320

# USP 処理した異材溶接継手の熱負荷前後における 残留応力マッピング

日本原子力研究開発機構 〇秋田貢一, 鈴木裕士 発電設備技術検査協会 西川 聡, 大北 茂

# Residual Stress Mapping on Ultrasonic Shot Peened Dissimilar Weld Joint Before- and After- Thermal Loading

## Koichi AKITA, Hiroshi SUZUKI, Satoru NISHIKAWA and Shigeru OHKITA

### 1 はじめに

異なる材料同士を溶接した異材溶接継手が温度変化 を受ける場合、その残留応力は溶接残留応力に両材料の 線膨張係数差に起因する熱応力が重畳した状態となる。 また、溶接部には応力腐食割れなどの対策としてピーニ ングが施されることがあり、この場合、ピーニング残留 応力も重畳する。このように、複数の要因が重畳して発 生する残留応力や、熱サイクル負荷におけるその変化機 構を明らかにするためには、応力の実測が不可欠である。 また、残留応力は部材内でつりあい状態にあるため、部 材表面から内部にかけての残留応力分布を把握するこ とが重要である。ここでは、ピーニングを施した異材溶 接継手の熱負荷前後における表面および内部の残留応 力分布を、X線と中性子の相補利用によって測定した結 果を報告する。特に中性子による測定では、2次元マッ ピングを行い、詳細な残留応力分布を明らかにした。

### 2 実験方法

2.1 試験体 試験体は、SUS316L と NCF600 を溶接金 属 Alloy82 で溶接した異材溶接継手であり、別途比較材 として NCF600 同士を溶接した同材溶接継手も準備した。 異材溶接継手 (D)および同材溶接継手(S)は各2体準備し た(D-1, D-2, S-1, S-2)。試験体寸法を Fig. 1 に示す。試験 体は、全9パスで TIG 溶接し、両面を研削で平面にした 後、電解研磨を施した。次いで、継手の溶接最終パス側 表面に超音波ショットピーニング(USP)を施した。USP は、試験片中央から左右に約±35mmの領域に施工した。 USP 処理後、異材と同材試験体の各1体(D-2 および S-2) に、320℃,2 時間の熱負荷を1回付与した。



Fig. 1 Dimension of specimen.

2.2 残留応力測定 X 線および中性子による残留応力 測定をいずれも室温で行った。

試験体 D-2 と S-2 の USP 施工後における x 軸上の表面 残留応力分布を X 線回折法により測定した。次いで、両 試験体に熱負荷を 1 回付与した後、再度表面残留応力を 測定した。Table 1 に X 線応力測定条件を示す。

熱負荷前である D-1 および熱負荷後の D-2 において、 x 軸を含む横断面内部の残留応力を中性子回折法によっ て 2 次元マッピングした。測定条件を Table 2 に示す。 マッピングは、ビードを中心として x 軸方向に±20 mm で表面から裏面までの 40×10 mm<sup>2</sup>の領域で行い、この 領域で 252 箇所の測定を行った。マッピングにおける x 軸方向と深さ方向の空間分解能は両者とも約 1.4 mm で ある。回折ピーク強度は約 100 カウントとした。なお、 ここでは簡単のため、平面応力を仮定して ( $\sigma_N = 0$ )、T および N 方向のひずみから T 方向残留応力を求めた。

Table 1 X-ray stress measurement condition.

Characteristic X-ray	MnKα
Diffraction	311
Diffraction angle $2\theta$ , deg	152
Irradiated diameter, mm	<b>\$</b> 3
Angle oscillation, deg	±3
Linear oscillation, mm	±4

Table 2 Neutron stress measurement condition.

Facility	OPAL/ANSTO, in Australia
Diffractometer	KOWARI
Wavelength, nm	0.152
Diffraction	311
Diffraction angle $2\theta$ , deg	90
Gauge volume, mm <sup>3</sup>	1×1×27 (T, N)

#### 3 結果および考察

3.1 表面残留応力 熱負荷前後のD-2およびS-2の表面 残留応力分布をそれぞれFig.2およびFig.3に示す。USP による圧縮残留応力は、ビードから離れた位置では NCF600 側でS-2, D-2 ともに約 500MPa、D-2 の SUS316L 側で約 400MPa となり、NCF600 のほうが若干大きい圧 縮残留応力が発生した。また、S-2 では溶接ビードにお ける圧縮残留応力はその周囲よりも小さくなっている。 D-2 でも同様にビードの NCF600 側近傍ではやや小さい 圧縮残留応力となっている。USP 施工条件が一定の場合、 USP によって導入される残留応力の大きさは被施工材 の機械的性質に依存すると考えられる。この点について は、今後、試験体各部の硬さ測定を実施するなどして調 査する予定である。

Fig. 2 および Fig. 3 のそれぞれで熱負荷の前後を比較 すると、D-2、S-2 ともに熱負荷後でも圧縮残留応力は維 持していた。ただし、D-2 では NCF600 側で約 100MPa、 SUS316L 側で約 50MPa 圧縮残留応力が低下し、また S-2 では、D-2 の NCF600 側と同様に約 100MPa 低下した。 ビード付近でも残留応力分布が全体的に平行移動して 低下したが、S-2 のビード中央付近では熱負荷による残 留応力低下はほとんど見られなかった。







Fig. 3 Surface residual stresses in L-direction on similar weld joint (S-2) before- and after-thermal loading.

3.2 内部残留応力 中性子回折による残留応力マッピ ングは、マシンタイムの都合で、まずは異材溶接継手の 熱負荷前 (D-1) および熱負荷後 (D-2) において行った。 Fig. 4 は、x 軸を含む試験体横断面における T 方向残留 応力の非破壊マッピングの結果である。熱負荷前では (D-1)、表面から深さ約 1mm までの領域に USP による 圧縮残留応力、その下に引張残留応力、そして試験片裏 面にむけて引張残留応力が徐々に小さくなっていく様 子が分かる。また、ビードの境界近傍では、特に SUS316L 側における引張残留応力がその周囲よりも若干小さい 値になっている。熱負荷後では(D-2)、表面近傍で圧縮残 留応力低下がみられ、また、NCF600 側では引張残留応 力の低下が認められる。 以上の傾向をより詳細に検討するために、表面近傍の 深さ 0.7 mm と、高い引張残留応力が発生している深さ 2.2 mm における残留応力のライン分布をプロットした。 結果を Fig. 5 に示す。熱負荷により、表面近傍では圧縮 残留応力が、また、内部では引張残留応力が、特に NCF600 側で低下している。

以上のように異材継手、同材継手ともに NCF600 側で 同程度の残留応力低下が生じた。また、SUS316L 側での 低下はそれよりも小さかった。線膨張係数は NCF600 と Alloy82 ではほぼ同じであり、一方、SUS316L と Alloy82 の間ではその差が大きい。したがって、NCF600 側にお ける残留応力低下の原因は、線膨脹係数差に起因して熱 負荷時に発生する熱応力ではなく、残留応力が高い領域 が熱負荷時に材料の降伏点に達し、塑性変形したためと 推測される。



Fig. 4 Residual stresses in T-direction on dissimilar weld joints. Upper figure: D-1 (As USP). Lower figure: D-2 (After thermal loading).



Fig. 5 Residual stress distributions beneath surface on dissimilar weld joints, D-1 (As USP) and D-2 (After thermal loading).

#### 4 まとめ

X線および中性子を用いて応力マッピングを行うこと で、熱負荷による残留応力変化を詳細に把握できること を示した。今後、シミュレーションの併用などにより、 熱サイクル負荷による異材溶接継手の残留応力低下機 構を明らかにする予定である。

謝辞:都市大学生の板野君、吉野君、ANSTOの Dr. V. Luzin に実験にご協力頂いた。本研究の一部には科研費 基盤(B)(No.2336006)を使用した。記して謝意を表す。