

制御冷却による船体構造用 YP 36 kgf/mm² 級 高張力鋼板の材質特性^{*1}

川崎製鉄技報
17 (1985) 1, 60-67

三宮 好史^{*2} 西崎 宏^{*3} 永井 潤^{*4} 志賀 千晃^{*5} 寺嶋 久栄^{*6} 関根 稔弘^{*7}

Properties of YP 36 kgf/mm² Class Hull Structural Steel Plates Produced by Accelerated Control Cooling Process

Yoshifumi Sannomiya, Hiroshi Nishizaki, Jun Nagai, Chiaki Shiga, Hisae Terashima, Toshihiro Sekine

要旨

昭和58年4月に当社水島製鉄所で稼動した多目的制御冷却設備 MACS (Multi-purpose Accelerated Cooling System) を用い、AH, DH および EH 級の制御冷却型船体構造用 YP 36 kgf/mm² 級鋼を製造し、その材質特性を調査した。MACS 材は、従来製法に対し炭素当量を 0.05~0.09% 低減できるため、溶接低温割れ感受性や大入熱溶接継手部じん性および線状加熱後のじん性において従来材(非水冷型)より優れ、また母材強度、破壊じん性、大入熱溶接継手強度および疲労強度でも従来材と同等以上であることが確認できた。これら制御冷却型高張力鋼の優れた特徴を活用することにより、今後船体構造用鋼板の一層の高張力化がはかれるものと期待できる。

Synopsis:

Online thermomechanical controlled cooling system named MACS (Multi-purpose Accelerated Cooling System) was set into operation in April 1983 at No. 2 Plate Mill at Mizushima Works, Kawasaki Steel Corporation. The mechanical properties of YP 36 kgf/mm² (350 MPa) class hull structural steel plates of A, D, and E grades manufactured by the MACS process, have been investigated. The plates, manufactured by the MACS process, having 0.05 to 0.09% lower carbon equivalent than usual, are superior to conventional steel plates in the welding crack and toughness at the heat affected zone of a large heat input welded joint. The values of tensile and fatigue tests both in base metal and in the large heat input welded joint, are satisfactory.

The application of the MACS device to producing higher strength steel with lower C_{eq} will introduce the increase in the amount of higher strength hull structural steel plates based on the superior characteristics of their mechanical properties.

1 緒 言

近年、省エネルギー指向を背景に、船体構造の軽量化に対するニーズが高まり、船体構造用鋼板の高張力化が積極的に進められている¹⁾。しかしながら、鋼板炭素当量 (C_{eq}) の増加による高張力化は加工性や溶接性を損なうため、これらの特性を改善した高張力鋼板の開発が必要不可欠となった。その一つが制御圧延技術である。これにより TS 50 kgf/mm² 級高張力鋼の C_{eq} をたとえば 0.43 から 0.38 あたりまで下げることができたが²⁾、制御圧延での C_{eq} 低減もここまでする限界であった。このため鋼板の高張力化は加工性と溶接性の比較的良好な YP 32 kgf/mm² 級鋼を主体としたものにとどまっていた。

制御冷却技術は、このような背景のもとで、従来の制御圧延よりさらに低い C_{eq} で同一強度を備えた鋼板を製造できるプロセスであり、まさに現在の鋼板ニーズに合致したプロセスであるといえる。制御冷却技術の開発により、軟鋼なみの溶接施工管理で高張力鋼を使用できる可能性が示され、高張力鋼の使用範囲の拡大による量的な需要増大が期待される。さらに質的にも従来の YP 32 kgf/mm² 級を主体としたものから YP 36 kgf/mm² 級主体へと、より一層の

高張力化がはかれることが期待できる。

本報は、水島製鉄所に設置された多目的制御冷却設備 MACS (Multi-purpose Accelerated Cooling System) による制御冷却 ACC (Accelerated Control Cooling) により製造された造船用 YP 36 キロ級高張力鋼板の母材特性、加工性、ならびに大入熱溶接継手部の特性について報告する。

2 供試鋼板

供試鋼には、化学成分と板厚の異なる MACS-ACC 製 YP 36 kgf/mm² 級鋼 8 種を用いた。Table 1 に各供試鋼の化学成分、グレードおよび板厚を示す。鋼 A1 および A2 は AH 36 相当鋼で REM, Ti 添加などの耐大入熱溶接処理を施していない。鋼 B1, B2 および B3 は DH 36 相当鋼で、鋼 C1, C2 および C3 は EH 36 相当鋼で、いずれも REM, Ti 添加による耐大入熱溶接処理を施している。また比較材としては当社の新制御圧延型 (非水冷型) プロセスである KTR (Kawasaki Thermomechanical Rolling) により製造した造船用 YP 36 kgf/mm² 級鋼を用いた。

* 1 昭和59年5月16日原稿受付

* 2 水島製鉄所管理部厚板管理室主査 (課長)

* 3 水島製鉄所管理部厚板管理室

* 4 水島製鉄所管理部部長

* 5 技術研究所第2研究部厚板特殊鋼研究室主任研究員 (課長) 工博

* 6 技術研究所第2研究部溶接研究室主任研究員 (課長)

* 7 水島製鉄所厚板圧延部厚板技術室主査 (部長補)

Table 1 Chemical composition of YP 36 kgf/mm² steels used

Steel	Grade	Thickness (mm)	Chemical composition (wt %)									Remarks
			C	Si	Mn	P	S	Al	N (ppm)	C _{eq} *	P _{cm} **	
A 1	AH36	25	0.15	0.24	1.02	0.016	0.004	0.029	29	0.32	0.21	—
A 2		35										
B 1	DH36	14	0.15	0.25	1.04	0.013	0.003	0.034	23	0.32	0.21	Modified with REM & Ti
B 2		25										
B 3		35										
C 1	EH36	25	0.08	0.26	1.46	0.008	0.001	0.036	40	0.32	0.16	
C 2		35	0.09	0.24	1.48	0.006	0.002	0.023	43	0.34	0.17	
C 3		38	0.08	0.26	1.46	0.008	0.001	0.036	40	0.32	0.16	

$$* C_{eq} = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Cu+Ni}{15} + \frac{Cu+Mo+V}{5} \quad (\%)$$

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

Table 2 Mechanical properties of sample steels

Steel	Grade	Thickness (mm)	Tensile properties			Charpy V notch toughness		
			Direction	YP (kgf/mm ²)	TS (kgf/mm ²)	El (%)	Direction	vE _θ * (kgf·m)
A 1	AH36	25	T	38	52	27	L	27.0
A 2	AH36	35	T	39	55	28	T	22.1
B 1	DH36	14	T	39	53	26	L	25.3
B 2	DH36	25	T	39	53	24	T	24.9
B 3	DH36	35	T	42	55	24	L	25.2
C 1	EH36	25	T	40	55	21	T	18.8
C 2	EH36	35	T	41	55	20	L	22.4
C 3	EH36	38	T	38	56	24	T	19.6
							L	24.5
							T	21.9
							L	27.4
							T	21.6
							L	29.8
							T	26.5
							L	28.7
							T	24.2

* θ: Test temperature, AH36: 0°C, DH36: -20°C, EH36: -40°C

3 母材特性

3.1 母材基本特性

Table 2 に供試各鋼の母材引張試験結果および 2mmV ノッチシャルビー衝撃試験結果を示す。

母材強度はいずれも YP 36 kgf/mm² 以上, TS 50 kgf/mm² 以上を十分に満足しており, 強度に関しては MACS-ACC 製 YP 36 kgf/mm² 級鋼 (以下 MACS 材と略す) は従来の制御圧延型 YP 36 kgf/mm² 級鋼 (以下従来材と略す) と同等のレベルを確保している。また母材じん性もそれぞれ規定された試験温度での規格値 (3.5 kgf·m) を十分に満足している。特に AH 鋼と DH 鋼の 50% FATT は, 制御圧延によるフェライト粒の細粒化と圧延後の急速冷却によるフェライト粒成長抑制の相乗効果により, L 方向, T 方向ともに -40°C 以下で, 従来鋼のレベル (-10~-30°C) と比較して優れている。Fig. 1 には供試鋼の板厚方向のじん性変化を 50% FATT の値で表面下 1mm と 1/2t 部と比較した。1/2t 部では表面下 1mm に対して若干の劣化が認められるもののそれらのじん性

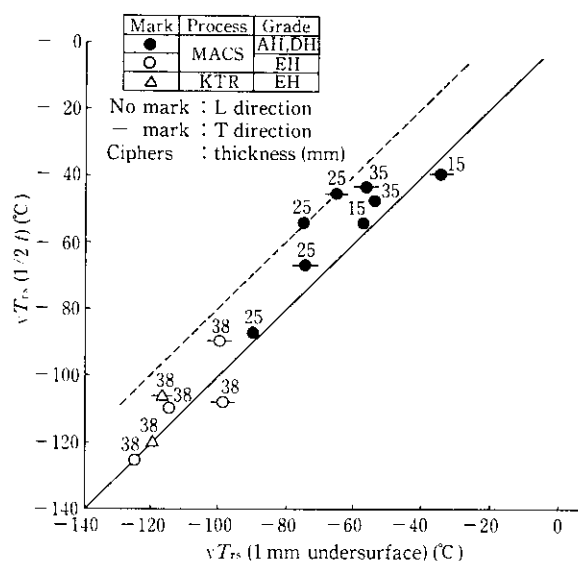


Fig. 1 Relation between vT_{rs} (1/2 t) and vT_{rs} (1 mm under surface)

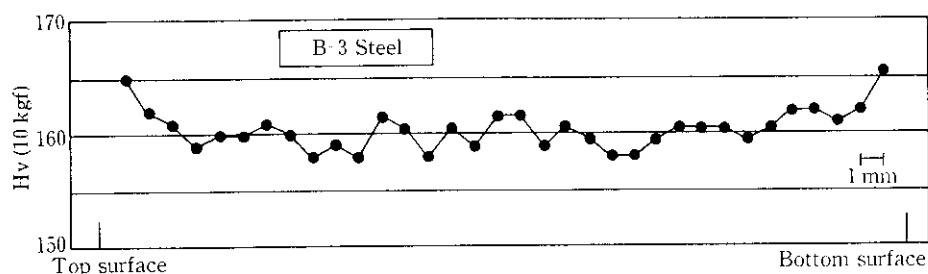
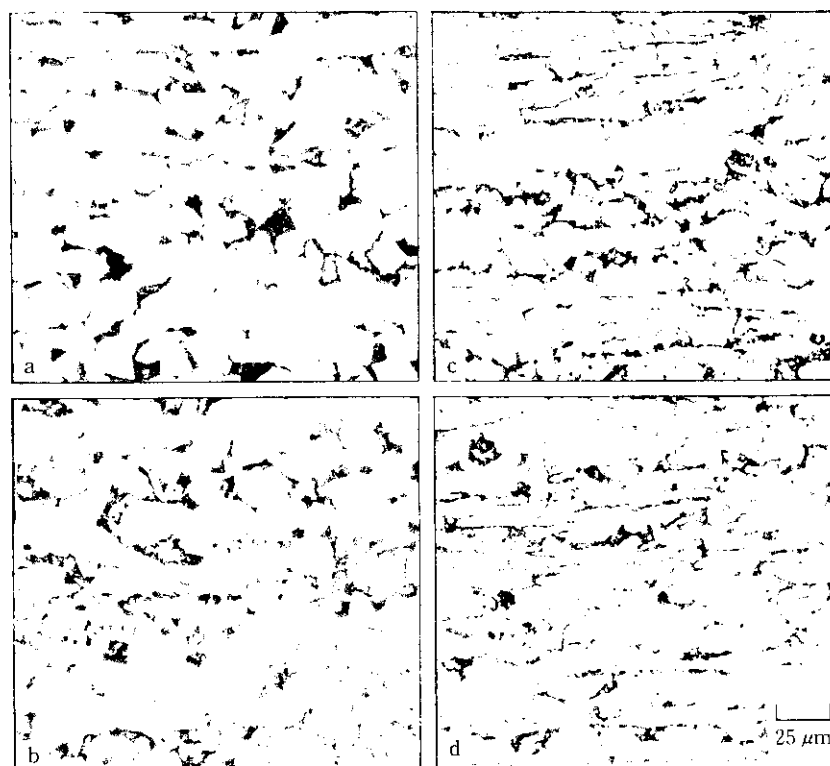


Fig. 2 Distribution of vickers hardness, Hv (10 kgf), on through-thickness direction



a: B2 steel, 1/4 t c: C1 steel, 1/4 t
b: B2 steel, 1/2 t d: C1 steel, 1/2 t

Photo 1 Microstructures of B2 steel (DH36, $t=25$ mm) and C1 steel (EH36, $t=25$ mm)

差は 20°C 以内である。

Fig. 2 には供試鋼の板厚方向硬度分布 (断面硬さ) の代表例として供試鋼 B3 (DH 36, 35 mm 厚) の測定値を示す。Hv (10 kg 荷重) 硬さ変化は最大で 10 以内である。これは圧延後半での制御圧延で表層部は板厚中心部よりも細粒化され、これが水冷による硬化性を低下させているためと考えられる。この現象が MACS 材の板厚方向の均質性を保つ一つの特徴といえる。

Photo 1 には供試鋼 B2 と C1 の光学顕微鏡組織を示す。制御圧延型の従来材にみられるフェライトとパーライトの層状組織は観察されず、それに代って微細なポリゴナルフェライトとパーライト、パーライトの混合組織が得られている³⁾。

3.2 溶接低温割れ感受性

Fig. 3 に溶接部最高硬さ試験結果を、Fig. 4 には斜め Y 型拘束割れ試験結果を示す。MACS 材の溶接最高硬さは、炭素当量の低減に相応してビード長さ 50 mm でも Hv 260 以下であり、実施工での仮付けの際にショートビードを置いてもその安全性が従来材よりも高いことをうかがわせる⁴⁾。

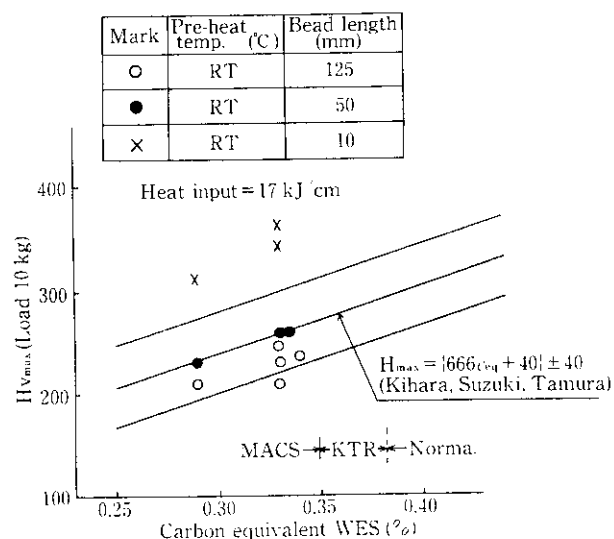
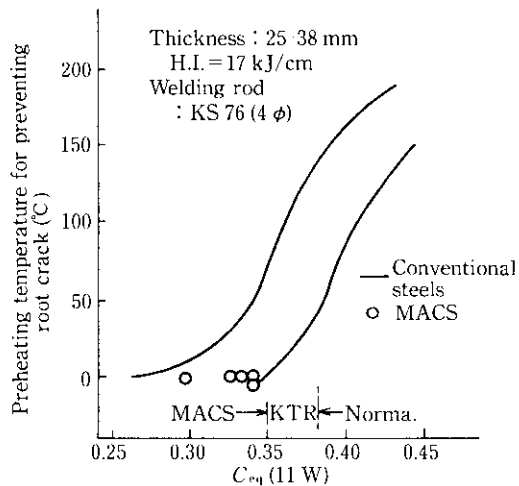


Fig. 3 Relation between maximum vickers hardness and carbon equivalent of MACS YP 36 kgf/mm² grade steels (plate thickness: 25–38 mm)

Table 3 Fracture toughness of base metal

Grade	Steel	Thick. (mm)	Longitudinal				Through thickness		
			COD		Deepnotch $K_{IC}=200$ (°C)	ESSO $K_{ICn}=600$ (°C)	COD		Deepnotch $K_{IC}=200$ (°C)
			$\delta_c=0.1$ (°C)	$\delta_c=0.2$ (°C)			$\delta_c=0.1$ (°C)	$\delta_c=0.2$ (°C)	
AH36	A 1	25	< -100	-100	—	—	-87	-72	—
	A 2	35	-55	-40	—	—	-81	-54	—
DH36	B 2	25	-71	-73	-158	-1	-64	-47	—
	B 3	35	-84	-62	-150	—	—	—	—
EH36	C 3	38	-107	-99	-145	-48	-75	-51	-112

Fig. 4 Relation between C_{eq} and preheating temperature for preventing root crack in y-groove restriction cracking test

また斜め Y 型拘束割れ試験でも低炭素当量化の効果は顕著であり、断面割れ阻止予熱温度はいずれの鋼種も 0°C 以下である。この良好な低温割れ感受性は、施工管理の簡素化ばかりか、施工条件によっては従来の低炭素系溶接棒に代って非低炭素系棒の使用の可能性をも示唆するものである。

3.3 破壊じん性

供試鋼の母材破壊じん性に関し、COD 試験、中央切欠中形引張試験および ESSO 試験を行った。その結果を Table 3 にまとめて示す。

3.3.1 脆性破壊発生特性

供試鋼 A1, A2, B2, B3 および C3 について、L 方向および板厚方向 (Z 方向) の母材 COD 試験を行った。結果は Table 3 に示すように、限界 COD 値 (δ_c 値) が 0.2 mm となる試験温度は AH, DH 級鋼 (A1, A2, B2, B3 鋼) の L 方向で -40~-100°C, Z 方向で -47~-72°C, また EH 級鋼 (C3 鋼) では L 方向で -99°C, Z 方向で -51°C と使用温度に対して十分安全側にある。Fig. 5 と 6 には MACS 材の母材 L, T および Z 方向の δ_c 値の温度依存性を供試鋼 A1, C3 について、また Fig. 7 には中央切欠付広幅引張試験での破壊じん性値 K_{IC} の温度依存性を供試鋼 B2 および C3 について示す。 δ_c 値は、A1 鋼, C3 鋼とも L, T, Z 方向で -40°C でも 0.3 mm 以上を示し、また K_{IC} 値が 200 kgf/mm^{3/2} を示す温度

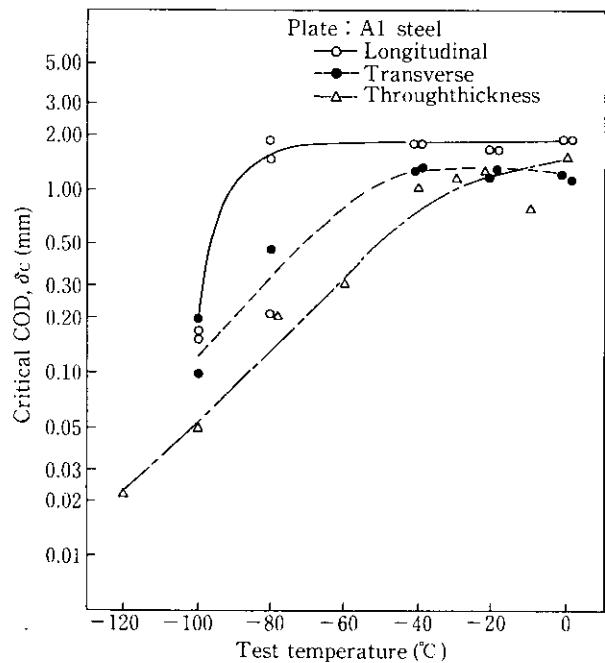


Fig. 5 Results of COD test (A1 steel: AH36, 25 mm)

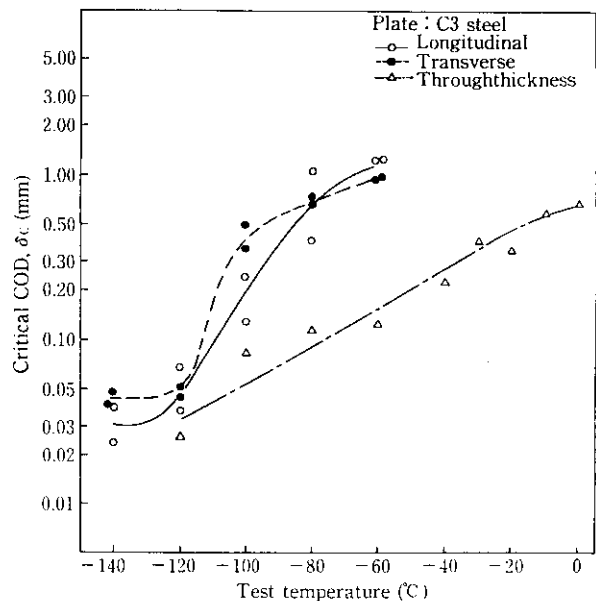


Fig. 6 Results of COD test (C3 steel: EH36, 38 mm)

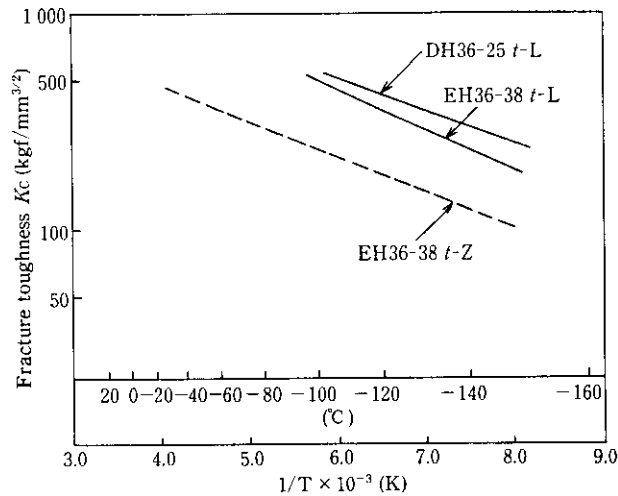


Fig. 7 Relation between fracture toughness K_c and test temperature of B2 (DH36: 25 mm) and C3 (EH36: 38 mm) steels

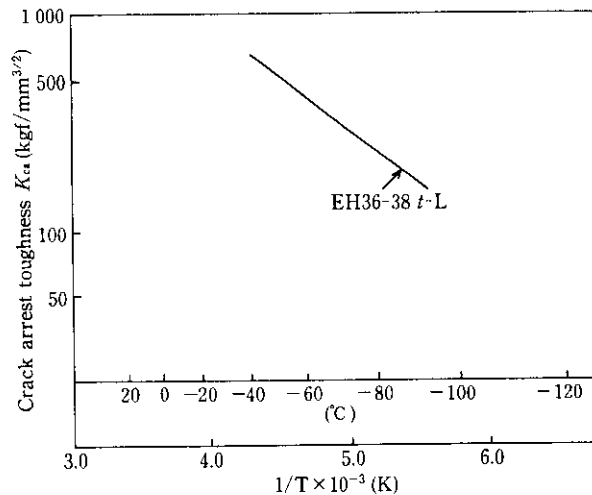


Fig. 8 Relation between crack arrest toughness K_{ca} and test temperature of C3 steel (EH36, 38 mm)

は C3 鋼の Z 方向でも -100°C 以下と脆性破壊発生特性的には十分安全側にある。

3.3.2 脆性亀裂伝ば停止特性

Fig. 8 は供試鋼 C3 について ESSO 試験で求めた破壊じん性値 K_{ca} の温度依存性を示す。 $K_{ca}=600\text{ kgf/mm}^{3/2}$ となる温度は -48°C で、脆性亀裂伝ば停止特性的にも十分に安全側にある。

4 溶接継手性能

制御冷却プロセス適用の目的の一つに、鋼材の大入熱継手部じん性の改善が挙げられる。MACS 材では、その炭素当量低減効果により、大入熱溶接継手部のじん性改善および溶接能率の向上が期待できるが、一方では溶接継手部の軟化や疲労強度の低下などが懸念される^{2,5)}。これらを確認すべく、MACS 材を用いて種々の大入熱溶接継手を製作し、その諸特性を調査した。

4.1 溶接条件

溶接法としては、片側一層盛サブマージアーク溶接 (FCB)、エレクトロガス溶接 (EGW) およびエレクトロスラグ溶接 (CESW) を

Table 4 Welding conditions

Welding method	Steel	Groove Design	Pass No.	H. I. (kJ/cm)
EGW	A-1 AH36		1	165
CESW	A-2 AH36		1	637
SAW (FCB)	B-2 DH-36		1	139
	B-3 DH-36		1	265 270
	C-3 EH36			

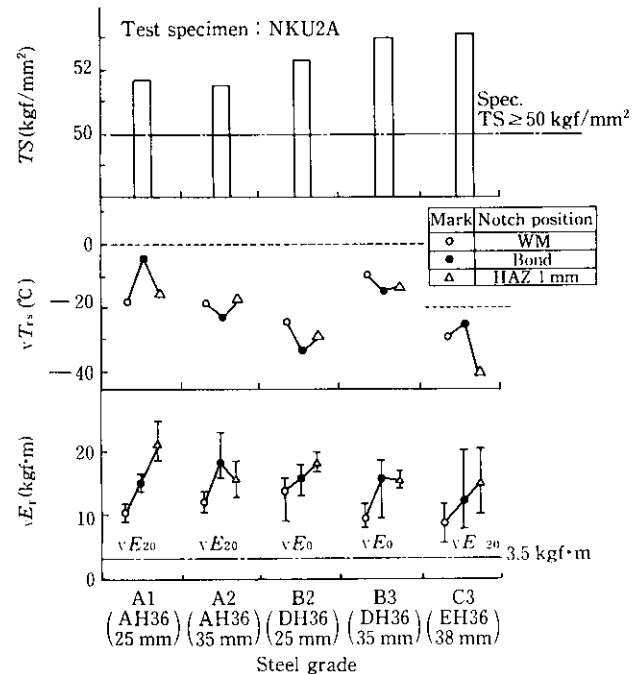


Fig. 9 Mechanical properties of weld joints

用いた。Table 4 に溶接条件と対象鋼種を示す。

4.2 溶接継手部基本特性

Fig. 9 に各溶接継手部の引張試験および 2mmV ノッチシャルピー衝撃試験結果を示す。NKU 2A 号試験片での継手引張試験では各鋼とも規格を十分に満足した。また、シャルピー衝撃試験結果も各要求温度で規格値を十分に満足している。Fig. 10 には C3 鋼 (EH36) の継手各位置の 2mmV ノッチシャルピー衝撃試験の遷移曲線を示す。

Fig. 11 は、MACS 材の大入熱溶接継手部溶接部シャルピー吸収エネルギーを溶接入熱量で整理し、従来材と比較したものである。MACS 材の吸収エネルギーは従来材の吸収エネルギーばらつき範

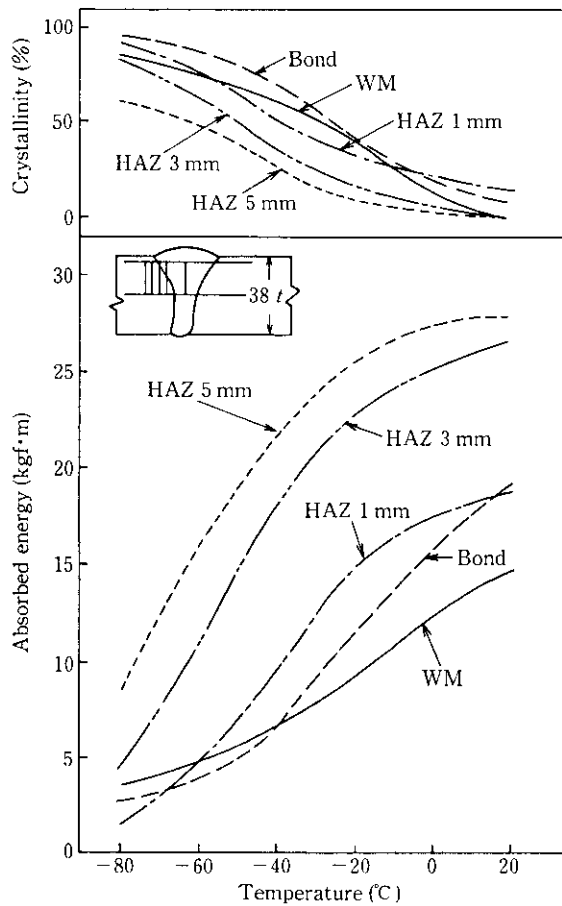


Fig. 10 Charpy impact properties of weld joint (C3 steel: EH 36, 38 mm FCB)

図の上側に位置し、 C_{eq} 低減の効果が認められる。

4.3 溶接継手部破壊じん性

Table 5 は溶接継手のじん性および脆性破壊発生特性を調査するために、各継手のボンド部と HAZ 3 mm でシャルピー衝撃試験、COD 試験および中央切欠付中形引張試験を実施した結果をまとめたものである。条件の最も厳しい溶接ボンド部での限界 COD 値が 0.1 mm を示す温度は、AH 36 で -15°C 、DH 36 で -48°C および -50°C 、EH 36 で -63°C と良好である。また中央切欠付中形引張試験でのボンド部の K_{IC} 値 ($\text{kgf}/\text{mm}^{3/2}$) が 400 を示す温度も DH 36 で -23°C 、EH 36 で -32°C と、各鋼種とも大入熱溶接継手のボンド部のじん性は、脆性破壊発生特性的に十分に安全側にある。Fig. 12 には、継手部限界 COD 値の温度依存性の代表

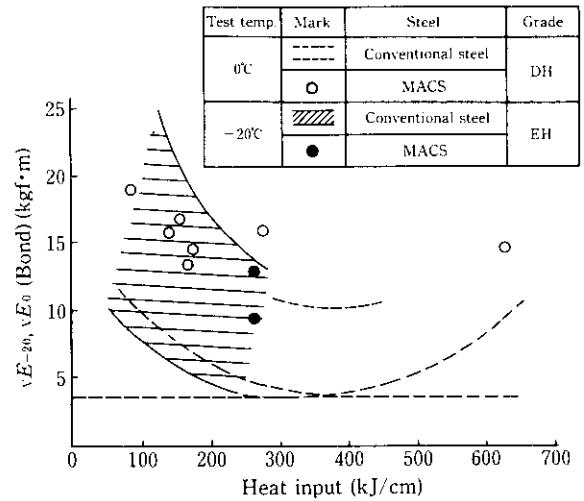


Fig. 11 Relation between vE_0 (Bond) and heat input value

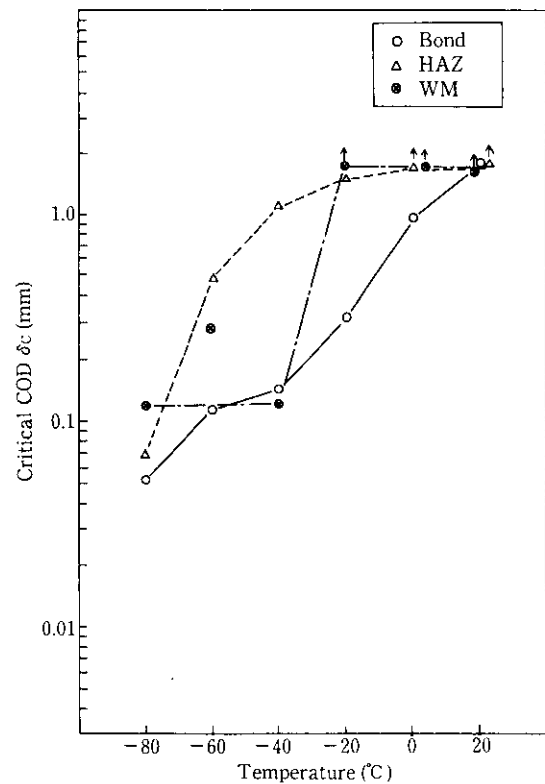


Fig. 12 Results of COD test of weld joint (C3 steel: EH36, 38 mm, FCB)

Table 5 Fracture toughness of weld joints

Grade	Steel	Thick. (mm)	Welding method (H.I. kJ/cm)	Bond				HAZ 3 mm		
				vT_{rs} (°C)	COD		Deep notch $K_{IC}=400$ (°C)	vT_{rs} (°C)	COD	
					$\delta_c=0.1$ (°C)	$\delta_c=0.2$ (°C)			$\delta_c=0.1$ (°C)	$\delta_c=0.2$ (°C)
AH36	A-1	25	EGW (165)	-6	-15	8	-5	-15	-80	-73
DH36	B-2	25	FCB (139)	-34	-48	-33	-23	-40	-52	-41
	B-3	35	FCB (270)	-15	-50	-37	—	-25	-59	-47
EH36	C-3	38	FCB (265)	-26	-63	-31	-32	-51	-75	-69

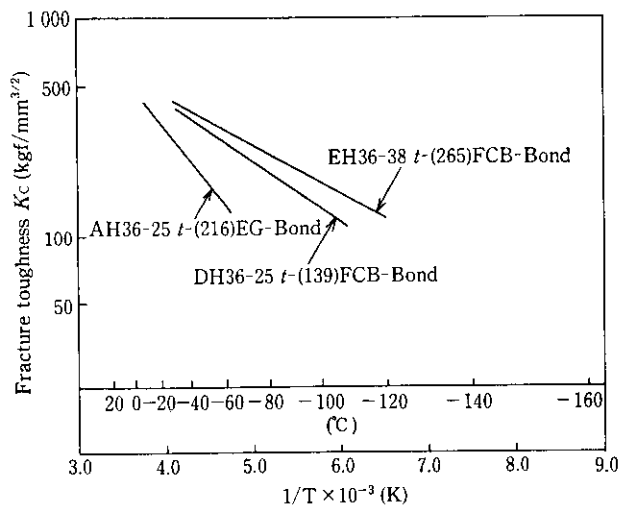


Fig. 13 Relation between fracture toughness K_{IC} and test temperature of weld joint

(A1 steel: AH36, 25 mm EGW)

(B2 steel: DH36, 25 mm FCB)

(C3 steel: EH36, 38 mm FCB)

例として C3 鋼のデータを、また Fig. 13 には継手ボンド部の K_{IC} 値の温度依存性を供試各鋼について示す。

4.4 溶接継手部疲労強度

Fig. 14 に B3 鋼 (AH 36, 35 mm 厚) で入熱 489 kJ/cm の CES 溶接を行った継手部および母材の疲労試験結果を示す。比較データとしては金属材料研究所の 50 kgf/mm² 鋼継手部疲労データを用いた。MACS 材の疲労強度は、母材部では比較データ (非水冷型 SM 50 B) とほぼ同等で、溶接継手部では比較材の疲労強度ばらつき範囲内のほぼ上限に位置しており、MACS 材は継手疲労強度に関しても従来材と同等の特性を維持していると判断できる。

5 加工性

MACS 材の加工性を調査するために、一般的な予歪時効試験に

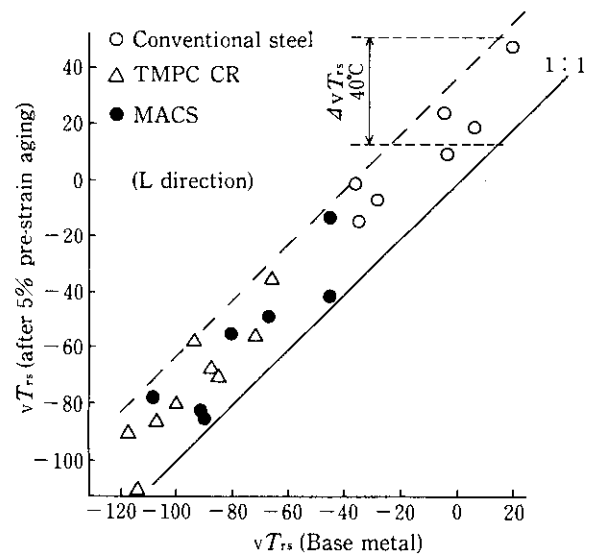


Fig. 15 Relation between vT_{rs} of base metals before and after 5% pre-strain aging treatment (250°C×0.5~1 h)

加えて、造船材で実施される成形加工用線状加熱がじん性に及ぼす影響を調査した。

Fig. 15 に母材の 5% 予歪時効 (250°C×0.5~1 h) による破面遷移温度の上昇を従来材と比較して示した。予歪時効によるじん性の劣化の程度は、従来材も MACS 材もともに破面遷移温度で 0°~40°C の範囲にあり、同等である。

また Fig. 16 には線状加熱後のシャルピー吸収エネルギーを炭素当量で整理して示した。加熱冷却条件としては JSQS (日本鋼船工作法研究委員会) で規定されている 900°C 加熱後 500°C まで空冷した後に水冷する方法と 900°C 加熱直後から水冷する方法を選んだ。MACS 材は低 C_{eq} 化の効果により、いずれの方法でも従来材を上回る値を示し、特に 900°C 加熱直後に水冷する方法でも母材じん性値を十分に満足することから、実施工での作業能率の向上が期待できる⁹⁾。

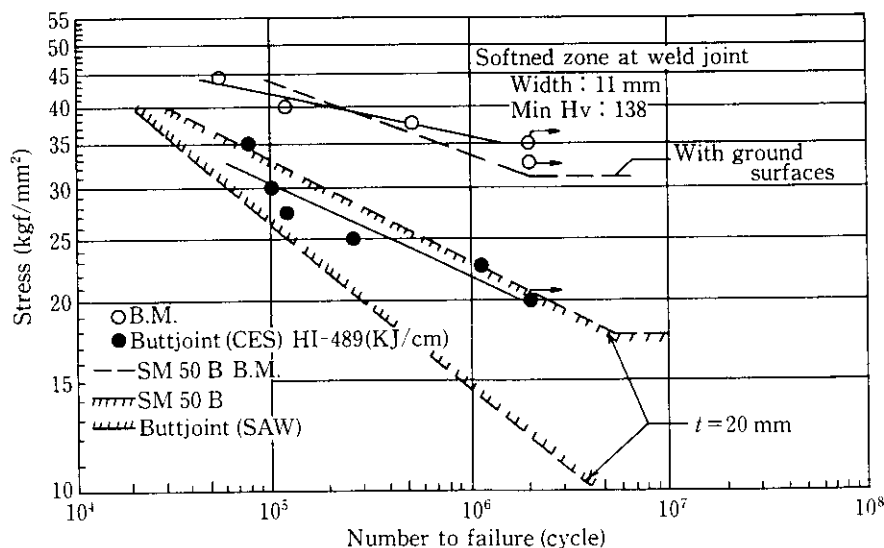


Fig. 14 Fatigue test results of base metal and weld joint of B3 steel (AH36, 35 mm)

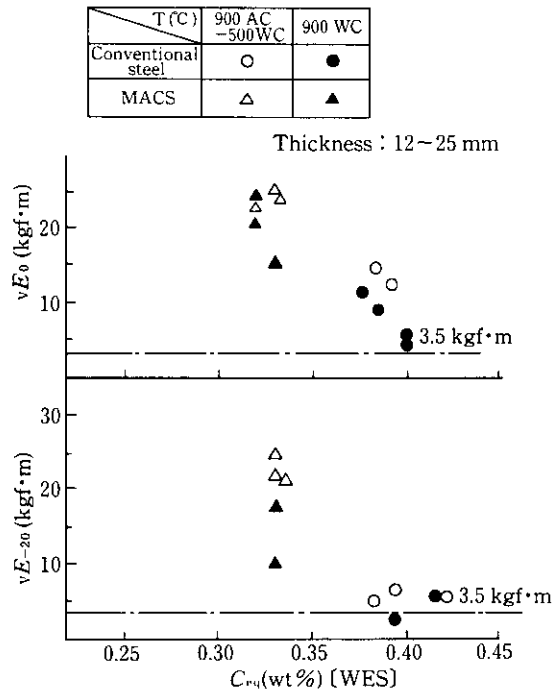


Fig. 16 Relation between C_{eq} WES and absorbed energy after flame heating (Grade: AH, DH)

6 製造実績

MACS による船体構造用高張力厚鋼板の生産量は、昭和 58 年 7

Table 6 Output of hull structural steel plate produced by MACS-ACC from Aug. '83 to Mar. '84

(t)			
Grade	YP 32 kgf/mm ²	YP 36 kgf/mm ²	Total
AH, DH	143 150	19 386	162 536
EH	868	3 703	4 571
Total	144 018	23 089	167 107

月の工程生産開始から 60 年 2 月末までで計 160 000 t を超え、現在では月産 10 000~20 000 t レベルの生産を実施している。Table 6 には 58 年 7 月から 60 年 2 月までの製造実績の鋼板グレード別内訳を示す。

MACS 製船体構造用高張力鋼に関しては、本報で紹介した諸特性の他にも、低温仕様に代表される特殊用途での性能改善および 100 mm を超える極厚材の性能改善を継続して実施しており⁷⁾、今後これらの成果により、一層の用途の拡大がはかられ、生産量もさらに増加してゆくものと期待している。

7 結 言

当社水島製鉄所で昭和 58 年 4 月に稼動した MACS プロセスにより製造した船体構造用高張力鋼板の材質特性を紹介した。

MACS プロセスの適用により、溶接低温割れ感受性および大入熱溶接継手性能の優れた高張力厚鋼板の製造が可能となり、今後実施工面での能率向上、施工管理の簡素化、高張力鋼の使用範囲の拡大等が期待できる。

参 考 文 献

- 1) 山田桑太郎, 矢島 浩, 安田健二: 「最近の船体用高張力鋼の使用についての動向 (その 1)」, 日本造船学会誌, (1982), No. 639, 452
- 2) 志賀千晃: 「造船用高張力鋼, TMCP による鋼板の特性上の問題と課題」, TMCP 鋼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), 117-147
- 3) 志賀千晃, 波戸村太根生, 天野虔一, 榎並禎一: 「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及ぼす影響」, 鉄と鋼, 68 (1982) 12, A 227
- 4) 日本造船研究協会第 193 研究部会: 第 2 分科会報告書, (1984)
- 5) 高嶋修嗣: 「大入熱対策鋼」, TMCP 鋼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), 93-115
- 6) 山田桑太郎: 「HT 材の船体構造への適用例と工作上的課題」, TMCP 鋼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), 253-277
- 7) 楠原祐司, 小林英司, 大西史博, 平井征夫, 天野虔一, 垂井 稔: 川崎製鉄技報, 17 (1985) 1, p. 68-72