

優れた強度・延性バランスを持つ SCM440 鋼と Ti-17 合金の
加工硬化挙動の In-situ 解析
In-situ Analysis on Work Hardening Behavior of SCM440 Steel and Ti-17
Alloy with Excellent Strength – Ductility Balance

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

優れた強度・延性バランスを持つ SCM440 鋼と Ti-17 合金の加工硬化挙動を解析するために、引張試験その場透過 X 線回折を行った、引張強さ 2 GPa 級の超高強度材料 SCM440 鋼を対象にして、マルテンサイト組織の加工硬化能に焦点をあて、加工硬化能、転位密度の上限やその増加挙動を明らかにした。

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：

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。

しかし、高強度であり、伸びも大きく、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、いわゆる革新的な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。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、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(産学共創基礎基盤研究プログラム ヘテロ構造制御)を推進してきた。また、現在では S I P(戦略的イノベーション創造プログラム)プロジェクトを推進中である。その成果として、0.1%C-2%Si-5%Mn 組成をベースとしたマルテンサイト組織およびフェライト+オーステナイト二相組織を得た。マルテンサイト組織引張強さ 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。フェライト+オーステナイト二相組織は、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局部伸びを併せ持つ。引張強さ×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[1-5]。これらの優れた力学的特性発現メカニズムを SPring-8 の放射光を用いて解明してきた。革新的構造材料開発の切り口を見だし、次世代自動車用ハイテンや航空機用 Ti 合金の開発につなげつつある。

今回、引張強さ 2 GPa 級の超高強度材料を対象にした。SCM440 鋼は、C 添加量を 0.4%で、Mn 添加量は 0.6%と低いが、Cr を 1.1%、Mo を 0.18%含む鋼で、マルテンサイト組織で引張強さ 2 GPa 級極めて高い強度を有する。また、今回はマルテンサイト組織の加工硬化能に焦点をあてる。マルテンサイト組織を微細と粗大に作り分け、加工硬化能、転位密度の上限やその増加挙動を明らかにする。また、航空機エンジン材料である Ti-17 合金の引張試験中の転位密度変化の測定も試みる。引張試験を行いながら X 線回折を行い、転位密度の増加をダイナミックにとらえたい。

実験：

材料は SCM440 鋼および Ti 合金であり、その組成は、Fe-0.4C-0.3Si-0.6Mn-0.1Ni-1.12Cr-0.18Mo である。Ti-17 合金の組成は Ti-5Al-2Zr-2Sn-4Mo-4Cr である。SCM440 鋼に関しては、大学において熱処理を行いマルテンサイト組織を微細、粗大と 2 種類作り分けた。2 μm、100 μm 組織とする。Ti-17 合金に関しては、鍛造素材をそのまま用いた。

引張試験片試料は平行部長さ 12 mm, 幅 2.5 mm, 厚さ 0.4 mm の引張試験片で、Fig.1 に示すように、BL46XU 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。1 次元半導体検出器 Mynten を用いる。検出器の位置は、鉄の場合、 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る。また、CCD カメラを持ち込み、試験片の伸びを直接計測した。

観察する 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) である。1 次元検出器 Mynten 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 程度とする。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。このとき、重要なのは、鋼の場合、フェライトの高角側の 3 本のピーク (220)、(310)、(321) で、特に重要なのは (321) であり、高いピーク強度が必要である。ピーク強度が低いと、修正 Williamson Hall 法を構成するパラメーターである Chkl や q といったコントラストファクターの算出の誤差が大きくなる。正確な転位密度や転位配列の算出には、高角側のピークに十分な強度が必要である。

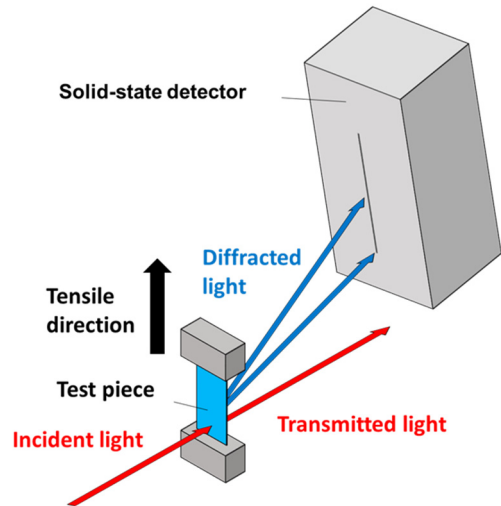


Fig.1 Schematic illustration of the in-situ transmission type X-ray diffraction during tensile test system [4].

結果および考察：

SCM440 鋼において、オーステナイト粒径を $115\ \mu\text{m}$ から $13\ \mu\text{m}$ まで微細にすることで、加工硬化能が大幅に向上したことが確認できた。現在、修正 Williamson Hall 法を用いて、転位密度変化を解析中である。

今後の課題：

修正 Williamson Hall 法を用いて、転位密度変化を解析中を進める。

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).