

令和 5 年 9 月 19 日現在

機関番号：14401

研究種目：基盤研究(A) (一般)

研究期間：2019～2021

課題番号：19H00804

研究課題名(和文) 船舶海洋構造物海水タンクの腐食時構造健全性評価技術の高度化

研究課題名(英文) Advancement of Evaluation Technology for Structural Integrity of Corroded Seawater Tanks of Ships and Offshore Structures

研究代表者

大沢 直樹 (Osawa, Naoki)

大阪大学・大学院工学研究科・教授

研究者番号：90252585

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 28,480,000円

研究成果の概要(和文)：実船のバラストタンクに腐食センサを設置し、タンク内環境を247日間モニタリングし、バラスト注排水と腐食進行度の関係に関する新たな知見を得た。3次元カメラ搭載タブレットを用いた写真撮影によりタンク壁面の初期腐食進行をモニタリングし、初期腐食の進行速度に関する知見を得た。セルオートマトン塗膜下腐食シミュレータを、計算の並列化等により大幅に高速化し、大寸パネルの腐食シミュレーションを可能にした。また、ベイズ推論により腐食試験結果から解析パラメータを決定する手法を開発した。鉄二価イオン感応性蛍光物質を添加した塗料により塗膜下アノード形成の時間空間変化を計測する手法を開発した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究の成果により、腐食衰耗による海水タンク壁面構造の最終強度低下の予測に必要な、タンク壁面の大域的腐食衰耗空間プロファイルの高精度シミュレーションを実施できる解析手法が開発され、実験結果から計算パラメータの決定するための手法が考案されてラボ試験で有効性が検証された。また、塗膜下腐食発生時の時間空間変化を直接計測する手法が開発されるとともに、実船海水タンク中の腐食環境の長期的変化に関する知見が収集された。これらにより、海洋環境を保全しつつ海底エネルギー資源開発を進めるために必要な、船舶海洋構造物の供用中構造健全性マネジメント(ISSIM)技術を確立するための基礎技術が整備された。

研究成果の概要(英文)：The corrosion sensor was installed in the ballast tank of a real ship and the in-tank environment was monitored for 247 days to obtain new knowledge on the relationship between ballast drainage and corrosion progress. The cellular automaton for under-film corrosion simulation was significantly accelerated by parallelizing the calculations, enabling the simulation of the corrosion of large-sized panels. A Bayesian inference method was developed to determine cell automaton parameters from corrosion test results. A method was developed to measure the time-space variation of anode formation under the coating film by using a paint with an Fe(II) sensitive fluorescent substance added.

研究分野：船舶海洋工学

キーワード：バラストタンク 塗膜下腐食 セルオートマトン 腐食センサ 腐食環境モニタリング ベイズ推論  
アノード 鉄二価イオン

## 1. 研究開始当初の背景

海洋環境を保全しつつ海底エネルギー資源開発を進めるために、船舶海洋構造物の供用中構造健全性マネジメント(ISSIM)技術を確立する必要がある。船舶海洋構造物 ISSIM の最重要技術課題の一つに、腐食損傷発生後の構造健全性評価技術の高度化がある。この課題では、腐食衰耗による海水タンク壁面構造の最終強度低下の予測が必要で、その際にタンク壁面の大域的腐食衰耗空間プロフィールの高精度シミュレーションが必要になる。

## 2. 研究の目的

本研究では、このシミュレーション手法を開発するため以下の実施を計画した：(a) 地球深部探査船バラストタンクの塗膜劣化・腐食状態の長期定点観測；(b) タンク壁面の各構造部位の塗膜欠陥統計特性確率モデルの構築；(c) 塗膜性能・腐食環境の不均一性と再塗装・補修を考慮したタンク壁全体の塗膜劣化・金属腐食連成シミュレーション手法の開発；(d) 腐食モニタリング結果を用いたベイズ更新によりシミュレーション精度を向上させる手法の開発。

## 3. 研究の方法

目的(a)については、計測対象船のバラストタンクに腐食センサを設置し、2019 年度下半期から研究期間終了までの長期環境モニタリングの実施を企画した。しかし、コロナ禍のためセンサの設置・データ回収のための訪船が厳しく制限され、2021 年 6 月に装置のバッテリー切れとともに計測装置を撤収することを余儀なくされた。その後、研究期間を 1 年間延長して、コロナ収束後に計測を再開するため機材の準備を行ったが、研究期間終了まで訪船制限が緩和されず、計測再開は果たせなかった。環境モニタリングとともにタンク壁面の塗膜損傷を定期的に観察することを計画したが、短時間に足場等が不要な一部の部分の写真撮影を延べ 2 回行うことができなかつた。

目的(b)については、実船計測結果をもとに統計モデルを開発することを企画したが、コロナ禍のため実船環境シミュレーションに必要なデータを取得できなかったため、複数の塗膜欠陥を導入した大型塗装試験板の複合環境サイクル試験の結果を用いて数学モデルの構築を行った。また、著者らが開発した、塗膜下腐食の発生を検知するための鉄二価イオン感応性蛍光物質 RhoNox-1 を用いた塗膜下アノード形成の検出手法を高度化し、電気化学計測により蛍光発光がアノード生成で生じていることを証明するとともに、蛍光発光のスペクトロイメージングによりアノードの発生・成長の時間空間変化を直接計測することを試みた。

目的(c)については、並列化等により既存セルオートマトンプログラムの大幅に高速化し、大寸パネルの塗膜下腐食シミュレーションの実現を図った。当初は実船モニタリングによる開発プログラムの検証を企画したが、コロナ禍のため実現できなかったため複数スクライプ付大型塗装試験板の腐食試験結果による検証を行った。

目的(d)については、既往研究で試行錯誤的に決定していたセルオートマトンパラメタを塗装試験板の腐食試験結果から論理的に決定する手法の開発を試みた。さらに、船級協会で使用されている腐食モデルの計算パラメタ推定法の開発も行った。

## 4. 研究成果

### (1) 大領域の塗膜下腐食シミュレーション手法の開発

空間共分散構造を持つ非正規乱数場生成法を開発し、塗膜下腐食セルオートマトン CellA<sup>9)</sup>に共分散構造を持つ非正規乱数場を解析する機能を付加した。また、CellA のセル状態更新計算を並列化するとともに、腐食ピット包絡計算に部分領域法と並列化を適用し、セル状態図の常時画面描画を抑制することによって CellA 解析の高速化を図った。高速化 CellA プログラムを用いて、2 スクライプ試験板の塗膜下腐食挙動を計算し、実験で観察された非対称な表面形状の発生確率を評価した。その結果、以下の知見を得た。

i) セル状態更新を並列化し、腐食ピット包絡計算に並列化と部分領域法を適用し、セル状態の常時画面表示を抑制することにより、計算時間を従来の約 1/10 以下（500×500 セル，24CPU コア計算機使用時）に短縮できた。また、計算ジョブを複数同時に投入してバックグラウンドで実行できるようになった。

ii) 対数正規乱数場を、指定された範囲を示す球状共分散関数で生成する方法を示した(Fig. 1.1)。解析領域で値が高低に 2 分されるように乱数を生成するためには、領域サイズの約 1/2 の共分散レンジが必要であることがわかった。

iii) 共分散構造を考慮した CellA 解析を行うと、複数スクライプ試験板腐食試験で計測された腐食断面非対称性が発生することで、計算パラメタの仮説が棄却されなくなった。

以上により、大寸パネルの腐食したシミュレーションを実施するための基盤が確立できた。

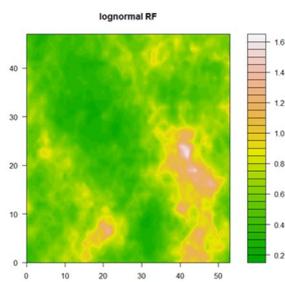


Fig. 1.1 Lognormal random field with covariance structure.

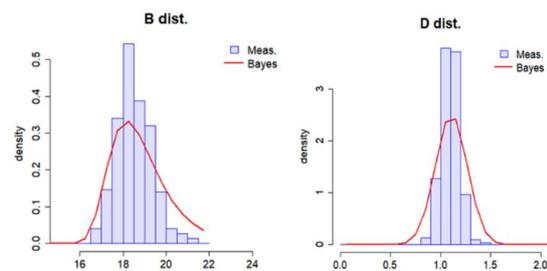


Fig. 2.1 Comparison of the frequency distribution of pseudo-observation value and the probability distribution obtained by Bayesian inference.

## (2) Bayes 推論による塗膜下腐食計算パラメタの決定

i) スクライプ塗装鋼板の実船 WBT 暴露試験で計測される腐食溝の形状特徴量と、CellA 計算パラメタを関連付ける統計モデルの開発を行った。CellA 計算の多数回繰り返し解析の結果、腐食部表面幅  $B$  には一般化 Gamma 分布が、腐食部深さ  $D$  には正規分布が良く適合することが分かった。これらの分布母数を目的変数、CellA の計算パラメタを説明変数として応答曲面を作成し、1 次曲面にて統計モデルを構築した。

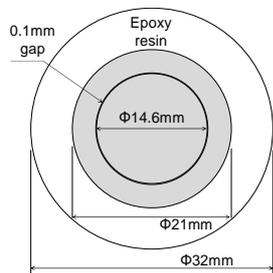
腐食溝形状の疑似観測値を用いた数値双子実験を開発した統計モデルに基づき実施し、MCMC 解析から CellA 計算パラメタの Bayes 推定を行った。その結果、本報で開発した統計モデルが疑似観測値をよく再現できることを確認した(Fig. 2.1)。

ii) IACS で採用されている確率論的腐食モデル<sup>2)</sup>のパラメタを板厚計測結果から決定できる、MCMC に基づくベイズ推定システムを開発した。開発システムの精度は、数値双子実験と船級協会の腐食データにより検証され、実際の船舶の腐食への適用性が検証された。数値双子実験の結果、塗装寿命のパラメタを別個に決定せず、全パラメタを同時に推定し、遷移時間を考慮する場合に計算結果が実験結果に最もよく適合することが分かった。

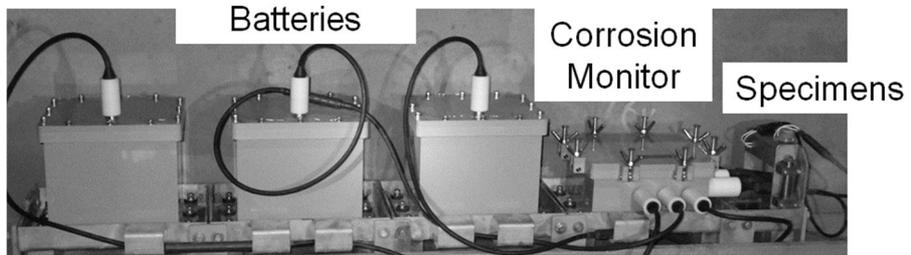
以上により、実験結果から塗膜下腐食シミュレーション計算パラメタを決定する基本技術が開発された。

## (3) 実船海水バラスト環境における無塗装鋼材の EIS 腐食モニタリング

海水バラストタンクの解析モデルを高度化するためには、タンク水位変動に伴う環境の変化が腐食速度に与える影響を解明する必要があり、その方法として電気化学インピーダンス(EIS)法が有効である。本研究では、塗装が防食性を喪失した段階を想定してバラストタンク環境の腐食評価を行った。



(a) Specimen



(b) Monitoring device

Fig. 3.1 Schematic and photo of the specimens and the monitoring device.

計測には鋼材をエポキシ樹脂埋した Fig. 3.1 (a)の同心円形センサを使用した。計測機及び蓄電池は、PVC製防水容器に封入し、センサとは水中コネクタで接続した (Fig. 3.1 (b))。計測機材を“ちきゅう”WBT内に2020年10月から2021年6月までの247日間設置し、インピーダンスと温度を連続計測した。

センサは計測中に二回没水した。初回没水中はインピーダンスはほぼ一定であった。その後センサが空气中に露出すると、数十日間の後にインピーダンスが減少して、環境温度に相関した変動が大きくなった。これは、没水中は腐食速度の変動が小さい一方で、空気露出中は時間経過による変化が大きいことを示す。2度目の没水時には最初の没水より大きいインピーダンス変化が生じた。これより、センサが露出した直後は雰囲気相対湿度は90%から水蒸気飽和程度の高い湿度を維持し、その後、タンク内気相割合の拡大と外気交換により、センサ周りの雰囲気湿度が徐々に低下していったことが推察された (Fig. 3.2)。

以上により、EIS法によるバラストタンク内腐食モニタリングの基本技術が開発できた。また、没水/非没水期間の比率が同じタンクでも、注排水回数が大きいと腐食量が大きかった。

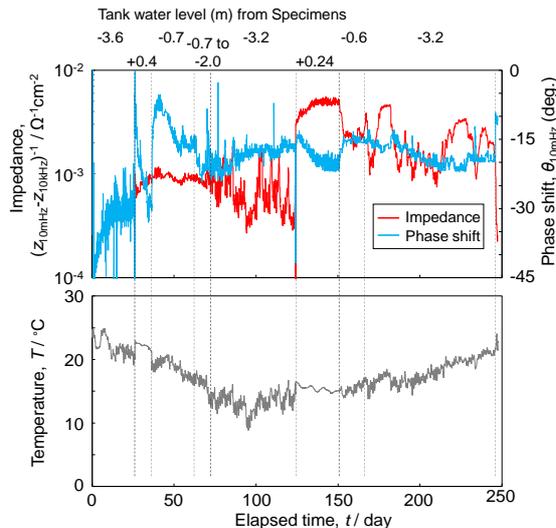


Fig. 3.2 Plot of impedance of upward specimen and temperature in the ballast tank of Chikyu during EIS monitoring.

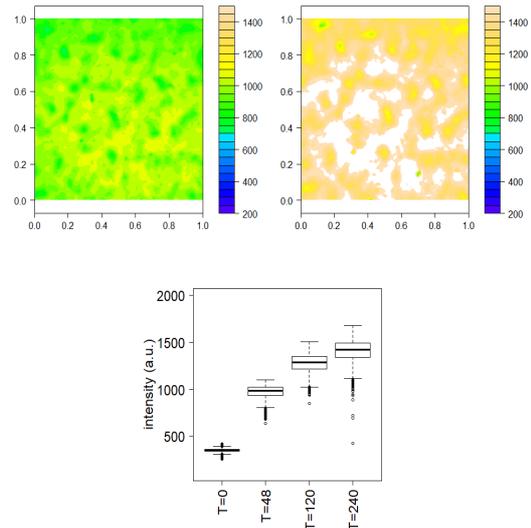


Fig. 4.1 Changes in  $I_{max}$ 's contour maps and boxplot of H035 (pure RhoNox-1) panel during the hot water immersion test.

#### (4) 鉄二価感応性蛍光物質を用いた塗膜下アノード形成過程の計測

複数の硬化剤を混合して防食性能が異なる鉄二価イオン感応性蛍光物質 RhoNox-1<sup>3)</sup>添加透明エポキシ塗料を作成した。作成した RhoNox-1 添加塗料で塗装した鋼板の腐食試験を実施した。腐食試験中に塗膜面のスペクトロ蛍光イメージング(SI)を行って、初期腐食のない塗膜下バラスト面における Fe(II)発生を検知を試みた。

本報で得られた知見は以下に要約できる。

i) SI 結果から辺長 10 画素の矩形領域毎に蛍光極大波長と極大発光強度を評価することにより、塗膜下腐食による Fe(II)の発生・増大 (= アノードの発生・拡大) の時間空間分布を推定することが可能である(Fig. 4.1) 。また、RhoNox-1 に不純物が混入すると、腐食反応とともに発光波長が短波長側にシフトする傾向がみられたが、この変化は不純物と Fe(II)および腐食生成物との反応で生じたと推測される。

ii) 蛍光計測部の腐食電位は蛍光発光の開始と同時に低下を開始し、試験終了まで低下し続けた。これは塗膜下におけるアノード領域の発生・成長を示している。塗膜面インピーダンスは試験期間を通じて変化がみられなかった。

iii) 高防食性硬化剤の混合比が多い試験板ほど、Fe(II)の発生が遅く腐食の進行が緩やかになる傾向が示された。この結果は、本報で開発した RhoNox-1 添加透明塗料を用いた蛍光計測により、塗装仕様や鋼種等の影響因子が塗膜下腐食潜伏寿命に与える影響を評価できることを示している。

#### ( 5 ) 海水タンク塗膜損傷の実船モニタリング

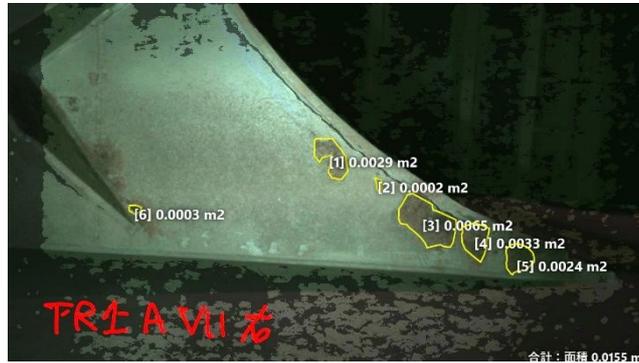


Fig. 5.1 Examples of the corrosion sites in the coated steel panels.

健全塗膜に発生する初期塗膜損傷の時間・空間変化を把握する目的で、実船タンク壁の健全塗膜中に少数の初期腐食が点在した部分を定点観測した。赤外線 3 次元カメラ搭載タブレットと距離計測アプリを使用して写真撮影に要する工数を大幅に削減した(Fig. 5.1) 。2020 年 10 月、2023 年 1 月に訪船して深度情報付写真の撮影により腐食発生位置および腐食部面積を記録し、以下の知見を得た。

i) 撮影部分の平板部腐食部数(エッジ・溶接ビード起点の腐食を除く)は延べ約 36m<sup>2</sup> の撮影範囲で 26 個と少なく、半径 50 mm 以上の腐食は特定区画に集中していた。

ii) 2 年間の腐食部寸法の増大量は大部分で 2mm を下回り、最大でも 3cm 以下であった。

iii) 腐食点数、腐食速度とも小さかったのは、コロナ禍のため本船の航海回数が極端に少なく、タンク内が高温になる期間が短かく、乾湿環境の交代頻度が少なかったことが原因であったと推察される。

#### 参考文献

- 1) 大沢ら, 日本船舶海洋工学会論文集, 23 (2016) 139-151.
- 2) IACS. 2018. Harmonised CSR-TB report, Pt,1 Ch3, Sec3.
- 3) Hirayama, T. et al., Journal of Royal Society of Chemistry, 4, pp. 1250-1256.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 0件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 林原仁志, 石渡隼也, 井上朝哉, 高田篤志, 大沢直樹, 小島隆志	4. 巻 33
2. 論文標題 海水バラストタンク乾湿交番環境における鋼材腐食速度の過渡変化評価	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 日本船舶海洋工学会講演論文集	6. 最初と最後の頁 GS12-4
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計1件（うち招待講演 0件/うち国際学会 0件）

1. 発表者名 林原仁志
2. 発表標題 海水バラストタンク乾湿交番環境における鋼材腐食速度の過渡変化評価
3. 学会等名 日本船舶海洋工学会令和3年度秋季講演会
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	北野 克和  (Kitano Yoshikazu)  (10302910)	東京農工大学・(連合)農学研究科(研究院)・准教授   (12605)	
研究分担者	井上 朝哉  (Inoue Tomoya)  (10359127)	国立研究開発法人海洋研究開発機構・研究プラットフォーム 運用開発部門・主任研究員   (82706)	
研究分担者	林原 仁志  (Hayashibara Hitoshi)  (20511588)	国立研究開発法人海上・港湾・航空技術研究所・その他部局 等・研究員   (82627)	

6. 研究組織（つづき）

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	石渡 隼也  (Ishiwata Junya)  (60834645)	国立研究開発法人海洋研究開発機構・研究プラットフォーム 運用開発部門・技術主任   (82706)	
研究分担者	小島 隆志  (Kojima Ryuji)  (70392694)	国立研究開発法人海上・港湾・航空技術研究所・その他部局 等・研究員   (82627)	
研究分担者	高田 篤志  (Takada Atsushi)  (90470054)	国立研究開発法人海上・港湾・航空技術研究所・その他部局 等・研究員   (82627)	

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究協力者	武内 崇晃  (Takeuchi Takaaki)	大阪大学・工学研究科・助教   (14401)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関