

自動車の安全性 を高める“強さ” への挑戦 薄板 (3)

複雑なプレス成形を可能にする「軟らかさ」への挑戦から始まった自動車用鋼板の技術開発（2007年8・9、10月号参照）は、時代変化とともに衝突安全性の向上や燃費向上のための軽量化ニーズが顕在化し、「成形性」と「高強度化」の両立が求められるようになった。新日鉄では、結晶組織制御を核とする材質のつくり込みを通して、相反する要求特性を満足する「高強度鋼板（ハイテン）」を開発し続けている。今号から2回にわたり、その挑戦の姿を紹介する。

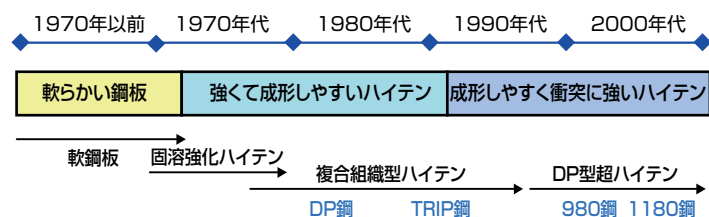
環境・安全ニーズから加速化したハイテン開発

自動車用薄鋼板の技術進歩は、さまざまな形状に成形しやすい「軟鋼板」の開発が端緒となった。しかし自動車用外板などの場合、軟らかいだけでは小石が当たった際などに凹み、商品価値を損なうため、「BH鋼板」のように最終製品として硬度を高めた鋼材も開発されてきた（2007年8・9月号、10月号参照）。

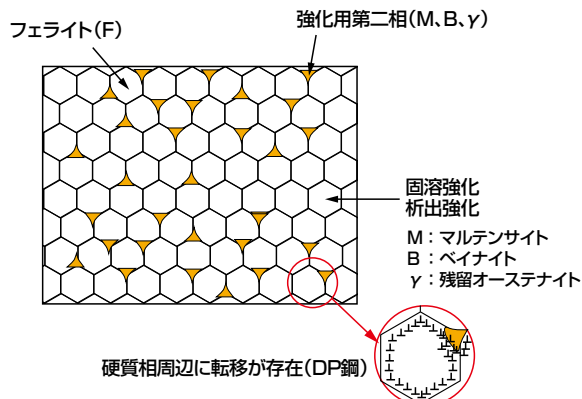
自動車用鋼板へのニーズはオイルショックを契機に大きく変化した。最初は省エネルギーの視点から、その後、地球環境問題が顕在化するにつれて、アメリカの排ガス規制（CAFE）の実施などの環境規制強化を背景に、CO₂排出削減と燃費向上ニーズが高まり、車体の軽量化が強く志向されるようになった。

1990年代には自動車の衝突安全性の確保が強く叫ばれるようになり、衝突の際に部材があまり変形しないように板厚を厚くする、または弱い部分に補強材を入れるなどしたため、車体重量は徐々に増加し、個々の部材の一層の軽量化が要求されるようになった。成形性の向上によるフォルムや表面の美しさに加えて、安全性や燃費が自動車の大きな商品価値となり、自動車

自動車鋼板に対する要求特性の変遷



フェライト系高強度鋼板の金属組織



鋼板内に硬軟の結晶組織を分散させ、強度と延性を両立させる「複合組織鋼板」は、1980年代以降、自動車用鋼板開発の主流を占めるようになった。

図1

鉄と炭素の状態図

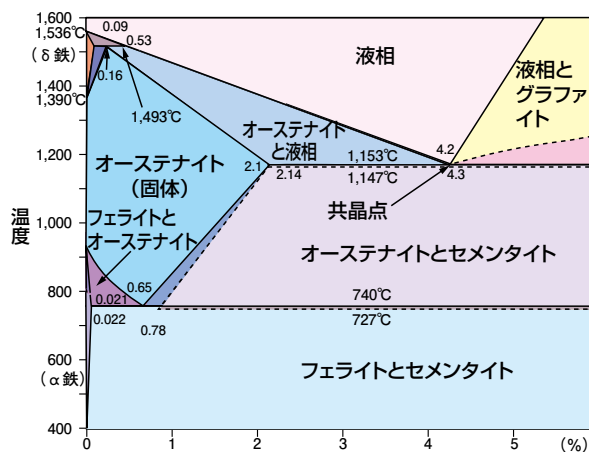


図3

高温での鉄はオーステナイトと呼ばれ多量の炭素を固溶できる。一方低温ではフェライトと呼ばれる結晶構造になり、ほとんど炭素を固溶できない。したがって低温ではフェライトと鉄炭化物の混合組織となる。

比較的高温では鉄炭化物とフェライトの層状組織であるパーライトが、少し低温では炭化物が微細分散したベイナイトが、そしてさらに低温まで冷やすと、炭素が溶けたまま閉じ込められたマルテンサイトと呼ばれる硬い組織が生成する。

用鋼板には従来からの成形性の良さ（軟らかさ）に加えて「強くて、軽い（薄い）」という特性が強く求められるようになった。

強くて成形性にも優れる鋼板——。鋼材の高強度化は合金添加や熱処理によって比較的容易に行えるが、複雑な形にするための成形性と両立することに高いハードルがある。新日鉄をはじめとする鉄鋼メーカーでは、自動車メーカーとのパートナーシップのもと、部材設計や利用技術を考慮した材質の最適化を目指し、さまざまな「高強度鋼板（ハイテン）」を開発し続けている（図1）。

硬・軟の組織を混在させて相反する特性を両立—DP鋼

鉄の高強度化の歴史は古く、薄板に限らず、厚板、鋼管、棒線などあらゆる鉄鋼材料開発において行われてきた。その挑戦は、エネルギー（力）が加わったときに変形しにくく、割れたり潰れたりしない材質の追求からスタートした。

当初は鉄にマンガン（Mn）やシリコン（Si）などの元素を添加して材質を硬くする「固溶強化」が利用されて

きたが、その方法では多くの合金が必要となりコスト高になるうえ、高強度化も440MPa（※1）程度が限界だった。590MPaなどさらなる高強度化が求められるようになると、圧延時の緻密な温度履歴管理により析出物と呼ばれる組織中の化合物の組成を変える「析出強化」と、焼入れでの「組織強化（転位強化）」を組み合わせた高度な熱処理技術の利用が進み、また一部の鋼材開発では、靱性（粘り強さ）を高めるため、「結晶の細粒化技術」も導入された。これが一般的な高強度鋼材開発の経緯だ。

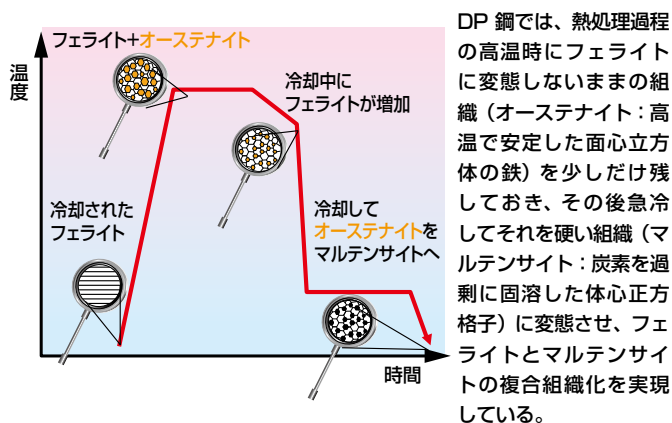
自動車用鋼板も当初はそうした基本的なメタラジーを活用して、590MPaまでの高強度化を達成したが、高強度化のために鋼板の材質を硬くすると延びにくくなる。他の用途の鋼板では、曲げる、切る、溶接するといった成形法が主流だが、デザイン性が重要視される自動車用鋼板では、延ばす、絞るなどの複雑な変形が求められる、延びやすさ（軟らかさ）が重要な特性となる。そこで、「硬さ（高強度化）」と同時に、延性に必要な「軟らかさ」を確保するための、新たな技術革新が求められた。

そこで生まれたのが「軟らかいものと硬いものを混ぜる」という発想。延びる部分と硬い部分を分ける、つまり鋼板内に硬い結晶組織と軟らかい結晶組織を分散させた「複合組織」が提案され、1980年代以降、自動車用鋼板開発における組織制御技術の主流となった。

硬・軟を混在させる結晶組織の分散方法には、要求される鋼材特性に応じて多彩な選択肢がある（図2）。複合組織材料として最初に開発された「DP（Dual Phase）鋼」は、鉄の軟らかい組織（フェライト）と硬い組織（マルテンサイト）の2つを鋼板内にバランス良く分散させた鋼材だ。

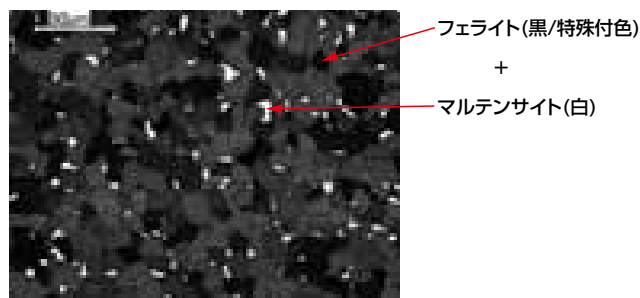
鉄は高温時の組織と低温時の組織が異なり、高温から低温に冷却される過程で組織の状態（実際には結晶の構造）が変化していく（変態）（図3）。フェライトは650℃～850℃程度の比較的高温で生成し、マルテンサイトは300℃程度以下の低温で生まれる。DP鋼では、熱処理過程の高温下でまずフェライトを生成させるが、すべての組織をフェライトにしてしまうと軟らかくなり過ぎたり、延性や靱性を悪化させる大きな鉄炭化物を生成したりしてしまうため、フェライトに変態しないままの組織（オーステナイト）を少しだけ残しておき、その後急激に冷却することで、フェライト以外の部分を硬いマルテンサイトに変態させる（図4）（写真1）。熱処理における緻密な温度制御によって可能になったこのメタラジーは、さまざまな複合組織鋼板のつくり込みの基本となっている。1970年代から研究が行われていたDP鋼は、80年代には自動車用鋼板として実用化され、急速に普及し、その後の「複合組織化による新たな自動車用高強度鋼板開発」を加速化させた。

DP鋼の熱処理における変態プロセス 図4



DP鋼のミクロ組織例

写真1



※1 MPa：メガパスカル。単位面積あたりにかかる力。1MPa＝1N/mm²

変幻自在の組織制御で 多彩な複合組織鋼板を生み出す

硬・軟を共存させる複合組織化は、フェライトとマルテンサイトの組み合わせだけではない。鉄はチタン(Ti)やシリコンなどの微量元素を含有するものの、基本的に鉄原子と炭素原子で構成されている。その2つの原子の振舞いによって鋼のミクロ組織の状態が決まる。

フェライトは炭素をほとんど含有しない鉄の結晶組織だが、フェライトの外にある鉄の炭化物となった炭素の存在形態で各組織の状態が変わる。例えば、高温からゆっくり冷えると鉄と炭化物がきれいに並んだパーライトになり、また温度変化が比較的早いと、その並びが乱れ炭化物が細かく分散したベイナイトになる。さらに急激に冷やすと、鉄の結晶から炭素が逃げ出す暇もなく結晶内に炭素が溶けたままで閉じ込められる。それがマルテンサイトだ。

温度変化の過程で生まれる鉄の組織は、フェライトが最も軟らかく、次がパーライトやベイナイトで、マルテンサイトは最も硬い。このような特性の相対的な違いを活かして複合組織をつくることができるため、例えば、フェライト(軟)とベイナイト(硬)の組み合わせなども可能になる(図5)。DP鋼も強度より成形性が重視される場合はフェライトの量を増やし、変形しにくい強度が求められる場合にはベイナイトやマルテンサイトを増やすといった多様なミクロ組織のつくり分けが行われ、従来の「二相(Dual)」の組み合わせを超えた複合組織化が

進んでいる。

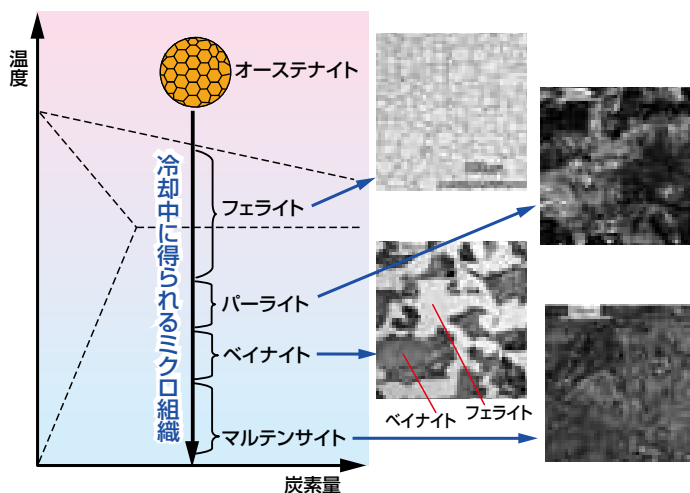
また、フェライトにマンガンやシリコンを添加したり、ニオブ(Nb)を入れて析出強化すると材質が硬くなるように、添加元素の加え方によっても各組織の強度が変化する。例えば、フェライトから排出された炭素が鉄炭化物になるのを特定の添加物によって妨げることで、一般的に高温で存在するオーステナイトの濃度を濃くして、冷却後もそのまま残すことができる。新日鉄では、このように各温度域で生まれる各組織の硬さや、添加物の種類と量、さらには組織自体の大きさなど、膨大な条件の組み合わせの中から要求特性に応じた最適値を導き出し、付加価値の高い高強度鋼板を提供し続けている。

高速変形する衝突時の強度を 飛躍的に高める—TRIP鋼

自動車鋼板の世界では、プレス成形など一般的な変形(静的変形)の約100万倍にも及ぶ速度で変形する衝突時の「動的変形」での強度が必要になる。衝突安全性の高い自動車用鋼板の理想は、プレス成形時(静的変形)には軟らかく、衝突(動的変形)の際に一瞬にして飛躍的に硬くなる鋼材だ。

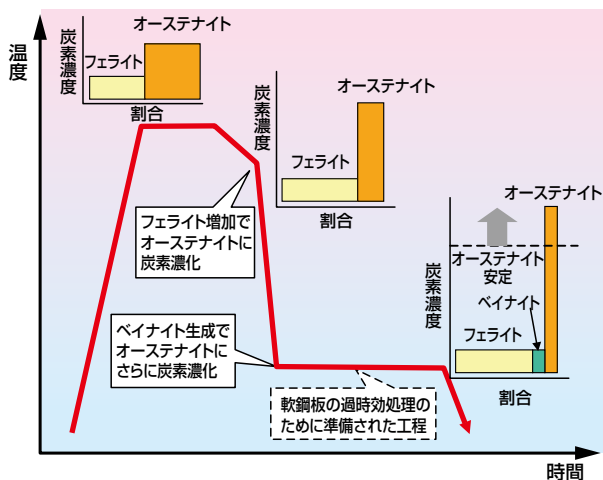
もともと鉄は、高速で変形すると強度が高まる特性を持つ。鉄の変形は床に敷いたカーペットを小さなたまりを動かすことで少しずつ移動させるのと同じように、結晶の中に存在する欠陥(転位)が結晶の中を動いて結晶

温度変化による鉄組織の変化の違い 図5



鉄は高温状態からの冷却温度の変化によって組織の状態が変わる。最初に発現するフェライトが最も軟らかく、その後現れるパーライト、ベイナイト、マルテンサイトの順に硬くなる。

低合金 TRIP 鋼製造のための
熱処理(焼鈍)の概念図 図6



複合組織鋼板の性質は、内在する組織のバランスによって決まる。成形性が重視される場合にはフェライトを増やし、強度が必要ときにはマルテンサイトを増やすなど、要求特性に応じた材質のつくり込みが行われている。

全体がすべることで起こる。鋼の中にある色々な障害物がこの転位の移動を邪魔することで鉄は硬くなる。ゆっくりとした変形ではあまり邪魔にならなかった小さな障害物も高速での変形では次々と障害物となって現れ、より一層硬くなるのが鉄の性質である。従って、ゆっくり変形させたときに転位移動の障害物が少なく軟らかなフェライトを利用した複合組織鋼では高速変形時に効率的に強度が上昇する。

新日鉄では、良好な成形性を維持しながら高速変形時の強度をさらに高める高強度鋼板開発に取り組んだ。まず着目したのが、「フェライトとオーステナイトを常温で組み合わせると、変形時にオーステナイトが硬いマルテンサイトに変化するため、破断せずに伸びやすくなる」という既存原理だ。しかし、こうした変態を発生させるためにはマンガンやニッケル (Ni) など多くの合金が必要となり、実用化・大量生産には至っていなかった。1980年代、新日鉄ではDP鋼開発で蓄積した複合組織化技術とこの原理を組み合わせ、高価な合金の代わりに鋼中に存在する炭素をオーステナイト中に集めることでオーステナイトを安定化する、廉価な低合金「TRIP (Transformation Induced Plasticity) 鋼」を開発した。

鋼中の炭素は高温では鉄に溶けているが、冷却されるとオーステナイト中に鉄炭化物 (セメンタイト) が生成されて、鉄に溶けた状態の炭素はほとんどなくなる。この炭素を溶かしたまま残してオーステナイトを安定化するため、シリコンやアルミ (Al) を微量添加することで、セメンタイトの生成を抑制し、冷却後もオーステナイト中

に炭素を固溶させたままに保つことに成功した。このTRIP鋼の開発では、成形性や溶接性を阻害する要因にもなりかねない炭素の量を、シリコン、アルミの添加量とともに精緻に制御して最適な組成と熱処理の条件を導き出している (図6)。TRIP鋼では、常温で残留したオーステナイトがプレス成形時には高い延性を提供し、衝突 (動的変形) の際には硬いマルテンサイトに変態することでDP鋼以上に高い強度向上効果を持つ (図7) (写真2)。

余談ではあるが、軟鋼板の材質劣化を防ぐ目的で、固溶炭素を捕まえる目的で確立されていた、「300~400℃での熱処理」技術 (過時効処理/2007年10月号本企画参照) が、偶然、炭素のオーステナイトへの濃化を促進させ安定化させるために必須の熱処理温度や時間とほぼ同じであったことは、その後のTRIP鋼の円滑な実用化・大量生産を可能にした重要な因子の一つと言える。

現在ではこうした開発技術を基盤に、自動車の使用部位ごとの多様な要求特性を満たす高強度鋼材が作り分けられている。次回は用途に応じた材料特性の追求、利用技術開発の姿を紹介する。

監修 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 (たかはし まなぶ)

プロフィール

1956年生まれ、熊本県出身。物理学専攻。

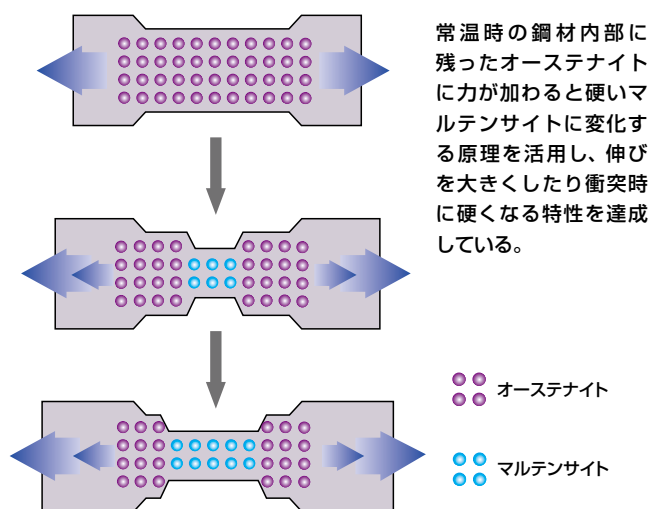
1982年入社。

自動車用薄鋼板、特に高強度鋼板の研究開発に従事。

2007年4月より現職。



TRIP 鋼の延性向上のメカニズム 図7



低合金 TRIP 鋼の顕微鏡写真 写真2

