

溶接部近傍表面内部残留応力測定 Residual Stress Measurement near Weld

栗村隆之¹, 湯村友亮¹, 菖蒲敬久², 伊藤登史政³

Takayuki KURIMURA¹, Tomoaki YUNOMURA¹, Takahisa SHOBU² and Toshimasa ITO³

¹三菱重工業(株), ²日本原子力研究開発機構, ³(株)デンソー

¹Mitsubishi Heavy Industries, LTD., ²JAEA, ³Denso Corporation

発電機器, 橋梁, 船舶など大型構造物や車両の製造においては, 部品・素材の接合は不可欠な工程であり, その中でも溶接は必要不可欠な接合方法となっている. 本研究では, 高エネルギー放射光 X 線の強い透過力に着目し, 破壊の発生する材料表面近傍かつ溶接部周辺における残留応力分布測定を SPring-8 の共用ビームライン BL19B2 を用いて行った. オーステナイト系ステンレス鋼 SUS304 を母材とする溶接部に対して, 侵入深さ一定法により表面から 50 μm の深さまでの溶接部に対して垂直方向の平均残留応力分布を複数の回折面で測定した結果, どの回折面においても溶接部を境に急激に応力が変化することがわかった.

キーワード: 溶接部, 残留応力, 侵入深さ一定法, オーステナイト系ステンレス鋼 SUS304

【背景と研究目的】

発電機器, 橋梁, 船舶など大型構造物や車両の製造においては, 部品・素材の接合は不可欠な工程であり, その中でも溶接は必要不可欠な接合方法となっている.

一方で, 溶接時の熱履歴に起因し, 溶接部近傍には残留応力の発生が避けられない. 機械構造物の破壊の大部分は溶接部を起点としており, 残留応力が疲労強度の低減, 応力腐食割れの発生・進展を引き起こすことが知られている. 破壊・変形の両者ともに残留応力が重要な要因の 1 つであると考えられており, 破壊・変形現象の解明や対策効果の理論的検討に関して溶接部およびその周辺の残留応力測定の要望は高い. 構造物の合理的な設計, 寿命予測, 保守保全さらには溶接条件の最適化のために, 非破壊的な残留応力測定技術の開発が強く望まれている. 特に, 溶接部の強度のバラツキは大きく, その解決として残留応力を正確に評価することが必要である. そのため, 放射光を利用することで溶接部の残留応力が高精度に評価できることが期待されている.

以上のように, 本課題申請は, 多分野で問題となっている溶接技術の向上を目的としており, 産業界における共通基盤技術の構築と位置づけられている.

そこで本研究では, 広く様々な分野で使用されているオーステナイト系ステンレス鋼 SUS304 を母材とする溶接材の表面近傍の応力分布を測定し, 粗大粒においても従来の応力測定法が適用できるかどうか, そして得られた結果が他の量子ビームの結果と比較して遜色ないかどうかを検討した.

【実験】

実験は, 大型放射光施設 SPring-8, 産業利用ビームラインの 1 つである BL19B2 にて行った. 装置は, 第 2 ハッチに設置されている縦振りの 8 軸回折計を使用した. エネルギーは 72keV である. Table 1 に本測定条件, Fig. 2 に試験片を回折計にマウントした様子を示す.

試験片は, SUS304 を母材とする溶接材 (厚さ 15 mm) である. 測定は, 侵入深さ一定法¹⁾を用い (Fig. 1), $\gamma\text{-Fe}$ の 3 つの回折面より溶接線に対して垂直面内方向

の表面から 50 μm までの平均残留応力を求めた。なお、回折弾性定数は単結晶の弾性定数を元に Kröner モデル²⁾により得られた計算値を用いた。

Table 1 X-ray conditions for stress measurement by synchrotron radiation.

Wavelength	0.1722 Å (E = 72.00 keV)		
Monochromatic crystal	Si (311)		
Sizes of divergent slits	Height = 0.5 mm, Width = 2.0 mm		
Sizes of receiving slits	Sollar slit		
Material	Welding made of SUS304		
Diffraction	$\gamma\text{-Fe 400}$	$\gamma\text{-Fe 420}$	$\gamma\text{-Fe 531}$
Diffraction angle 2θ	10.98 deg	12.28 deg	16.27 deg
X-ray Young's modulus E	144.13 GPa	183.29 GPa	202.47 GPa
X-ray Poisson ratio ν	0.3473	0.3058	0.2868

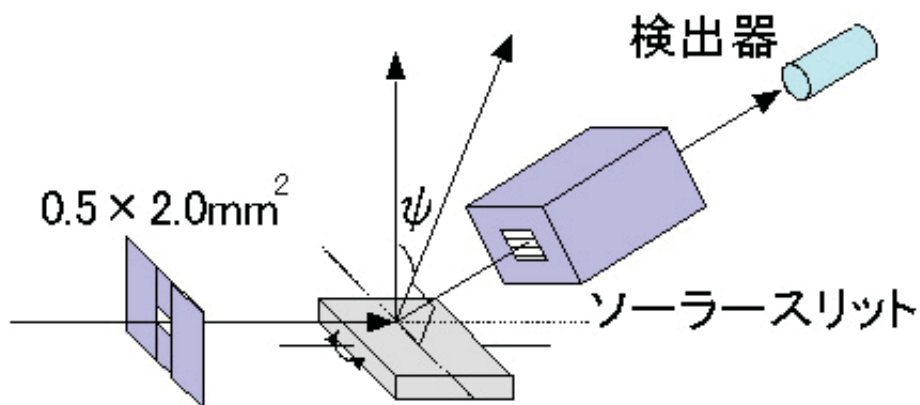


Fig. 1 Constant penetration depth method.

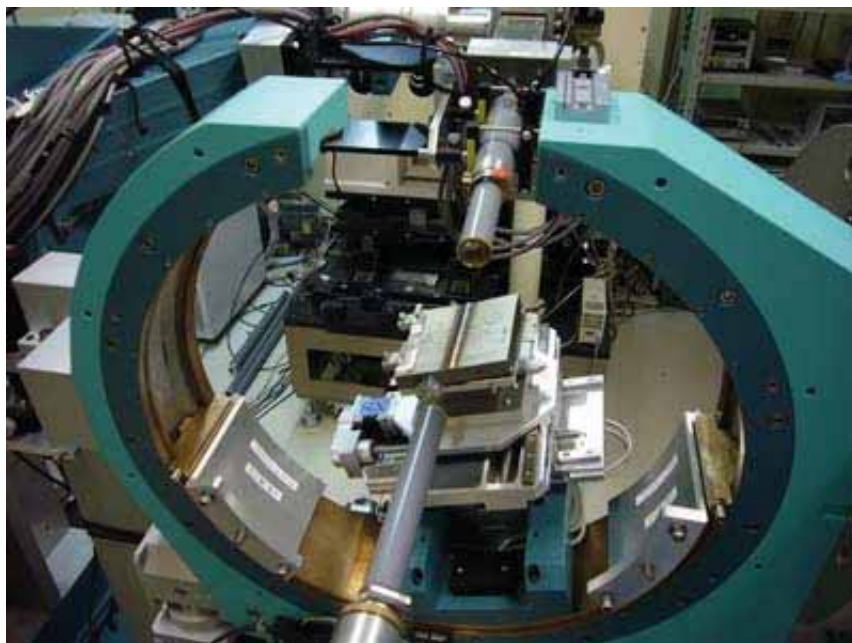


Fig. 2 Photograph.

【結果および考察】

Fig. 3 に 3 つの回折面の溶接部中央より 3 mm および 30 mm 離れた位置における $2\theta\text{-sin}^2\psi$ 線図および測定プロファイルの半価幅 (FWHM) を示す。どの回折面、場所においても、粗大粒の影響

で回折強度が非常に弱いために、かなりがたついた 2θ - $\sin^2\psi$ 線図である。また一般に、半価幅は $\sin^2\psi$ の増大に伴い広がっていくが、本測定においては $\sin^2\psi$ の増大とは関係なくランダムに半価幅が変化していることから、やはり粗大粒に対する測定が非常に困難であったと考えられる。

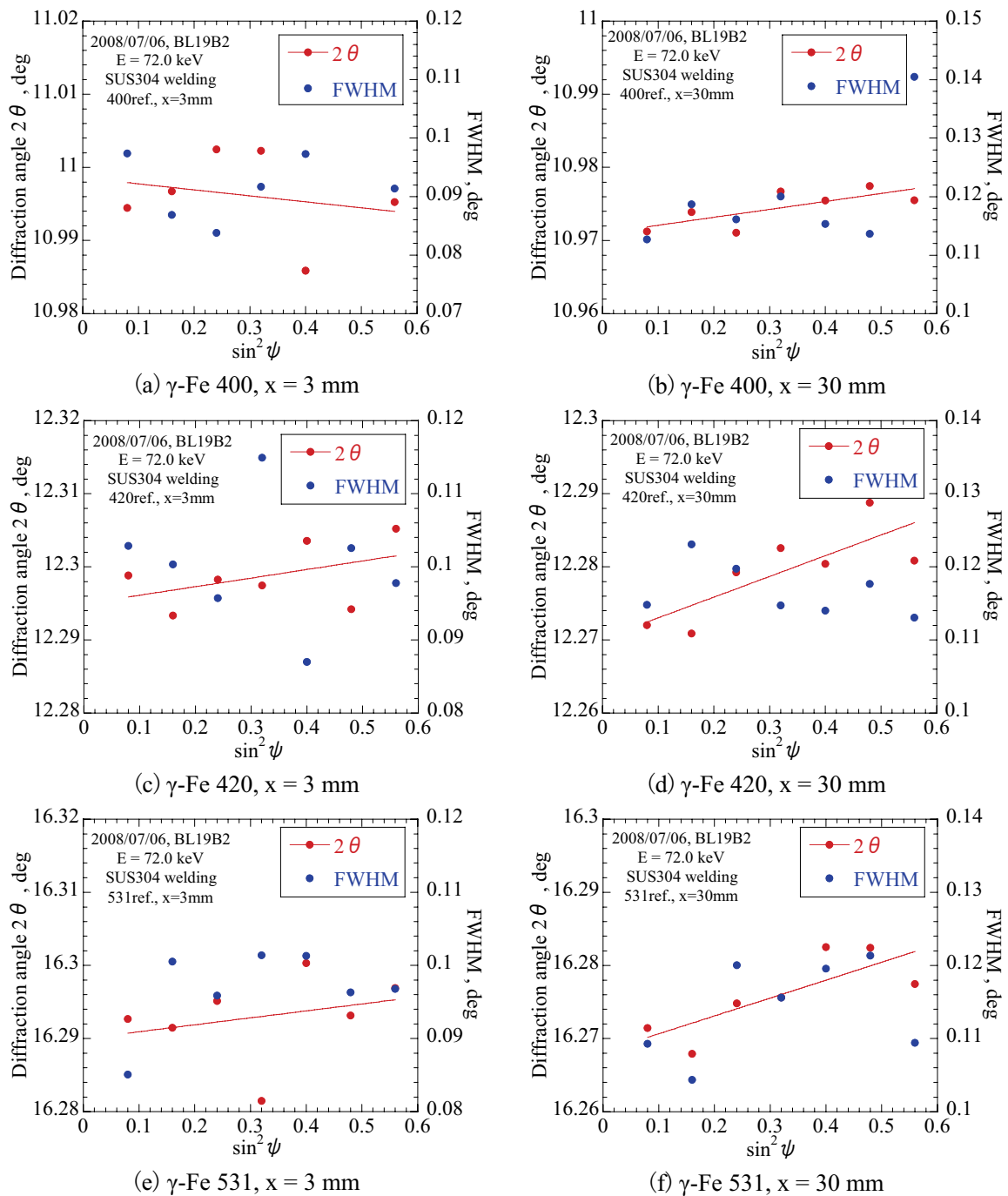


Fig. 3 2θ - $\sin^2\psi$ of weld.

Fig. 4 に 3 つの回折面より求めた残留応力を示す。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。Fig. 3 の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、その傾向は実験室系 X 線で極表面を測定した結果と一致していた³⁾。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。

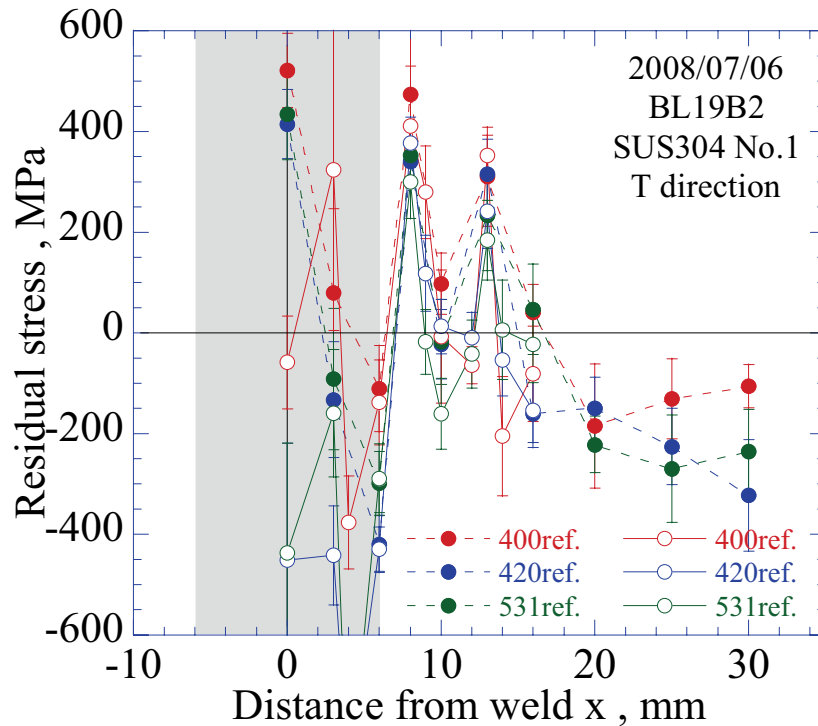


Fig. 4 Residual stress distribution of welding made of SUS304.

【今後の課題】

本研究において、オーステナイト系ステンレス鋼 SUS304 溶接材の表面部 50 μm の平均面内応力分布の傾向を見ることはできた。しかしながら誤差が非常に大きい。この原因は、粗大粒を有する材料における残留応力測定では回折に預かる結晶粒数が少ないためである。従来のピンポイント検出器を用いた方法では測定が困難であると思われる。

そこで、そのための対策として、以下の3つが考えられる。

1. 揺動法

2. 白色 X 線の利用

3. 2次元検出器の利用

1. に関しては BL22XU ですでに実施しているが、揺動条件が材料の形状や求めたい応力状態でユニークに決まる、局所領域とならないなどの問題が発生する。2. に関しては BL14B1 や BL28B2 で現在実施中であるが、測定場所ごとに回折線の強度がまちまちであることに変わりはない。ただし、複数の回折面を組み合わせることでこの問題を解決できる可能性があり、現在それを検討中である。3. に関しては、BL22XU で現在実施中であり、これも解析方法を現在検討中である。しかしながら近い将来、この2つの方法が高エネルギー放射光応力測定法の主流となり、様々な材料において適用されると考えられる。

【参考文献】

- (1) Y. Akiniwa, K. Tanaka, K. Suzuki, K. E. Yanase, K. Nishio, Y. Kusumi, H. Okado, and K. Arai, "Evaluation of residual stress distribution in shot-peened steel by synchrotron radiation", Journal of the Society of Materials Science, Vol. 52, No. 7, pp.764-769 (2003).
- (2) E. Kröner, "Berechnung der elastischen Konstanten des Vielkristalls aus den Konstanten des Einkristalls", Z. Phys., Vol. 504, pp.504-518 (1958).
- (3) T. Kurimura, M. Obata and S. Okido, "A guideline proposal from sub-committee on residual stress measurement of weld section", Proceedings of the 43rd symposium on x-ray studies on mechanical behaviour of materials, pp.138-143 (2008).