

Title	船舶バラストタンクの塗膜劣化・腐食減耗挙動とそのシミュレーション手法に関する研究
Author(s)	塩谷, 和彦
Citation	大阪大学, 2020, 博士論文
Version Type	VoR
URL	<a href="https://doi.org/10.18910/77499">https://doi.org/10.18910/77499</a>
rights	
Note	

*Osaka University Knowledge Archive : OUKA*

<https://ir.library.osaka-u.ac.jp/>

Osaka University

## 論文内容の要旨

氏名 ( 塩谷和彦 )

## 論文題名

船舶バラストタンクの塗膜劣化・腐食減耗挙動とそのシミュレーション手法に関する研究

## 論文内容の要旨

船舶バラストタンク (WBT) は海水による厳しい腐食環境にあり、著者らは、塗膜欠陥部での鋼材の腐食を抑制することで、その後の塗膜劣化、腐食減耗を抑制するWBT耐食鋼を開発した。WBT耐食鋼を適用することにより、再塗装や鋼材切替え時期の延長に寄与できると考えられる。耐食鋼開発の流れは、1) 実フィールドでの腐食現象、腐食環境、腐食機構の把握、2) 腐食試験法、耐食鋼の開発、3) 実フィールドでの効果検証、4) 長期の検証が必要な場合は腐食シミュレーション、である。従来、WBTの腐食現象、腐食環境は必ずしも明確でなく、また、WBT耐食鋼もなく、塗装鋼板の腐食シミュレーション技術も十分とは言い難い。そこで、本研究で取り組んだ。

第1章では、WBTにおける腐食問題を述べるとともに、橋梁材も含めた各種低合金耐食鋼、腐食シミュレーション技術に関する従来知見をレビューし、WBT耐食鋼、腐食シミュレーション技術の開発意義と本研究の位置付けを述べた。

第2章では、実船WBTを調査し、非没水部の塗膜劣化、腐食減耗は没水部よりも激しい事を明らかにするとともに、非没水部と没水部における塗膜劣化、腐食減耗機構を示した。

第3章では、非没水部であるWBT上甲板裏の腐食環境を測定し、温度、相対湿度、ACMセンサー出力の連動したサイクリックな変化から、上甲板裏は温度昇降に起因した乾湿繰り返しを含んだ環境であることを明らかにした。

第4章では、WBT耐食鋼の耐食性を述べた。スクライブ塗装鋼板の実験室腐食試験では耐食鋼の塗膜劣化面積は従来鋼の70%に抑制され、実船暴露では耐食鋼の塗膜劣化面積、腐食深さは、従来鋼のそれぞれ75%、71%に抑制され、これらから、耐食鋼の塗膜劣化、腐食減耗抑制効果を明確化した。耐食機構に関して、耐食鋼の錆粒子は従来鋼よりも微細であり、錆層下層での錆種 $\beta$ -FeOOHが従来鋼に比べて顕著に少なかったことから、耐食鋼では地鉄へのCl<sup>-</sup>到達量が少なくなっていることが示唆されることを述べた。

第5章では、WBT耐食鋼を実船WBTの上甲板と上甲板ロンジに適用し、就航4.8、7.3年に大規模領域の塗膜劣化量を調査した結果を示した。ロンジエッジにおける耐食鋼の塗膜劣化長さは4.8、7.3年いずれでも従来鋼の約70%に抑制され、塗膜劣化速度でも耐食鋼は従来鋼の約70%に抑制されていることを示した。このことから、耐食鋼の効果を実船船体でも実証した。また、耐食鋼のロンジエッジでの平均再塗装寿命は25年あるいはそれ以上と考えられることを述べた。

第6章では、2次元セルオートマトン塗膜損傷解析手法を開発し、川村ら(2015年)の孔食シミュレーション手法と統合して、WBT上部腐食環境下の塗装鋼板の塗膜損傷・腐食減耗一貫解析システムを開発した結果を述べた。山本ら(1998年)の塗装鋼板3段階腐食モデルに、近隣腐食誘起塗膜劣化、等の概念を導入、定式化した。開発解析システムは塗膜欠陥からの塗膜劣化拡大・合体現象を表現でき、さらに、塗膜損傷領域にピットを逐次生成させ、鋼材の腐食形態を表現できることを示した。解析システムの有効性は4章スクライブ塗装鋼板の実験と解析結果を比較して検証した。

第7章では、WBT塗装鋼板における局所塗膜欠陥空間分布を模擬できる“スパッタリング塗膜欠陥モデル”を提案し、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結果を述べた。開発手法の有効性は、5章のロンジエッジ腐食長さ計測結果と計算結果を比較して検証した。

第8章では、塗膜下腐食形態に及ぼす無機ジンクプライマーの影響を腐食試験で調査し、ジンク塗布/無塗布試験板のセルオートマトンパラメタを同定した。ジンク無塗布試験板では、ジンク塗布試験板から $A_0$ (塗膜劣化加速率)を増加するなどの必要があったが、ジンク塗布/無塗布塗装鋼板の腐食機構から、パラメタを変化させる合理性を示した。

第9章では、実験における2本スクライブ塗装鋼板の大きな非対称性腐食表面プロファイルに対して、セルオートマトン解析パラメタの乱数場に空間共分散構造を導入する必要性について検討した。プログラムには共分散構造を持つ対数正規乱数としてパラメタを与える機能を追加した。実験/計算でのプロファイル非対称性指標 $\beta$ の再現確率を評価した結果、共分散構造の導入により実験の再現確率が10.5倍向上した。このことから、塗膜性能、腐食環境の一様性が保証できない場合は、シミュレーションに空間共分散構造を導入する必要があることを述べた。

第10章では本論文を総括するとともに、今後の課題を述べた。

## 論文審査の結果の要旨及び担当者

氏 名 ( 塩 谷 和 彦 )			
	(職)	氏 名	
論文審査担当者	主 査	教授	大沢直樹
	副 査	教授	藤久保昌彦
	副 査	教授	飯島一博
	副 査	教授	川村恭己 (横浜国立大学工学研究院)

## 論文審査の結果の要旨

船舶バラスタタンク (WBT) は海水による厳しい腐食環境にあり、著者らは、塗膜欠陥部での鋼材の腐食を抑制することで、その後の塗膜劣化、腐食減耗を抑制するWBT耐食鋼を開発している。WBT耐食鋼を適用することにより、再塗装や鋼材切替え時期の延長に寄与できると考えられている。耐食鋼開発の流れは、1) 実フィールドでの腐食現象、腐食環境、腐食機構の把握、2) 腐食試験法、耐食鋼の開発、3) 実フィールドでの効果検証、4) 長期の検証が必要な場合は腐食シミュレーション、である。従来、WBTの腐食現象、腐食環境は必ずしも明確でなく、また、WBT耐食鋼もなく、塗装鋼板の腐食シミュレーション技術も十分とは言い難い。そこで、本研究で取り組んでいる。

第1章では、WBTにおける腐食問題を述べるとともに、橋梁材も含めた各種低合金耐食鋼、腐食シミュレーション技術に関する従来知見をレビューし、WBT耐食鋼、腐食シミュレーション技術の開発意義と本研究の位置付けを述べている。

第2章では、実船WBTを調査し、非没水部の塗膜劣化、腐食減耗は没水部よりも激しい事を明らかにするとともに、非没水部と没水部における塗膜劣化、腐食減耗機構を示している。

第3章では、非没水部であるWBT上甲板裏の腐食環境を測定し、温度、相対湿度、ACMセンサー出力の連動したサイクリックな変化から、上甲板裏は温度昇降に起因した乾湿繰り返しを含んだ環境であることを明らかにしている。

第4章では、WBT耐食鋼の耐食性を述べている。スクライブ塗装鋼板の実験室腐食試験では耐食鋼の塗膜劣化面積は従来鋼の70%に抑制され、実船暴露では耐食鋼の塗膜劣化面積、腐食深さは、従来鋼のそれぞれ75%、71%に抑制され、これらから、耐食鋼の塗膜劣化、腐食減耗抑制効果を明確化している。耐食機構に関して、耐食鋼の錆粒子は従来鋼よりも微細であり、錆層下層での錆種 $\beta$ -FeOOHが従来鋼に比べて顕著に少なかったことから、耐食鋼では地鉄へのCl<sup>-</sup>到達量が少なくなっていることが示唆されることを述べている。

第5章では、WBT耐食鋼を実船WBTの上甲板と上甲板ロンジに適用し、就航4.8、7.3年に大規模領域の塗膜劣化量を調査した結果を示している。ロンジエッジにおける耐食鋼の塗膜劣化長さは4.8、7.3年いずれでも従来鋼の約70%に抑制され、塗膜劣化速度でも耐食鋼は従来鋼の約70%に抑制されていることを示している。このことから、耐食鋼の効果を実船船体でも実証している。また、耐食鋼のロンジエッジでの平均再塗装寿命は25年あるいはそれ以上と考えられることを述べている。

第6章では、2次元セルオートマトン塗膜損傷解析手法を開発し、川村ら(2015年)の孔食シミュレーション手法と統合して、WBT上部腐食環境下の塗装鋼板の塗膜損傷・腐食減耗一貫解析システムを開発した結果を述べている。山本ら(1998年)の塗装鋼板3段階腐食モデルに、近隣腐食誘起塗膜劣化、等の概念を導入、定式化している。開発解析システムは塗膜欠陥からの塗膜劣化拡大・合体现象を表現でき、さらに、塗膜損傷領域にピットを逐次生成させ、鋼材の腐食形態を表現できることを示している。解析システムの有効性は4章スクライブ塗装鋼板の実験と解析結果を比較して検証している。

第7章では、WBT塗装鋼板における局所塗膜欠陥空間分布を模擬できる“スパッタリング塗膜欠陥モデル”を提案し、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結果を述べている。開発手法の有効性は、5章のロンジエッジ腐食長さ計測結果と計算結果を比較して検証している。

第8章では、塗膜下腐食形態に及ぼす無機ジンクプライマーの影響を腐食試験で調査し、ジンク塗布/無塗布試験板のセルオートマトンパラメタを同定している。ジンク無塗布試験板では、ジンク塗布試験板から $k_0$ （塗膜劣化加速率）を増加するなどの必要があったが、ジンク塗布/無塗布塗装鋼板の腐食機構から、パラメタを変化させる合理性を示している。

第9章では、実験における2本スクライブ塗装鋼板の大きな非対称性腐食表面プロファイルに対して、セルオートマトン解析パラメタの乱数場に空間共分散構造を導入する必要性について検討している。プログラムには共分散構造を持つ対数正規乱数としてパラメタを与える機能を追加している。実験/計算でのプロファイル非対称性指標 $\beta$ の再現確率を評価した結果、共分散構造の導入により実験の再現確率が10.5倍向上している。このことから、塗膜性能、腐食環境の一様性が保証できない場合は、シミュレーションに空間共分散構造を導入する必要があることを述べている。

第10章では本論文を総括するとともに、今後の課題を述べている。

以上のように、本論文は、バラストタンク用耐食鋼を開発してその耐食性向上メカニズムを解明するとともに、塗膜下腐食・金属腐食セルオートマトンを開発して、塗装鋼板の長期塗装劣化・腐食挙動の数値予測を始めて可能にしている。これらは船舶海洋構造物の維持管理の合理化と経年構造健全性の向上に大きく寄与する成果である。

よって本論文は博士論文として価値あるものと認める。