

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 19 日現在

機関番号：82110

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2012～2013

課題番号：24760606

研究課題名(和文)放射光X線を用いた溶接時の低温変態溶接金属の応力と固相変態のその場測定

研究課題名(英文) In-situ measurement of stress and solid state phase transformation in low temperature phase transformation weld metal by synchrotron X-ray during welding process

研究代表者

張 朔源 (zhang, shuoyuan)

独立行政法人日本原子力研究開発機構・原子力科学研究部門 量子ビーム応用研究センター ・博士研究員

研究者番号：00613184

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,200,000円、(間接経費) 960,000円

研究成果の概要(和文)：溶接残留応力を低減するために、低温領域で生じるマルテンサイトの変態膨張を利用することが注目されている。溶接構造物のマイクロ組織と機械性能の制御および予測するために、溶接時マイクロ組織および応力の形成メカニズムを明らかにする必要がある。そこで、高輝度である放射光を利用し、溶接時相変態と応力を同時にその場測定できるシステムを開発した。溶接金属～熱影響部～母材までのマイクロ組織状態および応力分布の時間変化を世界で初めて最速的な時間分解(0.1秒)で計測することに成功した。溶接連続冷却過程において、試験片全体の応力形成は熱収縮と固相変態(マルテンサイト変態)が大きく関与することが初めてその場計測成功できた。

研究成果の概要(英文)：Reduction of welding residual stresses due to introduction of volume expansion via martensitic low temperature phase transformation has received more attention. In order to predict and control the mechanical performance and microstructure of welded structures, it is necessary to clarify the formation mechanism of stress and microstructure during the welding process. Therefore, we developed an in-situ measurement system using synchrotron X-rays, which allows simultaneous measurement of the phase transformation and stress during the welding process. We succeeded in measuring the time variation of the stress distribution and microstructure between the weld metal, heat affected zone, and base material, with the fastest time resolution (0.1 seconds) in the world. By using the in-situ measurement system to observe the entire specimen, we found that stress formation was largely responsible for the solid phase transformation and thermal contraction in the welding continuous cooling process.

研究分野：材料加工・処理

科研費の分科・細目：若手研究(B)

キーワード：溶接 応力 固相変態 その場測定 放射光X線

### 1. 研究開始当初の背景

構造物を溶接する際、不均一な熱膨張・収縮により必然的に残留応力が生じ、この残留応力が溶接構造物の疲労強度、低温割れ、応力腐食割れなどに影響を与えることが知られている。通常残留応力を低減するためには、溶接後の熱処理、ピーニング処理などの方法が使われてきたが、これらの手法は現場における作業が困難であり、コストも増加する。近年、溶接過程冷却時低温域でオーステナイトからマルテンサイトに変態する時の変態膨張を利用して、溶接のままで溶接部に圧縮残留応力を導入し、溶接冷却過程における引張残留応力を低減することが世界各国に注目されている。

さらに、溶接構造物の機械性能を予測・制御するために、冶金学的に溶接現象を解明することが不可欠である。溶接プロセスに対して、ミクロ組織 温度 応力/ひずみの相互作用により溶接構造物の機械性能が最終的に決められていることが知られている。しかしながら、溶接後の調査では応力経時変化と相変態の影響を区分けすることが困難である。現状では、相互作用の明確化のためには、溶接時高温域で生じるミクロ組織と応力形成過程は推定するしかない。

この課題を解決するために、測定手法としては非接触で計測可能な X 線回折法がもっとも有効であるが、高速で変化する溶接挙動を測定するには、通常の X 線源では強度が弱く、時間分解能が低いので、in-situ 測定には向いていない。そこで、高輝度、単色性、指向性などの特徴を有する第 3 世代の放射光を利用した X 線回折による研究が世界中から注目を浴びている。

放射光からの高輝度 X 線による非接触で溶接時の in-situ 測定の例は多々あるものの、多くの回折線を計測することで算出することができる応力計測についてはその環境が整備されていないために研究例がほとんど存在しない。そこで、溶接構造材料の信頼性評価と予測に非常に重要であり、微視的に応力/ひずみ分布、相変態などの結晶状態に起因する物理量を溶接進行中に定量的に in-situ 測定には、さらなる測定手法の進歩が必要であった。

### 2. 研究の目的

放射光 X 線を利用して、材料の応力やミクロ組織情報を時分割評価する研究では、二次元検出器の利用が必要不可欠である。一方、応力測定を実施する場合、高精度な回折角と広い逆格子空間測定が必要条件となり、その条件を満たすためには、カメラ長を遠くすること、及び大面積カメラが不可欠である。

そこで、本研究ではコンパクトで軽量の二次元検出器に着目し、二次元検出器走査システムを開発し、反射法で応力算出手法を確立する。

さらに、本研究では二次元検出器走査シ

テムを改造し、3 台高時間分解能がある二次元検出器 (最速 0.01 秒) より構成された二次元検出器システムと溶接システムを組合せ、溶接時その場測定システムを開発する。

最終的に、このシステムを利用し、TIG 溶接時溶接金属から熱影響部までの応力時間変化とミクロ組織形成過程を実測し、冶金学的に応力とミクロ組織との相互作用を明らかにすることを目的とする。

### 3. 研究の方法

二次元検出器走査システムを利用し、ラウンドロビ試験片の測定により、反射法では高エネルギー放射光 X 線を使用した場合には回折面ごとに有効侵入深さが異なることから、このシステムで一度に計測できる複数の回折面を利用し、深さ方向の応力分布算出法を確立する。

そして、改造した二次元検出走査システムを利用し、SPRING-8 のビームライン BL22XU で図 1 に示すようにセットアップし、溶接その場測定実験を実施した。3 台二次元検出器 (PILATUS) と溶接システムを外部トリガーにより、同時に連動制御が実現できた。そして PILATUS-300K 検出器 (検出面積:  $83.8 \times 106.5\text{mm}$ ) は試験片近くに設置していることから、110、200、211、220 および 111、200、220、311、222 までを同時に撮影することができ、溶接時高速的に生じる凝固過程及び固相変態がその場測定できる。一方、2 台の PILATUS-100K 検出器 (検出面積:  $83.8 \times 33.5\text{mm}$ ) は、試験片から大きく離して設置していることから、211/311 の回折リングの一部 (本研究では、鉛直方向を  $0^\circ$ 、水平方向を  $90^\circ$  を定義すると、方位角度  $13\sim 21^\circ$  および  $45\sim 56^\circ$  の範囲) を撮影することができ、この 2 つの結果を融合することで溶接時の応力がその場測定できる。また、放射光 X 線の照射領域が溶接トーチ移動方向に対して、中心、および 2, 4, 5, 8, 11, 14mm 離れ、それぞれ同じ溶接条件で 7 回その場測定を行った。これにより、溶接時ミクロ組織の分布と応力分布の時間変化をその場計測ができた。

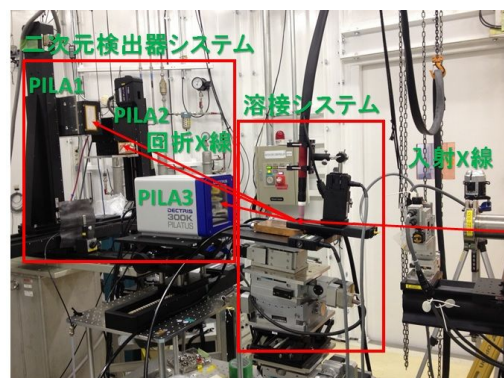


図 1 溶接時応力その場測定システム

#### 4. 研究成果

##### (1) 応力算出手法の検証

コンパクトな二次元検出器 (PILATUS 100k/300k) を走査アームに固定し、X 軸と Z 軸を走査させながら、場所ごとに一枚ずつ X 線回折写真が撮影できる。測定終了後、開発したプログラムにより一枚大面積二次元 X 線回折写真 (最大 H500mm × W800mm) が合成できる。

炭素鋼 (S50C) 試験片を機械鏡面研磨により、表層部に残留応力を導入した。それぞれに入射角度  $5^\circ$  と  $10^\circ$  で試験片 Fe 110、200、211、220、310、222 回折リングが検出できた。それぞれの回折面に対して X 線応力算出方法の一つであるアレンジした  $\sin^2$  法を適用し応力を求めた。各回折面より求めた平均応力と平均侵入深さの関係を図 2 に示す。一般的に、機械研磨により導入した応力は試験片表面から深くなるほど小さくなると言われている。本結果はそれを反映した結果であることから、本測定システムは正しく応力が算出できていると思われる。この開発されたシステムは鉄鋼材料の高温物性や応力誘起変態、表面処理材料の残留応力こう配測定などの研究に実際に利用されている。このシステム開発について、学術論文として公表予定である。

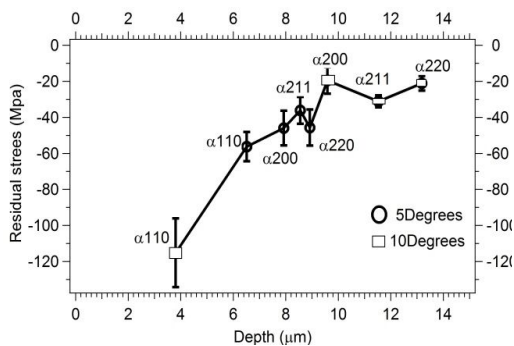


図 2 深さ方向の応力分布

##### (2) ミクロ組織分布の時間変化のその場測定

溶接時その場測定システムを利用し、7 回を分けて、その場測定した。in-situ 測定した膨大な X 線回折写真に対して、解析システムも開発した。これにより応力、相変態、格子定数などの情報の時間変化を抽出できた。一つの結果として、図 3 のようなミクロ組織の分布の時間変化が得られた。図 3 により、0 から 40 秒は加熱過程、40 秒から 300 秒は冷却過程ということが分かった。また、溶接冷却過程溶接金属と熱影響部生じたマルテンサイト変態過程も同定できた。このミクロ組織分布の時間変化のマッピングより、溶接過程、ミクロ組織の全体変化の状況を把握することができる。非常に重要な結果と考えておる (投稿予定)。本研究の手法は TIG や MIG などのアーク溶接や手法へ応用して、溶接金

属/熱影響部における介在物を利用する固相変態や溶接部における高温割れ/再熱割れなどの研究にも大きく貢献することが期待できる。

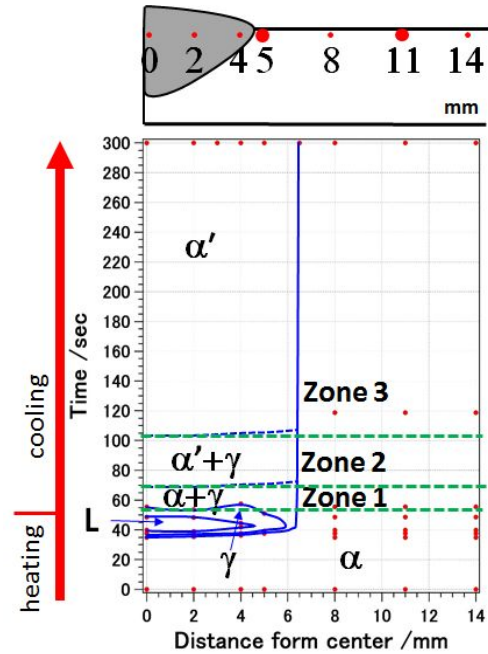


図 3 溶接時溶接継手におけるミクロ組織の時間変化

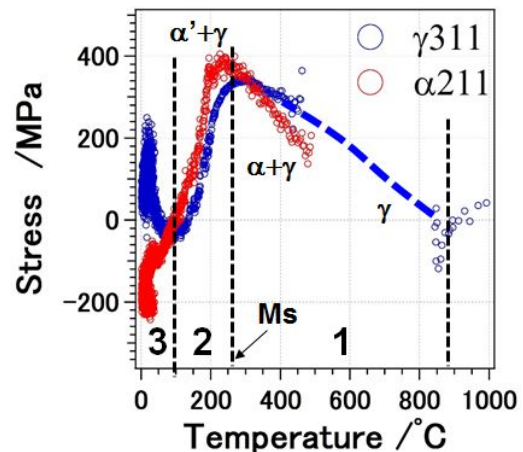


図 4 溶接時連続過程熱影響部におけるミクロ応力の時間変化

##### (3) ミクロ応力形成過程のその場測定

本研究では溶接時連続冷却過程におけるミクロ応力の形成は熱収縮とマルテンサイト変態の体積膨張から決めることが初めて世界最速 (時間分解能 0.1 秒) でその場測定成功できた。図 4 の示すように、冷却時と相のミクロ応力の温度変化を算出できた。Zone1 では、 $\alpha$  と  $\alpha'$  相の引張り応力が単調増加している。これは、 $\alpha$  から  $\alpha'$  への固相変態が生じたが、 $\alpha$  と  $\alpha'$  相が母材の収縮拘束により引張り応力がだんだんおおきくなってい

るためである。Zone2 では、 $\alpha$  と  $\beta$  相の引張り応力が単調減少となっている。この原因は、約 300 °C (Ms 点) ではマルテンサイト変態が開始したため、マルテンサイト相の体積膨張により引張り残留応力がだんだん小さくなっていると考えられる。また、Zone3 では  $\alpha$  と  $\beta$  相がそれぞれに圧縮と引張り応力が増加することが分かった。これはマルテンサイト変態がほぼ完了し、マルテンサイト相は溶接試験片の熱収縮により圧縮応力が大きくなっているためである。一方残留  $\beta$  相が熱膨張係数のミスマッチにより引張り応力がだんだん大きくなると考えられる。ミクロ組織の形成は応力状態に非常に影響を与えることが知られている。この成果により、ミクロ組織形成の予測と制御に対して、重要な情報を提供できるようになると思われる。

ンター・博士研究員  
研究者番号：00613184

## 5. 主な発表論文等

[学会発表](計5件)

Zhang Shuoyua, Takahisa Shobu, Ayumi Shiro, etc., In-situ stress measurement in the heat affected zone during TIG welding process, 7<sup>th</sup> International Conference on Mechanical Stress Evaluation by Neutron and Synchrotron Radiation(MECA SENS 2013), 2013年9月10日, Sydney, Australia

張 朔源, 菖蒲敬久, 城 鮎美など, 溶接時応力その場測定システムの開発, 日本材料学会第47回X線材料強度に関するシンポジウム, 2013年7月18日, 東京

Zhang Shuoyuan and Komizo Yuichi, In-situ observation of microstress and solid state transformation in low temperature transformation weld metal by synchrotron radiation X-rays, The International Symposium on Visualization in Joining & Welding Science through Advanced Measurements and Simulation (Visual-JW2012), 2012年11月30日, 大阪

Zhang Shuoyuan, Takahisa Shobu, Ayumi Shiro, etc., Development of Stress Measurement Method Using Two Dimensional Detector Scanning System, 9<sup>th</sup> International Conference on Residual Stresses (ICRS9), 2012年10月7日, Garmisch-Partenkirchen, Germany

張 朔源, 菖蒲敬久, 城 鮎美など, 二次元検出器走査システムを利用した応力測定法開発, 日本材料学会第46回材料強度に関するシンポジウム, 2012年7月6日, 京都

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

張 朔源 (ZHANG, Shuoyuan)

独立行政法人日本原子力研究開発機構・原子力科学研究部門・量子ビーム応用研究セ