

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 0.15C-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
0.15%C - 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

0.15C-2Si-7%Mn 鋼は、0.1C-2Si-7%Mn 鋼に比べ、さらに優れた強度・延性バランスを持つ。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 1600 MPa x 全伸び 30% 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。革新的構造材料を実現することを目標として、我々は国家プロジェクトを推進してきており、現在は S I P プロジェクト第二期を推進中である。0.1%C-2%Si-5%Mn 組成を中心にマルテンサイト組織鋼（引張強さ 1600 MPa 級で高延性）およびフェライト+オーステナイト二相組織鋼（引張強さ 1500 MPa x 伸び 30%）を開発した。学問的には、セメンタイトメタラジー¹⁾というコンセプトを提案してきた。

セメンタイトメタラジーによって、単なる低温焼入ではなく急速加熱急速冷却によっても、第 2 相が微細に分散した超微細組織が作り出せることを見出した。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、引張試験を行いながら X 線回折を行い誘起変態挙動をダイナミックにとらえたい。引張試験中の転位密度変化の測定も行った。今回の研究にも SPring-8 の高輝度放射光を用いた引張試験その場 X 線回折は、必要不可欠である。今回、前回に続き（2021A1559）、超微細分散オーステナイトの加工誘起変態強度のその場解析を行った。

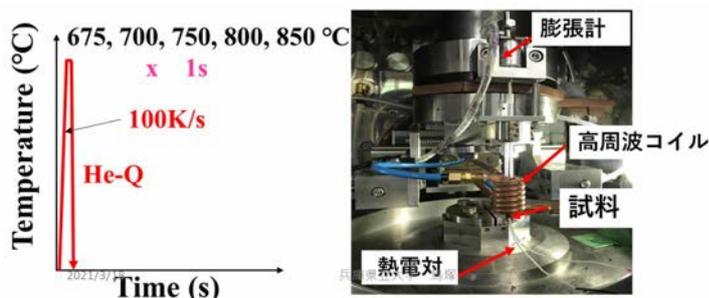


Fig.1 Rapid heating and cooling condition by thermo-mechanical treatment simulator.

実験方法

試料として、温間圧延で製造された Fe-0.1C-2Si-5mass%Mn 鋼, Fe-0.1C-2Si-7%Mn 鋼, Fe-0.15C-2Si-5%Mn 鋼, Fe-0.15C-2Si-7%Mn 鋼を用いた¹⁾。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、Fig.1 に示す急速加熱冷却 (750°C x 1 s, 800°C x 1 s, 850°C x 1 s) を加工熱処理シミュレータを用いて行った。セメントタイトメタラジの組織形成メカニズムを利用して、微細フェライト+オーステナイト組織を生成できた。

引張試験片試料は平行部長さ 12 mm, 幅 2.5 mm, 厚さ 0.4 mm の引張試験片で、BL19B2 のゴニオメータ上に設置した引張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、 2θ 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。引張速度はひずみ速度 0.26 mm/min

となるように行った。引張荷重の測定には、最大荷重 2 KN のロードセルを用いた。観察した X 線のピークは鉄の場合、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), (311), (222)であった。引張試験を行いながら X 線回折を同時に行う、いわゆる、*in-situ* 引張試験 X 線回折を行った。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。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、 γ 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 α 相 (110), (200), (211) と γ 相 (111), (200), (220) のピーク面積強度比より求めた。

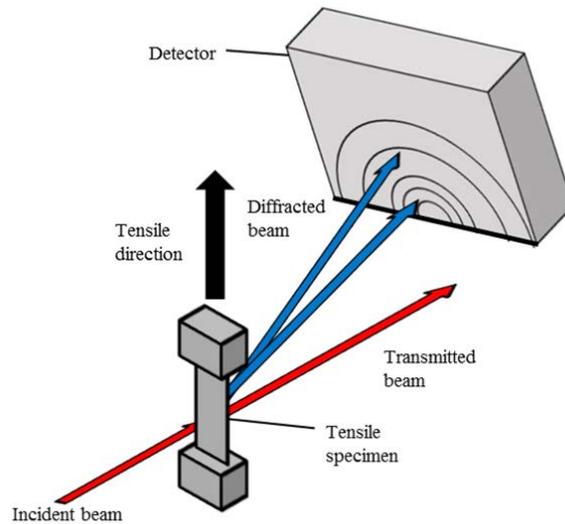


Fig.2 Schematic illustration of the in-situ transmission type X-ray diffraction during tensile test system.

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

結果および考察：

Fig.3 に 700°C x 1 s という急速加熱短時間保持急速冷却で得られた 0.1C-2Si-5%Mn 鋼の引張試験前 (赤線)、引張強さ (Fig. 4 矢印) 時点 (黒線) での X 線回折プロファイルを示す。引張試験前は、フェライトとオーステナイトの比がおおよそ 75 : 25 程度あった。したがって、700°C x 1 s という急速加熱短時間保持急速冷却であっても、初期組織であるフェライト+Mn リッチセメントタイト組織から逆変態によって、フェライト+オーステナイト 2 相組織が形成できたことが分かる。セメントタイトメタラジの威力である。

Fig. 3 からわかるように、引張強さ (Fig. 4 矢印) 時点 (黒線) でオーステナイトのピークは消滅していた。これは、変形によって、オーステナイト→フェライトの加工誘起変態が生じたためである。700°C x 1 s という急速加熱短時間保持急速冷却で生成した組織であっても、加工誘起変態は生じた。

Fig. 4 に各急速加熱短時間保持急速冷却に応じた公称応力-公称ひずみ曲線を示す。引張強さ x 全伸びで、700°C x 1 s で 1000 MPa x 25%、750°C x 1 s で 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、700°C 以下では超微細フェライト粒

組織の母相に微細オーステナイト粒が分散した組織、750℃では母相が超微細マルテンサイト組織になり、超微細オーステナイト粒が分散した組織となった。微細分散オーステナイトの加工誘起変態が、優れた強度・延性バランスをもたらした。

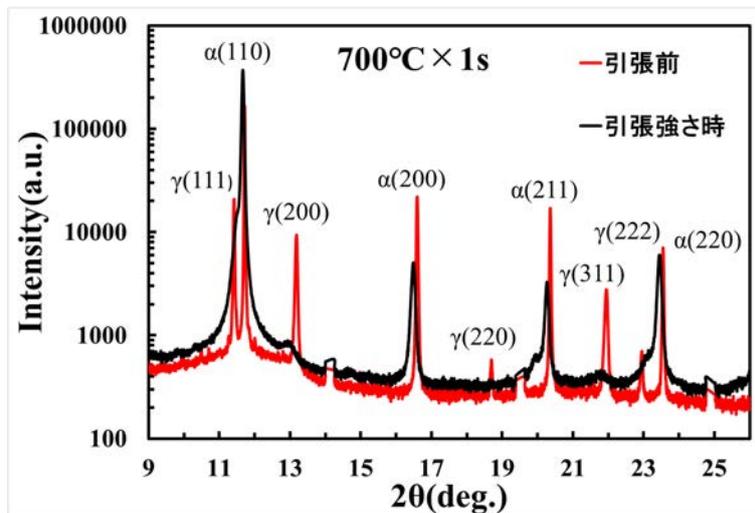


Fig. 3 Change in X-ray diffraction profiles before tensile test and at tensile strength in the 0.1C-2Si-5%Mn ultrafine ferrite + fine dispersed austenite structure steel obtained by rapid heating at 700°C, soaking for 1 s and rapid cooling based on cementite metallurgy.

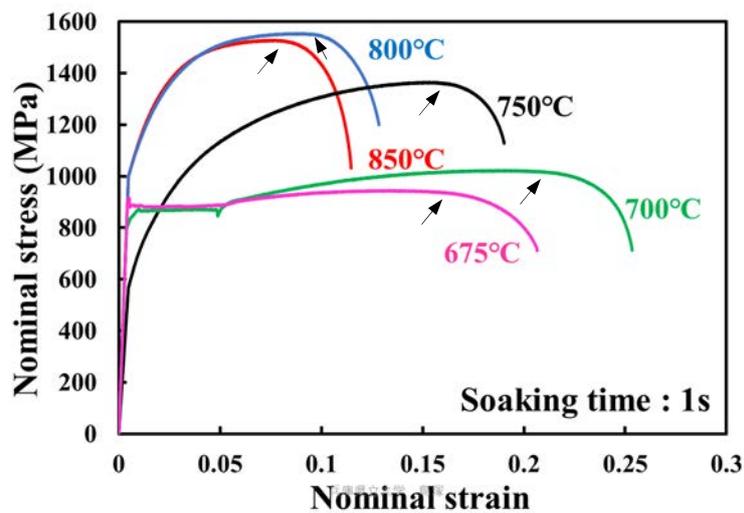


Fig. 4 Nominal stress - nominal strain curve of ultrafine ferrite + fine dispersed austenite in 0.1C-2Si-5%Mn steel obtained by rapid heating and cooling based on cementite metallurgy.

自動車用ハイテンの実機生産でも連続焼鈍という短時間製造技術が使用されている。このように、急速加熱短時間保持急速冷却でも組織形成が可能ということは、セメントメタラジーが中 Mn ハイテン鋼の実用化の可能性を示した結果といえる。

参考文献：

- [1] 安達節展, 鳥塚史郎, 足立大樹, 伊東篤志：鉄と鋼, 105 (2019), 197-206.