

北海道大学大学院 ○落合 宏  
愛知工業大学 鶴飼 隆好

Residual Stress Measurement of Welding by X-ray with Inherent Strain Method

By Hiroshi OCHIAI, Takayoshi UKAI

キーワード：残留応力,X線,固有ひずみ

Keywords : residual stress, X-ray, inherent strain

### 1. はじめに

溶接性の優れた超硬の開発において、発生する溶接残留応力の小さいことが評価のひとつとなる。今回 WC-Ni 系超硬の溶接性に関する研究において、X線残留応力測定を用いている。従来の方法では、溶接熱影響部の組織の不均質性から測定が非常に困難であることがわかった。

ここでは X, Y 軸方向の測定結果を同時に統計学的に満足するひずみ測定法を採用し、妥当な結果を得ることができたので報告する。

### 2. 溶接残留応力測定

固有ひずみ法を用いた残留応力測定を、Fig. 1 に示す。2 次元の溶接平板を例に説明すると、

$$\{s\} = [H]\{\epsilon^*\} \quad (1)$$

ただし、 $\{s\} = \{s_1, s_2, \dots, s_\ell\}^T$  : 測定ひずみ、応力ベクトル、 $\{\epsilon^*\} = \{\epsilon_1^*, \epsilon_2^*, \dots, \epsilon_n^*\}^T$  : 固有ひずみベクトル、 $[H]$  : 影響係数マトリックス、 $h_{ij}$  :  $[H]$  の要素。

式(1)を用いて、測定されたひずみまたは応力から最適な固有ひずみの大きさを決定する方法である。<sup>1)</sup>

X線測定の回折ピーク値は、ひずみを直接測定しているので、固有ひずみ法では応力よりも測定されたひずみ値をそのまま使用できるならば、残留応力測定精度が向上すると考え、次のような測定値  $2\theta$  から直接ひずみを決定する方法を提唱する。Fig. 2 に X 線によるひずみ、応力座標系を示す。 $2\theta$  は  $\overline{OP}$  を法線とする面に存在するひずみ  $\epsilon_{\psi, \varphi}$  に対応し、

$$\epsilon_{\psi, \varphi} = \epsilon_1 \cos^2 \varphi \sin^2 \psi + \epsilon_2 \sin^2 \varphi \sin^2 \psi + \epsilon_3 \cos^2 \psi \quad (2)$$

ただし、 $\psi$  : 入射角、 $\varphi$  : 測定角度、 $\epsilon_{1,2,3}$  : 主ひずみ。 $\epsilon_1 = \epsilon_x$ ,  $\epsilon_2 = \epsilon_y$ ,  $\epsilon_3 = -\nu(\epsilon_x + \epsilon_y)/(1-\nu)$  を式(2)に代入し、右辺を置換え  $\epsilon_{\psi, \varphi} = f_{\psi, \varphi}(\epsilon_x, \epsilon_y)$  と表し、 $\psi = \psi_1, \psi_2, \dots, \psi_i$ ,

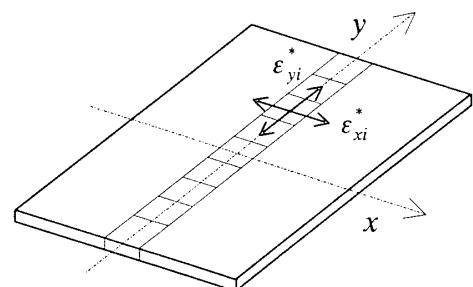


Fig.1 Inherent strains in welded plate

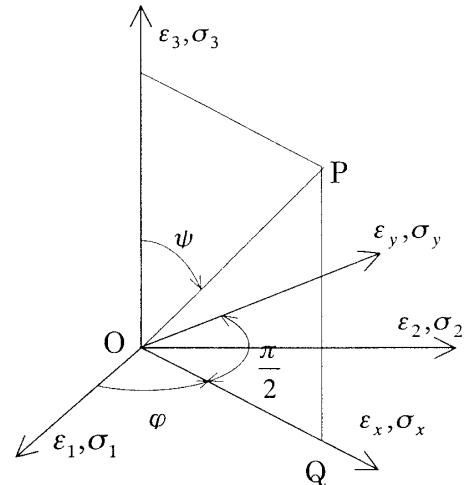


Fig.2 Coordinates of the principal stresses and strains

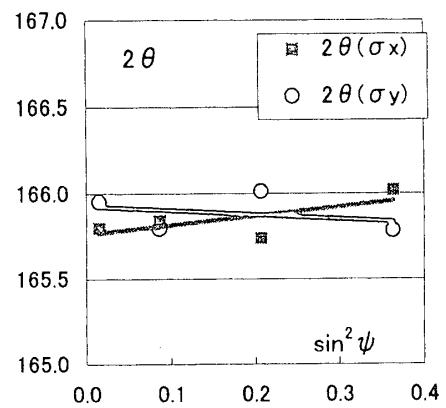


Fig.3 Measurement of stress  $\sigma_x, \sigma_y$  by  $2\theta - \sin^2 \psi$  method

$\varphi_n = 0^\circ, \varphi_j, 90^\circ$  の測定値  $\varepsilon_{\psi i, \varphi j}$  に対し、 $L_1 = \sum_{i,j=1}^n (f_{\psi i, \varphi j}(\varepsilon_x, \varepsilon_y) - \varepsilon_{\psi i, \varphi j})^2$  を最小とする  $\varepsilon_x, \varepsilon_y$  を求める問題となる。従って、 $\partial L_1 / \partial \varepsilon_x = 0, \partial L_1 / \partial \varepsilon_y = 0$  から最小二乗法の解として  $\varepsilon_x, \varepsilon_y$  を求めることができる。

従来は、Fig. 3 に示す  $2\theta - \sin^2 \psi$  線図の傾きから応力を求めていた。式(2)からも  $\psi = 0$  のとき、 $\varphi$  に関わらず  $\varepsilon_{\psi, \varphi}$  は一定となるので、図の 2 直線は Y 軸上で交わるはずである。このひずみ測定法を用いると、X, Y 軸の測定値を同時に満足する最適な  $\varepsilon_x, \varepsilon_y$  を求めることができる。

Fig. 4 に測定例とその結果を示す。図中の直線が計算結果から逆算した  $2\theta$  を表している。測定結果を満足する  $\varepsilon_x, \varepsilon_y$  が求められたことがわかる。

測定角度  $\varphi = 45^\circ$  などの値を加えることにより、測定精度を増すことが可能となる。さらに、主応力方向が未知な場合も、非線形ではあるが上述の方法に  $\varphi$  を未知数として加えると、最適な  $\varepsilon_x, \varepsilon_y, \varphi$  の組合せを容易に決定することができる。

### 3. 残留応力測定

超硬の結合金属割合の溶接性に関する研究のため、Fig. 5 に示す試料を作製し溶接残留応力を測定する。溶接は試料の中央部に、Ni 溶加棒を用いて円形に TIG 肉盛溶接し、溶接割れが生ずるか否かを判定し、次に残留応力の大きさで超硬の溶接性を判定することを考えている。溶接条件を Table 1 に示す。最初に結合金属 Ni の割合が 10, 20, 30, 40% (重量) の円板を放電プラズマ焼結装置 (SPS) を用いて作製し、素材の残留応力を測定した。X 線測定条件を Table 2 に、残留応力測定結果を Table 3 に表す。Ni の割合が大きくなると、超硬の表面 WC 部の圧縮残留応力は大きくなつたが、これは Ni の割合が大きいほど冷却時に塑性変形量が大きくなると説明できる。

測定試料の製作に多大なる協力、指導をいただいた北海道立工業試験場の鴨田秀一氏に謝意を表す。

参考文献 1) 落合 宏他 4 名、超硬材と鋼の TIG 溶接残留応力に関する研究、溶接学会全国大会講演概要 No. 67 (2000) 422, 2) 金 裕哲他 2 名、MoSi<sub>2</sub> 溶射材に生じた残留応力の特徴とその生成機構、溶接学会論文集 16-1, (1998) 82-86, 3) 鈴木 壽、超硬合金と焼結硬質材料、丸善 (1986)

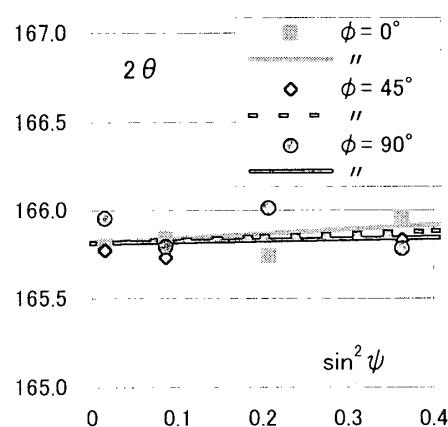


Fig.4 Measurement of strain  $\varepsilon_x, \varepsilon_y$  by  $2\theta - \sin^2 \psi$  method

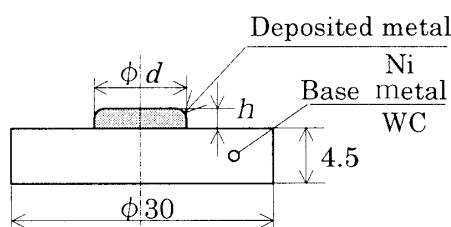


Fig.5 Test piece of welding

Table 1 Condition of TIG welding

Welding voltage	11 V
Welding current	90 A
Pulse current	60 A
Pulse frequency	80 Hz
Inert gas	Ar
Gas flow	0.01 m <sup>3</sup> /min

Table 2 Condition of X-ray measurement

Specimen	WC
X-ray	Co-Kα
Voltage	40 kV
Current	30 mA
Irradiation area	5 × 5 mm <sup>2</sup>
Diffracton plane	(112)
$2\theta_0$	123.70
$\psi_0$	0~40°

Table 3 Result of stress measurement

Specimen	Residual stress
WC-10%Ni	-203 MPa
WC-20%Ni	-368
WC-30%Ni	-371
WC-40%Ni	-457

(Center of SPS material)