

大入熱溶接継手部靱性に優れた YP 40 および 42 kgf/mm² 級厚鋼板の特性*

川崎製鉄技報
18 (1986) 4, 301-306

Properties of 390 and 415 MPa Yield Strength Steel Plates with Good Toughness in Large Heat Input Welded Joints



中野 善文
Yoshifumi Nakano
鉄鋼研究所 水島研究
部第2研究室 主任研
究員(課長)・Ph. D.



天野 虔一
Kenichi Amano
鉄鋼研究所 厚板研究
部厚板研究室 主任研
究員(課長)



三宮 好史
Yoshifumi Sannomiya
水島製鉄所 管理部厚
板管理室 主査(課長)



小林 英司
Eiji Kobayashi
水島製鉄所 管理部厚
板管理室 主査(課長
補)



小川 隆生
Takao Ogawa
水島製鉄所 厚板鑄鍛
部厚板鑄鍛技術室



矢島 浩
Hiroshi Yajima
三菱重工業(株) 技術
本部長崎研究所 主査・
工博

1 緒 言

我が国における一般商船の建造にあたって高張力鋼板の使用が開
始されてすでに久しい。高張力鋼板の適用は船体構造の軽量化を目
的としたもので、燃料消費量の低減を目指したいいわゆる省エネル
ギー船の建造を可能にした。船体構造用高張力鋼板は、降伏強さが
当初 315 MPa 保証 (YP 32 kgf/mm² 鋼) であったものが、最近
は 355 MPa 保証 (YP 36 kgf/mm² 鋼) までのものが使用されるよう
になってきた。そして、船体構造の全重量に対する高張力鋼板の使用
比率は、5万トン級以上の船では 50~75% にも達している。この
ようなすう勢は、鋼板の製造技術の向上ならびに設計技術上の進歩
に負うところが大きい。とくに、前者について特筆すべきは TMCP
(Thermo mechanical control process) 鋼の開発であり、これにより
きわめて溶接性の優れた高張力鋼板の製造が可能となった。最近の

要旨

大入熱溶接継手部の低温靱性に優れた船体構造用降伏強さ 40kgf/mm² (YP 390 MPa) 鋼および海洋構造物用降伏強さ 42 kgf/mm² (415 MPa) 鋼を開発した。YP 390 MPa 鋼は低 N、微量 Nb および REM-Ti 添加、YP 415 MPa 鋼は低 C、中 Mn、低 N、微量 Nb および REM-Ti 添加によりそれぞれ MACS (Multi-purpose accelerated cooling system) を用いて製造した。鋼板および入熱 147~274 kJ/cm のエレクトロガス溶接および片側一層サブマージアーク溶接により製作した継手の特性を、引張、シャルピー衝撃および破壊靱性試験により調べ、鋼板およびその大入熱溶接継手部が船体構造および海洋構造物として十分な特性をもつことを確認した。

Synopsis:

Ship structural 390 MPa yield strength (YP 40 kgf/mm²) steels and an offshore structural 415 MPa yield strength (YP 42 kgf/mm²) steel were developed to assure good low temperature toughness in large heat input welded joints. They were produced using MACS (Multi-purpose accelerated cooling system) with low N and a small amount of Nb and REM-Ti addition for the YP 390 MPa steels and with low C, medium Mn, low N, and small amounts of Nb and REM-Ti addition for the YP 415 MPa steel. Tensile, Charpy impact and fracture mechanics tests proved that the steel plates and their welded joints made by electro-gas welding and one side one pass submerged arc welding with heat inputs of 147 to 274 kJ/cm had sufficient properties for ship and offshore structures.

高付加価値化への指向は一層高い降伏強さをもつ高強度鋼の使用を
促しており、本稿で述べる降伏強さ 390 MPa 保証の YP 40 kgf/
mm² 鋼はそれに対応するものである。

一方、海洋構造物においてもセミサブリグやケーソンリグなどの
移動式石油掘削リグへの高張力鋼板の使用は機械積載量の増加によ
る機械輸送コストの削減を目的に指向されており、降伏強さ 415
MPa 保証の YP 42 kgf/mm² 鋼が要望されている。

このような高張力鋼板は、大入熱溶接施工と組み合わせることによ
りさらに使用効果が上るため、この点を考慮した鋼材の開発が求
められている。

本稿は、これらの要求に基づいて開発した大入熱溶接用 YP 40
および 42 kgf/mm² 級厚鋼板の特性を紹介したものである。

2 鋼板の開発目標性能

Table 1 に鋼板の開発目標性能を示す。目標性能はいずれも主庄

* 昭和61年7月14日原稿受付

Table 1 Aimed properties of steel plates and their welded joints

Steel	Plate thickness (mm)	Steel plate		Welded joint		Preheating temperature for preventing weld cracking (°C)		
		Tensile test		Charpy test 50% FATT (°C)	Charpy test			
		YP (MPa)	TS (MPa)		Welding method		Temp. (°C)	Absorbed energy (J)
YP 40 kgf/mm ² (YP 390 MPa)	A	25	≥390 ≥530	Ⅳ - 30	EG One side SAW	0	Ⅳ 30	160
	30	Ⅳ 390 Ⅳ 530	Ⅳ - 50	One side SAW		-20	Ⅳ 39	
YP 42 kgf/mm ² (YP 415 MPa)	E	25	≥390 ≥530	Ⅳ - 50	One side SAW	-60	Ⅳ 39	
	30	Ⅳ 415 Ⅳ 550	Ⅳ - 80	EG				

延方向およびそれに直角な方向についてのものである。YP 40 kgf/mm² 鋼は NV 船級に規定されているため、母材強度はこの規定値を採用した。母材および片側一層溶接継手部の靱性は YP 36 kgf/mm² 鋼と同レベル以上とした。YP 42 kgf/mm² 鋼は母材強度は ASTM A537 Cl. 2 を基本にしたものであり、母材および片面一層溶接継手部靱性としては -60°C 仕様を満足するものとした。また、いずれの鋼材においても、気温 0°C で予熱フリーの溶接で割れを生じないものとした。

3 鋼板製造の考え方

上記目標性能を満足させるための鋼板の製造に対する考え方を Table 2 に示す。本研究では大入熱溶接継手靱性を確保するために、低炭素当量化、低窒素化、さらに REM および Ti の添加などの化学組成面での改良を加えた。

REM および Ti の添加は、REM-Oxysulfide および TiN によりオーステナイト粒の粗大化を防止する目的をもつ。Fig. 1¹⁾ および 2 に、Ti および REM 添加によるオーステナイト粒粗大化防止効果を示す。Fig. 1 は 0.04 μm 以下の微細な TiN が多いほどオーステナイト粒径が小さくなることを示している。一方、REM は REM-Oxysulfide として、Fig. 2 に示すように fusion line 近傍で溶解する可能性のある TiN に代わって安定な微細粒子としてオーステナイト粒の粗大化を防止するとともに、フェライトの発生核となることにより粗大な上部ベイナイトの出現を抑制すると考えられる。

Table 2 Metallurgical approach for improving HAZ toughness of large heat input welded joint

Item	Improvement of HAZ toughness	
	Metallurgy	Approach
Grain size	Grain boundary pinning effect of insoluble fine precipitate	- Fine dispersion of TiN - REM addition
Micro-structure	Reduction of M-A constituent in upper bainite structure	- Lowering C_{eq} - Lowering C - Lowering N
	Nucleation of fine ferrite-pearlite structure	- Lowering C_{eq} - REM addition
Matrix	Reduction of free N and sol. Ti	- Lowering N - Control of Ti/N

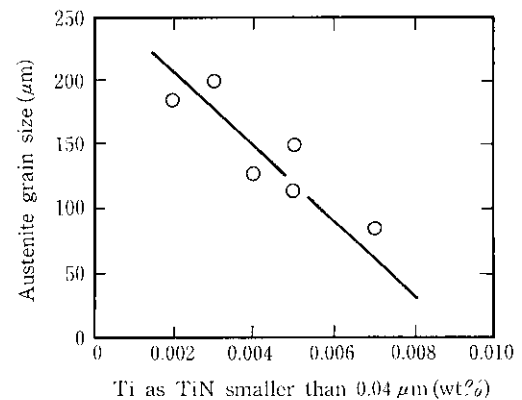


Fig. 1 Relation between austenite grain size at 1350°C and Ti content as TiN smaller than 0.04 μm existing in the plate before welding

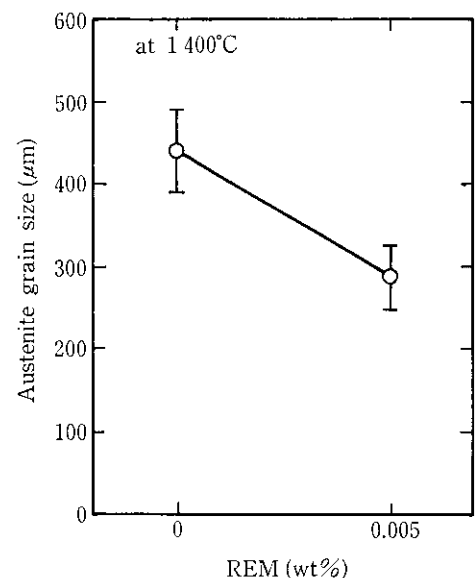


Fig. 2 Effect of REM content on austenite grain size at 1400°C (0.13% C-0.25% Mn-0.015% P-0.004% S-0.02% Al-0.014% Ti)

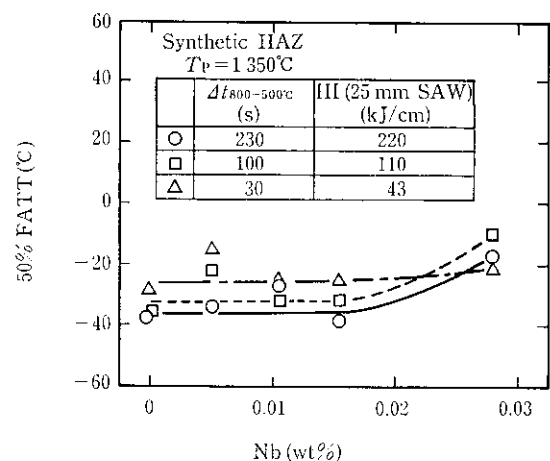


Fig. 3 Effect of Nb content on the synthetic HAZ toughness

低炭素当量化は、溶接割れ防止に必要な予熱温度の低下を可能にする。低窒素化は、固溶窒素および島状マルテンサイトの生成を抑制することにより溶接熱影響部 (HAZ) 靱性の確保を可能にする。

Table 3 Chemical compositions of steel plates

(wt %)

Steel		C	Si	Mn	P	S	Al	Nb	Cu	Ni	N	C _{eq} *	P _{cm} **	Note
YP 40 kgf/mm ² (YP 390 MPa)	A	0.14	0.33	1.20	0.013	0.002	0.031	0.014	—	—	0.0031	0.34	0.211	REM-Ti treated
	E	0.10	0.33	1.43	0.012	0.002	0.033	0.015	—	—	0.0036	0.34	0.183	
YP 42 kgf/mm ² (YP 415 MPa)	—	0.07	0.22	1.35	0.009	0.002	0.028	0.017	0.14	0.13	0.0027	0.31	0.154	

$$* C_{eq} = C + \frac{Mn}{6} + \frac{V+Mo+Cr}{5} + \frac{Cu+Ni}{15}$$

$$** P_{cm} = C + \frac{Si}{30} + \frac{Mn+Cu+Cr}{20} + \frac{Ni}{60} + \frac{Mo}{15} + \frac{V}{10} + 5B$$

一方、低炭素当量化、低窒素化にともなう母材強度の低下に対しては、YP 40 kgf/mm² 鋼については Nb を、YP 42 kgf/mm² 鋼については Nb に加えて Cu-Ni を添加し、さらに MACS 設備を用いた制御圧延・制御冷却プロセスにより強度の確保を図った。Nb の添加は母材強度の向上に効果があるが、過度の添加は大入熱溶接継手の HAZ 靱性を損う。Fig. 3 に再現 HAZ 靱性に及ぼす Nb の影響を示す。0.02% 以下の微量 Nb の添加であれば、HAZ 靱性はほとんど影響を受けない。Cu-Ni は HAZ 靱性を低下させることなく強度上昇が図れる元素として添加される。

4 YP 40 および 42 kgf/mm² 鋼板の特性

4.1 供試材

供試材の化学組成を Table 3 に示す。C 含有量の Mn 含有量に対する比 (C/Mn 比) は YP 40 kgf/mm² A 級鋼および E 級鋼においてそれぞれ 0.13 および 0.06、YP 42 kgf/mm² 鋼において 0.05 とした。N, S および P の含有量はいずれも低く制御し、微量 Nb、さらに REM-Ti を添加した。炭素当量は YP 40 および 42 kgf/mm² 鋼においてそれぞれ 0.34% および 0.31% であった。鋼板はいず

れも転炉で溶製し、脱ガスしたのち連続鋳造し、制御圧延後 MACS 設備による制御冷却により製造した。

4.2 母材基本特性

Table 4 に母材の引張試験結果および 2 mmV ノッチシャルピー衝撃試験結果を示す。YP 40 kgf/mm² A 級鋼、E 級鋼および YP 42 kgf/mm² 鋼のいずれの鋼材も Table 1 に示した目標強度および靱性を上まわる優れた値を示した。また、板厚方向の絞りも 70% 以上と大きく、耐ラメラータ性が優れていることを示している。

Photo 1 に母材の光学顕微鏡組織を示す。いずれもフェライト+

Table 4 Mechanical properties of steel plates

Steel	Plate thickness (mm)	Direction	Location	Tensile test*				Charpy impact test			
				Y _P	T _S	E _L	R _A	Absorbed energy (J)			50% FATT
				(MPa)	(MPa)	(%)	(%)	-40°C	-60°C	-80°C	(°C)
YP 40 kgf/mm ² (YP 390 MPa)	25	L	1/4 t	441	569	30	76	248	219	74	-67
			1/2 t	436	569	30	75	215	153	72	-64
		C	1/4 t	461	579	26	72	184	171	34	-66
			1/2 t	456	579	25	71	140	79	33	-46
		Z	1/4 t	446	574	45	75				
			1/2 t	436	564	30	76	262	195	129	-73
	30	L	1/4 t	446	564	29	76	168	113	47	-52
			1/2 t	456	569	28	75	194	171	123	-76
		C	1/4 t	446	569	28	73	142	103	30	-46
			1/2 t	451	574	55	73				
		Z	1/4 t	441	549	31	77	314	297	302	-113
			1/2 t	441	549	30	75	322	306	238	-97
YP 42 kgf/mm ² (YP 415 MPa)	30	L	1/4 t	451	554	28	75	303	286	227	-103
			1/2 t	451	549	29	74	279	233	184	-93
		C	1/4 t	451	554	27	77	321	308	293	-114
			1/2 t	451	559	27	75	318	298	272	-105
		Z	1/4 t	481	569	26	73	245	208	171	-100
			1/2 t	470	559	26	74	230	200	149	-87
		Z	1/4 t	451	569	53	75				
			1/2 t	451	569	53	75				

* Specimens: "NKU14A" for L and C
10 mmφ, GL=20 mm for Z

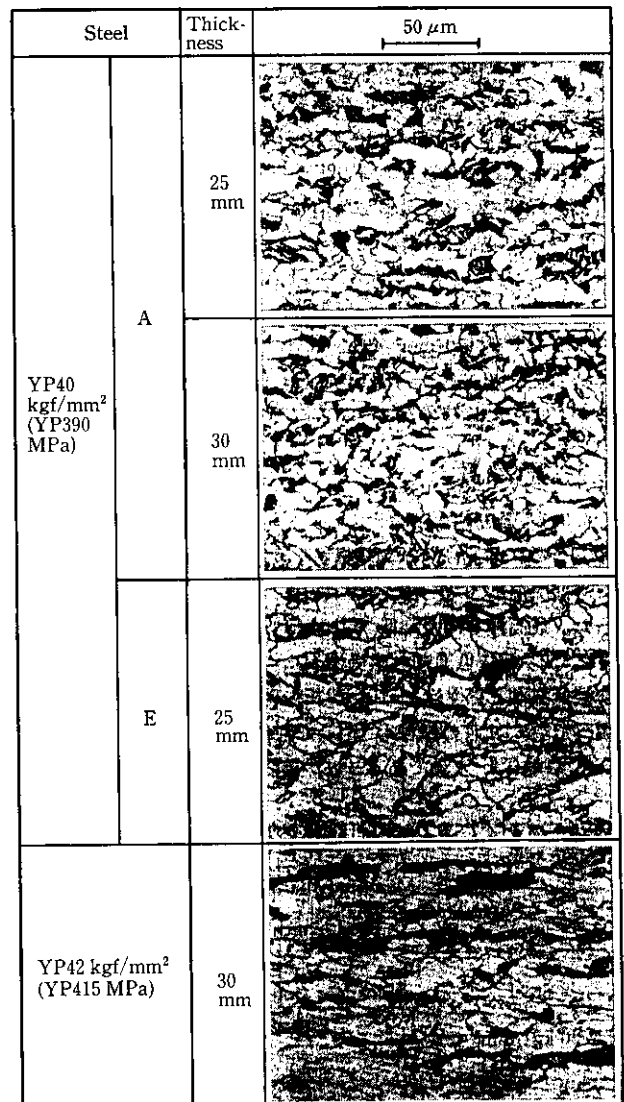


Photo 1 Microstructure of plates tested

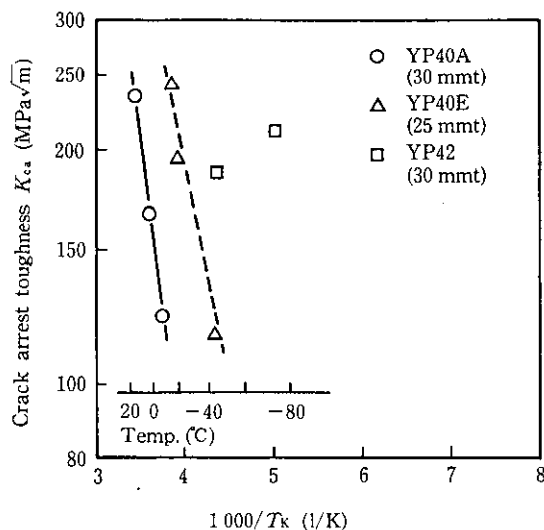


Fig. 4 Plot of crack arrest toughness vs. temperature

ベイナイト主体の微細な組織である。

母材の脆性破壊発生特性は三点曲げ CTOD 試験および中央切欠付き大型引張試験（ディープノッチ試験）により調べた。CTOD は YP 40 kgf/mm² A 級鋼については 0°C で 1.8 mm 以上、E 級鋼については -60°C で 1.9 mm 以上、YP 42 kgf/mm² 鋼については -60°C で 1.3 mm であった。一方、ディープノッチ試験の結果、YP 40 kgf/mm² A および E 級鋼さらに YP 42 kgf/mm² 鋼は全長 80 mm の板厚貫通亀裂が存在し、それに公称降伏強さの 1/2 の応力が作用したときにはそれぞれ -135°C、-152°C および -145°C より高い温度では脆性破壊が発生しないことが確認された。

Fig. 4 に二重引張試験で得られた亀裂伝ば停止特性を示す。試験結果は、クラックアレスターとして使われる YP 40 kgf/mm² E 級鋼については 186 MPa√m の亀裂伝ば停止靱性を与える温度が -25°C、YP 42 kgf/mm² 鋼については -65°C と優れた特性を示している。なお、 $K_{ca}=186 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ は亀裂伝ば時の有効応力拡大係数の考え²⁾に基づくものである。

4.3 溶接性

4.3.1 最高硬さ試験

Table 5 に最高硬さ試験結果を示す。試験は JIS Z3101 に基づき、雰囲気温度 0°C でビード長 10, 50, 125 mm の場合について行った。最高硬さは水冷型 YP 36 kgf/mm² 鋼と同レベルである。

4.3.2 溶接低温割れ感受性

溶接低温割れ感受性を JIS Z3158 の斜め Y 型拘束割れ試験により調べた。いずれの鋼材も 0°C で割れが観察されず、ルート割れ防止温度は 0°C 未満であることが確認された。

Table 5 Maximum hardness test results (HV)

		Bead length (mm)			
		10	50	125	
Steel	Plate thickness (mm)				
YP 40 kgf/mm ² (YP 390 MPa)	A	30	320	288	265
	E	25	309	258	248
YP 42 kgf/mm ² (YP 415 MPa)	—	30	328	308	293

4.4 歪時効特性

歪時効特性は鋼板に 5% の歪を付与したのち、250°C で 30 min の時効処理を行うことにより調べた。Table 6 に試験結果を示す。歪時効処理による破面遷移温度の変化は 8~31°C であり、従来鋼と同程度である。

Table 6 Effect of strain aging on Charpy impact test result

Steel		Plate thick- ness (mm)	Strain aging*	Charpy impact test			
				Absorbed energy (J)		50% FATT (°C)	ΔT** (°C)
				-40°C	-60°C		
YP 40 kgf/mm ² (YP 390 MPa)	A	25	No	184	171	-66	-25
		25	Yes	124	58	-41	
		30	No	194	171	-76	-8
		30	Yes	187	148	-68	
	E	25	No	303	286	-103	-31
		25	Yes	187	100	-72	
YP 42 kgf/mm ² (YP 415 MPa)	—	30	No	245	208	-100	-29
		30	Yes	230	159	-71	

* Strain aging: 5% + 250°C × 30 min

** ΔT = (50% FATT of nonstrain aged material) - (50% FATT of strain aged material)

4.5 大入熱溶接継手性能

4.5.1 溶接条件

Table 7 に溶接条件を示す。サブマージアーク溶接は 2~3 電極、エレクトロガス溶接は 1 電極のいずれも片側一層溶接である。溶接入熱量は 147~274 kJ/cm とした。

Table 7 Welding conditions

Steel	Plate thickness (mm)	Welding method	Groove shape (mm)	Electrode	Cur. (A)	Volt. (V)	Speed (cm/min)	Heat input (kJ/cm)
YP 40 kgf/mm ² (YP 390 MPa)	A	One side SAW		L	1500	35	60	166
				T1	1400	40		
				T2	1150	50		
	A	EG		—	580 590	30 31	4	261 274
				—	—	—		
	E	One side SAW		L	1080	32	26	149
YP 42 kgf/mm ² (YP 415 MPa)	—	One side SAW		L	1300	35	43	202
				T1	1050	40		
				T2	1150	50		
	—	EG		—	340 350	36 38	5	147 160
				—	—	—		
				—	—	—		

Table 8 Tensile strength of welded joints

Steel		Plate thickness (mm)	Welding method	Tensile strength (MPa)	
				Welded joint*	HAZ**
YP 40 kgf/mm ² (YP 390 MPa)	A	25	EG	574	549
		30	One side SAW	574	544
	E	25	One side SAW	534	526
YP 42 kgf/mm ² (YP 415 MPa)	—	30	One side SAW	569	522
		30	EG	559	533

* Specimens for welded joint: NKU2A

** Specimens for HAZ: 6 mm ϕ round bar

4.5.2 引張特性

Table 8 に継手および熱影響部 (HAZ) の引張試験結果を示す。HAZ の引張試験は、平行部径 6 mm の丸棒試験片を溶接線に平行に採取して行った。HAZ は溶接による軟化のため、母材の目標引張強さをかならずしも超えていない。しかしながら、継手はいずれも母材の目標引張強さを超え、溶接継手全体としては十分な強度を持ち、実際の使用においてはまったく支障がないことを示している。

4.5.3 シャルピー衝撃特性

Fig. 5 に継手の各部位におけるシャルピー衝撃試験による吸収エネルギーをまとめて示す。YP 40 kgf/mm² A 級鋼では 0°C で 50 J 以上、E 級鋼では -20°C で 60 J 以上、YP 42 kgf/mm² 鋼は -60°C で 39 J 以上であり母材の目標値を満足した。

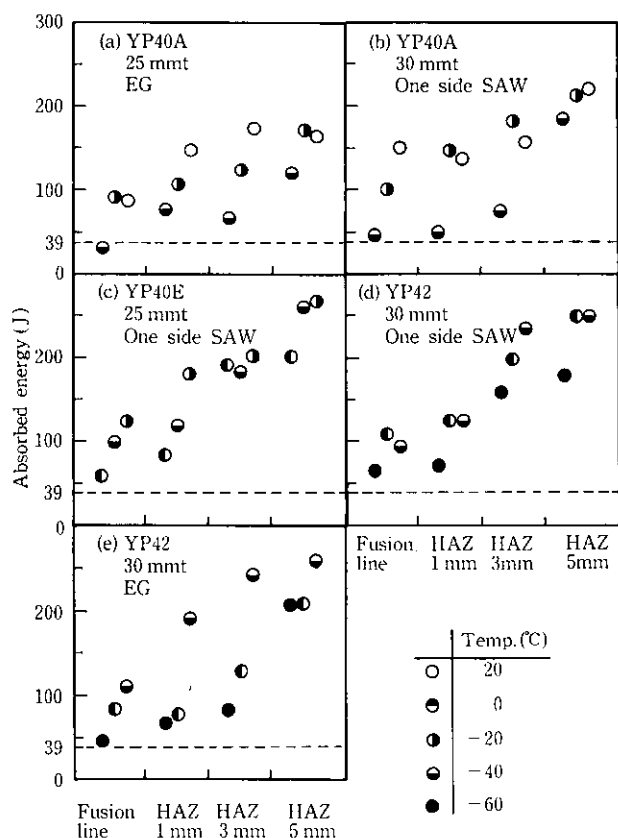


Fig. 5 Charpy impact energies of welded joints (Specimens were cut from 1 mm below the plate surface)

4.5.4 CTOD 特性

CTOD 試験は、海洋構造物用鋼材の多層盛溶接を用いた溶接性試験におけるように、fusion line を直線状にすることは困難なため、通常の大入熱溶接施工で用いられる継手そのものを用いて行った。Fig. 6 に fusion line の CTOD をまとめて示す。

溶接継手に要求される CTOD に関しては議論のあるところであるが、API³⁾ では海洋構造物を対象に板厚 75 mm 以下については 0.25 mm としている。この考えを適用すると、YP 40 kgf/mm² 鋼では全溶接方法で 0°C、YP 42 kgf/mm² 鋼の片面一層サブマージアーク溶接で -20°C、エレクトロガス溶接では -40°C で使用可能といえる。API では構造物の使用条件については規定していないため、破壊力学的には十分な根拠をもったものとはいえない。

CTOD を構造物の安全性評価に適用するにあたっては、CTOD 設計曲線が用いられる。現在、BSI PD6493⁴⁾ と WES2805⁵⁾ がそれぞれ異なった設計曲線を提案している。これらの CTOD 設計曲線に関しては種々問題もある⁶⁾ が、切欠付き引張試験あるいは隅肉止端部に表面切欠がある場合にその妥当性が示されている WES 2805 で提案されている式を用いる。想定欠陥寸法としては、ASME Boiler and Pressure Vessel Code Sec. III⁷⁾ の考えを適用すると、深さが板厚の 1/4、長さがその 6 倍の表面欠陥を想定すればよい。いま板厚を 30 mm とすると、WES 2805 に従えば等価欠陥寸法は 8.1 mm となり、Pisarski らの提案⁸⁾ と合う。負荷歪 ϵ は構造物の形状および設計応力に依存するが、一般的なものとして角変形 (15 mm/1000 mm)、目違い (5 mm) 付きの溶接継手ボンド部に溶接線に平行に表面欠陥が存在し、それに垂直に降伏歪 (ϵ_y) の 1/2 の引張応力が作用する構造物を考える。WES 2805 によると、このような条件では全負荷歪は $1.7\epsilon_y$ となる。

以上のように仮定すると、YP 40 および 42 kgf/mm² 鋼の溶接継手は通常の使用条件では 0.1 mm の CTOD があればよいと考えられる。したがって本供試材の大入熱溶接継手は YP 40 kgf/mm² 鋼で -20°C、YP 42 kgf/mm² 鋼で -60°C まで使用可能といえる。

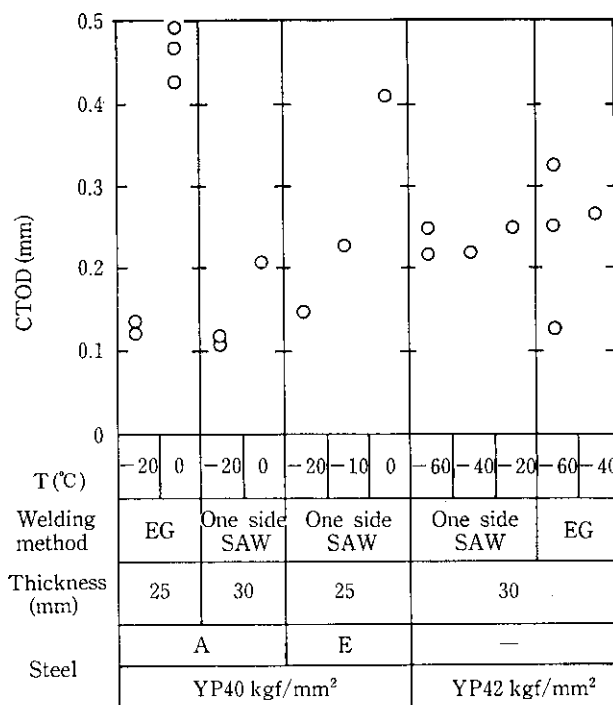


Fig. 6 CTOD values of the welded joints at fusion line

4.5.5 中央切欠付き大型引張特性

中央切欠付き大型引張試験はボンド部に板厚貫通切欠を付与して実施した。Fig. 7 に破壊発生時の応力から計算した破壊靱性値の温度依存性を示す。破壊靱性値は YP 40 kgf/mm² A 級鋼の片側一層サブマージアーク溶接継手以外は 0°C で 155 MPa $\sqrt{m}$ 以上の破壊靱性値をもつ。なお、図中 YP 40 A_{mod} は YP 40 kgf/mm² A 級鋼の C を 0.11% に、Mn を 1.42% にした材料である。

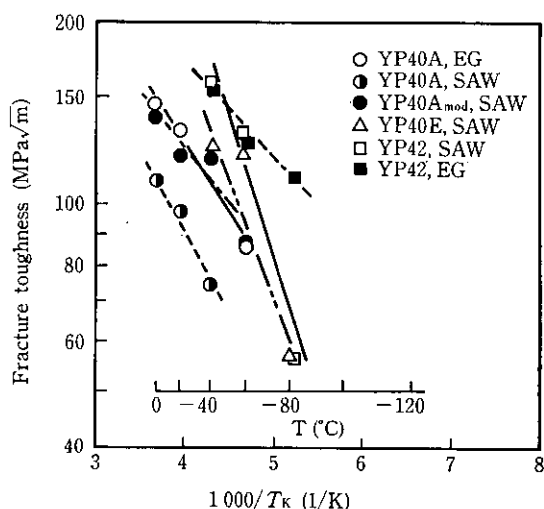


Fig. 7 Plot of fracture toughness of welded joints vs. temperature

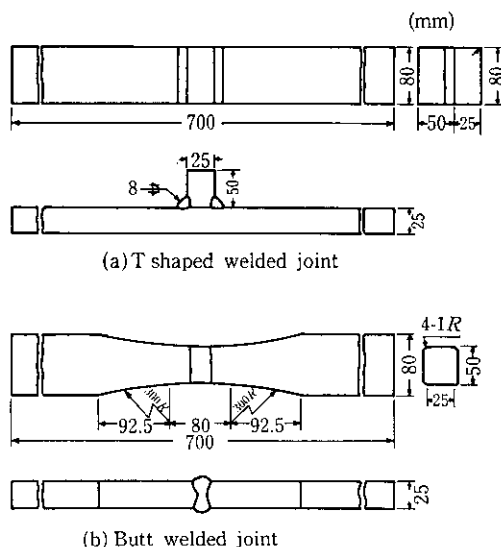


Fig. 8 Specimen geometries for fatigue test

4.6 疲労特性

板厚 25 mm の YP 40 kgf/mm² A 級鋼および YP 42 kgf/mm² 鋼について、母材、手溶接により製作した T 字隅肉継手および CO₂ ガス溶接により製作した突き合わせ継手を用いて疲労特性を調べた。用いた試験片形状を Fig. 8 に示す。疲労試験は片振り引張により行った。各供試材で得られた 2×10^6 サイクルの寿命を与える疲労強度を Table 9 に示す。いずれの疲労強度も従来鋼のそれと同程度である。

Table 9 Fatigue strength of steel plates and their welded joint

	Fatigue strength* (MPa)	
	YP 40 kgf/mm ² (YP 390 MPa)	YP 42 kgf/mm ² (YP 415 MPa)
Base metal	361	397
T-shaped welded joint	115	122
Butt welded joint	142	138

* Defined by the stress range which gives the life of 2×10^6 cycles

5 結 言

船体構造用 YP 40 kgf/mm² 鋼および海洋構造物用 YP 42 kgf/mm² 鋼として開発した大入熱溶接用鋼板を MACS プロセスにより製造し、その特性を入熱 147~274 kJ/cm のエレクトロガス溶接および片側一層サブマージアーク溶接により製作した継手を用いて調べた。その結果、次の結論を得た。

- (1) YP 40 kgf/mm² 鋼
 - (a) 低 N, 微量 Nb, REM-Ti 添加により製造した鋼板は十分な強度および靱性をもつ。
 - (b) 大入熱溶接継手は母材の目標引張強さを満足し、そのシャルピー吸収エネルギーは A 級鋼では 0°C で 50 J 以上、E 級鋼では -20°C で 60 J 以上である。また、CTOD は 0°C で 0.25 mm 以上である。
- (2) YP 42 kgf/mm² 鋼
 - (a) 低 C, 中 Mn, 低 N, 微量 Nb, Cu-Ni, REM-Ti 添加により製造した鋼板は十分な強度および靱性をもつ。
 - (b) 大入熱溶接継手は母材の目標引張強さを満足し、そのシャルピー吸収エネルギーは -60°C で 39 J 以上である。また、CTOD は片側一層サブマージアーク溶接では -20°C で、エレクトロガス溶接では -40°C で 0.25 mm 以上である。

参 考 文 献

- 1) 小田宗隆, 天野虔一, 船橋佳子, 志賀千晃, 上田修三: 鉄と鋼, 70 (1984) 13, S 1265
- 2) T. Kanazawa, S. Machida, H. Yajima, and M. Aoki: "Study on brittle crack arrest," Selected paper, J. Soc. Nav. Archit. Japan, 11 (1973)
- 3) American Petroleum Institute: Draft of API Specification for Steel Plates for Offshore Structures, April (1986)
- 4) British Standards Institute: PD6493 "Guidance on some methods for the derivation of acceptance levels for defects in fusion welded joints," (1980)
- 5) 日本溶接協会: WES 2805 「溶接継手のぜい性破壊発生に対する欠陥の評価方法」, (1980)
- 6) Y. Nakano, M. Nagayasu, K. Ota, S. Takizawa, and H. Nishizaki: "Crack tip opening displacement in heavy section steel plate and its welded joints," Preprint of the 1986 Offshore Technology Conference, ASME, Houston (USA), May (1986)
- 7) ASME Boiler and Pressure Vessel Code, Sec. III, "Rules for Construction of Nuclear Plant Components," (1974)
- 8) H. G. Pisarski and J. D. Harrison: "Background to the material selection procedures for steels and weldments contained in the proposed revisions to the department of energy guidance notes," in Offshore Welded Structures, (1981)