



ミニ特集・3

造船用鋼材の最近の進歩

造船用鋼材の最近の進歩

Recent Progress of Steel Plates for Shipbuilding

吉江淳彦
Atsuhiko Yoshie

新日本製鐵(株) 鉄鋼研究所
鋼材第二研究部長

1 はじめに

近年の船舶をとりまく環境の大きな変化として、世界的な安全確保・環境保護に対する意識の高まりがある。過去の大きな海難事故を教訓として、国際海事機関(IMO: International Maritime Organization)主導で船舶の安全性・信頼性を向上させるための国際的なルールづくりが行われている。国際船級協会(IACS: International Association of Classification Societies)では、ばら積み貨物船及び二重船殻油タンカーの共通構造規則(CSR: Common Structural Rule)が採択され、2006年4月1日以降に建造契約される船舶に適用されることになった。これらの規則では、北大西洋の最も厳しい波浪条件で25年間耐えうる構造強度が要求されている¹⁾。

もう一つの大きな変化はグローバル化の進展による地球規模での物流量の増大である。図1²⁾に世界の一次エネルギー消費量の推移を示す。今後2030年まで一次エネルギーの消費量は一様に増加し、特に石油、石炭、天然ガスの増加が著しいと予想されている。エネルギー以外の原材料や物資の輸

送も増加し、海上荷動き量は2005年の80億トンから2015年には132億トンまで増加すると言われている³⁾。この増加のペースは世界の人口増加のペース(2005年の64億人から2015年には74億人)を上回るものであり、社会資本の充実や生活の向上を目的とした発展途上国での物資の輸入増大が駆動力となっている。このため、タンカー、LNG船、バルクキャリア、コンテナ船、自動車運搬船等の各種船舶の需要は旺盛であり、世界の船舶の総船腹量は2006年末の7億1700万グロストン(GT)から2009年中には9億GTを突破するという予想もある⁴⁾。よって、今後ますます船舶の輸送効率・燃費向上を目的とした大型化や軽量化が進むと予想される。また、造船メーカーでの船舶建造の生産性向上は、今後長期にわたる大きな課題である。

このような世界的な動きを背景とした船主のニーズや、それをふまえた船級協会の規則改訂の動き、さらには造船メーカーのニーズに応えるための鋼材への要求は下記の3点であると考えられる。

- ①環境保護、安全性確保の観点からの耐破壊信頼性の向上
- ②Life Cycle Cost低減の観点からの耐疲労、耐腐食特性の向上
- ③船舶建造の生産性向上

以下では、これらのニーズに応えるべく近年開発された造船用鋼材およびその利用技術の例を記す。

2 耐破壊信頼性の向上

2.1 脆性破壊発生防止への取り組み

耐破壊信頼性向上の要求に応えるために、鉄鋼メーカーは長年にわたり高強度高靱性鋼の開発とその製造プロセスの改善を進めてきた^{5,6)}。特に1960年代から研究されてきた制御圧延法、さらには1980年代の日本での実用化を契機に世界に広まった加速冷却法(以下制御圧延法と加速冷却法をあわ

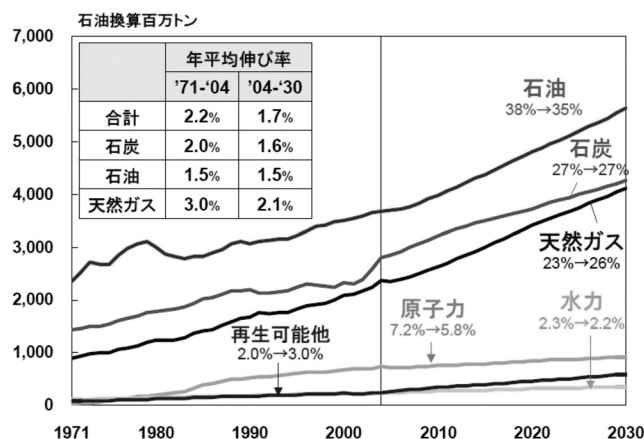


図1 世界の一次エネルギー消費(エネルギー源別)²⁾

せて TMCP : Thermo-mechanical Control Process と記載) により、厚板母材の強度-靱性バランスが飛躍的に改善された。さらに TMCP により、同一強度の厚板を得るための炭素当量を低く抑えられるようになったことで、溶接性が向上し、溶接前の予熱の省略・低減が可能になった。これは、船舶建造の生産性向上に大きく寄与するものである。炭素当量の低減は溶接熱影響部 (HAZ : Heat Affected Zone) 靱性の飛躍的な向上をもたらした。さらに、化学成分と TMCP 条件の精緻な組み合わせにより、大入熱溶接に対応しうる高 HAZ 靱性鋼も開発された。HAZ 靱性向上メカニズムは鉄鋼メーカーにより異なるが、基本的に TMCP の活用による低炭素当量化、母材組織の微細化に加えて、窒化物、酸化物、硫化物等を微細分散させることによって HAZ の組織を微細化するものである。施工面では、大入熱溶接に適した溶接材料や造船の外板を縦向きに高能率で溶接できる装置も実用化されている。詳細は本誌の小関・大北の解説を参照されたい⁷⁾。

TMCP と HAZ 靱性向上技術をあわせて製造される厚板は鉄鋼メーカー各社での商業生産開始以来、造船をはじめ、海洋構造物、ラインパイプ、建築、橋梁、建設機械などの各市場で大量に使用されてきた⁸⁾。TMCP 実用化後 20 年を経た近年でも、厚板製造技術の改良と高機能鋼材開発への挑戦は続いている⁶⁾。高精度形状制御圧延機が開発され、加速冷却装置の改良により冷却速度の制御性と冷却の均一性も著しく向上した。また、冷却直後の熱処理や、冷却とレベラー矯正との組み合わせによる鋼材特性の向上や残留ひずみの低減も図られている。

2.2 脆性き裂伝播停止性能向上への取り組み

前節の TMCP による母材組織の微細化や HAZ 靱性向上技術は、共に脆性破壊発生の抑制を目的とした技術であるが、更なる船舶の大型化が進むと、脆性き裂のアレスト性が問題となる可能性があることが、特にコンテナ船について指摘されている。脆性破壊の発生と共にき裂の伝播も防止して、二重の安全性を確保するためにも、鋼材が十分なアレスト性を併せ持つことが望ましい。脆性き裂はその大半が溶接部から発生しているため、溶接継手に沿って伝播するき裂を止めることが重要になる。過去に造船研究協会 SR147 研究部会で実施された、板厚 40 mm 以下の造船鋼材を用いた溶接継手部の大型アレスト試験による検討結果では、溶接継手部に沿って伝播する脆性き裂は、溶接残留応力の影響などで母材側にそれることにより停止する可能性が示唆された⁹⁾。しかし 40 mm を超える厚手の厚鋼板で同様の大型試験を実施したところ¹⁰⁾、薄手材の場合と異なり、き裂は溶接継手部に沿って直進し、途中で停止しない場合があることがわかった。また、溶接のない母材での試験結果でもき裂が停止しない

ケースも見られ、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も長大き裂を停止できない場合があることが明らかになった。脆性き裂を止めるためには、板厚が厚くなるほど高い Kca 値が要求されることもあらためて確認された。これらの結果は、超大型コンテナ船に使用される鋼材が具備すべき性能、施工法、さらには設計も含めた見直しが必要であり、特に鋼材についてはアレスト性の重要性を示唆するものである。

本誌白木原¹¹⁾の解説にあるように、非常に高いアレスト性を有する造船用鋼材としては、表層部の結晶粒径を $2\mu\text{m}$ 程度まで細粒化した厚板 (HIAREST[®]鋼) が実用化されている。この鋼材は -10°C での Kca が $10000\text{N}/\text{mm}^{1.5}$ (板厚 25 mm の例) を超える極めて高いアレスト性を有するが¹²⁾、特殊な製造法を用いるため、製造可能な最大板厚が 50 mm までであることから、超大型コンテナ船向けには、より高強度で板厚の厚い高アレスト鋼を開発する必要があった。このような要請を受けて、YP を $460\text{N}/\text{mm}^2$ まで高め、さらにアレスト特性の良好な造船用鋼 EH47 が実用化された¹³⁾。これは TMCP を駆使して母材の金属組織の微細化を図ると共に、HAZ 組織制御技術により 50 mm 超の板厚まで 1 パスで大入熱溶接することを可能としたものである。この厚板は鉄鋼メーカーと造船メーカーの協力の基に開発され、図 2¹³⁾に示すように、超大型コンテナ船の強力甲板部に適用された。鋼板の強度の増加に応じて使用する板厚を薄くできるため、アレスト性の向上が期待できると共に、1 パス溶接化により溶接欠陥発生の危険性も軽減された。

一方で、鋼材ではなく、隅肉溶接を用いた構造的な工夫によって脆性き裂の伝播を停止させる方法についても報告されている¹⁴⁾。この問題については 2007 年より日本海事協会に「脆性き裂アレスト設計研究委員会」が設置され、大学、船級協会、造船メーカー、鉄鋼メーカーが参画して検討を開始しており、船舶の安全性・信頼性向上に向けたアレスト試験

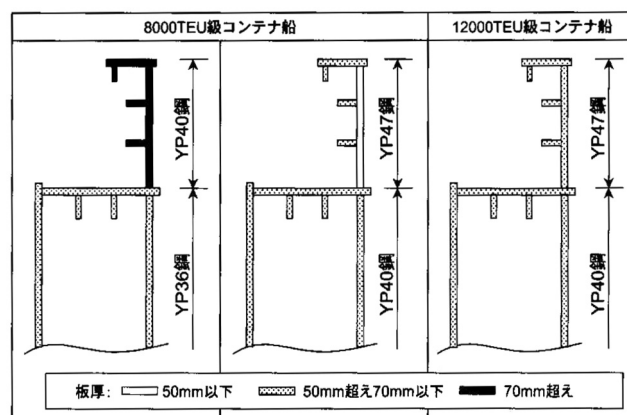


図2 超大型コンテナ船の強力甲板部構造例¹³⁾
(ハッチサイドコーミング、デッキプレート両部でアレスト可能)

法の確立、アレスト現象の解明、が期待されている。さらに、この調査研究に、「溶接部の脆性亀裂の発生と防止」、「脆性亀裂に係る溶接部の非破壊検査技術」の調査研究をあわせた「超大型コンテナ船構造安全対策検討委員会」が、国の委託を受けて日本船舶技術研究協会内に設置されている。

3 Life Cycle Cost (LCC) の低減

3.1 耐疲労特性の向上

LCCの低減も船舶の大きなニーズの一つであり、大きなものとして耐疲労特性の向上と耐食性の向上の二つがある。疲労き裂の大半は溶接部に発生する。溶接部には降伏応力相当の引張りの残留応力が存在すること、溶接止端部に応力が集中しやすいことなどが原因である。よって母材を高強度化しても溶接部の疲労強度は上がらず、高強度化の効果を享受できない場合が多い。溶接部の疲労き裂発生を鋼材で抑制する研究は過去にも多く試みられてきたが、いまだ有効なものは見出されていない。むしろ、溶接材料の改善や溶接部の後処理で、き裂発生抑制に有効なものが多く報告されている。

溶接法としては、TIG Dressingによる止端形状の改善により、き裂発生を抑制する方法が広く適用されている。また、図3¹⁵⁾のように溶接材料そのものの変態温度を制御することにより、溶接したままで圧縮残留応力を付与する方法も報告されている。この結果、図4¹⁶⁾に示すように疲労限度を高めることが可能になる。

溶接部の後処理法としては、グラインダー研磨による溶接止端部の形状改善により応力集中を低減する方法や、ショットピーニング、ハンマーピーニングなどにより溶接部に圧縮残留応力を付与する方法がとられている。近年報告された後処理法として、図5に示す超音波ピーニング法 (UIT: Ultrasonic Impact Treatment) がある。これは27 kHz程度の超音波を機械的な打撃振動に変換して鋼材表面をピンで叩くもので、グラインダー処理相当の止端部形状の改善効果、

ハンマーピーニング相当の圧縮残留応力付与、さらには打撃を受ける表層部の金属組織改善効果の重畳により、疲労強度を向上させるものである。

図6、7¹⁷⁾に、UIT 処理前後での溶接止端部形状と金属組織の変化と、十字継ぎ手の小型試験体での疲労試験結果を示す。UIT 処理を施したものは、止端部の形状はピンの形状が転写されることにより滑らかになっている。また、溶接したままの場合やグラインダー処理を施した場合 (IIW 推奨値

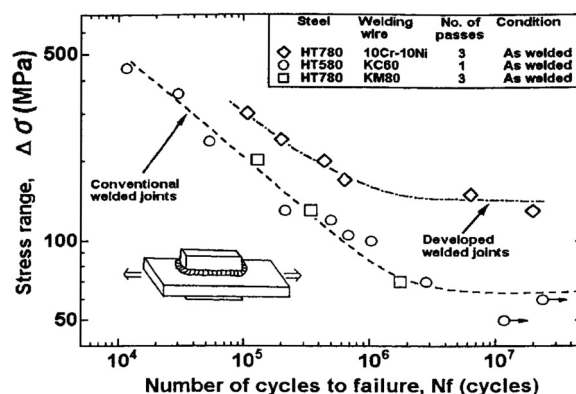


図4 疲労試験結果¹⁶⁾

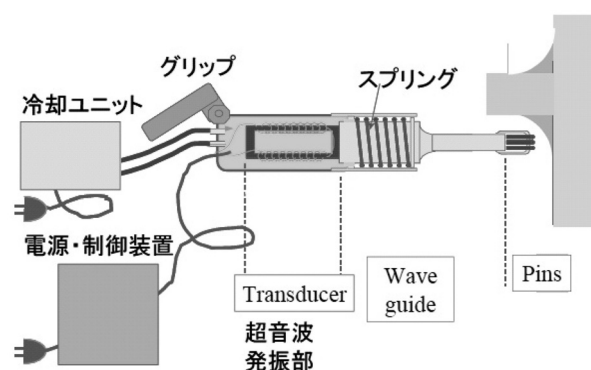


図5 UIT (ε sonix®: UIT L.C.C.の登録商標) の基本構成

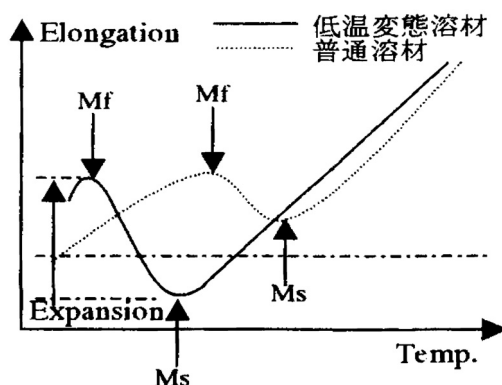


図3 低温変態溶材の温度-伸び関係¹⁵⁾

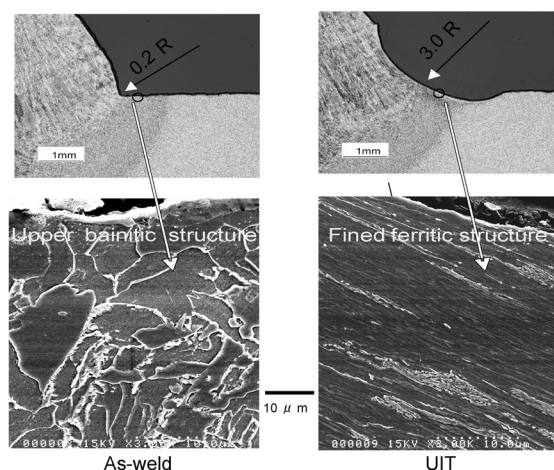


図6 UIT 処理による止端部形状と組織の変化¹⁷⁾

からの推定) に比べて明瞭に疲労寿命が向上している。

疲労き裂の進展については鋼材による抑制が可能であり、YP36 kgf/mm²クラスの厚板が実用化されている。TMCPによる微細組織制御により、フェライトにベイナイトを粒状に分散させたものや¹⁸⁾、フェライトとパーライトを細粒且つ粒状に分散させたもの¹⁹⁾が報告されている。図8、9²⁰⁾には、フェライトにマルテンサイトを層状に分散させた鋼材の例を示す。硬質のマルテンサイトがき裂進展の障害となり、

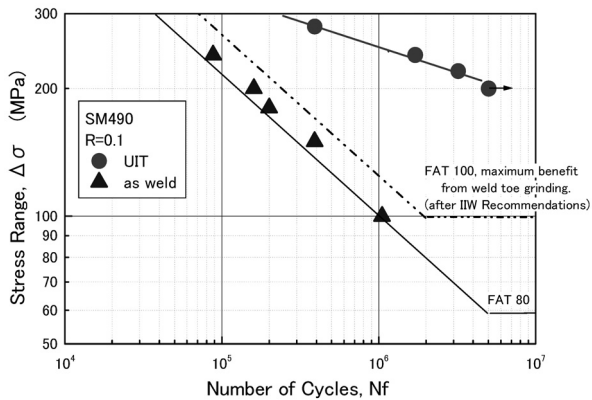


図7 十字継手の疲労試験結果¹⁷⁾

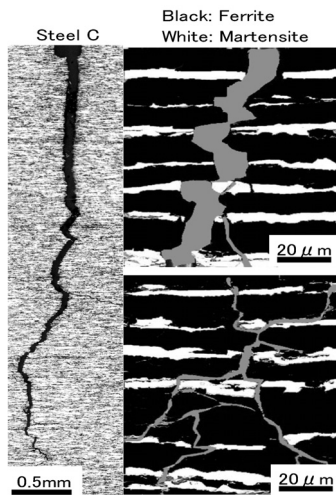


図8 疲労き裂進展経路²⁰⁾

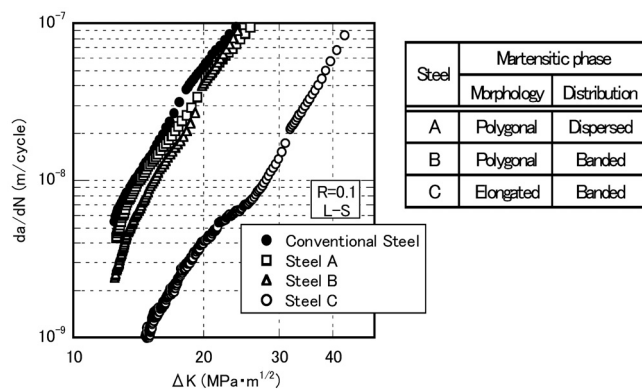


図9 疲労き裂進展試験結果²⁰⁾

き裂が分岐・迂回して進まざるをえないために、板厚を貫通する方向の進展速度は従来鋼の約五分の一まで低下する。

3.2 耐食性の向上

LCCの向上のみならず、安全性の確保にとっても重要な特性に耐食性がある。船齢が高い船舶の損傷の原因は概ね腐食損耗であるという調査結果も報告されている。腐食は材料と環境が相互に関わる現象であり、特に船舶の内部の環境は貨物の種類と構造・運用が密接に関わった複雑なものであるため、腐食現象が必ずしも技術的に明確になっていない場合もある。

その一例が、図10²¹⁾に示す原油タンカーの腐食問題である。提示された課題は、原油油槽 (COT: Cargo Oil Tank) の天井部 (デッキ裏) の腐食損耗と底板の局部腐食である。問題が顕在化した当時は、船体構造のダブルハル (DH) 化やTMCP鋼化が進んだ時期でもあったため、これらとの関係を含め様々な原因が推定され、国際的にも混乱の様相を呈していた。このような状況にあって、船舶の腐食問題解明に向けた造船研究協会のSR242委員会活動が世界に先駆けて実施され、実船調査による事実認識から技術的理解まで一貫した取り組みが展開された²²⁾。

その結果、実船天井部デッキ裏の腐食損耗の原因は、原油随伴の硫化水素ガスおよび防爆ガス中に含まれる水蒸気、酸素、炭酸ガスの存在と昼夜の温度変化による乾湿繰り返しであり、その実態は0.1 mm/年程度と小さいことがわかった。さらに、大量に発生するスラッジを腐食生成物と現場が誤解したことにより問題提起されていたこと、このスラッジの実態は固体Sであり原油に含まれる硫化水素が析出したものであることも明らかになった。

一方、底板部の腐食は、最大約4 mm/年の速さで局部的に腐食する現象で、近年のDH化と共に顕著になった問題である。COT内部には分厚いオイルコート層が形成され、この様な油分に覆われた鋼材では腐食が発生しない。しかし、原油タンカーは定期的にCOT内部の高圧原油による洗浄が

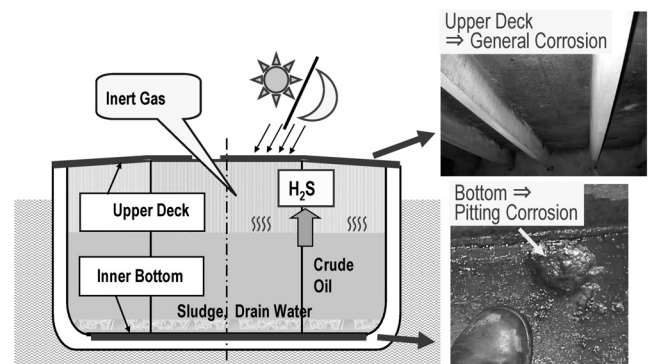


図10 原油タンカーの腐食問題²¹⁾

なされるため、この洗浄によってオイルコートが損傷を受けることがわかった。特にCOT内底部にロンジが存在しないDHの底板部は、直接高压原油にさらされてオイルコートが損傷を受ける部位が多いため、腐食が顕在化したものと予想される。また、COT内の原油中には油井に存在する岩塩が高濃度に溶解した地下水が混在しており、これが輸送中に析出して底部に滞留し、底板腐食の原因となること等も明らかになった。さらに、図11²¹⁾に示すように、COT底部のオイルコートは定期的にドック点検で再生され、局部腐食部分はより厚いオイルコートで保護されるため、ドック点検後は局部腐食の成長が停止することも確認された。このようなSR242委員会の成果は、船主、造船メーカー、船級協会、学識経験者および鉄鋼メーカーが一堂に会して初めてなされた、他国に類を見ない成果である。これらの貴重な技術の蓄積に基づき、鉄鋼メーカー各社で耐食成分系が種々検討された結果、原油タンカー用耐食鋼^{19, 23)}という新たなジャンルが開拓された。

これらの耐食鋼の実船への適用結果も開示されている²¹⁾。本誌白木原の解説¹¹⁾に示すように、30万トンクラスのVLCCのCOT底板全体に適用され、全15タンクの内、6タンクに無塗装で使用された。就航後2.3年経た後の初回ドック検査時の観察結果を図12²¹⁾に示す。従来鋼では、補修が

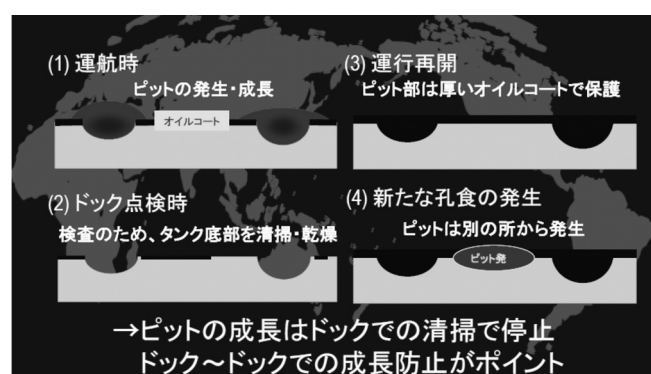


図11 ビットの発生・成長・停止²¹⁾

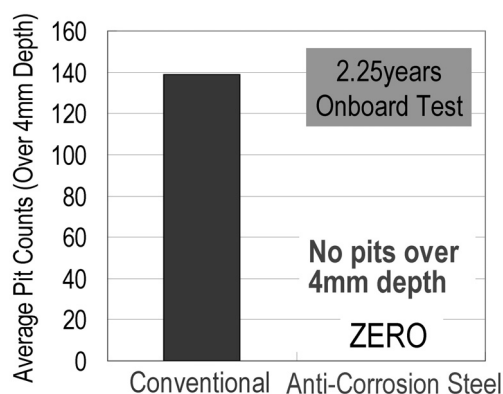


図12 タンク底板のビット深さ測定結果²¹⁾

必要な約4～10 mm超の深い局部腐食が相当な数発生していたのに対して、本耐食鋼では補修を要する局部腐食は皆無という顕著な効果が確認された。この結果と、ドックでの再オイルコート後は局部腐食が停止するというSR242で得られた知見から、全船齢寿命にわたり補修が不要になるという大きなメリットを得られる可能性も見いだされた。これ以外にも鉄鋼各社が開発した耐食鋼の実船への試適用がなされており、引続き、耐食鋼適用によるメリットが順次明らかとなると思われる。

一方、船舶の腐食問題への対策は、IMOで取上げられ、ルール化が進められている。一例として、昨年末にはバラストタンクの塗装基準が批准されている。また、その延長線上でタンカーの原油タンクへの塗装強制化も議論されている。上記の原油タンカー用耐食鋼の実船適用結果は、2006年にIMOの海上安全委員会で日本政府から紹介され、一定の国際的賛同が得られたため、塗装による防食対策と共に、耐食鋼の適用も含めた総合的防食方案が検討されることになった。

原油タンカーの防食に関わる技術の選択肢が広がり、耐食鋼の適用が可能となれば、船舶建造の生産性向上、コスト削減、さらには環境負荷低減等が可能となる。我国の海運、造船、鉄鋼各業界は、共に国際的に高い水準にあるリーダー的存在であるため、各業界がより一層連携を深めて、地球環境問題と密接に関わる本分野での国際貢献を果たしていくことが期待される。

4 まとめ

世界的な安全確保・環境保護に対する意識の高まりやグローバル化の進展による地球規模での物流量の増大を背景に、船舶に対して、構造面での安全性・信頼性確保と、輸送面での高速化、高効率化がより強く求められている。前者のためには、脆性破壊、疲労破壊、腐食損耗に対する鋼材の耐久性をさらに高める必要があり、また後者に対しては、大型化、軽量化等の相反する要求を高機能鋼材の提供によって満たしていく必要がある。さらには建造時の生産性向上に資する鋼材の提供も必要である。これらのいずれの要求に対しても、材料・設計・施工が一体となって問題を解決することが重要である。かつて船舶へTMCP鋼板を適用する過程で生じた、溶接継手軟化、切断時の形状不良、疲労損傷等の問題は、造船メーカーと鉄鋼メーカーの協力により都度解決されてきた。今後も、鉄鋼メーカー、造船メーカー、船級協会、船主、大学等の関係者が協力して新たな技術に挑戦し、世界をリードする船舶を供給していくことが期待される。その中で、高機能鋼材やその利用加工技術の提供を通じて鉄鋼メー

カーが果たす役割もますます大きくなるものと思われる。

参考文献

- 1) 日本海事協会会誌, 第276号, 2006臨時特集号, (2006.9)
- 2) 伊藤浩吉, 森田裕二: 第395回定例研究報告会資料「アジア／世界エネルギーアウトLOOK 2006」, 日本エネルギー経済研究所, (2006.9.21)
- 3) 中期経営計画, 商船三井株式会社, (2007.3.22)
- 4) DNV: World Fleet Development, (2006)
- 5) 新しい製造法による鋼材(TMCP鋼)の溶接構造物への適用に関するシンポジウムテキスト, 日本造船学編, (1983)
- 6) 第191・192回西山記念技術講座「21世紀を拓く高性能厚板」, 日本鉄鋼協会編, (2007.6)
- 7) 小関敏彦, 大北茂: 本誌, 9.
- 8) 吉江淳彦: 日本造船学会誌, (2005) 885, 49.
- 9) 日本造船研究協会: SR147研究報告書「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」, (1976)
- 10) 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: 日本船舶海洋工学会講演会論文集, (2006.11) 3, 359.
- 11) 白木原浩: 本誌, 15.
- 12) 石川忠, 間瀬秀里, 長谷川俊永, 野見山裕治, 吉江淳彦: 鉄と鋼, 85 (1999), 544.
- 13) 山口欣弥, 北田博重, 矢島浩, 廣田一博, 白木原浩: KANRIN 日本船舶海洋工学誌, (2005) 3, 70.
- 14) 半田恒久, 鈴木伸一, 木治昇, 豊田昌信, 宮田隆司: 溶接構造シンポジウム講演論文集, (2006.11)

- 15) 富永知徳, 三木千寿, 高橋健, 糟谷正, 森影康: 土木学会論文集, No.759/I-67, (2004.4), 355.
- 16) 太田昭彦, 渡辺修, 松岡一祥, 志賀千晃, 西島敏, 前田芳夫, 鈴木直之, 久保高宏: 溶接学会論文集, 18 (2000) 1, 141.
- 17) 野瀬哲郎, 島貫広志, 中島清孝, 鈴木環輝: 溶接構造シンポジウム2006講演論文集, (2006.11)
- 18) 菅田登, 藤原和哉, 有持和茂, 大西一志, 山下正人: まてりあ, 43 (2004) 2, 148.
- 19) 伊木聡, 猪原康人, 平井龍至: JFE技報, 5 (2004.8), 13.
- 20) 中島清孝, 野瀬哲郎, 石川忠: 溶接構造シンポジウム2004講演論文集, (2004), 335.
- 21) 日本船舶技術研究協会, 日本鉄鋼連盟: DE 50/25/7 報告資料, Proposal of Countermeasure for Cargo Oil Tank Corrosion by Anti-Corrosion Steel, (2007.3.2). (日本船舶技術研究協会 提供 (日本財団助成事業))
- 22) 日本造船研究協会: SR242研究部会成果報告書「原油タンカーの新形コロージョン挙動の研究」, (2002)
- 23) K. Katoh, S. Imai, D. Yasunaga, H. Miyuki, Y. Yamane, H. Ohyabu, K. Kobayashi, M. Yoshikawa and Y. Tomita: World Maritime Technology Conference, (2003), A15.

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22日受付)