

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分科会塗料部会)

— 暴露期間10年後の研究成果 —

平成7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 ©1995 by P.W.R.I.

All rights reserved. No part of this book may be reproduced by any means, 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分科会塗料部会)

—暴露期間10年経過後までの研究結果—
Cooperative Research Report on Coating Technologies for
Long Term Durability in the Marine Environment

建設省土木研究所

材料施工部	新材料開発研究官	片 脇	清
〃	化学研究室 室 長	坂 本	浩 行
〃	〃 研究員	佐々木	厳

財団法人 土木研究センター

顧 問	田 中	柳之助
調査試験部長	森	芳 徳
専門調査役	福 島	稔
〃	中 家	俊 和
〃	田 辺	弘 往

要 旨

海域は、鋼構造物に対して腐食性の厳しい環境であるため、海洋構造物による海洋空間等の有効利用を図るには、鋼構造物の長期防錆塗装技術の開発が不可欠である。

このため、駿河湾の大井川町沖合に設置した海洋技術総合研究施設の本体および本体の第3デッキに設置した暴露用架台に取り付けた多数の塗装試験片の暴露試験により、長期の防錆性や、長期の防錆性と景観保持性を伴せ持つ塗装システムの開発ならびにこれらの塗装システムの塗り替えに適した塗装システムの開発を行った。その結果、海上大気中の長期防錆に適した新規塗装システム、長期の景観保持性の可能な塗装システムおよび防錆性の優れた塗り替え塗装システムならびに塗膜の寿命予測に不可欠な塗膜の劣化機構について多くの知見が得られ、海上大気中における長期防錆塗装技術の開発について明るい見通しが得られた。

キーワード：海洋構造物，鋼構造物，防食技術，塗料，長期防錆塗装，塗り替え，
暴露試験，腐食環境測定

海上大気中の長期防錆塗装技術に関する研究

まえがき

周囲を海に囲まれたわが国は、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。

きび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、社会資本の蓄積増加にもなるので、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「海上大気中の長期防錆塗装技術に関する研究」を昭和59年(1984)から5ヶ年計画で開始した。

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5ヶ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。

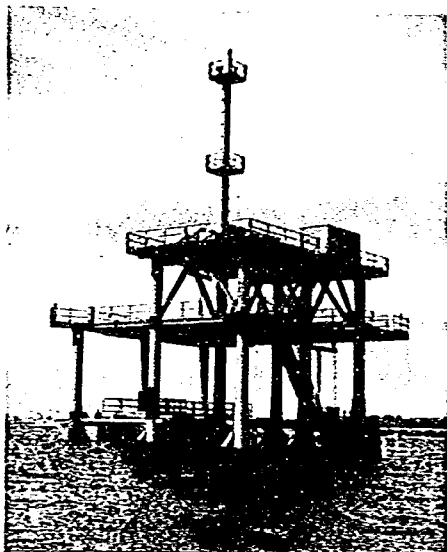
暴露試験場所は、土木研究所が駿河湾内に設置した「海洋技術総合研究施設」を使用して行った。

この研究は、わが国周辺の沖合い大小水深海域で利用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の世界47ヶ所の現場の一つとして採択された。

本研究報告書は、暴露試験開始10年経過後の成果を纏めたものである。

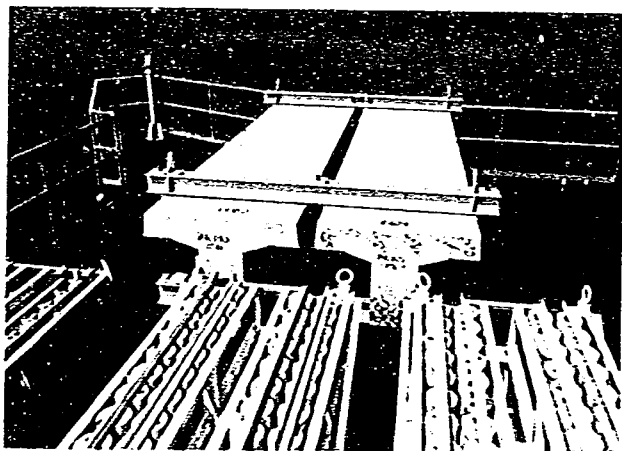
纏めにあたっては、試験の経過が端的に把握できるよう、経年的な図表によって説明するよう努めた。



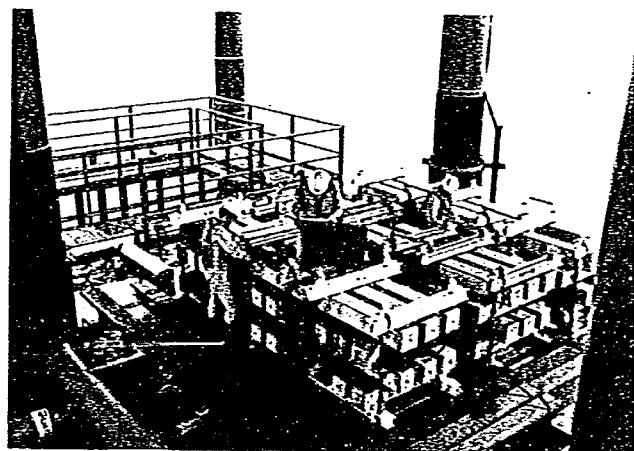
海洋技術総合研究施設の全景



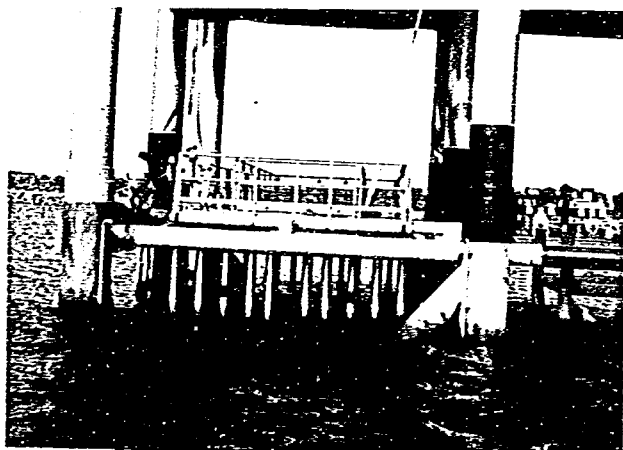
第一デッキ（長期防錆型塗装）



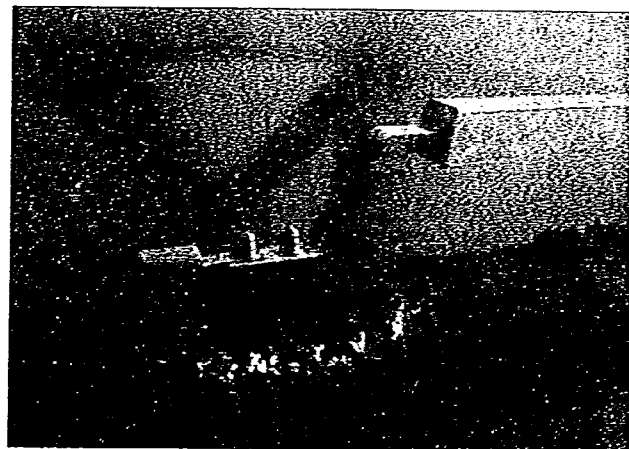
第二デッキ（コンクリート中鋼材の防食）



第三デッキ（塗覆装、コンクリート中鋼材の防食）



飛沫・干満部（塗覆装、高耐蝕性金属被覆）



海中部（アルミニウム合金陽極）

目 次

まえがき

1. 研究目的等	1
1.1 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	8
2.1 海洋技術総合研究施設の場所	8
2.2 海洋技術総合研究施設の概要	9
2.3 海洋技術総合研究施設設置までの経緯	12
3. 研究の経過	13
4. 研究内容	17
4.1 腐食環境の調査	17
4.2 塗装鋼材の劣化機構と劣化予測技術の研究	24
4.3 新設塗装システムの研究	28
4.4 塗替え塗装システムの研究	47
4.5 施設本体の塗装	51
4.6 簡易塗替え塗装システムの開発	65
4.7 部分補修、簡易塗替え仕様の検討	69
4.8 塗替え塗装の防食性試験	76
5. 暴露試験10年間の成果と今後の課題	81
付 録	85
(本研究で実施した試験方法および評価方法)	
(研究施設の全景、施設本体、試験片の代表写真等)	

1 研究目的等

1.1 目的

駿河湾内の静岡県側大井川沖に、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、塗装の品質も向上し、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で、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

建設省土木研究所では、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において、数多くの調査試験を実施してきた。

この調査試験のほとんどは、官民合同の共同研究というスタイルが、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って、『研究会』を組織して、調査試験を実施してきた。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挙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により行った。

(2) 本州四国連絡橋の防錆塗装に関する試験（昭和38～45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、それ迄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（5 R / 1 4 : 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り替え試験
- 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) 東京湾横断道路橋の防食に関する試験（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工程の影響に関する試験
- ②高力ボルト接合面の防錆法に関する試験
- 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り替えに関する試験

(4) 構造材料の防食技術に関する研究（昭和48年～51年、(財)国土開発技術研究センター、鋼管杭協会、建設省土木研究所の共同研究）

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被覆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試験（昭和52年～61年、建設省土木研究所から鋼管杭協会に委託）

(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) 海洋構造物の塗り替えに関する試験（昭和54年～58年、(社)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、(社)日本鋼橋塗装専門会、(財)土木研究センター、建設省土木研究所の共同研究）

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て、塗膜の劣化を促進できる複合環境試験装置を試作し、大気暴露試験結果との相関性の良い試験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、耐湿試験などの室内での促進劣化試験を行った。また、これと並行して、沖縄県各地、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り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

科学技術庁では、昭和57年度から科学技術振興調整費によって「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5ヶ年計画としてスタートさせたが、これに含まれる研究項目は、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技術の開発
- 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。

この研究を実施するにあたって、民間の技術力の参加を得て、官民による共同研究として、これを進めることになった。そしてこの研究の暴露試験は、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になった。

共同研究の実施機関は、次のとおりである。

(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ヶ年の期間(昭和57年～61年)が終了した後、すなわち昭和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、差し当たり昭和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」。

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)塗装併用電気防食設計技術の開発実験	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していくため、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（第一、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

- ・土木研究所内に設置
- ・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第一分科会：土木研究所、鋼材倶楽部で構成される。

第一分科会にワーキンググループを編成し、1WGは耐食性金属材料部門、
2WGは高分子系塗覆装防食材部門としている。

②第二分科会：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される。

③第三分科会：土木研究所、土木研究所で構成し、電気防食部門と塗料部門に分ける。

(3) 防錆防食技術開発委員会（平成6年度）

委員長	浅間達雄	財団法人土木研究所参与
副委員長	蒔田 實	財団法人土木研究所参与
委員	岡崎治義	建設省土木研究所材料施工部長
々	片脇 清	建設省土木研究所新材料開発研究官
々	坂本浩行	建設省土木研究所化学研究室長
々	久我 昂	社団法人鋼材倶楽部土木専門委員会委員長
々	清水健次	社団法人鋼材倶楽部市場開発部長

委員	津野和男	社団法人プレストレスト・コンクリート建設業協会耐久性技術委員会委員長
々	武藤徳一	社団法人プレストレスト・コンクリート建設業協会専務理事
々	田中柳之助	財団法人土木研究センター顧問
々	小林豊治	財団法人土木研究センター技術委員
々	佐藤靖	財団法人土木研究センター技術委員
々	森芳徳	財団法人土木研究センター常任参与調査試験部長

(4) 共同研究連絡調整会議（平成6年度）

久我 昂	社団法人鋼材倶楽部（新日本製鐵㈱建材技術開発部担当部長）
伊藤陽一	々（新日本製鐵㈱鉄構研究所表面処理研究部主任研究員）
清水義明	々（NKK総合材料研究所京浜材料研究センター主幹）
栗栖孝雄	々（川崎製鐵㈱エンジニアリング事業部鋼構造研究所主査）
塩谷千歳	々（住友金属工業㈱建設技術部東京土木建材技術室参事）
中家俊和	々（関西ペイント㈱技術開発本部第4部係長）
田邊弘往	々（大日本塗料㈱技術本部基礎研究部副参事研究員）
海野武人	々（ナカボーテック㈱技術開発研究所研究管理部）
三浦正美	々 市場開発部土木開発課長
太田 実	社団法人プレストレスト・コンクリート建設業協会（㈱ピー・エス 第一営業部長）
武藤徳一	々 専務理事
町田 武	々（㈱ピー・エス メンテナンス室長）
田中柳之助	財団法人土木研究センター顧問
森 芳徳	々 常任参与調査試験部長
戸村壽一	々（ナカボーテック㈱取締役業務本部長）
福島 稔	々（日本ペイント㈱品質保証部長）
坂本浩行	建設省土木研究所材料施工部化学研究室長

(5) 共同研究第3分科会（塗料部会）の構成員（昭和58年度～平成6年度）

（順不同、敬称略、これまでの研究関係者を含む）

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
	（現）財団法人土木研究センター
片脇 清	建設省土木研究所地質化学部化学研究室長
	（現）土木研究所材料施工部新材料開発研究官
坂本浩行	建設省土木研究所材料施工部化学研究室長
守屋 進	々 主任研究員

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	々	研究員
佐々木 敏	々	研究員
田中柳之助	財団法人土木研究センター	
柳田 力	々	
荒居 昇	々	
佐々木勝夫	々	
中家俊和	々	(関西ペイント株式会社)
橋本定明	々	(々)
西本 悟	々	(々)
白井建三	々	(々)
後藤健夫	々	(々)
森野光治	々	(々)
村松利光	々	(々)
篠原稔雄	々	(大日本塗料株式会社)
田邊弘往	々	(々)
永井昌憲	々	(々)
辻 敏幹	々	(々)
多記 徹	々	(々)
大川敏夫	々	(々)
(主査)福島 稔	々	(日本ペイント株式会社)
門田 進	々	(々)
井上勇一	々	(々)
岡本洋輔	々	(々)
石原嘉孝	々	(々)
安井正宏	々	(々)
武吉理夫	々	(々)

2 研究施設等

2.1 海洋技術総合研究施設の場所

(1) 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海岸線から約250m沖合、水深7.5mの位置に設置するよう計画された。東経138°18'55"、北緯34°47'17"の地点である。

(2) 海上大気中の長期防錆塗装技術に関する研究は、駿河湾大井川町の沖合約250mに設置されたこの海洋技術総合研究施設（図-2.2.1）を利用して行った。

この施設のうち、海面からの高さが4mから29mまでの部分を海上大気部の環境と考えて、研究の実施は当該施設のこの部分と施設の海上13.9mの地点に設けられた第1デッキの上面と下面とに設置した暴露施設（図-2.2.2）およびこの間に設置した環境試験施設（図-2.2.3）により行った。

2.2 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法の概要を図-2.2.1に示す。また施設の諸元を表-2.2.1に示す。

表-2.2.1 海洋技術総合研究施設諸元

項 目	諸 元
第 1 デ ッ キ	高さT.P.+13.9m、面積189㎡（10.5m×18.0m）
第 2 デ ッ キ	高さT.P.+ 8.9m、面積255㎡（15.0m×15.0m+4.0m×7.5m）
第 3 デ ッ キ	高さT.P.+ 2.0m、面積56.25㎡（7.5m×7.5m）
海 底 面 標 高	深さT.P.- 7.50m
気象観測用張出し	第2デッキの3箇所
荷揚げ用張出し	第2デッキに1箇所
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㎡（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：400kg/㎡、第2デッキ356kg/㎡、第3デッキ：356kg/㎡

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→ジャケット据付け→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

本施設は、昭和57年度、建設省土木研究所から製作発注され、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。

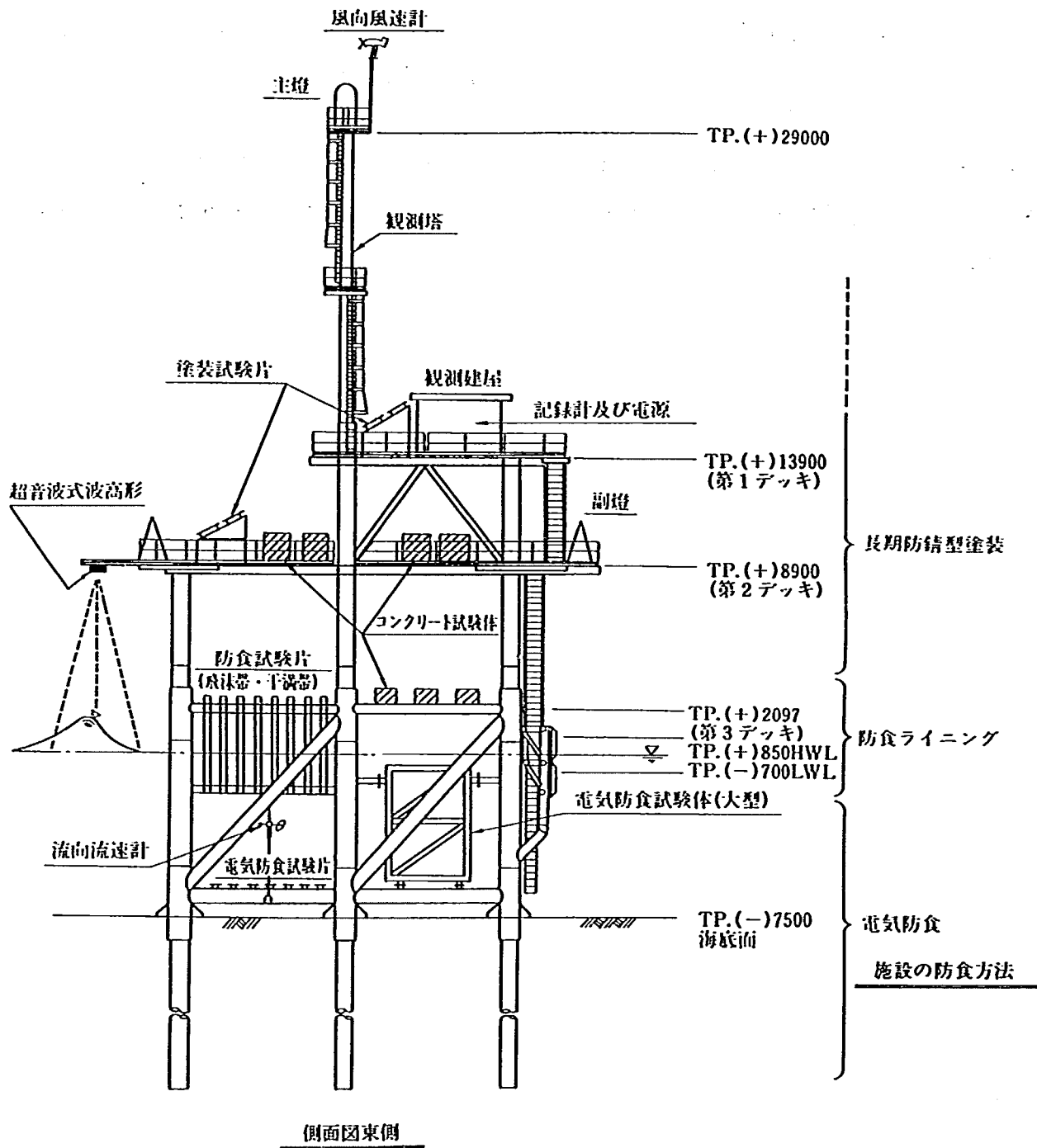
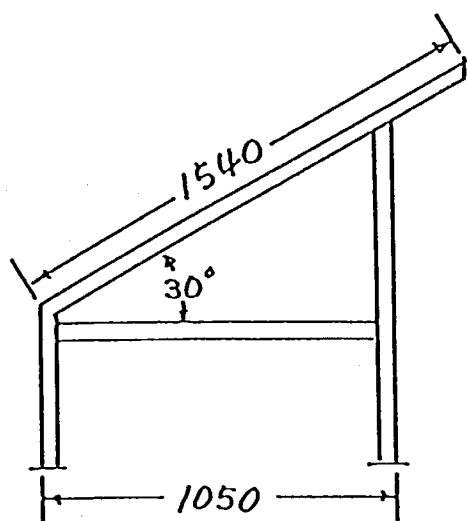
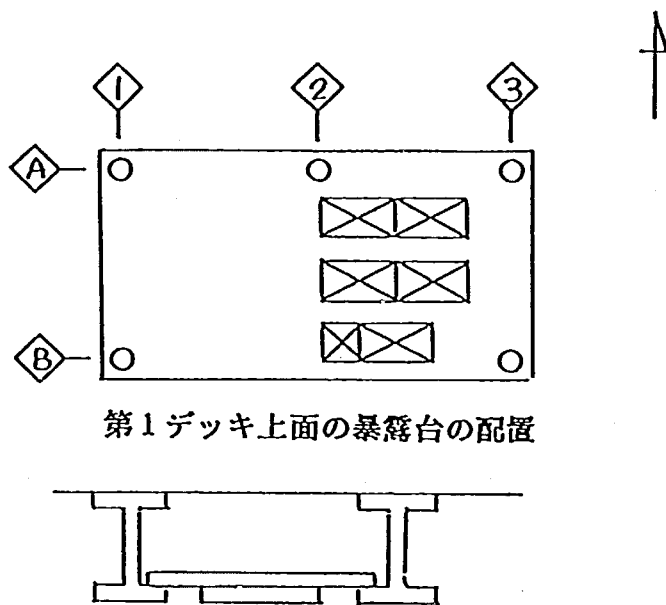


図-2.2.1 海洋技術総合研究施設 (海洋曝露試験施設)



暴露台の形状



第1デッキ上面の暴露台の配置

第1デッキ下面の暴露状態

図-2.2.2 第1デッキに設置した曝露施設

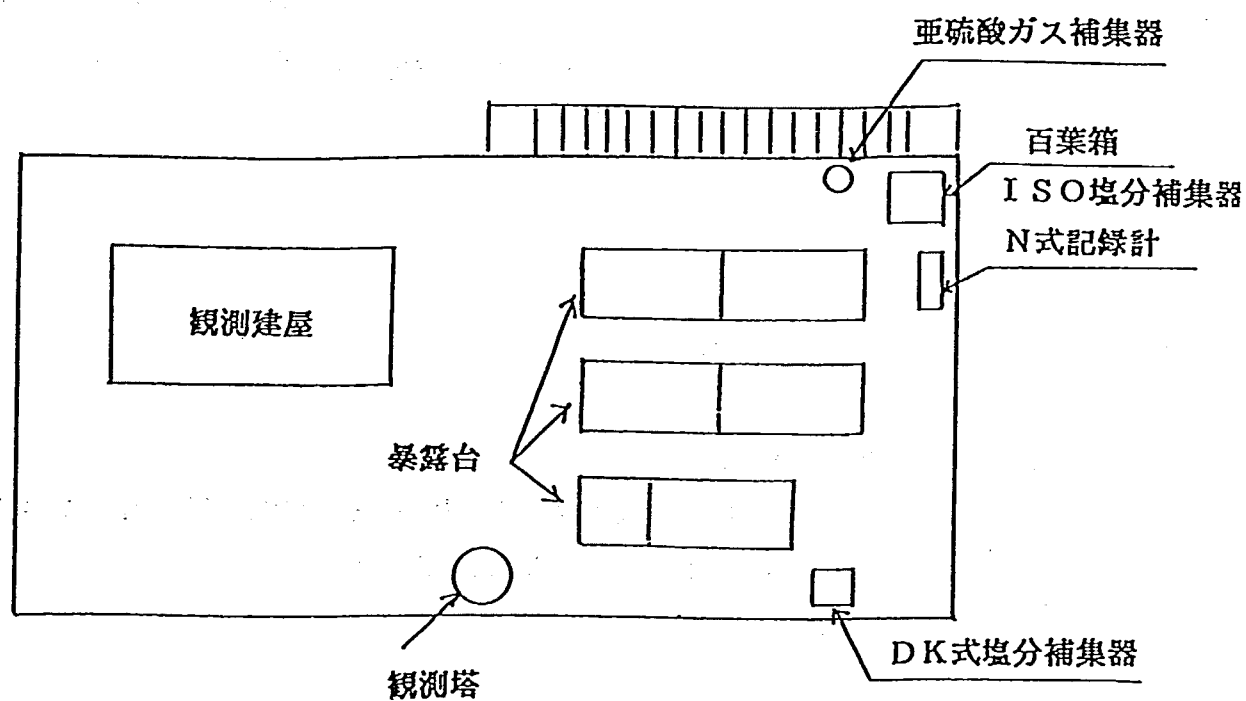


図-2.2.3 環境試験施設

2. 3 海洋技術総合研究施設設置までの経緯

2. 3. 1 海洋技術総合研究施設計画の経緯

昭和56年度から、科学技術庁が関係各省参加のもとに開始した「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、分担担当することとなった建設省土木研究所化学研究室では、研究課題「防食等による海洋構造物の耐久性向上技術」の研究を開始するため、海洋暴露試験施設の設置を検討し、その適地の選考が開始された。

また、建設省中部地方建設局静岡河川工事事務所では、駿河海岸や富士海岸で海岸侵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、とくに駿河海岸では海岸侵食が激しいため、侵食の機構と防止工法等のための調査が必要であるとの判断で、そのための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. 3. 2 研究項目

第1に、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ある。

第2に、海岸防災に関する項目がある。これは海岸への土砂供給の現象、海浜変形等への対策用として、漂砂現象の解明等海岸侵食防止対策工法の開発のための研究である。

第3に、構造物の安定性や使用材料の耐久性に関する項目がある。これは、海洋空間や資源利用のため海洋構造物が建設されるが、安定性に関しては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る。

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。

- (1) 海洋構造物の耐久性向上技術に関する研究
- (2) 自然環境条件の調査
- (3) 海岸侵食対策に関する調査研究
- (4) 海洋構造物の安定性に関する調査研究

2. 3. 3 海洋技術総合研究施設の建設地点

上述の研究を推進するための適地の選定にあたり、大井川町、大井川漁業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。

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、特に、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。

調査は毎年定期的に実施し、年度毎の研究の経過を表-3.1に示す。

次にテーマごとにその評価内容および経緯を表-3.2に示す。

表-3.1 研究の経緯

年度	実施項目	実施内容
昭和 58年 (1983)	1)研究会の設立	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会を設立し、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㈱、関西ペイント㈱、大日本塗料㈱がこれに参加した。
	2)研究計画の立案	研究会で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	建設省土木研究所の発注により、新日本製鐵㈱(北九州)で研究施設(ジャケット構造)が製作され、昭和58年(1983)11月から翌年2月にわたって14種類の防錆塗装を行った。
	4)研究施設の海上曳航と現地への設置	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。
59年 (1984)	1)暴露試験片の製作と取付け	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)塗替え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。
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については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は、現場で測定を行った。
	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)試験片による塗替え塗装試験の実施	1年間暴露した試験片を回収して、各種の仕様でぶり替え塗装を行い、再び暴露した。

年度	実 施 項 目	実 施 内 容
60年 (1985)	4) D K 式飛来塩分測定装置の取付けと塩分量の測定	D K 式飛来塩分量測定装置を第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。
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) I S O / J T C 1 5 6、J W G 4 共同暴露場として、気温・湿度・濡れ時間(気温と湿度から推定)、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。
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、現地測定と試験片を回収して膜厚の変化と塩素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 I S O 方式による環境測定を行った。
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) 環 境 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 I S O 方式による環境測定を行った。 3) N 式環境測定装置を設置し、気温・湿度・各種部位の表面温度の測定を開始した。
	3) 施設本体の塗替え塗装	施設本体の一部に塗替え塗装を行った。
	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について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 I S O 方式による環境測定を行った。
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。

年度	実 施 項 目	実 施 内 容
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。
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	塗替え塗装仕様検討用の試験片を取付けた。
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) 暴露試験片の取外し	部分補修仕様検討用の試験片を取外した。(暴露5年後)
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) 新規暴露試験片の取付け	前年に取外した部分補修仕様に塗替え仕様の塗装を行い、初期データを取り試験片を再度取付けた。

表-3. 2 駿河湾暴露試験研究テーマの経緯

テ - マ 名	評 価 項 目	暴露開始年度	評 価 の 内 容
腐 食 環 境 調 査	鋼材の腐食減量	1985年(昭和60年) ↓	・暴露2年、4年、10年後の腐食減量測定済。継続暴露は各鋼材2枚。 ・詳細は本文参照。
	飛来塩分量	2005年(平成17年)	・1985年(昭和60年)以降、毎年実施。詳細は本文参照。
鋼材の劣化機構と劣化予測の研究	水蒸気、酸素透過 付着性、インピーダンス 塩素侵入、外観観察 膜厚変化、組成分析 カルトインテグラー コロシジョンレートメーター	1984年(昭和59年) ↓ 1989年(平成元年) <終了>	・1989年(平成元年)暴露4年後の塗膜状態測定のため試験片を取外し回収。 ・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。 ・詳細は本文参照。
塗替え塗装システムの研究	一般部、塗残し部の 錆、ふくれ 塗残し部の錆侵入幅	1985年(昭和60年) ↓ 1989年(平成元年) <終了>	・1989年(平成元年)暴露5年後の塗膜状態測定のため試験片を取外し回収。 ・4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。 ・研究終了。詳細は本文参照。
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、光沢、付着性 顕微鏡観察(塗膜表面) インピーダンス	1984年(昭和59年) ↓ 2005年(平成17年)	・外観観察、光沢測定は今後も継続を予定。詳細は本文参照。 ・1994年(平成6年)暴露10年後の試験片を取外し、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。
施設本体の塗装システムの研究	外観観察、光沢 インピーダンス、付着力 膜厚変化	1984年(昭和59年) ↓ 2005年(平成17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。 ・付着力、膜厚測定は5年毎に測定中。今後も継続評価予定。 ・1994年(平成6年)で暴露10年。詳細は本文参照。
施設本体の簡易塗替塗装システムの開発	外観観察 ごばん目付着性	1988年(昭和63年) ↓ 1998年(平成10年)	・外観観察：毎年。碁盤目付着：暴露5年後まで5年毎、6年以降2年毎。 ・1994年(平成6年)で暴露6年。今後も継続評価予定。詳細は本文参照。
部分補修、簡易塗替仕様の検討	旧塗膜・外観観察 塗替膜・碁盤目付着 アドヒージョン	旧塗膜の暴露 1988年(昭和63年)	・第1回目回収：2年暴露後の1990年(平成2年)→塗替後1992年(平成4年)再暴露。 ・第2回目回収：5年暴露後の1993年(平成5年)→塗替後1994年(平成6年)再暴露。 ・現在評価中のため、報告書には掲載していない。
塗替塗装の防食性評価	旧塗膜、塗替塗膜の 外観、カルトインテグラー インピーダンス、断面	旧塗膜の暴露 1992年(平成4年)	・第1回目回収：3年暴露後の1995年(平成7年)→塗替後1996年(平成8年)再暴露。 ・今後も継続評価予定。・現在評価中のため、報告書には掲載していない。

4. 研究内容

4. 1 腐食環境の調査

4. 1. 1 目的

塗装鋼材の防錆性は、そのおかれている環境に左右され、特に海洋環境では飛来塩分や湿気の影響で激しい腐食を生じる。

海洋環境での長期防錆塗装システムを開発するには、暴露試験結果を正しく解析することが重要で、長期にわたり本研究施設が置かれている環境を調査することを目的とした。

4. 1. 2 計画

本施設の腐食環境は、海面からの高さ、方向、部材の位置などによって異なるので、これらの条件ごとに腐食に関係すると思われる因子を測定して、それぞれの場所での腐食環境を把握し、その環境条件を明らかにする試みを行った。また、本施設の腐食環境の程度を知るために、各種鋼材の腐食量を測定した。

測定項目、測定場所、測定期間および測定方法を表-4. 1. 1に示した。

4. 1. 3 結果

本施設は海洋構造物の耐久性向上技術開発のため、海上に設置された研究用施設として恒久性、規模的にも我が国最初の試みであって、海洋で総合的な防食技術の向上に関する研究を行うに当たり、重要なデータを取得する場所として貴重な施設である。本施設を利用して研究を実施する際、施設が設置されている環境を正確に把握することが重要であるので、海洋環境での腐食の原因として、直接係わる腐食因子と間接的に係わる環境因子に大別して環境測定を行った。

(1) 腐食因子の測定

飛来塩分、硫酸化物および水分と接している濡れ時間の長さや頻度は、腐食を促進する特徴的な因子であると考えられるのでこれの測定を行った。

1) 飛来塩分量

JIS法は塩分捕集用ガーゼ平面を塩分が通過し、捕集効率が悪いと考えられるため、本施設での測定はDK法とISO法で行った。塩分の飛来方向、高さの影響をDK法によって調査した。昭和60年(1985)11月から開始した飛来塩分量調査結果を表-4. 1. 2~4. 1. 3に示した。

2) 硫酸化物量

近年、酸性雨などで話題になっている大気中の酸性物質は、雨水に溶け込んで裸鋼材の腐食を促進したり、塗膜の種類によっては溶解、変色を生じる原因となる。他地区のデータと比較するため、ISO法とJIS法で3ヵ月間隔の測定を行い、季節変動が分る測定を行った。

結果を表-4.1.4~4.1.5に示した。

3) 濡れ時間

ISO方式と露点温度法について測定を行い、両者の比較を行った結果を表-4.1.6に示した。

(2) 環境因子の測定

環境因子として気温、相対湿度、表面温度、風向、風速の測定を行った。

(3) 鋼材腐食量

環境の腐食程度を知るため鋼材の腐食量の調査を行った。海面からの高さで鋼材の種類の影響をみるため、第1、2デッキ上で普通鋼材2種と耐候性鋼材2種の腐食量を測定した。結果を表-4.1.7~4.1.8に示した。表-4.1.7の腐食速度は4年間および9年間の腐食量の積み重ねを1年分の腐食速度に換算した数値で表した。

4.1.4 結果の概要

(1) 飛来塩分量

垂直平面部に飛来した塩分を雨水と共に採取するDK方式と、円筒状ガーゼに全方位から飛来した塩分を採取するISO方式の比較を行った結果、DK式による飛来塩分量が若干少ない値を示したが、傾向は同じでほとんど差はないと言えることが分った（測定方法の詳細については、章末付録を参照）。

季節によって特定方向からの飛来塩分が多いという傾向は認められなかったが、駿河湾では毎年7月から10月にかけて波高が高く、波の高い夏に風向と飛来塩分量が一致する傾向が認められた。さらに、飛来塩分量の海面からの高さによる影響を調査した結果、海面から近い第2デッキの飛来塩分量が多く、第1デッキと高さ5メートルの差で約2倍の塩分量の差が認められた。

(2) 硫黄酸化物量

（財）日本ウェザリングテストセンターのデータと比較した結果、駿河湾で観測した硫黄酸化物量が他地区よりも多い傾向が認められたが、海水成分の SO_4 イオンが捕集されたためであり、実際の SO_2 汚染は少ないものと考えられる。

(3) 濡れ時間

ISO法による濡れ時間は、長くなる傾向が認められた。ISO法は相対湿度が80%を越える時間で濡れ時間を推定するが、実際には気温の降下とともに表面温度も低下し、湿度80%程度では露点温度に達しないことがあるため、露点方式よりも長い濡れ時間になると考えられる。駿河湾は湿度が比較的低いので、1日のうち結露による濡れ持続時間は短いと推定される。

(4) 鋼材腐食量

腐食環境が厳しい海洋環境では、鋼材の種類に関係なく腐食が進行することが分った。また、第1、第2デッキにおける腐食量に差が認められなかった。飛来塩分量は海面から近い第2デッキが2倍多かったが、試験板の取り付け位置が共に日照面である点から、濡れ時間が両者で同じであると推定され、腐食量に差が出なかったと考えられる。

普通鋼SS41の腐食量を昭和63年に開始した他地区のデータと飛来塩分量、濡れ時間との対比で比較した結果、本施設の飛来塩分量は最も多く、濡れ時間は最も短い傾向が認められた。腐食は水分と塩分の複合作用であり、本施設での暴露試験では濡れ時間が短いことから飯岡に比べて腐食量がやや少ない傾向であった。しかし、飯岡と同様ISOの国際的な腐食環境調査では、C4の評価で厳しい腐食環境であると言える。

表-4. 1. 1 腐食環境調査の測定項目

分類	測定項目	測定場所	測定期間	備考
腐食因子	飛来塩分量 (DK式)	第1デッキ東西南北方向 第2デッキ南方向	昭和60年(1985)～	3ヵ月毎に測定。季節変動も調査
	飛来塩分量 (ISO式)	第1デッキ	昭和61年(1986)～	3ヵ月毎に測定。季節変動も調査
	硫酸化物 (JIS式)	第1デッキ	昭和62年(1987)～ 平成元年(1989)	3ヵ月毎に測定。季節変動も調査
	濡れ時間	第1デッキ日照面、裏面	平成元年(1989)	ISO方式と露点温度法で測定。
環境因子	気温、相対湿度	第1デッキ	昭和61年(1986)～ 平成元年(1989)	N式記録装置で測定
	表面温度	第1デッキ日照面、裏面		試験片と施設本体で測定
	風向・風速	最寄りの気象観測所		日最大風速と累積風向時間を調査
鋼材腐食	鋼材腐食量の測定	第1、2デッキ日照面 (東南向き垂直) 第1デッキ裏面	昭和60年(1985)～ 平成17年(2005)	普通鋼(SS41、SM50)と耐候性鋼(SMA-P、SMA-W)の腐食量を測定。 2000、20005年に調査予定。

表-4. 1. 2 飛来塩分量測定結果 (DK式とISO方式での飛来塩分量比較)

DK方式 (塩分量NaCl mg/dm ² /day)		ISO方式 (塩分量NaCl mg/dm ² /day)	
昭和61年(1986)11月27日～62年4月16	2.414	昭和61年(1986)11月27日～62年2月28	3.165
62.(1987) 4.16～62. 7.29	1.916	昭和62(1987). 2.28～62. 5.29	3.136
62.(1987) 7.29～62.12.16	1.926	昭和62(1987). 5.29～62. 9. 8	2.111
		昭和62(1987). 9. 8～62.11.27	5.671
62.(1987)12.16～63. 5.24	4.077	昭和62(1987). 11.27～63. 2.19	1.217
		昭和63(1988). 2.19～63. 5.24	7.828
63.(1988) 5.24～63. 9.21	3.880	昭和63(1988). 5.24～63. 9. 8	3.082
63.(1988) 9.21～63.12. 6	2.584	昭和63(1988). 9. 8～63.12. 6	3.826
63.(1988)12. 6～ 1. 2.28	3.373	昭和63(1988). 12. 6～ 1. 2.28	3.877
昭和63年(1989) 2.28～ 1. 5.30	3.264	昭和63(1989). 2.28～ 1. 5.30	2.961
1.(1989) 5.30～ 1. 8. 1	2.552	昭和63(1989). 5.30～ 1. 9.27	2.499
1.(1989) 8. 1～ 1. 9.27	3.048		
1.(1989) 9.27～ 2. 3.31	2.681	昭和63(1989). 9.27～ 1.12.14	3.325

表-4. 1. 3 飛来塩分量の季節変動調査 (DK式)

調査期間(季節)		塩分量 (NaCl mg/dm ² /day)				
		東	西	南	北	第2南
昭和61(1986)年	春(3月～5月)	0.4474	0.9379	0.3740	1.1758	0.3753
	夏(6月～8月)	0.1084	0.4347	1.1305	0.7173	0.2769
	秋(9月～11月)	0.3426	0.2477	0.1293	0.4275	0.2968
	冬(12月～2月)	0.0600	1.0288	0.5958	0.7289	9.1038*
昭和62(1987)年	春(3月～5月)	0.0514	0.9533	0.6780	0.1125	5.1645*
	夏(6月～8月)	0.1684	0.8396	0.6318	0.0888	0.2190
	秋(9月～11月)	0.5052	0.7808	0.3770	0.2554	0.6296
	冬(12月～2月)	1.0440	0.8824	0.5298	1.2133	0.7810
昭和63(1988)年	春(3月～5月)	1.1883	0.8912	0.5703	1.4168	0.8606
	夏(6月～8月)	1.5154	0.6328	0.6563	1.0756	1.6326
	秋(9月～11月)	1.3133	0.3719	0.4707	0.7583	0.9060
	冬(12月～2月)	1.0836	0.6645	0.4626	1.0932	0.6956
平成元年(1989)	春(3月～5月)	0.8715	0.7261	0.5280	1.1396	0.5967
	夏(6月～8月)	0.5671	0.4700	0.6473	1.0348	1.7306
	秋(9月～11月)	0.6937	0.7681	0.6619	0.6658	4.7411*
	冬(12月～2月)	0.7163	0.7588	0.4514	0.7540	5.5514*

(注*:異常値)

表-4. 1. 4 硫黄酸化物量 (SO_2 $\text{mg}/\text{dm}^2/\text{day}$) の他地域との比較 (JIS法)

調査期間		駿河湾	銚子	東京	沖縄
平成元年 (1989)	1月	0.341	0.077	0.174	0.058
	2月		0.089	0.145	0.154
	3月		0.082	0.120	0.108
	4月	0.338	0.113	0.141	0.061
	5月		0.058	0.125	0.071
	6月		0.070	0.128	0.092
	7月	0.219	0.033	0.145	0.075
	8月		0.072	0.173	0.292
	9月		0.034	0.158	0.217
	10月	0.466	0.063	0.149	0.108
	11月		0.081	0.177	0.104
	12月		0.095	0.187	0.062

表-4. 1. 5 硫黄酸化物量の測定結果

調査期間		日数	硫黄酸化物量 SO_2 $\text{mg}/\text{dm}^2/\text{day}$
昭和62年 (1987)	2月28日～62. 5.29	90	0.299
	5月29日～62. 9. 8	102	0.256
	9月 8日～62.11.27	80	0.404
	11月27日～63. 2.19	84	0.415
昭和63年 (1988)	2月19日～63. 5.24	95	0.391
	5月24日～63. 9. 8	107	0.259
	9月 8日～63.12. 6	89	0.414
	12月 6日～ 1. 2.28	84	0.341
平成元年 (1989)	2月28日～ 1. 5.30	91	0.338
	5月30日～ 1. 9.27	120	0.219
	9月27日～ 1.12.14	78	0.466

表-4. 1. 6 濡れ時間測定結果(測定時期:平成元年3月、7月、10月)

3月	濡れ時間(時間)		7月	濡れ時間(時間)		10月	濡れ時間(時間)	
	ISO法式	露点方式		ISO法式	露点方式		ISO法式	露点方式
1	13.0	10.0	1	21.0	4.8	1	5.0	—
2	0.0	0.0	2	24.0	16.0	2	—	—
3	0.5	0.0	3	24.0	6.8	3	5.0	—
4	22.0	13.5	4	24.0	4.8	4	—	—
5	24.0	15.0	5	8.0	6.0	5	5.0	1.0
6	10.0	14.5	6	6.7	3.2	6	8.0	4.0
7	11.0	4.0	30	6.4	6.0	7	17.0	5.0
8	10.0	7.0	31	6.8	4.8	8	7.5	2.5
9	8.5	0.0				9	4.0	1.5
10	7.0	0.0				10	4.0	—
11	6.5	0.0				11	5.0	1.5
12	0.0	0.0				12	12.0	6.5
13	14.0	8.5				13	12.0	4.0
14	21.5	9.0				14	10.0	2.5
15	0.0	0.0				15	13.0	4.0
16	0.0	0.0				16	14.0	8.0
17	0.0	0.0				17	5.0	6.5
18	0.0	0.0				18	1.5	0.0
19	0.0	0.0				19	18.0	0.0
20	3.5	4.0				20	7.5	2.8
21	5.0	8.0				21	4.8	2.8
22	5.0	0.0				22	8.4	10.0
23	8.5	5.0				23	15.0	9.0
24	19.0	5.5				24	12.0	7.6
25	8.5	6.5				25	12.0	2.0
26	3.0	0.0				26	9.0	5.2
27	9.0	7.0				27	6.0	2.0
28	10.0	5.0				28	4.5	0.0
29	6.5	4.0				29	10.0	3.0
30	0.0	0.0				30	9.2	7.2
31	24.0	19.0				31	23.0	20.0

表-4. 1. 7 各種鋼材の腐食量調査結果

取付け：昭和60(1985)年11月21日

取外し：平成元年(1989) 8月1日、平成6年(1994) 7月27日

暴露 年数	鋼材の種類	試験板 No.	暴露 場所	腐食量 g	表面積 cm ²	腐食減量 g	平均板厚 減少(mm)	腐食速度 (mm/year)
4	SS-41	S02	第1デッキ	24.0	342.5	70.07	0.089	0.022
		S07	第1デッキ	65.2		190.36	0.243	0.061
		S12	第2デッキ	21.9		63.94	0.081	0.020
	SM-50	A321H2	第1デッキ	26.6	333.1	79.86	0.102	0.025
		A341Y2	第1デッキ	33.8		101.47	0.129	0.032
		A391Y2	第2デッキ	20.9		62.74	0.080	0.020
	JIS 耐候性鋼	B29	第1デッキ	18.9	333.9	56.60	0.072	0.018
		B34	第1デッキ	55.7		186.82	0.213	0.053
		B39	第2デッキ	17.7		53.01	0.086	0.017
	耐候性鋼	D25	第1デッキ	17.4	335.6	51.84	0.066	0.017
		D30	第1デッキ	29.3		87.30	0.111	0.028
		D35	第2デッキ	17.1		50.95	0.065	0.016
9	SS-41	S03	第1デッキ	74.2	344.8	215.2	0.243	0.027
		S13	第2デッキ	57.7	345.1	167.2	0.189	0.021
	SM-50	A321V2	第1デッキ	99.9	340.0	293.8	0.333	0.037
		A401V2	第2デッキ	56.8	339.9	167.10	0.189	0.021
	JIS 耐候性鋼	B30	第1デッキ	41.7	340.1	122.6	0.144	0.016
		B40	第2デッキ	33.9	340.0	99.70	0.117	0.013
	耐候性鋼	D26	第1デッキ	37.7	343.7	109.7	0.126	0.014
		D36	第2デッキ	31.7	340.1	93.20	0.108	0.012

表-4. 1. 8 各地区での腐食量と腐食因子の比較

	駿河湾(海洋)	飯 岡(海岸)	鳴 門(海岸)	穂 高(山間)
腐食量(mg/cm ²)	44.4	55.9	35.9	12.6
塩分量(mg/dm ²)	3.0	1.7	1.0	0
濡れ時間(時間)	3.7	8.3	9.1	12.9

4. 2 塗装鋼材の劣化機構と劣化予測技術の研究

4. 2. 1 目 的

20年以上の長期防錆性をもつ塗装系の開発を行うためには、その寿命を予測する技術が必要である。塗装鋼材の劣化には、塗膜の変化、塗膜と鋼材の界面の変化などが複雑に影響していて、劣化予測を困難にしている。本研究では、海上大気部での塗装鋼材の劣化機構を明らかにし、劣化の予測技術を得ようとするものである。

4. 2. 2 計 画

塗装鋼材の劣化機構を知るため塗装系を単純化し、試験板を海上大気部に暴露して塗膜の変化を測定・観察することにした。早期に結果を得るため、本来の1/2程度の薄膜で試験した。測定項目および塗装系を表-4. 2. 1～4. 2. 2に示した。

表-4. 2. 1 測定項目および測定方法（期間：昭和59年(1984)～平成元年(1989)）

測定の種類	測 定 項 目	測 定 方 法	調 査 時 期
塗膜機能の 測 定	水 蒸 気 透 過 性	J I S Z 0 2 0 8に準拠	0、1、2、5年後
	酸 素 透 過 性	製科研式酸素透過試験機による	
	塗膜インピーダンス	交流ブリッジ法による (周波数：0.2、0.5、1.0 Hz)	
	塩素イオン侵入度	EPMAによる塗膜断面の線分析	3、5年後
劣化状態の 測 定	塗 膜 の 外 観 変 化	肉眼、顕微鏡(光学、電子)観察 光沢測定	毎 年
	膜 厚 変 化	電磁微厚計による	
	塗 膜 組 成 の 変 化	赤外分析(FT-IR)による	0、1、2、5年後
	素地鋼材の変化	塗膜下錆の観察 カレントインテグラブター法測定 コロージョンレートメーター法	

表-4. 2. 2 塗装系と測定項目

No.	塗 装 仕 様	膜厚	透 過 性	肉眼観察	そ の 他
1	エポキシ樹脂塗料下塗	40 μ	○	○	○
	ポリウレタン樹脂塗料上塗	20			
2	エポキシジンクプライマー	15		○	
	エポキシ樹脂塗料下塗	40			
	ポリウレタン樹脂塗料上塗	20			
3	鉛系錆止めペイント	40	○	○	○
	フタル酸樹脂塗料上塗	20			
4	長ばくエッチングプライマー	10		○	
	鉛系錆止めペイント	40			
	フタル酸樹脂塗料上塗	20			
5	エポキシジンクプライマー	15		○	○
	塩化ゴム系塗料下塗	30			
	塩化ゴム系塗料中塗	20			
	塩化ゴム系塗料上塗	20			
6	塩化ゴム系塗料下塗	30	○		
	塩化ゴム系塗料中塗	20			
	塩化ゴム系塗料上塗	20			

4. 2. 3 結果の概要

諸特性の暴露経時変化を表-4. 2. 3に示した。

(1) 外観観察および光沢測定

塗装系3 (錆止め/フタル酸塗)、塗装系4 (エッチングプライマー/錆止め/フタル酸塗)は一般部で錆が進行し、塗膜下で劣化が進行していると推定される。塗装系2 (エポキシジンク/エポキシ樹脂/ポリウレタン塗)と塗装系5 (エポキシジンク/塩化ゴム系塗)は、エポキシジンクリッチプライマーの防錆効果によって、一般部の錆は認められなかった。

(2) 顕微鏡観察

本試験は塗装系により上塗りの色が異なるため、塗膜の劣化状態をそのまま比較することは難しいが、フタル酸上塗りは暴露2年後に直径数 μ mに及ぶ表面クレーターが随所に認められ、5年後には表面樹脂層が認められなくなる程劣化していることが分った。塩化ゴム系上塗りは暴露2年後にフタル酸でみられた劣化によるクレーターは認められなかったが、3年後には全体に劣化し粗面化する傾向が認められた。一方、ウレタン系上塗りは2年後まで健全な状態を示したが、3年後から表面劣化による粗面化が目立つ傾向が認められた。

(3) 膜厚変化

いずれの塗装系においても膜厚減少を検出できる程の変化は認められなかった。

(4) 水蒸気透過性、酸素透過性

塗装系3 (鉛系錆止め/フタル酸上塗)は他の塗装系に比べ透過性が大きく、暴露5年後には劣化によりクラックを生じ測定不可能であった。一方、塗装系1 (エポキシ下塗/ウレタン上塗)、塗装系6 (鉛系錆止め/フタル酸上塗)は透過性が低く、経年変化も認められなかった。

(5) 赤外分析

全ての塗りの表層部における顔料比率が増大する傾向が認められた。ウレタン上塗りでは、2年目からウレタン結合(1700 、 1650cm^{-1})の吸収の減少が認められた。塩化ゴム系上塗では5年後、硫酸バリウムのピーク(1080cm^{-1})が現れ、白亜化の進行が認められた。

(6) 塩素イオン侵入度 (X線マイクロアナライザーによる分析)

塗装系1 (エポキシ下塗/ウレタン上塗)は3年後に約 $6\mu\text{m}$ 、5年後に約 $20\mu\text{m}$ まで塩素イオンの侵入が認められた。塗装系3 (鉛系錆止め/フタル酸上塗)は3年後に $3\mu\text{m}$ の侵入であったが、5年後には著しく劣化した部分から塩素イオンの侵入による素地面への蓄積が認められた。

(7) 塗膜インピーダンス

エポキシ系下塗りを塗装した塗装系1と5は変化はなかったが、鉛系錆止めの塗装系3は初期から $\tan\delta$ 値が大きく、透過性が大きいことを示している。

(8) カレントインタラプター

分極抵抗値はエポキシジンを塗装した塗装系5が最も大きく、エポキシ系下塗りの塗装系1、鉛系錆止めの塗装系3の順で小さくなる傾向が認められた。この傾向は、塗膜を剥離して素地の状態を調査した結果と一致していた。即ち、塗装系5は全く錆が認められず、塗装系1はわずかに点錆が認められ、塗装系3は5～10%の面積に錆を生じていた。

(9) コロージョンレートメーター

カット部から腐食が進行しやすい塗装系1 (エポキシ下塗/ウレタン上塗)は、カット部の電流値が経時増加し塗膜下腐食の進行が確認された。ジンクリッチプライマーの効果がある塗装系5 (エポキシ下塗/ジンクリッチプライマー/フタル酸上塗)は、2年後まで電流値の変化がなく、5年後にカット部に小さいふくれが認められ、電流値が増加した。

4. 2. 4 まとめ

全ての塗装系について5年暴露後チョーキングが認められたが、チョーキング層の厚みは極わずかであった。塗膜表面の劣化は走査型電子顕微鏡による観察が有効で、劣化状態を直接見ることができる有効な手段であると言える。アルキド樹脂の劣化が著しく、微小なわれなど塗膜内部に及ぶ劣化を生じていた。

エポキシ樹脂および塩化ゴム塗装系は、水蒸気、酸素、塩素イオン等の腐食因子の透過性が低く、経年変化も認められなかった。即ち、腐食因子の遮断性が高い塗膜によって発錆が抑制され、更に、下塗りにエポキシジンクリッチプライマーを塗装すると、ジンの防食作用により、著しく発錆を抑制することができることが確認された。

カレントインタラプターおよびコロージョンレートメーター等による電気化学的方法によって、素地の腐食状態との対応がとれ、塗膜下腐食のモニタリングに有効であると考えられる。

表-4. 2. 3 諸特性の暴露経時変化

測定項目	塗 装 系 No		暴 露 期 間				
			1 年	2 年	3 年	4 年	5 年
一 般 部 錆 評 価	1	エポキシ下塗/ウレタン上塗	1 0	1 0	1 0	9	9
	2	エポキシジック/エポ下塗/ウレタン上塗	1 0	1 0	1 0	1 0	1 0
	3	銀系錆止め/フタル酸上塗	9	9	6	5	4
	4	長びくエッチング/銀系錆止め/フタル酸上塗	7	7	6	4	2
	5	エポキシジック/塩化ゴム下塗・中塗・上塗	1 0	1 0	1 0	1 0	1 0
カ ッ ト 部 からの 錆/ふくれ 侵 入 幅	1	エポキシ下塗/ウレタン上塗	3～8mm	5～12mm	10～18mm	9～20mm	9～24mm
	2	エポキシジック/エポ下塗/ウレタン上塗	—	—	—	—	—
	3	銀系錆止め/フタル酸上塗	0 mm	0 mm	0 mm	0 mm	0 mm
	4	長びくエッチング/銀系錆止め/フタル酸上塗	—	—	—	—	—
	5	エポキシジック/塩化ゴム下塗・中塗・上塗	0.5mm>	0～1mm	2mm	1～2mm	2mm
光沢保持率 %	1	エポキシ下塗/ウレタン上塗	6 2	1 2	6	6	1 0
	2	エポキシジック/エポ下塗/ウレタン上塗	—	8	5	6	2 0
	3	銀系錆止め/フタル酸上塗	2 8	7	7	7	8
	4	長びくエッチング/銀系錆止め/フタル酸上塗	—	6	6	6	5
	5	エポキシジック/塩化ゴム下塗・中塗・上塗	4 4	9	5	5	4
測 定 項 目		塗 装 系		初期	1 年	3 年	5 年
水 蒸 気 透 過 係 数 g・cm/m ² ・24hrs・mmHg	1	エポキシ下塗/ウレタン上塗	1.1×10 ⁻³		2.2×10 ⁻³	1.3×10 ⁻³	1.9×10 ⁻³
	3	銀系錆止め/フタル酸上塗	8.8×10 ⁻³		6.5×10 ⁻³	6.4×10 ⁻³	測定不可
	6	塩化ゴム下塗・中塗・上塗	1.1×10 ⁻³		1.5×10 ⁻³	0.7×10 ⁻³	1.8×10 ⁻³
酸 素 透 過 係 数 ml・cm/cm ² ・sec・cmHg	1	エポキシ下塗/ウレタン上塗	7×10 ⁻¹²		6×10 ⁻¹²	12×10 ⁻¹²	13×10 ⁻¹²
	3	銀系錆止め/フタル酸上塗	95×10 ⁻¹²		66×10 ⁻¹²	13×10 ⁻¹¹	測定不可
	6	塩化ゴム下塗・中塗・上塗	11×10 ⁻¹²		9×10 ⁻¹²	13×10 ⁻¹²	11×10 ⁻¹²
インピーダンス変化 tan δ (0.2kHz)	1	エポキシ下塗/ウレタン上塗	0.120		0.142	0.438	0.14
	3	銀系錆止め/フタル酸上塗	1.29		2.41	2.55	2.50
	5	エポキシジック/塩化ゴム下塗・中塗・上塗	0.161		0.158	0.210	0.087
カレントインタラプタ 分極抵抗変化 Ω・cm	1	エポキシ下塗/ウレタン上塗	7.6×10 ⁸		4.4×10 ¹⁰	5.0×10 ⁷	8.6×10 ⁴
	3	銀系錆止め/フタル酸上塗	2.0×10 ⁵		2.4×10 ⁶	2.1×10 ⁶	1.0×10 ⁴
	5	エポキシジック/塩化ゴム下塗・中塗・上塗	1.0×10 ¹⁰		6.7×10 ⁹	7.6×10 ⁹	4.0×10 ⁷
コロージョンレート メーター カット部 電流値 (A/12.5cm ²)	1	エポキシ下塗/ウレタン上塗	1.5×10 ⁻⁵		4.7×10 ⁻⁵	3.9×10 ⁻⁴	3.0×10 ⁻³
	3	銀系錆止め/フタル酸上塗	1.9×10 ⁻⁵		3.4×10 ⁻⁵	2.9×10 ⁻⁵	1.9×10 ⁻⁴
	5	エポキシジック/塩化ゴム下塗・中塗・上塗	4.8×10 ⁻⁷		4.3×10 ⁻⁶	1.6×10 ⁻⁵	2.0×10 ⁻⁵

4. 3 新設塗装システムの研究

4. 3. 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なう。

4. 3. 2 計 画

(1) 供試塗装系

現行長期防錆塗装システム（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. 3. 1 および表-4. 3. 2 に示した。

(2) 暴露場所

試験片は施設の第1デッキ（海上13.9m）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. 3. 3 に示した。

表-4. 3. 3 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)
経 過 年 数	初期	1 年	2 年	3 年	4 年	5 年	6 年
調 査 項 目							
外 観 観 察	○	○	○	○	○	○	○
光 沢	○	○	○	○	○	○	○
顕微鏡観察							
インピーダンス							

調 査 年 度	平成3 (1991)	平成4 (1992)	平成5 (1993)	平成6 (1994)
経 過 年 数	7 年	8 年	9 年	10年
調 査 項 目				
外 観 観 察	○	○	○	○
光 沢	○	○	○	○
顕微鏡観察				○
インピーダンス				○

表-4. 3. 1 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)	鉛系錆止めペイント (35 μ m)	鉛系錆止めペイント (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)	鉛系錆止めペイント (35 μ m)	鉛系錆止めペイント (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	厚膜型無機ジंकリッ チペイント (75 μ m)	ミストコート (- μ m)	フェーノールジं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	厚膜型無機ジंकリッ チペイント (75 μ m)	ミストコート (- 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)	
7	厚膜型無機ジंकリッ チペイント (75 μ m)	ミストコート (- 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)	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	厚膜型無機ジंकリッ チペイント (75 μ m)	ミストコート (- μ m)	厚膜型ビニル樹脂 塗料 (150 μ m)	ビニル樹脂塗料 上塗 (30 μ m)			
9	厚膜型エポキシジंक リッチペイント(75 μ m)	ガラスフレークポリ エステル (350 μ m)	ガラスフレークポリ エステル (350 μ m)	ふっ素樹脂塗料 (20 μ m)	ふっ素樹脂塗料 (20 μ m)		

表-4. 3. 2 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)	超厚膜型エポキシ樹脂 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	無機ジンクリッチ プライマー (15 μ m)	厚膜型無機ジンクリッチ 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)	鉛系錆止めペイント (35 μ m)	鉛系錆止めペイント (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	無溶剤タールウレタン (2000 μ m)	ポリウレタン樹脂塗料 上塗 (30 μ m)				
7	ポリエステルガラスフ レークプライマー(40 μ m)	ポリエステルガラス フレーク塗料 (350 μ m)	ポリエステルガラス 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	超厚膜エポキシ樹脂塗料 (750 μ m)	超厚膜エポキシ樹脂 塗料 (750 μ m)				
10	無溶剤エポキシ樹脂塗料 (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	厚膜型無機ジンクリッチ ペイント (75 μ m)	ミストコート (- μ m)	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)	鉛系錆止めペイント (35 μ m)	鉛系錆止めペイント (35 μ m)	フェノールMIO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)	超厚膜型ポリウレタン 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)	厚膜型鉛系錆止め ペイント (50 μ m)	厚膜型鉛系錆止め 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	エポキシ樹脂ジンク 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) 評価方法

- 1) 外 観 観 察 : 錆、ふくれ、われ、変色、白亜化を目視観察し、その劣化の程度を10段階で評価した。
- 2) 光 沢 : 60度鏡面光沢値
- 3) 顕微鏡観察 : 電子顕微鏡による表面観察(試験片を45度傾け3000倍で撮影、加速電圧25kV)。
- 4) インピーダンス : 試験片を3%食塩水に室温で2時間浸漬後、LCR計(YHP 4274A MULTI FREQUENCY LCR METER)を用いて測定。なお、波高値は10mVとした。

4. 3. 3 結果

系統Aの外観観察および光沢の測定結果を表-4.3.4および図-4.3.1~4.3.2に示した。系統Bの外観観察および光沢の測定結果を表-4.3.7および図-4.3.9に示した。また、顕微鏡観察の結果を図-4.3.6に、インピーダンスの測定結果を表-4.3.6と表-4.3.10~4.3.11に示した。

4. 3. 4 結果の概要

(1) 防食性

1) 現行長期防錆塗装システム

現行長期防錆塗装システムでは、仕様No. A-6(無機ジンクリッチペイント/エポキシ樹脂/ポリウレタン樹脂塗料)のような長期耐久性塗装はもとより、仕様No. A-1(鉛系さび止めペイント/フタル酸樹脂塗料)のような一般環境に使用される塗装仕様も海上環境暴露10年間でふくれ、さびなどの防錆上の劣化は見られていない。また、インピーダンスについては1KHzにおける $\tan \delta$ の値は小さく、暴露10年ではいずれの塗装系も健全な状態にある。

2) 開発中の塗装システム

開発中の塗装システム18種の内、ふくれやさび等防錆上の劣化が認められなかった塗装系は、
B-1(エポキシ樹脂プライマー/超厚膜型エポキシ樹脂塗料/ポリウレタン樹脂塗料)
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/厚膜型無機ジンクリッチ塗料/シリコン樹脂塗料)
B-5(長暴エッチングプライマー/鉛系錆止め塗料/シリコンアルキド樹脂塗料)
B-7(ポリエステル樹脂プライマー/ポリエステルガラスフレーク塗料)
B-8(エポキシ樹脂ガラスフレーク塗料)、
B-9(超厚膜型エポキシ樹脂塗料)、
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(厚膜型無機ジンクリッチ塗料/ミスト/ふっ素樹脂塗料用プライマー/ふっ素樹脂塗料)
B-14(ポリウレタン樹脂プライマー/超厚膜型ポリウレタン樹脂塗料)、
B-16(エポキシ樹脂プライマー/ふっ素樹脂塗料)、
B-17(長暴エッチングプライマー/厚膜型鉛系錆止め塗料/ポリエステル樹脂塗料)の13種である。

防錆上の劣化が認められた塗装系としては、

B-13 (鉛系錆止め塗料/フェノールMIO塗料/ふっ素樹脂塗料)は4年目からふくれが発生。

B-15 (亜鉛めっき/エポキシ樹脂プライマー/ふっ素樹脂塗料)は5年目からふくれが発生。

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。

B-10 (無溶剤エポキシ樹脂塗料)は試験片のエッジ部より錆発生が認められた。

B-6 (無溶剤タールウレタン塗料/ポリウレタン樹脂塗料)ははがれが認められた。

また、インピーダンス測定に関し1KHzにおける $\tan \delta$ の値は

B-4 (無機ジンクリッチプライマー/厚膜型無機ジンクリッチ塗料/シリコン樹脂塗料)を除きいずれも小さく、暴露10年では健全な状態にある。B-4の塗装系は導電性のあるジンクリッチプライマーとジンクリッチペイントを除く塗料の膜厚が他の塗装系に比べて小さいため、初期から塗膜抵抗が小さくなっていた事が予想される。

(2) 耐候性

系統Aの光沢・白亜化の結果を表-4.3.4および4.3.5に、系統Bの結果を表-4.3.7~4.3.9に示した。

上塗り塗料に用いた樹脂系はふっ素、シリコンアルキド、シリコン、ウレタン、フタル酸、塩化ゴム等であり、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、13、15、16)は10年経過後も白亜化は全く生じておらず、光沢保持率の低下も少なかった。

シリコン樹脂塗料(仕様No. B-4)はふっ素樹脂系より劣るものの白亜化は殆ど生じておらず、また光沢に関しては初期光沢値は28と低いものの光沢保持率は暴露10年で60%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、塩化ゴム樹脂系等の塗料は2年以内に光沢保持率が10%以下になった。

10年間暴露した塗膜の表面を電子顕微鏡で観察すると、フタル酸、塩化ゴム、シリコンアルキド、ウレタン樹脂塗料は粗面化が著しく樹脂劣化に伴う粉化も認められた。またフタル酸樹脂塗料は数 μ の巣穴とひび割れが観察された。ふっ素樹脂塗料は1 μ 以下の巣穴は認められるものの上記の塗料の比べ粗面化の程度は小さかった。また、ポリエステルガラスフレーク塗料/ふっ素樹脂塗料はエポキシ樹脂塗料/ふっ素樹脂塗料やフェノールMIO塗料/ふっ素樹脂塗料に比べて巣穴が大きくなった。一方、シリコン樹脂塗料は他の塗料に比べて粗面化の程度は小さいもののひびわれが観察された。

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及び耐白亜化性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事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上に架設した場合、10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実用レベルの品質であると考えられる。

— 33 —

データ欄の “ - ” は、回収済みのもの

— 34 —

データ欄の“-”は、回収済みのもの

表4. 3. 6 現行長期防錆塗装システム（系統A）の調査結果（その3）

インピーダンス測定（駿河湾暴露10年）

NO.	試験片NO.	塗膜異常	0.2KHZ			0.4KHZ			1 KHZ		
			R(Ω)	C(F)	tanD	R(Ω)	C(F)	tanD	R(Ω)	C(F)	tanD
A-1	84-B103-5		2.0×10^7	4.9×10^{-10}	0.082	1.5×10^7	4.8×10^{-10}	0.060	6.2×10^6	4.7×10^{-10}	0.054
A-2	84-B203-5		1.4×10^7	4.8×10^{-10}	0.099	8.4×10^6	4.6×10^{-10}	0.108	3.9×10^6	4.3×10^{-10}	0.094
A-3	84-B303-5		1.6×10^7	3.2×10^{-10}	0.151	1.1×10^7	3.1×10^{-10}	0.126	5.3×10^6	2.9×10^{-10}	0.106
A-4	84-B403-5		2.3×10^7	3.3×10^{-10}	0.108	1.3×10^6	3.1×10^{-10}	0.093	6.4×10^6	2.9×10^{-10}	0.081
A-5	84-B503-5		3.2×10^7	3.0×10^{-10}	0.081	2.0×10^7	2.9×10^{-10}	0.074	9.1×10^6	2.8×10^{-10}	0.065
A-6	84-B603-5		2.9×10^7	2.8×10^{-10}	0.098	1.6×10^7	2.7×10^{-10}	0.077	8.5×10^6	2.6×10^{-10}	0.075
A-7	84-B703-5		3.2×10^7	2.3×10^{-10}	0.108	2.5×10^7	2.3×10^{-10}	0.069	1.1×10^7	2.1×10^{-10}	0.066
A-8	84-B803-5		1.4×10^7	4.1×10^{-10}	0.119	9.9×10^6	4.0×10^{-10}	0.105	4.7×10^7	3.7×10^{-10}	0.089
A-9	84-B903-5		3.3×10^8	1.1×10^{-11}	0.220	8.0×10^7	1.3×10^{-11}	0.040	3.3×10^7	1.2×10^{-11}	0.040

*) 3%食塩水浸漬（浸漬面積9.1cm²）

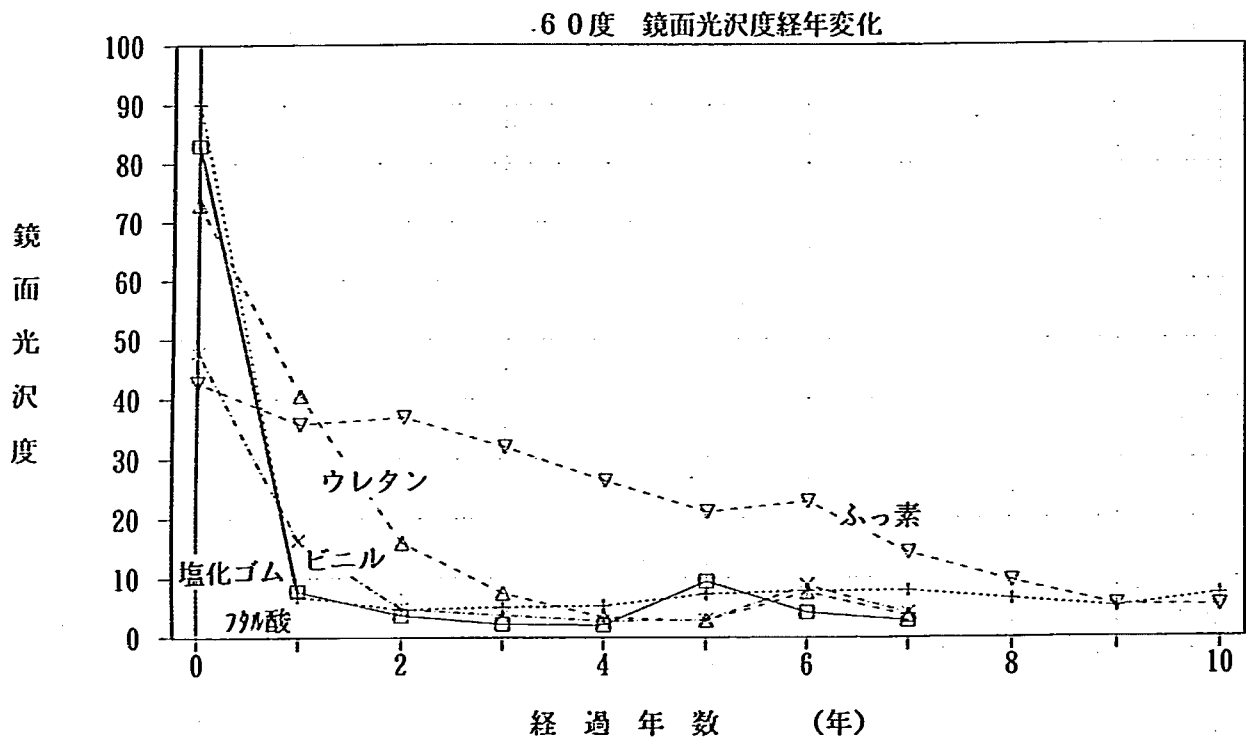
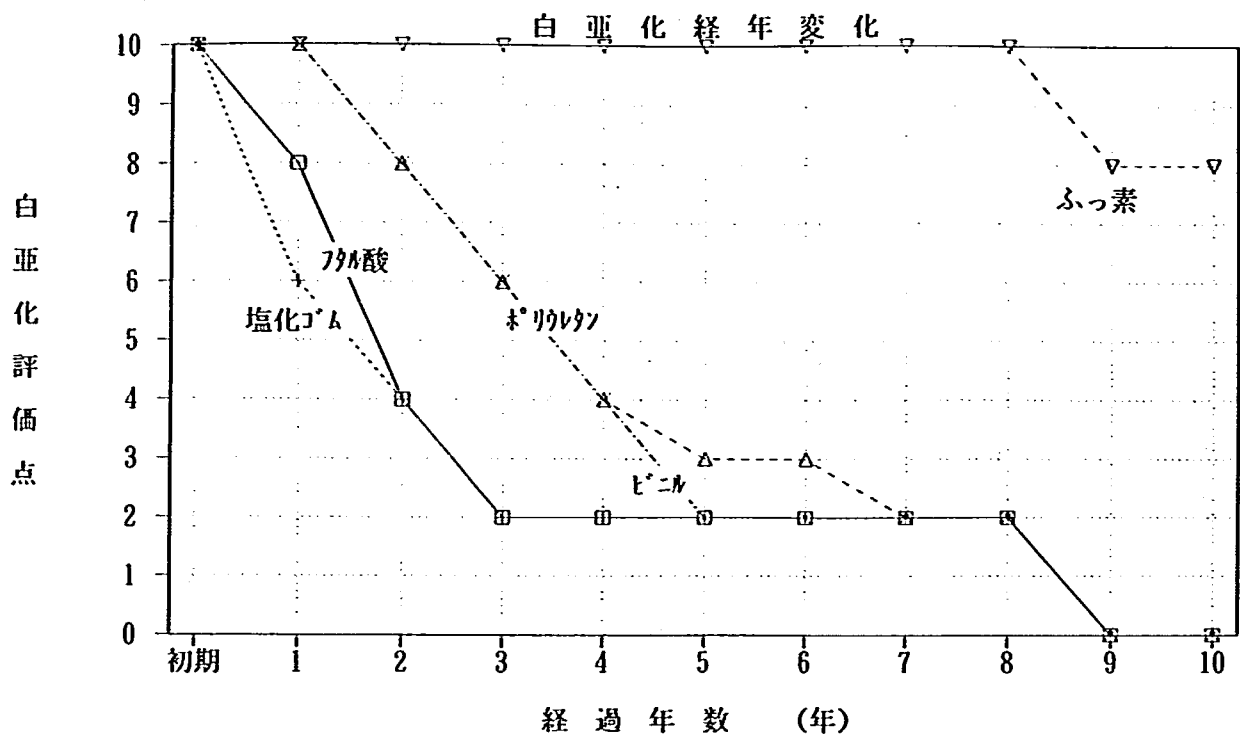
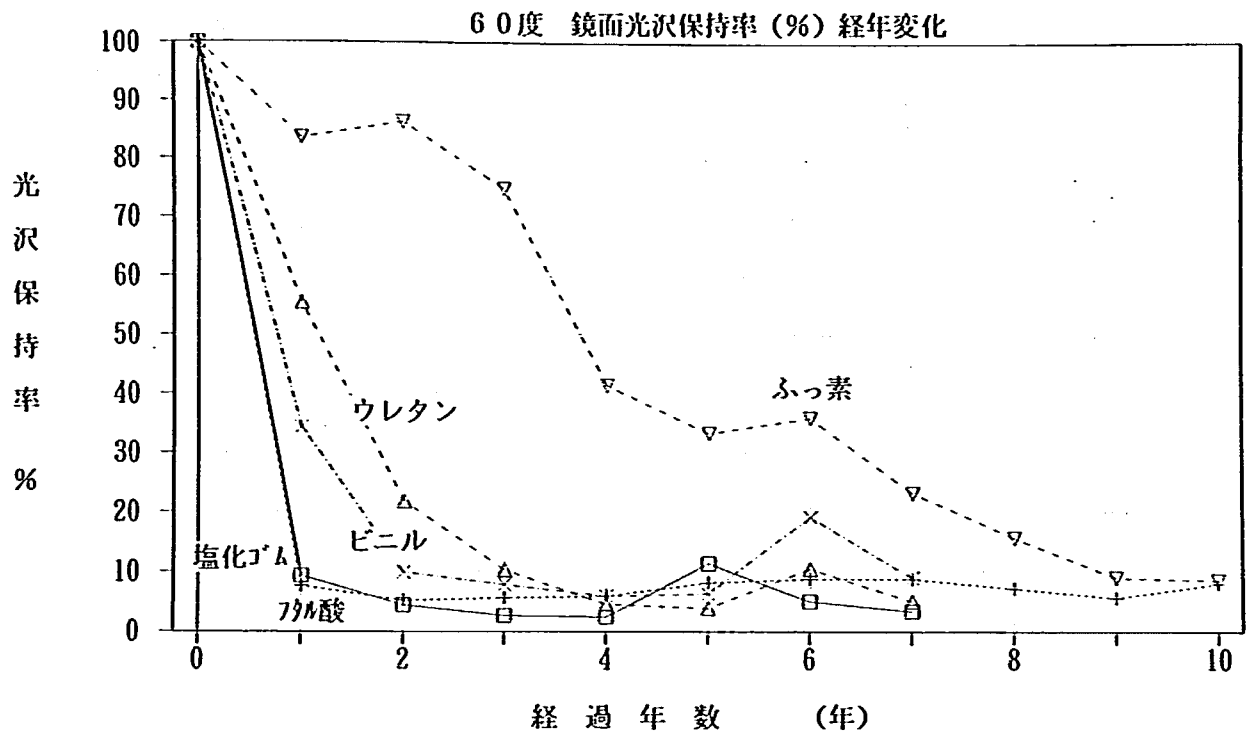


図4. 3. 1 現行長期防錆塗装システムの経年変化（白亜化、光沢度）
 上塗り塗料は共通なので、□；A-1フタル酸、+；A-3塩化ゴム、
 △；A-6ポリウレタン、×；A-8ビニル、▽；A-9ふっ素を代表とした。



凡 例 (塗装仕様)	
□ ; A-1	鉛系錆止め/フタル酸
+ ; A-3	無機ジンクショッププライマー/塩化ゴム系
△ ; A-6	厚膜無機ジンク/エポキシ下塗/ポリウレタン
× ; A-8	厚膜無機ジンク/ビニル系
▽ ; A-9	厚膜無機ジンク/ポリエステルGF/ふっ素

図4. 3. 2 現行長期防錆塗装システムの経年変化(60度光沢保持率)
 上塗り塗料は共通なので、□ ; A-1 フタル酸、+ ; A-3 塩化ゴム、
 △ ; A-6 ポリウレタン、× ; A-8 ビニル、▽ ; A-9 ふっ素を代表とした。

— 38 —

データ欄の“-”は、回収済みのもの

— 39 —

データ欄の“-”は、回収済みのもの

(注1) マーキング部と一般部の膜厚差が認められる。エッジよりさび、ふくれ

表 4.3.9 開発中の塗装システム（系統B）の調査結果（その3）

[illegible]

データ欄の“-”は、回収済みのもの

(注2) C168が4年目よりエッジにふくれあり。

表4: 3.10 開発中の塗装システム（系統B）の調査結果（その4）

インピーダンス測定（駿河湾暴露10年）

NO.	試験片NO.	塗膜異常	0.2KHZ			0.4KHZ			1 KHZ		
			R(Ω)	C(F)	t a n D	R(Ω)	C(F)	t a n D	R(Ω)	C(F)	t a n D
B-1	84-C103-5		3.8×10^8	1.5×10^{-11}	0.140	2.0×10^8	2.2×10^{-11}	0.090	7.3×10^7	2.3×10^{-11}	0.094
B-2	84-C108-5		1.0×10^8	3.4×10^{-11}	0.130	7.2×10^7	4.8×10^{-11}	0.114	4.4×10^7	4.3×10^{-11}	0.085
B-3	84-C113-5		4.4×10^8	6.0×10^{-12}	0.300	7.1×10^8	6.2×10^{-12}	0.090	4.8×10^8	6.7×10^{-12}	0.050
B-4	84-C118-5		2.7×10^5	4.4×10^{-9}	0.690	1.9×10^5	3.6×10^{-9}	0.593	1.1×10^5	2.8×10^{-9}	0.503
B-5	84-C123-5		2.6×10^7	3.5×10^{-10}	0.086	1.5×10^7	3.4×10^{-10}	0.075	6.9×10^6	3.3×10^{-10}	0.069
B-6	84-C128-5	上塗なし	4.0×10^8	5.0×10^{-12}	0.400	3.0×10^8	6.3×10^{-12}	0.210	—	6.6×10^{-12}	0.010
B-7	84-C133-5		6.0×10^7	8.8×10^{-11}	0.151	4.2×10^7	8.3×10^{-11}	0.112	2.7×10^7	8.0×10^{-11}	0.075
B-8	84-C138-5		2.1×10^8	1.6×10^{-11}	0.240	2.2×10^8	1.1×10^{-11}	0.160	3.3×10^8	1.3×10^{-11}	0.040
B-9	84-C143-5		1.4×10^8	7.0×10^{-11}	0.080	8.4×10^7	6.9×10^{-11}	0.068	4.8×10^7	6.8×10^{-11}	0.050

*) 3%食塩水浸漬（浸漬面積9.1cm²）

表4. 3. 1 1 開発中の塗装システム（系統B）の調査結果（その5）

インピーダンス測定（駿河湾暴露10年）

NO.	試験片NO.	塗膜異常	0.2KHZ			0.4KHZ			1 KHZ		
			R(Ω)	C(F)	t a n D	R(Ω)	C(F)	t a n D	R(Ω)	C(F)	t a n D
B-10	84-C148-5	鋼板の腐食	—	—	—	—	—	—	—	—	—
B-11	84-C153-5		4.7×10^7	2.9×10^{-10}	0.059	3.0×10^7	2.8×10^{-11}	0.046	1.4×10^7	2.8×10^{-10}	0.039
B-12	84-C158-5		3.1×10^7	2.2×10^{-10}	0.116	1.8×10^7	2.1×10^{-11}	0.096	9.6×10^6	2.0×10^{-10}	0.080
B-13	84-C163-5		2.4×10^7	2.5×10^{-10}	0.131	1.4×10^7	2.4×10^{-10}	0.114	6.8×10^6	2.2×10^{-10}	0.102
B-14	84-C168-5	鋼板の腐食	—	—	—	—	—	—	—	—	—
B-15	84-C173-5		1.9×10^7	4.6×10^{-10}	0.093	1.1×10^7	4.4×10^{-10}	0.084	4.8×10^6	4.2×10^{-10}	0.079
B-16	84-C178-5		1.7×10^7	5.4×10^{-10}	0.083	1.0×10^7	5.2×10^{-10}	0.075	4.8×10^6	5.0×10^{-10}	0.063
B-17	84-C183-5		2.2×10^7	4.1×10^{-10}	0.086	1.2×10^7	4.0×10^{-10}	0.082	4.9×10^6	3.8×10^{-10}	0.083
B-18	84-C188-5		3.1×10^7	3.2×10^{-10}	0.082	1.8×10^7	3.1×10^{-10}	0.069	8.4×10^6	3.0×10^{-10}	0.063

*) 3%食塩水浸漬（浸漬面積9.1cm²）

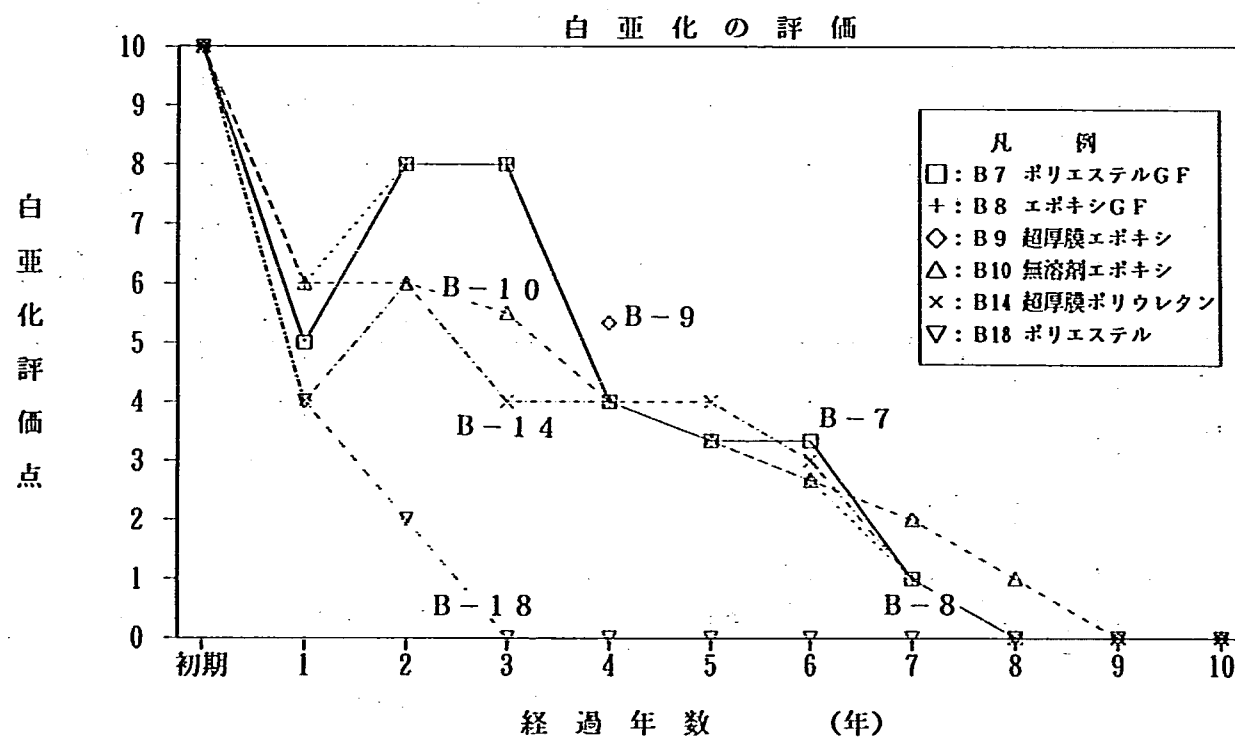
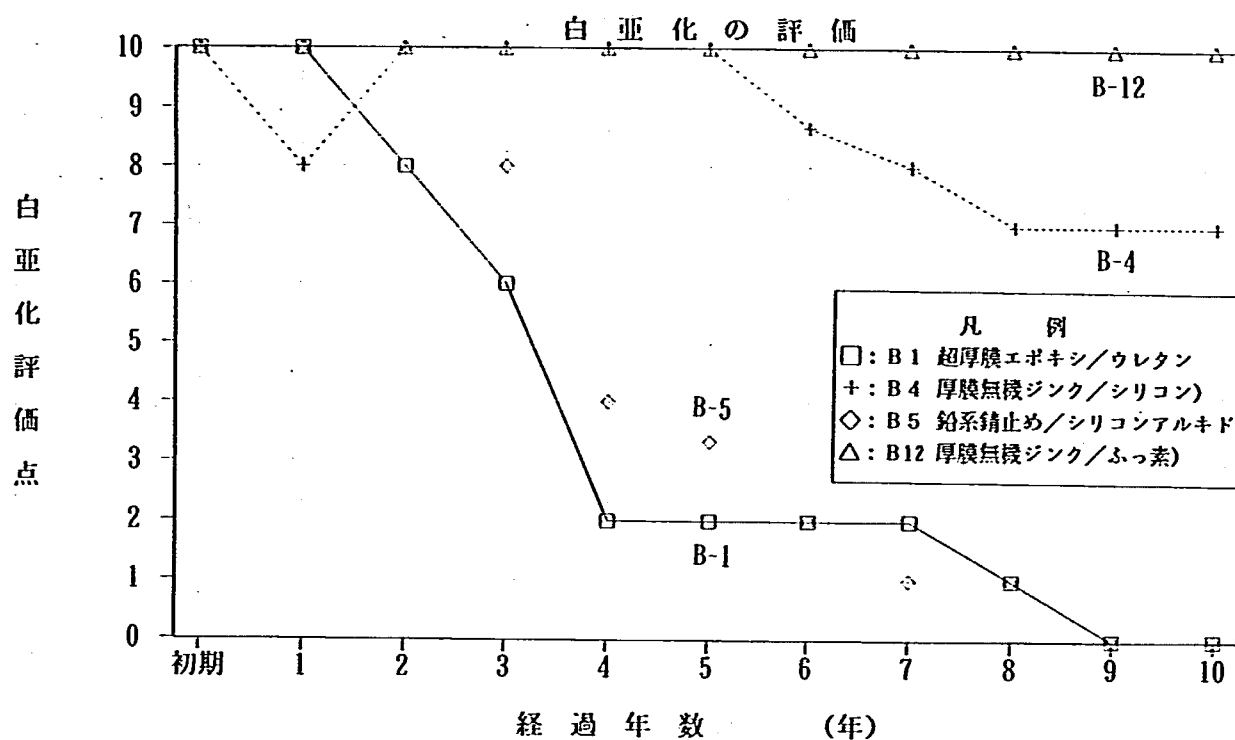


図 4. 3. 3 開発中の塗装システムの経年変化 (白亜化)

注) 上塗りは共通なので上記10試料を代表とした。

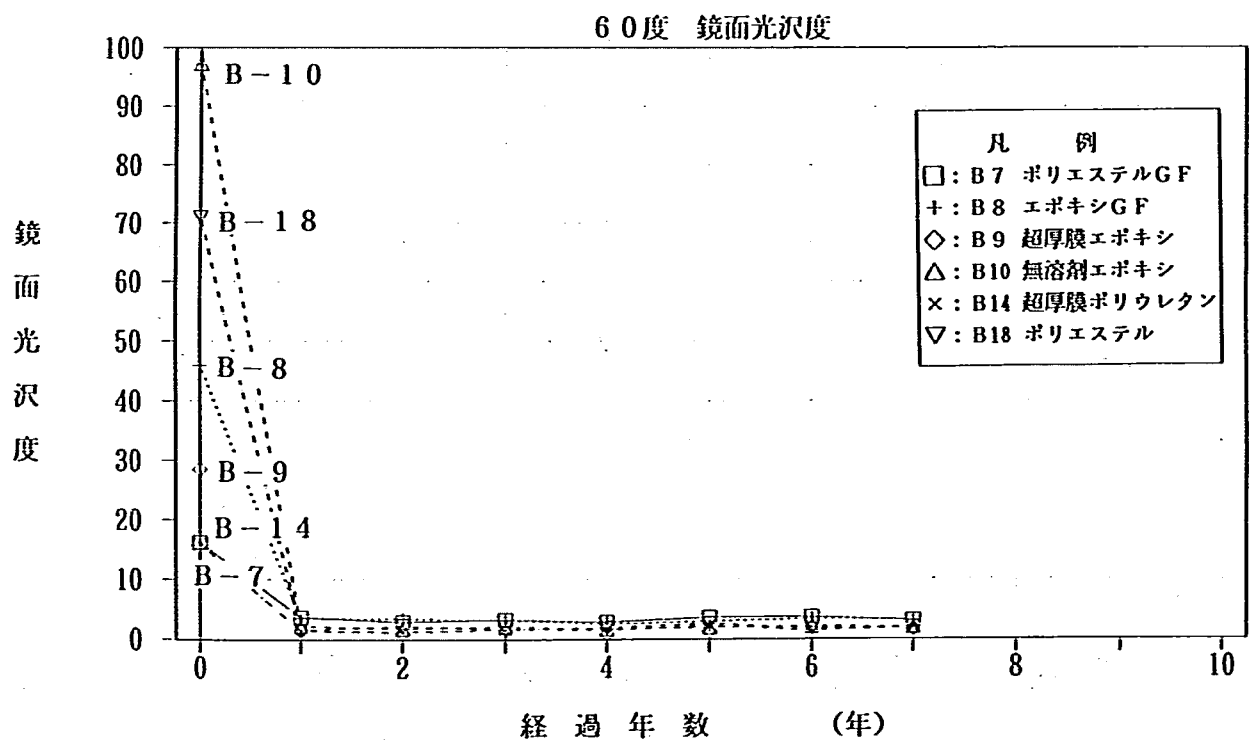
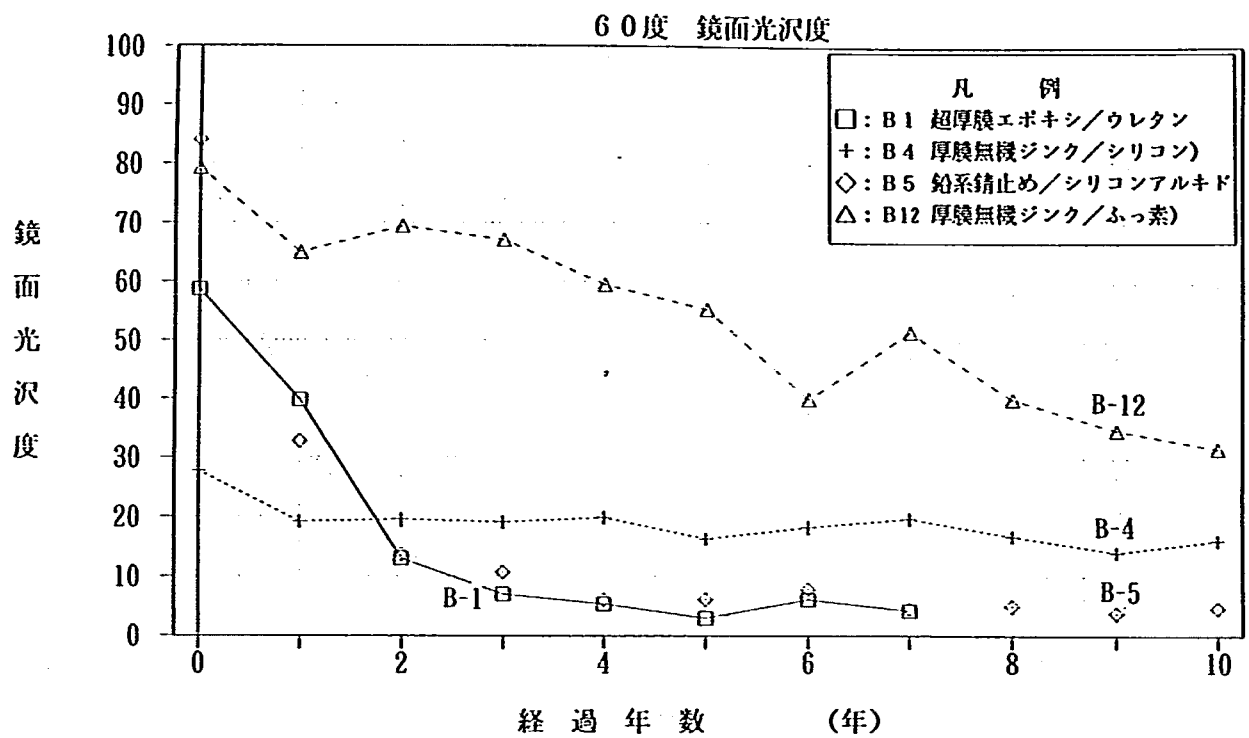


図4. 3. 4 開発中の塗装システムの経年変化(60度光沢度)

注) 上塗りは共通なので上記10試料を代表とした。

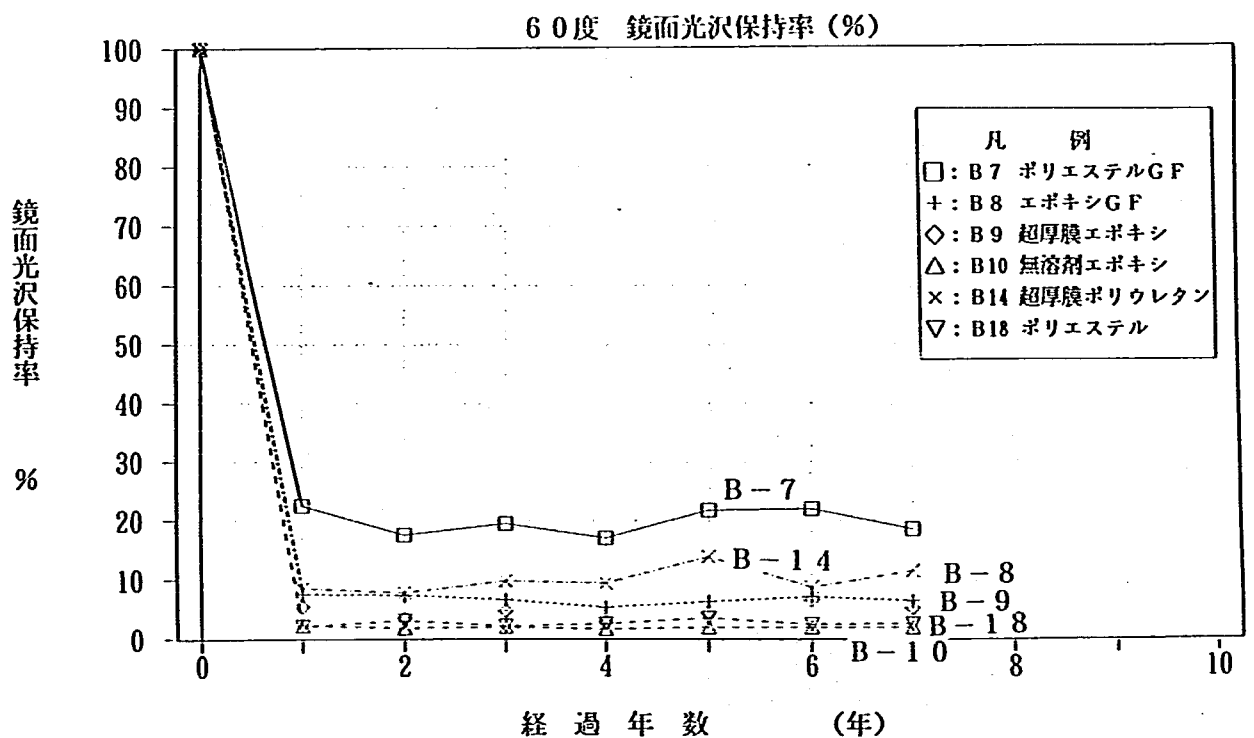
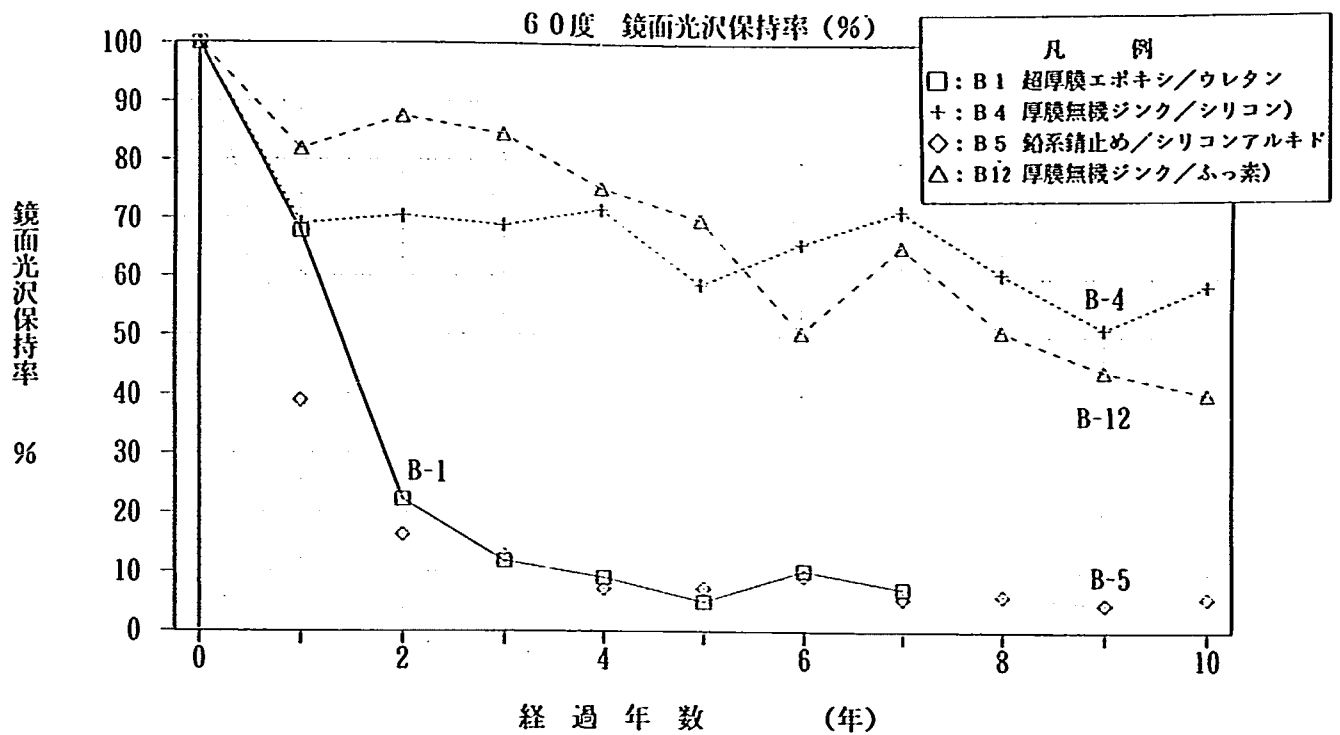


図4.3.5 開発中の塗装システムの経年変化(60度光沢保持率)

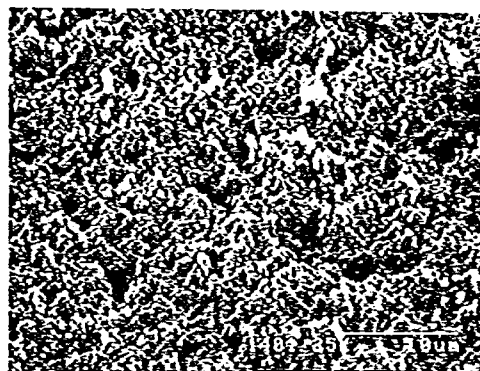
注) 上塗りは共通なので上記10試料を代表とした。

図4. 3. 6 新設塗装システム10年暴露試験後の塗膜表面観察

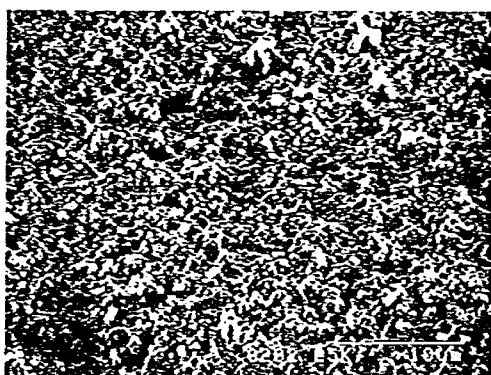
アルキド系上塗 (A-1)



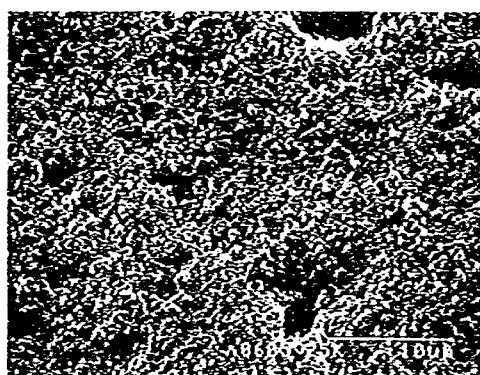
シリコンアルキド系上塗 (B-5)



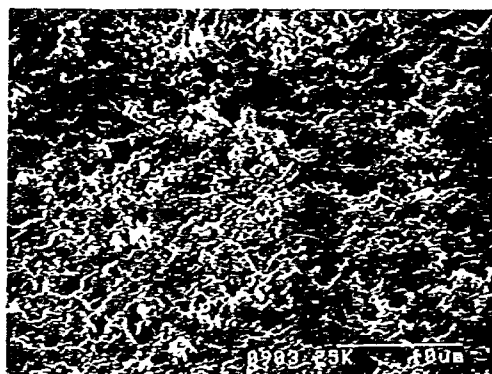
塩化ゴム系上塗 (A-2)



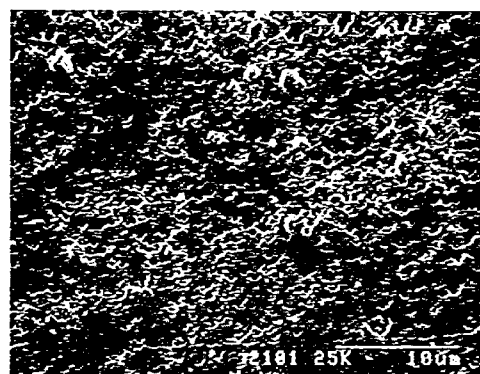
ウレタン系上塗 (A-6)



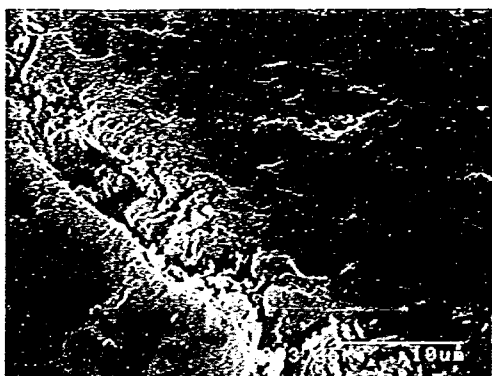
ふっ素系上塗：ポリエステルガラスフレーク下塗 (A-9)



ふっ素系上塗：エポキシ系下塗 (B-12)



シリコン系上塗 (B-4)



4. 4 塗替え塗装システムの研究

4. 4. 1 目 的

海洋構造物を半永久的に使用するためには、塗替え塗装の技術が必要である。海上での塗替え塗装においては施工環境が悪いので、防錆性はもちろん施工性も良くなければならない。そのため、適性かつ効果的な塗替え塗装システムを開発する。

4. 4. 2 計 画

発錆度が異なる試験片を作製し、この上に塗替えを行い再暴露して発錆度の違いが塗替え塗膜の耐久性に及ぼす影響を調査する。取上げた因子と水準を表-4. 4. 1 に示した。

調査項目と調査時期は塗替え後の暴露経過年数ごとに、一般部と塗残し部の錆、ふくれおよび塗残し部からの錆の侵入幅を調査することとした。錆の侵入幅は次式にて算出した。

$$\text{錆侵入幅} = (\text{錆の幅} - \text{塗残し部の1辺の長さ}) / 2$$

表-4. 4. 1 塗替えシステムの研究の実験因子と水準

実 験 因 子	実 験 水 準
A. 下地の発錆度	I エポキシ樹脂塗料20 μ mで1年間暴露し発生させる
	II エポキシ樹脂塗料40 μ mで1年間暴露し発生させる
	III エポキシ樹脂塗料60 μ mで1年間暴露し発生させる (IIIは試験片の一部に塗に残し部を設ける)
B. 下地処理程度	I ワイヤブラシ掛け
	II 水洗のみ
C. 塗替え塗装システム	I 鉛系錆止めペイント 30 μ m
	II 鉛系錆止めペイント 60 μ m
	III 変性エポキシ樹脂塗料 30 μ m
	IV 変性エポキシ樹脂塗料 60 μ m
	V エポキシ樹脂塗料 30 μ m
	VI エポキシ樹脂塗料 60 μ m

4. 4. 3 結果の概要

発錆頻度の異なる試験片に塗替え塗装を行い、再暴露した試験片の塗替え後4年間の変化を表-4. 4. 2 に示した。塗替え塗装後再暴露4年のデータを検討した要因について四元配置の分散分析を行い、各要因が塗替えに及ぼす影響について検討した。分散分析の結果を図-4. 4. 1～図-4. 4. 3 に示した。

(1) 塗替え時の発錆率（初期塗装膜厚）の影響

膜厚を薄く(20 μ m)塗装して暴露した水準は発錆率が高く、その上に補修しても再暴露によって錆が出やすい傾向が認められた。初期塗装時に膜厚を十分に塗装し発錆率が低い状態で補修塗装すると、補修

後の錆を抑制できる傾向が認められた。

(2) 塗替え塗料間の差

エポキシ樹脂塗料が良好である傾向が認められた。

(3) 下地処理の差

今回の試験ではワイヤーブラシ掛けと水洗の有意差は認められなかった。両者とも十分に試験板の付着塩分等を除去できていたものと考えられる。

(4) 塗替え塗装膜厚の差

60 μm の水準が良好である傾向を示した。

4. 4. 4 まとめ

今回の塗替え塗装システムの研究から、海洋構造物を補修する際のポイントをまとめた。

- ・発錆率が低い早期に補修することで、補修後の防食性が長期に維持できる。
- ・塗替え塗料はエポキシ樹脂塗料が耐久性の観点から推奨できる。
- ・塗替えはできるだけ厚く塗装すること。
- ・ワイヤーブラシや水洗により付着塩分等を除去すること。

【塗替え塗装システムの研究暴露試験結果の分散分析】

要因 A : 初期塗装膜厚 (a_1 ; 20 μm a_2 ; 40 μm a_3 ; 60 μm)

B : 塗替え塗料種 (b_1 ; エポキシ樹脂塗料 b_2 ; 変性エポキシ樹脂塗料 b_3 ; 鉛系錆止め塗料)

C : 下 地 処 理 (c_1 ; ワイヤーブラシ掛け c_2 ; 水洗)

D : 補修塗装膜厚 (d_1 ; 30 μm d_2 ; 60 μm)

要 因	S	ϕ	V	F_o	F_o'	
A	7.72	2	3.86	7.32*	6.4 **	母平均の推定: $a_1 = 7.8 \pm 0.5$ $a_2 = 8.1 \pm 0.5$ $a_3 = 8.9 \pm 0.5$ $b_1 = 9.0 \pm 0.5$ $b_2 = 7.5 \pm 0.5$ $b_3 = 8.3 \pm 0.5$ $d_1 = 7.6 \pm 0.4$ $d_2 = 9.0 \pm 0.4$
B	13.6	2	6.78	12.84*	11.3 **	
C	0.44	1	0.44	0.84		
D	18.8	1	18.8	35.6**		
A×B	14.4	4	3.61	6.84*	6.0 *	
B×C	0.89	2	0.44	0.84		
A×C	0.44	2	0.03	0.05		
A×D	11.1	2	5.53	10.5 *	9.2 **	
B×D	0.22	2	0.11	0.21		
C×D	0.44	1	0.44	0.84	(** ; 99%有意)	
E	2.11	4	0.53		$V_E' = 0.6$ $\phi_E' = 16$	

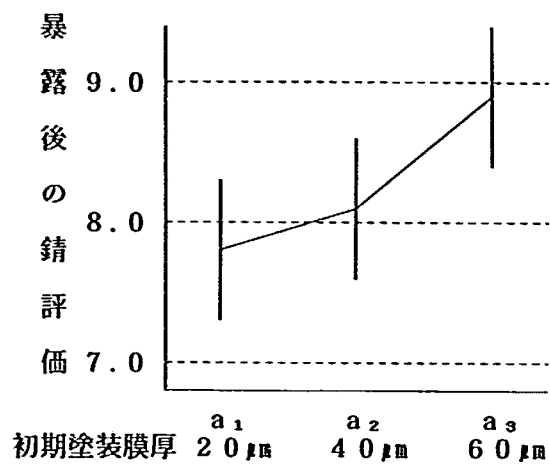


図-4.4.1 初期塗装膜厚の差

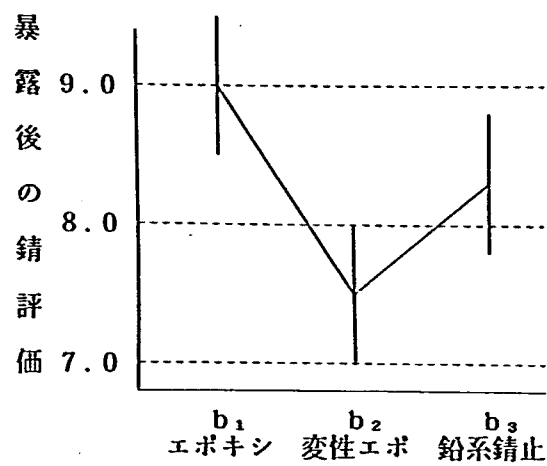


図-4.4.2 補修塗料間の差

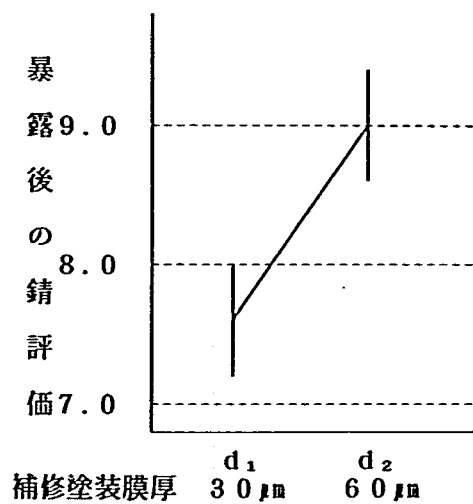


図-4.4.3 塗替え塗装膜厚の差

表-4. 4. 2 塗替え塗装システムの研究暴露試験結果

初期の 塗 装 膜	塗替え前 の発錆率	塗 替 え 塗 装 仕 様			塗替え1年後		塗替え3年後の状態			塗替え4年後の状態		
		塗 料	前処理	膜厚 μm	一般部 錆	塗残し 部錆	一般部 錆	塗残し 部錆	錆侵入 幅	一般部 錆	塗残し 部錆	錆侵入 幅
エポキシ 樹脂塗料 20μm	点錆及び ニジミ錆 10~20%	エポキシ 樹脂塗料	ブラシ	30	1 0		8			8		
			水 洗		1・0		6			8		
			ブラシ	60	1 0		1 0			1 0		
			水 洗		1 0		1 0			1 0		
		変性 エポキシ 樹脂塗料	ブラシ	30	1 0		5			4		
			水 洗		1 0		5			4		
			ブラシ	60	1 0		9			8		
			水 洗		1 0		9			8		
エポキシ 樹脂塗料 40μm	点錆及び ニジミ錆 0.1~1.0 %	エポキシ 樹脂塗料	ブラシ	30	3 ケ		8			8		
			水 洗		1 0		8			6		
			ブラシ	60	1 0		9			8		
			水 洗		1 0		1 0			1 0		
		変性 エポキシ 樹脂塗料	ブラシ	30	2 ケ		8			8		
			水 洗		1 0		8			8		
			ブラシ	60	1 0		8			8		
			水 洗		1 0		9			8		
エポキシ 樹脂塗料 60μm	一般部は 良 好 発 錆 率 0.03% 以下	エポキシ 樹脂塗料	ブラシ	30	1 0	2	1 0	0	8	1 0	0	1 0
			水 洗		1 0	2	1 0	0	10<	1 0	0	1 0
			ブラシ	60	1 0	1 0	1 0	4	4	1 0	4	1 8
			水 洗		1 0	8	1 0	0	18	1 0	0	2 5
		変性 エポキシ 樹脂塗料	ブラシ	30	1 0	4	8	0	10	8	0	1 2
			水 洗		1 0	2	9	0	5	8	0	1 0
			ブラシ	60	1 0	8	1 0	0	3	9	3	7
			水 洗		1 0	8	1 0	0	8	9	0	1 4
		鉛系錆止 め塗料	ブラシ	30	1 0	4	9	2	0	8	0	2
			水 洗		1 0	2	8	0	1	8	0	4
			ブラシ	60	1 0	6	1 0	4	0	8	4	0
			水 洗		1 0	4	1 0	0	0	9	0	4

4. 5 施設本体の塗装

4. 5. 1 目 的

施設本体の鋼材表面を利用して、長期防錆塗装システムの耐久性の検証試験を行う。

4. 5. 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。試験塗装に供した塗装システムを表-4.5.2に、またこれまでに実施した調査項目と今後10年間の予定を表-4.5.1に示した。

(1) 調査項目と調査時期

初期から10年経過後まで、および11年後から20年経過後までを次に示す。

表-4.5.1 調査項目と調査時期

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
調 査 項 目	膜厚	○					○					○
	光沢	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
	外観観察	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
	イビ-ダックス ¹⁾	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
	付着力 ^{1) 2)}	○					○					○
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	
経 過 年 数		11年	12年	13年	14年	15年	16年	17年	18年	19年	20年	
調 査 項 目	膜厚					○					○	
	光沢	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	
	外観観察	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	
	イビ-ダックス ¹⁾	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	
	付着力 ^{1) 2)}					○					○	

1)施設本体と同時に塗装した試験片を用いて測定した。

2)経時測定の付着力は5年おきに測定。

(2) 調査内容

- 1) 光沢：60度鏡面光沢値。水をしめらせたウェスで水洗後30分して測定した。
- 2) 外観観察：さび、ふくれ、われ、変色、白亜化等を目視観察した。
- 3) イペーダス：3%食塩水に溶解したCMCをアルミ箔に塗付し、それを試験片につけ、90分後に測定した。
測定面積は10cm×10cmで、実測値とした。
- 4) 付着力：アドヒージョンテスト。

4. 5. 3 結果

施設本体の10ヶ年経過後の調査結果の概要を以下に示す。また、調査結果を表－4. 5. 3～4. 5. 6および図－4. 5. 1～4. 5. 5に示した。

4. 5. 4 結果の概要

(1) 外観観察

- 1) ジンクリッチ系塗料を下塗とした塗装系の仕様No. A、D、H、I、J、B、C、L、M、Nは10年間経過後も、一般部、エッジ部ともに錆が認められず、防錆効果が大きいことが確認された。
- 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程度の塗装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）にほぼ全面に錆、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。ここで使用される塗装系では、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。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) 仕様A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) 仕様IとDはそれぞれ仕様No. <本州四国連絡橋公団塗装系No. 5 (1)に同じ>を標準として、工数（塗り回数）の低減と、ビニル系塗料に補修性を要求した仕様に対応している。両仕様とも暴露10年経過しても大きな欠陥はなく、良好な防錆性を有している。5年目以降の調査結果に引き続き塗装系の工数低減の可能性を示唆するデータが得られたと考えられる。
- 5) 超厚膜型エポキシ樹脂塗料を用いた仕様Jは、仕様Hを標準としエッジ部、添接部など特殊部向け仕様に対応し、より腐食しやすい部位での使用が期待される。今回の調査では点錆が発生していたが、これは塗膜表面の凹凸が大きく、膜厚が均一になったためであると考えられ、これらの塗装においては、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仕様Fと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10年経過しても大きく成長していない。仕様Fは点錆が認められた。本仕様はプ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、欠陥を生じたものと推定される。

また、仕様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

各仕様ごとに東西南北について経時で測定を行った。10年経過後でも方角による差は明確には現れていない。図-4.5.1に施設本体各仕様の光沢値の経年変化を示した。

ふっ素樹脂塗料を上塗に用いた塗装系（仕様B）の光沢値は、その保持状態が良好で、初期と比べて若干低下した程度で、白亜化も全く生じていない。

仕様Aはガラスフレーク塗料の上に塗装しているため、微妙な凹凸により光沢値は低くなっているが、ふっ素樹脂塗料本来のつやは残っていると考えられる。塗膜表面を電子顕微鏡で観察した結果、特に劣化は認められない。ふっ素以外の上塗りを用いた塗装系は全体に光沢値がかなり低下していた。

(3) インピーダンス

塗膜のインピーダンスは、本体各仕様と同仕様で作製した暴露試験板を測定した。インピーダンスの経年変化を表-4.5.5～4.5.6に示した。

インピーダンスには多少の変動が認められるものの、例えば、1kHzにおける $\tan\delta$ の値をみると、かなり小さい値となっており、暴露10年経過しても健全な状態にあると考えられる。

(4) まとめ

今回施設本体に供試した塗料は、作業性も含めて大きな欠陥はなく、海上環境において、十分実用に耐える品質であることが確認できた。

(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型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においても長期に鉄素地を保護し、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、今回の調査結果から、海洋構造物大気部の長期防錆塗装仕様について考え、提案するとすれば、次のようになると考えられる。すなわち、図-4.5.6に示す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No.5(1)と同一のH仕様を標準とし、防食性を重視したA仕様、エッジ部、添接部など特殊部向けのJ仕様、工

数低減を図った I 仕様、耐候性を重視した B 仕様、工数低減に補修性を加味した D 仕様などから、部位、環境条件、維持管理の難易度等を考慮して、選択するのが望ましい。また、特殊部向けの J 仕様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。

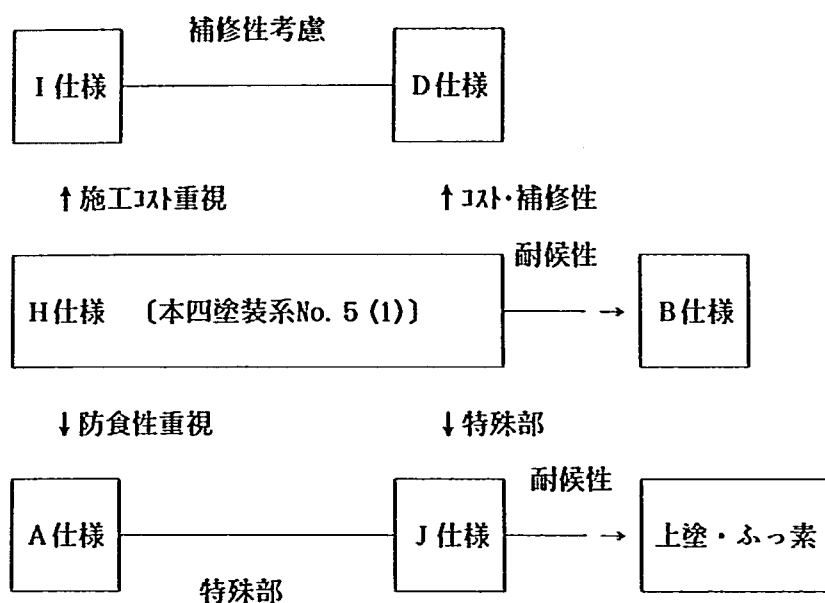


図-4. 5. 6 海上長期防錆塗装仕様（大気部）の概念図

付記

施設本体の「段階部」「手摺り部」は、設置1年目より全面に錆、ふくれが発生し、10年経過した現在損傷が著しい。今後10年間本施設を試験に利用するためには、その保全は重要である。そのため、早急に塗替え作業を行うことが強く望まれる。

表-4.5.2 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	備考
A	主鋼管 1 - A, B, C	ブラスト処理	厚膜型エポキシ樹脂ゾンクリッチヘイント(75μm)	※リエステル樹脂(350μm)	※リエステル樹脂(350μm)	ふっ素樹脂塗料上塗(20μm)	ふっ素樹脂塗料上塗(20μm)		815μm	
D	主鋼管 2 - A, B, C	ブラスト処理	厚膜型無機ゾンクリッチヘイント(75μm)	ミストコート	厚膜型エポキシ樹脂塗料(150μm)	エポキシ樹脂塗料上塗(30μm)			255μm	
H	主鋼管 3 - A, B, C	ブラスト処理	厚膜型無機ゾンクリッチヘイント(75μm)	ミストコート	厚膜型エポキシ樹脂塗料(60μm)	厚膜型エポキシ樹脂塗料(60μm)	※ウレタン樹脂塗料用中塗(30μm)	※ウレタン樹脂塗料用上塗(30μm)	255μm	
I	斜材 3B - 3C間	ブラスト処理	厚膜型無機ゾンクリッチヘイント(75μm)	ミストコート	厚膜型エポキシ樹脂塗料(150μm)	※ウレタン樹脂塗料上塗(30μm)			255μm	
J	斜材 2C - 3C間	ブラスト処理	エポキシ樹脂ゾンクリッチプライマー(15μm)	超厚膜エポキシ樹脂塗料(2000μm)	※ウレタン樹脂塗料上塗(30μm)				2045μm	
G	斜材 1B - 2B間	ブラスト処理	エポキシ樹脂樹脂(750μm)	エポキシ樹脂樹脂(750μm)	※ウレタン樹脂塗料用中塗(30μm)	※ウレタン樹脂塗料上塗(30μm)			1560μm	
E	斜材 1B - 1C間	ブラスト処理	※リエステル樹脂(40μm)	※リエステル樹脂(350μm)	※リエステル樹脂(350μm)	※ウレタン樹脂塗料用中塗(30μm)	※ウレタン樹脂塗料上塗(30μm)		800μm	
B	斜材 2B - 3B間	ブラスト処理	厚膜型無機ゾンクリッチヘイント(75μm)	ミストコート	ふっ素樹脂塗料用プライマー(100μm)	ふっ素樹脂塗料用中塗(50μm)	ふっ素樹脂塗料上塗(20μm)	ふっ素樹脂塗料上塗(20μm)	265μm	
C	斜材 1C - 2C間	ブラスト処理	エポキシ樹脂ゾンクリッチプライマー(25μm)	変性エポキシ樹脂樹脂(1000μm)	変性エポキシ樹脂塗料(50μm)	変性エポキシ樹脂塗料(50μm)			255μm	
F	斜材 2B - 2C間	ブラスト処理	エポキシ樹脂樹脂(300μm)	エポキシ樹脂樹脂(750μm)	※ウレタン樹脂塗料用中塗(30μm)	※ウレタン樹脂塗料上塗(30μm)			1110μm	
K	第1デッキ上面	ブラスト処理	厚膜型無機ゾンクリッチヘイント(75μm)						75μm	
L	第1デッキ下面	ブラスト処理	厚膜型無機ゾンクリッチヘイント(75μm)	ミストコート	ターウレタン樹脂塗料(200μm)	ターウレタン樹脂塗料(200μm)			475μm	
M	第2デッキ上下面	ブラスト処理	厚膜型無機ゾンクリッチヘイント(75μm)	ミストコート	ターウレタン樹脂塗料(200μm)	ターウレタン樹脂塗料(200μm)			475μm	
N	1, 2デッキ縁取り	ブラスト処理	厚膜型無機ゾンクリッチヘイント(75μm)	ミストコート	変性エポキシ樹脂塗料(75μm)	変性エポキシ樹脂塗料(75μm)	※ウレタン樹脂塗料上塗(30μm)		255μm	
O-2	1~2デッキ間段階、手摺り	ブラスト処理	変性エポキシ樹脂塗料(75μm)	変性エポキシ樹脂塗料(75μm)	※ウレタン樹脂塗料上塗(30μm)				180μm	
O-4	2~3デッキ間段階	ブラスト処理	無機ゾンクリッチヘイント(30μm)	変性エポキシ樹脂塗料(75μm)	変性エポキシ樹脂塗料(75μm)	※ウレタン樹脂塗料上塗(30μm)			210μm	
P	タワー	ブラスト処理	厚膜型エポキシ樹脂ゾンクリッチヘイント(75μm)	厚膜型エポキシ樹脂塗料(60μm)	厚膜型エポキシ樹脂塗料(60μm)	※ウレタン樹脂塗料中塗(30μm)	※ウレタン樹脂塗料上塗(30μm)		255μm	

注) *: 手摺り部は、パワー ツール処理

表-4. 5. 3 施設本体の塗装システム（調査結果 その1）

No	塗 装 部	塗 装 系	膜 厚 μ m	観察部材	塗 膜 外 観 調 査 結 果 (平成6年度調査時)	60度 鏡 面 光 沢 度											60度 鏡面光沢保持率(%)																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																												
						方位	経 過 年 数										経 過 年 数																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																												
							経 過 年 数	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	経 過 年 数	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																	
A	主 鋼 管 1-A B、C	厚膜型エポキシソリッドプライマー ポリエステルガラスフレック塗料 ふっ素樹脂塗料上塗り	75 300×2 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	A：ふっ素樹脂塗料上塗り																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																											

表-4. 5. 4 施設本体の塗装システム（調査結果その2）

No	塗 装 部	塗 装 系	膜 厚 μ m	観察部材	塗 膜 外 観 調 査 結 果 (平成6年度調査時)	60度 鏡 面 光 沢 度											60度 鏡面光沢保持率(%)												
						方位	経 過 年 数										経 過 年 数												
							初期	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	初期	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
C	斜 材 1 C-2 C 間	エポキシ樹脂ジンクリッチプライマー 変性ポリエステル樹脂プライマー 変性ポリエステル樹脂塗料	25 100 50×2	1-2 デッキ間	・チーキング：0点(2C側エッジ部上塗り剥がれ) ・あて傷：6箇所 ・エッジ部：錆4箇所	東		14	31	22	8	5	6	5	8	4	4	C：変性ポリエステル樹脂塗料											
						西		24	7	19	4	6	3	3	5	3	3												
						南		24	19	19	7	10	4	4	4	4	2												
						北		29	13	15	5	9	6	5	3	4	1												
						平均	61	23	17	19	6	8	5	4	5	4	3											100	37
F	斜 材 2 B-2 C 間	エポキシ樹脂ガラスフレーク塗料 エポキシ樹脂ガラスフレーク塗料 ポリウレタン樹脂塗料用中塗り ポリウレタン樹脂塗料上塗り	300 750 30 30	1-2 デッキ間	・錆：9点 ・2B、2C側エッジ部の錆、割れが 層状錆に拡大	東		14	25	11	23	14	9	6	6	7	2	F：ポリウレタン樹脂塗料上塗り											
						西		17	29	21	18	26	20	16	15	10	10												
						南		21	18	21	17	12	10	6	5	3	6												
						北		7	30	18	14	20	18	13	11	9	7												
						平均	18	15	26	18	18	18	14	10	9	7	6											100	81
K	第1デッキ 上 面	厚膜型無機ジンクリッチペイント	75	第1デッキ 上 面	・錆：4点																								
L、M	1、2 デッキ 上下面	厚膜型無機ジンクリッチペイント ！ストコート フェルクレタン樹脂塗料	75 200×2	第1デッキ 下面(L)	・錆：1箇所(1㎡程度)	凹凸が大きく測定不可能																							
				第1デッキ 上面(L)	・チーキング：0点 ・錆：無し																							平均	7
N	1、2 デッキ 縁取り	厚膜型無機ジンクリッチペイント ！ストコート 変性エポキシ樹脂塗料 ポリウレタン樹脂塗料上塗り	75 75×2 30	第1デッキ 縁取り	・チーキング：6点	凹凸が大きく測定不可能																							
				第2デッキ 縁取り	・チーキング：2点																							平均	42
O-2	階 段	変性エポキシ樹脂塗料 ポリウレタン樹脂塗料上塗り	75×2 30	1-2 デッキ間	・上面 錆：0点 ・裏面 錆：0点、全面はがれ ・側面 錆：4点	凹凸が大きく測定不可能																							
				2-3 デッキ間	・上面 錆：下段0点 中～上段6点 ・裏面 錆：8点 ・側面 錆：8点、チーキング：2点 南側のみ上塗り剥離 ・手摺：南側上塗り剥離																							平均	25
	手摺り	(パワーフォーム処理) 変性エポキシ樹脂塗料 ポリウレタン樹脂塗料上塗り	75×2 30	第1デッキ	・錆：2点、部分的に0点																								
				第2デッキ	・錆：1点、部分的に0点＝(東南角)																							平均	25
P	ク ワー 1 B-2 B 間	厚膜型無機ジンクリッチペイント ！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り ポリウレタン樹脂塗料上塗り	75 60×2 30 30	クワー本体	・チーキング：0点、変色大 ・錆：現地塗装部Fより30cm	東			29	17	17	13	15	13	10	11	9	P：ポリウレタン樹脂塗料上塗り											
						西			14	19	14	13	13	10	8	8	6												
						南			42	28	26	18	17	14	10	11	9												
						北			43	35	33	23	19	15	15	12	9												
						平均	39			32	25	23	17	16	13	11	11											8	100

表-4. 5. 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	0.2 kHz			0.5 kHz			1.0 kHz		
		R (Ω)	C (F)	$\tan \delta$	R (Ω)	C (F)	$\tan \delta$	R (Ω)	C (F)	$\tan \delta$
A	1年	3.6×10^7	3.2×10^{-10}	0.069	2.1×10^7	2.9×10^{-10}	0.052	1.3×10^7	2.7×10^{-10}	0.045
	2年	2.9×10^7	3.0×10^{-10}	0.092	1.5×10^7	2.7×10^{-10}	0.079	5.6×10^6	2.6×10^{-10}	0.019
	3年	3.5×10^7	3.6×10^{-10}	0.063	2.1×10^7	3.4×10^{-10}	0.045	1.4×10^7	3.4×10^{-10}	0.033
	4年	3.0×10^7	3.6×10^{-10}	0.074	1.4×10^7	3.3×10^{-10}	0.069	4.5×10^6	3.2×10^{-10}	0.111
	5年	9.6×10^6	6.0×10^{-10}	0.138	6.0×10^6	6.0×10^{-10}	0.088	3.8×10^6	6.0×10^{-10}	0.069
	7年	8.1×10^6	4.5×10^{-10}	0.218	5.2×10^6	4.0×10^{-10}	0.153	3.6×10^6	3.9×10^{-10}	0.113
	8年	9.2×10^6	4.3×10^{-10}	0.201	5.0×10^6	4.2×10^{-10}	0.152	3.8×10^6	4.2×10^{-10}	0.099
	9年	3.6×10^7	6.3×10^{-10}	0.035	1.9×10^7	6.1×10^{-10}	0.027	1.1×10^7	6.0×10^{-10}	0.024
	10年	2.9×10^7	1.0×10^{-10}	0.275	2.9×10^7	1.0×10^{-10}	0.110	2.9×10^7	1.0×10^{-10}	0.055
B	1年	3.9×10^6	9.1×10^{-10}	0.224	2.0×10^6	7.7×10^{-10}	0.207	1.3×10^6	7.0×10^{-10}	0.175
	2年	6.4×10^6	6.9×10^{-10}	0.180	3.6×10^6	6.3×10^{-10}	0.140	2.5×10^6	5.7×10^{-10}	0.108
	3年	4.7×10^6	1.0×10^{-9}	0.169	2.6×10^6	9.0×10^{-10}	0.136	1.6×10^6	8.0×10^{-10}	0.124
	4年	5.7×10^6	9.5×10^{-10}	0.147	2.8×10^6	6.8×10^{-10}	0.167	1.7×10^6	8.0×10^{-10}	0.117
	5年	4.9×10^6	1.2×10^{-9}	0.135	2.6×10^6	1.1×10^{-9}	0.111	1.6×10^6	1.0×10^{-9}	0.099
	7年	4.4×10^6	1.0×10^{-9}	0.181	2.5×10^6	1.0×10^{-9}	0.127	1.6×10^6	9.0×10^{-10}	0.111
	8年	4.5×10^6	1.2×10^{-9}	0.147	2.7×10^6	1.1×10^{-9}	0.107	1.6×10^6	1.0×10^{-9}	0.100
	9年	5.0×10^6	1.8×10^{-9}	0.094	3.1×10^6	1.6×10^{-9}	0.064	1.9×10^6	1.6×10^{-9}	0.052
	10年	2.6×10^6	2.0×10^{-9}	0.153	1.5×10^6	1.9×10^{-9}	0.112	7.5×10^5	1.8×10^{-9}	0.118
C	1年	4.5×10^6	6.6×10^{-10}	0.268	2.8×10^6	5.6×10^{-10}	0.203	1.9×10^6	5.2×10^{-10}	0.161
	2年	4.3×10^6	6.5×10^{-10}	0.285	2.8×10^6	5.6×10^{-10}	0.203	2.0×10^6	5.2×10^{-10}	0.153
	3年	5.1×10^6	7.0×10^{-10}	0.223	3.5×10^6	6.7×10^{-10}	0.136	2.3×10^6	6.3×10^{-10}	0.110
	4年	6.3×10^6	8.5×10^{-10}	0.149	3.2×10^6	7.8×10^{-10}	0.128	1.8×10^6	1.7×10^{-9}	0.051
	5年	5.4×10^6	1.0×10^{-9}	0.147	3.0×10^6	9.0×10^{-10}	0.117	2.0×10^6	9.0×10^{-10}	0.088
	7年	5.1×10^6	9.0×10^{-10}	0.173	1.0×10^6	8.0×10^{-10}	0.133	2.0×10^6	8.0×10^{-10}	0.099
	8年	6.2×10^6	1.0×10^{-9}	0.161	3.3×10^6	7.8×10^{-10}	0.136	2.2×10^6	7.6×10^{-10}	0.095
	9年	6.7×10^6	1.2×10^{-9}	0.099	4.0×10^6	1.1×10^{-9}	0.072	2.6×10^6	1.1×10^{-9}	0.056
	10年	3.7×10^7	1.0×10^{-10}	0.215	2.8×10^7	1.0×10^{-10}	0.114	2.8×10^7	1.0×10^{-10}	0.057
D	1年	2.0×10^6	1.6×10^{-9}	0.249	1.1×10^6	1.3×10^{-9}	0.223	5.0×10^5	1.2×10^{-9}	0.265
	2年	3.5×10^6	9.2×10^{-10}	0.247	1.9×10^6	7.7×10^{-10}	0.218	1.3×10^6	7.0×10^{-10}	0.175
	3年	3.0×10^6	1.3×10^{-9}	0.204	1.6×10^6	1.1×10^{-9}	0.181	6.0×10^5	1.0×10^{-9}	0.265
	4年	3.4×10^6	1.6×10^{-9}	0.146	1.6×10^6	1.4×10^{-9}	0.142	7.3×10^5	1.3×10^{-9}	0.168
	5年	3.5×10^6	1.4×10^{-9}	0.162	1.8×10^6	1.3×10^{-9}	0.136	1.0×10^6	1.2×10^{-9}	0.132
	7年	3.9×10^6	1.2×10^{-9}	0.170	2.0×10^6	1.1×10^{-9}	0.145	1.2×10^6	1.0×10^{-9}	0.133
	8年	4.0×10^6	1.3×10^{-9}	0.192	1.9×10^6	1.2×10^{-9}	0.140	1.3×10^6	1.0×10^{-9}	0.122
	9年	5.0×10^6	1.7×10^{-9}	0.094	2.5×10^6	1.6×10^{-9}	0.080	1.5×10^6	1.6×10^{-9}	0.066
	10年	1.7×10^6	2.5×10^{-9}	0.187	9.0×10^5	2.3×10^{-9}	0.154	5.0×10^5	2.1×10^{-9}	0.152
E	1年	1.1×10^7	4.0×10^{-10}	0.189	6.6×10^6	3.6×10^{-10}	0.134	4.4×10^6	3.4×10^{-10}	0.106
	2年	2.4×10^7	3.9×10^{-10}	0.085	1.3×10^7	3.5×10^{-10}	0.070	5.2×10^6	3.4×10^{-10}	0.090
	3年	2.2×10^7	4.9×10^{-10}	0.074	1.1×10^7	4.5×10^{-10}	0.064	3.0×10^6	4.4×10^{-10}	0.090
	4年	2.1×10^7	5.1×10^{-10}	0.074	5.8×10^6	4.7×10^{-10}	0.117	3.4×10^6	4.4×10^{-10}	0.106
	5年	9.3×10^6	8.0×10^{-10}	0.107	4.2×10^6	7.5×10^{-10}	0.101	2.6×10^6	7.2×10^{-10}	0.085
	7年	6.5×10^6	7.0×10^{-10}	0.175	3.8×10^6	6.0×10^{-10}	0.140	2.4×10^6	6.0×10^{-10}	0.111
	8年	6.0×10^6	7.0×10^{-10}	0.190	4.0×10^6	6.0×10^{-10}	0.133	2.7×10^6	6.5×10^{-10}	0.091
	9年	7.4×10^6	9.0×10^{-10}	0.120	4.2×10^6	8.0×10^{-10}	0.095	2.5×10^6	8.0×10^{-10}	0.080
	10年	5.0×10^6	9.0×10^{-10}	0.177	3.1×10^6	9.0×10^{-10}	0.114	1.9×10^6	8.0×10^{-10}	0.105
F	1年	3.3×10^6	4.4×10^{-10}	0.548	2.3×10^6	3.4×10^{-10}	0.407	1.7×10^6	3.0×10^{-10}	0.312
	2年	3.8×10^6	4.1×10^{-10}	0.511	2.6×10^6	3.3×10^{-10}	0.371	2.0×10^6	2.9×10^{-10}	0.274
	3年	7.4×10^7	1.0×10^{-10}	0.108	7.2×10^7	1.0×10^{-10}	0.044	7.3×10^7	1.0×10^{-10}	0.022
	4年	1.3×10^7	3.3×10^{-10}	0.185	4.5×10^6	2.8×10^{-10}	0.253	3.0×10^6	2.5×10^{-10}	0.212
	5年	3.9×10^6	7.8×10^{-10}	0.291	2.5×10^6	6.5×10^{-10}	0.196	1.8×10^6	5.5×10^{-10}	0.161
	7年	5.6×10^6	5.0×10^{-10}	0.284	3.4×10^6	4.3×10^{-10}	0.218	2.4×10^6	3.8×10^{-10}	0.175
	8年	6.0×10^6	6.2×10^{-10}	0.269	3.7×10^6	4.0×10^{-10}	0.215	2.6×10^6	4.0×10^{-10}	0.153
	9年	3.7×10^6	3.0×10^{-10}	0.717	2.5×10^6	2.0×10^{-10}	0.637	2.1×10^6	1.0×10^{-10}	0.758
	10年	2.2×10^6	8.2×10^{-10}	0.441	1.5×10^6	7.0×10^{-10}	0.303	1.1×10^6	6.3×10^{-10}	0.230

表-4.5.6 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	0.2 kHz			0.5 kHz			1.0 kHz		
		R (Ω)	C (F)	$\tan \delta$	R (Ω)	C (F)	$\tan \delta$	R (Ω)	C (F)	$\tan \delta$
G	1年	6.8×10^6	2.7×10^{-10}	0.433	5.3×10^6	2.3×10^{-10}	0.261	4.3×10^6	2.2×10^{-10}	0.168
	2年	5.7×10^6	1.5×10^{-10}	0.931	3.7×10^6	1.3×10^{-10}	0.662	2.0×10^6	1.3×10^{-10}	0.612
	3年	9.7×10^6	3.3×10^{-10}	0.249	6.8×10^6	3.0×10^{-10}	0.156	4.8×10^6	2.9×10^{-10}	0.114
	4年	3.2×10^6	4.2×10^{-10}	0.592	2.2×10^6	3.1×10^{-10}	0.467	1.7×10^6	2.6×10^{-10}	0.360
	5年	3.0×10^6	7.0×10^{-10}	0.379	1.2×10^7	6.0×10^{-10}	0.265	1.5×10^6	5.0×10^{-10}	0.212
	7年	9.4×10^6	3.7×10^{-10}	0.229	5.9×10^6	3.4×10^{-10}	0.159	4.3×10^6	3.0×10^{-10}	0.123
	8年	2.8×10^6	7.2×10^{-10}	0.496	1.2×10^6	6.0×10^{-10}	0.265	1.5×10^6	5.0×10^{-10}	0.212
	9年	1.8×10^7	2.0×10^{-10}	0.221	2.0×10^7	1.6×10^{-10}	0.100	1.1×10^7	1.5×10^{-10}	0.097
	10年	5.4×10^7	1.0×10^{-10}	0.147	4.4×10^7	9.8×10^{-11}	0.074	3.6×10^7	1.0×10^{-10}	0.044
H	1年	2.1×10^6	1.3×10^{-9}	0.291	1.2×10^6	1.1×10^{-9}	0.241	5.9×10^5	1.0×10^{-9}	0.270
	2年	2.7×10^6	9.8×10^{-10}	0.301	1.7×10^6	8.7×10^{-10}	0.215	1.2×10^6	8.0×10^{-10}	0.166
	3年	3.5×10^6	1.3×10^{-9}	0.175	2.0×10^6	1.2×10^{-9}	0.133	1.2×10^6	1.1×10^{-9}	0.121
	4年	4.0×10^6	1.4×10^{-9}	0.142	2.0×10^6	1.3×10^{-9}	0.122	1.2×10^6	1.2×10^{-9}	0.111
	5年	3.1×10^6	1.8×10^{-9}	0.143	1.6×10^6	1.6×10^{-9}	0.124	6.0×10^5	1.5×10^{-9}	0.177
	7年	4.5×10^6	1.1×10^{-9}	0.161	2.4×10^6	1.0×10^{-9}	0.133	1.6×10^6	1.0×10^{-9}	0.099
	8年	4.7×10^6	1.2×10^{-9}	0.177	2.4×10^6	1.0×10^{-9}	0.133	1.3×10^6	1.0×10^{-9}	0.122
	9年	6.0×10^6	2.2×10^{-9}	0.060	2.9×10^6	2.0×10^{-9}	0.055	1.8×10^6	2.0×10^{-9}	0.044
	10年	2.6×10^6	2.4×10^{-9}	0.128	1.3×10^6	2.2×10^{-9}	0.111	8.0×10^7	2.1×10^{-9}	0.001
I	1年	2.7×10^6	1.1×10^{-9}	0.268	1.4×10^6	1.9×10^{-9}	0.227	7.4×10^5	9.0×10^{-10}	0.239
	2年	4.7×10^6	9.5×10^{-10}	0.178	2.9×10^6	8.5×10^{-10}	0.129	1.9×10^6	8.1×10^{-10}	0.103
	3年	3.5×10^6	1.3×10^{-9}	0.175	2.0×10^6	7.0×10^{-9}	0.133	1.3×10^6	1.2×10^{-9}	0.102
	4年	5.9×10^6	1.1×10^{-9}	0.123	3.2×10^6	1.1×10^{-9}	0.090	1.8×10^6	1.0×10^{-9}	0.088
	5年	4.4×10^6	1.7×10^{-9}	0.106	2.2×10^6	1.6×10^{-9}	0.090	1.3×10^6	1.5×10^{-9}	0.082
	7年	4.6×10^6	1.2×10^{-9}	0.144	2.7×10^6	1.1×10^{-9}	0.107	1.7×10^6	1.1×10^{-9}	0.085
	8年	4.8×10^6	1.4×10^{-9}	0.149	3.0×10^6	1.2×10^{-9}	0.088	1.9×10^6	1.2×10^{-9}	0.070
	9年	5.8×10^6	2.0×10^{-9}	0.069	3.9×10^6	1.2×10^{-9}	0.068	2.4×10^6	1.9×10^{-9}	0.035
	10年	3.3×10^6	2.3×10^{-9}	0.105	1.8×10^6	2.2×10^{-9}	0.080	1.1×10^6	2.1×10^{-9}	0.069
J	1年	6.4×10^6	3.0×10^{-10}	0.414	4.1×10^6	2.5×10^{-10}	0.311	2.8×10^6	2.2×10^{-10}	0.258
	2年	2.5×10^7	2.2×10^{-10}	0.145	1.4×10^7	1.5×10^{-10}	0.152	4.4×10^6	1.8×10^{-10}	0.201
	3年	2.1×10^7	2.6×10^{-10}	0.146	1.3×10^7	2.3×10^{-10}	0.106	5.1×10^6	2.3×10^{-10}	0.136
	4年	5.0×10^7	1.4×10^{-10}	0.114	2.8×10^7	1.2×10^{-10}	0.095	1.8×10^7	1.1×10^{-10}	0.080
	5年	2.3×10^7	5.4×10^{-10}	0.064	1.0×10^7	5.1×10^{-10}	0.062	4.0×10^6	4.5×10^{-10}	0.088
	7年	9.8×10^6	3.4×10^{-10}	0.239	5.8×10^6	3.1×10^{-10}	0.177	3.8×10^6	2.7×10^{-10}	0.155
	8年	6.0×10^6	4.9×10^{-10}	0.271	1.0×10^7	4.0×10^{-10}	0.080	4.0×10^6	3.2×10^{-10}	0.124
	9年	3.5×10^7	3.3×10^{-10}	0.069	2.3×10^7	3.1×10^{-10}	0.045	1.3×10^7	2.9×10^{-10}	0.042
	10年	3.7×10^7	1.0×10^{-10}	0.215	4.4×10^7	1.1×10^{-10}	0.066	3.6×10^7	1.0×10^{-10}	0.044
L	1年	5.5×10^6	4.4×10^{-10}	0.329	3.7×10^6	3.7×10^{-10}	0.232	2.7×10^6	3.4×10^{-10}	0.173
	2年	7.8×10^6	3.5×10^{-10}	0.292	5.0×10^6	2.8×10^{-10}	0.227	3.7×10^6	2.6×10^{-10}	0.165
	3年	8.7×10^6	4.0×10^{-10}	0.229	5.4×10^6	3.6×10^{-10}	0.164	3.8×10^6	3.4×10^{-10}	0.123
	4年	2.5×10^7	3.8×10^{-10}	0.084	1.4×10^7	3.5×10^{-10}	0.065	5.1×10^6	3.4×10^{-10}	0.092
	5年	1.9×10^7	6.5×10^{-10}	0.064	6.0×10^6	6.0×10^{-10}	0.088	3.6×10^6	6.0×10^{-10}	0.074
	7年	9.1×10^6	4.7×10^{-10}	0.186	5.2×10^6	4.2×10^{-10}	0.146	3.4×10^6	3.9×10^{-10}	0.120
	8年	1.2×10^7	6.0×10^{-10}	0.111	5.8×10^6	5.4×10^{-10}	0.102	3.6×10^6	5.2×10^{-10}	0.085
	9年	8.8×10^7	1.3×10^{-10}	0.070	5.4×10^7	1.2×10^{-10}	0.099	3.4×10^7	1.2×10^{-10}	0.039
	10年	1.1×10^7	7.9×10^{-10}	0.092	3.7×10^6	7.4×10^{-10}	0.116	2.4×10^6	7.0×10^{-10}	0.095
M	1年	5.0×10^6	5.5×10^{-10}	0.289	3.8×10^6	4.7×10^{-10}	0.178	2.6×10^6	4.5×10^{-10}	0.136
	2年	6.5×10^6	4.5×10^{-10}	0.272	4.5×10^6	4.3×10^{-10}	0.165	2.8×10^6	4.0×10^{-10}	0.142
	3年	4.6×10^6	5.9×10^{-10}	2.933	4.0×10^6	6.4×10^{-10}	1.244	3.6×10^6	6.3×10^{-10}	0.702
	4年	9.3×10^6	5.5×10^{-10}	0.156	5.3×10^6	5.1×10^{-10}	0.118	3.4×10^6	4.8×10^{-10}	0.098
	5年	1.8×10^7	8.1×10^{-10}	0.055	5.2×10^6	7.7×10^{-10}	0.080	3.0×10^6	7.4×10^{-10}	0.072
	7年	7.3×10^6	7.0×10^{-10}	0.156	3.8×10^6	6.5×10^{-10}	0.129	2.4×10^6	6.0×10^{-10}	0.111
	8年	1.2×10^7	8.0×10^{-10}	0.083	5.2×10^6	7.6×10^{-10}	0.081	3.0×10^6	7.4×10^{-10}	0.072
	9年	1.9×10^7	1.0×10^{-10}	0.042	8.0×10^6	9.0×10^{-10}	0.044	4.0×10^6	9.0×10^{-10}	0.044
	10年	5.1×10^6	1.1×10^{-9}	0.142	3.1×10^6	1.0×10^{-9}	0.103	2.0×10^6	1.0×10^{-9}	0.080

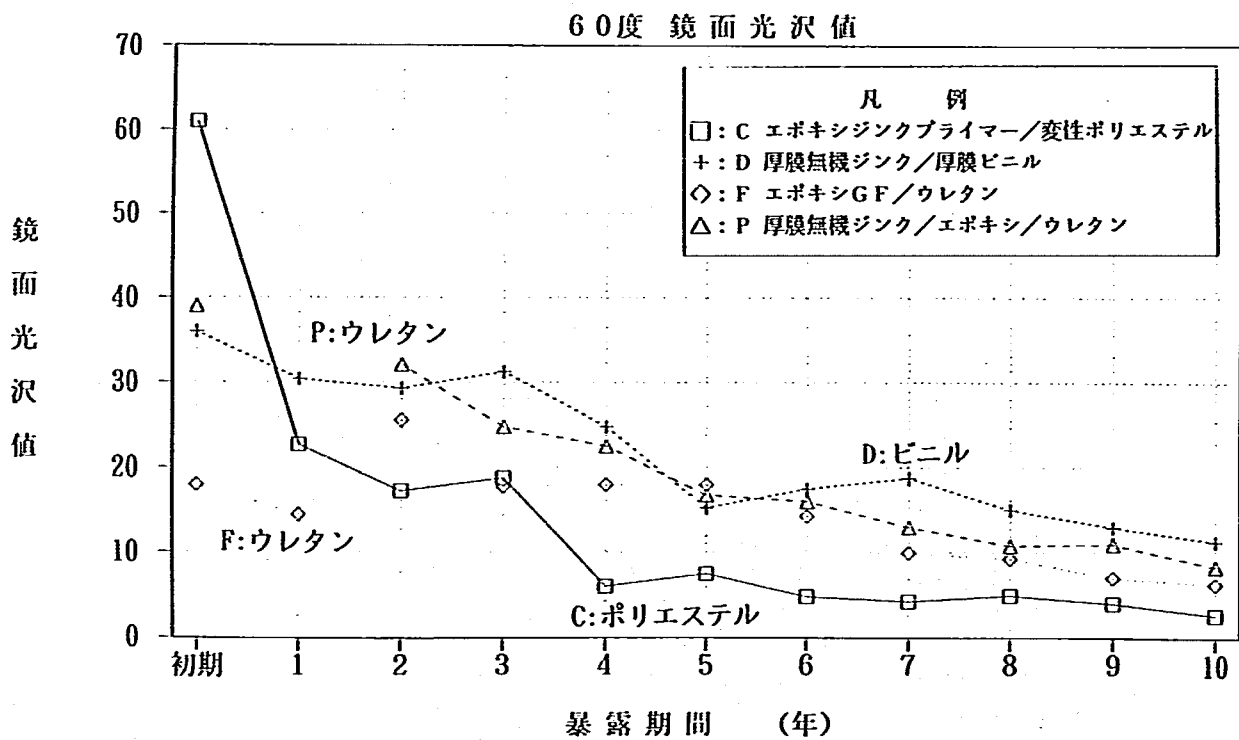
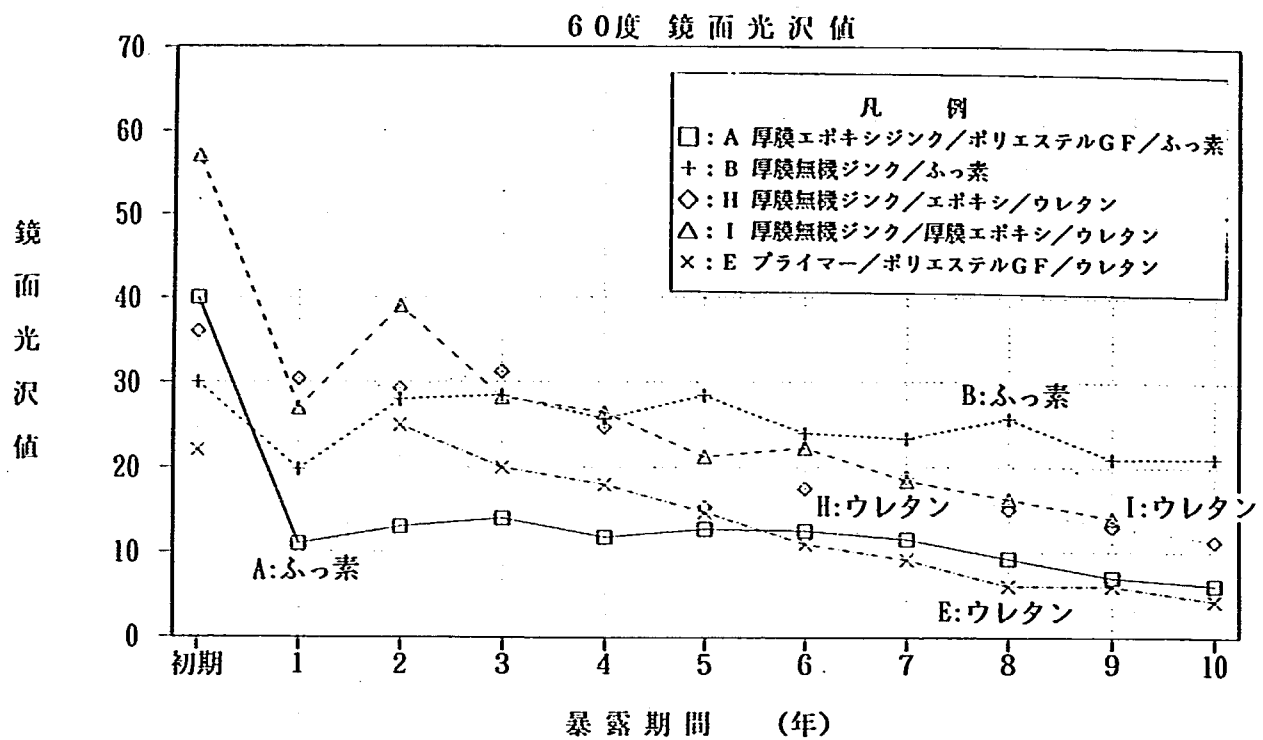


図 4. 5. 1 施設本体の光沢値の経年変化 (60度鏡面光沢値)

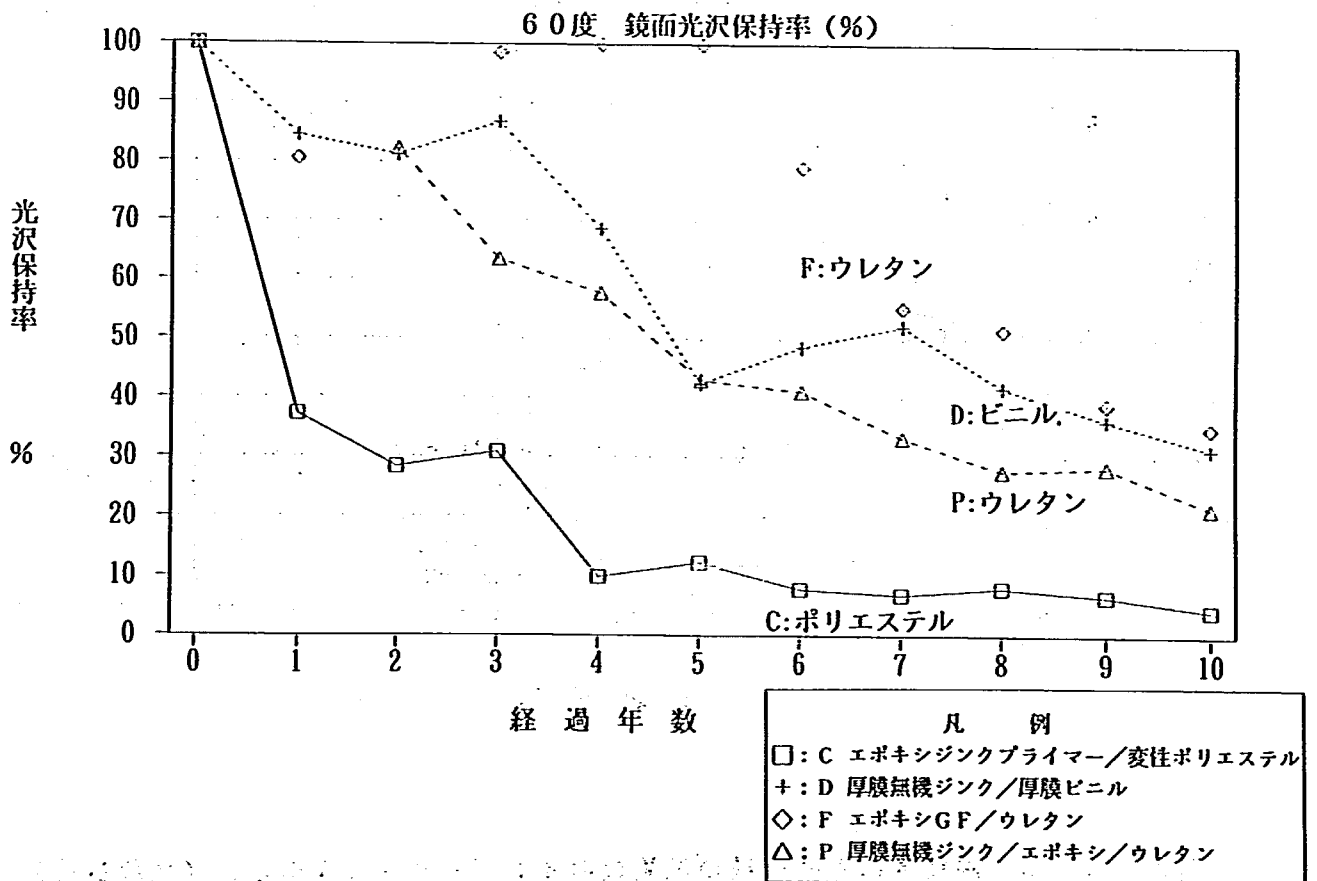
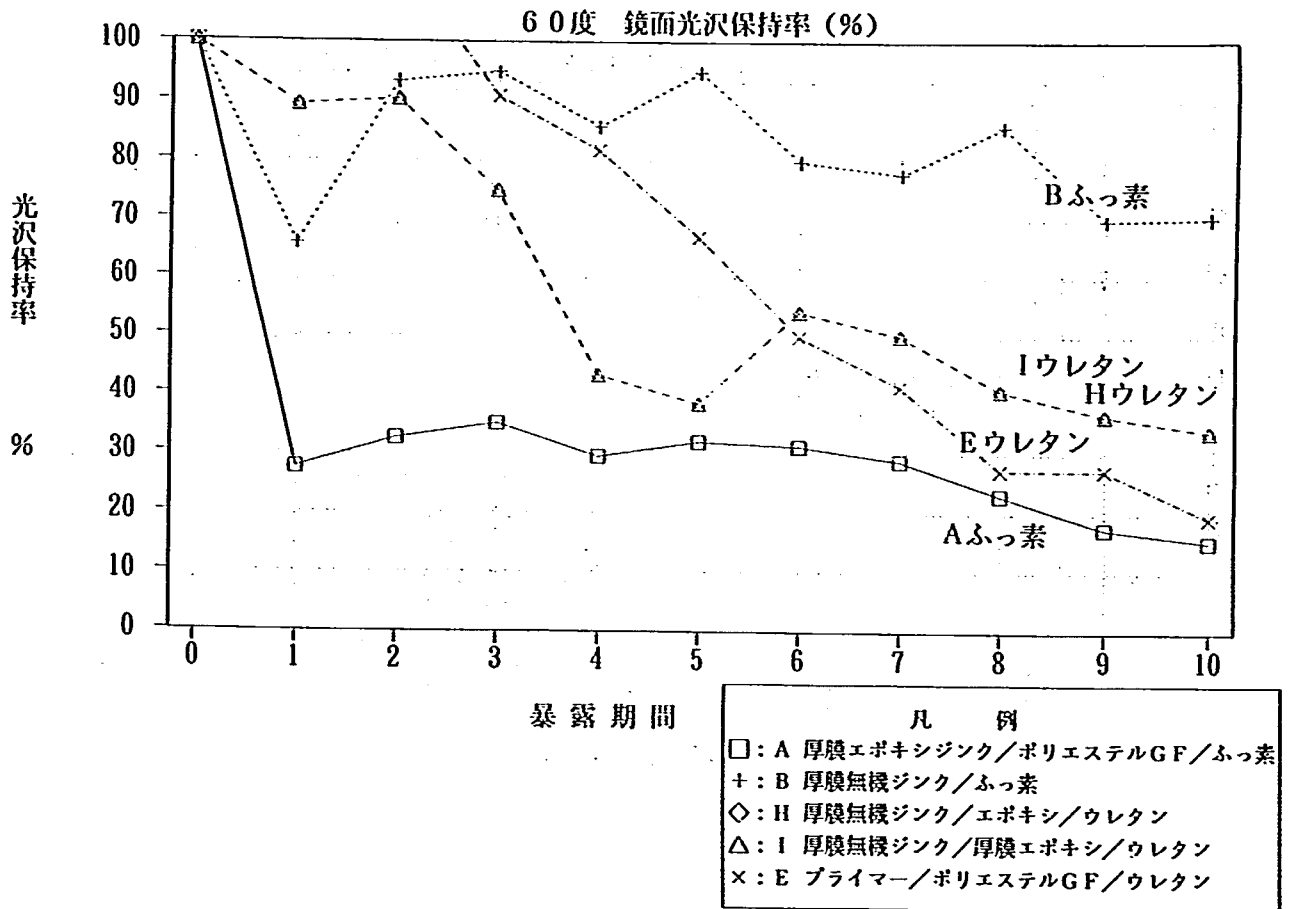


図4.5.2 施設本体の光沢値の経年変化 (60度鏡面光沢保持率)

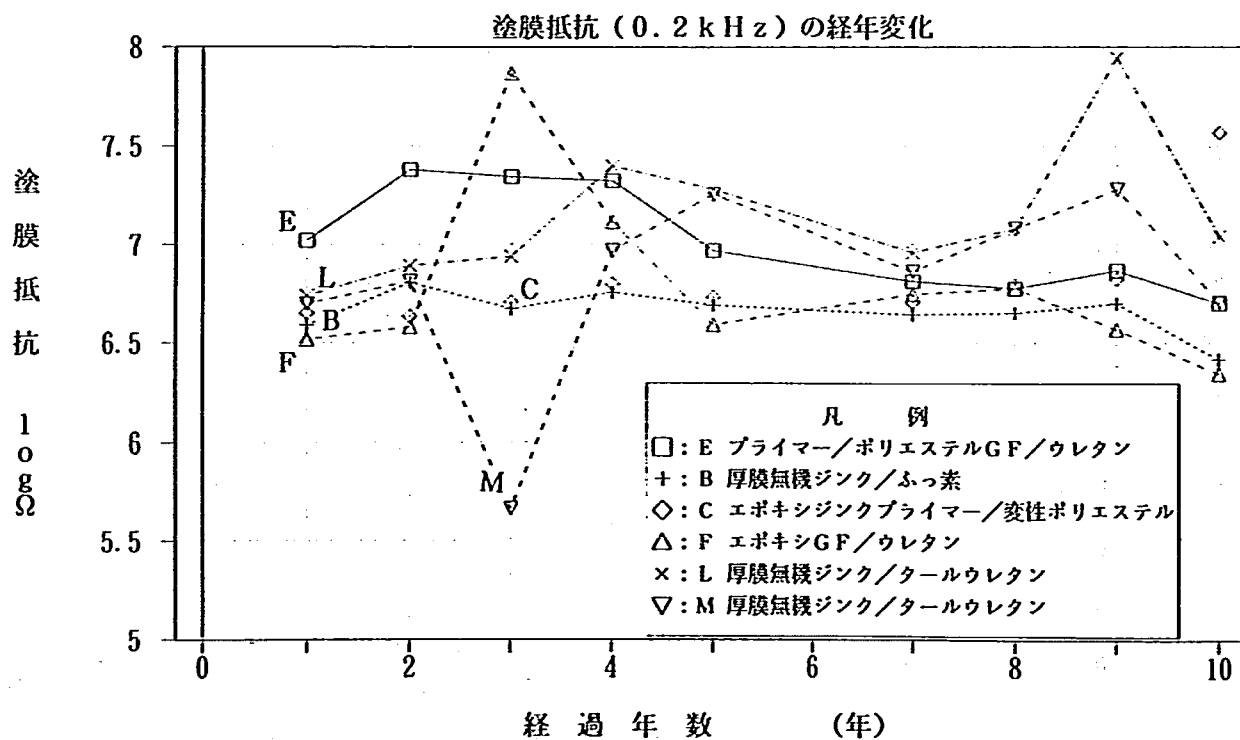
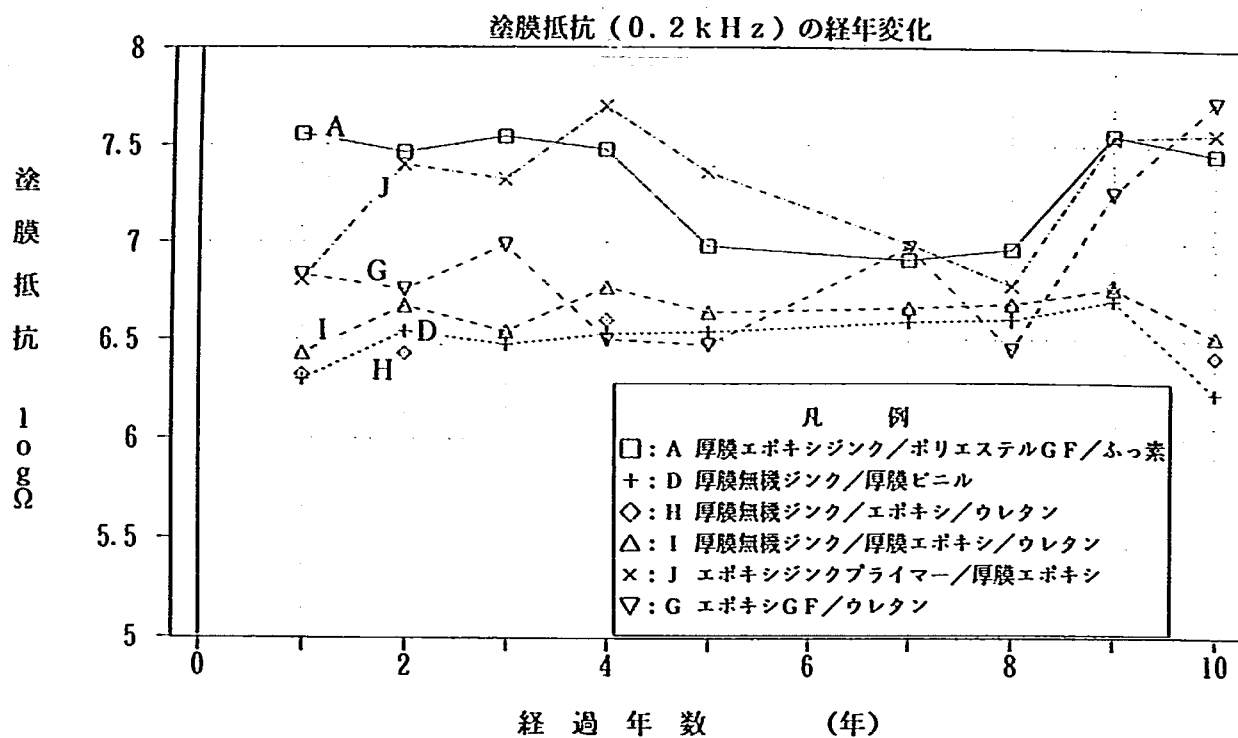


図 4. 5. 3 施設本体と同仕様の試験板のインピーダンス経年変化 (塗膜抵抗)

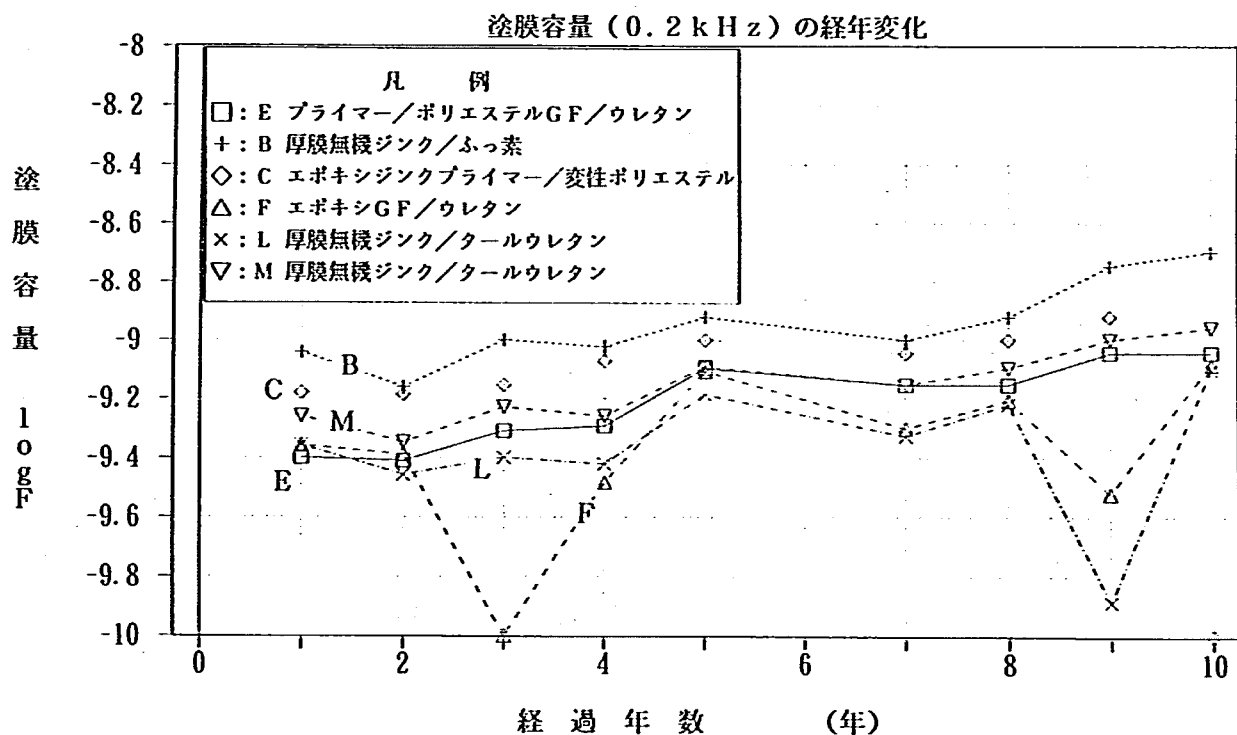
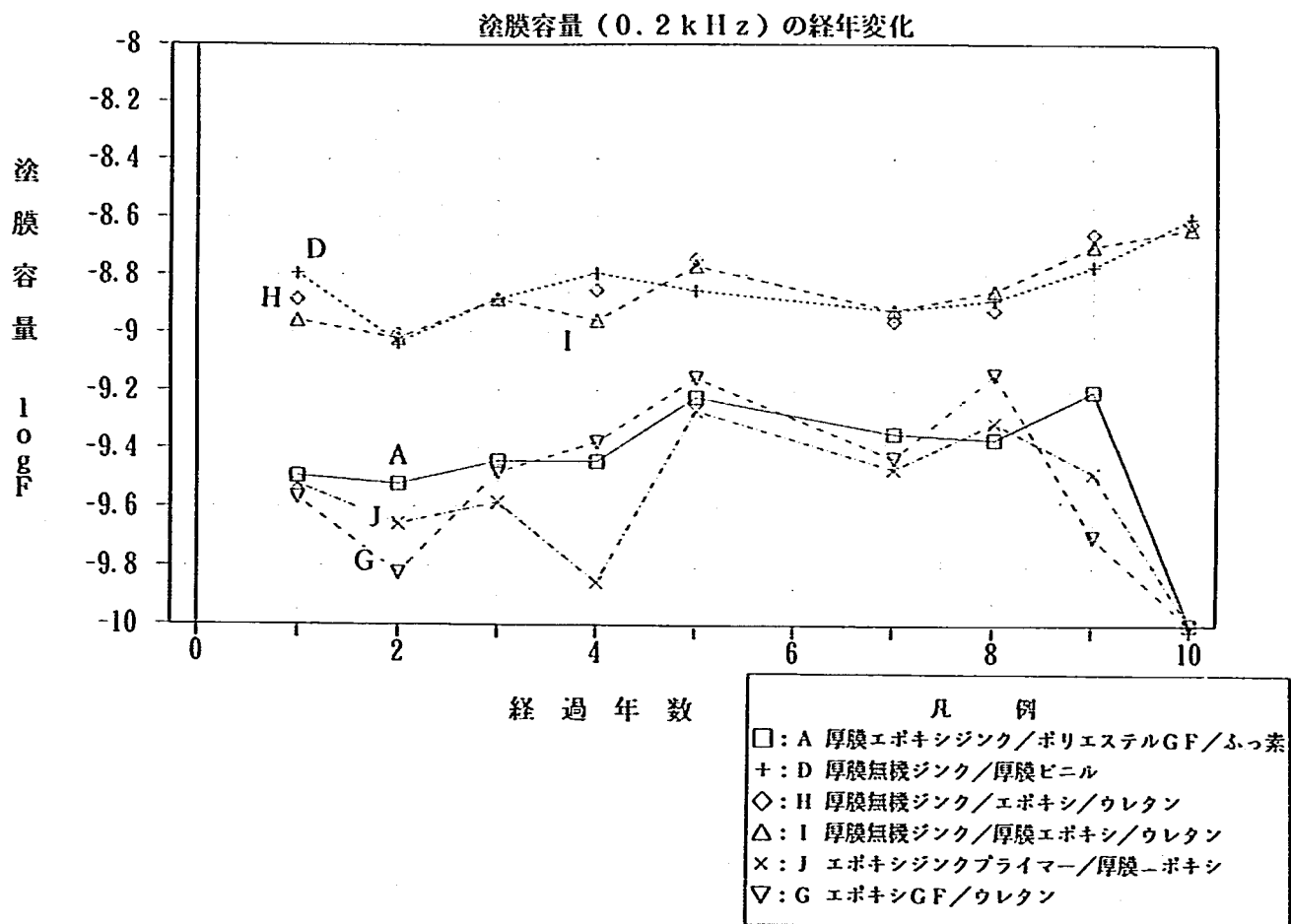


図4.5.4 施設本体と同仕様の試験板のインピーダンス経年変化 (塗膜容量)

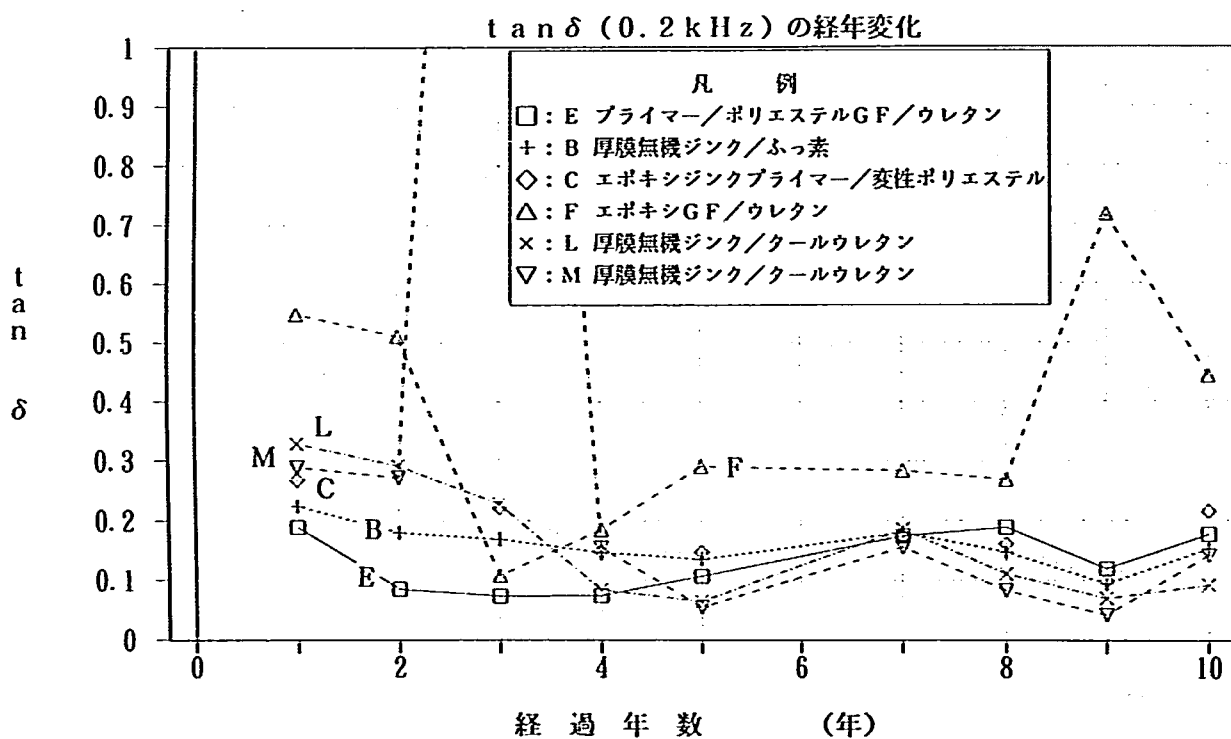
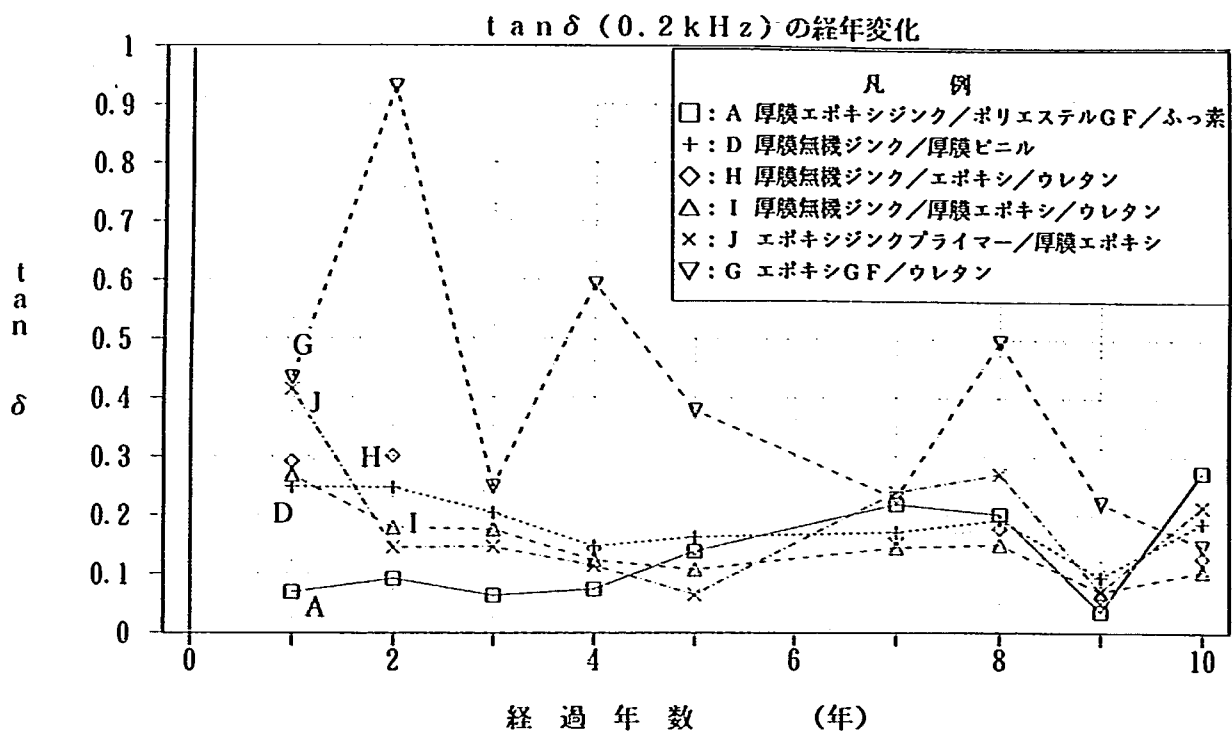


図 4. 5. 5 施設本体と同仕様の試験板のインピーダンス経年変化 ($\tan \delta$)

4. 6 簡易塗替え塗装システムの開発

4. 6. 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え仕様（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. 6. 2 計画

施設本体の一部を用いて簡易塗替え塗装を行い、経時変化を観察する。簡易塗替え塗装仕様を表4. 6. 1に示した。また、これまでに実施した調査項目と、さらに10年間の調査予定を表4. 6. 2に示した。

表- 4. 6. 1 簡易塗替え試験の内容

旧 塗 膜	I 厚膜無機ジンク／厚膜エポキシ／ウレタン用中塗り／ウレタン上塗り II 厚膜エポキシジンク／ポリエステルGF／ふっ素上塗り III 厚膜無機ジンク／厚膜ビニル／ビニル上塗り
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）
塗替え塗装系	①ふっ素上塗り ②ふっ素用中塗り／ふっ素上塗り ③ウレタン用中塗り／ウレタン上塗り ④ビニル上塗り
調 査 項 目	・基盤目付着性 ・外観観察

表-4. 6. 2 調査項目と調査時期（長期防錆塗装システムの開発）

調査年度		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	平成7 1995	平成8 1996	平成9 1997	平成10 1998
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
調査	基盤目付着	—	○				○					○
	外観観察	—	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
調査年度		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	平成18 2006	平成19 2007	平成20 2008	
経過年数		11年	12年	13年	14年	15年	16年	17年	18年	19年	20年	
調査	基盤目付着					○					○	
	外観観察	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	

*)調査内容

基盤目付着性：カッターナイフで5mm基盤目9ヶ作製し、セロテープ剥離。

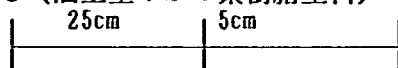
外 観 観 察：さび、ふくれ、われ、キズ、変色、白亜化等を目視観察。

4. 6. 3 塗替え実験

第2デッキ主鋼管1-C、2-C、および3-Cを試験部位とした。塗替え範囲、素地調製、塗替え塗装系を次に示す。

塗替え仕様 ①

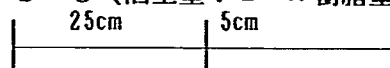
1-C（旧上塗：ふっ素樹脂塗料）



塗替え仕様① 水洗のみ	塗替え仕様① 水洗+#240 ペーパー研磨	25cm
----------------	-----------------------------	------

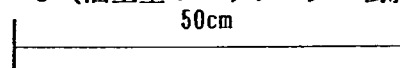
塗替え仕様④

2-C（旧上塗：ビニル樹脂塗料）



塗替え仕様④ 水洗のみ	塗替え仕様④ 水洗+#240 ペーパー研磨	25cm
----------------	-----------------------------	------

3-C（旧上塗：ポリウレタン樹脂塗料）（塗替え仕様②、③）



塗替え仕様② 水洗のみ	塗替え仕様② 水洗+#240 ペーパー研磨	50cm
塗替え仕様③ 水洗のみ	塗替え仕様③ 水洗+#240 ペーパー研磨	

各塗替え仕様と旧塗膜との関係は、次のとおりである。

	塗 替 塗 料	旧 塗 膜
塗替仕様①	ふっ素樹脂塗料	ポリエステルGF／ふっ素樹脂塗料
塗替仕様②	ふっ素樹脂塗料	ポリウレタン樹脂塗料
塗替仕様③	ポリウレタン樹脂塗料	ポリウレタン樹脂塗料
塗替仕様④	ビニル樹脂塗料	ビニル樹脂塗料

4. 6. 4 結果

施設本体を用いて行った簡易塗替え仕様の6年後の結果を表-4.6.3に示した。

このような簡易塗替え仕様は、当初懸念されるところもあったが、いずれの塗装系も6年後、外観および付着性（基盤目付着性）ともに異常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6年経過後も良好な付着性を示した。しかし、この検討は主鋼管北面側を対象としたものであり、条件の厳しい南面側も同じ結果になるとは断言できない。従って、今後さらに経過を注意深く観察していくとともに、機会があれば主鋼管南面側を対象として同様の検討を行なっていきたい。

表-4. 6. 3 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）～6年後の結果

No.	塗 装 部 位	旧 塗 膜			素 地 調 整	適 用 塗 料 種	塗膜外観	基盤目 付着性
		No.	塗 装 系	膜 厚				
1	主鋼管 3-C	H	厚膜型無機ゾウリツチ	75 μ m	1) 目荒し 有り	ポリウレタン 樹脂塗料 中・上塗り	異常なし	9/9
			ミストコート					
			厚膜型エポキシ樹脂塗料	60 $\times$ 2				
			エポキシ樹脂塗料用中塗	30				
2	主鋼管 3-C	H	厚膜型無機ゾウリツチ	75	2) 目荒し 無し	ポリウレタン 樹脂塗料 中・上塗り	異常なし	9/9
			ミストコート					
			厚膜型エポキシ樹脂塗料	60 $\times$ 2				
			エポキシ樹脂塗料用中塗	30				
3	主鋼管 3-C	H	厚膜型無機ゾウリツチ	75	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	9/9
			ミストコート					
			厚膜型エポキシ樹脂塗料	60 $\times$ 2				
			エポキシ樹脂塗料用中塗	30				
4	主鋼管 3-C	H	厚膜型無機ゾウリツチ	75	2) 目荒し 無し	ふっ素樹脂塗料 用中塗/ふっ素 樹脂塗料上塗	異常なし	9/9
			ミストコート					
			厚膜型エポキシ樹脂塗料	60 $\times$ 2				
			エポキシ樹脂塗料用中塗	30				
5	主鋼管 1-C	A	厚膜型エポキシゾウリツチ	75	1) 目荒し 有り	ふっ素樹脂塗料 上塗	異常なし	9/9
			エポキシ樹脂塗料	350 $\times$ 2				
			ふっ素樹脂塗料上塗	20 $\times$ 2				
6	主鋼管 1-C	A	厚膜型エポキシゾウリツチ	75	2) 目荒し 無し	ふっ素樹脂塗料 上塗	異常なし	9/9
			エポキシ樹脂塗料	350 $\times$ 2				
			ふっ素樹脂塗料上塗	20 $\times$ 2				
7	主鋼管 2-C	D	厚膜型無機ゾウリツチ	75	目荒し 有り	エポキシ樹脂塗料 上塗	異常なし	9/9
			ミストコート					
			厚膜型エポキシ樹脂塗料	150				
8	主鋼管 2-C	D	厚膜型無機ゾウリツチ	75	目荒し 無し	エポキシ樹脂塗料 上塗	異常なし	9/9
			ミストコート					
			厚膜型エポキシ樹脂塗料	150				
			エポキシ樹脂塗料上塗	30				

1) 水洗+ #240 ペーパー研磨 2) 水洗のみ

4. 7 部分補修仕様、簡易塗替仕様の検討

4. 7. 1 目的

鋼構造物の耐久性（防食性、耐食性）を長期間維持させるためには、適当な時期に補修塗装を行な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№5 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. 7. 2 実験の概要

部分的に防食性が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. 7. 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№5 塗装系＜厚膜無機ジンク（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、予め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#320ペーパーで縦方向のみ研磨し、下半分は軽く水洗のみを行なって補修塗装に供した。

2) 補修塗装系

塗装系1：ハイビルドエポキシ樹脂塗料（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）／ハイビルドエポキシ樹脂塗料（300 μ m）／ふっ素樹脂塗料上塗（30 μ m）

塗装系3：3-N（日本ペイント担当） 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）

3-D（大日本塗料担当） 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）

3-K（関西ペイント担当） エポキシ樹脂塗料下塗（30 μ m）／超厚膜エポキシ塗料（1000 μ m）／ふっ素樹脂塗料上塗（30 μ m）

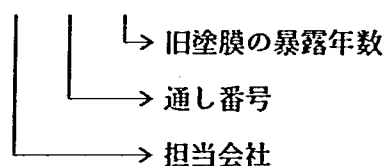
3) 暴露期間

旧塗膜は2年、5年、7年暴露して塗替塗装後、3年、5年、7年再暴露して評価する。

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No.の明細

88-J□△△-○



1 : 日本ペイント㈱ 2 : 大日本塗料㈱ 3 : 関西ペイント㈱

*)試験片No.の明細を表-4.7.1に示した。

(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No.5 塗装系<厚膜無機ジンク(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 : 厚膜無機ジンク(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)

*)上記塗膜を予め2年、5年、7年暴露し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研磨し、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

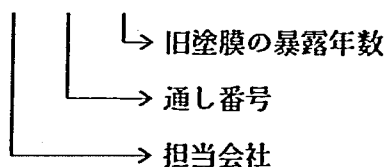
旧塗膜は2年、5年、7年暴露して簡易塗替塗装後、塗替塗膜を3年、5年、7年再暴露後評価する。

4)調査項目

旧塗膜に対する付着性試験(アドヒージョント)

5)試験片の明細

88-L□△△-○



1 : 日本ペイント、2 : 大日本塗料、3 : 関西ペイント

*)簡易塗替塗装系の試験片NO.の明細を表4.7.3に示す。

4. 7. 4 結果

旧塗膜を2年および5年暴露し、部分補修、簡易塗替後の付着性を測定して再度暴露した。旧塗膜暴露後塗替塗膜の初期付着性測定結果を表-4. 7. 2 および表-4. 7. 4 に示した。

更に、今後の評価スケジュールを表-4. 7. 5 に示した。

表-4. 7. 1 補修塗装系の試験片の内容

試験片NO.	適用下地	下地の暴露年数	塗替仕様NO.	担当会社
88-J104-1	旧塗膜	2	塗装系 1	日本ペイント
88-J105-1	旧塗膜	2	塗装系 2	
88-J106-1	旧塗膜	2	塗装系 3-N	
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-N	
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-N	
88-J204-1	旧塗膜	2	塗装系 1	大日本塗料
88-J205-1	旧塗膜	2	塗装系 2	
88-J206-1	旧塗膜	2	塗装系 3-D	
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-D	
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-D	
88-J304-1	旧塗膜	2	塗装系 1	関西ペイント
88-J305-1	旧塗膜	2	塗装系 2	
88-J306-1	旧塗膜	2	塗装系 3-K	
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-K	
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-K	

表-4. 7. 2 補修塗装塗膜の付着性評価結果（上段：旧塗膜の研磨有 下段：旧塗膜の研磨無）

試験片 No.	旧塗膜の 暴露年数	補修塗装系No.	補修塗装後の付着性(Kg/cm ²)			
			初 期	暴露3年後	暴露5年後	暴露7年後
88-J104-1	2年	塗装系 1	3 7 4 2			
88-J105-1	2	塗装系 2	4 3 4 4			
88-J106-1	2	塗装系 3 - N	3 9 4 3			
88-J107-3	5	塗装系 1	2 2 3 6			
88-J108-3	5	塗装系 2	2 9 3 1			
88-J109-3	5	塗装系 3 - N	5 3 5 1			
88-J110-5	7	塗装系 1				
88-J111-5	7	塗装系 2				
88-J112-5	7	塗装系 3 - N				
88-J204-1	2	塗装系 1	3 7 2 0			
88-J205-1	2	塗装系 2	2 5 1 9			
88-J206-1	2	塗装系 3 - D	3 0 2 0			
88-J207-3	5	塗装系 1	4 0 3 7			
88-J208-3	5	塗装系 2	4 0 4 1			
88-J209-3	5	塗装系 3 - D	3 0 2 5			
88-J210-5	7	塗装系 1				
88-J211-5	7	塗装系 2				
88-J212-5	7	塗装系 3 - D				
88-J304-1	2	塗装系 1	1 8 1 0			
88-J305-1	2	塗装系 2	1 0 1 0			
88-J306-1	2	塗装系 3 - K	1 5 2 0			
88-J307-3	5	塗装系 1	>7 0 >7.0			
88-J308-3	5	塗装系 2	7 0 6 0			
88-J309-3	5	塗装系 3 - K	4 0 3 5			
88-J310-5	7	塗装系 1				
88-J311-5	7	塗装系 2				
88-J312-5	7	塗装系 3 - K				

表-4. 7. 3 簡易塗替塗装系の試験片内容

試験片NO.	適用下地	下地の暴露年数	研磨の有無	塗替仕様NO.	担当会社
88-L101-1	旧塗膜①	2	有	塗装系 1	日本ペイント
88-L102-1	旧塗膜①	2	有	塗装系 1	
88-L103-1	旧塗膜①	2	有	塗装系 2	
88-L104-1	旧塗膜①	2	有	塗装系 2	
88-L105-3	旧塗膜①	2	有	塗装系 1	
88-L106-3	旧塗膜①	2	有	塗装系 1	
88-L107-3	旧塗膜①	5	有	塗装系 2	
88-L108-3	旧塗膜①	5	有	塗装系 2	
88-L109-3	旧塗膜①	5	有	塗装系 1	
88-L110-5	旧塗膜①	7	有	塗装系 1	
88-L111-5	旧塗膜①	7	有	塗装系 2	
88-L112-5	旧塗膜①	7	有	塗装系 2	
88-L201-1	旧塗膜①	2	有	塗装系 1	大日本塗料
88-L202-1	旧塗膜①	2	有	塗装系 1	
88-L203-1	旧塗膜①	2	有	塗装系 2	
88-L204-1	旧塗膜①	2	有	塗装系 2	
88-L205-3	旧塗膜①	5	有	塗装系 1	
88-L206-3	旧塗膜①	5	有	塗装系 1	
88-L207-3	旧塗膜①	5	有	塗装系 2	
88-L208-3	旧塗膜①	7	有	塗装系 2	
88-L209-3	旧塗膜①	7	有	塗装系 1	
88-L210-5	旧塗膜①	7	有	塗装系 1	
88-L211-5	旧塗膜①	7	有	塗装系 2	
88-L212-5	旧塗膜①	7	有	塗装系 2	
88-L215-5	旧塗膜②	7	有	塗装系 2	関西ペイント
88-L216-5	旧塗膜②	7	有	塗装系 2	
88-L301-1	旧塗膜①	2	有	塗装系 1	
88-L302-1	旧塗膜①	2	有	塗装系 1	
88-L303-1	旧塗膜①	2	有	塗装系 2	
88-L304-1	旧塗膜①	2	有	塗装系 2	
88-L305-3	旧塗膜①	5	有	塗装系 1	
88-L306-3	旧塗膜①	5	有	塗装系 1	
88-L307-3	旧塗膜①	5	有	塗装系 2	
88-L308-3	旧塗膜①	5	有	塗装系 2	
88-L309-3	旧塗膜①	7	有	塗装系 1	
88-L310-5	旧塗膜①	7	有	塗装系 1	
88-L311-5	旧塗膜①	7	有	塗装系 2	
88-L312-5	旧塗膜①	7	有	塗装系 2	

表-4. 7. 4 簡易塗替塗膜の簡易塗替え後の付着性(Kg/cm²) 試験結果

試験片 No	旧塗膜	暴露年数	研磨	塗替仕様No	初期	3年	5年	7年
88-L101-1	①	2	有	塗装系1	5 9			
88-L102-1	①	2	無	塗装系1	5 4			
88-L103-1	①	2	有	塗装系2	5 6			
88-L104-1	①	2	無	塗装系2	6 1			
88-L105-3	①	5	有	塗装系1	3 5			
88-L105-3	①	5	無	塗装系1	3 0			
88-L107-3	①	5	有	塗装系2	3 0			
88-L108-3	①	5	無	塗装系2	5 5			
88-L109-5	①	7	有	塗装系1				
88-L110-5	①	7	無	塗装系1				
88-L111-5	①	7	有	塗装系2				
88-L112-5	①	7	無	塗装系2				
88-L201-1	①	2	有	塗装系1	3 5			
88-L202-1	①	2	無	塗装系1	3 5			
88-L203-1	①	2	有	塗装系2	3 0			
88-L204-1	①	2	無	塗装系2	5 0			
88-L205-3	①	5	有	塗装系1	6 0			
88-L206-3	①	5	無	塗装系1	4 6			
88-L207-3	①	5	有	塗装系2	3 0			
88-L208-3	①	5	無	塗装系2	3 0			
88-L209-5	①	7	有	塗装系1				
88-L210-5	①	7	無	塗装系1				
88-L211-5	①	7	有	塗装系2				
88-L212-5	①	7	無	塗装系2				
88-L215-5	②	7	有	塗装系2				
88-L216-5	②	7	無	塗装系2				
88-L301-1	①	2	有	塗装系1	1 0			
88-L302-1	①	2	無	塗装系1	1 0			
88-L303-1	①	2	有	塗装系2	1 0			
88-L304-1	①	2	無	塗装系2	1 0			
88-L305-3	①	5	有	塗装系1	7 0			
88-L306-3	①	5	無	塗装系1	3 5			
88-L307-3	①	5	有	塗装系2	6 5			
88-L308-3	①	5	無	塗装系2	6 5			
88-L309-5	①	7	有	塗装系1				
88-L310-5	①	7	無	塗装系1				
88-L311-5	①	7	有	塗装系2				
88-L312-5	①	7	無	塗装系2				

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

4. 8 塗替塗装の防食性試験

4. 8. 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仕様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. 8. 2 目的

長期防錆仕様（例えば鋼道路橋便覧 C-4 塗装系）における発錆状態は、ジンクリッチペイントを使用しているため、油性の様な全面に錆が発生する可能性は少なく、部分的にジンの欠落部より発錆する事が予想される。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/ふっ素樹脂塗料に、予めジン欠落部を作製し、部分的発錆試験片で作製仕様を確認する。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. 8. 3 実験

(1) 適用下地

- ①便覧 C 4 仕様（鋼ゾク(75 μ m)/ミストコート/エポキシ樹脂塗料(60 μ m $\times$ 2)/ふっ素樹脂塗料中塗(30 μ m)/ふっ素樹脂塗料上塗(30 μ m)) に直径5、10、20、30mmの塗残し部を設け、3年暴露して発錆した試験板 …… 1
- ②サンドブラスト板を無塗装で3年間暴露し、発錆させた後、SIS ST-3処理した試験板 …… 2

(2) 塗替塗装仕様

- ①変性エポキシ樹脂塗料(60 μ m $\times$ 3)/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) …… A
- ②エポキシプライマー(30 μ m)/超厚膜エポキシ塗料(300 μ m)/ふっ素樹脂塗料中塗(30 μ m)/ふっ素樹脂塗料上塗(30 μ m) …… B
- ③エポキシプライマー(30 μ m)/超厚膜エポキシ塗料(1000 μ m)/ふっ素樹脂塗料中塗(30 μ m)/ふっ素樹脂塗料上塗(30 μ m) …… C
- ④有機ゾク(30 μ m)/変性エポキシ樹脂塗料(60 μ m $\times$ 2)/ふっ素樹脂塗料中塗(30 μ m)/ふっ素樹脂塗料上塗(30 μ m) …… D
- ⑤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) …… E
- ⑥鉛系さび止め1種(35 μ m $\times$ 2)/7 α 酸樹脂塗料中塗(30 μ m)/7 α 酸樹脂塗料上塗(25 μ m) …… F
- ⑦鉛系さび止め1種(35 μ m $\times$ 2)/7 α -NMIO塗料(45 μ m)/塩化マグネシウム系塗料上塗(30 μ m) …… G

(3) 暴露期間（塗替塗装後）

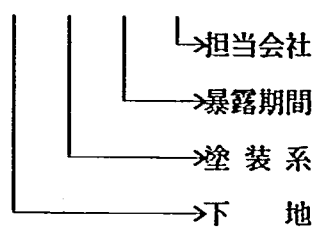
3年(3)、5年(5)、長期観察用(X)

(4) 担当会社

大日本塗料(1)、関西ペイント(2)、日本ペイント(3)

(5) 試験片NO. (詳細は表-4. 8. 1 参照)

9 1 - 1 - A - 3 - 1



(6) 評価項目

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塗り残し部からの錆の広がり……断面写真

*) 評価スケジュールを表-4. 2. 8 に示した。

表-4. 8. 1 試験片No.と塗替仕様

試験片NO.	下地	塗 替 え 塗 装 系
91-1-A-3-1	1	変性エポキシ(60 μ x3)/ふっ素用中塗(30 μ)/ふっ素上塗(25 μ)
91-1-A-5-1	1	
91-1-A-X-1	1	
91-1-A-3-2	1	
91-1-A-5-2	1	
91-1-A-X-2	1	
91-1-A-3-3	1	
91-1-A-5-3	1	
91-1-A-X-3	1	
91-1-B-3-1	1	I β キ γ Pr(30 μ)/超厚膜I β (300 μ)/ふっ素用中塗(30 μ)/ふっ素上塗(25 μ)
91-1-B-5-1	1	
91-1-B-X-1	1	
91-1-B-3-2	1	
91-1-B-5-2	1	
91-1-B-X-2	1	
91-1-B-3-3	1	
91-1-B-5-3	1	
91-1-B-X-3	1	
91-1-C-3-1	1	I β キ γ Pr(30 μ)/超厚膜I β (1000 μ)/ふっ素中塗(30 μ)/ふっ素上塗(25 μ)
91-1-C-5-1	1	
91-1-C-X-1	1	
91-1-C-3-2	1	
91-1-C-5-2	1	
91-1-C-X-2	1	
91-1-C-3-3	1	
91-1-C-5-3	1	
91-1-C-X-3	1	
91-1-D-3-1	1	有機Z γ (30 μ)/変性I β (60 μ x2)/ふっ素中塗(30 μ)/ふっ素上塗(25 μ)
91-1-D-5-1	1	
91-1-D-X-1	1	
91-1-D-3-2	1	
91-1-D-5-2	1	
91-1-D-X-2	1	
91-1-D-3-3	1	
91-1-D-5-3	1	
91-1-D-X-3	1	
91-1-E-3-1	1	I β キ γ 下塗(60 μ x2)/ふっ素中塗(30 μ)/ふっ素上塗(25 μ)
91-1-E-5-1	1	
91-1-E-X-1	1	
91-1-F-3-2	1	油性錆止(35 μ x2)/M I O (45 μ)/フタル酸中塗(30 μ)/フタル酸上塗(25 μ)
91-1-F-5-2	1	
91-1-F-X-2	1	
91-1-G-3-3	1	油性錆止(35 μ x2)/M I O (45 μ)/塩化Z γ 中塗(35 μ)/塩化Z γ 上塗(30 μ)
91-1-G-5-3	1	
91-1-G-X-3	1	

表-4. 8. 1 試験片Noと塗替仕様(続き)

試験片NO.	下地	塗 替 え 塗 装 系
91-1-H-3-1	1	長 期 観 察 用
91-1-H-5-1	1	
91-1-H-X-1	1	
91-1-H-3-2	1	
91-1-H-5-2	1	
91-1-H-X-2	1	
91-1-H-3-3	1	
91-1-H-5-3	1	
91-1-H-X-3	1	
91-2-A-3-1	2	変性エポキシ(60 μ ×3)/ふっ素用中塗(30 μ)/ふっ素上塗(25 μ)
91-2-A-5-1	2	
91-2-A-X-1	2	
91-2-A-3-2	2	
91-2-A-5-2	2	
91-2-A-X-2	2	
91-2-A-3-3	2	
91-2-A-5-3	2	
91-2-A-X-3	2	
91-2-B-3-1	2	I ⁺ キ ⁺ Pr(30 μ)/超厚膜EP(300 μ)/ふっ素用中塗(30 μ)/ふっ素上塗(25 μ)
91-2-B-5-1	2	
91-2-B-X-1	2	
91-2-B-3-2	2	
91-2-B-5-2	2	
91-2-B-X-2	2	
91-2-B-3-3	2	
91-2-B-5-3	2	
91-2-B-X-3	2	
91-2-C-3-1	2	I ⁺ Pr(30 μ)/超厚膜I ⁺ (1000 μ)/ふっ素用中塗(30 μ)/ふっ素上塗(25 μ)
91-2-C-5-1	2	
91-2-C-X-1	2	
91-2-C-3-2	2	
91-2-C-5-2	2	
91-2-C-X-2	2	
91-2-C-3-3	2	
91-2-C-5-3	2	
91-2-C-X-3	2	
91-2-D-3-1	2	有機ゾ ⁺ ン(30 μ)/変性I ⁺ (60 μ ×2)/ふっ素用中塗(30 μ)/ふっ素上塗(25 μ)
91-2-D-5-1	2	
91-2-D-X-1	2	
91-2-D-3-2	2	
91-2-D-5-2	2	
91-2-D-X-2	2	
91-2-D-3-3	2	
91-2-D-5-3	2	
91-2-D-X-3	2	

表-4. 8. 1 試験片Noと塗替仕様(続き)

試験片NO.	下地	塗 替 え 塗 装 系
91-2-E-3-1	2	I ⁺ 珪下塗(60 μ ×2)/ふっ素用中塗(30 μ)/ふっ素上塗(25 μ)
91-2-E-5-1	2	
91-2-E-X-1	2	
91-2-F-3-2	2	油性錆止(35 μ ×2)/M I O (45 μ)/77 μ 酸中塗(30 μ)/フタル酸上塗(25 μ)
91-2-F-5-2	2	
91-2-F-X-2	2	
91-2-G-3-3	2	油性錆止(35 μ ×2)/M I O (45 μ)/塩化ジ α 中塗(35 μ)/塩化ジ α 上塗(30 μ)
91-2-G-5-3	2	
91-2-G-X-3	2	
91-2-H-3-1	2	長 期 観 察 用
91-2-H-5-1	2	
91-2-H-X-1	2	
91-2-H-3-2	2	
91-2-H-5-2	2	
91-2-H-X-2	2	
91-2-H-3-3	2	
91-2-H-5-3	2	
91-2-H-X-3	2	

表-4. 8. 2 塗替塗装の防食性評価スケジュール

年 度	内 容
1992 (平成4年)	ブラスト板・旧塗膜暴露開始
1993 (平成5年)	↓
1994 (平成6年)	
1995 (平成7年)	↓ブラスト板・旧塗膜回収、塗替塗装
1996 (平成8年)	↓
1997 (平成9年)	
1998 (平成10年)	
1999 (平成11年)	↓塗替塗膜回収・評価 5年
2000 (平成12年)	↓
2001 (平成13年)	
2002 (平成14年)	↓塗替塗膜回収・評価
2003 (平成15年)	↓
2004 (平成16年)	
2005 (平成17年)	

5. 暴露10年間の成果と今後の課題

5. 1 研究の経過

本研究は科学技術庁が行なう「海洋構造物による海洋空間の有効利用に関する研究」のうち、建設省土木研究所が担当する「防食等による海洋構造物の耐久性向上技術の開発」の一環として、建設省土木研究所と(財)土木研究センターとの共同で行なわれた。

研究は防錆防食技術開発委員会の共同研究第三分科会が行ない、研究の実施は建設省土木研究所化学研究室と、(財)土木研究センターおよびそこに所属する塗料製造会社3社

(関西ペイント㈱、大日本塗料㈱、日本ペイント㈱)が担当した。

研究は計画にしたがって、1982年から1983年にかけて施設本体の塗装と試験片等の作製を行ない、1983年に駿河湾海洋技術総合施設を現地設置するとともに試験片等を取り付けた。その後、毎年調査を行ない、1994年10月に満10年の調査を終了した。

5. 2 研究課題と成果

本研究は『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なわれてきた。この度、10年という長期間の海上暴露試験により、目標が達成できる見通しを得るとともに、その間に得られた結果を実際の防食塗装にも反映させてきたので、成果と今後の課題をまとめて報告することにした。取上げた研究課題と成果の概要を以下に示した。

取上げた研究課題：

- ・海上の腐食環境調査
- ・鋼材の劣化機構と劣化予測技術の開発
- ・新規塗装システムの開発
- ・塗替え塗装技術の開発

1) 海上の腐食環境調査

海上の腐食環境の実体について調査して、腐食環境因子(表面温度、結露時間、飛来塩分量、付着塩分量、硫黄化合物)と海面からの距離、方向、部材の位置、季節、気象(風向、風力、気温、雨量等)の関係を明らかにした。塗装鋼板の劣化と各種鋼板の腐食量を対比して、腐食環境との関係も明らかになった。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、海面での飛沫帯の発生と飛来によって生じることが分かった。

本施設はISO腐食環境分類基準(ISO/9223:1992~9226:1992)の研究の日本での測定地としても環境調査を行ない、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) 鋼材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、塗装鋼板の劣化を予測する方法に対する知見を得た。

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なった。厚膜無機ジンクリッチペイントの上に高遮断性の塗装を行なえば、20年以上の防食性が得られることを明らかにし、具体的な塗装システムを提案するとともに、施設本体への塗装によって作業性も含めて実用性があることが分かった。特に、数mm単位に塗装する超厚膜エポキシ樹脂塗料の効果も確認できた。また、ふっ素樹脂塗料を上塗りに使用すれば、20年以上の耐候性も得られることが立証された。

4) 塗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、塗替え塗装技術の開発が必要である。試験片と施設本体を使用して調査して、部分補修システムと全面塗装システムについて海上での作業性も含めて塗替え塗装技術の開発ができた。

5. 2 今後の課題

10年間の研究の間に新しい要求の発生や新しい技術の開発があり、さらに研究すべき課題が出てきた。今後の課題としては、本施設の海洋暴露施設としての態勢整備、新しい要求に応じた研究の実施がある。

1) 海洋暴露施設としての態勢整備

海洋構造物による海洋空間の有効利用を図るためには、恒久的な海洋暴露施設が必要であるが、我が国には適当な施設がない。本施設は国際的にも環境の位置付けができたこともあり、我が国での海洋標準暴露地として活用できるようにすることが望ましい。このためには、国内の他の標準暴露地との比較を行なって特徴を明確にするとともに、設備と管理体制を整えることが必要である。

2) 新しい要求に応じた研究

構造物の防錆塗装にも公共性が求められ、社会情勢に適合することが要求される。これからは、これらの新しい要求に応じた研究を行なう必要がある。新しい要求を分類すると次のようになる。

- ・国際化への対応
- ・地球環境と省力・省資源への配慮
- ・塗装の高耐久性化と評価の信頼性向上

(1) 国際化への対応

我が国では工業製品については国際化対応が図られてきたが、建設分野でも市場開放に伴い、国際化が必要になってきた。塗装分野では、ヨーロッパを中心に進められてきたISO基準が、アメリカ圏とアジア圏も参加して実質的な国際基準となってきた。現在、審議が進められている「構造物の保護塗装

基準(ISO/TC35/SC14)」では環境対策と長期耐久性追及の間にヨーロッパ諸国と我が国の間に見解の相違があり、我が国の要求を主張するためには、国際的にも環境の位置付けができていない本施設で資料を作成することが必要である。

(2) 地球環境と省力・省資源への配慮

地球環境への配慮は、産業界全体の必須課題となっている。塗装分野でも社会情勢の変化に対応して、溶剤や鉛化合物の削減等の環境保全塗料、塗装の持つ色彩付与という特徴を生かした環境調和塗料、省力・省資源塗料が開発されている。これらの塗料の開発を行ない、その性能を本施設で客観的に評価されなければならない。

(3) 塗装の高耐久性と評価の信頼性向上

塗装の高耐久性は、恒久的な目標として常に研究が行なわれている。このような研究成果の確認を随時行ない、合わせてこれらの耐久性の評価技術の開発が必要である。

謝辞

本研究における一連の暴露試験調査は、駿河湾海洋技術総合研究施設（マリンステーションするが）において実施しているものである。末筆ながら同施設の管理者である中部地方建設局静岡河川工事事務所に対し深甚なる謝意を表する次第である。

付 録

本研究で実施した試験方法および評価方法を以下にまとめた。

1. 塗膜透湿度測定方法
2. 塗膜の酸素透過量測定方法
3. 塗膜の塩素イオン侵入度測定方法
4. 塗膜インピーダンス測定方法
5. 塗膜付着力測定方法
6. 塗膜外観変化（肉眼観察）測定方法
7. 塗膜の外観変化（電子顕微鏡）測定方法
8. 塗膜外観変化（60度鏡面光沢度）測定方法
9. FT-IRによる分析方法
10. 塗膜厚の変化測定方法
11. 電気化学的測定（カレントインタラプター法）測定方法
12. 電気化学的測定（コロージョンレートメーター法）測定方法
13. 飛来塩分測定方法

17

THE FIRST PART OF THE BOOK IS A
GENERAL INTRODUCTION TO THE
HISTORY OF THE UNITED STATES
FROM THE BEGINNING OF THE
NINETEENTH CENTURY TO THE
PRESENT TIME. THE SECOND PART
IS A HISTORY OF THE UNITED STATES
FROM THE BEGINNING OF THE
THIRTEENTH CENTURY TO THE
PRESENT TIME. THE THIRD PART
IS A HISTORY OF THE UNITED STATES
FROM THE BEGINNING OF THE
FOURTEENTH CENTURY TO THE
PRESENT TIME. THE FOURTH PART
IS A HISTORY OF THE UNITED STATES
FROM THE BEGINNING OF THE
FIFTEENTH CENTURY TO THE
PRESENT TIME. THE FIFTH PART
IS A HISTORY OF THE UNITED STATES
FROM THE BEGINNING OF THE
SIXTEENTH CENTURY TO THE
PRESENT TIME. THE SIXTH PART
IS A HISTORY OF THE UNITED STATES
FROM THE BEGINNING OF THE
SEVENTEENTH CENTURY TO THE
PRESENT TIME. THE SEVENTH PART
IS A HISTORY OF THE UNITED STATES
FROM THE BEGINNING OF THE
EIGHTEENTH CENTURY TO THE
PRESENT TIME. THE EIGHTH PART
IS A HISTORY OF THE UNITED STATES
FROM THE BEGINNING OF THE
NINETEENTH CENTURY TO THE
PRESENT TIME. THE NINTH PART
IS A HISTORY OF THE UNITED STATES
FROM THE BEGINNING OF THE
TWENTIETH CENTURY TO THE
PRESENT TIME. THE TENTH PART
IS A HISTORY OF THE UNITED STATES
FROM THE BEGINNING OF THE
THIRTIETH CENTURY TO THE
PRESENT TIME.

1. 塗膜透湿度測定方法

1. 1 概 要

透湿度は一定時間に単位面積の膜状物質を透過する水蒸気の量の大小を言う。本試験では遊離塗膜を境界面とし、一方の側の空気を相対湿度90%、他の側の空気を吸湿剤によって乾燥状態に保ち、24時間で塗膜を透過する水蒸気の量(g)を測定し、その材料1㎡あたりに換算した水蒸気量を塗膜の透過度とする。

1. 2 試験方法

JIS Z 0208防湿包装材料の透湿度試験方法(カップ法)に準拠して行う。

試験条件：温度 $20 \pm 0.5^{\circ}\text{C}$ 、相対湿度 $90 \pm 2\%$

1. 3 装 置

1)透湿カップ：JIS Z 0208に準拠した包装材透湿カップを用いる。透湿面積： 28.26cm^2

2)恒温恒湿装置： $20^{\circ}\text{C} \pm 0.5^{\circ}\text{C}$ に設定。空気の循環速度は 1.2m/sec

3)化学天秤：測定容量： 200g 感度： 0.1mg

1. 4 操 作

1)吸湿剤(水分測定用塩化カルシウム)をカップに平ら入れ、試験片との距離を約3mmにする。

2)試験片をカップと同心円になるようにセットし、溶融封ろう剤(融点 $69\sim 73^{\circ}\text{C}$ パラフィン)をカップの周縁の溝に流し込み、試験片の縁を封かんする。

3)試験体を所定の試験条件に保った恒温恒湿装置の中に入れ、適当な間隔で秤量する。連続する秤量で単位時間当たりの質量増が5%以内、5mg以上で一定になるまで試験を続ける。また、カップに入れた吸湿剤が、その質量に対して10%の吸湿をする以前に試験を終了する。

1. 5 測定結果の算出と表示

透湿度は次式を用いて算出する。

$$\text{透湿度 } Q \text{ (g/㎡} \cdot 24\text{h)} = \frac{240 \times m}{t \times A}$$

A：透湿面積 $28.26 \text{ (cm}^2\text{)}$

t：試験を行った最後の二つの秤量時間間隔(h)

m：試験を行った最後の二つの秤量時間間隔の増加質量(mg)

*透過係数 $k_T \text{ (cm/sec)}$ JISA1218への単位換算 Q_K

$$Q_K \text{ (cm/sec)} = 1.44 \times 10^{-6} Q \text{ (透湿度g/㎡} \cdot 24\text{h)}$$

$$\left[\begin{array}{l} \text{H}_2\text{O } 18 \text{ (g/mol)} = 22400 \text{ (cm}^3\text{/mol)} \text{ H}_2\text{O} | (0^{\circ}\text{C, 1atm)} \\ \text{H}_2\text{O (g)} = (22400/18) \text{ (cm}^3\text{)} \text{ H}_2\text{O} | = 1244.4 \text{ (cm}^3\text{)} \text{ H}_2\text{O} | \end{array} \right]$$

2. 塗膜の酸素透過量測定方法

2.1 概 要

塗膜中を通過する酸素量を測定する方法である。

2.2 試験片

ピンホールのない直径18mmの円形塗膜試験片を用いる。

2.3 測定方法

1) 測定原理

フィルムを透過した酸素の電極での還元反応で生じた電流変化から、酸素透過量を求めるものである。

陰極（白金）での酸素の還元反応：



陽極（銀）での反応：



2) 測定回数：各試料について3回測定する。

3) 測定時間：測定時間は電流値が一定になるまで。

4) 測定装置：製科研式フィルム酸素透過率計。

2.4 測定結果の計算と表示

酸素透過係数Pは次式より求める。

$$P = \frac{i^\infty \cdot l}{NFA P_s} \quad \text{cc} \cdot \text{cm} / \text{cm}^2 \cdot \text{sec} \cdot \text{cmHg}$$

$$\left[\begin{array}{ll} N = 4 \text{ (反応に関与する電子数)} & P_s = 7.6 \\ F = 96500 / 22400 \text{ (ファラデー定数)} & i^\infty : \text{測定電流 } (\mu A) \\ A : \text{フィルムと密着する白金の面積} & l : \text{膜厚 } (\mu m) \end{array} \right]$$

製科研式フィルム酸素透過率計の場合は次式より求める。

$$\begin{aligned} P &= \frac{P \times 7.6}{1 \times 10^{-4}} \\ &= 2.931 \times i^\infty \times 10^{-7} \quad \text{cm} / \text{sec} \end{aligned}$$

3. 塗膜の塩素イオン侵入度測定方法

3. 1 概 要

塗膜による腐食性物質(Cl^-)の遮蔽性を評価するためXMA(X線マイクロアナライザー)を用いて塗膜中への Cl^- の侵入度を測定する。

3. 2 試験方法

塗装試験板より5mm角の試料を切出しエポキシ樹脂等で埋込む。塗装断面をサンドペーパー(#240→#600→#1000)で水研ぎし、最後に水を使用しないで#1000サンドペーパーで仕上げ研磨後、金(Au)蒸着してXMA(帯分析)で分析する。

3. 3 装 置

微小部走査X線分析装置

4. 塗膜インピーダンス測定方法

4. 1 概 要

非破壊法によって塗膜のインピーダンスを測定し、塗膜の防錆性や劣化程度を調べる。

4. 2 測 定

- 1)セルにペースト(CMCと食塩の3%水溶液)を塗布し、測定塗膜に貼付け60±10分間放置する。
- 2)インピーダンス測定器で周波数0.2、0.5、1.0kHzの抵抗と容量を測定。 $\tan\delta$ を算出する。
- 3)測定部分の塗膜を充分水洗すると共に、マーカーで測定した部分が分かるようにしておく。

4. 3 評価と解析

- 1)抵抗と容量の経時変化：防錆性が低下すると抵抗が小さくなり、ふくれを生じると容量が大きくなる。
- 2) $\tan\delta$ 値の経時変化：防錆性が低下すると大きくなり、2.0を超えると防錆性が失われたと判断される。
- 3)抵抗の周波数特性：抵抗が周波数に反比例すれば塗膜は健全で、抵抗が周波数に関係なくほぼ一定なら塗膜の防錆性は失われていると判断される。

5. 塗膜付着力測定方法

5. 1 概 要

塗膜の付着力をプルオフ法で測定する。

5. 2 装 置

- 1) 引張り試験機またはアドヒージョンテスター
- 2) 測定用端子

5. 3 測 定

- 1) 測定する塗面を#400程度のサンドペーパーで軽く研磨する。塗面に端子(エルコ社製アドヒージョンテスター用)を速硬化エポキシ接着剤で貼付け、20℃で3時間以上放置する。
- 2) 貼付けた端子周辺塗膜に、カッター等を用いて素地に達する傷をつける。
- 3) 引張り試験機またはアドヒージョンテスター(エルコ社製)で端子を引張り、剥離強度(kg/cm²)と剥離した層の比率を記録する。
- 4) 引張り試験機を用いる場合、速度は0.5mm/min. または80kgf/cm²到達時間を1.5分程度とし、アドヒージョンテスターを用いる場合は、できるだけ休みなくシリンダーを回転させる。
- 5) 測定が70kgf/cm²以上になる場合は、70kgf/cm²以上と記録し測定を中止する。

6. 塗膜外観変化(肉眼観察)測定方法

6. 1 概 要

塗装試験板および塗装鋼材の耐候性、防錆性を外観観察によって評価し、経年的に塗膜の外観状態の変化を求める。

6. 2 試験項目

白亜化(チョーキング)、ふくれ、われ、はがれ、さび

6. 3 評価基準

(財)日本塗料検査協会「塗膜の評価基準」(1970)に準拠する。

7. 塗膜の外観変化(電子顕微鏡)測定方法

7. 1 概 要

走査型電子顕微鏡(SEM; Scanning Electron Microscopy)で塗膜表面の劣化状態を観察する。

7. 2 試験方法

塗装試験板より試料を切出し、塗面を金(Au)で蒸着して測定試料を作製する。試料台の角度を変え、電子線の照射角を変える。45度、3000倍を標準とし、塗面状態の観察を行う。

7. 3 装 置

走査型電子顕微鏡

8. 塗膜外観変化(60度鏡面光沢度)測定方法

8. 1 概 要

入射角と受光角がそれぞれ60度の光沢反射率を測定し、基準面の光沢度を100とした時の百分率で表す。塗膜の外観評価と、樹脂劣化の判断基準の一つとする。

8. 2 測定方法(JIS K 5400の6.7に準拠)

塗膜表面の付着物をはけで除去した後測定する。位置を変えて5回測定し、各測定値と平均値を記録する。

測定装置: 平行光形光源で入射角、受光角が60度の鏡面光沢度測定装置

9. FT-IRによる分析方法

9. 1 概 要

FT-IR従来のプリズムと異なる干渉計を用い、さらにコンピューターによりフーリエ変換し感度アップが図られている。暴露前後の塗面の差スペクトルをとることで、塗膜組成や樹脂構造の経時変化を観察し、塗膜劣化機構を解明できる。

9. 2 分析方法

1) 試料調整方法

ナイフで塗膜を物理的に削り、KBr錠剤法で測定する。

2) 差スペクトルのとり方

塗膜中の顔料特有の吸収は暴露により変化しないと仮定し、差スペクトルをとる。

装置: FT-IR測定装置

10. 塗膜厚の変化測定方法

10.1 概要

初期膜厚と暴露後の膜厚の経時変化を測定する方法である。

10.2 装置

- 1) 測定は2点調整形電磁膜厚計を用いる。
- 2) 測定位置が一定になるように固定マスクを用いる。
- 3) 測定器の調整：被測定部材と同一材質、板厚で表面粗さ $Rz6\mu m$ 以下を使用する。被測定塗膜厚に近い厚さの標準板で調整する。

10.3 測定結果の解析

試験片毎に5点測定を行い、値を記録し5点の平均値を求める。変化量は次式を用いて計算する。

$$\text{変化量} = (\text{経時後の平均膜厚}) - (\text{初期の平均膜厚})$$

11. 電気化学的測定（カレントインタラプター法）測定方法

11.1 概要

塗膜と塗膜下金属面の時定数の差を利用して塗膜抵抗を除去し、塗膜下金属の分極を測定できる。微小電流を短時間印加するので、塗膜下金属に与える影響が小さい等の特長がある。

11.2 試験方法

3%食塩水を満たしたセル中で試験を行う。定電流パルス発生装置によりカソード方向に5mV程度分極するように定電流を印加し、10秒間分極した時の分極電圧から分極抵抗を求める。

11.3 装置

定電流パルス発生装置（北斗電工製 塗膜用カレント・パルス・ジェネレーター）

XYレコーダー

11.4 測定結果の解析

分極抵抗を次式で求める。

$$R_e = \frac{\eta}{i} \quad (\Omega)$$

η ; 分極電圧

i ; 印加電圧

（防錆技術 29, 290-296('80)、田辺 et al., 参照）

12. 電気化学的測定（コロージョンレートメーター法）測定方法

12.1 概 要

ポテンシオスタットを基本としたコロージョンレートメーターは、塗装金属の腐食現象、例えば金属の減量、腐食形態、塗膜の防食機構、環境／塗膜／金属の相互作用等を科学的に解釈するに必要な基本値、①塗膜の電気抵抗（分極抵抗）、②塗装金属の自然電位、③電位と電流との関係の曲線（分極曲線）を自動的に測定する装置で、塗装鋼板の防食性を定量的に評価する塗膜の劣化機構解明の一手段である。

12.2 試験方法

塗膜に長さ20mmのナイフ傷をつけた状態で暴露し、一定期間毎にコロージョンレートメーターにより傷箇所の腐食電流を測定する。また、同時に傷のない箇所についても測定し、参考データとする。

<コロージョンレートメーター測定条件>

浸漬液：3%食塩水溶液

浸漬温度：30℃（塗膜側、塗装鋼板裏側）

浸漬時間：80時間

13. 飛来塩分測定方法

13.1 概 要

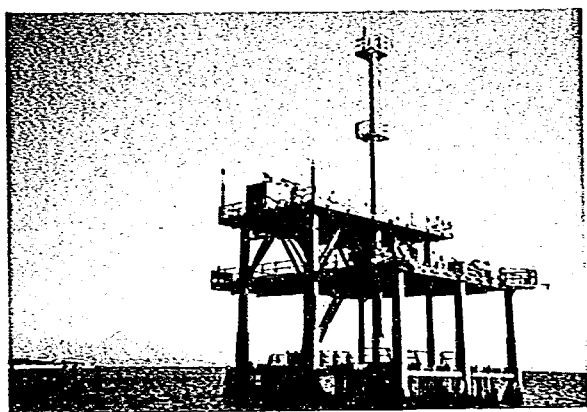
塗装鋼材および鋼材の腐食に大きな影響を与えられ飛来塩分の測定方法のうち、本研究ではDK式（土研式）とISO法式を採用した。

13.2 DK式（土研式）

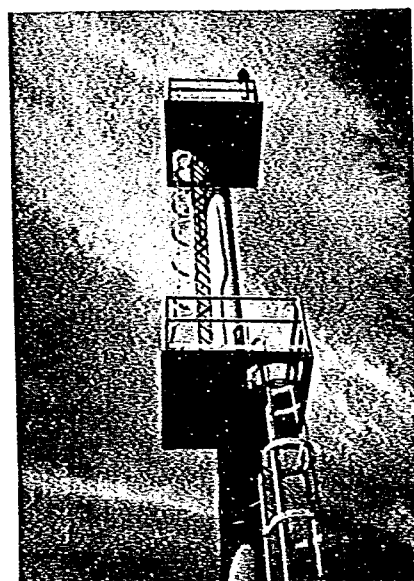
10×9cmのステンレス製垂直平面に雨水と共に捕集する方法。測定は3ヵ月毎に行ない、季節変動も調査した。風向による方向性をみるため第1デッキにおいて東西南北の4方向、海面からの高さの影響をみるため、第2デッキの南方向の合計5箇所に装置を設置し、昭和60年11月から測定を開始した。土木研究所では本装置を全国に設置して測定を行なっているので、他地区と飛来塩分量を比較することが可能となる。

13.3 ISO方式

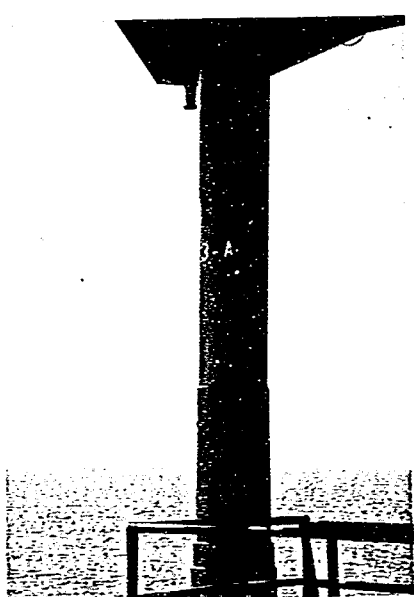
キャンドロドロップと呼ばれる円筒状に巻いたガーゼに捕集する方法。原理上、360度全方向での塩分捕集が可能であるため、第1デッキに設置して測定した。3ヵ月毎に測定を行ない、季節変動も調査した。



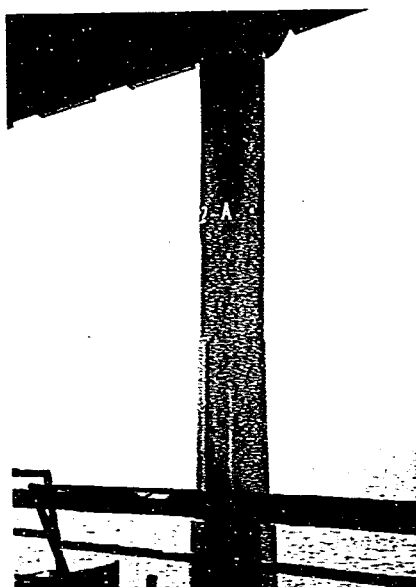
全 景



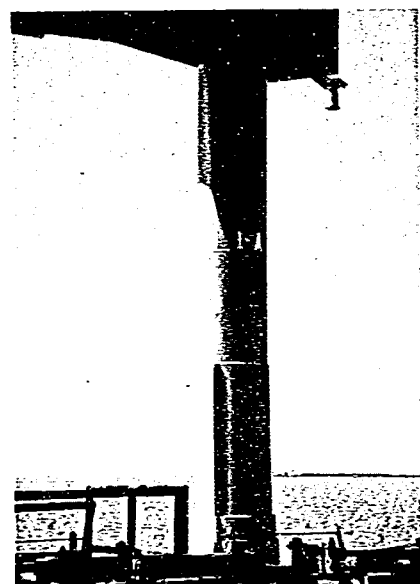
タワー



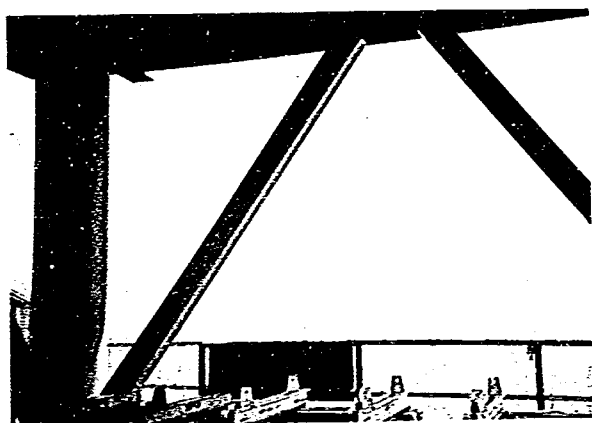
厚膜無機ジンク
エポキシ
ポリウレタン



厚膜無機ジンク
厚膜ビニル



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



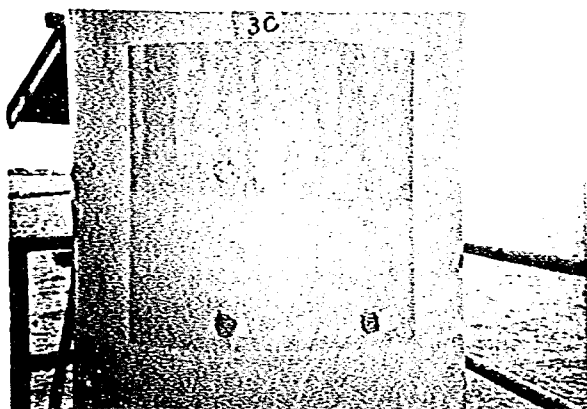
第2デッキ



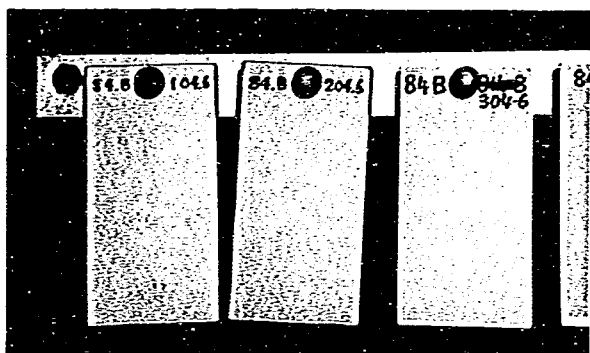
階段
(第1デッキ/第2デッキ間)



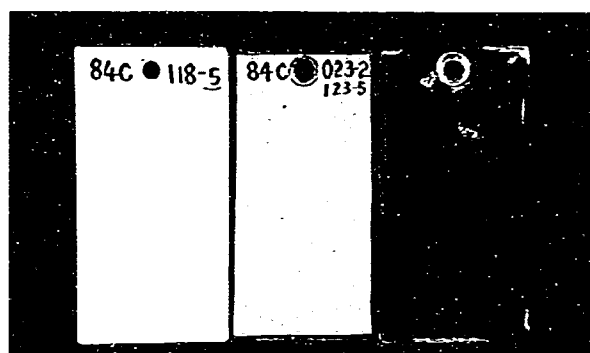
暴露架台



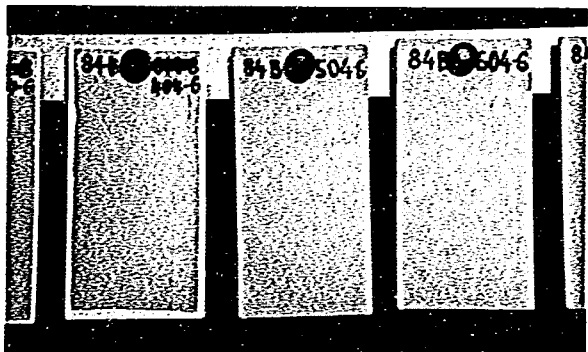
簡易塗り替えシステムの検討
(上部：ふっ素，下部：ポリウレタン)



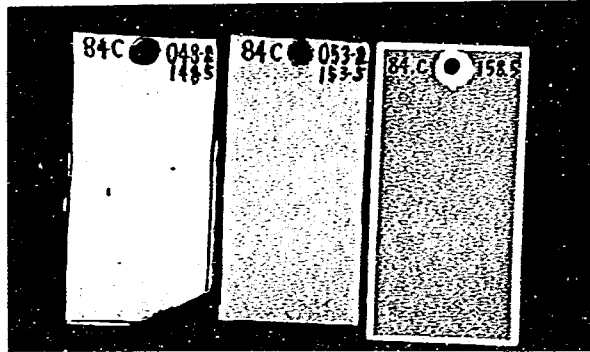
A-1 鉛系錆止め
フタル酸系
A-2 鉛系錆止め
塩化ゴム系
A-3 厚膜無機ジンク
塩化ゴム系



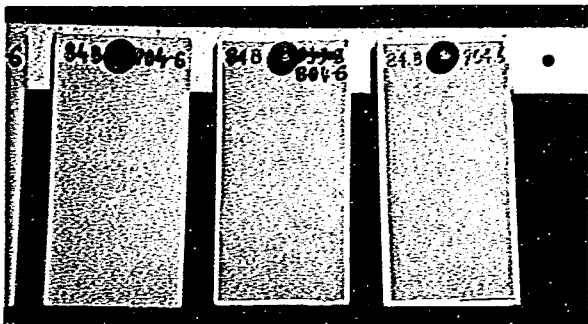
B-4 厚膜無機ジンク
シリコン
B-5 鉛系錆止め
シリコンアルキド
B-6 無溶剤タールエポ
ポリウレタン



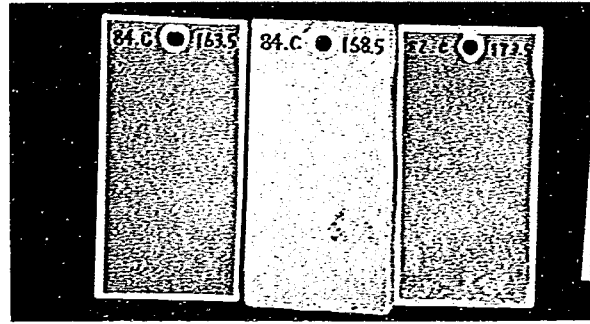
A-4 フェノール
フタル酸系
A-5 エポキシ
ポリウレタン
A-6 厚膜無機ジンク
エポキシ
ポリウレタン



B-10 無溶剤エポキシ
B-11 亜鉛溶射
エポキシ
ポリウレタン
B-12 厚膜無機ジンク
ふっ素



A-7 厚膜無機ジンク
エポキシMIO
ポリウレタン
A-8 厚膜無機ジンク
ビニル
A-9 厚膜無機ジンク
ガラスフレーク
ふっ素



B-13 鉛系錆止め
ふっ素
B-14 超厚膜型ポリウ
レタン
B-15 亜鉛メッキ
エポキシ
ふっ素

海洋構造物の耐久性向上技術に
関する共同研究報告書
(第3分科会塗料部会)

ISSN 0386-5878
共同研究報告書第143号
平成7年12月(1995)

建設省土木研究所
財団法人土木研究センター

要 旨

海域は、鋼構造物に対して腐食性の厳しい環境であるため、海洋構造物による海洋空間等の有効利用を図るには、鋼構造物の長期防錆塗装技術の開発が不可欠である。

このため、駿河湾の大井川町沖合に設置した海洋技術総合研究施設の本体および本体の第3デッキに設置した暴露用架台に取り付けた多数の塗装試験片の暴露試験により、長期の防錆性や、長期の防錆性と景観保持性を併せ持つ塗装システムの開発ならびにこれらの塗装システムの塗り替えに適した塗装システムの開発を行った。その結果、海上大気中の長期防錆に適した新規塗装システム、長期の景観保持性の可能な塗装システムおよび防錆性の優れた塗り替え塗装システムならびに塗膜の寿命予測に不可欠な塗膜の劣化機構について多くの知見が得られ、海上大気中における長期防錆塗装技術の開発について明るい見通しが得られた。

キーワード：海洋構造物、鋼構造物、防食技術、塗料、長期防錆塗装、塗り替え、暴露試験、腐食環境測定

郵便はがき

五十円切手
をはって下
さい。

305-□□

建設省土木研究所
材料施工部化学研究室
行

茨城県つくば市大字旭一番地

No. 003

No. 003

配布先氏名

配布先住所

○

共同研究報告書第 143 号 部

上記のとおり受領しました。

所 属（住所）

氏 名 印