

# ピーニング処理された異種材溶接部の残留応力の熱サイクル安定性

Thermal cycle stability of peened residual stresses  
on dissimilar weld-joint

鈴木 賢治<sup>1)</sup> 山岸 葵<sup>1)</sup> 北嶋 進也<sup>1)</sup> 木村 満彦<sup>1)</sup>

Kenji SUZUKI Aoi YAMAGISHI Shinya KITAJIMA Mitsuhiro KIMURA

西川 聰<sup>2)</sup> 菖蒲 敬久<sup>3)</sup> 城 鮎美<sup>3)</sup>

Satoru NISHIKAWA Takahisa SHOBU Ayumi SHIRO

<sup>1)</sup>新潟大学 <sup>2)</sup>発電技術検査協会 <sup>3)</sup>原子力機構

オーステナイト系ステンレス鋼とニッケル基合金の異種材溶接部に超音波ショットピーニングを施し、圧縮残留応力を導入した。また、同試験体を 593K, 12.5 MPa の高温水中に 2hr 加熱して冷却した熱サイクル試験体も用意した。これらの試験体の溶接部の残留応力を侵入深さ一定法にて測定し、熱サイクルの有無によるピーニング残留応力の変化を測定した。ピーニング残留応力は、母材の残留応力は一様に約-600MPa の圧縮であるが、溶接部では溶接線方向に-1000MPa 以上の大きな圧縮、溶接方向垂直には SUS 側で圧縮が小さく、Ni 側でやや大きな圧縮に波打つ分布を示した。溶接部で熱サイクルを与えると、溶接部の大きな残留応力が低下する傾向が認められた。

**キーワード**：異種材溶接、ピーニング、残留応力、熱サイクル、ステンレス鋼、ニッケル基合金

## 1. 目的

溶接部の引張り残留応力を改善するためにショットピーニングが施される。高温高圧下で、ピーニング面下の圧縮残留応力が安定に維持されるかは発電設備の健全性に直接関わる重要な事項である。本課題では、異材溶接部にショットピーニングを施した試験片に 593K と室温の熱サイクルを与えた試験片の残留応力の安定性と回折面依存性を明らかにする。

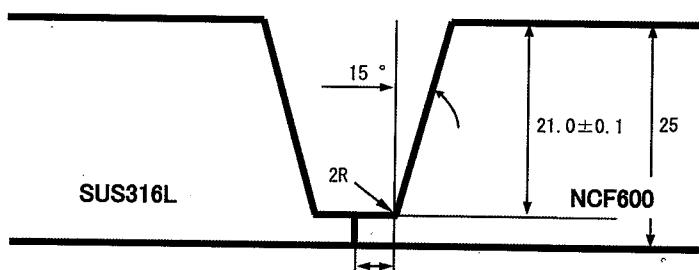


図 1 突き合わせ継ぎ手の断面詳細

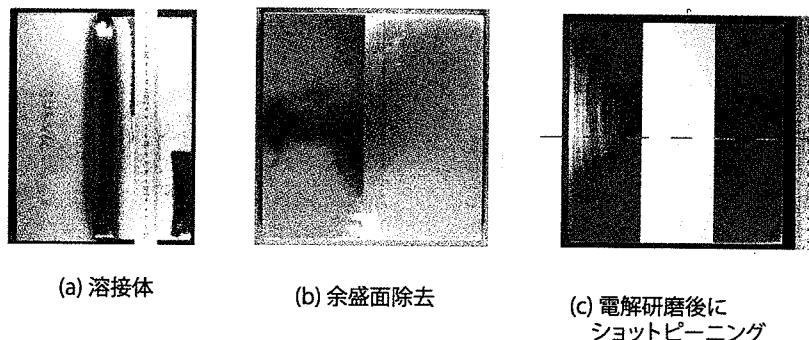


図2 溶接試験体

原子力発電設備のSCC対策として、溶接部の引張残留応力を改善する必要がある。その対策として、ショットピーニング法が開発され、実用化を検討する段階にある。しかし、本応力改善法で最も懸念されることは、原子炉の運転・停止の熱サイクルに伴い、付与した圧縮残留応力が安定に維持できるかについて綿密に調査する必要がある。オーステナイト系ステンレス(SUS316L)とニッケル基合金(NCF600)との接合部には熱膨張差に起因する熱応力が発生する。異材溶接部に施したピーニング残留応力が、熱サイクルによりどのような挙動をするかについての研究はない。ゆえに、本課題は原子力発電設備の経年化対策の安全の見地から研究の意義が大きい。

## 2. 方法

### 2.1 溶接試験体

オーステナイト系ステンレスSUS316Lおよびニッケル基合金NCF600(インコネル600相当)の突き合わせ溶接体を試験体とした。各母材は板厚25mm、溶接部長さ250mm、幅100mmの寸法で、試験片の突き合わせ断面形状を図1に示す。それらをTIG溶接にて溶接した。溶接金属はYNiCr-3(82合金相当)であり、溶接条件は、電流100~200A、電圧11V、溶接速度1~1.5mm/s、ワイヤ送給量0.77~1.39g/sとした。溶接パスは22である。

溶接後、余盛研削面の機械加工層を電解研磨により除去し、溶接部を中心に幅65mmの領域にショットピーニングを施した。その後で、試験片を半分に切断し、一方をピーニング処理のままの試験体、他方を熱サイクル処理とした(図2)。

ピーニング条件は、カットワイヤ寸法Φ0.3mmx0.3mm、ワイヤー材質SUS304(Hv500)、入射角90°、ショット時間160s、ノズル径Φ7mm、ガス圧5kg/cm<sup>2</sup>である。これらを半分に切断したので、試験片の最終形状は、板厚20mmの長さ193mm、幅100mmとなる。それぞれwelding#1および#2となる。表面の溶接部幅は約18mmである。

熱サイクルは、593K、12MPaの高温高圧水中に2h保持し、昇降温度速度55K/hとした。これを1サイクル与え、ピーニングによる残留応力の変化を測定した。ショットピーニングしたままの試験片をwelding#1(as peened)、またピーニング後熱サイクルを与えた試験片をwelding#2(after thermal cycle)とした。

### 2.2 X線応力測定

X線による残留応力は測定は、BL22XUにて実施した。測定方法はピーニング面下に急激な応力勾配があるので、高エネルギーX線による侵入深さ一定法を用いた(図3)。

X線の条件は、波長エネルギー70.26keV、ダブルスリットのサイズ1.0x0.2mm<sup>2</sup>、X線侵入深さ30μmとした。測定に使用した回折はγ-Feの420回折とした。応力定数はKrönerモデルにより計算した。SUS316については単結晶の文献値<sup>1)</sup>から応力定数を求め、NCF600およびYNiCr-8についてはNi単結晶の値<sup>2)</sup>を用いた。

応力の測定位置は、SUS316L側からインコネル600側(x=-25~25)ステップ2mmとした。測定方向はx方向(T)およびy方向(L)の2方向とした。

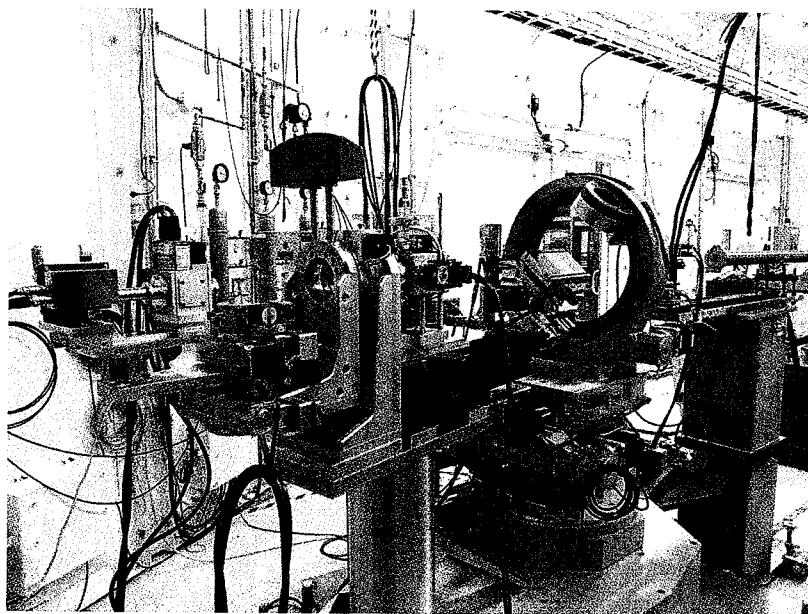


図3 侵入深さ一定法による溶接体の応力測定

### 3. 研究成果

測定に適した回折面について調べるために、各回折面を測定した。超音波ピーニングされた面においては、回折線幅が広がり回折X線強度の低下が激しいこと、また強加工により配向があった。そのほか、実験中に蓄積リングでビーム中断があり、測定時間短縮を余儀なくされた。結果として、測定時間を要するしたことから420回折でNi母材からSUS316L母材までの表面の残留応力分布を測定することだけで終わり、回折面依存性については本研究では割愛した。

図4は溶接後にショットピーニングしたままの残留応力分布である。母材については、SUS316LとNCF600でほぼ同様の圧縮となり、応力方向に対しても差異がない。しかし、溶接部では、溶接線方向に母材よりも大きな圧縮が形成され、溶接部の中心で約-1400MPaとなる。また、溶接線横断方向では、SUS316Lに近い側で圧縮残の低下、NCF600に近い側では母材よりも大きな圧縮となり、溶接線垂直方向(T)の残留応力は変動する。これは、異種材溶接部の残留応力特性として

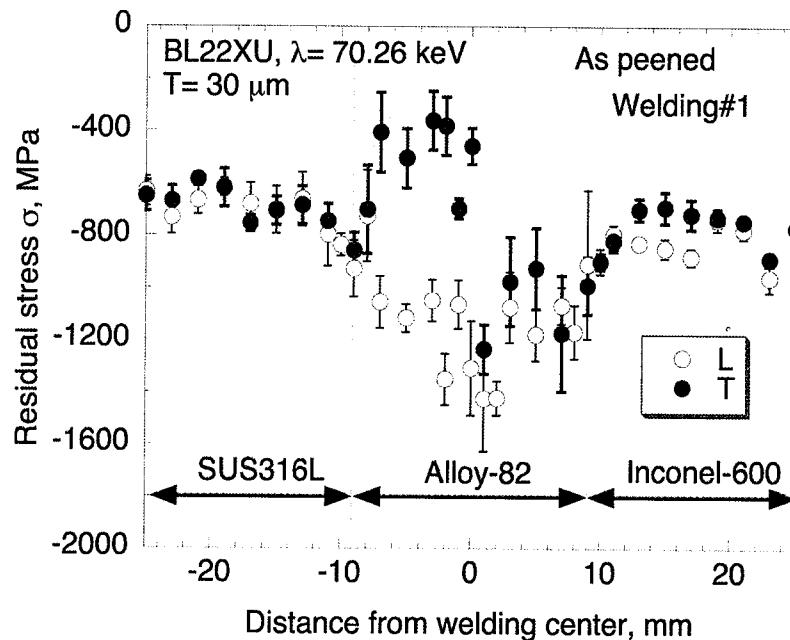


図4 ピーニング後の溶接体の残留応力分布

重要な結果であり、そのメカニズムとして興味深い。

図5はショットピーニング後に熱サイクルを負荷した試験片表面の残留応力分布である。傾向としては、図4に示したピーニング後の残留応力と同様であるが、溶接部の圧縮残留応力が低下していることがわかった。

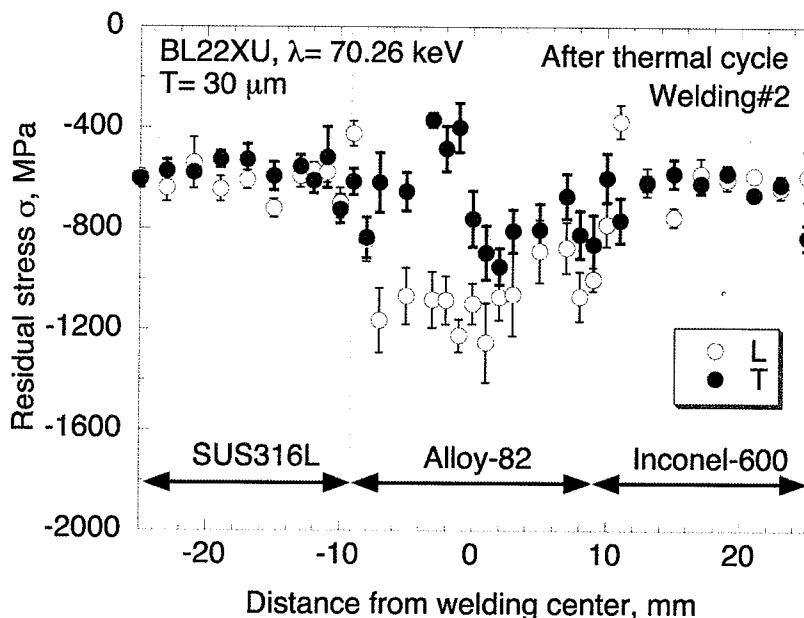


図5 熱サイクル後の溶接体の残留応力分布

#### 4. 結論・考察

異種材溶接継ぎ手においては、図4と5の比較から高温高圧水中の原子炉圧力容器内の熱サイクルで溶接部の圧縮残留応力がやや低下する傾向がある。特に、溶接部の溶接線方向の残留応力については-1400MPaが-1200MPaへ、NCF600側で-1200MPaが-900MPaへと圧縮残留応力が減少している。異種材では熱サイクルにより塑性変形が生じて、それによりピーニング残留応力が変化するのが原因と考えられる。また、溶接金属のSUS316L側で溶接線垂直方向の圧縮が小さい傾向が見られるのは、溶接による引張り残留応力が影響している可能性もある。

一様にピーニングしたにもかかわらず、溶接部に母材よりも大きな圧縮残留応力が導入されることが注目される。溶接部の残留応力を直接実測するには、溶接部は粗大な集合組織である。粗大粒、集合組織、溶接材そのものはX線応力測定については、まだ研究段階である。このメカニズムを検討するために、ピーニングする前の溶接材の残留応力分布を求めた。3次元有限要素解析を試みて、シミュレーションにより計算した。

溶接体と同様に22パスの溶接シミュレーションを経て、余盛り除去、切断したときの残留応力を解析した。その結果を図6に示す。図中の $\sigma_{11}$ 方向が溶接線方向(L),  $\sigma_{22}$ が溶接線垂直方向(T)に対応する。解析結果の残留応力分布は、ピーニング後の図4と比較すると対照的である。溶接部に大きな引張り残留応力が発生し、溶接線方向がより大きな引張り応力を示す。また、SUS316L側でやや引張り低下する傾向がある。溶接部の引張り残留応力が、ピーニングではより大きな圧縮へと変化するのは、ヒステリシスの影響と思われる。ピーニング処理前の残留応力分布が、ピーニング残留応力分布に影響することは、製造方法としても学問としても興味深い。

今後は、溶接部の残留応力測定について、またピーニング残留応力の初期残留応力の依存性について検討をすることが期待される。異種材溶接継ぎ手の残留応力、また初期残留応力分布がピーニング残留応力に与える影響など、重要な研究課題がある。

#### 5. 引用(参照)文献等

- 1) H. M. Ledbetter, "Predicted single-crystal elastic constants of stainless-steel 316," British Journal of NDT, Vol. 23, 1981, pp. 837-878.
- 2) G. A. Alers, J. R. Neighbours and H. Sato, "J. Phys. Chem. Solids," Vol. 13, 1960, pp. 40-55.

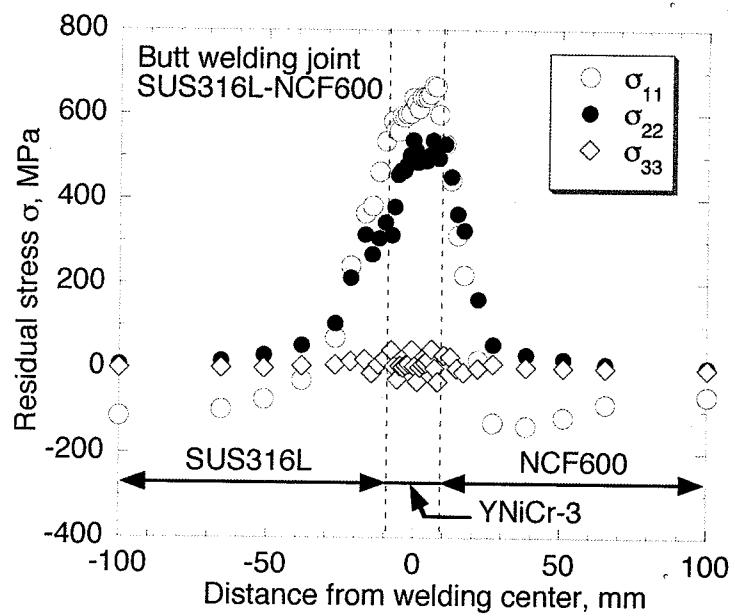


図 6 溶接残留応力の有限要素解析