

原子力発電機器における応力改善工法の 長期安全性評価のための基盤技術開発

(受託者) 国立研究開発法人日本原子力研究開発機構

(研究代表者) 秋田貢一 物質科学研究センター中性子材料解析研究ディビジョン

(再委託先) 公立大学法人大阪府立大学、一般財団法人発電設備技術検査協会

(研究期間) 平成 26 年度～28 年度

1. 研究の背景とねらい

軽水炉の安全性に関わる課題として応力腐食割れ（SCC）がある。SCC は、ピーニングなどの応力改善工法により、部材表層に圧縮残留応力を付与することで防止できる。しかし、その圧縮残留応力はプラントの稼働中に緩和する可能性があり、緩和が大きい場合は潜在的に SCC 発生のリスクを抱えることになる。したがって、応力改善工法により付与した圧縮残留応力の長期間稼働後の持続性を評価する技術が確立できればこのリスクが低減でき、原子力安全に貢献できる。

本研究では、長期間稼働後の圧縮残留応力の持続性を評価するための基盤技術として、理想化陽解法をベースとした有限要素法解析（Finite Element Method: FEM）手法を開発する。具体的には、原子力発電プラント溶接構造物の応力改善工法適用部における溶接施工からピーニング及び実環境（ここでは熱サイクルおよび圧縮荷重）までの一連の工程を通した残留応力シミュレーション手法を開発する。また、解析手法の検証のため、原子力プラントの冷却配管を模擬した実機部分模擬溶接試験体を製作し、それらの残留応力を X 線回折法および中性子回折法を用いて実測する。ここでは、その進捗状況を報告する。

2. これまでの研究成果

(1) 実機部分模擬溶接試験体の製作

原子力発電プラント溶接部のピーニング適用箇所を模擬して、溶接部の材料の組合せが、①母材、溶接金属ともにオーステナイト系ステンレス鋼、②母材がフェライト鋼とオーステナイト系ステンレス鋼、溶接金属がオーステナイト系ステンレス鋼またはニッケル基合金の実機模擬溶接継手試験体を製作し（表 1）、FEM 解析の検証に用いた。図 1 に試験体の製作の流れを示す。また、図 2 (a) および (b) に、製作した同材溶接試験体と異材溶接試験体をそれぞれ示す。整形加工後の一部の試験体に対し、外表面または内表面の溶接部近傍にショットピーニング（SP）を施した。

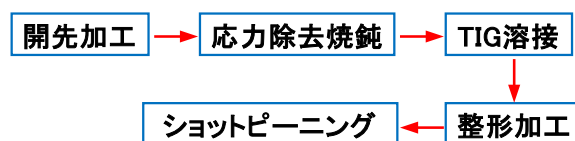


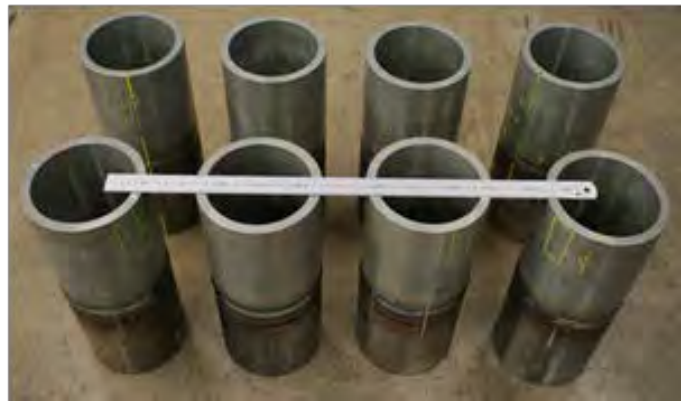
図1 試験体製作の流れ

表 1 本研究で製作した溶接試験体

溶接試験体	材料	寸法	数量	製作時期
同材	母材：SUS316LTP 溶接金属：316L	肉厚 11.25 mm, 外径 161.5 mm, 長さ 195 mm	7 体	平成 26 年度
異材	母材：SUS316LTP, STPT370 溶接金属：316L	肉厚 11.25 mm, 外径 161.5 mm, 長さ 400 mm	4 体	平成 27 年度
	母材：SUS316LTP, STPT370 溶接金属：alloy82		4 体	平成 27 年度



(a) 同材溶接試験体

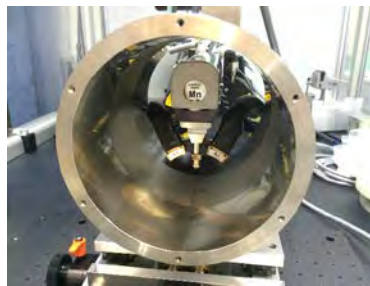


(b) 異材溶接試験体

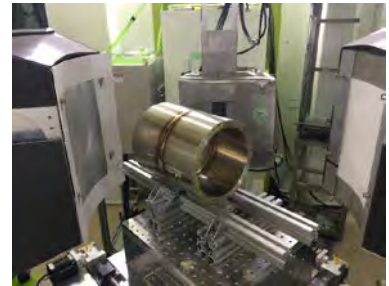
図2 冷却系配管を模擬した実機部分模擬用溶接試験体（TIG 溶接後）の外観



(a) 外表面の測定



(b) 内表面の測定



(c) 板厚内部の測定

図3 X線回折(a), (b)および中性子回折(c)による残留応力測定の様子

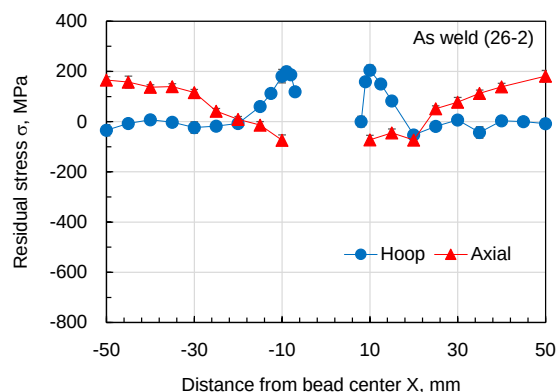
(2) 残留応力測定

製作した同材および異材溶接試験体の残留応力を、X線回折および中性子回折によって測定した。X線回折では試料表面から $10\mu\text{m}$ 程度深さまでの極表層内の平均応力、また、中性子回折では試料の断面内の残留応力分布が非破壊・非接触で測定できる。測定の状況を図3(a)～(c)に示す。なお、中性子回折実験は、大強度陽子加速器施設物質生命科学研究施設（J-PARC MLF）に設置されている工学中性子回折装置（TAKUMI）を用いて実施した。結果の例として、同材試験体における残留応力測定結果を図4(a)および(b)に示す。溶接残留応力（図4(a)）は、ほぼゼロあるいは引張残留応力であったが、SP 施工により約 600MPa の圧縮残留応力が導入された（図4(b)のソリッドマーク）。同材溶接試験体に 350°C 、1 時間保持の熱サイクルを付与し、その後、室温下で残留応力を測定した（図4(b)のオープンマーク）。その結果、圧縮残留応力が $150\sim 200\text{MPa}$ 程度低下した。以上のように、溶接→SP 施工→熱サイクルの一連の工程における残留応力の変化過程を実験的に明らかにした。

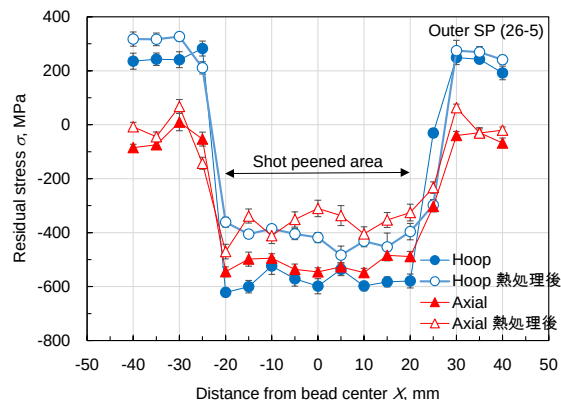
(3) FEM 解析

①ピーニングの力学モデル構築

SP 施工によって導入される残留応力の挙動について数値解析することは有意である。しかし、多量に衝突が繰り返される現象を解析した事例は見当たらない。本研究ではまず、汎用 FEM 解析ソフト ABAQUS を用いて1発のショットを用いて SP を行った際に発生する残留応力分布を解析した（図5(a)）。実際の SP では大量のショットが衝突するため ABAQUS を用いた SP の解析は、

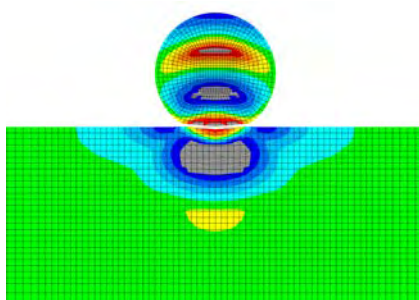


(a) 溶接後

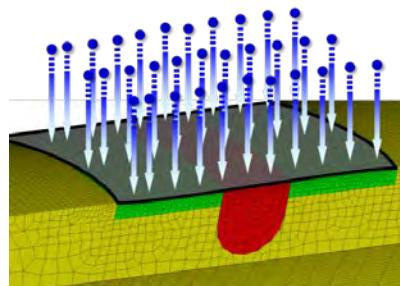


(b) SP 施工後および熱サイクル付与後

図 4 同材溶接試験体における外表面の残留応力測定結果



(a) ショット衝突時の残留応力分布 (ABAQUS)



(b) 多量のショットをランダムに衝突

図 5 ピーニング残留応力挙動のシミュレーション法検討

計算時間の観点から非現実的である。そこで、SP 時の応力緩和挙動の予測システムを構築するために、動的問題における理想化陽解法の定式化を行い、次いで、衝突時の荷重分布履歴を荷重履歴関数と荷重分布関数の積でモデル化した。そして、図 5 (b) のように、ショットを多量に衝突させることで SP による残留応力の大規模解析に成功した。本研究で開発した SP の力学モデルを図 6 に示す。

②実機部分模擬溶接試験体の残留応力解析

開発したピーニングの力学モデルを組み込んだ理想化陽解法 FEM 解析手法を用いて、同材および異材の実機部分模擬溶接試験体の溶接、SP 施工ならびに熱サイクル付与の各工程における残留応力をシミュレーションした。ここでは例として、異材溶接継手における結果を図 7 (a)–(c) に示す。図 7 (a) は解析モデルであり、節点数 4,785,560、要素数 450,720 である。移動熱源非線形熱弾塑性三次元解析により配管のマルチパス溶接を再現し、溶接残留応力 (図 7 (b))、溶接部の一部に SP 施工した残留応力 (図 7 (c)) を解析した。詳細は省略するが、解析結果は実験結果と傾向が一致しており、提案した解析手法によって、一連の工程における残留応力シミュレーションが可能であることが確認できた。

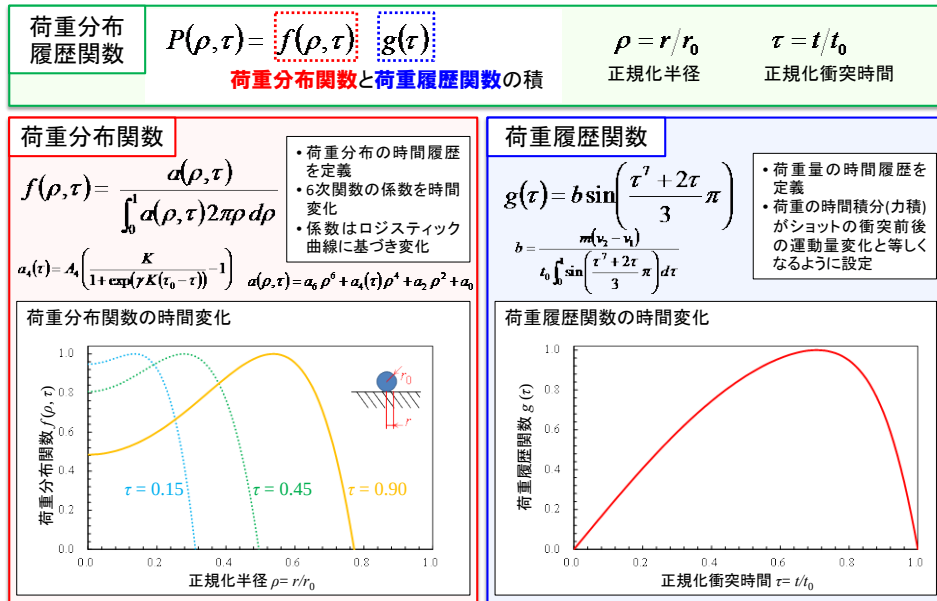


図6 ショットピーニングの力学モデル

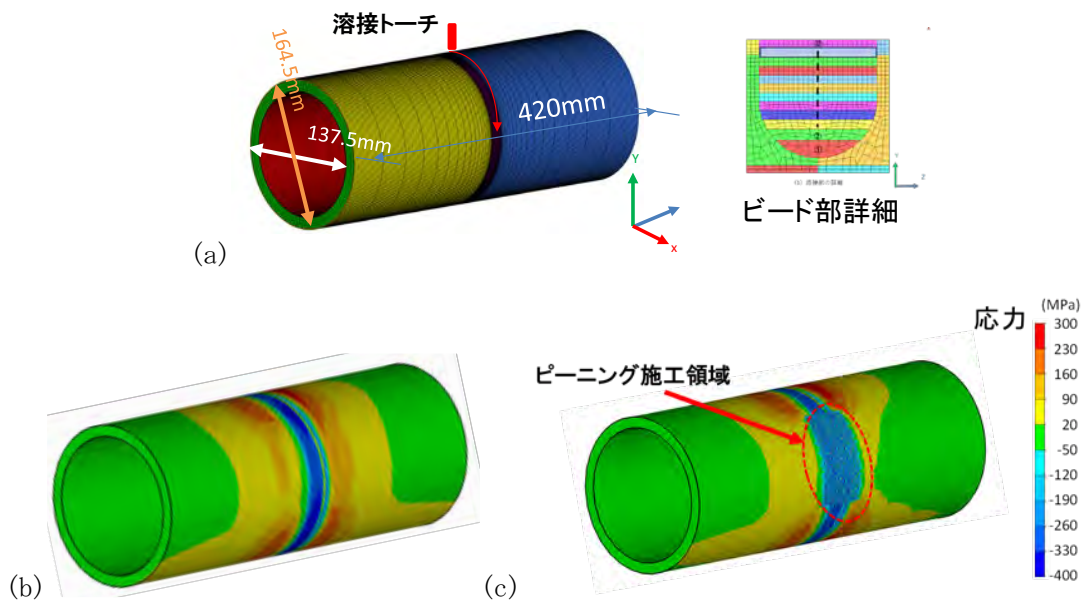


図7 残留応力シミュレーション結果 (a)解析モデル、溶接残留応力(b)、SP 残留応力(c)

3. 今後の展望

これまでに実験および解析を行った、溶接、ピーニング、熱サイクルの各工程の残留応力は、実験と解析の傾向が良く一致しており、残留応力値の実験と解析の差は、目標値の $\pm 150\text{MPa}$ にほぼ収まっている。平成28年度中には、試験体に圧縮荷重を付与した場合の残留応力変化についての解析手法の妥当性検証などを実施し、本研究の最終目標を達成する見込みである。

謝辞：中性子回折実験は J-PARC MLF（課題番号 2015P0401）で行った。同実験でお世話になった原子力機構 J-PARC センターの相澤一也博士、ハルヨ・ステファヌス博士および川崎卓郎博士に謝意を表す。