

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 原子力科学研究部門 物質科学研究センター

(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

原子力発電プラント構造物の溶接部における応力腐食割れ（Stress Corrosion Cracking: 以下 SCC）を予防するため、ショットピーニング（Shot peening: SP）等の応力改善工法により、部材表面に圧縮残留応力を付与する場合がある。しかし、そうして付与した圧縮残留応力は、プラントの長期間運転による熱時効や、熱応力、外部応力の負荷によって緩和する可能性があり、その場合、圧縮残留応力による SCC 抑制効果が低下し、SCC の潜在的リスクを抱えることになる。もし、付与した圧縮残留応力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、原子力安全に有効である。

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¹⁾をベースとした有限要素法（Finite Element Method: FEM）解析手法を開発する。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 SP 施工及び実環境（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が可能な FEM 解析手法を開発する。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、それらの表面及び内部の残留応力をそれぞれ X 線回折法および中性子回折法を用いて実測する。開発する FEM 解析手法の残留応力解析精度は、実用上十分なおよそ±150 MPa 以内を目標とする。

2. これまでの研究成果

(1) ショットピーニングの応力解析システムの構築

SP は、数万、数十万といった多数のショット（直径 1mm 程度の金属やガラスの粒）を金属材料表面に高速で衝突させて、その材料表面層に圧縮残留応力を導入する表面処理技術である。SP による圧縮残留応力の解析システム開発にあたり、まず、1 個のショットが金属材料に衝突する間

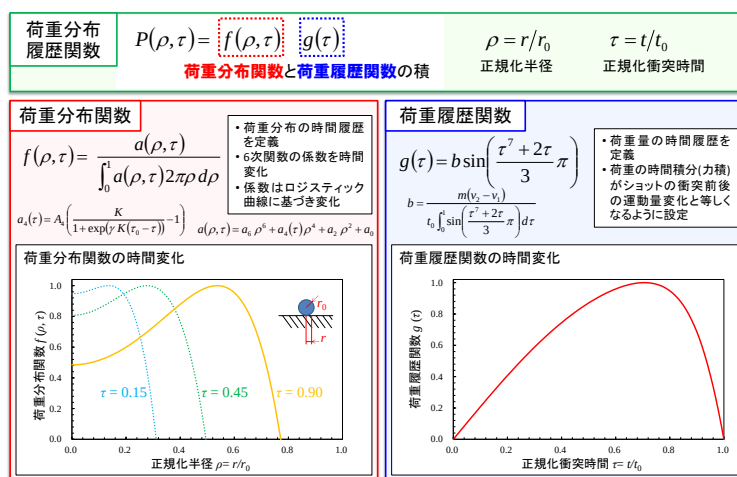


図1 提案したショット衝突の等価荷重モデル

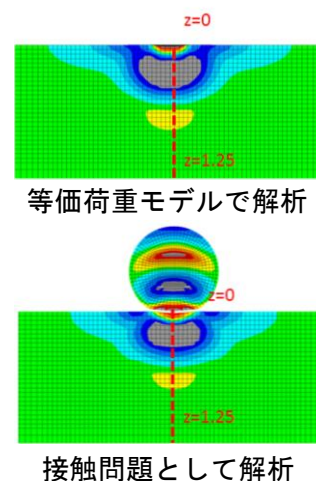


図2 応力解析結果

題において、図 1 に示す等価荷重モデルを提案し、理想化陽解法 FEM 解析手法に組み込んだ。そして、その解析システムによって求めた応力分布が、ショットと対象物との衝突を接触問題として定式化した解析により得られた結果と良好に一致することを確認した(図 2)。

実際の SP では、多数のショットが対象物のある領域に対して投射される。そこで、ある領域内に、時間的、空間的にランダムに等価荷重を作用させて応力を解析できるよう解析システムを高度化した。図

3 は、平板の溶接部に 5 万ショットの SP を施工した場合の残留応力分布を解析した結果であり、圧縮残留応力(青色)の導入が再現できている。次いで本手法を配管溶接部に適用し、実機同様の 3 次元構造物においても、SP による圧縮残留応力を解析によって求められることを示した。図 4 にその一例を示す。ショットの衝突面積率(Ratio of collision: R_c)の増加とともに、表面層の引張残留応力(黄色および赤色)が圧縮残留応力(青色)に改善される様子が解析できている。

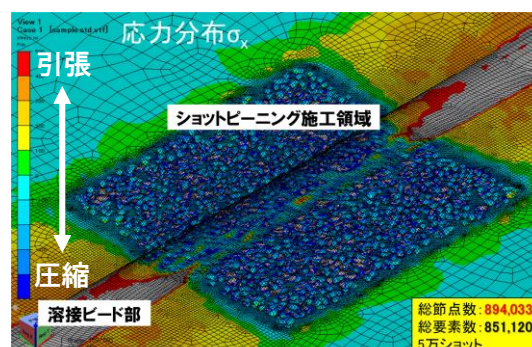


図 3 平板溶接部における SP 応力解析例
(溶接ビードに直交方向の応力)

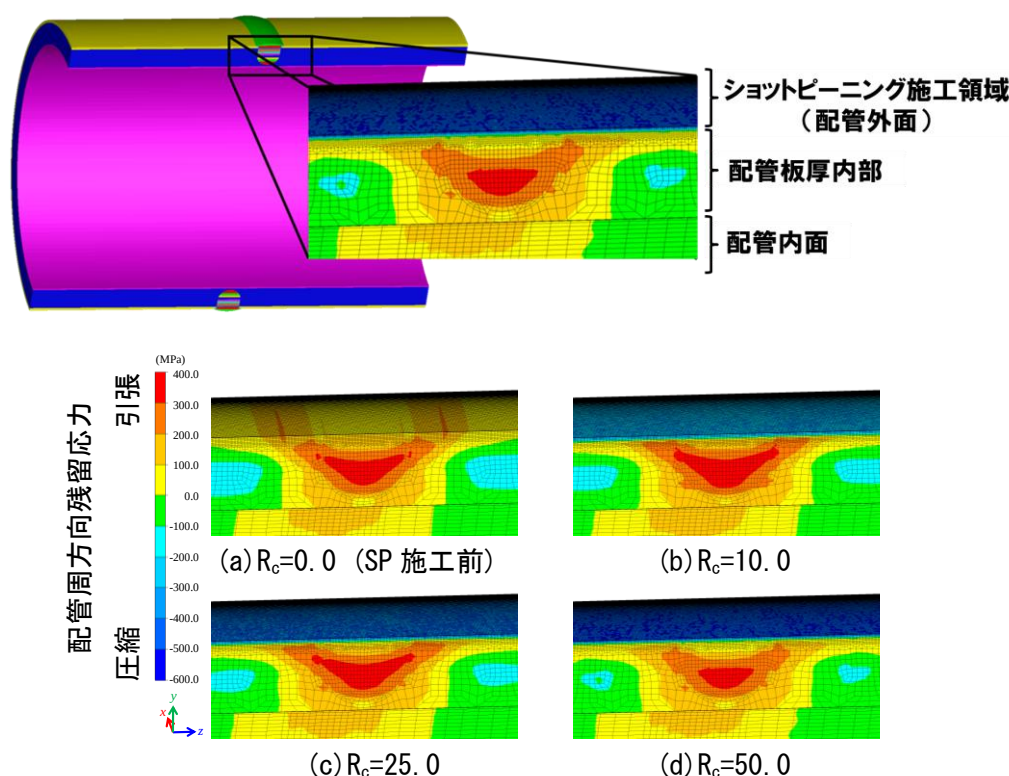


図 4 配管溶接部に SP 施工した際の残留応力変化過程の解析結果

(2) 実機模擬溶接試験体を用いた解析システムの検証

開発した解析システムの検証のため、原子炉冷却配管を模擬した同材および異材の円筒多層溶接継手を製作し、溶接状態および SP 施工状態における試験体の残留応力を実測した。図 5(a)および(b)はそれぞれ溶接状態および SP 施工状態における同材継手の解析結果と実験結果との比較

例である。両者は良く一致しており、解析の妥当性が確認された。

解析システムによる円筒多層溶接継手の SP 残留応力の解析に要した計算時間は、およそ 10 日間程度であり、開発した解析システムを用いることで、実用的な計算時間で SP 時の残留応力分布を評価可能であることを確認した。

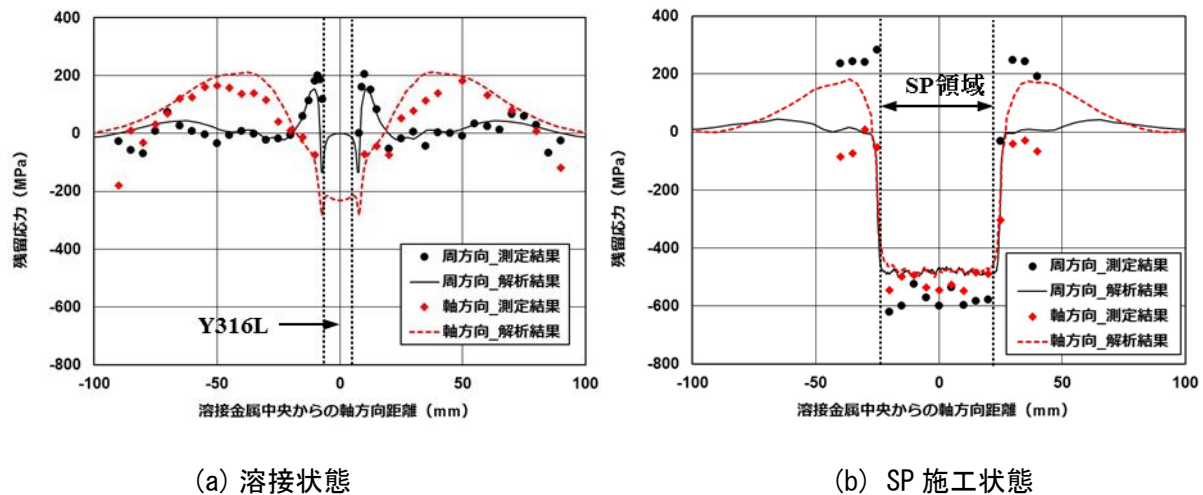


図 5 同材継手表面残留応力の解析と実験の比較

(3) 模擬環境下における SP 残留応力の持続性検討

原子炉配管の一部の溶接部には、製造状態において溶接残留応力と SP 残留応力が存在し、さらに運転時には、起動停止時の温度サイクルに起因する熱応力、そして、地震等による過大荷重が作用し、製造状態の残留応力に重畳する。これら一連の過程における SP 残留応力の持続性が、開発した解析システムで解析できるかについて検討した。まず、実機の運転温度を調査し、実機模擬試験体に 350℃の熱サイクルを与えた。そして、その前後の残留応力状態を実験と解析で比較し、両者が良好に一致することを確認した。

また、地震時を想定した大荷重をピーニング後の残留応力に繰り返し負荷した解析を実施した。その結果、圧縮の軸力を繰り返し負荷した場合に、ピーニング部の残留応力が緩和、もしくは引張りとなる可能性があることが分かった。大荷重負荷の解析結果を検証するため、SP を施した異材円筒多層溶接試験体に対して軸圧縮力を負荷し、試験体表層から内部にかけての負荷状態および負荷前後の弾性ひずみ分布を中性子回折により、その場測定した。中性子回折用の大荷重負荷試験機(荷重容量 1 MN $\approx$ 100 tonf) を新たに開発し(図 6)、大強度陽子加速器施設の物質・生命科学実

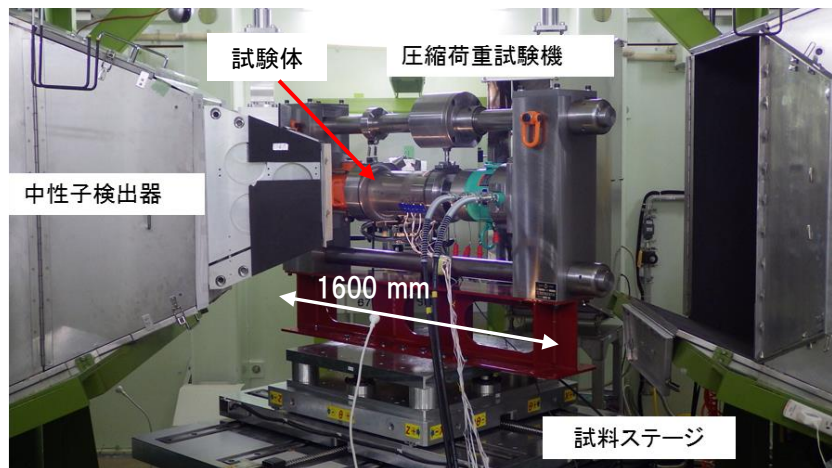
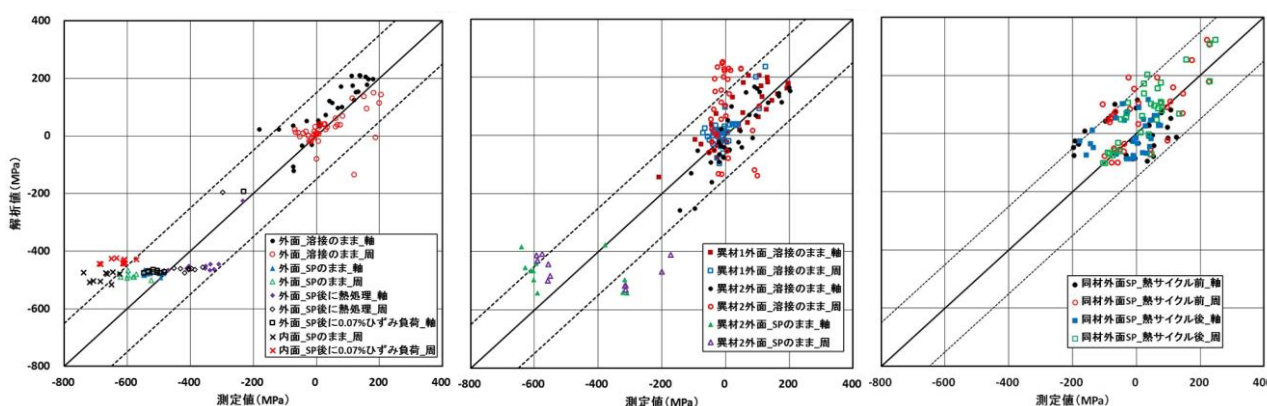


図 6 開発した中性子回折用配管圧縮負荷機構
(J-PARC MLF BL19 にセットした様子)

験施設（J-PARC MLF）に設置して中性子実験を行った。得られた実験結果は解析結果と良好な対応を示し、大荷重負荷の場合の解析システムの妥当性を確認した。

（４）適用性の評価

実機において SP やレーザーピーニングなどのピーニングが適用されている部位について文献調査して使用環境等についてまとめ、本研究における実験・解析の負荷応力および熱サイクル条件を決定した。図 7 は、実機模擬試験体の一連の工程（溶接、SP 施工、熱サイクル付与、荷重付与）における表面及び内部の残留応力の解析結果と実験結果との比較を示す。図から分かるように、実験と解析の差は目標値 $\pm 150\text{MPa}$ にほぼ収まっている。これにより、開発した解析手法は、解析時間、解析精度ともに、実用レベルに達していることが確認された。



(a) 同材継手の表面残留応力 (b) 異材継手の表面残留応力 (c) 同材継手の内部残留応力

図 7 同材継手残留応力の解析値と実測値の比較

（図中のバンド幅は $\pm 150\text{MPa}$ 。3つの図の縦軸（解析値）、横軸（測定値）のスケールは同一）

（５）まとめ

原子炉配管溶接部の一連の工程を通して残留応力シミュレーションできる FEM 解析手法を開発し、到達目標を達成した。これにより、SP で付与した圧縮残留応力とその持続性を計算により短時間で把握できることから、原子炉溶接部等における SCC 発生のリスクや発生後のき裂進展を予測でき、従って適切な対策が可能になる。以上のように、本研究成果は、原子力発電プラントの安全性評価の高度化ならびに潜在リスクの低減に有効である。

3. 今後の展望

現状では実験と解析の差が $\pm 150\text{MPa}$ を超える場合が一部あったため、今後、材料定数の精緻化や SP 現象の更なる詳細なモデル化などにより、解析精度の向上を図る。また、実機で用いられているレーザーピーニング、ウォータージェットピーニング等の SP 以外のピーニング法による残留応力が解析できるように本手法を拡張していきたい。

4. 参考文献

- (1) K. Ikushima and M. Shibahara: Prediction of residual stresses in multi-pass welded joint using Idealized Explicit FEM accelerated by a GPU, Computational Materials Science, Vol. 93 (2014), pp. 62–67.

謝辞：中性子回折実験は J-PARC MLF（課題番号 2015P0401）で行った。同実験でご協力いただいた Stefanus Harjo 博士、川崎卓郎博士、相澤一也博士に謝意を表す。