

薄板溶接材の X線残留応力測定

(平成9年12月1日 原稿受付)

物質工学科 秋山 哲也
 物質工学科 吉田 大輔
 物質工学科 寺崎 俊夫

Measurement of welding residual stress in thin plate by X-ray method

by Tetsuya AKIYAMA
 Daisuke YOSHIDA
 Toshio TERASAKI

Abstract

Measurement of welding residual stress distributions in a thin plate was carried out by using X-ray method. From 0 to 150 MPa of stress, the error was less than 50 MPa. Up to 350 MPa, it is better to consider that the error is about 100 MPa. New method discussed in this paper is useful to obtain Bragg's angle.

1. 緒言

造船, 橋梁, 車両などの溶接構造物では, 高強度化, 軽量化が進み, 変形や強度の面から, 残留応力の推定や測定が重要となっている。

X線応力測定法は, 金属結晶内の格子面間隔の変化を測定してひずみを求め, 弾性理論を用いて応力を求める方法である^{(1),(2),(3),(4)}。非破壊測定であるとともに絶対測定法で, 計数管法が導入されると一躍注目されるようになり, セラミックスなど新材料への適用も研究されている⁽⁵⁾。厳密にX線応力測定法を行うには, 結晶粒度, 集合組織, 正確なX線弾性定数, 正確な回折角など条件をそろえる必要がある。一方, 溶接部は, 粗粒域, 組織変化を有し, 薄板は集合組織を有しており, 薄板溶接部の残留応力は, X線応力測定にとって決して良い条件が整っているとは言えない。そこで本研究では, 薄板溶接部の残留応力測定にX線応力測定法を用いたときの精度を実験で調べた。また, 溶接部組織の Bragg 回折角を, 残留応力が生じている状態の現場で測定する方法についても検討した。

2. X線応力測定法について

X線による応力測定は結晶格子の面間隔の変化からひ

ずみを測定し, 応力を算定するものである。図-1に示すように応力, ひずみを定義するとき, (k, l, m) 方向のひずみは

$$\epsilon_{k,l,m} = \epsilon_x \cdot k^2 + \epsilon_y \cdot l^2 + \epsilon_z \cdot m^2 + \gamma_{xy} \cdot k \cdot l + \gamma_{yz} \cdot l \cdot m + \gamma_{zx} \cdot m \cdot k \quad (1)$$

と表される。6つの異なる (k, l, m) 方向についてひずみを測定すれば, 式(1)より, x, y, z 方向の6つのひずみ成分を求めることができる。一方, 特殊な場合を除き, 一般的なX線応力測定に用いられるX線の加速

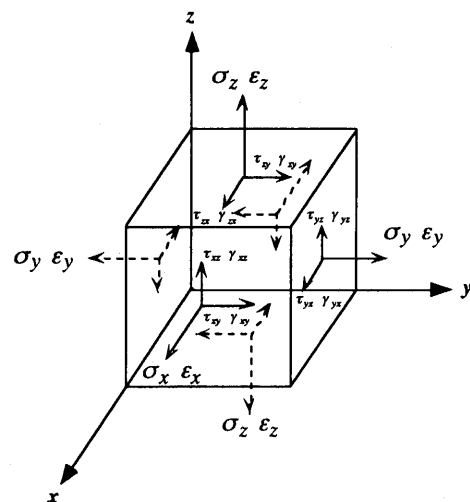


図-1 応力とひずみの定義

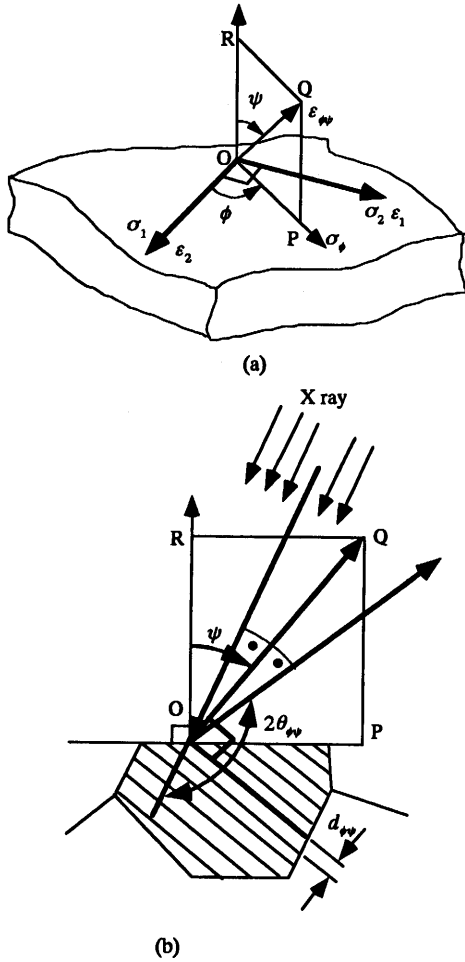


図-2 X線法概念図

電圧は低く、X線の侵入深さは10μm程度で浅い。即ち平面応力状態と見なせ、更に簡単に取り扱える。図-2(a)は、試験片表面に存在する主応力σ₁、σ₂および主応力から角度φ方向の応力を示している。ε_{φψ}は、主応力から角度φ、表面の方線から角度ψの方向のひずみである。X線法では、ε_{φψ}は、図-2(b)に示すように、結晶面の方線がε_{φψ}と一致する結晶の面間隔の変化から測定される。試験片は多結晶体であるから、X線照射面内の多くの結晶の中に、この条件を満たすものが存在すると考えられる。

そこでε_{φψ}について考えると平面応力の図-2の場合、

$$\begin{aligned} \epsilon_{\phi\psi} &= \epsilon_1 \cos^2\phi \sin^2\psi + \epsilon_2 \sin^2\phi \sin^2\psi + \epsilon_3 \cos^2\psi \\ &= (\epsilon_1 \cos^2\phi + \epsilon_2 \sin^2\phi - \epsilon_3) \sin^2\psi + \epsilon_3 \end{aligned} \quad (2)$$

のように、主ひずみを用いて表せる。ここで、応力とひずみの関係式を主ひずみ、主応力について表した式(3)の関係を用いると、

$$\begin{cases} \epsilon_1 = \frac{1}{E}\sigma_1 - \nu\sigma_2 \\ \epsilon_2 = \frac{1}{E}\sigma_2 - \nu\sigma_1 \\ \epsilon_3 = \frac{\nu}{E}\sigma_2 + \sigma_1 \end{cases} \quad (3)$$

式(4)をえる。

$$\begin{aligned} \epsilon_{\phi\psi} &= \frac{(1+\nu)}{E} \left(\frac{\sigma_1 + \sigma_2}{2} + \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{2} \cos 2\phi \right) \sin^2\psi + \epsilon_3 \\ &= \frac{(1+\nu)\sigma_\phi}{E} \sin^2\psi + \epsilon_3 \end{aligned} \quad (4)$$

式(4)は、X線法で測定可能なひずみと試験片表面の任意の方向の応力を関係づける式である。

次に、X線法とε_{φψ}の関係を述べる。X線法では、ひずみはBraggの回折角の変化として検出される。ひずみが無いときの格子面間隔d₀と回折角θ₀の関係は、X線の波長λを用いて、

$$d_0 = \frac{n\lambda}{2\sin\theta_0}$$

と表せられる。

また、変形後の面間隔およびひずみは以下のように表せるため、

$$\begin{aligned} d_{\phi\psi} &= d_0 + \Delta d = \frac{n\lambda}{2\sin(\theta_0 + \Delta\theta)} \\ \epsilon_{\phi\psi} &= \frac{\Delta d}{d_0} = \frac{d_{\phi\psi} - d_0}{d_0} = \frac{\frac{1}{\sin(\theta_0 + \Delta\theta)} - \frac{1}{\sin\theta_0}}{\frac{1}{\sin\theta_0}} \\ &\cong \frac{\cos\theta_0}{\sin\theta_0} \Delta\theta = -\cos\theta_0 (\theta_{\phi\psi} - \theta_0) \end{aligned} \quad (5)$$

式(4)、(5)より

$$2\theta_{\phi\psi} = -\frac{2(1+\nu)\sigma_\phi}{E \cdot \cot\theta_0} \cdot \sin^2\psi - \frac{2\epsilon_3}{\cot\theta_0} + 2\theta_0 \quad (6)$$

式(6)を得る。

$$M_\phi = -\frac{2(1+\nu)\sigma_\phi}{E \cdot \cot\theta_0} \quad (7)$$

とおくとき、式(7)は、ψに無関係な定数で、種々のsin²ψについて2θ_{φψ}を実験で求めプロットしたとき、直線の傾きを与える。式(7)中の材料定数をまとめてKとおくと、

$$\begin{aligned} \sigma_\phi &= -\frac{E \cdot \cot\theta_0}{2(1+\nu)} M_\phi \\ &= -K \cdot M_\phi \end{aligned} \quad (8)$$

式(8)を得る。式(8)は、実験値M_φと材料定数Kから、試験片表面の任意の方向φの応力が求められることを示している。

3. ブラック回折角の推定方法の提案

溶接継手は、溶接熱サイクルのために組織変化を生じる。本研究のように軟鋼を対象にした場合、母材はフェ

ライト、熱影響部は焼入組織即ちマルテンサイトやベイナイトに変化する場合がほとんどである。これら組織の違いはフェライトの格子定数と炭化物の配列およびセルやパケットサイズの違いである。通常の鋼を対象にしたX線応力測定では、フェライト結晶の面間隔を用いるため、炭化物の種類や分布状態は式(8)に示した材料定数に寄与しない。また、フェライトもマルテンサイトも基本的な結晶構造はほとんど同じで、格子定数と軸比が異なるだけである。

そこで本研究では、溶接による組織変化が式(8)に与える影響を無負荷状態での Bragg の回折角 θ_0 の変化として取り扱うこととし応力の負荷された実際の試験片から実験により無負荷状態での Bragg の回折角 θ_0 を求める方法を検討した。

$\sin^2\psi-2\theta$ 線図は、式(6)で表せる。本方法は、式(6)中の ϵ_3 が ϕ 、 ψ に関係のない定数であることに注目し、異なる2つの ϕ について行った実験結果から ϵ_3 を求め、 $\sin^2\psi-2\theta$ 線図の切片の値から、 θ_0 を求めるものである。

σ_ϕ と主応力の関係は

$$\sigma_\phi = \frac{(\sigma_1 + \sigma_2)}{2} + \frac{(\sigma_1 - \sigma_2)}{2} \cos 2\phi \quad (9)$$

$$= -M_\phi \cdot K$$

さらに $\pi/2$ ずれた方向の応力では

$$\sigma_{\phi+\frac{\pi}{2}} = \frac{(\sigma_1 + \sigma_2)}{2} + \frac{(\sigma_1 - \sigma_2)}{2} \cos 2\left(\phi + \frac{\pi}{2}\right) \quad (10)$$

$$= -M_{\phi+\frac{\pi}{2}} \cdot K$$

式(9)、(10)を加えると

$$\sigma_\phi + \sigma_{\phi+\frac{\pi}{2}} = \sigma_1 + \sigma_2$$

$$= -K(M_\phi + M_{\phi+\frac{\pi}{2}})$$

$$= -\frac{E}{2(1+\nu)} \cot \theta_0 (M_\phi + M_{\phi+\frac{\pi}{2}})$$

また式(3)より

$$\epsilon_3 = \frac{\nu(\sigma_1 + \sigma_2)}{E}$$

であるから、 $\sin^2\psi-2\theta$ 線図の切片の値を C とすると

$$C = 2 \left(\theta_0 - \frac{\epsilon_3}{\cot \theta_0} \right) = 2 \left(\theta_0 - \frac{\nu(\sigma_1 + \sigma_2)}{E \cot \theta_0} \right)$$

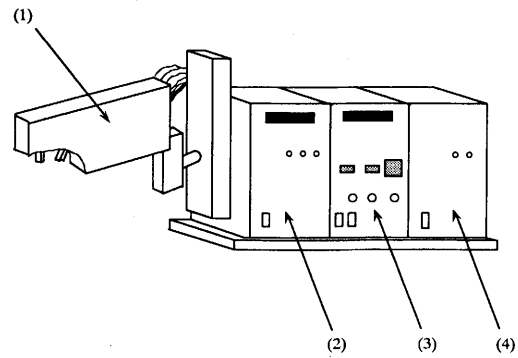
$$= 2 \left\{ \theta_0 - \frac{\nu}{1+\nu} (M_\phi + M_{\phi+\frac{\pi}{2}}) \right\} \quad (11)$$

式(11)より、実験で得られる値 C 、 M_ϕ 、 $M_{\phi+\frac{\pi}{2}}$ から式(12)より、 θ_0 を求めることができる。

$$\theta_0 = \frac{C}{2} + \frac{\nu}{1+\nu} (M_\phi + M_{\phi+\frac{\pi}{2}}) \quad (12)$$

4. 実験

4.1 X線応力測定装置



(1) Goniometer (2) X-ray Power Supply
(3) Goniometer Controller (4) Water Cooling Unit

図-3 X線応力測定装置

図-3に、X線応力測定装置の外観図⁽⁶⁾を示す。汎用の移動可能な機種で、予め設定した $\sin^2\psi$ に対する 2θ を半価幅法を用いて算出することができる。蛍光板を用いて、X線の照射位置と照射範囲を調べたところ照射位置は規定位置よりも1mmずれており、照射範囲は $2 \times 10 \text{ mm}^2$ であった。スリットを挿入しても照射範囲を制限できず、照射位置のずれの問題も含めてメーカーに問い合わせたところ根本的な組立直しが必要であるとの解答があり汎用機ではそこまで検査して出荷していないとの回答も得た。本装置は機械電子研究所の物を借用しているため実験はこの状態で行った。したがって、照射ねらい位置は1mmずらした状態で設置した。

表-1 測定条件

equipment type	DX-10(shimazu)
characteristic X-rays	CrK α
diffracted surface	(211)
detector	Xe-PC
filter	V
slit	0.8°
lamp voltage	30 kV
lamp current	10 mA
irradiated arte	$2 \times 10 \text{ mm}^2$
2θ traverse rate	6° / min
incident angle point	6
oscillatory motion	off

表-1に、測定条件をまとめて示す。また、軟鋼の場合の定数は、

$$\left(\frac{E}{1+\nu} \right) = 175 \text{ [GPa]}$$

$$K = -318 \text{ [MPa / deg.] } (\theta_0 = 78.2^\circ)$$

の様に与えられている^{(2),(6)}。

4.2 既知応力の測定

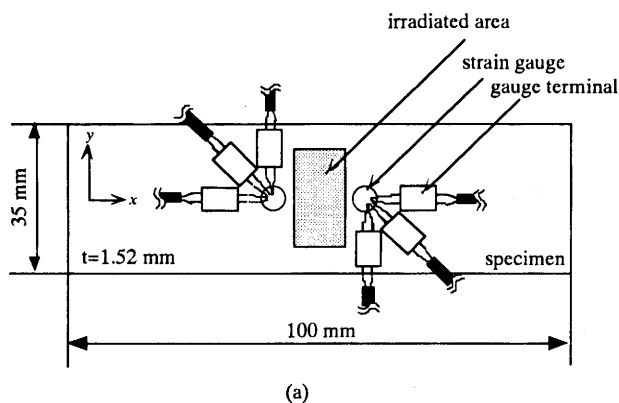
既知の応力を負荷した状態で、X線応力測定装置が如何なる値を示すかを調べるために3軸ひずみゲージをとりつけた試験片に曲げ荷重を負荷し、表面応力を測定した。

4.2.1 曲げ試験片

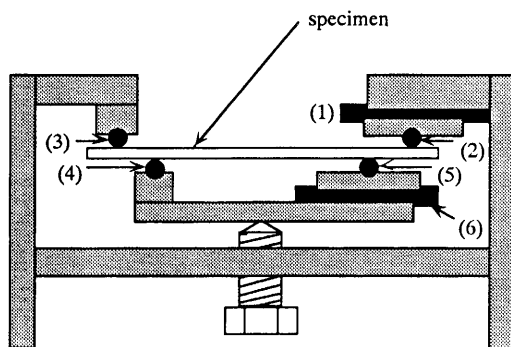
表-2 曲げ試験片の化学成分(重量%)

C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo
0.13	0.21	0.72	0.021	0.006	0.02	0.03	0.001

材質は軟鋼で、化学成分を表-2に、試験片形状を図-4(a)に示す。650°Cで30分の応力除去焼鈍を行った後、エメリー紙でスケールを除去し、さらに約0.2mm表面層を電解研磨した後に、ひずみゲージを貼り付けた。



(a)



(b)

図-4 曲げ試験片と治具

4.2.2 曲げ治具

図-4(b)に、4点曲げ治具を示す。図中の番号(1)から(6)で示す丸棒は、試験片に曲げ以外の荷重が負荷されないように取り付けた支持棒である。

4.3 溶接残留応力の測定

材料には、化学成分を表-3に示す軟鋼板を用いた。

表-3 溶接試験片の化学成分(重量%)

C	Si	Mn	P	S	N	O	sol.Al
0.0189	<0.01	0.18	0.014	0.0124	0.0019	0.0018	0.052

650°Cで30分の応力除去焼鈍を行った後、エメリー紙でスケールを除去し、溶接電圧15V、電流100A、溶接速度760mm/minで、TIG溶接機で、ビードオンプレート溶接した。溶接後、図-5に示す範囲を約0.2mm電解研磨し、残留応力測定試験片とした。応力測定位置を図中に示す。

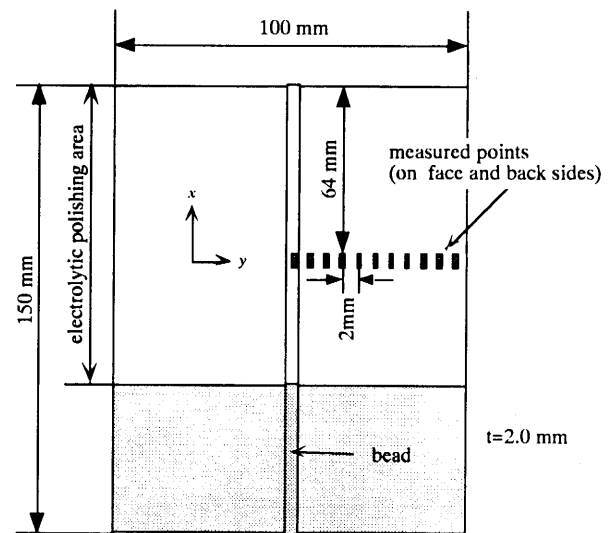


図-5 溶接試験片と応力測定位置

5. 実験結果および考察

5.1 負荷応力と測定応力の関係

5.1.1 荷重負荷に伴う $2\theta - \sin^2\psi$ 線図の変化

図-6に、無負荷状態の4点曲げ試験片を用いたときの $2\theta - \sin^2\psi$ 線図を示す。図中の直線は最小二乗法を用いた直線で、この傾きから応力値が求められる。 σ_y は0のわずであるが、0にはなっておらず、実験値のばらつきが大きい。

図-7は、負荷応力が100 Mpaの時の結果である。図-6, 7ともに σ_x は直線によく載っている。

$2\theta - \sin^2\psi$ 線図を見る限り、 σ_x は良好な実験結果と言える。

5.1.2 負荷応力と測定応力の比較

負荷応力 σ_{ap} と測定応力 σ_m の関係を図-8に示す。太い実線と破線は σ_x と σ_y について、最小二乗法で求めた直線である。

図-9は、比較のために、X線応力測定標準⁽²⁾に記載されている測定例である。図-9では、直線関係が良好で絶

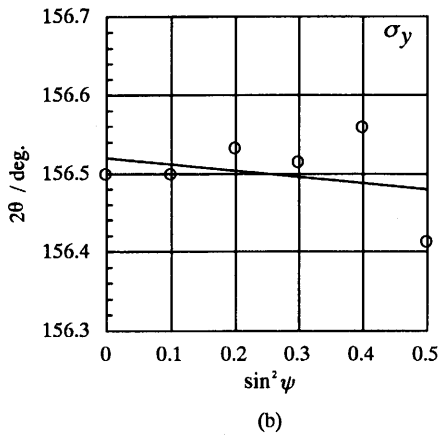
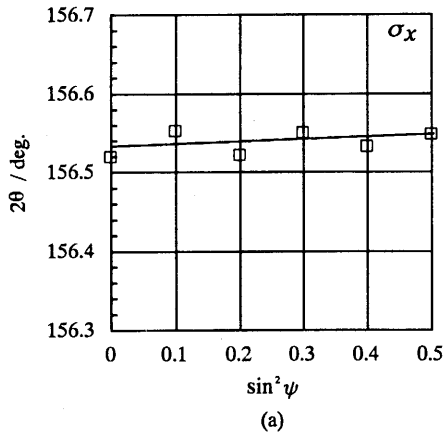


図-6 無負荷状態での $\sin^2\psi$ - 2θ 図

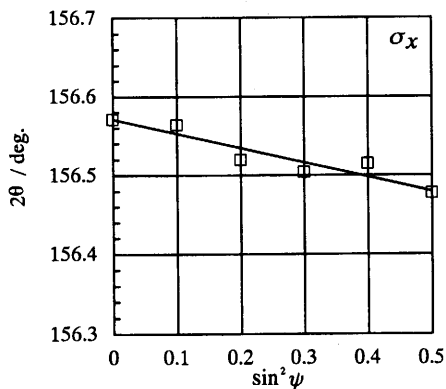


図-7 負荷応力100 MPa での $\sin^2\psi$ - 2θ 図

対値が80 MPa ずれているのに対し、図-8では直線関係のずれが目立つ。 $\sigma_{ap}=100$ MPa の σ_x は、図-7に示したように良好な実験値が得られているにも関わらず、直線からずれている。したがって、本実験では絶対値に約40 MPa のばらつきが生じていると解釈される。

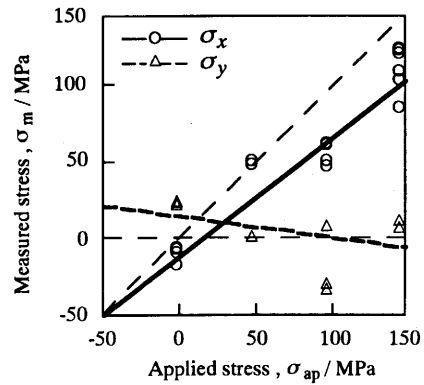


図-8 曲げ試験による応力測定結果

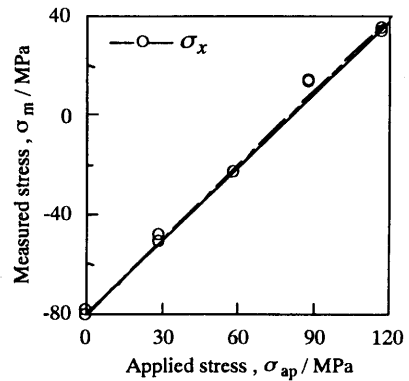


図-9 応力測定基準による測定例

5.2 ブラッグ回折角の推定

表-4 θ_0 の計算結果

Stress (MPa)	0	50	100	150
θ_0 (deg.)	78.24	78.26	78.27	78.22

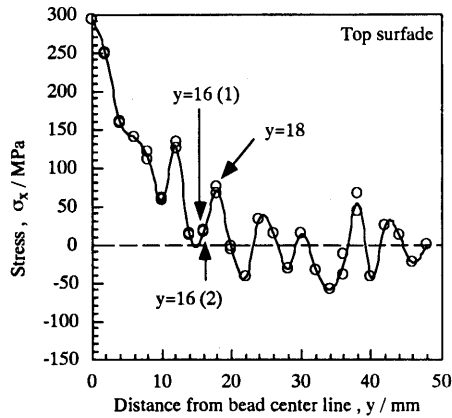
Literature value (78.2)

表-4に、曲げ試験結果と式(12)から求めた ϕ_0 を示す。これは焼鈍材についてのみの結果であるが、理論値と良く似た値が得られていることが分かる。本方法の実用性を検討するためには積極的に組織変化させた材料を用いて更に検討する必要があると思われる。

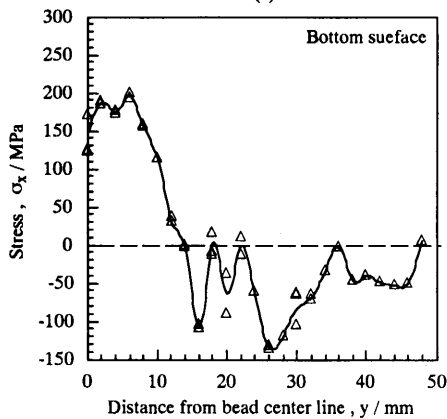
5.3 溶接残留応力

5.3.1 溶接残留応力の測定結果

溶接材の残留応力分布を図-10に示す。(a),(b)はそれぞれ表側、裏側の結果である。溶接部直上で最も大きい引張残留応力が発生しており、 $x=14$ mm近傍を境に圧縮に転じる傾向を示しているが、約4mmの周期で脈動した結果となっている。図中のプロット点はそれぞれ1回の実験に対応しており、この脈動には再現性のあることが分かる。

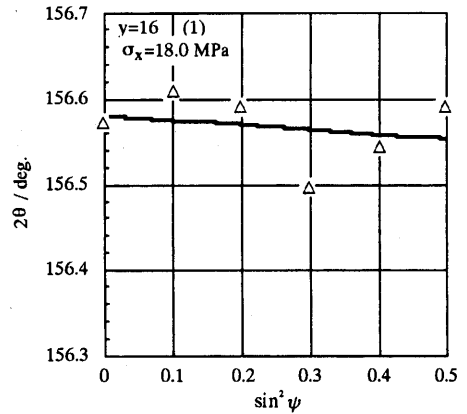


(a)

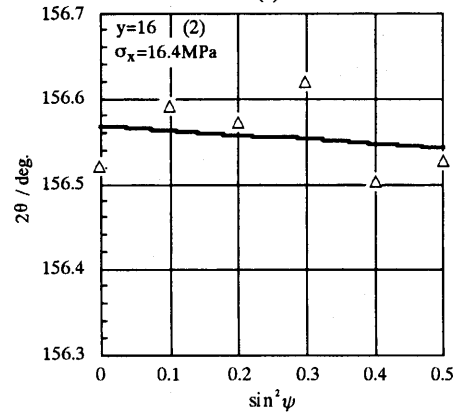


(b)

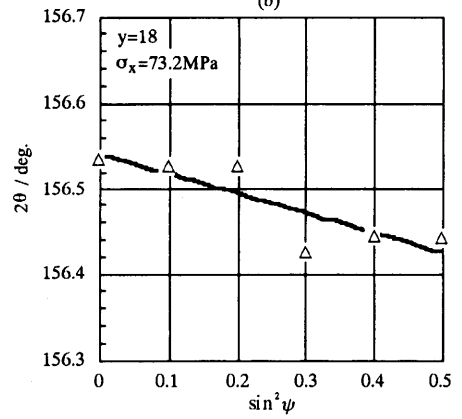
図-10 残留応力測定結果
(a)表面側 (b)裏面側



(a)



(b)



(c)

図-11 特徴点の2θ - sin²ψ関係の比較

5.3.2 特徴点の2θ - sin²ψ線図

低い値を示した y = 16mmでの2回の実験の2θ - sin²ψ線図を、図-11(a), (b)に示す。sin²ψ = 0.3の2θの値が大きく異なっているにも関わらず良く似た応力値を示していることが分かる。図-11(c)は、図-10(a)中で高い値を示した y = 18での2θ - sin²ψ線図である。図-11(a), (b)と同程度に直線に載っており、特に実験上不備があったとは考えられない。

5.3.3 固有ひずみ法で測定した残留応力分布との比較

図-12は、同一材料に同一溶接条件でビードオンプレート溶接した試験片の残留応力分布を固有ひずみ法を用いて求めた結果⁽⁷⁾と、図-10(a), (b)の平均値を比較した結果である。

100 Mpa程度の誤差で、両者は同じ傾向を示している。脈動部については低い値を示すデータの方が正解値に近いことが分かるが、5.3.2で述べたように、脈動の原因は不明である。

したがって、脈動も誤差の1つと考え、X線法は100 Mpa程度の誤差を持った簡便な実験手段と考えて利用することが賢明である。

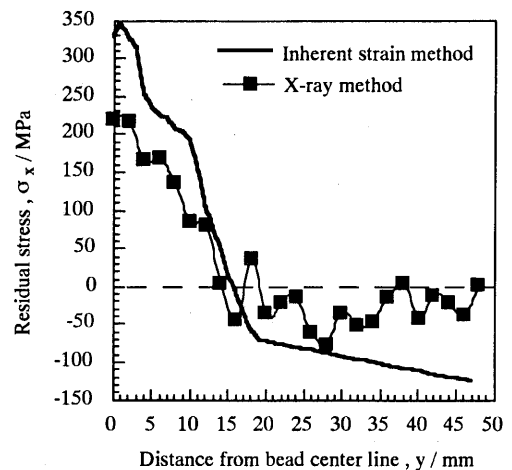


図-12 固有ひずみ法との比較

6. 結 言

簡易型X線応力測定装置を用いて既知応力を負荷した軟鋼試験片と軟鋼薄板溶接部の残留応力分布の測定を行った結果、以下の結論を得た。

1) 既知応力を負荷した軟鋼試験片の実験から応力150 Mpaまでは約50 Mpa、軟鋼薄板溶接部の実験から350 Mpaまででは100 Mpaの誤差を見込めば、簡易型X線応力測定装置は使用可能である。

2) 応力が負荷された状態で、無負荷状態でのBraggの回折角 θ_0 を推定する方法を提案した。

謝 辞

X線応力測定装置を快く使用させて頂きました、福岡県機械電子研究所の中村憲和氏に、心から感謝致します。

参考文献

- (1) 日本材料学会編：X線応力測定法(1981) 養賢堂
- (2) 日本材料学会編：X線応力測定法標準
- (3) 日本材料学会編：X線材料強度学 基礎編, 実験法編(1973) 養賢堂
- (4) 日本造船研究協会編：第225研究部会, 残留応力の計測法・推定法の研究 平成7年度報告書
- (5) 日本非破壊検査協会編：新非破壊検査便覧(1992) 日刊工業新聞社
- (6) 島津製作所：X線応力測定装置操作マニュアル
- (7) 寺崎俊夫, 福谷理明：溶接構造シンポジウム'97 講演論文集(1997), pp 181-184