

海洋構造物の耐久性向上技術に関する共同研究報告書
(海上大気中の長期防錆塗装技術に関する研究 第3分科会)
—暴露期間15年後の研究成果—

平成12年12月

建設省土木研究所材料施工部化学研究室
財団法人 土木研究センター

Copyright © (2000) by P.W.R.I

All rights reserved. No part of this book may be reproduced by any means, nor transmitted, nor translated into a machine language without the written permission of the Director General of P.W.R.I.

この報告書は、土木研究所長の承認を得て刊行したものである。したがって、本報告書の全部又は一部の転載、複製は、土木研究所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。

海洋構造物の耐久性向上技術に関する共同研究報告書 (海上大気中の長期防錆塗装技術に関する研究 第3分科会) —暴露期間15年後の研究成果—

建設省土木研究所	材料施工部化学研究室	室 長	明嵐	政司
(財)土木研究センター	研究開発第4部	主任研究員	守屋	進
		部 長	鷹取	勲
		専門調査役	田邊	弘住
		同	多記	徹
		同	安井	正宏
		同	中家	俊和

要 旨

海上大気部における鋼材の防食方法として、長期防錆塗装技術を確立するため、(財)土木研究センターと共同研究として実施している海洋技術総合研究施設における塗装試験片および施設本体の塗膜の暴露15年経過時の防食性能を評価したものである。

キーワード：海上大気中、長期防錆塗装、長期暴露試験、鋼材の防食

まえがき

周囲を海に囲まれた我が国は、海との調和を図りながら海洋空間や資源をさらに有効に活用していく必要がある。

厳しい腐食環境をもつ海域の土木構造物の防錆塗装の高耐久化を図ることは、鋼構造物の安全性や長寿命化に貢献し、その成果は各方面から期待され、1日も早い実用化が望まれている。

科学技術庁所管の科学技術振興調整費による「海洋構造物による海洋空間等の有効利用に関する研究」の建設省土木研究所担当の実施課題の中の分担課題として「海上大気部の長期防錆塗装技術に関する研究」を昭和59年(1984年)から5箇年計画で開始した。

建設省土木研究所は「海洋構造物の耐久性向上技術に関する研究」の課題を設定し、五カ年計画終了後も引き続き土木研究所と(財)土木研究センター、(社)鋼材倶楽部、(社)プレストレスト・コンクリート建設業協会との共同研究として、継続して試験研究を続けているものである。

暴露試験場所は、土木研究所が駿河湾に設置した「海洋技術総合研究施設」を利用して行った。この研究は、我が国周辺の沖合大小深海域領でできる大規模開発に役立てるため、各種構造物に共通する基盤技術の開発を行うことを目指している。その間、本研究施設は、ISO/TC156により制定されるISO規格化を目的とした大気の腐食性の分類システムに関する国際共同暴露試験地世界47箇所の暴露地の一つとして採択された。

本研究報告書は、暴露試験開始15年経過後の成果をまとめたものである。まとめに当たり、分かりやすいように試験の経過を経年的に表の形でまとめた。15年の実施内容は以下の通りである。

1. 施設本体の調査(観測小屋、観測塔含む)
外観、光沢、インピーダンス、写真
2. 施設本体を利用した簡易塗り替え実験の調査
外観、写真
3. 施設本体を利用した補修実験の調査
外観、写真
4. 暴露試験片の調査
 - 1) 現行(スタート時)塗装システム(系統A)
 - 2) 開発中(スタート時)の塗装システム(系統B)
 - 3) 部分補修仕様(TPNo. 88-Jシリーズ)
 - 4) 簡易塗替仕様(TPNo. 88-Lシリーズ)
 - 5) 塗替塗装の防食性評価(その1)
(無塗装板、塗り残し部)(TPNo. 91シリーズ)

目 次

まえがき

1. 研究の経緯	1
1. 1 研究目的	1
1. 2 本研究開始までの塗装に関する研究の経緯	1
1. 3 官民共同研究開始の経緯と進め方	3
2. 研究施設等	7
2. 1 海洋技術総合研究施設設置までの経緯	7
2. 2 海洋技術総合研究施設の場所	7
2. 3 海洋技術総合研究施設の概要	7
3. 研究の経過	10
4. 研究内容	17
4. 1 新設塗装システムの研究	17
4. 2 施設本体の塗装	17
4. 3 簡易塗替え塗装システムの開発	50
4. 4 部分補修仕様, 簡易塗替仕様の検討	56
4. 5 塗替え塗装の防食性試験	67
5. 施設本体の補修塗装経過	76
5. 1 補修塗装	76
6. 今後の課題	77
6. 1 研究の成果	77
6. 2 海洋暴露施設としての体制整備	78
6. 3 新しい要求に応じた研究	78
あとがき	80
付属資料	81
研究施設の全景、施設本体、試験片の代表写真	

1. 研究の経緯

1. 1 研究目的

駿河湾内の静岡県大井川沖に科学技術振興調整費によって、「海洋技術総合研究施設」が設置された。この施設はわが国で最初の恒久的な海洋試験施設で、今後の海洋における防錆防食試験の標準試験場と位置付けられるものである。

この施設を使用して「海上大気中の長期防錆塗装技術に関する研究」を行った。海上大気中の防錆塗装は、新しい塗料の開発や塗装方法の改善によって塗装の品質も改善し、海上でも10年以上の耐久性を有する塗装システムが得られたことは、これまで実施してきた試験研究で確認しているが、今後、海洋をより有効に活用するためには、さらに耐久性の高い新規の長期防錆塗装技術の開発が望まれている。

本研究ではこのため海上で少なくとも20年の耐久性を有することを目標とし、実海域での試験を体系的に行うことにより、高性能で信頼性の高い長期防錆塗装技術の開発を行うこととした。

1. 2 本研究開始までの塗装に関する研究の経緯

建設省土木研究所は駿河湾において長期防錆塗装技術に関する共同研究を開始する以前から、鋼道路橋などの土木構造物の防錆塗装関連分野で数多くの調査試験を実施してきた。

調査試験のほとんどは、官民合同の共同研究スタイルが建設省で制度化される以前であったので、研究目的を同じくする官民の技術者達が集まり、研究会を組織して試験研究を実施してきた。しかし、今回の駿河湾における共同研究は、民間活力の導入を図る目的で設けられた制度のもとで実施しているものであり、調査試験の進め方の体制は異なるものの、塗料メーカーやファブリケーター等、民間企業から選ばれたわが国における第一級の研究者の積極的な協力のもとに実施された点では共通している。これらの調査試験の積み重ね経験があったからこそ、駿河湾の研究に繋がったということができる。これら駿河湾以前の調査試験の経緯を年代順に列举すると以下のようである。

(1) 若戸大橋の防錆塗装に関する試験（昭和34年～36年）

建設省土木研究所において塗装関連の調査試験が行われるようになったのは、戦後の混乱から完全に立ち直り、経済的にも発展段階を迎えた昭和30年代に入ってからで、当時、東洋一の吊り橋と言われた若戸大橋（昭和37年9月竣工）の防錆塗装に関する試験を現地暴露試験や促進劣化試験より行った。

(2) 本州四国連絡橋の防錆塗装に関する試験（昭和38年～45年）

昭和30年代後半に本州四国連絡橋の架設計画が具体化したため、それまで国鉄が実施してきた塗料の暴露試験に引き続いて、第二次試験を計画した際に建設省もそれに歩調を合わせて、昭和38年度末から大気暴露試験により下記の試験を行った。

- ① 塗料メーカー銘柄品間の防錆効果の差異
- ② 下地処理の種類による防錆効果の差異
- ③ ウォッシュプライマーの種類による防錆効果の差異
- ④ 鉛丹塗料の防錆効果
- ⑤ 鉛系さび止め顔料の種類による防錆効果の差異
- ⑥ 塗膜の防錆性におよぼす塗装時期の影響

⑦塗膜の耐久性におよぼす鋼種の影響

⑧ジンクリッチプライマーの種類による防錆効果の差異

その後、新しい塗料や塗装系の調査が必要になり、以下の試験を追加した。

⑨上塗り塗料（5R/14：赤）の変退色試験

⑩長期防錆型塗装系の耐久性試験

⑪合成樹脂塗料による塗り替え試験

⑫ジンクリッチ塗膜に対する各種塗料の付着性試験

⑬飛沫帯および干満帯における塗替え試験

⑭海上長大橋用着色塗料の変退色性試験

⑮フェノールジンクロメートさび止めペイントの品質と防錆効果に関する試験

（３）東京湾横断道路の防錆に関する試験（昭和46年～56年）

東京湾横断道路橋の防食について、以下の試験を行った。

①長期防錆型塗装系の耐久性におよぼす塗装行程の影響に関する試験

②高力ボルト接合面の防錆性に関する試験

③さび面用塗料の実用性に関する試験

④粉体エポキシ塗装鉄筋の耐食性試験

⑤有害金属を含まない無公害型塗料の実用性能に関する試験

⑥塗装と電気防食併用法に関する試験

⑦塗膜厚検査法に関する基礎的試験

⑧長期防錆型塗装系の塗替えに関する試験

（４）構造材料の防食技術に関する研究（昭和48～51年、国土開発技術研究センター、鋼管杭協会との共同研究）

海域に建設される土木構造物において、とりわけ腐食が著しい飛沫帯および防食皮膜の補修が困難な干満帯に適用する防食技術を開発する目的で実施されたもので、建設省土木研究所における共同研究の第一号となったものである。

（５）飛沫帯および干満帯に適用する防食技術の開発（昭和52～61年、鋼管杭協会に委託）

（４）の後を受け継ぎ10年間の長期にわたって実施したもので、駿河湾における飛沫帯および干満帯の防食技術に関する開発研究の基礎となった。

（６）海洋構造物の塗替えに関する試験（昭和54～58年、日本鋼橋塗装専門会との共同研究）

（７）防食材料の促進劣化に関する試験（昭和55～58年、日本鋼橋塗装専門会、土木研究センターとの共同研究）

紫外線、塩分、湿度など複数の塗膜劣化要因を任意に組み合わせ、塗膜劣化を促進する複合環境試験装置を試作し、大気暴露試験結果と相関性の良い結果が得られる試験条件を見出すための試験をはじめ、促進耐候性試験、塩水噴霧試験、耐湿試験など促進劣化試験を行った。また、並行して沖縄、千葉県市川市、茨城県阿字ヶ浦での暴露試験や全国規模の鋼道路橋塗装実態調査を行うなどにより、防食材料の促進劣化試験法の確立および塗替え塗装基準作成のための基礎資料を得た。

1. 3 官民共同研究開始の経緯と進め方

1. 3. 1 共同研究開始の経緯

(1) 科学技術庁の研究計画

科学技術庁は昭和57年度から科学技術振興調整費によって、5箇年計画で「海洋構造物による海洋空間等の有効利用に関する研究」をスタートした。その研究項目は次の通りである。

- ①海洋構造物の設計・施工等に必要な自然環境を把握する技術の開発
- ②大型の浮遊式海洋構造物の建設基礎技術の開発
- ③厳しい波浪から海洋構造物を守る波浪制御
- ④防食等による海洋構造物の耐久性向上技術の開発
- ⑤大波浪海域における海洋構造物の実海域実施研究

(2) 建設省土木研究所の研究計画

上記のうち、建設省土木研究所が担当することになった研究計画は、④の「防食等による海洋構造物の耐久性向上技術の開発」研究である。この研究は官民共同研究として進めた。そして暴露試験は、駿河湾静岡県側大井川沖の「海洋技術総合研究施設」を利用して実施することとなった。共同研究の実施機関は次の通りである。

(官側) 建設省土木研究所

(民側) 社団法人 鋼材倶楽部

社団法人 プレストレスト・コンクリート建設業協会

財団法人 土木研究センター

ただこの研究は「耐久性の向上」をめざしており、耐久性に関する試験はこれまでの内外の例をみても比較的長期の実験となっているので、実海域での数年間の短期的な暴露試験では、本来的な目的が達成されないことが明らかであるので、科学技術庁が設定した5年間（昭和57～61年）が終了したのち、昭和62年以降も暴露試験を継続することとしてスタートした。

共同研究は当面20年間を目処としているが、社会情勢の変化、試験内容の進化等が予想されるので、さし当たり昭和58年度（1983）から平成5年度（1993）までの10年間の研究計画を策定している。

(3) 共同研究の目的

海洋技術総合研究施設を用いて、海洋構造物を対象とする高度な防食技術の開発およびそれらの長期耐久性評価を行うことを目的とする。

(4) 共同研究の名称と分担

共同研究の名称は「海洋構造物の耐久性向上技術に関する研究」である。また、共同研究の研究項目別の分担等を表1.3.1に示す。

表 1. 3. 1 共同研究課題と分担

研 究 項 目	研 究 細 目	研究分担
1. 飛沫部および干満部における鋼構造物の防食技術に関する研究	1) 防食被覆材料の適用試験（本体） 2) 防食被覆材料の耐久性試験（防食供試体）	A B B
2. 飛沫部におけるコンクリート構造物の防食技術に関する研究	1) コンクリート中の鋼材の防食技術の開発 2) 耐海水コンクリート部材の設計技術の開発	A C
3. 海中部における電気防食設計技術に関する研究	1) 構造形状に応じた電気防食設計法の開発試験 2) 塗装併用電気防食技術の開発実験	A D
4. 海上大気部の長期防錆型塗装技術に関する研究	1) 長期防錆型塗装系の適用試験 2) 長期防錆型塗装系の耐久性試験	A D
5. 研究成果のまとめ		A B C D

注) A：土木研究所 B：鋼材倶楽部

C：プレストレスト・コンクリート建設業協会 D：土木研究センター

1. 3. 2 共同研究の進め方

(1) 共同研究の運営体制

海洋構造物の耐久性向上技術に関する共同研究協定を建設省土木研究所と民間3団体とで毎年締結する。共同研究を円滑かつ効果的に運営するため、次の組織を設けて業務を推進する。

①防錆防食技術開発委員会（開発委員会）

- ・研究計画の審議
- ・研究成果報告の審議

②共同研究連絡調整会議（連絡調整会議）

- ・研究運営の連絡調整

③共同研究分科会（第1、第2、第3の3分科会とする）

（各分科会内でさらに組織を分けることがある）

- ・研究計画の原案作成
- ・研究の実施
- ・研究報告書の原案作成

④共同研究事務局

- ・土木研究センター内に設置
- ・委員会、連絡調整会議の開催
- ・委員会資料等の作成
- ・共同研究報告書のとりまとめ作成

(2) 分科会の構成

- ①第1分科会：土木研究所、鋼材倶楽部で構成し、共同研究実施機関以外の防食試験担当会社（12社2団体）が参加所属する。第1分科会にワーキンググループを編成し、第1WGは耐食性金属材料部門、第2WGは高分子系塗覆装防食材部門としている。

②第2分科会：土木研究所、プレストレスト・コンクリート建設業協会で構成し、共同研究実施機関以外の（社）セメント協会が参加所属する。

③第3分科会：土木研究所、土木研究センターで構成し、塗料部門と電気防食部門よりなる。

(3) 共同研究第3分科会塗料部門の研究担当者

(主査) 田邊弘往 大日本塗料株式会社

明嵐政司 建設省土木研究所材料施工部化学研究室長

守屋 進 建設省土木研究所材料施工部化学研究室主任研究員

金井浩一 財団法人土木研究センター

多記 徹 大日本塗料株式会社

中家俊和 関西ペイント株式会社

安井正宏 日本ペイント株式会社

これまでの第3分科会塗料部門の研究関係者を以下に示す。

蒔田 實 建設省土木研究所地質化学部長

(現 ニチレキ株式会社)

森 芳徳 建設省土木研究所地質化学部化学研究室長

(元 財団法人土木研究センター参与)

片脇 清 建設省土木研究所材料施工部長

(現 社団法人日本鋼橋塗装専門会)

坂本浩行 建設省土木研究所材料施工部化学研究室長

(現 ニチレキ株式会社)

西崎 到 建設省土木研究所材料施工部化学研究室主任研究員

寺田 剛 建設省土木研究所材料施工部化学研究室

(現 舗装研究室)

佐々木巖 建設省土木研究所材料施工部化学研究室

田中柳之助 (元)財団法人土木研究センター理事

橋本定明 (元)関西ペイント株式会社 (現 財団法人日本塗料検査協会)

西本 悟 関西ペイント株式会社

白井健三 々

後藤健夫 々

森野光治 々

村松利光 々

安達良光 々

松本康幸 々

岡 修治 々

富田賢一 々

篠原稔雄 大日本塗料株式会社

永井昌憲 々

松野英則 々

小川 修	々	
岩瀬嘉之	々	
松本剛司	々	
辻 敏幹	々	
大川敏夫	(元)大日本塗料株式会社	
福島 稔	(元)日本ペイント株式会社	(現 社団法人鋼橋塗装専門会)
門田 進	日本ペイント株式会社	
井上勇一	々	
岡本洋輔	々	
福田英夫	々	
石原嘉孝	々	
武吉理夫	々	
藤城正樹	々	
岡本 聡	々	

2. 研究施設等

2. 1 海洋技術総合研究施設設置までの経緯

2. 1. 1 海洋技術総合研究施設計画の経緯

昭和56年度から開始した「海洋構造物による海洋空間等の有効利用に関する研究」の一環として、建設省土木研究所化学研究室は「防食等による海洋構造物の耐久性向上技術」に関する研究を開始するため、海洋暴露試験施設の設置を検討し適地選考を開始した。

また、建設省中部地方建設局静岡河川工事事務所は、駿河海岸や富士海岸で海岸浸食や高波による災害防止のための海岸保全事業を実施しており、特に、駿河海岸では海岸浸食が激しく、浸食機構と防止工法等のための調査が必要であるとの判断から観測施設を必要としていた。

したがって、暴露試験用の施設としてのみならず、総合的に海域の自然条件を調査し、沿岸の防災にも役立つ施設となる海洋技術総合研究施設として計画された。

2. 1. 2 研究項目

まず、海上の風、波浪、潮流、水質、地形、地質など自然条件を明らかにするための観測とその実態把握が挙げられる。つぎに、海岸防災に関する研究、すなわち海岸への土砂供給現象、海浜変形等に対する対策用、および漂砂現象の解明等海岸浸食防止対策工法の開発のための研究がある。さらに構造物の安定性に関して、強大な波力に抵抗できる構造形式や疲労が問題であり、耐久性に関しては、鋼やコンクリート構造物の腐食が問題とされ、これらの技術開発用研究が必要であった。

計画時に検討された主要な研究項目は、次のとおりである。

- ・ 海洋構造物の耐久性向上技術に関する研究
- ・ 自然環境条件の調査
- ・ 海岸浸食対策に関する調査研究
- ・ 海洋構造物の安定性に関する調査研究

2. 1. 3 海洋技術総合研究施設の建設地点

以上の研究を推進するための適地の選定に当たり、大井川町、大井川漁業協同組合等の理解と協力を得て、駿河海岸の静岡県志太郡大井川町高新田地先(沖合)を設置地点と決定した。

2. 2 海洋技術総合研究施設の場所

施設の位置は、駿河海岸の静岡県志太郡大井川町高新田地先(沖合)である。設置地点汀線付近は、勾配1/10で比較的きついが、水深5mより沖では海底勾配1/80と緩い。また、しらす漁に支障ないように海岸線から約250m沖合い、水深7.5mの位置に設置するよう計画された。東経138°55'、北緯34°47'17"の地点である。

2. 3 海洋技術総合研究施設の概要

研究施設の構造と試験への利用の概要を図2.2.1に示す。また、施設の諸元を表2.3.1に示す。

表 2.3.1 海洋技術総合研究施設諸元

項 目	緒 元
第1デッキ	高さ T.P. + 13.9m、面積 189 m ² (10.5m × 18.0m)
第2デッキ	高さ T.P. + 8.9m、面積 255 m ² (15.0m × 15.0m + 4.0m × 7.5m)
第3デッキ	高さ T.P. + 2.0m、面積 56.25 m ² (7.5m × 7.5m)
海底面標高	深さ T.P. - 7.5m
気象観測用張出し	第2デッキの3カ所
荷揚げ用張出し	第2デッキに1カ所
観測タワー	第1デッキ上面から高さ 13.1m
観測建屋	第1デッキ上 10.7 m ² (4.5m × 2.38m)
設計条件	鋼管杭基礎 (9本) を有するジャケット構造 HWL: T.P. + 0.85m MSL: T.P. + 0.15m LWL: T.P. - 0.7m 海底面土質: 砂質土 潮流: 0.5m/s、設計波高: H _{max} = 7.7m 床荷重: 第1デッキ: 40MPa、第2デッキ 35.6MPa、第3デッキ 35.6MPa
本体防錆防食法	海上大気部: 長期防錆型塗装、飛沫干満部: 重防食塗覆装 海中部: アルミニウム合金陽極使用電気防食法 (一部重防食塗覆装と併用) (これらの防錆防食法は、試験の一部とする)
施工条件	製作工場 (北九州) より海上運搬 → ジャケット据えつけ → 鋼管杭打設・固定 → デッキ (上部鋼構造物) 搭載・固定 → 各種装備 → 完成

建設省土木研究所が本施設を発注し、昭和58年度に完成した。その後、本施設は建設省中部地方建設局静岡河川工事事務所に所管替えとなったので、維持管理は同工事事務所が行っている。

なお、海上大気中の長期防錆塗装技術に関する研究は、第1デッキに設置した暴露施設により行った。暴露施設を図2.2.2に示す。

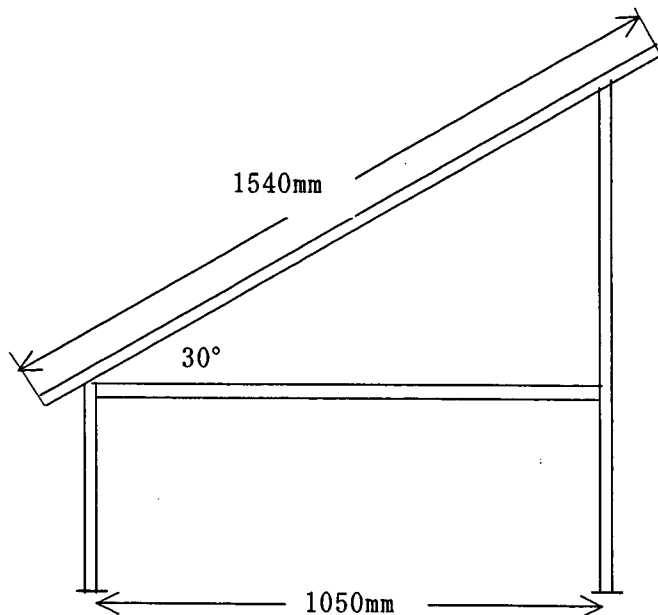
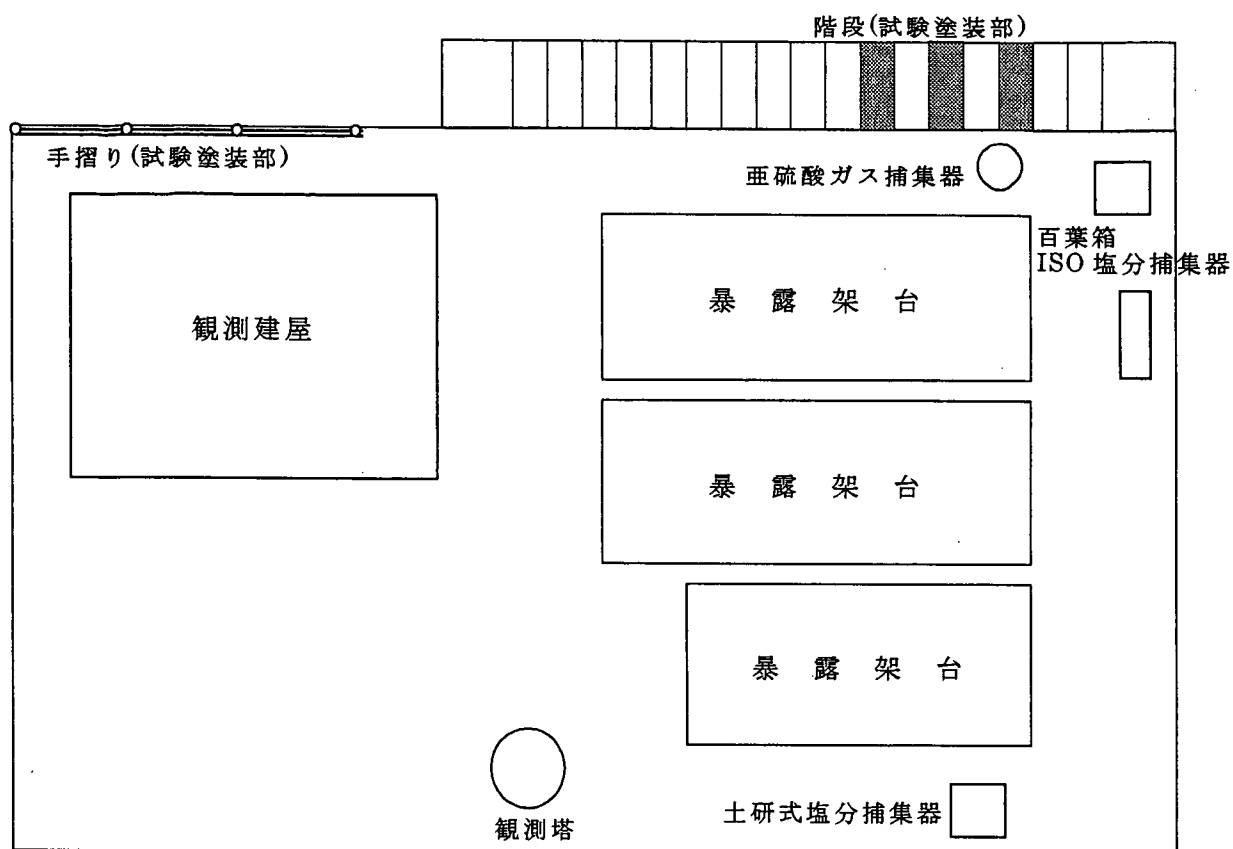


図 2.2.2 環境測定施設および暴露架台

3. 研究の経過

海洋技術総合研究施設は、昭和58年度（1983）に工場で製作され、そこで塗装後、海上を曳航され現地に設置された。

試験片による暴露試験は昭和59年度（1984）から実施した。腐食環境の測定も同時に実施したが、その後随時試験を追加し、昭和61年（1986）からはISOの全世界にわたる試験の一環としての環境測定も行った。

調査は、毎年定期的の実施し、年度毎の研究の経過を表3. 1に示す。

次にテーマごと実施経過を表3. 2に示す。

表3. 1 研究の経過

年 度	実 施 項 目	実 施 内 容
昭和58年 (1983)	1) 共同研究の開始	建設省土木研究所と(財)土木研究センターによる共同研究を開始し、研究組織を作った。 (財)土木研究センターの研究実施には、日本ペイント(株)、関西ペイント(株)、大日本塗料(株)がこれに参加した。
	2) 研究計画の立案	研究目的と研究実施計画等の立案を行った。
	3) 研究施設の製作 および防錆塗装 の実施	研究施設（ジャケット構造）は建設省土木研究所の発注により製作され、昭和58年(1983) 11月から翌年2月にわたって研究対象となる防錆塗装を行った。
	4) 研究施設の設置	研究施設が海上曳航され、駿河湾大井川町沖合の現地に設置された。
昭和59年 (1984)	1) 暴露試験片の作製 と取付け	1) 塗装鋼材の劣化機構と劣化予測技術の研究 2) 新設塗装システムの研究 3) 塗替塗装システムの研究 上記1)2)3)の試験片を製作して取付けた。
	2) 施設本体と暴露試験片の塗膜の初期値の測定	塗膜の初期性能を測定した。

昭和60年 (1985)	1) 1年後の塗膜状態の測定	1) 塗装鋼材の劣化機構と劣化予測技術の研究のための試験片を回収して調査した。 2) その他の試験片と試験本体の塗膜について、現場で調査した。
	2) 環境の測定	付着塩分量と鋼材の表面温度を測定した。
	3) 試験片による塗替塗装試験の実施	1年間暴露した試験片を回収して、各種の仕様で塗替塗装を行い、再び暴露した。
	4) 土研式飛来塩分測定装置の取付けと塩分量の測定	土研式飛来塩分測定装置を第1デッキに4方向、第2デッキに1方向取付けた。
	5) 腐食量測定鋼材の取付け	4種類の鋼材を第1デッキの日照面と裏面、第2デッキの日照面に取付けた。
昭和61年 (1986)	1) 2年後の塗膜状態の測定	試験片と施設本体の塗膜について、現場で測定を行った。
	2) 環境の測定	1) 飛来塩分量と鋼材の表面温度を測定した。 鋼材の1年後の腐食減量を測定した。 2) ISO/TC156/WG4 共同暴露場として、気温・湿度・ぬれ時間（気温と湿度とから推定）、亜硫酸ガスの測定、海塩粒子の測定設備を取付け、測定を開始した。
昭和62年 (1987)	1) 3年後の塗膜状態の測定	1) 塗装鋼材の劣化機構と劣化予測技術の研究のための試験片については、現地調査と、試験片を回収して膜厚の変化と塩素イオン侵入度の測定および塗膜表面の電子顕微鏡観察を行った。 2) その他の試験片と施設本体の塗膜については、現場で測定を行った。
	2) 環境の測定	1) 鋼材の2年後の腐食減量を測定した。 2) 飛来塩分量の測定とISO方式による環境測定を行った。

昭和63年 (1988)	1) 4年後の塗膜状態の測定	試験片と施設本体の塗膜について、現場で測定を行った。
	2) 暴露環境条件の測定	1) 鋼材の3年後の腐食減量を測定した。 2) 飛来塩分量の測定とISO方式による環境測定を行った。 3) 気温・湿度・各種部位の暴露環境の条件の測定を開始した。
	3) 施設本体の塗替塗装の実施	施設本体の一部に塗替塗装を行った。
	4) 新規暴露試験片の取付け	部分補修仕様が防食性に及ぼす影響を検討するための試験片を取付けた。
平成元年 (1989)	1) 5年後の塗膜状態の測定	1) 塗装鋼材の劣化機構と劣化予測技術の研究のための試験片を回収して測定した。 2) その他の試験片と施設本体の塗膜については、現場で測定を行った。
	2) 環境の測定	1) 鋼材の4年後の腐食減量を測定した。 2) 飛来塩分量の測定とISO方式による環境測定を行った。
平成2年 (1990)	1) 6年後の塗膜状態の測定	試験片と施設本体の塗膜について、現場で測定を行った。
平成3年 (1991)	1) 7年後の塗膜状態の測定	試験片と施設本体の塗膜について、現場で測定を行った。
平成4年 (1992)	1) 8年後の塗膜状態の測定	試験片と施設本体の塗膜について、現場で測定を行った。
	2) 新規暴露試験片の取付け	塗替塗装仕様検討用の試験片を取付けた。
平成5年 (1993)	1) 9年後の塗膜状態の測定	試験片と施設本体の塗膜について、現場で測定を行った。
	2) 暴露試験片の回収	部分補修仕様を検討するための試験片を取り外した。 (暴露5年後)

平成6年 (1994)	1) 10年後の塗膜状態の測定	試験片と施設本体の塗膜について、現場で測定を行った。
	2) 環境の測定	鋼材の10年後の腐食減量を測定した。
	3) 塗替試験片の取付け	前年に取外した部分補修仕様に塗替仕様の塗装を行い、初期データを取り試験片を暴露した。
平成7年 (1995)	1) 11年後の塗膜状態の測定	試験片と施設本体の塗膜について、現場で測定を行った。
	2) 暴露試験片の取外し	1) 部分補修仕様、簡易塗替仕様検討用の試験片を取外した。(旧塗膜の暴露7年後) 2) 塗替塗装の防食性検討用の試験片(塗残し部有)とサンドブラスト鋼板を取外した。 (旧塗膜、サンドブラスト鋼板とも暴露3年後)
平成8年 (1996)	1) 12年後の塗膜状態の測定	試験片と施設本体の塗膜について、現場で測定を行った。
	2) 暴露試験片の取付け	前年に取外した塗替塗装の防食性検討用の試験片(塗残し部有)と、サンドブラスト鋼板に塗替塗装して再度取付けた。
	3) 海洋技術総合研究施設修理依頼用資料作成	海洋技術総合研究施設も建造10年以上経過しているため老朽化が目立つ。そこで、関係部署に施設の補修、修理を依頼するための説明資料を作成した。
	4) 新規研究テーマの調整	今後10年を対象として、社会に貢献する新しい研究テーマを持ち上げ、新たに暴露することにした。

平成9年 (1997)	1) 13年後の塗膜状態の測定	試験片と施設本体の塗膜について、現場で測定を行った。
	2) 付着強度の測定<1>	テーマ名”部分補修仕様の検討”で、補修後5年経過した塗膜の付着強度を測定した。
	3) 付着強度の測定<2>	テーマ名”簡易塗替仕様の検討”で、塗替後3年および5年経過した塗膜の付着強度を測定した。
	4) 施設本体の補修試験を実施	第2～第1デッキ間の「階段部」および第1デッキ北側「手摺り部」で下記要領で補修試験を行った。ただし、日程の都合で、上塗塗料の塗装は来年度とした。 [補修試験要領] ①手ケレン②変性エポキシ塗装③超厚膜形エポキシ塗装
平成10年 (1998)	1) 14年後の塗膜状態の測定	試験片と施設本体の塗膜について、現場で測定を行った。
	2) 施設本体の補修試験の実施	第2～第1デッキ間の「階段部」および第1デッキ北側「手摺り部」で下記要領で補修試験を行った。 [補修試験要領] ①中塗塗装②ふっ素樹脂塗料上塗塗装
平成11年 (1999)	1) 15年後の塗膜状態の測定	試験片と施設本体の塗膜について、現場で測定を行った。
	2) 付着強度の測定<1>	テーマ名”部分補修使用の検討”で、補修後7年経過した塗膜の付着強度を測定した。
	3) 付着強度の測定<2>	テーマ名”簡易塗替仕様の検討”で、塗替後3年経過した塗膜の付着強度を測定した。

表3. 2(1) 暴露試験研究テーマの経緯

研究テーマ名	評価項目	研究期間 (予定含む)	実施の内容
腐食環境調査	鋼材の腐食減量測定	昭和60年(1985年)	・暴露2年後(昭和62年)、暴露4年後(平成元年)および暴露10年後(平成6年)の腐食減量測定 済。継続暴露は各鋼材2枚ずつ。 ・詳細は共同研究報告書144号に報告済み。
	飛来塩分量測定	昭和60年(1985年)	・昭和60年(1985年)以降平成元年(1989年)まで毎年実施。 ・詳細は共同研究報告書144号に報告済み。
鋼材の劣化機構と劣化予測の研究	水蒸気透過、酸素透過 付着性、インピーダンス 塩素侵入度、外観観察 膜厚変化、組成分析(IR)、カレント インタラプタ、コロージョンレ トメーター	昭和59年(1984年) ↓ 平成元年(1989年) 〈終了〉	・平成元年(1989年)暴露5年後の塗膜状態測定のため試験片を取外し回収した。 ・研究終了 ・5年間の成果を平成元年報告書(平成2年3月発行)に詳細報告済。 ・詳細は共同研究報告書144号に報告済み。
塗替え塗装システムの研究 (発錆度の異なる試験片 →旧塗膜はエポキシ樹脂塗料)	一般部のさび、ふくれ 塗残し部のさび、ふくれ 塗残し部のさびの侵入幅	昭和60年(1985年) ↓ 平成元年(1989年) 〈終了〉	・平成元年(1989年)暴露5年後の塗膜状態測定のため試験片を取外し回収した。 ・研究終了 ・5年間の成果を平成元年報告書(平成2年3月発行)に詳細報告済。 ・詳細は共同研究報告書144号に報告済み。
新設塗装システムの研究 1. 現行長期防錆システム (系統A) 2. 開発中の塗装システム (系統B)	外観観察、光沢、付着性 顕微鏡観察(塗膜表面) インピーダンス	昭和59年(1984年)	・外観観察、光沢測定は毎年実施中。 ・平成6年(1994年)暴露10年後の試験片を取りはずし、回収し付着強度測定、顕微鏡観察(塗膜表面)、インピーダンス測定を実施した。 ・継続調査予定。 ・詳細は本文参照。
施設本体の塗装システムの研究	外観観察、光沢、付着性 インピーダンス 膜厚変化	昭和59年(1984年)	・光沢、インピーダンス測定および外観観察は毎年実施中。 ・付着性、膜厚測定は5年毎に測定中。 ・継続調査予定。 ・平成6年(1994年)で暴露10年。 ・詳細は本文参照。
施設本体の簡易塗替え塗装システムの開発	外観観察 基盤目付着性	昭和63年(1988年)	・外観観察は毎年実施中。 ・基盤目付着性は暴露5年後(平成5年)までは5年毎に、暴露6年(平成6年)以降は2年毎に測定。 ・平成6年(1994年)で暴露6年。 ・今後も継続評価予定。 ・詳細は本文参照。

表3. 2(2) 暴露試験研究テーマの経緯

研究テーマ名	評価項目	研究期間 (予定含む)	実施の内容
部分補修仕様、簡易塗替仕様の 検討 (TPN0.88-Jシリーズ) (TPN0.88-Lシリーズ)	旧塗膜 ……外観観察 塗替塗膜 ……基盤目試験 アドヒージョン	昭和63年(1988年)	・第1回の旧塗膜回収は、暴露2年後の平成2年(1990年)。 ↓ 塗替塗膜は平成4年(1992年)暴露開始。 ・第2回目の旧塗膜回収は、暴露5年後の平成5年(1993年)。 ↓ 塗替塗膜は平成6年(1994年)暴露開始。 ・第3回目の旧塗膜取外しは、暴露7年後の平成7年(1995年)。 ↓ 塗替塗膜は平成8年(1996年)暴露開始。 ・詳細は本文参照。
塗替塗装の防食性評価<その1> (無塗装板、塗り残し部) (TPN0.91-シリーズ)	旧塗膜、塗替塗膜ともに 外観観察、カレントインタラプタ インピーダンス、断面写真	平成4年(1992年)	・旧塗膜、サンドブラスト鋼板とも平成7年(1995年)暴露3年後の試験 片を回収した。 ↓ 塗替塗膜は平成8年(1996年)暴露開始予定。 ・今後も継続評価予定。
上塗りの種類、膜厚が塗膜の防 食性に及ぼす影響に関する研究	外観、光沢、写真 塗膜下素地の観察 付着性(引張り、基盤目) 分極抵抗(カレントインタラプタ) 塗膜抵抗(インピーダンス) 腐食電流(コロージョンレートメ ーター)	平成4年(1992年)	・暴露7年後の試験片を回収し各種測定を開始。 ・今後も継続評価予定。

4. 研究内容

4. 1 新設塗装システムの研究

4. 1. 1 目的

海上長期防錆塗装システムを確立するために、現在用いられているシステムおよび開発中の新規塗装システムの性能確認を行う。

4. 1. 2 計画

(1) 供試塗装系

現行長期防錆システム(系統 A)、開発中の新規塗装システム(系統 B)の塗装系と膜厚を表 4. 1. 2 および表 4. 1. 3 に示した。

(2) 暴露場所

試験片は施設の第一デッキ(海上 13.9 m)に設置した暴露台に架設した。

(3) 調査項目

調査年度別の調査項目を表 4. 1. 1 に示した。

表 4. 1. 1 調査年度別調査項目

調査年度	昭和 59 (1984)	昭和 60 (1985)	昭和 61 (1986)	昭和 62 (1987)	昭和 63 (1988)	平成 1 (1989)	平成 2 (1990)	平成 3 (1991)	平成 4 (1992)	平成 5 (1993)	平成 6 (1994)
経過年数	初期	1 年	2 年	3 年	4 年	5 年	6 年	7 年	8 年	9 年	10 年
外観観察	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
光沢	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
顕微鏡写真											○
インピーダンス											○

調査年度	平成 7 (1995)	平成 8 (1996)	平成 9 (1997)	平成 10 (1998)	平成 11 (1999)	平成 12 (2000)	平成 13 (2001)	平成 14 (2002)	平成 15 (2003)	平成 16 (2004)	平成 17 (2005)
経過年数	11 年	12 年	13 年	14 年	15 年	16 年	17 年	18 年	19 年	20 年	21 年
外観観察	○	○	○	○	○		○			○	
光沢	○	○	○	○	○		○			○	
顕微鏡写真										○	
インピーダンス										○	

(空欄は調査を実施しない)

(4) 評価方法

1) 外観観察

さび、ふくれ、白亜化を目視観察し、その劣化の程度を日本塗料検査協会「塗膜の評価基準」を用いて評価した。

2) 光沢

光沢計にて 60 度鏡面光沢度を測定した。

表 4. 1. 2 現行長期防錆塗装システム (系統 A)

No.	第 1 層	第 2 層	第 3 層	第 4 層	第 5 層	第 6 層	第 7 層
1	長ばくエッチング プライマー (15 μ m)	鉛系さび止めペイント (35 μ m)	鉛系さび止めペイント (35 μ m)	フタル酸樹脂塗料 中塗 (30 μ m)	フタル酸樹脂塗料 上塗 (25 μ m)		
2	長ばくエッチング プライマー (15 μ m)	鉛系さび止めペイント (35 μ m)	鉛系さび止めペイント (35 μ m)	フェノールM I O 塗料 (45 μ m)	塩化ゴム系塗料 中塗 (35 μ m)	塩化ゴム系塗料 上塗 (30 μ m)	
3	無機ジंकリッチ プライマー (20 μ m)	塩化ゴム系塗料 下塗 (45 μ m)	塩化ゴム系塗料 下塗 (45 μ m)	塩化ゴム系塗料 中塗 (35 μ m)	塩化ゴム系塗料 上塗 (30 μ m)		
4	厚膜形無機ジंकリッ チペイント (75 μ m)	ミストコート	フェノールジंकロ プライマー (30 μ m)	フェノールM I O 塗料 (60 μ m)	フェノールM I O 塗料 (60 μ m)	塩化ゴム系塗料 中塗 (35 μ m)	塩化ゴム系塗料 上塗 (30 μ m)
5	無機ジंकリッチ プライマー (20 μ m)	エポキシ樹脂塗料 下塗 (60 μ m)	エポキシ樹脂塗料 下塗 (60 μ m)	ポリウレタン樹脂塗 料用中塗 (30 μ m)	ポリウレタン樹脂 塗料上塗 (30 μ m)		
6	厚膜形無機ジंकリッ チペイント (75 μ m)	ミストコート	エポキシ樹脂塗料 下塗 (60 μ m)	エポキシ樹脂塗料 下塗 (60 μ m)	ポリウレタン樹脂塗 料用中塗 (30 μ m)	ポリウレタン樹脂 塗料上塗 (30 μ m)	
7	厚膜形無機ジंकリッ チペイント (75 μ m)	ミストコート	エポキシ樹脂塗料 下塗 (60 μ m)	エポキシ樹脂塗料 下塗 (60 μ m)	エポキシ樹脂M I O 塗料 (40 μ m)	ポリウレタン樹脂塗 料用中塗 (30 μ m)	ポリウレタン樹脂 塗料上塗 (30 μ m)
8	厚膜形無機ジंकリッ チペイント (75 μ m)	ミストコート	厚膜形ビニル樹脂 塗料 (150 μ m)	ビニル樹脂上塗 塗料 (30 μ m)			
9	厚膜形無機ジंकリッ チペイント (75 μ m)	ポリエステル樹脂ガラ スフレーク塗料 (350 μ m)	ポリエステル樹脂ガラ スフレーク塗料 (350 μ m)	ふっ素樹脂塗料 上塗 (20 μ m)	ふっ素樹脂塗料 上塗 (20 μ m)		

表4. 1. 3 開発中の塗装システム (系統B)

No.	第1層	第2層	第3層	第4層	第5層	第6層
1	エポキシ樹脂塗料 プライマー (20 μ m)	超厚膜形エポキシ樹脂 塗料 (2000 μ m)	ポリウレタン樹脂塗料 上塗 (35 μ m)			
2	ポリウレタン樹脂塗料 プライマー (20 μ m)	無溶剤形ポリウレタン樹脂 塗料 (1000 μ m)	ポリウレタン樹脂塗料 上塗 (35 μ m)			
3	ビニルエステル樹脂 プライマー (25 μ m)	ビニルエステルガラス フレーク塗料 (300 μ m)	ビニルエステルガラス フレーク塗料 (300 μ m)	ポリウレタン樹脂塗料 上塗 (30 μ m)		
4	無機ジnkリッチ プライマー (15 μ m)	厚膜形無機ジnkリッ チペイント (75 μ m)	シリコン樹脂塗料 上塗 (25 μ m)	シリコン樹脂塗料 上塗 (25 μ m)		
5	長ばくエッチング プライマー (15 μ m)	鉛系さび止めペイント (35 μ m)	鉛系さび止めペイント (35 μ m)	シリコンアルキド樹脂 塗料中塗 (30 μ m)	シリコンアルキド樹脂 塗料上塗 (25 μ m)	
6	無溶剤形タールウレタン 樹脂塗料 (2000 μ m)	ポリウレタン樹脂塗料 上塗 (30 μ m)				
7	ポリエステル樹脂ガラスフ レークプライマー (40 μ m)	ポリエステル樹脂ガラスフ レーク塗料 (350 μ m)	ポリエステル樹脂ガラスフ レーク塗料 (350 μ m)			
8	エポキシ樹脂ガラス フレーク塗料 (500 μ m)	エポキシ樹脂ガラス フレーク塗料 (500 μ m)	エポキシ樹脂ガラス フレーク塗料 (500 μ m)			
9	超厚膜形エポキシ樹脂塗料 (750 μ m)	超厚膜形エポキシ樹脂塗料 (750 μ m)				
10	無溶剤形エポキシ樹脂塗料 (500 μ m)					
11	亜鉛溶射 (75 μ m)	無機シーラー (20 μ m)	エポキシ樹脂塗料下塗 (60 μ m)	エポキシ樹脂塗料下塗 (60 μ m)	ポリウレタン樹脂塗料用 中塗 (30 μ m)	ポリウレタン樹脂塗料 上塗 (30 μ m)
12	厚膜形無機ジnkリッチ ペイント (75 μ m)	ミストコート	ふっ素樹脂塗料用 プライマー (100 μ m)	ふっ素樹脂塗料用中塗 (50 μ m)	ふっ素樹脂塗料上塗 (20 μ m)	ふっ素樹脂塗料上塗 (20 μ m)
13	長ばくエッチング プライマー (15 μ m)	鉛系さび止めペイント (35 μ m)	鉛系さび止めペイント (35 μ m)	フェノールM I O塗料 (50 μ m)	ふっ素樹脂塗料上塗 (20 μ m)	ふっ素樹脂塗料上塗 (20 μ m)
14	ポリウレタン樹脂塗料 プライマー (40 μ m)	超厚膜形ポリウレタン 樹脂塗料 (2000 μ m)				
15	亜鉛メッキ	エポキシ樹脂プライマー (50 μ m)	ふっ素樹脂塗料上塗 (20 μ m)			
16	エポキシ樹脂プライマー (30 μ m)	ふっ素樹脂塗料上塗 (20 μ m)	ふっ素樹脂塗料上塗 (20 μ m)			
17	長ばくエッチング プライマー (15 μ m)	厚膜形鉛系さび止め ペイント (50 μ m)	厚膜形鉛系さび止め ペイント (50 μ m)	ポリエステル樹脂塗料 上塗 (50 μ m)	ポリエステル樹脂塗料 上塗 (50 μ m)	
18	エポキシ樹脂ジnkリッチ プライマー (15 μ m)	ポリエステル樹脂塗料 下塗 (100 μ m)	ポリエステル樹脂塗料 上塗 (50 μ m)	ポリエステル樹脂塗料 上塗 (50 μ m)		

4. 1. 3 調査結果

現行長期防錆塗装システム(系統 A)の外観観察および光沢の測定結果を表 4. 1. 4 および図 4. 1. 1 に示した。開発中の新規塗装システム(系統 B)での外観観察および光沢の測定結果を表 4. 1. 5～6 および図 4. 1. 2 に示した。

(1) 防食性

1) 現行長期防錆システム

防食性はさびとふくれの発生で評価した。現行として用いられていた防錆塗装システム系統 A の中で一般環境に設置される構造物に適用される油性さび止め/フタル酸樹脂塗料の塗装システム(仕様 No. A-1)が暴露 13 年後までは異常が認められなかったが暴露 14 年後で点さびの発生が認められた。また上塗り塗膜の消耗により中塗りが 80% 程度露出している。

やや厳しい環境に適用される塩化ゴム系(仕様 No. A-2)は、さびの発生はないものの、上塗り塗膜の消耗により中塗りが 40～60%程度露出している。

一方、海洋環境などの厳しい環境に適用される厚膜形無機ジンクリッチペイント/エポキシ樹脂塗料下塗り/ポリウレタン樹脂塗料(仕様 No. A-6)などの塗装システムは暴露 15 年後もさびとふくれの発生は無く健全な状態であった。

2) 開発中の新規塗装システム

開発中の塗装システム 18 種類の内、さびやふくれなど防錆上の劣化が認められなかった塗装システムは

B-1 (エポキシ樹脂プライマー/超厚膜形エポキシ樹脂塗料/ポリウレタン樹脂塗料)

B-2 (ポリウレタン樹脂プライマー/無溶剤ポリウレタン樹脂塗料/ポリウレタン樹脂塗料)

B-3 (ビニルエステル樹脂プライマー/ビニルエステルガラスフレーク塗料/ポリウレタン樹脂塗料)

B-4 (無機ジンクリッチプライマー/厚膜形無機ジンクリッチペイント/シリコン樹脂塗料)

B-5 (長暴形エッチングプライマー/鉛系さび止め/シリコンアルキド樹脂塗料)

B-8 (エポキシ樹脂ガラスフレーク塗料)

B-11 (亜鉛溶射・無機シーラー/エポキシ樹脂塗料/ポリウレタン樹脂塗料)

B-12 (厚膜形無機ジンクリッチペイント/ミストコート/ふっ素樹脂塗料)

B-16 (エポキシ樹脂プライマー/ふっ素樹脂塗料)

防錆上の劣化が認められた塗装システムは

B-6 (無溶剤タールウレタン樹脂塗料/ポリウレタン樹脂塗料)は、はがれが認められた。上塗りが全面消耗し、素地からのはがれが 80～95%発生している。

B-7 (ポリエステルガラスフレーク)はエッジからのはく離が進行している。

B-9 (超厚膜形エポキシ樹脂塗料)は全面われが 12 年目から生じている。

B-10 (無溶剤エポキシ樹脂塗料)は試験板のエッジ部よりさびが発生し、塗膜に浮きを生じている。

B-13 (鉛系さび止め/フェノール MI0/ふっ素樹脂塗料)は 4 年目からふくれが発生した。

ふくれの成長は少ない。

B-14 (ポリウレタン樹脂プライマー/超厚膜形ポリウレタン樹脂塗料)は12年目から塗膜の浮きと層状のさびを生じている。

B-15 (亜鉛めっき/エポキシ樹脂塗料/ふっ素樹脂塗料)は5年目からふくれが発生した。その後ふくれの成長は少ない。

B-17 (長暴形エッチングプライマー/厚膜形鉛系さび止め/ポリエステル樹脂塗料)は12年目から、われ、はがれを生じている。

B-18 (エポキシジンクリッチプライマー/ポリエステル樹脂塗料)は7年目からふくれが発生した。その後ふくれの成長は少ない。

(2) 耐候性

耐候性は白亜化と光沢保持率で評価した。現行長期防錆システム(系統A)の光沢・白亜化の結果を表4.1.4および図4.1.1に、また開発中の新規塗装システム(系統B)の結果を表4.1.5、4.1.6および図4.1.2に示す。

上塗り塗料に用いた樹脂系はふっ素樹脂、シリコン樹脂、シリコンアルキド樹脂、ポリウレタン樹脂、塩化ゴム系樹脂、ビニル樹脂およびポリエステル樹脂である。

樹脂系により光沢、白亜化の程度が大きく異なった。ふっ素樹脂塗料を上塗りとした塗装系(仕様 No. A-9、B-12、B-13、B-15、B-16)は15年経過後も白亜化の発生はほとんどなく、光沢保持率の低下も他の塗装系と比較して少なかった。(図4.1.1)シリコン樹脂塗料(仕様 No. B-8)はふっ素樹脂系より劣るものの白亜化はほとんど生じておらず、また光沢に関しては光沢保持率は暴露15年で40%と低下が小さかった。これに対し、他の塗装系の光沢は、ポリウレタン樹脂塗料が3年、フタル酸樹脂塗料、塩化ゴム系樹脂塗料などは2年以内に光沢保持率が10%以下になった。

長期防錆塗装システムの上塗り塗料としては光沢保持性および耐白亜化に優れた材料が望まれており、現時点ではふっ素樹脂塗料が最も適していることを今回の試験結果から実証した。なお、ポリウレタン樹脂塗料を上塗りとした仕様は、今回のように試験片を暴露台に架設した場合、15年経過後は光沢も大きく低下し、白亜化もしているが、暴露初期の光沢値の低下や白亜化の程度は塩化ゴム系塗料やフタル酸樹脂塗料に比べて良好であり、使用部位によっては十分な耐候性を有するレベルの品質であると考えられる。

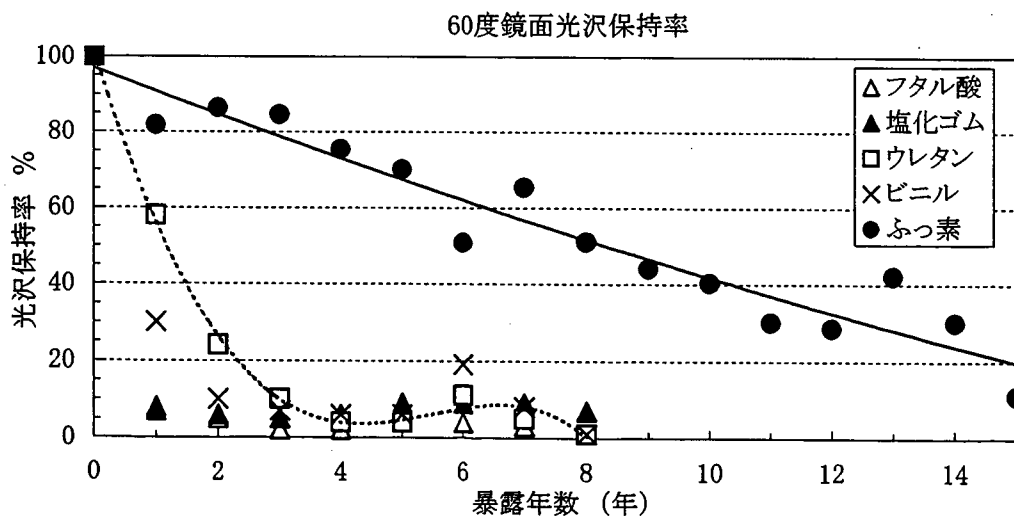
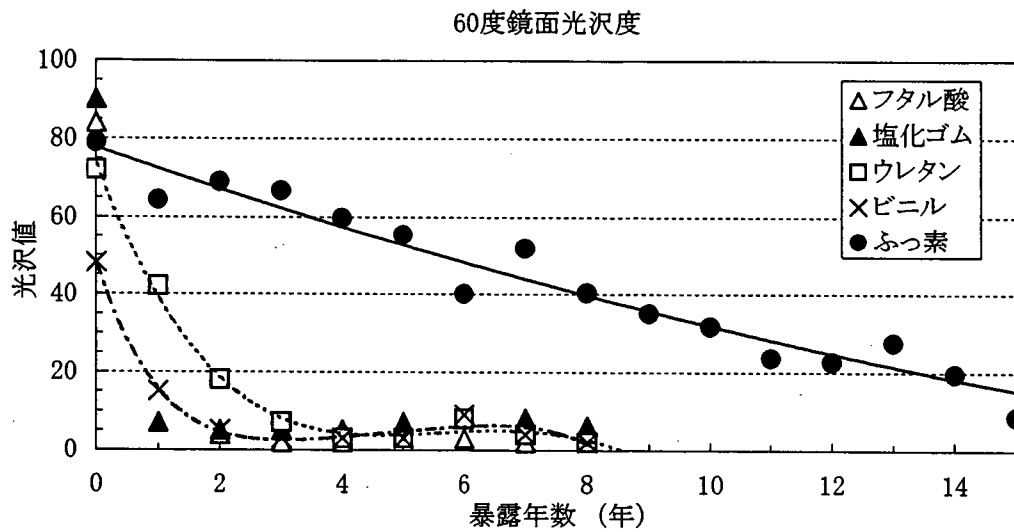
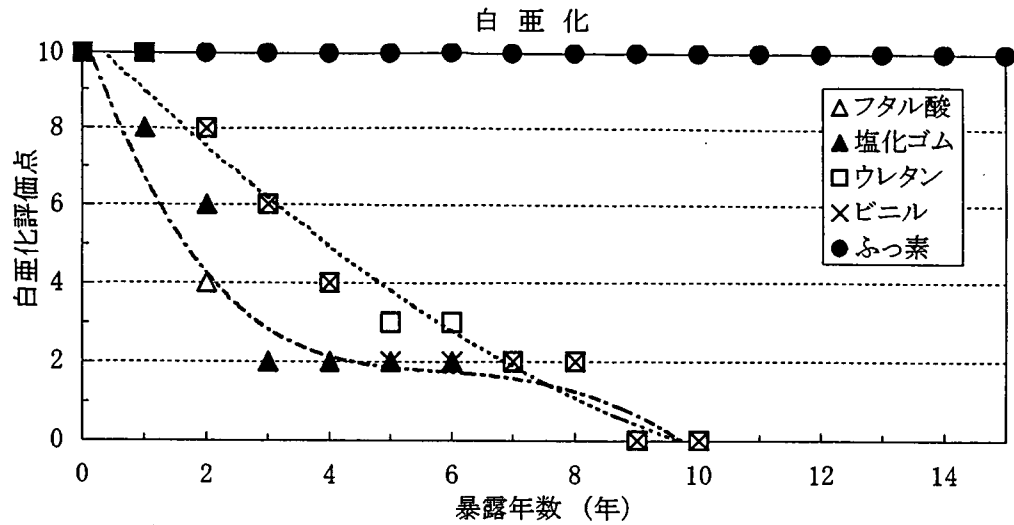
(3) 結果のまとめ

以上のことから防食性と耐候性を総合評価すると、下塗りに厚膜形ジンクリッチペイントを用い、上塗りにふっ素樹脂塗料を用いた塗装系は、暴露15年後も良好な防食性と耐候性をもつことが確認できた。油性さび止め/フタル酸樹脂塗料は暴露14年後で発錆が始まり耐久性の限界に達している。塩化ゴム系樹脂塗料は、試験片の評価では海洋環境でも暴露15年で良好な防食性を示すものの、暴露初期の段階で光沢の低下や白亜化など耐候性で問題を生じ、現時点では上塗り塗膜が消失しつつあり塗膜劣化が顕著である。

開発中の塗装システムでは無溶剤タールウレタン塗料や超厚膜エポキシ樹脂塗料で上塗りをを用いていないものや、無溶剤エポキシ樹脂塗料で上塗りをを用いていないものについては塗膜の浮きが発生し素地からはく離している試験板もある。これら厚膜の硬質塗料で耐候性に劣る材料を上塗りなしで暴露環境に用いるのは問題があると考えられる。

系統Aの調査結果(1) 初期～15年

試験板番号の末尾5の板は暴露10年で回収し、表面観察に供した。



塗装仕様

フタル酸:A-1、塩化ゴム:A-3、ポリウレタン:A-6、ビニル:A-8

ふっ素:B-6 (上塗りは共通なので試験片の状態等により選択した)

図4. 1. 1 現行長期防錆塗装システムの経年変化

系統Bの調査結果(1) 初期～15年

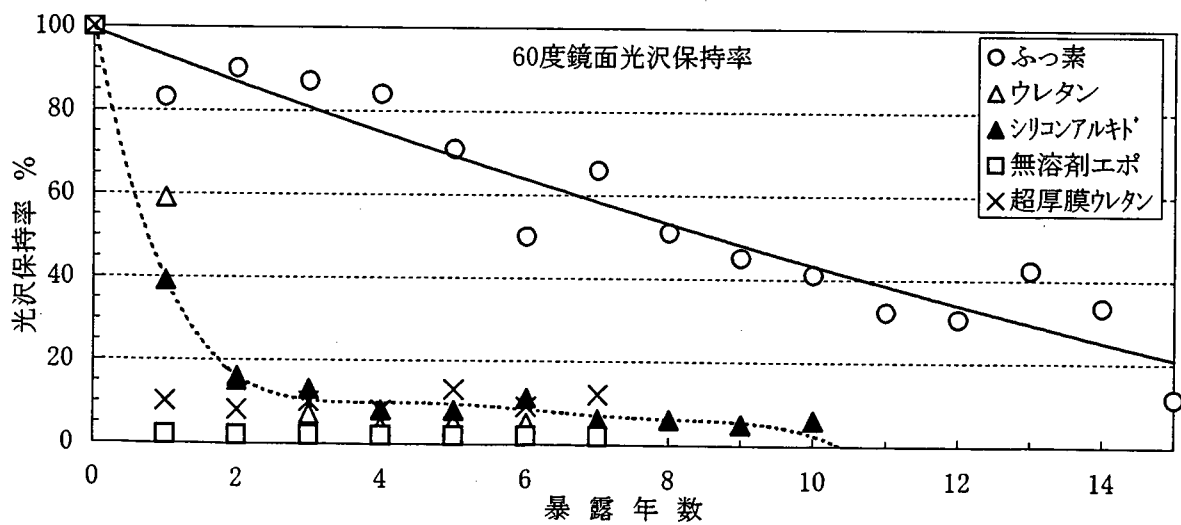
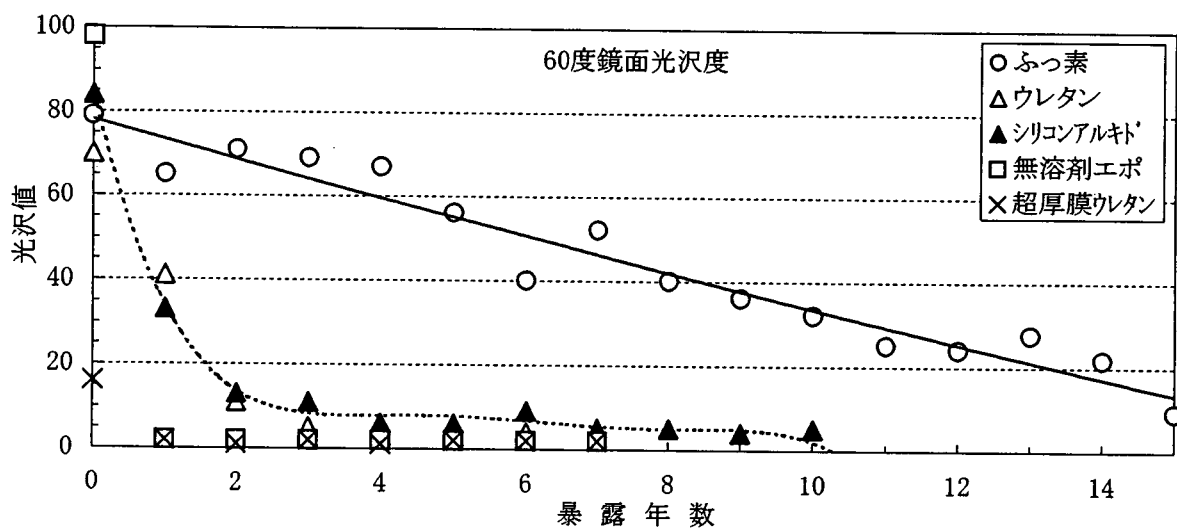
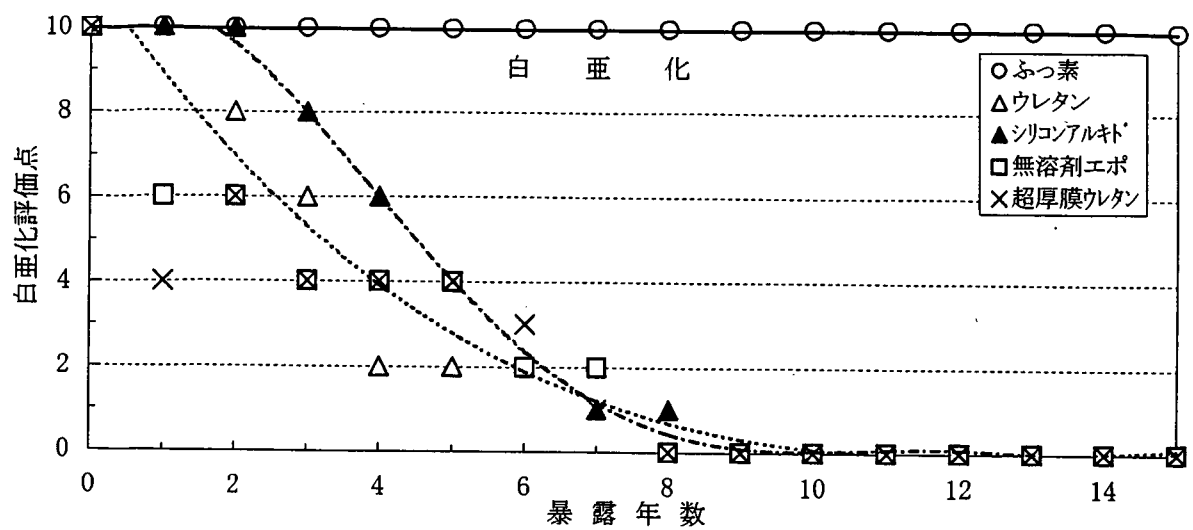
[illegible]

表4.1.6 開発中の塗装システム 系統Bの調査結果(2) 初期～15年

[illegible]

データ欄の“—”は途中で回収した試験板。

試験板番号の末尾が5の板は暴露10年で回収し、表面観察に供した。



塗装仕様

ふっ素: B-12、ポリウレタン: B-11、シリコンアルキド: B-5

無溶剤エポキシ: B-10、超厚膜ウレタン: B-14

図4. 1. 2 開発中の塗装システムの経年変化

4. 2 施設本体の塗装

4. 2. 1 目的

施設本体の鋼材表面を利用して、長期防錆塗装系の耐久性の検証試験を行う。

4. 2. 2 計画

施設本体に試験塗装を行い、その経年変化を観察する。実施の調査項目を表4.2.1 (1) および表4.2.1 (2) に示す。試験塗装に供した塗装系を表4. 2. 2に示す。

(1) 調査項目と調査時期

初期から20年経過後まで、およびそれ以後の予定を表4. 2. 1 (1)、表4. 2. 1 (2) に示す。

表4. 2. 1 (1) 調査項目と調査時期 (初期～10年後)

調査年度		昭和59年 (1984)	昭和60年 (1985)	昭和61年 (1986)	昭和62年 (1987)	昭和63年 (1988)
経過年数		初期	1年	2年	3年	4年
調査項目	膜厚	○				
	光沢	○	○	○	○	○
	外観	○	○	○	○	○
	インピーダンス	○	○	○	○	○
	付着力	○				

調査年度		平成元年 (1989)	平成2年 (1990)	平成3年 (1991)	平成4年 (1992)	平成5年 (1993)	平成6年 (1994)
経過年数		5年	6年	7年	8年	9年	10年
調査項目	膜厚	○					○
	光沢	○	○	○	○	○	○
	外観	○	○	○	○	○	○
	インピーダンス	○	○	○	○	○	○
	付着力	○					○

表 4. 2. 1 (2) 調査項目と調査時期 (11年後～20年後予定)

調査年度		平成7年 (1995)	平成8年 (1996)	平成9年 (1997)	平成10年 (1998)	平成11年 (1999)
経過年数		11年	12年	13年	14年	15年
調査項目	膜厚					○
	光沢	○	○	○	○	○
	外観	○	○	○	○	○
	インピーダンス	○	○	○	○	○
	付着力					○

調査年度		平成12年 (2000)	平成13年 (2001)	平成14年 (2002)	平成15年 (2003)	平成16年 (2004)
経過年数		16年	17年	18年	19年	20年
調査項目	膜厚					○
	光沢		○			○
	外観		○			○
	インピーダンス		○			○
	付着力					○

備考) 空白部は調査を行わない

(2) 調査内容

- 1) 光沢：60度鏡面光沢値。十分に水を含ませたガーゼで塗膜表面を拭き取り30分間乾燥して測定する。
- 2) 外観観察：さび、ふくれ、われ、変色、白亜化等を目視観察する。
- 3) インピーダンス：3%食塩水に溶解したカルボキシメチルセルロースをアルミ箔に塗付し、それを試験片につけ、90分後に測定する。測定面積は10cm×10cmで、実測値とする。
- 4) 付着力：アドヒージョンテスト。

4. 2. 3 結果

施設本体の15年経過後の調査結果を以下に示す。また、調査結果の図表を表4. 2. 3～表4. 2. 6および図4. 2. 1～図4. 2. 7に示す。

表4.2.2 施設本体の塗装システム

仕様	塗装部位	素地調整	第1層	第2層	第3層	第4層	第5層	第6層	合計膜厚
A	主鋼管	1A、1B 1C	ブラスト 処理 厚膜形エポキシ樹脂ジンク リッチペイント (75 μ m)	ポリエステル樹脂ガラス フレーク塗料(350 μ m)	ポリエステル樹脂ガラス フレーク塗料(350 μ m)	ふっ素樹脂塗料 上塗(20 μ m)	ふっ素樹脂塗料 上塗 (20 μ m)		815 μ m
D	主鋼管	2A、2B 2C	ブラスト 処理 厚膜形無機ジンクリッチ ペイント (75 μ m)	ミストコート	厚膜形ビニル樹脂 塗料 (150 μ m)	ビニル樹脂塗料 上塗 (30 μ m)			255 μ m
H	主鋼管	3A、3B 3C	ブラスト 処理 厚膜形無機ジンクリッチ ペイント (75 μ m)	ミストコート	厚膜形エポキシ樹脂 塗料 (60 μ m)	厚膜形エポキシ樹脂 塗料 (60 μ m)	ポリウレタン樹脂塗料 用中塗 (30 μ m)	ポリウレタン樹脂塗料 上塗 (30 μ m)	255 μ m
I	斜材	3B-3C 間	ブラスト 処理 厚膜形無機ジンクリッチ ペイント (75 μ m)	ミストコート	厚膜形エポキシ樹脂 塗料 (150 μ m)	ポリウレタン樹脂塗料 上塗 (30 μ m)			255 μ m
J	斜材	2C-3C 間	ブラスト 処理 エポキシ樹脂ジンクリッチ プライマー (15 μ m)	超厚膜エポキシ樹脂 塗料 (2,000 μ m)	ポリウレタン樹脂塗料 上塗 (30 μ m)				2,045 μ m
G	斜材	1B-2B 間	ブラスト 処理 エポキシ樹脂ガラス フレーク塗料 (750 μ m)	エポキシ樹脂ガラス フレーク塗料 (750 μ m)	ポリウレタン樹脂塗料 用中塗 (30 μ m)	ポリウレタン樹脂塗料 上塗 (30 μ m)			1,560 μ m
E	斜材	1B-1C 間	ブラスト 処理 ポリエステル樹脂 プライマー (40 μ m)	ポリエステル樹脂ガラス フレーク塗料 (350 μ m)	ポリエステル樹脂ガラス フレーク塗料 (350 μ m)	ポリウレタン樹脂塗料 用中塗 (30 μ m)	ポリウレタン樹脂塗料 上塗 (30 μ m)		800 μ m
B	斜材	2B-3B 間	ブラスト 処理 厚膜形無機ジンクリッチ ペイント (75 μ m)	ミストコート	ふっ素樹脂塗料用 プライマー (100 μ m)	ふっ素樹脂塗料用 中塗 (50 μ m)	ふっ素樹脂塗料 上塗 (20 μ m)	ふっ素樹脂塗料 上塗(20 μ m)	265 μ m
C	斜材	1C-2C 間	ブラスト 処理 エポキシ樹脂ジンクリッチ プライマー (25 μ m)	変性ポリエステル樹脂 プライマー (100 μ m)	変性ポリエステル樹脂 塗料 (50 μ m)	変性ポリエステル樹脂 塗料 (50 μ m)			255 μ m
F	斜材	2B-2C 間	ブラスト 処理 エポキシ樹脂ガラス フレーク塗料 (300 μ m)	エポキシ樹脂ガラス フレーク塗料 (750 μ m)	ポリウレタン樹脂塗料 用中塗 (30 μ m)	ポリウレタン樹脂塗料 上塗 (30 μ m)			1,100 μ m
K	第1デッキ上面		ブラスト 処理 厚膜形無機ジンクリッチ ペイント (75 μ m)						75 μ m
L	第1デッキ下面		ブラスト 処理 厚膜形無機ジンクリッチ ペイント (75 μ m)	ミストコート	タールウレタン樹脂 塗料 (200 μ m)	タールウレタン樹脂 塗料 (200 μ m)			475 μ m
M	第2デッキ上下面		ブラスト 処理 厚膜形無機ジンクリッチ ペイント (75 μ m)	ミストコート	タールウレタン樹脂 塗料 (200 μ m)	タールウレタン樹脂 塗料 (200 μ m)			475 μ m
N	第1、2デッキ 縁取り		ブラスト 処理 厚膜形無機ジンクリッチ ペイント (75 μ m)	ミストコート	変性エポキシ樹脂 塗料 (75 μ m)	変性エポキシ樹脂 塗料 (75 μ m)	ポリウレタン樹脂塗料 上塗 (30 μ m)		255 μ m
O-2	第1～2デッキ間 階段、手すり		ブラスト 処理 変性エポキシ樹脂塗料 (75 μ m)	変性エポキシ樹脂塗料 (75 μ m)	ポリウレタン樹脂塗料 上塗 (30 μ m)				180 μ m
O-4	第2～3デッキ間 階段、手すり		ブラスト 処理 無機ジンクリッチペイント (30 μ m)	変性エポキシ樹脂塗料 (75 μ m)	変性エポキシ樹脂 塗料 (75 μ m)	ポリウレタン樹脂塗料 上塗 (30 μ m)			210 μ m
P	タワー		ブラスト 処理 厚膜形エポキシ樹脂ジンク リッチペイント (75 μ m)	厚膜形エポキシ樹脂 塗料 (60 μ m)	厚膜形エポキシ樹脂 塗料 (60 μ m)	ポリウレタン樹脂塗料 用中塗 (30 μ m)	ポリウレタン樹脂塗料 上塗 (30 μ m)		255 μ m

注)*: 手すり部はパワーツール処理

(1) 外観観察

- 1) ジンクリッチ系塗料を下塗りとした重防食塗装系A、D、H、I、J、B、Nは、前年調査時同様15年経過後も、エッジ部等に一部さびが認められるものがあるが、全般的にさび、ふくれ等の異状は認められず、防錆効果の優れていることが確認された。特に厚膜形無機ジンクリッチペイントと遮断性能の優れた厚膜形の塗装を組み合わせることが有効であることが分かった。
- 2) 下塗にジンクリッチ系塗料を使用せず、かつ変性エポキシ樹脂塗料150 μ m程度の塗料系の仕様を試験的に適用した「階段部」「手摺り部」は、早期(暴露1年後)にほぼ全面にさび、ふくれが発生し、その後経過年数にともないその量が増加している。
このような塗装系では、本施設が設置されている海上環境での防錆性能を維持するのが困難であることを示している。
上記1)の結果と併せてジンクリッチ系塗料を使用した塗装系を優先的に採用することや、下塗膜厚の増加などが必要である。
- 3) 塗装系Aでは、外的原因による損傷からの発錆と塗膜のはがれ以外は、欠陥が認められていない。したがって、長期防錆性に優れる厚膜下塗塗装系に長期耐候性を有する上塗塗料として、ふっ素樹脂塗料を組み合わせることで、美粧性を加味した長期耐久性を有する塗装系が期待できる。
- 4) 塗装系Iと塗装系Dは、それぞれH塗装系(本州四国連絡橋公団塗装系Eに同じ)を標準として、工数(塗装回数)の低減を目的とし、塗装系Dはビニル系塗料とすることで補修性を重視した仕様となっている。両塗装系とも暴露15年経過しても大きな欠陥はなく、良好な防錆性を示しており、重防食仕様における工数低減の可能性を示すデータが得られた。
- 5) 超厚膜形エポキシ樹脂塗料を用いた塗装系Jは、塗装系Hを標準としてエッジ部、添接部など特殊部向けの仕様に对应し、より腐食しやすい部位での使用が期待される材料である。今回の調査では、点さびが発生していたが、これは塗膜表面の凹凸が大きく、凹部の膜厚が異常に薄くなったためと考えられる。このように超厚膜でレベリング性の悪い塗料の塗装においては、ローラー押え等の塗膜表面の平滑化工程を入れるのが望ましいと考えられる。

6) エポキシ樹脂ガラスフレーク塗料を用いた塗装系Fと塗装系Gにおいて、暴露1年後より塗膜欠陥が認められた。ただし、これら塗膜欠陥は暴露15年経過しても大きく成長していない。

塗装系Fでは、点さびが認められた。本塗装系は、ブラスト表面にプライマーを塗装せずに直接ガラスフレーク塗料を塗装しているため、塗料の素地に対する濡れ性(なじみ)が劣っていたためにこのような欠陥を生じたものと推定される。

また、塗装系Gは、塗料中に含まれる油状物がしみだしていたので、その後浅割れに至っている。これは下塗のガラスフレーク塗料が十分に硬化しない内に、中塗り、上塗りを塗装したための不具合と推定される。

(2) 60度鏡面光沢度

各塗装系ごとに東西南北について経時で測定を行った。15年経過後でも方角による差は明確には現れていない。図4. 2. 1に施設本体塗装系の光沢値の経年変化を示す。上塗にふっ素樹脂塗料を用いた塗装系(塗装系B)は最も光沢の保持状態が良好であった。しかしながら、他の樹脂系よりは高いレベルにあるものの、14、15年後で低下が進んできた。ただし、白亜化は起こっておらず、外観的には光沢もあり、十分美観を維持していることから上塗としての機能は十分持っていると考えられる。光沢保持率のグラフを見ると、ポリウレタン、ビニル、は3~5年後で光沢保持率の低下が大きくなっており、変成ポリエステルは1年後で急激に低下している。

(3) インピーダンス

本体塗装系のA、B、C、D、E、F、G、H、I、J、L、Mについて30×30cmの試験片に塗装してインピーダンスを測定しているが、15年現在でいずれも $10^7 \sim 10^8 \Omega \cdot \text{cm}^2$ (1kHz) の高い数値を示しており、塗膜の劣化は認められない。表4.

2. 5~表4. 2. 6に各塗装系の塗膜抵抗、塗膜容量、 $\tan \delta$ を示す。

(4) まとめ

1) 実験開始時点で超重防食塗装系と考えられていた、厚膜形ジンクリッチペイント、厚膜形~超厚膜形下塗塗料、ふっ素樹脂塗料上塗よりなる塗装系の耐久性が15年の暴露実験で実証された。一方では重防食塗装系でもエッジ部でさびがでているものがあり、エッジ部の防食対策が重要であることが改めて認識された。

2) 高耐候性上塗としてのふっ素樹脂塗料の耐久性が実証された。

表4. 2. 3 施設本体の塗装系調査結果

No.	塗装部	塗 装 系	膜厚 μ m	観察部材	塗膜外観調査結果	60度鏡面光沢度															60度鏡面光沢保持率(%)																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																						
						方位	初期	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	初期	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
A	主鋼管 1A、1B 1C	厚膜エポキシジグリッチペイント ポリエステルガラスフレーク塗料 ふっ素樹脂塗料上塗	75 350×2 20×2	1-2 デッキ間	・1B、1C:異常なし	東		12	15	14	12	11	12	12	11	6	5	5	6	5	7	4	A:ふっ素樹脂塗料上塗																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																				
				2-3 デッキ間	・1A、1B、1C:異常なし	西					9	16	12	11	9	6	6	4	5	5	4	3																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
						南		14	13	14	9	13	13	10	10	8	8	8	7	7	3	5																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
						北		8	12	14	17	11	13	13	7	7	6	5	7	5	7	3																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
		平均	40	11	13	14	12	13	13	12	9	7	6	6	6	6	5	4	100	28	33	35	29	32	31	29	23	18	15	14	15	14	13	9.1																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																									
D	主鋼管 2A、2B 2C	厚膜型無機ジグリッチペイント ミストコート 厚膜型ビニル樹脂塗料 ビニル樹脂塗料上塗	75 150 30	1-2 デッキ間	・2B チョーキング:南0点、北0点 ・2C チョーキング:南0点、北0点	東		37	36	30	26	12	11	14	10	8	7	6	6	5	6	9	D:ビニル樹脂塗料上塗																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																				
				2-3 デッキ間	・2A、2B:異常なし ・2C:2カ所にさび、あて傷	西		39	38	35	29	17	23	30	23	18	16	18	20	20	15	12																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
						南		18	11	39	19	9	19	17	19	15	15	14	12	11	12	12																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
						北		27	33	21	25	23	17	15	8	9	7	9	9	8	8	10																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
		平均	36	30	29	31	25	15	18	19	15	13	11	12	12	11	10	11	100	84	81	87	69	42	49	52	42	36	31	32	33	31	28	30																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																									
H	主鋼管 3A、3B 3C	厚膜型無機ジグリッチペイント ミストコート 厚膜型エポキシ樹脂塗料 ポリウレタン樹脂塗料用中塗 ポリウレタン樹脂塗料上塗	75 60×2 30 30	1-2 デッキ間	・3B、3C:変色大 ・チョーキング:0点	東		48	36	36	24	18	25	22	12	11	11	9	7	6	8	8	H:ポリウレタン樹脂塗料上塗																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																				
				2-3 デッキ間	・3A、3B、3C:異常なし	西		28	38	28	15	19	24	26	25	23	21	18	13	14	14	14																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
						南		35	28	25	16	11	19	15	11	11	11	9	12	11	11	8																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
						北		35	46	34	16	15	21	20	19	13	12	12	11	12	12	9																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
		平均	41	37	37	31	18	16	22	21	17	15	14	12	11	11	11	10	100	89	90	75	43	38	54	50	41	37	34	29	26	26	27	24																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																									
I	斜 材 3B-3C 間	厚膜型無機ジグリッチペイント ミストコート 厚膜型エポキシ樹脂塗料 ポリウレタン樹脂塗料上塗	75 150 30	1-2 デッキ間	・チョーキング:0点、変色大 ・3B側エッジ部:さび70cm ・3C側エッジ部:さび20cm	東				26	21	19	21	12	12	10	6	11	11	11	9	8	I:ポリウレタン樹脂塗料上塗																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																				
						西		28	40	34	31	21	25	21	19	15	18	15	14	11	8	9																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
						南		31	28	21	20	16	17	11	9	8	4	10	9	8	7	6																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
						北		22	51	32	34	29	26	29	25	22	20	21	20	20	14	15																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
		平均	57	27	39	28	27	21	22	18	16	14	12	14	13	13	9	10	100	47	68	50	46	37	39	32	29	25	21	25	23	22	17	17																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																									
J	斜 材 2C-3C 間	エポキシジグリッチプライマー 超厚膜型エポキシ樹脂塗料 ポリウレタン樹脂塗料上塗	15 2000 30	1-2 デッキ間	・チョーキング:0点、変色大 ・2C:フランジ内側にさび10×20cm ・3C:フランジエッジ部にさび1個		凹凸が大きく測定不可能															J:ポリウレタン樹脂塗料上塗																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
				平均	3																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																						

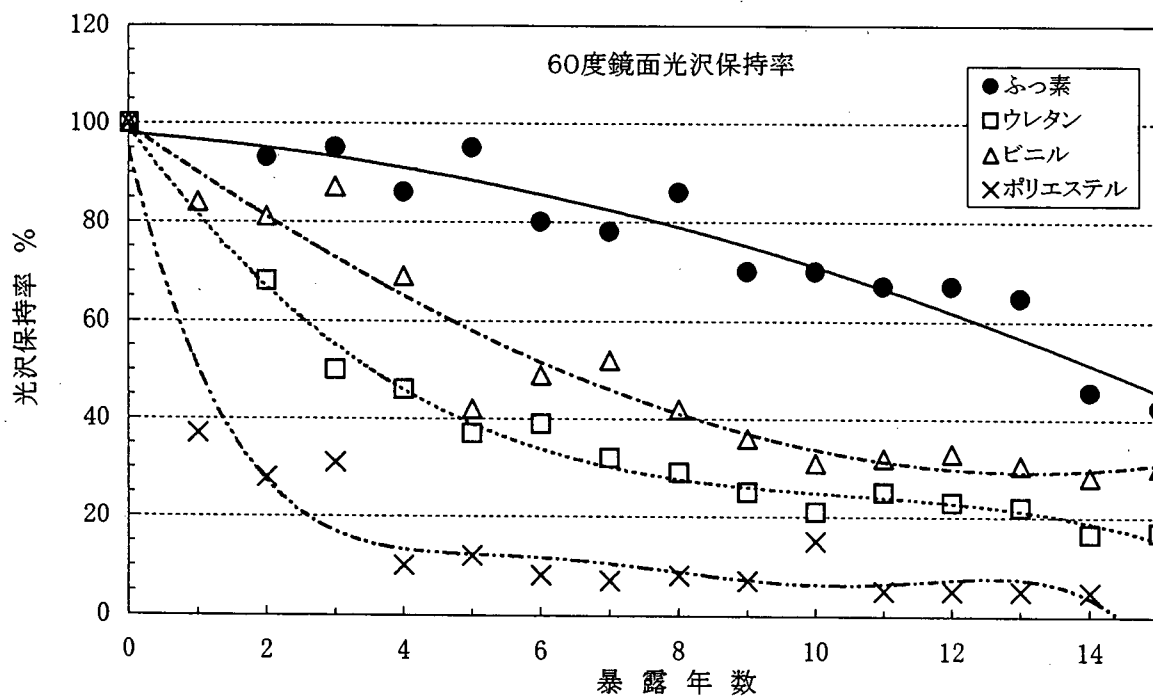
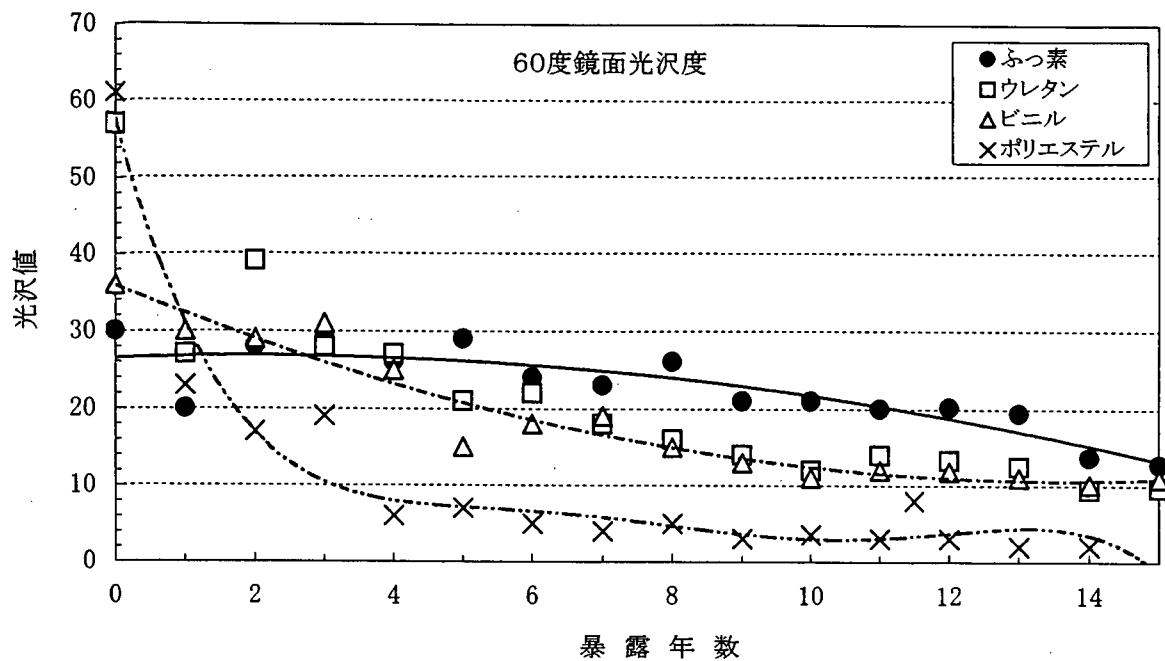


図4. 2. 1 施設本体の光沢値経年変化

表4. 2. 4 施設本体と同仕様試験板のインピーダンス変化

仕様 No.	経過 年数	0.2kHz			0.5kHz			1.0kHz		
		交流抵抗 $\Omega \text{ cm}^2$	静電容量 F/cm^2	$\tan \delta$	交流抵抗 $\Omega \text{ cm}^2$	静電容量 F/cm^2	$\tan \delta$	交流抵抗 $\Omega \text{ cm}^2$	静電容量 F/cm^2	$\tan \delta$
A	1	3.6×10^9	3.2×10^{-8}	0.069	2.1×10^9	2.9×10^{-8}	0.052	1.3×10^9	2.7×10^{-8}	0.045
	2	2.9×10^9	3.0×10^{-8}	0.092	1.5×10^9	2.7×10^{-8}	0.079	5.6×10^8	2.6×10^{-8}	0.019
	3	3.5×10^9	3.6×10^{-8}	0.063	2.1×10^9	3.4×10^{-8}	0.045	1.4×10^9	3.4×10^{-8}	0.033
	4	3.0×10^9	3.6×10^{-8}	0.074	1.4×10^9	3.3×10^{-8}	0.069	4.5×10^8	3.2×10^{-8}	0.111
	5	9.6×10^8	6.0×10^{-8}	0.138	6.0×10^8	6.0×10^{-8}	0.088	3.8×10^8	6.0×10^{-8}	0.069
	7	8.1×10^8	4.5×10^{-8}	0.218	5.2×10^8	4.0×10^{-8}	0.153	3.6×10^8	3.9×10^{-8}	0.113
	8	9.2×10^8	4.3×10^{-8}	0.201	5.0×10^8	4.2×10^{-8}	0.152	3.8×10^8	4.2×10^{-8}	0.099
	9	3.6×10^9	6.3×10^{-8}	0.035	1.9×10^9	6.1×10^{-8}	0.027	1.1×10^9	6.0×10^{-8}	0.024
	10	2.9×10^9	1.0×10^{-8}	0.275	2.9×10^9	1.0×10^{-8}	0.110	2.9×10^9	1.0×10^{-8}	0.055
	12	5.9×10^8	6.8×10^{-8}	0.200	3.3×10^8	6.1×10^{-8}	0.160	2.2×10^8	5.5×10^{-8}	0.130
	14	2.8×10^8	9.8×10^{-8}	0.287	1.4×10^8	8.3×10^{-8}	0.267	8.8×10^7	7.6×10^{-8}	0.238
	15	4.2×10^8	9.7×10^{-8}	0.196	2.2×10^8	8.8×10^{-8}	0.162	1.3×10^8	8.3×10^{-8}	0.147
B	1	3.9×10^8	9.1×10^{-8}	0.224	2.0×10^8	7.7×10^{-8}	0.207	1.3×10^8	7.0×10^{-8}	0.175
	2	6.4×10^8	6.9×10^{-8}	0.180	3.6×10^8	6.3×10^{-8}	0.140	2.5×10^8	5.7×10^{-8}	0.108
	3	4.7×10^8	1.0×10^{-7}	0.169	2.6×10^8	9.0×10^{-8}	0.136	1.6×10^8	8.0×10^{-8}	0.124
	4	5.7×10^8	9.5×10^{-8}	0.147	2.8×10^8	6.8×10^{-8}	0.167	1.7×10^8	8.0×10^{-8}	0.117
	5	4.9×10^8	1.2×10^{-7}	0.135	2.6×10^8	1.1×10^{-7}	0.111	1.6×10^8	1.0×10^{-7}	0.099
	7	4.4×10^8	1.0×10^{-7}	0.181	2.5×10^8	1.0×10^{-7}	0.127	1.6×10^8	9.0×10^{-8}	0.111
	8	4.5×10^8	1.2×10^{-7}	0.147	2.7×10^8	1.1×10^{-7}	0.107	1.6×10^8	1.0×10^{-7}	0.100
	9	5.0×10^8	1.8×10^{-7}	0.094	3.1×10^8	1.6×10^{-7}	0.064	1.9×10^8	1.6×10^{-7}	0.052
	10	2.6×10^8	2.0×10^{-7}	0.153	1.5×10^8	1.9×10^{-7}	0.112	7.5×10^7	1.8×10^{-7}	0.118
	12	2.0×10^8	2.3×10^{-7}	0.170	9.1×10^7	2.1×10^{-7}	0.170	5.6×10^7	2.0×10^{-7}	0.150
	14	2.1×10^8	2.2×10^{-7}	0.172	1.1×10^8	2.0×10^{-7}	0.140	6.8×10^7	1.9×10^{-7}	0.123
	15	2.6×10^8	2.1×10^{-7}	0.143	1.2×10^8	1.9×10^{-7}	0.135	7.1×10^7	1.8×10^{-7}	0.117
C	1	4.5×10^8	6.6×10^{-8}	0.268	2.8×10^8	5.6×10^{-8}	0.203	1.9×10^8	5.2×10^{-8}	0.161
	2	4.3×10^8	6.5×10^{-8}	0.285	2.8×10^8	5.6×10^{-8}	0.203	2.0×10^8	5.2×10^{-8}	0.153
	3	5.1×10^8	7.0×10^{-8}	0.223	3.5×10^8	6.7×10^{-8}	0.136	2.3×10^8	6.3×10^{-8}	0.110
	4	6.3×10^8	8.5×10^{-8}	0.149	3.2×10^8	7.8×10^{-8}	0.128	1.8×10^8	1.7×10^{-7}	0.051
	5	5.4×10^8	1.0×10^{-7}	0.147	3.0×10^8	9.0×10^{-8}	0.117	2.0×10^8	9.0×10^{-8}	0.088
	7	5.1×10^8	9.0×10^{-8}	0.173	1.0×10^8	8.0×10^{-8}	0.133	2.0×10^8	8.0×10^{-8}	0.099
	8	6.2×10^8	1.0×10^{-7}	0.161	3.3×10^8	7.8×10^{-8}	0.136	2.2×10^8	7.6×10^{-8}	0.095
	9	6.7×10^8	1.2×10^{-7}	0.099	4.0×10^8	1.1×10^{-7}	0.072	2.6×10^8	1.1×10^{-7}	0.056
	10	3.7×10^9	1.0×10^{-8}	0.215	2.8×10^9	1.0×10^{-8}	0.114	2.8×10^9	1.0×10^{-8}	0.057
	12	9.1×10^7	2.3×10^{-7}	0.390	5.6×10^7	2.0×10^{-7}	0.290	3.7×10^7	1.8×10^{-7}	0.240
	14	1.2×10^8	2.3×10^{-7}	0.297	6.0×10^7	1.9×10^{-7}	0.281	3.5×10^7	1.8×10^{-7}	0.255
	15	1.2×10^8	1.9×10^{-7}	0.342	7.8×10^7	1.6×10^{-7}	0.240	5.2×10^7	1.5×10^{-7}	0.201
D	1	2.0×10^8	1.6×10^{-7}	0.249	1.1×10^8	1.3×10^{-7}	0.223	5.0×10^7	1.2×10^{-7}	0.265
	2	3.5×10^8	9.2×10^{-8}	0.247	1.9×10^8	7.7×10^{-8}	0.218	1.3×10^8	7.0×10^{-8}	0.175
	3	3.0×10^8	1.3×10^{-7}	0.204	1.6×10^8	1.1×10^{-8}	0.181	6×10^7	1.0×10^{-7}	0.265
	4	3.4×10^8	1.6×10^{-7}	0.146	1.6×10^8	1.4×10^{-7}	0.142	7.3×10^7	1.3×10^{-7}	0.168
	5	3.5×10^8	1.4×10^{-7}	0.162	1.8×10^8	1.3×10^{-7}	0.136	1.0×10^8	1.2×10^{-7}	0.132
	7	3.9×10^8	1.2×10^{-7}	0.170	2.0×10^8	1.1×10^{-7}	0.145	1.2×10^8	1.0×10^{-7}	0.133
	8	4.0×10^8	1.3×10^{-7}	0.192	1.9×10^8	1.2×10^{-7}	0.140	1.3×10^8	1.0×10^{-7}	0.122
	9	5.0×10^8	1.7×10^{-7}	0.094	2.5×10^8	1.6×10^{-7}	0.080	1.5×10^8	1.6×10^{-7}	0.066
	10	1.7×10^8	2.5×10^{-7}	0.187	9.0×10^7	2.3×10^{-7}	0.154	5.0×10^7	2.1×10^{-7}	0.152
	12	1.1×10^8	3.2×10^{-7}	0.220	5.3×10^7	2.9×10^{-7}	0.210	3.2×10^7	2.7×10^{-7}	0.190
	14	1.2×10^8	2.6×10^{-7}	0.266	6.2×10^7	2.3×10^{-7}	0.225	4.0×10^7	2.1×10^{-7}	0.188
	15	1.2×10^8	2.7×10^{-7}	0.254	5.5×10^7	2.3×10^{-7}	0.224	3.6×10^7	2.1×10^{-7}	0.210

表4. 2. 5 施設本体と同仕様試験板のインピーダンス変化

仕様 No.	経過 年数	0.2kHz			0.5kHz			1.0kHz		
		交流抵抗 $\Omega \text{ cm}^2$	静電容量 F/cm^2	$\tan \delta$	交流抵抗 $\Omega \text{ cm}^2$	静電容量 F/cm^2	$\tan \delta$	交流抵抗 $\Omega \text{ cm}^2$	静電容量 F/cm^2	$\tan \delta$
E	1	1.1×10^9	4.0×10^{-8}	0.189	6.6×10^8	3.6×10^{-8}	0.134	4.4×10^8	3.4×10^{-8}	0.106
	2	2.4×10^9	3.9×10^{-8}	0.085	1.3×10^9	3.5×10^{-8}	0.070	5.2×10^8	3.4×10^{-8}	0.090
	3	2.2×10^9	4.9×10^{-8}	0.074	1.1×10^9	4.5×10^{-8}	0.064	3.0×10^8	4.4×10^{-8}	0.090
	4	2.1×10^9	5.1×10^{-8}	0.074	5.8×10^8	4.7×10^{-8}	0.117	3.4×10^8	4.4×10^{-8}	0.106
	5	9.3×10^8	8.0×10^{-8}	0.107	4.2×10^8	7.5×10^{-8}	0.101	2.6×10^8	7.2×10^{-8}	0.085
	7	6.5×10^8	7.0×10^{-8}	0.175	3.8×10^8	6.0×10^{-8}	0.140	2.4×10^8	6.0×10^{-8}	0.111
	8	6.0×10^8	7.0×10^{-8}	0.190	4.0×10^8	6.0×10^{-8}	0.133	2.7×10^8	6.5×10^{-8}	0.091
	9	7.4×10^8	9.0×10^{-8}	0.120	4.2×10^8	8.0×10^{-8}	0.095	2.5×10^8	8.0×10^{-8}	0.080
	10	5.0×10^8	9.0×10^{-8}	0.177	3.1×10^8	9.0×10^{-8}	0.114	1.9×10^8	8.0×10^{-8}	0.105
	12	3.1×10^8	1.2×10^{-7}	0.210	1.5×10^8	1.1×10^{-7}	0.200	8.9×10^7	1.0×10^{-7}	0.180
	14	2.9×10^7	1.3×10^{-7}	0.212	1.4×10^8	1.1×10^{-7}	0.204	7.8×10^7	1.1×10^{-7}	0.186
	15	3.4×10^8	1.0×10^{-7}	0.232	1.9×10^8	9.0×10^{-8}	0.190	1.2×10^8	8.4×10^{-8}	0.162
F	1	3.3×10^8	4.4×10^{-8}	0.548	2.3×10^8	3.4×10^{-8}	0.407	1.7×10^8	3.0×10^{-8}	0.312
	2	3.8×10^8	4.1×10^{-8}	0.511	2.6×10^8	3.3×10^{-8}	0.371	2.0×10^8	2.9×10^{-8}	0.274
	3	7.4×10^9	1.0×10^{-8}	0.108	7.2×10^9	1.0×10^{-8}	0.044	7.3×10^9	1.0×10^{-8}	0.022
	4	1.3×10^9	3.3×10^{-8}	0.185	4.5×10^8	2.8×10^{-8}	0.253	3.0×10^8	2.5×10^{-8}	0.212
	5	3.9×10^8	7.8×10^{-8}	0.291	2.5×10^8	6.5×10^{-8}	0.196	1.8×10^8	5.5×10^{-8}	0.161
	7	5.6×10^8	5.0×10^{-8}	0.284	3.4×10^8	4.3×10^{-8}	0.218	2.4×10^8	3.8×10^{-8}	0.175
	8	6.0×10^8	6.2×10^{-8}	0.269	3.4×10^8	4.0×10^{-8}	0.215	2.6×10^8	4.0×10^{-8}	0.153
	9	3.7×10^8	3.0×10^{-8}	0.717	2.5×10^8	2.0×10^{-8}	0.637	2.1×10^8	1.0×10^{-8}	0.758
	10	2.2×10^8	8.2×10^{-8}	0.411	1.5×10^8	7.0×10^{-8}	0.303	1.1×10^8	6.3×10^{-8}	0.230
	12	6.5×10^7	1.4×10^{-7}	0.880	4.5×10^7	1.0×10^{-7}	0.710	3.4×10^7	8.2×10^{-8}	0.570
	14	1.1×10^8	1.3×10^{-7}	0.585	7.0×10^7	8.9×10^{-8}	0.508	4.6×10^7	7.7×10^{-8}	0.443
	15	1.4×10^8	8.4×10^{-8}	0.656	9.7×10^7	6.7×10^{-8}	0.486	7.0×10^7	5.8×10^{-8}	0.389
G	1	6.8×10^8	2.7×10^{-8}	0.433	5.3×10^8	2.3×10^{-8}	0.261	4.3×10^8	2.2×10^{-8}	0.168
	2	5.7×10^8	1.5×10^{-8}	0.931	3.7×10^8	1.3×10^{-8}	0.662	2.0×10^8	1.3×10^{-8}	0.612
	3	9.7×10^8	3.3×10^{-8}	0.249	6.8×10^8	3.0×10^{-8}	0.156	4.8×10^8	2.9×10^{-8}	0.114
	4	3.2×10^8	4.2×10^{-8}	0.592	2.2×10^8	3.1×10^{-8}	0.467	1.7×10^8	2.6×10^{-8}	0.360
	5	3.0×10^8	7.0×10^{-8}	0.379	1.2×10^9	6.0×10^{-8}	0.265	1.5×10^8	5.0×10^{-8}	0.212
	7	9.4×10^8	3.7×10^{-8}	0.229	5.9×10^8	3.4×10^{-8}	0.159	4.3×10^8	3.0×10^{-8}	0.123
	8	2.8×10^8	7.2×10^{-8}	0.496	1.2×10^8	6.0×10^{-8}	0.265	1.5×10^8	5.0×10^{-8}	0.212
	9	1.8×10^9	2.0×10^{-8}	0.221	2.0×10^9	1.6×10^{-8}	0.100	1.1×10^9	1.5×10^{-8}	0.097
	10	5.4×10^9	1.0×10^{-8}	0.147	4.4×10^9	9.8×10^{-9}	0.074	3.6×10^9	1.0×10^{-8}	0.044
	12	4.1×10^7	2.0×10^{-7}	1.000	2.6×10^7	1.2×10^{-7}	0.980	2.0×10^7	8.9×10^{-8}	0.920
	14	2.9×10^7	1.2×10^{-7}	2.287	2.5×10^7	7.9×10^{-8}	1.601	2.2×10^7	6.6×10^{-8}	1.085
	15	1.6×10^8	6.3×10^{-8}	0.789	1.1×10^8	4.9×10^{-8}	0.561	8.8×10^7	4.3×10^{-8}	0.424
H	1	2.1×10^8	1.3×10^{-7}	0.291	1.2×10^8	1.1×10^{-7}	0.241	5.9×10^7	1.0×10^{-7}	0.270
	2	2.7×10^8	9.8×10^{-8}	0.301	1.7×10^8	8.7×10^{-8}	0.215	1.2×10^8	8.0×10^{-8}	0.166
	3	3.5×10^8	1.3×10^{-7}	0.175	2.0×10^8	1.2×10^{-7}	0.133	1.2×10^8	1.1×10^{-7}	0.121
	4	4.0×10^8	1.4×10^{-7}	0.142	2.0×10^8	1.3×10^{-7}	0.122	1.2×10^8	1.2×10^{-7}	0.111
	5	3.1×10^8	1.8×10^{-7}	0.143	1.6×10^8	1.6×10^{-7}	0.124	6.0×10^7	1.5×10^{-7}	0.177
	7	4.5×10^8	1.1×10^{-7}	0.161	2.4×10^8	1.0×10^{-7}	0.133	1.6×10^8	1.0×10^{-7}	0.099
	8	4.7×10^8	1.2×10^{-7}	0.177	2.4×10^8	1.0×10^{-7}	0.133	1.3×10^8	1.0×10^{-7}	0.122
	9	6.0×10^8	2.2×10^{-7}	0.060	2.9×10^8	2.0×10^{-7}	0.055	1.8×10^8	2.0×10^{-7}	0.044
	10	2.6×10^8	2.4×10^{-7}	0.128	1.3×10^8	2.9×10^{-7}	0.111	8.0×10^9	2.1×10^{-7}	0.001
	12	1.0×10^8	3.2×10^{-7}	0.250	5.3×10^7	2.9×10^{-7}	0.210	3.3×10^7	2.7×10^{-7}	0.180
	14	6.3×10^6	5.0×10^{-7}	2.526	5.0×10^6	3.8×10^{-7}	1.720	4.2×10^6	3.3×10^{-7}	1.179
	15	1.7×10^8	2.6×10^{-7}	0.177	9.2×10^7	2.4×10^{-7}	0.139	5.6×10^7	2.3×10^{-7}	0.118

表4. 2. 6 施設本体と同仕様試験板のインピーダンス変化

仕様 No.	経過 年数	0.2kHz			0.5kHz			1.0kHz		
		交流抵抗 $\Omega \text{ cm}^2$	静電容量 F/cm^2	$\tan \delta$	交流抵抗 $\Omega \text{ cm}^2$	静電容量 F/cm^2	$\tan \delta$	交流抵抗 $\Omega \text{ cm}^2$	静電容量 F/cm^2	$\tan \delta$
I	1	2.7×10^8	1.1×10^{-7}	0.268	1.4×10^8	1.9×10^{-7}	0.227	7.4×10^7	9.0×10^{-8}	0.239
	2	4.7×10^8	9.5×10^{-8}	0.178	2.9×10^8	8.5×10^{-8}	0.129	1.9×10^8	8.1×10^{-8}	0.103
	3	3.5×10^8	1.3×10^{-7}	0.175	2.0×10^8	7.0×10^{-7}	0.133	1.3×10^8	1.2×10^{-7}	0.102
	4	5.9×10^8	1.1×10^{-7}	0.123	3.2×10^8	1.1×10^{-7}	0.090	1.8×10^8	1.0×10^{-7}	0.088
	5	4.4×10^8	1.7×10^{-7}	0.106	2.2×10^8	1.6×10^{-7}	0.090	1.3×10^8	1.5×10^{-7}	0.082
	7	4.6×10^8	1.2×10^{-7}	0.144	2.4×10^8	1.1×10^{-7}	0.107	1.7×10^8	1.1×10^{-7}	0.085
	8	4.8×10^8	1.4×10^{-7}	0.149	3.0×10^8	1.2×10^{-7}	0.088	1.9×10^8	1.2×10^{-7}	0.070
	9	5.8×10^8	2.0×10^{-7}	0.069	3.9×10^8	1.2×10^{-7}	0.068	2.4×10^8	1.9×10^{-7}	0.035
	10	3.3×10^8	2.3×10^{-7}	0.105	1.8×10^8	2.2×10^{-7}	0.080	1.1×10^8	2.1×10^{-7}	0.069
	12	1.7×10^8	2.6×10^{-7}	0.190	1.0×10^8	2.4×10^{-7}	0.140	6.3×10^7	2.3×10^{-7}	0.110
	14	4.4×10^7	3.8×10^{-7}	0.427	2.9×10^7	3.4×10^{-7}	0.305	1.9×10^7	3.1×10^{-7}	0.266
	15	1.2×10^8	2.3×10^{-7}	0.285	8.1×10^7	2.1×10^{-7}	0.168	6.7×10^7	2.0×10^{-7}	0.113
J	1	6.4×10^8	3.0×10^{-8}	0.414	4.1×10^8	2.5×10^{-8}	0.311	2.8×10^8	2.2×10^{-8}	0.258
	2	2.5×10^9	2.2×10^{-8}	0.145	1.4×10^9	1.5×10^{-8}	0.152	4.4×10^8	1.8×10^{-8}	0.201
	3	2.1×10^9	2.6×10^{-8}	0.146	1.3×10^9	2.3×10^{-8}	0.106	5.1×10^8	2.3×10^{-8}	0.136
	4	5.0×10^9	1.4×10^{-8}	0.114	2.8×10^7	1.2×10^{-8}	0.095	1.8×10^9	1.1×10^{-8}	0.080
	5	2.3×10^9	5.4×10^{-8}	0.064	1.0×10^9	5.1×10^{-8}	0.062	4.0×10^8	4.5×10^{-8}	0.088
	7	9.8×10^8	3.4×10^{-8}	0.239	5.8×10^8	3.1×10^{-8}	0.177	3.8×10^8	2.7×10^{-8}	0.155
	8	6.0×10^8	4.9×10^{-8}	0.271	1.0×10^9	4.0×10^{-8}	0.080	4.0×10^8	3.2×10^{-8}	0.124
	9	3.5×10^9	3.3×10^{-8}	0.069	2.3×10^9	3.1×10^{-8}	0.045	1.3×10^9	2.9×10^{-8}	0.042
	10	3.7×10^9	1.0×10^{-8}	0.215	4.4×10^9	1.1×10^{-8}	0.066	3.6×10^9	1.0×10^{-8}	0.044
	12	7.7×10^8	3.4×10^{-8}	0.310	4.4×10^8	2.9×10^{-8}	0.250	2.7×10^8	2.7×10^{-7}	0.020
	14	5.4×10^8	4.2×10^{-8}	0.361	3.3×10^8	3.7×10^{-8}	0.257	2.1×10^8	3.5×10^{-8}	0.218
	15	8.1×10^8	3.0×10^{-8}	0.322	4.8×10^8	2.6×10^{-8}	0.246	3.2×10^8	2.4×10^{-8}	0.203
L	1	5.5×10^8	4.4×10^{-8}	0.329	3.7×10^8	3.7×10^{-8}	0.232	2.7×10^8	3.4×10^{-8}	0.173
	2	7.8×10^8	3.5×10^{-8}	0.292	5.0×10^8	2.8×10^{-8}	0.227	3.7×10^8	2.6×10^{-8}	0.165
	3	8.7×10^8	4.0×10^{-8}	0.229	5.4×10^8	3.6×10^{-8}	0.164	3.8×10^8	3.4×10^{-8}	0.123
	4	2.5×10^9	3.8×10^{-8}	0.084	1.4×10^9	3.5×10^{-8}	0.065	5.1×10^8	3.4×10^{-8}	0.092
	5	1.9×10^9	6.5×10^{-8}	0.064	6.0×10^8	6.0×10^{-8}	0.088	3.6×10^8	6.0×10^{-8}	0.074
	7	9.1×10^8	4.7×10^{-8}	0.186	5.2×10^8	4.2×10^{-8}	0.146	3.4×10^8	3.9×10^{-8}	0.120
	8	1.2×10^9	6.0×10^{-8}	0.111	5.8×10^8	5.4×10^{-8}	0.102	3.6×10^8	5.2×10^{-8}	0.085
	9	8.8×10^7	1.3×10^{-8}	0.070	5.4×10^9	1.2×10^{-8}	0.099	3.4×10^9	1.2×10^{-8}	0.039
	10	1.1×10^9	7.9×10^{-8}	0.092	3.7×10^8	7.4×10^{-8}	0.116	2.4×10^8	7.0×10^{-8}	0.095
	12	4.6×10^8	7.3×10^{-8}	0.240	2.6×10^8	6.6×10^{-8}	0.180	1.7×10^8	6.2×10^{-8}	0.150
	14	6.4×10^8	6.3×10^{-8}	0.197	3.6×10^8	5.7×10^{-8}	0.154	2.4×10^8	5.4×10^{-8}	0.125
	15	6.5×10^8	6.7×10^{-8}	0.183	3.7×10^8	6.1×10^{-8}	0.141	2.3×10^8	5.8×10^{-8}	0.115
M	1	5.0×10^8	5.5×10^{-8}	0.289	3.8×10^8	4.7×10^{-8}	0.178	2.7×10^8	4.5×10^{-8}	0.136
	2	6.5×10^8	4.5×10^{-8}	0.272	4.5×10^8	4.3×10^{-8}	0.165	2.8×10^8	4.0×10^{-8}	0.142
	3	4.6×10^8	5.9×10^{-8}	2.933	4.0×10^7	6.4×10^{-8}	1.244	3.6×10^7	6.3×10^{-8}	0.702
	4	9.3×10^8	5.5×10^{-8}	0.156	5.3×10^8	5.1×10^{-8}	0.118	3.4×10^8	4.8×10^{-8}	0.098
	5	1.8×10^9	8.1×10^{-8}	0.055	5.2×10^8	7.7×10^{-8}	0.080	3.0×10^8	7.4×10^{-8}	0.072
	7	7.3×10^8	7.0×10^{-8}	0.156	3.8×10^8	6.5×10^{-8}	0.129	2.4×10^8	6.0×10^{-8}	0.111
	8	1.2×10^9	8.0×10^{-8}	0.083	5.2×10^8	7.6×10^{-8}	0.081	3.0×10^8	7.4×10^{-8}	0.072
	9	1.9×10^9	1.0×10^{-8}	0.042	8.0×10^8	9.0×10^{-8}	0.044	4.0×10^8	9.0×10^{-8}	0.044
	10	5.1×10^8	1.1×10^{-7}	0.142	3.1×10^8	1.0×10^{-7}	0.103	2.0×10^8	1.0×10^{-7}	0.080
	12	3.6×10^8	1.2×10^{-7}	0.180	1.9×10^8	1.1×10^{-7}	0.150	1.1×10^8	1.1×10^{-7}	0.130
	14	1.5×10^7	1.6×10^{-7}	3.316	1.4×10^7	1.2×10^{-7}	1.878	1.3×10^7	1.1×10^{-7}	1.148
	15	6.6×10^8	1.0×10^{-7}	0.120	3.3×10^8	9.5×10^{-8}	0.100	2.0×10^8	902×10^{-8}	0.088

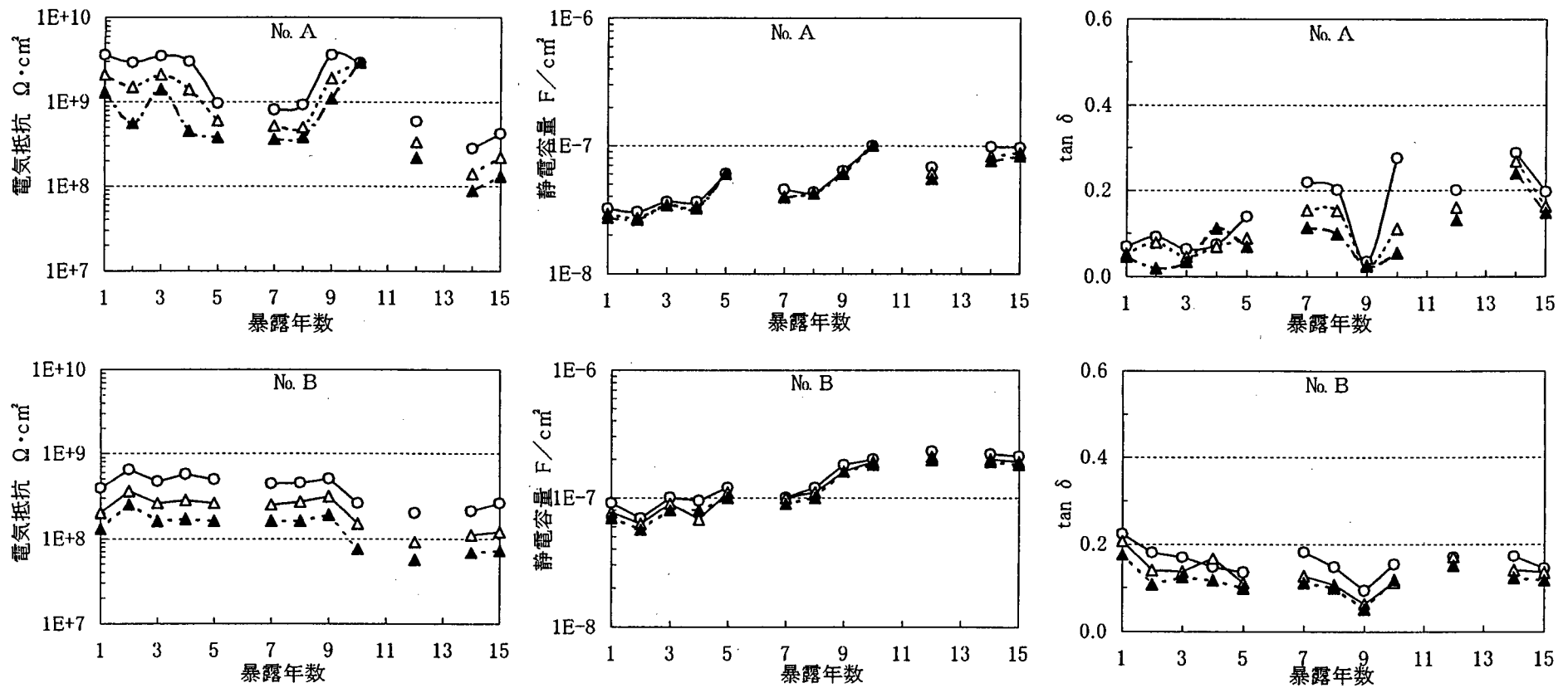


図4. 2. 2 施設本体と同仕様の試験板のインピーダンス経年変化(抵抗、容量、 $\tan \delta$)

No.A:厚膜エポキシジンク/ポリエステルガラスフレーク/ふっ素上塗

No.B:厚膜型無機ジンク/ミストコート/ふっ素樹脂用プライマー・中塗・上塗

—○—;0.2kHz —△—;0.5kHz ---▲---;1.0kHz

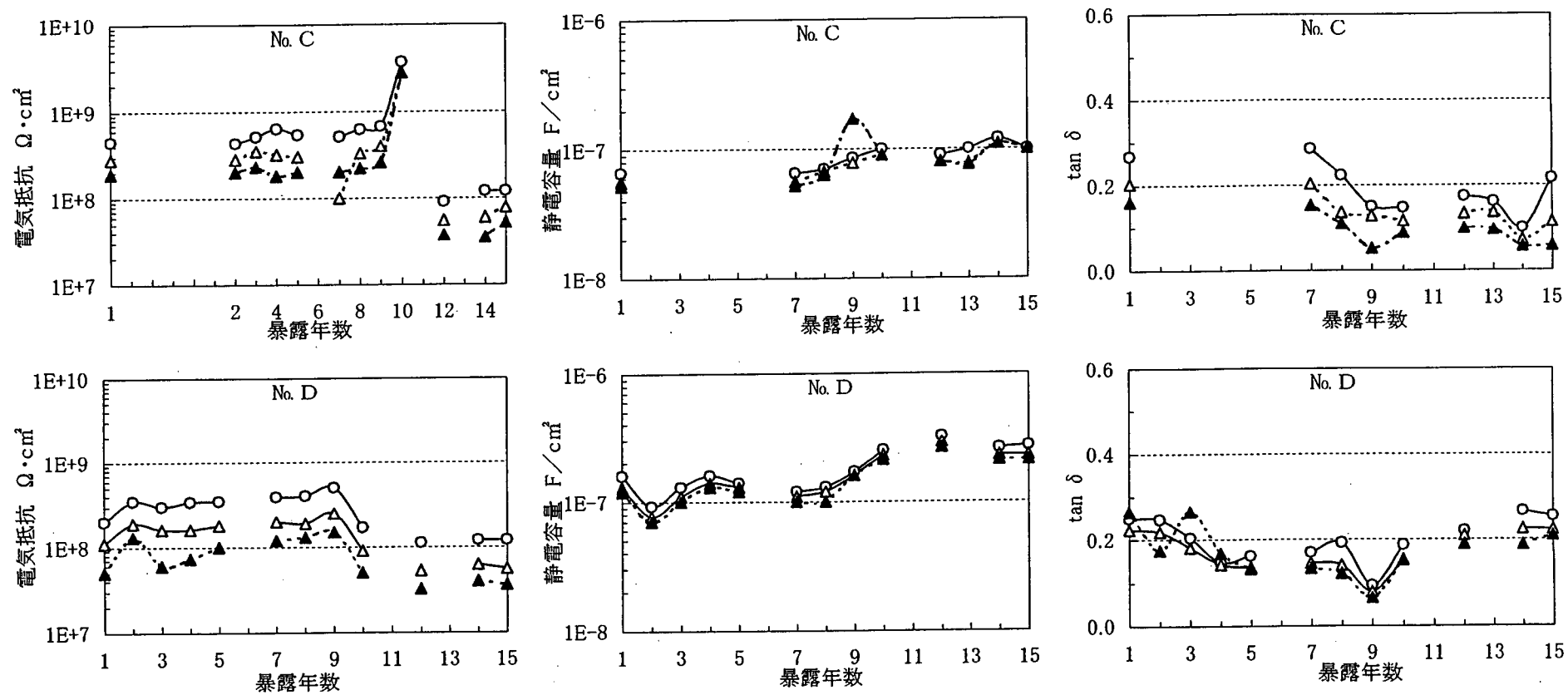


図4. 2. 3 施設本体と同仕様の試験板のインピーダンス経年変化(抵抗、容量、 $\tan \delta$)

No.C:エポキシジンクプライマー/変性ポリエステルプライマー/変性ポリエステル
 No.D:厚膜無機ジンク/ミストコート/厚膜ビニル/ビニル上塗
 —○—;0.2kHz —△—;0.5kHz —▲—;1.0kHz

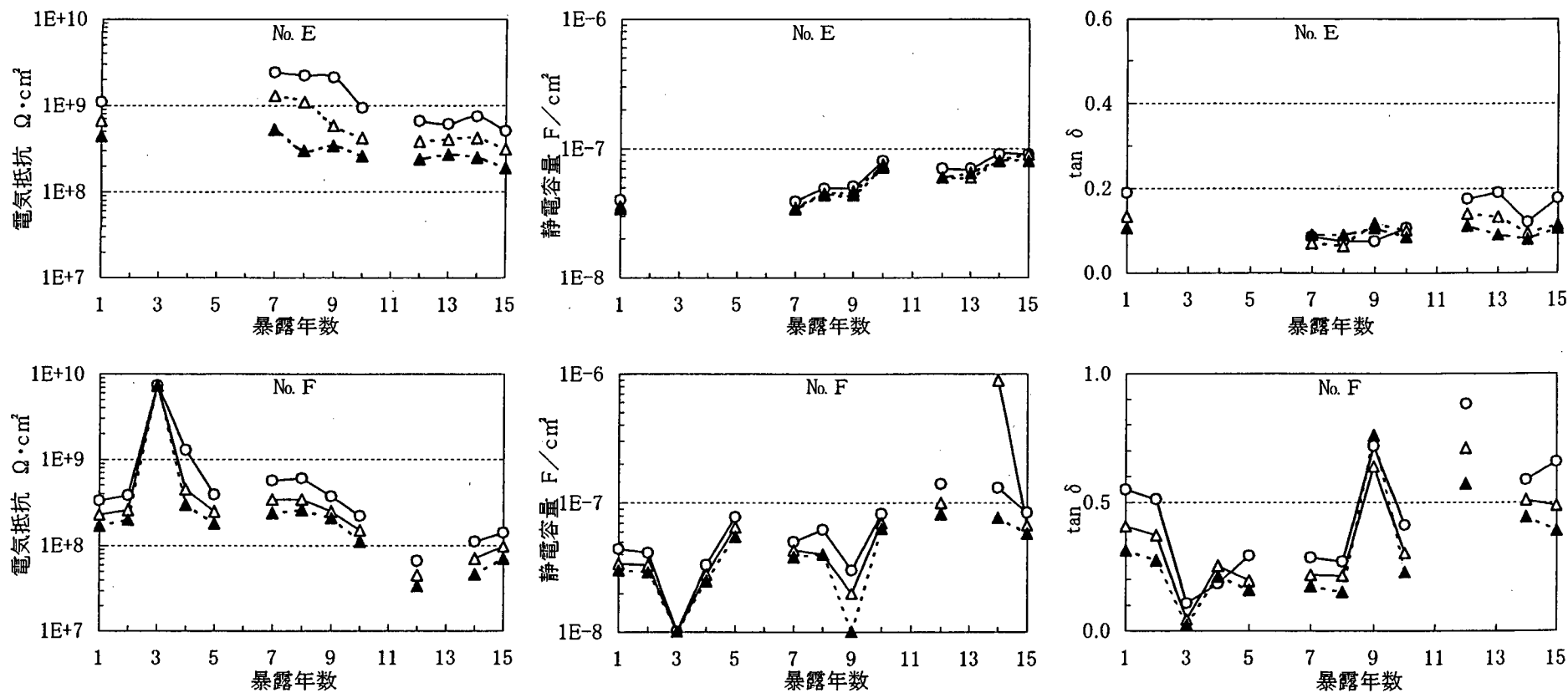


図4. 2. 4 施設本体と同仕様の試験板のインピーダンス経年変化(抵抗、容量、 $\tan \delta$)

No.E: ポリエステルプタイマー/ポリエステルフレーク/ウレタン用中塗・ウレタン上塗

No.F: エポキシガラスフレーク×2/ウレタン用中塗・ウレタン上塗

—○—; 0.2kHz —△—; 0.5kHz —▲—; 1.0kHz

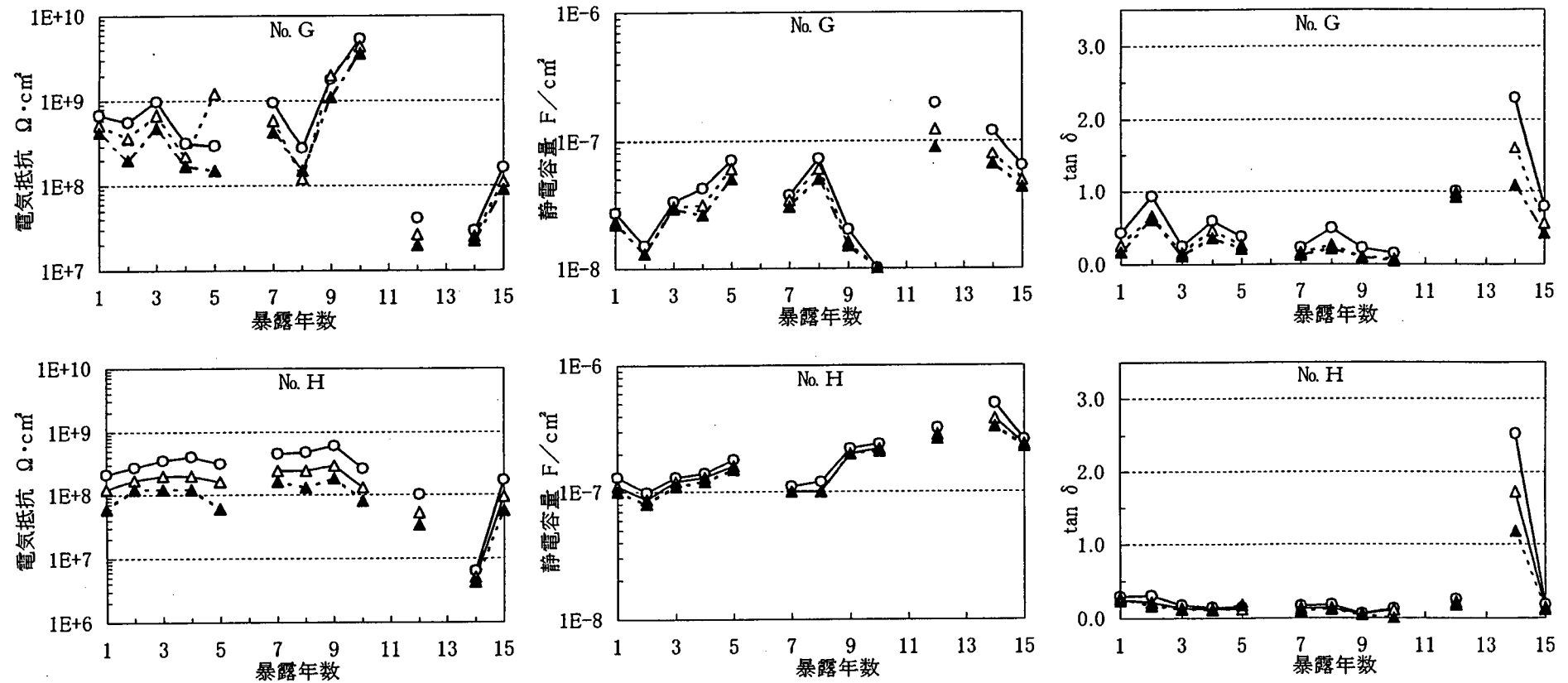


図4. 2. 5 施設本体と同仕様の試験板のインピーダンス経年変化(抵抗、容量、 $\tan \delta$)

No.G: エポキシガラスフレーク/ウレタン用中塗・ウレタン上塗
 No.H: 厚膜無機ジンク/厚膜エポキシ/ウレタン用中塗・ウレタン上塗
 —○—; 0.2kHz —△—; 0.5kHz —▲—; 1.0kHz

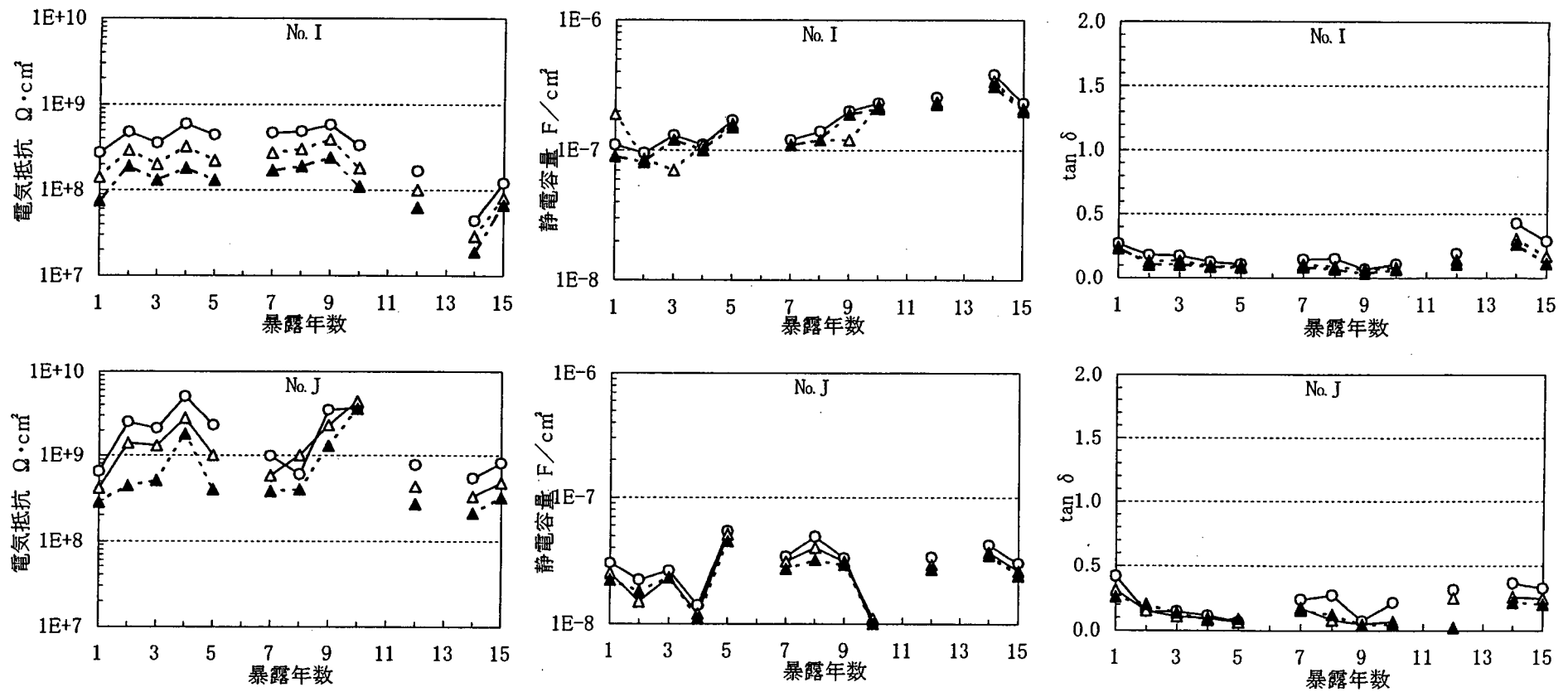


図4. 2. 6 施設本体と同仕様の試験板のインピーダンス経年変化(抵抗、容量、 $\tan \delta$)

No.I:厚膜無機ジンク/厚膜エポキシ/ウレタン上塗

No.J:エポキシジンクプライマー/超厚膜エポキシ/ウレタン上塗

—○—;0.2kHz —△—;0.5kHz —▲—;1.0kHz

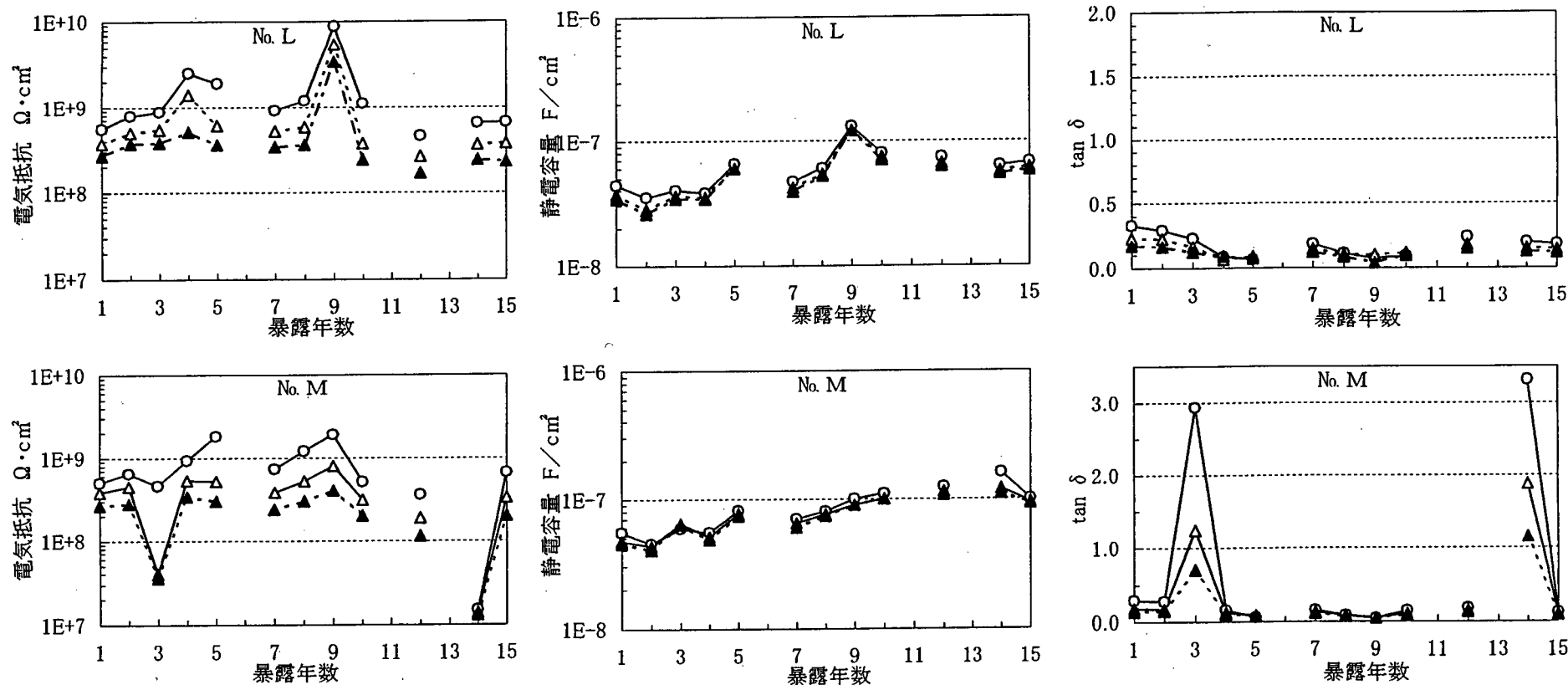


図4. 2. 7 施設本体と同仕様の試験板のインピーダンス経年変化(抵抗、容量、 $\tan \delta$)

No.L: 厚膜無機ジンク/タールウレタン×2

No.M: 厚膜無機ジンク/タールウレタン×2

—○—; 0.2kHz —△—; 0.5kHz —▲—; 1.0kHz

(5) 長期防錆塗装仕様の提案

海洋に設置される鋼構造物は、塩分、水分、紫外線などの影響により、塗膜の劣化、鋼材の腐食などによる損傷を免れないが、その環境条件のために補修は極めて困難な場合が多い。したがって、このような構造物を対象とする防錆塗装は長期防錆塗装系の適用が望ましい。

長期防錆塗装系は、厚膜形ジンクリッチペイントなどの防食下地、耐水性、耐薬品性の優れた厚膜型の合成樹脂塗料中塗、耐候性の優れたポリウレタン樹脂、ふっ素樹脂塗料上塗等で構成され、海上大気中のような厳しい腐食環境中においても長期にわたって鉄素地を保護し、塗膜の美観を保持するものである。

また、塗膜に要求される耐久性としては、前述のように、塗替えは極めて困難であるので、その構造物の耐用年数に見合った耐久性が必要であると考えられる。

そこで、15年後の調査結果を踏まえた上で、海洋構造物大気部の長期防錆塗装仕様について考察し、次のような提案をしたい。

すなわち、図4.2.8に示すように、海上連絡橋の主塔や桁の一般部に多用されている本州四国連絡橋公団塗装系Eと同一のH塗装系を標準とし、防食性を重視したA塗装系、エッジ部、添接部など特殊部向けのJ塗装系、工数低減を図ったI塗装系、耐候性を重視したB塗装系、工数低減に補修性を加味したD塗装系などから、部位、環境条件、維持管理の難易度などを考慮して、選択するのが望ましいと考える。

また、特殊部向けのJ塗装系も耐候性を重視して、上塗にふっ素樹脂塗料を適用することが望ましいと考える。

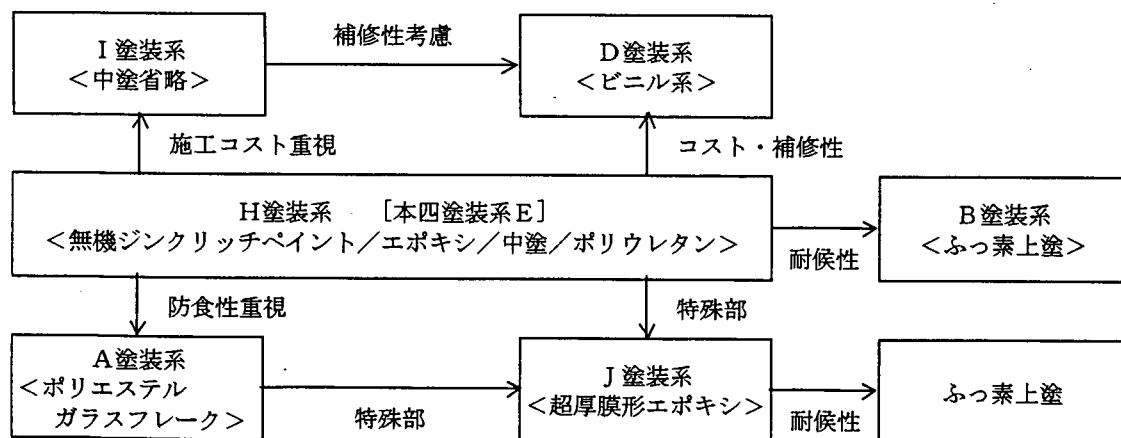


図4.2.8 海上長期防錆塗装仕様（大気部）の概念図

4. 3 簡易塗替え塗装システムの開発

4. 3. 1 目的

海洋構造物の長期防錆塗装システムの補修仕様として、経済的な塗装工法である簡易塗替仕様（外観向上などの化粧仕上げのみのもの）の暴露試験を本体施設の一部を用いて行い、耐食性、旧塗膜との付着性を明らかにする。

4. 3. 2 計画

施設本体の一部を用いて、簡易塗替え塗装を行ない、その経時変化を観察する。

簡易塗替え塗装の塗装系を表 4.3.1 に示す。調査項目を表 4. 3. 2 (2) および表 4. 3. 2 (2) に示す。

表 4. 3. 1 簡易塗替え試験の内容

旧塗膜	I 厚膜無機ジンクリッチペイント／厚膜エポキシ ／ウレタン用中塗／ウレタン上塗 II 厚膜有機ジンクリッチペイント／ポリエステルガラスフレーク ／ふっ素上塗 III 厚膜無機ジンクリッチペイント／厚膜ビニル／ビニル上塗
素地調整	・ 目荒し有り（水洗＋＃240 ペーパー研磨） ・ 目荒しなし（水洗のみ）
塗替塗装系	①ふっ素上塗 (←旧塗膜II利用) ②ふっ素用中塗／ふっ素上塗 (←旧塗膜I利用) ③ウレタン用中塗／ウレタン上塗 (←旧塗膜I利用) ④ビニル上塗 (←旧塗膜III利用)
調査	・ 基盤目付着性 ・ 外観

表 4. 3. 2 (1) 調査項目と調査時期 (長期防錆塗装系の開発)

調査年度		昭和63年 (1988)	平成元年 (1989)	平成2年 (1990)	平成3年 (1991)	平成4年 (1992)	平成5年 (1993)
経過年数		初期	1年	2年	3年	4年	5年
調査項目	基盤目付着性		○				
	外観		○	○	○	○	○

*) 本体の設置 4 年後を旧塗膜とみなし本実験を開始した (1988年より)

調査年度		平成6年 (1994)	平成7年 (1995)	平成8年 (1996)	平成9年 (1997)	平成10年 (1998)	平成11年 (1999)
経過年数		6年	7年	8年	9年	10年	11年
調査項目	基盤目付着性	○				○	
	外観	○	○	○	○	○	○

備考) 空白は測定なし

表 4. 3. 2 (2) 調査項目と調査時期(12年後～20年後予定)

調査年度		平成12年 (2000)	平成13年 (2001)	平成14年 (2002)	平成15年 (2003)
経過年数		12年	13年	14年	15年
調査項目	碁盤目付着性				○
	外観		○		○

調査年度		平成16年 (2004)	平成17年 (2005)	平成18年 (2006)	平成19年 (2007)	平成20年 (2008)
経過年数		6年	7年	8年	9年	20年
調査項目	碁盤目付着性					○
	外観		○			○

*) 調査内容

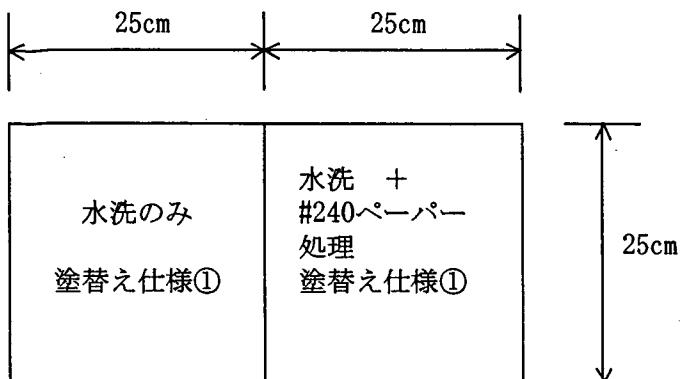
碁盤目付着性：カッターナイフで5mmの碁盤目9個切り、セロハン粘着テープはく離。

外観：さび、ふくれ、われ、キズ、変色、白亜化等を目視観察。

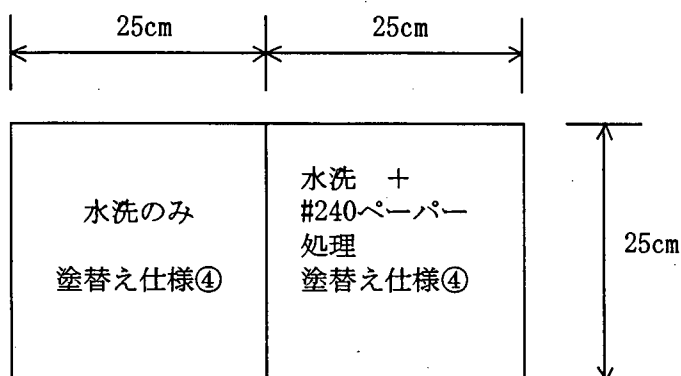
4. 3. 3 塗替え実験

試験部位は第2デッキ主鋼管（1-C、2-C、および3-C）T.P.10.4m付近を使用。塗替え範囲、素地調整、塗替え塗装系を以下（図4.3.1）に示す。

1-C（旧上塗：ふっ素樹脂塗料）（塗替え仕様①）



2-C（旧上塗：ビニル樹脂塗料）（塗替え仕様④）



3-C（旧上塗：ポリウレタン樹脂塗料）（塗替え仕様②、③）

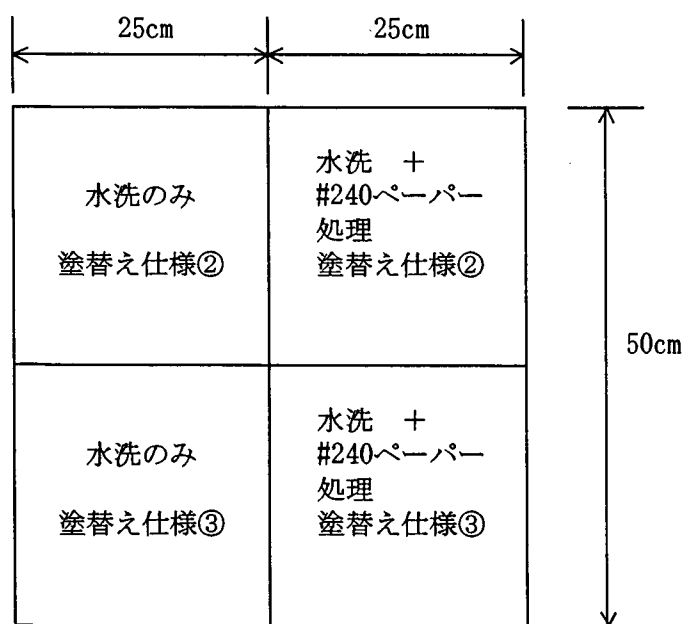


図4.3.1 各主鋼管への塗替え仕様

各塗替え仕様と旧塗膜との関係を表4.3.3に示す。

表4.3.3 塗替え塗装系と旧塗膜の関係

	塗 替 塗 料	旧 塗 膜
塗替塗装系①	ふっ素樹脂塗料	ポリエステルガラスフレーク ／ふっ素樹脂塗料
塗替塗装系②	ふっ素樹脂塗料	ポリウレタン樹脂塗料
塗替塗装系③	ポリウレタン樹脂塗料	ポリウレタン樹脂塗料
塗替塗装系④	ビニル樹脂塗料	ビニル樹脂塗料

4.3.4 結果

施設本体を用いて行なった簡易塗替え仕様の11年後の結果を表4.3.3に示す。

このような簡易塗替え塗装系は、当初懸念されるところもあったが、いずれの塗装系も11年後の状態は、外観上の異状は認められず、良好であった。

従来、ふっ素樹脂塗料上塗への塗替は困難とされてきたが、今回のデータでは目荒しなしの場合でも暴露10年経過しても良好な付着性を示し、更に暴露11年後においても外観上全く問題なかった。しかしながら、この検討は、主鋼管北面側を対象としたものであり、日照条件上厳しいとは言えない。今後の課題としては、もっと厳しい環境下での検証が必要と思われる。

表 4. 3. 4 簡易塗替え仕様の検討
簡易塗替え仕様による活膜部の試験塗装（化粧塗り）～10年後の結果

NO.	塗装部	旧 塗 膜			素地調整	適用塗料種	塗膜外観
		No	塗 装 系	膜厚 (μ m)			
1	主鋼管 3-C	H	厚膜型無機ジンクリッチペイント ミストコート 厚膜型エポキシ樹脂塗料 ポリウレタン樹脂塗料用中塗 ポリウレタン樹脂塗料上塗	75 60×2 30 30	1) 目荒し有り	ポリウレタン樹脂塗 料用中塗／ポリ ウレタン樹脂塗料上 塗	異常なし
2	主鋼管 3-C	H	厚膜型無機ジンクリッチペイント ミストコート 厚膜型エポキシ樹脂塗料 ポリウレタン樹脂塗料用中塗 ポリウレタン樹脂塗料上塗	75 60×2 30 30	水洗のみ	ポリウレタン樹脂塗 料用中塗／ポリ ウレタン樹脂塗料上 塗	異常なし
3	主鋼管 3-C	H	厚膜型無機ジンクリッチペイント ミストコート 厚膜型エポキシ樹脂塗料 ポリウレタン樹脂塗料用中塗 ポリウレタン樹脂塗料上塗	75 60×2 30 30	1) 目荒し有り	ふっ素樹脂塗料 用中塗／ふっ素 樹脂塗料上塗	異常なし
4	主鋼管 3-C	H	厚膜型無機ジンクリッチペイント ミストコート 厚膜型エポキシ樹脂塗料 ポリウレタン樹脂塗料用中塗 ポリウレタン樹脂塗料上塗	75 60×2 30 30	水洗のみ	ふっ素樹脂塗料 用中塗／ふっ素 樹脂塗料上塗	異常なし
5	主鋼管 1-C	A	厚膜型エポキシジンクリッチペイント ポリエステルガラスフレーク塗料 ふっ素樹脂塗料上塗	75 350×2 20×2	1) 目荒し有り	ふっ素樹脂塗料 上塗	異常なし
6	主鋼管 1-C	A	厚膜型エポキシジンクリッチペイント ポリエステルガラスフレーク塗料 ふっ素樹脂塗料上塗	75 350×2 20×2	水洗のみ	ふっ素樹脂塗料 上塗	異常なし
7	主鋼管 2-C	D	厚膜型エポキシジンクリッチペイント ミストコート 厚膜型ビニル樹脂塗料 ビニル樹脂塗料上塗	75 150 30	目荒し有り	ビニル樹脂塗料 上塗	異常なし
8	主鋼管 2-C	D	厚膜型エポキシジンクリッチペイント ミストコート 厚膜型ビニル樹脂塗料 ビニル樹脂塗料上塗	75 150 30	水洗のみ	ビニル樹脂塗料 上塗	異常なし

1) 水洗＋#240ペーパー処理

4. 4 部分補修仕様、簡易塗替仕様の検討

4. 4. 1 目的

鋼構造物の耐久性（防食性、耐食性）を長期維持させるためには、適当な時期に補修塗装を行うことが必要となる。現在、橋梁など一般の海上鋼構造物には、本州四国連絡橋公団（E）塗装系が一般部における標準的な塗装系である。従ってこの塗装系における補修塗装システムを検討する。

4. 4. 2 実験の概要

部分的に防食性で低下した場合の補修を想定した「部分補修仕様」と上塗塗膜のみが劣化して耐候性が低下した場合の「簡易塗替仕様」について検討する。

4. 4. 3 実験

（1）部分補修仕様

1）適用下地

旧塗膜：本州四国連絡橋公団 E 塗装系＜厚膜無機ジンクリッチペイント（75 μ m）／ミストコート／エポキシ樹脂塗料下塗（60 μ m $\times$ 2）／ポリウレタン樹脂塗料用中塗（30 μ m）／ポリウレタン樹脂塗料上塗（30 μ m）＞を旧塗膜とし、あらかじめ 2 年、5 年、7 年間暴露した試験片を使用する。試験片の上半分は水洗後 # 3 2 0 ペーパーで縦方向のみ処理し、下半分は軽く水洗のみを行なって補修塗装に供する。

2）補修塗装系

塗装系 1：超厚膜形エポキシ樹脂塗料（300 μ m）

／ふっ素樹脂塗料上塗（30 μ m）

塗装系 2：エポキシ樹脂塗料下塗（30 μ m）／超厚膜形樹脂塗料

（300 μ m）／ふっ素樹脂塗料上塗（30 μ m）

塗装系 3：No. 1

エポキシ樹脂塗料下塗（30 μ m）／エポキシガラスフレーク塗料

（400 μ m）／ふっ素樹脂塗料上塗（30 μ m）

No. 2

エポキシ樹脂塗料下塗（30 μ m）／ビニルエステルガラスフレーク

塗料（300 μ m）／ふっ素樹脂塗料上塗（30 μ m）

No. 3

エポキシ樹脂塗料下塗（30 μ m）／超厚膜形エポキシ塗料（1000 μ m）

／ふっ素樹脂塗料上塗（30 μ m）

3) 暴露期間

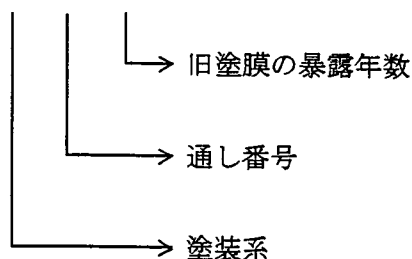
旧塗膜は各々2年、5年、7年暴露して塗替塗装を行い塗替え塗膜を3年、5年、7年再暴露して後評価する。

4) 調査項目

旧塗膜に対する付着性試験（アドヒージョンテスト）

5) 試験片の明細

88-J□△△-○



- 1：エポキシガラスフレーク
- 2：ビニルエステルガラスフレーク
- 3：超厚膜形エポキシ

＊）試験片No.の明細を表4. 4. 1に示す。

(2) 簡易塗替仕様

1) 適用下地

旧塗膜①：本州四国連絡橋公団E塗装系＜厚膜形無機ジンクリッチペイント(75 μ m)／ミストコート／エポキシ樹脂塗料下塗(60 μ m $\times$ 2)／ポリウレタン樹脂塗料用中塗(30 μ m)／ポリウレタン樹脂塗料上塗(30 μ m)＞

旧塗膜②：厚膜形無機ジンクリッチペイント(75 μ m)／ミストコート／エポキシ樹脂塗料下塗(60 μ m $\times$ 2)／ふっ素樹脂塗料用中塗(30 μ m)／ふっ素樹脂塗料上塗(30 μ m)

＊）上記塗膜をあらかじめ2年、5年、7年暴露させた試験片を使用する。

試験片の1枚は水洗後#320ペーパーで縦方向のみ処理し、残りの1枚は軽く水洗のみを行なって塗替塗装に供する。

2) 塗替塗装系

塗装系1：ポリウレタン樹脂塗料用中塗(30 μ m)／ポリウレタン樹脂塗料上塗(30 μ m)

塗装系2：ふっ素樹脂塗料用中塗(30 μ m)／ふっ素樹脂塗料上塗(30 μ m)

3) 暴露期間

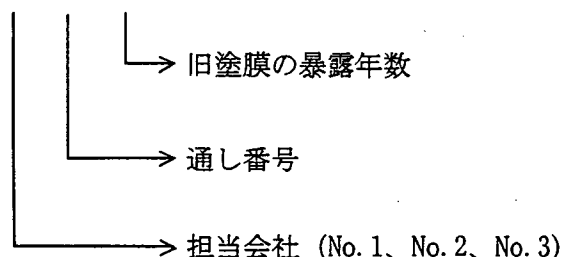
旧塗膜は各々2年、5年、7年暴露して簡易塗替え塗装を行い、塗替え塗膜を3年、5年、7年暴露後評価する。

4) 調査項目

旧塗膜に対する付着性試験（アドヒージョンテスト）

5) 試験片の明細

88-L□△△-○



*) 簡易塗替塗装系の試験片No.の明細を表4.4.3に示す。

4.4.4 結果

旧塗膜を2年、5年および7年暴露し、部分補修塗装、簡易塗替塗装後の付着性を測定した。部分補修塗装あるいは簡易塗替塗装後7年経過したものは終了し、5、3年のものは補修後再度暴露する。旧塗膜暴露後補修塗装塗膜および塗替塗装塗膜の初期付着性測定結果をそれぞれ表4.4.2および表4.4.4に示す。

(1) 部分補修仕様の検討

旧塗膜を2年暴露して、補修後7年経過した試験片、旧塗膜を5年暴露し、補修後5年経過した試験片および旧塗膜を7年暴露して、補修後3年経過した試験片の付着性を測定した。その測定結果を表4.4.2に示す。

付着強度は変動があるが、全ての試験片で十分な強度を維持しており、はく離の形態としては旧塗膜の無機ジンクリッチペイントの凝集破壊がほとんどであった。旧塗膜との層間剥離はほとんど認められなかった。

(2) 簡易塗替塗装仕様の検討

旧塗膜を2年暴露して、簡易塗替え後5年暴露した試験片と旧塗膜を5年暴露し簡易塗装後3年暴露した試験片の付着性を測定した。その測定結果を表4.4.4に示す。

付着性測定結果を考察すると、付着強度の変化にははっきりとした傾向は認められなかったが、いずれにしても十分な付着強度を示した。はく離の形態は旧塗膜のエポキシ下塗の凝集破壊が大部分であった。また水洗のみで塗替え塗装をした場合でも、旧塗膜との層間ではく離するケースはなかった。

更に、今後の調査スケジュールを表4.7.5に示す。

表 4 . 4 . 1 補修塗装系の試験片の内容

試験片 N o .	適用下地	下地の暴露年数	塗替仕様 N o .
88-J104-1	旧塗膜	2	塗装系 1
88-J105-1	旧塗膜	2	塗装系 2
88-J106-1	旧塗膜	2	塗装系 3 - 1
88-J107-3	旧塗膜	5	塗装系 1
88-J108-3	旧塗膜	5	塗装系 2
88-J109-3	旧塗膜	5	塗装系 3 - 1
88-J110-5	旧塗膜	7	塗装系 1
88-J111-5	旧塗膜	7	塗装系 2
88-J112-5	旧塗膜	7	塗装系 3 - 1
88-J204-1	旧塗膜	2	塗装系 1
88-J205-1	旧塗膜	2	塗装系 2
88-J206-1	旧塗膜	2	塗装系 3 - 2
88-J207-3	旧塗膜	5	塗装系 1
88-J208-3	旧塗膜	5	塗装系 2
88-J209-3	旧塗膜	5	塗装系 3 - 2
88-J210-5	旧塗膜	7	塗装系 1
88-J211-5	旧塗膜	7	塗装系 2
88-J212-5	旧塗膜	7	塗装系 3 - 2
88-J304-1	旧塗膜	2	塗装系 1
88-J305-1	旧塗膜	2	塗装系 2
88-J306-1	旧塗膜	2	塗装系 3 - 3
88-J307-3	旧塗膜	5	塗装系 1
88-J308-3	旧塗膜	5	塗装系 2
88-J309-3	旧塗膜	5	塗装系 3 - 3
88-J310-5	旧塗膜	7	塗装系 1
88-J311-5	旧塗膜	7	塗装系 2
88-J312-5	旧塗膜	7	塗装系 3 - 3

表 4. 4. 2 (1) 補修塗装塗膜の付着性評価

試験片 No.88	旧塗膜 の暴露 年数	補 修 塗 装	補修後 の暴露 年数	補修塗装後の付着性			
				旧塗膜の処理(水洗/サンドペーパー処 理)		旧塗膜の処理(水洗のみ)	
				付着強度 (MPa)	はく離部	付着強度 (MPa)	はく離部
J-104-1	2	1	初期(92)	3.7	1M/T30% 2U40% A30%	4.2	1M/T50% 1U20% 2U30%
			4年(96)	5.0	1U80% 1T/2U20%	5.5	1T/2U60% A40%
			5年(97)	4.5	1U40% A60%	3.5	1U60% 2M40%
			7年(99)	3.7	1U80% 2M/2T20%	3.0	1U80% 2M/2T20%
J-105-1	2	2	初期(92)	4.3	2U80% A20%	4.4	1U30% 2U50% A20%
			4年(96)	4.0	1U80% 2U20%	4.0	1U80% 2U20%
			5年(97)	5.0	1U30% 2U70%	4.0	1U30% 2U70%
			7年(99)	3.0	1U40% 1M/1T30% 2M/2T30%	3.0	1U50% 2M/2T50%
J-106-1	2	3-N	初期(92)	3.9	1U30% 2U50% 2U/T30	4.3	2U/T70% 1U30%
			4年(96)	3.0	2U/T70% A30%	3.0	2U/T60% A40%
			5年(97)	3.0	1U30% 2U30% 2M40%	3.0	1U40% 2M60%
			7年(99)	1.0	2M/T100%	1.0	2M/T100%
J-107-3	5	1	初期(94)	2.2	2T90% A10%	3.6	2T90% A10%
			4年(97)	5.5	2U30% A70%	7.0	2U30% A70%
			5年(99)	—	—	—	—
			7年(01)				
J-108-3	5	2	初期(94)	2.9	2T80% 1Z10% 1U10%	3.1	2T95% A5%
			4年(97)	—	—	—	—
			5年(99)	—	—	—	—
			7年(01)				
J-109-3	5	3-N	初期(94)	5.3	1T/2U90% 1M/T10%	5.1	1T/2U95% 1M/T5%
			4年(97)	5.0	2U100%	5.5	2U100%
			5年(99)	—	—	—	—
			7年(01)				
J-110-5	7	1	初期(96)	2.5	2U80% 1T/2M5% A5%	2.5	2U70% 1T/2M30%
			4年(99)	5.5	1T/2M100%	1.5	1T/2M100%
			5年(01)				
			7年(03)				
J-111-5	7	2	初期(96)	2.5	2U100%	2.5	2U80% 1T/2M5% A15%
			4年(99)	2.5	1T/2M100%	2.0	1T/2M100%
			5年(01)				
			7年(03)				
J-112-5	7	3-N	初期(96)	2.0	A100%	2.5	1T/2U100%
			4年(99)	3.0	1U100%	7.0	1U90% 2U10%
			5年(01)				
			7年(03)				

注) はく離部の表示 1Z; 旧ジंकリッチペイント凝集破壊 1U; 旧塗膜下塗凝集破壊 1M; 旧塗膜中塗凝集破壊
 1T; 旧塗膜上塗凝集破壊
 2U; 補修塗膜下塗凝集破壊 2M; 補修塗膜中塗凝集破壊 2T; 補修塗膜上塗凝集破壊
 A; 接着剤からの剥離
 /; 層間剥離を示す。 1M/T; 旧塗膜中塗と上塗層間剥離

表 4. 4. 2 (2) 補修塗装塗膜の付着性評価

試験片 No.88	旧塗膜 の暴露 年数	補 修 塗 装	補修後 の暴露 年数	補修塗装後の付着性			
				旧塗膜の処理(水洗/サンドペーパー処)		旧塗膜の処理(水洗のみ)	
				付着強度 (MPa)	はく離部	付着強度 (MPa)	はく離部
J-204-1	2	1	初期(92)	3.7	1U80% 1Z20%	2.0	1U60% 1Z40%
			4年(96)	2.0	A100%	2.5	1U70% A30%
			5年(97)	5.0	1U50% 2U50%	3.8	1U80% 2U20%
			7年(99)	2.0	2U100%	4.0	2U100%
J-205-1	2	2	初期(92)	2.5	1U100%	1.9	1U60% 1Z40%
			4年(96)	2.0	1U100%	2.5	1U40% 2U40% A20%
			5年(97)	2.0	2U80% 2M20%	2.5	2U80% 2M20%
			7年(99)	1.5	2U100%	1.5	1U20% 2U80%
J-206-1	2	3-D	初期(92)	3.0	1U100%	2.0	1U100%
			4年(96)	3.0	1U50% 2U40% 1T/2U10%	3.0	1Z60% 2U40%
			5年(97)	5.4	1U60% 1T40%	2.8	1Z30% 2U40% 2M30%
			7年(99)	1.0	1Z60% 2U40%	2.0	1Z50% 1U30% 2U20%
J-207-3	5	1	初期(94)	4.0	2U100%	3.7	2U100%
			4年(97)	5.0	2U100%	4.2	1U100%
			5年(99)	—	—	—	—
			7年(01)				
J-208-3	5	2	初期(94)	4.0	1Z30% 1U70%	4.1	1Z100%
			4年(97)	4.9	1Z60% 1U40%	5.5	1Z10% 1U90%
			5年(99)	—	—	—	—
			7年(01)				
J-209-3	5	3-D	初期(94)	3.0	1Z50% 1U50%	2.5	1Z50% 1U50%
			4年(97)	1.3	1Z100%	1.0	1Z100%
			5年(99)	—	—	—	—
			7年(01)				
J-210-5	7	1	初期(96)	2.0	1Z/U100%	2.5	1Z/U100%
			4年(99)	2.5	1U100%	1.5	1U100%
			5年(01)				
			7年(03)				
J-211-5	7	2	初期(96)	2.5	1Z/U100%	2.5	1Z/U100%
			4年(99)	2.0	1U100%	2.0	1U100%
			5年(01)				
			7年(03)				
J-212-5	7	3-D	初期(96)	2.0	1Z/U100%	3.0	1Z/U100%
			4年(99)	2.5	1U100%	2.0	1U100%
			5年(01)				
			7年(03)				

注) はく離部の表示 1Z; 旧ジツクリッチペイント凝集破壊 1U; 旧塗膜下塗凝集破壊 1M; 旧塗膜中塗凝集破壊
 1T; 旧塗膜上塗凝集破壊
 2U; 補修塗膜下塗凝集破壊 2M; 補修塗膜中塗凝集破壊 2T; 補修塗膜上塗凝集破壊
 A; 接着剤からのはく離
 /; 層間のはく離を示す。 1M/T; 旧塗膜中塗と上塗層間のはく離

表4. 4. 2 (3) 補修塗装塗膜の付着性評価

試験片 No.88	旧塗膜 の暴露 年数	補修 塗装	補修後 の暴露 年数	補修塗装後の付着性			
				旧塗膜の処理(水洗/サンドペーパー処)		旧塗膜の処理(水洗のみ)	
				付着強度 (MPa)	はく離部	付着強度 (MPa)	はく離部
J-304-1	2	1	初期(92)	1.8	S80% A20%	1.0	S70% 1T20%
			4年(96)	3.0	2U/T30% A70%	3.0	2M/T20% A80%
			5年(97)	4.4	2U70% A30%	3.0	2U50% 2T50%
			7年(99)	5.0	1U60% 2M/T30% A10%	2.2	1U60% A40%
J-305-1	2	2	初期(92)	1.0	S100%	1.0	S100%
			4年(96)	2.5	A100%	2.5	2U/T10% A90%
			5年(97)	5.3	2U30% A70%	6.8	1U100%
			7年(99)	6.1	1Z70% 2U10% 2M/T20%	3.9	2U80% 1U10% A10%
J-306-1	2	3-K	初期(92)	1.5	S100%	2.0	S100%
			4年(96)	3.0	A100%	2.5	A100%
			5年(97)	3.5	2M100%	3.0	2M70% A30%
			7年(99)	3.2	1Z10% 1U70% A20%	3.2	1Z20% 1U80%
J-307-3	5	1	初期(94)	>7.0	—	>7.0	—
			4年(97)	>7.0	—	4.0	1Z40% 1U30% 2U30%
			5年(99)	5.9	1Z10% 2U/M60% A30%	4.0	1Z10% 1U30% 2U60%
			7年(01)				
J-308-3	5	2	初期(94)	>7.0	—	6.0	
			4年(97)	>7.0	—	4.5	1Z70% 2U30%
			5年(99)	5.6	1U90% 2M/T10%	3.2	1U90% 2M/T10%
			7年(01)				
J-309-3	5	3-K	初期(94)	4.0		3.5	
			4年(97)	5.0	2U60% 2M40%	7.0	2U20% 2M80%
			5年(99)	5.8	1U90% 1T10%	4.8	1U90% 1T10%
			7年(01)				
J-310-5	7	1	初期(96)	3.0	1Z100%	3.0	1Z100%
			4年(99)	3.5	1U100%	5.5	1U100%
			5年(01)				
			7年(03)				
J-311-5	7	2	初期(96)	3.0	1Z100%	2.0	1Z100%
			4年(99)	2.5	1Z100%	4.0	1Z100%
			5年(01)				
			7年(03)				
J-312-5	7	3-K	初期(96)	3.5	1Z70% 1U30%	2.0	1Z60% 1U40%
			4年(99)	4.5	1Z40% 1U60%	—	—
			5年(01)				
			7年(03)				

注) はく離部の表示 1Z; 旧ジンクリッチペイント凝集破壊 1U; 旧塗膜下塗凝集破壊 1M; 旧塗膜中塗凝集破壊
 1T; 旧塗膜上塗凝集破壊
 2U; 補修塗膜下塗凝集破壊 2M; 補修塗膜中塗凝集破壊 2T; 補修塗膜上塗凝集破壊
 A; 接着剤からのはく離
 /; 層間のはく離を示す。 1M/T; 旧塗膜中塗と上塗層間のはく離

表4. 4. 3 (1) 簡易塗替え塗装後の付着性評価

試験片 No. 88	旧塗膜 塗装系	旧塗膜 の暴露 年数	サンド ペーパー 処理	塗替 塗装系 No.	塗替後 の暴露 年数	塗替後の付着性	
						付着強度 MPa	はく離部
L-101-1	①	2	有り	1	初期(92)	5.9	1U50% 1M/T25% 2U25%
					4年(96)	2.2	
					5年(97)	3.6	1U80% 2M/T20%
					7年(99)	—	—
L-102-1	①	2	無し	1	初期(92)	5.4	1U100%
					4年(96)	2.8	
					5年(97)	5.0	1U60% 2M/T40%
					7年(99)	—	—
L-103-1	①	2	有り	2	初期(92)	5.6	1U100%
					4年(96)	2.8	
					5年(97)	4.8	1U60% 2M/T40%
					7年(99)	—	—
L-104-1	①	2	無し	2	初期(92)	6.1	1U100%
					4年(96)	2.9	
					5年(97)	2.7	1U40% 2M60%
					7年(99)	—	—
L-105-3	①	5	有り	1	初期(94)	3.5	1Y/2U85% 1U15%
					3年(97)	4.0	1Z30% 2M30% 2T40%
					5年(99)	2.8	1U40% 2M/T60%
					7年(01)		
L-106-3	①	5	無し	1	初期(94)	3.0	2T/M50% 1U15% 1T/2U35%
					3年(97)	5.3	2M90% 2T10%
					5年(99)	2.8	1U70% 2T30%
					7年(01)		
L-107-3	①	5	有り	2	初期(94)	3.0	1U45% 1T/2U55%
					3年(97)	>7.0	
					5年(99)	3.0	1U80% 2T20%
					7年(01)		
L-108-3	①	5	無し	2	初期(94)	3.5	1U10% 1T/2U10% 2U/T80%
					3年(97)	6.5	2M40% A60%
					5年(99)	3.0	1U80% 2T20%
					7年(01)		
L-109-5	①	7	有り	1	初期(96)	3.0	1U40% A60%
					3年(99)	3.2	1U90% 2M/T10%
					5年(01)		
					7年(03)		
L-110-5	①	7	無し	1	初期(96)	3.0	1U30% 1T/2M10% A60%
					3年(99)	4.0	1U85% 2M/T15%
					5年(01)		
					7年(03)		
L-111-5	①	7	有り	2	初期(96)	2.5	1U40% 1T/2M50% A10%
					3年(99)	3.1	1U90% 2M/T10%
					5年(01)		
					7年(03)		
L-112-5	①	7	無し	2	初期(96)	3.0	1U30% 1T/2M50% A20%
					3年(99)	6.5	1U60% 2M/T40%
					5年(01)		
					7年(03)		

注) 剥離部の表示 1U; 旧塗膜下塗凝集破壊 1M; 旧塗膜中塗凝集破壊 1T; 旧塗膜上塗凝集破壊
 2U; 補修塗膜下塗凝集破壊 2M; 補修塗膜中塗凝集破壊 2T; 補修塗膜上塗凝集破壊
 A; 接着剤からの剥離
 /; 層間はく離を示す。 1M/T; 旧塗膜中塗と上塗層間はく離

表 4. 4. 3 (2) 簡易塗替え塗装後の付着性評価

試験片 No. 88	旧塗膜 塗装系	旧塗膜 の暴露 年数	サンド ペーパー 処理	塗替 塗装系 No.	塗替後 の暴露 年数	塗替後の付着性	
						付着強度 MPa	はく離部
L-201-1	①	2	有り	1	初期(92)	3.5	1Z70% 1U30%
					4年(96)	2.6	
					5年(97)	3.0	1Z20% 1U80%
					7年(99)	—	—
L-202-1	①	2	無し	1	初期(92)	3.5	1Z70% 1U30%
					4年(96)	1.7	
					5年(97)	2.0	1Z70% 1U30%
					7年(99)	—	—
L-203-1	①	2	有り	2	初期(92)	3.0	1U100%
					4年(96)	2.3	
					5年(97)	4.2	1U100%
					7年(99)	—	—
L-204-1	①	2	無し	2	初期(92)	5.0	1U100%
					4年(96)	2.3	
					5年(97)	3.0	1U100%
					7年(99)	—	—
L-205-3	①	5	有り	1	初期(94)	6.0	1U100%
					3年(97)	2.0	1U100%
					5年(99)	—	—
					7年(01)		
L-206-3	①	5	無し	1	初期(94)	4.6	1Z10% 1U90%
					3年(97)	4.0	1U100%
					5年(99)	—	—
					7年(01)		
L-207-3	①	5	有り	2	初期(94)	3.0	1Z50% 1U90%
					3年(97)	2.8	2M100%
					5年(99)	—	—
					7年(01)		
L-208-3	①	5	無し	2	初期(94)	3.0	2T100%
					3年(97)	2.2	2M100%
					5年(99)	—	—
					7年(01)		
L-209-5	①	7	有り	1	初期(96)	2.0	1U90% A10%
					3年(99)	1.3	2M/T100%
					5年(01)		
					7年(03)		
L-210-5	①	7	無し	1	初期(96)	3.0	1U/M90% A10%
					3年(99)	2.8	1U90% 1M10%
					5年(01)		
					7年(03)		
L-211-5	①	7	有り	2	初期(96)	3.0	1U100%
					3年(99)	3.8	1U90% 1M10%
					5年(01)		
					7年(03)		
L-212-5	①	7	無し	2	初期(96)	3.0	1U100%
					3年(99)	0.9	2M/T100%
					5年(01)		
					7年(03)		

注) 剥離部の表示 1U; 旧塗膜下塗凝集破壊 1M; 旧塗膜中塗凝集破壊 1T; 旧塗膜上塗凝集破壊
 2U; 補修塗膜下塗凝集破壊 2M; 補修塗膜中塗凝集破壊 2T; 補修塗膜上塗凝集破壊
 A; 接着剤からのはく離
 /; 層間のはく離を示す。 1M/T; 旧塗膜中塗と上塗層間のはく離

表4. 4. 3 (3) 簡易塗替え塗装後の付着性評価

試験片 No. 88	旧塗膜 塗装系	旧塗膜 の暴露 年数	サンド ペーパー 処理	塗替 塗装系 No.	塗替後 の暴露 年数	塗替後の付着性	
						付着強度 MPa	はく離部
L-301-1	①	2	有り	1	初期(92)	1.0	S90% 2U10%
					4年(96)	5.8	
					5年(97)	3.5	A100%
					7年(99)	—	—
L-302-1	①	2	無し	1	初期(92)	1.0	S100%
					4年(96)	2.5	
					5年(97)	6.0	A100%
					7年(99)	—	—
L-303-1	①	2	有り	2	初期(92)	1.0	S100%
					4年(96)	6.0	
					5年(97)	7.0	I Z100%
					7年(99)	—	—
L-304-1	①	2	無し	2	初期(92)	1.0	S100%
					4年(96)	7.0	
					5年(97)	5.0	I Z100%
					7年(99)	—	—
L-305-3	①	5	有り	1	初期(94)	7.0	
					3年(97)	4.0	I Z40% 2T30%
					5年(99)	3.6	2M100%
					7年(01)		
L-306-3	①	5	無し	1	初期(94)	3.5	
					3年(97)	4.5	I Z100%
					5年(99)	4.1	2M90% 2M/T10%
					7年(01)		
L-307-3	①	5	有り	2	初期(94)	6.5	
					3年(97)	5.0	2M100%
					5年(99)	4.8	2M100%
					7年(01)		
L-308-3	①	5	無し	2	初期(94)	6.5	
					3年(97)	4.5	2M100%
					5年(99)	3.4	2M100%
					7年(01)		
L-309-5	①	7	有り	1	初期(96)	3.0	I Z100%
					3年(99)	2.9	I Z100%
					5年(01)		
					7年(03)		
L-310-5	①	7	無し	1	初期(96)	3.5	I Z90% 1M10%
					3年(99)	2.8	I Z50% 2M/T40% A10%
					5年(01)		
					7年(03)		
L-311-5	①	7	有り	2	初期(96)	4.0	I Z100%
					3年(99)	4.7	I Z60% 2U10 2M/T30%
					5年(01)		
					7年(03)		
L-312-5	①	7	無し	2	初期(96)	3.0	I Z90% 1U10%
					3年(99)	4.1	I Z90% 1U10%
					5年(01)		
					7年(03)		

注) 剥離部の表示 1U; 旧塗膜下塗凝集破壊 1M; 旧塗膜中塗凝集破壊 1T; 旧塗膜上塗凝集破壊
 2U; 補修塗膜下塗凝集破壊 2M; 補修塗膜中塗凝集破壊 2T; 補修塗膜上塗凝集破壊
 A; 接着剤からの剥離
 /; 層間はく離を示す。 1M/T; 旧塗膜中塗と上塗層間はく離

表 4. 4. 5 部分補修、簡易塗替の評価スケジュール
(88-J、88-Lシリーズ)

年 度	内 容		
昭和63年(1988)	旧塗膜曝露開始		
平成元年(1989)	2年後		
平成2年(1990)	↓旧塗膜回収・塗替		
平成3年(1991)		5年後	
平成4年(1992)	塗替塗膜暴露		7年後
平成5年(1993)	3年後	↓旧塗膜回収・塗替	
平成6年(1994)			
平成7年(1995)		3年後	↓旧塗膜回収・塗替
平成8年(1996)	↓調査	5年後	
平成9年(1997)		↓調査	3年後
平成10年(1998)		7年後	5年後
平成11年(1999)	↓調査	↓調査	↓調査
平成12年(2000)		7年後	5年後
平成13年(2001)		↓調査	↓調査
平成14年(2002)			7年後
平成15年(2003)			↓調査
平成16年(2004)			

4. 5 塗替え塗装の防食性試験

4. 5. 1 まえがき

鋼構造物を長期間使用するためには、塗替え塗装の技術が必要である。この塗替え塗装技術を向上するために、より適正な塗替え塗装系を確立するとともに、塗替え塗装後の防錆メカニズムについての研究が期待される。

4. 5. 2 目的

長期防錆仕様（例えば鋼道路橋便覧 C-4 塗装系）におけるさびの発生状態は、ジンクリッチペイントを使用しているため、油性の様な全面にさびが発生する可能性は少なく、部分的にジンクリッチ塗膜の欠落部より発錆することが予想される。従って、本研究では、無機ジンクリッチペイント/エポキシ樹脂塗料/ふっ素樹脂塗料（鋼道路橋便覧 C-4 塗装系）であらかじめジンクリッチ塗膜欠落部を有する部分的発錆試験片に作製し、塗替え塗装系の防食効果を確認する。更に、防食性に対する旧塗膜の損傷部の大きさの影響を把握する事を目的とする。

4. 5. 3 試験

(1) 適用下地

① 便覧 C-4 塗装系<無機ジンクリッチペイント(75 μ m)/ミストコート/エポキシ樹脂塗料下塗(60 μ m $\times$ 2)/ふっ素樹脂塗料用中塗(30 μ m)/ふっ素樹脂塗料上塗(30 μ m)>あらかじめ ϕ 5mm、 ϕ 10mm、 ϕ 20mm、 ϕ 30mmの鉄面を塗り残し、駿河湾で暴露3年で発錆させた試験板
..... 1

② サンドブラスト板を無塗装で3年間暴露暴露し、発錆させた後、ISO ST3で処理した試験板
..... 2

(2) 塗替え塗装系

① 変性エポキシ樹脂塗料(60 μ m $\times$ 2)/ふっ素樹脂塗料用中塗(30 μ m)/ふっ素樹脂塗料上塗(30 μ m)
..... 塗装系 A

② 専用プライマー(30 μ m)/超厚膜エポキシ樹脂塗料(300 μ m)/ふっ素樹脂塗料用中塗(30 μ m)/ふっ素樹脂塗料上塗(30 μ m)
..... 塗装系 B

③ 専用プライマー(30 μ m)/超厚膜形エポキシ樹脂塗料(1000 μ m)/ふっ素樹脂塗料用中塗(30 μ m)/ふっ素樹脂塗料上塗(30 μ m)
..... 塗装系 C

④ 有機ジンクリッチペイント(30 μ m)/変性エポキシ樹脂塗料(60 μ m $\times$ 2)/ふっ素樹脂塗料用中塗(30 μ m)/ふっ素樹脂塗料上塗(30 μ m)
..... 塗装系 D

⑤ エポキシ樹脂塗料(60 μ m $\times$ 2)/ふっ素樹脂塗料用中塗(30 μ m)/ふっ素樹脂塗料上塗(30 μ m)
..... 塗装系 E

⑥ 油性さび止め(35 μ m $\times$ 2)/フェノールMI0(45 μ m)/フタル酸樹脂塗料中塗(30 μ m)/フタル酸樹脂塗料上塗(25 μ m)
..... 塗装系 F

⑦油性さび止め(35 μ m $\times$ 2)/フェノールMI0(45 μ m)/塩化ゴム系樹脂塗料中塗(35 μ m)
/塩化ゴム系樹脂塗料上塗(30 μ m) ……塗装系G

(3) 塗替え塗装前処理

- ・適用下地が旧塗膜の場合…回転ドリルに矢じり状の砥石をつけ、塗り残し部(発錆部)の素地が露出するまで処理した。
- ・適用下地がサンドブラスト鋼板の場合…電動ディスクサンダーで素地が露出するまで処理した。

(4) 暴露期間(塗替え塗装後)

0年……………控板

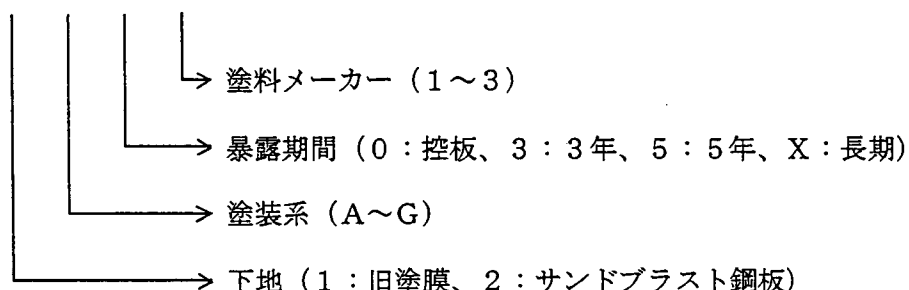
3年……………3

5年……………5

長期観察用……………X

(5) 試験片No. (詳細は表4.5.1参照)

91-1-A-3-1



(6) 調査項目

①外観……………ふくれ、さび

②塗膜下腐食……………カレントインタラプタ、インピーダンス

③塗り残し部からのさびの広がり……………断面写真

*) 調査スケジュールについては表4.5.2に示した。

4.5.4 結果

平成7年度に3年間暴露した旧塗膜(塗残し部有)およびサンドブラスト鋼板を取外し回収して、上記4.5.3(2)に示す塗替え塗装を実施した。その後3年間暴露した試験片を回収し、評価試験を実施中。

表4. 5. 1 (1) 試験片No. と塗替仕様

試験片No.	下地	塗 替 塗 装 系	メーカー
91-1-A-0-1	1	変性Ep 60 μ ×2 + ふっ素中塗 30 μ + ふっ素上塗 25 μ	1
91-1-A-3-1	1	変性Ep 60 μ ×2 + ふっ素中塗 30 μ + ふっ素上塗 25 μ	1
91-1-A-5-1	1	変性Ep 60 μ ×2 + ふっ素中塗 30 μ + ふっ素上塗 25 μ	1
91-1-A-X-1	1	変性Ep 60 μ ×2 + ふっ素中塗 30 μ + ふっ素上塗 25 μ	1
91-1-A-3-2	1	変性Ep 60 μ ×2 + ふっ素中塗 30 μ + ふっ素上塗 25 μ	2
91-1-A-5-2	1	変性Ep 60 μ ×2 + ふっ素中塗 30 μ + ふっ素上塗 25 μ	2
91-1-A-X-2	1	変性Ep 60 μ ×2 + ふっ素中塗 30 μ + ふっ素上塗 25 μ	2
91-1-A-3-3	1	変性Ep 60 μ ×2 + ふっ素中塗 30 μ + ふっ素上塗 25 μ	2
91-1-A-5-3	1	変性Ep 60 μ ×2 + ふっ素中塗 30 μ + ふっ素上塗 25 μ	2
91-1-A-X-3	1	変性Ep 60 μ ×2 + ふっ素中塗 30 μ + ふっ素上塗 25 μ	2
91-1-B-0-1	1	Ep Pr30 μ + 超厚膜形Ep 30 μ + ふっ素中塗 30 μ + ふっ素上塗 25 μ	1
91-1-B-3-1	1	Ep Pr30 μ + 超厚膜形Ep 30 μ + ふっ素中塗 30 μ + ふっ素上塗 25 μ	1
91-1-B-5-1	1	Ep Pr30 μ + 超厚膜形Ep 30 μ + ふっ素中塗 30 μ + ふっ素上塗 25 μ	1
91-1-B-X-1	1	Ep Pr30 μ + 超厚膜形Ep 30 μ + ふっ素中塗 30 μ + ふっ素上塗 25 μ	1
91-1-B-3-2	1	Ep Pr30 μ + 超厚膜形Ep 30 μ + ふっ素中塗 30 μ + ふっ素上塗 25 μ	2
91-1-B-5-2	1	Ep Pr30 μ + 超厚膜形Ep 30 μ + ふっ素中塗 30 μ + ふっ素上塗 25 μ	2
91-1-B-X-2	1	Ep Pr30 μ + 超厚膜形Ep 30 μ + ふっ素中塗 30 μ + ふっ素上塗 25 μ	2
91-1-B-3-3	1	Ep Pr30 μ + 超厚膜形Ep 30 μ + ふっ素中塗 30 μ + ふっ素上塗 25 μ	3
91-1-B-5-3	1	Ep Pr30 μ + 超厚膜形Ep 30 μ + ふっ素中塗 30 μ + ふっ素上塗 25 μ	3
91-1-B-X-3	1	Ep Pr30 μ + 超厚膜形Ep 30 μ + ふっ素中塗 30 μ + ふっ素上塗 25 μ	3

備考) Ep : エポキシ、Pr : プライマー

下地 1 : 旧塗膜、下地 2 : サンドブラスト

表4. 5. 1 (2) 試験片No. と塗替仕様

試験片No.	下地	塗 替 塗 装 系	メーカー
91-1-C-0-3	1	Ep Pr30 μ ■+超厚膜形Ep 1000 μ ■+ふっ素中塗 30 μ ■+ふっ素上塗 25 μ ■	3
91-1-C-3-1	1	Ep Pr30 μ ■+超厚膜形Ep 1000 μ ■+ふっ素中塗 30 μ ■+ふっ素上塗 25 μ ■	1
91-1-C-5-1	1	Ep Pr30 μ ■+超厚膜形Ep 1000 μ ■+ふっ素中塗 30 μ ■+ふっ素上塗 25 μ ■	1
91-1-C-X-1	1	Ep Pr30 μ ■+超厚膜形Ep 1000 μ ■+ふっ素中塗 30 μ ■+ふっ素上塗 25 μ ■	1
91-1-C-3-2	1	Ep Pr30 μ ■+超厚膜形Ep 1000 μ ■+ふっ素中塗 30 μ ■+ふっ素上塗 25 μ ■	2
91-1-C-5-2	1	Ep Pr30 μ ■+超厚膜形Ep 1000 μ ■+ふっ素中塗 30 μ ■+ふっ素上塗 25 μ ■	2
91-1-C-X-2	1	Ep Pr30 μ ■+超厚膜形Ep 1000 μ ■+ふっ素中塗 30 μ ■+ふっ素上塗 25 μ ■	2
91-1-C-3-3	1	Ep Pr30 μ ■+超厚膜形Ep 1000 μ ■+ふっ素中塗 30 μ ■+ふっ素上塗 25 μ ■	3
91-1-C-5-3	1	Ep Pr30 μ ■+超厚膜形Ep 1000 μ ■+ふっ素中塗 30 μ ■+ふっ素上塗 25 μ ■	3
91-1-C-X-3	1	Ep Pr30 μ ■+超厚膜形Ep 1000 μ ■+ふっ素中塗 30 μ ■+ふっ素上塗 25 μ ■	3
91-1-D-0-3	1	有機ZRP 30 μ ■+変性Ep 60 μ ■×2 +ふっ素中塗 30 μ ■ +ふっ素上塗 25 μ ■	3
91-1-D-3-1	1	有機ZRP 30 μ ■+変性Ep 60 μ ■×2 +ふっ素中塗 30 μ ■ +ふっ素上塗 25 μ ■	1
91-1-D-5-1	1	有機ZRP 30 μ ■+変性Ep 60 μ ■×2 +ふっ素中塗 30 μ ■ +ふっ素上塗 25 μ ■	1
91-1-D-X-1	1	有機ZRP 30 μ ■+変性Ep 60 μ ■×2 +ふっ素中塗 30 μ ■ +ふっ素上塗 25 μ ■	1
91-1-D-3-2	1	有機ZRP 30 μ ■+変性Ep 60 μ ■×2 +ふっ素中塗 30 μ ■ +ふっ素上塗 25 μ ■	2
91-1-D-5-2	1	有機ZRP 30 μ ■+変性Ep 60 μ ■×2 +ふっ素中塗 30 μ ■ +ふっ素上塗 25 μ ■	2
91-1-D-X-2	1	有機ZRP 30 μ ■+変性Ep 60 μ ■×2 +ふっ素中塗 30 μ ■ +ふっ素上塗 25 μ ■	2
91-1-D-3-3	1	有機ZRP 30 μ ■+変性Ep 60 μ ■×2 +ふっ素中塗 30 μ ■ +ふっ素上塗 25 μ ■	3
91-1-D-5-3	1	有機ZRP 30 μ ■+変性Ep 60 μ ■×2 +ふっ素中塗 30 μ ■ +ふっ素上塗 25 μ ■	3
91-1-D-X-3	1	有機ZRP 30 μ ■+変性Ep 60 μ ■×2 +ふっ素中塗 30 μ ■ +ふっ素上塗 25 μ ■	3

備考) ZRP : ジンクリッチペイント

下地 1 : 旧塗膜、下地 2 : サンドブラスト

表4. 5. 1 (3) 試験片No. と塗替仕様

試験片No.	下地	塗 替 塗 装 系	メーカー
91-1-E-0-1	1	Ep下塗 60 μ m $\times$ 2 + ふっ素中塗 30 μ m + ふっ素上塗 25 μ m	1
91-1-E-3-1	1	Ep下塗 60 μ m $\times$ 2 + ふっ素中塗 30 μ m + ふっ素上塗 25 μ m	1
91-1-E-5-1	1	Ep下塗 60 μ m $\times$ 2 + ふっ素中塗 30 μ m + ふっ素上塗 25 μ m	1
91-1-E-X-1	1	Ep下塗 60 μ m $\times$ 2 + ふっ素中塗 30 μ m + ふっ素上塗 25 μ m	1
91-1-F-0-2	1	油性 35 μ m $\times$ 2 + MIO 45 μ m + 7タル酸中塗 30 μ m + 7タル酸上塗 25 μ m	2
91-1-F-3-2	1	油性 35 μ m $\times$ 2 + MIO 45 μ m + 7タル酸中塗 30 μ m + 7タル酸上塗 25 μ m	2
91-1-F-5-2	1	油性 35 μ m $\times$ 2 + MIO 45 μ m + 7タル酸中塗 30 μ m + 7タル酸上塗 25 μ m	2
91-1-F-X-2	1	油性 35 μ m $\times$ 2 + MIO 45 μ m + 7タル酸中塗 30 μ m + 7タル酸上塗 25 μ m	2
91-1-G-0-3	1	油性 35 μ m $\times$ 2 + MIO 45 μ m + 塩化ゴ'ム中塗 35 μ m + 塩化ゴ'ム上塗 30 μ m	3
91-1-G-3-3	1	油性 35 μ m $\times$ 2 + MIO 45 μ m + 塩化ゴ'ム中塗 35 μ m + 塩化ゴ'ム上塗 30 μ m	3
91-1-G-5-3	1	油性 35 μ m $\times$ 2 + MIO 45 μ m + 塩化ゴ'ム中塗 35 μ m + 塩化ゴ'ム上塗 30 μ m	3
91-1-G-X-3	1	油性 35 μ m $\times$ 2 + MIO 45 μ m + 塩化ゴ'ム中塗 35 μ m + 塩化ゴ'ム上塗 30 μ m	3

備考) 下地 1 : 旧塗膜、下地 2 : サンドブラスト

表4. 5. 1 (4) 試験片No. と塗替仕様

試験片No.	下地	塗 替 塗 装 系	メーカー
91-2-A-0-1	2	変性Ep 60 μ m $\times$ 2 + ふっ素中塗 30 μ m + ふっ素上塗 25 μ m	1
91-2-A-3-1	2	変性Ep 60 μ m $\times$ 2 + ふっ素中塗 30 μ m + ふっ素上塗 25 μ m	1
91-2-A-5-1	2	変性Ep 60 μ m $\times$ 2 + ふっ素中塗 30 μ m + ふっ素上塗 25 μ m	1
91-2-A-X-1	2	変性Ep 60 μ m $\times$ 2 + ふっ素中塗 30 μ m + ふっ素上塗 25 μ m	1
91-2-A-3-2	2	変性Ep 60 μ m $\times$ 2 + ふっ素中塗 30 μ m + ふっ素上塗 25 μ m	2
91-2-A-5-2	2	変性Ep 60 μ m $\times$ 2 + ふっ素中塗 30 μ m + ふっ素上塗 25 μ m	2
91-2-A-X-2	2	変性Ep 60 μ m $\times$ 2 + ふっ素中塗 30 μ m + ふっ素上塗 25 μ m	2
91-2-A-3-3	2	変性Ep 60 μ m $\times$ 2 + ふっ素中塗 30 μ m + ふっ素上塗 25 μ m	3
91-2-A-5-3	2	変性Ep 60 μ m $\times$ 2 + ふっ素中塗 30 μ m + ふっ素上塗 25 μ m	3
91-2-A-X-3	2	変性Ep 60 μ m $\times$ 2 + ふっ素中塗 30 μ m + ふっ素上塗 25 μ m	3
91-2-B-0-1	2	Ep Pr30 μ m + 超厚膜形Ep 300 μ m + ふっ素中塗 30 μ m + ふっ素上塗 25 μ m	1
91-2-B-3-1	2	Ep Pr30 μ m + 超厚膜形Ep 300 μ m + ふっ素中塗 30 μ m + ふっ素上塗 25 μ m	1
91-2-B-5-1	2	Ep Pr30 μ m + 超厚膜形Ep 300 μ m + ふっ素中塗 30 μ m + ふっ素上塗 25 μ m	1
91-2-B-X-1	2	Ep Pr30 μ m + 超厚膜形Ep 300 μ m + ふっ素中塗 30 μ m + ふっ素上塗 25 μ m	1
91-2-B-3-2	2	Ep Pr30 μ m + 超厚膜形Ep 300 μ m + ふっ素中塗 30 μ m + ふっ素上塗 25 μ m	2
91-2-B-5-2	2	Ep Pr30 μ m + 超厚膜形Ep 300 μ m + ふっ素中塗 30 μ m + ふっ素上塗 25 μ m	2
91-2-B-X-2	2	Ep Pr30 μ m + 超厚膜形Ep 300 μ m + ふっ素中塗 30 μ m + ふっ素上塗 25 μ m	2
91-2-B-3-3	2	Ep Pr30 μ m + 超厚膜形Ep 300 μ m + ふっ素中塗 30 μ m + ふっ素上塗 25 μ m	3
91-2-B-5-3	2	Ep Pr30 μ m + 超厚膜形Ep 300 μ m + ふっ素中塗 30 μ m + ふっ素上塗 25 μ m	3
91-2-B-X-3	2	Ep Pr30 μ m + 超厚膜形Ep 300 μ m + ふっ素中塗 30 μ m + ふっ素上塗 25 μ m	3

備考) 下地 1 : 旧塗膜、下地 2 : サンドブラスト

表4. 5. 1 (5) 試験片No. と塗替仕様

試験片No.	下地	塗 替 塗 装 系	メーカー
91-2-C-0-3	2	Ep Pr30 μ m+超厚膜形Ep 1000 μ m+ふっ素中塗 30 μ m+ふっ素上塗 25 μ m	3
91-2-C-3-1	2	Ep Pr30 μ m+超厚膜形Ep 1000 μ m+ふっ素中塗 30 μ m+ふっ素上塗 25 μ m	1
91-2-C-5-1	2	Ep Pr30 μ m+超厚膜形Ep 1000 μ m+ふっ素中塗 30 μ m+ふっ素上塗 25 μ m	1
91-2-C-X-1	2	Ep Pr30 μ m+超厚膜形Ep 1000 μ m+ふっ素中塗 30 μ m+ふっ素上塗 25 μ m	1
91-2-C-3-2	2	Ep Pr30 μ m+超厚膜形Ep 1000 μ m+ふっ素中塗 30 μ m+ふっ素上塗 25 μ m	2
91-2-C-5-2	2	Ep Pr30 μ m+超厚膜形Ep 1000 μ m+ふっ素中塗 30 μ m+ふっ素上塗 25 μ m	2
91-2-C-X-2	2	Ep Pr30 μ m+超厚膜形Ep 1000 μ m+ふっ素中塗 30 μ m+ふっ素上塗 25 μ m	2
91-2-C-3-3	2	Ep Pr30 μ m+超厚膜形Ep 1000 μ m+ふっ素中塗 30 μ m+ふっ素上塗 25 μ m	3
91-2-C-5-3	2	Ep Pr30 μ m+超厚膜形Ep 1000 μ m+ふっ素中塗 30 μ m+ふっ素上塗 25 μ m	3
91-2-C-X-3	2	Ep Pr30 μ m+超厚膜形Ep 1000 μ m+ふっ素中塗 30 μ m+ふっ素上塗 25 μ m	3
91-2-D-0-3	2	有機ZRP 30 μ m+変性Ep 60 μ m $\times$ 2 +ふっ素中塗 30 μ m+ふっ素上塗 25 μ m	3
91-2-D-3-1	2	有機ZRP 30 μ m+変性Ep 60 μ m $\times$ 2 +ふっ素中塗 30 μ m+ふっ素上塗 25 μ m	1
91-2-D-5-1	2	有機ZRP 30 μ m+変性Ep 60 μ m $\times$ 2 +ふっ素中塗 30 μ m+ふっ素上塗 25 μ m	1
91-2-D-X-1	2	有機ZRP 30 μ m+変性Ep 60 μ m $\times$ 2 +ふっ素中塗 30 μ m+ふっ素上塗 25 μ m	1
91-2-D-3-2	2	有機ZRP 30 μ m+変性Ep 60 μ m $\times$ 2 +ふっ素中塗 30 μ m+ふっ素上塗 25 μ m	2
91-2-D-5-2	2	有機ZRP 30 μ m+変性Ep 60 μ m $\times$ 2 +ふっ素中塗 30 μ m+ふっ素上塗 25 μ m	2
91-2-D-X-2	2	有機ZRP 30 μ m+変性Ep 60 μ m $\times$ 2 +ふっ素中塗 30 μ m+ふっ素上塗 25 μ m	2
91-2-D-3-3	2	有機ZRP 30 μ m+変性Ep 60 μ m $\times$ 2 +ふっ素中塗 30 μ m+ふっ素上塗 25 μ m	3
91-2-D-5-3	2	有機ZRP 30 μ m+変性Ep 60 μ m $\times$ 2 +ふっ素中塗 30 μ m+ふっ素上塗 25 μ m	3
91-2-D-X-3	2	有機ZRP 30 μ m+変性Ep 60 μ m $\times$ 2 +ふっ素中塗 30 μ m+ふっ素上塗 25 μ m	3

備考) 下地 1 : 旧塗膜、下地 2 : サンドブラスト

表 4. 5. 1 (6) 試験片No. と塗替仕様

試験片No.	下地	塗 替 塗 装 系	メーカー
91-2-E-0-1	2	Ep下塗 60 μ m $\times$ 2 + ふっ素中塗 30 μ m + ふっ素上塗 25 μ m	1
91-2-E-3-1	2	Ep下塗 60 μ m $\times$ 2 + ふっ素中塗 30 μ m + ふっ素上塗 25 μ m	1
91-2-E-5-1	2	Ep下塗 60 μ m $\times$ 2 + ふっ素中塗 30 μ m + ふっ素上塗 25 μ m	1
91-2-E-X-1	2	Ep下塗 60 μ m $\times$ 2 + ふっ素中塗 30 μ m + ふっ素上塗 25 μ m	1
91-2-F-0-2	2	油性さび止め 35 μ m $\times$ 2+MIO 45 μ m+フタル酸中塗 30 μ m+フタル酸上塗 25 μ m	2
91-2-F-3-2	2	油性さび止め 35 μ m $\times$ 2+MIO 45 μ m+フタル酸中塗 30 μ m+フタル酸上塗 25 μ m	2
91-2-F-5-2	2	油性さび止め 35 μ m $\times$ 2+MIO 45 μ m+フタル酸中塗 30 μ m+フタル酸上塗 25 μ m	2
91-2-F-X-2	2	油性さび止め 35 μ m $\times$ 2+MIO 45 μ m+フタル酸中塗 30 μ m+フタル酸上塗 25 μ m	2
91-2-G-0-3	2	油性さび止め 35 μ m $\times$ 2+MIO 45 μ m+塩化ゴム中塗 35 μ m+塩化ゴム上塗 30 μ m	3
91-2-G-3-3	2	油性さび止め 35 μ m $\times$ 2+MIO 45 μ m+塩化ゴム中塗 35 μ m+塩化ゴム上塗 30 μ m	3
91-2-G-5-3	2	油性さび止め 35 μ m $\times$ 2+MIO 45 μ m+塩化ゴム中塗 35 μ m+塩化ゴム上塗 30 μ m	3
91-2-G-X-3	2	油性さび止め 35 μ m $\times$ 2+MIO 45 μ m+塩化ゴム中塗 35 μ m+塩化ゴム上塗 30 μ m	3

備考) 下地 1 : 旧塗膜、下地 2 : サンドブラスト

表 4. 5. 2 塗替塗装の防食性調査スケジュール

年 度	内 容
平成 4 年 (1 9 9 2)	ブラスト板・旧塗膜暴露開始
平成 5 年 (1 9 9 3)	
平成 6 年 (1 9 9 4)	
平成 7 年 (1 9 9 5)	↓ ブラスト板・旧塗膜回収、塗替塗装
平成 8 年 (1 9 9 6)	塗替塗膜再曝露開始
平成 9 年 (1 9 9 7)	
平成 1 0 年 (1 9 9 8)	3 年後
平成 1 1 年 (1 9 9 9)	↓ 塗替塗膜回収・調査 5 年後
平成 1 2 年 (2 0 0 0)	長期暴露用
平成 1 3 年 (2 0 0 1)	↓ 塗替塗膜回収・調査
平成 1 4 年 (2 0 0 2)	
平成 1 5 年 (2 0 0 3)	
平成 1 6 年 (2 0 0 4)	
平成 1 7 年 (2 0 0 5)	↓

5. 施設本体の試験塗装経過

海洋技術総合研究施設は昭和58年(1983年)現地に設置されて以来、近年になって施設本体の一部で腐食が著しくなってきた。施設本体の維持を図り、試験を継続していくために補修の必要が生じた。そこで平成8年度に腐食状態を調査し、その中で特に腐食が著しかった第一デッキ、第二デッキ間の手摺りの一部を対象として平成9年(1997)から平成10年(1998)にかけて補修実験を行った。

5. 1 補修塗装

5. 1. 1 補修塗装系

1) 平成9年度に作成した補修塗装系

素地調整(3種ケレン): さび、劣化塗膜をケレン棒、ハンマー、ワイヤーブラシ等で除去し、鋼材面を露出する。活膜は残す。

下塗り(1回目)	: 変性エポキシ樹脂塗料下塗	240g/m ² (60μm目標)
下塗り(2回目)	: 超厚膜形エポキシ樹脂塗料	600~800g/m ² (500μm目標)
上塗り	: ふっ素樹脂塗料上塗	120g/m ² (25μm目標)

5. 1. 2 補修塗装試験実施内容

1) 素地調整

平成9年7月31日午前に実施

2) 下塗り(1回目)

平成9年7月31日午前に変性エポキシ樹脂塗料下塗を塗装

3) 下塗り(2回目)

平成9年8月1日午前に超厚膜形エポキシ樹脂塗料を塗装した。上塗りは天候不順のため次年度とした。

4) 下塗り(3回目)

当初の補修塗装系にはなかったが、塗装間隔が1年開いたため塗装

平成10年7月28日変性エポキシ樹脂塗料下塗を塗装

5) 上塗り

平成10年7月29日ふっ素樹脂塗料上塗を塗装

5. 1. 3 補修塗装部の経過

添付写真で階段、手摺りの暴露1年後の状況を示す。各試験塗装部とも異常は認められない。

6. 今後の課題

本研究では「海上で 20 年以上の耐久性のある塗装システムを得る」ことを目標として行われてきた。現在 15 年の長期海上暴露試験で得られた成果は以下の 5 項目が上げられる。

6. 1 研究の成果

(1) 海上での腐食環境調査

環境調査により腐食因子と海面からの距離や気象との関係が明らかになり、腐食環境と塗装鋼板、各種鋼材の腐食量を対比した。この結果、腐食に対する影響の大きい飛来塩分は、風向と風力との関係があり海面で飛沫が発生し飛来することがわかった。また本施設は ISO 腐食環境分類基準(ISO/9223:1992~9226:1992)の研究で、日本での測定地として環境調査を行い、世界的に見た腐食環境の位置付けができて標準暴露地として活用できるようになった。

(2) 塗膜の劣化機構と劣化予測技術の開発

塗膜自体の劣化、塗膜と鋼材の界面現象の測定、塗膜下鋼材の変化を測定して塗装鋼材の劣化を予測する方法での知見を得た。

(3) 新規塗装システムの開発

海上で 20 年以上の耐久性を持つ塗装システム開発を目標に、塗装試験片と施設本体の調査を行い、厚膜形無機ジンクリッチペイントの上に高遮断性の塗装を行えば暴露 15 年後で問題が生じないことから 20 年以上の防食性が期待できることが分かった。また数 mm 単位で塗装する超厚膜エポキシ樹脂塗料の効果や、ふっ素樹脂塗料の耐候性が実証できた。

(4) 塗り替え塗装技術の開発

海洋構造物を半永久的に使用するためには、塗り替え技術の開発が必要である。試験片と本体を使用し、部分補修システムと全面塗り替えシステムについて海上での作業性を含めて塗り替え技術の開発を継続している。

今後は 20 年の耐久性立証のため以上 4 項目の研究継続とともに今後の課題としては、本研究施設の海洋暴露施設としての体制整備と新しい要求に応じた研究が要請されている。

(5) 学協会発表

暴露 10 年後の成果を各学協会で報告した。

1) 「鋼構造物用塗料の海洋大気部 10 年暴露後の耐久性評価」

(防錆管理 Vol.42, No.7, 244~279, 1998)

2) 「海洋大気部暴露における鋼構造物用塗料の防食性」

— 海洋技術総合研究施設を用いた防食塗膜の 10 年暴露の評価結果 —
(材料と環境'97:腐食防食協会)

3) 「高耐久性塗装システムの海上大気部における防食性」

— 海洋技術総合研究施設を用いた防食塗膜の 10 年暴露の評価結果 —
(土木学会年次講演会 1997)

- 4) 「鋼構造物用塗料の海洋大気部 10 年暴露後の耐久性評価」
— 海洋技術総合研究施設を用いた防食塗膜の 10 年暴露の評価結果 —
(鋼構造協会 1997)
- 5) 「Long Term Durability of High Performance Coatings for Bridge Application
Maritime Atmosphere」
(色材協会国際発表大会 1997)
- 6) 「Long Term Durability of High Performance Coatings After Ten Years Outdoor
Test in Maritime Atmosphere」
(SSPC 98 Seminars)

6. 2 海洋暴露施設としての体制整備

(1) 施設の維持管理

設置後 15 年が経過し本体は試験に利用されているため保全面では良好であるが付属設備(ボートランディング、階段、手摺など)は試験対象外のため腐食が進行している。

ボートランディングについては平成 10 年取り替えを行い、階段、手摺については補修工法確認のため試験塗装を実施したが引き続き改修が必要と考える。また上部デッキ面の一部を有機ジンクリッチペイントで補修を行った。

(2) 施設の有効利用

第 3 分科会は主として試験板での暴露試験を最上階の第 1 デッキで実施し環境測定も行ってきた。海上大気部での暴露試験場所としては ISO の標準地であり今後も試験を継続していくが、今後の新しい要求に応じた塗料開発にあたり暴露による促進試験が必要と考えている。このため飛沫を直接受ける第 3 デッキでの試験体の設置が考えられる。

6. 3 新しい要求に応じた研究

平成 7 年 12 月に作成した本研究での 10 年目の総括として当時の新しい要求に応じた研究として①国際化への対応 ②地球環境と省力・省資源への配慮 ③塗装の高耐久化と評価の信頼性向上を上げた。

これらを踏まえて今後の課題として省資源、省エネルギー、ストックメンテナンス、環境調和に対する研究開発が必要である。

(1) 省資源と環境調和に対する研究

1) 有機溶剤の使用量を削減する塗料および塗装システムの開発

有機溶剤の削減は塗料のハイソリッド化、無溶剤化、水性化がある。部分的には実用化されているが新規材料や新システムの長期耐久性を知る必要がある。

2) ライフサイクルコストを削減する塗料および塗装システムの開発

現在、海上橋で用いられている塗装システムは無機ジンクリッチペイントの犠牲陽極作用と有機被膜による環境遮断で、耐候性向上のためふっ素を上塗りに用いたシステムであり、ほぼ完成したと考えられる。しかしライフサイクルコストを低減させるために、より長期耐久システムの研究が必要である。

(2) スtockメンテナンスに対する研究

1)維持・補修技術の開発

塗り替え補修技術の開発を継続しているが、長期防錆システムの補修は部分的な劣化対策が必要と考えられる。このため部分劣化部の素地調整方法や補修システムについて省力化した高性能の材料に対する研究や暴露による促進試験での検証が必要と考えられる。また部分劣化に対しては、評価方法が明確でなく従来の塗膜劣化判断と塗り替え診断では対応が困難となっている。このため部分劣化部については、調査と同時に直ちに補修できる診断補修を一体化した補修技術の開発が必要となる。

2)塗膜劣化判定方法の開発

従来、交流インピーダンスの測定などがあったが、塗装システムの高級化に伴い解析が困難となってきた。近年では低周波インピーダンスや高抵抗計による測定も提唱されており劣化評価の信頼性向上の研究が必要と考えられる。

3)海洋構造物の防錆技術のマニュアル化

本研究は15年が経過し、長期海上暴露試験で成果が出つつある。また過去からの防錆塗装関連分野での調査試験も数多くあり、これらを総括する意味でも海洋鋼構造物の防錆技術に関するマニュアル化が必要と考えられる。

4)海洋構造物防錆防食 Q&A 集の作成

海洋での防錆防食について土木関係者に知見を広めるため他分科会と共同で Q&A 集を作成中である。

あとがき

本報告は、駿河湾大井川沖に設置された海洋技術総合研究施設において実施した塗装試験片の暴露15年までの調査結果をとりまとめたものである。今後、さらに継続調査を行い、塗装の長期耐久性を検証する予定である。

謝辞

本共同研究において塗装試験片の暴露を行っている海洋技術総合研究施設を維持管理されている建設省中部地方建設局静岡河川工事事務所の関係各位に謝意を表します。

付属資料

研究施設の全景

施設本体

試験片の代表写真

「海洋技術総合研究施設」試験塗装1年後の外観（平成11年8月）

＜第1デッキ北側手摺補修＞

ふっ素樹脂塗料上塗
塗装後



ふっ素樹脂塗料上塗
塗装後

左側
塗料メーカー：1



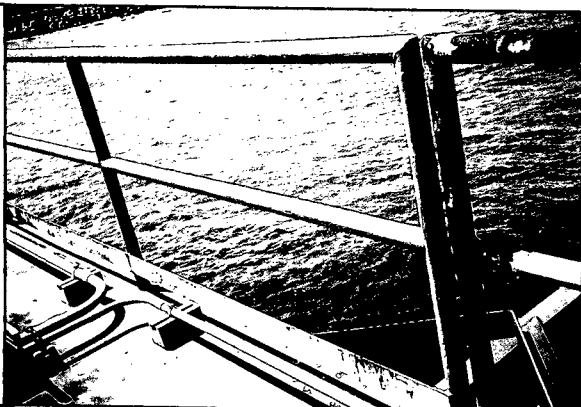
ふっ素樹脂塗料上塗
塗装後

中側
塗料メーカー：3



ふっ素樹脂塗料上塗
塗装後

右側
塗料メーカー：2



「海洋技術総合研究施設」試験塗装1年後の外観（平成11年8月）

<第1デッキ～第2デッキ間 階段補修>

ふっ素樹脂塗料上塗
塗装後

上段
塗料メーカー：1



ふっ素樹脂塗料上塗
塗装後

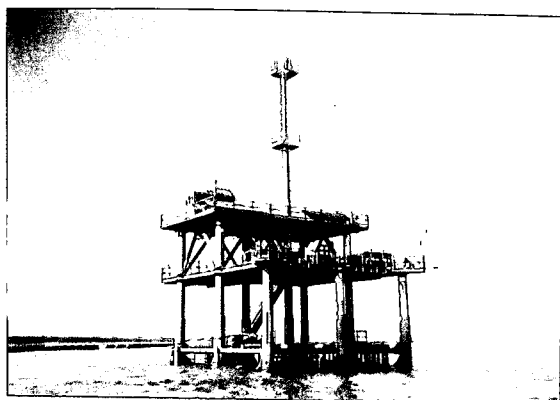
中段
塗料メーカー：2



ふっ素樹脂塗料上塗
塗装後

下段
塗料メーカー：3

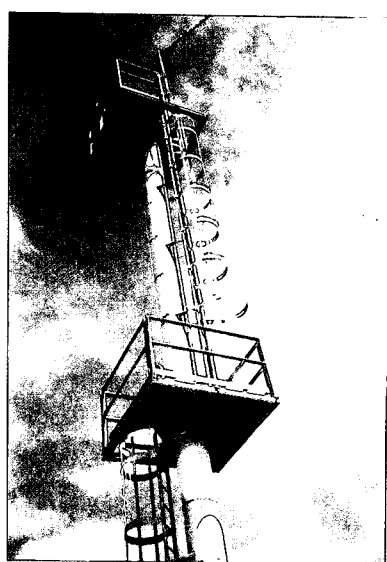




施設全景



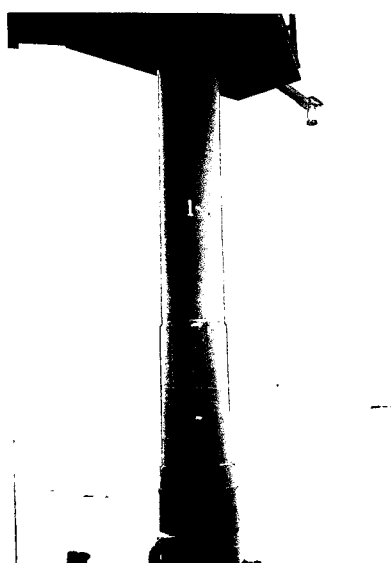
暴露架台全景



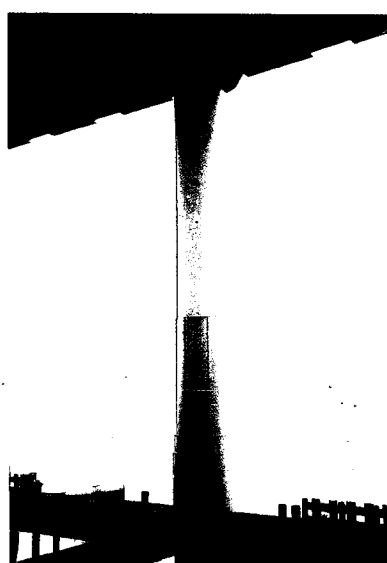
タワー



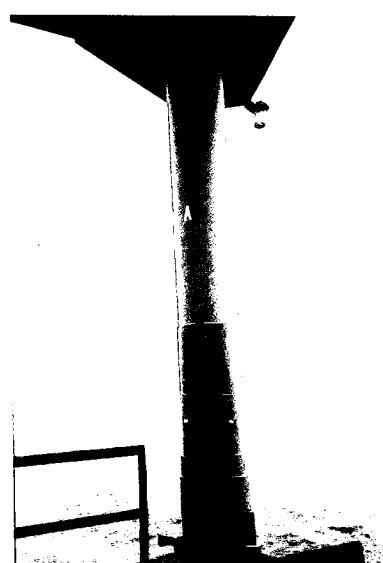
階段
第1デッキ/第2デッキ間



厚膜エポキシジンク
ポリエステルガラスフレーク
ふっ素



厚膜無機ジンク
厚膜ビニル



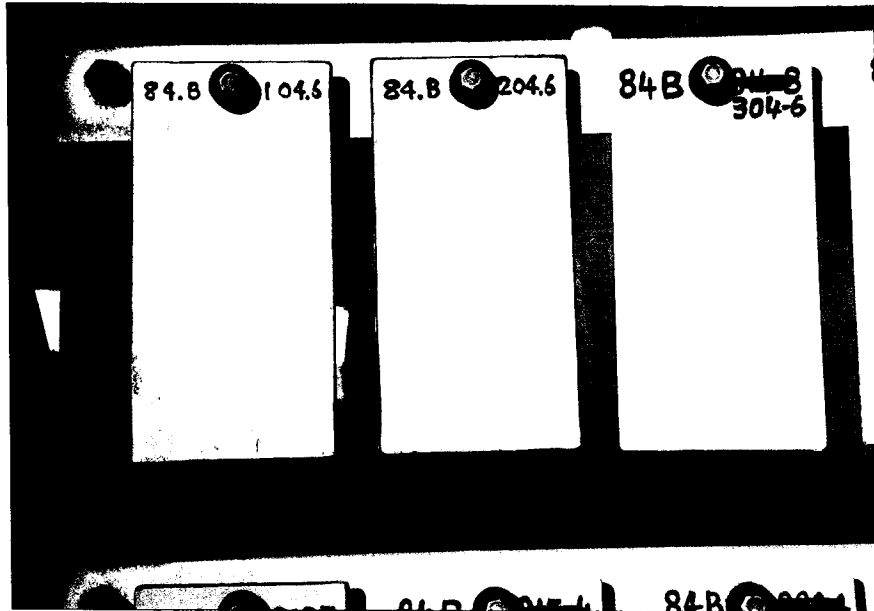
厚膜無機ジンク
エポキシ
ポリウレタン

試験板

A-1(104)
鉛系さび止め
フタル酸樹脂

A-2(204)
鉛系さび止め
塩化ゴム系

A-3(304)
無機ジンクプライマー
塩化ゴム系

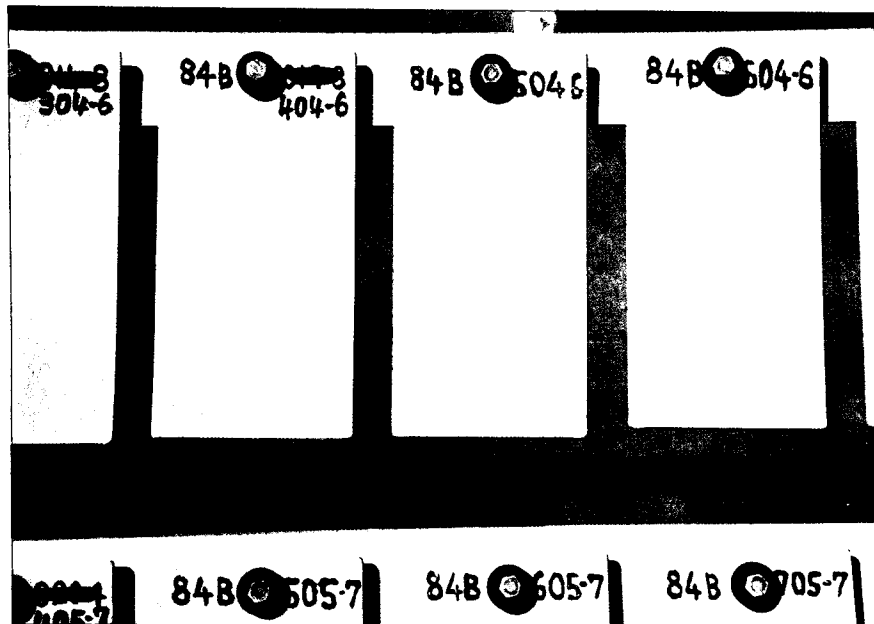


試験板

A-4(404)
厚膜形無機ジンク
塩化ゴム系

A-5(504)
無機ジンクプライマー
ポリウレタン

A-6(604)
厚膜形無機ジンク
ポリウレタン



試験板

A-7(704)
厚膜形無機ジंक
ポリウレタン

A-8(804)
厚膜形無機ジंक
ビニル

A-9(904)
厚膜形有機ジंक
ふっ素

