

X線回折による溶接金属部の非破壊的残留応力測定技術の開発

Development of Non-Destructive Stress Measurement Technique with X-ray Diffraction Method for Weld Metal

王 昀 大城戸 忍 波東 久光
Wang Yun Okido Shinobu Hato Hisamitsu
菊地 敏一 千葉 篤志
Kikuchi Toshikazu Chiba Atsushi

構造物溶接金属部の健全性評価技術として、X線回折による非破壊的残留応力測定技術の開発を進めている。溶接部およびその近傍では、入熱量によって微小領域の残留応力分布が発生する場合があります。空間分解能および回折強度の両立を考慮した測定が必要である。また、集合組織や結晶の粗大化の影響により、従来の一次元X線回折による $\sin^2\psi$ 法での測定が困難な場合があります。そこで、この研究では一次元X線回折により、抵抗スポット溶接部近傍の微小領域における残留応力分布の測定を試みた。さらに、 $\cos\alpha$ 法に基づき、実機の溶接構造物の残留応力測定に適用可能な二次元X線回折システムを開発し、ニッケル基溶接金属などを対象に、従来法との比較によって有効性を確認した。この技術は、原子力発電プラントなどの予防保全への適用が期待される。

1. はじめに

構造物の溶接部には、高い信頼性が要求される。溶接金属部には、熱履歴によって引張残留応力が発生し、SCC (Stress Corrosion Cracking: 応力腐食割れ) や疲労き裂の起点となるため、実機構造物の品質管理上、その評価が重要であり、溶接金属部の非破壊的残留応力測定技術の開発が必要となる。

代表的な非破壊的残留応力測定技術として、X線回折法¹⁾がよく利用されている。X線回折法は、表面下10 μm 程度までの表面近傍の局所領域における原子格子面間隔の変化から応力を評価する手法であり、日本材料学会により、その測定方法が標準化されている¹⁾。その中では結晶粒径や微細組織などの影響が十分考慮されている。

一方、抵抗スポット溶接のような入熱量の小さい溶接金属部近傍における微小領域の残留応力分布の測定は、照射領域および回折強度に制限されるため、容易ではない。また、溶接金属部では、熱履歴による結晶粗大化や集合組織の影響により、X線回折強度が結晶の数や方位に制限さ

れ、従来の0次元や一次元X線回折を用いた $\sin^2\psi$ 法では、応力測定が困難な場合がある。実機測定においては、構造物の形状の制約で、測定が困難な場合はある。特に狭隘(あい)な空間における測定では、X線管球および検出器の揺動が必要である従来の $\sin^2\psi$ 法は適用できない場合が多い。そのため、近年 $\sin^2\psi$ 法のほかに、 $\cos\alpha$ 法^{2), 3)}や2D法⁴⁾などの二次元X線応力評価理論に基づいた残留応力測定が注目されている。

そこで、この研究では、測定の空間分解能を向上させ、一次元X線回折により、抵抗スポット溶接部近傍の微小領域残留応力分布の測定を試みた⁵⁾。また、 $\cos\alpha$ 法を測定理論として、大型压力容器内部の溶接部を測定対象に、可搬型X線回折装置にIP (Imaging Plate: イメージングプレート) を搭載して、二次元X線回折による残留応力測定技術および実機測定のための位置決め治具を開発した。溶接金属を含めて、異なる表面加工条件で仕上げた複数の供試材の応力を測定し、従来法の測定結果と比較することで、この技術の有効性を確認した。また、開発した二次元X線応力測定システムをBWR (Boiling Water Reactor: 沸騰水型原子炉) のシュラウドサポートプレートを模擬したモックアップ試験体へ適用して、大型構造物の実機測定におけるこのシステムの有効性を検討した⁶⁾。

ここでは、X線回折による溶接金属部の非破壊的残留応力測定技術の開発について述べる。

2. X線回折による残留応力測定の原理

X線回折法では、ブラッグ条件を満足する結晶からの回折現象を利用して、次式に示す関係から、回折面間隔 d に対応した角度 θ を測定する。ただし、この λ は特性X線の波長である。

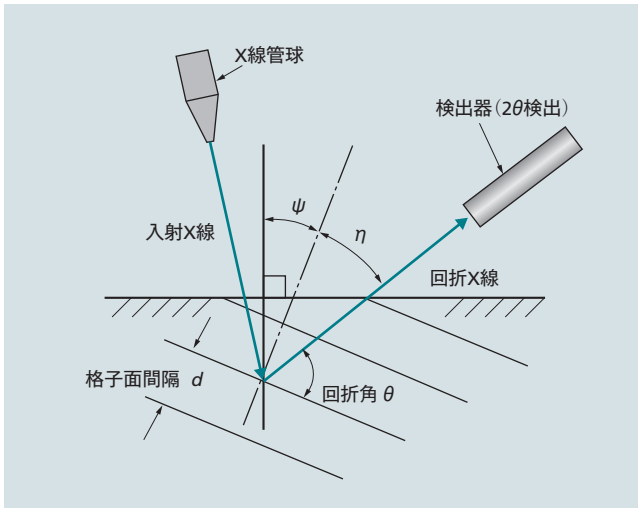


図1 | X線回折による残留応力測定的光学系の模式図

応力が作用すると材料の結晶格子がひずむため、格子面間隔 d が変化する。 d の変化は各 ψ での回折角 θ として検知し、応力を算出する。

$$\lambda = 2d \sin \theta \quad (1)$$

通常X線の侵入深さは浅く、表面下10 μm の情報しか得られないため、平面応力状態が仮定できる場合が多い。そこで、格子面法線と試料表面法線のなす角 ψ と回折角 θ の関連を用いて、応力 σ_x は式(2)で求められる。

$$\sigma_x = -\frac{E_{hkl}}{2(1+\nu_{hkl})} \frac{\pi}{180} \cot \theta_0 \frac{\partial(2\theta)}{\partial(\sin^2 \psi)} \quad (2)$$

ここで、 θ_0 は無ひずみ状態での回折角であり、 E_{hkl} および ν_{hkl} は、それぞれ所定のhkl回折におけるX線縦弾性係数とポアソン比である。つまり、図1の光学系模式図に示すように異なる ψ に対応する 2θ を測定すれば、 $2\theta - \sin^2 \psi$ 線図の傾きから応力 σ_x が求められる。ここで、回折角 θ の余角を η とする。

3. 一次元X線回折による微小領域の残留応力分布測定

3.1 抵抗スポット溶接の概要

抵抗スポット溶接は、溶接速度が速く、工程が簡単なため、低コストで部品などを組み立てることが可能である。このメリットにより、自動車、航空機から家電製品までさまざまな分野で幅広く応用されている⁷⁾。

一方、施工するときの入熱履歴によって引張残留応力が発生するため、製品の健全性を評価するには、その残留応力分布を把握することが大切である。しかし、ほかの溶接に比べて、抵抗スポット溶接は入熱領域が狭いため、残留応力測定は困難であり、その残留応力とき裂の発生形態の相関性については不明な点が多い。そこで、この研究はX線回折法を用いて、抵抗スポット溶接を施工したNi合金の表面および深さ方向の残留応力を測定した。

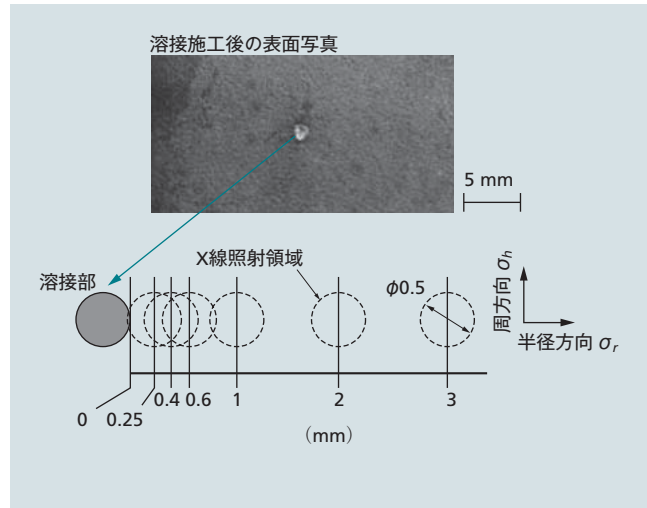


図2 | 抵抗スポット溶接近傍の表面残留応力測定位置

照射領域は0.5 mm、溶融境界から1 mm以内の微小領域の応力分布を測定するために、照射領域をオーバーラップさせながら測定を行った。

3.2 供試材および測定方法

供試材は、Ni合金母材NCF600 (JIS G 4902)である。抵抗スポット溶接は、株式会社東京測器研究所のW-50R抵抗スポット溶接装置を用いて45 Wの出力で施工した。

残留応力測定には、Proto Manufacturing Limitedの可搬型X線回折装置「iXRD Combo」を用いた。特性X線はMn-K α で、311回折で測定した。残留応力測定は、抵抗スポット溶接部の溶融境界から0.25/0.4/0.6/1/2/3 (mm)の位置で行い、それぞれの位置で半径方向(σ_r)および周方向(σ_h)の2方向の残留応力を測定した(図2参照)。測定の空間分解能を高めるため、X線照射領域の直径は0.5 mmとし、さらに、溶融境界から1 mm以内の微小領域の応力分布を測定するために、照射領域をオーバーラップさせながら測定を行った。なお、応力評価に十分な回折強度を得るため、測定時間を20分にした。また、表面から25/50/75/150/450 (μm)まで電解研磨し、深さ方向の残留応力分布を測定した(図3参照)。

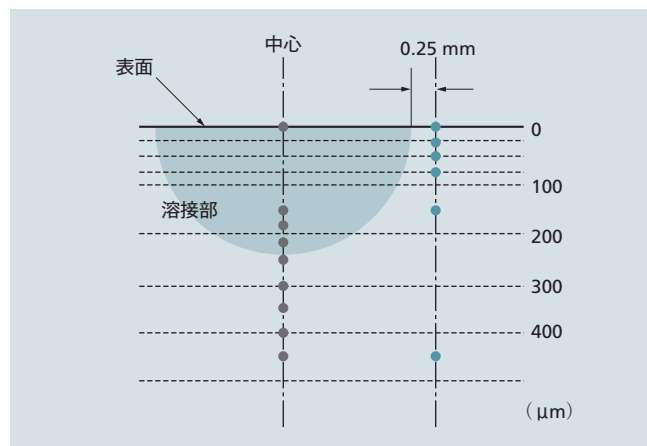


図3 | 抵抗スポット溶接近傍の内部残留応力測定位置

電解研磨により、深さ方向の残留応力分布を測定した。

3.3 残留応力測定結果および考察

抵抗スポット溶接施工前の表面初期残留応力は約100 MPaの圧縮応力であった。溶接施工後の溶接部近傍の表面では、溶接中心部に対して半径方向(σ_r)、周方向(σ_h)の残留応力は、溶接の中心部に約300 MPaの最大引張応力を有し、左右対称で溶融境界から約1.5 mmまでの範囲に分布している(図4参照)。溶接の中心部では、溶接金属が完全に溶融し再凝固するため、残留応力は主に凝固後周辺の拘束に起因すると考えられる。一方、溶融境界の近傍では、溶接中の温度勾配により、高温部の膨張が周囲の低温部に拘束され、圧縮側の降伏が発生するため、入熱後冷却収縮によって引張残留応力が生じる。通常温度勾配は溶接の中心部から離れると緩やかになるため、残留応力分布は左右対称で漸減すると考えられる。

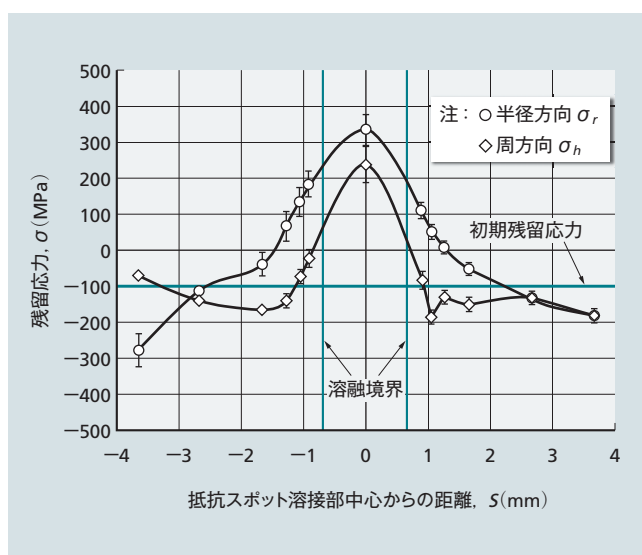


図4 | 抵抗スポット溶接近傍の表面残留応力分布
測定領域(空間分解能)および回折強度を適切化することにより、微小領域の応力分布の測定可能性を確認した。

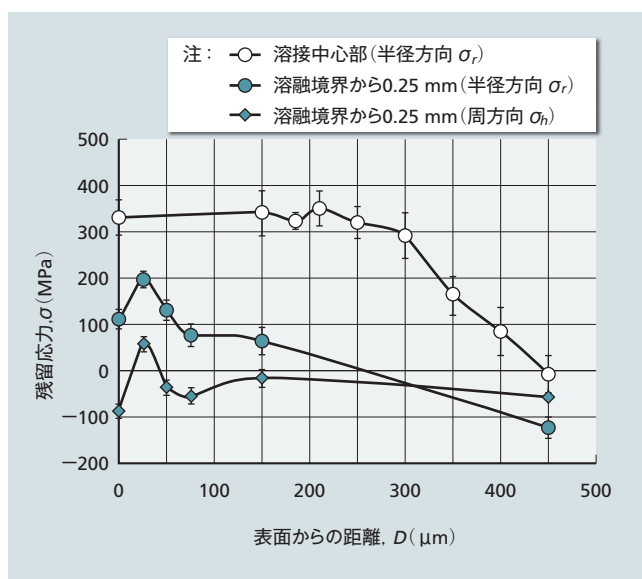


図5 | 抵抗スポット溶接近傍の内部残留応力分布
電解研磨により、深さ方向の残留応力分布を測定した。

一方、内部の応力分布は、溶接の中心部で、表面下300 μmまではほぼ一定の引張りの330 MPaであり、300 μm以上は徐々に減少する。溶融境界から0.25 mm位置の深さ方向の残留応力は、25 μm深さでは最大の引張りの200 MPaであり、それ以上の深さでは残留応力は漸減する(図5参照)。溶接の中心部は、表面下300 μmまでは、再凝固するときに大きな内部拘束を受けるため、周囲よりも高い引張残留応力を生じると考えられる。

以上のように、測定領域および回折強度を適切化することにより、抵抗スポット溶接部のような微小領域の応力分布を測定することができた。今後、この方法は抵抗スポット溶接のような入熱の小さい溶接部の健全性評価や微小領域の数値解析精度の向上へ寄与できると考えられる。

4. 二次元X線残留応力測定システムの開発

4.1 測定の原理

二次元X線応力評価理論に基づく $\cos\alpha$ 法は田中ら²⁾によって提案された。吉岡ら⁸⁾はIP法への適用性を示すとともに、佐々木ら⁹⁾は $\cos\alpha$ 法を三軸応力測定に拡張した。 $\cos\alpha$ 法は、測定対象物と無ひずみの標準試料(通常は焼きなました粉末)の両回折環の、入射中心に対する半径方向の距離差から応力を算出する方法である(図6参照)。

IPを用いる場合は、X線源をIPの中心に設置し、IP面に垂直にX線を入射する。入射X線と回折面法線間のなす角、すなわち回折角 θ の余角 η は、IPに記録した回折環が $+\eta$ 側と $-\eta$ 側に分けられる。佐々木ら⁹⁾により、入射角 ψ_0 を50 deg以下に設定すれば、回折環上各位置の η を一定と仮定しても実用上問題がない。ここで、 $-\eta$ 側からX線入射中心Oに対する時計回りの中心角を α とする。測定応力 σ_x は次式により計算される。

$$\sigma_x = KM / [\sin^2(\psi_0 - \eta) - \sin^2(\psi_0 + \eta)] \quad (3)$$

上記の材料定数 K および複数の α から得られた $L\text{-}\cos\alpha$ 線図の傾き M は、次に示す式(4)、(5)により導出される。ここで、回折環から求められるパラメータ L は式(6)で与えられる。

$$K = (\cos^2\theta \tan 2\theta / 2l' \tan\theta) \cdot E_{hkl} / (1 + \nu_{hkl}) \quad (4)$$

$$M = dL/d(\cos\alpha) \quad (5)$$

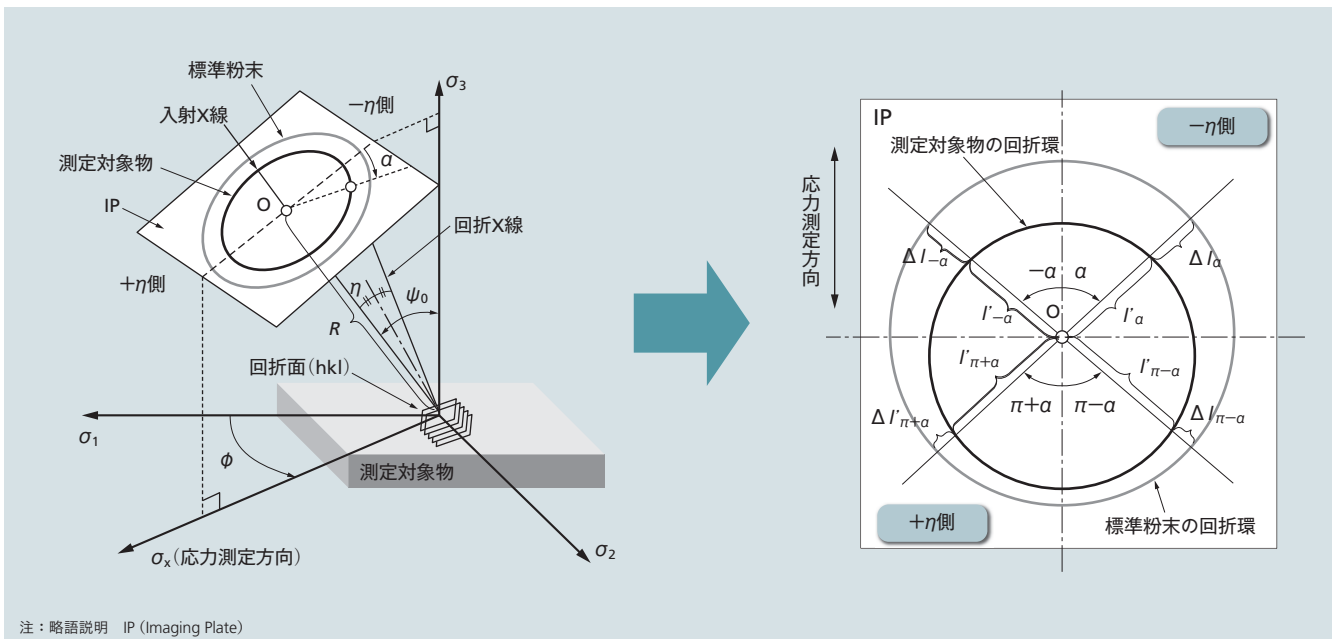
$$L = [(\Delta l_\alpha - \Delta l_{\pi+\alpha}) + (\Delta l_{-\alpha} - \Delta l_{\pi-\alpha})] / 2 \quad (6)$$

ここで、各パラメータは以下のように定義する。

$\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$: 主応力

σ_x : 測定応力

ϕ : 主応力 σ_1 から測定応力 σ_x までの回転角



注：略語説明 IP (Imaging Plate)

図6 | $\cos\alpha$ 法の光学系座標系およびIPに記録した回折環

主応力 σ_1 に対する任意の回転角 ϕ における応力 σ_x を測定するとき、この方向にIPを入射角 ψ_0 で傾斜させ、2回の照射を行い、試験片と標準粉末の回折環を同一IPに記録する。

ψ_0 : X線入射角 (X線入射方向と試験片表面法線間のなす角)

η : 入射X線と回折面法線間のなす角 (IPにおいて、回折X線の受光位置から測定表面までの距離が、入射X線中心Oから測定表面までの距離より小さい側を「+ η 側」、大きい側を「- η 側」とする)

O : X線入射中心 (無ひずみ状態の標準粉末の回折環近似円の中心)

α : 回折環上X線入射中心Oに対する中心角

R : 測定位置からIPまでの距離 (照射距離)

θ : 測定材料の無ひずみ状態のブラッグ回折角

θ' : 測定材料の試験片のブラッグ回折角

θ'' : 標準粉末のブラッグ回折角

l' : 測定試験片の α 方向における回折環のX線強度ピーク位置からX線入射中心O点までの距離

l'' : 標準粉末の回折環近似円の半径

Δl_α : α 方向における $|l'' - l'|$ の実測 ($\Delta l_{-\alpha}$, $\Delta l_{\pi+\alpha}$, $\Delta l_{\pi-\alpha}$ も同様に定義)

E_{hkl} : hkl回折のX線の弾性定数 (縦弾性係数)

ν_{hkl} : hkl回折のX線の弾性定数 (ポアソン比)

4.2 二次元X線回折システム

4.2.1 IP二次元検出器

この研究で開発したIP二次元検出器をiXRD Comboに搭載した (図7参照)。IPの中央にX線を通させ、試験片の表面に入射後、回折X線の二次元回折環をIP受光面に記録する。

IPは輝尽性発光体を塗布したフィルムである。X線をIPに照射すると蛍光体中に準安定な一種の着色中心が形成される。レーザー光を照射すると、蓄えられていたX線エネルギーは蛍光として放出される。その強度を光電子増倍管でカウントして、IPの受光面に記録されたX線情報を読み出すことができる。可視光で着色中心を消去すれば、IPを繰り返し使用することが可能である。

4.2.2 画像処理アルゴリズム

開発した画像処理アルゴリズムにより画像処理および応力算出を行った (図8参照)。回折環を分かりやすくするため、X線回折画像の輝度に対して、反転処理を実施した。溶接金属は集合組織や粗大結晶の影響で回折強度に方向性

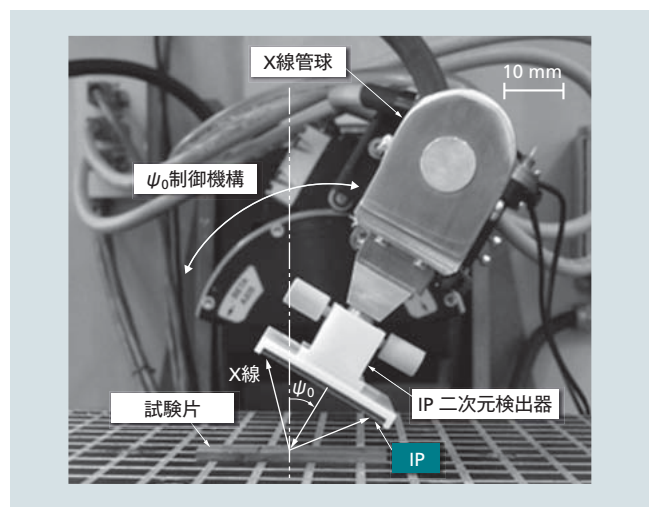


図7 | IP二次元検出器を搭載したX線回折装置

従来の $\sin^2\psi$ 法による測定と異なり、この装置は測定時 ψ_0 が揺動しないため、実構造物の隅部溶接部のような狭隘な場所への適用性を向上させた。

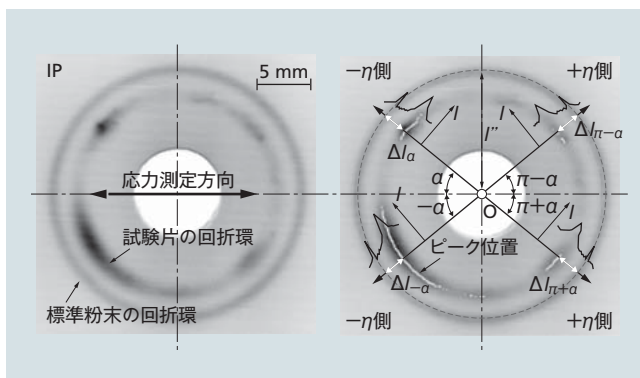


図8 | 画像処理アルゴリズムの回折環

回折環輝度情報を検出し、アルゴリズムの演算により、応力計算に必要なパラメータを求め、さらに応力を算出する。

がある。弱い回折ピークを排除するため、回折強度のフィルタリングにより、適切な評価範囲として抽出した。そのピーク位置を試験片の回折環上の白い点で示している。 $\cos\alpha$ 法は、たとえ応力測定方向($\alpha=0$ deg)の回折強度が弱いために排除されても、 0 deg \sim 90 degの範囲の中で、ある α 値に対して、 α 、 $-\alpha$ 、 $\pi+\alpha$ および $\pi-\alpha$ の4つの方向に評価できる回折プロファイルさえ存在すれば、理論上応力測定が可能である。特に、回折強度の方向依存性の高い材料の場合は、一次元X線回折による $\sin^2\psi$ 法に比べて、二次元X線回折情報を利用した $\cos\alpha$ 法の有効性が高いと考えられる。

5. 測定性能確認試験

5.1 測定条件

開発した二次元X線応力測定システムの測定性能を確認するために、複数の供試材の残留応力を測定した。測定条件を表1に示す。供試材は、Ni基合金DNiCrFe-1J (JIS Z 3224), YNiCr-3 (JIS Z 3334), NCF600 (JIS G 4902) およびオーステナイト系ステンレス鋼SUS304である。実機構造物の表面加工条件の影響を検討するため、DNiCrFe-1Jの測定表面に電解研磨(表面下 $50\ \mu\text{m}$)および「グラインダ+フラップホイール」の表面処理を施し、2種類の試験片を用意して、後述の応力制御の四点曲げ試験に供した。YNiCr-3, NCF600およびSUS304の表面については、そ

表1 | X線測定条件

X線の測定条件を示す。

特性X線	Mn-K α
特性X線の波長	$2.10314 (10^{-10}\text{m})$
X線管電圧	17 (kV)
X線管電流	1.5 (mA)
入射角 ψ_0	30 (deg)
ビーム径	2 (mm)
照射時間	10 (分)
照射距離	20 (mm)

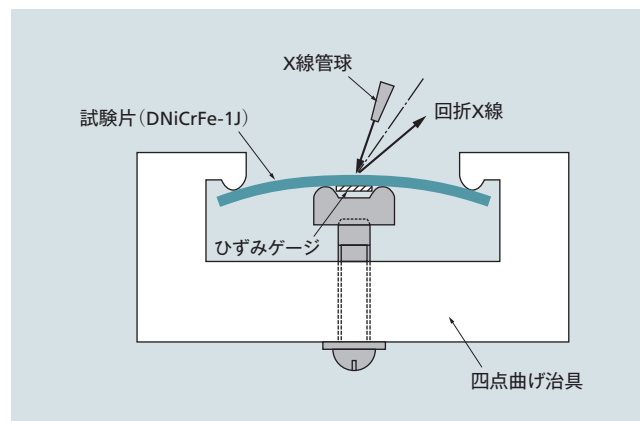


図9 | 四点曲げ試験の模式図

負荷前後のX線残留応力測定値の差分と、ひずみゲージ測定から換算した負荷応力を比較することにより、システムの測定精度を検討した。

れぞれ機械加工、ショットピーニングおよびウォータージェットピーニング (Water Jet Peening) の3種類の表面処理を施した。各試験片について、従来の一次元X線回折($\sin^2\psi$ 法)による応力測定結果や四点曲げ試験の負荷応力との比較によって、二次元X線回折($\cos\alpha$ 法)の測定性能を検討した。

二次元X線回折の測定性能を確認するため、ビードオンNi基溶接金属DNiCrFe-1Jから四点曲げ試験片を製作した。溶接部の結晶粒径は約 $90\ \mu\text{m}$ であった。四点曲げ試験において、試験片のX線測定面の背面にひずみゲージを貼り付け、四点曲げ治具で負荷しながら、二次元X線回折により応力を測定した(図9参照)。ひずみから応力への換算においては、事前に実施した本材の引張試験で得られたバルク材のヤング率 E を用いた。

標準粉末の材質は、以下の条件を考慮して選定した。

- (1) 照射距離 R とIPの面積などの幾何条件を考慮して、IPの上に回折環の全体を記録できるように適切な $2\theta''$ となる材質
- (2) 標準粉末と試験片の回折環を区別できるように両回折環の間に十分な間隔を持たせるため、両回折角 $2\theta''$ と 2θ 間の差が大きい材質

そこで、標準粉末として、Ni基溶接金属にCu粉末(結晶粒径 $10\ \mu\text{m}$)、SUS304試験片の測定に α -Fe粉末(結晶粒径 $20\ \mu\text{m}$)を用いた。粉末は純水に希釈して、試験片の測定箇所の近傍[測定点から $20\sim 40$ (mm)]に薄く塗布して、ドライヤーで乾燥させた。測定後、純水で濡らした布で完全に拭き取った。

5.2 測定結果

開発した二次元X線応力測定システムを用いて、材質や表面加工条件の異なる複数の試験片の残留応力を測定した。応力は二次元X線回折に対する画像処理により求めた

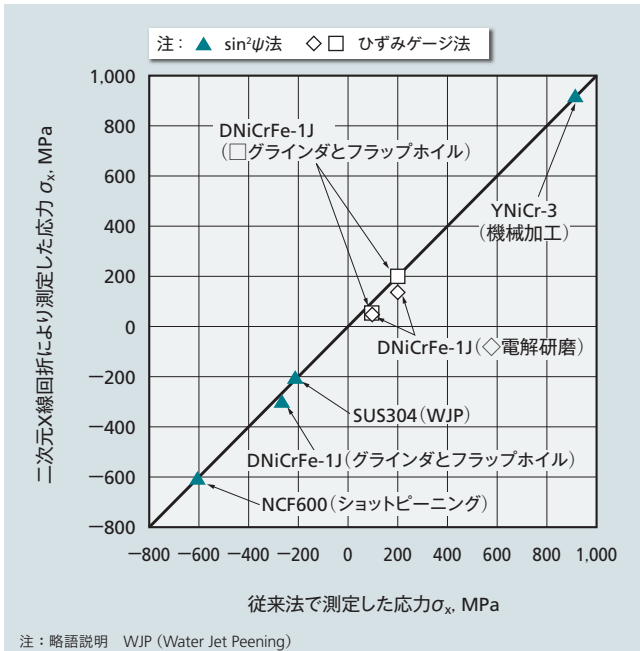


図10 | 二次元X線回折法と従来法の応力測定値の比較
 複数の供試材および表面仕上げ条件で、二次元X線回折法は、従来法とほぼ同等な測定結果が確認され、 $\sin^2\psi$ 法で測定困難な溶接金属部への適用性が見込まれた。

$L\text{-}\cos\alpha$ 線図から算出した(図10参照)。同図中のオープンマークは、応力制御の四点曲げ試験の測定結果を示す。◇および□は、それぞれ電解研磨および「グラインダ+フラップホイール」の表面処理を表す。両試験片において、二次元X線回折の測定値がひずみゲージの出力とほぼ一致した。▲は、同一試験片において、二次元X線回折($\cos\alpha$ 法)と一次元X線回折($\sin^2\psi$ 法)で得られた結果の比較を示す。「グラインダ+フラップホイール」施工した溶接金属DNiCrFe-1J、機械加工したYNiCr-3合金、ショットピーニングを施工したNCF600およびウォータージェットピーニング施工したSUS304において、両手法でもほぼ同様な測定結果が得られた。

以上の検討から、二次元X線回折を用いた溶接金属部の残留応力測定技術の有効性を検証することができたと考えられる。

6. 実機測定への適用検討

6.1 測定対象

二次元X線応力測定システムの実機適用性を、BWR炉底部の一部を模擬して製作したモックアップ試験体を用いて検討した。測定対象は、後述するBWRシュラウドサポートプレートの上下面の溶接部H8、H9とした。従来の報告¹⁰⁾によりBWR炉底部に発見されたSCCは溶接線直交方向となり、周方向の残留応力がSCCの進展を支配することから、周方向の残留応力測定のみを目的にした。

シュラウドサポートプレートは、圧力容器の底部に設置

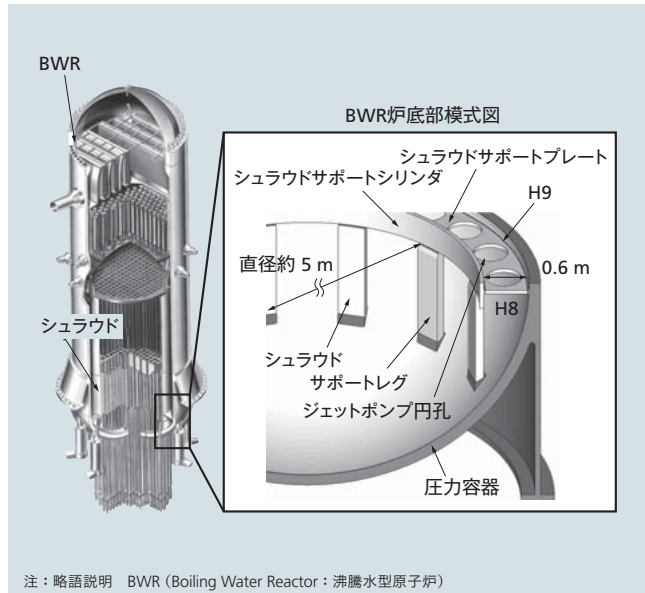


図11 | BWR炉底部の模式図

H8は内周側にあるシュラウドサポートシリンダの溶接部、H9は外周側にある圧力容器の溶接部である。

されるリング状の板であり、その半径方向の幅は0.6 m程度で、狭いスペースになっている(図11参照)。

この開発のX線装置の実機適用性検証は、BWR炉底部の一部を模擬して原寸で製作した鉄製モックアップ試験体で行った。

6.2 位置決め治具

X線回折装置の測定部をBWRシュラウドサポートプレートに設置するため、溶接部H8およびH9専用の位置決め治具をそれぞれ製作した(図12参照)。

X線回折装置の測定部を位置決め治具に装着した後に、

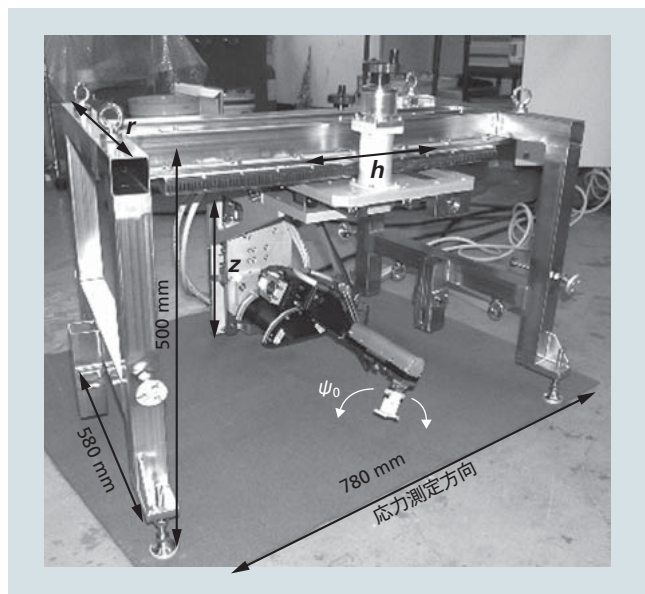


図12 | 測定位置決め用治具の外観

シュラウドサポートプレートの形状追従性を考慮して、半径方向(r方向)、周方向(h方向)および垂直方向(z方向)の駆動機構を設けた。

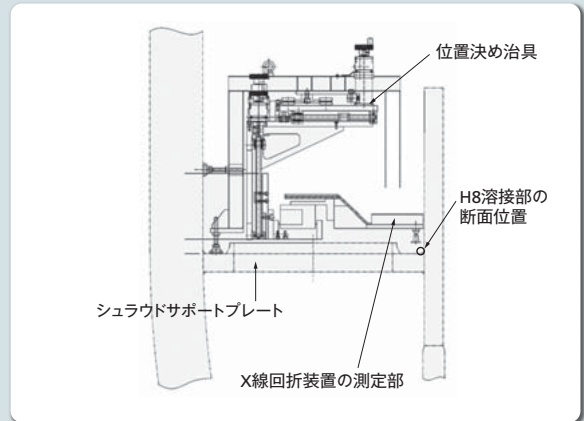
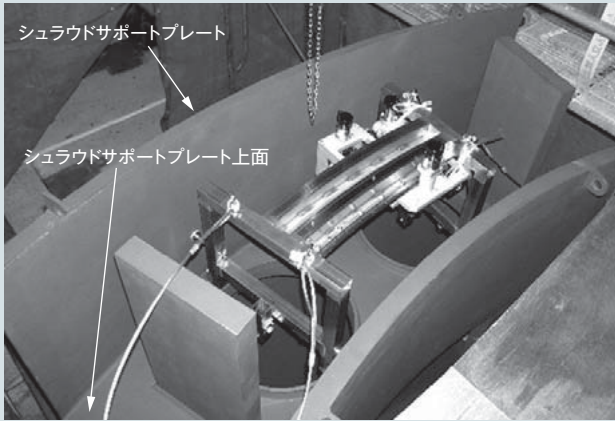


図13 | シュラウドサポートプレート上面のH8溶接部における位置決め治具の設置
シュラウドサポートプレートの上部の空間を利用して、X線回折装置の測定部を搭載した位置決め治具を設置した。

BWRシュラウドサポートプレートのモックアップ試験体に設置した。上面の溶接部H8での設置を図13に示す。シュラウドサポートプレートの上部の空間を利用して、X線回折装置の測定部を搭載した位置決め治具の設置を確認した。一方、図14に示したように、シュラウドサポートプレート下部において、位置決め治具をシュラウドサポートレグどうし間のスパンに通し、さらにシュラウドサポートプレート上の円孔を經由して設置したつり具で固定することで、従来のX線応力測定装置では測定が困難であった下面の測定を可能とした。

X線管球および検出器の揺動が不要なため、上述のように専用治具を用いることにより、 $\cos\alpha$ 法に基づいた二次元X線応力測定技術は、シュラウドサポートプレートのような狭隘な場所での実機応力測定への適用性が十分に考えられる。

以上の検討より、開発した二次元X線応力測定システム

は大型構造物の実機測定が可能なることを確認した。

7. 検討結果と適用性の確認

構造物の溶接金属部における残留応力測定を目的に、一次元X線回折により、抵抗スポット溶接部近傍の微小領域における残留応力分布の測定を試みた。また、IP二次元検出器および位置決め治具を含めた二次元X線残留応力評価システムを開発するとともに、開発した手法の実機適用性をBWR炉底部のモックアップ試験体にて検証した。得られた主な結果を以下に示す。

- (1) 測定領域および回折強度を適切化することにより、測定の間隔分解能約0.5 mmで、抵抗スポット溶接部近傍の微小領域の応力分布の測定を可能にした。
- (2) Ni基溶接金属を含め、異なる表面仕上げで製作した数種類の試験片に対して、従来の $\sin^2\psi$ 法による一次元X線の測定結果と四点曲げ試験の負荷応力を比較することで、

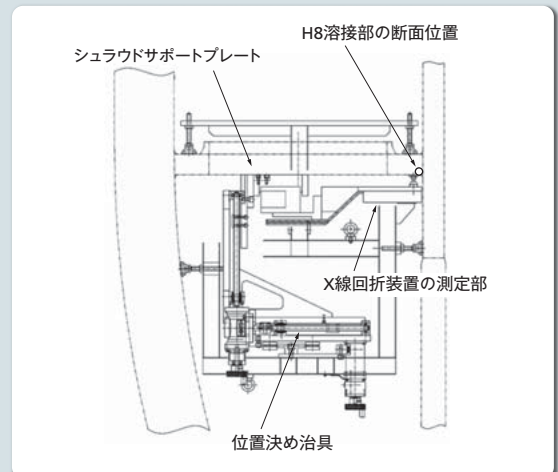
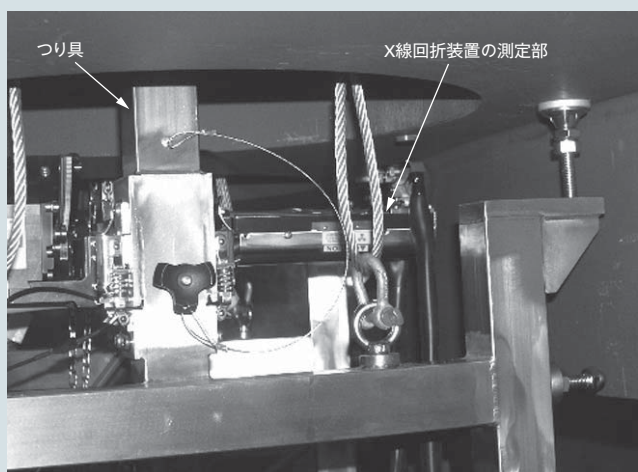


図14 | シュラウドサポートプレート下面のH8溶接部における位置決め治具の設置
位置決め用治具をシュラウドサポートレグどうし間のスパンに通して、シュラウドサポートプレート上の円孔を經由して設置したつり具で固定する。

cos α 法に基づいた二次元X線残留応力測定法の溶接金属への適用性を確認した。

(3) 製作した専用の位置決め治具により、BWRシュラウドサポートプレートの上下表面における溶接部での残留応力測定を可能にし、二次元X線応力測定システムの大型圧力容器への適用性を確認した。

8. おわりに

ここでは、X線回折による溶接金属部の非破壊的残留応力測定技術の開発について述べた。

東日本大震災後、原子力発電プラントにはこれまで以上に高い信頼性が要求されている。高経年化しつつある原子力発電プラントを対象とした場合、引き続き予防保全工事によるSCC発生防止対策が必要となる。一方、耐SCC性改善効果評価の一環として、溶接金属部の非破壊的残留応力測定技術の開発も重要である。

この研究で得られた構造物溶接金属部の残留応力測定技術の成果は、今後、予防保全工法の高度化に貢献する技術へと発展することが期待される。

参考文献

- 1) 日本材料学会：JSMS-SD-5-02 X線応力測定法標準（鉄鋼編）（2002）
- 2) 田中，外：残留応力のX線評価—基礎と応用，養賢堂（2006）
- 3) 平，外：細束X線応力測定の一方法とその疲労き裂伝ば問題への応用，日本材料学会，材料，27，294，pp. 251～256（1978）
- 4) B. B. He：Two-dimensional X-Ray Diffraction，John Wiley & Sons（2009）
- 5) 王，外：抵抗スポット溶接部の残留応力分布測定およびその残留応力によるSCC感受性評価，日本材料学会第59期学術講演会講演論文集，pp.305～306（2010）
- 6) 王，外：二次元X線回折による実機構造物溶接金属部の残留応力測定技術の開発，日本材料学会第49回X線材料強度に関する討論会講演論文集，pp. 37～43（2012）
- 7) 奥田：抵抗スポット溶接入門，産報出版（1997.8）
- 8) 吉岡，外：イメージングプレートによる微小領域のX線応力測定，日本非破壊検査協会，非破壊検査，42，12，pp.666～673（1993）
- 9) 佐々木，外：2次元X線検出器イメージングプレートを用いた全平面応力成分の単一入射X線応力測定，日本材料学会，材料，44，504，pp. 1138～1143（1995）
- 10) 青木，外：BWR環境下で長期間使用されたニッケル基合金溶接部の応力腐食割れ事象から得られた知見に基づくき裂進展解析評価，日本保全学会，保全学，5，3，pp. 46～53（2006）

執筆者紹介



王 昀

2007年日立製作所入社，日立研究所 エネルギー材料研究部 所属
現在，インフラ関連の構造材料の開発に従事
工学博士
日本材料学会会員，日本機械学会会員，日本原子力学会会員



大城戸 忍

1992年日立製作所入社，日立GEニュークリア・エナジー株式会社
原子力技術本部 原子力予防保全技術部 所属
現在，原子力の新規制対応のマネジメント業務に従事
工学博士
日本材料学会会員，腐食防食学会会員，日本非破壊検査協会会員



波東 久光

1981年日立製作所入社，日立研究所 エネルギー材料研究部 所属
現在，原子力の予防保全技術の開発に従事
日本機械学会会員，日本原子力学会会員



菊地 敏一

1981年日立製作所入社，日立GEニュークリア・エナジー株式会社
日立事業所 原子力設計部 所属
現在，原子力の予防保全計画，廃炉技術開発に従事



千葉 篤志

1993年日立製作所入社，日立GEニュークリア・エナジー株式会社
日立事業所 原子力品質保証部 所属
現在，原子力発電設備向け製品の品質保証関係業務に従事
技術士（機械部門）
日本機械学会会員