

脆性亀裂伝播停止性能に優れた コンテナ船用極厚 YP460 N/mm² 級鋼

Development of YP460 N/mm² Class Heavy Thick Plate with Excellent Brittle Crack Arrestability for Mega Container Carriers

長谷 和邦 HASE Kazukuni JFE スチール スチール研究所 鋼材研究部 主任研究員 (副部長)・博士 (工学)
半田 恒久 HANDA Tsunehisa JFE スチール スチール研究所 接合・強度研究部 主任研究員 (課長)・博士 (工学)
衛藤 太紀 ETO Taiki JFE スチール 西日本製鉄所 (福山地区) 鋼材商品技術部 主任部員 (副課長)

要旨

脆性亀裂伝播停止特性 (アレスト性能) に優れた極厚 YP460 N/mm² 級鋼を開発した。合金成分と制御圧延条件の最適化および *Super-OLAC*[®] (On-Line Accelerated Cooling) による制御冷却技術の適用により、板厚 70 mm 以上の極厚鋼板において YP460 N/mm² を超える高強度と高アレスト性能との両立を達成した。開発鋼は、ベイナイト組織の微細化による靱性向上に加えて、特定の集合組織を積極的に発達させることによりアレスト性能の向上を図り、板厚 70 mm 圧延材において船体設計温度 (−10°C) での脆性亀裂伝播停止靱性 (Kca) が 15 000 N/mm^{3/2} を超える非常に優れたアレスト性能を達成した。さらに、コンテナ船の構造を模擬した構造体を用いて脆性亀裂伝播停止試験を実施し、開発鋼の優れたアレスト性能を実証した。

Abstract:

YP460 N/mm² class heavy thick plate with excellent crack arrestability for mega container carriers has been developed. Advanced alloy design and optimized controlled rolling and cooling process using *Super-OLAC*[®] (On-Line Accelerated Cooling) are applied to obtain highly oriented textures parallel to the surface of the plate, which are effective to prevent brittle crack propagation. Crack arrest toughness (Kca at −10°C) of the developed steel is 16 800 N/mm^{3/2}, which is more than double of the guidelines on brittle crack arrest design issued by Class NK. The large scale duplex ESSO test, assuming the structure of hatch side coaming of container carriers, was also carried out, and the result revealed that the developed steel plate has excellent performance to stop brittle crack propagation. The developed steel plate is supposed to be utilized to ensure the safety of mega container carriers against the brittle fracture.

1. はじめに

近年、アジアヨーロッパ間の物流活発化にともない船舶の大型化、高性能化が進んでいる。特にコンテナ船の大型化は著しく、最近では 18 000 TEU (Twenty foot equivalent unit : 20 フィートコンテナの積載可能個数) クラスの超大型コンテナ船が建造されるようになってきた^{1,2)}。コンテナ船は、その船殻構造から、上部構造部材である強力甲板やハッチコーミングの高強度・厚肉化が進み、大型コンテナ船では、板厚 70 mm を超える YP390 N/mm² 級鋼 (以下、YP390 鋼) や YP460 N/mm² 級鋼 (以下、YP460 鋼) が適用されている^{3~5)}。

コンテナ船の安全性確保、脆性破壊防止の観点から鋼材にはあるレベル以上の破壊靱性値が求められる。亀裂の発

生が想定される部位や大規模破壊につながる恐れのある重要部材については靱性に優れた E 級鋼 (母材靱性 −40°C 仕様) が適用され、建造時の溶接施工管理にも十分な配慮がなされているが、亀裂の発生を完全に防止することは困難である。したがって、万が一脆性亀裂が発生しても、その伝播を停止させて船体の安全性を確保するため、脆性亀裂伝播停止性能 (アレスト性能) に優れた鋼材をハッチコーミングなどに配置することが求められる。

厚肉の船体構造用鋼板のアレスト性能は、産学連携の「脆性亀裂アレスト設計研究委員会」で検討され⁶⁾、その結果を反映し 2009 年 9 月に日本海事協会から「脆性亀裂アレスト設計指針」が発行された⁷⁾。これによると、板厚 50~75 mm の極厚鋼板を使用する場合、ハッチサイドコーミングで発生した脆性亀裂の強力甲板への脆性亀裂の伝播、および強力甲板で発生した脆性亀裂のハッチコーミングへの伝播を防ぐためには、バットシフトなどの構造上の対策を行

なった上で、船体設計温度（-10℃）での脆性亀裂伝播停止靱性 Kca 値が 6 000 N/mm^{3/2} 以上の鋼材使用が必要とされている。また、2013 年 1 月には、国際船級協会連合 (IACS: International Association of Classification Societies) より、極厚鋼板適用に関する統一規則 (UR: Unified Requirement) が発行され、2014 年 1 月以降に建造契約するコンテナ船に対して、板厚 50 mm 超、100 mm 以下の YP460 鋼を使用する船体には、バットシフトやストップホールなどの構造対策を施すとともにハッチコーミングと強力甲板への高アレスト鋼の適用が要求された⁸⁾。そのため、鋼材メーカーには、高強度・厚肉高アレスト鋼の開発が求められている。

鋼材のアレスト性能向上に関しては、これまで数多くの研究が行なわれ、主として鋼組織の微細化によるアレスト性能向上が図られてきた^{9~14)}。JFE スチールは、これまで厚板分野ではほとんど注目されてこなかった集合組織に着目し、脆性亀裂の直進伝播を抑制する集合組織を選択的に発達させることで、アレスト性能を格段に向上させる技術を開発した。本報告では、超大型コンテナ船のハッチコーミング用鋼材として好適な高アレスト極厚 YP460 鋼を開発したので、その特性を報告する。

2. 高アレスト化技術

従来から、結晶粒微細化による母材靱性値の向上 (vTrs の低下) や鋼板表面組織の微細化によりシアリップと呼ばれる塑性変形を伴った領域を形成させることによってアレスト性能を向上させる技術が検討されてきた^{9~15)}。

当社は、厚板分野ではこれまで積極的に活用されてこなかった集合組織に着目し、アレスト性能の向上に取り組んできた⁴⁾。半田らは、脆性亀裂伝播停止温度に対するシャルピー遷移温度と集合組織の寄与度を重回帰分析により定量的に評価し、 $vTrs (°C) = -12 \cdot X_{(100)} - 22 \cdot X_{(211)}$ なるパラメータ (以下、Y 指数) を提案し、この値の絶対値が大きいほど脆性亀裂伝播停止性能が優れることを示した (図 1)¹⁶⁾。すなわち、(100) 面や (211) 面の集合組織を発達させた鋼板では、脆性亀裂伝播部の破面にへき開面に沿って多数のサブクラックが形成され、これによりアレスト性能が向上する。また、津山らは、通常鋼板の脆性亀裂停止部

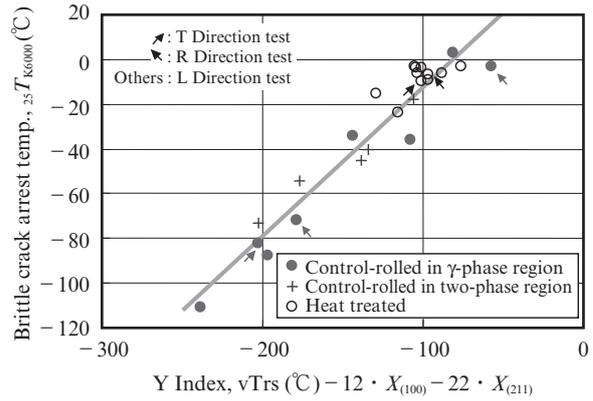


図 1 アレスト性能に及ぼす Y 指数の影響¹⁶⁾

Fig. 1 Relationship between $_{25}TK_{6000}$ and Yindex

はサムネイル状の破面形態を示すのに対して、鋼板の 1/4t 部から 1/2t 部にかけて、(100) 面や (211) 面を発達させた鋼板では、スプリットネイル状の破面形態を示すこと、スプリットネイル状の破面形態ではサムネイル状破面に比べて亀裂進展にともなう亀裂先端の応力拡大係数の低下が大きくなることを示した¹⁷⁾。これらの検討結果は、特定の集合組織を活用することで従来達成できなかった高いレベルの Kca 値が得られる可能性があることを示唆している。

本開発では、アレスト性能向上の観点から母材靱性向上と集合組織の最適化を行なった。すなわち、アレスト性能向上に有利な変態集合組織を発達させるために化学組成の最適設計を行ない、また、鋼板靱性向上ならびに圧延集合組織を発達させるために制御圧延条件の最適化を実施した。これにより、非常に高いアレスト性能を有する極厚 YP460 鋼の開発に成功した。

3. 開発鋼の母材特性

3.1 化学組成および製造方法

開発鋼の化学組成を表 1 に示す。開発鋼は、極厚鋼板でも YP460 鋼の強度が達成できるよう C 当量を高く設定する一方、溶接性に配慮し低 P_{CM} 設計を適用した。連続製造で溶製したスラブを、熱間圧延によって板厚 70 mm と 85 mm に圧延した。熱間圧延では、YP460E 級鋼 (母材靱性 -40℃

表 1 開発鋼の化学組成

Table 1 Chemical composition of steels developed

Thickness (mm)	(mass%)							Ceq*	P _{CM} **
	C	Si	Mn	P	S	Others			
70	0.06	0.15	1.91	0.005	0.002	Cu, Ni, Cr, Nb, Ti	0.46	0.19	
85	0.06	0.15	1.89	0.006	0.002	Cu, Ni, Cr, Nb, Ti	0.46	0.19	
Specification of EH47 (IACS UR W31)	As approved by each classification society						≤0.49	≤0.22	

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

**P_{CM}=C+Si/30+(Mn+Cu+Cr)/20+Mo/15+V/10+Ni/60+5B

表 2 開発鋼の機械的特性

Table 2 Mechanical properties of steels developed

Steel	Thickness (mm)	Position	Tensile property				Charpy impact property	
			Direction	YP (N/mm ²)	TS (N/mm ²)	EI (%)	Direction	vE-40 (J)
Developed	70	1/4t	C	497	591	26	L	332
		1/2t	C	490	585	24	L	294
	85	1/4t	C	486	587	26	L	344
		1/2t	C	477	586	21	L	334
Specification of EH47 (IACS UR W31)			C	≥460	570-720	≥17	L	≥53 (70 mm) ≥64 (85 mm)

YP: Yield point TS: Tensile strength
EI: Elongation vE-40: Absorbed energy

仕様)の母材特性を満足し、かつ高アレスト性能を得るために最適化されたTMCP(Thermo-mechanical control process)条件を適用した。以下に母材特性、アレスト性能、溶接継手性能について紹介する。

3.2 母材の機械的特性

開発鋼の機械的特性を表2に示す。板厚70mm, 85mmそれぞれの鋼板の1/4t部, 1/2t部の引張試験結果とシャルピー衝撃試験結果である。いずれの鋼板も1/4t部, 1/2t部ともにYP460鋼のスペックを満足する引張特性が得られている。また、-40℃でのシャルピー吸収エネルギーは290J以上であり、E級鋼の規格を十分に満足している。

3.3 母材組織

開発鋼の板厚1/4t部, 1/2t部のマイクロ組織を写真1に示す。板厚70mm材, 85mm材ともに組織はベイナイト組織となっており、板厚、断面内の部位によらず一定の組織が得られている。

板厚中央部より試験片を採取し、集合組織をX回折強度比によって評価し、Y指数を導出した。代表的な面方位であ

るND//<100>とND//<211>について結晶方位のランダムな標準試料のX線回折強度の比として、面集積度を算出し、母材の脆性破面遷移温度と合わせてY指数を算出した。70mm圧延材, 85mm圧延材のY指数はいずれも-170であることから、開発鋼は高いアレスト性能を有していることが期待できる。

3.4 脆性亀裂伝播停止性能

開発鋼の脆性亀裂伝播停止性能(アレスト性能)を評価するため、温度勾配型 ESSO 試験を行なった。試験片は応力負荷方向が圧延方向となるように採取した。開発鋼のKca値の温度依存性を既存のYP390鋼⁴⁾と比較して図2に示す。船体の設計温度(-10℃)でのKca値はYP390鋼の場合、通常仕様2500 N/mm^{3/2}, 高アレスト仕様で7300 N/mm^{3/2}であったが、開発鋼では、板厚70mm材, 85mm材でそれぞれ16800 N/mm^{3/2}, 9600 N/mm^{3/2}という非常に高いKca値が得られた。写真2に標準 ESSO 試験後の破面外観を示す。板厚中央部に比べて、板厚表面側の脆性亀裂が先行して伝播したスプリットネイル状の破面形態を示しており、集合組織制御の効果が顕著に現れた結果となった。

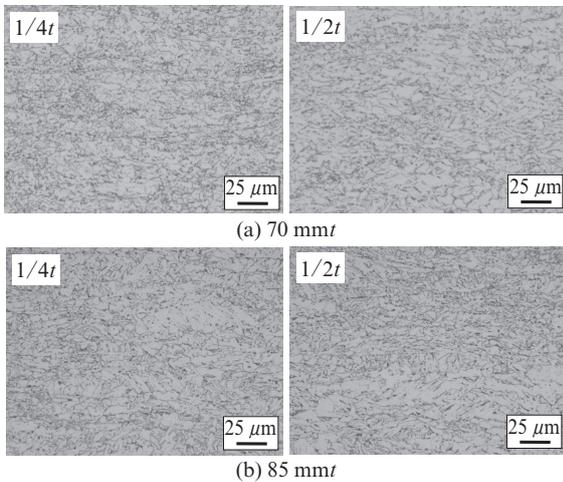


写真1 開発鋼のマイクロ組織

Photo 1 Microstructures of steels developed

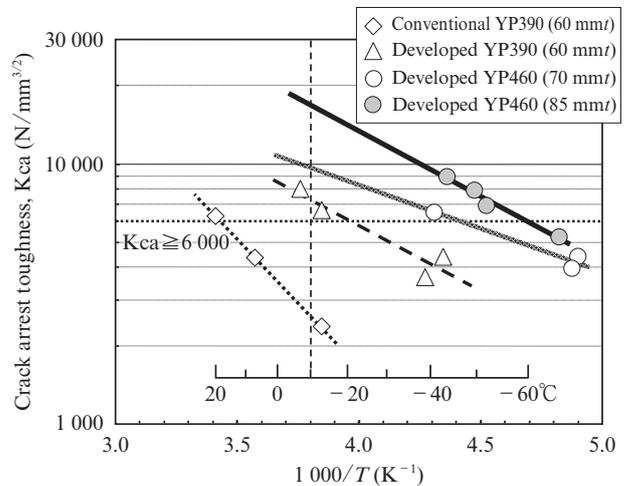


図2 標準 ESSO 試験結果

Fig. 2 Results of temperature gradient type ESSO test

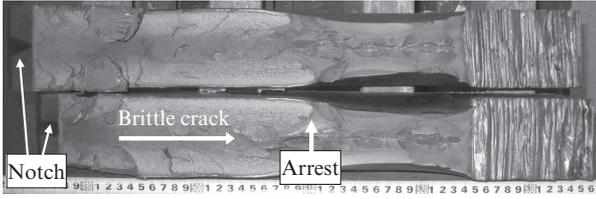


写真2 標準 ESSO 試験後の破面外観

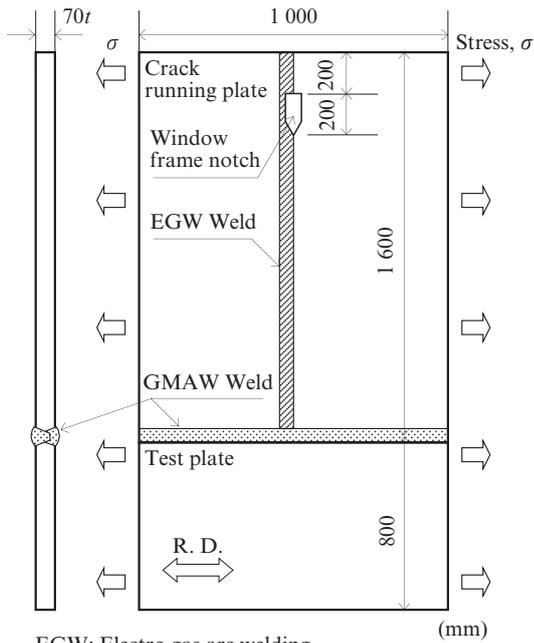
Photo 2 Example of fracture appearance of temperature gradient ESSO test specimen (Kca=7 880 N/mm^{3/2}, Temperature=-50°C)

開発鋼のアレスト性能を実証するために、超大型混成 ESSO 試験を行なった。試験片形状を図3に示す。強力甲板で発生した脆性亀裂がハッチコーミングに突入する場合を想定し、試験体を作製した。試験体を-10°Cに冷却保持後、所定の応力を負荷し、ノッチ部に衝撃を与えて脆性亀裂を発生・伝播させ、開発鋼の脆性亀裂伝播停止性能を評価した。

表3 超大型混成 ESSO 試験結果

Table 3 Results of large scale duplex ESSO tests

No.	Applied stress (N/mm ²)	Test temperature (°C)	Result	Crack length in test plate (mm)
1	257	-10	Arrest	23
2	282	-10	Arrest	29



EGW: Electro gas arc welding
GMAW: Gas metal arc welding

図3 超大型混成 ESSO 試験片

Fig. 3 Dimension of large scale duplex ESSO test specimen

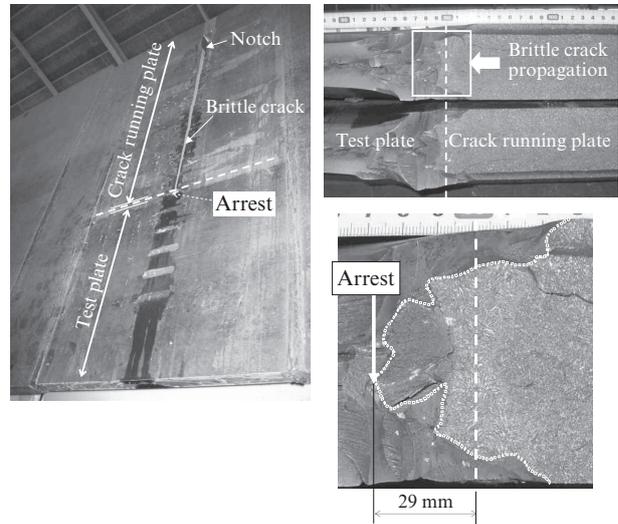


写真3 超大型混成 ESSO 試験片と破面外観

Photo 3 Fracture path and fracture appearance of large scale duplex ESSO test specimen

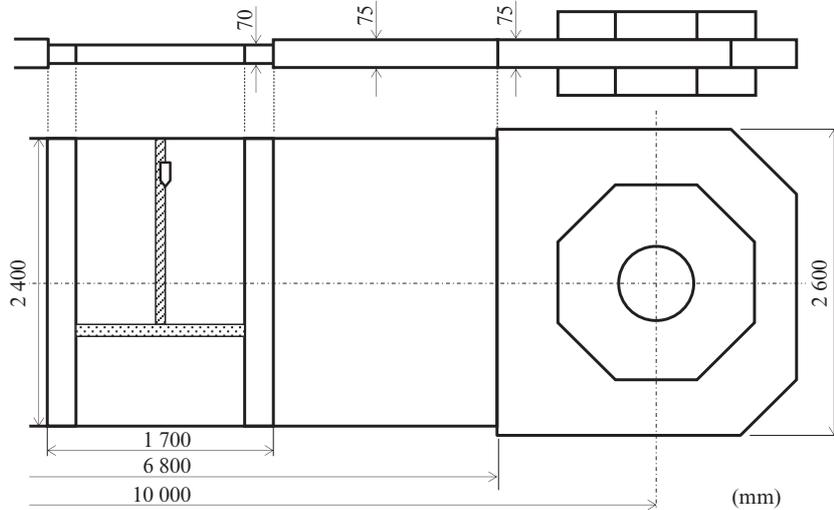


図4 超大型混成 ESSO 試験方法

Fig. 4 Test procedure of large scale duplex ESSO test

超大型試験では、脆性亀裂伝播速度が 500~800 m/s 程度の場合、試験片長さを 6.8 m 以上とするか、あるいは荷重負荷点間距離を 10 m 以上とすれば試験片に突入する亀裂の動的応力拡大係数への除荷応力の影響が小さくなり、実際の条件とほぼ同等な試験になることが明らかにされている^{18, 19)}。そのため、本試験では図 4 に示すように標点間距離を 10 m として試験を実施した。負荷応力は、YP390 鋼と YP460 鋼の設計応力である 257 N/mm² および 282 N/mm² の 2 条件で行なった。結果を表 3 に示す。いずれの条件においても、脆性亀裂はアレストした。応力 282 N/mm² で試験実施した試験体の破面を写真 3 に示す。脆性亀裂は試験板に突入直後に停止しており、開発鋼のアレスト性能が非常にすぐれていることがわかる。

4. 開発鋼の溶接性

4.1 耐割れ感受性

開発鋼を用いてショートビードによる最高硬さ試験を行

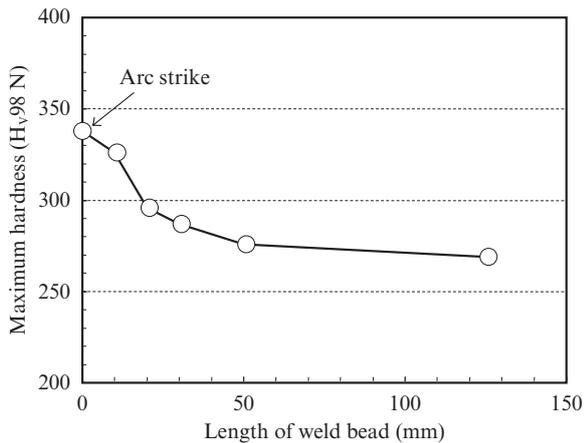


図 5 最高硬さ試験結果

Fig. 5 Maximum hardness test results of the developed steel

表 4 y 形拘束割れ試験結果

Table 4 y groove weld cracking test results

Welding atmosphere	Preheating temperature	Crack ratio (%)		
		Surface crack	Cross section	Root crack
20°C, RH60%	25°C	0	0	0
		0	0	0
		0	0	0
0°C	0°C	0	0	0
		0	0	0
		0	0	0
-20°C	-20°C	0	0	0
		0	0	0
		0	0	0

*Welding consumable: LB-62UL (4.0 mmφ), Kobe Steel, Ltd.

*Welding condition 170 A-25 V-150 mm/min, 1.7 kJ/mm

なった。母材の最高硬さは JIS Z 3101 に準拠して測定した。結果を図 5 に示す。最高硬さはビード長が短くなるに従い増加しているが、開発鋼はアークストライク時でも Hv 350 以下の良好な特性を示した。

日本鋼船工作法精度標準 (JSQS: Japanese Shipbuilding Quality Standard) では、C 当量が 0.36 mass% を超える TMCP 型高張力鋼は、気温が 5°C 以下の場合に予熱が必要であることを規定している。本開発鋼は、母材強度とアレスト性能確保の観点から C 当量は 0.36 mass% を超えているため、耐低温割れ性試験を行ない、予熱フリー溶接での割れ感受性を評価した。板厚 70 mm の開発鋼を用い、試験雰囲気 20°C-湿度 60%, 0°C および -20°C とし、試験片温度をそれぞれ 25°C, 0°C, -20°C とし、JIS Z 3158 にしたがって、

表 5 溶接条件

Table 5 Welding conditions of multi-pass GMAW

Welding consumable	DW-460 L (1.2 mmφ), Kobe Steel, Ltd. FBB-3 (Backing material), Id
Welding condition	Groove angle: 40°, Gap: 5 mm 280 A, 35 V, 210 mm/min, 2.8 kJ/mm, 100% CO ₂
Macrostructure	

表 6 溶接継手引張試験結果

Table 6 Tensile test results of weld joint

Prescription	Thickness (mm)	Width (mm)	TS (N/mm ²)	Fracture position
EH47 GMAW joint	85	30	598	Base plate
			602	Base plate
Specification of EH47 (IACS UR W31)			≥570	—

TS: Tensile strength GMAW: Gas metal arc welding

表 7 溶接継手の衝撃試験結果

Table 7 Charpy impact test results of weld joint

Prescription	Thickness portion Notch position	vE ₋₂₀ (J)		
		Surface-1 mm	1/2t	Root-1 mm
EH47 GMAW joint	W. M.	153	143	105
	F. L.	282	236	171
	F. L.+2 mm	304	367	314
	F. L.+5 mm	334	342	327
Specification of EH47 (IACS UR W31)		≥64	≥64	≥64

vE₋₂₀: Absorbed energy GMAW: Gas metal arc welding

W. M.: Weld metal F. L.: Fusion line

溶接入熱 17 kJ/cm で y 形溶接割れ試験を行なった。試験結果を表 4 に示す。開発鋼は -20℃ においても表面割れ、断面割れ、およびルート部割れは発生しておらず、低 P_{CM} 成分設計により優れた耐低温割れ性を有していた。

4.2 多層溶接継手特性

開発鋼の継手特性を評価するためにフラックス・コアードワイヤ (FCW: Flux cored wire) を用いてガスメタルアーク溶接 (GMAW: Gas metal arc welding) による多層溶接継手を作製した。溶接条件を表 5 に示す。溶接継手の引張試験およびシャルピー衝撃試験は、日本海事協会の船級承認試験に準拠して実施した。継手引張試験結果および継手シャルピー試験結果を表 6 と 7 にそれぞれ示す。開発鋼は継手引張強度、継手シャルピー衝撃特性ともに YP460 E 級鋼のスペックを満足する結果が得られた。

5. おわりに

アレスト性能に優れた極厚 YP460 鋼を開発した。開発鋼は、鋼板靱性と集合組織分布を最適化し、非常に高いレベルのアレスト性能を達成した。開発鋼の特徴と得られた結果を以下にまとめる。本開発鋼の適用により、大型化するコンテナ船のより一層の安全性向上に寄与できると考えている。

- (1) 開発鋼は、極厚材で YP460 鋼の母材特性を満足し、かつアレスト性向上と溶接性が両立できるように高 C 当量、低 P_{CM} 成分とした。
- (2) 開発鋼は、化学成分、制御圧延条件、制御冷却条件それぞれの最適化によって、母材靱性を向上させ、変態集合組織と圧延集合組織を発達させることにより非常に優れたアレスト性能を達成した。板厚 70 mm, 85 mm の鋼板を用いて標準 ESSO 試験を実施した結果、-10℃ での Kca 値はそれぞれ 16 800 N/mm^{3/2}, 9 600 N/mm^{3/2} であった。
- (3) 板厚 70 mm の開発鋼を用いて、コンテナ船の上部構造を模擬した超広幅試験を行なった。助走板で発生した脆性亀裂は試験板 (開発鋼) に突入後直ちに停止しており、開発鋼のアレスト性が非常に優れていることを実証した。

- (4) 開発鋼の多層溶接継手性能は、YP460 鋼の規格値をすべて満足しており、アークストライク試験, y 型溶接割れ試験を実施し、実施工面でも溶接性に問題ないことを確認した。

参考文献

- 1) 長塚誠治. KANRIN. 2007-03, no. 11, p. 14.
- 2) たとえば, <http://www.ship-technology.com/projects/triple-e-class/>
- 3) 森茂博, 田中幸子, 田中義雄, 廣田一博. KANRIN. 2009-05, no. 24, p. 18.
- 4) 西村公宏, 半田恒久, 橋本正幸. JFE 技報. 2007-11, no. 18, p. 18.
- 5) 一宮克行, 角博幸, 平井龍至. JFE 技報. 2007-11, no. 18, p. 13.
- 6) たとえば, Yamaguchi, Y.; Yajima, H.; Aihara, S.; Yoshinari, H.; Hirota, K.; Toyoda, M.; Kiyosue, T.; Tanaka, S.; Okabe, T.; Kageyama, K.; Funatsu, Y.; Handa, T.; Kawabata, T.; Tani, T., Proc. of the 21th International Offshore and Polar Engineering Conference. Beijing, China, 2010-06-20-25, p. 80.
- 7) 日本海事協会. 脆性亀裂アレスト設計指針. 2009-09.
- 8) IACS. Requirements for Use of Extremely Thick Steel Plates, UR S33, 2013-01.
- 9) 多田益男, 矢島浩, 出口明雄, 仁藤弘, 勝田順一. 西部造船会会報. 1989, no. 69, p. 227.
- 10) 鈴木伸一, 村岡隆二, 谷三郎, 和田典巳. NKK 技報. 1999, no. 168, p. 78.
- 11) 田村栄一, 南二三吉. CAMP-ISIJ. 2008, vol. 21, p. 564.
- 12) 金子雅人, 谷徳孝. R&D 神戸製鋼技報. 2011-08, vol. 61, no. 2, p. 2.
- 13) 久保論, 川畑友弥, 稲見彰則, 前田隆雄, 平松秀樹, 松田博和, 道場康二, 西山五郎, 清未孝昭, 松浦雅文, 岡本恵一. 日本船舶海洋項学会講演会論文集. 2007, no. 5E, p. 139.
- 14) 白幡浩幸, 皆川昌紀, 井上健裕, 大谷潤, 船津裕二. まてりあ. 2012, vol. 51, no. 2, p. 76.
- 15) 石川忠, 井上健裕, 萩原行人, 今井嗣郎. 新日鉄技報. 1999, no. 371, p. 107.
- 16) 半田恒久, 田川哲哉, 南二三吉. 鉄と鋼. 2012, vol. 98, no. 1, p. 32.
- 17) 津山青史, 竹内佳子, 西村公宏, 半田恒久. 溶接学会論文集. 2012, vol. 30, no. 2, p. 188.
- 18) 半田恒久, 伊木聡, 遠藤茂, 津山青史, 潮海弘資. 溶接学会論文集. 2012, vol. 30, no. 3, p. 213.
- 19) Handa, T.; Igi, S.; Endo, S.; Tsuyama, S.; Shiomi, H., Science and Technology of Welding and Joining. 2013, vol. 18, no. 6, p. 478.



長谷 和邦



半田 恒久



衛藤 太紀