ものづくりの原点

が秘める理想の特性を引き出す、 未踏領域への挑戦を



スチール缶から家電や自動車、建築物、橋梁まで、 社会の幅広い分野で活用されている鉄。新日鉄では、 多様化、高度化する社会ニーズに応える鋼材製品を 開発・提供し続けている。今号では「ものづくりの 原点一科学の世界」シリーズの特別座談会として、 京都大学名誉教授の牧正志氏(当社顧問)にご登場い ただき、幅広い特性を発現する機能材料としての鉄 の素晴らしさと、鉄鋼材料が秘めた無限の可能性に ついてお話を伺った。

京都大学名誉教授

(新日本製鉄(株) 顧問) 牧 下志氏

プロフィール ◉ まき・ただし

1943年生まれ。66年京都大学工学部金属工学科卒業。同大学院(金属加工 学専攻)を経て73年「準安定オーステナイト鉄合金のマルテンサイト変態誘起 塑性 (TRIP) 現象に関する研究」で工学博士の学位を取得し、76年同大学助 教授、88年同大学教授に。その後、(社)日本鉄鋼協会会長、(社)日本金属学会 理事も務め、2007年より現職。現在、(社)日本熱処理技術協会会長。日本鉄鋼 協会西山賞(07年)、日本金属学会賞(09年)ほか、受賞多数。

空気や水のように当たり前、 自然と生活になじむ鉄

高橋 まず初めに、生活における鉄 の存在についてお話を伺いたいと思 います。鉄はビルや橋、自動車、家 電など、生活の中で大量に使用され ている身近な材料であるにもかかわ らず、普段の生活でそれを意識して いる人は少ない気がしています。

牧 それは「素材 | の宿命ですね。生 活で使われている材料の約半分を占 める金属の95%が鉄であり、空気や 水のように生活になくてはならない ものですが、姿を自在に変えて暮ら しに深く浸透しているため、普段あ まり認識されません。

例えば本州四国連絡橋の吊橋構造 は鉄の線材の高強度化によって実現 したと言えますが、社会の興味は設 計やデザインなどに向かいがちです。 線材は高強度化しても見た目は変わ りませんからね(笑)。それも"縁の下 の力持ち"である鉄の宿命です。

宮坂 家電や自動車向け鋼板など表 面処理を施した美麗な材料は、鉄だ

と思われていないことが多々ありま す。当社を見学された方に、家電製 品などの実例を紹介すると「これも鉄 なんですか? |と驚かれることがあり ます。スチール缶に至っては、鉄とは 異なる「スチール」という別の材料だ と思っている人もいるぐらいです(笑)。 高橋 よくアルミは加工しやすく、 鉄は硬くて加工しにくいと誤解され ることがあります。鉄、特に薄鋼板 では塑性加工により非常に複雑な形 状をつくれることもあまり知られて いませんね。

牧 難易度は異なりますが、鉄を含 めた金属は全般的に「延び」の性質を 持っています。一方、金属以外の素 材であるセラミックスは延びがなく 圧延できないため、粉を固めて成形 しなければなりません。また、プラ スチックは樹脂を加熱して型で成形 できますが、圧延・伸線することは できません。金属は加工成形がしや すく、中でも鉄は資源量の豊富さか ら「大根より安い | と言われるほど廉 価で、供給規模、経済性、工学的信 頼性の点から見ても、他に取って代 われる材料はないと思います。

熱処理によって生み出される 幅広い強度特性

宮坂 今お話のあった成形の自由度 や資源の豊富さに加えて、特性とし ての幅広い強度範囲が鉄の社会への 浸透を促したと思いますが、いかが ですか。

牧 世界で十数億トンもの鉄鋼材料 が使われている大きな理由は、200~ 4,000MPa(*1)という幅広い強度範囲 によってさまざまな用途に合う製品 を生み出してきたことにあります(図 1)。複雑な成形に耐え得る、軟らか い自動車のボディパネルから強靭な 橋梁ケーブルまで、これほど幅広い 強度をカバーできる材料は、鉄、正 確には"鉄-炭素の合金"である「鋼」 しかありません。そしてそこに鉄が 持つ本質的な素晴らしさがあります。

鉄は、成分の調整と多彩な熱処理 方法によって鋼中の炭素の振る舞い をコントロールし、他の金属にはな い多彩な材質を生み出すことができ

ます。例えば、高温の鋼(オーステ ナイト相)を急冷すると、原子が拡散 する暇もなく変態(※2)するので、鉄 結晶の隙間の小さな侵入型元素であ る炭素原子が鉄の結晶から逃げ出せ ず結晶内に溶けたままで閉じ込めら れ、その結果、硬いマルテンサイト



新日本製鉄(株)フェロー

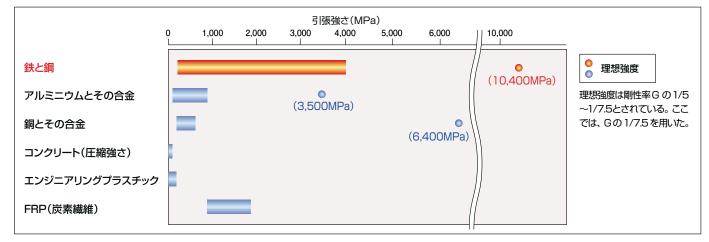
宮坂 明博



新日本製鉄(株)技術開発本部 鉄鋼研究所 鋼材第一研究部長

高橋 学

図 1 各種工業材料の強度レベル



※1 MPa : メガパスカル。引張強さや圧力の単位。N/m㎡と同じで、1 m㎡あたり1N(約0.1kgf)の力が作用する。1kgf/m㎡=9.8MPa

※2 変態:組成は一定のまま、温度や圧力など外部環境の変化によって、原子の配列や結合状態が変化する現象で、物理的、化学的、機械的な各性質が大きく変化する



になります。逆に、ゆっくり冷やす と鉄の結晶から炭素が逃げて軟らか いフェライトとセメンタイトの混合 組織になったり、フェライトとセメン タイトがきれいに並んだパーライト になります(図2)(図3)。

「天の配剤」で生まれた 鉄の魅力

宮坂 炭素は安価な合金元素である と同時に、高炉での製銑プロセスで は、炭素の塊である石炭(コークス) が鉄鉱石から酸素を除去する還元材 としての役割を持ち、その工程で自 然に鉄-炭素合金である銑鉄がつく り出されています。還元材として使っ た炭素がそのまま鉄に入って、結果 的に鉄鋼製品の幅広い強度を可能に しているのですね。

牧 おっしゃるとおり、鉄鋼製品の 製造プロセスにおいて炭素が取り込 まれることは必然であり、それが鋼 材機能面で不可欠な存在となってい る。非常に幸運な「天の配剤」とさえ 感じますね。

高橋 そうした観点から言えば、人 間が使いこなせる温度領域が限られ る中で、鉄の熱処理は非常にコント ロールしやすい温度領域に入ってい ることも天の配剤ですね。

牧 2.000℃以上もの高温でようやく 鉄が溶けるとしたら古代から鉄が使 われることはなく、現在のような高 炉法 (最高約1,600℃) による近代製 鉄も生まれていません。また、鉄は 727℃ (A₁変態点)以上のオーステナ イト相に加熱した後の冷却の方法・ 速度によってさまざまな材質を発現 させることができますが、もしもこ の変態温度が200℃高ければ焼入れ は困難だったでしょう。また、この 温度が200℃低かったら、焼入れは 簡単だったでしょうが、鉄やその他 の元素が十分に拡散できないために、 強度をつくり分けることは難しかっ たはずです。いずれにしても鉄鋼材 料は現在のように重宝な存在ではな かったはずです。

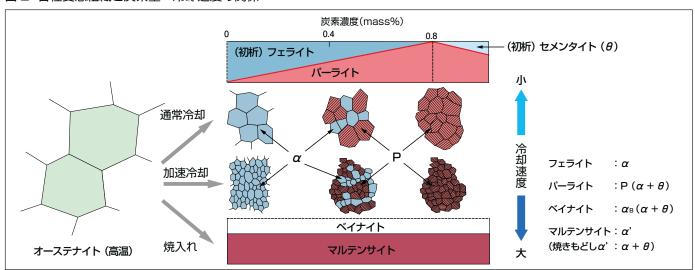
ナノレベルで特性を追求し、 キロメートル・トンでつくり込む

高橋 実際の鉄鋼材料開発では強度 をはじめ、延性や靭性などさまざまな 特性が求められます。鋼は高炭素に なると強度が高まりますが、硬くて脆 くなり加工成形しにくくなるため、自 動車用鋼板では、「炭素をいかにゼロ に近づけて軟らかくするか」が開発の メインストリームでした。いわば「強 い鉄鋼らしくない」材料開発史だった と言えます。

牧 そこが鋼の懐の深さです。炭素 が入っているといっても強度の高い 高炭素鋼で0.8%程度です。それほど 少量で強度が劇的に変わるところが 鋼の特徴です。これを利用して多種 多様な鋼材が開発されてきました(図 4)。成形加工しやすい材料を目指し て炭素レスを追求する過程で、炭化 物に代わり、金属間化合物を析出さ せた新たなマルエージ鋼という高強 度鋼材が生まれました。また、錆に強 い鉄が必要になると炭素を低減して クロムを添加したステンレス鋼を開発 し、低温下の靭性が求められればオー ステナイト系の材料を開発する。つま り、鉄はあらゆるニーズに対応する能 力、したたかさを秘めた材料です。

宮坂 ニーズに合致する材料を開発・ 提供し続けてきた歴史の中で、例え ば最近では、構造物用の鉄鋼材料に

図2 各種変態組織と炭素量・冷却速度の関係



熱処理によって、破壊しにくい強度・ 靭性を持たせても、現場施工の高効 率化のために大入熱溶接されると、 その特性が失われてしまいます。高 強度化を進める上で溶接への対応の ように利用技術にまで踏み込んだ対 応が重要になっています。

牧 溶接後の強度・靭性を維持する ためには、高熱を加えた後も結晶粒 が粗大化しないようにする結晶組織 制御が必要です。こうした仕掛けづ くりを支えているのが「解析技術」の 進歩です。この40年間、学術的に原 理原則が見出されて鋼材特性に対す る理解も進んできましたが、現在は推 論ではなく原子挙動などを光学顕微 鏡や電子顕微鏡で実際に観察・解析 することができます(写真1)。

「ナノテクノロジー」とよく言いま すが、結晶粒の微細化によって緻密 に鋼の強度・靭性などの特性をコント ロールするためには、ミクロ・ナノオー ダーでの組織解析・制御が不可欠で あり、鉄鋼業はナノの世界での材料 開発の先駆者なのです。ミクロ・ナノ の世界で材料特性を引き出し、大規 模な製鉄プロセスにおいて、数メート ル、数キロメートル、そしてトン単位 で品質・特性をつくり込んでいること に鉄鋼製品の素晴らしさがあります。

"宝の山"が無限に広がる 鉄の世界

高橋 現在、実用材料では生産プロ セスや市場ニーズ、価格などとのバ ランスが重要であり、各特性につい て極限まで追求しているとは言えませ ん。しかし鉄の諸特性をさらに高めて いくためには、現在の開発手法に加 えて何らかのブレイクスルーをもたら す新たな発想が必要だと思いますし、 今後は社会ニーズへの対応とは別な 視点からの研究が重要になってくると 考えています。

牧 よく学生から「鉄の材料開発は もうやり尽くしたのですか?」と聞か れますが、鉄に限らず、金属材料の 実用的な材料特性の最大値(チャンピ オンデータ) はこの40年間変わらず、 工業生産可能な鉄の強度も細線では 4.000MPa、バルク材では2.500MPa で止まっています。実験や、特殊に つくったもの以外、実用に提供されて

いるチャンピオンデータは理想強度の 20%程度です。それは加工性や疲労 などの阻害要因とのバランスが考慮 されているからです。鉄は成熟材料 と思われがちですが、あらゆる分野で 挑戦中であり、ゴールはありません。

写真] 高分解能透過型電子顕微鏡で 見た鉄の組織

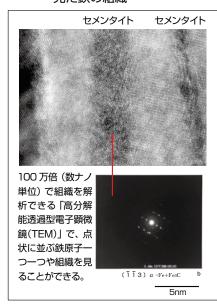


図3 各種変態組織の強度レベル (実験室データも含む)

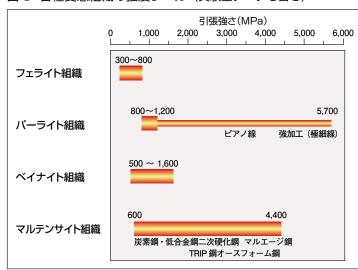


図 4 各種鉄鋼材料の炭素量と主要変態組織

鉄鋼材料		炭素量	主要変態組織*
1. 加工用薄鋼板		極低C	フェライト
2. 一般構造用鋼		0.2%C	フェライト+パーライト (マルテンサイト)
3. 機械構造用鋼		0.1~0.6%C	マルテンサイト (フェライト+パーライト)
4. ばね用鋼		0.5~0.9%C	パーライト、 マルテンサイト
5. 高硬度鋼	軸受鋼	0.95~1.1%C	
	工具鋼	0.6~1.5%C	マルテンサイト
	高速度鋼	0.7~1.6%C	
他	レール鋼	0.7~1.0%C	パーライト
IB .	電磁鋼	極低C	フェライト

()内には今後利用が期待される変態組織を示した

高橋 例えば薄板では、割れを防ぐ ために介在物除去や、組織均一化な どの手法を使っていますが、実際に どこで割れが生じ、どのように広がっ ていくのかという理論は確立されて いません。ちょっと分かったような 気がしてよく見てみると、分からな いことがまたいくつも増えるという のが実感です。

宮坂 鉄は高炭素化・高強度化する と脆くなると言われながら、橋梁ケー ブルは2,000MPaになっても強靭で す。しかしその理由は十分には解明さ れていません。このケーブルでの現象 を徹底的に研究すると、厚板や薄板の 高強度化における脆性破壊などへの 対策のヒントを見出せるかもしれませ ん。鉄には突き詰めるに値する宝の山 がまだまだ残っていると思います。

単純な成分組成で新たな ブレイクスルーを目指す

宮坂 今後の鉄鋼材料開発の方向性 を考えたときに、各特性を上げようと 思えば、合金元素を添加して手間暇 をかければ比較的簡単に行えます。し かしコストや資源問題、リサイクル性 などの見地から、できるだけ合金元素 に頼らない開発が求められると思いま す。個別ニーズに対応する特殊鋼や、 耐食性や意匠性などを持たせる表面 処理を除き、将来的になるべく単純な 組成での鋼材開発が重要になっていく

と思いますが、いかがでしょうか。

牧 日本でつくられている1億トン の主流を占める単純組成の鋼材にお ける高強度化は、合金元素を微量添 加するマイクロアロイと、熱処理な どで組織を微細化する方法が開発の 大きな流れです。

材料には「生まれ」と「育ち」があ ります。鉄はもともと割れの原因と なる不純物・介在物を含有し「生ま れ」が悪かったのですが、それを良く したのが精錬です。現在では精錬技 術の進歩で不純物(りん(P)、硫黄(S) など) は数ppm(※3) まで低減されて います。この40年間で最高強度のチャ ンピオンデータは変わらないと言い ながら、製造プロセスは革新的に飛 躍してあらゆる実用鋼材が強度的に はワングレードアップしています。

一方、熱処理など「育ち」の世界で は、今後のブレイクスルーに対して2 つの方向性が考えられます。まず、鋼 材には固溶強化、粒子分散強化(析出 強化)、転位強化(加工強化)、結晶粒 微細化強化といった組織制御による 強化理論(※4)があります。こうした 強化機構を使えば計算上は8,000MPa の高強度化も可能です。中でも、結晶 粒微細化による強化機構は、結晶が1 μm以下になると飛躍的に発現します が、現在、鉄鋼材料の結晶粒は数十 μmで、細かくても10 μmです。つま り富士山で言えばまだ2合目あたりま

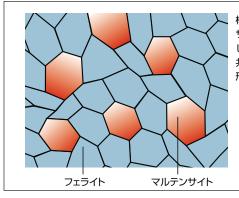
でなのです。転位強化もまだ3合目あ たりです。私たちは、結晶粒微細化強 化と転位強化という2つの優れた強化 機構を使い切れていないわけです。

高強度という機能を有する構造材 料としての鉄の可能性を広げるため には、特に結晶粒微細化がブレイク スルーの主役になるでしょう。現在 10μmオーダーの微細化技術が20年 後には数μmオーダーになり、確実 に鋼材特性がワングレード上がると 思います。

もう一つの方向性は、変態組織の さらなる活用です。現在、薄板の開 発では、2つの変態組織を分散させ て強度・延性の両立を図るといった 複合組織の活用が注目されています (図5)。鉄にはオーステナイト相と4 種類の変態組織があるので、今後は 2つの変態組織に限らずさまざまな 組み合わせや各変態組織のサイズと 分布の制御の中で多彩な特性を持つ 鋼材が開発されると思います。この世 界は未開であり、その研究成果がもた らす可能性は無限です。

高橋 お話の通り、結晶組織を微細 化しながら、そうした変態組織もコン トロールしていくところに鉄の無限の 可能性を感じます。大量生産の中で実 現のために越えなければならないハー ドルは多々ありますが、今後も果敢に 挑戦していきたいですね。本日は貴重 なお話をありがとうございました。

図 5 硬い部分と軟らかい部分が共存する複合組織 Dual Phase (DP) 鋼



構造が安定した硬いマルテン サイトの結晶と軟らかく変形 しやすいフェライトの結晶を 共存させて、強くて加工・成 形性の良い鋼材を開発。

DP鋼のミクロ組織例 フェライト(黒) マルテンサイト(白)

※3 ppm: parts per millionの略で、100万分の1を意味する単位

※4 鋼材の強化理論:鋼材強度を高めるには、マンガンやシリコンなどの元素を添加する方法 (固溶強化)、微細な析出物などを分散させる方法 (粒子分散強化)、塑性加工や変態を 利用して転位 (結晶構造の乱れた部分) を多量に導入する方法 (転位強化) 、結晶粒を細かくする方法 (結晶粒微細化強化) などの方法がある