

鉄鋼材料の魅力 - そのミクロの世界 -

京都大学工学研究科 牧 正志

1. はじめに

鉄鋼材料は、安全で快適な社会を支える重要な基盤的構造材料である。あまりにも身近にありふれた材料であるため、その重要性が忘れがちであるが、種々の要求に応えるべく鉄鋼材料は着実に進歩し続けている。ここでは、最近のいくつかの進歩の例を紹介し、それらをミクロの世界からながめて鉄鋼材料の魅力について述べてみたい。

2. 鉄鋼材料はなぜ多様な用途に対応できるのか

我々は日頃の生活で鉄を意識することはあまりないが、周りを見渡すと非常に多くの鉄製品が存在することに気が付く。鉄鋼材料は、土木・建築、自動車、鉄道、船舶、電機などあらゆる分野で使用されており、我々の生活には無くてはならない構造用素材であり、量的にも他の金属材料に比べて圧倒的に多い。世界で年に約8億トンの鉄が生産され、わが国ではその内の約1億トンを生産し、技術・学術両面において世界をリードしている。供給の規模、経済性、工学的信頼性などから考えて、鉄鋼材料の重要性は今後も変わることなく、構造材料の主流として位置し続けることに疑いはない。

鉄鋼材料がこのように広い分野で実用に供されている理由は、広範な強度レベルをカバーできること、加工性がよいこと、安価であること、リサイクル性に優れていること、などが挙げられる。

構造材料では種々の特性が要求されるが、その最も基本的なものは強さとねばさ（強度と靱性）である。鉄鋼材料は、引張強度で200MPaから約3GPaという非常に広範な強度レベルをカバーできる。これは他の金属材料には見られない鉄鋼材料の大きい魅力の一つである。鉄鋼材料の強度が広範に変化するのには、種々の相変態があるからである。

3. 鉄鋼の各種変態組織と強度レベル

鉄鋼材料は基本的には炭素（C）量が約1mass%以下のFe-C合金であり、これに目的に応じて種々の合金元素が添加されている。

図1はFe-C合金において、高温のオーステナイト相から生成する各種変態組織をC量および冷却速度でまとめたものである。徐冷により、純鉄および極低炭素鋼ではフェライト(α)組織が、共析鋼ではパーライト(P)組織（フェライトとセメンタイト

(Fe_3C)の層状組織)が生成する。亜共析鋼では α +P組織になり、C量が増えるにつれてパーライト分率が増えていく。冷却速度を大きくすると変態温度が低下し、それぞれの組織が微細になる。さらに、臨界冷却速度以上で急冷すると焼きが入り、いずれのC量でもマルテンサイト組織になる。また、中間の冷却速度でベイナイト組織が得られる場合もある。

鋼は強度レベルによって、図2のように軟鋼、高張力鋼、強靱鋼、超強力鋼などとよばれる。これらを組織的に見ると、軟鋼は主としてフェライト組織であり、非調質高張力鋼はフェライト+パーライトである。これら拡散変態生成物では、パーライト組織の約900MPa程度が最高強度である。一方、マルテンサイト組織は約600MPa以上の広範な強度をカバーすることができ、高張力鋼以上の鋼の重要な基地組織である。

図3に用途別に分類した鉄鋼材料と、それらのおおよそのC量および主な加工法を示す。強さ、硬さが要求される鋼ほどC量が多くなっている。通常、加工用薄鋼板と一般構造用鋼はフェライト(+パーライト)組織を、機械構造用鋼、ばね鋼、高硬度鋼ではマルテンサイト組織を利用している。ただし、

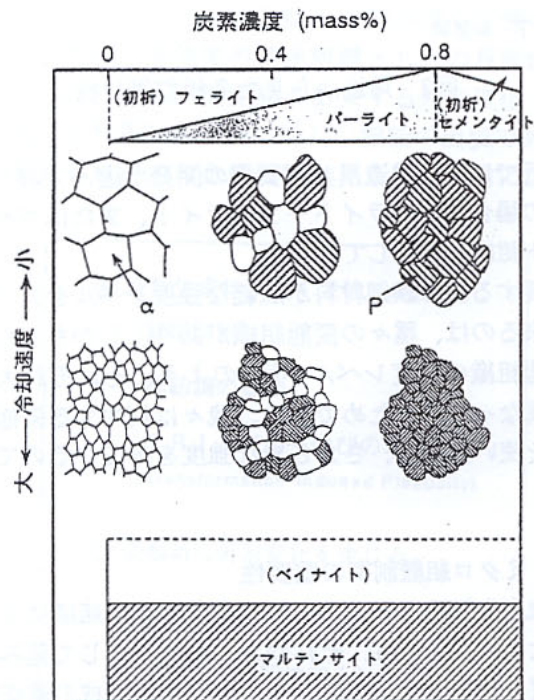


図1 炭素鋼の各種変態組織と炭素量および冷却速度の関係

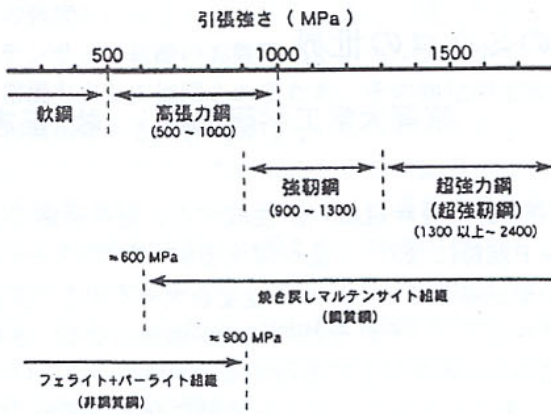


図2 鉄鋼材料の強度レベルによる分類と組織

	炭素量	主な加工法
1. 加工用薄鋼板	極低C	プレス成形
2. 一般構造用鋼	0.2% C以下	溶接
3. 機械構造用鋼	0.1-0.6% C	機械加工
4. ばね用鋼	0.5-0.9% C	
5. 高硬度鋼		
軸受鋼	0.95-1.1% C	
工具鋼	0.6-1.5% C	
高速度鋼	0.7-1.6% C	
6. ステンレス鋼	13% Cr以上	
7. 耐熱鋼		

図3 用途から見た各種鉄鋼材料

最近では機械構造用非調質鋼の開発が進んでおり、この場合はパーライト+フェライト、またはベイナイト組織を利用している。

要するに、鉄鋼材料が広範な強度レベルをカバー出来るのは、種々の変態組織があり、しかもこれら変態組織の強度レベルが図4のようにそれぞれ大きく異なっているためである。我々は利用する変態組織を使い分けて、さまざまな強度を得ているのである。

4. ミクロ組織制御の重要性

強度や靱性などの力学的性質は、微細組織によって大きく変化する。それゆえ、用途に応じて望みの性質を得るには、合金元素およびその組成の適切な選択に加えて、微細組織を最適に制御することが重要である。強靱化という観点からは、結晶粒の微細

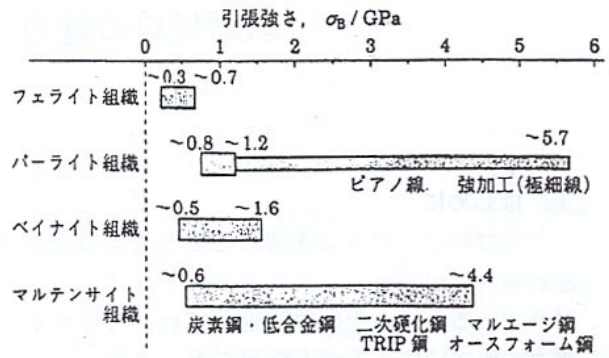


図4 鋼の各組織の強度レベル (実験室データも含む)

化および第二相の均一微細分散化が最も重要である。近年、ナノ材料、ナノ組織が注目を浴びているが、金属材料の組織は μm ~ nm のオーダーであり、鉄鋼材料を含む金属材料は古くからナノ組織制御によってその特性向上を計っているのである。

組織制御は熱処理によって行われる。熱処理は相変態、析出、再結晶を基礎としており、これらを有機的に結合させる加工熱処理は組織制御の最も有効な手段である。近年、鉄鋼材料において種々の加工熱処理や新しいタイプの熱処理が登場し、より複雑で精緻な組織制御が可能になってきた。

5. 超微細粒鋼 (フェライト組織) の創製

金属材料の結晶粒が小さくなるほど室温での強度が上昇し、しかも同時に靱性が向上する。それゆえ、構造用金属材料では結晶粒微細化は最も重要で基本的な組織制御である。鉄鋼材料の結晶粒径は、通常、数 $100\mu\text{m}$ ~ $10\mu\text{m}$ 程度であり、現在実用バルク材で最も細かいフェライト粒は代表的な加工熱処理であるTMCPによって得られる $5\mu\text{m}$ 程度である。微細粒を得る方法には、図5に示すように、相変態や再結晶を利用した熱処理 (または加工熱処理) による方法と、液体からの超急冷、メカニカルアロイング、超微粒子の焼結、アモルファスの結晶化などの特殊なプロセスによる方法がある。後者の方法によってナノサイズの超微細組織が得られるが、形状に制限があるため、大型構造材料は現在のところ作製が難しい。近年、前者の加工熱処理法を駆使して、大型鋼材で $1\mu\text{m}$ もしくはそれ以下の超微細フェライト粒を得る試みが盛んに行われている。

図6に示すように、フェライト組織を有する低炭素鋼の場合に、フェライト粒径が $20\mu\text{m}$ から $5\mu\text{m}$ に変化すると、強度は約 140MPa 上昇し、延性-脆性遷移温度は約 80°C 低下する。もしも $1\mu\text{m}$ の超微細粒にな

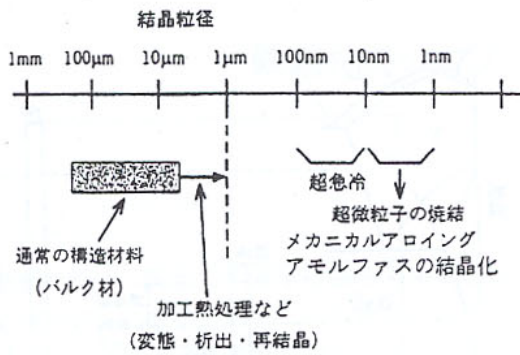


図5 種々な方法により得られる結晶粒の大きさ

れば、20 μ m材に比べて強度は約500MPa上昇し、遷移温度は約280 $^{\circ}$ C低下することが期待される。ここに、1 μ mの魅力がある。

1997年から始まった鉄系スーパーメタルプロジェクト (NEDO) と超鉄鋼 (STX-21) プロジェクト (物質・材料研究機構) (いずれも第1期の5年の活動を終え、2002年から第2期のプロジェクトが開始している) では、いずれも、Ni, Cr, Moなどの合金元素に頼らない単純組成 (Fe-Mn-Si-C) の低炭素鋼で1 μ mもしくはそれ以下の超微細フェライト粒創製に挑戦してきた。両プロジェクトとも現行のTMCP法の極限を追求し、現行のプロセスでは手が着けられていなかった未開の領域である低温大圧下圧延 (500~700 $^{\circ}$ Cで1パス50%以上の圧延) を施すことにより、実験室的規模ではあるが、1 μ mを切る超微細フェライト粒を得ることに成功している。これらの研究により、動的フェライト変態、ひずみ誘起低温拡散変態、加工誘起オーステナイト逆変態などの、今までほとんど知られていなかった新しい結晶粒微細化の原理が生まれつつある。

6. ピアノ線 (パーライト組織) の秘密

パーライト組織を強伸線加工したピアノ線は約3 GPaと実用鋼で最高強度を示し、実験室的には図4に示したように極細線で5.7GPaの引張強度が得られている。ピアノ線はパーライト組織が大きな加工硬化を示すという特徴を利用して高強度を得ているが、強伸線後の加工組織の詳細は、細線であるための観察の困難さや組織の複雑さのためにほとんど不明であった。しかし、近年、最新の解析機器を用いた研究により、パーライト組織を強伸線加工すると、ラメラセメントタイトがナノ粒子化 (20nm程度) することや、セメントタイトの一部が溶解してフェライト中にCが過飽和に固溶すること、など今まで想像もなかった現象がおこっていることが明らかになってきた。ピアノ線は古い材料であるが、その超高強度

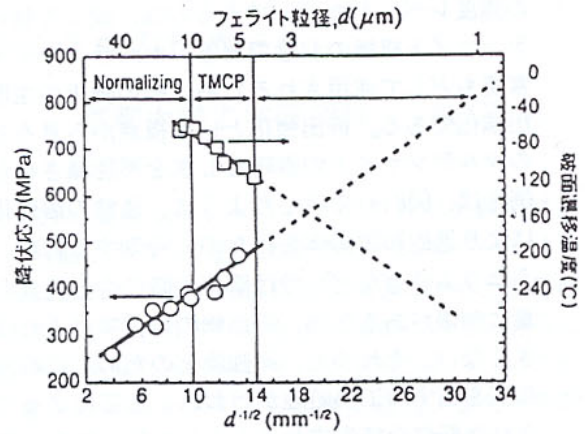


図6 フェライト粒径と降伏応力および延性-脆性遷移温度の関係

の謎や内部組織の秘密が最近になってようやく明らかになり、その結果、大ひずみ加工によって大変面白い組織変化が起こることを我々に教えてくれた。

最近、強伸線加工以外にも種々の大ひずみ加工法による超微細粒形成の研究が盛んになっている。粉末のメカニカルミリングによって、20nm程度のナノ結晶粒が純鉄で得られている。バルク材を得る方法としては、せん断変形を繰返して与えるECAP法や繰返し重ね圧延法などがあり、0.1 μ m程度の超微細粒を得る新しい方法として注目を浴びている。

7. マルテンサイトの魅力

鋼のマルテンサイトの有用性は図7に示すように二つある。ひとつは、変態生成物が硬くて強い組織であるため、高強度の基地組織としての重要性であり、他は、せん断型変態に由来する外形変化 (形状変化) を利用した種々の新しい機能の出現である。

鉄鋼材料が他の金属材料に見られぬ非常に広範囲

- ① 変態生成物が硬くて強い組織 (鉄鋼材料)
 - ・ 強靱鋼の基地
 - ・ TRIP (均一伸びの増大) (Transformation-Induced Plasticity)
 - ② 変態時に外形変化を生じる。
 - ・ 形状記憶効果
 - ・ TRIP (靱性向上)

図7 鋼のマルテンサイトの有用性

の強度レベルをカバーできるのは、硬くて強いマルテンサイト組織のお陰である。マルテンサイトは通常焼もどして使用されるため、その強化の主因は析出強化である。析出強化という視点から見ると、鋼のマルテンサイトの素晴らしさを再認識させられる。例えば、図8(a)に示したように、通常の溶体化処理により過飽和固溶体を得たのち時効する材料（アルミニウム合金など）では溶体化時の合金元素の固容量に制限があるため、析出物の体積率はそれほど大きくない。それゆえ、高強度化のためには時効前に加工を施す加工熱処理が行われ、加工によって導入された転位を核生成サイトとして析出物を出来るだけ細かく均一に分散させるようにしている。ところが、図8(b)のようにマルテンサイト変態は合金元素を多量に固溶する高温のオーステナイトを母相とするため、著しい過飽和固溶体を得ることが出来る手段である。しかも、マルテンサイトには高密度の格子欠陥が存在しているので、焼入れたままで図8(a)の加工熱処理を施した状態になっていると見なせる。さらに、マルテンサイトの焼もどしは、図8(b)に示すように非常に過冷度が大きい状態で析出させていることになる。過冷度が大きいほど核生成のための駆動力が大きくなり、臨界核の大きさが小さくなる。つまり、マルテンサイトは、多量の析出物を均一微細に生成するためのきわめて好ましい条件を自然に備えており、析出強化を最大限に利用できる優れた組織であり、鋼の超高強度化には欠かせない重要な変態組織である。

マルテンサイト変態は、せん断型変態であるため変態時に外形変化（形状変化）を生じる。変態時の形状変化によって周囲の母相に応力を発生する。逆に、母相に残留応力があつたり変形時に応力集中がおこると、マルテンサイト変態によってそれを軽減することが出来る。このような作用を巧く利用すると、靱性・延性が向上する。その一例が、加工誘起変態を利用したTRIP(Transformation-induced Plasticity: 変態誘起塑性)現象である。

TRIPによる延性および靱性向上の理由を模式的に図9に示す。安定なオーステナイトを引張試験すると、ある程度の均一変形をした後くびれが発生し、そこに変形が集中して破断に至る。ところが準安定オーステナイトの場合には、くびれが生じるとその部分の応力が高くなるので加工誘起マルテンサイトが生成する。鋼のマルテンサイトは強いので、くびれの部分が強化されそこでの変形がおこらなくなり、他の部分で変形が進行する。このように、加工誘起マルテンサイト変態によってくびれの進展が抑制される結果、大きな均一伸びが得られるようになる。

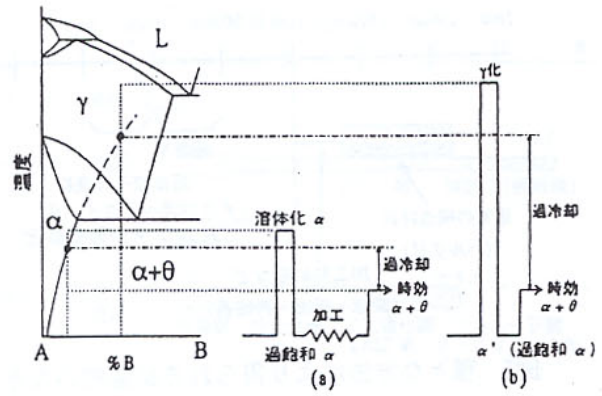


図8 溶体化材(a)および焼入れ材(b)の時効析出の比較

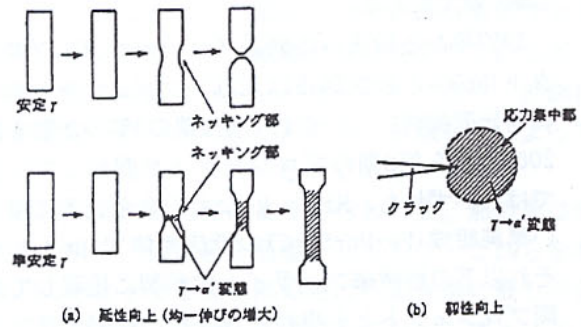


図9 TRIP現象による延性（均一伸び）および靱性向上の説明図

さらに、変形中にマルテンサイトが生成すると靱性も向上する。これは、クラック先端の応力集中部に適当なバリエーションのマルテンサイトが生成することにより変態時の外形変化によって応力集中が緩和されるからである。

このように、TRIP現象を伴う材料は、材料にかかる応力を感知して準安定オーステナイトがマルテンサイト変態をおこし、変形中に発生する破断や割れの原因を自ら取り除いているわけで、まさしく知能材料の典型的な例といえる。

マルテンサイトの利用は、超強力鋼の基地組織として重要であると共に、同時に、応力によって生成する（加工誘起変態）という特徴や、形状変形を伴うという特徴を巧く利用することにより、強靱性に優れた新しいタイプの鉄鋼材料（TRIP鋼）や新しい機能を有する材料（その代表的な例が形状記憶合金である）の開発が可能である。

参考文献

- 1) 牧正志、ふえらむ、3, 781 (1998).
- 2) 牧正志、熱処理、40, 287 (2000).
- 3) 牧正志、金属、71, 771 (2001).