

厚板制御冷却設備による極地向低温用鋼板の開発

Structural Steel Plates for Arctic Use Produced by Multipurpose Accelerated Cooling System

楠原 祐司(Yuji Kusuhara) 小林 英司(Eiji Kobayashi) 大西 史博(Fumihito Ohnishi) 平井 征夫(Ikuo Hirai) 天野 虔一(Kenichi Amano) 垂井 稜(Ryo Tarui)

要旨：

近年、活発化しつつある氷海域のエネルギー資源開発のための船や海洋構造用鋼材として大入熱溶接に耐えうる低温用 YP 36 kgf/mm² 鋼(板厚 32 mm)を MACS 設備を用いて製造し、その母材および溶接継手部特性を調査した。母材じん性は、1/2 t 部 C 方向の vTrs で -100℃以下、C 方向の COD 試験の -60℃の限界 COD 値で、1.0 mm 以上、C 方向の ESSO 試験の Kca が 600 kgf/mm^{3/2} を示す温度で -60℃と脆性破壊の発生およびき裂伝播停止特性とも安全側にある。両者一層溶接や片側二層溶接継手部のじん性は、溶接各位置とも vE -60 で 7 kgf・m 以上で、ボンド部の -60℃の限界 COD 値も 0.3 mm 以上と良好であった。また斜 y 型拘束割れ試験の断面割れ阻止予熱温度は、0℃未満であった。

Synopsis：

Arctic use of the YP 36 kgf/mm² class structural steel plate for high heat input welding was developed by using Multipurpose Accelerated Cooling System (called "MACS") which was established in April 1983 at Mizushima Works, Kawasaki Steel Corp. The characteristics of the steel (32 mm in thickness) are summarized as follows: (1) Fracture appearance transition temperature at middle thickness in the transverse direction was lower than -100℃, the COD value(δc) at -60℃ was higher than 1.0 mm, and the corresponding temperature to a crack arrest toughness (Kcs) of 600 kgf/mm^{3/2} was -60℃. It can be concluded from the above that the material has sufficient properties for brittle crack initiation and crack arrest. (2) At a high heat input to the one side two pass/each side one pass welding joint, vE-60 was more than 7 kgf・m at any notch position and δc at -60℃ notched on the fusion line was 0.3 mm or more. (3) The preheating temperature for crack prevention was confirmed to be below 0℃ by the y-groove, large scale fillet restraint weld cracking test.

(c)JFE Steel Corporation, 2003

楠原 祐司^{*2} 小林 英司^{*3} 大西 史博^{*4} 平井 征夫^{*5} 天野 虔一^{*6} 垂井 稜^{*7}

Structural Steel Plates for Arctic Use Produced by Multipurpose Accelerated Cooling System

Yuji Kusuhashi, Eiji Kobayashi, Fumihiro Ohnishi, Ikuo Hirai, Keniti Amano, Ryo Tarui

要旨

近年、活発化しつつある氷海域のエネルギー資源開発のための船や海洋構造物用鋼材として大入熱溶接に耐えうる低温用 YP 36 kgf/mm² 鋼 (板厚 32 mm) を MACS 設備を用いて製造し、その母材および溶接継手部特性を調査した。母材じん性は、1/2 t 部 C 方向の νT_{rs} で -100°C 以下、C 方向の COD 試験の -60°C の限界 COD 値で 1.0 mm 以上、C 方向の ESSO 試験の K_{cs} が 600 kgf/mm^{3/2} を示す温度で -60°C と脆性破壊の発生およびき裂伝播停止特性とも安全側にある。両側一層溶接や片側二層溶接継手部のじん性は、溶接各位置とも νE_{-60} で 7 kgf・m 以上で、ボンド部の -60°C の限界 COD 値も 0.3 mm 以上と良好であった。また斜 y 型拘束割れ試験の断面割れ阻止予熱温度は、0°C 未満であった。

Synopsis:

Arctic use of the YP 36 kgf/mm² class structural steel plate for high heat input welding was developed by using Multipurpose Accelerated Cooling System (called "MACS") which was established in April 1983 at Mizushima Works, Kawasaki Steel Corp. The characteristics of the steel (32 mm in thickness) are summarized as follows:

(1) Fracture appearance transition temperature at middle thickness in the transverse direction was lower than -100°C, the COD value (δ_c) at -60°C was higher than 1.0 mm, and the corresponding temperature to a crack arrest toughness (K_{cs}) of 600 kgf/mm^{3/2} was -60°C. It can be concluded from the above that the material has sufficient properties for brittle crack initiation and crack arrest.

(2) At a high heat input to the one side two pass/each side one pass welding joint, νE_{-60} was more than 7 kgf・m at any notch position and δ_c at -60°C notched on the fusion line was 0.3 mm or more.

(3) The preheating temperature for crack prevention was confirmed to be below 0°C by the y-groove, large scale fillet restraint weld cracking test.

1 緒 言

北アラスカ沖ボーフォート海を中心に氷海域の石油エネルギー資源の開発が活発化しつつある。このような地域で使用される船や海洋構造物には、軽量化のための高張力化と同時に溶接効率をあげるために溶接低温割れ感受性が低く、かつ大入熱溶接継手部のじん性の優れた鋼材が要求される。鋼材としては、YP 36 kgf/mm² 級鋼から YP 70 kgf/mm² 級鋼がその用途に応じて使用されているが、現在では YP 36 kgf/mm² 級鋼が多く使用される状況にある。氷海域用の YP 36 kgf/mm² 鋼に要求される性能としては

- (1) 母材じん性および両側一層溶接や片側二層溶接のような大入熱溶接継手部じん性が優れていること
- (2) 溶接低温割れ感受性が低いこと

などがあげられる。このような性能を満足させる厚板製造法として、非水冷型制御圧延法 KTR (Kawasaki Thermomechanical Rolling)¹⁾ と多目的制御冷却設備 MACS (Multipurpose Accelerated Cooling System) を用いて制御圧延と圧延後の制御冷却 (ACC) を組み合わせた水冷型制御圧延法がある。本報では、MACS-ACC (以下 MACS という) で製造した厚鋼板の母材および溶接継手部の特性

について報告する。なお比較材としては、KTR で製造した同厚の鋼板を用いた。

2 供試鋼板

MACS 法による鋼板は 32 mm 厚の EH 36 で、ACC 処理したものである。比較材の KTR 法による鋼板は同じく 32 mm の EH 36 を用いた。供試材の化学成分を Table 1 に示す。比較材の KTR 法の鋼板は炭素当量が 0.38% で、REM, Ti を添加した大入熱溶接用の材料を用いた。MACS 材の化学成分は溶接硬化性、溶接低温割れ感受性を代表する指数である C_{eq} , P_{cm} がそれぞれ 0.33%, 0.15% で、従来の非水冷型造船 50 kgf/mm² 鋼に對しかなり低い値になっている。これは比較材として示した KTR 材の化学成分とくらべて分かるように C, Ni 量の低減および Cu, V の添加省略による。MACS 材における C_{eq} と P_{cm} 値の低減は制御冷却過程での第 2 相組織導入による強度の向上で可能となる。一方、鋼板に要求される低温じん性は低温加熱による微細 γ 粒整粒化、制御冷却前の制御圧延および制御冷却過程での結晶粒成長の抑制により改善される^{2,3)}。

溶接入熱 100 kJ/cm 以上の大入熱溶接継手部のじん性を確保する

*1 昭和59年5月30日原稿受付

*2 水島製鉄所管理部厚板管理室課長

*3 水島製鉄所管理部厚板管理室主査

*4 水島製鉄所管理部検査課掛長

*5 技術研究所第2研究部溶接研究室主任研究員・工博

*6 技術研究所第2研究部厚板特殊鋼研究室主任研究員

*7 本社製鋼鋼材技術部技術サービス室主査

Table 1 Chemical compositions of steels for YP 36 kgf/mm² arctic use produced by MACS and KTR (wt %)

Steel	C	Si	Mn	P	S	Al	Cu	Ni	V	Ti	REM	C _{eq}
MACS (ACC)	0.06	0.27	1.47	0.008	0.001	0.038	—	0.40	—	0.010	0.006	0.33
KTR	0.07	0.37	1.52	0.008	0.001	0.041	0.16	0.55	0.04	0.011	0.006	0.38

Table 2 Tensile test properties of seel plates

Process	Direction	YP (kgf/mm ²)	TS (kgf/mm ²)	El (%)	RA (%)
MACS (ACC)	L	38	53	27	—
		39	54	26	—
	T	39	53	26	—
		39	53	25	—
	Z	39	51	19	77
		41	51	20	78
KTR	L	42	52	29	—
		42	52	29	—
	T	46	54	27	—
		45	54	27	—
	Z	43	53	20	82
		43	53	19	81
		43	53	19	79

L- and T-Direction: NKU No. 1 specimen

Z-Direction: Diameter=10 mm, G.L.=50 mm

Table 3 Results of charpy impact test

Process	Direc- tion	Absorbed energy (kgf·m)					CVN50% FATT (°C)
		$\sqrt{E_{-40}}$	$\sqrt{E_{-60}}$	$\sqrt{E_{-80}}$	$\sqrt{E_{-100}}$	$\sqrt{E_{-120}}$	
MACS (ACC)	L	30.4	28.0	27.1	19.9	17.7	-120
		31.7	31.7	29.6	21.6	14.9	
		32.3	32.0	31.3	23.8	13.8	
		(31.5)	(30.6)	(29.3)	(21.8)	(15.5)	
	T	30.0	28.3	22.2	20.0	3.1	-111
		32.0	27.3	24.2	16.7	2.6	
27.3		26.3	21.5	14.8	3.0		
(29.8)		(27.3)	(22.6)	(17.2)	(2.9)		
KTR	L	30.0	30.4	25.6	17.1	16.8	-140
		31.2	30.4	30.6	17.5	16.4	
		31.2	31.3	25.6	17.0	17.2	
		(30.8)	(30.7)	(27.1)	(17.2)	(16.8)	
	T	30.9	26.0	16.3	12.9	8.0	-132
		33.3	26.9	19.5	14.6	7.3	
26.8		17.9	24.2	11.2	8.6		
(30.3)		(23.6)	(20.0)	(12.9)	(8.0)		

() Average

ため①C_{eq}とくにC量の低減, ②REM-Ti処理, ③低N化, さらに安定したじん性値を得ることを目的に, ④適量Niの添加を行っている。なおNiは鋼板母材部の強度, じん性の向上にも寄与している。

このような基本的な化学成分設計に加えて, 脆性き裂の起点となる非金属介在物の減少および鋼板材質異方性の一層の改善のため低Pおよび低S化を図っている。

3 母材特性

3.1 引張特性

Table 2にL, T, Z各方向の引張試験結果を示す。MACS材はC_{eq}が低いにもかかわらずYP38~40 kgf/mm², TS51~54 kgf/mm²の値を示し, かつZ方向の絞り値も77%以上あって耐ラメラティア材としても十分なものであることが分る。

3.2 シャルピー衝撃特性

Table 3に32mm板厚1/4部のシャルピー衝撃試験結果を示す。MACS材の-60°Cでの圧延方向および圧延直角方向の吸収エネルギーは26から32 kgf·mの高い値を示し, 破面遷移温度($\sqrt{vT_{rs}}$)も-110°C以下である。また, 板厚中心部でのシャルピー衝撃特性の例をFig. 1に示す。吸収エネルギーおよび $\sqrt{vT_{rs}}$ ともに板厚1/4部と同等の値を示す。Fig. 1の中には比較材としてKTR材の結果を併記してあるが, KTR材の $\sqrt{vT_{rs}}$ はMACSより低くなっている。これはKTR材にセパレーションが多く発生していることによるものと考えられる。

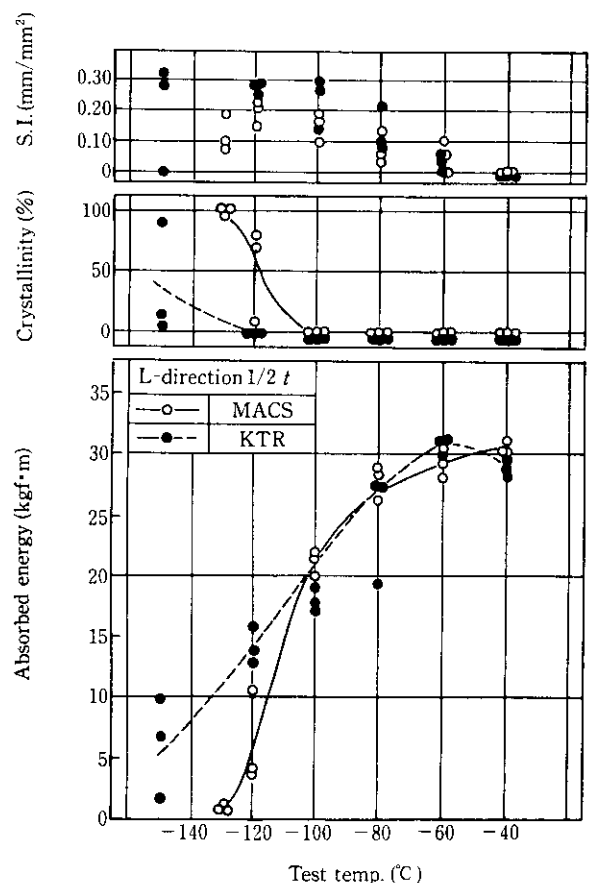


Fig. 1 Transition curves of charpy impact test on the specimens taken in the thickness direction from the middle of a 32 mm thick plate

4 母材部破壊じん性

4.1 脆性破壊発生特性

32 mm 全厚の COD 試験結果を Table 4 に、また板厚方向の COD 試験結果を Fig. 2 に示す。MACS 材、KTR 材とも -60°C の温度での限界 COD 値は L, T 方向で 1.4 mm 以上である。板厚方向 (Z 方向) の δ_c 値も -60°C で 0.25 mm 以上である。

4.2 脆性き裂伝播停止特性 (ESSO 試験)

Fig. 3 に ESSO 試験で得られた T 方向の脆性き裂伝播停止特性 K_{ca} 値の温度依存性を示す。セパレーション指数が大きく $\sqrt{T_{rs}}$ の低い KTR 材の方が MACS 材よりは低温側にあるが、MACS 材でも -60°C の K_{ca} 値は $620 \text{ kgf/mm}^{3/2}$ であり、脆性き裂伝播停止板として十分な性能を有している⁴⁾。

Table 4 Results of three point bending test

Process	Direction	Temp. ($^{\circ}\text{C}$)	Critical COD (mm)	
MACS (ACC)	L	-40	2.039,	1.752
		-60	1.630,	1.666
		-80	1.690,	1.667
	T	-40	1.509,	1.618
		-60	1.391,	1.413
		-80	1.378,	1.157
KTR	L	-40	2.215,	2.437
		-60	2.058,	2.346
		-80	2.115,	2.225
	T	-40	2.122,	1.355
		-60	2.072,	1.658
		-80	1.467,	1.419

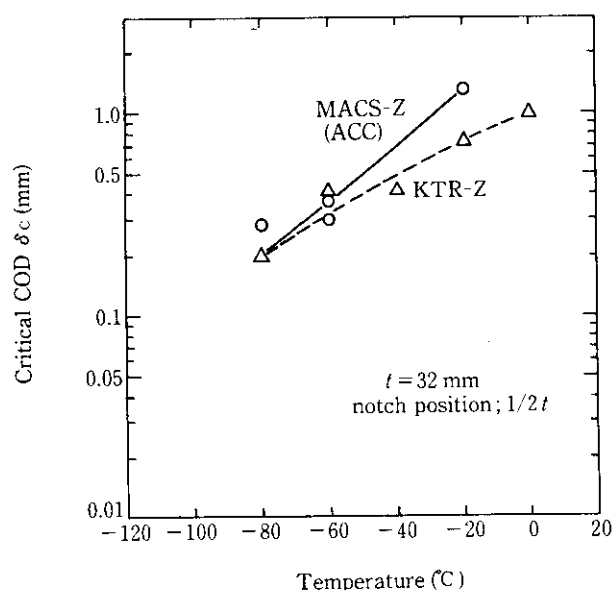


Fig. 2 Results of three point bending test in through thickness direction

5 溶接低温割れ感受性

JIS Z 3158 の斜め y 型拘束割れ試験の結果を Table 5 に示す。表

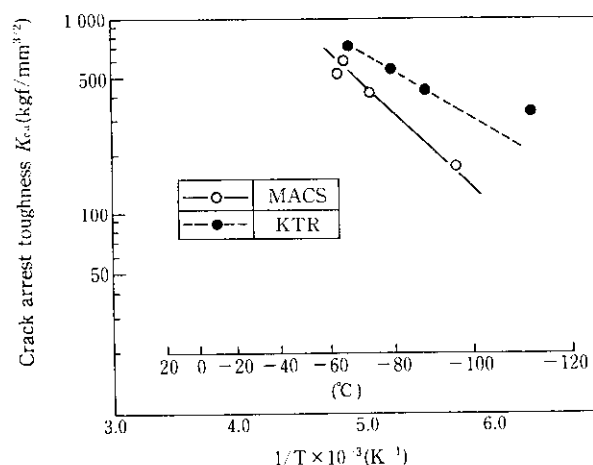


Fig. 3 Results of ESSO test for crack arrest toughness

Table 5 Results of y-groove restraint cracking test for steel plates produced by MACS process

Preheating temp. for crack prevention ($^{\circ}\text{C}$)		
Surface	Sectional	Root
<0	<0	<0

Table 6 Welding method for high heat input welding

Welding	Heat input (kJ/cm)		Groove Design
One side two pass SAW	1 pass	120	
	2 pass	95	
Each side one pass SAW	B.S.	85	
	F.S.	110	

面、断面およびルート割れの阻止温度は、 0°C 未満である。また、試験体温度 0°C における小入熱上向き隅肉溶接 および水平隅肉溶接試験でも鋼板そのものに起因する割れは一切認められず良好な溶接低温割れ感受性を示した。

6 溶接部基本特性

6.1 溶接条件

Table 6 に片面 SAW と両面 SAW の溶接条件を示す。いずれの溶接も入熱量は 100 kJ/cm の大入熱溶接で行った。

6.2 溶接継手部強度

NKU 2A 号試験片による継手部引張試験結果を Table 7 に示す。破断位置はいずれの溶接法においても母材部であり、その引張強さは C_{eq} が 0.33% で 100 kJ/cm の大入熱溶接に対して 54 kgf/mm^2

Table 7 Tensile test results at high heat input welding joint of steel plates produced by MACS process

Welding	TS (kgf/mm ²)	Fracture location
One side two pass	54.9	BM
Each side one pass	55.8	BM
	55.7	BM

BM: Base metal

Table 8 Results of charpy impact test at high heat input welding joint of steel plates produced by MACS process

Welding method	Notch location		Absorbed energy at -60°C (kgf·m)	vT_{rs} (°C)
One side two pass SAW	Sub- surface	WM	11.4	-71
		Bond	14.7	-81
		HAZ 2	10.8	-82
	$\frac{1}{2}t$	WM	7.0	-56
		Bond	19.5	-60
		HAZ 2	17.5	-66
Each side one pass SAW	Sub- surface	WM	18.7	-85
		Bond	9.1	-60
		HAZ 2	24.4	-71
	$\frac{1}{2}t$	WM	20.6	-87
		Bond	17.4	-86
		HAZ 2	22.0	-89

以上と母材部と同等の強度を示す。

6.3 溶接継手部シャルピー衝撃特性

溶接最終層 (FS) の表面から 2 mm (約 $1/4t$) および $1/2t$ から試験片を採取してシャルピー衝撃試験を行った結果を **Table 8** に示す。いずれの溶接法、板厚位置および切欠ノッチ位置とも -60°C の吸収エネルギーは平均 7 kgf·m 以上であり、また **Fig. 4** に示すように -60°C の吸収エネルギーの個々の値も MACS 材については 5 kgf·m 以上となり十分なシャルピー衝撃特性を示す。

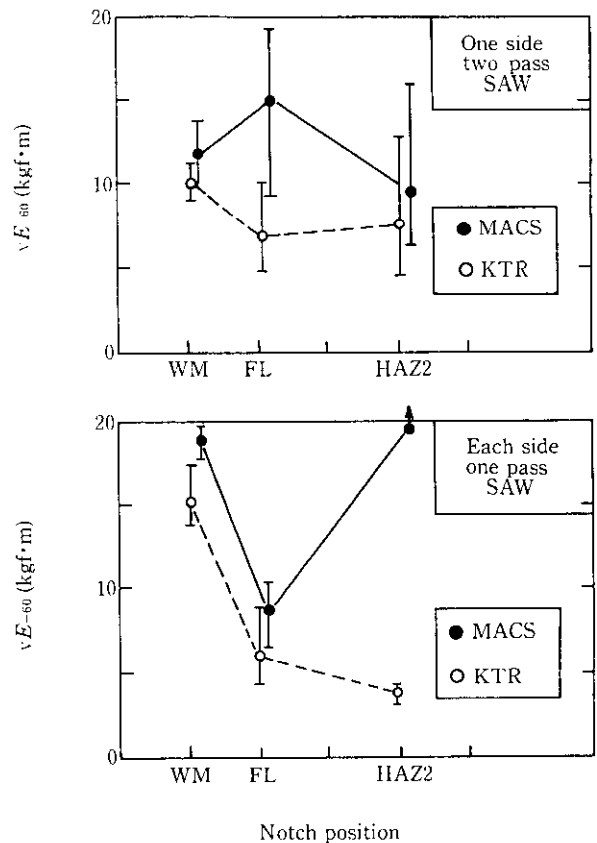
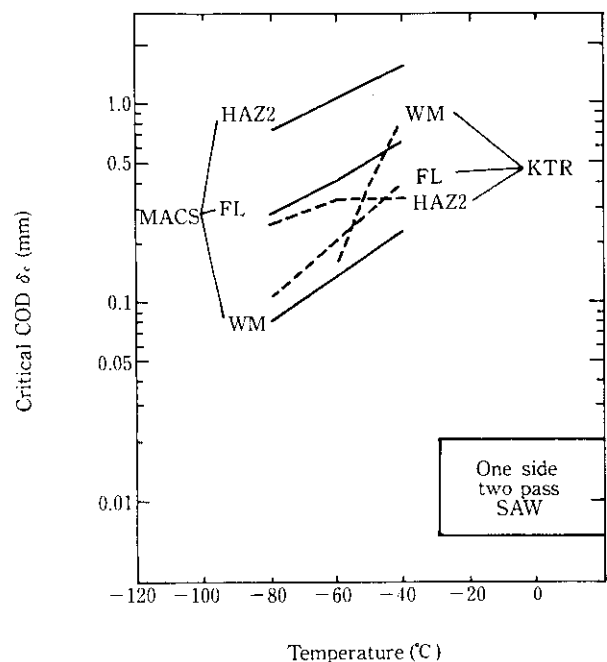
7 溶接継手部破壊じん性

7.1 小型試験による脆性破壊発生特性

Table 6 に示した片面 SAW と両面 SAW による溶接継手部の脆性破壊発生特性について 32 mm 全厚 COD 試験を行った。それらの結果を **Fig. 5** および **Fig. 6** にそれぞれ示す。MACS 材の FL, HAZ 部はいずれの溶接法とも -60°C において、限界 COD 値が 0.35 mm 以上の値を示す。

7.2 大型試験による脆性破壊発生特性

片面 SAW と両面 SAW による溶接部について残留応力を多層

**Fig. 4** Results of charpy impact test at high heat input welding joint**Fig. 5** Results of three point bending test at one side two pass SAW high heat input welding joint

SAW で付加し、それぞれの溶接ボンド部に 64 mm の板厚貫通切欠 (0.2 mm 先端ノッチ) をそう入した大型十字継手引張試験を行った。結果を **Table 9** に示す。角変形のついたきびしい条件における -60°C での破壊応力は gross 応力で 36 kgf/mm² 以上であ

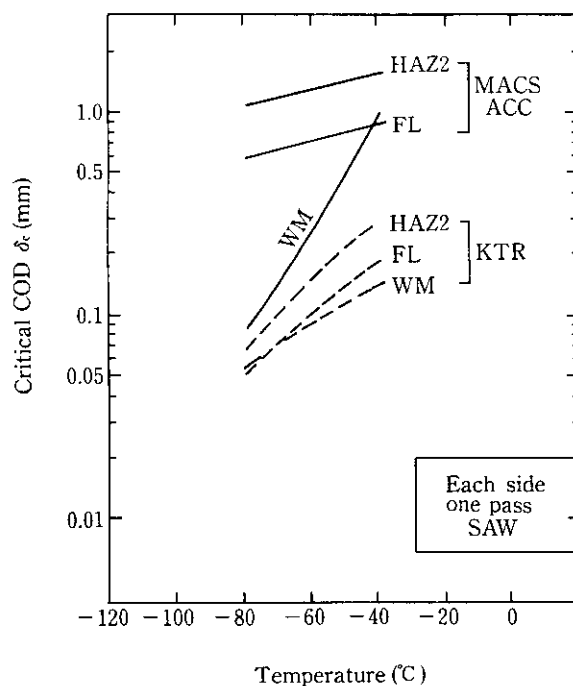
Table 9 Results of wide width center-notched tensile test under residual stress for brittle fracture initiation

Process	Welding method	Angular distortion (mm)	Fracture stress (kgf/mm ²)		Fracture toughness K_{IC} (kgf/mm ^{3/2})
			Gross stress	Net stress	
MACS (ACC)	Each side one pass SAW	3.9 2.3	39.6 40.8	44.4 45.8	402 414
	One side two pass SAW	2.1 4.5	41.8 43.8	46.8 49.1	424 445
KTR	Each side one pass SAW	9.2 10.2	41.5 40.3	46.6 45.2	421 410
	One side two pass SAW	5.9 5.3	40.1 45.9	45.4 51.5	422 466

り、母材と同等の性能を有する。

8 結 言

氷海域構造用鋼材として MACS で製造した低 C 系の 32 mm 厚 YP 36 kgf/mm² 級鋼板の母材および大入熱溶接継手部の特性を調査した。その結果、本鋼材は予熱なしに溶接施工でき、また -60°C の低温でも母材および溶接入熱量 100 kJ/cm の大入熱溶接

**Fig. 6** Results of three point bending test at each side one pass SAW high heat input welding joint

継手部とも脆性破壊発生特性的、き裂伝播停止特性的に安全側にあることを確認した。今回の結果からも MACS 製造法は、低温貯蔵タンクやさらに厚物の極地向低温用鋼への適用拡大が期待できる。

参 考 文 献

- 1) 志賀千晃, 波戸村太根生, 工藤純一, 鎌田晃郎, 広瀬圭介, 関根稔弘: 「極寒冷地向け高張力大径ラインパイプの開発」, 川崎製鉄技報, **13** (1981) 1, 106
- 2) 志賀千晃, 波戸村太根生, 天野康一, 横並領一: 「制御圧延後の冷却速度および冷却停止温度が材質特性におよぼす影響」, 鉄と鋼, **68** (1982) 10, A 227
- 3) 齊藤良行, 木村 求, 田中康浩, 関根稔弘, 坪田一哉, 田中智夫: 「厚板圧延における変形抵抗を利用した組織と材質制御」, 川崎製鉄技報, **15** (1983) 4, 241
- 4) 永元, 牛島, 川村, 矢島, 多田: 「新制御圧延型 50 キロ級高張力鋼板の破壊靱性とその評価」, 日本造船学会論文集, (1982) 152, 405