



特集記事 ● 3 鉄鋼材料への機能性付与
各論 用途別機能性付与(1) 輸送機3

船舶における機能性鋼板の適用現状

Application of Functional Steel Plates to Ship Hull Structure

多田益男

Masuo Tada

廣田一博

Kazuhiro Hirota

三菱重工業(株) 長崎研究所
主席研究員

三菱重工業(株) 長崎造船所

1 はじめに

従来より船体の安全性確保のために、造船所の設計・工作管理に加え、船級協会規格や造船工作法標準等による十分な管理がなされて来た。しかし、船舶の事故・損傷による環境汚染を防止すべく、船体の安全性に係る社会的要求は高まっており、船体構造には従来よりも高い強度的信頼性が求められている。一方、現場の生産性向上も大きな課題であり、生産技術に関するハード、ソフト面の改善に加え、変形が少ないなど工作しやすい鋼材も求められて来た。上記のニーズに対し、近年の製鋼・圧延技術の進歩により、強度的信頼性や工作性に関して機能性を高めた鋼材が開発・製品化され、実船に適用されている。

ここでは、これら機能性材料とその実船適用の現状について紹介するとともに、今後の船体用鋼材の課題や期待について述べる。

2 高アレスト鋼板(表面超細粒鋼板)

船舶の衝突・座礁等の“非常時”において船体の大規模破壊を回避するためには、これら非常時においても高い脆性き裂停止性能を有する鋼板が必要である。日本海事協会では、脆性き裂停止性能に一定の要件を定め、この要件を満たす性能を有する鋼板を「高アレスト鋼板」として定義している¹⁾。

通常運航時に溶接欠陥や疲労き裂を起点として発生・伝播した脆性き裂は、き裂発生後の応力状態(応力の緩和)や鋼材のアレスト性能ならびに構造的連続(外板と骨材の交差など)によるき裂伝播への抵抗性から致命的損傷に至る前に停止することが期待できる¹⁾。しかし、“非常時”としてタンカー満載時の衝突状態を解析した例によれば、被衝突船のシアストレーキ(船側外板上部)は破壊され、内構材の破壊とともに破口近傍の鋼材は最大約10%の塑性ひずみを受ける²⁾。

この塑性ひずみにより、通常運航時では期待できる脆性き裂の停止が非常時では完全には期待できない場合が有り得る。

表面超細粒(SUF: Surface layer with ultra fine grain)鋼板は、Fig.1に示したように超細粒(1~2ミクロン)のフェライト組織を表層部(板厚の片側約1/6)に付与した鋼板で、脆性き裂の伝播時にSUF部のシアリップ形成効果により、飛躍的にアレスト性能を向上させた「高アレスト鋼板」である²⁻⁴⁾。

通常の船体用EH級鋼板(KE36)とSUF鋼板に5%および10%の塑性ひずみを付与した後に温度勾配型ESSO試験を行った結果をFig.2に示す⁵⁾。日本海事協会では、船体に生じる応力状態を、衝突・座礁等の“非常時”と“通常運航時”に分類し、クラックアレスター材に要求すべき脆性き裂停止特性値(Kca)を“非常時6000N/mm^{1.5}以上”、“通常運航時4000N/mm^{1.5}以上”と定めている¹⁾。Fig.2から、KE36鋼

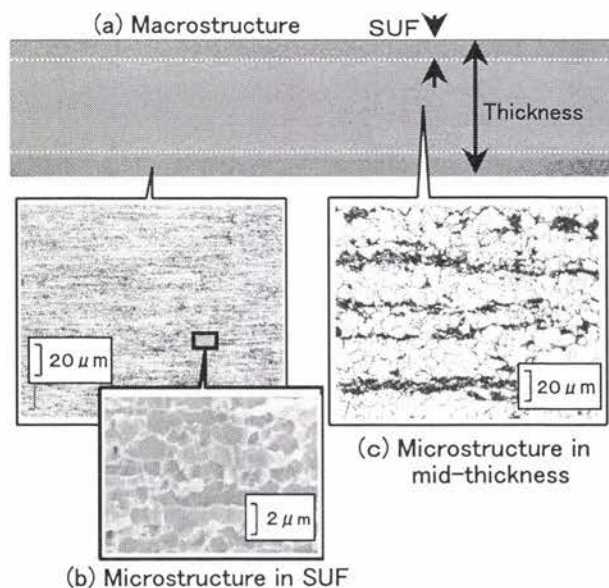


Fig.1 Macro and microstructures of a SUF steel plate

板は、5%塑性ひずみ付与の条件においても、船舶の最低使用温度 -10°C で“非常時”におけるアレスト性能要求値を下回っている。これに対し、SUF鋼板は、10%の塑性ひずみを受けた後でも、十分なアレスト性能を有している。さらに、種々の大型破壊モデル試験が実施され、“非常時”におけるアレスター材としての性能が確認された²⁾。

SUF鋼板を最初に適用した船舶の例を、Fig.3に示す⁶⁾。78,000 m³の低温式LPG船で“非常時”においても大規模破壊を確実に防止するために、カーゴタンクをカバーする全域のシアストレーキにSUF鋼板が配置されている。これ以降、SUF鋼板は、バルクキャリアーやオアキャリアー等へも採用され、その適用実績が増加している¹⁾。さらに、SUF鋼板は、“非常時”にとどまらず、低温海域を航行する船舶や低温貨物タンクの周辺船体構造の安全性確保にも有効であり、船舶の安全性に係る社会的要求を背景に今後もその適用範囲は拡大していくものと予測される。

3 高疲労強度鋼板 (疲労き裂進展抑制鋼板)

従来、疲労損傷の防止はもっぱら対象部位で発生する変動応力をいかに抑制するかという観点で行われてきた。これは、溶接部からの疲労き裂の発生や疲労き裂の進展特性が鋼材の強度や組織に依存しないとの認識によるものであった。しかし、鋼材組織の制御により疲労き裂進展を抑制できる鋼板が開発され、より高い疲労強度信頼性の実現が可能となった。

疲労き裂進展抑制 (FCA: Fatigue crack arrester) 鋼板のき裂進展抑制機構をFig.4に示す⁷⁾。組織的には適切な分率のフェライトとベイナイトから構成される複合組織で、抑制機構は次に挙げる3つの効果に基づいている。

- ①相境界によるき裂進展速度抑制効果。
- ②繰返し軟化によるき裂開口の抑制効果。
- ③繰返し軟化による予ひずみ後延性破壊抵抗の低下を抑制する効果。

FCA鋼板の疲労き裂進展速度は、小型試験片 (CT試験片) では従来鋼板の約1/2以下であることが確認されている⁷⁾。Fig.5は実構造における疲労寿命延伸効果を確認するために実施された船体構造モデル (サイドロンジを模擬) の疲労試験結果である^{8,9)}。FCA鋼板を適用したモデルのスチブナ角回し溶接トウ部から疲労き裂が発生し、フェイスを破断するまでの寿命は、従来鋼板の約2倍であり、構造体においても有意な寿命延伸効果が確認されている。

FCA鋼板は、Fig.6に示すように低温式LPG船の二重底フロア材に初めて適用された⁹⁾。これは、ロンジ貫通スロット部の疲労寿命延伸を目的としている。参考までに、FCA鋼板と従来鋼板の場合での疲労き裂進展解析結果を示す⁹⁾。FCA鋼板を採用することで、約2.5倍の寿命延伸効果が期待

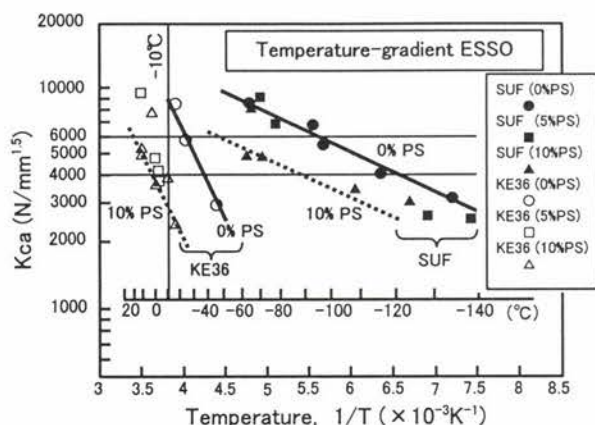


Fig.2 Effect of plastic strain on crack arrestability in SUF and KE36 steel plates (Plate thick: 25mm)

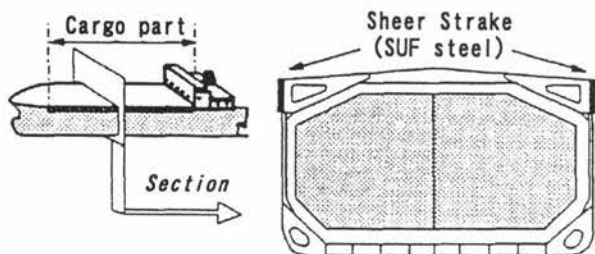


Fig.3 Applied parts of SUF steel plates in LPG carrier

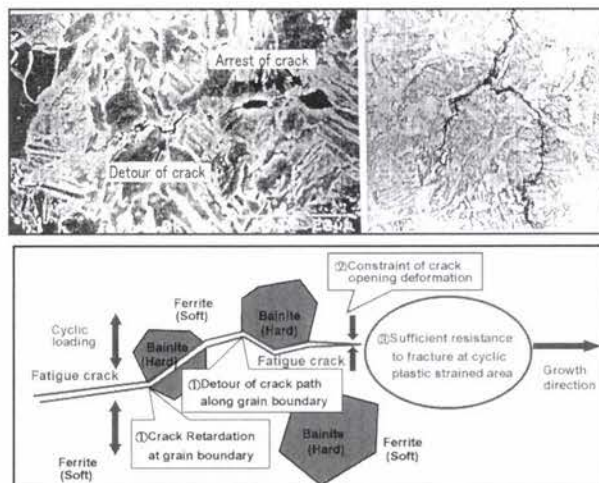


Fig.4 Mechanism of fatigue crack propagation resistance of FCA steel plate with dual phase microstructure

できる。疲労損傷を防止することは、構造物の安全性を確保していく上で重要な技術であるとともに、メンテナンスや補修に係る費用の削減も可能であり、今後とも高疲労強度鋼板の必要性は高まっていくものとする。

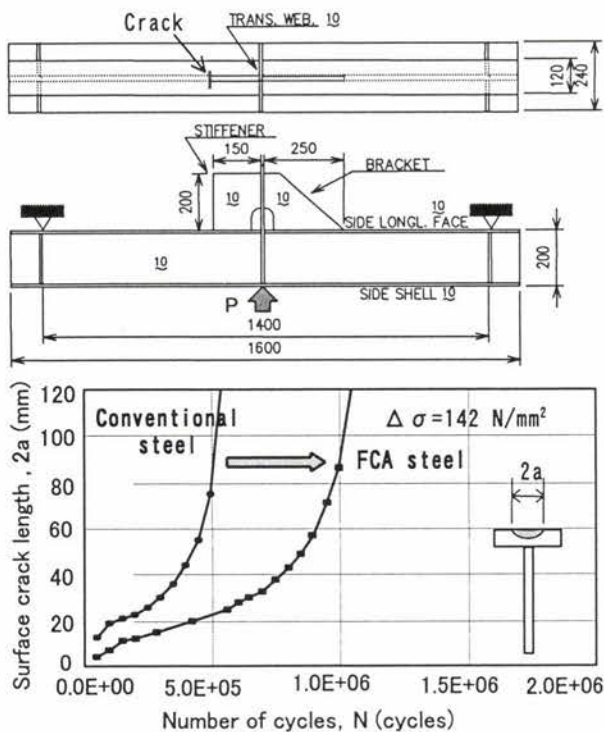


Fig.5 Results of the fatigue crack propagation test for side longitudinal stiffener model

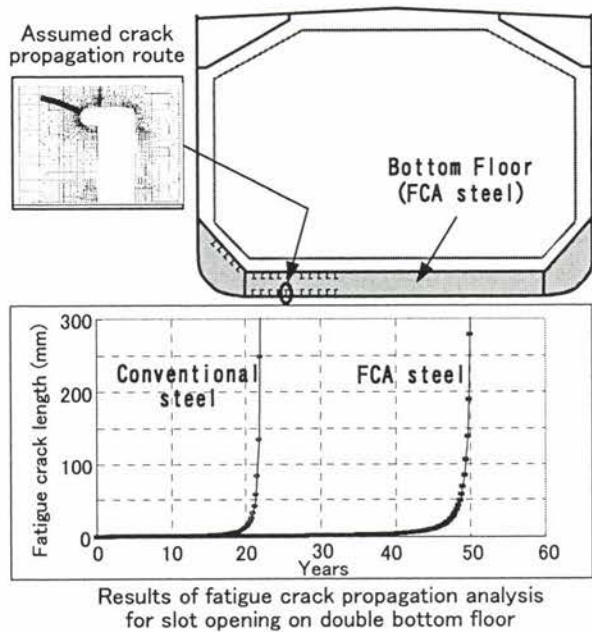


Fig.6 Applied parts of FCA steel plate in LPG carrier

4 熱変形抑制鋼板 (残留応力制御鋼板)

造船を含む鋼構造物の建造工程において、切断や溶接時の入熱による鋼材変形は避けることができない。これらは施工能率の低下や矯正工数の増加を招く要因となる。また、現場作業の機械化・自動化を進める上では高精度に部材を組立てることが求められるため、切断・溶接作業工程における工作精度を高めていく必要がある。

切断や溶接時における鋼材変形は、入熱量やそのバラツキならびに鋼材圧延後の形状や内部応力(残留応力)が原因とされている。特に不均一な残留応力は予測が困難であるため、その低減が必要である。鋼材圧延後の形状不良や残留応力不均一を解決する手段として、Fig.7に示したシステムからなる形状・残留応力制御技術が開発された¹⁰⁾。加熱/圧延/加速冷却の過程において平坦度不良や残留応力の発生を抑制するとともに、オンラインでの残留応力予測により、鋼材および切断後の形状を評価・判定するものである。さらに、必要に応じて機械的/熱的な制御を加えて高精度な残留応力の制御を達成している。

上述の技術で製造された残留応力制御鋼板が船殻ブロックに適用され、その有効性が実証されている¹¹⁾。ダブルハルVLCCの平行ブロック(サイズ:幅12m×長さ20m×高さ3m)の組立てにおいて、13本のロンジが溶接されたスキンパネルとスリットを切断したトランスパネルの製作過程およびスキンパネルにトランスパネルを引込む作業工程の中で、工作誤差や作業時間が計測されている。一例として、残留応力制御鋼板を適用したブロックと従来鋼板ブロックごとの、スリット間隔やスリット幅の計測値から得られるトランスパネル側の許容値(T_U :上限、 T_L :下限)とロンジ間隔誤差を重ねて表示したものをFig.8に示す。残留応力制御鋼板は、ロンジ間隔誤差がトランスの許容値に入っており、手直しすることなくトランス引込みが可能である。一方、従来鋼板で

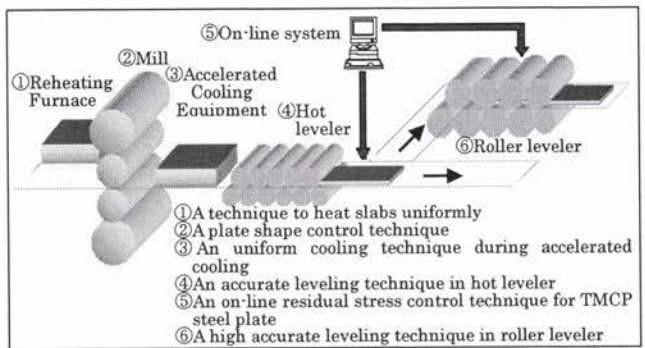


Fig.7 Plate shape and residual stress control techniques for a TMCP steel plate

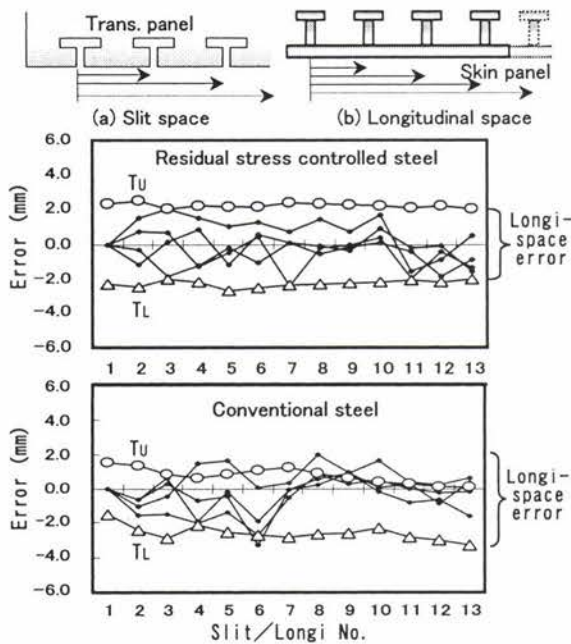


Fig.8 Comparison of longi-space and slit space error

はロンジ間隔誤差が許容値を超えている個所があり、手直しが必要と判断される。実際にトランス引込みに要した時間が計測されており、従来鋼板ブロックではスリットの切断手直しを含めて多くの時間を要したのに対し、残留応力制御鋼板ブロックでは大幅な時間短縮が図れたことが報告されている。

造船現場における生産性向上は大きな課題であり、作業工程の機械化・自動化が進んでいる。これら機械化・自動化に対応した工作性の良い鋼板のニーズはますます高まっている。

5 安全性向上への課題と期待

船体の安全性を確保して、寿命延長とそれに伴うライフサイクルコストの軽減を達成するためには船体の腐食を抑制することが重要な課題である。(社)日本造船研究協会第242研究部会(SR242:原油タンカーの新型コロージョン挙動の研究)では、オイルタンカー(VLCC)のカーゴオイルタンク(COT)の腐食について、実船調査による実態の把握と原因やメカニズムの解明が進められた。これらの研究成果を受け、COTの模擬環境下において耐腐食性向上鋼板の研究・開発が行われ、底板に発生する孔食や上甲板内面(vapor space環境)の全面腐食の進行を抑制できる鋼板が実現された¹²⁻¹⁴⁾。これらの耐食性向上鋼板は、従来のTMCP型船体用鋼板と同等の溶接性や加工性を有していることも特徴である。

上記した耐食性向上鋼板をCOTに適用したVLCCが既に

就航しており、また現在建造中の船舶もある。これら耐食性向上鋼板の実船COT環境下における効果検証には時間を要するが、腐食の進行を大幅に遅らせ、寿命延長とともに老朽化による船体損傷事故等による海洋環境汚染防止のためにも重要な技術としてその成果が期待される。

一方、コンテナ船の大型化が進み、これに伴い8000TEU(20ftコンテナ換算個数)を超えるメガキャリアーでは上甲板付近の縦通部材に板厚70~80mm前後のYP390N/mm²級高張力鋼板を採用する事例が出て来ている¹⁵⁾。このような極厚鋼板を多用する船体の構造信頼性をいかに確保するかは重要な課題である。最近実施された高強度極厚鋼板(板厚65、70mm)の大型脆性き裂伝播試験では、船舶の最低使用温度(-10℃)の条件下で、ある応力以上において大入熱溶接継手部はもとより母材でも従来並の配慮では脆性き裂の停止が困難であることが報告されている¹⁶⁾。このような極厚鋼板では、溶接継手靱性の安定確保はもとより母材の脆性き裂アレスト性能の検証・確保が重要である。さらに、極厚化に伴う溶接欠陥の排除や検知技術も重要な課題である。

コンテナ船の大型化の傾向は今後も続くと思われるが、これらの諸問題を解決する一例として、大入熱溶接対応のYP460N/mm²級高張力鋼板が開発されている¹⁵⁾。

参考文献

- 1) 福井努, 北田博重, 多田益男, 廣田一博, 石川忠: 船体構造におけるクラックアレスターの要求性能, JHPI, 41 (2003) 6, 303.
- 2) 石川忠, 井上健裕, 萩原行人, 大下滋, 黒岩隆夫, 橋本州史, 多田益男, 矢島浩: 表層超細粒鋼の脆性き裂伝播停止特性(その2), 日本造船学会論文集, (1995) 178, 555.
- 3) 野見山裕治, 長谷川俊永, 石川忠, 吉川宏: 表層超細粒フェライト組織を活用した高アレスト鋼板の開発(高アレスト鋼板の開発-1), CAMP-ISIJ, 8 (1995), 691.
- 4) 石川忠, 野見山裕治, 萩原行人, 栗飯原周二: 表層超細粒鋼の脆性き裂伝播停止特性(その1), 日本造船学会論文集, (1995) 177, 259.
- 5) 地主修一, 石川忠, 萩原行人, 井上健裕, 間瀬秀里: 表層超細粒鋼板の脆性き裂伝播停止性能に及ぼす塑性ひずみの影響(高アレスト鋼板の特性評価-3), CAMP-ISIJ, 8 (1995), 1356.
- 6) 石川忠, 今井嗣郎, 井上健裕, 渡邊一夫, 多田益男, 橋本州史: 表層超細粒(SUF)鋼板のLPGタンカーへの適用, CAMP-ISIJ, 10 (1997), 587.
- 7) 菅田登, 有持和茂, 藤原知哉, 永吉明彦, 稲見彰則, 山下正人, 矢島浩: 金属組織制御による鋼材の疲労き

- 裂進展特性の改善, 日本造船学会論文集, (2001) 190, 507.
- 8) 菅田登, 有持和茂, 廣田一博, 渡邊栄一, 多田益男, 福井努, 北田博重, 山本元道, 高充宝, 矢島浩: 鋼材組織による溶接構造物の疲労寿命改善, 日本造船学会論文集, (2003) 194, 193.
 - 9) 廣田一博, 杉村忠士, 有持和茂, 菅田登, 勝元弘: 船体用耐疲労鋼を用いた局部構造の疲労寿命に関する一考察, 西部造船会会報, (2003) 109, 49.
 - 10) 谷徳孝, 岡田順応, 大江憲一, 宮崎建雄: 残留応力制御型TMCP鋼板の有効性検証 (第1報), 日本造船学会論文集, (2001) 189, 299.
 - 11) 谷徳孝, 上田太次, 大江憲一, 宮崎建雄, 中島義男: 残留応力制御型TMCP鋼板の有効性検証 (第2報), 日本造船学会論文集, (2001) 190, 599.
 - 12) 井上幸一, 大島卓雄, 米澤拳志, 今井嗣郎, 加藤謙治, 宇佐美明: 原油タンカー/カーゴオイルタンク底板の孔食と新しい対策技術—孔食の進展が遅い耐孔食鋼板—, 日本造船学会誌TECHNO MARINE, (2004) 878, 201.
 - 13) 伊木聡, 猪原康人, 平井龍至: 造船用高機能鋼—JFEスチールのライフサイクルコスト低減技術, JFE技報, (2004) 5, 13.
 - 14) 鹿島和幸, 幸英昭, 勝元弘, 稲見彰則: タンカー原油タンク用耐食鋼板の開発, 日本造船学会講演会論文集, (2005) 5, 131.
 - 15) 上田直樹, 大竹和彦, 坂本利伸, 西村信一, 森英男: 最近の大型コンテナ船の技術動向, 三菱重工技報, 41 (2004) 6, 326.
 - 16) 石川忠, 井上健裕, 小関正, 廣田一博, 白木原浩, 矢島浩: 厚鋼板を使用した溶接継手における脆性き裂伝播挙動, 造船学会三学連合大会ポスターセッション, (2004)

(2005年9月2日受付)