

海洋構造物の耐久性向上技術に関する 共同研究報告書

—海洋暴露 20 年の総括報告書—

平成 18 年 5 月

独立行政法人土木研究所 材料地盤研究グループ 新材料チーム

財団法人 土木研究センター

社団法人 日本鉄鋼連盟

社団法人 プレストレスト・コンクリート建設業協会

第345号平成18年5月

海洋構造物の耐久性向上技術に関する 共同研究報告書

ー海洋暴露20年の総括報告書ー

独立行政法人 土木研究所材料地盤グループ（新材料）

上席研究員 西崎 到

総括主任研究員 守屋 進

財団法人 土木研究センター

社団法人 日本鉄鋼連盟 海洋防食第一分科会

社団法人 プレストレスト・コンクリート建設業協会 大井川暴露試験共同研究委員会

要旨

独立行政法人土木研究所と財団法人土木研究センター，社団法人日本鉄鋼連盟，社団法人プレストレスト・コンクリート建設業協会は，海洋構造物の防食技術を向上させることを目的として，昭和57年度から駿河湾にある海洋総合技術研究施設を用いて，海中部，干満部，飛沫部および海上大気部における鋼構造物およびコンクリート構造物の耐久性を向上させることを目的として暴露試験を実施してきた。本報告は，海洋暴露20年の研究成果の総括報告書である。

キーワード：海洋暴露試験，鋼構造物，コンクリート構造物，防食技術，防食材料

はじめに

1960 年代後半，全国的な高速道路網の整備計画や，東京湾岸道路，本州四国連絡橋などの巨大プロジェクトが計画された。これらプロジェクトは，海上や海浜地域など厳しい腐食環境に予定されており，構造物の防食技術の確立が求められていた。

土木研究所では，長大橋の塗装技術の向上を目的として，若戸大橋用の塗料の調査研究を始めとして本州四国連絡橋用塗装材料開発のため大気暴露試験を行っていた。さらに，東京湾横断道路の建設に関わる研究として，海上環境である飛沫部・干満部・海中部・海底土中部における鋼構造物の腐食性状の把握と防食方法に関する研究を東京湾内で実施した。昭和 48 年（1973 年）から建設省総合技術開発プロジェクト「海洋構造物の耐久性向上技術の開発」が始まり，化学研究室は「構造材料の防食技術の開発」を開始した。この研究では，実海域での実大鋼構造物を用いて，飛沫部・干満部を対象として民間で開発された防食技術を活用した長期間の暴露試験で，その防食性能を評価するものであった。この研究は，鋼管杭協会および財団法人国土開発技術研究センターと共同研究で実施した。共同研究の実施にあたっては，防食ぐい開発委員会を設置して，昭和 49 年（1974）に東京湾内の千葉沖で，昭和 50 年（1975）に外洋環境の阿字ヶ浦で鋼管杭の暴露試験を開始した。千葉沖の暴露試験は，暴露期間 11.5 年の昭和 61 年（1986）に終了した。阿字ヶ浦の暴露試験は，暴露期間 22 年の平成 9 年（1997）に終了した。これらの調査結果は，土木研究所資料第 3687 号「外洋に 20 年間暴露した防食鋼管杭の耐食性試験報告書」（平成 12 年 1 月）に取りまとめている。

一方，昭和 56 年度（1981）に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」について，フィジビリティスタディが行われ，昭和 57 年度（1982）より研究が開始され，土木研究所化学研究室が「防食等による海洋構造物の耐久性向上技術」を担当することとなり，海洋暴露試験施設として駿河湾大井川沖に海洋技術総合研究施設を設置した。

海洋技術総合研究施設を利用した暴露試験も民間との共同研究として実施した。

すなわち，飛沫部・干満部および海中部の鋼構造物の防食技術については，社団法人鋼材倶楽部（現，社団法人日本鉄鋼連盟）と，飛沫部および干満部のコンクリート構造物の防食技術については，社団法人プレストレスト・コンクリート建設業協会と，海上大気部の長期防錆形塗装技術および海中部の電気防食設計技術については，財団法人土木研究センターと共同研究で実施している。

本報告書は，世界的にも例を見ない長期間の実環境における暴露試験結果である海洋技術総合研究施設における 20 年間の暴露試験結果をとりまとめたものである。

目 次

はじめに

第1章 駿河湾海洋技術総合研究施設の設置経緯と施設概要

1. 設置に至るまでの経緯
2. 海洋技術総合研究施設と設置場所

第2章 共同研究の概要

1. 研究目的
2. 官民共同研究開始の経緯と進め方
 2. 1 共同研究開始の経緯
 2. 2 共同研究の進め方

第3章 海洋暴露 20 年の研究成果

I. 飛沫部・干満部および海中部における鋼構造物の防食技術に関する研究－第1分科会－

1. はじめに
2. 研究経過
 2. 1 研究経過
 2. 2 第1分科会の研究担当者
3. 研究課題
4. 研究方法と研究成果
 4. 1 暴露試験材
 4. 2 鋼材の腐食に関する検討
 4. 3 ステンレス鋼の耐久性に関する研究
 4. 4 チタンの耐久性に関する研究
 4. 5 有機ライニング鋼材の耐久性に関する研究
 4. 6 厚膜塗装材の耐久性に関する研究
 4. 7 保護カバーを用いた現地防食方法の耐久性に関する研究(ペトロラタムライニング)
5. まとめ
6. 今後の計画
7. 発表論文

II. 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－第2分科会－

1. はじめに
2. 研究経過
3. 研究課題
4. 研究方法と研究成果
 4. 1 コンクリート供試体の設置場所

- 4. 2 コンクリートのかぶりと配合
- 4. 3 樹脂塗装鉄筋の実用化
- 4. 4 塗膜系被覆材の実用化
- 4. 5 耐塩性コンクリートの開発
- 5. まとめ
- 6. 発表論文

III. 海上大気部の長期防錆形塗装技術に関する研究－第3分科会塗料ワーキング－

- 1. はじめに
- 2. 研究経過
- 3. 研究課題
- 4. 研究方法と研究成果
 - 4. 1 腐食環境調査
 - 4. 2 新設塗装システムの研究
 - 4. 3 施設本体の塗装システムの研究
 - 4. 4 施設本体の簡易塗替え塗装システムの研究
 - 4. 5 簡易塗替え塗装システムの研究
- 5. まとめ
- 6. 発表論文

IV. 海中部における電気防食設計技術に関する研究－第3分科会電気防食ワーキング－

- 1. はじめに
- 2. 研究経過
- 3. 研究課題
- 4. 研究方法と研究成果
 - 4. 1 電気防食試験位置
 - 4. 2 小型試験片を用いた試験
 - 4. 3 大型供試体を用いた試験
 - 4. 4 施設本体を利用した試験
- 5. まとめ

おわりに

第 1 章 駿河湾海洋技術総合研究施設の設置経緯と施設概要

1. 設置に至るまでの経緯

昭和 56 年度（1981）に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」について、フィジビリティスタディが行われ、昭和 57 年度（1982）より研究が開始された。その中で、「防食等による海洋構造物の耐久性向上技術」に関しては、建設省土木研究所化学研究室（現、独立行政法人土木研究所材料地盤研究グループ新材料チーム）が中心となって研究を実施することとなり、海洋暴露試験施設の設置が計画された。

一方、建設省中部地方建設局静岡河川工事事務所（現、国土交通省中部地方整備局静岡河川事務所）では、静岡県の駿河海岸および富士海岸において海岸浸食や高波による災害を防止するために海岸保全事業を行ってきているが、駿河海岸では海岸浸食がはげしいために浸食の機構と防止工法について詳細な調査を行う必要があると考えられ、そのための波浪観測施設を必要としていた。

このような状況のもとで、研究施設は単に防食材料の暴露試験を行うだけでなく、総合的な海域の自然条件を調査し、沿岸の防災にも役立つ施設とすることが計画された。施設の設置場所となる地元、静岡県、大井川町、関連漁業協同組合の協力を得て、また土木研究所においても化学研究室、海岸研究室（現、国土交通省国土技術政策総合研究所海岸研究室）、コンクリート研究室（現、独立行政法人土木研究所技術推進本部構造物マネジメント技術チーム）が、この計画に参画した。

すなわち、海洋空間の利用をはかるための防食材料の暴露試験を行う場合、また海岸浸食を防止する場合でも、海上の風、波浪、潮流、水質、地形、地質などの自然条件をまず把握する必要がある。本施設は、これら自然条件の観測を行い、その実態を把握するための海上観測施設としての機能も有している。このことから本施設は、海洋技術に関する総合的な研究・観測に利用される海洋技術総合研究施設となった。

2. 海洋技術総合研究施設と設置場所

海洋技術総合研究施設の概要を、写真－１，図－１に示す。また，海洋技術総合研究施設の設置位置を図－２に示す。



写真－１ 海洋技術総合研究施設

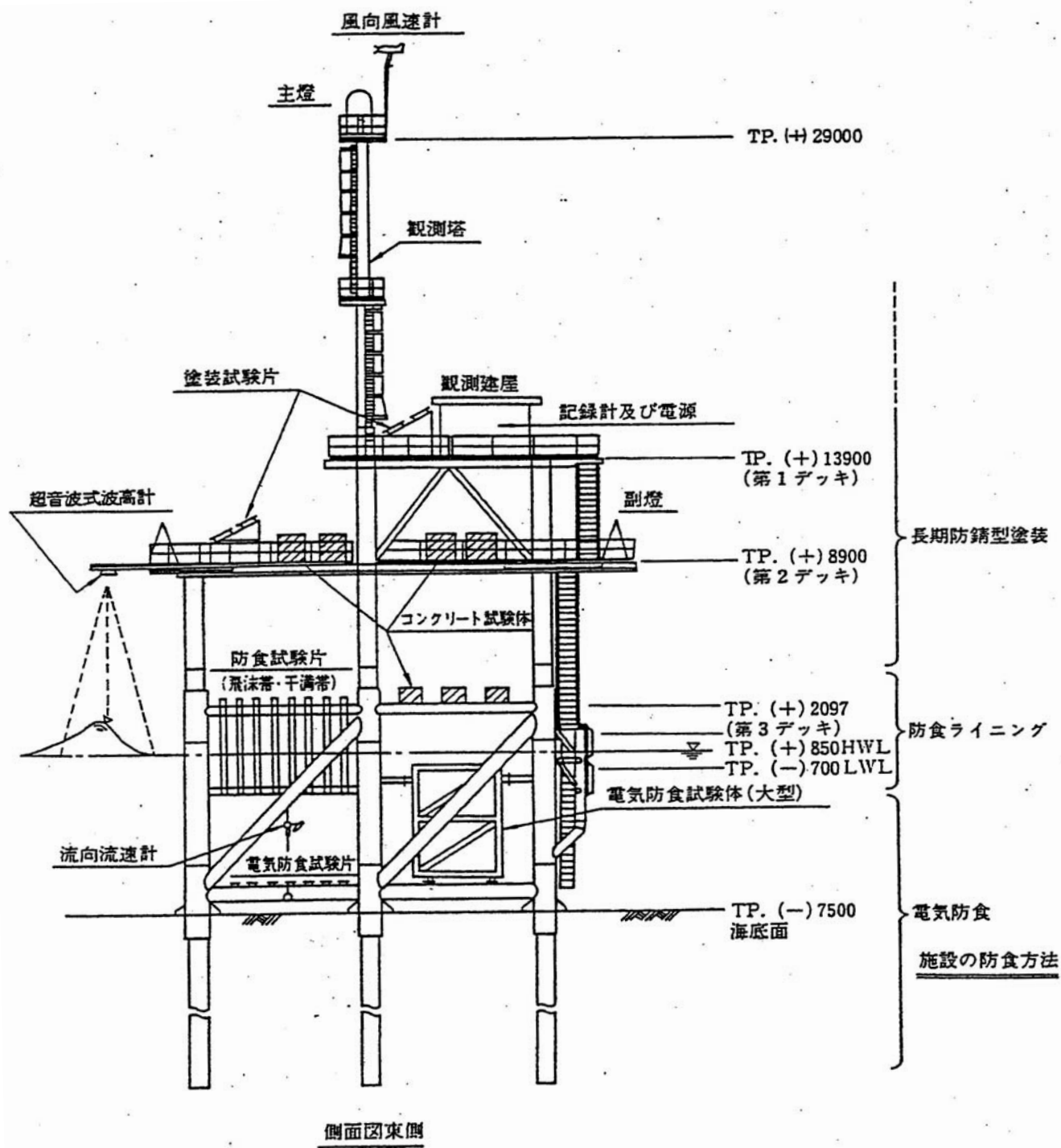


図-1 海洋技術総合研究施設の概要

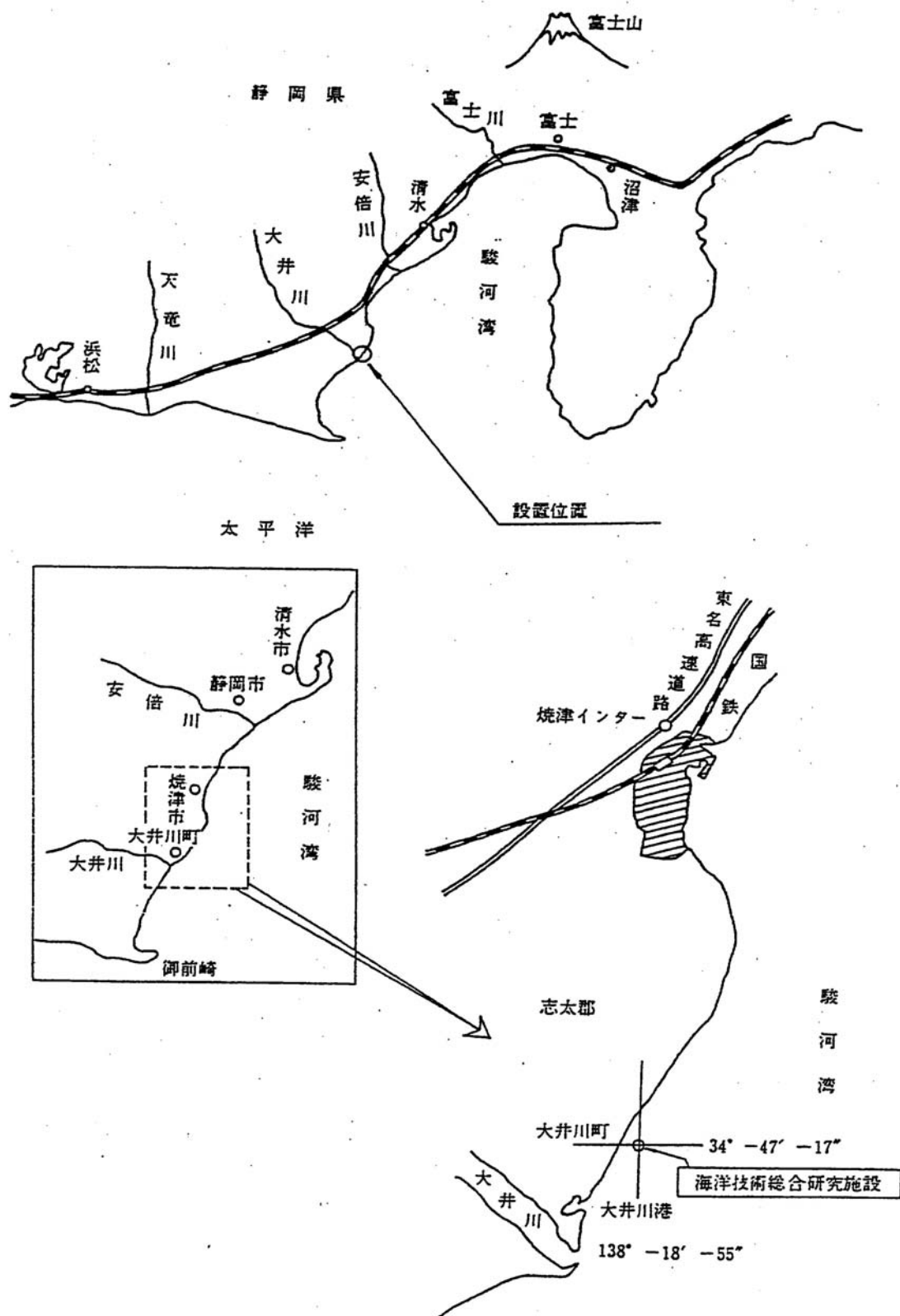


図-2 海洋技術総合研究施設の設置位置図

第2章 共同研究の概要

1. 研究目的

駿河湾内の静岡県大井川沖に科学技術振興調整費によって、「海洋技術総合研究施設」が設置された。この施設はわが国で最初の恒久的な海洋試験施設で、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。

海上で少なくとも20年の耐久性を有する海洋構造物の防食技術を確立することを目的として、この施設を使用して建設省土木研究所と民間関係者と共同研究を開始した。

2. 官民共同研究開始の経緯と進め方

2. 1 共同研究開始の経緯

2. 1. 1 科学技術庁の研究計画

科学技術庁（現、文部科学省）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 ケ年計画としてスタートさせた。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・施工等に必要なる自然環境を把握する技術の開発
- ②大型の浮遊式海洋構造物の建設基礎技術の開発
- ③厳しい波浪から海洋構造物を守る波浪制御
- ④防食等による海洋構造物の耐久性向上技術の開発
- ⑤大波浪海域における海洋構造物の実海域実施研究

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

（官側） 建設省 土木研究所（現、独立行政法人 土木研究所）

（民側） 社団法人 鋼材倶楽部（現、社団法人 日本鉄鋼連盟）
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

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

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

2. 1. 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。

2. 1. 4 共同研究の名称と分担

共同研究の名称は「海洋構造物の耐久性向上技術に関する研究」である。また、共同研究の研究項目別の分担等を表－1 に示す。

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

注) A：土木研究所，B：鉄鋼連盟，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

2. 2 共同研究の進め方

2. 2. 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土木研究所と民間３団体とで毎年締結する。共同研究を円滑かつ効果的に運営するため、次の組織を設けて業務を推進する。

①防錆防食技術開発委員会(開発委員会)

- ・研究計画の審議
- ・研究成果報告の審議

②共同研究連絡調整会議(連絡調整会議)

- ・研究運営の連絡調整

③共同研究分科会(第１，第２，第３の３分科会とする)

(各分科会内でさらに組織を分けることがある)

- ・研究計画の原案作成
- ・研究の実施
- ・研究報告書の原案作成

④共同研究事務局

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

防錆防食技術開発委員会名簿（2006年3月31日現在）

委員長	蒔田 實	財団法人土木研究センター参与（元建設省土木研究所地質化学部長）
委 員	田中柳之助	元財団法人土木研究センター
	森 芳徳	元建設省土木研究所地質化学部化学研究室長
	片脇 清	社団法人日本橋梁・鋼構造物塗装技術協会理事
	西崎 到	独立行政法人土木研究所材料地盤研究グループ（新材料）上席研究員
	守屋 進	同上 主任研究員
	川人健二	社団法人日本鉄鋼連盟（新日本製鉄株式会社）
	野中正幸	同上
	安井常二	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
	石井浩司	同上（株式会社ピーエス三菱）
	中村 亮	財団法人土木研究センター専務理事
	永井昌憲	同上 専門調査役（大日本塗料株式会社）
	阿部正美	同上（株式会社ナカボーテック）
	森嶋義雄	同上（日本防蝕工業株式会社）
事務局	金井浩一	同上

共同研究連絡調整会議名簿（2006年3月31日現在）

守屋 進	独立行政法人土木研究所材料地盤研究グループ（新材料）主任研究員
川人健二	社団法人日本鉄鋼連盟（新日本製鉄株式会社）
野中正幸	同上
石井浩司	社団法人プレストレスト・コンクリート建設業協会 （株式会社ピーエス三菱）
吉田光秀	同上（株式会社富士ピー・エス）
永井昌憲	財団法人土木研究センター専門調査役（大日本塗料株式会社）
中野 正	同上（関西ペイント販売株式会社）
大澤隆英	同上（日本ペイント販売株式会社）
森嶋義雄	同上（日本防蝕工業株式会社）
金井浩一	同上

2. 2. 2 分科会の構成

- ①第1分科会：土木研究所，日本鉄鋼連盟で構成し，共同研究実施機関以外の防食試験担当会社(12社2団体)が参加所属する。第1分科会にワーキンググループを編成し，第1WGは耐食性金属材料部門，第2WGは高分子系塗覆装防食材部門としている。
- ②第2分科会：土木研究所，プレストレスト・コンクリート建設業協会で構成し，共同研究実施機関以外の社団法人セメント協会が参加所属する。
- ③第3分科会：土木研究所，土木研究センターで構成し，塗料部門と電気防食部門よりなる。

2. 2. 3 第1分科会の研究項目

(1)高耐食性金属材料被覆法の適用による長寿命，低コスト防食技術の確立

高耐食性金属材料（ステンレス，キュプロニックル，モネル，チタンなど）を適用することで，施設の期待寿命内でのメンテナンスのミニマム化，および維持管理に要するトータルコスト低減の可能性を探究することを目的とした。

(2)低合金系耐海水鋼材の実使用における優位性の確認検討

裸使用時や塗装使用時において，低合金系耐海水鋼材が防食性，耐久性，および維持管理に要するトータルコストの観点で有利であるかどうかを探究することを目的とした。

注：低合金系耐海水鋼材は，試験経過とともに普通鋼に対する優位性が認められなくなり，本報告では単に低合金鋼と呼ぶこととし，「耐海水鋼」の名称を削除した。また，テーマ（2）の目的を「無防食鋼材の腐食速度や塗装防食被覆材の劣化機構を検討する」ことに設定し直した。

(3)新規塗覆装材料および工法の実使用状態での確性

1980年代に開発された，防食塗装と防食被覆の実海域での有用性を評価することを目的とした。

2. 2. 4 第2分科会の研究項目

海洋環境におけるコンクリート構造物の塩害対策は，（社）日本道路協会「道路橋の塩害対策指針（案）・同解説」や建設省の総合技術開発プロジェクト「コンクリートの耐久性向上技術の開発」等により，技術的な対応は一応確立されている。

しかし，塩害対策の長期的な耐久性の確認，新材料を利用した防食技術，コンクリートの品質向上等，今後さらに研究していかなければならない課題も数多く残されている。

そこで，海洋環境下でも特に腐食条件が激しいと言われている飛沫帯におけるコンクリート構造物の防食技術の確立を目的に研究を実施した。具体的な研究項目および内容は表－2に示す。

（1）コンクリートの防食技術の基本に関する研究

- ①コンクリートのかぶりと配合：セメントの種類とかぶり及び水セメント比による防食効果を把握する。
- ②コンクリートの内部組織と防食性能の把握：コンクリートのポロシチーと水密養生による防食効果を把握する。
- ③腐食調査と補修技術の開発：腐食進行を経時的に把握し，補修材料の開発を促進する。

（2）コンクリート中の鋼材の防食技術に関する研究

- ①樹脂塗装鉄筋の実用化：樹脂の品質と施工性を確認する。

- ②P C鋼材の防塩処理材料の開発：ポリエチレンシースを開発し、防食性能を確認する。
- (3) 耐海水コンクリート部材の設計技術に関する研究
 - ①塗膜系被覆材の実用化：塗膜系被覆材の開発を促進する。
 - ②含浸系材料の実用化：含浸系材料の開発を促進する。
 - ③耐塩性コンクリートの開発：コンクリート用混和材料を開発する。

2. 2. 5 第3分科会塗装ワーキングの研究項目

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なうことで、高性能で信頼性の高い長期防錆塗装技術の開発を行なうことを目的として、下記課題の研究を行なった。

- (1) 腐食環境調査：暴露試験結果を解析するため、試験場所の腐食環境を把握する。
- (2) 新設塗装システムの研究：当時の長期防錆システム、および開発中の塗装システムの性能確認を行なう。
- (3) 施設本体の塗装システムの研究：施設本体を利用して、長期防錆塗装システムの耐久性の検証試験を行なう。
- (4) 施設本体の簡易塗替え塗装システムの研究：施設本体を利用した4種ケレン程度の素地調整による塗替え塗装・耐久性の検証試験を行なう。
- (5) 簡易塗替え塗装システムの研究：塗装鋼板を用いて4種ケレン程度の素地調整による塗替え塗装・耐久性の検証試験を行なう。

2. 2. 6 第3分科会電気防食ワーキングの研究項目

鋼管杭を用いた形状の複雑な構造物を対象に、海象条件の変化に対応する電気防食設計技術に関する研究を実施した。

なお、本章で記述した各分科会の研究項目は、共同研究開始時のものである。研究途中で内容の見直しや、新しいテーマを追加しているが、それについては各分科会の章で説明している。

第3章 海洋暴露20年の研究成果

I. 飛沫部・干満部および海中部における鋼構造物の防食技術に関する研究 －第1分科会－

1. はじめに

第1分科会では、駿河湾における「海洋技術総合研究施設」をフィールドに、1984年（昭和59年）から2003年（平成15年）までの約20年間にわたって実海域における各種防食工の長期暴露試験を実施してきた。その成果は、東京湾横断道路や夢舞大橋などの防食に適用され、今後羽田再拡張、海峡横断構想のように100年耐久が求められる分野や、既存施設のリニューアルニーズが高まる中、LCC(ライフサイクルコスト)を最小とする提案が求められる時代に対して、今後の技術開発の方向性や、提案仕様の有効性を証明する極めて説得性の高いデータが系統だって採取され、当初の計画を完了した。

2. 研究経過

2. 1 研究経過

試験は1984年（昭和59年）の試験材設置から、1993年（平成5年）の10年目で中間的総括や見直しを踏まえ、2003年（平成15年）までの10年間の延長を経て回収され、合計20年の暴露試験を実施している。この間、単年度ごとの一般調査、数年ごとの詳細調査を参考に、当初計画に一部変更を加えつつ、その後の技術開発を反映した追加暴露などを実施している。表－I－1に主な調査経緯を示す。通常は外観観察を主とする一般調査であり、2.5年（1986年）、5.5年（1989年）、9.5年（1993年）、14.5年（1998年）、19.5年（2003年）経過の年には、現地で暴露のまま、あるいは一時撤去して観察、測定、さらに回収して実験室に持ち帰り、破壊試験等を含む詳細調査を実施している。また、6.5年（1990年）、9.5年（1993年）、12.5年（1996年）、14.5年（1998年）には、新たな暴露試験材を設置している。

表－Ⅰ－１ 主な調査経緯

(○一般，◎詳細)

年度	経過年	調査	研究テーマ 1	研究テーマ 2	研究テーマ 3
昭和 59 1984	0.5	○	・試験材供試	・試験材供試	・試験材供試
昭和 60 1985	1.5	○			
昭和 61 1986	2.5	◎	・局部腐食詳細	・耐海水鋼の腐食調査	・付着力，素地面調査
昭和 62 1987	3.5	○			
昭和 63 1988	4.5	○			
平成 01 1989	5.5	◎	・SUS 隙間腐食調査 ・SUS316L 電防開始	・耐海水鋼の腐食調査	・付着力，素地面調査 ・ペトロラタム+FRP 解体
平成 02 1990	6.5	○	・モネル溶接部腐食 調査 ・SUS316L 隙間腐食 調査	・耐海水鋼の腐食調査	・カラー樹脂被覆鋼管供試 ・厚膜エポキシ，ピンホール および塗膜調査
平成 03 1991	7.5	○	・SUS316L 電防 ・Ti クラッド+塗装+ 電防		
平成 04 1992	8.5	○			・カラー樹脂被覆材塗膜 調査
平成 05 1993	9.5	◎	・SUS 隙間腐食調査 ・非鉄金属腐食調査 ・SUS304 電防開始 ・高耐食性ステンレス 暴露	・耐海水鋼の腐食調査 ・耐海水鋼+塗装+電防 供試	・付着力，素地調査 ・超厚膜被覆材供試 ・補修塗装材供試 ・ペトロラタム+FRP 更新
平成 06 1994	10.5	○			
平成 07 1995	11.5	○	・SUS304 隙間腐食調 査		
平成 08 1996	12.5	○	・SUS304 電防開始		・カラー樹脂被覆板供試 ・超厚膜塗装材の補修
平成 09 1997	13.5	○			・厚膜塗装材の補修
平成 10 1998	14.5	◎	・SUS304 隙間腐食調 査 ・Ti 系新規試験材供試	・耐海水鋼の腐食調査	・アクリル系塗料調査 ・補修防食材供試
平成 11 1999	15.5	○			
平成 12 2000	16.5	なし			
平成 13 2001	17.5	○			
平成 14 2002	18.5	なし			
平成 15 2003	19.5	◎	・試験材回収，調査	・試験材回収，調査	・試験材回収，調査

註) 2000年および2002年は，調査なし

2. 2 第1分科会の研究担当者

平成15年度以降の第1分科会の関係者を以下に示す。

守屋 進	独立行政法人土木研究所材料地盤研究グループ新材料チーム主任研究員
岡 扶樹	(元)新日本製鐵(株)建材開発技術部土木基礎建材技術グループマネジャー
山本正弘	(元)新日本製鐵(株)鉄鋼研究所鋼構造研究開発センター主幹研究員
川人健二	新日本製鐵(株)建材開発技術部マネジャー
吉崎信樹	新日本製鐵(株)君津技術研究部主任研究員
今福健一郎	新日本製鐵(株)鉄鋼研究所鋼構造研究開発センター主任研究員
森 玄	(前)日本鋼管(株)建材センター建材技術開発部土木建材チーム
元木卓也	J F E スチール(株)建材センター建材技術部土木技術室副課長
釣 之郎	J F E スチール(株)スチール研究所耐食・防食研究部主任研究員(課長)
岡本政信	(前)住友金属工業(株)鋼板・建材カンパニー建設技術部土木技術研究室長
喜田 浩	住友金属工業(株)鋼板・建材カンパニー東京土木建材技術室担当次長
幸 英昭	住友金属工業(株)厚板・建材研究開発部部長研究員
上村隆之	住友金属工業(株)厚板・建材研究開発部主任研究員
鈴木公明	(前)(株)日本製鋼所鉄鋼事業部材料企画担当部長
福田 隆	(株)日本製鋼所経営企画室
金子照男	(前)(社)日本チタン協会(住友金属建材(株)建築建材工事営業グループ長)
小田高士	(社)日本チタン協会(新日本製鐵(株)チタン事業部部長)
伊藤 均	(社)日本チタン協会企画部長
山本孝美	(社)日本チタン協会(住友金属工業(株)チタン部チタン技術室)
永田秀樹	日本鋳業協会鉛垂鉛需要開発センターセンター次長
中野 正	関西ペイント販売(株)建設塗料本部防食塗料技術部部長
多記 徹	(前)大日本塗料(株)技術本部基礎研究第一部部長代行
永井昌憲	大日本塗料(株)技術開発部門研究部研究第一グループグループ長代行
倉田忠志	中国塗料(株)インダストリアルディビジョン工業用塗料技術センター重防設計グループリーダー
中西英幸	日本ペイント技術部ミゼロングループマネジャー
野口忠久	(元)(株)ナカボーテック技術開発研究所試験分析室リーダー
大野泰彦	(前)(株)ナカボーテック技術研究所開発研究室リーダー
井川一弘	(株)ナカボーテック技術研究所所長代理
志鶴真介	(株)ナカボーテック技術研究所
岡嶋真人	日本油脂BASFコーティングス(株)工業塗料本部技術部
金谷 勲	(元)日本油脂BASFコーティングス(株)工業塗料本部技術2部1G
奈良部博	(元)三井金属塗料化学(株)技術本部技術二部長
中西英幸	三井金属塗料化学(株)技術部ミゼロン・防耐火グループマネジャー

3. 研究課題

研究課題は、次の3件の研究テーマからなる。

□研究テーマ1：「高耐食性金属材料被覆法の適用による長寿命，低コスト防食技術の確立」

高耐食性金属材料（ステンレス，キュプロニッケル，モネル，チタンなど）を適用することで，施設の期待寿命内でのメンテナンスのミニマム化，および維持管理に要するトータルコスト低減の可能性を探究することを目的とした。

□研究テーマ2：「低合金系耐海水鋼材の実使用における優位性の確認検討」

裸材や塗装時において，低合金系耐海水鋼材が防食性，耐久性，および維持管理に要するトータルコストの観点で有利であるかどうかを探究することを目的とした。

注：低合金系耐海水性鋼材は，試験経過とともに普通鋼に対する優位性が認められなくなり，本報告では単に低合金鋼と呼ぶこととし，「耐海水鋼」の名称を削除した。また，テーマ2の目的を「無防食鋼材の腐食速度や塗装防食被覆材の劣化機構を検討する」ことに設定し直した。

□研究テーマ3：「新規塗覆装材料および工法の実使用状態での確性」

1980年代に開発，防食塗装と防食被覆の実海域での有用性を評価することを目的とした。

4. 研究方法と研究成果

4. 1 暴露試験材

試験材は1984年（昭和59年）の実験開始時に設置したものを第1次試験材，その後追加暴露したものを第2次試験材と呼ぶ。なお，2003年（平成15年）の20年暴露終了後，さらに10年間の新たな暴露（新規暴露試験と呼ぶ）を開始しており，この試験材を第3次試験材と呼ぶが，本報告の対象外である。

4. 1. 1 試験材の形状

試験材の形状は，試験施設に直接取り付けを考慮して，鋼管状かL型板状であり，鋼管状はΦ165mm×3,500mmを，L型板状は140mm×140mm×3,800mmを標準としている。

4. 1. 2 試験材仕様

表－I－2に研究テーマ1と研究テーマ2に関する試験材を，表－I－3に研究テーマ3に関する試験材を防食仕様（種類）別に示す。表には参考に第3次試験材と，2003年度調査後の残存現況も示している。

研究テーマ1および2の金属系試験材は，第1次試験材として普通鋼裸材，各種ステンレス鋼，各種クラッド鋼，チタン，塗装材を供試している。その後，第2次試験材として高耐食性ステンレス鋼を加え，電気防食併用試験を追加している。また，試験材表面には予め人工的なすき間を付与し，すき間腐食発生の有無を調査している。いずれもより一層の耐食性の向上と耐用寿命の延長を期待するものである。

研究テーマ3の塗覆装系試験材は，いずれも重防食仕様である。第1次試験材はガラスフレーク入りの各種樹脂塗装，超厚膜樹脂塗装および防食材+保護カバー系であり，第2次試験材は新しい超厚膜樹脂塗装，ポリエチレン系樹脂被覆の他に，耐候性を有する各種上塗り塗装系である。また予め損傷を想定した帯状の塗り残し欠陥部を設け，数年間の劣化損傷を経た後の補修施工を計画した。

表－Ⅰ－２ 金属材料系試験材の内容
研究テーマ１および２

(単位：本)

防 食 方 法		すき 間付 与	テーマ 1			テーマ 2		2003 年度回収後の残存			
			1次 材 ¹⁾	2次 材 ²⁾	3次 材 ³⁾	1次材	2次材	テーマ 1		テーマ 2	
								継続	新規	継続	新規
普通鋼，低合金鋼											
素材裸仕様	普通鋼(SS400)					6					
	低合金鋼 ⁴⁾					6					
塗装	普通鋼(SS400)+塗装					4					
	低合金鋼+塗装					8					
非鉄金属被覆 ＋塗装	溶射+塗装		1								
	溶融亜鉛めっき+塗装		1								
ステンレス鋼											
素材裸仕様	二相ステンレス鋼	○	6								
ステンレス被覆	ステンレス鋼	○	14	2 ^{※ 4}							
	高耐食性ステンレス鋼	○		3 ^{※ 1}	1				1		
	SUS316L クラッド鋼	○	1								
電気防食併用	ステンレス鋼＋電防	○		7	6				6		
非鉄金属（キューロニック，モネル，チタン）											
非鉄金属被覆	チタン	○	3					2			
	9-1 キューロニッククラッド ⁵⁾	○	2	1				2			
	モネルクラッド	○	2								
	チタンクラッド鋼			1							
その他の暴露材											
非鉄耐食性 金属被覆	ポリウレタン+チタン被覆				2				2		
非鉄耐食性 金属被覆 ＋電防	チタン+電防				1				1		
	ポリウレタン+ チタン被覆+電防				2				2		
	ペトロラタム+ チタン被覆+電防				1				1		
塗装・電防併用	チタン+塗装+電防			1 ^{※ 2}				1			
	チタン+ステンレス 鋼+塗装+電防			1				1			
	低合金鋼+塗装+電防						2 ^{※3}				
計			30	16	13	24	2	6	13	0	0
							19		0		
			59			26		19			

(註) 1) 第 1 次試験材の形状は研究テーマ 1 では管状，研究テーマ 2 では L 型板状である

2) 第 2 次試験材の形状

※1 細い管 3 本で 1 試験材をなすものが 1 本あり，他は L 型板状である，

※2 形状が角管，

- ※3 形状が平板状，※4 はステンレス鋼 SUS316L，304 の各 1 本でいずれも非電防
 3) 第 3 次試験材とは 2003 年度新規暴露材である
 4) 低合金鋼は，試験開始当時 耐海水鋼と呼称していた

表－I－3 塗覆装材料系試験材の内容
 研究テーマ 3

(単位：箇所または本，枚)

防 食 系	塗 覆 装 系	研究テーマ 3					
		1 次 1)	2 次 2)	2 次 ※	3 次 3)	回収後の残存 2003 年 8 月後	
						継 続 (2 次)	新規 (3 次)
有機ライニング							
塗覆装 ＋ 上塗り系	ポリウレタン樹脂＋ふっ素樹脂		1	1			
	ポリウレタン樹脂＋アクリルウレタン樹脂		1	1			
	アクリル樹脂＋(ふっ素・シリコン) 樹脂			1			
	エポキシ樹脂＋(シリコン・ふっ素・ポリウレタン樹脂)		1	3			
	厚膜エポキシ樹脂＋無機質上塗		1	1			
	水系エポキシ樹脂＋水系ウレタン樹脂		1	1			
ポリエチレン 被覆系	カラーポリエチレン樹脂 ポリエチレン樹脂＋電防		4	3	2 2	2	2 2
厚膜塗装							
GF 入り 塗装系	G F 入りビニルエステル樹脂	1					
	G F 入りポリエステル樹脂	6					
	G F 入りエポキシ樹脂	3					
厚膜系	厚膜エポキシ樹脂	3	2	2		2	
	厚膜ウレタン樹脂	3	3	3			
	エポキシ系レジンモルタル	6					
	アクリル樹脂			1			
	無溶剤型エポキシ樹脂＋ふっ素樹脂		1	1			
保護カバー							
防食材 ＋ 保護カバー系	ペトロラタム＋各種保護カバー	14					
	エポキシ樹脂＋防汚塗料	1					
	エポキシ樹脂＋防汚テープ	1					
	ゴム系粘着材＋F R P カバー	4					
	エポキシ＋F R P カバー＋電防		1				
	特殊ウレタン＋F R P カバー		1		1		1
	特殊シリコン＋FRP カバー				1		1
補修試験							
	超厚膜エポキシ樹脂→水中硬化エポキシ樹脂		1			1	
	着色ビニルエステル樹脂→着色ビニルエステル樹脂		1				
	タールエポキシ樹脂→アクリル樹脂						
	GF 入りエポキシ→(無溶剤エポキシ樹脂, 防食シート樹脂)		1				
	合 計	42	20	18	6	5	6
		11					

(註) 1) 第 1 次試験材は施設本体に施工されたもので，当初からの継続対象である

2) 第 2 次試験材は管状または板状の試験材

※は色差および光沢度測定用の小型試験片(1996 年，1998 年取付)

3)第3次試験材とは2003年度新規暴露材である

4)GFとはガラスフレークのことである

4. 2 鋼材の腐食に関する検討

4. 2. 1 目的

海洋構造物の防食ライフサイクルコスト（LCC）低減に資するという観点で、普通鋼，ならびに普通鋼の上に比較的劣化し易いタールエポキシ塗装を施して，20年間暴露した防食工の劣化を詳細に解析した。

4. 2. 2 試験材

普通鋼と低合金鋼(耐海水鋼)の裸材と塗装材を表－I－4に示した期間でそれぞれ20年間暴露した。

表－I－4 無防食材と塗装材の試験材の内容と試験期間

記号No.	防食系	防食仕様	形状	素材サイズ (mm)	撤去の経過 および予定								当初 本数	残存 '03年7月調査時	
					西暦	'86	'89	'90	'93	'98	'03			本数	No.
					経過年	2.5	5.5	6.5	9.5	14.5	19.5	予備			
B-1-1～6	低合金鋼A	無防食材(プラスト処理)	L型	140×140×18 ^t ×3800 ^l		○	○	○	○	○	○		6	1	B-1-5
B-2-1～4	低合金鋼A+塗装	無機シンクリッチ(75μm×1回) +タールエポキシ(300μm×2回)	L型	140×140×18 ^t ×3800 ^l			○		○	○	○		4	1	B-2-4
B-3-1～4	低合金鋼B+塗装		L型				○		○	○	○		4	1	B-3-4
B-4-1～6	普通鋼(SS400)	無防食材(プラスト処理)	L型	140×140×20 ^t ×3800 ^l		○	○		○	○	○	○	6	2	B-4-5,6
B-5-1～4	普通鋼(SS400)+塗装	無機シンクリッチ(75μm×1回) +タールエポキシ(300μm×2回)	L型	140×140×20 ^t ×3800 ^l			○		○	○	○		4	1	B-5-4

4. 2. 3 まとめ

- (1) 普通鋼は初期数年間の腐食速度は大きいですが，15年程度経過した後は，ほぼ一定の腐食速度に収斂してくることが明らかになった。「港湾の施設の技術上の基準・同解説」の鋼材腐食速度標準値，飛沫帯：0.3mm/年，干満部：0.1～0.3mm/年，海中部：0.1～0.2mm/年に比べ，本試験結果は，飛沫帯5年で0.4～0.5mm/年と大きいですが，15年を超えると0.25～0.35mm/年へ。干満部5年で0.15～0.25mm/年に対し15年を超えると0.1mm/年以下。海中部5年で0.25mm/年に対して15年を超えると0.05mm/年という結果であり，供用期間中の平均値という観点の鋼材腐食速度標準値と同様の結果となった。(図－I－1，2)
- (2) CrやCuを微量添加した低合金鋼は，20年の長期間においては普通鋼と腐食量はほぼ同等になり適用するメリットは少ない。
- (3) 今回，腐食のミクロな凹凸をレーザー変位計を用いて詳細に計測し，腐食後の鋼材の形状を3次元的に得ることが出来た。今後は構造耐力との関係や環境ごとの腐食メカニズムの解明につながることを期待される。特に腐食量から鋼材の構造耐力を評価できるシステムの開発や，評価法の基準化などが重要と考えられる。(図－I－3)
- (4) タールエポキシ塗装材では，初期から15年目までの劣化の進行は穏やかだが，20年目で劣化が急に進展することが，さび面積率，交流抵抗値，塗膜厚などの測定結果で認められ，塗装材の劣化が直線的でないことが分かった。(図－I－4，5)

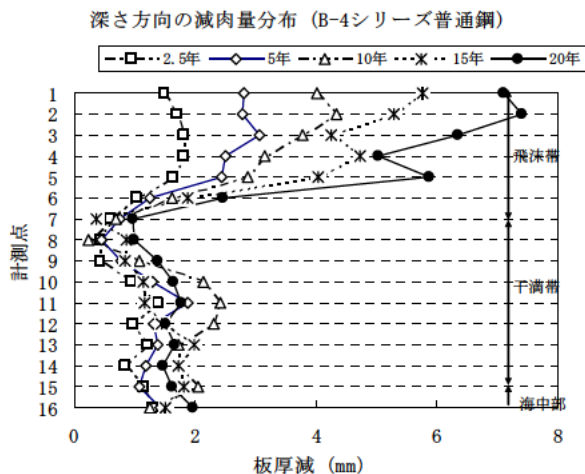


図-I-1 無防食材の腐食量の深さ方向分布 (普通鋼)

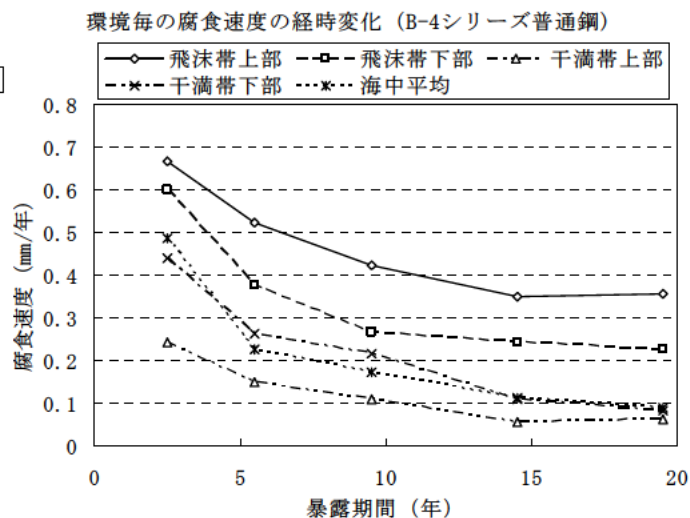


図-I-2 無防食材の腐食速度の時間変化

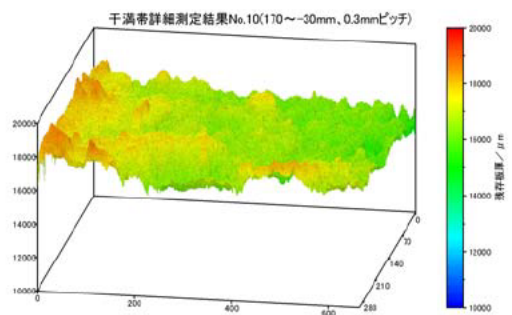


図-I-3 無防食材の残存板厚詳細測定結果 (B-4-6, 20年経過普通鋼干満帯 0.3mmピッチ)

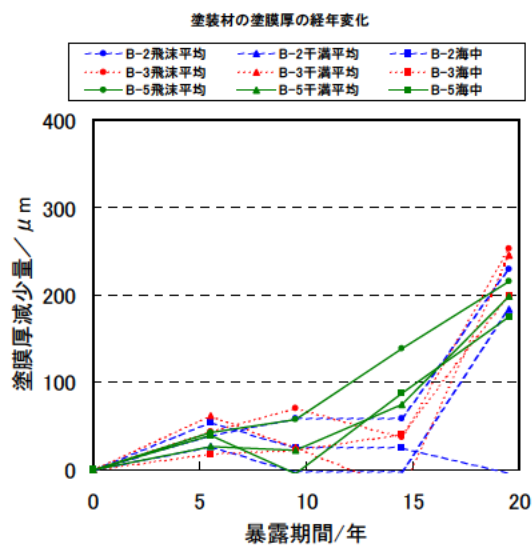


図-I-4 各種塗装材の塗膜厚の経時変化

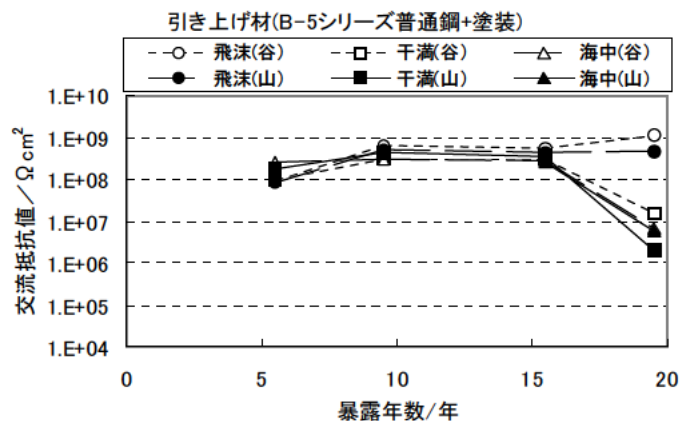


図-I-5 塗装材の交流抵抗値(1kHz)の時間変化

*但し現地モニタリング(交流抵抗値測定)は劣化状況とあまり対応がなかったことから現場でのモニタリング手法の改善が望まれる

*これまでの塗装材の劣化評価は健全部を対象とし、塗装端部やあて傷部などを除外して評価してきた。耐久性の高い防食鋼材においては、これら劣化の起点部位を早く検出し、その部位の劣化進展を評価していく必要がある。

4. 2. 4 タールエポキシ防食仕様について

長期耐久性よりも、溶接部や格点部などの構造を選ばず、現地施工も可能な安価防食仕様として、無機ジンク+タールエポキシ塗装(600 μ m 程度)の採用が考えられる。その場合、飛沫帯に関しては 15 年程度の耐久性が望めることが分かった。干満帯、海中部では 10 年から 15 年で劣化が目立ち始め、20 年では急激な劣化が予測される。塗装材の劣化は時間に対して直線的ではなく、ある時間経過後に急激に進行し始めることに十分注意する必要がある。塗膜のさび面積率を Gompertz 関数に合わせた結果を図-I-6 に示す。使用に際しては海中部では電気防食を併用し、干満部では外観評価を 2~3 年間隔で行いながらのメンテナンスが必要である。なお、タールエポキシ樹脂塗料は、作業員への発ガン性の疑いがあることから、国のグリーン調達でその使用が禁止された。

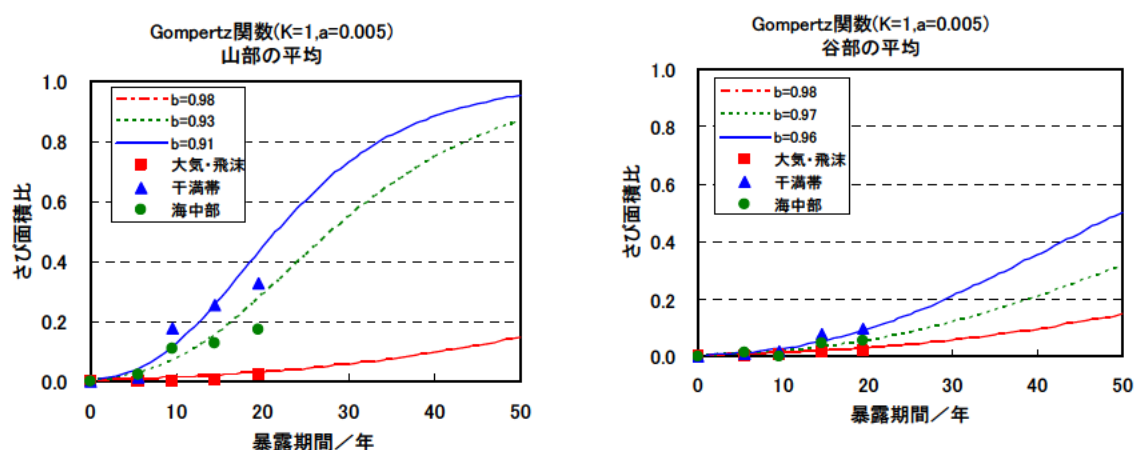


図-I-6 塗膜のさび面積率(平均値)を Gompertz 関数に合わせた結果

4. 3 ステンレス鋼の耐久性に関する研究

4. 3. 1 目的

一般にステンレス鋼は普通鋼等に比べて耐食性が良好と見なされており、海洋構造物用の候補材料の1つにあげられる。しかし、海水は塩分を多く含有し高耐食材料であるステンレス鋼にとっても苛酷な環境であり、SUS304 および SUS316L 鋼のような汎用ステンレス鋼では、海水環境下において孔食、すき間腐食等の局部腐食感受性を有することが知られている。特に大型海生生物の付着下でのすき間腐食の発生は大きな問題となっている。これに対する防食対策としては次の2つの方法が考えられる。第1の方法はSUS304等の汎用ステンレス鋼を電気防食（カソード防食）して用いるものである。第2はCr、Mo等の耐食性改善元素を増量した耐海水性の良好なステンレス鋼を用いる方法である。なお、ここでの耐海水性とは海水環境下での耐食性という意味である。本報告においては、これら2つの方法に関し、過去約20年にわたって海洋暴露試験を行い検討した内容を次に示し、結果についてまとめた。

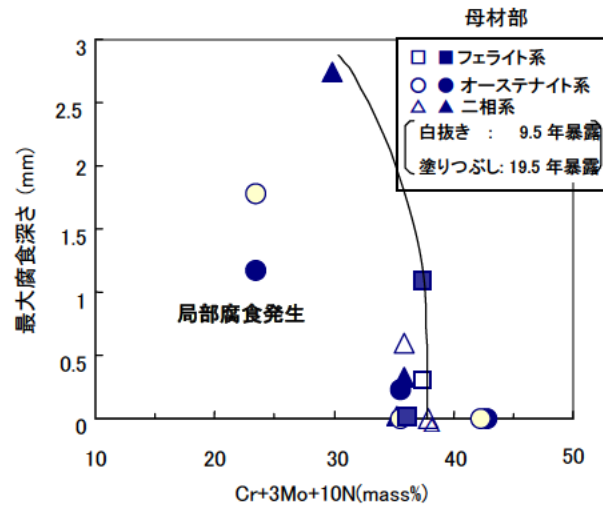
4. 3. 2 試験結果

各種ステンレス鋼の暴露試験材から、飛沫帯、干満帯、水中の各部位のデータを取りまとめた結果を図-I-7、8に示す。

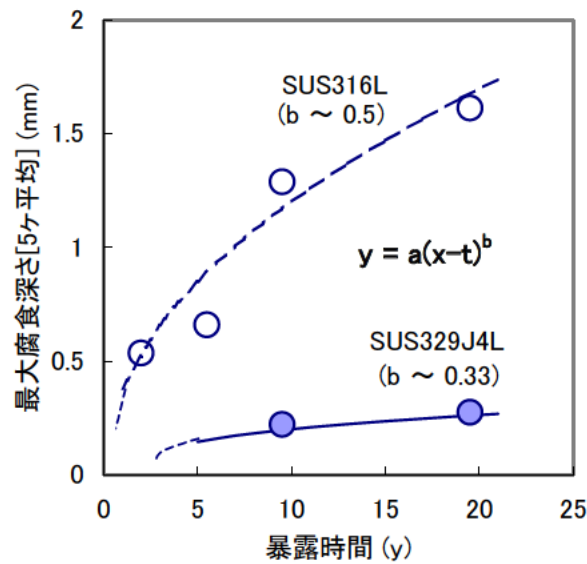
4. 3. 3 まとめ

各種ステンレス鋼の約20年にわたる海洋暴露試験を行い、従来から問題とされている孔食、すき間腐食等の局部腐食感受性を中心に調査し、次の結果を得た。

- (1) 汎用ステンレス鋼（SUS304、316L）の干満帯および海中部での孔食、すき間腐食等の局部腐食の発生防止対策として電気防食が有効であり、 -500mV vs. SCE より卑な電位に設定すれば良いことが明らかとなった。なお、電気防食の試験は2年間の結果ではあるが、原理的に有効な防食方法であり、長期的にも効果を有すると考えられる。
- (2) 海水環境下におけるステンレス鋼の腐食は大型海生生物付着下でのすき間腐食を中心とした局部腐食であった。飛沫帯の局部腐食は孔食であり干満帯および海中部よりもその腐食の程度はかなり軽微であった。
- (3) 成分的に $\text{Cr} + 3\text{Mo} + 10\text{N}$ 量が $38(\text{mass}\%)$ を越えると、ステンレス鋼（母材自由表面）の局部腐食の発生は認められず、良好な耐海水性を有することが判明した。したがって、海水環境へのステンレス鋼の適用に際し耐海水性を確保するには、 $\text{Cr} + 3\text{Mo} + 10\text{N} \geq 38(\text{mass}\%)$ の材料が有効である。
- (4) 母材部に比較して溶接部の耐食性が大きく劣った試験体が見られ、実構造物へのステンレス鋼の適用に当たって母材並の耐食性を確保するには、適切な溶接材料・溶接条件の選定が重要である。



図－I－7 各種ステンレス鋼の耐海水性に及ぼす合金成分の影響



図－I－8 局部腐食深さの経時変化（深い方から5つの平均値の経時変化）

4. 4 チタンの耐久性に関する研究

4. 4. 1 目的

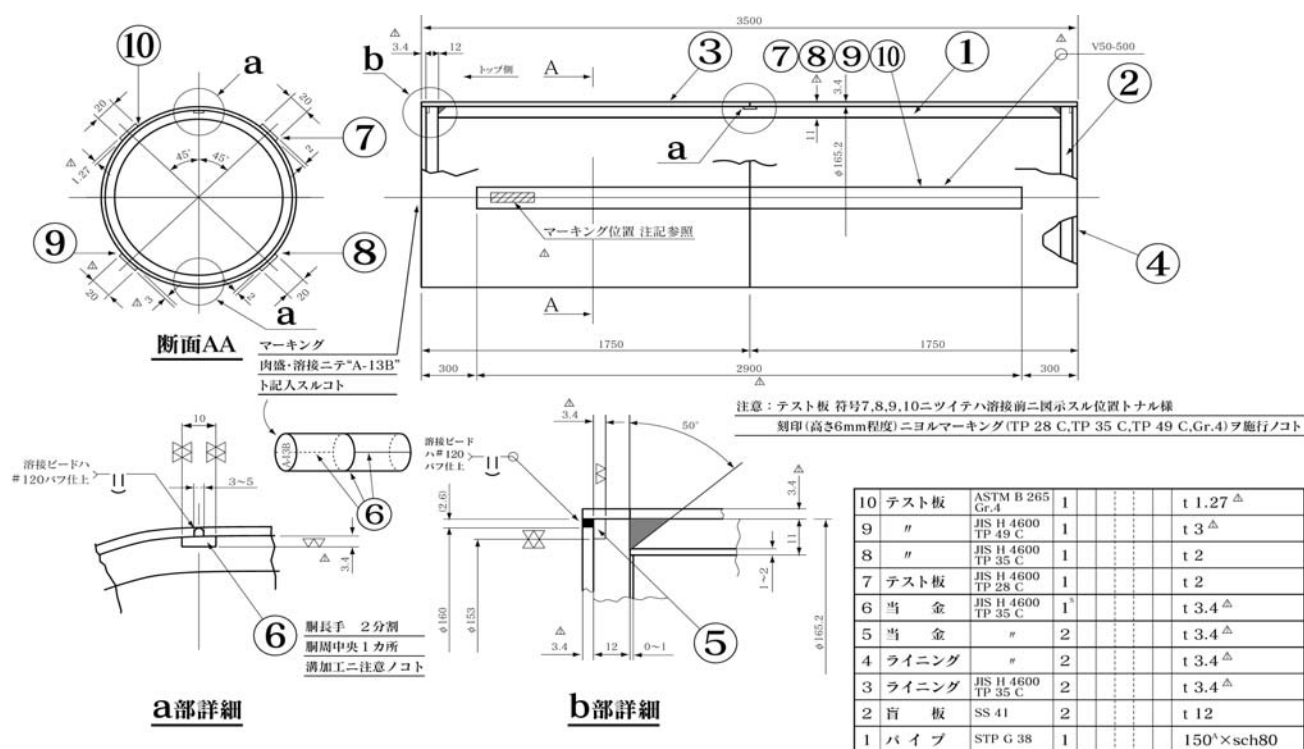
海洋環境に鋼製建造物を建設するには、海水による腐食をいかに防ぐかが大きな課題となる。そこで耐海水性に優れるチタン（純チタン・チタン合金）で鋼材を完全に覆い鋼材を腐食から保護できるか試験した。また、純チタンとチタン合金間での接触腐食、海洋生物による腐食、人工すき間付与による腐食の有無についても調査した。

供試チタンの成分

試験材名称	成分（元素記号の前数字は各元素の質量%）
チタンクラッド	純チタン（0.12O-0.04Fe-0.01N-0.004H-残部 Ti）、 チタン合金（Ti-6Al-4V, Ti-3Al-2.5Sn, Ti-0.5Pd）

4. 4. 2 試験材

試験片（A-13-A）は鋼管（SS41：SS41は現在SS400と称す）外面をチタンで完全に被覆した試験片。試験片（A-13-B, A-13-C）は、被覆した純チタン上に純チタンおよびチタン合金の短冊状小片をスポット溶接し、すき間腐食、金属接触腐食発生の有無についても試験した。各試験体の代表例を図－I－9に示す。この試験片3本を平均海水面を基準として、海中部700mm，干満部1550mm，飛沫・海上大気部1250mmとし暴露した。



図－I－9 試験片代表例 A－13－C

（鋼管（SS41）外面をチタンで被覆更に上記成分の短冊状チタンをスポット溶接でセット）

4. 4. 3 まとめ

チタンは生物付着下や人工すき間部にも、腐食の発生が認められず、一般部にも腐食が

認められなかったことから、既往の評価と同様に、海洋環境での高い耐食性を確認した。

- (1) 鋼管全面を純チタンで被覆した試験体 (A-13-A) では、暴露 10 年の間に、飛沫部が変色して黒みをおびたが、腐食は認められなかった。また、干満部や水中部に、海洋生物が付着したが、付着生物下に腐食は認められなかった。さらに、鉢巻状に樹脂を巻き、人工すき間を付与した部分にもすき間腐食は認められなかった。
- (2) 鋼管全面を純チタンで被覆し、その表面に短冊状純チタン及びチタン合金片をスポット溶接し、本体と短冊間での金属接触腐食及び隙間での耐食性を評価したが試験体 (A-13-B), (A-13-C) に腐食は、認められなかった。20 年経過結果例を図-I-10 に示す。
- (3) チタンを異種金属と共に使用する場合は接触腐食を防止する方策が必要となる。この内、カソード防食を用いる場合は、チタンが水素吸収しない電位で電気防食することが必要となる。本試験においてチタンの電位変化を測定した結果を図-I-11 に示す。

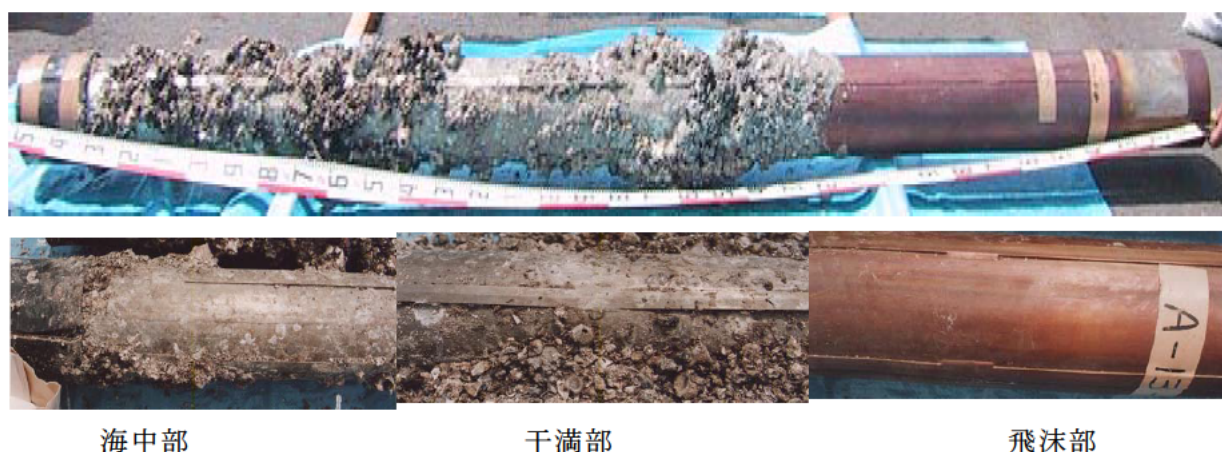


図-I-10 20 年間暴露後の 試片例 (A-13-C)
飛沫帯、海洋生物下、チタン-チタン合金間にも腐食なし

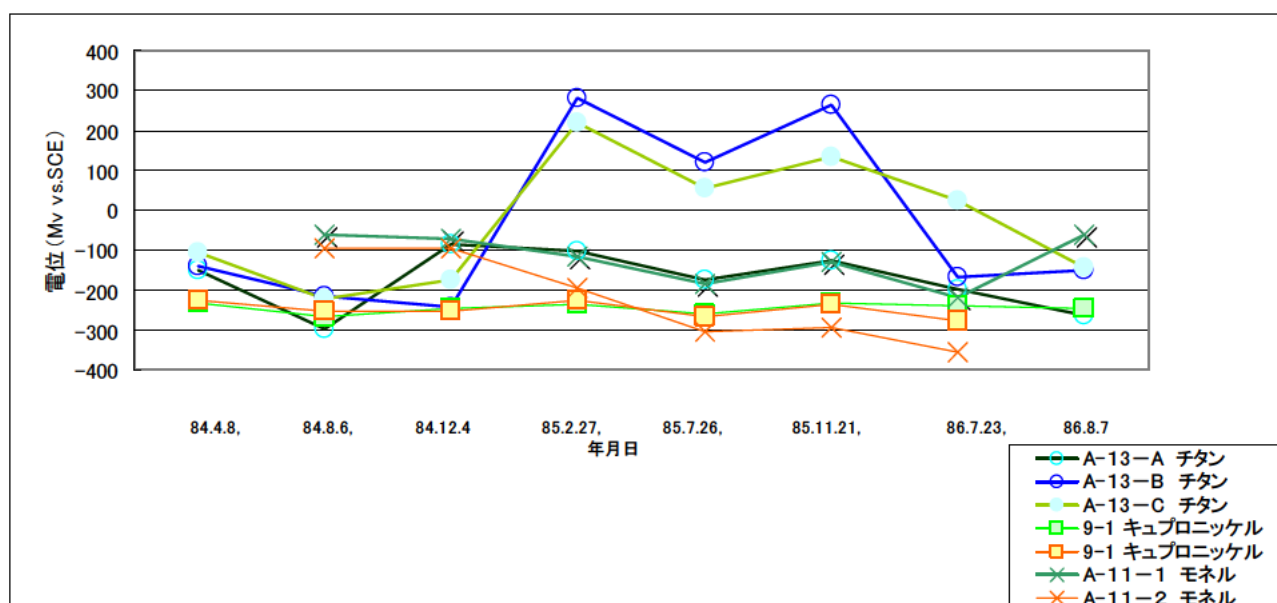


図-I-11 各種金属材料の海水中での電位変化 (注: 測定時間間隔が均一でない)

4. 5 有機ライニング鋼材の耐久性に関する研究

4. 5. 1 目的

海洋環境は一般に海中部，干満帯，飛沫帯および海上大気部にその腐食環境が区分できる。この内，干満帯から特に飛沫帯にかけては，鋼の腐食速度を律速する酸素還元反応に必要な酸素が十分供給されるだけでなく，鋼材表面に付着した海水の蒸発により塩化物イオン濃度が凝縮されるため，極めて厳しい腐食環境になる。しかも，この領域は電気防食による鋼材の腐食の抑制が原理的に困難である。このような厳しい腐食環境においても鋼材を防食する手段として，鋼材表面にポリエチレンやポリウレタン等を積層した有機ライニング鋼材が開発され，普及しつつある。

本研究では，従来の有機ライニング鋼材に対し，周囲の景観に対する調和性に配慮するために着色した有機ライニング鋼材において，その防食層の耐久性と鋼材としての耐食性について評価を行った。

4. 5. 2 試験材

表－I－5に本暴露試験に供した試験材の一覧を示す。本試験では，ポリウレタン防食層の上に景観調和性を考慮した着色樹脂層を積層したもの（C-2，C-4），ポリウレタン防食層自身を着色したもの（C-3），アクリル樹脂をベースに着色層を積層したもの（C-7），そして着色ポリエチレンを積層したもの（C-3，E-1，E-2，E-3，E-4，E-5）を供した。各試験体の代表的な形状は全長 3500mm であり，試験材の下端から 530mm の領域が常時海水に浸かっている海中部に，その次の 1550mm の領域が干満帯，残りの 1092 もしくは 1420mm の領域が飛沫帯にそれぞれ暴露した。

表－I－5 暴露試験供試材一覧

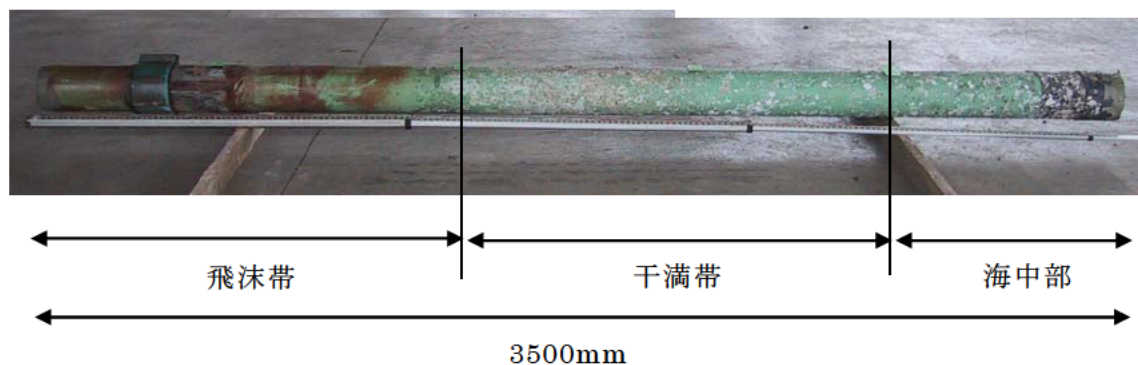
	記号	防食系	防食仕様または防食加工法	形状	試験材サイズ (mm)	被覆・ 塗膜厚さ (μ m)	色調	暴露期間 (年)	備考
C系	C-2	超厚膜 塗覆装	ポリウレタン樹脂塗料+ふっ素樹脂塗料	管	165.2 ϕ ×3500 ¹		淡青	13	'03回収
	C-3		着色ポリエチレン(淡緑)				淡緑	13	'03回収
	C-4		ポリウレタン樹脂塗料+アクリル樹脂塗料				濃緑	13	'03回収
	C-5		ポリウレタン樹脂塗料			2530	緑	23	2013まで延長
	C-6		ポリウレタン樹脂塗料			2530	黒	23	2013まで延長
	C-7		アクリル樹脂塗料+ふっ素シリコン共重合樹脂塗料			2370	灰	8	'98 回収
E系	E-1	カラー ポリエチレン 樹脂被覆	ポリエチレン樹脂被覆	管	165.2 ϕ ×3500 ¹ ×3.2 ²		グレイッシュイエローグリーン	10	'03回収
	E-2		ポリエチレン樹脂被覆		267.4 ϕ ×2900 ¹ ×11.1 ¹	2500以上	グレイッシュイエローグリーン	10	'03回収
	E-3		ポリエチレン樹脂被覆		165.2 ϕ ×3500 ¹ ×3.2 ²	3200±50	グレイッシュグリーン	10	'03回収
	E-4		ポリエチレン樹脂被覆	板	250w×3800 ¹ ×12 ²		ブルー	2	'95 流失
	E-5		ポリエチレン樹脂被覆			2450	石積調	2	'96 流失

4. 5. 3 まとめ

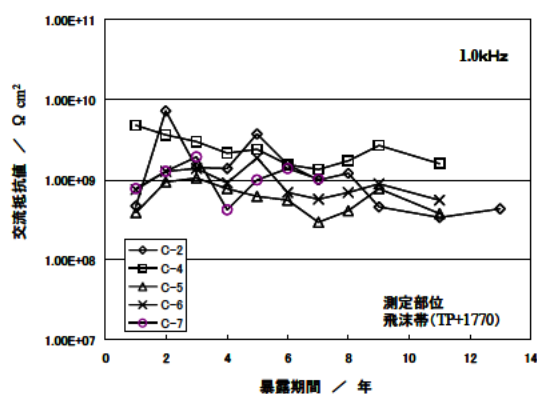
- (1) 試験体の外観については，一部の試験体で表面に擦り傷の発生や貝のくい込みがみとめられたが，全ての試験片において，鋼面に達する欠陥，ふくれおよび流れさびの発生は認められず，波浪の厳しい概要環境においても長期にわたって良好な耐衝撃性および耐食性を有した。
- (2) 防食層の交流インピーダンスを測定したところ，暴露試験の継続に伴う交流抵抗値の減少や容量成分の増大は認められず，防食層が初期の防食性能を保持していることが

確認できた。

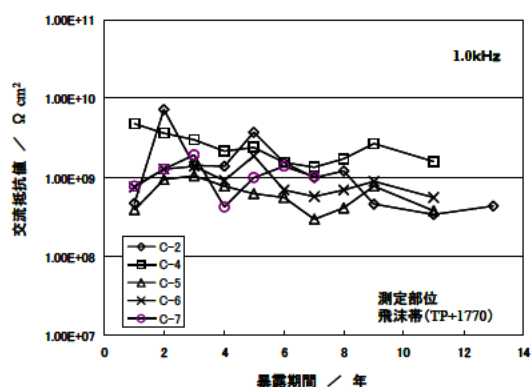
(3) したがって、有機ライニング鋼材は、海中部から飛沫帯にかけて長期に渡って良好な耐久性を有するものと考えられる。



図－I－12 10年間暴露したポリエリレンライニング鋼材(E-3)の除貝後の外観



図－I－13 有機ライニング試験材の交流抵抗値に及ぼす暴露期間の影響
(現地測定, 0.2 k H z)



図－I－14 有機ライニング試験材の静電容量に及ぼす暴露期間の影響
(現地測定, 0.2 k H z)

4. 6 厚膜塗装材の耐久性に関する研究

4. 6. 1 目的

厚膜塗装を施した新規塗覆材および工法の実使用状態での確性を行なった。

4. 6. 2 試験材

(1) 厚膜塗装材（施設本体，1984 年より試験開始）に関する 8 種の試験材の防食仕様を表－I－6 に示す。

(2) 新規厚膜塗装材（試験材，1993 年より試験開始）の防食仕様を表－I－7 に示す。

4. 6. 3 試験結果

厚膜塗装材の飛沫帯および干満帯における防食性評価として，外観観察，塗膜下鋼素地面観察，膜厚測定，インピーダンス測定および付着力の測定を経時で行なった。新規厚膜塗装材の防食性評価として，外観観察，膜厚測定およびインピーダンス測定を経時で行なった。厚膜塗装材 20 年暴露および新規厚膜塗装材 10 年暴露後の結果を下記に示す。

表－I－6 厚膜塗装材の仕様

No	防食系	防食仕様	試行対策部位	
1	ガラスフレーク入り ビニルエステル樹脂塗料	ビニルエステル系プライマー(60μm)／ガラスフレーク入りビニルエステル(300μm×3 回)／ポリウレタン(60μm)	飛～海・直立材	1C
2	ガラスフレーク入り ポリエステル樹脂塗料	無機ジンクリッチ(75μm)／ガラスフレーク入りポリエステル(3 回塗り，1400μm)	飛～海・直立材 飛・水平材 飛・水平材	1B 1A↔1B 1B↔1C
3		ポリエステル系プライマー(60μm)／ガラスフレーク入りポリエステル(6 回塗り，1400μm)	飛～海・直立材 飛・水平材 飛・水平材 海・水平材	2B 1B↔2B 2B↔1C 2B↔3B
4	ガラスフレーク入り エポキシ樹脂塗料	ガラスフレーク入りエポキシ(6 回塗り，2000μm)	飛～海・直立材	2C
5		無機ジンクリッチ(75μm)／エポキシ系プライマー(60μm)／ガラスフレーク入りエポキシ(500μm×3 回) ^{※1}	飛～海・直立材 飛・水平材	1A 1A↔2A
6	厚膜エポキシ樹脂塗料	無機ジンクリッチ(75μm)／エポキシ(2000μm)	飛～海・直立材 飛・水平材 飛・水平材 海・水平材	3A 2A↔3A 1C↔2C 2A↔3A
7	厚膜ウレタン樹脂塗料	ポリウレタン系プライマー(25μm)／ポリウレタン(2000μm)／ポリウレタン(30μm)	飛～海・直立材 飛～海・水平材 飛～海・水平材 海・水平材	3B 2B↔3B 3A↔2B 3A↔3B
8-1	エポキシ系 レジンモルタル	エポキシ系プライマー(25μm)／エポキシ系レジンモルタル(多層塗り，2000μm)／ポリウレタン(50μm)	飛～海・直立材 飛～海・斜材	3B 3B↔2B
8-2		エポキシ系プライマー(25μm)／エポキシ系レジンモルタル(多層塗り，2000μm)／アクリル(50μm)	飛～海・斜材 飛～海・斜材 飛～海・斜材 飛～海・斜材	2B→2A 2B→1B 2C→2B 2C→3B

※1 飛・水平材→2A の 2003 年度損傷部に対して水中硬化型エポキシ樹脂塗料(300～500μm)をローラー塗布した

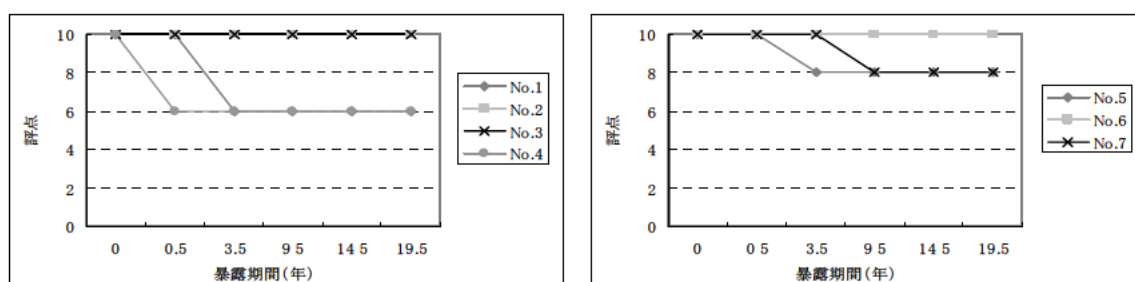
表－I－7 新規厚膜塗装材の内容と暴露予定

系	記号	防食系	防食仕様または防食加工法	形状	試験片サイズ(mm)	塗膜厚さ(μm)	色調	暴露期間(年)	備考
F系	F-1	超厚膜形エポキシ樹脂塗料	有機シソ(20μm)/エポキシ(1000μm×2)□	管	165 2φ × 3500 ¹⁾	2020	淡緑	10	'03回収
	F-2	超厚膜形エポキシ樹脂塗料	有機シソ(20μm)/エポキシ(1250μm×2)□			2520	青	20	2013年まで延長
	F-3	アクリル系樹脂塗料	プライマー(70μm)/アクリル(1500+1000μm)/アクリル(50μm)□			2620	青	5	'98回収
	F-4	ポリアウレタン系樹脂塗料	プライマー(70μm)/ポリアウレタン(2500μm)□			2530	黒	20	2013年まで延長
	F-5	シリコン樹脂塗料 高耐候性 上塗塗料 (接海水環境)	有機シソ(20μm)シリコン用中塗(30μm)/シリコン上塗(25μm)□ エポキシ(1000μm×2) ポリアウレタン樹脂塗料			2075 2075 2090	下塗 淡緑 下塗 白	10	・側面は円周で3等分して塗り分ける ・'03回収

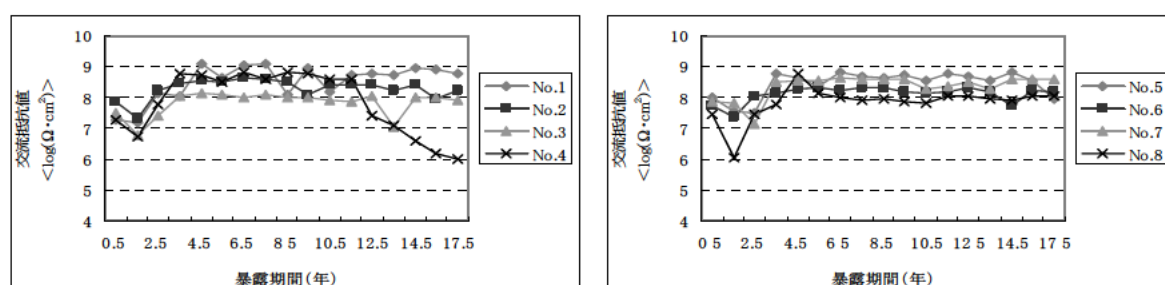
(注) □は別途小試験片(板状または筒状)を光沢・色差測定用に暴露

(1) 厚膜塗装材

8種厚膜塗装材のうち直立材(No.1～No.7)の外観経時変化を図－I－15に示し、インピーダンスの経時変化を図－I－16に示す。また付着強度の経時変化を図－I－17に示す。



図－I－15 直立材の外観経時変化



図－I－16 交流抵抗値の経時変化(周波数 1kHz)

図－I－15からNo.1およびNo.4の塗装系に若干のさび、ふくれが見られる。しかしながらその発生程度が0.5%以下なので20年経過後の劣化は非常に小さいといえる。

2～3年ごとに実施される定期詳細調査において、10cm×10cmの範囲で厚膜塗装材を鋼素地面まで強制的にはく離し、さび発生状況を観察した。20年経過後も鋼素地面は金属光沢を有し、さびの発生は見られなかった。図－I－16の結果からNo.4以外は20年近

く経過しても $10^8 \Omega \cdot \text{cm}^2$ 以上の高抵抗を示した。No.4 も抵抗値が低下傾向にあるが、 $10^6 \Omega \cdot \text{cm}^2$ 以上の値を示しており、従来の判定基準から判定しても塗装材は異常なしと考える。図-I-17 から 20 年経過しても付着力は低下しておらず、金属素地との付着力は充分維持している。

(2)新規厚膜塗装材

新規厚膜塗装材のインピーダンス測定結果を図-I-18 に示す。図から 5 種類の新規厚膜塗装材の交流抵抗値は 10 年経過後も $10^8 \Omega \cdot \text{cm}^2$ 以上あり健全と考える。

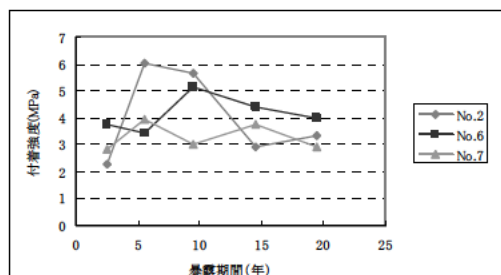


図-I-17 付着強度の経時変化

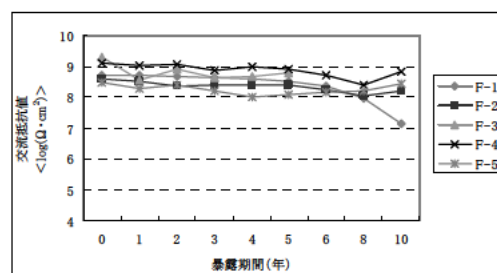


図-I-18 交流抵抗値の経時

4. 6. 4 まとめ

本研究では、厚膜塗装材 20 年、新規厚膜塗装材 10 年後の防食材料の劣化度を調査した。外観の発錆およびインピーダンス測定で若干の劣化傾向が見られるが、その程度は小さく、厚膜塗装材は 20 年経過してもほぼ健全であると判断できる。ただし、端部等施工不十分と思われる部分や波浪や流木による塗膜損傷部にさびやはく離が発生していた。飛沫部・干満部を対象とした厚膜塗装を施工する場合、端部等膜厚のつきにくい部位の施工管理を充分に行なう必要がある。波浪や流木が集中しやすい部位には、保護カバーや防舷柵を設置するなどしてそれらを緩和する手法を施すことも考えられる。

4. 7 保護カバーを用いた現地防食方法の耐久性に関する研究（ペトロラタムライニング）

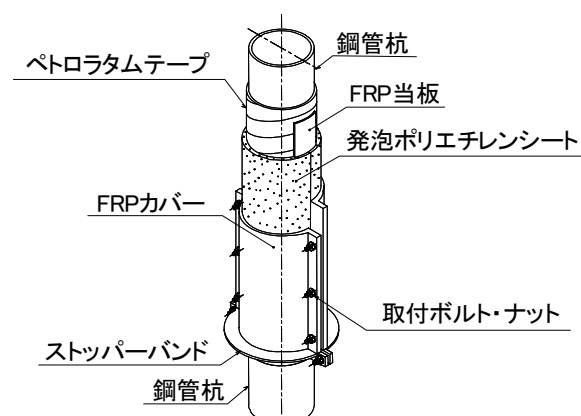
4. 7. 1 目的

海洋技術総合研究施設本体を構成する 9 本杭の海上大気部のジャケット接続部に現地施工されたペトロラタム系防食材＋保護カバー系の実海域における有用性を評価することを目的とした。

4. 7. 2 試験材

(1) 試験材

海洋技術総合研究施設鋼管杭（9 本）に被覆されたペトロラタム系防食材＋保護カバー。図－I－19 に、ペトロラタムライニングの概略図を示す。



(2) 試験方法

① 外観観察

目視で試験材の損傷，変形の有無を観察した。

② 防食効果の確認

保護カバー開放後，鋼材表面の発錆等の有無を目視により観察した。

図－I－19 ペトロラタムライニングの概略図

4. 7. 3 試験結果

(1) 外観観察

1984 年から暴露を開始したが，1986 年から 1992 年にかけて台風時における漂流物の衝突等による FRP 保護カバー（標準仕様）の損傷が認められた。そのため，1993 年から表－I－8 に示す耐衝撃性能を向上させた FRP 保護カバー（耐衝撃仕様）に更新した結果，損傷頻度が低減した。

(2) 防食効果の観察

暴露開始後 5.5 年目（1989 年）に観察した結果，鋼材表面には浸水や発錆等の異状は認められなかった。また，暴露開始後 19.5 年目にも同様な観察を行なった結果，1989 年調査時と同様，異状は認められなかった。

表－I－8 FRP 保護カバー材の耐衝撃性能比較例

	カバー設計厚さ (mm)	耐衝撃エネルギー (Kgf・m) 注)	耐衝撃強度比 (－)	暴露期間
標準仕様	2.0	0.81	1.0	1984 年～1997 年
耐衝撃仕様	4.5	5.65	7.0	1993 年～

注) ISO/DIS6603 に準拠した試験法による

4. 7. 4 まとめ

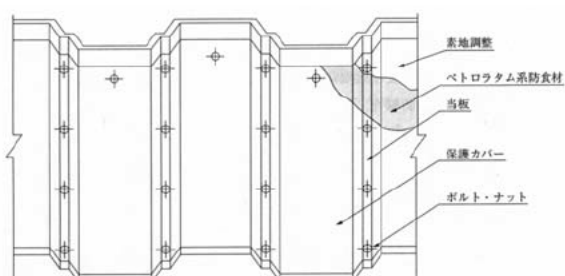
ペトロラタム系防食材＋保護カバー系試験材では、一部の試験材で保護カバーが台風時における漂流物等の衝突により被害を受けたものもあったが、表－I－8および図－I－20に示す耐衝撃性能を向上させた FRP 保護カバーの適用により破壊・損傷が減少した。また、防食効果に関しては、暴露後 19.5 年時点でも鋼素地面に発錆等の腐食は認められなかった。これらのことから海洋環境（主に飛沫・干満帯）にある鋼構造物の長期防食に対してペトロラタム系防食材＋FRP 保護カバー系は防食効果に優れた仕様であることが確認された。



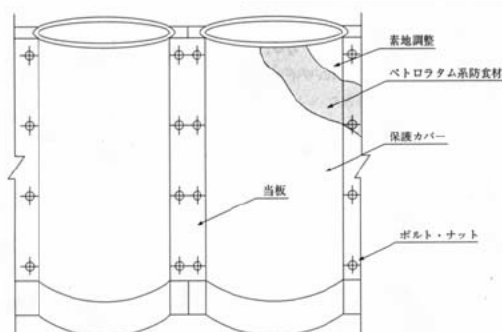
図－I－20 耐衝撃 FRP 保護カバーの暴露状況

4. 7. 5 適用例

保護カバー材を用いた被覆防食工法であるペトロラタム系防食材＋保護カバーの防食仕様は、新設と既設の鋼構造物の防食工法として、また劣化した塗装やライニング系などの補修工法として有効である。その適用例を図－I－21および図－I－22に示す。



図－I－21 鋼矢板への適用概略図



図－I－22 鋼管矢板への適用概略図

5. まとめ

(1) 鋼材の腐食に関する検討

①海洋環境で普通鋼を無防食の状態で腐食させた場合、飛沫帯、干満帯および海中部いずれにおいても、初期の数年間の腐食速度は大きいですが、14.5年程度経過した後は、ほぼ一定の腐食速度に収斂してくることが、長期間の試験で明らかになった。

②普通鋼に微量のCrやCuを添加した低合金鋼は、5.5年以下の短期間では腐食量に有意差が見られても、19.5年間の長期間においては、普通鋼と腐食量がほぼ同等になり、防食上有効性が無いことが明らかとなった。

(2) ステンレス鋼の耐久性に関する研究

①汎用ステンレス鋼(SUS304,316L)の干満帯および海中部での孔食、隙間腐食等の局部腐食の発生防止対策として電気防食が有効であり、 -500mV vs. SCE より卑な電位に設定すれば良いことが明らかとなった。なお、電気防食の試験は2年間の結果ではあるが、原理的に有効な防食方法であり、長期的にも効果を有すると考えられる。

②海水環境下におけるステンレス鋼の腐食は、大型海生生物付着下での隙間腐食を中心とした局部腐食であった。飛沫帯の局部腐食は孔食であり、干満帯および海中部よりもその腐食の程度はかなり軽微であった。

③成分的に $\text{Cr}+3\text{Mo}+10\text{N}$ 量が $38(\text{mass}\%)$ を越えると、ステンレス鋼(母材自由表面)の局部腐食の発生は認められず、良好な耐海水性を有することが判明した。したがって、海水環境へのステンレス鋼の適用に際し耐海水性を確保するには、 $\text{Cr}+3\text{Mo}+10\text{N} \geq 38(\text{mass}\%)$ の材料が有効である。

④母材部に比較して溶接部の耐食性が大きく劣った試験体が見られ、実構造物へのステンレス鋼の適用に当たって母材並の耐食性を確保するためには、適切な溶接材料・溶接条件の選定が重要である。

(3) チタンの耐久性に関する研究

純チタンは、生物付着下や人工すき間部にすき間腐食の発生が認められず、一般部にも腐食が認められなかったことから、既往の評価と同様に、海洋環境での高い耐食性を確認した。

(4) 有機ライニング鋼材の耐久性に関する研究

10～13年間の海洋暴露試験の結果、今回の実験に共試した全ての有機ライニング鋼材は、海中部から飛沫帯に渡って、防食層の劣化（耐候性低下や漂流物衝突による鋼面に達する防食層の割れの発生、防食層のイオン透過抵抗の低下）や鋼材の腐食（防食層のふくれの発生、流れさびの発生）は認められず、長期に渡って優れた耐久性を保持することが明らかになった。

(5) 厚膜塗装材の耐久性に関する研究

外観の発錆や、塗膜抵抗値に若干の劣化傾向が見られるが、その程度は小さく、厚膜

塗装材は 20 年経過してもほぼ健全であると判断できる。

ただし、端部等施工不十分と思われる部分や、波浪や流木による塗膜損傷部にさびやはく離が発生していた。飛沫部・干満部を対象として厚膜塗装を施工する場合、端部等膜厚のつきにくい部位の施工管理を充分に行なう必要がある。また、波浪や流木により塗膜が損傷する可能性がある部位には、保護カバーや防舷柵を設置することも有効である。

（６）保護カバーを用いた現地防食方法の耐久性に関する研究

ペトロラタム系防食材＋保護カバー系試験材では、一部の試験材で保護カバーが台風による漂流物の衝突や強い波浪等の被害を受けたものもあったが、耐衝撃性能を向上させた FRP 保護カバーの適用により破壊・損傷が減少した。また、防食効果に関しては、暴露後 19.5 年時点でも鋼素地面に発錆等の腐食は認められなかった。これらのことから海洋環境（主に飛沫・干満帯）にある鋼構造物の長期防食に対してペトロラタム系防食材＋FRP 保護カバー系は防食効果の優れた仕様であることが確認された。

6. 今後の計画

約 20 年間の「海洋構造物の耐久性向上技術に関する研究」（旧暴露試験と呼ぶ）は、今後 LCC(ライフサイクルコスト)を最小とする提案が求められる時代に対して、将来の技術開発の方向性や、提案仕様の有効性を証明する極めて説得性の高いデータが系統だって採取し、当初の計画を完了した。

一方、昨今の防食技術の進歩に伴い新たに開発された耐食金属があること、最大 20 年間の暴露を経ても十分な防食性能を保持しているため暴露を更に継続したい試験体があること、期間途中で暴露を開始したため暴露期間が十分でない試験体があること等から、2003 年から 2013 年までさらに 10 年間の新たな海洋暴露試験（新規暴露試験と呼ぶ）を計画し、より耐久性の高い防食仕様・補修仕様を実海域で評価することとした。

新規暴露試験の概要を以下に示す。

- ① 1984 年から 20 年間の海洋暴露試験の成果・知見を総合した複合防食の性能評価（耐食金属＋樹脂・塗装＋電気防食の併用など）
- ② 旧暴露試験からの継続暴露による長期（30 年）耐久性評価
- ③ 高耐食性金属被覆防食の性能評価
- ④ 補修技術の信頼性評価
- ⑤ 環境対応技術の評価

暴露試験期間は 10 年を予定しており、各防食仕様が劣化していないという結果が予想されることから、試験にあたっては、

- ① 人工的に欠陥部を作りその箇所の劣化進行度を評価する
- ② 一部の暴露試験体については、同一仕様の試験片を促進試験により評価することにより、防食仕様の劣化曲線の推定と事前に想定した防食仕様メカニズムの妥当性評価を試みる
- ③ また、補修技術の信頼性を評価する観点から、1 年程度実環境で裸暴露したものへ補修を施し、その性能を評価することも試みる

等の新しい試験方法も追加することとした。

なお、試験体制は、独立行政法人土木研究所と社団法人日本鉄鋼連盟の共同研究契約（旧暴露試験）を期間延長して海洋構造物の耐久性向上技術に関する共同研究第 1 分科会が遂行する。

7. 発表論文

- (1) Y.Suzuki,T.Kyuno,and Y.Simizu : Study of Corrosion-Protection Technologies in Splash and Tidal Zones, Ocean Space Utilization '85, 1985.
- (2) 久野忠一, 清水義明, 土居一幸, 田中柳之助, 片脇清士 : A106 飛沫帯および干満帯における鋼構造物の防食技術 (第 1 報), 腐食防食学会第 33 回腐食防食討論会, 1986.10
- (3) 片脇清士 : 海洋技術総合研究施設を用いた海洋構造物の防食技術に関する研究, 日本防錆技術協会, 1987.7
- (4) 清水義明, 大長智, 片脇清士 : 209 飛沫帯および干満帯における鋼構造物の防食技術 (第 2 報), 日本防錆技術協会第 7 回防錆防食技術発表会, 1987.7
- (5) 田中柳之助 : するが湾における鋼材の防食に関する暴露試験, 日本工業振興協会, 海洋構造物の耐久性向上技術に関する年次講演会, 1993.4
- (6) 岡扶樹, 守屋進 : 沿岸環境での各種防食工の耐久性, 第 25 回日本道路会議, 2003.

Ⅱ 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 －第2分科会－

1. はじめに

コンクリート構造物の設計施工に際しては強度を主とした力学的性質はもちろんのこと、耐久性も重要な検討事項であった。しかし、耐久性に関する配慮が十分でなかったために、昭和 50 年代後半に日本海沿岸や沖縄をはじめ、各地で鋼材腐食によるコンクリートの損傷、いわゆる塩害が表面化したことが報告された。各研究機関において塩害のメカニズムやその対策が研究・開発が開始され、コンクリートの塩害対策として昭和 59 年 2 月「道路橋の塩害対策指針（案）」（日本道路協会）が発行された。そこには鋼材かぶりを厚くすること、密実なコンクリートを打設すること、等を基本対策とし、改善策としてコンクリート塗装やエポキシ樹脂鉄筋等の使用を進めている。さらに、平成 14 年 3 月「道路橋示方書・同解説・コンクリート橋編」では、前述の塩害対策指針（案）が準拠され耐久性の向上を図るために塩害地域におけるかぶりの規定の設定などの見直しが行われている。成果を出すには長期間の時間を待たねばならなかった。

一方、建設省土木研究所（現：独立行政法人土木研究所）は、「海洋構造物の耐久性向上技術に関する研究」を（社）鋼材倶楽部（現：（社）鉄鋼連盟）、（社）プレストレスト・コンクリート建設業協会および（財）土木研究センターと共同で昭和 57 年から駿河湾に位置する海洋技術総合研究施設を用いて開始した。共同研究の分担課題として（社）プレストレスト・コンクリート建設業協会は「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」を担当し、

- ① コンクリート材料と防食
- ② コンクリート中鋼材と防食
- ③ 耐海水コンクリート部材の開発

について、長期暴露試験を実施することにより検討することを目的とするものである。

2. 研究経過

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 カ年計画としてスタートさせた。これに含まれる研究項目は、以下の通りである。

- ①海洋構造物の設計・施工等に必要な自然環境を把握する技術の開発
- ②大型の浮遊式海洋構造物の建設基礎技術の開発
- ③厳しい波浪から海洋構造物を守る波浪制御技術の開発
- 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

上記の内、建設省土木研究所（現：独立行政法人土木研究所）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り、民間の技術力の参加を得て、官民による共同研究として進めることになった。そしてこの研究の暴露試験は、「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、以下のとおりである。

- （官側） 建設省土木研究所（現：独立行政法人 土木研究所）
- （民側） 社団法人 鋼材倶楽部（現：社団法人 日本鉄鋼連盟）
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」を目指しており、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 カ年の期間（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。本年度で暴露 20 年が経過している。

共同研究第 2 分科会の担当者は、

- 守屋 進 独立行政法人土木研究所
- 石井 浩司 株式会社 ピーエス三菱
- 酒井 博士 株式会社 ピーエス三菱
- 大谷 悟司 オリエンタル建設株式会社
- 浅井 洋 三井住友建設株式会社
- 藤田 学 三井住友建設株式会社
- 吉田 光秀 株式会社 富士ピー・エス

である。

3. 研究課題

第2分科会で共同研究として実施している研究課題を表Ⅱ-1に示す。

表Ⅱ-1 研究課題

コンクリートの防食技術の基本	コンクリートのかぶりと配合
	コンクリートの内部組織と防食性能の把握
	腐食調査と補修技術の開発
コンクリート中の鋼材の防食技術	樹脂塗装鉄筋の実用化
	P C 鋼材の防塩処理材料の開発
耐海水コンクリート部材の設計技術	塗膜系被覆材の実用化
	含浸系材料の実用化
	耐塩性コンクリートの開発

4. 研究方法と研究成果

4. 1 コンクリート供試体の設置場所

製作した各種コンクリート試験体は、駿河湾沖 250m に位置する海洋技術総合研究施設の第 2 デッキ、第 3 デッキに暴露した。第 2 デッキは海面上 8.9m の位置で、時々海水飛沫を受ける環境で、第 3 デッキは海面上 2.1m の位置で、常時海水飛沫を受ける環境である。

4. 2 コンクリートのかぶりと配合

4. 2. 1 試験概要

製作した試験体は 200×200×1200mm の角柱試験体とし、表-Ⅱ-2 に示すように試験要因は、セメントの種類、水セメント比、暴露環境、暴露期間とした。試験は、定期的に試験体からコアを採取し、塩分分析を行い(1)式に示す Fick の拡散方程式を解いて、表面塩化物イオン濃度と見かけの拡散係数を算出し比較検討した。

$$C(t,X) = Co(1 - \text{erf}(X/(2\sqrt{D \cdot t}))) \quad (1) \text{式}$$

ここで、 $C(t,X)$: 時間 t , 距離 X における塩化物量(kg/m^3) Co : 表面塩化物イオン濃度(kg/m^3)

X : 表面からの距離(cm)

t : 経過時間(年)

erf : 誤差関数

D : 見かけの拡散係数($\text{cm}^2/\text{年}$)

表-Ⅱ-2 試験要因

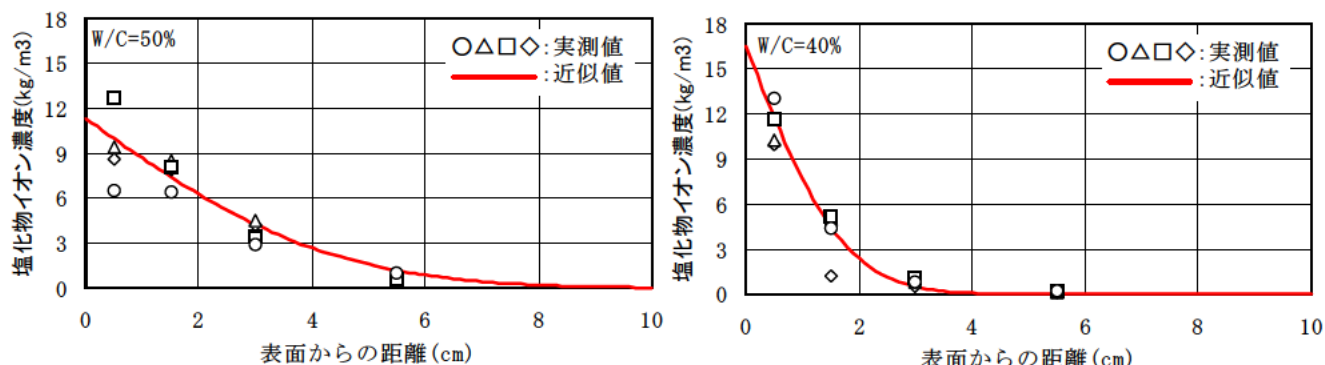
セメントの種類	普通ポルトランドセメント(OPC) 早強ポルトランドセメント (HPC)
水セメント比 (W/C)	30%, 40%, 50%
暴露環境	第 2 デッキ, 第 3 デッキ
暴露期間	6 年, 10 年, 12 年, 14 年, 20 年

4. 2. 2 試験要因と見かけの拡散係数

図-Ⅱ-2 に塩化物イオン濃度分布の一例を示す。コンクリートに浸透する塩化物イオンはコンクリート表面に多く存在し、内部に少なくなる傾向を示している。また、W/C が大きくなると内部に浸透している塩化物イオン濃度は大きくなる傾向を示している。すなわち、W/C の小さな PC 構造物は塩化物イオンの浸透に対して有利であることが明確である。さらに、塩化物イオンの浸透量は、環境の厳しい第 3 デッキの方が第 2 デッキより大きい傾向にあった。

(1)式を用いて見かけの拡散係数を算出した結果を図-Ⅱ-3 に示す。セメントの種類の影響に関しては、OHPとHPCには大きな相違は認められなかったが、OPH, HPCともW/Cの低下にともない見かけの拡散係数は低下する傾向にあり、W/C=40%, 50%それぞれ 0.1~0.2 $\text{cm}^2/\text{年}$, 0.4~0.6 $\text{cm}^2/\text{年}$ とW/C低下による遮塩効果が大きい結果となった。W/C低下によりコンクリート組織が緻密になった結果と考えられる。これら見かけの拡散係数は、2002 年制定コンクリート標準示方書 [施行編] に示されている算出式による値の 1/5~1/3 程度と非常に小さな

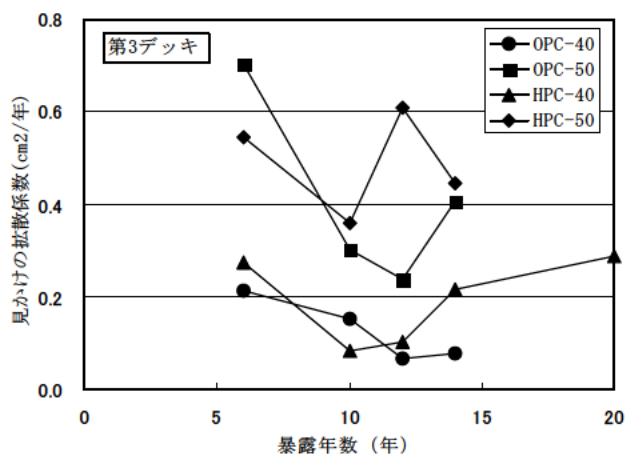
値となっていた。



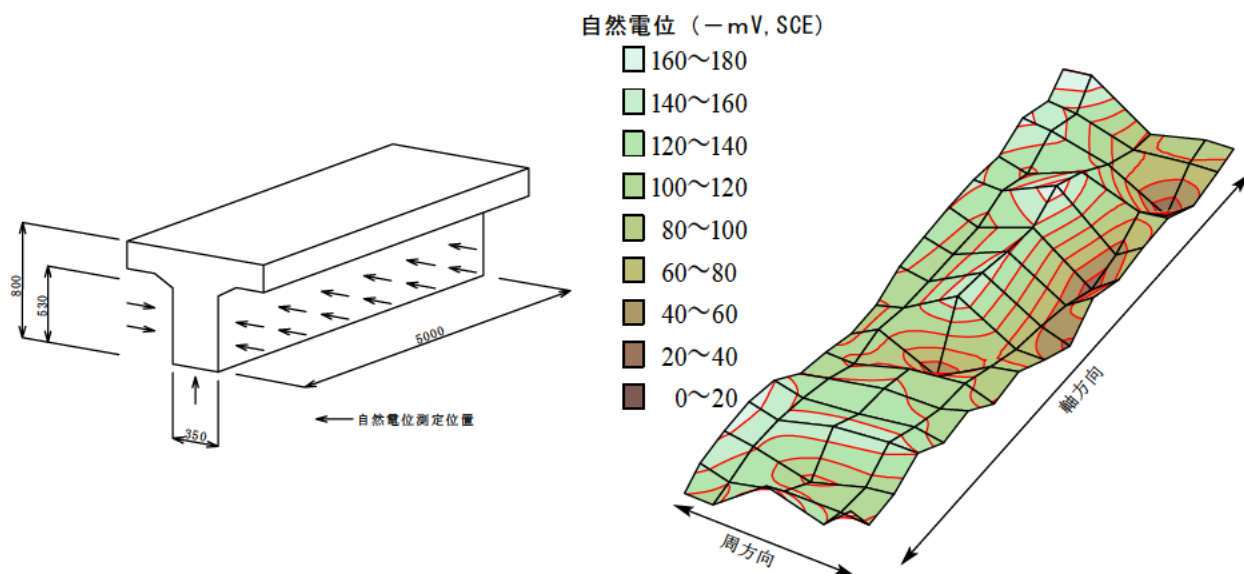
図－Ⅱ－２ 塩化物イオン濃度分布の一例（暴露 14 年；第 3 デッキ）

これら結果から、コンクリートの防食技術の基本は、W/C を小さくすることと、かぶりを十分に確保することと考えられる。

図－Ⅱ－４ に第 2 デッキに暴露した PC 桁試験体の形状・寸法と暴露 20 年後の自然電位分布を示す。桁底面の自然電位が卑な傾向を示しているが、ASTM C-876 を鋼材腐食の基準に用いると大半が「90%以上の確率で腐食なし」と判定された。PC 構造物は十分な耐久性を有していることが明確である。



図－Ⅱ－３ 見かけの拡散係数の経時変



図－Ⅱ－４ PC 桁試験体の形状・寸法と自然電位分布（暴露 20 年）

4. 3 樹脂塗装鉄筋の実用化

4. 3. 1 試験概要

製作した試験体は 200mm×200mm×1200mm の角柱試験体（HPC-40）とし、樹脂塗装鉄筋を埋設した。暴露は第 3 デッキである。使用した樹脂塗装鉄筋は 3 種類で、一部、樹脂塗装鉄筋に人為的にキズを設けた。表－Ⅱ－3 に使用した樹脂塗装材の仕様を示す。

暴露 20 年後、試験体から樹脂塗装鉄筋を取り出し、以下に示す条件で疲労試験に供し、定期的に試験を中止してピンホール検知器を用いて塗膜のひび割れの有無を測定した。写真－Ⅱ－2、写真－Ⅱ－3 に疲労試験機、およびピンホール検知器を用いた塗膜のひび割れ確認状況を示す。

つかみ間隔：30φ = 390mm

上限応力度：180N/mm² 下限応力度：150N/mm²

周 波 数：10Hz

表－Ⅱ－3 樹脂塗装材の仕様

種類	径	外観	膜厚			ピンホール	曲げ加工性	硬度	備考
		有害な欠陥 なきこと	平坦部180±50 μm			1,000V ≤5ヶ/m	5℃ 4Dd×180°	(皮膜) ≥2H	
A	D13	Good	平均	最大	最小	2.2	Good	2H	予熱温度230℃
B			170	220	130	1.3			予熱温度240℃
C			191	230	140	1.3			予熱温度230℃



写真－Ⅱ－2 疲労試験機

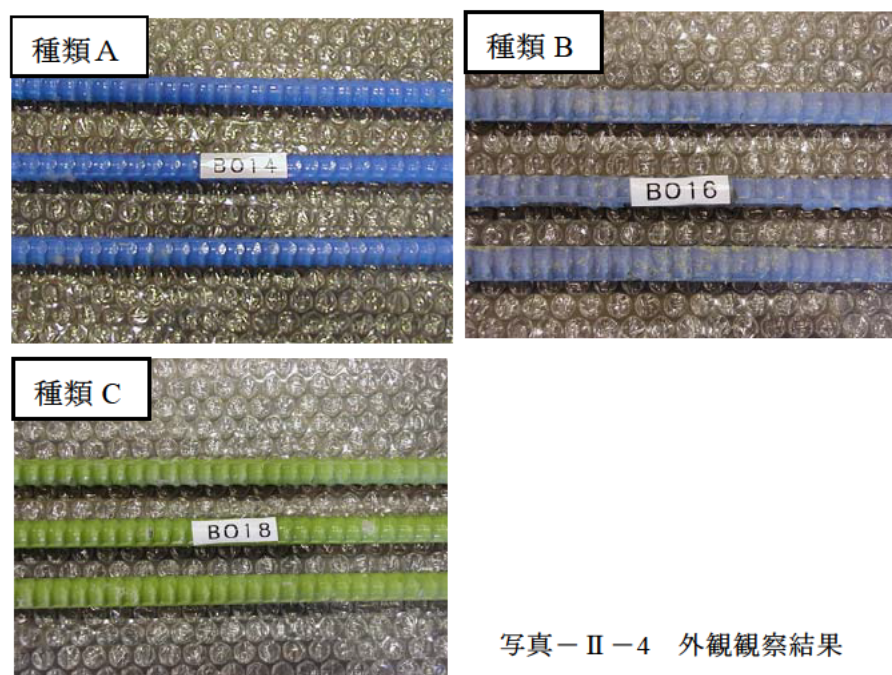


写真－Ⅱ－3 ひび割れ有無の確認状況

4. 3. 2 外観観察結果

コンクリート試験体から取り出された 3 種類の樹脂塗装鉄筋は、いずれも鋼材腐食が認めら

れず十分な防食性能を有するものと推定された。しかし、種類 B については取出時に、塗膜が破損した。塗装材自体の劣化、鉄筋と塗装材との付着劣化が考えられる。写真－Ⅱ－4 に外観観察結果を示す。



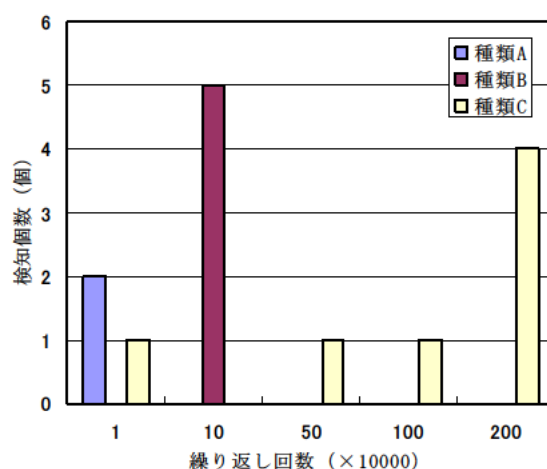
写真－Ⅱ－4 外観観察結果

4. 3. 3 塗膜の疲労特性

疲労試験の繰り返し回数と塗膜損傷の数の関係を図－Ⅱ－5 に示す。ここで疲労損傷とは、疲労試験を行うことによりピンホール検知器で検知できるようになったことと定義する。なお、取出し時に塗膜に生じた損傷部位はカウントから除外し、疲労試験の実施によって新たに検知された損傷個数を示している。

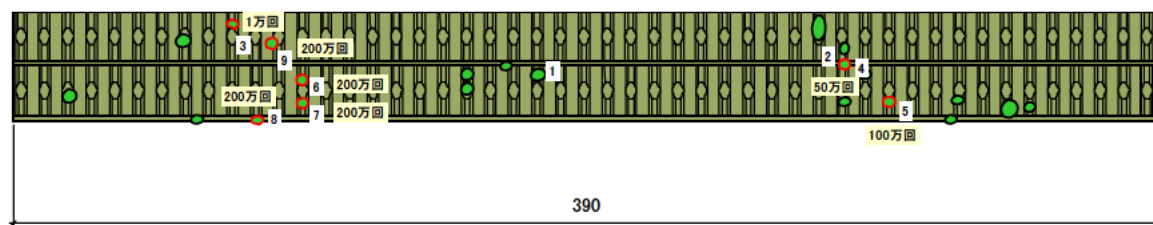
図より全ての塗装材料において、疲労回数の増加に伴い疲労損傷する傾向が認められた。種類Aおよび種類Bは、疲労試験初期に損傷部の増加が検知されたが、その後継続して発生する傾向は認められない。一方、種類Cは、疲労回数の増加に従って損傷箇所も発生していることが確認できた。ここで、図－Ⅱ－6 に種類Cの疲労損傷図を写真－Ⅱ－5、写真－Ⅱ－6 に損傷箇所、人為的にキスを設けた部分を示す。

図－Ⅱ－6 に示すように疲労損傷が認められる部位は、塗装の種類にかかわらず鉄筋のリブ頂部であり、塗膜のひび割れは認められなかった。写真－Ⅱ－5 に示すように疲労損傷を受けた部分は、鉄筋運搬時、コンクリート試験体制作時または鉄筋取出時にピンホール検知器では検知できないような損傷を受け、疲労により検知できるようにな

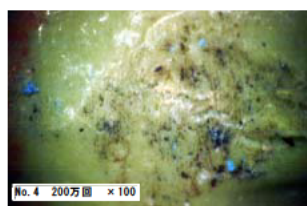
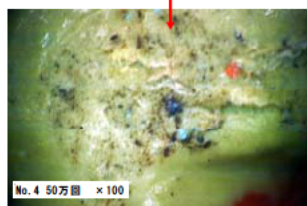


図－Ⅱ－5 繰り返し回数と塗膜損傷数の関係

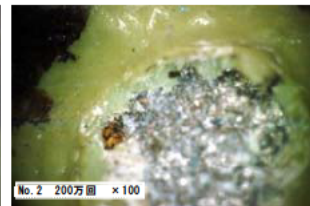
ったものと推定される。樹脂塗装鉄筋の取り扱いに注意を要しないと疲労損傷により鋼材腐食を招く可能性が推定できる。一方、写真－Ⅱ－6 に示すように人為的にキズを設けた部位は、疲労によりひび割れが誘発されることはなかった。



図－Ⅱ－6 疲労損傷



写真－Ⅱ－5 疲労損傷部



写真－Ⅱ－6 人為的キズ部

4. 4 塗膜系被覆材の実用化

4. 4. 1 実験概要

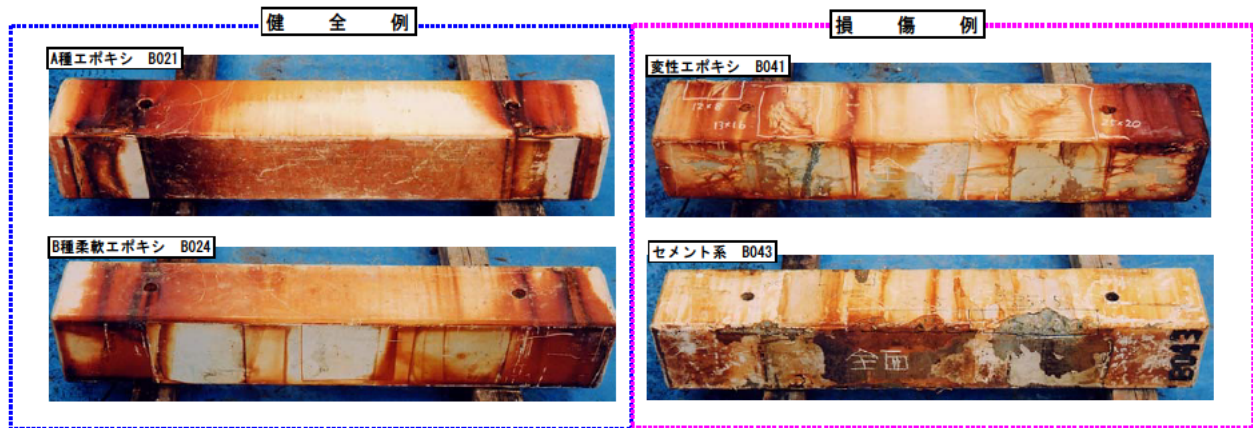
試験体は、200mm×200mm×1200mm の角柱試験体とし、各種類の塗膜系塗料を塗布した。暴露環境は第 3 デッキである。使用した材料の仕様を表Ⅱ-4 に示す。試験は、外観観察、コンクリート中に浸透した塩化物イオン濃度、付着強度を行い、各種塗膜系塗装の耐久性を評価した。

表Ⅱ-4 塗膜系被覆材の仕様

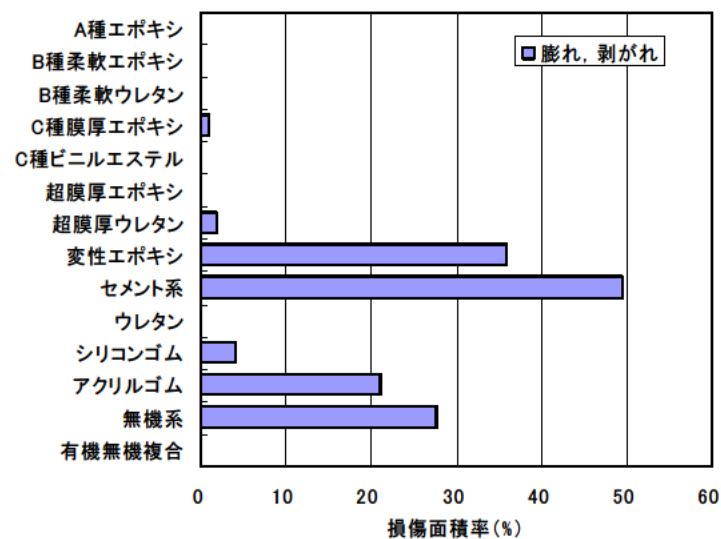
供試材料の系統		第1層	パテ	第2層	第3層	第4層
A種の塗装系		エポキシ樹脂プライマー 100g/m ² , (－)	エポキシ樹脂パテ 必要量, (－)	エポキシ樹脂塗料中塗 260g/m ² , (60 μ)	ポリウレタン樹脂塗料上塗 120g/m ² , (30 μ)	
B種の塗装系 (柔軟型エポキシ系)		エポキシ樹脂プライマー 100g/m ² , (－)	エポキシ樹脂パテ 100g/m ² , (－)	柔軟型エポキシ樹脂 塗料中塗 230g/m ² , (60 μ)	柔軟型ポリウレタン樹脂 塗料上塗 125g/m ² , (30 μ)	
B種の塗装系 (柔軟型ポリウレタン系)		エポキシ樹脂プライマー 100g/m ² , (－)	エポキシ樹脂パテ 300g/m ² , (－)	柔軟型ポリウレタン樹脂 塗料中塗 260g/m ² , (60 μ)	柔軟型ポリウレタン樹脂 塗料上塗 120g/m ² , (30 μ)	
C種の塗装系 (厚膜型エポキシ系)		エポキシ樹脂プライマー 100g/m ² , (－)	エポキシ樹脂パテ 100g/m ² , (－)	厚膜型エポキシ樹脂 塗料中塗 780g/m ² , (350 μ)	ポリウレタン樹脂塗料 上塗 125g/m ² , (30 μ)	
C種の塗装系 (ビニルエステル系)		エポキシ樹脂プライマー 100g/m ² , (－)	エポキシ樹脂パテ 300g/m ² , (－)	厚膜型ビニルエステル 樹脂塗料中塗 1000g/m ² , (350 μ)	ポリウレタン樹脂塗料 上塗 120g/m ² , (30 μ)	
次世代材料の 評価	超厚膜型エポキシ系	エポキシ樹脂プライマー 100g/m ² , (－)	エポキシ樹脂パテ 100g/m ² , (－)	超厚膜型エポキシ樹脂 塗料 中塗 2000g/m ² , (1000 μ)	ポリウレタン樹脂塗料 上塗 125g/m ² , (30 μ)	
	超厚膜型ウレタン系	湿気硬化型ポリウレタン 樹脂プライマー 100g/m ² , (－)	エポキシ樹脂パテ 必用量, (－)	超厚膜型ポリウレタン樹脂 塗料中塗 850g/m ² , (500 μ)	同左	ポリウレタン樹脂塗料上塗 120g/m ² , (30 μ)
	変性エポキシ系	エポキシ樹脂プライマー 100g/m ² , (－)	エポキシ樹脂パテ 必用量, (－)	特殊エポキシ樹脂塗料中塗 920g/m ² , (500 μ)	同左	ポリウレタン樹脂塗料 上塗 120g/m ² , (30 μ)
	セメント系					
	ウレタン径					
	シリコンゴム系					
	アクリルゴム径					
無機材料		無機質プライマー 100g/m ² , (－)	エポキシ樹脂パテ 100g/m ² , (－)	無機質塗料中塗 150g/m ² , (30 μ)	無機質塗料上塗 100g/m ² , (30 μ)	
有機無機複合材料		有機無機複合塗料用プライマー 100g/m ² , (－)	有機無機複合塗料用パテ 300g/m ² , (－)	有機無機複合塗料中塗 100g/m ² , (400 μ)	ポリウレタン樹脂塗料上塗 100g/m ² , (30 μ)	

4. 4. 2 外観観察結果

試験体を外観観察した結果を写真Ⅱ-7, 図Ⅱ-7 に示す。観察結果は、各試験体の膨れ、剥がれの面積を試験体表面積で除して損傷面積率として整理した。この結果、「道路橋の塩害対策指針（案）・同解説」に規定されている A 種, B 種および C 種に該当する塗装材には顕著な損傷は認められなかった。



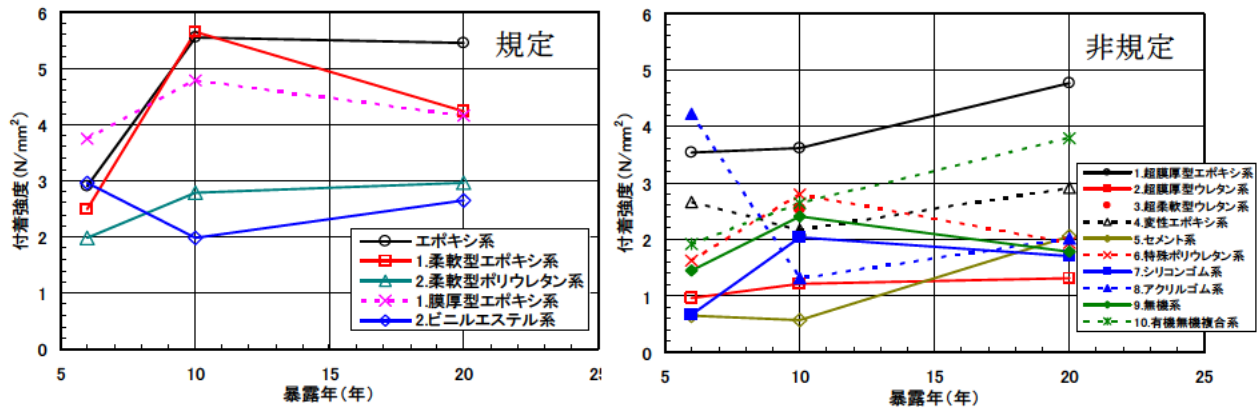
写真－Ⅱ－7 外観観察結果事例



図－Ⅱ－7 試験体の損傷面積率（暴露 20 年）

4. 4. 3 付着試験結果

各塗装材料の付着強度の経時変化を図－Ⅱ－8 に示す。「道路橋の塩害対策指針（案）・同解説」に規定されている材料は、規定されていない材料と比較して、付着強度が大きい傾向にあった。また、規定されていないアクリク系塗料の付着強度は暴露 10 年で大きく低下していたが、その他の材料においては暴露期間とともに若干、大きくなる傾向にあった。

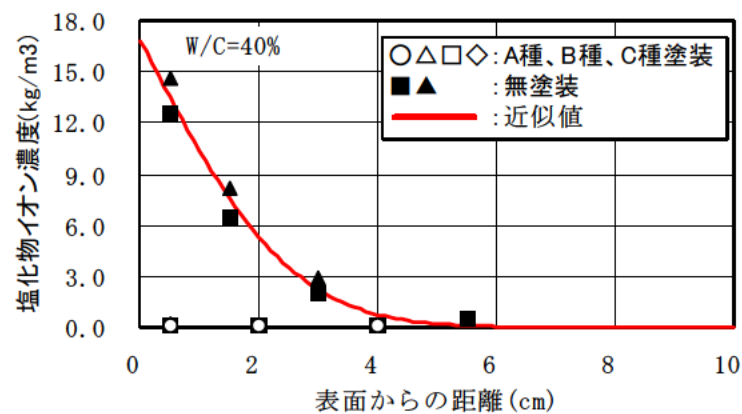


図－Ⅱ－8 付着強度の経時変化

4. 4. 4 塩化物イオン濃度分布

「道路橋の塩害対策指針（案）・同解説」に規定されているA種、B種およびC種に該当する塗装材における暴露20年後の塩化イオン濃度分布を図－Ⅱ－9に示す。

いずれの材料においても塩化物イオン濃度は 0.2kg/m^3 以下で、無塗装試験体と比較すると十分に塩化物イオンの浸透を遮断していることが明確である。



図－Ⅱ－9 塩化物イオン濃度分布

4. 5 耐塩性コンクリートの開発

4. 5. 1 試験概要

製作した試験体は 200mm×200mm×1200mm の角柱試験体とした。試験要因は、表－Ⅱ－5 に示すようにコンクリートの種類，暴露環境，暴露期間とした。

試験は，定期的に試験体からコアを採取し，塩分分析を行い(1)式に示す Fick の拡散方程式を解いて，表面塩化物イオン濃度と見かけの拡散係数を算出し比較検討した。

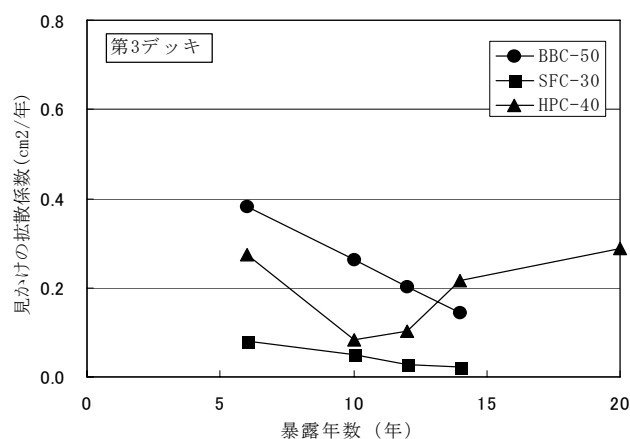
表－Ⅱ－5 試験要因

セメントの種類	高炉セメント(BBC) シリカフュームセメント (SFC)
水セメント比	30%， 50%
暴露環境	第 2 デッキ， 第 3 デッキ
暴露期間	6 年， 10 年， 12 年， 14 年， 20 年

4. 5. 2 耐塩性コンクリートの遮塩性能

図－Ⅱ－9 に(1)式により算出された見かけの拡散係数の経時変化を示す。比較として図－Ⅱ－3 の HPC-40 を併記した。

シリカフュームセメントを用いたコンクリートは，遮塩が最も優れており，高炉セメントを用いたコンクリートは，HPC-40 とほぼ同程度の遮塩性を示していた。



図－Ⅱ－9 見かけの拡散係数の経時変化

5. まとめ

昭和 50 年代に報告された鋼材腐食によるコンクリートの損傷、いわゆる塩害に対して、昭和 59 年 2 月「道路橋の塩害対策指針（案）」（日本道路協会）が発行され基本対策が明示された。しかし、塩害対策の長期的な耐久性の確認、新材料を利用した防食技術およびコンクリートの品質向上など、今後さらに研究していかなければならない課題も数多くのこされている。

このような背景のもと、昭和 57 年度から駿河湾に位置する海洋技術総合研究施設を利用した「飛沫帯におけるコンクリート構造物の防食技術に関する研究」を建設省土木研究所（現：独立行政法人土木研究所）と実施した。本報告は、暴露 20 年までの研究成果をまとめたものである。

(1) コンクリートの防食技術の基本

耐久性を低下させる主要因としてコンクリートの中性化と塩分浸透が挙げられる。

塩化物イオンの浸透量に影響を与える要因として、外環境、水セメント比が考えられた。外環境として波浪の影響を受ける第 2 デッキと飛来塩分の影響を受ける第 3 デッキで検討した結果、より環境の厳しい第 3 デッキでは塩化物イオンの浸透量が大きく、試験体の外観観察結果や鋼材腐食結果からも損傷が著しい傾向にあった。一方、水セメント比で検討すると、水セメント比 40% のコンクリートの見掛けの拡散係数は、50% のそれと比較して小さく塩化物イオンの浸透に対して有効であることが明確となった。さらに、見掛けの拡散係数は、暴露年数の長期化に伴い小さくなる傾向にあり、2002 年制定コンクリート標準示方書〔施行編〕に示されている算出式による値の $1/5 \sim 1/3$ 程度と非常に小さな値となっていた。

塩化物イオンの浸透量は、コンクリート表面から離れる程小さくなることも考慮すれば、コンクリートによる防食技術の基本は、水セメント比を小さくし、かぶりを大きくすることであると考えられる。

(2) コンクリート中の鋼材の防食

コンクリート中の鋼材の防食技術として、エポキシ樹脂塗装鉄筋に関して検討を行った。外観観察から評価すると、いずれの材料も防食性能を有していると考えられた。また、疲労試験の結果、ひび割れなどの塗膜の疲労損傷は生じなかった。しかし、樹脂塗装鉄筋の運搬、コンクリート打設時に軽微な損傷を与えた場合には、疲労損傷を生じ鋼材腐食の可能性が推定され、取り扱いに注意が必要であると考えられる。

(3) 耐海水コンクリート部材の設計技術

耐海水コンクリート部材として、塗膜系被覆材、混和材を混入した耐塩コンクリートについて検討した。

塗膜系被覆材として道路橋の塩害対策指針（案）に定められた A 種、B 種、C 種並びに規定されていない超厚膜エポキシ系、シリコンゴム系、アクリルゴム系などを用い、外観観察、付着強度試験および塩分浸透量で耐久性能を検討した。塩害対策指針（案）に定められた塗料は、厳しい環境である第 3 デッキに 20 年暴露されたにもかかわらず健全でコンクリート中への塩分浸透もほとんど認められなかった。一方、次世代型と呼ばれる塗料は、種類にもよるが試験体面積の 20～30% に浮きやはく離が認められ前者と比較して耐久性に差が認められた。

耐塩コンクリート部材として高炉セメントとシリカフェームを用い、外観観察、塩化物イオンの浸透から耐久性で検討した。使用材料にかかわらず塩分浸透量は少なくなり、外観観察か

らも腐食によるひび割れは認められなかった。したがって、コンクリート混和材を用いることは耐久性を向上させるために有効な手法と考えられる。

6. 発表論文

- ① 片脇清士，田中柳之助，太田稔，町田武，近藤順：飛沫帯におけるコンクリート構造用材料の防食について，腐食防食討論会，腐食防食協会，昭和 61 年 10 月
- ② 國府勝郎，片脇清士，町田武：防食性能に対するコンクリート品質の影響，コンクリート工学年次論文報告集，1987
- ③ 片脇清士，坂本浩行，町田武，佐久間隆夫：海洋暴露コンクリートへの塩化物浸透に関する試験，第 19 回日本道路会議論文集，日本道路協会，平成 3 年
- ④ Kiyoshi Katawaki, Hiroyuki Sakamoto, Kazuo Tsuno, Takeshi Machida, Koji Ishii: Development of Corrosion Protection Technology for Prestressed Concrete Structure through the Large Scale Exposure Test, FIP Symposium'93, Kyoto, Japan, 1993
- ⑤ 片脇清士，坂本浩行，町田武：海洋暴露 8 年後のコンクリート供試体の紡織調査，第 20 回日本道路会議論文集，日本道路協会，平成 5 年
- ⑥ H. Sakamoto, K. Tsuno, M. Fujita, Y. Kawamoto: Research on Anticorrosion Technology for Concrete Structures in Splash Zones, Concrete Under Severe Conditions 2, 1998.6
- ⑦ 大谷悟司，浅井洋，守屋進：長期暴露試験によるコンクリート構造物の耐久性評価に関する実験的考察，第 12 回プレストレストコンクリートの発展に関するシンポジウム，平成 15 年 10 月
- ⑧ 吉田光秀，石井浩司，守屋進：長期暴露試験によるコンクリート構造物の耐久性評価に関する実験的考察，第 25 回日本道路会議，日本道路協会，平成 15 年 11 月
- ⑨ 浅井 洋，守屋 進，大澤隆英：表面被覆工法の長期耐久性に関する実験的検討，第 26 回日本道路会議，日本道路協会，平成 16 年 11 月
- ⑩ 大谷悟司，浅井 洋，守屋 進，大澤隆英：暴露 20 年経過したコンクリート表面被覆材の性能，第 13 回プレストレストコンクリートの発展に関するシンポジウム，平成 16 年 10 月

Ⅲ 海上大気部の長期防錆形塗装技術に関する研究 －第3分科会塗装WG－

1. はじめに

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、社会資本ストックの維持管理費用を縮減することに貢献することになるので、その成果の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査費による「海洋構造物による海洋空間等の有効利用に関する研究」のうち建設省土木研究所担当の課題として「海上大気中の長期防錆技術に関する研究」を昭和 59 年（1984）から開始した。

本研究報告書は、暴露試験 20 年の成果をまとめたものである。

2. 研究経過

旧建設省土木研究所（現、独立行政法人土木研究所）と財団法人土木研究センターが共同研究を実施するのにあたり、関西ペイント株式会社、大日本塗料株式会社、日本ペイント株式会社が参加した。

海洋技術総合研究施設を利用した試験板の暴露試験を昭和 59 年（1984）から開始した。調査は毎年定期的実施してきた。主な研究経過を下記に示す。

研究課題	1984	1994	2004	2014
(1) 暴露試験片による塗装系の評価	さび・ふくれ・白亜化の観察， 光沢・インピーダンス測定			
(2) 環境測定・飛来塩分測定	1985	1988		
(3) 無塗装鋼材の腐食減量測定（1，2，3，4，10 年後測定）	1985	1996		
(4) 塗装鋼板の劣化機構と劣化予測技術の研究 （暴露試験片回収し，膜厚，塩素侵入度，SEM および電気化学的測定実施）				
(5) 施設本体塗装系の評価				
(6) 施設本体の塗替え塗装実施（ポリウレタン上塗，ふっ素上塗の水洗又は 4 種ケレンによる簡易塗替え検討）		1988		
(7) 塗装鋼を用いた 4 種ケレン程度の素地調整による塗替え塗装・耐久性の検証試験		1988		

本研究の実施には、多数の関係者が参画した。本報告では 20 年の調査（平成 15 年）以降の関係者を下記に示す。

- ・ 守屋 進 独立行政法人土木研究所
- ・ 金井 浩一 財団法人土木研究センター
- ・ 中野 正 関西ペイント販売株式会社
- ・ 黒川 雅哲 関西ペイント販売株式会社
- ・ 渡辺 健児 日本ペイント販売株式会社
- ・ 新谷 憲生 日本ペイント販売株式会社

- ・ 大澤 隆英 日本ペイント販売株式会社
- ・ 多記 徹 大日本塗料株式会社
- ・ 永井 昌憲 大日本塗料株式会社
- ・ 松本 剛司 大日本塗料株式会社

3. 研究課題

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なうことで、高性能で信頼性の高い長期防錆塗装技術の開発を行なうことを目的として、下記課題の研究を行なった。

- 1) 腐食環境調査：暴露試験結果を解析するため、試験場所の腐食環境を把握する。
- 2) 新設塗装システムの研究：当時の塗装システム、および開発中の塗装システムの性能確認を行なう。
- 3) 施設本体の塗装システムの研究：施設本体を利用して、長期防錆塗装システムの耐久性の検証試験を行なう。
- 4) 施設本体の簡易塗替え塗装システムの研究：施設本体を利用した 4 種ケレン程度の素地調整による塗替え塗装・耐久性の検証試験を行なう。
- 5) 簡易塗替え塗装システムの研究：塗装鋼を用いて 4 種ケレン程度の素地調整による塗替え塗装・耐久性の検証試験を行なう。

4. 研究方法と研究成果

4. 1 腐食環境調査

本施設の腐食環境について定量的な把握ができ、その腐食環境は ISO/TC156/WG4 の国際共同暴露試験地として採択された（クラス C 4）。ISO 12944-2 : 1998 で分類されている腐食カテゴリーを表－Ⅲ－1 に示す。

表－Ⅲ－1 大気暴露・最初の 1 年の腐食速度（ γ_{corr} ）¹⁾

Corrosivity Category	Mass loss per unit surface/thickness loss (after first year of exposure)				Examples of typical environments in a temperate climate (informative only)	
	Low-carbon steel		Zinc		Exterior	Interior
	Mass loss g/m ²	Thickness loss μm	Mass loss g/m ²	Thickness loss μm		
C1 very low	≤ 10	≤ 1, 3	≤ 0, 7	≤ 0, 1	—	Heated buildings with clean atmospheres, e.g. offices, shops, schools, hotels.
C2 low	> 10 to 200	> 1, 3 to 2.5	> 0, 7 to 5	> 0, 1 to 0, 7	Atmospheres with low level of pollution. Mostly rural areas.	Unheated buildings where condensation may occur, e.g. depots, sports halls.
C3 medium	> 200 to 400	> 25 to 50	> 5 to 15	> 0, 7 to 2, 1	Urban and industrial atmospheres, moderate sulfur dioxide pollution. Coastal areas with low salinity.	Production rooms with high humidity and some air pollution, e.g. food-processing plants, laundries, breweries, dairies.
C4 high	> 400 to 650	> 50 to 80	> 15 to 30	> 2, 1 to 4, 2	Industrial areas and coastal areas with moderate salinity.	Chemical plants, swimming pools, coastal ship- and boatyards.
C5-1 very high (industrial)	> 650 to 1 500	> 80 to 200	> 30 to 60	> 4, 2 to 8, 4	Industrial areas with high humidity and aggressive atmosphere.	Buildings or areas with almost permanent condensation and with high pollution.
C5-M very high (marine)	> 650 to 1 500	> 80 to 200	> 30 to 60	> 4, 2 to 8, 4	Coastal and offshore areas with high salinity.	Buildings or areas with almost permanent condensation and with high pollution.
NOTES 1 The loss values used for the corrosivity categories are identical to those given ISO 9223. 2 In coastal areas in hot, humid zones, the mass or thickness losses can exceed the limits of category C5-M. Special precautions must therefore be taken when selecting protective paint system for structures in such areas.						

ISO/TC156/WG4 では、これら規格の裏付けとなるデータベースを作成する目的で、1986

年から 13 カ国, 49 地域で 5 年間にわたり国際共同暴露試験を行なった。わが国では, TC156 国内対策委員会の JWG4 委員を中心に調査研究委員会を設け, 国際共同暴露試験プログラムに基づき国内 4 カ所〔銚子, 東京, 大井川沖 (駿河湾海洋技術総合研究施設第 1 デッキ), 沖縄〕で暴露試験を行なった。世界 49 地域での海塩粒子のマップを図-III-1 に示す。

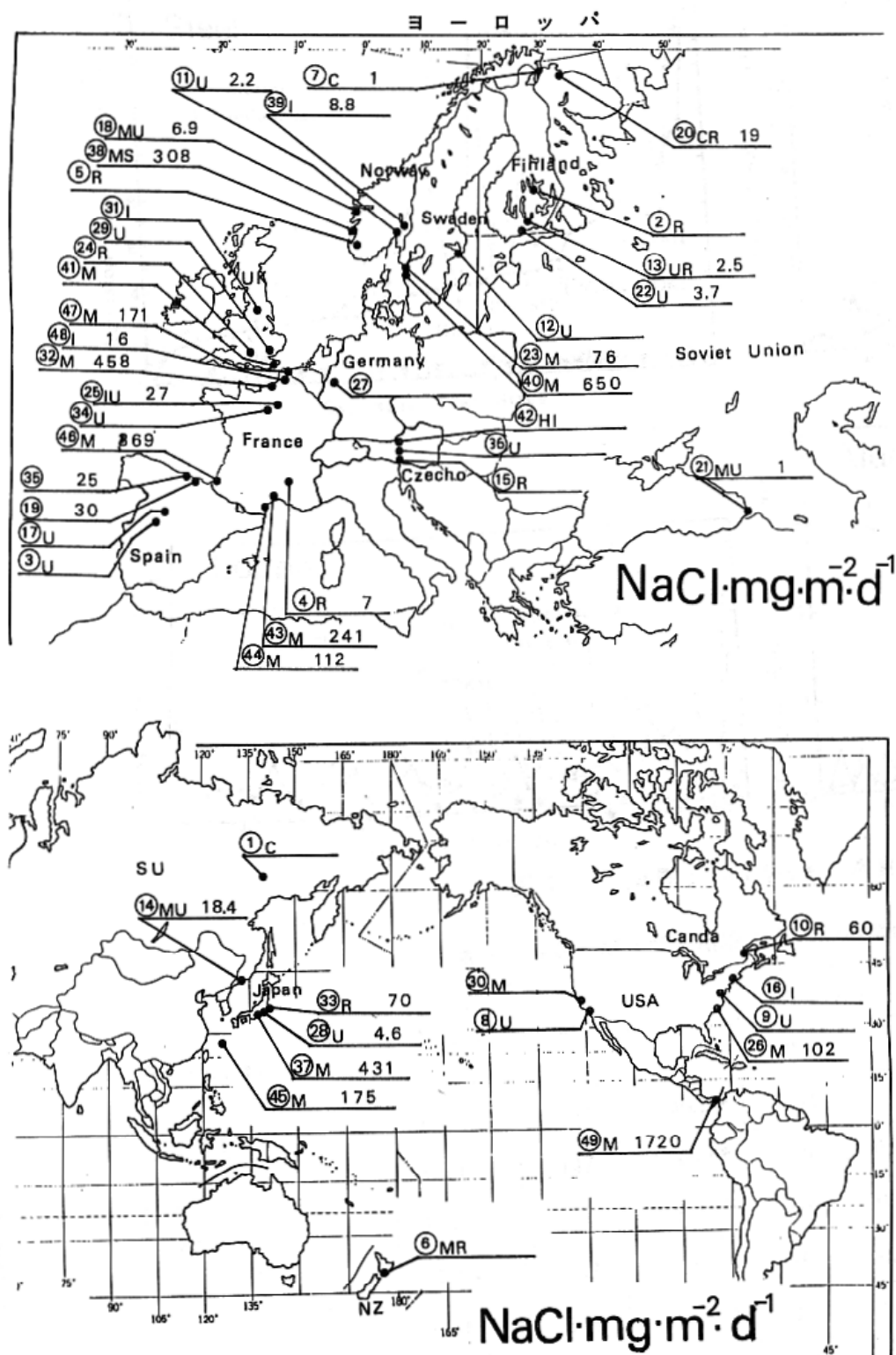


図-III-1 共同暴露プログラムにおける海塩粒子マップ²⁾

なお飛来塩分量は DK 方式と ISO 方式（ウェットチャンドル式）の 2 種類で実施した。具体的飛来塩分測定方法を下記に示す。

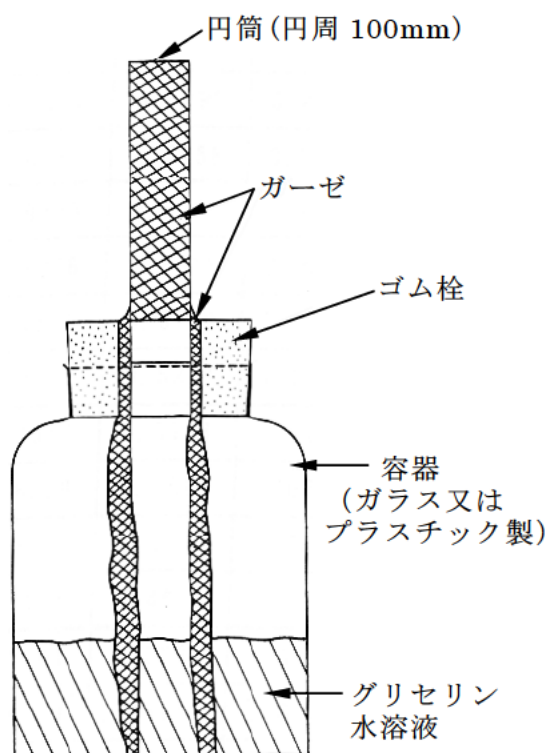
1) DK 式（土研式）

10×10cm のステンレス垂直平面に雨水と共に捕集する方式。測定は 3 カ月毎に行ない、季節変動も調査した。風向による方向性を考察するため第 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考慮するため第 2 デッキの南方向の 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。

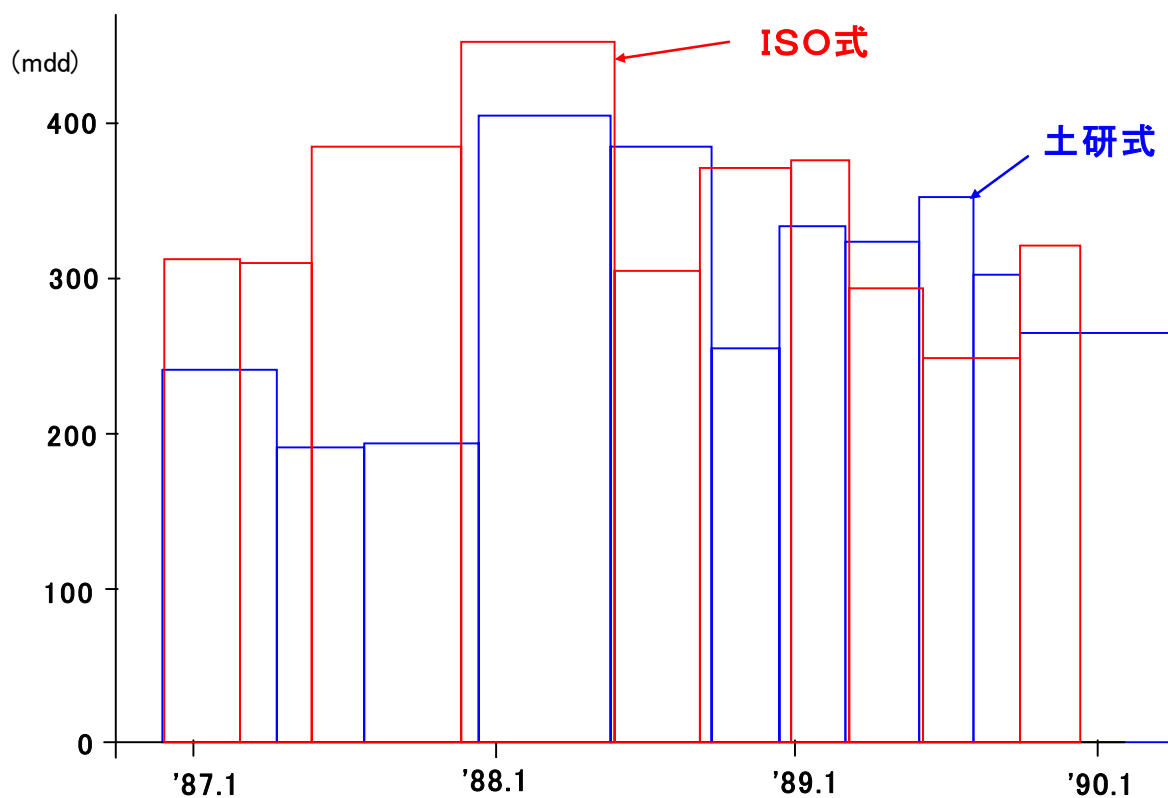
2) ISO 方式（ウェットチャンドル式）

キャンドル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 度全方向から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 カ月毎に測定を行ない、季節変動も調査した。

図－Ⅱ－2 に ISO 方式（ウェットチャンドル式）海塩粒子捕集具を示し、図－Ⅲ－3 に DK 式と ISO 方式で測定した飛来塩分測定結果を示す。また、ISO 腐食環境分類は、表－Ⅲ－2 に示すように、駿河湾（大井川沖）は、C 4（high）に分類された。



図－Ⅲ－2 ウェットチャンドル式海塩粒子捕集具



図－Ⅲ－３ 飛来塩分量測定結果（DK 式と ISO 方式での飛来塩分量比較）

表－Ⅲ－２ I S O 腐食環境分類

	銚子	東京	大井川沖	沖縄
飛来塩分量 mg/m ² ・d	70	5	431	175
SO ₂ 汚染量 mg/m ² ・d	8	15	33	12
ぬれ時間 h/y	5720	2220	－	3830
炭素鋼の腐食 μm/y	43.3	39.5	48.4	75.2
ISO腐食 環境分類	C4	C2～3	C4	C4

4. 2 新設塗装システムの研究

(1) 長期防錆塗装システム（系統 A） 9 種類の暴露試験結果

当時の長期防錆塗装システムの 1 つである厚膜形無機ジンクリッチペイント／エポキシ樹脂塗料／ふっ素樹脂塗料のような長期耐久性塗装仕様は、海上環境暴露 20 年経過してもふくれ、さびなどの保護機能上の欠陥はみられず、現行長期防錆塗装システムの良好な防錆性を示した。20 年間評価した当時の長期防錆塗装システムを表－Ⅲ－3 に示す。

表－Ⅲ－3 暴露開始当時使用されていた塗装系

仕様	1層目	2層目	3層目	4層目	5層目	6層目	7層目	合計膜厚(μm)
A-1	長ばく形エッチングプライマー(15)	鉛系さび止めペイント1種(35)	鉛系さび止めペイント1種(35)	長油性フタル酸樹脂塗料中塗(30)	長油性フタル酸樹脂塗料上塗(25)			140
A-2	長ばく形エッチングプライマー(15)	鉛系さび止めペイント1種(35)	鉛系さび止めペイント1種(35)	フェノール樹脂MIO塗料(45)	塩化ゴム系塗料中塗(35)	塩化ゴム系塗料上塗(30)		195
A-3	無機ジンクリッチプライマー(15)	塩化ゴム系塗料下塗(45)	塩化ゴム系塗料下塗(45)	塩化ゴム系塗料中塗(35)	塩化ゴム系塗料上塗(30)			170
A-4	無機ジンクリッチペイント(75)	ミストコート	フェノールジンクロマト(30)	フェノール樹脂MIO塗料(60)	フェノール樹脂MIO塗料(60)	塩化ゴム系塗料中塗(35)	塩化ゴム系塗料上塗(30)	290
A-5	無機ジンクリッチプライマー(15)	エポキシ樹脂塗料下塗(60)	エポキシ樹脂塗料下塗(60)	ポリウレタン樹脂塗料用中塗(30)	ポリウレタン樹脂塗料上塗(30)			195
A-6	無機ジンクリッチペイント(75)	ミストコート	エポキシ樹脂塗料下塗(60)	エポキシ樹脂塗料下塗(60)	エポキシ樹脂塗料用中塗(30)	ポリウレタン樹脂塗料上塗(30)		255
A-7	無機ジンクリッチプライマー(75)	ミストコート	エポキシ樹脂塗料下塗(60)	エポキシ樹脂塗料下塗(60)	エポキシ樹脂MIO塗料(40)	ポリウレタン樹脂塗料用中塗(30)	ポリウレタン樹脂塗料上塗(30)	295
A-8	無機ジンクリッチペイント(75)	ミストコート	厚膜形ビニル樹脂塗料上塗(150)	ビニル樹脂塗料上塗(30)				255
A-9	厚膜型エポキシジンクリッチペイント(75)	ポリエステル樹脂ガラスフレーク塗料(350)	ポリエステル樹脂ガラスフレーク塗料(350)	ふっ素樹脂塗料上塗(20)	ふっ素樹脂塗料上塗(20)			815

注) 表中 () 内の数字は膜厚、なおミストコートは合計膜厚から除外した。

(2) 開発中の塗装システム（系統 B） 18 種の暴露試験結果

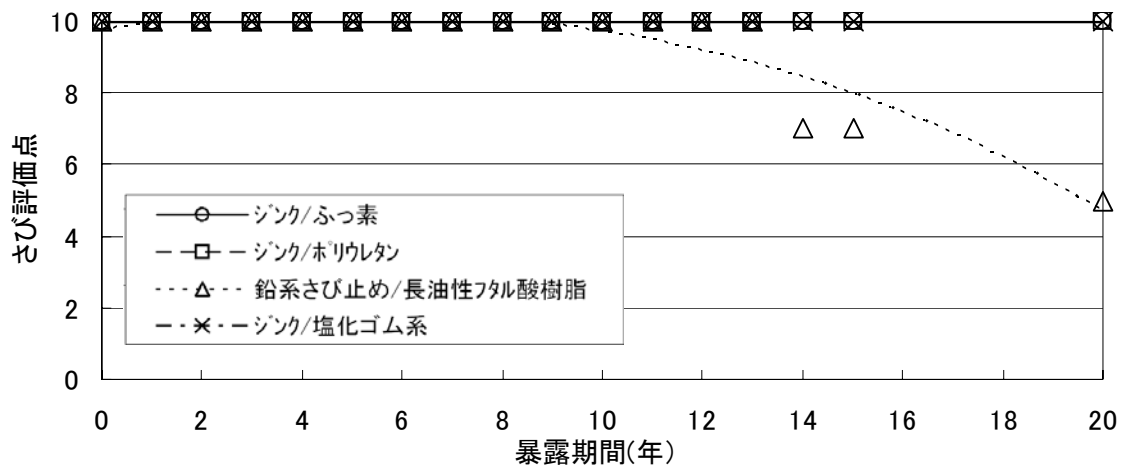
当時の長期防錆塗装システムよりも厚膜に塗装するシステムであるビニルエステルガラスフレーク塗料／ポリウレタン樹脂塗料，ポリエステルガラスフレーク塗料，エポキシ樹脂ガラスフレーク塗料，超厚膜形エポキシ樹脂塗料，無機ジンクリッチペイント／シリコン樹脂塗料，亜鉛溶射／エポキシ樹脂塗料／ポリウレタン樹脂塗料，厚膜形無機ジンクリッチペイント／ふっ素樹脂塗料が良好であった。

ふっ素樹脂塗料を上塗りとした塗装系は 20 年経過後も白亜化を生じておらず、光沢保持状態も良好であった。長期防錆塗装システムの上塗り塗装としては、光沢保持率および耐白亜化の優れたふっ素樹脂塗料の耐候性の良さが確認できた。ポリウレタン樹脂塗料を上塗りとした仕様の試験片は経時で、光沢低下や白亜化が見られたが、塩化ゴム系塗料やフタル酸樹脂塗料に比べて良好で、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いえる。当時、開発中の塗装システムを表－Ⅲ－4 に示す。また、代表的塗装系のさび、光沢保持率および白亜化の 20 年間暴露評価結果を図－Ⅲ－4，図－Ⅲ－5 および図－Ⅲ－6 に示す。さらに、暴露 20 年後の塗膜外観と、カレントインタラプタ法による塗膜抵抗測定結果を図－Ⅲ－7 に示す。

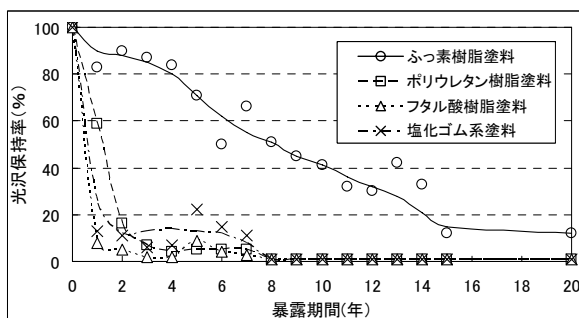
表－Ⅲ－４ 暴露開始当時の新規塗装系

仕様	1層目	2層目	3層目	4層目	5層目	6層目	合計膜厚 (μm)	特徴
B-1	エポキシ樹脂プライマー(20)	超厚膜形エポキシ樹脂塗料(2000)	ボリウレタン樹脂塗料上塗(35)				2055	超厚膜形エポキシ樹脂塗料(2000)の使用
B-2	ボリウレタン樹脂プライマー(20)	無溶剤形ボリウレタン樹脂塗料(1000)	ボリウレタン樹脂塗料上塗(35)				1055	無溶剤形ボリウレタン樹脂塗料(1000)の使用
B-3	ビニルエステル樹脂プライマー(25)	ビニルエステル樹脂カスフレック塗料(300)	ビニルエステル樹脂カスフレック塗料(300)	ボリウレタン樹脂塗料上塗(30)			655	ビニルエステル樹脂カスフレック樹脂塗料の使用
B-4	無機シソクリッチプライマー(15)	厚膜形無機シソクリッチベイント(75)	シリコン樹脂塗料上塗(25)	シリコン樹脂塗料上塗(25)			140	シリコン樹脂塗料上塗の使用
B-5	長ばく形エッチングプライマー(15)	鉛系さび止めベイント1種(35)	鉛系さび止めベイント1種(35)	シリコンアルキド樹脂塗料中塗(30)	シリコンアルキド樹脂塗料上塗(25)		140	シリコンアルキド樹脂塗料上塗の使用
B-6	無溶剤形ターウレタン樹脂塗料(2000)	ボリウレタン樹脂塗料上塗(30)					2030	無溶剤形ターウレタン樹脂塗料(2000)の使用
B-7	ポリエステル樹脂プライマー(40)	ポリエステル樹脂カスフレック塗料(350)	ポリエステル樹脂カスフレック塗料(350)				740	ポリエステル樹脂カスフレック塗料の使用
B-8	エポキシ樹脂カスフレック塗料(500)	エポキシ樹脂カスフレック塗料(500)	エポキシ樹脂カスフレック塗料(500)				1500	エポキシ樹脂カスフレック塗料の使用
B-9	超厚膜形エポキシ樹脂塗料(750)	超厚膜形エポキシ樹脂塗料(750)					1500	超厚膜形エポキシ樹脂塗料(750)の使用
B-10	無溶剤形エポキシ樹脂塗料(500)						500	無溶剤エポキシ樹脂塗料(500)の使用
B-11	亜鉛溶射(75)	無機シーラー(20)	エポキシ樹脂塗料下塗(60)	エポキシ樹脂塗料中塗(60)	ボリウレタン樹脂塗料用中塗(30)	ボリウレタン樹脂塗料上塗(30)	275	亜鉛溶射+塗装
B-12	厚膜形無機シソクリッチベイント(75)	ミストコート	ふっ素樹脂塗料用プライマー(100)	ふっ素樹脂塗料用中塗(50)	ふっ素樹脂塗料上塗(20)	ふっ素樹脂塗料上塗(20)	265	厚膜形無機シソク+ふっ素樹脂
B-13	長ばく形エッチングプライマー(15)	鉛系さび止めベイント1種(35)	鉛系さび止めベイント1種(35)	フェノール樹脂MI0塗料(50)	ふっ素樹脂塗料上塗(20)	ふっ素樹脂塗料上塗(20)	175	鉛系さび止め+ふっ素の組み合わせ
B-14	ボリウレタン樹脂プライマー(40)	超厚膜形ボリウレタン樹脂塗料(2000)					2040	超厚膜形ボリウレタン樹脂塗料(2000)の使用
B-15	亜鉛めっき	エポキシ樹脂プライマー(50)	ふっ素樹脂塗料上塗(20)				70	亜鉛めっき+ふっ素
B-16	エポキシ樹脂プライマー(30)	ふっ素樹脂塗料上塗(20)	ふっ素樹脂塗料上塗(20)				70	エポキシ樹脂プライマー+ふっ素樹脂上塗
B-17	長ばく形エッチングプライマー(15)	厚膜形鉛系さび止めベイント(50)	厚膜形鉛系さび止めベイント(50)	ポリエステル樹脂塗料上塗(50)	ポリエステル樹脂塗料上塗(50)		215	厚膜形鉛系さび止め+ポリエステル樹脂塗料上塗
B-18	エポキシシソクリッチプライマー(15)	ポリエステル樹脂塗料下塗(100)	ポリエステル樹脂塗料上塗(50)	ポリエステル樹脂塗料上塗(50)			215	ポリエステル樹脂塗料の使用

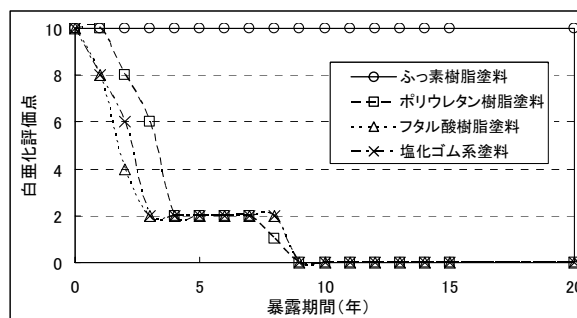
注) 表中()内の数字は膜厚(μm)、ただしNo. B-15の亜鉛めっきの膜厚は含まない。またミストコートは合計膜厚から除外した。



図－Ⅲ－４ 主な塗装系のさび発生程度



図－Ⅲ－５ 主な上塗りの光沢保持率



図－Ⅲ－６ 主な上塗りの白亜化

A-1 塗装系 (鉛系さび止めペイント 2 回/ 長油性フタル酸樹脂塗料中塗・上塗)	C-4 塗装系 (無機ジシランペイント/エポキシ樹脂塗料下塗 2 回/ ふっ素樹脂塗料中塗・上塗)
	
【塗膜抵抗】 $10^4 \Omega \cdot \text{cm}^2$	【塗膜抵抗】 $10^{11} \Omega \cdot \text{cm}^2$

図－Ⅲ－７ 施設暴露 20 年後の A 塗装系・C-5 塗装系試験片の状況

C-4 塗装系（ふっ素樹脂塗料塗装系）は、暴露 20 年後もさびの発生がなく、光沢保持率も他の上塗りより高い。更に白亜化が見られず、塗膜抵抗も $10^{11} \Omega \cdot \text{cm}^2$ と高く健全塗膜であることを証明した。

4. 3 施設本体の塗装システムの研究

施設本体にも長期防錆塗装を施し、海洋構造物大気部における塗装系の有用性を評価した。施設本体の大気部塗装系を表Ⅲ－５に示す。

表Ⅲ－５ 施設本体の塗装系

仕様	塗装部位	素地調整	第 1 層	第 2 層	第 3 層	第 4 層	第 5 層	第 6 層	合計膜厚
A	主鋼管 1－A, B, C	ブラスト処理	厚膜形エポキシ樹脂シンクリッチペイント(75 μm)	ポリエステルガラスフレーク(350 μm)	ポリエステルガラスフレーク(350 μm)	ふっ素樹脂塗料上塗(20 μm)	ふっ素樹脂塗料上塗(20 μm)		815 μm
D	主鋼管 2－A, B, C	ブラスト処理	厚膜形無機シンクリッチペイント(75 μm)	ミストコート	厚膜形ビニル樹脂塗料(150 μm)	ビニル樹脂塗料上塗(30 μm)			255 μm
H	主鋼管 3－A, B, C	ブラスト処理	厚膜形無機シンクリッチペイント(75 μm)	ミストコート	厚膜形エポキシ樹脂塗料(60 μm)	厚膜形エポキシ樹脂塗料(60 μm)	ポリウレタン樹脂塗料用中塗(30 μm)	ポリウレタン樹脂塗料上塗(30 μm)	255 μm
I	斜材 3B－3C間	ブラスト処理	厚膜形無機シンクリッチペイント(75 μm)	ミストコート	厚膜形エポキシ樹脂塗料(150 μm)	ポリウレタン樹脂塗料上塗(30 μm)			255 μm
J	斜材 2C－3C間	ブラスト処理	エポキシ樹脂シンクリッチプライマー(15 μm)	超厚膜エポキシ樹脂塗料(2000 μm)	ポリウレタン樹脂塗料上塗(30 μm)				2045 μm
G	斜材 1B－2B間	ブラスト処理	エポキシ樹脂ガラスフレーク塗料(750 μm)	エポキシ樹脂ガラスフレーク塗料(750 μm)	ポリウレタン樹脂塗料用中塗(30 μm)	ポリウレタン樹脂塗料上塗(30 μm)			1560 μm
E	斜材 1B－1C間	ブラスト処理	ポリエステル樹脂プライマー(40 μm)	ポリエステル樹脂ガラスフレーク塗料(350 μm)	ポリエステル樹脂ガラスフレーク塗料(350 μm)	ポリウレタン樹脂塗料用中塗(30 μm)	ポリウレタン樹脂塗料上塗(30 μm)		800 μm
B	斜材 2B－2C間	ブラスト処理	厚膜形無機シンクリッチペイント(75 μm)	ミストコート	ふっ素樹脂塗料用プライマー(100 μm)	ふっ素樹脂塗料中塗(50 μm)	ふっ素樹脂塗料上塗(20 μm)	ふっ素樹脂塗料上塗(20 μm)	265 μm
C	斜材 1C－2C間	ブラスト処理	エポキシ樹脂シンクリッチプライマー(25 μm)	変性エポキシ樹脂プライマー(100 μm)	変性エポキシ樹脂塗料(50 μm)	変性エポキシ樹脂塗料(50 μm)			255 μm
F	斜材 2B－2C間	ブラスト処理	エポキシ樹脂ガラスフレーク塗料(300 μm)	エポキシ樹脂ガラスフレーク塗料(750 μm)	ポリウレタン樹脂塗料用中塗(30 μm)	ポリウレタン樹脂塗料上塗(30 μm)			1110 μm
K	第1デッキ上面	ブラスト処理	厚膜形無機シンクリッチペイント(75 μm)						75 μm
L	第1デッキ下面	ブラスト処理	厚膜形無機シンクリッチペイント(75 μm)	ミストコート	タールウレタン樹脂塗料(200 μm)	タールウレタン樹脂塗料(200 μm)			475 μm
M	第2デッキ上下面	ブラスト処理	厚膜形無機シンクリッチペイント(75 μm)	ミストコート	タールウレタン樹脂塗料(200 μm)	タールウレタン樹脂塗料(200 μm)			475 μm
N	1, 2デッキ縁取り	ブラスト処理	厚膜形無機シンクリッチペイント(75 μm)	ミストコート	変性エポキシ樹脂塗料(75 μm)	変性エポキシ樹脂塗料(75 μm)	ポリウレタン樹脂塗料上塗(30 μm)		255 μm
0-2	1～2デッキ間階段, 手摺り	ブラスト処理*	変性エポキシ樹脂塗料(75 μm)	変性エポキシ樹脂塗料(75 μm)	ポリウレタン樹脂塗料上塗(30 μm)				180 μm
0-4	2～3デッキ間階段	ブラスト処理	無機シンクリッチペイント(30 μm)	変性エポキシ樹脂塗料(75 μm)	変性エポキシ樹脂塗料(75 μm)	ポリウレタン樹脂塗料上塗(30 μm)			210 μm
P	タワー	ブラスト処理	厚膜形エポキシ樹脂シンクリッチペイント(75 μm)	厚膜形エポキシ樹脂塗料(60 μm)	厚膜形エポキシ樹脂塗料(60 μm)	ポリウレタン樹脂塗料用中塗(30 μm)	ポリウレタン樹脂塗料上塗(30 μm)		255 μm

注) * : 手摺り部は、パワーツール処理

施設本体に試験塗装を行ない、その経年変化を観察した結果、ジンクリッチ系塗料を下塗りとした塗装系は、20年経過後も、一般部、エッジ部ともにさびが認められず、防錆効

果が大きいことが確認された。長期防錆性に優れる厚膜下塗り塗装系と長期耐候性を有する上塗り塗料として、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。施設本体に供試した塗料は、海上環境において実用に耐える品質であることを確認した。

また、施設の飛沫部および干満部に位置する第3デッキに厚膜塗装材を塗装し実海域での有用性を評価する。

塗装に関する8種の試験材の防食仕様を表－Ⅲ－6に示す。

表－Ⅲ－6 厚膜塗装材の仕様

No.	防食系	防食仕様	試行対策部位	
1	ガラスフレーク入り ビニルエステル樹脂塗料	ビニルエステル系プライマー(60μm)／ガラスフレーク入りビニルエステル(300μm×3回)／ポリウレタン(60μm)	飛～海・直立材	1C
2	ガラスフレーク入り ポリエステル樹脂塗料	無機シンクリッチ(75μm) ／ガラスフレーク入りポリエステル(3回塗り, 1400μm)	飛～海・直立材 飛・水平材 飛・水平材	1B 1A ↔ 1B 1B ↔ 1C
3		ポリエステル系プライマー(60μm) ／ガラスフレーク入りポリエステル(6回塗り, 1400μm)	飛～海・直立材 飛・水平材 飛・水平材 海・水平材	2B 1B ↔ 2B 2B ↔ 1C 2B ↔ 3B
4	ガラスフレーク入り エポキシ樹脂塗料	ガラスフレーク入りエポキシ(6回塗り, 2000μm)	飛～海・直立材	2C
5		無機シンクリッチ(75μm)／エポキシ系プライマー(60μm) ／ガラスフレーク入りエポキシ(500μm×3回) ^{※1}	飛～海・直立材 飛・水平材	1A 1A ↔ 2A
6	厚膜エポキシ樹脂塗料	無機シンクリッチ(75μm)／エポキシ(2000μm)	飛～海・直立材 飛・水平材 飛・水平材 海・水平材	3A 2A ↔ 3A 1C ↔ 2C 2A ↔ 3A
7	厚膜ウレタン 樹脂塗料	ポリウレタン系プライマー(25μm)／ポリウレタン(2000μm) ／ポリウレタン(30μm)	飛～海・直立材 飛～海・水平材 飛～海・水平材 海・水平材	3B 2B ↔ 3B 3A ↔ 2B 3A ↔ 3B
8-1	エポキシ系 レジンモルタル	エポキシ系プライマー(25μm) ／エポキシ系レジンモルタル(多層塗り, 2000μm) ／ポリウレタン(50μm)	飛～海・直立材 飛～海・斜材	3B 3B ↔ 2B
8-2		エポキシ系プライマー(25μm) ／エポキシ系レジンモルタル(多層塗り, 2000μm)／アクリル(50μm)	飛～海・斜材 飛～海・斜材 飛～海・斜材 飛～海・斜材	2B → 2A 2B → 1B 2C → 2B 2C → 3B

※1 飛・水平材 1A ↔ 2A の2003年度損傷部に対して水中硬化型エポキシ樹脂塗料(300～500μm)をローラー塗布した

塗膜下鋼素地面観察

2～3年に1回実施される定期詳細調査において、10cm×10cmの範囲で厚膜塗装材を鋼素地面まで強制的にはく離し、鋼素地面のさび発生状況を観察した。20年経過後の詳細調査においても鋼素地面は金属光沢を有し、さびの発生は見られなかった。(図－Ⅲ－8および図－Ⅲ－9参照)



図－Ⅲ－８ 塗膜下鋼素地観察
No.6 : 有機ジンクリッチ／
エポキシ塗装系



図－Ⅲ－９ 塗膜下鋼素地観察
No.2 : 有機ジンクリッチ／
ガラスフレーク入りポリエステル
塗装系

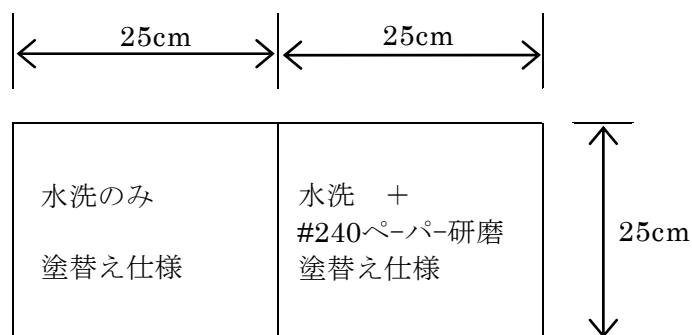
4. 4 施設本体の簡易塗替え塗装システムの研究

—素地調整程度4種による塗替え塗膜の耐久性の検証—

第2デッキ主鋼管 1-C（ふっ素樹脂塗料上塗），2-C（ビニル樹脂塗料上塗），3-C（ポリウレタン樹脂塗料上塗）を試験部位とし，水洗またはペーパー研磨による4種ケレン素地調整後，同種の上塗塗料を塗装し，経時で外観および付着性（基盤目付着性）を評価した。15年経過後も外観および付着性とも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えは困難とされてきたが，今回の結果より水洗のみでも良好な結果を示し，4種ケレン程度でも塗替えの可能性が見出された。4種ケレン塗替え試験の内容を表Ⅲ-7および図Ⅲ-10に示す。また，15年後の塗替え試験結果を表Ⅲ-8に示す。

表Ⅲ-7 4種ケレン塗替え試験の内容

旧塗膜	Ⅰ 厚膜無機ZRP／厚膜エポキシ／ウレタン用中塗／ウレタン上塗 Ⅱ 厚膜有機ZRP／ポリエステルGF／ふっ素上塗 Ⅲ 厚膜無機ZRP／厚膜ビニル／ビニル上塗
素地調整	・面あらし有り（水洗＋＃240 ^{ペ-パ-} 研磨） ・面あらし（水洗のみ）
塗替え塗装系	①ふっ素上塗（←旧塗膜Ⅱ利用） ②ふっ素用中塗／ふっ素上塗（←旧塗膜Ⅰ利用） ③ウレタン用中塗／ウレタン上塗（←旧塗膜Ⅰ利用） ④ビニル上塗（←旧塗膜Ⅲ利用）
調査項目	・基盤目付着性 ・外観観察



図Ⅲ-10 各主鋼管への塗替え仕様

表－Ⅲ－８ ４種ケレン塗替え塗装の検討

４種ケレン塗替え塗装による活膜部の試験塗装(化粧塗り)～15年後の結果

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

1)水洗＋＃240 ペーパー研磨

2)水洗のみ

4. 5 簡易塗替え塗装システムの研究

—塗装試験片による試験—

平成２年版鋼道路橋塗装便覧 C-2 仕様のポリウレタン塗装系を施した塗装鋼板をあらかじめ２年，５年，７年暴露し，水洗又はペーパー研磨による４種ケレン素地調整後，塗替え塗装を行なった。その後３年，５年，７年暴露して付着性試験（アドヒージョンテスト）を行なったところ，旧塗膜と塗替え塗膜の層間での離れはなく，良好な付着強度を示した。以上の結果より，平成２年版鋼道路橋塗装便覧 C-2 仕様のポリウレタン塗装系は水洗又はペーパー研磨による４種ケレン程度の素地調整でも，十分な耐久性を示す塗替え塗装が可能であることを確認した。

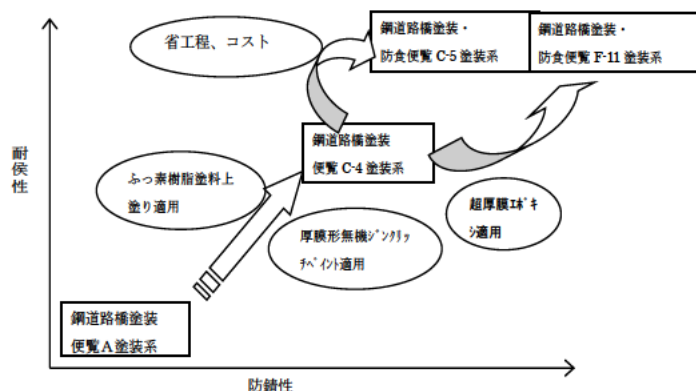
5. まとめ

本研究では実海上での長期の暴露試験を行なった結果を踏まえて総括すれば、当初の目標である「海上大気中で 20 年以上の耐久性を有する塗装システムを得る」ということについては、これを達成することができた。海上大気中の防錆塗装に関して、得られた研究成果は以下のとおりである：

- (1) 海上大気中の腐食環境の実体が明らかになり、防錆対策を有効に立てることができるようになった。
- (2) 海上大気中の防錆性を高めるためには、超厚膜塗料の適用による遮断性の向上が有効であって、本研究で取上げたガラスフレーク塗料、超厚膜形エポキシ樹脂塗料や、ポリウレタン樹脂塗料は防錆性に優れるだけでなく、塗装作業性も含め充分実用性があることが立証された。
- (3) ふっ素樹脂塗料上塗りは、さらに長期の防錆性を必要とする場合の上塗り塗料として適していると同時に、要求が高まりつつある景観調和のためにも適していることが分かった。
- (4) 海上では傷部などからの腐食の進行が速く、常に海塩粒子が付着しやすい環境のため、通常行なわれるような塗替え塗装は困難である。このため、発錆箇所を部分的に補修する方法と外観を復元する塗替え塗装は、実用性があることが判った。

塗装試験片および施設本体塗装の長期耐久性に関する試験結果より、海上大気部という厳しい腐食環境下で下塗りに厚膜形ジンクリッチペイントを用い、上塗りにふっ素樹脂塗料を用いた塗装系は海上暴露という厳しい腐食環境下で 20 年以上の良好な防錆性と耐候性を有することが実証できた。しかしながら一方で、上述の重防食塗装系でも一部部材エッジ部でさびが出ている所があり、エッジ部の防錆対策が重要であることが改めて認識された。

本暴露試験結果の成果は平成 17 年 12 月発刊の鋼道路橋塗装・防食便覧にも生かされた。図－Ⅲ－11 にその概念図を示す。



図－Ⅲ－11 これからの重防食系の概念図

<引用文献>

- 1) ISO 12944-2 : 1998
- 2) 外川 靖人：防錆管理 P55～P66 No.2 (1993)

6. 発表論文

- 1) 建設省土木研究所, (財)土木研究センター: 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10年後の研究成果 – ; 共同研究報告書第143号, 建設省土木研究所, 1995
- 2) 建設省土木研究所, (財)土木研究センター: 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15年後の研究成果 – ; 共同研究報告書第255号, 建設省土木研究所, 2000
- 3) 永井昌憲, 中家俊和, 岡本聡, 森芳徳, 守屋進: 海洋大気暴露における鋼構造物用塗料の防食性, 第46回材料と環境討論会講演集(1997)
- 4) 中家俊和, 永井昌憲, 岡本聡, 森芳徳, 守屋進: 高耐久性塗装システムの海上大気部における防食性, 第52回土木学会年次学術講演会講演集(1997)
- 5) 安井正宏, 中家俊和, 永井昌憲, 森芳徳, 守屋進: 鋼構造物用塗料の海洋大気部10年暴露後での耐久性評価, 第20回鉄鋼塗装討論会要旨集(1997)
- 6) 安井正宏, 永井昌憲, 中家俊和, 森芳徳, 守屋進: 鋼構造物用塗料の海洋大気部10年暴露後での耐久性評価, 防錆管理 Vol.42 No.7 p244 (1998)
- 7) K.Katawaki : Long Term Durability of High Performance Coatings for Bridge Application Maritime Atmosphere, Proceedings of 70th Annivesary Conference on Colour Mateials (1997)
- 8) M.Nagai, H.Tanabe, M.Yasui, T.Nakaya, H.Sakamoto, S.Moriya, K.Katawaki : Long Term Durability of High Performance Coatings after 10 years Outdoor Test , Proceedings of SSPC'98 (1998)
- 9) 安井正宏, 中家俊和, 多記徹, 守屋進: 長期防錆塗装系の駿河湾海上暴露15年の結果, 鋼橋塗装 Vol.29 No.1 p18 (2001)
- 10) 多記徹, 中家俊和, 安井正宏, 守屋進: 重防食塗装系海上暴露17年後の結果, 第25回道路会議講演予稿集(2002)

Ⅳ．海中部における電気防食設計技術に関する研究 －第3分科会電気防食WG－

1．はじめに

海洋鋼構造物は，苛酷な腐食環境下において長期耐用が要求され，何らかの腐食防止対策を必要とする。海水中部の鋼材の防食対策として電気防食の適用はすでに周知であるが，土木構造物は近年ますます大型化し，多種類の用途に応じて形状が複雑化している。電気防食設計技術は，構造物の形状や規模などに適応できるものでなくてはならず，また，海域の波浪，潮流，干満，水温などなどの環境・海象条件においても防食効果が確実で，経済性の優れた設計技術の確立が望まれている。

2．研究経過

表－Ⅳ－1には具体的な調査項目の展開を示した。はじめに小型板状試験片を用いて鋼材の陰分極特性や所要防食電流密度を求め，次に大型供試体および施設本体を対象に，主として電位分布の状況を調査した。また，防食効果を確認するための電位測定用基準電極として亜鉛合金の自然電位を長期間測定し，照合電極としての適合性を検証した。一方，電気防食と各種塗装系との併用防食法では，別途実験室において実施された試験結果から最適塗装系を選定して実海域での検証試験を行い，塗膜損傷率と電気防食条件との関係を明らかにした。

表－Ⅳ－1 研究経過

試験材	年度 経過年 調査項目	S59	S60	S61	S62	S63	H1	H2	H3	H4	H5	H6 ～ H17
		0.5	1.5	2.5	3.5	4.5	5.5	6.5	7.5	8.5	9.5	
施設 本体	電位分布											
	陽極発生電流											
	亜鉛基準電極電位											
大型 供試体	電位分布											
小型 試験片	自然腐食電位											
	陰分極特性											
	電位と電流密度の 関係											
小型塗装 試験片	併用最適塗装系選定											
	塗膜損傷率と防食電											
	流密度											

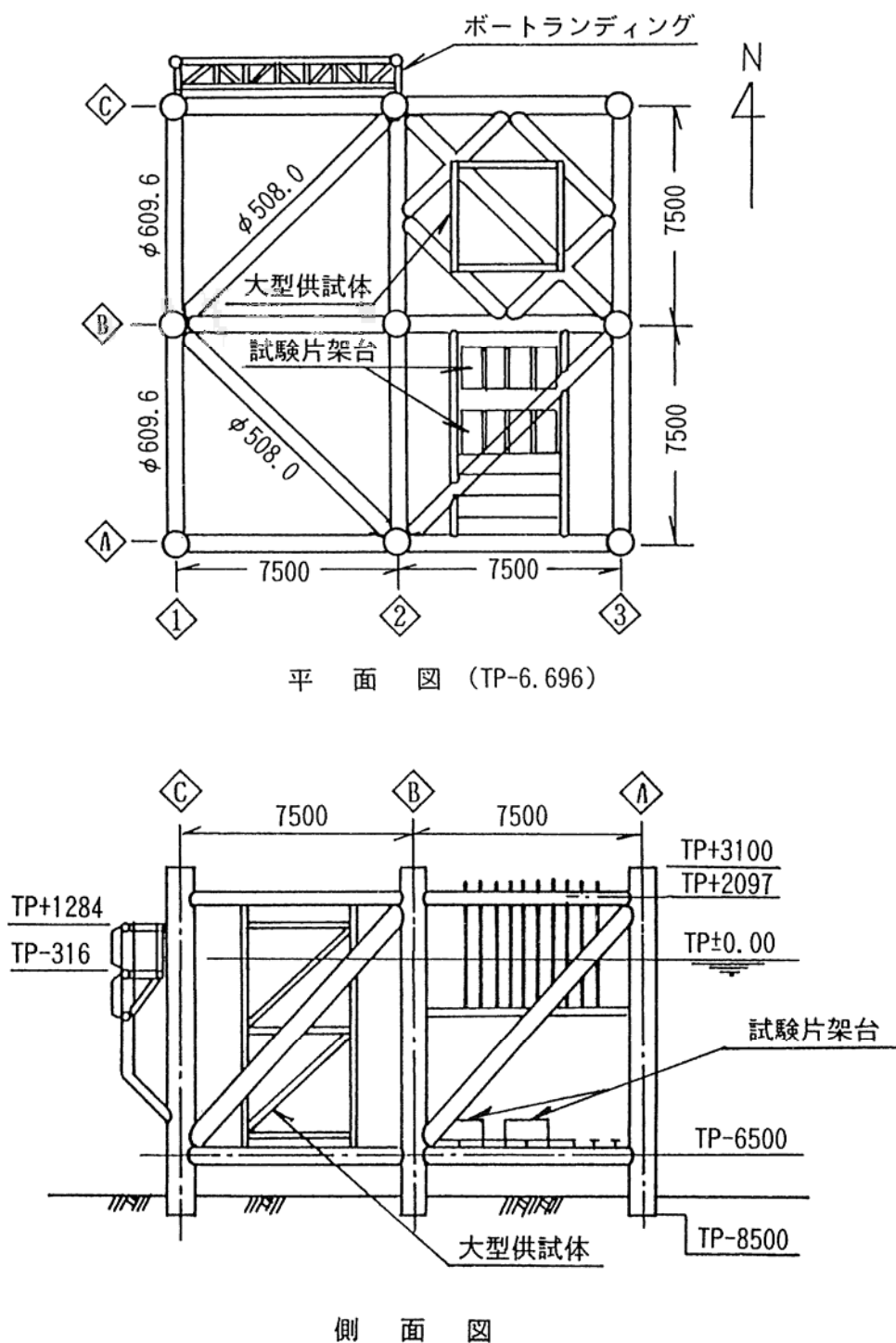
3. 研究課題

研究課題は、鋼管杭を用いた形状の複雑な構造物を対象に、海象条件の変化に対応する電気防食設計技術の確立である。

4. 研究方法と研究成果

4. 1 電気防食試験位置

電気防食試験の対象は、鋼管ジャケット構造の海洋技術総合試験施設の没水部と、この施設の海水中部に取付けられた鋼管組立て籠型の大型供試体である。この他に、板状の裸鋼および塗装鋼の小型試験片を海水中部に設置して調査対象とした。図－IV－1に施設本体の平面図と海水中部側面図並びに大型供試体と小型試験片の設置位置を示す。



図－IV－1 大型供試体と試験片架台の位置

4. 2 小型試験片を用いた試験

(1) 陰分極試験

図-IV-2は小型試験片を用いて求めた裸鋼（サンドブラスト処理）の陰分極曲線である。試験片と亜鉛陽極との間に抵抗を挿入して結線し、陰極電流密度を6種類（25, 50, 70, 120, 200, 300mA/m²）設定して通電し、2時間後、1年後、1.5年後に電流密度と電位を測定して陰分極曲線を作成した。初期に防食電位（-770mV : SCE基準、以降電位は同電極基準）に達する電流密度は、100mA/m²よりやや大きい程度であった。この値は実験室試験（80mA/m²）に比べ大きい値である。この要因は実海域では常に波浪や潮流の影響を受け、分極がしにくいことが挙げられる。1年後経過まで防食電位に達していない電流密度では、電位は時には貴方向に変化し、一方、初期に防食電位に達している電流密度では、その後も電位は卑方向への分極が進み電流の低減が認められた。定常状態に至ったのは1.5年後で、その時の電流密度は約50mA/m²であった。この結果から、初期に比較的大きい電流密度で通電して防食電位に到達すれば、防食電流密度はその後時間の経過とともに低減することを示唆し、実設計において良好な電位（分布）を得るには、耐用年数に見合う陽極質量、すなわち設計防食電流密度が重要な因子であることを示している。

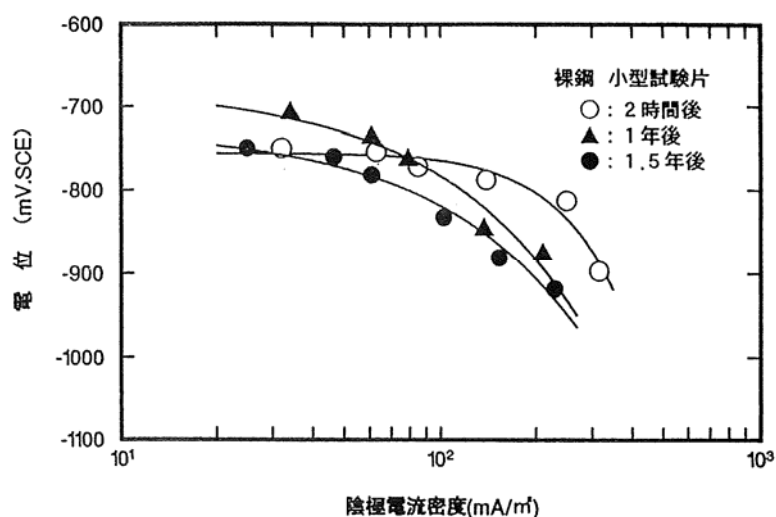
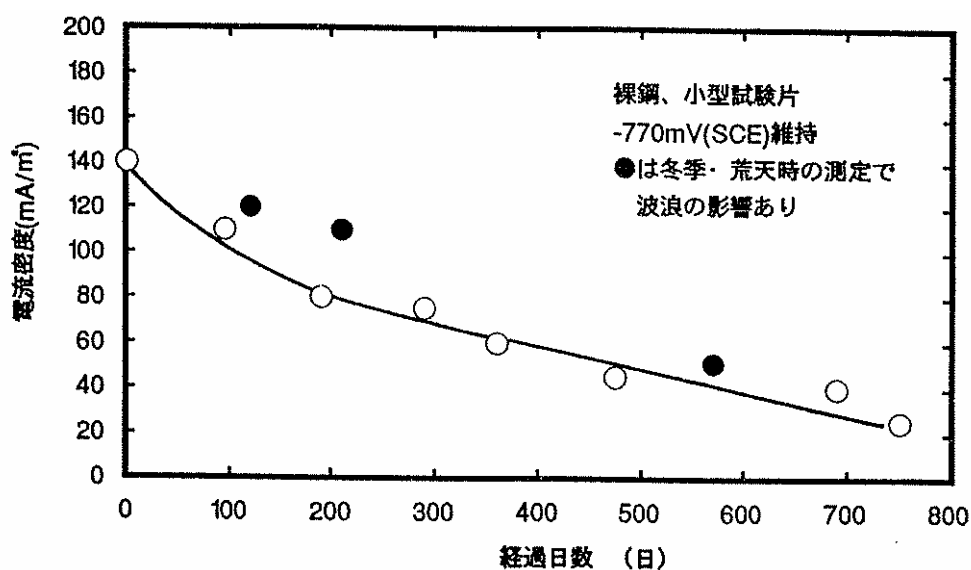


図-IV-2 陰分極の経時変化

(2) 防食電流密度試験

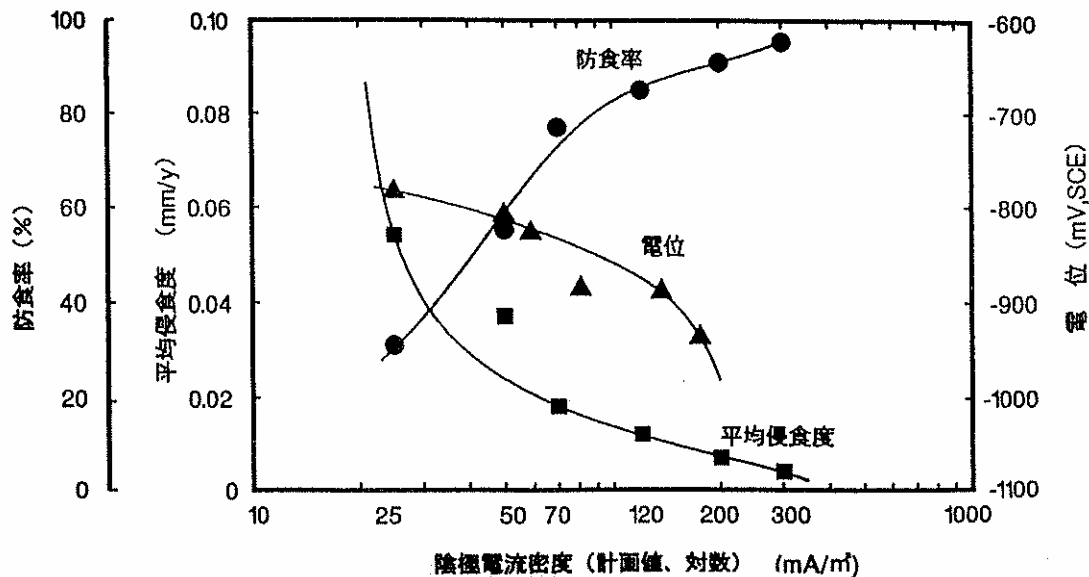
図-IV-3には一般の外洋性海域における試験として、駿河湾で実施された裸鋼材試験片に対する防食電流密度の経時変化を示す。試験は予め計画した電流密度で通電したが、図は実際に測定されたデータから防食電位（-770mV）を維持する電流密度の経時変化として表したものである。所要防食電流は通常初期に大きく次第に低減する傾向を示す。本試験においても同様の傾向を示した。また、測定ごとの電流密度の変動も初期に大きく、これも次第に小さくなる傾向を示した。図から明らかなように、当初の設計防食電流密度としては通常の内湾環境に適用される100mA/m²では不足と考えられ、より大きい電流密度で数ヵ月を要するものと推定される。このような陰分極の状況や電流密度の変動は、こ

の沿岸外洋性海域の試験施設付近では常に波浪があり、また、そのために海水中に浮遊細砂があつて鋼面が陰分極しにくいことが原因となっている。即ち、122日、206日および565日経過後の測定値で、復極の基づく電流値の大きな増加が認められたのはいずれも冬季で、著しく波浪の大きい条件に対応したものと考えられる。このような鋼表面の復極に対応する防食電流の変化は、初期の200日経過ごろまでは不安定で変動が大きいが、1年経過以後は安定して波浪等の影響は小さくなっている。以上のような状況から、外洋性海域において波浪や漂砂を原因とする復極に対応して裸鋼材が初期から防食電位を維持するための防食電流密度は、設計値として $120\sim 150\text{mA}/\text{m}^2$ 程度が必要と考えられる。防食電流密度の低減については、約1年経過で当初のほぼ $1/2$ に低下した。



図－Ⅳ－３ 防食電流密度の経時変化

図－Ⅳ－４には防食電流密度試験における防食効果を示す。試験片の質量減から平均侵食度を求め、防食片と非防食片の質量減とを比較して防食率を求めた。防食率は最大の電流密度のとき95.4%，最小電流密度で30.9%となり、防食電流密度に依存する傾向を示した。



図－IV－4 防食電流密度試験結果（774日，小型試験片）

（３）電気防食と塗装併用における最適塗装系

電気防食と塗装の併用において，供試した塗装系は防食下地として有機および無機ジンクリッチペイントの有無，防食塗料としてタールエポキシ樹脂およびガラスフレーク入りポリエステル樹脂のいずれかで，膜厚を数種類変えて予めスクラッチを付与した。

これに当初 2 年間は亜鉛合金陽極による電気防食（電位 $-1030\sim-1080\text{mV}$ ）を，その後は試験施設本体との接続による電気防食（ $-920\sim-980\text{mV}$ ）を併用した。試験片に流入した防食電流は，当初の 2 年間では $1.5\text{mA}/\text{m}^2$ 以下でガラスフレーク入りポリエステル樹脂の方が大きく，また，両塗装系とも防食下地のない場合が多かった。外観的にはタールエポキシ樹脂の場合のみ，防食下地の有無に係わらずスクラッチに沿って若干のふくれが認められた。また，10 年経過後に回収された試験片の塗装健全部のインピーダンス測定では， $10^7\Omega\cdot\text{cm}^2$ 以上の良好な値が確認された。以上のように，10 年後でも外部（漂流物など）からの衝撃などによる著しい塗膜損傷がなければ，これらの現行指針推奨塗装系は電気防食との併用に十分適正のあることが立証された。

（４）塗膜損傷に対する陰極電流密度

電気防食と塗装の併用において，供試した塗装系は前項と同じ防食下地の有無，防食塗料はタールエポキシ樹脂（ $200\mu\text{m}$ ）で，塗膜損傷としては予めスクラッチおよび塗り残し面積で 2.2，6.5，13% を付与し，前項と同じ電気防食を併用した。試験片に流入した防食電流は，当初の 4 ヶ月後では塗膜損傷率との間に相関性が認められ，損傷率が大きいほど電流密度が大きかったが，2 年経過後では海生生物付着等の影響で相関性が失われた。

図－IV－5 に塗り残し面積率と電流密度の関係を示す。防食下地は陰極電流密度の抑制と塗膜損傷部周辺のふくれ発生の抑制に有効であったが，無機系と有機系のジンクリッチペイントの差は明瞭ではなかった。

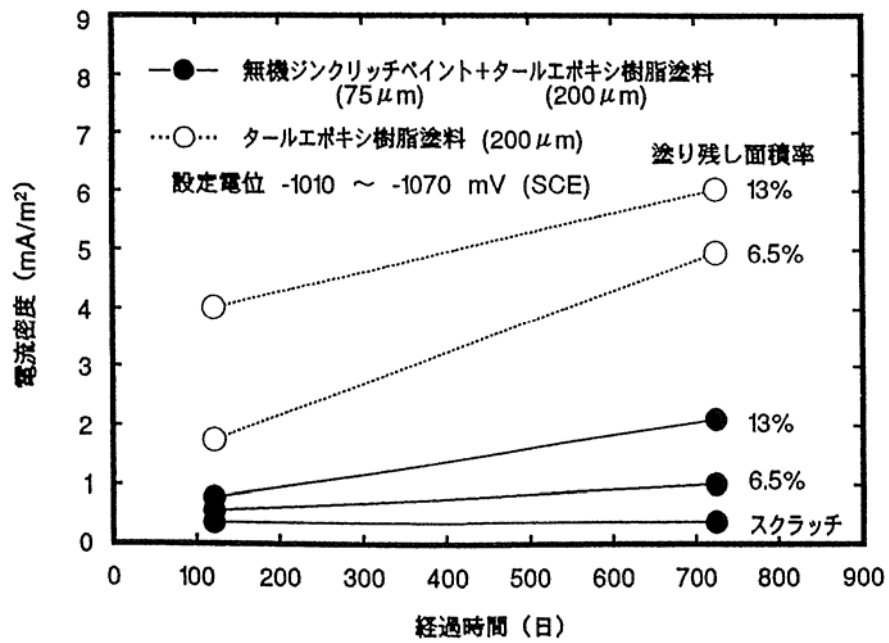
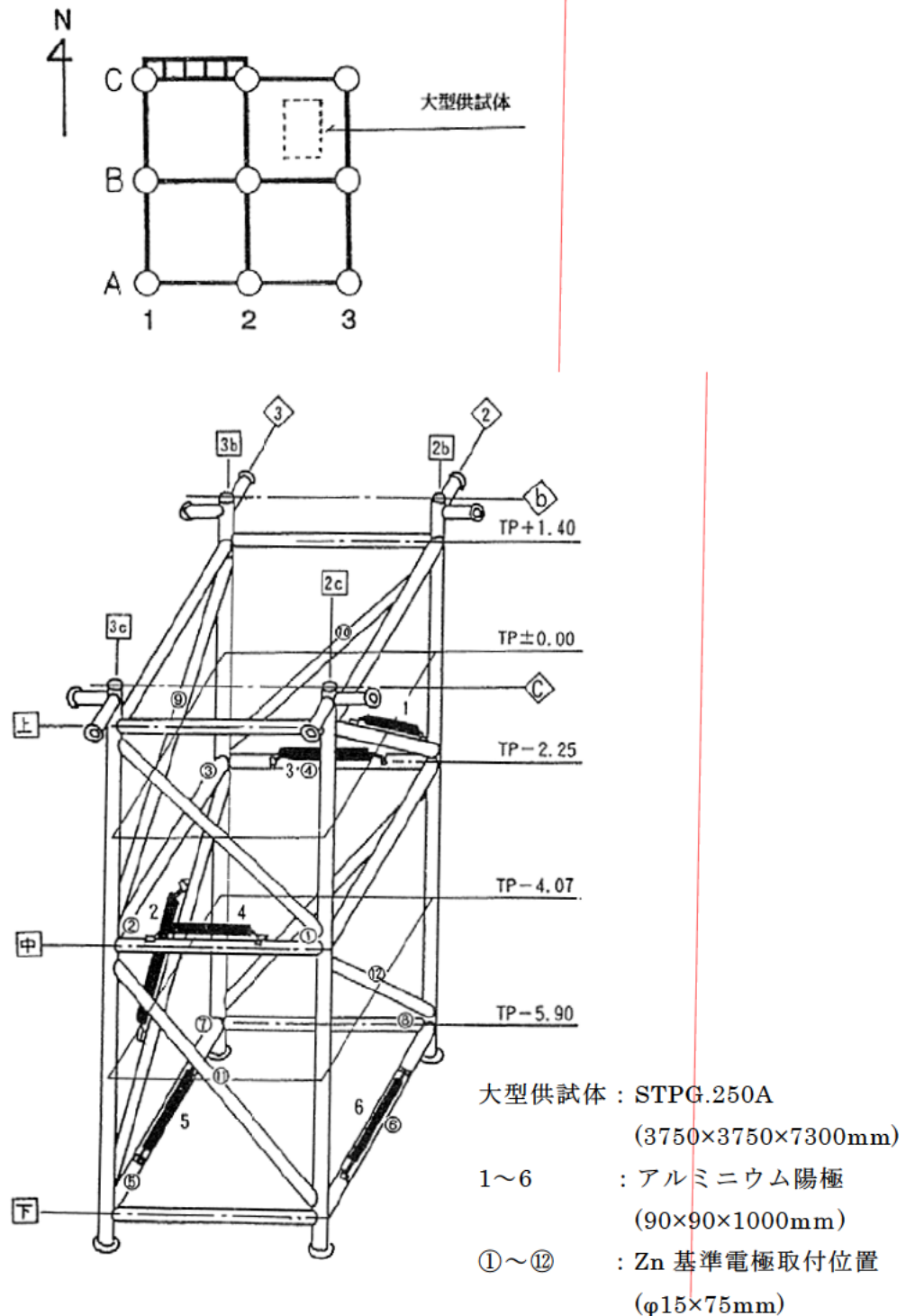


図-IV-5 塗残り面積率と電流密度の関係

4. 3 大型供試体を用いた試験

図－IV－6 に大型供試体の構造を示す。供試体の海水中における裸鋼材の面積は 68.2m^2 で、供試体には発生電流2A型（ $90\times 90\times 1000\text{mm}$ ）のアルミニウム合金陽極6個がそれぞれ絶縁した状態で取付けられており、その電氣的な接続は上部第2デッキに設けた配電盤で任意の操作が可能である。また、供試体には電位分布の状態を調べる亜鉛基準電極が12個設置されている。



図－IV－6 電気防食試験用大型供試体見取図

大型供試体に対してアルミニウム合金陽極 1 個 (No. 1) を短絡して通電を開始した当初は、アルミニウム合金陽極の発生電流が約 2 A 程度で、これは陰極面積 68.2m^2 に対して約 $30\text{mA}/\text{m}^2$ となり防食電流密度としては不足で、約 7 ヶ月後もほとんど陰分極を生じていなかった。なお、この現象は No. 1 アルミニウム合金陽極の取付けた位置が干満帯にあり、時間的に十分有効に作動しなかったのが原因と判断される。約 1 年経過後、No. 4 および No. 6 の 2 個の陽極を用いて通電したところ、1 日後の発生電流が 5.69A ($83.4\text{mA}/\text{m}^2$) となり、その後の 114 日目以降の測定では陰分極が進み、全て -800mV より卑な防食状態を満足する電位に達していた。1 年経過後は、供試体の全域に亘って電位分布の平均化も進み、 $-870\sim-920\text{mV}$ を示した。位置的に見ると、No. 6 陽極に近い位置にある No. 6 の亜鉛基準電極による測定値が最も卑で、114 日経過以後は -900mV より卑な値で安定した。

そのほか No. 8, ⑪, ⑫, 陽極 No. 4 に近い No. ①, ② の位置などが比較的卑な値を示した。陽極 2 個による通電当初は、陽極近傍と遠隔部とでは 137mV の電位差が認められたが、1 年後には約 55mV になり、その差は次第に減少した。アルミニウム合金陽極の発生電流は、供試体の陰分極の進行とともに次第に低減して、約 300 日後には陽極 2 個の合計で約 3 A を示し、防食電流密度としては約 $45\text{mA}/\text{m}^2$ に低減した。図-IV-7 には電流密度と電位の経時変化を示した。供試体の電位は時間の経過とともに卑方向に移行し、最貴値と最卑値の差が小さくなり、電位の均一分布が進行していることが窺える。以上のことから推定すると、 $80\text{mA}/\text{m}^2$ 以上の電流密度が印加されれば、電位は構造物の位置で若干異なるものの、3 ヶ月程度で防食電位に達するものと考えられ、その後は電位分布の均一化とともに全体的に陰分極が進み、1 年後には電流密度は $1/2$ 程度に低減した。

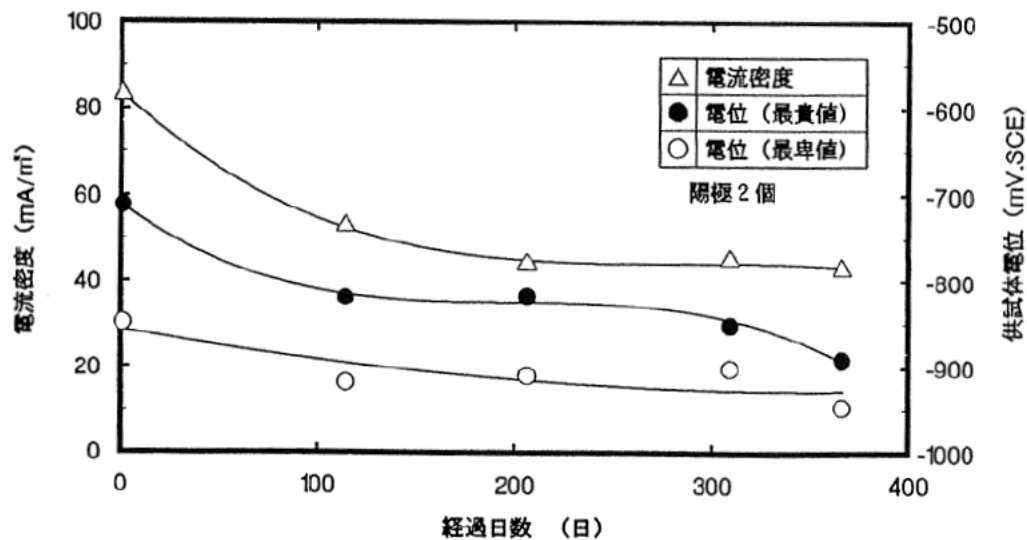
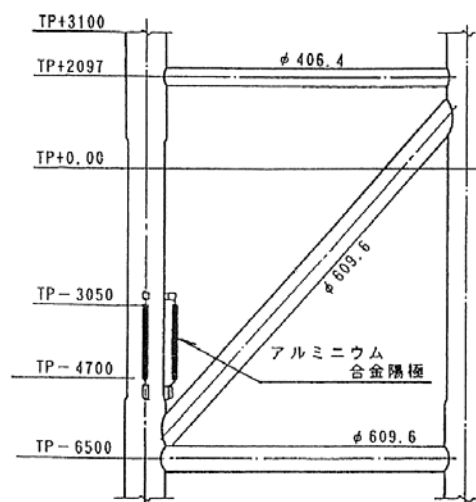
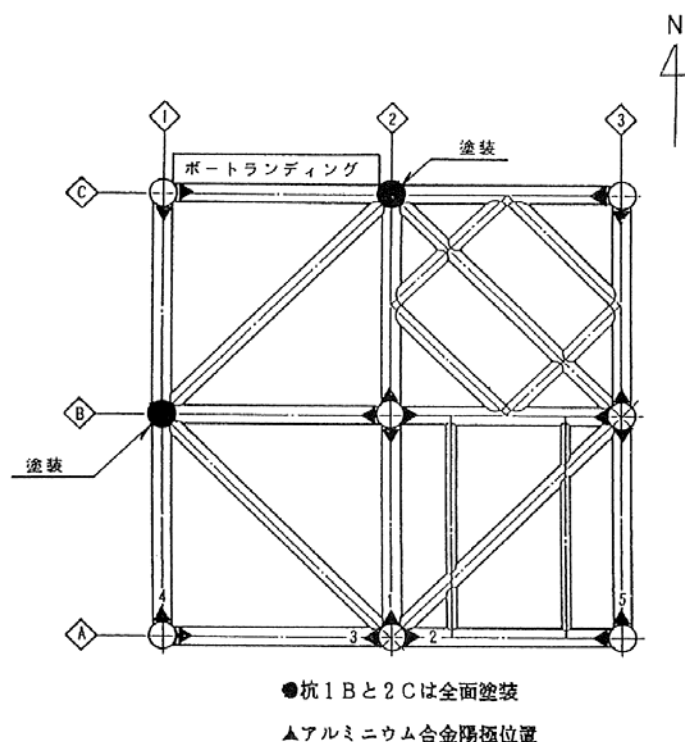


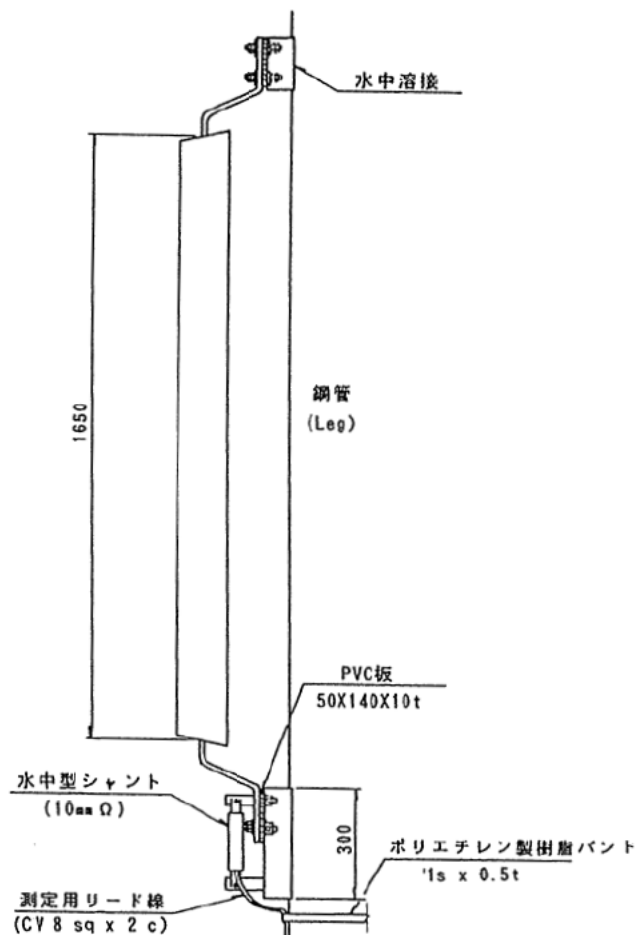
図-IV-7 電流密度と電位の変化

4. 4 施設本体を利用した試験

施設本体の海中部構造は、直径914.4mmの直立杭9本、直径609.6mmの水平材および同径の斜材で構成され、平面的には15m×15mの大きさである。これらの鋼管部材は直立杭2本およびその他にも一部塗装があるが、電気防食の対象としてはそれらも含め、海水中部および海土中部で当初は合計798.8㎡であった。その後、他の分科会や研究課題のための鋼材設置が加わって現在は953.6㎡である。施設本体には図－IV－8に示すようにアルミニウム合金陽極が取付けられた。アルミニウム合金陽極は、図－IV－9に示す棒状の発生電流3A型（135×135×1650mm）、正味質量約80kg、設計耐用寿命15年のもので、施設本体とは絶縁され、その間に水中型発生電流測定用シャント抵抗（10mΩ）を介して接続した。アルミニウム合金陽極の取付個数は、表－IV－2に示すように徐々に増加させた。



図－IV－8 施設本体におけるアルミニウム合金陽極



図－Ⅳ－９ 発生電流測定装置を取付けたアルミニウム合金陽極

表－Ⅳ－２ アルミニウム合金陽極取付経過

取付日	取付個数	陽極No.	取付位置 (杭No.)	合計個数
S59. 8. 5	3	1, 2, 3	2A	3
S60. 7. 30	2	4, 5	1A, 3A	5
S60. 7. 31	2	6, 7	1A, 3A	7
S61. 7. 30	11	8～11	2B (4個), 3B (4個) 1C (2個), 3C (2個)	18

(1) 施設本体の電位分布

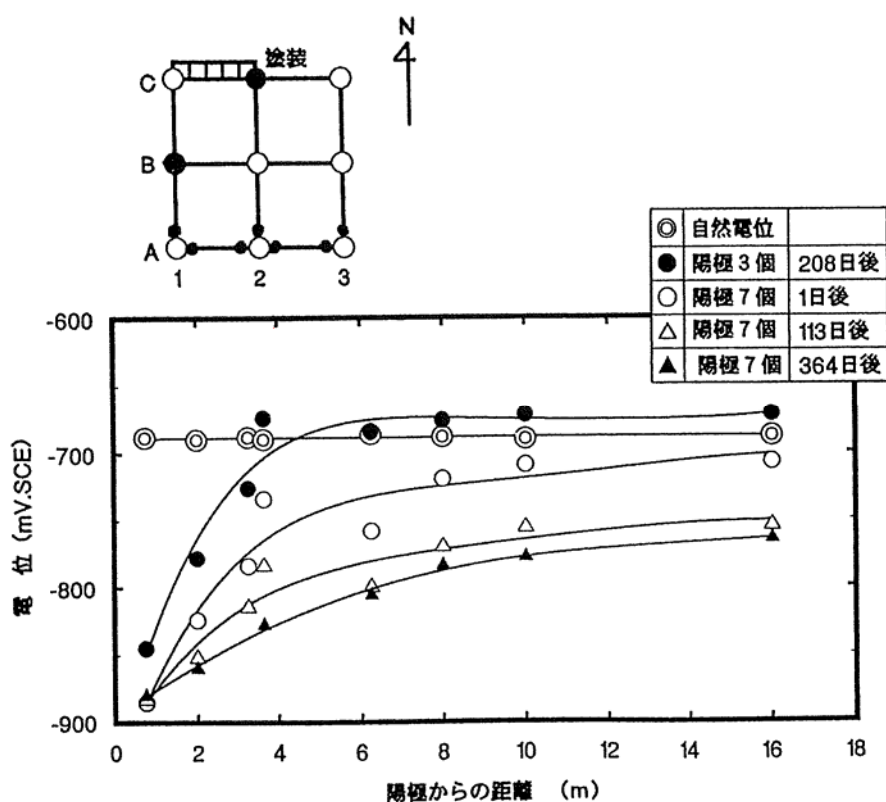
施設本体の陰分極を調べるために、施設全域に亘り48箇所の測定点で電位の経時変化を測定した。当初、杭2Aに3個の陽極を取付け、1年後に杭1A及び3Aに各2個を追加した経過に伴い、陰分極の傾向は当初は杭2Aを中心に進行し、1年後、陽極が7個に増加された後はA列の分極が、次いで徐々にB列の分極が進んだ。陽極に遠いC列は最も陰分極が遅れたが、1年後にはその一部が防食電位に達した。水深別に見ると、陽極取付レベルの水深－4m付近の分極が最も大きい傾向が認められた。

（２）施設本体の電位分布の経時変化

施設本体の防食用のアルミニウム合金陽極は、表－Ⅳ－２に示したように段階的に取付数を増加したが、陽極３個の場合では、１日後に防食電位まで陰分極したのは陽極に最も近い１箇所のみで、２０８日経過後で３箇所である。この場合はまだ防食電流の不足が明らかである。１年後に陽極４個を増設すると、その当日から陰分極が進み、１日後では施設本体全域において数十ｍＶも卑方向に変化し、４８箇所中の１５箇所で防食電位に達している。１１３日後では過半数が防食電位より卑な値に到達し、その他の箇所もほぼ防食電位に近い値を示した。１年後の測定では全域が防食状態であることを確認した。ここで当初の防食計画どおりさらに１１個の陽極を増設して、施設の海水中部全域を安全かつ十分な防食状態まで陰分極させた。

（３）アルミニウム陽極からの距離と電位分布

図－Ⅳ－１０には杭２Ａからの距離と電位分布の関係を示す。当初は杭２Ａにアルミニウム合金陽極３個を取付けてあり、図には２０８日後の電位分布を示した。防食電位に達したのは約２ｍまでで、それより遠い部分では約３.５ｍまで分極効果が認められたが、さらに遠隔位置では腐食生成物の付着により若干貴方向へ変化していた。１年後に杭１Ａおよび３Ａに各２個ずつ陽極を増加（合計７個）したので、以降は杭２Ａ～２Ｃの列における距離と電位分布の関係を示した。１日後では約３ｍまで防食電位に達し、全長に亘って分極は認められた。さらに１１３日後には約６ｍまで、約１年後には一部で約１０ｍ付近まで防食電位に達した。



図－Ⅳ－１０ 施設本体の電位分布

(4) 水深方向の電位分布

図-IV-1 1には杭2Aにおける陰分極状況を示した。当初の陽極3個では7ヵ月後も陽極取付レベル近傍のみが防食電位に達する程度であったが、陽極7個に増加してさらに10ヵ月後の測定では水深全長に亘って十分な防食電位に到達し、特に陽極取付けレベル付近の分極は顕著であった。

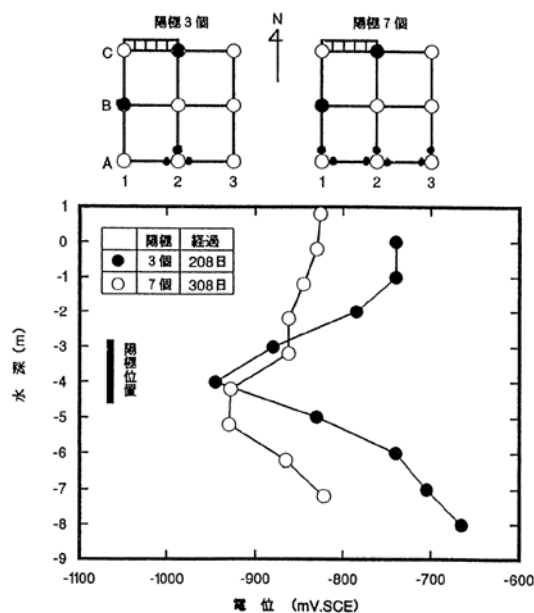


図-IV-1 1 杭2Aにおける水深方向電位経時変化

(5) 杭No.2列の電位分布

図-IV-1 2には陽極7個の場合の、杭No.2列（2A, 2B, 2C）における陰分極状態を示す。分極状況は、1日後に比べて1年後ではかなり分極が進行しているが、1日後、1年後とも7個の陽極に近い位置にある杭2Aの分極度合が、杭2B, 2Cに比較して大きかった。

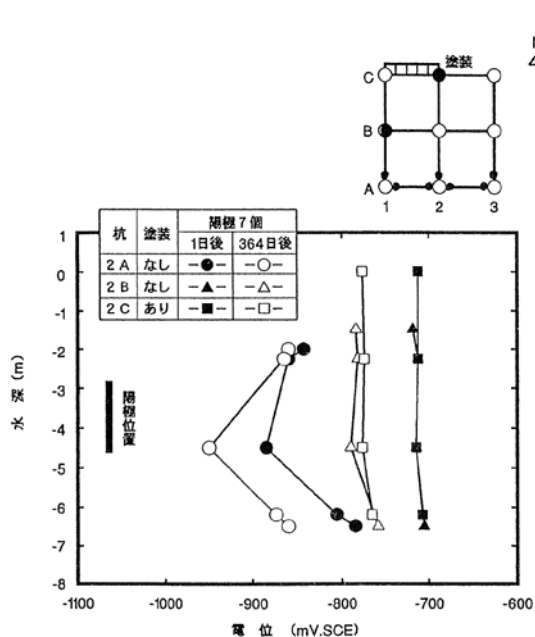
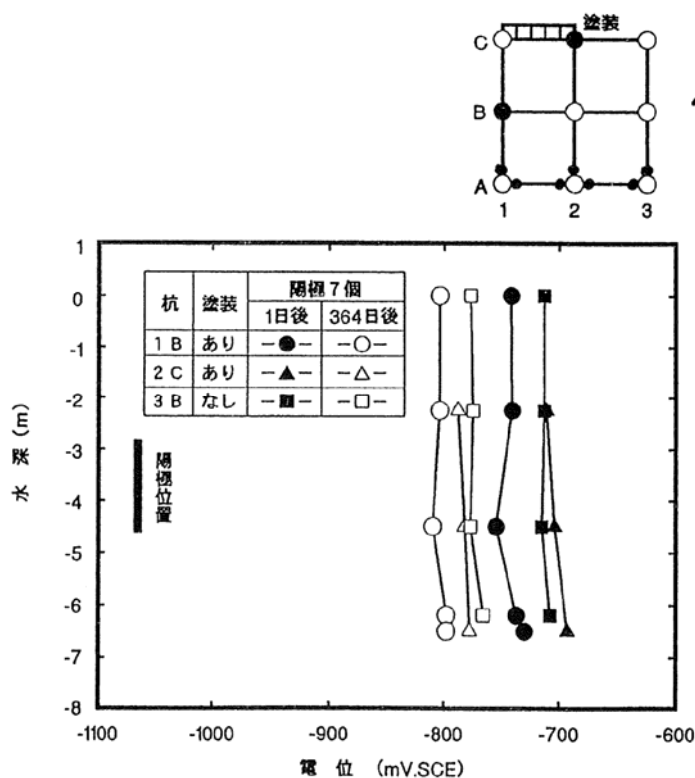


図-IV-1 2 杭No.2列における陰分極状況

（６）塗装杭における電位分布

図－Ⅳ－１３には陽極７個の場合における塗装された杭１Ｂおよび２Ｃの分極状況を示す。この場合もそれぞれの杭で１年後の分極がかなり進んだが、杭Ａ列或いは、杭２Ａから等距離の位置にある杭１Ｂと３Ｂの比較では塗装（厚膜型無機ジンクリッチ+タールウレタン樹脂塗装 $367\mu\text{m}$ ）された杭１Ｂの方が分極が大きく卑な電位を示した。また、厚膜型の無機ジンクリッチ+ガラスフレーク入りポリエステル樹脂塗料（ $1638\mu\text{m}$ ）が施されている杭２Ｃは、陽極からの距離が最も離れた位置にあるが、１年経過後は杭３Ｂより分極効果が大きかった。



図－Ⅳ－１３ 塗装された杭の分極状況

（７）長期間における電位の経時変化

図－Ⅳ－１４には陽極を全数（１８個）取付けた後の、全ての杭の電位分布経時変化を示す。全体の傾向として２．５年後の電位と比較して、６年後の電位は陽極付近を除いて数十mV貴な値を示しているが、これは他の試験部材が施設本体に取付けられて対象面積が増加したことと、測定が冬季の荒天時であったことに起因した現象である。塗装杭の杭１Ｂおよび２Ｃの電位は水深方向で減衰が少なく、ほぼ均一な電位分布を示しており、塗膜が電位分布の均一化に寄与していることが窺える。一方、塗装杭でないその他の杭は、水深－４～－５m付近で卑な値を示している。これは同レベルに陽極が取付けられていることによる。図－Ⅳ－１５には杭２Ａの電位経時変化を示す。アルミニウム合金陽極が３個および７個取付けまでは陽極取付け付近を除いて防食電位に達していないが、施設本体の防食に必要なかつ十分な全１８個の陽極を設置した後は、長期に亘り安定した防食状態を維持し、陽極の設計耐用年数１５年が経過した２０年後も、陽極の消耗に伴い電位は貴方向に移行しているが、電位分布は比較的良好で防食状態を維持している。

陽極18個取付後

	経過 (年)
△	2.5
▲	6
○	9
●	20

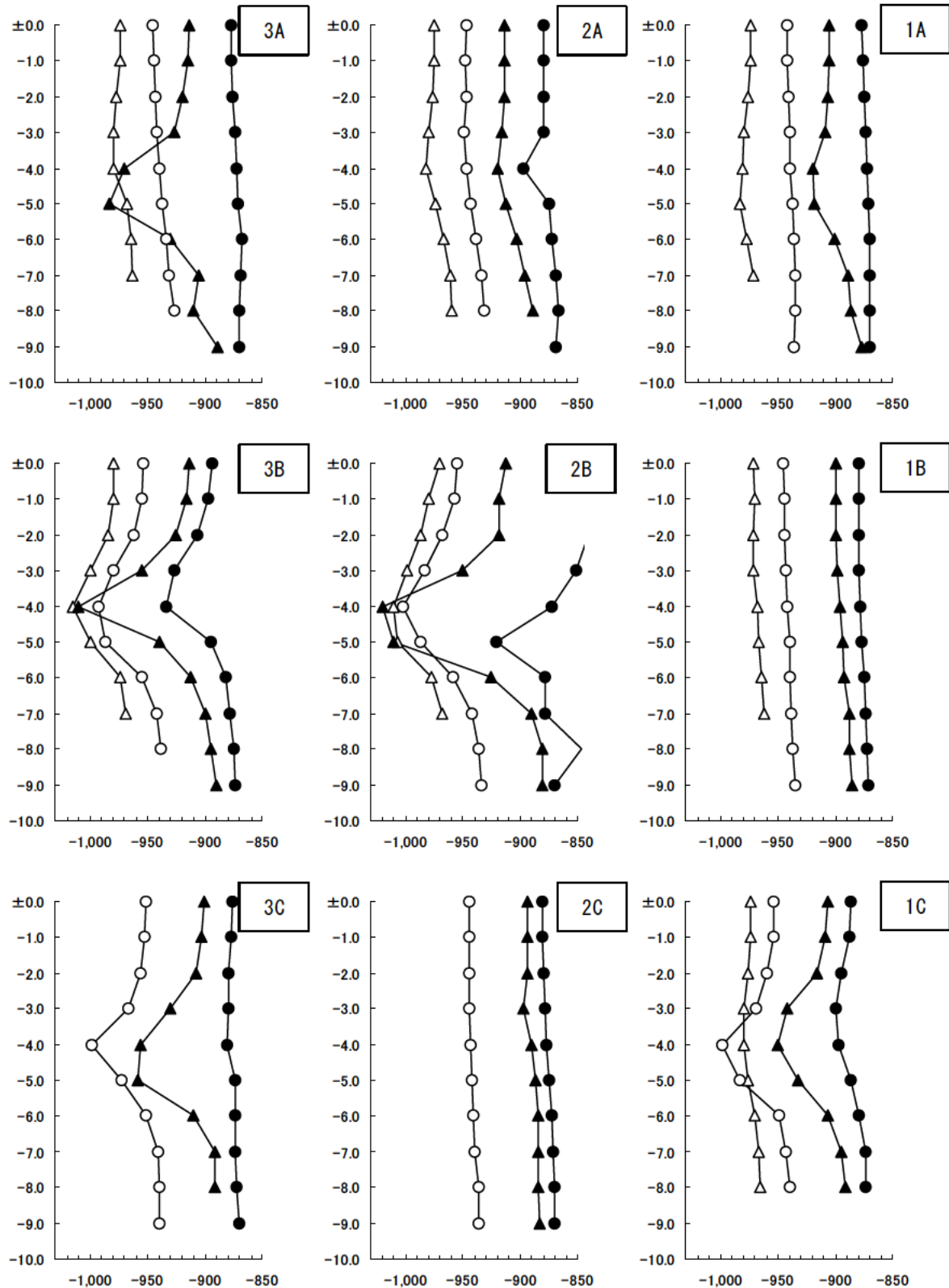
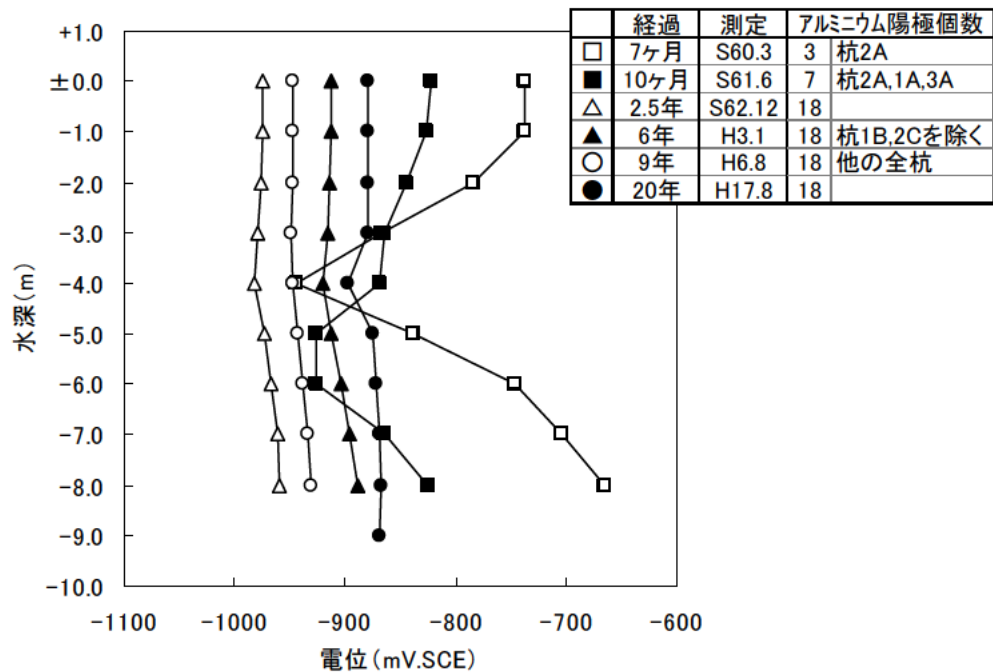


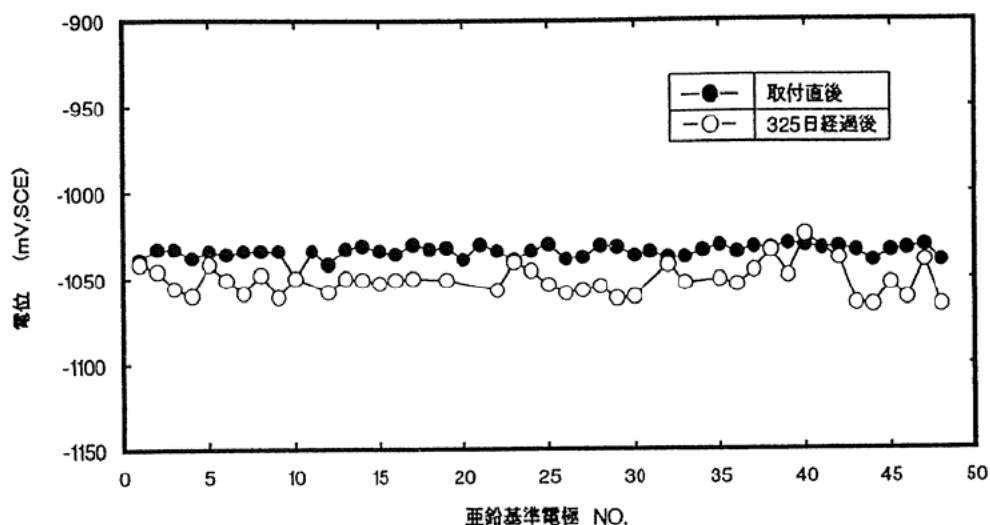
図-IV-14 施設本体の各杭の電位経時変化



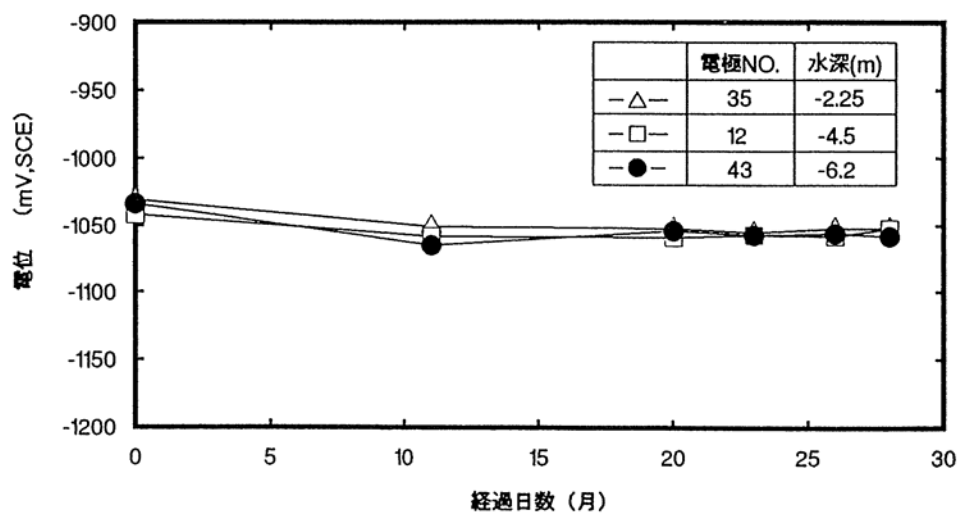
図－IV－15 杭2Aの電位経時変化

(8) 亜鉛基準電極電位の安定性

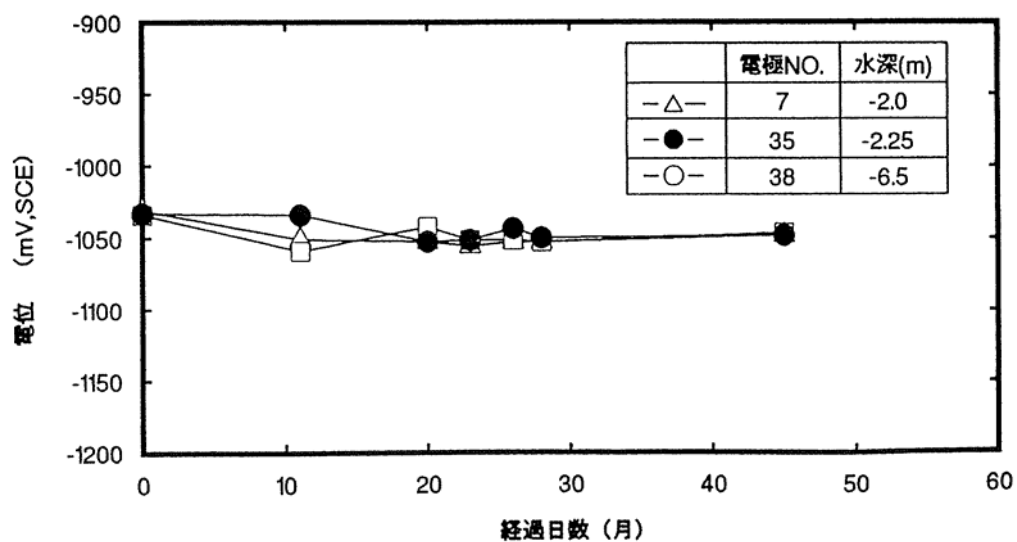
施設本体に取付けてある48個の亜鉛基準電極の電位変化を測定した。測定は、飽和カロメル基準電極を潜水士によって至近距離に近づけて行った。取付直後と約1年後の値を図－IV－16に示す。取付直後に－1030～－1040mVを示したものが、1年後には－1050前後とやや卑方向へ変わり、若干のばらつきを示している。図－IV－17には長期継続している各水深合計16個の2年4ヵ月間の変化を示す。約300日経過後には－1050～－1060mVでほぼ安定し、取付部位、水深に関係なく20mV位の範囲にある。図－IV－18にはさらに長期継続した2個の4年11ヵ月間の電位経時変化を示す。亜鉛基準電極の電位は－1050mV程度の値で安定しており、実際の海洋構造物において十分使用できるものと考察される。



図－IV－16 施設本体における亜鉛基準電極の電位経時変化



図－IV－1 7 施設本体における亜鉛基準電極の電位経時変化 (2)



図－IV－1 8 施設本体における亜鉛基準電極の電位経時変化 (3)

(9) 環境調査

表－Ⅳ－3 に試験施設付近の海水の水質分析結果を示す。本調査は毎年実施しており、各調査項目とも変動は少ない値を呈し、本海域の水質は清浄な海水と判断される。

表－Ⅳ－3 試験施設付近の海水の水質

測定日	位置	水温 (℃)	水素イオン 濃度 pH	抵抗率 ($\Omega \cdot \text{cm}$)	溶存酸 素 (ppm)	塩化物イオン 濃度(ppm)	硫酸イオン 濃度(ppm)
1985. 2.27	表水	13.8	8.0	21.4	8.8	19,300	2,720
	底水	12.8	8.0	21.4	8.9	18,900	2,740
1988. 8. 6	表水	24.3	8.0	21.3	7.2	19,500	2,520
	底水	24.0	8.1	20.8	7.7	20,100	2,640
1991.11.17	表水	18.1	8.1	23.0	7.4	18,700	2,360
	底水	17.5	8.2	22.0	7.8	18,600	2,320
1994. 8. 3	表水	24.4	8.2	20.5	6.7	19,150	2,550
	底水	24.2	8.2	20.5	6.3	19,400	2,570
1997. 7.30	表水	24.0	8.2	24.0	8.0	15,600	2,200
	底水	24.0	8.2	21.0	7.1	18,300	2,500
2001. 8. 4	表水	27.1	8.2	20.4	6.7	17,400	2,320
	底水	25.6	8.2	18.6	7.0	19,500	2,580
2003. 8. 4	表水	24.6	8.0	26.4	6.9	16,550	2,250
	底水	22.9	8.0	22.8	6.5	19,100	2,560

5. まとめ

海中部における電気防食に関する研究でこれまでに、①構造物形状に応じた電気防食設計 ②塗装併用電気防食設計 ③潮流環境における電気防食設計等に関しての基本的な試験を研究開始から10年間でほぼ終了し、以降は補助試験を継続して行っている。

今までに得られた成果は、平成3年度に、「電気防食設計指針（案）・同解説」（建設省土木研究所，昭和58年度版）の改訂版として作成された「海域における土木鋼構造物の電気防食指針（案）・同解説」に反映されており，関西国際空港連絡橋や東京湾横断道路などの大型の海洋鋼構造物の実施工に反映されている。

おわりに

本暴露試験結果は、20年の長期間にわたって各種防食材料・技術の防食性能を評価したものである。これは大変貴重なデータであるので、今後、これらデータが社会資本の維持管理に活用されることを望むものである。

最後に、本暴露試験は、共同研究として長期間にわたって実施しているものであり、その間多数の方が、研究に参画されていました。これまでに参画されました方々に謝意を表します。また、本施設の維持管理を行っていただいております国土交通省中部地方整備局静岡河川事務所の関係各位に感謝の意を表します。