

# 放射光白色 X 線を用いた 2 相ステンレス鋼の内部ひずみ測定

原子力機構 ○桐山幸治, 原子力機構 菖蒲敬久,  
北見工大 柴野純一, 原子力機構 金子 洋

## Strain Measurement of Duplex Stainless Steel Using SR White X-ray

Koji KIRIYAMA, Takahisa SHOBU,  
Jun-ichi SHIBANO, and Hiroshi KANEKO

### 1 緒言

2 相ステンレス鋼は Cr 含有量が多いため不働態皮膜が安定で、オーステナイト系ステンレス鋼に比べて全面腐食や孔食に対して優れており、応力腐食割れも起こりにくいことが知られている。そのため、復水器や熱交換器などで用いられることが多いが、溶接接合部における脆化および耐食性の劣化が課題として指摘されている<sup>1)</sup>。溶接接合部近傍では組織的性質や弾性的性質が大きく変化する。さらに多相材料では、負荷環境下において、各相の応力分布が複雑であることが予想される<sup>2)4)</sup>。そのため、各相の結晶レベルでの詳細な観察が重要となる。

そこで、本研究では、各結晶からの同方向を向いた複数の回折面情報を同時に得ることができ、かつ、より深部の微小な領域を観察できる放射光白色 X 線応力測定手法<sup>5)7)</sup>に着目し、2 相ステンレス鋼の結晶レベルでの変形挙動評価に対する有用性を検討した。実際に 1 軸引張負荷時の  $\alpha$  相、 $\gamma$  相における各格子面のひずみを測定し、弾性定数の違いを考慮したひずみ特性を調べた。

### 2 実験方法

**2.1 試験片** 試験片は SUS329J1 である。機械的性質を Table 1 に示す。ヤング率は 186GPa である<sup>1)</sup>。 $\phi 13$  mm の丸棒を Fig.1 に示すような形状に加工した。加工後は、応力除去を目的として 200℃・1 時間の焼鈍を行った。焼鈍温度が通常の鉄鋼材料に施す温度より低いのは、2 相ステンレス鋼が 475℃および 900℃付近において短時間で熱時効による脆化を起こすためである。試験片平行部は #2000 のエメリー紙で研磨した。

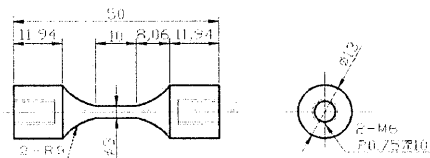


Fig.1 Specimen configurations

Table 1 Mechanical properties of specimen

Tension Test	Yield Strength @0.2%	Tensile strength, N/mm <sup>2</sup>	Elongation, %	Reduction of area, %	Hardness, HBW
Specification	>390	>590	>18	>40	<277
Results	604	639	33	83	247

**2.2 実験条件** 本研究は日本原子力研究開発機構の専用ビームライン SPring-8/BL14B1 にて行った。SUS329J1 の熱膨張係数: 10.1 (10<sup>-6</sup>/K) に適合したひずみゲージを試験片平行部に取り付け、それを簡易型引張試験機にセットした上で、放射光白色 X 線を照射し、透過した回折 X 線を光軸より  $2\theta=10^\circ$  回転させた位置に設けた Ge 半導体検出器(SSD)を用いて、各回折面の反射をエネルギー分散法により一度に測定した。その回折面情報から試験片軸方向(引張軸方向)のひずみを測定した。試験片前方のスリットは縦 0.05mm×横 0.3mm、後方のコリメータ/スリットは縦 0.05mm×横 5.0mm とした。

測定時の条件を Table. 2 に示す。各条件での測定結果は、測定点の全回折 X 線プロファイルを積算している。簡易引張試験機によって試験片に負荷したひずみ量は降伏点以下の弾性変形領域の範囲内である。

Table 2 Measurement conditions

測定 No	負荷ひずみ, $\mu\epsilon$ *1	負荷ひずみの降伏点に対する割合, % *2	測定範囲 *3
1	0	0	縦 9 点×横 5 点
2	845	26	縦 5 点×横 3 点
3	1356	42	縦 5 点×横 3 点
4	1604	49	縦 5 点×横 3 点
5	2152	66	縦 5 点×横 3 点
6	2838	87	縦 5 点×横 3 点

\*1: 無負荷時の値を 0 と設定、 \*2: ヤング率=186GPa、

降伏応力を 0.2%耐力=604MPa とした場合

\*3: 測定間隔は縦横共 0.3 mm、縦横の中心が試験片中心

### 3 結果および考察

**3.1 ひずみ測定回折面の決定** 無負荷における試験片の回折 X 線プロファイルの測定結果を Fig.2 に示す。 $\alpha$  相、 $\gamma$  相それぞれからの回折面ピークが多数測定された。これらの回折面をひずみ測定のための回折面と設定した。それぞれのピークエネルギーを  $E_{hkl-0}$  として、次項での引張負荷時における  $E_{hkl}$  とのピークシフトからひずみを算出した。

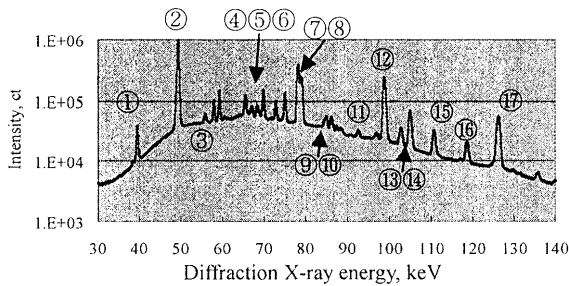


Fig. 2 Diffraction X-ray profile of duplex stainless steel using white X-ray

- ①  $\gamma$  (200), ②  $\alpha$  (200), ③  $\gamma$  (220), ④  $\gamma$  (311), ⑤  $\gamma$  (222),  
 ⑥  $\alpha$  (220), ⑦  $\alpha$  (310), ⑧  $\gamma$  (400), ⑨  $\alpha$  (222), ⑩  $\gamma$  (331),  
 ⑪  $\alpha$  (321), ⑫  $\alpha$  (400), ⑬  $\gamma$  (511)/(333), ⑭  $\alpha$  (330)/(411),  
 ⑮  $\alpha$  (420), ⑯  $\gamma$  (600)/(442), ⑰  $\alpha$  (431)/(510)

### 3.2 引張負荷下における各相回折面のひずみ特性

回折プロファイルのピークシフトから求めた微視的ひずみ値とひずみゲージによって測定した負荷ひずみ値を相毎に平均した結果を Fig. 3 に示す。各相共に、負荷ひずみが 0.0016  $\epsilon$  の測定点で減少していた。また、その測定点以下では機械的ひずみ値よりも大きく、 $\alpha$  相よりも  $\gamma$  相の平均微視的ひずみの方が大きかった。反対に、その測定点以上では傾向が反転した。

回折面毎にまとめた結果を Fig. 4、Fig. 5 に示す。 $\alpha$  相においては、(411)/(330)、(420)、(220)、(321)で、 $\gamma$  相では(511)/(333)、(311)、(220)、(222)で微視的ひずみ値の大きな変動が見られた。また、Kröner モデルで算出した X 線のヤング率  $E \times 10^{-10}$  が小さいほど、回折面毎の微視的ひずみ値が大きい傾向があった。

大きな変動が見られた回折面の多くは、 $\alpha$  相鉄におけるすべり面 {110}{112}{123}、 $\gamma$  相鉄における {111} に相当している。また、この変動は 0.0016  $\epsilon$  付近において顕著に発生していた。このことから、2 相ステンレス鋼において、実際には負荷ひずみが降伏応力の 50% 程度の割合であっても、材料内部においては局所的なすべりによるひずみの解放や塑性変形が生じている可能性が推測された。

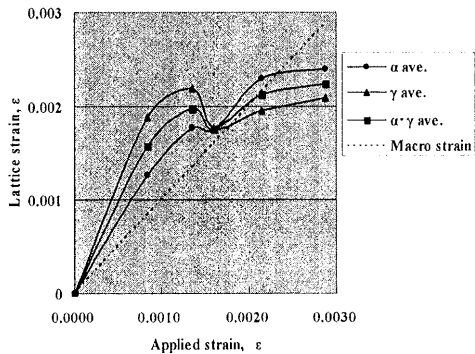


Fig. 3 Average of lattice strains of  $\alpha$ -Fe and  $\gamma$ -Fe of duplex stainless steel under tensile stress

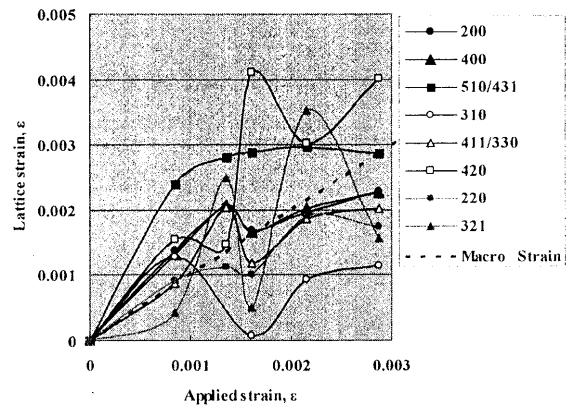


Fig. 4 Lattice strains of  $\alpha$ -Fe of duplex stainless steel under tensile loading

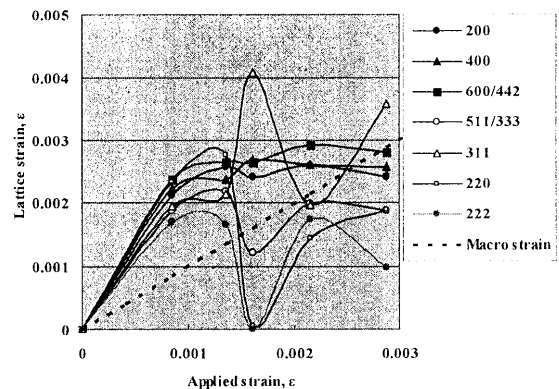


Fig. 5 Lattice strains of  $\gamma$ -Fe of duplex stainless steel under tensile loading

## 4 結言

放射光白色 X 線を用いた 2 相ステンレス鋼の内部ひずみ測定を行った。その結果、引張負荷時に回折面によってひずみが大きく変動する様子が確認できた。また、多数の回折面ピークを得られる本測定手法は多相からなる鉄鋼材料や複数の回折面情報を解析する必要がある際には有効な手法であることが確認できた。

## 参考文献

- 1) “二相ステンレス鋼の上手な使い方 - その特性と使用実績”、(社)日本材料学会・腐食部門委員会 (1999)
- 2) 友田ら、熱処理、38、pp.174-179(1998)
- 3) Harjo et al., Mat. Trans., vol.43, 7, pp.1969 (2002)
- 4) Dakhlaoui et al., Mat. Sci. and Eng. A, vol.444, pp.6 (2007)
- 5) 柴野ら、材料、Vol.56 No.10, pp.985 (2007)
- 6) Shobu et al. 9th SRI conf. proc., AIP CP Vol.879 (2007)
- 7) 柴野ら、材料、Vol.57 No.7 (2008)
- 8) 田中ら、“残留応力の X 線評価” 養賢堂 (2006)
- 9) Daymond et al., Acta mater, Vol.48, pp.553 (2000)
- 10) Hearmon R.F.S. The elastic constant of crystals and other anisotropic materials, vol.18. (1984)