

TIG 溶接時における応力のその場計測(2) In-situ Stress Measurement during TIG Welding Process (2)

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

^aHitachi Ltd., Hitachi Research Lab., ^bComprehensive Research Organization for Science and Society,
^cJapan Atomic Energy Agency, ^dJapan 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、低炭素鋼の MAG 溶接止端部の応力集中による亀裂起点を回避する TIG 再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、Fe₃O₄ から FeO、γ相に相変態・熱膨張・熱収縮した後、α相が析出し、冷却後はα相、γ相、FeO となった。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 300 MPa 程度の圧縮応力が残留する結果となった。

キーワード： TIG 溶接、MAG 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、火力設備などの分野において鉄鋼が構造用材料として使用されており、TIG(Tungsten Inert Gas)溶接、MAG(Metal Active Gas)溶接、レーザー溶接、摩擦攪拌接合などにより構造体が組立られている。溶接技術は構造体の疲労破壊、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。この解決に向けて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。

MAG 溶接は大量の溶接が可能であることから、多くの分野で多用されている。一方、溶着量が多いため MAG 溶接による盛りり端部に応力が集中し、亀裂の起点になりやすい。そこで、MAG 溶接後に TIG 再溶接により滑らかな溶接形状を形成することで、亀裂起点を回避し疲労寿命が長くなることが知られている。そこで、本課題では、シミュレーションの検証を目的に MAG 溶接した低炭素鋼の溶接止端部を TIG により再溶接する時の熱影響部(HAZ)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、SPring-8 産業利用室と共同で実施した。2014A 期の課題では、一般構造用圧延鋼材の SS400(フェライト)を供試材として TIG 溶接時における相変態と HAZ 領域における応力変化を評価した。本課題では、MAG 溶接後の止端部を TIG により再溶接する時の HAZ 領域における応力変化を検討した。

実験：

構造用に使用されている低炭素鋼に MAG 溶接した試料を用いた。試料サイズ

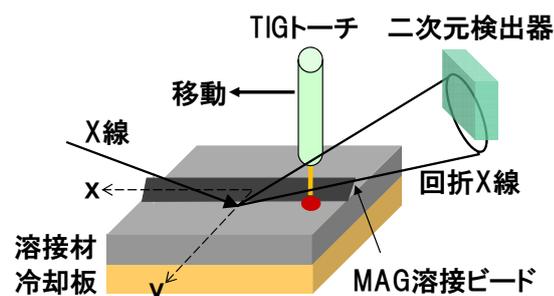


図 1. TIG 溶接時のその場 X 線回折測定の概要図

は 100 mm 角、厚さ 12 mm の試料を 20 枚程度準備した。また実機を模擬して表面酸化層を回転金属ブラシで除去した。

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~35 mm まで 2 mm/秒の速度で移動させながら回折 X 線像を 0.2 秒毎、アーク放電開始から 300 秒間、露光した。また MAG 溶接止端部を TIG 溶接した。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 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 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 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/素子でカメラ長較正用の CeO₂ を露光後、フェライト α 相の(211)回折が露光面の上方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 CeO₂(420)を y=0 mm、x=0、20、25、30mm で露光した。無歪の CeO₂(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を実施した。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 Voigt 関数でフィッティングし、格子定数と sin²ψ 法による応力を算出した。

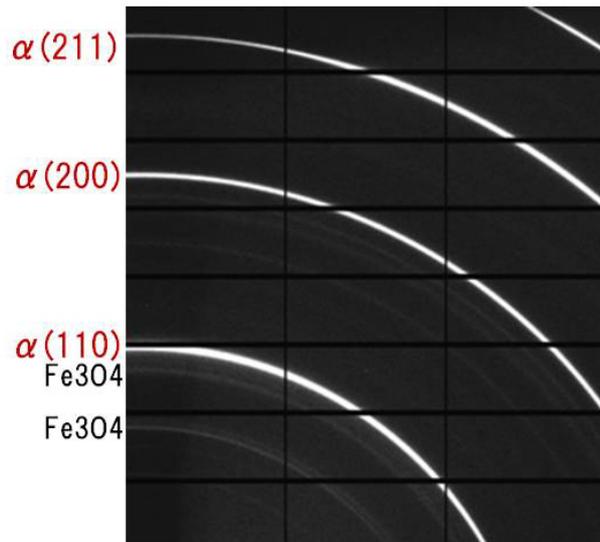


図 2. 低炭素鋼の溶接前の回折 X 線像

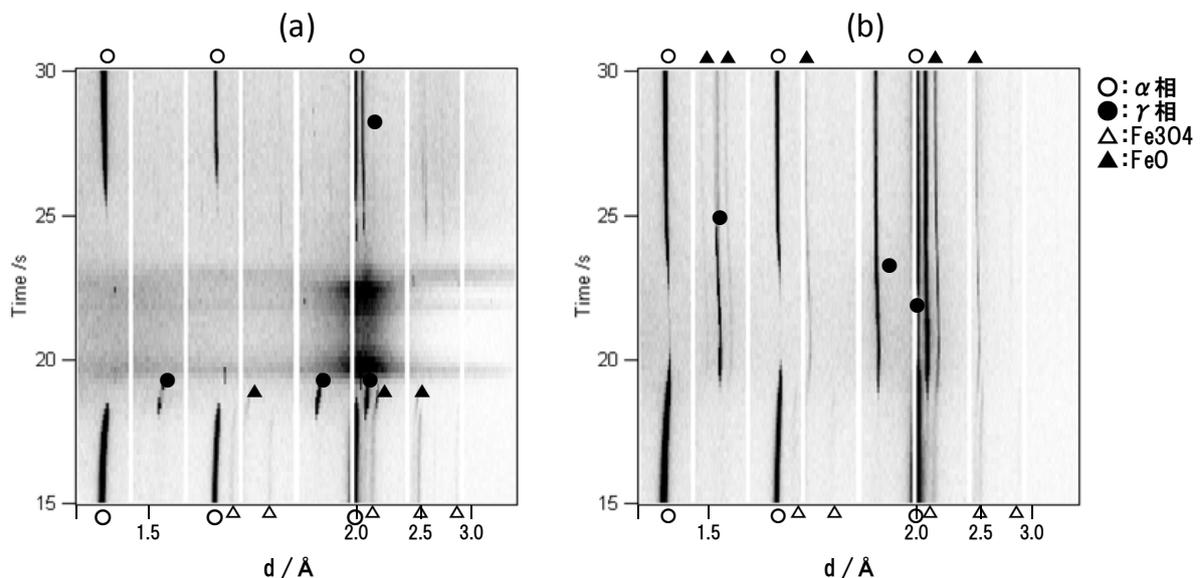


図 3. 溶接時のその場 X 線回折像(面間隔：d vs. 溶接開始からの時間)
(a) : y=2 mm、(b) : y=5 mm

結果および考察：

図2に低炭素鋼の溶接前の回折X線像を示す。CeO₂(420)の回折線から較正したカメラ長：1019 mmとPILATUS2Mでの回折像位置から相を同定した。溶接前はフェライトα相と表面酸化層のFe₃O₄からなっている。表面酸化層の除去によりFe₃O₄からの回折線は微弱である。X線回折像の鉛直方向(幅31素子分)を抽出・一次元化し、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=2 mmの溶融領域、(b)はy=5 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、Fe₃O₄が熱膨張し18秒でFeO、γ相に相変態・熱膨張しながら19秒後に溶融した。24秒後にγ相、続いてα相が析出した。図3(b)のHAZ領域では、α相、Fe₃O₄からFeO、γ相に相変態・熱膨張・熱収縮し、23秒後からα相が析出し、冷却後はα相、γ相、FeOとなった。

無歪のCeO₂(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、sin²ψ法により解析した応力は3~8 MPaとなり、この精度内でフェライトα(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=5 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sin²ψ法により、温度は格子定数とα相の線膨張係数：11.7×10⁻⁶/°Cから算出した。TIG溶接前のMAG溶接止端部はMAG溶接・表面酸化層除去により400 MPa程度の圧縮応力となっていた。図4から、領域I：トーチ位置(x)：-40~-25 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(未解析部)、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。これらは、2014A期に実施した結果とほぼ同様な結果となったが、本実験では、TIG溶接後HAZ部で300 MPa程度の圧縮応力が残留し、2014A期での結果より100 MPa程度大きな値となっており、MAG溶接若しくは表面酸化層除去の影響と考えられる。HAZ領域での圧縮応力の増加は繰返し疲労による亀裂起点回避の観点で有効と思われる。

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

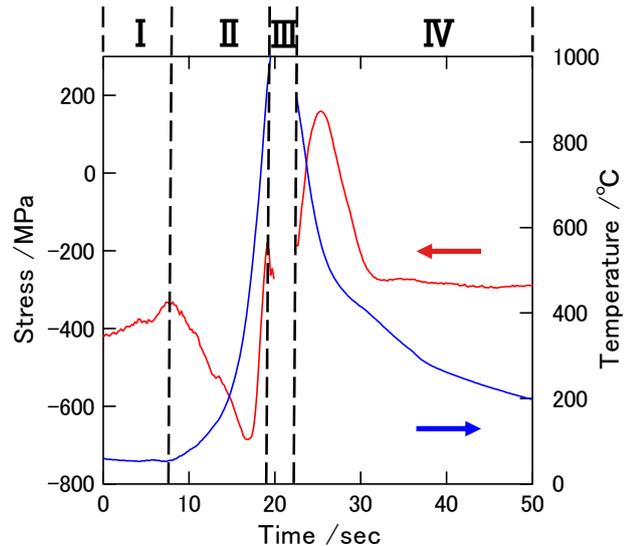


図4. 溶接時の応力と温度の時間依存性
y=5 mm