ビードオンプレート溶接における3次元残留応力の簡易測定法*

—固有ひずみ分布の関数表示による残留応力の推定法と測定法 (第3報)—

上田 幸雄**, 麻 寧緒***

Simple Measuring Methods of 3 Dimensional Residual Stresses in Bead-on-plate Welds*

—Estimating and Measuring Methods of Residual Stresses Using Inherent strain Distribution Described as Functions (Report 3)—

by Yukio Ueda** and Ning Xu Ma***

In this paper, very simple measuring methods of 3-dimensional residual stresses are proposed with the aid of distribution functions of inherent strains. In the simple measuring methods, inherent strain zones are predicted by newly proposed formulas based on the results of thermal elastic plastic FEM analysis, and a few of coefficients involved in distribution functions of inherent strains are estimated using measured elastic strains at some points. In the actual measurements, when a specimen T perpendicular to weld line is sliced from a welded plate, the method is called as simple T method. When measurements are done only on the surface of a welded plate, the method is called as simple surface method.

With comparing residual stresses obtained both by thermal elastic plastic FEM analysis and by simple T method and simple surface method, the validity of proposed simple measuring methods is demonstrated.

Key Words: Residual stresses, Simple measuring methods, Inherent strain zones, Coefficients of function, thermal elastic plastic analysis, FEM, bead-on-plate welds

1. 緒 言

ビードオンプレート溶接は溶接継手における残留応力を検討する上でひとつの基本となるモデルである¹⁻³⁾。したがって、ビードオンプレート溶接による残留応力、特に板厚内部の残留応力分布が簡単な方法で測定でき

ば、種々の溶接継手に対しても同様な方法を適用して残留応力分布を測定する道が拓かれる。そこで、本論文では、ビードオンプレート溶接板を例として、残留応力の生成源である固有ひずみに注目し、固有ひずみ分布領域を新しい推定式により決定し、さらに固有ひずみの分布関数に基づき、非常に少ない計測点数により3次元残留応力分布を推定する簡易測定法を提案する。具体的には、Fig. 1に示すように横断面の薄板T片のみを切り出す簡易T法および板表面だけの測定による簡易表面法を開発した。さらに熱弾塑性解析の結果に対して簡易測定法を適用し、数値実験で残留応力の簡易測定法の有効性および精度を検証する。

2. 固有ひずみ分布の関数表示

既報^{2,3)}で述べたように、十分に長い溶接継手の中央部付近の各横断面における残留応力を生成する固有ひずみとして、溶接線方向(x)の成分 ϵ_x^* 、板幅方向(y)の成分 ϵ_y^* および板厚方向(z)の成分 ϵ_z^* のみを考慮すれば良

Fig. 1 Schematic showing of simple measuring methods of 3-dimensional residual stresses in a bead-on-plate weld.

Fig. 2 Shape of distribution zones of inherent strains in bead-on-plate welds.

*原稿受付 平成5年7月29日 平成5年2月溶接構造研究委員会 で発表

**正 員 大阪大学 Member, Osaka University

***学 生 員 大阪大学 Student Member, Osaka University

Fig. 3 Distribution zone of inherent strain ϵ_x^* in relatively thin welded plate.

Fig. 4 Distribution patterns of inherent strains in bead-on-plate welds.

い。ここで、これらの成分を便宜的に ϵ_s^* ($s=x, y, z$) で表す。これらの固有ひずみは溶接線全長にわたって存在するが、前報²⁾の結果によって横断面では Fig. 2 に示すように楕円状の領域内のみに存在する。このような楕円領域の大きさは固有ひずみ成分ごとに異なる。具体的にその大きさ R_s は、楕円の長・短軸方向の半径、すなわち板幅方向の分布幅 a_s および板厚方向の分布深さ b_s で表わされる。また溶接金属を含む HAZ の形状も楕円状であり、その大きさを Fig. 2 に示すように $R_m(a_m, b_m)$ で表す。一方、板厚が薄くなると、固有ひずみ成分 ϵ_x^* の分布は Fig. 3 に示すように板厚を貫通する。なお、この場合の固有ひずみ成分 ϵ_x^* の分布領域は Fig. 3 に示すように板厚 H より大きい楕円の一部と見なせる。この時の b_x の大きさは板上下表面における ϵ_x^* の分布幅 a_x, a'_x と板厚 H により次式で計算できる。

$$b_x = H / \sqrt{1 - (a'_x/a_x)^2} \quad (1)$$

上述した楕円領域における固有ひずみ分布パターンを Fig. 4 に示す³⁾。各固有ひずみ成分 ϵ_s^* ($s=x, y, z$) の分布を極座標系 (r, θ) で関数表示したものであり、 r 方向に関しては溶接金属を含む HAZ の内部において線形関数を、その外部では指数関数を用いて分布を近似している。また楕円の θ 方向の変化は線形関数を用いて近似できる。すなわち、

$$\epsilon_s^*(r, \theta) = \begin{cases} \left(1 - \frac{r}{R_m}\right) \epsilon_{s0}^* + \frac{r}{R_m} \epsilon_{sRm}^*(\theta) & (0 \leq r \leq R_m) \\ \exp\left(-\frac{3(r-R_m)^2}{(R_s-R_m)^2}\right) \epsilon_{sRm}^*(\theta) & (R_m \leq r \leq R_s) \end{cases}$$

$$\epsilon_{sRm}^*(\theta) = \left(1 - \frac{\theta}{\pi/2}\right) \epsilon_{sam}^* + \frac{\theta}{\pi/2} \epsilon_{sbm}^* \quad (0 \leq \theta \leq \pi/2)$$

$$(s=x, y, z) \quad (2)$$

固有ひずみ分布を上述のように関数表示する場合、関数に含まれる未知数は、HAZ 領域の大きさ $R_m(a_m, b_m)$ と固有ひずみ分布領域の大きさ $R_s(a_s, b_s, s=x, y, z)$ および固有ひずみの大きさ ($\epsilon_{s0}^*, \epsilon_{sam}^*, \epsilon_{sbm}^*, s=x, y, z$) となる。特に固有ひずみの大きさを次式に示す関数表示の未知係数ベクトル $\{A^*\}_p$ で表す。

$$\{A^*\}_p = \{\epsilon_{s0}^*, \epsilon_{sam}^*, \epsilon_{sbm}^*, s=x, y, z\} \quad (3)$$

HAZ および固有ひずみ分布領域の大きさが既知の場合、各固有ひずみ成分に対する未知係数の総数 p_s は 3 であり、3 成分に対する未知係数の総数 p は 9 となる。

固有ひずみ 3 成分のうち、溶接線方向の固有ひずみ成分 ϵ_x^* は、HAZ の内部においてほぼ一様である^{2,3,8)}。したがって、 $\epsilon_{x0}^*, \epsilon_{xam}^*, \epsilon_{xbm}^*$ の大きさは等しいと仮定できる。すなわち、

$$\epsilon_{x0}^* = \epsilon_{xam}^* = \epsilon_{xbm}^* \quad (4)$$

また、Fig. 4 に示す楕円の θ 方向における固有ひずみ成分 $\epsilon_y^*, \epsilon_z^*$ の分布が一様であると近似すると、式(3)に示す未知係数ベクトル $\{A^*\}_p$ の成分間で次の関係が成立する。

$$\epsilon_{yam}^* = \epsilon_{ybm}^*, \quad \epsilon_{zam}^* = \epsilon_{zbm}^* \quad (5)$$

この場合、各固有ひずみ成分に対して独立な未知係数の総数 p_s は 2 であり、3 成分に対する未知係数の総数 p は 6 個に減る。

3. HAZ と固有ひずみ分布領域の推定式

固有ひずみを関数表示した式(2)には、HAZ 領域の大きさ $R_m(a_m, b_m)$ 及び固有ひずみ分布領域の大きさ $R_s(a_s, b_s)$ が含まれている。一般に、HAZ 領域が相変態による金属組織変化との関係で定義されている。軟鋼の場合、材料の力学的溶融温度 T_m は A_{c1} 相変態点の温度とほぼ同じで約 700°C であるので、HAZ は力学的溶融領域とほぼ対応する。その大きさ $R_m(a_m, b_m)$ は熱伝導問題に対する温度解析解を用いて推定できる。

固有ひずみ分布領域の大きさ $R_s(a_s, b_s)$ の推定式を導出するために、Table 1 に示すそれぞれの溶接条件、板寸法 (板幅、板厚) に対して、熱弾塑性有限要素法を用いて、固有ひずみ分布領域の大きさをそれぞれ計算した。計算では溶接に伴う熱量を瞬間的に溶接金属部に投入し、溶接線方向の変形が平面変形であると仮定した^{2,6)}。

Table 1 Plate sizes and heat input used in thermal elastic plastic FEM analysis.

Heat input Q (J/mm)	Thickness H (mm)	Half width B (mm)
420, 840, 1500, 2100	10, 12, 16, 20, 24 30, 50, 100, 500	50, 100, 250, 500

Fig. 5 Temperature dependence of physical properties used in head conduction FEM analysis.

Fig. 6 Temperature dependence of mechanical properties used in thermal elastic plastic FEM analysis.

計算で用いた板の材料は軟鋼で、軟鋼の物理定数および機械的性質の温度依存性は Fig. 5 と Fig. 6 に示されている。

3.1 HAZ 領域の推定式

HAZ 領域 $R_m(a_m, b_m)$ については、瞬間線熱源を溶接線上の板表面に与えた場合の過渡温度場に対する解析解⁴⁾を用いることにより次式の形で推定できる。

$$R_m = a_m = b_m = \sqrt{2Q/(\pi \rho c_p T_m)}, \quad T_m = 700^\circ\text{C} \quad (6)$$

ここで、 c , ρ は室温における材料の比熱と密度で、 Q は単位溶接長さあたりの入熱量である。 c , ρ の値はそれぞれ $0.411 \text{ (J/g/}^\circ\text{C)}$, $7.82 \times 10^{-3} \text{ (g/mm}^3\text{)}$ である。以下では同じ値を用いる。

なお、上式の外、溶接部近傍のマクロ組織の観察によって、HAZ 領域は簡単かつ精度よく測定できる。

次に固有ひずみ分布領域 $R_s(a_s, b_s)$ の推定式について述べる。

3.2 固有ひずみ分布領域推定式の導出手順

固有ひずみ分布領域推定式の導出手順としては、まず半無限板に対して所定の溶接入熱量を与えた時の固有ひずみ分布領域 $R_{s0}(a_{s0}, b_{s0})$ を基準分布領域として採用し、これに対する推定式を導出する。次に板厚等の寸法を考慮した時の有限板における分布領域 $R_s(a_s, b_s)$ の推定式を導出する。

3.3 半無限板における固有ひずみ分布領域の推定式

固有ひずみの基準分布領域 $R_{s0}(a_{s0}, b_{s0})$ は半無限板(無限に大きい厚さ、幅、長さを有する板)に対するものである。板寸法に関係なく、入熱量と材料定数によって決まることになる。熱弾塑性解析の結果得られた基準分布領域 $R_{s0}(a_{s0}, b_{s0})$ と入熱量 Q の関係を Fig. 7 に示す。さらに、この関係をパラメータ r_0^* で整理すると、Fig. 8 が得られる。ここで、 r_0^* は半無限板表面に溶接線方向の瞬間線熱源を与えた場合の解析解⁴⁾を用いて計算した最高温度 $T_{\max}$ と母材の室温での線膨張係数 α の積が母材の室温での降伏ひずみ ε_{yB} に等しい、すなわち $\alpha T_{\max} = \varepsilon_{yB}$ という条件⁵⁾から導出したものである。便宜的に r_0^* を降伏半径と呼び、次式で定義する。

$$r_0^* = \sqrt{2\alpha Q/(\pi \rho c_p \varepsilon_{yB})} \quad (7)$$

上式の α , ε_{yB} の値はそれぞれ $1.20 \times 10^{-5} \text{ (1/}^\circ\text{C)}$, 1.571×10^{-3} と仮定した。

Fig. 8 に示すように FEM 解析で得た $R_{s0}(a_{s0}, b_{s0})$ と

Fig. 7 Relation of inherent strain distribution zones and heat input in the half infinite plate.

Fig. 8 Relation of inherent strain distribution zones and parameter r_0^* in the half infinite plate.

降伏半径 r_0^* の間には線形関係が見られる。この線形関係を用いると固有ひずみ成分 ε_x^* , ε_y^* , ε_z^* の分布領域の大きさ (a_{x0}, b_{x0}) , (a_{y0}, b_{y0}) , (a_{z0}, b_{z0}) を次式に基づき推定することができる。

$$\left. \begin{aligned} a_{x0} &= 0.80r_0^*, & b_{x0} &= 0.70r_0^* \\ a_{y0} &= 0.60r_0^*, & b_{y0} &= 0.58r_0^* \\ a_{z0} &= a_{y0}, & b_{z0} &= b_{y0} \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

3.4 有限板における固有ひずみ分布領域の推定式

有限板に対する固有ひずみ分布領域 $R_s(a_s, b_s)$ は、基準領域 $R_{s0}(a_{s0}, b_{s0})$ を基にして板寸法(板幅 B , 板厚 H)の影響を考慮して推定することができる。ただし、固有ひずみ分布領域は板厚により変化するので、板厚を分類し、それぞれに対して推定式を導出する。

3.4.1 板厚 H の影響および板厚の分類

固有ひずみ成分 ε_x^* の分布幅 a_x および深さ b_x は、Fig. 9 に示すように板厚により変化する。図に示す a_x^* は、 ε_x^* の分布領域が板厚を貫通した場合の板裏面の分布幅である。特に、 ε_x^* の分布領域の深さ b_x は板厚 H により大きく変化する。

$b_x = H$, すなわち、固有ひずみ分布領域の深さ b_x が板厚 H に等しくなる場合の板厚を厚板と考え得る下限という意味で、厚板の下限と呼び、 H_c で表す。 H_c の大きさは、板裏面における最高到達温度 $T_{\max}$ と室温での線膨

Fig. 9 Effects of plate thickness on distribution zone (a_x , b_x) of inherent strain component ϵ_x^* .

張係数 α の積が室温での降伏ひずみ ϵ_{yB} に等しい、すなわち、 $\alpha T_{\max} = \epsilon_{yB}$ となる場合の板厚として近似的に決めることができる。溶接線方向の瞬間線熱源を用いた場合、 H_c は次式で表される。

$$H_c = \sqrt{2\alpha Q / (\pi \epsilon \rho \epsilon_{yB})} \quad (9)$$

$b_x < H$, すなわち、 $H > H_c$ の場合、固有ひずみ ϵ_x^* は板厚の一部だけに分布する。この場合、板厚 H が厚くなると、固有ひずみ分布の楕円領域の大きさ (a_x , b_x) は殆ど変化しない。このような板厚以上になると温度分布は半無限板の場合とほぼ同じになり、(a_x , b_x) は板厚に関係なく、ほぼ一定と見なせる。

$b_x > H$, すなわち $H < H_c$ の場合、固有ひずみ ϵ_x^* は板裏面まで分布する。板裏面における ϵ_x^* の分布幅を a_x^* とすると、Fig. 9 の破線で示されている楕円の深さ b_x は式(1)を用いて計算できる。板厚 H が厚板の下限 H_c より薄くなると、横断面での熱伝導は中間厚板の熱伝導問題^{4,7)} となるので、高温領域は厚板の場合より広がっており、それに伴い固有ひずみ分布領域の大きさ (a_x , a_x^* , b_x) は増大する。

板厚 H が更に薄くなると、 ϵ_x^* の板下表面での分布幅 a_x^* は板上表面での分布幅 a_x にほぼ等しくなり、楕円の深さ b_x が無限大に近づく。ここでは、HAZ 領域の深さ b_m が板厚 H と等しくなる場合の板厚、すなわち力学的溶融領域は板厚を貫通した場合の板厚を薄板と見なし得る上限の板厚という意味で、薄板の上限と呼び、 H_m で表す。溶接線方向の瞬間線熱源を用いて、 H_m の大きさを次式で計算することができる。

$$H_m = b_m = \sqrt{2Q / (\pi \epsilon \rho C T_m)}, \quad T_m = 700^\circ\text{C} \quad (10)$$

$H \leq H_m$ の場合、力学的溶融領域が板厚を貫通するので、残留応力成分 σ_x は板厚方向においてほぼ一様分布となり、残留応力成分 σ_y と σ_z は非常に小さくなる⁹⁾。したがって σ_y と σ_z を生成する支配的な固有ひずみ成分 ϵ_y^* , ϵ_z^* を考慮しなくても良い。

以上のような考察に基づき、板厚を次式のように厚板、中間厚板、薄板に分類する。すなわち、

$$\left. \begin{array}{l} \text{薄板} \quad H \leq H_m \\ \text{中間厚板} \quad H_m < H < H_c \\ \text{厚板} \quad H \geq H_c \end{array} \right\} \quad (11)$$

厚板および中間厚板においては、3次元残留応力の問題であり、それを測定するため、3つの固有ひずみ成分 (ϵ_x^* , ϵ_y^* , ϵ_z^*) を推定しなければならない。薄板に対しては、

Fig. 10 Effects of plate thickness on distribution zones ($a_y \approx a_z$, $b_y \approx b_z$) of inherent strain component ϵ_y^* , ϵ_z^* .

Fig. 11 Effects of plate width on inherent strain distribution zones.

固有ひずみ成分 ϵ_x^* のみを考慮すれば良いことになる。

一方、 ϵ_x^* の分布領域の大きさ (a_y , b_y) と ϵ_z^* の分布領域の大きさ (a_z , b_z) はほぼ等しく、板厚 H により Fig. 10 に示すように変化する。 ϵ_x^* の分布領域 (a_x , b_x) と比べて、 $H \geq H_c$ の厚板に対しても局所の角変形が生じるので、 ϵ_y^* の分布領域 (a_y , b_y) が板厚 H とともに漸増しつづける。また、 a_y が b_y と違う理由は、表面の影響であると考えられる。

3.4.2 板幅 B の影響

厚板 ($H = 30$ mm) に対して、入熱量 $Q = 1500$ J/mm の溶接を行った場合に、板幅 B が固有ひずみ分布領域の大きさ $R_s(a_s, b_s)$ におよぼす影響を Fig. 11 に示す。板幅が非常に小さい場合、固有ひずみ分布領域は小さくなるが、普通によく使用されている板 ($B > 50$ mm) では、板幅の影響が小さい。すなわち厚板においては、板幅 B が固有ひずみ分布領域への影響を考慮しなくてもよいことになる。

一方、薄板および中間厚板に対して、板幅が固有ひずみ成分 ϵ_x^* の分布領域の大きさに及ぼす影響は厚板の場合と比べ大きくなり、横断面の平均温度上昇により支配される^{5,6,9)}。固有ひずみ成分 ϵ_y^* , ϵ_z^* の分布領域への影響は厚板の場合とほぼ同じ程度である。

3.4.3 有限板における固有ひずみ分布領域の推定式

(1) ϵ_x^* の分布領域 (a_x , b_x) の推定式

説明の都合上、厚板、薄板、中間厚板の順序で ϵ_x^* の分

布領域 (a_x, b_x) の推定式をそれぞれ示す。

厚板 ($H \geq H_c$)

厚板の場合、板厚と板幅が固有ひずみ分布領域 (a_x, b_x) に及ぼす影響は小さく、(a_x, b_x) の大きさは Fig. 9 に示すようにほぼ一定であり、基準領域の大きさ (a_{x0}, b_{x0}) と等しい。すなわち、

$$a_x = a_{x0}, \quad b_x = b_{x0} \quad (12)$$

薄板 ($H \leq H_m$)

薄板の場合、 ϵ_x^* は板厚方向にほぼ均一に分布し、その分布領域の大きさは板幅方向の分布幅 a_x だけで表せる。なお、 ϵ_x^* の分布領域の幅 a_x は文献^{6,9)} で既に検討されているので、その結果を次式に示す。

$$\left. \begin{aligned} a_x &= (1.0 - 0.27\alpha T_{av}/\epsilon_{yB}) a_0 \\ a_x &= a_x, \quad b_x = \infty \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

ここで、 $T_{av} = Q/(C_p H \times 2B)$ は横断面の平均温度上昇であり^{6,9)}、 a_0 は、板幅が無限度で $H \leq H_m$ 場合の薄板における固有ひずみ分布領域の幅である⁹⁾。幅が無限度の薄板の溶接金属部に溶接線方向の瞬間面熱源を与えた場合の温度に関する解析解⁹⁾を用いると、 a_0 は次式を用いて近似できる。

$$a_0 = \frac{\alpha Q}{\sqrt{2\pi e c p H \epsilon_{yB}}} \times k_{a0} \quad (14)$$

ここで、 k_{a0} は温度に依存する材料定数、熱源の形状などに対する修正係数である。 $H = H_m$ の場合について、熱弾塑性解析を行い、その結果に基づき、 k_{a0} を決めると約 0.70 になる。

中間厚板 ($H_m \leq H < H_c$)

厚板と薄板における固有ひずみ分布領域が分ると、その間を補間することにより Fig. 9 に示されるように中間厚板における a_x, b_x が求まる。まず、板の上下表面での ϵ_x^* の分布幅 a_x, a'_x を次式に示すように線形的に内挿する。

$$\left. \begin{aligned} a_x &\doteq \frac{(H_c - H)}{(H_c - H_m)} a_{xm} + \frac{(H - H_m)}{(H_c - H_m)} a_{xc} \\ a'_x &\doteq \frac{(H_c - H)}{(H_c - H_m)} a_{xm} \end{aligned} \right\} \quad (15a)$$

ここで a_{xc}, a_{xm} はそれぞれ厚板の下限 ($H = H_c$) および薄板の上限 ($H = H_m$) における分布領域の幅である。さらに、固有ひずみ分布領域が楕円状であるという仮定より、 b_x が求まる。すなわち、

$$b_x = \frac{H}{\sqrt{1 - (a'_x/a_x)^2}} > H \quad (15b)$$

(2) $\epsilon_y^*, \epsilon_z^*$ の分布領域 (a_y, b_y)、(a_z, b_z) の推定式 ϵ_y^* と ϵ_z^* の分布領域の大きさは等しいとみなせるので^{2,3)}、以下では、 ϵ_y^* の分布領域 (a_y, b_y) の推定式のみについて述べる。

(a_y, b_y) は、板厚と殆ど関係なく、板厚と溶接線近傍の変形により支配されると考えられる。ここで、溶接線近傍の変形を、幅が降伏半径 r_0^* の領域での平均温度上昇 $T_0 (= Q/c_p H \times 2r_0^*)$ によるひずみ αT_0 で表す。 T_0 はこの局部領域の平均温度上昇を意味するので、これを局部平均温度上昇と呼ぶ。また、有限板における分布領域の大きさ (a_y, b_y) と半無限板における分布領域の大きさ (a_{y0}, b_{y0}) の比を固有ひずみ分布領域の無次元値として、それぞれ (ξ_{ay}, ξ_{by}) で表すと、(ξ_{ay}, ξ_{by}) は Fig. 12 に示すようにパラメータ $\alpha T_0/\epsilon_{yB}$ とほぼ線形な関係があるとみなせる。この関係によって固有ひずみ分布領域 (a_y, b_y) は次式で推定することができる。

Fig. 12 Relation between dimensionless inherent strain zone ($a_y/a_{y0}, b_y/b_{y0}$) and parameter $\alpha T_0/\epsilon_{yB}$.

$$\left. \begin{aligned} \xi_{ay} &= a_y/a_{y0} = (1.0 - 0.075\alpha T_0/\epsilon_{yB}) \\ \xi_{by} &= b_y/b_{y0} = (1.0 - 0.067\alpha T_0/\epsilon_{yB}) \end{aligned} \right\} \quad (16)$$

また、薄板に対しては固有ひずみ成分 ϵ_y^* と ϵ_z^* を考慮する必要がないので、(a_y, b_y) と (a_z, b_z) の大きさは零とする。

3.5 固有ひずみ分布領域の推定精度の向上

以上で述べたように固有ひずみ成分 ϵ_y^* と ϵ_z^* の分布領域 ($a_y = a_z, b_y = b_z$) は、簡単に式(16)を用いて推定できる。ところが、固有ひずみ成分 ϵ_x^* の分布領域 (a_x, b_x) は、板厚の分類によって推定式が異なり、その精度も異なる。厚板および薄板に対して、式(12), (13)を用いて再現した固有ひずみ分布領域は熱弾塑性解析で得られたものと良く対応する。しかし、薄板と厚板の間にある中間厚板においては、楕円とみなした固有ひずみ分布領域の深さ b_x が板厚の外に出てしまい、式(15)の線形内挿関数により推定した分布領域の精度はやや低いと予想される。この場合、上述した推定式で計算した固有ひずみ分布領域の大きさを第1近似とし、もし多くの弾性ひずみの計測点数、例えば未知係数の総数 p の2倍以上の計測点数を採れる場合には、残留応力の再現誤差 E_r を最小にするように領域の推定精度を向上させることができる。なお、再現誤差 E_r は次式で定義される²⁾。

$$E_r = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^m (\sigma_i^m - \sigma_i^e)^2}}{\sqrt{\sum_{i=1}^m (\sigma_i^m)^2}} \quad (17)$$

ここで σ_i^m と σ_i^e はそれぞれ残留応力の計測値と再現値である。 m は残留応力の直接計測値の総数である。

4. 3次元残留応力簡易測定法の提案

一般には固有ひずみに基づいて板厚内部を含む3次元残留応力分布を測定するために、まず数多くの薄板試験片を切出し、次に各薄板試験片に残留する弾性ひずみあるいは応力の分布を計測しなければならない^{10,11)}。このような一般的な方法を用いる場合、計測量が多く、ひずみゲージ寸法の制限および試験片の切出や応力解放のための加工の都合によって板厚内部における残留応力の詳細分布を測定するのが困難である。そこで、これらの問題を解決するために、ビード溶接された板を例として板厚内部の3次元残留応力分布の簡易測定法を提案する。この簡易測定法では、まず固有ひずみ分布領域を前述の推定式により決定して、この分布領域における固有ひず

みを関数表示し、次に関数に含まれる未知係数 $\{A^*\}_p$ のみを実験によって決定する。さらに得られた固有ひずみを用いて3次元残留応力の分布を推定する。

固有ひずみの分布を式(2)を用いて関数表示した場合の未知係数 $\{A^*\}_p$ と弾性ひずみ $\{\epsilon^e\}$ の関係および弾性ひずみ $\{\epsilon^e\}$ と残留応力 $\{\sigma\}$ の関係は次の二つの式により与えられる²⁾。

$$\{\epsilon^e\} = [G]\{A^*\}_p \quad (18)$$

$$\{\sigma\} = [D]\{\epsilon^e\} \quad (19)$$

ここで $[G]$ は未知係数—弾性ひずみの弾性応答マトリックスである。 $[D]$ は材料のヤング率 E とポアソン比 ν で構成される応力—弾性ひずみマトリックスである。

式(18)によって、 p 個の未知係数 $\{A^*\}_p$ を決めるために、 m ($m \geq p$) 個の弾性ひずみ $\{\epsilon^e\}_m$ を計測する必要がある。Fig. 1に示すように溶接線に垂直な薄板 T 片を切り出す。このように、 T 片を切出す簡易測定法を簡易 T 法と呼ぶ。さらに固有ひずみの分布が θ 方向に一樣であると仮定すると、表面だけの測定によって板厚内部の残留応力分布が推定できるので、この簡易測定法を簡易表面法と呼ぶ。以下では、簡易 T 法および簡易表面法について測定手順を示す。

4.1 簡易 T 法 (Simple T Method)

簡易 T 法では、まず T 片を切出す。 T 片には固有ひずみ成分 $\epsilon_x^e, \epsilon_z^e$ のみが存在する。 $\epsilon_x^e, \epsilon_z^e$ の未知係数 $\{A_{yz}^*\} = \{\epsilon_{y0}^e, \epsilon_{yam}^e, \epsilon_{ybzm}^e, \epsilon_{z0}^e, \epsilon_{z2am}^e, \epsilon_{zbzm}^e\}^T$ を、 T 片の測定から式(18)を用いて推定する。 ϵ_x^e の未知係数 $\{A_x^*\} = \{\epsilon_{x0}^e, \epsilon_{xam}^e, \epsilon_{xbzm}^e\}^T$ は、切断前の完全な状態と化した元の試験体 R の上下表面で計測した3個の弾性弛緩ひずみ $\{\epsilon^e\}_m$ により次式を用いて推定することができる。

$$[G]_{mp}\{A_x^*, A_{yz}^*\}_p^T = \{\epsilon^e\}_m \quad (20)$$

一方、溶接板が十分に長い場合には、溶接線方向の変形が平面変形条件を満たすので、上式のマトリックスを解かず $\{A_x^*\}$ を以下に示す手順で簡単に求めることができる。

平面変形条件は次式で示される。

$$\epsilon_x = k_0 + k_1 y + k_2 z \quad (21)$$

ここで、 k_0, k_1, k_2 はそれぞれ平均伸びひずみ、 y 方向の曲げ曲率と z 方向の曲げ曲率であり、 y および z は横断面内の y および z 座標である。固有ひずみが存在しない領域では、弾性ひずみ ϵ_x^e は変形ひずみ ϵ_x と等しくなる。したがって、Fig. 1(a)に示す元の試験体 R の弾性領域(例えばその上下表面)に3個の弾性弛緩ひずみを計測すれば、 k_0, k_1, k_2 を決定することができる。

次に固有ひずみ ϵ_x^e の大きさは変形ひずみ ϵ_x と弾性ひずみ ϵ_x^e の差に等しいことから、次式で簡単に計算できる。

$$\epsilon_x^e = \epsilon_x - \epsilon_x^e \quad (22)$$

また ϵ_x^e の分布を表す未知係数 $\{A_x^*\}$ の中で $\epsilon_{x0}^e, \epsilon_{xam}^e, \epsilon_{xbzm}^e$ はほぼ等しいので、 ϵ_{x0}^e あるいは ϵ_{xam}^e のみを計測すれば良いことになる。さらに ϵ_{x0}^e および ϵ_{xam}^e は、元の試験体 R の横断面における上表面の溶接中心点 O あるいはHAZと母材の境界点 a_m で弾性ひずみ $\epsilon_{x0}^e, \epsilon_{xam}^e$ を計測し、上式を用いることにより推定できる。

4.2 簡易表面法 (Simple Surface Method)

簡易表面法では、式(5)に示す未知係数ベクトル $\{A^*\}_p$ の成分間の関係を利用して、元の試験体の上表面だけで各成分に対して2個の弾性弛緩ひずみを計測すれば、式(18)に基づいて固有ひずみ分布の未知係数 $\{A^*\}_p$ が決められる。さらに推定された固有ひずみ分布を用いて板厚内

部の3次元残留応力分布を推定することができる。

なお試験体の表面での残留応力については、非破壊的な方法でも測定できるので、これを簡易表面法と組合せて、板厚内部の3次元残留応力分布を非破壊的な方法で測定することができる。したがって簡易表面法を実溶接構造物の残留応力測定に適用できる可能性も現れる。

5. 簡易測定法の精度

5.1 計測位置・計測点数と精度

固有ひずみの分布領域が既知の場合、原理的には固有ひずみの分布を決めるために、未知係数の数 p と同じ計測点数が必要である。実際には、計測誤差が生じるので、 p 個の計測値だけでは、計測誤差がそのまま、残留応力の推定誤差になる。精度を向上するために、 p 個以上の計測点を選ぶ必要がある。

まず計測位置を固有ひずみが存在する領域に限定し、さらに式(3)に示された固有ひずみの未知係数 $\{A^*\}_p$ に対応する位置、すなわち溶接中心点 O およびHAZと母材の境界 a_m, b_m という3点を基準計測位置として選定する。次に測定精度と附加計測点数の関係を明らかにするために、数値実験を行った。すなわち、

1) Fig. 4に示すような固有ひずみ分布を仮定して、弾性ひずみ及び残留応力を計算し、これを正解と仮定する。

2) この弾性ひずみに正規分布を有する計測誤差 ($-40 \mu \sim 40 \mu$) を与え、それを計測値、すなわち、弾性弛緩ひずみとする。

3) 附加計測点数と位置を種々変動させて、固有ひずみを推定し、残留応力を再現する。

4) 多様な計測位置の組合せと計測点数・位置が再現した残留応力の精度を式(19)に示す再現誤差 E_r により評価する。

Fig. 13は、 $H=30$ mmの厚板を例にして、未知係数の総数 p に対する全計測点数 m の比 m/p と残留応力の再現誤差を示す。同図に示されている黒丸点●は、 m/p を一定にし、計測位置を変化させた時に生じる残留応力の再現誤差である。計測点数比 m/p が1.0より多くなれば、その誤差は急激に小さくなる。したがって、実測の際に、基準計測位置を含め、未知係数の総数の2倍以上の計測点数があれば、附加計測位置の相違と計測誤差のばらつきは再現した残留応力に殆ど影響せず、残留応力を高い

Fig. 13 Effect of relative number of measured strains on the measured accuracy of residual stresses.

Fig. 14 Residual stress distributions obtained by TEPA and by simple T method and simple surface method (TEPA: Thermal Elastic Plastic Analysis).

精度で再現することができる。

5.2 簡易測定法の精度

簡易測定法の精度を検討するため、固有ひずみ分布領域の推定精度が最も低い中間厚板 ($H=20\text{ mm}$, $Q=1500\text{ J/mm}$) を例として、残留応力測定の数値実験を行った。具体的に、熱弾塑性解析で得られた弾性ひずみを計測値として想定し、正規分布を有する乱数を計測誤差 ($-40\text{ }\mu\text{m} \leq \Delta \epsilon_p^0 \leq 40\text{ }\mu\text{m}$, $s=x, y, z$) として弾性ひずみに与える。数値実験に用いた弾性ひずみの計測点数 m を固有ひずみ分布関数に含まれる未知係数の総数 p の2倍とする。

推定式を用いて固有ひずみ分布領域を推定し、さらに3.5節で述べた方法でその推定精度を向上させ、簡易T法および簡易表面法を用いて推定した残留応力をFig. 14に示す。図中の実線、破線、点線はそれぞれ熱弾塑性解析と簡易T法、簡易表面法によるものである。熱弾塑性解析の結果を正解と考えると、簡易T法は精度が良く、簡易表面法は簡易T法より精度が少し落ちるが、実用的な精度を与えている。したがって、簡易T法および簡易表面法は、計測が非常に簡単であり、計測点数も非常に少ないにもかかわらず、3次元残留応力分布が十分な精度で得られる実用的な測定法であると考えられる。

6. 結 論

本研究で得られた主な結果を以下に示す。

- 1) 熱弾塑性解析の結果を用いてビードオンプレート溶接における固有ひずみ分布領域の推定式を導出した。
- 2) 固有ひずみ分布領域の推定式および固有ひずみ分布関数を用いた3次元残留応力分布の簡易測定法 (簡易T法、簡易表面法) を開発した。特に簡易表面法は、板表面だけの測定で、板厚内部の残留応力分布を簡単に推定できる残留応力測定法である。
- 3) 簡易測定法を用いて3次元残留応力分布を測定する場合、必要な弾性ひずみの計測点数は、固有ひずみの

未知係数の総数 (各固有ひずみ成分に対して3個) の2倍以上採れば、基準計測位置以外の計測位置が異なったり、多少の計測誤差があっても、精度よく推定できることを明らかにした。

4) 簡易T法および簡易表面法の精度を数値実験で検証した。これらの簡易測定法は非常に簡単でありながら、少ない計測点数によって3次元残留応力分布を精度良く測定することができる。

参 考 文 献

- 1) 佐藤邦彦, 寺崎俊夫ら: 基本溶接継手の残留応力分布と溶接諸条件の関係, 溶接学会誌, 第48巻 (1986) 第1号, pp. 708-713.
- 2) 上田幸雄, 麻寧緒: 固有ひずみの関数表示法および推定法, 溶接学会論文集, 第11巻 (1993) 第1号, pp. 189-195.
- 3) 上田幸雄, 麻寧緒, 古木良一: ビードオンプレート溶接の3次元残留応力のTL_yL_z法とT法による測定, 溶接学会論文集, 第11巻 (1993) 第1号, pp. 555-562.
- 4) H.H. Rykalin: Heat transfer in Welding Processes (in Russian), 1951.
- 5) 上田幸雄, 袁敏剛ら: 残留応力の生成源を用いた溶接残留応力推定法, 溶接学会論文集, 第6巻 (1988) 第1号, pp. 59-64.
- 6) 上田幸雄, 袁敏剛: T型およびI型継手の溶接残留応力の固有ひずみによる推定法, 溶接学会論文集, 第9巻 (1991) 第3号, pp. 337-343.
- 7) 佐藤邦彦, 上田幸雄, 藤本二男: 溶接変形・残留応力, 産報出版 (1979), pp. 75-82.
- 8) 麻寧緒: 固有ひずみ分布の関数表示法と3次元残留応力分布の測定法に関する研究, 大阪大学提出学位論文 (1993年12月).
- 9) 佐藤邦彦, 寺崎俊夫: 構造用材料の溶接残留応力・溶接変形に及ぼす溶接諸条件の影響, 溶接学会誌, 第45巻 (1976) 第1号, pp. 42-50.
- 10) 上田幸雄, 福田敬二: 固有ひずみ論に基づく3次元残留応力測定法, 日本造船学会論文集, 第145巻, pp. 203-211.
- 11) 上田幸雄, 福田敬二: 長い溶接継手の3次元残留応力測定理論, 溶接学会誌, 第52巻 (1983) 第2号, pp. 110-117.