



## 鉄鋼材料、この素晴らしい素材

顧問 牧 正志

### 1. はじめに

私は4年前に大学を定年退職するまで、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、鉄および鉄合金の物質としての素晴らしさに感動し、その魅力にとりつかれたためです。

今回、新日鉄技報100周年記念特集号発刊に際し寄稿のお誘いをいただきました。良い機会ですので、大学における長年の研究生活そして技術開発本部での最近の勤務を通じて私が感じてきた、鉄の魅力、鉄鋼材料の未来、鉄鋼研究の難しさ、鉄と接する楽しさ、鉄鋼研究者に望むこと、などについて思いつくままに述べてみたいと思います。これは、鉄を扱う研究者・技術者、特に若い皆さんへの期待を込めた私からのメッセージです。

### 2. ミクロの世界からみた鉄鋼材料の魅力

鉄鋼材料は我々の生活には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、その重要性和難みが分からない存在です。鉄鋼材料はなぜこのように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くつかの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、その優れた強度-靱性(延性)バランスと、広範な強度レベルをカバーできることにあります。鉄鋼材料は引張強さで約200MPaという軟らかいものから、5GPa程度という強くて硬いものまで非常に広範な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。

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に由来します。鉄-炭素合金の状態図を組織制御や強化の観点から見ると、素晴らしい仕組みが備えられていることが分かります。炭素が侵入型元素であるというのも、他の合金にはないユニークな点で、鉄鋼材料の特性を際立てています。鉄を扱う我々は、この鉄-炭素合金の状態図の理解を通して、鉄鋼材料の物質と

しての素晴らしさを認識する必要があります。

鉄-炭素合金には高温側にオーステナイトという固相が存在することが重要なのです。このオーステナイトが熱処理の出発組織(母相)になり、炭素量や冷却速度を変えることによって、フェライト、パーライト、ベイナイト、マルテンサイトと強度レベルが大きく異なる様々な変態組織を得ることが出来ます。つまり、我々は変態組織を使い分けることにより様々な強度を得、それによって多様な用途に対応しているのです。アルミニウム合金の場合には、オーステナイトに匹敵する高温での固相がないため相変態がなく、鋼のような多様な熱処理が行えません。アルミニウム合金を扱ってみると、いかに鉄鋼材料が素晴らしい恵まれた材料であるかが良くわかります。

このように、鉄-炭素合金ではオーステナイトがあるおかげで様々な相変態が occurs ますが、いずれの変態組織も、平衡状態図が示すように室温ではフェライトとセメンタイト( $\text{Fe}_3\text{C}$ )の二相から成っています(ただし、マルテンサイトだけは焼入れ状態では炭素過飽和のフェライト単相です)。それではなぜ、同じフェライト+セメンタイトの二相組織なのに、変態組織が変わると強度レベルが大きく変わのでしょうか。その理由は、セメンタイトの量と存在状態の違いにあります。

フェライトは炭素をほとんど固溶しないため(室温では1ppm以下)、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 $15.3 \times [\text{mass}\% \text{C}]$ で表されますので、例えば0.8% Cの共析鋼では約12%ものセメンタイト量になります。一般に金属材料は、第二相の量が多くなるほど組織制御や強化がしやすくなり、好ましいのです。通常非鉄合金に比べて、鉄-炭素合金は第二相(セメンタイト)の量が大変多い合金なのです。鉄鋼材料は、このセメンタイトの量を炭素量によって変え、形態およびサイズを熱処理(相変態)によって変化させることによって、幅広い強度を発現させているのです。

鉄-炭素合金にはパーライト変態(共析変態)があります。この変態で生成するパーライト組織は、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積層された組織です。これは素晴らしい天然の複合

材料です。このような微細な層状組織を我々は人工的に作る事が出来るでしょうか。パーライト変態は鉄鋼材料の貴重な財産です。この変態のお陰で、引張強さ200~300MPa程度の純鉄が、炭素という安価な合金元素を0.8%添加するだけで、900MPaという高強度を示すようになるのです。

鉄鋼材料が非常に高強度(高硬度)になるのは、マルテンサイトのお陰です。マルテンサイトは通常、焼もどして使用されますので、その強化の主因は析出強化です。析出により大きな強化を得るには、析出物の量を多くするか、析出物を微細にする必要があります。マルテンサイトは無拡散変態であるため、母相のオーステナイトで固溶していた炭素はそのままマルテンサイト(フェライト)に強制的に固溶します。つまり、マルテンサイトは、著しい過飽和固溶体を得る有効な手段なのです。しかも、マルテンサイトにはセメントイト析出の核生成サイトとなる転位が高密度に存在しています。このように、鋼のマルテンサイトは、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。このお陰で、鋼のマルテンサイトは他の金属には見られない大きな強度を示すのです。

このように鋼の変態組織はそれぞれに異なった個性を持っており、組織制御や強靱化の方法が異なります。これが鉄鋼材料の面白いところであり、難しい点でもあります。すべての変態組織になじむことによって初めて、鉄鋼材料の素晴らしさ奥深さを実感する事が出来ます。鉄鋼材料を扱う研究者、技術者は出来るだけ多くの変態組織に直接触れてなじむ事が大切だと思います。

### 3. 鉄鋼に未来はあるか

鉄鋼材料は構造材料として欠かせない材料です。他にも構造材料はいろいろありますが、供給の規模、経済性、工学的信頼性などから考えて、鉄鋼材料にとって代わるものがあるとは考えられません。鉄鋼材料が将来にわたって工業材料の中心的役割を果たさねばならない宿命を負っている限り、我々は、より安価なものを供給する努力に加えて、より高性能、高機能を有した鋼を開発し続けていかねばならない責務があります。それでは、鋼に未来はあるのでしょうか。

「鉄鋼材料は成熟した材料で、もう研究することはないのでは」とか、「鉄鋼産業は成熟産業で、鉄鋼は材料として発展する余地はないのでは」などの言葉を時に耳にします。しかし、鉄鋼材料はまだまだ発展途上の材料であり、鉄鋼業は著しい市場拡大を控えたエネルギーあふれる成長産業と言えるでしょう。鉄鋼材料は決して成熟しきった材料、研究し尽くした材料ではありません。金属組織学的観点だけから見ても、まだまだ未開、未着手の領域があり、多くの可能性を秘めています。二、三の例を挙げてみましょう。

例えば、強度に関していうと、現在の実用鋼の最高強度

はバルク材でマルエージ鋼の約2.5GPaです(極細線では約5GPa)。2.5GPaという値は鋼の理想強度の1/4~1/5程度であり、我々は鉄鋼の有する本来の強度機能を未だ十分に引き出していません。鉄鋼材料はもっと強くなるはずですが。最高強度2.5GPaという値は40年以上も前に達成されたもので、その後現在に至るまで停滞したままです。超高強度化には種々の難しさはありますが、この停滞の最大の理由は、鋼の超高強度化が工業的重要テーマで無くなり魅力を失ったため、真剣に取り組む研究者がほとんどいなくなったことにあります。種々の強化機構を組み合わせると、例えば5GPaという強さは原理的には実現不可能な値ではありません。しかしこのような超高強度化が実現しないのは、超高強度になると早期破断(降伏変形前の破断)を起こすようになるからです。超高強度化に伴う早期破断の顕在化を抑制する方法のひとつは、結晶粒の微細化です。つまり、結晶粒の超微細化こそが超高強度化実現の鍵を握っているのです。

そもそも、我々は未だ、金属材料の強化機構を完全には使いこなしていません。強化機構には固溶強化、粒界強化(細粒強化)、転位強化(加工硬化)、粒子分散強化(析出強化)の4つがありますが、現在我々がその能力を最大限に発揮させて使いこなしているのは析出強化だけです。粒界強化(強度は結晶粒径の $-1/2$ 乗に比例)および転位強化(強度は転位密度の $1/2$ 乗に比例)は共に原理的には大きな強化が期待出来ます。しかし、現在、実用鋼で種々の方法を駆使して得られている最も微細な結晶粒径は $5\mu\text{m}$ 程度、最高転位密度は $1\times 10^{15}/\text{m}^2$ 程度です。皮肉なことに、これらの値は丁度強度上昇が急激に大きくなり始める辺りの組織状態なのです。要するに、我々は未だ粒界強化も転位強化も、その本来の強化能力を発揮させていないのです。逆にいえば、有り難いことに、まだ未開の強化の手段が残っているということです。この強化の未開領域、つまり、超微細粒組織と超高密度転位組織の創成は、組織制御の未踏領域そのもので、長年停滞していた超高強度化の壁を打破する可能性を秘めた挑戦に値するテーマの一つでしょう。近年、大ひずみ加工が組織制御の分野で注目を浴び研究が盛んになっているのも、このような背景があるからです。

鉄鋼材料には様々な相変態がありますが、各変態組織にはそれぞれ長所と短所があります。適当な二相(または多相)を複合させることにより、互いの長所を生かし欠点を補う事が出来ます。亜共析鋼のフェライト+パーライト組織は典型的な複相組織鋼であり、軟らかいフェライト地に硬いマルテンサイトを分散させたdual phase鋼や強いマルテンサイトにねばいオーステナイトを分散させた9%Ni鋼なども有名です。たとえば、強度-延性バランスで、通常強度を上げて行きますと延性は連続的に低下していきませんが、時々、延性が不連続に大きく上昇する事があります。このような不連続な特性向上は、複相化したときに出現することが多いのです。様々な変態組織があるという鉄鋼の

特長を最大限に発揮させることが出来るのが複相組織鋼です。二相や三相組織の組み合わせは数多くあり、我々の知らない有望な複相組織がまだまだあるに違いありません。これも、未開の領域です。複相材料を得るために代表的な熱処理が、フェライト+オーステナイトなどの二相域を利用した二相域熱処理です。この熱処理の面白さは、二相域での加熱中におこる二相間の合金元素の分配を利用し、低合金鋼でありながら高合金の性質を持った第二相を分散させることが出来ることにあります。さらに、複相組織は熱処理中の粒成長が遅くなるので、微細粒を得やすいという利点もあります。複相組織の活用が一層望まれます。

鉄鋼に現れる様々な変態組織を使い分けることによって広範な強度レベルをカバーしている事は先に述べました。これら変態組織の中で、ベイナイトは変態機構の理解も工業的利用も一番遅れています。ベイナイトの強度はマルテンサイトとフェライト（+パーライト）の中間にあります。それゆえ、高強度や高硬度が必要な時はマルテンサイトが用いられ、強度レベルが低い鋼では主にフェライトが用いられてきたため、ベイナイトは今まではどちらかと言うと脇役的な存在で、十分に活用されていませんでした。ベイナイトという重要な変態組織が、ほとんど未開の状態に残っていたのは幸せなことです。ベイナイトをマルテンサイトのように徹底的に研究し使いこなすことが出来れば、優れた特性を有する新しい鋼が色々生まれてくるはずです。

#### 4. 鉄鋼研究の難しさと継続の大切さ

現在実用化されている鉄鋼材料は、多くの先達が心血を注いで長い時間をかけて創り上げてきたものです。その性質をさらに大きく上回る高級な製品を開発したり、新しいプロセスを開発するには、以前にもまして高い能力と努力が必要です。決して片手間仕事で成し得るものではなく、総力を挙げて取り組むべき課題です。

1960年代から1970年代初頭の高度経済成長期、我が国の鉄鋼業が著しく成長していた頃は、企業も大学も多くの優れた人材（研究者）を有し、高いポテンシャルを維持しながら互いに競い合い、基礎・応用両面にわたる精力的な研究で活気に満ちていました。その間に蓄積されたポテンシャルはその後の鉄鋼材料開発、プロセス開発に対して大きな貢献をしました。当時の研究者たちは、鉄鋼材料研究にロマンを感じ、大きな誇りを持っていました。しかしその後社会情勢の変化に対応し、多くの研究者（特に大学関係）が鉄鋼材料から新素材の分野へと移っていき、企業においても鉄鋼研究者の数は減少しました。

大学でも鉄鋼を研究する人が昔に比べ激減し、今でも減少は続いています。一度鉄から離れた人が再び鉄に戻るには、また、今まで鉄に無縁であった人が鉄鋼材料の研究に新たに参入するのは、ハードルが高く大変難しいことなのです。なぜなら、研究対象として見たとき、鉄鋼材料はあまりにも多種多様で複雑であり、しかも過去に膨大な研究

の蓄積があり、年々着実にしかも高度に進歩しているため、的確な課題の抽出、独創的な研究テーマの設定が非常に難しいからです。鉄鋼研究者に高い能力が要求される由縁です。鉄鋼研究に対する高いポテンシャルを維持するためには、鉄鋼に慣れ親しみ常に問題意識を持ち続けること、すなわち研究の継続が必要なのです。

鉄鋼材料には過去に莫大な研究の蓄積があります。過去の研究の中には、優れた原理を有しながらプロセスの難しさや当時のニーズにマッチせず実際に利用されずに埋もれている現象が多くあります。加工熱処理を例にとると、1960年代に非常に注目を浴びたオースフォームやTRIP（マルテンサイト変態誘起塑性）は、鋼の強靱化に非常に有効であるにもかかわらず、種々の制約によって実用化に至らず、1970年代後半には世の中の関心が急速に薄れていきました。しかし、優れた原理を有する現象は、登場したのが早すぎたためにその時は日の目を見ず忘れ去られたとしても、周囲の状況の変化や新しい発想の出現によって、必ず時期が来れば再登場するものです。実際、TRIPやオースフォームは20～30年後に復活し、今では実用鋼に適用されるようになっています。

他にも、優れた原理を有しながら登場したのが早すぎたため実用化されず埋もれている現象や技術は数多くあるでしょう。過去の研究は宝の山で、これが鉄鋼材料の財産です。この宝の山に埋もれている優れた現象や技術を探り当て、新しい姿に復活させることも鉄鋼研究者、技術者の大きな能力のひとつです。若い研究者、技術者がこのような過去の重要な研究や技術、いわば貴重な知的財産をどれだけ知り継承しているのでしょうか。知的財産の伝承のためにも、個人または組織として研究を継続していく事が大切であると思います。

#### 5. 組織観察の重要さと楽しさ

私は大学で主に鉄鋼材料の組織制御について研究しておりましたので、組織観察が最も重要な研究手段でした。組織を眺めていると金属の世界に浸ることが出来、ミクロの世界の美しさに感動し、金属が血の通った生き物のように思えてきます。それゆえ私は、組織写真は絶対に美しくなければならぬ、という信念を持っています。

組織観察には大変難しい点があります。熱処理に伴う組織変化・組織形成の研究では、組織写真そのものが実験データです。例えば、引張試験で強度測定をする場合には、操作さえ間違わねば誰でも同じデータが得られます。しかし組織観察の場合には、観察する人の組織を読み取る能力が重要になります。なぜなら、一つの試料から多くの写真を撮ると、どれ一つ同じ組織写真はありません。このことは、ミクロになればなるほど、つまり光学顕微鏡組織よりも電子顕微鏡組織のほうがより顕著になります。全体の傾向を示しているという1枚（または数枚）の写真を、最終的にはデータとして採用するわけですから、多くの写真の中からそれを選び抜くには、注意深い観察と判断が必

要です。そのためには全体感を把握するために多くの組織写真をとること（または眺めること）が大切です。組織観察が大変骨の折れる作業である理由はここにあります。

しかしながら、組織観察には大変楽しい一面があります。それは、金属と会話が出来るということです。ある目的の特性を発揮させるために最適の組織を創ろう（組織制御）と考え、新しい熱処理を試みたとしましょう。その結果は組織写真に現れます。それを見て一喜一憂しながら、なぜこのような組織になったのか、なぜ思うような組織にならなかったのかを考えます。それを明らかにするために、さらに別の熱処理を行い、一連の組織観察を行った後、自分なりの答えを出さねばなりません。あらゆる知識を総動員し、時には計算をして考えます。しかし、たいていの場合、問題を解くヒントはすでに撮っている組織写真の中に隠されています。それを我々が読み取れるかどうかにかかっているのです。

そのためには、多くの写真を、出来れば直接に顕微鏡下で、組織の隅々までを何度も何度もなめるように眺めることが大切です。そして、なぜこのような組織になったのか、を金属の気持ちになって金属と会話をしながら考えるのです。考え続ける事が大切です。そうすると、何故この組織に気がつかないのか、ここに解決のヒントがあるだろう、何故そのような間違った熱処理をするのか、もう一工夫すれば望んでいる組織になるのに、という金属の叫び声が聞こえてくるようになります。

組織観察は、説明のためだけに行うものではありません。金属との会話を通じて問題解決のヒントや全く予想もせぬ新しい現象を見出すきっかけが得られるところに、組織観察の重要さと楽しさがあるのです。私は、金属材料を扱う研究者、技術者は金属と会話が出来ることが必要不可欠であると思っています。そのための一つの有効な方法が金属組織観察なのです。近年、組織観察のための手法、解析機器は著しく進歩していますが、いかに観察機器が進歩しても、結局は情報の宝庫である金属組織を読み取る研究者の能力こそが一番大切である、ということは今も昔も変わらないと思います。

## 6. 若い鉄の研究者に望むこと

素晴らしい素材である鉄鋼材料を生かすも殺すも、我々研究者、技術者次第です。最後に、研究とはどういうものか、研究者とはどうあるべきか、私が思っていることを少し述べてみます。

研究は面白いものです。毎日がわくわくする時は、研究がうまくいっている時です。その面白さがあるから、連日のきつい作業にも耐えられるのです。研究者はその面白さと感動を出せるだけ多く体験せねばなりません。

寝食を忘れて頑張ることは大切ですが、頑張りさえすれば良い結果が得られる、というものではないところが研究のつらいところです。努力をすればそこその結果は得られるでしょうが、それを超える優れた成果を上げるには、

努力以外に、個人の高い研究能力と優れた研究センスが必要なのです。研究のセンスは、良いセンスを持った上司の指導によってのみ身に着くものです。研究能力には専門知識、解析力、観察力などがあり、加えてプレゼンテーション力とコミュニケーション力も必要です。これらの素養は、頭が柔軟で集中力のある若い時にしか身に付きません。年をとれば知識の幅は広がりますが、なかなか深まりません。若い人は、今が大切です。

実験で手を動かし計算機を使っていれば、自ずとデータは出てくるので、それで研究をしているという自己満足に陥りやすいものです。頭を使わず結果のみをひたすら追い求め、説明なしに結果の羅列だけで終わるのは、単なる作業です。このような作業が日常になると、そのうちそれが研究なのだと思ってしまうのです。研究もどきを研究と錯覚してはいけません。研究者は、いつも考え続けなければなりません。何故か何故かと考え続けるのです。突然のひらめきは、考え続けている人にもみ現れるのです。考えることは習慣です。考えることを忘れた研究者は研究者失格です。常に基本に立ち返り、原理原則に則って物事を考える習慣を身につけてください。

研究は独創的でなければなりません。人の物まねや後追い研究は誰でも出来ます。自分でしかできない研究をすることに、研究者の誇りがあるのです。また、研究には継続も必要です。しつこく、あきらめず、ねばり強く取り組むことが大切です。ねばり抜き、ただ一人未踏の山を越えたとき、その後ろに誰も知らない素晴らしい宝の山が待っているのです。

研究は、論文としてまとめて初めて完成します。企業の研究は、論文を書くのが目的ではありませんが、少なくとも論文としてまとまるような質の高い研究をすべきです。学会で発表し、論文にまとめるという経験を繰り返すことにより、自然に研究者のポテンシャルが向上し、ひいては会社に貢献できる研究者に育つのです。

どうか、志の高い、本物の研究者になっていただきたいと思います。

## 7. おわりに

鉄は素晴らしい素材です。このような素晴らしい材料を扱っていることに感謝し、将来にわたり構造材料の中心としてあり続ける鉄鋼材料の研究開発に従事していることに、大きな誇りを持ってください。そして、まだまだ大きな可能性を秘めたこの材料を、さらに大きく育てていくのは、我々に課せられた大きな責務です。

鉄を扱う研究者・技術者は、鉄の物質としての魅力を知り、鉄を好きになる事が不可欠です。鉄と会話が出来、鉄を生き物のように感じるような、研究者・技術者になってほしいと願っています。鉄を愛し、高い志と情熱を持つ有能な人材がいる限り、鉄鋼材料の未来は明るいと確信しています。