

連携記事

原油タンカー用耐食鋼

—タンカーの腐食事故防止に向けた耐食鋼開発と国際ルール策定への取り組み—

Corrosion Resistance Steel for Crude Oil Tankers

— Development of Corrosion Resistant Steel and Action for Establishment of International Rules to Prevent Corrosion Accidents of Oil Tankers —

(株)神戸製鋼所 鉄鋼事業本部
厚板商品技術部
次長

古川直宏
Naohiro Furukawa

新日鐵住金(株) 技術開発本部
鉄鋼研究所 厚板・形鋼研究部
主幹研究員

鹿島和幸
Kazuyuki Kashima

新日鐵住金(株) 技術開発本部
鉄鋼研究所 厚板・形鋼研究部
主幹研究員

伊藤 実
Minoru Ito

JFEスチール(株) スチール研究所
耐食材料研究部
主任研究員

釣 之郎
Shiro Tsuru

(株)神戸製鋼所 技術開発本部
材料研究所 表面制御研究室
主任研究員

阪下真司
Shinji Sakashita

1 はじめに

世界のエネルギー需要が年々高まる中で、石油は重要な位置を占め続けており、大量の原油が生産国から消費地へラインパイプや海上輸送により供給されている。このうち、海上輸送は全世界で年間20億トン近くに達しており積載量20万トン級VLCC (Very Large Crude Oil Carrier : 超大型原油タンカー) などを用いて輸送されている。また、アジア地域は石油供給の大半を海上輸送に頼っている状況にある。

ところで商船は、①外航船 (世界中を運航可能)、②内航船 (国内のみを運航可能) に大きく分けられる。外航船については厳格な国際ルールが定められており、非政府組織である船級協会 (日本海事協会 (NK)、ロイド船級協会、アメリカ船級協会 (ABS) など) で規定された各技術基準を満足し、かつ船級による検査により保証されていることが必要要件とされている。また、全世界で運航することから、設計や運航など基本的な要件については、IMO (International Maritime Organization : 国際海事機関) や IACS (International Association of Classification Societies : 国際船級協会) などの場において加盟国間で議論され、決定されている。

以前は、原油タンカーのCOT (Cargo Oil Tank : 荷油タンク) の防食処置については、統一基準がなく、塗装されるケースや塗装されずにそのまま使用される場合など対応はまちまちであった。しかしながら、1990年代に相次いで発生した老齢船における腐食が原因となった事故とそれによる原油流出による環境破壊問題を受けて^{1,2)}、IMOを中心に防食強化に向

けた議論が開始され、防食義務化を軸としたルール作りの機運が高まっていた。

このような防食義務化に向けた国際的な流れの中で、産学官一体となった取り組みによって日本発の技術である「COT用耐食鋼による防食技術」が認められルール化された経緯と各社で開発されたCOT耐食鋼について、以下に紹介していく。

2 タンカーの防食に関する国際ルール化

2.1 IMOにおける原油タンカーCOT防食義務化の流れ

国際連合の専門機関の一つであるIMOは、2011年9月時点で170国が加盟し、海運の安全性や技術向上などについての種々課題に対して5つの委員会のもとで審議を続けている。その委員会の中で船舶の安全に関する議題については、MSC (Maritime Safety Committee : 海上安全委員会) で審議され、下部に設けられた専門的な9つの小委員会の中で技術的な議論が進められている。

原油タンカーの防食義務化については、欧州を中心とした船主団体からの要請を受けて、2003年にまずはIACSにおいて検討が開始された。一旦は時期尚早として凍結されるも、欧州海上安全庁 (EMSA) からのCOTの塗装強制化や性能基準開発など技術検討が必要との勧告などもあり、2006年よりIMOにおいて防食義務化に関する議論が開始された。

一方、我が国では、タンカーの腐食問題に対して造船会社、船社、鉄鋼会社が共同で調査・研究を進める研究会 ((社) 日

本造船研究協会第242研究部会（通称SR242）が1999年に発足し、多数の原油タンカーの実船調査や腐食部位の詳細解析、サンプルや測定機器を用いた実環境の調査など3年間に渡り実施した。その結果、COT内での腐食が進む二つの部位、即ち①タンク底板部、②タンク上甲板部における腐食実態や環境条件、またその腐食メカニズムについて有益な知見が得られた^{3,6)}。また、この活動成果をもとに、無塗装でも鋼材性能により必要な防食性を確保する新しい発想の鋼材「COT用耐食鋼」が各鉄鋼会社で開発され、実船での検証を進めていった。

上記状況を踏まえて、2006年に産学官が一体となって「船舶の構造破壊防止に係る基準に関する調査研究」を立ち上げ、欧州勢が進める非常に厳しい管理による塗装を強制する動きに対して、造船所の負荷の高い塗装だけでなく、開発した耐食鋼を用いることで従来通りの無塗装でも使用可能とする基準を認めさせるべく活動を開始した。

その後、MSC／設備設計小委員会（DE）で継続的に議論されたが、各国の意見がまとまらない状態が続いていた。しかしながら、種々の技術資料や各社実船適用実績などを用いながら粘り強く説得を続けていくことによって、最終的に2010年5月に我が国の原案通りに「厳格な塗装もしくは無塗装の耐食鋼を適用」することを主旨とする基準案で合意を得ることが出来た。その内容は、SOLAS条約（The International Convention for the Safety of Life at Sea：海上における人命の安全のための国際条約）改定案に取り入れられて⁷⁾、発効に至っている。

また、この条約改正を受けて、IACSで統一ルール作りの協議が開始され、日本海事協会で作成された「COT用耐食鋼に関するガイドライン（2010年12月）」をベースに、関連する統一規則なども発効されており、各船級規則に取り入れられている^{8,9)}。

2.2 制定された原油タンカーCOT防食ルールの内容⁷⁻⁹⁾

1) 適用船

COT防食義務化は、以下（1）～（3）のいずれかの条件に該当する載貨重量5,000トン以上の原油タンカーに適用

- （1） 2013年1月1日以降に建造契約が結ばれた船舶
- （2） 建造契約日が無い場合、2013年7月1日以降起工または同様の建造段階にある船舶
- （3） 2016年1月1日以降に完工の船舶

ただし、原油を運搬しないタンカーに対しては適用されない

2) 防食範囲

新しいルールでは、底面（内底板）と上面（強力甲板）について、防食対策が義務化（図1）

（その他の区域は、従来通り無塗装で可）

- （1） 強力甲板（付随する内部構造部材を含む）および内底板。
- （2） リングフレームガーダー構造の場合、横フレームは最初のトリッピングブラケットの高さまで

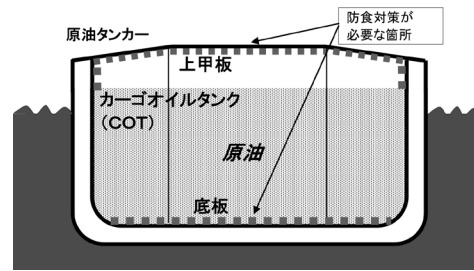


図1 原油タンカーCOTにおける防食が義務化された部位

- （3） バルクヘッドは点検用設備の最上レベルまで点検用設備がない場合は、強力甲板から、タンク高さの10%まで。ただし、3mを超える必要はない
- （4） 内底板から高さ0.3mまでの全ての構造部材

また、一部を塗装するなど耐食鋼と塗装の組み合わせも可

3) 目標性能

塗装もしくは耐食鋼による性能目標は下記

塗装) 15年後に所定の良好な塗装状態を維持する

耐食鋼) 25年後に所定の予備厚以内に腐食量を抑える

この場合、塗料、耐食鋼ともにIMOで規定された性能認証試験に適合することが必要となり、適合した材料に対しては各船級より型式承認が発行される。また、無塗装で使用する場合は、溶接材料も使用する耐食鋼との溶接継手で異常な腐食が発生しないことを確認しておく必要があるが、データがない場合は溶接部のみ塗装しても使用することが可能。

3 タンカー内の腐食メカニズムと国際ルールにおける評価試験の紹介

3.1 タンカー内の腐食メカニズム

3.1.1 底板

原油タンカーのCOT内の環境と腐食状況は上述のSR242委員会³⁾によって詳細に調査されている。原油タンクの底板の腐食は、局所的に起こる穴状の形態のものであり、深さは最大で10 mmにも及ぶ。原油タンク底板には、原油積載運航時に腐食に不可欠な水が滞留していることが観察されている。この水は高濃度の塩化物を含む中性水（ブライン）であり、原油中の含有水分が搬送中に分離したものと考えられている。一方、原油タンク内面にはオイルコートと称されている原油成分が固着している。このオイルコートは塗装と同様の環境絶縁性を有する。このため腐食はオイルコートの欠陥部で生じると考えられる。

図2にタンク底板の腐食機構の模式図を示す。オイルコート欠陥部においてはオイルコート健全部と欠陥部で電池を形成し、欠陥部の腐食が促進されることにより孔食が進展する

とされる機構⁶⁾と、欠陥部が酸性化することにより腐食進展するとされる機構が考えられている。以下に酸性化の機構について説明する。

欠陥部で腐食が生じると加水分解によってpHが低下する。底板には10 mass%の高濃度のブラインが滞留しているため、腐食部は強い酸環境になり得る。このため、ピット内では活性溶解が生じ半球状に腐食が進展すると考えられる。実際にピット内部のpH値を計測した結果、pH値が1.5以下を示す結果が示されている。

また、SR242の調査結果からピットの進展はドック検査後に停止すると考えられている³⁾。この考え方を図3に示す。ドック検査時にタンク内のクリーニングがおこなわれるため、ドック入り前に発生したピット内は清掃される。その後の就航時には新たにオイルコートで覆われるため、結果として新たな場所にピットが発生すると考えられる。実船試験でピット深さを追跡調査した結果、2.5年目と5年目の深さはほぼ同じであった(図4¹⁰⁾)。この結果は、上述のドック検査後にピット進展が停止することを示すものである。

3.1.2 上甲板

原油タンク上甲板裏側の腐食は、銅板がほぼ均一に腐食するいわゆる全面腐食の形態である。

平均の腐食速度は概ね年間0.1 mm以内であると報告されている³⁾が、腐食環境によってはそれを上回る場合がある。腐食対策のひとつとして塗装もおこなわれているが、初期塗装に加えメンテナンス時は足場が必要となるなど膨大な費用

がかかるという問題がある。

上甲板裏側の空隙部にはタンク内防爆の目的でイナートガスと呼ばれるエンジン排ガスが導入されるため、CO₂、O₂、SO₂等の腐食性ガスが存在する。さらに原油由来のH₂Sも比較的高濃度に存在する。原油タンク気相部ではO₂とH₂Sが共存していることが知られているが⁶⁾、このような環境は自然界ではありえず、このことから上甲板の腐食環境がいかに特異であるかがわかる。

また、上甲板裏側は昼夜の温度差により結露と乾燥が繰り返される環境であり、結露水はCO₂やSO₂の存在によりpHが2~4程度まで低下する。腐食生成物としては鉄さびに加えH₂Sが酸化されて生成するS(固体硫黄)が比較的多くみられるのが本腐食環境の特徴であり、腐食生成物層はさびとSが層状に存在する構造となっている。腐食メカニズムを図5にまとめる。上甲板裏側はイナートガス成分とH₂S存在下における弱酸水による乾湿繰り返しにより腐食が進行すると考えられる。

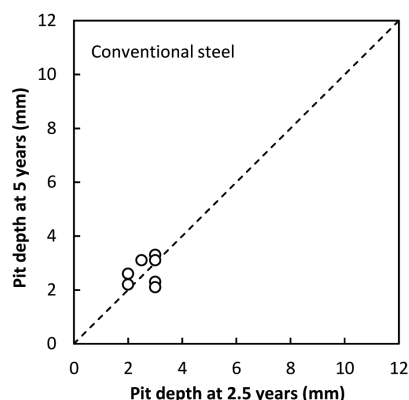


図4 同一ピットの2.5年目と5年目検査時の深さ計測結果

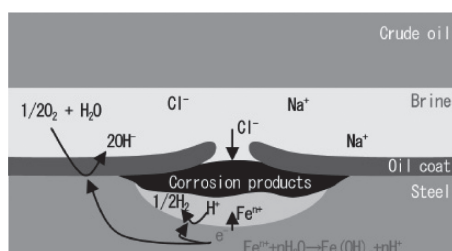


図2 底板の腐食機構の模式図(ピット内酸性化)

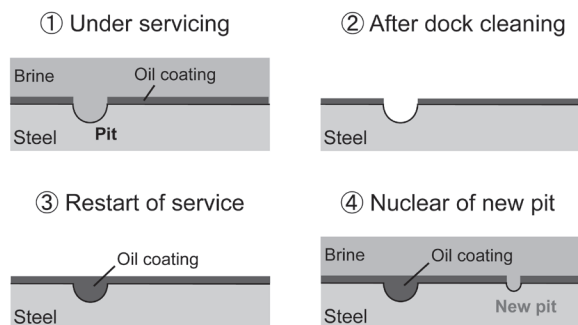


図3 ドック検査におけるピット成長停止の考え方

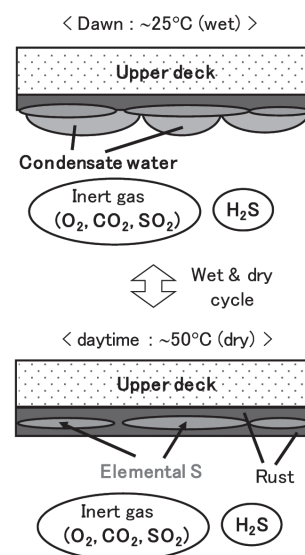


図5 上甲板裏側の腐食機構

3.2 国際ルールにおける評価試験方法

3.2.1 COT底板

底板用の評価試験法は、ピット内酸性化の機構にもとづいたもので、ピット内の酸性環境を抽出した試験である。実環境におけるブラインの分析結果をもとにpHの低いNaCl溶液中での腐食速度を求めるものである。IMO規定の試験方法は以下のとおりである^{7,9)}。試験材としては従来鋼と耐食鋼を用い、試験期間は72時間である。試験溶液は10% NaClを塩酸でpH=0.85に調整したものを使用し、24時間ごとに試験溶液を交換するよう規定されている。試験温度は30±2℃、比量は20 cc/cm²以上である。72時間の試験後の腐食速度が1 mm/年以下であれば耐食鋼として認められる。また、溶接継手についても評価試験が必要であり、168時間の試験で母材部と溶金部に段差が無いことを耐食性確保の要件としている。

3.2.2 COT上甲板

上甲板用の評価試験法は、実船の腐食環境を考慮した再現腐食試験法である。蒸留水を入れた密閉容器中に上甲板裏側気相部の腐食性ガスを模擬したガス(O₂、CO₂、SO₂、H₂S含有)を吹き込み原油タンク内の環境を模擬している。また試験片は上甲板裏側を模擬するため試験槽天井裏に取り付け、25℃-50℃の温度サイクルを付与することにより結露と乾燥の繰り返しを再現したものである。この再現腐食試験後の鋼材上に生成した腐食生成物を分析した結果、組成は実船と類似しており、実環境の腐食生成物として特徴的な単体Sも検出された。また、図6に示すように、腐食生成物層の断面分析より単体Sが層状に存在することが判明、実環境において見られるさびとSの層状構造が本試験により再現されることが確認された¹¹⁾。

IMO規定の試験方法は以下のとおりである^{7,9)}。試験材としては耐食鋼と従来鋼を使用し、耐食鋼は21、49、77、98日間の試験をおこなう。従来鋼は98日間の試験をおこない、従来鋼の腐食速度が0.2~0.4 mm/年の間であれば試験として

適切と判断される。試験片温度は50±2℃を19±2時間、25±2℃を3±2時間、降温および昇温時間はそれぞれ1時間以上に制御し、蒸留水温度は試験片が50℃のときに36℃を上回らないよう制御する。吹き込むガスの組成は体積割合でO₂が4±1%、CO₂が13±2%、SO₂が100±10 ppm、H₂Sが500±50 ppm、N₂が83±2%で、試験開始から24時間の流量は100 cc/分、それ以降は20 cc/分である。試験結果から25年後の腐食量を推定し、2mm以下であれば耐食鋼として認められる。また、底板と同様に溶接継手についても評価試験が必要であり、98日間の試験で母材部と溶金部に段差が無いことを耐食性確保の要件としている。

4 COT用耐食鋼について

COT耐食鋼については、船級規則により試験方法やクライテリアなどが明確に定められており、それらの基準を満足した鋼材が商品化されている。また、試験採用を含めて数多くのタンカーで長期間に渡る実績を有しており、その優れた防食性能が確認されている。

既に鉄鋼各社においてCOT底板用耐食鋼、上甲板用耐食鋼が開発されているが、以下に開発されている耐食鋼の特徴や実船での適用結果の一例を報告する。各社の商品に関する最新情報については各社ホームページなどを通じて紹介されている。

4.1 COT底板用耐食鋼

1) 新日鐵住金「NSGP®-1」

NSGP-1を適用した船では良好な結果が得られている¹²⁾。図7はNSGP-1を適用した船の10年後の結果を示したものであるが、従来鋼を用いた船5年と比較してもピット数は大幅に低減していることがわかる。また本船では5年目で存在したピットの深さをドック毎に計測しているが、ピット深さは10年目も変わらず、従来鋼と同様にドック検査後にピット進展が停止することを検証した¹²⁾。本船のほかNSGP-1は既に約

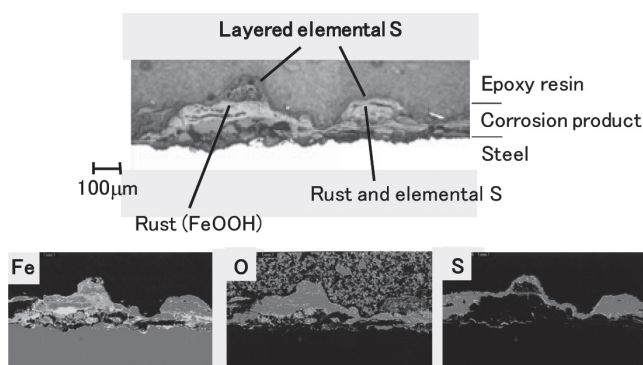


図6 再現腐食試験後の腐食生成物層断面

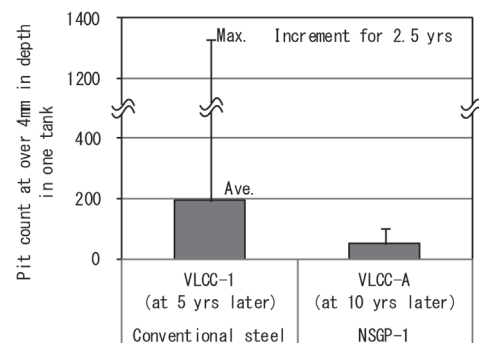


図7 従来鋼適用のVLCC-1の5年後とNSGP-1適用VLCC-Aの10年後のピット数比較

10隻の大型原油タンカーの原油タンク底板に全面適用されており、図8に示すようにいずれも従来鋼を用いた船に比べてピット数が大幅に低減していることがわかる¹²⁾。

2) JFE スチール「JFE-SIP®-OT1」¹³⁾

図9にSOLAS条約に定められたCOT底板用の耐食試験結果を示すが、1mm/年未満の腐食速度を有している。また、母材や溶接継手などの機械的特性についても、IACSの統一規則¹⁴⁾で定められた鋼の強度と靱性レベルにおいて、タンカー底板に適用されるDH36のスペックを満足している。一方、図10に溶接継手の耐食性試験を行った後の母材と溶接金属の境界部の断面を示すが、母材／溶接金属境界部における耐食試験後の段差はいずれも30 μm以下で不連続面なしと判定され、SOLAS条約に定められた溶接継手の耐食性のクライテリアを満足している⁷⁾。

このようにJFE-SIP®-OT1は原油タンクの底板に発生する深い孔食を抑制する耐食性と、従来鋼と同等の機械的特性および溶接性を兼ね備えており、AH32～36¹⁴⁾およびDH32～36¹⁴⁾において最大板厚40mmまで、底板用タンカー耐食鋼として日本海事協会から型式承認を取得している。JFE-SIP®-OT1を適用することにより、塗装を施すことなく、低廉なライフサイクルコストで原油タンカーの安全性向上に寄与できるものと期待できる。

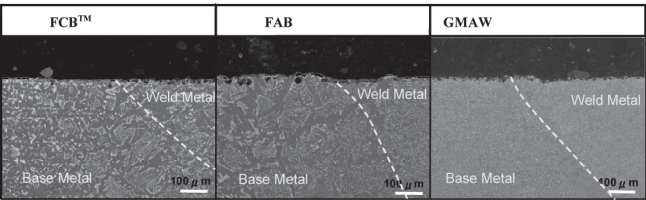
3) 神戸製鋼所「KPAC®-1」

KPAC-1は既に8隻の実船に適用されている。実船における

最大ピット深さおよび深さ2 mm以上のピット数の一例を図11および図12に示す^{10,15,16)}。KPAC-1と従来鋼との溶接部では、無塗装でも異常な腐食は認められず、溶接部は健全であることも確認された。また、実船試験におけるKAPC-1のピット深さは2.5年目と5年目で変化しておらず、従来鋼と同様にピット進展がドック検査後に停止することも確認できた¹⁶⁾。

このため、KPAC-1適用により船舶寿命を通じてピットの補修が大幅に低減できる可能性が示唆され、メンテナンスコストの大幅な低減が期待される。

また、KPAC-1はAH32、DH32、AH36、DH36¹⁴⁾において原油タンカー貨物油タンク底板に使用する耐食鋼材として日本海事協会から承認を取得している。



GMAW: Gas metal arc welding
FAB: Flux asbestos backing
FCB: Flux copper backing

図10 JFE-SIP®-OT1の各種溶接継手の耐食試験後の断面

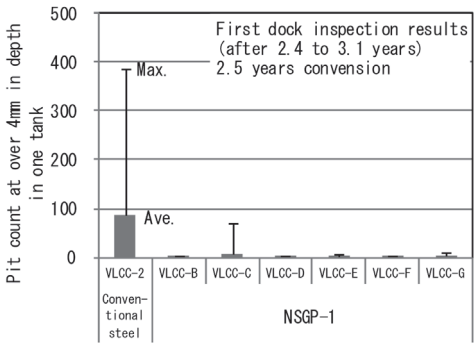


図8 従来鋼適用船とNSGP-1適用船6隻のピット数の比較

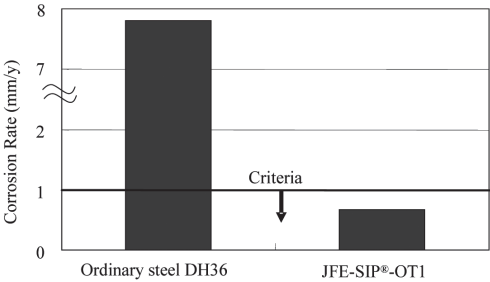


図9 JFE-SIP®-OT1の耐食性

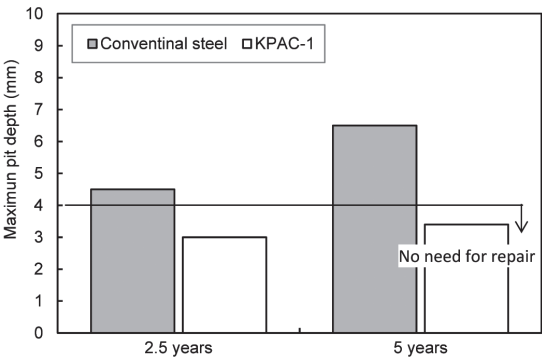


図11 KPAC-1適用船のピット最大深さ一例

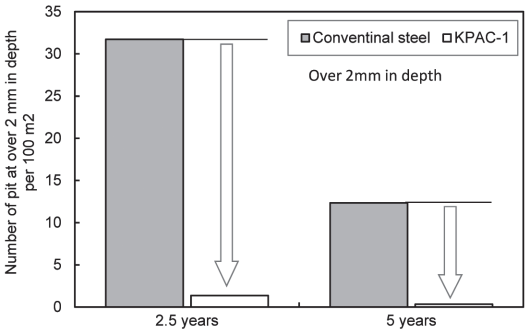


図12 KPAC-1適用船の深さ2mm以上のピット数一例(5yearは2.5year目以降に新たに成長したピットのみ)

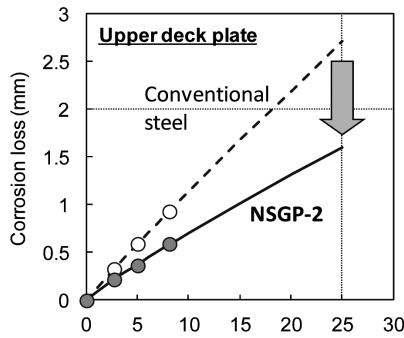


図13 NSGP-2の実船試験結果および25年後腐食量の推定

4.2 COT上甲板用耐食鋼

・新日鐵住金「NSGP®-2」

NSGP-2は微量合金元素添加により弱酸性水の乾湿繰り返し環境における耐食性を向上させたものである。NSGP-2は実環境で約8年間試験適用されており、同じ環境における従来鋼との比較で耐食性を評価した。結果を図13に示す¹²⁾。8年間の試験においてNSGP-2は従来鋼に比べおよそ4割腐食量が低減した。25年後の腐食量を推定すると、従来鋼では評価試験法において合格基準として設定されている2 mmを上回る2.7 mmであるのに対し、NSGP-2は1.6 mmと大幅に少ない。このように、NSGP-2は長期の実環境試験において良好な耐食性が検証されている。

5 おわりに

耐食鋼は基本的に無塗装での使用となることから、建造時の塗装に関するコストや工期の圧縮につながるとともに、運用中においても大規模な補修が必要となる可能性は低く、維持コストの面でも塗装に対してメリットがあるものと思われる。既に新しい塗装基準が適用されたタンカーでのCOT耐食鋼の採用実績もあり、今後建造されるタンカーにおいてCOT耐食鋼が広く使用されていくものと予想される。

残念ながら、先に述べたPSPCを初め造船に関する国際基準については、その多くが欧州主導で作成され、アジアを中心とした建造国の意見を反映させることに苦心しているのが現状ではある。しかしながら、COT用耐食鋼については、我が国が主導して新技術や基準案を作成して国際基準化された数少ない成功例と言える。今後も、造船関係の安全に関する基準の改定に際して、産学官の各関係者と密に連携した取り組みを継続し、鉄鋼会社も世界一の力を有する我が国の海事クラスターの一員として、日本の造船業界の発展に寄与していく所存である。

参考文献

(2015年7月24日受付)

- 1) 小森 務：KANRIN 日本船舶海洋工学会誌, 13 (2007), 38.

- 2) 潮海 弘資：KANRIN 日本船舶海洋工学会誌, 31 (2010), 29.
- 3) 日本造船研究協会：SR242 研究部会成果報告書, 原油タンカーの新型コロージョン挙動の研究, (2002)
- 4) D.T.Yasunaga, K.Katoh, S.Inami, H.Miyuki, Y.Ymane, H.Ohyabu, Y.Kobayashi, M.Yoshikawa and Y.Tomita : Study on Cargo Oil Tank Upper Deck Corrosion of Oil Tanker, World Marine Technology Conference, San Francisco, (2003)
- 5) K.Katoh, S.Imai, D.T.Yasunaga, H.Miyuki, Y.Yamane, H.Ohyabu, Y.Kobayashi, M.Yoshikawa and Y.Tomita : Study on Localized Corrosion on Cargo Oil Tank Bottom Plate of Oil Tanker, World Marine Technology Conference, San Francisco, (2003)
- 6) 吉川光昭：材料と環境, 53 (2004), 388.
- 7) SOLAS Chapter II-1, Part A-1, Reg.3-11, as amended by resolution MSC.291 (87) , APPENDIX, Test Procedures for Qualification of Corrosion Resistant Steel for Cargo Tanks in Crude Oil Tankers.
- 8) IACZ UR W30, Normal and higher strength corrosion resistant steels for cargo oil tanks, (2013)
- 9) IACS UI SC 258, For Application of Regulation 3-11, Part A-1, Chapter II-1 of the SOLAS Convention (Corrosion Protection of Cargo Oil Tanks of Crude Oil Tankers), adopted by Resolution MSC.289 (87) The Performance Standard for Alternative Means of Corrosion Protection for Cargo Oil Tanks of Crude Oil Tankers, (2013)
- 10) 阪下 真司ほか：溶接学会誌, 4 (2015), 84.
- 11) K.Kashima : Proceedings of International Symposium on Shipbuilding Technology 2007, (2007), 5.
- 12) 伊藤実, 鹿島和幸, 本田貴之, 原宗里, 稲見彰則, 西村誠二：新日鐵住金技報, 400 (2014), 86.
- 13) JFE 技報, 33 (2014), 67.
- 14) IACS UR W11, Normal and higher strength hull structural steel, (2014)
- 15) S.Sakashita, A.Tatsumi, H.Imamura and H.Ikeda : Development of Anti-Corrosion Steel for Bottom Plates of Cargo Oil Tanks, Proc. of the Int. Symp. on Shipbuilding Technology, ISST2007, Osaka, (2007)
- 16) S.Sakashita, H.Kawano and N.Furukawa : Onboard Evaluation of Low Alloy Corrosion Resistant Steel for Cargo Oil Tank of Crude Oil Tanker, Proceedings of the NACE International East Asia & Pacific Rim Area Conference & Expo 2013, Kyoto, (2013)