

解説

受賞技術-29

脆性き裂伝播抵抗に優れる造船用厚鋼板

Thick Plate with Excellent Brittle Crack Arrestability for Shipbuilding

JFEスチール(株)
知的財産部
主任部員

竹内佳子
Yoshiko Takeuchi

JFEスチール(株)
技術企画部
部長(理事)

長谷和邦
Kazukuni Hase

JFEスチール(株)
スチール研究所 鋼材研究部 部長
(現(株)豊田中央研究所)

三田尾眞司
Shinji Mitao

JFEスチール(株)
スチール研究所 鋼材研究部
部長

村上善明
Yoshiaki Murakami

JFEスチール(株)
スチール研究所 接合・強度研究部
主任研究員

半田恒久
Tsunehisa Handa

JFEスチール(株)
スチール研究所 研究企画部
主任部員

植田圭治
Keiji Ueda

1 はじめに

近年、中国をはじめとするアジア諸国の経済発展にともない、海上貨物輸送量は年々増加傾向にある。港で荷下ろしを行った後にトラック等による地上の輸送へスムーズに移行できる特長をもつため、コンテナ船による輸送は1950年代に開始して以来輸送量が拡大し、現在ではもっとも一般的な海上輸送方法の一つとなった。大切な荷物を安全に運搬するためには、船舶の安全対策を行うことは非常に重要である。コンテナ船においては、例えば船体の沈没を防ぐため、船側および船底を二重構造とし、さらに隔壁はそれぞれ水密性を確保するように設計されている。また船体の建造時には、溶接後に超音波探傷検査を実施することで溶接欠陥を存在させないとするなどと、様々な安全対策がとられている。加えてコンテナ船特有の船体構造として図1¹⁾に示す通り、コンテナを船体上部から出し入れしやすいように上部が大きく開口しており、船側上弦部には高強度かつ極厚鋼板を使用したうえで、脆性き裂の伝播に対する安全対策も必要となる。本報告では、コンテナ船の船体安全性向上に寄与する技術の一つである、脆性き裂の伝播を抑制する特性を有する高アレスト鋼について紹介する。

2 コンテナ船の動向と技術課題

コンテナ船は船体上部が大きく開口した構造であるため、船体強度確保の観点から船側上弦部に極厚高強度鋼板が使用さ

れている。原油タンカーやばら積み船など一般的な商船に使用されている鋼板板厚が10~20 mm程度であるのに対して、大型コンテナ船には板厚50mmを超える高強度厚鋼板が使用されている。コンテナ船のコンテナ積載数の変化を図2に示す²⁴⁾。1990年頃のコンテナ船は最大積載数が5,000 TEU (TEU: Twenty-foot Equivalent Unit、20フィートコンテナ換算) クラスであったが、その後最大積載量が増加し最近では20,000 TEUを超える超大型コンテナ船も登場している。コンテナ船の大型化にともない船側上弦部に使用される鋼板はYP315 N/mm²級からYP390 N/mm²級やYP460 N/mm²級へと高強度化し、

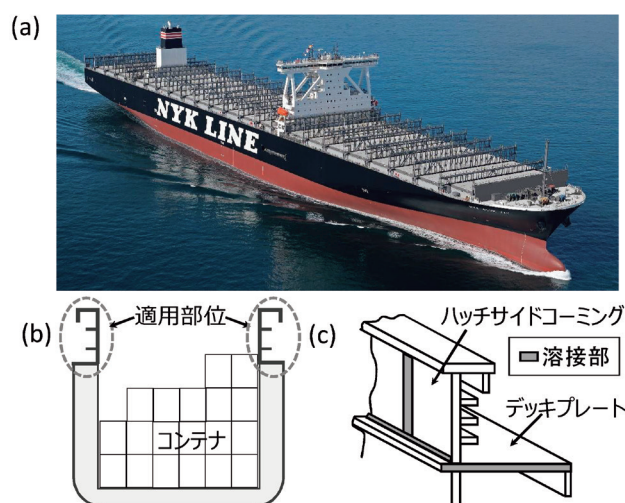


図1 コンテナ船の構造 (a) 大型コンテナ船の外観¹⁾
(b) 船体断面模式図 (c) 上部構造部の模式図

最新の超大型コンテナ船のハッチサイドコーミングには板厚 100 mm の YP460 N/mm² 級鋼が使用されている。一方、船体の大型化にともない新たな技術的課題が浮上した。すなわち、極厚鋼板を使用したコンテナ船では航行中の波浪の影響により万が一、溶接部にき裂が発生した場合、溶接線に沿って脆性き裂が伝播し、最悪の場合には船体に致命的損傷を与える可能性が示された⁵⁾。この課題に対応するために国際船級協会連合 (IACS ; International Association of Classification Societies) は 2014 年 1 月以降に建造契約するコンテナ船に対して、船体上部に板厚 50 mm 以上の YP390 N/mm² を超える高強度鋼板を用いる場合については、万が一脆性き裂が発生してもそのき裂を停止 (アレスト) させる設計を行うことを義務づけた^{6,7)}。これを受け船体上部構造と下部構造の溶接線を 300mm 以上ずらして溶接するバットシフトを行った上で、ハッチサイドコーミングとデッキプレートに高アレスト鋼板を使用す

る設計が広く採用されるようになった (図 3)。

脆性き裂伝播停止性能は温度勾配型標準 ESO 試験⁷⁾ 等により評価される破壊靱性の一種であり、船体設計温度 -10 °C におけるアレスト靱性値 (Kca 値) で評価される。シャルピー衝撃値などと同様に、鋼板のマトリックス靱性の向上により Kca 値も向上することから、結晶粒微細化や Ni 添加などによって靱性を向上した高アレスト鋼板が開発された⁸⁻¹⁰⁾。この手法は板厚が小さい鋼板では効果的であり実鋼板に多く採用された。一方、鋼板板厚が 60mm を超えると制御圧延制御冷却 (TMCP) による結晶粒微細化が不十分となり、要求される Kca 値を安定的に達成することが困難となった。超大型コンテナ船の建造を可能にするには従来にない新たな手法による高アレスト鋼の開発が急務であった。そこで、従来の結晶粒微細化に加え、これまで厚板分野では注目されていなかった集合組織制御技術に着目した高アレスト鋼の開発に取り組んだので以下に紹介する。

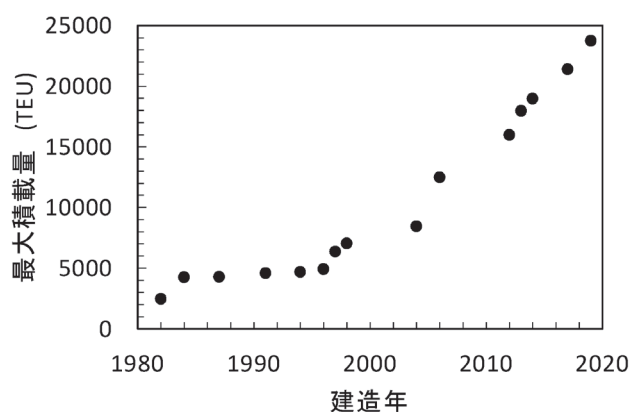


図2 コンテナ船の最大積載量の変化²⁻⁴⁾

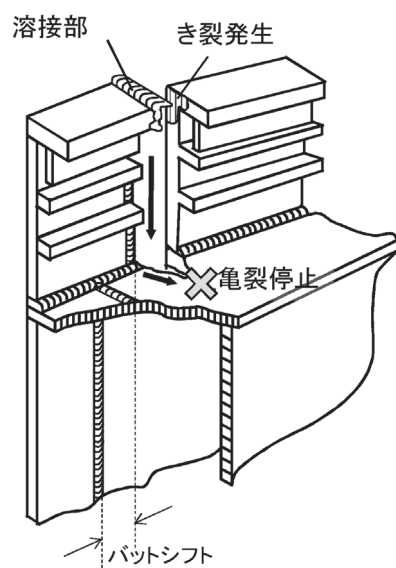


図3 コンテナ船の上部構造とアレスト設計の考え方

3 技術思想

これまで TMCP を活用した結晶粒微細化法は Kca 値を向上させるうえで非常に有効であるとされてきたが、板厚 60mm を超える極厚材では熱間圧延による鋼板内部の結晶粒の微細化効果が不十分となり、要求される Kca 値を安定的に達成することが困難であった。そこで、従来の結晶粒微細化に加え、これまで厚板分野では注目されていなかった集合組織制御技術に着目し、極厚材であっても高い脆性き裂伝播停止特性を有する鋼材開発に取り組んだ。

次に集合組織制御と脆性き裂伝播停止特性の考え方について説明する。発生した脆性き裂は、結晶面のへき開面上を伝播することが知られており¹¹⁾、bcc 構造を有する鋼組織の場合、{100} 面を伝播することが知られている。結晶粒がランダムな方位に並んでいる場合には、発生した脆性き裂は主応力方向と垂直な方向に伝播する。一方、集合組織制御を活用した開発鋼板では、図 4 に示すように {100} 面を主応力方向に対して斜め 45 度方向に配向するように集合組織を制御

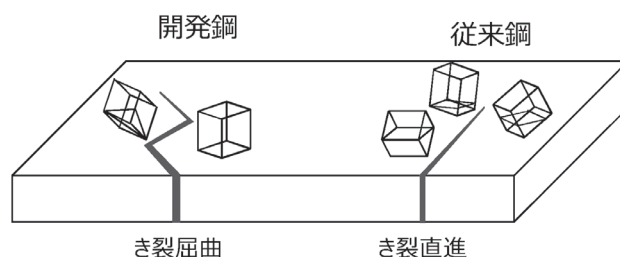


図4 集合組織制御による脆性き裂伝播抵抗向上の考え方

することで、き裂伝播に対する抵抗を高めることが可能である。集合組織を制御する手法の例として、図5にフェライトの集合組織強度におよぼす圧延温度の影響を示す¹²⁾。圧延温度を790℃から、710℃へ低下させることで、1/2t部における $\{100\} \langle 011 \rangle$ 方位や $\{113\} \sim \{112\} \langle 110 \rangle$ 方位の集積を高くすることが可能となる。この他にも変態集合組織を活用することで同様の効果を得ることが可能である^{13,14)}。極厚高アレスト鋼の開発においては、結晶粒が粗大化しやすい板厚中央部にこれら集合組織制御を適用した。板厚中央部に目標とする組織を得るための手段としては、厚銅板の代表的な製造プロセスであるTMCPにおいて、加熱温度、圧延条件（圧延温

度と圧下率）および冷却条件をそれぞれ最適な範囲で精緻に制御した。これにより、実製品レベルで結晶粒の微細化と集合組織制御を同時に達成する事に成功した。

4 開発鋼の特性

前章で説明した製造技術を適用し、板厚70～100 mmのYP460 N/mm²級高アレスト鋼を製造した。開発鋼の化学成分を表1に示す。成分設計の方針としては造船所での溶接施工性を考慮し、予熱が不要となる溶接割れ感受性指数（Pcm）を考慮した成分設計を行った。図6に板厚100mmの開発鋼

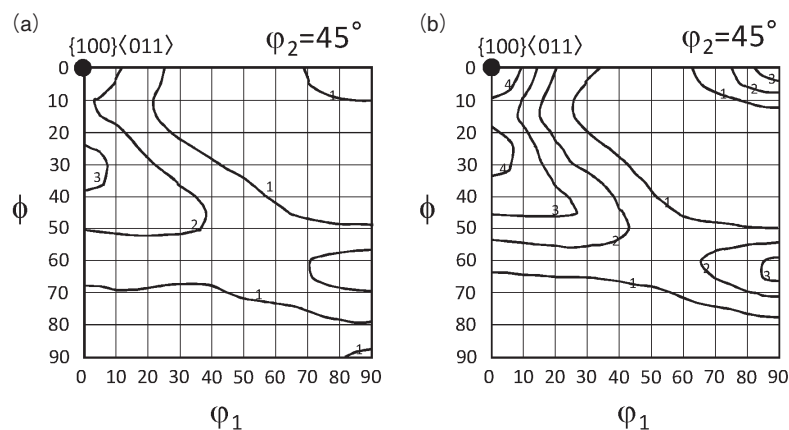


図5 圧延温度制御による集合組織制御の例
(a) 790℃圧延材 (b) 710℃圧延材

表1 化学成分¹⁴⁾

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

$$\text{Ceq(IIW)} = \text{C} + \text{Mn}/6 + 1/5 (\text{Cr} + \text{Mo} + \text{V}) + 1/15 (\text{Ni} + \text{Cu})$$

$$\text{Pcm} = \text{C} + \text{Si}/30 + \text{Mn}/20 + \text{Cu}/20 + \text{Ni}/60 + \text{Cr}/20 + \text{Mo}/15 + \text{V}/10 + 5\text{B}$$

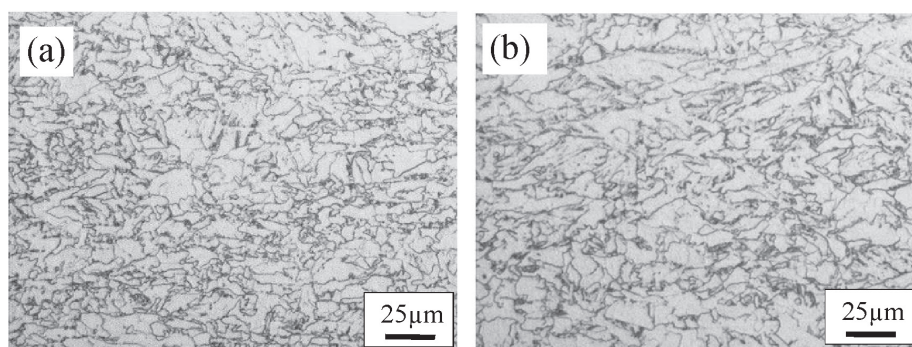


図6 開発鋼のミクロ組織¹⁴⁾
(a) 板厚 1/4 部 (b) 板厚中央部

のミクロ組織に示す。均一なベイナイト単相組織である。図7に開発鋼および集合組織制御技術を活用していない比較鋼の-10℃におけるKca値を示す。参考として図中にはIACSの統一規則でハッチサイドコーミング部に求められるKca値を記載した。Kca値は、板厚50~80mmまでは6000N/mm^{3/2}以上、80mmを超えから100mmまでは8000N/mm^{3/2}以上である。図7から明らかなように比較鋼では板厚が厚くなった場合に目標の達成は難しいが、開発鋼は要求値を超えるKca値をすべての板厚で達成している。現時点で使用する鋼材の最大板厚は100mmであるが、今後さらに要求板厚が拡大した場合でも製造することが可能である。

比較鋼と開発鋼の温度勾配型標準ESSO 試験実施後の試験破面を図8に示す。比較鋼では、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

進展していた。一方、集合組織制御を行った開発鋼では板厚中央部のき裂伝播抵抗が高くなった結果、スプリットネイル状の破面となった。破面形態が脆性き裂先端部の応力拡大係数の値に与える影響をFEM解析により求めた結果を図9に示す¹⁵⁾。図9 (a) に示す通り一般的なサムネイル状の破面とスプリットネイル状の破面のモデルを作成し、き裂先端部の応力拡大係数の低下割合を求めた結果、スプリットネイル状の破面の方が、き裂の進展にともなう応力拡大係数の低下が大きくなっている (図9 (b))。

以上示したように、極厚鋼板の板厚中央部に集合組織制御を適用することで従来技術では達成できなかった高いレベルのKca値を達成した。また、実際の船体で脆性き裂が発生した場合を想定して、開発鋼を用いて図10に示す超大型破壊試験を実施することで、実構造体として良好な脆性き裂伝

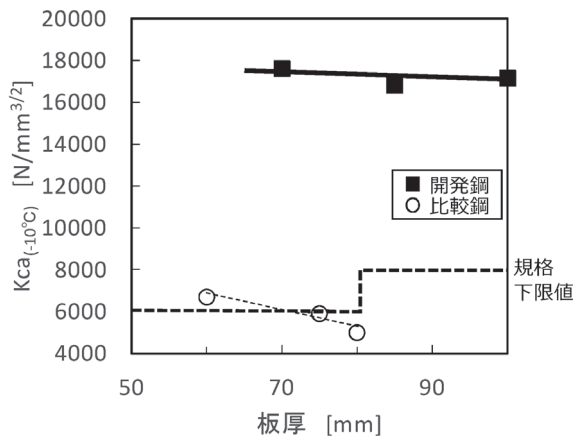


図7 開発鋼のアレスト靱性

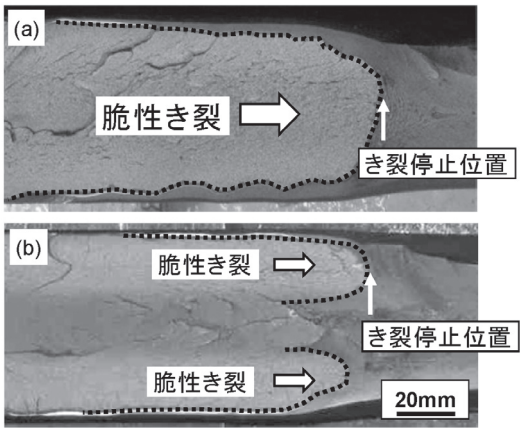
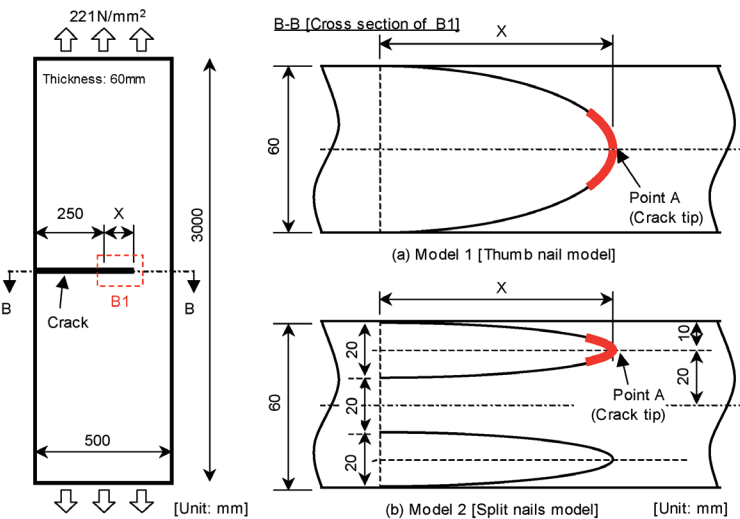
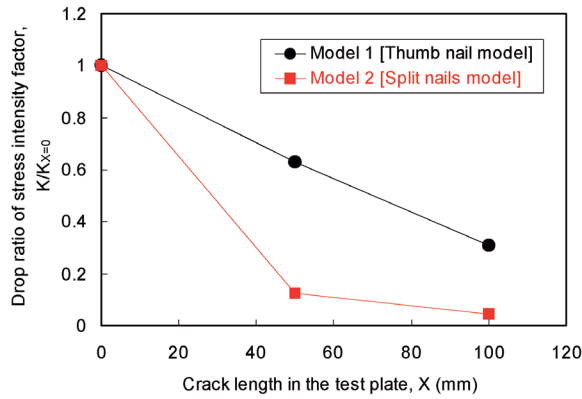


図8 温度勾配型標準ESSO 試験破面例 (a) 比較鋼 (b) 開発鋼



(a) 計算モデル



(b) 計算結果

図9 脆性き裂先端部の応力拡大係数に及ぼす破面形態の影響¹⁵⁾

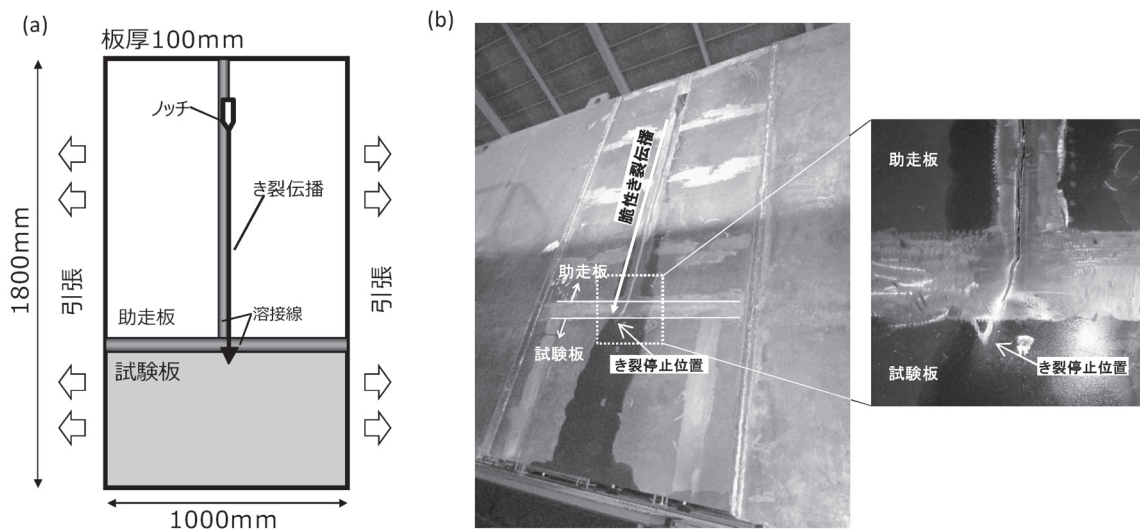


図10 超大型破壊試験の結果 (a) 試験体形状 (b) 試験結果

播抵抗特性を有していることも確認し、世界で初めて板厚100mmのYP460N/mm²級高アレスト鋼を開発した。

5 まとめ

大型コンテナ船向けに脆性き裂伝播抵抗に優れる極厚銅板の開発について紹介した。本開発では、従来から行われていた結晶粒微細化に加えて、新たに集合組織を活用することにより、これまで特性を得るのが困難であった極厚材においても高い脆性き裂伝播抵抗特性を得ることが出来た。

現在、本開発鋼は最大板厚100mmまで開発を完了しており、国内外の超大型コンテナ船建造プロジェクトに採用されている。

参考文献

- 1) 日本船舶海洋工学会:KANRIN, 73 (2017), シップ・オブ・ザ・イヤー2016 大型貨物船部門.
- 2) 国土交通省港湾局:国際コンテナ戦略港湾制作推進委員会 第7回資料2-1, (2016)
- 3) OOCL社:プレスリリース記事, (2017)
- 4) DNV-GL船級:登録船舶情報より
- 5) 山口欣弥, 北田博重, 矢島浩, 廣田一博, 白木原浩: KANRIN, 3 (2005), 70.
- 6) 国際船級協会連合統一規則 UR S33 Rev.1, (2015)
- 7) 国際船級協会連合統一規則 UR W31 Rev.1, (2015)
- 8) 石川忠, 野見山裕治, 萩原行人, 栗飯原周二:日本造船学会論文集, 177 (1995), 259.
- 9) 金子雅人, 谷徳孝:R&D神戸製鋼技報, 61 (2011) 2, 2.
- 10) 白幡浩幸, 大川鉄平, 中島清孝, 柳田和寿, 井上健裕, 稲見彰則, 石田浩司, 皆川昌紀, 船津裕二:新日鉄住金技報, 400 (2014), 26.
- 11) 大槻義彦:破壊のメカニズム, (1987) など
- 12) 西村公宏, 竹内佳子:鉄と鋼, 100 (2014) 9, 1097.
- 13) 半田恒久, 田川哲哉, 南二三吉:鉄と鋼, 98 (2012) 1, 32.
- 14) 長谷和邦, 半田恒久, 衛藤太紀, 山村直一, 青木雅弘:まてりあ, 56 (2017) 2, 82.
- 15) 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) 2, 188.

(2020年2月28日受付)