

優れた強度・延性バランスを持つ 0.1C-5Mn マルテンサイト鋼の  
加工硬化挙動の In-situ 解析  
In-situ Analysis on Work Hardening Behavior of 0.1C - 5Mn Martensitic  
Steels with an Excellent Balance of Strength and Ductility

鳥塚 史郎<sup>a</sup>, 足立 大樹<sup>a</sup>, 熊倉 美亜<sup>a</sup>, 小澤 秀人<sup>a</sup>, 花村 年裕<sup>b</sup>  
Shiro Torizuka<sup>a</sup>, Hiroki Adachi<sup>a</sup>, Mia Kumakura<sup>a</sup>, Hideto Ozawa<sup>a</sup>, Toshihiro Hanamura<sup>b</sup>

<sup>a</sup>兵庫県立大学, <sup>b</sup>(国)物質・材料研究機構  
<sup>a</sup>University of Hyogo, <sup>b</sup>NIMS

0.1%C-2%Si-5wt%Mn フェライト+オーステナイト二相組織鋼の高強度・高延性発現機構に関して、引張試験を行いながらの X 線回折測定を行い、オーステナイト相の加工誘起変態挙動と応力-ひずみ曲線を結びつけることができた。その結果、オーステナイトの体積率よりはむしろ、オーステナイトの加工誘起変態に対する安定性が、延性を支配することを明らかにした。

キーワード： 5%Mn 鋼, 残留オーステナイト, 引張試験中 X 線回折

背景と研究目的：

高強度であり、一様伸び、局部伸びも大きく、絞りも高い。さらに、シャルピー吸収エネルギー(USE)が高いという優れたトータルバランスを持った鋼の実現は困難である。それは、これらの性質がトレードオフの関係にあるからである。すなわち、引張強さを上げれば、伸びや靱性は低下してしまう。このトレードオフの関係を打破し、優れた革新的構造材料を実現することを目標として、国家プロジェクトである産学共創基礎基盤研究プログラム「ヘテロ構造制御」研究を行っている。

0.1%C-2%Si-5%Mn(いずれも wt.%)フェライト+オーステナイト二相組織鋼は、従来の TRIP 鋼と比べて、高強度(TS=1200MPa)かつ高延性(TE=25%)で大きな加工硬化率を持ち、さらに、TRIP 鋼としては大きな局部延性と絞りも持つ[1]。本研究では、高強度・高延性の発現機構を明らかにするために、放射光を用いて、引張変形中の残留オーステナイト体積率の変化を In-Situ で解析し、強度、延性と関係づけた。

実験：

試料：温間溝ロール圧延で作製した 0.1%C-2%Si-5%Mn 微細フェライト+セメンタイト鋼(UFG)に対して、二相域温度(625, 675°C)で保持時間 0.5, 1, 3 h の焼鈍を行い、フェライト( $\alpha$ )+オーステナイト( $\gamma$ )組織とし、 $\gamma$  粒の大きさと体積率を変化させた。

実験条件：実施ビームラインは BL19B2

はじめに、通常の引張試験(丸棒引張試験片：直径 3.5 mm, 標点間距離 GL=17.5 mm, クロスヘッド速度 CHS=0.5 mm/min)を行い、強度・延性の変化を調べた。 $\gamma$  粒の体積率、形態、粒径の測定は、大学の X 線回折および SEM-EBSD により行った。次に、引張変形中の  $\gamma$  相のマルテンサイト変態挙動を調査するために、板厚の薄い板状引張試験片(GL=12.8 mm, T=0.5 mm)を作製し、SPring-8 BL19B2 の大強度 X 線により引張試験(CHS=0.26 mm/min)中 In-situ 透過 X 線回折を行った。X 線エネルギーは 30 keV, 波長 0.4133(Å)で、検出には、半導体検出器を 5 個ならべたものを用いた。

結果および考察：

Fig.1 には各焼鈍温度・時間における丸棒引張による公称応力-公称ひずみ曲線を示す。675°C の試料は、降伏後急激に加工硬化し、高強度であるのに対し、625°C の試料では加工硬化が徐々に進み、強度は低下したが均一伸びは増加した。Fig.2 には、本 BL19B2 実験で得られた 675°C の試

料における X 線プロファイルを示す. 初期には主相である  $\alpha$  相と  $\gamma$  相の 2 相からなっているが, 引張試験開始後 200 s で,  $\gamma$  相が消滅していることがわかる. これは加工誘起変態が生じたため,  $\gamma$  相が  $\alpha$  相に変態したためである.

Fig.3 には, 板状引張試験における 675°Cx1 h と 625°Cx0.5 h の公称応力-公称ひずみ曲線および引張変形中の  $\gamma$  の体積率変化を示す. 675°Cx1 h では初期  $\gamma$  体積率が 31.8%であり, 625°Cx0.5 h は初期体積率が 12%である. 675°C で焼鈍した試料に関しては, 塑性変形開始時点より急激にマルテンサイト変態が進み, リューダース変形域を過ぎたところで,  $\gamma$  体積率が 5%程度にまで急激に減少した. 一方, 625°C で焼鈍した試料に関しては, 急激なマルテンサイト変態は生じず, 徐々に変態していることがわかる. 625°C の焼鈍で生じた  $\gamma$  相は, 体積率は少ないが, 変形に対して, より安定になったといえる. すなわち, 延性を支配するのは,  $\gamma$  相の体積率ではなく, その安定性であると考えられる. 一方, 高強度を得るためには, 体積率が重要と思われる.

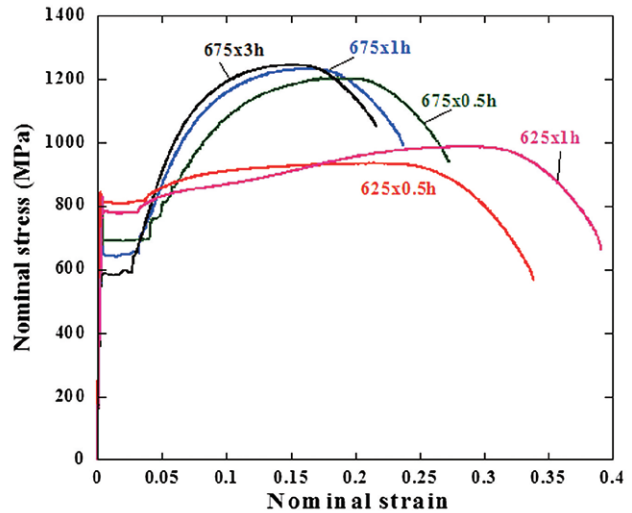


Fig.1. Effect of annealing temperature and time on nominal stress - nominal strain curves of 0.1%C-2%Si-5%Mn ferrite/austenite steels.

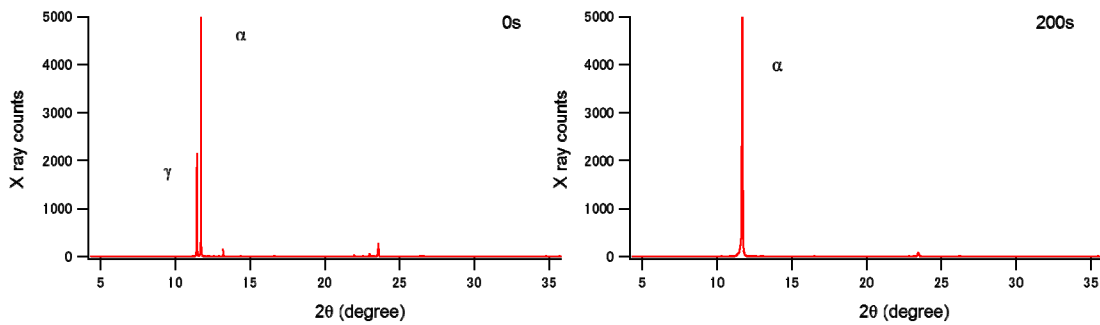


Fig.2. X ray profiles obtained by in-situ measurements during tensile test in 0.1%C-2%Si-5%Mn ferrite/austenite steels annealed at 675°C for 30 min using synchrotron radiation in BL19B2 in SPring-8. (a) Result before the tensile test and (b) result at 200s after starting the tensile test.

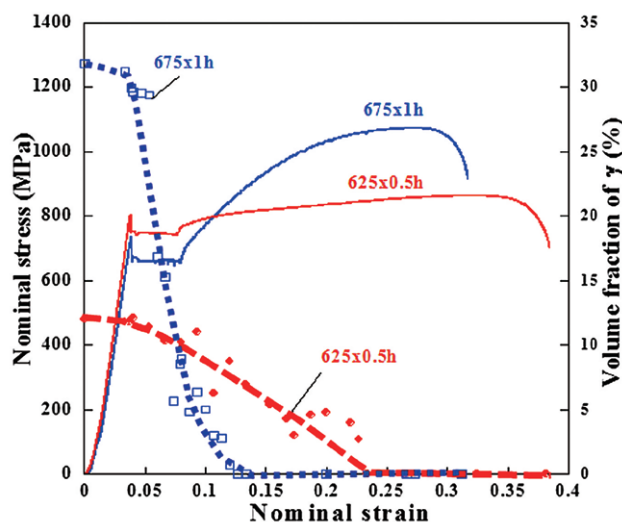


Fig.3. Change in  $\gamma$  volume fraction during tensile test in 0.1%C-2%Si-5%Mn ferrite/austenite steels by In-situ XRD using synchrotron radiation in BL19B2 in SPring-8.

なお、本研究は、日本鉄鋼協会 170 回秋季講演大会学生ポスターセッション(2015 年 9 月 17 日九州大学)にて、発表される[2].

**今後の課題：**

0.1%C -2%Si-5wt%Mn フェライト+オーステナイト二相組織鋼の高強度・高延性発現機構に関して、オーステナイトの体積率よりはむしろ、安定性が、延性を支配することを明らかにしたが、まだ、メカニズム全体としては端緒的データが得られたばかりである。さまざまな熱処理条件で得られた組織に対して、同様の検討をおこない、強度・延性発現機構全体を明らかにする必要がある。

**参考文献：**

[1] 鳥塚史郎、花村年裕、熱処理、53, 39-40 (2013).

[2] 熊倉美亜、第 170 回日本鉄鋼協会秋季講演大会学生ポスターセッション概要集、PS-32 (2015).