



平成 26 年 11 月 21 日  
独立行政法人日本原子力研究開発機構  
国立大学法人大阪大学

## レーザー加工時の金属の溶融・凝固の様子の観察に世界で初めて成功 ～ 戦略的イノベーション創造プログラム (SIP) 推進で成果活用へ ～ (お知らせ)

### 【発表のポイント】

- SPring-8 とレーザーを組み合わせた新しい観測手法と数値シミュレーションにより、レーザー加工時の金属が溶融・凝固の様子の「その場観察」に世界で初めて成功。
- 今回の成果は、SIP 課題「革新的設計生産技術」に提案・採択された課題で活用することとなり、今後本格的な研究を開始予定。

独立行政法人日本原子力研究開発機構（理事長 松浦 祥次郎。以下「原子力機構」という。）原子力科学研究部門 量子ビーム応用研究センター レーザー共同研究所 レーザー応用技術開発室の村松 壽晴 室長、山田 知典 研究員、同センター 量子ビーム材料評価・構造制御技術研究ユニット 弾塑性材料評価研究グループの菖蒲 敬久 研究主幹、国立大学法人大阪大学接合科学研究所の小溝 裕一 教授らの研究グループは、レーザーにより金属材料を溶接する際に、レーザーが当たった部分が一旦溶けて再び固化する様子やその時の溶けた部分の内部の流れを、大型放射光施設 SPring-8 の極めて強い単色 X 線により、「その場観察」することに初めて成功しました。

レーザー溶接において溶接部分の強度低下を防ぎ、材料の加工品質を向上させるためには、レーザーによって溶ける部分と周辺の溶けない部分との影響の及ぼしあい方を正しく把握する必要があります。この影響の度合いは、溶けた部分の流れを調べることで予想できますが、これまで詳細に調べられた例はありませんでした。今回、本研究グループは、SPring-8 とレーザーを組み合わせた従来にない高精度の観測手法を開発し、更に数値シミュレーション技術と組み合わせることにより、レーザー加工時に金属が溶融・凝固する様子を精密に観察することに世界で初めて成功しました。今回の成果により、溶接時に溶けて液体化した金属部分が周辺部分から受ける影響を正しく把握できるようになり、レーザー溶接の大幅な品質向上が期待されます。

本成果は、独国科学誌「Springer」のオンライン版に 6 月 15 日受理の上、掲載されました。

なお、大阪大学と共同提案した「高付加価値設計・製造を実現するレーザーコーティング技術の研究開発(研究開発責任者：国立大学法人大阪大学接合科学研究所 塚本 雅裕 准教授)」が、内閣府の SIP プログラム「革新的設計生産技術」に採択され、本成果を活用してゆく予定です。

## 【研究開発の背景と目的】

原子炉容器などの溶接構造物の設計・施工では、溶接に伴う強度低下などを的確に防止することが求められます。この強度低下の主要因としては、欠陥の生成や引張り型の残留応力<sup>1)</sup>の発生があります。このためまずは、レーザー照射により固体金属が加熱し、溶けた後、固まってゆく一連の時間的な変化を定量的に把握することが求められます。「その場観察」は、欠陥が生成する様子や、空間的な温度分布に影響を与える溶けた領域内部の流れの把握を可能とします。この温度分布が、引張り型残留応力を発生させる主要因であるため、流れの把握は、結果として残留応力の定量評価にも繋がります。しかしながら従来では、このような流れの観察を可能にする実験環境や数値シミュレーションを行う環境が十分に整っていなかったため、それを実現することができませんでした。

本研究は、SPring-8 放射光 X 線による高精度な「その場観察」と計算科学による数値シミュレーション技術を併用することにより、レーザー照射による溶けた金属領域の拡大と収縮の時間的な変化と、溶けた領域内部の流れを把握した上で、適切な残留応力を付与するための技術を確立しようとするものです。

## 【研究の方法と成果】

本研究は、大型放射光施設 SPring-8 の原子力機構専用ビームライン BL22XU にレーザー装置を持ち込んで行いました。高輝度単色性<sup>2)</sup>により特徴づけられる SPring-8 単色放射光 X 線は、材料に対する透過性が非常に優れている上に、材料のわずかな重さの差が画像にくっきりと反映される優れた特徴を有しています。この X 線をアルミニウム合金の表面に直径 0.05mm の炭化タンタル粒子を配置した材料の上部より照射し、透過した X 線 CCD カメラで捉えることにより、材料を破壊することなく内部の様子を時々刻々見ることが出来ます(イメージング法)。実験ではこの技術を利用し、図 1 左上のように、レーザーの照射により溶けて液体化したアルミニウム合金の領域と固体アルミニウム合金の領域の僅かな密度差(～8%)から、溶けた領域と固体領域の界面(固液界面)の時間変化を 0.02 秒、空間変化を 0.04 mm の精度で観測することに成功しました。他方、炭化タンタルは融点が高いために、アルミニウム合金が溶ける状況でも粒子のままです。しかも密度がアルミニウム合金に比べてはるかに大きいため、X 線が透過しにくく、図 1(a),(b) の点線で囲った部分のように影絵としてその位置を観察することができます。

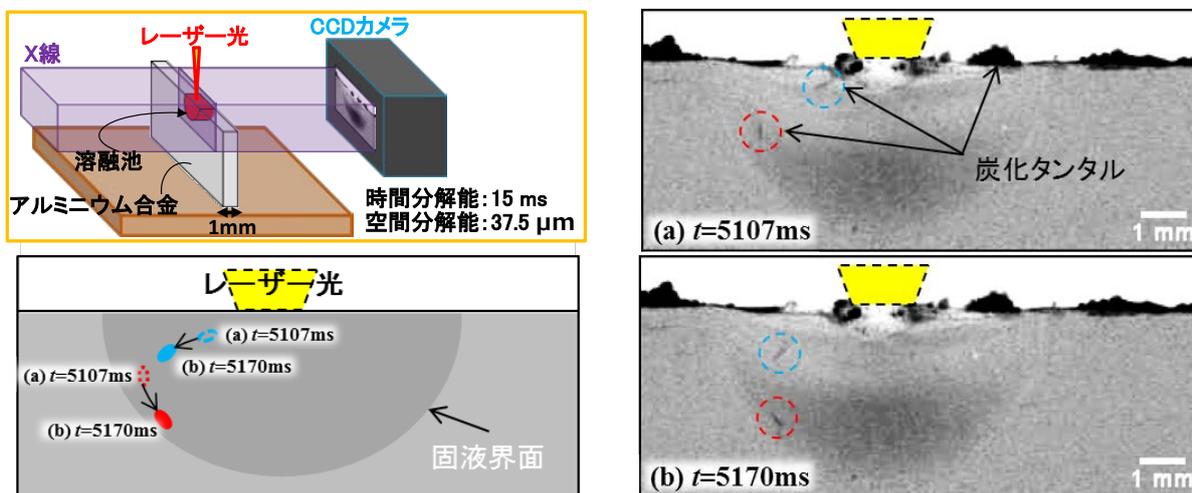
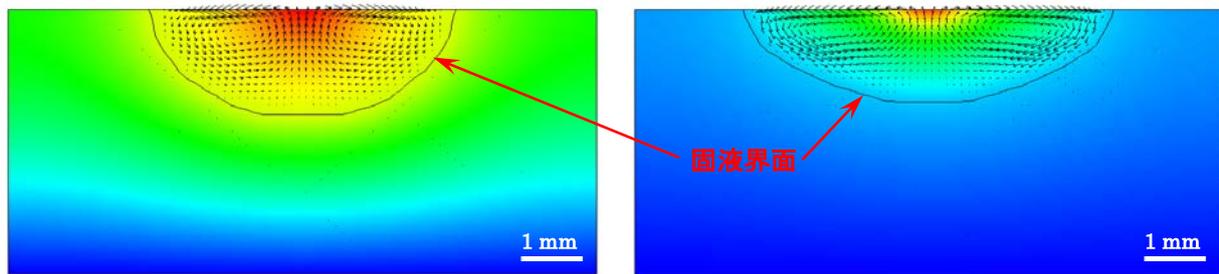


図1 SPring-8放射光 X 線を用いた固液界面の時間変化と溶けたアルミニウム合金内部の対流の様子の「その場観察」実験 ( ( ) ( ) : 時間の進行とともに変化する炭化タンタルの位置)

これによって、レーザー照射中この炭化タンタル粒子の動きを時々刻々追跡することにより、溶けたアルミニウム合金内部での対流の様子を「その場観察」することに成功しました。これら固液界面の時間変化と溶けたアルミニウム合金内部の対流の様子を同時かつ高精度な「その場観察」は、当研究グループが世界に先駆けて達成したものです。

更に、レーザー溶接<sup>3)</sup>プロセスに影響を及ぼす様々な物理現象を定量的に理解できるようにするため、計算科学シミュレーションコード SPLICE<sup>4)</sup>を新たに開発しました。この SPLICE コードは、レーザー光が材料に照射され、固体材料が溶けて液体になり、再び固まるまでの一連の物理現象を多階層スケールモデル<sup>5)</sup>などを利用して一気通貫で取扱うもので、これにより様々なスケールの物理現象が複雑に絡み合うレーザー溶接プロセスを精度良く評価することを初めて可能にしています。



(a) アルミニウム本来の熱伝導度を設定した場合

(b) 熱伝導度をアルミニウムの1/100に設定した場合

図2 SPLICEコードによる溶融アルミニウム対流挙動の評価

図2には、熱の広がりやすさを規定する熱伝導度を人為的に変更し、この影響を SPLICE コードで評価したものです。このような SPLICE コードによる解析結果を利用して現象を評価することで、レーザー溶接プロセスに影響を与える様々なパラメータを分離して評価することができ、適切な残留応力を付与するためのパラメータ設定のための検討を定量的に行うことができるようになりました。以上の成果の詳細は、最近出版された下記原著論文に記述されています。

### 【今後の期待】

大阪大学と共同提案した溶接機器の革新的な生産・製造技術の確立を目的とする「高付加価値設計・製造を実現するレーザーコーティング技術の研究開発」が、内閣府が推進する SIP プログラム「革新的設計生産技術」<sup>6)</sup>に採択され、この中で本研究成果を積極的に活用してゆく予定です。

### 【原著論文】

1. 著者：T. Yamada, T. Shobu, S. Yamashita, A. Nishimura, T. Muramatsu and Y. Komizo

タイトル：Visualization technique for quantitative evaluation in laser welding processes

書籍：In-situ Studies with Photons, Neutrons and Electrons Scattering II

出版社：Springer (Heidelberg) 掲載ページ：pp.201-215 (2014).

## 用語説明

- 1) 引張り型残留応力：外力を除去した後や溶接加工の後に、物体内部に残る応力成分の一つであり、機械的強度を低下させる要因。
- 2) 高輝度単色 X 線：一つの波長のみから成る高輝度 X 線。
- 3) レーザー溶接：レーザー光を熱源として、材料を局所的に溶融・凝固させ接合する方法。加工中の溶融金属の温度分布を適切に制御することにより、適切な残留応力分布を付与することが可能。
- 4) SPLICE コード：レーザー切断、溶接現象の解明に向けて開発した多次元コード。一流体モデルを用いて統一的に気・液・固の挙動が解析可能であり、溶接時の残留応力制御を目標としていることから、**residual Stress control using Phenomenological modeling for Laser welding repair process In Computational Environment** とし、SPLICE と命名。
- 5) 多階層スケールモデル：溶接過程では、熱源からの入熱により、加熱・溶融・対流・凝固・固相変態が生じる。この一連のプロセスで生じるレーザー光と物質の相互作用、物質の溶融、気化、凝固など複雑な相変化などは、原子レベルから目視可能な液体の運動レベルまで様々なスケールの物理現象が複雑に絡まりあう物理過程であり、これを微視化および粗視化を通じて取扱うモデル。
- 6) SIP プログラム「革新的設計生産技術」：SIP 課題は、社会的に不可欠で、日本の経済・産業競争力にとって重要な課題を総合科学技術・イノベーション会議が選定したもので、基礎研究から実用化までを見据えて一貫通貫で研究開発を推進するものです。当該研究開発の実施に当たっては、上記研究により得られた定量評価技術などを積極的に活用して進めることとなります。今後 4 年半に亘る研究開発により得られた成果は、新たなものづくりスタイルを広く普及・展開することで、地域発のイノベーションを実現し、グローバルトップを獲得できる新たな市場を創出し、日本のものづくり産業の競争力強化に反映されます。

# レーザー加工時の金属の溶融・凝固の様子を観察に世界で初めて成功

～ 戦略的イノベーション創造プログラム (SIP) 推進で成果活用へ～

独立行政法人日本原子力研究開発機構  
国立大学法人大阪大学

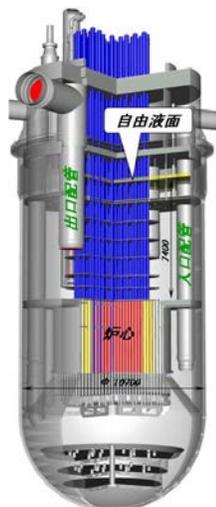
## 研究開発の背景と目的

- (1) 溶接構造物の長寿命化設計要求
- (2) 局所加工性に優れたレーザー光の利用
- (3) 溶接箇所の残留応力特性の適切化



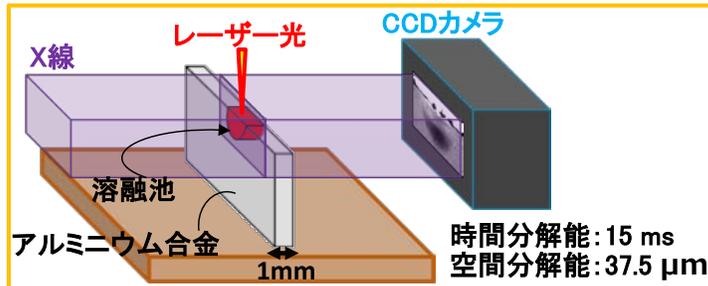
残留応力特性の評価では、レーザー照射により固体金属が加熱されて、溶けた後、固まってゆく一連の時間的変化(空間温度分布とこれに影響を与える溶けた領域内部の流れ)を定量的に把握することが必要

溶接時に現れる現象に影響を与えない非接触評価法(大型放射光施設 SPring-8 からの極めて強い単色X線による「その場観察」と数値シミュレーション)の利用



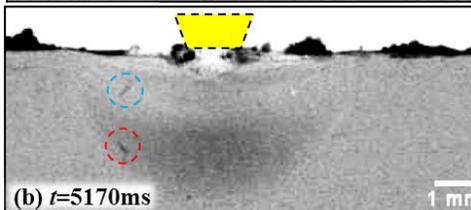
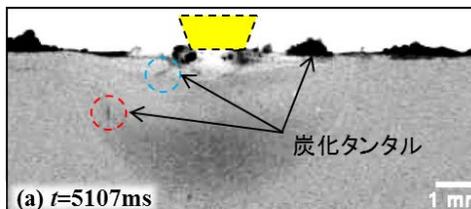
プラント寿命 60 年として特徴づけられる溶接構造物としての高速増殖実証炉

## 大型放射光施設 SPring-8 を利用した「その場観察」

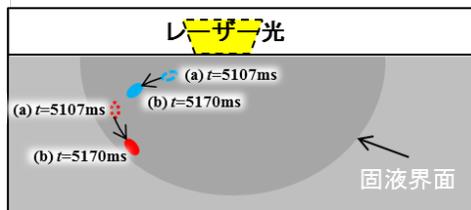


「その場観察」試験での装置セットアップ

レーザーが当たった部分が一旦溶けて再び固化する様子やその時の溶けた部分の内部の流れを、SPring-8 からの極めて強い単色 X 線によって、「その場観察」することに初めて成功

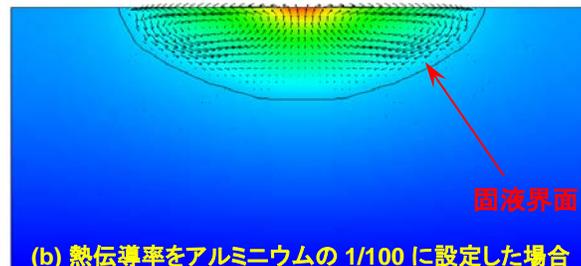
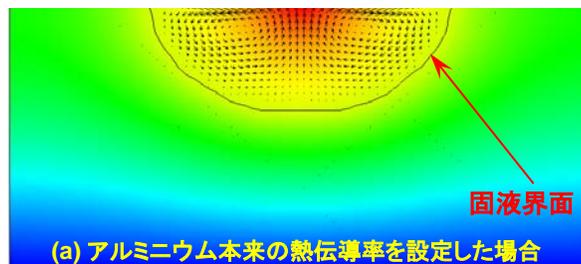


レーザー照射による固液界面の時間変化とアルミニウム合金内部の対流の様子



時間の進行とともに変化する炭化タンタルの位置

## SPLICE コードによる対流挙動の評価



レーザー溶接プロセスに対する影響因子の定量評価

## 研究成果

レーザー溶接プロセスに影響を与える様々なパラメータ(入熱量、ガス流量など)を分離して評価し、適切な残留応力を付与するための定量的なパラメータ設定検討手法を世界に先駆けて実現

## 今後の期待

大阪大学と共同提案した、革新的な生産・製造技術の確立に向けた研究提案が、内閣府が推進するSIP課題「革新的設計生産技術」に採択され、今後本格的な研究を開始する予定

今後の研究開発に当たっては、大型放射施設 SPring-8 からの極めて強い単色 X 線と SPLICE コードによる計算科学シミュレーション手法を積極的に活用

新たなものづくりスタイルを広く普及・展開することで地域発のイノベーションを実現して、グローバルトップを獲得できる新たな市場を創出し、日本のものづくり産業の競争力強化に反映



内閣府 SIP (戦略的イノベーション創造プログラム) 概要資料より転載