

脆性亀裂アレスト靱性に優れた大型コンテナ船用 極厚YP460N/mm²級鋼

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

白 幡 浩 幸*
Hiroyuki SHIRAHATA

柳 田 和 寿
Kazuhisa YANAGITA

石 田 浩 司
Kohji ISHIDA

大 川 鉄 平
Teppei OKAWA

井 上 健 裕
Takehiro INOUE

皆 川 昌 紀
Masanori MINAGAWA

中 島 清 孝
Kiyotaka NAKASHIMA

稲 見 彰 則
Akinori INAMI

船 津 裕 二
Yuuji FUNATSU

抄 録

脆性亀裂アレスト靱性に優れた大型コンテナ船用 YP460N/mm² 級鋼を開発した。開発に先立ち、高強度鋼のアレスト性支配因子を明確化、結晶粒径を定量化する手法を確立し、アレスト性向上のための最適な化学成分、TMCP 条件を見出した。開発鋼の優れたアレスト性能は、実構造を模擬した大型破壊試験でも実証された。さらに、従来の ESSO 試験に替わるアレスト性簡易評価手法を確立した。

Abstract

YP460N/mm² class heavy thick plate with excellent brittle crack arrest toughness for mega container ships has been developed. Prior to development, the effect of metallurgical factors on arrestability of high strength steel and a method to quantify the effective grain size were studied. On the basis of these findings, we have found the optimum chemical compositions and TMCP conditions to achieve high arrest toughness. Superior arrestability of the developed steel was also demonstrated in large scale fracture tests that simulate the real structure. In addition, simple method to evaluate arrestability in replace of conventional ESSO tests was established

1. 緒 言

近年、市場の国際化が進み、世界的規模で海上輸送量が増大し続ける中で、環境負荷の低減、輸送コストの低減を目的として、船舶の大型化、高性能化のニーズが高まっている。特にコンテナ船の大型化の傾向は顕著であり、最近では 14000 ～ 20000 TEU (twenty-foot equivalent unit : 20 フィートコンテナ換算個数) 級の超大型船が建造されるようになってきた。コンテナ船は上甲板に大きな開口部を有しており、その上縁部 (ハッチサイドコーミング) には、船体形状を維持するため、高強度の厚手鋼板が使用される。しかしながら、厚手鋼板の使用においては、耐脆性破壊特性低下による安全性の低下、船体重量の増加、溶接作業負荷の増大等に対する十分な配慮が必要である。

脆性破壊に対する安全性に関しては、脆性亀裂の発生防

止とともに、万一亀裂が発生した場合の伝播防止が非常に重要であるとの指摘がなされている¹⁾。脆性亀裂伝播挙動については、これまで造船研究協会 SR 委員会等において系統的な検討が行われてきた^{2,3)}。それらの検討結果から、板厚 40mm 以下の鋼板では溶接部で脆性亀裂が発生したとしても、溶接残留応力等の影響により、亀裂は母材側に逸れるため、母材の脆性亀裂伝播停止特性 (以下、アレスト性、またはアレスト靱性と表記) を確保することで溶接継手としての安全性を担保できると考えられてきた。

しかしながら、降伏点 (YP) 390N/mm² 級以上、板厚 65mm 以上の鋼板を用いた検討では、通常の造船 E グレードのシャルピー衝撃特性を満たす鋼材であっても長大亀裂を停止させるのは困難であることが明らかにされた⁴⁾。この研究をきっかけに、日本国内では産学連携で大型アレスト試験に関する共同研究が始まった。その研究成果を

* 大分技術研究部 主幹研究員 大分県大分市大字西ノ州 1 番地 〒 870-0992

基に、板厚 75 mm 以下の鋼板ではアレスト靱性 (K_{Ic}) が 6000 N/mm^{1.5} あれば脆性亀裂をアレストさせることができるとの指針が示された⁵⁾。これら一連の知見を踏まえ、(財)日本海事協会ではアレスト性保証規格が制定され⁶⁾、国際船級協会連合 (IACS) の UR (Unified Requirements) にも反映されることとなった⁷⁾。

上記の背景を踏まえ、新日鐵住金(株)では従来の YP390 N/mm² 鋼よりも高張力であり、かつアレスト靱性に優れた YP460 N/mm² 鋼を開発し、実船に適用した^{8,9)}。本報では、アレスト靱性を向上させるために確立した組織制御技術の概要、および開発鋼の特性について報告する。

2. 脆性亀裂アレスト靱性向上技術

一般的に靱性は脆性亀裂の発生特性を表すことが多く、その向上指針は概ね次の3点に集約される。

- ①有効結晶粒径 (d_{eff}) の微細化
- ②マトリクスの高靱化 (Ni 添加, 固溶 N 低減等)
- ③破壊の起点となる脆化相 (非金属介在物, 析出物, M-A 混合物 (Martensite Austenite constituent) 等) の低減

新日鐵住金ではアレスト性に及ぼす各種因子の影響について主に実験室製造鋼を用いた広範な検討を行い、アレスト性向上のための考え方も基本的には上記の通りであることを確認した。①の細粒化による効果は、破面の単位面積当たりのティアリッジ合計長さが増加し、破面形成エネルギーが増加するためと解釈される¹⁰⁾。②の Ni 添加による効果は従来から知られており¹¹⁾、実際に組織微細化効果とは異なることを確認している。これは、固溶 Ni による転位の易動度増加¹²⁾に起因するものと推測される。ただし、合金コストの観点から Ni が積極的に使用されることは少ない。③の脆化相もアレスト性に影響することが確認されたが、発生特性に及ぼす影響と比べれば小さい。上記因子のほか、アレスト性には集合組織も影響する¹³⁾ことが知られているが、過度に集合組織を発達させると生産性や材質異方性に問題が生じる可能性がある。以上の知見を踏まえ、本開発では①の d_{eff} 微細化を中心に検討することとした。

アレスト性を支配する d_{eff} は平均的な粒径と考えられるが、ベイナイト主体組織となる高強度鋼の場合、それがどのような組織単位に相当するかはこれまで明らかにされていなかった。そこで、EBSD (Electron Backscattering Diffraction) 法により温度勾配型 ESSO 試験片の破面近傍断面の結晶方位解析を行い、 d_{eff} と組織との対応について詳細な検討を実施した。亀裂が概ね平面的に伝播した領域を破面単位とすると、アレスト性は破面単位の平均サイズで整理でき、その破面単位はベイナイトのパケット、または数個のフェライト (α) 粒からなることを確認した。

また、図1に示すように、結晶方位差が同じであっても脆性亀裂伝播抵抗に大きな差が生じる場合があることを考慮して、伝播抵抗を表す新たな指標 (亀裂伝播偏向角) を

Crack propagation resistance	Large	Small
Schematic image of cleavage crack propagation (Top view)		
Misorientation	45°	45°
Deviation angle	45°	~0°

図1 脆性亀裂伝播抵抗の考え方
Basic concept of brittle crack propagation resistance

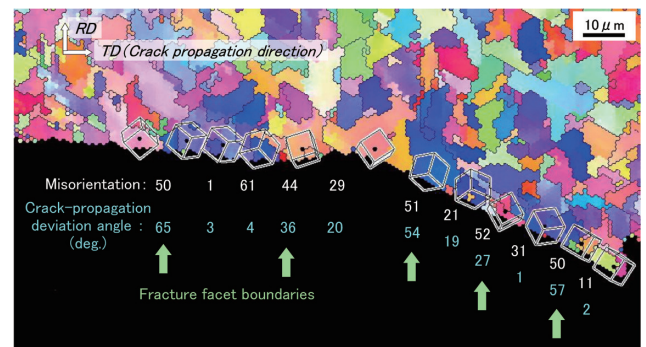


図2 EBSD による有効結晶粒径解析例
Example of analysis to estimate effective grain size by EBSD

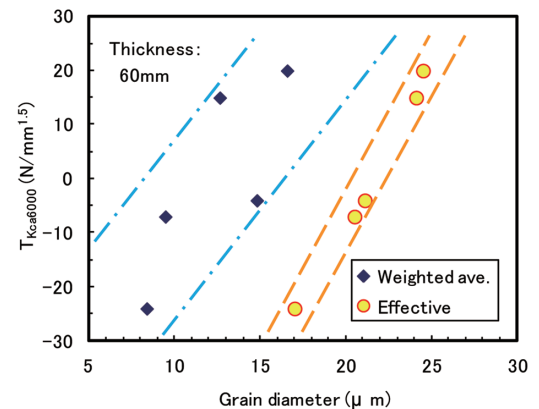


図3 粒径と $T_{KIc6000}$ との関係
Relationship between grain diameter estimated by EBSD and $T_{KIc6000}$ obtained by ESSO test

提案し、この偏向角が 25° 以上の境界が破面単位境界と対応することを見出した。解析結果の一例を図2に示す。通常 EBSD で求められる平均粒径は破面単位よりも小さく、 K_{Ic} が 6000 N/mm^{1.5} となる温度 $T_{KIc6000}$ との相関もあまりよくない。それに対して、上記知見を基に算出した d_{eff} は破面単位とほぼ等しく、図3に示すように $T_{KIc6000}$ との相関も良好である。

母材組織微細化の手段としては TMCP (Thermo Mechanical Control Process) がよく知られている。そこで、前述の d_{eff} を最も効果的に細粒化するための条件を見出すため、

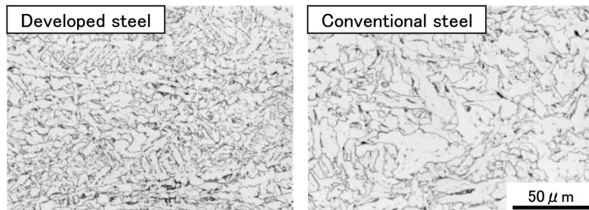


図4 開発鋼と従来鋼のミクロ組織

Microstructures of developed steel and conventional steel

一般的なスラブ加熱，制御圧延（Controlled Rolling：CR），加速冷却条件はもとより，CR中の各パス温度や圧下率まで含めて検討を行った。主な特徴は以下の通りである。

- 1) 加熱温度の狭レンジ制御による初期オーステナイト（ γ ）細粒化と合金元素溶体化の両立
- 2) CRのパススケジュール（温度，圧下率）最適化による γ 中への効率的な歪蓄積
- 3) CR後の強冷却による変態温度低温化， d_{eff} 細粒化

図4に従来鋼（通常のTMCPを適用したYP390鋼）と開発鋼（上記の条件で製造したYP460鋼）の母材ミクロ組織写真を示す。開発鋼の方が明らかに細粒となっていることがわかる。その結果，アレスト性が著しく向上する。

3. 開発鋼の特性

3.1 母材特性

上記の指針に基づき，板厚80mmと90mmの鋼板を製造した。開発鋼の化学成分，および母材特性を表1，2に示す。母材の機械的性質は目標強度，伸び，シャルピー特性を満足している。また，図5に示すように，標準 ESSO 試験により評価したアレスト靱性も良好であることがわかる。図6に $t/4$ （ t ：板厚）および $t/2$ 部のミクロ組織を示す。どちらも微細な α とベイナイトからなる組織であり，これが開発鋼の靱性，アレスト性が良好であった原因と考えられる。

表1 開発鋼の化学成分例

Typical chemical compositions of steels developed

Thickness (mm)	(mass%)						
	C	Si	Mn	P	S	Others	Ceq*
80	0.09	0.10	1.61	0.008	0.002	Mo, Nb, V, Ti, B	0.38
90	0.09	0.18	1.62	0.009	0.003	Cu, Ni, Mo, Nb, V, Ti, B	0.44

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

表2 開発鋼の機械的性質

Mechanical properties of steels developed

Thickness (mm)	Tensile test (t/4)			Charpy impact test (t/4)	ESSO test
	YP (N/mm ²)	TS (N/mm ²)	El (%)	vE _{-40°C} [ave./min.] (J)	Kca _{-10°C} (N/mm ^{1.5})
80	499	592	27	293/289	8292
90	500	587	28	282/272	10226
Specification	≥460	570-720	≥17	≥53/37	≥6000

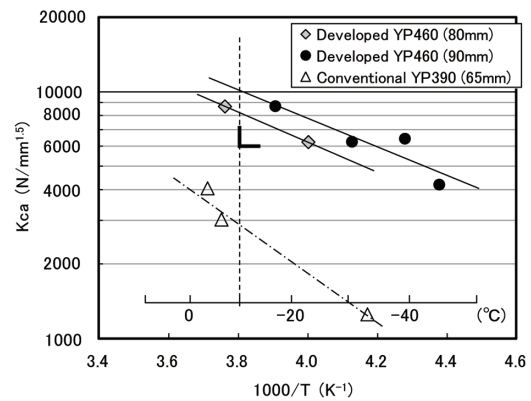


図5 温度勾配型 ESSO 試験結果

Results of temperature gradient type ESSO test

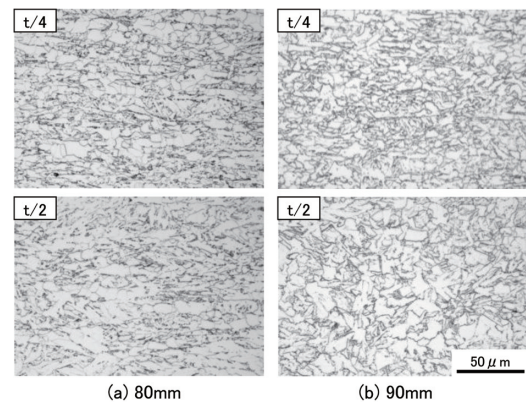


図6 開発鋼の母材ミクロ組織

Microstructures of steels developed

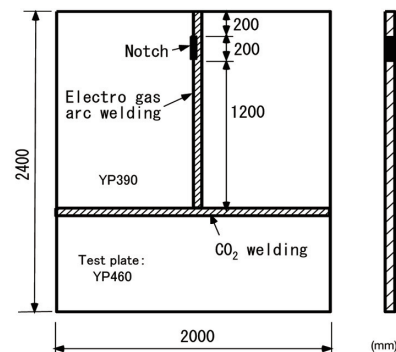


図7 大型破壊試験の例

Example of large scale fracture test

実構造でのアレスト性評価のため，8000トン引張試験機を用いた大型破壊試験も行った。結果の例を図7に示す。

表3 溶接条件, 溶接継手の機械的性質
Welding conditions and mechanical properties of welded joints

Thickness (mm)	Welding consumable	Welding conditions	Tensile test		Charpy impact test (t/4)			Deep notch
			TS (N/mm ²)	Fracture position	vE _{-20°C} [ave.] (J)			Kc _{-20°C} (N/mm ^{1.5})
					WM	FL	FL + 1 mm	
80	SF-47E*(1.2mmφ)	Groove angle: 40° Gap: 5 mm	633	Base plate	104	139	157	5234
90	SB41*(backing material)	300A, 31V, 290mm/min, 1.9kJ/mm, 100% CO ₂	676	Base plate	105	108	165	—
Specification			≥570	—	≥53			≥3580

*Nippon Steel & Sumikin Welding Co., Ltd.

WM: Weld metal, FL: Fusion line

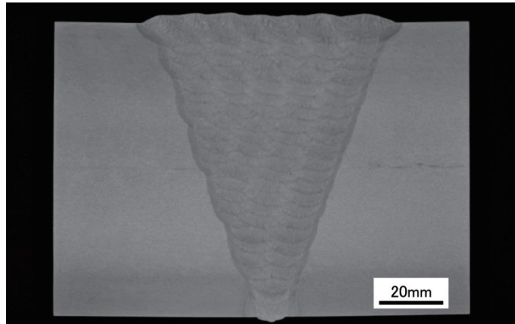


図8 継手マクロ組織 (板厚 90mm)
Macrostructure of welded joint

これはアッパーデッキ (YP390) の大入熱溶接部で発生した脆性亀裂をハッチサイドコーミング (YP460) で停止させるケースを想定している。-10℃で試験板 (YP460) に突入した亀裂は 30mm 程度で停止し、構造体としても良好なアレスト特性を有することを確認した⁸⁾。

3.2 溶接継手特性

開発鋼の継手特性を評価するため、ガスメタルアーク溶接により多層溶接継手を作製した。表3に溶接条件、継手特性評価結果を、図8に継手マクロの例を示す。引張強度、シャルピー吸収エネルギーはともに目標値を満足している。また、板厚 80mm の鋼板ではディープノッチ試験 (試験片幅: 480mm, 中央の溶融線部に 0.1mm 幅, 240mm 長の機械切欠導入) も行った。その結果、-20℃における破壊靱性値 (Kc) は 5000N/mm^{1.5} 以上であり、良好な脆性亀裂発生特性を有している。

4. 脆性亀裂アレスト靱性の簡易評価法

鋼板のアレスト靱性を評価するためには、全厚で 500mm 角の大型試験片を用いた ESSO 試験を複数体実施する必要がある。この試験コストが大きく、さらに工程ネックとなりうるため生産能力にも影響を及ぼす等問題が多い。そのため、ESSO 試験に替わる簡易な評価手法の確立が望まれていた。そこで、板厚 40 ~ 100mm, YP390 ~ 460 クラスの実機鋼板を用いて、各板厚部位から種々の小型試験片を採取して試験を行い、ESSO 試験結果との相関を調査した。その結果、表層の NRL 落重試験と t/4 部の V ノッチシャルピー試験を組み合わせた方法が適切であることを見

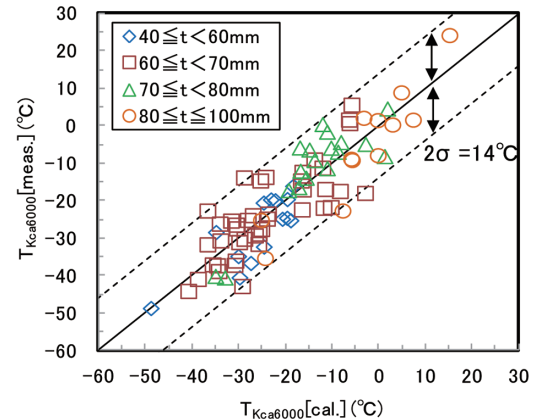


図9 $T_{Kca6000}$ 推定値と実測値の関係
Relationship between $T_{Kca6000}$ [cal.] and $T_{Kca6000}$ [meas.]

出し、落重の無延性遷移温度 (NDTT), シャルピーの破面遷移温度 (vTrs) を含む $T_{Kca6000}$ 推定モデルを考案した。本モデルによる $T_{Kca6000}$ 推定値と実測値の関係を図9に示す。誤差は±14℃の範囲に収まっており、推定精度は良好である。この手法に基づき小型試験によるアレスト性合否判定基準を確立した。

5. 結 言

超大型コンテナ船用 YP460 鋼の開発に際し、ミクロな結晶方位解析から大型破壊試験までを駆使して、脆性亀裂アレスト靱性を向上させるための組織制御技術を確立した。また、従来の ESSO 試験に替わるアレスト性の簡易評価法も確立した。開発鋼はこれまでに約 30000 トンの出荷実績を有しており、今後の需要拡大にも対応できる体制を整えつつある。

参考文献

- 1) 山口欣弥 ほか: 日本船舶海洋工学会誌 KANRIN. (3), 70 (2005)
- 2) 日本造船研究協会第 147 研究部会: 船体用高張力鋼板大入熱溶接継手の脆性破壊強度評価に関する研究. 第 87 号, 1978 年 2 月
- 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) Inoue, T. et al.: Proc. of the 16th Int. Offshore and Polar Engineering (ISOPE) Conf. 2006, p. 132
- 5) 日本海事協会: 脆性亀裂アレスト設計指針. 2009

- 6) 日本海事協会：鋼船規則 K 編材料. 2006
- 7) IACS: Requirements for Use of Extremely Thick Steel Plates, UR. S33, 2013
- 8) Funatsu, Y. et al.: Proc. of the 20th Int. Offshore and Polar Engineering (ISOPE) Conf. 2010, p. 102
- 9) 白幡浩幸 ほか：まてりあ. 51, 76 (2012)
- 10) 石川忠 ほか：新日鉄技報. (348), 3 (1993)
- 11) 長谷部茂雄 ほか：鉄と鋼. 61, 875 (1975)
- 12) 前野圭輝 ほか：鉄と鋼. 98, 667 (2012)
- 13) 半田恒久 ほか：鉄と鋼. 98, 548 (2012)



白幡浩幸 Hiroyuki SHIRAHATA
大分技術研究部 主幹研究員
大分県大分市大字西ノ州1番地 〒870-0992



大川鉄平 Teppei OKAWA
大分技術研究部 主任研究員 工博



中島清孝 Kiyotaka NAKASHIMA
大分製鉄所 品質管理部 厚板管理室 主幹
工博



柳田和寿 Kazuhisa YANAGITA
大分製鉄所 品質管理部 厚板管理室



井上健裕 Takehiro INOUE
鉄鋼研究所 材料信頼性研究部
上席主幹研究員 Ph.D.



稲見彰則 Akinori INAMI
厚板事業部 厚板技術部 厚板商品技術室
主幹



石田浩司 Kohji ISHIDA
大分製鉄所 品質管理部 厚板管理室長



皆川昌紀 Masanori MINAGAWA
鉄鋼研究所 厚板・形鋼研究部 主幹研究員



船津裕二 Yuuji FUNATSU
(財)日本海事協会 研究開発推進室
プロジェクトマネージャー 工博