強靭な鉄で社会を支える厚板 (2)

船舶・橋梁や高層建築物、エネルギー分野など“社会インフラ”を支える厚板製品に求められる最重要特性は、安全性・信頼性を高める「強度」「靭性」「溶接性」だ。その技術的ポイントとなる「結晶粒の微細化」は、製鋼段階での合金設計や、圧延・冷却工程での加工熱処理など、製鉄プロセスの各工程での金属組織のつくり込みによって可能になる。シリーズ第２回目では、高温での加工（熱間圧延）と高温からの冷却を組み合わせて自在な組織制御を行う「加工熱処理（TMCP)」を中心に、結晶粒微細化への取り組みと、高品質な厚板製品の安定供給への挑戦を紹介する。

圧延と冷却で結晶粒を微細化する「TMCP」

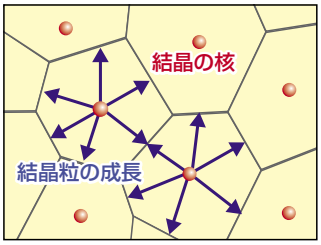
厚板の金属組織は、緻密な合金設計を前提として、加熱・圧延・冷却工程で加工ひずみと温度履歴を与えることによってつくり込まれる。従来の製造法に比べて、製造条件の制御範囲を大きく広げ、結晶粒の飛躍的な微細化を可能とした技術が「**TMCP**(※1)」だ。TMCP は圧延と圧延後の冷却の組み合わせによって、従来の熱処理法にはない新たな組織制御技術を実現したものだ。

結晶粒微細化の基本的な考え方は次の通りだ。

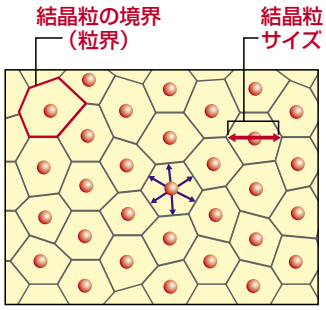
鋼材（厚板）の中を、より多くの結晶粒で埋め尽くすことができれば、結晶粒一つひとつの大きさを小さくすることができる。つまり、次々とたくさんの結晶が生まれ続け、しかも一つひとつの結晶がなかなか成長しないようにすれば、微細な結晶粒が得られることになる(**図 1**)。TMCP のキーテクノロジーは、圧延により多数の結晶が生まれる場所をつくること、および圧延後の冷却で結晶の成長を抑えることにほかならない。

厚い鋼片を圧延する場合、板厚が薄くなるに応じて、一つひとつの結晶もつぶされ、長く伸びた形になる。結晶の中で整然と並んでいた鉄の原子の配列は乱れ、**変形帯**など

結晶の生成・成長のバランスと結晶粒サイズ　図 1



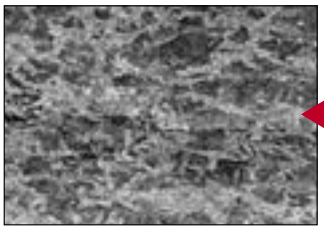
結晶粒の種(核)が生まれた後に、お互いにぶつかり合うまで成長することで結晶粒の大きさが決まる



一度にたくさんの核を生成させかつ成長を抑えることで結晶粒を小さくできる

圧延温度によるフェライト粒径の違い　写真 1

高温で圧延されて、再結晶しオーステナイトから変態したフェライト

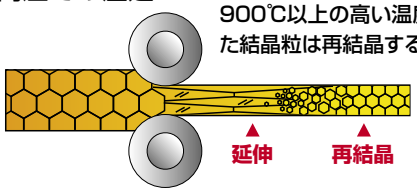


低温で圧延されて、変形帯やレッジを含むオーステナイトから変態したフェライト

圧延温度によるオーステナイトの結晶組織の違い　図 2

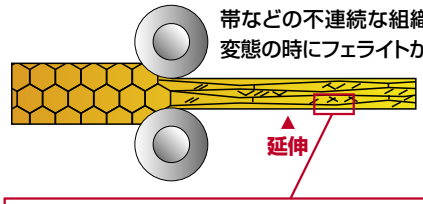
高温での圧延

900℃以上の高い温度で圧延すると、延伸した結晶粒は再結晶する。

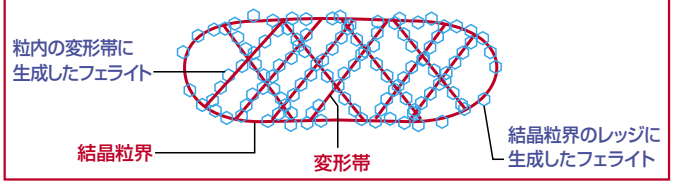


低温での圧延（制御圧延）

800℃以下の低い温度で圧延すると結晶粒は延伸したまま残る。結晶粒界には多数の階段状の凹凸（レッジ）ができる。結晶粒内にも変形帯などの不連続な組織が多くできる。これらは変態の時にフェライトが生まれる場所となる。



延伸したオーステナイト(赤)からは冷却中に多数のフェライト(青)が生まれる



（※ 1）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。

の不連続な組織が数多く生じるとともに結晶粒の境界(**粒界**)にも多数の階段状の凹凸（**レッジ**）ができる。このときに圧延温度が高い（約900℃以上）と、原子は自ら動いて、乱れた不安定な状態から、きれいに並んだ安定的な結晶に戻ろうとする。これが再結晶である。一方、圧延温度が低い（約800℃以下）と原子が動けないため、粒界や粒内の至る場所にレッジや変形帯を残したまま圧延が終わる(**図2**)。

圧延終了後、温度が下がる過程で、オーステナイトからフェライトに鉄の結晶構造が変わる「**変態**」が起こる。このときに、オーステナイトの鉄原子の配列が乱れた場所から新しいフェライトの結晶が生まれる。圧延中にオーステナイトが再結晶した場合は、原子の並びが乱れている場所は粒界のみとなるため、新しいフェライトの結晶はオーステナイトの粒界からしか生まれない。しかし、低温で圧延した場合は、オーステナイトの結晶の中の至るところにあるレッジや変形帯から新しいフェライトの結晶が数多く生まれる。すなわち、低温での圧延は、新しい結晶が生まれる場所の数を飛躍的に増やす役割を担っており、これが第一のキーテクノロジーである(**写真1**)。

もう一つのキーテクノロジーは圧延後の冷却である。新たに生まれたフェライトの結晶は時間とともに成長して大きくなる。高い温度にいると、最初に生成した少数の結晶が速く成長して大きくなり、厚板の中を埋め尽くしてしまう。そこで、圧延終了後の早い段階で冷却し、一つひとつの結晶の成長を抑えることが重要だ。このように、「**結晶粒の微細化**」は、制御圧延によって新しい結晶が生まれる場所を増やすことと、圧延後の冷却によって新しい結晶の成長を抑えることにより達成される。

TMCPの金属組織制御技術は結晶粒の微細化だけにとどまらない。製鋼段階から始まり、鋼片の加熱、圧延、制御冷却に至る各工程で、連続的に金属組織を制御することにより、必要な特性を鉄に与えることができる。TMCPはフェライト以外のマルテンサイト、ベイナイトといった高強度の金属組織についても幅広く制御することが可能だ(**図3**)。

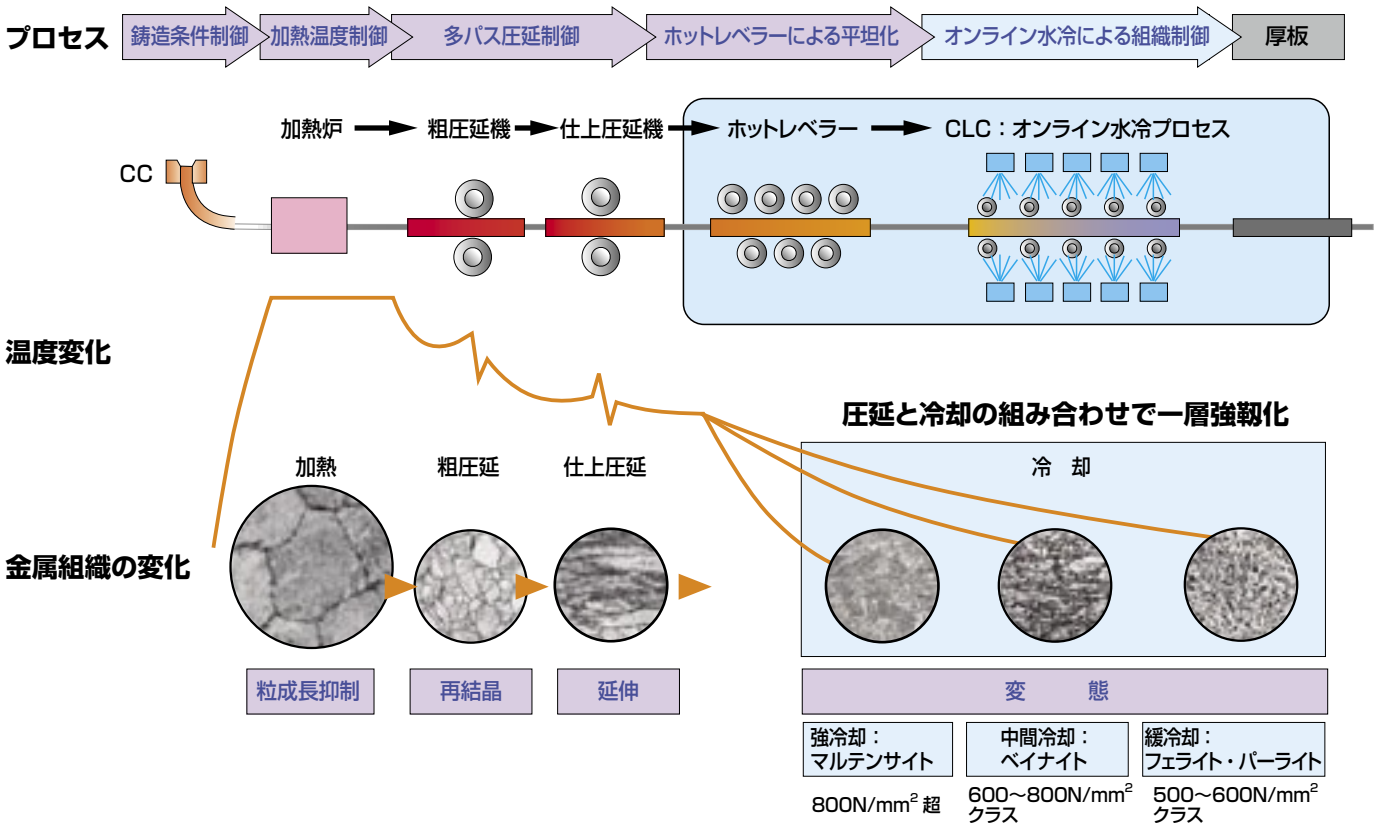
微量でも役に立つ「マイクロアロイ」

金属組織の制御に大きな効果を発揮するのが、**ニオブ**(Nb)や**チタン**（Ti）などの「**マイクロアロイ**（**微量元素**）」だ。100分の1パーセントオーダーのわずかな量を添加するだけで、厚板の加熱～圧延～制御冷却それぞれの工程で、結晶粒を微細化したり強度を高めたりする手助けをしてくれる。ここではニオブを例として、マイクロアロイの効果を説明しよう。

ニオブは鉄の中でばらばらの原子の状態で存在するか

金属組織を連続的に制御するTMCP

図3



（**固溶**）、または炭素や窒素と結合して「**析出物**」の形で存在する。鉄の温度が高いほど、ばらばらの原子の状態で存在する割合が高い。また、析出物は、温度が高いほど速く成長するので、高温ほど大きなサイズの析出物が存在する傾向がある。ニオブの析出物のサイズを粗く見積もると、圧延前に鋼片を加熱する温度（1,000℃以上）では約300ナノメートル（※2）、制御圧延の温度（800℃程度）では約50ナノメートル、圧延後の冷却の途中で変態が起こる温度（600℃程度）では約10ナノメートルである。このように温度が下がるにつれて、より小さな析出物が新たに生まれてくる。前の工程で生れた析出物は次の工程では大きすぎて役に立たなくなるため、固溶状態のニオブを残しておき、次の工程で必要な量だけを析出物として生成させて使うという制御が必要だ（**図4**）。

各工程でのニオブの役割をもう少し詳しく説明する。圧延前の加熱工程では、高温にさらされた鋼片の中の結晶が成長して粗大化するのを防ぐ役割を果たす。鋼片の中に微細なニオブの析出物をちりばめておくと、結晶粒界が膨れて、結晶が大きくなろうとするのを、まるでピンで止めるように抑えてくれる。この「**ピン止め効果**」は、次号で紹介する溶接部の結晶粒径の制御に使われている方法でもある。

次の圧延工程で、圧延の温度が高い（約900℃以上）と、鉄の原子は自ら動いて再結晶しようとする。しかし、ニオブは圧延により導入されたひずみエネルギーを駆動力として、微細に析出し、再結晶しようとするオーステナイトの結晶粒界をピン止め効果で抑えてくれる。このため、より多くのフェライトが生まれる場所（レッジや変形帯）を残したまま圧延を終わらせることができる。

さらに圧延後の冷却の間に鉄が変態すると、フェライトの鉄の原子の配列（結晶格子）をひずませるように、ニオブの析出物が生成し、強度を高めてくれる。

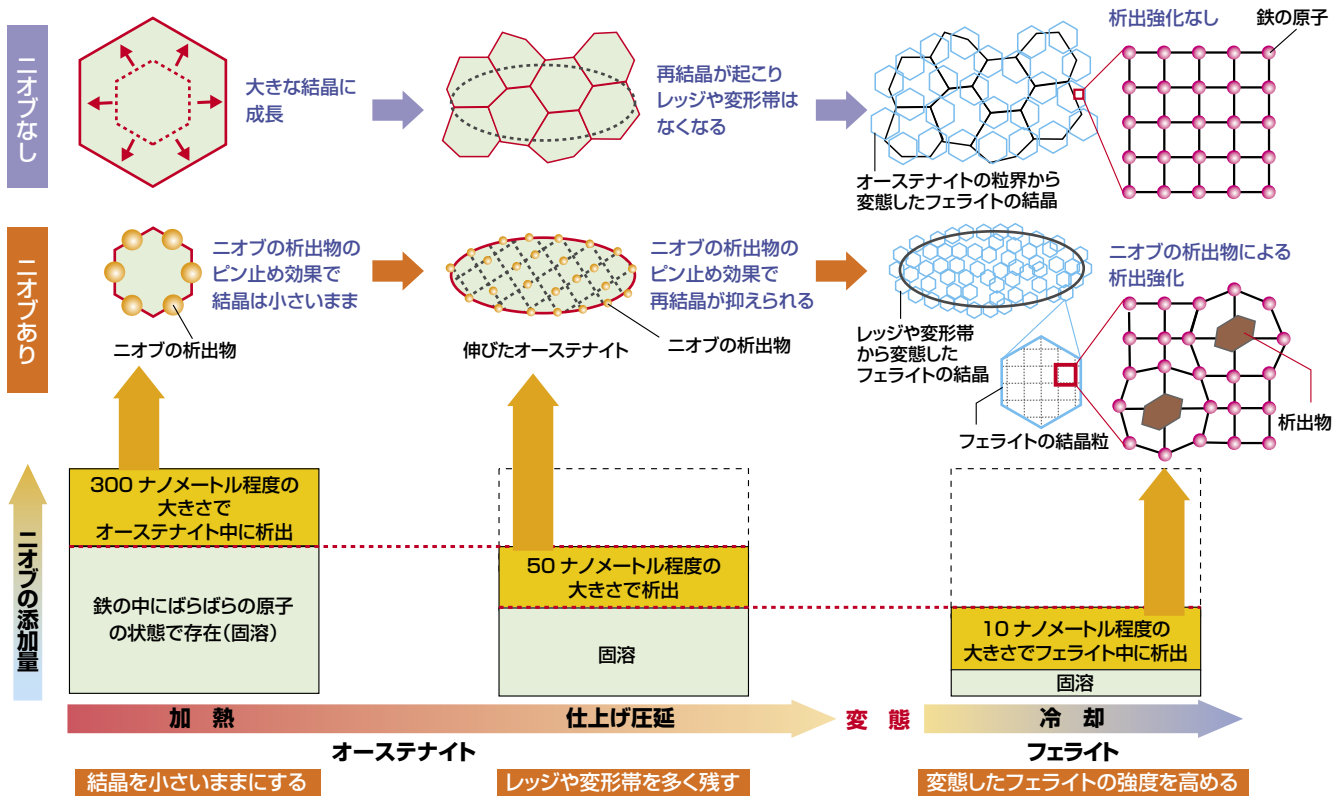
このように、ごく微量の添加量にもかかわらず、いつでもどこでも役に立つのがマイクロアロイだ。加熱、圧延、冷却の各工程で、必要な分だけを連続的に析出させることにより、それぞれの工程で、結晶の微細化や強度の上昇に貢献している。

高度な金属組織制御を実現した新日鉄のTMCP技術「CLC」

高品質な厚板商品を社会に提供し続けるためには、このような連続的な金属組織制御を大量生産の中で確実に実現することが必要だ。

新日鉄は、船舶の大型化に伴う靭性と溶接性向上の要求に応えるために、1960年代から圧延と冷却の組み合わせによる金属組織制御技術の開発に取り組み、1980年代初めに独自のTMCP技術である「**CLCプロセス**」を実現させた。1984年には世界で初めて海洋構造物用のTMCP鋼を6万ト

各工程でのニオブ析出物の生成と結晶粒微細化・高強度化への寄与　図4



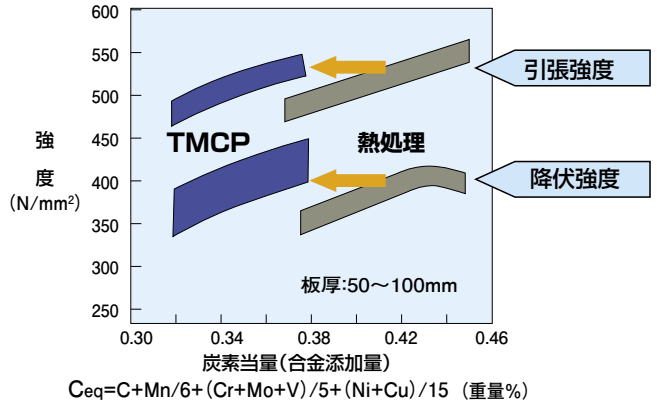
（※2）ナノメートル（nm）：1メートルの10億分の1のサイズ。ミクロンは1,000分の1ミリ。

ンも出荷して（オゼベルグ・プロジェクト）、TMCP 技術の世界的な普及の火付け役となった。

TMCP 鋼の製造の難しさは、短時間の製造工程で、均一な金属組織を持つ幅 5 m、長さ 30m にも及ぶ平坦な厚板を大量につくり込むことにある。特に、結晶粒を微細化し、所望の金属組織を得るためには、鋼材全体を狙い通りの冷却速度で均一に冷却する、狙った温度で冷却を瞬時に止めるといった「**制御冷却技術**」が必要になる。鋼材の表面の温度や粗さに応じて水の沸騰状態も刻々と変化し、鋼材の冷え方も変わるため、極めて高度な技術への挑戦がなされた。

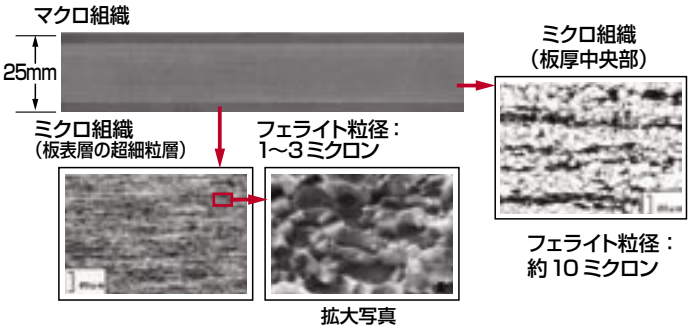
CLC 冷却装置の中には多くの開発成果が取り入れられている。厚板をレベラーで平坦にしてから冷却することにより厚板全体をより均一に冷却する方法や、冷却速度の制御範囲の広いスプレーノズル方式の採用など（**図 3**）、基本的な設備構成は現在に至るまで変わっていないが、初代 CLC 設備を実用化した後も、冷却精度の向上を図る研究は継続され、2005 年にはさらに進化した冷却設備「**CLC - μ（ミュー）**」が実用化された。「**CLC - μ**」は、冷却方法の抜本的な改善により、高い冷却速度から低い冷却速度まで極めて広い範囲で均一かつ自在な冷却を可能としたものだ。冷却後の鋼板内部の温度のばらつきを半減（従来比）するなど、あらゆる温度域における冷却精度を飛躍的に向上させた。このような冷却制御技術の高度化により、鋼板の金属組織の制御範囲も格段に広がった。

TMCPによる炭素当量（合金添加量）の削減　図5



Ceq=C+Mn/6+(Cr+Mo+V)/5+(Ni+Cu)/15（重量%）

HIAREST®鋼の金属組織（板厚25mm）図6



CLC による先端的な商品の開発

TMCP の最大の効果は、結晶粒の微細化と金属組織制御により、同じ強度の厚板を圧倒的に少ない炭素当量（合金添加量）で製造できるようになったことにある（**図 5**）。これにより、溶接時の低温割れの防止、溶接部の靭性の向上など、構造物の施工能率向上や安全性・信頼性の確保に大きく貢献した。このため、CLC により製造された厚板は、実用化後 10 年足らずで（～ 1991 年）、造船、建築、橋梁、ラインパイプ、圧力容器など、厚板の用途の大半で使われるようになった。これまでに CLC で製造された厚板の累計は 1,000 万トンを超える。

TMCP による精緻な金属組織制御の代表例が「**HIAREST® 鋼**」である。これは、一般の造船用鋼と同じ合金成分を持つ厚板の表層部の結晶粒径を 1 ～ 3 ミクロン程度まで微細化し、飛躍的に靭性を高めたものだ。適切な設計・施工と組み合わせれば、毎秒 1,000m のスピードで走る脆性き裂を止めることも可能となるため、大型船舶の脆性破壊防止のために使われている（**図 6**）。

この他にも、超大型コンテナ船などに使われる**高強度鋼「EH47」**や、溶接部靭性の要求が非常に厳しい海洋構造物用鋼の中で最も高強度の「**YP500N/mm² 鋼**」、これまでにない高圧力のガスラインパイプへの適用を目指した「**X120 UO 鋼管**（※ 3）」など、CLC を活用したハイグレードな厚板製品が現在でも次々と開発されている。

TMCP 技術は日本での実用化をきっかけとして、1980 年代から 1990 年代にかけて世界的な広がりを見せたが、現在では、日本以外の多くの鉄鋼メーカーが、制御冷却の難しさからこの技術を手放している。日本の TMCP が生き残り、今に至るまで世界の厚板技術をリードしている理由は、それぞれの工程で何が起こっているのかを丹念に調べ、それを基に総合的な技術として再構築したこと、造船・エネルギー・建築業界をはじめとする数多くのユーザーと共同で高度な利用加工技術を開発してきたことなどが挙げられる。次号では、厚板の利用加工技術最大のテーマである「溶接特性向上への挑戦」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、鋼管、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。

（※ 3）X120：API（American Petroleum Institute）規格による鋼管（ラインパイプ）の強度グレード。