

圧延、曲げ加工によって生じたジャケット材 残留応力の中性子回折法による測定

日本原子力研究所 土屋佳則 ○菊地賢司 皆川宣明
 森井幸生 加藤 崇 中嶋秀夫 辻 博史

1. はじめに

材料が様々な加工工程を経て製品として完成するまでに、その加工履歴により各工程で材料内部の残留応力状態は大きく変化する。製品の信頼性、耐久性などに残留応力が深く関与する材料を使用する場合、製品の最終的な残留応力状態を知るとともに、加工過程の各段階でどのような残留応力の再分配が起きているかを把握し、残留応力を制御する加工方法を検討することが求められる。そのためには内部残留応力の計算による評価と、それを検証する測定が必要である。特に、X線法、ひずみゲージ法など、表面残留応力測定法では不可能な材料内部残留応力の非破壊評価は様々な分野で重要視されているが、これまでその手段が存在しなかった。ところが近年、材料内部まで浸透する熱中性子を用いた残留応力測定法が確立しつつあり、基礎的な測定が行われるようになった。日本原子力研究所では、核融合炉用超伝導コイルを製作するうえで¹⁾ジャケット材に使用しているNi-Fe系超合金INCOLOY908の応力誘起粒界酸化(SAGBO)割れを防止するために、ジャケット材の中性子内部残留応力測定を進めている²⁾。INCOLOY908は200MPa以上の引張残留応力下でSAGBO割れの危険があるとされており、残留応力を低減する加工法が望まれる。本研究では中性子回折残留応力測定法を応用して、圧延材(直状)、及びそれを曲げ加工したジャケット材の内部残留応力を非破壊測定し、有限要素法(FEM)解析との比較を行うことで加工による残留応力再分配状況を把握することを目的とした。

2. 実験方法

2・1 試料 試料はINCOLOY908で作られた図1に示すような角丸パイプである。四方からローラーで冷間圧延することで半径方向に5%縮径している。圧延後の最終断面は $46 \times 46 \text{ mm}^2$ 、内径は37mmである。曲げ試料はこれを3点ロールベンダーで外周半径500mmの曲率に平面曲げ加工したものである。これらを長さ150mmに切断し、側面中央部の深さ方向の残留応力分布を測定した。曲げ試料については曲げの内側側面の中央部を測定した。測定箇所を図中黒丸で示す。測定箇所の試料厚さは4.5mmである。

2・2 中性子回折測定 中性子回折測定は日本原子力研究所研究用原子炉JRR-3Mに設置されている中性子回折残留応力測定装置(RESA)を用いて行った²⁾。中性子ビーム断面積をカドミウムスリットにより $2 \times 4 \text{ mm}^2$ に制限し、測定中心位置を試料深さ方向に1mm

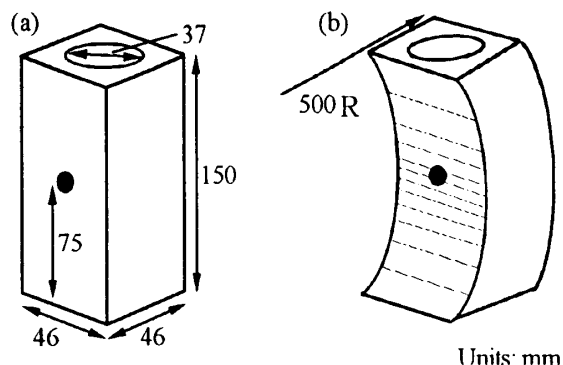


Fig.1 Schematic drawings of INCOLOY908 jacket samples. (a): rolled straight jacket, (b): bent jacket. The neutron measurement positions were indicated by dots.

毎に設定してパイプ内周面まで測定を繰り返すことで残留応力分布を得た。また、INCOLOY908は面心立方構造であり、(111)面回折を測定に使用した。入射中性子線波長はおおよそ 2 \AA とし、そのときの(111)面回折角 2θ は約 60° である。1つのプロファイルの測定時間は2～7時間であった。

2・3 FEM計算 解析コードには陽解法によるABAQUS Explicit Ver.5.8³⁾を用いた。解析は長さ150mmの1/2カットモデルで行い、圧延前の1辺48mmが46mmになるよう半径20cmのローラーで圧延し、5%縮径する工程を模擬した。曲げ加工は圧延後の応力分布を持ったモデルの片端を固定してもう一端に荷重を加え、徐荷した後に外周で曲率半径500mmになる条件により模擬した。ジャケット材は3次元固体要素C3D8R、節点総数9063、要素総数6357とし、ローラーは剛体要素R3D4とした。材料定数はINCOLOY908の室温での応力-ひずみ曲線から得たヤング率164GPa、降伏応力320MPaを用いた。また、ポアソン比は0.3、ジャケット材とローラーの接触部摩擦係数は0.15とした。

3. 結果及び考察

図2に圧延ジャケット材(直状)の軸方向残留応力分布の中性子回折測定とFEM解析の比較を示す。中性子回折測定で残留応力値の算出に用いたINCOLOY908の(111)面回折弾性定数には引張応力下で実施したその場中性子回折測定により求めたヤング率195GPa、及びポアソン比0.26を用いた。FEM計算ではジャケット材の長手方向に比較的大きな応力分布が見られたが、

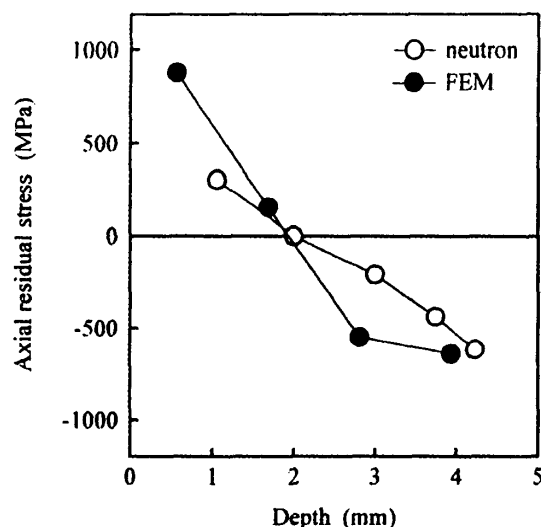


Fig. 2 Comparison of the axial residual stress distribution of the rolled straight jacket between the neutron diffraction method and FEM computing.

変形を弾性回復させた後に塑性変形が残った領域（固定端から30mmの部分）の計算値と中性子回折測定を比較した。図2より、中性子回折測定、FEM解析とも、ジャケット材表面付近で大きな引張応力状態であることが判明した。残留応力値は測定、解析結果ともに表面からおよそ2mmの深さで0となり、FEM計算の信頼性を示す結果となった。また、この測定によりジャケット内周面では600MPaを越える圧縮応力の存在が明らかになった。

図3に曲げ加工したジャケットの残留応力分布を示す。この測定により単純な平面曲げ加工では、圧延加工だけの試料に比較して残留応力値は小さくなることが判明した。表面付近では曲げ加工前のおよそ1/2程度の引張残留応力状態となっている。FEM解析では表面から深いところで圧縮応力状態になっているが、測定結果は表面からの深さが3mmの箇所でも弱い引張の状態であり、今のところ加工履歴による残留応力再分配状況を計算で確実に再現するには至っていない。その理由として、曲げ加工ジャケットの場合、実測と計算とは曲げ方法が異なることが挙げられる。また、中性子回折の測定領域は深さ方向に2mm程度の分布を持っており、測定値はその領域の平均値である。実測と計算の整合性を議論するうえで、測定領域の大きさ

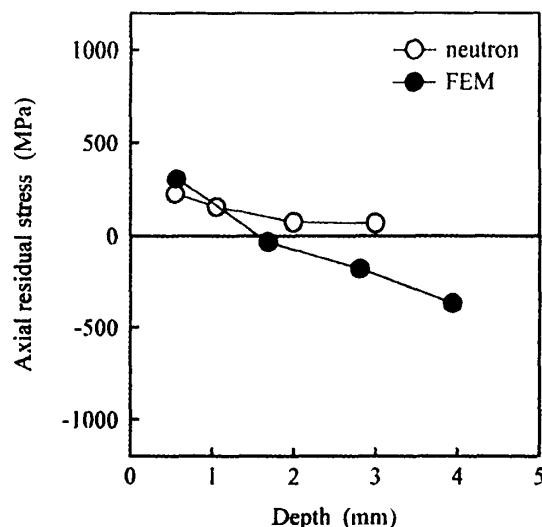


Fig. 3 Comparison of the axial residual stress distribution after the bending between the neutron diffraction method and FEM computing.

を考慮する必要があると考えられる。

4. まとめ

圧延試料について、中心に穴のあいた矩形断面を有するジャケット材の4面ローラー圧延加工では側面中央部の表面付近で強い引張の状態であることが明らかになった。直状モデルではFEM解析と中性子回折測定による残留応力は良く一致した。

曲げ試料の残留応力は直状の試料に比べて、小さくなることが判明した。実測と計算でもこの傾向は一致している。定量的な比較については、実際の曲げ加工プロセスが連続的に行われたのに対し、計算では1回の曲げと弾性回復プロセスしか考慮していないためと思われる。

参考文献

- 1) 安藤俊就, 檜山忠雄, 高橋良和, 中嶋秀夫, 加藤崇, 磯野高明, 杉本誠, 河野勝己, 小泉徳潔, 布谷嘉彦, 松井邦浩, 西島元, 土屋佳則, 辻博史, 島本進, 電気学会論文誌B, **120-B**, 449(2000).
- 2) Y. Tsuchiya, N. Minakawa, Y. Morii, T. Kato, H. Nakajima, K. Hamada, I. Watanabe, K. Ishio, T. Abe, H. Tsuji, Phys. B, **241-243**, 1264(1998).
- 3) ABAQUS/Explicit, Ver.5.8, Hibbitt, Karlsson & Sorensen, Inc., (1999).