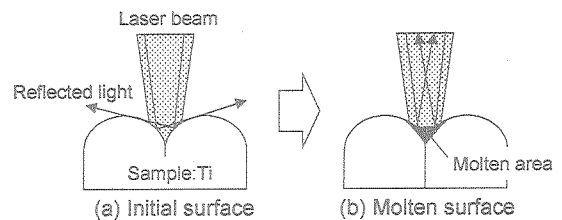


Fig. 7 Schematic drawing of typical reflection process in micro butt welding of pure titanium with pulsed Nd:YAG laser beam.

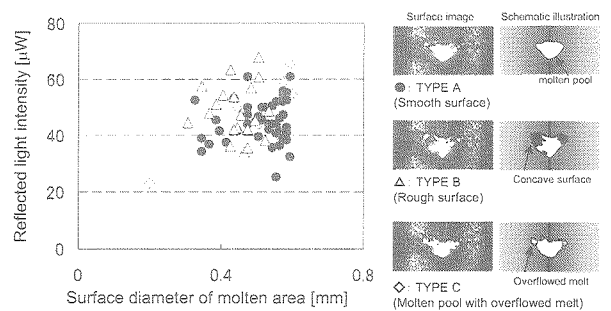


Fig. 8 Relationship between surface diameter of molten area and reflected light for each surface condition.

したがって、本溶接条件下においては、熱放射光については、インプロセスの溶融池径および重要な溶接結果の一つである溶込み深さとの相関が見受けられた。また、溶融池径に関しては、レーザーパワー毎の相関が異なることが明らかになった。一方、反射光に関しては、溶融池形成という顕著な表面状態変化がモニタできる程度であった。

3.3 パルス突合せ溶接における連続モニタリング

連続パルス溶接時におけるモニタリング信号の再現性を検討するために、レーザーパワー0.4 kW、照射時間15 msの溶接条件で、ラップレート1/3、1/2および2/3の三種類について検討を行った。その結果を Fig. 9 に示す。横軸は溶融池径で、縦軸はモニタリング信号の熱放射光強度あるいは反射光強度である。溶融池径と熱放射光との関係は、ラップレートに関わらず、保たれていることが確認できた。つまり、前照射による表面状態に変化が生じて、パルスレーザーで照射部を溶かすことには大きな影響はないと考えられる。一方、反射光に関しては、同様な傾向が現れているが、熱放射光ほど再現性はよくなかった。したがって、溶接プロセスモニタとしては、現状のままでは使用が難しいことが確認された。

以上の結果から、本連続パルス溶接時において、熱放射光は再現性が保たれることが判明した。一方、反射光は、再現性もよくなく、溶接プロセスモニタとしての使用は難しいことがわかった。

3.4 溶接プロセスに及ぼすパルスレーザー照射中の急峻なパワー変化の影響

適応制御はレーザーパワーを制御して、高品質継手の安定的な生産を目的とし、実用化が望まれている技術である。しかしながら、実際、パルスレーザー溶接時における、レーザーパワーの適応制御による急峻なピークパワーの増減により、溶接プロセスがどのようになり、モニタ信号にはどのように反映されるかという基礎的な知見については、未だ十分には明らかにされていない。そこで、3.2 節から、レーザーパワー毎に溶融池径と熱放射光との相関が異なることが認められたピークパワー0.4、0.8、1.6 kW に対して、パワーを急峻に変化させた場合の溶融池への影響を調査した。

3.4.1 急峻なパワー増加による溶接プロセスの変化

観測できる程度に成長した溶融池に対して、Fig. 10 に示

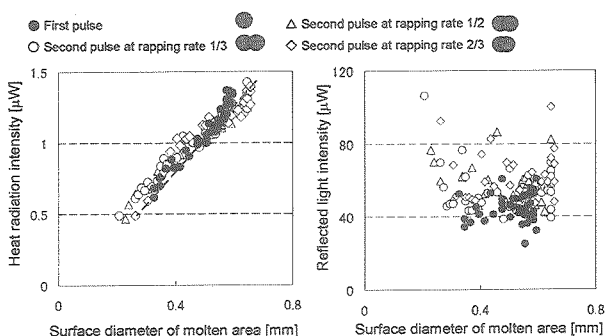


Fig. 9 Relationship between surface diameter of molten area and in-process monitoring signals in overlapped spot welding.

す条件で、レーザーピークパワーを150 μsの短時間で増加させ、その時の溶接現象を熱放射光および溶融池径でモニタした。Fig. 10の条件1で得られた観測結果の一例を Fig. 11 に示す。グラフは、横軸は照射開始時を基準とした時間であり、縦軸は、レーザーピークパワー、熱放射光強度、溶融池の高速度観察結果から算出した突合せ方向の溶融池径である。グラフ下の写真は、斜め45度方向から観測した溶融池表面の高速度画像を示す。観測結果から、照射開始後の1 msにおけるレーザーパワーの増加に対して、熱放射光強度が迅速に追従することが確認できるが、溶融池径の増加に関しては、顕著な応答を確認することができなかった。そこで、Fig. 10の各条件での溶融池径と熱放射光との関係をプロットし、詳細な検証を行うことにした。その結果を Fig. 12

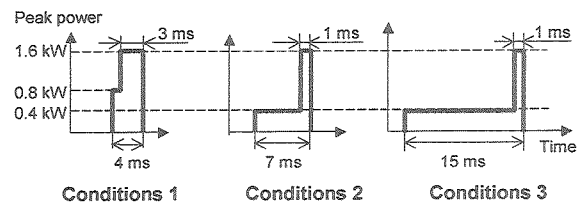


Fig. 10 Three welding conditions used, showing different laser peak power in pulsed YAG laser welding.

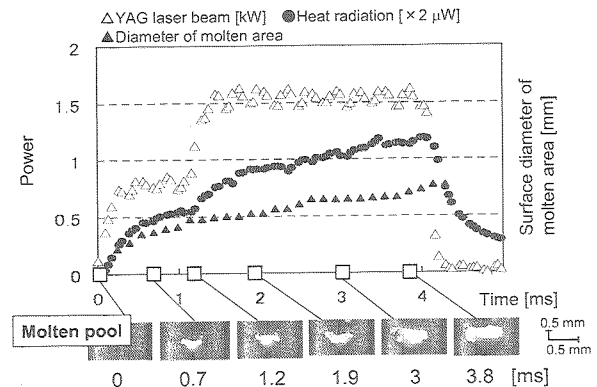


Fig. 11 Monitoring results of typical welding process caused by rapid increase of laser peak power, showing laser pulse shape, reflected light and heat radiation signals, and high-speed observation images of molten pool.

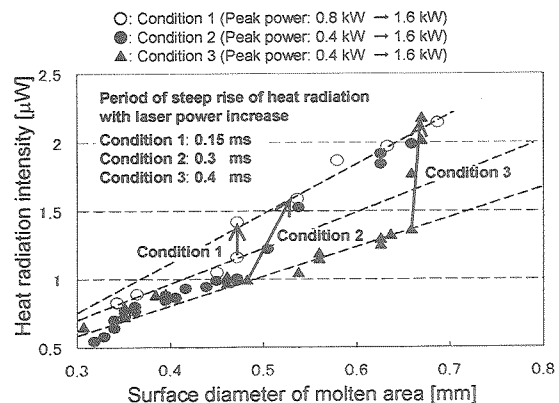


Fig. 12 Relationship between surface diameter of molten area and heat radiation with respect to laser power increase.

に示す。横軸と縦軸は Fig. 5 と同様である。レーザパワーの増加前では、各条件とも Fig. 5 に見られるような相関を満足する直線上に増加していたが、レーザパワーの増加により直線から外れ、その後は、変更したレーザパワーにおける熱放射光と溶融池径との相関を満足する直線上に移行することがわかった。さらに、移行の際、溶融池径の大きさの変化よりも、熱放射光の強度変化の方が顕著に起こることも判明した。このことは、レーザパワーの増加により、先ず融液が急激に暖められ、熱放射光強度が上昇し、その後、溶融池の成長へとつながっていく結果であると考えられる。また、条件 1, 2 および 3 において、レーザパワー増加によって、溶融池径に対して熱放射光強度が急激に増加する時間は、それぞれ 0.15, 0.3 および 0.45 ms であり、レーザパワーの増加量あるいは溶融池が大きいほど、その時間は長いことも確認された。

以上の結果により、本溶接条件下においては、溶融池が存在する状態での急峻なレーザピークパワーの増加に対し、熱放射光強度（温度）、溶融池径の順で反映されていくことがわかった。また、レーザパワーの増加前後で、各レーザパワーにおける溶融池径と熱放射光との相関があることが判明した。さらに、レーザパワー増加により、溶融池径に対して熱放射光強度が急激に増加する時間は、パワー増加あるいは溶融池が大きいほど、長くなることも確認された。

3.4.2 急峻なパワー低減による溶接プロセスの変化

3.4.1 節と同様に溶融池が存在する状態で、Fig. 13 に示す条件でピークパワーを 150  $\mu$ s の短時間で減少させ、その時の溶接現象を熱放射光および溶融池径でモニタした。Fig. 13 の条件 4 で得られた観測結果の一例を Fig. 14 に示す。

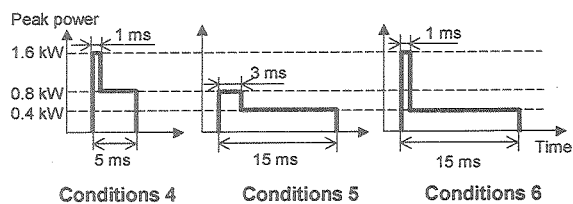


Fig. 13 Decrease welding conditions of laser peak power in pulsed YAG laser.

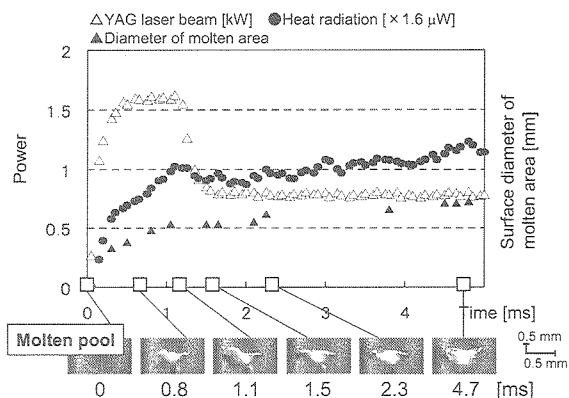


Fig. 14 Monitoring results of typical welding process caused by rapid decrease of laser peak power, showing laser pulse shape, reflected light and heat radiation signals, and high-speed observation images of molten pool.

縦軸、横軸などは Fig. 11 と同様である。観測結果から、照射開始後の 1 ms でのレーザパワーの急激な減少に対して、熱放射光強度は追従しているのが確認できる。また、溶融池表面は、ピークパワー 2 kW であるので非常に荒れていることが観測できるが、パワーが減少している 150  $\mu$ s の間、溶融池径はほぼ一定で、その後増加した。溶融池径と熱放射光との関係は Fig. 15 に示す。その結果、レーザパワーの増加の場合と同様に、各条件とも Fig. 5 に見られるような相関を満足する直線上を増加していた。その後、レーザパワーの減少時から直線を外れ、変更したレーザパワーにおける熱放射光と溶融池径との相関を満足する直線上に移行することもわかる。特に、レーザパワーの減少時は、溶融池径はほぼ変わらず、熱放射光強度のみが変化した。このことは、レーザパワーの減少により、融液の温度が低下し、その結果、熱放射光強度が減少したためであると考えられる。さらに、条件 4, 5 および 6 におけるレーザパワー減少により溶融池に対して熱放射光強度が急激に減少する時間は、増加時の場合よりも長く、それぞれ 0.45, 0.6 および 0.9 ms であった。これは、レーザパワーの増加による溶融池の加熱の方が、パワー減少時の自然放熱による溶融池の温度低下よりも、速い溶接現象であることを示していると考えられる。

以上の結果より、本溶接条件下での溶融池が存在する状態での急峻なレーザピークパワーの減少に対し、熱放射光強度（温度）は低下した。さらに、パワー減少に伴う、溶融池に対して熱放射光強度が急激に減少する時間は、パワー増加時の溶融池に対して熱放射光強度が急激に増加する時間よりも長くなることも判明した。

最後に、インプロセスモニタリングの観点から熱放射光についてまとめると、本溶接条件下で、常に入射レーザピークパワーを把握できていれば、一定のレーザパワーの場合には、熱放射光は溶融池径をモニタできる。熱放射光には、溶融池径の情報とパワー毎の溶融池の温度情報が両方とも反映されると考えられる。しかし、レーザパワーを変化させた時には、溶融池径よりも温度情報が顕在化し、その後は再び溶融池径の影響が現れてくるとみることができ。したがって、熱放射光は、レーザパワーの状態によ

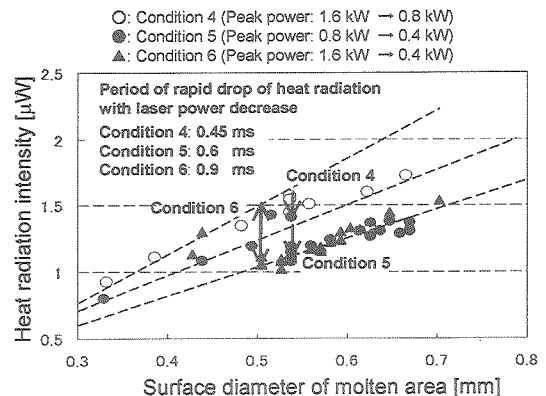


Fig. 15 Relationship between surface diameter of molten area and heat radiation with respect to laser power increase.

って, その時々溶接プロセスの重要な情報を反映していると考えられ, 適応制御の入力信号として適した信号であることが確認できた。

以上の得られた結果を踏まえて, 純チタンの突合せ溶接において課題であるスパッタおよびポロシティについて, 適用して低減を試みた結果を, 第二報で報告する。

#### 4. 結 言

本研究では, 純チタンに, パルス Nd:YAG レーザによるマイクロ突合せ溶接を行い, 溶接現象の解明と適応制御に利用できるインプロセスモニタリングについて検討を行った。得られた結果は以下のとおりである。

- 1) 純チタンのマイクロ突合せスポット溶接結果の場合,
  - ①本溶接条件下で, 深溶込みの溶接部を得るには, ピークパワー1.6 kW まで使用すれば可能であることが判明した。しかしながら, 溶接部内部のポロシティやスパッタの発生に注意する必要があることがわかった。
  - ②高速画像観察から, 溶融表面が数百  $\mu\text{s}$  程度の非常に速い溶融表面の変化を伴う溶接現象であることがわかった。
- 2) 突合せ溶接におけるインプロセスモニタリングでは,
  - ①本溶接条件下では, 熱放射光は, インプロセスの溶融池径および溶接結果の重要な一つである溶込み深さとの相関が認められた。また, レーザパワー毎に溶融池径との相関が異なることが明らかになった。一方, 反射光に関しては, 溶融池形成という顕著な表面状態変化がモニタできる程度であることがわかった。
  - ②本連続パルス溶接時において, 熱放射光は再現性が保たれることが判明した。一方, 反射光は, 再現性もよくなく, 溶接プロセスモニタとしての使用は, 現状の方法のままでは難しいことがわかった。
- 3) 溶接プロセスに及ぼすパルスレーザー照射中の急峻なパワー変動の影響について検討した結果,
  - ①本溶接条件下においては, 溶融池が存在する状態での急峻なレーザーピークパワーの増加に対し, 熱放射光強度(温度), 溶融池径の順で反映されていくことがわかった。また, レーザパワーの増加前後で, 各レーザーパワーにおける溶融池径と熱放射光との相関が成り立つことが判明した。さらに, レーザパワー増加によって熱放射光強度が急激に増加する時間は, パワー増加あるいは溶融池が大きいほど, 長くなることも確認された。
  - ②本溶接条件下での溶融池が存在する状態での急峻

なレーザーピークパワーの低減に対し, 熱放射光強度(温度)は低下した。さらに, パワー低下に伴う熱放射光強度が急激に減少する時間は, パワー上昇時の熱放射光強度が急激に増加する時間よりも長くなることも判明した。

- ③インプロセスモニタリングの観点から熱放射光についてまとめると, 本溶接条件下で, 常に入射レーザーピークパワーを把握できていれば, 一定のレーザーパワーの場合には, 熱放射光は溶融池径をモニタできる。熱放射光には, 溶融池径の情報とパワー毎の溶融池の温度情報が両方とも反映されると考えられる。しかし, レーザパワーを変化させた時には, 溶融池径よりも温度情報が顕在化し, その後は再び溶融池径の影響が現れてくるとみることができる。したがって, 熱放射光は, レーザパワーの状態によって, その時々溶接プロセスの重要な情報を反映していると考えられ, 適応制御の入力信号として適した信号であることがわかった。

#### 謝 辞

本研究は, 平成 17 年度地域新生コンソーシアム研究開発事業「高品質レーザーによる高融点金属微細接合装置の開発」において実施した研究成果の一つであり, 本研究の遂行にあたり, 材料提供して頂いた中村浩様をはじめとする株式会社ホリカワの皆様, モニタリング機器, 適応制御機器, 適応制御レーザー発振器に関して, ご支援頂いた松下電器産業(株)およびミヤチテクノス(株)の関係各位に厚く御礼申し上げます。

#### 参 考 文 献

- 1) Kawahito, Y. and S. Katayama: In-process monitoring and adaptive control for stable production of sound welds in laser micro-spot lap welding of aluminum alloy, *J. Laser Applications*, 17-1, (2005), 30.
- 2) Kawahito, Y. and S. Katayama: Adaptive Control for Improvement of Spot Weld Geometry in Full Penetration Welding of Thin Sheets, *J. Japan Laser Processing Society*, 12-2, (2005), 101.
- 3) Kawahito, Y. and S. Katayama: In-process monitoring and feedback control during laser microspot lap welding of copper sheets, *J. Laser Applications*, 16-2, (2004), 121.
- 4) Kogel-Hollacher, M., M. Jurca, C. Dietz, G. Jassen and E. F. D. Lozada: Quality Assurance in Pulsed Seam Laser Welding, *Proc. of ICALEO '88*, (1988), 168.
- 5) Kawahito, Y. and S. Katayama: Adaptive Control in Laser Micro-Spot Lap Welding of Aluminum Alloy (Report I), *J. Japan Laser Processing Society*, 11-3, (2004), 6.
- 6) Kawahito, Y. and S. Katayama: Laser Weldability, Monitoring Results and Pulse Duration Control under Different Defocused Conditions, *J. Japan Laser Processing Society*, 11-3, (2004), 12.