

TIG 溶接時における応力のその場計測 In-situ Stress Measurement During TIG Welding Process

平野 辰巳^a, 高松 大郊^a, 桑原 孝介^a, 張 朔源^b,
 菖蒲 敬久^c, 城 鮎美^c, 佐藤 眞直^d
 Tatsumi Hirano^a, Daiko Takamatsu^a, Kosuke Kuwabara^a, Shuoyuan Zhang^b,
 Takahisa Shobu^c, Ayumi Shiro^c, Masugu Sato^d

^a(株)日立製作所, 日立研究所, ^b(財)総合科学研究機構,
^c(独)日本原子力研究開発機構, ^d(公財)高輝度光科学研究センター

^a Hitachi Ltd., Hitachi Research Lab., ^b Comprehensive Research Organization for Science and Society,
^c Japan Atomic Energy Agency, ^d Japan Synchrotron Radiation Research Institute

溶接技術は構造体の組立に必須な技術であり、高精度な溶接シミュレーション技術が要望されている。応力・組織・強度の時間変化を計測し、シミュレーションに反映させる必要がある。そこで、フェライト材の TIG 溶接時の熱影響部における相変態や応力の時間変化を二次元検出器を用いたその場 X 線回折により評価した。α 相から FeO、γ 相の順に相変態・熱膨張・熱収縮した後、α 相が析出し、徐々に γ 相が消失し、冷却後は α 相と FeO のみとなった。これらは Fe-O の状態図と一致する結果となっている。一方、応力の時間変化は、最初に引張応力が増加、次に温度上昇に伴い圧縮応力が増加し α 相から γ 相に変態、その後 γ 相から α 相に変態し引張応力から冷却過程の収縮で圧縮応力が残留する結果となった。

キーワード： TIG 溶接、応力、相変態、その場

背景と研究目的：

自動車、鉄道車両、建設機械、プラント、原子力設備、火力設備などの事業分野では鉄鋼が構造用材料として利用されており、TIG(Tungsten Inert Gas)溶接、MAG(Metal Active Gas)溶接、レーザー溶接などにより構造体が組立られている。溶接技術は各事業分野において必須な技術であり、構造体の疲労破壊、耐用年数などを支配する一因であるため、高信頼な溶接技術が要求されている。また、グローバル化により世界各地どこでも同等な品質で低コストな構造体を製作する必要がある。この解決に向けて高精度なシミュレーション技術の早期確立が必須な状況となっている。従来、溶接プロセスのシミュレーションは溶接前後の応力計測や材料組織の観察により間接的に検証されているが、溶接中の材料状態を表すモデルの妥当性は必ずしも十分検証されていなかった。そこで、本課題では、シミュレーションの検証を目的に TIG 溶接時の熱影響部(HAZ : Heat Affected Zone)における応力の時間変化を評価した。既に、日本原子力研究開発機構(原研)では、TIG 溶接時の HAZ 領域における応力をその場で計測[1]しており、本課題では、原研、JASRI 産業利用推進室と共同で実施した。本報告では、溶接時における相変態と一部の HAZ 領域における応力変化について検討した。

実験：

試料は一般構造用圧延鋼材の SS400(フェライト)である。試料サイズは 100 mm 角、厚さ 12 mm で酸化スケール付試料を 20 枚程度準備した。

TIG 溶接時のその場 X 線回折測定の概要を図 1 に示す。実験は SPring-8 の BL46XU で実施した。TIG 溶接機、トーチや試料の駆動機構は原研所有の各装置、二次元検出器は産業利用推進

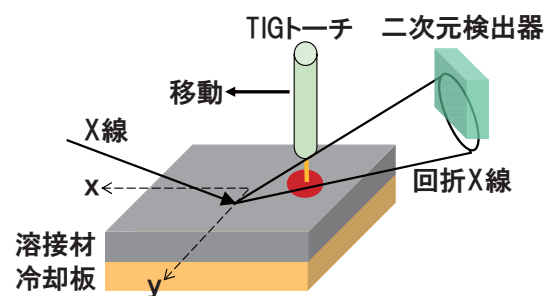


図 1. TIG 溶接時のその場 X 線回折測定の概要図

室所有の PILATUS2M を利用した。エネルギー：30 keV、ビームサイズ：0.5 mm(水平)×0.05 mm(鉛直)に制限した X 線を試料に入射角：5 度で照射し、回折した X 線のデバイリングの一部を二次元検出器で測定した。TIG 溶接の電流：150 A、アーク長：3 mm とした溶接トーチを x=-40 mm~40 mm まで 1 mm/秒の速度で移動させながら回折 X 線像を 0.1 秒毎、アーク放電開始から 300 秒間、露光した。溶接のビード幅は約 6 mm であった。溶接試料板は水冷(25°C)の Cu 冷却板上に固定して冷却した。X 線照射位置は x=0 mm、y=0、2、3、4、5、6、7、8、12 mm とし、各測定点毎に試料板を交換し、TIG 溶接しながら y 方向の歪に対応する回折 X 線像を測定した。更に、トーチと試料板が一体となったステージを CCW に 90 度回転し、各点の x 方向の歪に対応する回折 X 線像を測定した。二次元検出器の PILATUS2M は 1475(水平)×1679(鉛直)素子、0.172 mm 角/素子でダイレクトビームを露光後、フェライト α 相の(211)回折が露光面の上側にかかるよう検出器を 115 mm 上げた。また、 α 相(211)回折に近い $\text{CeO}_2(420)$ を y=0 mm、x=0、20、25、30mm で露光した。これは、 α 相(211)のデバイリングが温度により変化しても、無歪の $\text{CeO}_2(420)$ のデバイリングが真円になるよう回折 X 線に対する検出器のあおり角度(2 方向)の補正、PILATUS2M 内の 24 個の検出ブロック間の位置ズレ補正に使用した。回折 X 線像を汎用ソフト：fit2D[2]を利用して、回折角： 2θ と方位角： ϕ の二次元像に変換し、 ϕ 毎の 2θ を Voight 関数でフィッティングし、格子定数と $\sin^2\psi$ 法による応力を算出した。

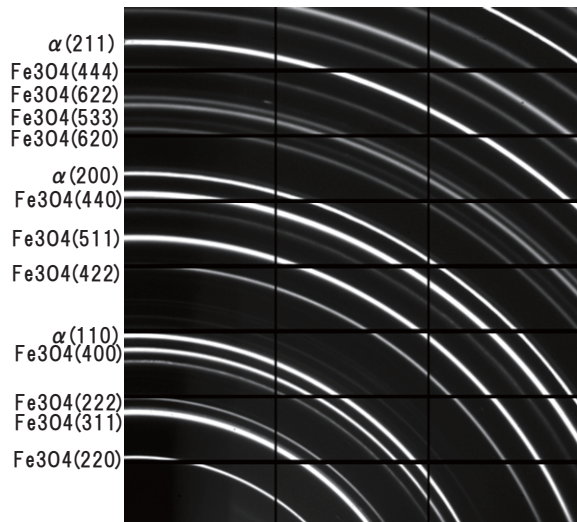


図 2. SS400 の溶接前の回折 X 線像

結果および考察：

図 2 に SS400 の溶接前の回折 X 線像を示す。 $\text{CeO}_2(420)$ の回折線から較正したカメラ長：1005 mm と PILATUS2M の各素子高さを用い、回折像から相を同定した。溶接前の SS400 はフェライト α 相と表面酸化相の Fe_3O_4 からなっている。X 線回折像の鉛直方向(幅 21 素子分)を抽出・一次元化

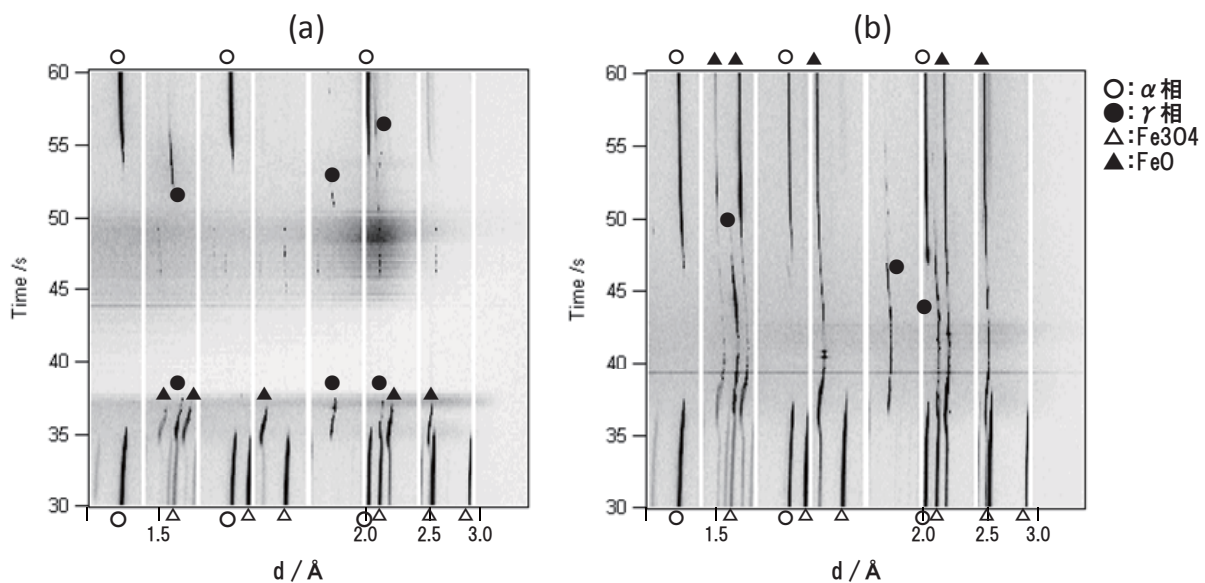


図 3. 溶接時のその場 X 線回折像(面間隔： d vs. 溶接開始からの時間)
(a)： $y=0$ mm、(b)： $y=4$ mm

し、各回折像を時間で並べた、溶接時のその場 X 線回折像を図 3 に示す。横軸は面間隔： d 、縦軸は溶接開始からの時間に対応する。図 3(a) は $y=0$ mm の溶融領域、(b) は $y=4$ mm の HAZ 領域である。上下に伸びる 7 本の白い線は検出素子がない領域である。図 3(a) の溶融領域では、 α 相、 Fe_3O_4 が熱膨張し 35 秒で FeO 、 γ 相の順に相変態・熱膨張しながら 38 秒後に溶融した。50 秒後に γ 相が析出し、53 秒後に α 相が析出し、 γ 相は徐々に消失した。図 3(b) の HAZ 領域では、36 秒で FeO 、 γ 相の順に相変態・熱膨張・熱収縮し、46 秒後から α 相が析出し、徐々に γ 相が消失し、冷却後は α 相と FeO のみとなった。これらは Fe-O の状態図と一致する結果となっている。

無歪の $\text{CeO}_2(420)$ のデバイリングから、回折 X 線に対する検出器のあおり角度、

PILATUS2M 内の 24 個の検出ブロック間の位置ズレを補正した結果、 $\sin^2\psi$ 法により解析した応力は 2~8 MPa となり、この精度内でフェライト $\alpha(211)$ 相の応力が解析できることがわかった。歪から応力への算出には、フェライトの室温におけるヤング率：211 GPa、ポワソン比：0.29 を使用した。図 4 に $x=0$ mm, $y=4$ mm における溶接時の y 方向の応力と温度の時間依存性を示す。応力は $\sin^2\psi$ 法により、温度は格子定数と α 相の線膨張係数： $11.7 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$ から算出した。図 4 から、領域 I：トーチ位置(x): -40~-26 mm における溶融と凝固により応力測定位置で引張応力が増加、領域 II：測定位置で温度上昇により膨張するが周囲の低温部が拘束するため圧縮応力が増加、領域 III： α 相から γ 相に変態、領域 IV： γ 相から α 相に変態後、引張応力から冷却過程の収縮で圧縮応力が残留、と考えられる。

測定した回折 X 線像は膨大でその一部を解析したのみであり、今後溶接時の各時間(t)、各位置(y)における応力解析を進める予定である。

参考文献：

- [1] S. Zhang et al., MECA SENSE 2013, " In-Situ Stress Measurement in the Heat Affected Zone during TIG Welding Process"
- [2] <http://www.esrf.eu/computing/scientific/FIT2D/>

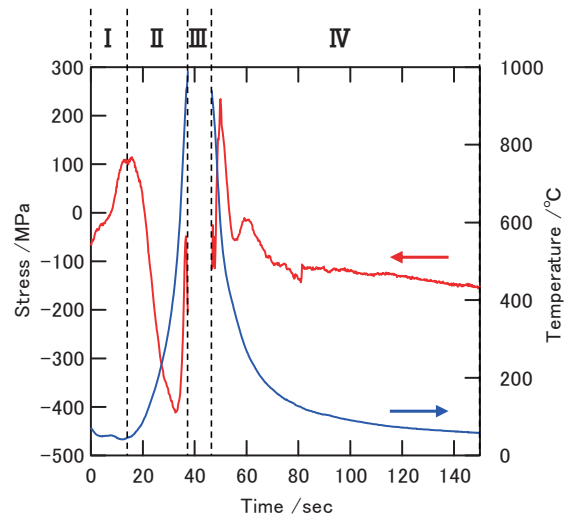


図 4. 溶接時の応力と温度の時間依存性
 $y=4$ mm