

溶接条件が半熔融帯流動特性に及ぼす影響の定量評価 Quantitative Evaluation of the Effect on Flow Characteristics in Mushy Zone by Welding Conditions

山田 知典^a, 山下 晋^a, 菖蒲 敬久^a, 西村 昭彦^a, 小川 剛充^a, 杉原 健太^a, 社本 英泰^b
Tomonori Yamada^a, Susumu Yamashita^a, Takahisa Shobu^a, Akihiko Nishimura^a, Takemitsu Ogawa^a,
Kenta Sugihara^a, Hideyasu Shamoto^b

^a(独)日本原子力研究開発機構, ^b(株)レーザックス

^aJapan Atomic Energy Agency, ^bLASER X CO., LTD.

残留応力制御・評価に向けて非常に重要な溶接時の温度過渡挙動の定量評価のため、大型放射光施設(SPring-8)からの放射光高輝度単色 X 線を利用し、レーザー照射時に形成される熔融池内挙動を吸収コントラストイメージング法にてその場観察を行なった。時間分解能の向上により、熔融池内部の主流と、熔融・凝固過程における固液界面の時間変化をより詳細に観察できた。

キーワード： アルミニウム合金、吸収コントラストイメージング法、流動場その場観察、ファイバーレーザー溶接

背景と研究目的：

原子力施設を始め一般産業プラントに展開可能なレーザー溶接技術の標準化を進めており、残留応力などに影響される機械的特性を溶接中の複合物理現象と関連付け、現象論的且つ定量的に評価することで、構造健全性を評価できる方法論の確立を目指している。

前期課題(2010B1833)では、溶接時の温度場が残留応力などに非常に影響を与えることから、温度場に関連すると考えられる熔融池内現象の把握を試みた。その結果、局所的ではあるがトレーサー粒子の軌跡より、熔融池内の流動を観察できた。さらに、従来の観察では不鮮明であった固液界面の時間変化との同時観察にも成功した。

今期は、溶接時の温度過渡挙動の定量評価に向けて、一定の溶接ビード形状が得られる条件下での流動場の観察と、冷却過程の固液界面の挙動から半熔融帯(Mushy zone)の特性評価を試みた。

実験：

実験は SPring-8 の偏向電磁石のビームライン BL19B2 で行なった。図 1 に示すように試験片(1^t×30^w×50^lmm)であるアルミニウム合金の上部よりレーザーを集光照射させ、約 45 μm のトレーサー粒子(炭化タンタル)の挙動を吸収コントラストイメージング法により計測し、熔融池内流動場の可視化を行なった。使用したレーザーは、空冷型連続発振のイッテルビウムファイバーレーザー(IPG YLR-300-AC、波長 1070nm、ビームクオリティ(M²)1.03)である。試験片は水冷銅板上に固定し、レーザー照射位置を移動させることで、レーザー照射部後方で熔融池が凝固する様子も観察可能にした。X 線のエネルギーは 30keV である。検出器には CCD カメラを使用し、シンチレータを透過した X 線を約 0.015 秒の時間分解能で観察した。観察範囲は 24mm×5.1mm である。

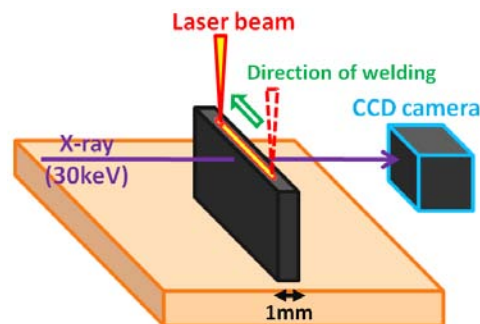


図 1. 流動場その場観察の模式図

結果および考察：

図2にレーザー光を固定して10秒間照射した際の溶融池内過渡流動挙動を示す。図中の時間は、レーザー照射開始($t=0\text{ms}$)からの経過時間を示している。溶融池内のトレーサー粒子はレーザー照射部から溶融池内に入り込むと、図2(a)~(c)に示すように固液界面に向けて移動したあと、界面に沿って溶融池底に移動した。図2(c)に示した粒子の軌跡より流速を求めると下降流は 19.5mm/s であった。さらに図2(d)~(f)に示すように溶融池底からレーザー照射部に向けて上昇するトレーサー粒子も観察された。この場合の流速は約 9.0mm/s であった[1]。

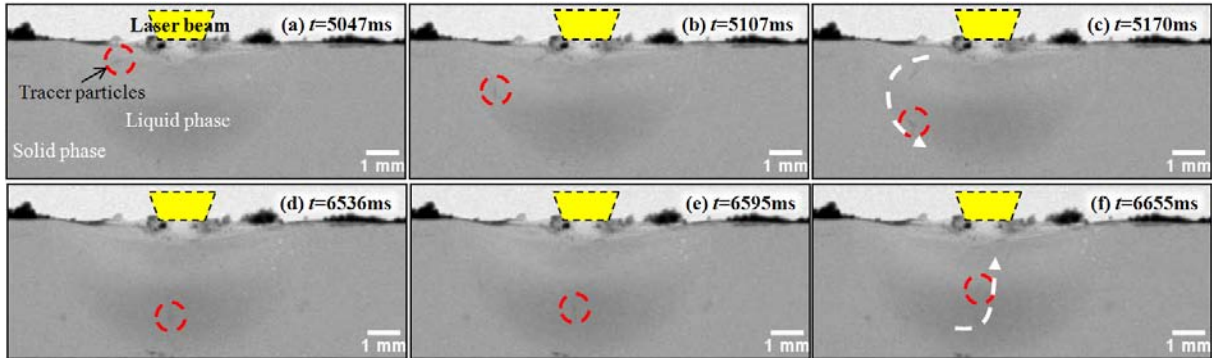


図2. 溶融池内部の流動場：(a)~(c)下降流、(d)~(f)上昇流

溶融池内観察では密度のコントラスト差より固液界面を確認する事が出来た。図3に図2より求めた溶融池形状(半径方向および深さ方向)の時間変化を示す。加熱過程では溶融池サイズは時間とともに拡大し、レーザー照射開始から5秒経過で約 3.5mm 、10秒経過で約 4.5mm となった。また、冷却は溶融池の表面積に依存するため、非常に短時間で終了した。この溶融池形状の時間変化から相変化速度を求め図4に示す。加熱過程では、レーザー照射直後が最も早く、徐々に遅くなり、冷却過程では凝固開始が最も遅く徐々に加速した。最大速度を比較すると冷却過程が約10倍速い事が確認できた。従って、溶融池内部で図2で示した流動が継続的に起こっていたとしても、凝固が一瞬で完了してしまうため、冷却過程では流動場が温度場に与える影響は少ないと考えられる[1]。

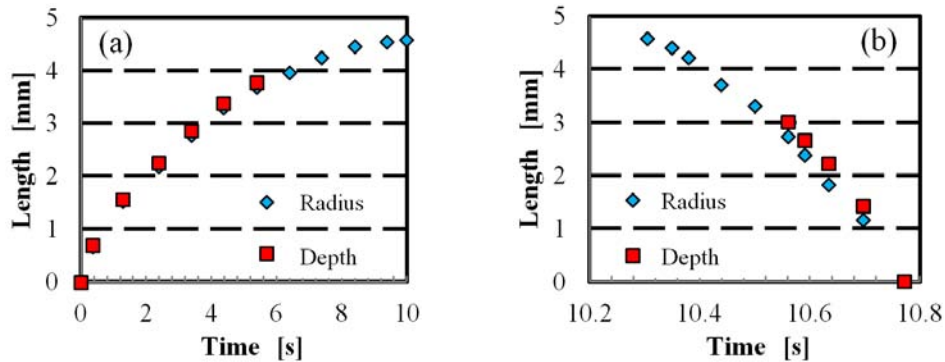


図3. 溶融池形状の時間変化：(a)加熱過程、(b)冷却過程

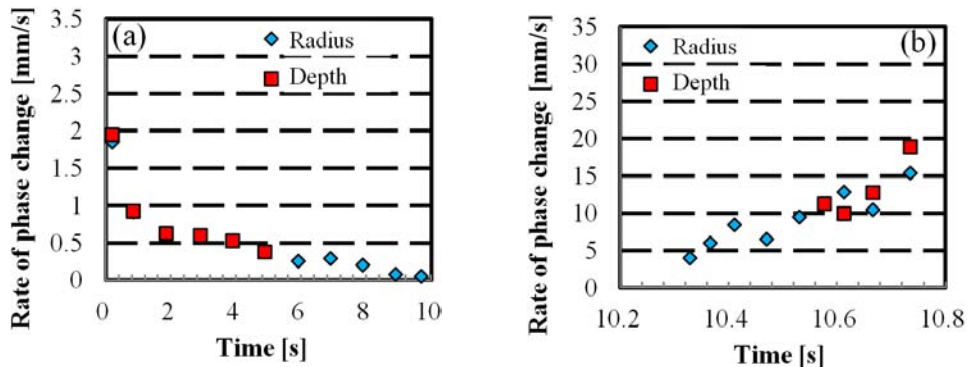


図4. 溶融池形状の時間変化より求めた相変化速度：(a)加熱過程、(b)冷却過程

図 5 に 1mm/s でレーザー光を走査させた際に形成した溶融池を示す。図中の時間は(a)からの経過時間である。溶融池形状は半球であり、溶接中はその形状が保たれていた。この場合、溶融池後方の固液界面より気泡が発生する様子が観察された。気泡の多くは、凝固壁でトラップされ(図 5(b))、溶接部に閉じ込められ、ポロシティ(溶接欠陥)として残留した(図 5(d))。図中の赤い矢印は、レーザー照射部の前方の流れを、青い矢印は後方の流れを示す。図 5(e)に示すように後方の流れに乗ったトレーサー粒子は途中気泡にトラップされ完全には追従出来なかったが、図 2 に示したレーザー光を固定して照射した場合と同様に、照射部を中心とした渦構造が形成されていた。この渦は前後で同様ではなく、前方が小さく、後方が大きな渦を描いていることが確認できた。この場合の凝固速度は溶接速度と等しく、溶接中は *Mushy zone* の特性も大きく変化しないと考えられる。また、流速と比較して凝固速度が遅いため、流動場が温度場に与える影響は大きいと考えられる。

以上、大型放射光施設(SPring-8)からの放射光高輝度単色 X 線を利用し、レーザー照射時に形成される溶融池内挙動のその場観察を実施した。CCD カメラの使用によりトレーサー粒子の挙動を追跡することが出来た。溶融池の挙動には、表面張力勾配と浮力が大きく影響している。これまでの実験では溶融池にかかる重力の向きは鉛直下向きであった。しかしながら、現場補修では、この重力の向きはさまざまな方向を取り得る。従って、この重力の向きは溶融池の安定性に大きな影響を及ぼすことが予想される。レーザー溶接補修では溶融池の安定性が重要であり、一方、レーザー切断ではドロスの排出が促進されるように溶融池は不安定であることが必要となる。

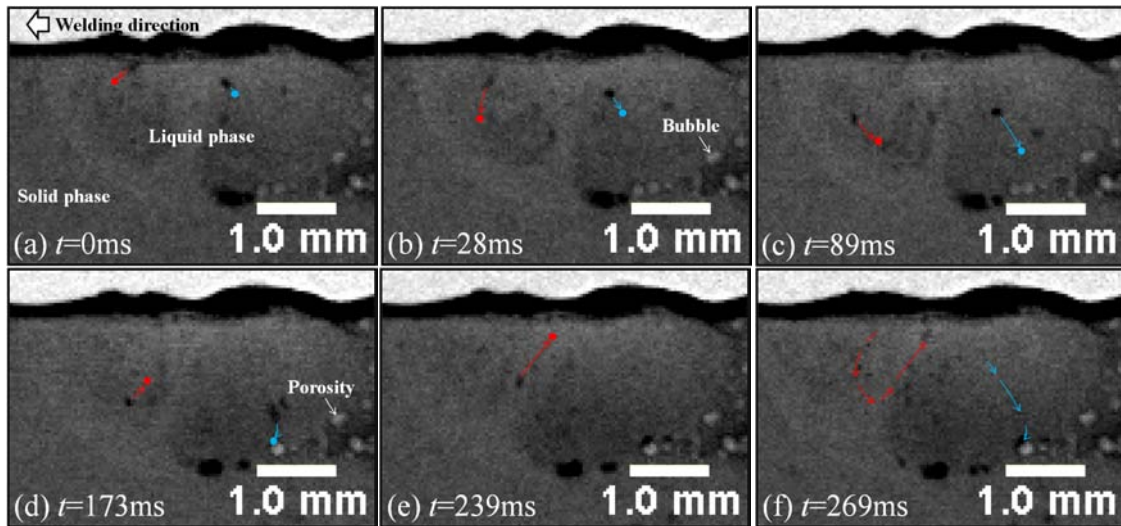


図 5. レーザー走査時の溶融池内の流動

本技術の産業応用例として、原子炉や石油化学プラントの熱交換器伝熱管へのレーザー溶接補修の適用が考えられる[2,3]。例えば、高経年化する石油化学プラントにおいては内壁の流れ加速減肉が問題となっており[3]、補修方法は、金属微粒子の充填や、溶接ワイヤの供給を行ない、これにレーザー照射することで母材と一緒に溶融させ減肉部分にクラディングを施すことである。この伝熱管は鉛直に設置されており、レーザー照射により生成する溶融池にかかる重力は横向きであるため、レーザー照射部分を中心として、表面張力勾配による駆動力と浮力が強めあう側と弱めあう側の 2 つが生じる。従って、溶融池内部の流れが非対称となるため、より複雑な流れとなることが予想され、本技術が有効となる好例である。

今後の課題：

溶融池内の主流と溶融・凝固過程の固液界面の時間変化の観察に成功したことで、数値シミュレーションとの比較・検討が可能になり、温度過渡挙動の定量化を行える見通しを得た。今後は、溶融池内の流動場をより定量的に評価するため、溶融池内部の主流だけでなく、微小な流れの観察も必要となり、時間・空間分解能の更なる向上と、トレーサー粒子を試験片内部に一定間隔で散布する等の工夫が必要となる。また、実際のプラントとして、高経年化する熱交換器伝熱管の減肉現象の予防保全技術として、レーザークラディング技術のその場観察に役立てる。

参考文献：

- [1] 山田知典、山下晋、杉原健太、小川剛充、菖蒲敬久、村松壽晴、日本原子力学会 2012 年春の大会、C1(2012)。

- [2] 西村昭彦、レーザー研究、**40** (3), P.183-187(2012).
- [3] 寺田隆哉、西村昭彦、レーザー学会学術講演会第 32 回年次大会、D.レーザープロセッシング
3、31aII-5、仙台 1/31、(2012).