

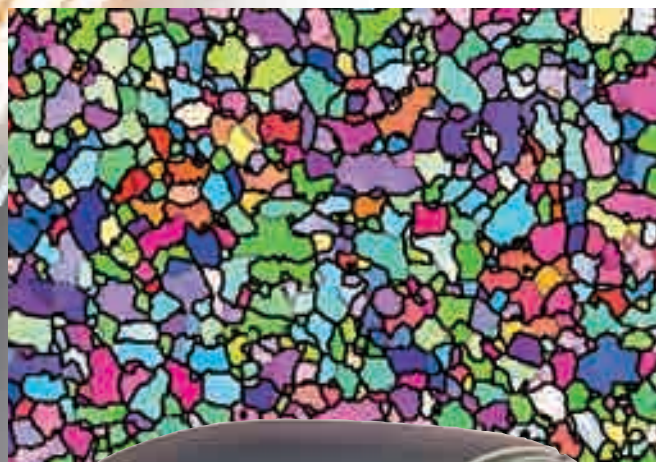
図解

多彩な特性を発揮する鉄

無限に広がる素材としての可能性

鉄は機械による効率化と電気文明の発展という産業革命の二大要素を支え、社会に劇的な変化をもたらしました。それは鉄づくりにかかわる技術者・研究者が鉄の特性を深く理解し、知恵と工夫を凝らして、多彩な性質を引き出し実用化してきた歴史に他なりません。古代文明以来、人類が利用し続けてきた鉄の素材としての素晴らしさ、今後の可能性を「鉄鋼組織」というミクロン・ナノの世界から見てみましょう。

● 監修：京都大学名誉教授 **牧 正志氏**
(新日鉄住金(株)顧問)



強さと靱さ、加工性を併せ持つ 鋼の魅力

社会で使われている金属の約95%を占め、生活になくてはならない鋼。社会で鋼材が大量に使われてきたのは、「鉄の惑星―地球に存在する豊富な資源量、つまり供給規模と経済性、そして工学的な信頼性すべてにおいて、他の素材にはない実用性を持つことによる。

鋼は強さ(強度)に加えて靱さ(靱性)があり、そのバランスに優れ、併せて加工性にも優れているため、流麗なデザインが求められる自動車のボディや家電製品からレール、強靱な構造物、長大吊り橋まで多様な用途に対応できる。加工性を維持しながら幅広い強度の範囲(200メガパスカル〜5ギガパスカル※1)をカバーできるのは、他の材料には見られない鋼(鉄-炭素合金)の素晴らしい魅力だ。



幅広い強度と優れた加工性を持つ鉄鋼製品の用途例



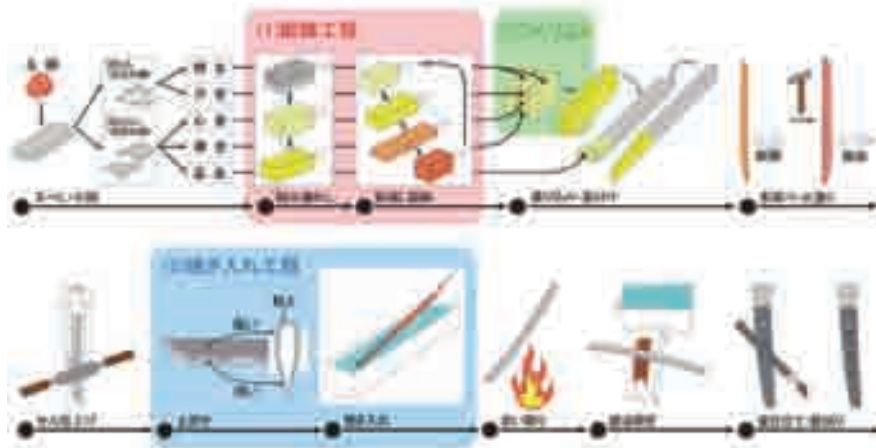
先人の知恵が生んだ材質の つくり込み―日本刀の世界

幅広い強度など、鋼材の基本的な特性の力ギを握るのは、炭素の含有量と温度だ。侵入型元素※2である炭素などを中心とした「成分調整」と「熱処理」により、組織の状態を変えて、他の金属にはないさまざまな材質を持たせることができる。

例えば、砂鉄を木炭で還元するたたら製鉄でつくられた鉄を材料とする日本刀は、高温の鋼を何度も折り返し叩いて不純物を取り除き、炭素量を均一化して(鍛錬)、最後に刃側に薄く、棟側に厚く土を塗って水で冷やす。土が薄く熱が伝わりやすい刃側は急冷されて硬く(焼き入れ)、厚く塗った棟側はゆっくり冷えて軟らかい粘りのある鋼になり(焼きなまし)、刀全体として硬いが折れにくい強靱な性質を持たせることができる。先人は試行錯誤の中からこうした自然の摂理(現象)を体得し、ものづくりの技に磨きをかけてきた。



日本刀の鍛冶風景と製作工程



※1 ギガパスカル (GPa) : 引張強さや圧力の単位。1GPa = 1,000MPa。1MPa (1N/mm²) は 1mm²あたり約 0.1kg の力が作用。
 ※2 侵入型元素: 鉄の結晶のすき間(格子間位置)に存在する合金元素。鉄に比べて原子半径が小さい炭素、水素、窒素、酸素の4つ。

「ナイト」に変化する(変態)。

ことにより、幅広い強度を持たせている。

なども開発された。

引張強さ (MPa)

組織	引張強さ (MPa)
フェライト	300 ~ 800
パーライト	800 ~ 1,200 (5,700)
ベイナイト	500 ~ 1,600
マルテンサイト	600 ~ 4,400

(強伸線加工：ピアノ線、スチールコード)

炭素濃度 (mass%)

組織	炭素濃度 (mass%)
(初析) フェライト	0 ~ 0.4
パーライト	0.4 ~ 0.8
(初析) セメンタイト (θ)	0.8 ~ 1.0

冷却速度

小 (Upward Arrow) → 大 (Downward Arrow)

組織変態

オーステナイト (熱処理の出発組織) → フェライト: α → パーライト: $P (\alpha + \theta)$ → ベイナイト: $\alpha_B (\alpha + \theta)$ → マルテンサイト: α'

組織変態の経路

オーステナイト → フェライト → パーライト → ベイナイト → マルテンサイト

力が加わると一瞬変形してすぐに硬くなる

実用材料は理論強度のまだ20% 未踏領域に挑む

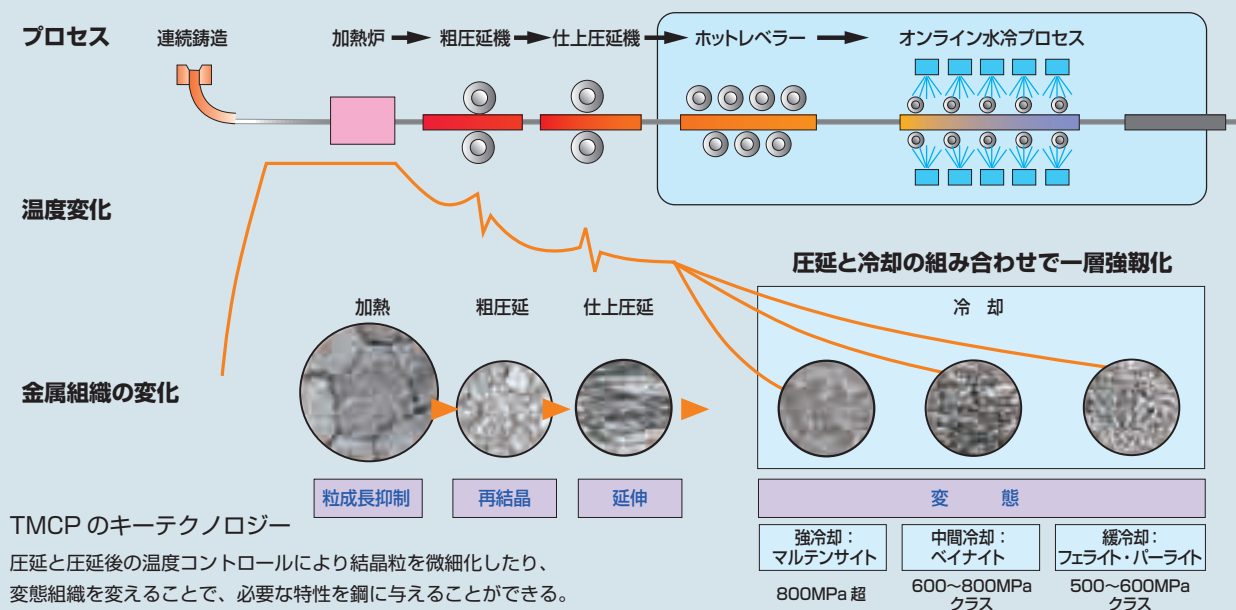
鋼は鉄に炭素を含む合金で、炭素が多くなるほど強く（硬く）なるが、炭素量が多い高強度鋼でもその含有量は0.8%程度。これだけ少量の元素調整で特性が劇的に変わるのが鉄の魅力だ。また、原料の鉄鉱石には天然の不純物（リン、硫黄）や介在物が含まれているが、現在は精錬技術（酸素を吹き込み不純物を除去する技術）の進歩でそうした物質も数ppm※5まで低減されている。

自動車用鋼板ではまず1970年代、加工性の向上（軟らかい鉄）を狙って高純化と低炭素化を追求してきた。その後現在まで、車体の軽量化・高強度化ニーズに応え、炭化物の代わりにチタンやマンガンなど多彩な金属元素との化合物を使って、加工しやすさを維持しながら高い強度を持つ鋼材（ハイテン）を開発している。

また、一般的に鋼は強くなると脆くなるが、結晶粒を微細化すると強くなると同時に靱さも増す。そこで鋼構造物に使われる厚鋼板では、TMCP※6という組織制御技術を駆使して、製造ラインでの加工と熱処理で結晶粒の大きさや組織をコントロールし、高強度・高靱性などの特性を出している。

実用鋼の最高強度は現在、約2.5ギガパスカル（極細線材では約5ギガパスカル）。加工性や疲労強度などとのバランスを考慮しているが、理論（理想）強度※7の20%程度までしか発揮しておらず、今後もさまざまな新材料開発の可能性がある。

金属組織を製造ラインで連続的に制御する例「TMCP」



各種工業材料の強度レベル

加工性や靱性を維持しながら幅広い強度をカバーできる材料は鋼だけだ。それでもまだ理論（理想）強度の20%程度しか発揮していない。

鉄と鋼

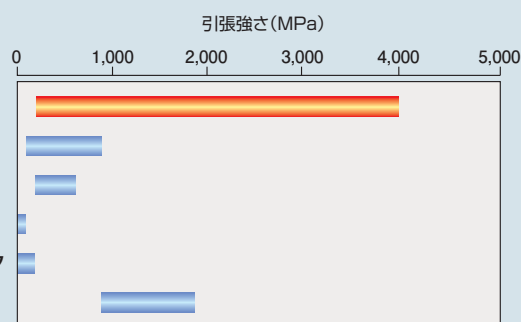
アルミニウムとその合金

銅とその合金

コンクリート（圧縮強さ）

エンジニアリングプラスチック

FRP（炭素繊維）



※5 ppm：主に濃度を表す単位で、100 万分の 1 の意。

※6 TMCP (Thermo-Mechanical Control Process)：従来の熱間圧延にはない、圧延と圧延後の冷却の制御による新たな組織制御技術。

※7 理論（理想）強度：転位などの格子欠陥を含まない完全結晶において、原子の結合を引き離す（引きちぎる）のに必要な応力。

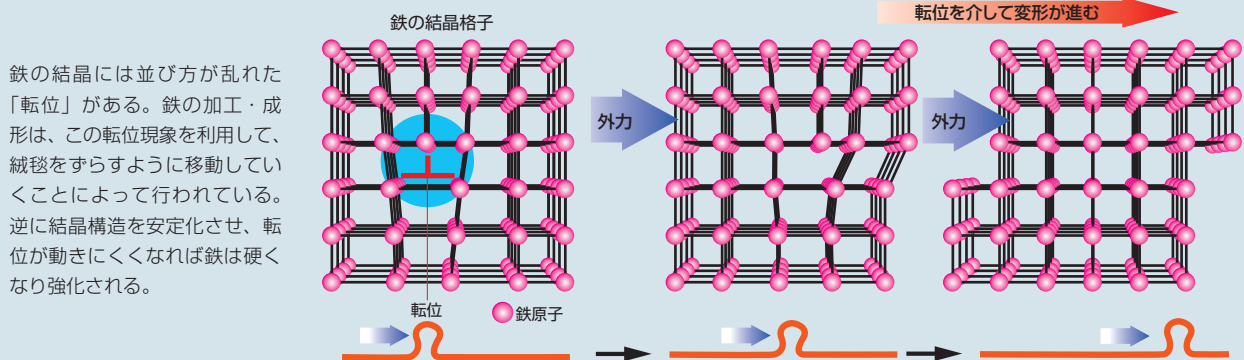
緻密なつくり込みで、
さらなる強度・靱性を追求

鉄の強度や靱性、加工のしやすさは、原子の「配列の乱れ（転位）」の動きやすさによって決まる。鉄を変形させるために力を加えると、転位が押されて、原子のつなぎ替えが起こる。この転位が動きやすいほど加工しやすい強度の低い鋼材となり、転位が動きにくくなると、加工しにくい高強度の鋼材になる。強化の手法には「固溶強化」「粒子分散強化（析出強化）」「粒界強化（結晶粒微細化）」「転位強化（加工硬化）」の四つがある。

鉄と炭素の合金である鋼の特性をブレイクスルーするためには二つの方向性がある。一つは鉄の組織を制御することによる高強度化。四つの強化機構のうち、現在十分に使いこなされているのが、固溶強化と粒子分散強化だ。転位強化や粒界強化による組織制御にはまだまだ研究の余地があり、ブレイクスルーの大きな可能性を秘めている。特に「粒界強化」では、結晶粒が1ミクロン以下になると飛躍的に強度が高まるため（現在は10ミクロンオーダー）、新たな微細化手法が考案されれば、計算上では8ギガパスカルまでの高強度化が可能になる。

もう一つの方法は、変態組織のさらなる活用。今後は二相の組み合わせに限らず、三相以上の組み合わせや組織のサイズ・分布などの多彩な制御技術の確立が期待されている。

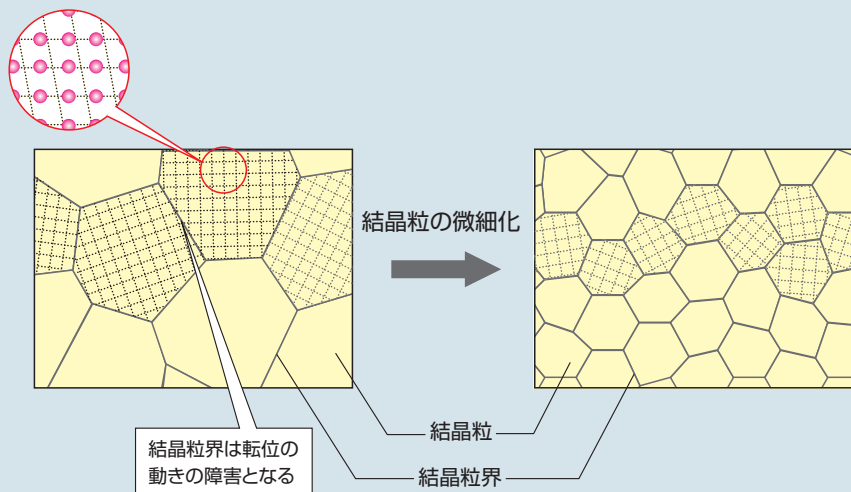
変形のメカニズム（転位の移動）



「粒界強化」の考え方（結晶粒の微細化と高強度化）

格子の位置に原子が並んでいる。

転位は原子が並んだ特定のすべり面に沿って動くので、結晶粒界では転位の動きやすい面が変化する。結晶粒が微細なほど粒界が数多く存在するので転位が動きにくくなり、強度が高まる。



天の配剤と英知で、ミクロン・ナノから キロメートル・トンをつくり込む

鋼材が社会で大量に使用されているのは「天の配剤」といえる。原料の資源量が豊富なことに加えて、製造工程の最初にある高炉では、石炭を蒸し焼きにすることで、コークスが鉄鉱石（酸化鉄）から酸素を取り除く還元剤として投入され、自然に鉄・炭素合金が生まれる。

また、高温とはいえ人間が使いこなせる温度領域（1200～800℃程度）で加工や熱処理ができ、特に約800℃以下の制御しやすい温度域で種々の変態が起こり、さまざまな材質をつくり込むことができる。

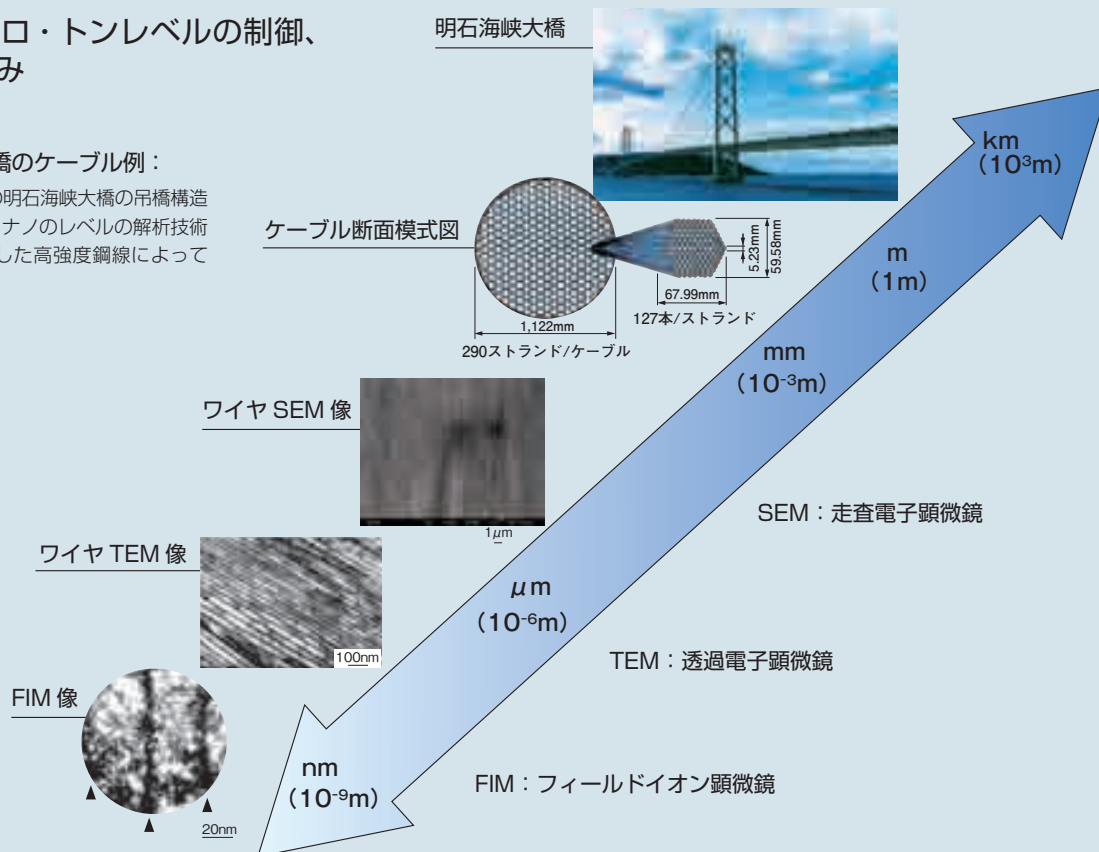
そして、多彩な特性を生み出す仕掛けづくりを支えているのが材料の本質を探る解析技術だ。学術的な「原理原則」の追求とあわせて、実際の原子挙動などを最先端の電子顕微鏡などの解析装置で観察する。そのときに組織観察で得られた膨大な組織写真（解析データ）から全体像を把握し、目的とする部分の現象を正しく理解する、いわば「鉄の気持ちになって考える」研究者の能力とセンスが重要であり、こうしたノウハウの蓄積は鉄鋼業が「ミクロン・ナノの材料開発の先駆者」といわれる所以でもある。

鉄鋼業はミクロン・ナノの世界で鋼の材料特性を引き出し、数キロメートル、トン単位の大規模な製鉄プロセスで特性（品質）を均一につくり込んでいる。新日鉄住金では、まだまだ発展途上にある鋼材開発において、研究・技術開発に挑戦し続けていく。

ナノ～キロ・トンレベルの制御、 つくり込み

明石海峡大橋のケーブル例：

全長 4km もの明石海峡大橋の吊橋構造は、ミクロン・ナノのレベルの解析技術を用いて開発した高強度鋼線によって実現した。



解析技術の進歩による材料設計技術の発展

フェライト中に析出したチタン炭化物（TiC）の透過電子顕微鏡での撮影写真。合金炭化物はフェライトの強度を高めるなど高強度鋼材において重要な役割を果たす。新日鉄住金では、高性能な電子顕微鏡の利用・観察技術を持ち、材料組織を原子レベルで解析することにより、鋼材特性の調査・改善を行っている。

本写真にはフェライトのFe原子列とTiCのTi原子列が写っている（C原子列は写っていない）。

