

バラストタンク耐食鋼 JFE-SIP®-BT 適用船の 塗装劣化挙動と腐食挙動

Coating Deterioration and Corrosion Behavior of the Corrosion Resistant Steel for Ballast Tank “JFE-SIP®-BT” Application Ship

塩谷 和彦 SHIOTANI Kazuhiko JFE スチール スチール研究所 耐食材料研究部 主任研究員 (課長)
中村 雅美 NAKAMURA Masayoshi JFE スチール 西日本製鉄所 鋼材商品技術部厚板・鍛造室 主任部員 (課長)
(現東日本製鉄所 厚板部厚板技術室 主任部員 (課長))

要旨

バラストタンクの塗装劣化を抑制し、塗装寿命を延長するバラストタンク耐食鋼 (JFE-SIP®-BT) を開発した。本報では、開発鋼を実船 (VLOC: Very large ore carrier) のバラストタンクに適用し、約5年経過後、塗装の劣化、ならびに鋼材の腐食挙動を調査した結果を報告する。適用部材は上甲板と上甲板ロンジである。上甲板では、鋼板サンプル(ダブルリングプレート)を上甲板に溶接後、船体と同時塗装し、塗装スクラッチからの劣化挙動を観察した。5年経過後、開発鋼における塗装劣化面積、腐食深さ、腐食体積は、従来鋼に対し、それぞれ、75%、84%、58%であった。上甲板ロンジでは、エッジ部における塗装劣化長さ率を評価した。その結果、開発鋼の平均塗装劣化長さ率は従来鋼の約65%であった。開発鋼の塗装劣化進展抑制効果を実船で確認することができた。

Abstract:

The corrosion resistant steel for ballast tank “JFE-SIP®-BT”, which prolongs coating life by preventing coating deterioration, has been developed. The developed steel has been applied to ballast tanks of a VLOC (Very large ore carrier). This paper reports evaluation results on coating deterioration and corrosion behavior of the developed steel after 5-year use. The parts applied were upper deck plates and longitudinal members of upper deck of ballast tanks. Doubling plates were welded to upper deck plates of ballast tanks and were coated simultaneously with the upper deck plates. The coating deteriorated area, corrosion depth and corrosion volume of the developed steel were 75%, 84%, and 58% of those of the conventional steel, respectively. The deteriorated length at the edge of longitudinal members in the developed steel was about 65% of that in the conventional steel. The prevention effect of coating deterioration by the developed steel was confirmed under the actual ballast tank condition.

1. はじめに

船舶が空荷状態で航行するとき、船舶の安定のために、バラストタンクには海水を積載する。そのため、バラストタンクは海水による腐食に耐えるよう、重防食塗装が施されるが、塗装は錆生成や塗膜膨れなどの経年劣化を生じる¹⁾。そのため、補修再塗装を必要とすることがあり、その費用が大きくなるという問題がある。また、補修再塗装には足場が必要だが、場所によっては足場が組みにくく、再塗装が難しい場合もある。そこで、ライフサイクルコスト低減の観点から、塗装劣化(錆生成や塗膜膨れ)を抑制し、塗装寿命(再塗装までの期間)の延長を可能とする耐食鋼の開発に着手した。

図1にバラストタンク耐食鋼の開発コンセプトを示す。

塗装の劣化過程は、塗装の劣化がない段階 (1st Stage) と、鋼材が腐食し、塗装が劣化していく段階 (2nd Stage) に分けられる。耐食鋼は後者の段階において、鋼材の腐食を抑制することで、塗装の劣化を抑制し、塗装寿命を延長する。腐食を抑制するコンセプトは、図1の右に示すように、鋼材

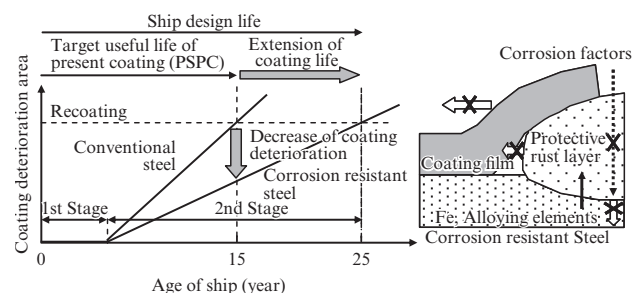


図1 開発コンセプト

Fig. 1 Concept of development

中の合金元素の作用により、地鉄表面への腐食性物質の透過を抑制する保護性の錆層を形成することである。塗装寿命は、現状の塗装寿命を15年（PSPCに規定される塗装仕様の目標耐用年数²⁾）としたとき、一般的な船舶設計寿命の25年^{3,4)}まで延長することを目標としている。

バラスタタンクで最も塗装劣化の激しい部位は上甲板近傍である⁵⁾。そこで、JFE スチールでは、まず、実際のバラスタタンクの上甲板近傍における腐食環境調査を行なった⁶⁾。その結果、乾湿繰り返し腐食環境であることが明らかになった⁶⁾。この測定結果をもとに、実験室腐食試験条件を決定し⁶⁾、種々の成分を有する鋼材の塗装劣化挙動を観察・評価し、さらに、最長2年間の実船バラスタタンク内での小型サンプル暴露試験でその効果を確認し⁷⁾、開発されたのがバラスタタンク耐食鋼（JFE-SIP®-BT）である。

本報では、開発鋼を実船に適用し、約5年経過後の塗装の劣化挙動、ならびに、鋼材の腐食挙動を評価した結果を報告する。適用部材は、バラスタタンクの上甲板、ならびに、バラスタタンク上甲板のロンジ材である。また、サンプル板（ダブリングプレート）をバラスタタンクの上甲板に溶接し、塗装スクラッチからの塗装劣化挙動、腐食挙動を観察した。ロンジ材ではそのエッジ部における塗装劣化挙動を観察した。

2. 実験方法

2.1 適用船およびダブリングプレート

適用船は超大型鉦石船（VLOC）であり、バラスタタンク耐食鋼は、海水積載タンクとしては、**図2**に示すNo. 5WBTに適用された。適用部材は上甲板と上甲板ロンジであり、塗装仕様はタールエポキシ 150 μm×2回塗りである。本船の航路は主にフィリピンとブラジルの往来であり、空荷時には海水を積載し、積荷時は海水を積載しない。

上甲板では、塗装損傷部からの塗装劣化進展（塗膜膨れや錆生成の進展）を模擬するために、**図3**に示す楕円状のダブリングプレートを作製し、No. 3WBTおよびNo. 5WBTの上甲板に設置した。作製、設置工程は次のとおりである。
 (1) プレートにショッププライマーを膜厚 15 μm 目標で塗布し、隅肉溶接で上甲板へ取り付けた。
 (2) タールエポキシ塗料を 150 μm×2回塗り仕様で、船体と同時塗装した。
 (3) 地鉄に至る 100 mm 長さのスクラッチを各3本付与した。両側2本はエヌティー（株）製 BM-2P アクリルカッターを用い、比較的広幅のスクラッチを付与し、中央1本はオルファ（株）製 HB5K カッターを用い、比較的狭幅のスクラッチを付与した。ダブリングプレートは、**図2**に示す4タンクにそれぞれ従来鋼2個、耐食鋼2個、合計16個を設置した。

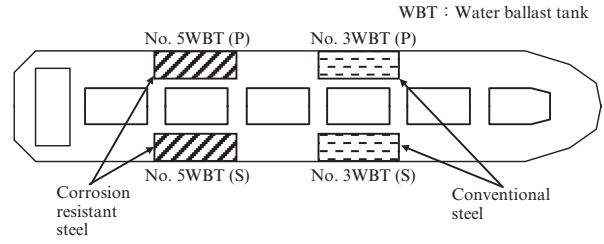
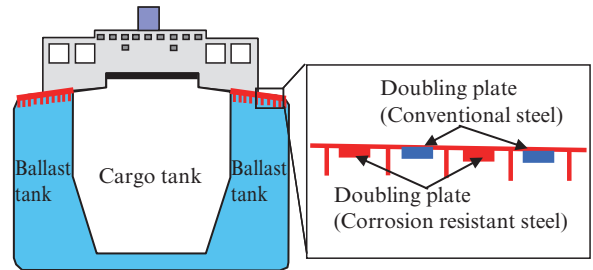


図2 耐食鋼適用タンクと従来鋼の調査タンク

Fig. 2 Application tank of corrosion resistant steel and investigation tank of conventional steel

(a) Installation position of doubling plate



(b) Shape of doubling plate

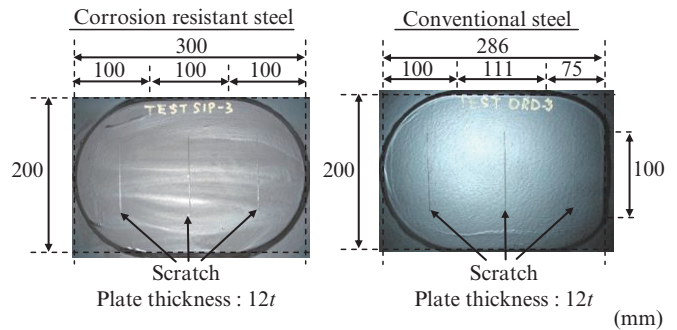


図3 ダブリングプレートの設置位置とその形状

Fig. 3 Installation position and shape of doubling plate

2.2 塗装劣化および腐食挙動の評価

2.2.1 ダブリングプレート

竣工約5年後、全ダブリングプレートの写真撮影を行ない、また、隅肉溶接部を切断して全プレートを回収し、プレートの除膜、除錆を行なった。評価として、スクラッチ部の塗装劣化面積、腐食深さ、腐食体積を測定した。評価範囲を**図4**に模式的に示す。塗装劣化面積は、**図4**(a)のように、スクラッチ長さ 100 mm の範囲において、錆および塗膜膨れの面積を測定した。腐食深さは、除膜、除錆後のプレートを、**図4**(b)のように、スクラッチ長さ 100 mm の範囲において、腐食領域を 20 mm 長さごとの5領域に分割し、各領域の最大腐食深さをデプスゲージで測定した。そして、各腐食領域の最大腐食深さの平均を腐食深さとした。腐食体積は、**図4**(c)のように、スクラッチ長さ 100 mm の範囲において、レーザ粗さ計（(株) キーエンス製 LJ-V7200）により、スクラッチに平行および直角方向に 0.3 mm ピッチ

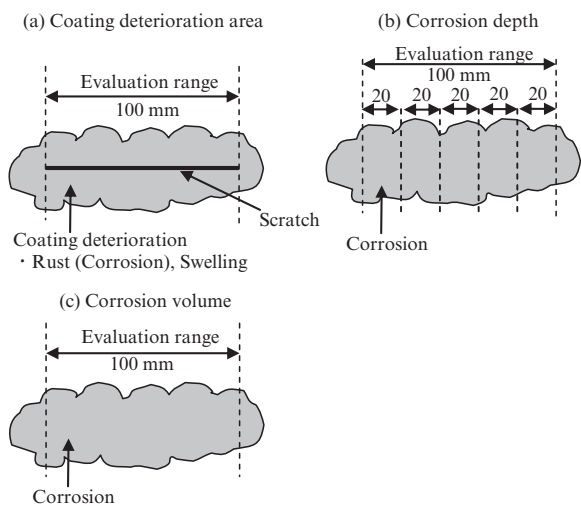


図4 ダブリングプレートスクラッチ部の塗装劣化面積，腐食深さ，腐食体積の評価範囲

Fig. 4 Evaluation range of coating deterioration area, corrosion depth and corrosion volume at scratch part on doubling plate

で腐食深さを測定し，それらを足し合わせることで求めた。なお，上記の塗装劣化面積と腐食体積は，測定した値をスクラッチ長さ 10 mm 当たりの値に換算した。

2.2.2 上甲板ロンジ材

船体の評価として，竣工約 5 年後，検査路上の上甲板ロンジエッジを連続的に写真撮影し，その写真からエッジ部における個々の塗装劣化長さ と 塗装劣化個数を測定した。そして，個々の塗装劣化長さに対する塗装劣化個数頻度，エッジ総長さに対する塗装劣化長さ率を求めた。評価タンクは従来鋼の No. 3WBT と耐食鋼の No. 5WBT であり，評価エッジの総長さは従来鋼，耐食鋼ともに 172 m である。

2.3 鋳粒子の観察

従来鋼と耐食鋼のダブリングプレート塗膜下に形成された鋳を採取し，透過電子顕微鏡でその鋳粒子を観察した。

3. 実験結果

3.1 塗装劣化および腐食挙動

3.1.1 ダブリングプレート

図 5 にダブリングプレート広幅スクラッチ部の塗装劣化面積と塗装劣化の典型的な外観を示す。スクラッチ部で鋳，塗膜膨れの塗装劣化が生じているが，耐食鋼の塗装劣化面積の平均値は従来鋼の 75% であった。なお，狭幅スクラッチの塗装劣化面積は，広幅スクラッチの 5% 程度の減少に留まった。

また，広幅スクラッチ部の腐食深さは，従来鋼において平均値で約 1.8 mm であった。一方，耐食鋼の腐食深さは，従来鋼の 84% の約 1.5 mm であった⁸⁾。

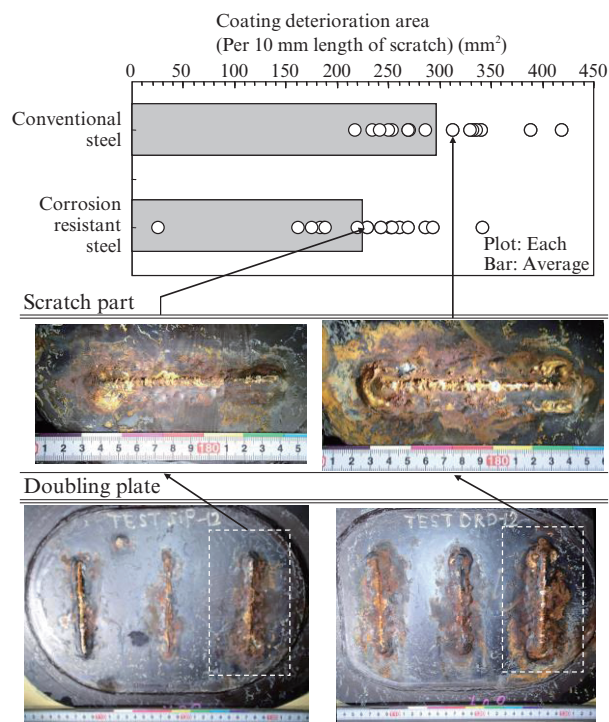


図5 ダブリングプレート広幅スクラッチ部の塗装劣化面積と塗装劣化の典型的な外観 (No. 3WBT, No. 5WBT)

Fig. 5 Coating deterioration area at wide scratch part of doubling plate and typical appearance (No. 3WBT, No. 5WBT)

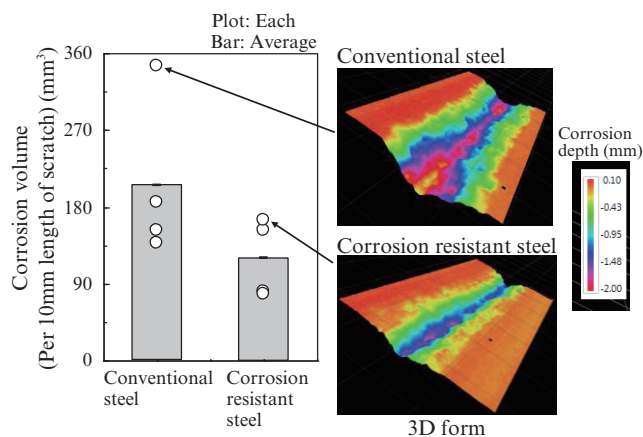


図6 ダブリングプレート広幅スクラッチ部の腐食体積 (No. 3WBT, No. 5WBT)

Fig. 6 Corrosion volume at wide scratch part of doubling plate (No. 3WBT, No. 5WBT)

図 6 は従来鋼と耐食鋼のダブリングプレート広幅スクラッチ部の腐食体積測定結果である。3D 画像で示した図は最も腐食体積が大きかったものについて，耐食鋼と従来鋼を比較したものであり，耐食鋼の腐食体積は従来鋼の約 50% であった。また，耐食鋼の腐食体積の平均値は従来鋼の 58% であった。

3.1.2 上甲板ロンジ材

図 7 に上甲板ロンジ材エッジ部における (1) 個々の塗装劣化長さの累計，(2) 総エッジ長さに対する塗装劣化長さ

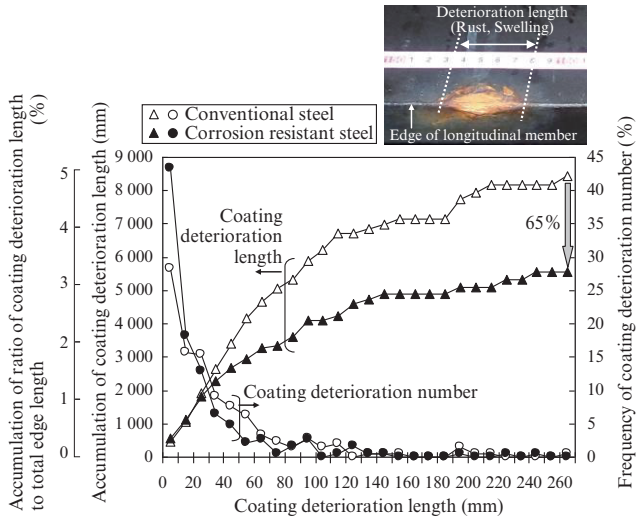


図7 上甲板ロンジ材エッジ部における塗装劣化長さ、塗装劣化長さ率、塗装劣化個数頻度

Fig. 7 Coating deterioration length, ratio of coating deterioration length and frequency of coating deterioration number at edge of upper deck longitudinal member

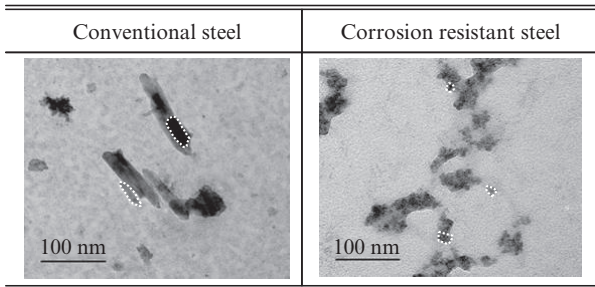


写真1 従来鋼と耐食鋼のダブリングプレート塗膜下に形成された錆粒子の透過電子顕微鏡像（白破線で囲んだ部分が1個の粒子を示す。）

Photo 1 Transmission electron microscope images of rust particles formed under coating film on conventional and corrosion resistant doubling plates (The part enclosed by the white dotted line shows one rust particle.)

率の累計、(3) 個々の塗装劣化長さに対する塗装劣化個数頻度を示す。(3) に関しては、従来鋼、耐食鋼の塗装劣化個数が、それぞれ 209 個、187 個と 10% 程度の違いがあったので、従来鋼、耐食鋼それぞれの塗装劣化長さに対する個数頻度は、該当塗装劣化長さにおける塗装劣化個数を、従来鋼、耐食鋼それぞれの全塗装劣化個数で割り付けた。なお、横軸に関して、たとえば、10~20 mm のプロットは、10 mm 超え 20 mm 以下を示している。

図7から、塗装劣化長さの総計は、従来鋼で約 8400 mm、耐食鋼で約 5600 mm であり、総エッジ長さに対する塗装劣化長さ率は、従来鋼で 4.9%、耐食鋼で 3.2% であった。すなわち、耐食鋼の塗装劣化長さ率は従来鋼の約 65% に抑制されている。塗装劣化個数の頻度について、20 mm 以下の塗装劣化長さの個数頻度は耐食鋼が大きく、一方、20 mm

超え 80 mm 以下の塗装劣化長さの個数頻度は耐食鋼が小さい。以上のことから、耐食鋼はエッジ方向での塗装劣化進展を抑制しており、耐食鋼は人為的に塗装損傷を与えていない船体においても、塗装劣化抑制効果を発現することが分かった。

3.2 従来鋼と耐食鋼の錆粒子

写真1に従来鋼と耐食鋼のダブリングプレート塗膜下に形成された錆粒子の透過電子顕微鏡像を示す。図中の白い破線で囲んだ部分が1個の錆粒子であり、耐食鋼の錆粒子は従来鋼のそれよりも微細であった。この錆粒子の微細化が、鋼材腐食減耗の抑制、塗装劣化の抑制に寄与していると考えられる。

4. 考察

4.1 実船と実験室腐食試験における塗装劣化と腐食挙動の比較

4.1.1 塗装劣化進展挙動の比較

塗装スクラッチ部からの塗装劣化進展を評価する実験室腐食試験条件を、(1) 35℃、5% NaCl 水溶液噴霧、2 h → (2) 60℃、20~30% RH、4 h → (3) 50℃、>95% RH、2 h ((1) に戻る) の塩水噴霧乾湿繰返しとし、その条件で従来鋼と耐食鋼の塗装劣化進展挙動を調査した⁶⁾。その結果、耐食鋼の塗装劣化面積は従来鋼の約 70% であり、耐食鋼のある塗装劣化面積 (600 mm²) に至る時間は、従来鋼の 1.7 倍であることが分かった。図8にその実験室腐食試験での

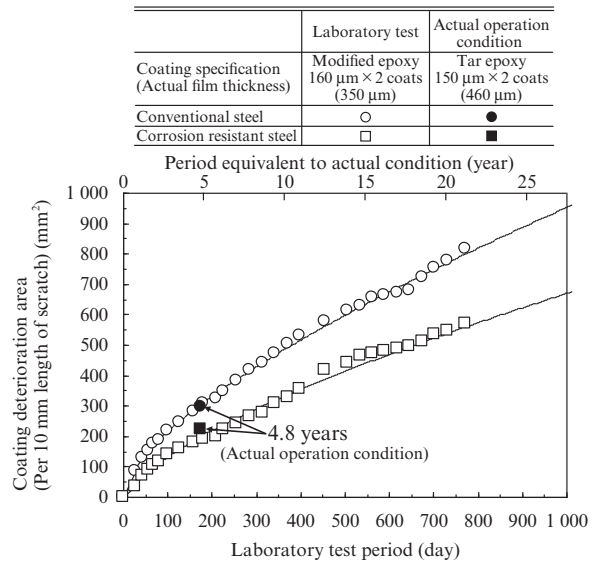


図8 実験室腐食試験（塩水噴霧乾湿繰返し試験）と実船における従来鋼と耐食鋼の塗装スクラッチ部からの塗装劣化面積の経時変化

Fig. 8 Transition of coating deterioration area at scratch part on conventional and corrosion resistant steels in cyclic corrosion test with salt spray and actual operation condition

塗装劣化面積の経時変化と、以下に述べる実験室腐食試験の加速倍率を考慮した本実船での塗装劣化面積測定結果を併せて示す。ここで、本実船のダブリングプレート広幅スクラッチにおける塗装劣化面積は、従来鋼で $297 \text{ mm}^2/4.8 \text{ 年}$ (1748 日)、耐食鋼で $223 \text{ mm}^2/4.8 \text{ 年}$ (1748 日) であった。一方、実験室腐食試験で、それらの面積に至る時間は、従来鋼が 167 日、耐食鋼が 206 日である。したがって、実験室腐食試験は、本実船に対して、約 10 倍の加速倍率であり、本実船の 4.8 年 (1748 日) の結果は、実験室腐食試験の 175 日にプロットできる。

図 8 に示すように実験室腐食試験における塗装劣化進展挙動と実船における塗装劣化進展挙動はほぼ一致した。このように、本塩水噴霧乾湿繰返し試験の妥当性が示されるとともに、耐食鋼の塗装劣化進展抑制効果を本実船において、定量的に確認することができた。また、このことから、本実船において、塗装劣化開始後に、耐食鋼の塗装劣化面積がある面積に至る時間は、従来鋼の約 1.7 倍になると考えられる。

なお、JFE スチールでは、小型サンプルを用い、別船で 2 年間の暴露試験を行なっている⁷⁾。この暴露試験では、開発鋼の塗装劣化面積が従来鋼の約 30% であった。すなわち、耐食鋼の塗装劣化進展抑制効果が、本船および実験室腐食試験でのそれよりも大きい。この理由として、別船での塗膜膨れ機構が、本船および実験室腐食試験と異なる事が原因と考えられる。本船および実験室腐食試験における塗膜膨れ先端での塗膜膨れ形態はプリスター状であった。一方、別船での塗膜膨れ形態は、フィリフォーム(糸状)であった。プリスターとフィリフォームの塗膜膨れ機構は異なる⁹⁾。したがって、この塗膜膨れ機構の違いにより、別船では、耐食鋼の効果が異なった(より効果を発現した)ものと考えられる。

4.1.2 鋼材腐食減耗挙動の比較

実験室腐食試験において、鋼材の腐食減耗を調査した結果、従来鋼では試験片板厚 3 mm を超える腐食貫通孔が広い領域で見られたが、耐食鋼ではそれが顕著に少なく、耐食鋼による腐食深さの抑制効果が示唆された⁶⁾。一方、本実船においても、耐食鋼の腐食深さは従来鋼の 84% に抑制されていた。このことから、実験室腐食試験での耐食鋼の腐食減耗抑制効果についても本実船で確認できたと考えられる。

4.2 耐食鋼による塗装寿命延長効果

耐食鋼適用による塗装寿命延長効果について、図 1 をもとに検討する。図 1 の 1st Stage で示される塗装劣化なしの期間を a 、2nd Stage で示される塗装劣化開始から再塗装までの期間を b とすると、従来鋼における塗装寿命 (A) は、

$$A = a + b \dots\dots\dots (1)$$

となる。耐食鋼を適用した場合、塗装の性能に依存する a は従来鋼と同じであるが、耐食鋼では塗装劣化開始後の腐食速度が小さいため、 b は大きくなる。図 8 で検討したように、塗装劣化開始後、ある塗装劣化面積に至る時間について、耐食鋼は従来鋼の 1.7 倍となる結果が得られた。したがって、耐食鋼を適用した場合の塗装寿命 (B) は次式ようになる。

$$B = a + 1.7 \times b \dots\dots\dots (2)$$

一方、図 7 のように、本実船において適用後 5 年経過時点ですでに耐食鋼適用の効果が現れていることから、 a は 5 年より小さいと考えられる。また、本船塗装仕様に近いタールエポキシ塗装 $250 \mu\text{m}$ (2 回塗り) において、塗装状態が FAIR になる時期は約 15 年であり¹⁾、IACS (国際船級協会連合) では塗装状態が FAIR になった時、再塗装を推奨していることから¹⁰⁾、 $a + b = 15$ と仮定する。 $b = 15 - a$ なので、(2) 式に代入すると、 $B = 25.5 - 0.7a$ となり、本船評価結果より、 $a < 5$ なので、 $22 < B \leq 25.5$ と見積もられる。このことから、耐食鋼適用により、22.5 年のドック時においても、塗り替え基準に達しないことも期待でき、一般的な設計寿命 25 年まで塗り替えなしとする可能性も十分あると考えられる。

5. おわりに

バラスタタンク耐食鋼を実船に適用し、竣工後約 5 年の塗装劣化挙動および腐食挙動を調査し、さらに、実験室腐食試験と比較した結果、以下のことが分かった。

- (1) 実船バラスタタンク上甲板に設置したダブリングプレートスクラッチ部の塗装劣化面積について、耐食鋼の塗装劣化面積は従来鋼の 75% に抑制されていた。また、ダブリングプレートスクラッチ部の腐食減耗について、耐食鋼の腐食深さは従来鋼の 84% に抑制され、耐食鋼の腐食体積は従来鋼の 58% に抑制されていた。
- (2) 耐食鋼の実船上甲板ロンジエッジの塗装劣化長さ率は従来鋼の約 65% に抑制されていた。また、耐食鋼は 20 mm 以下の塗装劣化個数頻度が従来鋼よりも大きく、20 mm 超え 80 mm 以下の塗装劣化個数頻度が従来鋼よりも小さかった。これらのことから、耐食鋼は人為的に塗装損傷を与えていない船体においても、塗装劣化抑制効果を発現することを確認した。
- (3) 耐食鋼の錆粒子は従来鋼のそれよりも微細であった。
- (4) 実験室腐食試験である塩水噴霧乾湿繰返し試験における塗装劣化進展挙動と実船における塗装劣化進展挙動がほぼ一致した。
- (5) (4) の結果から、本塩水噴霧乾湿繰返し試験の妥当性が示されるとともに、耐食鋼の塗装劣化進展抑制効果を本実船において、定量的に確認することができた。また、

本実船において、塗装劣化開始後の耐食鋼のある塗装劣化面積に至る時間は、従来鋼の約1.7倍になると考えられる。

(6) バラストタンク耐食鋼の適用により、一般的な船舶設計寿命の25年まで塗り替えなしにできる可能性は十分あると考えられる。

今後、塗装寿命の延長によるライフサイクルコストの低減の観点から、本耐食鋼の適用拡大をはかっていくとともに、塗装の簡易化（たとえば、PSPC 塗装基準の2回塗り²⁾を1回塗りに低減）や、鋼材腐食予備厚^{3,4)}の低減を目的として、検討を加えていきたい。

耐食鋼の実船への適用およびその評価は、川崎汽船株式会社、太洋日本汽船株式会社、ジャパンマリンユナイテッド株式会社のご協力により行なわれたものであり、関係各位に深く感謝いたします。

参考文献

- 1) Nippon Kaiji Kyokai. Guidance for Corrosion Protection System of Hull Structures - For Water Ballast Tanks and Cargo Oil Tanks - Second revision . 1995.
- 2) Nippon Kaiji Kyokai. Guidelines for Performance Standard for Protective Coatings Contained in IMO Resolution MSC. 215 (82), 2007.

- 3) IACS. Common Structural Rules for Double Hull Oil Tankers. 2006.
- 4) IACS. Common Structural Rules for Bulk Carriers. 2006.
- 5) 恵美洋彦, 熊野厚, 有馬俊朗, 湯浅通史, 山本規雄, 海野昌俊. 日本造船学会論文集. 1993, no. 174, p. 735.
- 6) Shiotani, K.; Samusawa, I.; Tachibana, S.; Komori, T. Proc. ICSOT, Ambon, Indonesia, The Royal Institution of Naval Architects, 2012, p. 27.
- 7) 塩谷和彦, 小森務, 星野俊幸, 西村公宏, 中村雅美, 潮海弘資. 日本船舶海洋工学会講演会論文集. 2010, no. 11, 論文番号 2010K-G10-3, p. 481.
- 8) 塩谷和彦, 橘俊一, 寒沢至, 潮海弘資, 秋山治之, 平沢宏章. 日本船舶海洋工学会講演会論文集. 2013, no. 17, 論文番号 2013A-GS4-5, p. 97.
- 9) Funke, W. Progress in Organic Coatings. 1981, no. 9, p. 29.
- 10) IACS. Recommendation 87 Guidelines for Coating Maintenance & Repairs for Ballast Tanks and Combined Cargo/Ballast Tanks on Oil Tankers, Rev. 1. 2006.



塩谷 和彦



中村 雅美