

レーザー溶接時の溶融池内対流現象のリアルタイム観察 Real-time observation of molten metal convection during laser welding

山田 知典^a, 菖蒲 敬久^a, 米本 幸弘^a, 山下 晋^a, 西村 昭彦^a, 寺崎 秀紀^b
Tomonori Yamada^a, Takahisa Shobu^a, Yukihiro Yonemoto^a, Susumu Yamashita^a,
Akihiko Nishimura^a, Hidenori Terasaki^b

^a(独)日本原子力研究開発機構, ^b大阪大学
^aJapan Atomic Energy Agency, ^bOsaka University

大型放射光施設(SPring-8)からの高強度 X 線を利用し、ファイバレーザー溶接時に形成される溶融池内部を高時間・空間分解能でリアルタイム観察可能な装置開発を行ない、固液界面の時間変化や対流現象、気泡の形成挙動を評価した。

キーワード： 高強度 X 線、レーザー溶接、溶融池、吸収コントラスト法、ファイバレーザー

背景と研究目的：

高い信頼性等が要求される原子炉施設でのレーザー溶接補修技術の確立には、補修時の溶接欠陥の防止や熱履歴に起因して発生する残留応力の制御等が必要となる。近年、半導体レーザー直接励起によるファイバレーザーの小型高出力化が著しく進展し、空冷で低消費電力のレーザー装置の普及が進んでいる。しかしながら原子炉施設への実機適用には至っていない。最大の理由は、高い品質保証を要求される溶接部分に関して、溶融池内で発生する気泡挙動が未解明なことであり、溶融池形状の時間変化や対流現象との関係[1]を定量的に検討する必要がある。本研究では、大型放射光施設(SPring-8)からの高強度 X 線を利用した溶融池の高時間・高空間分解能観察が可能な装置開発を行ない、溶融池内現象をリアルタイムで評価した。

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。X 線のエネルギーは 30keV であり、照射範囲は 12.5mm×4.5mm である。試験片(5^t×5^w×20^lmm)は純アルミニウム及びアルミニウム合金であり、約 100 μ m のトレーサー粒子 (タングステン) を埋め込んだ。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レーザー(IPG YLR-300-AC)であり、波長 1070nm、出力 330W、ビームクオリティ(M²)1.03、パワー密度 0.39W/mm² である。図 1 に示すように試験片上部より直径 1mm に集光させたレーザーを照射し、溶融池内での粒子の過渡挙動を吸収コントラスト法[2]により計測した。検出器にはシンチレータ付き CCD カメラを使用した。時間分解能は 111ms、空間分解能は 10 μ m である。

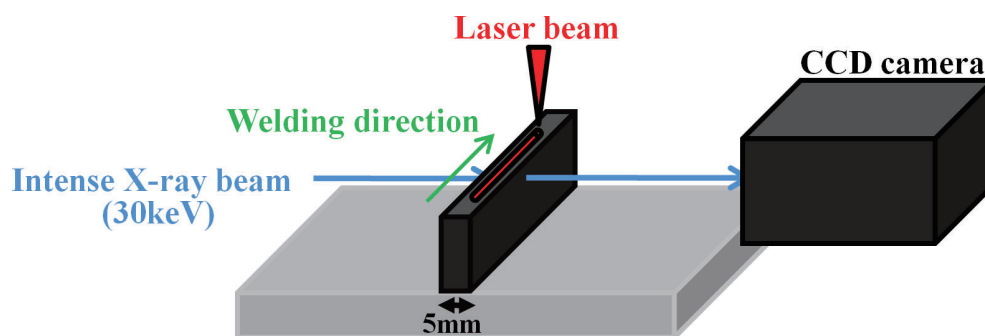


図 1. リアルタイム観察の模式図

結果および考察：

純アルミニウムにレーザースポット照射した際に形成された熱伝導型の溶融池を図2に示す。純アルミニウムは固体の密度 2700kg/m^3 、液体(933K)の密度 2385kg/m^3 [3]であり、約12%程度の密度差であるが、高強度 X 線を利用することにより固液界面を明瞭に観察可能であった。

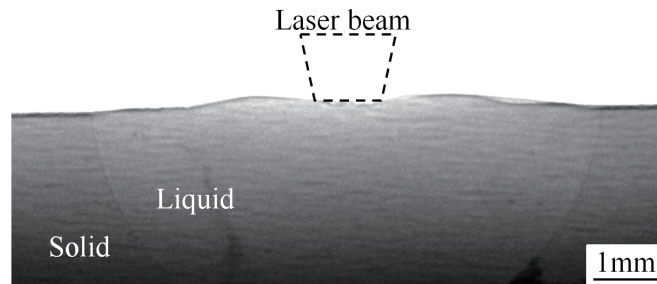


図2. レーザースポット照射時の熱伝導型の溶融池

アルミニウム合金に 1mm/s でビードオンプレート溶接を行なった結果を図3に示す。試験片はレーザー光に対して左から右に移動している。(a)を基準($t=0$)とし、(b)は 111ms 後、(c)は 222ms 後である。熱伝導型の溶融池であり、固液界面は純アルミニウムの場合と同様に観察可能であった。試験片上部には埋め込んだタングステン粒子が確認できる。粒子は穴が溶融した際に試験片表面まで浮上し、その後、溶融池底部まで落下した。この粒子の速度を求めるには時間分解能が不足しているが、本装置により内部挙動の観察が可能であることが示唆された。溶接初期(図3右上)には試験片表面で気泡が観察された。ここでは多数の気泡が発生しており、互いに結合し成長する様子が観察された。この気泡は溶融池が拡大すると確認されなかったことから、合金表面の酸化膜との間に吸着した水素がレーザー照射により加熱されることで気泡化したと考えられる。気泡の多くは表面付近に残留し、冷却後の組織観察(図4)において溶接欠陥として観察された。溶接欠陥には球型と楕円型があり、レーザー照射時に生成した気泡がそのまま残留した物が球型、気泡同士が結合する際に凝固した物が楕円型になったと考えられる。

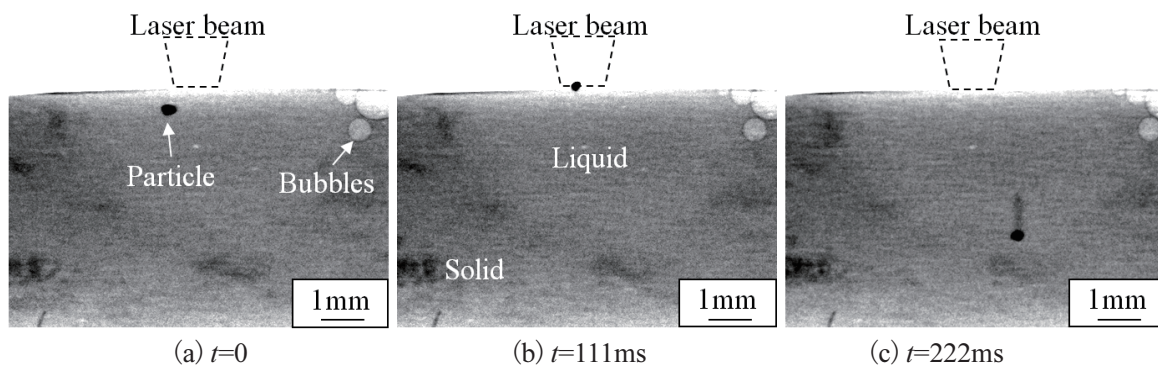


図3. ビードオンプレート溶接時の溶融池の挙動

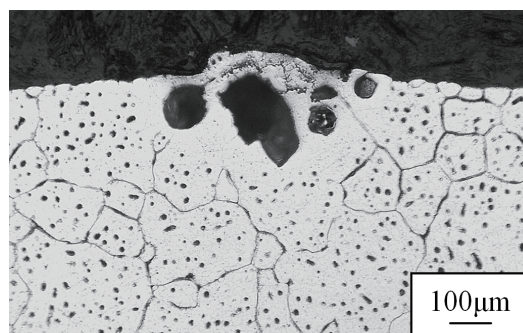


図4. 断面の組織

溶融池全体の挙動を把握するために、試験片表面にタングステン粒子を多数分布させ 1mm/s でビードオンプレート溶接を行なった。図5に示すようにタングステンが攪拌される様子から溶融池形状を確認可能であり、溶融池は時間経過とともに拡大した。大きな粒子は図3の場合と同様に非常に速い速度で溶融池底部まで落下したが、赤、緑、青の円で示すような直径 50 μ m~100 μ m 程度の小さな粒子は溶融池内の流れに乗り弧を描くように移動した。赤円で示した粒子の軌跡から求めた流速は 2.3×10^{-3} m/s であった。本装置により、従来では観察が難しかった固液界面の時間変化と湯流れを同時にリアルタイムで観察可能であることが確認できた。

本実験により観測された溶融池内に発生する気泡は、溶融池内に残留することで溶接欠陥となり、溶接部の強度を著しく低下させる。内部の欠陥の存在は溶接後の目視検査では判明しないため、気泡の挙動は注視する必要がある。また、上記の測定結果をもとに、原子炉配管のレーザー溶接箇所の挙動把握のために、鉄系材料を対象としたX線吸収コントラスト計測に関して、高エネルギーのビームラインの使用を検討することが出来た。

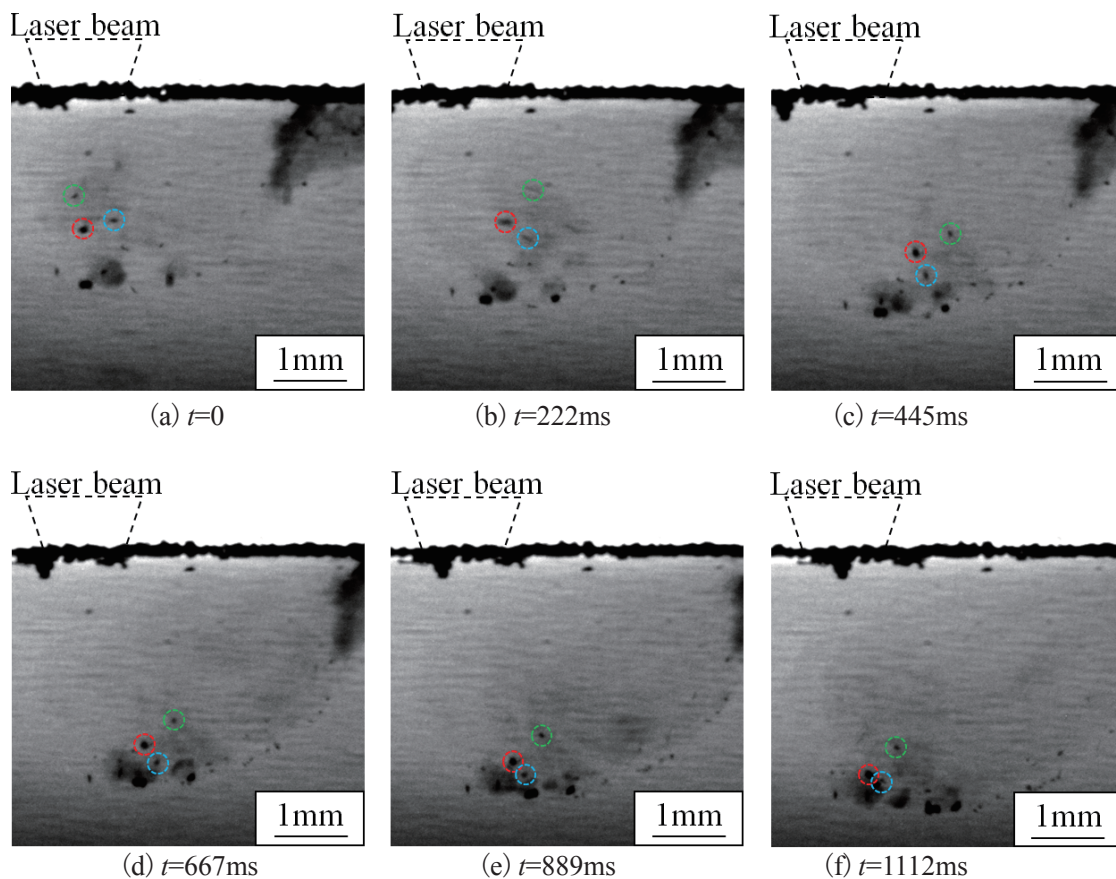


図5. 溶融池内の粒子の過渡挙動

今後の課題：

今回の観察では溶融池内で複数の流れが確認されたが、時間分解能が足りないため、速い流れには対応できなかった。今後は、高空間分解能を維持しつつ、より高い時間分解能を確保する必要がある。また、本実験では、厚み方向の情報が不足しており、対流の影響を定量評価するためには、3次元で溶融池を観察する必要がある。

参考文献：

- [1]瀬渡直樹、片山聖二、松縄朗、溶接学会論文集、**18**, 243-255, (2000).
- [2]Y. Arata, E. Abe and M. Fujisawa, *Transactions of JWRI*, **5**, 1-9, (1976).
- [3]大中逸雄、コンピュータ 伝熱・凝固解析入門 - castingプロセスへの応用-、丸善株式会社、(1985), 327.