

(解説)

# 大型コンテナ船用大入熱溶接型 YP355 ~ 460MPa 級鋼板及び溶接材料

岡野重雄\*・小林洋一郎\*・柴田光明\*・塩飽豊明\*\*・長谷 薫\*\*\*・笹倉秀司\*\*\*

\*鉄鋼部門・加古川製鉄所・技術研究センター \*\*鉄鋼部門・厚板商品技術部 \*\*\*溶接カンパニー・技術開発部

## 355-460 MPa Yield Point Steel Plates and Welding Consumables for Large Heat-input Welding for Giant Container Ships

Shigeo Okano・Yoichiro Kobayashi・Mitsuaki Shibata・Toyoaki Shiwaku・Kaoru Nagatani・Shyuji Sasakura

In order to respond to the trend towards container ship enlargement, high strength steel plates with YP 355 to 460, up to 65 mm thickness, and corresponding welding materials have been developed which ensure HAZ toughness for high heat-input welding (for example 50 kJ/mm SEGARC welding). The chemical compositions of these materials are of the low  $C_{eq}$  type, and utilize small amounts of Ti. They have the potential to contribute to the increased efficiency of giant container ship fabrication.

まえがき = 1990 年代後半の東アジア諸国の経済発展やアメリカの好景気持続により、世界的に海上荷動き量が増加し、特にコンテナ貨物が急増してきた。それにとともに、コンテナ船は大型化し、1994 年まではパナマックス型（パナマ運河通行可能）の 4 400TEU（Twenty feet Equivalent Unit : 20 フィートコンテナ換算個数）程度までの大きさだったものが、90 年代後半にはオーバパナマックス型の 6 000TEU 以上の大型コンテナ船が出現し、荷動きの効率化を競ってきた。さらに現在、8 000TEU から 10 000TEU を越える超大型コンテナ船の開発が進められている<sup>1)2)</sup>。

コンテナ船では、コンテナの積下ろしのために船の上甲板部が開口し、船倉内に仕切壁がないこと、輸送の迅速性から航行速度が速い（25 ノット程度）ことが大前提となっており、使用される鋼板は高強度かつ厚肉であることが大きな特徴である。具体的には VLCC（大型タンカ）における使用鋼板は YP315MPa 級軟鋼の板厚 20mm 以下が主体であるのに対し、大型コンテナ船の最も応力のかかる部位では、YP355、390MPa 級の板厚 50 mm 以上が使用される<sup>3)</sup>。また、更に高強度の YP460MPa 級の使用も検討されている。

このような厚肉鋼板を使用しながら、船体建造の効率を上げるために、鋼板には大入熱溶接の適用が求められる。しかし、大入熱溶接を適用すると、冷却速度が遅いため、その溶接熱影響部（HAZ）の靱性は低下し、従来の厚鋼板製造技術では、上記の厚肉・高強度・HAZ 靱性確保という要求のすべてを満足することは容易でなかった。また対応する溶接材料も新たに必要であった。当社ではこの要求に対応するために種々の開発を行い、す

に上市している<sup>4)~6)</sup>。本報ではそれらの特徴をまとめて紹介する。

### 1. 開発目標

表 1 に開発目標を示す。YP355 及び 390MPa 級鋼板は板厚 65mm まで、YP460MPa 級鋼板は板厚 55mm までを開発目標とした。強度は YP355 及び 390MPa 級鋼板では船級規則どおりであるが、YP460MPa 級鋼板については船級規則が制定されていないため、客先との調整により、TS540MPa 以上の目標を置いた。適用する溶接としては、大型コンテナ船の建造において、シャーストレイキやハッチコーミングに適用される立向 1 パス溶接の簡易エレクトロガスアーク溶接（SEGARC 法）を想定して、40 ~ 50kJ/mm の超大入熱を目標とし、E 級鋼の継手部の試験温度である - 20 °C で 41J 以上の衝撃値を確保することとした。

一方、溶接金属についても従来の溶接材料では十分な靱性を確保できないため、新たに開発を行うこととした。

### 2. 開発の考え方

#### 2.1 鋼板

図 1 に開発にあたっての考え方を示す。大入熱溶接部の HAZ 靱性確保には微量 TiN の分散による結晶粒粗大化の防止が有効であるが<sup>7)</sup>、前述のような超大入熱溶接においてはこれだけでは十分でなく、靱性を劣化させる島状マルテンサイト防止の観点から C や  $C_{eq}$  の低減が不可欠である。しかし、このような手段は高強度化及び厚肉化という目標と相反するため、他の手段を併用することが必要となる。当社で種々の検討を行った結果、Cu や

表 1 開発目標  
Table 1 Target properties

Strength class	Base metal properties				Properties of welded joints		
	Thickness (mm)	YP (MPa)	TS (MPa)	$\sqrt{E}_{-40}$ (J)	Welding method	Heat-Input (kJ/mm)	$\sqrt{E}_{-20}$ (J)
YP355	65	355	490 ~ 620	41 (av.) 29 (min.)	1pass SEGARC	50	41 (av.) 29 (min.)
YP390	65	390	510 ~ 650				
YP460	55	460	540 ~ 690			40	

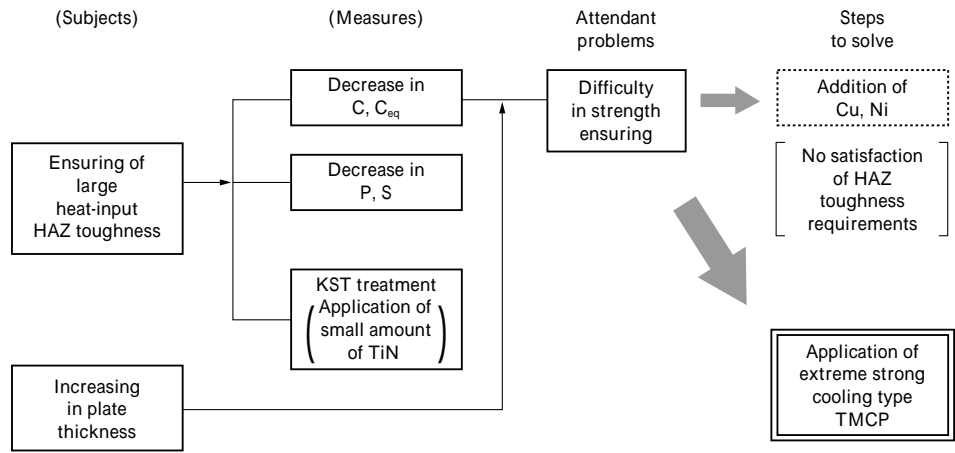


図1 鋼板開発の考え方  
Fig. 1 Ideas for steel plate development

Ni などの合金元素の添加による焼入性向上は HAZ 韌性の劣化をとまなうことが判明した。

そこで、我々は TMCP における冷却を新たに見直し、平坦度や残留応力の問題を解決しながら、従来にない速い冷却速度の TMCP を実用化した。

### 2.2 溶接材料

大入熱施工における溶接金属の韌性を確保するために、添加合金成分の最適化による組織制御を主に行った。具体的には Ti, B 量の最適化による粒界フェライトの抑制及びアシキュラフェライトの微細化, Ni 添加によるマトリックスの強硬化が有効であるが、韌性を劣化させる上部ベイナイト防止の観点から、C は極力低めとした上で、上述した以外の合金成分最適化による強度調整も行うこととした。

## 3. 開発鋼板の特徴

### 3.1 母材特性

各強度クラスごとの開発鋼板の化学成分と母材の機械

表2 開発鋼板の化学成分及び母材特性

Table 2 Chemical compositions and base metal properties of developed steel plates

Strength class	Steel	Main chemical composition (%)						C <sub>eq</sub> (%)	Base metal properties		
		Thickness (mm)	C	Mn	Nb	Ti	B		YP (MPa)	TS (MPa)	v <sub>E-40</sub> (J)
YP355	Developed	65	0.08	1.51	0.017	0.010	-	0.34	380	503	303
	Conventional	50	0.12	1.52	0.019	0.012	-	0.38	449	553	238
YP390	Developed	65	0.08	1.54	0.018	0.011	-	0.34	411	533	314
	Conventional	50	0.12	1.54	0.017	0.009	-	0.38	452	562	225
YP460	Developed	55	0.08	1.43	0.019	0.011	Added	0.33	486	589	284

表3 線状加熱試験条件

Table 3 Conditions of line-heating tests

Strength class	Thickness (mm)	Oxygen		Acetylene		Cutting nozzle	Height of cutting nozzle (mm)	Heating Temp. (°C)	Type of cooling	Number of heating
		Pressure (MPa)	Fluid rate (l/min)	Pressure (MPa)	Fluid rate (l/min)					
YP390	60	0.5	50	0.1	20	No.10	30	900	Cooling start just after heating	10

表4 線状加熱試験結果

Table 4 Results of line-heating tests

Line-heating	Tensile properties						Impact properties		
	Direction	Location	YP (MPa)	TS (MPa)	El. (%)	Fracture position	Direction	Location	v <sub>E-40</sub> (J)
Done	L	Full thickness	404	529	27	Base metal	L	Surface	355
Not-done	T	Full thickness	411	533	25	Base metal	L	t/4	314

的性質を従来型の YP390MPa 級鋼板と対比して表2に示す。いずれもC量を0.08%と低減し、微量のNb, Tiを添加している。最も強度の高いYP460MPa級鋼板では強度とHAZ韌性の確保の観点からBを添加しMn量を低めとしている。その結果、すべての強度クラスでC<sub>eq</sub>は0.34%以下に抑えられている。

いずれの鋼板も目標強度を十分に満足し、韌性もv<sub>E-40</sub>が280J以上と良好である。

### 3.2 溶接性

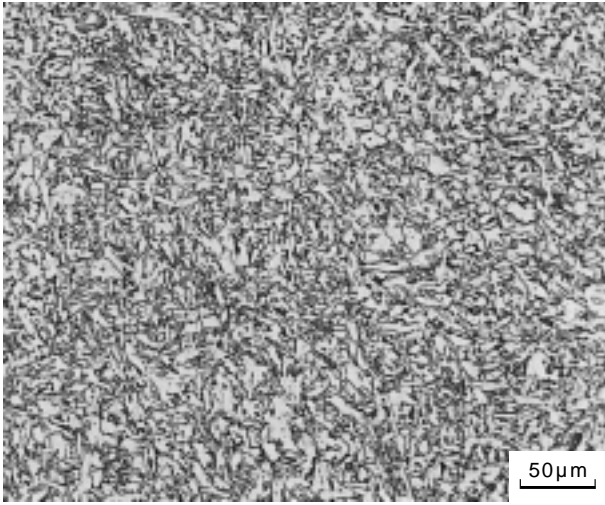
y型溶接割れ試験を行ったが、いずれの鋼板も常温において低温割れは全く発生せず、耐溶接割れ性は良好である。

### 3.3 線状加熱特性

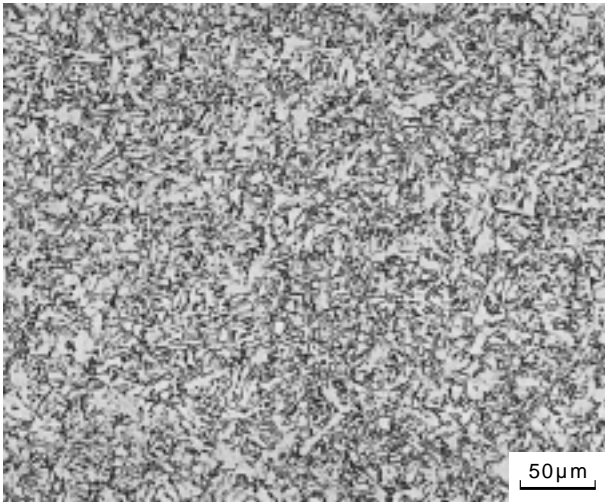
YP390MPa級鋼板について、表3に示す900加熱直後水冷を10回繰返すという過酷な条件で線状加熱特性を調査した。結果を表4に示すが、強度の低下はほとんどなく、韌性はむしろ向上している。

表 5 溶接金属の化学成分  
Table 5 Chemical compositions of weld metal

Strength class	Thickness (mm)	Gap (mm)	C	Si	Mn	P	S	Ni	Ti	B
YP390	60	8	0.06	0.15	1.55	0.012	0.009	2.00	0.04	0.004
YP460	55	8	0.06	0.16	1.45	0.013	0.009	1.90	0.04	0.003



(YP390, 60mm thickness, Gap 8mm, Heat-input 35.7kJ/mm)



(YP460, 55mm thickness, Gap 8mm, Heat-input 29.3kJ/mm)

写真 1 溶接金属のマイクロ組織の一例

Photo 1 An example of microstructure of weld metal

#### 4. 開発溶接材料の特徴

##### 4.1 溶接金属の特性

表 5 に溶接金属の化学成分を、写真 1 にマイクロ組織の一例を示す。YP355 及び YP390MPa 用と YP460MPa 用とでは合金元素の添加量を若干変えているが、合金成分の最適化により目標とする組織（粒界フェライトの抑制、アシキュラフェライトの微細化、上部ベイナイトの防止）を達成している。

また、縦長ビードにおいて懸念される溶接金属の耐高温割れ性を確認するために、板厚 35 から 65mm において梨型割れを評価したが、いずれの板厚も梨型割れは発生しておらず、耐高温割れ性は良好である。

##### 5. 大入熱溶接継手特性

上記で説明した開発鋼板のうち、YP390 及び YP460 MPa 級鋼板に対し、開発溶接材料を用いて大入熱 SEGARC 溶接を行い、継手部の靱性を確認した。表 6 に溶接条件を示す。ここでは実施工における開先精度のバラツキを想定して、ギャップを 3 段階に変化させて溶接を行った。その結果、溶接入熱は YP390MPa 級鋼板で 35 ~ 48kJ/mm、YP460MPa 級鋼板で 25 ~ 37kJ/mm の超大入熱溶接となっている。

マクロ組織の一例として YP390MPa 級鋼板のギャップ 10mm の場合を写真 2 に示す。継手靱性を表 7 にまとめて示す。いずれの強度クラス、ギャップにおいても、すべてのノッチ位置で -20℃ におけるシャルビ吸収エネルギーは 48J 以上であり、HAZ 及び溶接金属の靱性は良好である。

また、YP390 及び 460MPa 級鋼板の最大ギャップの継手に対して、ボンド部にノッチを入れた CTOD 試験も実施した。0℃（設計温度）における限界 CTOD 値はいずれの鋼板においても 0.4mm 以上であり、十分な耐脆性破

表 6 SEGARC 溶接条件  
Table 6 Conditions of SEGARC welding

Strength class	Thickness (mm)	Groove preparation		Welding consumable	Pass number	Welding current (A)	Welding voltage (V)	Welding speed (mm/min)	Heat input (kJ/mm)
		Angle of Groove	Root gap (mm)						
YP390	60	20° V	10	Wire : DWS-1LG mod. (1.6mm) Shielding gas : CO <sub>2</sub>	1	520	48	31.2	47.9
			8						
			6						
YP460	55	20° V	10	Wire : DWS-1LG mod. (1.6mm) Shielding gas : CO <sub>2</sub>	1	510	48	39.9	36.8
			8						
			5						

表7 SEGARC 溶接継手部の衝撃試験結果

Table 7 Impact test results of SEGARC welded joints

Strength class	Root gap (mm)	Heat input (kJ/mm)	Position	√E - 20 (J)		
				Weld metal	Fusion line	FL + 1mm
YP390	10	47.9	Surface	64	256	226
			t/2	60	101	175
			Back surface	75	145	152
	8	35.7	Surface	150	200	213
			t/2	112	104	85
			Back surface	102	116	81
6	35.4	Surface	125	175	198	
		t/2	89	96	238	
		Back surface	84	113	102	
YP460	10	36.8	Surface	51	162	183
			t/2	48	127	81
			Back surface	49	120	173
	8	29.3	Surface	71	159	206
			t/2	80	134	101
			Back surface	103	124	165
5	24.6	Surface	91	230	276	
		t/2	87	154	166	
		Back surface	92	142	81	

表8 SEGARC 溶接継手部のCTOD試験結果

Table 8 CTOD test results of SEGARC welded joints

Strength class	Root gap (mm)	Heat input (kJ/mm)	Position	Notch location	Test temp. ( )	CTOD value (mm)
YP390	10	47.9	Full thickness	Fusion line	0	0.46
YP460	10	36.8	Full thickness	Fusion line	0	0.62

note) Test method : BS7448 (1991) 3-point bend test

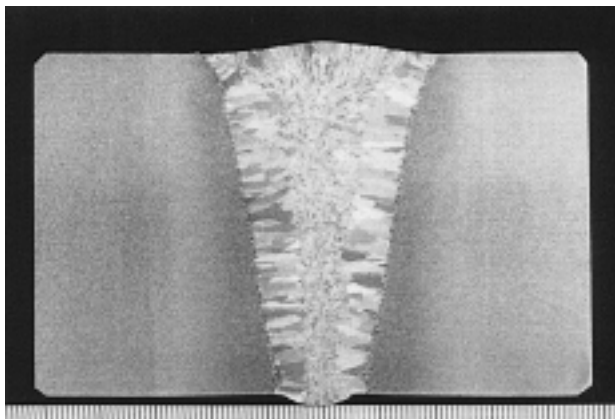


写真2 SEGARC 溶接継手部の断面マクロ組織の一例

(YP390, 板厚 60mm, ギャップ 10mm, 入熱 47.9kJ/mm)

Photo 2 An example of cross section macrostructure of SEGARC welded joints (YP390, 60mm thickness, Gap 10mm, Heat input 47.9kJ/mm)

壊発生特性を有していることが確認できた(表8)。

このような試験結果をふまえて、YP355 及び YP390 MPa 級鋼板については、これまでに大量に使用された実績を有するが、超大入熱 1 パス SEGARC 溶接の適用により従来の多パス CO<sub>2</sub> 溶接に比べて、溶接時間が 1/10 程度

に短縮できることが造船所における実施工で確認されている。

むすび= コンテナ船の大型化の趨勢に応えるため、新たな視点で成分系と製造法を見直し、溶接入熱 50kJ/mm もの超大入熱 SEGARC 溶接でも十分な HAZ 靱性と溶接金属の靱性を確保できる厚肉高強度鋼板及び溶接材料を開発した。これらは今後も継続する大型コンテナ船の建造効率の向上に大きく寄与するものと確信している。

#### 参考文献

- 1) 高平智明ほか：石川島播磨技報，Vol.41，No.6 (2001) p.249.
- 2) 中村 靖：日本海事協会誌，No.256 (2001) p.135.
- 3) 神田幸雄ほか：石川島播磨技報，Vol.39，No.2 (1999) p.70.
- 4) 塩飽豊明ほか：R&D 神戸製鋼技報，Vol.45，No.1 (1995) p.75.
- 5) 岡野重雄ほか：R&D 神戸製鋼技報，Vol.47，No.2 (1997) p.6.
- 6) 柴田光明ほか：CAMP-ISIJ，Vol.11 (1998) 521.
- 7) 笠松 裕ほか：鉄と鋼，Vol.65，No.8 (1979) p.102.