

# 異種材溶接継ぎ手の残留応力シミュレーション

## Simulation of residual stresses of dissimilar welding joint

新潟大学	山岸 葵	Aoi YAMAGISHI	Non Member
新潟大学	鈴木 賢治	Kenji SUZUKI	Member
発電設備技術検査協会	西川 聡	Satoru NISHIKAWA	Member

Welding is widely used as a joint method of large structures. The residual stress which is the inevitable consequence of welding causes fatigue fracture or stress corrosion cracking (SCC). In this study, the residual stresses of the dissimilar butt welding joint, which was fabricated between SUS316L and NCF600, were simulated using the finite element method. The distributions of the residual stress of the butt welding joint were anti-symmetry. The welded part had the large tensile residual stresses. In the welded part, the peened surface had the large compressive residual stresses, which were measured using synchrotron X-rays. The distribution of the residual stress by welding contrasted with that after peening.

**Keywords:** SUS316L, NCF600, Residual Stress, Dissimilar Welding Joint, Finite Element Method

### 1. 緒 言

大型構造物をはじめ製造において、部品・素材の接合方法として溶接が用いられる。その一方、溶接時の熱履歴に起因し、溶接近傍部には残留応力が生じ、疲労の低減、応力腐食割れ (SCC: stress corrosion cracking) の発生・進展<sup>[1]</sup>などの原因となり、問題が多い。ゆえに、溶接部の残留応力の測定が行われている。

現在、溶接部およびその近傍の残留応力評価には、数値計算や切断法、X線応力測定法などが行われ、なかでも数値解析が一般的である。切断法は、試験片を破壊しなければならず、X線応力測定法は、非破壊的な唯一の方法であるが、溶接部の集合組織や粗大粒に起因したばらつきが生じ、測定が難しい。そのほか、X線応力測定方法の不統一に起因するものも考えられ、日本材料学会 X線材料強度部門委員会では、溶接部残留応力測定小委員会を設立し、溶接部残留応力測定ガイドラインについて検討されている<sup>[2]</sup>。

本研究では、異種材溶接継ぎ手の残留応力分布を求めるために、計算力学研究センターの Quick Welder を用いて解析モデルの作成、残留応力のシミュレーションを行った。同一材溶接継ぎ手および異種材溶接継ぎ手の解析を行い、残留応力分布を求め、得られた2つの残留応力分布の比較・検討を行ったので報告する。また、溶接応力を改善するために、異種材溶接部にショットピー

ニング処理を施した。そのピーニング面の残留応力を放射光にて実測した結果についても報告する。

### 2. 解析方法

まず、異種材溶接継ぎ手の解析対象試験体を図1に示す。試験体は、オーステナイト系ステンレス鋼 SUS316L および NCF600 の突き合わせ溶接体とし、先端曲率半径 2R, 15°, 深さ 21.0 mm の開先加工をした。溶接金属には YNiCr-3 (82 合金) を使用している。溶接条件を表1に示す。溶接施工後、施工面から 5 mm を機械加工により除去し、さらに電解研磨した。そして、溶接施工面にショットピーニングを施した。座標の取り方は、図1のように溶接施工方向  $\sigma_{11}$ 、垂直方向  $\sigma_{22}$ 、それらが作る平面に対して垂直方向  $\sigma_{33}$  を定めた。

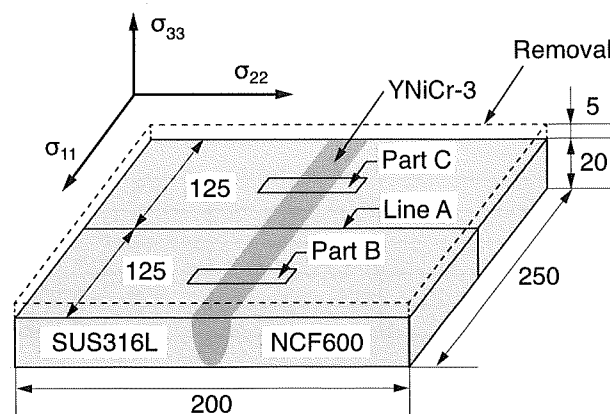


Fig. 1. Specimen of SUS316L-NCF600 welding joint.

Table 1. Conditions for welding.

Welding method	TIG
Current	100~ 200 A
Voltage	9~ 11 V
Welding speed	1.0~ 1.5 mm/s
Wire speed	0.77~ 1.39 g/s
Numbers of welding passes	22

同一材溶接継ぎ手では、図1の試験体と同じ寸法で SUS316Lの突き合わせ溶接体とし、溶接金属には SUS-316Lを使用したものを解析対象試験体とした。溶接条件、座標の取り方も異種材溶接継ぎ手と同一である。

次に、作成した解析モデルを図2に示す。モデルは  $\sigma_{11}$  方向に 20 分割、 $\sigma_{22}$  方向に 36 分割、 $\sigma_{33}$  方向に 5 分割、熱影響部は図2(a)を参考にさらに細分し、3Dモデルを構築した。全節点数は 10,836 点、全要素数は 15,286 個となった(図2(b))。溶接パスは、1パス目から4パス目までは1パス、5パス目からは22パス目までは2パスとし、5パス目は NCF600 側、6パス目は SUS316L 側、22パス目は SUS316L とした。

そして、各種パラメータの入力を行った。計算力学研究センターの Quick Welder の解析によって得られるのは、温度分布・溶接変形・残留応力で、それに必要なパラメータに以下のものを参考値を用いて入力した。

- 熱物性: 密度, 比熱, 熱伝導率
- 機械的物性: ヤング率, ポアソン比, 降伏応力, 硬化係数, 線膨張率

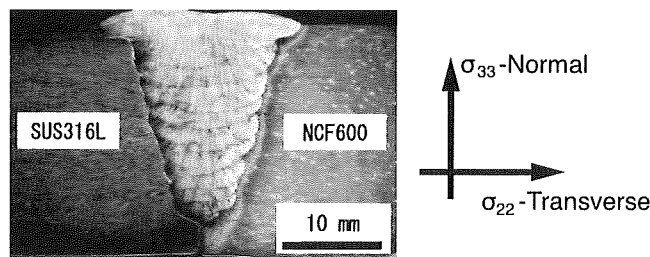
Table 2. Conditions for stress measurement using hard synchrotron X-rays.

Beamline	BL22XU in SPring-8		
Wavelength	70.26 keV		
Slit dimensions	1.0×0.2 mm <sup>2</sup>		
Method	Constant penetration depth method		
X-ray penetration depth	30 μm		
Diffraction	γ-Fe, 420		
Material	SUS316L	YNiCr-8	NCF600
Diffraction angle $2\theta_0$ , deg	12.566	12.636	12.711
Linear absorption factor $\mu$ , /cm	6.612	8.826	8.826
$E_{420}$ , GPa	183.3	215.3	215.3
$\nu_{420}$	0.3060	0.3045	0.3045
Stress constant $K$ , MPa/deg	-11124	-13008	-12930

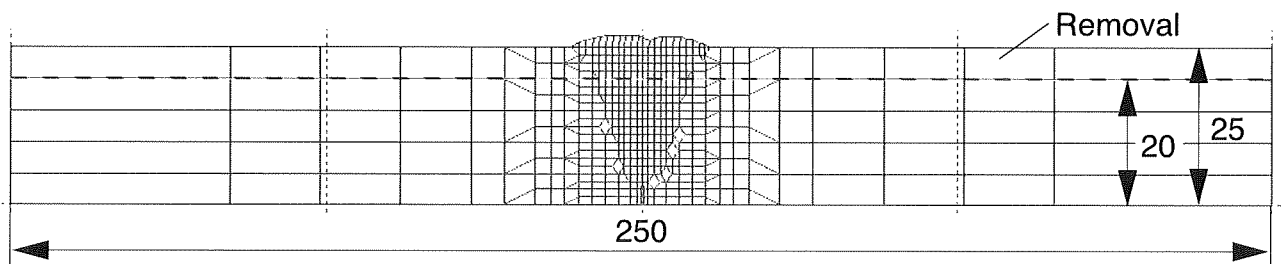
- 放冷条件: 放射率, 対流熱伝導率
- 変形拘束条件

### 3. 侵入深さ一定法による残留応力測定

図1の試験体を  $\sigma_{11}$  方向に対して半分切断し、一方をショットピーニング処理のままの試験体 (Part B)、他方をショットピーニング処理後、熱サイクルを与えた試験体 (Part C) とした。熱サイクルは、593 K, 12 MPa の高温高圧水中に2時間保持し、昇降温度速度 55 K/h



(a) Weld heat-affected zone



(b) Cross-section of welding SUS316L-NCF joint

Fig. 2. Analysis model of welded specimen.

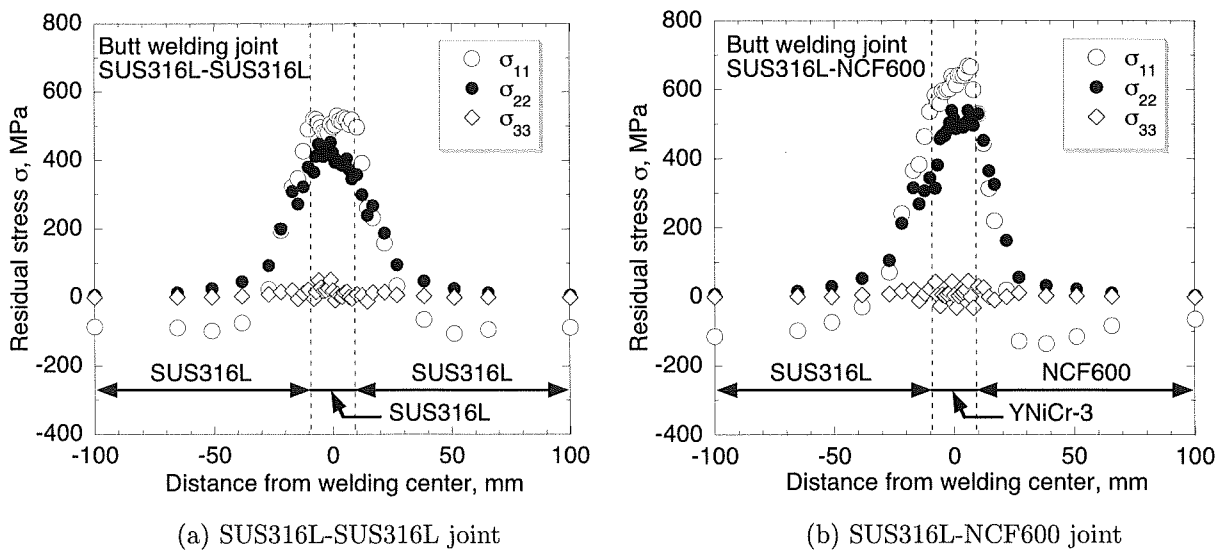


Fig. 3. Simulation results of residual stress distribution on surface of butt welding joint.

である。これを1サイクル与えた。

残留応力測定は、大型放射光施設 SPring-8 の日本原子力研究開発機構専用ビームライン BL22XU にて実施した。高エネルギー放射光による残留応力測定の X 線応力測定条件を表 2 に示す。ピーニング面の直下では、大きな応力勾配があり、 $\sin^2\psi$  線図に非線形が生じる。正確な応力測定を行うには、X 線侵入深さが  $\psi$  角に依存しない方法を必要とする。そのため、残留応力測定法には、侵入深さ一定法を用いた<sup>[3,4]</sup>。SUS316L の単結晶のスティフネス  $c_{ij}$  ( $c_{11} = 206$ ,  $c_{12} = 133$ ,  $c_{44} = 119$  GPa) の値<sup>[5]</sup>、YNiCr-3 および NCF600 の単結晶のスティフネスとして Ni の単結晶のスティフネス  $c_{ij}$  ( $c_{11} = 250.8$ ,  $c_{12} = 150.0$ ,  $c_{44} = 123.5$  GPa) の値<sup>[6]</sup> を用いて Kröner モデルにより各応力定数  $K$  を求めて、応力計算に使用した。

## 4. 解析結果および考察

### 4.1 同一材溶接継ぎ手

まず、同一材の各座標に対する残留応力分布を図 3 (a) に示す。これは、図 1 の試験体の Line A における応力分布を示している。

$\sigma_{33}$  は、溶接中心からの距離に関係なくほぼ 0 MPa となっている。これは解析対象位置が表面であり、 $\sigma_{33}$  方向の応力が存在しないことと対応している。そして、 $\sigma_{11}$  および  $\sigma_{22}$  は、どちらも似た分布形態を示し、端部で  $\sigma_{11} = -100$  MPa,  $\sigma_{22} = 0$  MPa, 最大引張り残留応力となり、 $\sigma_{11} = 500$  MPa,  $\sigma_{22} = 450$  MPa である。溶接部を離れると  $\sigma_{11}$  は約 -85 MPa,  $\sigma_{22}$  はほぼ 0 MPa

の一定値を示した。

母材の SUS316L を突き合わせ溶接したとき、溶接金属 SUS316L は溶融し、それが凝固し冷却して収縮しようとする。しかし、母材は温度が低く、付着した溶接金属が収縮するのを妨げる。その結果、母材は圧縮残留応力を生じ、溶接金属は引張り残留応力となる。溶接残留応力の発生原因には、(i) 溶接部近傍の局部収縮および (ii) 変態による体積変化などが考えられる<sup>[7]</sup>。同一材においては、拘束条件による多少のばらつきを考慮しても、線膨張係数および体積変化は同じため、残留応力分布は、左右対称の分布となる。図 3 (a) にはパスの影響が見られるが、ほぼ左右対称である。

### 4.2 異種材溶接継ぎ手

次に、異種材溶接継ぎ手の各座標に対する残留応力分布を図 3 (b) に示す。これも図 1 の試験体の Line A における残留応力分布を示している。

$\sigma_{33}$  は、同一材同様、溶接中心からの距離に関係なく  $\sigma_{33} = 0$  が確認できる。同一材と異なり、母材が SUS-316L と NCF600 のため、材料の物性値がそれぞれ異なる。ゆえに、 $\sigma_{11}$ ,  $\sigma_{22}$  の残留応力は同一材と異なり左右非対称となる。

溶接部の非対称については、溶接パスによる影響と異種材による影響とが考えられる。今回は SUS316L 側を最終パスにしている。同一材も同様にパスを置いていることを考慮すると、非対称の残留応力分布は、異種材による影響と考えるとよい。特に、 $\sigma_{11}$  は溶接部の NCF-600 側で最大引張り残留応力  $\sigma_{11} = 680$  MPa を生じて

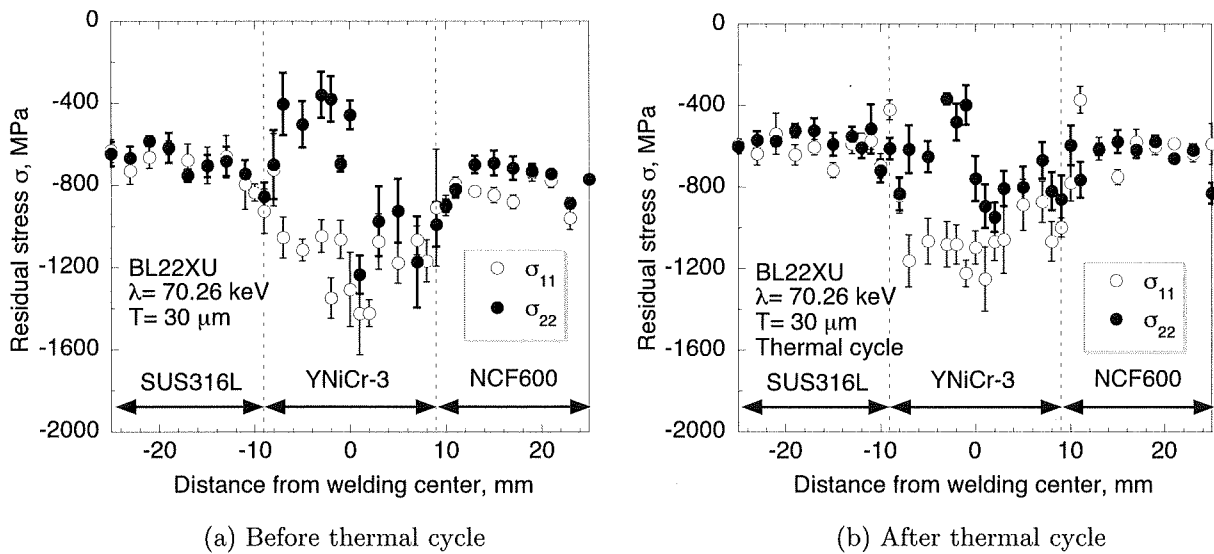


Fig. 4. Peened residual stress of welding specimen.

いる。また、 $\sigma_{22}$ も溶接部で $\sigma_{22} = 500$  MPaを示し、同一材よりも大きな引張り残留応力が発生する特徴がある。

### 4.3 ピーニング残留応力分布

高エネルギー放射光 X 線による応力測定結果を図 4 に示す。異種材溶接継ぎ手試験体にて図 4 (a) がショットピーニング処理のままの試験体 (Part B)、(b) がショットピーニング処理後、熱サイクルを与えた試験体 (Part C) の結果である。

ショットピーニングは鋼球などを高速で材料表面に投射して塑性変形を与え、表面層に圧縮残留応力層を形成し、強度を向上させる方法<sup>[8]</sup>である。図 4 (a) および (b) とともにすべての応力が圧縮残留応力となり、図 3 (b) の引張り残留応力はなくなった。

図 4 (a) および (b) の $\sigma_{11}$ は、溶接中央部の SUS316L 側で弱い圧縮残留応力、NCF600 側で最大圧縮残留応力となる。 $\sigma_{22}$ は、溶接部で圧縮残留応力の低下と増加の変化があり複雑な分布を呈している。また、溶接金属部以外では $\sigma_{11}$ 、 $\sigma_{22}$ は応力分布がほぼ同じであるが、溶接金属部では、特に SUS316L 側の $\sigma_{11}$ と $\sigma_{22}$ の残留応力値に大きな差がある。

ピーニング残留応力は、図 4 (a) のように一様でなく、溶接部と母材部で異なり、また、方向についても差がある。異種材の母材で同様な応力分布をしていることから、ピーニング前の残留応力分布がピーニング後の残留応力分布に影響していることが考えられる。溶接部の大きな引張り残留応力分布が、ピーニング後に大き

な圧縮残留応力に変化するメカニズムについては、今後、検討する必要がある。

図 4 (a) と (b) では、ピーニング処理のままの (a) よりも、熱サイクルを与えた (b) の方が、圧縮残留応力値が小さく、熱サイクルによる応力緩和の傾向が見られた。このことから、発電設備の起動停止による熱サイクルはピーニング残留応力に影響を与える。

## 5. 結 言

本研究では、SUS316L の同一材溶接継ぎ手と SUS316L-NCF600 の異種材溶接継ぎ手の残留応力シミュレーションの検討およびピーニング後の残留応力との比較を行った。得られた結果をまとめると以下の通りである。

- 1) 同一材溶接継ぎ手における残留応力分布は、同一材ゆえに左右対称の分布が予想され、解析結果もほぼ左右対称になった。溶接パスの影響は小さい。
- 2) 異種材溶接継ぎ手における残留応力分布は、非対称となり、異種材による影響と考えられる。また、溶接部では同一材よりも大きな引張り残留応力が得られ、溶接線方向 $\sigma_{11}$ の方が引張り残留応力が大きい。
- 3) 実測応力測定の結果、ショットピーニングによる圧縮残留応力の付与は一様ではなく、溶接部と母材部に差が生じる。特に、溶接部の SUS316L 側の $\sigma_{22}$ は圧縮残留応力が小さい。これは、ピーニング前の残留応力分布が影響している。また、熱サイクルを与えると、応力の緩和が見られた。

## 6. 謝 辞

本研究を遂行するにあたり計算力学研究センターの清島祥一氏より、溶接プログラム Quick Welder について多くの助言をいただきました。心よりお礼申し上げます。応力測定は、日本原子力研究開発機構の共用利用(課題番号 No. 2011A-E15)の援助によるものである。ここに記して、感謝の意を表します。

## 参考文献

- [1] 栗村隆之, “社団法人日本材料学会 X線材料強度部門委員会溶接残留応力測定小委員会最終報告書”, 2010.
- [2] 栗村隆之, 秋庭義明, “回折法による材料評価の新しい展開”, 材料, Vol. 58, No. 10, 2009, pp. 837-878.
- [3] 秋庭義明, 田中啓介, 鈴木賢治, 柳瀬悦也, 西尾光司, 楠見之博, 尾角英毅, 新井和夫, “放射光によるショットピーニング材の残留応力分布評価”, 材料, Vol. 52, No. 7, 2003, pp. 763-769.
- [4] 田中啓介, 鈴木賢治, 秋庭義明, 菖蒲敬久, “放射光による応力とひずみの評価”, 養賢堂, 2009, pp. 107-111.
- [5] H. M. Ledbetter, “Predicted single-crystal elastic constants of stainless-steel 316,” British Journal of NDT, Vol. 23, 1981, pp. 837-878.
- [6] G. A. Alers, J. R. Neighbours and H. Sato, “J. Phys. Chem. Solids,” Vol. 13, 1960, pp. 40-55.
- [7] 石井勇五郎, 田村博, “溶接工学概論改訂版”, 共立出版株式会社, 1978, pp. 105-110.
- [8] 田中啓介, 鈴木賢治, 秋庭義明, “残留応力の X線評価 —基礎と応用—”, 養賢堂, 2006, pp. 205-206.

(平成 23 年 9 月 30 日)