

日本鉄鋼連盟委託研究報告書

バラストタンクの防食技術に関する調査研究  
報告書  
【概要版】



2017年3月

一般財団法人 日本船舶技術研究協会



## はしがき

本報告書は、日本鉄鋼連盟殿からの委託事業として、2015年6月1日～2017年3月31日の間に実施した「バラスタタンの防食技術に関する調査研究」の成果報告書の概要を取りまとめたものである。



バラストタンクの防食技術に関する調査研究委員会（WBT委員会）委員名簿（敬称略・順不同）

委員長	大沢 直樹（国立大学法人 大阪大学）
委員	川村 恭己（国立大学法人 横浜国立大学）
	高田 篤志（国立研究開発法人 海上・港湾・航空技術研究所 海上技術安全研究所）
	林原 仁志（国立研究開発法人 海上・港湾・航空技術研究所 海上技術安全研究所）
	福井 努（一般財団法人 日本海事協会）（～2016.10）
	松本 和幸（一般財団法人 日本海事協会）（2016.11～）
	山本 規雄*（一般財団法人 日本海事協会）
	清水 友望（一般財団法人 日本海事協会）
	加藤 謙治（ロイドレジスターグループリミテッド）
	伊藤 功（郵船エンジニアリング株式会社）
	日野 圭（株式会社商船三井）（～2016.6）
	竹内 健（株式会社商船三井）（2016.7～）
	野間 慧（川崎汽船株式会社）（～2016.7）
	石川 岳（川崎汽船株式会社）（2016.8～）
	永浜 浩二（ジャパン マリンユナイテッド株式会社）（～2016.3）
	阪口 克典（ジャパン マリンユナイテッド株式会社）（2016.4～）
	小田 直樹（新日鐵住金株式会社）
	鹿島 和幸（新日鐵住金株式会社）
	青木 雅弘（JFEスチール株式会社）
	塩谷 和彦（JFEスチール株式会社）
	古川 直宏（株式会社神戸製鋼所）
	阪下 真司（株式会社神戸製鋼所）
	芳賀 利廣（サンキマリンサービス株式会社）
	日野 浩（一般社団法人 日本塗料工業会）
	高井 章（日本ペイントマリン株式会社）
	本間 瑞穂（中国塗料株式会社）
関係者	津野 良治（一般社団法人 日本船主協会）
研究協力者	狩野 泰秀（研究当時 国立大学法人 横浜国立大学大学院）
	三浦 元太（研究当時 国立大学法人 横浜国立大学工学部）
	片山 志乃（研究当時 国立大学法人 大阪大学大学院）
	竹野 成流（研究当時 国立大学法人 大阪大学大学院）
	織田 拓哉（研究当時 国立大学法人 大阪大学大学院）
事務局	松尾 真治（一般財団法人 日本船舶技術研究協会）（～2016.3）
	竹内 智仁（一般財団法人 日本船舶技術研究協会）（2016.4～）
	宮本 武（一般財団法人 日本船舶技術研究協会）
	福岡 哲二（一般財団法人 日本船舶技術研究協会）（2016.2～）

鈴木麻里子（一般財団法人 日本船舶技術研究協会）（～2016.1）

安本 春菜（一般財団法人 日本船舶技術研究協会）（2016.2～）

\*）2016年1月まで 一般財団法人日本海事協会, 2016年2月以降 ㈱マリタイムイノベーションジャパン

シミュレーションワーキング・グループ (WG) 委員名簿 (敬称略・順不同)

主査	大沢 直樹 (国立大学法人 大阪大学)
委員	川村 恭己 (国立大学法人 横浜国立大学)
	高田 篤志 (国立研究開発法人 海上・港湾・航空技術研究所 海上技術安全研究所)
	山本 規雄* (一般財団法人 日本海事協会)
	加藤 謙治 (ロイドレジスターグループリミテッド)
	塩谷 和彦 (JFEスチール株式会社)
	阪下 真司 (株式会社神戸製鋼所)
	鹿島 和幸 (新日鐵住金株式会社)
	研究協力者
	三浦 元太 (研究当時 国立大学法人 横浜国立大学工学部)
	片山 志乃 (研究当時 国立大学法人 大阪大学大学院)
	竹野 成流 (研究当時 国立大学法人 大阪大学大学院)
	織田 拓哉 (研究当時 国立大学法人 大阪大学大学院)
事務局	松尾 真治 (一般財団法人 日本船舶技術研究協会) (~2016.3)
	竹内 智仁 (一般財団法人 日本船舶技術研究協会) (2016.4~)
	宮本 武 (一般財団法人 日本船舶技術研究協会)
	福岡 哲二 (一般財団法人 日本船舶技術研究協会) (2016.2~)
	鈴木麻里子 (一般財団法人 日本船舶技術研究協会) (~2016.1)
	安本 春菜 (一般財団法人 日本船舶技術研究協会) (2016.2~)

\* ) 2016 年 1 月まで 一般財団法人日本海事協会, 2016 年 2 月以降 (株)マリタイムイノベーションジャパン

委員会等の開催状況（2015年6月1日～2017年3月31日）

- ・2015年4月15日 準備会 (会場：横浜国立大学)
- ・2015年5月12日 WG 準備会 (会場：横浜国立大学)
- ・2015年5月20日 鉄連各社との面談 (会場：日本船舶技術研究協会)
- ・2015年6月15日 WG 準備会 (会場：横浜国立大学)
- ・2015年8月10日 WG 準備会 (会場：航空会館)
- ・2015年8月27日 準備会 (会場：日本船舶技術研究協会)

◎第1回バラストタンクの防食技術に関する調査研究委員会

日 時：2015年9月29日（火）

場 所：航空会館 501 会議室

議 題：

- (1) 第3次研究計画と進め方
- (2) 委員会の体制について

配布資料

WBT-15-5-1 2014年度第4回委員会議事録（案）（2015年3月24日）

WBT-15-5-2 「バラストタンクの防食技術に関する調査研究委員会（第Ⅲ期）  
-腐食モデルの構築-」実施計画

参考 バラストタンクの防食技術に関する調査研究委員会 委員名簿

◎第2回バラストタンクの防食技術に関する調査研究委員会

日 時：2016年3月29日（火）

場 所：日本船舶技術研究協会 大会議室

議 題：

- (1) 本年度の成果報告
- (2) 次年度の計画

配布資料

WBT-15-6-1 第1回委員会議事録（案）

WBT-15-6-2 バラストタンクの防食技術に関する調査研究第Ⅲ期報告書

WBT-15-6-3 バラストタンク腐食データの収集状況

WBT-15-6-4 実船暴露試験2.5年後評価（速報）

WBT-15-6-5 バラストタンクの防食技術に関する調査研究（2016年度）

参考資料 第3回シミュレーションWG議事録（案）

◎第3回バラストタンクの防食技術に関する調査研究委員会

日 時：2016年11月16日（火）

場 所：日本船舶技術研究協会 大会議室

議 題：

- (1) 調査研究の進捗状況について
- (2) 第Ⅲ期活動の報告書内容について
- (3) 今後の予定

配布資料

- WBT-16-1-1 第2回委員会議事録(案)
- WBT-16-1-2(1) 第1回シミュレーションWG議事録
- WBT-16-1-2(2) 第2回シミュレーションWG議事録
- WBT-16-1-2(3) 第3回シミュレーションWG議事録
- WBT-16-1-2(4) 実船バラスタタンク腐食データ収集打合せ議事メモ
- WBT-16-1-3 バラスタタンクの防食技術に関する調査研究(第Ⅲ期)腐食モデルの構築 実施計画
- WBT-16-1-4 腐食形態の経時変化データと塗膜膨れ合体データの取得
- WBT-16-1-5 バラスタタンクの腐食評価試験に関する研究開発-結果の概要 鉄連
- WBT-16-1-6 WBT 塗膜下腐食セルオートマトン解析手法の開発状況
- WBT-16-1-6a セルオートマトンによる塗膜下腐食シミュレーション手法に関する研究  
(第1報: スクライブ塗装鋼板の解析)
- WBT-16-1-6b セルオートマトンによる塗膜下腐食シミュレーション手法に関する研究  
(第2報: バラスタタンク内エッジ腐食の解析)
- WBT-16-1-7 セルオートマトン解析結果と IACS 腐食モデルパラメタの関連付けについて
- WBT-16-1-8 バラスタタンク防食技術に関する調査研究(報告書目次案)
- WBT-16-1-9 ランダム場による腐食表面モデルに関する研究

◎第4回バラスタタンクの防食技術に関する調査研究委員会

日 時：2017年2月28日(火)

場 所：航空会館 202会議室

議 題：

- (1) 調査研究の進捗状況について
- (2) 第Ⅲ期活動の報告書案
- (3) 今後の予定

配布資料

- WBT-16-2-1 第3回委員会議事録(案)
- WBT-16-2-2 第7回シミュレーションWG議事録
- WBT-16-2-3 バラスタタンク傍証技術に関する調査研究報告書(案)
- WBT-16-2-4 バラスタタンク傍証技術に関する調査研究報告書概要版(案)
- WBT-16-2-5 調査研究結果概要

○第1回シミュレーションワーキング・グループ

日 時：2015年12月11日（金）

場 所：航空会館 203会議室

議 題：

（1） 調査研究の進捗状況について

配布資料

- WBT-WG-15-1-1 準備会議事メモ（2015年8月10日/8月29日/9月17日/10月21日）
  - WBT-WG-15-1-2 「バラストタンクの防食技術に関する調査研究委員会（第Ⅲ期）－腐食モデルの構築－」実施計画
  - WBT-WG-15-1-3 腐食モデル検証実船 WBT 外観写真について
  - WBT-WG-15-1-4 腐食形態の経時変化データと塗膜膨れ合体データの取得
  - WBT-WG-15-1-5 「実船と CCT の腐食形態比較」
  - WBT-WG-15-1-6 「CCT 腐食特性データ取得」進捗
  - WBT-WG-15-1-7 「バラストタンク腐食評価試験方法の確立（NK-鉄連共研）」進捗
  - WBT-WG-15-1-8 確率モデルによる多起点孔食の発生進行シミュレーション
  - WBT-WG-15-1-9 補修効果を考慮した腐食モデルの検討
  - WBT-WG-15-1-10 確率による状態変化に基づいた多起点の腐食進行シミュレーションの現状報告
  - WBT-WG-15-1-11 エッジ発錆長さ解析・エッジ付パネル腐食進行シミュレーション 第1報
  - WBT-WG-15-1-12 Study on Underfilm Corrosion Simulation Method Based on Cellular Automaton
- 参考 WG 委員名簿

○第2回シミュレーションワーキング・グループ

日 時：2016年2月24日（水）

場 所：日本船舶技術研究協会 大会議室

議 題：

（1） 調査研究の進捗状況について

配布資料

- WBT-WG-15-2-1 第1回 WG 議事録（案）
- WBT-WG-15-2-2 実船のバラストタンクの腐食に関するデータ収集について  
打ち合わせ議事録
- WBT-WG-15-2-3 「腐食形態の経時変化データと塗膜膨れ合体データの取得」進捗
- WBT-WG-15-2-4 エッジ発錆長さ解析・エッジ付パネル腐食シミュレーション第2報
- WBT-WG-15-2-5 局所的状態変化を考慮した確率モデルに基づく多点起点の腐食進行  
シミュレーション
- WBT-WG-15-2-6 全面腐食進行シミュレーション
- WBT-WG-15-2-7 バラストタンク防食技術に関する調査研究委員会（第Ⅲ期）  
－腐食モデルの構築－

○第3回シミュレーションワーキング・グループ

日 時：2016年3月16日（水）

場 所：日本船舶技術研究協会 大会議室

議 題：

- (1) 本年度成果報告書
- (2) バラストタンクの腐食データの収集と解析について
- (3) 今後の計画

配布資料

- WBT-WG-15-3-1 第2回 WG 議事録（案）
- WBT-WG-15-3-2 2015年度 報告書目次案
- WBT-WG-15-3-3 PSPC モデルシミュレータ作成
- WBT-WG-15-3-4 孔食点を配置した塗膜下腐食シミュレーション
- WBT-WG-15-3-5 エッジ発錆長さ解析・エッジ付パネル腐食シミュレーション
- WBT-WG-15-3-6 腐食形態の経時変化データと塗膜膨れ合体データの取得
- WBT-WG-15-3-7 CCT 腐食特性データ取得
- WBT-WG-15-3-8 実船曝露試験
- WBT-WG-15-3-9 海外動向の Watching
- WBT-WG-15-3-10 実施計画書
- WBT-WG-15-3-11 線状欠陥を2つ有する局所腐食進行シミュレーション

○第4回シミュレーションワーキング・グループ

日 時：2016年6月6日（月）

場 所：日本船舶技術研究協会 大会議室

議 題：

- (1) エッジ腐食シミュレーションの進捗状況について
- (2) 経年船タンク写真解析とシミュレーションへの組み込みについて
- (3) IACS 腐食モデルパラメタの決定方法について
- (4) 腐食面局所形状シミュレーションについて

配布資料

- WBT-WG-16-1-1 第3回 WG 議事録（案）
- WBT-WG-16-1-2 第2回委員会議事録（案）
- WBT-WG-16-1-3 「実船のバラストタンクの腐食に関するデータ収集」打合せ会議事録（案）
- WBT-WG-16-1-4 2016年度実施項目・分担・スケジュール
- WBT-WG-16-1-5 腐食モデル検証実船 WBT 外観写真収集状況および写真整理活動案
- WBT-WG-16-1-6 「腐食形態の経時変化データと塗膜膨れ合体データの取得」進捗
- WBT-WG-16-1-7 平成28年度の研究計画案（横浜国立大）
- WBT-WG-16-1-8 エッジ発錆長さ解析・エッジ付パネル腐食シミュレーション 第4報
- WBT-WG-16-1-9 Fundamental study on under-film corrosion simulation method based on cellular automation

○第5回シミュレーションワーキング・グループ

日 時：2016年9月14日（月）

場 所：日本船舶技術研究協会 大会議室

議 題：

- (1) 腐食シミュレーションの進捗状況
- (2) バラストタンク腐食画像解析の進捗状況
- (3) CCT試験の進捗状況
- (4) 今後の予定

配布資料

- WBT-WG-16-2-1 第4回WG議事録（案）
- WBT-WG-16-2-2 「実船のバラストタンクの腐食に関するデータ収集」打合せ会議事メモ
- WBT-WG-16-2-2 付属資料 「バラストタンクの腐食調査」
- WBT-WG-16-2-3 MOL BC写真解析結果（第1報）
- WBT-WG-16-2-4 塗装の補修・修理及び衰耗部材の切り替えを考慮した腐食状態予測
- WBT-WG-16-2-5 腐食試験（条件7）によるデータの収集（56日間）
- WBT-WG-16-2-6 ランダム場による腐食表面モデルの開発-経過報告-
- WBT-WG-16-2-7 実験データ（スクライブからの腐食の計測データ）を用いた共分散関数の推定について（案）
- WBT-WG-16-2-8 腐食形態の経時変化データと塗膜膨れ合体データの取得」進捗
- WBT-WG-16-2-9 バラストタンク腐食評価試験方法の確立（NK-鉄連共研）進捗

○第6回シミュレーションワーキング・グループ

日 時：2016年10月18日（火）

場 所：日本船舶技術研究協会 大会議室

議 題：

- (1) 腐食シミュレーションの進捗状況
- (2) バラストタンクの腐食評価試験に関する研究開発に関する成果報告
- (3) バラストタンク腐食画像解析の進捗状況
- (4) 第6回MARSTRUCT（Portugal）出席報告

配布資料

- WBT-WG-16-3-1 第5回WG議事録（案）
- WBT-WG-16-3-2 OMAE2016 収集した研究資料
- WBT-WG-16-3-3 腐食発生寿命分布の更新
- WBT-WG-16-3-4 セルオートマトンによる塗膜下腐食シミュレーション手法に関する研究（第2報：バラストタンク内エッジ腐食の解析）
- WBT-WG-16-3-5 WGT壁面腐食試解析結果
- WBT-WG-16-3-6 ランダム場による腐食表面モデルの開発-経過報告-

○第7回シミュレーションワーキング・グループ

日 時：2016年12月13日（火）

場 所：日本船舶技術研究協会 大会議室

議 題：

- (1) ランダム場による腐食表面モデルの開発進捗状況
- (2) ロンジウェブパネル腐食解析
- (3) 最終報告書について

配布資料

- WBT-WG-16-4-1 第6回WG議事録（案）
- WBT-WG-16-4-2 第3回委員会議事録（案）
- WBT-WG-16-4-3 ランダム場による腐食表面モデルの開発-経過報告-
- WBT-WG-16-4-4 ロンジパネル腐食解析（第1報）
- WBT-WG-16-4-5 バラストタンクの防食技術に関する調査研究 報告書目次案

○第8回シミュレーションワーキング・グループ

日 時：2017年1月13日（金）

場 所：航空会館 B102 会議室

議 題：

- (1) ロンジウェブパネル腐食解析
- (2) 報告書構成案

配布資料

- WBT-WG-16-5-1 第7回WG議事録案
- WBT-WG-16-5-2(1) ロンジウェブ腐食解析（第2報追補版）
- WBT-WG-16-5-2(2) ロンジウェブ腐食解析（第3報）
- WBT-WG-16-5-3 阪大シミュレーション腐食データの予備評価
- WBT-WG-16-5-4 報告書構成案

○第9回シミュレーションワーキング・グループ

日 時：2017年1月25日（水）

場 所：日本船舶技術研究協会 大会議室

議 題：

- (1) 進捗状況報告
- (2) 報告書案

配布資料

- WBT-WG-16-6-1 第8回WG議事録（案）
- WBT-WG-16-6-2 ロンジパネル腐食解析（第4報）
- WBT-WG-16-6-3 NK 共研スクライブ試験解析結果（速報）
- WBT-WG-16-6-4 ランダム場による腐食表面モデルの開発-経過報告-
- WBT-WG-16-6-5 バラストタンクの防食技術に関する調査研究 報告書（案）

○第10回シミュレーションワーキング・グループ

日 時：2017年2月22日（水）

場 所：日本船舶技術研究協会 大会議室

議 題：

（1）進捗状況報告

（2）報告書案審議

配布資料

WBT-WG-16-7-1 第9回WG議事録（案）

WBT-WG-16-7-2 Study on Under-film Corrosion Simulation of Large Coated Steel Panels  
in Water Ballast Tanks

WBT-WG-16-7-3 バラストタンクの防食技術に関する調査研究—ランダム場を用いた腐食進行  
モデルの検討—

WBT-WG-16-7-4 バラストタンクの防食技術に関する調査研究 報告書（案）

「バラストタンクの防食技術に関する調査研究」

報告書概要版目次

はしがき

委員名簿

委員会及びWGの開催状況

1. 背景、目的、目標	-----	1
2. 期待効果と将来的なルール提案	-----	1
3. 実施期間	-----	1
4. 実施内容および結果の概要	-----	2
5. 鋼の耐海水性と塗装劣化に対する効果	-----	6
5. 1 鋼の耐海水性と低合金耐食鋼	-----	6
5. 2 塗装劣化現象と塗装劣化原因	-----	8
5. 3 バラストタンク用耐食鋼	-----	12
6. 調査研究結果	-----	16
6. 1 バラストタンク腐食評価試験法の検討	-----	16
6. 2 腐食形態の経時変化データと塗膜膨れ合体データの取得	-----	22
6. 3 実船暴露試験結果	-----	24
6. 4 PSPC 適合鋼板の腐食モデルとその補修モデル	-----	25
6. 5 孔食点を配置した塗膜下腐食シミュレーション	-----	27
6. 6 ランダム場による腐食表面モデルの生成	-----	30
6. 7 セルオートマトンによる塗膜下腐食シミュレーション	-----	33
6. 7. 1 スクライブ塗装鋼板の解析	-----	33
6. 7. 2 バラストタンク内エッジ腐食の解析	-----	34
6. 7. 3 CCT スクライブ試験解析	-----	35
6. 8 セルオートマトン解析と IACS 腐食モデルの関連付け	-----	36
6. 9 防食技術に関する海外動向	-----	37
7. まとめ	-----	40



## 1. 背景、目的、目標

バラスタンクの防食技術に関する調査研究委員会（WBT 委員会）は、新防食技術開発のための基盤技術の整備を図ることを目的とし、第Ⅰ期（2011年10月～2013年9月）は、主に WBT の腐食機構解明、第Ⅱ期（2013年10月～2015年3月）は、主に WBT の腐食モデル構築および腐食シミュレータの開発を実施してきた。第Ⅱ期では、その第1ターゲットとして、耐食鋼による腐食予備厚の低減を目的に活動してきた。第Ⅰ期活動では実船 WBT 腐食調査により WBT 腐食機構を提案した。そして、第Ⅱ期活動では腐食モデル・シミュレータの骨格までは完成したが、その検証やラボ腐食試験による耐食鋼パラメータの組み込みが見達となった。

一方、委員会のターゲットの是非を明確にするために、船社殿に WBT の防食ニーズのヒアリングを行った結果、腐食予備厚の低減は船社殿の求める技術開発の大勢ではなく、むしろ補修寿命延長のほうが期待される効果であることが分かった。そこで、第Ⅲ期では補修寿命の延長を第1ターゲットとし、継続して腐食モデルの構築と腐食シミュレータの開発をすることとした。

目標：腐食モデル化および腐食シミュレータの開発

## 2. 期待効果と将来的なルール提案

期待効果：

- 1) 高級船（LNG 船、LPG 船など）など供用期間の長い船舶の補修寿命延長
- 2) タンカー、バルカー、コンテナ船、PCC の WBT の補修寿命延長
- 3) 売船価格のアップあるいは売船時 WBT の補修コストの低減
- 4) 残存板厚増加による安全・安心化

将来的なルール提案：

- 1) オイルメジャーを対象とした長寿命防食仕様の提案
- 2) IMO への長寿命防食仕様の提案
  - ・現状：25年仕様（PSPC 適合塗装15年+腐食予備厚10年）  
⇒耐食鋼：Ex.35年仕様
  - ・耐食鋼+試験法およびクライテリア
- 3) IACS への腐食予備厚増加代替耐食鋼の提案  
(更に腐食予備厚増加する動きがある場合)

## 3. 実施期間

2015年6月～2017年3月

#### 4. 実施内容および結果の概要

本調査研究委員会の実施内容は、以下のとおりである。なお、下線は鉄連受託実施項目を示す。

##### 1) バラストタンクの耐食性に関する従来知見の整理

鋼の耐海水性と耐海水鋼、塗装劣化現象と塗装劣化原因、バラストタンク用耐食鋼の腐食・塗装劣化抑制効果とその機構について整理した。

##### 2) 腐食モデル化および腐食シミュレータの開発

図 4-1 に腐食モデル化および腐食シミュレータの開発に関わる実施内容の関連図を示す。マクロ腐食モデルに関しては、既存 IACS 腐食モデルを進歩させ、PSPC 適合鋼板の腐食モデル化とその補修モデル化を作成した。局所腐食モデルは、目的に応じ、2 種類を作成した。すなわち、セルオートマトン法による局所腐食進行・塗装劣化モデルと孔食点配置およびランダム場による局所腐食表面モデルである。これらのモデルの基礎データおよび知見として、JFE スチールで実施した実験室腐食試験・実船暴露試験・実船試験結果、本調査研究委員会でも実施した実船暴露試験結果・実験室腐食試験結果、NK-鉄連共研で実施した実験室腐食試験結果を用いた。なお、セルオートマトン法で得られた腐食予測データのマクロ腐食モデルへの適用方法についての検討も行った。

##### 3) 防食技術に関する海外動向の状況把握

海外の学協会への発表、報告論文を整理した。

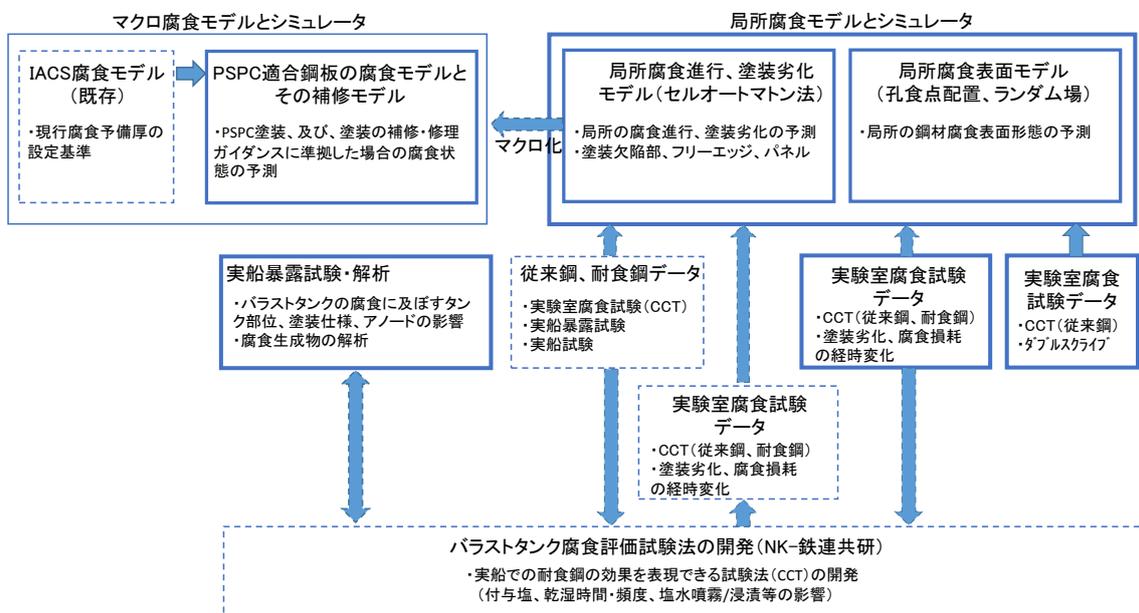


図 4-1 腐食モデル化および腐食シミュレータの開発に関わる実施内容の関連図  
(太枠内が本調査研究委員会での実施内容)

実施結果の概要

	項目	結果	
従 来 知 見 の 整 理	鋼の耐海水性と耐海水鋼	少量の Cu や Cr などを添加した耐海水鋼は過去に開発されており、暴露試験による評価結果や合金元素の作用機構が報告されている。	
	塗装劣化現象と塗装劣化原因	実船調査の結果、バラスタタンク内では塗膜樹脂の劣化・減耗はほとんど確認されず、本研究においては、塗膜と被塗物金属が剥離した状態が生じることを塗装劣化と呼ぶこととした。	
	バラスタタンク用耐食鋼	塗装欠陥部での鋼材の腐食を抑制することで塗装劣化を抑制する耐食鋼が開発されている。実船環境、実船適用での良好な結果が報告されている。	
調 査 研 究 結 果	バラスタタンク腐食評価試験方法の検討 (NK-鉄連共研)	塗装鋼材の塗装劣化開始後の塗装劣化、腐食損耗が評価出来る試験法として、実船における耐食鋼の効果の再現等の観点から、付与塩、乾湿時間・頻度、塩水噴霧/浸漬等の影響を検討。その結果、人工海水噴霧乾湿繰り返しを試験法として選定。 従来鋼と耐食鋼の実験室腐食試験データを取得。	
	腐食形態の経時変化データと塗膜膨れ合体データの取得	腐食シミュレーションの予測検証のため、ダブルスクライブ塗装板の CCT により、腐食形態の経時変化実測データ (168 日間) を取得した。	
	実船暴露試験結果	実船バラスタタンクにおいて暴露試験を実施。ラボ評価試験法と錆組成に近い。ラボ評価試験法は、本実船暴露試験に対し促進倍率が 10 倍以上であることが判明した。	
	PSPC 適合鋼板の腐食モデルとその補修モデル	PSPC 塗装を施した場合、及び、IMO の塗装補修・修理ガイダンスに準拠した場合に期待される腐食状態の予測手法を開発した。	
	孔食点を配置した塗膜下腐食シミュレーション	従来鋼・耐食鋼における腐食進行を模擬するシミュレーション手法として多点起点の孔食点の発生に基づいた腐食進行シミュレーション手法を開発した。	
	ランダム場による腐食表面モデル	現実の腐食進行を模擬した腐食表面形状を生成するための手法として、ランダム場を用いた腐食表面形状モデル生成手法を開発した。	
	セルオートマトンによる	スクライブ塗装鋼板の解析	スクライブ塗装試験板のラボ腐食試験と実船暴露試験結果から、鋼種による塗膜下腐食挙動の相違を考慮し

る塗膜下腐食シミュレーション		て塗膜きずを起点とする塗膜損傷の拡大と腐食面形状の定量的長期予測を可能にする数値シミュレーション手法が開発された。耐食鋼の腐食抑制効果をセルオートマトン解析に反映させる手法が開発された。
	バラストタンク内エッジ腐食の解析	同一バラストタンク部材の塗膜損傷の経時観測から、点状塗膜欠陥の空間分布と腐食潜伏寿命の確率分布を決定する手法が開発された。これにより、塗膜きずを起点としない実船塗膜下腐食の、鋼種による塗膜下腐食挙動の相違を考慮した定量的長期予測が実施可能になった。耐食鋼の腐食抑制効果を塗装欠陥セルのパラメタに反映させる手法が開発された。
	CCT スクライブ試験解析	開発したセルオートマトン解析手法により、単一・複数スクライブ実験室腐食試験における塗膜損傷拡大・腐食面形状の高精度再現に成功した。これにより、開発したセルオートマトンの多様な塗装仕様・腐食環境・塗膜損傷配置への適用性が示された。
セルオートマトン解析結果と IACS 腐食モデルパラメタの関連付け		実船板厚検査記録の腐食量最頻値を再現できるセルオートマトンパラメタを決定し、大寸法パネルの鋼種による塗膜下腐食挙動の相違を考慮した数値シミュレーションを実施した。シミュレーション結果を検査データと見做して、IACS 腐食確率モデルに回帰できることを示した。この確率モデルにより、IACS 評価基準に基づいて耐食鋼による塗装寿命延伸・腐食予備厚減少効果を評価できる。
防食技術に関する海外動向		本委員により情報収集した結果、WBT の防食に関しては、委員会メンバーによるものがほとんど（準備会、委員会活動期間の 2010～2016 年度のメンバーによる発表・論文：WBT 劣化現象 3 件、WBT 耐食鋼 7 件、シミュレーション 10 件、腐食モニタリング 2 件）。

（総括）バラストタンクの局所腐食進行・塗装劣化モデルの構築および局所腐食進行・塗装劣化シミュレータを開発した。そして、そのシミュレーション結果を、IACS 腐食モデルに回帰出来ることを示した。すなわち、バラストタンクの塗装劣化および腐食進行の見積もりのための方法論と計算ツールは確立、開発された。今後、長期経年船における塗装劣化、腐食進行データでの検証により、前記一連の手法で、耐食鋼による塗装寿命延伸・腐食予備厚減少効果を評価できる。但し、本シミュレーションは、現状、ある限定された

条件下でのシミュレーションに留まる。任意性を持たせるためにはパラメタ（塗装劣化速度、腐食速度を決定するパラメタ）の代表性の議論と、塗装状態、腐食環境、時間等に起因する偏差の考察と決定が必要である。一方、本シミュレーションの適用範囲の広がり大きく、バラスタタンクに限らず、カーゴホールドやカーゴタンクへの展開、また、船舶に限らず、海洋構造物、陸上構造物等への展開が考えられる。

## 5. 鋼の耐海水性と塗装劣化に対する効果

### 5. 1 鋼の耐海水性と低合金耐食鋼

#### 5. 1. 1 海洋での鋼材の腐食

海洋環境における鋼材の腐食の特徴は以下の通り<sup>5.1-1)</sup>。

- ・ 鋼材の腐食形態は全面腐食であるが、孔食状の局部腐食を呈することもある。
- ・ 海中部での鋼材の腐食速度は0.1mm/y程度であるが、飛沫帯では酸素が豊富に供給されるため腐食は促進される。
- ・ 鋼材の腐食速度は海水の流速の上昇に従って増加する。
- ・ 鋼材の腐食速度は時間の経過とともに減少する。
- ・ 海水は電気伝導度が高いため、海水中では電気防食が有効に作用する。
- ・ 海水中のCaおよびMgは炭酸塩あるいは水酸化物となって鋼材表面に堆積し、腐食反応を抑制する。

#### 5. 1. 2 低合金耐食鋼（耐海水鋼）

- ・ 機械的特性や溶接性などの基本的な特性を大きく劣化させない範囲で合金元素を添加して、ある環境に対する耐食性を向上させた低合金耐食鋼が開発されている。例えば、耐候性鋼、耐海水鋼、耐硫酸露点腐食鋼、原油タンク耐食鋼<sup>5.1-2),3)</sup>など。
- ・ 海水環境での鋼材の腐食は少量のCu、Ni、Cr、Al、Moなどの添加により低減されるとの実験結果があり、表5.1-1<sup>5.1-4)</sup>の耐海水鋼が開発された。
- ・ 日本、米国、英国などで、様々な部位での暴露試験により低合金鋼の腐食特性の定量評価が行われた。一例として、Mn-Cu-Cr系鋼材は平均満潮位および平均干潮位で板厚減少量を1/2以下に低減する結果であった（図5.1-1<sup>5.1-5)</sup>）。
- ・ 海水環境における合金元素の作用機構に関する研究例もあり、例えば、Cr添加は錆層の拡散障壁作用を高めてカソード反応を低下させること<sup>5.1-6)</sup>、Moは不溶性金属塩として沈着してアノード反応を抑制すること<sup>5.1-7)</sup>、などが報告されている。

表 5.1-1 過去に開発された耐海水鋼の化学成分 (%) の一例<sup>5.1-4)</sup>

	C	Si	Mn	Cu	Ni	Cr	Al	その他
A社	≦0.15	≦1.00	≦1.50	0.20~0.60	≦0.50	0.80~1.50	—	—
B社	≦0.15	≦0.75	1.00~2.00	≦0.40	—	≦0.50	—	Mo: ≦0.20
C社	≦0.15	≦0.55	≦1.50	≧0.20	—	0.80~1.50	—	Nb+V: ≦0.15
D社	≦0.14	≦0.55	≦1.50	—	—	0.80~1.30	—	—
E社	≦0.15	≦0.55	≦1.50	0.20~0.50	≦0.40	0.50~0.80	0.15~0.55	NbまたはV: ≦0.10
F社	≦0.13	≦0.50	≦0.60	0.60~1.50	—	0.50~3.0	0.50~1.50	—

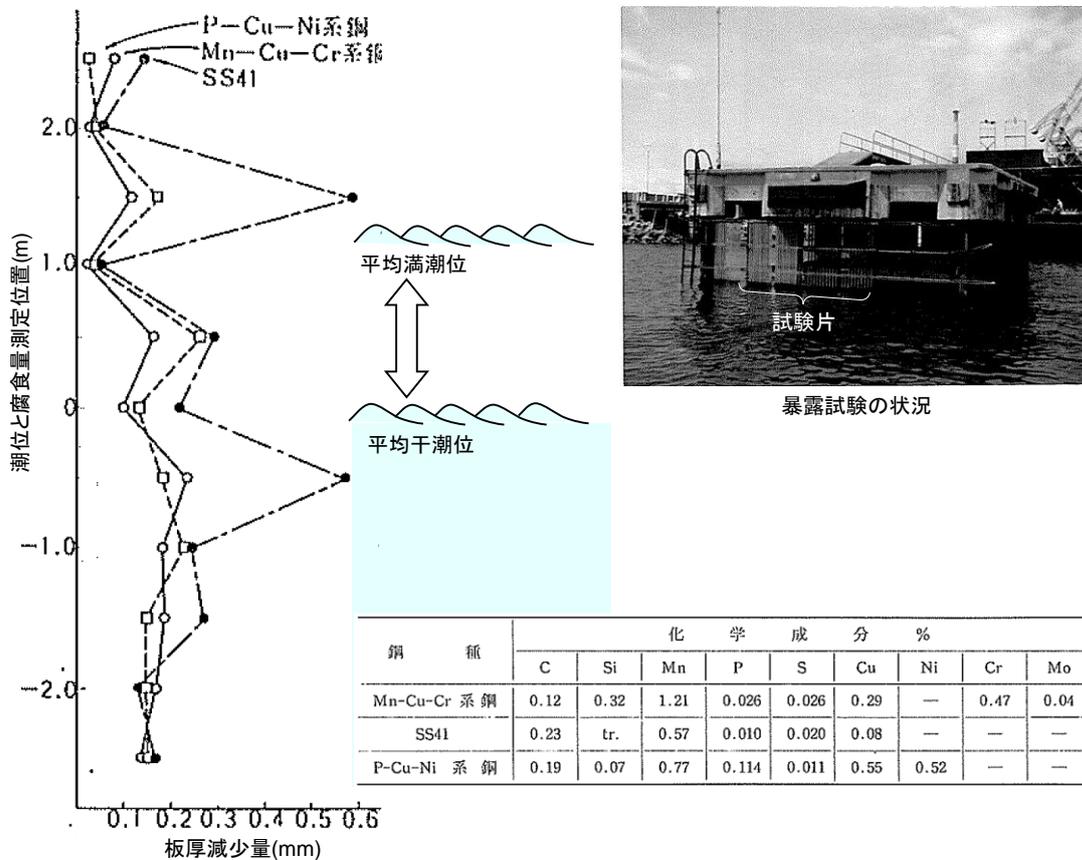


図 5.1-1 低合金鋼の海水暴露試験結果の一例 5.1-5)

<参考文献>

- 5.1-1) 腐食防食協会編：腐食・防食ハンドブック，丸善株式会社，2000年，III-2-1
- 5.1-2) 原油タンカーの性能基準に適合する新しい耐食鋼，ふえらむ，Vol.20, No.10, p.462 (2015).
- 5.1-3) 古川直宏，鹿島和幸，伊藤実，釣之郎，阪下真司：原油タンカー用耐食鋼，ふえらむ，Vol.20, No.10, p.466 (2015).
- 5.1-4) 松島巖：低合金耐食鋼，地人書館，p.117
- 5.1.5) 高村昭，荒川要，藤原和雄，広瀬博章：鋼の耐海水性に関する研究，R&D 神戸製鋼技報，Vol.20, No.3, p.69 (1970).
- 5.1.6) 松島巖，上野忠之：防蝕技術，Vol.19, p.458 (1970).
- 5.1.7) 岡田秀彌，内藤浩光，堀田渉：鉄と鋼，Vol.59, No.4, p.125 (1973).

## 5. 2 塗装劣化現象と塗装劣化原因

一般的に塗装された塗膜による防食機構は、以下の3つの作用によるとされている。<sup>5.2-1)</sup>

- ①バリアー作用
- ②抑制剤の作用
- ③流電作用

①のバリアー作用とは、水分や酸素、塩類といった腐食因子を遮断またはそれらの透過を抑制することにより被塗物の防食を行う。また、塗膜の持つ大きな電気抵抗により腐食電流が流れることを抑制することにより防食を行うと考えることもできる。

②の抑制剤の作用とは、塗膜中に添加される顔料等の添加剤の作用により、金属面の動態化を促進したり、被塗物表面をアルカリ化したりして腐食を抑制するものである。

③の流電作用による防食とは、塗膜中に被塗物金属より卑の金属を添加し、被塗物金属と添加金属の間で犠牲防食作用を起こさせ被塗物金属の防食を行うものである。

IMO バラストタンク塗装性能基準（以下、PSPC と記す。）に規定されているエポキシ樹脂系の重防食塗装は主に上記①のバリアー作用により被塗物金属の防食を行う塗装系である。

鋼構造物に塗装される塗膜としては一般的に樹脂系の塗料が施工されることが多い。陸上構造物に塗装される樹脂系の塗膜の劣化現象としては、日射（紫外線）による樹脂の結合の切断や変質、空気中の水分等による加水分解、空気中の酸素による酸化等により、塗膜を形成する樹脂が劣化し、膜厚の減少やクラック等を生じ塗膜としての機能を消失させてゆくことにより生じると考えられる。

次に、本研究が対象としているバラストタンク内における塗膜の劣化について考える。バラストタンク内に塗装される塗料は、PSPC 発効後はエポキシ樹脂系の重防食塗料が、それ以前は主にタールエポキシ系の重防食塗料が施工されていた。どちらの樹脂系も紫外線劣化には弱い樹脂系ではあるが、バラストタンク内には、日射が当たることなく、実際に本研究の中で実施した実船調査の中でも A 船（船齢 12.5 年、VLCC）、B 船（船齢 29 年、LNG キャリアー）ともに健全部の塗膜では、FTIR による分析や SEM による塗膜断面観察の結果、樹脂の変質や塗膜厚の減少は確認されなかった。また、A 船における塗膜の電気抵抗の測定結果からも 12.5 年経過後も大きな電気抵抗を有していることが確認された<sup>5.2-2)</sup>。日射の影響の無いバラストタンク内においては、何か外的な要因が働かなければ塗装された塗膜の樹脂に変質が生じることはないことが確認された。

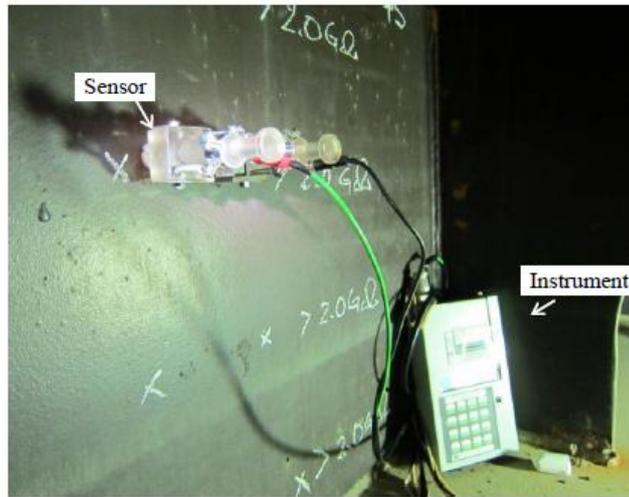


図 5.2.1 A 船における塗膜抵抗計測

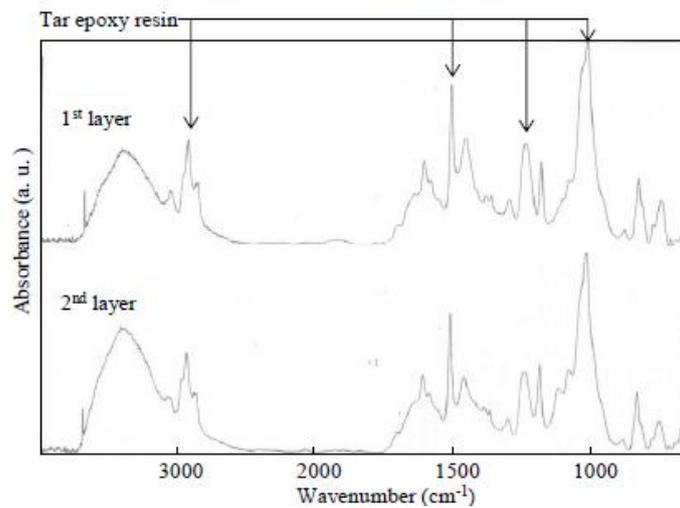
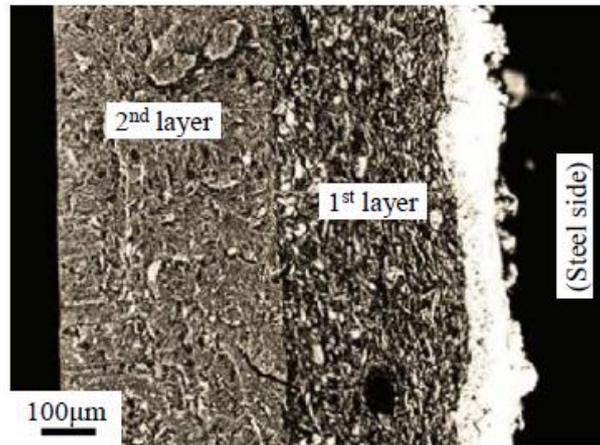


図 5.2.2 A 船より採取した塗膜の塗膜断面の SEM 写真 (上段)、FTIR 分析結果 (下段)

塗膜の樹脂そのものの劣化が無い (もしくはほとんど無い) バラストタンク内における

塗膜の劣化をどのように考えるのか。バラストタンク内に塗装される塗料は、上記に示したようにエポキシ樹脂系か、以前はタールエポキシ樹脂系の塗料が主体であった。どちらの塗料もバリアー作用を主な防食機構として作用する塗膜を形成する。樹脂系が変質もしくは劣化を生じていない、かつ、被塗物金属の表面に塗膜が付着している状況では、この種の塗料は、十分にバリアー作用を発揮し、塗膜として機能することになる。塗膜が被塗物金属表面と剥離した場合に、初めて被塗物金属表面で腐食電流が流れる、もしくは腐食因子の移動が容易になるため、腐食の進行を抑制する効果が消失する。このため、何らかの原因により塗膜と被塗物金属が剥離した状態が生じた際に、塗装された塗膜が劣化した、もしくは生じた時点塗装された塗膜の寿命と考え、本研究においては、このよう状態を塗装の劣化および塗装の寿命と呼ぶこととした。

では、このような塗装の劣化は如何にして生じるのか。いくつかの原因が考えられる。一つは、物理的外因により塗膜が消失するもしくは剥離する場合が考えられる。機械的なダメージによる塗膜の損傷や裏面の火気工事による剥離等があげられる。

また、塗装の不良、欠陥が起点となるものも考えられる。塗装不良、欠陥が存在すると早期に腐食が発生する。

もう一つの被塗物金属面から塗膜が剥離する大きな原因としては、カソード反応に起因する陰極剥離が考えられる。陰極剥離により生じたブリストー内は、通常アルカリ環境にあるため腐食は進行しないと考えられるが、何らかの原因により、ブリストーを形成している塗膜が破れる等により腐食環境にさらされる場合には、腐食が進行する。

このような原因により一度、被塗物金属に腐食が発生すると、その腐食の進行による塗膜面の剥離やこのような欠陥部の腐食を抑えるために働く電位防食の影響による陰極剥離に起因する塗膜の被塗物金属からの剥離がさらに進行していく。

バラストタンク内ではないが、林らの自動車用鋼板に関する塗膜下腐食の進展の検討 5.2-3)では、図 5.2-3 に示すように乾湿交番下では、錆の進展により塗膜剥離が進行し、また、湿潤環境下では、腐食進行の先端部でカソード反応が生じ、陰極剥離による塗膜剥離とともに腐食が進行していくことが報告されている。

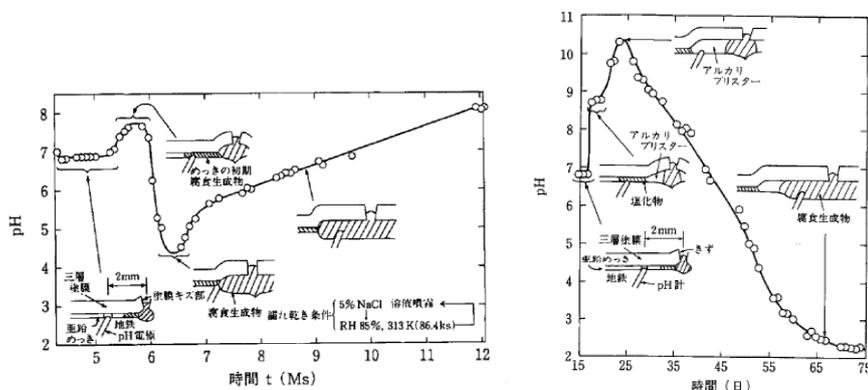


図 5.2-3 塗膜下腐食の進展に伴う pH の変化 (左図：乾湿交番環境、右図：連続湿潤環境)

また、上述の実船調査の際に、塗装欠陥部において、没水環境では、カソード反応に伴う腐食生成物が析出が確認されている。5.1.1 節に記述があるようにカソード反応に伴う腐食生成物は、Ca および Mg の炭酸塩あるいは水酸化物でエレクトロコーティングと呼ばれ、表面のアルカリ性や腐食因子の拡散抑制などにより腐食の進行を抑制する効果が期待される。

バラスタンク内における塗装劣化についてまとめると、

- 多くの場合、塗膜もしくは塗膜を形成する樹脂の劣化は生じていない。
  - 外的な要因や初期不良、欠陥を原因として腐食起点から腐食が発生することが多い。
  - 一度腐食が発生するとその腐食の進行による塗膜剥離と腐食の進行や電気防食に起因する陰極剥離により塗膜の剥離が進行する。
  - 塗膜の剥離が進行すると剥離箇所では、塗膜の持つバリアー効果が発揮されず更なる腐食が進行する。
  - 没水環境中で電気防食が働くとカソード反応に伴う腐食生成物の析出はエレクトロコーティングと呼ばれ、腐食反応を抑制する効果が期待できる。
- このような機構によりバラスタンク内の腐食が進行していくと考えることができる。

#### 参考文献

- 5.2-1) 社団法人日本塗料工業会：重防食塗料ガイドブック第4版, p.17-19
- 5.2-2) Sakashita, S., Shiotani, K., Kashima, K., Murakoshi, S., Fukunaga, K., Baba, T., Takai, A., Takada, A., Osawa, N., “Onboard Study on Deterioration of Coated Steel in Water Ballast Tank”, Proc.25<sup>th</sup> Int. Ocean and Polar Engineering Conference (ISOPE2015)(2015)pp.521-527
- 5.2-3) 林公隆、伊藤陽一、三吉康彦：自動車車体用 Zn 系めっき鋼板の腐食機構，新日鉄技報 第 353 号(1994), p.9-15

### 5. 3 バラストタンク用耐食鋼

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。しかし、塗装は錆生成や塗膜膨れなどの経年劣化を生じる<sup>5.3-1, 5.3-2)</sup>。そのため、補修再塗装を必要とすることがあり、その費用は多大になるという問題がある。そこで、塩谷<sup>5.3-3, 5.3-4)</sup>らは、バラストタンクの腐食環境において、塗装欠陥部での鋼材の腐食を抑制することで、その後の塗装劣化を抑制する耐食鋼 (JFE-SIP®-BT) を開発した。本節では、このバラストタンク耐食鋼について紹介する。

バラストタンク耐食鋼の開発に先立ち、バラストタンクの腐食環境を調査した。バラスト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。そこで、バラストタンクの上甲板裏の腐食環境の調査を行った。その結果を図 5.3-1<sup>5.3-3)</sup> に示す。昼夜の温度昇降に連動し、相対湿度の昇降が起こっている。また、ACM センサー (Atmospheric Corrosion Monitor) 出力は一定値を示さず、相対湿度に追随している。これらのことから、上甲板裏は乾湿繰返し環境である。

乾湿繰返し環境において、種々の成分を有する鋼材の塗装劣化挙動を観察・評価し、バラストタンク耐食鋼を開発した。図 5.3-2 に開発耐食鋼の腐食抑制および塗装劣化抑制機構を示す。開発耐食鋼は、鋼中の合金元素の作用により保護性の錆層を形成し、この錆層が塗装欠陥部からの腐食因子の鋼材表面への到達を抑制することで、腐食を抑制し、さらに塗装劣化を抑制する。なお、鋼材の成分組成を変化させることで、鋼材の腐食が抑制されることは、5.1 節に記述のとおり有り得ることであり、バラストタンクの腐食環境において、その耐食鋼が存在することに矛盾はない。開発耐食鋼の実船バラストタンク上甲板裏での暴露試験片の外観例 (図 5.3-3) と、除膜・除錆後の腐食深さプロファイル例 (図 5.3-4) を示す。本耐食鋼は、塗装材 (ショップなしエポキシ材、2.9 年) において、従来鋼の塗装劣化面積 : 80%、腐食深さ : 70%、腐食体積 : 60% に抑制し、塗装材 (ショップありエポキシ材、2.5~5 年) において、従来鋼の塗装劣化面積 : 75%、腐食深さ : 50%、腐食体積 : 40% に抑制する。

本耐食鋼の実船適用の結果例として、図 5.3-5 に超大型鉍石船バラストタンクの上甲板ロンジ材への適用結果を示す<sup>5.3-5)</sup>。図は上甲板ロンジエッジにおける総エッジ長さに対する塗装劣化長さ率と時間の関係を示している。耐食鋼の塗装劣化長さは従来鋼の約 70% に抑制されている。IACS (国際船級協会連合) /Recommendation 87<sup>5.3-6)</sup> では、塗装状態が FAIR (エッジ部においては劣化長さ比率が 20% 以上) になった時、再塗装を推奨している。それを基準にすれば、従来鋼の再塗装寿命が 18 年に対し、耐食鋼の再塗装寿命は 25 年となる。また、実験室腐食試験では経時とともに塗装劣化が鈍化する傾向が見られることから、耐食鋼の再塗装までの平均寿命は 25 年あるいはそれ以上が期待される。

なお、本耐食鋼の期待効果として、塗装寿命延長に加え、鋼材切替寿命延長、腐食予備厚低減、塗装簡易化、等が考えられる (図 5.3-6)。

5.3-1)Nippon Kaiji Kyokai : Guidance for Corrosion Protection System of Hull Structures-For Water Ballast Tanks and Cargo Oil Tanks-Second Revision, (1995).

5.3-2)Shiotani, K., Kashima, K., Sakashita, S., Fukunaga, K., Baba, T., Takai, A., Takada, A., Osawa, N. : Characterization of Deterioration Phenomenon in Ballast Tank, Proc. The 7th Int. Conf. on Thin-Walled Structures (ICTWS 2014), Paper 1304, (2014).

5.3-3)Shiotani, K., Samusawa, I., Tachibana, S., Komori, T. : Development of Corrosion Resistant Steel for Ballast Tank, Proc. Int. Conf. on Developments in Ship Design & Construction (ICSOT), (2012), pp. 27-33.

5.3-4)塩谷和彦, 中村雅美 : 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, JFE 技報, 33, (2014), pp.37-42.

5.3-5)塩谷和彦, 橋俊一 : バラストタンク耐食鋼適用船の塗装劣化挙動, 日本船舶海洋工学学会論文集, Vol.24, (2016), pp.211-218.

5.3-6) IACS : Recommendation 87 Guidelines for Coating Maintenance & Repairs for Ballast Tanks and Combined Cargo/Ballast Tanks on Oil Tankers, Rev.1, (2006).

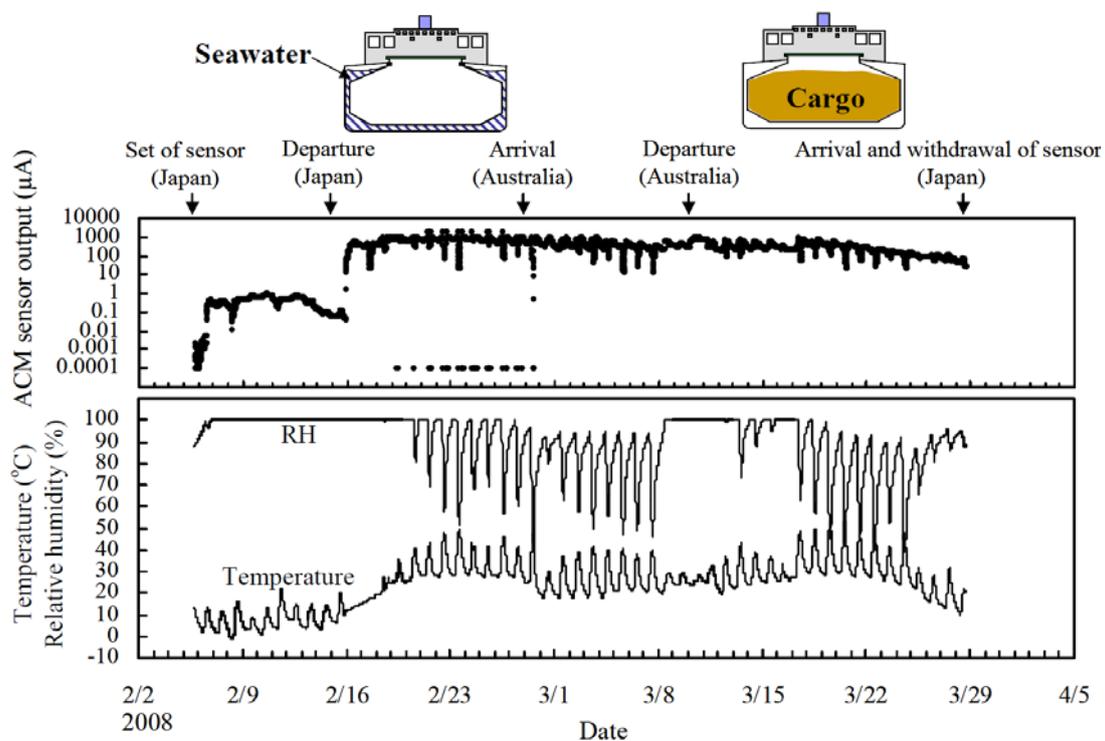


図 5.3-1 バラストタンク上甲板裏の温度、湿度、濡れ (ACM 電流) 計測結果 5.3-3)

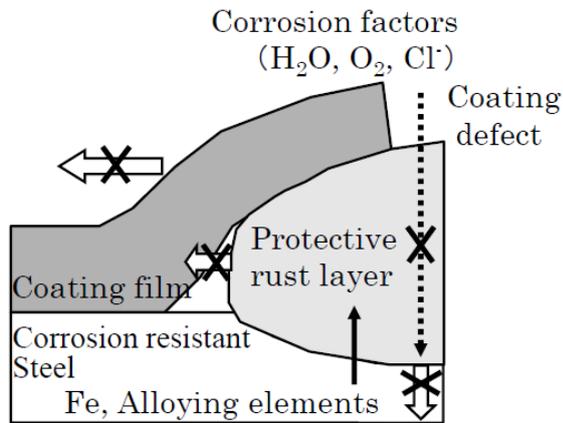


図 5.3-2 バラストタンク耐食鋼の腐食抑制および塗装劣化抑制機構 (JFE スチール耐食鋼の例)

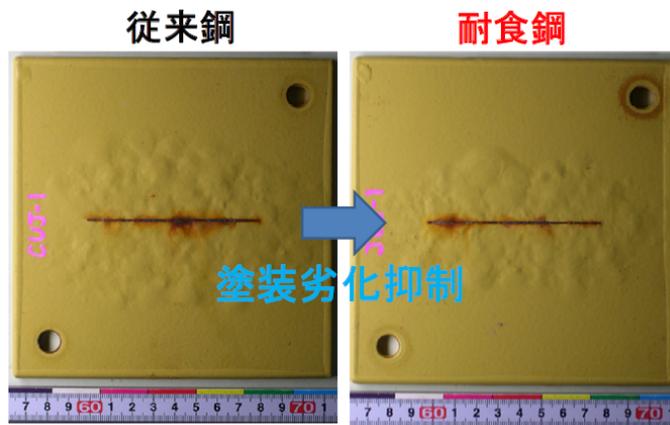


図 5.3-3 実船暴露材の外観例

(シOPPなしエポキシ材、耐食鋼：JFE スチール製、バラストタンク上甲板裏 2.9 年暴露)

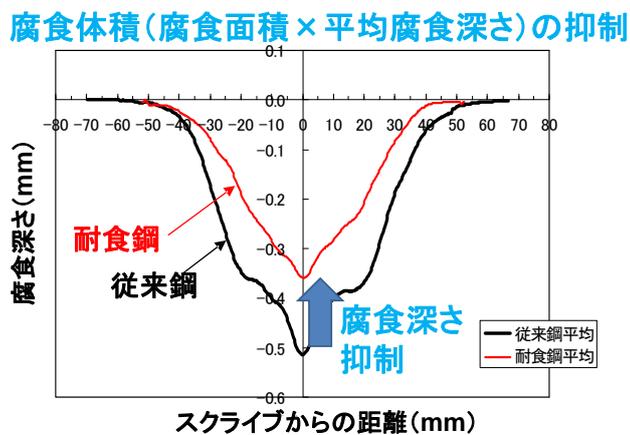


図 5.3-4 従来鋼と耐食鋼の除膜・除錆後の腐食深さプロファイル例

(シOPPなしエポキシ材、耐食鋼：JFE スチール製、バラストタンク上甲板裏 2.9 年暴露)

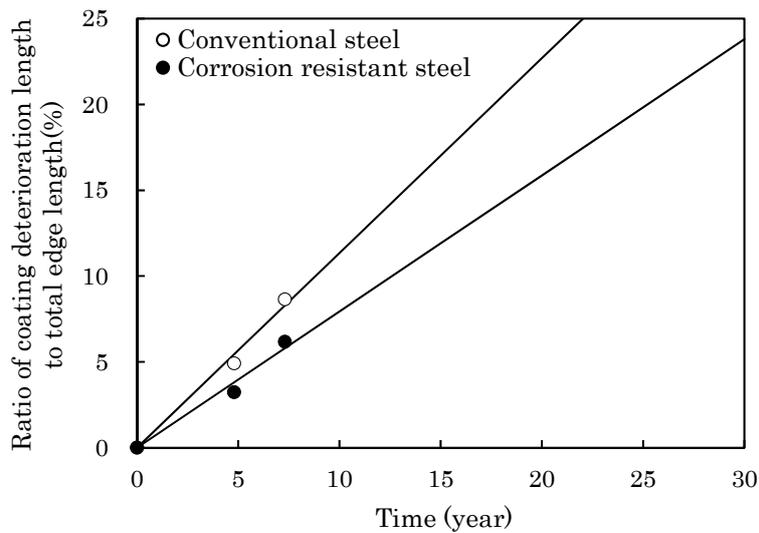


図 5.3-5 実船バラストタンク上甲板ロンジエッジでの塗装劣化長さ<sup>5.3-6)</sup>  
 (超大型鉱石船、PSPC 非適用、タールエポキシ 150  $\mu\text{m}$  × 2 回)

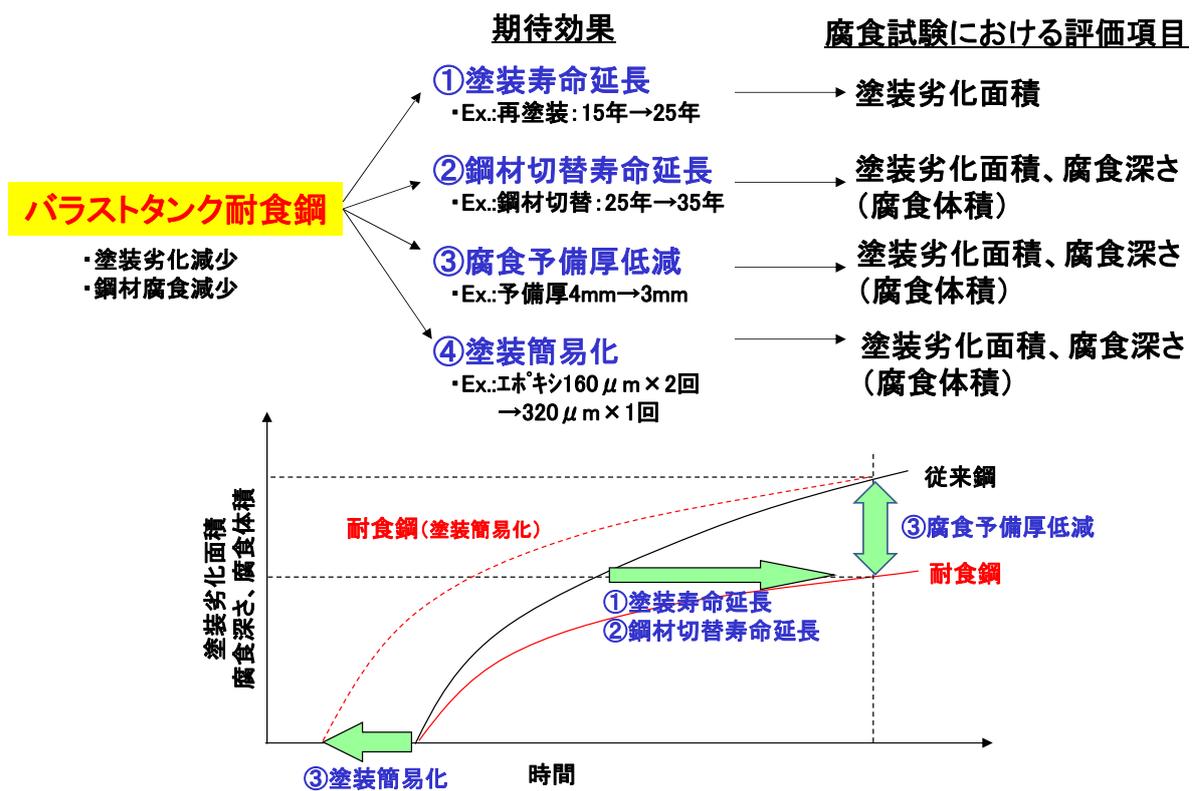


図 5.3-6 バラストタンク耐食鋼の期待効果

## 6. 調査研究結果

### 6. 1 バラストタンク腐食評価試験法の検討

本検討は、2013年11月～2016年6月に、日本鉄鋼連盟と日本海事協会との共同研究体制により研究を実施するとともに、日本海事協会の「業界要望による共同研究」のスキームにより研究支援を受けて実施したものである。本検討においては、「バラストタンクの防食技術に関する調査研究委員会」との情報交換を行い、検討を進めた。

#### 6. 1. 1 背景、目的

鉄鋼メーカーでは、バラストタンクの塗装寿命延長、塗装簡易化、腐食予備厚低減、等を狙いとして、耐食鋼と塗装を組み合わせられた技術を開発中である。しかし、これら耐食鋼を用いた新防食技術の効果を定量的に評価できる腐食評価試験法は確立されていない。

本研究では、耐食鋼を用いた新防食技術の効果を定量的に評価出来る試験法を開発することを目的とする。

#### 6. 1. 2 目標

塗装鋼材の塗装劣化開始後の塗装劣化面積および鋼材の腐食損耗が評価出来る腐食評価試験法の開発

バラストタンク対象部位：非没水部（上甲板裏近傍）

腐食評価試験法の必要要件：

- ・実船の腐食機構と概ね合致していること
- ・実船における従来鋼に対する耐食鋼の効果を表現できること
- ・長期における塗装劣化面積、腐食損耗を推定できる促進倍率であること
- ・IMO等国際規格化に際し、諸外国に於いて実施可能な試験条件であること

#### 6. 1. 3 実験方法

##### (1) 試験片

- 基本試験片形状：
  - ・6.0t×70×120（シヨップあり）
  - ・6.0t×100×120mm（シヨップなし）
- 鋼材：従来鋼、耐食鋼
- 塗装仕様：
  - 1) シヨッププライマー  
+ エポキシ 160 $\mu$ m×2回
  - 2) エポキシ 160 $\mu$ m×2回
- スクライブ：プラスチックカッター（Pカッター）

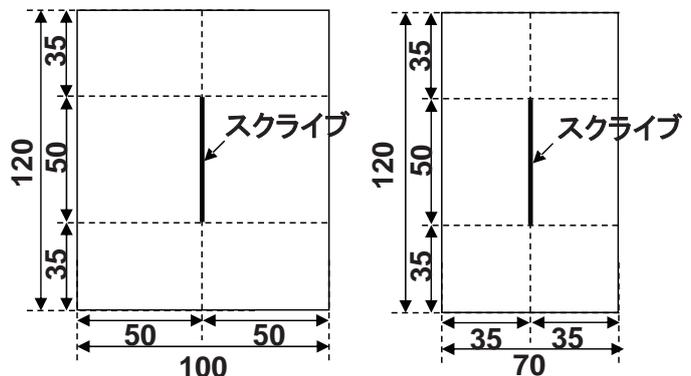


図 6.1-1 試験片形状とスクライブ付与位置

(2) 試験項目

表 6.1-1 評価項目

表面処理	項目	内容
無塗装材 (参考)	片面平均板厚 減少量	腐食試験による鋼材重量減を評価面積(腐食試験前のマスキング部以外の面積)で割り、算出。
塗装材	塗装劣化面積	腐食試験後の外観写真から、図1の部分の塗装劣化面積を測定。
	腐食深さ	1) 除膜・除錆後、腐食箇所をレーザ粗さ計(0.3mmピッチ)で測定(図2)。スクライプ部の腐食深さを平均化。 2) 除膜・除錆後、スクライプ部の腐食深さをデブスゲージ(10mmピッチ)で測定。その結果を平均化。
	腐食体積	除膜・除錆後、腐食箇所(図3)の深さをレーザ粗さ計(0.3mmピッチ)で測定。その結果から腐食体積を算出。
	鋼材重量減	腐食試験による鋼材重量減を測定。

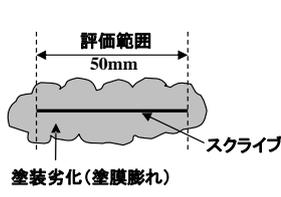


図1 塗装劣化面積

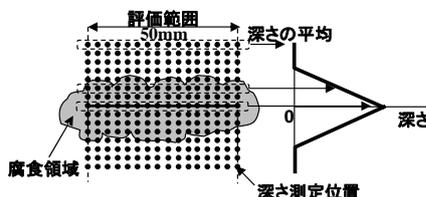


図2 腐食深さ

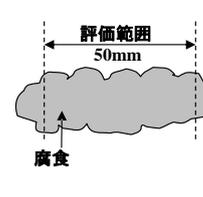


図3 腐食体積

(3) 腐食環境条件

表 6.1-2 腐食環境条件

開発	条件	工程1(塩付着)	工程2(乾燥)	工程3(湿潤)	サイクル	狙い	
STEP1	条件1	35°C, 5%NaCl噴霧, 2h	60°C, RH25%, 4h	50°C, RH>95%, 2h	工程1、2、3の繰返し	ベース	
	STEP 2-1 条件2	35°C, 人工海水噴霧, 2h	60°C, RH25%, 4h	50°C, RH>95%, 2h	工程1、2、3の繰返し	NaClを人工海水に変更	
	条件3	35°C, 人工海水噴霧, 1h	60°C, RH25%, 2h	50°C, RH>95%, 1h	工程1、2、3の繰返し	サイクル2倍	
STEP2-1 (予備試験1)	条件4	35°C, 人工海水浸漬, 0.5h	60°C, RH25%, 4h	50°C, RH>95%, 3.5h	工程1、2、3の繰返し	浸漬により塩付着均一化し、バラつき低減	
	条件5	35°C, 人工海水噴霧, 2h	60°C, RH25%, 4h	50°C, RH>95%, 6h	工程1、2、3の繰返し	濡れ時間増加し、促進性Up	
	条件6	35°C, 人工海水噴霧	—	—	—	常時濡れの基礎実験	
STEP2-2 (予備試験2)	STEP3	条件7	35°C, 人工海水噴霧, 2h	60°C, RH50%, 4h	50°C, RH>95%, 2h	工程1、2、3の繰返し	乾燥時の湿度増加し、促進性Up
		条件8	35°C, 人工海水噴霧, 2h	60°C, RH50%, 4h	50°C, RH>95%, 2h	上段サイクル7日と下段サイクル7日の交番	乾燥時の湿度増加し、促進性Up。実船と同様、交番
			35°C, RH>95%, 2h	60°C, RH50%, 4h	50°C, RH>95%, 2h		
	条件9	50°C, 人工海水浸漬, 0.5h	60°C, RH50%, 4h	50°C, RH>95%, 3.5h	上段サイクル7日と下段サイクル7日の交番	浸漬によりエレクトロレーティング層減少、また、平均温度増加させ促進性Up	
		—	60°C, RH50%, 4h	50°C, RH>95%, 4h			

6. 1. 4 実験結果

6. 1. 4. 1 腐食試験条件の実験結果

表 6.1-3 腐食試験条件の実験結果

開発	条件	試験期間	狙い	無塗装材		塗装材								装置汎用性		
				耐食鋼の優位性	腐食深さ	ショップなし+エポキシ				ショップあり+エポキシ						
						腐食形態	耐食鋼の優位性	パラつき	腐食形態	促進性	耐食鋼の優位性	パラつき	腐食形態		促進性	
				腐食深さ	腐食形態	塗装劣化面積	腐食深さ	パラつき	腐食形態	促進性	塗装劣化面積	腐食深さ	パラつき	腐食形態	促進性	
STEP1	条件1	84日	ベース			-	-	×	○	○	-	○	○		○	○
	条件2	84日	NaClを人工加水に変更	○		-	-	×	○	○	-	-	-		×	○
	条件3	84日	サイクル2倍			-	-	×	○	○	-	-	-		×	○
STEP 2-1 (予備試験1)	条件2	56日	STEP2-1ベース					△	○	○						○
	条件4	56日	浸漬により塩付着均一化し、パラつき低減					○	○	○						△
	条件5	56日	濡れ時間増加し、促進性Up					△	×	○						○
	条件6	56日	常時濡れの基礎実験					-	-	×						○
STEP 2-2 (予備試験2)	条件7	28日	乾燥時の湿度増加し、促進性Up	○		○				○	○				○	○
	条件8	28日 56日	乾燥時の湿度増加し、促進性Up。実船と同様、交番	○		○	○			○	○	○			○	○
	条件9	28日	浸漬によりエレクトロロテイング層減少、また、平均温度増加させ促進性Up	○		×				○	○				○	△
STEP3	条件7	168日	試験法要件確認	×	×	○	○	×	○	○	○	-	△	-	×	○
	条件8	168日	試験法要件確認	○	○	○	○	○	△	○	○	○	○	○	○	○

実船における耐食鋼の効果の再現、実船腐食機構(腐食形態)、パラつき、促進性、試験装置の汎用性の観点から条件8が最も有望

6. 1. 4. 2 条件8における耐食鋼の特性

条件8：ショップなしエポキシ材の外観

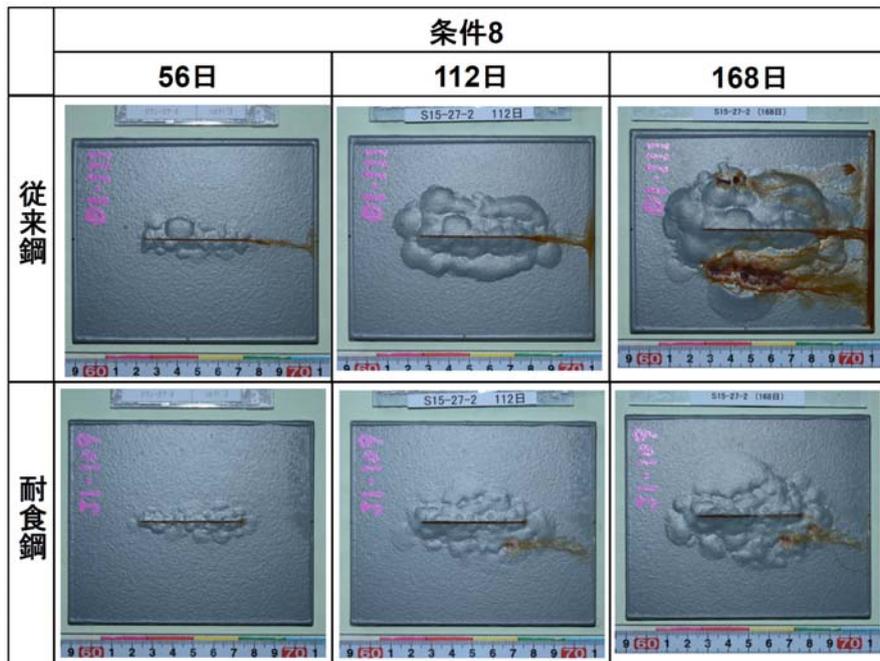
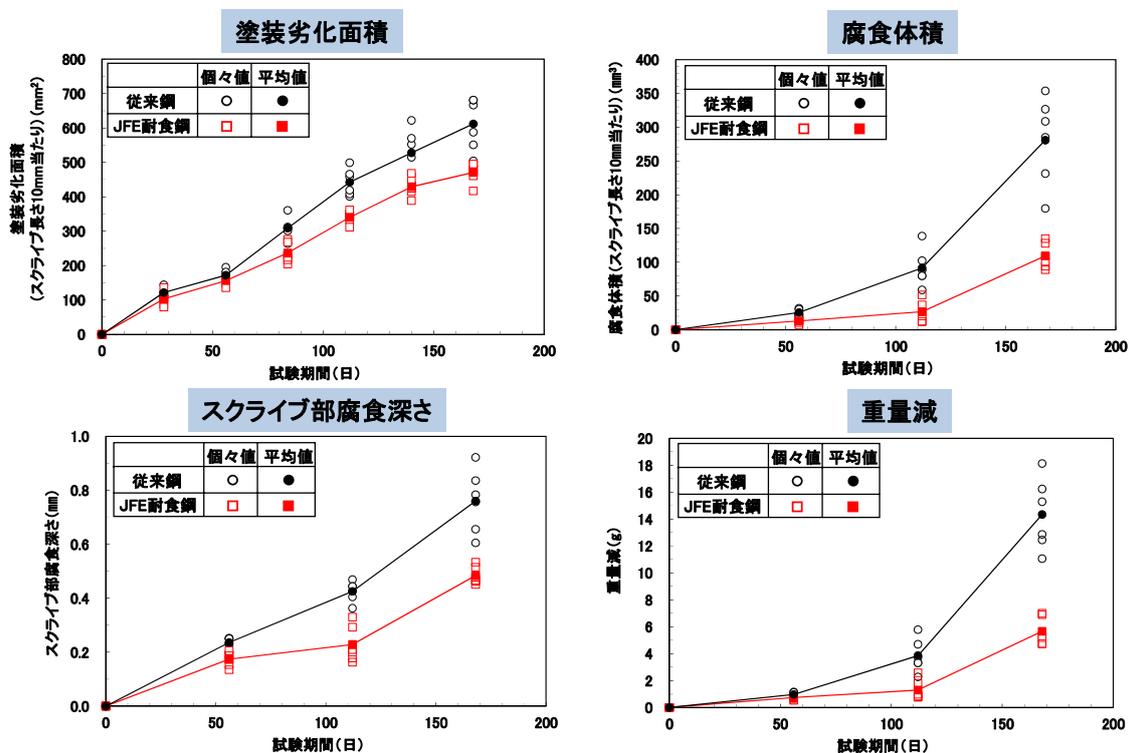


図 6.1-2 ショップなしエポキシ材の外観

条件8：シヨップなしエポキシ材の各種特性に及ぼす耐食鋼の効果



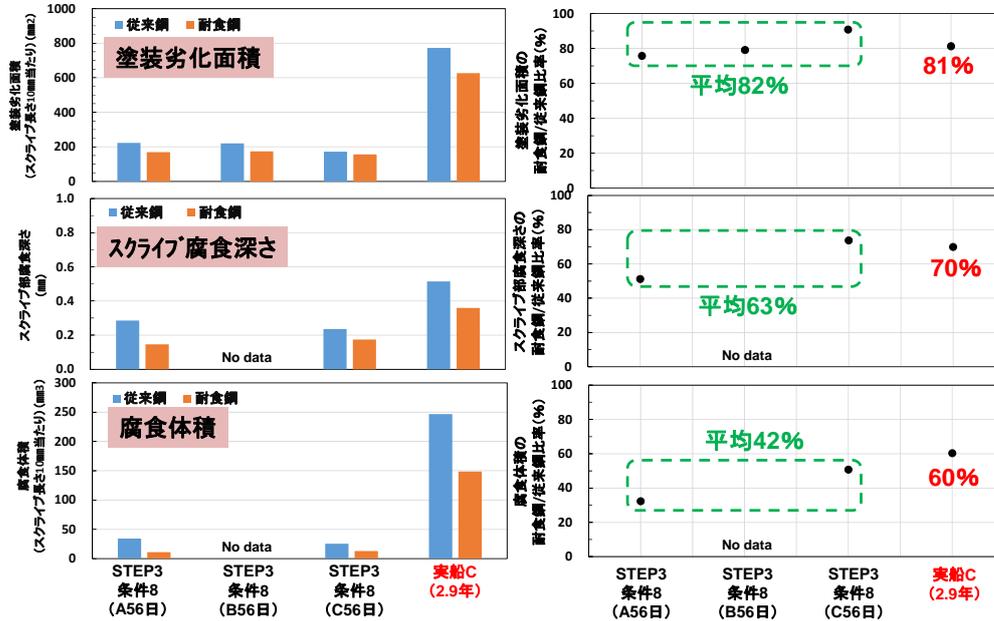
塗装劣化面積・腐食深さ・体積・重量減すべてにおいて、耐食鋼の効果を確認。

図 6.1-3 条件8：シヨップなしエポキシ材の各種特性に及ぼす耐食鋼の効果

条件8におけるさび組成

$\alpha$ -FeOOH:5%~10%程度、 $\beta$ -FeOOH:数%~15%程度、 $\gamma$ -FeOOH:数%以下、 $Fe_3O_4$ :20%~45%程度であり、別途実施した実船非没水部と比較的近いさび組成

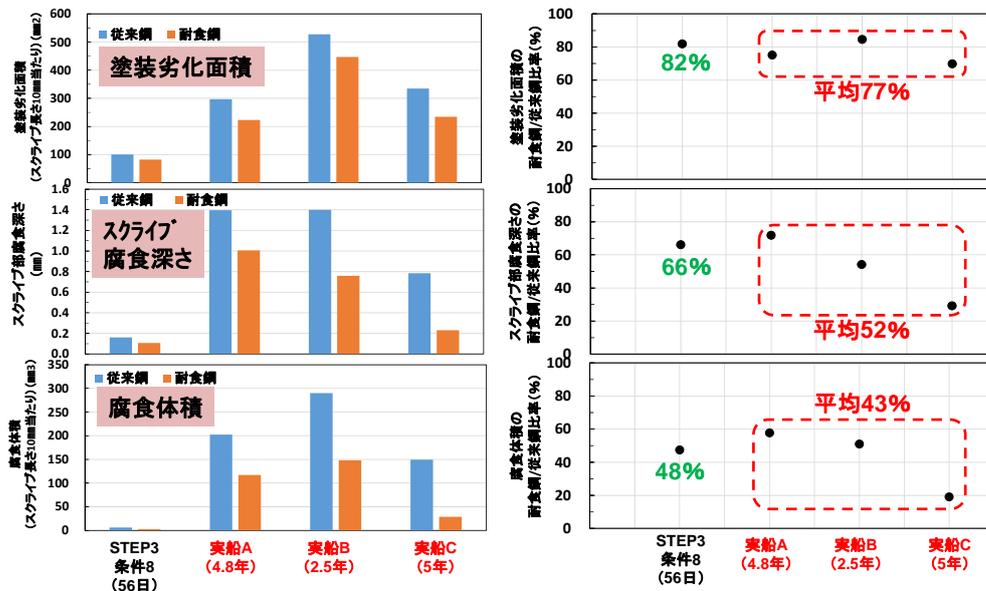
6. 1. 4. 3 従来鋼に対する耐食鋼の特性比率の実船暴露と CCT/条件8の比較  
 ショップなしエポキシ材



CCT/条件8は、実船における塗装劣化面積の耐食鋼/従来鋼比率を再現。  
 腐食深さ、腐食体積のそれは、実船よりもやや小さくなる傾向だが、ほぼ再現。

図 6.1-4 従来鋼に対する耐食鋼の特性比率 (ショップなしエポキシ材)

ショップありエポキシ材



CCT/条件8の塗装劣化面積、腐食深さ、腐食体積の耐食鋼/従来鋼比率は、  
 実船よりもやや大きい傾向だが、ほぼ再現。

図 6.1-5 従来鋼に対する耐食鋼の特性比率 (ショップありエポキシ材)

6. 1. 5 提案腐食評価試験

仕様		備考
鋼種と試験片数	従来鋼、耐食鋼を各6枚	
試験片形状	6t×70×120(mm) (図1)	
塗装	・エポキシ(160μm×2) ・シヨップ+エポキシ(160μm×2)	
スクライブ形状	図1(プラスチックカッター使用)	
腐食試験条件	図2	
評価項目	塗装寿命延長	塗装劣化面積
	鋼材切替寿命延長	1) 塗装劣化面積および腐食深さ、2) 重量減のいずれか
	腐食予備厚低減	
評価期間	1期間で評価(Ex.:56日)	・腐食深さ:スクライブ部腐食深さ(デプスゲージでの評価可否検討要) あるいは 平均腐食深さ(重量減を全塗装劣化面積で除する) ・塗膜膨れが微小で評価出来ない場合などの対応の検討要。

図1 試験片形状

図2 腐食試験条件

図 6.1-6 提案腐食評価試験法

6. 1. 6 まとめ

1) バラストタンクの非没水部(上甲板裏近傍)における塗装鋼材の塗装劣化開始後の塗装劣化面積および鋼材の腐食損耗が評価出来る腐食評価試験法として、試験片仕様、腐食試験条件、評価項目を検討した。腐食試験条件では、実船における耐食鋼の効果の再現、実船腐食機構、バラつき、促進性、試験装置の汎用性の観点から、付与塩の種類、乾湿時間、乾湿頻度、塩水の噴霧/浸漬等の影響を検討した。

2) その結果、下記を腐食評価試験法として提案する。

- ・試験片仕様： 塗装後、プラスチックカッターにて 50 mm長さのスクライブを付与
- ・腐食試験条件：
  - (35°C、人工海水噴霧、2h→60°C、RH50%、4h→50°C、RH>95%、2hの繰り返し)
  - 7日間 ⇔ (35°C、RH>95%、2h→60°C、RH50%、4h→50°C、RH>95%、2hの繰り返し) 7日間 の交番
- ・評価項目：耐食鋼の期待効果に応じて、塗装劣化面積、腐食深さ、鋼材重量減を測定

## 6. 2 腐食形態の経時変化データと塗膜膨れ合体データの取得

### 6. 2. 1 目的

シミュレーションは短期で決定したパラメータを用い、長期をシミュレートした結果が長期の実測と合っている必要がある。また、塗膜膨れ合体部分も実測と合っている必要がある。シミュレーションのそれら項目の検証のため、腐食形態の経時変化および塗膜膨れ合体データを取得した。

### 6. 2. 2 試験条件

1枚の塗装試験片に2本のスクライブを付与し、そして、腐食試験（CCT）による塗装劣化と鋼材腐食形態の経時変化を観察、測定した。

- ・鋼材：従来鋼
- ・試験片形状：6.0t×135w×120L
- ・塗装：シヨップなし、エポキシ/160 $\mu$ m×2回
- ・スクライブ：Pカッター（BM-2P）（図6.2-1）
- ・腐食試験条件：図6.2-2、期間168日間
- ・試験片枚数：3枚/1期間×5期間＝合計15枚
- ・期間：28日、56日、84日、126日、168日
- ・評価項目：外観、腐食形態（レーザー粗さ計による腐食深さ）

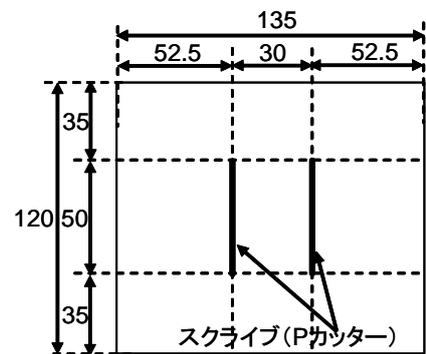


図 6.2-1 スクライブ付与位置

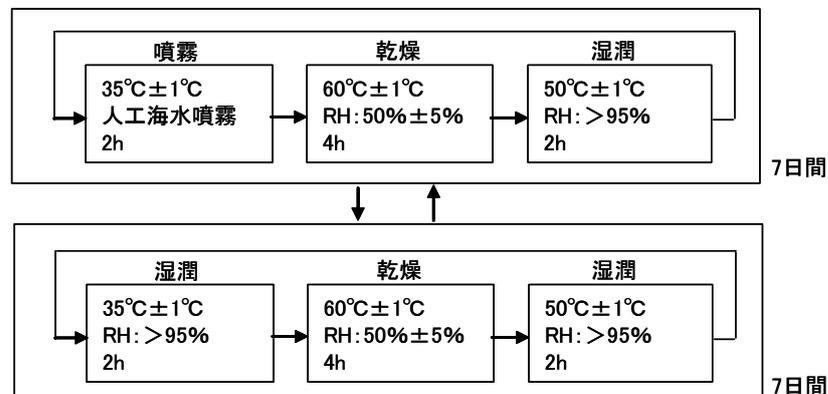


図 6.2-2 CCT 条件

### 6. 2. 3 結果

写真 6.2-1 に塗装劣化の経時変化を示す。84日経過で2つの塗膜膨れは合体しかかっている。168日経過で1部の試験片を除き、完全に合体した。図 6.2-3 にレーザー粗さ計により測定した腐食断面の経時変化を示す。84日経過で2つのスクライブのほぼ中央部（合体部）での腐食減耗が見られた。

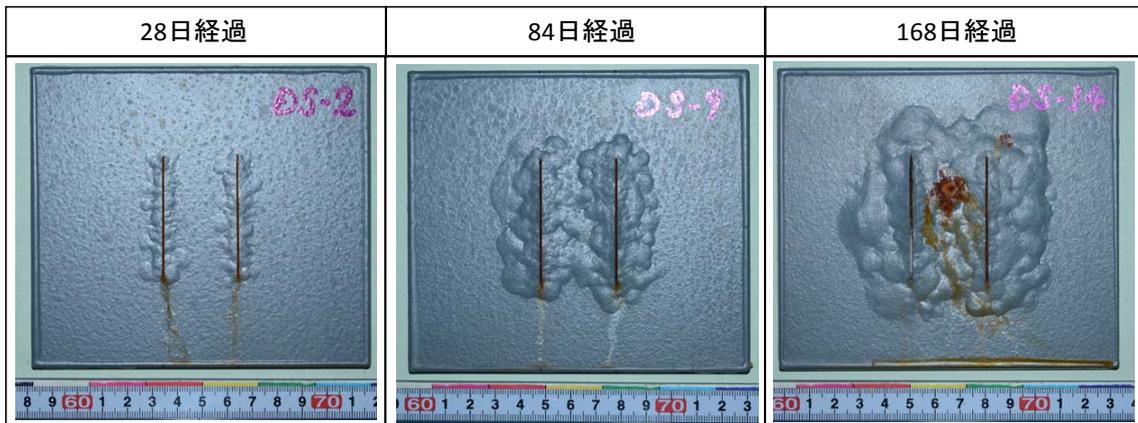


写真 6.2-1 塗装劣化の経時変化

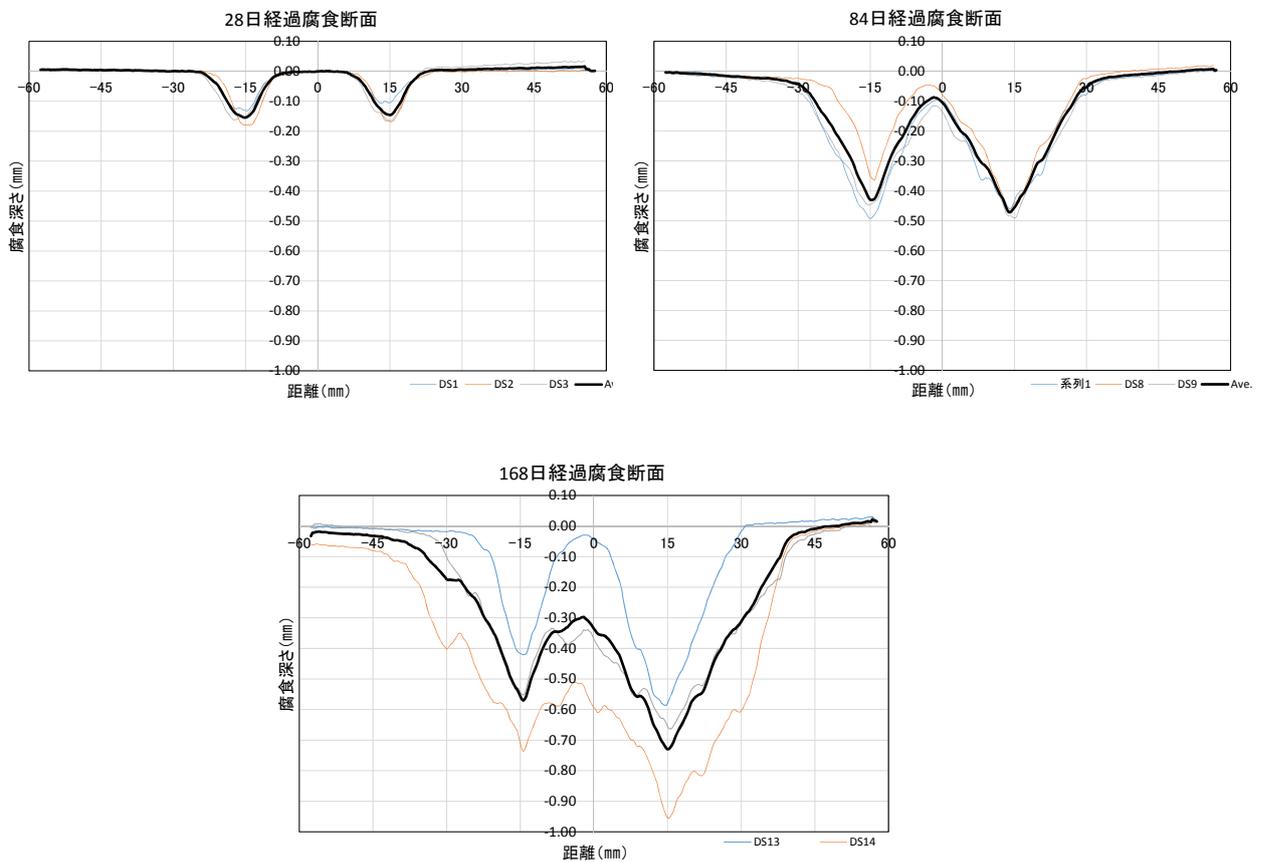


図 6.2-3 腐食断面の経時変化

### 6. 3 実船暴露試験結果

従来鋼の塗装試験片を、実船バラスタンク内(非没水部および没水部)に2.5年間暴露。

- (1) 試験片：[非没水部] 160 $\mu\text{m}$ ×2回(プライマーあり/なし)、160 $\mu\text{m}$ ×1回(プライマーなし)  
 [没水部] 160 $\mu\text{m}$ ×2回(プライマーあり/なし) 160 $\mu\text{m}$ ×2回(アノードあり)

#### (2) 結果

- ・ 塗装劣化面積：非没水部ではプライマーの効果が顕著、塗膜厚薄いほうが小さい傾向。  
 没水部ではプライマーの効果あり、アノードの効果大。
- ・ 腐食深さ：非没水部ではプライマーの効果あり、塗膜厚薄いほうが小さい傾向。  
 没水部ではプライマーの効果あり、アノードの効果大。

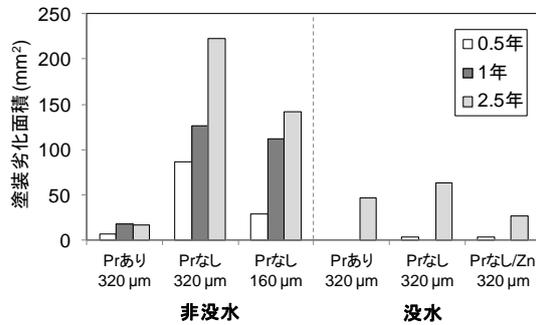


図 6.3-1 塗装劣化面積

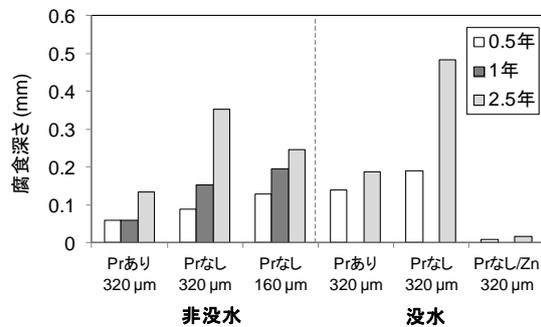


図 6.3-2 腐食深さ

- ・ 腐食生成物：非没水部、没水部とも  $\beta\text{-FeOOH}$  を検出、 $\beta\text{-FeOOH}$  は下層側に多い傾向。 $\text{Fe}_3\text{O}_4$  が比較的多い。
- ・ 断面分析：Cl はスクライブ部のさび中、地鉄界面付近に分布。塗膜膨れ先端部にも分布を確認。

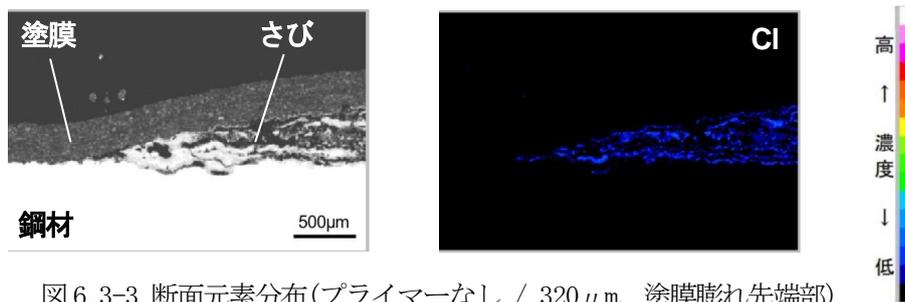


図 6.3-3 断面元素分布(プライマーなし / 320 $\mu\text{m}$ 、塗膜膨れ先端部)

#### (3) ラボ評価試験法との比較

- ・ 促進倍率：ラボ試験(条件8)の促進倍率は、本実船非没水部の10倍以上。
- ・ 腐食生成物：ラボ試験(条件8)と本実船非没水部のさび組成は近い傾向。

## 6. 4 PSPC 適合鋼板の腐食モデルとその補修モデル

船体構造の腐食対策として IMO は通称 PSPC と呼ばれる塗装性能基準を設けると共に、塗装の保守・修理ガイダンスを提示している。そこで、従来塗装と PSPC 塗装を施した場合、及び、塗装の補修・修理ガイダンスに準拠した場合に期待される腐食状態の予測を行った。予測にあたり、塗装の保守・修理による塗装性能の初期化、発生・進行していた腐食の進行停止、新たに発生した腐食の再成長を考慮した。

従来塗装の塗装寿命及び腐食の進行挙動は、板厚計測データの評価結果を参考に設定した。一方、PSPC 塗装については 15 年経過時の塗装の劣化度 3% を達成するモデルを設定した。また、補修及び修理に関するモデルは表 6.4-1 のように設定した。

表6.4-1 補修及び修理に関わるモデル設定

塗装の補修或いは修理の実施基準 (塗装劣化度)	補修 (maintenance)	0.03
	修理 (repair)	0.15
塗装補修を行う対象領域(全体に対する比率)		1/3, (2/3), 1
切り替え基準 (腐食量)		1.5 mm
点検・検査間隔	日常点検 (塗装補修)	0.1 年
	定期検査 (塗装修理・部材切り替え)	5 年

図 6.4-1 に従来塗装の場合、図 6.4-2 に PSPC 塗装の場合について、塗装補修・修理、衰耗部材の切り替えを行わない場合、塗装の補修領域を 0.33 及び 1.0 とした場合の腐食量分布の推定結果を示す。腐食量は 0.5、0.8、0.9、0.95 の累積確率に対応する腐食量及び平均腐食量を示す。

また、図 6.4-3 に従来塗装及び PSPC 塗装の場合で、塗装補修・修理、衰耗部材の切り替えを行わない場合と行う場合の、腐食量が衰耗部材切り替え基準を超える確率の推移を示す。

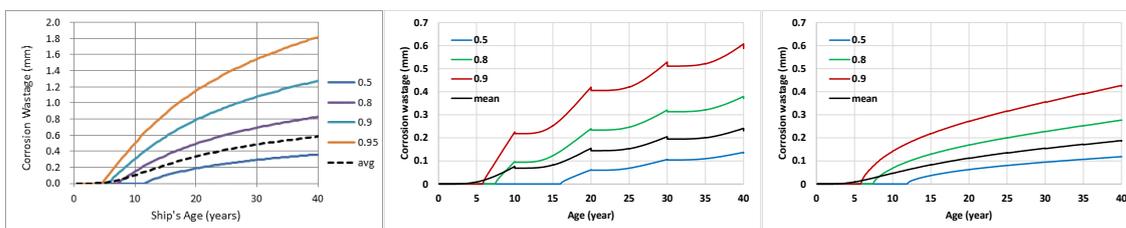


図6.4-1 従来塗装での腐食状態推移 (左：無補修、中央：補修領域1/3、右：補修領域 1)

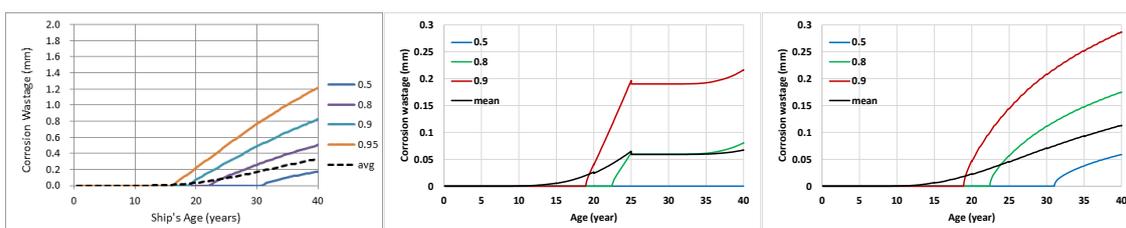


図 6.4-2 PSPC 塗装での腐食状態推移 (左：無補修、中央：補修領域 1/3、右：補修領域 1)

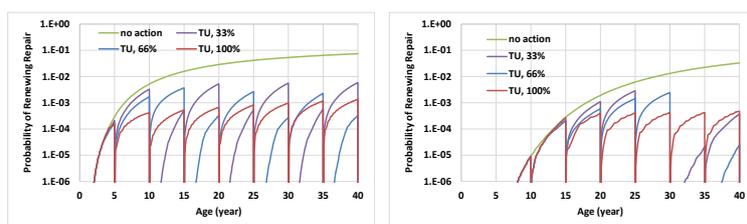


図6.4-3 腐食量が衰耗部材切り替え基準を超える確率（左：従来塗装、右：PSPC 塗装）

塗装の補修・修理を実施することで、腐食状態が大幅に改善されることが期待されることが示された。ただし、3%の劣化領域以下を維持するための塗装補修を行う場合、ある程度年数を経て全体的に劣化が始まる頃以降は、補修回数が非常に多く要求されることになる。ある程度劣化が進んだ時点で塗装の修理を行うことにより、ほぼ同程度の腐食状態を維持されることが期待されることが示された。

最近の IACS CSR にみられるネット寸法概念では腐食量と強度評価は密接に関連する。腐食予備厚は切り替え基準とリンクするので、設計時強度評価の基礎となるネット寸法を下回る状態に対する評価は重要である。塗装の補修・修理を行うことで、腐食の発生を抑え、また、発生した腐食の成長を抑制する効果、更には、定期的に衰耗部材の切り替え工事を行うことにより、腐食量が衰耗部材切り替え基準を超える確率を非常に小さく抑えることができることが分かる。補修・修理の効果のより、従来塗装及び PSPC 塗装の場合に対して、腐食状態の大幅な改善効果がうかがえる。

## 6. 5 孔食点を配置した塗膜下腐食シミュレーション

### 6. 5. 1 目的

前年度までに「線状欠陥を起点とした腐食進行モデル」を構築し、従来鋼と耐食鋼の腐食進行シミュレーションを行った。これらのシミュレーションでは、従来鋼・耐食鋼の腐食形状の統計的性質を再現できたが、各断面の形状が大きく異なるものとなった。すなわち従来のシミュレーションでは、腐食の全体的な統計的性質は再現できるものの、実際の腐食表面の局所的形状を再現できていない。今後、耐食鋼の有意性を検証しその妥当性を示すためには、より現実に近い腐食進行を模擬するシミュレーション手法の開発が望ましい。

以上のような背景から、本研究では線状欠陥からだけではなく、「多点起点の孔食点の発生に基づいた腐食進行シミュレーション手法」を開発する。また、開発するシミュレーションアルゴリズムを用いて、実船に相当するような全面腐食を含むシミュレーションを実施し、従来鋼・耐食鋼の性能評価を可能とするようなプログラム開発を行う。

### 6. 5. 2 多点起点の腐食進行シミュレーション手法の開発

#### 6. 5. 2. 1 多点起点の腐食進行シミュレーション手法の概要

多点起点の腐食進行シミュレーションでは以下のコンセプトに基づいてプログラム開発を行った。

(i)あらかじめ孔食点の場所は設定しない

(ii)確率モデルを用いて格子点(セル)の状態(status)を随時更新して、status を基に孔食点を生成し、腐食を進行させる

(iii)格子点の status の種類として「健全」・「塗装劣化進行」・「孔食進行可能」の3種類を設定した確率モデルとする。

(iv)線状欠陥を中心としながら線状欠陥上以外にも孔食点を発生させながら腐食が進行していく様子を再現する

また、孔食点の進行のモデルには、従来の腐食進行モデルのパラメタ（塗膜寿命、遷移時間、腐食進行係数等）以外に、ベベル角や塗膜による腐食進行遅延係数等のパラメタを導入し、それに基づくシミュレーションプログラムを開発した。シミュレーションのアルゴリズム詳細については、報告書を参照されたい。

#### 6. 5. 2. 2 シミュレーション手法結果

ここでは図 6.5-1 に、4.8 年における従来鋼と耐食鋼のシミュレーション結果を示す。線状欠陥を起点に腐食進行が進んでいる様子が再現できた。また、図 6.5-2 には断面形状を示す。本シミュレーション手法により、細かい凹凸のある断面がある程度再現できている。なお、本シミュレーションにより、従来鋼・耐食鋼ともに、平均腐食深さと腐食幅についても暴露試験と同等の傾向が得られた。

### 2.3 線状欠陥を 2 つ有する局所腐食進行シミュレーション

上記の腐食進行シミュレーションアルゴリズムを用いて、従来鋼の線状欠陥を 2 つ有する場合について局所腐食進行シミュレーションを行った。図 6.5-3 に示すように、初めはそれぞれの線状欠陥から腐食が広がり始め、時間がたつにつれて腐食が広がっていき、やがてそれぞれの線状欠陥から広がった腐食

が重っていく様子が観察できる。本研究で開発した手法により、複数欠陥を有する板の腐食現象をシミュレートすることがある程度可能であることがわかった。

### 6. 5. 3 結論

本研究では、線状欠陥を中心にして進行していく腐食の再現ができるシミュレーションの開発を行った。具体的には、多点起点の腐食進行シミュレーション手法の開発を行い、それを用いて従来鋼と耐食鋼の腐食進行のシミュレーションを行った。本研究で開発したシミュレーションプログラムを、線状欠陥を有する問題に適用した結果、従来鋼・耐食鋼ともに実験結果と結果が最大腐食深さ・腐食範囲で概ね一致した。本研究で開発した手法は、腐食深さ・腐食範囲を推定する手段として期待できる。また、多点起点のシミュレーションとすることにより、局所的な腐食部形状をある程度再現できることがわかった。また、本研究で開発した腐食進行シミュレーションアルゴリズムを、2つの線状欠陥を有する問題に適用した。それらの観察結果より、本手法を複数欠陥を有する問題にも適用することができる可能であると結論付けた。

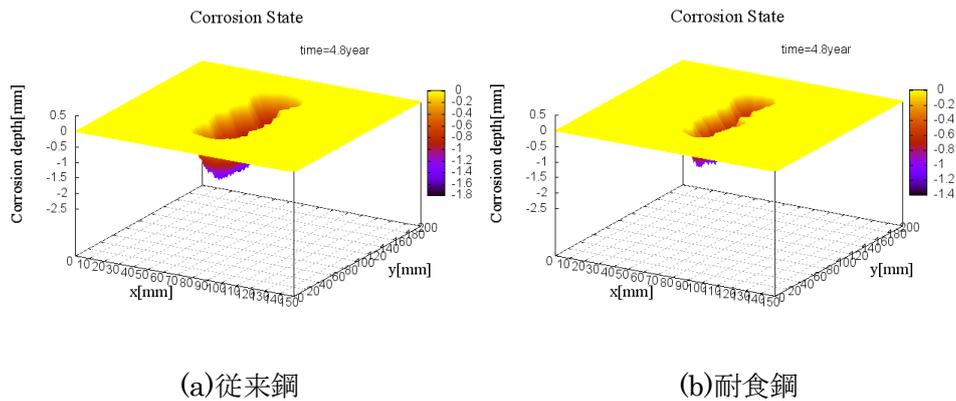


図 6.5-1 多点起点の腐食進行シミュレーション結果（腐食の3次元形状, t=4.8年）

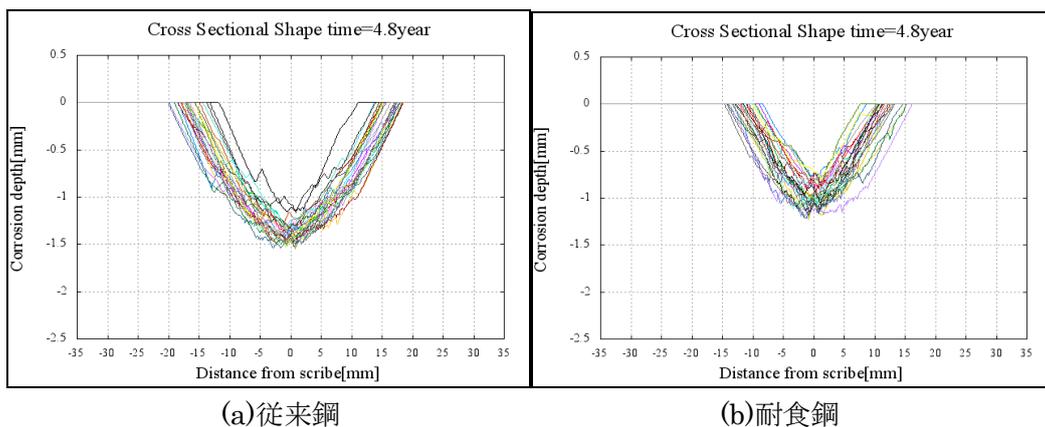


図 6.5-2 多点起点の腐食進行シミュレーション結果（断面形状, t=4.8年）

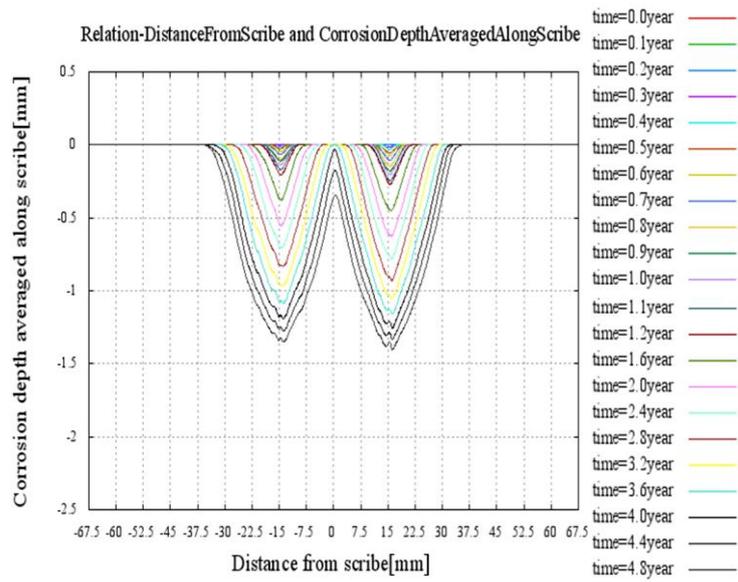


図 6.5-3 2つの線状欠陥を有する問題における腐食進行シミュレーション結果（平均断面形状）

## 6. 6 ランダム場による腐食表面モデルの生成

### 6. 6. 1 目的

前年度までに「多点起点の腐食進行モデル」を構築し、従来鋼と耐食鋼の腐食進行シミュレーションを行った。これらのシミュレーションでは、従来鋼・耐食鋼の腐食における腐食面の最大腐食深さやその統計的性質を再現することができた。しかしながら、腐食断面の形状はある程度の再現はできたものの、孔食点を配置するシミュレーション手法では腐食表面の正確な再現は困難であった。今後、より現実に近い腐食進行を模擬するシミュレーション手法を開発するためには、腐食表面形状の統計的性質を直接表現するモデルの構築が望ましいと考えられる。以上のような背景から、本研究ではランダム場を用いた腐食表面形状モデルの表現手法を検討する。また、提案する手法を用いて、複数の欠陥からの腐食進行や従来鋼と耐食鋼の性質の違いを検討するための腐食進行シミュレーションへの適用法について考察した。

### 6. 6. 2 ランダム場による腐食表面モデル生成手法の開発

#### 6. 6. 2. 1 ランダム場を用いた腐食表面モデルの生成手法

本研究では次式のような KL 展開法を用いたランダム場による腐食表面モデル生成手法を提案した。

$$\mathbf{v} = \boldsymbol{\mu} + \sum_{i=0}^N \xi_i \sqrt{\lambda_i} \boldsymbol{\varphi}_i \quad (1)$$

上式において、腐食表面は離散化された腐食量ベクトル  $\mathbf{v}$  で表される。また、式中の  $\boldsymbol{\mu}$  は平均腐食量ベクトルであり、 $\xi_i$  は標準正規確率変数を表す。 $\lambda_i, \boldsymbol{\varphi}_i$  はランダム場の性質を表す共分散 (Covariance) マトリクスの固有値、固有ベクトルである。共分散マトリクスは、ランダム場 (腐食表面形状) の統計的性質を表す共分散関数から得ることができる。すなわち、平均腐食量を表す表面形状と、そこからのばらつきを表現する共分散関数を適切に設定することができれば、その性質を持つランダム場 (腐食表面形状) を上式を用いて生成できる。

#### 6. 6. 2. 2 暴露試験結果を用いた共分散関数の導出

本研究では、暴露試験結果を用いて、共分散関数を導出した。具体的には、従来鋼のスクライブ試験片 4 体の船齢 4.8 年における腐食深さの計測結果を用いて、その  $x$  方向 (スクライブから離れる方向) と  $y$  方向 (スクライブに沿った方向) の統計的性質を考察するとともに、それに基づいて次式の形の共分散関数を仮定しその導出を試みた。

$$C(\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2) = C(x_1, y_1, x_2, y_2) = K \cdot C_x(x_1, x_2) \cdot C_y(y_1, y_2) \quad (2)$$

上式において、 $C_x(x_1, x_2)$  は  $x$  方向の共分散関数で、 $C_y(y_1, y_2)$  は  $y$  方向の共分散関数である。得られた共分散関数を用いて腐食面の生成を行ったところ、平均腐食量や分散 (標準偏差) については概ね妥当な結果となったが、 $x$  方向と  $y$  方向に規則的なパターンが生成されてしまい、実際の腐食表面とは異なる不自然な結果が得られた。以上の考察等を経て、最終的に以下のような、任意の二点間距離を考慮し  $x$  方向と  $y$  方向で相関長さを変えた共分散関数が適切であると結論づけた。

$$C(x_1, y_1, x_2, y_2) = \sigma(x_1)\sigma(x_2)\exp\left\{-\sqrt{\frac{(x_2-x_1)^2}{\alpha_x^2} + \frac{(y_2-y_1)^2}{\alpha_y^2}}\right\} l_0 \quad (3)$$

ここで、ここで $l_0$ は基準相関長さ、 $\alpha_x l_0$ は $x$ 方向の相関長さ、 $\alpha_y l_0$ は $y$ 方向の相関長さである。

### 6. 6. 2. 3 正規分布に基づくランダム場による腐食表面の生成

得られた相関関数に基づいて生成した腐食表面の例を図 6.6-1 に示す。図のように適切な表面形状が生成できたと考えられる。また、腐食量の統計的性質（平均と分散）も概ね妥当な結果が得られた。

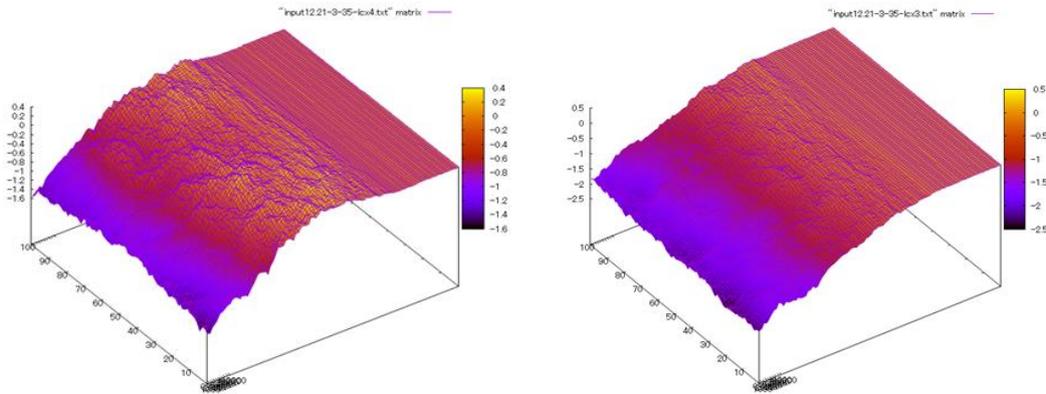


図 6.6-1 正規分布を用いたランダム場による腐食表面の生成結果の例

### 6. 6. 2. 4 切断正規分布に基づくランダム場による腐食表面の生成

上記までにある程度妥当な腐食表面形状が得られた。しかしながら、実際の腐食表面においては、腐食深さが比較的大きいスクライプの付近においては正規分布を示しているが、スクライプから離れるにつれて非正規分布となることがわかっている。KL 展開法を用いた通常のランダム場による表現では、非正規分布の表面形状を得ることができないため、本研究では、切断正規分布に基づく腐食表面の生成手法を提案・検討した。すなわち、図 6.6-2 に示すように、スクライプから一定距離離れた非正規分布の腐食深さの分布（図 6.6-2(b)左の棒グラフ）を、正規分布の 0 未満の部分のデータを 0 として取り扱うような切断正規分布で表現できると仮定し（図 6.6-2 (b)右）、その時の平均と分散を求めておく。それに伴い、平均腐食量曲線を実際の平均腐食量曲線とは異なり、腐食量がマイナスになる部分も存在するような曲線とする（図 6.6-2 (a)）。これらを、ランダム場の式((1)式)の平均腐食量ベクトル( $\mu$ )と、共分散関数((2)式)の標準偏差に適用することにより、腐食面形状を生成する。最後に、生成された面上の腐食量のうちマイナスとなるデータを 0 とすることにより、最終的な腐食面とする。

以上のような方法により、生成された腐食面形状を図.6.6-3 に示す。これらの腐食量は統計的に暴露試験片と概ね同等の性質を持つことがわかった。

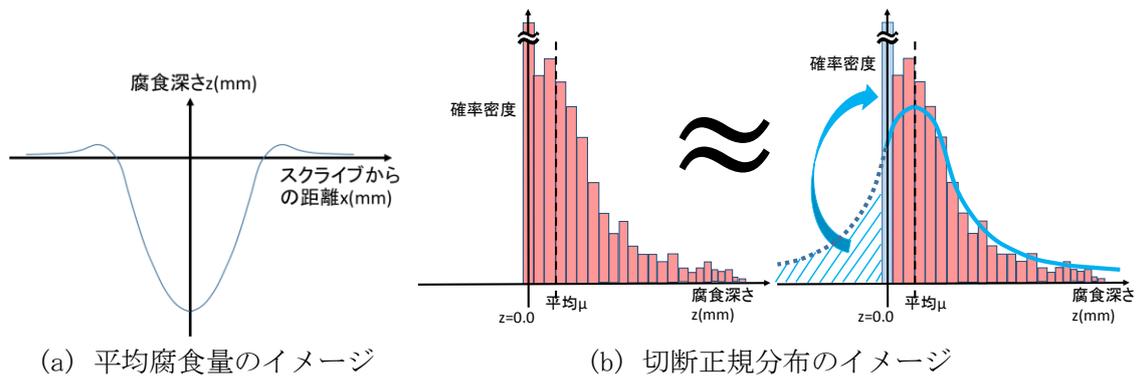


図 6.6-2 切断正規分布を用いた腐食表面生成の考え方

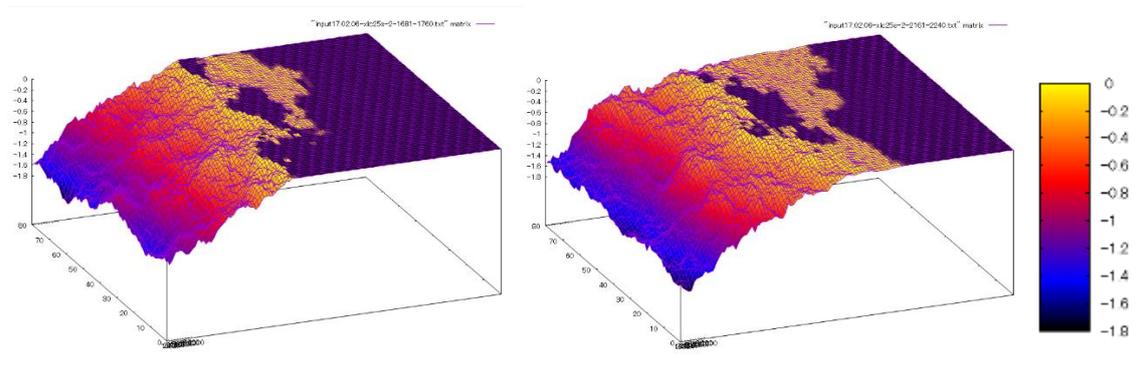


図 6.6-3 修正した切断正規分布を用いた腐食表面モデル

### 6. 6. 3 結論

本研究では、スクライプから進行する腐食の表面形状を生成するための手法として、KL 展開法で表されるランダム場を用いた手法を検討した。具体的には、まず暴露試験片の観察結果より平均腐食量曲線と共分散関数を定義した。また共分散関数として、任意の二点間距離を考慮し、 $x$  方向と  $y$  方向で相関長さを変えた共分散関数を提案した。また、KL 展開法によるランダム場の表現においては正規分布しか扱うことが出来ないという問題を解決するために、切断正規分布を用いた腐食表面モデルの表現法を提案した。これにより、標準偏差や基準となる平均腐食量などのパラメタを適切に調整することで、暴露試験片と同様な統計的性質を持つ腐食表面形状を生成できることが分かった。

また、本研究で提案した腐食表面形状の生成法においては、共分散関数と平均腐食量曲線が与えられれば、腐食表面の再現がある程度可能である。よって、別途経年時の平均腐食量等を予測することができれば、本研究で提案した手法を合わせて用いることにより、腐食進行による腐食表面形状の統計的変化を模擬できる腐食進行シミュレーション手法の開発が期待できる。

## 6. 7 セルオートマトンによる塗膜下腐食シミュレーション

### 6. 7. 1 スクライブ塗装鋼板の解析

2次元セルオートマトン塗膜損傷解析手法(図 6.7.1-1)を開発し, Kawamura et al.(2015)の孔食シミュレーション手法と統合することにより WBT 上部腐食環境下にある塗装鋼板の塗膜損傷・腐食減耗一貫解析を実現する. 開発手法の有効性は, Shiotani et al.(2012), 塩谷ら(2015)が実施したスクライブ塗装鋼板の実船暴露・複合サイクル腐食試験結果と解析結果を比較して検証した. さらに, 解析結果に基づいて耐食鋼の塗装劣化抑制効果の発現メカニズムについて論じた. 本節で得られた知見は以下のように要約できる.

- (1) 開発した塗膜損傷・腐食減耗一貫解析法により, バラストタンク上部腐食環境に暴露されたスクライブ塗装鋼板で, スクライブから塗膜フクレが拡大してスクライブ部を底とする V 字谷形状の腐食部が形成される過程が計算可能になった(図 6.7.1-2).
- (2) 実船調査結果とスクライブ塗装鋼板腐食試験結果から, 鋼種の別を考慮してセルオートマトン解析パラメータを決定する手法を開発した.
- (3) 開発手法により計算したスクライブ試験板の塗膜劣化部面積, 平均化腐食部断面の幅・最大深さ・断面形状は計測結果と良好に一致した(図 6.7.1-3). これらの結果は本研究で開発した解析手法および解析パラメータ決定法の有効性を示している.
- (4) 従来鋼と耐食鋼の解析パラメータの相違は, 耐食鋼において塗膜劣化・フクレ下腐食に加速効果を有する塗膜消失部の影響範囲が狭くなり, 塗膜消失部による急激な塗膜劣化が緩和される現象に対応していると解釈できる.
- (5) 塗膜欠陥・薄膜部のない塗膜にスクライブを入れた試験板では塗装寿命に便宜的な値を用いても実験結果と一致する計算結果を得ることができる. しかし, 実船バラストタンクの解析では, 薄膜部・塗膜欠陥部の塗装寿命と塗装寿命劣化加速率の確率分布を合理的に決定する必要がある.

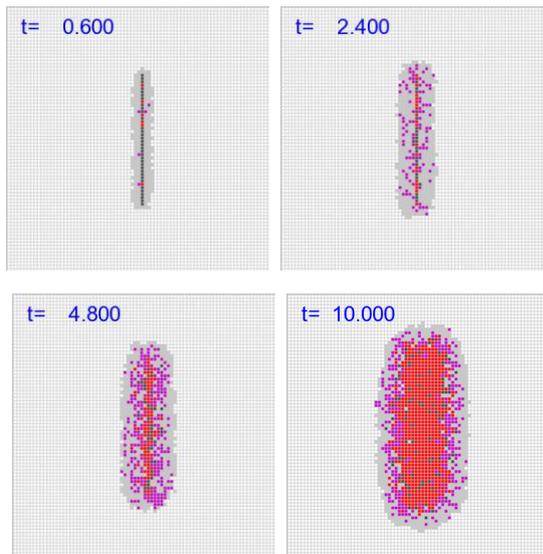


図 6.7.1-1 2次元セルオートマトンの解析例  
t=10years

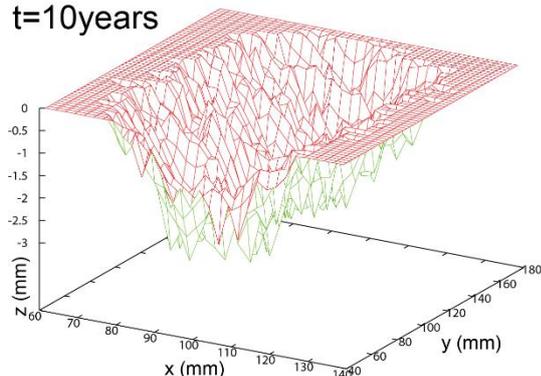
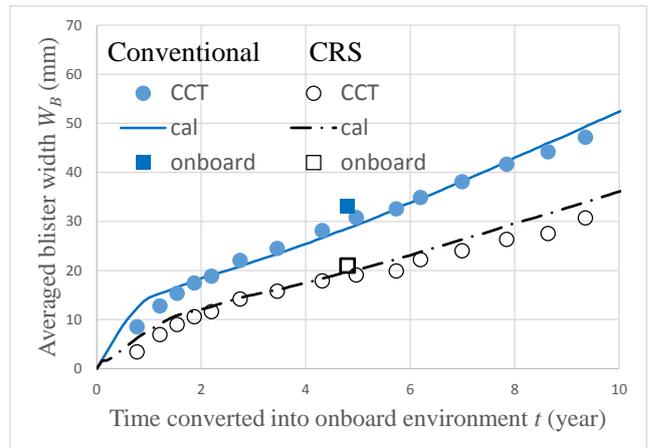
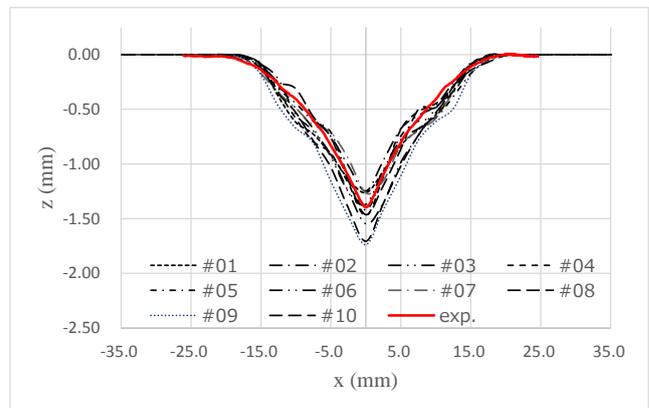


図 6.7.1-2 船齢 10 年時の従来鋼腐食部プロフィール



(a) 塗膜ふくれ平均幅の経時変化



(b) 実船暴露終了(4.8年)時の耐食鋼腐食部形状

図 6.7.1-3 実験結果と計算結果の比較

## 6. 7. 2 バラストタンク内エッジ腐食の解析

実船バラストタンク中エッジ腐食統計特性の経時変化を定量的に推定する目的で、エッジ腐食長さ計測結果から、エッジ上の局所塗膜欠陥の空間分布と腐食潜伏寿命確率分布を推定する手法を開発するとともに、エッジ等の線状薄膜部中の局所塗膜欠陥を起点とする塗膜下腐食をセルオートマトンにより解析する手法を開発した(図 6.7.2-1, 図 6.7.2-2)。開発手法の有効性は、塩谷ら<sup>4)</sup>のエッジ腐食計測結果とセルオートマトン計算結果を比較して検証した。さらに、耐食鋼と従来鋼の腐食潜伏寿命確率分布を比較し、耐食鋼のエッジ腐食抑制効果について論じた。本報で得られた知見は以下のように要約できる。

- (1) 点塗膜欠陥からの発錆が十分発達した状態を含む複数船齢での従来鋼エッジ腐食統計特性の計測結果から、従来鋼の欠陥・薄膜部解析パラメタを決定する手法を開発した。
- (2) 従来鋼エッジと同等の塗装仕様・腐食環境にある耐食鋼エッジ腐食統計特性の計測結果から、耐食鋼の欠陥・薄膜部解析パラメタを決定する手法を開発した。
- (3) 塩谷ら<sup>4)</sup>の実船エッジ腐食計測結果から、開発手法により欠陥・薄膜部解析パラメタを決定し、セルオートマトンにより従来鋼・耐食鋼エッジの腐食統計特性の長期予測を行った結果は、計測結果と良好に一致した(図 6.7.2-3)。この結果は、本報で開発したスパッタリングモデルとエッジ腐食解析パラメタ決定法の有効性を示している。
- (4) 従来鋼と耐食鋼のエッジ腐食解析パラメタを比較し、耐食鋼のエッジ腐食抑制効果は、塗膜欠陥腐食潜伏寿命の延伸と、発錆後の腐食域拡大速度の減少の2つのメカニズムが同時に作用して生じたと推定できることを示した(図 6.7.2-4)。

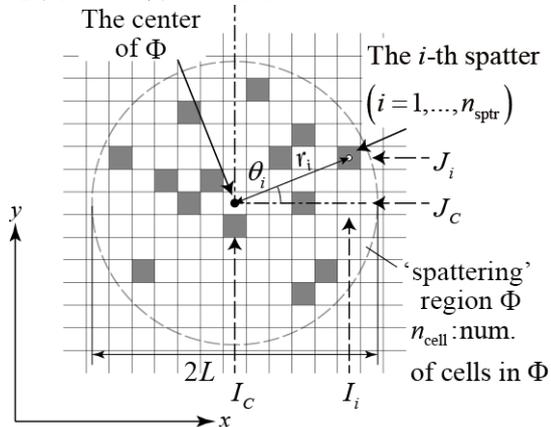


図 6.7.2-1 スパッタリング塗装欠陥モデル

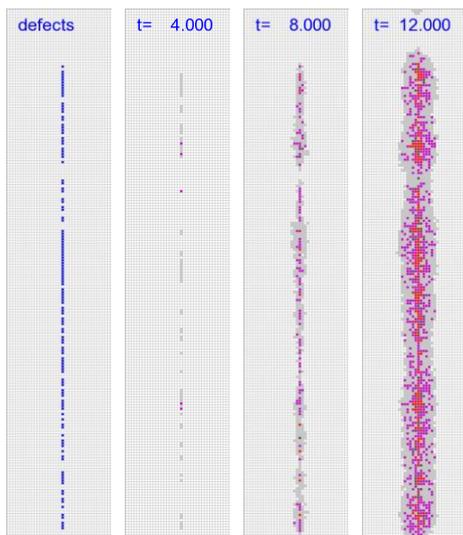


図 6.7.2-2 エッジ腐食セルオートマトン解析の例

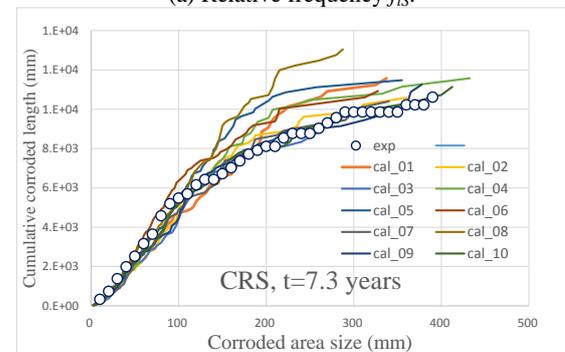
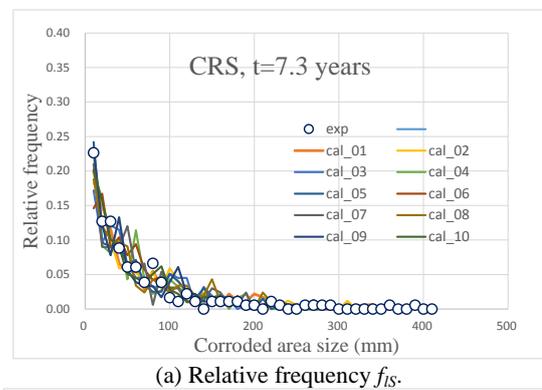


図 6.7.2-3 耐食鋼エッジ腐食統計量の実験・計算比較

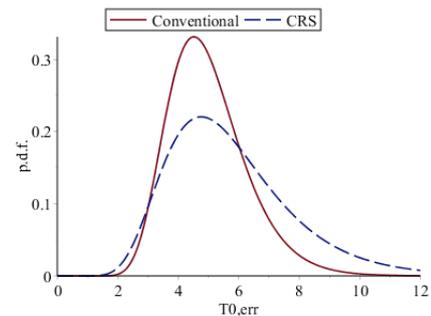


図 6.7.2-4 従来鋼・耐食鋼の塗膜点欠陥腐食潜伏寿命

### 6. 7. 3 CCT スクライブ試験解析

NK-鉄連共研で選定した CCT/条件 8 (以下、NK 共研 CCT と呼ぶ) で単一スクライブ試験のセルオートマトン解析を実施し、オートマトンパラメタの合わせ込みを行った。また、単一スクライブ試験結果から決定したパラメタを使用してダブルスクライブ試験のシミュレーション結果は、最大深さ、腐食部面積は実験と概ね一致したが、腐食面積・プロファイルの非対称性は再現できなかった。本節では以下の知見が得られた。

(1) 6.7.1 節で JFE 殿実施スクライブ塗装試験板 CCT 結果の塗膜ふくれ幅・腐食部プロファイルが再現できるよう決定したセルオートマトンパラメタのうち、べき乗則比例定数  $a$  とべき乗指数  $b$  を、NK 共研単一スクライブ試験の平均化断面形状の最大深さが概ね一致するよう調整した結果、 $a$  の平均を 0.929 から 0.595 に減少させ、 $b$  を 0.425 から 0.275 に減少させる必要があることがわかった。 $a$ 、 $b$  とも大幅に減少した原因は、塩水噴霧で NaCl でなく人工海水が使用されたため保護性の腐食生成物が生成されたこと、塗装系が異なることなどにあると推定される。

(2)  $a$ 、 $b$  以外のセルオートマトンパラメタについては、 $T_S$  (腐食生成物保護能持続時間)、 $A_0$  (隣接腐食部による塗膜環境遮断能減退加速係数)、 $f_{bare}$  (隣接塗膜喪失部による加速係数)、 $R_S$  (塗膜喪失部影響半径) のみ、6.7.1 節で決定した値を変更する必要があった。調整した計算パラメタを使用したセルオートマトン解析によって、単一スクライブ試験の塗膜膨れ・腐食部断面形状の時間変化を精度よく再現できた(図 6.7.3-1)。

(3) 単一スクライブ試験結果から決定した計算パラメタを使用した、複数スクライブ試験の塗膜下腐食シミュレーション結果は、実験結果の塗膜膨れ・腐食部断面形状の時間変化と概ね一致した (図 6.7.3-2)。この結果は、開発したセルオートマトンが多様な塗装仕様・腐食環境・塗膜損傷配置に適用可能なことを示している。

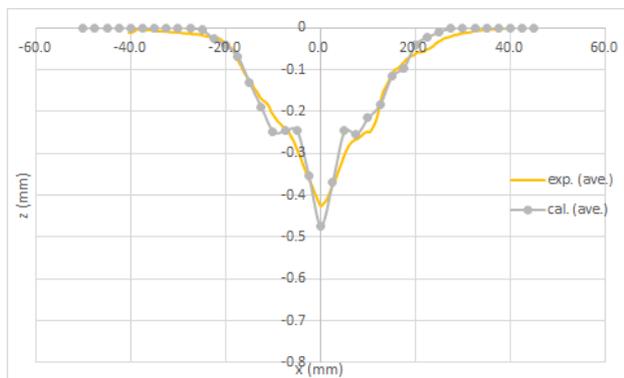


図 6.7.3-1 NK 共研単一スクライブ試験 112 日目 (船齢 3 年相当) の平均化腐食部断面形状の実験・計算比較。

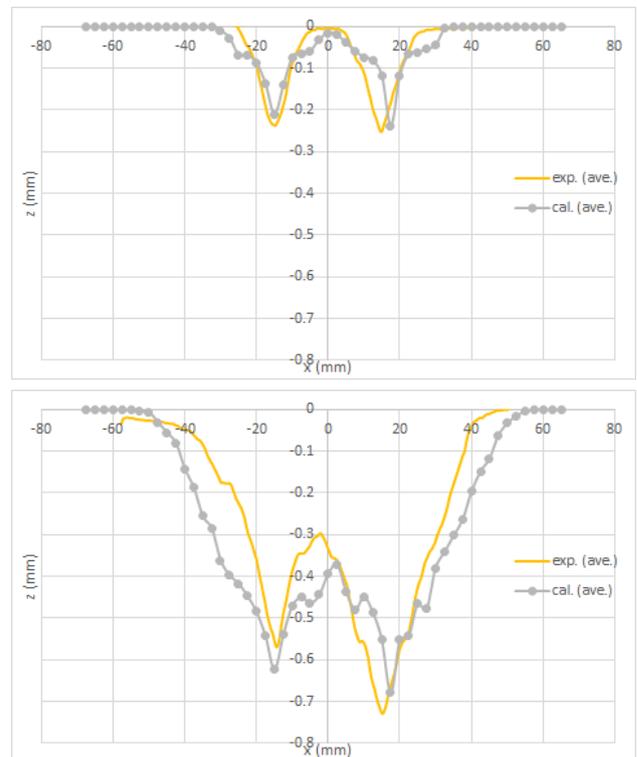


図 6.7.3-2 NK 共研単一スクライブ試験結果から決定したセルオートマトンパラメタを使用した複数スクライブ試験平均化腐食部断面形状の実験・計算比較。

## 6. 8 セルオートマトン解析と IACS 腐食モデルの関連付け

開発したセルオートマトンは、IACS 腐食確率モデルと同様な 3 段階腐食確率モデルを基礎としているが、塗膜下腐食挙動を再現するために各セル腐食状態の相互作用を考慮している。この定式化は、塗膜面の各点で独立な腐食過程を想定する IACS 腐食モデルの仮定に反しており、セルオートマトンのセル単位の塗膜寿命、ピット形成・成長は、IACS 確率モデルの塗膜寿命、ピット形成・成長に一致しない。

IACS 確率モデルのパラメタは、船舶検査で収集された多数の船舶の板厚計測データから回帰計算により決定される。セルオートマトンによって大寸法塗装鋼板の腐食シミュレーションを実施し、計算結果のセル腐食量を板厚計測データとみなして回帰計算を行えば、設定したセルオートマトン解析条件に対応した IACS 確率モデルパラメタを決定できる。その結果、IACS の評価基準によりタンク壁単位の塗装寿命、腐食予備厚等を評価することで、耐食鋼による塗装寿命延伸・腐食予備厚減少効果を評価できる。本節では、上記提案手法に従った、セルオートマトンパラメタと IACS 確率モデルの関連付けの試解析を実施した。本節では以下の知見が得られた。

- (1) 経年船 WBT パネルで観測された発錆状況に概ね対応するスパッタリング発生確率を選択するため、セルオートマトンパラメタに暫定値を設定し、 $\Theta$ ,  $\phi$ ,  $\beta$  を 5 通りに変化させて発錆部面積を比較した。その結果、本研究で収集した経年船腐食部写真および本研究で実施した実船調査結果と類似性が高い計算条件 (図 6.8-1) を選択した。
- (2) 入手した実船 WBT 没水部板厚計測データを分析し、腐食深さ頻度データのうち船齢 15 年の  $d_{mod}$  (約 0.3mm) が概ね表現できる計算条件を探索することを決定した。そして、板厚計測データの船齢 15 年腐食減耗量最頻値を再現できる従来鋼のセルオートマトンパラメタを選択し、大寸法パネルの腐食シミュレーションを実施した (図 6.8-2)。
- (3) 耐食鋼セルオートマトン計算条件を、a 値 (平均), b 値の耐食鋼/従来鋼比がスクライブ塗装試験板解析での比に一致し、 $T_{0,err}$  (スパッタ腐食潜伏寿命) および  $A_0$  (隣接腐食部による塗膜劣化加速係数) の平均・標準偏差の耐食鋼/従来鋼比がエッジ腐食解析での比に一致するよう決定した。決定した耐食鋼セルオートマトンパラメタを使用して、大寸法パネルの腐食シミュレーションを実施した。
- (4) 従来鋼、耐食鋼の大寸法パネル腐食シミュレーション結果から疑似板厚データを生成し、IACS 確率モデルへのフィッティングを試みた。その結果、本研究で開発したセルオートマトンによる腐食シミュレーション結果は、IACS 確率モデルに関連付けることが可能であることが示された。この結果は、基礎試験により鋼種によるセルオートマトンの相違を評価できれば、セルオートマトン計算結果と関連付けられた IACS 確率モデルにより、IACS 評価基準に基づいて耐食鋼による塗装寿命延伸・腐食予備厚減少効果を評価できることを意味する (図 6.8-3, 図 6.8-4)。

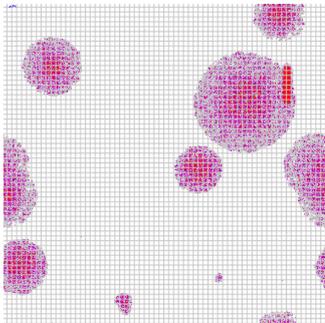


図 6.8-1 実船調査結果と類似性が高いスパッタ分布で計算した大寸法パネル腐食の例 (船齢 20 年)

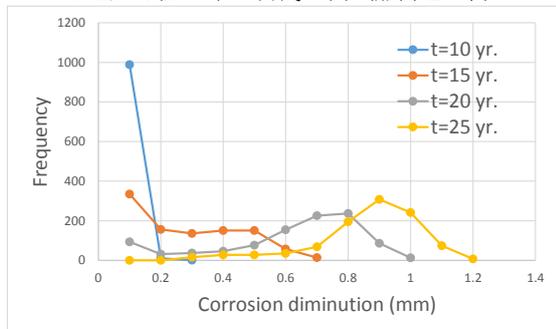


図 6.8-2 実船板厚計測データの腐食量最頻値を近似的に再現した従来鋼計算結果の例。

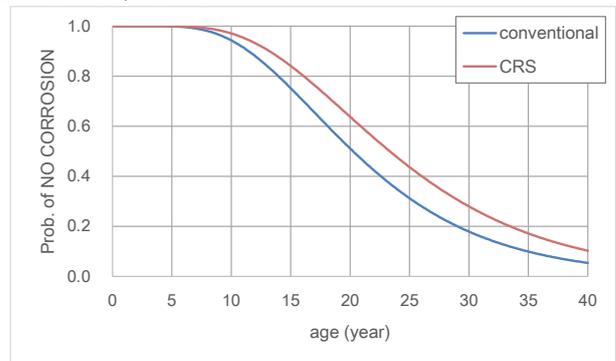


図 6.8-3 腐食量ゼロの確率の比較

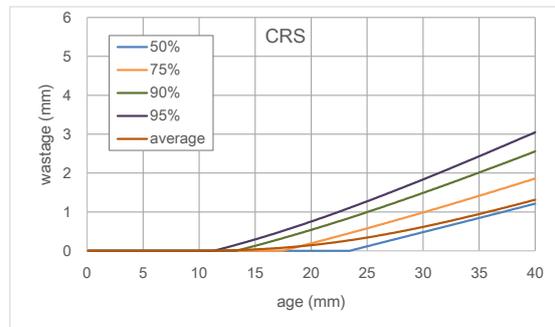


図 6.8-4 耐食鋼における腐食量分布

6. 9 防食技術に関する海外動向

WBTの防食に関する研究発表及び研究論文は、委員会メンバーにより発表されたものがほとんどであった。表 6.9-1 に、準備会活動期間（2010 年度）、委員会活動期間（第 I 期～第 III 期：2011 年度～2016 年度）における WBT 委員会メンバーによる WBT 防食技術に関する学協会報告（委員会で紹介された案件）を示す。WBT 劣化現象：3 件、WBT 耐食鋼：7 件、WBT 腐食シミュレーション：10 件、腐食モニタリング：2 件を報告している。

表 6.9-1 WBT 委員会メンバーによる WBT 防食技術に関する学協会報告（委員会で紹介された案件）（その 1）

年度	書誌					分類					
	内容					論文		講演会(開催地)		フォーラム(開催地)	技術報告
	劣化現象	耐食鋼	シミュレーション	モニタリング	その他	和文	英文	国内	国際会議		
2010	塩谷和彦, 小森務, 星野俊幸, 西村公宏, 中村雅美, 潮海弘資: パラストタンク耐食鋼と実船暴露試験結果, 日本船舶海洋工学会講演会論文集, 11, (2010), pp.481-484, 2010K-G10-3.							○ 神戸			
	○										
2012	Shiotani, K., Samusawa, I., Tachibana, S., Komori, T.: Development of Corrosion Resistant Steel for Ballast Tank, Proc. Int. Conf. on Developments in Ship Design & Construction (ICSOT), (2012), pp. 27-33.								○ インドネシア / アンボン		
	○										
2013	塩谷和彦, 中村雅美: パラストタンク耐食鋼 JFE-SIP <sup>®</sup> -BT 適用船の塗装劣化挙動と腐食挙動, JFE 技報, 33, (2014), pp.37-42.										○
	○										
	塩谷和彦, 橋俊一, 寒沢至, 潮海弘資, 秋山治之, 平澤宏章: パラストタンク耐食鋼の実船における塗装劣化挙動, 日本船舶海洋工学会講演会論文集, 17, (2013), pp.97-100, 2013A-GS4-5.							○ 大阪			
	○										
2014	Shiotani, K., Nakamura, M.: Coating Deterioration and Corrosion Behavior of Ship Using Corrosion Resistant Steel for Ballast Tank "JFE-SIPTM-BT", JFE Technical Report, 20, (2015), pp.40-46.										○
	○										
	Shiotani, K., Kashima, K., Sakashita, S., Fukunaga, K., Baba, T., Takai, A., Takada, A., Osawa, N.: Characterization of Deterioration Phenomenon in Ballast Tank, Proc. The 7th Int. Conf. on Thin-Walled Structures (ICTWS 2014), (2014), Paper 1304.								○ プサン		
	○										

表 6.9-1 WBT 委員会メンバーによる WBT 防食技術に関する学協会報告（委員会で紹介された案件）（その 2）

年度	書誌					分類					
						論文		講演会(開催地)		フォーラム (開催地)	技術報告
	和文	英文	国内	国際会議							
2014	川村恭己, 狩野泰秀, 大沢直樹, 山本規雄, 塩谷和彦, 鹿島和幸, 阪下真司, 加藤謙治: バラストタンク塗装鋼板の腐食シミュレーション手法に関する研究(その1)線状塗装欠陥を起点とする塗装下腐食の数値シミュレーション, 日本船舶海洋工学会講演会論文集, 19, (2014), pp.441-444, 2014A-GS9-2.							○ 長崎			
	劣化現象	耐食鋼	シミュレーション	モニタリング	その他						
			○								
	大沢直樹, 塩谷和彦, 川村恭己, 鹿島和幸, 阪下真司, 加藤謙治, 山本規雄, 高野翔: バラストタンク塗装鋼板腐食面の表面キャラクタライゼーション, 日本船舶海洋工学会講演会論文集, 19, (2014), pp.445-448, 2014A-GS9-3.							○ 長崎			
	劣化現象	耐食鋼	シミュレーション	モニタリング	その他						
			○								
	鹿島和幸, 塩谷和彦, 阪下真司, 村越知史, 福永恵太, 馬場勉, 高井章, 高田篤志, 大沢直樹: 船舶バラストタンクにおける腐食劣化現象のキャラクタライズ, 日本船舶海洋工学会講演会論文集, 19, (2014), pp.449-452, 2014A-GS9-4.							○ 長崎			
	劣化現象	耐食鋼	シミュレーション	モニタリング	その他						
			○								
2015	Shiotani, K.: Development of Corrosion Resistant Steel for Ballast Tank, Marine Coatings Forum.									○ ロッテルダム	
	劣化現象	耐食鋼	シミュレーション	モニタリング	その他						
			○								
	大沢直樹, 高田篤志, 小島隆志, 高野翔: エポキシ塗装鋼板塗膜下腐食モニタリングのための鉄2価イオン感応性蛍光プローブの開発, 日本船舶海洋工学会論文集, 22, (2015), pp. 93-99.					○					
	劣化現象	耐食鋼	シミュレーション	モニタリング	その他						
				○							
	大沢直樹, 狩野泰秀, 川村恭己, 竹野成流, 片山志乃: セルオートマトンによる塗膜下腐食シミュレーション手法に関する基礎的研究, 日本船舶海洋工学会講演会論文集, 20, (2015), pp. 505-508.							○ 神戸			
	劣化現象	耐食鋼	シミュレーション	モニタリング	その他						
			○								
Sakashita, S., Shiotani, K., Kashima, K., Murakoshi, S., Fukunaga, K., Baba, T., Takai, A., Takada, A., Osawa, N.: Onboard Study on Deterioration of Coated Steel in Water Ballast Tank, Proc. 25th Int. Ocean and Polar Engineering Conference (ISOPE2015) (2015) pp. 521-527.								○ ハワイ			
劣化現象	耐食鋼	シミュレーション	モニタリング	その他							
		○									
Kawamura, Y., Kanou, Y., Osawa, N., Yamamoto, N., Shiotani, K., Kashima, K., Sakashita, S., Katoh, K., Takano, S.: Characterization and Numerical Simulation of Corroded Surface of Coated Steel Plates in Water Ballast Tank, Proc. 25th Int. Ocean and Polar Engineering Conference (ISOPE2015) (2015) pp. 514-520								○ ハワイ			
劣化現象	耐食鋼	シミュレーション	モニタリング	その他							
		○									

表 6.9-1 WBT 委員会メンバーによる WBT 防食技術に関する学協会報告（委員会で紹介された案件）（その 3）

年度	書誌					分類					
						論文		講演会(開催地)		フォーラム (開催地)	技術報告
	内容					和文	英文	国内	国際会議		
2015	Osawa, N., Kojima, R., Takada, A., Takano, S., Katayama, S.: Development of Fe(II) Fluorescent Indicator for Underfilm Corrosion Monitoring of Water Ballast Tank, Proc. 25th Int. Ocean and Polar Engineering Conference (ISOPE2015), (2015), pp. 482-487.								○ ハワイ		
	劣化現象	耐食鋼	シミュレーション	モニタリング	その他						
			○								
2016	大沢直樹, 狩野泰秀, 川村恭己, 高田篤志, 塩谷和彦, 竹野成流, 片山志乃:セルオートマトンによる塗膜下腐食シミュレーション手法に関する研究(第1報:スクライブ塗装鋼板の解析), 日本船舶海洋工学会論文 文集, 23 (2016) pp.139-152.					○					
	劣化現象	耐食鋼	シミュレーション	モニタリング	その他						
			○								
2016	大沢直樹, 塩谷和彦, 高田篤志, 竹野成流, 片山志乃, 織田拓哉.:セル オートマトンによる塗膜下腐食シミュレーション手法に関する研究-(第 2報:バラスタタンク内エッジ腐食の解析)-, 日本船舶海洋工学会講演 会論文集, 22, (2016), pp.493-497, 2016S-GS5-15.							○ 福岡			
	劣化現象	耐食鋼	シミュレーション	モニタリング	その他						
			○								
2016	Osawa, N., Kanou Y., Kawamura, Y., Takada, A., Shiotani, K., Takeno, S., Katayama, S., Kristov,I.W :Development of Under-Film Corrosion Simulation Method based on Cellular Automaton, Proc. OMAE2016, (2016), paper OMAE2016-54508.								○ ブザン		
	劣化現象	耐食鋼	シミュレーション	モニタリング	その他						
			○								
2016	Osawa N., Kanou Y., Kawamura Y., Takada A., Shiotani K., Takeno S., Katayama S.:Fundamental study on under-film corrosion simulation method based on cellular automaton, Proc. PRADS2016, (2016), paper ID 140.								○ コペンハーゲン		
	劣化現象	耐食鋼	シミュレーション	モニタリング	その他						
			○								
2016	大沢直樹, 塩谷和彦, 高田篤志, 竹野成流, 片山志乃, 織田拓哉.:セル オートマトンによる塗膜下腐食シミュレーション手法に関する研究-第3 報:塗膜欠陥の腐食潜伏期間確率モデルの改良-, 日本船舶海洋工学 会講演会論文集, 23, (2016), pp. 259-264, 2016A-GS8-1								○ 岡山		
	劣化現象	耐食鋼	シミュレーション	モニタリング	その他						
			○								
2016	塩谷和彦, 橘俊一:バラスタタンク耐食鋼適用船の塗装劣化挙動, 日本 船舶海洋工学会論文集, 24, (2016), pp.211-218.					○					
	劣化現象	耐食鋼	シミュレーション	モニタリング	その他						
		○									
2016	大沢直樹, 塩谷和彦, 高田篤志, 竹野成流, 片山志乃, 織田拓哉.:セル オートマトンによる塗膜下腐食シミュレーション手法に関する研究(第 2報:バラスタタンク内エッジ腐食の解析), 日本船舶海洋工学会論文 集, 印刷中.					○					
	劣化現象	耐食鋼	シミュレーション	モニタリング	その他						
			○								

## 7. まとめ

バラストタンクの耐食性に関する従来知見の整理、腐食モデル化および腐食シミュレータの開発、防食技術に関する海外動向の状況把握を行い、以下の成果を得た。

### (1) バラストタンクの耐食性に関する従来知見の整理

- 1) 鋼の耐海水性と耐海水鋼：少量の Cu や Cr などを添加した耐海水鋼は過去に開発されており、暴露試験による評価結果や合金元素の作用機構が報告されている。
- 2) 塗装劣化現象と塗装劣化原因：実船調査の結果、バラストタンク内では塗膜樹脂の劣化・減耗はほとんど確認されない。本研究においては、塗膜と被塗物金属が剥離した状態が生じることを塗装劣化と呼ぶこととした。
- 3) バラストタンク用耐食鋼：塗装欠陥部での鋼材の腐食を抑制することで塗装劣化を抑制する耐食鋼が開発されている。本耐食鋼は、実験室腐食試験、実船暴露試験、実船適用（～7.3年）で良好な結果が報告されている。

### (2) 腐食モデル化および腐食シミュレータの開発

#### 1) バラストタンク腐食評価試験法の検討（NK-鉄連共研）

塗装鋼材の塗装劣化開始後の塗装劣化、腐食損耗が評価出来る試験法として、実船における耐食鋼の効果の再現等の観点から、付与塩、乾湿時間・頻度、塩水噴霧/浸漬等の影響を検討した。その結果、人工海水噴霧乾湿繰り返しを試験法として選定した。選定した実験室腐食試験条件で、従来鋼と耐食鋼の塗装劣化、腐食損耗データを取得した。

#### 2) 腐食形態の経時変化データと塗膜膨れ合体データの取得

腐食シミュレーションの予測検証のため、ダブルスクライブ塗装板の CCT により、腐食形態の経時変化実測データ（168日間）を取得した。

#### 3) 実船暴露試験結果

実船バラストタンクにおいて暴露試験を実施。ラボ評価試験法と錆組成が近い。ラボ評価試験法は、本実船暴露試験に対し促進倍率が10倍以上であることが判明した。

#### 4) PSPC 適合鋼板の腐食モデルとその補修モデル

PSPC 塗装を施した場合、及び、IMO の塗装補修・修理ガイダンスに準拠した場合に期待される腐食状態の予測手法を開発した。

#### 5) 孔食点を配置した塗膜下腐食シミュレーション

従来鋼・耐食鋼における腐食進行を模擬するシミュレーション手法として多点起点の孔食点の発生に基づいた腐食進行シミュレーション手法を開発した。

#### 6) ランダム場による腐食表面モデルの生成

現実の腐食進行を模擬した腐食表面形状を生成するための手法として、ランダム場を用いた腐食表面形状モデル生成手法を開発した。

#### 7) セルオートマトンによる塗膜下腐食シミュレーション

スクライブ塗装試験板のラボ腐食試験と実船暴露試験結果から、鋼種による塗膜下腐食挙動の相違を考慮して塗膜きずを起点とする塗膜損傷の拡大と腐食面形状の定量的長期予測を可能にする数値シミュレーション手法が開発された。耐食鋼の腐食抑制効果をセルオートマトン解析に反映させる手法が開発された。そして、開発したセルオートマトン解析手法により、単一・複数スクライブ実験室腐食試験における塗膜損傷拡大・腐食面形状の高精度再現に成功した。これにより、開発したセルオートマトンの多様な塗装仕様・腐食環境・塗膜損傷配置への適用性が示された。

さらに、同一バラスタタンク部材の塗膜損傷の経時観測から、点状塗膜欠陥の空間分布と腐食潜伏寿命の確率分布を決定する手法が開発された。これにより、塗膜きずを起点としない実船塗膜下腐食の、鋼種による塗膜下腐食挙動の相違を考慮した定量的長期予測が実施可能になった。耐食鋼の腐食抑制効果を塗装欠陥セルのパラメタに反映させる手法が開発された。

#### 8) セルオートマトン解析と IACS 腐食モデルの関連付け

実船板厚検査記録の腐食量最頻値を再現できるセルオートマトンパラメタを決定し、大寸法パネルの鋼種による塗膜下腐食挙動の相違を考慮した数値シミュレーションを実施した。シミュレーション結果を検査データと見做して、IACS 腐食確率モデルに回帰できることを示した。この確率モデルにより、IACS 評価基準に基づいて耐食鋼による塗装寿命延伸・腐食予備厚減少効果を評価できる。

### (3) 防食技術に関する海外動向

WBT の防食に関する研究発表及び研究論文は、委員会メンバーにより発表されたものがほとんどであった。2010～2016 年度に亘る準備会、委員会活動期間中のメンバーによる発表・論文は、WBT 劣化現象 3 件、WBT 耐食鋼 7 件、シミュレーション 10 件、腐食モニタリング 2 件である。

(総括) バラスタタンクの局所腐食進行・塗装劣化モデルの構築および局所腐食進行・塗装劣化シミュレータを開発した。そして、そのシミュレーション結果を、IACS 腐食モデルに回帰出来ることを示した。すなわち、バラスタタンクの塗装劣化および腐食進行の見積もりのための方法論と計算ツールは確立、開発された。今後、長期経年船における塗装劣化、腐食進行データでの検証により、前記一連の手法で、耐食鋼による塗装寿命延伸・腐食予備厚減少効果を評価できる。但し、本シミュレーションは、現状、ある限定された条件下でのシミュレーションに留まる。任意性を持たせるためにはパラメタ(塗装劣化速度、腐食速度を決定するパラメタ)の代表性の議論と、塗装状態、腐食環境、時間等に起因する偏差の考察と決定が必要である。一方、本シミュレーションの適用範囲の拡がりは大きく、バラスタタンクに限らず、カーゴホールドやカーゴタンクへの展開、また、船舶に限らず、海洋構造物、陸上構造物等への展開が考えられる。

