

集合組織を活用したメガコンテナ船用 超極厚高アレスト YP460 N/mm² 級鋼の開発

長谷和邦¹⁾ 半田恒久²⁾ 衛藤太紀³⁾
山村直一³⁾ 青木雅弘⁴⁾

1. 緒 言

近年、海上輸送の活発化にともない、船舶の大型化が進んでいる。特にコンテナ船の大型化は顕著であり、10,000TEU (Twenty feet equivalent unit: 20フィートコンテナの積載可能数) クラスの船が2005年に登場して以降、急速に大型化が進み最近では20,000TEU クラスの超大型船が建造されている。コンテナ船はその船殻構造から上部構造部材であるアッパーデッキやハッチコーミングで船体強度を確保する設計となっているため、これら部材には板厚 50 mm を超える厚肉高強度鋼板が用いられている。船体の大型化にともない、使用される鋼板の強度グレードは YP355 N/mm² 級鋼から YP460 N/mm² 級鋼(以下 YP460 鋼)へ推移し、さらに板厚も従来の 50~60 mm から 80 mm を超える超極厚鋼板が適用されるようになった。一方、船体の安全性確保、脆性破壊防止の観点から YP460 鋼を使用する船体には、バットシフトなどの構造対策を施すとともにアレスト靱性値 (Kca) が 6,000 N/mm^{3/2} 以上の脆性き裂伝播停止性能 (アレスト性能) に優れた鋼材をアッパーデッキやハッチコーミングに配置し脆性き裂の伝播を停止させる設計(図 1)を適用することが国際船級協会連合により義務づけられた⁽¹⁾⁽²⁾。そのため、統一規則を満足する板厚 80 mm を超える超極厚高アレスト YP460 鋼の開発が望まれていた。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・開発が行われ、鋼組織の微細化(鋼の靱性向上)によるアレスト性能向上

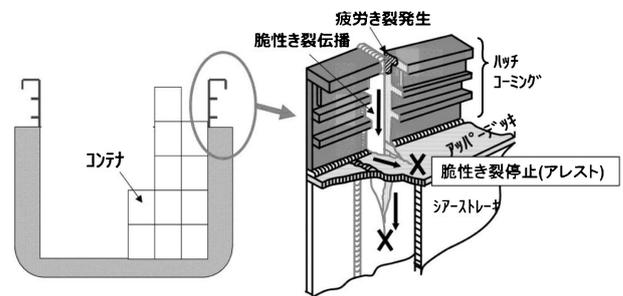


図 1 コンテナ船断面構造とアレスト設計の概念図。

が図られてきた⁽³⁾⁻⁽⁹⁾。しかし、板厚 80 mm を超える超極厚鋼板では高いアレスト性能の達成が困難であった。そこで、これまで厚板製品ではほとんど着目されてこなかった集合組織に着目し、極厚材であっても高アレスト性能が達成できる技術を開発した。

本報では、超大型コンテナ船の上部構造部材のために開発し超極厚高アレスト YP460 鋼について紹介する。

2. 開発技術

従来から、結晶粒微細化による母材靱性の向上 ($vTrs$ 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⁽³⁾⁻⁽⁹⁾。鋼板の極厚化にともない圧延での結晶粒微細化が困難となり、また全体断面に占める表層部の割合が相対的に低くなるため、80 mm を超える極厚鋼板で高アレスト性能を満足させるためには従来技術に代わる新たな組織制御指針が必要とされていた。

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だ⁽¹⁰⁾⁻⁽¹²⁾。開発鋼の技術的概念を図 2 に示す。結晶構造が bcc である鋼組織の場合、脆性き裂はへき開面である (100) 面を伝播する。結晶方位がランダムである場合、発生した脆性き裂は主応力方向と垂直方向に伝播する。開発鋼では、板

* JFE スチール株式会社：
スチール研究所 1) 鋼材研究部 部長
2) 接合・強度研究部 主任研究員
3) 西日本製鉄所 鋼材商品技術部 主任部員
4) 本社 厚板セクター部 主任部員
Development of Texture Controlled YP460 N/mm² Class Heavy Thick Plate with Excellent Brittle Crack Arrestability for Mega Container Carriers; Kazukuni Hase, Tsunehisa Handa, Taiki Eto, Naokazu Yamamura, Masahiro Aoki (JFE Steel Corporation)
2016年11月9日受理[doi:10.2320/materia.56.82]

厚中央部の集合組織を制御することで脆性き裂が主応力方向に対して45度方向に分岐進展し、き裂伝播抵抗を増大させることでアレスト性能の向上を狙った。図3は、脆性き裂伝播停止温度($Kca = 6000 \text{ N/mm}^{3/2}$ となる温度)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た結果である。脆性き裂伝播停止温度は $vTrs(^{\circ}\text{C}) - 12 \cdot X_{(100)} - 22 \cdot X_{(211)}$ なるパラメータ(以下、Y指数)とよい相関を示し、Y指数の絶対値が大きいほど脆性き裂伝播停止性能が優れることを明らかにした⁽¹⁰⁾。すなわち、(100)面や(211)面の集合組織を発達させた鋼板では、脆性き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。従来鋼と開発鋼のアレスト試験破面を図4に示す。従来鋼では、表面に比較して靱性値の低い板厚中央部が先行しサムネイル状の形態で脆性き裂が進展している。一方、板厚中央部の集合組織を制御した鋼板では、き裂伝播抵抗が高くなった結果ス

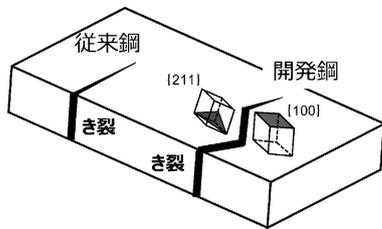


図2 開発鋼の組織制御。

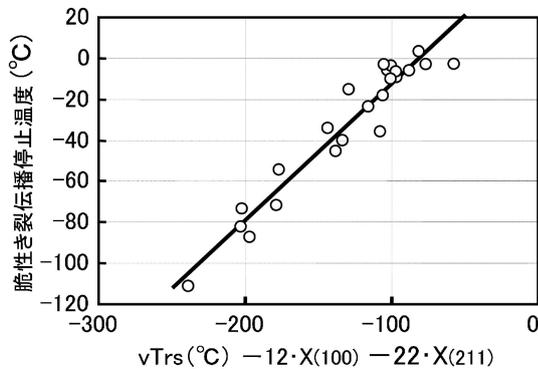


図3 アレスト性能におよぼす母材靱性と集合組織の影響。
vTrs: 延性-靱性遷移温度, X₍₁₀₀₎, X₍₂₁₁₎: (100), (211)面集積度。

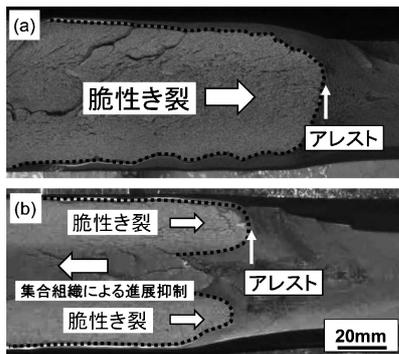


図4 温度勾配型 ESSO 試験破面 (a)従来鋼, (b)開発鋼。

プリットネイル状の破面を呈した。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き裂進展にともなうき裂先端の応力拡大係数の低下が大きくなることも明らかにされており⁽¹¹⁾、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アレスト靱性値(Kca値)が達成できる。集合組織制御は鋼材成分の最適化とTMCP(Thermo-mechanical Controlled Process)条件の最適化により行った。成分設計においては造船用鋼材に要求される溶接性を考慮し、低溶接割れ感受性組成(Pcm値)設計を適用し予熱フリー溶接を可能とした。また、TMCP条件最適化では、鋼材加熱条件、圧延における圧延温度と圧下率、および圧延後の冷却速度を最適制御することにより従来にない極厚材において高アレスト YP460鋼の開発を可能にした。

3. 開発鋼の特性

開発した技術を適用し実製造プロセスで板厚 100 mm の鋼板を製造した。開発鋼の化学組成および母材の機械的特性を表1, 2に示す。母材の機械的特性は YP460鋼の規格値を満足している。開発鋼のマイクロ組織はベイナイト単相組織である(図5)。開発鋼のアレスト性能を評価するために実施した温度勾配型 ESSO 試験の結果を図6に示す。開発鋼は従来鋼に比べて高いアレスト性能が達成されている。鋼板に要求されるアレスト靱性値は板厚が増すほど高い値が要求され

表1 開発鋼の化学組成。

(mass%)							
C	Si	Mn	P	S	Others	Ceq*	Pcm**
0.06	0.15	1.93	0.006	0.002	Cu, Ni, Cr, Nb, Ti	0.47	0.20

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

** $Pcm = C + Si/30 + (Mn + Cu + Cr)/20 + Mo/15 + V/10 + Ni/60 + 5B$

表2 開発鋼の母材特性。

板厚 (mm)	引張試験			シャルピー 衝撃試験		アレスト 試験		Y 指数
	YP (N/mm ²)	TS (N/mm ²)	EL (%)	vE ₋₄₀ (J)	vTrs (°C)	Kca at -10°C (N/mm ^{3/2})		
100	493	591	28	325	-86	11,230	-144	
開発目標	≥460	570-720	≥20	≥75	—	≥8,000	—	

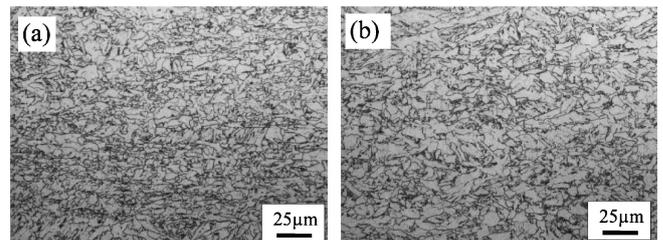


図5 開発鋼のマイクロ組織。(a)板厚1/4, (b)板厚中央部。

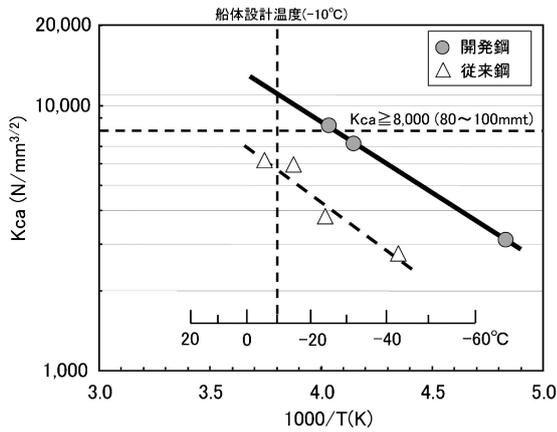


図6 開発鋼の温度勾配型 ESO 試験結果.

る。すなわち板厚 50 mm 以上 80 mm 以下の鋼板に必要なアレスト性能は船体設計温度である -10°C において K_{ca} 値が $6,000 \text{ N/mm}^{3/2}$ 以上であるのに対して板厚 80 mm 超え 100 mm 以下の超極厚材ではさらに高いアレスト性能 ($K_{ca} \geq 8,000 \text{ N/mm}^{3/2}$) が必要であることが示されている⁽¹³⁾。開発鋼は超極厚材に必要なアレスト性能を十分満足する。開発鋼のアレスト性能を確認するためにアップパーデッキで発生した脆性亀裂をハッチコーミングで停止させるケースを想定した超大型破壊試験を実施し、実構造体として良好なアレスト性能を有していることを検証済みである。

次に開発鋼の多層溶接継手性能を評価した。溶接条件を表 3 に示す。継手作製には造船所で一般的に用いられているフラックスコールドワイヤーク溶接 (FCAW) とサブマージーク溶接 (SAW) により継手を作製評価した。継手評価結果を表 4 に示す。継手引張特性、シャルピー衝撃特性ともに目標値を満足する良好な特性が得られた。また、継手の破壊靱性を評価する CTOD 試験においても目標値を満足する良好な結果が得られた。

以上示したように開発鋼は集合組織制御技術と低 P_{cm} 値成分設計により高いアレスト性能と溶接継手性能の両立を達成した。

4. 実用化状況および今後の展開

集合組織制御による高アレスト鋼の特許は多数出願されており、特許第 5304924 号等これまでに 20 件以上国内特許登録査定を受けている。海外でもアジアの近隣諸国を中心に登録査定を受けている。開発鋼は、大型コンテナ船に使用される極厚鋼板に関する国際船級協会連合の統一規則が適用されて以降初となる 18,000 TEU クラスの超大型コンテナ船に採用された。また、国内外で建造中の超大型コンテナ船にも採用されている。現在のコンテナ船で用いられている鋼板板厚は 80~90 mm が主流であるが、最大板厚 100 mm まで開発を完了しており、今後のさらなる船体サイズ大型化ニーズにも対応可能である。

表 3 溶接継手作製条件.

FCAW	溶接材料	ワイヤ: DW-460L (1.2 mm ϕ), 神戸製鋼 裏当材: FBB-3, 神戸製鋼
	溶接条件	溶接入熱: 1.5 kJ/mm, シールドガス: 100%CO ₂ パス間温度: 100°C
SAW	溶接材料	ワイヤ: KW-101B (4 mm ϕ), 神戸製鋼 フラックス: KB460, 神戸製鋼
	溶接条件	溶接入熱: 5.0 kJ/mm パス間温度: 100°C

開先形状

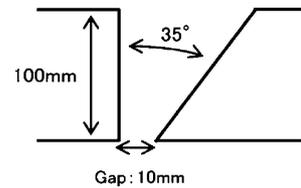


表 4 溶接継手特性.

溶接法	継手引張試験 TS (N/mm ²)	シャルピー衝撃試験 vE ₄₀ (J): 表面 2 mm			CTOD 試験
		溶接金属	溶接線	HAZ 2 mm	
FCAW	603	133	146	343	0.47, 0.90, 0.93
SAW	651	179	244	267	0.44, 0.61, 0.85
目標値	≥ 570	≥ 75 (平均)			$\delta \geq 0.15 \text{ mm}$

文 献

- (1) 国際船級協会 (IACS) 統一規則 UR S33, Requirements for Use of Extremely Thick Steel Plates in Container Ships (2013 年 1 月制定, 2015 年 9 月改訂).
- (2) 国際船級協会 (IACS) 統一規則 UR W31, Application of YP47 Steel Plates (2013 年 1 月制定, 2015 年 9 月改訂).
- (3) 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, **69** (1989), 227-238.
- (4) 鈴木伸一, 村岡隆二, 谷 三郎, 和田典巳: NKK 技報, **168** (1999), 78-82.
- (5) 田村栄一, 南二三吉: CAMP-ISIJ, **21** (2008), 564.
- (6) 金子雅人, 谷 徳孝: R&D 神戸製鋼技報, **61** (2011 年 8 月), 2-5.
- (7) 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, 清末孝昭, 松浦雅文, 岡本恵一: 日本船舶海洋項学会講演会論文集, **5E** (2007), 139-142.
- (8) 白幡浩幸, 皆川昌紀, 井上健裕, 大谷 潤, 船津裕二: まてりあ, **51** (2012), 76-78.
- (9) 石川 忠, 井上健裕, 萩原行人, 今井嗣郎: 新日鉄技報, **371** (1999), 107-111.
- (10) 半田恒久, 田川哲哉, 南二三吉: 鉄と鋼, **98** (2012), 32-38.
- (11) 津山青史, 竹内佳子, 西村公宏, 半田恒久: 溶接学会論文集, **30** (2012), 188-195.
- (12) 長谷和邦, 半田恒久, 衛藤太紀: JFE 技報, **33** (2014 年 2 月), 13-18.
- (13) http://www.classnk.or.jp/hp/ja/hp_news.aspx?id=2048&Type=press_release&layout=1