# 高エネルギーX線による溶接内部応力測定の確立

Internal Residual Stress in Welded Part using Area Detector

鈴木 賢治 <sup>1)</sup>	池田 達哉 1)	熊倉 和也 <sup>1)</sup>
Kenji SUZUKI	Tatsuya IKEDA	Kazuya KUMAKURA
菖蒲 敬久2)	城 鮎美2)	張 朔源 <sup>2)</sup>
Takahisa SHOBU	Ayumi SHIRO	Shuoyuan ZHANG

#### <sup>1)</sup> 新潟大学 <sup>2)</sup> 原子力機構

これまでの研究により、粗大粒を持つ溶接材の残留応力測定については、Mg 合金を対象 にして 30 keV のX線エネルギーを用いた回折斑点追跡法が確立している。本手法を 70 keV レベルへ拡張し、突き合わせ多層溶接したステンレス鋼に適用した。PILATUS の検出効率 は17レーム 30 min を要して低かったが、ひずみ分布を測定することができた。CCD は PILATUS よりも検出効率が低く、十分な測定ができなかった。

キーワード: 溶接,残留応力,回折斑点追跡法,ステンレス鋼,内部応力測定

### 1. 目的

粗大粒および溶接部の応力測定を確立するために、スパイラルスリットの開発・改良、回折スポット追跡法を開発した<sup>1)</sup>.本手法の有効性については、PILATUS検出器を用いて、粗大粒を持つAl合金および Mg 合金に曲げ負荷を与え、その応力を評価することにより、回折スポット追跡法の有効性を実証した.加えて、Mg 合金の溶接材の残留応力測定に本手法を応用し、有効性を確認してきた<sup>2)</sup>. ただし、これらの実験は PILATUSの検出効率を考慮して 30 keV での実験である.現在、鉄鋼材の溶接残留応力については実証されておらず、X線波長エネルギー 70 keV レベルでの有効性を確認することが課題となっている.本共用課題においては、高エネルギーX線に対する改良型のスパイラルスリットの性能の評価、CCD 検出器の高エネルギーX線における有効性を確認する.

これまで鉄鋼材系に対する内部残留応力評価手法は、0次元検出器(回折計)を使ったひずみスキャ ニング法が確立している.しかし、ステンレス鋼に代表される粗大粒や溶接部の残留応力測定に対 しては、0次元検出器では連続回折環が得られず未解決であった.粗大粒の応力評価の解決には、大 きく分けて2つのアプローチがある.一つは単結晶からの手法、もう一つは多結晶体からの手法で ある.申請者は、後者の手法からその解決策を探ってきた.具体的には、前述のようにスパイラルス リットを開発・改良し、回折スポット追跡法を提案し、その有効性を実証してきた.その最終段階と して、鉄鋼材に適した70 keV の波長と CCD 検出器を用いて回折スポット追跡法を新たに試みた.本 手法が確立するならば、これまで未解決であったステンレス鋼やニッケル基合金の溶接残留応力の測 定についての多結晶体からのアプローチが完成できる.

現在,発電設備の溶接部のSCCき裂の進展予測に溶接内部の複雑な残留応力分布が必要とされる が,そのデータがなく,もっぱら有限要素解析に頼っている.しかし,数値計算の結果が現実の残留 応力分布を正確に表しているかを確かめることができていない.本手法が確立するならば,溶接部

Materials	C	Si	Mn	Р	S	Ni	Cr	Mo	Fe
SUS316L	0.01	0.58	1.23	0.033	0.002	12.18	17.48	2.08	Bal.
Y316L	0.007	0.48	1.6	0.023	0.001	12.24	19.15	2.29	Bal.

Table 1: Chemical compositions (mass%).

Table 2: Welding conditions.

	Current	Voltage	Torch speed	Wire feed	Interpass
Pass	(A)	(V)	(mm/s)	rate (g/s)	temperature (K)
1st	120	10	1.5	0.103	305
2nd	150	10	1.5	0.147	315
3rd	150	10	1.5	0.147	340

の残留応力評価の信頼性改善に大きな進歩を与え、溶接技術の改善につながる。溶接による構造物の開発と保全についての新しい研究の展開が期待できる。

# 2. 実験方法

## 2・1. 試験片

試験片の材料は,母材 (SUS316L) および溶接ワイヤー (Y316L) の両方ともオーステナイト系ステンレス鋼 SUS316L を用いた.化学成分を表1に示す.

板厚9mm,幅100mm,長さ100mmの試験体(裏面に研削加工)の溶接試験体を製作し,その平板の中央に深さ7mm,幅6mm,半径3mmのU溝開先加工を施した.さらに,溶接による変形を拘束するために,試験体の溶接始端および終端部を溶接により固定した.U溝開先に3パスにより溶接を施して,ほぼ開先の溝を覆うように肉盛りした.溶接方法はTIG溶接を用い,その条件を表2に示す.



Fig. 1: Welding specimen.



Fig. 2: Experiment using diffraction spot trace method.

溶接完了後,固定していた溶接部を切り離して溶接試験体にした.図1に試験片外観を示す.溶接 始端および終端部は溶接部が板厚よりも低い凹状態になっているが,溶接部全体は外観を見てもき れいで,平坦でなだらかに凸状態で板厚よりごくわずか厚めである.なお,本報告では試験片の溶接 線垂直方向がひずみ測定におけるx方向,溶接線方向がひずみ測定のy方向と定義する.

## 2・2. X線ひずみ測定

本実験においては、シンクロトロン放射光の挿入光源を利用し、高エネルギーX線の強い透過力 により板厚9mmのステンレス鋼の透過させ、内部ひずみを測定する.そのため、SPring-8の日本原 子力機構専用ビームライン BL22XU を利用して実験を行った<sup>1</sup>.

ひずみ測定方向は、 $\varepsilon_x$  (溶接線垂直) と $\varepsilon_y$  (溶接線平行)の2方向である. オーステナイト系ステンレ ス鋼の粗大粒および溶接金属の粗大粒のために、回折環は斑点状になることから、内部ひずみ測定 方法は回折斑点追跡法 (DSTM)を用いることにした。図2に実験の様子を示す. スリットで絞られた X線ビームは溶接試験片を透過し、その回折 X線は改良されたスパイラルスリット<sup>2</sup>を通過して、水 平(x) および垂直(y)の各方向に設置した2軸ステージに固定された PILATUS-100K 検出器に到達す る. なお、この PILATUS 検出器とは別に CCD 型X線検出器も用意した.

表3に本実験のX線条件を示す. X線エネルギーは70.031 keV であり, 高エネルギーに対する PI-

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup>May 26-29, 2013, BL22XU, 課題番号 2013A-E07 (JASRI No. 2013A3784)

<sup>&</sup>lt;sup>2</sup>改良型スリットは従来のスパイラルスリットと異なり、スリット角度が回折角と一致するように製作されており、回 折角度が変わってもコリメーションは変わらない。そのため、回折角度によるゲージ体積寸法が変わらず、空間分解能の 精度が優れている。改良型スリットの精度に関する実験は 2012B-E12 にて報告済み。

Beam line	BL22XU in SPring-8
X-Ray energy	70.031 keV
Wavelength	0.177042 Å
Material	Welding joint of SUS316L (#2)
Thickness of sample	9 mm
Detector	PILATUS-100K
Spatial resolution	0.172 mm/pixel
Slit dimensions	$0.2  imes 1.0 \text{ mm}^2$
Exposure time	30 min
Vertical elements	L = 1983.22  mm
of detector	$\alpha = -0.2871 \deg$
	beam centre = $(407.994, 95.921)$
	v-offset $= 330 \text{ mm}$
Horizontal elements	L = 1974.06  mm
of detector	$\alpha = 0.3152 \deg$
	beam centre = $(119.080, 22.374)$
	h-offset = 280 mm

Table 3: Conditions for beam line X-rays.

LATUSの検出効率が低いので,入射ビームのスリットを敢えて 0.2×1.0mm<sup>2</sup> と垂直方向を広くした. PILATUS 検出器の補正を行った. それぞれ水平 (*h*) および垂直方向 (*v*) について,回折中心から検 出器までの距離 *L* および傾き角度 *α* を求めた. 具体的には,セリアの回折を利用して表1の補正を得 た. その各パラメータを利用して,次式により溶接試験片の回折角度 2*θ* の計算を行う. 垂直方向 (PILATUS-1) は

$$h_v = \sqrt{[330 - 0.172 (x - 407.994)]^2 + [0.172 (y - 95.921)]^2}$$
 [mm] (1)

$$2\theta = \arctan\left(\frac{h_v \cos \alpha}{L_v + h_v \sin \alpha}\right) \tag{2}$$

また,水平方向 (PILATUS-2) は

$$h_h = \sqrt{[280 + 0.172 (x - 119.080)]^2 + [0.172 (y - 22.374)]^2} \quad [mm]$$
(3)

$$2\theta = \arctan\left(\frac{h_h \cos \alpha}{L_h + h_h \sin \alpha}\right) \tag{4}$$

を用いて計算する.3

### 3.実験結果および考察

図3に PILATUS で測定した回折像の例を示す.図3(a) は水平方向の回折像であり、この画像により溶接線垂直方向(T)のひずみを測定する.ビーム中心は回折像の左方向に位置する.220回折、311

<sup>&</sup>lt;sup>3</sup>本実験の波長 70.031keV に対してリートベルト解析すると、各 20 は、220 回折 (8.022°)、311 回折 (9.409°)、222 回折 (9.828°)、400 回折 (11.353°) となる. なお、PILATUS 検出器アレイの x 軸方向 (紙面右方向) が、水平では高回折方向、垂 直ではビーム中心方向に相当するので、注意が必要である (Fig. 3).



(b) Vertical

Fig. 3: PILATUS images (depth z = 6.9 mm, x = 8.0 mm).

回折,222回折の斑点が確認できる.また,図3(b)は垂直方向に設置した PILATUS で測定した回折 像であり、この PILATUS により溶接線方向(L)のひずみを測定する.ビーム中心はこの回折像の紙 面の右方向に位置する.311回折,222回折が認められる.400回折が測定されることを期待したが, 残念ながら測定できなかった.

両方向とも 30 min の測定を蓄積したが、100 counts を超えることは難しかった。70keV のX線エ ネルギーに対して、PILATUS の検出効率が低下するために、板厚 9 mm の SUS316L の回折を測定す ることは実質困難であった。実験のビームタイムの都合から本実験では、深さ方向(z) に 0.32 mm ス テップでスキャニングした。スキャニング位置は x = 0, 4, 8, 12 mm の 4 mm ピッチとした。理想と しては、0.2 mm ステップで 2 方向のひずみを広い範囲で測定するためには、1 点 1 min の測定時間 で数百カウントは必要である。

PILATUS 検出器の代わりに CCD 検出器も用意して同様に回折を測定したが, PILATUS よりも悪かった.高エネルギーに対応したその場測定できる測定器の開発に期待したい.高エネルギーの測定効率が改善されるならば,計測できる回折斑点の数も増える可能性があり,より効率的,詳細な実験が期待できる.



Fig. 4: Strain maps in cross section of welded SUS316L.

さて、測定された回折斑点から DSTM により回折角を決定した。測定点を増やす対策として、回 折面を限定せずに測定した。測定された  $hk\ell$  回折面の格子間隔  $d_{hk\ell}$  から次式を用いて格子定数 a を 求めた。

$$a = \frac{d_{hk\ell}}{\sqrt{h^2 + k^2 + \ell^2}}\tag{5}$$

格子ひずみεは

$$\varepsilon = \frac{a - a_0}{a_0} \tag{6}$$

から求めた4.

溶接線垂直方向 (T) のひずみ  $\varepsilon_x$  および溶接線方向 (L) のひずみ  $\varepsilon_y$  のマップを図4に示す. 図中の x = 0 mm の位置が試験片の中央切断面に相当し,溶接部中央に相当する. 図 (a) の溶接線垂直方向 のひずみ  $\varepsilon_x$  を見ると,溶接部から離れた (x,z) = (4,6) に引張り領域が生じている. また,溶接部は 圧縮となっている.

<sup>&</sup>lt;sup>4</sup>測定時間も限られていたので, 無ひずみの格子定数 *a*<sub>0</sub> は, 本実験で測定された全格子定数の平均をそれぞれの方位 ごとに求めて利用した.

他方,溶接線方向のひずみ ε<sub>y</sub>は,図(b)に示すように溶接部に大きな引張りが生じており,その周 りを圧縮ひずみが取り囲むように生じている.引張りひずみのレベルは溶接線方向の方が溶接線垂 直よりも大きい.

なお,面外方向のひずみ ε<sub>z</sub> を測定できないために応力を計算することはできないので,本実験に おいて応力を求めていない.

#### 4. まとめ

板厚9mmの突き合わせ3層溶接したオーステナイト系ステンレス鋼の内部残留応力の分布を回 折斑点追跡法により測定した。得られた結果は、以下のごとくである。

- 1. 70 keV 相当の高エネルギーにおいて PILATUS の検出器効率が低下するために,検出時間に 30 min を要した. CCD 検出器の有効性についても試してみたが, PILATUS よりも検出成績は低かった.
- 回折斑点追跡法にて溶接線垂直方向および溶接線方向のひずみ分布を測定した。溶接方向垂直の残留応力ひずみは溶接部近傍の内部に引張りが発生した。溶接線方向の残留ひずみについては、溶接部に引張りが生じた。
- 3. 改良型スパイラルスリットを用いて回折斑点追跡法を利用すれば、溶接材の残留応力分布を測定することは原理的には十分に可能である。PILATUS検出器の改良により高エネルギーX線の検出効率が優れた2次元計数型検出器の開発が実現したならば、本実験手法によりオーステナイト系ステンレス鋼やニッケル基合金の内部残留応力を容易に測定することができる。

今後は,突き合わせ多層溶接したオーステナイト系ステンレス鋼の残留応力を有限要素法シミュ レーションして,ひずみ分布を比較する予定である.

### 5. 参考文献

- 1) 鈴木賢治, 菖蒲敬久, 城 鮎美, 豊川秀訓, "2次元検出器による内部ひずみ評価法", Vol. 11, No. 2, pp. 99-106 (2012).
- 2) 鈴木賢治, 菖蒲敬久, 城 鮎美, 張朔源, "2次元検出器を利用した粗大粒の内部応力評価", 第47 回X線材料強度に関するシンポジウム講演論文集, pp. 7-12 (2012), 日本材料学会.