

制御圧延法の高度化による厚肉造船用鋼板のアレスト性能向上

Enhancement of Crack Arrestability of Steel Plates with Heavy Thickness by Advanced Controlled Rolling

西村 公宏 NISHIMURA Kimihiro JFE スチール スチール研究所 厚板・形鋼研究部 主任研究員(課長)
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)
橋本 正幸 HASHIMOTO Masayuki JFE スチール 西日本製鉄所 鋼材商品技術部厚板・鋳鍛室 主任部員(副課長)

要旨

厚肉造船用鋼板の脆性き裂伝播停止性能(アレスト性能)の向上を検討した。制御圧延条件の適正化と *Super-OLAC*[®] (*On-Line Accelerated Cooling*) による制御冷却技術により、板厚 60 mm 以上の高強度厚肉材において -10℃での脆性き裂伝播停止靱性(Kca)が 6 000 N/mm^{1.5} を超える高いアレスト性能を有する鋼板の製造方法を開発した。開発鋼はフェライト粒の細粒化による靱性向上に加えて、集合組織を発達させることによりアレスト性能の向上を図っている。さらに、コンテナ船の構造を模擬した構造体を用いた脆性き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。開発鋼は大型コンテナ船の安全性確保に大きく寄与するものと考えられる。

Abstract:

Enhancement of performance to arrest brittle crack propagation is investigated for heavy-thickness steel plates used for ship structure. Highly optimized controlled rolling process and advanced cooling by *Super-OLAC*[®] (*On-Line Accelerated Cooling*) are applied to attain crack arrest toughness Kca greater than 6 000 N/mm^{1.5} in high strength steel plates with 60 mm thickness. The produced steel plate is characterized by both refinement of microstructure and texture control in terms of improving arrestability. The ESSO test of tee joint structure, supposing the structure of hatch coming of container ships, was carried out, and the results revealed that the developed steel plate has good performance to stop the brittle crack propagation. The developed steel plate is supposed to be utilized to ensure the safety of large container ships against brittle fracture.

1. はじめに

近年、船舶の大型化にともない、使用される鋼板の厚肉化が進んでいる¹⁾。特にコンテナ船はその船殻構造から、ハッチコーミング、アッパーデッキには強度部材として板厚 60~80 mm に及ぶ厚肉の鋼板が使用されている。ハッチコーミングの接合には大入熱溶接が用いられているが、厚肉化にともない、鋼材にはさらなる大入熱溶接への対応が求められるようになった。その要求に応じた鋼材が開発されており^{2,3)}、大型コンテナ船の建造効率向上に大きく寄与している。

一方、船舶の安全性の確保、脆性破壊の防止の観点から、鋼材にはあるレベル以上の破壊靱性値が求められる。き裂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

重要部位では E 級鋼のような靱性に優れた材料を用い、かつ建造時の加工や溶接施工管理にも十分な配慮がなされている。したがって、脆性き裂の発生の可能性は極めて低いといえるが、万が一脆性き裂を発生させても、その伝播を停止させて安全性を確保するという考え方がある⁴⁾。鋼材の脆性き裂伝播停止性能(アレスト性能)に関しては多くの研究例があり、長大き裂の停止には 4 000~6 000 N/mm^{1.5} の Kca 値(脆性き裂伝播停止靱性)が必要であるとされている⁴⁾。また、溶接部から発生した脆性き裂は溶接残留応力の効果で母材側に逸れるため、この場合も母材のアレスト性能により安全性は確保されるとされている。

しかし、これらの研究は主として板厚 50 mm 以下の鋼板に関するものであり、60 mm~80 mm とした厚肉の船体構造用鋼板についてのアレスト現象に関する研究例は少ない。さらに、最近、厚肉材の大入熱溶接継手ではボンド部に沿って脆性き裂が直進伝播する事例が報告されており、厚肉造船材を使用した船体構造の安全性について問題

提起がなされている^{1,13)}。

最終的に船体の大規模破壊を回避するためには、構造設計と材料の両面からのアプローチが考えられる。大型コンテナ船の構造に関してはハッチコーミングとアップパーデッキの接合部をシフトさせ、かつ両部材のT継手部に未溶着部を持たせる構造が提案されており、模擬構造体試験によりその効果が実証されている^{5,6,14)}。

しかし、さらに安全性を高めるために、アレスト性能を高めた材料が必要となる場合も考えられる。本報告では厚肉造船用鋼板のアレスト性能向上を検討し、Kca値が6000 N/mm^{1.5}を超える高アレスト鋼板の製造方法を開発したので、その特性とともに報告する。

2. 開発鋼の製造指針

アレスト性能を向上させるためにはマイクロ組織の微細化による靱性向上が有効である。実際にシャルピー靱性とKca値、NDT温度とはよい相関があることが実験的にも明らかにされており⁷⁾、母材靱性向上はアレスト性能向上の第一の指針となる⁸⁾。

また、集合組織を発達させることにより、同等のシャルピー靱性であってもアレスト性能に大きな差異があることも知られている⁹⁾。すなわち、フェライトの加工集合組織(鋼板表面に平行に(100)面が発達)や変態集合組織が発達した鋼板ではアレスト性能がさらに向上することが報告されている¹⁰⁾。

高靱性かつ高強度鋼板の製造方法としてTMCP(thermo-mechanical control process)は極めて有効である。オース

テナイト未再結晶温度域での圧延とその後の加速冷却の適用によりフェライト粒は細粒化し靱性向上に寄与する。一方、集合組織を発達させるためには、より高度な制御圧延、かつ低温側での圧延が必要である。加えて、厚肉材では圧下率が限られることにより、薄肉材より細粒化には不利であるため、細粒化と集合組織制御の両立は困難となってくる。

本開発では、厚肉材について制御圧延条件の最適化、すなわちオーステナイト再結晶域、未再結晶域、およびそれ以下の温度での圧延配分とその厳格管理によって、アレスト性能の向上を達成している。また、高強度化との両立のために圧延後の加速冷却を適用している。

3. 開発鋼の特性

3.1 製造プロセス

表1に通常鋼と開発鋼の化学成分を示す。母材靱性の確保と溶接性に配慮してC量は0.09%と低い。また、制御圧延をより有効にするため微量のNbを添加している。従来鋼と開発鋼の成分は同等であり、アレスト性能の向上のためには化学成分の調整よりも前述したようにTMCP条件の高度化によっている。具体的には、開発鋼Aはフェライトの細粒化、開発鋼Bはそれに加えて集合組織制御によるアレスト性能向上を目指した。圧延後はSuper-OLAC®(On-Line Accelerated Cooling)による制御冷却技術を最大限に活用して低C_{eq}での厚肉材の強度確保と細粒化を図っている。

表1 供試鋼の化学成分

Table 1 Chemical compositions of steels

	C	Si	Mn	P	S	Others	C _{eq} *	P _{CM} **
Conventional	0.09	0.34	1.43	0.01	0.002	Nb, Ti	0.33	0.17
Developed A	0.09	0.32	1.46	0.01	0.003		0.33	0.17
Developed B	0.09	0.35	1.45	0.01	0.003		0.33	0.17

*C_{eq} = C + Mn/6 + (Cr + Mo + V)/5 + (Cu + Ni)/15 **P_{CM} = C + Si/30 + (Mn + Cu + Cr)/20 + Mo/15 + V/10 + Ni/60 + 5B

表2 供試鋼の機械的特性

Table 2 Mechanical properties of steel plates

Steel	Thickness (mm)	Position	Tensile test				Charpy impact test		
			Direction	YP (MPa)	TS (MPa)	El (%)	Direction	√E ₋₄₀ (J)	√E ₋₈₀ (J)
Conventional	60	1/4t	C	476	569	27	L	301	77
		1/2t	C	405	538	26	L	53	-
Developed A	60	1/4t	C	468	543	30	L	305	249
		1/2t	C	393	510	30	L	339	299
Developed B	60	1/4t	C	412	540	30	L	317	309
		1/2t	C	424	511	30	L	308	159

√E₋₄₀: Absorbed energy at -40°C √E₋₈₀: Absorbed energy at -80°C

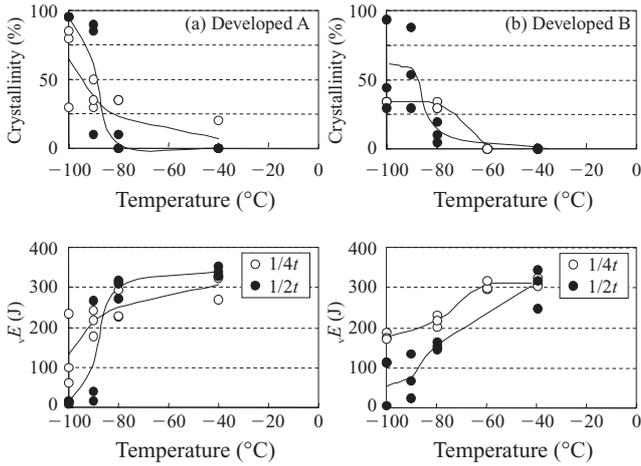


図1 供試鋼のシャルピー遷移カーブ (L方向)

Fig.1 Charpy transition curves of steel plates (L direction)

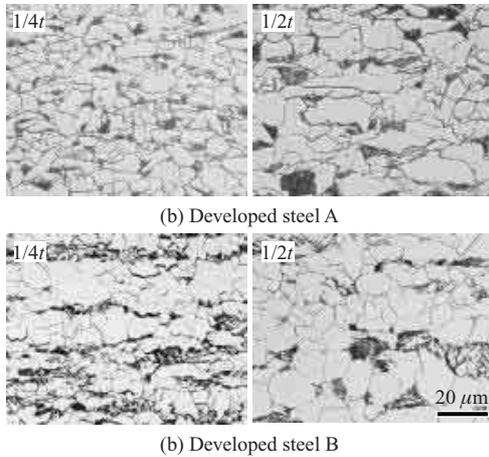


写真1 供試鋼のマイクロ組織
Photo 1 Microstructure of steels

3.2 母材機械的特性

表2に通常鋼と開発鋼の機械的特性を示す。引張強度は 390 N/mm^2 級を満足しており、そのレベルにも大きな違いはない。また、 -40°C でのシャルピー吸収エネルギーは 300 J 以上とEグレードの規格を十分に満足している。さらに、開発鋼においては制御圧延の厳格化によりシャルピー靱性がより向上している。図1に開発鋼のシャルピー遷移カーブを示す。両鋼ともにシャルピー破面遷移温度は板厚 $1/4t$ 部および $1/2t$ 部で $-80\sim-100^\circ\text{C}$ と良好であり、開発鋼A、Bには一般的な機械的特性に関する差異はほとんどないといえる。

写真1に開発鋼の板厚 $1/4t$ 部、 $1/2t$ 部のマイクロ組織を示す。開発鋼Aは適正な制御圧延によりフェライトが細粒化した典型的なフェライト-パーライト鋼である。一方、開発鋼Bは同じくフェライト-パーライト組織であるが、フェライト粒の細粒化とともに、加工により下部組織が見られる粒が存在することが分かる。

3.3 集合組織

板厚中央部より試験片を採取し、集合組織をX線回折強度比によって評価した。代表的な面方位である $\text{ND} // \langle 110 \rangle$ 、 $\text{ND} // \langle 100 \rangle$ 、 $\text{ND} // \langle 211 \rangle$ 、 $\text{ND} // \langle 111 \rangle$ について結晶方位のランダムな標準資料のX線回折強度の比として、面集積度を算出した。その結果を図2に示す。開発鋼A、Bともに(211)面と(111)面がやや標準資料より発達しているが、違いは(100)面、(211)面集積度に現れている。特に、(100)面集積度は開発鋼Aが1.2とほとんどランダム鋼板と変わらないのに対して、開発鋼Bでは2.0を超える値となっている。これらの面が発達することによりアレスト性能が向上することが指摘されている。

さらに、詳細に集合組織を解析するために、3次元方位解析を行った。図3は3次元結晶方位分布関数の主要な方位が現れる $\phi_2 = 45^\circ$ 断面を示す。これにより、面集積度では表現できない正確な面方位が解析できる。開発鋼Bでは $\text{ND} // \langle 100 \rangle$ が発達していたが、その主方位は $\{100\} \langle 011 \rangle$ であることが分かる。(100)面が発達した鋼板においてはマイクロクラックの発生による脆性き裂先端の応力緩和効果により、アレスト性能が向上するメカニズムとともに、き裂進展方向に対してへき開面が 45° 傾いた方向に集積していることによるき裂の屈曲進展の効果が指摘されてい

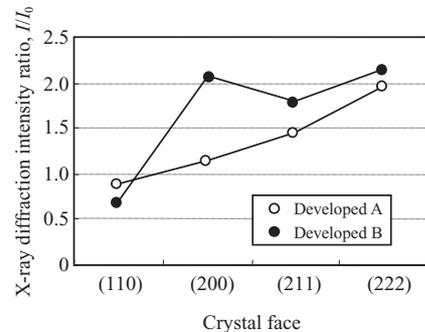


図2 供試鋼の板面に平行な面集積度

Fig.2 X-ray diffraction intensity ratio of textures of parallel to surface of steel plates

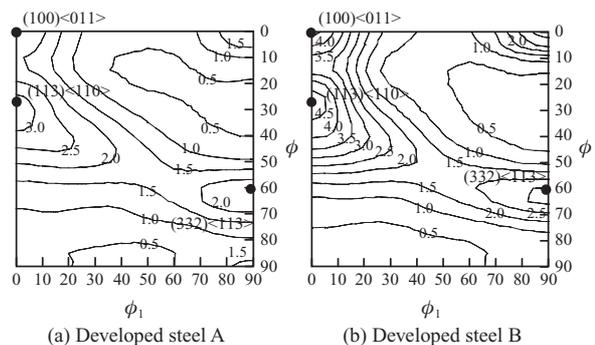


図3 供試鋼の3次元結晶方位解析結果 ($\phi_2 = 45^\circ$ 断面)

Fig.3 $\phi_2 = 45^\circ$ sections of crystallite orientation distribution function of steels

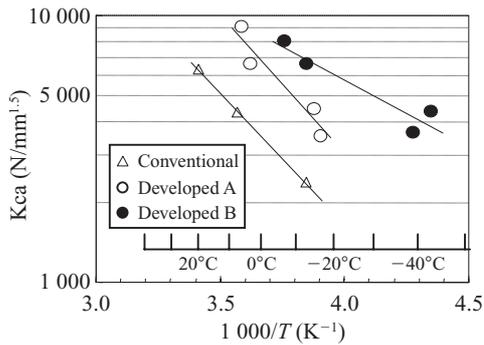


図4 供試鋼の ESSO 試験結果
Fig. 4 ESSO test results of steel plates

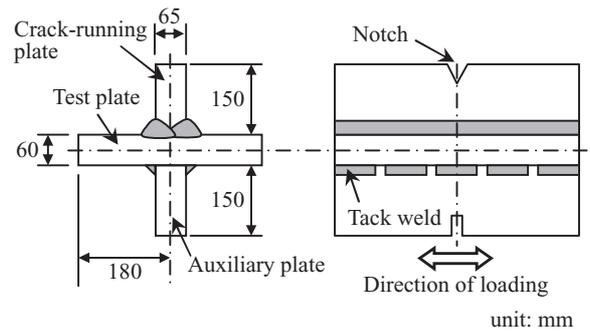


図5 T字継手 ESSO 試験の試験体形状
Fig. 5 Dimension of T joint ESSO test specimen

る¹¹⁾。図3より開発鋼は従来鋼よりもこれらの効果を発現しやすい方位分布となっていることが分かる。また(211)面の発達もアレスト性能の向上に寄与するものと考えられる。

以上のことから、通常鋼と開発鋼の特性差は集合組織の発達度にあるといえる。

3.4 脆性き裂伝播停止性能

脆性き裂伝播停止性能を評価するため、温度勾配型 ESSO 試験を行った。試験片幅は 500 mm であり応力負荷方向を L 方向になるように試験片を採取した。従来鋼と開発鋼の Kca 値の温度依存性を図4に示す。船体の設計温度である -10°C での Kca 値は従来鋼では 2500 N/mm^{1.5} であるが、高靱性化を図った開発鋼 A では 4900 N/mm^{1.5} と向上した。これはフェライト細粒化による靱性向上の効果である。さらに集合組織制御を利用した開発鋼 B では 7300 N/mm^{1.5} とアレスト性能が向上した。図1に示すように両鋼のシャルピー靱性値は同等であり、アレスト性能向上のメカニズムは集合組織の発達によるものと考えられる。

また、長大き裂の停止には 4000~6000 N/mm^{1.5} の Kca 値が必要であるとされており⁴⁾、本供試鋼は実構造においてもクラックアレスターとしての性能を有すると考えられる。

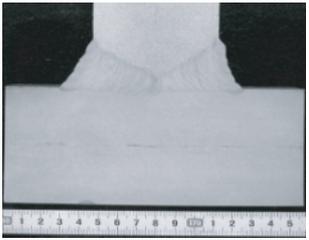
4. 構造体試験によるアレスト性能実証

開発鋼のアレスト性能を実証するため、構造体による試験を行った。開発鋼がアッパーデッキに使用されることを想定して、T字継手による脆性き裂伝播停止試験を行った^{12,15)}。

試験体の形状を図5に示す。供試鋼板に脆性き裂を発生伝播させる板厚 65 mm の脆化鋼板を助走板として完全溶込み溶接によって接合し T 字継手を作製した。溶接条件および T 継手部の断面マクロ写真の例を表3に示す。供試鋼板の下側には、引張荷重を負荷する場合に曲げ応力が生じないように、補助板を仮付け溶接にて取り付け、試験機の

表3 T字継手の溶接条件

Table 3 Welding condition of T joint

Welding method	CO ₂ arc welding
Welding consumables	YFL-C504R φ1.2 mm
Welding condition	180–280 A, 20–34 V, 20–45 cpm
Welding layer and Pass for each side	9 layers, 20–24 pass
Cross section of T joint	

タブ板へ溶接した。

試験体を -10°C に冷却し 70 min 保持後、公称応力 235 N/mm² に相当する荷重を負荷し、機械ノッチ部に打撃を与えて脆性き裂を発生・伝播させた。供試鋼板の表面より動的に脆性き裂を突入させてき裂の伝播停止挙動を調査した。

供試鋼板の板厚は 60 mm として、-10°C の Kca 値が 2500, 4900, 7300 N/mm^{1.5} を有する 3 種類の鋼板を試験した。

試験結果を表4および写真2に示す。なお、ひずみゲージによる動的計測により試験中のき裂伝播による荷重低下は極めて小さく、試験が有効であることを確認している。供試鋼板の Kca 値が 2500 N/mm^{1.5} の場合、脆性き裂は助走板から溶接金属を介して供試鋼板に突入し、鋼板を貫通した。一方、供試鋼板の Kca 値が高い場合には、き裂は停

表4 T字継手 ESSO 試験の試験条件

Table 4 Test condition and results of T joint ESSO test

Test temperature (°C)	-10		
Applied stress (MPa)	235		
Kca (-10°C) of test plate (N/mm ^{1.5})	2500	4900	7300
Result	Go	Arrest	Arrest

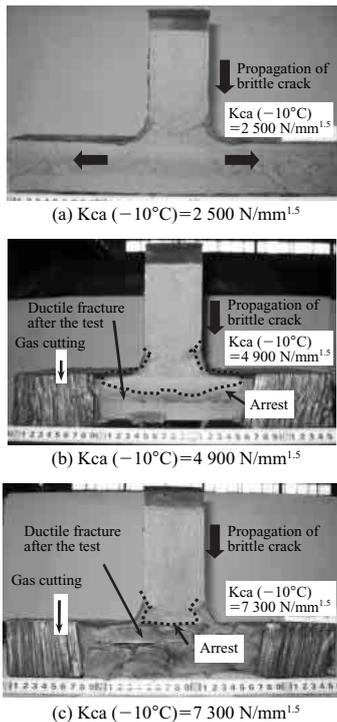


写真2 T字継手 ESSO 試験の破面

Photo 2 Fracture surface of T joint ESSO test specimen

止した。Kca 値が $4900 \text{ N/mm}^{1.5}$ の場合、き裂は供試鋼板の内部に流れ込んだが、板厚を貫通することなく内部で停止した。また、Kca 値が $7300 \text{ N/mm}^{1.5}$ とさらに大きい場合には、き裂は供試鋼板突入直後に停止した。

FEM (有限要素法) による計算結果によれば、脆性き裂が鋼板表面に突入した時点での K 値は約 $6000 \text{ N/mm}^{1.5}$ と計算され、鋼板内部へき裂が流れ込むとともに K 値は低下する。写真2の鋼板 Kca 値に依存したき裂停止挙動は、定性的にはこの計算結果で説明できる。

5. おわりに

制御圧延の高度化により、板厚 60 mm の厚肉材のアレスト性能向上を達成した。開発した鋼板の特長と得られた結果を以下にまとめる。

- (1) 制御圧延の高度化により、板厚 50 mm を超える厚肉材においてもフェライト細粒化により靱性向上と集合組織の発達との両立が可能である。開発鋼の -10°C での Kca 値は $7000 \text{ N/mm}^{1.5}$ を超える。
- (2) 開発鋼は ND//〈100〉の集積度が高く、その主方位は $\{100\} \langle 011 \rangle$ である。アレスト性能の向上はこの面方位の集積によるものと考えられる。
- (3) コンテナ船のハッチコームとアップパーデッキの接合部を模擬した T 字 ESSO 試験を行い、開発鋼の優れたアレスト性能を実証した。き裂伝播停止の挙動は鋼板 Kca 値によって説明できた。

本鋼材は溶接性など、船体構造用として問題ない特性を有することを確認している。その性能を最大限に活用した設計によって、よりいっそうの船舶の安全性向上、特に大型コンテナ船の安全性確保に寄与するものと考えている。

参考文献

- 1) 山口欣弥, 北田博重, 矢島浩, 廣田一博, 白木原浩. 超大型コンテナ船の開発—新しい高強度極厚鋼板の実用—. 日本船舶海洋工学会誌. 2005, vol. 3, p. 70.
- 2) 鈴木伸一, 一宮克行, 秋田俊和. 溶接熱影響部靱性に優れた造船用高張力鋼板. JFE 技報. 2007, no. 4, p. 12.
- 3) 鈴木伸一, 大井健次, 一宮克行, 木谷靖, 村上善明. マイクロアロイニング制御による大入熱溶接熱影響部靱性向上技術「JFE EWEL」とそれをを用いた厚鋼板の開発. まてりあ. 2004, vol. 43, p. 232.
- 4) 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総合報告書. 日本造船研究協会報告書第 100 号. 1985.
- 5) 半田恒久, 鈴木伸一, 豊田昌信, 与倉隆人, 木治昇, 中西保正. 厚板 T 継手における脆性き裂伝播停止挙動. 日本船舶海洋工学会講演会論文集. 2006, vol. 3, p. 363.
- 6) 半田恒久, 鈴木伸一, 豊田昌信, 与倉隆人, 木治昇, 中西保正. 厚板 T 継手における長大脆性き裂の停止挙動. 日本船舶海洋工学会講演会論文集. 2007, vol. 4, p. 461.
- 7) 日本溶接協会. 低温用圧延鋼板判定基準. WES3003-1995. 1995.
- 8) 鈴木伸一, 村岡隆二, 谷三郎, 和田典巳. 船体用高アレスト鋼. NKK 技報. 1999, no. 168, p. 78.
- 9) 多田益男, 矢島浩, 出口明雄, 仁藤弘, 勝田順一. セパレーションを発生する鋼板の破壊靱性とその評価. 西部造船会々報. 1984, vol. 69, p. 227.
- 10) 半田恒久, 久保高宏, 安田功一. 脆性き裂伝播停止靱性遷移温度とシャルピー遷移温度の相関関係に及ぼす集合組織の影響. 材料と組織の特性部会「構造材料の強度と破壊」. フォーラム, シンポジウム「構造材料の組織と各種破壊特性研究の現状」. 2006, p. 13.
- 11) 勝田順一, 上田正治, 豊貞雅宏. 二相域制御圧延した TMCP 鋼の脆性き裂伝播解析. 日本造船学会論文集. 1990, vol. 167, p. 261.
- 12) 半田恒久, 久保高宏, 川端文丸, 西村公宏, 鈴木伸一, 潮海弘資, 宮田隆司. 厚板 T 継手における脆性き裂伝播停止挙動に及ぼす鋼板 Kca 値の影響. 日本船舶海洋工学会講演会論文集. 2007, vol. 4, p. 459.
- 13) 井上健裕, 石川忠, 今井嗣郎, 小関正, 廣田一博, 多田益男, 山口欣弥, 松本俊之, 矢島浩. 厚手造船用鋼における長大き裂伝播挙動. 日本船舶海洋工学会講演会論文集. 2006, vol. 3, p. 359.
- 14) 田村栄一, 中川知和, 古川直宏, 豊田昌信, 木治昇. 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). CAMP-ISIJ. 2007, vol. 20, p. 470.
- 15) 田村栄一, 中川知和, 古川直宏, 豊田昌信, 木治昇. 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 1 報 板厚 60 mm の鋼板を用いた T 継手における脆性き裂伝播停止). CAMP-ISIJ. 2007, vol. 20, p. 469.



西村 公宏



半田 恒久



橋本 正幸