

# 溶接熱影響部靱性に優れた海洋構造物用厚鋼板

## Steel Plates with Excellent HAZ Toughness for Offshore Structure

柚賀 正雄 YUGA Masao JFE スチール スチール研究所 鋼材研究部 主任研究員 (副課長)  
橋本 正幸 HASHIMOTO Masayuki JFE スチール 西日本製鉄所 鋼材商品技術部厚板・鍛造室 主任部員 (課長)  
鈴木 伸一 SUZUKI Shinichi JFE スチール 厚板セクター部 主任部員 (副部長)

### 要旨

近年の石油資源開発の活発化にともなう海洋構造物用鋼板の需要増大に対応し、JFE スチールでは、鋼材に対する厳しい要求に応えるべく鋼材の高強度化、厚肉化、低温仕様化などの高性能化を進め、海洋構造物用鋼板の商品群の拡大を図っている。厚肉の高強度材においては、特に母材特性と溶接部 CTOD (き裂先端開口変位) 特性との両立が課題となるが、マイクロアロイ技術を活用した高度な材質設計や製鋼技術と加速冷却装置 Super-OLAC<sup>®</sup> (On-Line Accelerated Cooling) を用いた最新鋭の制御圧延・制御冷却技術との組み合わせによりそれらを実現している。Super-OLAC<sup>®</sup> を適用した鋼板は、溶接性を考慮した低  $P_{CM}$  (溶接割れ感受性組成) の成分設計がなされており、YP550MPa 級 (YP: 降伏点) の高強度材、YP420MPa 級の板厚 101.6 mm の厚肉材、CTOD 温度が  $-40^{\circ}\text{C}$  の低温仕様材などの海洋構造物用鋼材を開発している。これらを含めた各種高性能海洋構造物用鋼板は、すでに数多くの適用実績を有している。

### Abstract:

JFE Steel has developed high strength steel plates for offshore structures, which meet the low temperature specification. The range of products has expanded corresponding to the rising demand for the steel used for the offshore structure arising from robust oil resource development in recent years. Excellent properties of the plates and their welded joints are obtained by micro-alloying technology, and latest controlled rolling and accelerated cooling technology using Super-OLAC<sup>®</sup> (On-Line Accelerated Cooling). High strength steel plates which are designed for excellent weldability through the low weld cracking parameter  $P_{CM}$  value have been developed by Super-OLAC<sup>®</sup> for up to 550 MPa class in yield stress, up to 101.6 mm in thickness with 420 MPa class in yield stress, and satisfying  $-40^{\circ}\text{C}$  of crack tip opening displacement (CTOD) temperature specification for offshore structure. They have achieved already a lot of actual application results.

### 1. はじめに

近年、世界的なエネルギー需要の高まりにともない、石油資源開発は活発化しており、海洋構造物は大型化が進み、その設置域は氷海域、深海域へと広がりつつある。鋼材に対しては高強度化、厚肉化とともに、破壊力学による安全性評価として低温での溶接継手部の CTOD (crack tip opening displacement) 特性などが要求される。JFE スチールでは、鋼材への厳しい要求にも応えるべく、高強度・厚肉海洋構造物用厚鋼板を開発し、すでに多くの適用実績を有している。表 1 に当社で開発した海洋構造物用鋼板の例を示す。現在、YP (降伏点) が 690 MPa 級までに対応可能であり、このうち、YP550MPa 級以下の鋼材は制御圧延と制御冷却を駆使した TMCP (thermo-mechanical control

process) または直接焼入れ・焼もどし (DQ-T: direct-quenching and tempering) による製造が可能である。これ

表 1 海洋構造物用鋼の例

Table 1 Available strength and thickness of steel plates for offshore structures

YP Class (MPa)	Charpy Temp. ( $^{\circ}\text{C}$ )	CTOD Test Temp. ( $^{\circ}\text{C}$ )	Thickness (mm)
355	-40	-10	up to 101.6
420	-40	-10	up to 101.6
	-60	-40	up to 75
500	-40	—	up to 108
550	-40	—	up to 108
620	-40	—	up to 108
690	-40	—	up to 108

YP: Yield point CTOD: Crack tip opening displacement

らは各種規格の要求性能に適合するものであり、いずれも製造承認を取得済みである。今後、さらに板厚拡大、高性能化を進め、商品群のよりいっそうの拡充を計画している。

TMCP または DQ-T プロセスにより製造される鋼板は高度な材質設計と製鋼技術に加え、高い冷却能力と均一冷却性が特長である加速冷却装置 Super-OLAC<sup>®</sup> (On-Line Accelerated Cooling)<sup>1)</sup> を用いた最新鋭の厚板製造技術との組み合わせにより、優れた溶接性を有する低  $P_{CM}$  (溶接割れ感受性組成) の成分設計でありながら、厚肉材での母材特性を確保するとともに溶接継手の靱性および CTOD 特性との両立を達成している。

本報告では、開発した海洋構造物用 TMCP および DQ-T 型厚肉高張力鋼板について、鋼板および溶接継手の諸特性を紹介する。

## 2. 成分設計および製造プロセス

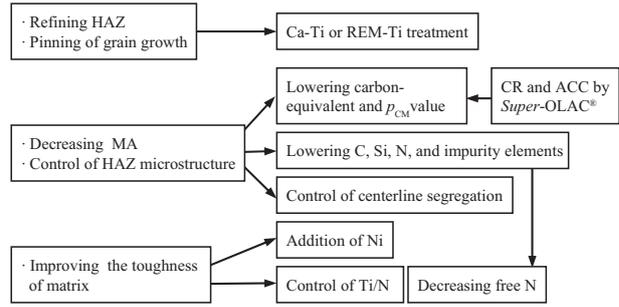
### 2.1 鋼板の開発目標

本報告で紹介する海洋構造物用厚鋼板の目標特性を表 2 に示す。Steel A は API (American Petroleum Institute) 規格の 2W Grade 50 鋼、鋼 B, C は API 2W Grade 60 鋼とその低温仕様、鋼 D は DNV (Det Norske Veritas) 規格の YP500MPa 鋼 (NV E500) に準拠した。鋼 C は最近、石油開発が進められている寒冷域での使用を考慮し、CTOD の試験温度を  $-40^{\circ}\text{C}$  とした。

### 2.2 溶接継手の CTOD 特性向上

海洋構造物用厚鋼板の要求性能として重要な特性の 1 つは、多層溶接の熱影響部 (HAZ: heat-affected zone) の靱性である。溶接部の靱性や CTOD 特性の低下原因は、溶接熱により fusion line 近傍に生成する粗粒域と、多パス溶接の熱サイクルにより生成する LBZ (local brittle zone) であると考えられる。

LBZ の抑制に対して重要な組織は CGHAZ (coarse grain HAZ) と ICCGHAZ (inter critically reheated CGHAZ) である。多層溶接 HAZ の靱性向上の考え方を図 1 に示す。



MA: Martensite-austenite constituent REM: Rare earth elements  
CR: Controlled rolling ACC: Accelerated cooling

図 1 HAZ (溶接熱影響部) 靱性向上に対する成分設計の考え方  
Fig. 1 Concept of improving heat-affected zone (HAZ) toughness

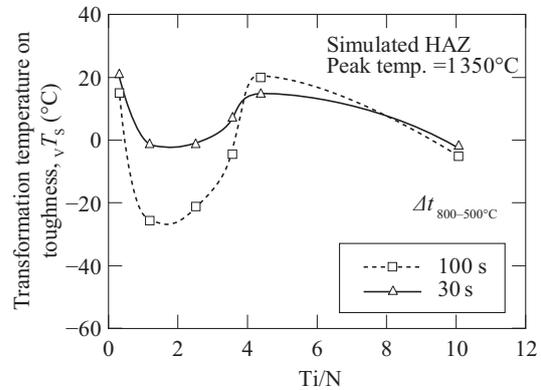


図 2 シミュレーション HAZ (溶接熱影響部) 靱性に及ぼす Ti/N 比の影響  
Fig. 2 Effect of Ti/N ratio on heat-affected zone (HAZ) toughness in simulated HAZ

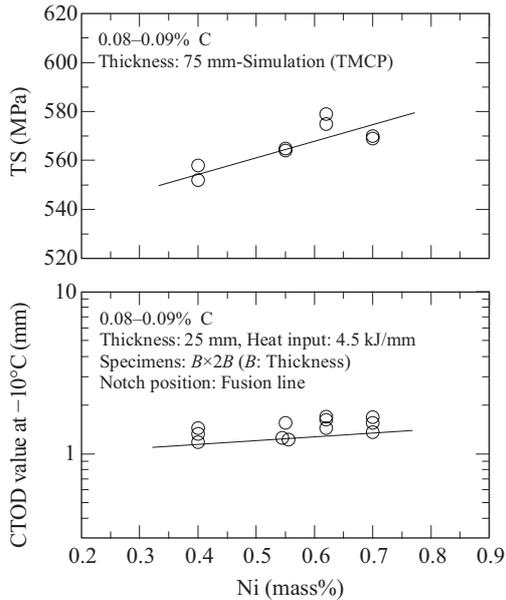
CGHAZ は、溶接熱により  $1350^{\circ}\text{C}$  以上の温度にさらされ粗粒化した部分であり、Ca-Ti 処理または REM (rare earth element) - Ti 処理<sup>2~4)</sup> により生成した高温で安定な酸化物および TiN のピンニングによりオーステナイト粒の粗大化を抑制するとともに、非金属介在物制御によりマイクロ組織を適性化する。熱サイクルを受けたシミュレーション HAZ 靱性と Ti/N 比の関係を図 2 に示す。Ti/N 比には最適

表 2 母材および継手の目標特性

Table 2 Target properties of the steel plates and welded joints

Steel	Thickness (mm)	Mother plate			Welded joint			
		YS (MPa)	TS (MPa)	Chapy absorbed energy (J)	Welding method	Heat input (kJ/mm)	Chapy absorbed energy (J)	CTOD value (mm)
A	101.6	345-483	$\geq 448$	$\sqrt{E_{-40^{\circ}\text{C}}} \geq 41$	SAW	1.5-4.5	$\sqrt{E_{-40^{\circ}\text{C}}} \geq 41$	$\geq 0.38$ at $-10^{\circ}\text{C}$
B	101.6	414-586	$\geq 517$	$\sqrt{E_{-40^{\circ}\text{C}}} \geq 48$	GMAW SAW	0.8 3.0-4.5	$\sqrt{E_{-40^{\circ}\text{C}}} \geq 48$	$\geq 0.30$ at $-10^{\circ}\text{C}$
C	75	414-586	$\geq 517$	$\sqrt{E_{-60^{\circ}\text{C}}} \geq 48$	SAW	5.0	$\sqrt{E_{-60^{\circ}\text{C}}} \geq 48$	$\geq 0.30$ at $-40^{\circ}\text{C}$
D	50	$\geq 500$	610-770	$\sqrt{E_{-50^{\circ}\text{C}}} \geq 33$	SAW	3.5	$\sqrt{E_{-50^{\circ}\text{C}}} \geq 37$	—

YS: Yield strength TS: Tensile strength  $\sqrt{E}$ : Absorbed energy CTOD: Crack tip opening displacement  
SAW: Submerged arc welding GMAW: Gas metal arc welding



TMCP: Thermo-mechanical control process  
TS: Tensile strength

図3 母材強度および継手 CTOD(き裂先端開口変位) 特性と Ni量の関係

Fig. 3 Effect of Ni content on strength of steel plates and crack tip opening (CTOD) property of welded joint

値が存在するため、厳格に Ti, N 量のコントロールを行っている<sup>5,6)</sup>。

ICCGHAZ は、第1パスの溶接熱により生成した CGHAZ が後続パスの溶接熱により  $A_{c1}$  点と  $A_{c3}$  点の間の2相域に再加熱された部分である。2相域に再加熱された際、逆変態したオーステナイト中に C が濃縮し、脆化相である MA (martensite-austenite constituent) が生成することにより、著しい靱性の低下が起こる<sup>7)</sup>。MA の生成を抑制するために、低 C, 低  $C_{eq}$  (炭素当量), 低  $P_{CM}$ , 低 P, 低 Si, 低 N とした上で、最新の加速冷却装置 Super-OLAC<sup>®</sup> の適用により、厚肉材における優れた強度を実現している。

図3 に母材強度および継手 CTOD 特性と Ni 量の関係を示す。一般に、強度確保のために合金元素の添加量を増加することは、継手の靱性や CTOD 特性の低下を引き起こすが、Ni 添加は CTOD 特性を確保しつつ母材強度の向上に寄与するため、CTOD の要求温度に応じて、Ni を適量添加することにより継手 CTOD 特性と母材特性との両立を図っている。

表3 鋼板の化学成分

Table 3 Chemical composition of steel plates

Steel	Thickness	C	Si	Mn	P	S	Al	others	(mass%)	
									$C_{eq}$	$P_{CM}$
A	101.6 mm	0.07	0.13	1.49	0.005	0.001	0.029	Cu, Ni, Nb, Ti, etc.	0.35	0.16
B	101.6 mm	0.08	0.14	1.57	0.005	0.001	0.032	Cu, Ni Nb, Ti, etc.	0.42	0.19
C	75 mm	0.07	0.10	1.55	0.005	0.001	0.028	Cu, Ni, Nb, Ti, etc.	0.42	0.18
D	50 mm	0.07	0.20	1.32	0.007	0.001	0.040	Cu, Ni, Cr, Mo, V, etc.	0.42	0.19

$$C_{eq} = C + Mn/6 + (Cr + Mo + V)/5 + (Cu + Ni)/15 \quad P_{CM} = C + Si/30 + Mn/20 + Cu/20 + Ni/60 + Cr/20 + Mo/15 + V/10 + 5B$$

### 3. 鋼板の諸特性

#### 3.1 化学成分と製造プロセス

表3 に各鋼板の化学成分を示す。C 量を 0.08% 以下に低減しており、 $P_{CM}$  は 0.20% 以下といずれも優れた溶接性を有している。製鋼工程では P, S の不純物元素および N を低減するとともに、必要に応じて Ca-Ti 処理または REM-Ti 処理を行い、連続 casting により厚さ 310 mm または 250 mm の铸片とした。厚板圧延では、制御圧延の後、Super-OLAC<sup>®</sup> を用いた加速冷却を実施した。また、铸片中心部のポロシティ圧着と鋼板のマイクロ組織制御のため、強圧下圧延を適用した。YP500MPa 級鋼の Steel D については、適正な強度・靱性の確保のため、加速冷却による直接焼入れ後、焼もどしを行った。

#### 3.2 母材の機械的特性

母材のマイクロ組織の例を写真1 に示す。Steel B は微細な

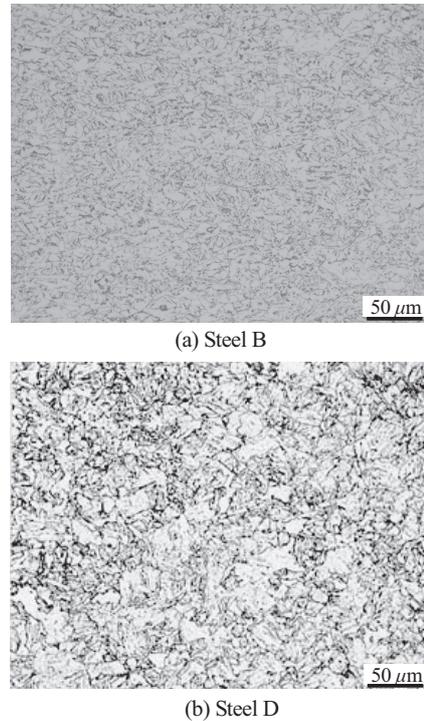


写真1 鋼板のマイクロ組織

Photo 1 Microstructure of steel plates

表 4 鋼板の機械的特性

Table 4 Mechanical properties of steel plates

Steel	Thickness	PWHT	Position	Direction	Tensile test			Charpy impact test			$\sqrt{T_s}$ (°C)
					YS (MPa)	TS (MPa)	El (%)	Absorbed energy, average (J)			
								-40°C	-50°C	-60°C	
A	101.6 mm	—	1/4t	L	432	527	32 <sup>*1</sup>	—	—	—	—
				T	438	542	31 <sup>*1</sup>	441	—	440	-85
B	101.6 mm	580°C ×4 h	1/4t	L	436	532	33 <sup>*1</sup>	434	—	427	-90
				T	452	544	33 <sup>*1</sup>	436	—	440	-100
C	75 mm	—	1/4t	L	446	529	35 <sup>*1</sup>	—	—	—	—
				T	451	541	34 <sup>*1</sup>	—	—	400	-135
D	50 mm	—	1/4t	L	569	659	29 <sup>*2</sup>	291 <sup>*3</sup>	278	—	-71
				T	567	660	28 <sup>*2</sup>	247 <sup>*3</sup>	238	—	-67
E	50 mm	—	1/2t	L	564	658	30 <sup>*2</sup>	239 <sup>*3</sup>	234	—	-69
				T	574	664	28 <sup>*2</sup>	228 <sup>*3</sup>	213	—	-62

<sup>\*1</sup>Specimen:φ12.5 mm, Gage length=50 mm    <sup>\*2</sup>Specimen:φ14 mm, Gage length=50 mm    <sup>\*3</sup>Testing temperature: -35°C  
 PWHT: Post weld heat treatment    YS: Yield strength    TS: Tensile strength    El: Elongation  
 $\sqrt{T_s}$ : Transformation temperature on toughness    L: Longitudinal    T: Transverse

アシキュラーフェライトを含むベイナイト主体組織であり、Steel A, C もほぼ同様の組織が得られている。Steel D は微細なベイナイト単相組織が得られている。

母材の引張試験結果およびシャルピー衝撃試験結果を表 4 に示す。いずれの鋼板においても板厚の 1/2 部を含めて表 1 に示した強度、靱性の目標値を満足している。板厚 101.6 mm の Steel B については、PWHT (post weld heat treatment) 後においても目標を満足する強度、靱性が得られている。

### 3.3 母材の CTOD 特性

3 点曲げ CTOD 試験により母材の破壊靱性特性を評価した。表 5 に試験結果を示す。いずれも、CTOD 値は要求温

度において十分に良好な値が得られている。

表 5 母材の CTOD (き裂先端開口変位) 試験結果

Table 5 Crack tip opening displacement (CTOD) test results of steel plates

Steel	Thickness	PWHT	Position	Test temp. (°C)	CTOD value (mm)
A	101.6 mm	—	T	-10	≥2.86, ≥2.43
B	101.6 mm	580°C ×4 h	L	-10	2.51, ≥2.56
			T	-10	≥2.58, ≥2.65
C	75 mm	—	L	-40	≥2.72, ≥2.62, 1.55

Specimen: B×B (B: Thickness)    PWHT: Post weld heat treatment  
 L: Longitudinal    T: Transverse

表 6 ひずみ時効シャルピー衝撃特性

Table 6 Strain aged Charpy impact properties of steel plates

Steel	Thickness	Position	Direction	Strain	Charpy absorbed energy, average (J)			$\sqrt{T_s}$ (°C)
					-40°C	-50°C	-60°C	
A	101.6 mm	Surface	T	0%	426	—	273	-88
				5%	254	—	18	-47
B	101.6 mm	Surface	T	0%	397	—	339	<-100
				5%	137	—	111	-70
				8%	83	—	44	-50
C	75 mm	Surface	T	0%	—	—	324	-135
				5%	—	—	310	-125
				10%	—	—	298	-105
D	50 mm	1/4t	L	0%	291 <sup>*1</sup>	278	—	-71
				5%	241 <sup>*1</sup>	194	—	-64

Aging: 250°C×1 h    <sup>\*1</sup>Testing temperature: -35°C    L: Longitudinal    T: Transverse  
 $\sqrt{T_s}$ : Transformation temperature on toughness

### 3.4 ひずみ時効特性

最大予ひずみ 10% を付加し、250℃ で 1 時間の時効処理後、シャルピー衝撃試験を実施した。表 6 にその試験結果を示す。ひずみ時効処理により靱性は低下傾向を示すが、いずれも目標を満足する靱性値が得られており、Steel B はひずみ 8% 付与における  $vT_s$  が -50℃、Steel C はひずみ 10% 付与における  $vT_s$  が -105℃ とそれぞれの仕様温度において非常に良好なひずみ時効特性を有している。

## 4. 溶接継手の諸特性

### 4.1 溶接条件

鋼板の溶接条件を表 7 に示す。溶接入熱が 0.8 kJ/mm に

ついては多層の GMAW (ガスマタルアーク溶接)、1.5 ~ 5.0 kJ/mm については多層の SAW (サブマージアーク溶接) により溶接継手を作製した。Steel A, B については、3 種類の溶接入熱の継手について性能評価を実施した。写真 2 に Steel B の溶接継手のマクロ組織を示す。

### 4.2 溶接継手の機械的特性

溶接継手の引張試験およびシャルピー衝撃試験結果を表 8 に示す。継手の引張強度は目標を満足し、継手シャルピーの吸収エネルギーは FL (fusion line) 部においても目標を満足する良好な結果が得られている。

### 4.3 溶接継手の CTOD 特性

溶接継手の CTOD 試験結果を図 4 に示す。BS 7748 Part

表 7 溶接条件

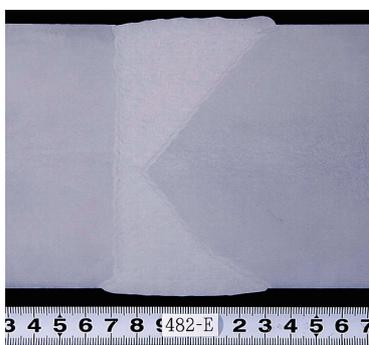
Table 7 Welding condition

Steel	Thickness	Welding method	Consumable	Groove shape	Heat input (kJ/mm)
A	101.6 mm	SAW	KW-30T/ KB100		1.5
					3.0
					4.5
B	101.6 mm	GMAW	DWA-55LSR*1		0.8
		SAW	US-36J*1 / PFH-55LT*1		3.0
		4.5			
C	75 mm	SAW	KW30T (modified) / KB100		5.0
D	50 mm	SAW	US-56B*1 / PFH-80AK*1		3.8

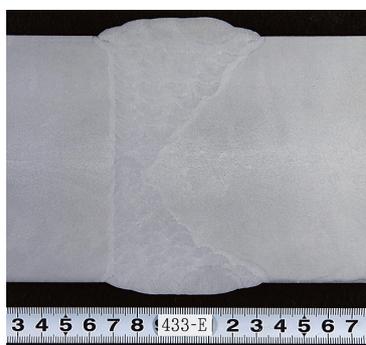
\*1 Supplied by Kobe Steel, Ltd.

SAW: Submerged arc welding

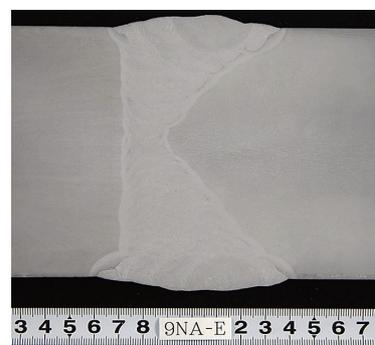
GMAW: Gas metal arc welding



(a) GMAW, Heat input = 0.8 kJ/mm



(b) SAW, Heat input = 3.0 kJ/mm



(c) SAW, Heat input = 4.5 kJ/mm

SAW: Submerged arc welding

GMAW: Gas metal arc welding

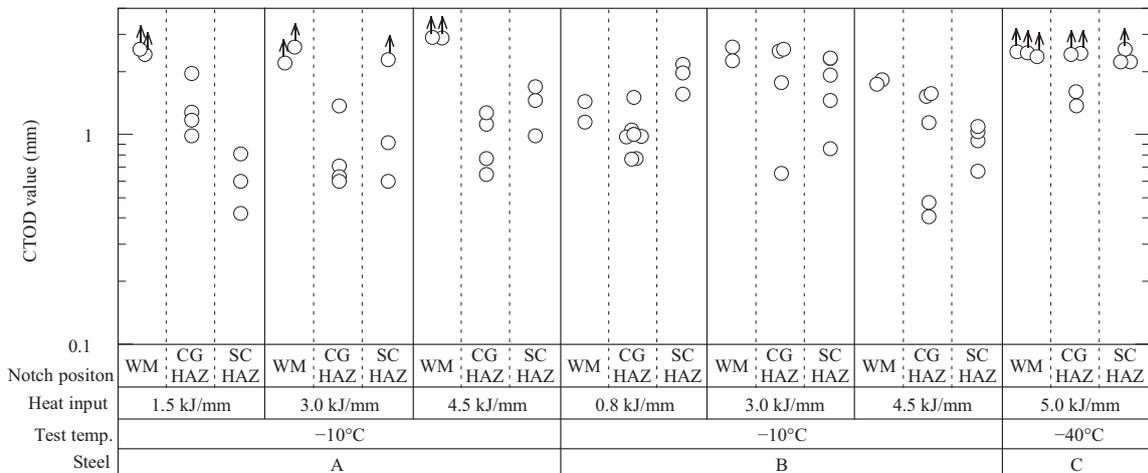
写真 2 Steel B の溶接継手のマクロ組織

Photo 2 Macrostructure of Steel B welded joint

表 8 溶接継手の機械的特性  
Table 8 Mechanical properties of welded joints

Steel	Thickness	Welding method	Heat input (kJ/mm)	Tensile test		Charpy impact test						
				Tensile strength (MPa)	Location of rupture	Position	Test temp.	Absorbed energy, average (J)				
								WM	FL	FL +1 mm	FL +2 mm	SCHAZ
A	101.6 mm	SAW	1.5	572	WM	1/4t	-40°C -60°C	291 250	462 434	— —	— —	306 139
			3.0	579	WM	1/4t	-40°C -60°C	197 172	397 187	— —	— —	351 278
			4.5	549	WM	1/4t	-40°C -60°C	249 162	416 416	— —	— —	399 361
B	101.6 mm	GMAW	0.8	593 591	HAZ HAZ	1/4t	-40°C -60°C	156 133	478 489	— —	278 257	274 249
			3.0	595 594	HAZ HAZ	1/4t	-40°C -60°C	238 193	397 322	— —	434 325	306 269
		4.5	596 595	HAZ HAZ	1/4t	-40°C -60°C	252 248	451 440	— —	428 406	399 346	
C	75 mm	SAW	5.0	543 546	HAZ HAZ	1/4t	-60°C -80°C	214 194	255 217	381 284	— —	— —
E	50 mm	SAW	3.8	682 684	HAZ HAZ	1/4t	-35°C -50°C	194 147	230 156	245 151	— —	— —

WM: Weld metal FL: Fusion line SCHAZ: Sub-critically HAZ HAZ: Heat-affected zone  
SAW: Submerged arc welding GMAW: Gas metal arc welding



Specimen: B×B (B: Thickness)  
WM: Weld metal CGHAZ: Coarse grain HAZ SCHAZ: Sub-critically HAZ HAZ: Heat-affected zone

図 4 溶接継手部の CTOD(き裂先端開口変位) 試験結果  
Fig. 4 Crack tip opening displacement (CTOD) test results of welded joint

2 (1997) および API RP 2Z<sup>8)</sup> に基づき、ノッチ位置が WM (weld metal), CGHAZ, SCHAZ (sub-critically HAZ) での CTOD 試験, 評価を行った。溶接入熱が 5.0 kJ/mm までの CGHAZ の CTOD 値は, Steel A が -10°C で 0.60 mm 以上, Steel B が -10°C で 0.40 mm 以上, Steel C が -40°C で 1.39 mm 以上, また, SCHAZ の CTOD 値は, Steel A が 0.42 mm 以上, Steel B が 0.67 mm 以上, Steel C が 2.22 mm 以上と, いずれも目標を満足しており, 十分に高い脆性破

壊発生抵抗を示す。なお, これらの試験片のき裂先端における CGHAZ, SCHAZ の占める比率は, すべて API RP 2Z の規定を満足するものであった。

### 5. おわりに

海洋構造物用高性能厚鋼板として YP420MPa 鋼の板厚 101.6 mm までの厚肉材, 寒冷域での使用を考慮した CTOD

温度が $-40^{\circ}\text{C}$ の低温仕様材，YP500MPaの高強度材の諸特性を紹介した。これらは高度な成分設計と加速冷却装置 *Super-OLAC*<sup>®</sup>をはじめとする厚板製造技術の組み合わせにより開発したものであり，いずれも良好な母材および溶接継手の性能を有している。

石油資源の開発は氷海域，深海域へと広がりがつあり，ますます高性能な海洋構造物用鋼材のニーズが高まってくることが予想される。今後も開発鋼の各種海洋構造物への適用が期待される。

#### 参考文献

- 1) 小俣一夫, 吉村洋, 山本定弘. NKK 技報. 2002, no. 179, p. 57-62.
- 2) 谷川治, 石井裕昭, 板倉教次, 天野虔一, 中野善文, 川端文丸. 川崎製鉄技報. 1993, vol. 25, no. 1, p. 13-19.
- 3) 久田光夫, 三宅孝則, 川端文丸. 川崎製鉄技報. 1998, vol. 30, no. 3, p. 142-147.
- 4) Hisata, M.; Kawabata, F; Itakura, N.; Orita, T; Yamamoto, O.; Kudo, J.; Proceedings of OMAE99, International Conference, ASME. 1999, MAT-2099.
- 5) 弟子丸慎一, 平井政夫, 天野虔一, 上田修三, 上村尚志, 坪田一哉.

川崎製鉄技報. 1986, vol. 18, no. 4, p. 295-300.

- 6) 中野善文, 天野虔一, 三宮好央, 小林英司, 小川隆生, 矢島浩. 川崎製鉄技報. 1986, vol. 18, no. 4, p. 301-306.
- 7) 川端文丸, 天野虔一, 板倉教次, 南二三吉, 荊洪陽, 豊田政男. 日本造船学会論文集. 1993, vol. 173, p. 349-357.
- 8) American Petroleum Institute. "API ecommend practice 2Z, forth edition". 2005-09.



柚賀 正雄



橋本 正幸



鈴木 伸一