

高強度・高延性フェライト+オーステナイト超微細組織 0.2C-7%Mn 鋼  
および微細組織 3D 造形 SUS316 ステンレス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  
0.2C-7%Mn Ultrafine Grained Ferrite + Austenite Steel with High Strength  
and High Ductility and Fine Grained SUS316 Stainless Steel Fabricated by  
3D Additive Manufacturing**

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-5%Mn 鋼は優れた強度・延性バランスを持つが、今回 C 添加量を 0.2%、Mn 添加量を 7% まで増加し、超微細フェライト+オーステナイト組織を形成した。この鋼に対し、引張試験その場透過 X 線回折を行い、加工硬化能の C 添加量依存性、Mn 添加量依存性の検討を行った。

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，3D 造形，インコネル 718

**背景と研究目的：**

構造用金属材料の国際競争力は、その国の産業全体の競争力を左右するといっても過言ではない。強い素材産業があるからこそ、強い自動車産業があり、航空機産業、機械産業がある。特に自動車用ハイテン(高強度鋼板)は、自動車産業の競争力の根幹をなす技術である。また、Ti 合金は今後の日本の航空機産業を支える材料となる。高強度・高延性であり、靱性も高い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るからである。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、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 S I P プロジェクト第二期(戦略的イノベーション創造プログラム)を推進中である。0.1%C-2%Si-5%Mn 組成のフェライト+オーステナイト二相組織鋼を開発し、引張強さは 1200 MPa レベルだが、30%を超える大きな一様伸びと大きな局部伸びを併せ持つ。2019A1648 の実験では、0.15C-2Si-5Mn および 0.15C-2Si-7Mn 鋼の加工誘起変態挙動の解析を行い、2019B1708 では、C および Mn 添加量をさらに上げ、0.2C-2Si-7Mn 鋼をターゲットに解析を行った。今回は、熱処理条件を大きく変え、オーステナイトの体積率を変化させ、さらなる強度・延性の向上を試みた。その強度・延性発現機構を解析し、強度・延性支配機構を明らかにする。

新しい取り組みとして、3次元造形、いわゆる、3D プリンターによる Additive manufacturing の研究をスタートした。ステンレス合金の引張変形中の加工誘起変態挙動を調査し、今まで調べてきた溶解・鍛造材のステンレス鋼の加工誘起変態挙動との差違を明らかにしたい。

**実験：**

試料は Mn 鋼およびステンレス合金であり、その組成は、Mn 鋼で Fe-0.15C-2.0Si-7Mn、Fe-0.2C-2.0Si-7Mn、Fe-0.15C-2.0Si-5Mn、Fe-0.2C-2.0Si-5Mn (wt%) である。また、ステンレス鋼に関しては、SUS304(Fe-18Cr-8Ni-0.03C)、SUS316L(Fe-17Cr-12Ni-2Mo-0.02C)を用いた。Mn 鋼に関しては、真空溶解、鍛造、温間溝ロール圧延を物質・材料研究機構にて行う。初期組織を微細フェライト+セメンタイト組織とした。また、その材料を大学において熱処理を行いマルテンサイト組織とした。SUS304、SUS316 に関しては、兵庫県立大学の圧延設備で、1 ミクロン超微細組織を作

り出した。また、熱処理によって、2 ミクロン、5 ミクロン組織も作り出しておいた。

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り試験機に取り付けた(Fig.1)。2次元検出器 PILATUS を用いた。検出器の位置は、鉄の場合、 $2\theta$  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 20 N のロードセルを用いた。

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。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。

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

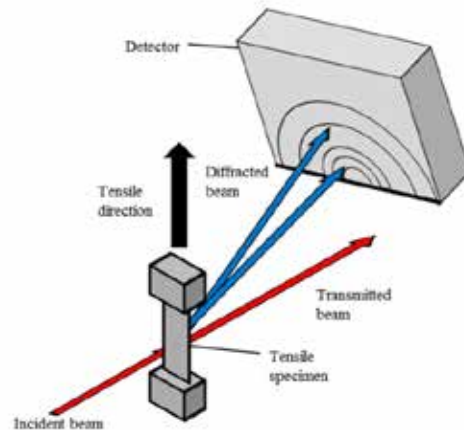


Fig.1 Schematic illustration of the *in situ* transmission type X-ray diffraction during tensile test system.

### 結果および考察：

Fig.2 に、675°C、700°C、725°Cでそれぞれ焼鈍した供試材(0.15%C-5%Mn  $\alpha$ + $\gamma$ 鋼)の公称応力–公称ひずみ曲線(実線)と引張試験中の $\gamma$ 体積率(破線)を示す。675°C焼鈍材では TS が 1000 MPa 級であり、最高荷重点で $\gamma$ が残留していたのに対し、700°C焼鈍材は引張強さが大きく向上し、最高荷重点で $\gamma$ を使い切り、引張強さ 1500 MPa-伸び 30%を示した。725°C焼鈍材は引張強さが大きくなったものの途中で破断してしまい、全伸びが大きく減少した。これらの結果から、700°Cが最適な焼鈍温度であることが明らかになった。700°C焼鈍材 0.15%C は、675°C焼鈍材と比べて、初期体積率が 15%大きくなり、伸び 25%で使い切る適切な安定性を有したことで、超高強度高延性が発現した。700°C焼鈍材の結果から、今まで $\gamma$ 体積率が 30%までしか、 $\gamma$ 体積率と引張強さに相関があることが認められなかったが、 $\gamma$ 体積率が 50%まで $\gamma$ 体積率と引張強さの関係にのることが明らかになった[1, 2]。

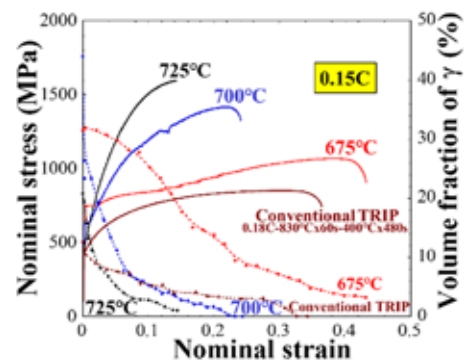


Fig.2 Nominal stress – strain curves and change in  $\gamma$  volume fraction with tensile strain in 0.15C-2Si-5%Mn steels annealed at 675°C, 700°C, 725°C for 1

今後の課題：引張強さが 1500 MPa になる機鋼への理解を深める。7%Mn の効果を明らかにする。

### 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**, 197 (2019).
- [2] 蓑田和樹, 足立大樹, 鳥塚史郎, CAMPS-ISIJ **31-2**, PS-99 (2018).