

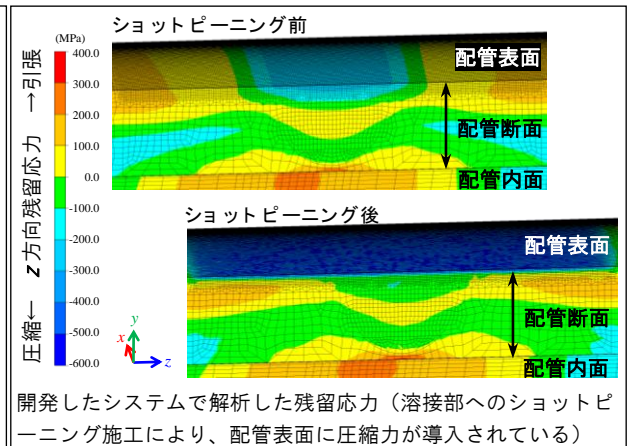
## 溶接継手の強度信頼性向上のために

### 世界初！ショットピーニングを実用レベルで解析可能なシステムを開発

公立大学法人大阪府立大学（理事長：辻 洋、以下「大阪府大」）大学院工学研究科航空宇宙海洋系専攻海洋システム工学分野の柴原正和准教授、国立研究開発法人日本原子力研究開発機構（理事長：児玉敏雄、以下「原子力機構」）物質科学研究センターの秋田貢一ディビジョン長、一般財団法人発電設備技術検査協会（理事長：藤富正晴、以下「発電技検」）溶接・非破壊検査技術センターの古川 敬所長らの共同研究グループは、原子炉構造物の溶接部における応力腐食割れを抑制するための表面改質技術のひとつである「ショットピーニング」工法によって発生する圧縮力（＝圧縮残留応力）を、実用レベルで解析するシステムの開発に成功しました。

#### ■本研究成果のポイント■

- ・ 多数のショット粒の衝突による圧縮残留応力の発生過程を実用レベルで解析するシステムを開発
- ・ 本解析手法を用いて、実機構造物に熱応力や地震荷重などの外力が作用した場合の圧縮残留応力の持続性も評価可能
- ・ 実機を模擬した円筒多層溶接試験体の残留応力をX線回折によって計測し、解析システムの妥当性を確認



原子炉溶接部の長期安全性を確保するためには、部材に加わる引張力と腐食環境とが同時に作用して発生する“割れ”である応力腐食割れを防止することが重要であり、その防止策のひとつとして、「ショットピーニング工法」（以下「SP」: Shot peening）が用いられています。SP は、部材表層に圧縮残留応力を導入することで割れの発生を抑えています。これまで、SP によって導入される圧縮残留応力や、そのプラント稼働期間中における持続性を予測する手法はありませんでした。そのため、SP の施工条件の決定や SP 施工後の耐力腐食割れ性の評価のためには、多量の実験を行う必要がありました。

本研究グループは、超大規模超高速非線形構造解析手法である「理想化陽解法有限要素解析手法」に SP の力学モデルを組み込むことで、SP によって導入される圧縮残留応力とその持続性を実用レベルで予測できる解析システムの開発に初めて成功しました。本研究成果は、原子炉溶接部における応力腐食割れ発生リスクの低減に有効であり、また、波及効果として、SP が適用されている船舶や橋梁などの溶接構造物や自動車の機械部品などの開発期間短縮や強度信頼性向上への貢献が期待されます。

本研究は、文部科学省国家課題対応型研究開発推進事業「英知を結集した原子力科学技術・人材育成推進事業」により実施された「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」（研究代表者：原子力機構 秋田貢一）の成果の一部です。

本成果は、Welding in the World 誌 2017 年 5 月号に掲載されました。

## (解説)

### 1. 背景

金属材料の表層内に圧縮残留応力を導入するショットピーニング工法は、原子炉プラント構造物の応力腐食割れ抑制や機械部品の疲労強度向上を目的として広く採用されています。ショットピーニングによって導入される残留応力、そしてその残留応力が機械・構造物の稼働中にどのように変化していくかをコンピュータ・シミュレーションによって予測できれば、ショットピーニング施工条件の最適化や機械・構造物の強度信頼性評価に大変有効です。しかし、これを実用レベルで、すなわち、数万個、数十万個といった多数のショット粒が、三次元形状を有する部材表面にランダムに衝突して発生する残留応力をシミュレーションすることはこれまで困難でした。

### 2. 研究成果

#### 荷重分布モデルを用いたショット粒衝突時の応力分布の予測

本研究では、先ず、ショット粒1個が部材表面に衝突する際に発生する残留応力を、衝突シミュレーションによって求めました(図1(a))。しかし、この計算を多数回繰り返すことは、現在のコンピュータの能力では困難です。そこで、本研究では、衝突シミュレーションによって得られた荷重の空間的、時間的変化過程をモデル化し(=等価荷重モデル)、その荷重分布を部材に与える方法を提案しました。図1(b)は、等価荷重モデルを用いて部材表層内に発生した残留応力分布です。図1(a)の結果とほぼ一致しており、等価荷重モデルの考え方が正しいことが示されました。

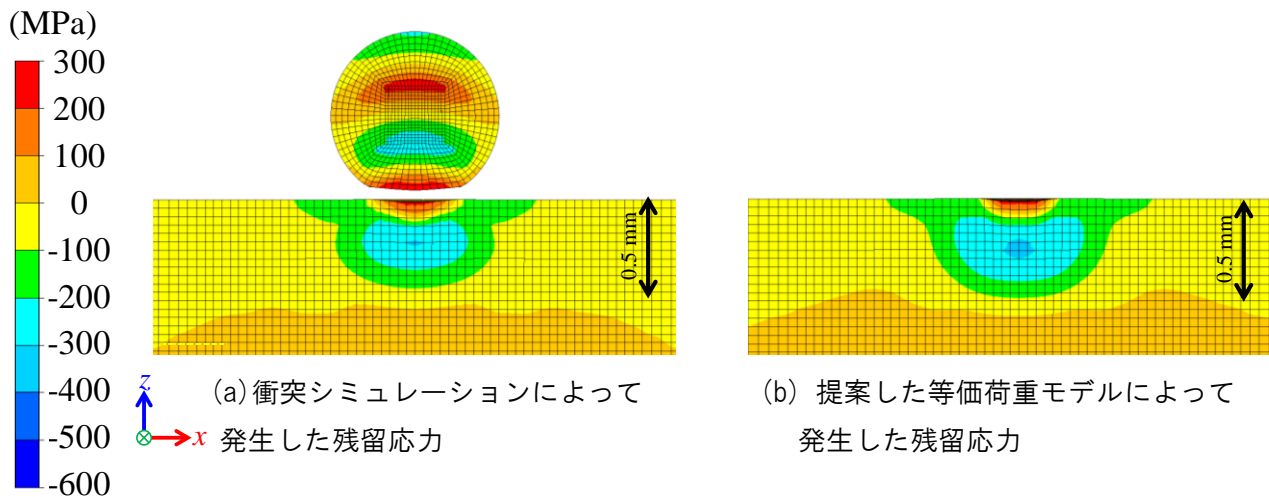


図1 ショット粒の衝突によって部材表層内に発生する x 方向の残留応力

次いで、超大規模超高速非線形構造解析手法である「理想化陽解法有限要素解析手法」に等価荷重モデルを組み込むことで、ショットピーニングによって発生する残留応力を実用レベルで解析できるシステムを構築しました。

### 円筒多層溶接試験体を用いた解析システムの妥当性検証

発電プラントの冷却配管を想定した円筒多層溶接試験体(以下「試験体」)の解析用モデルを図2に示します。この解析用モデルにおいて、溶接及びその後のショットピーニング工程で発生する残留応力を、構築した解析システムで解析しました。解析結果を図3に示します。図中のカラーマップは、試験体の溶接部近傍の拡大図で、周方向残留応力の分布を示しています。カラーマップの中央付近(=試験体内部)には、溶接によって発生した引張残留応力が発生しており(赤色)、一方、試験体の外面は全体的に青色となっており、すなわち表層にはショットピーニングによる圧縮残留応力が導入されたことがわかります。次に、解析結果の妥当性を検証するために試験体を実際に製作し、ショットピーニング施工後の残留応力をX線回折法によって実測しました。図4は、図2の上図に示すA-A'軸上における残留応力の解析結果(赤及び青の実線がそれぞれ軸方向及び周方向の残留応力)と実測結果(□及び△がそれぞれ軸方向及び周方向の残留応力)の比較です。解析結果と実測結果はほぼ一致しており、構築した解析システムにより、実用上十分な精度で残留応力が予測できることが確認されました。なお、実験に用いた試験体の設計・製作は発電技検が行い、X線回折を用いた残留応力測定(図5に測定の様子を示す)は、原子力機構が実施しました。

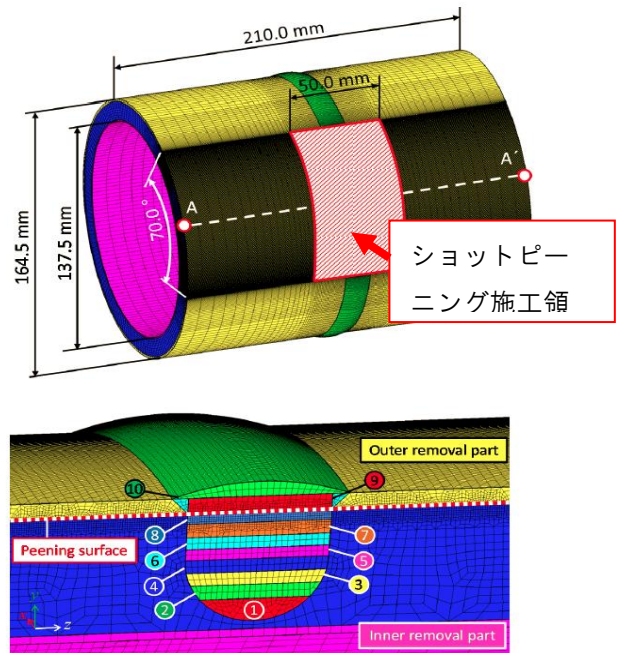


図2 実機を模擬した溶接継手配管試験体  
下図は、溶接部の断面拡大図

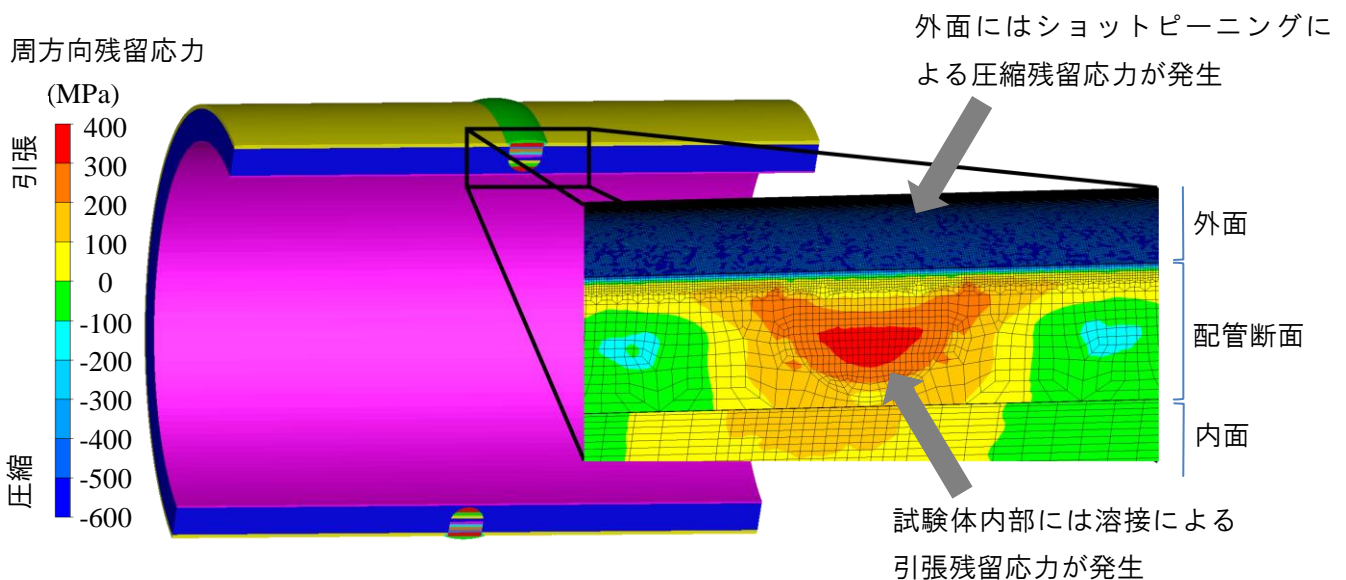


図3 溶接部近傍における周方向残留応力の解析結果



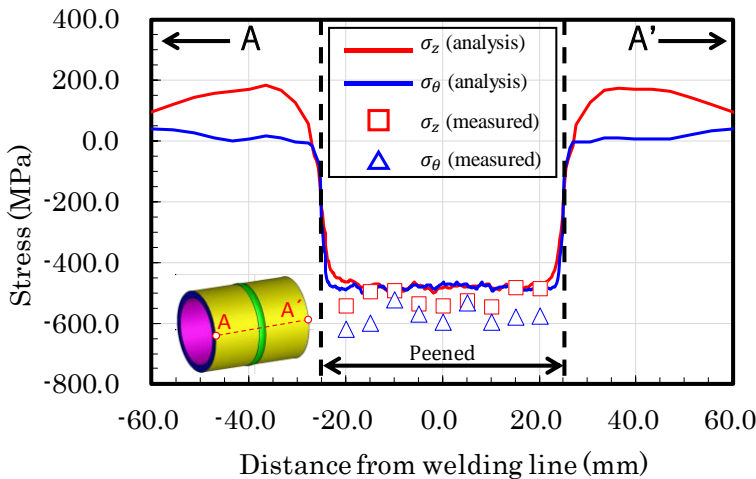


図4 A-A' 軸上における残留応力の解析結果と  
実測結果の比較

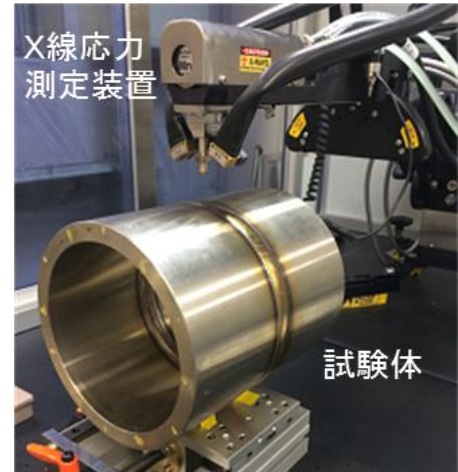


図5 円筒多層溶接試験体の残留  
応力測定の様子

### 3. 今後の展開

開発した解析システムを用いることで、実機のショットピーニング適用部に発生する圧縮残留応力及びその稼働中の変化が予測できますので、実験することなく短期間でショットピーニング施工条件の決定と稼働時の安全性評価が可能です。また、例えば、解析により実機の稼働中に応力腐食割れの発生限界まで圧縮残留応力が低下したと推測できれば、再度ショットピーニングを施工するなどの適切な対策を講じることができるなど、実機の稼働後の健全性評価にも有効です。

開発した解析システムは、ショットピーニングと類似の圧縮残留応力導入工法である超音波衝撃処理やレーザーピーニングなどにも拡張可能と考えられます。したがって、今後、これらの工法が適用されている原子力プラント構造物や船舶、橋梁等の溶接部、また、自動車や航空機の機械部品など、幅広い機械・構造物の強度信頼性向上への貢献が期待されます。

### 4. 論文情報

- ・ 雑誌名：Welding in the World (2017年5月号)
- ・ タイトル：Numerical analysis of residual stress distribution on peening process
- ・ 著者：Kazuki Ikushima<sup>1</sup>, Masakazu Shibahara<sup>1</sup>, Koichi Akita<sup>2</sup>, Hiroshi Suzuki<sup>2</sup>, Satoshi Morooka<sup>2</sup>, Satoru Nishikawa<sup>3</sup>, Takashi Furukawa<sup>3</sup>
- ・ 所属：1 大阪府大、2 原子力機構、3 発電技検

#### 【研究に関するお問い合わせ】

大阪府立大学 工学研究科 航空宇宙海洋系専攻 柴原正和

TEL 072-254-9345、E-mail: shibahara [at] marine.osakafu-u.ac.jp

日本原子力研究開発機構 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 秋田貢一

TEL 029-282-5997、E-mail: akita.koichi [at] jaea.go.jp

発電設備技術検査協会 溶接・非破壊検査技術センター 西川 聡

TEL 045-511-2751、E-mail: nishikawa-satoru [at] japeic.or.jp

【報道関係のお問い合わせ】

大阪府立大学 理事長室広報課広報グループ

担当：西野 寛子 TEL 072-254-9103 E-mail: hiroko.nishino [at] ao.osakafu-u.ac.jp

国立研究開発法人日本原子力研究開発機構 広報部

担当：広報部報道課長 佐藤 仁昭 TEL：03-3592-2346 FAX：03-5157-1950

発電設備技術検査協会 溶接・非破壊検査技術センター

担当：管理グループ長 水野 亮二 TEL 045-511-2751 E-mail: mizuno-ryouji[at]japeic.or.jp

（[at]の部分を@と差し替えてください）