

オーステナイト系ステンレス鋼 SUS316L 製溶接配管継手の
製造過程における応力・組織変化
Stress and Microstructure during manufacturing process for Welded Pipe
Joint of Austenitic Stainless Steel 316L

橋本 匡史^a, 伊原 涼平^a, 張 朔源^b, 城 歩美^b, 菖蒲 敬久^b, 望月 正人^a
Tadafumi Hashimoto^a, Ryohei Ihara^a, Syouyuan Zhang^b, Ayumi Shiro^b,
Takahisa Syobu^b, Masahito Mochizuki^a

^a大阪大学大学院工学研究科マテリアル生産科学専攻

^b日本原子力研究開発機構

^aGraduate School of Engineering, Osaka University.

^bJapan Atomic Energy Agency.

オーステナイト系ステンレス鋼配管溶接部で発生する応力腐食割れを防止するため、実際の配管溶接継手の製造工程（切削＋溶接）における残留応力変化を追跡した。割れは表面近傍の内部残留応力を駆動力として進展するため、残留応力は高エネルギー放射光を用いた侵入深さ一定法で $\sim 70\mu\text{m}$ までを評価した。その結果、暫定的ではあるが切削のみに比して切削＋溶接では表面の引張残留応力が重畳により極端に増加することを認めた。

キーワード： 切削，溶接，円周溶接継手，残留応力，侵入深さ一定法，XRD

背景と目的：

近年、エネルギー需要の増加ならびに環境問題の観点から原子力発電に注目が集まっている。しかしながら、既存の原子力発電プラントは高経年化問題を抱え、オーステナイト系ステンレス鋼製再循環系配管溶接熱影響部において応力腐食割れ(SCC)が顕在化している。これら SCC の検査、補修には多大な時間を要することから、効率的にエネルギーを供給するには、SCC 発生原因の解明が必要不可欠である。一般的に応力腐食割れは環境、材料、力学的要因の重畳により発生、進展するとされているが、原子力構造物で使用される SUS316L 鋼は非鋭敏化材のため、力学的要因である溶接引張残留応力に注目が集まっている。一方で、グラインダーおよび切削のような機械加工のみでも圧力容器炉内壁において SCC が生じるとの報告[1]もあり、溶接配管継手の製造工程が溶接前の内径合わせに切削加工を施していることから、それら製造工程（切削＋溶接）における応力・組織変化を追跡することが SCC の発生・進展防止に有益となる可能性がある。通常は汎用の X 線回折装置で電解研磨と $2\theta\text{-sin}^2\Psi$ 法の併用により逐次研磨法が用いられているが、深さ方向の応力勾配により $2\theta\text{-sin}^2\Psi$ 線図に非線形特性が現れること、尚且つ非破壊で測定出来ないことが問題となる。また、SCC は極表層で発生し、内部応力($\sim 100\mu\text{m}$)により進展することから高空間分解能で極表層および内部を詳細に測定する必要がある。しかしながら、測定対象領域は急峻な応力勾配が発生しているため、微小な一定ゲージ体積からの情報を計測し、内部まで X 線を侵入させなければならない。それらを達成するには高空間分解能で強度を確保できる高輝度 X 線が不可欠である。そして、切削ならびに溶接の重ね合わせ残留応力分布を測定し、日本機械学会の維持規格において定められたき裂進展解析を行うことにより、SCC のき裂発生・進展を評価し、

詳細な寿命予測が期待できる。また、我々が構築した切削ならびに溶接残留応力解析手法の精度を向上できれば、機械加工条件・溶接条件の組み合わせから SCC に対して鈍い溶接配管継手製造工程を提案できる可能性がある。

実験方法：

本研究ではオーステナイト系ステンレス鋼 SUS316L を供試材料として用いる。素材自身の残留応力を除去するために 1373K で熱処理を行った後、寸法 150x100x8mmt の試験体に加工した。そして、実機相当の切削加工を表面に行った。その試験体に対して TIG 熱源を用いたビードオンプレート溶接し、実溶接配管継手の製造過程を模擬した。また、切削のみの影響を確認するため切削ままも併せて用意した。すなわち、応力測定は切削まま、切削+溶接の 2 試験体である。本研究は角度分散法による侵入深さ一定法[2]で測定した。X 線を 50 μ m 以上侵入させるには 72keV 程度のエネルギーが必要である。低角入射により深さ方向分解能を向上でき、方位パラメータからバルクの弾塑性挙動に近いと予測される 531 反射を利用した。本研究における測定条件は以下の通りであり、切削（溶接）方向の応力成分を平面応力状態の仮定のもと測定した。また X 線の弾性定数はマシントイムの制限から Kroner モデルにより算出した。

- 1)エネルギー：72keV (CeO₂ での構成により 71.457keV と確認)
- 2)検出器：CdTe diode
- 3)スリット：入射側/2.0x0.3mm²：受光側/ソーラーズリット, 3.0x2.0mm²
- 4)回折面：531
- 5)散乱角：16.55deg
- 6)揺動：試験体の長手方向（溶接試験体では溶接線方向）に対して ± 4 mm で 2 往復

結果および考察：

2 θ -sin² Ψ 線図の一例を Fig. 1 に示す。勾配はマイナスをとるため侵入深さ内において引張残留応力が存在するとわかるが、僅かながら非線形挙動を示している。これは、切削により一方向に塑性変形が生じたため、集合組織を含む可能性が考えられるが、強配向ではないため等方均質材料を仮定して解析することにした。その結果を Fig. 2 に示す。切削ままの試験体は表面で非常に過大な引張残留応力が存在しており、内部に向かって圧縮化していく様相が測定できた。

一方、切削後に溶接した試験体では予想に反して表面近傍は残留応力が存在せず、内部に向かって引張に転じる結果となった。その要因として Fig. 3 に示す回折強度曲線の非対称性が考えられる。 Ψ 角を確保する際に侵入深さを制御するため、入射角のあおりを加えるが、それに伴い溶接金属の余盛りに X 線の光路を遮られた結果、低角側にブラインドが発生する。その結果、ピークフィッティングにより得られる回折角 2θ が真実よりも高角側に遷移するため、切削+溶接試験体の表面に近い残留応力値が圧縮化されたものとわかる。すなわち、侵入深さがある程度深くなるに伴いその影響が軽減されることから、侵入深さ 60 μ m のみ切削と溶接の重畳効果を正確に捉えていると推察する。侵入深さ 60 μ m における二水準を比較すると、切削ままに比べて切削+溶接試験体では残留応力の重畳効果によって引張側に遷移することが観察された。よって、溶接前に配管の内径調整を目的とした切削が溶接残留応力と重畳することによって、応力腐食割れの発生を促進し、その後の伝播速度を速めると考えられる。しかしながら、あくまでも暫定的なものであり、今後の再測定が必要である。

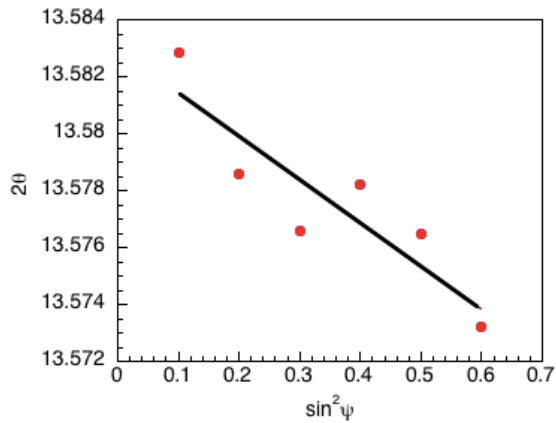


Fig. 1 侵入比 0.5 における切削試験体の 2θ - $\sin^2\Psi$ 線図

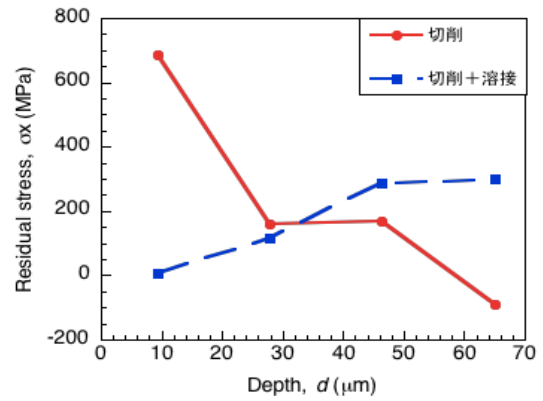


Fig. 2 製造工程の重畳による残留応力分布変化

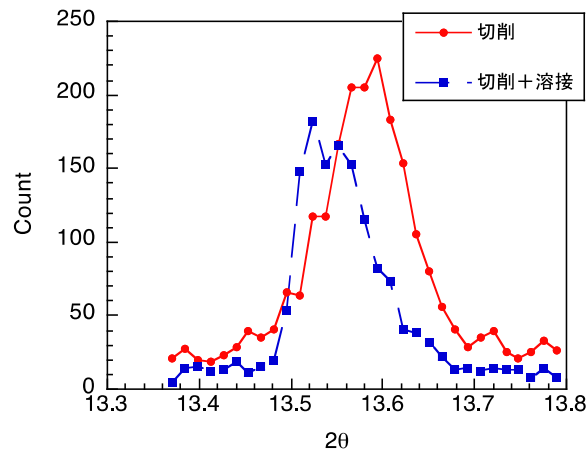


Fig. 3 回折強度曲線の非対称性

今後の課題：

溶接部における種々の破壊事象は溶接金属ならびに熱影響部で生じるため、表面の凹凸の影響を考慮して、表面近傍を再測定を実施する必要がある。また、オーステナイト系ステンレス鋼は粗大粒を有することから、侵入深さをまずにつれて回折強度曲線に弾性異方性が影響するため、多軸揺動（たとえば ω 揺動と同時にXY揺動）とそれに伴う散乱ベクトルの調整（ Ψ 軸と一致するように）が今後の課題である。

参考文献：

- [1] R.Ihara, J.Katsuyama, K.Onizawa, T.Hashimoto, Y.Mikami and M.Mochizuki, Prediction of Residual Stress Distributions due to Surface Machining and Welding and Crack Growth Simulation under Residual Stress Distribution, Nuclear Engineering and Design, Vol. 241, pp. 1335-1344, 2011.
- [2] Y.Akaniwa, Y.Kojima, H.Kimura and K.Maruko, "Prediction of Residual Stress Distribution in Severe Surface Deformed Steel by Constant Penetration Depth Method," Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Vol.57, pp.660-660 (2008). (in Japanese)