

独立行政法人港湾空港技術研究所

港湾空港技術研究所 報告

REPORT OF
THE PORT AND AIRPORT RESEARCH
INSTITUTE

Vol.48 No.2 June 2009

NAGASE, YOKOSUKA, JAPAN

INDEPENDENT ADMINISTRATIVE INSTITUTION,
PORT AND AIRPORT RESEARCH INSTITUTE

港湾空港技術研究所報告 (REPORT OF PARI)

第 48 卷 第 2 号 (Vol.48, No.2), 2009年6月 (June 2009)

目 次 (CONTENTS)

棧橋のライフサイクルマネジメントシステムの構築に関する研究加藤 絵万・岩波 光保・横田 弘3 (Development of Life Cycle Management System for Open-type WharfEma KATO・Mitsuyasu IWANAMI・Hiroshi YOKOTA)
潮流と海浜流による砂と凝集性土砂の底質輸送と干潟の地形変化に関する 3次元数値モデルの開発と現地適用鶴崎 賢一・栗山 善昭37 (Development of the Three-dimensional Numerical Model of Sediment Transports and Topographic Changes of Intertidal Flats due to Sands and Cohesive Sediments Generated by Tidal Currents and Wave-induced Currents and an Application to the Field.Ken-ichi UZAKI・Yoshiaki KURIYAMA)
関西国際空港海底粘土の長期圧密挙動に関するアイソタックモデルによる評価渡部要一・田中政典・佐々真志・森川嘉之63 (Evaluation of Strain Rate Effect with Isotache Model on Long-Term Consolidation of the Clay Deposits at Kansai International AirportYoichi WATABE・Masanori TANAKA・Shinji SASSA・Yoshiyuki MORIKAWA)
分割型圧密試験によって評価した関西国際空港海底粘土の圧密挙動に見られる層厚の影響渡部要一・田中政典・佐々真志・江村 剛83 (Thickness Effects on Long-Term Consolidation Behavior of Osaka Bay ClaysYoichi WATABE・Masanori TANAKA・Shinji SASSA・Tsuyoshi EMURA)
東京国際空港D滑走路の事前海底地盤調査結果に関する一考察渡部要一・田中政典・佐々真志・野口孝俊・宮田正史 ...103 (A Study of the Geotechnical Investigation Results at the Planning Site of the D-Runway of the Tokyo International Airport Yoichi WATABE・Masanori TANAKA・Shinji SASSA・Takatoshi NOGUCHI・Masafumi MIYATA)
信頼性設計に基づく性能設計実現に向けた新しい地盤定数設定法の提案渡部要一・田中政典・佐々真志・菊池喜昭 ...123 (New Determination Method of Soil Parameters for Performance Based DesignYoichi WATABE・Masanori TANAKA・Shinji SASSA・Yoshiaki KIKUCHI)
沿岸域に用いた気泡混合処理土の長期安定性確認調査渡部要一・田中政典・佐々真志 ...145 (10-Year Follow-up Study on Long-Term Properties of Air-Foam Treated Lightweight Soil Placed in Coastal AreasYoichi WATABE・Masanori TANAKA・Shinji SASSA)
海上大気中における各種防食塗装による鋼材の防食効果と塗膜の健全性評価手法審良 善和・岩波 光保・山路 徹 ...161 (Performance of corrosion prevention by painting methods in marine atmosphere and performance evaluation methods for soundness of paint layersYoshikazu AKIRA・Mitsuyasu IWANAMI・Toru YAMAJI)
任意形状スペクトルによる多方向不規則波の造波法の提案平山 克也・宮里 一郎 ...199 (Generation Method of Directional Random Waves with Arbitrary SpectrumKatsuya HIRAYAMA・Ichiro MIYAZATO)

海上大気中における各種防食塗装による鋼材の防食効果と 塗膜の健全性評価手法

審良 善和*・岩波 光保**・山路 徹***

要 旨

本研究は、港湾鋼構造物を塗装工法で防食する際に用いられる各種塗装系の長期防食効果を把握することを目的に、重防食塗装系を中心とした暴露試験を海上大気中および海水シャワー暴露場で実施し、各塗装系の防食効果および美観に関する性能評価を行った。また、塗装工法により被覆防食された港湾鋼構造物の健全性評価手法および余寿命予測手法を確立することを目的に分布定数系回路素子（CPE）を導入した新しい等価回路モデルを用いた塗膜の健全性評価手法の適用可能性について検討を行った。その結果、12年間にわたる塗装鋼板の長期暴露試験では、各種新設用および塗替え用塗装系の防食効果について評価することができた。また、塗膜の健全性評価手法として、インピーダンス測定結果を分布定数系回路素子を導入した等価回路モデルによって解析することで、健全性を想定した分布定数系回路素子（CPE）のインピーダンス値のパラメタである T_s 値および n_s 値により、塗膜の健全性の評価および余寿命を予測できる可能性があることが分かった。

キーワード：港湾鋼構造物，塗装工法，防食，健全性評価手法，暴露試験

* 地盤・構造部構造研究領域構造・材料研究チーム研究官

** 地盤・構造部構造研究領域構造・材料研究チームリーダー

*** 関西国際空港株式会社（元地盤・構造部材料研究室長心得）

〒239-0826 横須賀市長瀬3-1-1 独立行政法人港湾空港技術研究所
電話：046-844-5059 Fax：046-844-0255 e-mail：akira@pari.go.jp

Performance of corrosion prevention by painting methods in marine atmosphere and performance evaluation methods for soundness of paint layers

Yoshikazu AKIRA*

Mitsuyasu IWANAMI**

Toru YAMAJI***

Synopsis

To evaluate the corrosion prevention performance of the painting methods applied to port steel structures, the exposure test was conducted on various paint systems in the marine atmosphere and seawater shower. And, to establish the method of evaluating the residual performance and the remaining life of port steel structures with corrosion prevention by painting methods, the validity of the new equivalent circuit model by which Constant Phase Element (CPE) was added was examined. The performance of corrosion prevention by painting was evaluated from the result of the exposure test for 12 years. It was considered that the performance and the remaining life of the painting materials are predictable by the use of parameters "Ts" and "ns", which were obtained from the impedance value of CPE.

Key Words: port steel structures, painting, corrosion prevention, method of evaluating the residual performance, exposure test

* Researcher, Structural Mechanics and Materials Group, Geotechnical and Structural Engineering Department
** Head of Structural Mechanics and Materials Group, Geotechnical and Structural Engineering Department
*** Deputy Manager, Engineering Division, Construction Office, Kansai International Airport Co.,LTD
3-1-1 Nagase, Yokosuka, 239-0826 Japan
Phone : +81-46-844-5059 Fax : +81-46-844-0255 e-mail: akira@pari.go.jp

目 次

要 旨	161
1. まえがき	165
2. 各種塗装系の長期防食効果	165
2.1 概説	165
2.2 試験方法	165
2.3 結果および考察	170
2.4 まとめ	182
3. インピーダンス法による塗膜の健全性評価.....	183
3.1 概説.....	183
3.2 インピーダンス測定による塗膜の劣化度判定	183
3.3 分布定数系回路素子を導入した等価回路モデルによる健全度評価	185
3.4 まとめ	195
4. 結論	195
5. あとがき	196
謝辞	196
参考文献	196

1. まえがき

鋼管杭や鋼矢板などの港湾鋼構造物は、海洋環境下に曝されるため陸上構造物に比べ厳しい条件下にある。したがって、鋼構造物は、電気防食工法または被覆防食工法その他の防食工法によって適切に防食を行うように定められている¹⁾。また同時に、鋼構造物および防食工法を適切に維持管理しなければならない。被覆防食工法は大きく、塗装工法、有機被覆工法、無機被覆工法およびペトログラム工法に分類されるが、用いる材料および工法によって、その耐用年数は異なる。

塗装工法の歴史は、港湾鋼構造物に対する被覆防食工法の中では古く、昭和35～40年頃に油性塗料やタールエポキシ樹脂塗料などが開発され適用されるようになった。その後、用途や目的に応じた塗料が極めて多岐にわたり開発されている。これまで港湾鋼構造物に適用された防食塗装については、塗装仕様が規定され、その耐久性は過去の実績からある程度予測することができた。しかしながら、「港湾の施設の技術上の基準」の性能規定化に伴って、適用される防食工法や仕様を、環境条件、防食の範囲、設計供用期間および維持管理等を考慮して適切に決定することが求められている。また、構造物の維持管理を効率的かつ的確に実施するためには、被覆塗膜は外的要因により経年劣化するため、塗膜および鋼材の劣化診断技術を開発することは、鋼構造物の健全性評価や余寿命評価を行う上で極めて重要である。

塗装工法はその他の防食工法と比較して「塗る」という簡単な操作により施工することができるため、港湾鋼構造物の防食法として広く使用されている。特徴としては、

- 1) 大型構造物や複雑な形状にも施工が可能であり、新規、補修ともに施工は比較的容易で、安価に防食できる。
- 2) 膜厚が薄く軽量で、美装を考慮した防食ができる。
- 3) 環境条件に応じて塗料の種類や膜厚を選択でき、様々な塗装系で施工することができる。

が挙げられる²⁾。しかしながら、港湾鋼構造物のように海水の影響を受ける厳しい環境下においては、塗装系の種類によって耐用年数は数年から10数年と比較的短く、塗替え等の補修を行わない場合には、写真-1に示すように鋼材の腐食が進行してしまうため、適切な維持管理が重要な工法である。

本研究では、港湾鋼構造物に多く適用される重防食塗装系を中心として、海上大気中および海水シャワーによる乾湿繰返しの屋外暴露試験を12年間実施し、各塗装系



写真-1 塗装工法により防食した鋼管杭の劣化事例
(暴露20年, エポキシ樹脂塗装系)

の防食効果および美観に関する性能評価を行った³⁾⁴⁾⁵⁾⁶⁾。また、今後の維持管理に必要であると考えられる塗膜の健全性評価手法および余寿命評価手法の確立を目的に分布定数系回路素子を導入した新しい等価回路モデルを用いたインピーダンス法による塗膜および鋼材の健全度評価方法の妥当性について検討を試みた。

2. 各種塗装系の長期防食効果

2.1 概説

港湾鋼構造物に適用される各種防食塗装系の耐久性および防食効果について評価することを目的に1995年（平成7年）から独立行政法人港湾空港技術研究所所有（平成12年度までは港湾技術研究所）の海上大気暴露場および海水シャワー暴露場で塗装鋼板供試体を用いて暴露試験を実施した。供試体は重防食塗装系を中心として、新設用および塗替え用（補修）塗装仕様の長期耐久性を評価した。塗膜の健全性は、従来一般的に行われている外観目視調査、光沢および色差、付着力などととも、外的劣化要因である塩化物イオンの塗膜内への侵入状況をEPMAによる面分析によって評価した。ここで得られた成果は、港湾鋼構造物に塗装工法を適用した場合の維持管理計画の作成または維持管理を行う際の資料になると考えられる。

2.2 試験方法

(1) 供試体の概要

a) 新設用塗装系

供試体に用いた新設用塗装系の仕様を表-1に示す。供試体は、7種類の塗装系をブラスト処理した鋼板上に基本的にはスプレーによって塗装した。

下塗り塗料には無機ジンクリッチペイント、鉛系さび止めおよび有機ジンクリッチペイントを用いた。無機および有機ジンクリッチペイントは、高濃度に配合された

表-1 新設用塗装系の仕様

No.	下塗り		中塗り	上塗り	塗膜厚 (μm)
N1	無機ゾンクリッチペイント +ミストコート (75 μm)	エポキシ樹脂塗料下塗り (60 μm×2)	ポリウレタン樹脂 塗料用中塗り (30 μm)	ポリウレタン樹脂 塗料上塗り (25 μm)	250
N2			フッ素樹脂 塗料用中塗り (30 μm)	フッ素樹脂 塗料上塗り (25 μm)	250
N3			シリコン樹脂 塗料用中塗り (30 μm)	シリコン樹脂 塗料上塗り (25 μm)	250
N4	鉛系さび止め 1種 (35 μm×2)	—	長油性フタル酸樹脂 塗料中塗り (30 μm)	長油性フタル酸樹脂 塗料上塗り (25 μm)	125
N5		フェノール樹脂 MIO塗料 (45 μm)	塩化ゴム系塗料 中塗り (35 μm)	塩化ゴム系塗料上塗り (30 μm)	180
N6	有機ゾンクリッチ ペイント (20 μm)	超厚膜エポキシ 樹脂塗料 (2500 μm)	フッ素樹脂塗料用 中塗り (30 μm)	フッ素樹脂塗料用 上塗り (25 μm)	2575
N7	有機ゾンクリッチ ペイント (30 μm)	ガラスフレーク入りエポキシ 樹脂塗料 (500 μm×2)			1085

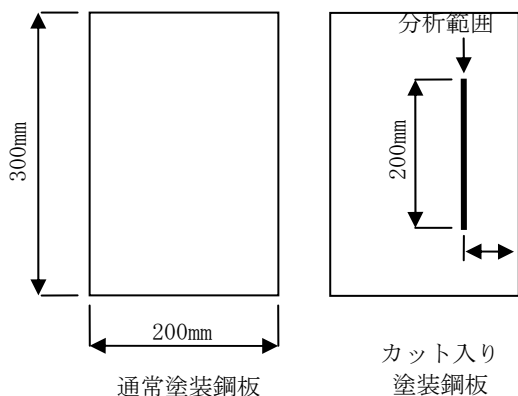


図-1 新設用塗装系供試体の形状

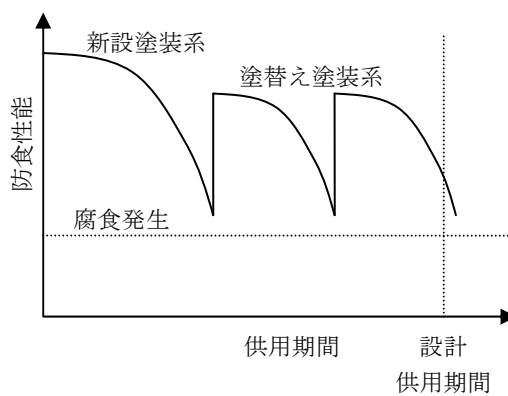


図-2 予想される防食性能低下曲線

亜鉛粉末の犠牲陽極作用と、それに基づく溶出反応による生成物の塗膜表面および内部での充填効果によって塗膜の遮断性を高め、優れた防錆性を発揮する材料である⁷⁾。

環境遮断効果を高め、酸素、水および塩化物イオンなどの外的腐食要因から鋼材表面を保護する2層目下塗りおよび中塗り塗料としては、エポキシ樹脂塗料、長油性フタル酸樹脂塗料、塩化ゴム系塗料およびガラスフレーク入りエポキシ樹脂塗料を用いた。また、耐候性を確保するための上塗り塗料としては、ポリウレタン樹脂塗料、フッ素樹脂塗料およびシリコン樹脂塗料を用いた。供試体の目標塗膜厚は塗装系によって異なり125～2,575 μmとした。

供試体の形状は、図-1に示すように、平面形状が200×300(mm)で板厚が3.2mmの鋼板を用いた。供試体は健全な通常の塗装鋼板および、塗装後、素地まで達する欠陥を予め導入したカット入り塗装鋼板の2種類を作製した。カット部は、それぞれの塗装系を被覆後、鋼材素地まで達

する疵を、試験面に200mmの長さで導入した。疵の導入方法は、N1～N5の供試体は、膜厚が250 μmと比較的薄いため、金属のこぎりを塗膜に押し当て往復させることで、塗膜にダメージを与えた。また、N6およびN7の供試体は、膜厚が厚いため、電動のミニルーター（金属の円盤の外周にダイヤモンド等の硬質成分を焼結させたカッター）を使用して塗膜に疵を生じさせた。いずれもカット部の疵の幅は1mm程度である。

新設塗装系の供試体の枚数は、いずれの塗装系も通常塗装鋼板が2枚（外観目視観察用および附着強度試験用）で、カット入り塗装鋼板が1枚とした。

b) 塗替え用塗装系

図-2に示すように塗装工法の耐用年数は、一般に数年から10数年と港湾鋼構造物の設計供用年数に比べ短いため、供用期間中に塗装工法による鋼材の防食効果は低下し、鋼材の腐食が生じる可能性がある。したがって、港

表-2 塗替え用塗装系の仕様

No.	下塗り		中塗り	上塗り	塗膜厚 (μm)
R1	有機ジンクリッチ ペイント (補修塗り)	変性エポキシ樹脂 塗料下塗り ($60\mu\text{m}\times 2$)	ポリウレタン樹脂 塗料用中塗り ($30\mu\text{m}$)	ポリウレタン樹脂 塗料上塗り ($25\mu\text{m}$)	175
R2			フッ素樹脂 塗料用中塗り ($30\mu\text{m}$)	フッ素樹脂 塗料上塗り ($25\mu\text{m}$)	175
R3			シリコン樹脂 塗料用中塗り ($30\mu\text{m}$)	シリコン樹脂 塗料上塗り ($25\mu\text{m}$)	175
R4		超厚膜エポキシ 樹脂塗料 ($300\mu\text{m}$)	フッ素樹脂 塗料用中塗り ($30\mu\text{m}$)	フッ素樹脂 塗料上塗り ($25\mu\text{m}$)	355
R5		超厚膜エポキシ 樹脂塗料 ($1000\mu\text{m}$)			1055

湾鋼構造物を塗装工法で防食させるためには、塗膜の塗替え等の補修が必要となる。したがって、塗装工法を適用した港湾鋼構造物のライフサイクル全体を考えた場合には、塗替え塗装後の鋼材の防食効果および塗膜の耐久性を把握する必要がある。そこで、塗替え時を模擬した供試体を作製し、塗替え塗装系の鋼材の防食効果について検討を行った。新設塗装系と併せて各塗装系を評価することで図-2に示すようなライフサイクル全体の維持管理計画の策定や防食性能を予測することが可能になると考えられる。

塗替え用塗装系の仕様を表-2に示す。塗替え塗装時の下塗りはいずれの塗装系も有機ジンクリッチペイントを用いた。これは、無機ジンクリッチペイントに比べ防食効果は劣るものの、鋼材との密着性が良く、動力工具による素地調整を行った場合でも鋼材に塗布することができるため、補修時の下塗り材として適していると考えられたためである。また、2層目の下塗りには変性エポキシ樹脂塗料および超厚膜樹脂塗料を重ね、中塗りおよび上塗りとして、ポリウレタン樹脂塗料、フッ素樹脂塗料およびシリコン樹脂塗料を塗布した塗装系とした。供試体の目標膜厚は175~1055 μm とした。

塗替え用塗装系の供試体の形状を図-3に示す。塗替え用塗装系は、塗替え前の旧塗膜を再現するため、まず、200×300(mm)の鋼板の中央部56×200(mm)の範囲には無機ジンクリッチペイント50 μm のみ塗布し、その他の範囲には、新設用塗装系のうちN1(無機ジンクリッチペイント(75 μm) + エポキシ樹脂塗料下塗り(60 $\mu\text{m}\times 2$) + ポリウレタン樹脂塗料中塗り(30 μm) + ポリウレタン樹脂塗料上塗り(25 μm))により塗装を施した後、飛沫帯を模擬した実海水を使用した海水シャワー暴露場で10ヶ月間暴露した。暴露試験は、1日に2回、シャワー散布と乾燥とを繰り返す乾湿繰返しの環境である。暴露の状況を写真-2に、暴露後の供試体の状況を写真-3に示

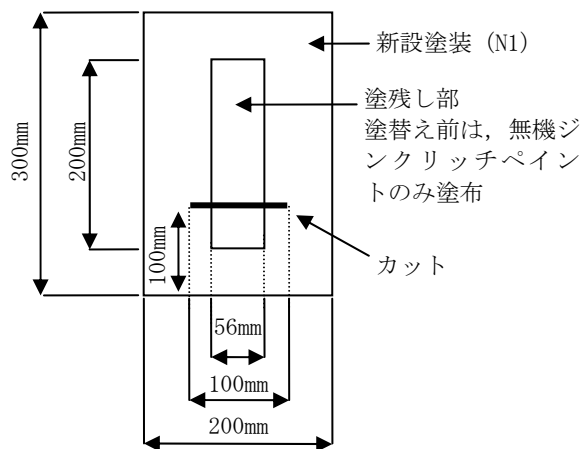


図-3 塗替え用塗装系供試体の形状



写真-2 暴露状況 (旧塗膜再現時)

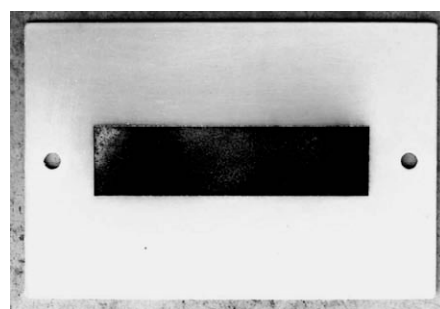


写真-3 暴露後の供試体の状況 (旧塗膜再現時)

す。供試体は水平に設置し、乾燥時も海水が滞留しやすい環境とした。したがって、暴露10ヶ月後の供試体中央部の塗残し部は全面的に腐食が進行している状態となった。

この中央部に腐食を生じさせた供試体を用いて塗替え塗装を行った。まず、錆が生じている中央部をISO 8501-1: Preparation of steel substrate before application of paints and related products. Visual assessment of surface cleanliness (1994)でSa2.5以上となるように電動工具で金属光沢が出るまで素地調整を行った。また、錆が生じていない旧塗装部は、塗替え塗料との付着を良くするために、ナイロン繊維研磨材で塗膜表面の目粗しを行った。その後、表-2に示す塗替え用塗料をはけ塗りし、塗替え用塗装系供試体とした。最後に塗替え塗装部となる供試体下端から100mmの位置に素地まで達する長さ100mmの欠陥を導入した。カット部の疵の導入方法は新設塗装系の場合と同様に、R1～R3の供試体はのこぎりの歯で、R4およびR5の供試体は電動のミニルーターで生じさせた。なお、カット部の疵の幅は0.5mm程度である。

塗替え塗装系の供試体の枚数は、いずれの塗装系も2枚とした。また、N2およびN3（有機ジンクリッチペイント-変性エポキシ樹脂塗料-耐候性系）の供試体の通常塗装鋼板に図-3のカット箇所に予め疵を導入し、その後タッチアップした供試体を作製した。ここで、タッチアップとは、塗替えなどの広範囲の補修と異なり、塗装面の小さな疵やピンホールおよび膨れなどの塗膜の小さな欠陥に対して、刷毛などで塗料を欠陥部に塗布する小規模補修の方法のことである。非常に簡単にできる補修の一つである。

(2) 暴露試験方法

暴露試験は海上大気中および飛沫帯を模擬した港湾空港技術研究所内の暴露試験場を利用し実施した。

a) 海上大気中暴露試験

JIS Z 2381（屋外暴露試験方法通則）に規定されている正南面30度での傾斜暴露とした。なお、供試体は久里浜湾の護岸から約5m離れた位置に設置した。暴露期間は、1995年11月から2007年12月までの12年間とした。ただし、塗替え用塗装系供試体は、1996年12月からの開始である。海上大気中暴露試験の状況を写真-4に示す。供試体を設置した場所の周辺には遮蔽物等はなく、飛来塩分や雨水等が直接作用する環境である。

海上大気中暴露場の環境条件は、平均温度16.6℃（最高38.55℃，最低-0.86℃），平均湿度77.9%の環境である（測定期間：2005年6月～2008年5月）。また、飛来塩分量

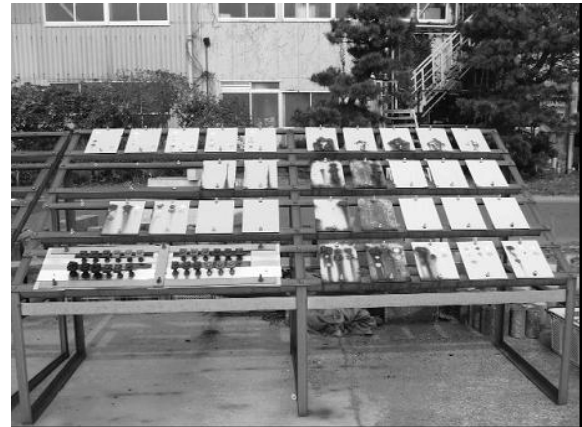


写真-4 海上大気中暴露試験の状況

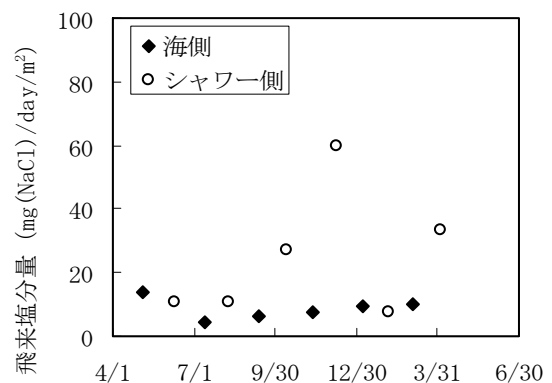


図-4 海上大気中暴露場の飛来塩分量

は、図-4に示すように捕集方向によって異なるが、年間平均で16.7 mg (NaCl) / day / m²となる（測定期間：2004年4月～2005年4月）。久里浜湾からの飛来塩分量（海側）は8.7mg (NaCl) / day / m²で、隣接する海水シャワー暴露施設からの飛来塩分量（シャワー側）はばらつきが大きいですが年平均で24.9mg (NaCl) / day / m²となる。いずれにしても、常時、飛来塩化物イオンが供試体表面に付着する環境であることから、海上大気中の環境を模擬した暴露試験となる。

b) 海水シャワー暴露試験

海水シャワー暴露試験は、久里浜湾の実海水をポンプで汲み上げ、写真-5に示すように供試体に散布させる暴露試験である。なお、飛沫帯を模擬した環境で、1日に2回、シャワー散布と乾燥とを繰り返す暴露試験である。海水散布の時間は、午前9時からおよび午後9時からの2回でそれぞれ4時間散布させた。供試体は水平に設置した。なお、暴露期間は、1995年11月から2001年12月までの6年間とした。ただし、塗替え用塗装系供試体は1996年12月からの開始である。



写真-5 海水シャワー暴露試験の状況

(3) 試験内容

暴露試験の調査項目を表-3に示す。塗膜および鋼材の変状を経時的に追跡するために、定期的に調査を行った。以下にそれぞれの試験方法を示す。

外観目視調査は、新設用および塗替え用塗装系とともに、健全部の塗膜の状態の観察と人為的に生じさせたカット部の鋼材の腐食および塗膜の膨れなどについて調査した。なお、鋼材の腐食および塗膜の膨れについては、JIS K 5600-8-3「塗料一般試験方法-第8部：塗膜劣化の評価-第3節：さびの等級」およびJIS K 5600-8-2「塗料一般試験方法-第8部：塗膜劣化の評価-第2節：膨れの等級」に準じて評価を行った。

塗膜の付着力調査は、プルオフ式の付着試験器を用いて測定した。なお、付着力試験は、JIS K5600-5-7：1999「塗料一般試験方法-第5部：塗膜の機械的性質-第7節：付着性（プルオフ法）」およびISO 4624 Paints and varnishes-Pull-off test for adhesionに準拠して行った。

色差は、JIS K5600-4-6「塗料一般試験方法-第4部：塗膜の視覚特性-第6節：測色（色差の計算）」に準拠し、供試体表面を水洗した後、塗膜の明度および色度を塗膜のL*a*b*表色系により数値化し色差（ ΔE^*ab ）を求めた。

光沢保持率は、JIS K5600-4-7「塗料一般試験方法-第4部：塗膜の視覚特性-第7節：鏡面光沢度」に準拠し、供試体表面を水洗した後、60°鏡面光沢を測定し、初期値との比をとって光沢保持率を求めた。

塩化物イオンの塗膜内部への浸透深さの測定は、供試体の一部を切り取り、EPMA（Electron Probe Micro Analysis）により塗膜断面の塩化物イオンの分布（浸透）状況を観察することで評価した。

EPMAは、加速した電子線を物質に照射（電子線による励起）されると、電子と物質との相互作用によって、特性X線、反射電子および二次電子などの各量子が発生するが、これらの各量子の特性を利用して物質の性質を調べ

表-3 調査項目

	内容
外観目視	・膨れなどの塗膜の変状調査 ・カット部の腐食および膨れ幅の測定
付着力	・プルオフ試験
色差	・ ΔE^*ab
光沢保持率	・60° 光沢値測定
塩化物イオンの浸透	・EPMA
塗膜の劣化度	・インピーダンス測定

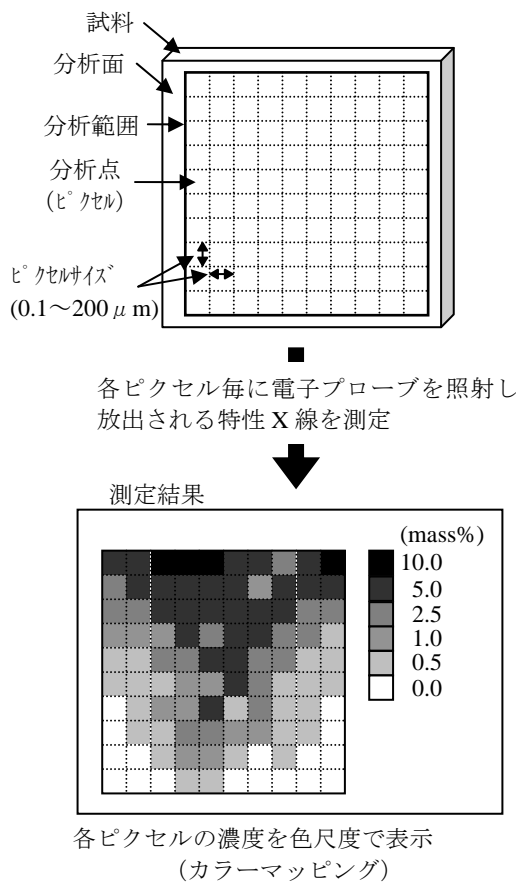


図-5 EPMAの面分析の概要

るもので、電子線が照射されている微小領域における構成元素の検出および同定と、各構成元素の比率（濃度）を分析することが可能である。また、同時に二次電子像および反射電子像によって試料の形状や組成的分布の観察を行うこともできる⁸⁾。図-5にEPMAの面分析の概要を示すが、分析面を任意の間隔でマス目状に区分した分析点（ピクセル）毎に電子プローブを照射し、放出される特性X線を測定する。得られた結果をそれぞれの構成元素毎の濃度に変換し、色尺度によって2次元的に表示し、分析面上の元素の分布を把握することができる。

2.3 結果および考察

(1) 外観目視調査

a) 新設用塗装系

新設用塗装系供試体の外観について、海上大気中暴露試験結果を写真-6に、海水シャワー暴露試験結果を写真-7に示す。いずれもカット入り塗装鋼板の結果を示すが、通常塗装鋼板の結果はカット部から離れた部分（図中の供試体の左半分の部分）と同じであった。

大気中暴露および海水シャワーともに塗装系の種類の違いにより劣化の進行度合いが異なることが分かる。また、下塗りに鉛系さび止めを使用したN4およびN5に比べて、無機または有機ジンクリッチペイントを下塗りに使用した供試体の方がカット部からの腐食の進行を抑えていることが分かる。これは、亜鉛粉末による犠牲陽極作用によるものであると考えられる。ただし、同じエポキシ樹脂系下塗り塗料を被覆している場合においても、無機ジンクリッチペイントを下塗りとした方が、防食効果は高く、海上大気中の環境下においては、およそ12年経過時においても腐食の進行はほとんど認められなかった。一方、有機ジンクリッチペイントを塗装したものは、暴露4年頃から腐食の進行が認められる。また、海水シャワー暴露条件下では、無機ジンクリッチペイントの場合、暴露2年頃からカット部の腐食が認められるが、暴露6年まではあまり大きな進展はみられない。有機ジンクリッチペイントの場合も腐食の開始は暴露1～2年頃からで無機ジンクリッチペイントと同様であるが、その後の腐食の進行は、無機ジンクリッチペイントを用いた場合は、カット部が局所的に腐食しているのに対して、有機ジンクリッチペイントを用いた場合には、カット部の腐食が進行することで、塗膜と素地の界面が剥離し、カット部と垂直な方向に腐食が進行していることが分かる。

カット部以外の健全な塗面について、JIS K 5600-8-3「塗料一般試験方法—第8部：塗膜劣化の評価—第3節

（さびの等級）」およびJIS K 5600-8-2「塗料一般試験方法—第8部：塗膜劣化の評価—第2節（膨れの等級）」に従い判定した結果を表-4に示す。エポキシ樹脂系下塗り塗料を施した供試体（N1, N2, N3, N6, N7）は腐食の発生も認められず、外観上は健全な状態を維持していた。しかしながら、長油性フタル酸樹脂系および塩化ゴム系の塗装系（N4, N5）の塗装面は腐食によって錆色を呈し、塗膜内の鋼材が腐食していると考えられる。長油性フタル酸樹脂系の腐食は塗装面全体において腐食が生じ、塩化ゴム系の場合は塗膜の微細な欠陥が生じていたと思われる箇所が局所的に腐食する傾向を示している。いずれにしても、海上大気中における長油性フタル酸樹脂系および塩化ゴム系の塗装系（N4, N5）については、鋼材の防食効果および美装性ともに、一般的に示されている塗装工法の耐用年数とほぼ同じである数年～10年程度⁹⁾であると思われる。しかしながら、現在、港湾鋼構造物など厳しい環境下に適用される塗装系として一般的となっているN1, N2, N3, N6およびN7の塗装系では、より長期の防食効果が得られていることが分かる。別途実施している港湾空港技術研究所所有の波崎海洋観測施設での長期暴露試験の結果では、写真-8に示すように、暴露24年経過時においても塗膜の外観に変状は見られず、健全な状態を維持していると考えられる。また、海水シャワーの場合には、いずれの塗装面も赤褐色に呈色した。これは、供試体を水平設置していたために海水が塗膜面上に滞留し変色したものであると考えられる。いずれにしても、カット部の腐食の進行状況およびN4, N5の塗膜の一般部の腐食の状況を海上大気中暴露試験の外観目視の結果と比較すると、いずれの場合も、海水シャワー暴露試験の方が腐食の進行が早く、飛沫帯のような海水の影響を直接受ける場合の方が海上大気中に比べ、塗膜の劣化および腐食の進行は早いと考えられる。

表-4 新設用塗装系健全部の外観判定結果（海上大気中暴露）

供試体	暴露期間（年）							
	0.5	1	2	3	4	6	8	12
N1	○	○	○	○	○	○	○	○
N2	○	○	○	○	○	○	○	○
N3	○	○	○	○	○	○	○	○
N4	○	○	○	○	○	○	さび Ri2	さび Ri5
N5	○	○	○	○	さび Ri2	さび Ri2	さび Ri2	さび Ri2
N6	○	○	○	○	○	○	○	○
N7	○	○	○	○	○	○	○	○

*JIS K 5600 に準拠して判定




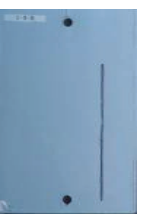


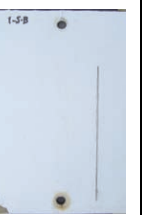



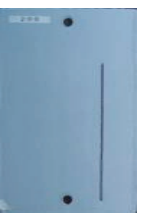

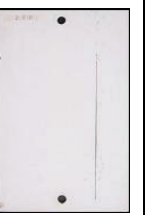






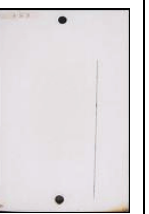
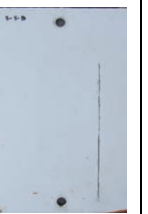





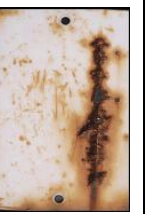












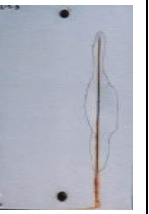
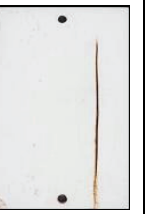








No.	暴露年数						
	1年	2年	3年	4年	6年	8年	12年
N1							
N2							
N3							
N4							
N5							
N6							
N7							

写真-6 新設塗装系供試体の外観（海上大気中暴露）














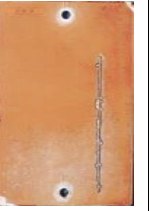
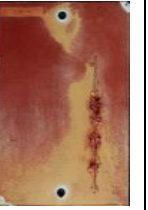



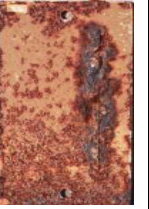









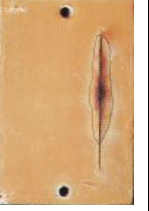






No.	暴露年数				
	1年	2年	3年	4年	6年
N1					
N2					
N3					
N4					
N5					
N6					
N7					

写真-7 新設用塗装系供試体の外観 (海水シャワー暴露)

供試体カット部から進行する腐食について、図-6に示すようにカット部と垂直に進行した膨れの幅を測定した結果の経時変化を図-7に示す。この膨れは鋼材の腐食に伴ったものであると考えられるため、腐食幅とした。供試体 (N1, N2, N3) の無機ジソク+エポキシ樹脂下塗り+上塗り系の塗装系は、海上大気中の腐食幅は3年経過時に1~2mmと測定された。非常に良好な防食状態にあると考えられる。また、海水シャワー暴露試験の結果では、1年程度は腐食の進行はみられず、その後20mm程度まで急激に腐食が進行した。したがって、この

塗装系を構造物に適用する場合には、飛来塩化物イオンの影響は受けるものの塗面は比較的乾燥状態にあるような個所においては良好な防食状態が維持できると考えられるため、維持管理時における点検の頻度なども比較的少なくすることができると考えられる。しかしながら、飛沫帯などのように特に厳しい環境下や海水や雨水等が滞留しやすい箇所においては、1年に1回の目視点検等が必要であると考えられる。

N4およびN5の塗装系（鉛系さび止め+フタル酸または塩化ゴム系）では、海上大気中および海水シャワー暴露



写真-8 波崎海洋観測施設での長期暴露試験結果 (塗装系: N6, 暴露 24 年経過)

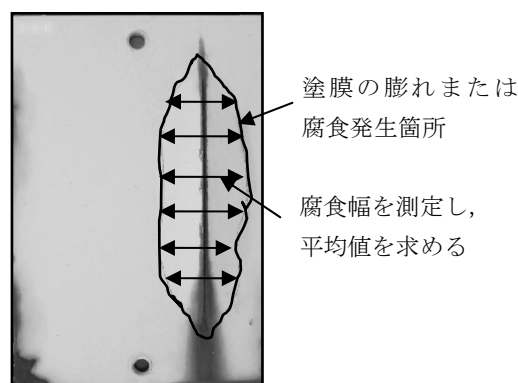


図-6 腐食幅の測定方法

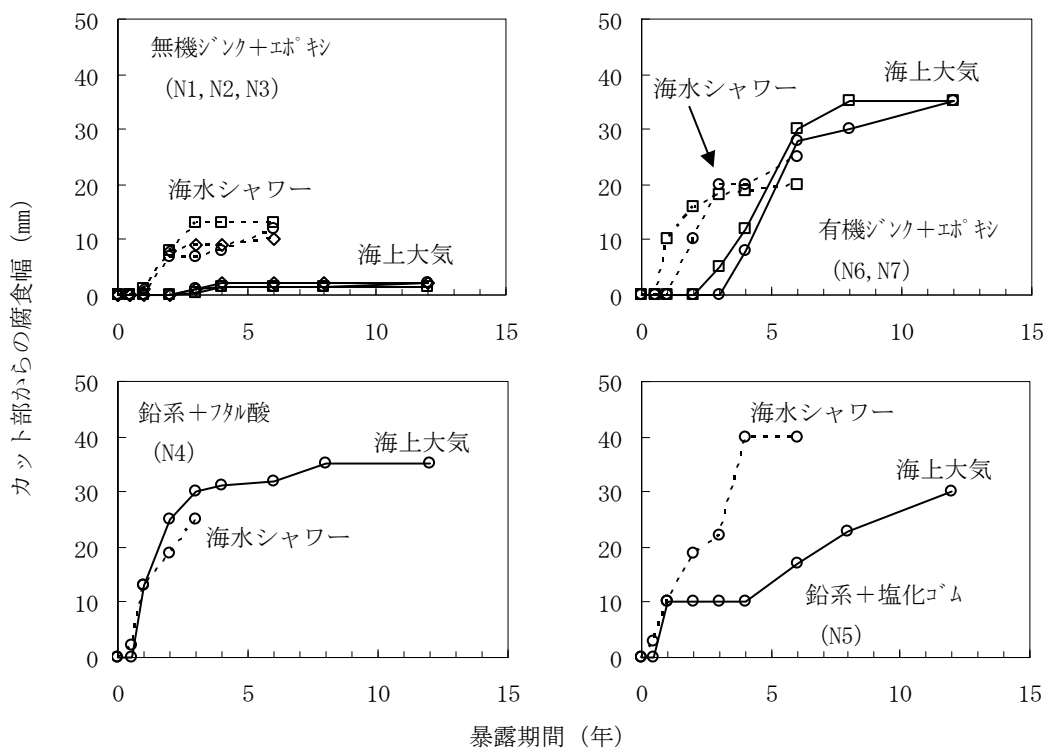


図-7 新設用塗装系のカット部の腐食幅の経時変化

ともに暴露初期から急激な腐食幅の進行がみられ、暴露12年目には、写真-9に示すように供試体裏面まで腐食し、板厚3.2mmの鋼板に貫通孔が発生していた。腐食速度で考えると少なくとも0.27mm/年となる。これは、無防食状態での腐食速度とほぼ同等¹⁰⁾と考えてよいと思われ、塗膜劣化部の補修対策は極めて重要であることが分かる。いずれにしても、この塗装系を用いる場合は、頻繁に点検を行い、対策を講じていく必要があると考えられる。

有機ジンクリッチペイント+エポキシ樹脂下塗り+上塗りの塗装系 (N6, N7) は、海上大気中で3年経過後、海水シャワー暴露で1年経過後に腐食幅が急激に大きくな

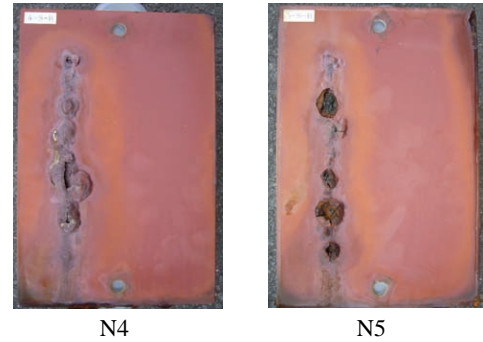


写真-9 供試体裏面の腐食の状態

No.	暴露年数					
	1年	2年	3年	5年	7年	11年
R1						
R2						
R3						
R4						
R5						

写真-10 塗替え塗装系供試体の外観 (海上大気中暴露)

っていることが分かる。したがって、本塗装系を適用する場合は、曝される環境によって異なるが1年ないし3年の間隔で点検を行う必要があると思われる。

b) 塗替え用塗装系

塗替え用塗装系供試体の外観について、海上大気中暴露試験結果を写真-10に、海水シャワー暴露試験結果を写真-11に示す。また、表-5にJIS K 5600-8-3およびJIS K 5600-8-2に準拠し、カット部以外の健全な塗装面の塗膜の劣化評価結果について示す。なお、塗膜の評価は旧塗膜に上塗りした部分（旧塗膜部）と予め腐食させた部分（塗残し部）について判定した。

海上大気中に暴露した供試体では、健全な塗膜（旧塗膜）に塗替え用塗料を上塗りした箇所はいずれも錆、膨れ等の不具合は生じておらず良好な防食効果を示していた。これは新設用塗装が健全であったと同時に塗替え用塗装を施したため、十分な防食効果が得られていたためであると考えられる。塗り残し部の塗膜は暴露7年目まではいずれの塗装系も膨れやワレなどの不具合は生じなかったが、暴露11年目において供試体（R1, R2, R3）の塗装系において密度2～3、大きさ2程度の膨れが発生した。これは、補修時（塗替え時）において、塗り残し部の発錆部分を動力工具で下地処理を行ったが、腐食が生じた




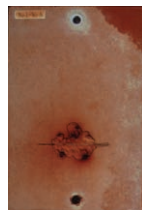

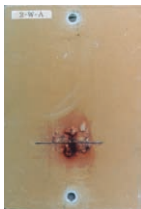
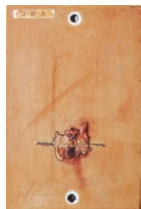







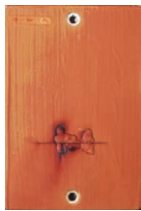





No.	暴露年数			
	1年	2年	3年	5年
R1				
R2				
R3				
R4				
R5				

写真-11 塗替え用塗装系供試体の外観（海水シャワー暴露）

表-5 塗替え用塗装系健全部の外観判定結果（海上大気中暴露）

供試体	旧塗膜部						塗残し（腐食）部					
	0.75	2	3	5	7	11	0.75	2	3	5	7	11
R1	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	膨れ密度2 大きさ2
R2	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	膨れ密度2-3 大きさ2
R3	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	膨れ密度2 大きさ2
R4	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
R5	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○

*JIS K 5600 に準拠して判定

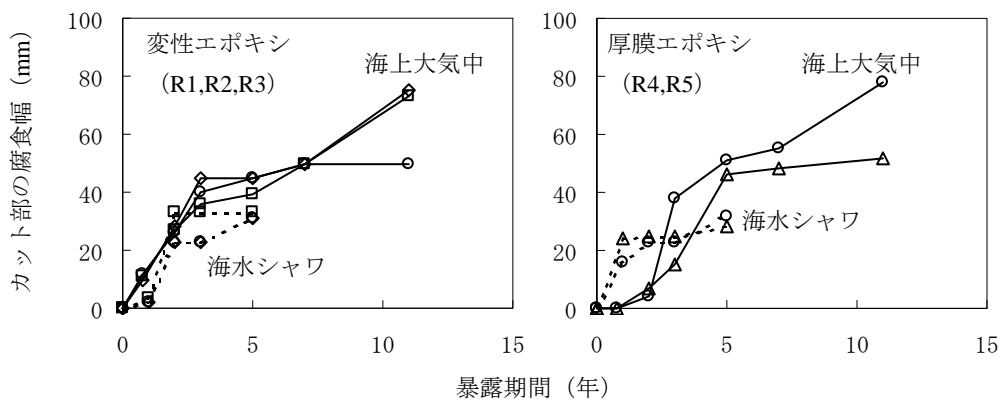


図-8 塗替え用塗装系のカット部の腐食幅の経時変化

鋼表面のケレンは非常に難しく、ケレン具が届かない微細な凹部（孔食部）の錆は除去できず残存した状態で塗替え塗装を行うため、塗装後も塗膜-鋼材界面の錆部に塩化物イオンなどの腐食因子が残留したためであると考えられる。このような中、暴露7年程度までは有機ジンクリッチペイントの防食効果によって塗膜の外観は良好であったものの、暴露11年目で劣化が顕在化したと推定される。一方、R4およびR5の供試体の塗膜の状態は暴露11年経過時も健全であった。これは、供試体R1～R3の塗装系の仕様が膜厚175 μ m程度と比較的薄膜であるのに対して、R4の塗装系が355 μ m、R5の塗装系が1055 μ mと膜厚が大きいため、塗膜の厚膜化による環境遮断効果により、供試体R1～R3に比べて塗膜による防食効果が長期間持続したためと考えられる。これらのことから、補修後（塗替え塗装後）の防食効果には下地処理が大きく影響するため念入りに処理する必要がある、もし補修時に十分な下地処理が行えないと判断される場合には膜厚を大きくすることが耐久性を向上する対策として有効であると考えられる。

カット部の腐食の進行は、海上大気中および海水シャワー暴露ともに1～3年程度で塗膜内部へ進行していることがわかる。塗膜内部の腐食の進展は、まず塗残し部の腐食幅が先に大きくなり、次いで健全部の塗膜まで達する傾向を示している。これは、カットのない箇所と同様に電動工具での下地処理の影響が考えられる。また、有機ジンクリッチペイントと無機ジンクリッチペイントとの犠牲陽極効果（防食効果）の違いも影響していると考えられる。図-8にカット部の腐食幅の経時変化を示す。比較的薄膜な塗装系である供試体R1, R2, R3においては、暴露環境にかかわらず開始時から塗膜内部に腐食が進展していることがわかる。一方、厚膜の塗装系である供試体R4およびR5は、海上大気中暴露の場合、腐食の進行を若干軽減した。これは塗膜の厚膜化による効果であると考えられる。しかしながら、いずれの塗装系も腐食幅は新設用塗装系の結果に比べ2倍程度大きく、塗膜の劣化の進行は塗替え時のほうが速いことがわかる。また、その腐食の箇所も塗替えた箇所を選択的に進行する傾向にある。このことは、港湾鋼構造物に塗装工法を適用した際

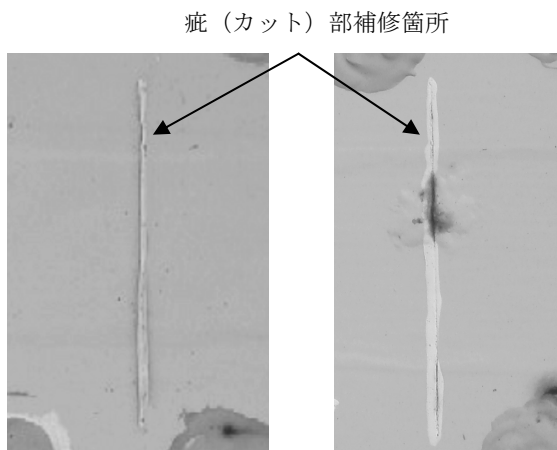


写真-12 タッチアップ部の腐食の外観

には、構造物の供用期間中にわたり、腐食が発生し塗膜の劣化が顕在化した箇所が補修を重ねても、その部分が再び先に腐食が開始してしまう可能性があり、維持管理時の点検が非常に重要であることを示している。

しかしながら、損傷または疵部分を腐食が発生する前または非常に軽微な腐食の段階でタッチアップすることによって、写真-12に示すように腐食等の劣化は抑制されていることが分かる。ここで、タッチアップとは、塗替えなどの広範囲の補修と異なり、塗装面の小さな疵やピンホールおよび膨れなどの塗膜の小さな欠陥に対して、刷毛などで塗料を欠陥部に塗布する小規模補修の方法のことである。非常に簡単に行える補修の一つである。このことは、塗膜の不具合箇所を早期に発見、補修することで腐食等の劣化を防ぐ事ができることを示唆している。ただし、旧塗膜との接着が十分でない場合などでは、塗膜界面が腐食因子の侵入経路となる。写真-13に付着強度試験を実施した箇所のタッチアップの状況を示すが、流れ錆が確認できるものや、腐食による膨れが生じてしまう可能性もあり、定期点検は非常に重要であると考えられる。

(2) 付着力試験結果

プルオフ式の付着力試験によって、塗膜の付着強度の測定を行った。ただし、塗装は塗り重ねにより施工され、また、塗膜と試験器を接着剤によって接着させるため、剥離する箇所が異なる。そこで、図-9に示すように剥離する位置を明確にして、付着強度を測定した。なお、付着強度は、鋼材表面との接着力や塗膜剥離などを判定するものであるが、国内では規格値を設定しているものではなく、一般的に1~1.5N/mm²程度であれば、港湾鋼構造物においても漂流物等の衝突などの偶発的な衝撃等が作用

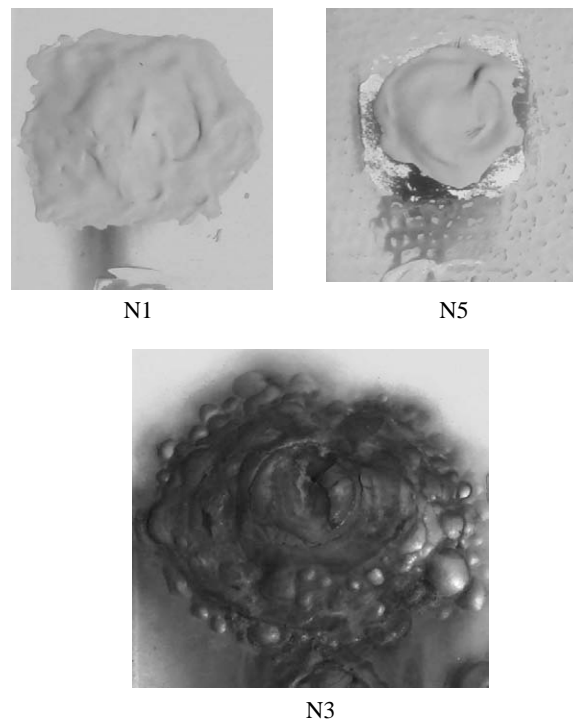


写真-13 タッチアップ部の腐食の外観
(直径2cmの円形の疵)

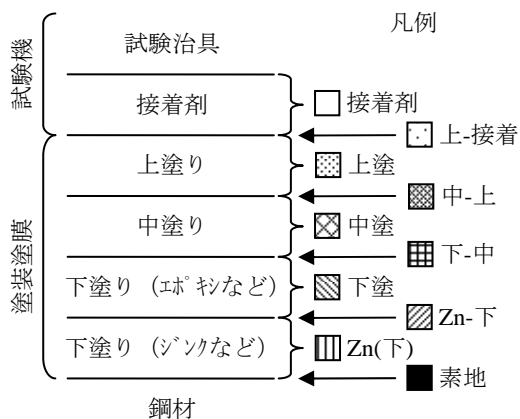


図-9 付着強度試験時の剥離位置

しない限り塗膜の剥離等の欠陥は生じないと考えられている。また、国外では、原子力向けのエポキシ樹脂塗料規格として、唯一 ANSI N5 12-1974: Protective coatings (paints) for the nuclear industry において2001b以上≒1.4N/mm²以上と規定されている。

a) 新設用塗装系

海上大気中および海水シャワー暴露試験結果を図-10および図-11に示す。なお、グラフ上の比率は試験後の剥離面において剥離した箇所(図-9)の面積比を表している。

付着強度は、いずれの塗装系も暴露初期に比べ0.5~1

年後の強度が高くなる傾向を示している。1年程度までは塗料の硬化および収縮などによって徐々に付着強度が増加すると考えられる。しかしながら、それ以降の付着強度は低下する傾向を示し、これは外的劣化要因である紫外線や水および塩化物イオンなどが影響していると思われる。しかしながら、いずれの塗装系も少なくとも2~3N/mm²程度以上の付着強度は確保されており、海水シャワー暴露試験供試体のN4のように鋼材の腐食が顕在化しない限り、付着強度は暴露12年目までは問題ないと考えられる。

剥離する箇所の違いに関しては、無機ジंकリッチペイントを使用した供試体N1、N2およびN3はほとんどの場合が無機ジंकリッチペイントで剥離が生じた。無機ジंकリッチペイントは犠牲陽極効果が非常に高いが、付着強度は若干劣ると考えられる。また、海上大気中暴露および海水シャワー暴露ともにN1およびN2の供試体において経時的に付着強度が低下する傾向も認められる。図-12に示すように、ANSIの限界値である1.4N/mm²を下回るのは、海水シャワー暴露で9年程度、海上大気中で25年程度となった。しかしながら、この付着強度の測定結果は

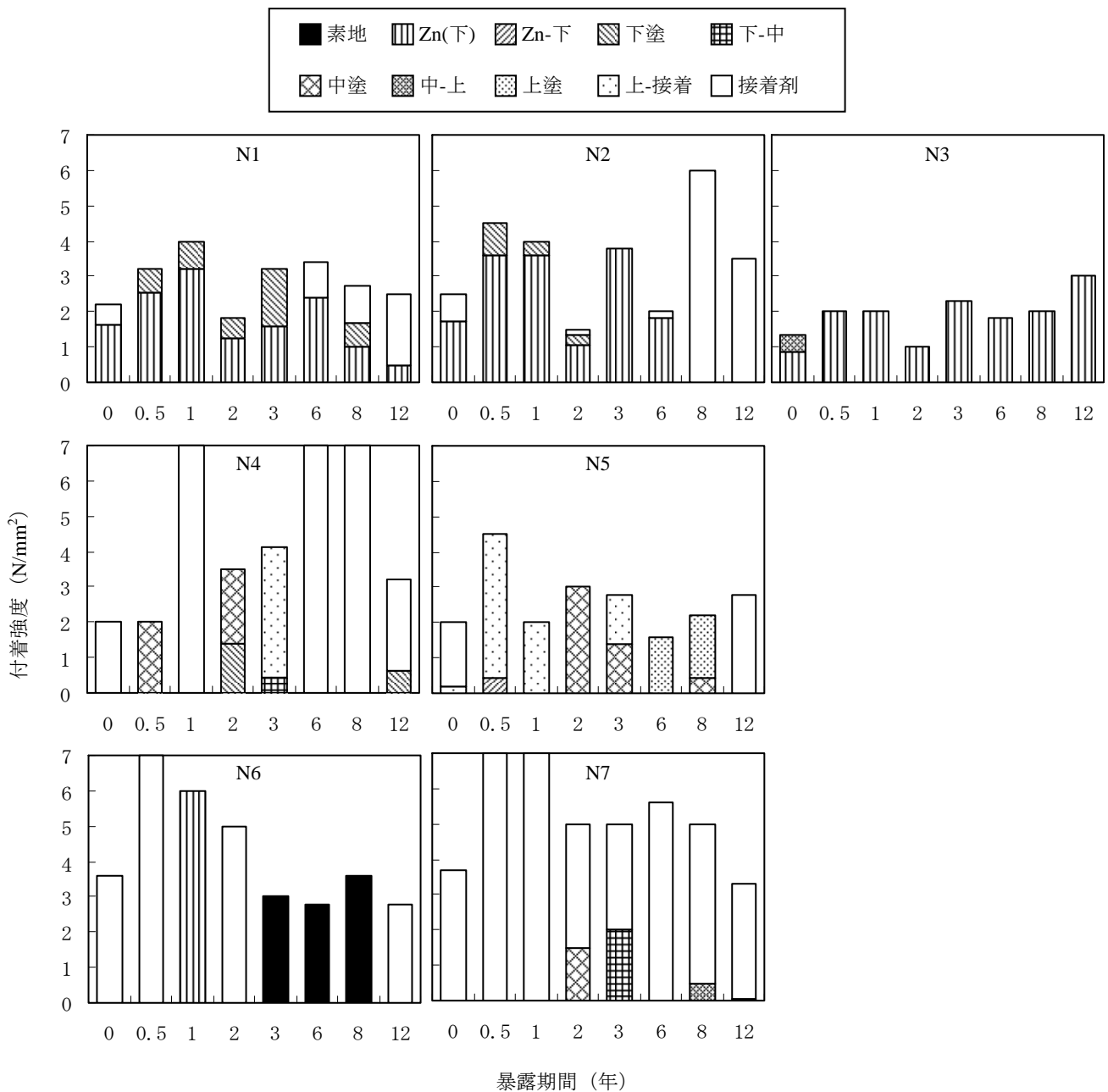


図-10 新設用塗装系の付着強度の経時変化 (海上大気中)

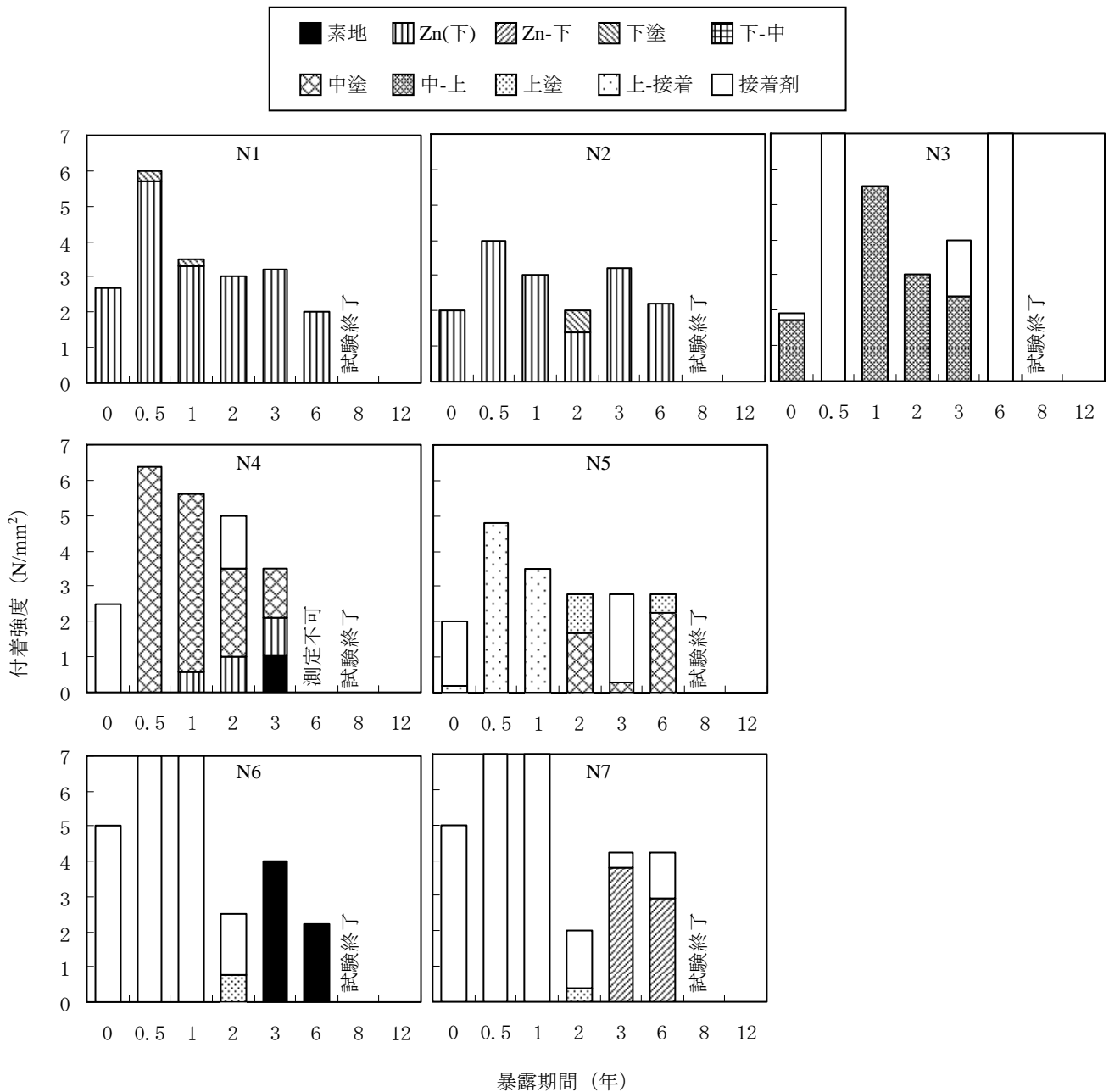


図-11 新設用塗装系の付着強度の経時変化 (海水シャワー)

ばらつきが大きいため、精度の高い将来予測を行うためには、より多くのデータや海上大気中に関しては長期のデータを収集する必要があると考えられる。

一方、有機ジンクリッチペイントを用いた供試体N6およびN7は、鋼材表面で剥離したのものもあるが、多くが接着剤で剥離した。このことから、ほとんどの結果が試験に用いた接着剤以上の付着強度を有していることになるため、付着性は高いと考えられる。しかしながら、付着強度試験結果にばらつきが大きく、N6供試体においては鋼表面で剥離しているものもあることから、塗膜-鋼材界面において、付着不良または何らかの劣化が生じてい

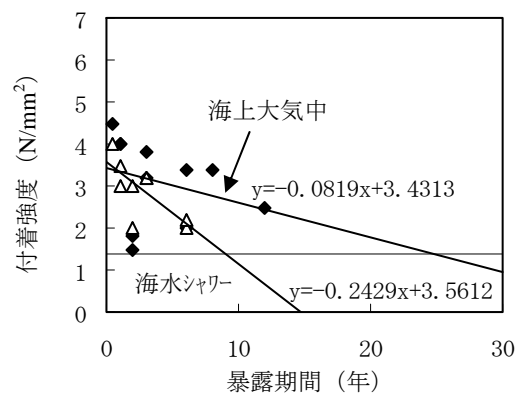


図-12 N1 および N2 の付着強度の将来予測

る可能性がある。全体のばらつきを考えると、N6（超厚膜形エポキシ樹脂塗料系）の付着強度は、安全側に考え、海上大気中暴露12年目は3N/mm²程度であると思われる。また、海水シャワー暴露の場合は、6年目の測定結果が3年目の結果の半分程度に低下していることから、鋼材界面の劣化進行が速く、10年程度で付着強度が無機ジンクリッチペイントと同程度の付着強度になる可能性がある。N7のガラスフレーク入り塗料系の場合は、鋼材界面の剥離もなく、N6に比べて高い強度を保持していることから、付着強度に関する耐久性は高いと考えられる。

いずれにしても、全ての供試体において、2N/mm²以上の付着強度を保持していることから、海上大気中暴露における12年経過時、海水シャワー暴露における6年経過時の付着強度は問題ない範囲にあると考えられる。

(3) 色差および光沢保持率

塗装で用いられる上塗り材は、紫外線による劣化に対する耐候性を向上させるだけでなく、意匠性・美粧性を向上させる材料である。

図-13に海上大気中暴露供試体の色差の経時変化を示す。なお、色差は変色の度合いを示す指標で、自動車塗装の性能では、 $\Delta E \leq 3$ （フロリダ暴露2年）と定められている¹¹⁾。いずれの供試体も暴露8年まで3以下を推移し、あまり大きな変色は認められなかった。しかし、フタル酸系塗料および塩化ゴム系塗料は非常にばらつきが大きいもの、ポリウレタン樹脂、シリコン樹脂およびフッ素樹脂系塗料の ΔE 値は1以下を推移し、非常に美粧性がよいことが分かる。

光沢保持率について、図-14に示す。なお、光沢保持率は、60°鏡面光沢度を測定し、暴露開始時の結果との割合で求めた。いずれの塗膜も時間の経過とともに光沢保持率は低下していることが分かる。特にフタル酸および塩化ゴム系塗料は急激に低下し、1~2年程度で塗膜の光沢はほとんど保持していない状況となっている。一方、フッ素、シリコンおよびポリウレタン樹脂に関しては、時間の経過とともに単調減少しているが、その割合はフタル酸および塩化ゴム系塗料より緩やかである。フッ素樹脂塗料の暴露初期の光沢保持率は高く、シリコンおよびポリウレタン樹脂は同程度であった。しかしながら、暴露5年目以降の光沢保持率にほとんど差はみられなかった。

(4) 塗膜内部の塩化物イオン分布

塗装工法における塗膜下での鋼材の腐食は、塗膜中に拡散浸透した塩化物イオンなどの腐食誘発物質が鋼材に

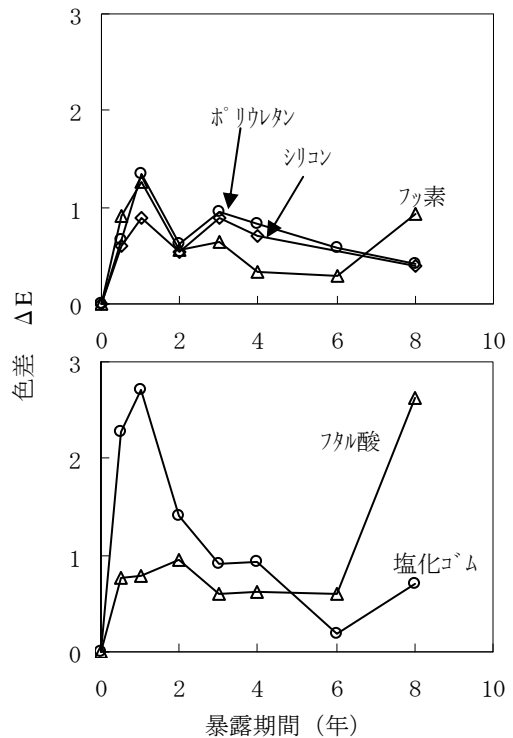


図-13 色差の経時変化（海上大気中）

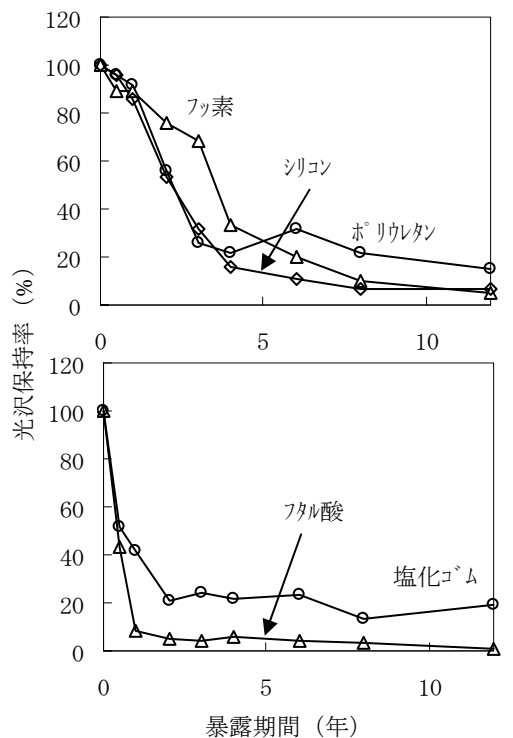


図-14 光沢保持率の経時変化（海上大気中）

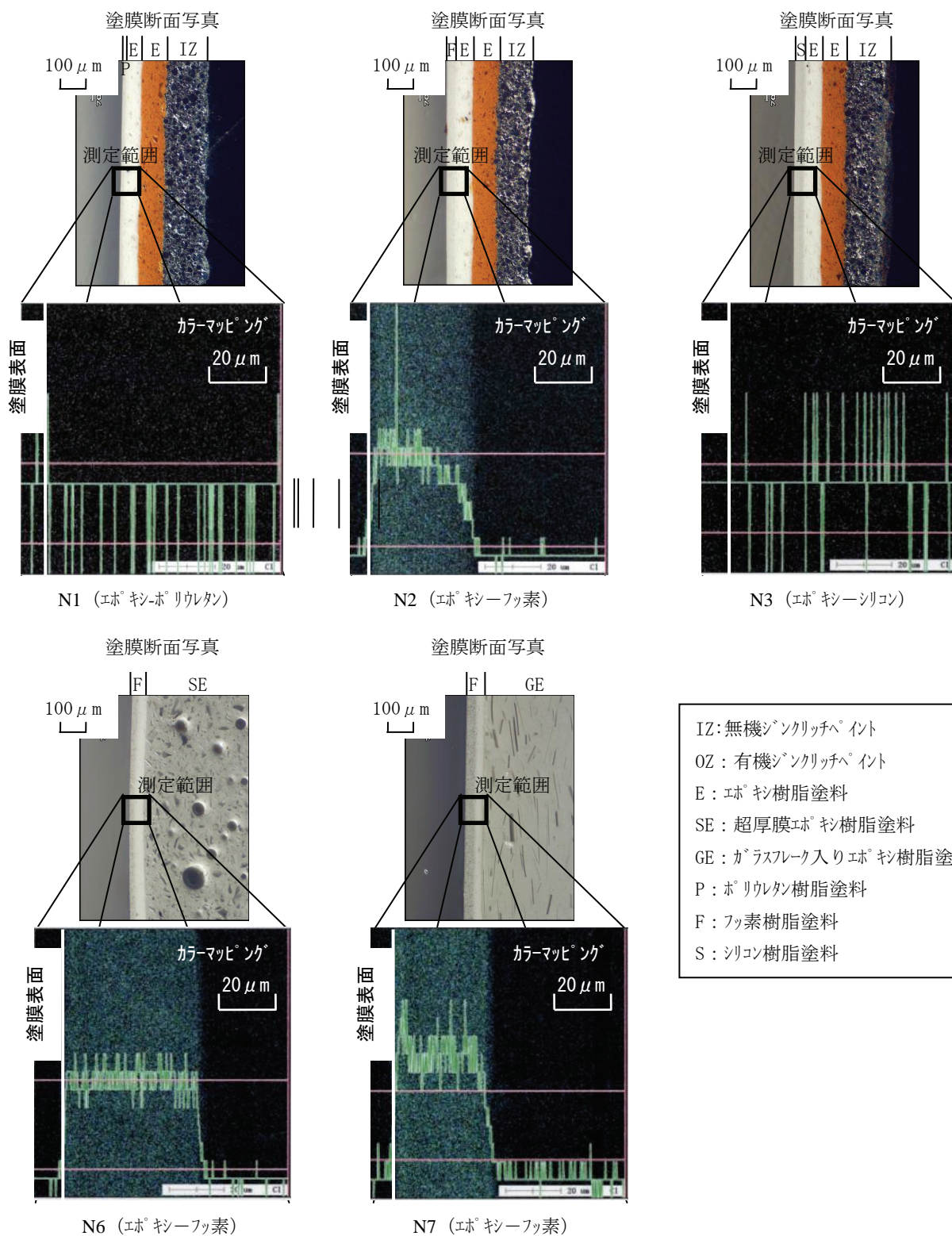


図-15 新設用塗装系の EPMA 像 (海上大気中)

到達することで、金属表面で腐食反応を開始する。また、水などの浸透物質による浸透圧により、局部的に塗膜が剥離し、腐食物質が滞留し腐食はさらに進む。また、塗膜は時間の経過とともに徐々に劣化するため、樹脂が分解して腐食誘発物質の拡散浸透は促進され、腐食反応は一層進行する⁷⁾。そこで、塗膜内の塩化物イオンを微視的に観察し塗膜の状態を評価した。

図-15に新設用塗装系暴露12年目の供試体のEPMA分析結果(C1)のカラーマッピング像を示す。なお、図には塗膜断面の拡大写真を併せて示す。いずれのカラーマッピングもおおよそ100×100(μm)の範囲の塩素分布で、上塗りから中塗りにかけての断面となり、青緑色で示された部分が塩化物イオンの存在する箇所である。これによると、上塗り材がポリウレタンおよびシリコン樹脂の場合は塩化物イオンが塗膜内部に全く浸透していない。また、上塗りにフッ素樹脂を用いた場合は、一様に上塗り部分に塩化物イオンが存在していることが分かる。これは、3フッ化のフッ素樹脂は塩素を多く含むため、樹脂中の塩素が検出されたものと考えられる。カラーマッピングに示された緑線の分布は塗膜の深さ毎の濃度を2次元の分布として表したものであるが、N2およびN7供試体の塩素分布は、塗膜表面から侵入したと思われる塩化物イオンが塗膜内部に拡散していると思われる分布形状となった。ただし、暴露12年目において、その浸透深さは最大でも20μm程度であり、耐久性上問題ないと考えられる。

したがって、今回測定した塗膜断面のように欠陥が無く適切に施工された塗膜は、塩化物イオンの浸透を遮断し、鋼材の防食効果や塗膜の耐久性は非常に高いと考えられる。このことは、塗装工法を適用する場合は、新設時の施工が鋼材の防食効果や耐久性に大きな影響を及ぼすことになり、施工時の不具合が供用期間中の維持管理に悪影響を及ぼすことになることを示している。したがって、塗装時の膜厚管理や塗り斑、出来形およびピンホールなどの確認が重要であると考えられる。

2.4 まとめ

本章では、海上大気環境下および海水シャワー暴露環境下における12年間の暴露試験結果から各種防食塗装系の耐久性および防食効果について検討した。結果を取りまとめて以下に示す。

1) 新設用塗装系に関して、無機ジンクリッチペイントを下塗りとした塗装系は、海上大気中での暴露の結果、暴露12年時で塗膜健全部に錆や膨れ等の異常が認められず、人為的に疵を生じさせたカット部においても疵部から生じる錆などによる膨れの幅は2mm以下程度

と小さく、非常に良好な防食効果を示した。無機ジンクリッチペイントを用いることで、港湾鋼構造物のような厳しい環境下においても、より有効な重防食塗装系塗装工法になると考えられる。

- 2) 塗替え用塗装系に関して、塗替え時の腐食部の下地処理が不十分であると塗膜の寿命が短くなると考えられる。また、塗膜に疵が生じた場合には、新設塗装に比べ、損傷部からの腐食の進行が非常に速いため、維持管理時には点検等を頻繁に行う必要があると考えられる。塗替え塗装の鋼材の防食効果および耐久性を向上させるためには、超厚膜型エポキシ樹脂塗料による塗装系が効果的であると考えられる。
- 3) 耐候性および美粧性に関しては、フッ素樹脂塗料を用いたものが、その他塗料よりも長く性能を保持していた。次いで、ポリウレタンおよびシリコン樹脂塗料となる。ただし、今回の試験ではあまり大きな差はなかった。
- 4) 塗装工法を補修(塗替え)する場合には、新設塗膜の無機ジンクリッチペイントが劣化し、鋼材の腐食が生じる前に塗替え等の対策を行うことで、長期の防食効果が期待できると考えられる。また、重防食塗装の場合は不具合の生じていない健全な塗膜の遮塩性は非常に高い。したがって、塗装工法を適用した港湾鋼構造物の維持管理は、点検を最適な頻度で行うことで、不具合箇所を早期に発見でき、その都度補修を行うことで防食塗膜の寿命延長、ひいては施設の長寿命化が図れると考えられる。

3. インピーダンス法による塗膜の健全性評価

3.1 概説

塗装は、構造物の形状にこだわらず容易に施工でき、また塗替えができる利点を有しているため、多くの鋼構造物に適用されているが、塗装工法の点検診断手法は未だ確立された手法はなく、目視による劣化度判定¹²⁾に頼らざるをえないのが現状である。したがって、供用期間中には事後保全的な維持管理となり、供用中は構造物の保有性能を低下させながらの維持管理となる。港湾鋼構造物は、厳しい環境に曝されるため、写真-9および写真-13で示したような集中腐食が生じる可能性が高く、残存耐力を評価することも非常に難しい。また、2.で示したように、一度腐食が発生した鋼材に塗替えを行った場合には塗膜の寿命は短くなり、逆に適切な時期に塗替えまたは補修を行った場合には塗膜の寿命および鋼材の防食効果は高くなることは明らかである。このことから、より安全で安心な社会基盤施設を合理的に維持管理していくためには、戦略的な手法が必要である。塗装工法で施される塗膜は外的要因により経年劣化するため、塗膜および鋼材の劣化診断技術は、塗装された鋼構造物の健全性評価および塗膜の余寿命評価を行う上で極めて重要である。しかしながら、健全性や余寿命を評価できる手法は確立されておらず、塗膜の塗替えの時期などの判定は、多くの場合、技術者または管理者の経験によって判断される場合が多いのが現状である。そこで、本章では、塗膜の余寿命および健全性評価手法として、インピーダンス法に着目し、手法の妥当性について検討を行った。

従来から塗膜の劣化挙動を評価する手法としては、電気化学インピーダンスを測定する方法が有効であるとされてきた。しかしながら、昨今の急速な技術革新に伴い、塗料の材料性能も向上し、200MΩを超える直流抵抗値を有する塗料が使用されるようになった。このため、従来の集中定数系回路素子に基づく測定では、塗膜の劣化挙動や健全性を十分に評価できない可能性がある。そこで、まずは、従来から用いられている手法の妥当性を確認するために、2.で示した暴露供試体を用いて、200~1000Hzの周波数のインピーダンス挙動から推定される塗膜の劣化度と暴露試験結果(外観目視結果)を経時的に比較し、従来の方法による劣化診断方法としての妥当性について検討した。また、新たに岡崎、伊藤らによって提案されている分布定数系回路素子を導入した新しい等価回路モデルを用いた塗膜の余寿命評価¹³⁾¹⁴⁾による劣化診断手法の妥当性について検討を試みた。

3.2 インピーダンス測定による塗膜の劣化度判定

水門鉄管塗替指針(昭和44年土木保守関係課長会議、電気事業連合会)では、0.2~2kHzの周波数を用いてインピーダンスを測定し、図-16および表-6に従って塗膜の劣化の状態を判定する方法を提案している。ここでは、2.の暴露試験供試体を用いて、インピーダンスを測定した結果から求めた劣化度と暴露試験結果を比較し、本評価手法の妥当性について検討する。

図-17に周波数1000Hz、500Hzおよび200Hzに対するインピーダンス値の経時変化を示す。また、表-7に劣化度判定結果を示す。これらによれば、比較的安定したデータが得られていると考えられる。しかし、超厚膜型エポキ

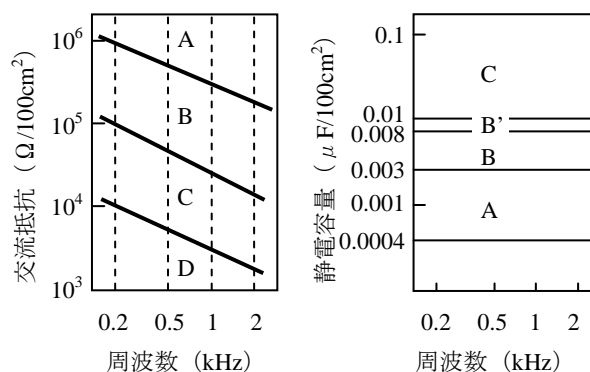


図-16 インピーダンス値の判定方法

表-6 劣化度判定方法

劣化度	インピーダンス値		塗膜の状態
	交流抵抗	静電容量	
I	A・B	A	異常なし
II	C	B	塗装が完全に固く付着し上塗りだけが劣化している
III	C	B'	塗膜に発錆・ふくれなどを生じている。
IV	D	C	塗膜の劣化著しい。

表-7 劣化度判定結果

供試体	暴露年数(年)					
	0	2	3	6	8	12
N1	I	I	II	I	I	I
N2	I	I	II	I	I	I
N3	I	I	I	I	I	I
N4	I	I	II	I	IV	—
N5	I	I	II	I	I	I
N6	I	I	I	I	I	I
N7	I	I	I	I	I	I

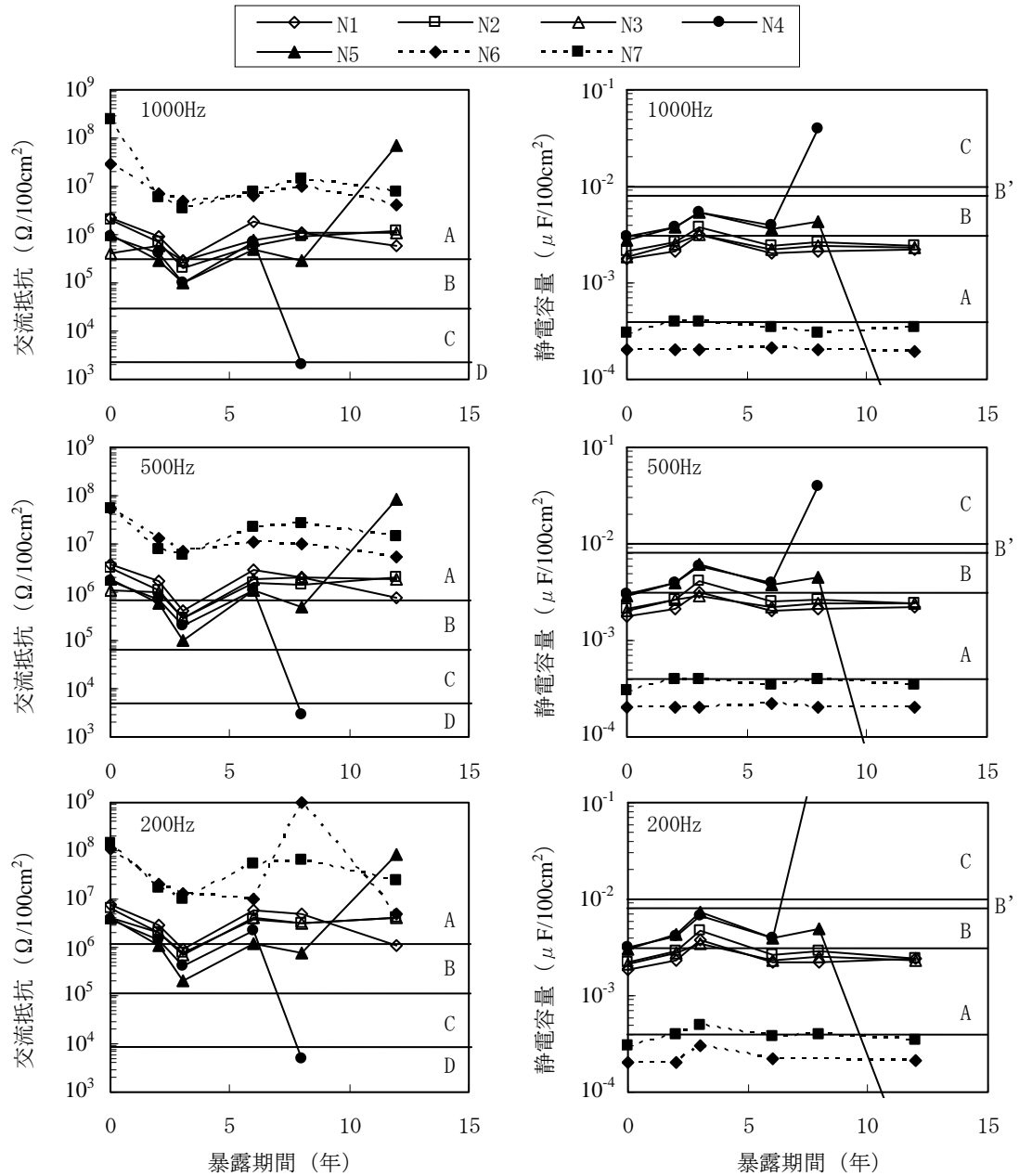
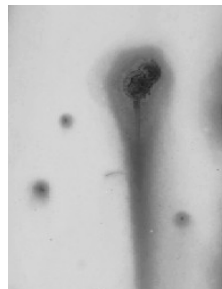


図-17 インピーダンスの測定結果

シ樹脂塗装系である供試体N6およびN7においては、交流抵抗が非常に大きく、静電容量が非常に小さな値を示し、静電容量は判定される範囲を下回る値となっている。このような高性能塗膜の劣化の判定には本手法では対応できない可能性がある。また、その他の塗装系においても、ある程度一定のデータが得られているが、暴露12年目に健全な塗膜に腐食が認められたN4およびN5の結果とインピーダンスの結果を比較すると、N5の外観は写真-14に示すように局所的に腐食が生じている場合であるが、暴露12年目のインピーダンス値は明らかに異常な値を示した。



N5 (塩化ゴム系)
暴露 12年

N4 (フタル酸樹脂)
暴露 8年

写真-14 劣化と判定された時点の塗膜の外観

また、N4においては暴露8年目で劣化度判定結果がIVとなったが、写真-14に示すとおり既に暴露8年時点で目視によって腐食が確認されている。このように、従来用いられているインピーダンス法による劣化度判定では、腐食の発生を判定することは可能であるが、戦略的な維持管理を行うための点検診断手法として利用する場合には、腐食が発生する前に判断または予測できる手法が必要である。したがって、本手法を使つての点検診断結果から劣化を予測することは非常に難しく、港湾のように非常に厳しい環境下での診断手法としては、塗膜の劣化進行を適切に評価できない可能性がある。

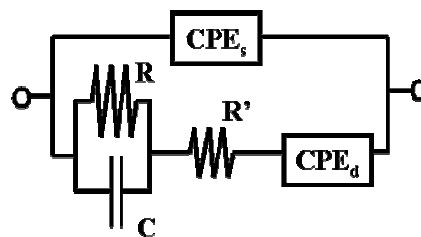
3.3 分布定数系回路素子を導入した等価回路モデルによる健全度評価

分布定数系回路素子を導入した新しい等価回路モデルを用いて、塗膜の健全度評価手法を開発することを目的に検討を試みた。検討内容は、防食性能の高いエポキシ樹脂塗料およびビニルエステル系樹脂塗料を用いて海水シャワー暴露試験を行い、交流インピーダンス法によるインピーダンス値の経時変化を測定した。その後、分布定数系回路素子を導入した等価回路モデルを用いて結果の解析を行い、本劣化診断技術の適用可能性について評価した。

(1) 分布定数系回路素子を導入した等価回路モデル

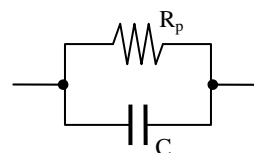
本研究の解析で用いた分布定数系回路素子を導入した等価回路モデルを図-18に示す。電極と溶液界面のモデルを電気回路に等価として表したものを等価回路と呼ぶが、鋼材の腐食も電気化学反応であることから、鋼材と溶液界面の腐食反応モデルを抵抗とコンデンサからなる集中定数系の等価回路で表すことができる。代表的なモデルとしては、図-19に示す腐食反応抵抗 (R_p) と電気二重層容量 (コンデンサ) からなる等価回路モデルで近似することができ、現在、鋼材の腐食を電気化学的に評価する一般的な方法としては、このモデルが用いられている。しかしながら、3.2で示したように、図-19で示す従来の方法による健全度評価方法では、港湾鋼構造物の防食対策として用いられるような高耐久な塗膜の劣化を十分に評価することが難しいのが現状である。そこで、分布定数系回路素子を導入した分布定数系等価回路モデルを構築し、塗膜の劣化および塗膜下腐食の電気化学的挙動を評価することとした。

分布定数系回路素子 (以下、CPEと呼ぶ) は、広範囲な周波数領域で一定の位相を示す (周波数分散特性) 特徴をもった回路素子である。従来は多孔性電極を使用した



CPE_s:塗膜の健全部を想定したインピーダンス値
CPE_d:塗膜の劣化部を想定したインピーダンス値
R:素地鋼板と膨れ内部に存在する溶液との界面における腐食反応抵抗
C:電気二重層容量
R':ふくれ内部溶液の抵抗

図-18 分布定数系回路素子を導入した等価回路モデル



R_p:腐食反応抵抗 (分極抵抗)
C:電気二重層容量

図-19 集中定数系等価回路モデル

電気化学系などの解析に用いられてきたCPEを導入することで、塗膜内への水分やイオン等の浸透や塗膜材の膨潤や熱膨張などの劣化状態を正確に表現できると考えられる。CPEは式(1)のようなインピーダンス特性を有する。

$$Z = \frac{1}{T(j\omega)^n} \quad (1)$$

ここで、 Z : CPEのインピーダンス値、 T : 任意定数、 n : 任意定数 ($0 < n < 1$)、 ω : 周波数、 j : 単位虚数である。

CPEのインピーダンス特性を用い、鋼構造物のCPEのT値およびn値を算出することで、塗膜の健全性を評価することが可能となると考えられる。塗膜の劣化が進行するとT値が増加し、またn値が減少する傾向を示す。ここで、n値について、0から1の範囲で考えるとn=1の場合、Tは導電率に相当する。またn=0では、Tは理想的な純粋な抵抗になることを意味する。

(2) 実験概要

a) 供試体概要

暴露試験に用いた供試体は、ブラストによりSSPC SP-10 (ISO Sa2.5) まで除錆処理した3.2×100×110(mm)の鋼板に表-8に示す塗装仕様で被覆したものをを用いた。塗装

表-8 供試体の塗装仕様および供試体の種類

No.	供試体 No.	塗装工程	塗料系	塗膜厚 (μm)		合計膜厚 (μm)
				1回目	2回目	
1	E1-500	上塗	超厚膜形エポキシ樹脂塗料	500		500
2	E1-1000	上塗	超厚膜形エポキシ樹脂塗料	1000		1000
3	E1-1500	上塗	超厚膜形エポキシ樹脂塗料	1500		1500
4	E1-2000	上塗	超厚膜形エポキシ樹脂塗料	2000		2000
5	E1-2500	上塗	超厚膜形エポキシ樹脂塗料	2500		2500
6	E2-250	下塗	タンク内面用エポキシ樹脂塗料下塗	50	100	250
		上塗	タンク内面用エポキシ樹脂塗料上塗	100		
7	E2-350	下塗	タンク内面用エポキシ樹脂塗料下塗	50	150	350
		上塗	タンク内面用エポキシ樹脂塗料上塗	150		
8	E2-450	下塗	タンク内面用エポキシ樹脂塗料下塗	50	200	450
		上塗	タンク内面用エポキシ樹脂塗料上塗	200		
9	E2-550	下塗	タンク内面用エポキシ樹脂塗料下塗	50	150×2	550
		上塗	タンク内面用エポキシ樹脂塗料上塗	200		
10	E2-850	下塗	タンク内面用エポキシ樹脂塗料下塗	50	200×2	850
		上塗	タンク内面用エポキシ樹脂塗料上塗	200×2		
11	V1-50	下塗	ビニルエステル樹脂系塗料	50		50
12	V1-100	下塗	ビニルエステル樹脂系塗料	100		100
13	V1-200	下塗	ビニルエステル樹脂系塗料	100×2		200
14	V1-300	下塗	ビニルエステル樹脂系塗料	100×3		300
15	V1-400	下塗	ビニルエステル樹脂系塗料	100×4		400
16	V1-500	下塗	ビニルエステル樹脂系塗料	100×5		500
17	V1-150	下塗	ビニルエステル樹脂系塗料	50		150
		上塗	ビニルエステル樹脂がラスフレック入り塗料	100		
18	V1-250	下塗	ビニルエステル樹脂系塗料	50		250
		上塗	ビニルエステル樹脂がラスフレック入り塗料	100×2		
19	V1-350	下塗	ビニルエステル樹脂系塗料	50		350
		上塗	ビニルエステル樹脂がラスフレック入り塗料	100×3		
20	V1-450	下塗	ビニルエステル樹脂系塗料	50		450
		上塗	ビニルエステル樹脂がラスフレック入り塗料	200×2		
21	V1-650	下塗	ビニルエステル樹脂系塗料	50		650
		上塗	ビニルエステル樹脂がラスフレック入り塗料	200×3		
22	V1-950	下塗	ビニルエステル樹脂系塗料	50		950
		上塗	ビニルエステル樹脂がラスフレック入り塗料	300×3		
23	V2-50	下塗	ビニルエステル樹脂系塗料	50		50
24	V2-100	下塗	ビニルエステル樹脂系塗料	100		100
25	V2-200	下塗	ビニルエステル樹脂系塗料	100×2		200
26	V2-300	下塗	ビニルエステル樹脂系塗料	100×3		300
27	V2-400	下塗	ビニルエステル樹脂系塗料	100×4		400
28	V2-500	下塗	ビニルエステル樹脂系塗料	100×5		500
29	V2-150	下塗	ビニルエステル樹脂系塗料	50		150
		上塗	ビニルエステル樹脂がラスフレック入り塗料	100		
30	V2-250	下塗	ビニルエステル樹脂系塗料	50		250
		上塗	ビニルエステル樹脂がラスフレック入り塗料	100×2		
31	V2-350	下塗	ビニルエステル樹脂系塗料	50		350
		上塗	ビニルエステル樹脂がラスフレック入り塗料	100×3		
32	V2-450	下塗	ビニルエステル樹脂系塗料	50		450
		上塗	ビニルエステル樹脂がラスフレック入り塗料	200×2		
33	V2-650	下塗	ビニルエステル樹脂系塗料	50		650
		上塗	ビニルエステル樹脂がラスフレック入り塗料	200×3		
34	V2-950	下塗	ビニルエステル樹脂系塗料	50		950
		上塗	ビニルエステル樹脂がラスフレック入り塗料	300×3		

方法はいずれもエアースプレー塗装とし、くし歯形ゲージで膜厚を管理した。塗料は、エポキシ樹脂系として超厚膜形エポキシ樹脂塗料、タンク内面用エポキシ樹脂塗料を用い、その他に耐水性、耐塩水性、耐酸性に優れているとされるビニルエステル樹脂ガラスフレーク入り塗料を2種類用いた。いずれの塗料も耐候性および鋼材の防食効果を確認するとともにインピーダンス結果の妥当性を検討するため、膜厚50～2500(μm)まで変化させて供試体を作製した。

b) 試験方法

暴露試験は、海水シャワー試験場でJIS Z2371 塩水噴霧試験方法に準じて試験体を設置し行った。写真-15に試験体の設置状況を示す。

海水シャワー暴露試験は、久里浜湾の実海水をポンプで汲み上げ、写真-5に示すように供試体に散布させる暴露試験である。なお、飛沫帯を模擬した環境で、1日に2回、シャワー散布と乾燥を繰り返す暴露試験である。海水散布の時間は、午前9時からおよび午後9時からの2回でそれぞれ4時間散布させた。

試験データの採取方法としては、測定時にLCRメーターとデータ収集ソフト内蔵パソコンを用いて各試験体のインピーダンスの測定を行った。電極の設置方法は、試験体に電解質ゲル(5wt%CMC：カルボキシメチルセルロース+3wt%NaCl水溶液)を1辺100mmの正方形のアルミ箔電極¹⁴⁾に塗付し、塗膜に密着・固定した。インピーダンスの測定状況を写真-16に示す。

(2) 結果および考察

a) インピーダンスの経時変化

図-20、図-21および図-22に暴露試験結果から得られたインピーダンス挙動の経時変化について一例を示す。ここで、インピーダンス特性として、複素平面表示(Cole-Coleプロット)と併せてインピーダンスの振幅(|Z|)と位相差(theta, θ)の周波数特性(Bode線図)を示す。|Z|およびthetaの関係を示す。なお、複素平面表示は、インピーダンス(式(1))の実数成分Z'をx軸に、虚数成分のZ''をy軸にプロットしたものである¹⁵⁾¹⁶⁾。

$$|Z| = Z' + jZ'' \quad (2)$$

$$\theta(\theta) = \tan^{-1} \frac{Z''}{Z'} \quad (3)$$

図-20に供試体V1-50(ビニルエステル樹脂、膜厚50μm)の結果を示すが、インピーダンスデータが暴露期間



写真-15 供試体の暴露状況



写真-16 インピーダンスの測定状況

暴露	□	○	◇
期間	■	●	◆

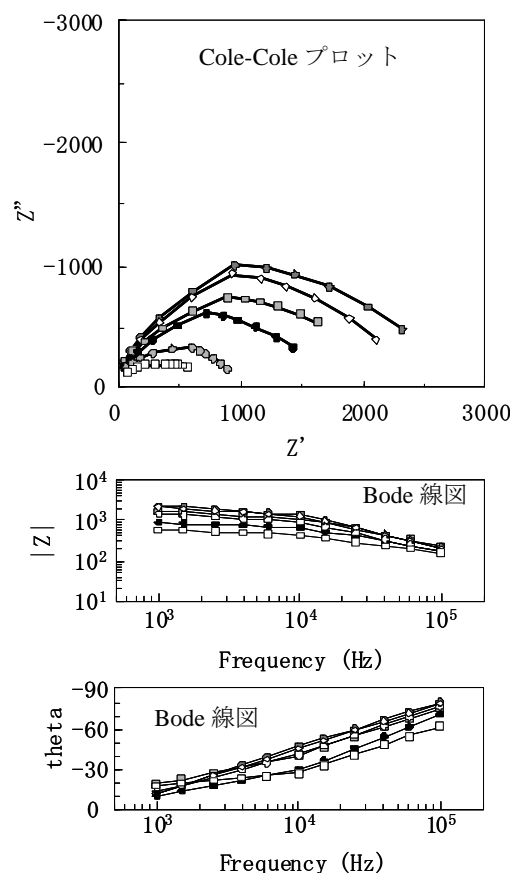


図-20 インピーダンス測定結果 (V1-50)

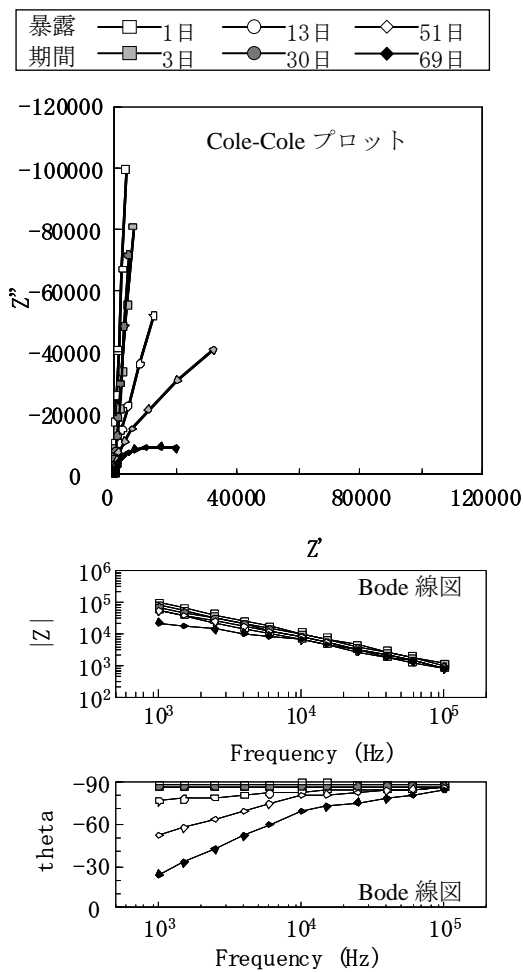


図-21 インピーダンス測定結果 (V1-200)

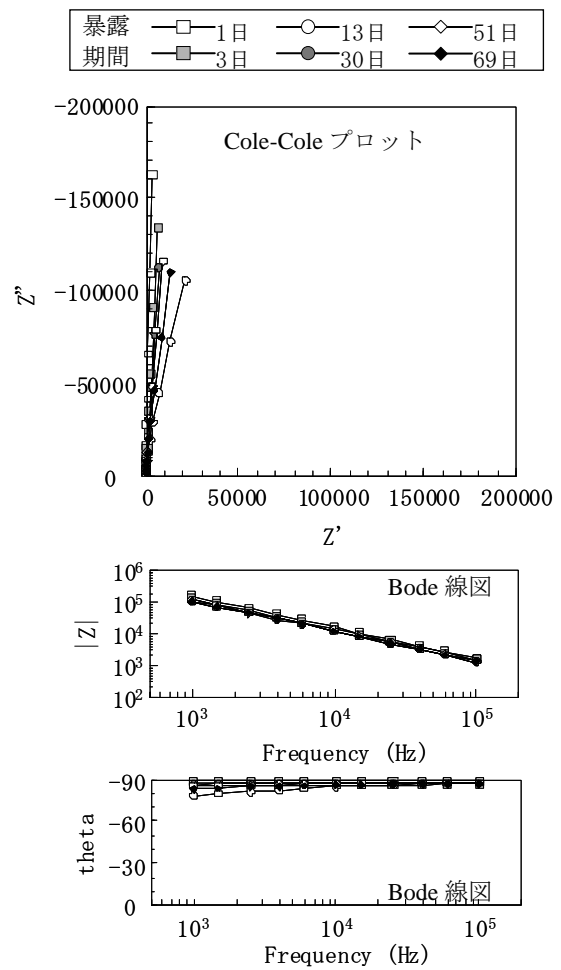


図-22 インピーダンス測定結果 (V1-350)

初期から腐食系特有の半円状の円弧が複素平面状に現れている。また、位相差が低周波数側で 0° に漸近していく傾向を示した。これは、塗膜内や塗膜と鋼材との間においてコンデンサおよび抵抗成分が現れてきたため位相差が変化したと考えられる。したがって、塗膜または鋼材表面は劣化の傾向を示しているといえる。しかしながら、暴露期間の経過とともに θ が減少する傾向を示さなかった。したがって、暴露試験の経過に伴う塗膜の経時的な劣化の進行はなかったと推察される。この供試体は、塗膜厚も $50\mu\text{m}$ と薄く、目視観察においても多くの点錆が確認されたことから、塗膜に微細な欠陥（ピンホールなど）が存在し、暴露初期から鋼材の腐食が進行していたと考えられる。

図-21は、供試体V1-200（ビニルエステル樹脂、膜厚 $200\mu\text{m}$ ）の結果であるが、暴露初期の段階では、Cole-Coleプロットにおいて位相差が -90° に近く、理想的な誘電体に近い挙動を示した。しかし、時間が経過するにつれ

て位相差が 0° 側に変化していく傾向を示した。これは、暴露初期から徐々に塗膜の劣化が進み、塗膜材の環境遮断性が低下することで、塗膜内での電導パス形成やマイクロな欠陥部の形成が生じたと推察される。

図-22に供試体V1-350（ビニルエステル樹脂系ガラスフレーク入り塗料、膜厚 $350\mu\text{m}$ ）の結果を示す。暴露時間が経過してもインピーダンスに関するBode線図の傾きがほぼ -1 であり、位相差が -90° に近く一定値を示していることからコンデンサおよび抵抗成分が現れていないと考えられるため、塗膜および鋼材は健全な状態にあると考えられる。また、供試体V1-200と比較すると位相差の変化に大きな差があり、ガラスフレーク入り塗料は耐久性が高く、塗膜の劣化進行が非常に遅いと推察される。

いずれにしても、塗膜または鋼材の劣化状態をインピーダンス挙動は十分に反映していると考えられるため、交流インピーダンス法によって測定された結果をもとに

分布定数系回路素子を導入した等価回路モデルによって解析し、塗膜および鋼材の健全度評価を試みた。

b) 分布定数系回路素子を導入した等価回路モデルによる解析結果

解析に用いる等価回路モデルは、図-23に示すように一般的な腐食回路モデルに分布定数系回路素子(CPE)を導入したものである(3.3(1)参照)。実際にインピーダンスを測定する際には、 100×100 (mm)のアルミ箔を電極として用い、 100cm^2 の範囲の劣化の状態を判定するものである。したがって、図に示すように塗膜内および鋼材表面は健全部と劣化部に分かれる可能性が高い。本回路モデルは、それぞれに対し分布定数系回路素子を導入し、解析するものである。よって、分布定数系回路素子から得られるパラメータは健全塗膜のCPEから T_s および n_s 、劣化塗膜のCPEから T_d および n_d の4つとなる。分布定数系回路素子のインピーダンス特性は、塗膜内部の電気伝導率、誘電率が必ずしも一定値でなく、施工上の不具合や外的劣化因子などの侵入などによって何らかの分布が存在することでもたらされると考えられるため、この指標を用いることで塗膜および鋼材の定量的な劣化評価が可能となる。しかしながら、図-23に示すR値(鋼材-塗膜間に存在する溶液との界面における腐食反応抵抗)、C値(電気二重層容量)およびR'値(鋼材-塗膜間に存在する溶液の抵抗)なども時間の経過とともに変化するため、7個のパラメータを求める必要がある。解析では、これらパラメータをインピーダンス測定結果をもとに最小二乗近似により回帰させ決定した。

表-8で示した各種塗装系の分布定数系回路素子(CPE)パラメータの経時変化を図-24~図-29に示す。いずれの塗装系においても、劣化部のCPEパラメータである T_d 値および n_d 値は急激に変化し、暴露100日程度でいずれの塗装系および膜厚においても劣化傾向を示した。値としては、 T_d 値が初期値 $10^{-9} \sim 10^{-10}$ であったのに対し、 $10^{-2} \sim 10^{-4}$ 程度まで増加した。また、 n_d 値においても暴露開始時は1程度であったものが、ほぼ0に近い値となっている。これは、暴露2日後から T_d 値の急激な増加および n_d 値の急激な低下をみせた供試体V1-50(図-26)において、急激な低下以降も腐食が確認されなかったものの、写真-17に示すように暴露69日目に非常に小さな点錆が確認された。この供試体は膜厚が $50 \mu\text{m}$ と非常に薄いこともあるが微少なピンホールが存在していたと考えられる。このピンホールに暴露初期から水が浸透し鋼材表面に達したことから、本回路モデルで解析した結果、劣化部の急激な値の変化が生じたものと考えられる。その他の供試体においても同様な傾向を示していることから、劣化部を想定した分布

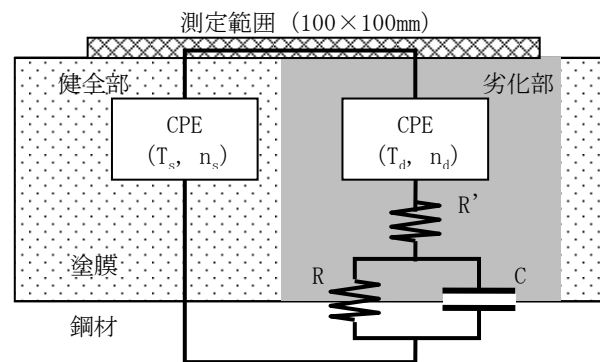
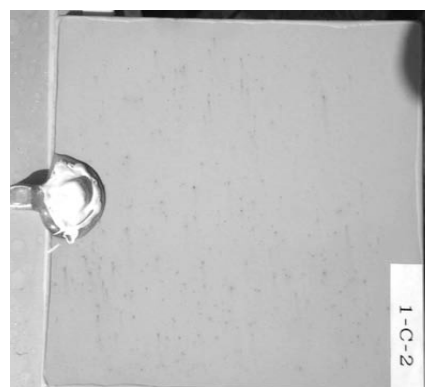


図-23 等価回路モデル



ビニルエステル樹脂 $50 \mu\text{m}$ (V1-50)

写真-17 暴露試験供試体の外観(69日後)

定数系回路素子(CPE)は、ピンホールなどの欠陥部の鋼材の状態を評価していると考えられる。ピンホールなどの欠陥は鋼材の防食効果に大きく影響するため、これら欠陥部の鋼材の状態を的確に判断の上では有効であると考えられる。

次に、健全部を想定した T_s 値および n_s 値については、いずれの供試体も時間の経過にともない、 T_s 値が徐々に増加し、 n_s 値が徐々に減少する傾向を示している。また、塗膜が厚くなるにしたがって T_s 値は小さく、 n_s 値は大きくなる傾向を示している。また、写真-17で示したようにピンホールからの腐食が確認された供試体においては、 T_s 値および n_s 値ともに値が大きくなる傾向を示している。このことから、塗膜全体の長期的な劣化挙動は健全部を想定した分布定数系回路素子(CPE)から求められた T_s 値および n_s 値によって評価が可能であると考えられる。

しかしながら、塗膜の劣化と判断されたビニルエステル樹脂系塗料(V1-50)の急激な値の変動後は、 T_s 値および n_s 値が逆に健全な方向に推移した。これについては、微視的な塗膜内部の状態を把握などの検討が必要であり今後の課題である。また、ビニルエステル樹脂ガラスフレイク入り塗料(V1)の結果において、 n_s 値および n_d 値が極

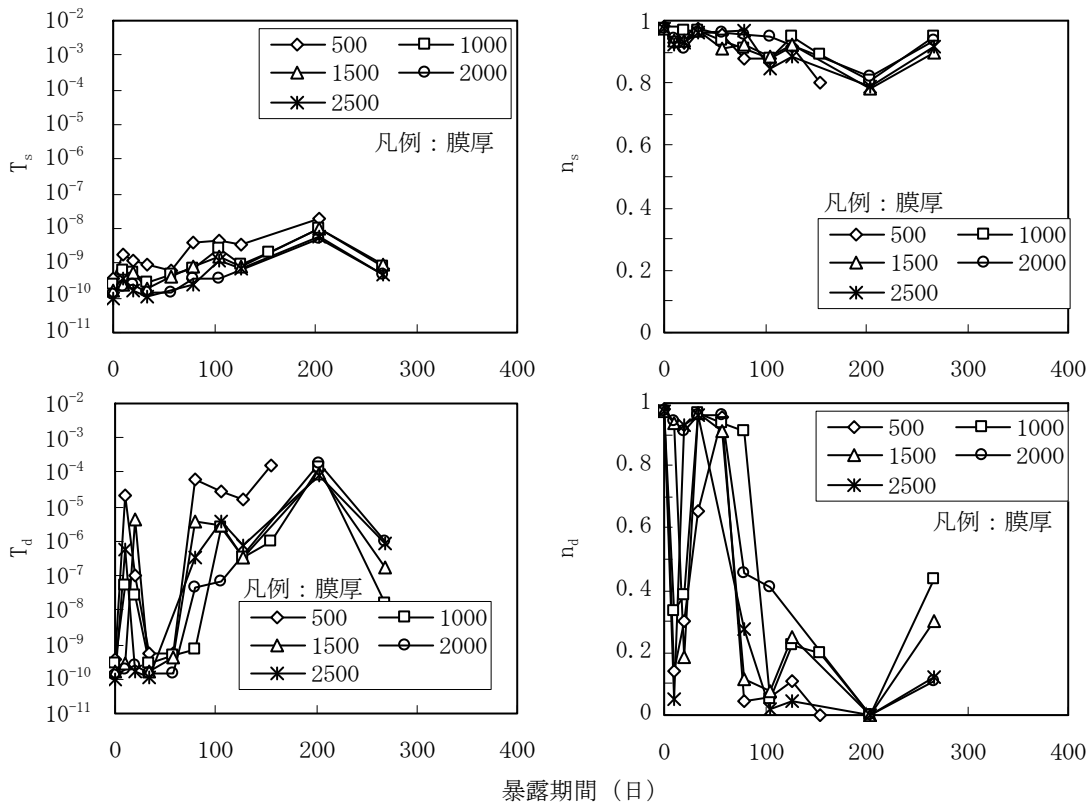


図-24 CPE のインピーダンスパラメタの経時変化 (超厚膜形エポキシ樹脂塗料 (E1, No.1~No.5))

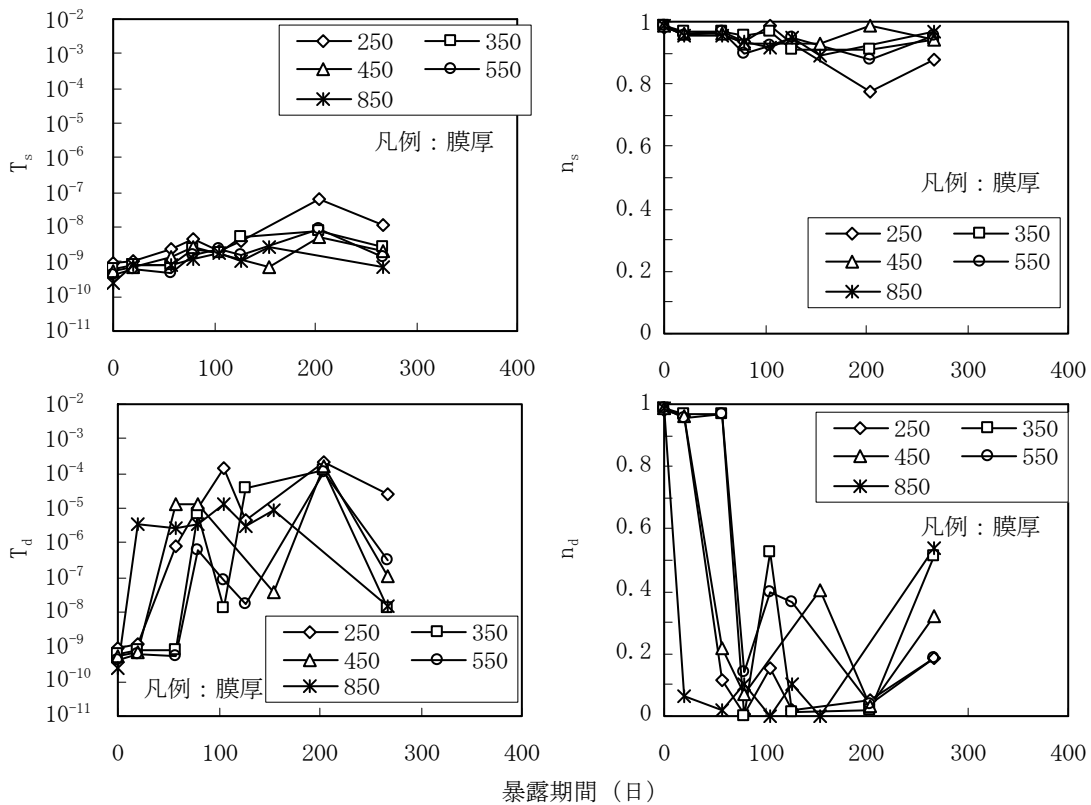


図-25 CPE のインピーダンスパラメタの経時変化 (タンク内面用エポキシ樹脂塗料 (E2, No.6~No.10))

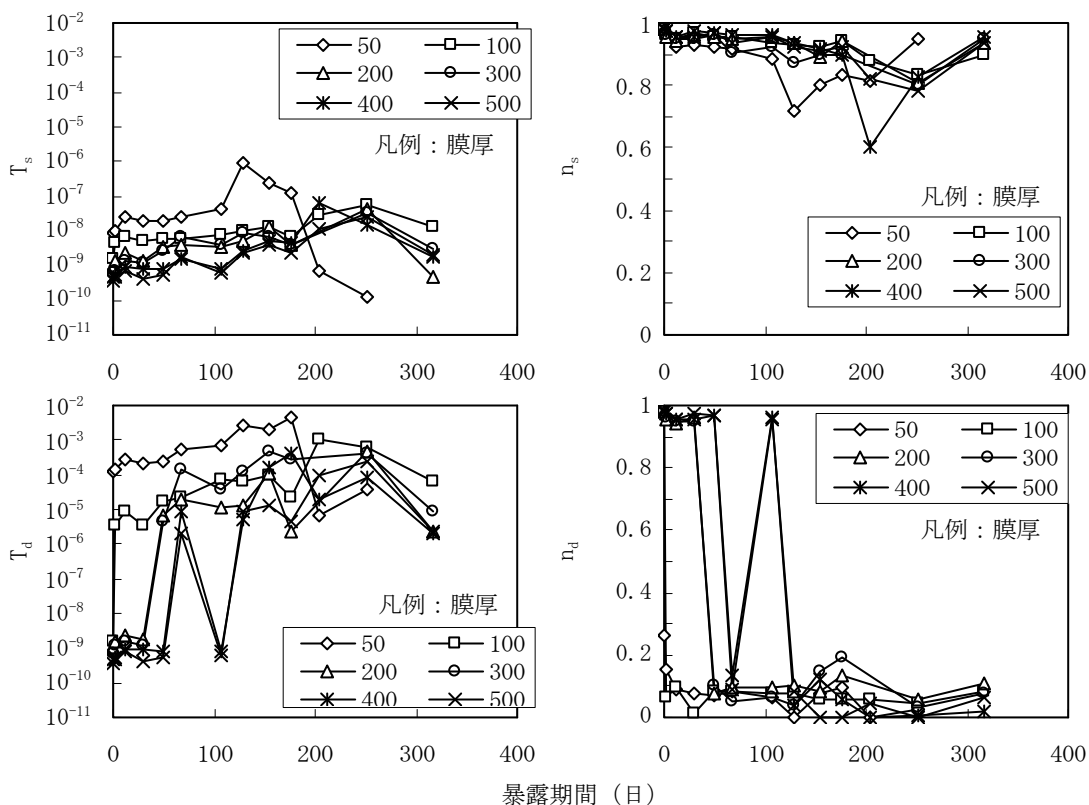


図-26 CPE のインピーダンスパラメタの経時変化 (ビニルエステル樹脂系塗料 (V1, No.11~16))

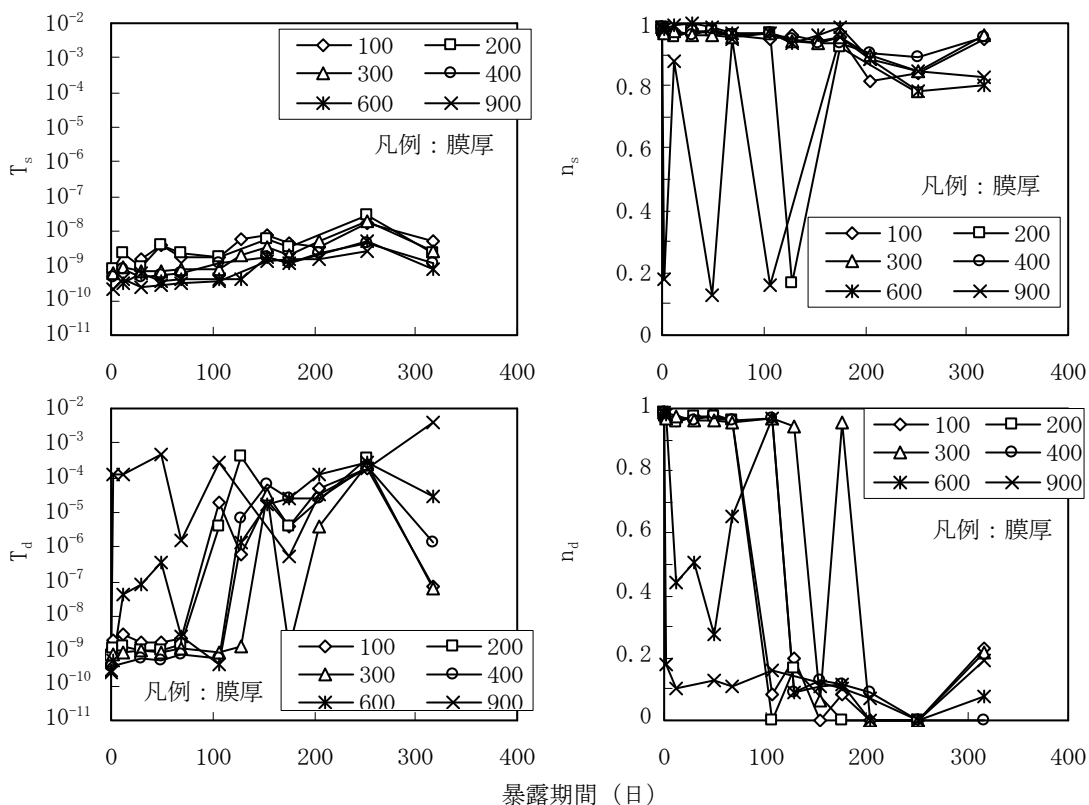


図-27 CPE のインピーダンスパラメタの経時変化 (ビニルエステル樹脂ガラスフレーク入り塗料 (V1, No.17~22))

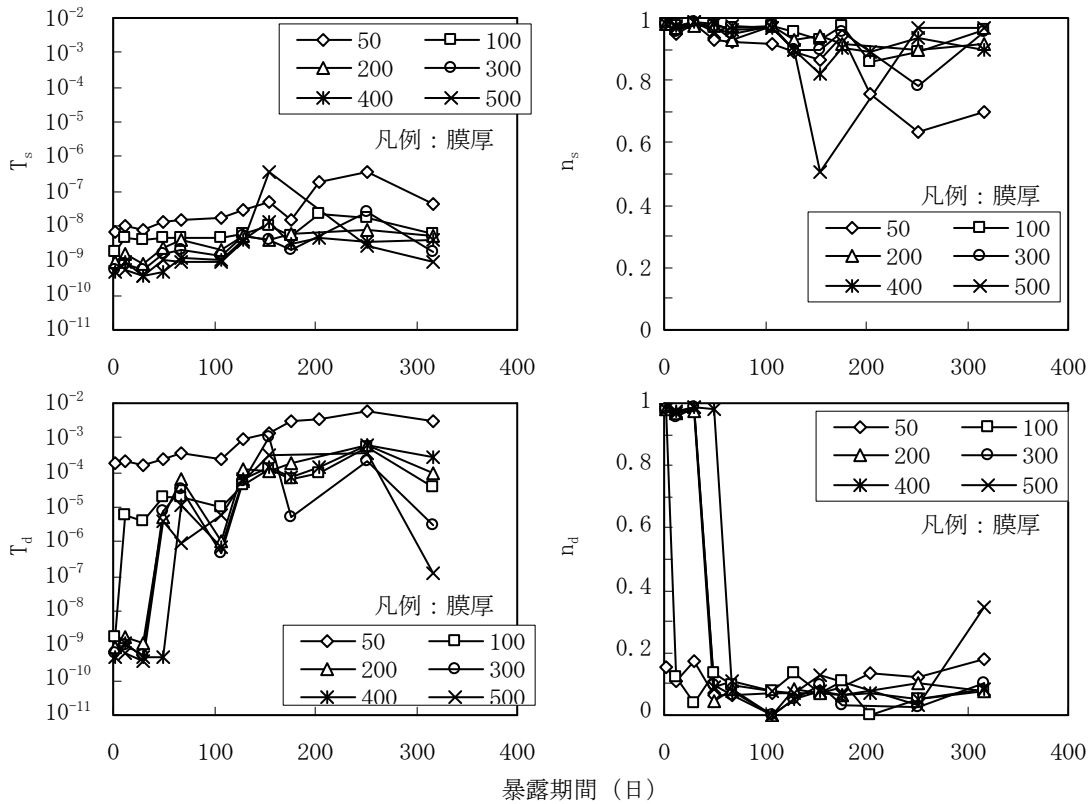


図-28 CPE のインピーダンスパラメタの経時変化 (ビニルエステル樹脂系塗料 (V2, No.23~28))

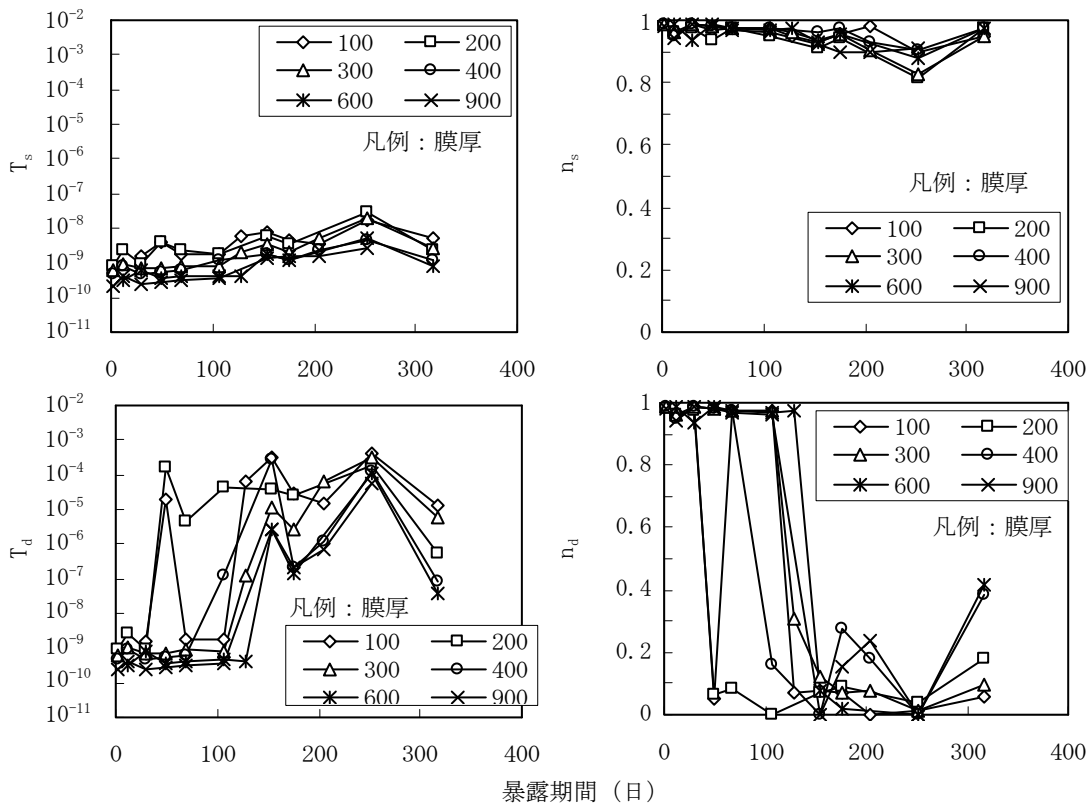


図-29 CPE のインピーダンスパラメタの経時変化 (ビニルエステル樹脂ガラスフレーク入り塗料 (V2, No.29~34))

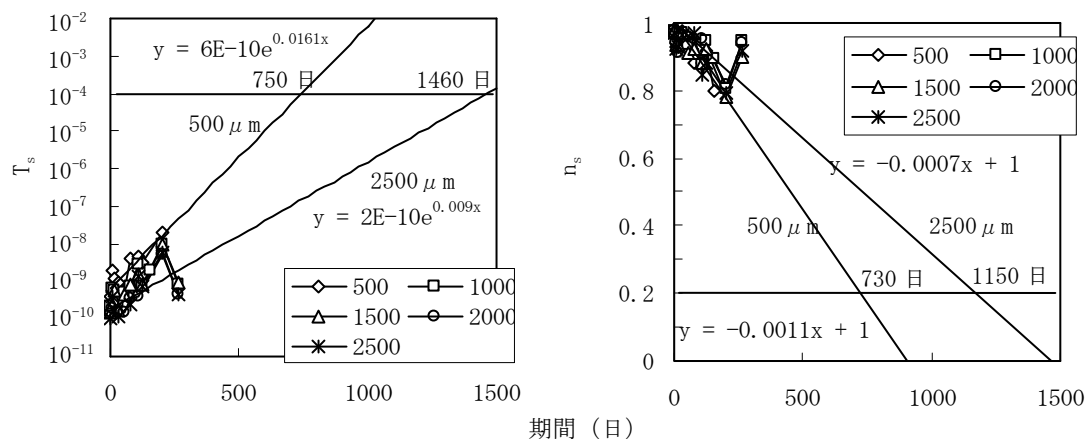


図-30 エポキシ樹脂塗装系の塗膜の劣化予測結果

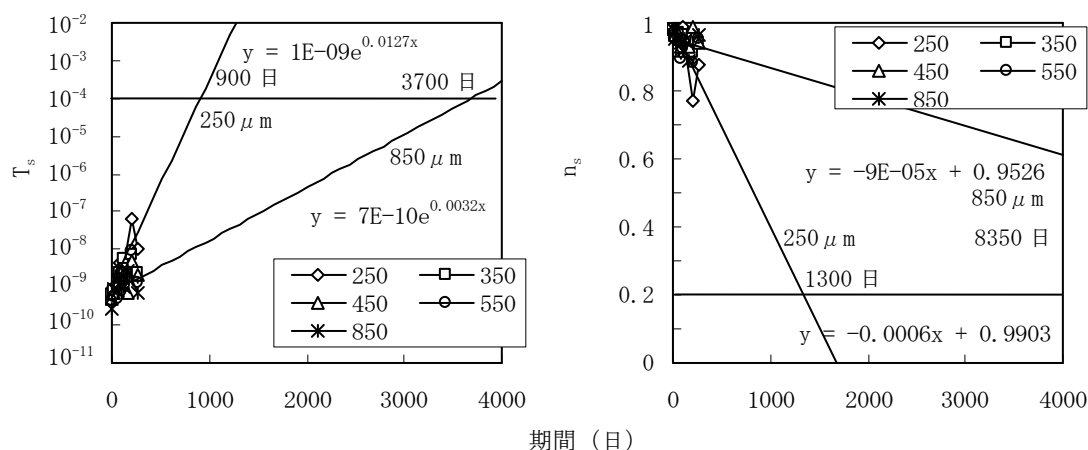


図-31 ビニルエステル樹脂塗装系の塗膜の劣化予測結果

端に変動している結果もあった。それぞれのパラメタを決定する解析手法として、現在は最小二乗近似による解析を行っているが、解析手法も改良を続ける必要があると考えられる。

c) 分布定数系回路素子を導入した等価回路モデルによる塗膜の健全性評価と劣化予測

塗膜の健全度を評価するには、健全部を想定した分布定数系回路素子 (CPE) から求められた T_s 値および n_s 値によって診断できる可能性がある。いずれの塗装系においても $\log_{10}(T_s)$ 値および n_s 値の変化はほぼ線形であると考えられる。したがって、この劣化直線を用いることで、塗膜の点検時点での健全性評価とその後の余寿命予測が行える可能性がある。現時点では、十分なデータが得られていないため、診断結果の信頼性は低いと考えられるが、現在までのデータを用いて塗膜の寿命予測を試みた。

まず、健全部を想定した分布定数系回路素子 (CPE) から求められた T_s 値および n_s 値の塗膜の劣化判定に用い

る閾値について、劣化部を想定した T_d 値および n_d 値をもとに仮定した。 T_d 値をみると劣化が顕在化したと考えられる値はおよそ 10^{-4} 程度であることが分かる。また、 n_d 値に関しては、劣化部を想定したCPEの値は急激に0付近まで低下するため、劣化判定の閾値は定かではないが、0~0.2以下で推移していることが分かる。これらの結果より、健全部を想定した分布定数系回路素子 (CPE) から求められた T_s 値の閾値を 10^{-4} とし、 n_s 値の閾値を0.2とした。

これまでに得られた T_s 値および n_s 値から求めた劣化時期について、図-30にエポキシ樹脂塗装系の場合を、図-31にビニルエステル樹脂塗装系の場合を示す。いずれの塗装系も最大膜厚および最小膜厚の値の経時変化を近似した結果である。エポキシ樹脂塗装系の場合、 T_s 値から予測した結果は膜厚500および2500 μm の塗装に対して、約750日および約1460日となり、 n_s 値の場合は約730日および約1150日となった。一方、カラスフレック入りビニルエステル樹脂塗装系の場合には、 T_s 値から予測した結果は膜厚

表-9 詳細定期点検診断の実施時期および実施頻度の考え方の例

対象施設	実施時期および頻度
水域施設	新規供用（管理委託）して5年以内に1回目を行い、その後は概ね10年間隔で実施する。ただし、埋没の進行またはその恐れのある施設については、概ね5年間隔で実施する。
外郭施設	新規供用（管理委託）して5年以内に1回目を、その10年後に2回目を、供用20年後に3回目を行い、これ以降は変状の発生・進展状況を踏まえつつ、概ね5年間隔で実施する。
係留施設	新規供用（管理委託）して5年以内に1回目を、その10年後に2回目を、供用20年後に3回目を行い、これ以降は変状の発生・進展状況を踏まえつつ、概ね5年間隔で実施する。
臨港交通施設 (橋梁, トンネル)	新規供用（管理委託）して概ね10年ごとに1回実施する

250 μ mおよび950 μ mの塗装に対して、約900日および約3700日となり、 n_s 値の場合は約1300および約8350日となった。本結果からは、ガラスフレーク入りビニルエステル樹脂塗装系の方が塗膜の耐久性は高いことが分かる。しかしながら、高耐久なガラスフレーク入りビニルエステル樹脂塗装系（膜厚850 μ m）の結果では、予測結果に大きな差が生じた。これは初期のインピーダンス結果からの予測であるためであると考えられる。実際に構造物の予測を行う際には、一般定期点検時または詳細点検時に本手法によりパラメタを解析することで、データの蓄積を行い、塗膜の健全性を評価することで、信頼性の高い予測ができる可能性がある。

ただし、本検討では塗膜劣化の閾値を仮定の下で推定していることや長期のデータが不足していることなどから信頼性に劣る結果であると考えられるため、今後も調査を続ける必要があると思われるが、本研究によって、本回路モデルより求めた分布定数系回路素子（CPE）のインピーダンス値より塗膜の健全度評価および寿命予測を行う新たな手法の可能性を示すことができた。

また、本手法により塗膜の健全性の評価のみならず、維持管理時においては、最適な点検時期の決定および塗替え時期の予測も可能となることから、塗装工法を施した港湾鋼構造物の今後の維持管理において、戦略的な維持管理計画の策定が可能となると考えられる。

c) 分布定数系回路素子を導入した等価回路モデルによる港湾鋼構造物の点検診断方法

港湾の施設の維持管理マニュアルには、一般定期点検診断は1~2年に1回の頻度で計画的に行い、詳細定期点検診断は、表-9に示すように実施時期および実施頻度の考え方を示している。塗装工法を施した港湾鋼構造物においても同様に実施の間隔を決定してもよいと考えられるが、塗膜の耐久性（健全性）については、2. で示したように、まだ十分に把握されてはいないのが現状である。このような中で適切に管理していくためには、本検討で

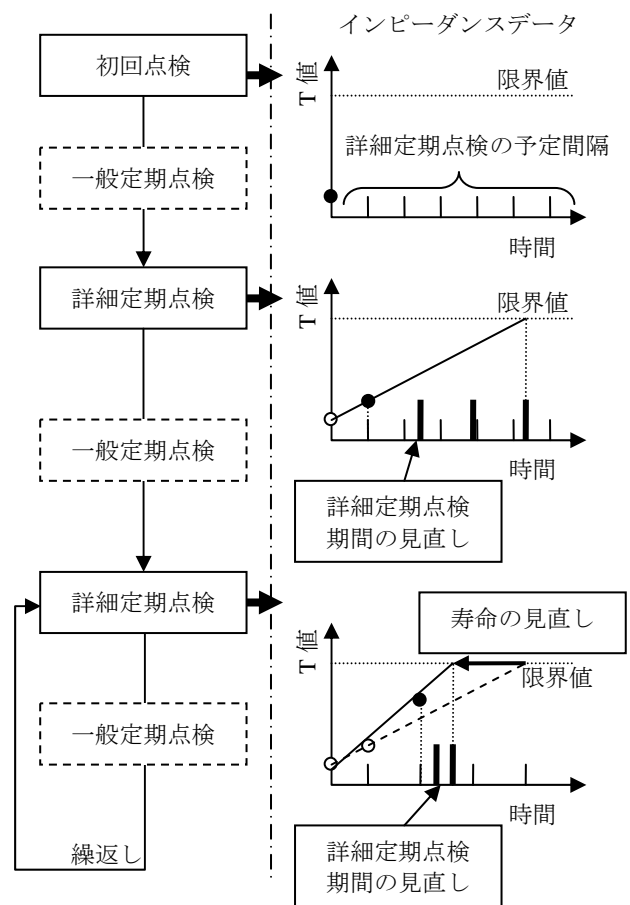


図-32 インピーダンス測定による塗装工法の維持管理

用いた分布定数系回路素子を導入した等価回路モデルにより導いたT値および n 値により劣化を予測することも一手法であると考えられる。

考え方としては、図-32で示すように、新規供用時には港湾の施設の維持管理マニュアルに則した維持管理計画を策定し、維持管理を行うことになるが、まずは初回点検時にインピーダンスを測定し初期値を保存しておく、その後、詳細定期点検診断時にインピーダンスを測定することで、おおよその塗膜の寿命を予測することで、そ

れ以後の点検時期を決定し、これを繰り返すことで、最適な頻度の点検診断が実施できるばかりでなく、塗膜の寿命も推定できるため、塗替え時期を事前に把握できるため、計画的な維持管理が可能になると考えられる。

3.4 まとめ

塗装工法により施された塗膜は外的要因により経年劣化するため、塗膜および鋼材の劣化診断技術は、鋼構造物の健全性評価を行う上で極めて重要である。塗膜の劣化挙動を評価する手法としては、従来から電気化学インピーダンスを測定する方法が有効であるとされてきた。しかし、未だ確立された診断手法はないのが現状で、目視による劣化度判定により塗装を施した港湾鋼構造物の健全性を評価するため、事後保全的な維持管理となっている。そこで、本章では、従来から実施されている200～1000Hzの周波数のインピーダンスから求められる塗膜の劣化度判定結果の妥当性について検討し、また、新たに岡崎、伊藤らによって提案されている分布定数系回路素子を導入した新しい等価回路モデルを用いた塗膜の余寿命評価手法による劣化診断手法の妥当性について検討を試みた。得られた結果を以下に示す。

- 1) 従来から実施されている劣化度判定による塗膜の健全性評価手法では、腐食が発生した場合を判定することは可能であるが、塗膜の劣化を予測することは難しく、目視による劣化度判定と同程度の結果を得る程度である。したがって、港湾のように非常に厳しい環境下での診断手法としては、塗膜の劣化進行を適切に評価できない可能性がある。
- 2) 分布定数系回路素子（CPE）を導入した等価回路モデルによる塗膜の健全度評価に関しては、健全部を想定した分布定数系回路素子（CPE）のインピーダンス値のパラメタである T_s 値および n_s 値を用いることによって塗膜の健全性を評価できる可能性がある。また、定期的に測定を行うことで塗膜の余寿命を予測できる可能性がある。

4. 結論

塗装工法はその他の防食工法と比較して「塗る」という簡単な操作により施工することができるため、港湾鋼構造物の防食法としても広く使用されている。しかしながら、港湾鋼構造物のように海水の影響を受ける厳しい環境下においては、塗装系の種類や膜厚などによって異なるが、耐用年数は数年から十数年と比較的短く、塗替

え等の適切な管理が必要となる工法である。構造物の維持管理を効率的かつ確実に実施するためには、被覆塗膜の耐久性および鋼材の防食効果を把握することは重要で、また、塗装塗膜および鋼材の劣化診断技術の確立は健全性評価をする上で極めて重要である。

現在の塗装を施した港湾鋼構造物の維持管理は、目視による劣化度判定により港湾鋼構造物の健全性を評価するため、事後保全的な維持管理となっている。しかし、今後は、より安全・安心な社会基盤施設を目指し、予防保全を考慮した戦略的な維持管理を行う必要がある。そうすることで、効率的で効果的な維持管理が可能となると考えられる。

以下に、本研究で得られた成果をもとに、塗装による防食を施した港湾鋼構造物を合理的に維持管理するための提言を示し結論とする。

新設（材料選定および施工）時

- 高い防食効果を確保したい場合には、無機ジンクリッチペイントを下塗りとするすることで、犠牲陽極作用による高い防錆効果が得られ有効であると考えられる。
- 鋼材との付着強度は有機ジンクリッチペイントが高く、塗膜の剥離等が生じる可能性のある環境下には有効であると考えられる。
- 耐候性および美粧性を確保したい場合には、今回の暴露試験結果では、フッ素樹脂塗料を用いたものが、その他塗料よりも長くその性能を保持していた。次いで、ポリウレタン樹脂およびシリコン樹脂塗料となった。ただし、今回の試験ではあまり大きな差はなかった。
- 重防食塗装の遮塩性は非常に高いが、疵やピンホールなど塗膜に不具合のある箇所は腐食の発生が非常に早いため、十分注意して施工する必要がある。

維持管理（点検診断）時

- 腐食が進行した鋼材への塗替え塗装は、塗装の寿命が短くなる可能性があるため、速やかな処置（補修）が大切である。比較的簡便なタッチアップ等の補修を行うことで塗膜の耐久性は向上するため、点検時においても随時対策を施すことが望ましいと考える。
- 疵や塗膜欠陥などからの腐食の進行は非常に早く、飛沫帯など特に厳しい腐食環境下では1～2年に1度の程度の目視点検は必要である。
- 塗替え塗装などの大規模補修を施す時期の予測は非常に難しいが、分布定数系回路素子（CPE）を導入し

た等価回路モデルによる塗膜の健全度評価を定期点検時または詳細点検時に行うことで、塗膜の健全性の評価および余寿命を予測できる可能性がある。また、点検頻度や塗替え時期の最適化など戦略的な維持管理が行える可能性がある。

- ・ 塗替え塗装後の管理に関して、腐食が生じていた箇所の塗替え塗膜の寿命は、新設塗装よりも短くなる可能性があるため、点検診断時には注意が必要である。

塗替え（補修）時

- ・ 塗替え塗装を行う際は、鋼材の下地処理が非常に重要で、処理が不十分であると塗膜の寿命が短くなる。塗替え塗装時の防食性および耐久性を向上させるためには、超厚膜型エポキシ樹脂塗料による塗装系が効果的であった。

5. あとがき

塗膜の耐久性および鋼材の防食効果に関する暴露試験に関して、本稿では欠陥部の腐食の進行などについて、新設用塗装系および塗替え用塗装系ともに評価することができたが、健全な塗膜の劣化に関しては現在も暴露試験を継続中である。塗装工法の防食効果の低下は疵などの不具合箇所から進展すると思われるが、外的な衝撃等を受けない限り不具合は生じないと考えられる。したがって、健全な塗膜の耐久性、防食効果を把握することは重要で今後の課題である。しかしながら、本稿では塗膜の劣化箇所の対応として、塗替え塗装時に留意する点などを明確にすることができた。塗装工法を適用する際や塗装工法が適用された既存の施設に対して、構造物を維持管理する上での有益な資料となると考えられる。

また、インピーダンス法による健全性評価手法および余寿命予測手法に関する検討については、本資料により可能性を示すことができたが、結果の信頼性の点から今後も検討を行う必要があると考えられる。

(2009年2月3日受付)

謝辞

本研究を遂行するにあたり、各種塗装系の長期防食効果に関する検討で実施した長期暴露試験において、関西ペイント販売(株)、大日本塗料(株)、日本ペイント(株)の関係各位および(株)ナカポーテック阿部正美氏には多大なご協力を頂きました。

また、インピーダンス法による塗膜の健全性評価手法に関する検討にあたり、横浜国立大学 岡崎慎司准教授、伊藤大輔助教には多大なご指導、ご協力を頂きました。また、実験を実施するにあたり横浜国立大学 石橋秀平氏にご助力頂きました。

ここに記し、皆様に対して深く感謝の意を表します。

最後に、インピーダンス法による塗膜の健全性評価手法に関する検討は、科学研究費補助金(基盤研究(C))「高性能コーティング材の健全性評価手法の開発」の一環として実施させて頂いた。ここに付記する。

参考文献

- 1) 国土交通省港湾局監修：港湾の施設の技術上の基準・同解説，(社)日本港湾協会，2008年，pp. 430-444
- 2) (財)沿岸開発技術研究センター：港湾鋼構造物 防食・補修マニュアル，(改訂版)，1997年，pp. 83-95
- 3) 阿部正美，濱田秀則，中家俊和，藤城正樹，茅島隆人：海洋環境に位置する港湾橋梁に対する防食塗装の暴露試験(中間報告)，第19回防錆防食技術発表大会講演予稿集，1999年，pp. 95-98
- 4) 阿部正美，濱田秀則，中家俊和，藤城正樹，茅島隆人：海洋環境に位置する港湾橋梁に対する防食塗装の暴露試験，防錆管理，Vol. 44，No. 1，2000年，pp. 8-13
- 5) 平崎敏史，阿部正美，猪俣茂男，茅島隆人，藤城正樹：海浜大気環境下における各種塗装鋼板の耐久性評価，第24回防錆防食技術発表大会講演予稿集，2004年，pp. 21-24
- 6) 堀誠，大澤隆英，宮下剛，阿部正美，審良善和：海浜大気環境下における各種防食塗装鋼板の耐久性(暴露12年の報告)，第28回防錆防食技術発表大会講演予稿集，2008年，pp. 37-40
- 7) (社)腐食防食協会：腐食・防食ハンドブック，丸善(株)，2000年，pp. 437-461
- 8) (社)土木学会：硬化コンクリートのマイクロ世界を拓く新しい土木学会基準の制定—EPMA法による面分析方法と微量成分溶出試験方法について—，2006年，pp. 21-32
- 9) (財)沿岸開発技術研究センター：港湾鋼構造物 腐

食・補修マニュアル（改訂版），1997年，pp. 83-95

- 1 0) 国土交通省港湾局監修：港湾の施設の技術上の基準・同解説，（社）日本港湾協会，2008年，pp. 437-438
- 1 1) 桑島輝明：自動車用水性塗料技術の進展，塗装工学，Vol133，No. 6，1998年，pp. 237
- 1 2) （財）沿岸開発技術研究センター：港湾鋼構造物防食・補修マニュアル，2008年，pp70-71
- 1 3) 石橋秀平，伊藤大輔，横山隆，岡崎慎司，審良善和：分布定数回路を用いた交流インピーダンス法による鋼構造物用防食塗膜の定量的劣化評価，第27回防錆防食技術発表大会講演予稿集，2007年，pp. 119-122
- 1 4) 石橋秀平，伊藤大輔，横山隆，光田司，関根和喜，岡崎慎司：インピーダンス法による高性能コーティングの劣化挙動の追跡，材料と環境2007，2007年，pp. 101-104
- 1 5) 逢坂哲彌，小山昇，大坂武男：電気化学法－基礎測定マニュアル，（株）講談社，1990年，pp. 157-182
- 1 6) 藤嶋昭，相澤益男，井上徹：電気化学測定法（上），技報堂出版，1984年，pp. 209-222

港湾空港技術研究所報告 第48巻第2号

2009・6

編集兼発行人 独立行政法人 港湾空港技術研究所
発行所 独立行政法人 港湾空港技術研究所

横須賀市長瀬3丁目1番1号
TEL.046(844)5040 URL.<http://www.pari.go.jp/>

印刷所 横浜ハイテクプリンティング株式会社

Copyright© (2009) by PARI

All rights reserved. No part of this book must be reproduced by any means without the written permission of the President of PARI.

この資料は、港湾空港技術研究所理事長の承認を得て刊行したものである。したがって、本報告書の全部または一部の転載、複写は港湾空港技術研究所理事長の文書による承認を得ずしてこれを行ってはならない。

CONTENTS

Development of Life Cycle Management System for Open-type Wharf	Ema KATO, Mitsuyasu IWANAMI, Hiroshi YOKOTA3
Development of the Three-dimensional Numerical Model of Sediment Transports and Topographic Changes of Intertidal Flats due to Sands and Cohesive Sediments Generated by Tidal Currents and Wave-induced Currents and an Application to the Field.	Ken-ichi UZAKI, Yoshiaki KURIYAMA37
Evaluation of Strain Rate Effect with Isotache Model on Long-Term Consolidation of the Clay Deposits at Kansai International Airport	Yoichi WATABE, Masanori TANAKA, Shinji SASSA, Yoshiyuki MORIKAWA63
Thickness Effects on Long-Term Consolidation Behavior of Osaka Bay Clays	Yoichi WATABE, Masanori TANAKA, Shinji SASSA, Tsuyoshi EMURA83
A Study of the Geotechnical Investigation Results at the Planning Site of the D-Runway of the Tokyo International Airport	Yoichi WATABE, Masanori TANAKA, Shinji SASSA, Takatoshi NOGUCHI, Masafumi MIYATA103
New Determination Method of Soil Parameters for Performance Based Design	Yoichi WATABE, Masanori TANAKA, Shinji SASSA, Yoshiaki KIKUCHI123
10-Year Follow-up Study on Long-Term Properties of Air-Foam Treated Lightweight Soil Placed in Coastal Areas	Yoichi WATABE, Masanori TANAKA, Shinji SASSA145
Performance of corrosion prevention by painting methods in marine atmosphere and performance evaluation methods for soundness of paint layers	Yoshikazu AKIRA, Mitsuyasu IWANAMI, Toru YAMAJI161
Generation Method of Directional Random Waves with Arbitrary Spectrum	Katsuya HIRAYAMA, Ichiro MIYAZATO199