

中性子を用いた鉄鋼材料中の析出物および応力の解析技術

Micron Scale Evaluation Technique of Steel Using Neutron Beam

仲道 治郎 HARUO Nakamichi JFE スチール スチール研究所 分析・物性研究部 主任研究員(副部長)・博士(工学)
佐藤 馨 KAORU Sato JFE スチール スチール研究所 主席研究員・Ph. D.
末吉 仁 HITOSHI Sueyoshi JFE スチール 知的財産部 主任部員(副課長)

1. はじめに

中性子は、高い物質透過力を有しているため材料の内部および全体の組織解析に非常に有望視され、多くの検討が行なわれている。鉄鋼材料分野への応用も進められており、一般社団法人鉄鋼協会の産発プロジェクト展開鉄鋼研究「中性子利用鉄鋼評価技術の基礎検討に係る研究」(2006~2008年度)¹⁾、C型研究会「新世代中性子源を利用した鉄鋼元素機能研究会」(2009~2012年度)²⁾、I型研究会(2013年度~)が実施されている。現在、世界最大強度の中性子線を誇るJ-PARC(大強度陽子加速器施設, Japan Proton Accelerator Research Complex)の稼動がすすむに伴い、鉄鋼製造プロセスや鉄鋼材料開発で重要な熱処理や変形過程での動的測定も可能になってきている。また、小型中性子線源を用いた組織評価技術も発展してきており、中性子解析技術を活用した鉄鋼研究への期待がますます高まっている。JFEスチールでは、これらの中性子利用技術に関する研究会などに当初から積極的に参画し、新しい測定方法の利用・検討を行なっている。本報告では、これら研究会で実施した成果のうち、小角散乱を用いた鋼中微細析出物の形態評価例、厚鋼板溶接部残留応力の測定、および、TRIP(Transformation induced plasticity)鋼の引張変形挙動中のその場観察について紹介する。

2. 小角散乱による鋼中析出物評価³⁾

2.1 背景

鉄鋼材料中の微細析出物は、材料の強度に大きく影響を与えるため、その形態評価は重要である。そのため、透過電子顕微鏡(TEM)をはじめ、さまざまな評価が行なわれている⁴⁾。TEMの場合、観察領域が限定されるために析出物の平均情報を得ることが困難である。一方、中性子を用いた小角散乱測定では、散乱スペクトルの比較から、析出物のサイズや形状などの情報を得ることが可能である。また、中性子は透過能が高いために、材料の照射領域の大きな体積の平均の情報が得られる。これらの特徴に注目して、熱処理による析出形態変化を、TEMおよび中性子小角散乱を用いて評価し、熱処理による析出形態挙動について解析を行なった。

2.2 実験方法

サンプルとしては、Ti添加炭素鋼を用いた。材料を実験室で真空溶製し、 γ 相で溶体化処理をしたのちに圧延を行なった。圧延後の冷却過程の熱処理条件を450 から650に変化させることで炭化物形態を変化させた。サンプル処理および特性については文献3)を参照されたい。

中性子実験は、国立研究開発法人日本原子力研究開発機構(茨城県那珂郡東海村)の3号炉に設置されている中性子小角散乱装置(SANS-J-II)を用いて行なった。表裏面の

研削から

に澤衣精諮 期え

ブルの結果とともに示す。表層近傍のピーク位置はわずかに低角度側に位置しているが、Root 部近傍のピークは低角度側へ大きくシフトしており、格子間隔が広がっていることがわかる。このような無ひずみ材からの格子定数のずれを用いて残留ひずみ (ϵ) を求め、溶接部の各部位による T 方向ひずみ分布マップを図 4 示す。

直行する 3 方向の格子ひずみから残留応力を求めることができる。溶接金属中心線での残留応力分布を図 5 に示す。表層部近傍から Root 部へ近づくに伴い引張残留応力が増大していることがわかる。また、T 方向の残留応力が最も高く、Root 部では最大 1 000 MPa 以上の高い引張応力が残留している。このとき、Root 部近傍では L 方向および N 方向でも引張応力であり、高い三軸応力状態となっていることが確認された。また、溶接金属表層部についてひずみゲージにより測定した残留応力も図中に示す。この値が中性子回折により測定した表層部残留応力値とほぼ等しいことから、中性子回折により残留応力測定が精度よく評価されたと言える。

中性子の高い透過能を利用することで、厚い試料の残留応力の分布について、溶接部内部まで評価することが可能

となり、溶接時の残留応力分布の場所による特徴について有効な知見が得られた。また、溶接時に含まれる水素と割れとの関係を調査する⁵⁾ことで、溶接割れの制御について多くのことが明らかとなることが期待される。

4. TRIP 鋼板の加工変形時の相変態挙動その場観察⁶⁾

4.1 背景

自動車用薄板と V 字溝板

- 4) たとえば, 佐藤馨, 仲道治郎, 山田克美. 顕微鏡. 2005, vol. 40, no. 3, p. 183.
- 5) 石川信行, 末吉仁, 鈴木裕士, 秋田貢一. 溶接学会論文集. 2011, vol. 29, no. 3, p. 218.
- 6) 末吉仁, 石川信行, 山田克美, 佐藤馨, 中垣内達也, 松田広志, 新垣優, 友田陽. 波紋 (日本中性子科学会誌). 2014, vol. 23, p. 34.
- 7) Tanaka, K.; Akiniwa, Y.; Hayashi, M. Mater. Sci. Res. Int. 2002, vol. 8, no. 4, p. 165.
- 8) Kim, S-H.; Kim, J-B.; Lee, W-J. J. Mat. Process Tech. 2009, vol. 209, no. 8, p. 3905.
- 9) 鈴木裕士, 盛合敦, 下条豊, 徐平光, 塩田佳徳, 秋田貢一. M&M 材料力学カンファレンス. 2010, p. 333.
- 10) たとえば, 友田陽. ふえらむ. 2010, vol. 15, no. 1, p. 17.
- 11) ステファヌス ハルヨ. 日本結晶学会誌. 2008, vol. 50, p. 40.



仲道 治郎