

(論文)

超大型コンテナ船向け大入熱溶接用YP460MPa級厚肉鋼板の開発

Development of Thick YP460MPa Class Steel Plate for Large Heat-input Welding for Very Large Containerships



金子雅人*
Masahito KANEKO



泉 学*
Manabu IZUMI



古川直宏*
Naohiro FURUKAWA



安部研吾*
Kengo ABE

In order to respond to the trend towards container ship enlargement, high strength steel plates with YP460MPa, up to 60mm in thickness have been developed by the application of extreme strong cooling TMCP and PROME system. The chemical composition of the developed steel plate is of the low carbon equivalence (Ceq) type, and utilizes small amounts of Ti which ensure HAZ toughness for high heat-input welding (for example 40kJ/mm SEGARC welding). The developed steel plate has the potential to contribute to higher efficiency in giant container ship fabrication.

まえがき = 近年、物資の海上輸送増大が駆動力となって船舶の大型化が進んでおり、特にコンテナ船ではコンテナ積載数が1万個を超える超大型船も建造されている。

船体構造の設計において重要となる構造の安全性と信頼性の確保について、コンテナ船の場合、甲板開口部周辺の縦強度の確保が重要となっている。このため甲板周辺の鋼板の極厚化もしくは高強度化が検討されており、この部分に対して従来のTMCP鋼の最高強度規格であるYP390MPa級を超えるYP460MPa級鋼の適用が考えられている¹⁾。

YP460MPa級鋼の実用化については、現在船級規則に規定が無いため、その実船への適用にあたっては、従来材と同等の安全性が確保されていることを確認する必要がある。加えて、施工を配慮した高能率大入熱溶接の適用なども当然必要な要素と言える。

以上の背景を踏まえ、当社は大型コンテナ船用大入熱溶接型高強度厚肉鋼板 YP460MPa 級鋼板を開発した。本報において、その開発コンセプトおよび特性の概略について報告する。

1. 開発目標

開発目標を表1に示す。適用対象部材をハッチサイド

コーミングとし、板厚60mmまでを開発目標とした。なおYP460MPa級鋼板は、現在船級規則が制定されていないため、日本海事協会(NK船級)で規格化されているYP390MPa級鋼(EH40)に関する規格の考え方をもとに鋼材規格を設定した。

また船舶においては、万一、脆性亀裂が発生した場合を想定し、それを停止させるバックアップアレスト機能を考慮した構造設計が重要となる²⁾。そこで、母材のアレスト特性については、コンテナ船の設計温度となる温度(-10℃)において日本造船研究協会第193研究部会(以下、SR193という)で検討されたクラックアレス材として有効とされる値³⁾(Kca 3,900~5,900N/mm^{1.5})を満足することを目標とした。このレベルのアレスト特性を有する鋼材を使用したコンテナ船ハッチサイドコーミングと強力甲板のT継手を模擬した大型溶接構造体による脆性破壊試験を行った結果、脆性亀裂は強力甲板に達することなく停止し、安全性を確認することができている⁴⁾。

2. 開発の考え方

図1に本鋼板開発の考え方を示す。入熱量が40kJ/mmを超える超大入熱溶接においては、TiNの微細分散

表1 開発目標
Table 1 Target properties

Grade	Thickness (mm)	Base metal properties				Arrestability Kca(- 10) (N/mm ^{1.5})	Properties of welded joints		
		YP (MPa)	TS (MPa)	EL (%)	vE - 40 (J)		Welding Method	TS (MPa)	vE - 20 (J)
YP460	60	460	570 ~ 720	17	53 (Ave.) 37 (Each.)	3,900 ~ 5,900	1 pass SEGARC	570 ~ 720	53 (Ave.) 37 (Each.)
EH40	70	390	510 ~ 650	20	39 (Ave.) 27 (Each.)			3,900 ~ 5,900	510 ~ 650

*鉄鋼部門 加古川製鉄所 技術研究センター

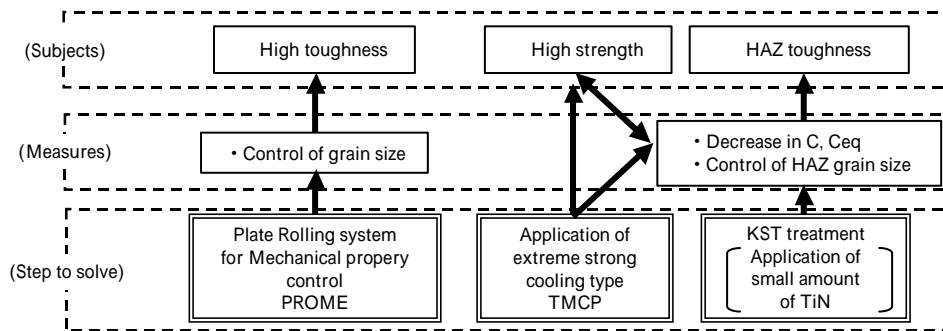


図1 開発思想

Fig. 1 Concept for steel plate development

による結晶粒粗大化防止だけではなく、溶接熱影響部（HAZ）における靱性を劣化させる島状マルテンサイト発生防止の観点から低C化や低Ceq化が不可欠である。しかし、これらは高強度化と相反する。そこで当社ではTMCP設備および制御方法について開発を進め、均一かつ強冷却技術を実現し、加速冷却で問題となってきた平坦度不良や内在残留応力の問題について解決を図ってきた。その結果、これまで困難とされてきた高強度と大入熱溶接適用という相反する要求の両立を実現している⁵⁾。

一方、一般に高強度化すると降伏強度が脆性破壊強度を上回り、弾性変形中に脆性破壊を起こしやすくなる。そのため、国際船級協会連合（IACS）統一規則では破壊力学的手法に基づいて構造部材ごとに使用靱性グレードを設定しており、強度クラスの増加に伴って要求靱性を向上させることで対応している⁶⁾。母材の脆性不安定亀裂に対して靱性を向上させる手段として、Nb添加による組織細粒化やNi添加によるマトリックスの強靱化が一般に知られているが、これら合金元素の添加はHAZ靱性の劣化を伴いやすく、従来の溶接方法がそのまま使用できないなどの危惧がある。そこで、大入熱溶接時のHAZ靱性を確保しつつ優れた脆性破壊特性を有する鋼板を開発するため、合金元素に頼らない方法として、亀裂進展に対して抑制効果があると考えられている結晶方位差15°以上の大角粒径の微細化を検討した。すなわち、結晶方位差15°以上の大角粒径を細粒化し、亀裂に対する抵抗箇所を増やすことで破壊靱性が向上すると考えた。

変態後の組織を微細化させるためには、再結晶、未再結晶温度域での適切な圧延条件による粒径の微細化、および転位などの変態生成サイトの導入が有効であると考えられる。しかしながら、これまでのTMCP鋼は、表面温度による圧延最終パスの圧下温度のコントロールのみを考慮したパス設定となっているため、厚肉材において鋼板内部の圧延温度域がばらついてきた。これに対し、制御圧延途中の多段温調により鋼板内部の温度を厳格に制御できるプロメ（Plate Rolling system for Mechanical property control）⁷⁾システムを適用し、再結晶/未再結晶温度域圧下率の適正化を行った。

図2にプロメシステムを適用した開発鋼のEBSP（Electron Backscattering Pattern）結晶方位粒界マップを示す。従来YP390MPa級鋼板（EH40）と比較して結晶方位差15°以上の大角粒界は微細化されており、これ

Steels	vTrs (°)	Grain size (μm)	Grain boundary map
YP460	-85	12	
Conventional EH40	-60	30	

図2 EBSPによる大角粒界測定結果

Fig. 2 Grain boundary map with EBSP

により靱性の高位安定化を達成することができたと考えられる。

3. 開発鋼の特徴

3.1 母材特性

開発鋼板の化学成分を表2に示す。低温での大入熱溶接HAZ靱性確保の観点から、島状マルテンサイト発生による靱性劣化防止の考えに基づき、C量を0.08%に抑え、微量のNb、Tiを添加している。その結果炭素当量（Ceq）は0.34%と低く抑えている。一方、上記成分設計のもとで高強度を確保すべく強冷却TMCPを適用した。

開発鋼板の母材特性を表3に示す。機械特性は目標強度を十分に満足し、靱性も $vE_{.40}$ が320J以上と目標値（53J）を十分に満足するとともに、破面遷移温度は-80以下と良好である。またアレスト特性においても、温

表2 開発鋼の化学成分の一例

Table 2 Example of chemical composition of developed steel plate

Thickness (mm)	Chemical composition (%)					Ceq
	C	Si	Mn	Nb	Ti	
60	0.08	0.13	1.54	0.018	0.011	0.34

$$Ceq = C + Mn/6 + (Cr + Mo + V)/5 + (Cu + Ni)/15$$

表 3 開発鋼の母材特性

Table 3 Mechanical properties of developed steel plate

	Thickness (mm)	Base metal properties ^{1,2}					Arrestability
		YP (MPa)	TS (MPa)	EL (%)	vE - 40 (J)	vTrs ()	Kca (- 10) (N/mm ^{1.5})
YP460	60	487	582	27	Each. 327, 319, 331 Ave. 326	- 85	7,400
YP460 Target properties	60	460	570 ~ 720	17	53 (Ave.) 37 (Each.)	-	3,900 ~ 5,900

1 Round tensile specimen : NK14A
2 Charpy test specimen : NKU4

表 4 SEGARC 溶接条件および継手特性

Table 4 Conditions of SEGARC welding and mechanical properties of welded joint

Thickness (mm)	Welding condition									Properties of welded joints			
	Angle of groove (°)	Root gap (mm)	Welding consumable	Pass number	Welding current (A)	Welding voltage (V)	Welding speed (cm/min)	Heat input (kJ/mm)	TS ¹ (MPa)	vE - 20 ² (J)			
										Position	Depo	Fusion line	FL + 1mm
60	20	8	Wire : DWS-1LG (1.6mm φ) Shielding gas: CO ₂	1	400	43	2.5	42	578	Surface t/2	117	247	266
										Back surface	83	131	182
											94	158	199
			YP460 Target properties						570 ~ 720				53 (Ave.) 37 (Each.)

1 Flat tensile specimen : NKU2A
2 Charpy test specimen : NKU4

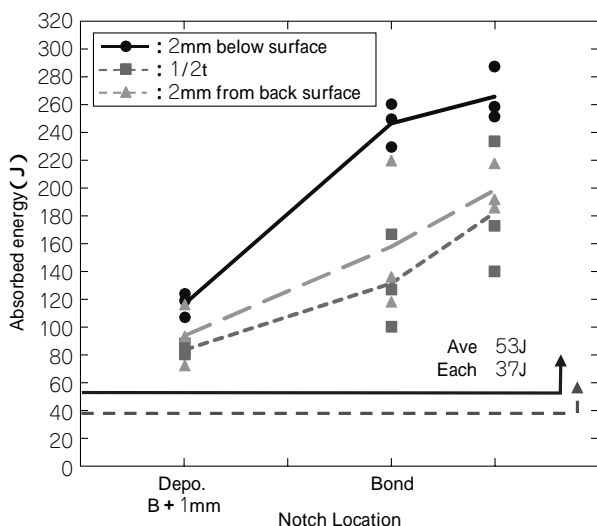


図 3 開発鋼の継手衝撃特性

Fig. 3 Charpy V-notch impact test results (root gap : 8mm)

度勾配型脆性破壊試験 (ESSO) により、最低設計温度 (-10) における応力拡大係数 Kca を求めた結果、Kca は 7,000N/mm^{1.5} 以上と SR193 でクラックアレスタ材として有効とされる値 (3,900 ~ 5,900N/mm^{1.5}) を十分満足していることが確認された。

3.2 大入熱溶接継手特性

開発鋼板の溶接条件および溶接継手特性を表 4 および図 3 に示す。ハッチサイドコーミング部における実際の施工を模擬して、大入熱 1 電極 SEGARC 溶接を行った結果、入熱量は 42kJ/mm の大入熱溶接となっている。

継手強度は目標値を十分に満足しており、また試験温度 -20 で、V ノッチシャルビ衝撃試験により評価した継手靱性は、全てのノッチ位置で 53J 以上を示しており、良好な継手特性を示していることが確認された。

むすび = 強冷却 TMCP および板厚内部の圧延温度域を厳格管理するプロメシステムの適用により、Ni 等の合金元素を添加することなく、高強度、高靱性、優れた溶接継手特性および高い破壊靱性を達成することができた。開発鋼は今後も継続するコンテナ船の大型化と安全性向上に応えるものであり、急速に需要が拡大するものと考えられる

参考文献

- 1) 白木原浩：造船分野における鉄鋼材料利用技術と課題，第 191, 192 回西山記念技術講座 (2007) p.75.
- 2) 山口欣弥ほか：超大型コンテナ船の開発 - 新しい高強度極厚鋼板の実用 - 感臨，第 3 号 (2005) p.70.
- 3) 日本造船研究協会第 193 研究部会：新製造法による 50 キロ級高張力鋼の有効利用に関する研究第 100 号 (1985 年 5 月)
- 4) 田村栄一ほか：厚板溶接継手部の脆性き裂伝播停止特性に関する基礎検討 - 第 2 報 脆性き裂停止に対する隅肉溶接構造の効果，材料とプロセス，vol.20 (2007) .
- 5) 岡野重雄ほか：大型コンテナ船用大入熱溶接型 YP355 ~ 460Mpa 級鋼板および溶接材料，R&D 神戸製鋼技報，Vol.52，No.1 (2002) p.2.
- 6) 福井 努ほか：船体構造におけるクラックアレスターの要求性能，JHPI，41 No.6 (2003) p.15.
- 7) 藤内秀人ほか：厚板圧延におけるオンライン材質制御技術の開発 - 厚板プロメシステムの開発，材料とプロセス，Vol.14 (2001) p.1040.