

薄板のマイクロ貫通溶接時の溶接部形状改善に対する適応制御法

—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3報）—

川人洋介*, 片山聖二*

Adaptive Control for Improvement of Spot Weld Geometry in Full Penetration Welding of Thin Sheets

—Adaptive Control in Laser Micro-Spot Lap Welding of Aluminum Alloy (Third Report)—

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

(原稿受付 2004年9月24日)

The previous reports revealed that the adaptive control procedure developed was effective for stable production of full-penetration welds without through-hole defects in micro-lap welding of A3003 aluminum alloy sheets of 0.1 mm in thickness with a pulsed fundamental YAG laser beam. In this third report, with the objectives of producing stable lap full-penetration weld joints without swelling, spot welding was performed at low laser power density. Then the concavity of the weld fusion zones was remarkable with an increase in the pulse duration. These in-process monitoring results showed that the total power of heat radiation represented the bottom surface diameter of spot weld fusion zone. Accordingly, the laser pulse duration was controlled at 0.15 ms intervals on the basis of that the total power of heat radiation in order to produce a satisfactory spot weld fusion zone. As a result, all 20 fully penetrated welds of desirable sizes were consistently produced. It was consequently confirmed that the developed adaptive control was also effective for the improvement of full penetration lap weld geometry in laser micro-spot welding of A3003 thin sheets.

Keywords: adaptive control, heat radiation, micro-spot lap welding, YAG laser beam, aluminum alloy,

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ている。この大量生産に必要不可欠な課題が高信頼性の実現である。レーザ溶接で高信頼性を確保するためには、溶接プロセス現象を明らかにし、モニタリング信号に基づくインプロセスでの適応制御法^{1,2)}を開発することが重要である。

第1報³⁾では、薄板のアルミニウム合金A3003の重ね貫通溶接において、レーザ光を焦点位置で照射し、穴欠陥が抑制できるモニタリング方法と適応制御結果について報告した。第2報⁴⁾では、レーザ焦点はずし位置での貫通溶接における適応制御法について検討し、穴欠陥の抑制と重ね接合部の拡大が可能であることを明らかにした。しかし、レーザスポット溶接部の重ね部に膨らみが見られた。そこで、本報告では、接合部に発生する膨らみを抑制するための適応制御法について検討を行った。具体的には、接合部周辺の変形を低減するために、サンプルを焦点はずし位置に設置し、レーザパワー密度をできるだけ下げた条件で貫通溶接を実施した。また、溶接時の反射光と熱放射光の計測およびレーザ照射部表面の溶融とブルーム挙動の高速度撮影結果を基に、溶接プロセスを明らかにすることも試みた。その結果、低パワー密度レーザ光の長時間照射条件では、接合部面積が拡大し、重ね部周辺の膨らみを低減させることができたが、溶融部中央に、溶融池拡大に伴い窪みが発生することがわかった。そこで、溶接プロセスを特徴づけるモニタ信号（本報告では、熱放射光強度の総量）に

基づいて、サンプル毎に照射時間を適応制御し、溶融部中央の窪みを小さくし、しかも所定の裏面の溶融部径を満たす方法について検討した。その結果、薄板のアルミニウム合金の重ね貫通スポット溶接において、適応制御法は、溶融部形状の改善に対しても有効であることを示唆することができた。最後に、第1報³⁾から本報告までを通じて、アルミニウム合金薄板のマイクロスポット貫通溶接における一連の適応制御法について考察を行った。

2. 供試材料および実験方法

供試材料は、厚さが0.1 mmのアルミニウム合金A3003であり、前報^{3,4)}と同じである。

また、本実験で使用したレーザ発振器は、適応制御型基本波パルス Nd: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^{3,4)}と同様である。溶接は、焦点位置を基準に、レンズから遠ざかる方向をプラスとして、焦点はずし距離-2 mm位置で0.1 mmの薄板を重ね合わせ、Table 1に示す溶接条件で、照射時間を変えて貫通溶

Table 1 Welding conditions with pulsed YAG laser.

Energy	17–55 J
Peak power	1.2 kW
Pulse duration	15–45 ms
Pulse shape	
Laser focusing condition	-2 mm defocus

接を実施した。さらに、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モニタリング信号に基づき、溶接部形状の改善のために、照射時間を 0.15 ms 間隔で適応制御を行った。

3. 実験結果および考察

3.1 接合部周辺の変形を抑えたレーザスポット溶接

接合部周辺の変形の低減に低パワー密度でのレーザ溶接が有効であると考え、第2報⁴⁾で貫通溶接ができる最も焦点はずし距離が大きい-2 mm で溶接を行うことにした。Table 1 のレーザ照射時間を 15 ms から 45 ms まで 10 ms ずつ増やした各溶接条件で、5 サンプルずつ溶接を実施した。そして、各溶接条件での引張剪断試験も行った。それらの結果を Fig. 1 に示す。Fig. 1 (a) は溶融部径に及ぼす照射時間の影響を示し、Fig. 1 (b) は溶融部径と引張剪断強度との関係を示している。Fig. 1 (a)において照射時間 15 ms では、部分溶込み溶接部か貫通溶接部のどちらかが得られたが、20 ms 以上の照射時間では貫通溶接部のみが形成した。一方、引張剪断強度は、照射時間の増加とともに単調に増加した。

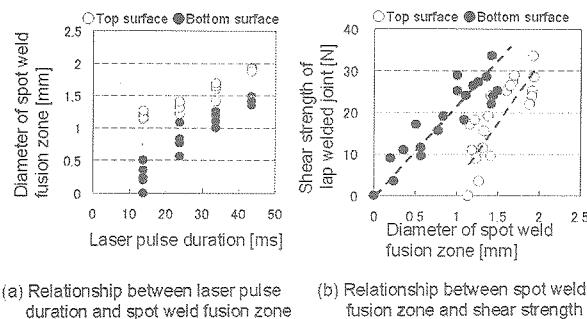


Fig. 1 Experimental results of laser micro-spot lap welding of A3003 thin sheets, showing effect of pulse duration on spot weld diameters (a) and relationship between diameter and tensile shear strength of weld joints.

そこで、照射時間 25 ms 以上の貫通溶接部のサンプルについて溶接部の形成状況を調査した。その貫通溶接部断面の一例を Fig. 2 示す。断面形状から、第2報⁴⁾に比べると接合周辺部の変形は低減され、顕著な膨らみは防止されていたが、照射時間が進むにつれて、溶融部中央の窪みが深くなり、溶融部中央の厚みが薄くなることが確認された。しかし、引張剪断試験の結果から、溶融部中央の厚みの減少は強度に影響を及ぼさないレベルであることがわかった。

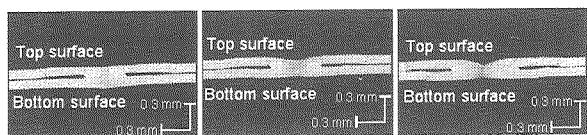


Fig. 2 Cross-sectional photos of laser full-penetration lap spot welds.

したがって、溶接変形を低減させるために、焦点はずし距離-2 mm で、レーザピークパワー 1.2 kW として貫通溶接を実施した結果、接合周辺部の溶接変形を低減でき、重ね部の膨れを防止することができた。なお、引張剪断試験結果に影響が現れなかったが、溶融部中央の厚みが減少することが起こることが確認できた。

3.2 モニタリング結果と溶接結果との相関

貫通溶接プロセスを明らかにするために、レーザ照射時の反射光と熱放射光の計測結果、ならびにブルームと溶融池表面の高速度撮影結果を検討した。その結果の一例を Fig. 3 に示す。縦軸は、レーザピークパワー、反射光強度および熱放射光強度を表す。グラフ下の写真は、上段にレーザ誘起ブルームの高速画像を示し、下段にレーザ照射部表面の溶融状態の高速画像を示す。高速度カメラによる観測から、溶融池は、照射開始 1.8 ms 後に形成が確認でき、照射時間とともに成長することがわかる。一方、レーザ誘起ブルームの発生は観察できなかった。これらの溶接プロセス現象に対し、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、熱放射光は溶融池の拡大とともにほぼ単調

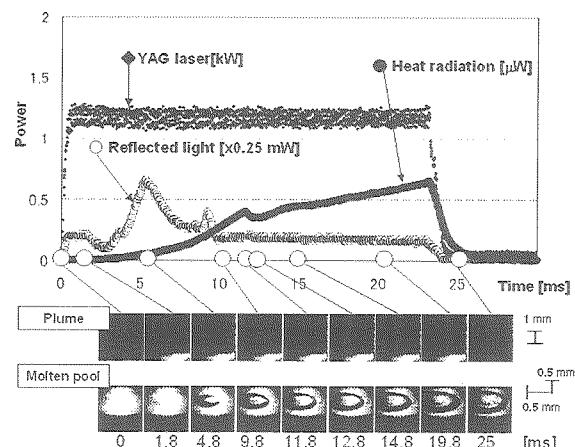


Fig. 3 Monitoring results during full-penetration welding of A3003 sheets of 0.1 mm in thickness performed at -2 mm defocused distance, showing laser pulse shape, reflected light and heat radiation signals, and high-speed observation images of laser-induced plume and molten pool.

に增加了。

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ことを試みた。反射光としては、溶融状態をモニタするために、溶融池が大きいほど、溶融表面の状態が顕著に現れると考え、レーザパルス波形のティーリング開始直前の強度を反射光モニタリング信号とした。一方、熱放射光は、照射時間が進むと溶融池が増加したので、レーザ照射開始からティーリング開始直前までの強度の総量を用いて評価することにした。その結果を Fig. 4 に示す。横軸はモニタリング信号で、縦軸は溶融部径である。反射光強度に関して

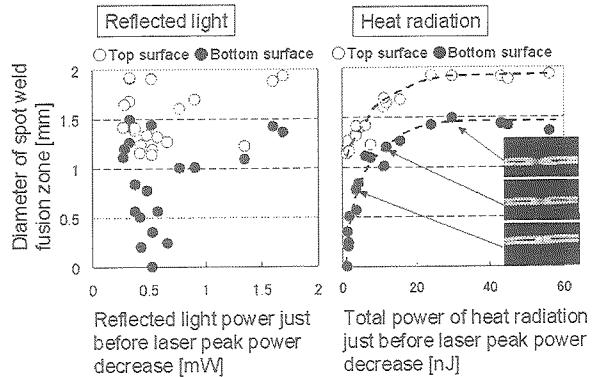


Fig. 4 Relationship between in-process monitoring signals and size of laser spot lap welds in A3003 sheets.

は、溶接プロセスと同等に、表面および裏面の溶融部径との相関を見つけることが困難である。一方、熱放射光とは表面と裏面の溶融部径とも相関関係を読み取ることができた。具体的には、溶融部径は、熱放射光の強度総量が 30 nJ までは、その強度総量の増加とともに増加し、それを超えるとほぼ一定となった。なお、溶融池が大きい場合に溶融部表面の中央が凹形状になることを考慮すると、表面および裏面の溶融部径は、それぞれ 1.4 mm および 1 mm 程度が望ましいと考えられる。このことから、熱放射光強度の総量を 5 nJ 程度に設定するとよいことになる。

したがって、本溶接条件下において、反射光では、溶接プロセスと溶接結果との間に明確な対応を読み取ることはできなかった。一方、熱放射光強度の総量は、溶融池径とともに増加し、表面溶融部の中央の窪みを小さく抑制できる所定の溶融部径をモニタできる信号であると判断された。

3.3 热放射光强度の総量に基づく適応制御法

接合部周辺の変形を低減するために、-2 mm 焦点はずし位置にサンプルを置き、1.2 kW のレーザパワーで貫通溶接を実施した。その結果、接合部周辺部の溶接変形は低減でき、重ね部の膨れを防止できたが、溶融部径の増加とともに溶融部中央の厚みが減少した。そこで、溶融部中央の厚みを確保するために、狙いを裏面の溶融部径 1 mm とし、レーザ波形のティーリングなどでの熱放射光を考慮して、レーザ照射開始から計測した熱放射光強度の総量が 4.2 nJ 以上でレーザ照射を停止するように適応制御を行った（以後、適応制御 1 と呼ぶことにする）。さらに、3.1 節で検討した最小のパルス幅 15 ms でも、パルスレーザ溶接では、一般的に、長いパルス幅に相当するので、照射時間を短くするために、Table 2 に示すようなレーザ波形のティーリングに変更し、適応制御 1 と同様な制御を行った（以後、適応制御 2 と呼ぶ）。適応制御 2 では、上板と下板の接合を確認してから、レーザパワーを 3 kW にまで上げ、接合部周辺の変形抑制とパルス幅の短縮を狙った。ここで、レーザパワーを 3 kW に設定したのは、第 2 報⁴⁾の 3.3 節において表面の溶融部径が 1.2 mm 程度で、照射時間 1 ms 以上増加させても、穴あきが発生しなかった結果を考慮したことによる。また、この適応制御 2 の熱放射光の閾値は、Fig. 4 の表面

の溶融部径が 1.2 mm 程度となる場合の熱放射光強度の総量 2.1 nJ とした。

2種類の適応制御について、制御のフローチャートを Fig. 5(a)および(b)に示す。その適応制御結果を Fig. 6 に示す。Fig. 6 の横軸はレーザ照射開始からティーリング開始までの熱放射光強度の総量で、縦軸は裏面の溶融部径である。裏面の最大溶融部径の目標値は 1 mm である。適応制御 1 では、20 サンプルに対して、表面の溶融部径は、最大値、平均値および最小値がそれぞれ、1.69 mm, 1.48 mm および

Table 2 Improved long tailing of the adaptive control for reduction of laser pulse duration, compared to the conventional laser pulse.

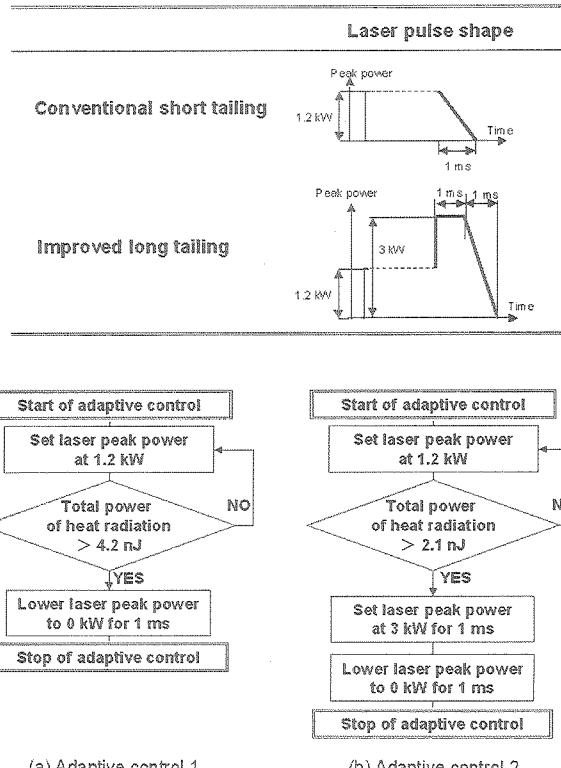


Fig. 5 Flow charts of two kinds of adaptive control.

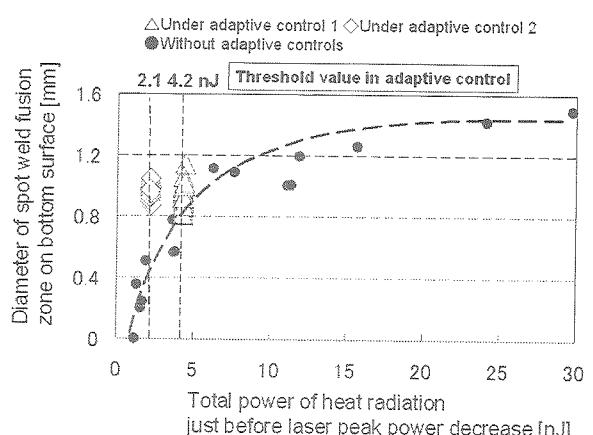


Fig. 6 Bottom surface diameters of spot weld fusion zones made at -2 mm defocused distance as a function of total heat radiation power just before laser peak power decrease, showing effect of adaptive controls on weld formation of target size.

1.30 mm であり、裏面の溶融部径は、最大値、平均値および最小値がそれぞれ、1.14 mm, 0.93 mm および 0.81 mm であった。一方、照射時間短縮のための適応制御 2 の 20 サンプルでは、表面の溶融部径は、最大値、平均値および最小値がそれぞれ、1.45 mm, 1.37 mm および 1.23 mm であり、裏面の溶融部径は、最大値、平均値および最小値がそれぞれ、1.05 mm, 0.96 mm および 0.87 mm であった。両適応制御とも裏面の溶融部径に関しては、目標値に近い値であった。また、適応制御 2 では、表面の溶融部径も改善することができ、20 サンプルに対する平均照射時間は、適応制御 1 では 24.5 ms に比べ、20.0 ms とし、2 割程度レーザ照射時間を短縮化することができた。

次に、それぞれの溶接部断面を観察し、その一例を Fig. 7 に示す。適応制御 1 では、表面溶融部中央に窪みは確認できないが、適応制御 2 では中央部が窪み、接合部の厚みが減少していた。この溶融部形状は、照射時間が長い場合と酷似しており、過剰にエネルギーが入りすぎたためと考えられる。改善策の一つとして、高いピークパワーでの過剰入熱の防止には、適応制御の応答性を上げることで対応できるが、本実験では、適応制御サイクルが 150 μ s であり、今後、高速タイプの適応制御システムで改善を試みる必要がある。

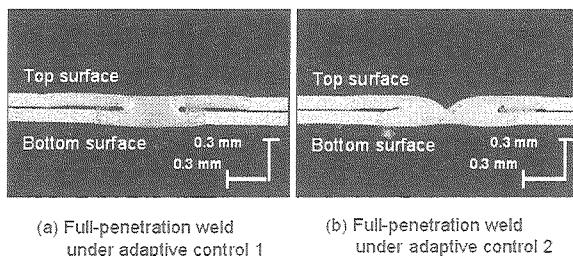


Fig. 7 Cross sections of laser full-penetration spot lap welds produced under adaptive controls.

以上の結果より、焦点はずし距離-2 mm で、レーザパワー-1.2 kW での貫通溶接では、溶融部径の増加とともに溶融部中央の厚みが減少するが、この改善策として、熱放射光に基づく照射時間の適応制御法が有効であることが確認された。また、照射時間短縮のための適応制御も行ったが、2 割程度のパルス幅の短縮化が可能であったが、溶融部中央の厚みが低下した。

3.4 アルミニウム合金薄板のレーザスポット重ね溶接法における適応制御法

第 1 報³⁾から本報告まで、アルミニウム合金薄板のマイクロスポット貫通重ね溶接において様々な適応制御法を検討してきた。その内、有効であった適応制御法を従来の通常の溶接法とともに Table 3 にまとめて示す。そして、各適応制御法で得られたスポット溶接部の断面形状例とその特徴を Table 4 に示し、表面と裏面の溶融部径を Fig. 8 に示す。縦軸は、溶融部径と貫通穴径である。

適応制御なしの従来の溶接条件では、5 サンプルにおい

Table 3 List of the adaptive controls for in laser micro-spot lap welding of A3003 sheets of 0.1 mm in thickness.

Laser welding condition	Laser focusing condition	Pulse shape	Monitoring signal	Controlled signal	Reference
Conventional condition	0 mm	Peak power 4 ms 3.2 kW Time 0.9 kW	—	—	Report 1 ³⁾
Adaptive control A	0 mm	35.5 ms 0.9 kW	Heat radiation Reflected beam	Peak power	Report 1 ³⁾
Adaptive control B	-1 mm	4.5 ms 3 kW	Reflected beam	Pulse width	Report 2 ⁴⁾
Adaptive control C	-2 mm	4.4 ms 3 kW	Heat radiation	Pulse width	Report 2 ⁴⁾
Adaptive control D	-2 mm	25 ms 1.2 kW	Heat radiation	Pulse width	Report 3

Table 4 Summary of cross sections and characteristics of laser full-penetration spot welds produced under normal condition and several adaptive controls.

Laser welding condition	Cross section	Characteristic
Conventional condition		Concave on the bottom surface
Adaptive control A		Narrow lap weld
Adaptive control B		Swell in lap joint
Adaptive control C		Swell in lap joint
Adaptive control D		Better lap weld

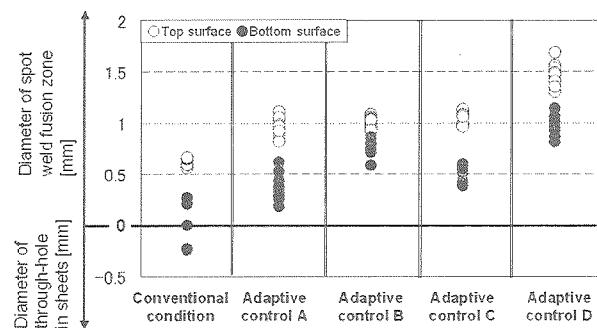


Fig. 8 Diameters of laser spot weld fusion zones showing effect of adaptive controls.

て、部分溶込み溶接部、貫通溶接部、貫通穴欠陥を有する溶接部の 3 種類の溶接が形成した。貫通溶接できた最大の表面と裏面の溶融部径は、0.65 mm と 0.27 mm と非常に小径であった。第 1 報³⁾では、貫通穴欠陥を抑制する適応制御法 A について検討を行った。貫通穴欠陥は、過剰入熱により急激に成長したブルームが融液を吹き飛ばした結果であると考えられる。そこで、安定した溶接状態を維持するために、反射光強度と熱放射光強度に基づいて、レーザパワーを適応制御した。その結果、20 サンプルすべてにおいて、貫通穴は発生せず、貫通溶接が可能となり、表面の溶

融部径の最大値、平均値および最小値はそれぞれ 1.11 mm, 0.98 mm および 0.82 mm となった。更に、裏面の溶融部径の最大値、平均値および最小値は、0.62 mm, 0.42 mm および 0.20 mm とすることができた。第 2 報⁴⁾では、穴欠陥抑制とさらなる溶融部拡大を狙い、レーザ焦点はずし位置での貫通溶接を行い、適応制御 B と C について報告した。焦点はずし距離 -1 mm と -2 mm の溶接では、プルームの発生が早い溶接プロセスと遅い溶接プロセスに対応した。その結果、溶接プロセスを顕著に示すモニタリング信号が異なった。それぞれのモニタリング信号に基づき適応制御を行った結果、すべての 20 サンプルにおいて貫通溶接ができた。また、焦点はずし距離 -1 mm における適応制御 B では、裏面の溶融部径の最大値、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 にすることができた。一方、焦点はずし距離 -2 mm の適応制御 C においては、下板の最小厚み 90 μm を確保するために裏面の溶融部径 0.65 mm 以下を目指して実施した結果、裏面の溶融部径の最大値、平均値および最小値は、それぞれ 0.60 mm, 0.57 mm および 0.38 mm にすることことができた。適応制御 B と C とも、適応制御 A に比べ、裏面の最小溶融部径が 1.5 倍以上改善できた。最後に、本報告での適応制御 D では、適応制御 B と C で発生した接合部周辺の変形を低減させ、重ね部の膨らみを抑制するために、-2 mm 焦点はずし位置で、低レーザパワーの貫通溶接を実施した。一方、低パワー密度の溶接では、接合部周辺部の溶接変形を低減でき、膨らみを防止できたが、溶融部径の増加とともに溶融部中央の厚みが減少することが起こった。そこで、20 サンプルを用い、溶融部中央の薄肉化を防止するために、裏面の最大溶融部径 1 mm の目標値を設定して適応制御 D を行った結果、裏面の溶融部径は、最大値、平均値および最小値がそれぞれ 1.14 mm, 0.93 mm および 0.81 mm が得られ、重ね部の膨らみ防止と薄肉化防止が図られ、ほぼ満足な結果が達成できることが確認された。

以上、第 1 報から本報告を通じて、アルミニウム合金の薄板の貫通溶接において、裏面の溶融部径の不足、貫通穴欠陥、下板における溶接接合部の細り、接合部重ね部の膨らみや中央部の窪みといった、実際の生産現場で起こりうる欠陥や課題について、Table 3 に示した適応制御法 A, B, C および D がそれぞれ有効であることが確認された。また、薄板のアルミニウム合金のレーザ溶接では、溶接パラメータの変更だけでも、溶接プロセスが大きく変わり、溶接プロセスに適したモニタリング信号の選択が必要であることが判明した。

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溶接部形状改善のための適応制御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) 接合部周辺の変形抑制のレーザスポット溶接の場合、
①溶接変形を低減するために、-2 mm 焦点はずし位

置にサンプルを設置し、レーザピークパワー 1.2 kW として貫通溶接を実施した結果、接合部周辺部の溶接変形を低減でき、重ね部の膨れを防止することができた。

- ②入熱が過剰に投入され、溶融部が大きいとき、その中央の厚みが減少することが確認できた。

2) モニタリング結果と溶接結果との相関では、

- ①本溶接条件下では、反射光は、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、溶接結果と明確な対応を読み取ることはできなかった。

- ②本溶接条件下では、熱放射光は、裏面の溶融部径と相関があり、表面の溶融部中央の窪みが小さいと考えられる所定の裏面の溶融池径をモニタできうる信号であることがわかった。

3) 適応制御の結果によると、

- ①溶融部径の増加とともに溶融部中央の厚みが低下する溶接部形状に対し、熱放射光に基づく照射時間の適応制御を行った結果、溶融部中央の厚みが確保でき、所定の溶融部径が 20 サンプルについて得られ、適応制御の有効性が示唆された。

4) アルミニウム合金薄板のマイクロスポット貫通溶接における適応制御法をまとめると、

- ①アルミニウム合金薄板の貫通溶接において、実際の生産現場で起こりうる、貫通穴を有する溶接欠陥、裏面の溶融部径の不足、下板における溶接接合部の細り、接合部重ね部の膨らみや中央部の窪みといった課題について、適応制御法が有効であることが示唆できた。

- ②アルミニウム合金薄板のレーザスポット重ね溶接では、溶接パラメータの変更だけでも、溶接プロセスが大きく変わり、溶接プロセスに適したモニタリング信号の選択が重要であ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) 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.
- 3) 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.
- 4) 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.