

中性子回折法によるオーステナイト系ステンレス鋼 配管突合せ溶接継手の残留応力分布測定

Residual Stress Distribution in Austenitic Stainless Steel Pipe Butt-Welded Joint Measured by Neutron Diffraction Technique

前川 晃 (Akira Maekawa)*¹ 野田 満靖 (Michiyasu Noda)*¹
大厩 徹 (Toru Oumaya)*² 高橋 茂 (Shigeru Takahashi)*³

要約 溶接や加工等によって生じる残留応力は高サイクル疲労や SCC などの損傷の重要な影響因子の一つであり、損傷評価には残留応力を的確に把握し反映する必要がある。残留応力の解析予測技術や測定技術については、従来から多くの研究がなされているものの、残留応力が溶接条件や加工プロセスに複雑に依存していることから、現状ではまだ十分な精度で評価できるまでに至っていない。本論文では、残留応力の予測・測定技術の高度化研究に供することを目的に実施したオーステナイト系ステンレス鋼配管突合せ溶接継手の残留応力測定結果を報告する。測定は日本原子力研究開発機構の残留応力測定用中性子回折装置を利用して行った。本測定の結果、溶接部から長手方向に沿った残留応力の低減傾向や軸方向応力による配管板厚の曲げ状態など、この種の継手に見られる特徴的な分布傾向のデータが得られた。測定結果と有限要素法による解析結果と比較すると応力の分布傾向は一致したが、定量的には測定結果の方が解析結果よりも引張応力側にシフトしたような差異があった。さらに、X線回折法やひずみゲージ法による測定結果とも比較し、測定方法の違いによる結果の差異を明らかにした。

キーワード オーステナイト系ステンレス鋼配管、突合せ溶接継手、残留応力分布、中性子回折法、X線回折法、ひずみゲージ法、有限要素法

Abstract Residual stress is inevitable consequence of welding or manufacturing process, which might greatly affect propagation of high-cycle fatigue or SCC crack. In order to evaluate damages due to the crack, it is required to estimate residual stress and to reflect them to the evaluation process as well. The magnitude and distribution of residual stress greatly depend on the individual process of welding or manufacturing, while the accuracy of prediction or measurement is still insufficient. This paper reports the result of residual stress measurement of butt-welded pipe made of austenitic stainless steel. It also intended to improve prediction and measurement techniques concerning to residual stress. The measurement was conducted by neutron diffraction technique employing the diffractometer for residual stress analysis developed by Japan Atomic Energy Agency. The measured results showed typical characteristics of butt-welded pipe both in decline of stress along axial direction and in radial distribution of bending due to axial stress. The measured result agreed qualitatively with the result predicted by the finite element analysis. A quantitative comparison between measured result and analysis showed a shift of the measured stress toward higher tensile. The measured result was also compared with the results by X-ray diffraction and strain-gauge methods to grasp the distinctive results of the methods.

Keywords Austenitic stainless steel pipe, Butt-welded joint, Residual stress distribution, Neutron diffraction technique, X-ray diffraction technique, Strain gauge method, Finite element method

1. 緒言

原子力発電プラントの溶接配管や強加工曲がり配

管に生じた残留応力は、高サイクル疲労や応力腐食割れ (SCC) といった損傷の重要な影響因子の一つであり、それらの損傷評価には残留応力の影響を適

* 1 (株)原子力安全システム研究所 技術システム研究所

* 2 元(株)原子力安全システム研究所 技術システム研究所 現在 関西電力(株)

* 3 元(株)原子力安全システム研究所 技術システム研究所

切に考慮する必要がある。そのため、例えばき裂進展に関しては、残留応力場におけるき裂進展といった研究^{(1)~(4)}も多数行われている。

損傷評価ではまず残留応力を設定する必要があるが、現状ではその予測や測定精度が必ずしも十分ではないために、残留応力を過度に安全側に設定する場合がある。保守性を保持しつつ、実際に近い評価を行うためには残留応力についても実際に即した条件設定が必要である。

著者ら^{(5)~(9)}は残留応力の予測および測定（残留応力の評価）技術の精度・信頼性向上の検討に資することを目的として、発電プラント等で使用されているオーステナイト系ステンレス鋼配管の溶接継手や曲がり部の残留応力測定を行っている。

残留応力測定に関しては、非破壊測定技術の代表的なものとして X 線回折法があり、日本材料学会で測定方法の標準化が図られ、また、溶接残留応力の測定に関してベンチマーク研究が行われている。

X 線回折法では表面極近傍（数十 μm ）の残留応力が測定⁽¹⁰⁾⁽¹¹⁾できる。

シンクロトロン放射光による測定法は表面から数百 μm 深さまでの測定が可能で、ピーニングなどの表面処理の効果の確認などに多く適用^{(12)~(14)}されている。

中性子回折法は中性子ビームの優れた透過性により数 mm から数十 mm の深さまで測定できることが特長である。近年、構造内部の残留応力測定ニーズの増加、測定装置の高度化、測定法標準化検討の進捗等が相まって広範な分野で測定^{(15)~(22)}が行われるようになってきている。

これらの測定法はそれぞれで精度向上等の研究が進められているが、各測定法の特長を生かし相補的に適用することによってさらに精度や信頼性を高めようという考え⁽²³⁾も提唱されている。

解析予測法に関しては、従来は簡易法による研究⁽²²⁾が多かったが、近年は有限要素法（FEM）による詳細解析をベースとして計算の高速化や複雑構造への適用に関する研究が多い。現状でも市販の汎用構造解析コード（あるいは溶接に特化した専用解析コード）を適用して残留応力の解析は可能であるが、多層多パス溶接や異材溶接、複雑形状部の溶接などについては解の検証がまだ十分ではなく、モックアップ測定データとの比較等による検証^{(24)~(29)}が行われている。

本報では、原子力発電所において SCC 損傷が多数

報告されているオーステナイト系ステンレス鋼配管突合せ溶接継手を対象に実施した中性子回折法による残留応力測定結果を報告し、合わせて FEM 解析結果並びに X 線回折法およびひずみゲージ法による測定結果との比較について報告する。

2. 実験方法

本研究では中性子回折法および X 線回折法、ひずみゲージ法による残留応力測定を行った。ここでは、中性子回折法の測定原理と測定条件を示す。X 線回折法とひずみゲージ法による測定条件は後述の測定結果と共に示す。

2.1 中性子回折法による残留応力測定法

試料に中性子ビームが入射すると結晶格子によって中性子ビームが回折され、その場合 Bragg の回折条件に従って、式 (1) が成り立つ。

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

ここで、 λ ：中性子の波長

d ：格子面間隔

θ ：回折角度

無ひずみ状態の格子面間隔 d_0 が、負荷応力または残留応力によって d に変化すると回折角度が変化する。式(1)を波長一定として微分して書き換えると式(2)が得られ、格子面間隔の変化 $\Delta d (=d-d_0)$ 、または回折角度の変化 $\Delta\theta (= \theta-\theta_0)$ を測定することによってひずみ ε が求められる。

$$\varepsilon = (d-d_0)/d_0 = -\cot\theta_0 \cdot \Delta\theta \quad (2)$$

回折角度のピーク位置は回折プロファイルをガウス分布に近似しその中心から決定した。

このとき、無ひずみ状態の格子面間隔 d_0 、または回折角度 θ_0 が必要である。今回の測定では、 d_0 は供試体および供試体と同一条件で製作したダミー試験体から、残留ひずみが十分に解放されるサイズの微小片を切り出して無ひずみ状態の基準用試験片“dゼロクーポン”を作製し、それを測定することにより求めた。

中性子回折法では中性子の侵入深さが深いために 3 軸状態での測定となる。図 1 に示すような中性子

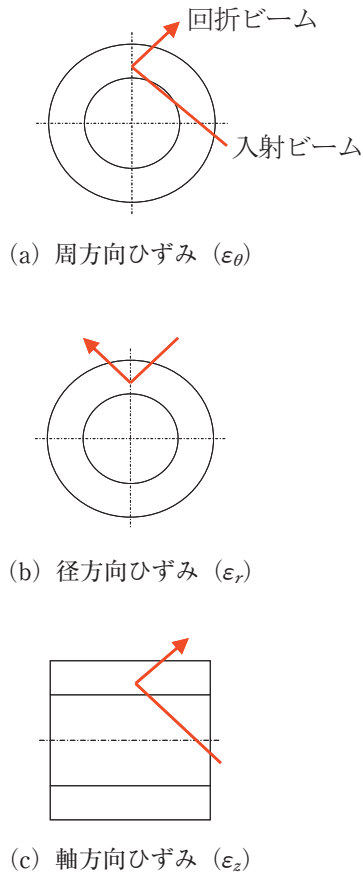


図1 中性回折法による3軸ひずみ成分の測定法

ビームの入射方向を変えて周方向，径方向，軸方向の3方向のひずみ成分を測定し，フック則に従って残留応力を決定した。

残留応力の決定に必要な回折弾性定数およびポアソン比は文献値を参考に設定した。

測定には日本原子力研究開発機構の研究用原子炉JRR-3のガイドホールに設置されている残留応力測定用中性子回折装置 (RESA) を用いた。

2.2 供試体

供試体はオーステナイト系ステンレス鋼 SUS316TP の突合せ周溶接継手である。外径は 165.2mm，内径は 128.8mm で，板厚は 18.2mm である。

供試体の製作寸法，溶接開先を図2に示す。初層溶接は自動ガスタングステンアーク (GTA) 溶接 (下向き姿勢)，2層目以降は被覆アーク溶接 (下向き姿勢) とした。

溶接電流は 105~150A，溶接電圧は 10~27V，溶

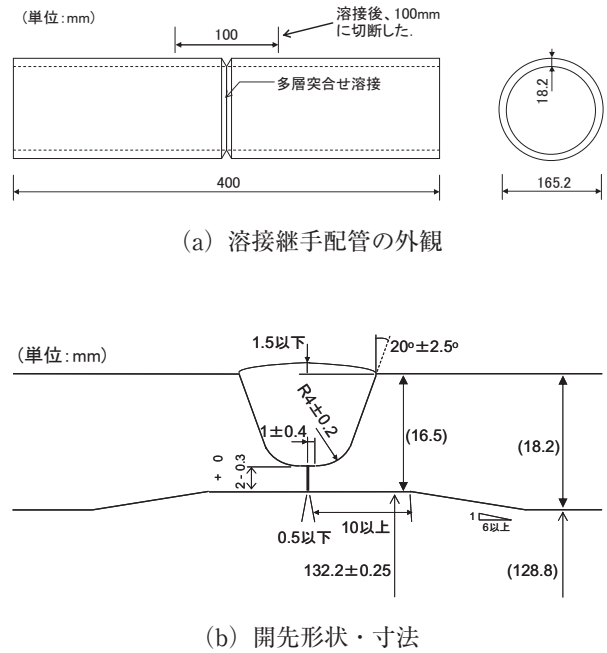


図2 供試体の製作方法

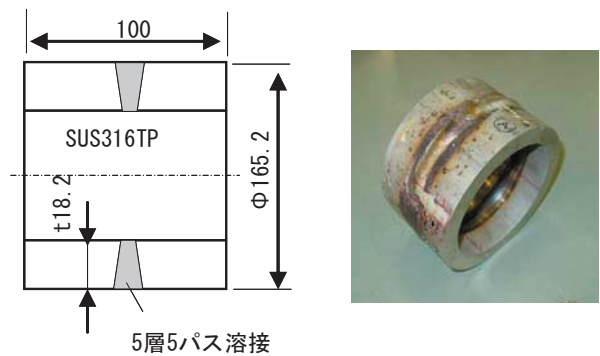


図3 供試体の構造寸法，外観写真

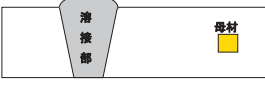
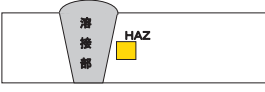

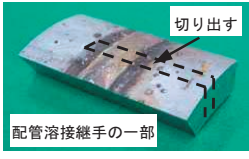

接パス数は5，溶接層数は5である。全長400mmの配管継手を製作し溶接部を中心に両端を各々150mm切断し，最終的に長さ100mmの配管突合せ溶接継手を供試体とした。図3に供試体の形状寸法を示す。

2.3 dゼロクーポン

前述したように，中性子回折による残留応力測定では無ひずみ状態での格子面間隔 d_0 を測定する必要がある。 d_0 は供試体と同一条件で製作したダミー供試体または測定に供した供試体から d ゼロクーポンを作製して測定した。

表1に d ゼロクーポンの採取位置および作製方法を示す。d ゼロクーポンは母材および熱影響部

表1 dゼロクーポンの作製方法

	採取位置	クーポン作製方法
母材	溶接部から離れた位置の板厚中央部 	放電加工により、 $2 \times 2 \times 2\text{mm}^3$ の小片を8個切り出す。 ↓ 元の方向に揃えて、 $4 \times 4 \times 4\text{mm}^3$ の立方体に接着剤で組立てる。
HAZ	HAZの板厚中央部 	作製したクーポン 
測定箇所	溶接部を含む測定箇所全体 	放電加工により、 $3 \times 3 \times 3\text{mm}^3$ の小片を192個切り出す。 ↓ 元の方向に揃えて、 $57 \times 18 \times 3.2\text{mm}^3$ の直方体に接着剤で組立てる。 

(HAZ)の2箇所から放電加工により残留応力が十分に解放されると考えられる $2 \times 2 \times 2\text{mm}^3$ の小片をそれぞれ8個切り出し、それらを切り出した位置および方向を揃えて接着剤にて $4 \times 4 \times 4\text{mm}^3$ の立方体に組み立てて作製した。さらに、供試体の測定領域から $3 \times 3 \times 3\text{mm}^3$ の小片を192個切り出し、切り出した位置および切り出し方向を揃えて元の形状に組み立てることにより作製した。前者2つのdゼロクーポンは、一般的なクーポン作製方法に従ったものである。後者のクーポンは測定と同じ位置の d_0 値の分布をHAZから母材に亘り詳細にかつ連続的に評価することを目的として新しく考案したクーポン作製方法である。

2.4 測定条件および測定箇所

中性子応力測定標準⁽¹⁶⁾をもとに、測定装置・治具アライメントの条件を考慮して測定条件を設定した。

3軸方向のそれぞれの測定条件を表2に、測定箇所を図4に示す。測定は、周方向の溶接始終点(0°)の断面を対象に、外表面溶接止端部から長手方向8

表2 供試体の測定条件

	回折面	波長	ゲージ体積
周方向ひずみ	111	1.8 Å	$3 \times 3 \times 3 \text{mm}^3$
径方向ひずみ	311		
軸方向ひずみ	311		

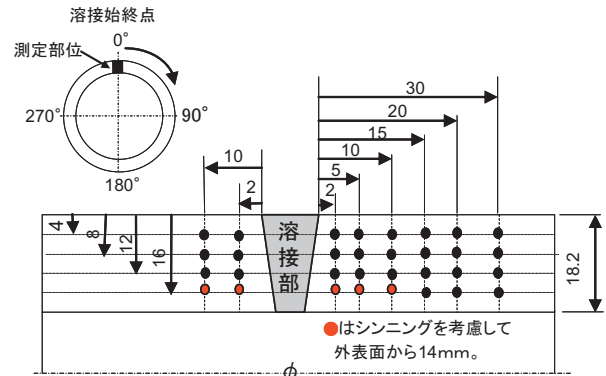


図4 供試体の測定箇所
(周方向溶接始終点(0°位置)の断面)



図5 RESA装置による残留応力測定の様相

箇所、板厚方向4箇所について実施した。図5に残留応力の測定状況を示す。

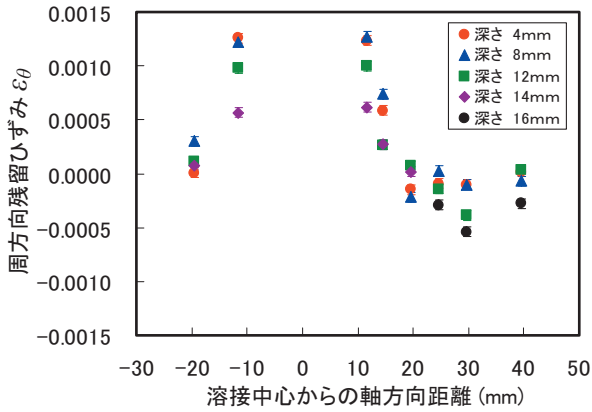
3. 実験結果

3.1 d_0 値の測定結果

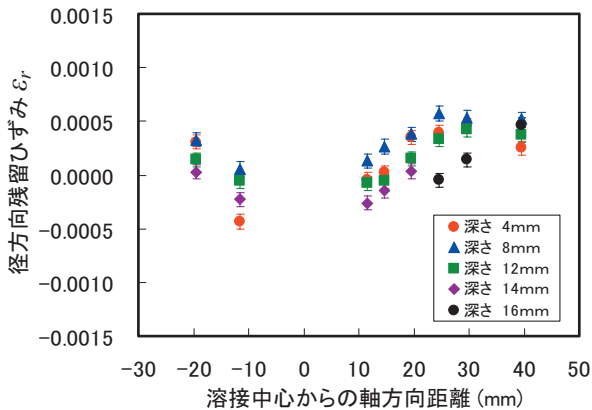
dゼロクーポンの測定の結果、111格子面(周方向測定)、311格子面(径方向および軸方向測定)とも、母材およびHAZ、測定箇所から作製したdゼロクーポンの d_0 値の差は小さかった。また、クーポンの異なる位置での d_0 値に変動は見られず、ほとん

表3 無ひずみ状態の d_0 の測定結果

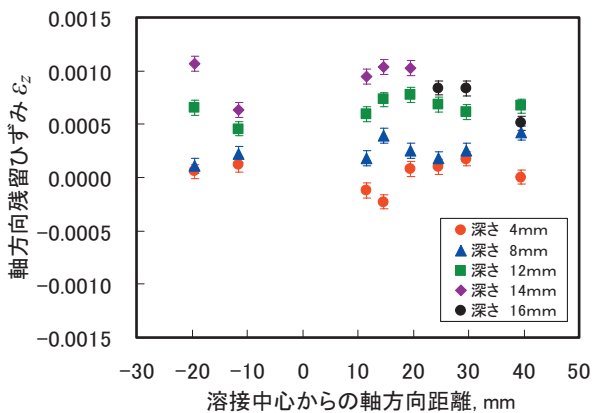
成分	格子面	格子面間距離 d_0 (Å)
周方向	111	2.0762
径方向	311	1.0842
軸方向	311	1.0842



(a) 周方向ひずみ ϵ_θ



(b) 径方向ひずみ ϵ_r



(c) 軸方向ひずみ ϵ_z

図6 供試体の残留ひずみ測定結果 (外表面溶接止端から長手方向 (管軸方向) 分布)

ど一定値であった。そこで、供試体の残留ひずみ算定用の d_0 値として、測定箇所から作製した d ゼロクーポンの全 d_0 値の平均値を採用した。表3に採用した d_0 値を示す。

3.2 供試体の測定結果

(1) 残留ひずみ

供試体の残留ひずみ測定結果を図6に示す。図6(a) および (c) の周方向ひずみおよび軸方向ひずみは、溶接部から配管軸方向に沿って滑らかに減少している。また、軸方向ひずみは図7に示すように、配管内面側が引張で外面側が圧縮の配管板厚方向に曲げ状態であることがわかる。このような残留ひずみ分布は突合せ溶接配管継手に一般的に見られる傾向であり、今回の測定結果も定性的には妥当な結果と判断される。

径方向ひずみ (図6(b)) は、周方向および軸方向ひずみに比較して値が小さいという点では一般的な傾向と一致したが、周方向および軸方向ひずみとの大きさの相対比の観点からは、やや値が大きいと推察される。

なお、図6から分かるように、溶接部を挟んで左右両側ではほぼ同じ値であり、左右で有意な差は無いことが確認された。(図6および図8では便宜的に溶接部左側の測定位置を (-) 座標値で表示した。図4参照)

(2) 残留応力

残留ひずみと回折弾性定数 E およびポアソン比 ν を用い、フック則を適用して残留応力を算定した。 E 、 ν は SUS316 の弾性ステイフネスを用いて Kröner モデルにより求めた値⁽³⁰⁾である。

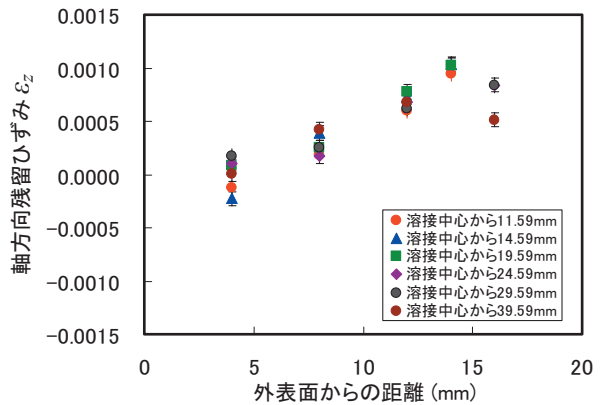
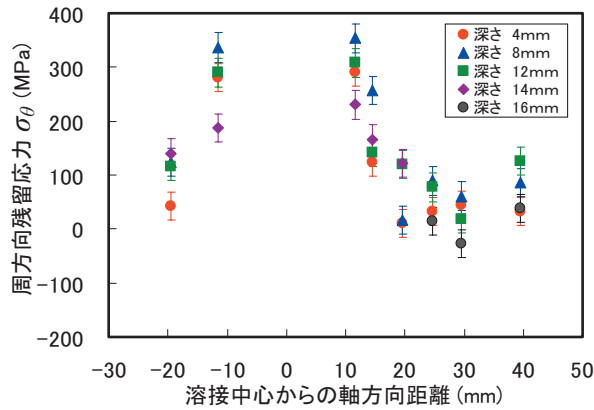
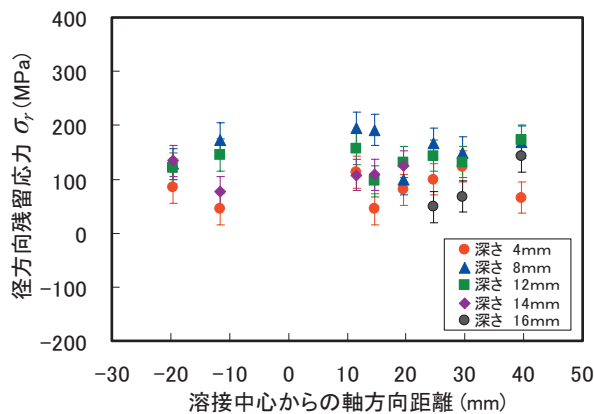
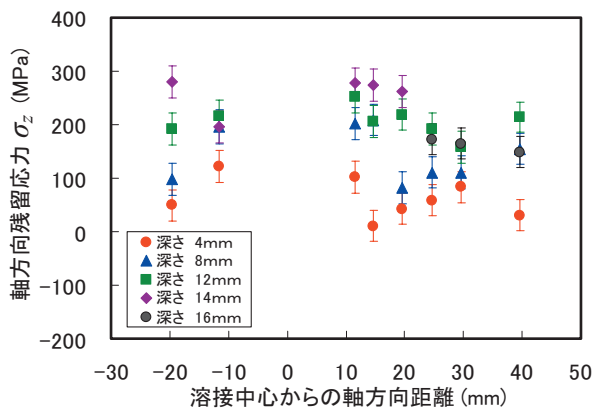


図7 軸方向ひずみの板厚方向分布

表4 残留応力算定に使用した E , ν

	回折面	回折弾性定数 E (GPa)	ポアソン比 ν
周方向	111	237.0	0.25
径方向	311	182.5	0.31
軸方向	311	182.5	0.31

(a) 周方向残留応力 σ_{θ} (b) 径方向残留応力 σ_r (c) 軸方向残留応力 σ_z 図8 供試体の残留応力測定結果
(外表面溶接止端から長手方向(管軸方向)分布)

使用した E , ν を表4に示す. また, 周方向の残留ひずみは回折面(111)にて測定した値であることから, ポアソン比の影響は小さいと仮定して文献31及び32により回折面(311)の等価な値に補正して残留応力を算出した.

周方向および径方向, 軸方向応力の配管軸方向の残留応力分布を図8に示す. 図9に配管板厚方向の軸方向残留応力分布を示す. 文献19の炭素鋼配管突合せ溶接継手の残留応力分布と比較すると, 各方向の残留応力分布は類似の傾向が見られた. ただし, 周方向応力や径方向応力と相対的な応力の大きさを比較すると, 本研究の軸方向応力が引張り側に大きい分布傾向であった.

各方向の残留応力分布は, 残留ひずみと同様に溶接部を挟んで左右両側ではほぼ同じ値であり, 左右で有意な差はなかった. したがって, 以降は溶接部右側の測定値について考察を行う.

図8と図9より SCC の損傷に対して大きな影響を及ぼす引張残留応力の主要なものは,

- ・内面の溶接近傍の周方向応力 $\sigma_{\theta} \approx 230\text{MPa}$
- ・内面の溶接近傍の軸方向応力 $\sigma_z \approx 280\text{MPa}$

であった.

これらは当該材料の室温での降伏値 σ_y と同等か, あるいは若干超える値であった.

この降伏応力と同程度の引張残留応力は溶接中心から 20mm 内の熱影響部 (HAZ) に分布しており, 周方向応力は溶接中心から離れるに依り急速に低下するが, 軸方向応力の低下は穏やかである. 図9に示すように軸方向残留応力は配管内面側に引張応力のピーク値がある分布をしている. SCC が配管内面で発生することを考慮すると, 以上の結果は5層5パス突合せ溶接配管の場合, 軸方向残留応力が SCC

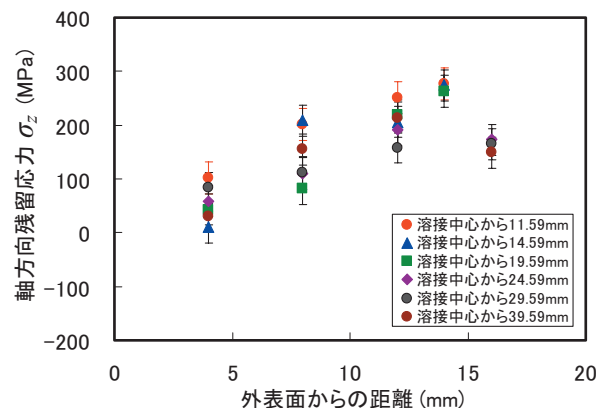


図9 軸方向残留応力の板厚方向分布

へより広範囲に影響を与えることを示している。

4. 考察

4.1 残留応力解析結果との比較

(1) FEM 解析

突合せ溶接配管の溶接プロセスおよび溶接後の配管両端の切断プロセスに従った3次元FEM解析を行った。

解析は汎用構造解析コードABAQUSを使用した。

解析モデルを図10に示す。供試体の溶接断面形状をモデルに反映し、5層5パスの溶接シミュレーションを行った。図12(a)の温度分布解析結果に示すように、移動熱源モデルにて熱伝導解析を行った。溶接プロセスでの熱伝導解析は、溶接時に熱電対にて測定した溶接近傍の温度測定値を考慮しながら実施した。その結果、計測値と解析値の誤差は500℃以下の状態で約±20℃以下、500℃以上の状態で約±50℃以下であり、解析結果への影響はほとんど無視できると程度であった。

弾塑性解析での応力-ひずみ特性は、供試体と同一溶接条件で製作した突合せ溶接板材から、母材、溶接金属について試験片を切り出し、引張試験を行って求めた。図11に解析に使用した応力-ひずみ曲線を示す。配管両端の切断も解析条件へ反映した。

解析結果の代表として、図12(b)に軸方向の残留応力分布を示す。同図から、軸方向応力は管内面側が引張、外面側が圧縮の曲げ状態であることが分かる。

(2) 測定結果と解析結果の比較

図13に周方向と軸方向の応力測定結果と解析結果を比較して示す。同図から、両結果の分布傾向は定性的に一致したが、定量的には差異があった。差異は全体的に測定結果の方が解析結果よりも引張応力側の方へシフトしたような傾向であった。

差異の原因を特定するために、残留ひずみについて測定結果と解析結果との比較を行った。なお、ひずみ解析値はABAQUSにより計算された応力値をフック則を用いて、測定回折面に対応したひずみ値を算出して求めた。図14(a), (b), (c)のそれぞれに周方向、径方向ひずみおよび軸方向ひずみの測定値を解析値と比較して示す。周方向ひずみの測定値が解析値に対して引張ひずみ側へシフトした傾向を示した一方、径方向ひずみと軸方向ひずみの測定値

は解析値とほぼ一致した。このことから周方向ひずみの測定値と解析値との差が応力測定値の精度に影響を与えていることがわかった。この周方向ひずみの測定値と解析値の差の原因を明らかにすれば、配管溶接継手に対して精度の良い残留応力測定ができると考えられる。今後この要因分析と検証実験を進める予定である。

解析については、残留応力の大きさは材料特性、特に降伏応力 σ_y の影響が大きいことが知られている。今回は、単調な引張試験データを用いたが、オーステナイト系ステンレス鋼は繰り返し荷重によって硬化する特性があり、溶接パスの繰り返しに対してそのような硬化特性を考慮することも、精度向上に必要な検討の一つと考えられる。

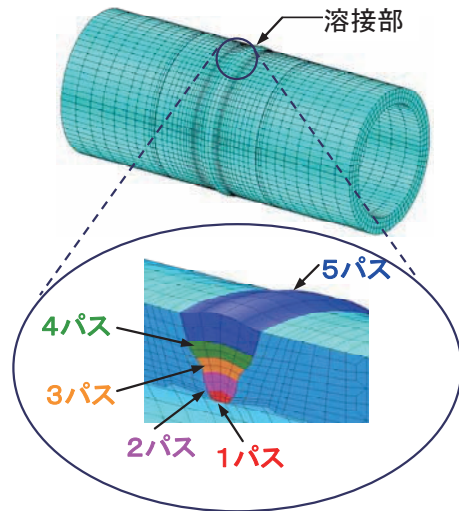


図10 FEM解析モデル

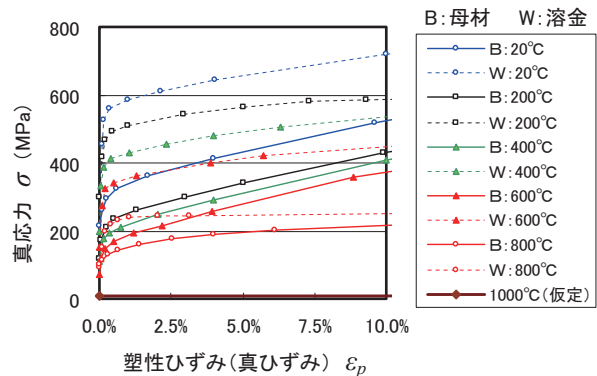


図11 解析に使用した応力-ひずみ曲線

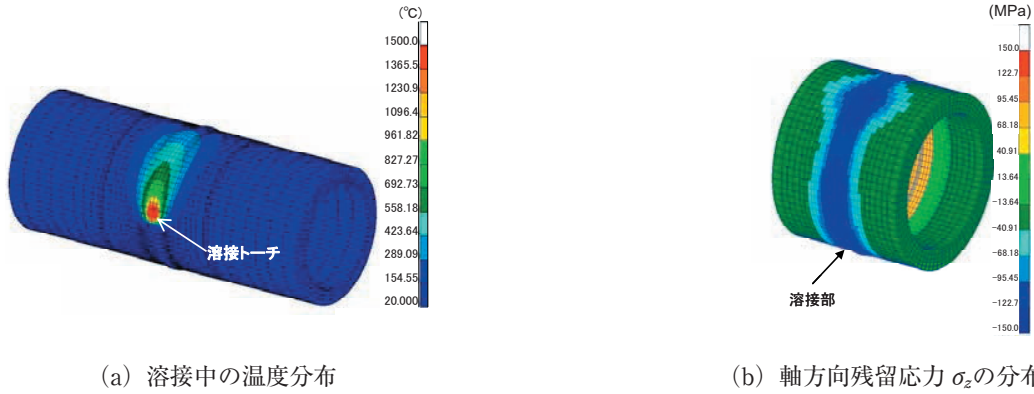


図 12 FEM 解析結果

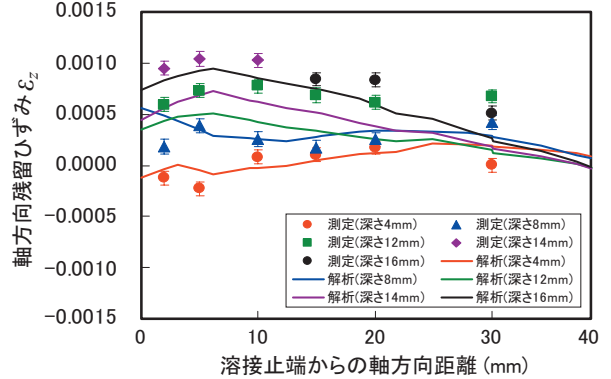
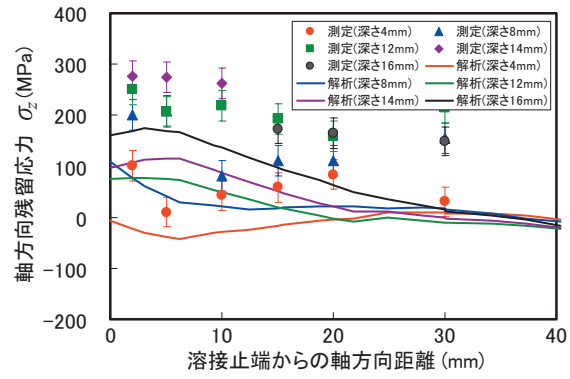
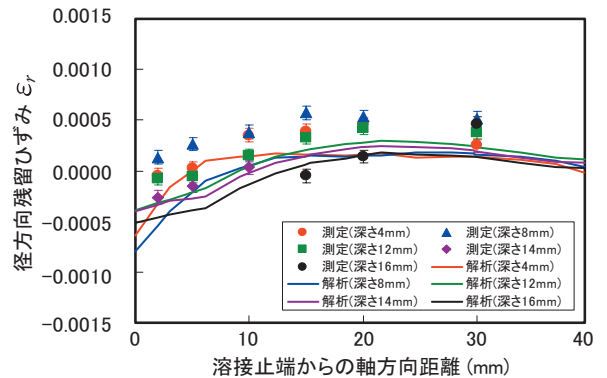
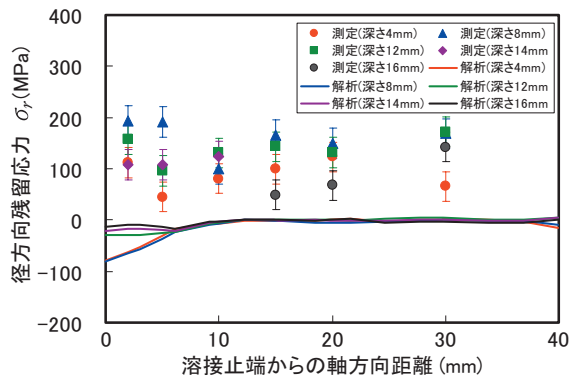
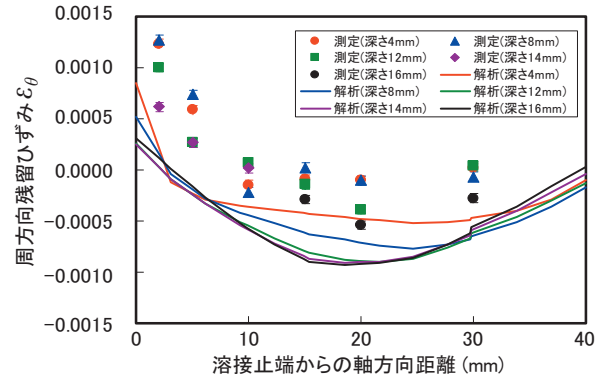
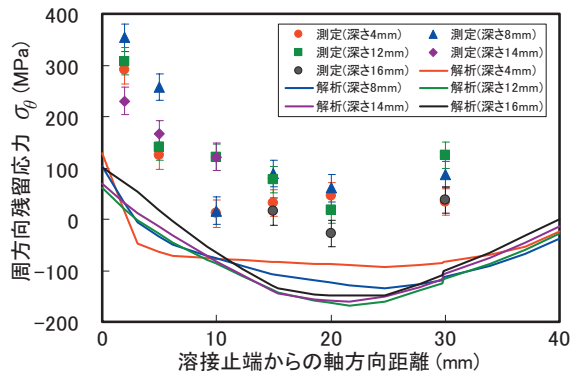


図 13 中性子回折法による残留応力測定結果と解析結果の比較

図 14 中性子回折法による残留ひずみ測定結果と解析結果の比較

4.2 X線回折法による測定結果との比較

(1) X線回折法による残留応力測定

X線応力測定法標準⁽¹⁰⁾に準じて溶接近傍外表面の残留応力を測定した。表5に使用したX線回折装置の仕様を示す。

(2) X線回折法による測定結果との比較

図15に中性子回折法とX線回折法による測定結果の比較を示す。中性子回折法の測定値は外表面から深さ4mmと8mmの測定値から外挿した。X線回折法の測定値はばらつきが大きく、測定結果からは突合せ溶接継手に見られる一般的な傾向が明確には見られなかった。X線回折法に関して、特にオーステナイト系ステンレス鋼では表面状態や集合組織の形成等の条件によって誤差が大きくなる場合があること⁽³³⁾、使用する特性X線の最適化といった課題⁽³⁴⁾がある。さらに、金属結晶粒径が大きくてX線回折に寄与する結晶数が少なくなる場合は、回折法が前提とする結晶方位のランダム性が著しく阻害される。X線回折法の測定結果についてはそうした観点からの吟味が必要と考えられる。

4.3 ひずみゲージ法による測定結果との比較

(1) ひずみゲージ法による残留応力測定

上記に加え、ひずみゲージ法により外表面の残留応力を測定した。分割したときの小片の最終寸法は、10mm × 10mm × 4mmを目安とした。残留応力は、小片に細断した時の周方向ひずみ変化 $\Delta\epsilon_x$ および軸方向ひずみ変化 $\Delta\epsilon_y$ から、式(3)により周方向応力 σ_θ と軸方向応力 σ_z を求めた。

$$\left. \begin{aligned} \sigma_\theta &= \frac{E}{1-\nu^2} (\Delta\epsilon_x + \nu\Delta\epsilon_y) \\ \sigma_z &= \frac{E}{1-\nu^2} (\Delta\epsilon_y + \nu\Delta\epsilon_x) \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

(2) ひずみゲージ法による測定結果との比較

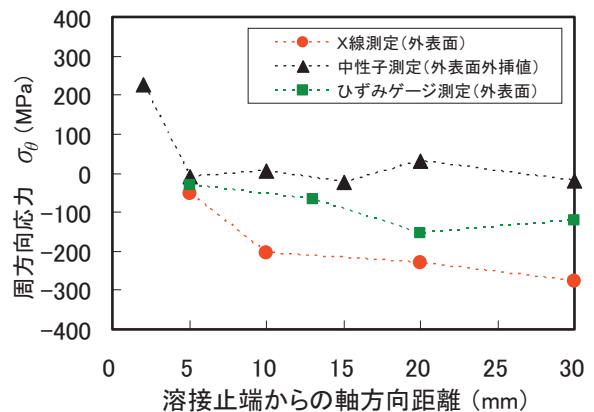
図15に、ひずみゲージ法による測定値を中性子回折法およびX線回折法による測定値と合わせて示している。

ひずみゲージ法による測定値と中性子回折法による測定値の応力分布傾向は良く似ている。ただし、周方向応力については、4.1節で考察したように、

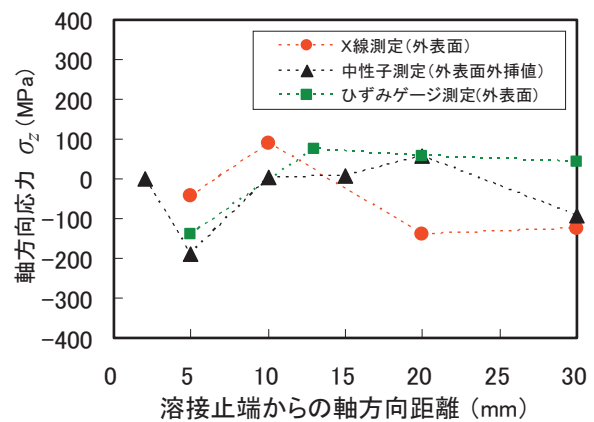
中性子回折法の値は引張応力側にシフトしたような傾向であった。

表5 X線回折装置の主な仕様

装置	スペクトリス (株) 製 X'Pert PRO MPD
測定方法 (X線入射方法)	並傾法 (ψ -一定法)
特性X線	Cr - $K\beta$
管電圧, 管電流	40kV, 40mA
入射角度	0° ~ 45° で, 4点以上
X線照射面積	2mm × 3mm
応力定数	-366 MPa/deg
回折面	γ -Fe (311)
ピーク位置算出法	Pearson VII近似
揺動	なし
表面処理	電解研磨 0.8mm



(a) 周方向残留応力 σ_θ



(b) 軸方向残留応力 σ_z

図15 中性子回折法とX線回折法, ひずみゲージ法による測定データの比較

5. 結論

高サイクル疲労や SCC などの損傷の重要な影響因子である残留応力に関して、解析予測や測定技術の精度・信頼性向上の検討に資することを目的に、中性子回折法を用いてオーステナイト系ステンレス鋼配管突合せ溶接継手の残留応力測定データを取得した。

中性子回折法による測定データは FEM 解析結果ならびに X 線回折法およびひずみゲージ法による測定結果と比較し、残留応力分布の傾向や差異について検討した。

本研究結果をまとめると以下の通りである。

(1) 中性子回折法により、溶接部近傍の長手方向、板厚方向について周方向、径方向、軸方向の 3 成分の残留応力測定データを取得し、その応力分布傾向を明らかにした。

測定データは、炭素鋼配管突合せ溶接継手と類似の残留応力分布傾向であった。さらに、配管内面側熱影響部に降伏応力と同程度の大きさの引張残留応力が周方向や軸方向に生じており、しかも軸方向応力は引張応力のピーク値が内面側に偏った分布をしていることがわかった。

(2) FEM 解析結果と中性子回折法による測定結果とを比較すると定性的な分布傾向は一致したが、定量的には中性子回折法による測定データの方が全体的に引張応力側へシフトしたような傾向であった。

定量的な差異の原因は、周方向ひずみの測定値と解析値との差であり、この差異の原因を明確にすれば良いことがわかった。

解析に関しては溶接パスの繰り返しに伴う材料の繰り返し硬化など材料特性の影響が大きい可能性が考えられた。

上述のように、残留応力評価精度向上の方向性について検討した。

(3) X 線回折法による測定結果は、中性子回折法の測定結果と比べると応力分布の傾向は明確ではなかった。表面状態や集合組織などの誤差要因についての検討が必要と考えられる。

一方、ひずみゲージ法による測定結果は、中性子回折法による測定値とほぼ良い一致を得た。

(4) 中性子回折法および X 線回折法、ひずみゲージ法といった各測定法による結果や解析による予測ではそれぞれ長短があり、また、データに測定方法特有の分布を持つことがわかった。残留応力評価には各手法を相補的に活用するとともに、それらのデータを総合的に評価して SCC 損傷評価へ適用することが、現状では合理的と考えられる。

(5) 上記(2)の課題に関して、測定については要因分析と検証実験、解析については材料特性をパラメータとした感度解析等の検討を実施し、それらの結果を合わせて更に検討を進める予定である。

謝辞

中性子回折実験は文部科学省の支援により(財)放射線利用振興協会が実施した平成 19 年度上期および平成 20 年度上期の中性子利用技術移転プログラム(トライアルユース制度)において行ったものである。中性子回折実験に際しては東京都市大学 秋田貢一教授をはじめ、日本原子力研究開発機構 量子ビーム応用研究部門の土屋佳則博士および鈴木裕士博士、神戸工業試験場の齊藤徹博士に多大なご指導ご支援を戴いたことを記して謝意を表したい。

文献

- (1) (社)日本溶接協会 原子力研究委員会, 原子力発電プラントにおける溶接・残留応力と強度に関する国内シンポジウム(第 39 回国内シンポジウム)資料集, (2007).
- (2) 宮崎克雅, 菅野智, 望月正人, 林眞琴, 白鳥正樹, 干強, “影響関数法および固有ひずみ解析法による溶接残留応力場における表面き裂の応力拡大係数の評価”, 日本機会学会論文集(A編), 第 65 巻, 第 636 号, pp.1709-1715 (1999).
- (3) Katsuyama, J., Asano, W., Onizawa, K., Mochizuki, M. and Toyoda, M., “Crack Growth Analysis of SCC under Various Residual Stress Distributions near the Piping Butt-Welding,” Proc. of 2007 ASME-PVP Conf., PVP2007-26574, San Antonio, Texas, USA, (2007).

- (4) Shiratori, M., Nakanishi, S., Tanaka, Y. and Iwamatsu, F., "Estimation of SCC Crack Propagation under Corrosion Environment by "SCAN" ," Proc. of 2007 ASME-PVP Conf., PVP2007-26055, San Antonio, Texas, USA, (2007).
- (5) Noda, M., Maekawa, A., Takahashi, S., Oumaya, T., Serizawa, H. and Murakawa, H., "Evaluation of Residual Stress Distribution in Austenitic Stainless Steel Pipe Butt-Welded Joint," Proc. of the 8th International Welding Symposium, SA2-8, (2008).
- (6) Maekawa, A., Noda, M., Takahashi, S., Oumaya, T., Serizawa, H. and Murakawa, H., "Evaluation of Residual Stress Distribution in Austenitic Stainless Steel Pipe Butt-Welded Joint," 溶接学会論文集, 第27巻, 第2号, pp.240s-244s (2009).
- (7) 大厩徹, 前川晃, 野田満靖, 高橋茂, 芹澤久, 村川英一, "中性子回折による SUS316 配管の溶接継手の残留応力測定結果と数値解析結果の比較," 日本機械学会 M&M2009 材料力学カンファレンス, OS1212, (2009).
- (8) 前川晃, 野田満靖, 大厩徹, 高橋茂, "中性子回折法による冷間加工曲がり配管の残留応力評価," 日本機械学会 2009 年年次大会, S0304-1-1, (2009).
- (9) 前川晃, 大厩徹, 野田満靖, 高橋茂, "X 線回折法による集合組織を有する曲がり配管の残留応力測定," 日本機械学会 2009 年年次大会, S0304-1-4, (2009).
- (10) 日本材料学会 X 線材料強度部門委員会編, "X 線応力測定標準 (2002 年度版) - 鉄鋼編一," JSMS-SD-5-02, 日本材料学会, (2002).
- (11) 栗村隆之, 佐野雄二, 大城戸忍, "溶接部残留応力測定小委員会中間報告," 第 42 回材料強度に関するシンポジウム 講演論文集, pp72-77 (2007).
- (12) 柳瀬悦也, 西尾光司, 楠見之博, 新井和夫, 鈴木賢治, 秋庭義明, 來海博央, 田中啓介, "放射光高エネルギー X 線を用いたショットピーニング処理をした鉄鋼の残留応力分布の評価," 材料, Vol.51, No.7, pp.756-763 (2002).
- (13) 佐野雄二, "ピーニング施工部の応力評価," Spring-8 利用シンポジウム - 放射光による応力評価の実用化 - 講演論文集, pp.56-60 (2005).
- (14) 佐野雄二, 秋田貢一, 政木清孝, "放射光およびレーザピーニング効果の確認," 日本実験力学学会 2006 年度年次講演会文集, (2006).
- (15) 林眞琴, 大城戸忍, 皆川宣明, 森井幸生, "中性子回折による残留応力測定装置の開発と炭素鋼曲げ塑性変形材の残留応力分布の測定," 材料, Vol.47, No.47, pp.420-426 (1998).
- (16) 日本材料学会 X 線材料強度部門委員会編, "中性子応力測定標準," 日本材料学会, (2005).
- (17) 鈴木裕士, 齋藤徹, 町屋修太郎, 森井幸生, "中性子回折法における非対称モノクロメータシステムの開発," 第 42 回材料強度に関するシンポジウム 講演論文集, pp.1-4 (2007).
- (18) 鈴木裕士, 町屋修太郎, 齋藤徹, 盛合敦, 秋田貢一, 森井幸生, "中性子回折法による原子炉大型構造物の残留応力測定 (残留応力測定用中性子回折装置 RESA の高度化)," 第 42 回材料強度に関するシンポジウム 講演論文集, pp.11-15 (2007).
- (19) 林眞琴, 石渡雅幸, 森井幸生, 皆川宣明, "中性子回折による炭素鋼配管突合せ溶接継手の残留応力," 材料, Vol.45, No.7, pp.772-778 (1996).
- (20) 林眞琴, 石渡雅幸, 皆川宣明, 船橋達, "中性子回折によるソケット溶接継手の残留応力の測定," 材料, Vol.44, No.507, pp.1464-1469 (1995).
- (21) 林眞琴, 森井幸生, 小林晋昇, "中性子トリアルユース制度の 06 年度報告および茨城県材料構造解析装置の概要," 第 42 回材料強度に関するシンポジウム 講演論文集, pp.44-49 (2007).
- (22) Yetisir, M., Rogge, T. and Donabarger, R., "Residual Stresses of CANDU Feeder Bends - Effect of Bend Radius," Proc. of 2006 ASME-PVP Conf., PVP2006-ICPVT-11-93407, Vancouver, BC, Canada, (2006).
- (23) 鈴木裕士, 菖蒲敬久, "中性子および放射光による残留応力測定とその相補利用," ふえらむ, Vol.11, No.11, pp.9-16 (2006).
- (24) 例えば, 松岡一祥, 直井保, "パイプ円周溶接により生ずる残留応力に関する一解法," 溶接

- 学会誌, 第51巻, 第2号, pp.148-155 (1982).
- (25) 村川英一, 尾田勇, 伊藤真介, 芹澤久, 柴原正和, 西川弘泰, “反復サブストラクチャー法を用いた溶接熱弾塑性解析の高速化,” 関西造船協会論文集, 第243号, pp.67-70 (2005).
- (26) 西川弘泰, 芹澤久, 村川英一, “大規模溶接シミュレーションの実機適用,” 溶接学会論文集第24巻, 第2号, pp.168-173 (2006).
- (27) Warren, A.P., Bate, S.K. and Hurrell, P., “The Effect of Modeling Simplifications on the Prediction of Residual Stresses in a Multi-Pass Plate Groove Weld,” Proc. of 2007 ASME-PVP Conf., PVP2007-26339, San Antonio, Texas, USA, (2007).
- (28) Bate, S.K., Warren, A.P., Watson, C.T., Hurrell, P. and Francis, J.A., “UK Research Programme on Residual Stresses—Progress to Date,” Proc. of 2007 ASME-PVP Conf., PVP2007-26337, San Antonio, Texas, USA, (2007).
- (29) (独) 原子力安全基盤機構, “平成19年度 複雑形状部機器配管健全性実証事業に関する報告書,” 08 基材報-0011, (2008).
- (30) 田中啓介, 鈴木賢治, 秋庭義明, “残留応力の X 線評価 - 基礎と応用 -, ” 養賢堂, pp.345-350, (2006).
- (31) 林真琴, 大本寛, 道下秀紀, Root, J.H., “Zr-2.5% Nb 合金における集合組織と弾性定数の中性子回折法による測定,” 材料, Vol. 46, No.7, pp.743-749 (1997).
- (32) 大城戸忍, 林真琴, 秋庭義明, 田中啓介, 皆川宣明, 森井幸生, “集合組織を有する Al 合金製嵌合継手の中性子回折による残留応力測定,” 材料, Vol.54, No.3, pp.333-338 (2005).
- (33) 朴位坤, 小林英男, 中村春夫, 小出孝道, “X 線法によるオーステナイト系ステンレス鋼の溶接残留応力の測定,” 日本機械学会材料力学部門講演会講演論文集 (Vol. B), pp.70-71 (1994).
- (34) 小木曾勝彦, “V, Mn, Cr 各特性 X 線による SUS304 の応力測定法比較,” 第37回材料強度に関するシンポジウム講演論文集, pp.117-122 (2001).