



ミニ特集・2

造船用鋼材の最近の進歩

造船分野における鉄鋼材料利用技術と課題

Technology and Challenge in Application of Steel Material in Shipbuilding

白木原浩

Hiroshi Shirakihara

三菱重工業(株) 長崎造船所
造船設計部船殻設計課 課長

1 まえがき

船舶は海洋環境を航行する大型構造物であり高い安全性が要求される。一方、製品競争力強化のために性能向上や工作生産性向上が大きな課題であり、そのために設計・工作両面から多くの取り組みが続けられている。特に、船体構造の主要材料である鉄鋼材料については、強度的信頼性や工作性に関してより高機能な鋼材の開発・実用化に対する期待が大きい。

ここでは、高機能鋼材の原点とも言うべき高張力(ハイテン)鋼と船体構造設計の密接な関係をいくつかの大型商船構造を例に紹介し、次に近年新規開発された高機能鋼材の実船適用の現状について記し、併せて構造設計・工作面から見た課題と期待を述べる。

2 高張力鋼の利用技術

2.1 はじめに

船体構造設計において最も重要な構造の安全性と信頼性の確保のため、大洋航行中に遭遇する推定最大荷重(設計荷重)に対し、構造部材が十分な強度を有する手段として高張力鋼を使用する事が基本である。特に船体の大型化に伴ってその必要性は顕著であり、例えば最近の大型化したコンテナ船は高張力鋼抜きでは設計が成立しない。また、これと表裏一体の関係として、高張力鋼を適用して軟鋼よりも構造重量を下げ、安全性と両立した経済的な船体を得る事も重要である。以下、数船種について紹介し、HT(ハイテン)化と疲労強度についても述べる。

2.2 VLCC(大型オイルタンカー)

図1に示す通り、船体構造断面はデッキ(甲板)が塞がった閉断面であり、船側と船底が二重構造である。縦強度*1上は甲板の板と小骨(肋骨)を軟鋼または32HT、36HT*2にする選択があるが、甲板に軟鋼を採用する設計は稀で、甲板に32HTを採用して縦強度上の重量を若干軽減し内構材と板・小骨は軟鋼主体で厚めとする、或いは甲板に36HT採用で縦強度上の重量を大幅に軽減し内構材と板・小骨がHT主体といった設計が一般的である。

近年、船級規則が共通化(CSR: Common Structural Rule)される動きが出て来ており、オイルタンカーの場合、大きな腐食予備厚を画一的に規則化し、極端に厳しく且つ画一的な疲労強度規則が設けられるため、設計自由度が大幅に制限され、HT効果を生かして安全で軽量の船体を建造し、高度な保船技術で安全な就航を続け、船の一生を通じた高い経済性を得るという多くの本邦船主の既存方針がとり難く

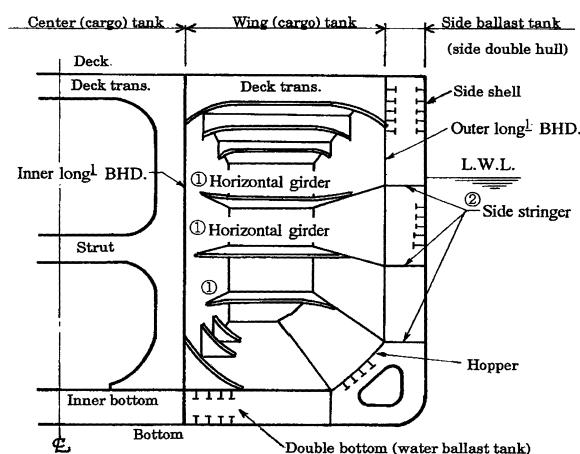


図1 VLCCの船体構造例

*1 船体全体が1本の梁として変形し応力を生じる事に対する強度。

*2 規格降伏応力がそれぞれ32kgf/mm² (315N/mm²) 及び36kgf/mm² (355N/mm²) の高張力鋼(ハイテン)。

なって来ていると言える。

2.3 バルクキャリア（ばら積み貨物船）

図2に示す通り、甲板の開口のため船体梁が開断面であり、縦強度上必要な甲板の断面積の確保に制約が大きいいため、大型船では甲板を軟鋼で設計すると板厚が極厚となり成立せず、基本的に甲板はHT適用となる。内構材・板・小骨にもHTを適用しHT効果を得る設計とする事が多い。

2.4 コンテナ船

図3に示す通り、大きな甲板開口のため船体梁は開断面で、しかもバルクキャリアのようなトップサイドタンクがないので、大型商船の中でも最も縦強度の厳しい船種である。

縦強度確保のためには甲板周りの板と骨の板厚を大きくするのが一般的で、大型船は高強度HTでなければ成立しない。最近著しく大型化して10,000TEU*³クラスも建造されているが、最大板厚80 mm程度までの極厚の40HTが使われている。極厚になると靱性が低下し易く、万一の脆性き裂発生時のアレスト性（き裂停止性能）の確保が課題となる。これに対する一つの解として、40HTを超える47HT（規格降伏応力460N/mm²）が開発され、8,000TEUクラスの大型船に

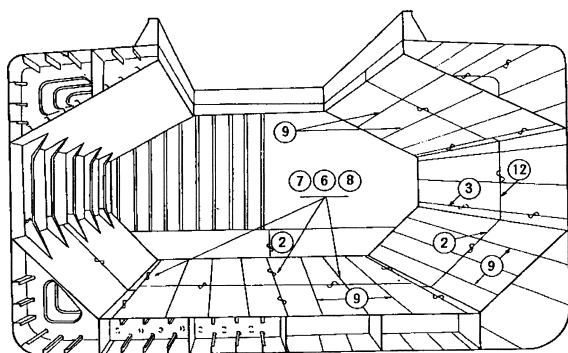


図2 バルクキャリアの船体構造例

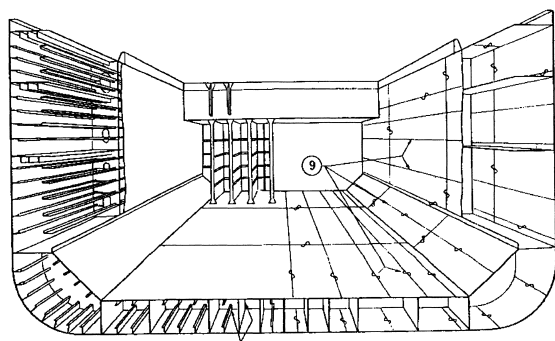


図3 コンテナ船の船体構造例

適用、極厚化を抑えた50 mm厚でアレスト性を確保した事例がある（詳細は後述）¹⁾。

2.5 HT化と疲労強度

HT効果を得る場合、HT化によって作用応力は高くなるが、引張りや曲げの応力に対しては船級規則で作用応力の増加に応じた部材強度が確保されるため問題はない。また、母材の疲労強度も高強度化と共に増加する。これらと異なり、溶接部の疲労強度は（一般鋼材では）HT化と共に増加せず、安全性確保上は言うまでもなく、近年高まっている環境汚染防止上からも、その確保が重要な設計要件である。

3 高機能鋼材の実船適用

3.1 はじめに

構造信頼性を確保し、且つ高い経済性を追求する船体構造設計においては、前節で述べたように高強度な材料を適用しながら疲労強度を高める配慮が必要であるが、同様に靱性や耐腐食性に対する配慮も欠かせない。

また、溶接性・切断性に代表される鋼材の工作性の確保も重要な課題である。特に最近では、熟練作業者の大量退職に伴う技術伝承問題対策として、より加工性に優れ、自動化の適用し易い鋼材に対するニーズも高まっている。

上記の設計・工作におけるニーズに対応し、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。ここでは造船のニーズの視点から、これら高機能鋼材の特徴と実船適用の現状について紹介する。

3.2 高靱性化

脆性破壊は、船体構造の折損といった大規模破壊を引き起こす可能性があることから、十分な配慮が不可欠である。脆性破壊防止の観点からは、①脆性き裂を発生させない事、②万一発生した脆性き裂の伝播を停止（アレスト）する事、の二段階についての配慮が必要である。ここでは、高靱性化による船体構造の信頼性向上の観点から、実船採用された2つの高機能鋼材について紹介する。

3.2.1 高アレスト鋼板（表面超細粒鋼板）

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、発生後の応力状態や鋼材のアレスト性能及び構造的不連続によるき裂伝播への抵抗性から大規模損傷に至る前に停止することが期待できる²⁾。しかし、“非常時”としてタンカー

*3 TEUは20フィート型コンテナに換算した積み個数。

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、破口近傍の鋼材は最大約10%の塑性歪を受ける³⁾。この塑性歪により、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、図4に示す超細粒（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ており^{3・5)}、“非常時”においても十分に高いアレスト性能を有する事が確認されている。SUF鋼板を最初に適用した78,000 m³型LPG船（図5⁶⁾）では、“非常時”でも大規模破壊を確実に防止するため、貨物部全域のシアストレーキにSUF鋼板が配置されている。これ以降もバルクキャリア等への適用実績が増加している²⁾。

高アレスト鋼板は、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、船舶の安全性に対する社会的要求を背景に今後もその適用範囲は拡大して行くものと予測される。

3.2.2 アレスト性と高強度化を両立した鋼板（YP47鋼板）

脆性破壊防止において重要な脆性き裂の発生防止及び万一発生したき裂の停止は、いずれも鋼材が厚手化すれば難しくなる事が知られており、船級規則も厚い鋼板には高い靱性グレードを要求している。一方、縦強度部材に特に厚い鋼板を使用する必要があるコンテナ船の大型化が急速に進行し、8,000TEUを超えるクラスでは、甲板近傍の縦強度部材に板厚70～80 mm前後の40HTを採用する事例が出ており、100 mmの採用計画も聞かれている。このような大幅な極厚化は慎重に行うべきであり、構造信頼性の十分な検証が必要である。

図6に示す最近の高強度極厚鋼板（65、70 mm厚）の大型脆性き裂伝播試験では、船舶の通常最低使用温度（-10℃）下で、一定の応力以上では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事が報告されている⁷⁾。このような極厚鋼板では、溶接継手靱性の安定性確保と脆性き裂の発生防止のみならず、万一脆性き裂が発生した場合のバックアップ機能として、母材の脆性き裂アレスト性能の検証・確保が重要である。

これらの諸問題を解決する鋼材として、大入熱溶接対応の47HT鋼が開発されている^{1・8)}。本鋼を採用した設計では高強度化による板厚低減により、重量削減とアレスト性向上を同時に達成している。本鋼板は、高強度化による薄手化に加え、製造技術により、従来鋼板よりもアレスト性を格段に高め、脆性き裂に対する安全性を向上しているのが特徴である。

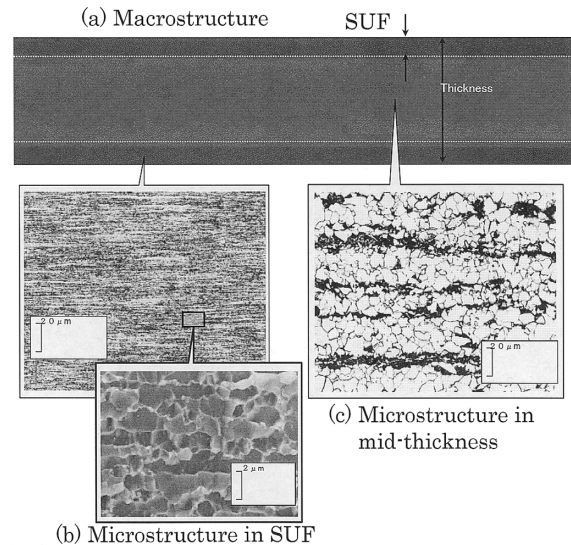


図4 SUF鋼のミクロ/マクロ組織

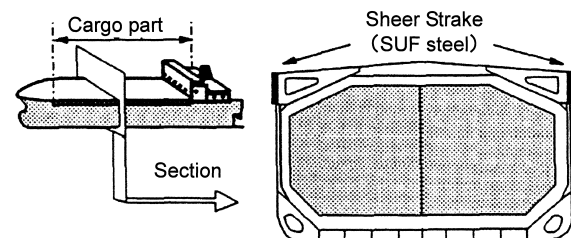


図5 SUF鋼のLPG船実船適用範囲

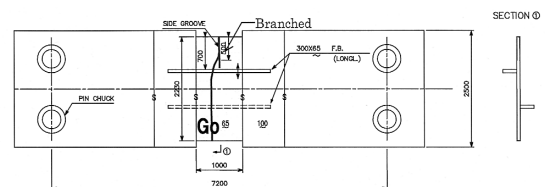


図6 アレスト性を特に考慮しない母材による大型脆性亀裂伝播停止試験結果の例

Steel Grade	EH
Thickness	65mm
Test temperature	-10 degree C
Applied stress	Design stress for hull girder
Result	Go

図7に示す通り大型ESSO試験により開発鋼のアレスト性が確認されている。また、本鋼板が初めて実船適用された8,100TEUコンテナ船の写真を図8に示す。

3.3 高疲労強度鋼板（疲労き裂進展抑制鋼板）

従来、疲労損傷の防止は局部変動応力を如何に抑制するか

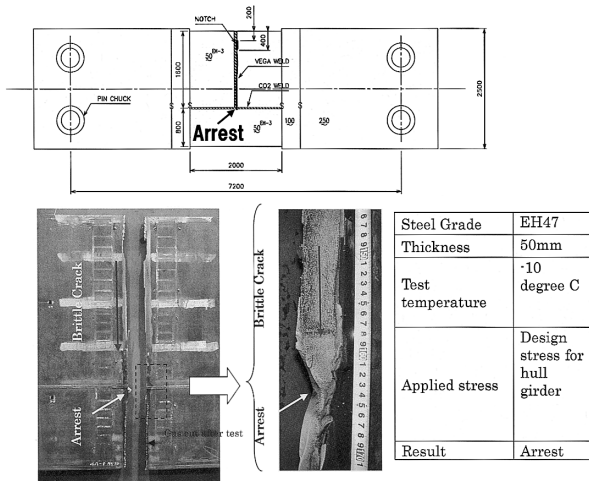


図7 開発鋼による大型脆性亀裂伝播停止試験結果の例

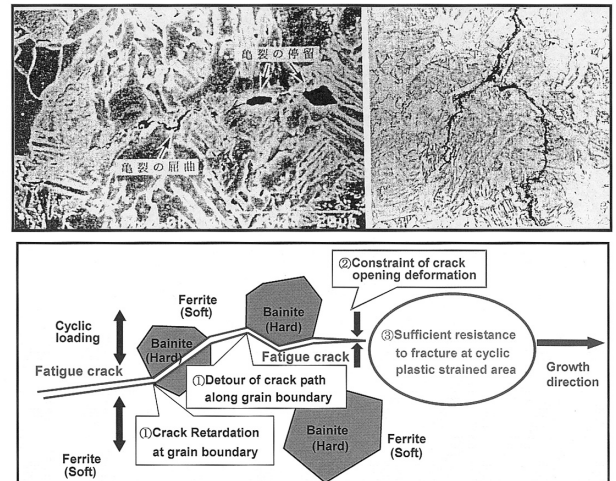


図9 複合組織によるFCA鋼の疲労亀裂進展遅延メカニズム



図8 47HTを初めて適用した8,100TEUコンテナ船

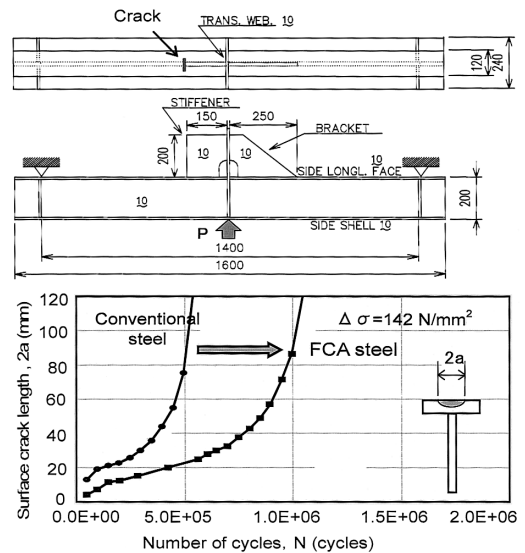


図10 サイドロジモデルによる疲労亀裂進展挙動の比較試験結果

の観点で行われて来たが、近年鋼材側でも組織の制御により疲労き裂進展を抑制する鋼板が開発され、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 Arrestor) 鋼板は、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、図9に示すき裂進展抑制機構を有する⁹⁾。FCA鋼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以下である事が確認されており⁹⁾、図10に示す船体構造要素モデルの疲労試験結果でも、従来鋼板の約2倍の破断寿命が確認されている¹⁰⁾。FCA鋼板は、図11に示すLPG船の二重底部材に初適用された。同図下の疲労き裂進展解析結果¹¹⁾によりFCA鋼板を採用する事で、約2.5倍の寿命延伸効果が期待できる。

疲労寿命延伸は、構造安全上は言うまでもなく、メンテナンスや補修に係る費用の削減も可能とし、今後とも高疲労強度鋼板の必要性は高まって行くものと考えられる。

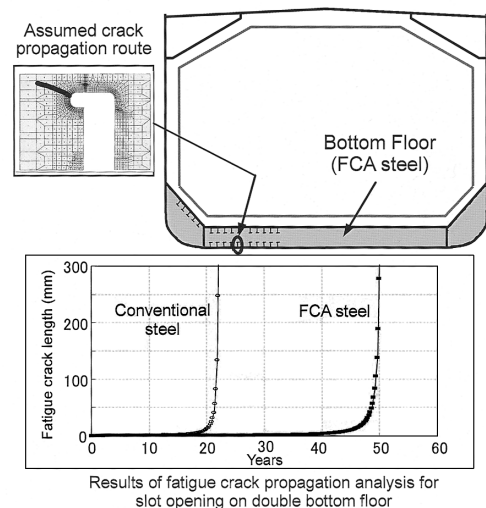


図11 FCA鋼が最初に実船適用されたLPG船の適用部位と亀裂進展計算結果

3.4 耐食性向上鋼板

船体の安全性を確保して、ライフサイクルコストを軽減するためには船体の腐食を抑制する事が重要な課題である。(社)日本造船研究協会第242研究部会では、オイルタンカーのカーゴオイルタンク (COT) の腐食について、実船調査と原因・メカニズムの解明が進められた。この研究成果を受け、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、タンク底板に発生する孔食や甲板内面 (vapor space環境) の全面腐食の進行を抑制できる鋼板が実現した¹²⁻¹⁴⁾。これらの耐食性向上鋼板は、従来のTMCP型鋼板と同等の溶接性や加工性を有する事も特徴である。この鋼板をCOTに適用したVLCCが既に就航し、実環境下における効果検証を行っている (図12)。効果の最終確認には時間を要するが、腐食の進行を大幅に遅らせ、寿命延長と共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。

一方で、COTの腐食対策としてIMOでは塗装義務化の検討が進んでおり、これに対し耐食性向上鋼板も有効な対策であるとして働きかけが行われている。安定した耐食性が確認できれば、就航後のメンテナンスにおいてデリケートな塗装に比べ有利であることは間違いなく、今後の動向が注目される。

3.5 工作性

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行く必要がある。

3.5.1 熱変形抑制鋼板 (残留応力制御鋼板)

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と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。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、形状・残留応力制御技術が開発された¹⁵⁾。

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¹⁶⁾。VLCCの平行ブロック (幅12 m×長さ20 m×高さ3 m) 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。図13は残留応力制御鋼を適用したブロックと従来鋼ブロックのスリット間隔誤差とロンジ間隔誤差を重ねて表示したものである。残留応力制御鋼は、ロンジ間隔誤差がトランスの許容値に入っており、手直しくトランス引込みが可能であ

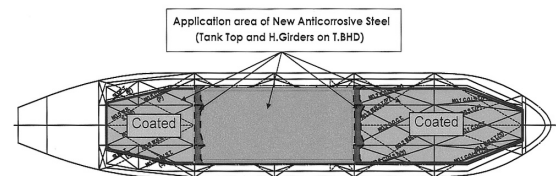
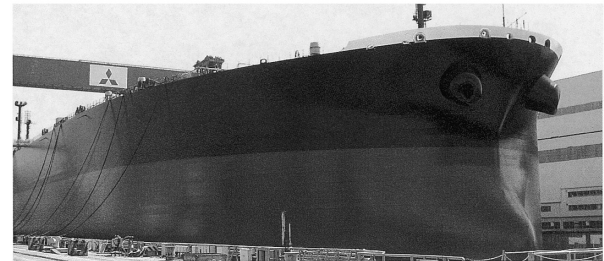


図12 耐食性向上鋼板の適用範囲 (耐孔食鋼の例)

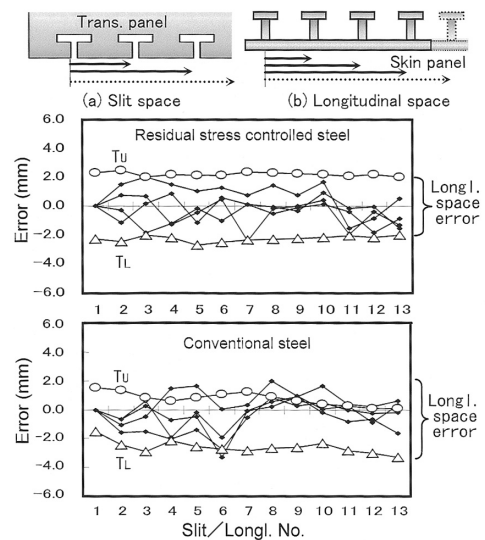


図13 ロンジ部材及びロンジ部材が貫通するスリットの間隔誤差の比較

るが、従来鋼では誤差が許容値を超えた個所があり、手直しが必要である。実際にトランス引込みに要した時間も計測されており、従来鋼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、残留応力制御鋼では大幅な時間短縮となった事が報告されている。

造船現場における生産性向上は熟練作業者の大量退職からも大きな課題であり、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。

4 まとめ

HTは船体の大型化に伴い、所要強度の確保、強度を維持した船体の軽量化、船体鋼板の極厚化を抑えた溶接性及びアレスト性確保等、船主・造船所双方に様々な効果をもたらして来たが、今後もその利用目的を明確にし、HTの特性を十

分に踏まえ弊害を抑えた的確な設計と共に利用を拡大して行くべきである。

近年、船体構造設計および建造工程からのニーズに対し、様々な高機能鋼材が開発され、実船に適用されている。いずれの鋼材も、造船用鋼材として工作現場が求める高い溶接性を確保しつつ、新しい機能を有する材料である。

また、鋼材に対するニーズは、設計、建造(工作性)、就航後と異なる場面からのものであり、結果として高機能鋼材によるメリットを享受する側も異なっている。すなわち、これらの開発にあたっては、素材である厚板から製品である船舶まで見通した取り組みが必要である。

構造設計においては、高強度、高靱性、高い耐疲労特性が今後も求められるが、これらのニーズに対応した開発にあたっては、造船所に加え、これら設計要件規則を定める船級協会の積極的な取り組みも求められる。

工作性に関連しては、熟練作業者の減少対策、自動化対策、ブロックの高精度化による工期短縮と品質向上が今後も主要なニーズと考えられる。一方、高機能鋼材による工作性のメリットは、建造プロセスが変わるレベルでなければ定量的な評価が難しいとも言われており、より積極的な工作部門の対応と、より高機能な鋼材の実現が必要である。

就航後のメンテナンス低減には、主に耐食性能の向上や疲労性能の向上が当てはまるが、これらについては運行管理を行っている船主(船社)との連携が必要である。また、これらはCSRに代表される規則強化の影響を大きく受ける分野でもあり、将来を見据えた対応が必要である。

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—, KANRIN (咸臨), 3 (2005/11), 70.
- 2) 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.
- 3) 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.
- 4) 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.
- 5) 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.
- 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) T. Inoue, T. Ishikawa, S. Imai, T. Koseki, K. Hirota, M. Tada, H. Kitada, Y. Yamaguchi and H. Yajima: Proceedings of the Sixteenth (2006) International Offshore and Polar Engineering Conference, The International Society of Offshore and Polar Engineers, (2006), 132.
- 8) Y. Yamaguchi, T. Matsumoto and H. Yajima: Technical Requirements to Ensure Structural Reliability for Mega Container Ships—Application of New Higher Strength Hull Structural Steel Plates of Heavy Thickness—, International Symposium Royal Institute of Naval Architect., (2006)
- 9) 誉田登, 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.
- 10) 誉田登, 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.
- 11) 廣田一博, 杉村忠士, 有持和茂, 誉田登, 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.
- 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) 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.
- 16) 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.

この特集記事は第191・192回西山記念技術講座「21世紀を拓く高性能厚板」(2007年6月)の講演内容を「ふえらむ」用にわかりやすく解説したものです。

(2007年10月10日受付)