

タンク内塗料の調査研究

環境・エネルギー研究領域 ＊村上 陸尚、松岡 一祥、田中 義照
勝又 健一、林 慎也

(独) 鉄道建設・運輸施設整備支援機構 松尾 誠一、田原 洋一

1. はじめに

内航船舶を安全かつ経済的に運航するため、船体の腐食防止対策が不可欠である。また、これまでタンク内塗装の主流であったタールエポキシ系塗料に対して人体に与える悪影響や環境への問題が指摘され、これに代わるものとして、ノンタールエポキシ系塗料の開発及び実用化が進められている。更に、平成17年4月から建造される一定のタンカーに対しては、ダブルハル化により二重船側部にバラストタンク等が設置されることとなり、これらの背景から、海運事業にあっては、船内タンク等に用いる塗料の効果（防錆効果等）及び信頼性についての関心が高まっている。

また国際的にも、国際船級連合（IACS）と主要な国際団体がバラストタンク塗装強化基準を国際海事機関（IMO）に提案し、IMO 小委員会で検討されることが決まっており、タンク内の塗装下地処理、膜厚、塗料そのものの品質等について、新たに見直す動きがある。

このような状況のなか本調査研究は（独）鉄道建設・運輸施設整備支援機構から委託を受け実施され、タンクに用いる塗料について、塗膜の状況、海水バラストの搭載による影響及び温度による影響等現状調査を実施し、不具合の発生原因の検討、課題の抽出を行い、その防食対策に取り纏めた。

2. 調査研究の内容

主に内航船舶を対象とし、以下の調査を行った。

（1）現状調査

①タンク状態の調査

- ・タンク内塗料の状態
- ・タンク内の海水バラストと塗料状態の関係
- ・ヒーティングの影響を受ける部分の塗料状況

②ノンタール系塗料の機能、施工仕様等の調査

③タンク構造等の調査

（2）現状分析と対策の検討

①現状調査を踏まえ、課題の抽出

②不具合の発生要因解析

③腐食を低減するための対策

3. 不具合の種類

塗装作業中の欠陥としては、タルミ、タレ、ハケ目、ゆず肌、ぶつなどがある。これらを防ぐためには、基本的には適切な塗料の使用を行えばよい。一方、塗膜の経時後の問題としては、錆、はく離、割れ、フクレなどがある。これらを防ぐためには、膜厚管理、被塗面の汚れの除去、塗料の付着力の向上などが主に考えられる。

4. 現状調査

4.1 調査方法及び判定方法

タンク内塗料の実態調査は、概ね船齢10年以上の船舶を調査対象船に選定し、ドックスケジュール等を確認しながらタンク開放の日時にあわせて実施した。また、調査結果の判定に客観性を持たせるため、原則 ①鉄道・運輸機構 ②海技研 ③調査船のタンク内塗料メーカーの各職員で構成されたメンバーで実施した。

具体的には、調査に先立ち、本船の工務監督、船長等から本船の搭載貨物、航路、バラスト注排水の頻度、塗装仕様、補修の有無等本船の基礎データについてヒアリングを行い、造船所の担当者にタンクの安全性を確認し、調査タンクを決定する。

タンク内調査としては、タンク内に入り、塗料の膜厚計測、不具合の状況を調査メンバー各人が判定を考慮しながら調査、不具合部の写真撮影等実施する。

調査終了後、発錆率等、直接的に数値化が不可能なものについては、ASTM (American Society for Testing and Material : アメリカ材料試験協会) D610-01 RUST¹⁾ / D714-87 Blister²⁾を参考にした判定表を用い調査員全員で協議し、客観性を持たせた評価値を、タンク調査表に記入する。

4.2 タンク内塗料の性能等

本調査は、表－１に示される 11 隻の船舶を対象に実地調査をおこない、タンク内における欠陥の種類、その度合いおよび発生部位について調べた。

本実地調査において確認できた欠陥のほとんどが、フクレおよび錆であった。以下にフクレおよび錆の発生の特徴を挙げ、発生状況の例を図－１、２にそれぞれ示す。

フクレ

- ・ 気層部より水没部に多く発生していた。
- ・ 発錆部の周囲に多く発生していた。フクレが壊れ錆になっている様子がわかるものも多かった。
- ・ 狭隘部にフクレ発生の著しい箇所があった。
- ・ ビード付近に多く発生していた。
- ・ 開口部、フレーム、ブラケットなどのフリーエッジ部周辺に多く発生していた。
- ・ 大きいものは径が 200 mm 程度のフクレが発生していた。
- ・ マーキングの跡に沿って発生しているフクレもあった。
- ・ フクレの発生している箇所の膜厚は健全部に比べて小さいものが多くあった。

錆

- ・ 気層部に多く発生していた。
- ・ 溶接ビード部に多く発生していた。また、その周辺にも発生している場合も多く見受けられた。
- ・ 構造上、溶接が困難となる場所（狭隘部）に多く発生していた。
- ・ 暴露甲板に接しているタンク上面に多く発生していた。
- ・ パイプは他の部位に比べ著しく腐食していた。
- ・ ロンジのフランジなどのエッジ処理（面取り）がされている船のほうがされていない船に比べ、発錆率が著しく低かった。
- ・ 同一タンク内でも F O タンクに接している壁はヒーティングの影響を受け、その他の壁に比べ著しく錆が発生していた。
- ・ 錆による腐食の進行を防ぐには、アノードの設置が効果的である。
- ・ 錆の発生している箇所の膜厚は健全部に比べて小さいものが多くあった。



図－１ フクレの発生状況 （左）水没部仕切壁，（中）溶接線付近，（右）開口部周辺



図－２ 錆の発生状況 （左）気層部のブラケット，（中）フリーエッジ部，（右）パイプ

5. 不具合の発生要因解析

5.1 対象船舶と調査項目

5.1.1 調査船舶

調査船舶は表-1 に示される 11 隻である。

5.1.2 調査項目

主な調査項目は、調査船舶の概要、塗装等のデータ(下地処理SIS番号、塗料の種類、膜厚、プライマー及び電気防食)、タンク内各部位(船首側、船尾側、外側、内側、天井及び床)の発錆率(ASTM D610)¹⁾ と実測膜厚及びフクレ発生率(ASTM D714)²⁾ である。

5.2 評価方法

5.2.1 数量化

調査項目を数量化して、発錆率及びフクレ発生率を調査項目の関数として表現する。この時、調査項目が互いに独立であれば、最少二乗法等で各調査項目に数値を与えることができる。

発錆率を例にすると具体的には、
発錆率[%]=F1(船種)×F2(トン数)×F3(積荷)×
F4(船齢)×F5(SIS 番号)×F6(塗料種類)×F7(膜厚)×F8(プライマー種類)×F9(電気防食)×F10(部位)

の形式を仮定し、F1 から F10 の関数形状を調査結果に基づいて決める。

5.2.2 数量化の前提とデータ構造

前節 5.2.1 の F1 から F10 を現状 11 隻の調査結果から決定しようとする、生じる問題点について、平面部分の発錆率を例に以下に論じる。なお、フクレについては、今回のデータでばらつきが大きく有意な評価結果を得ることが出来なかった。

(1) 発錆率

発錆率については、そのパーセントの対数状の離散化で、グレード 1 (50 %以上)からグレード 10 (0.01 %以下)に分けられるが、2 から 9 については上限の数値を与えることができる。しかし、グレード 1 については範囲が広すぎることから数量化では使用困難である。また、1 船のデータが全てグレード 10 の場合については、その程度は評価不能であり、数量化には用い難い。

そのため、I 船、J 船及び K 船の 3 隻は平面部分すべての調査結果がグレード 10 であり、平面部分の数量化では対象外となる。

(2) 船種

船種によるオペレーションの差が影響する可能性があり、これを要因とすることに問題は無い。しかし、ほかの項目の制約を受ける可能性はある。

11 隻の中から、(1)の制約の有る 3 隻を除いた 8 隻を以下の 3 種類に分けた。

①客船、フェリー等：3 隻

②常温貨物(タンカー、薬品及び石灰石)：4 隻

③低温貨物(リーファー)：1 隻

(3) トン数

トン数の影響を評価できるモデルが無く、もし差異が生じるとしてもモデル化のためにはデータ数が不足しているため、今回は考慮していない。

(4) 積荷

船種と併せる事ができる。

(5) 船齢

そのまま数値として処理することができる。

(6) 下地処理

不明でないものでは、D 船の SIS St 2、H 船の SIS Sa 2.5 を除くと SIS St 3 に限られる。そこで、下地処理については数量化処理を行わず、別途検討するものとした。

(7) 塗料の種類

変性エポキシを使用している A 船を除く 7 隻はタールエポキシを使用している。

変性エポキシとタールエポキシに数値を与えることが出来る。

(8) プライマー

総て不明もしくは無機ジンクプライマーであるため、解析対象外となる。

(9) 電気防食

解析対象の 8 隻中、3 隻が不明、残りは電気防食していない。そこで、一応、不明と無しを解析対象として、不明については別途検討する。

(10) 膜厚

実測膜厚をそのまま用いることが出来る。

(11) 部位

総ての部位に数値を与えることが出来る。

5.2.3 数量化の試行

(1) 上述 3.2.2 の制約の下に数量化を行うと、

$$\ln(\text{錆}\%) = 6.37 + 2.85 \ln(Y/T) + F1 + Fp + Fc + Fs$$

Y:年数、 T:膜厚[mm]

F1:船種/積荷、フェリー/客船: 0、常温貨物(石灰等を含む):

-2.37、リーファー: -1.23

Fp:電防、不明: 0、無し: 1.40

Fc:塗料、タールエポキシ: 0、変性エポキシ: 1.17

Fs:部位、前方: 0、後方: 0.322、船側: 0.330、内側: 0.0868、
上方: 0.872、床: 0.417

となる。数量化式で、同一発錆率における船齢と膜厚の比例関係を仮定しているが、これは、海洋構造物用塗装系での経験³⁾を参考としている。

使用した総てのデータの推定値と観察結果を比較して図-3に示した。

図中大きい記号はタンク上面を示している。○以外の記号は、

- : C 船(石灰石運搬船、船齢 11 年、電防が不明)
- : D 船(液体化学薬品ばら積船、船齢 16 年、下地処理が SIS St 2 と低グレード)
- ▲ : E 船(リーファー、船齢 15 年、下地処理と電防が不明)
- ◎ : F 船(カーフェリー、船齢 17 年、電防が不明)

である。

(2) 精度とばらつき

対数正規分布とした場合の標準偏差 $[s(\ln(\text{錆}\%))]$ を以下に示す。

- ・ 全体: 1.32、(3.75 倍)
- ・ 部位による差
前方: 0.868 (2.38 倍)、 後方: 0.883 (2.42 倍)
内側: 0.896 (2.45 倍)、 外側: 1.11 (3.05 倍)
上面: 2.39 (10.9 倍)、 床面: 1.11 (3.04 倍)
標準偏差が 1 程度(約 3 倍)であれば、原データの発錆率が 3 倍刻みであることから妥当である。
しかし、タンク上面は発錆率の 2 刻み程度の標準

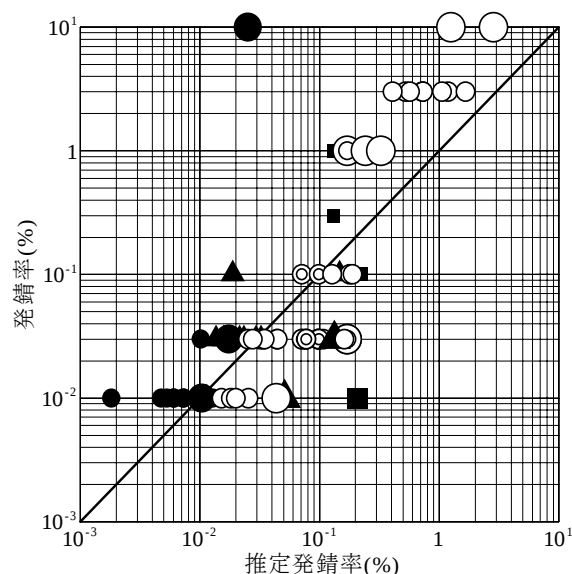


図-3 推定値と計測値の比較

偏差である。このことは、図-3の大きな記号のばらつきとして認識できる。

5.3 各要因についての評価

(1) 船種/積荷

船種と貨物については以下がいえる。

- ・ フェリー/客船の劣化は早い。
- ・ 上記は、貨物船とのバラストオペレーションの差と考えられる。
- ・ 常温貨物では劣化が遅い(フェリー/客船の 0.435 倍の膜厚で良い)。
- ・ 低温貨物は常温貨物に劣る(フェリー/客船の 0.651 倍の膜厚で良い)。
- ・ 上記については、リーファーが 1 隻しかなく、かつ、転売で電気防食等が不明である影響とも考えられる。

(2) 下地処理

下地処理は、E 船が不明、D 船が SIS St 2 と低グレードであった。図-3を見ると、タンク上面及び D 船の 1 点を除けばばらつきは少なく、下地処理の影響は少ないと考えられる。

(3) 塗料の種類

A 船のみが変性エポキシで、その他はタールエポキシであるが、要因解析の結果、以下がいえる。

- ・ 変性エポキシ塗料の膜厚はタールエポキシ塗料の 1.51 倍必要である。
- ・ 10 年前の変性エポキシ塗料に比べて現在の塗料が改良されている可能性はあるが、変性剤の化学種の影響が大きいと考えられるため、今後の調査が必要である。

(4) 電気防食

電気防食の有無については以下がいえる。

- ・ 電気防食が明白な船舶は評価がよすぎて対象外となっている。
- ・ 電気防食不明の 3 隻を基準として評価したが、以下にそれらの推定値-評価値 $\ln(\text{錆}\%)$ の平均を示す。

C 船、石灰石運搬船: -0.863

E 船、リーファー、転売船: ほぼ 0

F 船、フェリー: 0.755

- ・ 5.3.1(1)と併せて、リーファーを対象外とすれば、F 船は電気防食無し、C 船は電気防食ありと判断される。
- ・ 以上から電気防食の有無は膜厚換算で、2.21 倍となる。

(5) 部位

- ・ タンク前方の壁面を基準とする。
- ・ タンク後方、タンク内側、タンク外板側の壁面、及び床面は基準に比べて 1.1 倍程度の膜厚が必要であり、互いにあまり差が無い。また、5.2.3(2)で示したようにばらつきも小さい。その理由としては、高温貨物のデータが無いこと、C 重油の燃料タンクに接する区画のデータが無かったことが考えられる。
- ・ タンク上面の壁面の劣化は早く、基準に比べて 1.36 倍の膜厚が必要である。また、5.2.3(2)で示したようにばらつきも大きい。
- ・ 上記の理由としては、タンク上面が曝露甲板に接しているか否かの差であり、曝露甲板に接している場合には、基準に比べて 2.86 倍の膜厚が必要である。接していない場合には、0.755 倍とむしろ劣化は遅い。

6. 防食対策

塗料の性能を発揮するには塗料の設計と同時に塗装工程の管理が重要である。防食対策に必要とされる主要要素は表面処理、塗装施工方法、膜厚管理、電気暴食、メンテナンスなどがあげられる。これらのうちどれか 1 つが欠けても、欠陥の発生を防ぐことはできないといっても過言ではない。

本節では、防食対策にとって重要な要素を中心に説明する。

6.1 錆およびフクレの対策

塗膜の欠陥の原因は主に、

- ①仕様どおりの調合が行われていない
- ②均一かつ適切な膜厚が確保されていない
- ③被塗面の異物除去をしっかりと行っていない
- ④熱影響による塗膜の劣化

である。

本調査で実際に錆およびフクレが確認された主な部位ごとに予防対策を以下に示す。

6.1.1 溶接ビード（錆、フクレ）

溶接ビード上で凸凹が目立つ場合は塗装が不均一になるうえに、その隙間にスラグが残っていると塗膜付着不良となり、欠陥が発生する。対策：グラインダーでビード頭を研削する必要がある。また、刷毛塗によって先行塗装を行い十分な膜厚を確保する。

6.1.2 溶接部周辺（錆、フクレ）

溶接部周辺にはスパッターが散在し固着してい

る。膜厚が不均一になり錆や剥離の原因となる。

対策：グラインダーなどでスパッターを除去する。

6.1.3 ブラケット、補強材、フリーエッジ部（錆、フクレ）

ガスノロ、シャープエッジ、溶断部の凸凹のため膜厚が確保しにくい、または、膜厚の不均一などが原因と考えられる。対策：ガスノロやシャープエッジはグラインダーを用いて面取加工する。溶断部の凸凹はグラインダーを用いて平滑化する。また、刷毛塗によって先行塗装を行い十分な膜厚を確保する。

6.1.4 狭隘部（錆、フクレ）

清掃しにくくかつ塗装しにくいために適切な膜厚を確保できていないことが原因である。対策：念入りの清掃および塗装を行う。また、ロンジ、アングルの裏面などはスプレー塗装での膜厚が確保しにくいため、あらかじめ刷毛またはローラーによって先行塗装を行う。先行塗装の後は Wet-on-Wet でスプレーによる本塗装を行う。

6.1.5 暴露鋼板に接しているタンク上面（錆）

結露の繰り返しによる塗膜劣化が原因と考えられる。また、電気防食の効果が期待できない。対策：ブロック塗装時に反転状態で十分な膜厚を確保する。2 度塗りによる施工が望ましい。

6.1.6 FO タンクに隣接しているバラストタンク壁（錆）

FO タンクに隣接するバラストタンク壁は 50℃ 近傍に達するものと思われ、このような壁面の塗膜は熱影響を受けている。対策：耐海水性と同時に耐熱性も考慮した防食仕様が望まれる。しかしながら、このような箇所は、欠陥の発生を防ぐのは難しいので、電気防食の設置が効果的である。

また、一般的には、エポキシ系塗料による塗装が施されているとき、貨物が 60℃ 以上に至る場合には、塗膜が軟化するので、塗料の選定及び使用について塗料メーカーに相談すべきである。また、40℃ 前後の場合でも高湿度であれば、塗料そのものが劣化し、塗膜が泥状となり崩れることがある。このような場合にも注意を要する。

6.1.7 パイプ（錆）

パイプ表面は平坦ではないので、塗装しにくく適切で均一な膜厚を与えにくい。対策：ウェットゲージで膜厚の確認をしながら塗装する。また、2 度塗りを行い、十分な膜厚を確保することも有

効であると思われる。

6.1.8 マーキング線（フクレ）

マーキングによる塗料の付着力不足が原因と考えられる。対策：規定以外のマーキングはパワーツールやシンナー拭きで除去。

7. ノンタールエポキシ系塗料の使用

近年、タールエポキシ系塗料は塗装性や防食性の良さからタンク内塗料の主流であった。しかし、タールエポキシ系塗料のタール分の発ガン性による塗装作業者の人体への悪影響および海洋汚染の観点から、その使用を禁止される方向にある。一方、検査の観点からもタンク内部が明るくなることが求められ、黒くない変性エポキシ塗料が用いられるようになってきている。

ノンタールエポキシ系塗料の主流は変性エポキシ塗料であるが、変性剤の化学種により、付着性能、浸透特性等が異なる。塗料メーカーによっては、現行タールエポキシ塗料にほぼ匹敵する性能の変性エポキシ塗料も存在する。

変性エポキシは環境および検査の面でタールエポキシ系塗料より優れており、性能においても今後の向上が期待される。

7. おわりに

本調査研究においては、タンク内に用いる塗料についての現状調査を実施し、課題の抽出を行うとともに、適正な塗料や施工仕様等について検討し錆を防ぐための対策等について取り纏めた。

さらに、調査で得たデータを用いて錆の発生要因解析を行い、発錆率を求める簡易式を求め、その妥当性を確認した。

また、本式を用いることにより、各部位におけ

る平坦部の膜厚とタールエポキシ塗料の耐用年数との関係を求めることが可能となった。

この調査により、主に、塗装前の下地処理、塗膜の厚さ及びタンク内の環境管理等が、塗装に大きく影響していることが確認された。

今後、航行している船舶のタンク内塗料の主流はノンタールエポキシ系塗料となる。そのため、ノンタールエポキシ系塗料を使用した船舶を中心に調査していくことが重要である。

謝辞

本調査研究は、（独）鉄道建設・運輸施設整備支援機構からの受託研究として実施された。（社）船舶整備共有船主協会、（社）日本中小型造船工業会、及び各塗料メーカーからは貴重なご意見を頂いた。また、実地調査は1年に満たない期間であったため、調査可能な船舶数に制約があったものの、造船所をはじめ、関係事業者の方に様々なご協力を賜り、バラストタンク等の開放時期に合わせ調査を無事実施することができた。

関係者各位に心より感謝したい。

参考文献

- 1) Standard Test Method for Evaluating Degree of Rusting on Painted Surface, ASTM, Designation: D 610-01
- 2) Standard Test Method for Evaluating Degree of Blistering Paints, ASTM, Designation: D 714-87
- 3) 松岡，在田，翁長：海洋構造物用塗装系の耐用期間の要因解析，日本造船学会論文集，No. 161，(1987)．

表－1 調査船データ

船名	船種	総トン数(トン)	船齢(年)	積荷 (温度)	下地処理	ジョブプライマー	塗料	膜厚(μm)	電防	保守点検	保守内容	バラストと注排水頻度
A船	液体貨物ばら積船	199	9	植物性淡白質水溶液、(常温)	SIS St3	無機シंक	変性エポ	250×1	無	毎年	無	10日/月バラスト 搭載状態
B船	液体化学薬品ばら積船	498	13	トルエン、キシレン等、(常温)	SIS St3	無機シंक	TE	300	無	2.5年毎	無	10日/月バラスト 搭載状態
C船	石灰石運搬船	14,930	11	石灰石、(常温)	SIS St3	不明	TE	200×1	無	毎年	無	空荷時フルバラスト、FOTヒーティング(40～50℃)
D船	液体化学薬品ばら積船	197	16	炭酸カルシウム、(常温)	SIS St2	不明	TE	不明	無	5年毎	無	注排水無し
E船	リーファー	6557	15	フルーツ、(冷温)	不明	不明	TE	不明	不明	2.5年毎	不明	空荷時フルバラスト
F船	カーフェリー	11,086	17	人、車	SIS St3	不明	TE	不明	不明	毎年	不明	HT: 常時搭載. NO. 1, 4BWT: 冬季、荒天時フルバラスト
G船	旅客兼自動車渡船	2,758	18	人、車	SIS St3	不明	TE	不明×2	無	毎年	有: 新造時同様	注排水有り
H船	カーフェリー	8,754	21	人、車	SIS St2.5	無機シंक	TE	不明×1	無	毎年	不明	HT: 常時搭載. NO. 3BWT: 冬季、荒天時搭載
I船	RO/RO貨物船	8,349	5	トラック	SIS St2.5	無機シंक	TE	不明	不明	2年毎	無	NO. 6BWT: 多い、NO. 2BWT: 調整用、FPT: 少ない(フル)
J船	石灰石運搬船	8,566	6	石灰石、(常温)	SIS St2.5	無機シंक	TE	200	有	20ヶ月毎	アノード追加	注排水有り 多い
K船	油タンカー	3,160	15	ガソリン、(常温)	SIS St3	無機シंक	TE	250×1	無	毎年	不具合のタッチアップ、St2、TE、刷毛塗	年間80航海し空荷時はバラスト搭載