

学術論文

焦点はずし条件におけるレーザ溶接性とモニタリングおよびパルス照射時間制御 —アルミニウム合金のレーザスポット重ね溶接法における適応制御(第2報) —

川人 洋介*, 片山 聖二*

Laser Weldability, Monitoring Results and Pulse Duration Control under Different Defocused Conditions
- Adaptive Control in Laser Micro-Spot Lap Welding of Aluminum Alloy (Report II) -

KAWAHITO Yousuke 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 and katayama@jwri.osaka-u.ac.jp

(原稿受付 2004年9月22日)

With the objective of obtaining a fundamental knowledge for further development of monitoring and adaptive control procedures for laser lap welding of thin sheets, micro-spot lap welding was performed on A3003 aluminum alloy sheets of 0.1 mm in thickness with a pulsed YAG laser at different laser pulse durations controlled on the basis of in-process monitoring signals. In this research, the monitoring signals and pulse width controls suitable for stable and consistent production of sound full-penetration welds were investigated at two different defocused distances. At the distances investigated, there was a difference in the generation and behavior of laser-induced plume, and full-penetration welds were produced for several laser pulse durations. In-process monitoring results showed that the reflected light and the heat radiation signals were more effective in the case of the formation of a laser-induced plume and no apparent plume, respectively. Accordingly, the laser pulse duration was controlled at 0.15 ms intervals on the basis of the proper selection of the reflected light power or the heat radiation intensity. Consequently, fully penetrated laser spot lap-weld fusion zones without a burn-through hole or with the prescribed bottom surface sizes were consistently produced in all 20 samples under the respective defocused conditions. This also confirmed that the most proper signals of in-process monitoring for adaptive control should be selected by considering the existence of laser-induced plume.

Keywords: in-process monitoring, laser pulse duration, duration control, heat radiation, reflected light, laser defocusing position, laser-induced plume.

1. 緒 言

レーザ溶接は、エレクトロニクス産業や自動車産業などの分野において、大量高速生産の工程に適用され、更なる展開が期待されている。そのような大量生産に必要不可欠な点が高信頼性であり、その実現には、レーザ溶接現象を明らかにし、モニタリング信号に基づく適応制御法¹⁻⁶⁾を開発することが必要であり、重要である。

第1報⁷⁾では、薄板のアルミニウム合金の重ね貫通溶接において、焦点位置でレーザ照射した場合に発生する穴欠陥を抑制できる適応制御法について報告した。しかしながら、穴欠陥の発生は抑制できたが、裏面の溶融部径は約0.2mmと小さかった。そこで、本研究では、穴欠陥の防止と溶融部径の拡大の両方を達成することを目的として、焦点はずしの条件において貫通溶接を実施し、レーザ照射中の反射光および熱放射光を計測し、それと同時にレーザ照射部表面の溶融状況とブルーム挙動を高速度カメラで観察した。焦点はずし位置としては、レーザ誘起ブルームの発生が極端に早いものと遅いものの2種類で検討を行い、その結果から溶接プロセスを特徴づけるモニタ信号を明らかにした。特に、アルミニウム合金薄板の重ね貫通溶接においては、焦点はずし位置によって溶接プロセスが異なり、適応制御に有効なモニタリング信号は各焦点はずし位置で異なることが示唆された。そこで、各焦点はずし位置におい

て有効的であると判断されたモニタリング信号に基づいて照射時間を制御した結果、穴欠陥の防止ができ、また所定の裏面溶融部径も得ることができることが確認された。

2. 供試材料および実験方法

供試材料は、厚さ0.1mmのアルミニウム合金A3003であり、前報⁷⁾と同様である。

本実験で使用したレーザ光は、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・観察方法は前報⁷⁾と同様である。溶接は、Fig. 1に示すように、レーザ照射位置は、焦点位置を基準にレンズから遠ざ

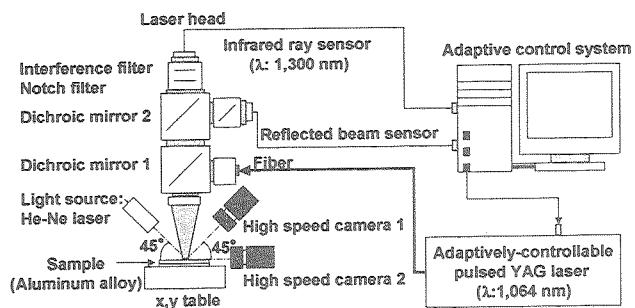


Fig. 1 Schematic experimental set-up of in-process monitoring and laser adaptive control system.

かる方向をプラスとして、焦点はずし距離-3 mm から 3 mm 位置（レンズの焦点距離：50 mm）で 0.1 mm の薄板を重ね合わせ、Table 1 に示す 4 ms の照射条件でレーザ光を大気中で照射し、焦点はずし距離に対するレーザ溶接性を調べた。なお、各焦点はずし距離でのパワー密度は、焦点近傍での高パワー密度を計測できる装置が設置できないため、参考値として、基本波 YAG レーザのパワー 3 kW で照射時間 1.5 ms の矩形パルスを厚さ 10 mm のカーボン板に照射し、レーザパワー 3 kW を加工されたスポット痕の面積で割ったもので代用した。そのパワー密度を Fig. 2 に示す。横軸は、焦点位置を基準とした焦点はずし距離であり、縦軸はパワー密度の参考値である。焦点はずし距離-1 mm および-2 mm でのパワー密度は、約 4 kW/mm^2 および 1.8 kW/mm^2 であった。

特に、焦点はずし距離-1 mm および-2 mm において、照射時間を変えた各 5 サンプルの溶接結果と反射光および熱放射光のモニタリング結果を比較し、溶接プロセスを顕著に示す信号を求めた。そして、穴欠陥の防止のため、または所定の裏面の溶融部径を得るために、溶接プロセス信号に基づいて、0.15 ms 間隔でレーザのパルス照射時間制御を行った。

Table 1 Welding conditions with pulsed YAG laser.

Energy	7.5 ~ 22.5 J
Peak power	3 kW
Pulse duration	3 ~ 8 ms
Pulse shape	
defocused distance	-3 mm ~ 3 mm

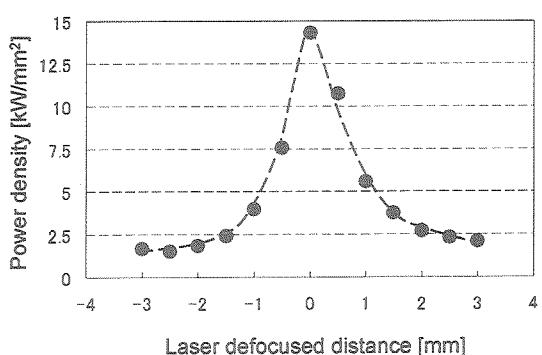


Fig. 2 Laser power density as a function of defocused distance in using focusing optics of welding apparatus developed for adaptive control.
(These values were obtained from the areas of evaporated carbon traces.)

3. 実験結果および考察

3.1 レーザスポット溶接結果

薄板のレーザスポット貫通溶接では、機械的特性の優れた良好な溶接部を得るために、穴欠陥の防止と溶融部の

径拡大が重要である。そこで、良好な溶接部を形成するために有効な焦点はずし距離の効果に関する知見を得るために、焦点はずし距離を-3 mm から+3 mm まで 1 mm ずつ変化させ、それぞれ 5 サンプルに対して、パルス時間 4 ms の条件下 YAG レーザを照射し、貫通溶接を実施した。各条件での表面と裏面の溶融部径の計測結果を Fig. 3 に示す。横軸は焦点はずし距離で、縦軸は溶融部径と貫通穴径である。スポット溶接の結果、焦点はずし距離が-3 および 3 mm では、一部、部分溶込み溶接あるいは未接合となり、-2 mm から 2 mm までは貫通溶接部が得られた。しかし、-1 mm では貫通穴欠陥が 1 サンプルに生じ、焦点位置および+1 mm の高パワー密度の条件ではすべて貫通穴欠陥が発生した。したがって、貫通穴欠陥を防止するためには、焦点はずしの条件が有効であることがわかる。一方、表面の溶融部径の変化は焦点位置に対してほぼ対称的であり、サンプルの厚みが非常に薄いためレーザ溶接ヘッドの光学特性が反映していると考えられる。

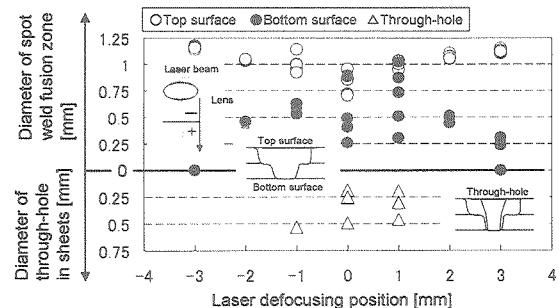


Fig. 3 Effect of defocused distance on sizes of laser lap welds in thin A3003 sheets.

以上の結果より、裏面の溶融部径が大きい貫通溶接部を得るために、本報告では、焦点はずし距離-1 mm および-2 mm において検討することにした。

3.2 焦点はずし距離-1 mm におけるモニタリング結果と溶接結果の相関

焦点はずし距離-1 mm でレーザ照射時間を 3, 4 および 5 ms と変えた各条件において 5 サンプルずつ貫通溶接を実施した。その結果を Fig. 4 に示す。横軸は照射時間で、縦

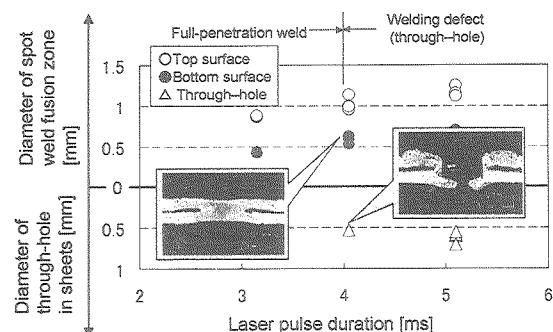


Fig. 4 Effect of pulse duration on sizes of laser lap welds in thin A3003 sheets.

軸は溶融部径と貫通穴径である。Fig. 4 から明らかなように、照射時間が 3 ms 以上ですべて貫通溶接部が得られたが、4 msにおいては良好な貫通溶接部と一部貫通穴欠陥が発生し、5 ms ではすべて穴欠陥が発生したことがわかる。なお、照射時間 4 ms における貫通溶接部の裏面溶融部径の最大値、平均値および最小値は、約 0.63 mm, 0.60 mm および 0.52 mm であった。

そこで、良好な貫通溶接部の生成と貫通穴欠陥の発生の違いを明らかにするために、各溶接時の反射光および熱放射光の計測結果とプルームおよび表面溶融部の高速度観察結果を比較した。良好な溶接部が得られた場合のモニタリング結果と溶接プロセスの高速度観察結果を Fig. 5 にまとめて示す。縦軸は、レーザパワー、反射光強度および熱放射光強度である。グラフ下の写真は、上段にレーザ誘起プルームの高速画像を示し、下段に斜め 45 度方向から観測したレーザ照射部表面の溶融状態の高速度撮影画像を示す。なお、表面写真的スケールは、斜め方向から観測したため、縦横比が異なる。高速度カメラによる観測から、溶融部は、照射開始 0.4 ms 後に形成が確認でき、照射時間の増加に伴って拡大し、中央部には窪みが見られるようになることがわかった。また、レーザ誘起プルームの発生は 1.1 ms では明瞭に観測でき、1.8 ms まで成長し、その後 3 ms まではほぼ一定であった。これらの溶接プロセス現象に対し、反射光強度は、溶融池の生成とともに減少に転じ、レーザパワーを低下させると、増加に転じ、3.6 ms で再びピークが現出した。これは、3.6 ms の時点ではプルームが弱く、溶融池表面に窪みがはつきり確認できることから、窪みが埋まって溶融池表面が平坦化して反射光が戻ったためであると考えられる。一方、熱放射光強度は、溶融池の拡大とともに増加し、2 ms 以後は、ほぼ一定の値を示した。これは、1.8 ms 以降のプルームの大きさがほぼ一定であること、さらに 2 ms 以降の溶融池径が急激に成長していないことか

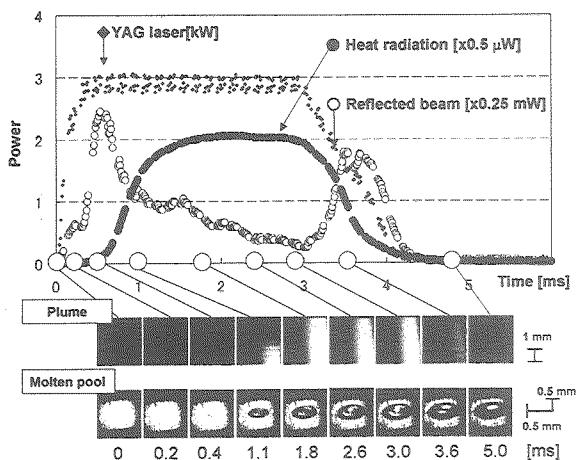


Fig. 5 Monitoring results during full-penetration welding of A3003 sheets of 0.1 mm in thickness performed at -1 mm defocused distance, showing laser pulse shape, reflected light and heat radiation signals, and high-speed observation images of plume and molten pool.

ら、溶接プロセスが安定した状態にあることが推測でき、その結果、2 ms 以後の熱放射強度もほぼ一定になったと考えられる。

次に、貫通穴形成時のモニタリング結果と溶接現象の観察結果を Fig. 6 に示す。表示形式は、Fig. 5 と同様である。高速度観測の結果から、溶融池とレーザ誘起プルームはともに、2.5 ms まで良好な貫通溶接部形成時と同様な変化を示したが、3.1 ms では、貫通穴が発生して溶融池の融液は貫通穴周辺部に追いやりられ、プルームは消滅した。この溶接プロセスに対し、反射光は減少を続け、レーザパワード下降時ににおいてピークは検出されなかった。これは、貫通穴をレーザ光が通り抜けたためであると考えられる。一方、熱放射光は、貫通溶接時と比較して大きな差はなかった。

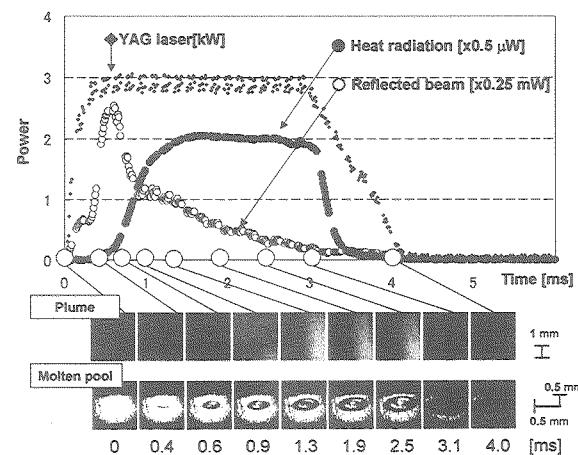


Fig. 6 Monitoring results during welding of A3003 sheets of 0.1 mm in thickness performed at -1 mm defocused distance leading to formation of burn-through hole, showing laser pulse shape, reflected light and heat radiation signals, and high-speed observation images of plume and molten pool.

以上の結果より、溶接結果とモニタリング信号との相関を明らかにするため、反射光の信号としては、レーザ光が貫通穴を通過するのが顕著に現れるレーザパワード下降開始直前の強度を使用し、一方、熱放射光は、溶融池の変化と対応関係が認められたので、強度の最大値を用いて評価した。その結果を Fig. 7 に示す。横軸はモニタリング信号で、

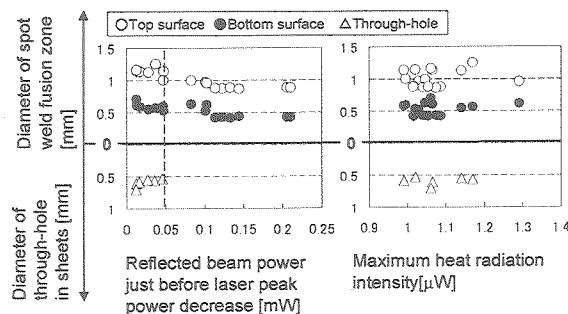


Fig. 7 Relationship between in-process monitoring signals and size of lap welds in A3003 sheets.

縦軸は溶融部径である。ただし、穴欠陥が発生した場合は貫通穴径を記載した。反射光強度に関しては、0.05 mW 付近を境に強度が低い場合には貫通穴欠陥が発生し、高い値の場合には良好な貫通溶接部が得られた。これは、反射光強度がある値以上検出されている場合は、窪み部もしくはキーホールが小さく、レーザパワーの低下に伴って良好な溶接部が生成できるように消滅可能な状態に保持されている状況であると考えられる。そして、反射光がある値以下に低下してくると、低パワー密度のレーザエネルギー增加分でも、キーホールが不安定になり、反射光が検出できないほど大きな穴が発生し、修復不能な穴欠陥となつたと考えられる。一方、熱放射光のモニタリング波形は、貫通溶接部形成と穴欠陥発生との両プロセスの間でほとんど区別できず、相関を見つけることが困難であった。

したがって、焦点はずし距離が-1 mm の場合、穴欠陥の発生を予知する信号としては反射光強度が適切であると判断される。

3.3 焦点はずし距離-2 mm におけるモニタリング結果と溶接結果の相関

照射時間を 3 ms から 8 ms まで 1 ms ずつ増やした各条件で 5 サンプルずつ貫通溶接を実施した。その結果、溶融部径と穴欠陥の発生に及ぼす照射時間の影響を Fig. 8 に示す。照射時間 3 ms では部分溶込み溶接で、4 ms から 7 ms までは貫通溶接部が得られ、8 ms では一部のサンプルで貫通穴欠陥が発生した。溶融部径から、貫通溶接条件は 4 ms から 7 ms までと判断できる。さらに、貫通溶接部の形状を調べるために、各貫通溶接条件の 2 サンプルを抽出し、断面形状を比較した。その結果を Fig. 9 に示す。横軸は裏面の溶融部径で、縦軸は下板の最小厚みである。裏面溶融部径の増大に従って、下板裏面の溶融部は凹形状となり、曲率が大きくなって下板の最小厚みが減少することがわかる。具体的には、下板の最小厚みとして 90 μm を確保するためには、裏面の溶融部径を 0.65 mm にする必要がある。

そこで、実際に発生した、部分溶込み溶接、貫通溶接、貫通穴欠陥発生の 3 種類の溶接プロセスについて検討した。

初めに、照射時間 3 ms の部分溶込み溶接でのモニタリング結果と高速度観察結果を Fig. 10 に示す。表示形式は、Fig.

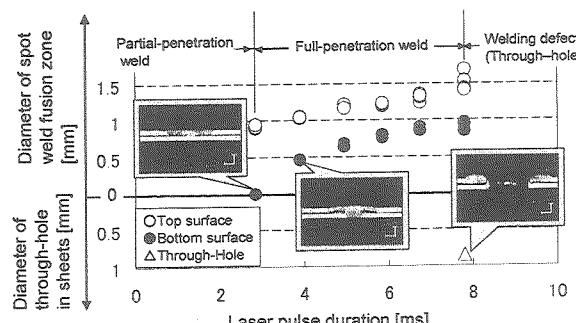


Fig. 8 Effect of laser pulse duration on sizes of lap welds in thin A3003 sheets.

5 と同様である。高速度観測結果から、溶融部は、照射開始 0.7 ms 後に形成が確認でき、照射時間の経過に伴って成長することがわかった。また、レーザ照射中ブルームの発生は観測できなかった。このような溶接プロセス現象に対し、反射光強度は、複雑に変化しながらも増加傾向を示した。レーザ照射開始時に反射光強度が低いのは、Fig. 11 に示すように、焦点はずし距離-2 mm では、パワー密度が 1.8 kW/mm² と、3.2 節での焦点はずし距離-1 mm における 4 kW/mm² パワー密度に比べて低いために、溶融開始までに時間がかかり、上薄板が変形したためと考えられる。また、レーザ照射の後半に反射光強度が照射開始時よりも高くなるのは、レーザ照射直後に表面が膨張し、反射光は散乱され、照射時間が進むにつれて、溶融池が大きくなり、平滑

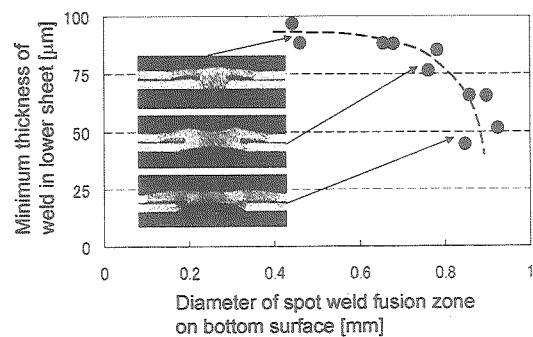


Fig. 9 Relationship between minimum thickness of lower sheet and size of lap welds in A3003 sheets.

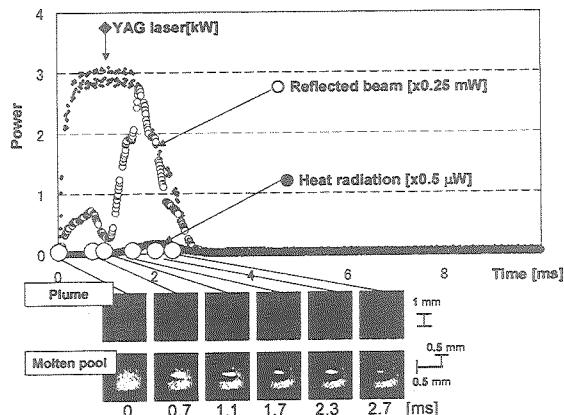


Fig. 10 Monitoring results during partial-penetration welding of A3003 sheets of 0.1 mm in thickness performed at -2 mm defocused distance, showing laser pulse shape, reflected light and heat radiation signals, and high-speed observation images of plume and molten pool.

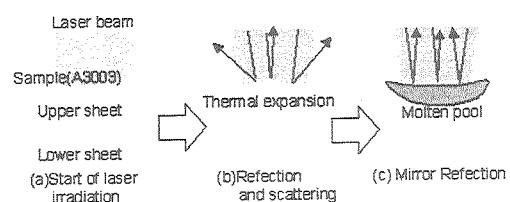


Fig. 11 Schematic drawing of reflection or scattering of laser beam at -2 mm defocused distance.

な液面が形成され、そこから鏡面反射のように強い反射光が戻ってきたためであると考えられる。一方、熱放射光強度は、溶融部が拡大するに従い若干増加した。

次に、照射時間 4 ms の貫通溶接時のモニタリング結果と観察結果を Fig. 12 に示す。表示形式は、Fig. 10 と同様である。高速度カメラによる観測から、照射時間 3 ms と同様に溶融部は照射時間と共に拡大し続けた。なお、この場合もプルームは観測できなかった。この溶接プロセスに対し、反射光は 2.3 ms から増加から減少に傾向を転じた。これは、1.0 ms から 2.6 ms までの溶融池表面の高速画像観測結果を比較すると、明るい部分が、溶融池の端から中央部に移動しているので、溶融池の液体面が僅かに壅んだことが考えられ、そのため反射が減少に転じたと考えられる。また、熱放射は溶融部の拡大とともに増加し、溶融の拡大が鈍化すると、ほぼ一定の値になった。

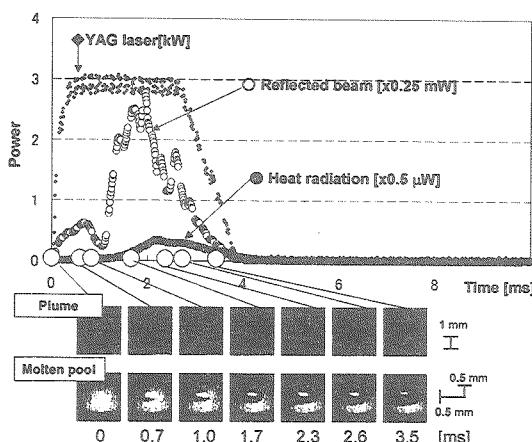


Fig. 12 Monitoring results during full-penetration welding of A3003 sheets of 0.1 mm in thickness performed at -2 mm defocused distance, showing laser pulse shape, reflected light and heat radiation signals, and high-speed observation images of plume and molten pool.

さらに、照射時間 8 ms の貫通穴発生時のモニタリング結果と観察結果を Fig. 13 に示す。表示形式は、Fig. 10 と同様である。高速度観測から、0.6 ms に溶融部が確認でき、貫通溶接時と同様に溶融部が増加し、6.2 ms では溶融部の中央部に壅みが観測された。これと同時に大きなプルームが発生し、穴欠陥が生成したため、反射光も低下したままとなり、継続したプルームの発生はなかった。

以上、焦点はずし距離が-2 mm での溶接プロセスに対し、反射光は複雑な挙動を示した。この挙動はレーザ照射部の変形や溶融池とその形状などに対応していると考えられるが明確な対応を読み取ることはできなかった。一方、熱放射光は、貫通溶接時と同様に、溶融池の拡大とともに増加し、大きなプルーム発生時には、さらに急激な増加を示した。これに関しては、熱放射光の強度にプルームからの発光も影響していることも考えられるが、大きなプルームの反力により融液が周囲に広がり、溶融エリアが拡大したた

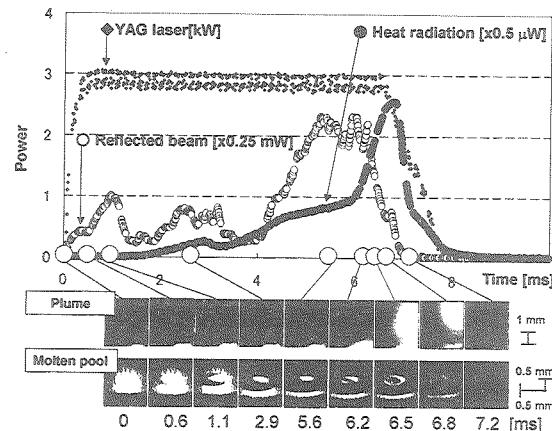


Fig. 13 Monitoring results during welding of A3003 sheets of 0.1 mm in thickness performed at -2 mm defocused distance leading to formation of burn-through hole, showing laser pulse shape, reflected light and heat radiation signals, and high-speed observation images of plume and molten pool.

めと考えられる。

次に、溶接結果とモニタリング信号との相関を明らかにするため、反射光では、レーザ光が貫通穴を通過するのが顕著であるレーザパワー降下開始直前の反射光強度を用い、一方、熱放射光は強度の最大値を用いて評価した。その結果を Fig. 14 に示す。反射光強度に関しては、溶接結果との相関を見つけるのが困難であるが、熱放射には表面と裏面の溶融径とともに相関が読み取れた。これは、溶融池径の増加とともに熱放射光強度が増加する傾向が現れたためであると考えられる。具体的には、裏面の溶融部径 0.65 mm には、 $0.17 \mu\text{W}$ が必要であることがわかった。

以上、焦点はずし距離-2 mm のレーザ溶接条件下では、溶融部径と熱放射光強度の最大値には明らか相関があることがわかった。

したがって、焦点はずし距離が-1 mm および-2 mm の条件においては、異なる溶接プロセスが進行し、溶接結果とモニタリング信号はレーザ誘起プルームの存在による影響から理解できた。すなわち、プルームがある場合は、溶融

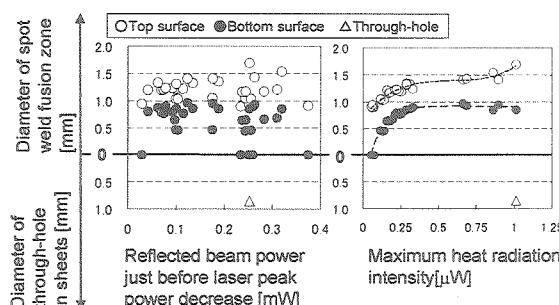


Fig. 14 Relationship between in-process monitoring signals and size of welds, showing formation feasibility of weld fusion zones of target sizes under adaptive control.

部に窪みが発生し、その窪みとキーホールの安定化が溶接プロセスの中で重要な働きをするため、反射光が溶接結果と結びつくことになった。一方、プルームがなかなか発生しない場合、溶接プロセスは熱伝導的に進行するため、溶融部径の拡大に伴って変化する熱放射光が溶接結果と結びつくことになったと考えられる。

3.4 各焦点はずし距離におけるパルス照射時間制御法

焦点はずし距離-1 mm および-2 mm の条件では、それぞれに溶接プロセスを顕著に表すモニタリング信号に閾値を決めて、Fig. 15 の制御フローチャートに従って各条件において 20 サンプルについてパルス照射時間制御を実施した。Fig. 15 (a) に示すように、焦点はずし距離-1 mm では、3.2 節で明らかになったように、0.05 mW 付近で貫通溶接部形成か貫通穴欠陥発生かの区別できる閾値が存在したので、0.15 ms のパルス照射時間制御のための判断時間とレーザ照射停止判定後のレーザ波形にタイミングが付与されていることを考慮して、レーザ照射開始から 1 ms 以降において 0.1 mW 以下になるとレーザ照射を停止するパルス照射時間制御を実施した。その結果を Fig. 16 に示す。横軸はタイミング開始直前の反射光強度で、縦軸は溶融部径と貫通穴

径である。パルス照射時間制御を行った結果、◇および◆で示されているように、すべてのサンプルで貫通穴を有する溶接欠陥は発生せず、裏面の溶融部径の拡大を図ることが可能であることが確認された。具体的には、裏面の溶融部の最大径、平均値および最小値は、それぞれ 0.86 mm, 0.77 mm および 0.59 mm であった。このようにパルス照射時間制御をした場合は、しない場合の最小値 0.53 mm よりも改善されている。しかしながら、上板と下板の間に空隙が発生し、接合形状としては課題が残った。この対策法については、今後、検討する予定である。

次に、Fig. 15(b) に示すように、焦点はずし距離-2 mm では、3.3 節で述べたように、下板の最小厚み 90 μm を確保するため、裏面の溶融部径を 0.65 mm 以下に抑える必要があり、そのために、熱放射光強度を 0.17 μW 以下にする必要があるので、20 サンプルに対して、0.14 μW 以上になった時点でのレーザ照射を停止するパルス照射時間制御を実施した。その結果を Fig. 17 に示す。横軸はタイミング開始直前の熱放射光強度で、縦軸は溶融部径である。パルス照射時間制御の結果、◇および◆で示されるように、下板の最小厚みが 90 μm 程度を確保するために必要な裏面の溶融部径の目標値である 0.65 mm に対し、最大 0.60 mm、平均 0.57 mm、最小 0.38 mm を達成した。また、3 サンプルについて、下板の最小厚みを計測したところ、90 μm 以上であった。しかしながら、焦点はずし距離-1 mm と同様に上板と下板の間に空隙が発生し、接合部形状としては課題が残った。

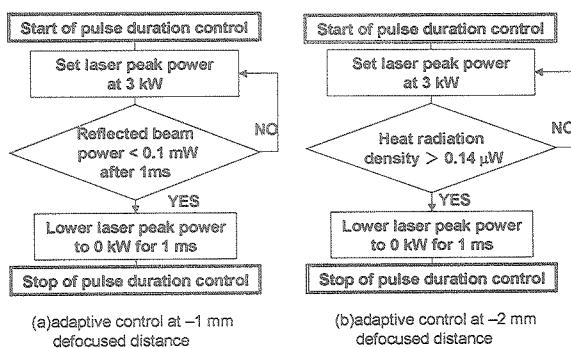


Fig. 15 Flow charts of pulse duration control based upon reflected light signal (a) and heat radiation signal (b).

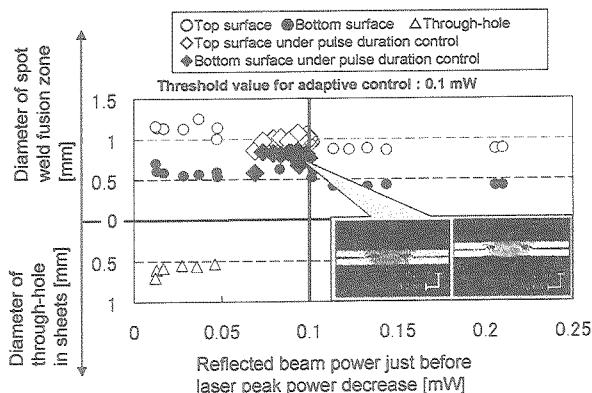


Fig. 16 Bottom surface diameters of spot weld fusion zones made at -1 mm defocused distance as a function of reflected light power, showing effect of pulse duration control on weld formation of target size.

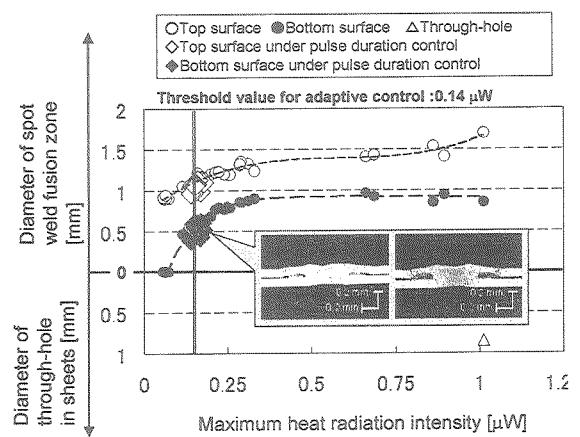


Fig. 17 Bottom surface diameters of spot weld fusion zones made at -2 mm defocused distance as a function of heat radiation level, showing effect of pulse duration control on weld formation of target size.

以上、焦点はずし距離-1 mm および-2 mm の条件で適応制御を行った結果、溶接プロセスを顕著に反映しているモニタリング信号に基づくパルス照射時間制御法は、貫通穴欠陥の発生を防止でき、また、下板の最小厚みの確保に対しても有効であることを確認できた。すなわち、第 1 報⁷⁾における焦点位置での適応制御では、裏面の溶融部径の最小値が 0.2 mm であったのに対し、焦点はずし距離-1 mm

および-2 mm の条件では、約 0.59 mm および 0.38 mm と 2 倍程度上回る結果が得られた。

4. 結 言

本研究では、アルミニウム合金薄板のレーザマイクロスポット重ね溶接におけるモニタリングと適応制御について検討を行った。得られた結論は以下のとおりである。

- 1) 通常のレーザマイクロスポット溶接の結果
 - ① 焦点はずし距離や照射時間によって、部分溶込み溶接部、貫通溶接部および貫通穴欠陥発生の溶接部が形成し、溶接現象がそれぞれ異なることが示唆された。
 - ② 裏面溶融部径の拡大を目指した場合に、焦点はずし距離-1 mm では、貫通溶接時に貫通穴欠陥の発生が課題であったが、焦点はずし距離-2 mm では、下板の最小厚みが薄くなることが課題となり、課題が変わることがわかった。
- 2) インプロセスマニタリングの結果
 - ① 焦点はずし距離-1 mm の条件下の溶接プロセスにおいて、レーザ誘起ブルームが発生する場合、反射光が溶接結果と関連し、モニタリング信号として有効であることがわかった。
 - ② 焦点はずし距離-2 mm の条件下の溶接プロセスでは、レーザ誘起ブルームが発生せず、溶融池は熱伝導的に生成されるため、溶融池径の拡大を表す熱放射光強度が、反射光と比べ溶接結果と関連することがわかった。
- 3) パルス照射時間制御結果
 - ① 焦点はずし距離-1 mm では、反射光に基づくパルス照射時間制御の結果、すべてのサンプルで貫通穴欠陥は発生せず、裏面の溶融部径の拡大を図ることができた。裏面の溶融部の最大径、平均値および最小値は、それぞれ約 0.86 mm, 0.77 mm および 0.59 mm であり、制御しない場合の約 0.63 mm, 0.60 mm および 0.52 mm より向上した。

- ② 焦点はずし距離-2 mm では、熱放射光に基づくパルス照射時間制御の結果、裏面の溶融部径で最大 0.60 mm、平均 0.57 mm および最小 0.38 mm を達成し、下板の最小厚みにおいて 90 μm が確保された。
- ③ 裏面溶融部径の最小値は、焦点はずし距離-1 mm および-2 mm では、それぞれ 0.59 mm と 0.38 mm となり、焦点位置での適応制御における裏面溶融部径の最小値 0.2 mm に対して、2 倍程度大きな値が得られることが確認された。

謝 辞

本研究の遂行にあたり、モニタリング機器、適応制御機器、適応制御レーザ発振器に関して、ご支援頂いた松下電器産業㈱および FME ㈱（ミヤチテクノス㈱）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 in Laser Micro-Spot Lap Welding of Aluminum Alloy, The Review of Laser Engineering, 32-5, (2004), 357.
- 2) 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.
- 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) Kawahito, Y. and S.Katayama: Adaptive Control in Laser Micro-Spot Lap Welding of Aluminum Alloy (Report I) - Adaptive Control for Fully-Penetrated Micro Welding of Thin Sheets, J. Japan Laser Processing Society, 11-3, (2004), 6.