

強靱な鉄で 社会を支える 厚板 (1)

厚板は、その名のとおり「板厚が厚い」鋼板を指す。国によって定義は異なるが、日本では JIS 規格で板厚 3mm 以上を厚板と定義しており、厚いものでは 300mm 以上の製品が製造されている (グラフ 1・写真 1)。「鉄=大きくて重たい」といった、一般の人が抱くイメージ通りの鉄鋼製品だ。本企画では 3 回にわたり、高度な金属組織制御技術や構造物の安全性に不可欠な利用加工技術 (溶接) にまで踏み込んだ材質制御のメカニズムと、技術開発への挑戦について紹介する。

安全性、信頼性確保のために要求される 「強度」「靱性」「溶接特性」

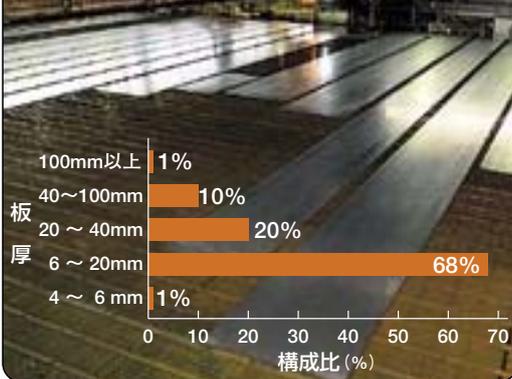
厚板の用途は、船やビル、橋、建設・産業機械、液化天然ガス (LNG)・石油貯蔵タンク、海底油田掘削用の海洋構造物、パイプライン、発電プラントなど多岐にわたり、エネルギー関連を含めた“社会インフラそのもの”を形成する材料として使われている (写真 2)。厚板が使われる構造物のトラブルは人命や地球環境に直接影響を及ぼすため、「安全性・信頼性」の確保は鋼材の開発と製造の最優先課題だ。

厚板に要求される第一の特性は、構造物を維持するための「強度」。実際に使用されている厚板の強度は、普通鋼のような引張強度が 400N/mm^2 (※1) クラスから、高強度のものでは $1,200\text{N/mm}^2$ クラス以上のものまでである。高強度を追求する厚板の技術開発が、現在までの鉄のメタラジー (金属工学) の発展をリードしてきた。さらに、強度を維持しながら、鋼板が使用される環境下での安全性を十分に確保するために、粘り強く壊れにくい性質 (靱性) も必要だ。厚板では、まずこの「強度」と「靱性」を高いレベルでバランスさせることが重要である。

また、ほぼすべての場合に、厚板は切って「溶接」して使われるため、溶接部についても「どんな使い方をされても割れない」くらいの高い信頼性・安全性が重要だ。例えば、ビルなどの大型構造物では、板厚 100mm の鋼板を一回で溶

板厚と構成比

グラフ 1



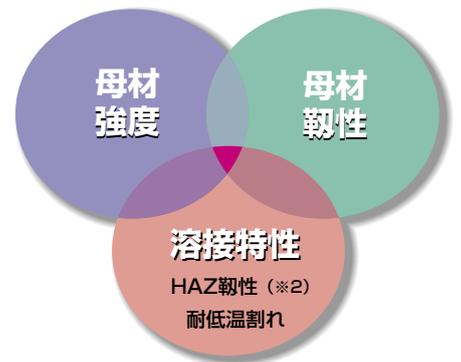
極厚材



写真 1

厚板の要求特性

図 1



厚板の用途 造船55%、建設・産業機械15%、建築・橋梁15%、エネルギー関連など15% 写真2



船舶の外板、隔壁など

©エム・オー・エル・エフィエンス



橋梁の主桁、橋脚、橋塔など



ビルの柱など

(※ 1) 1N/mm^2 の強度は 1cm^2 あたり約 10kg の荷重に耐えられる強度
(※ 2) HAZ : Heat Affected Zone (溶接熱影響部)

接してしまう大エネルギーかつ高能率な「大入熱溶接」が行われるケースもあるため、鋼板そのもの（母材）の材質に加えて、大きな熱的負荷がかかる溶接部の材質を制御する技術の開発も不可欠となる。

このほかにも、疲労強度、耐遅れ破壊特性、高温強度など、さまざまな環境での壊れにくさをはじめ、耐食性や意匠性に至る多様な特性が求められるが、いずれの場合でも前提となるのは「強度」「靱性」「溶接特性」の3つの特性の確保である（図1）。

相反する特性の両立が 高いハードル

しかし、この「強度」「靱性」「溶接特性」の3つの特性をすべてあわせ持つ厚板をつくることは容易ではない。通常、強度を上げるためには鉄の中に炭素やマンガン、ニッケルなどの合金元素を加える。これらの元素は、焼入れ性（硬い金属組織であるマルテンサイトへのなりやすさ）を上げたり、結晶中の鉄の原子を動きにくくさせることによって強度アップに有効だが、逆に鉄を脆くする原因にもなり、「靱性」を低下させてしまうこともある。また、厚板は数ミクロンから数十ミクロン（※3）の大きさの結晶が集まってできているが、この結晶の大きさの影響も大きい。結晶が大きくなると「靱性」は低くなってしまい、割れやすくなる。特に溶接のように高温にさ

らされると、「靱性」の敵である結晶の粗大化が起こるため、溶接部の靱性の低下は大きな問題となる。「強度」と「靱性」、「溶接特性」は相反する関係にあり、その両立が技術開発の高いハードルとなっている。

第1回目の今回は、母材のつくり込みにおける「強度」「靱性」両立のメカニズムと技術開発について紹介する。

靱性に影響する 鉄の変形メカニズム

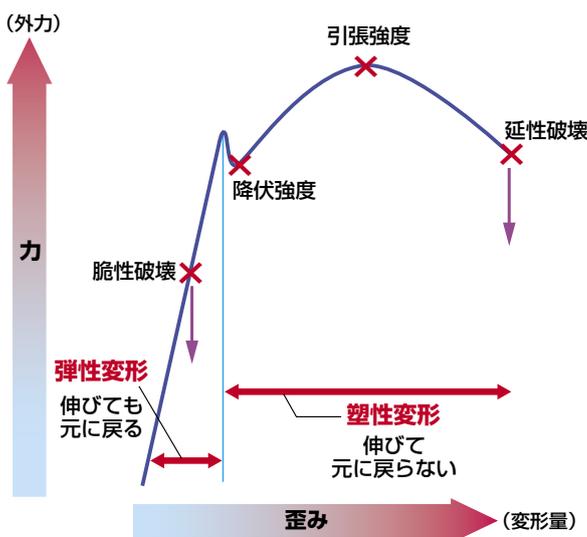
厚板の研究開発においては、特に大型船舶の安全性確保が問題になったことを契機として、長年、破壊力学の観点から「靱性」向上のための研究が進められてきた。

まず、「強度」「延性」「靱性」の関係を、鉄に力が加わったときの「応力-歪曲線」で考えてみよう（グラフ2）。

鉄の結晶の中には線状に存在する結晶格子の乱れ（転位）がある。鉄にある大きさ（降伏強度）以上の力を加えると、この転位が動く（すべる）ことによって変形する（塑性変形、図2）。通常、溶接構造物は降伏強度より低い力の範囲（弾性変形の領域）で設計されているので、塑性変形することはない。

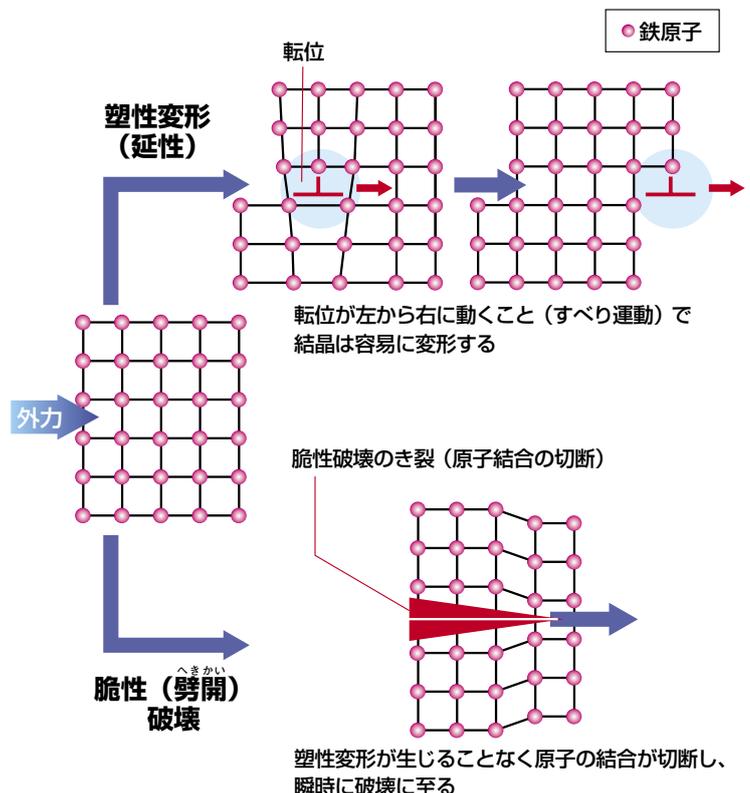
しかし、降伏強度よりも大きな力が加わると、塑性変形が進み、変形した部分がぐびれて引きちぎられるように破断する。これが「延性破壊」であり、延性破壊に至るまでの最大の強度を「引張強度」という。降伏強度は設計で想

強度・延性・靱性の関係 グラフ2
(応力-歪曲線)



厚板に「降伏強度」より小さな力が加わるとわずかに歪むが、力を取り除くと元に戻り変形は残らない。厚板はこのような「弾性変形」の条件で使用される。「弾性変形」であっても、著しい低温環境、力が集中する場所の存在、瞬間的に大きな力がかかるなどの条件が重なると、ガラスが割れるように「脆性破壊」する場合があります、これを避けるために「靱性」が求められる。

塑性変形と脆性破壊の模式図 図2



(※3) ミクロン (μm) : 1mmの1,000分の1の長さ

定した範囲内の力がかかっても溶接構造物を塑性変形させないための強度である。一方、引張強度は、降伏強度を超えるような予想外の大きな力がかかった場合でも延性破壊を起こさないために必要な強度だ。

延性破壊は塑性変形の延長線上にある破壊であり、ある程度予想がつくが、塑性変形せずに、突然ガラスのように破断する場合がある。これを「脆性破壊」といい、最も避けるべき危険な破壊形態だ（グラフ2）。脆性破壊は、鉄の結晶をサイコロにみたてた場合に数字の書いてある面（劈開面）に沿って割れるという体心立方格子金属の特徴的な現象である（図2）。特に、構造物の一部に力が集中してかかったり、衝撃的な力がかかったり、使用温度が著しく低かったりする条件が重なった場合に起こることがある。高強度鋼ほど高い力がかかるように設計されているので、何も策を講じなければ、高強度鋼ほど脆性破壊を起こしやすいという懸念すべき状況になってしまう。この脆性破壊を防ぐ特性が「靱性」だ。

強度・靱性を両立させる「結晶粒の微細化」

「強度」と「靱性」のバランスを適正に維持して両立させる、最も有力な方法が「結晶粒の微細化」だ。

「強度」は転位が動きにくいほど高くなる。鉄の原子は、一つの結晶の中では整然と同じ方向に並んでいるが、隣の結晶の原子は別の向きに並んでいる。結晶と結晶の境界（結晶粒界）では原子の並んだ向きが変化する。

鉄の結晶中の転位は原子の並ぶ方向に沿って動くので、結晶粒界では転位の動きやすい方向が変化する。このため、結晶粒界は転位の動きを止める障害となる。結晶粒が微細

なほど結晶粒界が数多く存在するので、材料全体で転位が動きにくくなり、強度が高まる。

一方、「靱性」は原子の結合の切れにくさであり、切れにくいほど脆性破壊を起こしにくい。鉄は原子の並んだ方向に沿って割れる。結晶粒界は、原子の並んだ方向（原子結合の切れる方向）が変化する場所となるため、脆性破壊の割れ（き裂）が進む障害となる。よって、結晶粒が微細なほど材料全体で脆性破壊への抵抗が高まり、靱性が高まる。例えば、同じ距離をき裂が進む場合、大きな結晶が10個あれば脆性破壊の割れの向きは9回だけ変化して破断するが、小さな結晶100個であれば99回向きを変えることで、き裂が進むためのエネルギーが余分に必要となり、必然的に破断しにくくなる（図3）。

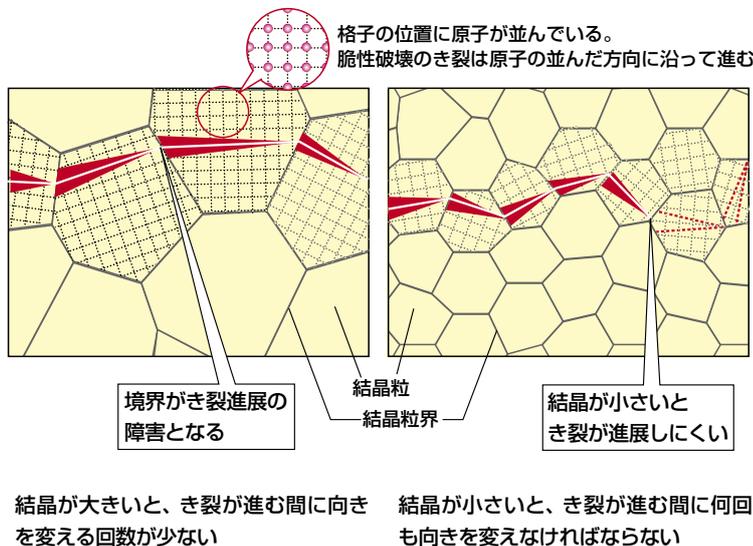
このように「結晶粒の微細化」は、数多くの結晶粒界が転位の動きの障害となり「強度」を高めると同時に、それらの粒界で脆性破壊のき裂の進行を止めて「靱性」を高める効果もあわせ持つ、理想的な強化方法である（図4）。

「合金設計」と「加工熱処理」で金属組織と強度が決まる

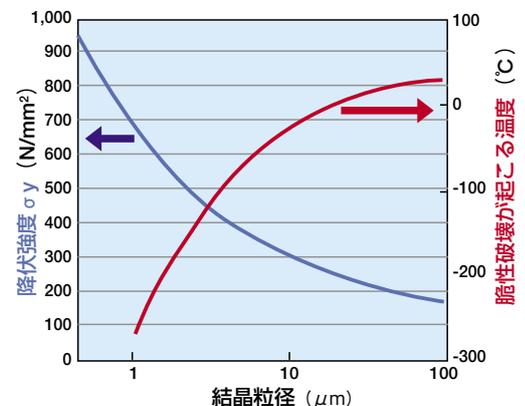
厚板は、焼鈍やめっきなどを含めた長い工程で材質をつくり込む薄板に比べて、加熱・圧延・冷却という短い工程で、「強度」「靱性」に「溶接特性」を加えた厚板の3大特性をつくり込む必要がある。

つくり込みのキーテクノロジーは、鉄にさまざまな元素を調合してより良い特性を実現する「合金設計」と、鉄に最適な温度の履歴を与えて望ましい金属組織を得る「熱処理」だ。高価な元素を多く添加した鉄は生まれながらにして才能にあふれる鉄であり、それを熱処理によって厳しく

脆性破壊のき裂進展と結晶粒サイズの関係 図3



強度、靱性と結晶粒サイズの関係の例 図4



結晶粒が小さくなると降伏強度が上がるとともに脆性破壊が起こる温度も低くなる（脆性破壊が起こりにくくなる）

(※ 4) ppm (ピーピーエム) : 1 万分の 1 パーセントの単位

教育すれば、さらに立派な鉄に育つのである。

まず、製鋼段階では、不純物（水素、酸素、窒素、硫黄など）を極限まで除去すると同時に、役割に応じてさまざまな元素を添加し、その後の製造工程で金属組織をつくり込むための環境を整える。高強度鋼では、普通鋼が含有する炭素、シリコン、マンガンに加えて、銅、ニッケル、クロム、モリブデンなどの合金元素やニオブ、バナジウム、チタン、ボロンなどの微量元素を添加する。後者は ppm（※4）オーダーで調整され、鉄の中では微細な化合物として存在する。この化合物を利用して、加熱・圧延・冷却の各工程で緻密に結晶粒を制御するのだ。多くの金属の中で、これほど多様で微量の元素を駆使して材質をコントロールするのは鉄だけだ。微量な成分のバランスが材質に大きく影響するため、製鋼段階での適正な合金設計なくして、その後の工程は成立しない。

従来の高強度鋼の製造方法では、合金を添加した鋼片を、圧延工程で厚板の形状に整えた後に、再び高温に加熱して熱処理をした。

鉄の金属組織と強度は、高温のオーステナイトから低温に温度が下がる間に存在する「変態温度域（800℃～300℃）」をどのような冷却速度で冷やすかにより大きく変化する。ゆっくり冷やせば、引張強度が 400 から 500N/mm² クラスのフェライト（※5）とパーライト（※6）（一部ベイナイト）の混合組織になる。これをもっと速く冷却すると、600 から 800N/mm² クラスの強度を持つベイナイト（※7）組織に変わる。さらに速く冷却すると 800N/mm² 以上の強度を持つマルテンサイト（※8）組織が得られる（図5）。これらの組織の大きな違いは鉄の中の炭素の存在状態にある。ゆっくり冷やせば、その間に炭素原子が動いて（拡散）鉄との化合物をつくることのできるため、純鉄に近いフェライト

と炭素を多く含むパーライトに分離する。早く冷やすと、鉄と炭素が十分に動く時間がなく、鉄の中に炭素原子がそのまま残ったマルテンサイトになる。ベイナイトはこれらの中間の組織である。このように、冷却速度の変化によってさまざまな形に結晶組織が変化するため、変態が起る温度域での冷却速度の制御が重要になる。しかし、従来の熱処理法では、高温に加熱した後に、炉から出して冷えるまで放っておくか、水でおもいきり冷やすかのどちらかの選択肢しかなかった。さらに結晶粒を微細化する手段も、加熱温度の制御が中心の限られたものであった。

従来の製造法に比べて、金属組織の制御範囲を大きく広げ、結晶粒の飛躍的な微細化も可能とした技術が **TMCP** だ【TMCP (Thermo-Mechanical Control Process)：加工熱処理法または熱加工制御法 (JIS)。新日鉄のプロセスの名称は **CLC**:Continuous on-Line Control Process】。そのキーテクノロジーは、圧延による新しい結晶の種（核）の植え付けと、圧延後の冷却による結晶粒の微細化にある。「圧延工程での加工の効果」と「冷却工程での変態温度域の冷却速度制御の効果」を組み合わせることにより、従来の熱処理法にはない新たな組織制御技術を実現したものである。この TMCP については次号で詳しく紹介する。

監修 新日本製鉄(株) 技術開発本部 鉄鋼研究所
鋼材第二研究部長 主幹研究員

吉江 淳彦 (よしえ・あつひこ)

プロフィール
1955年生まれ、東京都出身。
1980年入社。

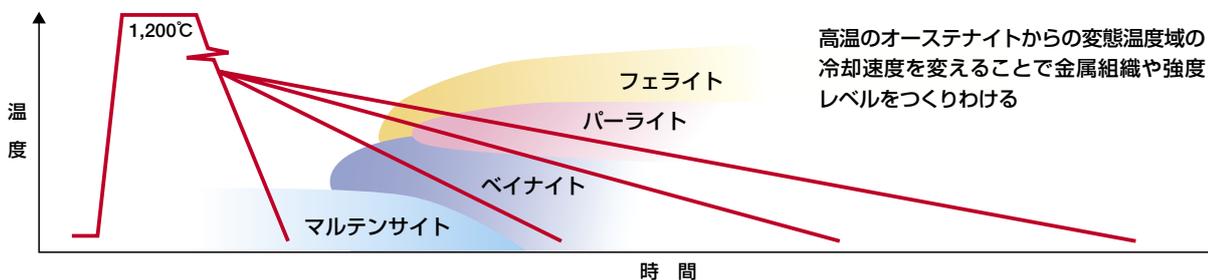
厚板、線材、形鋼、薄板の研究開発および
技術開発企画業務に従事。

2005年より現職。



変態温度域の冷却速度と金属組織、強度レベルの関係

図5



50μm				
冷却速度	100℃/秒 (速い)	10℃/秒	1℃/秒	0.1℃/秒 (遅い)
金属組織	マルテンサイト	ベイナイト	細粒フェライト+ベイナイト	フェライト+パーライト
強度レベル	800N/mm ² 以上	600N/mm ² クラス	500N/mm ² クラス	400N/mm ² クラス

(※5) フェライト：炭素をほとんど含まない軟らかく変形しやすい組織

(※6) パーライト：鉄と炭素の化合物（セメントライト）とフェライトが交互に層状になっている組織

(※7) ベイナイト：微細なフェライト中にさらに微細なセメントライトが分散している組織

(※8) マルテンサイト：炭素を非常に多く含む硬く脆い組織。フェライトの中に炭素が原子の状態で分散している