溶接熱影響部靭性に優れた海洋構造物用TMCP厚鋼板

High Strength TMCP Steel Plate for Offshore Structure with Excellent HAZ Toughness at Welded Joints

永和 洋* 義 之 吉 井 臼杵 博 福 渡 部 健 Yoshiyuki WATANABE Kazuhiro FUKUNAGA Ken-ichi YOSHII Hirokazu USUKI 岐 篠原 康 浩 壱 浩 米 田 剾 Yasuhiro SHINOHARA Hiroshi IKI Tsuyoshi YONEDA

抄 録

近年,使用環境の苛酷化により,エネルギー資源開発に適用される海洋構造物用鋼板にはさらに優れ た溶接熱影響部(HAZ) 靭性が要求されている。そこで,溶接継手でのHAZ 靭性が優れた海洋構造物用 鋼板を開発した。開発のポイントはHAZ での有効結晶粒径微細化であり,優れたHAZ 靭性を有する Ti オキサイド鋼(Ti-O 鋼)のキーテクノロジーである粒内変態フェライト(IGF)の生成能力を向上させ, 更なる有効結晶粒径の微細化を図った。その手段として,Ti-O 鋼において重要な役割を担う元素である Mn に着眼し,Mn 添加量を意図的に高めたTi-O 鋼を適用した。その結果,従来Ti-O 鋼に比べて開発鋼 のIGF 生成量が増加し,その変態競合組織であるフェライトサイドプレート(FSP)のサイズが微細とな り,HAZ 靭性を向上させることに成功した。この知見を基に実ラインで製造した開発鋼は,一20℃でも 優れた熱影響部のき裂先端開口変位(CTOD)特性を有していることを確認しており,寒冷地での適用も 可能である。

Abstract

The steel for offshore structure has been required more excellent low temperature HAZ toughness since environment of offshore structures have been severer conditions such as deep sea and frigid sea. Therefore, the excellent HAZ toughness steel for offshore structure has been developed. The important point of development of steel is refinement of effective grain size of HAZ microstructure, strengthening of formation of IGF has been tried on Ti-O steel. Mn, which is important element for Ti-O steel on IGF formation, is much added to the Ti-O steel intentionally. As a result, the formation of IGF is increasing compared with conventional Ti-O steel and FSP size is decreasing, and HAZ toughness is improved. Developed steel has excellent CTOD properties at -20° C, thus the developed steel can be applied as offshore structural steel in frigid sea.

1. 緒 言

海洋構造物に用いられる厚鋼板(以下海構材)には, 脆 性破壊防止の観点から母材のみならず溶接部に対しても 優れた低温靭性が要求される。特に,低温靭性としてシャ ルピー衝撃特性だけではなく,局所的な脆化域に支配さ れるき裂先端開口変位(Crack Tip Opening Displacement: CTOD)特性が求められるケースが多く,溶接熱影響部(Heat Affected Zone: HAZ)の組織微細化,脆化組織の低減・生 成抑制を通した高靱化と高強度化の両立が,海構材課題の 一つとなっている。

新日鐵住金(株)では、これまで溶接継手部の CTOD 特 性を保証した鋼として、Ti-N 鋼、Ti-O 鋼、Mg-O 鋼、Cuprecipitated 鋼等があり,これらの技術を適用した降伏強 度(Yield Stress: YS) 355 MPa 以上の鋼を開発し,実用 化している^{1,2)}。このような微細粒子利用による HAZ 高靱 化技術を総称して,新日鐵住金では HTUFF[®] (High HAZ Toughness Technology with Fine Microstructure Imparted by Fine Particles: エイチタフ)と称している。従来,継手 CTOD 特性の要求は-10°Cが一般的であったが,近年,海 洋構造物敷設(設置)環境が氷海域,さらには北極圏域に まで拡大し,サハリンプロジェクト (Sakhalin Pjt.)のよう に-35°C以下での極低温継手 CTOD 特性の要求があるプ ロジェクトもあることから,YP355 MPa, YP420 MPa 鋼の 開発を完了し実用化している^{3,4)}。また,エネルギー需要拡 大を背景として,海洋構造物の大型化やそれに伴う軽量化 ニーズの高まりから鋼材の高強度化が進む一方で,海洋開 発環境の更なる寒冷地化が進み,これまで標準的に求めら れていた-10℃での継手 CTOD 特性だけではなく,-20℃ での継手 CTOD 特性を有する鋼材需要が増加しており,こ れに対応するために,-20℃継手 CTOD 特性をターゲット とした鋼材開発を計画した。

HAZ 靭性を向上させるためには①HAZ 硬さの低減, 12 脆化相の低減, ③HAZにおける有効結晶粒径微細化 を考慮することが重要である。なかでも③HAZにおける 有効結晶粒径微細化は、他と比較して強度を損なうこと なくHAZ 靭性を向上させることが可能であるため、強度 と HAZ 靭性の両立が求められる海構材では最も有効な手 段と考えられる。優れた HAZ 靭性を有する Ti-O 鋼は、製 鋼段階での脱酸制御により、鋼中に微細な Ti 酸化物を高 密度に分散させ、これらが HAZ における粒内変態の核生 成サイトとなることで粒内変態フェライト (Intra-Granular Ferrite: IGF)の生成が促進した結果、その競合変態組織 である HAZ 靭性に有害な粗大なフェライトサイドプレー ト (Ferrite Side Plate: FSP)の生成を抑制し、HAZ におけ る有効結晶粒径の微細化を図った鋼である。それゆえに、 Ti-O 鋼はそれのみでも良好な HAZ 靭性を確保可能である が、-20℃での継手 CTOD 特性を安定的に確保するために、 HAZにおける有効結晶粒径の更なる微細化を試みた。こ れを検討するに当たり、Ti-O 鋼中に存在する Ti 酸化物か ら IGF が生成する有力な機構が、HAZ の冷却時に Ti 酸化 物がマトリックスであるオーステナイトから Mn を吸収し, その周囲に Mn 欠乏層を形成させるということ 5,0 に着眼し た。この Ti-O 鋼の特徴である IGF の生成を最大限に活か すため、Ti-O 鋼をベースとし IGF 生成に大きく関与してい

る Mn を効果的に活用することで IGF 生成をさらに促進させ, HAZ における有効結晶粒径の更なる微細化を可能にした New HTUFF 鋼の開発に成功した。

これは、Ti-O 鋼をベースとした HAZ 組織における Mn の寄与として、従来知見通りの①HAZ 組織中の旧オース テナイト粒内における微細な Tiオキサイド回りの Mn 欠 乏層生成による粒内変態の促進効果に加えて、界面に濃 化しやすい Mn の特徴を活かし、②HAZ 組織中の旧オー ステナイト粒界への Mn 濃化による HAZ 靭性に有害な 粗大 FSP の生成の抑制効果を複合的に作用させることに より, HAZ における有効結晶粒径の更なる微細化を達成 できるものであり 7, この技術を新日鐵住金では Effective Manganese Using (EMU) と称している。Mn は、鋼の母材 強度, 靭性を向上させる有効な元素であるが, MnとTi-O 鋼を組み合わせた EMU 技術により、HAZ 靭性においても 極めて有効な作用が得られることが明らかとなった。本報 では、その開発結果および実機製造した結果について述べ る。なお, EMUのメカニズム等については本技報に掲載 されている 8)。

2. 開発目標

海洋構造物用 TMCP (Thermo-Mechanical Controlled Process) 鋼材として適用される API2W Gr.60⁹ および EN10225 S420¹⁰ の化学成分,母材および継手の要求特性 を表1に示す。いずれも近年の海洋構造物に多く適用され る YS420MPa クラスの 50k 級鋼材である。これらの規格 の鋼材において継手 CTOD 特性保証が要求される場合は,-10℃での保証が通常であるが,近年の海洋構造物適用環 境の低温化に伴い顧客からも-20℃での継手 CTOD 保証

表1 海洋構造物用 TMCP 鋼材の代表的な規格における要求特性 Chemical compositions and mechanical requirements of TMCP steel for offshore structure

1 Chemical composition

Spec.			(mass%)																
		С	Si	Mn	Р	S	Cu	Ni	Cr	Мо	Nb	V	Ti	Al	N	В	Ca	C _{eq}	Рсм
API2W	Min.	-	0.05	1.15	-	-	-	-	-	-	-	*	0.003	0.02	-	-	-	-	-
Gr.60	Max.	0.16	0.50	1.65	0.03	0.010	0.35	1.0	0.25	0.15	0.03		0.02	0.06	0.012	0.0005	-	0.45	0.25
EN10225	Min.	-	0.15	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.015	-	-	-	-	-
S420	Max.	0.14	0.55	1.65	0.020	0.007	0.30	0.70	0.25	0.25	0.040	0.080	0.025	0.055	0.010	0.0005	0.005	0.42	0.22

*Vanadium shall not be intentionally added without the specific approval of the purchaser.

2 Mechanical properties of base material 2 -1 Tensile test

Spec.	Thickness (t) (mm)	Yield strength (YS) (MPa)	Tensile strength (TS) (MPa)	Elongation (%)	YS/TS ratio (%)	
API2W	≦ 25	414/621	> 517	\geq 22 (GL=50 mm)	_	
Gr.60	$25 < t \leq 100$	414/586	≥ 517	$\geq 16 (GL=200 \text{ mm})$		
	≤ 16	≥ 420	500/660		≤ 93	
EN10225	$16 < t \le 40$	≥ 400	300/000	≥ 19		
S420	$40 < t \le 63$	≥ 390	480/640	$(GL=5.65\sqrt{S})$	≤ 90	
	$63 < t \le 100$	≥ 380	400/040			

2-2 Charpy V-notch impact test

Spec.	Thickness (t) (mm)	Test temperature (°C)	Location of specimen	Energy (J)
API2W Gr.60	≤ 100	-40	Mid-thick.	$\geq 41/48$ (min./ave.)
EN10225 S420	≤ 40	-40	Sub-surface	≥ 42/60
	$40 < t \le 100$	-40	Sub-surface and mid-thick.	(min./ave.)

③ Fracture toughness of welded joints

	-								
			Charpy test	CTOD					
Spec.	Test Temperature (°C)	Location of specimen	Notch location	Energy (J)	Test temperature (°C)	Notch location	Critical CTOD (δ) (mm)		
API2W Gr.60	Transition full curve	Quarter-thick. Root	Coarse grain HAZ (CGHAZ) Sub-critical HAZ (SCHAZ)	-	-10	Coarse grain HAZ (CGHAZ) Etched HAZ boundary (Eached HAZ)	(≧0.38)		
EN10225 S420	-40	Cap Mid-thick. Root	Weld Metal (WM) Fusion Line (FL) FL+2mm (HAZ) FL+5mm (HAZ)	≥ 29/42 (min./ave.)	-10	Weld Metal Grain coarsend HAZ (GCHAZ) Subcritical/Intercritical HAZ boundary (SC/ICHAZ)	(≧0.25)		

要求が増えてきたことから、-20℃での継手 CTOD 保証を 開発目標とした。

3. 開発材の諸特性

3.1 化学成分および製造方法

-20℃での継手 CTOD 特性確保のために、様々な手法 が考えられるが、先に述べた通り Ti-O 鋼をベースとし、 Mn を効果的に活用する EMU 技術を駆使した New HTUFF 鋼の適用を前提とした。また、脱酸、非金属介在物制御や 中心偏析制御などの精錬から凝固に至るまでの製鋼技術は もちろん、厚板工程における TMCP 技術とその効果を最大 限に発揮するためのマイクロアロイング技術を駆使するこ とが必要である。そこで Nb、Ti を活用するとともに、加 熱から冷却までの諸条件を厳密に制御することにより、化 学成分および炭素当量 (C_{eq}) や溶接割れ感受性組成 (P_{CM}) を必要以上に高めることなく母材の高強度、高靭性化を 図った。

図1に製造プロセス,表2に代表的な化学成分を示す。 鋳造プロセスにおいては,高い清浄度を確保することはも とより,中心偏析対策として分割ロールによる軽圧下を実 施した。加熱から加速冷却までのTMCPプロセスでは条件 の適正化とともに厳格管理を行った。加熱では添加Nbが 十分に固溶しかつTi(C,N)により加熱オーステナイト粒径 の粗大化が抑制される適正温度にコントロールした。

継手靭性の向上対策を表3に示す。-20℃での継手 CTOD 特性を確保するためには HAZ 組織の微細化が重要 と考えられるが、本開発では EMU 技術を駆使した New HTUFF 鋼の適用により、溶接溶融線近傍の組織における 有効結晶粒径を従来鋼以上に微細化させるとともに、島状 マルテンサイト(Martensite-Austenite constituent: MA)低 減のため低 Si 化、無 Al 化とし、TiC 脆化回避のための Ti-N の化学量論組成バランスの適正化などを行った。



図1 製造プロセス Manufacturing process

表2 New HTUFF 鋼の化学成分例 Typical chemical compositions of New HTUFF steel

		(mas	Others	(mass%)			
С	Si	Mn	Р	S	Al	Others	Рсм
0.07	0.17	1.93	0.004	0.003	0.001	Cu,Ni,Nb,Ti	0.19

表3 HAZ 靭性向上手段 Measures of improving HAZ toughness

Measures	Purpose					
Ti killed and fix the nitrogen	Improving matrix toughness and					
II-kined and fix the introgen	nucleation IGF					
Low silicon	Decreasing local brittle zone (MA)					
Low carbon	Decreasing HAZ hardness					
Low aluminum	Enhancing nucleation IGF and					
Low aluminum	decreasing local brittele zone (MA)					
Control the TiN balance	Suppressing TiC embrittlement					
L any improvity along onto	Improving matrix toughness and					
Low impurity elements	decreasing local brittle zone					
Low P _{CM}	Improving matrix and HAZ toughness					
Effective menopology vaine	Suppressing formation of harmful					
Effective manganese using	microstructure (FSP)					

- 47 -

2-3 Through thickness tensile test

Spec.	Thickness (t) (mm)	Tensile strength (MPa)	Reduction of area (%)		
API2W Gr.60	$19 \le t \le 100$	-	≥ 30 (min.)		
EN10225	$25 \leq t \leq 40$	≥ 400	≥ 25/35		
S420	$40 < t \le 100$	≥ 384	(min./ave.)		



図2 母材引張試験結果(60 ≤ t ≤ 100 mm) Mechanical properties of base material (tensile test)



図3 母材衝撃試験結果(60 ≤ t ≤ 100 mm) Mechanical properties of base material (Charpy impact test)



図4 Z 引張試験結果 ($60 \le t \le 100 \text{ mm}$) Mechanical properties of base material (through thickness tensile test)

4. 海洋構造物用鋼板への適用例

4.1 母材特性

-20℃継手 CTOD 対応の New HTUFF 鋼は 2013 年に開 発を完了しており、開発後に当該鋼種を-10℃継手 CTOD 保証鋼へ適用し、製造を実施した。図2に母材引張試験, 図3に母材衝撃試験,図4にZ方向引張試験の結果を示す。 要求特性を十分に満足する強度および母材靭性,Z引張特 性(絞り値:RAz)を有していることを確認した。母材靭 性については、通常要求される試験温度-40℃において、 鋼板表層部は 220J 程度、板厚中心部でも 190J と良好な結



図5 母材ミクロ組織(t = 100 mm) Microstructures of base material

果であり,さらに試験温度-60℃でも良好な結果が得られ ていることがわかった。図5に板厚100mm材のミクロ組 織を示す。TMCP条件の適正化と厳格管理により,100mm

Welding method	SAW / multi	pass welding	FCAW / multipass welding								
Groove profile (Unit:mm)		30°									
Woldingwire	IU IU	ይሐ \ *1									
	1-D (4	.οψ) 1 Γι *1	SF-50L(1.2¢)*1								
Flux	NB-5	5L*1	-								
Shielding gas	· ·	-	80%Ar-20%CO ₂								
Current (A)	750	650	280								
Voltage (V)	32	28	26								
Speed (mm/s)	320	360	380								
Heat input (kJ/mm)	4.5	3.0	0.8								

*1 Nippon Steel & Sumikin Welding Co., Ltd.

図6 溶接条件 Welding conditions



図7 継手マクロ組織 Macrostructure of welded joints

の厚手材においても鋼板全体で微細なフェライト-ベイナ イト組織となっており,良好な母材の機械的特性を得るこ とができた。

4.2 継手特性

板厚 100mm の鋼板を用いて,継手特性の評価を行った。 溶接条件として,図6で示す海構材で適用される API RP 2Z^{II})に準拠した入熱量(Heat Input:HI)=0.8kJ/mm のフラッ クス入りワイヤ溶接(Flux Cored Arc Welding:FCAW)継 手,HI=3.0kJ/mm および 4.5kJ/mm の潜弧溶接(Submerged Arc Welding:SAW)継手の3条件の実継手を作製し,溶 接後の機械的特性を評価した。図7に継手マクロ組織、図 8にHI=4.5kJ/mmのSAW継手のミクロ組織を示す。New HTUFF 鋼の特徴である,粗大なオーステナイト粒内に微 細な IGF が生成する狙い通りの組織となっていることを確 認した。図9に溶接部断面硬さ分布を示す。HAZの軟化



図8 継手ミクロ組織 Microstructure of welded joint

は小さく,溶接金属(Weld Metal:WM)部が母材に対し て十分にオーバーマッチングとなっていることがわかる。

図 10 に試験温度 -20℃にて実施した継手 CTOD 試 験結果を示す。ノッチ位置は API RP 2Z¹¹⁾に従い,粗粒 HAZ (Coarse Grain HAZ: CGHAZ),溶接継手を適切な腐

- 49 -

食液で腐食した際に現出する HAZ の境界(Etched HAZ boundary)に加えて、通常継手で評価される WM 部とした。 すべての入熱量でのすべてのノッチ位置において、試験温 度-20℃でも目標値である δ 値 0.38mm をはるかに上回る 極めて良好な CTOD 特性が得られた。図 11 に-40℃にお ける継手衝撃試験結果を示す。いずれの溶接条件下におい ても要求値を十分に満足する良好な低温特性を示した。

4.3 溶接性

New HTUFF 鋼において, Controlled Thermal Severity 試験 (CTS)¹⁰, y 型溶接割れ試験¹²⁾により溶接性についても調査を実施した。当該鋼種は低 P_{CM} 鋼板であることもあり,いずれの試験においても予熱フリー条件下で割れは発生せず,良好な溶接性を示した(表4,表5)。

5. 結 言

TMCP 技術,マイクロアロイング技術を最大限に活用 するとともに,EMU 技術を適用することにより,板厚 100mmの YS420 MPa クラスの-20℃継手 CTOD 保証鋼の

表4 CTS 試験結果 CTS weldability test results

Preheat temperature	F	Crack		
(°C)	Min.	Max.	Ave.	evaluation
25	277	317	293	No cracking
50	271	301	288	No cracking
75	261	311	288	No cracking

SMAW: 1.0 kJ/mm

図 11 継手衝撃試験結果 Charpy impact test results of welded joints

Preheat		Surface craking ratio						Section craking ratio				Root craking ratio)	
temperature	(%)						(%)					(%)						
(°C)	1	2	3	4	5	Average	1	2	3	4	5	Average	1	2	3	4	5	Average
25	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
50	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
75	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
100	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

表5 y 型溶接割れ試験結果 y-groove weldability test results

SMAW: 1.7 kJ/mm

Atmosphere: 28°C, 71% humidity

開発に成功した。本鋼材は既に製造を開始しており,優れ た母材,継手の機械的特性を示している。

参照文献

- Chijiiwa, R. et al.: Proc. Int. Conf. OMAE. Houston, 1988, ASME, p. 165
- 2) Kamo, T. et al.: Proc. 23rd Int. Conf. OMAE.Vancouver, 2004, ASME, OMAE2004-51093
- Aihara, S. et al.: Proc. 18th Int. Conf. OMAE. St.John's, 1999, ASME, MAT-2100
- Chijiiwa, R. et al.: Proc. 18th Int. Conf. OMAE. St.John's, 1999, ASME, MAT-2101

- 5) Shigesato, G. et al.: CAMP-ISIJ. 16, 1532 (2003)
- Sugiyama, M. et al.: Proc. 30th Risø Int. Symp. on Materials Science. Edt. Hansen, N., Huang, X., Jensen, D.J., Denmark, 2009, RISO & DTU, p. 343
- Fukunaga, K. et al.:Proc. 29th Int. Conf. OMAE. Shanghai, 2010, ASME, OMAE2010-20319
- 8) 谷口俊介 ほか:新日鉄住金技報. (400), (2014)
- 9) API Specification 2W. 2006
- 10) EN 10225. 2009
- 11) API Recommended Practice 2Z. 2005
- 12) JIS Z 3158

福永和洋 Kazuhiro FUKUNAGA 君津製鉄所 品質管理部 厚板管理室 主査 千葉県君津市君津1番地 〒299-1141

渡部義之 Yoshiyuki WATANABE 君津製鉄所 品質管理部 厚板管理室 主幹

吉井健一 Ken-ichi YOSHII 君津製鉄所 品質管理部 厚板管理室長

臼杵博一 Hirokazu USUKI 君津技術研究部 主任研究員

壱岐 浩 Hiroshi IKI 厚板事業部 厚板技術部 厚板商品技術室 主幹

米田 剛 Tsuyoshi YONEDA 厚板事業部 厚板技術部 厚板商品技術室 主幹