



特集記事・8

我が国のエネルギーを支える鉄鋼技術【使う】

輸送機器用厚鋼板の特徴と製造技術

Manufacturing Technologies and Material Features of Steel plates for Shippings and Construction Machineries

JFE スチール（株）スチール研究所
理事 鋼材研究部長遠藤 茂
Shigeru EndoJFE スチール（株）スチール研究所
耐食材料研究部長三田尾眞司
Shinji Mitao

1 緒言

船舶や建設・産業機械などの輸送機器では、機器の軽量化や製造時の消費エネルギーと排出CO₂の低減が可能となる高強度材の適用が拡大している。また、トータルの輸送エネルギーの低減を目的として、1隻あたりの輸送量の増加が期待できる船舶の大型化も進んでいる。このような大型化も部材重量の低減が可能になる高強度材の適用拡大が必須となる。さらに、船舶の長寿命化、再塗装などのメンテナンスを軽減できる耐食鋼やクラッド鋼の適用も拡大している。このような高強度鋼に代表される環境調和型の鋼材の製造技術では、その製鋼技術や微量元素の制御さらに厚板圧延時の加工熱処理技術（TMCP：thermo-mechanical controlled processing）も著しい進歩を示している。また、高強度鋼の更なる高機能化を目的として、厚板製造でのオンラインの熱処理プロセス（HOP：Heat treatment On-line Process）も開発されている。

本報告では、革新的な厚板製造技術に関して、TMCP適用時のメタラジー「組織・材質制御技術」ならびに加速冷却設備と冷却技術の最近の技術革新について紹介する。次に、至近の造船分野ならびに建産機分野において開発された高機能・高強度鋼についての紹介も行う。船舶分野では、大入熱溶接用鋼、高強度（YP390-460N/mm²）高アレスト鋼、耐食鋼、クラッド鋼についてその材質制御技術と特徴について紹介する。建産機分野では、大型化と重量の軽量化を果たすべく、建設用クレーンのブームやアウトリガーに使用される高強度鋼板の開発状況について紹介する。

2 TMCP技術

2.1 TMCP-加速冷却設備・新加速冷却技術の開発 —均一・強冷却技術の確立—

TMCPのメタラジーについては次節に概説する。ここでは

加速冷却設備の変遷と至近の技術開発について述べる。厚板の加速冷却は、制御圧延とともにTMCP技術の中核をなす技術で¹⁾、1980年に世界で初めて厚板のオンライン加速冷却法が実用化されている²⁾。JFEスチール西日本製鉄所（福山地区）において世界で初めて実用化されて以来、TMCPの高度化に向けた取組みが国内外で継続的に続けられている（図1）。

第1世代の加速冷却が世に出てから四半世紀が経過し、最近開発された冷却設備としては、高圧多孔噴流により冷却能力を高めたMULPIC³⁾、新しい水流制御技術によって理論限界冷却速度を実現したSuper-OLAC⁴⁾、そして冷却速度を制御し冷却時の均一性を向上したCLC-μ⁵⁾、などがあり、高強度で高性能な鋼板の製造に適用されている。

Super-OLACでは、温度ばらつきの原因となる遷移沸騰を避け、冷却開始とほぼ同時に全面が核沸騰状態になるような冷却方式を追究し、加速冷却後の鋼板表面温度分布は、加速冷却を行わない制御圧延ままの鋼材と同等で均一な分布が工業的に達成されている。CLC-μでは、これまでのCLCに比べても冷却時の鋼板の上下面、幅方向にさらに均一な冷却を行えるよう水の核膜沸騰特性や流れと鋼板の変形挙動を考慮した新しい冷却方式となっている。また、冷却ゾーン細分化に

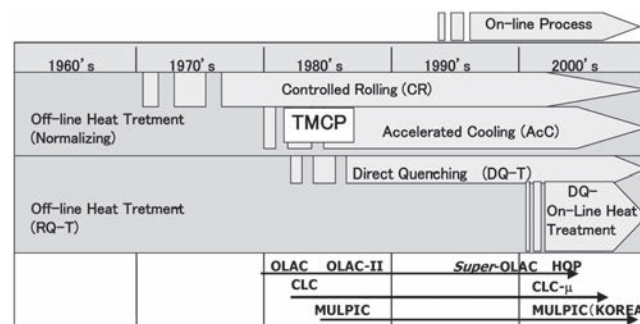


図1 厚板製造プロセス（TMCP）の進歩と連続化の流れ

よる多段冷却が可能で広い冷却速度範囲が実現されている。
 なお、韓国でも2003および2010年にMULPICが導入され、
 冷却能の向上と制御モデルのレベルアップが実現されている
 ようである。

2.2 TMCPによる高機能鋼の組織制御技術の基礎

ー厚板メタラジーー

主に引張強度600MPa以下の鋼材における高靱性を図
 る際に、圧延温度を低温側に制御して行う制御圧延 (CR :
 Controlled Rolling) を行う。これにより、オーステナイト
 (γ) の結晶粒を微細化し、あるいは、加工ひずみを蓄積させ
 て、引き続き行われる変態の核生成サイトの密度を増加させ
 るのが目的である。このCR後、引き続き、加速冷却を適用
 すると (CR-AcC)、CRまま放冷した場合 (As CR) と比較し
 て、変態の生じる温度が低温側に移行する (図2 (a) 中の太
 矢印参照)。変態の駆動力が大きくなる一方で、原子の拡散
 速度は小さくなるので、より均一、微細にフェライトが生成
 する。このような変態組織の均一・微細化を通して、鋼材の
 高強度化、高靱性を図っている⁶⁾。船舶用の降伏強度 (YP)
 315MPa級鋼と、さらに高強度の銅板は、この加速冷却を適
 用し製造される場合が多い。

建産機用鋼材などの高強度化に対応すべく、圧延後再
 加熱焼入れー焼戻し処理 (RQ-T : Reheat Quenching and
 Tempering) が行なわれてきた。1980年代以降TMCP技術
 の開発とともに、オンラインプロセス化が進み、再加熱を省
 略した直接焼入れー焼戻し処理 (DQ-T : Direct Quenching
 and Tempering) が多く用いられているようになってきた。
 DQ-Tプロセスは、その鋼材成分、圧延条件、水冷条件を緻密
 に制御することで、RQ-Tプロセスよりも強度靱性バランス
 に優れた高張力鋼の製造が可能である。特に、未再結晶圧延
 (オースフォーム) を活用したCR-DQ-Tプロセスでは、焼入
 れ性を精緻に制御することで、高強度・高靱性が達成され
 ている⁷⁾。

図3に圧延後の直接焼入れによって、オースフォームを活
 用した降伏強さ960N/mm²級鋼の機械的特性例を示す⁸⁾。図
 3のマイクロ組織は、マルテンサイトに変態する前の γ (旧 γ
 と呼ばれる) の結晶粒界を現出させて光学顕微鏡で観察した
 ものである。未再結晶域圧延材 (図3で圧延終了温度800℃)
 は、再結晶域圧延材 (図3で圧延終了温度900℃超) よりも、
 旧 γ 粒が大きく展伸し、かつ組織の微細化が認められる。こ
 の組織変化により仕上げ温度の低下にともない、降伏強さが
 増加するとともに靱性 (−40℃でのシャルピー試験での吸収
 エネルギー) が向上していることが分る。

オンライン熱処理プロセス (図2 (b)) も開発実用化されて
 いる。このプロセスを用いた急速加熱焼もどし (従来のオフ
 ライン熱処理の場合に比べ、昇温速度が1~2桁大きい) を適
 用することによって、有効結晶粒を微細化し、さらに、鋼材
 中のセメントサイトを均一微細分散などの組織制御が可能
 となる。また、これによる高靱性化や耐水素性の向上も報告
 されている⁹⁾。

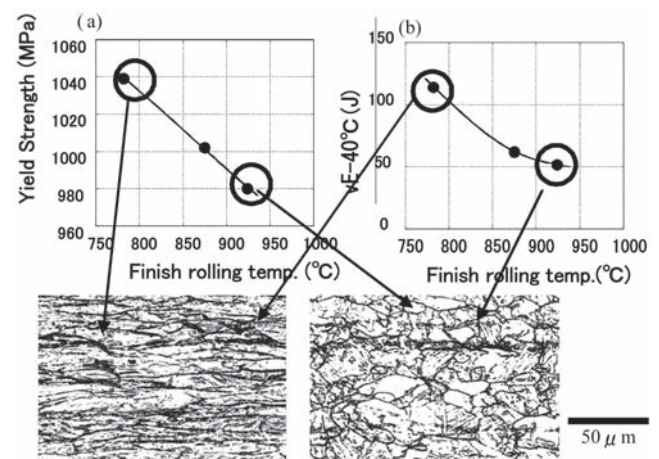


図3 機械的性質に及ぼすオースフォームの影響
 (降伏強度960N/mm²級鋼)
 (a) 降伏強さ、(b) −40℃におけるシャルピー吸収エネルギー

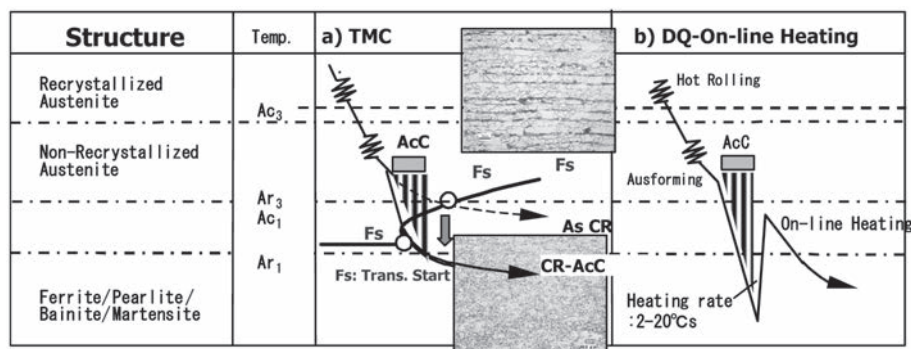


図2 TMC (a) ならびにDQ-On-line Heating (b) の温度履歴の模式図

3 船舶用高機能鋼材

3.1 大入熱溶接用鋼

溶接の高効率化は溶接構造物では最も大きな課題である。構造部材の厚肉化に伴い大入熱溶接化の傾向は強く、造船分野では1990年代初頭の10kJ/mm以上の入熱から最近では約50kJ/mmの超大入熱溶接が実施工で用いられるようになった。厚肉—高強度鋼の機械的特性を確保するためには、合金元素の添加量、炭素当量 (Ceq) を増加させる方向となる。そのため、たとえば、大入熱溶接を行った際の溶接熱影響部 (HAZ: Heat Affected Zone) に、硬質のM-A (Martensite-Austenite Constituent) を含む低靱性の上部ベイナイトが生成し、HAZ靱性を劣化させる。加速冷却の適用により、Ceqの増加を極限まで抑制することは、大入熱溶接部の高品質化を実現する重要な基本技術要素のひとつとなっている。また、鋼中のSi、Al量を低減してM-Aを低減し、HAZの靱性を改善しようとする検討がなされている¹⁰⁾。

また、HAZの加熱 γ 粒径微細化と変態後の最終組織微細化検討がなされている。加熱 γ の微細化によるHAZ靱性改善を目的としたTi、N量の最適化検討結果が報告されている。さらに強力なピン止め粒子の検討を行い、CaやMg等の酸化物・硫化物を微細 (数10～数100 μm) かつ高密度に分散させた鋼材が開発されている (図4¹¹⁾)。TiN鋼と開発鋼では γ 粒成長挙動に顕著な差があり、開発鋼では1400℃で数10秒間保持しても概ね150 μm 以下の γ 粒径を維持できることが確認されている。

γ 粒内の組織微細化技術では、Tiの酸窒化物やMn硫化物と、その複合体、REM (Rare Earth Metal、希土類金属) の酸硫化物、Caの酸硫化物 (TiN-MnS、REM (O,S)-BN、Ca (O,S)、 $\text{Ti}_2\text{O}_3\text{-MnS}$) 等が利用されている¹²⁾。最近の技術としては、TiNを γ 粒成長抑制に活用するとともにBNとCa

系非金属介在物を粒内組織微細化制御に活用したTiN-BN-(Ca,Mn) S鋼が開発され、造船用の高強度大入熱溶接用鋼に適用されている (図5¹⁰⁾)。

3.2 高強度 (YP390-460N/mm²) 高アレスト鋼コンテナ船用鋼

この10年間にコンテナ船の大型化が著しく進展した。従来の6000TEU (twenty-foot equivalent unit、20フィートコンテナ換算) 積みから直近では15000TEUを超えるメガコンテナ船の実用化が進んでいる。これに対応して板厚50mm以上のYP390MPa超級鋼の適用が進むとともに溶接施工効率向上のため超大入熱溶接用鋼が開発・実用化されている。また、大型コンテナ船の安全性確保のため、産官学連携で大規模な大型実験を含む共同研究がなされ¹³⁾、日本海事協会から2009年に「脆性亀裂アレスト設計指針」¹⁴⁾が発行されている。この指針はアレスト設計がなされるコンテナ船の板厚50mmを超えるハッチサイドコーミングなどに適用される。このような背景から、船舶の大型化に対応した大入熱溶接の特性に優れたYP460MPa級の開発に加えて、高アレスト性 (高Kca値) を具備したYP390超の鋼板も開発されている (図6¹⁵⁾)。開発された鋼板は、実船への適用も進んでいる。さらに一層

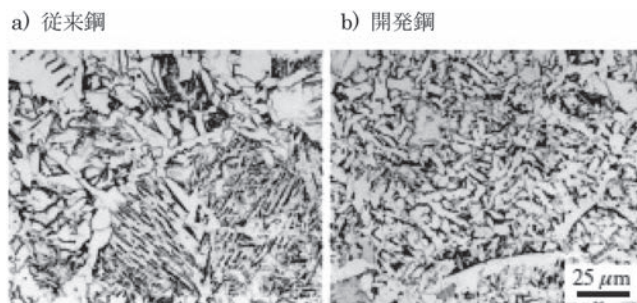


図5 TiN-BN-(Ca,Mn) S鋼の溶接再現熱サイクル後の粒内組織¹⁰⁾

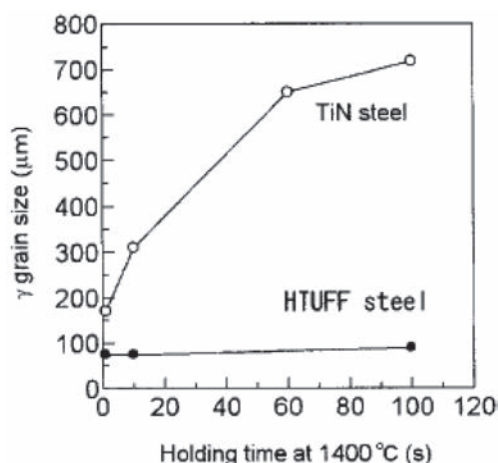


図4 超微粒子分散鋼 (開発鋼) とTiN鋼の γ 粒粗大化挙動¹¹⁾

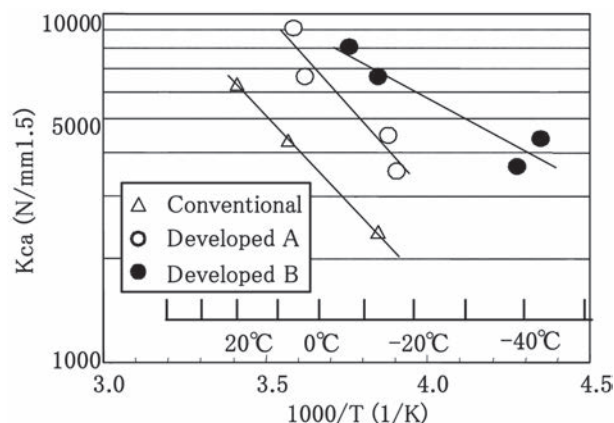


図6 開発YP390のアレスト特性 (Kca値)¹⁵⁾

の大型化に対応し大入熱溶接性にも優れたYP460MPa級の高アレスト鋼も開発され実船への適用が進んでいる¹⁶⁾。

3.3 造船用耐食鋼

原油タンカーの海難事故は、油流出による深刻な環境汚染をとともなうため、様々な技術的観点からその対策が検討されている。船体構造に関しては、1989年に起きたExxon Valdez号のアラスカ沖での座礁事故による大規模な環境汚染を受け、いわゆる改正MORPOL条約により、タンカーの二重船殻（ダブルハル）構造化が義務づけられている。さらに、新造船の構造強度基準を、その目標（ゴール）を明示する目標指向型の規則として作成するゴールベーススタンダード（GBS：Goal-Based Ship Construction Standards）の概念の導入や、IACS加盟10船級の構造寸法を共通化した共通構造規則（CSR：Common Structural Rules）等が制定され、船舶の安全性向上と長寿命化の推進が図られている¹⁷⁾。一方で、船舶の損傷の多くは腐食によるものと言われており¹⁸⁾、鋼材の耐食性向上も、船舶の安全や環境保全を確保する重要な手段のひとつである。実際に、原油タンカー荷油タンク（COT）の安全性向上に関して、IMO（国際海事機構）において海上人命安全条約（SOLAS条約）改定が審議され、塗装の強制化とともに、その代替手段として、耐食鋼の無塗装適用が認められている¹⁹⁾。耐食鋼は、微量の耐食性元素を組み合わせる添加した低合金鋼であり、溶接性や加工性については従来の鋼材と同等で、特別な施工管理を必要としない²⁰⁾。ここでは、タンカー用耐食鋼とバラストタンク用耐食鋼について紹介する。

3.3.1 タンカー用耐食鋼

タンカー原油タンク内の腐食環境については、1999年度からの3年間、旧（社）日本造船研究協会第242研究部会（SR242委員会）において大規模な調査研究が行われ、多くの有用な知見が得られた²¹⁾。図7に、原油タンカーCOT内の腐食環境を模式的に示す²²⁾。腐食が問題となるCOT上甲板裏とCOT

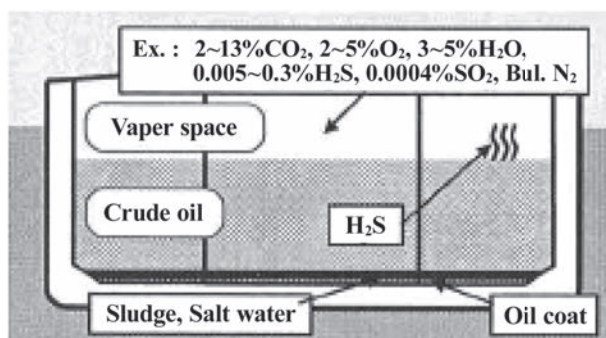


図7 原油タンカーCOTの腐食環境（断面模式図）²²⁾

底板とでは、腐食環境や腐食の状況が大きく異なる。

COT上甲板裏の空きスペースには、防爆を目的として、不活性化ガス（イナートガス）が導入される。イナートガスは、ボイラーの排ガスを洗浄・冷却したガスで、窒素78%、二酸化炭素14%、酸素2~4%の組成を持つ。このイナートガスと原油より発生する硫化水素（H₂S）が混合し、特殊な腐食環境を形成する。鋼材の腐食形態は全面腐食で、腐食生成物は比較的少量に生成されるが、それは固体Sと錆の複合物であって、鋼材自体の腐食による損耗は、平均0.1mm/年以内と比較的小さい²⁰⁻²³⁾。

一方、COT底板は、通常、原油やスラッジから成る、絶縁抵抗の高いオイルコートと呼ばれる皮膜に覆われている。オイルコートが健全であれば底板の腐食は大幅に抑制される。しかし、原油より分離した、高濃度の塩化物イオンを含むドレン水が、底板上に数cmの水層を形成していることが知られており、オイルコートの絶縁抵抗は水分吸収によって激減する。この状況でオイルコートに欠陥が生ずると、欠陥部と健全部で電池を形成し、孔食となる。COT底板では、4mm/年に達する孔食の存在が明らかになっている。上甲板裏で生成したSが落下し、底板に付着することも、孔食を促進すると考えられている。

これらの特殊な腐食環境において良好な耐食性を示す耐食鋼が開発されている。例えば、COT上甲板用として、実際に模擬した雰囲気中で、昼夜の気温差に相当する結露・乾燥を繰り返す評価法により、腐食速度が従来鋼に対し1/2程度となる耐食鋼が開発されている²⁴⁾。また、COT底板用として、種々の孔食評価の結果、孔食深さを35~50%低減させる耐食鋼^{22,24)}や、孔食の腐食速度を1/5に低減させる耐食鋼^{25,26)}が開発されており、実船への適用が進められている^{22,24,25)}。

3.3.2 バラストタンク用耐食鋼

バラストタンクは、船舶が空荷の状態で行く際の安定性を確保するために、海水を搭載するタンクであり、海水による腐食に耐えるよう重防食塗装が施される。2006年にIMOにおいて、バラストタンク塗装性能基準（PSPC）が採択され、塗料や塗装仕様等が詳細に規定されている²⁷⁾。しかし、バラストタンクの上甲板裏は、太陽からの熱と海水の飛沫による厳しい腐食環境下にあるため、塗装劣化が生じた部分の腐食速度は、0.5mm/年に達することが知られている²⁸⁾。PSPCにおける目標耐用年数の15年²⁷⁾は、一般的に想定される船体の設計寿命（例えば、25年^{29,30)}）より短く、PSPCに沿った重防食塗装であっても、補修再塗装が必要になる可能性は高い。補修再塗装には多大な費用がかかり、また、足場が組みにくい場所に関しては再塗装自体が困難な場合もある。バラストタンク用耐食鋼は、腐食生成物による鋼材の保

護性向上作用等により、鋼材の腐食性を低減させ、塗装寿命を延長させる鋼材である³¹⁾。

図8は、実船バラストタンク内上甲板裏において、10ヶ月間、および、2年間、暴露した試験片の外観である³¹⁾。試験片には、ショットブラスト後、タールエポキシ100 μ mの塗装を施し、カッターナイフにより地鉄に至るスクラッチが付与されている。いずれの試験片においても、スクラッチ部からの塗膜ふくれが認められるが、塗膜ふくれは開発鋼(耐食鋼)において顕著に抑制されている。耐食鋼の適用により、15年の塗装寿命を25年以上に延長できると期待されている³²⁾。

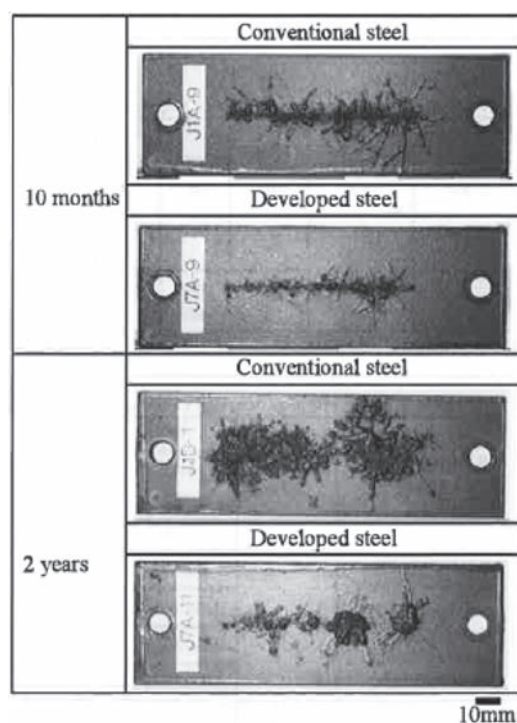


図8 バラストタンク上甲板裏実船暴露試験片の外観³¹⁾

3.4 クラッド鋼

クラッド鋼は、主に強度や靱性など、構造物材料として必要な機械的特性を受け持つ母材(炭素鋼、低合金鋼)の表面(片面、あるいは両面)に、耐食性、耐摩耗性、伝熱性、導電性などの物理的・化学的機能を受け持つ材料(合せ材)を重ね合わせた、積層型の複合材料である。クラッド鋼の製造法として、組立圧延法、鑄込圧延法、爆発圧着法、肉盛溶接法、拡散溶接法などが実用化されている。

船舶用クラッド鋼の代表的な用途は、ケミカルタンカーの船殻・カーゴタンクである^{33,34)}。合せ材に要求される機能は、積荷となる様々な薬品(硫酸、りん酸など)に対する耐食性であり、SUS316L、SUS317LNなどのオーステナイト系ステンレス鋼が選択される。一方、母材である鋼材には、高比重の積荷や波浪による厳しい荷重条件に耐える強度ならびに靱性が要求される。

組立圧延法によるステンレスクラッド鋼の製造において、TMCPの適用は、母材の機械的性質と合せ材の耐食性の両立に有効である。図9は、(a)に示す試験条件でSUS304、SUS316を熱間加工、加速冷却し、粒界への炭化物の析出を、しゅう酸エッチング試験(JIS G0571)で評価した結果である³⁵⁾。図中の数値はビッカース硬さである。例えば、最終パス温度: 950 $^{\circ}$ Cの場合に着目すると、SUS304、SUS316ともに、加速冷却における冷却速度の増大によって、炭化物の析出が抑えられることがわかる。同様に、冷却速度: 10 $^{\circ}$ C/sに着目すると、最終パス温度の上昇によって、炭化物の析出が抑えられる。加速冷却と、適正な熱間加工条件の選択によって、母材に要求される機械的性質を確保しつつ、合せ材における炭化物の析出・鋭敏化を抑え、所望の耐食性を確保することが可能である³⁶⁾。

船舶用クラッド鋼に関する最近のエポック・メイキングな話題は、2009年5月に就役した新南極観測船「しらせ」へのステンレスクラッド鋼の適用である³⁴⁾。新しく開発された高

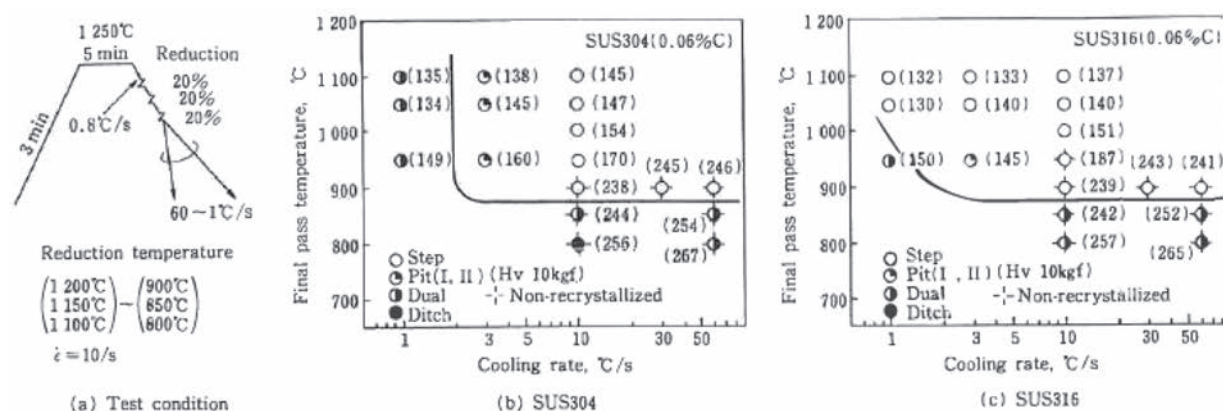


図9 SUS304、SUS316における炭化物の析出におよぼす熱間加工条件、冷却速度の影響³⁵⁾

耐食ステンレスクラッド鋼（合せ材：JSL310Mo（23Ni-25Cr-4.5Mo）、母材：EH36級鋼）が喫水付近のアイスベルトに、また、合せ材をSUS317Lとしたクラッド鋼が船首常時没水部に、それぞれ適用された（図10）。砕氷航行における海水の摩擦による抵抗は非常に大きく、耐摩耗性に優れた高性能耐水塗料で塗装したとしても、長期的には部分的な剥離が生じ、腐食が進行して、表面粗度が増大する。新開発の高耐食ステンレスクラッド鋼をアイスベルトに適用することにより、塗装なしでも長期にわたって平滑な表面が保たれ、摩擦抵抗の増大が抑えられる結果、良好な燃費を維持することができる。新開発クラッド鋼は、氷海域と高温水域の双方を航行し、海水と外気に接しつつ、電気防食が十分に効かない、砕氷船喫水付近の厳しい腐食環境においても、十分な耐食性を発揮している。

4 建産機用高強度鋼

建設用クレーンは、クレーン重量の軽量化を果たすべく、特にブームやアウトリガーに使用される鋼材には高強度鋼が求められている。高強度化に対応すべく、引張強度780～1180N/mm²の高張力鋼が開発され実生産されている³⁷⁾。これらの高張力鋼は、前述のTMCP技術を駆使し、強度のみならず優れた低温靱性も実現している。また、建産機の設計において、従来引張強度設計であるのに対し、最近では降伏強度設計に対応した高降伏強度を保証するYP960MPa鋼やYP1100MPaの開発も報告されている⁹⁾。

いずれの鋼板においても、炭素当量や合金元素、加熱、圧延、冷却、熱処理プロセスを最適にコントロールすることで高強度化、高靱性化を図るとともに、溶接割れ感受性組成P_{cm}などを低く抑えることで溶接施工性の向上、切断性、曲げ性などの加工性能向上も同時に実現している。曲げ性では、上述の高強度材においても板厚の1.5～2倍の曲げ半径の加工が可能である。なお、大型化の傾向は、パワーショベル、ブルドーザー、などにおいても同様である。

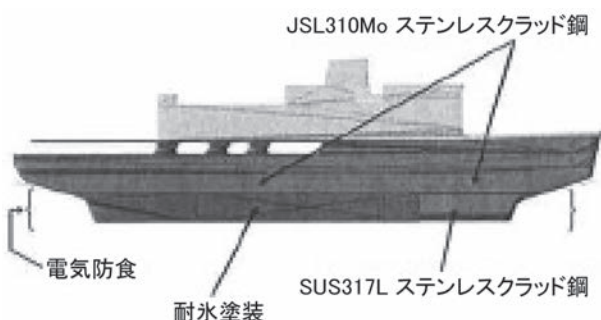


図10 新「しらせ」におけるステンレスクラッド鋼適用部位³⁶⁾

オンライン熱処理プロセスを用いた急速加熱焼もどしを適用することによって、優れた低温靱性を有するYP960MPa鋼やYP1100MPa（表1）も開発されている⁹⁾。

オンライン熱処理鋼板の焼もどしパラメータ（T.P.）による整理したシャルピー衝撃試験による破面遷移温度との関係を図11に示す³⁸⁾。T.P.値と強度は昇温速度の大小に関わらず、T.P.値によって概ね決まるが、破面遷移温度は、昇温速度に依存し、通常のオフライン熱処理（0.3℃/秒の昇温速度）に比べて、オンライン熱処理材（5℃/秒以上の昇温速度）の破面遷移温度は約10℃低く、靱性が改善されている。

$$T.P. = T_x (\log t + C) \quad (1)$$

T：温度（K）、t：時間（h）、C：定数

5 結言

船舶や建産機などの輸送機器に用いられる高強度鋼材の製造技術に関して至近の技術開発とそのメタラジーを含めて概説した。また、それら分野において開発された高機能・高強

表1 高降伏強度鋼YP960、1100MP級鋼の機械的特性例

Grade	Thickness (mm)	Tensile properties			Charpy impact properties	C _{eq} ***** (%)
		YS* (MPa)	TS** (MPa)	El*** (%)	$\sqrt{E_{-40^\circ\text{C}}}$ **** (J)	
YP960	12.0–32.0	≧ 960	980–1150	≧12	≧27	≦0.64
YP1100	12.0–32.0	≧1100	1180–1500	≧12	≧27	≦0.70

*Yield strength **Tensile strength ***Elongation

**** Absorbed energy at -40℃

***** Carbon equivalent = C + Mn/6 + (Cu + Ni)/15 + (Cr + Mo + V)/5

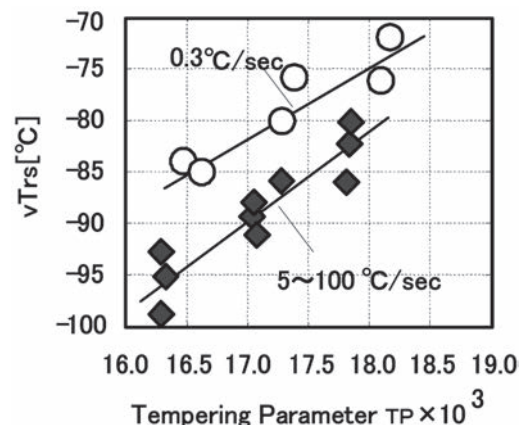


図11 引張強度780N/mm²級鋼の焼もどしパラメータと破面遷移温度（vTrs）との関係³⁸⁾

度鋼についても紹介した。安心・安全、(高強度厚肉化)、ライフサイクルコスト低減の観点から革新的厚板製造プロセスを活用した高機能鋼板の開発が進められている。この傾向は今後も継続するものと予想される。

参考文献

- 1) 小指軍夫：制御圧延・制御冷却，東京，地人書館，(1997)
- 2) 東田幸四郎：日本鋼管技報，89 (1981)，121.
- 3) James F. Evans and Michael T. Clark：AISE Steel Technology, 79 (2002) 6, 49.
- 4) 藤林晃夫，小俣一夫：JFE技報，5 (2004)，8.
- 5) 芹澤良洋，山本龍司：日本機械学会誌，110 (2007) 1060, 8.
- 6) 関根寛：第86・87回西山記念技術講座，厚板製造技術の進歩と材質，日本鉄鋼協会，(1982)，123.
- 7) K.Okamoto, A.Yoshie and H.Nakao：Physical Metallurgy of Direct Quenched Steels. ed. by K.A.Taylor, TMS-AIME, PA, USA, (1993)，339.
- 8) 長尾彰英，林謙次，大井健次，伊藤高幸，平田健二：まてりあ，47 (2008)，93.
- 9) 長尾彰英，伊藤高幸，小日向忠：JFE技報，18 (2007)，29.
- 10) 一宮克行，角博幸，平井龍至：JFE技報，(2007) 18, 13.
- 11) 児島昭彦，清瀬明人，植森龍治，皆川昌紀，星野学，中島隆雄，石田浩二，安井洋二：新日鉄技報，380 (2004)，2.
- 12) 船越督己，田中智夫，上田修三，石川正明，腰塚典明，小林邦彦：鉄と鋼，63 (1977)，303.
- 13) Y.Yamaguchi, H.Yajima, S.Aihara, H.Yoshinari, K.Hirota, M.Toyoda, M. Kiyosue, K.Tanaka, S. Okabe, K. Kageyama, Y.Funatsu, T.Handa, T.Kawabata and T.Tani：ISOPE, (2010)，71.
- 14) 脆性亀裂アレスト設計指針，日本海事協会，(2009)
- 15) 西村公宏，半田恒久，橋本正幸：JFE技報，18 (2007)，18.
- 16) Y.Funatsu, J.Otani, K.Hirota, T.Matsumoto and H.Yajima：Proc. of the 20th ISOPE Conf., (2010)，102.
- 17) 柴崎公太：ユニバーサル造船テクニカルレビュー，(2010) 6, 1.
- 18) 原田晋：防錆管理，47 (2003)，89.

- 19) 潮海弘資：KANRIN (日本船舶海洋工学会誌)，31 (2010)，29.
- 20) 小森務：KANRIN (日本船舶海洋工学会誌)，13 (2007)，38.
- 21) 第242研究部会，原油タンカーの新型コロージョン挙動の研究－研究概要総括書－，日本造船研究協会，(2002)
- 22) 猪原康人，小森務，京野一章，植田圭治，鈴木伸一，潮海弘資：日本船舶海洋工学会講演会論文集，(2006) 3, 339.
- 23) 鹿島和幸，久保論，稲見彰則，幸英明：配管技術，51 (2009) 11, 72.
- 24) 鹿島和幸，幸英明，勝元弘，稲見彰則：日本造船学会講演会論文集，(2005) 5, 131.
- 25) 井上幸一，大島卓雄，米澤孝志，今井嗣郎，加藤謙治，宇佐美明：日本造船学会誌，878 (2004)，201.
- 26) 今村弘樹，安部研吾，坂下真司，久本淳，池田英次：CAMP-ISIJ, 19 (2006)，1189.
- 27) Guidelines for Performance Standard for Protective Coatings contained in IMO Resolution MSC.215 (82)，Nippon Kaiji Kyokai, (2007)
- 28) 在田正義：材料と環境，46 (1997)，532.
- 29) Common Structural Rules for Double Hull Oil Tankers, IACS, (2006)
- 30) Common Structural Rules for Bulk Carriers, IACS, (2006)
- 31) 塩谷和彦，小森務，星野俊幸，西村公宏，中村雅美，潮海弘資：日本船舶海洋工学会講演会論文集，11 (2010)，481.
- 32) 鹿毛勇，小森務：配管技術，51 (2009) 11, 66.
- 33) 座間正人，斉藤正洋，矢島浩，梶田剛，関信博，須賀正孝，本田正春，永元隆一：日本造船学会論文集，163 (1988)，407.
- 34) 鈴木伸一，村岡隆二，小日向忠，遠藤茂，堀田知夫，小俣一夫：JFE技報，2 (2003)，37.
- 35) 本田正春，山本定弘，津山青史，松本和明，伊沢徹，松尾敏憲：日本鋼管技報，116 (1987)，17.
- 36) 山内豊：ユニバーサル造船テクニカルレビュー，(2009) 4, 1.
- 37) 都築岳志：ふえらむ，18 (2013) 2, 17.
- 38) 鹿内伸夫，三田尾眞司，遠藤茂：JFE技報，18 (2007)，1.

(2013年8月21日受付)