固有ひずみ法による原子炉溶接継手の残留応力の測定*

－原子炉容器管台貫通部の残留応力測定－

中長 啓治**, 太田 高裕***, 小川 直輝***, 麻 寧緒****,
濱口 裕充*****, 佐藤 嶺樹*****, 名山 理介*****

Measurement of Welding Residual Stresses of Reactor Vessel by Inherent Strain Method*

- Measurement of Residual Stresses of Pipe-Plate Penetration Joint -

by NAKACHO Keiji**, OHTA Takahiro***, OGAWA Naoki***, MA Ninshu****,
HAMAGUCHI Hiromitsu*****, SATOU Mineki***** and NAYAMA Michisuke*****

This study aims to ensure the safety of the nuclear power plants. The accidents of leak from the welded zones at the pipe penetration part of reactor vessel or at the coolant pipe are reported at home or abroad. One of the main causes is the welding residual stress. So, it is important to know the welding residual stress for the keeping of high safety of the plants, the estimation of plants life cycle and the plan of maintenance. The welded joints of the nuclear power plants have complex shapes, and the welding residual stresses also have complex distributions three-dimensionally. In this study, the inherent strain method combined with Finite Element Method (FEM) is used to measure the welding residual stresses accurately.

The mock-up is idealized for the welded joint at the pipe penetration part of actual reactor vessel. The inherent strain method is applied to measure the residual stresses. In this method, the inherent strains are unknowns. When the residual stresses are distributed complexly in 3-dimensional stress-state, the number of unknowns becomes very large. So, the inherent strains are expressed with some functions to decrease the number largely. The theory, the experiment process and the analyzed results are explained. The characteristics of the distributions of residual stresses and their production mechanisms are discussed. The inherent strain method gives the most probable values and the deviations of the residual stresses. The deviations are small enough for the most probable values. It assures the high reliability of the estimated results.

Key Words: Welding residual stress, Measurement, Inherent strain method, Finite element method, Nuclear power plants, Pressure vessel, Welded joint

1. 緒 言

著者らは、原子炉の安全性、健全性及び経済性の向上を目的とし、原子炉容器及び冷却材配管の溶接部の残留応力を固有ひずみ法により測定することを進めている。国内外で報告されている漏洩事象の多くはこれらの溶接部において発生しており、溶接残留応力が主因の一つであると考えられる。したがって、溶接残留応力を測定することにより、力学的な面から割れ発生防止に最適な溶接法を究明するこ

とや、き裂発生後の伝播解析の精度を向上させ、寿命評価の信頼性を高めることができる。

ところで、残留応力の測定法はこれまで種々提案されているが¹⁾、厚板の内部の残留応力分布を測定できる理論は少なく、例えば、逐次穿孔法として有名な Sachs 法²⁾では管の残留応力分布が軸対称でしかも軸方向に一様であることが条件となっている。最近では DHD (Deep-Hole Drilling) 法³⁾があるが、穿孔ラインに沿った残留応力分布が得られるだけで 3 次元的な分布は測定できない。本研究で対象とする溶接部は厚板で、特に本体容器では溶接部は複雑な形状をしており、厚板の内部で残留応力も複雑に変化しているものと考えられる。3 次元的に複雑に分布している残留応力を測定する手法は、著者らが提案した“固有ひずみ法”⁴⁾以外には見当たらない。

本研究では、原子炉溶接継手の残留応力の測定に固有ひずみ法を適用する。研究対象とする継手は原子炉容器の管台貫通溶接部である。この継手は寸法的に小さく（ひずみの計測数が制限される）、しかも、応力分布が複雑に変化している（未知固有ひずみ数が非常に多くなる）と推察される。そこで、固有ひずみの分布を関数表示する手法⁵⁾を採用する。これにより、未知数を大幅に減少させ、測定を現実的なものとすることができる。

*受付日 平成19年9月3日 受理日 平成19年11月21日
平成18年度春季全国大会で発表

**正 員 大阪大学接合科学研究所 Member, Joining and
Welding Research Institute, Osaka University

*** 三菱重工業㈱ Mitsubishi Heavy Industries, Ltd.

****正 員 ㈱日本総研ソリューションズ Member, JRI
Solutions, Limited

***** 大阪大学大学院（現在 ㈱神戸製鋼所） Graduate
School of Engineering, Osaka University (Present
Address: Kobe Steel, Ltd.)

*****学生員 大阪大学大学院 Student Member, Graduate School
of Engineering, Osaka University

*****正 員 三菱重工業㈱ Member, Mitsubishi Heavy Industries,
Ltd.

本研究では、上記継手の残留応力測定に適した関数表示固有ひずみ法の理論を具体的に展開し、それに基づいて有限要素法解析プログラムを構築した。又、実験手に近い試験体（モックアップ）を製作して、同プログラムを使用し、その3次元溶接残留応力分布を測定した。本報告では、その解析理論、実験手順、解析手順及び代表的な解析条件に対して得られた測定結果を示す。

2. 固有ひずみ法による残留応力測定理論

本研究では固有ひずみ法を適用する。“固有ひずみ”とは、ある構造物あるいは部材において応力が生じている場合、そのひずみを取り除く（0にする）と、その構造物あるいは部材が無応力状態になる、そのような“応力の発生源”となっているひずみのことである。

固有ひずみと残留応力は弾性的に、即ち、一意的に対応している。したがって、計測ひずみより固有ひずみを求めることができる。しかし、計測ひずみと固有ひずみの関係、固有ひずみと残留応力の関係を、3次元任意形状・任意固有ひずみ分布（任意残留応力分布）状態に対して、連続体の弾性力学理論より求めることは不可能である。そこで、有限要素法を用いて、それらの関係が定式化された。その理論が、著者らが提案した“固有ひずみ法”⁴⁾である。固有ひずみ法は逆問題としての解析法の一つである。

2.1 関数表示固有ひずみ法の基礎理論

物体内で分布している固有ひずみを有限要素法で取り扱う場合、要素毎に異なると考えて取り扱うのが要素表示の固有ひずみ法⁴⁾で、各要素の固有ひずみがそのまま未知数となる。本研究では、固有ひずみの分布を関数で表示することを考える⁵⁾。この場合、適切な分布関数を設定すると、その係数の値が分かると、固有ひずみ分布を得ることができる。言い換えると、分布係数が未知数で、計測ひずみから分布係数を推定することになる。関数表示することにより未知数の数を大幅に減少させることができる。

$$\{\varepsilon_s^*\} = [P_{sp}] \{A_p\} \quad (s=1 \cdots s_{\max}, p=1 \cdots q) \quad \dots (1)$$

ここで、

$\{\varepsilon_s^*\}$ ：物体内で分布している固有ひずみ成分（3次元なら最多6成分）

$[P_{sp}]$ ：分布関数マトリックス

$\{A_p\}$ ：分布係数ベクトル（未知数）

$s_{\max}$ ：固有ひずみの成分数（3次元なら最多6成分）

q ：全固有ひずみ成分に対する分布係数の総数。

$$q = \sum_{s=1}^{s_{\max}} p_s$$

p_s ：各固有ひずみ成分の分布係数の数

分布係数の値が確定された場合、固有ひずみ分布が確定

され、そのような固有ひずみが分布しているとした場合の弾性ひずみ分布及び応力分布を弾性計算により求めることができる。

$$\{\varepsilon_k\} = [H_{kp}^F] \{A_p\} \quad (k=1 \cdots n, p=1 \cdots q) \quad \dots (2)$$

ここで、 $\{\varepsilon_k\}$ ：分布関数及びその分布係数の値に対応する弾性ひずみ

$[H_{kp}^F] : \{A_p\}$ と $\{\varepsilon_k\}$ の関係を表す弾性応答マトリックス

n ：全要素の弾性ひずみ成分の総数

$$\{\sigma_k\} = [M_{kp}^F] \{A_p\} \quad (k=1 \cdots n, p=1 \cdots q) \quad \dots (3)$$

ここで、 $\{\sigma_k\}$ ：分布関数及びその分布係数の値に対応する応力

$[M_{kp}^F] : \{A_p\}$ と $\{\sigma_k\}$ の関係を表す弾性応答マトリックス

n ：全要素の応力成分の総数（＝弾性ひずみ成分の総数）

n 個の弾性ひずみ $\{\varepsilon_k\}$ の内、計測される弾性ひずみを m 個 ($m \leq n$) とし $\{m\varepsilon_i\}$ で表すと、 $\{m\varepsilon_i\}$ と固有ひずみ分布係数 $\{A_p\}$ の関係は式(2)を縮小することにより求められる (n 個の連立方程式の集合が m 個の連立方程式の集合となる)。この関係は測定方程式と呼ばれる。これを式(4)で表す。

$$\{m\varepsilon_i\} = [H_{ip}^F] \{A_p\} \quad (i=1 \cdots m, p=1 \cdots q) \quad \dots (4)$$

ここで、 m ：計測する弾性ひずみの数

式(4)で $\{m\varepsilon_i\}$ と $\{A_p\}$ を関係付ける $[H_{ip}^F]$ の成分は次のように求めることができる。即ち、 $[H_{ip}^F]$ の第 r 列は $\{A_p\}$ の r 番目の成分を1、他の成分を0とした時に、それに対応する固有ひずみ（式(1)）が生じさせる各計測点での弾性ひずみとして、弾性計算により簡単に求めることができる。

関数表示に近似したことによる誤差及び計測誤差により、通常、計測ひずみ $\{m\varepsilon_i\}$ は式(2)及び式(4)を満足せず、両辺の値に差が生じる。これを統計学的に処理するために、計測する弾性ひずみ数を未知数である固有ひずみ分布係数の数以上にしておく。式(4)で両辺の値の差、即ち、誤差を $\{x_i\}$ で表すと、

$$\{m\varepsilon_i\} - [H_{ip}^F] \{A_p\} = \{x_i\} \quad (i=1 \cdots m, p=1 \cdots q) \quad (m \geq q) \quad \dots (5)$$

ここで、 $\{x_i\}$ ：誤差

式(5)は m 個のスカラー方程式から構成されており、誤差がなければ、その中の任意の q 個を用いると、すべての固有ひずみ分布係数を一意的に求めることができる。しかし、誤差が含まれていると、どの方程式（どの計測ひずみ）

を選択するかにより、算出される固有ひずみ分布係数の値は違ったものとなる。そこで、統計学的手法を導入して、 m 個のすべての方程式 (m 個のすべての計測ひずみ) を用いて、確率的に最も生じやすい値 (最確値) とその偏差を求める。

固有ひずみ分布係数の最確値を $\{\hat{A}_p\}$ で表すと、誤差 $\{x_i\}$ は残差 $\{v_i\}$ と呼ばれるものとなり、式 (5) は、

$$\{m\epsilon_i\} - [H_{ip}^F] \{\hat{A}_p\} = \{v_i\} \quad (i=1\cdots m, p=1\cdots q) \quad (6)$$

ここで、 $\{\hat{A}_p\}$: 固有ひずみ分布係数の最確値
 $\{v_i\}$: 残差

残差の平方和を S とし (式 (7)), S が固有ひずみ分布係数の最確値に対して最小となるように最小 2 乗法を適用する (式 (8)). 式 (8) は固有ひずみ分布係数の最確値を求める連立方程式となっており、正規方程式と呼ばれる。残差が式 (6) で表されることより、式 (8) より式 (9) を導くことができる。式 (9) は計測ひずみと固有ひずみ分布係数の最確値の関係を示している。

$$S = \{v_i\}^T \{v_i\} \quad (i=1\cdots m) \quad (7)$$

$$\partial S / \partial \{\hat{A}_p\} = \{0\} \quad (p=1\cdots q) \quad (\text{正規方程式}) \quad (8)$$

$$[H_{ip}^F]^T \{m\epsilon_i\} = [H_{ip}^F]^T [H_{ip}^F] \{\hat{A}_p\} \quad (\text{正規方程式}) \quad (9)$$

($i=1\cdots m, p=1\cdots q$)

$[H_{ip}^F]^T [H_{ip}^F]$ は $q \times q$ の正方マトリックスであり、その逆マトリックスを求めると、固有ひずみ分布係数の最確値は計測ひずみより、次式のように求められる。

$$\{\hat{A}_p\} = \left([H_{ip}^F]^T [H_{ip}^F] \right)^{-1} [H_{ip}^F]^T \{m\epsilon_i\} \equiv [G_{pi}^F] \{m\epsilon_i\} \quad (i=1\cdots m, p=1\cdots q) \quad (10)$$

固有ひずみ分布係数の最確値と式 (2) 及び式 (3) より、弾性ひずみ及び残留応力の最確値を求めることができる。

$$\{\hat{\epsilon}_k\} = [H_{kp}^F] \{\hat{A}_p\} \quad (k=1\cdots n, p=1\cdots q) \quad (11)$$

$$\{\hat{\sigma}_k\} = [M_{kp}^F] \{\hat{A}_p\} = [M_{kp}^F] [G_{pi}^F] \{m\epsilon_i\} \equiv [N_{ki}^F] \{m\epsilon_i\} \quad (k=1\cdots n, i=1\cdots m, p=1\cdots q) \quad (12)$$

又、最確値の精度は次のように評価できる。測定の重みと同じ (単位重み) とすると、測定の分散の不偏推定量は、

$$\hat{s}^2 = \{v_i\}^T \{v_i\} / (m-q) = S / (m-q) \quad (i=1\cdots m) \quad (13)$$

固有ひずみ分布係数と残留応力の最確値の不偏分散は、それぞれ、

$$(\hat{s}_{A_p})^2 = \left(\sum_{i=1}^m (g_{pi}^F)^2 \right) \cdot \hat{s}^2 \quad (p=1\cdots q) \quad (14)$$

ここで、 g_{pi}^F : 式 (10) 中の $[G_{pi}^F]$ の成分

$$(\hat{s}_{\sigma_k})^2 = \left(\sum_{i=1}^m (n_{ki}^F)^2 \right) \cdot \hat{s}^2 \quad (k=1\cdots n) \quad (15)$$

ここで、 n_{ki}^F : 式 (12) 中の $[N_{ki}^F]$ の成分

標準偏差の推定値として、通常通り、不偏分散の正の平方根をとると、

$$\hat{s}_{A_p} = \sqrt{\left(\sum_{i=1}^m (g_{pi}^F)^2 \right) \cdot \hat{s}^2} \quad (p=1\cdots q) \quad (16)$$

$$\hat{s}_{\sigma_k} = \sqrt{\left(\sum_{i=1}^m (n_{ki}^F)^2 \right) \cdot \hat{s}^2} \quad (k=1\cdots n) \quad (17)$$

2.2 原子炉容器貫通溶接部 (非軸対称円周厚板継手) に対する解析理論 (関数表示 T-L 法の展開)

2.2.1 試験体、座標系と固有ひずみ成分

原子炉容器管台貫通溶接部は管台となる円管を本体容器に接合するものであるが、一般的に非軸対称な形状をしている。この溶接部の残留応力を関数表示固有ひずみ法を適用して測定する。直接の解析対象とする試験体 (モックアップ) を Fig. 1 に示す。母板とする厚板平板 (板厚 110 mm, 長さ × 幅 700 mm × 700 mm) に入射角 45° で管部材 (外径 100 mm, 板厚 15 mm, 長さ 480 mm) が貫通溶接されている。異材継手であり、母板は SM490A, 管は SUS316, 溶接棒は ENiCrFe-1 (ニッケル基合金 600 材) である。試験体は 0° - 180° 断面に対する対称性を有している。実溶接も出来る限り対称に行われるので、固有ひずみがこの断面に対して対称に分布しているものと仮定する。

座標系としては円柱座標系を使用する。管部材の軸方向

Fig. 1 Mock-up of the welded joint of pressure vessel

を z ，径方向を r ，周方向を θ で表す．応力や固有ひずみの成分はこの円柱座標系に対して表示する．固有ひずみの成分は右肩に“*”を付けて表す．即ち，その直ひずみ3成分を ε^*_{zr} ， $\varepsilon^*_{r\theta}$ ， $\varepsilon^*_{\theta z}$ で，せん断ひずみ3成分を γ^*_{zr} ， $\gamma^*_{r\theta}$ ， $\gamma^*_{\theta z}$ で表す．

2.2.2 切断及び計測手順

試験体の切断及び解放ひずみの計測手順を以下に示す．平板継手に対して提案された T-L 法⁶⁾と呼ばれる手法に基づいている．Fig. 2 にその作業の流れを示す．図中，ひずみゲージの貼付位置に関しては，作業の概要が分かる程度に粗く示している．詳細は Fig. 3 に示されている．尚，使用したゲージはすべて2軸ひずみゲージ（ゲージ長：1 mm）である．

- (1) 初期の試験体（モックアップ）を，以後，3D 試験体と呼ぶ．3D 試験体は2体準備する．3D 試験体には，固有ひずみの6成分がすべて有効固有ひずみとして存在している．3D 試験体の表面にゲージを貼付し，以後の切断時に解放されるひずみを計測する．この計測ひずみを $\{\varepsilon_{3D}\}$ と表示する．
- (2) 3D 試験体において固有ひずみ存在領域を十分大きい目に想定し，その外部を切断し取り除く．切断後の試験体を3D-C 試験体と呼ぶ．3D-C 試験体も2体準備する．
- (3) 3D-C 試験体の一つより， zr 面を面とする薄板を切断し，

Fig. 2 Procedure of measuring and cutting

Fig. 3 Location of measuring

T 片と呼ぶ．T 片は周方向にいくつかの角度（ $0^\circ - 180^\circ$ 断面に対する対称性の仮定より，本実験では， 0° ， 45° ， 90° ， 135° ， 180° の5つの角度）において切り出す．このように切り出されたT片では，その面に垂直方向の固有ひずみ成分（ ε^*_{θ} ）及び垂直方向を含むせん断固有ひずみ成分（ $\gamma^*_{r\theta}$ ， $\gamma^*_{\theta z}$ ）はほぼ完全に解放されており，面内方向の固有ひずみ成分（ ε^*_{zr} ， $\varepsilon^*_{r\theta}$ ， γ^*_{zr} ）のみによって残留応力が生成されているものと仮定することができる．各T片の表面（切断面）にひずみゲージを貼付する．Fig. 3 (a) はひずみゲージ貼付位置を $0^\circ - 180^\circ$ 断面に対して示したものである． 45° ， 90° 及び 135° 断面においても同様に貼付する．T 片を更に細片に切断し，その時に解放されるひずみを計測する．この計測ひずみを $\{\varepsilon_T\}$ と表示する．

- (4) もう一つの 3D-C 試験体より，母板の板厚方向に垂直な面を有する薄板（楕円リング状薄板）を切断し，L 片と呼ぶ．L 片は固有ひずみが存在していると想定される領域をすべて含むように複数枚（本実験では14枚）切り出す．L 片においては，L 片の面が z 軸方向に垂直ではないため，固有ひずみの6成分がすべて有効固有ひずみとして残存している．各L片の表面（切断面）にひずみゲージを貼付する．Fig. 3 (b) は $0^\circ - 180^\circ$ ライン上におけるひずみゲージ貼付位置を，すべてのL片に対してまとめて示したものである． 45° ， 90° 及び 135° における径方向にも同様に貼付する．L 片を更に細片に切断し，その時に解放されるひずみを計測する．この計測ひずみを $\{\varepsilon_L\}$ で表示する．

2.2.3 測定方程式の構築

有限要素法により，まず，3つの試験体・試験片（3D 試験体，T 片，L 片）における測定方程式（弾性応答）を別々に求める．

- (1) 3D 試験体：6つの固有ひずみ成分のすべての分布係数 $\{A_p\}$ の成分に対し，順次，1つだけに単位量を与え（他の成分は0とする），試験体の計測位置に生じる弾性ひずみを求める．これにより求められた応答マトリックスを $[H_{3D}^F]$ で表すと，

$$\{\varepsilon_{3D}\} = [H_{3D}^F] \{A_p\} \dots \dots \dots (18)$$

- (2) T片：面内の3つの固有ひずみ成分 (ε_z^* , ε_r^* , γ_{zr}^*) の分布係数に、順次、単位量を与え (他の成分は0とする)、試験片の計測位置に生じる弾性ひずみを求める。求められた応答マトリックスを $[H_T^F]$ で表す。但し、T片においては、応答マトリックス $[H_T^F]$ の列を他の2つの応答マトリックスと同じように全分布係数に対応させるため、列を追加し、追加成分は0としておく (存在していないと仮定している固有ひずみ3成分に対しては弾性ひずみが発生しないようにしておく)。

$$\{\varepsilon_T\} = [H_T^F] \{A_p\} \dots \dots \dots (19)$$

- (3) L片：3D試験体と同様の計算手順で、応答マトリックス $[H_L^F]$ を求めることができる。

$$\{\varepsilon_L\} = [H_L^F] \{A_p\} \dots \dots \dots (20)$$

- (4) 全体に対する測定方程式：3D試験体、T片及びL片での計測ひずみを同時に使用する場合の測定方程式は、上記の3つの式を統合して、

$$\{\varepsilon_w\} = [H_w^F] \{A_p\} \dots \dots \dots (21)$$

ここで、

$$\{\varepsilon_w\} = \left\{ \begin{matrix} \{\varepsilon_{3D}\} \\ \{\varepsilon_T\} \\ \{\varepsilon_L\} \end{matrix} \right\}, [H_w^F] = \begin{bmatrix} [H_{3D}^F] \\ [H_T^F] \\ [H_L^F] \end{bmatrix}$$

式(21)が本研究での測定方程式で、前節の式(4)に相当する。以後の理論展開は前節と同じである。

尚、3D試験体及びL片には、6つの固有ひずみ成分がすべて有効固有ひずみとして残留しているので、計測数が未知分布係数の数より多ければ、理論上は、単独でも (あるいは、3つの試験体・試験片の内、2つを用いて)、残留応力を推定することが可能である。但し、それにより、感度が悪い計測位置 (解放弾性ひずみ/解放固有ひずみ) の比が小さい位置) の数 (比率) が多くなると、推定される最確値の信頼性が低くなる (偏差が大きくなる) と考えられる (式(4)及び式(10)~(17)を参照)。この点に関しては、3.1節で述べる計測数の少数化 (実験の効率化) と共に、今後、検討を進める予定である。

2.2.4 固有ひずみ分布関数

溶接残留応力を生成している固有ひずみは、溶接溶融部での剛性回復後の熱ひずみと、溶接に伴う温度変化時に、同部を含め、その周囲に発生する塑性ひずみである。そこで、溶接部を含めその周囲に固有ひずみが存在すると考える領域を想定し、その領域内で、固有ひずみ各成分に対して、境界では0となる条件を満たす下記のような分布関数を設定した。

- (1) zr面 (T片) に対する分布関数

分布関数として、多次多項関数と三角多項関数を準備し

た。局所座標系を設定し、固有ひずみ及び座標を正規化したものを以下に示す。局所座標系は、zr断面で管外面と母板の上表面との交点を原点とする。又、固有ひずみは多項式の各項の最大値で、座標は固有ひずみ領域端部の座標で無次元化することにより正規化する。変化に富んだ分布が表現できるように、二つの関数共、z方向及びr方向に5項 (N=5) まで式展開しプログラム化した。

- (a) 多次多項関数

$$\varepsilon_k^{*f}(\zeta, \xi) = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N A_{ijk} F_i \left(\frac{\zeta}{Z_k} \right) F_j \left(\frac{\xi}{R_k} \right) \dots \dots \dots (22)$$

ここで、k: zr断面の周方向番号 (T片の番号)

ζ, ξ : 局所座標 (軸方向, 径方向)

Z_k, R_k : 局所座標における固有ひずみ領域端部の座標

A_{ijk} : 固有ひずみ分布係数

$$F_1(x) = (1-x), F_2(x) = 4x(1-x), F_3(x) = (1-x)(1-3x)\left(1+\frac{x}{2}\right),$$

$$F_4(x) = 10.96x(1-x)\left(1-\frac{x}{4}\right)(1-2x),$$

$$F_5(x) = 22.46x(1-x)\left(1-\frac{10x}{3}\right)\left(1-\frac{10x}{6}\right)\left(1-\frac{10x}{9}\right)$$

$$x = \frac{\zeta}{Z_k} \quad \text{or} \quad x = \frac{\xi}{R_k}$$

- (b) 三角多項関数

$$\varepsilon_k^{*f}(\zeta, \xi) = A_{lk} \left(1 - \frac{\zeta}{Z_k} \right) \left(1 - \frac{\xi}{R_k} \right) + \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N A_{ijk} \cos \left((2i-1) \frac{\pi \zeta}{2Z_k} \right) \cos \left((2j-1) \frac{\pi \xi}{2R_k} \right) \dots \dots \dots (23)$$

ここで、 A_{lk}, A_{ijk} : 固有ひずみ分布係数

- (2) θ 方向 (周方向) に対する分布関数

固有ひずみの周方向の分布は、実験と連動し、T片が切り出されるzr断面における固有ひずみ分布を補間することにより表現する。本実験でのT片の切断位置は $\theta = 0^\circ, 45^\circ, 90^\circ, 135^\circ, 180^\circ$ の5つである (5つの角度が $\theta_{k=1,2,3,4,5}$ となる)。各T片 (zr断面) における固有ひずみ分布は式(22)あるいは式(23)により表される。その間の任意の角度 θ での固有ひずみ分布はそれらの式を用いて補間表示する。補間にはLagrangeの補間法 (Lagrangeの補間多項式) を採用する。Lagrangeの補間多項式は、指定されたいくつかの点を多次曲線で滑らかに連続させるもので、周方向の固有ひずみ分布は、式(22)あるいは式(23)を用いて、次式で表されることになる。

$$\varepsilon_L^{*f}(\zeta, \xi, \theta) = \sum_{k=0}^n \varepsilon_k^{*f}(\zeta, \xi) \cdot L_k(\theta) \dots \dots \dots (24)$$

ここで、 $\varepsilon_k^{*f}(\zeta, \xi)$: 式(22)あるいは式(23)

$L_k(\theta)$: Lagrange の補間係数

$$L_k(\theta) = \prod_{\substack{m=0 \\ m \neq k}}^n \frac{\theta - \theta_m}{\theta_k - \theta_m} \\ = \frac{(\theta - \theta_0) \cdots (\theta - \theta_{k-1})(\theta - \theta_{k+1}) \cdots (\theta - \theta_n)}{(\theta_k - \theta_0) \cdots (\theta_k - \theta_{k-1})(\theta_k - \theta_{k+1}) \cdots (\theta_k - \theta_n)}$$

周方向の分布を式 (24) のように補間することにより、新たに未知係数が発生することはない。周方向には式 (24) のように分布しているものとして、 zr 断面に対する式 (22) あるいは式 (23) に含まれる未知分布係数の最適化が行われることになる。

ところで、本解析では、固有ひずみ分布の $0^\circ - 180^\circ$ 断面に対する対称性を仮定している。上式により滑らかな分布を表現することはできるが、 0° 及び 180° での対称性を満足させることはできない。そこで、次のような計算法を考案した。即ち、 $0^\circ - 180^\circ$ における固有ひずみ分布が、 0° の外側には 0° を対称面として、 180° の外側には 180° を対称面として連続的に分布していると想定した。これにより、 0° 及び 180° での対称性をほぼ完全に満足させることができる。又、これによっても新たな未知数は発生しない。

3. 実験と解析の概要

3.1 実験作業

試験体は $0^\circ - 180^\circ$ 断面に対する対称性を有しており、溶接も下記のように実継手に近い溶接条件で出来る限り対称に実施した。これにより、固有ひずみ（溶接残留応力）は $0^\circ - 180^\circ$ 断面に対称に分布していると仮定した。

溶接は手溶接（被覆アーク溶接）により行い、電流は $120\text{ A} \sim 130\text{ A}$ 、電圧は 24 V 、入熱量は $8\text{ kJ/cm} \sim 13\text{ kJ/cm}$ である。溶接方向は谷側の 0° 付近を始端とし山側の 180° 付近を終端とした。その $0^\circ - 180^\circ$ 間を連続的に溶接せず、数回に分け、両側を交互に溶接しながら終端 180° に到るようにした。又、パス数及び層数は $0^\circ - 180^\circ$ 間の位置により異なり、途中の 90° 付近で少なく、 0° 付近及び 180° 付近で多くなっている。平均としては $7 \sim 8$ 層、 20 パス程度である。

試験体（3D 試験体）は 2 体準備し、1 体からは T 片を、もう 1 体からは L 片を切り出した。更に、T 片と L 片を細断した。このような各切断の前にひずみゲージを貼付し、切断前後の計測値より解放ひずみを算出した。

ひずみ計測は、本研究が新しい測定法の最初の試みであり、又、国家プロジェクトでもあるので、万全を期するため、固有ひずみが存在すると推察される領域を十二分に含む広領域において、出来る限り多数計測した。その結果、計測ひずみ数は下記（Table 2）の固有ひずみ分布係数（未知数）の数より遥かに多くなり、3D 試験体、T 片及び L 片での総計は 2871 となった（明らかに不可解な数値を示す不良データは取り除いている）。今後、本研究成果を基に、出来る限り少数で高精度が得られるように、計測位置の選定

法などを検討し、本測定法の効率化を進めていく予定である。

3.2 解析作業

今回の解析には 2871 の計測ひずみのすべてを使用した。解析に用いた要素分割を Fig. 4 に示す。全要素数は 32476 である。試験体は異材溶接継手であり、解析に必要な各材料の材料定数（室温における弾性係数、ポアソン比）を Table 1 に示す。

分布関数としては上記の 2 種類（式 (22) + 式 (24)、あるいは、式 (23) + 式 (24)）を適用し、それぞれ、 zr 面（T 片）に対する分布関数として 1 項のみを使用した場合から 5 項までを使用した場合に対して解析を実行した。各ケースでの固有ひずみ分布係数の総数を Table 2 に示す。

解析で想定する固有ひずみ領域は、各 T 片において、Fig. 5 に示すように、a, b, c, d の 4 つの境界位置を示すパラメータを用いて設定した。厚板断面内では a と b を通る楕円を、管断面内では板厚方向に一定と仮定した。上記の 2 種類の分布関数に対して、このような 4 つの領域パラメータを設定し、その値を変化させ、解析結果への影

Fig. 4 Mesh division of the mock-up

Table 1 Material properties

	Material	Young's modulus (MPa)	Poisson's ratio
Weld metal	ENiCrFe-1	$2.14\text{E}+05$	0.3
Pipe	SUS316	$1.95\text{E}+05$	0.3
Plate	SM490A	$2.03\text{E}+05$	0.3

Table 2 Number of coefficients (unknowns)

Num. of members	High-degree function	Trigonometric function
1	15	30
2	60	75
3	135	150
4	240	255
5	375	390

Fig. 5 Parameters of the region of inherent strain

響を調べた。

又、解析は、固有ひずみ成分として 6 成分をすべて考慮する場合と、直ひずみ 3 成分 (ε_z^* , ε_r^* , ε_θ^*) のみを考慮する場合の 2 つの条件に対して実行した。これは、計測ひずみはすべて直ひずみであり、せん断固有ひずみ (γ_{rz}^* , $\gamma_{r\theta}^*$, $\gamma_{\theta z}^*$) に対する感度によっては、推定結果の信頼性 (例えば、残留応力の偏差) が、せん断固有ひずみを含めた方が必ずしも高くなるとは限らないと予想したことによる (式 (4) 及び式 (10)~(17) を参照)。

4. 測定結果及び考察 (原子炉容器貫通溶接部の残留応力)

本測定法を適用し、実験と有限要素法解析により得られた残留応力分布を以下に示す。前章で述べたように種々の条件で解析を行ったが、本論文では、その代表例として、

Fig. 6 Residual stress σ_z at the section of $0^\circ - 180^\circ$

分布関数としては多次多項関数を 4 次まで使用し、固有ひずみ領域パラメータは 5 つのすべての T 片において $a=b=c=d=70$ mm と設定し、固有ひずみ成分としては直ひずみ 3 成分のみを考慮した場合の結果を示す。

$0^\circ - 180^\circ$ 断面における残留応力の最確値と偏差の分布を

Fig. 7 Residual stress σ_r at the section of $0^\circ - 180^\circ$ Fig. 8 Residual stress σ_θ at the section of $0^\circ - 180^\circ$

Fig. 9 Residual stress σ_z at the section of 90° Fig. 11 Residual stress σ_θ at the section of 90° Fig. 10 Residual stress σ_r at the section of 90°

Fig. 6～Fig. 8 に示す．Fig. 6 は軸方向応力 σ_z を，Fig. 7 は径方向応力 σ_r を，Fig. 8 は周方向応力 σ_θ を示している．同様に， 90° 断面における残留応力の最確値と偏差の分布を Fig. 9～Fig. 11 に示す．

残留応力（最確値）分布の特徴としては，周方向応力が最も大きな引張応力成分となっており，特に 0° 側（谷側）において溶接部から管台にかけて大きな引張応力が見られる．軸方向応力も 0° 側（谷側）において溶接部から管台にかけてやや大きな引張応力が発生している．径方向応力は 90° 断面においてやや大きな引張応力が見られる．

これらの分布傾向を溶接金属の収縮に対する内的拘束の程度から考察してみる．同拘束は，軸方向には， 180° 側

（山側）は溶接金属部表面は自由表面となっており， 0° 側（谷側）の溶接部の方が厳しい．軸方向応力 σ_z の分布傾向はそれに対応している．径方向には，逆に， 180° 側（山側）に近いほど内的拘束は厳しくなっていると考えられる．しかし，径方向応力 σ_r は途中の 90° 断面において 180° 断面よりも大きな引張が発生している．その原因は明確ではないが，例えば，溶接が手溶接であり， 0° から 180° までの半周を連続的に溶接するのではなく，数回に分けている不連続溶接であること，又，周方向の位置によりパス数が異なっていることが影響因子として考えられる．溶接金属の収縮に対する周方向の拘束は，溶接線の方が周方向と一致する 0° 付近及び 180° 付近で最も厳しくなり，溶接線の方と周方向が 45° の角度を持つ 90° 付近で最も弱くなる．周方向応力 σ_θ の分布傾向はこれに対応している．

解析結果の精度は次のようになっている．まず，すべての要素に対しての偏差の最大値を同最確値の最大値と比べると，その比は軸方向成分では約 0.28，径方向成分では約 0.35，周方向成分では約 0.30 となっている．又，応力の最確値の絶対値が 100 MPa 以上となっている領域において，すべての要素の応力の〔偏差／最確値〕比を求めると，その平均値は軸方向成分では約 0.24，径方向成分では約 0.22，周方向成分では約 0.23 となっている．応力の最確値の絶対値が 50 MPa 以上となっている領域まで広げると，その平均値は軸方向成分では約 0.33，径方向成分では約 0.32，周方向成分では約 0.29 となっている．応力の最確値が小さな領域では，偏差は最確値に対して相対的に大きくなっている．

尚，解析諸条件を変化させた場合の結果への影響，それらの結果に対する評価（診断）に関しては，別報で詳細に検討する予定である．

5. 結 言

本研究では、原子炉溶接継手の残留応力を固有ひずみ法により測定した。研究対象とした継手は原子炉容器の管台貫通溶接部である。この継手は寸法的に小さく、しかも、応力分布が複雑に変化していると推察されたので、固有ひずみの分布を関数表示する手法を採用した。これにより、未知数を大幅に減少させ、測定を現実的なものとすることができた。

上記継手の残留応力測定に適した関数表示固有ひずみ法の理論を具体的に展開し、それに基づいて有限要素法解析プログラムを構築した。又、実継手に近い試験体（モックアップ）を製作して、同プログラムを使用し、その3次元溶接残留応力分布を測定した。

本報告では、本研究の全体像を説明した。その中で、測定理論は実験手順と合わせ詳細に記述した。解析結果としては代表的な解析条件に対して得られた結果のみを示した。残留応力各成分の最確値の分布を示し、周方向応力が引張応力として最も大きな成分であること等、その分布傾向と生成要因について簡単に説明した。又、偏差と最確値の大きさを比較し、解析結果の信頼性を評価するための参考値とした。尚、解析諸条件を変化させた場合の結果への影響、それらの結果の評価（診断）に関しては、別報で詳細に検討し考察する予定である。

謝 辞

本論文は、経済産業省「革新的実用原子力技術開発提案公募事業」において、平成15年度に2年計画として採択さ

れた研究「3次元溶接構造物の革新的内部残留応力測定及びびき裂進展解析の精緻化に関する技術開発」の成果の一部である。関係各位に謝意を表します。又、実験の実施においては三菱重工業（株）高砂研究所岩本洋一氏に、解析プログラムの作成においては（株）日本総合研究所諏訪高典氏（現在、キヤノン（株））に多大なご協力を得た。ここに、感謝の意を表します。

参 考 文 献

- 1) The Japan Welding Society: Handbook of Welding and Joining (2nd Edition, Maruzen(2003), I-3-4.
- 2) G. Sachs: Der Nachweis Innerer Spannungen in Stangen und Rohren, Zeitschrift für Metallkunde, 19 (1927), 352-357.
- 3) E.J. Kingston, D. Stefanescu, A.H. Mahmoudi, C.E. Truman and D.J. Smith: Novel Applications of the Deep-Hole Drilling Technique for Measuring Through-Thickness Residual Stress Distributions, Journal of ASTM International, 3-4 (April 2006), Paper ID/JAI 12568.
- 4) Y. Ueda, K. Fukuda, K. Nakacho and S. Endo: A New Measuring Method of Residual Stresses with the Aid of Finite Element Method and Reliability of Estimated Values, Journal of the Society of Naval Architects of Japan, 138 (1975), 499-507, and Theoretical and Applied Mechanics (University of Tokyo Press), 25 (1977), 539-548, etc.
- 5) Y. Ueda and N.X. Ma: Estimating and Measuring Methods of Residual Stresses Using Inherent Strain Distribution Described as Functions (Report 1), Quarterly Journal of the Japan Welding Society, 11-1 (1993), 189-195, etc.
- 6) Y. Ueda, K. Fukuda and M. Tanigawa: New Measuring Method of 3-Dimensional Residual Stresses Based on Theory of Inherent Strain, Journal of the Society of Naval Architects of Japan, 145 (1979), 203-211, and Journal of The Japan Welding Society, 49-12 (1980), 845-853, etc.