



アラカルト

若手研究者・技術者へのメッセージ-1

ミクロの世界から見た鉄鋼材料の魅力

Attraction of Steels from a Viewpoint of Microstructure

牧 正志

Tadashi Maki

新日本製鐵(株)
顧問

1 はじめに

私は昨年(平成19年)3月末に大学を定年退職しました。大学卒業後そのまま研究室に居残り、以来約40年の間、一貫して鉄鋼材料の組織制御に関する研究を行ってきました。多くの材料がある中で、鉄鋼材料の研究を長い間続けてこられた理由は、鉄および鉄合金の素晴らしさ、物質としての面白さとその魅力に取り憑かれたためです。

今回、ふえらむ編集委員会から、若手研究者・技術者に対するメッセージ記事の執筆依頼をいただきました。良い機会ですので、長年の組織制御の研究を通じて私が感じた鉄鋼材料の魅力について述べてみたいと思います。

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ありませんが、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つきます。鉄鋼材料は、我々の生活になくてはならない構造用素材です。量的にも他の金属材料に比べて圧倒的に多く、水や空気と同じようにあまりにもありふれているため、その重要性和有り難みが分からない存在です。供給の規模、経済性、工学的信頼性などから考えて、鉄鋼材料に取って代わる材料があるとはとうてい考えられません。

なぜ、鉄鋼材料がこのように工業的に重要で大量に使用されているのでしょうか。安価であるとか、加工性に優れているとかいろいろな理由が挙げられますが、多様な用途に対応できる最大の理由は、広範な強度レベルをカバーできることにあると思います。図1¹⁾に示したように、鉄鋼材料は引張強さで約200MPaという軟らかいものから4GPa程度という強くて硬いものまで非常に広範な強度レベルをカバーできます。これが他の材料には見られない鉄鋼材料の素晴らしさで

あり、大きな魅力なのです。

3 鉄鋼材料はなぜ広範な強度レベルをカバーできるのか

鉄鋼材料の基本は鉄-炭素合金であり、これに目的に応じて種々の合金元素が添加されています。鉄鋼材料が非常に幅広い強度レベルを発現できるのは、鉄と炭素の合金であること由来しています。図2は鉄-炭素合金の状態図です。この

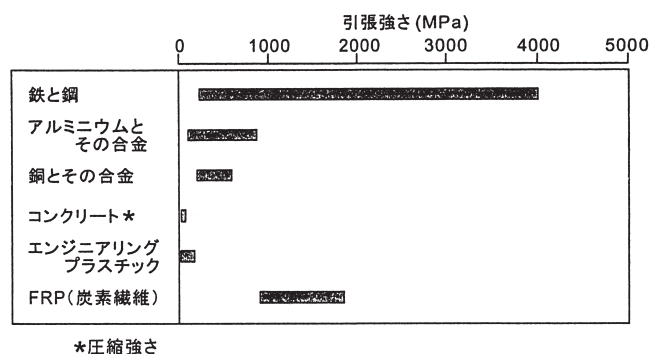


図1 各種工業材料の強度レベル¹⁾

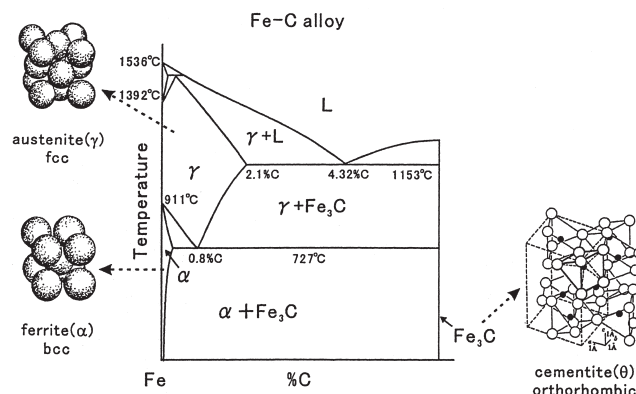


図2 鉄-炭素合金の平衡状態図 (Fe-Fe₃C 系状態図)

状態図が大変うまくできているのです。

鉄は室温では体心立方晶のフェライト (α) で、温度を上げると面心立方晶のオーステナイト (γ) に変わります。高温側に低温と異なる別の固相 (γ) が存在することが、鉄-炭素合金の重要な点です。オーステナイト相があるお陰で、熱処理によって室温での組織を望みとおりに変えることができるのです。

炭素量の異なる鋼をオーステナイトから種々の速度で冷却すると、図3のように変態組織がさまざまに変化します。徐冷した場合、純鉄および極低炭素鋼ではフェライトが、共析鋼 (0.8% C 鋼) ではパーライトが生成します。冷却速度を大きくすると過冷却によって変態温度が低下し、それぞれの組織が微細になります。さらに冷却速度を大きくすると焼きが入り、マルテンサイトになります。また、中間の冷却速度でベイナイトが得られる場合もあります。

ここで大切なことは、各変態相の強度レベルがそれぞれ大きく異なっていることです (図4²⁾)。これが、鉄鋼材料が幅広い強度をカバーすることができる理由です。つまり、我々は

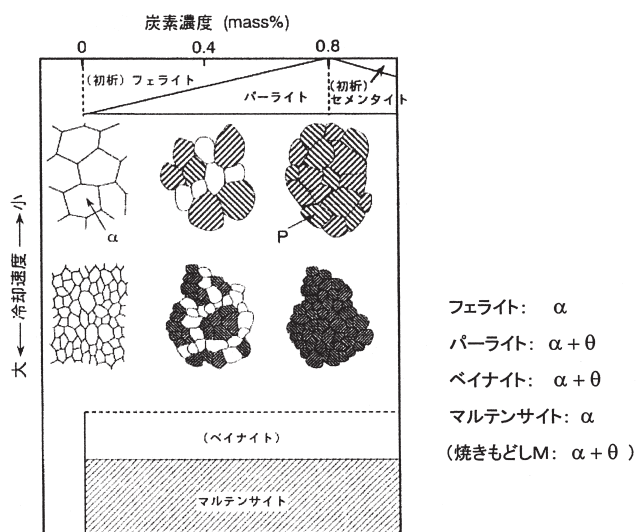


図3 鉄-炭素合金の各種変態組織と炭素量および冷却速度の関係

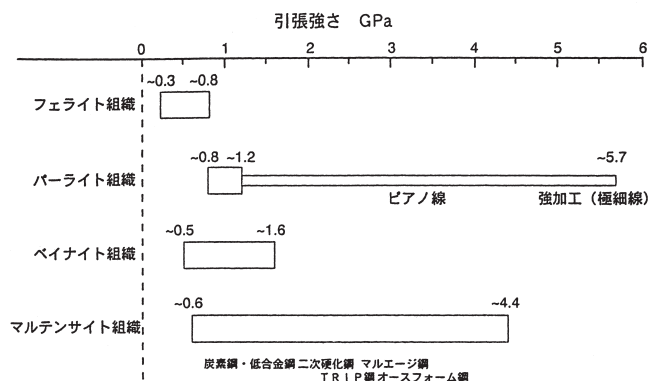


図4 鋼の各種組織の強度レベル (実験室的データも含む)²⁾

用途によって利用する変態組織を使い分けて、様々な強度を得ているのです。とくに、マルテンサイトは焼入れ焼もどしによって約600MPa以上4GPa程度までの非常に広範な強度をカバーすることができます。鉄鋼材料にとってマルテンサイトがいかに重要であるかが分かります。

4 鉄鋼材料はなぜ様々な相変態があるのか

鉄鋼材料に様々な相変態が存在する理由は、前述したようにオーステナイト相が存在するからです。このオーステナイトが鋼の熱処理の出発組織 (母相) になります。図5に鉄-炭素合金と代表的なアルミニウム合金であるアルミニウム-銅合金の模式的な状態図を示します。鋼の場合には熱処理の出発組織がオーステナイト (γ) 相ですが、アルミニウム合金の場合にはこれに匹敵する高温での固相がありません。それゆえ、アルミニウム合金ではパーライト変態やマルテンサイト変態などがなく、鋼のような多様な熱処理が行えません。組織制御の観点から二つの状態図をながめると、オーステナイト相の有り難さを再認識させられます。

固相→固相変態には機構の異なる二つの変態、つまり拡散変態と無拡散変態があります。図3のフェライトやパーライトが拡散変態で、マルテンサイトが無拡散変態で生成した組織です。高温で状態図に従っておこる相変態や析出は、鉄原子や合金原子が拡散することによって相の結晶構造や組成が変わります。原子の拡散は温度依存性が非常に大きく、温度が低くなると急激に移動頻度が低下します。純鉄における鉄原子の体拡散の頻度と温度の関係を図6に示します。鉄原子が1秒間に1回ジャンプする (拡散する) 温度は約550℃で、このあたりの温度が鉄原子が動くか動かないかの目安になります。鉄以外の合金元素、たとえばモリブデンやニッケルなどの置換型合金原子も鉄原子と同様です。一方、炭素は侵入型原子ですので、その拡散は鉄原子や置換型合金原子と比較して極めて速く、しかも低温でおこります。図6の右に示

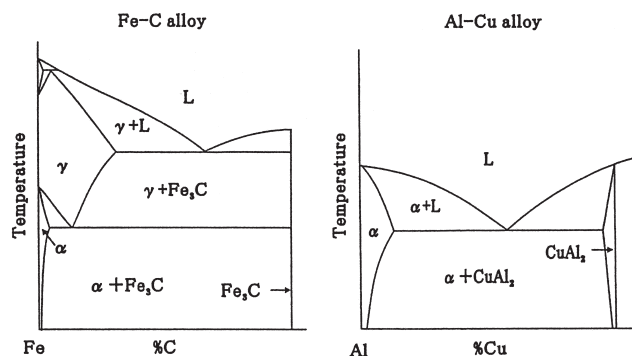


図5 鉄-炭素合金とアルミニウム-銅合金の平衡状態図の比較

したように、炭素原子は40℃近傍で、1秒間に1回ジャンプします。それゆえ、550℃～40℃の温度範囲は、鉄原子や置換型合金原子は動けないが炭素原子は自由に動けるとい、特異な温度範囲にあります。このような温度域でおこるのがベイナイト変態です。このように鉄-炭素合金は、溶媒原子(Fe)と溶質原子(C)の拡散する温度域が大きく異なるという大変珍しい合金なのです。

前述したように、冷却速度を大きくすると拡散変態からマルテンサイト変態に変化しますが、その理由は変態が開始する温度と原子が拡散できる温度との関係で説明できます。たとえば、図7は、共析鋼をオーステナイトから種々の速度で冷却した時のパーライト変態開始温度(A_1 点)の変化を模式的に示しています。 A_1 点は冷却速度が大きくなるにつれて低下し(これを過冷却という)、ついにはオーステナイトが500～550℃以下、つまり鉄原子が拡散しなくなる温度まで持ちこたされます。こうなると、もはや拡散変態であるパーライト変態がおこらなくなり、代わりにMs点で無拡散変態(マルテンサイト変態)がおこるようになるわけです。これが、上部臨界冷却速度が存在する理由です。

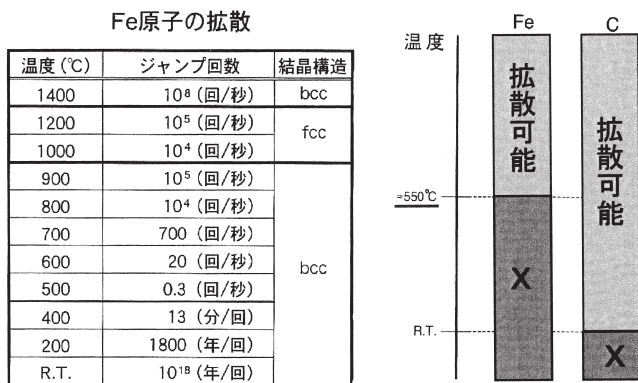


図6 鉄原子の拡散頻度と温度の関係、および鉄原子と炭素原子の拡散可能な温度域の比較

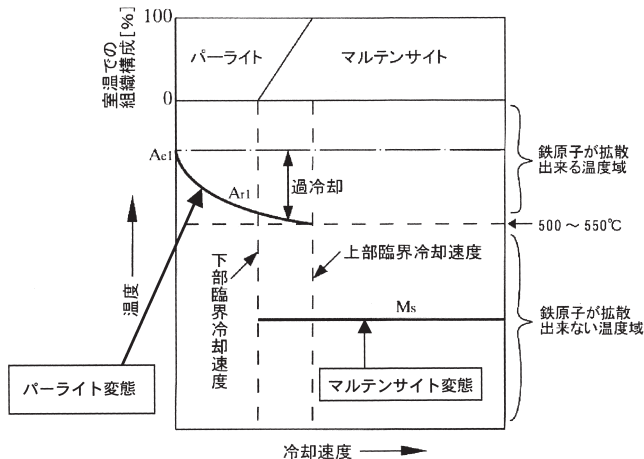


図7 共析炭素鋼の変態点および室温組織に及ぼす冷却速度の影響

5 なぜ鉄鋼材料の組織が変わると強度レベルが変わるのか

鉄鋼材料は、オーステナイトのお陰でいろいろな相変態があり、様々の変態組織を示します。しかし、図2の状態図が示すように、いずれの組織も室温では α と Fe_3C の2相から成り立っています(ただし、マルテンサイトは焼入れ状態では単相(炭素過飽和のフェライト)で、焼もどしにより α と Fe_3C の2相になる)。それではなぜ、同じ $\alpha + \text{Fe}_3\text{C}$ の2相組織なのに、図4のように変態組織が変わると強度レベルが大きく変わるのでしょうか。その理由は、セメンタイトの存在状態にあります。

鉄-炭素合金では、フェライトは炭素をほとんど固溶しない(室温では数ppm)ので、添加した炭素はすべてセメンタイトになります。セメンタイトの体積率は $15.3 \times [\text{mass}\% \text{C}]$ で表せますので³⁾、1.0%Cの高炭素鋼では15.3%ものセメンタイト量になります。通常、非鉄合金では第二相の量が数%程度であることを考えれば、鉄-炭素合金は第二相の量が大変多い合金といえます。

この多量に存在する硬いセメンタイト(Hv=1000程度⁴⁾)の形態やサイズを変えることによって、鉄鋼材料は幅広い強度レベルを発現するのです。図8はフェライト中に存在するセメンタイトの様々な存在形態の例です。微細粒子を均一に分散させるもの、薄膜を積層させるもの、そして細線を一方に並べるもの、などが考えられます。これらのなかの、セメンタイト粒子が均一微細に分散した状態がマルテンサイトの低温焼もどし組織、薄板状のセメンタイトが密に積層したのがパーライト組織です。つまり、炭素鋼ではどのような変態組織でも、母相のフェライトはほぼ純鉄のやわらかい相ですが、第2相のセメンタイトの量、形態、サイズ、分布が変化することにより、強度が大きく変化するのは、この多量に存在する硬いセメンタイト(Hv=1000程度⁴⁾)の形態やサイズを変えることによって、鉄鋼材料は幅広い強度レベルを発現するのです。図8はフェライト中に存在するセメンタイトの様々な存在形態の例です。微細粒子を均一に分散させるもの、薄膜を積層させるもの、そして細線を一方に並べるもの、などが考えられます。これらのなかの、セメンタイト粒子が均一微細に分散した状態がマルテンサイトの低温焼もどし組織、薄板状のセメンタイトが密に積層したのがパーライト組織です。つまり、炭素鋼ではどのような変態組織でも、母相のフェライトはほぼ純鉄のやわらかい相ですが、第2相のセメンタイトの量、形態、サイズ、分布が変化することにより、強度が大きく変化するのは、この多量に存在する硬いセメンタイト(Hv=1000程度⁴⁾)の形態やサイズを変えることによって、鉄鋼材料は幅広い強度レベルを発現するのです。

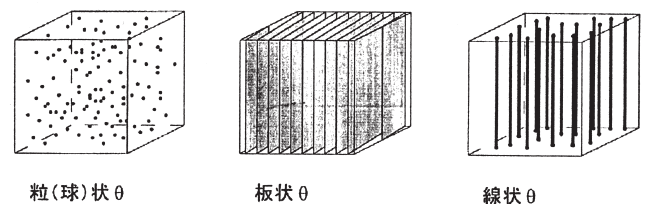


図8 鉄-炭素合金におけるフェライト(純鉄)中のセメンタイト(θ)の存在形態

6 パーライト変態の有り難さ

鉄-炭素合金にパーライト変態（共析変態、共析組成 0.8%C）があったことは大変ラッキーでした。このときに生成するパーライト組織（図9）は、フェライト地に薄いセメンタイト板が $0.1 \sim 0.5 \mu\text{m}$ という極めて細かい間隔で層状に積層された組織です。これは素晴らしい天然の複合材料といえます。このような純鉄とセメンタイトの微細な層状組織を人工的に作ることができるでしょうか。パーライト組織は鉄鋼材料の貴重な財産です。これのお陰で、安価な炭素をわずか 0.8% 添加するだけで、引張強さ 900MPa という高強度が得られるのです。

7 鋼のマルテンサイトの素晴らしさ

鉄鋼材料が他の金属材料に見られぬ非常に広範囲の強度レベルをカバーできるのは、先に述べたように、硬くて強いマルテンサイトのお陰です。通常、マルテンサイトは焼もどして使用されるので、過飽和炭素は炭化物として析出します。それゆえ、焼もどしマルテンサイトの強化の主因は析出強化です。析出強化は大変有効な強化法²⁾で、図10に示したように強化量は析出粒子間距離 (λ) の逆数に比例します。つまり、大きな析出強化を得るためにはできるだけ λ を小さくすればよく、そのためには、析出物の体積 (f) を多くするか、析出物半径 (r) を小さくする必要があります。

析出強化という観点から眺めてみると、高炭素鋼のマルテンサイトは素晴らしい組織であることを再認識します。図11(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、溶体化温度での合金元素の固溶量に制限があるため、強化に利用できる析出物の体積率はそれほど大きくできません。そこで、析出物をできるだけ細かくするように (b) に示すような加工熱処理（時効前の加工）が通常施されます。これは、

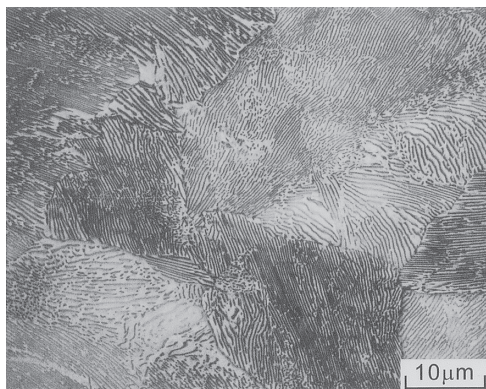


図9 共析鋼のパーライト組織（光学顕微鏡組織）

加工によって導入された転位を析出の核生成サイトとして利用し、均一微細な析出物を得ようとするものです。ところが、図11(c)のマルテンサイト変態をみると、合金元素を多量に固溶する高温相（鋼ではオーステナイト）を母相として、原子の拡散を伴わない無拡散変態で生成するため、母相に固溶していたすべての合金元素はそのままマルテンサイト中にも過飽和に固溶することになります。つまり、マルテンサイト変態は著しい過飽和固溶体を得る手段なのです。しかも、マルテンサイトには高密度の格子欠陥（転位）が存在しているので、焼入れたままで図11(b)の加工熱処理を施した状態になっていると見なせます。このように、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極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、優れた組織なのです。

このように高炭素鋼マルテンサイトを 200°C 近傍で低温焼もどしを行うと、微細な鉄炭化物 (ϵ 炭化物) が多量に析出することにより大きな析出強化がおこり、高強度（高硬度）が得られるわけです。しかし、高炭素マルテンサイトでも $500 \sim 700^\circ\text{C}$ での高温で焼もどすと硬さが大きく低下してしまい

$$\text{析出強化 } \sigma = \frac{2Gb}{\lambda}$$

λ : 析出粒子間距離 G : 剛性率
 b : 転位のバーガースベクトル

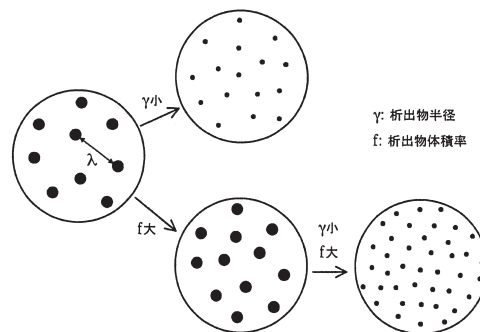


図10 析出物の分散状態と析出強化量の関係

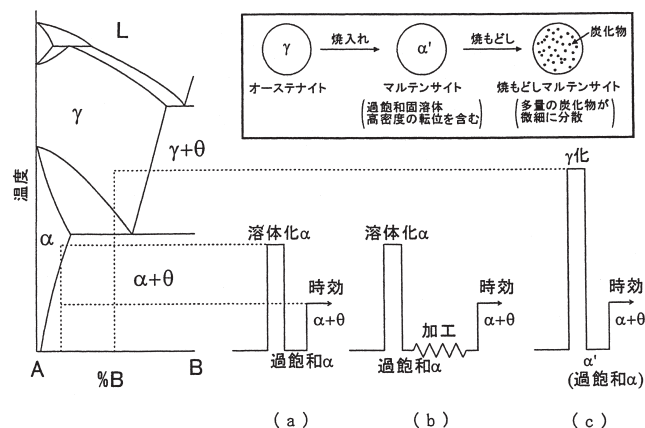


図11 (a), (b) 溶体化材および (c) 焼入れ材の時効析出の比較

ます。これは、高温で焼もどすとセメンタイトが容易に粗大化してしまうからで、析出強化から見たときのセメンタイトの欠点です。この欠点を補う方法のひとつとして、マルテンサイトの高温焼もどし時にセメンタイトに変わって合金炭化物を微細に析出させる焼もどし二次硬化があります。

8 おわりに

鉄鋼材料が広範な強度レベルをカバーできる秘密が鉄-炭素合金の状態図にあることを述べ、組織制御の観点から見た本合金のユニークさと魅力についてミクロの世界から眺めてみました。この状態図の素晴らしさのお陰で、多様な相変態があり、様々な熱処理が可能なのです。鉄鋼材料は研究すればするほど、他の金属・合金と比較すればするほど、素晴らしい材料だということが分かります。重厚長大な構造物を構成する鉄鋼材料が、多様な美しいミクロの世界を持ち、ナノレベルでの精緻な組織制御でその特性を発揮していることを知らない人が大勢います。鋼 (Fe-C 合金) がいかに素晴らしい物質・材料であるかを、できるだけ多くの方々 (とくに学生さん) に感じ取ってもらいたいと願っています。

私は、長年、鉄鋼材料の研究に従事してきました。この間に「鉄鋼材料は成熟した材料でもう研究することがない」と

か、「鉄鋼産業は成熟産業で、材料としての発展はない」などの言葉をしばしば耳にしましたが、決して成熟した材料ではありません。鉄鋼材料はまだまだ発展途上の材料で、多くの可能性を秘めています。鋼が有している本来の能力を、我々はまだ十分には引き出していません。たとえば、強度に關しうと、引張強さで1~2GPa程度の鋼は高強度鋼ですが、それでも鉄の本来有している強度 (理想強度) の高々10~20%程度です。鉄鋼材料はまだまだ強くなるはずで、工業的重要性はもとより、研究対象としても、まだまだ解決せねばならない問題が山積している、魅力にあふれた材料です。鉄を愛し、情熱を持った有能な若い研究者・技術者がいる限り、鉄鋼材料の未来は明るいと確信しています。

参考文献

- 1) 矢田浩：ふえらむ，1 (1996)，185.
- 2) 牧正志：ふえらむ，3 (1998)，781.
- 3) 高木節雄：第141，142回西山記念技術講座，日本鉄鋼協会編，(1992)，1.
- 4) 梅本実，土谷浩一：鉄と鋼，88 (2002)，117.

(2008年4月21日受付)