

## 白色放射光を用いた複層鋼板の局所残留応力解析

Analysis of local internal stress in multilayered steels using synchrotron X-ray diffraction

井上 純哉<sup>1)</sup> 小島 真由美<sup>1)</sup> 南部 将一<sup>1)</sup> 徐 平光<sup>2)</sup> 秋田 貢一<sup>2)</sup> 鈴木 裕士<sup>2)</sup>  
 Junya INOUE Mayumi OJIMA Shoichi NAMBU Pingguang XU Koichi AKITA Hiroshi SUZUKI  
 菖蒲 敬久<sup>2)</sup> 張 朔源<sup>2)</sup> 城 鮎美<sup>2)</sup> 小関 敏彦<sup>1)</sup>  
 Takahisa SHOBU Shuoyuan ZHANG Ayumi SHIRO Toshihiko KOSEKI

<sup>1)</sup> 東京大学 <sup>2)</sup> 原子力機構

焼入マルテンサイト鋼とオーステナイト鋼の複層鋼板における残留応力分布を測定した。初期状態では、焼入時のマルテンサイト変態の体積膨張に起因して、マルテンサイトでは圧縮応力、オーステナイトではマルテンサイトとバランスを取るように引張応力が発生していることが確認された。変形が生じると軟質であるオーステナイト相と硬質であるマルテンサイト間での塑性変形差によって残留応力分布が生じる。すなわち、変形初期ではオーステナイト相では塑性変形が生じるのに対し、マルテンサイト相は弾性変形を続けることから、除荷後は、マルテンサイト相に比較的大きな引張応力が残存する。

キーワード：内部応力 変形 複層鋼板

### 1. 目的

高強度マルテンサイト鋼と高延性オーステナイト鋼を積層した複層型鋼板（複層鋼板）では、従来鋼板を遙かに凌駕する強度・延性バランス（引張強度 1.3GPa 以上、一様伸び 30%<sup>1)</sup>）が実現されており、次世代社会基盤材料（例えば、衝撃吸収エネルギー型高性能自動車用鋼板など）として期待されている。更なる力学的特性向上のためには、複層鋼板の特異な変形挙動を理解することが重要であり、そのためには二相混合状態がもたらす応力・ひずみの不均質性や異相界面がもたらす効果を明らかにすることが重要である。応力・ひずみ測定には種々の方法があるものの、ひずみ精度が高く、相分離が可能で、変形を  $hkl$  結晶粒群単位で分類・評価可能な回折測定は、複相金属材料の変形挙動の解明には特に有効な手段である。しかし X 線を用いた場合、鉄鋼材料においては強度が不十分なため表面測定に限定される。そのため鋼においても十分な強度が確保され、材料深部の情報が得られる放射光回折測定は非常に有効である。さらに、集光可能な特長により、界面を考慮したサンプル中の応力分布も検討可能な点も放射光を用いるアドバンテージの 1 つである。さらには、パルス光である点から、1 つのスペクトル中に多数の  $hkl$  反射が含まれるため、单一波長の場合に比べて情報量が多い点も放射光を用いる利点である。一方で、複層鋼板の変形挙動解明という課題とは別に、マルテンサイトの大変形挙動についても有効な知見が得られると期待している。一般的に、マルテンサイト鋼は非常に脆性的なため引張時に早期に破断する。そのため従来は変形初期の検討に限られてきた。大変形時の検討については、圧延材で実施された例はあるものの、複雑な応力状態であるため未だ不明な点が多い。一方、複層中では、引張応力下であってもマルテンサイトに十分な延性が発現するので、一軸応力下における変形機構解析の可能性に期待が寄せられる。

## 2. 方法

供試鋼は、外層がオーステナイト鋼(SUS316)、中心層は0.13Cマルテンサイト鋼の3層複層鋼板である。1mm厚まで冷間圧延をした後、1100°Cのオーステナイト域で2min保持した後急冷することで中心層をマルテンサイト組織とした。各層の厚さは、マルテンサイト層；約200μm、オーステナイト層；約400μmであり、総厚は約1mmである。ここから引張試験片を作製し、変形前および各ひずみレベルまで変形後、引張試験片中心部から10mm×10mm×1mmの回折測定用試験片を採取した。入射および受光スリットサイズを0.05mm(ビーム径50μm)、回折角を10°とし、試料表面から試料厚さ方向にビームをシフトさせることで、層厚方向のhkl格子ひずみ分布を測定した。ひずみの成分は引張方向に平行なひずみである。検出器にはGe半導体検出器(SSD)を用い、エネルギー分散法によって測定した。

## 3. 研究成果

図1に変形前および変形後のサンプル厚さ方向のhkl格子ひずみ分布を示す(横軸はサンプル厚さ方向の位置を示しており、ゼロ位置はマルテンサイト層中の中心位置と対応している)。無ひずみ状態の格子ひずみには複層材と同一の熱処理を施した各構成鋼単一材、すなわち0.13Cマルテンサイト鋼およびSUS316鋼の値を用いた。式(1)によりhkl格子歪みを算出した。

$$\varepsilon_{hkl} = (d_{hkl} - d_{hkl}^0) / d_{hkl}^0 \quad (1)$$

この時、 $\varepsilon_{hkl}$ はhkl格子ひずみ、 $d_{hkl}$ はhkl格子面間隔、 $d_{hkl}^0$ は単一材から得た無ひずみ時のhkl格子面間隔である。ビーム径を絞ることにより界面を考慮したサンプル内残留応力分布が得られた。

## 4. 考察・結論

初期状態において、マルテンサイトでは圧縮ひずみ、オーステナイトではマルテンサイトとバランスをとるよう引張ひずみが測定された。これは、焼き入れ時に生じたマルテンサイト変態の体積膨張に起因すると考えられる。変形が進むと、軟質なオーステナイトと硬質なマルテンサイト間の塑性変形差によって残留応力分布が生じる。すなわち、変形初期には、オーステナイトでは塑性変形が開始し、加工硬化分を考慮すべきではあるが弾性域ほどは応力が増加しないのに対し、マルテンサイトでは塑性変形が生じにくく弾性変形し続け応力が増加する。そのため、除荷後はオーステナイトと比較しマルテンサイトでは顕著な引張応力が残存する。さらに変形が進むとマルテンサイトでも塑性変形が開始する。そのため、弾性変形域ほどは応力が増加せず、残留応力変化は小さいと考えられる。回折プロファイルにはひずみ他に結晶配向に関する情報も含まれる。そこで、積分強度から変形集合組織を評価し、マルテンサイトの変形挙動を解析することを試みている。同様の結晶構造すべり系が同一であるフェライト鋼の変形との比較を試みているものの、本実験で得られたプロファイルはある限られた方向の強度プロファイルに過ぎず、定性的な議論に留まっている。本実験ではマシンタイムの都合上、ひずみ測定を優先に実験を行ったが、次回以降は中性子回折測定も視野に入れ集合組織測定も実施する予定である。

## 5. 引用(参照)文献等

- 1) 小関敏彦ら 金属 Vol. 80 (2010), No. 4 271-309

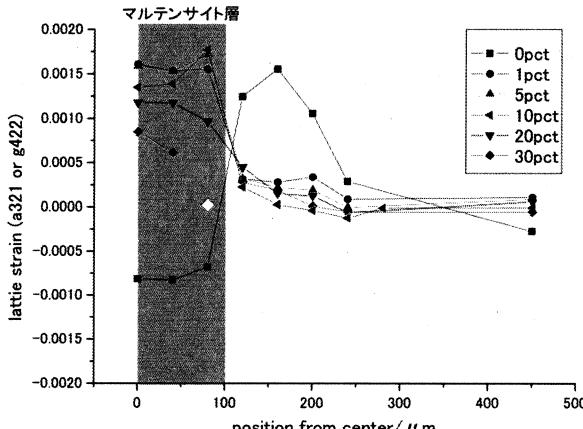


図1 各巨視ひずみレベルにおける試料厚さ方向のhkl格子ひずみ分布