

学術論文

スパッタ低減およびアンダーフィル抑制のための 低パワーレーザ初期照射の適応制御法

— 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2報) —

川人洋介*, 鬼頭昌之*, 片山聖二*, 中村浩**

Adaptive Control for Reduction in Spattering and Underfilling with Low-Peak Power Laser Irradiation
- In-Process Monitoring and Adaptive Control in Laser Micro Butt Welding of Pure Titanium (Second Report) -

KAWAHITO Yousuke, KITO Masayuki, KATAYAMA Seiji and NAKAMURA Hiroshi

*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)

**株式会社ホリカワ (〒916-0088 福井県鯖江市川去町 6-8)

kawahito@jwri.osaka-u.ac.jp

(原稿受付 2006 年 6 月 12 日)

This research was undertaken with the objectives of elucidating dominant generation factors of spattering and underfilling in butt seam welding of pure titanium with a pulsed Nd:YAG laser, and of demonstrating adaptive control procedures effective for reduction in spattering and underfilling. Large spatters were confirmed to be caused by the irradiation of a high peak power laser on a small molten pool. Low peak power was maintained until the heat radiation signal represented the designed effective size for the prevention of large spatters. The generation rate of spatters over 100 μm in diameter decreased by one eighth times that under normal control. As for underfilling, the larger size was produced with a wider gap, and the gap size corresponded to the periods below a certain reflected laser intensity because part of a laser beam passed through the gap. Laser peak power was controlled at low level until the reflected laser increased after the formation of a molten pool bridging the gap. As a result, underfills were greatly improved by half sizes smaller than those made with a rectangular pulsed laser. Therefore, adaptively-controlled low peak power was beneficial to the reduction in large spatters and underfills produced by wide gaps.

Keywords: adaptive control, heat radiation, reflected light, spatter, underfill

1. 緒 言

パルスレーザ溶接では、精密微細接合が可能であるが、深溶込みの接合部を作製するとき、スパッタやアンダーフィルが発生しやすく、これらの低減・防止法の開発が解決すべき緊急課題である。溶接欠陥の低減・防止には、溶接プロセス現象の解明に基づく最適な溶融・蒸発・凝固プロセスの制御が不可欠である。また、インプロセスモニタリングに基づくレーザ適応制御法が最も有効な手法として期待でき、近年、モニタリングや適応制御に関する有効な検討結果が報告されている^{1)~7)}。

しかしながら、スパッタおよびアンダーフィルの生成・防止に対するインプロセスモニタリングとそれに基づく適応制御法については報告されていない。そこで、第1報⁸⁾では、パルスNd:YAGレーザ照射による純チタンの突合せスポット溶接において、反射光では、溶融池形成等の顕著な表面状態の変化がモニタでき、熱放射光は、溶融池径および溶込み深さと関連があることを明らかにした。

本研究では、第1報⁸⁾でのインプロセスモニタリング信号としての反射光や熱放射光の特徴を活かし、純チタンの突合せシーム溶接時に発生するスパッタとアンダーフィルに対し、発生機構と支配的な要因を明確にし、低減および抑制に有効な適応制御法の検討を行った。まず、スパッタに関しては、サイズと発生時刻およびそれらに及ぼすレーザパワーと熱放射光の影響を調査し、スパッタの発生機構と発生因子を考察した。そして、スパッタ低減のためのレ

ーザパワーと照射時間の適応制御を試みた。また、アンダーフィルについても、隙間とレーザパワーとの関係を明らかにし、発生機構を検討した。さらに、反射光および熱放射光によるインプロセスモニタリングの可能性を検証した上で、有効と判断されるインプロセスモニタリング信号に基づく、アンダーフィル抑制のためのレーザ適応制御を実施した。

2. 供試材料および実験方法

供試材料は、厚さ3mmのJIS2種工業用純チタンであり、前報⁸⁾と同様である。使用レーザは、適応制御型基本波パルスYAGレーザであり、レーザ装置と主な溶接方法や計測・観察方法も前報⁸⁾と同様である。インプロセスモニタリングに関しては、レーザ照射中の反射光および熱放射光の計測とともに20,000 F/sで溶接現象の高速度観察も実施し、溶接現象とモニタリング信号との対応づけを行った。さらに、適応制御は、スパッタ低減とアンダーフィル抑制に対し、有効と推測される溶融状態を実現するため、反射光あるいは熱放射光でインプロセスモニタリング結果を基に、レーザパワーを150 μs 間隔で決定し、高速制御を行った。なお、本研究での適応制御の定義は、レーザ溶接プロセスをリアルタイムでモニタリングし、そのモニタリング信号に基づいて、溶接状態を判断し、所定の溶接結果を得るために適した溶接パラメータへの変更を、レーザ発振器が瞬時に行う制御と定義している。

3. 実験結果および考察

3.1 純チタンの突合せシーム溶接時の溶接課題

サンプルは突合せ部分の表面が集光レンズの焦点位置にくるように設置し、ピークパワー0.4 kWで照射時間30 ms, 0.8 kWで10 ms, 1.6 kWで5 msの3種類の矩形基本波パルス YAG レーザを用い、1 照射/sで、突合せ方向に0.3 mmずらしながら5回照射し、シーム溶接を行った。得られたビード外観と突合せ面での断面形状を Fig. 1 に示す。溶接ビードは、0.4 kWでは、ほぼ一定の幅が得られたが、0.8 kW以上で、表面にスパッタが付着していた。さらに、1.6 kWでは、融液が吹きこぼれて肥大化した部分も認められた。溶込みに関して、全5回照射の平均の溶込み深さは、レーザパワーの低い順から、それぞれ0.44, 0.68 および1.1 mmであり、ピークパワーの増加に伴い増加した。また、0.8 kW以上で、大きなポロシティが底部と中央部に発生した。

以上の結果、検証した溶接条件では、0.8 kW以上のレーザパワーで、表面にスパッタが付着した溶接部が得られ、また、大きなポロシティも発生することがわかった。

3.2 突合せシーム溶接時のインプロセスモニタリング

本溶接条件下のスパッタの発生状況を解明するために、インプロセスモニタリングを実施した。一例として1.6 kWで照射5回目のシーム溶接時の結果を Fig. 2 に示す。上のグラフは、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であり、下のグラフは、高速度観察画像から求めたスパッタの発生時刻と体積である。グラフ下の写真は、斜め45度方向から観測したスパッタの高速度画像である。なお、スパッタの発生時刻は、溶融池からスパッタが切り離れた直後の時刻を採用し、0.8 msの高速度画像では、溶融池に近い二つの小さなスパッタが新たに確認され、発生時刻を0.8 msとした。また、体積に関しては、スパッタを球形と仮定し、0.8 msの高速度画像のようにスパッタの外形が確認できる場合は最大幅を球の直径とし、スパッタが速く、1.4 msの高速度画像のように線にしか認識されない時は、最小幅を球の直径とし、その時発生したスパッタの総量を求めた。Fig. 2 の下グラフから、スパッタの発生状況は、レーザ照射開始から1 ms以内に直径100 μmを超えるスパッタが集中的に発生し、その後はサイズを間

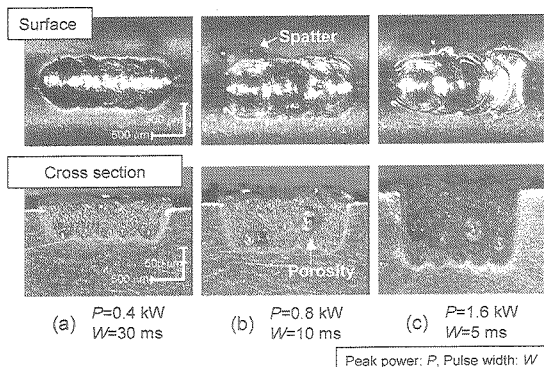


Fig. 1 Surfaces and cross sections of micro butt seam welding of pure titanium with pulsed Nd:YAG laser.

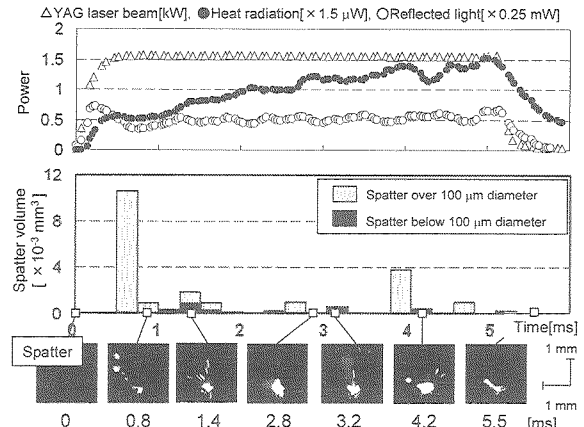


Fig. 2 Monitoring results of typical butt weld of pure titanium, showing YAG laser pulse shape, reflected light and heat radiation signals, and high-speed observation images of spatters occurring from spot molten pool.

わず突破的に発生していることがわかる。これに対し、反射光は、レーザ照射中変動するものの、スパッタと明瞭な対応は読取れなかった。一方、熱放射光は、その値が小さい(溶融部が小さい)ときに、パワー増加が急速であるとスパッタが大量に発生する傾向があることが示唆された。

次に、レーザ照射開始から1 ms以内に大量にスパッタが発生する特徴的な過程について詳細な検証を行った。その時の連続写真を Fig. 3 (a)に示す。なお、比較のために、5 ms経過した時の標準的なスパッタ発生時の連続写真を Fig. 3 (b)に示す。(a)の発生時では、強いブルームが確認後、小さな溶融池から融液が勢いよく飛び出し、0.3 msの間に次々とスパッタが発生した。これに対し、(b)では、強いブルームが確認後、サイズの小さなスパッタは発生したが、溶融池が大きく揺らぐだけで、大きなスパッタは観測されなかった。これは、溶融池が大きい場合、融面が大きく揺れるだけで持ちこたえ、スパッタの発生までには至らなかったと推察される。

また、Fig. 2 からスパッタの発生と熱放射光信号との間に関連性があることが示唆されたので、1.6 kWのシーム溶接における他の4照射も含めて、熱放射光とスパッタとの関係を詳細に調べた。その結果を Fig. 4 に示す。横軸は熱放射光強度で、縦軸は全5回照射で発生したスパッタの体積である。スパッタは熱放射光が0.9 μW までは大量に発

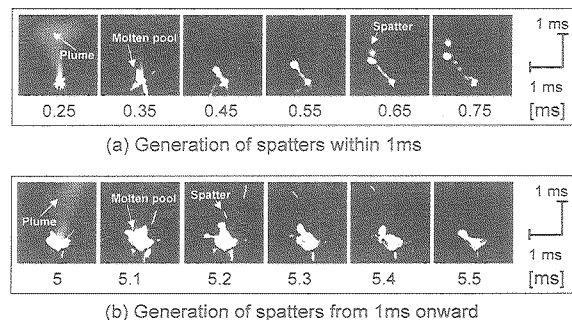


Fig. 3 Features of spatter generation during laser irradiation at 1.6 kW peak power.

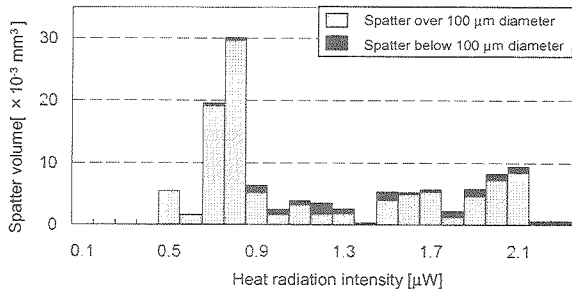


Fig. 4 Relationship between spatter generation and heat radiation from Ti subjected to pulsed laser at 1.6 kW peak power.

生し、その時の溶融池径は 0.4 mm 程度であった。それ以上の径では、スパッタの発生は激減した。これは、先に述べたように溶融池径が小さい場合、高パワー密度のレーザに対し溶融池が持ちこたえられず、スパッタが大量に発生し、溶融池径が溶融池径 0.4 mm(熱放射光強度 0.9 μW)を超える程度にまで成長すれば、融液が持ちこたえ、スパッタ発生が抑制できることが期待される。

0.4 kW と 0.8 kW のレーザパワーについても、スパッタの発生状況を調査した。レーザパワー毎に、シーム溶接の全 5 回照射についてスパッタを直径 100 μm 以上とそれ未満に分類し、単位時間当たりのスパッタの発生率をまとめたものを Table 1 に示す。1.6 kW での平均した結果でも、Fig. 2 と同様な傾向が読み取れ、1 ms 以内に直径 100 μm を超える大きなサイズのスパッタが、12.4 mm³/s 発生し、他の発生率と比較して一桁多く、その後の発生率は 2 mm³/s となり、84 %減少した。これに対し、0.4 kW と 0.8 kW での発生率は 0.9 mm³/s 以下で、集中的に大きなサイズのスパッタが発生することはなく、特に、0.4 kW では、スパッタの発生がかなり抑えられることが確認される。

以上の結果より、本溶接条件下でのスパッタは、0.8 kW 以下の低パワーのレーザ照射では発生が抑えられたが、1.6 kW では、直径 100 μm を超える大きなものがレーザ照射開始から 1 ms 以内に集中的に発生した。これは、高レーザビークパワーに対し、溶融池が小さいために持ちこたえられないためと推察された。そして、1.6 kW の場合、溶融池径が 0.4 mm(本実験結果では熱放射光強度 0.9 μW)にまで成長すると、大きなサイズのスパッタの発生抑制に有効があることも確認された。

Table 1 Generation rate of spatter at each laser peak power.

| Welding condition | | (a) | (b) | (c) |
|--|--------------------------|--------|--------|--------|
| Peak power, P | | 0.4 kW | 0.8 kW | 1.6 kW |
| Pulse width, W | | 30 ms | 10 ms | 5 ms |
| Generation Rate of spatter below 100 μm [mm ³ /s] | Average from 0 to 1 ms | 0 | 0.47 | 0.53 |
| | Average from 1 ms onward | 0.18 | 0.88 | 0.5 |
| Generation Rate of spatter over 100 μm [mm ³ /s] | Average from 0 to 1 ms | 0 | 0.65 | 12.4 |
| | Average from 1 ms onward | 0.05 | 0.58 | 2 |

3.3 スパッタ低減のための低パワーレーザ適応制御

本溶接条件下で、0.8 mm 以上の溶込み深さを得るには、1.6 kW のレーザパワーで可能であるが、レーザ照射初期の時点でスパッタが溶接部周辺部へ大量に発生し、スパッタが付着した溶接部材が得られることになる。そこで、第 1 報⁸⁾で明らかにした溶融池径と溶込み深さをインプロセスモニタリングできる熱放射光に基づいて、レーザパワーの増減を 150 μs 間隔で決定し、スパッタの発生を低減させる適応制御を試みた。具体的には、Fig. 5 のフローチャートに示すように、溶融池が所定の溶融池径 0.4 mm(本実験では熱放射光強度 0.9 μW)までは、スパッタの発生が比較的少ない 0.4 kW の低パワーで照射し、その後必要な溶込みを得るために、1.6 kW に変更し、0.8 mm の溶込み深さ(熱放射光強度 1.7 μW)になった時点で、レーザ照射を停止した。その適応制御時の溶接現象をモニタリングした結果を Fig. 6 に示す。熱放射光強度が 0.9 μW 未満では、0.4 kW のレーザパワーが照射され、100 μm 径を超えるサイズのスパッタの発生は少なく、熱放射光強度が 0.9 μW に達すると、1.6 kW にレーザパワーが変更され、さらに 1.7 μW を超えるとレーザ照射を停止しており、適応制御が正常に動作したことが確認できた。

適応制御で得られた溶接部の表面と断面および各パワーでのスパッタの発生率をそれぞれ Fig. 7 および Table 2 に示す。Fig. 7 (a)から、溶接部の外観は、スパッタの付着や融液が吹きこぼれた箇所がなく、良好であることがわかる。溶込み深さは、(b)の断面から 5 回照射の平均を算出すると、0.93 mm で所定の溶込み深さ 0.8 mm を超えていた。スパッタ

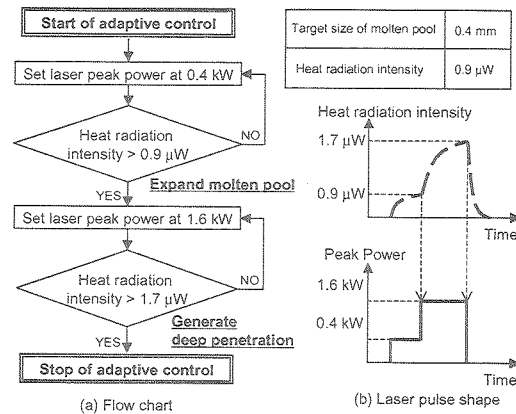


Fig. 5 Flow chart of adaptive control for reduction of spatters.

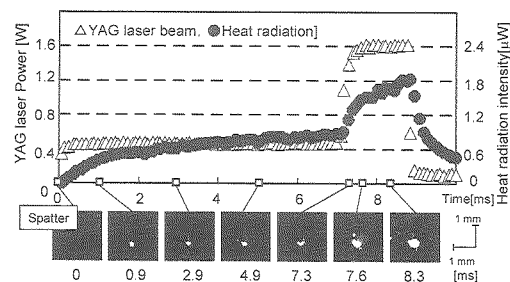


Fig. 6 Monitoring results under adaptive control for reduction of spatters.

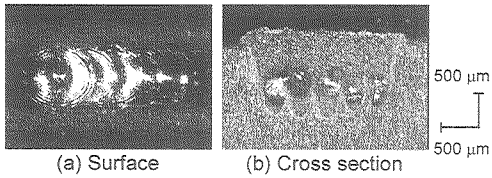


Fig. 7 Welding results under adaptive control for reduction in spattering.

Table 2 Generation rate under adaptive control for reduction in spattering at 1.6 kW laser power.

| | Under adaptive control | Without adaptive control |
|--|------------------------|----------------------------|
| Irradiation time of 1.6 kW Laser power | 1 ms - 1.8 ms | 5 ms |
| Generation rate of spatter over 100 μm [mm ³ /s] | 1.48 | 12.4 (0-1 ms) 2 (1-5 ms) |
| Generation rate of spatter below 100 μm [mm ³ /s] | 0.48 | 0.53 (0-1 ms) 0.5 (1-5 ms) |

タの発生に関しては、Table 2 に示すように、適応制御しない場合の 1.6 kW の照射 1 ms 以内の突出したスパッタ発生が確認されず、1 ms 以後のスパッタと同程度かそれ以下の発生率となった。特に、100 μm 径を超えるサイズのスパッタの発生率は、88%減少し、大幅な改善が達成された。

以上、0.4 kW の低パワーレーザを、スパッタの発生を抑えるのに効果が期待できる大きな溶融池に成長するまで照射し、その後 1.6 kW の高パワーに変更する適応制御法を適用した結果、100 μm 径を超えるスパッタが 88%減少し、スパッタの発生が大幅に低減できることが判明した。

3.4 隙間が存在する場合のシーム溶接の課題

実際の突合せ溶接において、すべての溶接箇所の隙間を完全になくすことは困難である。そこで、ピークパワー 0.4、0.8 および 1.6 kW でそれぞれの照射時間を 15、5 および 2 ms の 3 種類の矩形パルス波を用いて、0、40、50、60、90 および 100 μm の隙間が存在する場合の溶接課題を調べた。一例として、約 40 および 100 μm の隙間が存在した場合の溶接部表面と断面形状を Fig. 8 に示す。0.4 kW では、溶融部径および溶込み深さは、隙間によってほとんど変わらないが、0.8 kW 以上で、隙間 100 μm の場合、突合せ方向の溶融部径が極端に狭くなり、明瞭なアンダーフィルが発生した。

次に、各隙間について、溶融部径、溶込み深さおよびアンダーフィルをまとめて Fig. 9 に示す。横軸は隙間で、縦

| Welding conditions | P = 0.4 kW W = 15 ms | | P = 0.8 kW W = 5 ms | | P = 1.6 kW W = 2 ms | |
|--------------------|-------------------------|-------|------------------------|--------|------------------------|--------|
| Gap | 43 μm | 98 μm | 43 μm | 103 μm | 43 μm | 106 μm |
| Weld fusion zone | | | | | | |
| Cross section | | | | | | |

Fig. 8 Welding results under existence of gaps.

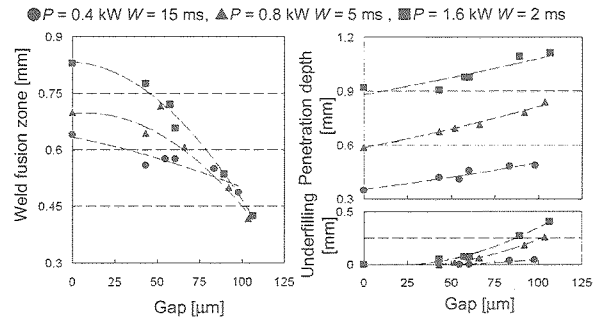


Fig. 9 Features of welding results produced by each gaps.

軸は突合せ方向の溶融部径、溶込み深さ、アンダーフィルである。隙間が増加すると、溶融部径は大幅に減少したが、溶込みは増加した。また、アンダーフィルは隙間 50 μm 程度から発生し、隙間の増加とともに程度が大きくなり、1.6 kW では、約 100 μm の隙間で 0.41 mm にまで達した。一方、0.4 kW では 50 μm 程度に抑えられることもわかった。

したがって、本溶接条件下で、隙間は、溶融部径の減少を引き起こし、50 μm 以上では、アンダーフィルも発生させ、1.6 kW のレーザパワーでは、アンダーフィルが 0.41 mm に達した。しかしながら、0.4 kW の低パワーでは、40 μm 程度に抑えられることもわかった。

3.5 突合せ溶接時の隙間のインプロセスモニタリング

前節では、100 μm の隙間の存在下でも、0.4 kW パワーのレーザ照射では、アンダーフィルが抑えられることが判明した。そこで、溶接中の反射光と熱放射光の計測および溶融池の高速度観察を行い、抑制機構を明らかにすることを試みた。パワー 0.4 kW での隙間 84 μm のインプロセスモニタリング結果を Fig. 10 に示す。上のグラフは、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である。グラフ下の上の写真は、突合せ方向と垂直な面内の斜め 45 度方向から高速度ビデオで観察した溶融池の画像である。下の写真は、写真下に記載している時間でレーザ照射を停止させて得られた突合せ溶接部の断面形状である。照射開始から 4.9 ms までは、溶融部が 2

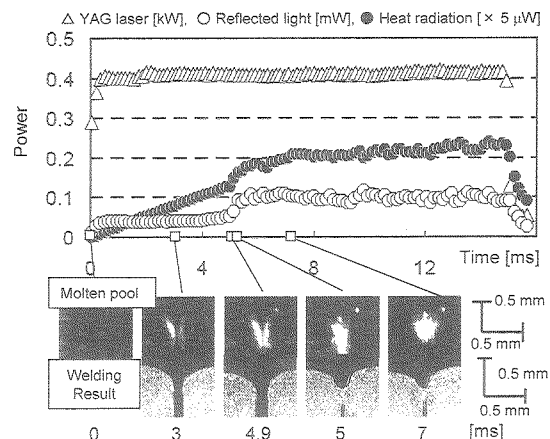


Fig. 10 Monitoring results under adaptive control for underfills, showing laser pulse shape, reflected laser and heat radiation signals, high-speed observation images of spot molten pools and cross sections of Ti joints with gaps.

箇所観測され、今だ接合部が形成されていないと判断され、このことは溶接部の断面からも確認できる。その間、反射光は非常に低い値で、熱放射光は単純な増加を示した。これは、反射光については、一部レーザー光が隙間を通り抜け、熱放射光では、隙間の周辺部に当たっているレーザー光で加熱されて、溶融池が増加した結果であると考えられる。5 msでは、隙間をまたがる溶融池が形成され、反射光も強く戻り、熱放射光は急激に増加し、その後は、隙間がない場合と同様な傾向を示した。これは、レーザー光の通りぬけがなくなった結果、反射レーザー光の吸収も大幅に増加したことが原因であると考えられる。このような隙間が存在する場合の反射光と熱放射光の変化は、従来計測されていない新しいインプロセスモニタリング結果である。

次に、0.4 kW レーザパワーで、アンダーフィルが抑えられた原因を考察する。80 μm 程度の隙間での、各パワーでの隙間をまたがる溶融池が形成された前後の高速度画像を比較した結果を Fig. 11 に示す。パワーが大きいくほど、隙間に融液が深く流れ落ち込み、落ち込んだ所で隙間をまたがる溶融池が形成されることがわかった。この落ち込んだ溶融池を基にして、大きな溶融池へと成長するので、レーザーパワーに伴いアンダーフィルが顕在化すると推測される。一方、隙間の上方部で溶融池を形成させることができると、アンダーフィル抑制に有効であることが期待できる。

0.4 kW での隙間をまたがる溶融池形成時の反射光と熱放射光の特徴的な変化には、隙間のインプロセスモニタリング信号としての可能性があるがあるので、40 から 100 μm までの5段階の隙間について、反射光および熱放射光は、照射開始から 80 μW を超えるまでの時間、および隙間をまたがり溶融池形成時の急激な増加を表す指標として、50 μs 間に 0.3 mW/s 以上増加する時刻までの時間を調べた。その結果を Fig. 12 に示す。反射光は、隙間と比例関係を示し、一方、熱放射光は、隙間 60 μm 以上で相関が見受けられた。この結果は、反射光と熱放射光とも、隙間のインプロセスモニタリング信号として可能であり、溶融池の表面情報を顕著に表す反射光の方が、精度が高い結果が得られている。

以上の結果、レーザーパワーが増加すると、融液が隙間に

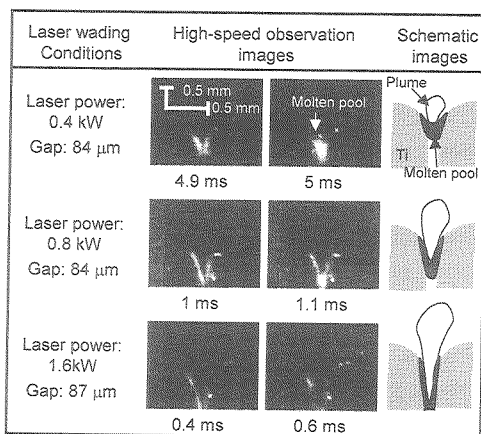


Fig. 11 High-speed video images showing formation of bridged molten pools over gaps.

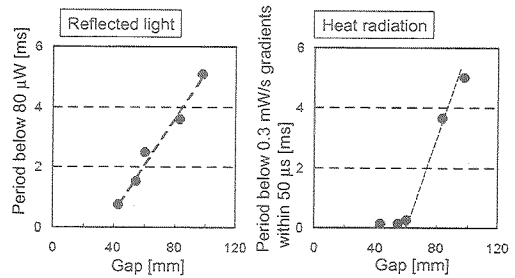


Fig. 12 Relationship between gaps and monitoring signals

流れ込み、落ち込んだ所で隙間をまたがる溶融部が形成されるため、アンダーフィルが顕在化することもわかった。また、反射光と熱放射光とも、隙間のインプロセスモニタリングとして可能であり、溶融池の表面情報を顕著に表す反射光の方が、精度が高いことが判明した。

3.6 アンダーフィル抑制のための低パワー適応制御

低パワーレーザー照射を行い、隙間をまたがる溶接部をできるだけ隙間の上方部に形成させることで、アンダーフィルを抑制する適応制御法について検討した。具体的には、Fig. 13 に示すフローチャートに従って、0.4 kW でレーザー照射し、隙間をまたがる溶融池を継手上部に形成させ、溶融池の形成を反射光でリアルタイム検知し（本実験条件では 80 μW を超えること）、その後必要な溶込みを得るために、1.6 kW に変更し、0.8 mm の溶込み深さ（熱放射光強度 1.7 μW）になった時点で、レーザー照射を停止した。その時のインプロセスモニタリング結果を Fig. 14 に示す。反射光強度が 80 μW を超えた 5.4 ms では、溶融池が隙間にまたがって形成されていることが高速度観察結果から確認でき、その後は 1.6 kW にレーザーパワーが変更され、熱放射光強度が 1.7 μW を超えるとレーザー照射が停止しており、適応制御が正常に動作したことが確認できた。

60 μm から 100 μm の隙間において得られた溶接部の表面と断面を Fig. 15 に示す。Fig. 8 に示す大きなアンダーフィルの発生は抑えられ、最大でも 0.15 mm で、60%以上改善された結果が得られた。また、溶融部径も、100 μm 程度の隙間で、0.42 mm から 0.70 mm に大幅な改善を示した。

最後に、100 μm 程度の隙間が存在するサンプルに対して、

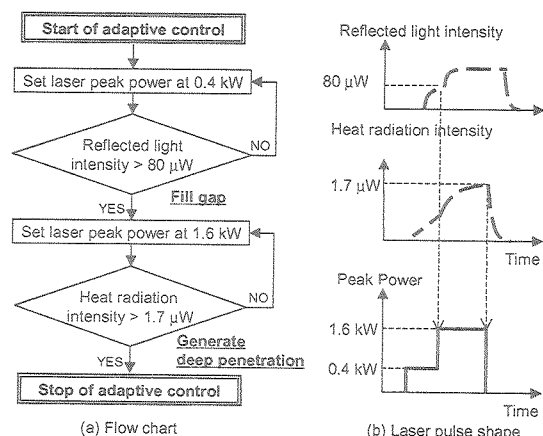


Fig. 13 Flow chart of adaptive control for underfills.

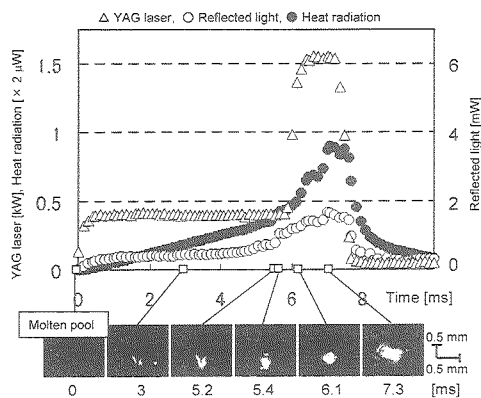


Fig. 14 Monitoring results under adaptive control for reduction of underfills.

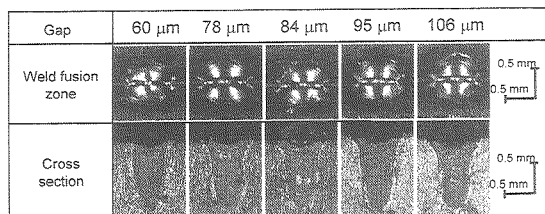


Fig. 15 Welding results under adaptive control for reduction of underfills at each gap.

本適応制御法を用い、1回/sで10回照射し、シーム溶接を行った。その結果を Fig. 16 に示す。なお、比較のため、Fig. 16 (a)に1.6 kWで照射時間2 msの矩形パルスでシーム溶接を行った結果も示す。最小のビード幅と最大のアンダーフィルは、単純な矩形パルスで0.4 mmと0.32 mmであるのに比べ、本適応制御法では、それぞれ0.6 mmと0.16 mmであり、1.5倍以上改善され、明確な溶落ちも認められなかった。また、照射回数が増えると、凝固収縮で隙間が小さくなるため、本適応制御法は、シーム溶接の初めの照射ほど、効果を発揮することもわかった。

以上の結果、0.4 kWの低パワーでレーザー照射を行い、隙間にまたがる溶接池を隙間の上方部に形成させることにより、100 μm程度までの隙間においても、アンダーフィルを

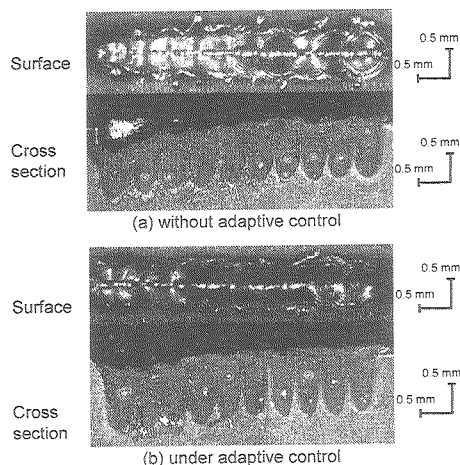


Fig. 16 Seam welding results under adaptive control for reduction of underfilling in case of 100 μm-gap existence.

最大でも0.15 mm以下に抑えられ、単純な矩形パルスでの結果に比べ、60%以上改善できることがわかった。また、溶接部幅も、100 μm程度の隙間で、0.42 mmから0.70 mmに増加し、1.6倍程度に改善できた。さらに、本適応制御法は、シーム溶接においても有効であることが確認できた。

4. 結 言

本研究では、純チタンに、パルスNd:YAGレーザーによるマイクロ突合せ溶接を行い、スパッタ低減およびアンダーフィル抑制のための初期低パワーレーザー照射を用いた適応制御法の検討を行った。得られた結果は以下のとおりである。

1) スパッタ低減のための低パワー適応制御

① 本溶接条件下のスパッタは、低パワーレーザー照射では抑えられ、1.6 kWのパワーでは、レーザー照射開始から1 ms以内では溶融池が小さいため、レーザーパワーに対し溶融池が持ちこたえられず、直径100 μmを超えるものが集中的に発生することがわかった。これに対し、溶融池径が溶融池径0.4 mmにまで成長した場合、大きなサイズのスパッタ低減に効果があることもわかった。

② スパッタの発生を抑えるのに効果が期待できる溶融池にまで0.4 kW低パワーでレーザー照射をし、その後1.6 kWの高パワーに変更する適応制御法で、100 μm径を超える大きなサイズのスパッタを88%減少させることができ、大幅な改善効果が認められた。

2) アンダーフィル抑制のための低パワー適応制御法

① 本溶接条件下では、隙間は、溶融部径の減少を引き起こし、50 μm以上では、アンダーフィルも発生させ、1.6 kWのレーザーパワーでは、アンダーフィルが0.4 mmに達した。しかしながら、0.4 kWのレーザーパワーでは、40 μm程度に抑えられることもわかった。

② レーザーパワーが高い場合、融液が隙間に流れ込み、落ち込んだ所で隙間をまたがる溶融部が形成されるため、アンダーフィルが顕在化することもわかった。また、反射光と熱放射光とも、隙間のインプロセスモニタリングとして可能であり、溶融池の表面情報を顕著に表す反射光の方が、精度が高いことが判明した。

③ 低パワーレーザー照射により、隙間にまたがる溶融池を板上部に形成させることで、100 μm程度の隙間ではアンダーフィルが形成したが、単純な矩形パルスでの結果に比べ、60%以上改善され、溶融幅も1.6倍程度の改善を示した。さらに、本適応制御法は、シーム溶接においても有効であることが確認された。

以上の実験結果から、パルス波形初期において低パワーレーザー照射を行う本適応制御法は、スパッタ低減およびアンダーフィル抑制に対し有効であることが確認された。なお、ポロシティの低減法については、第3報で報告する。

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」で実施した研究成果の一つであり、関係各位に感謝致します。本研究の遂行にあたり、レーザー機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 prevention of through-holes in full-penetration lap welds of aluminum alloy sheets, *J. Laser Applications*, **18-2**, (2006), 93.
- 2) 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.
- 3) Sun, A., E. Jr. Kannatey-Asibu, and M. Gartner: Monitoring of Laser Weld Penetration Using Sensor Fusion, *J. Laser Applications*, **14-2**, (2002), 114.
- 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) Postma, S., R.G. K.M. Aarts, J. Meijer and J.B. Jonker: Penetration control in laser welding of Sheet metal, *J. Laser Applications*, **14-4**, (2002), 210.
- 6) Kurita, T., T. Ono and T. Nakai: A Study of Groove Depth Profile Monitoring Using the YAG Laser Processing Sound, *The Review of Laser Engineering*, **27-11**, (1999), 777.
- 7) Claus, B. and F.O. Olsen: Laser Welding Closed-Loop Power Control, *J. Laser Applications*, **15-1**, (2003), 19.
- 8) Kawahito, Y. M. Kito and S. Katayama: In-Process Monitoring and Adaptive Control in Laser Micro Butt Welding of Pure Titanium (First Report), *J. Japan Laser Processing Society*, **13-1**, (2006), 35.