

優れた強度延性バランスを持つ 0.1C-2Si-10%Mn 鋼の
 $\gamma \rightarrow \alpha$ 加工誘起変態挙動のその場 X 線観察

In-situ Analysis on $\gamma \rightarrow \alpha$ Strain Induced Transformation Behavior of 0.1C-2Si-10Mn Ferrite+Austenite Steel with Excellent Strength-ductility Balance

鳥塚 史郎
Shiro Torizuka

兵庫県立大学大学院
The Graduate School of Engineering, University of Hyogo

引張試験その場透過 X 線回折を行い、0.075-0.3%C - 2%Si - 5-10%Mn フェライト+オーステナイト組織鋼における強度、延性および加工硬化挙動とオーステナイトの加工誘起変態の関係を C および Mn の観点から明らかにした。Fe-0.15C-2.0Si-5 Mn の組成において、引張強さ 1500MPa, 全伸び 30%の特性が得られた。その発現機構を、オーステナイトの加工誘起変態の量と速度から説明した。

キーワード： フレッシュマルテンサイト，残留オーステナイト，超微細組織，引張試験，その場透過 X 線回折，強度，延性，加工誘起変態

背景と研究目的：

我々は、0.1%C-2%Si-5%Mn 組成をベースとしたヘテロ組織とその優れた力学的特性の関係を解析することによって、強度・延性のトレードオフの関係にある力学的性質の限界を打破することを目指している。この 0.1%C-2%Si-5%Mn 組成をベースとしたヘテロ組織の一つは、マルテンサイト組織で、微細化・超微細化によって、引張強さ 1400 MPa 級で高延性と高靱性も同時に達成できる可能性を持つ[1]。もう一つはフェライト+オーステナイト二相組織で、母相と分散相の微細化によって、TS は 1200 MPa レベルであるが、大きな一様伸びと局部伸びを併せ持つものである。引張強さ x 全伸びバランスは、30000 MPa%を超え、既存鋼に比べ極めて優れている。その優れた力学的特性発現メカニズムを解明すれば、革新的構造材料開発の切り口を見いだすことができ、次世代自動車用ハイテンの開発につながる。引張強さ 1500 MPa、全伸び 20%が、ISMA（新構造材料技術組合）における目標であるが、この目標を突破できる可能性がある組織がフェライト+オーステナイト二相組織である。

引張試験のように被測定物が移動する状態で、X 線回折情報を得るためには、大強度 X 線が必要であり、SPring-8 は、まさにそれに適合する。我々は、報告書（2015A1847）[2]にあるように、引張試験時の変形の進行に伴う転位密度の増加を In-situ 測定する方法を確立している。さらに、引張変形のともしなう転位密度の変化、転位配列（ランダム構造、セル構造）の変化も、引張試験中のその場 X 線回折によって明らかにしてきている[3]。また、加工誘起変態に進行に伴う、残留オーステナイト量の変化と強度・延性の関係も明らかにしている[4]。

今回の実験では、さらなる強度・延性の向上を目指して、C 添加量を 0.075%から 0.3%と大きく変化させ、また、Mn 添加量を 7-10%に上げた材料を作製した。超微細フェライト+オーステナイト組織およびマルテンサイト組織を作り出した。その組織と力学的特性の関係を明らかにするために、引張試験を行いながら X 線回折を行い引張変形中の組織変化をダイナミックにとらえ、高強度・高延性発現機構を理解することを目的とした。

実験：

試料は鋼であり、その組成は、Fe-0.075C-2.0Si-5Mn, Fe-0.10C-2.0Si-5Mn, Fe-0.15C -2.0Si-5Mn、Fe-0.20C-2.0Si-5Mn, Fe-0.30C -2.0Si-5Mn、および、Fe-0.1C -2.0Si-7Mn、Fe-0.15C-2.0Si-7Mn, Fe-0.1C -2.0Si-10Mn (wt%) である。補助的に SUS304, SUS316 も用いた。引張試験片試料は平行部長さ 12mm, 幅 1.2mm, 厚さ 0.5mm の引張試験片で、BL19B2 のゴニオメータ上に設置した引張り試験

機に取り付けた。X線の検出器としては、1次元検出器 Mynthen、および、2次元検出器 Pilatus も用いた。検出器の位置は、 2θ が $5\text{-}35^\circ$ の範囲で計測できるように、適切な位置に設置した。X線のエネルギーは 30 keV とした。材料は鉄鋼材料であるが板厚 0.5 mm であれば十分な回折強度が得られる。引張速度はひずみ速度 0.26 mm/min となるように行った。1次元検出器 Mynthen を用いて、引張試験を行いながら X線回折を同時に行う In-situ 引張試験 X線回折を行った。応力-ひずみ曲線を取得しながら、応力-ひずみ曲線に対応する X線回折データを得た。データの測定間隔は、 1 s 程度とした。また、Fig.1 に示すように、集合組織の影響も把握するため、2次元検出器 Pilatus を用いて、引張試験を行いながらデバイ・シェラーリングも測定した。各面の回折ピークの数、強度と半値幅 (FWHM : Full Width at Half Width) を測定した[4]。観察する X線のピークはフェライト相で(110), (200), (211), (220), (310)の各面とオーステナイト相では、(111), (200), (220), (311), (222)である。

得られたデータをもとに、また、半値幅より、修正 Williamson-Hall 法を用いて転位密度および転位配列を示す係数 M を求めた。残留オーステナイトに関しては、①式で示すように、 hkl 理論回折強度 R とピーク面積強度 I より、体積率 V_γ を推定した[4]。

$$V_\gamma = \frac{\frac{1}{n} \sum_j \frac{I_j^f}{R_j^f}}{\frac{1}{n} \sum_j \frac{I_j^f}{R_j^f} + \frac{1}{n} \sum_j \frac{I_j^m}{R_j^m}} \quad \text{①}$$

結果および考察：

Fig.2 に真応力-真ひずみ曲線とオーステナイト体積率の変化を示す。C量が 0.15% までは、引張強さと一様伸びが同時に向上した。引張強さ 1500 MPa 、全伸び 30% を達成できた[5]。しかし、 0.2% 、 0.3% では、引張強さも伸びもかえって低下した。 0.15% の時は、すべてのオーステナイトが変態したが、 0.2% および 0.3% では、オーステナイトは残留した。このことが、強度および伸びが十分発現しなかった原因と思われる。Cが高すぎると、オーステナイトが過安定となったためと考えられる。

今後の課題：

Mn の影響について、現在検討中である。

参考文献：

- [1] 鳥塚史郎ら,平成 29 年度 SPring-8 産業新分野支援課題・一般課題(産業分野)実施報告書(2017B)、2017B1934.
- [2] 鳥塚史郎ら,平成 27 年度 SPring-8 産業新分野支援課題・一般課題(産業分野)実施報告書(2015A)、2015A1847.
- [3] 前田晃宏,鳥塚史郎,足立大樹,自動車技術会論文集 **49**, 856 (2018).
- [4] 安達節展,鳥塚史郎,足立大樹,伊東篤志,鉄と鋼, **105**, 197 (2019).
- [5] 蓑田和樹,足立大樹,鳥塚史郎, CAMPS-ISIJ **31-2**, PS-99 (2018).

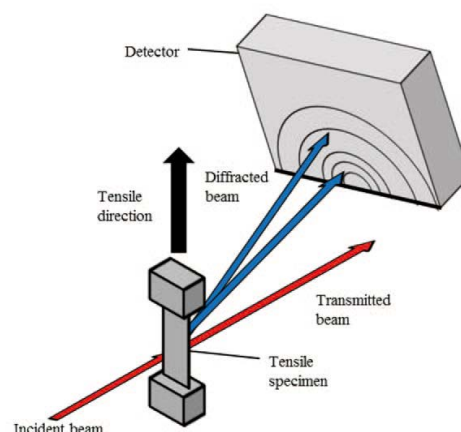


Fig.1 Schematic illustration of the in-situ transmission type X-ray diffraction during tensile test system [4].

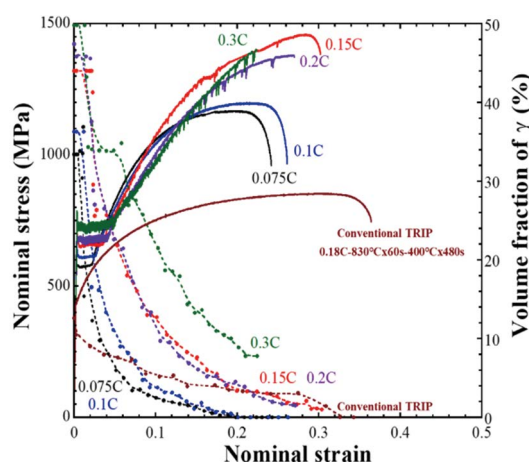


Fig.2 Relationship between nominal stress -nominal strain curves and change in the volume fraction of austenite [5].