

# 高エネルギー放射光を用いた溶接部表面内部残留応力測定

三菱重工業株式会社 栗村 隆之 日本原子力研究開発機構 菖蒲 敬久

## Residual Stress Measurement of Weld Section Using High Energy Synchrotron Radiation X-rays

Takayuki KURIMURA (MHI) Takahisa SHOBU (JAEA)

### 1 緒 言

大型構造物などで、溶接時の熱履歴に起因して発生する残留応力は、破壊・変形の両者に対して重要な要員となるため、溶接部の制度の良い残留応力測定牛実が求められている。この残留応力を求める非破壊法として X 線や中性子、放射光などの量子ビームを用いた回折法が注目されている。特に放射光は材料の表面から内部に至る応力・ひずみ分布が測定できるということで近年特に注目されている。

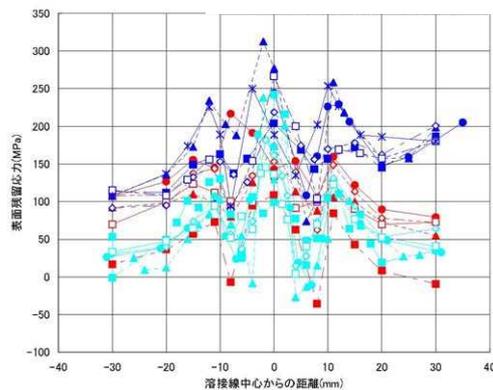
本研究では、この放射光を用いて、日本材料学会 X 線材料強度部門委員会内溶接部残留応力測定小委員会で作成された溶接材の表面、内部の残留応力・

ひずみ測定を実施し、現在、どの程度の測定が可能であるかを報告する。

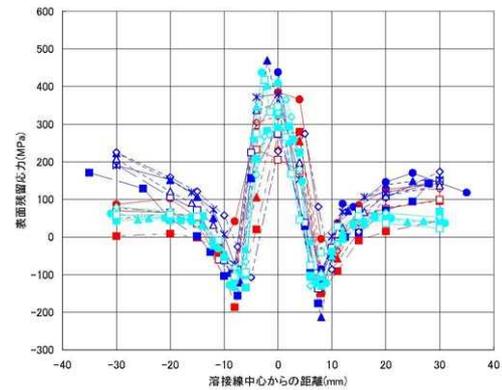
### 2 実験方法

#### 2.1 試験片

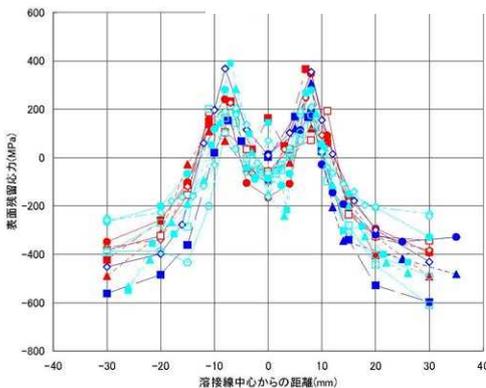
材料は溶接小委員会において作成された SM570 および SUS304 を母材とする溶接材を使用した。作成方法等については、文献 1 を参照していただきたい。なお図 1 に実験室系 X 線を用いて測定された SM570 および SUS304 溶接材表面の 2 方向の応力分布を示す<sup>(1)</sup>。



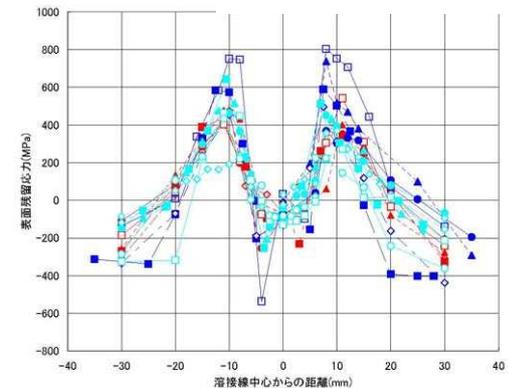
(a) 570 L



(b) 570 T



(c) 304 L



(d) 304 T

Fig. 1 Residual stress distribution beneath the surface of weld.

Table . X-ray conditions for strain or stress measurement.

Beamline	BL02B1	BL19B2	BL14B1	BL22XU
Wave length	0.172 ( E =72keV )	0.172 ( E = 72keV )	0.083 - 0.248 ( E = 50 - 150 keV )	0.182 ( E = 68.2keV )
Monochromatic crystal	Si(311)	Si(311)	-	Si (111)
Sizes of divergent slits	Height = 0.2 mm Width = 2.0 mm	Height = 0.5 mm Width = 2.0 mm	Height = 0.05 mm Width = 0.3 mm	Height = 1.0 mm Width = 0.2 mm
Sizes of receiving slits 1			Height = 0.05 Collimeter	Height = 1.0 mm Width = 0.2 mm
Sizes of receiving slits 2	Sollar slit	Sollar slit	Width = 1.0 mm	Height = 1.0 mm Width = 0.2 mm
Detector	NaI	NaI or CdTe diode	Ge-SSD	CdTe diode
Material	SUS304	SM570	SM570	SM570
Diffraction	-Fe 642	-Fe 521	Various diffractions	-Fe 433
Diffraction angle 2	20.6 deg	19.19 deg	10 deg	20.755 deg.
Preset time	10 sec	20 sec	600 sec	3 sec
X-ray Young's modulus E <sup>4)</sup>	212.08 GPa	198.49 GPa	-	273.9 GPa
X-ray Poisson ratio <sup>4)</sup>	0.2767	0.2982	-	0.274

## 2.2 実験条件

実験は、大型放射光施設（SPring-8）に設置されている一般共用ビームラインである BL02B1 および BL19B2、そして原子力機構専用ビームライン BL14B1 および BL22XU を使用した。各ビームラインにおける測定条件を表 1 に示す。ただし、BL19B2 および BL22XU に関してはいくつかの条件で測定を実施したのでそのうちの 1 つを示す。また、BL14B1 においてはエネルギー分散法によるひずみ測定を行った。

測定は、図 2 に示すように、表面部近傍に関しては侵入深さ一定法<sup>(2)</sup>、内部に関してはひずみスキャンニング法<sup>(3)</sup>でそれぞれ行った。なお、図 3 に示す

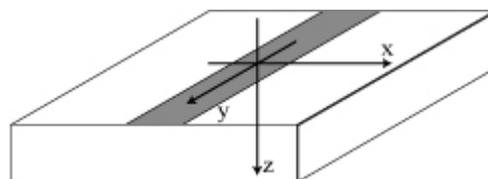


Fig. 3 Schematic of welding.

ように、溶接線より離れる方向を x 軸、溶接線と平行方向を y 軸、深さ方向を z 軸として以下、結果を報告していく。

## 3 実験結果および考察

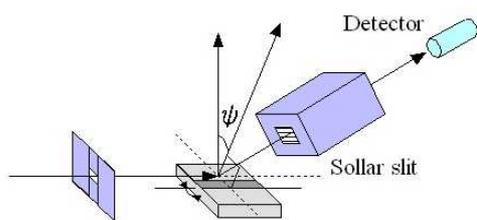
### 3.1 SM570 表面近傍応力測定

#### 3.1.1 BL19B2 における測定

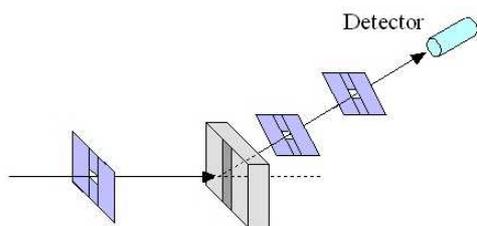
図 4 挿入図に -Fe 521 回折プロファイルを示す。原子散乱因子の影響により非常に強度が弱い、S/N 比（ピークとバックの比）は十分であると思われるので本回折面を用いて表面近傍の残留応力測定を実施した。

図 4 に侵入深さ一定法を用いて測定した  $x = 3, 5, 30$  mm における  $2\theta - \sin^2$  線図を示す。侵入深さは表面から  $50 \mu\text{m}$  である。どの場所においてもかなりののがたつきが発生している。これは回折に預かる結晶粒数が十分でないためであると思われる。

図 5 に溶接線に対して垂直方向（T-direction）および平行方向（L-direction）の表面から  $50 \mu\text{m}$  までの深さにおける平均残留応力分布を示す。ここで横軸の 0 の位置が溶接部となる。垂直方向に関しては、0 を中心に対照的な応力分布を示しているが、平行方向はかなり異なっている。横軸のプラス側だけに注目すると、溶接部で引張応力を示し、溶接部より少し離れたところでもっとも強い圧縮応力が発生して



(a) Constant penetration depth method.



(b) Strain scanning method.

Fig. 2 Optics.

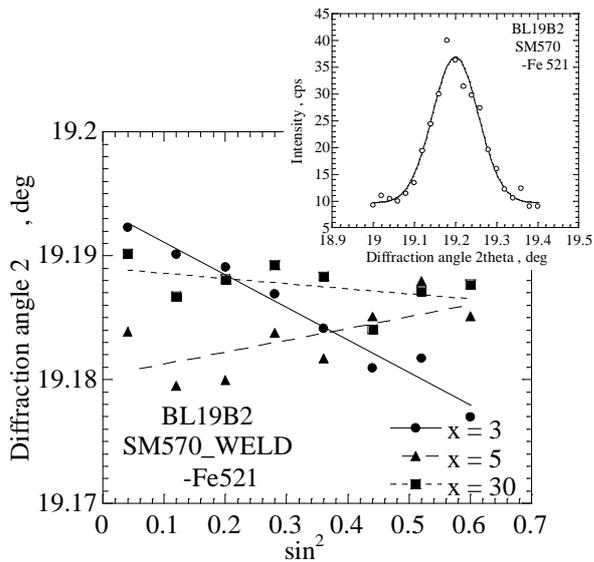


Fig. 4  $2\theta$ - $\sin^2$  diagram of SM570 welding measured at BL19B2. Inserted figure shows the profile of  $-Fe\ 521$  reflection.

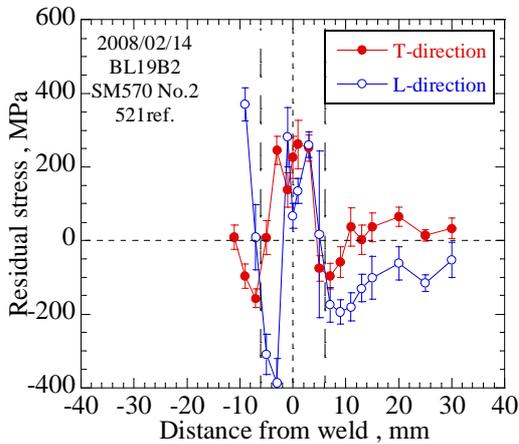


Fig. 5 Residual distribution near weld made of SM570.

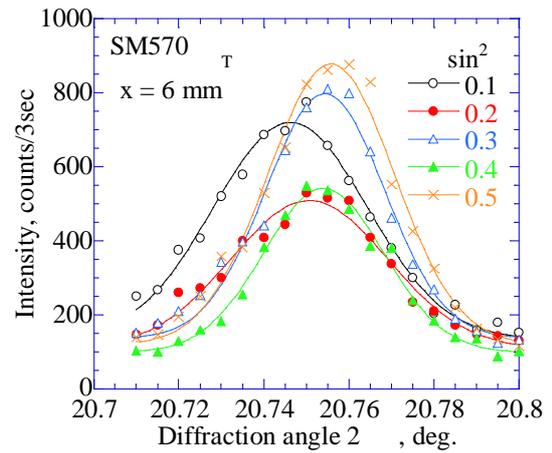
いることがわかる。しかしながらその絶対値はかなり異なり、溶接部より離れたところでは、垂直方向は引張応力、平行方向は圧縮応力を示している。名垂直方向に関して、図 1(b)と今回の結果を比較すると、絶対値は今回の結果のほうが全体に小さくなっているが傾向は一緒であり、内部では応力が 0 に近いことがこの結果から推察される。

### 3.1.2 BL22XU における測定

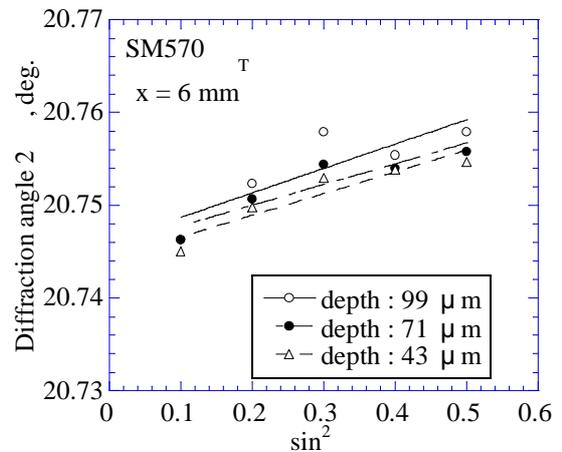
図 6 (a)に  $-Fe433$  回折プロファイルを示す。角に関係なく、ほぼ左右対称なプロファイルが得られている。

図 6 (b)に侵入深さ一定法を用いて 3 段階の深さを制御して測定した  $x = 6\text{ mm}$  における  $2\theta$ - $\sin^2$  線図を示す。直線とは言いがたいが、BL19B2 で測定した結果と比較すれば十分直線であると思われる。おそらく BL22XU でもソーラスリットを使用すればより質の良いデータが得られたと思われる。

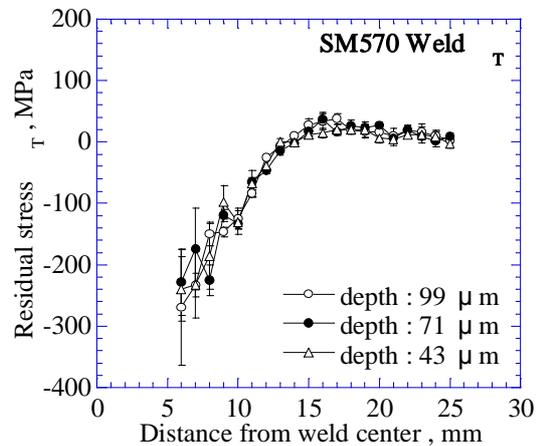
図 6 (c)に溶接線に対して垂直方向の表面から 3 階



(a) Profiles



(b)  $2\theta$ - $\sin^2$



(c)

Fig. 6 Profiles of  $-Fe\ 433$  reflection (a),  $2\theta$ - $\sin^2$  diagram (b) and stress distribution of welding measured at BL22XU.

階の深さまでの平均残留応力分布を示す。図 5 と同様、横軸の 0 の位置が溶接部であり、本測定では、溶接部は測定していない。よって母材に注目すると、どの深さまでの平均残留応力もほとんど同じ結果を示しているが、溶接部より離れた位置における残留

応力がほとんどまとまっているのに対して、溶接部近傍はばらつきだしている。これは溶接による影響のため、表面から内部にかけて応力変化が大きいためであると考えられる。

本結果と実験室系 X 線と比較すると、溶接中心より 13mm 程度はなれたところで応力が圧縮から引張へ変化しているところは一致している。応力値に関しても、表面部とほとんど一致していることから表面 100 μm 付近まではほとんど応力変化がないといえる。

一方、BL19B2 の結果と比較すると、溶接部近傍の応力値は大きい。ほぼ同じ深さまでの応力データを得ているにもかかわらずこのような違いで現れているが、本原因に関しては現在のところ明確な回答は得られていない。

### 3.2 SM570 内部ひずみ分布測定

#### 3.2.1 BL19B2 における測定

図 8 に図 2 (b) のような透過法で測定した -Fe 110 回折プロファイルを示す。もっとも強い反射だが入射 X 線の強度が弱いため、回折強度も弱く、プロファイルの形もかなりがたついてしまった。

#### 3.2.2 BL22XU における測定

図 9 に図 2 (b) のような透過法で溶接材の中心付近の深さで測定した -Fe 211 回折プロファイルを示す。アンジュレータ光源からの非常に強力な X 線を用いることで、鉄鋼材 10mm でも十分な回折強度が得られた。図 9 には x を変化させた 4 つのプロファイルを示したが、x = 0 つまり溶接内部だけ回折強度が弱く、また他の 3 つに比べて大きくシフトしていることがわかる。

図 10 に溶接線と垂直方向のひずみ(a)および測定で得られたプロファイルの半価幅(b)の内部 2 次元分布を示す。横軸は溶接部中央からの距離、縦軸は深さを表しており、深さ z = 0 が深さの中心、z がマイナス方向が溶接部の存在する側として定義して表した。図 10 (a) のひずみは無ひずみ格子面間隔  $d_0$  を (x, z) = (30, 0) と定義し、以下の式を用いて求めた。

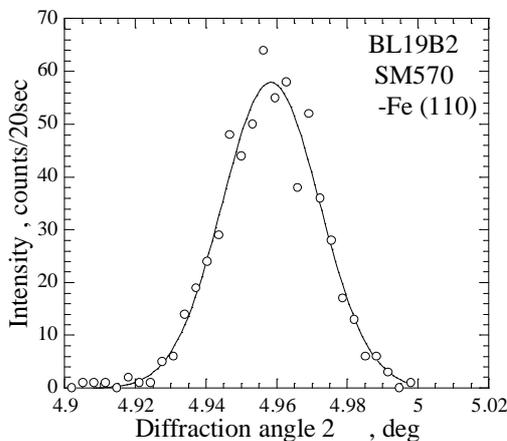


Fig. 8 Profile of -Fe 110 reflection.

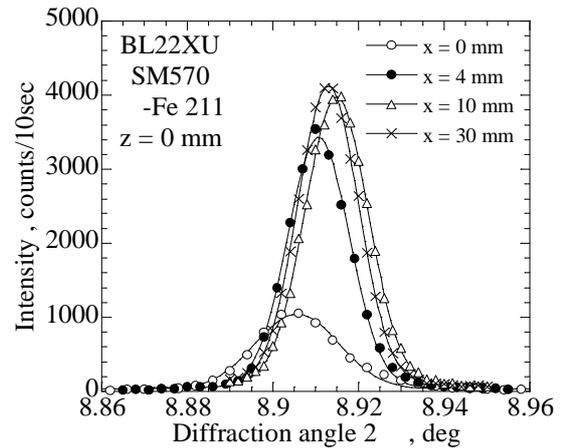


Fig. 9 Profile of -Fe 111 reflection.

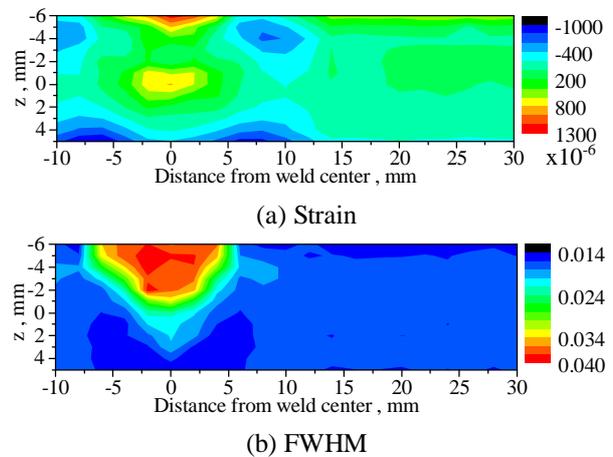


Fig. 10 Distributions of strain (a) and FWHM (b) of weld made of SM570.

$$\varepsilon = \frac{d - d_0}{d_0} \cdot 2d \sin \theta = \lambda$$

また図 10 では z = -6 が示されている。試験片の厚みは 10mm なので、この位置は溶接部のみ存在し、母材には存在しないが、透過法においては測定領域 (ゲージ体積) が深さ方向に広がるため、仮想的にこの領域のひずみが発現する。ゆえにこの領域に関しては除外するものとする。ひずみ分布においては、溶接内部で表面に近い領域に強い引張ひずみが、中央部に弱い引張ひずみが、そして HAZ と思われる領域 (x = 10 mm) とその反対側表面に強い圧縮ひずみが、それぞれ観測された。本結果と図 2(b) を比較するとその振る舞いは完全に一致しており、定性的には内部ひずみ分布測定ができているといえる。一方、半価幅分布に関しては、溶接内部で広がっており、塑性変形による影響が本測定から十分観測されているといえる。また、注目すべきは、(x, z) = (±7, -4) の領域に周りよりも若干大きな半価幅の値を持つ領域が存在することである。これがどのような意味を持っているのか、溶接に伴う熱影響がこのよ

うな形で現れたのか、もう少し検討するための測定が必要である。

### 3.2.2 BL14B1 における測定

図 11 にエネルギー分散法により測定した母材中心付近のエネルギースペクトルを示す。一回の測定で様々な回折線を得ることができる。

図 12 に  $-Fe321$ 、 $420$ 、 $521$  回折より得られた溶接線と垂直方向のひずみおよび半価幅分布を示す。この測定においては、試料を動かす範囲に制約条件が発生したために、溶接部内部を完全に測定することができなかった。測定できた範囲に注目すると、各回折面で内部ひずみ分布および半価幅分布に違いが現れた。ひずみ分布では、 $321$  回折は溶接内部の一部、 $420$  回折では溶接部と母材との境界付近、 $521$  回折では、母材にそれぞれ引張りひずみが存在し、圧縮ひずみに関しても特に規則性は現れなかった。そして、本結果は図 10 (a)ともかなり異なっている。この原因は、回折強度が不足していることが一番に考えられる。その理由として、測定場所ごとに得られた回折強度にはばらつきはほとんどなかったことから回折に預かる結晶粒の和は十分であり、プロフィール自体も左右対称な形をしていたことがあげられる。

一方、半価幅については回折面ごとに傾向が異なっているが、溶接部内部で半価幅の広い領域が観測されている。その中で、唯一  $420$  回折が図 10(b)に似て、溶接部内部で広がっている領域が観測されていた。

本測定の結果から、白色応力測定において必要と

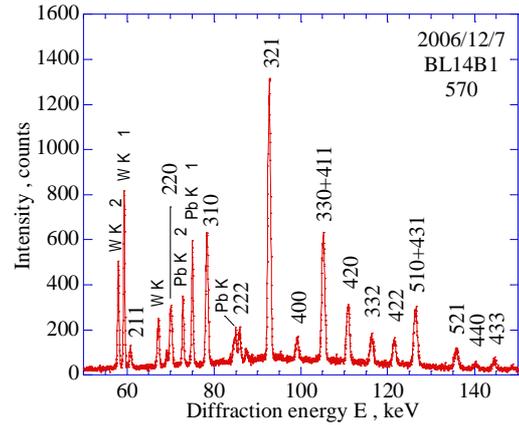


Fig. 11

される強度をきちんと調べる必要があるといえる。また ESRF で実施されているような一度に複数の方向のひずみを求める手法などを取り入れる必要があるといえる。

### 3.3 SUS304 表面近傍応力測定

#### 3.3.1 BL02B1 における測定

図 13 に  $-Fe 642$  回折による侵入深さ一定法を用いて測定した  $x=0$  および  $20\text{mm}$  における  $2-\sin^2$  線図を示す。 $x=0\text{mm}$  においては、 $2-\sin^2$  線図に若干のばらつきが見られるが、 $x=20\text{mm}$  においては直線にのっており、非常に質の高いデータが得られたといえる。

図 14 (a)に溶接線に対して平行方向、(b)に溶接線に対して垂直方向の表面から 2 段階の深さまでの平

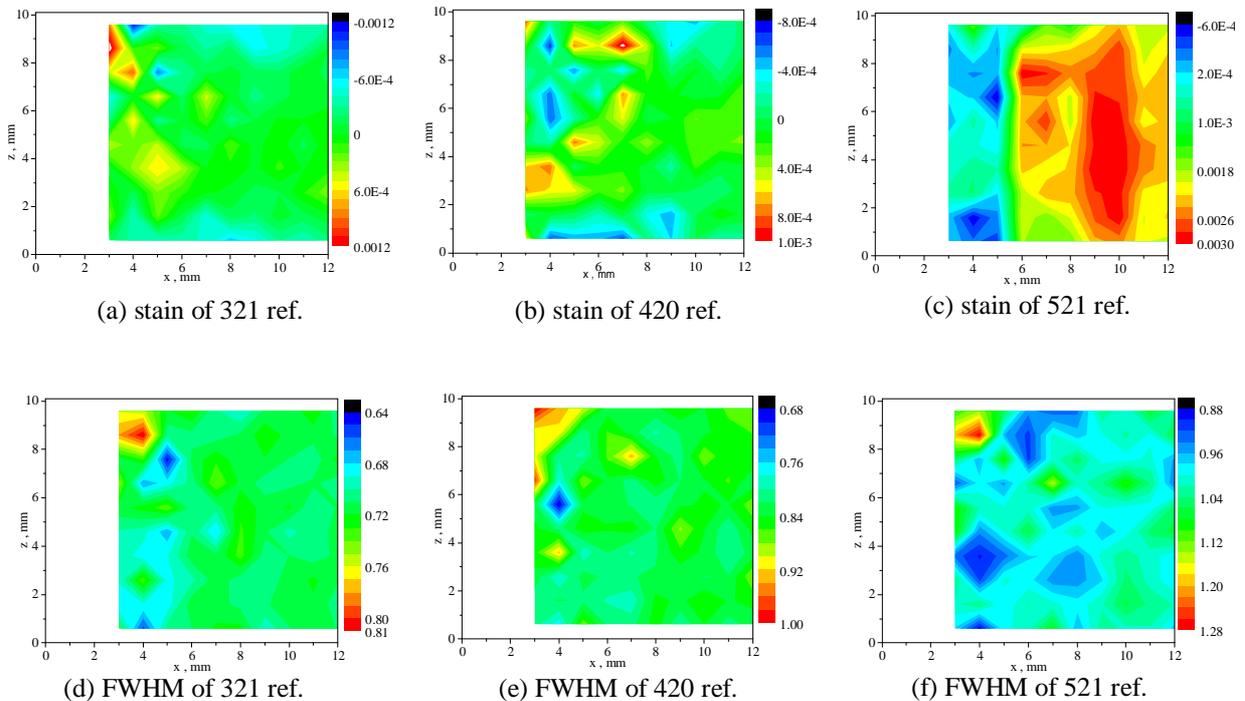
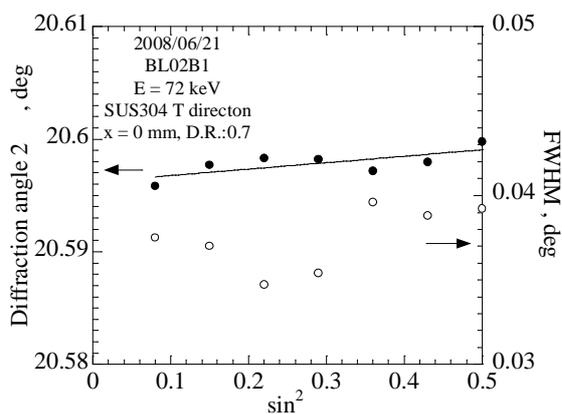
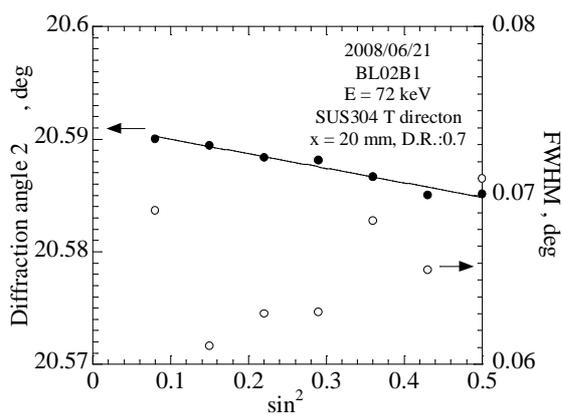


Fig. 12 Distributions of strain and FWHM of weld made of SM570 measured at BL14B1.



(a)  $x = 0$  mm



(b)  $x = 20$  mm

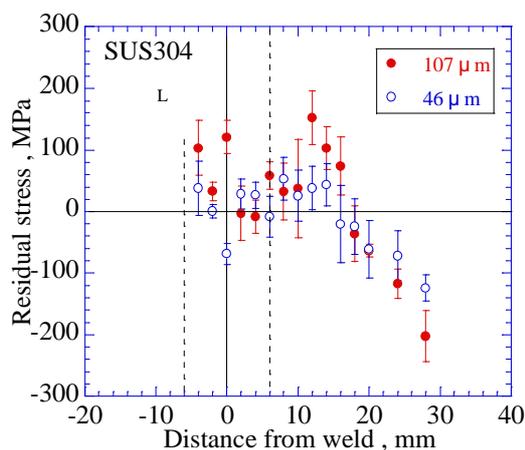
Fig. 13.2  $-\sin^2$  diagram of SUS304 welding measured at BL02B1.

均残留応力分布を示す。L 方向に関して、深さによる違いはさほど現れておらず、溶接部より若干離れたところに最も強い引張応力が発生し、16mm のところで、引張りから圧縮応力へ変化している。図 1(c)と比較した場合、応力の傾向は一緒であるが、全体的に溶接線から離れた場所に位置している。これは極表面と内部の違いによるものかもしれない。一方、T 方向に関して、深さによる違いははっきりと見られないが、溶接部と母材との境界でほぼ無応力から最大引張へ極端に応力が変化し、L 方向よりも若干溶接部よりはなれた位置で引張りから圧縮へ応力が変化している。この結果は、図 1(d)とほとんど一致している。

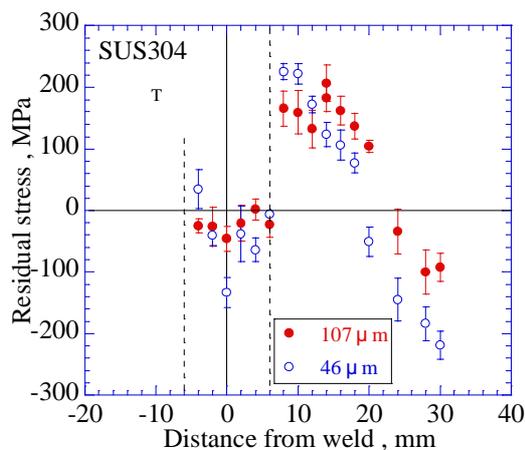
以上のことから本測定では溶接部の応力分布が観測されているといえる。

### 3.3.2 BL19B1における測定

本測定では、回折面による違いが現れるかどうかを検討した。図 15 に 3 つの回折面に対して侵入深さ一定法を用いて測定した溶接部に対して垂直方向の免れない応力分布を示す。実線と点線はそれぞれ 1 回目、2 回目の測定結果であり、 $x < \pm 6$  mm の範囲が溶接部である。本結果からあまり精度のよい測定とはいえないが、その傾向はほぼ一緒であった。特に、回



(a) L



(b) T

Fig. 14 Stress distributions of SUS304 weld.

折面に関しても、 $x = 7$  mm で引張応力が、 $x = 6$  mm で圧縮応力がそれぞれ最大となっており、その傾向は図 1 (d)や図 14 (b)とほとんど一致していた。ただし、溶接部中心付近は 1 回目と 2 回目で傾向が異なっている。これはおそらく測定した試料位置が溶接線平行方向に若干異なっていたためであり、溶接部ではその場所ごとに内在している応力が変化していると考えられる。

## 4 結 言

本研究では、SPring-8 に設置されている様々なビームラインを用いて溶接部の表面から内部にいたる応力分布測定を実施し、溶接部の応力評価およびそれぞれのビームラインの可能性について検討した。結果は以下の通りである。

- 1) 産業利用ビームラインである BL19B2 においては、表面近傍の応力分布測定が可能である。ただし、測定時間などはかなり必要である。
- 2) 一般共用ビームラインである BL02B1 においては、BL19B2 と同じ偏向電磁石ビームラインではあるがサジタル集光による強度の増加により

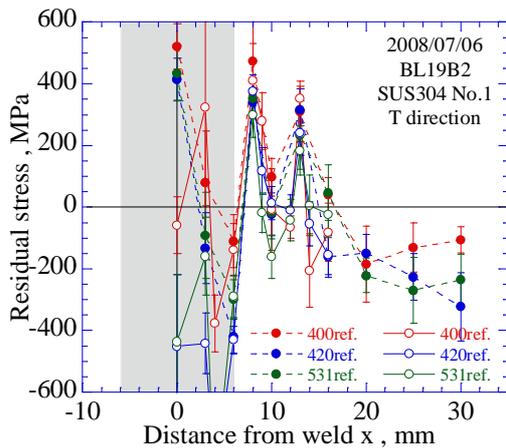


Fig. 15 Stress distributions of SUS304 weld measured at BL19B2.

表面近傍の応力測定が非常に精度よく測定することが可能である。内部についても十分測定が可能であると思われる。

- 3) 白色 X 線による応力評価では、内部応力分布を得るためには十分な強度、つまり十分な時間が必要であり、これが満たされれば非常に簡単に測定が可能であるといえる。
- 4) 原子力機構線用ビームラインである BL22XU においては、アンジュレータ光源、Si111 面分光結晶面、さらにはレンズ集光など高エネルギー放射光応力測定をするためのアプリケーションがそろっていることから、表面から内部までもっとも質の高い応力測定が可能である。今後は 2 次元検出器による応力評価へシフトしていく予定である。
- 5) 溶接部測定結果に関しては、表面部近傍ではほぼ実験室系 X 線の結果と一致し、急激な応力勾配は発生していないと思われる。一方、内部に関してはデータ不足もあり、今後さらに測定を続けていくこと、そしてその結果と中性子の結果を比較することで内部応力分布を検討していく必要がある。

放射光実験は、(財)高輝度光科学研究センター (JASRI) が実施する重点産業利用課題として SPring-8 の BL19B2 で実施しました (課題 No. 2007B1885、No. 2008A1885)。また、本研究を遂行するにあたり、JASRI の佐藤真直博士に多大なご協力を頂きました。試験片は、日本材料学会 X 線材料強度部門委員会内溶接部残留応力測定小委員会で作成された溶接材を使用させていただきました。ここに記して心から感謝の意を表す。

## 参考文献

- 1) T. Kurimura, M. Obata and S. Okido, "A guideline proposal from sub-committee on residual stress measurement of weld section", Proceedings of the 43<sup>rd</sup> symposium on x-ray studies on mechanical behaviour of materials, pp.138-143 (2008).
- 2) Evaluation of Residual Stress Distribution in Shot-Peened Steel by Synchrotron Radiation, Y. Akiniwa, K. Tanaka, K. Suzuki, E. Yanase, K. Nishio, Y. Kusumi, H. Okado and K. Arai, Journal of the Society of Material Science, Japan Vol.2, No.7, 764-769 (2003).
- 3) T. Shobu, J. Mizuki, K. Suzuki, Y. Akiniwa and K. Tanaka, "Correction of surface aberration in strain scanning method with analyzer", Journal of the Society of Materials Science, Japan, Vol.55, No.1, pp.101-109 (2006).
- 4) E. Kröner, "Berechnung der elastischen Konstanten des Vielkristalls aus den Konstanten des Einkristalls", Z. Phys., Vol. 504, pp.504-518 (1958).