

学術論文

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1報）

—薄板のマイクロ貫通溶接のための適応制御法—

川人 洋介*, 片山 聖二*

Adaptive Control in Laser Micro-Spot Lap Welding of Aluminum Alloy (Report I)
- Adaptive Control for Fully-Penetrated Micro Welding of Thin Sheets -

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14日)

This paper describes the first investigation results of adaptive control for micro-spot lap welding of A3003 aluminum alloy sheets of 0.1 mm in thickness with a pulsed fundamental YAG laser beam. The objective of this research is to produce full-penetration spot welds without through-holes stably. Through investigation of 20 samples under the just focused conditions, 2 full-penetration welds with through-holes were produced. These in-process monitoring results showed that, in the case of the formation of welds with through-holes, the minimum value of the reflected light signal and the fluctuation level of heat radiation signal were lower and wider, respectively, than the ones in normal full-penetration welds. Therefore, the laser pulse peak power was controlled at 0.15 ms intervals in order to maintain the reflected light power and the heat radiation variation within the levels corresponding to the formation of normal full-penetration welds during welding for 28 ms period. Consequently, fully penetrated welds without through-holes were consistently produced in all 20 samples under the monitoring of reflected light and heat radiation from the molten pool and the adaptive control of a pulsed laser power.

Key words: in-process monitoring, adaptive control, heat radiation, reflected light, micro-spot lap welding, pulsed YAG laser, 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、レーザ光の高パワー密度・高エネルギー密度熱源である特長を活かし、大量高速生産の工程に適用されている。大量生産には、溶接プロセスの高生産性に加え、高信頼性も必要である。

高信頼性の実現には、レーザ溶接のプロセス現象を明らかにし、プロセスに適した手法や継手形状などを用いることが重要である。しかしながら、高パワー密度のレーザ溶接では、短時間に、気体、液体、固体、プラズマの4相が混在し、時にはスパッタやキーホールの変動などによりプロセス状態が不安定になることもある。また、実際のレーザ溶接では、材料の表面状態、治具とその抑えの程度、光学系の劣化によるレーザ光強度の低下など、複数の溶接パラメータが影響し合い、不具合が発生する場合があり、経験を積んだ熟年技術者でも原因究明が容易ではなく、プロセスの安定維持を難しくしている。特に、軽量化などの観点から使用されるアルミニウム合金薄板のレーザ溶接では、材料自身が、一般に溶接に使用される基本波 YAG レーザや炭酸ガスレーザの近赤外線領域に対して反射率が高く、さらに薄板であるため熱容量も小さいので、材料表面状態のわずかな違いなどで溶接結果に影響が出やすく、未溶接や穴欠陥などの溶接不良が発生しやすい。近年、モニタリング技術および適応制御技術に関する検討結果¹⁾⁻⁷⁾が報告されている。したがって、溶接欠陥や不良の解決方法の

一つとして、モニタリング信号に基づく適応制御法が有効であると考えられる。

本研究では、アルミニウム合金の薄板に基本波パルス YAG レーザを照射し、スポット重ね溶接を行うとともに、レーザ溶接中の反射光と熱放射光の計測およびレーザ照射部の表面溶融状態とレーザ誘起ブルームの高速画像観察も行った。反射光と熱放射光については、高速画像観察結果や溶接結果との相関を調査し、プロセスや溶接結果のモニタリングとしての有効性を評価した。さらに、レーザ照射中の個々の溶接部からの反射光と熱放射光に基づいて、レーザパワーを適応制御することを試み、穴欠陥が抑制できる可能性を明らかにした。

2. 供試材料および実験方法

供試材料はアルミニウム合金 A3003 であり、サイズは 30 × 5 mm で、厚さが 0.1 mm のものを用いた。

本実験で使用したレーザ装置は、ミヤチテクノス製 ML-2351A をベースに開発され、外部からの指令電圧を与えることにより、レーザ光のピークパワーを 5 kW 以下の範囲において 0.1 ms 間隔で制御できる平均パワー 50 W の適応制御型基本波 YAG レーザ装置である。加工方法としては、Fig. 1 に示すように、焦点距離 50 mm の集光レンズの焦点位置に 0.1 mm の薄板を重ね合わせて設置し、ファイバーで伝送した基本波 YAG レーザを大気中で照射し、貫通スポット溶接を試みた。また、レーザ照射中の反射光

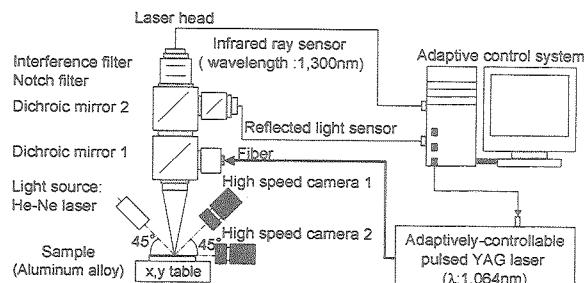


Fig. 1 Schematic experimental set-up of in-process monitoring and laser adaptive control system.

および熱放射光をモニタすると同時に、加工表面およびレーザ誘起ブルームの高速画像観察を行った。各モニタ信号を計測した方向は、反射光と熱放射光については、基本波 YAG レーザと同軸方向である。一方、加工表面の高速観察画像では 10 mW の He-Ne レーザを撮影用背光として水平から 45 度傾けて入射させ、正反射光を受光できる方向から、レーザ誘起ブルームについては水平方向から観察した。反射光を計測しているスポット径は ϕ 1 mm で、Si フォトダイオードで計測した。熱放射光の計測では、レーザ光と同軸方向から計測するため、nW オーダーの非常に微弱な熱放射光でも、正反射光と同軸方向で計測できるようするために、正反射光を選択的に OD8 以下に減衰させるノッチフィルターと半値幅 10 nm の 1.3 mm 干渉フィルターを透過させ、InGaAs フォトダイオードで計測を行った。なお、フォトセンサの増幅器は、遮断周波数 100 kHz で增幅率 6.8×10^5 のプリアンプを使用した。熱放射光を計測しているスポット径は ϕ 500 μm である。画像観察では、KODAK 製 EKTAPRO HS MOTION ANALYZER MODEL 4530 を用い 1 秒間に 9,000 コマの高速画像撮影を行った。

さらに、20 サンプルについて、貫通溶接と穴欠陥を有する場合のモニタリング結果を比較し、得られた特徴的な信号に基づき、穴欠陥を抑制することを目的として、レーザピークパワーの適応制御を 0.15 ms 間隔で行った。

3. 実験結果および考察

3.1 レーザスポット溶接結果

基本波 YAG レーザを用い、ピークパワー 2 kW、パルス幅 4 ms の矩形波を、その焦点位置に設置した 0.1 mm 厚の A3003 重ね薄板に対して照射し、貫通溶接を試みた。5 サンプルに対して行った結果、2 サンプルで貫通溶接部が得られ、1 サンプルで部分溶接部となり、残り 2 サンプルで穴欠陥が発生した。Fig. 2 に貫通溶接されたサンプルの表面と裏面および断面写真を示す。表面および裏面の平均溶融部径は約 0.62 mm および 0.25 mm で、裏面の溶融部は凹状を呈し、接合部径と裏面溶融部径がほぼ等しい。

したがって、重ね接合部径が材料厚さの約 2 倍と狭く、裏面溶融部が大きな凹状を呈することから、接合部径の拡大と裏面溶融部の凹形状の改善が必要である。そこで、レーザパワーを 5 % および 40 % 上げて貫通溶接を実施し

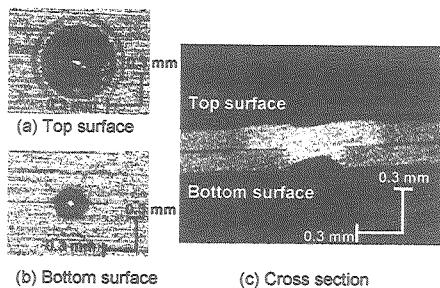


Fig. 2 Surfaces and cross section of laser spot lap weld in A3003 sheets made at 2 kW power and 4 ms width.

た。しかし、すべてサンプルで穴欠陥が発生し、裏面の溶融径は 0.24 mm 程度で拡大させることができなかった。

そこで、次に、穴欠陥の抑制を考慮し、ピークパワーを 0.9 kW に下げ、パルス時間を 28 ms にした矩形波を照射し、貫通溶接を実施した。その結果、20 サンプル中、18 サンプルについては重ね貫通溶接ができたが、残り 2 サンプルについては、貫通した穴が形成された。貫通溶接部と穴欠陥の断面形状の例を Fig. 3 に示す。貫通接合ができた表面と

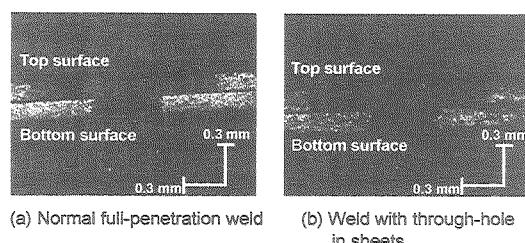


Fig. 3 Cross sections of normal full-penetration weld and weld with through-hole.

裏面の溶融部直径の平均値は、約 0.95 mm と 0.4 mm であった。溶接部の形状は、裏面に凹みが見られず、改善されていたが、接合部の径は裏面の溶融部径よりも小さかった。一方、上板と下板を貫通した穴欠陥には、下板に溶融部がほとんど見受けられなかった。これは、下板に溶融部が形成された後、レーザ光の過剰入熱により、融液が吹き飛ばされたためと考えられる。

以上の結果、ピークパワーを 0.9 kW まで下げた場合でも、貫通溶接が可能な場合と穴欠陥が発生する場合があることが判明した。

3.2 レーザマイクロ重ね溶接におけるインプロセスマニタリング

3.1 で貫通溶接を実施した 20 サンプルに対し、レーザ照射中の基本波 YAG レーザの出力波形ならびに溶融池からの熱放射光および反射光を計測し、さらに、溶接中の表面の溶融状態とレーザ誘起ブルームの高速度ビデオ観察も同時に行った。

3.2.1 貫通溶接時のインプロセスマニタリング結果

貫通溶接ができた場合の一例として、基本波 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、

および溶接中の表面の溶融状態とレーザ誘起プルームの高速度ビデオ観察結果を Fig. 4 に示す。グラフは、横軸は照

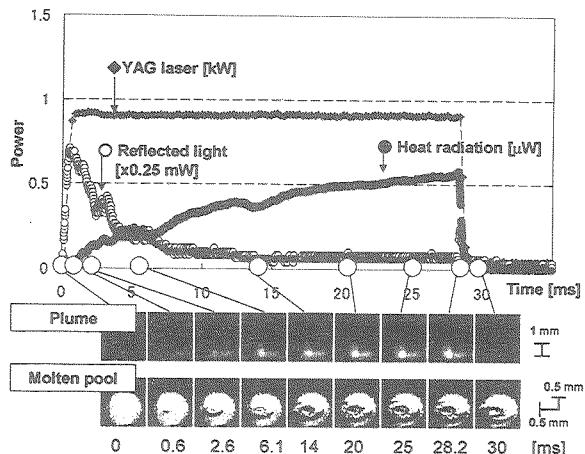


Fig. 4 Monitoring results of typical full-penetration weld of A3003 sheets, showing laser pulse shape, reflected light and heat radiation signals, and high-speed observation images of laser-induced plume and molten pool.

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。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加工表面の溶融状態の高速画像を示す。また、加工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、溶融部の大きさを示すスケールを採用した。高速度カメラによる観測から、溶融部は、照射開始 0.6 ms 後に形成が確認でき、照射が進むにつれて、成長していくことがわかった。また、レーザ誘起プルームは、溶融部生成後、照射開始から 6.1 ms に発生し、この時、溶融部の中央部に小さなくぼみが確認できた。その後、レーザ照射停止時までプルームは継続して発生しており、溶融部のくぼみが成長していく様子が確認できた。

反射光に関しては、溶融部が発生した 0.6 ms で、その強度が減少傾向に転じ、そのまま照射停止時まで減少し続けた。減少の原因については、初期の段階では、溶融表面による吸収と散乱(同軸上以外への反射)、その後は、溶融部の中央部のくぼみによる吸収・散乱(多重反射)も影響したと考えられる。一方、熱放射光は、溶融部の拡大とともに、照射停止時まで増加を続けた。

以上、本実験のレーザ溶接条件下では、表面の溶融部の拡大に伴い、反射光の信号強度は減少傾向にあり、熱放射光の信号強度は増加傾向にあることがわかった。

3.2.2 穴欠陥発生時のインプロセスモニタリング結果

レーザ照射中に上板と下板を貫通する穴欠陥が発生した 2 つのサンプルの計測および観察結果については同様な結果であった。その一例を Fig. 5 に示す。レーザ光の出力波形、熱放射光と反射光の計測結果、ならびに溶接時表面の溶融状態およびレーザ誘起プルームの高速度ビデオ観察結

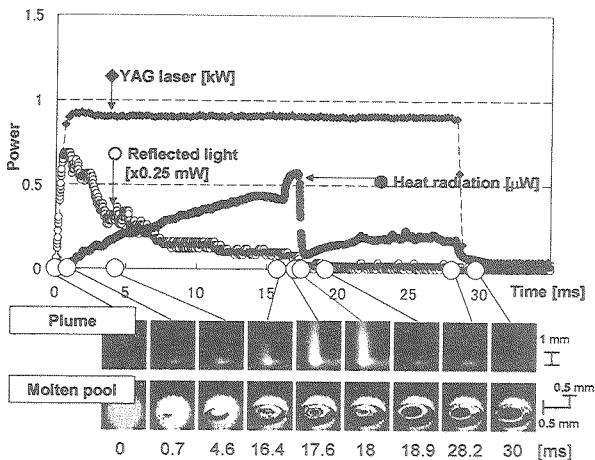


Fig. 5 Monitoring results in full-penetration A3003 weld with through-hole, showing laser pulse shape, reflected light and heat radiation signals, and high-speed observation images of laser-induced plume and molten pool.

果が Fig. 4 と同様にまとめて示されている。照射開始から 16.4 ms までは、表面の溶融状態とレーザ誘起プルームとともに、貫通溶接時と同様な傾向が観測されたが、17.6 ms ではレーザ誘起プルームの急激な増加が確認でき、18.9 ms において表面溶融部に穴の形成とプルームの消滅が確認された。

計測した反射光は、照射開始 0.7 ms 後の溶融部発生から、減少傾向に転じ、穴欠陥発生後にさらに強度が減少し、照射停止時の強度は、貫通溶接よりも低いことがわかった。その原因については、貫通穴からレーザ光が通り抜けた結果、反射光が減少したためであると考えられる。一方、熱放射光は、貫通穴が生成される前に、急激な強度の増減をしており、貫通穴生成後は、ゆっくりとした増加傾向を示した。この傾向の原因については、次のような溶接プロセスが考えられる。1) 焦点位置でのレーザ照射のため、くぼみが生成して過剰入熱が吸収された。2) 溶融部が増加して熱放射光が増大した。3) 溶融部はさらにくぼみやすくなり、レーザ光の吸収は増加した。4) 吸收されたレーザ光により大きなプルームが発生した。5) レーザ誘起プルームの反力で大きな貫通穴が発生した。6) 溶融部に貫通穴があいていると、貫通穴を通り抜けるレーザ光が増えてエネルギーの供給が低下し、反射光は検出されず、しかも表面方向の放射熱を発する部分の面積も減少し、熱放射光強度は急激に減少した。7) 穴周辺部に当っている。レーザ光により加熱されたため、放射光強度は徐々に増加した。

以上、貫通穴欠陥が形成する溶接の場合、反射光強度は、レーザ照射が停止する 28 ms 時点の強度が通常の貫通溶接時に比べ低く、そして、熱放射光強度は貫通穴が生成される前に急激に増減することがわかった。

3.2.3 溶接結果とモニタリング信号との比較

貫通溶接部と穴欠陥が形成された場合について、裏面の溶融部径と反射光または熱放射光変化との相関を調べた。

反射光の結果を Fig. 6 に示す。横軸は裏面の溶融部径と貫通穴径であり、縦軸はレーザ照射が停止する 28 ms 時の

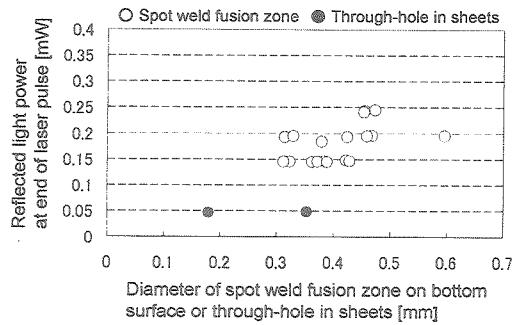


Fig. 6 Relationship between spot weld fusion zone diameter on bottom surface and reflected light.

反射光強度である。ただし、貫通穴が生じた場合、裏面の溶融部径はプロットしていない。28 ms 時の反射光については、貫通溶接ができたのは 0.14 mW 以上の強度であり、穴欠陥発生は 0.05 mW 以下となり、通常より 3 分の 1 程度低かった。この低い値は、貫通穴が存在するためと考えられる。

次に、熱放射光の結果を Fig. 7 に示す。横軸は裏面の溶

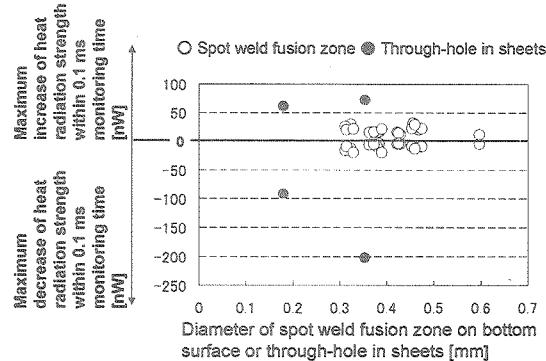


Fig. 7 Relationship between spot weld fusion zone diameter on bottom surface and heat radiation.

融部径と貫通穴径であり、縦軸は、各サンプルの照射開始から停止までの間に計測された熱放射光強度の 0.1 ms 間の最大の増加量および最大の減少量である。ただし、Fig. 6 と同様に貫通穴が生じた場合、裏面の溶融部径はプロットしていない。Fig. 7 に示すように、貫通溶接ができた 18 サンプルの熱放射光強度の変化量は、最大の増加量 32 nW と最大の減少量 -19 nW との間に存在することになる。これに對し、穴欠陥が発生した場合は、最大の増加量と最大の減少量が 61 nW 以上と -91 nW 以下と 2 倍以上変化が大きいことがわかった。これは、貫通穴が生成される前に、急激な強度の増減があるためである。

以上の結果から、反射光と熱放射光とも、通常の貫通溶接の場合と穴欠陥発生の場合を区別するのに有効なモニタリング信号であることがわかった。

3.3 薄板同士のレーザマイクロ重ね溶接における適応制御結果

本研究の適応制御法としては、20 サンプルに対し、穴欠陥の発生を防止するために、実際に貫通溶接ができた範囲

に反射光強度と熱放射光の増減変動を抑えることを目標として、反射光強度を 0.14 mW 以上に保持し、0.1 ms における熱放射光強度の増加量と減少量を、3.2.3 で示した最大の増加量と減少量の 3 分の 1 である 11 nW 以下と -6 nW 以上にする適応制御を実施した。また、貫通溶接ができた場合での熱放射光強度の最大の増加量および最大の減少量の 3 分の 1 を熱放射光の閾値に設定したのは、溶接状態を貫通溶接ができたレベルに保つことで、穴欠陥の発生を事前に抑えることを狙い設定した。そのときのフローチャートを Fig. 8 に示す。照射時間を 28 ms に固定して、0.15 ms 毎に

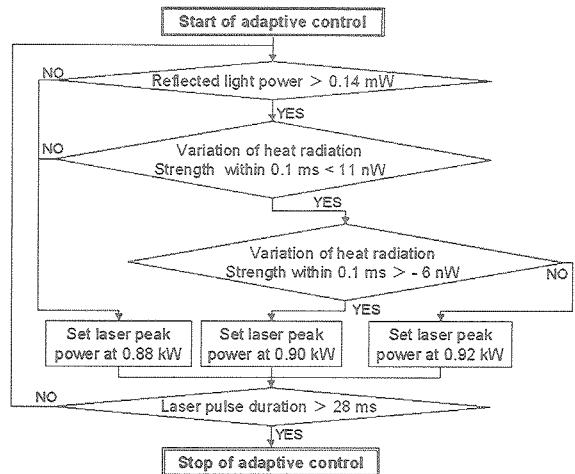


Fig. 8 Flow chart of adaptive control based upon reflected light and heat radiation signals.

反射光強度と熱放射光強度をモニタし、最初に、反射光に基づく適応制御として、0.14 mW 以下になると、溶融池のくぼみの成長を抑制するために、レーザピークパワーを 2 % 下げて 0.88 kW に変更を行った。次に、熱放射光の適応制御として、反射光強度が 0.14 mW より大きい場合に限って、0.1 ms における熱放射強度の増加量が 11 nW を上回ると、レーザピークパワーを 2 % 下げた 0.88 kW に変更し、熱放射強度の減少量が -6 nW を下回ると、レーザピークパワーを 2 % 上げた 0.92 kW に変更した。

適応制御結果の一例を Fig. 4 と同様なデータで Fig. 9 に示す。高速度カメラによる観測から、溶融部は、照射開始 0.6 ms 後に形成が確認でき、照射が進むにつれて、成長していくことがわかった。また、レーザ誘起ブルームは、溶融部生成後、照射開始から 5.9 ms 後には確認でき、この時、溶融部の中央部に小さなくぼみが確認できた。その後、レーザ照射停止時までブルームは継続して発生しており、溶融部のくぼみが成長していく様子が確認できた。反射光に関しては、溶融部が発生した 0.6 ms で、その強度が減少傾向に転じ、そのまま照射停止時まで減少し続けた。一方、熱放射光は、溶融部の拡大とともに、照射停止時まで増加を続けた。これは、3.2.1 で示した貫通溶接ができた場合の結果と同様な傾向であった。しかし、レーザ波形については、適応制御の結果、変化させられたところが見受けられた。最もレーザ波形が変化させていた 2.4 ms から 3.8 ms を Fig. 10 に示す。横軸は照射開始を基準とした時間で、

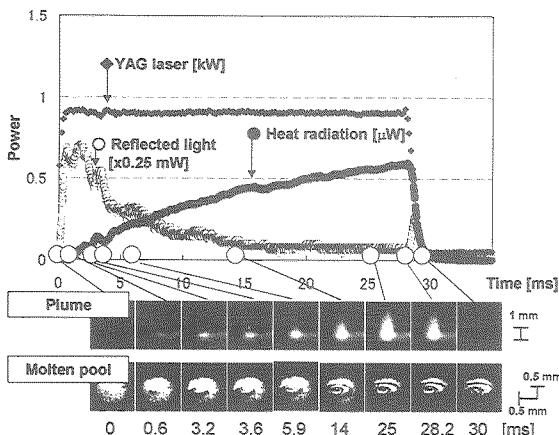


Fig. 9 Monitoring results of typical full-penetration weld of A3003 sheets, showing laser pulse shape, reflected light and heat radiation signals, and high-speed observation images of plume and molten pool under adaptive control condition.

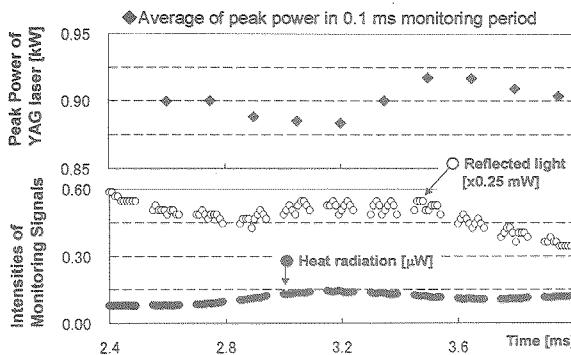


Fig. 10 Typical monitoring results under adaptive control during short period, showing laser peak power, reflected light and heat radiation signals.

縦軸は、レーザピークパワー、反射光および熱放射光の強度である。熱放射光強度が 6 nW を上回った、あるいは、-11 nW を下回った場合、増減を打ち消すように、適応制御システムからレーザピークパワーが指令され、その結果、熱放射の変動と逆位相でレーザピークパワーが変動しているのが確認できた。一方、反射光に対する適応制御は、実験した 20 サンプルでは、反射光強度が 0.14 mW 以上を保ち続けたので、動作しなかった。

次に、20 サンプルに対して適応制御を行った場合の反射光のインプロセスマニタリング結果を Fig. 11 に示す。Fig. 6

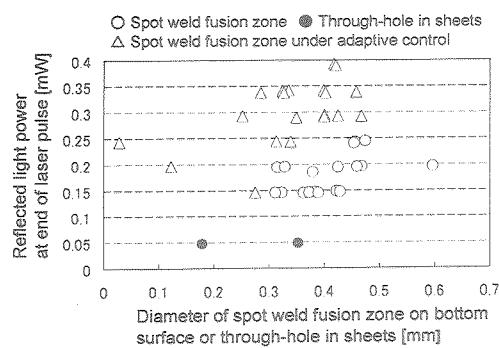


Fig. 11 Relationship between spot weld fusion zone diameter on bottom surface and reflected light under adaptive control condition.

と同様な表示である。穴欠陥は発生せず、反射光強度はすべてのサンプルで 0.14 mW 以上であった。

一方、適応制御を行った場合の熱放射光の結果を、Fig. 12

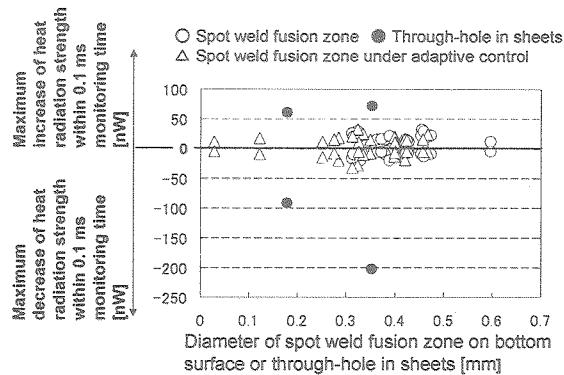


Fig. 12 Relationship between spot weld fusion zone diameter on back surface and heat radiation under adaptive control condition.

に示す。表示形式は、Fig. 7 と同様である。3.3.3 で示した貫通溶接ができた場合の最大の増加量 32 nW および最大の減少量 -19 nW に対し、本適応制御法を行った場合では、32 nW と -31 nW であった。つまり、熱放射光の閾値が、熱放射光の増加に対しては有効であったが、減少では 2 倍近く減少する結果となった。しかし、Fig. 12 が示すように、穴欠陥が発生した場合は -91 nW 以上減少しており、本適応制御法はその 3 分の 1 程度に減少量を抑え、貫通溶接ができたレベルに溶接状態を保ち、穴欠陥を発生させなかった。したがって、適応制御の熱放射の閾値は、有効であると考えられる。

一方、表面および裏面の平均溶融径は、約 1.00 mm および 0.37 mm であり、Fig. 11 および Fig. 12 に示すように裏面の溶融径は依然小さく、30 μm 程度の溶融径も存在した。これは、本適応制御法により、溶接へのレーザパワーの投入が抑えられた結果であると考えられる。

そこで、照射時間を 35.5 ms と拡大して、同様な適応制御実験を行った。適応制御の動作は Fig. 9 および Fig. 10 に示した例と同様であった。

照射時間 28 ms および 35.5 ms の適用制御で得られた溶接部の断面形状を Fig. 13 に示す。さらに、通常の場合と 28 ms および 35.5 ms での適応制御で得られた裏面の溶融部径を比較して Fig. 14 に示す。低パワーで長時間照射した適

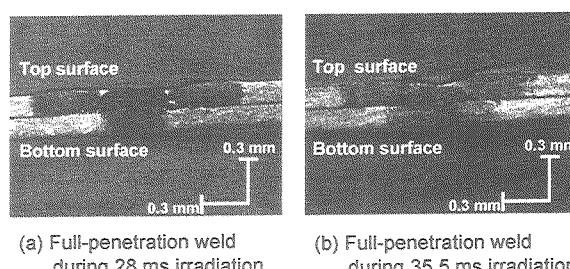


Fig. 13 Cross sections of full-penetration welds produced under monitoring and adaptive control.

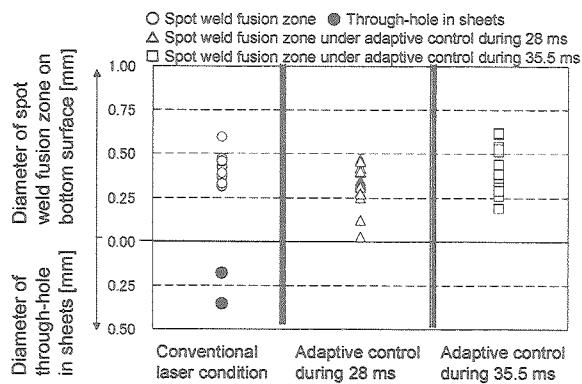


Fig. 14 Diameter of spot weld fusion zone on bottom surface made under adaptive control for hole repair in addition to data under conventional conditions.

応制御の場合、接合断面からわかるように、Fig. 2 で見られた裏面溶融部の凹みは見られなかった。また、照射時間 35.5 ms の適応制御の方が、照射時間 28 ms の適応制御よりも接合部径が増加しているのが確認された。しかし、接合部の径は裏面の溶融部径よりも小さく、注意が必要である。

Fig. 14 から明らかなように、照射時間 35.5 ms の適応制御においてもすべてのサンプルにおいて穴欠陥は発生しなかった。また、35.5 ms の適応制御では、28 ms の適応制御に比べ、裏面の平均溶融径は、0.37 mm から 0.42 mm に増加しており、最小の溶融部径も 0.03 mm から 0.2 mm 程度になり、大幅に改善した。そして、接合部径も、板厚の 0.1 mm より広いものを得ることができた。

以上の結果より、本研究で検討した反射光と熱放射光に基づく適応制御の照射時間 28 ms と 35.5 ms のそれぞれ 20 サンプルにおいて、穴欠陥の発生は確認できなかった。したがって、本適応制御によって、穴欠陥を抑制できる可能性を示唆することができた。

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インプロセスマ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 適応制御を行わない通常のレーザ溶接の場合、同一の溶接条件では、貫通溶接が可能な場合と穴欠陥が発生する場合があることが判明した。
- 2) インプロセスマニタリングの結果
 - ① 本レーザ溶接条件下では、表面の溶融部の拡大に伴い、反射光強度は減少傾向にあり、熱放射光強度は増加傾向にあることがわかった。

② 上板と下板を貫通する穴が形成された場合、反射光強度はレーザ照射停止時において通常の貫通溶接時に比べ低く、熱放射光強度は貫通穴が生成される前に、急激な増減変動をするのがわかった。

③ 反射光と熱放射光とも、通常の貫通溶接の場合と穴欠陥発生の場合を区別するのに有効なインプロセスマニタリング信号であることがわかった。

3) 適応制御結果

① 照射時間 28 ms および 35.5 ms の熱放射の急激な増減変動を抑える適応制御において、すべての 20 サンプルで穴欠陥は発生しなかった。さらに、35.5 ms の場合、28 ms に比べ、裏面の平均溶融径は、0.37 mm から 0.42 mm に増加し、最小の溶融部径も 0.03 mm から 0.2 mm 程度に大幅に改善した。

② レーザ照射中に熱放射光強度の急激な増減変動を抑えることは、穴欠陥を抑制できる可能性を示唆することができ、熱放射光は穴欠陥を抑制する適応制御のためのモニタリング信号として有効であることがわかった。

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) Claus, B. and F.O. Olsen: Laser Welding Closed-Loop Power Control, J. Laser Applications, 15-1, (2003), 19.