

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 24 年 3 月 31 日現在

機関番号：82110

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2010～2011

課題番号：22860079

研究課題名（和文）放射光 X 線を用いた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研究課題名（英文）Real-time observation of molten pool convection during laser welding
using an intense X-ray beam

研究代表者

山田 知典（YAMADA TOMONORI）

独立行政法人日本原子力研究開発機構・敦賀本部レーザー共同研究所・博士研究員

研究者番号：70586271

研究成果の概要（和文）：

構造物の破壊や変形に対して重要な要因である残留応力を、高精度で評価・制御可能とするには、溶接中の各種現象と関連付けた評価が必要となる。ここでは、残留応力が溶接時の温度場に影響されることから、温度場に関連すると考えられる溶融池（溶融金属のたまり）内の対流現象に注目した。このため、大型放射光施設（SPring-8）を利用した溶接中の材料内部のリアルタイム観察装置を開発した。これにより、溶融池形状の時間変化と対流現象の同時観察に成功した。

研究成果の概要（英文）：

Residual stress is important factor of destruction behavior and weld distortion. For control of residual stress, highly accurate evaluation about welding phenomena is necessary. Here, we paid attention to molten pool convection which relates to temperature distribution during welding process. Real-time observation of molten pool during laser welding process was carried out using an intense X-ray beam from synchrotron radiation facility (Super Photon ring-8 GeV: SPring-8). We succeeded the simultaneous monitoring of molten pool shapes and convection phenomena in molten pool during laser welding process.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2010 年度	1,260,000	378,000	1,638,000
2011 年度	850,000	255,000	1,105,000
年度			
年度			
年度			
総計	2,110,000	633,000	2,743,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：材料工学・材料加工・処理

キーワード：ファイバーレーザー溶接・溶融池・放射光高輝度単色 X 線・

吸収コントラストイメージング法・流動場のリアルタイム観察

1. 研究開始当初の背景

溶接部には溶接時の熱履歴に起因した残留応力が発生し、構造物の破壊や変形に対して重要な要因となる。従来の残留応力特性に関する研究は、溶接熱履歴を受けた結果とし

て、溶接後の試験片を用いて行なわれているため、溶接中の溶融・凝固過程と発生する残留応力との関係は未だ明らかにされていないが、より高精度な残留応力評価・制御を実現するためには、溶接中に現れる各種の複雑

現象を適切に考慮しなければならない。

本研究では溶接中の現象として、材料が最も高温に加熱された際に形成する溶融池内の対流に着目した。対流は、溶融池形状や溶込み深さに影響を与えることから、温度場とも関連していると考えられ、残留応力との関係は無視できない。従来から溶融池表面・内部の観察が行われているが、内部は直接観察が難しく、対流の定量的な評価はされていない。

2. 研究の目的

本研究では溶融池内の対流特性を定量評価するために、溶接中の材料内部を高時間分解能・高空間分解能でリアルタイム観察可能な装置開発を行なった。

3. 研究の方法

(1)大型放射光施設 SPring-8 での装置開発は、溶接時の材料内のリアルタイム観察に利用されているマイクロフォーカスX線透視撮影装置を参考に行なった。

(2) 鉄鋼材料を対象に試作した溶融池可視化装置により、溶融池内の対流現象を観察した。

(3) アルミニウム合金を対象に試作した溶融池可視化装置により、溶融池内の対流現象を観察した。

4. 研究成果

(1)装置開発は大型放射光施設 SPring-8 のビームラインで行なった。溶接時の熱源としては、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 (M^2) 1.03) を使用した。レーザー照射部はアルミ製チャンバーで囲い、反射光や散乱光が周囲に漏れない構造とした。図 1 に示すように試験片の上部よりレーザーを集光照射させ、トレーサー粒子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、溶融池内流動場の可視化を行なった。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。空間分解能は $37.5 \mu\text{m}$ である。

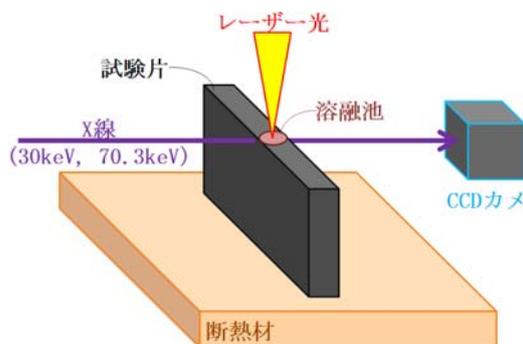


図 1. 流動場その場観察の模式図

(2) 鉄鋼材料での溶融池内観察は、アンジュレータのビームライン BL22XU を利用して行なった。使用した X 線のエネルギーは 70.3 keV である。トレーサー粒子は、平均粒径 $150 \mu\text{m}$ のタングステンであり、レーザー照射前に試験片内部に埋め込んだ。図 2 にレーザー光を固定して照射した際に形成した溶融池を示す。図中の時間はレーザー照射開始からの経過時間である。レーザー照射直後 ($t=0.1\text{s}$)、試験片内部に黒いコントラストが現れ、トレーサー粒子は確認出来なくなった。この結果から、トレーサー粒子は、レーザー光が直接照射されたことにより溶融し、溶融池内部の対流によって攪拌された可能性が高い。従って、溶融池内では非常に速い流動が形成されていると考えられる。溶融池内の対流は鮮明に捉えることは出来なかったが、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。純鉄の密度を参考にする、固相 (1200K) での密度は $7630\text{kg}/\text{m}^3$ 、液相での密度 (1809K) は $7015\text{kg}/\text{m}^3$ であるため、約 8% の密度差となる。レーザー照射時間の経過と共に溶融池は拡大し、 $t=5.4\text{s}$ において溶融池深さは約 0.7mm となった。

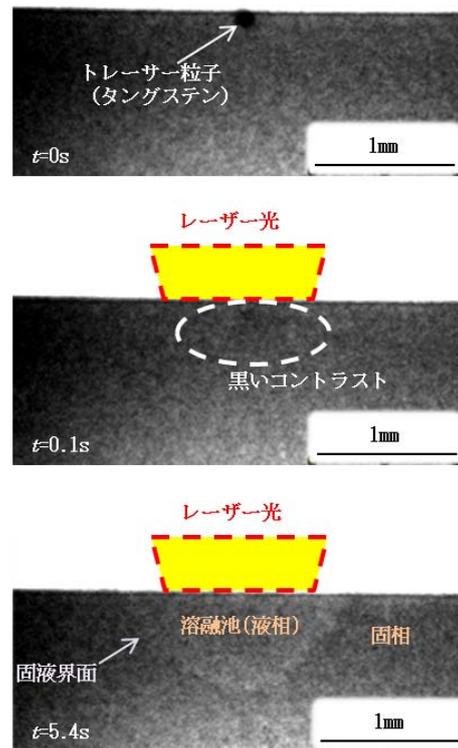


図 2. レーザー照射中の溶融池内挙動

(3) アルミニウム合金での溶融池内観察は、偏向電磁石のビームライン BL19B2 で行なった。使用した X 線のエネルギーは 30 keV である。トレーサー粒子は、タングステンと比較して、より融点が高く、比重の小さい炭化タンタル (平均粒径 $45 \mu\text{m}$) を選定し、レーザー

照射前に試験片表面に塗布した。図3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。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、破線で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。トレーサー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、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ており、この場合の流速は約9.0mm/sであった。こうしたレーザー照射部を中心とした渦構造は、レーザー照射中は継続的に観察されたことから、これが主流と考えられる。

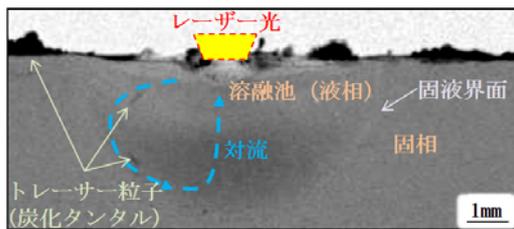


図3 溶融池内部の流動場

アルミニウム合金においても鉄鋼材料と同様に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。純アルミニウムの密度を参考にするると、固相(800K)での密度は2595kg/m³、液相での密度(933K)は2385kg/m³であるため、約8%の密度差となる。図4に観察された溶融池形状(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。

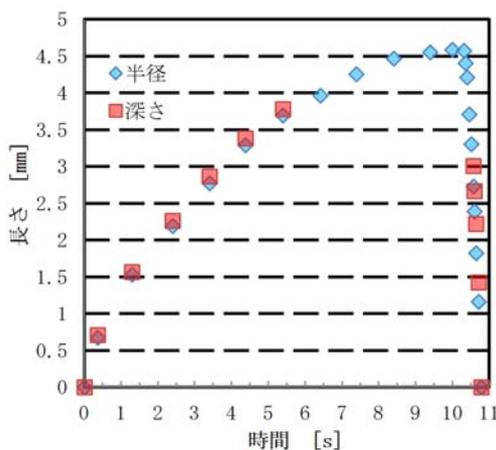


図4 溶融池形状の時間変化

この溶融池形状の時間変化から相変化速度を求め図5に示す。加熱過程(固相⇒液相)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(液相⇒固相)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。溶融池内部に図3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。

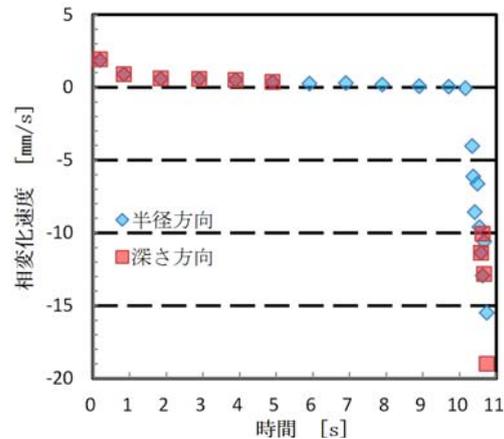


図5 溶融池形状の時間変化より求めた相変化速度

(4) 従来の研究では不鮮明であった固液界面を鮮明に捉える事が出来たのは非常に大きな成果である。さらにアルミニウム合金においては、固液界面の時間変化と、目的とする溶融池内流動場の同時観察に成功した。これらの結果は、開発中の溶接プロセス評価コード SPLICE による計算結果と比較・検討を行うことで、温度過渡挙動の定量化を図り、残留応力制御・評価に繋げていく。

今後の課題としては、鉄鋼材料においてもアルミニウム合金と同等以上の観察を可能とし、溶融池内流動場のより定量的評価に向けて、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る。従って、時間・空間分解能の更なる向上と、トレーサー粒子の選定、設置方法などの工夫が必要となる。

5. 主な発表論文等

[学会発表] (計9件)

①山田知典、菖蒲敬久、米本幸弘、山下晋、西村昭彦、村松壽晴、高精度実験と計算科学の組合せによるレーザー溶接プロセスの現象論的評価(3)放射光 X 線による溶融池のリアルタイム観察、日本原子力学会 2011 年春の年会、2011 年 3 月 30 日、福井大学(福井県)

②山田知典、菖蒲敬久、山下晋、西村昭彦、村松壽晴、放射光 X 線によるレーザー溶接中の溶融池内のリアルタイム観察、第 75 回レーザー加工学会講演会、2011 年 5 月 11 日、関西大学(大阪府)

③ T. Yamada, T. Shobu, Y. Yonemoto, S. Yamashita, A. Nishimura, T. Muramatsu, Phenomenological evaluation of laser-irradiated welding processes with a combined use of higher-accuracy experiments and computational science methodologies (3) In-situ observations of welded pool using an intense X-ray beam, ICONE19, May 17, 2011, Makuhari(Japan)

④ T. Yamada, T. Shobu, Y. Yonemoto, S. Yamashita, A. Nishimura, T. Muramatsu, In-situ X-ray observation of molten pool depth during laser micro welding, LPM2011, June 7, 2011, Takamatsu(Japan)

⑤ 山田知典、菖蒲敬久、米本幸弘、山下晋、西村昭彦、村松壽晴、レーザー溶接補修技術の標準化に向けた研究開発 (5) 熔融池温度過渡特性の評価、日本原子力学会 2011 年秋の大会、2011 年 9 月 21 日、北九州国際会議場(福岡)

⑥ T. Yamada, T. Shobu, Y. Yonemoto, S. Yamashita, A. Nishimura, T. Muramatsu, Phenomenological evaluation of laser-irradiated welding processes with a combined use of higher-accuracy experiments and computational science methodologies (3) In-situ observations of welded pool using an intense X-ray beam, ICONE19 in Osaka, Oct. 24, 2011, Osaka university(Japan)

⑦ T. Yamada, T. Shobu, S. Yamashita, A. Nishimura, T. Muramatsu, Phenomenological Evaluation of Laser Welding Processes with a Combined Use of Higher-Accuracy Experiments and Computational Science Methodologies (2) In-situ Observation of Phenomena in Molten Pool Using Intense X-ray Beams, ICMR2011, Nov. 21, 2011, BEXCO(Korea)

⑧ 山田知典、菖蒲敬久、山下晋、小川剛充、杉原健太、西村昭彦、村松壽晴、レーザー溶接中の熔融池内流動場の評価、第 76 回レーザー加工学会講演会、2011 年 12 月 5 日、東京大学(東京都)

⑨ 山田知典、山下晋、杉原健太、小川剛充、菖蒲敬久、村松壽晴、レーザー溶接補修技術の標準化に向けた研究開発 (8) レーザー溶接中の熔融池内流動場の特性評価、日本原子力学会 2012 年春の年会、2012 年 3 月 19 日、福井大学(福井県)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

山田 知典 (YAMADA TOMONORI)

独立行政法人日本原子力研究開発機構・

敦賀本部・レーザー共同研究所・博士研究員

研究者番号：70586271

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし