レーザ溶接プロセス

Laser Welding Process

川人 洋介*
Yousuke KAWAHITO

Key Words: Laser Welding, Keyhole, X Ray, Phase Contrast, MPS, Blue Laser, Solid-Phase Welding

1. 緒言

溶接は産業の発展、科学技術の振興に重要な基幹技術であり、科学の進歩に即応して発展させる必要がある。大阪大学 接合科学研究所 レーザプロセス学分野では、レーザ科学と生産技術との高度な融合を目指し、レーザを活用した接合、切断、表面改質、分離・除去等の材料加工法に関する基礎研究を行っている。特に、溶接・接合現象について光学的観察法およびX線透視法等による可視化を行い、溶接・接合メカニズム解明やモニタリング知能化等の研究に焦点を取り組んでいる。さらに、レーザの効率的な熱的な利用だけでなく、光と物質との相互作用に基づく物理化学的な作用を活用し、樹脂金属直接接合等の革新的な新プロセス創出やその実用化に取り組み、社会貢献している。

本稿では、最近の研究トピックスとして、1) 大型放射光施設によるレーザ溶接時のX線観察、2) 数値計算法による溶接現象の解明、3) 青色レーザ熱源の開発、4) ビードレス接合の研究成果について挙げる。

2. レーザ溶接プロセスにおける最近の研究トピックス

2.1 大型放射光施設によるレーザ溶接時のX線観察¹⁾

レーザは高パワー密度が特徴であり、近年、10 MW/mm²級の超高パワー密度が実現できるシングルモードファイバーレーザが開発された。シングルモードファイバーレーザによって生成されるキーホールは0.1 mm以下と細く、X線が物質を透過する際に吸収されることに起因する濃淡（コントラスト）により画像を形成する吸収コントラストを利用して、密度差が僅かな固液界面を見ることが難しい。そこで、X線が電磁波であることに注目し、物体を透過すると屈折し、位相差が生じ、干渉が発生することに基づく位相コントラスト（Fig.1 参照）を用いて微細領域の観察を行った。具体的には、大型放射光施設 Spring8 を用いて、位相コントラストを実現し、アルミニウム合金 A6061 の500 W 出力シングルモードファイバーレーザを用いたメル

Fig.1 Principle of X-ray phase contrast.

トラン溶接時のキーホール挙動と欠陥生成の観察を実施した。

供試材は、板厚 3 mm¹ のアルミニウム合金 A6061 である。実験装置の概略図を Fig.2 に示す。本研究で利用したレーザ発振器は、最大出力 500 W のシングルモードファイバーレーザで、波長が 1,070 nm で、BPP (Beam Parameter Product) が 1.04 mm*mrad と小さく、焦点距離 190 mm の集光レンズにより集光される。焦点位置でのスポット径は 170 μm 程度となる。実験は加工ヘッドを前進角に 10 度傾けた状態で、レーザパワー 500 W、溶接速度 17 mm/s、焦点はずし -1 mm の条件下で実験を行った。溶接時に使用したファンは、ハネ径 200 mm で、風量が 23 m³/min である。ファンの口の中心がレーザの照射点と同じ高さとなるように調整し、レーザの進行方向に対して照射点から 600 mm だけ離れた場所にファン本体を設置した。さらに、溶接時の溶融池内部におけるキーホール挙動を調査するため、大型放射光施設 Spring8 を用いた X 線位相差法により、1000

* 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)
Joining and welding research Institute, Osaka University (11-1 Mihogaoka, Ibaraki, Osaka, 567-0047 Japan)

frames/s で観察を行った。

従来観察してきた X 線吸収差法では、固液界面（凝固界面）や気液界面（キーホール壁面）の詳細に観察することはできなかったが、X 線干渉によって起こる位相差を画像化する X 線位相差法を利用することにより、キーホールの界面をシャープに撮影することができた。得られた X 線の透過結果を Fig.3 に示す。安定状態にあるキーホールの中心付近が大きく膨らんだのち、膨張部分から生成された気泡がキーホールから離れ、凝固界面に付着していく様子が観察できる。付着した気泡は、溶接が進むにつれて金属部にポロシティを形成し、時間経過とともにポロシティが伸びていく様子が確認できた。このとき界面を沿って小さなバブルが上部に移動していき、界面に付着している気泡にそれが吸収されていくことによって、気泡およびポロシティが成長していく様子が観測できた。

このように、キーホールから気泡が生成する様子まで観察できるだけでなく、明瞭な固液界面により熔融池がはっきり観察できるのは、吸収コントラストでは不可能で位相コントラストで初めて実現できた新しい研究成果である。

Fig.2 Schematic drawing of experimental set up.

Fig.3 X-ray transmission images of keyhole and molten pool.

2.2 数値計算法による溶接現象の解明²⁾

レーザ溶接はキーホールという特殊な熔融機構を有する。これまでレーザ吸収、熱伝導、蒸発、熔融および相変化等のレーザ溶接における物理現象を考慮した数値計算によって熱的および流体力学的効果が解明されてきた³⁾⁷⁾。しかし、明らかにされたレーザ溶接現象は限定的であり、溶接品質の観点では更なる現象解明が必要である。本数値計算手法（粒子法）では、解析対象を領域分割することなく、計算対象に均等に配置した点の情報に基づき、連続体の力学計算が可能であり、キーホールのような大変化を伴う自由表面の計算に適している。本数値計算では、供試材の金属を、縦横高さ方向に等間隔に三次元的に配置した粒子群としてモデルとした。空間に配置された粒子は、速度、温度などの物理量の情報を持ち、流れに従って移動する。また、本数値計算で使用した粒子法は、非圧縮流れの MPS (moving particle semi-implicit) 法⁸⁾を基にレーザ溶接用に独自に開発した。

本数値計算結果と X 線その場観察による実験観測結果との比較について述べる。6 kW レーザ出力、溶接速度 100 mm/s の X 線透視観察結果を Fig.4 に示す。なお、0 ms はレーザ照射開始時間である。照射開始 0.5 ms 後にキーホール先端は 1.5 mm に達し、2 ms 後までは 1.7 m/s の速度で成長し、3 ms 以降は大幅に減速して 0.01 m/s の速度で安定することが明らかになった。

次に、同溶接条件における粒子法による数値計算結果の中央断面の温度分布を Fig.5 に示す。照射開始 0.5 ms 後に

Time	0 ms	0.5 ms	2 ms
X-ray pictures of keyhole			
Keyhole depth	0 mm	1.5 mm	3.3 mm
Time	3 ms	10 ms	20 ms
X-ray pictures of keyhole			
Keyhole depth	3.8 mm	4.2 mm	4 mm

Fig.4 X-ray transmission observation results of keyhole formation at 6 kW power and 100 mm/s speed.

Fig.5 MPS calculated results of keyhole formation at 6 kW power and 100 mm/s speed.

キーホール先端は 1.4 mm に達し、2 ms 後までは 1.2 m/s の速度で成長し、3 ms 以降は 1 桁小さい 0.09 m/s の速度で成長する結果が得られた。X 線透視観察結果と比較し、キーホール形成過程が数値計算で再現されていることが確認された。

本数値計算を用いて、X 線観察からでは定量化できないキーホール形成の重要な因子である蒸発速度を算出した。レーザ照射時間とキーホール深さ 1 mm 当たりの蒸発速度の関係を Fig.6 に示す。供試材表面から 1 mm 深さのキーホール（以下、区間 (1) と称す）では、0.2 ms で蒸発速度は最大 0.63 g/s であり、時間とともに 0.05 g/s 程度に 1 桁減衰した。供試材表面から 2 mm 深さの区間 (2) では、1 ms で最大 0.25 g/s であり、時間とともに 0.06 g/s 程度に減衰した。表面から深さ 3 mm 以降も同様な傾向で、区間 (3) では、最大 0.26 g/s から 0.07 g/s 程度に減衰し、区間 (4) では、最大 0.18 g/s から 0.08 g/s 程度に減衰した。

区間 (1) から (4) までにおいて、キーホール先端が次の区間に侵入するときに、蒸発速度が最大値をとった。また、キーホールの成長に伴い、各区間での最大蒸発速度が 0.63 g/s から 0.18 g/s に 1/4 程度に減少していることがわかった。しかしながら、キーホールの成長が止まった区間 (5) では、蒸発量は明瞭なピークをとらなかった。20 ms での各区間での蒸発速度は、0.05 ~ 0.08 g/s の値で、これらはキーホール維持に必要な蒸発量と推察される。

以上の数値計算結果から、これまで明らかにできなかった

Fig.6 MPS calculated results of vaporization rate at 6 kW power and 100 mm/s speed.

た蒸発量とキーホールとの定量的な関係が示唆され、より詳細なレーザ溶接現象を理解する知見が得られた。

2.3 青色レーザ熱源の開発⁹⁾

レーザ溶接・接合の熱源としては高出力と高パワー密度の両立が必要であり、既存レーザの高度な利用と同時に新規レーザ熱源開発は重要である。レーザ熱源の課題としては、溶接・接合用のレーザ波長が近赤外域に限定され、金属へのエネルギー吸収率が低いことおよび高額な初期投資が産業界への普及の妨げとなっていることが挙げられる。

これらの課題解決の為、レーザ発振器と異なる進歩を遂げ、近年高出力化が進み、安価で可視光（波長：455 nm）である大型プロジェクターの光源（LD 素子）に注目し、複数の LD 素子を用いた青色レーザを独自設計し、新しい光源とする開発を開始している。青色レーザは、4 W 出力 LD 素子を 8 個束ねた LD バンクを 8 個集め、計 64 個の LD 素子を用いて光学設計し、最大出力 250 W の高出力青色レーザを作製した。（Fig.7 参照）作製した青色レーザを用いて各種金属の吸収特性をカロリメトリック法で検証した。

供試材は、銅（板厚 1 mm）、SUS304（板厚 1 mm）、A1050（板厚 3 mm）、SUS420（板厚 3 mm）である。本実験条件は、レーザ出力 250 W で溶接速度 1 mm/s であり、試料裏面に直接冷却用の水が接し、効率的に水が試料の熱を奪い取るように設計されているアクリル製の吸収測定用ジグに試料が固定されている。ジグの入口と出口に Pt100 型の白金測温抵抗体を設置し水温を計測する構成となっている。本カロリメトリック法では、レーザエネルギーが材料に吸収され、最終的に熱になったものを水で写し取り、総熱量を求め、入射レーザのエネルギーで割った値から吸収率を算出した。なお、測定精度は、ニクロム線による 250 W の発熱により校正しており、校正値は 1.03 % である。銅、SUS304 および A1050 で計測された吸収率は、それぞれ 65 %、75

Fig.7 Focusing property and power measurement of blue laser beam.

% および 25 % であった。

特に SUS304 については、ファイバーレーザ（波長 1070 nm）を用いてレーザ出力 4 kW、溶接速度 50 mm/s の吸収率が 74 % であることが報告⁷⁾されており、キーホールが形成された場合と同様な吸収率が青色レーザで実現できることがわかった。また、銅のような難加工材料に有効であり、キーホール型ではない溶融溶接・接合には効率よくレーザエネルギーを投入できることが判明した。

2.4 ビードレス接合¹⁰⁾

平面精度、接合圧力および加熱条件により、接合面に新生面を押し出し、金属間結合を生じる圧接や拡散接合の固相接合機構が知られている¹¹⁾。一方、溶接は部材を溶融させる接合機構であり、材料の面粗さやギャップにある程度の裕度を持つことができる有用な接合方法である。

高出力のレーザ溶接はハイパワー密度と同時に、入熱量を簡単に制御できる自由度を併せ持つ。固相接合で要求される平面精度を有する部材同士の接合に、レーザ加熱により、溶融量を最小限にして接合できる可能性を検討した。

供試材は SPCC でサイズは 30 × 120 × 1 mm である。供試材の 1 mm の面に対して様々な面粗さで仕上げを施した。供試材の仕上げ面を突き合わせ、約 40 MPa の面圧で押圧し治具に固定した。波長 1030 nm のディスクレーザ発振器を用いて焦点はずし距離を 20 mm（スポット径 φ 5 mm）、移動速度を 17 mm/s、レーザ出力を 500 ～ 1000 W に変化させて突合せ部に対しレーザ照射を行った。

実験結果を Table 1 に示す。○が示す条件が供試材表面に溶接ビードが形成されておらず、未接合でもないビードレスで接合された条件である。特に Ra 0.048 面及び Ra 0.183 面の供試材へ、レーザ出力 900 W で照射して得られた接合継手は、引張試験において接合面で破断せず、母材の引張強度 360 MPa と同等以上の強度を有することが確認された。また、180° 曲げ試験においても接合面で破断しなかった。レーザ出力 1000 W 以上の場合、いずれの面粗さでも、溶融ビードが外観に形成された。Fig.8 にレーザ出力 900 W ビードレス接合部の断面写真を示す。拡散接合に類似した

Table 1 Relationship between surface roughness and beadless weld.

End face processing	Surface roughness, Ra [mm]	Laser power [W]					
		500	600	700	800	900	1000
Superroll	0.048 ▽▽▽▽	×	○	○	○	○	W
	0.183 ▽▽▽▽	×	○	○	○	○	W
Machining	0.492 ▽▽▽▽	×	○	○	○	○	W
	1.539 ▽▽▽▽	-	×	○	○	○	W
	12.53 ▽▽▽▽	-	×	○	○	○	W
EDM	0.275 ▽▽▽▽	-	×	×	×	○	W

EDM: Electrical discharge machining, Superroll: a mirror finish with roller burnishing tool

×: Non-bonded, W: Weld, ○: Beadless weld, -: Not complied with

Fig.8 Cross section photos (Laser power: 900 W, Ra: 0.048).

界面の乱れが観察され、微細化した結晶が接合界面を跨いで存在した。このことから、ビードレス接合は溶融せずに、再結晶によるレーザを用いた固体接合である可能性が新たに判明した。今後は、接合機構の解明とともに異材接合への応用も検討していく。

3. 結言

これまで述べたようにレーザ溶接に関してこれまでに明らかにされていなかった知見や新しい現象が見つかっており、研究としての面白さや新たな局面が見えてきた。これらの基礎研究を応用につなげイノベーションを起こし、ものづくりへ貢献したい。その為に、これまで行ってきた溶接・接合現象の解明について継続的に深い理解を探索し、数値計算等の別手法と組合せ、総合的に溶接・接合メカニズム解明に取り組む。また、レーザの熱的な利用だけでなく、光と物質との相互作用に基づく物理化学的な作用を活用し、極限環境の中でレーザ溶接（例えば宇宙レーザ溶接）等の革新的な新プロセス創出やその実用化にも取り組んでいく。

引用文献

- 1) 中田光紀、片山聖二、川人洋介、近藤勝義、菖蒲敬久、今井久志、川上博士、富沢雅美、中島裕也、中村浩、多田弘幸、菖蒲敬久：

- 溶接学会全国大会講演概要第96集 (2015) 160-161.
- 2) 千村伊作、川人洋介、村川英一：レーザ加工学会誌、**23**-2 (2016) 45-52.
 - 3) A. Otto, H. Koch, K-H. Leitz and M. Schmidt: Physics Procedia, **12** (2011) 11-20.
 - 4) H. Ki, P. S. Mohanty and J. Mazumder: Journal of Laser Applications, **14**-1 (2002) 39-45.
 - 5) J.-H. Cho and S.-J. Na: J. Phys. D: Appl. Phys., **39** (2006) 5372.
 - 6) V. Semak, W. D. Bragg, B. Damkroger and S. Kempka: J. Phys. D: Appl. Phys. **32**-15 (1999) L61-L64.
 - 7) 川人洋介、松本直幸、阿部洋平、片山聖二：溶接学会論文集、**27**-3 (2009) 183-188.
 - 8) S. Koshizuka, H. Tamako and Y. Oka: Computational Fluid Dynamics J, **4** (1995) 29-46.
 - 9) 吉田涼平、氷見太、川人洋介、中島裕也、塩川邦夫：溶接学会全国大会講演概要第99集 (2016) 78-79.
 - 10) 氷見太、川人洋介、井上裕滋、西本浩司、西野精一、川上博士：溶接学会全国大会講演概要第99集 (2016) 66-67.
 - 11) 中村保：素形材、**52**-7 (2011) 8-14.