

セメンタイトメタラジーにもとづく急速加熱冷却で得られた  
超微細フェライト＋微細分散オーステナイト組織 7Mn 鋼の  
加工誘起変態挙動の In-situ 解析

**In-situ Analysis on Strain-induced Martensitic Transformation Behavior of  
7%Mn Ultrafine Grained Ferrite + Austenite Structure Steels Formed by  
Rapid Heating and Cooling Based on Cementite Metallurgy**

鳥塚 史郎, 伊東 篤志  
Shiro Torizuka and Atsushi Ito

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

0.1C-2Si-7%Mn 鋼は優れた強度・延性バランスを持つが、今回、急速加熱冷却により超微細フェライトと微細分散オーステナイトからなる組織を形成し、その力学的特性を引張試験その場 X 線回折で調べた。オーステナイトの存在と加工誘起変態挙動が測定でき、引張強さ 1400 MPa x 全伸び 20% という優れた強度・延性発現機構の解明につながった。

キーワード： フェライト、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：**

構造用金属材料の国際競争力は、その国の産業の競争力を左右する。しかし、高強度・高延性・高靱性という優れたトータルバランスを持った金属材料は存在しない。それは、これらの性質がトレードオフの関係にあり、引張強さを上げれば、伸びは低下する。トレードオフの関係を打破し、革新的構造材料を実現することを目標として研究を推進中である。0.1%C-2%Si-5%Mn 組成を中心にマルテンサイト組織鋼およびフェライト＋オーステナイト二相組織鋼を開発した。我々は、この優れた力学的特性発現のメカニズムを SPring-8 の放射光を用いて解明してきた[1]。同時に、セメンタイトメタラジーという組織制御コンセプトを提案している。セメンタイトメタラジーとは、鉄の一般的析出物であるセメンタイト(Fe<sub>3</sub>C)中にあらかじめ Mn を高濃度に濃縮させ、(Fe<sub>5</sub>Mn<sub>5</sub>)<sub>3</sub>C のようにしておく。この Mn リッチなセメンタイトを核として金属組織を制御できることを見出した。セメンタイトメタラジーと急速加熱急速冷却の組み合わせによって、オーステナイトが微細に分散した超微細フェライト＋オーステナイト複相組織が作り出せる。オーステナイトの体積率が同じでも、オーステナイトが微細分散するため、高い加工硬化能が得られる可能性がある。オーステナイトの体積率が小さくても、引張強さ 1400 MPa x 全伸び 15%以上という優れた強度と延性が得られた。今までの研究では、第 2 相であるオーステナイトの体積率に注目してきたが、オーステナイトの超微細分散という新しい切り口を見出した。SPring-8 の高輝度 X 線を利用して、超微細分散オーステナイトの加工誘起変態強度をその場 X 線回折で解析し、その強度・延性発現機構を解析した。引張試験を行いながら X 線回折を行い、加工誘起変態挙動をダイナミックにとらえる。

**実験：**

試料は Mn 鋼であり、その組成は、Mn 鋼で Fe-0.10C-2Si-5Mn, Fe-0.15C-2Si-5Mn, Fe-0.2C-2Si-5Mn、および、Fe-0.1C-2Si-7Mn、Fe-0.15C-2Si-7Mn, Fe-0.15C-2Si-7Mn, Fe-0.2C-2Si-7Mn および SUS301, SUS316L である。Mn 鋼は、セメンタイトメタラジーを用いて組織形成を行うが、セメンタイト中への Mn の濃縮は、温間圧延によって行った。超微細フェライト＋微細分散オーステナイト組織の生成は、急速加熱冷却 (750°C x 1 s, 800°C x 1 s, 850°C x 1 s) を行い、加工熱処理シミュレータを用いた。

引張試験片試料は平行部長さ 12 mm, 幅 2.5 mm, 厚さ 0.5 mm 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。集合組織の影響も考慮したため、2次元検出器 Pilatus-300K を用いた。検出器の位置は、 $2\theta$  が 5 - 35° 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。引張速度はクロスヘッド速度 0.26 mm/min とした。

測定した X 線のピークはフェライト相で(110), (200), (211), (220), (310), (321)の各面とオーステナイト相では (111), (200), (220), (211), (311)である。Fig.1 に示すように、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 線回折を実施した。データの測定間隔は 1 s とした。得られたデータをもとに、各ピーク強度の比からフェライト相とオーステナイト相の比を求めた。得られたデータをもとに、 $\gamma$  体積率は式(1)を用いて、hkl 理論回折強度 R と得られた散乱角における  $\alpha$  相(110)、(200)、(211)と  $\gamma$  相 (111)、(200)、(220) のピーク面積強度比より求めた。

$$V_{\gamma} = \frac{\frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \frac{I_{\gamma}^j}{R_{\gamma}^j}}{\frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \frac{I_{\gamma}^j}{R_{\gamma}^j} + \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \frac{I_{\alpha}^j}{R_{\alpha}^j}} \quad (1)$$

### 結果および考察：

Fig. 2 に 750°C x 1s という急速加熱短時間保持急速冷却で得られた 0.2C-2Si-7%Mn 鋼の公称応力-公称ひずみ曲線を示す。引張強さ x 全伸びで、おおよそ、1400 MPa x 19% という優れた強度延性バランスが得られている。EBSD を用いた組織観察結果では超微細フェライトと微細分散オーステナイトが確認できた。マルテンサイト組織の存在も調査中である。

Fig. 3 に引張変形前 (オレンジ色) と引張強さ (Fig.2 の矢印) 時点 (緑色) での X 線の回折プロファイルを示す。引張前でフェライト( $\alpha$ )とオーステナイト( $\gamma$ )が確認できた。体積率は 15% であった。そのオーステナイトは、引張変形によって加工誘起変態し、ほぼすべてがマルテンサイトに変態したことが明らかである。したがって、加工誘起変態が、高い加工硬化能をもたらし、

1400 MPa x 19% を発現したと考えられる。

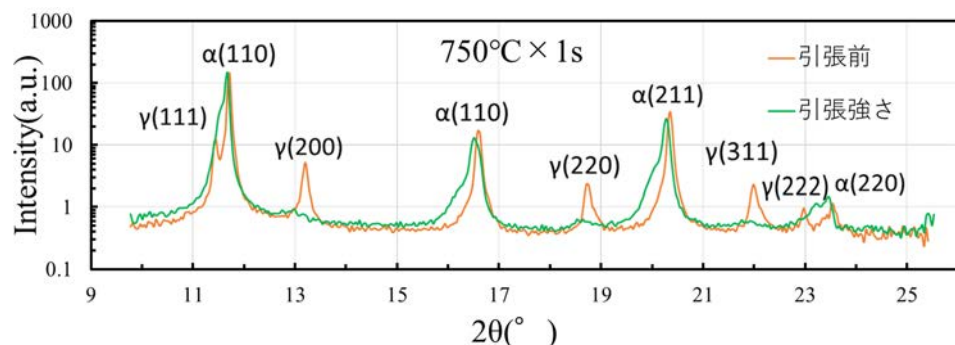


Fig.3 Change in X-ray diffraction profiles before tensile test and at tensile strength in the 0.1C-2Si-7%Mn ultrafine ferrite+ fine dispersed austenite structure steel obtained by rapid heating at 750°C, soaing for 1s and rapid cooling based on cementite metallurgy.

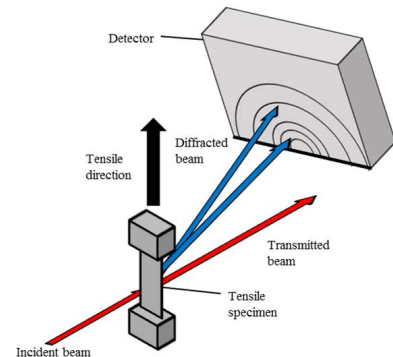


Fig.1 Schematic illustration of the in-situ transmission type X-ray diffraction during tensile test system.

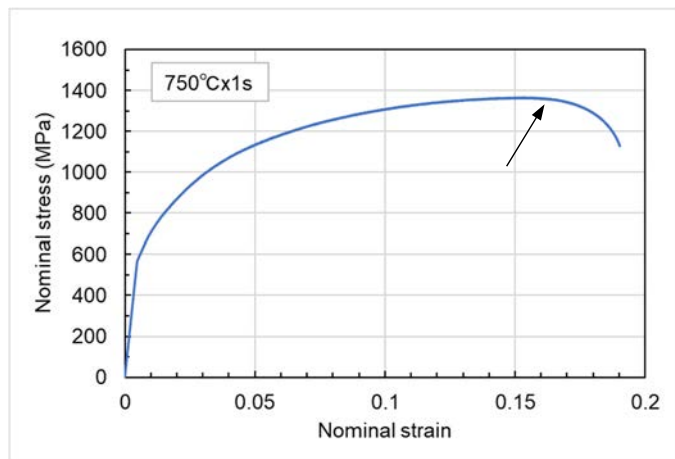


Fig.2 Nominal stress - nominal strain curve of ultrafine ferrite + fine dispersed austenite in 0.2C-2Si-7%Mn steel obtained by rapid heating and cooling based on cementite metallurgy.