

連携記事

海洋構造物の信頼性を守る鉄—1

石油、ガス掘削用海洋構造物用厚鋼板開発の最近の動向

Recent Trends in Development of Heavy Plates for Off-Shore Structures

吉田 讓*¹、西村誠二*²、長井嘉秀*²、都築岳史*²、
井上健裕*²、稲見彰則*³、加茂孝浩*⁴

1 緒言

近年の世界的エネルギー需要堅調の中、関連する鋼構造物、特に海上で石油、天然ガスを掘削する海洋構造物の需要が高まっている。そして、それに使用される鋼材は高強度、厚手で更に要求特性が非常に厳格であることが特徴である。

昭和55年(1980年)3月27日、北海においてノルウェーの会社が海底石油採掘の為に設置していた海洋構造物(半潜水型石油掘削リグ)が転倒し、その上で生活、仕事に従事していた212名のうち、123名という多数の犠牲者を出す事故が起きた。この事故の原因はリグを支えている5本の鋼製脚の中の1本が折れ、バランスを失って転覆したのである。この事故を契機に海洋構造物の破壊に対する安全性要求が厳格になり、破壊力学に基づいた靱性評価法であるCTOD (Crack Tip Opening Displacement) 試験が本格的に適用され、鋼材、溶接接合部への要求特性も非常に厳格なものとなった。

そこで海洋構造物用鋼材の開発は、溶接継手-10℃ CTOD 保証YP355N鋼に始まり、海洋構造物用としては初のTMCP (Thermo Mechanical Control Process: 加工熱処理または熱加工制御) 鋼であるYP355-TMCP鋼(降伏応力355N/mm²のTMCP鋼材)が開発され、それに引き続きYP420、460、500、550鋼(それぞれ降伏応力420、460、500、550N/mm²の鋼材)と高強度化が図られてきた。また開発地域の厳寒化に対応し、より低温での破壊靱性に優れた溶接継手-40℃ CTOD 保証鋼が開発されるに至った。最近では海洋構造物の大型化による使用鋼材の高張力化の進展、使用環境の厳格化による環境温度の低温化(寒冷化)、負荷(波浪)応力の増大など、鋼材への要求が更に厳格なものとなってきている。

本稿では、最初に現在使用されている海洋構造物について概説し、次に使用される鋼材への要求性能並びに対応する鋼材の開発、特性について述べる。

2 石油、ガス掘削用海洋構造物の種類と使用される鋼材

2.1 掘削構造物

油田開発において、経済性のある油田を発見し、さらに効率よく石油を採掘するためには多数の試掘や探掘が繰り返し行われる。掘削構造物は試掘や探掘を行うもので、数週間から数カ月かけて一つの井戸を掘削したのち、他地点へ移動して掘削を行うことを繰り返す。このため、海底に完全に固定されるのではなく、自由に移動できるようになっており、ジャッキアップリグやセミサブ (Semi-submersible)、ドリルシップなどの形式が存在する。掘削構造物の概略を図1に示す。ジャッキアップリグは主に水深120mまでの浅い海域で使用され、より深い海域ではセミサブやドリルシップが使用される。近年

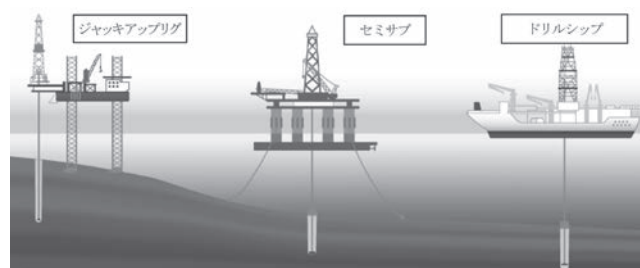


図1 掘削構造物の例¹⁾

*1 新日本製鐵(株) 厚板営業部厚板商品技術グループ(現、日鐵住金溶接工業(株))
*2 新日本製鐵(株) 厚板営業部厚板商品技術グループ
*3 住友金属工業(株) 厚板技術部
*4 住友金属工業(株) 鹿島製鉄所 厚板部

では開発鉱区の深海化が進み、セミサブやドリルシップの需要が増加するとともに、ジャッキアップリグの大型化も進んでいる。ジャッキアップリグは可動昇降脚を有し、掘削時は脚を下ろしてデッキを持ちあげて海底に固定される。昇降はラック&ピニオン（ラック（直線歯車）とピニオン（円形歯車）を組み合わせ回転力を直線の動きに変える機構）によって行われ、非常に大きな荷重がかかることから極厚のHT780（TS $\geq 780\text{N/mm}^2$ ）高強度鋼が使用される。セミサブ、ドリルシップはDPS（Dynamic Positioning System）により位置保持をして浮遊したまま掘削作業を行うタイプとなっている。

2.2 生産構造物

石油やガスの実際の生産に用いられる構造物を生産構造物またはプラットフォームという。生産構造物には固定式と浮遊式に分類される。固定式の代表的なものがジャケットタイプであり、他に重力式やコンプライアントタワーがある。主な生産構造物の概略を図2に示す。ジャケットタイプは現在、世界中に約7000基あり、水深が深くなると著しくコストが高くなることから、主に300m以下の海域で使用されている。生産構造物も水深が深くなると浮体構造物が用いられ、形状や係留方式の違いからTLP（Tension Leg Platform）、SPAR、FPSO（Floating Production, Storage & Offloading）、セミサブなどがある。生産構造物に使用される鋼材はYP355N/mm²クラスが主流であったが、深海化や搭載モジュールの増加により構造物の大型化が進み、YP420N/mm²を超える高強度化が進んできており、次章以降で詳細を説明する。

3 石油、ガス掘削用海洋構造物における破壊靱性要求

海洋構造物用厚板の必要特性は、規格で厳格に要求値が定

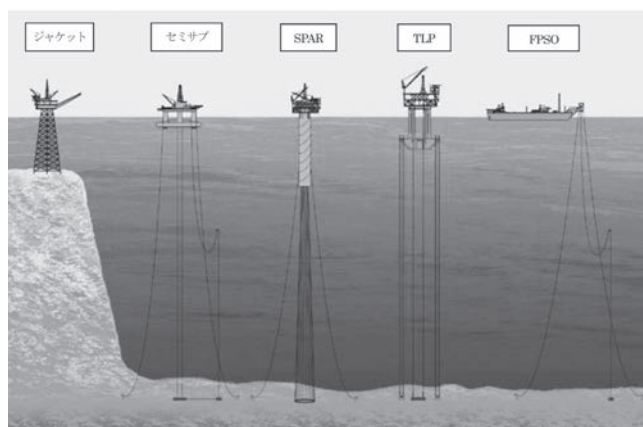


図2 生産構造物の例²⁾

められている。1980年代初頭までの初期の海洋構造物においては、破壊靱性要求はシャルピー衝撃値のみであったが、1980年北海で起きた転覆事故の反省から、破壊靱性値である限界CTOD値が要求されるようになったのは冒頭に述べたとおりである。

この事故は、ソナーを取り付けた溶接部の欠陥から疲労亀裂が進展し、嵐による外力で脆性破壊を生じ転覆したものであった。このように、一般的に構造物の破壊事故は、溶接部より生じることが多く、海洋構造物での破壊靱性要求は母材に加えて溶接部にも科されるに至った。これらの特性は、母材では鋼材の事前承認試験（PQT：Pre-Qualification Test）、溶接部では溶接施工法承認試験（WPQT：Welding Procedure Qualification Test）にて確認されている。CTOD試験は、疲労による鋭い切り欠き欠陥を有する試験片に曲げ応力を負荷し、脆性破壊の開始する時点での亀裂開口量を測定することで鋼材の破壊靱性を評価する試験である。CTOD要求が海洋構造物で取り入れられるとともに、限界CTOD値（通常3本のCTOD試験の最低値をもってその鋼材・継ぎ手の破壊靱性値とみなし、限界CTOD値と呼ぶ）の支配因子が精力的に研究された。シャルピー衝撃試験が脆性破壊の発生・伝播を含めて破面全体を形成するエネルギーで評価されるのに対し、CTOD試験ではその破壊発生時点での値を評価するため、特に脆性破壊の発生特性をより厳密の評価する試験と言える。

一般に延性－脆性遷移温度領域のシャルピー衝撃試験結果はバラツキが大きいことが知られているが、CTOD試験結果もバラツキが大きく、しばしば要求値より低い低値が出現する。脆性破壊は、亀裂や欠陥または切欠き底部の最弱部での発生に支配されることが明らかになり、特に海洋構造物に適用される多層盛溶接部では、CTOD試験片の疲労亀裂先端に、溶接熱影響により生じた局部脆化域（LBZ：Local Brittle Zone）が合致した場合に低値が出現することが明らかになった。その後、溶接熱影響部（HAZ：Heat Affected Zone）の温度履歴をシミュレートした再現HAZ試験片による調査により、LBZとしてフェライト（ α ）－オーステナイト（ γ ）の二相域に再加熱された粗粒域（IRCGHAZ：Intercritically Reheated Coarse Grain HAZ、図3参照³⁾）が最低靱性を示し、その原因としてM-A（Martensite-Austenite Constituent：マルテンサイト－オーステナイト混合物）が着目された。

HAZでのM-Aを低減し、溶接部CTOD特性に優れた鋼材の開発が行われた。M-A削減のためには、TMCP技術を用い炭素量、炭素当量（Ceq）を下げるのが有効であった。またその他の化学成分も、M-A削減のための最適化が図られた。粗粒域（CGHAZ：Coarse Grain HAZ、図3³⁾）そのものを減らすためHAZ細粒化の技術も開発され、要求CTOD値を安定的にクリアできる鋼材が開発・実用化された。

継手CTOD試験結果が、亀裂先端とLBZの位置関係により大きく影響されることから、API-RP-2Z⁴⁾等の規格では、継手CTOD試験後、試験片を切断して亀裂先端とLBZの位置関係を明確にすることを要求している。その調査方法は図4³⁾に示すようにCTOD試験片に導入された初期疲労亀裂が溶接熱影響によって生じたCGHAZ部をどの程度含むかという比率を調べるなどによって行われる。CTOD試験は、試験自体が元厚での試験片を用いて行われ、さらにノッチ位置調査まで必要となることから、特に厚手材では試験の工期および費用が大きくなっている。

海洋構造物用鋼のCTOD要求値は、CTODデザインカーブ(図5⁵⁾)によって求められ、溶接まで0.34mm、SR (Stress

Relieving：応力除去焼なまし) 後で0.25mmが要求された。シャルピー試験の要求値については母材、溶接部を含めて、各種規格でグレード毎に試験温度と値が決められているが、CTOD値については明記されていない。前述のAPIやENの規格でも、CTOD試験の実施要求はあるものの、その要求値は明記されておらず(表1)⁶⁾、プロジェクト、部位毎に設定される。CTOD要求値の設定方法は、前述CTODデザインカーブ等を使用して、BS7910やWES2805の規格に従って求めることが可能となっており、最近では、継手部で強度ミスマッチがある場合でも、適用可能であることが報告されている⁷⁾。

なお、海洋構造物用鋼の中でも、ジャッキアップリグのラック材は板厚200mm程度以上の高強度鋼が用いられる

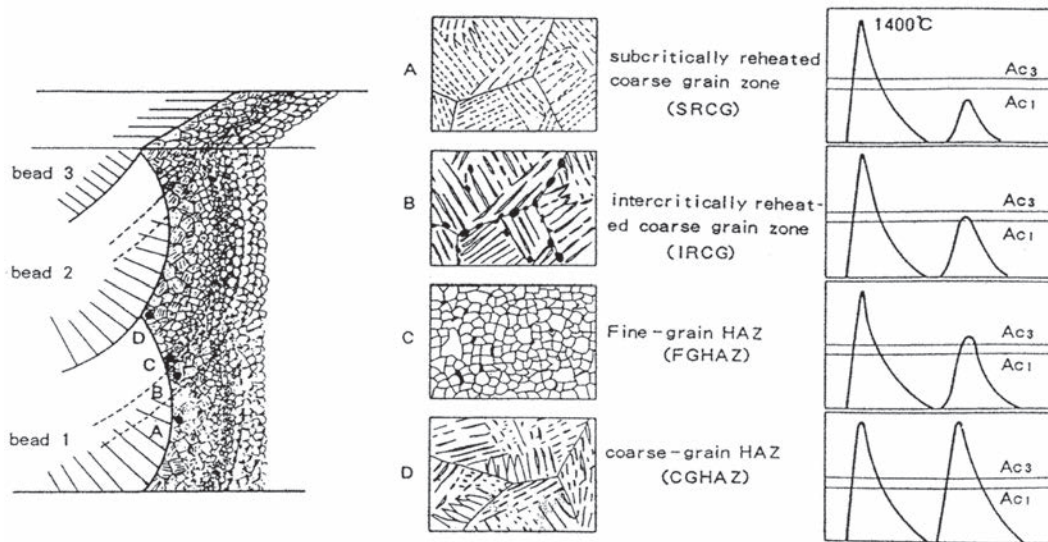


図3 多パス溶接における溶接熱影響部 (HAZ) の熱履歴と金属組織的特徴³⁾

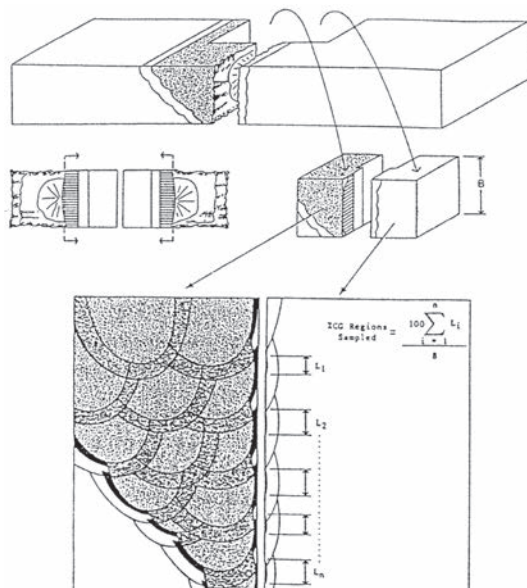


図4 CTOD試験の亀裂先端とLBZの対応調査方法 (API RP2Z)³⁾

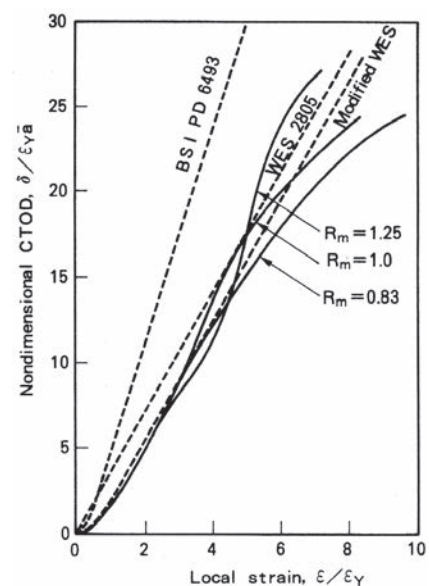


図5 CTODデザインカーブの例⁵⁾

特殊な部材である。ジャッキアップリグの概要を図6⁶⁾に示す。このラック材の場合は板厚と強度から、CTOD 試験実施に大容量の試験機が必要であり、試験の実施自体が困難である。そこで、極厚材や高強度鋼では板厚を薄くして行う減厚CTOD 試験や広幅試験により評価を行うことにより安全性を確保している。

また、イギリスHSE (Health and Safety Executive) 規格では、海洋構造物で土中に位置する部材では、硫化物還元バクテリアによるサワー環境を想定して、サワー環境下でのHSC (Hydrogen Stress Cracking) 特性の調査が要求されている。

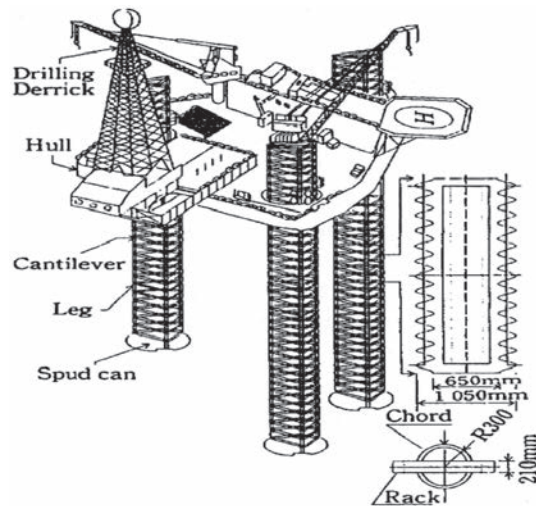


図6 ジャッキアップリグの構造⁶⁾

4 鋼材開発における 金属組織制御技術と開発例

海洋構造物は厳しい環境下で長期の連続使用となるため、過酷な使用環境に耐え得る必要がある。従って、鋼材に対しても海洋構造物専用の厳しい規格が設定されている。例えば、北海域ではEN規格 (EN10225)、ノルウェーではEN規格を更に厳格化したNORSOK規格 (M-120)、メキシコ湾ではAPI規格 (API2W等)、その他の地域ではENまたはAPIのどちらかの規格がベースとして適用され、必要に応じてプロジェクト毎に要求が追加されたりすることが多い。表2にYP420鋼について鋼材規格を比較する。参考として、船級協会の可動式掘削構造物用の規格例も載せているが、海洋構造物用は、化学成分範囲の狭幅化、母材の板厚中心部での靱性(厚材)、溶接部特性評価項目の追加等が要求されていることがわかる。

最近では生産構造物、掘削構造物の大型化による使用鋼材の高張力化の進展、北極海などの極寒海域での使用による靱性要求温度の低温化が要求されるプロジェクトが出てきている。以下に、その要求を満足する鋼材の開発とそれを支える技術について説明する。

4.1 鋼材開発を支える金属組織制御技術

厳しい鋼材特性を満足するには、まずC、P、S、NやPcm(溶接割れ感受性組成)の低減と中心偏析の改善が基本となるが、低C、低Pcmと高強度を両立させるためにはTMCP技術の適用が必須となる。TMCP技術は制御圧延 (CR:Controlled

表1 各規格におけるCTODの規定例⁶⁾

	API RP22(1998)	prEN10225(1997)
ベース規格	API2W 60(1993)	S420M3z
適用板厚	$t \leq 4" [100\text{mm}]$	$t \leq 100\text{mm}$
取鋼成分	C	$\leq 0.16\%$
	P	$\leq 0.03\%$
	S	$\leq 0.010\%$
	Ceq(IIW)	$\leq 0.42\%$ ($t \leq 1-1/2" [40\text{mm}]$) $\leq 0.45\%$ ($1-1/2" [40\text{mm}] < t \leq 4" [100\text{mm}]$)
	Pcm	$\leq 0.23\%$ ($t \leq 1-1/2" [40\text{mm}]$) $\leq 0.25\%$ ($1-1/2" [40\text{mm}] < t \leq 4" [100\text{mm}]$)
熱処理	母材	TMCP
	PWHT	発注時に指定
母材特性	YS	60-90ksi [414-621MPa] ($t \leq 1" [25\text{mm}]$) 60-85ksi [414-586MPa] ($t > 1" [25\text{mm}]$)
	TS	$\geq 75\text{ksi} [517\text{MPa}]$
	ϕz	$t \geq 3/4" [19\text{mm}]$ で要求あれば、 $\geq 25/30\%$ (EACH/AVE.)
	衝撃試験	$vE \geq 30/35ft \cdot lb$ (EACH/AVE.) : -40℃
	金時効衝撃試験	要求あれば、 5%歪 + 250℃ 1hr時効後、 $vE \geq 30/35ft \cdot lb$ (EACH/AVE.) : -40℃
	溶接部特性	衝撃試験
	CTOD	値は発注時に規定:-10℃
溶接部特性	硬さ試験	Weld Metal $\geq$ Base Material
		Hv10 ≤ 325

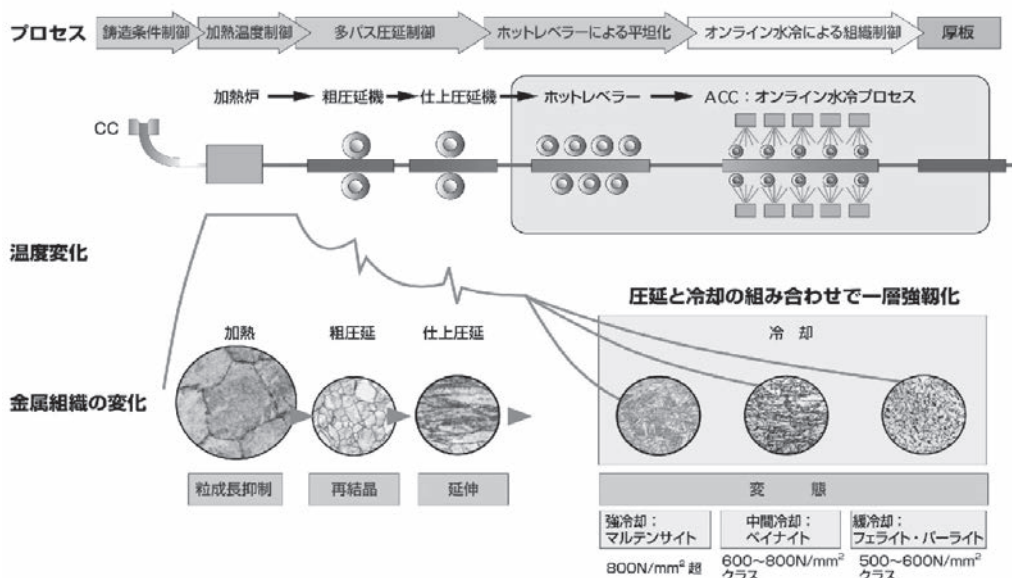
Rolling) と加速冷却 (ACC : Accelerated Cooling) 及びこれらを組み合わせたプロセス (図7)⁸⁾ のことである。制御圧延は、 γ の再結晶温度以下で圧延することであり、塑性変形によって導入された γ の粒界や粒内の欠陥 (粒界のレッジ構造、変形帯、転位集積体など) がフェライト (α) 変態の核生成サイトとなることによって、 α 結晶粒の顕著な微細化を可能とする。加速冷却は圧延後の鋼材を概ね変態開始以前の温度から水冷することにより、 γ - α 変態を過冷却の状態で生

じさせ、 α 結晶粒をさらに微細にすることができる。さらに金属組織の一部をベイナイトやマルテンサイトにすることで鋼材の強度や靱性を著しく向上することができる。実際のTMCPでは制御圧延や加速冷却に加えて、再加熱を低温で行うことやTiやNbといったマイクロアロイ元素 (Micro Alloying Element) の利用により細粒化効果を最大化することが行われている (図8)。従来の焼ならしの熱処理で製造した場合に比べてTS:490N/mm²級の鋼材の場合で100N/mm²

表2 YP420鋼の鋼材規格の比較

ベース規格	API 2W (2006)	EN10225 (2009)	NORSOK M-120 (2008)	船級 (2008)
適用板厚	t ≤ 100mm	t ≤ 100mm	同左	-
取鋼成分	C	≤ 0.16%	同左	≤ 0.20%
	P	≤ 0.03%	同左	≤ 0.030%
	S	≤ 0.010%	同左	≤ 0.030%
	Ceq (IIW)	≤ 0.42% (t ≤ 40mm) ≤ 0.45% (40mm < t)	同左	発注時に指定
	Pcm	≤ 0.23% (t ≤ 40mm) ≤ 0.25% (t > 40mm)	同左	発注時に指定
熱処理	母材	TMCP	同左	QT or TMCP
	PWHT	要求あれば (発注時に温度指定)	要求あれば (580℃ ± 20℃)	-
母材特性	YS	414-621MPa (t ≤ 25mm) 414-586MPa (t > 25mm)	420-540MPa	≤ 420MPa
	TS	≤ 517MPa	500/660MPa (t ≤ 40mm) 480/640MPa (t > 40mm)	530-680MPa
	φZ	t ≤ 19mmで要求あれば ≤ 30%(Each)	t ≤ 25mmで要求あれば ≤ 25/35% (Each/Ave.)	t ≤ 15mmで要求あれば Z35 ≤ 25/35% (Each/Ave.)
	衝撃試験 (C方向) at -40℃	シャルピ位置: 厚み中央 vE ≤ 48J (Ave.)	シャルピ位置: 表下2mm +厚み中央 (t ≤ 40mm) vE ≤ 60J (Ave.)	シャルピ位置: 表下2mm (t ≤ 40mm) 1/4厚 (t > 40mm) vE ≤ 27J (Ave.)
	歪時効衝撃試験	要求あれば 5%歪 +250℃ 1hr時効後 vE ≤ 48J (Ave.)	要求あれば 5%歪 +250℃ 1hr時効後 vE ≤ 42J (Ave.)	-
溶接部特性	適用規格	S11 (API RP22 (2005)) 要求あれば	Option18 (ANNEX E) 要求あれば	必須 (t > 25mm)
	衝撃試験 at -40℃	衝撃遷移曲線採取	vE ≤ 42J (Ave.)	同左
	CTOD at -10℃	値は発注時に規定	値は発注時に規定	温度, 値は発注時に規定

金属組織を連続的に制御する TMCP

図7 厚板製造プロセスにおけるTMCPの説明図⁸⁾

程度の強度アップが可能であり、同一強度であれば逆にCeqを大幅(0.4→0.3%)に低減できる(図9)⁹⁾。Ceqの低減は母材の靱性改善や溶接部の硬さ低減を通じて溶接性の飛躍的改善やHAZ靱性の改善をもたらした。このようなTMCP技術は1960-70年代にCRの研究と実用化がなされ、1980年代には国内各社がACC装置を実用化し¹⁰⁻¹⁴⁾、TMCP技術を世界に先駆けて日本の技術として確立した。1980年当時、従来の海洋構造物用の鋼材は焼準しにより製造されていたが、厳格な靱性要求を満足することは難しいことであった。そこで、TMCP技術が確立すると海洋構造物用鋼材にも適用が試みられ、1984年には、世界初のTMCP鋼材がOseberg IプロジェクトにCTOD保証鋼として採用された。それ以来、高強度、高靱性の海洋構造物用鋼材にはTMCP技術は必須の技術となった。しかし、近年では、高強度化や靱性要求(CTOD)のいっそうの低温化が求められており、これに対応するためには、いっそうの低C化やNi等の靱性低下の比較的小さい合金元素の添加で補うことが行われている。更に最近ではCu析出による高強度化¹⁵⁾やTMCP技術の発展形としてベイナイト組織を微細化し、靱性を確保する技術¹⁶⁾が開発されている。

海洋構造物用鋼材の材質を制御するもうひとつの重要な技術はHAZの靱性を向上させるための金属組織制御である。以下に、その基本的な技術と変遷について説明する(図10)。

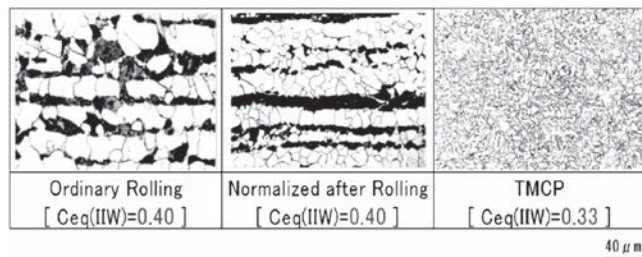


図8 TMCPによる金属組織の微細化

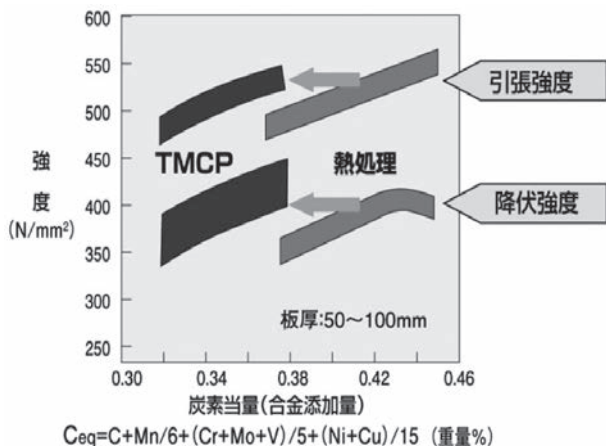


図9 TMCPによる低炭素化の効果

まず、継手部のCTODを改善するためにHAZの有効結晶粒細粒化の方法としてTiNによるピン止め効果を利用したものが広く実用化されている。これは、溶接の熱影響(最高到達温度約1400℃)により粗大化しようとする γ 結晶粒界をTiNの粒子によりピン止めし、金属組織を微細化にしようとする技術であった。1980年代になると、前述したように海洋構造物用鋼材のHAZ靱性が精力的に検討され、CTOD特性は局所脆化域(Local Brittle Zone)の金属組織の粗大化や高炭素マルテンサイト(M*, 現在では高炭素のマルテンサイト-オーステナイト混合物(M-A)と考えられている)などの脆化相の影響を強く反映することが明らかとなった¹⁷⁾。M-Aの生成に対する様々な元素の影響なども検討され、低C化などによるM-Aの低減が行われた。また、金属組織の微細化では、 α の粒内変態(Intra Granular Ferrite (IGF))を利用してHAZの金属組織微細化を達成する技術が実用化された。これは、Ti酸化物¹⁸⁾やTiN/MnS¹⁹⁾を γ 粒内に分散させ、これらの析出物上に α 粒を核生成させることによって γ 粒内を微細化する技術(図11)であり、海洋構造物用鋼板の製造に多く利用された。また、近年では、大入熱溶接でも熱的に安定な酸化物や硫化物の微粒子を鋼中に分散させて γ 粒を顕著に微細化させる技術²⁰⁾も開発された。図12は超微細粒子の例であり^{20,21)}、図13に示すようにこれらの微細分散したピン止め粒子によって、1400℃の高温でも γ 粒がほとんど成長しておらず、極めて強力なピン止め効果が発揮されていることがわか



図10 HAZ靱性制御(細粒化)技術の変遷

チタン酸化物から生まれたフェライト

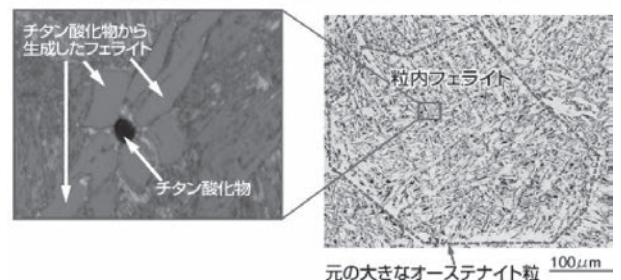


図11 粒内フェライトによるHAZ組織微細化

る。この他にもTiNの利用に基礎を置き、BNを利用した技術²²⁾やREM (OS) (希土類金属の酸硫化物) のピン止め効果を利用した技術²³⁾、低C微細ベイナイトを利用した技術²⁴⁾などが開発された。

以上のように、海洋構造物用鋼材はTMCP技術やHAZ靱性制御技術の発展により開発、供給されてきたといえるが、一方で海洋構造物用鋼材の高強度化やCTODなどの高靱性化の要求がTMCP技術やHAZ靱性制御技術の発展を促してきたと言える。

4.2 高強度生産構造物用鋼材の開発

CTOD保証鋼の高強度化の歴史は、TMCP化から始まり、1984年にOseberg I プロジェクト (北海) にてTMCPのYP350鋼が世界で初めて採用されて以来、YP420鋼²⁵⁾、YP460鋼、YP500鋼²⁶⁾がそれぞれDraugenプロジェクト (北海、1990年)、BayuUndanプロジェクト (チモール海、2000年)、Graneプロジェクト (北海、2000年) に初めて採用された。更に、YP550鋼²⁷⁾が一部石油会社で、初めてプロジェクトで採用されることとなった。これらには4.1の新しい技術が適用されている。YP500鋼²⁶⁾およびYP550鋼²⁷⁾の化学成分・機械的目標値の例をそれぞれ表3、表4に、溶接継手CTOD試験結果をそれぞれ図14、図15に示す。

表3 YP500鋼の化学成分・機械的特性の例²⁶⁾

Typical chemical compositions of YS500N/mm ² offshore structural steel									
	(mass%)						(mass%)		
	C	Si	Mn	P	S	Al	Others	P _{cm}	
YS500N/mm ² developed steel	0.09	0.15	1.60	0.005	0.002	0.003	Cu, Ni, Nb, Ti, Mg	0.21	
1. Tensile test									
Thickness (mm)	Yield strength (N/mm ²)		Tensile strength (N/mm ²)		Elongation (%)		YS/TS ratio (%)		
t ≤ 16	500/580		600/700		≥ 17		≤ 93		
t > 16							≤ 90		

表4 YP550鋼の化学成分・機械的特性の例²⁷⁾

C	Si	Mn	P	S	Cu	others	Pcm
0.03	0.12	1.09	0.004	0.003	0.95	Ni, Cr, Mo	0.19
*Pcm=C+Si/30+Mn/20+Cu/20+Ni/60+Cr/20+Mo/15+V/10+5B							
Thickness (mm)	Transverse (Round12. 5 ϕ, GL50mm)				Through- thickness (Round12. 5 ϕ)		
	Position	Yield Strength (MPa)	Tensile Strength (MPa)	Elongation (%)	Tensile Strength (MPa)	RA (%)	
76.2	1/2t	589	662	30.0	658	77.0	

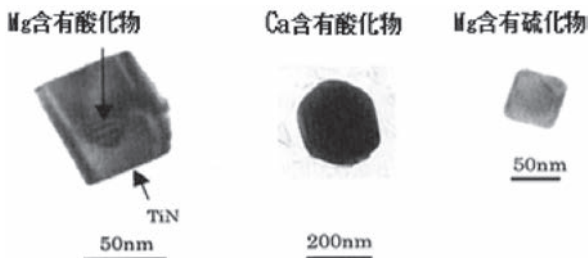


図12 MgやCaを含む超微細粒子

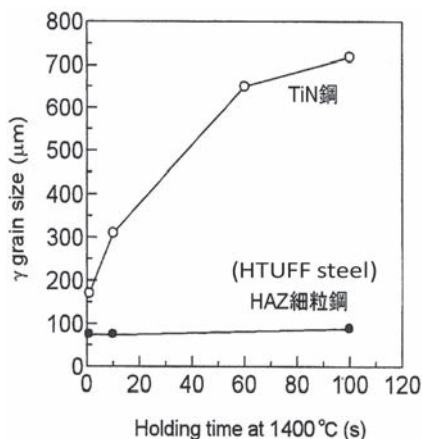


図13 超微細粒子によるHAZ組織微細化

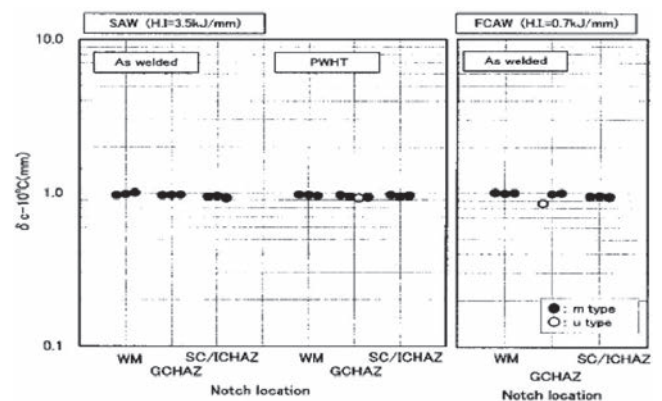


図14 YP500級鋼のCTOD試験結果例²⁶⁾

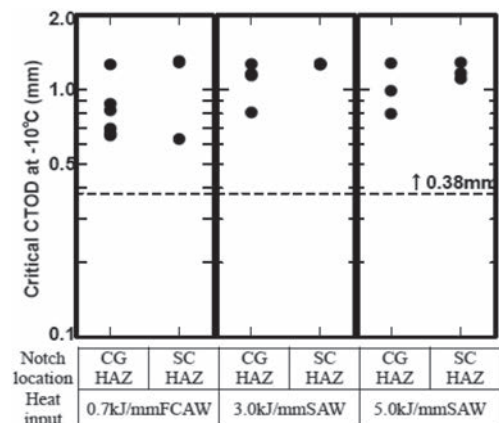


図15 YP550級鋼のCTOD試験結果例²⁷⁾

4.3 極寒海域生産構造物用鋼材の開発

CTODの試験温度は一般的には-10℃であるが、極寒海域では-40℃～-60℃が要求されると言われており、YP420レベルの-50℃CTOD保証鋼(板厚75mm)²⁸⁾や-40℃CTOD保証鋼(板厚100mm)が開発された。その化学成分例および溶接継手CTOD試験結果をそれぞれ表5、図16に示す。また、それに対応する溶接材料も開発されている²⁹⁾。

4.4 掘削構造物用鋼

掘削構造物としては、ジャッキアップリグ、セミサブリグ、ドリルシップなどがあるが、ここでは、ジャッキアップリグ

の脚に使用されるYP690級鋼材について紹介する。この脚部分には、デッキ部分から脚を昇降させるための歯型をなすラック材とそれを両側から挟みこむ半円形補強のコード材が使われる(図17)。ラック材には極厚材が適用されるが、特に近年掘削域の深海化により、ジャッキアップリグが大型化するとともに脚の長さが長くなり、ラック材の板厚は7インチ(178mm)が主流となり、一部210mmが適用される場合もある。コード材は、冷間曲げ、あるいは熱間曲げ後熱処理して使用される。

ラック材は、板厚方向に切断し、切断面が歯となるため、板厚内部の特性も重要になる。ラック材の主な仕様の例を表6に示すが、高強度、低温靱性、断面の硬さなどが要求され、板厚中心の靱性保証も要求される場合がある。さらに、北海などの寒冷地での稼動を想定して、-60℃での靱性が要求される場合もある。

低温靱性確保のためにはNiの添加量が重要であるとともにP、Sなどの不純物元素の低減も必要である。また、焼入れ-焼戻し(QT: Quench & Temper)による製造であるため、極厚材の板厚中心部の強度と靱性を両立させるために焼入れ性の確保が重要でCr、Mo、B等の合金元素が添加される。さらに、板厚中心部の内部品質確保のため、スラブの水素、ポロ

表5 -40℃継手CTOD保証YP420MPa鋼の化学成分例

C	Si	Mn	P	S	Cu	others	Pcm
0.04	0.11	1.36	0.003	0.002	0.93	Ni,Cr,Mo	0.18

*Pcm=C+Si/30+Mn/20+Cu/20+Ni/60+Cr/20+Mo/15+V/10+5B

Thickness (mm)	Transverse (Round12.5φ, GL50mm)				Through-thickness (Round12.5φ)	
	Position	Yield Strength (MPa)	Tensile Strength (MPa)	Elongation (%)	Tensile Strength (MPa)	RA (%)
101.6	1/2t	492	560	30.2	554	77.0

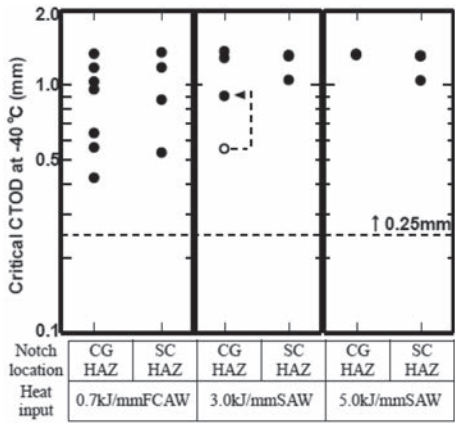


図16 -40℃継手CTOD保証YP420MPa鋼のCTOD試験結果



図17 ジャッキアップリグの脚部の部材

表6 ラック用YP690級鋼の仕様例

板厚 (mm)	試験位置	引張試験		硬さ試験	試験位置	シャルピー衝撃試験	
		降伏強さ (MPa)	引張強さ (MPa)	HBW		試験温度 (℃)	吸収エネルギー (J)
177.8	1/4t	≥690	793-965	≥260	1/4t	-37	≥69 (平均)
					1/2t	-27	≥69 (平均)

表7 ラック用YP690級鋼の製造実績例

板厚 (mm)	試験位置	引張試験		硬さ試験	試験位置	シャルピー衝撃試験	
		降伏強さ (MPa)	引張強さ (MPa)	HBW		試験温度 (℃)	吸収エネルギー (J)
177.8	1/4t	844	900	283	1/4t	-37	168
					1/2t	-27	155

シティを低減して内部の健全性を高めるとともに、圧延の強化も重要である。

このラック用極厚材に対して、鋼塊法や鍛造を利用しての製造が中心であり、連続鋳造法での供給は限られている。日本では、400mm厚の連続鋳造スラブから板厚178mmや300mm厚の連続鋳造スラブから板厚165mmのラック材が製造されている。表7は、その鋼板の製造実績の例である。板厚中心部含めて、良好な特性が得られている。

5 結言

以上のように高い安全性を要求される海洋構造物用鋼材の開発を通じて、これまで多くの技術開発が重ねられ現在の高機能鋼製造技術の確立を果たしてきた。今後も経済的な発展による石油、天然ガス需要の増加が見込まれる一方で、容易に開発できる地域が少なくなり掘削地域の更なる厳格化（厳寒化、遠隔地化、大水深化など）が進展し、使用される鋼材への要求品質も更に厳しいものとなっていく。そこで、こうした要求に常に応えられるように鋼材製造技術、溶接接合部品質向上技術などの一層の進展、飛躍が望まれる。

参考文献

- 1) 日本海洋掘削株式会社 HP,
<http://www.jdc.co.jp/business/offshore/rigtype.php>
- 2) 三井海洋開発株式会社 HP,
<http://www.modec.com/jp/business/domain/fps.html>
- 3) 栗飯原周二, 岡本健太郎, 萩原行人: 日本造船学会誌, 723 (1989) , 601.
- 4) API Recommended Practice 2Z (RP2Z) , May, (1987)
- 5) S.Machida, Y.Hagiwara, T.Inoue, S.Aihara and K.Itoh : Proc. 23rd Int. Conf. on OMAE, Hague, (1989) , 691.
- 6) 今井嗣郎: 日本造船学会誌, 837 (1999) , 167.
- 7) 南二三吉, 中野善文, 鈴木秀一, 塩飽豊明, 森谷豊, 萩原行人, 豊田政男: 溶接学会論文集, 12 (1984) , 568.
- 8) 吉江淳彦: 鉄の薄板, 厚板がわかる本, 日本実業出版社, (2009) , 66.
- 9) 8) と同じ
- 10) 東田幸四郎, 山崎喜崇, 松本和明, 長嶺多加志, 平部謙二, 有方和義: 鉄と鋼, 67 (1981) 4, S340.
- 11) 尾上泰光, 梅野正紀, 萬谷興亜, 十河泰雄, 酒井和夫, 岩永健, 森川博文: 製鉄研究, 309 (1982) , 18.
- 12) 大谷泰夫, 橋本保, 渡辺征一, 別所清, 細川能夫: 鉄と鋼, 70 (1984) , A209-A212.
- 13) 高嶋修嗣: 新しい製造法による鋼材 (TMCP) の溶接構造物への適用に関するシンポジウム, 日本造船学会, (1983) , 93.
- 14) 吉原正典, 上村尚志, 吉村茂彦, 板東清次, 木村求, 天野慶一: 鉄と鋼, 70 (1984) , A205-A208.
- 15) T.Kamo, T.Urabe, K.Ohnishi, H.Nakamura, S.Okaguchi, M.Hamada and S.Suzuki: Proc. 23rd Int. Conf. on OMAE, Vancouver, (2004) , 1.
- 16) 藤原知哉, 岡口秀治: 鉄と鋼, 80 (1994) , 771.
- 17) 土師利昭, 栗飯原周二, 大野恭秀, 内野耕一, 川島善樹果, 富田幸男, 千々岩力雄, 三村宏: 製鉄研究, 326 (1987) , 36.
- 18) R.Chijiiwa, H.Tamehiro, M.Hirai, H.Matsuda and H.Mimura: 7th Int. Conf. on Offshore Mechanics and Arctic Engineering, 5 (1988) , 165.
- 19) Y.Tomita, N.Saitoh, T.Tsuzuki, T.Tokunaga and K.Okamoto: ISIJ Int., 34 (1994) , 829.
- 20) 児島明彦, 清瀬明人, 植森龍治, 皆川昌紀, 星野学, 中島隆雄, 石田浩司, 安井洋二: 新日鉄技報, 380 (2004) , 2.
- 21) 児島明彦, 植森龍治, 皆川昌紀, 星野学, 市川和利: まてりあ, 42 (2003) , 67.
- 22) 古澤遵, 有持和博, 蔵保浩文, 中野直和, 鈴木秀一: 住友金属, 40 (1987) , 39.
- 23) M.Koda, K.Amano, Y.Nakano, C.Shiga, K.Tsubota, T.Kohno, Y.Kumakura and S.Kaihara: Proc. of 6th Int. Conf. on OMAE, (1987) , 45.
- 24) 畑野等, 岡崎喜臣, 川野晴弥, 岡野重雄: まてりあ, 43 (2003) , 244.
- 25) Y.Yoshida, H.Tamehiro, R.Chijiiwa, K.Funato, N.Doi, K.Tanaka, and M.Kibe: Proc.12th Int.Conf. on OMAE, Glasgow, (1993)
- 26) 長井嘉秀, 深水秀範, 井上肇, 伊達昭宏, 中島隆雄, 児島明彦, 足達智彦: 新日鉄技報, 380 (2004) , 12.
- 27) 15) と同じ
- 28) R.Chijiiwa, A.Kojima, T.Tsuruta, A.Date, S.Soda, S.Aihara, N.Saitoh, S.Ohkita and S.Imai: Proc. 18th Int. Conf. on OMAE, St. Johns, (1999)
または, S.Aihara, Y.Tomita, T.Tsuzuki, N.Saitoh, Y.Yoshida, S.Ohkita and S.Imai: Proc. 18th Int. Conf. on OMAE, St. Johns, (1999)
- 29) K.Kojima, S.Ohkita, S.Aihara, S.Imai, R.Motomatsu, M.Umeki and T.Miura: Proc. 18th Int. Conf. on OMAE, St. Johns, (1999)

(2011年12月19日受付)