共同研究報告書

整理番号第３４７号

海洋構造物の耐久性向上技術に関する共同研究報告書

（飛沫部及び干満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）

－暴露期間 20 年経過後までの研究成果－

平成 18 年７月

独立行政法人土木研究所
社団法人日本鉄鋼連盟

Copyright © (2006) by P.W.R.I.

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

この報告書は、独立行政法人土木研究所理事長の承認を得て刊行したものである。したがって、本報告書の全部又は一部の転載、複製は、独立行政法人土木研究所理事長の文書による承認を得ずしてこれを行ってはならない。

共同研究報告書
第３４７号平成18年７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

（飛沫部及び干満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）

－暴露期間20年経過後までの研究成果－

独立行政法人　土木研究所　材料地盤グループ　新材料チーム　上席研究員　西崎　到
総括主任研究員　守屋　進
社団法人　日本鉄鋼連盟　海洋防食第１分科会

要旨

独立行政法人 土木研究所と社団法人　日本鉄鋼連盟は，海洋鋼構造物の耐久性向上技術を確立することを目的として，昭和57年度から「飛沫部および干満部における鋼構造物の防食技術」に関する共同研究を，駿河湾の海洋総合技術研究施設において，各種防食技術の暴露試験を行っている。

本報告は，暴露期間20年経過までの研究成果をとりまとめたものである。

キーワード：鋼構造物，海洋環境，防食材料，防食技術

はじめに

周囲を海に囲まれている島国のわが国では、従来から海運や漁業など海洋の利用が盛んであったが、将来も資源や空間など海洋をより有効に利用してゆく必要がある。

海洋空間の有効利用をはかるためには、湾岸道路や海峡横断橋などの海洋鋼構造物を、その厳しい腐食環境から保護するための防食技術の確立が不可欠である。このためには、高度な防食技術を開発して、構造物の耐久性の飛躍的な向上を図る必要がある。

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設置された「海洋技術総合研究施設」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。

この施設を利用して海上で少なくとも 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。

建設省土木研究所（現、独立行政法人　土木研究所）と社団法人　鋼材倶楽部（現、社団法人　日本鉄鋼連盟）は、駿河湾にある海洋技術総合研究施設を利用して海洋環境における鋼材の防食技術に関する共同研究を実施している。1984 年（昭和 59 年）から 2003 年（平成 15 年）までの約 20 年間にわたる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。

本報告書は、海洋技術総合研究施設における 20 年間の暴露試験で得られた各種防食技術の成果をとりまとめたものである。

これまでに、本共同研究で得られた成果は、東京湾横断道路や夢舞大橋などの防食に適用されてきた。

今後、ここで得られたデータが、羽田再拡張や海峡横断構想のように 100 年間の耐久性が求められる分野や，既存構造物のリニューアルなどに役立つことを期待するものである。

目　　次

はじめに

１．官民共同研究の経緯 …… 1
1．1 官民共同研究の目的 …… 1
1．2 官民共同研究開始の経緯と進め方 …… 1
1．2．1 共同研究開始の経緯 …… 1
1．2．1．1 科学技術庁の研究計画
1．2．1．2 建設省土木研究所の研究計画
1．2．1．3 共同研究の目的
1．2．1．4 共同研究の名称と分担
1．2．2 共同研究の進め方 …… 2
1．2．2．1 共同研究の運営体制
1．2．2．2 分科会の構成
1．2．2．3 共同研究第一分科会の研究担当者

２．第１分科会の研究の概要 …… 11
2．1 研究の経緯 …… 11
2．2 研究の目的 …… 11
2．2．1 研究テーマ１ …… 11
2．2．2 研究テーマ２ …… 11
2．2．3 研究テーマ３ …… 11
2．3 試験場所および試験施設 …… 12
2．4 試験環境 …… 15
2．5 試験内容 …… 15

３．試験材と試験方法 …… 17
3．1 試験材 …… 17
3．2 各試験材の詳細 …… 18
3．2．1 研究テーマ１の試験材料 …… 18
3．2．1．1 第１次試験材（Ａ系）
3．2．1．2 第２次試験材（Ａ、Ｃ、Ｄ、Ｈ系）
3．2．2 研究テーマ２の試験材料 …… 21
3．2．2．1 第１次試験材（Ｂ系）
3．2．2．2 第２次試験材（Ｄ系）

3．2．3 研究テーマ３の試験材料 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 22
3．2．3．1 第１次試験材
3．2．3．2 第２次試験材（Ｃ、Ｅ、Ｆ、Ｇ、Ｉ系）
3．3 試験方法 ・・・ 26
3．3．1 研究テーマ１の試験方法 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 26
3．3．1．1 試験材供試位置
3．3．1．2 調査項目および調査方法
3．3．2 研究テーマ２の試験方法 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 26
3．3．2．1 試験材供試位置
3．3．2．2 調査項目および調査方法
3．3．3 研究テーマ３の試験方法 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 27
3．3．3．1 試験材供試位置
3．3．3．2 調査項目および調査方法

４．試験結果 ・・ 68
4．1 鋼材の腐食に関する検討 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 68
4．1．1 研究の目的 ・・・ 68
4．1．2 試験材および試験内容 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 68
4．1．2．1 試験材
4．1．2．2 試験方法
4．1．3 試験結果 ・・ 69
4．1．3．1 外観観察結果
4．1．3．2 現地測定結果
4．1．3．3 引き上げ後調査結果
4．1．3．4 塗装材の外観変化の定量的な評価
4．1．3．5 鋼材腐食形状の詳細調査
4．1．4 考察 ・・・ 76
4．1．4．1 無防食材の腐食
4．1．4．2 塗装材の解析
4．1．4．3 試験全体
4．1．5 まとめ ・・ 78

4．2 ステンレス鋼の耐久性に関する研究 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 116
4．2．1 研究の目的 ・・・ 116
4．2．2 試験材および試験方法 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 116
4．2．2．1 試験材料

4．2．2．2 試験方法
4．2．3 試験結果 …… 119
4．2．4 考察 …… 121
4．2．5 まとめ …… 125

4．3 キュプロニッケル・モネル・チタンの耐久性に関する研究 …… 194
4．3．1 研究の目的 …… 194
4．3．2 試験材および試験方法 …… 194
4．3．3 試験結果 …… 194
4．3．3．1 キュプロニッケル
4．3．3．2 モネル
4．3．3．3 チタン
4．3．4 まとめ …… 195

4．4 有機ライニング鋼材の耐久性に関する研究 …… 253
4．4．1 研究の目的 …… 253
4．4．2 試験材および試験方法 …… 253
4．4．3 試験結果 …… 258
4．4．3．1 外観調査結果
4．4．3．2 膜厚調査結果
4．4．3．3 インピーダンス測定結果
4．4．3．4 色差・光沢保持率測定結果
4．4．4 考察 …… 286
4．4．5 まとめ …… 287

4．5 厚膜塗装材の耐久性に関する研究 …… 290
4．5．1 研究の目的 …… 290
4．5．2 試験材および試験方法 …… 290
4．5．2．1 厚膜塗装材
4．5．2．2 新規厚膜塗装材
4．5．3 試験結果 …… 290
4．5．3．1 厚膜塗装材
4．5．3．2 新規厚膜塗装材
4．5．3．3 17.5年経過厚膜塗装材の外観写真
4．5．4 まとめ …… 292

4．6 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 …… 306
4．6．1 研究の目的 …… 306
4．6．2 試験材および試験方法 …… 306
4．6．2．1 ペトロラタム系防食材＋各種保護カバー系
4．6．2．2 塗装＋FRP保護カバー＋電気防食系
4．6．2．3 特殊ウレタン系樹脂＋FRP保護カバー系
4．6．3 試験結果 …… 307
4．6．3．1 ペトロラタム系防食材＋各種保護カバー系
4．6．3．2 塗装＋FRP保護カバー＋電気防食系
4．6．3．3 特殊ウレタン系樹脂＋FRP保護カバー系
4．6．4 まとめ …… 308

５．総まとめ …… 317
5．1 普通鋼と低合金鋼 …… 317
5．2 ステンレス鋼 …… 317
5．3 キュプロニッケル、モネル、チタン …… 317
5．4 有機ライニング鋼材 …… 317
5．5 厚膜塗装材 …… 318
5．6 保護カバーを用いた現地防食方法 …… 318

６．今後の計画 …… 319

あとがき …… 321

付属資料
図表一覧

１．官民共同研究の経緯

1．1 官民共同研究の目的

1984年に、駿河湾内の静岡県大井川沖に科学技術振興調整費によって「海洋技術総合研究施設」が設置された。この施設はわが国で最初の恒久的な海洋試験施設で、今後の海洋における防錆防食試験の標準試験場と位置付けられるものである。

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の間で共同研究を開始した。

1．2 官民共同研究開始の経緯と進め方

1．2．1 共同研究開始の経緯

1．2．1．1 科学技術庁の研究計画

科学技術庁では、1982年度（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ヵ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・施工等に必要な自然環境を把握する技術の開発
(2) 大型の浮遊式海洋構造物の建設基礎技術の開発
(3) 厳しい波浪から海洋構造物を守る波浪制御
(4) 防食等による海洋構造物の耐久性向上技術の開発
(5) 大波浪海域における海洋構造物の実海域実施研究

1．2．1．2 建設省土木研究所の研究計画

上記のうち、建設省土木研究所が担当することとなった研究計画は、(4)の「防食等による海洋構造物の耐久性向上技術の開発」研究であり、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

この研究は、海洋構造物の耐久性向上を目指しており、数年間の暴露試験では長期間の耐久性を評価することはできないので、５年間（昭和57年度～昭和61年度）の科学技術振興調整費による研究が終了した後の昭和62年度以降も継続された。

共同研究は20年間を目処としていたが、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年）から平成５年度（1993年）までの10年間の研究計画が策定され、その後再度延長されて、20年の暴露試験結果を得るに至った。

なお、20年の暴露を経ても健全な一部の試験材と、その後に開発された耐食金属を中心とした試験材については、平成25年度（2013年）まで新たな試験計画が策定された。

1．2．1．3 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。

1．2．1．4 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1.2.1に示す。

表1.2.1　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）	ＡＢ 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		ＡＢＣＤ

注）Ａ：土木研究所、Ｂ：日本鉄鋼連盟、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

1．2．2 共同研究の進め方

1．2．2．1 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、建設省土木研究所と民間３団体とで毎年締結する。共同研究を円滑かつ効果的に運営するため、次の組織を設けて業務を推進する。

(1) 防錆防食技術開発委員会（開発委員会）
- 研究計画の審議
- 研究成果報告の審議

(2) 共同研究連絡調整会議（連絡調整会議）
- 研究運営の連絡調整

(3) 共同研究分科会（第１、第２、第３の３分科会とする）

（各分科会内でさらに組織を分けることがある）

・研究計画の原案作成

・研究の実施

・研究報告書の原案作成

(4) 共同研究事務局

・土木研究センター内に設置

・委員会、連絡調整会議の開催

・委員会資料等の作成

・共同研究報告書のとりまとめ作成

防錆防食技術開発委員会（名簿）

委員長	蒔田　實	財団法人土木研究センター参与
委　員	田中柳之助	(元)財団法人土木研究センター
	森　芳徳	同上
	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
	中村　亮	財団法人土木研究センター専務理事
	岡　扶樹	社団法人日本鉄鋼連盟（新日本製鐵㈱建材開発技術部マネジャー）
	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（㈱ピーエス三菱メンテナンス部課長）
	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㈱研究部副参事研究員）
	中野　正	同上（関西ペイント販売㈱防食技術センター部長）
	大澤隆英	同上（日本ペイント販売㈱鉄構塗料部マネジャー）
	阿部正美	同上（㈱ナカボーテック技術顧問）
	森嶌義雄	同上（日本防蝕工業㈱水中環境技術部担当部長）
事務局	金井浩一	財団法人土木研究センター研究開発第四部

共同研究連絡調整会議（名簿）

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
岡　扶樹　　社団法人日本鉄鋼連盟（新日本製鐵㈱建材開発技術部マネジャー）
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
　　（㈱ピーエス三菱 メンテナンス部課長）
吉田光秀　　同上（㈱富士ピー・エス 技術開発グループ課長）
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㈱研究部副参事研究員）
中野　正　　同上（関西ペイント販売㈱防食技術センター部長）
大澤隆英　　同上（日本ペイント販売㈱鉄構塗料部マネジャー）
森嶌義雄　　同上（日本防蝕工業㈱水中環境技術部担当部長）
金井浩一　　財団法人土木研究センター研究開発第四部

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

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

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

1．2．2．3 共同研究第１分科会の研究担当者

これまでの第１分科会の関係者を以下に示す。（2006年3月末日現在）

蒔田　實　　(元)建設省土木研究所地質化学部長
森　芳徳　　(元)建設省土木研究所地質化学部化学研究室長
片脇清士　　(元)建設省土木研究所材料施工部長
坂本浩行　　(元)建設省土木研究所材料施工部化学研究室長
寺田　剛　　(前)建設省土木研究所材料施工部化学研究室
明嵐政司　　(前)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上席研究員
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チーム上席研究員
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
佐々木巖　　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
田中柳之助　(元)財団法人土木研究センター

金井浩一　　財団法人土木研究センター

(社)日本鉄鋼連盟（旧(社)鋼材倶楽部）関係者名簿

久我　昴　　(前)新日本製鐵㈱建材開発技術部担当部長
田中成人　　(元)新日本製鐵㈱建材開発技術部部長代理
吉田耕太郎　　(元)新日本製鐵㈱鉄構海洋事業部技術開発部部長代理
岡　扶樹　　新日本製鐵㈱建材開発技術部土木基礎建材技術グループマネジャー
山下久男　　(元)新日本製鐵㈱建材開発技術部土木基礎建材技術グループマネジャー
伊藤陽一　　(元)新日本製鐵㈱鉄鋼研究所表面処理研究部主幹研究員
宮坂明博　　(前)新日本製鐵㈱鉄鋼研究所表面処理研究部長
山本正弘　　新日本製鐵㈱鉄鋼研究所鋼構造研究開発センター主幹研究員
今福健一郎　　新日本製鐵㈱鉄鋼研究所鋼構造研究開発センター主任研究員
篠原敏雄　　(元)日本鋼管㈱建材センター建材技術開発部次長
中川　茂　　(元)日本鋼管㈱建材センター建材技術開発部次長
森　　玄　　(前)日本鋼管㈱建材センター建材技術開発部土木建材チーム
元木卓也　　ＪＦＥスチール㈱建材センター建材技術部土木技術室副課長
清水義明　　(元)日本鋼管㈱総合材料技術研究室主幹
藤田　栄　　(前)日本鋼管㈱技術開発本部総合材料技術研究所マテリアルズ・ソリューション研究センター主幹
釣　之郎　　ＪＦＥスチール㈱スチール研究所耐食・防食研究部主任研究員（課長）
高橋　功　　(元)川崎製鉄㈱エンジニアリング事業部研究開発センター建材研究室
栗栖孝雄　　(元)川崎製鉄㈱エンジニアリング事業本部鋼構造研究所主任研究員（部長）
望月一雄　　(元)川崎製鉄㈱技術研究所表面処理研究部門長
村瀬正次　　(元)川崎製鉄㈱技術研究所表面処理研究部門主任研究員
加藤　敏　　(元)住友金属工業㈱建設技術部東京土木建材技術室長
塩谷千歳　　(元)住友金属工業㈱建設エンジニアリング事業部建設技術部東京土木建材技術室長
山中和夫　　(元)住友金属工業㈱建材事業部建材技術部担当部長
岡本政信　　(前)住友金属工業㈱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㈱鋼板・建材カンパニー建設技術部東京土木建材技術室担当次長
幸　英昭　　住友金属工業㈱総合技術研究所厚板・建材研究開発部防食技術グループ部長研究員
上村隆之　　住友金属工業㈱総合技術研究所厚板・建材研究開発部主任研究員
武生博文　　(元)㈱神戸製鋼所鉄鋼生産本部厚板技術部

吉間　豊	(元)㈱神戸製鋼所鉄鋼生産本部厚板技術部主任部員
下畑隆司	(元)㈱神戸製鋼所鉄鋼事業本部生産本部生産技術部課長
山内　学	(元)㈱神戸製鋼所鉄鋼事業本部生産技術部企画担当次長
田原隆康	(元)㈱日本製鋼所鉄鋼事業部鉄構機器部
塚田博之	(元)㈱日本製鋼所鉄構事業本部技術部課長
三浦　立	(元)㈱日本製鋼所主幹研究員
鈴木公明	㈱日本製鋼所鉄鋼事業部材料企画担当部長
北岡一泰	(元)(社)チタニウム協会(㈱神戸製鋼所チタン本部販売部)
鈴木　清	(元)(社)チタニウム協会(㈱神戸製鋼所チタン技術部長)
藤井雅光	(元)(社)日本チタン協会(㈱神戸製鋼所チタン技術部長)
村瀬系三	(元)(社)チタニウム協会(日本ステンレス㈱技術開発部)
鈴木敏夫	(元)(社)チタニウム協会(日本ステンレス㈱技術開発部)
草野明彦	(元)(社)日本チタン協会(新日本製鐵㈱チタン部担当部長)
加古幸博	(前)(社)日本チタン協会(新日本製鐵㈱チタン部部長)
小田高士	(社)日本チタン協会(新日本製鐵㈱チタン事業部部長)
伊藤　均	(社)日本チタン協会企画部長
大八木亮太郎	(元)(社)日本チタン協会(住友金属工業㈱ステンレスチタン建築部課長)
金子照男	(前)(社)日本チタン協会(住友金属建材㈱建築建材工事営業グループ長)
山本孝美	(社)日本チタン協会(住友金属工業㈱チタン部チタン技術室)
中山　実	(元)日本鉛亜鉛需要研究会
下田和則	(元)日本鉛亜鉛需要研究会部長
川本和生	(元)日本鉛亜鉛需要研究会部長
武市知明	(元)日本鉛亜鉛需要研究会部長
武井和彦	(元)日本鉛亜鉛需要研究会部長
永田秀樹	日本鉱業協会鉛亜鉛需要開発センターセンター次長
藤田正敏	(元)関西ペイント㈱建設塗料本部研究所
中家俊和	(前)関西ペイント㈱船舶・鉄構塗料本部第２技術部課長
中野　正	関西ペイント販売㈱建設塗料本部防食塗料技術部部長
児玉五男	(元)昭和高分子㈱営業企画部次長
中村和明	(元)昭和高分子㈱加工技術研究所課長
田邉弘往	(元)大日本塗料㈱技術本部基礎研究部参事補研究員
多記　徹	(前)大日本塗料㈱技術本部基礎研究第一部部長代行
倉田忠志	中国塗料㈱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食設計グループリーダー
海野武人	(元)㈱ナカボーテック技術開発研究所技術顧問

望月紀保	(前)㈱ナカボーテック技術開発研究所開発研究室室長
大野泰彦	㈱ナカボーテック技術研究所開発研究室リーダー
野口忠久	(前)㈱ナカボーテック技術開発研究所試験分析室リーダー
志鶴真介	㈱ナカボーテック技術研究所
阿蘇品英志	(元)日東電気工業㈱工業材事業部門工業材研究所主幹研究員
萬浩一郎	(元)日本シーアールエム㈱耐蝕材料一部
平松雄二	(元)日本油脂㈱塗料事業部汎用塗料部
佐野俊一	(元)日本油脂㈱コーティングスカンパニー海洋鉄構塗料本部技術部第２グループグループマネジャー
岡嶋眞人	(元)日本油脂ＢＡＳＦコーティングス㈱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㈱工業塗料本部技術２部１Ｇ
上田滋夫	(元)ブリヂストン㈱工業用品開発本部土木資材開発室長
奈良部博	(前)三井金属塗料化学㈱技術本部技術二部長
中西英幸	日本ペイント防食コーティングス㈱技術部ミゼロングループマネジャー
川口三六生	(元)横浜ゴム㈱エンジニヤドプロダクツ工場工事管理課

共同研究第１分科会の関係者構成（昭和58年度～平成６年度）

（五十音順、敬称略、これまでの研究関係者を含む、○印は主査）

共同研究第１分科会

	阿蘇品	英志	日東電気工業㈱
	石岡	千里	㈱神戸製鋼所
	石渡	正夫	川崎製鉄㈱
	伊藤	陽一	新日本製鐵㈱
	井上	肇	住友金属工業㈱
	上田	滋夫	ブリヂストン㈱
	海野	武人	㈱ナカボーテック
	大橋	明	㈱日本製鋼所
	大八木亮太郎		㈳チタニウム協会
	岡本	忠夫	日本鋼管㈱
	片脇	清	建設省土木研究所
	加藤	敏	住友金属工業㈱
	川上	元雄	㈱神戸製鋼所
	川口	三六生	横浜ゴム㈱
	北岡	一泰	㈳チタニウム協会
	北村	昌章	住金大径鋼管㈱
	橘高	元	㈱神戸製鋼所
○	久我	昂	新日本製鐵㈱
	久野	忠一	川崎製鉄㈱
	栗栖	孝雄	川崎製鉄㈱
	児玉	五男	昭和高分子㈱
	小林	一樹	横浜ゴム㈱
	佐藤	一郎	㈳鋼材倶楽部
	佐野	俊一	日本油脂㈱
	塩谷	千歳	住友金属工業㈱
	実藤	公一	三井金属塗料化学㈱
	篠原	敏雄	日本鋼管㈱
	篠原	稔雄	大日本塗料㈱
	清水	義明	日本鋼管㈱
	下田	和則	日本鉛亜鉛需要研究会
	下畑	隆司	㈱神戸製鋼所
	白井	健三	関西ペイント㈱
○	白石	基雄	新日本製鐵㈱
	新谷	与一郎	日本ステンレス㈱
	鈴木	清	㈳チタニウム協会
	鈴木	敏夫	㈳チタニウム協会
	鈴木	嘉秋	新日本製鐵㈱
	瀬渡	哲朗	住友金属工業㈱
○	大長	智	新日本製鐵㈱
	高橋	功	川崎製鉄㈱
○	瀧口	洋一	新日本製鐵㈱
	武生	博之	㈱神戸製鋼所
	竹光	忠志	中国塗料㈱
	田中	繁夫	日本鋼管㈱
	田中	成人	新日本製鐵㈱
	田中	宏	日本鉛亜鉛需要研究会
	田辺	弘往	大日本塗料㈱
	田原	隆康	㈱日本製鋼所
	千賀	平造	㈱神戸製鋼所
	塚田	博之	㈱日本製鋼所
	辻	敏幹	大日本塗料㈱
	土居	一幸	新日本製鐵㈱
	東辻	善夫	日本鉛亜鉛需要研究会
	轟	丈詩	日本鋼管㈱
	富川	昌彦	日本油脂㈱
	中家	俊和	関西ペイント㈱
	中山	種清	住友金属工業㈱
	中山	実	日本鉛亜鉛需要研究会
	奈良部	博	三井金属塗料化学㈱
	橋本	定明	関西ペイント㈱
	長谷川	欣也	川崎製鉄㈱
	林	登	㈱神戸製鋼所
	東	常廣	㈱井上商会
	肥田	修	㈱日本製鋼所
	平松	雄二	日本油脂㈱
	藤井	雅光	㈳日本チタニウム協会
	藤田	正敏	関西ペイント㈱
	前田	正竜	住友金属工業㈱
	溝邊	喜久雄	㈱神戸製鋼所
	宮下	正文	㈱日本製鋼所
	村瀬	系三	㈳チタニウム協会
○	望月	博正	新日本製鐵㈱
	森	芳徳	建設省土木研究所
	吉川	浩助	日本亜鉛需要研究会
	吉田	耕太郎	新日本製鐵㈱
	吉間	豊	㈱神戸製鋼所
	萬	浩一郎	日本シーアールエム㈱

共同研究第１分科会ワーキンググループ１

石岡　千里　㈱神戸製鋼所
石渡　正夫　川崎製鉄㈱
伊藤　陽一　新日本製鐵㈱
井上　肇　住友金属工業㈱
海野　武人　㈱ナガボーテック
大橋　明　㈱日本製鋼所
大八木亮太郎　㈳チタニウム協会
岡本　忠夫　日本鋼管㈱
片脇　清　建設省土木研究所
加藤　敏　住友金属工業㈱
川上　元雄　㈱神戸製鋼所
北岡　一泰　㈳チタニウム協会
北村　昌章　住金大径鋼管㈱
橘高　元　㈱神戸製鋼所
久野　忠一　川崎製鉄㈱
久我　昂　新日本製鐵㈱
栗栖　孝雄　川崎製鉄㈱
佐藤　一郎　㈳鋼材倶楽部
塩谷　千歳　住友金属工業㈱
篠原　敏雄　日本鋼管㈱
清水　義明　日本鋼管㈱
下田　和則　日本鉛亜鉛需要研究会
下畑　隆司　㈱神戸製鋼所
白石　基雄　新日本製鐵㈱
新谷　与一郎　日本ステンレス㈱
鈴木　清　㈳日本チタニウム協会
鈴木　敏夫　㈳チタニウム協会
鈴木　嘉秋　新日本製鐵㈱
瀬渡　哲朗　住友金属工業㈱
大長　智　新日本製鐵㈱
武生　博文　㈱神戸製鋼所
田中　繁夫　日本鋼管㈱
田中　成人　新日本製鐵㈱
田中　宏　日本鉛亜鉛需要研究会
田辺　弘往　大日本塗料㈱
田原　隆康　㈱日本製鋼所
千賀　平造　㈱神戸製鋼所
塚田　博之　㈱日本製鋼所
土居　一幸　新日本製鐵㈱
東辻　善夫　日本鉛亜鉛需要研究会
轟　文詩　日本鋼管㈱
中家　俊和　関西ペイント㈱
中山　種清　住友金属工業㈱
中山　実　日本鉛亜鉛需要研究会
橋本　定明　関西ペイント㈱
長谷川　欣也　川崎製鉄㈱
林　登　㈱神戸製鋼所
肥田　修　㈱日本製鋼所
藤井　雅光　㈳日本チタニウム協会
藤田　正敏　関西ペイント㈱
前田　正竜　住友金属工業㈱
溝邊　喜久雄　㈱神戸製鋼所
宮下　正文　㈱日本製鋼所
村瀬　系三　㈳チタニウム協会
望月　博正　新日本製鐵㈱
森　芳徳　建設省土木研究所
吉川　浩助　日本鉛亜鉛需要研究会
吉田　耕太郎　新日本製鐵㈱
吉間　豊　㈱神戸製鋼所

共同研究第１分科会ワーキンググループ２

阿蘇品	英志	日東電気工業㈱
伊藤	陽一	新日本製鐵㈱
上田	滋夫	㈱ブリヂストン
海野	武人	㈱ナカボーテック
岡本	毅	中国塗料㈱
片脇	清	建設省土木研究所
加藤	久	日本高分子化学㈱
川口	三六生	横浜ゴム㈱
川崎	靖夫	三井金属鉱業㈱
北村	昌章	住金大径鋼管㈱
久我	昂	新日本製鐵㈱
久野	忠一	川崎製鉄㈱
栗栖	孝雄	川崎製鉄㈱
児玉	五男	昭和高分子㈱
小林	一樹	横浜ゴム㈱
佐藤	一郎	㈱鋼材倶楽部
佐野	俊一	日本油脂㈱
塩谷	千歳	住友金属工業㈱
実藤	公一	三井金属塗料化学㈱
篠原	稔雄	大日本塗料㈱
清水	義明	日本鋼管㈱
白井	健三	関西ペイント㈱
鈴木	嘉秋	新日本製鐵㈱
大長	智	新日本製鐵㈱
高橋	功	川崎製鉄㈱
高橋	弘孝	㈱日本アマコート
多記	徹	大日本塗料㈱
竹光	忠志	中国塗料㈱
田中	成人	新日本製鐵㈱
田辺	弘往	大日本塗料㈱
辻	敏幹	大日本塗料㈱
土居	一幸	新日本製鐵㈱
苫元	尚明	横浜ゴム㈱
富川	昌彦	日本油脂㈱
永井	晶憲	大日本塗料㈱
中家	俊和	関西ペイント㈱
奈良部	博	三井金属塗料化学㈱
芳賀	和雄	㈱ブリヂストン
橋本	定明	関西ペイント㈱
東	常廣	㈱井上商会
藤田	正敏	関西ペイント㈱
前田	正竜	住友金属工業㈱
森	芳徳	建設省土木研究所
吉田	耕太郎	新日本製鐵㈱
萬	浩一郎	日本シーアールエム㈱

２．第１分科会の研究の概要

2.1 研究の経緯

1981年度に科学技術庁によって「海洋構造物による海洋空間等の有効利用に関する研究」の計画が策定され、先ずフィジビリティ・スタディが行われた。その結果、５件の研究項目とその担当機関が決定し、1982年度から５ヵ年計画で研究を開始した。そのうち、科学技術庁および建設省土木研究所は「防食等による海洋構造物の耐久性向上技術の開発」に関して、①海中部の電気防食、②飛沫・干満部の鋼材防食法、③飛沫部のコンクリートの防食法および、④海上大気部の塗装の４件の中課題を設定して担当した。

本研究は中課題ごとに分科会を設けて推進を図った。社団法人鋼材倶楽部は、「飛沫帯および干満帯における鋼構造物の防食技術に関する研究」を実施するため、会員の中から賛同者を募り第１分科会を組織した。研究は、建設省土木研究所と社団法人鋼材倶楽部の共同研究として開始し、その後、建設省土木研究所は独立行政法人土木研究所に、社団法人鋼材倶楽部は組織の改廃により社団法人日本鉄鋼連盟に引継いだ。

2.2 研究の目的

第１分科会では、次の３件の研究テーマに沿って試験を行った。

2.2.1 研究テーマ１

研究テーマ１は、「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」であり、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。

2.2.2 研究テーマ２

研究テーマ２は、「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」であり、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：低合金系耐海水性鋼材については、期待に反して、試験期間の経過とともに普通鋼に対する耐食性の面での優位性が認められなくなったため、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、4.1.1（研究の目的）に後述するように「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。

2.2.3 研究テーマ３

研究テーマ３は、「新規塗覆装材料および工法の実使用状態での確性」であり、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。

2.3 試験場所および試験施設

試験場所はわが国の沿岸海域を代表する場所の一つとして選ばれた、静岡県志太郡大井川町高新田地先の沖合約250mである。

図2.3.1に試験を実施している海洋技術総合研究施設の位置を示す。図2.3.2には研究施設の側面を示す。付近の水深は約7.5m、海底は砂質で季節によって海底面の高さが若干変動している。

研究施設の平面的な大きさは約15m×15mで、３層のデッキを有し、最上階の第１デッキ上には気象観測塔を有している。第１分科会では、飛沫帯、干満帯、海中の３つの環境を対象として暴露試験を実施するため、海面上約２mの第３デッキ以下のレベルに試験材を設置した。更に、研究施設本体の飛沫帯と干満帯に防食塗覆装を施工し、研究施設本体自体を試験対象とした。

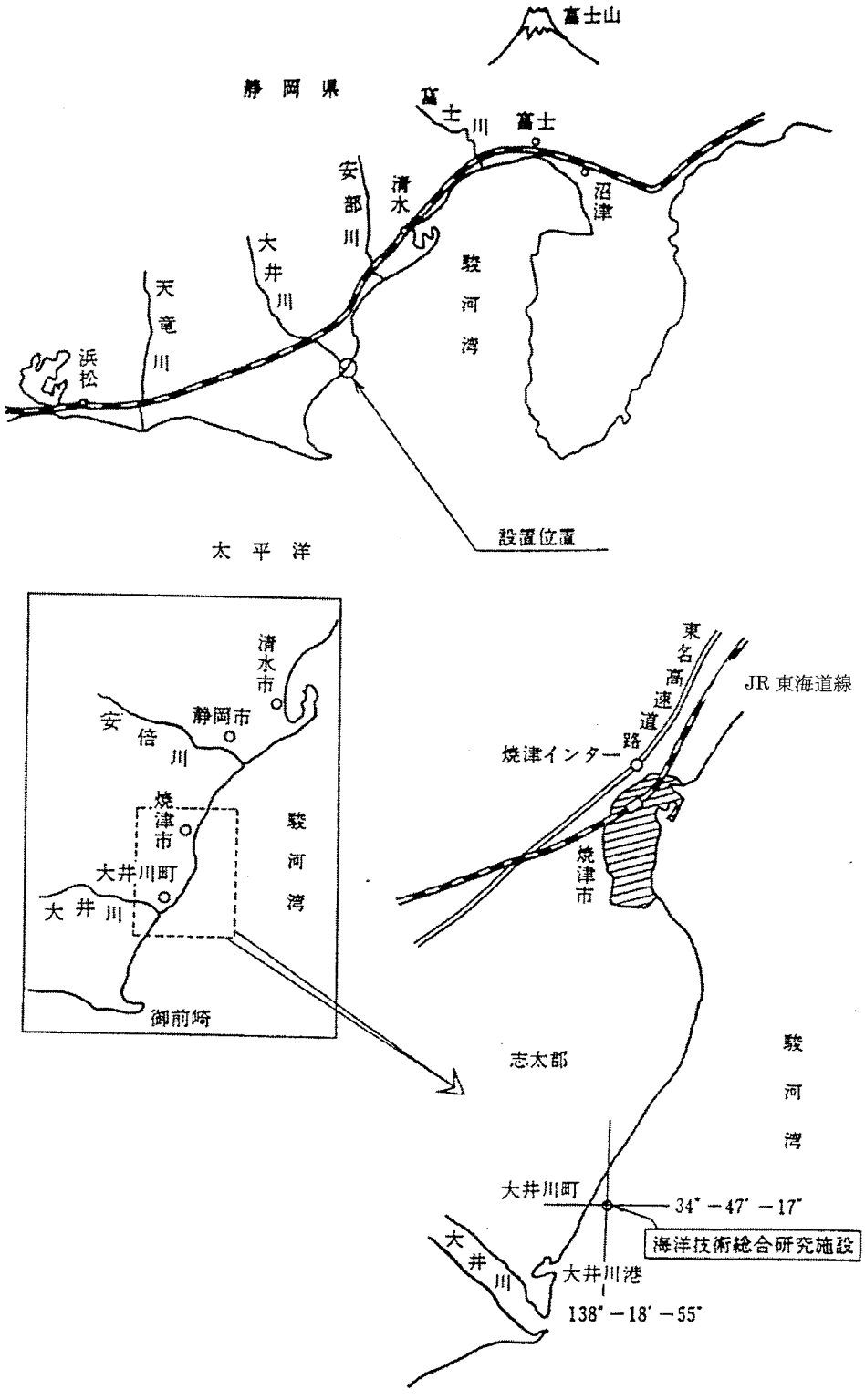


図2.3.1　海洋技術総合研究施設位置図

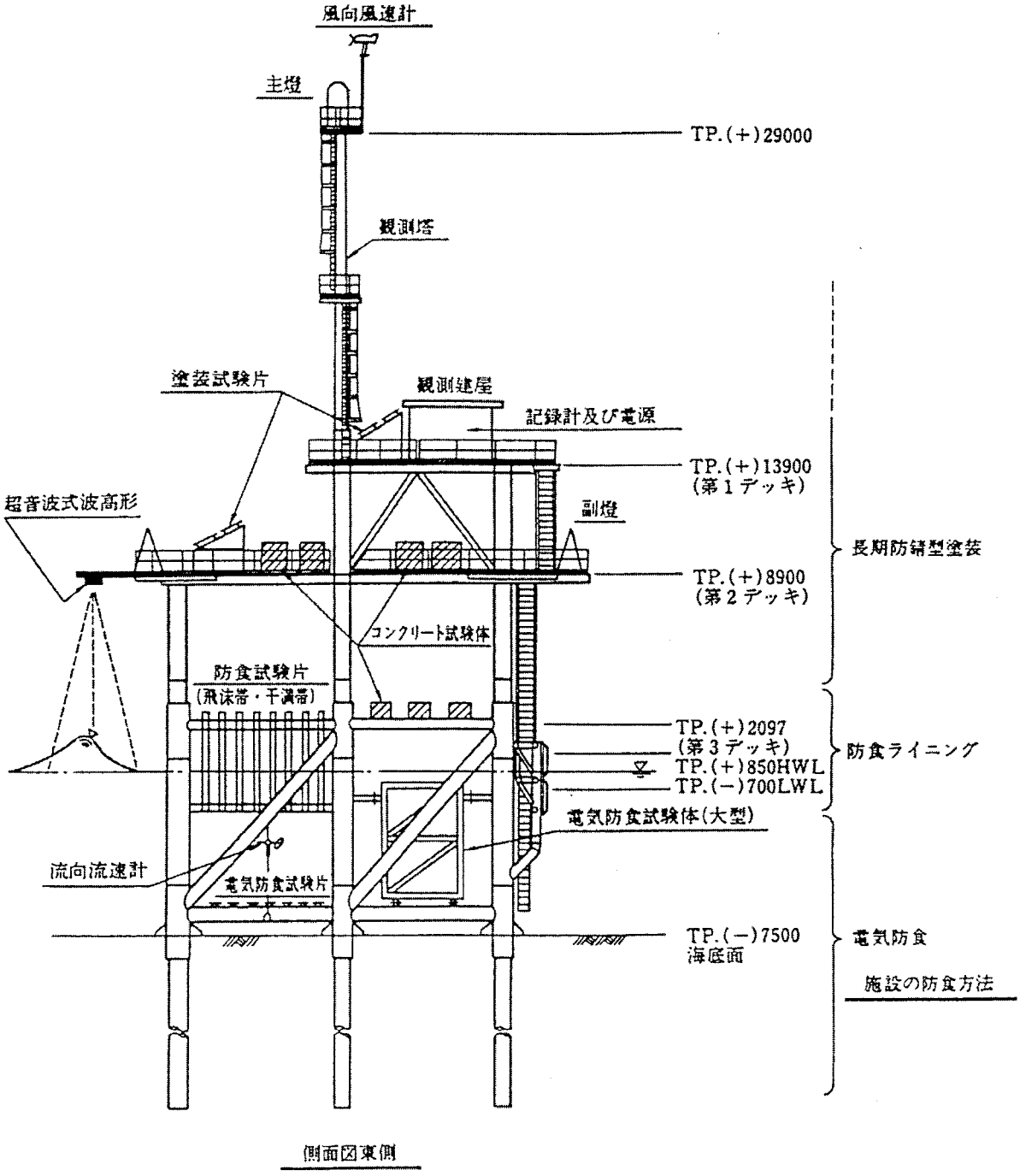


図2.3.2　海洋暴露試験位置図

2.4 試験環境

前記の研究施設は駿河湾内に設置されており、「静岡県志太郡大井川町史(下)」(1984年10月刊行)によれば、研究施設付近の気象は年平均温度が16.2℃、月平均温度は最高が８月の26.2℃、最低は１月の5.9℃である。夏季は東北地方以北を除くわが国全体の平均気温に近く、冬季は駿河湾に面して沿岸近くを黒潮が流れるので厳しい寒気の到来はない。しかし、位置的に風の影響が大きく、夏季は東方洋上を台風が接近通過することがあり、時には直接台風の襲来を受けることもある。また冬季は西方向からの季節風が強い。雨量については、この地方はわが国の多雨地帯の一つで年間2,000㎜を超え、特に７～９月に多い。

本試験では、飛沫帯および干満帯における試験材の調査が主目的であるため、研究施設付近の海水、海象の調査が必要である。各調査時ごとに海水を採取してその水質を分析した。

2.5 試験内容

本研究では、金属材料及び塗覆装材料を海洋環境、とくに飛沫帯及び干満帯を主として大気部から海中部にわたる腐食環境に暴露して、その防食性と耐久性の効果を確認した。なお、防食鋼材の電気防食試験も実施した。

試験は、予め測定項目を定めた定期一般調査と定期詳細調査とを組合わせて、長期調査計画を策定し進めた。定期一般調査では、現地において暴露状態の試験材を対象に毎年定期的に外観観察と測定を実施した。定期詳細調査では、現地における詳細調査の他に、回収した試験材を対象とする実験室での破壊試験も実施した。また、調査において異状と思われる損傷等が確認された場合は、その原因追求に関する調査を実施した。さらに、試験途中の調査結果を検討して、新たな試験対象を加えるなど計画を修正した。

2003年度は、試験開始から約20年目であり、ほとんどの試験材を回収して詳細調査を行った。いったん撤去して調査した結果、再度設置して20年の暴露期間を更に延長することとした試験材や2003年度に新たに設置した試験材（新規暴露試験と呼び、2003年夏から10年間の暴露試験を予定）があり、その数に関して表2.5.1に示す。例えば、研究テーマ１においては、2003年度の調査対象が18体であり、このうちの12体を回収し６体を暴露延長（表中では一時撤去・再暴露と表現）した。これに、2003年度に新規に暴露試験を開始した13体を加え19体が、2003年度末の時点で試験を継続中である。研究テーマ３については、施設本体の調査対象箇所が防食仕様別に42ヵ所、光沢度および色差測定用の小試験片（板状または円筒状）が18個設置してある。

表2.5.1　2003年度調査時の試験材の数

テーマ	次	調査対象		回収材		一時撤去・再暴露		'03年度新規材		調査後
1	1	12	18 (1)	9	12	4	6	0	13	19
	2	6 (1)		3		2		0		
	3	0		0		0		13		
2	1	6	7 (1)	6	7	0		0		0
	2	1 (1)		1						
	3	0		0						
3	1	本体	42※1	0		0		0		42※1
	2	試験材	20	15	15	5	5	0	6	11
	3		0	0		0		6		
	2	小試験片	18	2※2		0		0		16

1) （ ）は流失のため調査できなかった数。2003年度に確認

2) ※1は研究施設本体の調査対象箇所数

3) ※2は光沢度、色差測定用小試験片の数、E-1-1材とE-3-1材の２本は同仕様の試験材の一部に取付けてあったので試験材と同時に2003年度に回収

4) 第３次試験材とは2003年度暴露開始の新規材

３．試験材と試験方法

3.1 試験材

試験は長期的な計画を策定して開始し、試験期間途中で単年度ごとあるいは数年ごとの見直しや中間的総括を行った。例えば、試験材の一時的な撤去による現場での観察、繰り上げ回収材に対する実験室での損傷原因追求に関する詳細調査、新規試験材の追加暴露などを実施した。試験材は多種類、多数にわたるので各研究テーマとも1984年の暴露実験開始当初のものを第１次試験材と呼び、その後暴露したもの（2003年度に新規に暴露を開始したものは本報告の対象外であり、新規暴露材と呼ぶ）はすべて第２次試験材と呼ぶことにし、防食仕様毎に記号とNo.を付して分類した。

試験は1984年から10年間の長期計画を策定して1993年まで実施した。その後、中間的総括や見直しを行って、2003年まで10年間の延長を決めた。この間、試験計画に沿った試験材の回収や、その後の技術開発を反映した追加暴露などが行われた。本章では2003年度までのそれらの経緯をまとめた。試験材は研究テーマ３件について、暴露試験開始当初からの第１次試験材と、それ以後に供試した第２次試験材に分類され、ほぼ暴露年度順にアルファベットとNo.を組み合わせた記号を付与した。

表3.1.1は研究テーマ１と研究テーマ２に関する試験材を、防食仕様の系（種類）別に分類したものである。ステンレス鋼、低合金鋼、非鉄耐食性金属（キュプロニッケル、モネル、チタン）、金属被覆＋塗装および電気防食併用等であるが、その他に比較材としての普通鋼も含まれている。表には第１次試験材、第２次試験材および第３次試験材（2003年度に10年間を予定して暴露試験を開始した新規暴露材）の区分、2003年度調査後の残存現況も示した。

表3.1.2は研究テーマ３に関する試験材を防食仕様の系別に示したもので、超厚膜塗装、ガラスフレーク入り塗装、上塗りに試験目的を付加した塗装＋上塗り、ポリエチレン被覆、防食材＋保護カバー、補修塗装等に分類される。このうち光沢および色差について調査する第２次試験材では、途中から光沢および色差測定専用の小形試験片（板状または管状）を供試した。表には第１次試験材および第２次試験材の区分、2003年度調査時の残存現況も示した。

表3.1.3には各研究テーマにおける各種試験材の記号別分類を暴露開始年の順に示した。1984年の暴露試験当初においては原則として、研究テーマ１をＡ系、研究テーマ２をＢ系、研究テーマ３を本体No.系として開始したが、その後、新規に追加する試験材はすべて第２次試験材と分類し、その試験材にはアルファベット順に記号およびNo.をつけることを原則とした。

全試験材について時間経過をまとめた一覧表を表3.1.4に示す。

3.2 各試験材の詳細

3.2.1 研究テーマ１の試験材料

3.2.1.1 第１次試験材（Ａ系）

研究テーマ１に関する第１次試験材の種類と詳細調査のための撤去状況を表3.2.1に、試験材の化学成分を表3.2.2に示す。

試験材の形状はいずれも管状で、普通鋼を素管としてこれに防食材を被覆したもの、もしくは防食材金属をそのまま素管としたものである。素管はSTPG38、150A Sch.80、肉厚11mmを標準とした。長さは3,500mmであり、直径は89.1～171.2mmの範囲内の５種類である。

試験材の防食仕様はオーステナイト系、フェライト系、二相系の各種ステンレス鋼による被覆の他に、キュプロニッケル、モネル、チタン等の非鉄金属による被覆、溶射＋塗装系、めっき＋塗装系の計13種類である。被覆厚さは、板巻き施工材とクラッド材では３mmである。二相系ステンレス鋼は素管のまま用い、その肉厚は9.6～12.7mmである。塗装系は溶射（200μm）＋塗装（4,000μm）、めっき（130μm）＋エポキシプライマー（30μm）＋塗装（500μm×３回）で比較的厚い重防食塗装である。供試試験材は当初合計30本で開始した。この研究テーマ１の第１次試験材を記号でＡ系と分類した。

研究テーマ１の第１次試験材のうち、表3.2.1の△印および□印を付けたものは、試験材の表面に人工的にすき間を付与し、すき間腐食発生の有無とその程度を調査した試験材である。△印は試験開始の1984年に、また□印については1987年調査終了後にすき間を付与した。すき間付与の位置は、平均満潮位（H.W.L）直上の飛沫帯、干満帯中央部および平均干潮位（L.W.L）直下の海中部の３ヵ所とした。すき間付与の方法は、粘着剤付ポリエチレン収縮チューブ（150A用、肉厚２mm、長さ200mm）を図3.2.1に示す位置で加熱収縮させた。

なお試験材Ａ-13-BおよびＡ-13-Cについては、上記すき間の他、図3.2.2に示すように純チタンで被覆した管の外面の３～４ヵ所に$20^{w}\times2,900^{l}\times2\,mm^{t}$の細長い純チタン板あるいはチタン合金板をスポット溶接で取り付けることによりすき間を付与した。それらの材質を表3.2.3に示す。

3.2.1.2 第２次試験材（Ａ、Ｃ、Ｄ、Ｈ系）

表3.2.4には研究テーマ１に関する第２次試験材の内容および暴露の経過と予定を示す。表3.2.5には第２次試験材の化学成分を示す。この第２次試験材では1989年度および1991年度に暴露を開始したものを試験目的によってＡ系またはＣ系と分類し、1993年度および1996年度に開始したものをＤ系とし、さらに1998年度に開始したものをＨ系と分類した。ここで一部の第２次試験材をＡ系（A-1-6～9、A-14）に分類したのは、いずれも第１次試験材と同等の仕様の金属材料を供試したためである。それらを用いた追加試験の目的は次のとおりである。

（１）ステンレス鋼管材の人工すき間付与部に対する電気防食

（第１回電気防食試験、Ａ系、SUS316L鋼）

第１次試験材についての暴露結果観察の結果、SUS316L鋼その他のステンレス鋼に、海水中と干満帯において人工すき間付与部と付着生物下で、多数のすき間腐食発生が確認された。このすき間腐食発生に対する抑制効果の確認を目的として電気防食試験を実施した。

SUS316L鋼試験材の電気防食方法として、試験材とアルミニウム合金陽極によって電気防食が行われている試験施設本体とを接続した。この第１回試験は、1989年から1991年までの２年間実施したが、とくに電位制御は行わなかった。試験材Ａ-1-6は比較のための非電気防食材で試験材Ａ-1-7が電気防食材である。

試験材の寸法および形状は165.2mm$^{\phi}$×3,162mm^{l}×7.1mm^{t}で、すき間付与は第１次試験材と同じ方法で図3.2.3(a)に示す干満帯２ヵ所、海中部１ヵ所の３ヵ所とした。

（２）ステンレス鋼管材の人工すき間付与部に対する電気防食

（第２回電気防食試験、Ａ系SUS316L鋼）

第１回電気防食試験において、半定量的ながら人工すき間付与部および付着生物下のすき間腐食発生を完全に防止できることを確認したので、第２回試験では陰極電位を設定して電気防食条件を求めた。

防食方法は、第１回電気防食試験と同様に試験材と試験施設本体とを接続したが、第２回電気防食試験では回路に可変抵抗を挿入し、防食電位を-500mV(vs.SCE)および-770mV(vs.SCE)に設定した。試験材Ａ-1-8材はSUS316L鋼の単独使用を想定して-500mV(vs.SCE)とし、Ａ-1-9材はSUS316Lと普通鋼を併用する場合を想定して-770mV(vs.SCE)に設定した。試験期間は1991年から1993年の２年間である。試験材の形状、寸法、すき間付与法などは図3.2.3(a)に示すように第１回電気防食試験と同様とした。

（３）ステンレス鋼管材の人工すき間付与部に対する電気防食

（第３回電気防食試験、Ｄ系SUS304鋼）

SUS316L鋼材のすき間腐食防止に関しては、第１回電気防食試験により試験材とアルミニウム合金陽極との短絡条件下で定性的ではあるがその有効性を確認し、第２回電気防食試験により、-500mV(vs.SCE)と-770mV(vs.SCE)の設定電位条件下で電気防食が有効なことを確認した。第３回電気防食試験では、SUS316L鋼材よりも安価ではあるが耐すき間腐食性が劣るSUS304鋼材について、電気防食によるすき間腐食防止効果の確認を目的に、第２回電気防食試験と同じ条件での試験を実施した。試験材には、JIS G3459のSUS304、165.2mm$^{\phi}$×3,500mm^{l}×7.85mm^{t}継目無鋼管３本を用いた。試験材Ｄ-6は比較用の非電気防食材とし、Ｄ-7およびＤ-8は電気防食中の施設本体と可変抵抗を介して接続し、それぞれ-500mV(vs.SCE)、-770mV(vs.SCE)に設定した。設定電位の根拠は第２回電気防食試験と同じである。なお、人工すき間は図3.2.3(b)に示すように飛沫帯、干満帯、海中部の各１ヵ所に付与した。試験は1993年から２年間行った。

（４）ステンレス鋼管材の人工すき間付与部に対する電気防食

（第４回電気防食試験、Ｄ系SUS304鋼）

第３回電気防食試験では、電位測定箱内への浸水が原因と思われる導通不良により設定電位が適切に維持できず、電気防食効果が検証できなかったので、新たな試験材を用意し第３回電気防食試験と同じ方法で再試験を行った。試験材Ｄ-7-2を-500mV(vs. SCE)に、Ｄ-8-2を-770mV(vs. SCE)に設定した。ただし比較材としての非電気防食材は設置せず、人工すき間は図3. 2. 3(C)に示すように第１回、第２回電気防食試験と同じ干満帯２ヵ所、海中部１ヵ所とした。試験は1996年から２年間行った。

（５）耐食性防汚材料としての9-1キュプロニッケル材の暴露（Ａ系）

9-1キュプロニッケルの耐食性と防汚性の確認を目的として、試験材Ａ-14を第１次試験材と同じ高さ位置に設置した。試験材はキュプロニッケル被覆厚２mm^{t}のクラッド鋼で、素管は165. 2$^{\phi}$×3, 162^{l}×９mm^{t}の管状である。

（６）チタンクラッド鋼材への一部塗装および電気防食（Ｃ系）

チタンクラッド鋼と普通鋼の組み合わせ部材に部分塗装を施した系の、飛沫帯、干満帯および海中部における超長期耐久性を確認する目的で、チタンクラッド鋼の角管の上下部に部分塗装し、さらに海中部のタールエポキシ塗装部（300μm）にアルミニウム合金陽極を取付け、第１次試験材と同じ高さ位置に設置した。

この試験材Ｃ-1は肉厚５mm、150mm×150mm×3, 162mm^{l}の角形鋼管の外面に厚さ５mm（Ti １mm＋鋼材４mm）、長さ2, 412mmのチタンクラッド鋼板を板巻き溶接したもので、さらに角形鋼管の外側の４面に対して図3. 2. 4に示すように中央部の2, 342mmを残してレベルを変えて上下を塗装し、40mm×100mm×200mm、質量2. 26kgのアルミニウム合金陽極４個を各面の海中部に１個ずつ取付けた。塗装は飛沫帯上部に対しては無機ジンクリッチペイント（75μm）＋エポキシ樹脂（120μm）＋ふっ素樹脂（55μm）塗装とし、海中部は無機ジンクリッチペイント（25μm）＋タールエポキシ樹脂（300μm）塗装とした。干満帯に相当する中央部はチタンクラッドのチタン表面をそのまま暴露した。1991年から暴露し2003年にいったん引き上げ調査を行い、継続して暴露している。

（７）高耐食性ステンレス鋼新規材の暴露（Ｄ系）

第２次試験材として３種類の高耐食性ステンレス鋼を新たに暴露した。

試験材Ｄ-3は100mm×150mm×3, 800mm^{l}×３mm^{t}のＬ形材である。人工すき間は、試験材の両面をＬ形の同材質、同厚さで、150mm×200mmと170mm×220mm、長さ200mmの２枚のステンレス鋼板でゴム板（100mm×150mm×200mm^{l}、厚さ３mm^{t}）を挟み込むことで付与した。すき間付与レベルは図3. 2. 5(a)に示すように飛沫帯（+2, 010～+1, 810mm）とH. W. L直下（+1, 060～+860mm）の２ヵ所とした。この試験材Ｄ-3は、2003年７月の調査時に流失が確認された。

試験材Ｄ-4は素管がSTPG 370-EG、165. 2mm$^{\phi}$、Sch40、3, 500mm^{l}、厚さ３mmの鋼管で、これに高耐食性ステンレス鋼を厚さ１mmに板巻き溶接で被覆したものである。人工すき間は図3. 2. 5(b)に示すように第１次試験材と同様の方法で、同位置に付与した。

試験材D-5は25.4mm$^{\phi}$×3,130mm^{l}×2.2mm^{t}の高耐食性ステンレス鋼管３本を間隔34.6mmで並べたもので、人工すき間は図3.2.5(c)に示すように平均干潮面（±０mm）および海中部の上下２ヵ所の合計３ヵ所に29$^{\phi}$×0.5^{t}の熱収縮性のテフロンチューブを温水で加熱収縮させて付与した。

（８）耐食性金属を用いた複合防食系の暴露（H系）

１）耐食性金属ライニング＋重防食塗装＋電気防食（H-1材）

H-1材は、飛沫帯から干満帯中央までをチタン被覆、干満帯中央から平均干潮位（L.W.L）間をSUS304鋼被覆、L.W.Lから海中部を普通鋼鋼管にタールエポキシ塗装し電気防食を施した複合防食仕様から成るものである。図3.2.6(a)に示すように、3,500mm^{l}×150mm$^{\phi}$の鋼管の外側に上端部50mm下からすき間を残して2,050mm^{l}×0.4mm^{t}のチタン板を巻き付け、このすき間に1,950mm^{l}×1.2mm$^{\phi}$のチタンワイヤー15本を鋼管の長手方向に沿って、鋼管の円周に均等に配置し、さらにポリウレタンをこのすき間内のチタンワイヤーの周囲に充填した。このチタン板の下方には700mm^{l}×0.5^{t}のSUS304鋼が巻き付けてあり、さらに全長の残り最下部700mm^{l}の鋼管部にはタールエポキシ300μmが塗装してある。このタールエポキシ塗装部には電気防食用のアルミニウム合金陽極（５年寿命）が取付けてある。試験材の詳細は1998年度報告書巻末付録に示した。

試験は、この複合防食仕様の耐食・耐久性を確認するもので1998年から2013年を予定している。

２）チタンクラッド鋼とその溶接部の耐海水性の確認（H-2材）

H-2材は、図3.2.6(b)に示すように3,500mm^{l}×170mm$^{\phi}$の鋼管に二層チタンクラッド薄鋼板（チタン１mm^{t}＋鋼３mm^{t}）を巻き付け、その上に全長にわたり円周方向２ヵ所に3,500mm^{l}×20mm^{w}×２mm^{t}のチタン板を溶接し、上下管端部はチタン薄板で密閉してある。

試験は溶接部の耐食性を確認する目的で2003年にいったん回収調査し、再設置した。

3．2．2 研究テーマ２の試験材料

3．2．2．1 第１次試験材（Ｂ系）

研究テーマ２に関する第１次試験材の種類および詳細調査のための撤去予定を表3.2.6に示す。また表3.2.7に試験材の化学成分を示す。

試験材の形状はいずれも山形（プレス曲げ）で、寸法は耐海水鋼が140mm×140mm×18mm^{t}×3,800mm^{l}（B-1、B-2）または140mm×100mm×20mm^{t}×3,800mm^{l}（B-3）、比較のための普通鋼は140mm×140mm×20mm^{t}×3,800mm^{l}（B-4、B-5）である。裸のまま（ブラストのままB-1、B-4）のほかに、無機ジンクリッチペイント（75μm）＋タールエポキシ樹脂塗料（300μm×２回）の塗装材（B-2、B-3、B-5）を供試した。供試試験材は1984年に当初24本で開始した。なお、研究テーマ２の第１次試験材を記号でＢ系と分類した。

3．2．2．2 第２次試験材（Ｄ系）

表3.2.8には研究テーマ２に関する第２次試験材の内容および暴露の経過と予定を示す。また、表3.2.9には試験材の化学成分を示す。なお、この第２次試験材はＤ系と分類した。試験は耐海水鋼塗装材に対する電気防食で、目的および試験材の内容は次のとおりである。

耐海水鋼にさらに長期寿命を期待する防食法として、塗装に電気防食を付加した試験材を暴露した。塗装と電気防食の併用により、塗膜損傷部や劣化部が生じた後も電気防食により塗装寿命を延引することや、防食電流の軽減や電位分布の改善が期待できる。本試験では、この防食システム全体の長寿命化の可能性を確認することを目的とした。試験材Ｄ-1は200mm^{w}×2,850mm^{l}の板材で、有機ジンクリッチペイント（20μm）＋エポキシ樹脂塗料（300μm）の塗装を施したものを試験施設本体と接続して電気防食を行った。なお、試験材Ｄ-1は2003年７月の調査時に流失が確認された。

また、試験材Ｄ-2は300mm^{w}×3,000mm^{l}×12mm^{t}の板材で、有機ジンクリッチペイント（20μm）＋エポキシ樹脂塗料（300μm）の塗装を施したものに同様の電気防食を行った。

3．2．3 研究テーマ３の試験材料

3．2．3．1 第１次試験材

研究テーマ３は、1980年代以降に開発された防食塗装および防食被覆系の、実海域における有用性を評価することを目的とした。研究テーマ３に関する試験材の防食仕様を表3.2.10(1)～(3)に示す。研究テーマ３の第１次試験材の防食被覆は試験施設本体に直接施工されたが、表に示す防食系のうちNo.10系、No.12系は現場において試験施設本体据付け後に塗装施工し、他はいずれも陸上において施設本体製作時に塗装施工した。

供試した防食仕様は海洋環境用の重防食塗覆装系で、1984年に大別して12系統19種類で開始した。

なお、第１次試験材のNo.12ペトロラタム＋各種保護カバーは、海洋試験施設本体を構成する９本の杭のうち、海上大気部のジャケット接続部に対して、現地で被覆施工されたものである。防食被覆の仕様は、表3.2.10(3)に示すようにペトロラタム＋各種カバーとして５種類およびペトロラタム＋ライニングが１種類の計６種類である。

1989年に実施したカバーを開放しての調査により防食効果を確認後、杭1Ｃを除く他のすべての杭を1Ｃの仕様に統一しFRPカバー厚さを変えて再被覆した。

その後、南東に面した試験材のカバーが台風時の波浪や浮遊物の衝突によると思われる損傷を受けたので、1993年には杭No.1Ａ、2Ａ、3Ａ、3Ｂ、3Ｃの５本に対してFRPの厚さを増したペトロラタム＋FRPカバー系を供試した。その防食仕様はペトロラタムペースト（0.5 kg/m^{2}）＋ペトロラタムテープ（55%重層巻き）＋緩衝材（発泡ポリエチレン、独立発泡10倍、厚さ10mm）＋FRPカバー（厚さ４または５mm）である。いずれも耐久性と防食性を経時調査する予定である。

3. 2. 3. 2 第２次試験材（C、E、F、G、I系）

研究テーマ３における第２次試験材は、1984年の暴露試験開始以後に実施した中間的評価の結果、あるいは各年度の検討によって新しく追加暴露した試験材であり、一部には試験施設本体に被覆施工された防食材も含む。この第２次試験材のうち、防食被覆の防食性と耐久性を調査するものは試験体が管状、板状とも防食材と称し、とくに光沢、色差を測定する小型材は試験片と呼ぶことにした。これは、光沢・色差の測定が、1990年度暴露のＣ系および1993年度暴露のＥ系、Ｆ系の第２次試験材を対象に実施されていたが、各試験材とも上部取付架台からの流れさびの付着により変色し測定不適となったことから、1996年度より別途小型試験片を暴露し測定することに変更したためである。

試験材はこれまで1990年、1993年、1996年、1998年に追加暴露されたが、それらは暴露開始年、試験目的、防食仕様等によってＣ系、Ｅ系、Ｆ系、Ｇ系、Ｉ系の記号およびNo.を付して分類した。

表3.2.11(1)～(2)には第２次試験材の内容を示す。第２次試験材の試験目的および内容は次のとおりである。

（１）超厚膜塗装材（Ｃ系）

1990年代の重防食塗覆装で、超厚膜塗装および着色ポリエチレン樹脂被覆を含み、いずれも長期耐久性の確認を目的とした。

試験材は165.2mm$^{\phi}$×3,500mm^{l}の素管に塗装系としてはポリウレタン（C-2、C-4、C-5、C-6）、ポリエチレン（C-3）、アクリル（C-7）の各樹脂塗装で、C-2～C-7の６本のうち２本（C-2、C-7）は上塗りがふっ素樹脂塗料である。1990年から2003年の暴露を予定したが、このうちC-7材は1998年に回収撤去した。

（２）カラーポリエチレン樹脂被覆材（Ｅ系）

Ｅ系はポリエチレンのカラー化および景観要素（模様の付与など）をふまえた試験材で、耐久性および耐候性の確認を目的とした。

試験材は５本（E-1～E-5）で、形状は165.2mm$^{\phi}$×3,500mm^{l}で3.2mm^{t}が２本、11.1mm^{t}が１本の管状が３本、他の２本は250mm^{w}×12mm^{t}×3,800mm^{l}の板状である。防食仕様はすべてカラーポリエチレン被覆で、４本は単色、１本は模様である。被覆厚さは2,500～3,500μmmである。1993年から2003年の暴露を行った。なお、1995年調査時にE-4材が、1996年調査時にE-5材が、取付部より脱落、流失していたのが確認された。

（３）耐食耐候性塗装材（Ｆ系）

Ｆ系試験材は1990年代に開発された、海洋構造物を対象とする超重防食塗装で、いずれも耐久性の確認を目的とするものであるが、一部（F-5材）には超重防食に耐候性を加味した塗装系を含み、耐候性と耐久性を確認することを目的とした。

試験材は５本（F-1～F-5）で、形状は管状で素管寸法は165.2m$^{\phi}$×3,500mm^{l}である。い

ずれも新規に開発された塗料で、超厚膜エポキシ樹脂塗料、アクリル系樹脂塗料、ポリウレタン樹脂塗料であり、一部は超厚膜エポキシ樹脂塗料にシリコン樹脂、ふっ素樹脂、ポリウレタン樹脂等の高耐候性上塗塗料を塗り分けている。被覆厚さは、2,020～2,620μmmである。このうちF-3材は1998年に回収撤去し、その他は2003年に引き上げ調査した。

（4）補修塗料の耐久性（G系）

いずれも塗装の劣化あるいは損傷後の補修に適用するもので、試験は図3.2.7に示すように、予め各種の損傷形態を想定して帯状の塗り残し（G-1、G-2）または線状のカット（G-4）等の欠陥部を設けてあり、１～２年経過後の適時に補修作業を実施した。補修塗料としては、原塗覆装材の仕様に応じて水中硬化型エポキシ樹脂塗料、ガラスフレーク入りビニルエステル樹脂塗料、アクリル樹脂塗料、無溶剤型エポキシ樹脂塗料、防食シート等を計画した。被覆厚さは約500～5,000μmと多様である。いずれも補修後の塗覆装材の耐久性を確認することを目的としている。1993年の暴露開始後、２年程度の経過で補修を行い、2003年に引き上げ調査した。

試験材は４本（G-1～G-4）であるが管状が１本、他の３本はL形板状である。素管寸法は150mm$^{\phi}$×3,800mm^{l}で、L形板状の寸法は140mm×20mm^{t}×3,800mm^{l}または150mm×19mm^{t}×3,800mm^{l}である。これまで、1996年度にG-1材、G-4材、1997年度にG-2材の補修を行った。また、G-3材は補修を行わずに暴露継続し、1998年に回収撤去した。

（5）新塗装系および新被覆防食法（Ｉ系）

Ｉ系試験材は、塗装系については環境への影響を低減することを狙ったもので、耐候性と耐食性を、またカバー系については低コスト仕様のものについての耐久性確認を目的とした。

試験材は図3.2.8に示すようにいずれも管状で、150mm$^{\phi}$×3,500mm^{l}×11^{t}が１本（Ｉ-1材）、140mm$^{\phi}$×3,800mm^{l}×５^{t}が２本（Ｉ-2-1材、Ｉ-2-2材）で残り２本（Ｉ-3材、Ｉ-4材）が165.2mm$^{\phi}$×3,500mm^{l}×６^{t}である。

防食仕様は、厚膜エポキシ樹脂に無機質上塗塗料を塗装したもの（Ｉ-1材）、エポキシ樹脂塗料＋FRPカバーに電気防食（アルミニウム陽極取付け）を施したもの（Ｉ-2-1材）、特殊ウレタン樹脂塗料＋FRPカバー（Ｉ-2-2材）、無溶剤型エポキシ樹脂塗料にふっ素樹脂塗料を塗装したもの（Ｉ-3材）、水系エポキシ樹脂塗料に水系ウレタン樹脂塗料を塗装したもの（Ｉ-4材）の各１本、計５種類である。なお、Ｉ-2-2材は特殊ウレタン樹脂の中に吸水性高分子を含有している。

海洋環境では従来からコンクリート被覆やペトロラタム系防食被覆が用いられているが、Ｉ-2-2材は従来工法と同様もしくはそれ以上の長期耐久性を発揮し、従来工法よりも廉価であることと環境に優しいことを目的とした。

（6）色差および光沢測定用試験片（C系、E系、F系、Ｉ系）

3.2.3.2で前述したように、第２次試験材のうち塗装系のC系、E系、F系については、

1990年度および1993年度の暴露開始から色差および光沢について各年度ごとに測定したが、試験材取付け用の架台上部からの流れ錆により表面が汚れ、測定に適さなくなったので、1996年度から新しく色差および光沢測定用の小型試験片の暴露を開始した。試験片はC系、F系およびE系であり、このうち、ポリエチレン被覆のE片ではE-1およびE-3片が165.2mm$^{\phi}$×400mm^{l}の巻付け円筒状で、E-2片は100mm×220mmのステンレス板への貼り付けである。

また、1998年度に新規材としてI系を取付けたので、同時にI-1、I-3、I-4材に相当する色差および光沢測定用小型試験片も設置した。

3．3 試験方法

本報告書において、各種試験材に関しての評価試験方法とその結果に関して４章で試験材別に示すが、ここでは研究テーマ別に示す。

3．3．1 研究テーマ１の試験方法

3．3．1．1 試験材供試位置

第１次と第２次試験材は、試験目的に合わせて試験施設本体と絶縁し、飛沫帯から海中部にまたがって取付け暴露した。図3.3.1には1984年の第１次試験材による暴露試験開始当初の平面配置を示す。第２次試験材は、調査により試験材を回収した後に随時暴露・回収した。図3.3.2には、2003年度調査時の配置を示す。

3．3．1．2 調査項目および調査方法

1984年に長期調査計画として、表3.3.1に示す内容のうち始めの10年間を策定した。その後、途中で加えた第２次試験材の追跡調査も考慮して、1993年に10年目以降の10年間（1994～2003年）の長期計画を策定した。調査は単年度あるいは数年ごとに、年度報告にもとづいて見直しや中間的総括を行い、適宜回収や追加あるいは試験材提供社による独自調査などを実施した。2003年度からは一部の試験材の継続と新規試験材の暴露を行うこととし、さらに10年間延長し2013年度まで暴露試験を行う予定である。

表3.3.1における定期一般調査とは、現地での外観観察、測定を主として実施するものであり、定期詳細調査とは、破壊試験を含む詳細調査を実施するものである。

表3.3.2には調査項目と試験方法を示す。定期一般調査では全面を対象とする外観観察の他に、所定の方法で所定の位置を対象に、生物付着量、塗膜厚、交流抵抗、ピンホールの有無等の測定を実施した。観察位置はそれぞれ観察結果表に示した。詳細調査のうち回収材による実験室試験では、その都度調査試験計画を立案して実施した。とくに高耐食性金属材料についてはすき間腐食発生の有無に注目した。なお、定期一般調査においては、経年の変化を評価し大きな変化の予想されない一部の調査項目については省略した。電気防食試験では電位の計測を継続した。

3．3．2 研究テーマ２の試験方法

3．3．2．1 試験材供試位置

研究テーマ２の第１次と第２次試験材については、前述の研究テーマ１の場合と同様に暴露した。図3.3.3に1984年の第１次試験材による暴露試験開始当初の平面配置を示す。第２次試験材は、研究テーマ１の場合と同様に、試験材の回収された後に暴露したが、それらの配置を図3.3.4に示す。

3．3．2．2 調査項目および調査方法

長期的な調査計画は表3.3.3に示すように研究テーマ１の場合と同様で、調査項目や試験方法についても表3.3.4に示すように研究テーマ１の場合とほぼ同様である。したがって定期一般調査および定期詳細調査の時期、方法等の内容もほぼ同様である。

試験方法については、定期一般調査では所定の位置、方法により外観観察、生物付着量、塗膜厚、交流抵抗、ピンホールの有無等の測定を行ったが、とくに大きな変化が予想されない場合、省略した項目もある。詳細調査では、回収材を対象に実験室試験として耐海水鋼の腐食量および最大侵食深さを普通鋼と比較した。

3．3．3 研究テーマ３の試験方法

3．3．3．1 試験材供試位置

研究テーマ３においては、当初試験施設本体に直接塗覆装された防食材を第１次試験材と呼んで調査対象としたが、表3.3.11(1)～(2)に示すように、管材、板材を主として多種類、多数の防食材が第２次試験材として供試された。

図3.3.5に当初施設本体に施工された各種防食仕様（第１次試験材）の配置を示す。図3.3.6には施設本体における各種防食塗覆装の暴露の高さ位置と平面配置を示す。第２次試験材は各テーマの第１次試験材の撤去回収後の空きスペースに順次供試されたが、形状が管状、Ｌ型状、平板状と異なるので全域に散在している。その配置を図3.3.7に示す。

図3.3.8は1996年度に暴露された光沢および色差測定用の小形試験片の形状と暴露配置を示す。

3．3．3．2 調査項目および試験方法

研究テーマ３の塗覆装材に関する長期調査計画は、表3.3.5に示すように基本的には研究テーマ１および２の場合と同様であるが、研究テーマ３の各種試験材ではその試験目的や各年度の調査結果から必要な時点で必要な詳細調査を行った。例えば想定外の現象が生じた場合の原因追求などである。表3.3.6には第１次試験材を対象とする調査項目とその試験方法を示す。定期一般調査では、外観観察を主とするが、これに塗膜の交流抵抗測定や打診を実施し、初期は膜厚、ピンホールの有無、生物付着量も調査した。定期詳細調査では、これらの項目に加えて塗膜付着力、塗膜下素地面調査も実施した。表3.3.7は第２次試験材の調査項目および試験方法を示す。

表 3.1.1　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		隙間付与	テーマ1			テーマ2		2003年度回収後の残存			
								テーマ1		テーマ2	
			1次材[1]	2次材[2]	3次材[3]	1次材	2次材	継続	新規	継続	新規
4.1章　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								
4.2章　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		
4.3章　非鉄金属（キュプロニッケル、モネル、チタン）											
非鉄金属被覆	チタン	○	3					2			
	9-1 キュプロニッケルクラッド	○	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	チタンクラッド+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 3.1.2　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）	回収後の残存 2003年8月後 新規（3次）
4.4章　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		4	3	2	2	2
	ポリエチレン樹脂＋電防				2		2
4.5章　厚膜塗装							
GF入り塗装系	GF入りビニルエステル樹脂	1					
	GF入りポリエステル樹脂	6					
	GF入りエポキシ樹脂	3					
厚膜系	厚膜エポキシ樹脂	3	2	2			
	厚膜ウレタン樹脂	3	3	3		2	
	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			
4.6章　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＋FRPカバー	4					
	エポキシ＋FRPカバー＋電防		1				
	特殊ウレタン＋FRP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

表 3.1.3　試験材の記号別分類

材		研究テーマ 1			研究テーマ 2			研究テーマ 3		
次	開始	系	記号No.	本	系	記号No.	本	系	記号No.	本
第 1 次	1984	A系	A-1～A-13	12	B系	B-1～B-5	6	本体	No.1～12	21
第 2 次	1989	A系	A-1-6 A-1-7	2※1						
	1990							C系	C-2～C-6	5
	1991	A系	A-1-8 A-1-9	2※1						
		A系	A-14	1						
		C系	C-1	1※3						
	1993	D系	D-3～D-5	3	D系	D-1～D-2	2※2			
								E系	E-1～E-3	3
								F系	F-1,F-2, F-4,F-5	4※6
								G系	G-1,G-2,G-4	3※4
								本体	No.12	5
	1996※5							C系	C-2,C-4～C-7	5※5
								E系	E-1～E-3	3※5
								F系	F-1～F-5	7※5
	1998	H系	H-1	1※7				I系	I-1,3,4	6※9
			H-2	1※8					I-2-1,2-2	2※10
第 3 次	2003	N系	N-7～N-19	13				N系	N-1～N-6	6

(注)
1) ※1　SUS 電防
2) ※2　低合金鋼+塗装+電防
3) ※3　チタン+塗装+電防
4) ※4　補修
5) ※5　研究テーマ 3 の 1996 年度暴露はすべて色差・光沢測定専用の小試験片で、そのうち E-1 材および E-3 材が管状で他は板状である
6) ※6　F-5 材が上塗りで 3 種類に分かれる
7) ※7　チタン+ステンレス鋼+塗装+電防
8) ※8　チタンクラッド鋼
9) ※9　6 本のうち 3 本は第 2 次試験材で残り 3 本は色差・光沢測定用小型試験片である
10) ※10 エポキシ+FRP+電防(I-2-1)、ウレタン+FRP(I-2-2)

表 3.1.4 (1)　暴露試験材および試験片一覧

単位：mm

試験材記号 No.	テーマ	次	防食系 防食施工法	防食仕様		防食被覆(mm)	隙間	形状	素管寸法(mm)	暴露・施工 部位	暴露・施工 位置対象	開始	暴露期間(年) '84 0.5	'85 1.5	'86 2.5	'87 3.5	'88 4.5	'89 5.5	'90 6.5	'91 7.5	'92 8.5	'93 9.5	'94 10.5	'95 11.5	'96 12.5	'97 13.5	'98 14.5	'99 15.5	'00 16.5	'01 17.5	'02 18.5	'03 19.5	回収(予定)	備考
A-1-1											3B3A-1	'84	□	—	—	—	—	■															'89	
A-1-2											3B3A-2	'84	□	—	—	—	—	—	—	—	—	■											'93	
A-1-3		1	ステンレス鋼板溶接	SUS316L(17Cr-12Ni-2Mo-L.C.)		3	○	管	165.2φ,3500l,11t	飛・干・海	3B3A-3	'84	○	—	▲◎	—	—	▲◎	—	—	—	●											'93	
A-1-4											3B3A-4	'84	□	—	—	—	—	—	—	—	—	—					■						'98	
A-1-5											3B3A-5	'84	□	—	—	—	—	—	—	—	—	—					—					■	'03	
A-1-6					非電防		○				2B3B-1	'89						○	—	●													'91	
A-1-7		2	ステンレス鋼板溶接	SUS316L (17Cr-12Ni-2Mo-L.C.)	電防	7.1	○	管	165.2φ,3162,7.1t	飛・干・海	2B3B-2	'89						○	—	●													'91	
A-1-8					電防 -500mV		○				2B3B-2	'91								○	—	●											'93	
A-1-9					電防 -770mV		○				2B3B-1	'91								○	—	●											'93	
A-2-1											3B3A-6	'84	□	—	—	—	—	—	—	—	—	■											'93	
A-2-2			ステンレス鋼板溶接	22Cr-26Ni-5Mo-L.C.		3		管	165.2φ,3500l,11t	飛・干・海	3B3A-7	'84	□	—	—	—	—	—	—	—	—	—										■	'03	
A-2-3							○				3B3A-8	'84	○	—	▲◎	—	—	▲◎	—	—	—	●											'93	
A-3-1											3B3A-9	'84	□	—	—	—	—	—	—	—	—	■											'93	
A-3-2			ステンレス鋼板溶接	25Cr-50Ni-6Mo-Cu-Ti-L.C.		3		管	165.2φ,3500,11t	飛・干・海	3B3A-10	'84	□	—	—	—	—	—	—	—	—	—										■	'03	
A-3-3							○				3A2A-1	'84	○	—	▲◎	—	—	▲◎	—	—	—	●											'93	
A-4-1											3A2A-2	'84	□	—	—	—	—	—	—	—	—	■											'93	
A-4-2			ステンレス鋼板溶接	26Cr-4Mo-Ni-L.C.-L.N.		3		管	165.2φ,3500,11t	飛・干・海	3A2A-3	'84	□	—	—	—	—	—	—	—	—	—										■	'03	
A-4-3							○				3A2A-4	'84	○	—	▲◎	—	—	▲◎	—	—	—	●											'93	
A-5	1		ステンレス鋼鋳込み圧延クラッド	SUS316L(17Cr-12Ni-2Mo-L.C.)		3		管	165.2φ,3500,8t	飛・干・海	3A2A-5	'84	□	—	—	▲○	—	▲◎	—	—	—	●											'93	
A-6			溶射＋塗装	Zn-13Al(200μm)+ウォッシュプライマー+ウレタン(4mm)		4		管	165.2φ,3500,11t	飛・干・海	3A2A-6	'84	□	—	—	—	—	—	—	—	—	—										■	'03	
A-7-1			二相ステンレス鋼(素管)	25Cr-7Ni-3Mo-Cu-N-L.C.			○	管	114.3φ,3500l,9.6t	飛・干・海	3A2A-7	'84	□	—	—	▲○	—	▲◎	—	—	—	●											'93	
A-7-2		1									3A2A-8	'84	□	—	—	—	—	—	—	—	—	—										■	'03	
A-8-1			二相ステンレス鋼(素管)	25Cr-6Ni-3Mo-L.C.				管	89.1φ,3500l,12.7t	飛・干・海	3A2A-9	'84	□	—	▲	—	—	—	—	—	—	—										■	'03	
A-8-2							○				3A2A-10	'84	□	—	—	▲○	—	▲◎	—	—	—	●											'93	
A-9-1			二相ステンレス鋼(素管)	22Cr-5Ni-3Mo-L.C.			○	管	139.8φ,3500l,12t	飛・干・海	2A1A-1	'84	□	—	—	▲○	—	▲◎	—	—	—	●											'93	
A-9-2											2A1A-2	'84	□	—	—	—	—	—	—	—	—	—										■	'03	
A-10-1			キュプロニッケル圧延クラッド	9-1キュプロニッケル(88Cu-9Ni-Fe-Mn)		2		管	165.2φ,3500l,12t	飛・干・海	2A1A-3	'84	□	—	—	▲	—	—	—	—	—	—										→	('13)	
A-10-2							○				2A1A-4	'84	□	—	—	▲○	—	▲◎	—	—	—	●											'93	
A-11-1			モネル圧延クラッド	モネル(NCuP,65Ni-31Cu)		3		管	165.2φ,3500l,9t	飛・干・海	2A1A-5	'84	□	—	—	▲	—	—	—	■													'90	
A-11-2							○				2A1A-6	'84	□	—	—	▲○	—	▲◎	—	—	—	●											'93	
A-12			溶融めっき+塗装	溶融Znめっき(130μm)+エポキシプライマー(30μm) +GF入りビニルエステル(500μm×3)		1.66		管	165.2φ,3500,11t		2A1A-7	'84	□	—	—	—	—	—	—	—	—	—										■	'03	
A-13-A			チタン板溶接	純Ti(素管)		3		管	165.2φ,3500l,12t	飛・干・海	2A1A-8	'84	□	—	▲	▲○	—	▲◎	—	—	—	●											'93	
A-13-B				純Ti(素管)+純Ti(片)溶接			○				1A1B-1	'84	○	—	▲	—	—	—	—	—	—	—										→	('13)	
A-13-C				純Ti(素管)+Ti合金(片)溶接			○				1A1B-2	'84	○	—	▲	—	—	—	—	—	—	—										→	('13)	
A-14		2	キュプロニッケルクラッド	9-1キュプロニッケル		2		管	165.2φ,3162l,9t	飛・干・海	2A1A-5	'91								□	—	—										→	('13)	

○：隙間付与設置　　▲：一時撤去観察　　●：隙間付与材の回収

□：非隙間付与設置　　◎：隙間付与材設置　　■：非隙間付与材の回収

表 3.1.4 (2)　暴露試験材および試験片一覧

単位：mm

試験材記号 No.			テーマ	次	防食系 防食施工法	防食仕様	防食被覆 (μm)	隙間	色調	形状	素管寸法(mm)	暴露・施工 部位	暴露・施工 位置対象	開始	'84 0.5	'85 1.5	'86 2.5	'87 3.5	'88 4.5	'89 5.5	'90 6.5	'91 7.5	'92 8.5	'93 9.5	'94 10.5	'95 11.5	'96 12.5	'97 13.5	'98 14.5	'99 15.5	'00 16.5	'01 17.5	'02 18.5	'03 19.5	回収(予定)	備考
B-1-1					低合金鋼(旧称:耐海水鋼(Cu-Cr-P系))	裸材(ブラスト処理)				L形	140×140×18t×3800l	飛・干・海	1A1B-3	'84	□		■																				'86	
B-1-2													1A1B-4	'84	□					■																'89	
B-1-3													1A1B-5	'84	□								■													'93	
B-1-4													1A1B-6	'84	□													■								'98	
B-1-5													1A1B-7	'84	□																				■	'03	
B-1-6													1A1B-8	'84	□						■															'90	
B-2-1					低合金鋼(旧称:耐海水鋼(Cu-Cr-P系)+塗装)	無機ジンクリッチ(75μm)+タールエポキシ(300μm×2)	675			L形	140×140×18t×3800l	飛・干・海	1B2B-1	'84	□					■																	'89	
B-2-2													1B2B-2	'84	□								■													'93	
B-2-3													1B2B-3	'84	□													■								'98	
B-2-4													1B2B-4	'84	□																				■	'03	
B-3-1					低合金鋼(旧称:耐海水鋼(L.C.+Cu+P系))+塗装	無機ジンクリッチ(75μm)+タールエポキシ(300μm×2)	675			L形	140×100×20t×3800l	飛・干・海	1B2B-5	'84	□					■																	'89	
B-3-2			2	1									1B2B-6	'84	□								■													'93	
B-3-3													1B2B-7	'84	□													■								'98	
B-3-4													1B2B-8	'84	□																				■	'03	
B-4-1					普通鋼(SS400)	裸材(ブラスト処理)				L形	140×140×20t×3800l	飛・干・海	2B3B-1	'84	□		■																				'86	
B-4-2													2B3B-2	'84	□					■																'89	
B-4-3													2B3B-3	'84	□								■													'93	
B-4-4													2B3B-4	'84	□													■								'98	
B-4-5													2B3B-5	'84	□																				■	'03	
B-4-6													2B3B-6	'84	□																				■	予備	
B-5-1					普通鋼(SS400)+塗装	無機ジンクリッチ(75μm)+タールエポキシ(300μm×2)	675			L形	140×140×20t×3800l	飛・干・海	2B3B-7	'84	□					■																	'89	
B-5-2													2B3B-8	'84	□								■													'93	
B-5-3													2B3B-9	'84	□													■								'98	
B-5-4													2B3B-10	'84	□																				■	'03	
C-1			1	2	チタン+塗装+電防	Ti(1mm)+IZP(75μm)+エポキシ(60μm×2)+ふっ素(30+25μm)	1250			角管	150×150,3162l,5t	飛・干・海	2B3B-7	'91								□													→	(’13)	
						Ti(1mm)+IZP(75μm)+エポキシ(150μm×2)	1375																											→	(’13)	
C-2		材	3	2	ポリウレタン樹脂塗料+ふっ素樹脂塗料	ポリウレタン(黒)+着色ふっ素(淡青)			淡青	管	165.2φ,3500l	飛・干・海	3B3A-1	'90							□													■	'03	
	-1	片								板	100×220	飛	3A-2A	'96												□							→	(’13)	
C-3		材			ポリエチレン	着色ポリウレタン(淡緑)			淡緑	管	165.2φ,3500l	飛・干・海	1B2B-5	'90							□													■	'03	
C-4		材			ポリウレタン樹脂塗料+アクリルウレタン樹脂塗料	ポリウレタン(黒)+着色アクリルウレタン(濃緑)			濃緑	管	165.2φ,3500l	飛・干・海	1B2B-1	'90							□													■	'03	
	-1	片								板	100×220	飛	3A-2A	'96												□							→	(’13)	
C-5		材			ポリウレタン樹脂塗料	着色ポリウレタン(緑2500μm)	2500		緑	管	165.2φ,3500l	飛・干・海	1A1B-8	'90							□													→	(’13)	
	-1	片								板	100×220	飛	3A-2A	'96												□							→	(’13)	
C-6		材			ポリウレタン樹脂塗料	黒色ポリウレタン(2500μm)	2500		黒	管	165.2φ,3500l	飛・干・海	1A1B-4	'90							□													→	(’13)	
	-1	片								板	100×220	飛	3A-2A	'96												□							→	(’13)	
C-7		材			アクリル樹脂塗料+ふっ素シリコン共重合樹脂塗料	水中硬化型アクリル系(下塗:2000μm 中塗:300μm)+着色ふっ素・シリコン共重合(灰色70μm)	2370		灰	管	165.2φ,3500l	飛・干・海	1A1B-3	'90							□													■	'98	
	-1	片								板	100×220	飛	3A-2A	'96												□							→	(’13)	

○：隙間付与設置　□：非隙間付与設置　▲：一時撤去観察　◎：隙間付与材設置　●：隙間付与材の回収　■：非隙間付与材の回収

表 3.1.4 (3)　暴露試験材および試験片一覧

単位：mm

試験材記号 No.	テーマ	次	防食系 防食施工法	防食仕様		防食被覆 (μm)	隙間	色調	形状	素管寸法(mm)	基礎・施工 部位	基礎・施工 位置対象	開始	暴露期間 (年) '84 0.5	'85 1.5	'86 2.5	'87 3.5	'88 4.5	'89 5.5	'90 6.5	'91 7.5	'92 8.5	'93 9.5	'94 10.5	'95 11.5	'96 12.5	'97 13.5	'98 14.5	'99 15.5	'00 16.5	'01 17.5	'02 18.5	'03 19.5	回収 (予定)	備考
D-1	2	2	低合金鋼(旧称：耐海水鋼)+塗装+電防	OZP(20μm)+エポキシ(300μm)		320			板	200w×28501×　t	飛・干・海	3A2A-7	'93										□											流失	
D-2				OZP(20μm)+エポキシ(300μm)		320			板	300w×30001×12t	飛・干・海	2A1A-1	'93										□										■	'03	
D-3			高耐食性ステンレス	20Cr-18Ni-6Mo		3000	○		L形	100×150×38001×3t	飛・干・海	1B2B-2	'93										○										流失	
D-4				30Cr-2Mo		1000	○		管	165.2φ,Sch40,35001	飛・干・海	3B3A-9	'93										○										●	'03	
D-5				25Cr-7Ni-3.2Mo-0.3N		2200	○		3細管	25.7φ,31301,2.2t	飛・干・海	1B2B-6	'93										○										●	'03	
D-6	1	2	SUS304 (素管)	18Cr-9Ni-L.C.	非電防		○		管	165.2φ,35001,7.85t	飛・干・海	3A2A-5	'93										○					●						'98	
D-7					-500mV		○		管			2A1A-4	'93										○		●								'95	
D-7-2					-500mV		○		管		飛・干・海	2A1A-4	'96													○		●					'98	
D-8					-770mV		○		管		飛・干・海	2A1A-6	'93										○		●								'95	
D-8-2					-770mV		○		管		飛・干・海	2A1A-6	'96													○		●					'98	
E-1		材	ポリエチレン樹脂被覆					グレイッシュイエローグリーン	管	165.2φ,35001,3.2t	飛・干・海	3A2A-4	'93										□										■	'03	
	-1	片							管	165.2φ,4001,	飛	3A-2A	'96													□						◆	'03	
E-2		材		丸ダイ法				グレイッシュイエローグリーン	管	267.4φ,29001,11.1t	飛・干・海	3A2A-1	'93										□										■	'03	
	-1	片							板	100×220	飛	3A-2A	'96													□						→	('13)	
E-3		材		丸ダイ法				グレイッシュイエローグリーン	管	165.2φ,35001,3.2t	飛・干・海	3A2A-2	'93										□										■	'03	
	-1	片							管	165.2φ,4001,	飛	3A-2A	'96													□						◆	'03	
E-4		材						青	板		飛・干・海	3A2A-10	'93										□		流失									
E-5		材		多重ラミネートシート貼り付け方法				石積調	板	250w×38001×12t	飛・干・海	1A1B-5	'93										□		流失									
F-1		材	超厚膜型エポキシ樹脂塗料	OZP(20μm)+エポキシ(1000μm×2)		2020		淡緑	管	165.2φ,35001	飛・干・海	3B3A-2	'93										□										■	'03	
	-1	片							板	100×220	飛	2A-1A	'96													□						→	('13)	
F-2		材	超厚膜型エポキシ樹脂塗料	OZP(20μm)+エポキシ(1250μm×2)		2520		青	管	165.2φ,35001	飛・干・海	3B3A-3	'93										□										→	('13)	
	-1	片							板	100×220	飛	2A-1A	'96													□						→	('13)	
F-3		材	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	管	165.2φ,35001	飛・干・海	3B3A-6	'93										□						■				'98	
	-1	片							板	100×220	飛	2A-1A	'96													□						→	('13)	
F-4		材	ポリウレタン樹脂塗料	プライマー(30μm)+ポリウレタン(2500μm)		2530		黒	管	165.2φ,35001	飛・干・海	3B3A-8	'93										□										→	('13)	
	-1	片							板	100×220	飛	2A-1A	'96													□						→	('13)	
F-5	管	3	2	高耐候性上塗塗料(接海水環境)	各1/3周	OZP(20μm)+エポキシ(1000μm×2)	シリコン用中塗り(30μm)+シリコン上塗り(25μm)	2075		管	165.2φ,35001	飛・干・海	2A-1A-8	'93									□										■	'03	
							ふっ素用中塗り(30μm)+ふっ素上塗り(25μm)	2075																											
							ポリウレタン用中塗り(35μm)+ポリウレタン用上塗り(35μm)	2090																											
F-51	-1S				上塗り別に1本ずつ	OZP(20μm)+エポキシ(1000μm×2)	シリコン用中塗り(30μm)+シリコン上塗り(25μm)	2075	白	板	100×220	飛	2A-1A	'96													□						→	('13)	
F-52	-1F						ふっ素用中塗り(30μm)+ふっ素上塗り(25μm)	2075	白	板	100×220			'96													□						→	('13)	
F-53	-1U						ポリウレタン用中塗り(35μm)+ポリウレタン用上塗り(35μm)	2090	白	板	100×220			'96													□						→	('13)	
G-1		3	2	超厚膜型エポキシ樹脂塗料	OZP(20μm)+エポキシ(1000μm+2)			2020		グレー	L形	140×140×38001×20t	飛・干・海	2B3B-1	'93										□										■	'03	
				水中硬化型エポキシ樹脂塗料	水中硬化型エポキシ樹脂塗料(500μm)			5000		緑																									
G-2				GF入り着色ビニルエステル	変成エポキシ(50μm)+GF入り着色ビニルエステル(350μm×2)			720		青	管	150φ,38001,19t	飛・干・海	2B3B-2	'93										□										→	('13)	
					変成エポキシ(50μm)+GF入り着色ビニルエステル(350μm×2)			720		青																									
G-3				タールエポキシ	タールエポキシ(70μm)+タールエポキシ(70μm)			140		黒	L形	150×150×38001×19t	飛・干・海	2B3B-3	'93										□						■				'98	
				アクリル系樹脂塗料	プライマー(200μm)+アクリル(2500μm)+アクリル(200μm)+アクリル(50μm)			2950		青																									
G-4				超厚膜型エポキシ樹脂塗料	OZP(75μm)+プライマー(30μm)+GF入りエポキシ(600μm×3m)			1605		緑	L形	150×150×38001×19t	飛・干・海	2B3B-8	'93										□										■	'03	
				無溶剤型エポキシ樹脂塗料	無溶剤エポキシ樹脂塗料(400～500μm)			500		緑																									

○：隙間付与設置　　▲：一時撤去観察　　●：隙間付与材の回収　　◆：試験片の回収

□：非隙間付与設置　　◎：隙間付与材設置　　■：非隙間付与材の回収

G系の点線上は当初塗装、下線下は補修塗装

表 3.1.4 (4)　暴露試験材および試験片一覧

単位：mm

試験材 記号 No.			テーマ	次	防食系 防食施工法	防食仕様	防食被覆 (μm)	隙間	色調	形状	素管寸法(mm)	暴露・施工 部位	暴露・施工 位置対象	開始	'84 0.5	'85 1.5	'86 2.5	'87 3.5	'88 4.5	'89 5.5	'90 6.5	'91 7.5	'92 8.5	'93 9.5	'94 10.5	'95 11.5	'96 12.5	'97 13.5	'98 14.5	'99 15.5	'00 16.5	'01 17.5	'02 18.5	'03 19.5	回収 (予定)	備考
H-1			1	2	チタンクラッド鋼・ステンレス鋼・普通鋼 ＋ 塗装	飛沫帯：チタン,0.4mm^t(2100mm^h) 干満帯：SUS304,0.5mm^t(700mm^h) 海中部：タールエポキシ樹脂塗料,300μm(800mm^h) 電気防食：アルミ陽極(200×100×20^t)	400 500 300			管	165.2φ,3500l,11t	飛・干・海	3B3A-4	'98																□	→	→	→	→	→	('13)	
H-2					チタンクラッド鋼	二層チタンクラッド薄鋼板　チタン 1mm SS400 4mm 溶接施工：純チタンカバー溶接	1000			管	165.2φ,3500l,11t	飛・干・海	3A2A-5	'98																□	→	→	→	→	■	'03	
I-1		管	3	2	厚膜エポキシ樹脂塗料 ＋ 無機質上塗塗装	厚膜型有機ジンクリッチプライマー　75μm 厚膜型エポキシ樹脂塗料　300μm 無機質系塗料用中塗塗料　30μm 無機質系上塗塗料　30μm	435		淡青	管	165.2φ,3500l,11t	飛・干・海	3B3A-6	'98																□	→	→	→	→	■	'03	
	-1	片								板	100×220	飛	3A-2A	'98																□	→	→	→	→	→	('13)	
I-2	-1	管			エポキシ樹脂塗料 ＋ FRPカバー ＋ 電気防食	特殊エポキシ樹脂塗料(水中用)200μm FRPカバー　3mm 電気防食：アルミ合金陽極(200×100×40^t)	200 ＋ 3000		青	管	165.2φ,3500l,11t	飛・干・海	2B3B-4	'98																□	→	→	→	→	■	'03	
	-2	管			ウレタン樹脂塗料 ＋ FRPカバー	特殊ウレタン樹脂塗料　2000μm FRPカバー　3mm	2000 ＋ 3000		青	管	165.2φ,3500l,11t	飛・干・海	2B3B-3	'98																□	→	→	→	→	■	'03	
I-3		管			無溶剤型エポキシ樹脂 ＋ ふっ素樹脂塗料	ジンクリッチプライマー　20μm 無溶剤型エポキシ樹脂塗料　1000μm ふっ素系上塗塗装　20μm	1040		淡青	管	165.2φ,3500l,11t	飛・干・海	2A1A-4	'98																□	→	→	→	→	■	'03	
	-1	片								板	100×220	飛	3A-2A	'98																□	→	→	→	→	→	('13)	
I-4		管			水系エポキシ樹脂塗料 ＋ 水系ウレタン樹脂塗料	水系ジンクリッチプライマー　75μm 水系エポキシ中塗り　120μm 水系ウレタン上塗り　80μm	275		白	管	165.2φ,3500l,11t	飛・干・海	2A1A-5	'98																□	→	→	→	→	■	'03	
	-1	片								板	100×220	飛	2A-1A	'98																□	→	→	→	→	→	('13)	

○：隙間付与設置　　▲：一時撤去観察　　●：隙間付与材の回収
□：非隙間付与設置　　◎：隙間付与材設置　　■：非隙間付与材の回収

表 3.1.4 (5)　暴露試験材および試験片一覧

単位：mm

試験材記号 No.	テーマ	次	防食系 防食施工法	防食仕様	防食被覆(mm)	隙間	色調	形状	素管寸法(mm)	暴露・施工 部位	暴露・施工 位置対象	開始	暴露期間(年) '03 0	'04 1	'05 2	'06 3	'07 4	'08 5	'09 6	'10 7	'11 8	'12 9	'13 10		回収(予定)	備考
N-1	3	3	特殊防食樹脂a ＋ FRPカバー	特殊防食樹脂a(ウレタン系) 5mm ＋FRPカバー 2mm	7		青	管	165.2φ,3500l,6t	飛・干・海	2B3B-5	'03	□	→											('13)	
N-2			特殊防食系樹脂b	特殊防食樹脂b(シリコン系) 5mm ＋FRPカバー 2mm	7						2B3B-4	'03	□	→											('13)	
N-3			ポリエチレン被覆 ＋ タールエポキシ	ポリエチレン被覆 2.5mm (特殊表面処理1)	2.5		黒	管	165.2φ,3500l,5t	飛・干・海	3B3A-1	'03	□	→											('13)	
N-4			ポリエチレン被覆 ＋ タールエポキシ ＋ 電気防食	ポリエチレン被覆 2.5mm (特殊表面処理1) 電気防食:アルミニウム合金陽極(150×70×40t)	2.5						3B3A-2	'03	□	→											('13)	
N-5			ポリエチレン被覆 ＋ タールエポキシ	ポリエチレン被覆 2.5mm (特殊表面処理2)	2.5						3B3A-5	'03	□	→											('13)	
N-6			ポリエチレン被覆 ＋ タールエポキシ ＋ 電気防食	ポリエチレン被覆 2.5mm (特殊表面処理2) 電気防食:アルミニウム合金陽極(150×70×40t)	2.5						3B3A-6	'03	□	→											('13)	
N-7	1		超厚膜エポキシ ＋ 高耐食性ステンレスシートライニング ＋ 電気防食	20Cr-18Ni-6Mo-0.7Cu-0.2N 電気防食:アルミニウム合金陽極(200×100×30t)	0.4		黒	管	165.2φ,3500l,11t	飛・干・海	3B3A-7	'03	□	→											('13)	
N-8			ウレタン塗装 ＋ 二相ステンレス鋼被覆 ＋ 電気防食	25Cr-7Ni-3Mo-Cu-W-N 電気防食:施設本体と接続	0.8			管	165.2φ,3500l,4.8t	飛・干・海	3B3A-7	'03	□	→											('13)	
N-9			ウレタン塗装 ＋ 二相ステンレス鋼被覆 ＋ 電気防食	25Cr-7Ni-3Mo-Cu-W-N 電気防食:施設本体と接続	0.8			管	165.2φ,3500l,4.8t		3B3A-7	'03	□	→											('13)	
N-10			ウレタン塗装 ＋ 二相ステンレス鋼被覆 ＋ 電気防食	25Cr-7Ni-3Mo-Cu-W-N	0.8			管	165.2φ,3500l,4.8t		3B3A-7	'03	□	→											('13)	

□： 非隙間付与設置

表 3.1.4 (6)　暴露試験材および試験片一覧

単位：mm

試験材記号 No.	テーマ	次	防食系 防食施工法	防食仕様	防食被覆(mm)	隙間	色調	形状	素管寸法(mm)	暴露・施工 部位	暴露・施工 位置対象	開始	'03 0	'04 1	'05 2	'06 3	'07 4	'08 5	'09 6	'10 7	'11 8	'12 9	'13 10		回収(予定)	備考
N-11	1	3	高耐食性ステンレスライニング ＋ 電気防食	23Cr-25Ni-5.5Mo-0.2N 電気防食：アルミニウム合金陽極(30ℓ×150×150)	1.4	○			165.2φ,3500ℓ,4.6t	飛・干・海	3B3A-5	'03	○	→									→		('13)	
N-12			ポリエチレン被覆 ＋ タールエポキシ	20Cr-18Ni-6Mo-0.8Cu-0.2N 電気防食：アルミニウム合金陽極(30ℓ×150×150)	1.5	○			165.2φ,3500ℓ,4.6t		3B3A-5	'03	○	→									→		('13)	
N-13			高耐食性ステンレス	25Cr-23Ni-4.5Mo-1.5Cu-0.2N	20			L形	100×100×19t×3800ℓ	飛・干・海	2B3B-4	'03	□	→									→		('13)	
N-14			ポリウレタン被覆 ＋ チタン箔被覆 ＋ 電気防食	ポリウレタン被覆(2.7mm)＋接着層(3.5mm)＋Ti(0.4mm) 電気防食：アルミニウム陽極(30ℓ×200×100)	6.6			管	165.2φ,3500ℓ,11t	飛・干・海	3B3A-7	'03	□	→									→		('13)	
N-15			ポリウレタン被覆 ＋ チタン箔	ポリウレタン被覆(2.2mm)＋Ti箔(0.1mm)	2.3				139.8φ,3500ℓ,4.5t	飛・干・海	3B3A-5	'03	□	→									→		('13)	
N-16			ポリウレタン被覆 ＋ チタン箔 ＋ 電気防食	ポリウレタン被覆(2.2m)＋Ti箔(0.1mm) 電気防食：アルミニウム合金陽極(30ℓ×200×100)	2.3			管	139.8φ,3500ℓ,4.5t		3B3A-7	'03	□	→									→		('13)	
N-17			ポリウレタン被覆 ＋ チタン被覆	ポリウレタン被覆(3.8mm)＋接着層(3.8mm)＋Ti(0.4mm)	8.0				165.2φ,3150ℓ,11t	飛・干・海	3B3A-5	'03	□	→									→		('13)	
N-18			チタンクラッド ＋ 電気防食	Ti(1.0mm) 電気防食：アルミニウム合金陽極(-900mV固定)	1.0				165.2φ,3500ℓ,11t	飛・干・海	3B3A-5	'03	□	→									→		('13)	
N-19			有機ジンクリッチ ＋ タールエポキシ ＋ ペトロラタムテープ ＋ チタン薄板カバー	有機ジンクリッチ(100μm) ＋タールエポキシ(640μm) ＋ペトロラタムテープ(4.4mm) ＋Ti(0.6mm)	5.74			管	165.2φ,3150ℓ,11t		3B3A-7	'03	□	→									→		('13)	

□：非隙間付与設置

○：隙間付与設置

表 3.1.4 (7)　暴露試験材および試験片一覧　(研究施設本体)

単位:mm

試験材記号No.	テーマ	次	防食系 防食施工法	防食仕様	防食被覆(mm)	塩間	色調	形状	管寸法(mm)	基盤・施工 部位	基盤・施工 位置対象	開始	'84 0.5	'85 1.5	'86 2.5	'87 3.5	'88 4.5	'89 5.5	'90 6.5	'91 7.5	'92 8.5	'93 9.5	'94 10.5	'95 11.5	'96 12.5	'97 13.5	'98 14.5	'99 15.5	'00 16.5	'01 17.5	'02 18.5	'03 19.5	回収(年)	備考
1			GF入りビニルエステル	ビニルエステル系プライマー(30μm)+GF入りビニルエステル(300μm×3)+ポリウレタン(30μm)						直立材	1C	'84																				→	継続	
2			GF入りポリエステル	有機ジンクリッチ(75μm)+GF入りポリエステル(3塗り、1400μm)						直立材	1B	'84																				→	継続	
										飛・水平材	1A-1B	'84																				→	継続	
										飛・水平材	1B-1C	'84																				→	継続	
3				ポリエステル系プライマー(60μm)+GF入りポリエステル(3塗り、1400μm)						直立材	2B	'84																				→	継続	
										飛・水平材	1B-2B	'84																				→	継続	
										飛・水平材	2B-2C	'84																				→	継続	
4			GF入りエポキシ	GF入りエポキシ(3回塗り、2000μm)						直立材	2C	'84																				→	継続	
5				無機ジンクリッチ(75μm)+エポキシ系プライマー(30μm)+GF入りエポキシ(500μm×3)						直立材	1A	'84																				→	継続	
										飛・水平材	1A-2A	'84																				→	継続	
6			厚膜エポキシ	有機ジンクリッチ(15μm)+エポキシ(2000μm)						直立材	3A	'84																				→	継続	
										飛・水平材	2A-3A	'84																				→	継続	
										飛・水平材	1C-2C	'84																				→	継続	
7			厚膜ウレタン	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)						直立材	3B	'84																				→	継続	
										飛・水平材	2B-3B	'84																				→	継続	
										飛・水平材	3A-3B	'84																				→	継続	
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(2000μm)+ポリウレタン(50μm)						直立材	2A	'84																				→	継続	
										飛～海・斜材	2A↘1A	'84																				→	継続	
		-2		エポキシ系プライマー(25μm)+エポキシ系レジンモルタル(2000μm)+アクリル(50μm)						飛～海・斜材	2B↘2A	'84																				→	継続	
										飛～海・斜材	2B↘1B	'84																				→	継続	
										飛～海・斜材	2C↘2B	'84																				→	継続	
										飛～海・斜材	2C↘3C	'84																				→	継続	
9		-1	ペトロラタム+FRPカバー	ペトロラタムペースト(2.5kg/m²)+ポリウレタン発泡体(緩衝材5mm)+FRPカバー(3mm)						飛～海・斜材	1C↘2C	'84																				→	継続	
		-2	エポキシ+塗料	無機ジンクリッチ(50μm)+エポキシ(500μm×2)+有機金属系防汚塗料(100μm)						飛～海・斜材	1A↘1B	'84																				→	継続	
		-3	エポキシ+テープ	無機ジンクリッチ(50μm)+エポキシ(500μm×2)+アクリル系ゲル防汚テープ(3mm)						飛～海・斜材	1B↘1C	'84																				→	継続	
10		-1	ゴム系粘着材+カバー	ブチルゴム系粘着材(1.2mm)+NR系膨潤ゴム(3mm)+FRPカバー(4mm)						直立材	3C 下1/2	'84																				→	継続	
		-2								飛・水平材	2A-2B	'84																				→	継続	
										飛・水平材	2C-3C	'84																				→	継続	
										飛・水平材	3B-3C	'84																				→	継続	
										直立材	3C 上1/2	'84																				→	継続	
										飛～海・斜材	3C↘3B	'84																				→	継続	
										飛～海・斜材	3B↘2B	'84																				→	継続	
										飛～海・斜材	3B↘3A	'84																				→	継続	
										飛～海・斜材	3A↘2A	'84																				→	継続	
11			ペトロラタム+カバー	ペトロラタムペースト(0.3kg/m²)+ペトロラタムテープ(1mm)+FRPカバー(光硬化型3mm)+ポリウレタン(0.2kg/m²)						直立材 大・飛接続部	1A	'84																					'89	
											1C	'84																				→	継続	
12	-1		ペトロラタム+各種カバー	ペトロラタムペースト(0.5kg/m²)+ペトロラタムテープ(55%ラップ)+発泡(10mm)+FRPカバー(2mm)							2A	'84																					'89	
	-2	-1		ペトロラタムペースト(0.5kg/m²)+ペトロラタムテープ(55%ラップ)+発泡(10mm)+FRPPカバー(2mm)							2C	'84																					'89	
		-2		ペトロラタムペースト(0.5kg/m²)+シート(2mm)+発泡(10mm)+FRPPカバー(2mm)							1B	'84																					'89	
	-3	-1		ペトロラタムペースト(0.5kg/m²)+ペトロラタムテープ(55%ラップ)+発泡(10mm)+PEカバー(3mm)							2B	'84																					'89	
		-2		ペトロラタムペースト(0.5kg/m²)+ペトロラタムテープ(2mm)+発泡(10mm)+PEカバー(3mm)							3B	'84																					'89	
	-4			ペトロラタムペースト(0.5kg/m²)+ペトロラタムテープ(55%ラップ)+FRPライニング(2mm)							3A	'84																					'89	
											3C	'84																					'89	
12	-1		ペトロラタム+FRPカバー*(* 補修)	ペトロラタムペースト(0.5kg/m²)+ペトロラタムテープ(55%ラップ)+発泡PE(10mm)+FRPカバー(2mm)						直立材 大・飛接続部	1A	'89																					'93	
											2A	'89																					'93	
											3A	'89																					'93	
											1B	'89																				→	継続	
											2B	'89																				→	継続	
											3B	'89																					'93	
											2C	'89																				→	継続	
											3C	'89																					'93	
12	-1		ペトロラタム+FRPカバー*(* 補修)	ペトロラタムペースト(0.5kg/m²)+ペトロラタムテープ(55%ラップ)+発泡PE(10mm)+FRPカバー(4.5mm)	FRPカバー(mm) 4					直立材 大・飛接続部	1A	'93																						→	継続	
					4						2A	'93																						→	継続	
					5						3A	'93																						→	継続	
					5						3B	'93																						→	継続	
					4						3C	'93																						→	継続	

表 3.2.1　金属被覆系試験材の内容と撤去予定

研究テーマ1　第1次試験材

テーマ	次材	系	記号No.	防食系	防食仕様	形状	素材サイズ (mm)	塗装、被覆厚 (mm)	撤去の経過および予定 (年 / 経過年数) '89 5.5	'90 6.5	'93 9.5	'98 14.5	'03 19.5	当初本数	回収 '03年7月調査時 本数	回収 '03年7月調査時 No.	'03年調査後の残存 '13 29.5
1	1	A	A-1-1～5	ステンレス鋼板溶接	SUS316L	管	165.2φ×3500^{l}×11^{t}	3	○		○△	○	○	5	1	A-1-5	
			A-2-1～3	ステンレス鋼板溶接	22Cr-26Ni-5Mo-Ti-L.C.	管		3			○△		○	3	1	A-2-2	
			A-3-1～3	ステンレス鋼板溶接	25Cr-50Ni-6Mo-Cu-Ti-L.C.	管		3			○△		○	3	1	A-3-2	
			A-4-1～3	ステンレス鋼板溶接	26Cr-4Mo-Ni-L.C.-L.N.	管		3			○△		○	3	1	A-4-2	
			A-5	ステンレス鋼 鋳込み圧延ｸﾗｯﾄﾞ	SUS316L(鋳込み圧延ｸﾗｯﾄﾞ)	管	165.2φ×3500^{l}×8^{t}	3			□			1			
			A-6	溶射+塗装	Zn-13Al(200μm) +ｳｫｯｼｭﾌﾟﾗｲﾏｰ +ｳﾚﾀﾝ(4000μm)	管	165.2φ×3500^{l}×11^{t}	4					○	1	1	A-6	
			A-7-1～2	二相ステンレス鋼(素管)	25Cr-7Ni-3Mo-Cu-N-L.C.	管	114.3φ×3500^{l}×9.6^{t}				□		○	2	1	A-7-2	
			A-8-1～2	二相ステンレス鋼(素管)	25Cr-6Ni-3Mo-L.C.	管	89.1φ×3500^{l}×12.7^{t}				□		○	2	1	A-8-1	
			A-9－1～2	二相ステンレス鋼(素管)	22Cr-5Ni-3Mo-L.C.	管	139.8φ×3500^{l}×12^{t}				□		○	2	1	A-9-2	
			A-10-1～2	ｷｭﾌﾟﾛﾆｯｹﾙ圧延ｸﾗｯﾄﾞ	9-1ｷｭﾌﾟﾛﾆｯｹﾙ	管	165.2φ×3500^{l}×12^{t}	2			□			2	1		A-10-1
			A-11-1～2	ﾓﾈﾙ圧延ｸﾗｯﾄﾞ	ﾓﾈﾙ	管	165.2φ×3500^{l}×9^{t}	3		○	○			2			
			A-12	溶融めっき+塗装	溶融Znめっき(130μm) +ｴﾎﾟｷｼﾌﾟﾗｲﾏｰ(30μm) +GF入りﾋﾞﾆﾙｴｽﾃﾙ(500μm×3回)	管	165.2φ×3500^{l}×11^{t}	1.66					○	1	1	A-12	
			A-13-A	チタン板溶接	A.純ﾁﾀﾝ(素管)	管	165.2φ×3500^{l}×11^{t}	3			□			3	2		
			A-13-B		B.純ﾁﾀﾝ(素管)+純ﾁﾀﾝ(片)	管											A-13-B
			A-13-C		C.純ﾁﾀﾝ(素管)＋ﾁﾀﾝ合金(片)	管											A-13-C
													計	30	12		

(注)　○：人工隙間なし
△：1984年隙間付与試験材(ﾎﾟﾘｴﾁﾚﾝ収縮ﾁｭｰﾌﾞ)
□：1987年隙間付与試験材(ﾎﾟﾘｴﾁﾚﾝ収縮ﾁｭｰﾌﾞ)

表 3.2.2　金属被覆系試験材の化学成分

研究テーマ1　第1次試験材

（%）

テーマ	次材	系	記号 No.	防食系	防食仕様	被覆厚 (mm)	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	Cu	その他	
1	1	A	A-1	ステンレス鋼板溶接	SUS316L (17Cr-12Ni-2Mo-L.C.)	3	0.014	0.69	1.17	0.030	0.001	17.05	12.42	2.09	-		
			A-2	ステンレス鋼板溶接	22Cr-26Ni-5Mo-Ti-L.C.	3	0.04	0.88	1.20	0.021	0.005	21.46	25.30	5.19	-	Ti(0.40)	
						3	0.04	0.70	1.17	0.033	0.003	21.41	25.97	4.70	-	Ti(0.41)	
			A-3	ステンレス鋼板溶接	25Cr-5Ni-6Mo-Cu-Ti-L.C.	3	0.012	0.47	0.64	0.012	0.009	24.37	49.08	5.74	0.99	Ti(1.25)	
			A-4	ステンレス鋼板溶接	26Cr-4Mo-Ni-L.C.-L.N.	3	0.0031	0.09	0.09	0.004	0.002	25.5	0.26	3.97	0.01	Al(0.13),Nb(0.15),N(0.0057)	
			A-5	ステンレス鋼 鋳込み圧延クラッド	SUS316L (17Cr-12Ni-2Mo-L.C.)	3	0.019	0.43	1.65	0.023	0.002	17.35	12.10	2.065	-		
			A-7	二相ステンレス鋼(素管)	25Cr-7Ni-3Mo-Cu-N-L.C.	10*	0.018	0.43	0.91	0.029	0.003	24.85	7.00	3.16	-	N(0.138)	A-7-1
							0.019	0.35	0.87	0.030	0.003	24.90	7.15	3.20	-	N(0.139)	A-7-2
			A-8	二相ステンレス鋼(素管)	25Cr-6Ni-3Mo-L.C.	9.6*	0.012	0.49	1.04	0.015	0.001	25.0	7.09	3.04	-	N(0.11)	
			A-9	二相ステンレス鋼(素管)	22Cr-5Ni-3Mo-L.C.	12.7*	0.017	0.43	1.83	0.023	0.001	21.24	5.39	2.86	0.04		
			A-10	キュプロニッケル圧延クラット	9-1キュプロニッケル (88Cu-9Ni-Fe-Mn)	2	-	-	0.74	-	-	-	9.36	-	88.53	Cu+Ni+Fe+Mn(99.98)	
			A-11	モネル圧延クラッド	モネル(NCuP,65Ni-31Cu)	3	0.10	0.30	0.94	-	0.003	-	64.95	-	31.36	Ti(0.01),Nb(0.01),Fe(2.31)	
			A-13-A	チタン板溶接	純チタン JIS2種TP35C	3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	H(0.004),O(0.12)**	
			A-13-B		純チタン＋純チタン片 (溶接)											Fe(0.04),N(0.01)	
			A-13-C		純チタン＋チタン合金片 (溶接)											残部Ti	

（注）　1）＊は素管肉厚

2）＊＊は純チタン(管)の化学成分

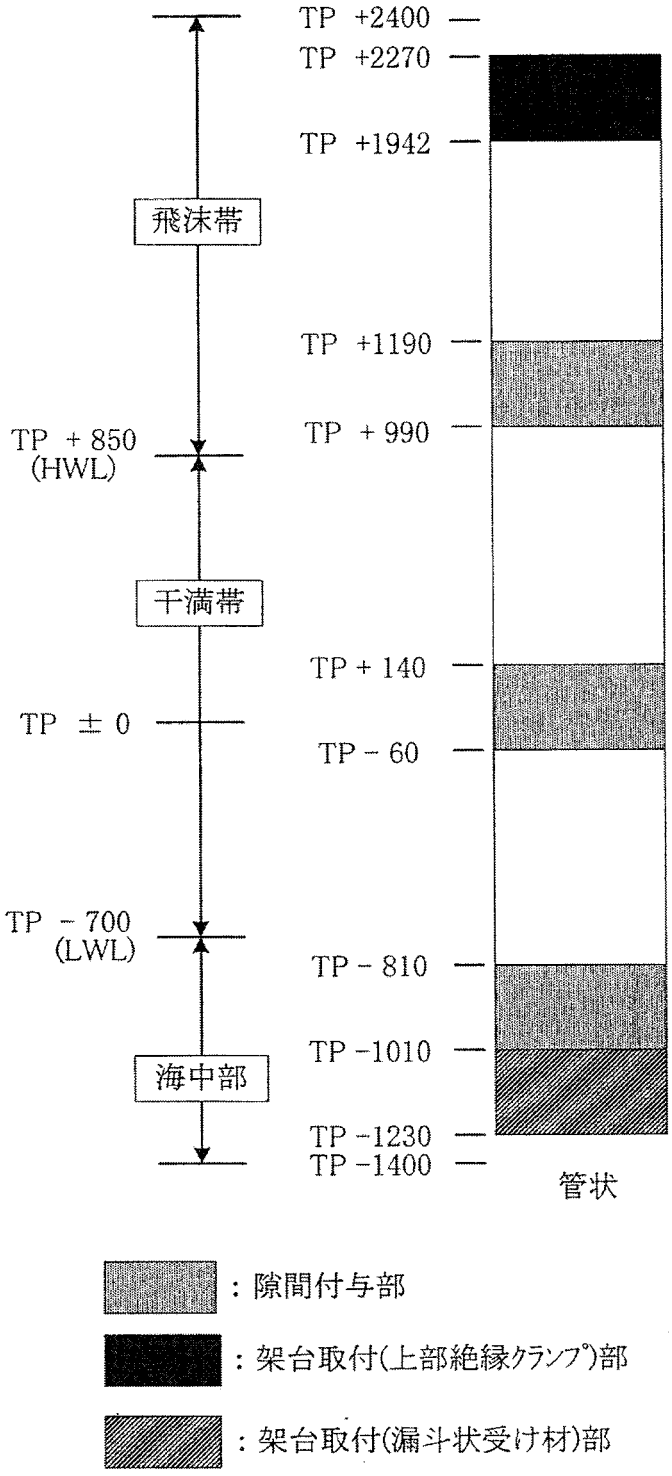
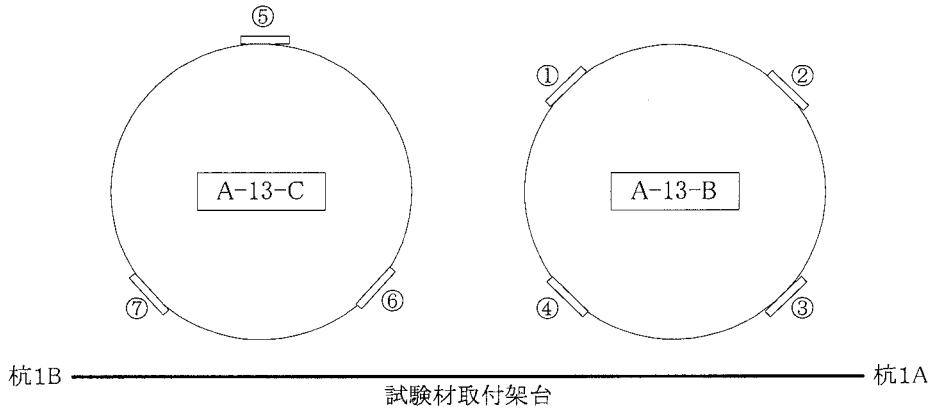


図 3.2.1　試験材の隙間付与位置

研究テーマ 1、第 1 次試験材



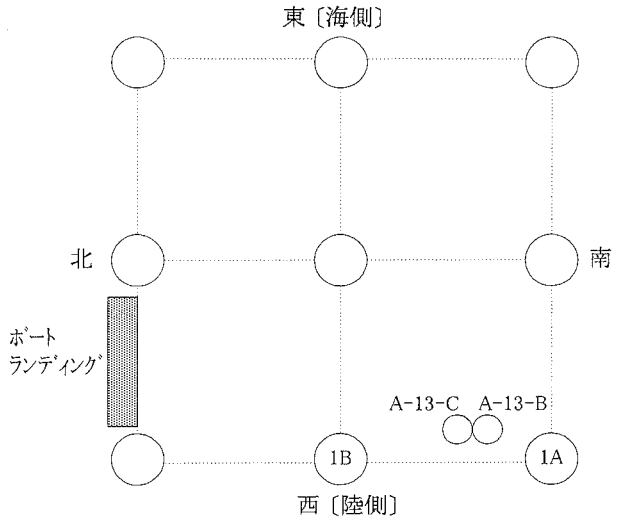


図 3.2.2　試験材 No.13-B、C に取付けられた隙間付与材の位置
研究テーマ1　第 1 次試験材

表 3.2.3　試験材 No.13-B、C に取付けられた隙間付与材の材質および化学成分
研究テーマ1　第 1 次試験材

〔%〕

試験材	隙間付与材			C	Fe	N	O	H	Al	V	Ni	Mo	Ti
(管)	No.	記号	材質（仕様、規格）										
A-13-B	①	TP35C	純チタン JIS2 種	—	0.061	0.0039	0.079	0.0019	—	—	—	—	Rem
	②	TP49C	純チタン JIS3 種	—	0.135	0.0038	0.151	< 0.0010	—	—	—	—	Rem
	③	Gr4	純チタン ASTM 0265	< 0.005	0.172	0.0037	0.283	0.0033	—	—	—	—	Rem
	④	TP28C	純チタン JIS1 種	—	0.043	0.0031	0.040	0.0016	—	—	—	—	Rem
A-13-C	⑤		チタン合金 (Ti-3Al-2.5V)	0.009	0.213	0.0024	0.042	0.0024	2.90	2.68	—	—	Rem
	⑥	Gr12	チタン合金 ASTM B265(Ti-0.3Mo-0.8Ni)	0.005	0.048	0.0019	0.125	0.0018	—	—	0.87	0.28	Rem
	⑦	Gr5	チタン合金 ASTM B265(Ti-6Al-4V)	0.011	0.228	0.0029	0.140	0.0071	6.59	4.42	—	—	Rem

試験片寸法 ： $20^{w} \times 2^{t} \times 2900^{l}$ mm
試験材 ： 管状、純チタン巻き、TP35C ： JIS H4600

表 3.2.4　金属被覆系試験材の内容と暴露経過および予定

研究テーマ1　第2次試験材

テーマ	次材	系	記号 No.	防食系		防食仕様	形状	素管サイズ および防食仕様	隙間付与	暴露経過および予定
1	2	A	A-1-6	SUS316L	非電防		管	165.2φ×3162^{l}×7.1^{t}	○	SUS316L
			A-1-7		電防	施設本体に接続			○	電防 1回
			A-1-8	SUS316L	電防	-500mV	管	165.2φ×3162^{l}×7.1^{t}	○	SUS316L
			A-1-9		電防	-770mV			○	電防 2回
			A-14	キュプロニッケルクラッド		9-1キュプロニッケル	管	被覆 2^{t} 165.2φ×3162^{l}×9^{t}		
		C	C-1	チタンクラッド		純Tiクラッド+塗装[1)]+電防	角管	被覆Ti 1^{t}、部分塗装 150×150×3162^{l}×5^{t}		
		D	D-3	高耐食性ステンレス鋼		20Cr-18Ni-6Mo	L形	100×150×3800^{l}×3^{t}	○	*2
			D-4			30Cr-2Mo	管	165.2φ×Sch40×3500^{l} 被覆 1t	○	
			D-5			25Cr-7Ni-3.2Mo-0.3N	3管	25.7φ×3130^{l}×2.2^{t}	○	
			D-6	SUS304	非電防		管	165.2φ×3500^{l}×7.85^{t}	○	*1
			D-7		電防	-500mV	管		○	SUS304
			D-8		電防	-770mV	管		○	電防 3回
			D-7-2	SUS304	電防	-500mV	管	165.2φ×3162^{l}×7.85^{t}	○	SUS304
			D-8-2		電防	-770mV	管		○	電防 4回
		H	H-1	チタン+ステンレス ＋塗装+電防		飛沫帯 純チタン, 0.4mmt 干満帯 SUS304鋼, 0.5mmt 海中部 タールエポキシ,300μm アルミ陽極	管	150φ×3500^{l}×5^{t} チタン, 0.4mm^{t}被覆 SUS304, 0.5mmt被覆 タールエポキシ, 300μm 電気防食		
			H-2	チタンクラッド鋼		二層チタンクラッド 純チタン,1mmt SS400,3mmt	管	170φ×3500^{l}×3^{t} チタン, 1mm^{t}被覆		

暴露経過および予定: '89 '90 '91 '92 '93 '94 '95 '96 '97 '98 '99 '00 '01 '02 '03 '13

1) 上部(鋼)塗装 ： 無機ジンクリッチ(75μm)+エポキシ(ミストコート)
上部(鋼+チタンクラッド)塗装 ： エポキシ(60μm×2)+ふっ素(30+25μm)
下部(鋼+チタンクラッド) ： タールエポキシ(150μm×2)
下部(鋼)塗装 ： 無機ジンクリッチ(75μm)+エポキシ(ミストコート)

*1 一時引き上げ 隙間腐食測定後再設置

*2 2003年7月 流失確認

表 3.2.5　金属被覆系試験材の化学成分

研究テーマ1　第2次試験材

(%)

テーマ	次材	系	記号No.	防食系		防食仕様	形状	隙間付与	C	Si	Mn	P	S	Cu	Cr	Ni	Mo	その他	備考
1	2	A	A-1-6	SUS316L	非電防		管	○	0.024	0.35	1.25	0.033	0.001	—	16.35	12.00	2.21	Fe(1.35)	
			A-1-7		電防	施設本体に接続		○											
			A-1-8	SUS316L	電防	-500mV	管	○	0.024	0.35	1.25	0.033	0.001	—	16.35	12.00	2.21	Fe(1.35)	
			A-1-9		電防	-770mV		○											
			A-14	キュプロニッケルクラッド		9-1キュプロニッケル	管		—	—	0.46	—	—	Rem	—	9.47	—	Cu+Ni+Fe+Mn(99.90) Pb(0.01)Zn(0.04)Fe(1.01)	
		C	C-1	チタンクラッド		純Tiクラッド+塗装[1)]+電防	角管												
		D	D-3	高耐食性ステンレス鋼		20Cr-18Ni-6Mo	L形	○	≦0.02	≦0.80	≦1.00	≦0.03	≦0.015	0.50～1.00	19.0～21.0	17.0～19.5	5.5～6.5	N(0.16～0.24)	
			D-4			30Cr-2Mo	管	○	0.003	0.13	0.11	0.018	0.004		29.58	0.14	2.15		
			D-5			25Cr-7Ni-3.2Mo-0.3N	3管	○	0.012	0.43	0.54	0.018	0.0004	0.05	25.30	6.75	3.28	N(0.275)	
			D-6	SUS304	非電防		管	○	0.01	0.46	1.60	0.29	0.01	—	18.35	9.67	—	SUS304継目無鋼管 JIS G3459	
			D-7		電防	-500mV	管	○											
			D-8		電防	-770mV	管	○											
			D-7-2	SUS304	電防	-500mV	管	○	0.04	0.48	0.84	0.25	0.05	—	18.22	8.60	—		
			D-8-2		電防	-770mV	管	○											
		H	H-1	チタン+ステンレス ＋塗装+電防		飛沫帯　純チタン, 0.4mmt 干満帯　SUS304鋼, 0.5mmt 海中部　タールエポキシ,300μm アルミ陽極	管		0.01	—	—	—	—	—	—	—	—	H(0.001)、O(0.10) N(0.01)、Fe(0.04) Ti(BAL)	チタン部
									0.05	0.61	0.99	0.027	0.004	—	18.28	8.56	—		SUS304鋼部
			H-2	チタンクラッド鋼		二層チタンクラッド　純チタン,1mmt SS400,3mmt	管												

1)　上部(鋼)塗装 ： 無機ジンクリッチ(75μm)+エポキシ(ミストコート)
上部(鋼+チタンクラッド)塗装 ： エポキシ(60μm×2)+ふっ素(30+25μm)
下部(鋼+チタンクラッド) ： タールエポキシ(150μm×2)
下部(鋼)塗装 ： 無機ジンクリッチ(75μm)+エポキシ(ミストコート)

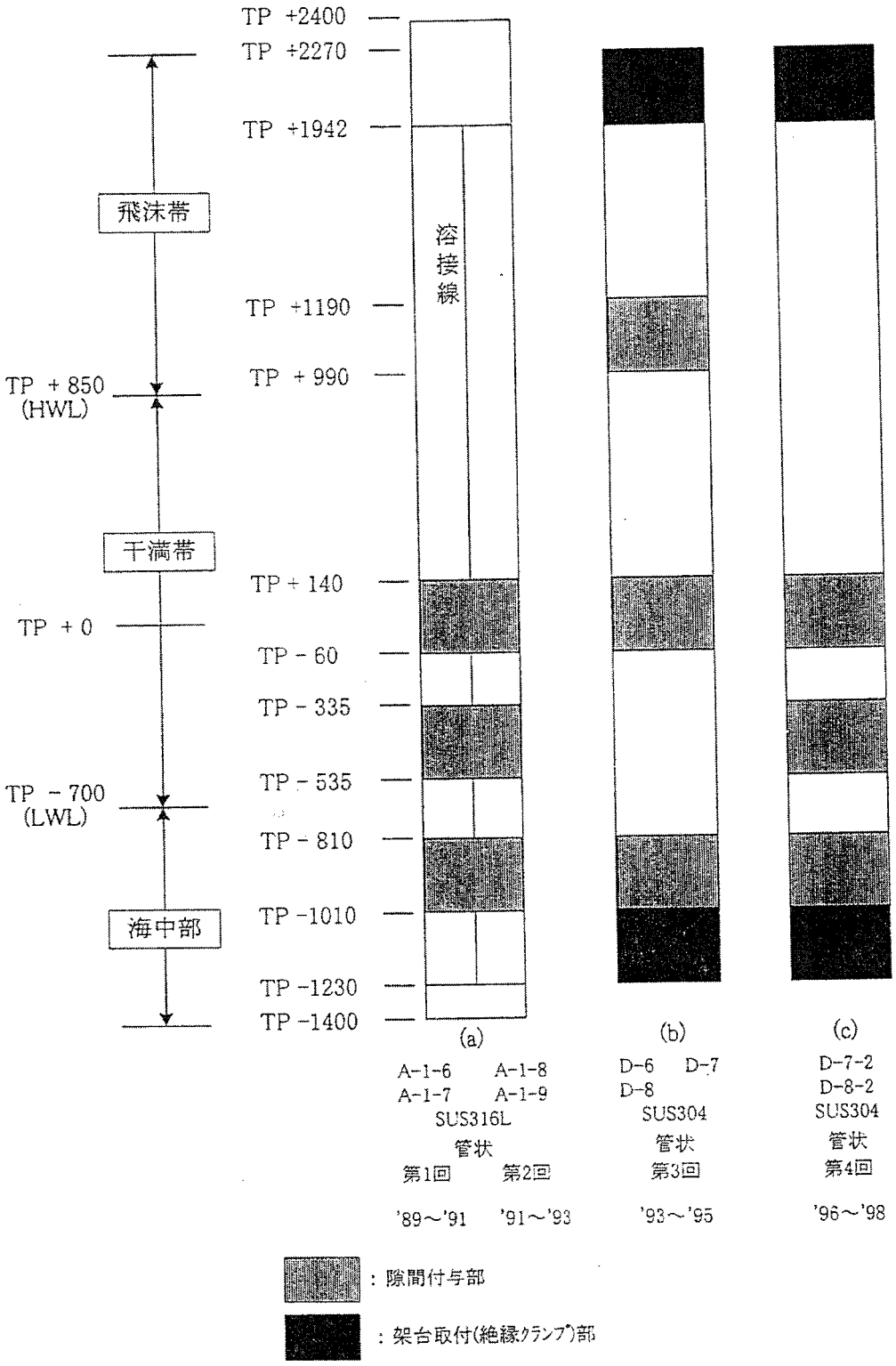


図 3.2.3　ステンレス鋼の電気防食試験における隙間付与位置
研究テーマ 1、第 2 次試験材

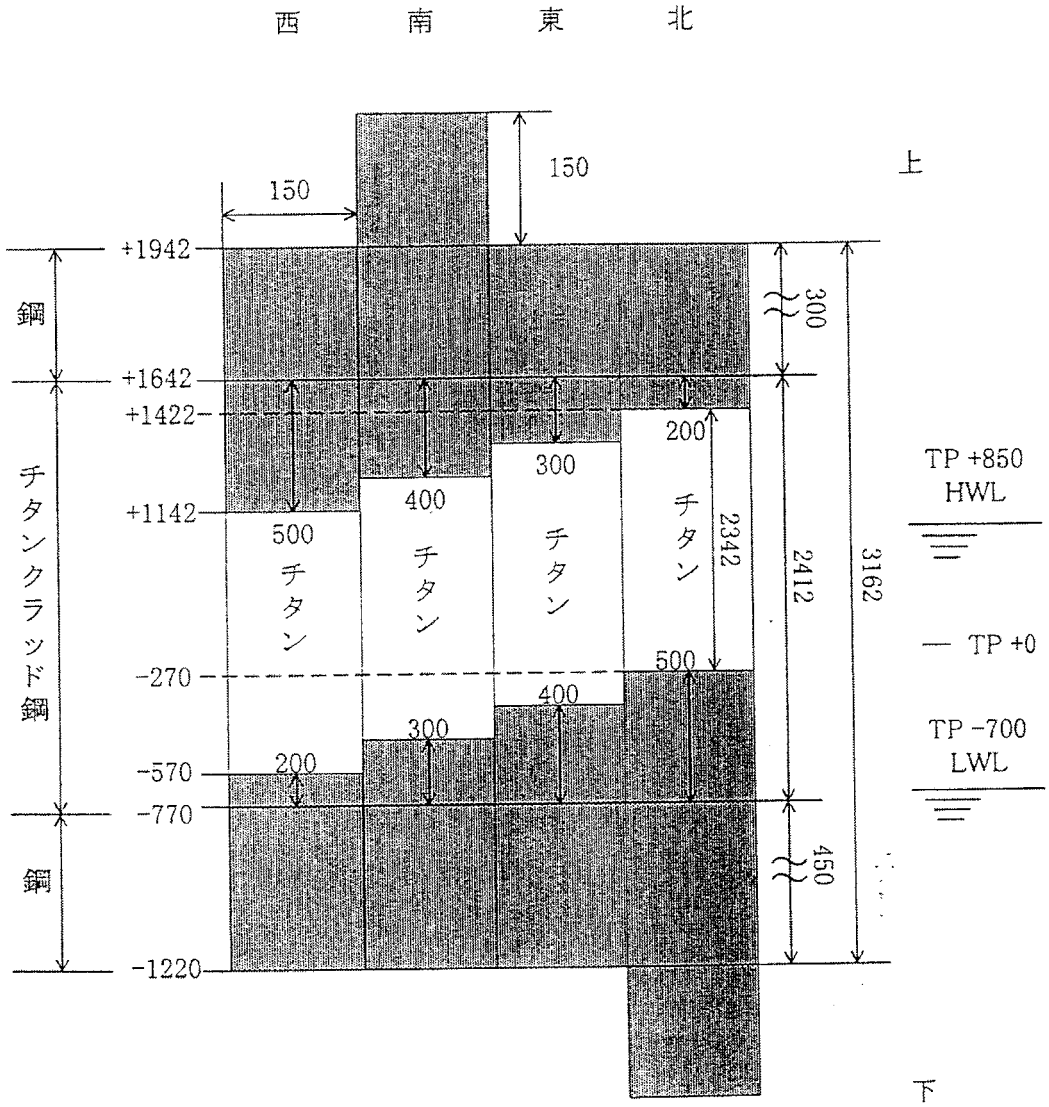


図 3.2.4　チタンクラッド(C-1)の塗装範囲(展開図)
研究テーマ 1、第 2 次試験材

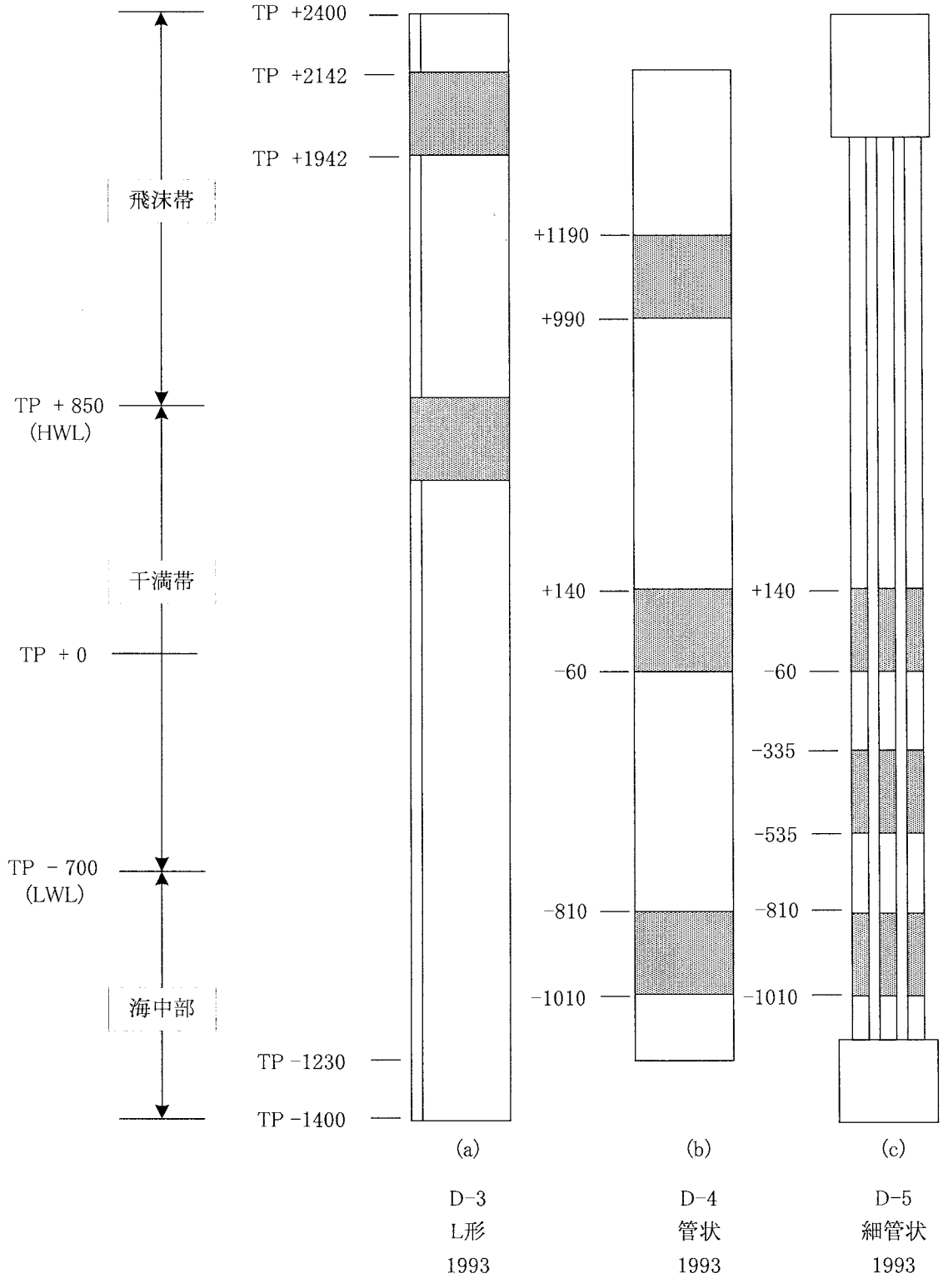
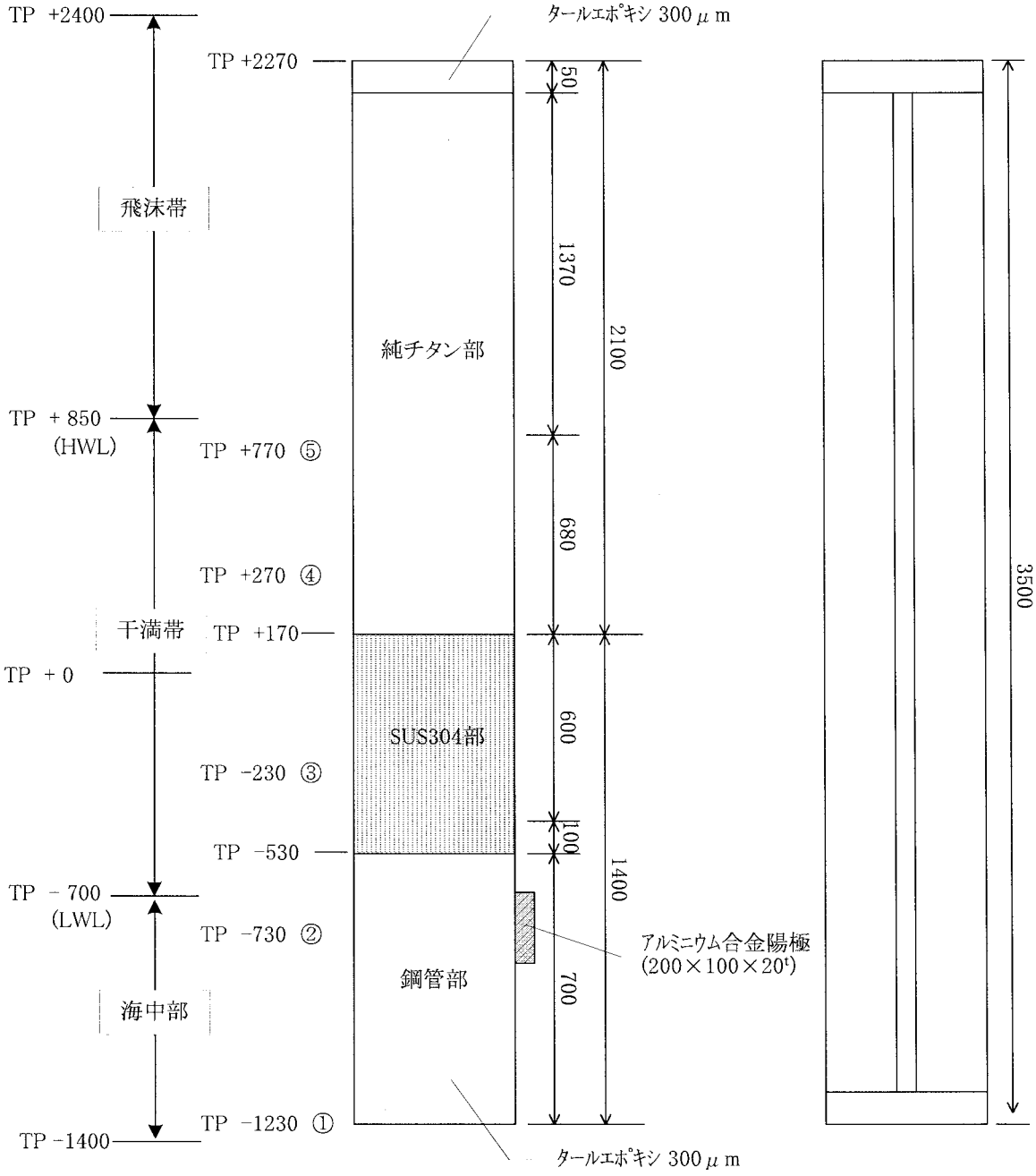


図 3.2.5　試験材の隙間付与位置

研究テーマ 1　第 2 次試験材



※ ①～⑤は電位測定位置(西側：陽極側)

図 3.2.6　試験材の形状と暴露ﾚﾍﾞﾙ

研究テーマ 1　第 2 次試験材

表 3.2.6　低合金鋼(旧称:耐海水鋼)試験材および撤去予定
研究テーマ 2　第 1 次試験材

テーマ	次材	系	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 (年 / 経過年数)							当初本数	残存 '03年7月調査時	
								'86	'89	'90	'93	'98	'03			本数	No.
								2.5	5.5	6.5	9.5	14.5	19.5	予備			
2	1	B	B-1-1～6	Cu-Cr-P系低合金鋼	裸材(ﾌﾞﾗｽﾄ処理)	L型	140×140×18^{t}×3800^{l}	○	○	○	○	○	○		6	1	B-1-5
			B-2-1～4	Cu-Cr-P系低合金鋼+塗装	無機ｼﾞﾝｸﾘｯﾁ(75μm×1回)+ﾀｰﾙｴﾎﾟｷｼ(300μm×2回)	L型	140×140×18^{t}×3800^{l}		○		○	○	○		4	1	B-2-4
			B-3-1～4	L.C.-Cu-P系低合金鋼+塗装		L型			○		○	○	○		4	1	B-3-4
			B-4-1～6	普通鋼(SS400)	裸材(ﾌﾞﾗｽﾄ処理)	L型	140×140×20^{t}×3800^{l}	○	○		○	○	○	○	6	2	B-4-5,6
			B-5-1～4	普通鋼(SS400)+塗装	無機ｼﾞﾝｸﾘｯﾁ(75μm×1回)+ﾀｰﾙｴﾎﾟｷｼ(300μm×2回)	L型	140×140×20^{t}×3800^{l}		○		○	○	○		4	1	B-5-4
														計	24	6	

表 3.2.7　低合金鋼(旧称:耐海水鋼)試験材の化学成分
研究テーマ 2　第 1 次試験材

(%)

テーマ	次材	系	記号No.	鋼種	C	Si	Mn	P	S	Cu	Cr	その他
2	1	B	B-1 B-2	Cu-Cr-P系耐海水鋼	0.17	0.48	0.87	0.108	0.02	0.24	0.53	
			B-3	L.C.-Cu-P系耐海水鋼	0.056	0.53	1.43	0.085	0.004	0.32	—	Nb (0.022) Ti (0.019) T.Al (0.044) N (0.0030)
			B-4 B-5	普通鋼(SS400)	0.14	0.22	0.72	0.016	0.009		0.02	

表 3.2.8　低合金鋼(旧称:耐海水鋼)試験材の内容と暴露予定
研究テーマ 2　第 2 次試験材

テーマ	次材	系	記号No.	防食系	防食仕様	防食仕様および防食被覆	形状	隙間付与	暴露経過および予定 '89	'90	'91	'92	'93	'94	'95	'96	'97	'98	'99	'00	'01	'02	'03
2	2	D	D-1	低合金鋼+塗装+電防	施設本体に接続	200W×2850^{l}×^{t} 有機ジンクリッチ(20μm)+エポキシ(300μm)	板																*1
			D-2			300W×3000^{l}×12^{t} 有機ジンクリッチ(20μm)+エポキシ(300μm)	板																

*1 2003年7月 流失確認

表 3.2.9　金属被覆系試験材の化学成分
研究テーマ 2　第 2 次試験材

(%)

テーマ	次材	系	記号No.	防食系	防食仕様	形状	C	Si	Mn	P	S	Cu	Cr	Ni	Mo	その他	備考
2	2	D	D-1	低合金鋼+塗装+電防	施設本体に接続	板	≦0.14	≦1.00	≦1.50	≦0.030	≦0.030	0.15～0.40	0.80～1.30		≦0.30		耐海水鋼
			D-2			板	≦0.15	≦0.55	≦1.50	≦0.030	≦0.035	≧0.20	0.80～1.30	添加	添加	Nb+N(≦0.15)	耐海水鋼

注:低合金鋼は、試験開始当初　耐海水鋼と呼ばれていた。

表 3.2.10 (1)　塗覆装系試験材の内容

研究テーマ3　第1次試験材

テーマ	次材	系	No.	防食系	防食仕様	施工対象部材	
3	1		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(30 μm)＋GF入りビニルエステル(300 μm×3回)＋ポリウレタン(30 μm)	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	有機ジンクリッチ(75 μm)＋GF入りポリエステル(3回塗り、1400 μm)	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(60 μm)＋GF入りポリエステル(3回塗り、1400 μm)	飛～海・直立材 飛・水平材 飛・水平材 海・水平材	2B 1B↔2B 2B↔2C 2B↔3B
			4	ガラスフレーク入りエポキシ樹脂塗料	GF入りエポキシ(3回塗り、2000 μm)	飛～海・直立材	2C
			5		無機ジンクリッチ(75 μm)＋エポキシ系プライマー(30 μm) ＋GF入りエポキシ(500 μm×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	有機ジンクリッチ(15 μm)＋エポキシ(2000 μm)	飛～海・直立材 飛～海・水平材 飛～海・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(25 μm)＋ポリウレタン(2000 μm)＋ポリウレタン(30 μm)	飛～海・直立材 飛～海・水平材 飛～海・水平材 海・水平材	3B 2B↔3B 3A↔3B 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(25 μm)＋エポキシ系レジンモルタル(多層塗り、2000 μm) ＋ポリウレタン(50 μm)	飛～海・直立材 飛～海・斜材	2A 2A↘1A
			8-2		エポキシ系プライマー(25 μm)＋エポキシ系レジンモルタル(多層塗り、2000 μm) ＋アクリル(50 μm)	飛～海・斜材 飛～海・斜材 飛～海・斜材 飛～海・斜材	2B↘2A 2B↘1B 2C↘2B 2C↘3C

※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(300～500 μm)をローラー塗布

表 3.2.10 (2)　塗覆装系試験材の内容

研究テーマ3　第1次試験材

テーマ	次材	系	No.	防食系	防食仕様	施工対象部材	
3	1		9-1	ペトロラタム ＋ FRPカバー	ペトロラタムペースト(2.5kg/m^2)＋ポリウレタン発泡体(緩衝材 5mm)＋FRPカバー(3mm)	飛～海・斜材	1C ↘ 2C
			9-2	エポキシ樹脂塗料 ＋ 防汚塗料	無機ジンクリッチ(50 μm)＋エポキシ(500 μm×2回)＋有機錫系防汚塗料(100 μm)	飛～海・斜材	1A ↘ 1B
			9-3	エポキシ樹脂塗料 ＋ 防汚テープ	無機ジンクリッチ(50 μm)＋エポキシ(500 μm×2回)＋アクリル系ゲル防汚テープ(3mm)	飛～海・斜材	1B ↘ 1C
			10-1	ゴム系粘着材 ＋ FRPカバー	ブチルゴム系粘着材(1.2mm)＋NR系膨潤ゴム(3mm)+FRPカバー(4mm)	干・直立材＊	3C下1/2
			10-2		ブチルゴム系粘着材(1.2mm)＋FRPカバー(3mm)	飛・水平材＊ 飛・水平材＊ 飛・水平材＊	2A↔ 2B 3B↔ 3C 2C↔ 3C
			11	ペトロラタム ＋ FRPカバー	ペトロラタムペースト(0.3kg/m^2)＋ペトロラタムテープ(1mm)＋FRPカバー(光硬化型 3mm) ＋ポリウレタン(0.2kg/m^2)	飛・直立材 飛～海・斜材 飛～海・斜材 飛～海・斜材 飛～海・斜材	3C上1/2 3B ↘ 3A 3C ↘ 3B 3B ↘ 2B 3A ↘ 2A

(注) ＊は現地施工

表 3.2.10 (3)　塗覆装系試験材の内容

研究テーマ3　第1次試験材

テーマ	次材	系	No.	防食系	防食仕様	施工対象部材	
3	1	FRP	12-1	ペトロラタム＋各種保護カバー	ペトロラタムペースト(0.5kg/m^2)＋ペトロラタムテープ(55%ラップ)＋発泡PE(10mm)＋FRPカバー(2mm)	飛・直立材接続部	1A、1C
		FRPP	12-2-1		ペトロラタムペースト(0.5kg/m^2)＋ペトロラタムテープ(55%ラップ)＋発泡PE(10mm)＋FRPPカバー(2mm)		2A
			12-2-2		ペトロラタムペースト(0.5kg/m^2)＋ペトロラタムシート(2mm)＋発泡PE(10mm)＋FRPPカバー(3mm)		2C
		PE	12-3-1		ペトロラタムペースト(0.5kg/m^2)＋ペトロラタムテープ(55%ラップ)＋発泡PE(10mm)＋PEカバー(3mm)		1B 2B
			12-3-2		ペトロラタムペースト(0.5kg/m^2)＋ペトロラタムシート(2mm)＋発泡PE(10mm)＋PEカバー(3mm)		3B
		FRPライニング	12-4	ペトロラタム＋FRPライニング	ペトロラタムペースト(0.5kg/m^2)＋ペトロラタムテープ(55%ラップ)＋FRPﾗｲﾆﾝｸﾞ(2mm)		3A、3C
		FRP	12-1	ペトロラタム＋FRPカバー	ペトロラタムペースト(0.5kg/m^2)＋ペトロラタムテープ(55%ラップ)＋発泡PE(10倍、10mm)＋FRPカバー(2.5mm、4mm、5mm)※1	飛・直立材接続部	1A、2A、3A 1B、2B、3B 2C、3C
					ペトロラタムペースト(0.5kg/m^2)＋ペトロラタムテープ(55%ラップ)＋発泡PE(10倍、10mm)＋FRPカバー(4mm)※2		(1A)、(2A) 3A、(3B) (3C)
					ペトロラタムペースト(0.5kg/m^2)＋ペトロラタムテープ(55%ラップ)＋発泡PE※3(10倍、5mmおよび15mm)＋FRPカバー(5mm)※4		(3A)、(1B) (2B)、(1C) (2C)

(注) 1) 施工はすべて現地施工
2) ※1は1989年度解体調査後仕様(1Cは当初の2mm、1B,2B,2Cは2.5mm、1A,3Cは4mm、2A,3A,3Bは5mm)
3) ※2は1993年度補修後仕様
4) ※4は2003年度補修の新しい保護カバー仕様
5) ※3は直径の異なる3段の鋼管杭の部位で上段、下段は5mm、中段は15mmを適用。ただし、杭3Aは下段のみ補修
6) 2003年度調査後の現状は(杭No.)印

表3.2.11(1)　塗覆装系試験材の内容と暴露予定

研究テーマ3　第2次試験材

テーマ	次材		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 (μm)	色調	暴露期間 (年)	備考
3	2	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	ポリウレタン(黒)+着色ふっ素(淡青)※	管	165.2φ×3500^{l}		淡青	13	'03回収
			C-3		ポリエチレン	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+アクリルウレタン樹脂塗料	ポリウレタン(黒)+アクリルウレタン(濃緑)※				濃緑	13	'03回収
			C-5		ポリウレタン樹脂塗料	着色ポリウレタン(緑2500μm)※			2530	緑	23	2013まで延長
			C-6		ポリウレタン樹脂塗料	黒色ポリウレタン(2500μm)※			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	水中硬化型アクリル系(下塗り;2000μm 中塗り;300μm)+着色ふっ素・シリコン共重合(灰色70μm)※			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	165.2φ×3500^{l}×3.2^{t}		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	丸ダイ法※		267.4φ×2900^{l}×11.1^{t}	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	丸ダイ法※		165.2φ×3500^{l}×3.2^{t}	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	シート貼り付け方法	板			ブルー	2	'95 流失
			E-5		ポリエチレン樹脂被覆	多重ラミネート貼り付け方法		250w×3800^{l}×12^{t}	2450	石積調	2	'96 流失

(注) 1) ※は別途小試験片(板状または管状)を光沢・色差測定用に暴露

表 3.2.11 (2)　塗覆装系試験材の内容と暴露予定

研究テーマ3　第2次試験材

テーマ	次材	系	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 (μm)	色調	暴露期間 (年)	備考
3	2	F系	F-1	耐食耐候性塗料	超厚膜型ｴﾎﾟｷｼ樹脂塗料	OZP(20μm)+ｴﾎﾟｷｼ(1000μm×2)※			管	165.2φ×3500l	2020	淡緑	10	'03 回収
			F-2		超厚膜型ｴﾎﾟｷｼ樹脂塗料	OZP(20μm)+ｴﾎﾟｷｼ(1250μm×2)※					2520	青	20	2013年まで延長
			F-3		ｱｸﾘﾙ系樹脂塗料	ﾌﾟﾗｲﾏｰ(70μm)+ｱｸﾘﾙ(1500+1000μm)+ｱｸﾘﾙ(50μm)※					2620	青	5	'98 回収
			F-4		ﾎﾟﾘｳﾚﾀﾝ樹脂塗料	ﾌﾟﾗｲﾏｰ(30μm)+ﾎﾟﾘｳﾚﾀﾝ(2500μm)※					2530	黒	20	2013年まで延長
			F-5		高耐候性上塗り塗装（接海水環境）	ｼﾘｺﾝ樹脂塗料	OZP(20μm)+ｴﾎﾟｷｼ(1000μm×2)	ｼﾘｺﾝ用中塗り(30μm)+ｼﾘｺﾝ上塗り(25μm)※	各1/3周		2075	下塗り淡緑	10	・側面は円周で3等分して塗り分ける ・'03回収
						ふっ素樹脂塗料		ふっ素用中塗り(30μm)+ふっ素上塗り(25μm)※			2075	上塗り白		
						ﾎﾟﾘｳﾚﾀﾝ樹脂塗料		ﾎﾟﾘｳﾚﾀﾝ用中塗り(35μm)+ﾎﾟﾘｳﾚﾀﾝ上塗り(35μm)※			2090			
		G系	G-1	補修塗料	超厚膜型ｴﾎﾟｷｼ樹脂塗料	OZP(20μm)+ｴﾎﾟｷｼ(1000μm+2)　(塗り残し有り)			L板	140×20t×3800l	2020	淡緑	10	・飛沫、干満上、干満帯下に300mm幅で塗り残し ・'03回収
					水中硬化型ｴﾎﾟｷｼ樹脂塗料	水中硬化型ｴﾎﾟｷｼ樹脂塗料(5000μm)					5000	緑		
			G-2		GF入り着色ﾋﾞﾆﾙｴｽﾃﾙ	OZP(20μm)+GF入り着色ﾋﾞﾆﾙｴｽﾃﾙ(350μm×2)（OZP残の塗り残し有り）			管	150φ×19t×3800l	720	青	20	・上端から500～800mmにOZP残の塗り残し ・2013年まで延長
						変成ｴﾎﾟｷｼ(50μm)+GF入り着色ﾋﾞﾆﾙｴｽﾃﾙ(350μm×2)					750			
			G-3		ﾀｰﾙｴﾎﾟｷｼ樹脂塗料	ﾀｰﾙｴﾎﾟｷｼ(70μm)+ﾀｰﾙｴﾎﾟｷｼ(70μm)			L板	150×19t×3800l	140	黒	5	'98 回収
					ｱｸﾘﾙ系樹脂塗料	ﾌﾟﾗｲﾏｰ(200μm)+ｱｸﾘﾙ(150μm)+ｱｸﾘﾙ(1000μm)					1350	青		
			G-4		超厚膜型ｴﾎﾟｷｼ樹脂塗料	IZP(75μm)+ﾌﾟﾗｲﾏｰ(30μm)+GF入りｴﾎﾟｷｼ(600μm×3)　(損傷付き)			L板	150φ×19t×3800l	1605	緑	10	・上端より150mm間隔に2×40mmの横長帯状カット ・'03回収
					無溶剤型ｴﾎﾟｷｼ樹脂塗料	無溶剤型ｴﾎﾟｷｼ樹脂塗料(400～500μm)					400 500			
		I系	I-1	厚膜エポキシ樹脂塗料+無機質上塗塗料		OZP(75μm)+エポキシ(300μm)+無機質系中塗塗料(30μm)+無機質系上塗塗料(30μm)			管	150φ×11t×3500l	435	淡青	5	'03 回収
			I-2-1	エポキシ樹脂塗料+FRPカバー+電気防食		特殊ｴﾎﾟｷｼ樹脂塗料(200μm)+FRPｶﾊﾞｰ(3mm)+電気防食用ｱﾙﾐﾆｳﾑ合金陽極(200mm×100mm×40mmt)			管	140φ×5t×3800l	3200	青	5	'03 回収
			I-2-2	ｳﾚﾀﾝ樹脂塗料+FRPｶﾊﾞｰ		特殊ｳﾚﾀﾝ樹脂塗料(2000μm)+FRPｶﾊﾞｰ(3mm)					5000	青		
			I-3	無溶剤型ｴﾎﾟｷｼ樹脂塗料+ふっ素樹脂塗料		ｼﾞﾝｸﾘｯﾁﾌﾟﾗｲﾏｰ(20μm)+無溶剤型ｴﾎﾟｷｼ樹脂塗料(1000μm)+ふっ素系上塗塗料(20μm)			管	165.2φ×6t×3500l	1040	淡青	5	'03 回収
			I-4	水系エポキシ樹脂塗料+水系ウレタン樹脂塗料		水系ｼﾞﾝｸﾘｯﾁﾌﾟﾗｲﾏｰ(75μm)+水系ｴﾎﾟｷｼ中塗(120μm)+水系ｳﾚﾀﾝ上塗(80μm)					275	白	5	'03 回収

(注)　1) ※は別途小試験片(板状または管状)を光沢・色差測定用に暴露
2) G系の補修材料は点線の上段が初期塗装で下段が補修塗装、補修は現地施工
3) IZP：無機ジンクリッチ
4) OZP：有機ジンクリッチ

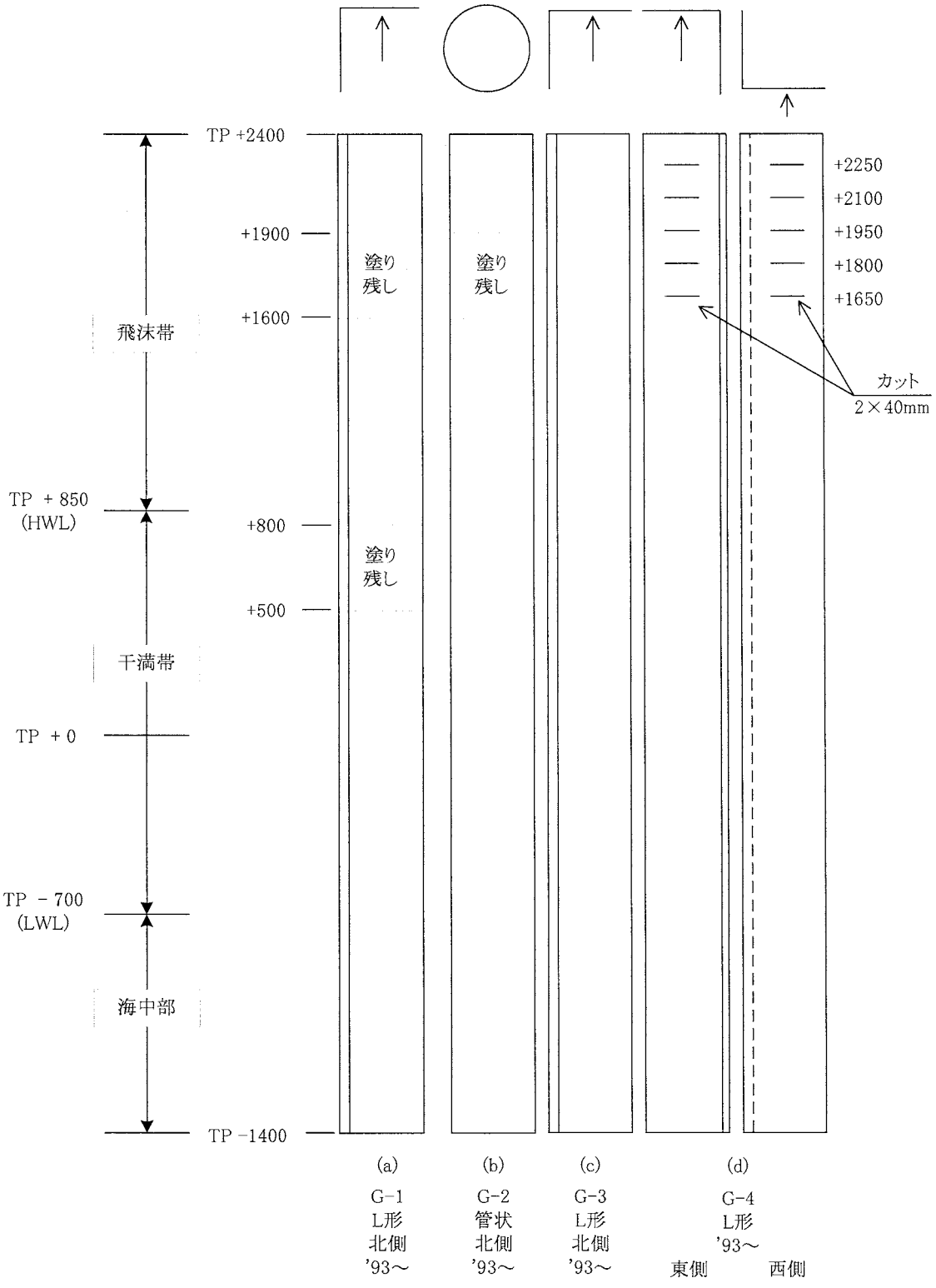


図 3.2.7　補修試験材(G 系)の形状と暴露レベル

研究テーマ 3　第 2 次試験材　1993 年度取付

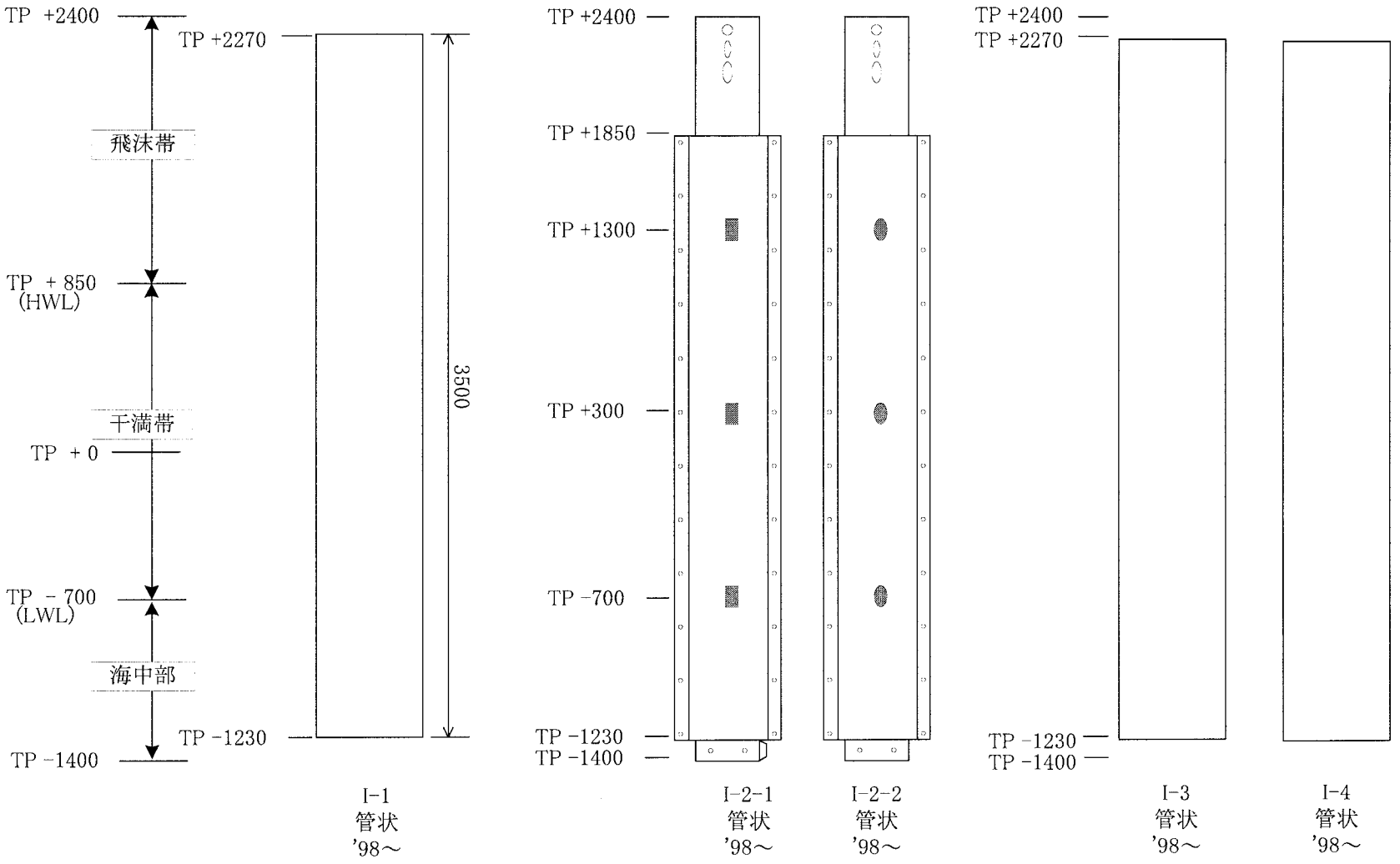
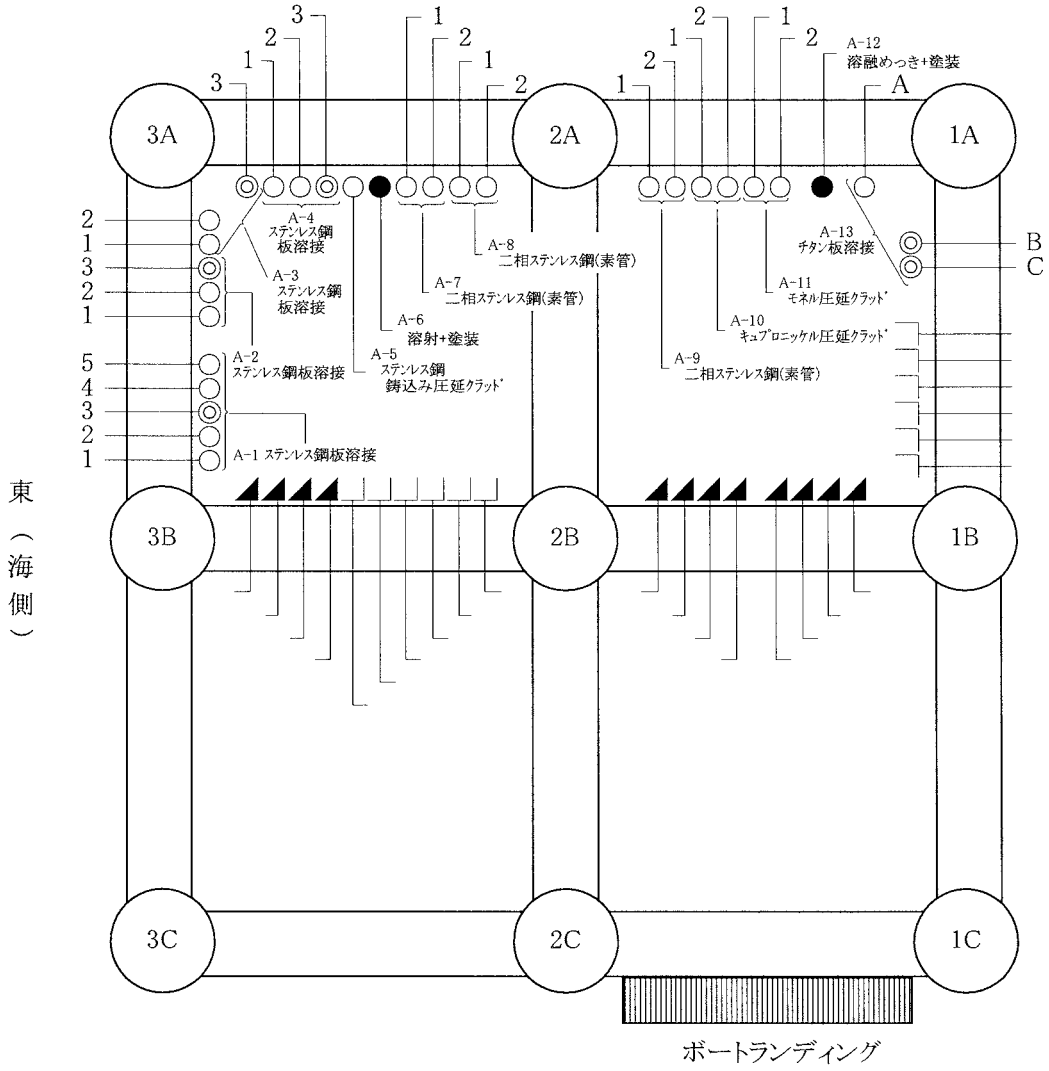


図 3.2.8　試験材(I 系)の形状と暴露レベル

研究テーマ 3　第 2 次試験材　1998 年度取付

南側

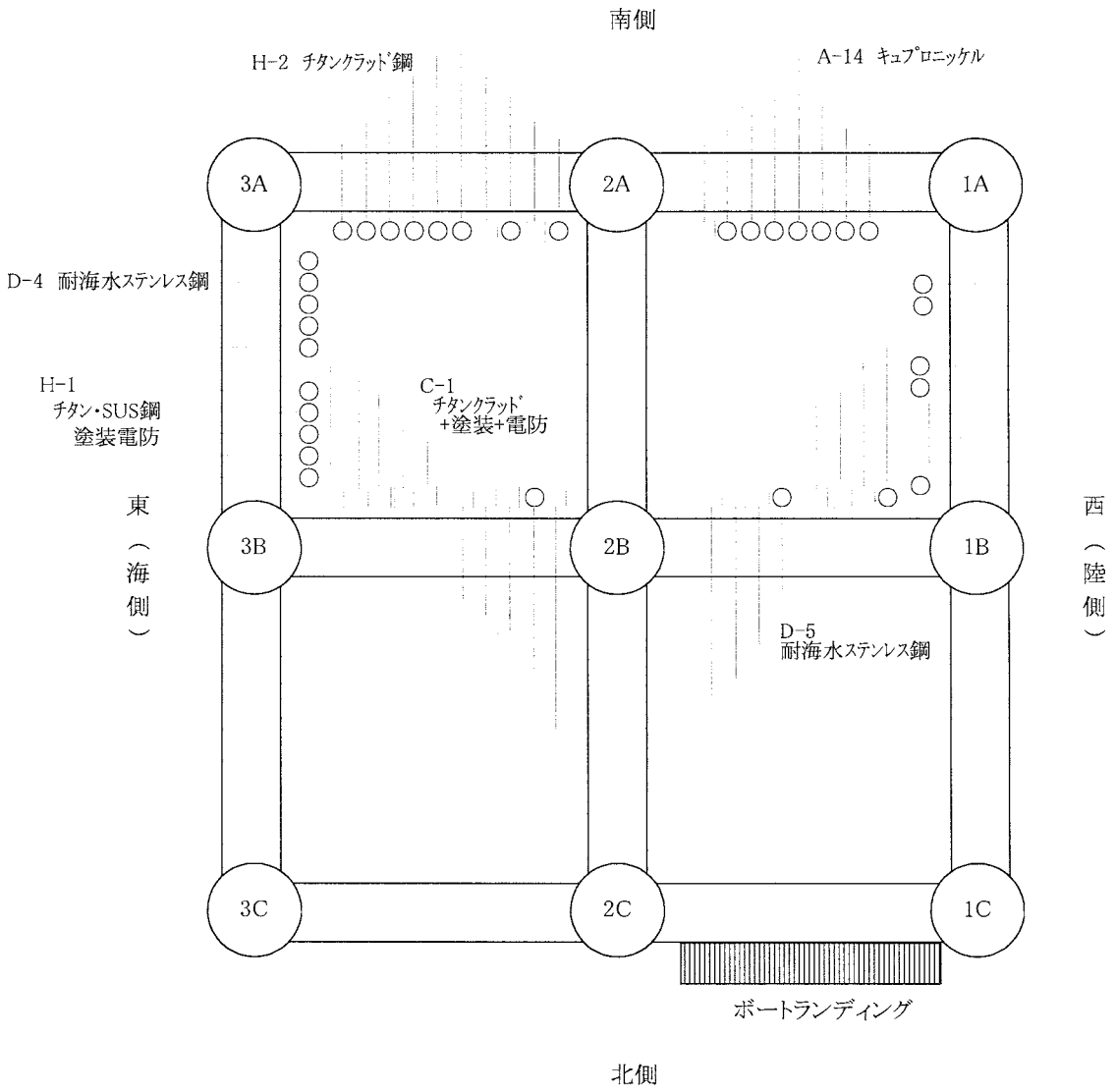


東（海側）　　西（陸側）

北側

○：管状試験材　●：塗装試験材　◎：隙間付与材

図 3.3.1　試験材の配置(1984 年暴露開始時)
研究テーマ 1、第 1 次試験材　A 系



試験材	暴露
A-14, C-1	: 1991 年～
D-4, D-5	: 1993 年～
H-1, H-2	: 1998 年～

図 3.3.2　各種試験材の配置（2003 年度調査時）
研究テーマ 1、第 2 次試験材

注：図中の耐海水ステンレス鋼は旧称であり、本報告では高耐食性ステンレス鋼と表記している。

表3.3.1　長期調査計画
研究テーマ1

年	'84	'85	'86	'87	'88	'89	'90	'91
経過年数	0.5	1.5	2.5	3.5	4.5	5.5	6.5	7.5
調査	○	○	◎	○	○	◎	○	○

年	'92	'93	'94	'95	'96	'97	'98	'99
経過年数	8.5	9.5	10.5	11.5	12.5	13.5	14.5	15.5
調査	○	◎	○	◎	○	○	◎	○

年	'00	'01	'02	'03	'04	'05	'06	'07
経過年数	16.5	17.5	18.5	19.5	20.5	21.5	22.5	23.5
調査	○	○	○	◎▲	△	○	—	—

年	'08	'09	'10	'11	'12	'13
経過年数	24.5	25.5	26.5	27.5	28.5	29.5
調査	◎	—	—	○	—	◎

(注)　1) ○ : 定期一般調査
2) ◎ : 定期詳細調査(破壊調査含む)
3) △ : 一時引上げ補修後再設置
4) ▲ : 一時撤去調査後再設置

表3.3.2　調査項目および試験方法
研究テーマ1

調査項目	試験方法	'03調査	定期一般	定期詳細
外観観察	目視(健全部、異常部)	○	○	◎
外観写真	全景、接写(健全部、異常部)	○	○	◎
隙間付与部の観察	目視、ディプスゲージ	○	○	◎
孔食測定	ディプスゲージ	○		◎
生物付着状況調査	目視、秤量	※1	○	◎
付着生物剥離後の観察	目視	※1	○	◎
膜厚測定	kett膜厚計、VL-30B、ﾚﾝｼﾞⅢ(300μm～8mm)	○	○	◎
交流抵抗測定※2	三田無線、LCRﾒｰﾀｰ、D-55(交流0.2,0.5,1.0kHz)	○	○	◎
塗膜ピンホール測定	ｻﾝｺｰ電子、ﾎﾘｽﾀｰⅠ型(3～12kV)、5kV印加	○	○	◎
電気防食効果	電位・電流測定、防食効果確認	○		◎

(注)　※1　初期の調査で状況を把握したので1994年度以降中止
※2　なお、調査結果で後述するように、現場測定における交流抵抗の初期(1984～1986 年度)値が、その後の値に比べ 1/10 から 1/100 程度低い値を示しているが、これについては当初は環境条件や測定方法、計測器などをいろいろ試み検討を重ねた。特に測定箇所が海面に近い飛沫帯にあり、海水の飛沫、塩分の堆積やその湿潤性による影響を受け、測定部周辺の表面のリーク電流を含んでいるため低い交流抵抗値になったと考えられるので、これらの影響を排除するように検討した結果、1987 年度からは測定面の純水による十分な洗浄や測定までの海塩粒子再付着防止用のビニルシートの貼付け(シリカゲル封入、1時間程度)を実施して測定を行なっている。

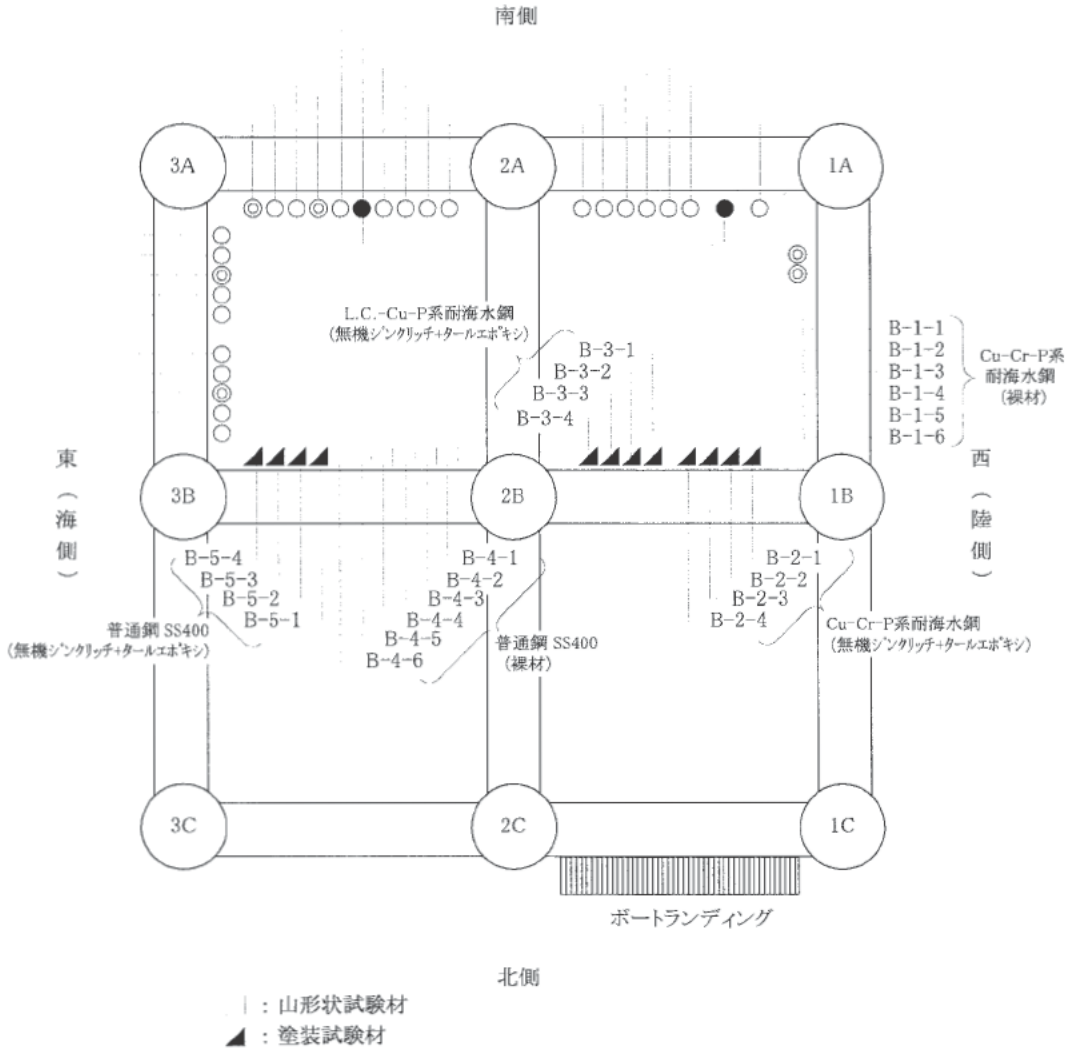
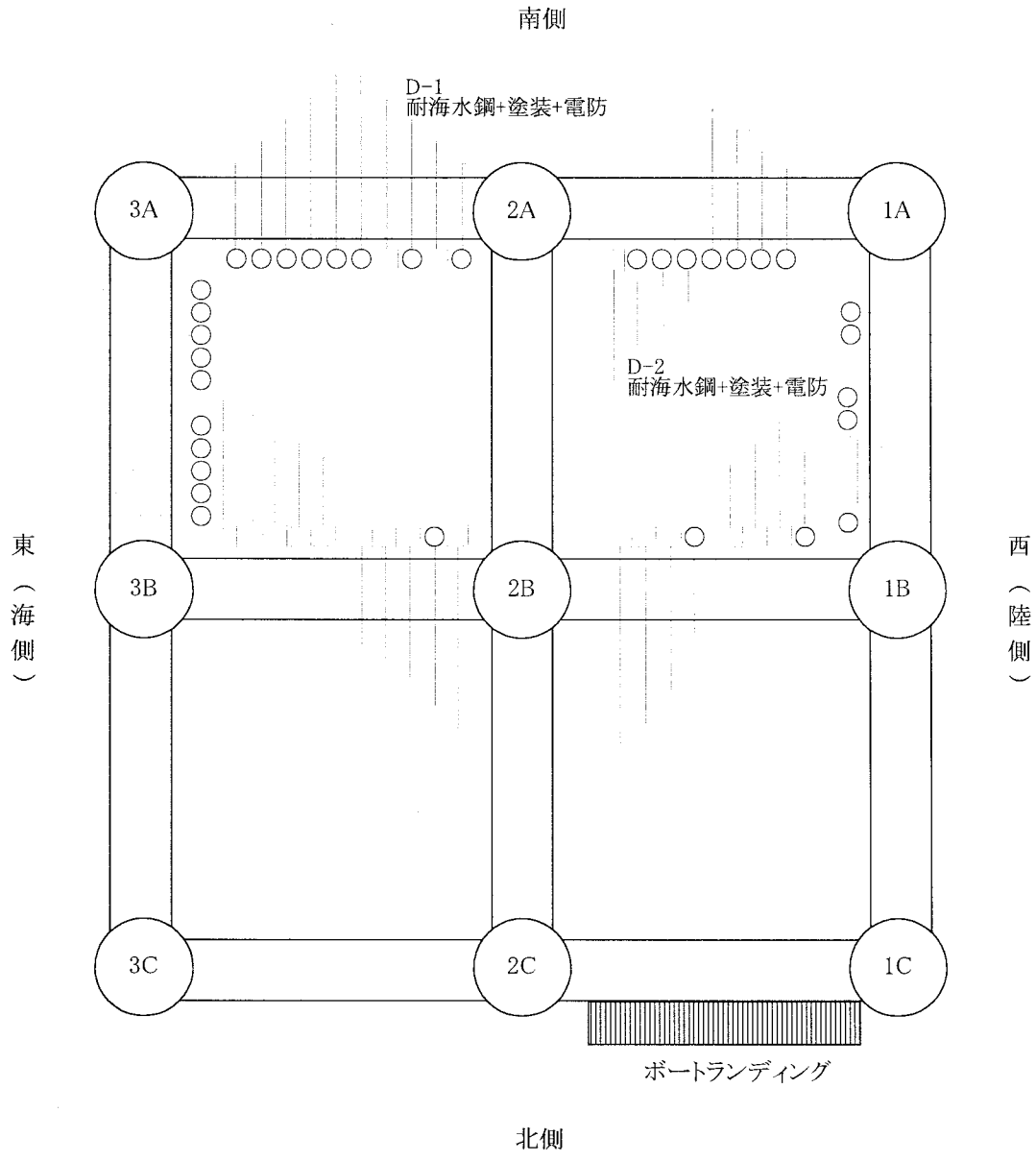


図 3.3.3　試験材の配置(1984 年暴露開始時)

研究テーマ 2、第 1 次試験材　B 系

注:図中の耐海水鋼は試験開始当時の旧称であり、本文中では低合金鋼と表記している。



試験材　　暴露

D-1, D-2　　：1993 年～

（D-1　：2003 年 7 月 流失確認）

図 3.3.4　各種試験材の配置（2003 年度調査時）

研究テーマ 2、第 2 次試験材

注：図中の耐海水鋼は試験開始当時の旧称であり、本文中では低合金鋼と表記している。

表3.3.3　長期調査計画

研究テーマ2

年	'84	'85	'86	'87	'88	'89	'90	'91
経過年数	0.5	1.5	2.5	3.5	4.5	5.5	6.5	7.5
調査	○	○	◎	○	○	◎	○	○

年	'92	'93	'94	'95	'96	'97	'98	'99
経過年数	8.5	9.5	10.5	11.5	12.5	13.5	14.5	15.5
調査	○	◎	○	◎	○	○	◎	○

年	'00	'01	'02	'03	'04	'05	'06	'07
経過年数	16.5	17.5	18.5	19.5	20.5	21.5	22.5	23.5
調査	—	○	—	◎	—	○	—	—

年	'08	'09	'10	'11	'12	'13
経過年数	24.5	25.5	26.5	27.5	28.5	29.5
調査	◎	—	—	○	—	◎

（注）　1）○：定期一般調査
　　2）◎：定期詳細調査（破壊調査含む）

表3.3.4　調査項目および試験方法

研究テーマ2

調査項目	試験方法	'03調査	定期一般	定期詳細
外観観察	目視(健全部、異常部)	○	○	◎
外観写真	全景、接写(健全部、異常部)	○	○	◎
板厚測定	マイクロメーター	○		◎
孔食測定	ディプスゲージ	○		◎
生物付着状況調査	目視、秤量	※1	○	◎
付着生物剥離後の観察	目視	※1	○	◎
膜厚測定	kett膜厚計、VL-30B、ﾚﾝｼﾞⅢ(300μm～8mm)	○	○	◎
交流抵抗測定※2	三田無線、LCRﾒｰﾀｰ、D-55(交流0.2,0.5,1.0kHz)	○	○	◎
塗膜ピンホール測定	ｻﾝｺｰ電子、ﾎﾘｽﾀｰⅠ型(3～12kV)、5kV印加	○	○	◎
電気防食効果	電位・電流測定、防食効果確認	○		◎

（注）※1　初期の調査で状況を把握したので1994年度以降中止

※2　交流抵抗測定方法についてはP37の表2.2.2の研究テーマ1の場合と同様である

No.	防食系	m²	備考
①	GF入りビニルエステル系	114	ボートランディング含む
②	GF入りポリエステル系	52	
③	GF入りポリエステル系	62	
④	GF入りエポキシ系	72	
⑤	GF入りエポキシ系	59	
⑥	厚膜エポキシ系	60	
⑦	厚膜ウレタン系	66	
⑧	レジンモルタル系	69	
⑨	防食材＋カバー系	21	3種類
⑩	防食材＋カバー系	28	2種類　現地施工
⑪	防食材＋カバー系	40	
⑫	防食材＋カバー系	43	4種類　現地施工

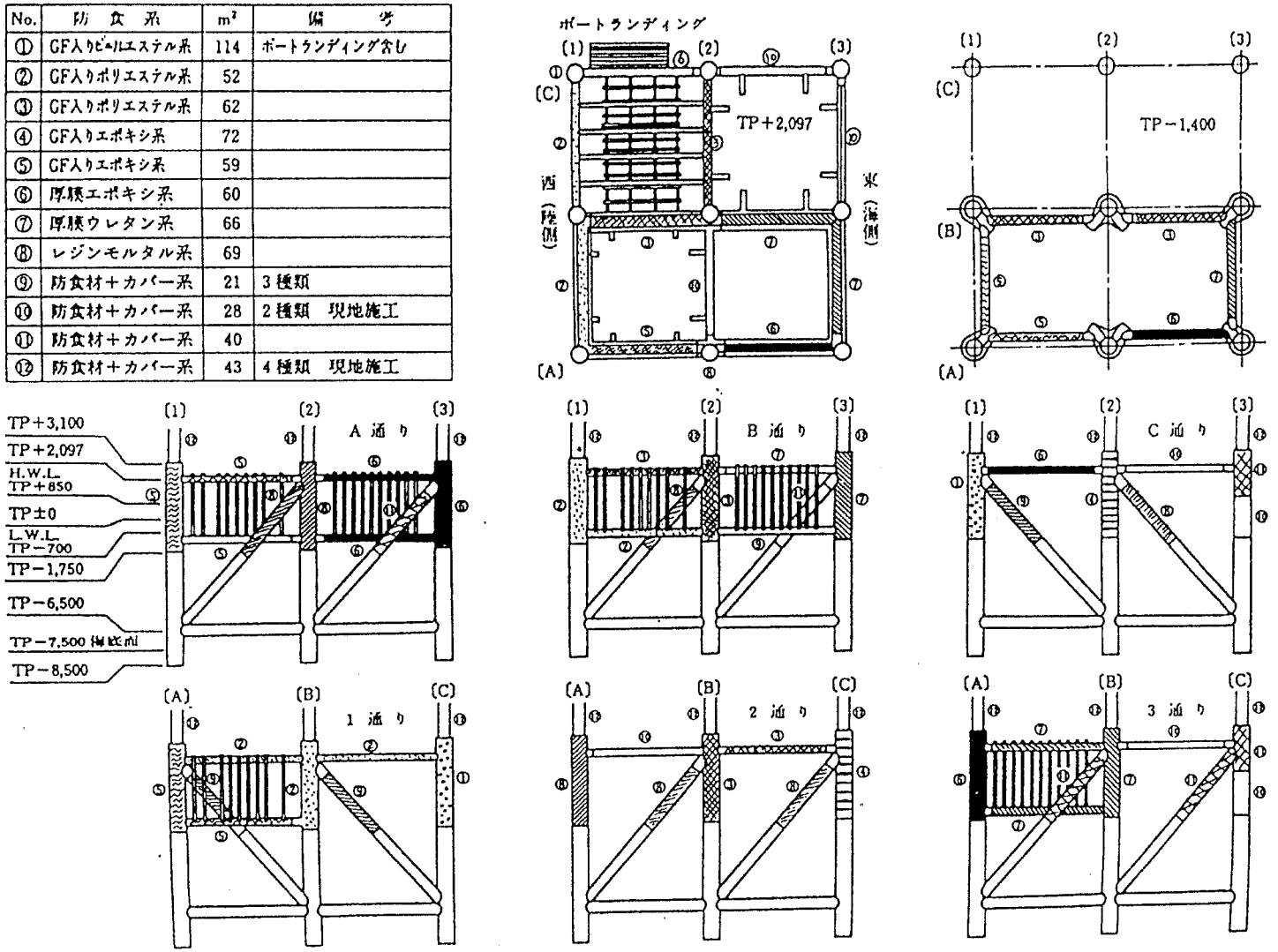
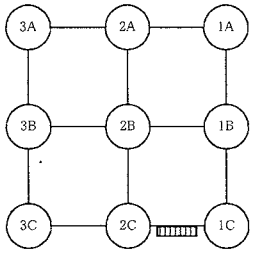
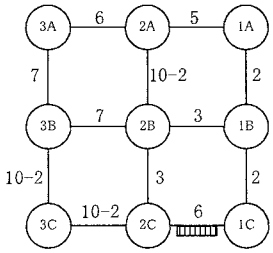
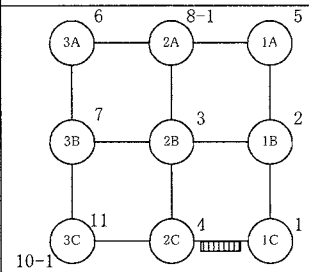
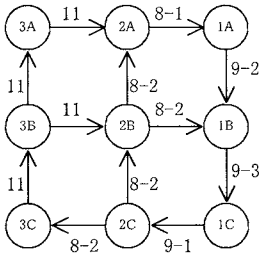
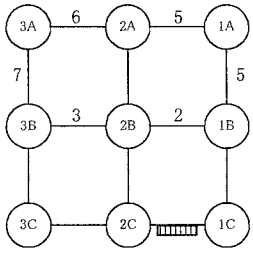


図 3.3.5　　試験施設の防食仕様とその位置（1984 年暴露開始時）

研究テーマ 3　第 1 次試験材

No.	暴露レベル (TP)	位 置 ・ 方 向	防食仕様 No.	本 数
1	飛沫帯直立材 (+4245～−3100)		12	9
2	飛沫帯水平材 (+2300～−1894)		2 3 5 6 7 10-2 合計	2 2 1 2 2 3 12
3	飛沫帯～干満帯～ 海中部 直立材 (+3100～−1750)		1 2 3 4 5 6 7 8-1 10-1 11 合計	1 1 1 1 1 1 1 1 1/2 1/2 9
4	飛沫帯～干満帯～ 海中部 ※ 斜材 矢印が下方向を 示す		8-1 8-2 9-1 9-2 9-3 11 合計	1 4 1 1 1 4 12
5	海中部水平材 (−1197～−1603)		2 3 5 6 7 合計	1 1 2 1 1 6

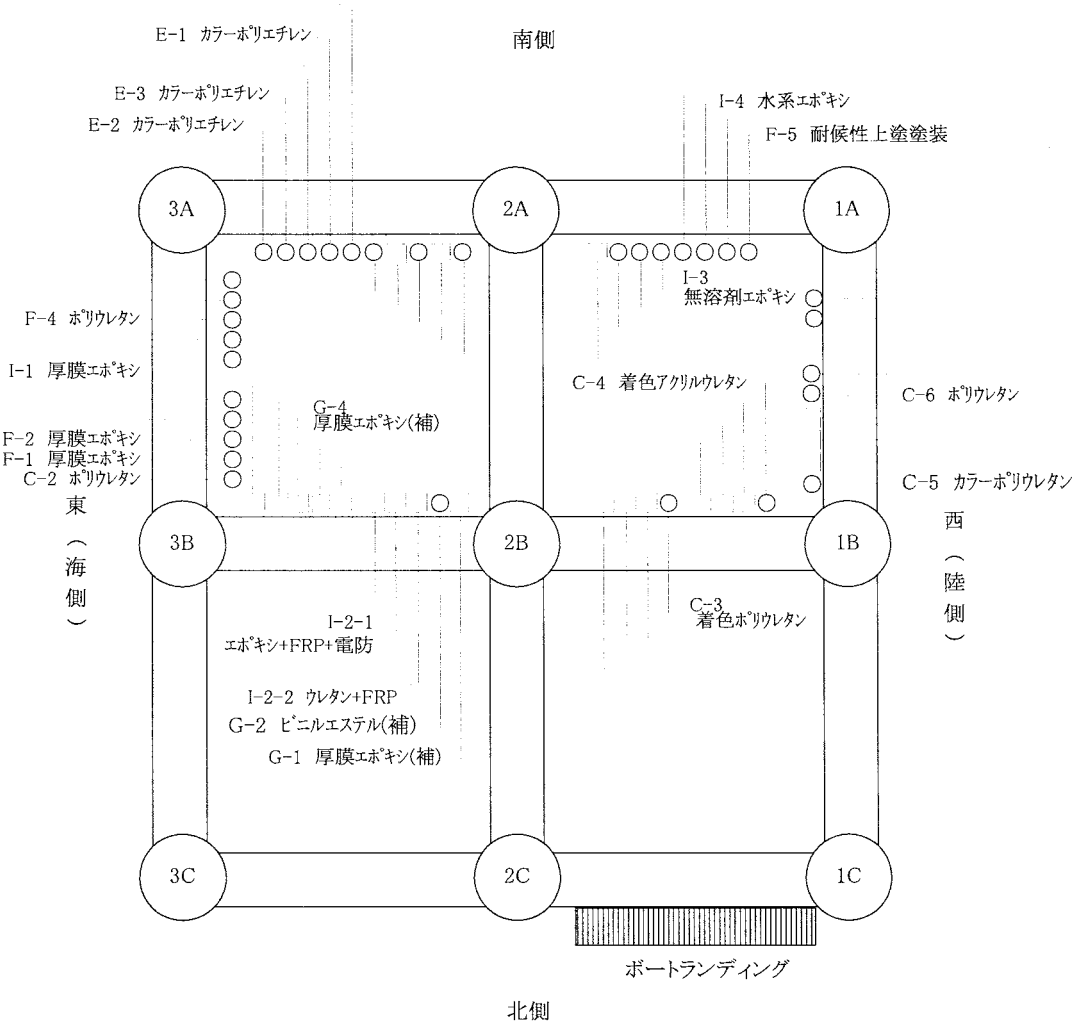
※ 杭 No.1B,2C は−1750～海底土壌まで下記の塗装

No.1B 無機ｼﾞﾝｸﾘｯﾁ(75μm)+ﾀｰﾙｳﾚﾀﾝ(150μm×2)

No.2B 無機ｼﾞﾝｸﾘｯﾁ(75μm)+GF 入りﾎﾟﾘｴｽﾃﾙ(500μm×2)

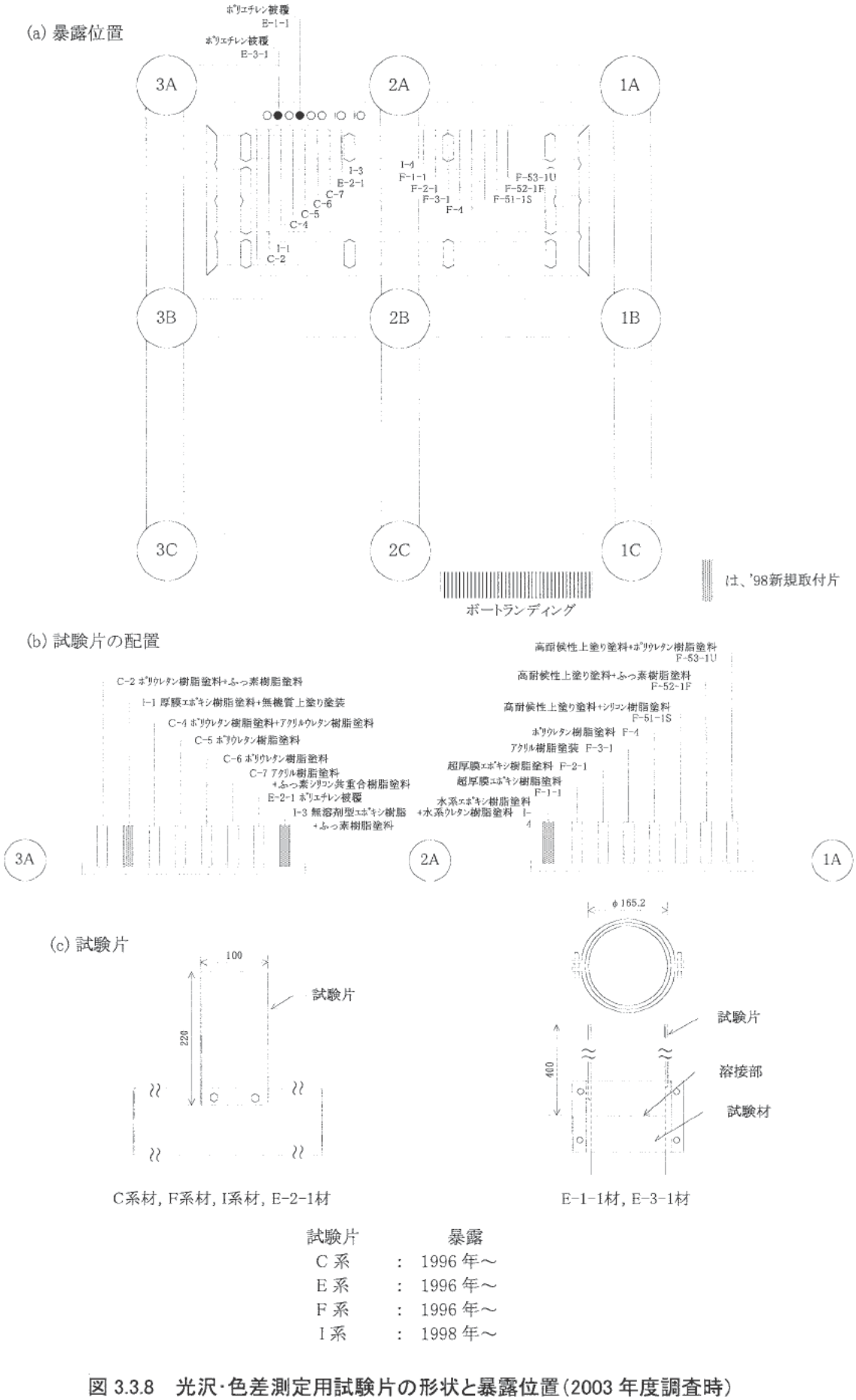
図 3.3.6 試験施設に対する防食塗覆装の位置と暴露レベル

研究テーマ 3、第 1 次試験材



試験材		暴露
C-2～C-6	:	1990 年～
E-1～E-3	:	1993 年～
F-1,2,45	:	1993 年～
G-1 → 補修	:	1993 年 → 1996 年～
G-2 → 補修	:	1993 年 → 1997 年～
G-4 → 補修	:	1993 年 → 1996 年～
I-1,I-2-1,I-2-2,I-3,I-4	:	1998 年～

図 3.3.7　各種試験材の配置(2003 年度調査時)
研究テーマ 3、第 2 次試験材



試験片	暴露
C 系	: 1996 年～
E 系	: 1996 年～
F 系	: 1996 年～
I 系	: 1998 年～

図 3.3.8　光沢･色差測定用試験片の形状と暴露位置(2003 年度調査時)
研究テーマ 3、第 2 次試験材

表3.3.5　長期調査計画

研究テーマ3

年	'84	'85	'86	'87	'88	'89	'90	'91
経過年数	0.5	1.5	2.5	3.5	4.5	5.5	6.5	7.5
調査	○	○	◎	○	○	◎	○	○

年	'92	'93	'94	'95	'96	'97	'98	'99
経過年数	8.5	9.5	10.5	11.5	12.5	13.5	14.5	15.5
調査	○	◎	○	◎	○	○	◎	○

年	'00	'01	'02	'03	'04	'05	'06	'07
経過年数	16.5	17.5	18.5	19.5	20.5	21.5	22.5	23.5
調査	—	○	—	◎▲	△	○	—	—

年	'08	'09	'10	'11	'12	'13
経過年数	24.5	25.5	26.5	27.5	28.5	29.5
調査	◎	—	—	○	—	◎

(注)　1) ○ : 定期一般調査
2) ◎ : 定期詳細調査(破壊調査含む)
3) △ : 一時撤去補修後再設置
4) ▲ : 一時撤去調査後再設置

表3.3.6　調査項目および試験方法

研究テーマ3

調査項目	試験方法	'03 調査	定期 一般	定期 詳細
外観観察	目視(健全部、異常部)	○	○	◎
外観写真	全景、接写(健全部、異常部)	○	○	◎
生物付着状況	目視、秤量	※1	○	◎
塗覆装劣化調査	目視	○	○	◎
膜厚測定	kett膜厚計、VL-30B、ﾚﾝｼﾞⅢ(300μm～8mm)	○	○	◎
交流抵抗測定	三田無線、LCRﾒｰﾀｰ、D-55(交流0.2,0.5,1.0kHz)	○	○	◎
塗膜ピンホール測定	ｻﾝｺｰ電子、ﾎﾘｽﾀｰⅠ型(3～12kV)、5kV印加	○	○	◎
塗膜付着力測定	ｴﾙｺﾒｰﾀｰ社、ｱﾄﾞﾋｼﾞｮﾝﾃｽﾀｰ(0～70kg/m2)			◎
塗膜下素地面観察	目視、写真			◎
塗膜剥離部補修	各社仕様による			◎
被覆打診調査	ﾌﾟﾗｽﾁｯｸﾊﾝﾏｰによる打診	○	○	◎

(注)　※1 初期の調査で状況を把握したので1994年度以降中止

表3.3.7　調査項目および試験方法

研究テーマ3　第2次試験材　(○ 定期一般、◎ 定期詳細)

調査項目	試験方法	C系	E系	F系	G系	I系
外観観察・写真	目視・全景	○◎	○◎	○◎	○◎	○◎
膜厚測定	kett膜厚計、VL-30B、ﾚﾝｼﾞⅢ(300μm～8mm)	◎		◎		◎※2
交流抵抗測定※5	三田無線、LCRﾒｰﾀｰ、D-55(交流0.2,0.5,1kHz)	○◎		○◎		○◎※3
塗膜ﾋﾟﾝﾎｰﾙ測定	ｻﾝｺｰ電子、ﾎﾘｽﾀｰⅠ型(3～12kV)、5kV印加	○◎				
色差※1	ﾐﾉﾙﾀｶﾒﾗ、CR-300	○◎	○◎	○◎		○◎※2
光沢度※1	BYK Micro TRI Gross	○◎	○◎	○◎		○◎※2
電位測定						○◎※4

(注)　※1　色差・光沢の測定は小試験片を対象とする
※2　対象は、I-1、I-3、I-4
※3　対象は、I-1、I-2-2、I-3、I-4
※4　対象は、I-2-1
※5　交流抵抗測定方法については表2.2.2の研究テーマ1の場合と同様である

４．試験結果

４．１　鋼材の腐食に関する検討

4．1．1 研究の目的

本研究は、当初は「耐海水鋼」と呼ばれていたCrやCuを微量添加した低合金鋼の海水中での耐食性を確認するために進めたが、試験期間の経過とともにこれら低合金鋼の普通鋼に対する耐食性の面での優位性が認められなくなった。一方、同時期に、海洋鋼構造物のLCC（ライフサイクルコスト）削減ニーズが高まってきた。そこで、無防食鋼材とタールエポキシ樹脂塗装を施した比較的単純な防食被覆鋼材の各種防食性能を解析することで、LCC計算に資するための鋼材の腐食速度や塗装防食被覆材の劣化機構を明らかにするという目的に設定し直し、暴露試験材を詳細に解析することとした。

4．1．2 試験材および試験内容

4．1．2．1 試験材

鋼材の海洋環境での腐食を明らかにするために、普通鋼と低合金鋼（耐海水鋼）の無防食材ならびに塗装材を表4.1.1に示した期間でそれぞれ暴露した。B-1シリーズは低合金鋼の無防食材、B-4シリーズは普通鋼の無防食材、B-2とB-3シリーズは低合金鋼の塗装材、B-5シリーズは普通鋼の塗装材である。これらの暴露材の化学成分を表4.1.2に示す。また、亜鉛系の皮覆（Zn-Al溶射と亜鉛めっき）上に塗装をした試験材も暴露した。それらの仕様を表4.1.3に示す。

表4.1.1 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(ブラスト処理)	L型	140×140×18^{t}×3800^{l}	○	○	○	○	○	○		6	1	B-1-5
B-2-1～4	低合金鋼A＋塗装	無機ジンクリッチ(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(ブラスト処理)	L型	140×140×20^{t}×3800^{l}	○	○		○	○	○	○	6	2	B-4-5,6
B-5-1～4	普通鋼(SS400)+塗装	無機ジンクリッチ(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

4．1．2．2 試験方法

(1) 無防食材：現地では外観観察（スケッチ）と写真撮影をほぼ毎年行った。また、自然電位の測定（暴露初期から約３年間）、生物付着量測定（暴露初期から７年間）も行った。さらに、経時的に引き上げた試験片は、ブラスト処理によりさびを落とし、図4.1.2に示す位置の板厚を200mmピッチでポイントマイクロメータにより計測して腐食減量を解析した。なお、普通鋼の19.5年暴露材に関しては、レーザー変位計を用いて、詳細な板厚分布も計測した。（首都大学東京の野上准教授、名古屋大学の伊藤教授のご協力による。）

(2) 塗装材：現地では外観観察（スケッチ）と写真撮影、塗膜厚、交流抵抗値測定をほぼ毎年行った。塗装材の現地調査項目を表4.1.4に示す。現地での評価時のスケッチの例と各種現地測定の評価箇所を図4.1.1に示す。現地での測定箇所は、海上大気・飛沫部に相当する。

また、経時的に引き上げた試験材は、外観観察、写真撮影、塗膜厚の測定、交流抵抗値測定に加えて、ピンホール検査、付着力測定を行った。引き上げ後の塗膜厚の測定位置を図4.1.3に示す。

(3) 亜鉛系皮覆＋塗装材：現地では外観観察（スケッチ）と写真撮影、塗膜厚、交流抵抗値測定をほぼ毎年行った（表4.1.4）。19.5年暴露材を引き上げ、外観観察、写真撮影、交流抵抗値測定に加えて、ピンホール検査、付着力測定を行った。現地測定位置は図4.1.1とほぼ同じ箇所である。

4．1．3 試験結果

4．1．3．1 外観観察結果

無防食材（B-4シリーズ普通鋼）の年毎の観察結果（スケッチ）とその写真を図4.1.4に示す。図では普通鋼のみを示すが、低合金鋼も外観的にはほとんど違いはなかった。外観は、普通鋼、低合金鋼ともに全面が赤さびに覆われ、飛沫部を中心にさびこぶが発生しており、暴露後３年目程度から確認され、徐々に明瞭になった。

低合金鋼と普通鋼に無機ジンクリッチペイント＋タールエポキシ樹脂塗装を施した試験材は計３種類暴露しており、すべての試験材で塗膜はく離や発錆が数多く見られた。このような外観の変化に対し、鋼材成分による差（普通鋼と低合金鋼）は認められなかった。亜鉛系皮覆＋塗装材は、19.5年の試験期間中に外観の変化はほとんど認められなかった。

4．1．3．2 現地調査結果

(1) 無防食材の現地調査結果

無防食材の自然電位の変化を図4.1.5に示す。測定は約３年間のみ実行したが、無防食材はこの間でほぼ一定の電位を示した。低合金鋼（B-1シリーズ）と普通鋼（B-4シリーズ）を比較すると、普通鋼が50mV程度低い電位を示した。両者の電位差は、電気的な接続がある場合には異種金属接触腐食の発生も起こり得る電位差であり注意が必要である。

図4.1.6に無防食材における貝類などの生物付着量の測定結果を示す。生物付着量は年毎の変動が大きく、特に、暴露2.5年目のB-4シリーズで非常に多い付着量であった。無防食材の生物付着量は暴露期間による差はあるが、材料間の差は認められず、平均的には100g/m^{2}以下である。この結果より、生物付着量は毎年蓄積しながら増加するものではなく、付着と脱離を繰り返しながら毎年平均的な量が付着しているものと考えられる。本測定の結果を元に長期の状態を予測すると、本試験の環境での付着量はおおむね100g/m^{2}以下であると考える。

(2) 塗装材の現地調査結果

塗装材の電位測定結果を図4.1.5に示す。測定結果にはばらつきもあるが、無防食材よりも100mV程度低い電位を示した。これは、下塗り塗膜が無機ジンクリッチプライマーであり、下塗り塗膜中に含まれる亜鉛粒子による犠牲防食作用が働いているためと考えられる。もし、塗膜部がこの電位に維持されているとすると、塗膜欠陥部の露出鋼面は防食される電位である。しかしながら、引き上げ材を解析した結果によると、5.5年目では、塗膜欠陥部の鋼材腐食は顕著ではないが、9.5年目以降では塗膜欠陥部において鋼材の腐食が顕著になっており、上記無機ジンクリッチペイントによる防食作用は存在したとしても長期間の効果には乏しいと思われる。

図4.1.7に塗膜厚の現地測定結果をまとめて示す。B-5-3ならびにB-2-1は他の試験体に比べ暴露初期より塗膜厚が200μm程度薄く、また、B-3-1は他の試験体より100μm以上塗膜厚が厚かった。この結果は劣化により変化したのではなく、塗装試験材の製作時のばらつきと考えられ、各試験体でのデータの取り扱いには注意を要する。全体の塗膜厚測定結果の時間変化を見ると、全ての塗装材で時間経過に伴い、徐々に塗膜厚が減少していることが分かる。そしてその減少量は数十μmの範囲である。

塗膜の交流抵抗値の現地測定結果として、1kHzの交流抵抗値の経年変化を図4.1.8に示す。B-5シリーズで暴露初期に$10^6\Omega \cdot cm^2$程度の低い抵抗値が得られているが、4年目以降は、$10^8\Omega \cdot cm^2$程度で変化なく、ほぼ一定値になっていた。また、程度の違いはあれ、B-2、B-3シリーズも同様の結果であった。ここで、4年目以降の安定した交流抵抗値が、現場測定部（大気・飛沫部）の塗膜抵抗値として測定できていると考えると、暴露初期の低い交流抵抗値は塗膜性能以外の現場測定上の問題、たとえば、電極やケーブル端子などに飛来海塩粒子が付着したようなことが考えられる。

(3) 亜鉛系皮覆＋塗装材の調査結果

図4.1.9はZn-Al溶射＋塗装材、ならびに亜鉛めっき＋塗装材の塗膜厚、図4.1.10は交流抵抗値の現地測定結果をそれぞれ示す。塗膜厚、1kHzの交流抵抗値ともに現地測定結果は19.5年の間で変化が少なかった。

4. 1. 3. 3 引き上げ後調査結果

(1) 無防食材の調査結果

無防食材B-1シリーズ（普通鋼）、B-4シリーズ（低合金鋼）の引き上げ除錆した後の外観の経時変化を図4.1.11、図4.1.12にそれぞれ示す。両試験体ともに、時間経過に伴って表面の凹凸が大きくなっているのがわかる。表面の凹凸は干満帯で明瞭でないが、飛沫帯では目立つ。これは腐食量と対応があり、腐食が進行するに伴って目立ってくるためと考えられる。それぞれ特徴的な部分を拡大して表示した写真を図4.1.13～15に示す。B-1シリーズの低合金鋼とB-4シリーズの普通鋼との差がわかり易いように、両鋼種を並べて示す。飛沫帯では両鋼種ともに凹凸が目立つが、低合金鋼の方が凹凸がより明瞭であるよ

うに見られる。干満帯、海中部では両鋼種の差はほとんど認められない。腐食による凹凸形成は鋼種の差より環境の違いが大きく、飛沫帯では比較的大きな直径２、３cm程度の窪み状の腐食が認められ、干満部では、直径数mm～１cm程度の小さな孔食状の凹凸が形成されている。さらに海中部では、所々に直径５cm程度の陥没した様な腐食形状が認められる。これらは一見すると生物付着との関係が類推されるが、このような腐食形状と生物付着を含めた環境因子の関係に関しては、今回の結果からは明らかではなく、また、既往の文献でも報告例は見当たらない。

図4.1.16は引き上げた無防食材の板厚減少をＢ-1シリーズ、Ｂ-4シリーズについてそれぞれ示す。飛沫帯における板厚減少が大きく、干満帯上部の板厚減少は小さい。干満帯下部と海中部の板厚減少はその中間である。平均的な板厚減少についてはＢ-1シリーズ（低合金鋼）とＢ-4シリーズ（普通鋼）の差は認められない。

図4.1.17に板厚減少、すなわち鋼材の腐食量の経時変化を環境毎に示す。飛沫帯上部が最も腐食量が大きく、次に飛沫帯下部であった。その次に腐食量が大きいのが干満帯下部と海中部であり、干満帯上部は最も腐食量が少なかった。飛沫帯では、時間経過に伴い腐食量が直線的に増加し続けている。干満・海中部でも初期には腐食量の直線的な増加が見られるが、時間経過とともに腐食量の増加が小さくなっている。普通鋼と低合金鋼とでは明確な差異は認められない。海水環境での低合金耐食鋼の腐食メカニズムに関しては、松島が開発の経緯も含めてまとめているので、詳細はそちらを参照していただきたい[1)]。

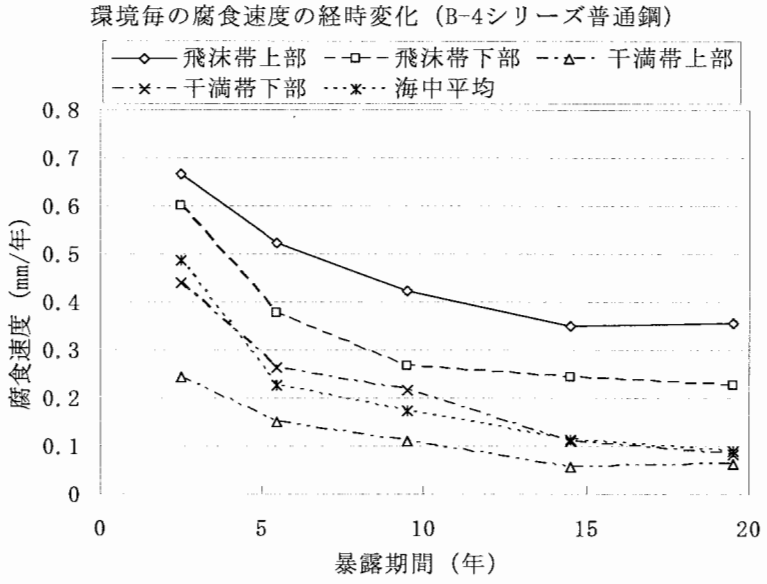


図4.1.18 無防食材の腐食速度の時間変化

図4.1.18は腐食量を腐食速度として計算した結果を示す。ただし、本暴露試験では、試験体は所定の期間で引き上げて腐食量を測定しているため、ここに示す腐食速度とは試験期間の異なる複数の試験体（図では５体）の腐食量をそれぞれの暴露期間で割ったもので

あり、瞬間的な腐食速度ではなく、それぞれの試験体について時間的に平均した計算値である。すなわち、図における長期（14.5、19.5年）の腐食速度の値には、暴露初期の腐食速度をも含むことに注意を要する。ここで、B-4シリーズの普通鋼において腐食速度が初期から減少し続けており、9.5年を越えるとほぼ一定値になった。この結果では、暴露初期に低合金鋼B-1シリーズで腐食速度が普通鋼（B-4シリーズ）に比較して小さいことが認められるが、5.5年目以降ではその差は認められない。こちらもやはり時間経過に伴い腐食速度は低下し、9.5年以上ではほぼ一定の値になった。このような腐食速度の時間変化は、本試験において19.5年という長期にわたり、試験材を定期的に解析した結果得られたことにより、初めて得られた貴重なデータである。また、耐海水鋼と呼ばれていた低合金鋼は、短期間の暴露試験では普通鋼に比較して小さい値が得られていたものの、長期間の結果では有意差がないこともわかった。

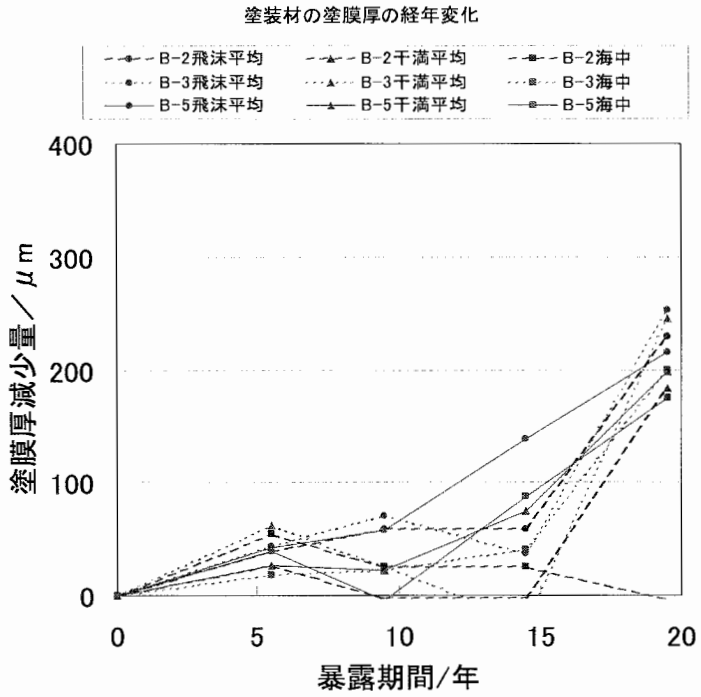


図4.1.20 各種塗装材の塗膜厚の経時変化

(2) 塗装材の調査結果

図4.1.19は、B-2、B-3、B-5シリーズの普通鋼（低合金鋼）＋厚膜形無機ジンク75μm＋タールエポキシ樹脂塗装（600μm）材における試験前後の塗膜厚の変化を膜厚減少量として示した。また、図4.1.20には、飛沫、干満、海中部毎の膜厚減少量の時間変化を示す。図4.1.19中の測定不能と示した位置は、測定箇所が腐食の進行によりさびが発生し塗膜厚の測定ができなくなっていた部分である。いずれの試験体でも19.5年間で塗膜厚が大きく減少していることが分かった。塗膜厚の減少傾向に、飛沫、干満、海中の差はあまり見られない。塗膜厚の減少量は、全体で平均すると250μm程度になり、年間平均では10数μm程

度の減少になる。ただし、B-2、B-3シリーズで15年までの塗膜厚の減少量はそれほど大きくないのに、19.5年で急に大きくなっていた。

図4.1.20と図4.1.7を比較してみると、図4.1.7の測定部位は図4.1.20の飛沫平均に相当すると考えられる。図4.1.7ではB-2-4、B-3-4の測定結果は20年間にわたり、膜厚の減少がそれほど大きくない。一方、図4.1.20の引き上げ材の測定結果では、特に14.5年目から19.5年目の結果で大きく膜厚が減少している。この結果に関しては現場測定での誤差要因と塗膜の乾燥などの影響が出ている可能性はあるが、測定精度の観点から引き上げ材の測定結果の信頼性が高いため、塗膜厚が14.5年から19.5年の間で急激に減少したと考えるのが妥当である。

図4.1.21にはB-2、B-3、B-5シリーズの普通鋼（低合金鋼）＋厚膜形無機ジンク75μm＋タールエポキシ樹脂塗装（600μm）材の交流抵抗値（1kHz）の測定結果を示し、さらに、図4.1.22～24は交流抵抗値の周波数依存性をそれぞれ示す。ここで、山と示したのは試験材がLアングル形状なのでその外側、谷はその内側であることを意味する。以降、同様に山と谷を測定された位置に関しての記述として用いる。

1kHzの交流抵抗値は試験材の種類と関係なく14.5年目まではそれほど変化がなく、19.5年目において大きく低下していることが分かった。それも海中部と干満部で低下が大きい。また、山と谷では山側で低下が大きい場合が多い。周波数依存性でも同様のことがわかる。

塗膜の交流抵抗値の低下は塗膜の防食性能の低下と対応があると考えられ、19.5年暴露材で明確になってきている。塗装材の劣化過程は未だ明らかになってはいないが、塗膜厚の変化や交流抵抗値の変化を見ると、時間経過に伴って徐々に変化するのではなく、ある時間が経過すると一気に劣化が進展する傾向があることがわかる。このことは、短期間の評価では明らかにならず、19.5年間定期的に評価し続けた結果明らかになったことである。

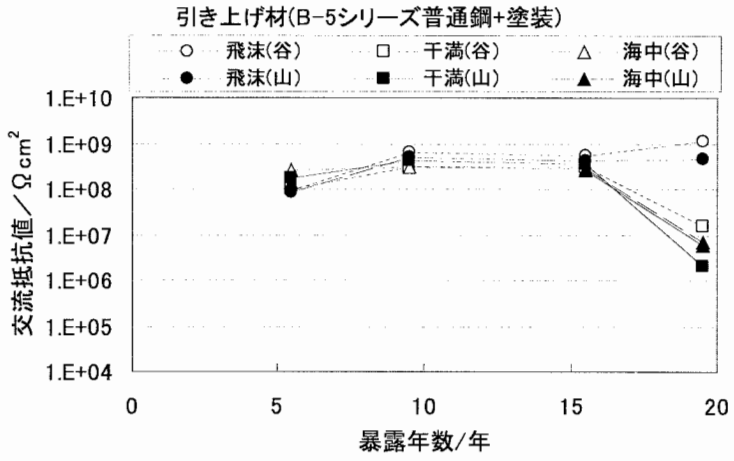


図4.1.21 塗装材の交流抵抗値（1kHz）の時間変化

図4.1.25は付着力の測定値の時間変化を示す。個々の試験体では、飛沫帯、干満帯より

も海中部での付着力が低下しているものが認められるが、暴露期間と付着力の低下にはあまり関係が見られない。

(3) 亜鉛系皮覆＋塗装材の調査結果

図4.1.26はZn-Al溶射と亜鉛めっき上に塗装を施した試験体の引き上げ後の塗膜厚を示す。初期測定値のデータが欠落したので、増減に関しての正確な情報は得られないが、A-6において、海中部で塗膜厚が厚い結果となっている。これら試験体の引き上げ後の交流抵抗値を図4.1.27に示す。交流抵抗値の低下は認められず、塗膜としての劣化はあまり進んでいないと思われる。

また、付着力の測定結果を図4.1.28に示す。付着力の低下が起こっているとは思われないが、一部塗膜と亜鉛系皮覆の界面ではく離しているケースが見られた。これらの試験体は上塗りの塗膜厚が厚く、この部分の性能低下が進んでいないため、塗膜層下の溶射皮膜やめっき皮膜の防食性能を評価し得るには到っていないと考えられる。

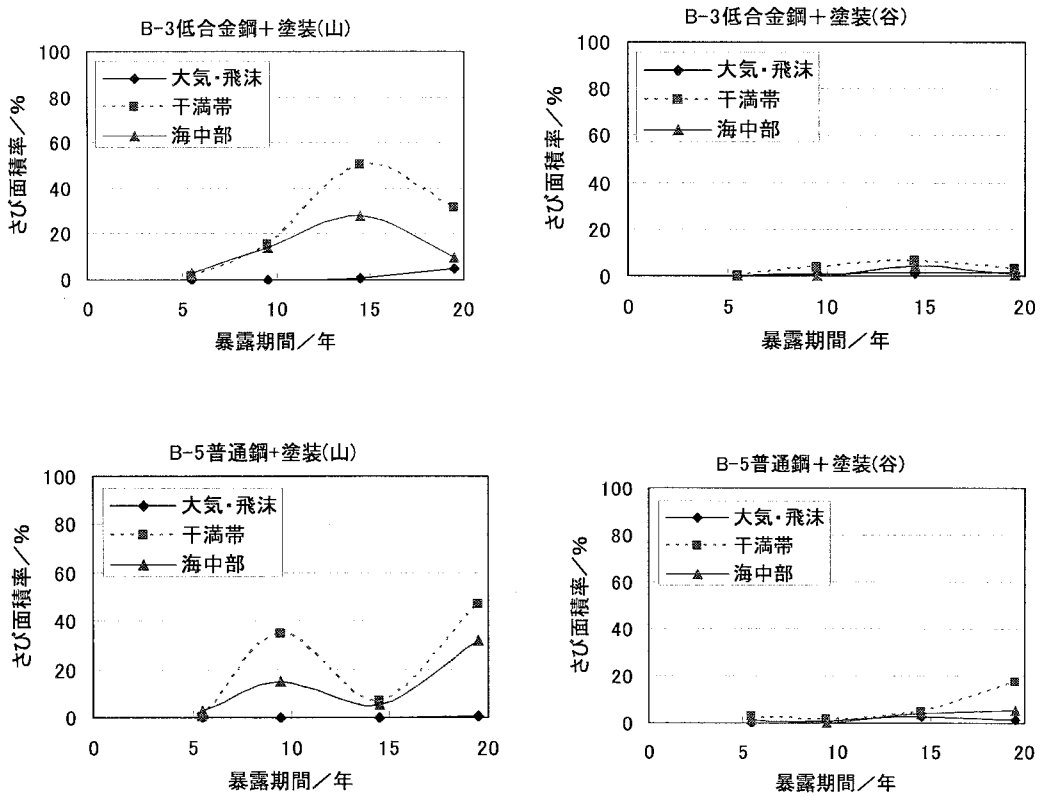


図4.1.32 塗装材の外観観察結果を画像処理したさび面積率の時間変化

4．1．3．4 塗装材の外観変化の定量的な評価

図4.1.29は、普通鋼に厚膜系無機ジンク＋タールエポキシ樹脂塗装を施した5.5年暴露材の引き上げ後の外観写真、図4.1.30は19.5年暴露材の外観写真をそれぞれ示す。5.5年材で

は、塗膜の上塗り層のはく離が数箇所認められるが、はっきりとしたさびが認められる部位は少なかった。これが20年暴露材では数多くの箇所で塗膜がはがれ、さびの発生している部分が見られた。特に干満帯下部より海中部では激しく腐食している部位が見られた。

試験体は約５年おきに引き上げて評価したので、腐食（さび）面積を画像処理により定量化することを試みた。しかしながら、引き上げ後の外観写真は、年次が異なった場合に同一の条件で撮影できなかったので比較評価が難しく、そこで、全ての試験体でほぼ同一条件で評価した外観スケッチ図を基にさび面積率の定量化を試みた。図4.1.31は普通鋼＋厚膜形無機ジンク75μm＋タールエポキシ樹脂塗料600μmの塗装を施したB-5シリーズの外観スケッチの結果を示す。画像処理が行い易いようにさび部は赤く塗りつぶした。これらの図よりさび面積率を計算した結果を表4.1.5に示す。さび面積率は、19.5年暴露したB-5シリーズ（普通鋼＋塗装）の干満帯でもっとも大きな約50%という値を得た。

これらさび面積率の結果をグラフ化したものを図4.1.32に示す。さび面積率は、時間経過に伴い徐々に増加しているわけではなく、B-5の山部のように、9.5年目で多くなり、14.5年目で少なくなっている場合がある。回収して詳細評価した試験体を再度暴露すると結果に引き上げの影響が出るため、本試験では順次引き上げて解析した。その結果、同一試験体を連続観察することが出来ず、試験体間で劣化の状態にばらつきがあったためと考えられる。また、全てのシリーズで山と谷の違いが認められ、山部の方がさび面積率が大きい。これは波の当たり方の違いや波による付着生物のはがれに伴う塗膜の損傷の違いなどによるものと考えられる。

このような塗膜の劣化過程を近似する関数として、Gompertz関数が提案されている。Gompertz関数は下式に示される関数形をしている。

$$y = K \cdot a^{b^t}$$

図4.1.33はGompertz関数のパラメータを変えたときにグラフの形状がどのように変化するかを示したものである。定数Kは時間tが無限大になった際の値で、この場合はさびが全面に広がることを考えて1.0とした。定数aは時間tが0の時の値を決めるパラメータで、今回は塗膜の初期欠陥率を0.5%と考えて0.005を採用した。そして、bを変化させることで関数をデータに近似させた[2)]。

表4.1.5の結果より、個々の試験体のばらつきを平均化する目的で、B-2、B-3、B-5シリーズを平均化し、それをGompertz関数に合わせた結果を図4.1.34に示す。さび面積率を平均化したこともあり、劣化の進展は本関数に近似していることがわかった。

これらの図より、さび面積の進展は山部の干満帯で最も大きく、その次に海中部で飛沫帯の順に小さいこと、また山部に比べて波の影響が少ないと考えられる谷部で劣化の進展が遅いことがわかる。また、劣化の進展速度が遅い谷部や山部の飛沫帯はGompertz関数に良く対応するが、山部の干満帯や海中部では対応が悪いこともわかる。これは、山部の干満帯や海中部では付着生物が波力によりはがれ落ちる場合に塗膜を損傷する可能性や、劣

化の進展がマクロセル的な腐食の影響も受けている可能性があるためと思われる。いずれにせよ、この様な推定曲線に近似することで塗膜劣化の定量化と塗膜の寿命推定につなげていけると思われ、今後の検討課題である。

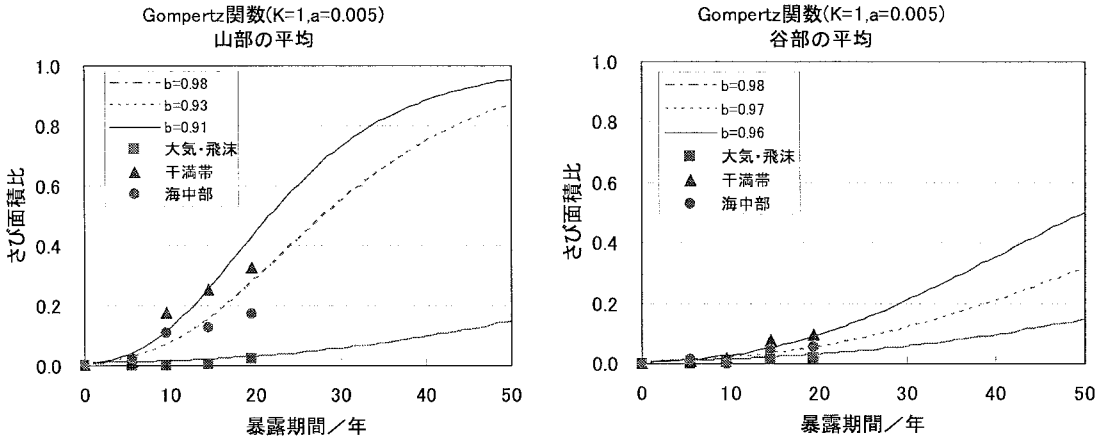


図4.1.34 塗膜のさび面積率（平均値）をGompertz関数に合わせた結果

4．1．3．5 鋼材腐食形状の詳細解析

図4.1.35に無防食材の残存板厚のレーザー変位計による詳細測定結果を示す[3]。図では19.5年暴露した普通鋼（B-4-6）を幅100mm、長さ3,800mmの長尺試験片に切断し、長尺材のまま１mmピッチで片面ずつ全長測定し、両面の測定結果より板厚を計算して表示したものである。また、図4.1.36はこの測定値を幅方向で平均した結果を、これまでの暴露試験の解析で行ってきた200mmピッチで測定した腐食測定結果と対応させて表示したものである。飛沫帯での残存板厚が薄くなっていること、またそれぞれの部位での凹凸の形状が正確に測定できている。また、深さ方向の平均値は200mmピッチで粗く測定したこれまでの結果との対応もあり、本方法で精度良く板厚が測定できていることがわかる。

図4.1.37～39は、より精度良く測定するために、19.5年暴露した普通鋼（B-4-6）を幅100mm、長さ200mmの小試験片に切断し、この切断片をベースの高さを一定にするためにアルミのホルダーにねじ止めし、0.3mmピッチで片面ずつ詳細測定し、両面の測定結果より板厚を計算した結果をそれぞれ示す[3]。実際は全長で16試験片測定されたが、ここでは典型的な３試験片の結果のみを示す。

図4.1.40は測定値を幅方向で平均し、過去の結果と比較して示す。詳細解析の測定値はポイントマイクロメータにより計測したマクロな測定結果と一致している。今後は、これらの詳細な凹凸の形状と環境要因の関係や、構造耐力との対応も検討していく[4]。

4．1．4 考察

4．1．4．1 無防食材の腐食

無防食材の腐食調査より、飛沫帯が大きな腐食速度を持ち、干満帯は逆に小さく、海中

部は約0.1～0.2mm/年の腐食速度であるという腐食傾向に関しては、従来知見とほぼ一致した結果が得られた。しかしながら、19.5年間に鋼材の腐食量が時間とともに直線的に増加する（腐食速度が一定）のではなく、初期から9.5年にかけて徐々に腐食速度が低下してくる事が分かった。これはさびの蓄積や付着生物の影響によるものと思われる。これまで海洋での鋼材の暴露はいくつか報告されているが[5-8]、このような結果は得られておらず、本研究が19.5年という長期にわたり定期的に評価し続けた結果得られた新しい知見である。

1970年代に鉄鋼各社により商品化された耐海水鋼と呼ばれていた低合金鋼[9]は、本試験場での長期暴露試験により、腐食量という観点では普通鋼に対して優位性は認められなかった。また、腐食により形成された凹凸も顕著になる傾向が見られた。さらに、電位も普通鋼に対して50mV貴になり、両者を組み合わせて使用する際にはマクロセル腐食に関する注意を要する。

19.5年間暴露した無防食の普通鋼に対しては、今回新たに、長期間の腐食により鋼材表面に形成されたミクロな凹凸をレーザー変位計により詳細に計測することを試みた。測定結果の詳細な解析は現在も進行中であるが、最小0.3mmピッチで腐食形態や残存板厚のミクロ分布が測定されており、これらを詳細に解析することで、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が期待される。

4．1．4．2 塗装材の解析

普通鋼にタールエポキシ樹脂塗装を施した試験材の解析では、引き上げ材の交流抵抗値が14.5年目まではほとんど変化を示さなかったのに、19.5年目で大きく低下したことが明らかになった。また、塗膜厚も14.5年までの測定結果と19.5年の測定結果とでは大きな変化が認められた。これらの結果とさび面積を画像処理によって定量化した結果に相関関係があることが認められる。すなわち、塗膜の劣化進展は、時間に対して直線的でなく、時間経過に伴い急激に劣化が進展し始める時期があるように思われる。これをGompertz関数のような非線形な関数系に近似することで、有機系防食材の劣化過程を定量的に推定することが可能になると考えられる。さらに、引き上げ材の交流抵抗値は塗膜の劣化の指標となり得ることが分かった。

しかしながら、現場で19.5年間にわたり交流抵抗値を含めいくつかのデータを取得し続けてきた結果と、引き上げ材を解析した結果とは明快な関係が得ることができなかった。また、膜厚測定結果や交流抵抗値の測定結果では、現場での測定結果と引き上げ材の測定結果とが必ずしも一致しないことも明らかになった。これは現場で膜厚や交流抵抗値などを測定する場合の装置的、あるいは足場の不安定さなどによる測定誤差が大きくなるというできる問題と、測定部位が飛沫帯中心に限られ、さらに飛沫帯における有機被覆の劣化がそれほど大きくないことなどが原因と考えられる。逆に、引き上げ材では、干満・海中部での塗膜の劣化が大きい部分が評価でき、かつ陸上でこれらの部位の交流抵抗値が精度良く測定できるため、交流抵抗値などの測定結果と塗膜の劣化との相関が認められたと考

えられる。今後は、干満部・海中部における塗膜の劣化を現場でモニタリングする方法の検討が望まれる。

今回、引き上げ材のスケッチ図をデジタル化して画像処理を行い、さび面積を数値化することで劣化の進展を定量化できた。本来は、外観写真を画像処理することがより精度を上げることになると考えられるので、現場での写真の撮り方や評価の標準化などが必要と考えられる。

4. 1. 4. 3 試験全体

本研究における試験期間中の評価は、防食材の健全部を中心に行われてきた。たとえば、塗膜の劣化でも、あて傷などは評価から外したり、交流抵抗値や塗膜密着力の測定も測定困難な塗膜劣化部を避けて、塗膜の健全部を評価してきた。昨今、防食材が高性能化し、長期の耐久性が要求される中で、傷部や端部などが防食工としての劣化の起点になってきた。したがって、今後はこれらの劣化起点をいち早く検出して、その部位での劣化進展を評価することが重要と考えられる。

また、これまで比較的定性的な評価が主体であった防食材の劣化評価に、定量的な評価を行えば、寿命推定につながる結果が得られることが分かってきた。今後は、引き上げ材を定量解析する手法とそれに対応する現場的なモニタリング法の検討が必要である。とりわけ、防食材の劣化部を現場的にモニタリングする方法の開発が望まれる。

4. 1. 5 まとめ

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樹脂塗装を施して、19.5年間暴露した防食工の劣化を詳細に解析した。その結果、

1) 海洋環境で普通鋼を無防食の状態で暴露させた場合、飛沫帯、干満帯、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。「港湾の施設の技術上の基準・同解説」では、鋼材の腐食速度の標準値として、飛沫帯では0.3mm/年、干満部で0.1～0.3mm/年、海中部で0.1～0.2mm/年を記載している。これに比べ、本暴露試験の結果は、飛沫帯で5.5年間の短期間では0.4～0.5mm/年と大きな値を示すが、14.5年を超えると0.25～0.35mm/年の値であり、干満部でも同じく5.5年間の短期間では0.15～0.25mm/年に対して14.5年を超えると0.1mm/年以下、海中部でも同じく5.5年間の短期間では0.25mm/年に対して14.5年を超えると0.05mm/年と低減するという結果を得た。上記基準の腐食速度の標準値は、数十年の供用期間の港湾施設を対象として、供用期間中の平均値という観点から設定されており、本試験の結果は同様の結果となった。
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。

3) 今回新たに、腐食により形成されたミクロな凹凸をレーザー変位計を用いて詳細に計測することを試みた。これにより腐食後の鋼材の形状を３次元的に正確に得ることが出来た。今後、測定した腐食形態を詳細に解析することで、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が期待される。特に、腐食量を簡便に予測し、その結果としての板厚減少量と構造耐力とを評価できるシステムの開発が望まれる。

4) タールエポキシ樹脂塗装材では、初期から14.5年目までの劣化の進行と19.5年目の結果とを比較すると、19.5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。

なお、タールエポキシ樹脂塗料は発がん性が懸念されており、各種基準類でも使用しない方向であることから、その他の研究報告などでほぼ同等の性能があるとされている超厚膜形塗料を適用すると良い。

5) 塗装材に対する現地でのモニタリング結果（交流抵抗値測定）は、劣化状況とあまり相関がなかったが、引き上げ材の劣化状況と交流抵抗値には相関があった。これは、現場でのモニタリングにおいて測定条件を一定にすることが困難であることに起因すると考えられるため、測定手法の改善が望まれる。

6) これまで、塗装材の劣化評価においては、測定可能な健全部を対象とし、塗装端部やあて傷部などを除外して評価してきたが、耐久性の高い被覆鋼材においては、これら劣化の起点となる部位を早く検出し、その部位の劣化進展を評価していく必要がある。

ところで、これから建設される海洋構造物では、鋼材を無防食で用いることはまず無いと考えられるが、あまり長期の耐久性を要求されず、溶接部や格点部などの構造を選ばず、工場施工だけでなく現地施工も可能である安価な防食仕様として、無機ジンク＋タールエポキシ樹脂塗装（600μm程度）が採用されることも十分考えられる。その場合、今回の結果より、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。これに対して、干満帯、海中部では10年から15年程度で劣化が目立ち始め、20年では急激に劣化が進展していくことが予測できる。

そこで、海中部では電気防食を併用する、干満部では外観評価を２～３年間隔で行いながら必要とあればメンテナンスしていくことを推奨する。それにより、20年程度の耐久性は期待できると考えられる。また、20年以降は適切な保全・補修を繰り返しながら使用していくことを推奨する。その際に、今回の結果で分かるように、塗装材の劣化は時間に対して直線的に進むのではなく、ある時間を経過した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。

参考文献

1) 松島巌「低合金耐食鋼－開発,発展、そして研究」、地人書館（1995）
2) 伊藤義人、金仁泰、貝沼重信、門田佳久、土木学会論文集No.766/I-68、291（2004）
3) 山沢哲也、野上邦栄、伊藤義人、渡邉英一、杉浦邦征、藤井堅、土木学会第60回年次学術講演会CD-ROM,I-030（2005）
4) 近藤恒樹、田村功、藤井堅、渡邉英一、伊藤義人、杉浦邦征、土木学会第60回年次学術講演会CD-ROM,I-360（2005）
5) 守屋進；鋼橋塗装、28（3）、15（2000）
6) 山本正弘、加治木俊行；第50回材料と環境討論会予稿集、37（2003）
7) 善一幸「海洋構造物（腐食の実態と対策）」鹿島出版会（1979）
8) B.R.Hou、J.L.Zhang、H.Y.Sun、Y.Liand、B.Xiang;British Corrosion jounal、36（4）、310（2001）
9) 鋼材倶楽部：鋼材防食調査委員会報告書、「鋼材の腐食防食に関する資料」、p.126（1973）

表 4.1.1　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(ﾌﾞﾗｽﾄ処理)	L型	140×140×18^{t}×3800^{l}		○	○	○	○	○	○		6	1	B-1-5
B-2-1～4	低合金鋼A＋塗装	無機ｼﾞﾝｸﾘｯﾁ(75μm×1回) +ﾀｰﾙｴﾎﾟｷｼ(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(ﾌﾞﾗｽﾄ処理)	L型	140×140×20^{t}×3800^{l}		○	○		○	○	○	○	6	2	B-4-5,6
B-5-1～4	普通鋼(SS400)+塗装	無機ｼﾞﾝｸﾘｯﾁ(75μm×1回) +ﾀｰﾙｴﾎﾟｷｼ(300μm×2回)	L型	140×140×20^{t}×3800^{l}			○		○	○	○		4	1	B-5-4

表 4.1.2　無防食材と塗装材下地鋼材の化学成分

記号No.	鋼種	化学成分(質量%)							
		C	Si	Mn	P	S	Cu	Cr	その他
B-1 B-2	低合金鋼A	0.17	0.48	0.87	0.108	0.02	0.24	0.53	
B-3	低合金鋼B	0.056	0.53	1.43	0.085	0.004	0.32	—	Nb (0.022) Ti (0.019) T.Al (0.044) N (0.0030)
B-4 B-5	普通鋼(SS400)	0.14	0.22	0.72	0.016	0.009		0.02	

表 4.1.3 亜鉛系皮覆+塗装材の暴露試験材

記号No.	防食系	防食仕様	形状	素材サイズ (mm)	塗装、被覆厚 (mm)	経過年数 19.5年
A-6	溶射+塗装	Zn-13Al(200μm) +ｳｫｯｼｭﾌﾟﾗｲﾏｰ +ｳﾚﾀﾝ(4000μm)	管	165.2φ×3500^{l}×11^{t}	4	○
A-12	溶融めっき+塗装	溶融Znめっき(130μm) +ｴﾎﾟｷｼﾌﾟﾗｲﾏｰ(30μm) +GF入りﾋﾞﾆﾙｴｽﾃﾙ(500μm×3回)	管	165.2φ×3500^{l}×11^{t}	1.66	○

表 4.1.4　塗装材の試験項目及びとその方法

調査項目	試験方法
外観観察	目視(健全部、異常部)
外観写真	全景、接写(健全部、異常部)
生物付着状況	目視、秤量
塗覆装劣化調査	目視
膜厚測定	kett膜厚計、VL-30B、ﾚﾝｼﾞⅢ(300μm～8mm)
交流抵抗測定	三田無線、LCRﾒｰﾀｰ、D-55(交流0.2,0.5,1kHz)
塗膜ﾋﾟﾝﾎｰﾙ測定	ｻﾝｺｰ電子、ﾎﾘｽﾀｰⅠ型(3～12kV)、5kV印加
塗膜付着力測定	ｴﾙｺﾒｰﾀｰ社、ｱﾄﾞﾋｼﾞｮﾝﾃｽﾀｰ(0～70kg/m2)
塗膜下素地面観察	目視、写真

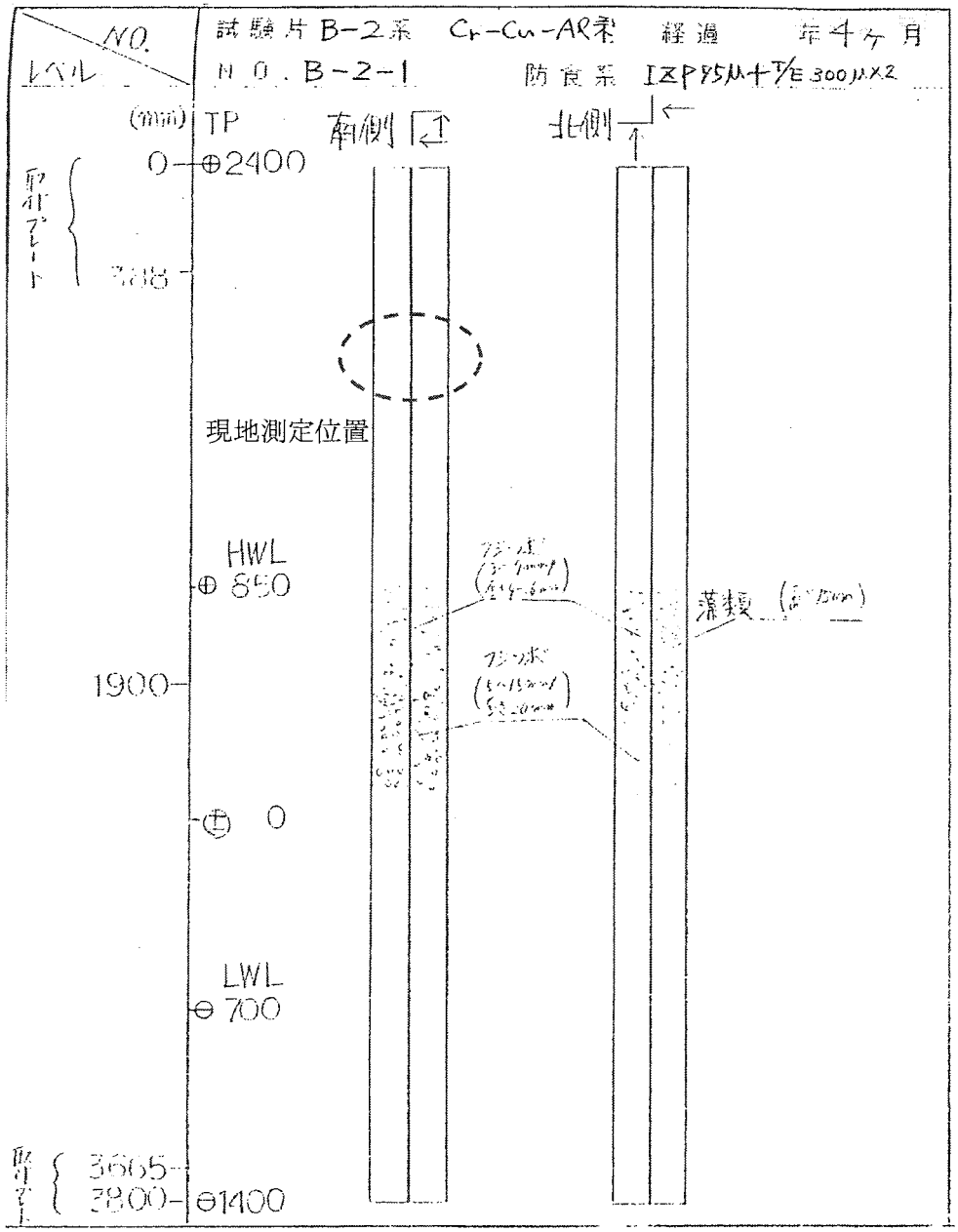
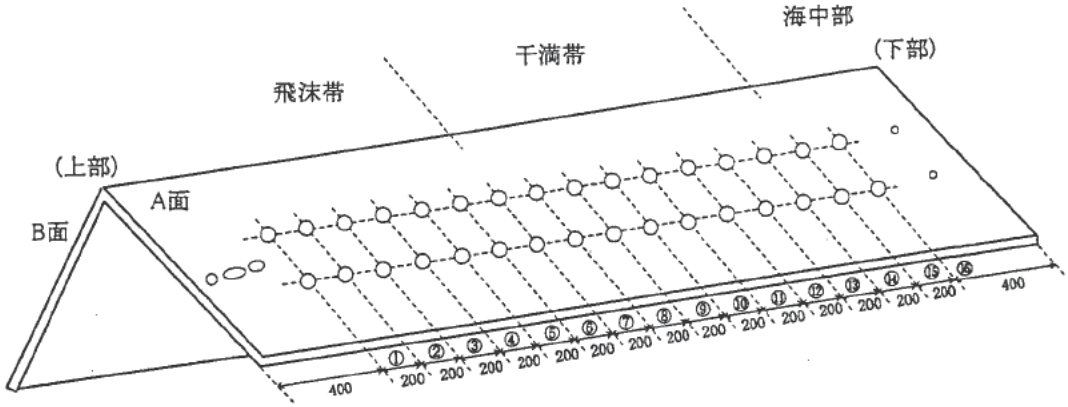
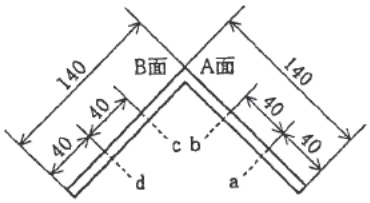


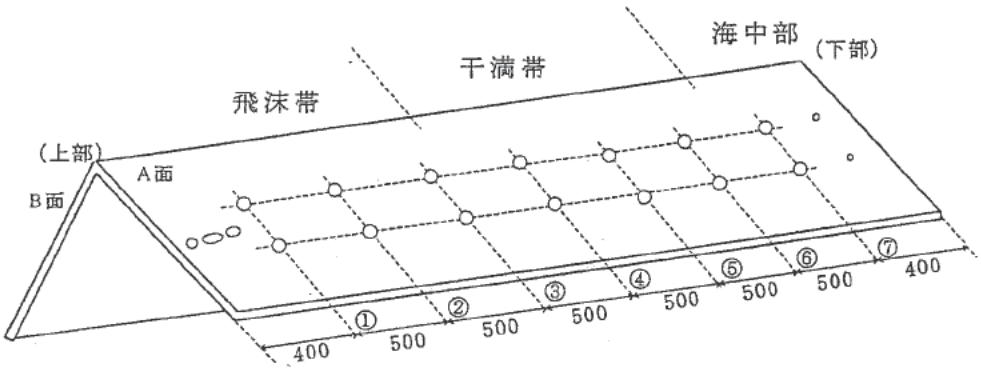
図 4.1.1　塗装材のスケッチの例と現地測定を行った位置

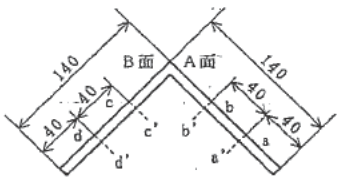




140×140型

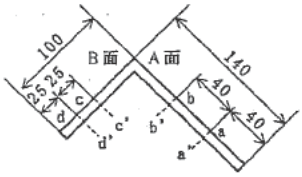
図 4.1.2　無防食材の引き上げ後板厚を測定した位置





140×140型

B-2-4材
B-5-4材



140×100型

B-3-4材

図 4.1.3　塗装材の引き上げ後、塗膜厚を測定した位置

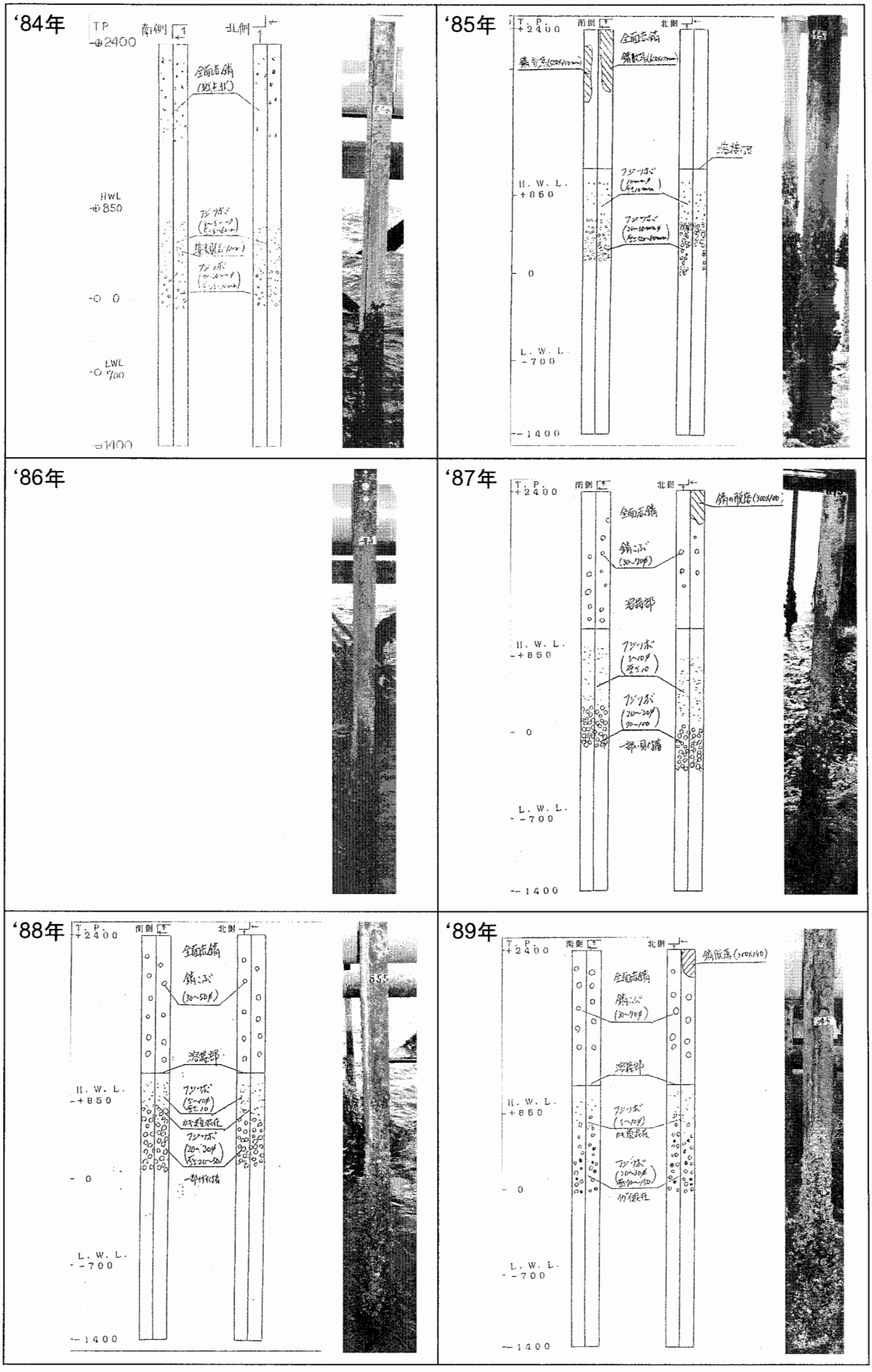


図4.1.4(1) 現地でのスケッチと外観写真(B-4シリーズ普通鋼,無防食)

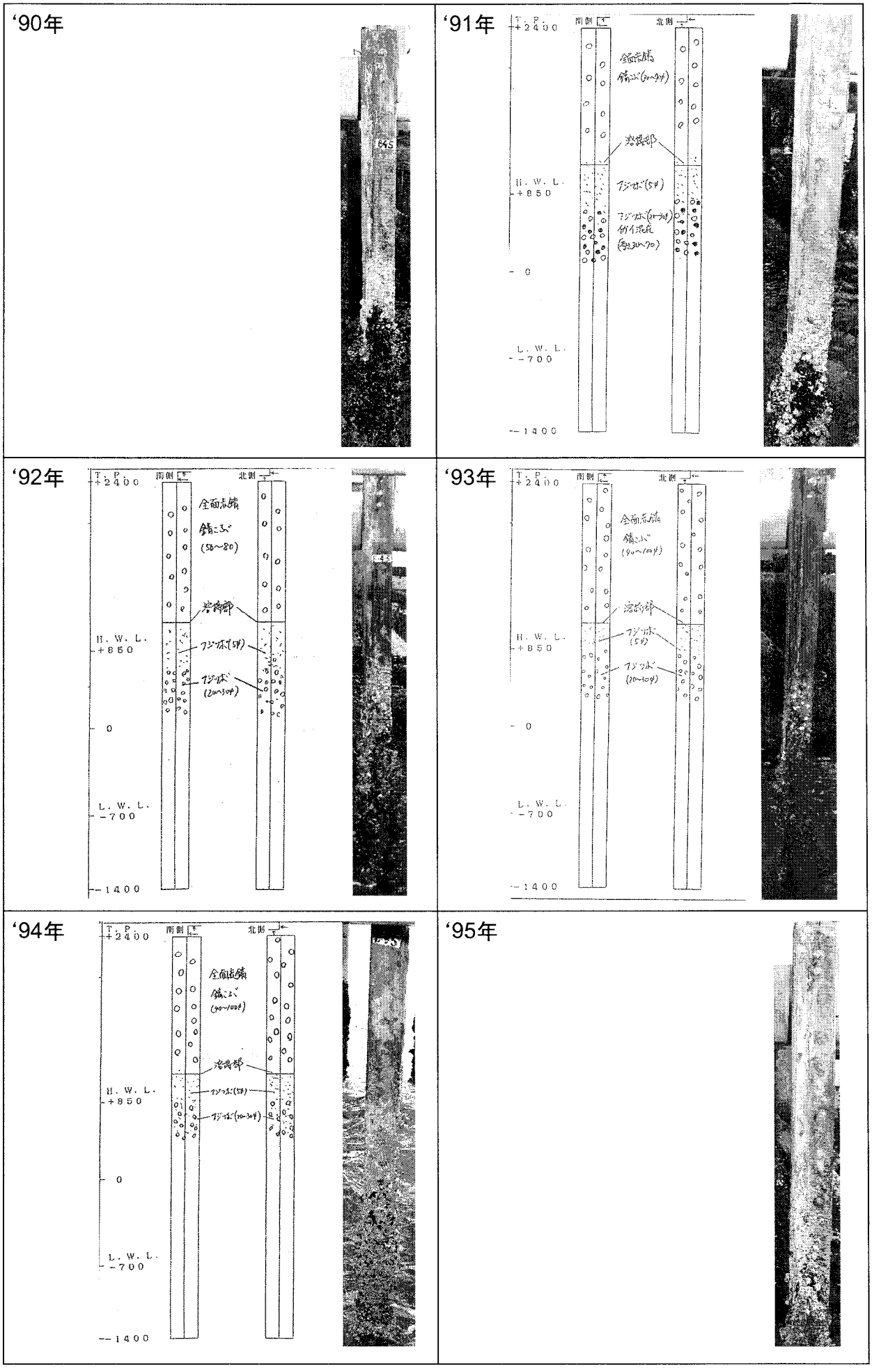


図4.1.4(2) 現地でのスケッチと外観写真(B-4シリーズ普通鋼,無防食)

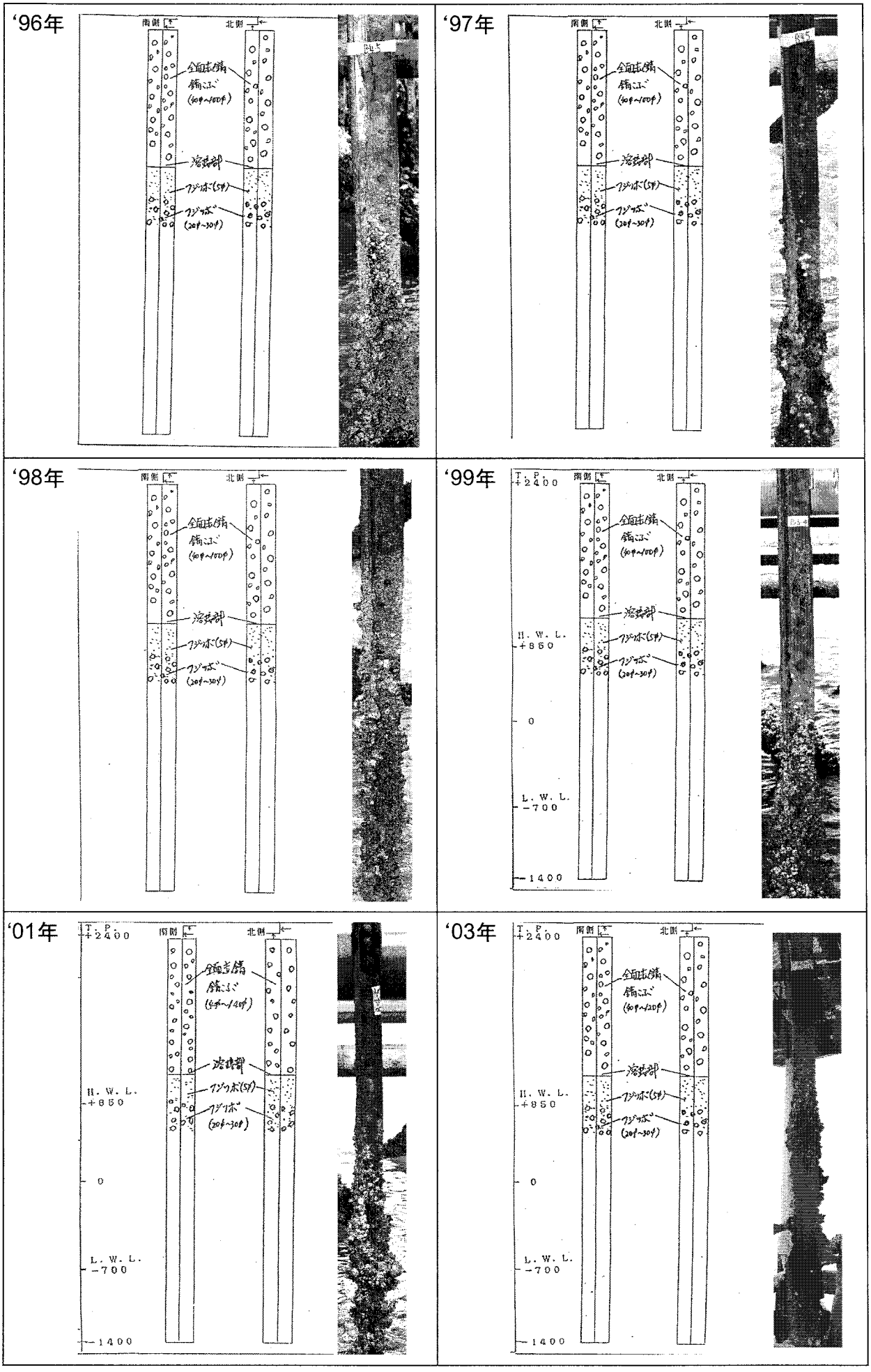


図4.1.4(3) 現地でのスケッチと外観写真(B-4シリーズ普通鋼,無防食)

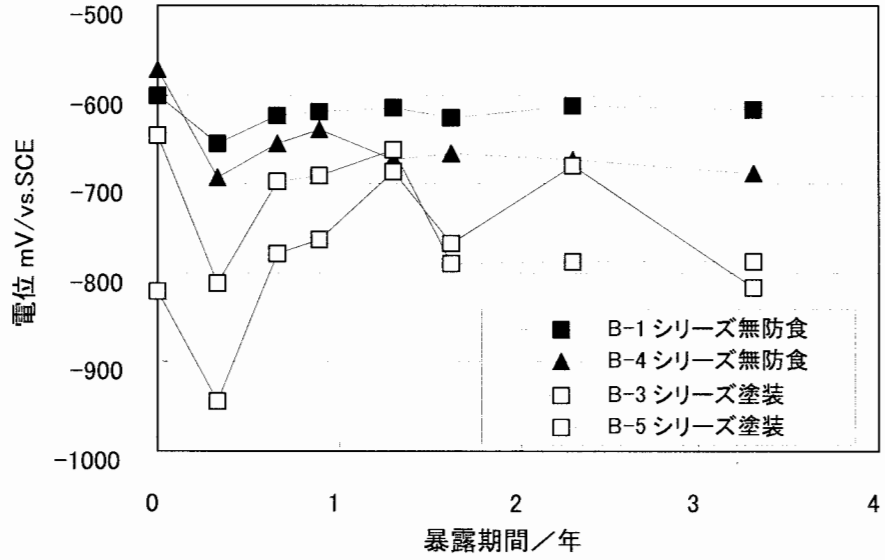


図 4.1.5　自然電位の時間変化

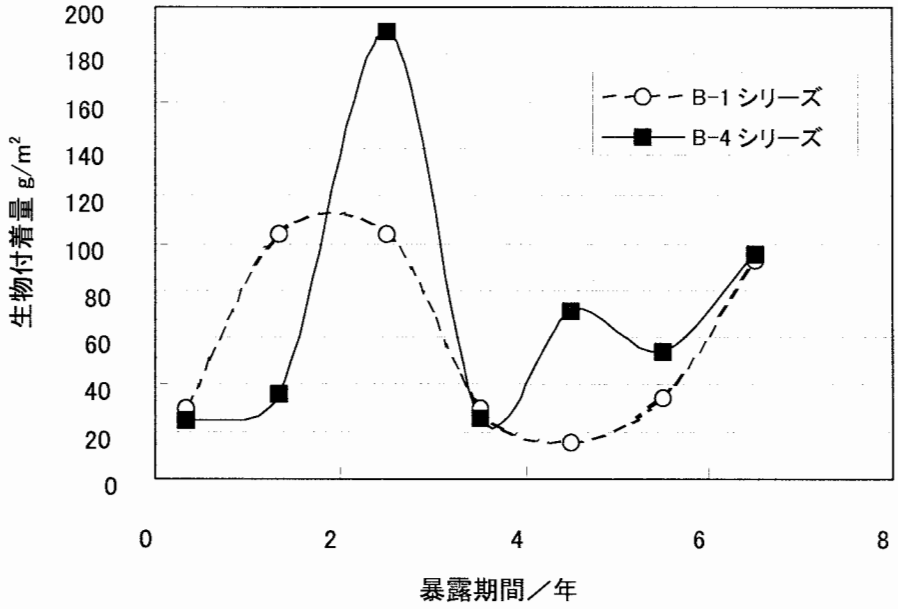
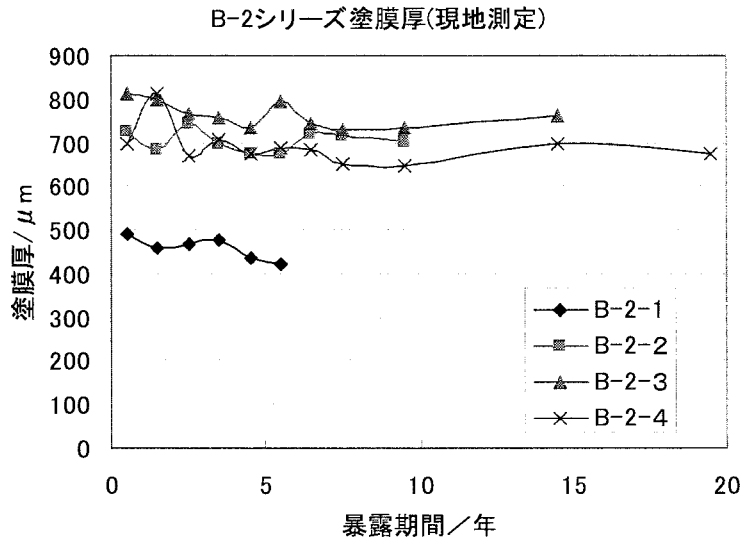
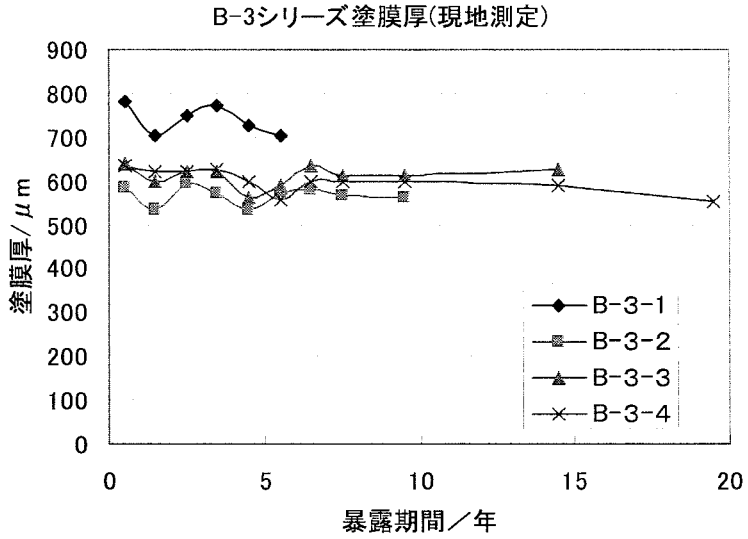


図 4.1.6　生物付着量の時間変化





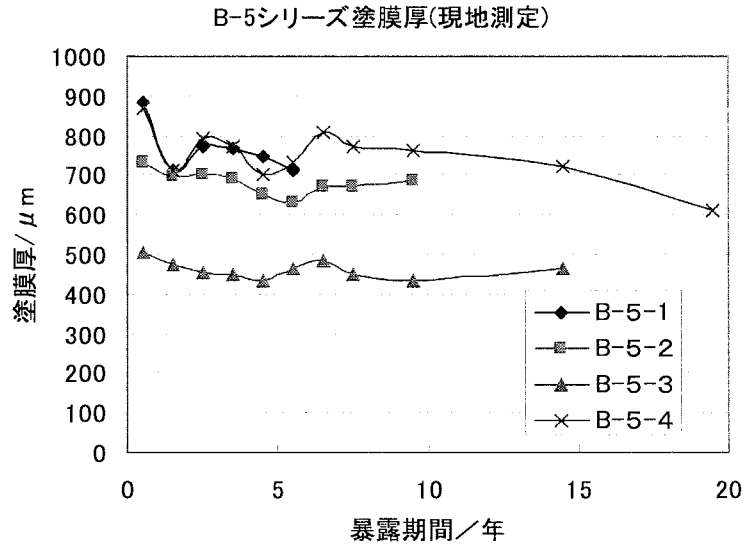
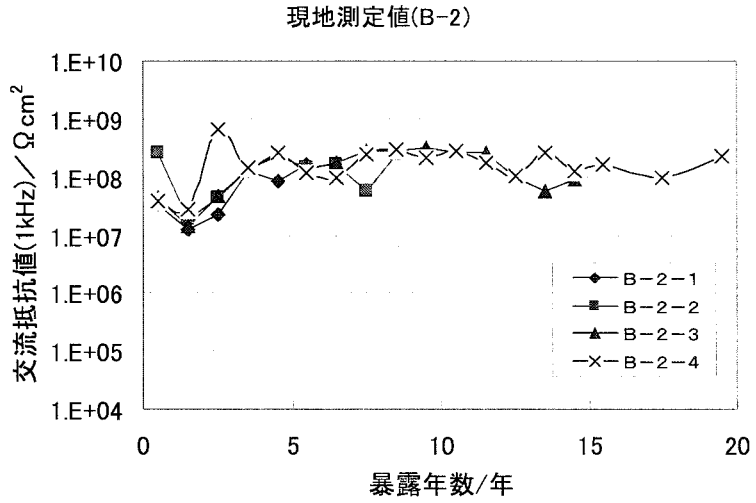
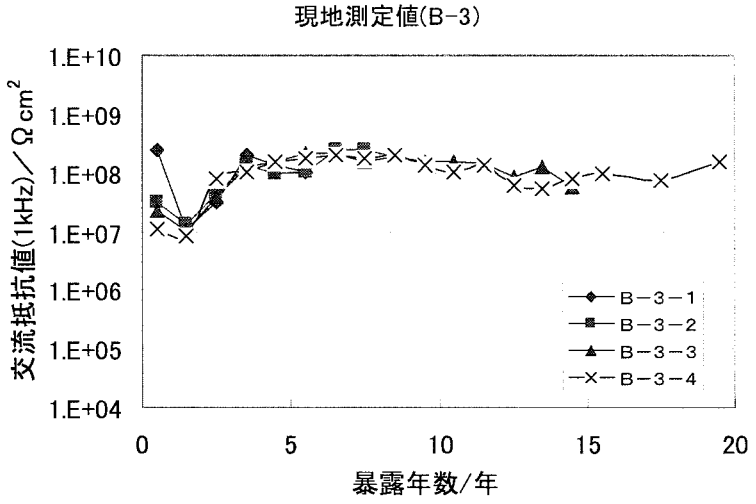


図 4. 1. 7　塗装材の塗膜厚の時間変化





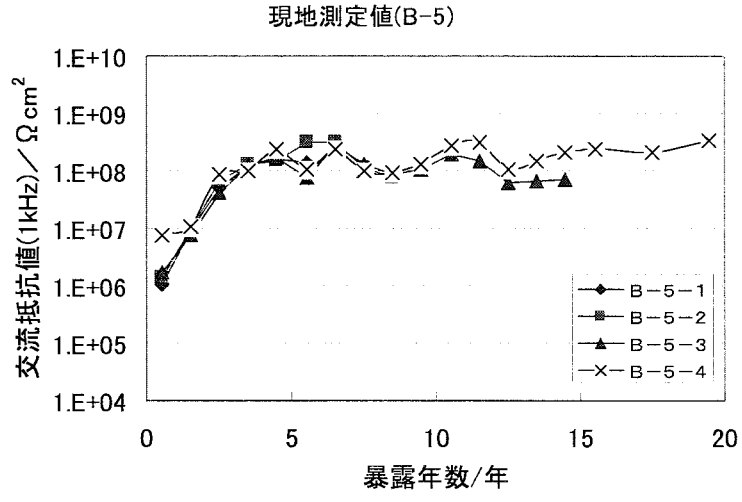


図 4.1.8　塗装材の交流抵抗値の時間変化（現地測定結果）

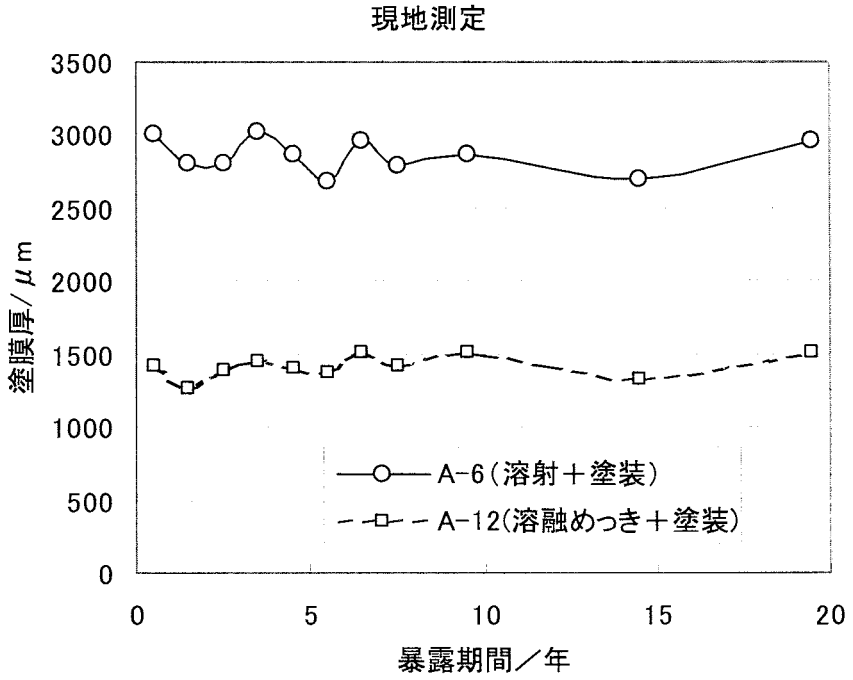


図 4.1.9　亜鉛系皮覆＋塗装材の塗膜厚の時間変化

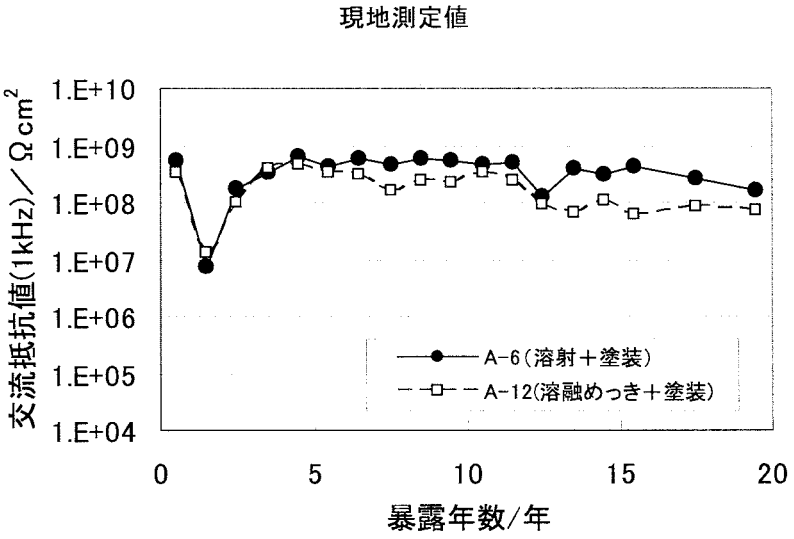


図 4.1.10　亜鉛系皮覆＋塗装材の交流抵抗値の時間変化

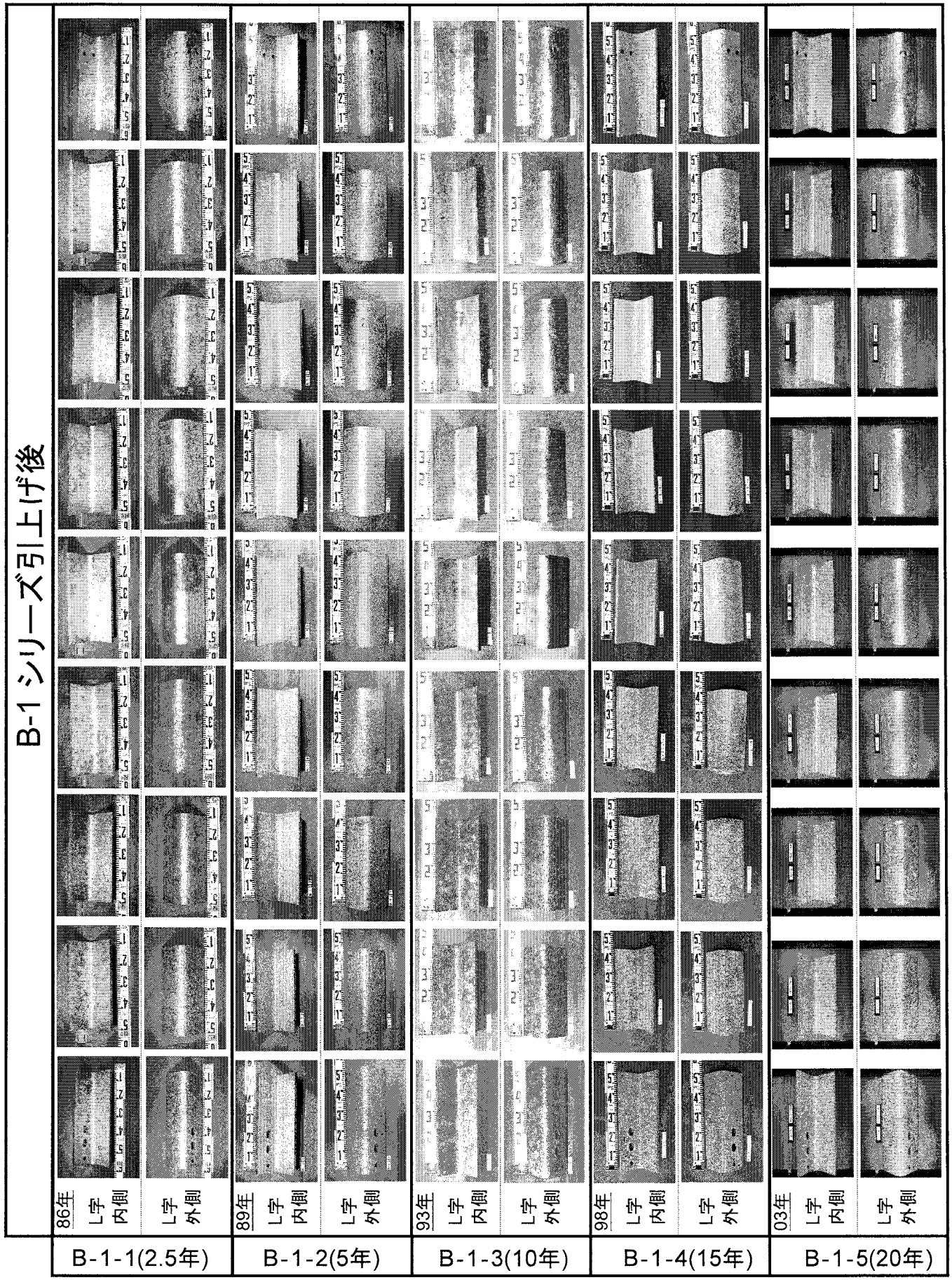


図4.1.11　B-1鋼(低合金鋼)の除さび後の外観

図4.1.12　B-4鋼(普通鋼)の除さび後の外観

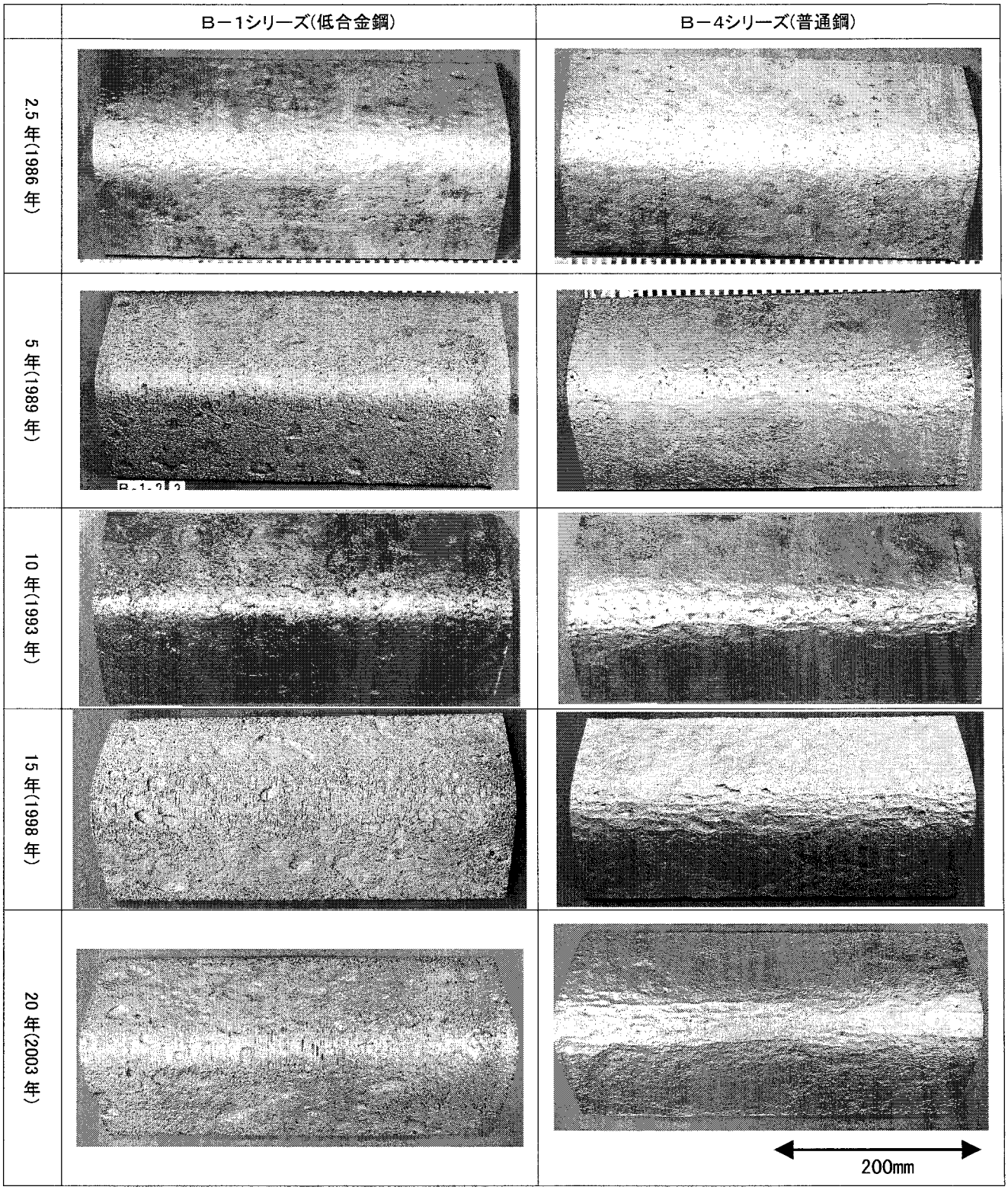


図 4.1.13　　無防食材の除錆後の外観(飛沫帯；1100～1500mm)

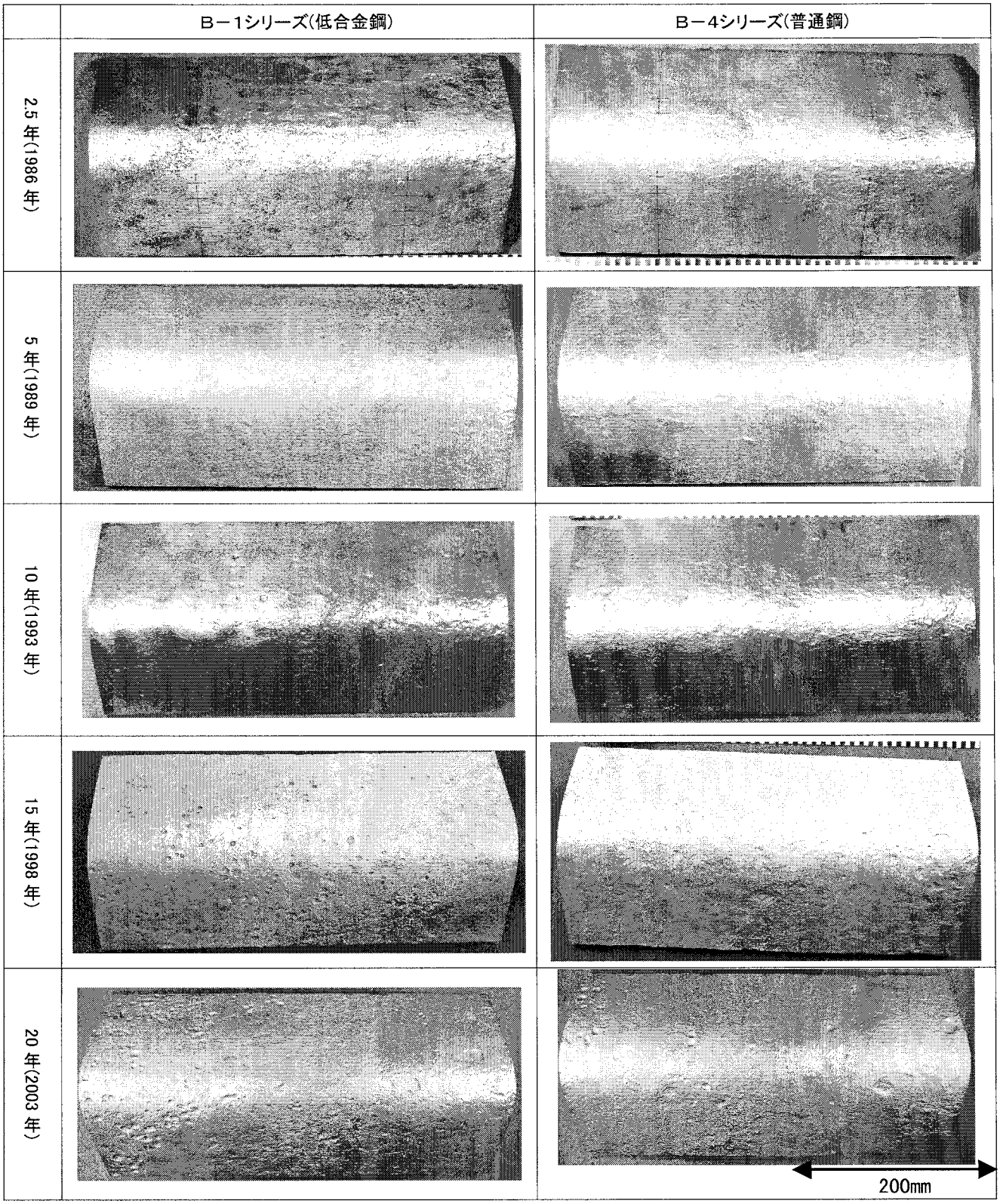


図 4.1.14　　無防食材の除錆後の外観(干満帯；300～-100mm)

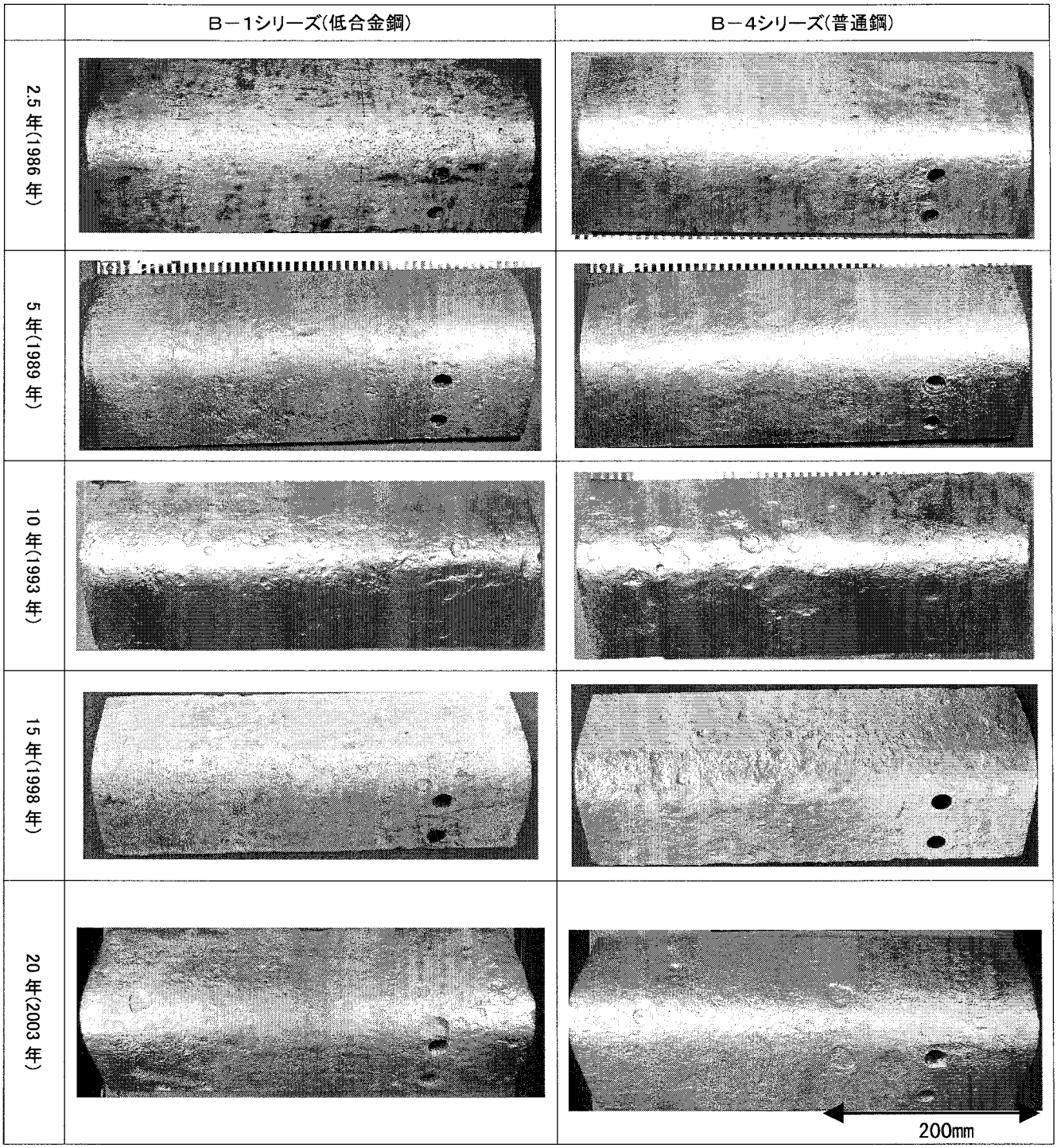


図 4.1.15　　無防食材の除錆後の外観(海中部；-900～-1400mm)

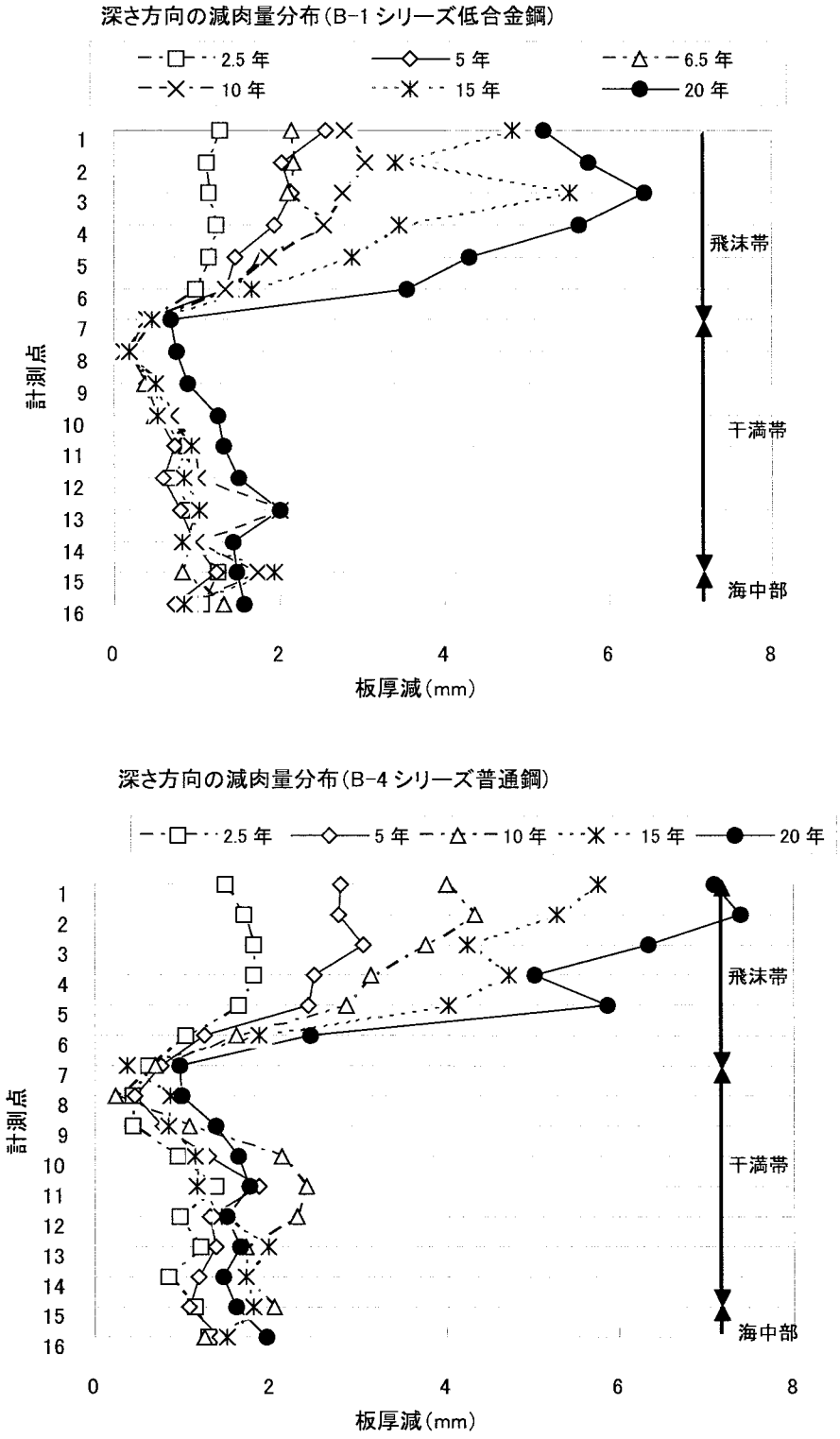
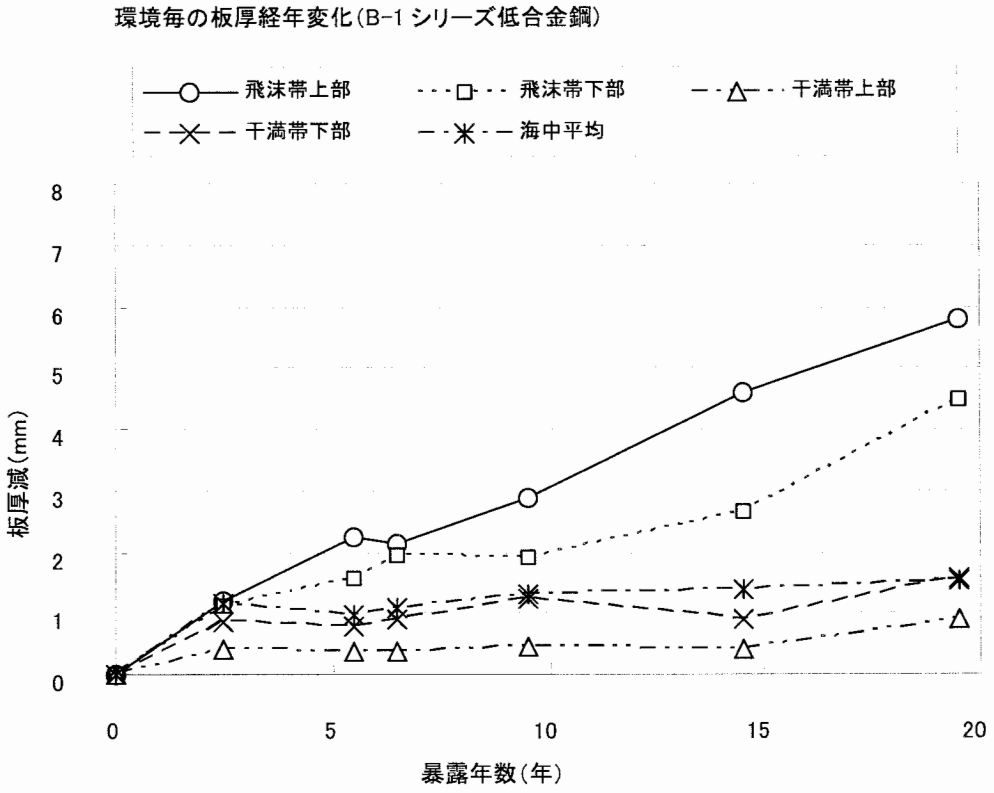


図 4.1.16　無防食材の腐食量の深さ方向分布（下：普通鋼，上：低合金鋼）



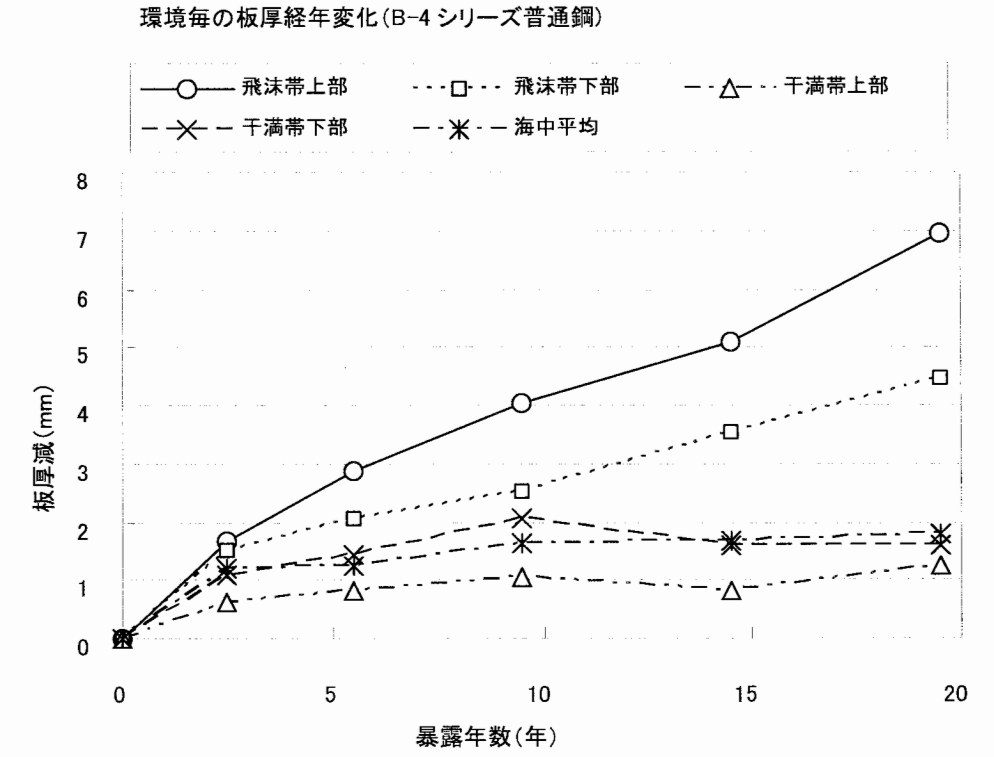
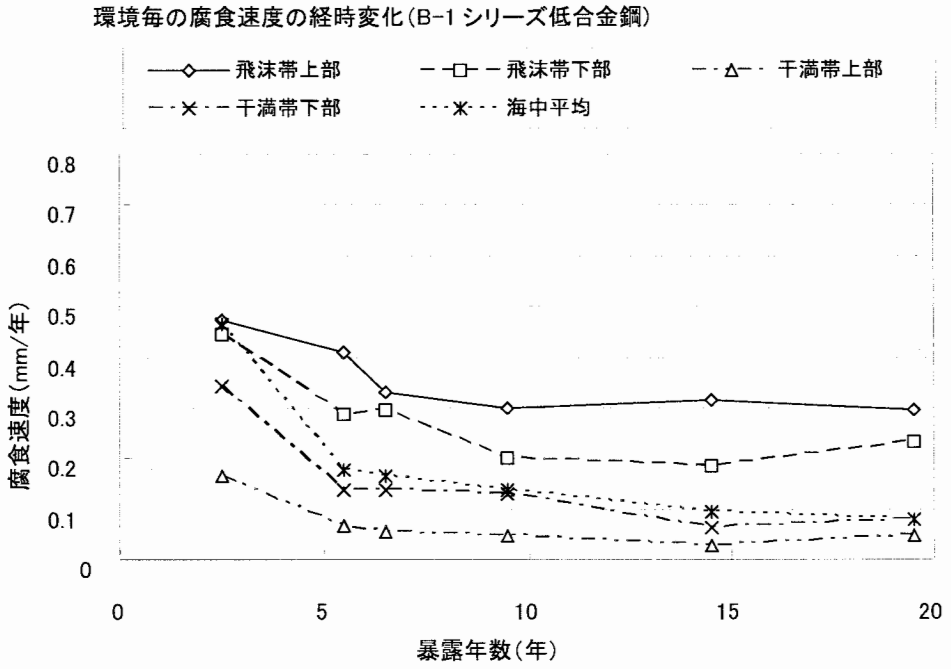


図 4.1.17　無防食材の環境毎の腐食量の時間変化(下：普通鋼，上：低合金鋼)



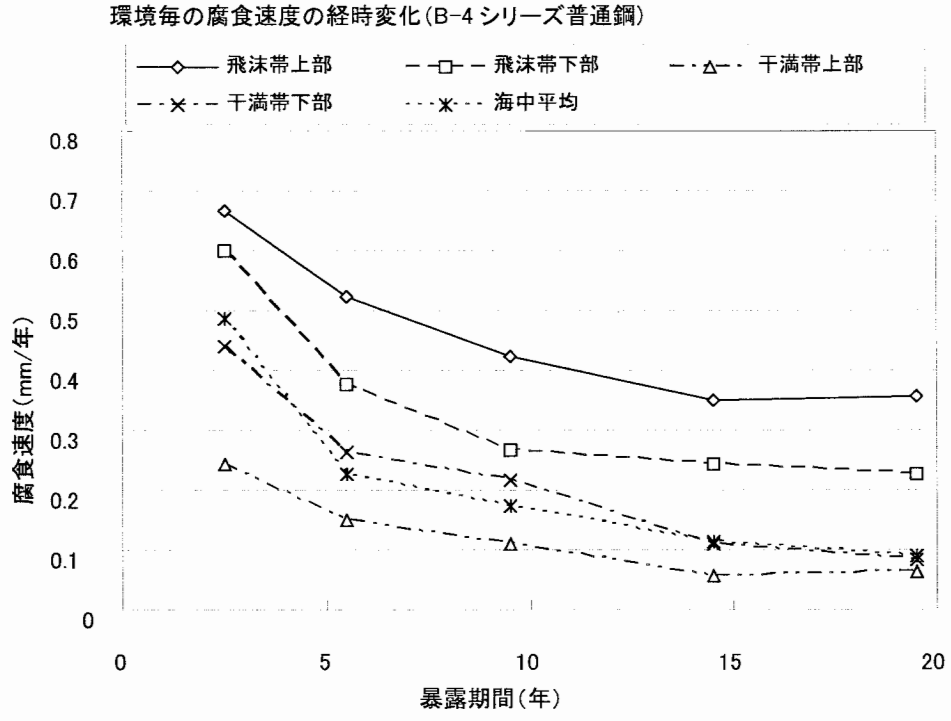


図 4.1.18　無防食材の腐食速度の時間変化(下：普通鋼，上：低合金鋼)

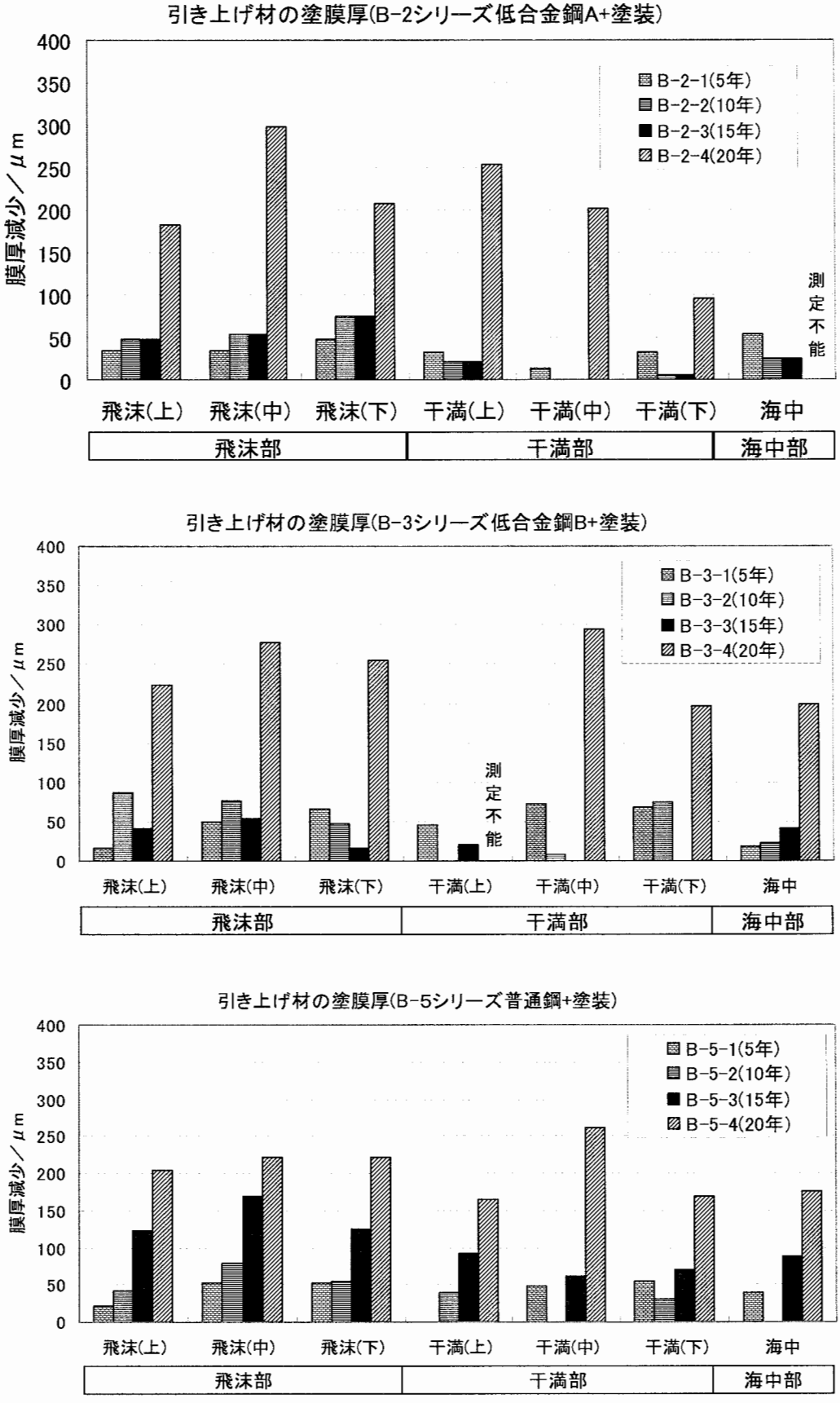


図 4.1.19　塗装材の塗膜厚の測定結果(引き上げ材)

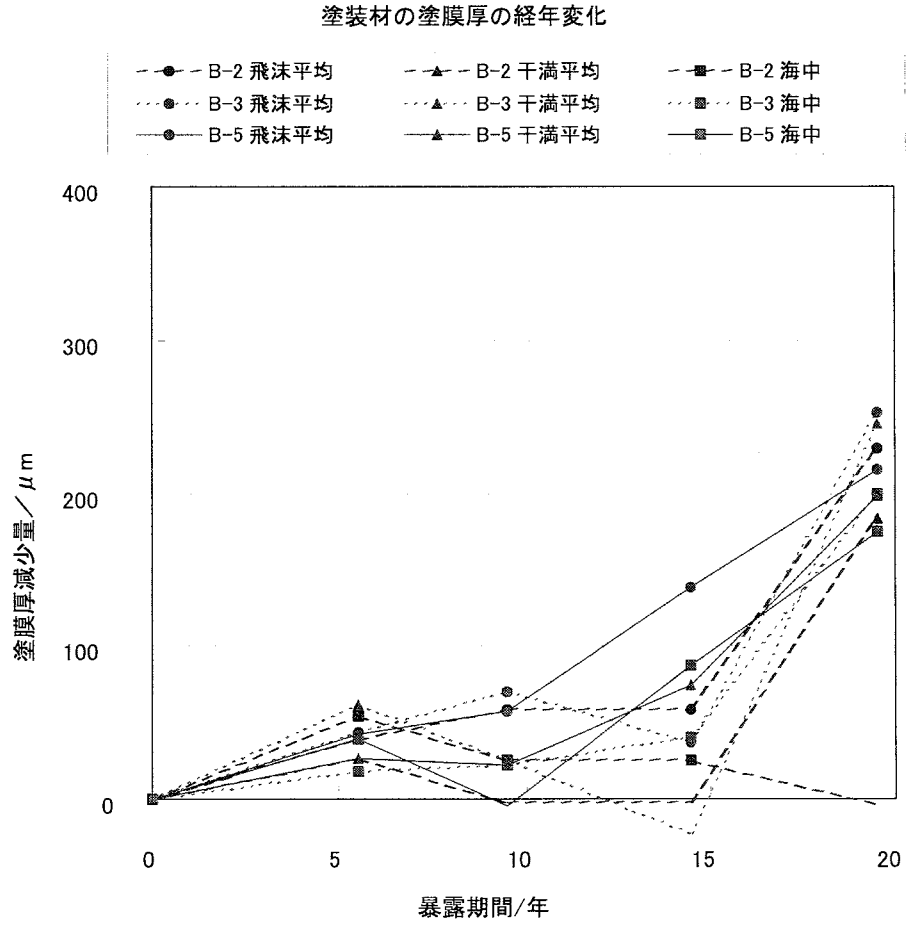


図 4.1.20　各種塗装材の塗膜厚の経時変化

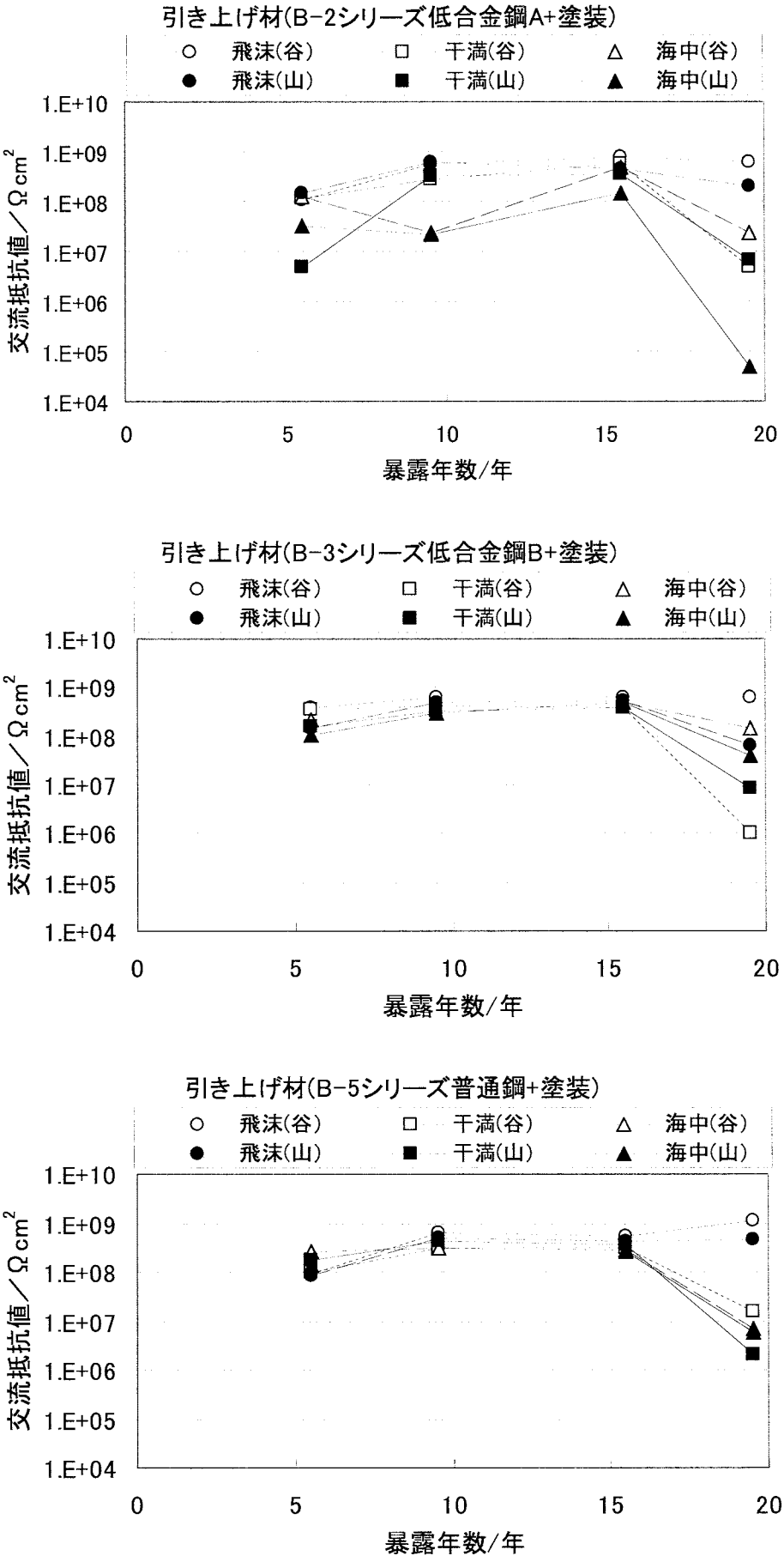


図 4.1.21　塗装材の交流抵抗値(1kHz)の時間変化

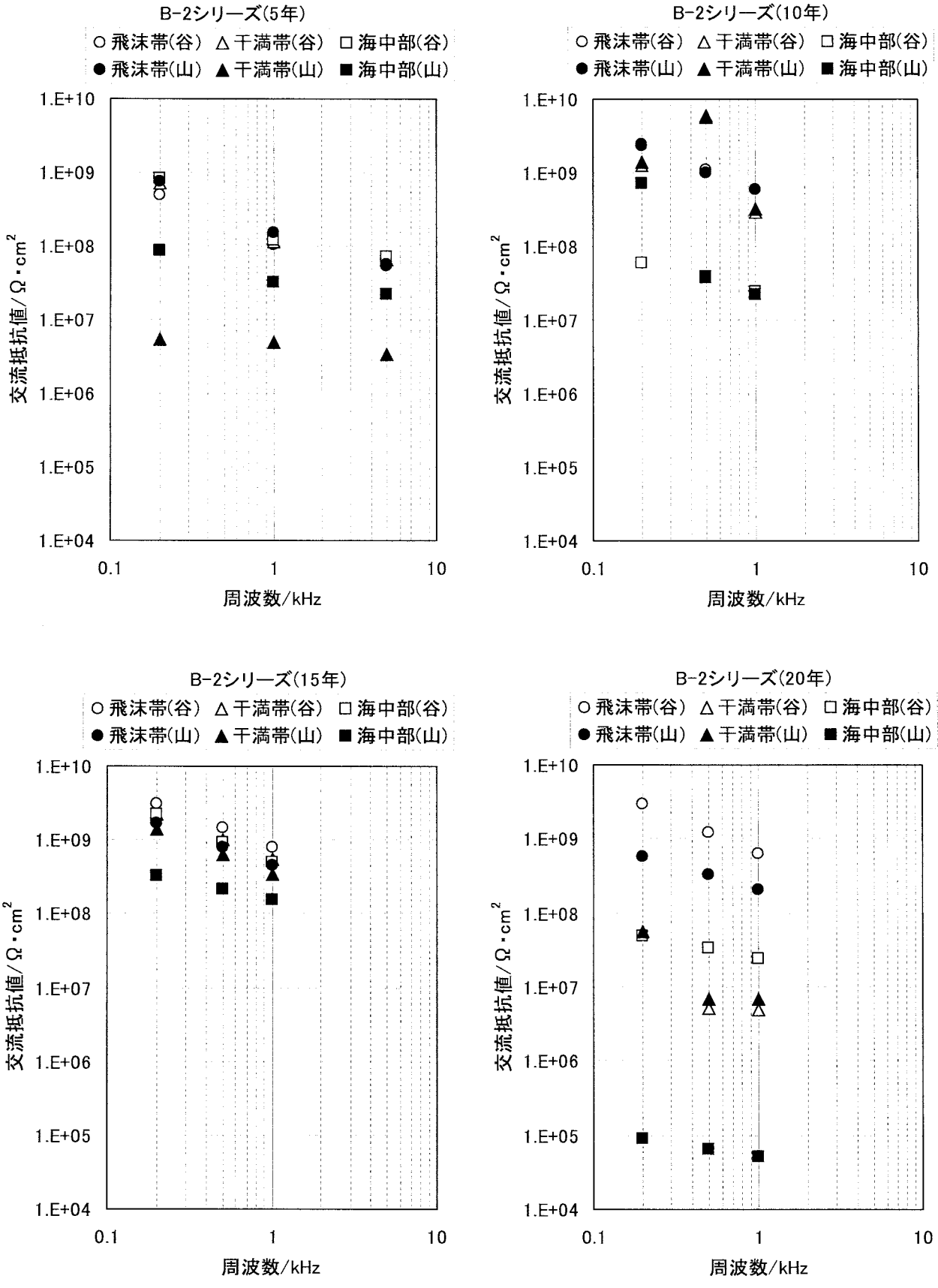


図 4.1.22　交流抵抗値の周波数依存性(B-2 シリーズ低合金鋼 A+塗装、引き上げ材)

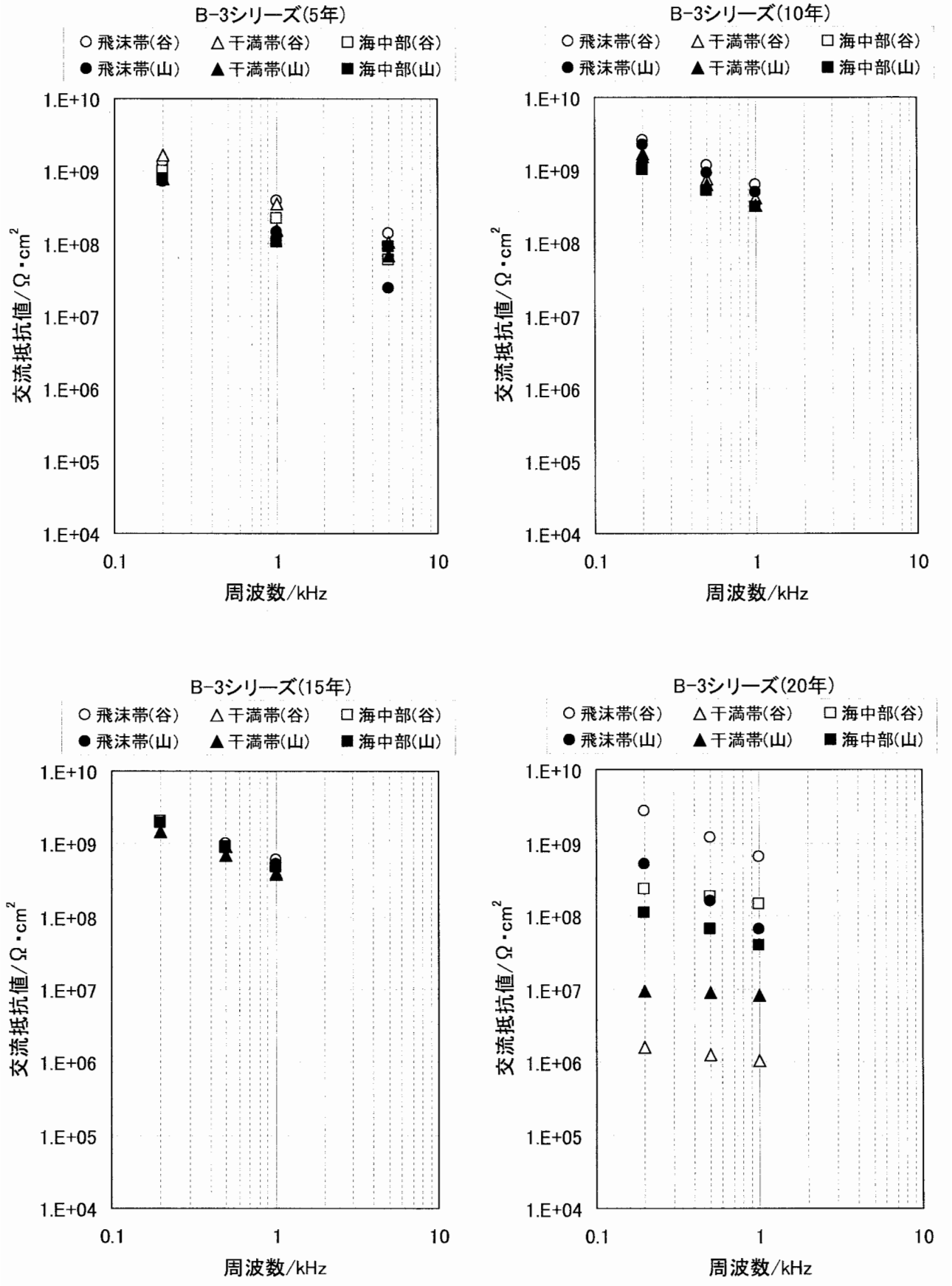


図 4.1.23　交流抵抗値の周波数依存性(B-3 シリーズ低合金鋼 B+塗装、引き上げ材)

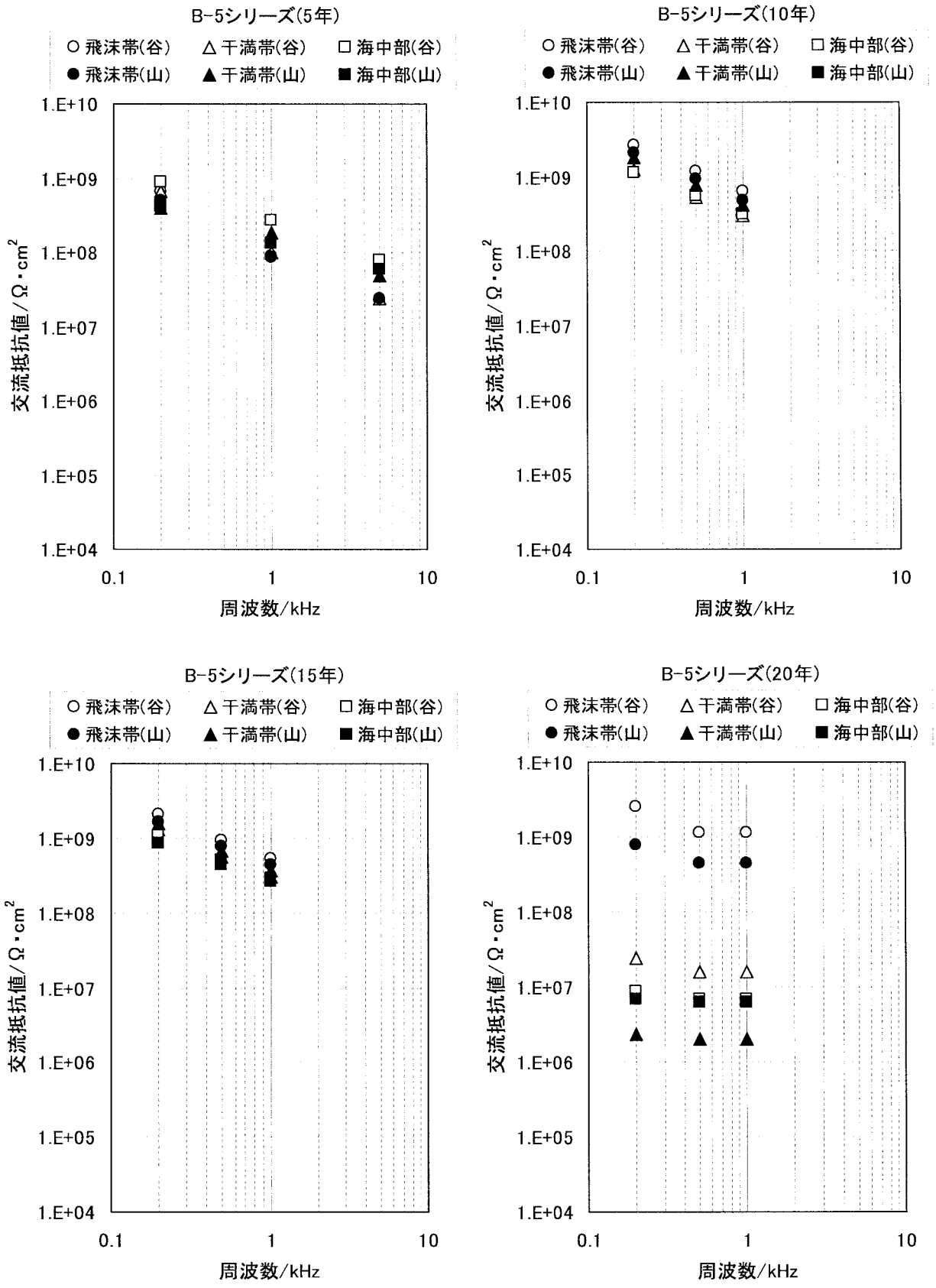
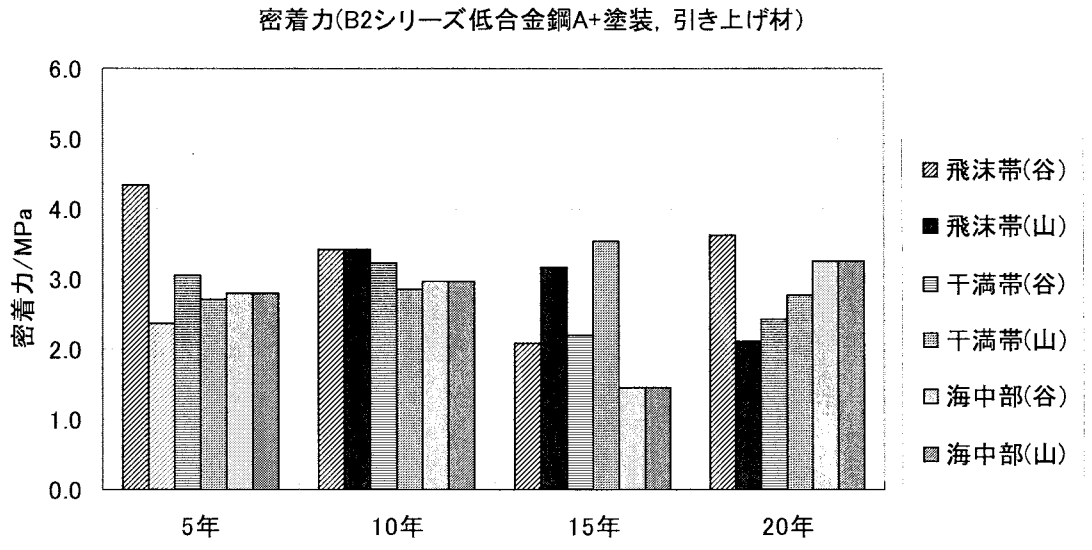
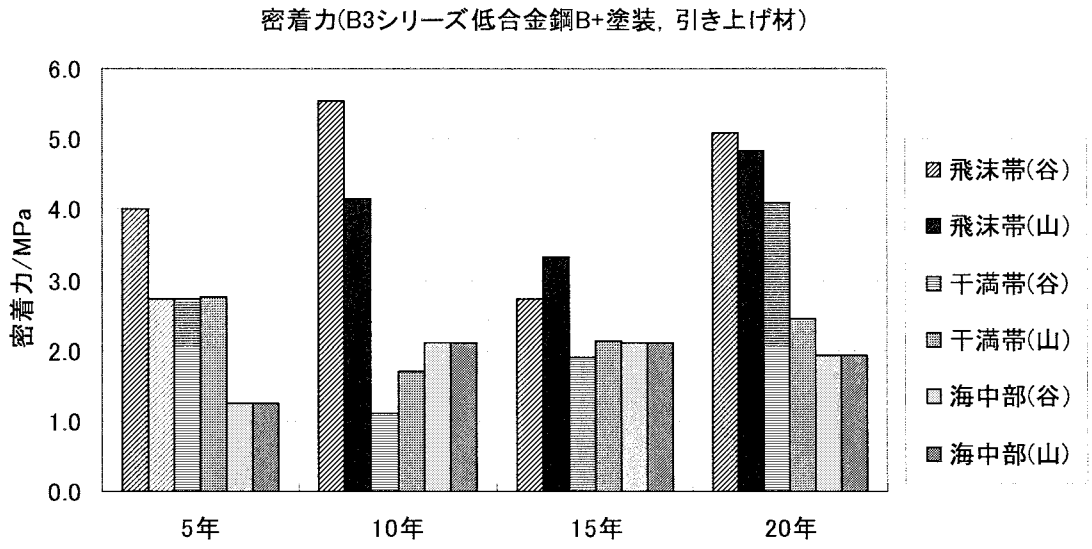


図 4.1.24　交流抵抗値の周波数依存性(B-5 シリーズ普通鋼+塗装、引き上げ材)





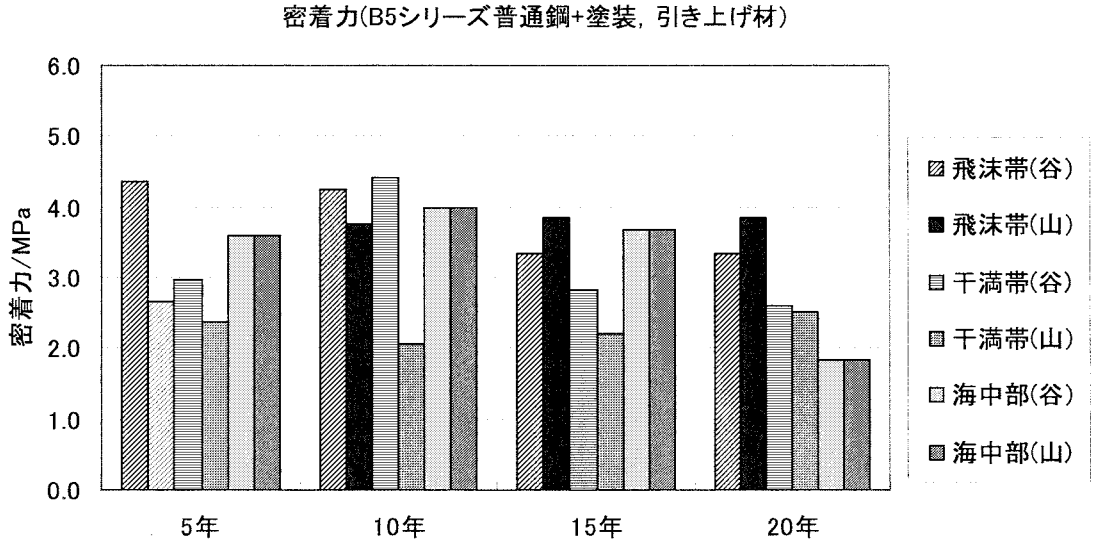


図 4.1.25 塗装材の密着力の時間変化

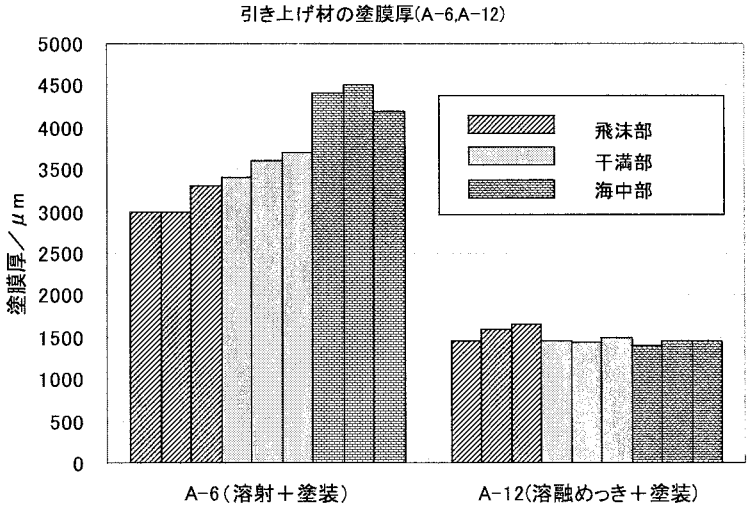


図 4.1.26　亜鉛系皮覆+塗装材の塗膜厚

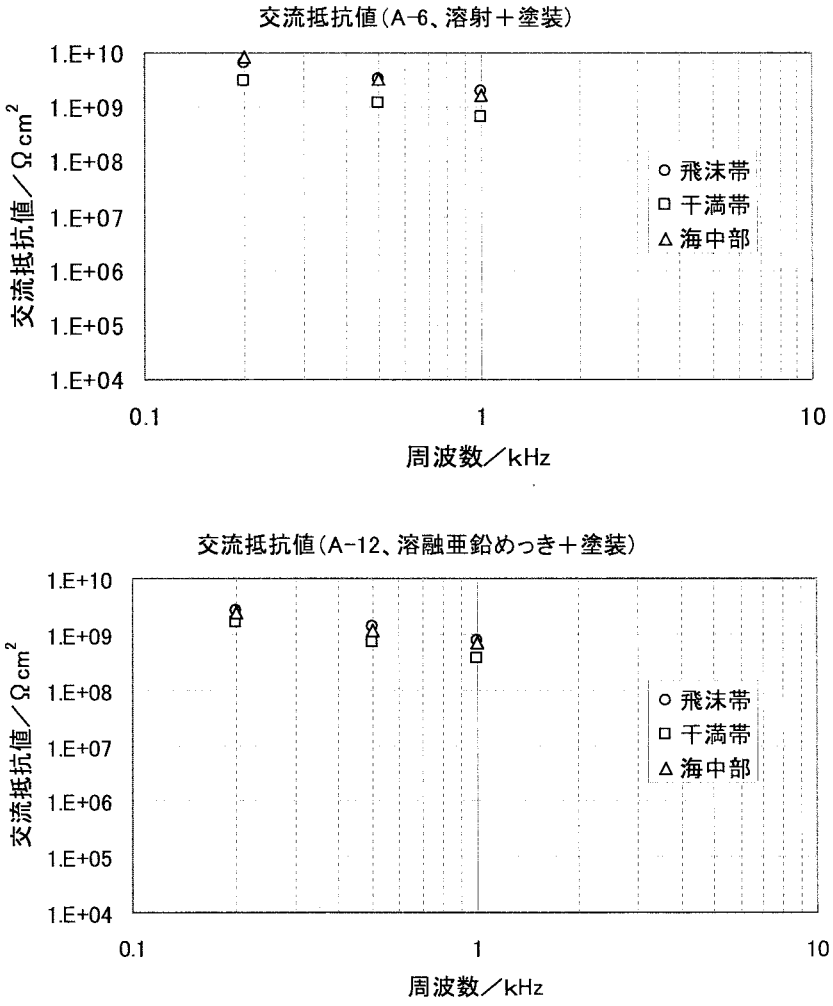


図 4.1.27　亜鉛系皮覆+塗装材の交流抵抗値の周波数依存性

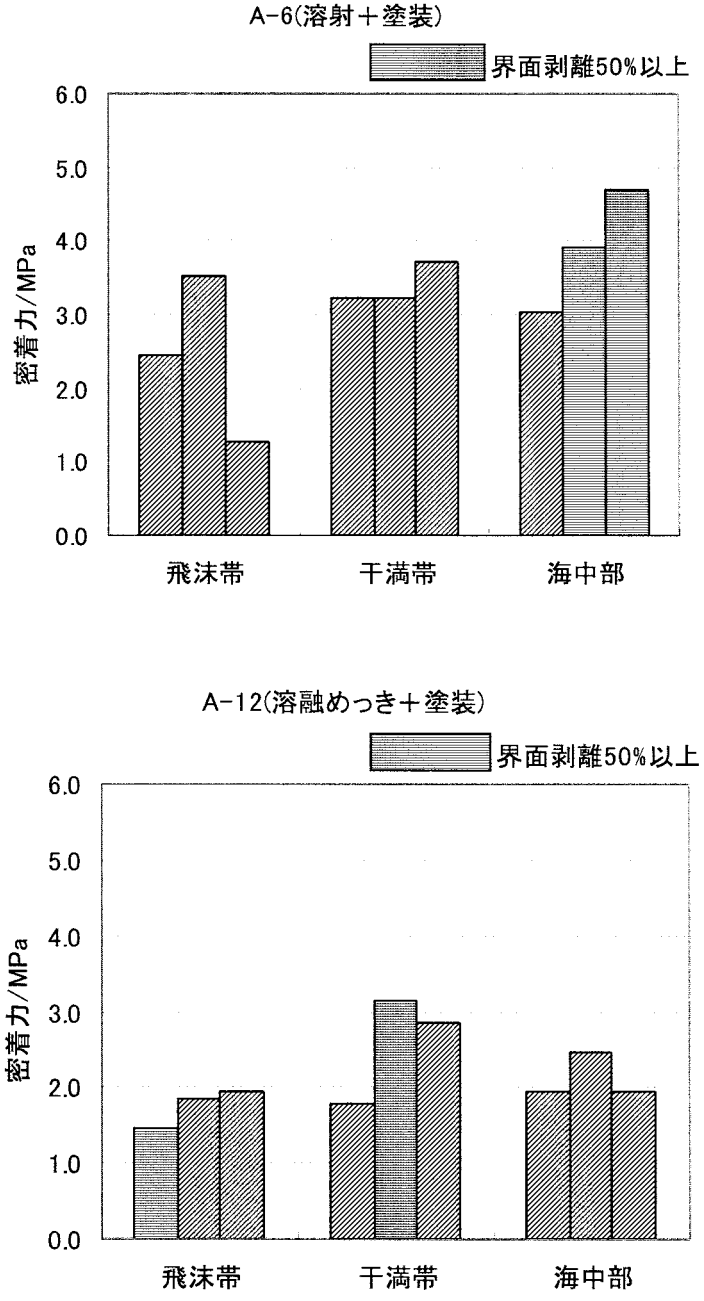


図 4.1.28　亜鉛系皮覆+塗装材の密着力

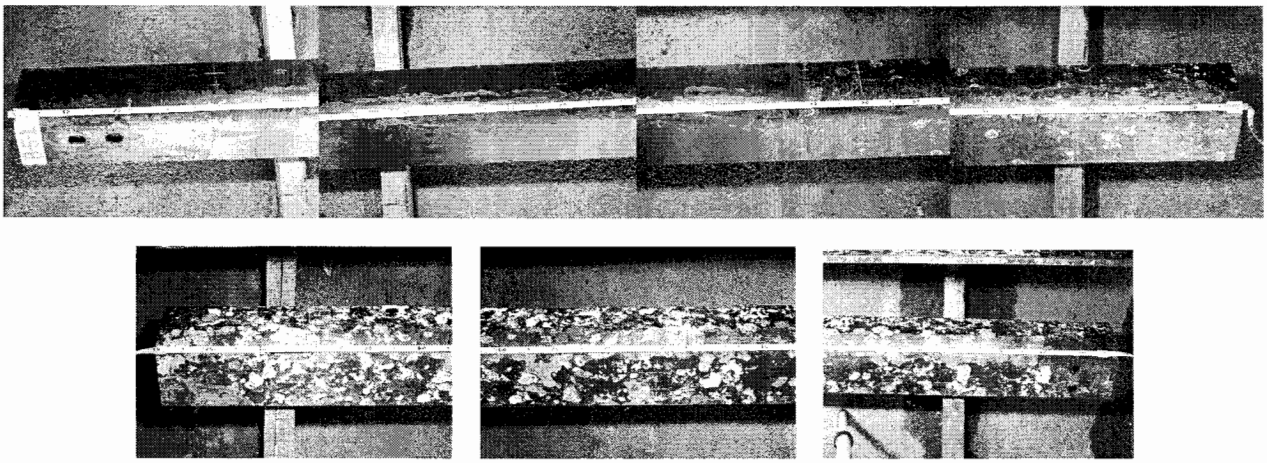


図 4.1.29　B-5-1　(普通鋼＋無機ジンク＋タールエポ 5 年暴露材)の
引き上げ後、付着物を除去した外観写真

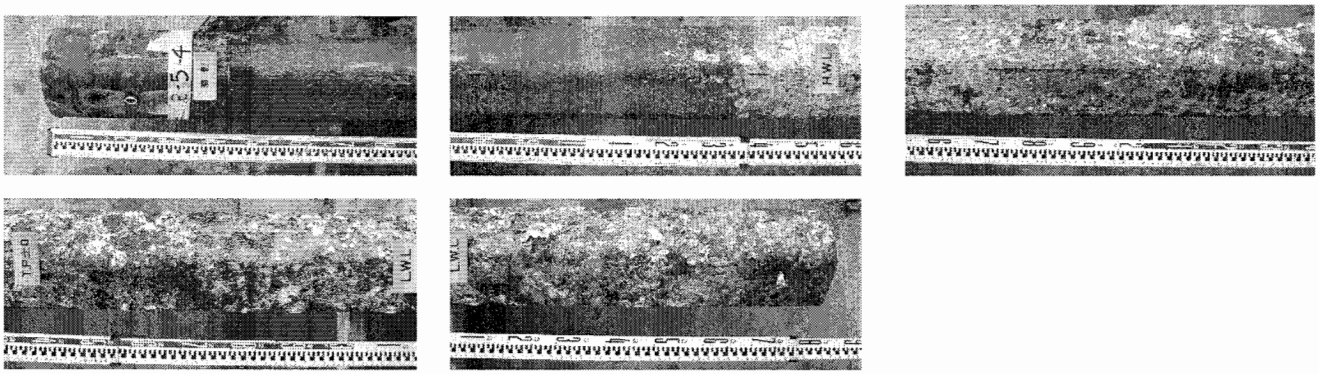
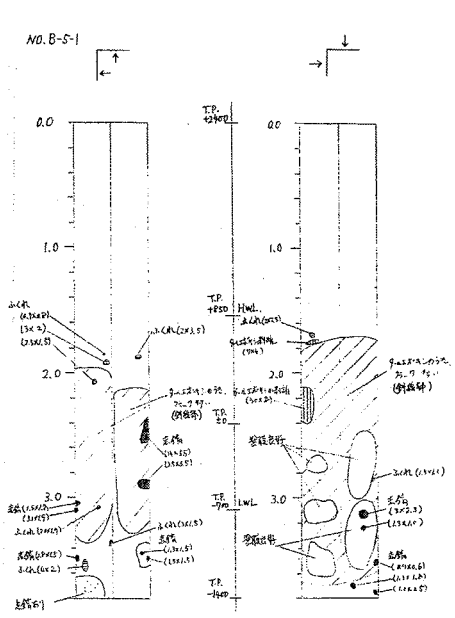


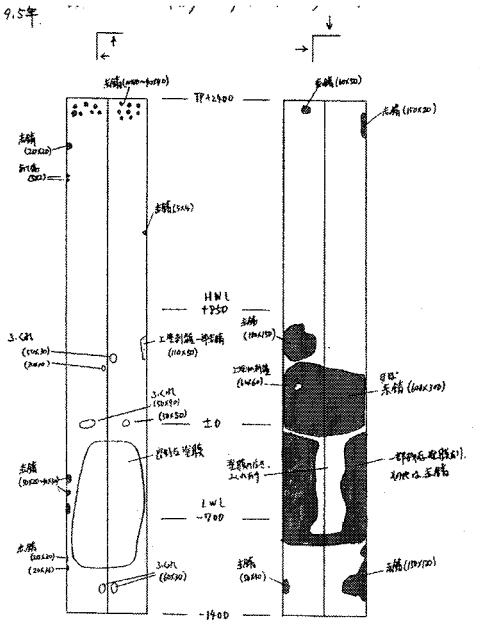
図 4.1.30　B-5-4　(普通鋼＋無機ジンク＋タールエポ 20 年暴露材)の
引き上げ後、付着物を除去した外観写真

表 4.1.5　さび面積率の計算結果

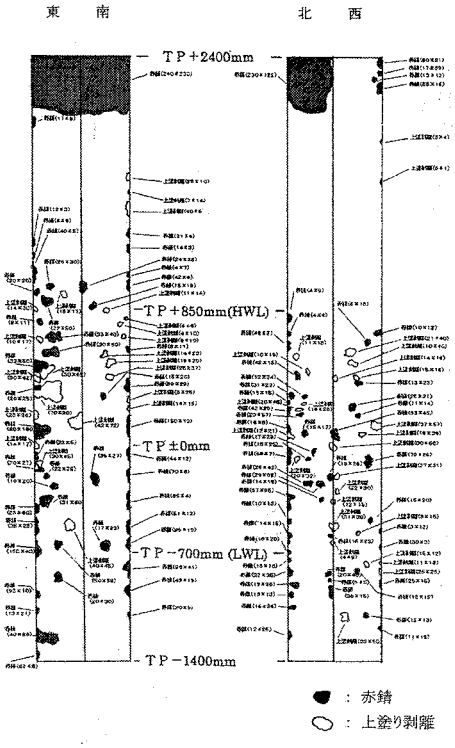
	約5年経過		10年経過		15年経過		20年経過	
低合金鋼A+塗装(B-2シリーズ	山	谷	山	谷	山	谷	山	谷
大気・飛沫	0.0	0.0	0.2	0.4	0.7	0.0	0.7	2.6
干満帯	2.2	0.0	2.5	0.1	18.8	13.0	19.3	9.7
海中部	1.4	2.6	4.0	0.0	4.8	6.2	10.5	10.2
低合金鋼B+塗装(B-3シリーズ	山	谷	山	谷	山	谷	山	谷
大気・飛沫	0.0	0.0	0.0	0.6	1.0	1.4	5.0	1.1
干満帯	1.4	0.0	15.6	3.9	50.5	6.1	31.4	2.6
海中部	3.1	0.0	13.8	0.0	28.0	4.3	9.9	0.9
普通鋼+塗装(B-5シリーズ)	山	谷	山	谷	山	谷	山	谷
大気・飛沫	0.0	0.0	0.0	0.5	0.3	3.0	0.4	1.2
干満帯	0.0	2.5	34.6	1.3	6.6	4.9	47.2	17.1
海中部	2.6	1.3	14.8	0.3	5.8	3.9	32.0	5.5



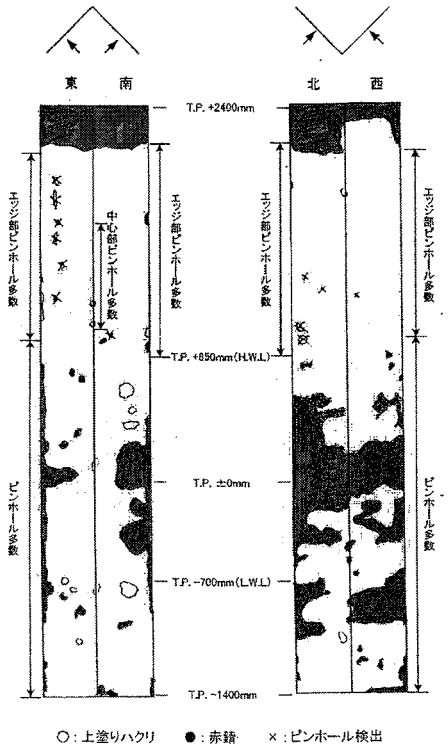
5 年



10 年目



15 年目



20 年目

図 4.1.31　B-5 シリーズ（普通鋼＋塗装）の外観スケッチ
（塗りつぶした部分がさび部）

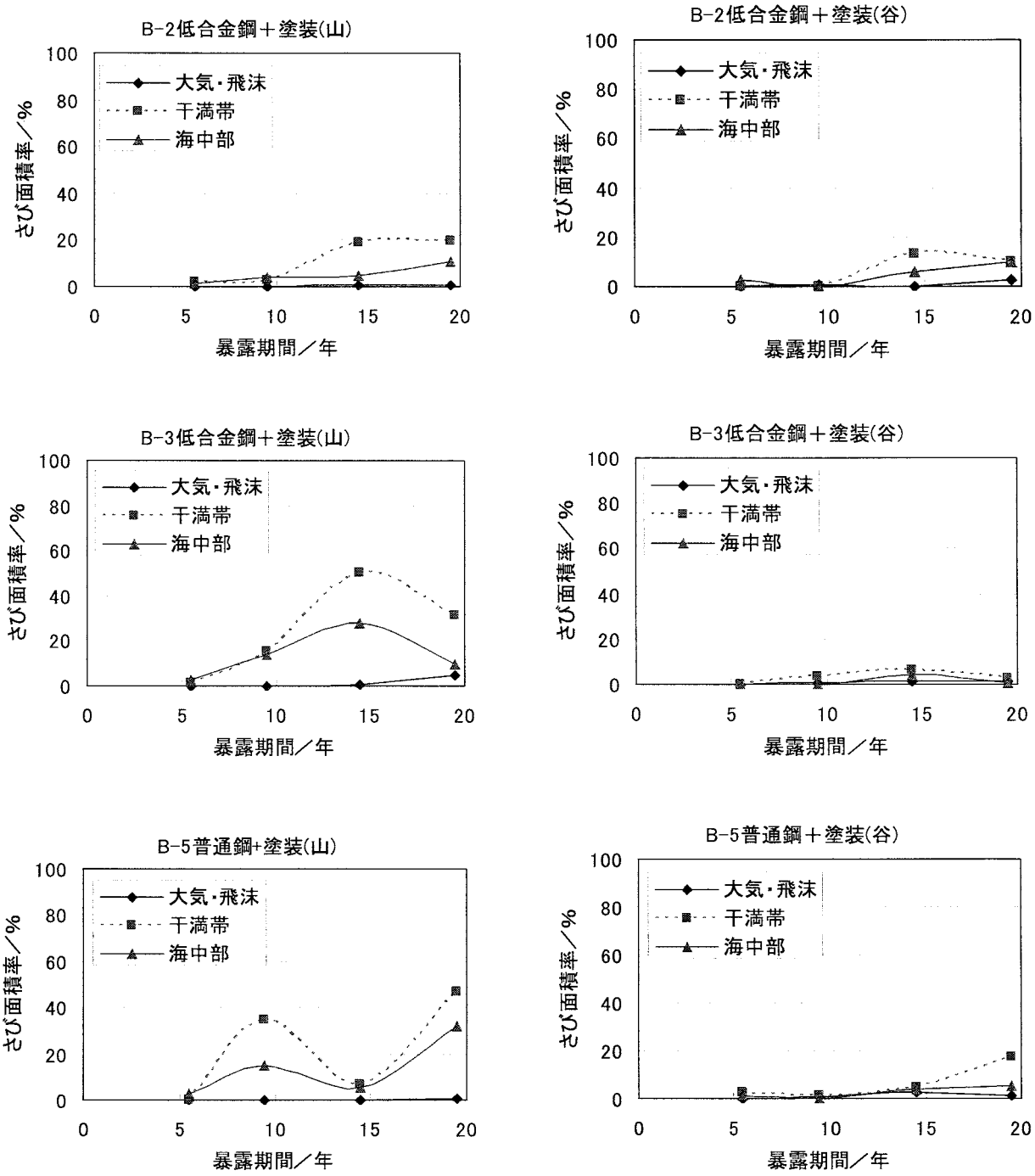
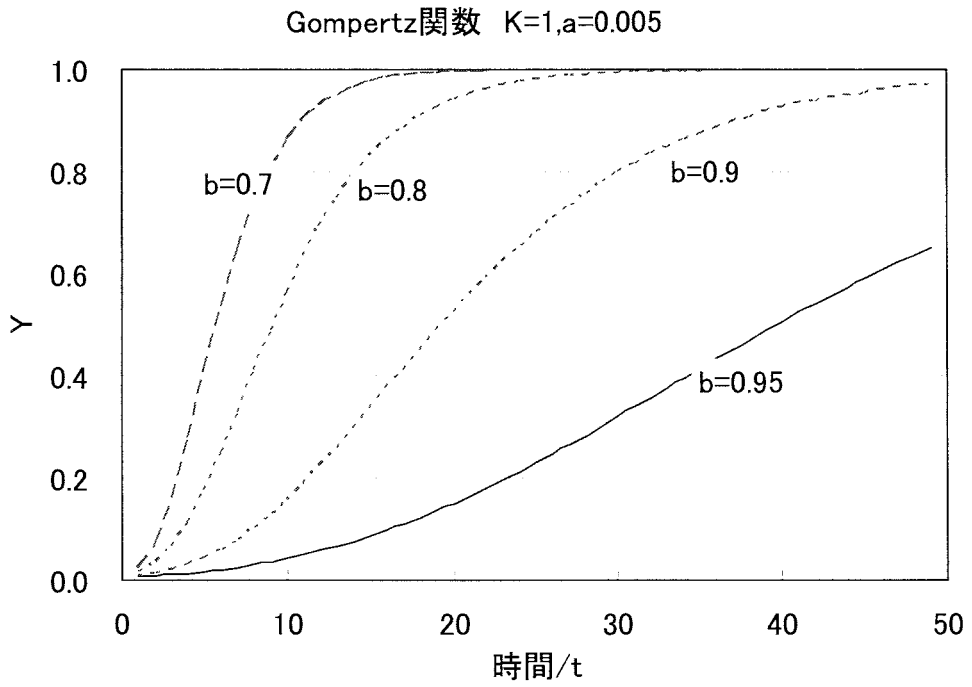


図 4.1.32　塗装材の外観観察結果を画像処理したさび面積率の時間変化

$$y = K \cdot a^{b^t}$$



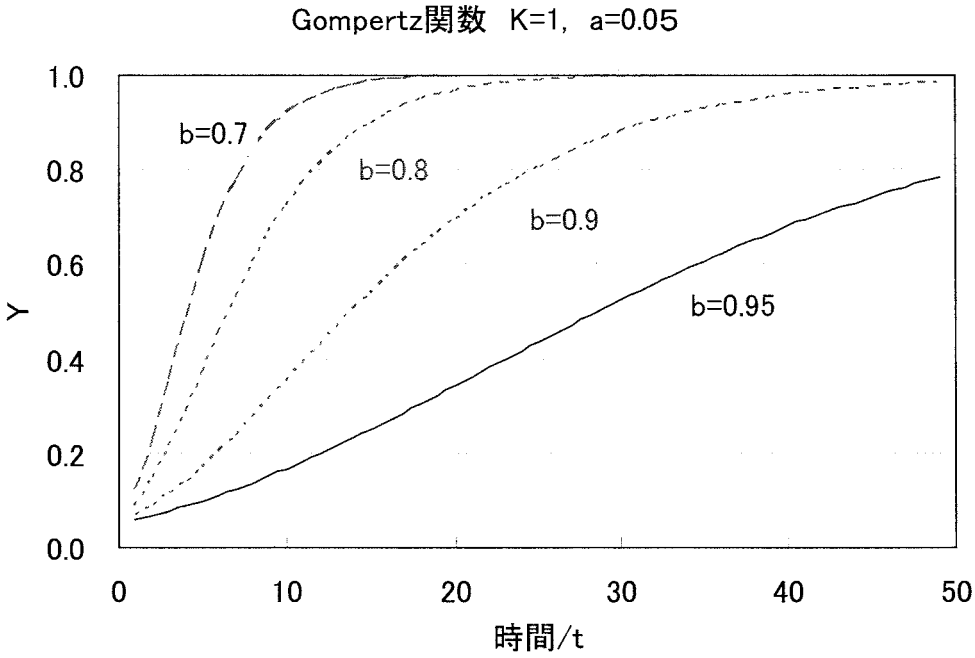
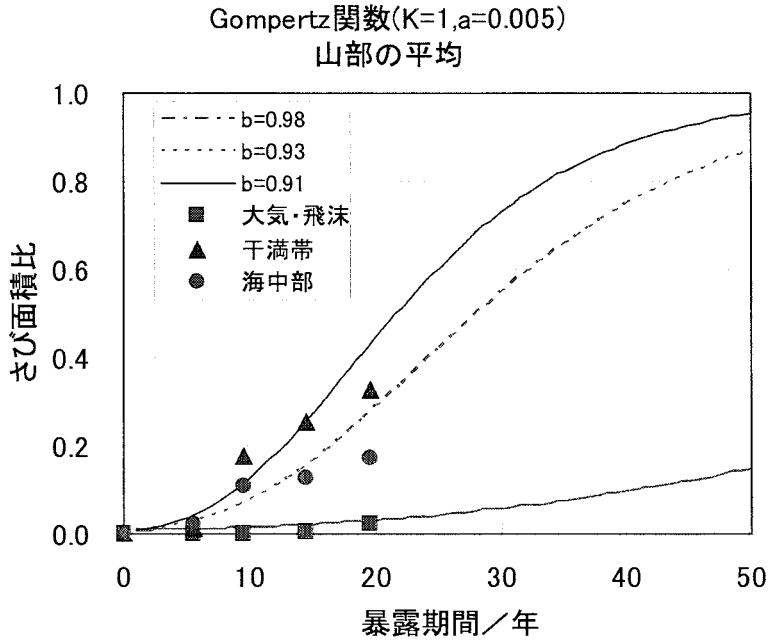


図 4.1.33 Gompertz 関数



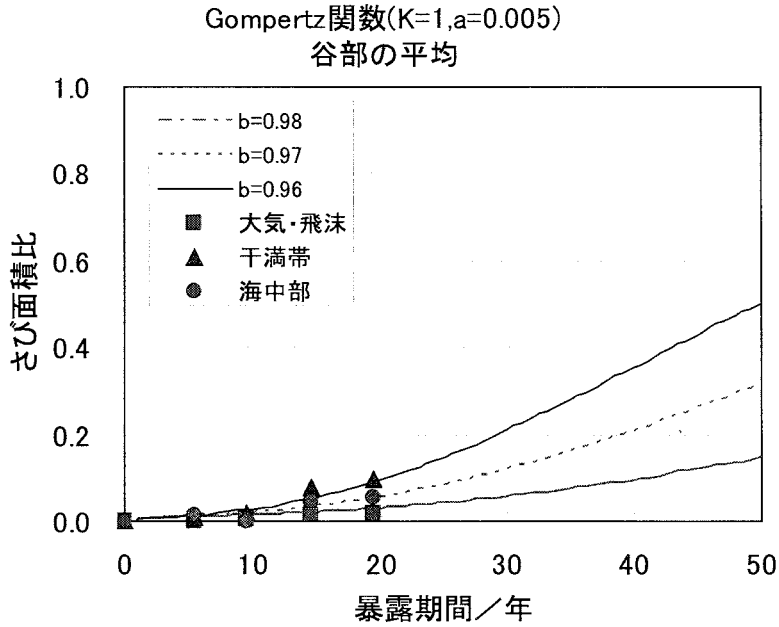


図 4.1.34　塗膜のさび面積率(平均値)を Gompertz 関数に合わせた結果

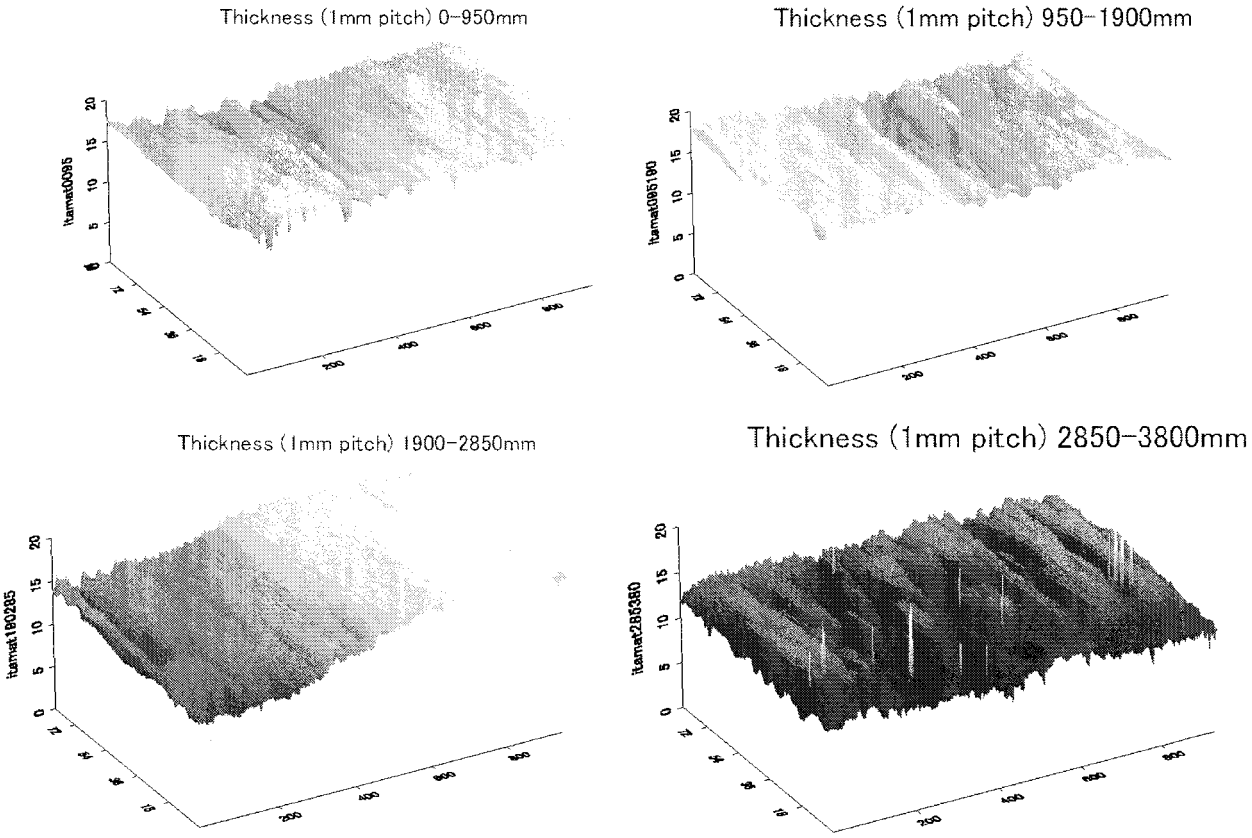


図 4.1.35　無防食材の残存板厚詳細測定結果(B-4-6、20 年経過普通鋼 1mm ピッチ)

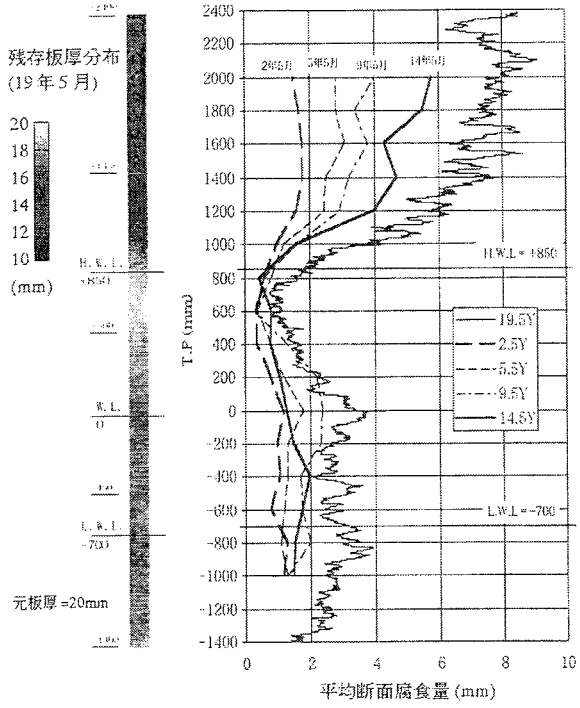


図 4.1.36　1mm ピッチの測定結果と 200mm ピッチ測定結果との対応

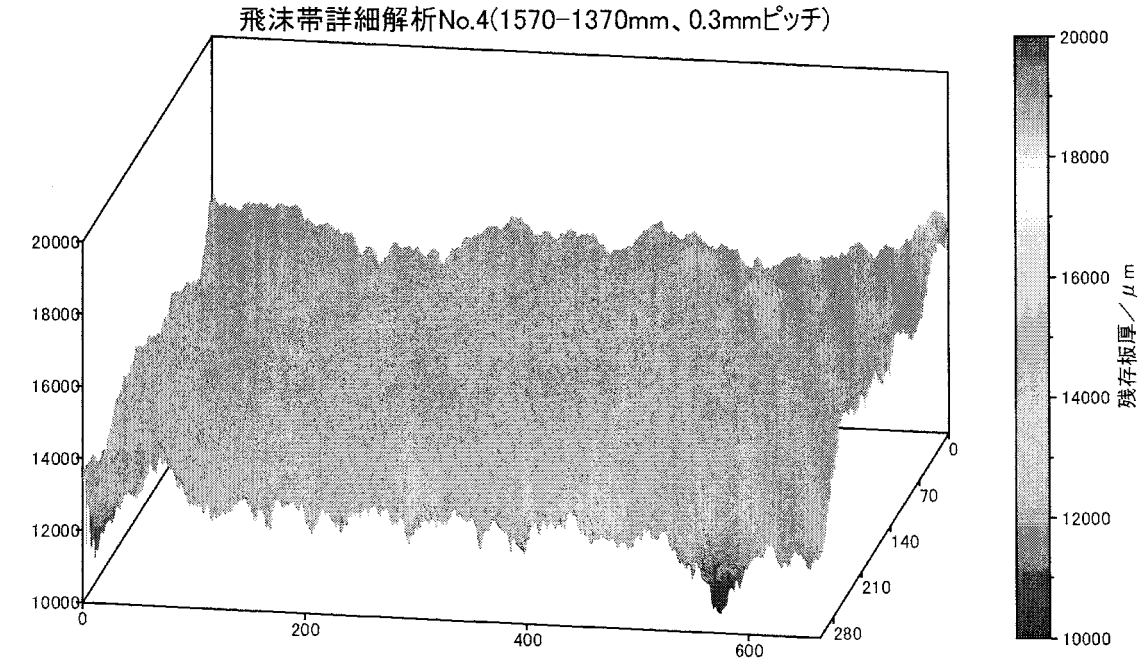


図 4.1.37　無防食材の残存板厚詳細測定結果(B-4-6、20 年経過普通鋼飛沫帯 0.3mm ピッチ)

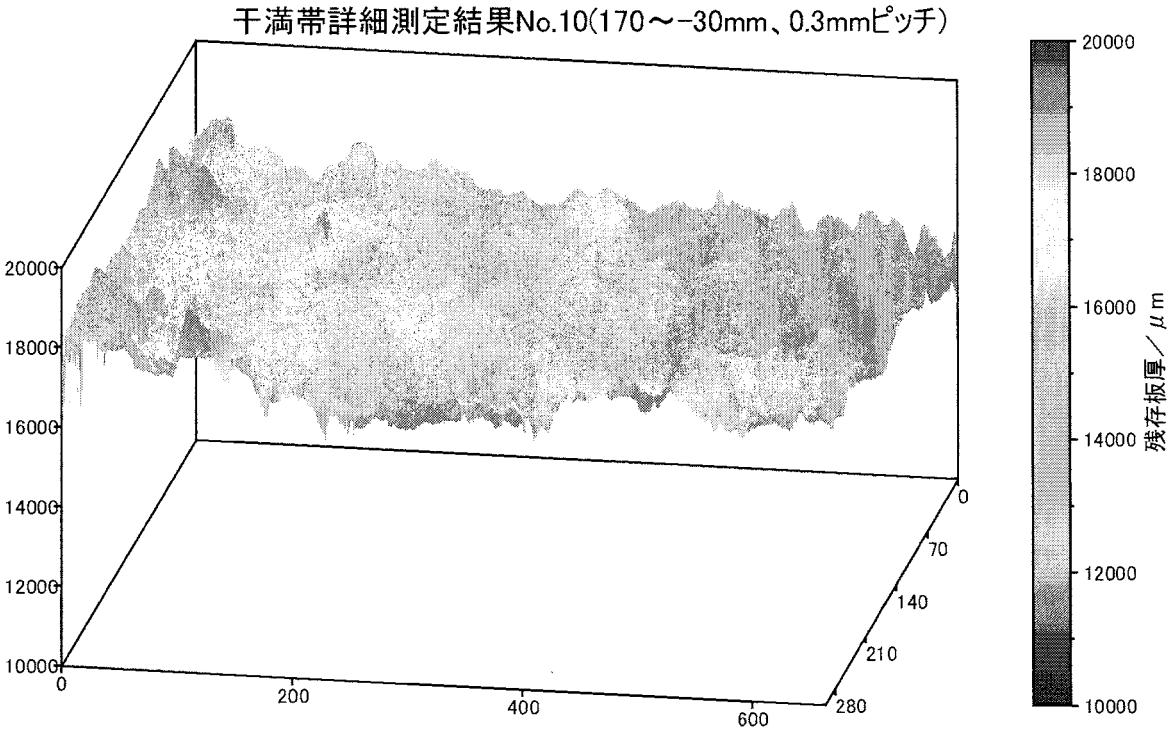


図 4.1.38　無防食材の残存板厚詳細測定結果(B-4-6、20 年経過普通鋼干満帯 0.3mm ピッチ)

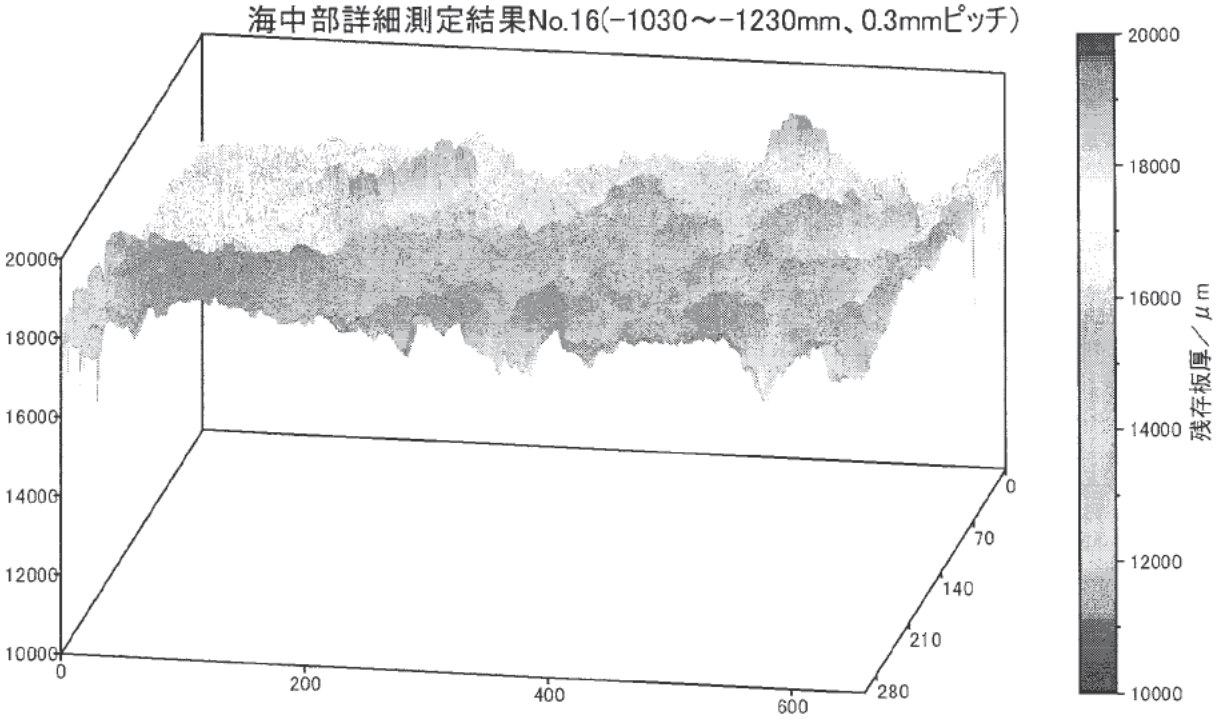


図 4.1.39　無防食材の残存板厚詳細測定結果(B-4-6、20 年経過普通鋼海中部 0.3mm ピッチ)

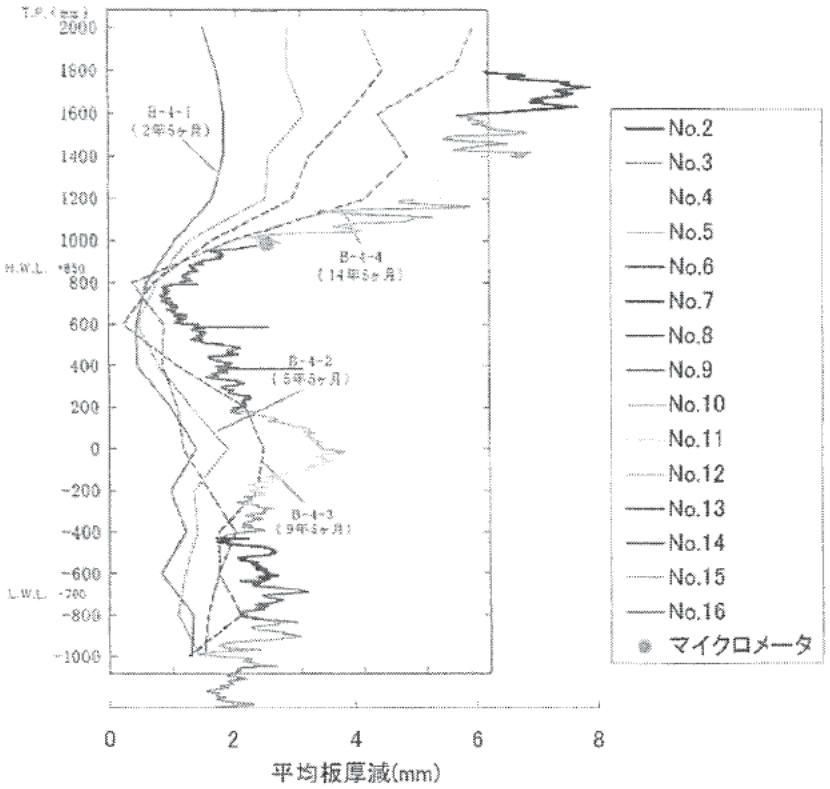


図 4.1.40　0.3mm ピッチの測定結果と 200mm 測定結果との対応

４．２　ステンレス鋼の耐久性に関する研究

4．2．1 研究の目的

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過酷な環境であり、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、ここでいう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結果について述べる。

なお、ここに本研究で対象としたステンレス系試験材およびその目的の概要を表4.2.1に示す。

4．2．2 試験材および試験方法[1-2)]

4．2．2．1 試験材料

試験は長期的な計画を策定して開始したが、これまでに単年度ごとあるいは数年ごとの見直しや中間的総括を行った。その結果、試験材の一時的な撤去による現場での観察、繰り上げ回収材に対する実験室での損傷原因追求に関する詳細調査、新規試験材の追加暴露などを適宜実施した。試験材は多種類、多数にわたるので各研究テーマとも1984年の暴露実験開始当初のものを第１次試験材と呼び、その後暴露したものはすべて第２次試験材と称することにした。

(1) 第１次試験材（Ａ系）

第１次試験材の種類および詳細調査のための撤去予定を表4.2.2に示し、試験材の化学成分を表4.2.3に示す。

試験材の形状はいずれも管状で、普通鋼の鋼管に防食材としてステンレス鋼を被覆したもの、もしくはステンレス鋼管である。管材はSTPG38、150ＡSch.80、肉厚11mmを標準とした。長さは3,500mmであり、直径は89.1～171.2mmの範囲内の５種類である。

試験材の防食仕様はオーステナイト系、フェライト系、二相系の各種ステンレス鋼による被覆である。被覆厚さは板巻き施工材およびクラッド材では３mmである。二相系ステンレス鋼は管のまま用い、その肉厚は9.6～12.7mmである。第１次試験材を記号でＡ系と分類した。

この研究テーマ１の第１次試験材のうち表4.2.2の△印および□印を付したものは、試験材の表面に予め人工的にすき間を付与して、すき間腐食発生の有無とその程度を所定年度毎に調査することにした試験材である。△印は当初の1984年に、また□印については1987

年調査終了後にすき間を付与した。すき間付与の位置は平均満潮位（H.W.L）直上の飛沫部に１ヵ所、干満部の中央部または、干満部内の上下２ヵ所、および平均干潮面（L.W.L）直下の海中部に１ヵ所の計４ヵ所を原則としたが、干満部の１ヵ所を除いて計３ヵ所としたものもある。すき間付与の方法は、図4.2.1に示すように、粘着剤付きポリエチレン収縮チューブ（150Ａ用、仕上がり厚さ３mm、長さ200mm）を加熱収縮させた。このすき間はステンレス鋼の電気防食材および比較材（非電気防食）にも付与した。

(2) 第２次試験材（Ａ、Ｃ、Ｄ、Ｈ系）

表4.2.4は第２次試験材の内容および暴露の経過と予定を示す。表4.2.5は第２次試験材の化学成分を示す。この第２次試験材では1989年度および1991年度に暴露を開始したものを試験目的によってＡ系またはＣ系と分類し、1993年度および1996年度に開始したものをＤ系とし、さらに1998年度に開始したものをＨ系と分類した。ここで一部の第２次試験材をＡ系（A-1-6～9、A-14）に分類したのは、いずれも第１次試験材と同等の内容の金属材料を供試したためである。それらを用いた追加試験の目的は次のとおりである。

1) ステンレス管材の人工すき間付与部に対する電気防食（第１回、Ａ系、SUS316L）

第１次試験材によるこれまでの観察で、SUS316L鋼その他のステンレス鋼に海水中および干満帯において、人工すき間付与部および付着生物下で多数のすき間腐食発生が確認された。このすき間腐食発生に対する抑制効果の確認を目的として、電気防食試験を実施することにした。

防食方法は、すでにアルミニウム合金陽極によって電気防食が行われている試験施設本体とSUS316L試験材を接続して防食回路に挿入した。この第１回試験ではとくに電位制御は行わなかった。期間は1989年から1991年までの２年間実施した。試験材Ａ-1-6は比較のための非電気防食材で、試験材Ａ-1-7が電気防食材である。

試験材の寸法および形状は165.2mm$^{\phi}$×3,162mm^{l}×7.1mm^{t}で、すき間付与は第１次試験材と同じ方法で図4.2.2(a)に示す干満帯２ヵ所、海中部１ヵ所の３ヵ所とした。

2) ステンレス管材の人工すき間付与部に対する電気防食（第２回、Ａ系SUS316L）

第１回電気防食試験において、半定量的ながら人工すき間付与部および付着生物下のすき間腐食発生が完全に防止されることが確認できたので、第２回試験では陰極電位を設定して電気防食条件を求めることとした。

防食方法は第１回と同様な試験施設本体との接続によったが、第２回試験では回路に可変抵抗を挿入し、-500mV(vs.SCE)および-770mV(vs.SCE)に設定した。試験材Ａ-1-8材はSUS316L鋼単独使用を対象に想定して-500mV(vs.SCE)とし、A-1-9材はSUS316Lと普通鋼を併用する系を対象と考えて-770mV(vs.SCE)に設定した。期間は1991年から1993年の２年間とした。試験材の形状、寸法、すき間付与法などは図4.2.2(a)に示すように第１回試験と同様とした。

3) ステンレス管材の人工すき間付与部に対する電気防食（第３回、Ｄ系SUS304）

すでに、SUS316L鋼材のすき間腐食発生に対してはアルミニウム合金陽極との短絡によっ

て定性的に、また、-500mV(vs.SCE)、-770mV(vs.SCE)の設定電位条件下でそれぞれ電気防食が有効なことを確認したが、さらに耐すき間腐食性が劣るといわれるSUS304鋼材に対する同様な効果確認を目的として、第２回試験と同じ条件による電気防食試験を実施した。試験材は、JIS G3459のSUS304、165.2mm$^{\phi}$×3,500mm^{l}×7.85mm^{t}継目無鋼管３本を用いた。試験材Ｄ-6は比較用の非電気防食材とし、D-7およびD-8は電気防食中の施設本体と可変抵抗を介して接続し、それぞれ-500mV(vs.SCE)、-770mV(vs.SCE)に設定した。電位設定の理由は第２回試験と同様である。なお、人工すき間は図4.2.2(b)に示すように飛沫帯、干満帯、海中部の各１ヵ所に付与した。試験は1993年からの２年間とした。

4) ステンレス管材の人工すき間付与部に対する電気防食（第４回、Ｄ系SUS304）

第３回の電気防食試験では、回路中の結線が測定箱内の浸水によると思われる理由によって導通不良を生じ、当初からの設定電位維持が中断され、電気防食効果が検証できなかったので、新しく試験材を用意し第３回と同じ方法で再試験を行った。試験材Ｄ-7-2を-500mV(vs.SCE)に、D-8-2を-770mV(vs.SCE)に設定した。ただし今回は比較の非電気防食材はなく、人工すき間は図4.2.2(C)に示すように第１回、第２回と同様の干満帯２ヵ所、海中部１ヵ所とした。試験は1996年からの２年間とした。

5) 高耐食性ステンレス鋼（旧称・耐海水性ステンレス鋼）の暴露（Ｄ系）

第２次試験材として３種類の高耐食性ステンレス鋼の暴露を実施した。試験材Ｄ-3は100mm×150mm×3,800mm^{l}×３mm^{t}のＬ形材である。人工すき間は両面をＬ形の同材質、同厚さで、150mm×200mmおよび170mm×220mm、長さ200mmの２枚のステンレス鋼板でゴム板（100mm×150mm×200mm^{l}×３mm^{t}）を挟んで両面に付与した。すき間付与レベルは図4.2.3(a)に示すように飛沫帯（+2,010～+1,810mm）とH.W.L直下（+1,060～+860mm）の２ヵ所とした。この試験材Ｄ-3は2003年７月の調査時に流失が確認された。

試験材Ｄ-4は素管がSTPG370-EG、165.2mm$^{\phi}$、Sch40、3,500mm^{l}、厚さ３mmの鋼管で、これに高耐食性ステンレス鋼を厚さ１mmに板巻き溶接で被覆したものである。人工すき間は図4.2.3(b)に示すように第１次試験材と同様の方法で、同位置に付与した。

試験材Ｄ-5は25.4mm$^{\phi}$×3,130mm^{l}×2.2mm^{t}の高耐食性ステンレス鋼管３本を間隔34.6mmで並べたもので、人工すき間は図4.2.3(C)に示すように平均干潮面（±０mm）および海中部の上下２ヵ所の合計３ヵ所に29$^{\phi}$×0.5^{t}のテフロンチューブを２層重ねて取付けて付与した。暴露試験は1993年から10年間実施した。

4. 2. 2. 2 試験方法

(1) 試験材供試位置

第１次および第２次試験材は、いずれも試験目的に合わせて試験施設本体とは絶縁し、飛末帯から海中部にまたがって取付け暴露した。図4.2.4は1984年の第１次試験材による暴露試験開始当初の平面配置を示す。第２次試験材は、その後試験材の回収された後に随時暴露・回収されたが、2003年度調査時の配置を図4.2.5に示す。

(2) 調査項目および調査方法

当初は、長期的な調査計画として表4.2.6に示す内容のうち、はじめの10年間を策定した。その後、途中で加えた第２次試験材の追跡調査も考慮して、1993年に10年後以降の10年間の長期計画を策定した。調査は、単年度あるいは数年ごとに年度報告にもとづいて見直しや中間的総括を行い、適宜回収や追加あるいは独自調査などを実施した。2003年度からは、一部の試験材の継続および新規試験材の暴露でさらに10年間の延長を2013年度まで行う予定である。

表4.2.6における定期一般調査とは、現地での外観観察、測定を主として実施するものであり、定期詳細調査とは、破壊試験を含む詳細調査を実施するものである。

表4.2.7には調査項目と試験方法を示す。ステンレス鋼では、これらの調査項目の内、外観観察およびすき間腐食発生の有無を調べた。また。局部腐食の深さをデプスゲージを用いて測定した。

4．2．3 試験結果

(1) 各種ステンレス鋼の暴露試験結果

暴露試験後のA-1-5材、A-2-2材、A-3-2材およびA-4-2材の全長にわたる外観観察結果を図4.2.6～9および図4.2.10～17に示す。これらの試験片は、いずれも人工すき間付与のない管状で、19年５ヵ月間暴露されたものである。また、それらの局部腐食発生状況を表4.2.8～11に発生数、侵食の深さおよび大きさなどの数値でまとめた。これらの試験結果を以下にまとめる。

①A-1-5材（SUS316L）では、飛沫帯には局部腐食の発生が認められず、干満帯には73ヵ所、海中部には23ヵ所の合計96ヵ所の発生が確認された。この局部腐食では侵食深さが１mmを超えるものが、干満帯に７ヵ所、海中部に９ヵ所の合計16ヵ所発生していた。この干満帯７ヵ所のうち５ヵ所はL.W.Lに近く、しかもそのうち４ヵ所は溶接部に発生し、さらにこのうちの２ヵ所は元板厚３mmを貫通し、他の２ヵ所も深さ２mm以上で、溶接部での侵食が著しいことを示していた。また、海中部T.P.-1,000mm以下の試験材下端部の円周状絶縁ゴムシート部下に浅いが大きい腐食が認められた。

②A-2-2材（22Cr-26Ni-5Mo-Ti-L.C.）では、干満帯の母材部と溶接部に各１ヵ所、海中部の溶接部に１ヵ所の合計３ヵ所に比較的浅い局部腐食が発生するにとどまり、A-1-5材より耐食性が優れていた。

③A-3-2材（25Cr-50Ni-6Mo-Cu-Ti-L.C.）では、干満帯の溶接部に深さの浅い局部腐食が３ヵ所認められるのみで、これもA-1-5材より耐食性が優れていた。

④A-4-2材（26Cr-4Mo-Ni-L.C.-L.N.）では、飛沫帯には局部腐食が認められず、干満帯で23ヵ所、海中部で10ヵ所の発生が認められたが、侵食深さが１mmを超えるものはＬＷＬ直下の海中部の溶接部近傍に１ヵ所のみであった。このA-4-2材は合計33ヵ所の局部腐食のうち、溶接部に遠い母材部に発生したのは干満帯に２ヵ所とL.W.L直下の５ヵ所の計

７ヵ所で、他はすべて干満帯と海中部の溶接部およびその近傍に集中した。また、海中部T.P.-1,000mm以下の試験材下端部の絶縁ゴムシート部の溶接部に、浅いが180×37mm位の大きい腐食が認められた。

表4.2.12には今回19年５ヵ月間の暴露で回収されたステンレス鋼溶接材４本の比較を示した。局部腐食発生はA-1-5材（SUS316）が最も多く、A-1-5材＞A-4-2材＞A-2-2材≒A-3-2材の順に少ない。局部腐食は飛沫帯にはどの試験材にも発生せず、干満帯の方が約３倍の暴露面積ではあるものの、海中部より発生数が多い。

(2) 二相ステンレス鋼試験材（A系）

３種類の二相ステンレス鋼試験材の19年５ヵ月間暴露後の外観状況を図4.2.18～21(2)および図4.2.22～27に示した。その局部腐食発生状況を発生数、その深さ、大きさの最大値でまとめて、試験材別に表4.2.13～15に示した。

①A-7-2材（25Cr-7Ni-3Mo-Cu-N-L.C.）は、飛沫帯では小さく浅い局部腐食が１ヵ所認められるのみで、干満帯では全域34ヵ所に分散発生していた。その侵食深さは0.33mmが最大で、大きさは11×15mmが最大と、全般的に浅く小さい局部腐食が多い傾向を示した。海中部には局部腐食がまったく認められなかった。

②A-8-1材（25Cr-6Ni-3Mo-L.C.）は、干満帯に浅く小さい局部腐食が１ヵ所発生したのみで、海水中の耐食性が極めてよかった。ただし、干満帯から海中部の溶接部らしき痕跡に上下方向に極めて小さい点状孔食が連続発生していた。

③A-9-2材（22Cr-5Ni-3Mo-L.C.）は飛沫帯には腐食が認められず、干満帯に155ヵ所と海中部に61ヵ所の極めて多数の局部腐食が発生していた。そのほとんどは母材部で、溶接部には干満帯で１ヵ所、海中部で２ヵ所認められるのみであった。また、局部腐食が多いにもかかわらず貫通孔は認められなかった。しかし、侵食深さ１mm以上の局部腐食は、干満帯に12ヵ所、海中部に７ヵ所あり、その最大値は干満帯で2.74mm、海中部で2.32mmであった。大きさでは海中部の最下端、絶縁用ゴムシート下に148×168mmの浅い大きい腐食が認められた。

表4.2.16には今回19年５ヵ月間の暴露で回収された二相ステンレス鋼３本の局部腐食発生状況を比較して示した。局部腐食発生数はA-9-2材が著しく多く、侵食深さも他に比べて著しく大きい。A-7-2材、A-8-1材はこれに比べると海水中の耐食性が良好で、特にA-8-1材は極めて耐食性に優れていた。

(3) 高耐食性ステンレス鋼（旧称・耐海水性ステンレス鋼）試験材（D系）

高耐食性ステンレス鋼のD-4材およびD-5材は第２次試験材で、1993年から2003年まで10年間の暴露後回収された。その外観観察結果を図4.2.28～29および図4.2.30～33に示した。表4.2.17にはD-4材の局部腐食発生状況を発生数、その侵食深さ、大きさを示した。

①D-4材（30Cr-2Mo）は高耐食性ステンレス鋼の長さ１mを４段階に板巻き溶接したもので、この飛沫帯、干満帯、海中部に各１ヵ所ずつ粘着剤付ポリエチレン収縮チューブ（長さ200mm）を加熱して貼付け、人工すき間が付与してある。図4.2.28および表4.2.17にお

いて溶接部に発生した局部腐食で侵食深さの未記入29ヵ所は、溶接部表面に凹凸の溶接痕が残っていて深さ測定が不可能のためである。このD-4材は飛沫体から海中部にわたり長さ方向を四分割し、かつ縦方向に２分する縦横の溶接線があり、特に干満帯および海中部ではこの溶接部の非人工すき間部に多数の局部腐食が集中し、そのうち干満帯で３ヵ所、海中部で１ヵ所の貫通孔が認められた。人工すき間付与部では飛沫帯、干満帯、海中部にそれぞれ１～３ヵ所の少数の局部腐食が認められた。

②D-5材（25Cr-7Ni-3.2Mo-0.3N）は25.4mm$^{\phi}$の細管３本を間隔34.6mmで並べたもので、干満帯２ヵ所および海中部１ヵ所の合計３ヵ所に29$^{\phi}$×0.5mm^{t}のテフロンチューブを２層取付けて人工すき間が付与してある。D-5材は19.5年間でまったく腐食が認められなかった。外観観察結果を図4.2.29に示した。

4．2．4 考察

(1) 電気防食

SUS304鋼について電気防食の効果を２年間の試験により検討した。その母材についての結果を図4.2.34～36に示す。

飛沫帯においては、電気防食無し材の場合に軽微な孔食が発生するが、干満帯や海中部に比べわずかである。また、電気防食有り材では孔食の発生は認められなかった。なお、大気中においては、表面が濡れている場合を除き原理的には電流が流れないため、電気防食の効果は望めないと考えられる。

次に干満帯および海中部では、電気防食をしない場合には最大１mmを越える深い局部腐食が多数発生するのに対し、電気防食をした場合には局部腐食の発生は認められなかった。この場合、電気防食の効果は干満帯および海中部のいずれにおいても普通鋼の防食電位の-770mV(vs.SCE)まで卑にせずとも、-500mV(vs.SCE)の設定で十分に効果的であった。さらに、母材同様、溶接部に関しても電気防食は局部腐食防止に有効であった。

SUS316L鋼についても、図4.2.37～38に示すように、電気防食の実施により同様の局部腐食防止効果が認められた。

このように、電気防食は耐海水性が十分でない汎用ステンレス鋼の防食対策として非常に有効であることが判明した。

(2) 各種ステンレス鋼の耐海水性

暴露試験後に観察されたステンレス鋼の腐食形態は、すべてピットあるいはすき間腐食（ふじつぼ、ムラサキイガイ等の大型海生生物付着下でのすき間腐食を含む）等の局部腐食であったので、最大局部腐食深さと鋼の化学組成、人工すき間の有無、暴露位置（飛沫帯、干満帯、海中部）、暴露時間との関係でデータを整理した。以下、ミクロ組織毎にステンレス鋼の海洋暴露試験結果について述べる。なお、試験材料毎にその寸法および人工すき間の形状が大きく異なるので、試験材全体としての相互の比較は困難と考えられる。また、溶接部に関しても、試験体毎に溶接条件が異なることや、後述するように溶接部の

耐食性が母材よりも著しく劣る場合があり、溶接材料、溶接条件が不適切と考えられる場合もあった。このようなことから、人工すき間以外の母材表面（自由表面）における結果を中心にまとめた。

1）オーステナイト系ステンレス鋼および高ニッケル合金

ステンレス鋼SUS316Lおよび22Cr-26Ni-5Mo鋼と25Cr-50Ni-6Mo合金の結果について、最大局部腐食深さを暴露位置、暴露年数で整理した結果を図4.2.39～50に示す。

SUS316L鋼では、２年間の暴露試験の結果、SUS304鋼と同様に最大深さ１mmを越える局部腐食が干満帯および海中部に多数発生した。一方、飛沫帯では9.5年で軽微な局部腐食が見られたのみである。干満帯と海中部のいずれにあっても、最大腐食深さの時間依存性についてはばらつきが大きく、明らかな傾向は認められなかった。また、人工すき間の影響も明らかではなかった。これは、人工すき間以外の箇所においても大型海生生物が付着し、その下ですき間腐食として局部腐食がしばしば認められたことから、人工すき間の影響が明らかにならなかったものと考えられる。また、母材と溶接部との耐海水性の明らかな差は見られなかった。

次に、22Cr-26Ni-5Mo鋼については、飛沫帯で20年後においても局部腐食の発生は認められなかったが、干満部、海中部においては局部腐食が発生した。最大局部腐食深さ1.4mmで、SUS316L鋼の場合と比較して浅く、耐海水性は改善されている。人工すき間の影響に関しては、すき間の存在する場合の方が無い場合よりも発生・成長が若干早まる傾向が認められた。また、母材と溶接部との耐海水性の明らかな差は認められなかった。

25Cr-50Ni-6Mo合金については、母材人工すき間有りの場合に局部腐食の発生が認められたが人工すき間無しの場合では局部腐食の発生はなく、22Cr-26Ni-5Mo鋼に比べて耐海水性が改善されていることが判明した。しかし、溶接部に関しては１mmを越える深い局部腐食の発生が認められた。これは使用した溶接材料の選定あるいは溶接条件が不適切であった可能性が考えられ、適切な溶接材料・溶接条件の採用により溶接部の耐食性を母材並に改善することが必要である。

以上の３鋼種とSUS304鋼の母材人工すき間無しの場合の結果を暴露位置毎にまとめて、図4.2.51～53に示す。ステンレス鋼の耐食性向上元素であるCr、Mo添加量が高くなるほど、耐海水性が改善される傾向が認められる。Cr、Mo添加量の高い25Cr-50Ni-6Mo合金では局部腐食の発生は認められず良好な耐海水性を保持しているが、人工すき間のある場合にはすき間腐食感受性を有することに留意する必要がある。

2）二相ステンレス鋼

４種類の二相ステンレス鋼、すなわち25Cr-7Ni-3.2Mo-0.3N鋼、25Cr-7Ni-3Mo-N鋼、25Cr-6Ni-3Mo鋼（以上、SUS329J4L）、22Cr-5Ni-3Mo鋼（SUS329J3L）の海洋暴露試験を行った結果について、最大局部腐食深さを暴露位置、暴露年数で整理して図4.2.54～65に示す。

25Cr-7Ni-3.2Mo-0.3N鋼は20年の暴露試験において局部腐食が認められず、良好な耐海水

性を有することが判明した。

25Cr-7Ni-3Mo-N鋼は干満帯および海中部において比較的軽微な局部腐食が母材に発生した。溶接部には局部腐食の発生はなかった。人工すき間の影響はほとんど認められない。20年では飛沫帯において軽微な局部腐食が発生したが、その他の期間では認められなかった。

25Cr-6Ni-3Mo鋼は干満部において局部腐食を発生した。人工すき間の形成により若干局部腐食が加速される傾向にある。溶接部には局部腐食の発生はなかった。また、飛沫帯においても局部腐食の発生はなかった。

SUS329J3Lの22Cr-5Ni-3Mo鋼は数年で１mmを超える深さの局部腐食が発生し、上記３種類のSUS329J4Lと比較してCr量の低い分、耐海水性に劣ることが判明した。SUS316L鋼とSUS329J4L鋼の中間の耐食性を有するといえる。溶接部と母材部とで顕著な耐海水性の差は認められなかった。

これらの４種類の二相ステンレス鋼の母材人工すき間無しの場合について部位別にまとめた結果を図4.2.66～68に示す。SUS329J3LはSUS329J4Lに比してCr含有量が少なく、耐海水性に劣ることが明らかであり、SUS329J4Lのなかでも N量の高い0.3%N添加鋼の耐海水性が良好であることが判明した。以上のように、二相ステンレス鋼においては、Cr、N含有量の高いほど耐海水性が改善される傾向にあることが明らかとなった。

3) フェライト系ステンレス鋼

２種のフェライト系ステンレス鋼、すなわち26Cr-4Mo鋼と30Cr-2Mo鋼について海洋暴露試験を行った。その結果について最大局部腐食深さを暴露位置、暴露年数で整理して図4.2.69～76に示す。

26Cr-4Mo鋼ついては数年後から局部腐食が発生し、人工すき間無しの場合では時間と共に最大腐食深さが深くなる傾向にあることが認められた。人工すき間有りの場合、母材では局部腐食の発生がないのに対し、溶接部では飛沫帯、干満帯および海中部のすべての位置において局部腐食が発生し、溶接部の耐海水性が母材に比し大きく劣っていることを示している。先の25Cr-50Ni-6Mo合金の場合と同様、溶接材料の選定あるいは溶接条件が不適切であった可能性が考えられる。なお、母材では飛沫帯での局部腐食の発生は認められなかった。

30Cr-2Mo鋼については、10年の暴露試験結果のみである。局部腐食のほとんどは溶接部に発生した。母材では人工すき間無しの場合には局部腐食の発生はないが、溶接部においては干満帯と海中部で多数の局部腐食の発生が認められた。人工すき間有りの場合では海中部で母材に局部腐食が発生し、溶接部にあってはいずれの位置においても多数の局部腐食が発生した。したがって、この場合も溶接材料の選定あるいは溶接条件が不適切であった可能性が考えられる。特に、溶接部の耐食性劣化に関するフェライト系ステンレス鋼特有の問題は、溶接時の不活性ガスによるシールドが不十分な場合には炭素のピックアップによる鋭敏化*注) を原因とする耐食性劣化の可能性を有することである。そのため適切な溶

接条件の確保が重要である。

図4.2.77～79に、各暴露位置毎のこれらフェライト系ステンレス鋼の母材人工すき間無しの場合についての結果をまとめた。飛沫帯においては局部腐食の発生はなく、干満帯と海中部においては26Cr-4Mo鋼に局部腐食の発生が認められた。30Cr-2Mo鋼では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。

＊注）大気中の有機物や二酸化炭素からの炭素およびステンレス鋼に元々含まれている炭素が、クロムと化合しクロム炭化物が粒界に生成、析出して粒界近傍のクロム量が減少して粒界の耐食性が劣化することを言う。

4）ステンレス鋼の耐海水性に及ぼす合金成分の影響

以上のように、溶接部の耐食性は溶接材料の選定や溶接条件に依存する場合があるので、評価対象を母材かつ人工すき間の無い場合（母材自由表面）に限定して、長期暴露試験をもとに、合金成分の影響を検討することとした。ステンレス鋼の耐海水性は、一般的にCr、Mo等の耐食性を向上させる合金元素の添加量に依存することが知られている。また、Nについても二相系およびオーステナイト系ステンレス鋼の局部腐食感受性を低減させることも知られている。ここでは、10年および20年暴露材の結果について、Cr+3Mo+10N量[3]で整理した結果を図4.2.80に示す。明らかに、Cr+3Mo+10N量が38(mass%)以上となれば、ステンレス鋼の鋼種によらず海水環境下での局部腐食感受性が著しく低減しており、良好な耐海水性を有することを示している。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、Cr+3Mo+10N量≧38(mass%)の材料が有効である。

(3) 局部腐食深さの経時変化（腐食深さの予測）

ステンレス鋼の種類によっては、海水環境で局部腐食が発生する場合がある。その場合、補修時期を設定するのに当たり、将来どのように局部腐食が進展するのかをある程度予測する必要が生ずる。そのため、暴露年数を変えたデータ数の多いSUS316L鋼を中心に、腐食深さの経時変化について検討し、数式化を試みた。

これまで各種ステンレス鋼の結果を述べたように、最大局部深さには時間的に著しいバラツキがあり、このままでは腐食深さの経時変化の傾向を把握することは困難である。河口汽水域での各種ステンレス鋼の５年間の水中暴露試験結果について、すき間腐食深さに関し腐食深さの深い方からいくつかのデータの平均値を求め、その時間変化を求めた例[4]がある。それを参考に、今回局部腐食深さの深い方から５個を選び、その平均値を局部腐食深さとしてその時間変化をプロットすることとした。その結果を図4.2.81に示す。若干のバラツキはあるものの、SUS316L鋼では時間の1/2乗に、SUS329J4L鋼は1/3乗に比例して局部深さが深くなることが判る。一般にすき間腐食深さに関し、時間：ｘ、腐食深さ：ｙ、すき間腐食発生までの誘導時間：ｔとして、$y = a(x - t)^b$で示されるとされている。また、ｂは1/3～1/2の範囲内にある[5]とされており、今回の結果と良く一致する。今後データ数が増えれば、上記の結果を参考にある程度の腐食深さの進展を予測することも可能となると思われる。なお、本プロットは、１つの局部腐食が継続して成長した場合の時間変化

を示したものではなく、１つの大型試験体全体について、深い方から５個を選び、平均局部腐食の深さの時間変化を示したものである。局部腐食は必ずしも継続的に成長するとは限らず、途中で成長を停止する場合もあるため、このような評価手法とした。

4. 2. 5 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Cr+3Mo+10N量が38(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、Cr+3Mo+10N≧38(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。

（ステンレス鋼の使用上の留意点）

これまで述べたように、ステンレス鋼においては溶接部の耐食性が母材に比較して劣る場合がある。その対策としては、溶接金属部の凝固偏析（特にMo）による耐食性の低下を考慮した適切な溶接材料の選定が望ましいと考えられる。すなわち、オーステナイト系および二相系ステンレス鋼ではCr+3Mo+10N量、フェライト系ステンレス鋼ではCr+3Mo量が母材より高めの溶接材料の使用が推奨される。また、いうまでもないが、特にフェライト系ステンレス鋼の場合には、炭素のピックアップによる鋭敏化を原因とする耐食性の低下を避けるべく、不活性ガスによるシールドを確保した溶接施工が望まれる。さらに、ステンレス鋼全般に関することであるが、溶接時に生成する表面スケールを除去しない場合、耐食性の大幅な劣化をもたらす[6]ので、ガスシールドを実施しスケールの生成を防止するか、あるいは生成したスケールを除去することにより耐食性の向上が期待できる。この場合、除去後の表面粗度が重要で、酸洗いあるいは目の細かい研磨紙による研磨除去により、滑らかな表面にすること[6]が望ましい。

最後に、上記の大井川沖20年海洋暴露試験結果を基に、飛沫帯、干満帯および海中部の部位別のステンレス鋼の選定案を以下に示す。

・電気防食を用いる場合は、ステンレス鋼の使用部位に対して-500mV(vs. SCE)以下、普通鋼に対して-770mV(vs. SCE)以下[7]の設定電位とすることにより、海中部および干満帯での局部腐食の発生を防止できる。

・電気防食を用いない場合、Cr+3Mo+10N≧38(mass%)以上の各種ステンレス鋼を用いることによって、飛沫帯、干満帯および海中部での局部腐食の発生を防止できる。

表4.2.18 大井川沖20年海洋暴露試験結果を基にした部位別のｽﾃﾝﾚｽ鋼選定(電気防食適用含む)

	電気防食*1を適用	電気防食不適用
飛沫帯	Cr＋3Mo＋10N≧38(mass%)を満足する各種ステンレス鋼*2 (電気防食作用せず)	Cr+3Mo+10N≧38(mass%)を満足する各種ステンレス鋼*2
干満帯	SUS304鋼、SUS316鋼あるいはこれらの同等以上の耐食性を有するステンレス鋼	
海中部		

＊1：フェライト系ステンレス鋼および二相ステンレス鋼の場合、水素脆性を生じない電位を選定する必要がある。

＊2：溶接施工では、凝固偏析（たとえばMoの負偏析）に起因する耐食性劣化あるいはガスシールドが不十分なことによる炭素のピックアップによる耐食性劣化を避ける等の適切な溶接材料の選定、溶接施工および必要に応じた後処理を行うことが望ましい。

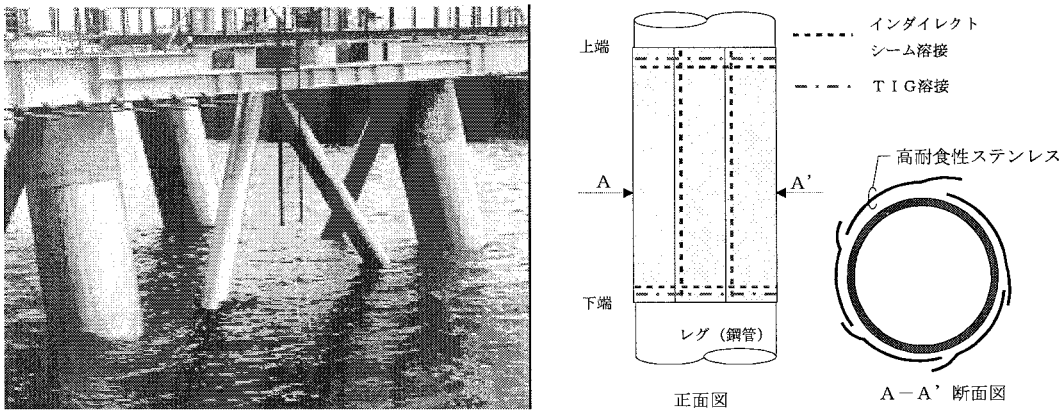


図 4.2.82 高耐食性ｽﾃﾝﾚｽﾗｲﾆﾝｸﾞの適用例（写真の銀色部分が高耐食性ｽﾃﾝﾚｽ鋼）とｽﾃﾝﾚｽﾗｲﾆﾝｸﾞ材の構成（右図）の一例

参考文献

1) 建設省土木研究所材料施工部化学研究室、鋼材倶楽部編：暴露期間10年後の研究成果共同研究報告書第141号；平成７年12月
2) 日本鉄鋼連盟編:共同研究記録（その19）；2004年５月
3) 腐食防食協会編：腐食防食データーブック、p. 542（1995）
4) 守屋ら：第49回材料と環境討論会講演集、p. 127（2002）
5) 守屋ら：第49回材料と環境討論会講演集、p. 131（2002）
6) ステンレス協会編：ステンレス鋼便覧（第３版）、p. 458（1995）
7) (財)沿岸開発技術研究センター：港湾構造物防食・補修マニュアル（改訂版）、p. 52～53；平成９年４月

表4.2.1　ステンレス試験材とその目的の概要

テーマ	防食系		防食仕様 （主要成分、電防等）	形状	素管サイズおよび防食仕様	皮膜厚 (mm) 等	目　的 （暴露期間：約20年）
1	オーステナイト系ステンレス鋼		SUS316L(17Cr-12Ni-2Mo)	管	165.2φ×3500l×11t	3	金属皮膜による防食効果 飛沫帯、干満帯、水中部 にて暴露、耐海水性の確認
			22Cr-26Ni-5Mo-Ti-L,C,			3	
			25Cr-50Ni-6Mo-Cu-Ti-L,C,			3	
	フェライト系ステンレス鋼		26Cr-4Mo-Ni-Cu-Al-Nb-L,C,-L,N,			3	
	ステンレス鋼 鋳込み圧延ｸﾗｯﾄﾞ		SUS316L(鋳込み圧延ｸﾗｯﾄﾞ)		165.2φ×3500l×8t	3	鋳込み圧延ｸﾗｯﾄﾞ：同上
	二相ステンレス鋼管(単体)		25Cr-7Ni-3Mo-Cu-N-L,C,		114.3φ×3500l×10t		二相ステンレス：耐海水性の確認
			25Cr-6Ni-3Mo-L,C,		89.1φ×3500l×9.6t		
			22Cr-5Ni-3Mo-Cu-L,C,		139.8φ×3500l×12.7t		
	SUS316L	非電防		管	165.2φ×3162l×7.1t	隙間 (すきま) 付与	汎用ステンレス鋼SUS316L の電気防食効果の確認
		電防	施設本体に接続				
	SUS316L	電防	-500mV	管	165.2φ×3162l×7.1t		
		電防	-770mV				
	オーステナイト系ステンレス鋼単体		20Cr-18Ni-6Mo-Cu-N	L形	100×150×3800l×3t		耐海水性の確認
	フェライト系ステンレス鋼被覆		30Cr-2Mo	管	165.2φ×Sch40×3500l 被覆　1t		
	二相ステンレス鋼管(単体)		25Cr-7Ni-3.2Mo-Cu-0.3N	管3本	25.7φ×3130l×2.2t		
	SUS304 (18Cr-8Ni)	非電防		管	165.2φ×3500l×7.85t 継目無鋼管 JIS G3459		汎用ステンレス鋼SUS304 の電気防食効果の確認
		電防	-500mV				
		電防	-770mV				
	SUS304	電防	-500mV	管	165.2φ×3162l×7.85t		
		電防	-770mV	管			

（注）以下の図表において、隙間、すき間と表記されているものはすべて すきま の意である。

表4.2.2　金属被覆系試験材の内容と撤去予定

研究テーマ1　第1次試験材

テーマ	次材	系	記号No.	防食系	防食仕様	形状	素材サイズ (mm)	塗装、被覆厚 (mm)	撤去の経過および予定（年／経過年数） '89 5.5	'90 6.5	'93 9.5	'98 14.5	'03 19.5	当初本数	回収 '03年7月調査時 本数	No.	'03年調査後の残存 '13 29.5
1	1	A	A-1-1～5	ステンレス鋼板溶接	SUS316L	管	165.2φ×3500^{l}×11^{t}	3	○		○△	○	○	5	1	A-1-5	
			A-2-1～3	ステンレス鋼板溶接	22Cr-26Ni-5Mo-Ti-L.C.	管		3			○△		○	3	1	A-2-2	
			A-3-1～3	ステンレス鋼板溶接	25Cr-50Ni-6Mo-Cu-Ti-L.C.	管		3			○△		○	3	1	A-3-2	
			A-4-1～3	ステンレス鋼板溶接	26Cr-4Mo-Ni-L.C.-L.N.	管		3			○△		○	3	1	A-4-2	
			A-5	ステンレス鋼 鋳込み圧延ｸﾗｯﾄﾞ	SUS316L(鋳込み圧延ｸﾗｯﾄﾞ)	管	165.2φ×3500^{l}×8^{t}	3			□			1			
			A-6	溶射+塗装	Zn-13Al(200μm) +ｳｫｯｼｭﾌﾟﾗｲﾏｰ +ｳﾚﾀﾝ(4000μm)	管	165.2φ×3500^{l}×11^{t}	4					○	1	1	A-6	
			A-7-1～2	二相ステンレス鋼(素管)	25Cr-7Ni-3Mo-Cu-N-L.C.	管	114.3φ×3500^{l}×9.6^{t}				□		○	2	1	A-7-2	
			A-8-1～2	二相ステンレス鋼(素管)	25Cr-6Ni-3Mo-L.C.	管	89.1φ×3500^{l}×12.7^{t}				□		○	2	1	A-8-1	
			A-9－1～2	二相ステンレス鋼(素管)	22Cr-5Ni-3Mo-L.C.	管	139.8φ×3500^{l}×12^{t}				□		○	2	1	A-9-2	
													計	22	8		

（注）　○：人工隙間なし
△：1984年隙間付与試験材(ﾎﾟﾘｴﾁﾚﾝ収縮ﾁｭｰﾌﾞ)
□：1987年隙間付与試験材(ﾎﾟﾘｴﾁﾚﾝ収縮ﾁｭｰﾌﾞ)
●：1984年隙間付与試験材(ﾁﾀﾝまたはﾁﾀﾝ合金片の溶接)

表4.2.3　金属被覆系試験材の化学成分

研究テーマ1　第1次試験材

（%）

テーマ	次材	系	記号 No.	防食系	防食仕様	被覆厚 (mm)	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	Cu	その他	
1	1	A	A-1	ステンレス鋼板溶接	SUS316L (17Cr-12Ni-2Mo-L.C.)	3	0.014	0.69	1.17	0.030	0.001	17.05	12.42	2.09	-		
			A-2	ステンレス鋼板溶接	22Cr-26Ni-5Mo-Ti-L.C.	3	0.04	0.88	1.20	0.021	0.005	21.46	25.30	5.19	-	Ti(0.40)	
						3	0.04	0.70	1.17	0.033	0.003	21.41	25.97	4.70	-	Ti(0.41)	
			A-3	ステンレス鋼板溶接	25Cr-5Ni-6Mo-Cu-Ti-L.C.	3	0.012	0.47	0.64	0.012	0.009	24.37	49.08	5.74	0.99	Ti(1.25)	
			A-4	ステンレス鋼板溶接	26Cr-4Mo-Ni-L.C.-L.N.	3	0.0031	0.09	0.09	0.004	0.002	25.5	0.26	3.97	0.01	Al(0.13),Nb(0.15),N(0.0057)	
			A-5	ステンレス鋼 鋳込み圧延ｸﾗｯﾄﾞ	SUS316L (17Cr-12Ni-2Mo-L.C.)	3	0.019	0.43	1.65	0.023	0.002	17.35	12.10	2.065	-		
			A-7	二相ステンレス鋼(素管)	25Cr-7Ni-3Mo-Cu-N-L.C.	10*	0.018	0.43	0.91	0.029	0.003	24.85	7.00	3.16	〔0.5〕	N(0.138),(Cu添加)	A-7-1
							0.019	0.35	0.87	0.030	0.003	24.90	7.15	3.20	〔0.5〕	N(0.139),(Cu添加)	A-7-2
			A-8	二相ステンレス鋼(素管)	25Cr-6Ni-3Mo-L.C.	9.6*	0.012	0.49	1.04	0.015	0.001	25.0	7.09	3.04	-	N(0.11)	
			A-9	二相ステンレス鋼(素管)	22Cr-5Ni-3Mo-L.C.	12.7*	0.017	0.43	1.83	0.023	0.001	21.24	5.39	2.86	0.04		

（注）　1）＊は素管肉厚

表4.2.4　金属被覆系試験材の内容と暴露経過および予定

研究テーマ1　第2次試験材

テーマ	次材	系	記号 No.	防食系		防食仕様	形状	素管サイズ および防食仕様	隙間付与	暴露経過および予定
1	2	A	A-1-6	SUS316L	非電防		管	165.2φ×3162^{l}×7.1^{t}	○	SUS316L
			A-1-7		電防	施設本体に接続			○	電防 1回
			A-1-8	SUS316L	電防	-500mV	管	165.2φ×3162^{l}×7.1^{t}	○	SUS316L
			A-1-9		電防	-770mV			○	電防 2回
		D	D-3	高耐食性ステンレス鋼		20Cr-18Ni-6Mo	L形	100×150×3800^{l}×3^{t}	○	*2
			D-4			30Cr-2Mo	管	165.2φ×Sch40×3500^{l} 被覆 1t	○	
			D-5			25Cr-7Ni-3.2Mo-0.3N	3管	25.7φ×3130^{l}×2.2^{t}	○	
			D-6	SUS304	非電防		管	165.2φ×3500^{l}×7.85^{t}	○	*1
			D-7		電防	-500mV	管		○	SUS304
			D-8		電防	-770mV	管		○	電防 3回
			D-7-2	SUS304	電防	-500mV	管	165.2φ×3162^{l}×7.85^{t}	○	SUS304
			D-8-2		電防	-770mV	管		○	電防 4回

暴露経過および予定：'89 '90 '91 '92 '93 '94 '95 '96 '97 '98 '99 '00 '01 '02 '03 ‥ '13

*1　一時引き上げ　隙間腐食測定後再設置

*2　2003年7月 流失確認

表4.2.5　金属被覆系試験材の化学成分
研究テーマ1　第2次試験材

(%)

テーマ	次材	系	記号No.	防食系		防食仕様	形状	隙間付与	C	Si	Mn	P	S	Cu	Cr	Ni	Mo	その他	備考
1	2	A	A-1-6	SUS316L	非電防		管	○	0.024	0.35	1.25	0.033	0.001	—	16.35	12.00	2.21	Fe(1.35)	
			A-1-7		電防	施設本体に接続		○											
			A-1-8	SUS316L	電防	-500mV	管	○	0.024	0.35	1.25	0.033	0.001	—	16.35	12.00	2.21	Fe(1.35)	
			A-1-9		電防	-770mV		○											
		D	D-3	高耐食性ステンレス鋼		20Cr-18Ni-6Mo	L形	○	≦0.02	≦0.80	≦1.00	≦0.03	≦0.015	0.50～1.00	19.0～21.0	17.0～19.5	5.5～6.5	N(0.16～0.24)	
			D-4			30Cr-2Mo	管	○	0.003	0.13	0.11	0.018	0.004		29.58	0.14	2.15		
			D-5			25Cr-7Ni-3.2Mo-0.3N	3管	○	0.012	0.43	0.54	0.018	0.0004	0.05	25.30	6.75	3.28	N(0.275)	
			D-6	SUS304	非電防		管	○	0.01	0.46	1.60	0.29	0.01	—	18.35	9.67	—	SUS304継目無鋼管 JIS G3459	
			D-7		電防	-500mV	管	○											
			D-8		電防	-770mV	管	○											
			D-7-2	SUS304	電防	-500mV	管	○	0.04	0.48	0.84	0.25	0.05	—	18.22	8.60	—		
			D-8-2		電防	-770mV	管	○											

表4．2．6 長期調査計画

研究テーマ1

年	'84	'85	'86	'87	'88	'89	'90	'91
経過年数	0.5	1.5	2.5	3.5	4.5	5.5	6.5	7.5
調査	○	○	◎	○	○	◎	○	○

年	'92	'93	'94	'95	'96	'97	'98	'99
経過年数	8.5	9.5	10.5	11.5	12.5	13.5	14.5	15.5
調査	○	◎	○	◎	○	○	◎	○

年	'00	'01	'02	'03	'04	'05	'06	'07
経過年数	16.5	17.5	18.5	19.5	20.5	21.5	22.5	23.5
調査	○	○	○	◎▲	△	○	—	—

年	'08	'09	'10	'11	'12	'13
経過年数	24.5	25.5	26.5	27.5	28.5	29.5
調査	◎	—	—	○	—	◎

(注) 1) ○ : 定期一般調査
2) ◎ : 定期詳細調査(破壊調査含む)
3) △ : 一時引上げ補修後再設置
4) ▲ : 一時撤去調査後再設置

表 4.2.7 調査項目および試験方法

調査項目	試験方法	'03 調査	定期 一般	定期 詳細
外観観察	目視(健全部、異常部)	○	○	◎
外観写真	全景、接写(健全部、異常部)	○	○	◎
隙間付与部の観察	目視、ディプスゲージ	○	○	◎
孔食測定	ディプスゲージ	○		◎
生物付着状況調査	目視、秤量	※1	○	◎
付着生物剥離後の観察	目視	※1	○	◎
膜厚測定	kett膜厚計、VL-30B、ﾚﾝｼﾞⅢ(300μm～8mm)	○	○	◎
交流抵抗測定※2	三田無線、LCRﾒｰﾀｰ、D-55(交流0.2,0.5,1.0kHz)	○	○	◎
塗膜ピンホール測定	ｻﾝｺｰ電子、ﾎﾘｽﾀｰⅠ型(3～12kV)、5kV印加	○	○	◎
電気防食効果	電位・電流測定、防食効果確認	○		◎

(注) ※1　初期の調査で状況を把握したので 1994 年度以降中止

※2　なお、調査結果で後述するように、現場測定における交流抵抗の初期(1984～1986 年度)値が、その後の値に比べ 1/10 から 1/100 程度低い値を示しているが、これについては当初は環境条件や測定方法、計測器などをいろいろ試み検討を重ねた。特に測定箇所が海面に近い飛沫帯にあり、海水の飛沫、塩分の堆積やその湿潤性による影響を受け、測定部周辺の表面のリーク電流を含んでいるため低い交流抵抗値になったと考えられるので、これらの影響を排除するように検討した結果、1987 年度からは測定面の純水による十分な洗浄や測定までの海塩粒子再付着防止用のビニルシートの貼付け(シリカゲル封入、1 時間程度)を実施して測定を行なっている。

表4.2.8 SUS316L鋼の局部腐食発生状況(1)

研究テーマ1、第1次試験材

A-1-5材(17Cr-12Ni-2Mo-L.C.), 元板厚 3mm, 19.5年暴露, 人工隙間付与なし

2003年度回収

mm : 深さ(縦×横)

	飛沫帯		干満帯			海中部	
	母材部	溶接部	母材部		溶接部	母材部	溶接部
東	0ヵ所		1.17 (20×12)	0.32 (9×6)		1.79 (5×7)	
			1.16 (3×5)	0.30 (8×4)		1.55 (5×5)	
			1.07 (6×8)	0.27 (5×7)		1.32 (6×5)	
			0.79 (11×11)	0.24 (12×6)		0.82 (3×5)	
			0.74 (10×5)	0.22 (5×4)		0.52 (4×4)	
			0.67 (13×6)	0.18 (16×9)		0.38 (10×8)	
			0.67 (7×18)	0.17 (10×10)		0.18 (5×11)	
			0.65 (14×9)	0.16 (10×3)		0.07 (6×11)	
			0.59 (14×13)	0.15 (2×4)			
			0.56 (3×5)	0.13 (16×15)			
			0.56 (9×23)	0.12 (9×6)			
			0.53 (10×7)	0.11 (14×9)			
			0.53 (11×7)	0.10 (11×10)			
			0.53 (7×10)	0.05 (6×12)			
			0.46 (9×6)	0.03 (12×12)			
			0.45 (6×5)	0.03 (6×10)			
			0.39 (9×8)	0.02 (8×11)			
				34ヵ所		8ヵ所	
西	0ヵ所	0ヵ所	0.90 (6×4)	0.30 (17×12)	貫通孔(16×10)	1.61 (10×6)	
			0.73 (8×6)	0.28 (12×13)	貫通孔(20×13)	1.59 (7×4)	
			0.68 (9×6)	0.24 (8×9)	2.15 (13×7)	1.53 (10×4)	
			0.64 (8×8)	0.20 (6×4)	2.05 (10×12)	1.30 (5×4)	
			0.62 (4×4)	0.19 (22×12)	0.74 (6×7)	1.23 (8×7)	
			0.61 (4×4)	0.19 (8×14)	0.59 (6×5)	1.07 (5×4)	
			0.56 (9×14)	0.19 (10×5)	0.47 (9×5)	0.87 (7×3)	
			0.46 (18×17)	0.18 (2×6)	0.25 (8×7)	0.74 (6×8)	
			0.46 (5×9)	0.16 (4×4)	0.11 (21×16)	0.72 (7×5)	
			0.44 (21×8)	0.16 (9×9)	0.05 (6×11)	0.60 (14×9)	
			0.40 (10×13)	0.13 (8×10)		0.36 (7×6)	
			0.37 (6×5)	0.13 (8×10)		0.35 (4×9)	
			0.36 (8×10)	0.10 (22×14)		0.35 (6×5)	
			0.34 (8×10)	0.05 (5×4)		0.20 (6×4)	
			0.31 (15×10)			0.19 (6×8)	
				29ヵ所	10ヵ所	15ヵ所	0ヵ所

表4.2.9 ステンレス鋼の局部腐食発生状況(2)

研究テーマ1、第1次試験材

A-2-2材(22Cr-26Ni-5Mo-Ti-L.C.), 元板厚 3mm, 19.5年暴露, 人工隙間付与なし

2003年度回収　　mm：深さ(縦×横)

	飛沫帯		干満帯		海中部	
	母材部	溶接部	母材部	溶接部	母材部	溶接部
東	0ヵ所		0.23 (5×3) 1ヵ所		0ヵ所	
西	0ヵ所	0ヵ所	0ヵ所	0.27 (3×3) 1ヵ所	0ヵ所	0.65 (16×11) 1ヵ所

表4.2.10 ステンレス鋼の局部腐食発生状況(3)

研究テーマ1、第1次試験材

A-3-2材(25Cr-50Ni-6Mo-Cu-Ti-L.C.), 元板厚 3mm, 19.5年暴露, 人工隙間付与なし

2003年度回収　　mm : 深さ (縦×横)

	飛沫帯		干満帯		海中部	
	母材部	溶接部	母材部	溶接部	母材部	溶接部
東	0ヵ所		0ヵ所		0ヵ所	
西	0ヵ所	0ヵ所	0ヵ所	0.12 (9×2) 0.11 (8×4) 0.05 (8×2) 3ヵ所	0ヵ所	0ヵ所

表4.2.11 ステンレス鋼の局部腐食発生状況(4)

研究テーマ1、第1次試験材

A-4-2材(26Cr-4Mo-Ni-L.C.-L.N.), 元板厚 3mm, 19.5年暴露, 人工隙間付与なし

2003年度回収　　mm：深さ(縦×横)

	飛沫帯		干満帯		海中部	
	母材部	溶接部	母材部	溶接部	母材部	溶接部
東	0ヵ所	0ヵ所	0.39 (4×3) 0.33 (7×3) 0.26 (12×8) 0.26 (4×3) 0.23 (7×4) 0.18 (5×5) 0.18 (3×4) 0.11 (10×8) 0.03 (4×5) 9ヵ所	0.77 (8×4) 0.53 (13×11) 0.37 (7×2) 0.34 (3×3) 0.31 (5×6) 0.27 (4×8) 0.26 (3×5) 0.22 (3×5) 0.21 (8×5) 0.15 (28×12) 0.14 (7×2) 0.11 (8×9) 0.05 (10×16) 13ヵ所	1.11 (8×7) 0.58 (6×3) 0.31 (4×3) 0.30 (5×4) 0.29 (4×3) 5ヵ所	0.60 (180×37) 1ヵ所
西	0ヵ所		0.01 (5×3) 1ヵ所		0.69 (3×5) 0.31 (3×3) 0.17 (2×5) 0.11 (3×3) 4ヵ所	

表4.2.12　ステンレス鋼の局部腐食（発生数、最大深さ、最大大きさ）の比較
研究テーマ1、第1次試験材、19.5年暴露

2003年度　　（最大深さおよび最大大きさ　：　mm）

材 No.		A－1－5		A－2－2		A－3－2		A－4－2	
合金系		SUS316L		22Cr-26Ni-5Mo-Ti-L.C.		25Cr-50Ni-6Mo-Cu-Ti-L.C.		26Cr-4Mo-Ni-L.C.-L.N.	
暴露期間		1984～2003							
経過（年）		19.5							
部位		母材部	溶接部	母材部	溶接部	母材部	溶接部	母材部	溶接部
飛沫帯	最大深さ	—	—	—	—	—	—	—	—
	最大大きさ	—	—	—	—	—	—	—	—
	発生数	0	0	0	0	0	0	0	0
干満帯	最大深さ	1.17	>3.00 貫通2ヵ所	0.23	0.27	—	0.12	0.39	0.77
	最大大きさ	22×14	21×16	5×3	3×3	—	8×4	12×18	28×12
	発生数	63	10	1	1	0	3	10	13
海中部	最大深さ	1.79	—	—	0.65	—	—	1.11	0.60
	最大大きさ	14×9	—	—	16×11	—	—	8×7	180×37
	発生数	23	0	0	1	0	0	9	1

（注）

最大深さ　mm
最大大きさ　mm （たて×よこ）
発生数（個）

表4.2.13　二相ステンレス鋼の局部腐食発生状況(1)

研究テーマ1、第1次試験材

A-7-2材(25Cr-7Ni-3Mo-Cu-N-L.C.), 元板厚 3mm, 19.5年暴露, 人工隙間付与なし

2003年度回収　　mm：深さ(縦×横)

	飛沫帯	干満帯	海中部
	母材部	母材部	母材部
東	0ヵ所	0.28 (3×5) 0.24 (5×5) 0.16 (3×8) 0.14 (15×10) 0.14 (5×8) 0.12 (8×4) 0.09 (6×8) 0.05 (17×5) 0.05 (5×8) 0.05 (5×4) 0.04 (7×7) 0.03 (6×10) 0.03 (7×8) 0.01 (8×8) 0.01 (6×4) 0.01 (8×9) 0.01 (4×7) 0.01 (5×3) 18ヵ所	0ヵ所
西	0.22 (3×3) 1ヵ所	0.33 (1×2) 0.30 (4×3) 0.22 (5×3) 0.17 (3×2) 0.17 (13×4) 0.15 (6×2) 0.14 (8×4) 0.14 (7×8) 0.13 (11×15) 0.09 (6×8) 0.08 (4×3) 0.03 (5×6) 0.03 (2×6) 0.03 (3×6) 0.02 (8×2) 0.01 (2×4) 16ヵ所	0ヵ所

表4.2.14　二相ステンレス鋼の局部腐食発生状況(2)

研究テーマ1、第1次試験材
A-8-1材(25Cr-6Ni-3Mo-L.C.), 元板厚 3mm,
19.5年暴露, 人工隙間付与なし

2003年度回収　　mm：深さ(縦×横)

	飛沫帯 母材部	干満帯 母材部	海中部 母材部
東	0ヵ所	0.01（ 8×8 ） 1ヵ所	0ヵ所
西	縦に点状腐食あり （多数）	縦に点状腐食あり （多数）	縦に点状腐食あり （多数）

北西の干満帯から海中部に縦に細かな点状孔食がある

表4.2.15 二相ステンレス鋼の局部腐食発生状況(3)

研究テーマ1、第1次試験材

A-9-2材(22Cr-5Ni-3Mo-L.C.), 元板厚 3mm, 19.5年暴露, 人工隙間付与なし

2003年度回収

mm : 深さ(縦×横)

	飛沫帯		干満帯					海中部			
	母材部	溶接部	母材部				溶接部	母材部			溶接部
東			2.03 (16×14)	0.48 (4×5)	0.29 (7×5)	0.15 (18×10)		2.32 (7×8)			
			1.72 (9×7)	0.47 (5×9)	0.28 (10×8)	0.13 (9×9)		1.48 (5×5)			
			1.43 (10×22)	0.47 (3×5)	0.28 (10×10)	0.12 (4×3)		1.29 (12×8)			
			1.22 (11×8)	0.45 (9×4)	0.28 (4×8)	0.11 (4×3)		1.26 (15×7)			
			1.05 (11×7)	0.44 (6×4)	0.27 (6×6)	0.10 (6×4)		0.98 (17×6)			
			0.95 (14×11)	0.44 (21×10)	0.25 (6×10)	0.09 (4×5)		0.80 (12×7)			
			0.86 (4×9)	0.42 (16×10)	0.23 (5×4)	0.08 (10×6)		0.80 (4×4)			
			0.76 (5×5)	0.41 (9×9)	0.23 (9×8)	0.08 (7×5)		0.64 (148×168)			
			0.71 (6×6)	0.41 (3×6)	0.21 (4×6)	0.08 (6×5)		0.46 (6×5)			
			0.69 (9×7)	0.37 (19×8)	0.21 (11×5)	0.08 (7×4)		0.45 (8×5)			
			0.64 (8×5)	0.37 (12×12)	0.20 (8×3)	0.07 (12×7)		0.39 (12×5)			
			0.62 (6×5)	0.37 (4×5)	0.20 (8×3)	0.07 (6×10)		0.32 (7×5)			
			0.59 (4×4)	0.36 (9×7)	0.20 (7×7)	0.05 (6×13)		0.30 (5×5)			
			0.57 (18×10)	0.35 (7×6)	0.20 (3×4)	0.04 (14×7)		0.28 (10×9)			
			0.57 (5×4)	0.34 (8×8)	0.18 (10×4)	0.03 (7×4)		0.27 (4×3)			
			0.56 (8×4)	0.34 (4×5)	0.18 (9×9)	0.03 (5×4)		0.25 (12×8)			
			0.53 (8×11)	0.33 (11×8)	0.18 (9×4)	0.02 (5×4)		0.20 (8×5)			
			0.53 (10×7)	0.30 (9×6)	0.18 (9×7)	0.02 (14×7)		0.18 (5×9)			
			0.49 (13×10)	0.29 (6×8)	0.17 (4×4)	0.02 (9×7)		0.15 (4×5)			
	0ヵ所					76ヵ所				19ヵ所	
西			2.74 (13×9)	0.34 (12×3)	0.20 (5×10)	0.08 (9×3)	0.50 (10×7)	1.38 (10×6)	0.30 (3×3)		0.23 (8×3)
			2.23 (14×10)	0.33 (12×4)	0.20 (15×9)	0.08 (5×4)		1.05 (14×12)	0.29 (4×3)		0.23 (2×2)
			1.51 (8×11)	0.33 (12×8)	0.20 (5×3)	0.08 (6×9)		1.03 (13×4)	0.27 (4×4)		
			1.32 (14×13)	0.33 (6×5)	0.19 (5×2)	0.08 (6×3)		0.93 (11×9)	0.25 (4×3)		
			1.23 (12×6)	0.31 (10×5)	0.18 (16×12)	0.07 (4×9)		0.85 (16×9)	0.24 (8×4)		
			1.09 (16×7)	0.30 (4×4)	0.18 (5×4)	0.07 (9×7)		0.76 (16×4)	0.23 (10×4)		
			1.01 (11×4)	0.29 (5×8)	0.18 (6×5)	0.06 (5×2)		0.73 (11×10)	0.22 (5×3)		
			0.88 (13×10)	0.29 (4×4)	0.18 (2×13)	0.06 (9×8)		0.71 (4×4)	0.20 (3×2)		
			0.87 (14×11)	0.29 (12×9)	0.18 (8×4)	0.05 (7×9)		0.60 (6×5)	0.19 (9×8)		
			0.81 (14×11)	0.28 (11×9)	0.17 (7×3)	0.04 (11×3)		0.50 (10×4)	0.17 (2×5)		
			0.62 (8×3)	0.28 (13×4)	0.17 (6×6)	0.04 (8×4)		0.49 (7×2)	0.12 (3×2)		
			0.57 (10×6)	0.27 (8×6)	0.15 (9×11)	0.04 (7×4)		0.49 (7×5)	0.11 (8×2)		
			0.47 (8×5)	0.27 (8×8)	0.14 (4×4)	0.04 (6×3)		0.46 (15×8)	0.10 (2×3)		
			0.44 (5×5)	0.26 (5×3)	0.14 (5×5)	0.03 (8×8)		0.41 (6×4)	0.10 (5×6)		
			0.44 (12×4)	0.26 (5×4)	0.11 (3×4)	0.02 (3×2)		0.40 (7×5)	0.09 (5×3)		
			0.40 (15×11)	0.26 (9×8)	0.11 (6×4)	0.02 (2×4)		0.36 (7×3)	0.07 (6×2)		
			0.40 (4×5)	0.25 (7×4)	0.11 (5×3)	0.01 (5×4)		0.35 (2×4)	0.07 (5×2)		
			0.38 (15×10)	0.24 (15×7)	0.10 (4×3)	0.01 (5×6)		0.33 (4×7)	0.06 (8×3)		
			0.38 (3×2)	0.21 (9×10)	0.09 (6×2)			0.33 (5×7)	0.02 (5×10)		
			0.37 (14×12)	0.20 (7×5)	0.09 (6×11)			0.30 (9×3)	0.01 (5×4)		
	0ヵ所	0ヵ所				78ヵ所	1ヵ所			40ヵ所	2ヵ所

表4.2.16　二相ステンレス鋼の局部腐食（発生数、最大深さ、最大大きさ）の比較
研究テーマ1、第1次試験材、19.5年暴露

2003年度　　（最大深さおよび最大大きさ　：　mm）

材 No.		A－7－2		A－8－1		A－9－2	
合金系		25Cr-7Ni-3Mo-Cu-N-L.C.		25Cr-6Ni-3Mo-L.C.		22Cr-5Ni-3Mo-L.C.	
暴露期間		1984～2003					
経過（年）		19.5					
部位		母材部	溶接部	母材部	溶接部	母材部	溶接部
飛沫帯	最大深さ	0.22		—		—	—
	最大大きさ	3×3		—		—	—
	発生数	1		0		0	0
干満帯	最大深さ	0.33		0.02		2.74	0.50
	最大大きさ	11×15		5×5		21×10	10×7
	発生数	34		1		154	1
海中部	最大深さ	—		—		2.32	0.23
	最大大きさ	—		—		148×168	8×3
	発生数	0		0		59	2

（注）

最大深さ　mm
最大大きさ　mm （たて×よこ）
発生数（個）

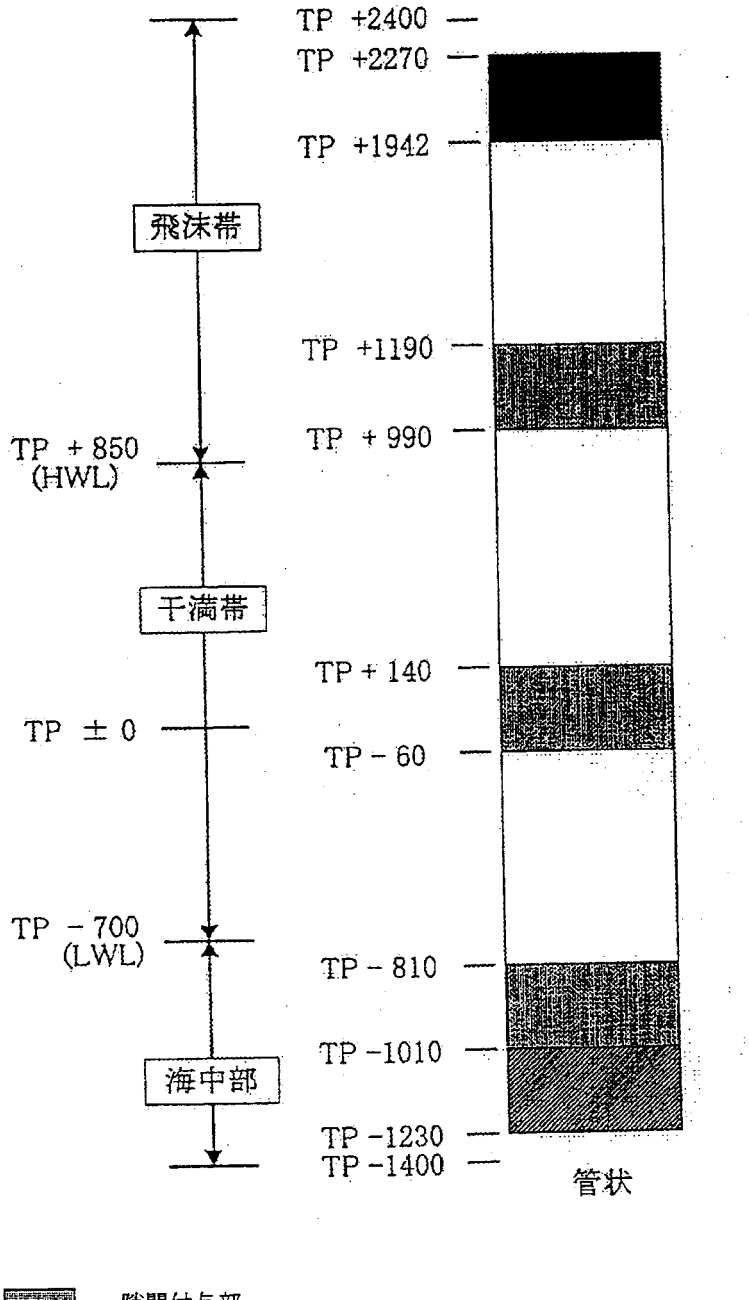


図 4.2.1 試験材の隙間付与位置
研究テーマ1 1次試験材

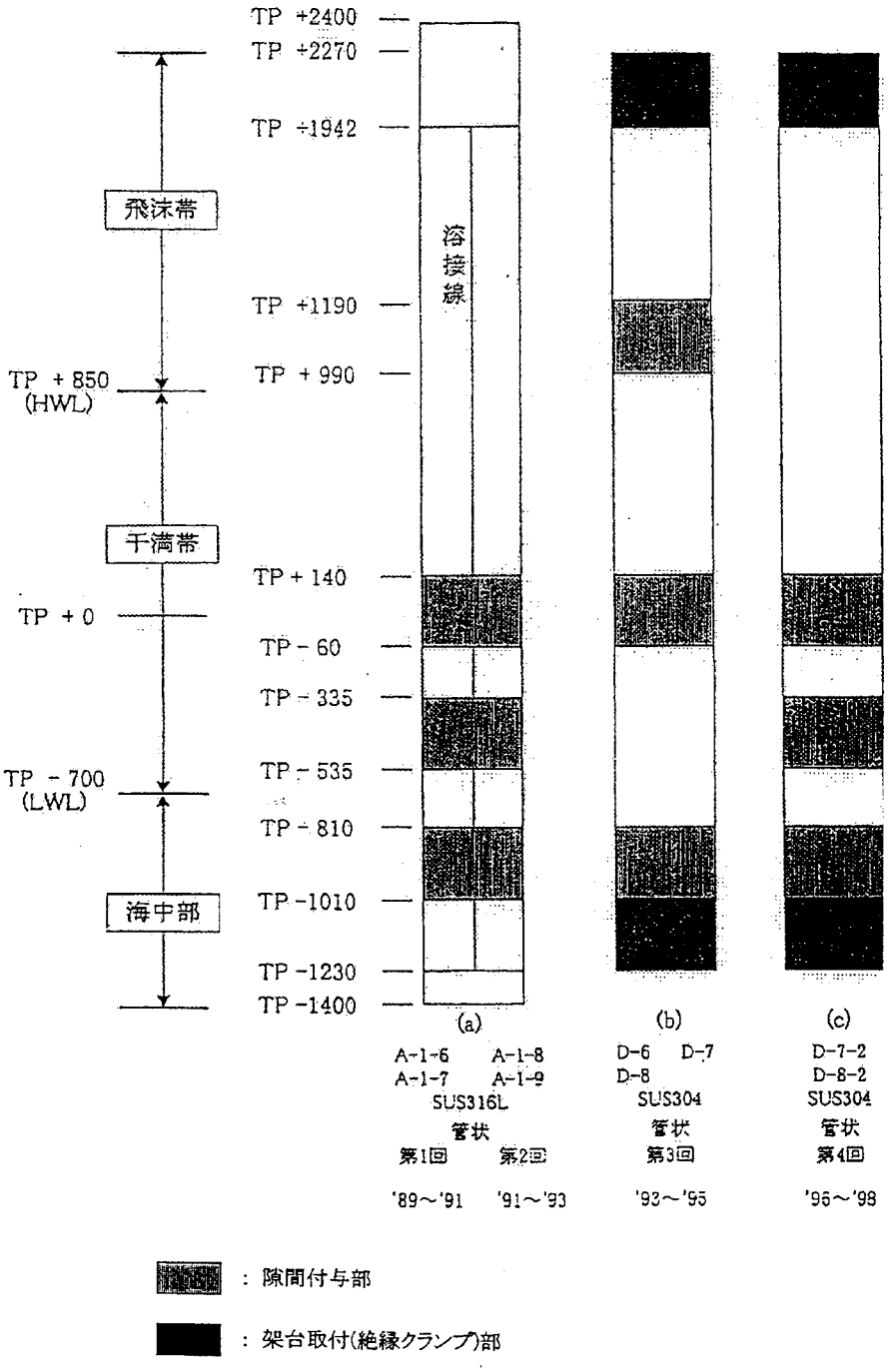


図 4.2.2 ステンレス鋼の電気防食試験における隙間付与位置
研究テーマ1 第2次試験材

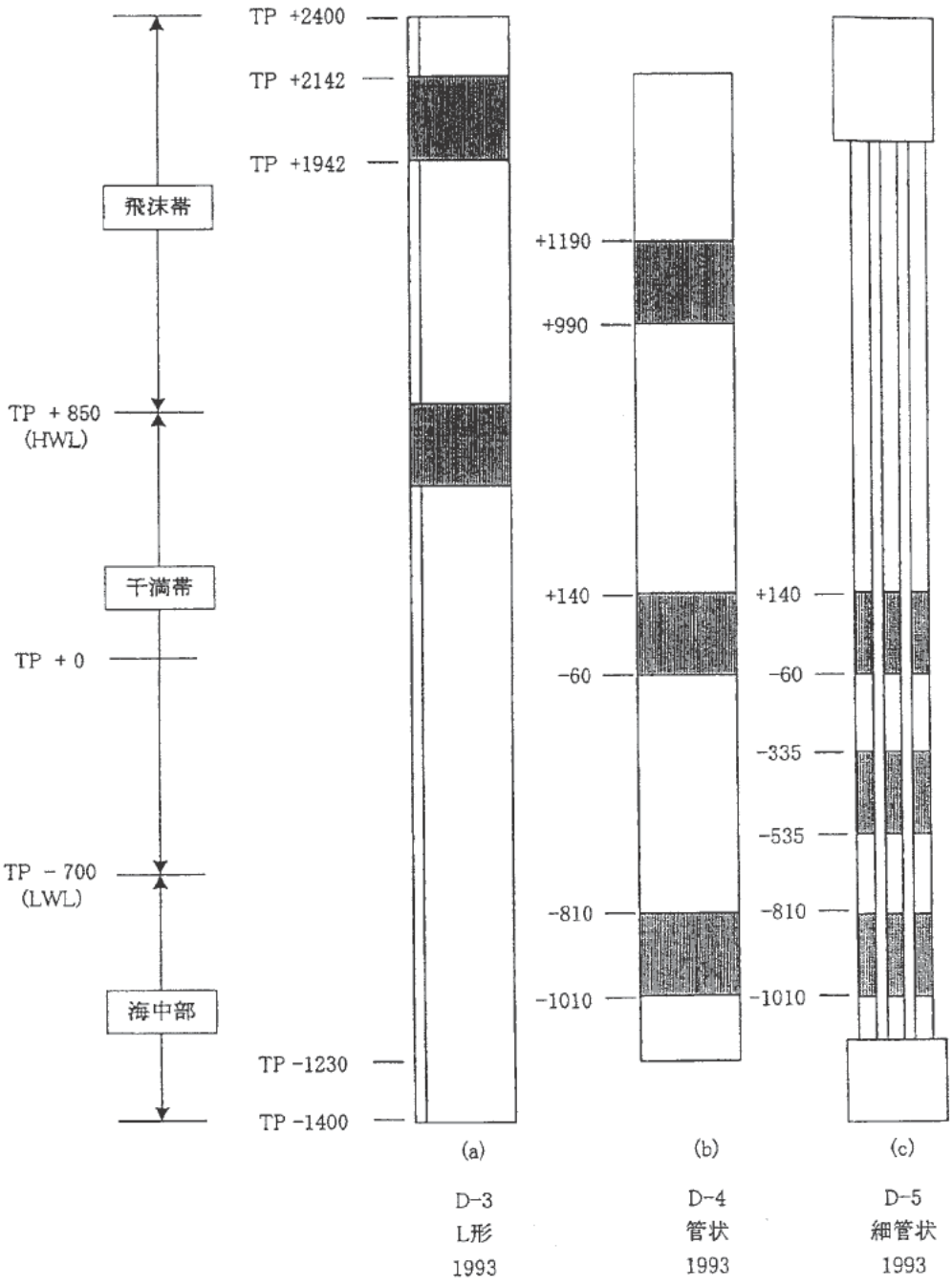


図 4.2.3 試験材の隙間付与位置
研究テーマ1 第2次試験材

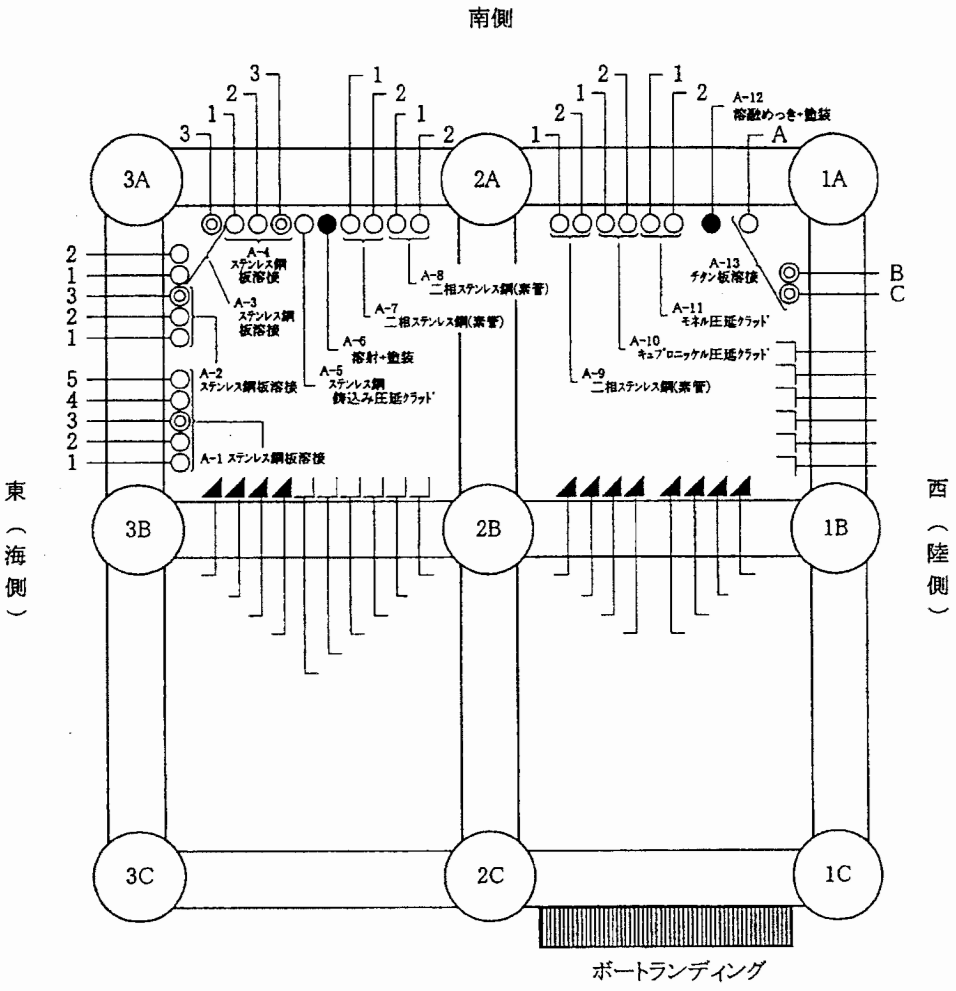
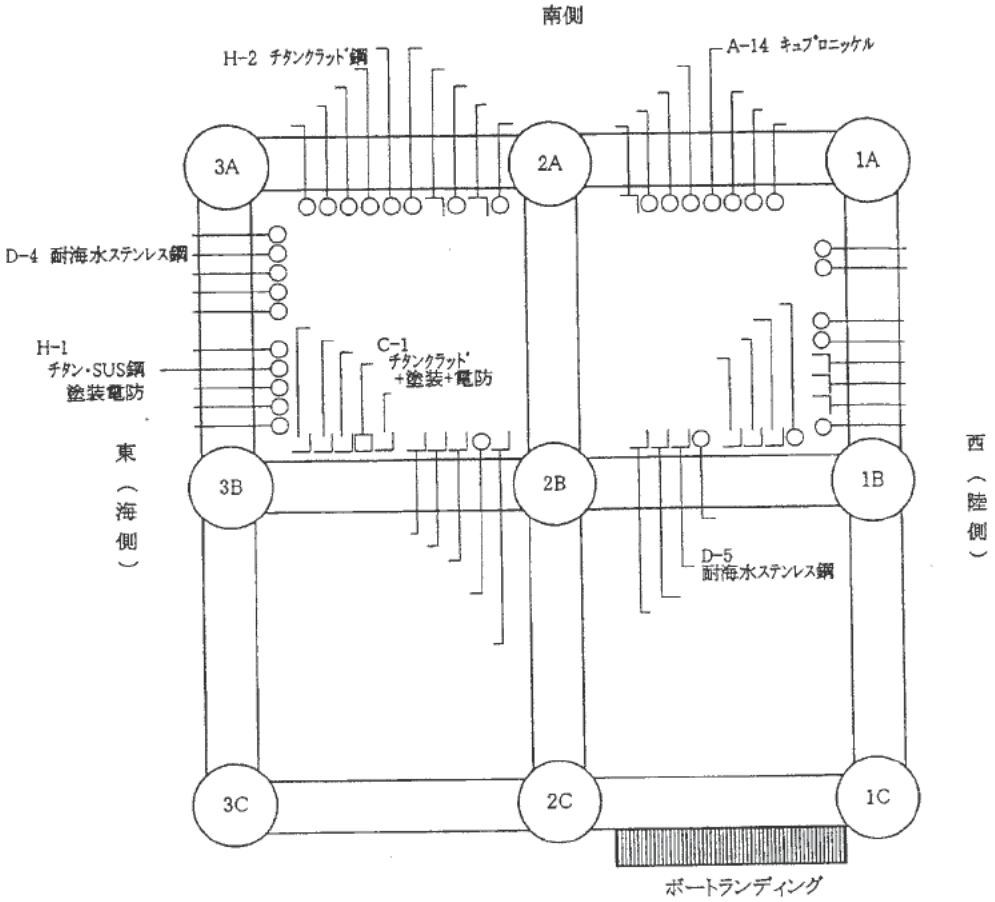


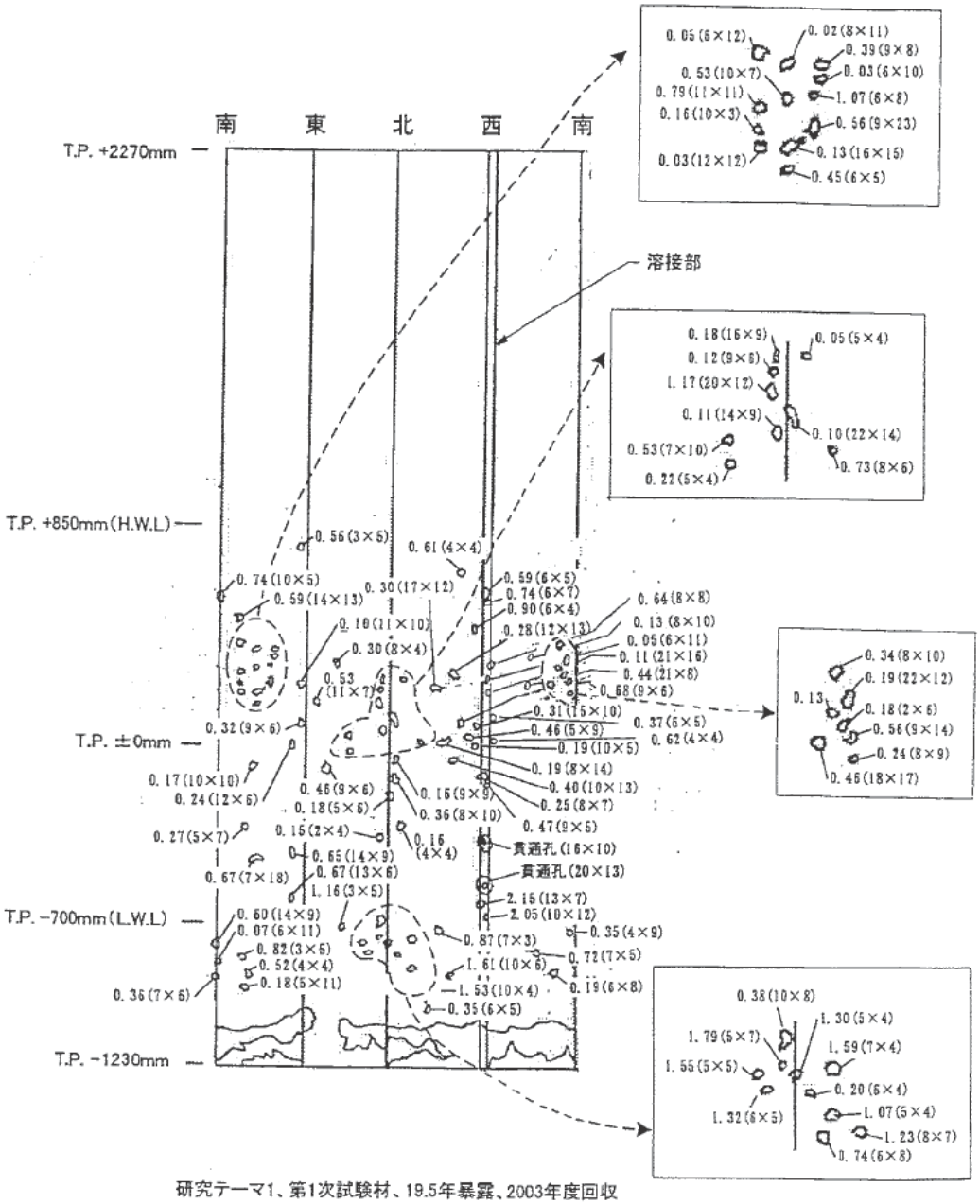
図 4.2.4 試験材の配置（1984年暴露開始時）
研究テーマ、第1次試験材、A系（旧 図 2.2.1）



試験材	暴露
A-14, C-1	: 1991年～
D-4, D-5	: 1993年～
H-1, H-2	: 1998年～

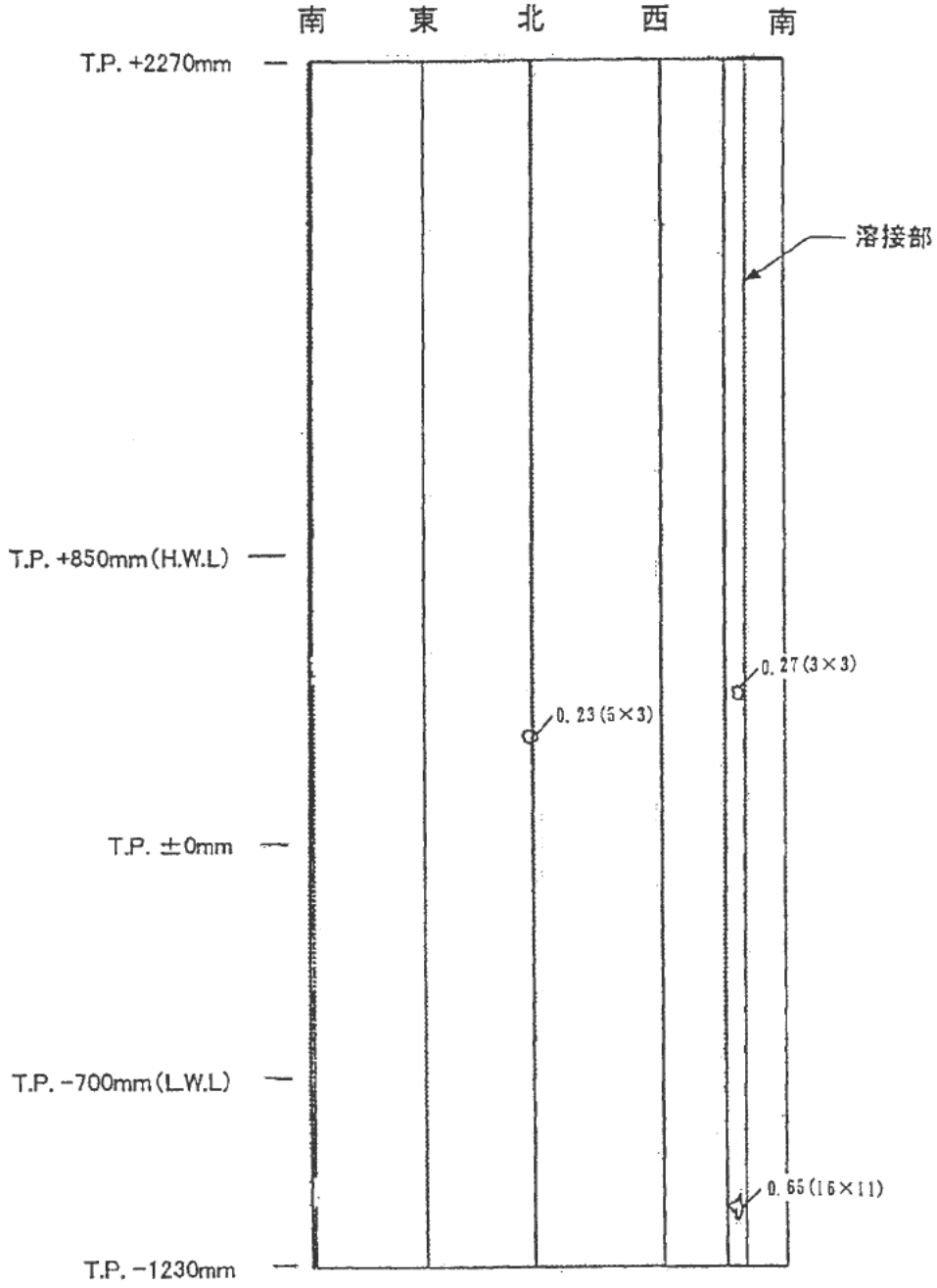
図 4.2.5　各種試験材の配置（2003 年調査時）
研究テーマ、第２次試験材

（注）図中の耐海水ステンレス鋼は旧称であり、現在は高耐食性ステンレス鋼と称している。



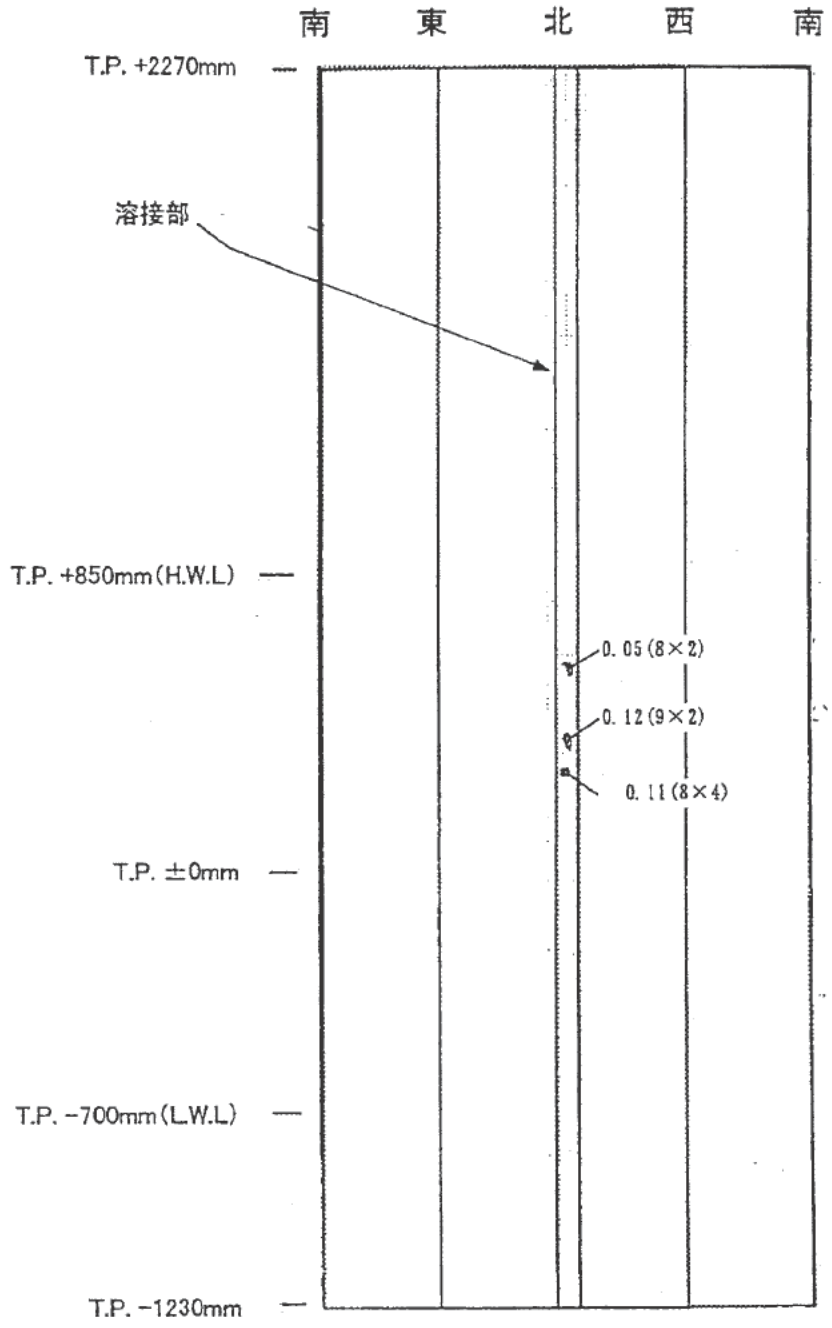
研究テーマ1、第1次試験材、19.5年暴露、2003年度回収
A-1-5材、SUS316L鋼
初期肉厚 11mm、人工隙間付与なし、深さ(縦×横)mm

図 4.2.6 ステンレス鋼の局部腐食発生状況(1)



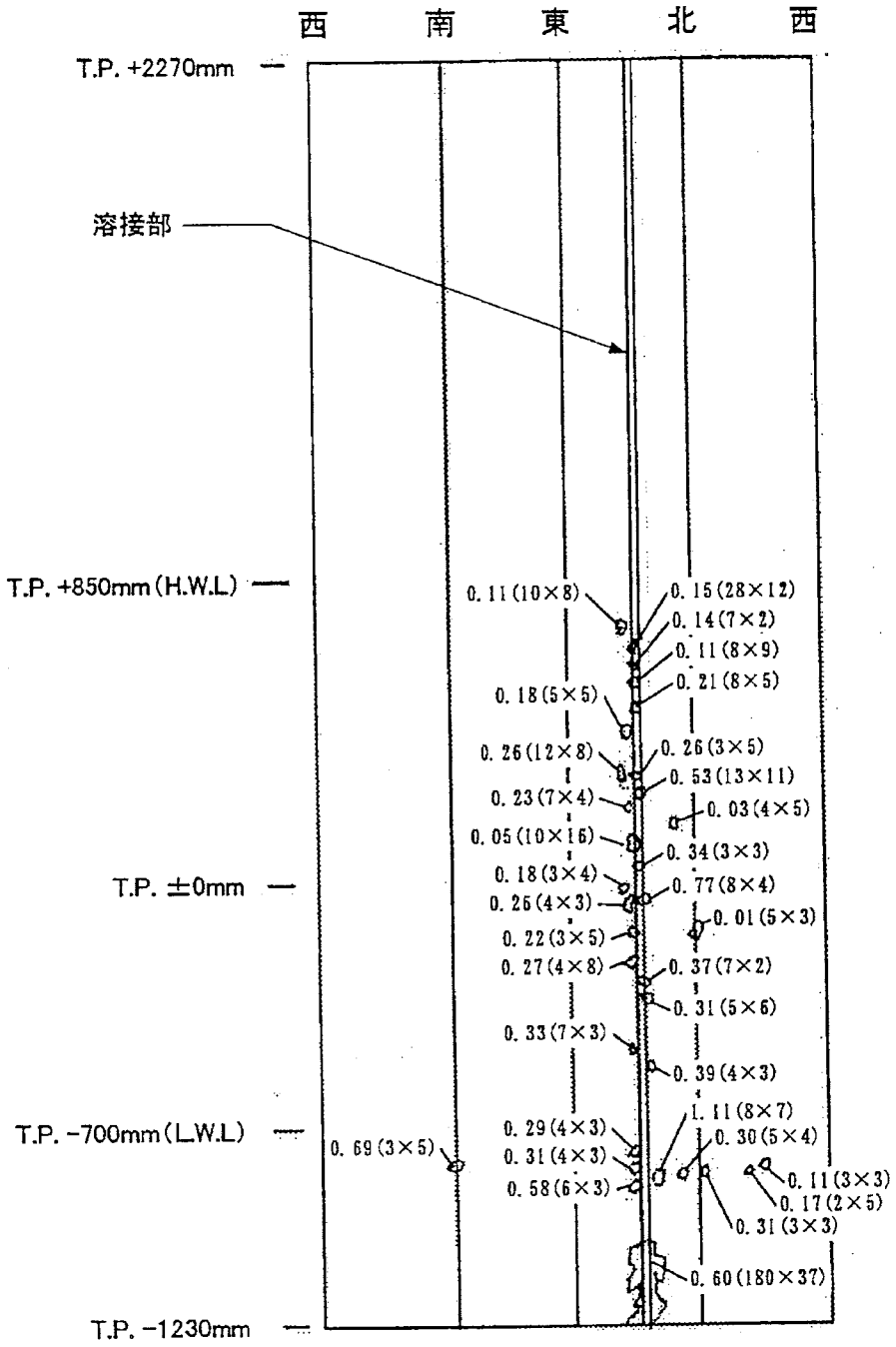
研究テーマ1、第1次試験材、19.5年暴露、2003年度回収
A-2-2材、22Cr-26Ni-5Mo-Ti-LC.
初期肉厚 11mm、人工隙間付与なし、深さ(縦×横)mm

図 4.2.7 ステンレス鋼の局部腐食発生状況(2)



研究テーマ1、第1次試験材、19.5年暴露、2003年度回収
A-3-2材、25Cr-50Ni-6Mo-Cu-Ti-L.C.
初期肉厚 11mm、人工隙間付与なし、深さ(縦×横)mm

図 4.2.8 ステンレス鋼の局部腐食発生状況(3)

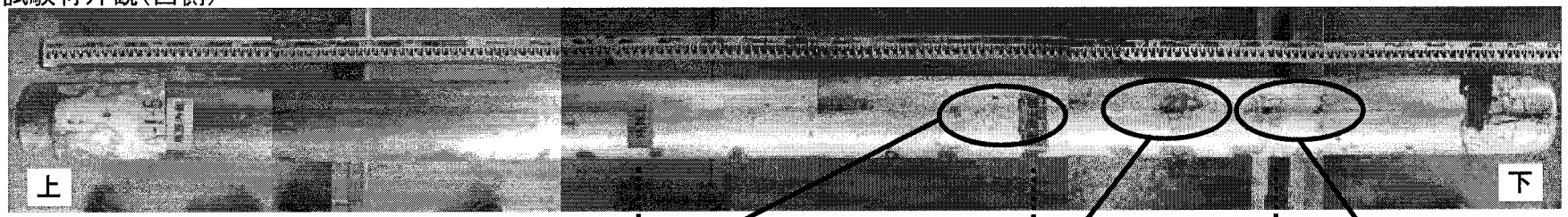


研究テーマ1、第1次試験材、19.5年暴露、2003年度回収
A-4-2材、26Cr-4Mo-Ni-LC-LN.
初期肉厚 11mm、人工隙間付与なし、深さ(縦×横)mm

図 4.2.9 ステンレス鋼の局部腐食発生状況(4)

A-1-5材（ステンレス鋼板溶接：SUS316L）

試験材外観（西側）



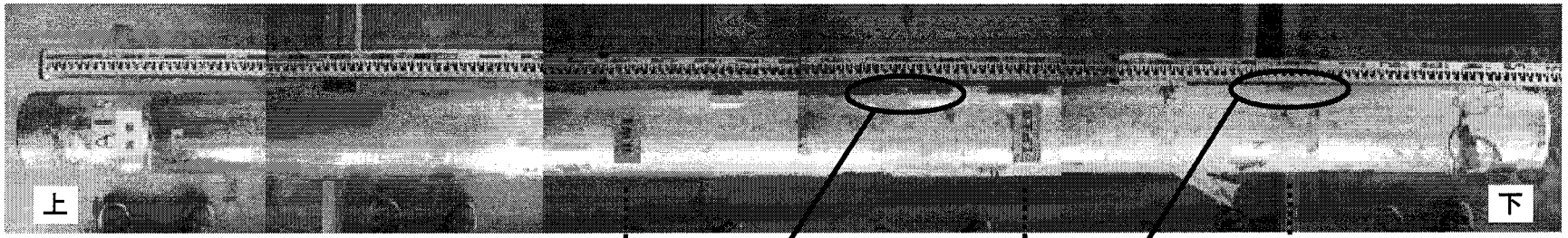
局部腐食形態



図4.2.10　ステンレス鋼の腐食状況
研究テーマ1，第一次試験材，19.5年暴露，2003年度回収

A-1-5材（ステンレス鋼板溶接：SUS316L）

試験材外観（東側）



局部腐食形態

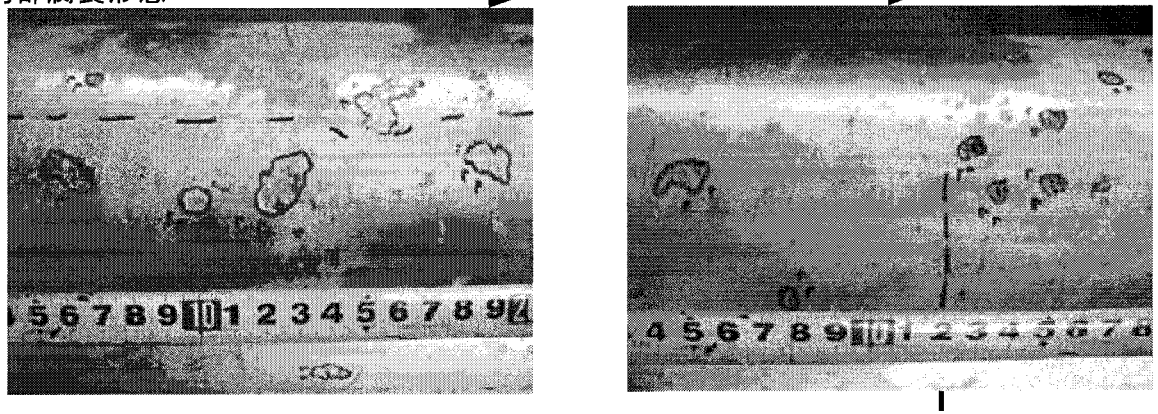


図4.2.11　ステンレス鋼の腐食状況
研究テーマ1，第一次試験材，19.5年暴露，2003年度回収

A-2-2材（ステンレス鋼板溶接：22Cr-26Ni-5Mo-Ti-L.C.）

試験材外観（西側）

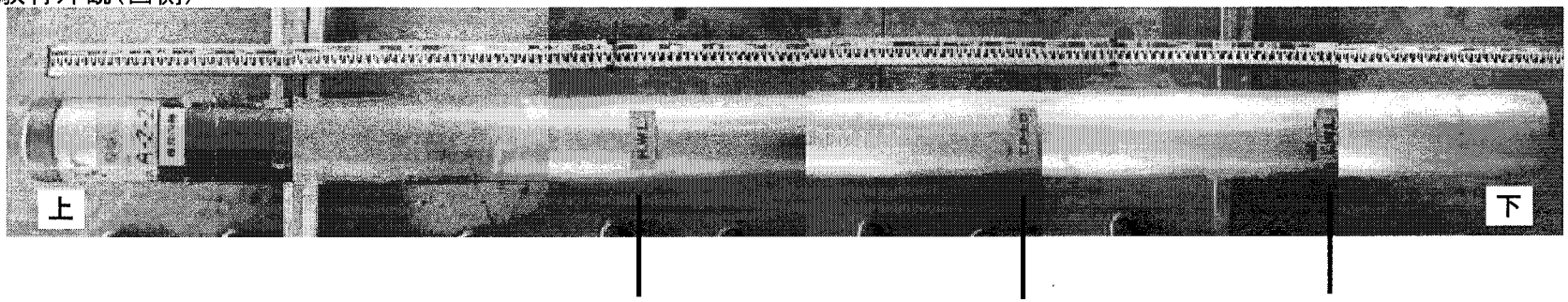
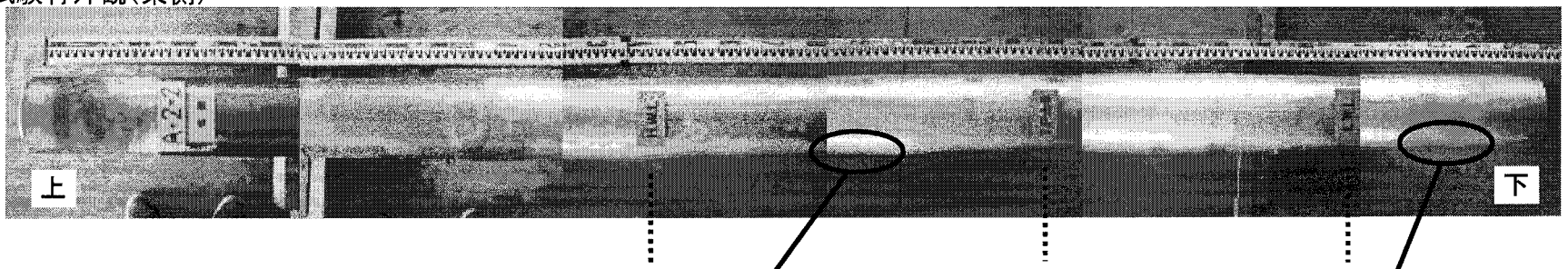


図4.212　ステンレス鋼の腐食状況
研究テーマ1，第一次試験材，19.5年暴露，2003年度回収

A-2-2材（ステンレス鋼板溶接：22Cr-26Ni-5Mo-Ti-L.C.）

試験材外観（東側）



局部腐食形態

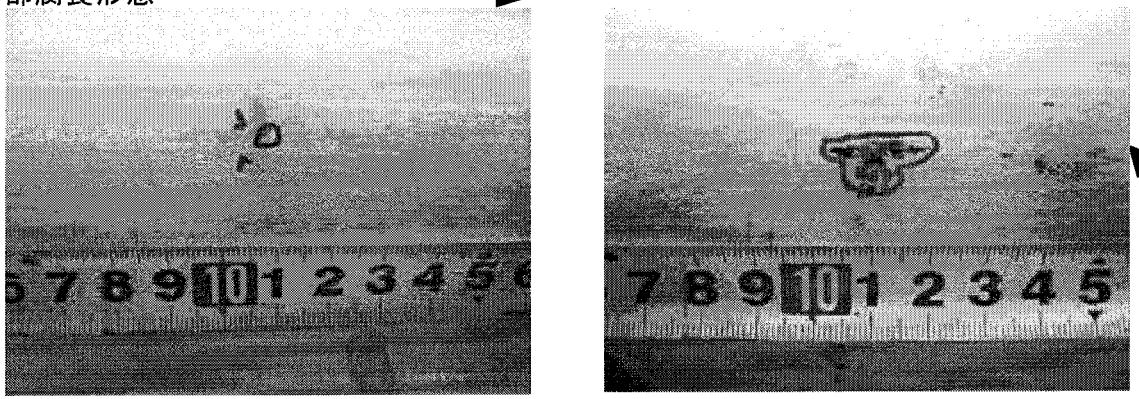
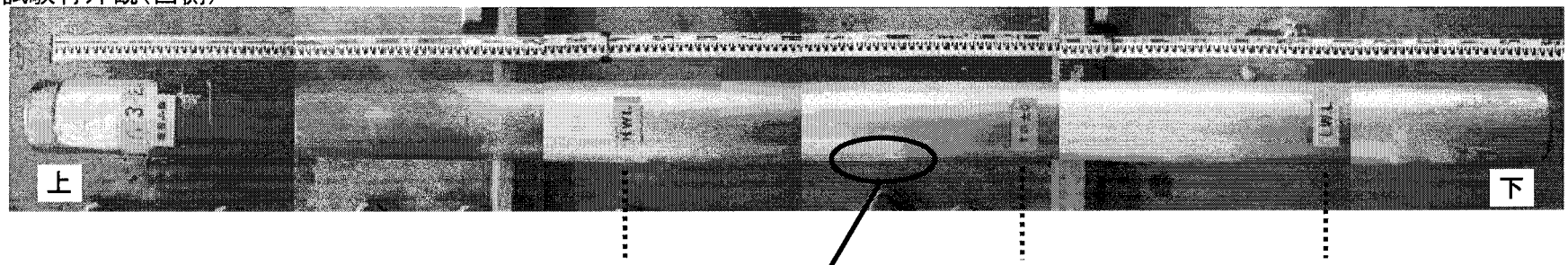


図4.2.13　ステンレス鋼の腐食状況
研究テーマ1，第一次試験材，19.5年暴露，2003年度回収

A-3-2材（ステンレス鋼板溶接：25Cr-50Ni-6Mo-Cu-Ti-L.C.）

試験材外観（西側）



局部腐食形態

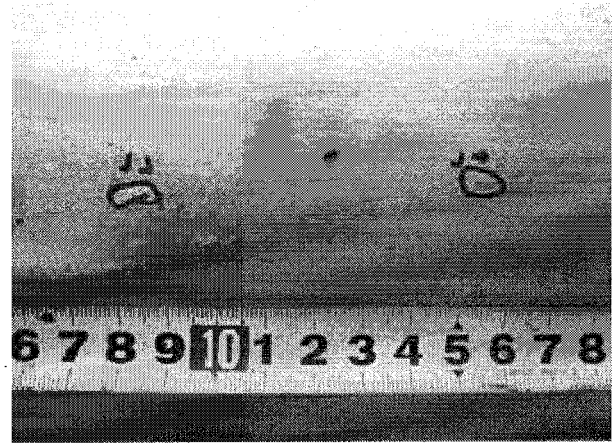


図4.2.14　ステンレス鋼の腐食状況
研究テーマ1，第一次試験材，19.5年暴露，2003年度回収

A-3-2材（ステンレス鋼板溶接：25Cr-50Ni-6Mo-Cu-Ti-L.C.）

試験材外観（東側）

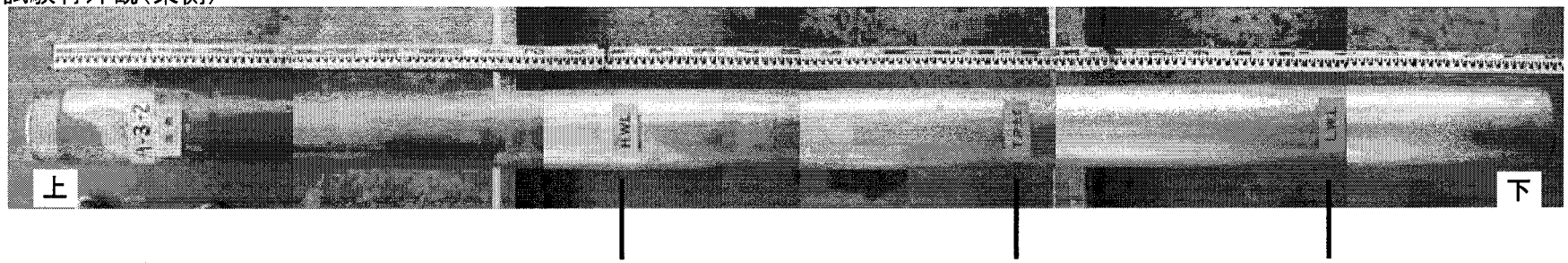
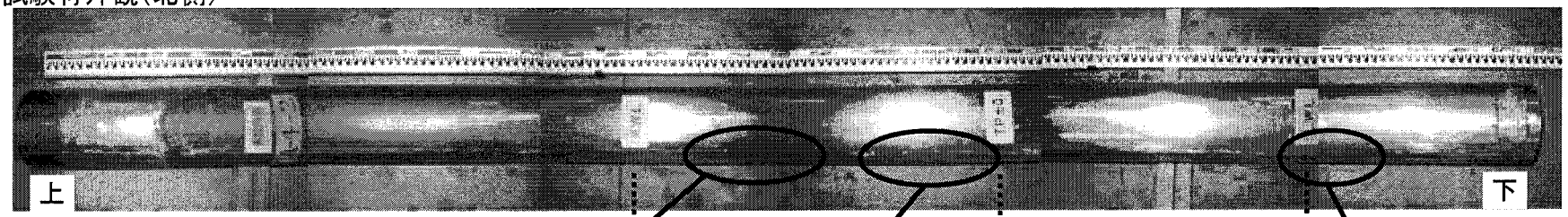


図4.2.15　ステンレス鋼の腐食状況
研究テーマ1，第一次試験材，19.5年暴露，2003年度回収

A-4-2材（ステンレス鋼板溶接：26Cr-4Mo-Ni-L.C.-L.N.）

試験材外観（北側）



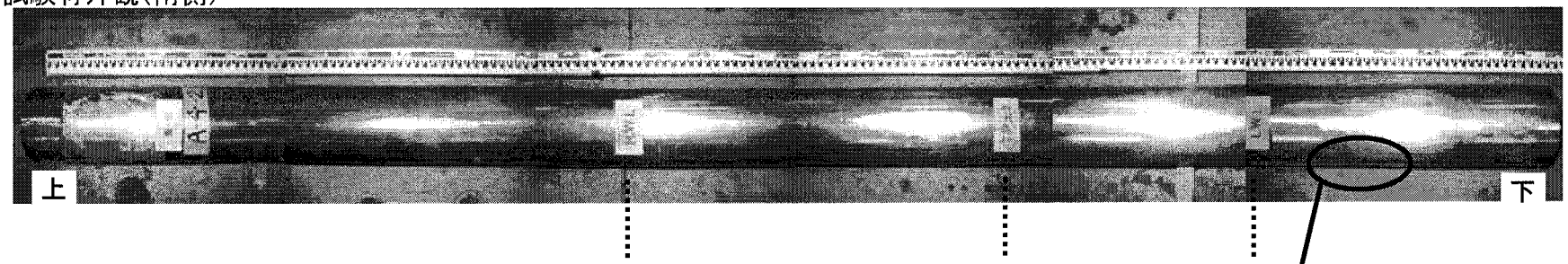
局部腐食形態



図4.2.16　ステンレス鋼の腐食状況
研究テーマ1，第一次試験材，19.5年暴露，2003年度回収

A-4-2材（ステンレス鋼板溶接：26Cr-4Mo-Ni-L.C.-L.N.）

試験材外観（南側）



局部腐食形態

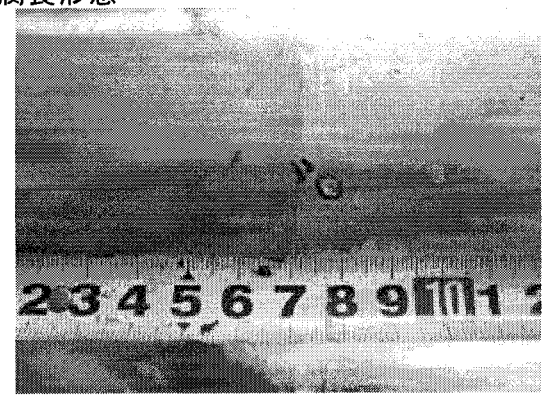
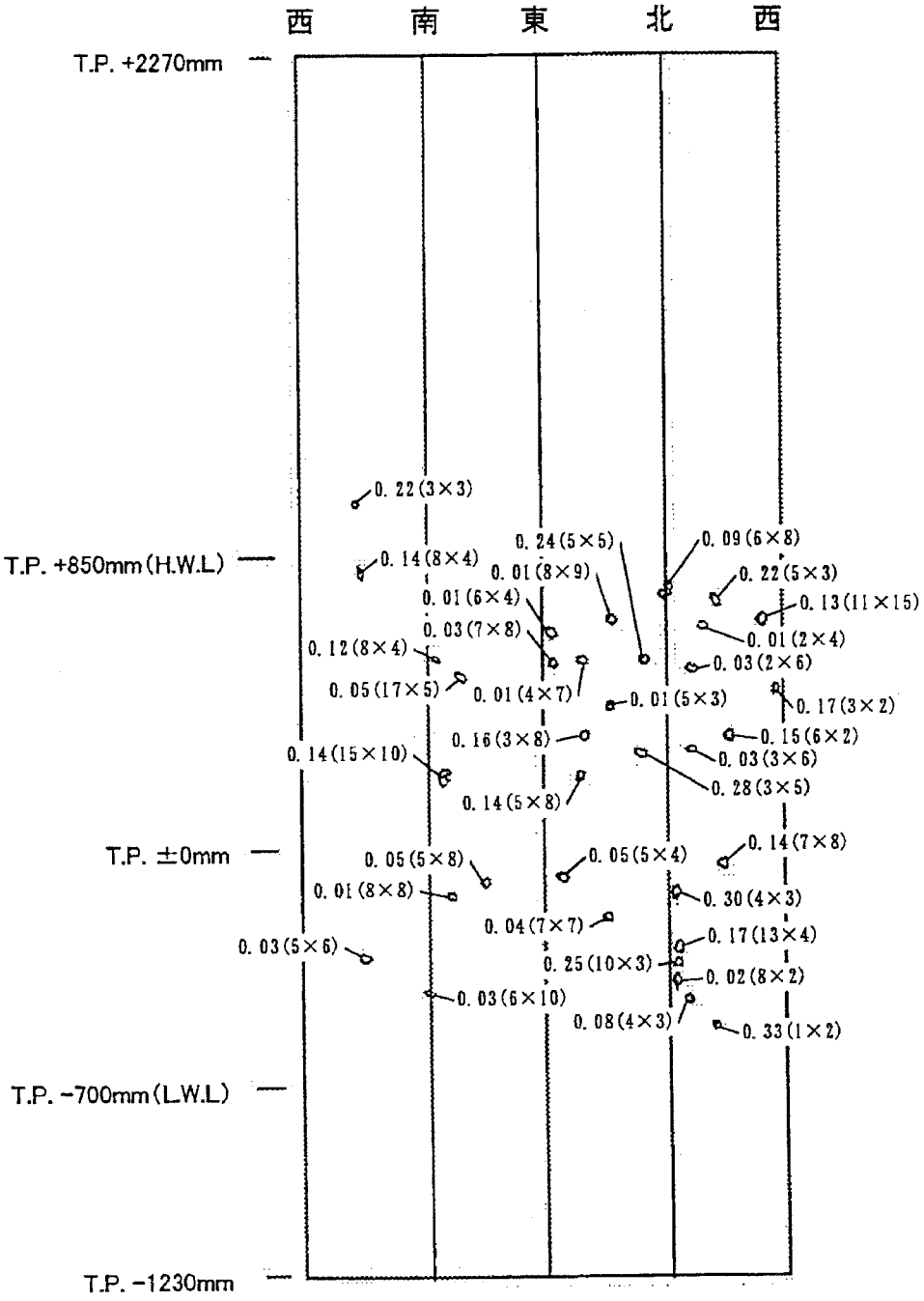
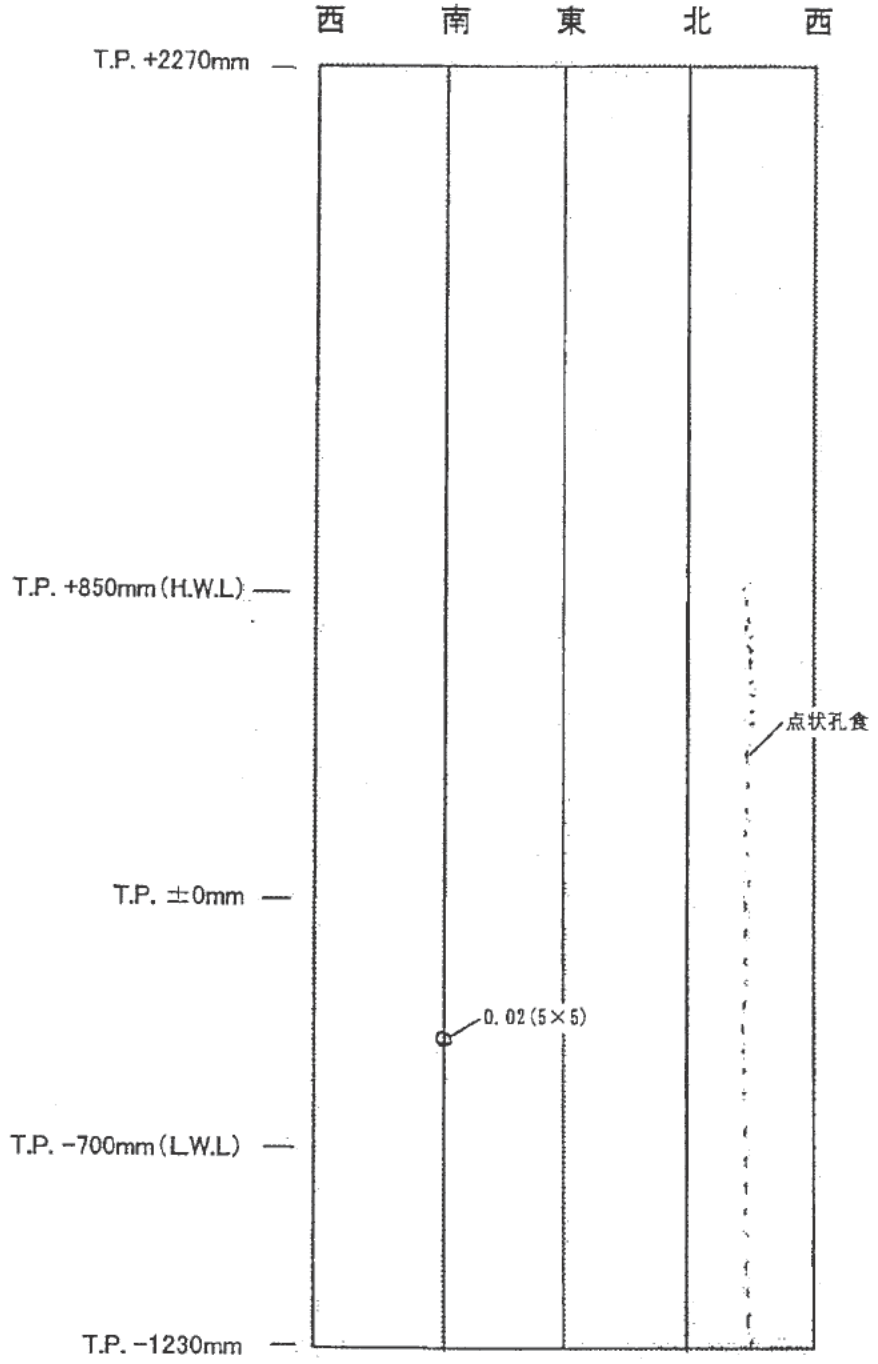


図4.2.17　ステンレス鋼の腐食状況
研究テーマ1，第一次試験材，19.5年暴露，2003年度回収



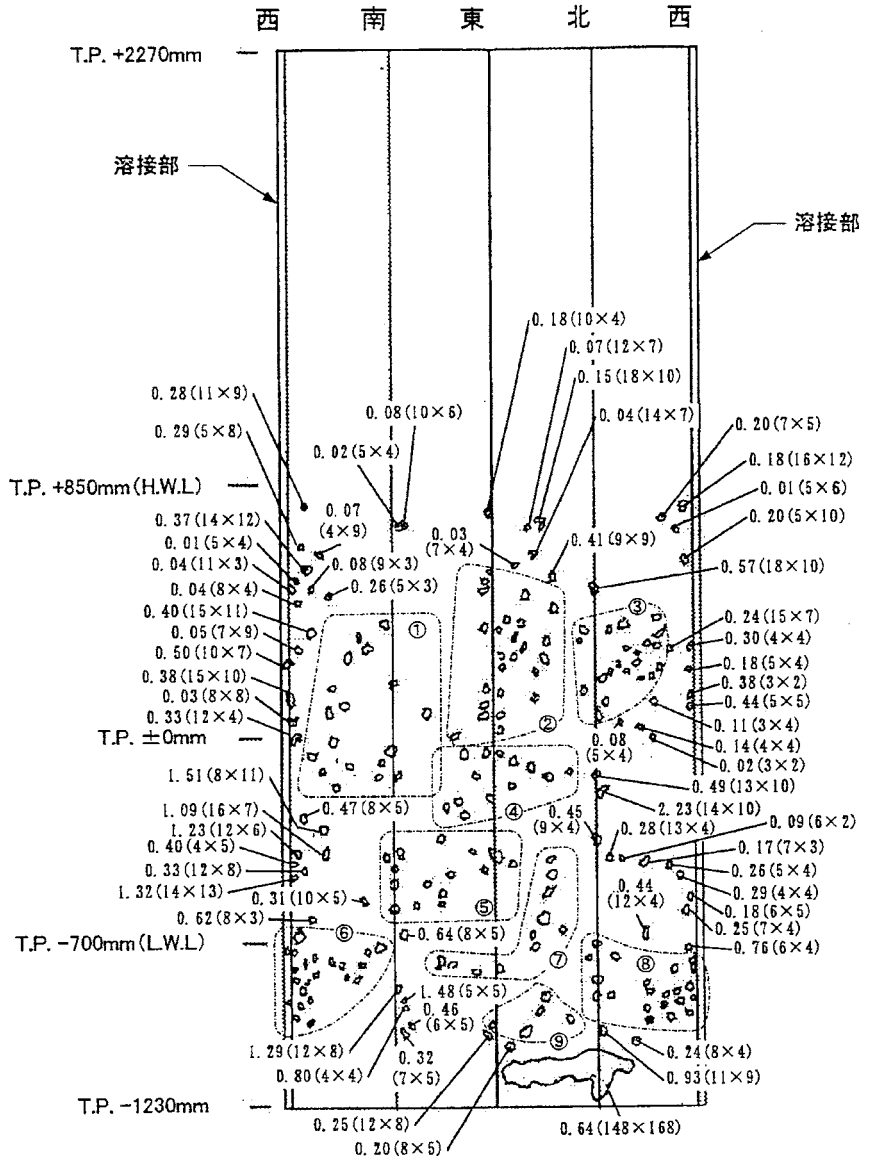
研究テーマ1、第1次試験材、19.5年暴露、2003年度回収
A-7-2材、25Cr-7Ni-3Mo-Cu-N-L.C.
初期肉厚 9.6mm、人工隙間付与なし、深さ(縦×横)mm

図 4.2.18　二相ステンレス鋼の局部腐食の発生状況(1)



研究テーマ1、第1次試験材、19.5年暴露、2003年度回収
A-8-1材、25Cr-6Ni-3Mo-L.C.
初期肉厚12.7mm、人工隙間付与なし、深さ(縦×横)mm

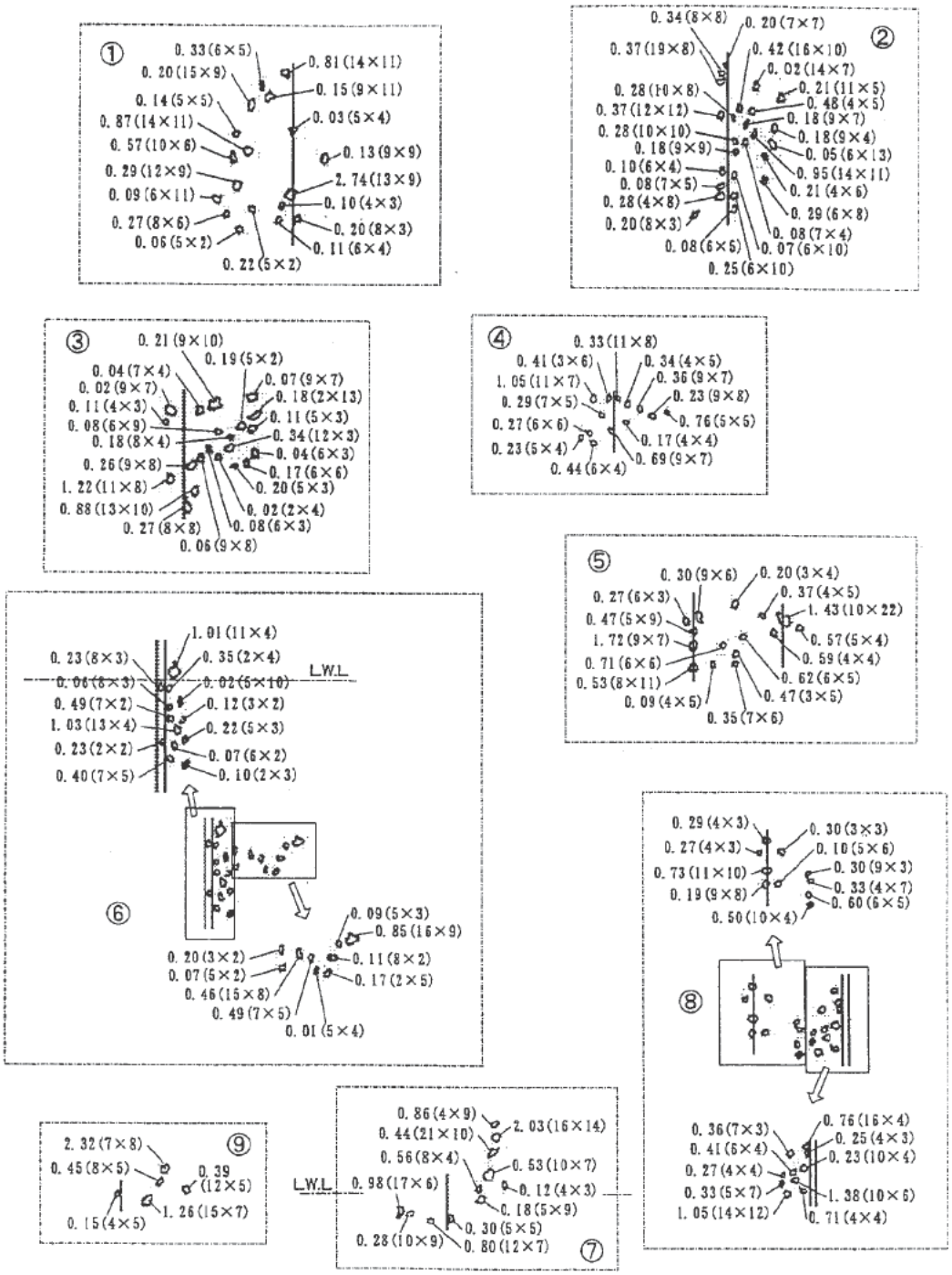
図 4.2.19　二相ステンレス鋼の局部腐食発生状況(2)



※ ①～⑨の各箇所は次頁の図参照

研究テーマ1、第1次試験材、19.5年暴露、2003年度回収
A-9-2材、22Cr-5Ni-3Mo-LC.
素管、人工隙間付与なし、深さ(縦×横)mm

図 4.2.20 二相ステンレス鋼の局部腐食発生状況(3)

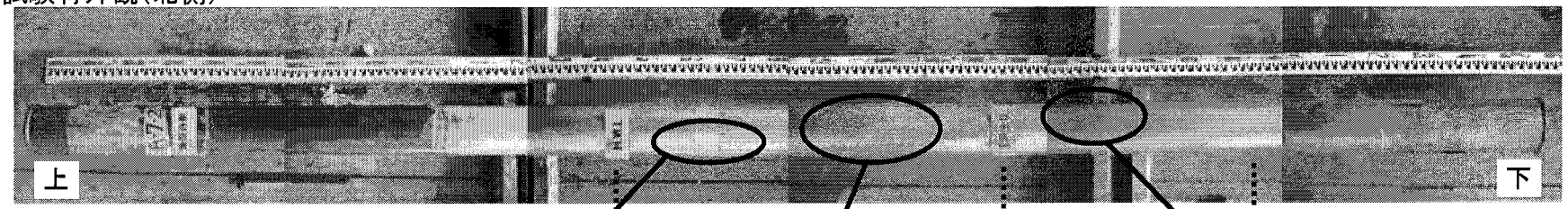


①～⑨の詳細
研究テーマ1、第1次試験材、19.5年暴露、2003年度回収
A-9-2材、22Cr-5Ni-3Mo-LC.
素管、人工隙間付与なし、深さ(縦×横)mm

図 4.2.21　二相ステンレス鋼の局部腐食発生状況
（図 4.2.20①～⑨の詳細）

A-7-2材（二相ステンレス鋼：25Cr-7Ni-3Mo-Cu-N-L.C.）

試験材外観（北側）



局部腐食形態

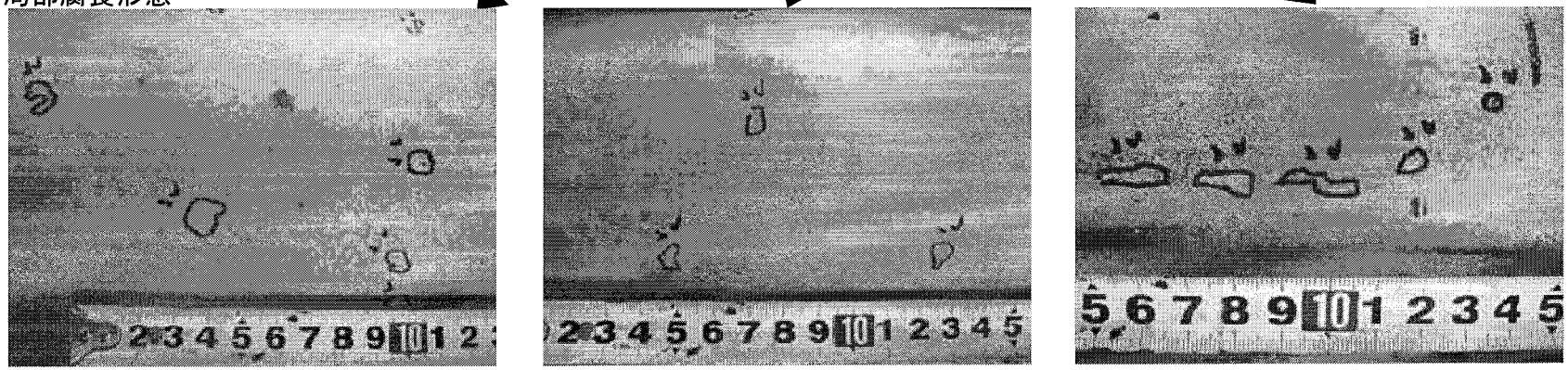
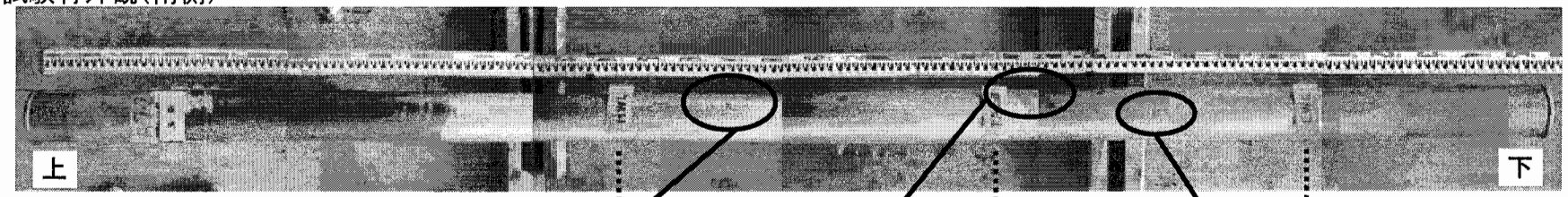


図4.2.22　ステンレス鋼の腐食状況
研究テーマ1，第一次試験材，19.5年暴露，2003年度回収

A-7-2材（二相ステンレス鋼：25Cr-7Ni-3Mo-Cu-N-L.C.）

試験材外観（南側）



局部腐食形態

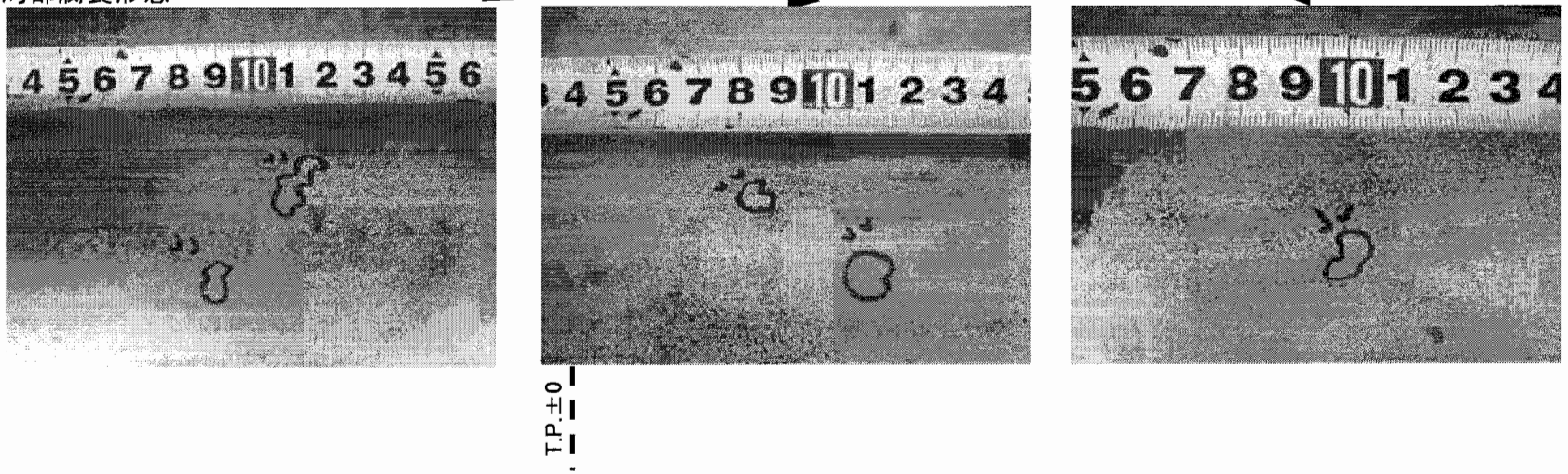


図4.2.23　ステンレス鋼の腐食状況
研究テーマ1，第一次試験材，19.5年暴露，2003年度回収

A-8-1材（二相ステンレス鋼：25Cr-6Ni-3Mo-L.C.）

試験材外観（北側）

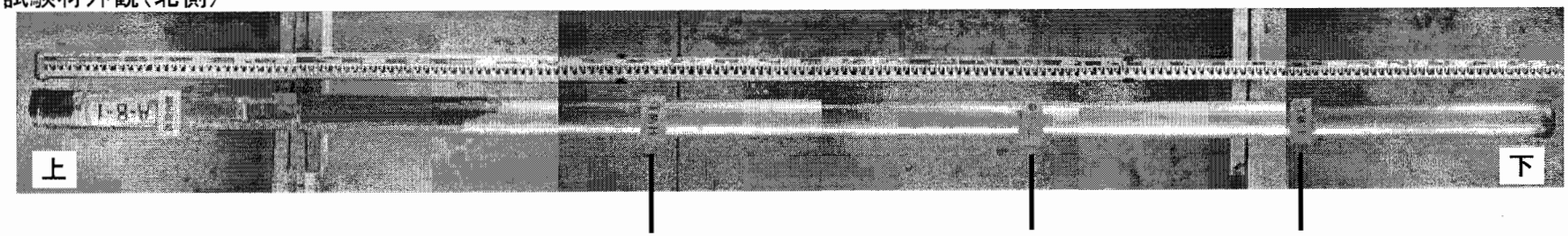
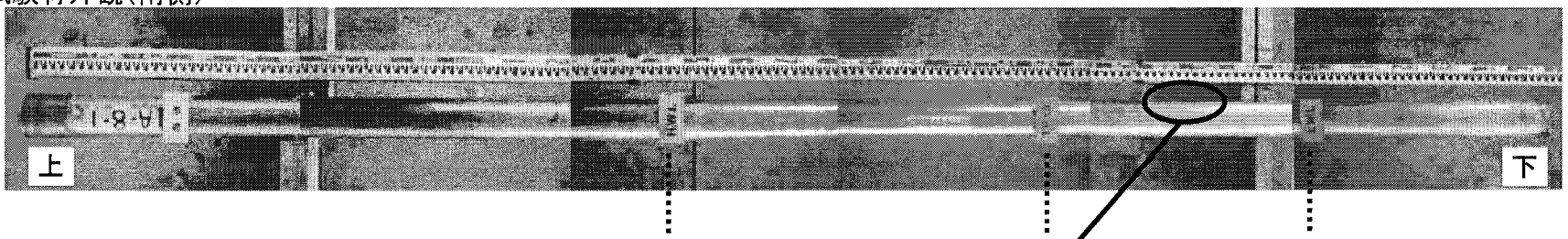


図4.2.24　ステンレス鋼の腐食状況
研究テーマ1，第一次試験材，19.5年暴露，2003年度回収

A-8-1材（二相ステンレス鋼：25Cr-6Ni-3Mo-L.C.）

試験材外観（南側）



局部腐食形態

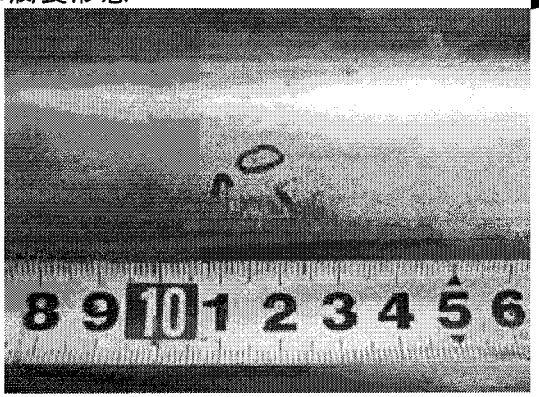


図4.2.25　ステンレス鋼の腐食状況
研究テーマ1，第一次試験材，19.5年暴露，2003年度回収

A-9-2材（二相ステンレス鋼：22Cr-5Ni-3Mo-L.C.）

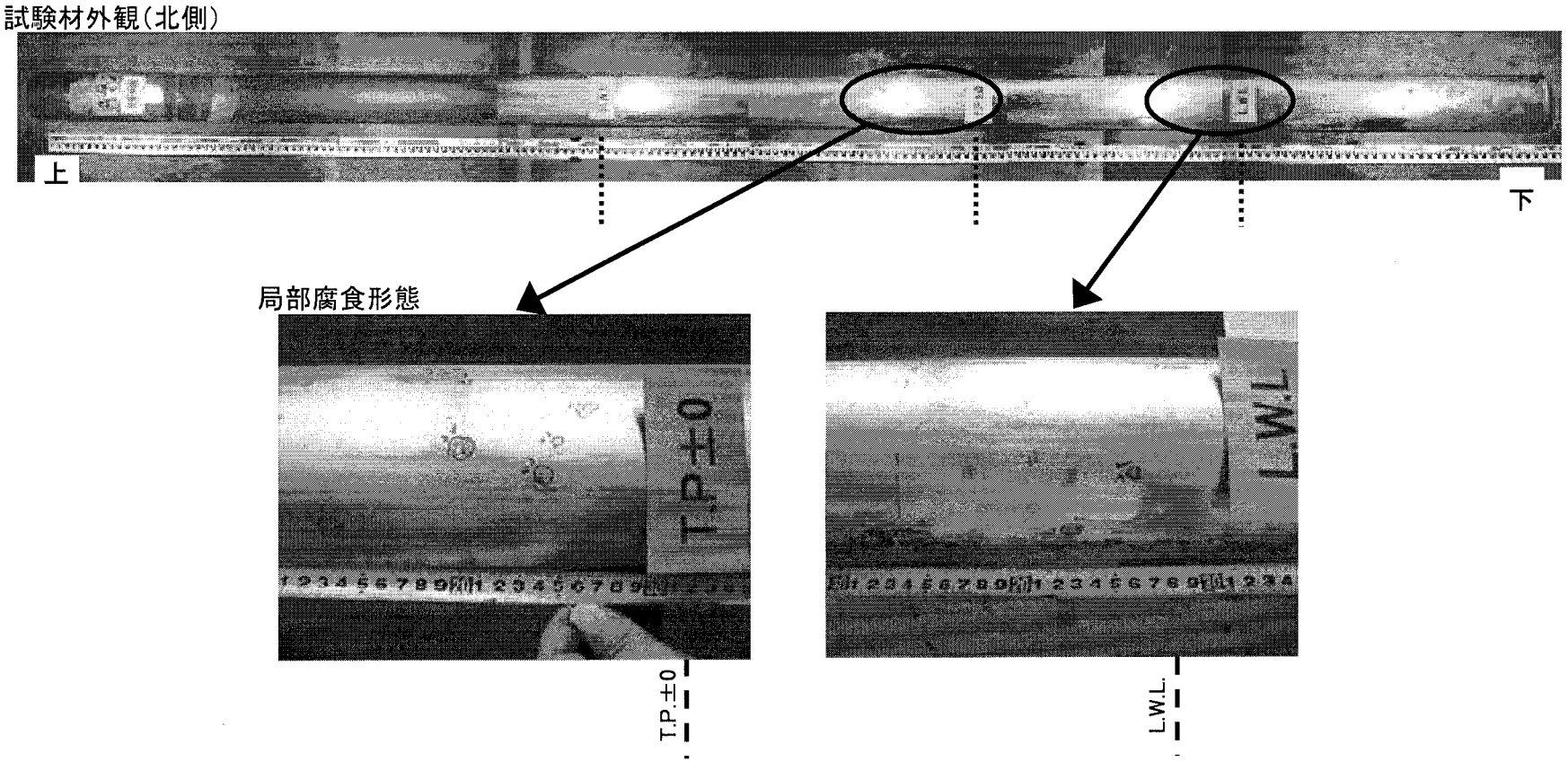
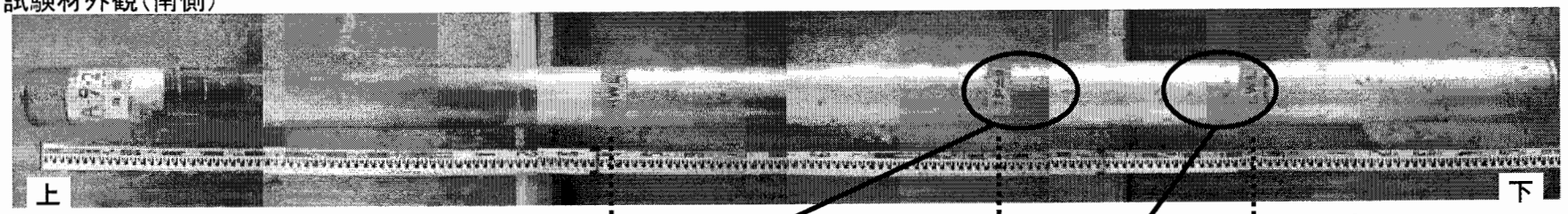


図4.2.26　ステンレス鋼の腐食状況
研究テーマ1，第一次試験材，19.5年暴露，2003年度回収

A-9-2材（二相ステンレス鋼：22Cr-5Ni-3Mo-L.C.）

試験材外観（南側）



局部腐食形態

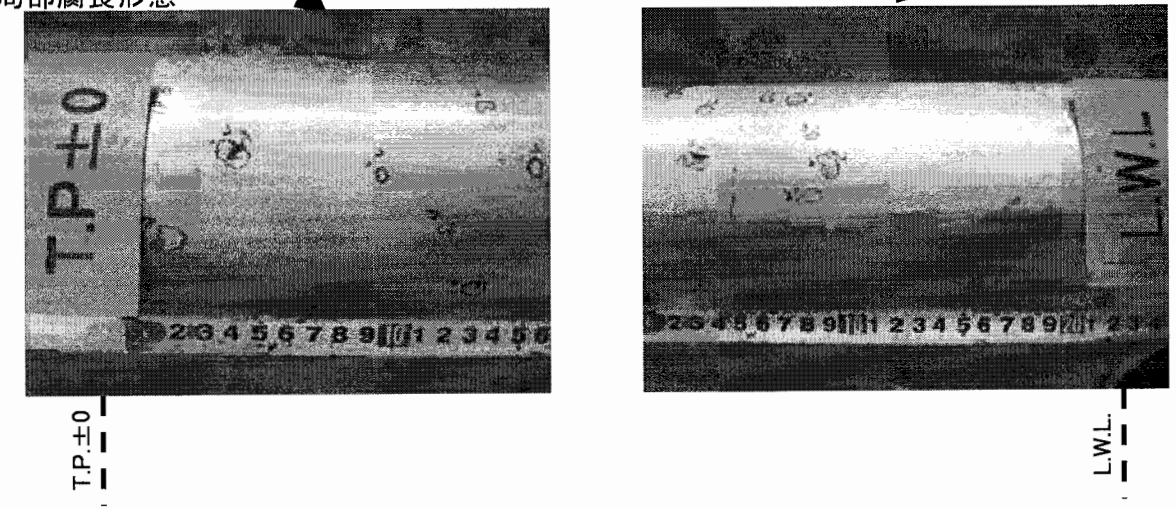
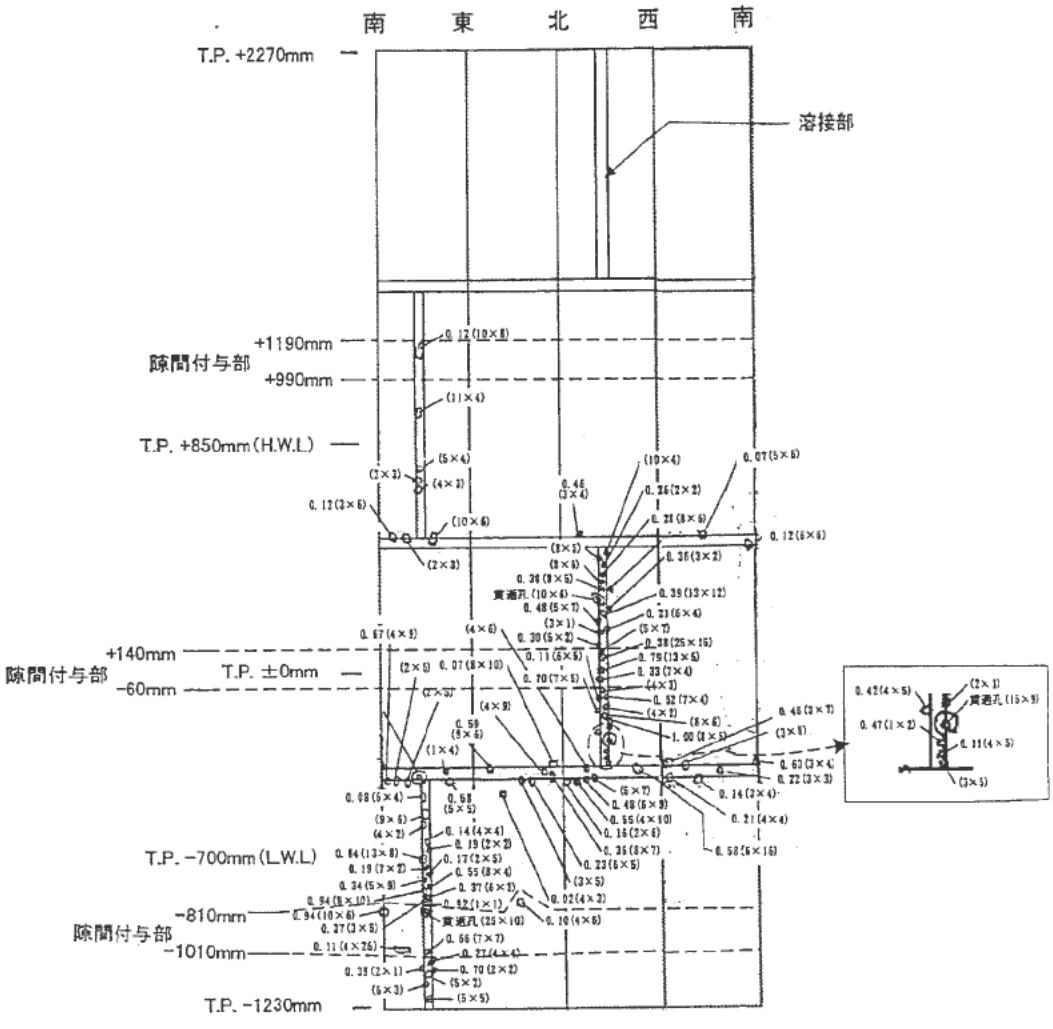


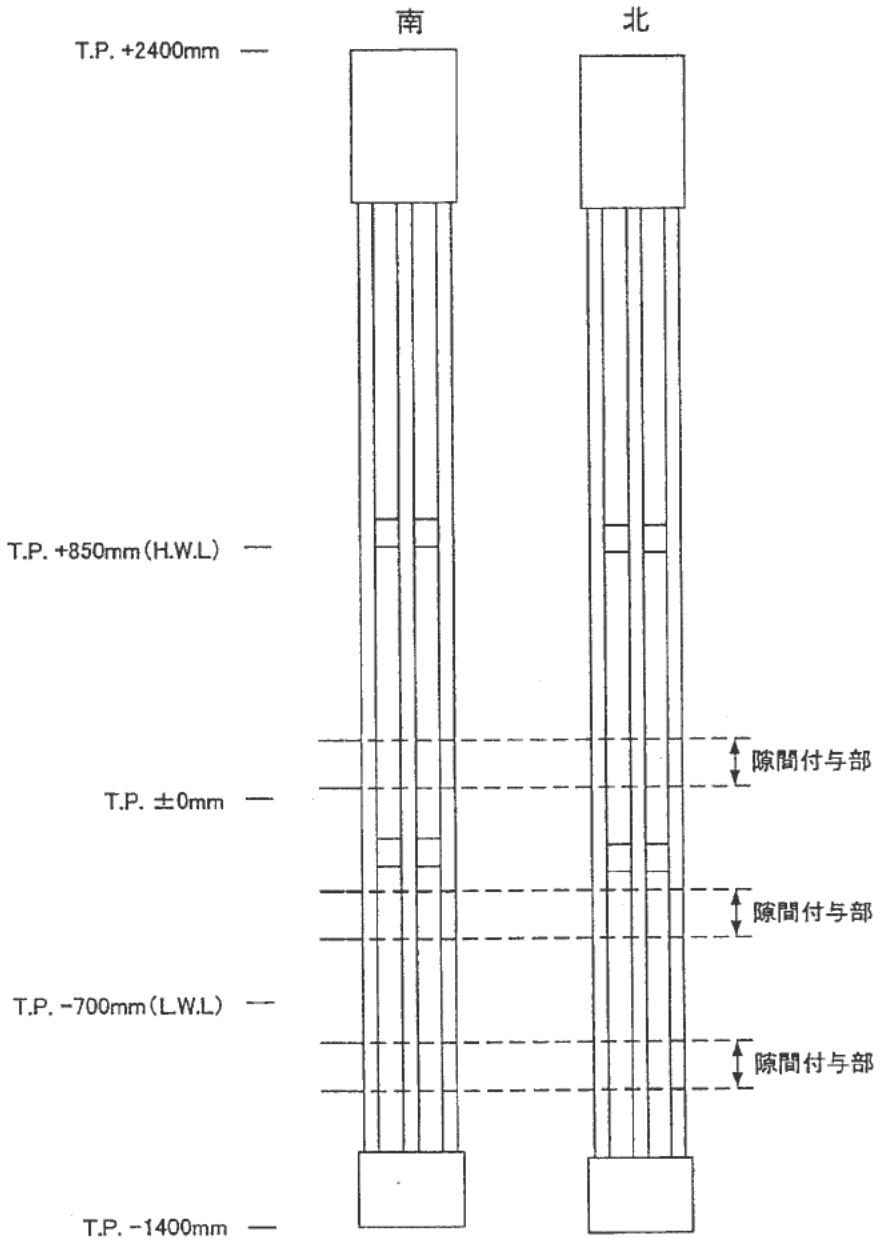
図4.2.27　ステンレス鋼の腐食状況
研究テーマ1，第一次試験材，19.5年暴露，2003年度回収



(注) 図の人工隙間付与部表示は局部腐食箇所表示のために変形した

研究テーマ1、第2次試験材、10年暴露、2003年度回収
D-4材、30Cr-2Mo
初期肉厚データなし、人工隙間付与あり、深さ(縦×横)mm

図 4.2.28 高耐食性ステンレス鋼試験材の局部腐食発生状況(1)



研究テーマ1、第2次試験材、10年暴露、2003年度回収
D-5材、25Cr-7Ni-3.2Mo-0.3N
初期肉厚 2.2mm、人工隙間付与あり、深さ(縦×横)mm

図 4.2.29 高耐食性ステンレス鋼試験材の局部腐食発生状況(2)

D-4材（高耐食ステンレス鋼：30Cr-2Mo）

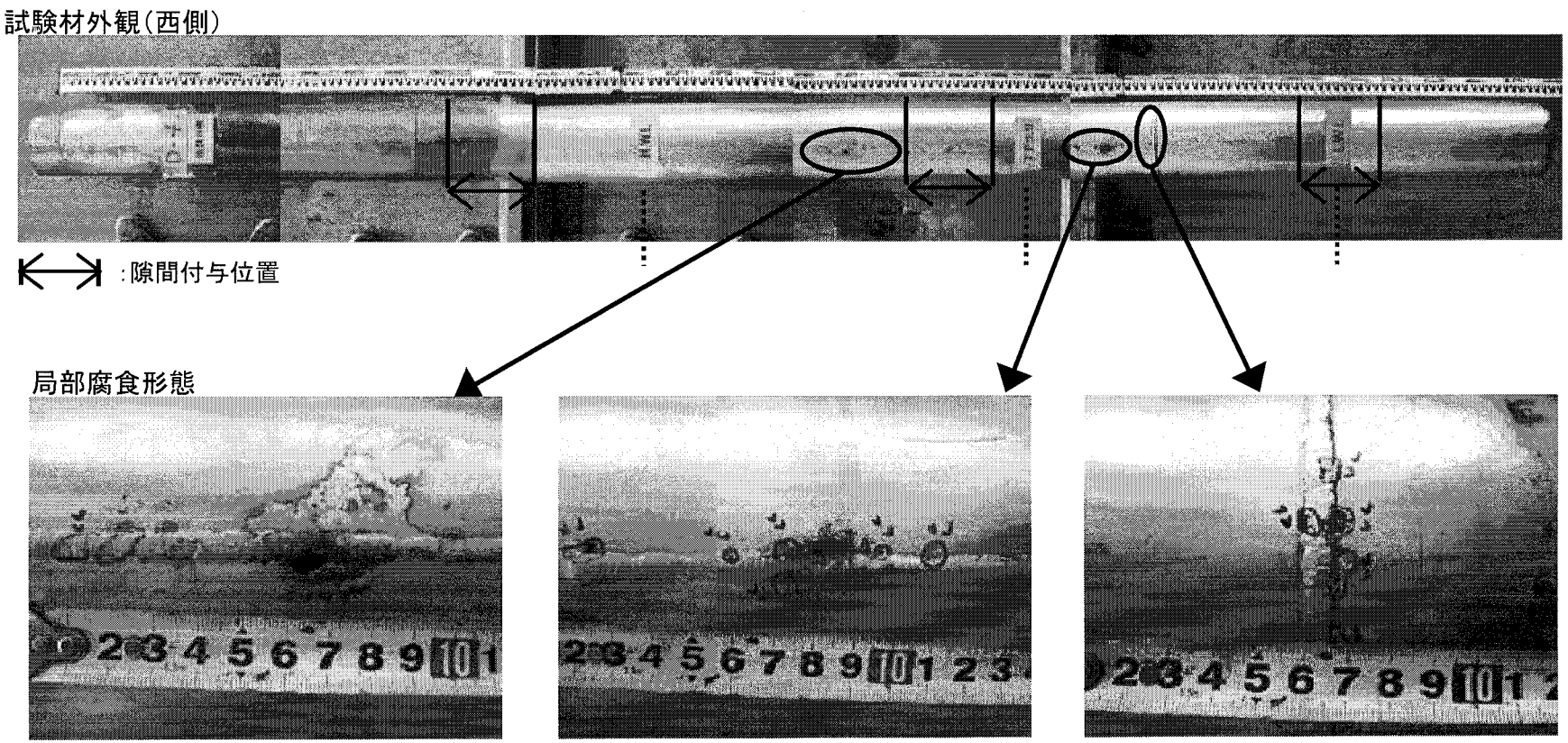


図4.2.30　ステンレス鋼の腐食状況
研究テーマ1，第二次試験材，10年暴露，2003年度回収

D-4材（高耐食ステンレス鋼：30Cr-2Mo）

試験材外観（東側）

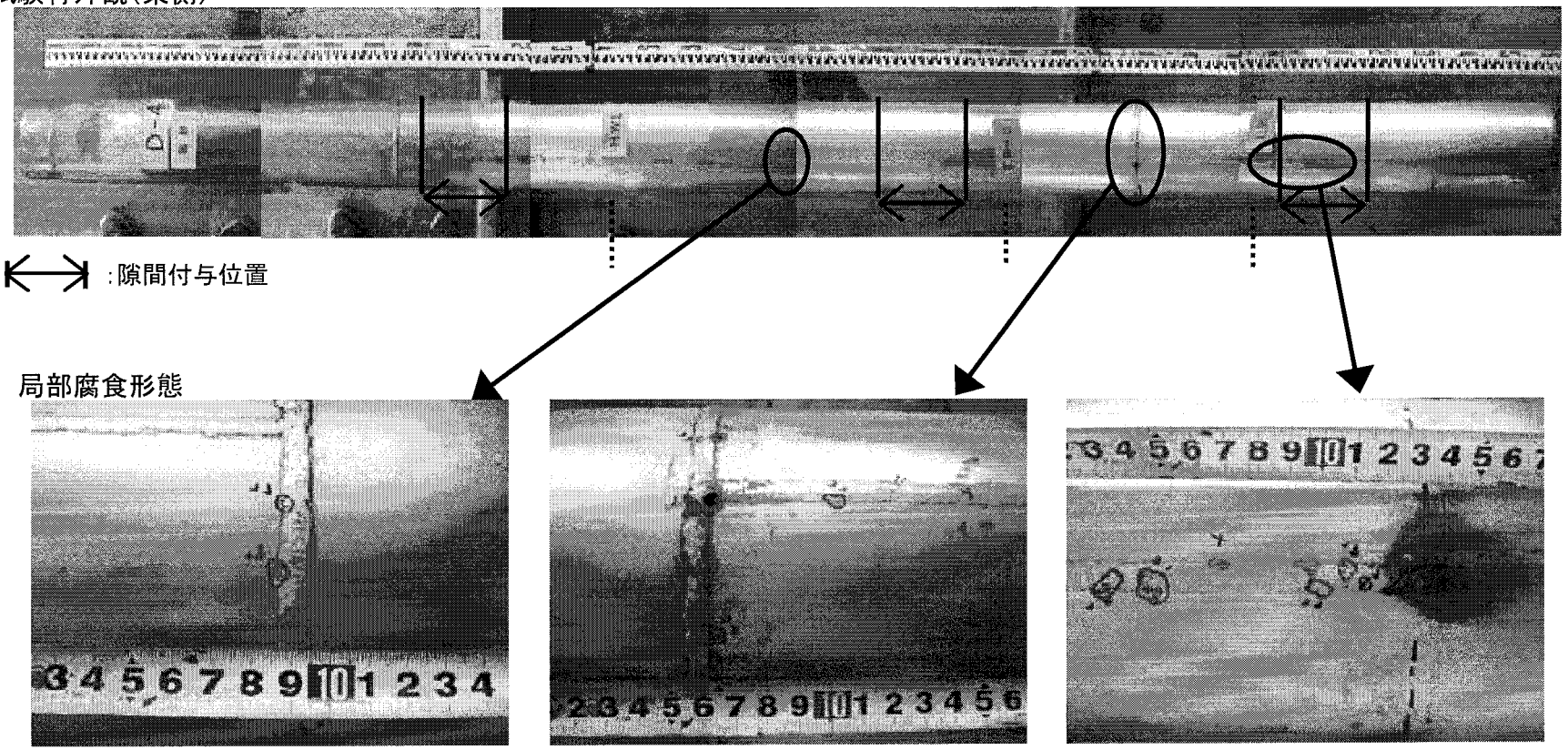


図4.2.31　ステンレス鋼の腐食状況
研究テーマ1，第二次試験材，10年暴露，2003年度回収

D-5材（高耐食ステンレス鋼：25Cr-7Ni-3.2Mo-0.3N）

試験材外観（南側）

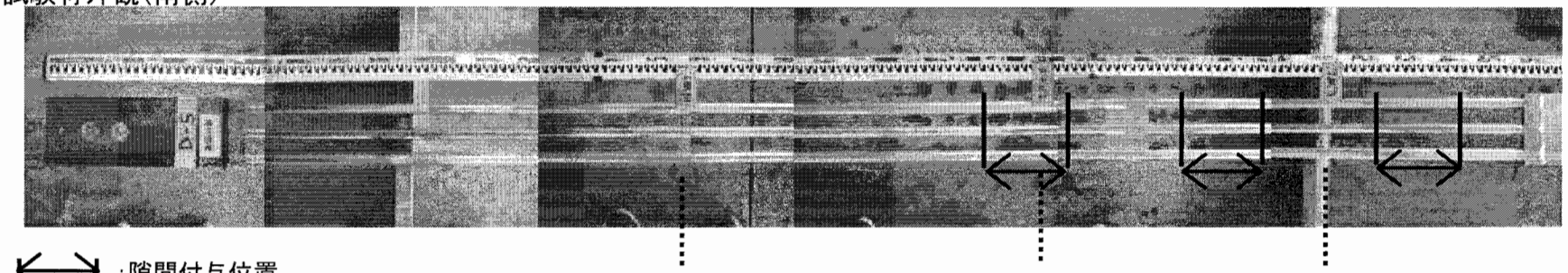


図4.2.32　ステンレス鋼の腐食状況
研究テーマ1，第二次試験材，10年暴露，2003年度回収

D-5材（高耐食ステンレス鋼：25Cr-7Ni-3.2Mo-0.3N）

試験材外観（北側）

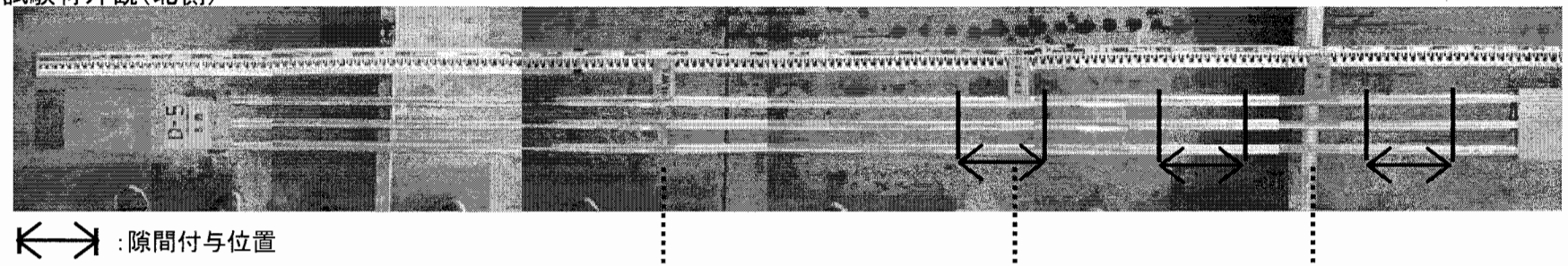


図4.2.33　ステンレス鋼の腐食状況
研究テーマ1，第二次試験材，10年暴露，2003年度回収

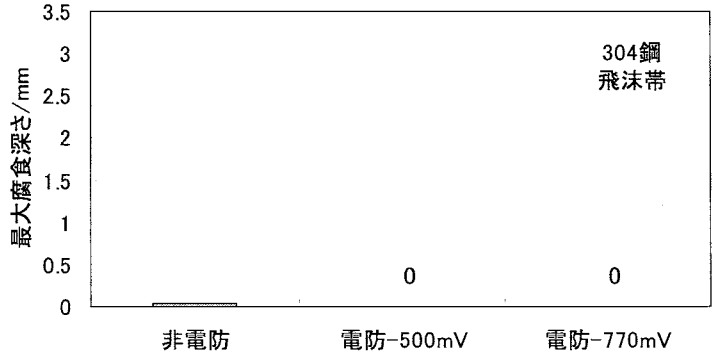


図 4.2.34　SUS304 鋼の腐食におよぼす電気防食の効果(飛沫帯,2 年)

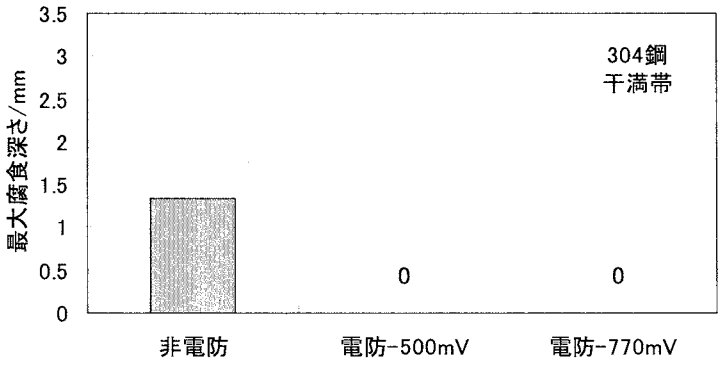


図 4.2.35　SUS304 鋼の腐食におよぼす電気防食の効果(干満帯,2 年)

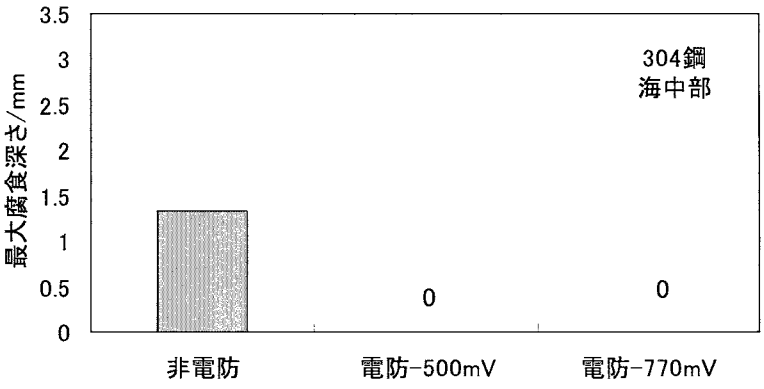


図 4.2.36　SUS304 鋼の腐食におよぼす電気防食の効果(海中部,2 年)

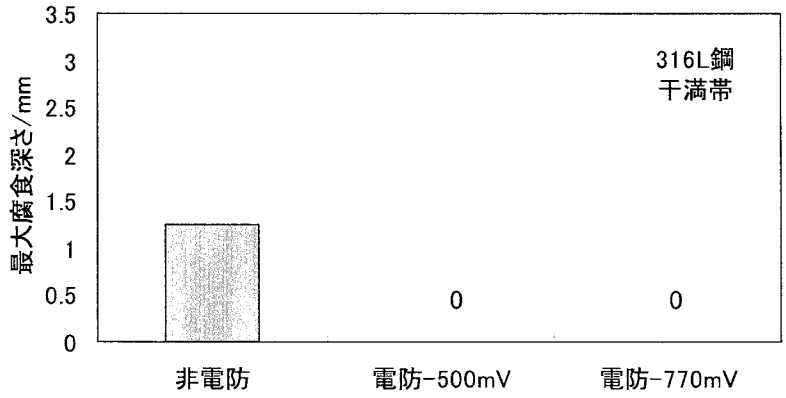


図 4.2.37　SUS316L鋼の腐食におよぼす電気防食の効果(干満帯,2 年)

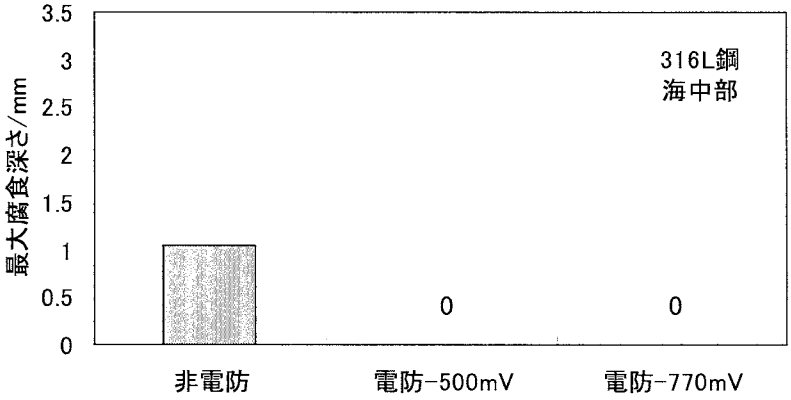


図 4.2.38　SUS316L 鋼の腐食におよぼす電気防食の効果(海中部,2 年)

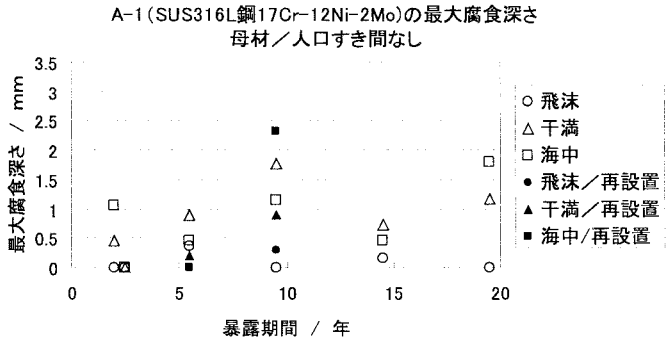


図 4.2.39 A1（SUS316L）鋼の最大腐食深さと暴露期間との関係（母材／人工すき間なし）

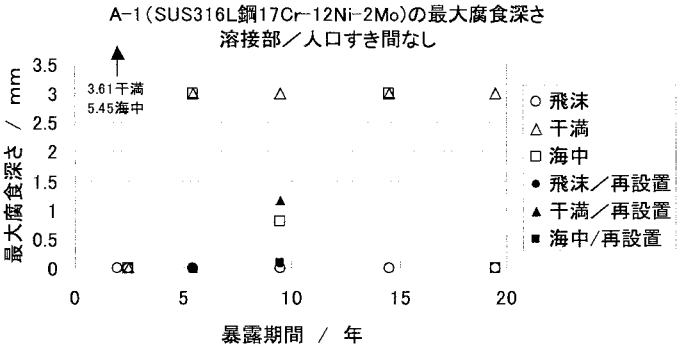


図 4.2.40 A1(SUS316L)鋼の最大腐食深さと暴露期間との関係（溶接部／人工すき間なし）

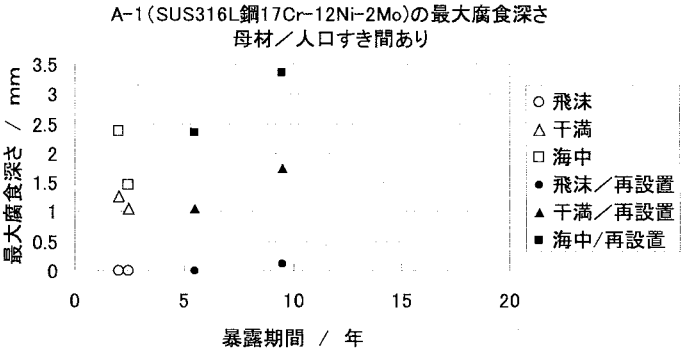


図 4.2.41 A1(SUS316L)鋼の最大腐食深さと暴露期間との関係（母材／人工すき間あり）

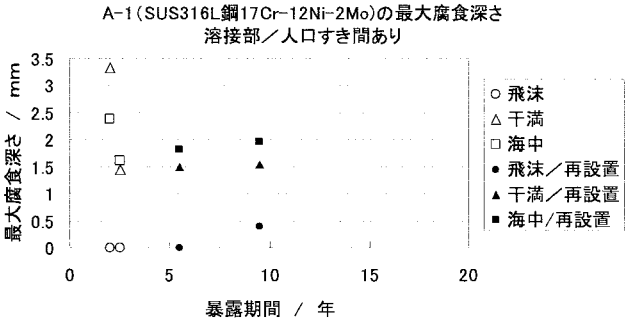


図 4.2.42 A1(SUS316L)鋼の最大腐食深さと暴露期間との関係(溶接部／人工すき間あり)

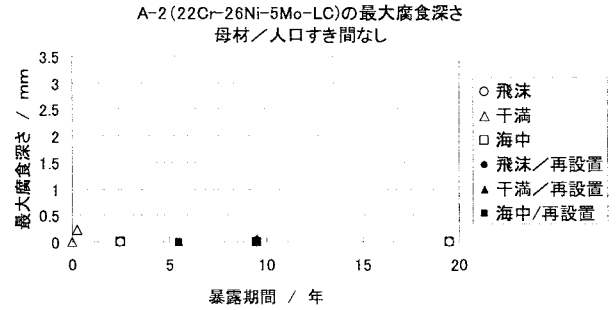


図4.2.43 A-2 鋼の最大腐食深さと暴露期間との関係(母材／人工すき間なし)

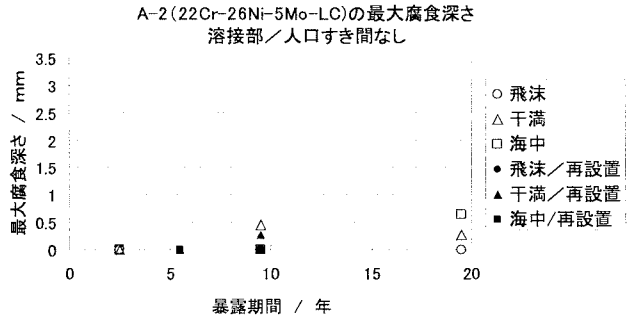


図4.2.44 A-2 鋼の最大腐食深さと暴露期間との関係(溶接部／人工すき間なし)

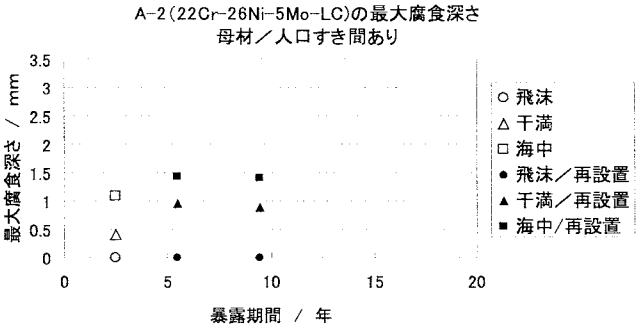


図4.2.45 A-2 鋼の最大腐食深さと暴露期間との関係(母材／人工すき間あり)

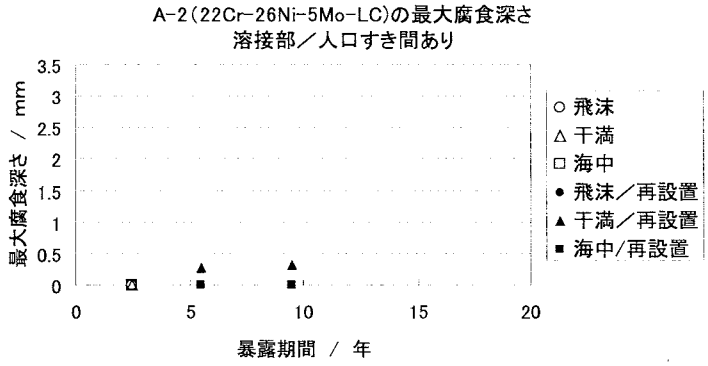


図4.2.46 A-2 鋼の最大腐食深さと暴露期間との関係(溶接部／人工すき間あり)

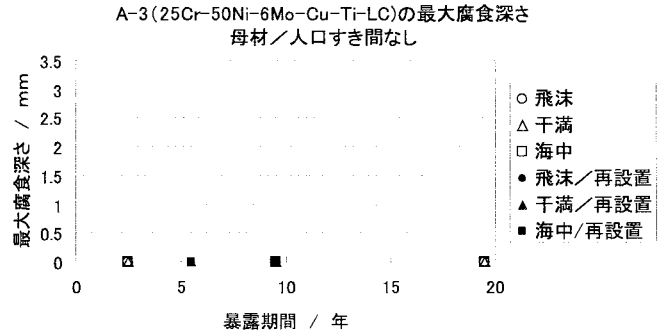


図 4.2.47 A-3鋼の最大腐食深さと暴露期間との関係(母材／人工すき間なし)

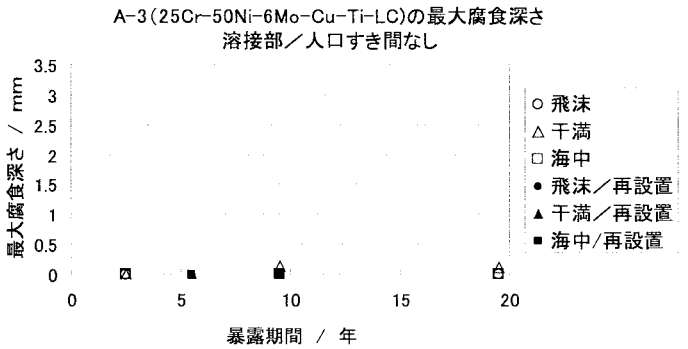


図 4.2.48 A-3鋼の最大腐食深さと暴露期間との関係(溶接部／人工すき間なし)

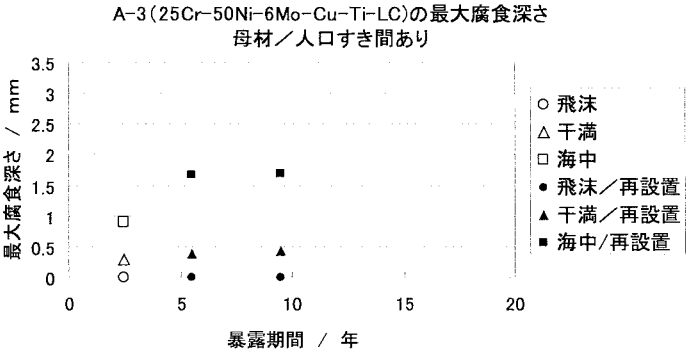


図 4.2.49 A-3鋼の最大腐食深さと暴露期間との関係(母材部／人工すき間あり)

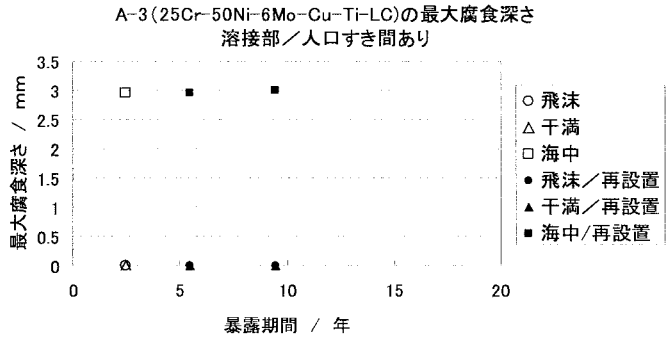


図 4.2.50 A-3鋼の最大腐食深さと暴露期間との関係(溶接部／人工すき間あり)

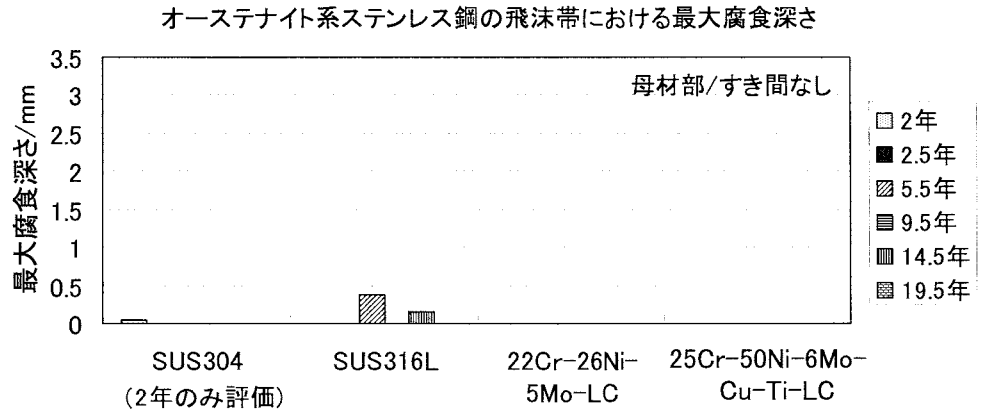


図 4.2.51 オーステナイト系ステンレス鋼の最大腐食深さ(飛沫帯)

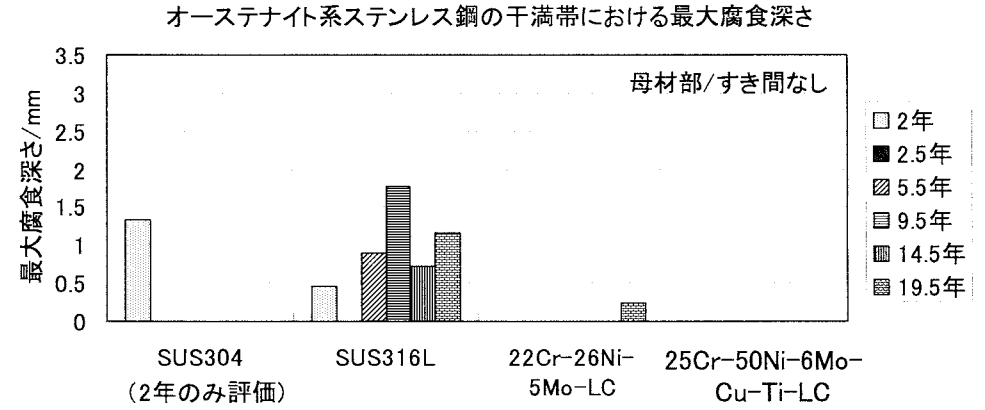


図 4.2.52 オーステナイト系ステンレス鋼の最大腐食深さ(干満帯)

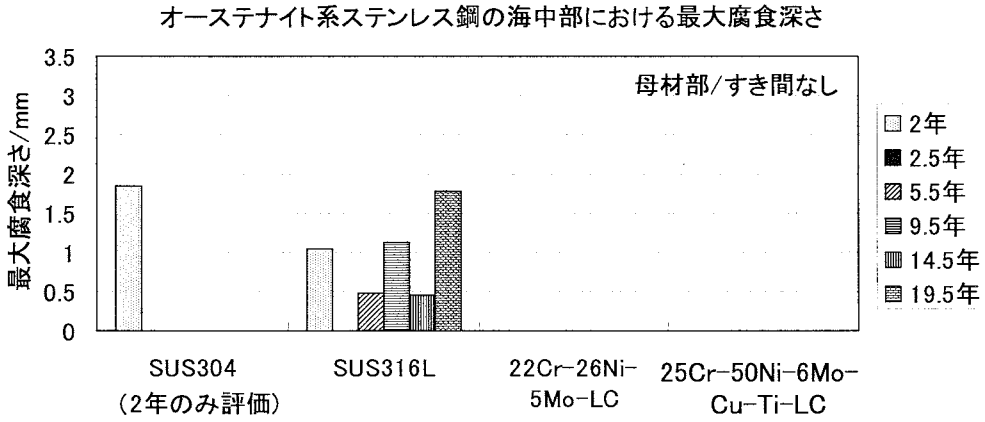


図 4.2.53 オーステナイト系ステンレス鋼の最大腐食深さ(海中部)

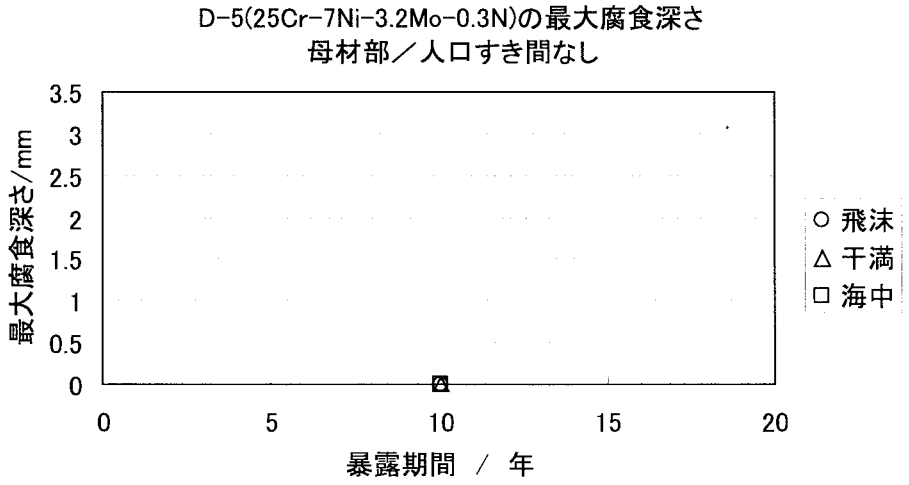


図 4.2.54 D-5 鋼の最大腐食深さと暴露期間との関係（母材／人工すき間なし）

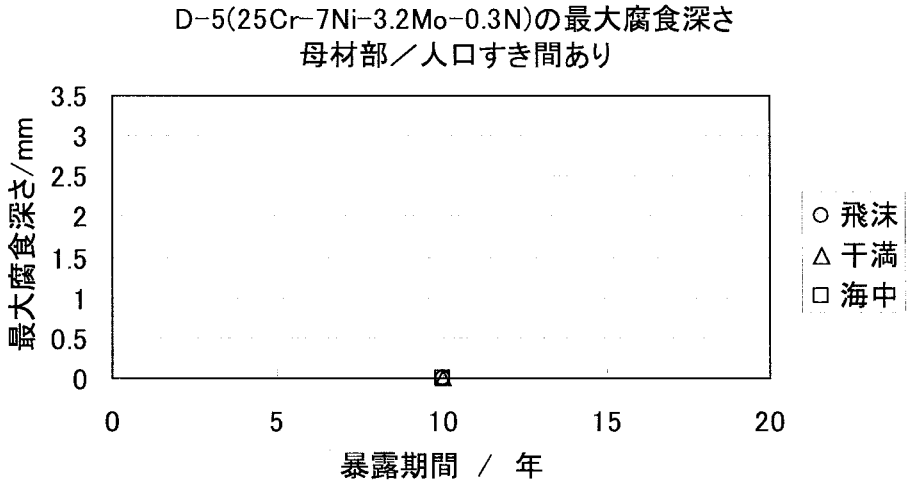


図 4.2.55 D-5 鋼の最大腐食深さと暴露期間との関係（母材／人工すき間あり）

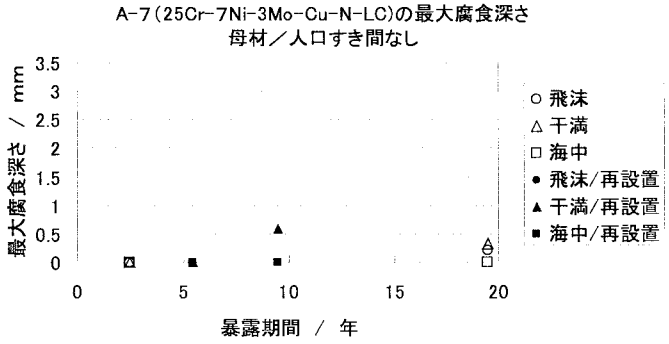


図 4.2.56 A-7 鋼の最大腐食深さと暴露期間との関係(母材／人工すき間なし)

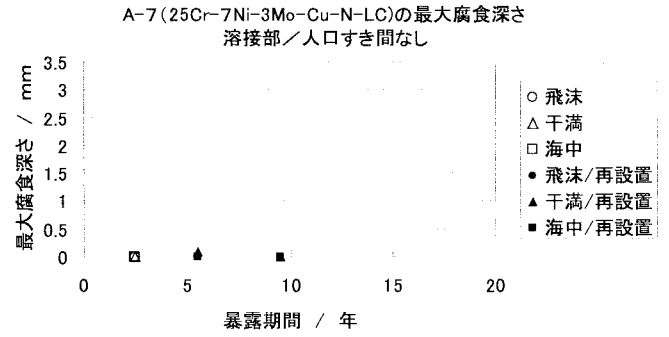


図 4.2.57 A-7 鋼の最大腐食深さと暴露期間との関係(溶接部／人工すき間なし)

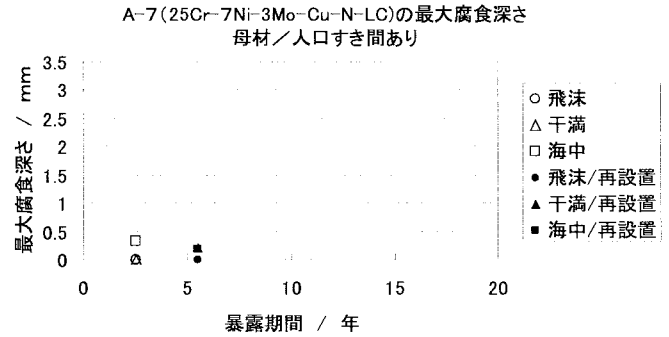


図 4.2.58 A-7 鋼の最大腐食深さと暴露期間との関係(母材／人工すき間あり)

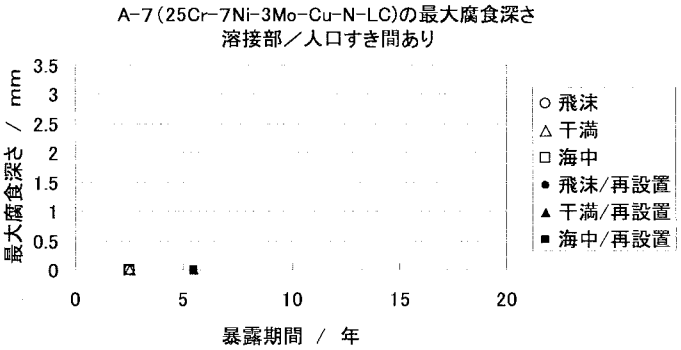


図 4.2.59 A-7 鋼の最大腐食深さと暴露期間との関係(溶接部／人工すき間あり)

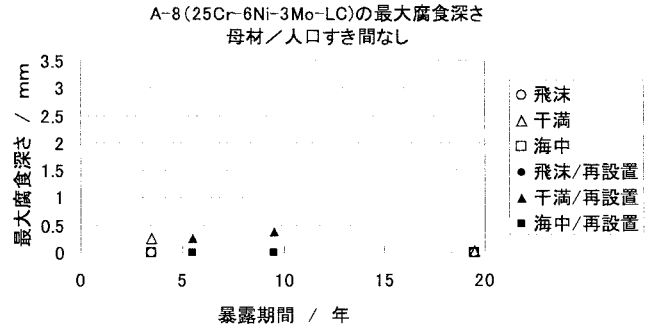


図 4.2.60 A-8 鋼の最大腐食深さと暴露期間との関係（母材／人工すき間なし）

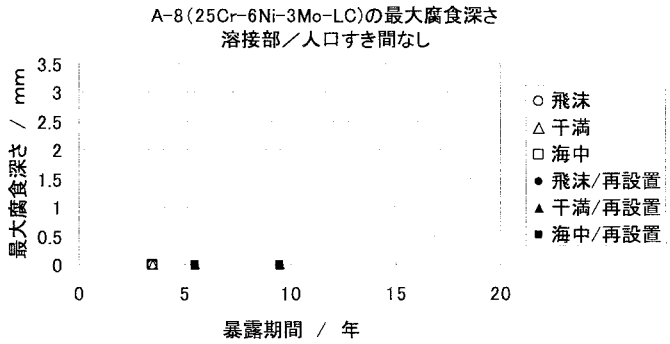


図 4.2.61 A-8 鋼の最大腐食深さと暴露期間との関係（溶接部／人工すき間なし）

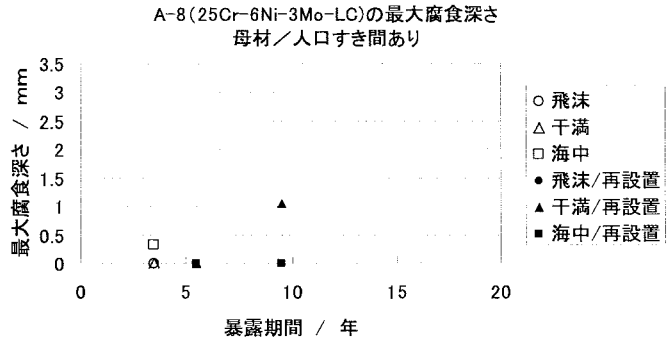


図 4.2.62 A-8 鋼の最大腐食深さと暴露期間との関係（母材部／人工すき間あり）

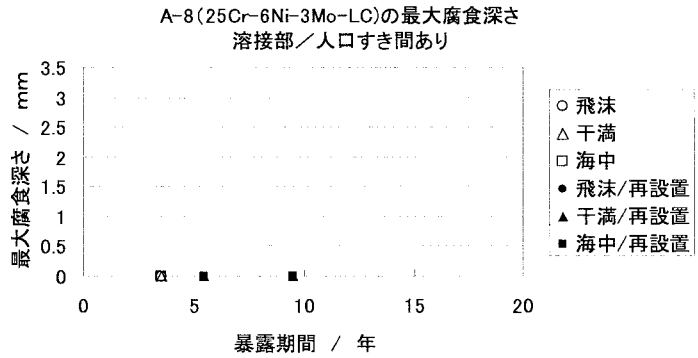


図 4.2.63 A-8 鋼の最大腐食深さと暴露期間との関係（溶接部／人工すき間あり）

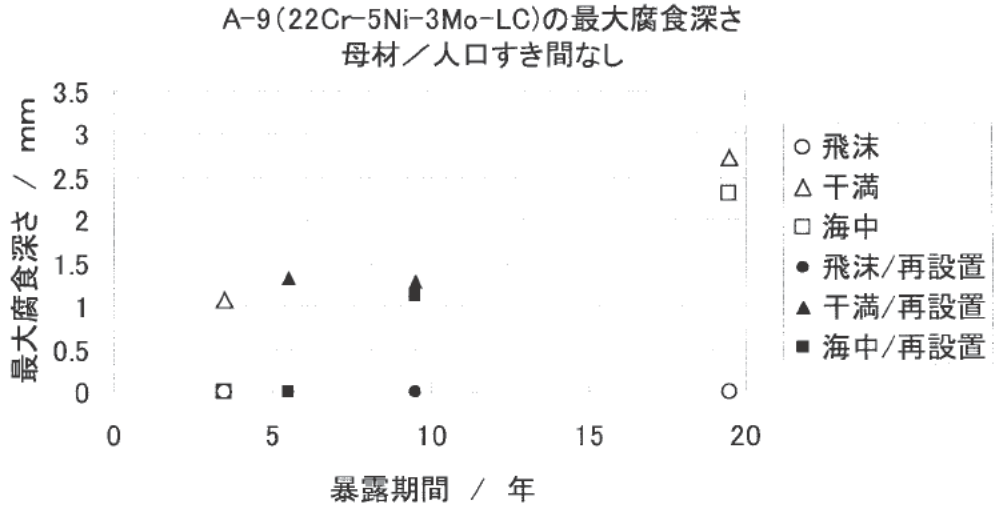


図 4.2.64 A-9 鋼の最大腐食深さと暴露期間との関係（母材／人工すき間なし）

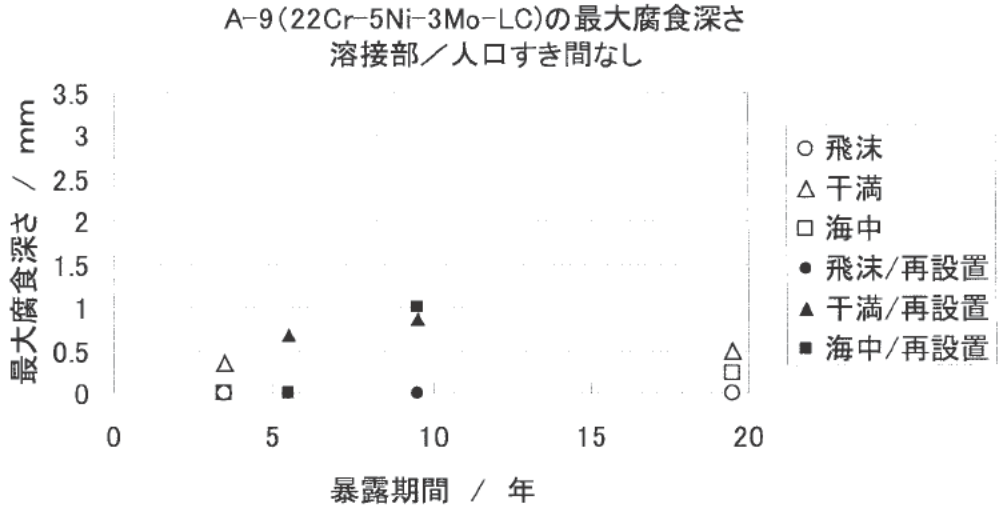


図 4.2.65 A-9 鋼の最大腐食深さと暴露期間との関係（溶接部／人工すき間なし）

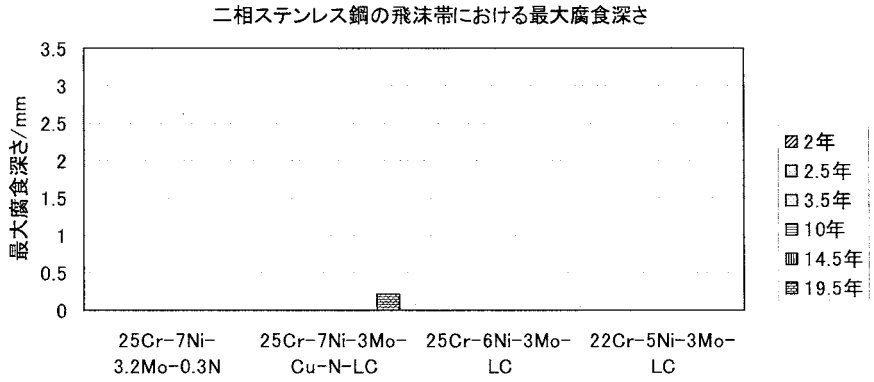


図 4.2.66　二相ステンレス鋼の最大腐食深さ(飛沫帯)

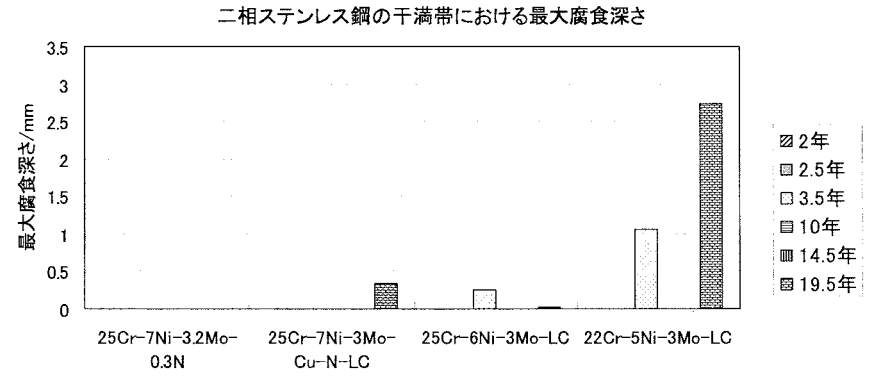


図 4.2.67　二相ステンレス鋼の最大腐食深さ(干満帯)

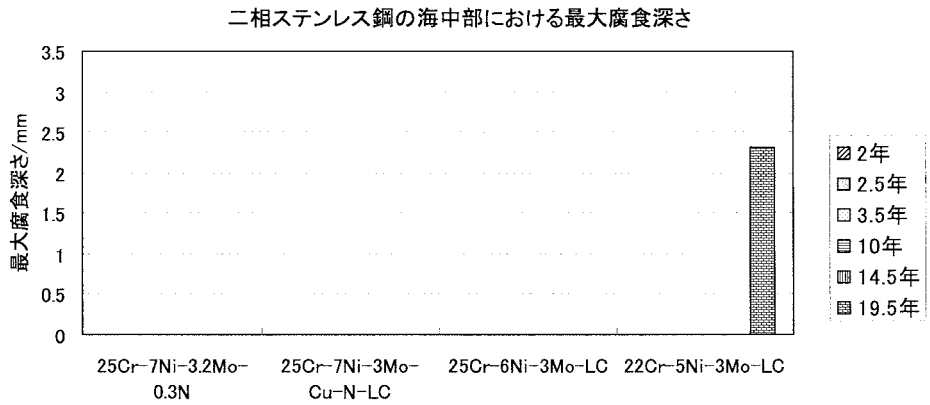


図 4.2.68　二相ステンレス鋼の最大腐食深さ(海中部)

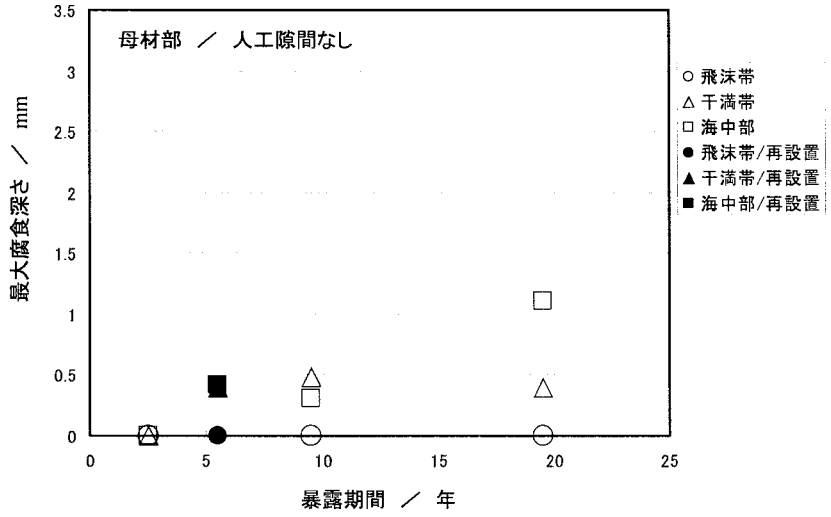


図4.2.69　A-4鋼の最大腐食深さと暴露期間との関係（母材／人工すき間なし）

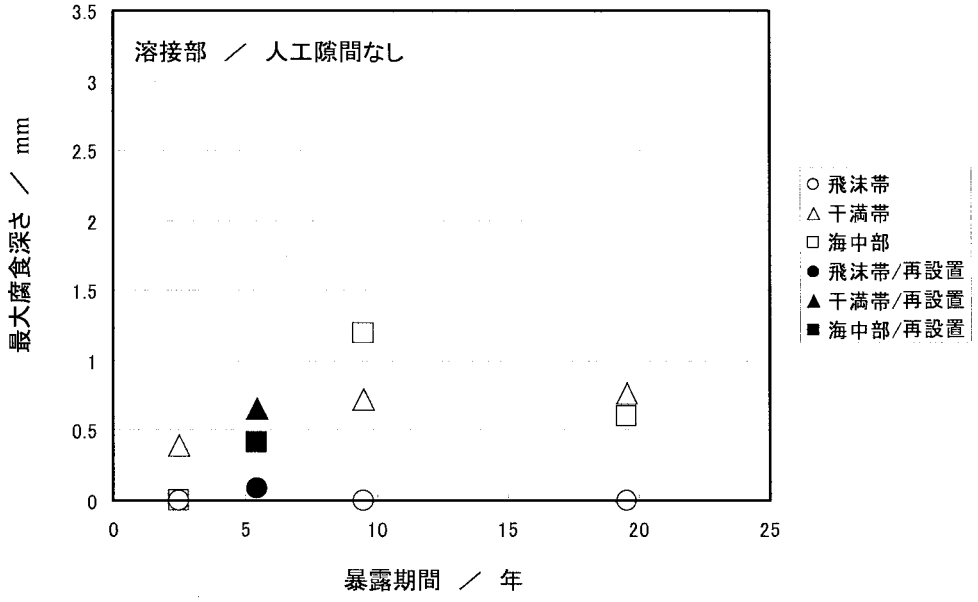


図 4.2.70　A-4鋼の最大腐食深さと暴露期間との関係（溶接部／人工すき間なし）

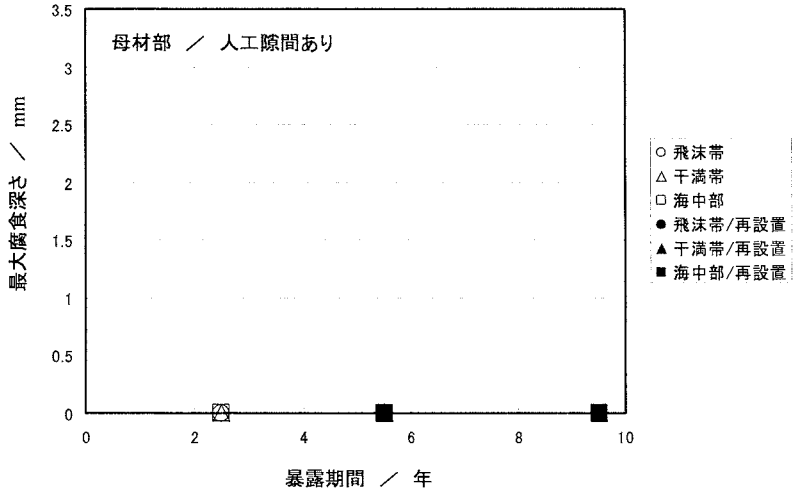


図4.2.71　A-4鋼の最大腐食深さと暴露期間との関係(母材／人工すき間あり)

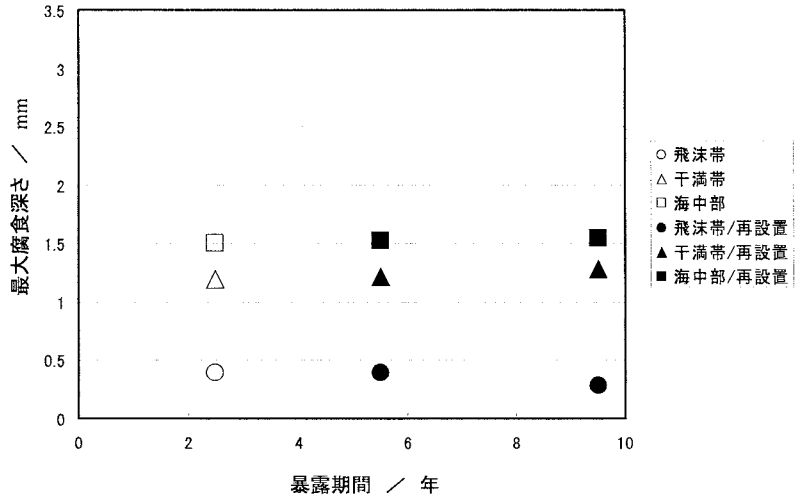


図4.2.72　A-4鋼の最大腐食深さと暴露期間との関係(溶接部／人工すき間あり)

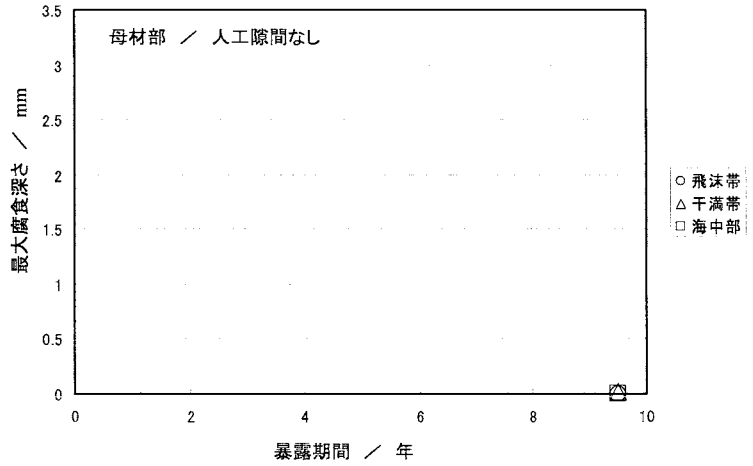


図 4.2.73　A-8 鋼の最大腐食深さと暴露期間との関係（母材／人工すき間なし）

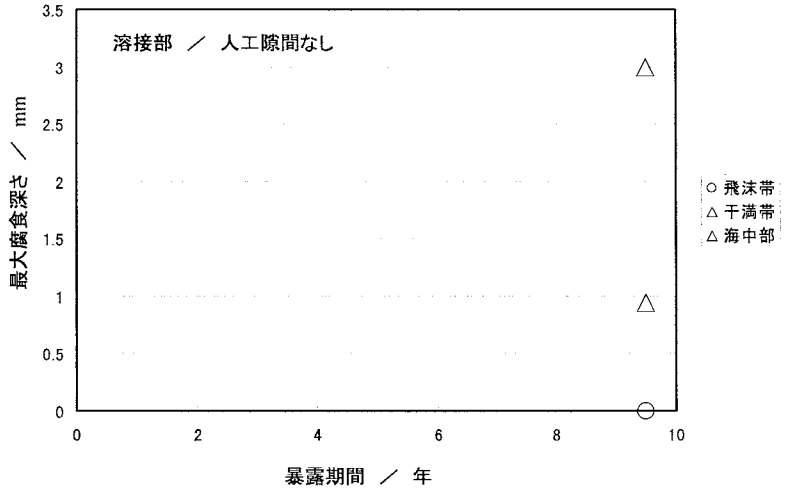


図 4.2.74　A-8 鋼の最大腐食深さと暴露期間との関係（溶接部／人工すき間なし）

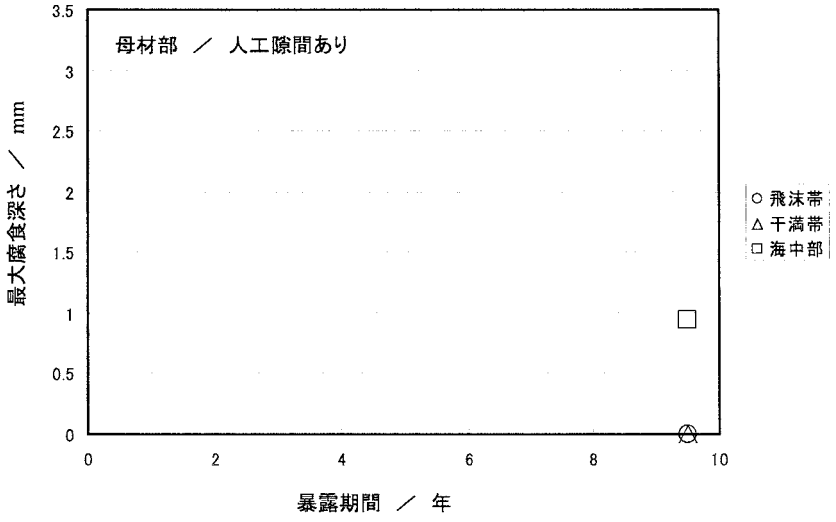


図 4.2.75　A-8 鋼の最大腐食深さと暴露期間との関係（母材／人工すき間あり）

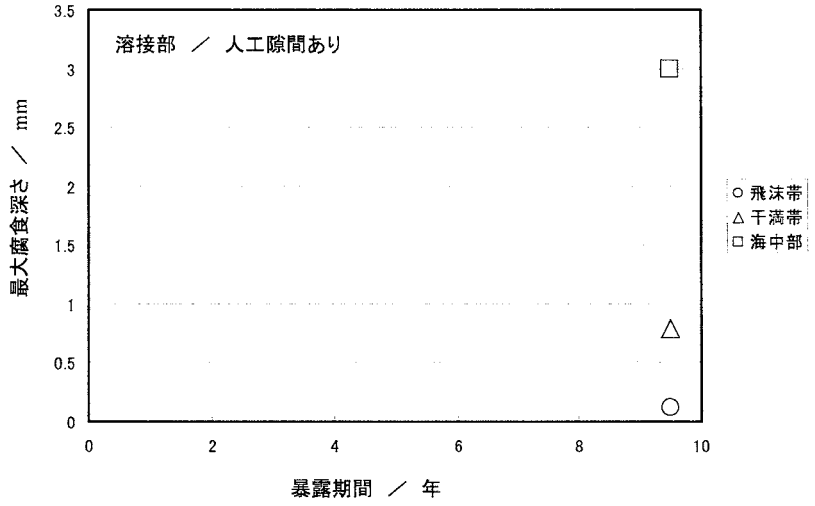


図 4.2.76　A-8 鋼の最大腐食深さと暴露期間との関係（溶接部／人工すき間あり）

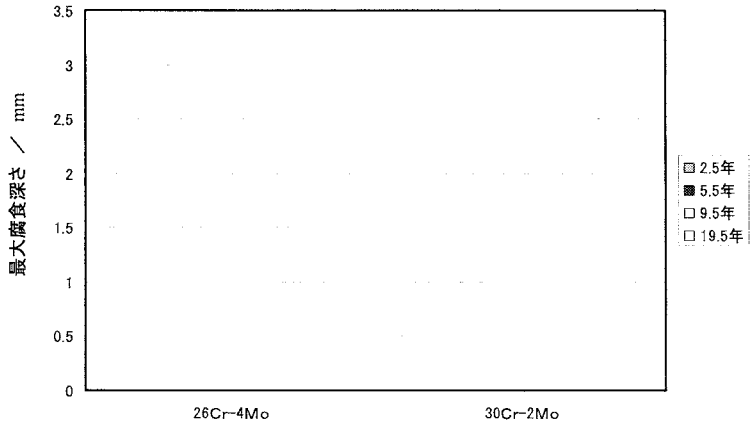


図 4.2.77 フェライト系ステンレス鋼の最大腐食深さ(飛沫帯)

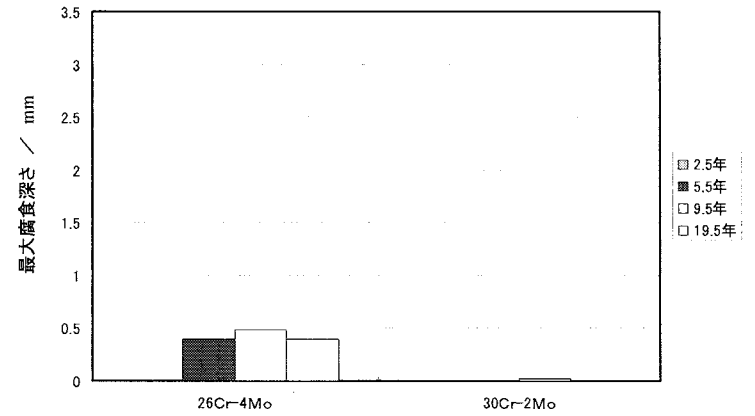


図 4.2.78 フェライト系ステンレス鋼の最大腐食深さ(干満帯)

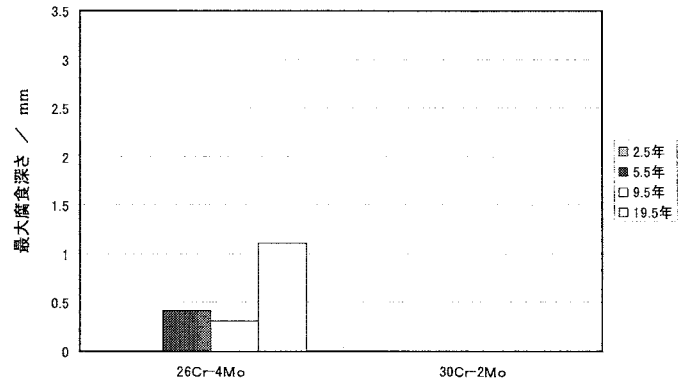


図 4.2.79 フェライト系ステンレス鋼の最大腐食深さ(海中部)

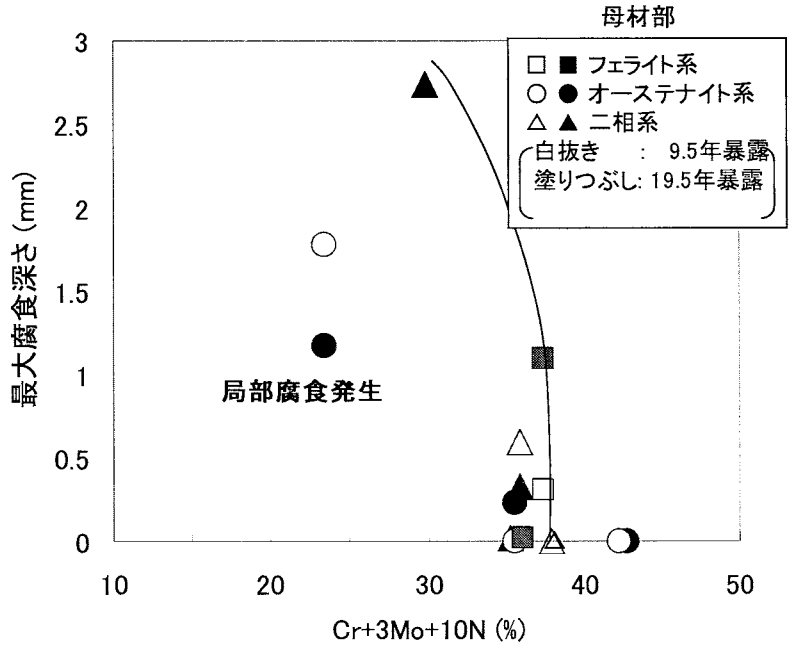


図 4.2.80 各種ステンレス鋼の耐海水性に及ぼす合金成分の影響

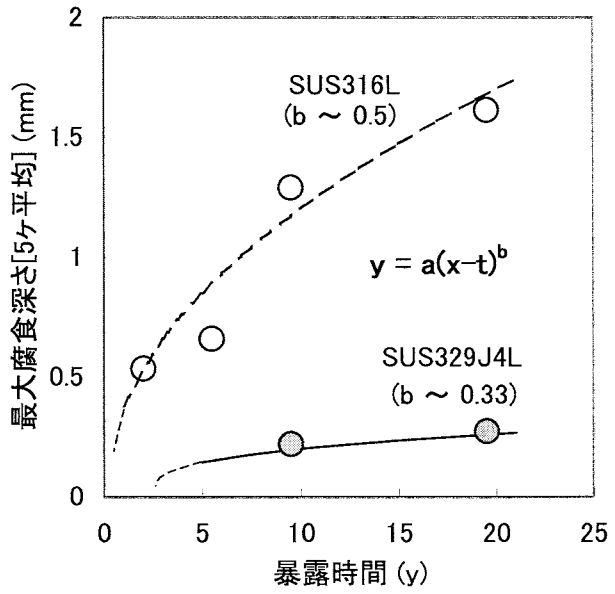


図 4.2.81 局部腐食深さの経時変化(深い方から5つの平均値の経時変化)

４．３　キュプロニッケル・モネル・チタンの耐久性に関する研究

4．3．1 研究の目的

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。そこで今回の研究の一環として、耐海水性に優れると期待されるキュプロニッケル、モネル、チタン（純チタン・チタン合金）で鋼材を、それぞれの金属で覆い溶接して作成した試験体を長期暴露した。

また、純チタンとチタン合金間での異種金属接触腐食（ガルバニックコロージョン）の発生の有無についても調査した。

試験材名称	成分（元素記号の前数字は各元素の質量%）
キュプロニッケル圧延クラッド	9-1キュプロニッケル（88Cu-９Ni-Fe-Mn）
モネルクラッド	NCuP、65Ni-31Cu（NCuP：JIS品種記号）
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） ※表4.3.6参照

4．3．2 試験材および試験方法

この項で報告する金属被覆系試験材の内容については表4.3.1に、化学成分については表4.3.2に、試験材の暴露試験時期、期間については表4.3.3に示す。なお、これらの各表には、本項の対象以外の金属被覆系試験材についても参考として記載した。

試験体は鋼管（SS41：SS41は現在ではSS400と表記される鋼材であるが、以下の図表中では旧表記のSS41とSS400が混在していることに注意）の外面をキュプロニッケル、モネル、チタンで完全に被覆（上下端部を含む）し、海洋暴露施設の第３デッキに設置した。

試験体はいずれも、外径165.2mm×長さ3,500mmの円筒状であり、平均海水面を基準として、海中部700mm、干満部1,550mm、飛沫・海上大気部1,250mmとした。なお、試験片（A-13-B、A-13-C）では、表4.3.6に示すように、被覆した純チタン上に純チタン短冊状小片とチタン合金の短冊状小片をそれぞれスポット溶接し、鋼管上に被覆した純チタンと短冊状の小片との間でのすき間腐食、異種金属接触腐食発生の有無についても試験した。各試験体の構造を図4.3.1～5に、暴露施設を海上設置する前に陸上で試験体を設置した状況を図4.3.6に示す。

4．3．3 試験結果

4．3．3．1 キュプロニッケル

キュプロニッケルは、暴露経過1.5年目の観察においてはみどりさびの発生程度であったが、2.5年目の観察においては干満部の生物付着下で浅い局部腐食の発生を認めた。3.5年目では、多数の局部腐食が観察された。

一方、生物付着について1984年から1994年に亘り試験した結果、図4.3.85に示すように、ステンレス、モネルなどのほかの暴露試験体に比べて少ない。

20年間に亘る観察結果を図4.3.7～30に示す。

4．3．3．2 モネル

暴露2.5年目の観察において、干満部の生物付着下で局部腐食の発生を認めた。3.5年目の観察においては、図4.3.84に示すように、局部腐食の個数の増加が認められた。

一方、溶接部（研磨仕上）に沿って、溶接作業の不手際（溶接材の選定、後仕上げなど）によると思われる腐食が発生した。2.5年目で厚さ３㎜のモネル板を貫通する孔食が１箇所発生し、暴露年数の経過と共に、干満部下部から海中部にかけて鋼板を貫通する腐食域が拡大した。母材部においても経年と共に腐食が発生した。各年の観察結果を図4.3.31～46に示す。

4．3．3．3 チタン

(1) 鋼管全面を純チタンで被覆した試験体（A-13-A）においては、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、干満部や水中部については、海洋生物が付着したが、付着生物下においても腐食は認められなかった。さらに、人工すき間を付与した部分についてもすき間腐食は認められなかった。各年の観察結果を、図4.3.47～54、図4.3.70～76に示す。

(2) 鋼管全面を純チタンで被覆し、その上に短冊状のチタン合金の短冊片をスポット溶接し、人工すき間と異種金属接触腐食の程度を評価した試験体（A-13-B）については、すき間腐食の発生も、異種金属腐食も認められなかった。各年の観察結果を、図4.3.47～65、図4.3.69～83に示す。

(3) 鋼管全面を純チタンで被覆し、その上に短冊状の純チタンの短冊片をスポット溶接し、人工すき間での腐食を評価した試験体（A-13-C）については、すき間腐食の発生が認められなかった。各年の観察結果を、図4.3.47～62、図4.3.66～83に示す。

(4) チタンの電位変化を測定したので図4.3.86、87に示す。

4．3．4 まとめ

1) キュプロニッケルは、暴露3.5年経過時の観察で局部腐食が認められ、6.5年経過時には生物付着下にも局部腐食が認められた。生物付着量については、図4.3.85に示すように、他の試験体（ステンレス、チタン、有機樹脂など）に比べ、最も少なかった。
2) モネルは、キュプロニッケルよりも早い段階から、図4.3.85に示すように、局部腐食の発生が認められた。
3) 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[1)]と同様に、海洋環境での高い耐食性を

確認した。

（チタン使用上の留意事項）

純チタンは、今回の試験結果でもわかるとおり、通常の海洋環境での使用において実用上腐食しないと考えて良い。ただし、普通鋼の表面に被覆して用いられる場合、異種金属接触による鋼材の腐食損傷を防止する方策が必要となる。また、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を用いることが必要となる。もしくは純チタンと鋼材を電気的に絶縁すべきである。（図4.3.86、87参照）

参考文献

1) Titanium Design Data Book, Titanium Metals Corporation of America

表 4.3.1　金属被覆系試験材の内容と撤去予定

研究テーマ1　第1次試験材

テーマ	次材	系	記号No.	防食系	防食仕様	形状	素材サイズ (mm)	塗装、被覆厚 (mm)	撤去の経過および予定（年／経過年数） '89 5.5	'90 6.5	'93 9.5	'98 14.5	'03 19.5	当初本数	回収 '03年7月調査時 本数	No.	'03年調査後の残存 '13 29.5
1	1	A	A-1-1～5	ステンレス鋼板溶接	SUS316L	管	165.2φ×3500^{l}×11^{t}	3	○		○△	○	○	5	1	A-1-5	
			A-2-1～3	ステンレス鋼板溶接	22Cr-26Ni-5Mo-Ti-L.C.	管		3			○△		○	3	1	A-2-2	
			A-3-1～3	ステンレス鋼板溶接	25Cr-50Ni-6Mo-Cu-Ti-L.C.	管		3			○△		○	3	1	A-3-2	
			A-4-1～3	ステンレス鋼板溶接	26Cr-4Mo-Ni-L.C.-L.N.	管		3			○△		○	3	1	A-4-2	
			A-5	ステンレス鋼鋳込み圧延クラッド	SUS316L(鋳込み圧延クラッド)	管	165.2φ×3500^{l}×8^{t}	3			□			1			
			A-6	溶射+塗装	Zn-13Al(200μm) +ウォッシュプライマー +ウレタン(4000μm)	管	165.2φ×3500^{l}×11^{t}	4					○	1	1	A-6	
			A-7-1～2	二相ステンレス鋼(素管)	25Cr-7Ni-3Mo-Cu-N-L.C.	管	114.3φ×3500^{l}×9.6^{t}				□		○	2	1	A-7-2	
			A-8-1～2	二相ステンレス鋼(素管)	25Cr-6Ni-3Mo-L.C.	管	89.1φ×3500^{l}×12.7^{t}				□		○	2	1	A-8-1	
			A-9－1～2	二相ステンレス鋼(素管)	22Cr-5Ni-3Mo-L.C.	管	139.8φ×3500^{l}×12^{t}				□		○	2	1	A-9-2	
			A-10-1～2	キュプロニッケル圧延クラット	9-1キュプロニッケル	管	165.2φ×3500^{l}×12^{t}	3			□			2	1		A-10-1
			A-11-1～2	モネル圧延クラッド	モネル	管	165.2φ×3500^{l}×9^{t}	3		○	○			2			
			A-12	溶融めっき+塗装	溶融Znめっき(130μm) +エポキシプライマー(30μm) +GF入りビニルエステル(500μm×3回)	管	165.2φ×3500^{l}×11^{t}	1.66					○	1	1	A-12	
			A-13-A	チタン板溶接	A.純チタン(素管)	管	165.2φ×3500^{l}×11^{t}	3			□			3	2		
			A-13-B		B.純チタン(素管)+純チタン(片)	管											A-13-B
			A-13-C		C.純チタン(素管)＋チタン合金(片)	管											A-13-C
													計	30	12		

(注) ○：人工隙間なし
△：1984年隙間付与試験材(ポリエチレン収縮チューブ)
□：1987年隙間付与試験材(ポリエチレン収縮チューブ)

表 4.3.2　金属被覆系試験材の化学成分

研究テーマ1　第1次試験材

（%）

テーマ	次材	系	記号 No.	防食系	防食仕様	被覆厚 (mm)	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	Cu	その他	
1	1	A	A-1	ステンレス鋼板溶接	SUS316L (17Cr-12Ni-2Mo-L.C.)	3	0.014	0.69	1.17	0.030	0.001	17.05	12.42	2.09	-		
			A-2	ステンレス鋼板溶接	22Cr-26Ni-5Mo-Ti-L.C.	3	0.04	0.88	1.20	0.021	0.005	21.46	25.30	5.19	-	Ti(0.40)	
						3	0.04	0.70	1.17	0.033	0.003	21.41	25.97	4.70	-	Ti(0.41)	
			A-3	ステンレス鋼板溶接	25Cr-5Ni-6Mo-Cu-Ti-L.C.	3	0.012	0.47	0.64	0.012	0.009	24.37	49.08	5.74	0.99	Ti(1.25)	
			A-4	ステンレス鋼板溶接	26Cr-4Mo-Ni-L.C.-L.N.	3	0.0031	0.09	0.09	0.004	0.002	25.5	0.26	3.97	0.01	Al(0.13),Nb(0.15),N(0.0057)	
			A-5	ステンレス鋼 鋳込み圧延クラッド	SUS316L (17Cr-12Ni-2Mo-L.C.)	3	0.019	0.43	1.65	0.023	0.002	17.35	12.10	2.065	-		
			A-7	二相ステンレス鋼(素管)	25Cr-7Ni-3Mo-Cu-N-L.C.	10*	0.018	0.43	0.91	0.029	0.003	24.85	7.00	3.16	-	N(0.138)	A-7-1
							0.019	0.35	0.87	0.030	0.003	24.90	7.15	3.20	-	N(0.139)	A-7-2
			A-8	二相ステンレス鋼(素管)	25Cr-6Ni-3Mo-L.C.	9.6*	0.012	0.49	1.04	0.015	0.001	25.0	7.09	3.04	-	N(0.11)	
			A-9	二相ステンレス鋼(素管)	22Cr-5Ni-3Mo-L.C.	12.7*	0.017	0.43	1.83	0.023	0.001	21.24	5.39	2.86	0.04		
			A-10	キュプロニッケル圧延クラット	9-1キュプロニッケル (88Cu-9Ni-Fe-Mn)	2	-	-	0.74	-	-	-	9.36	-	88.53	Cu+Ni+Fe+Mn(99.98)	
			A-11	モネル圧延クラッド	モネル(NCuP,65Ni-31Cu)	3	0.10	0.30	0.94	-	0.003	-	64.95	-	31.36	Ti(0.01),Nb(0.01),Fe(2.31)	
			A-13-A	チタン板溶接	純チタン JIS2種TP35C	3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	H(0.004),O(0.12)**	
			A-13-B		純チタン＋純チタン片 (溶接)											Fe(0.04),N(0.01)	
			A-13-C		純チタン＋チタン合金片 (溶接)											残部Ti	

(注)　1) ＊は素管肉厚

2) ＊＊は純チタン(管)の化学成分

表 4.3.3　暴露試験材および試験片一覧

単位：mm

試験材記号 No.	テーマ	次	防食系 防食施工法	防食仕様	防食被覆(mm)	隙間	形状	素管寸法(mm)	暴露・施工 部位	暴露・施工 位置対象	開始	暴露期間(年) '84 0.5	'85 1.5	'86 2.5	'87 3.5	'88 4.5	'89 5.5	'90 6.5	'91 7.5	'92 8.5	'93 9.5	'94 10.5	'95 11.5	'96 12.5	'97 13.5	'98 14.5	'99 15.5	'00 16.5	'01 17.5	'02 18.5	'03 19.5	回収(予定)
A-1-1	1	1	ステンレス鋼板溶接	SUS316L(17Cr-12Ni-2Mo-L.C.)	3		管	165.2φ,3500l,11t	飛・干・海	3B3A-1	'84	□	—	—	—	—	■															'89
A-1-2										3B3A-2	'84	□	—	—	—	—	—			■												'93
A-1-3						○				3B3A-3	'84	○	—	▲◎	—	—	▲◎			●												'93
A-1-4										3B3A-4	'84	□	—	—	—	—	—									■						'98
A-1-5										3B3A-5	'84	□	—	—	—	—	—														■	'03
A-1-6		2	ステンレス鋼板溶接	SUS316L (17Cr-12Ni-2Mo-L.C.) 非電防	7.1	○	管	165.2φ,3162,7.1t	飛・干・海	2B3B-1	'89						○	—	●													'91
A-1-7				電防		○				2B3B-2	'89						○	—	●													'91
A-1-8				電防 -500mV		○				2B3B-2	'91								○	—	●											'93
A-1-9				電防 -770mV		○				2B3B-1	'91								○	—	●											'93
A-2-1		1	ステンレス鋼板溶接	22Cr-26Ni-5Mo-L.C.	3		管	165.2φ,3500l,11t	飛・干・海	3B3A-6	'84	□	—	—	—	—	—			■												'93
A-2-2										3B3A-7	'84	□	—	—	—	—	—			—											■	'03
A-2-3						○				3B3A-8	'84	○	—	▲◎	—	—	▲◎			●												'93
A-3-1			ステンレス鋼板溶接	25Cr-50Ni-6Mo-Cu-Ti-L.C.	3		管	165.2φ,3500,11t	飛・干・海	3B3A-9	'84	□	—	—	—	—	—			■												'93
A-3-2										3B3A-10	'84	□	—	—	—	—	—			—											■	'03
A-3-3						○				3A2A-1	'84	○	—	▲◎	—	—	▲◎			●												'93
A-4-1			ステンレス鋼板溶接	26Cr-4Mo-Ni-L.C.-L.N.	3		管	165.2φ,3500,11t	飛・干・海	3A2A-2	'84	□	—	—	—	—	—			■												'93
A-4-2										3A2A-3	'84	□	—	—	—	—	—			—											→	('13)
A-4-3						○				3A2A-4	'84	○	—	▲◎	—	—	▲◎			●												'93
A-5			ステンレス鋼鋳込み圧延ｸﾗｯﾄﾞ	SUS316L(17Cr-12Ni-2Mo-L.C.)	3		管	165.2φ,3500,8t	飛・干・海	3A2A-5	'84	□	—	—	▲○	—	▲◎			●												'93
A-6			溶射＋塗装	Zn-13Al(200μm)+ｳｫｯｼｭﾌﾟﾗｲﾏｰ+ｳﾚﾀﾝ(4mm)	4		管	165.2φ,3500,11t	飛・干・海	3A2A-6	'84	□	—	—	—	—	—			—											■	'03
A-7-1		1	二相ステンレス鋼(素管)	25Cr-7Ni-3Mo-Cu-N-L.C.		○	管	114.3φ,3500l,9.6t	飛・干・海	3A2A-7	'84	□	—	▲○	—	—	▲◎			●												'93
A-7-2										3A2A-8	'84	□	—	—	—	—	—			—											■	'03
A-8-1			二相ステンレス鋼(素管)	25Cr-6Ni-3Mo-L.C.			管	89.1φ,3500l,12.7t	飛・干・海	3A2A-9	'84	□	—	▲	—	—	—			—											■	'03
A-8-2						○				3A2A-10	'84	□	—	—	▲○	—	▲◎			●												'93
A-9-1			二相ステンレス鋼(素管)	22Cr-5Ni-3Mo-L.C.		○	管	139.8φ,3500l,12t	飛・干・海	2A1A-1	'84	□	—	—	▲○	—	▲◎			●												'93
A-9-2										2A1A-2	'84	□	—	—	—	—	—			—											■	'03
A-10-1			ｷｭﾌﾟﾛﾆｯｹﾙ圧延ｸﾗｯﾄﾞ	9-1ｷｭﾌﾟﾛﾆｯｹﾙ(88Cu-9Ni-Fe-Mn)	3		管	165.2φ,3500l,12t	飛・干・海	2A1A-3	'84	□	—	—	▲	—	—	—		—											→	('13)
A-10-2						○				2A1A-4	'84	□	—	—	▲○	—	▲◎			●												'93
A-11-1			モネル圧延ｸﾗｯﾄﾞ	ﾓﾈﾙ(NCuP,65Ni-31Cu)	3		管	165.2φ,3500l,9t	飛・干・海	2A1A-5	'84	□	—	—	▲	—	—	—	■	—												'90
A-11-2						○				2A1A-6	'84	□	—	—	▲○	—	▲◎			●												'93
A-12			溶融めっき+塗装	溶融Znめっき(130μm)+ｴﾎﾟｷｼﾌﾟﾗｲﾏｰ(30μm) +GF入りﾋﾞﾆﾙｴｽﾃﾙ(500μm×3)	1.66		管	165.2φ,3500,11t		2A1A-7	'84	□	—	—	—	—	—			—											■	'03
A-13-A			チタン板溶接	純Ti(素管)	3		管	165.2φ,3500l,12t	飛・干・海	2A1A-8	'84	□	—	▲	—	▲○	—	▲◎			●												'93
A-13-B				純Ti(素管)+純Ti(片)溶接		○				1A1B-1	'84	○	—	▲	—	—	—			—											→	('13)
A-13-C				純Ti(素管)+Ti合金(片)溶接		○				1A1B-2	'84	○	—	▲	—	—	—			—											→	('13)
A-14		2	ｷｭﾌﾟﾛﾆｯｹﾙｸﾗｯﾄﾞ	9-1ｷｭﾌﾟﾛﾆｯｹﾙ	2		管	165.2φ,3162l,9t	飛・干・海	2A1A-5	'91								□	—	—										→	('13)

凡例 ○：隙間付与設置　　▲：一時撤去観察　　●：隙間付与材の回収
□：非隙間付与設置　　◎：隙間付与材設置　　■：非隙間付与材の回収

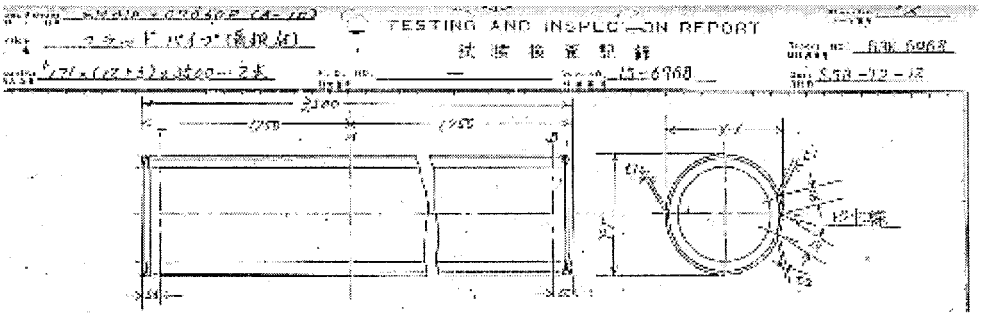


図 4.3.1　試片 A-10-1,2（鋼管(SS41)外面をキュプロニッケルで被覆）

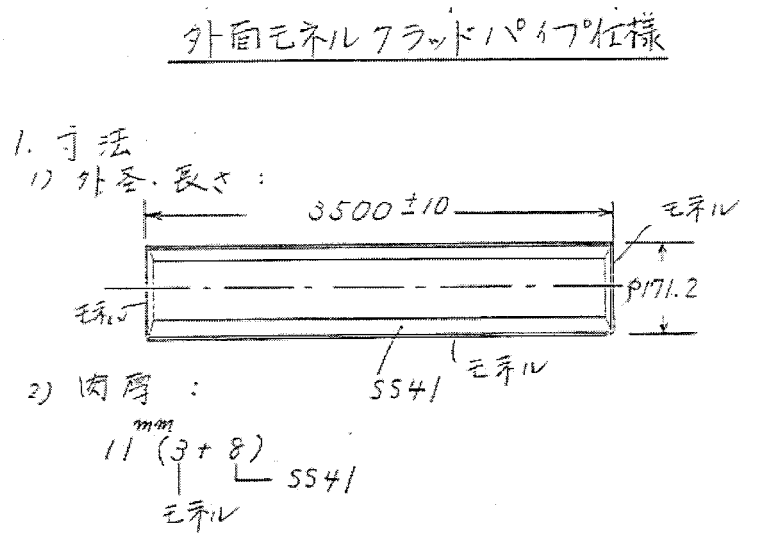


図 4.3.2　試片 A-11-1,2（鋼管(SS41)外面をモネルで被覆）

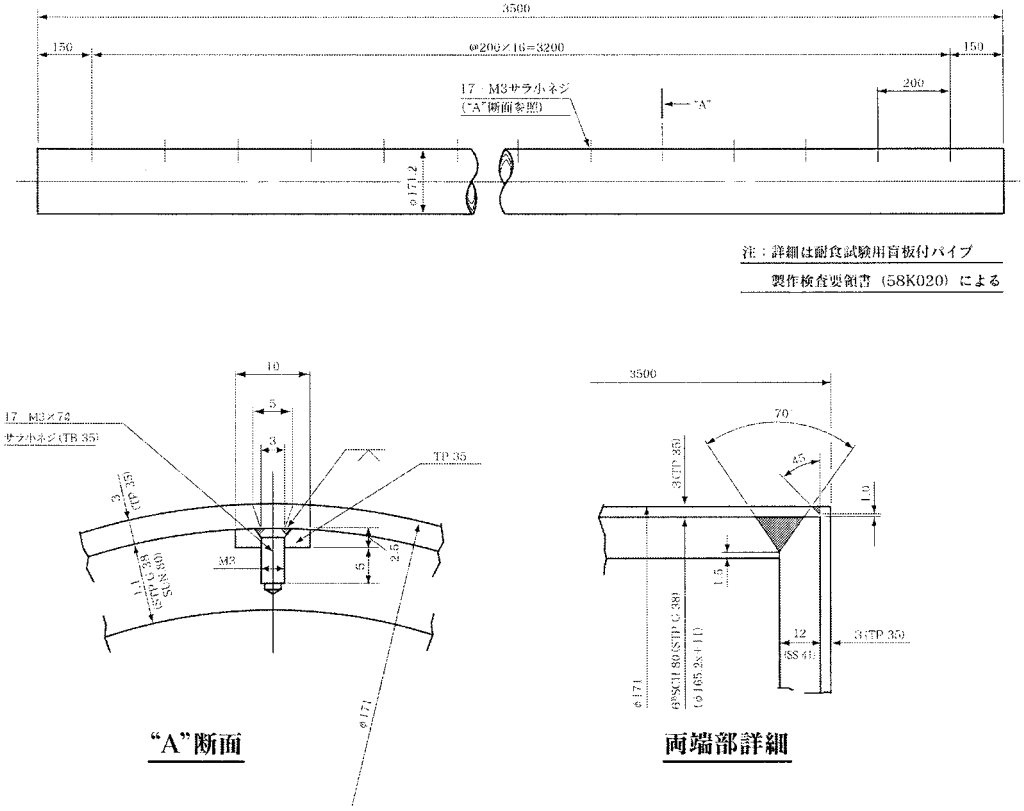
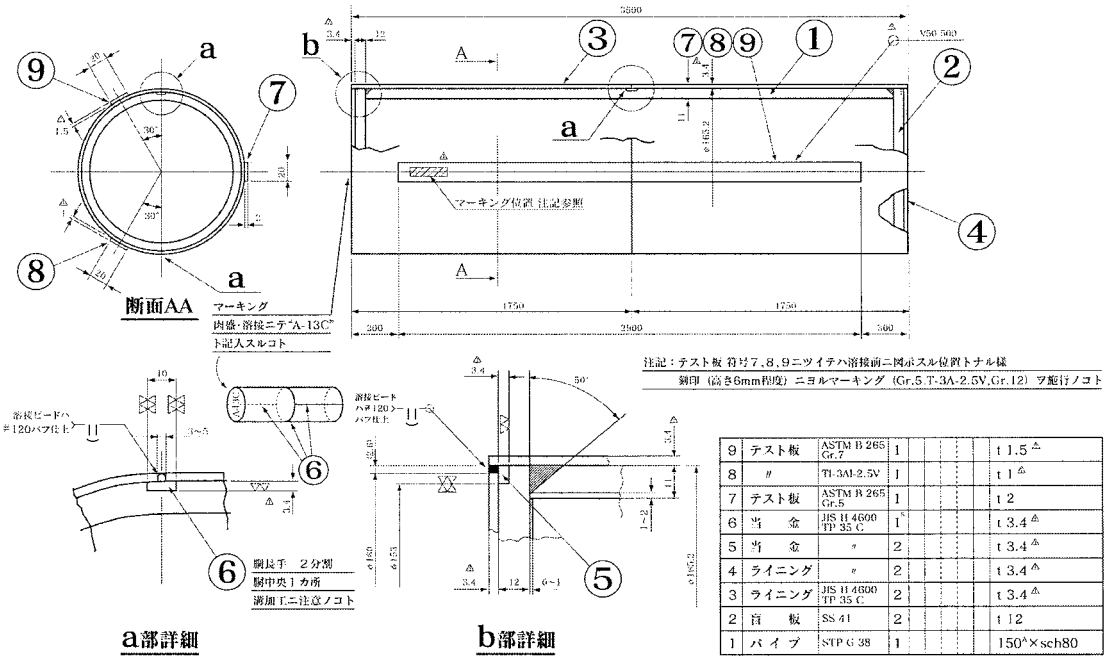


図 4.3.3 試片 A−13−A（鋼管(SS41)外面をチタンで被覆）

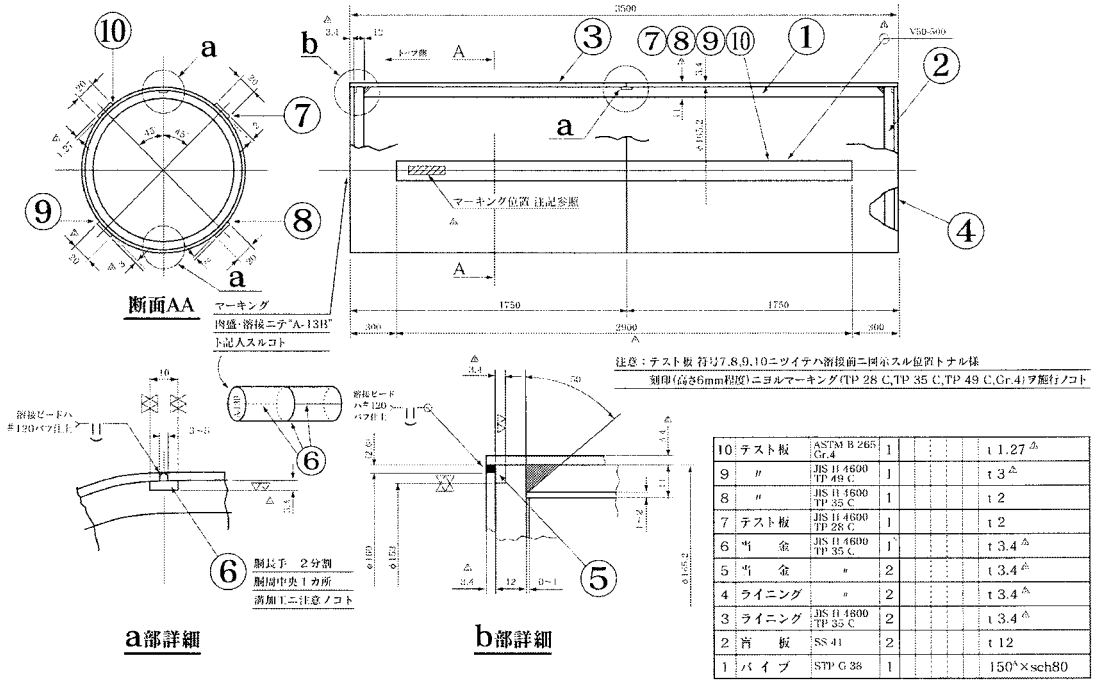
（備考：TP35 は現在、TP340 に相当。以下同じ。）



9	テスト板	ASTM B 265 Gr.7	1				t 1.5 △
8	〃	Ti-3Al-2.5V	1				t 1 △
7	テスト板	ASTM B 265 Gr.5	1				t 2
6	当　金	JIS H 4600 TP 35 C	1				t 3.4 △
5	当　金	〃	2				t 3.4 △
4	ライニング	〃	2				t 3.4 △
3	ライニング	JIS H 4600 TP 35 C	2				t 3.4 △
2	首　板	SS 41	2				t 12
1	パイプ	STP G 38	1				150A×sch80

図 4.3.4 試片 A−13−B（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）

（備考：TP35C は現在、TP340C に相当。）



10	テスト板	ASTM B 265 Gr.4	1		t 1.27 △
9	〃	JIS H 4600 TP 49 C	1		t 3 △
8	〃	JIS H 4600 TP 35 C	1		t 2
7	テスト板	JIS H 4600 TP 28 C	1		t 2
6	当　金	JIS H 4600 TP 35 C	1		t 3.4 △
5	当　金	〃	2		t 3.4 △
4	ライニング	〃	2		t 3.4 △
3	ライニング	JIS H 4600 TP 35 C	2		t 3.4 △
2	胴　板	SS 41	2		t 12
1	パ イ プ	STP G 38	1		150A×sch80

図 4.3.5 試片 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)

(備考:TP28C は現在 TP270 に、TP35C は TP340C に、TP49C は TP480C に相当。)

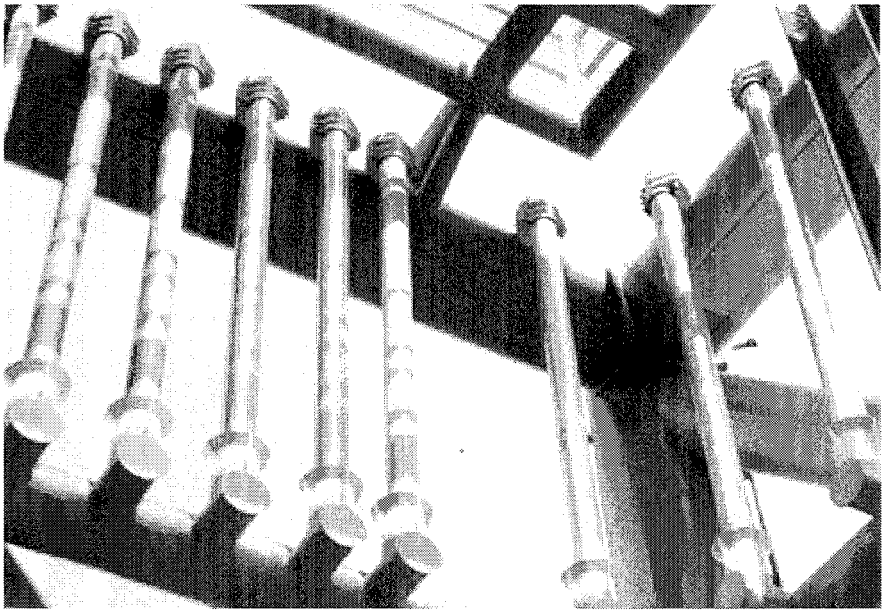


図 4.3.6 1983 年試験塔にセット完了した試験片

左から、A-10(キュプロニッケル)2 本、A-11(モネル)2 本、右から、A-13(チタン)3 本、

(注:左から 5 本目 A-12(溶融 Zn めっき＋塗装))

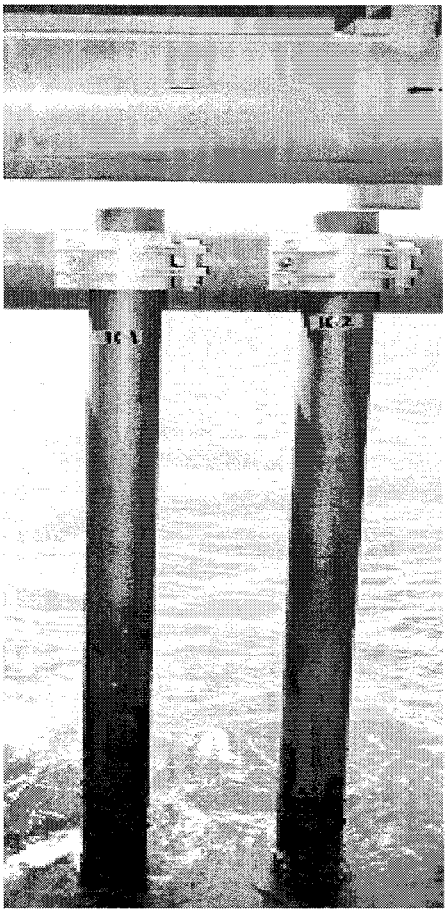
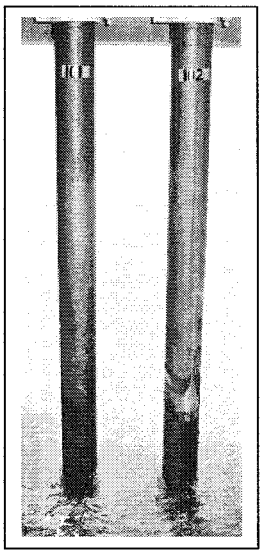
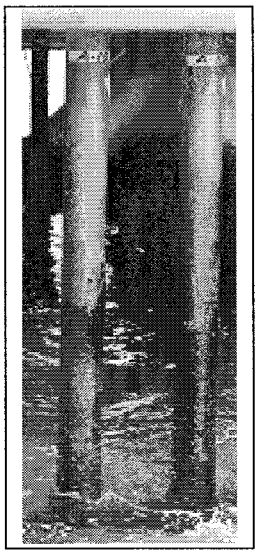
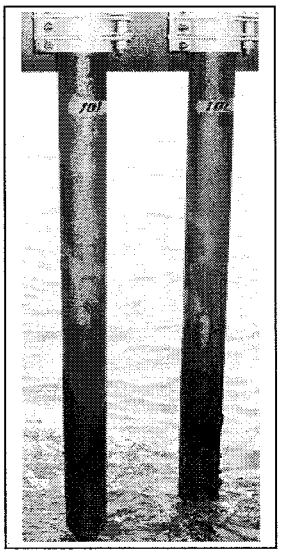
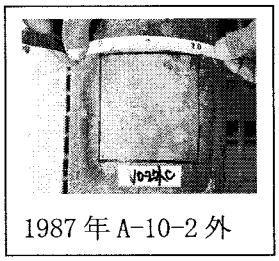


図 4.3.7　1987 年キュプロニッケル(A-10-1,2)

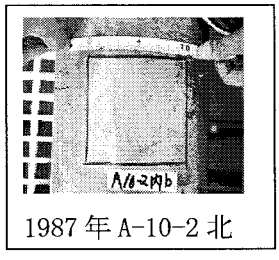








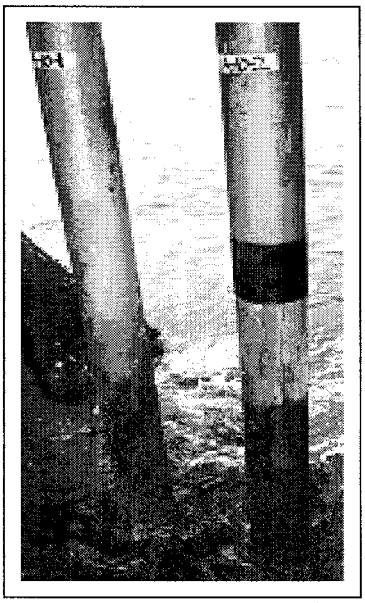
1987 年 A-10-2 外

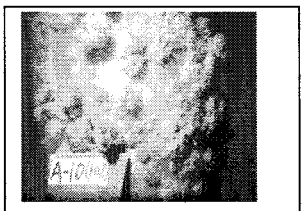


1987 年 A-10-2 北

1985 年　　1986 年　　1987 年

図 4.3.8　1985 年～1987 年キュプロニッケル(A-10-1,2)



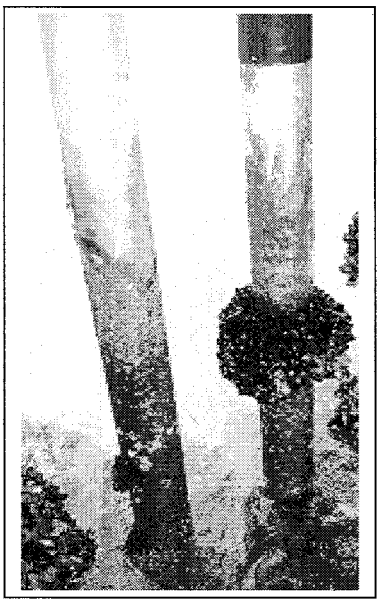


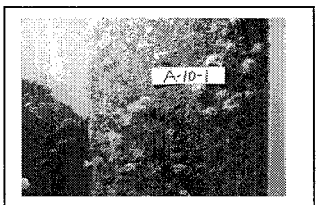
A-10-2 北生物除去前



A-10-2 北生物除去後

図 4.3.9　1988 年キュプロニッケル(A-10-1,2)

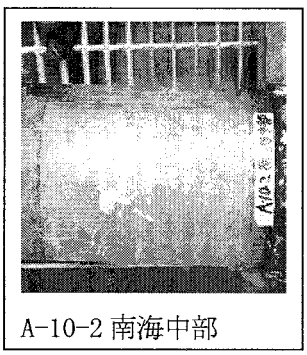




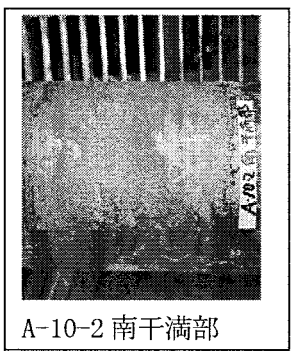
A-10-1 生物除去前



A-10-1 生物除去後



A-10-2 南海中部



A-10-2 南干満部

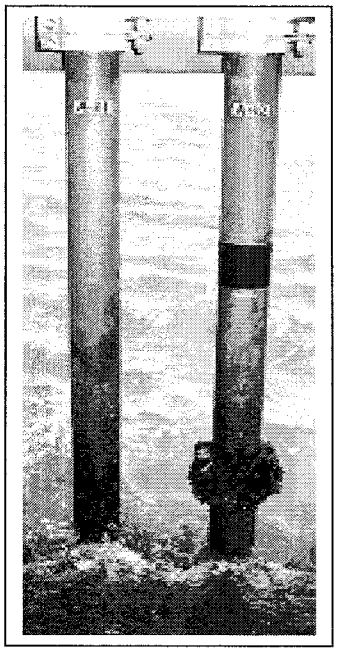


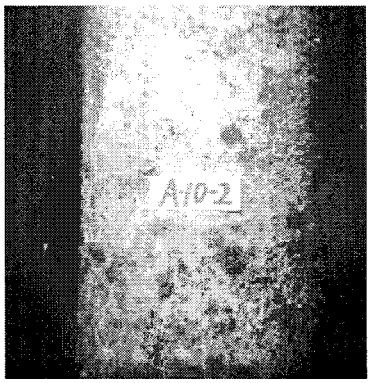
A-10-2 南生物剥離箇所



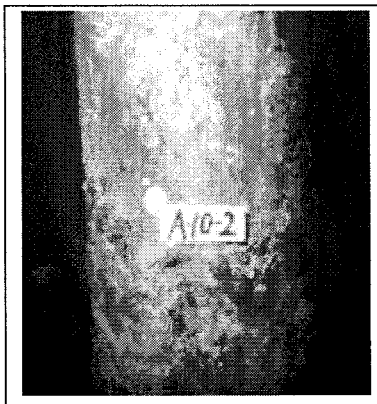
A-10-2 南生物剥離箇所

図 4.3.10　1989 年キュプロニッケル(A-10-1,2)



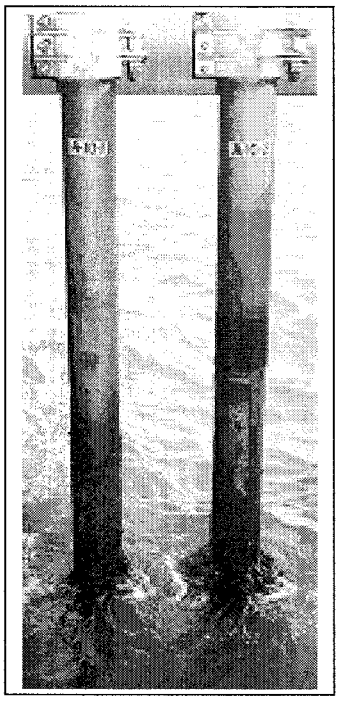


生物除去前



生物除去後

図 4.3.11　1990 年キュプロニッケル(A-101,2)





A-10-1 生物除去前



A-10-1 生物除去後

図 4.3.12　1991 年キュプロニッケル(A-10-1,2)

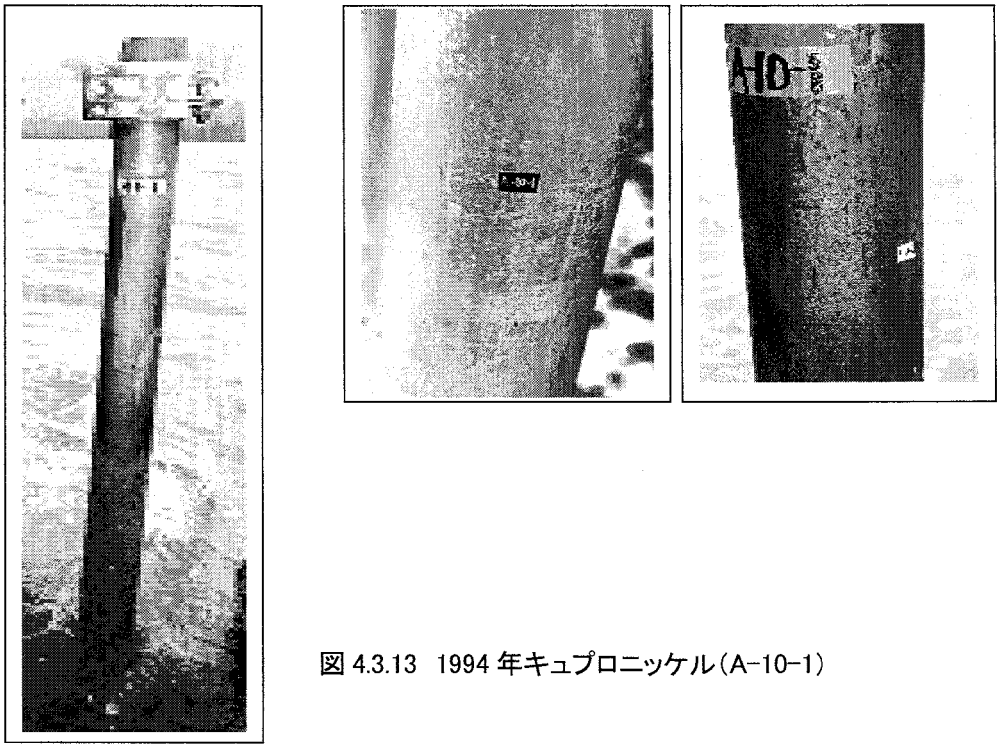


図 4.3.13　1994 年キュプロニッケル(A-10-1)

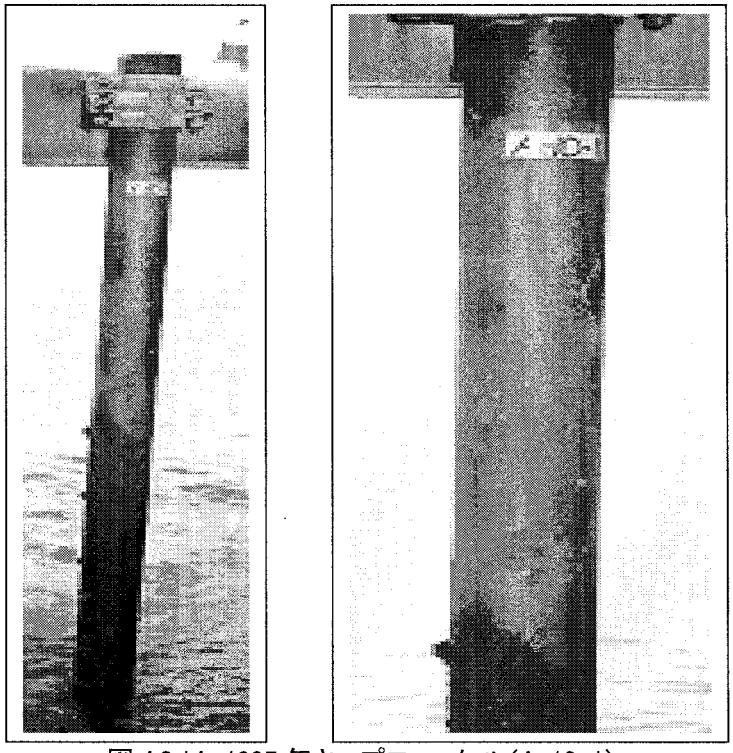


図 4.3.14　1995 年キュプロニッケル(A-10-1)

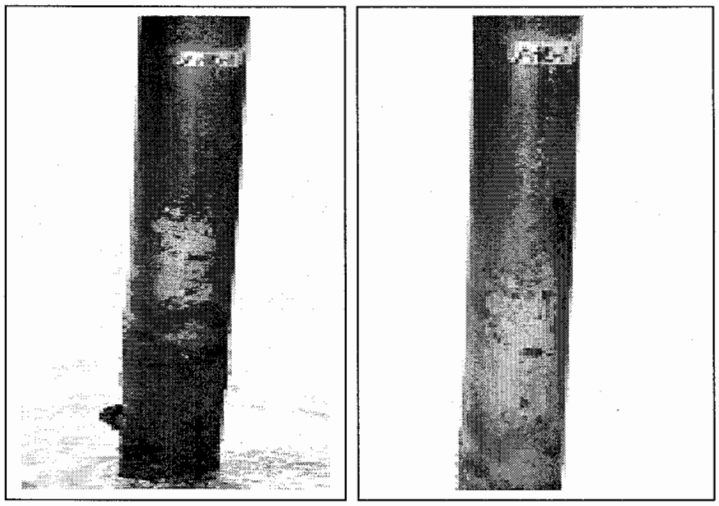


図 4.3.15　1996 年キュプロニッケル
(A-10-1)

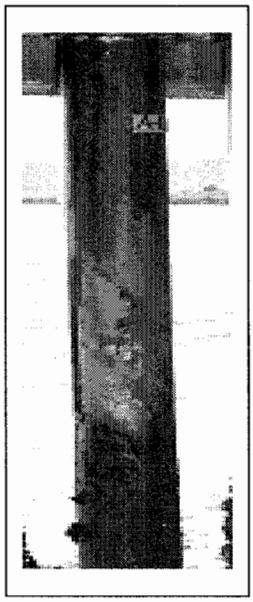
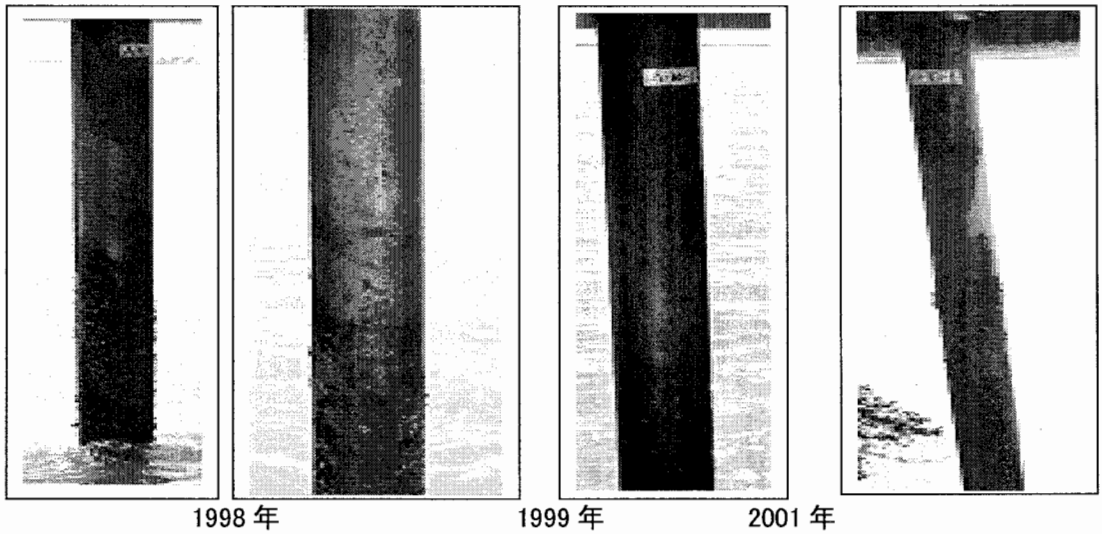
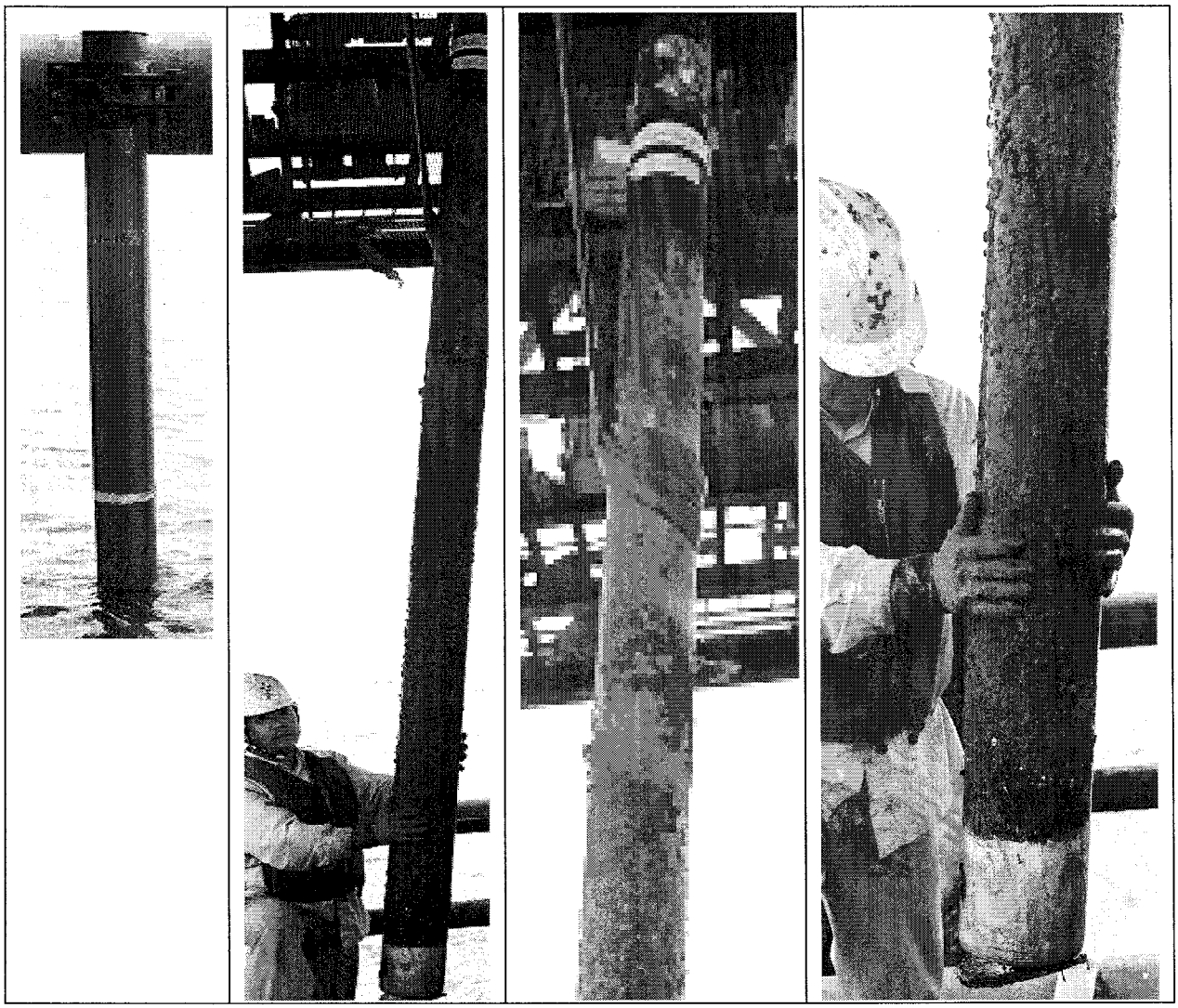


図 4.3.16　1997 年キュプロニッケル(A-10-1)



1998 年　　1999 年　　2001 年

図 4.3.17　1998～2001 年キュプロニッケル(A-10-1)



全景

図 4.3.18　2003 年キュプロニッケル(A-10-1)

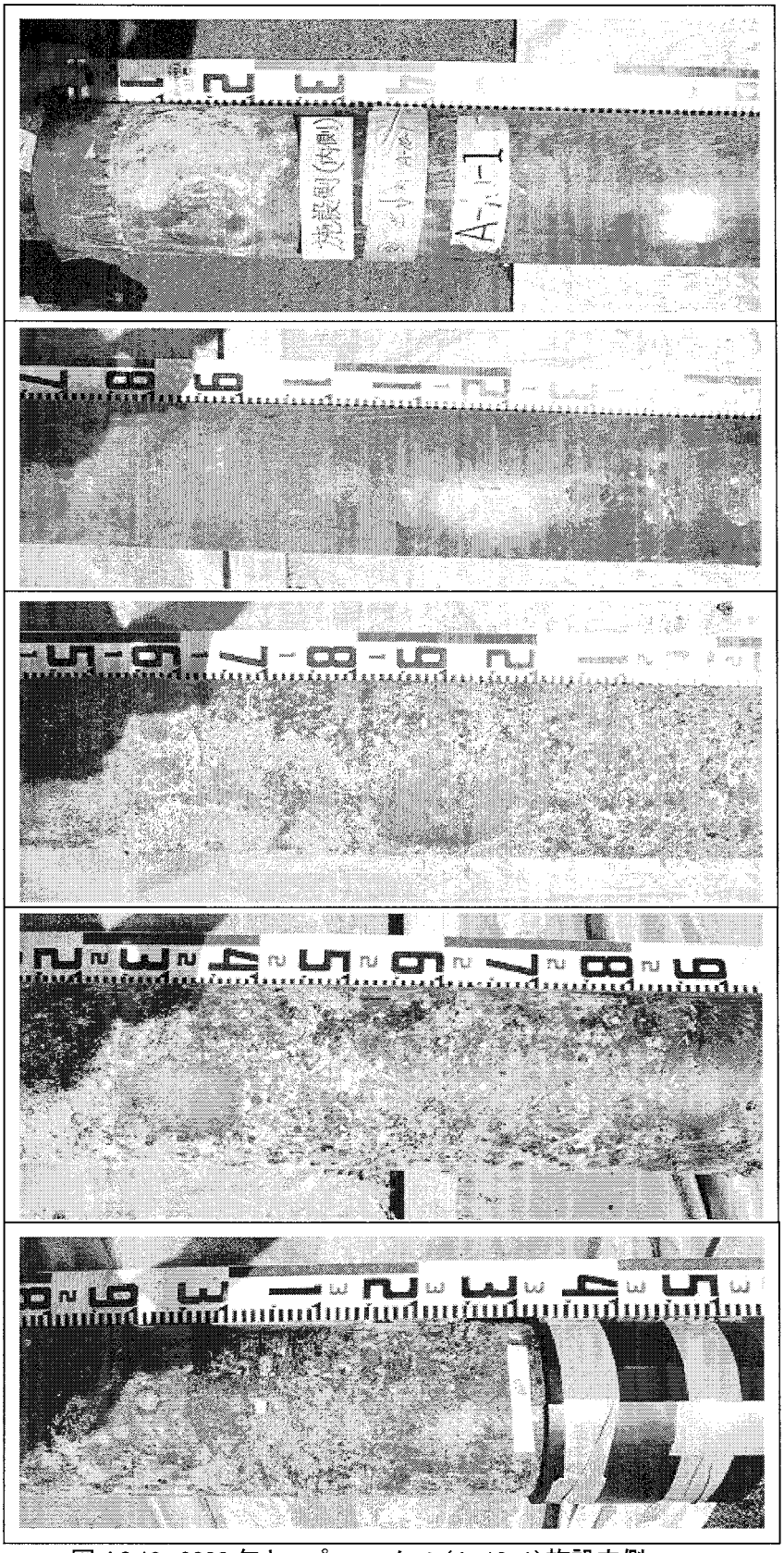


図 4.3.19　2003 年キュプロニッケル(A-10-1)施設内側

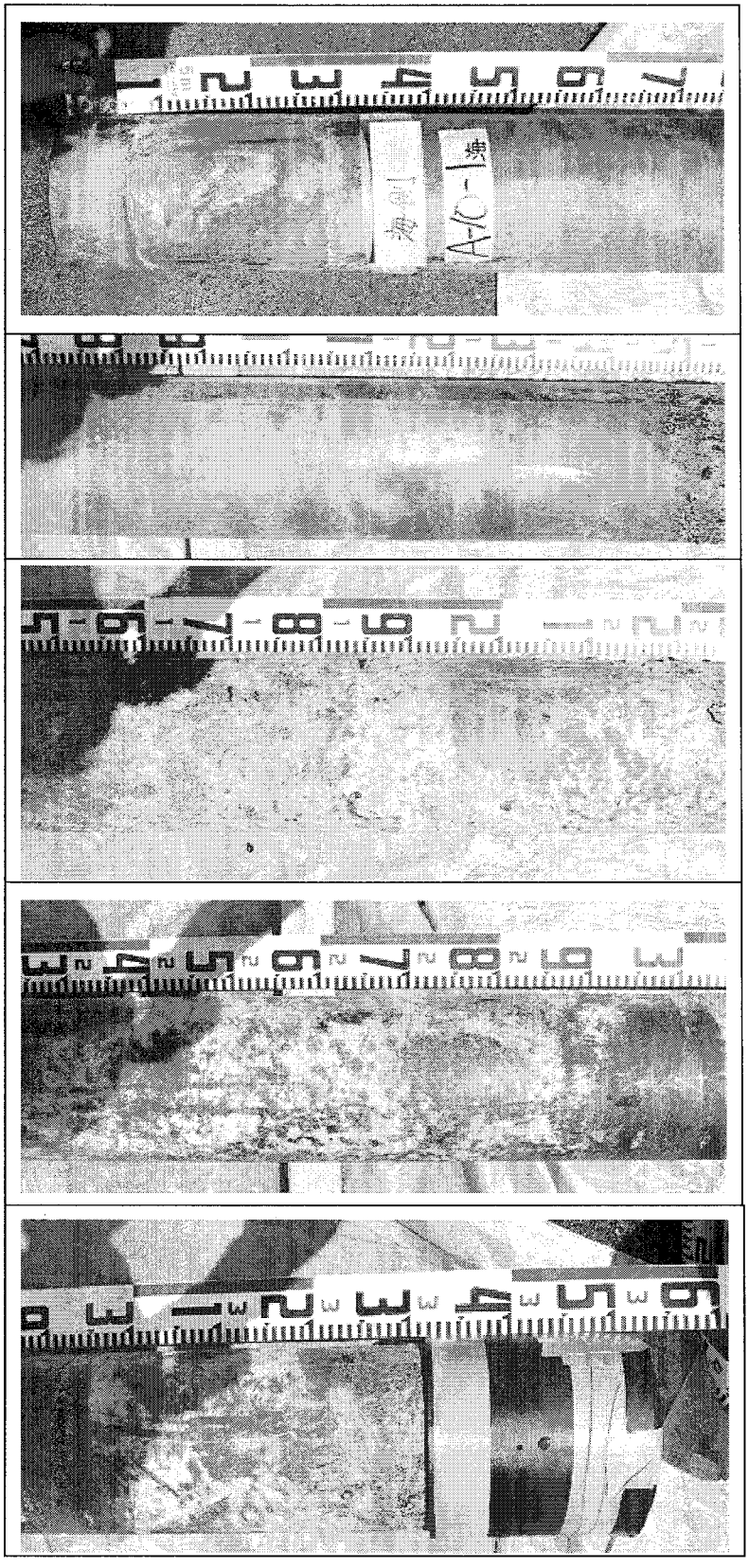


図 4.3.20　2003 年キュプロニッケル（A-10-1）施設海側

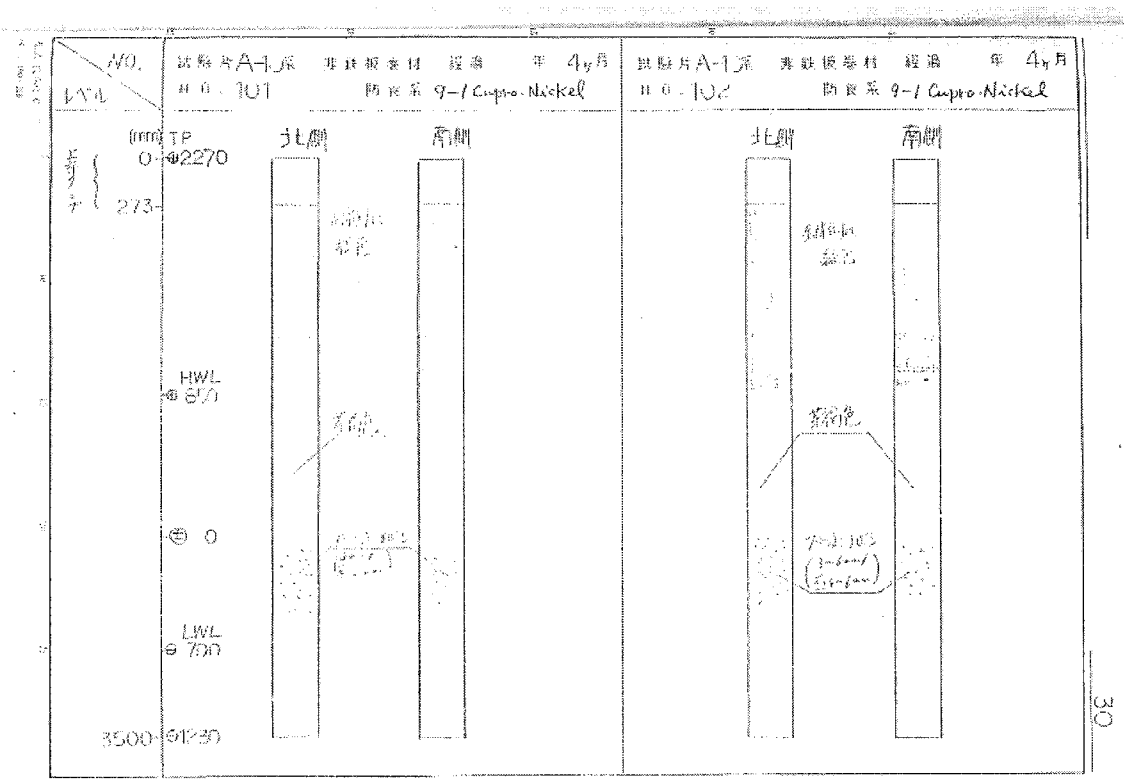


図 4.3.21　1984 年キュプロニッケル(A-10-1,2)

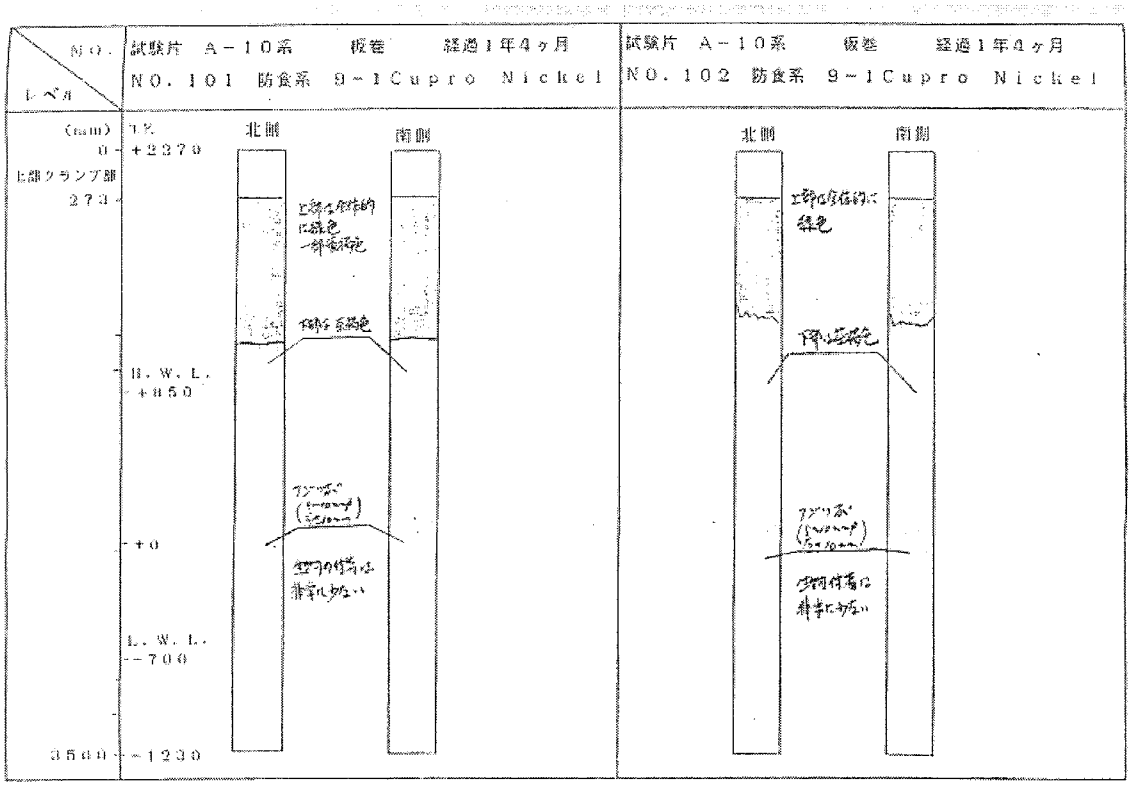


図 4.3.22　1985 年キュプロニッケル(A-10-1,2)

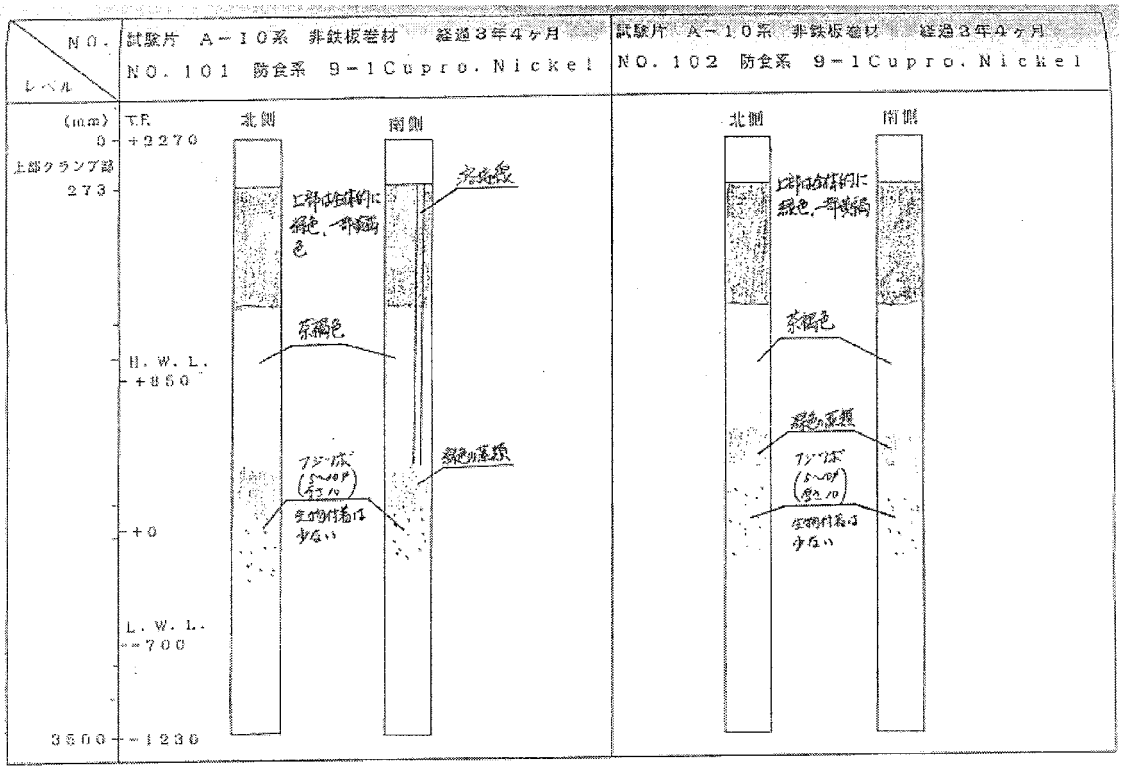


図 4.3.23 1987 年キュプロニッケル(A-10-1,2)

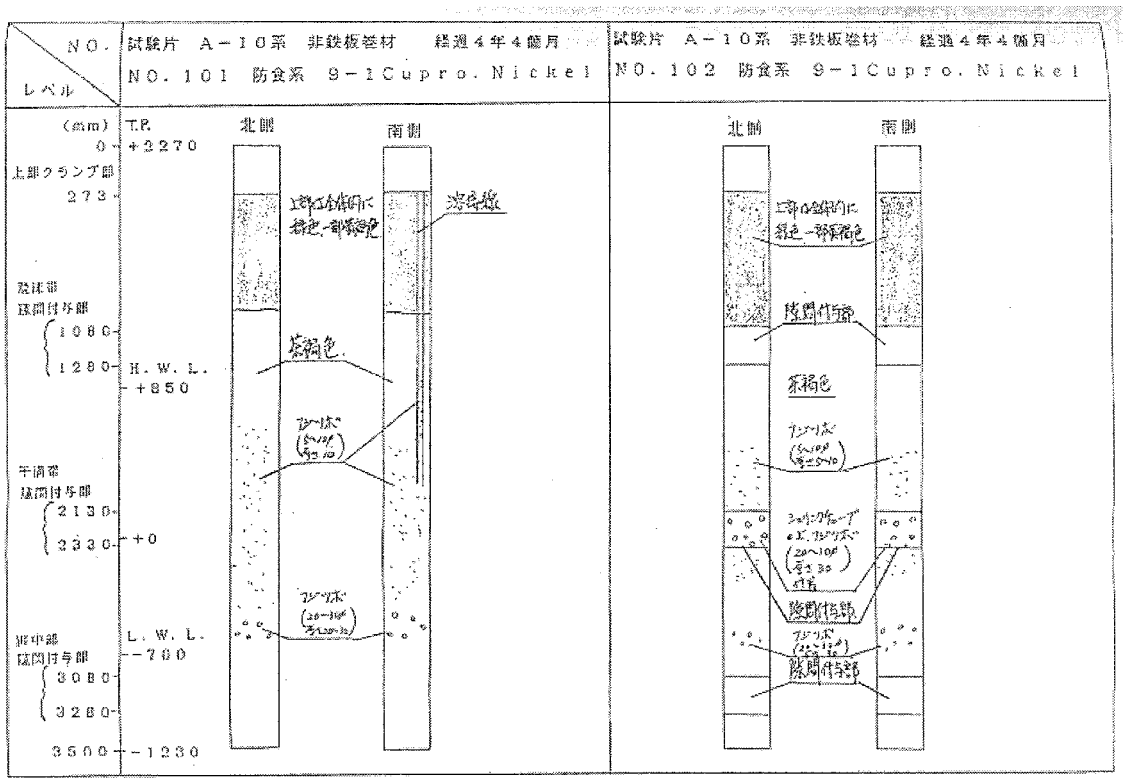


図 4.3.24 1988 年キュプロニッケル(A-10-1,2)

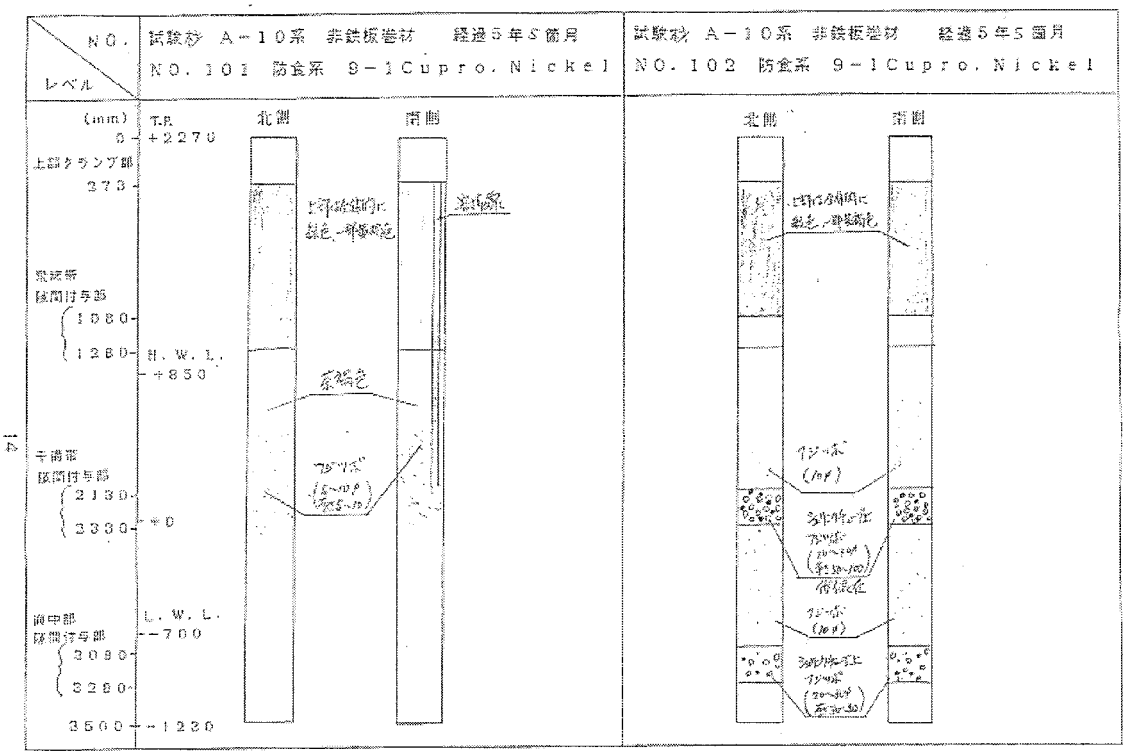


図 4.3.25 1989 年キュプロニッケル(A-10-1,2)

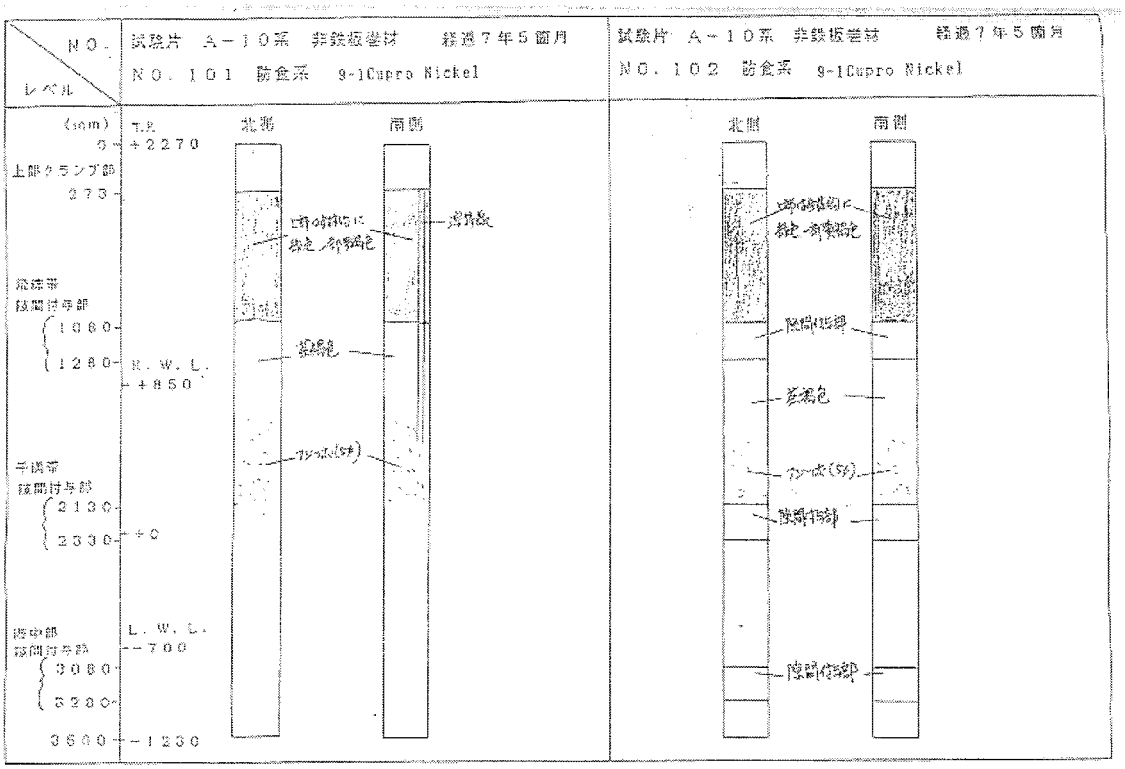


図 4.3.26 1991 年キュプロニッケル(A-10-1,2)

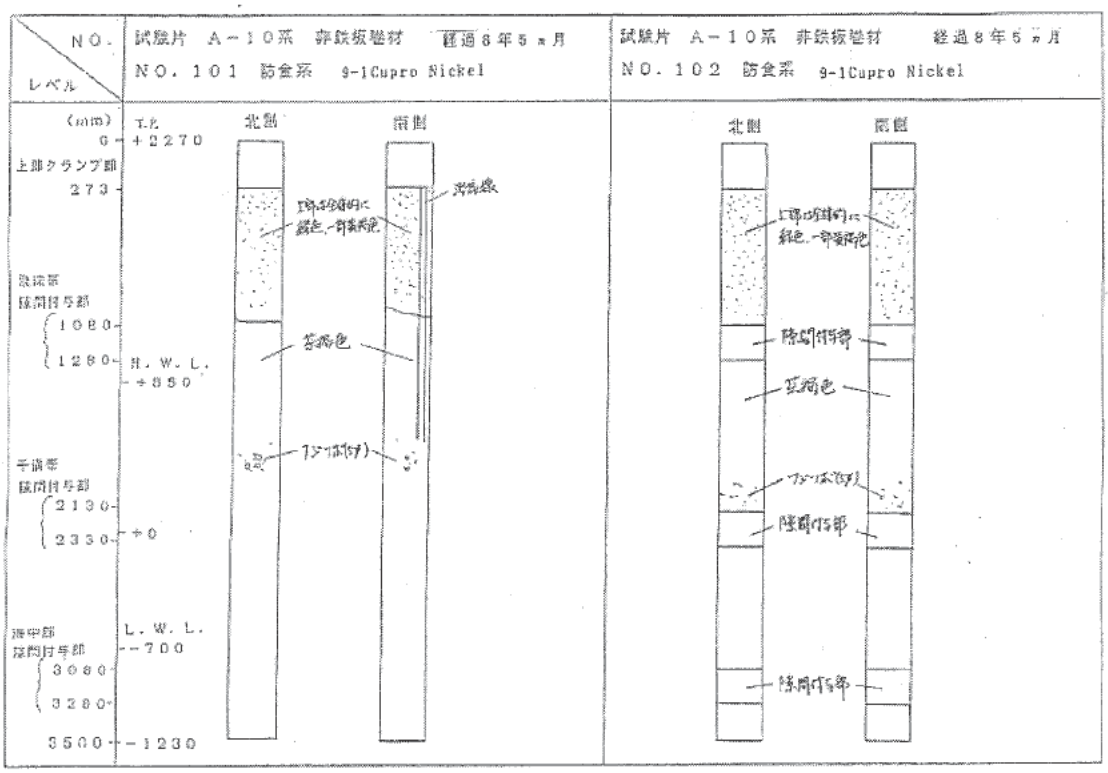


図 4.3.27 1992 年キュプロニッケル(A-10-1,2)

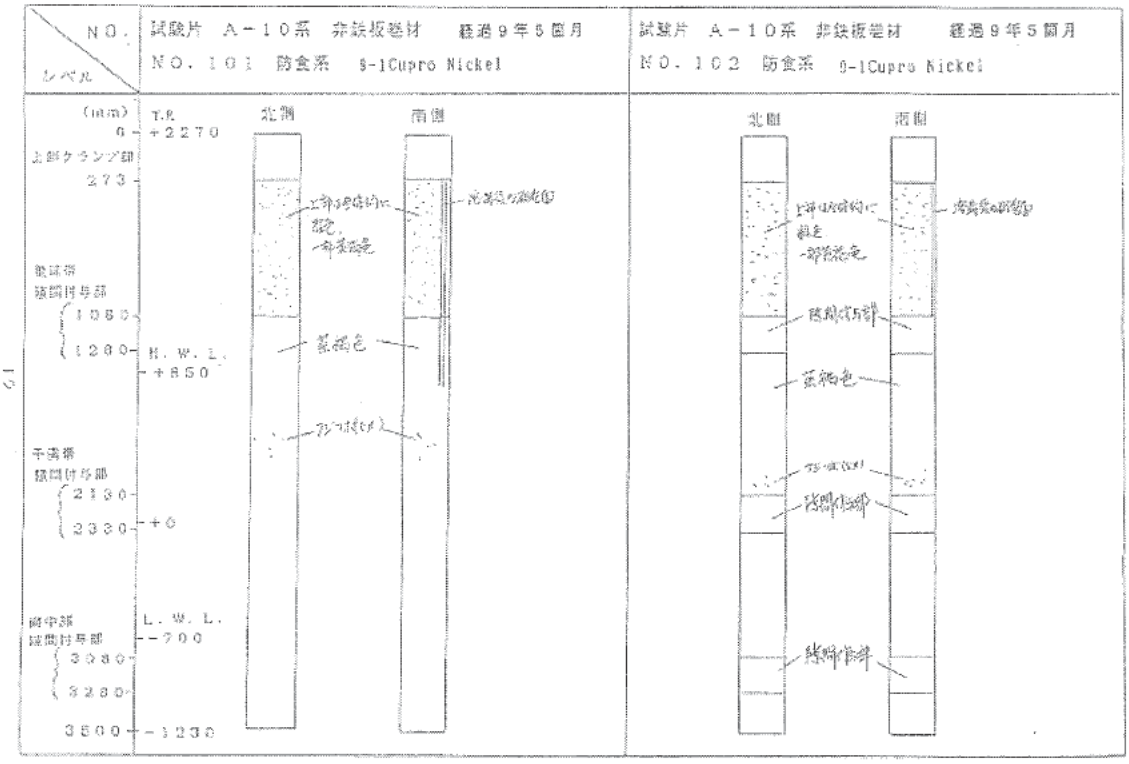


図 4.3.28 1993 年キュプロニッケル(A-10-1,2)

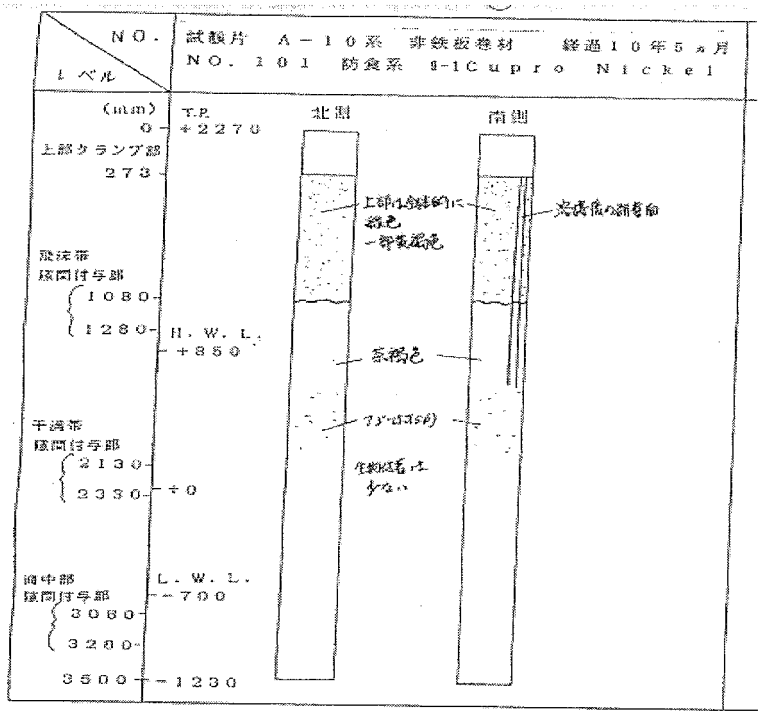


図 4.3.29 1994 年キュプロニッケル(A-10-1,2)

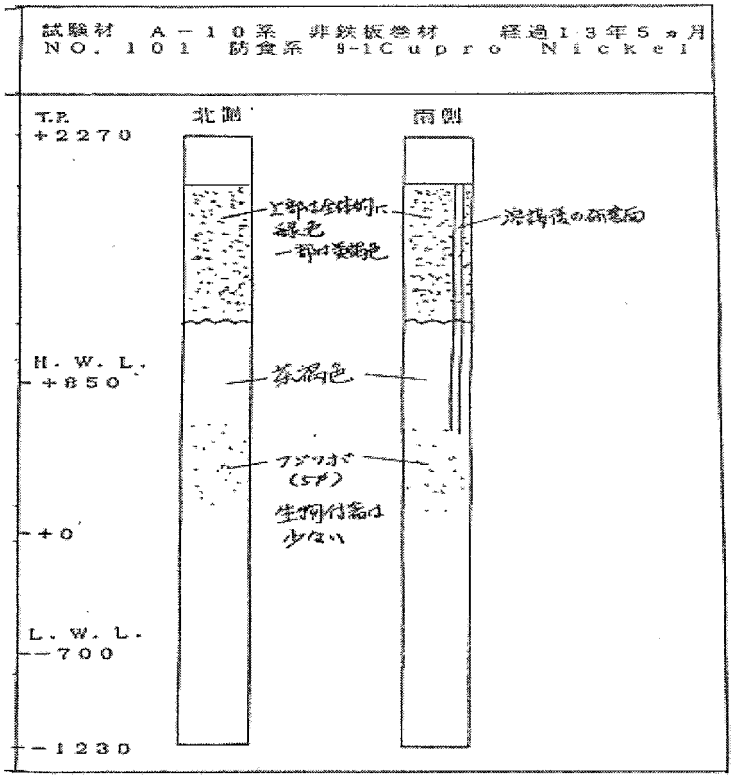
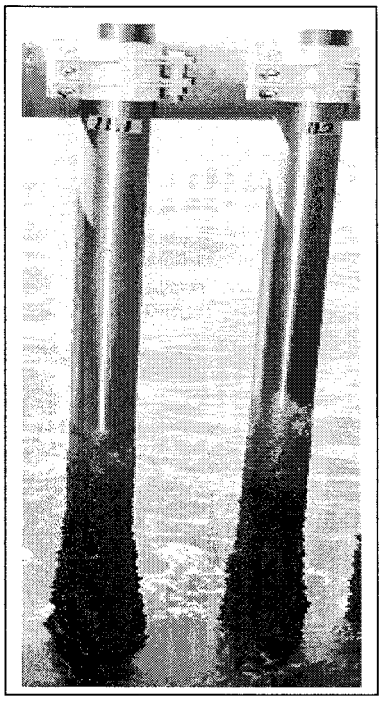
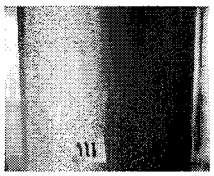


図 4.3.30 1997 年キュプロニッケル(A-10-1)施設海側

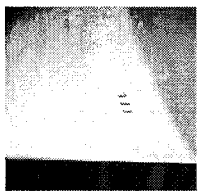




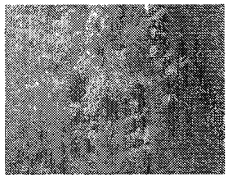
A-11-1 健全部



A-11-1 水中

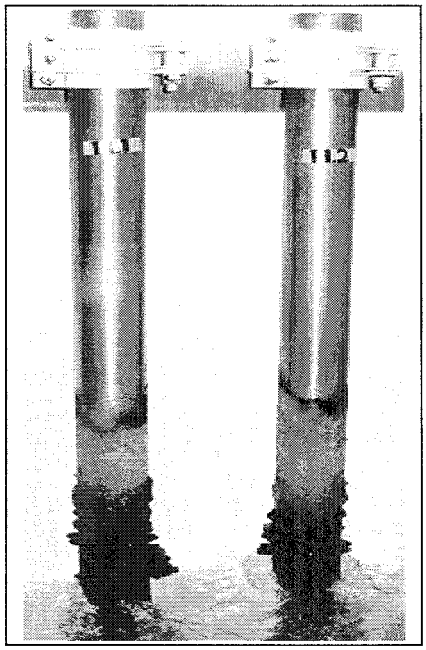


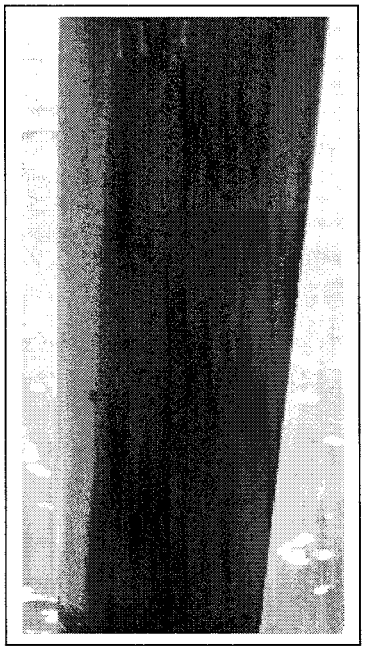
A-11-1 緑錆部

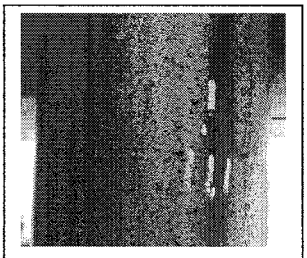


A-11-1 水中

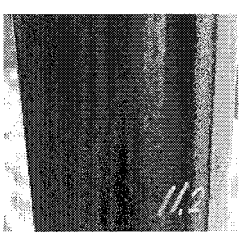
図 4.3.31　1984 年モネル(A-11-1,2)



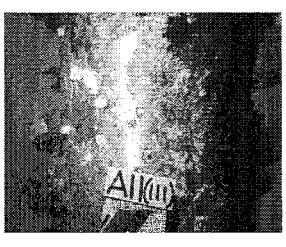




拡大写真

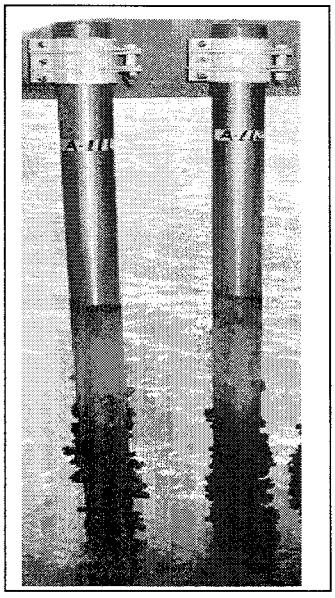


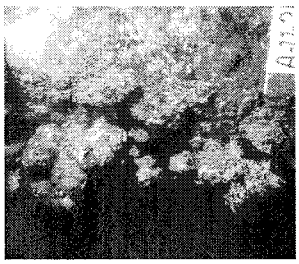
拡大写真



拡大写真

図 4.3.32　1985 年モネル(A-11-1,2)



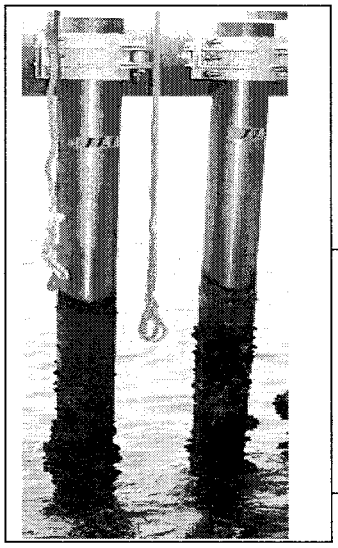


生物除去前



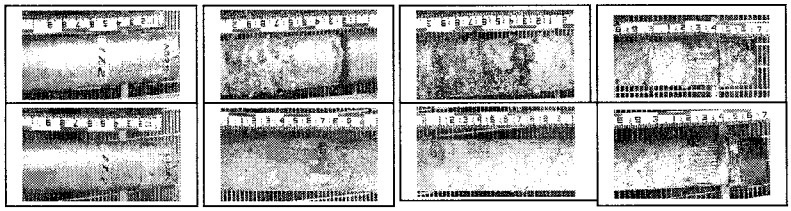
生物所除去後

図 4.3.33　1986 年モネル(A-11-1,2)



南側

北側

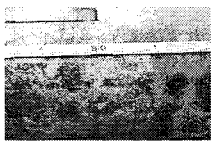




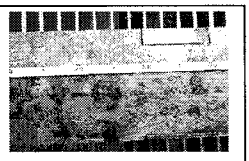
生物除去前



生物除去後

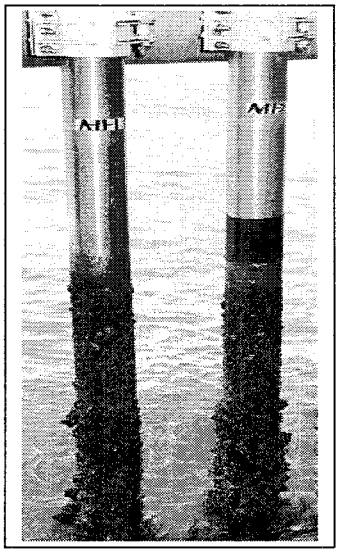


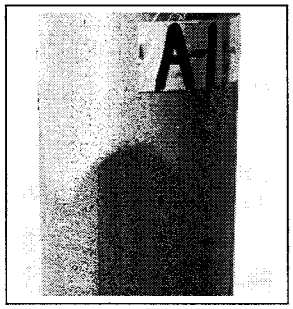
A-11-2 溶接部付近の鉄錆



同左溶接部付近の鉄錆

図 4.3.34　1987 年モネル(A-11-1,2)







生物除去前



生物除去後

図 4.3.35　1988 年モネル(A-11-1,2)

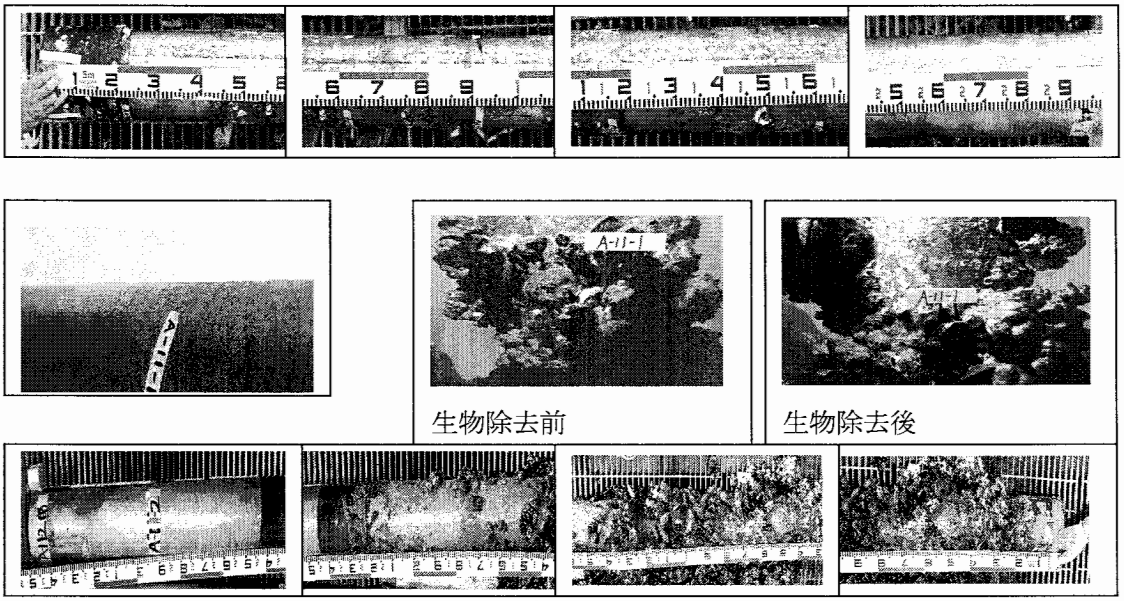


図 4.3.36　1989 年モネル(A-11-1,2)

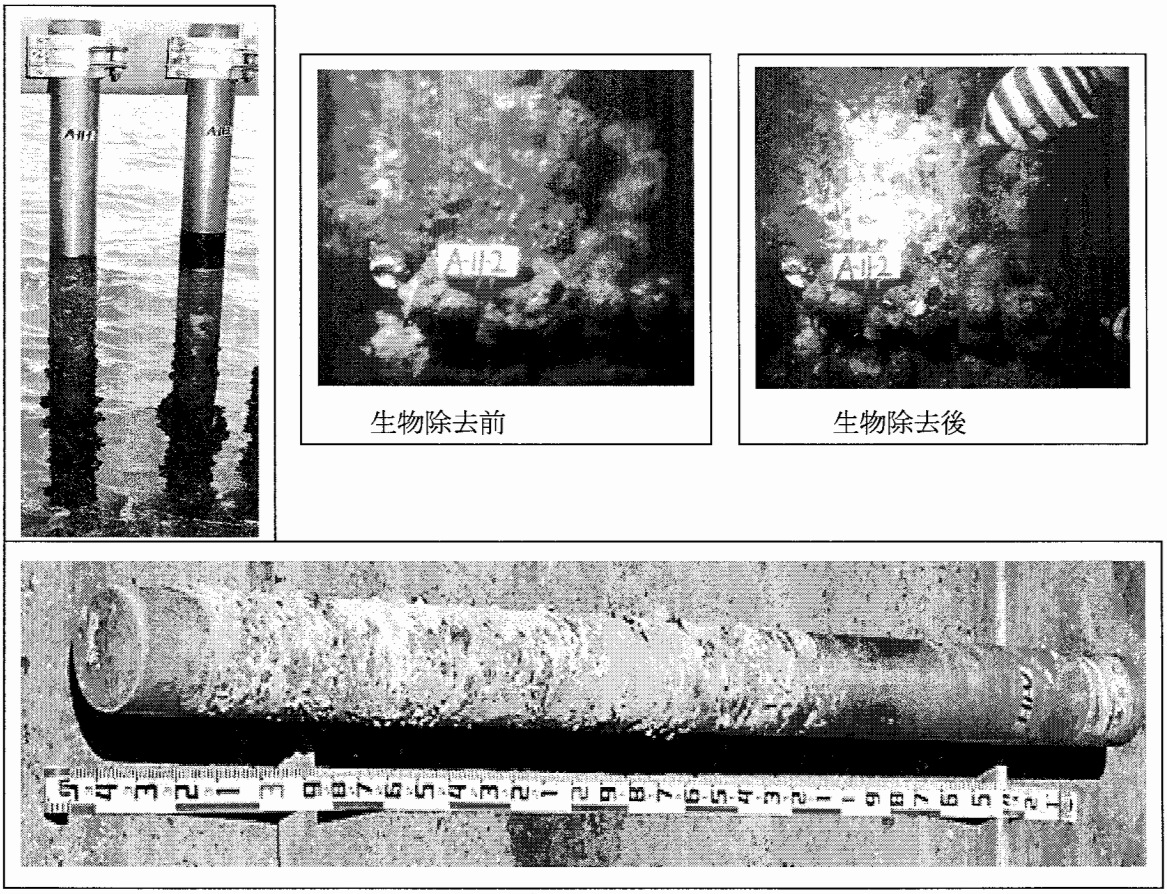


図 4.3.37　1990 年(1)モネル(A-11-1)

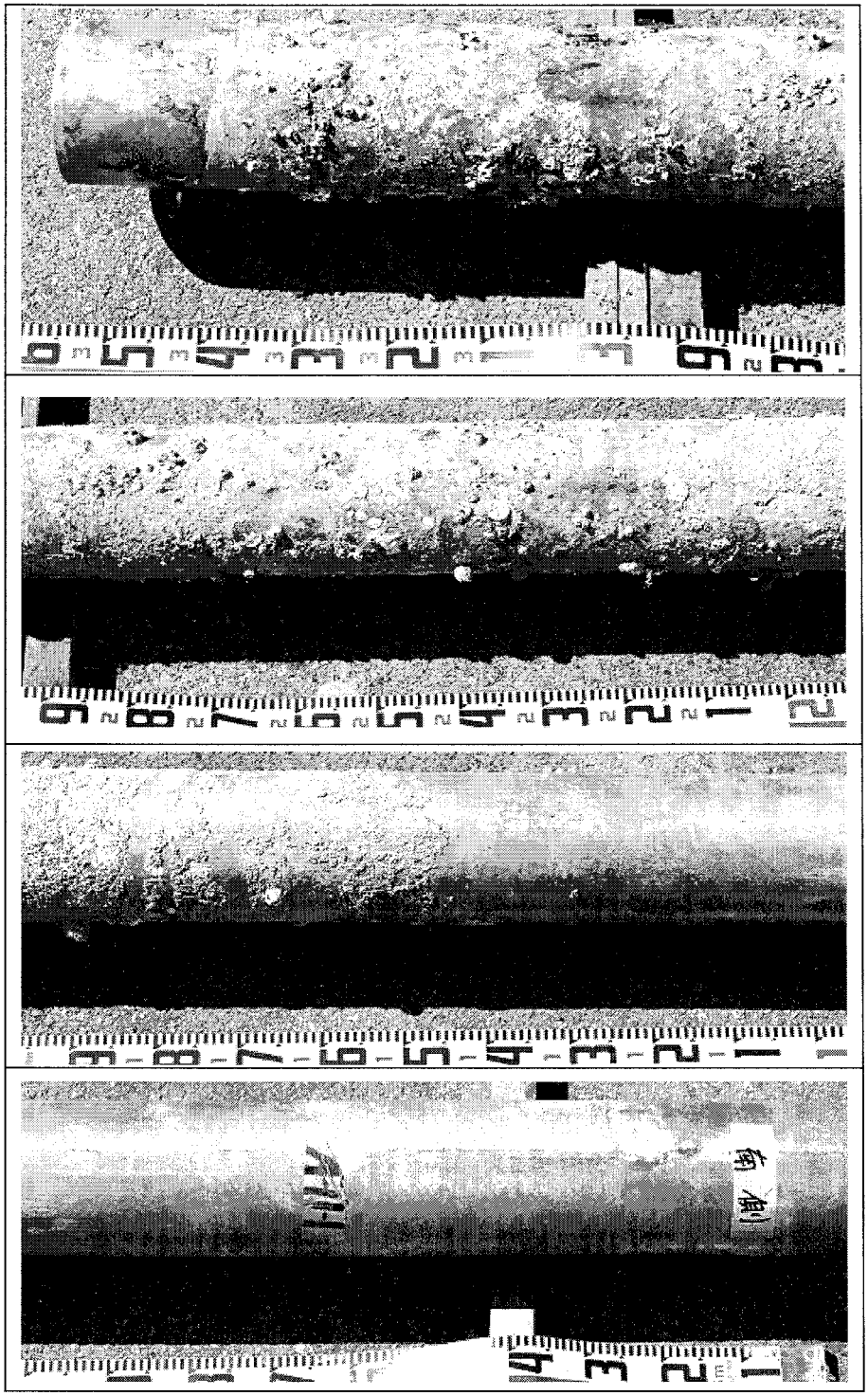


図 4.3.38　1990 年(2)モネル(A-11-1)南側

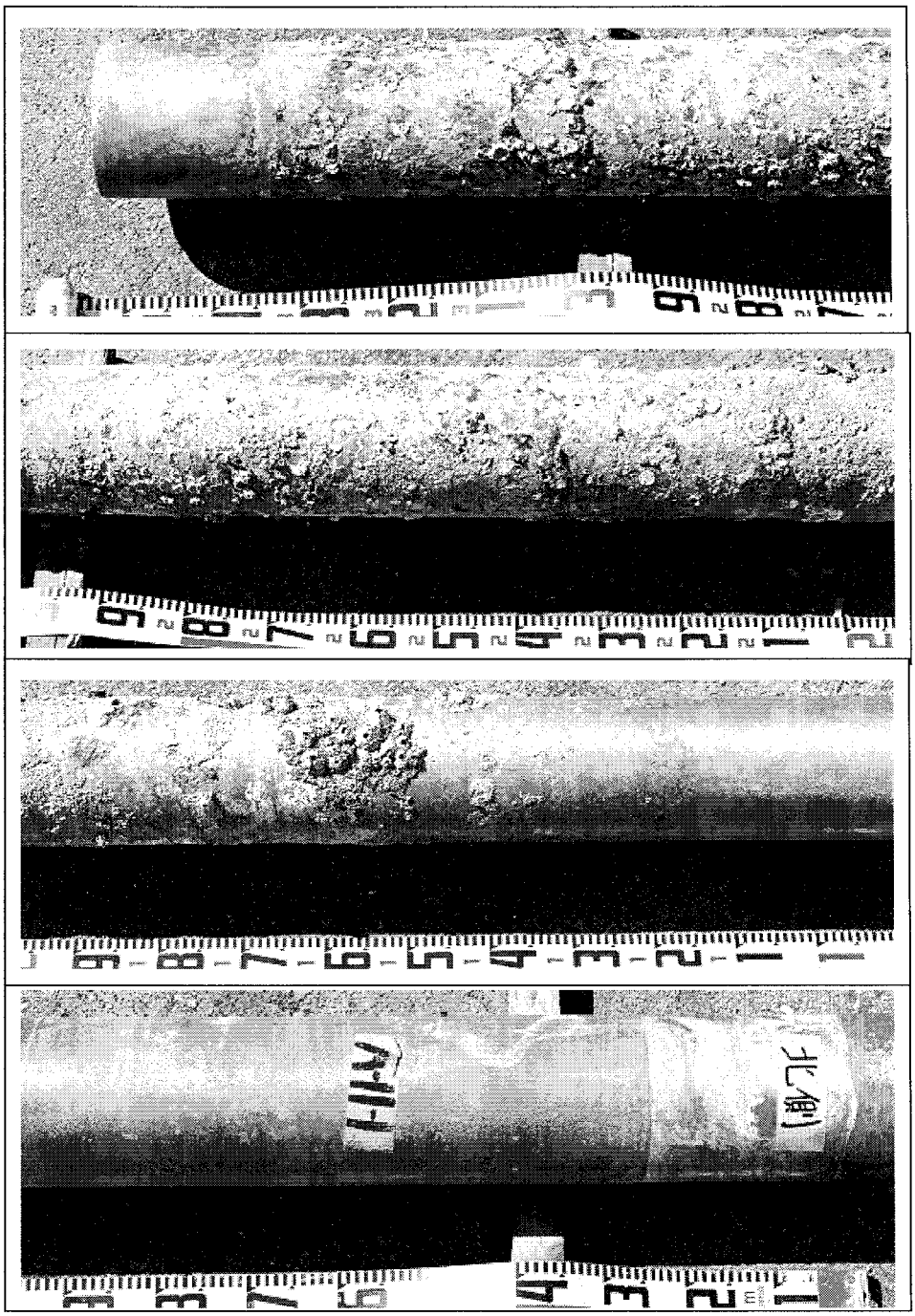
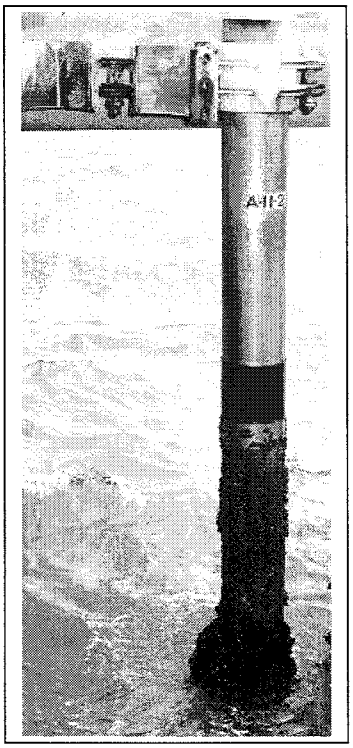


図 4.3.39　1990 年(3)モネル(A-11-1)北側





生物除去前



生物除去後

図 4.3.40　1991 年(1)モネル(A-11-2)

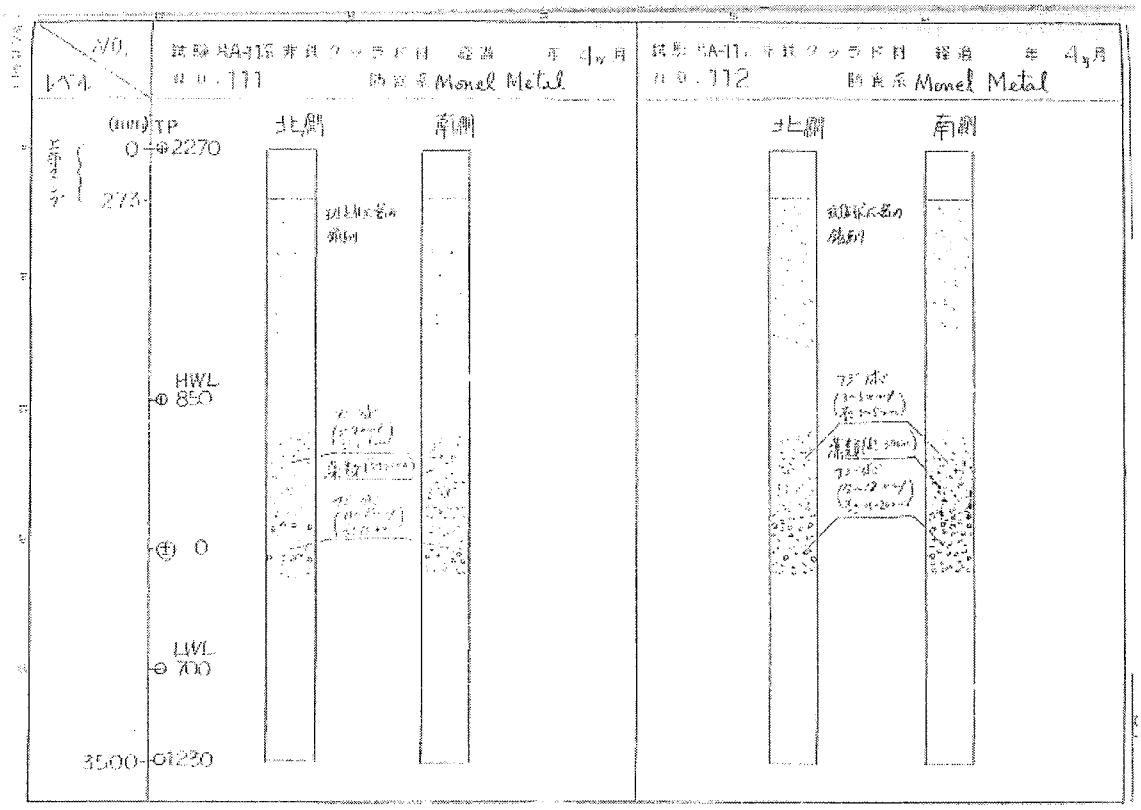


図 2.3.41　1984 年モネル(A-11-1,2)

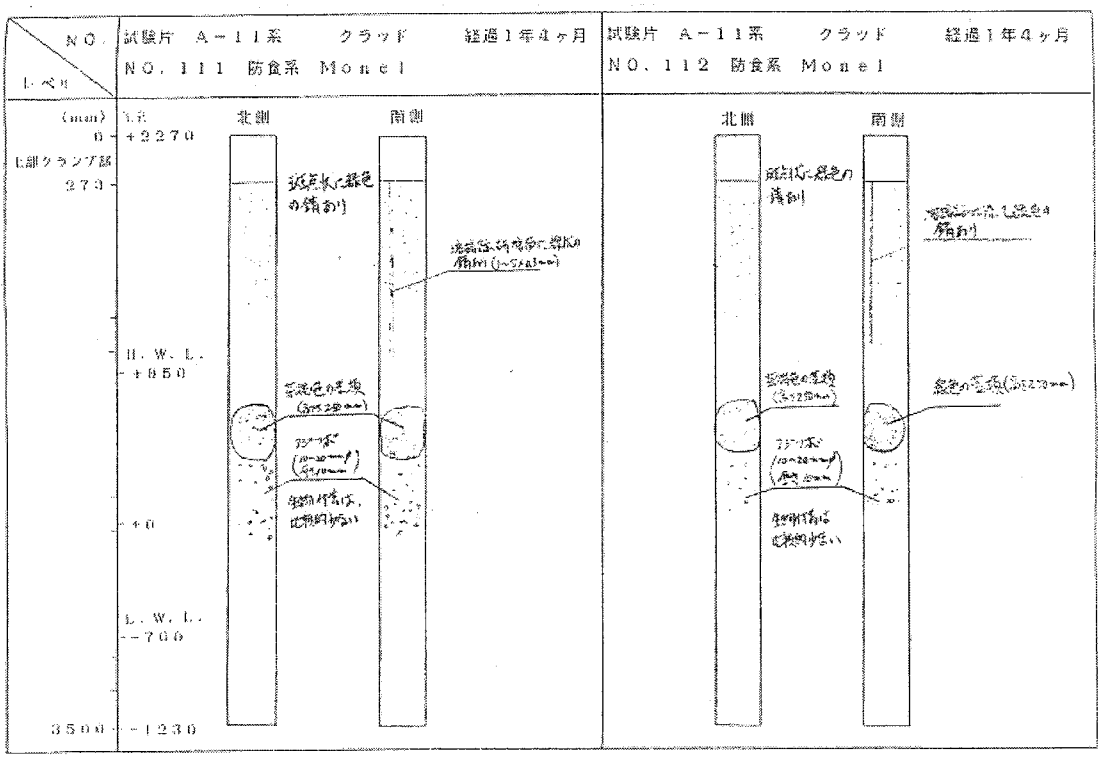


図 4.3.42 1985 年モネル(A-11-1,2)

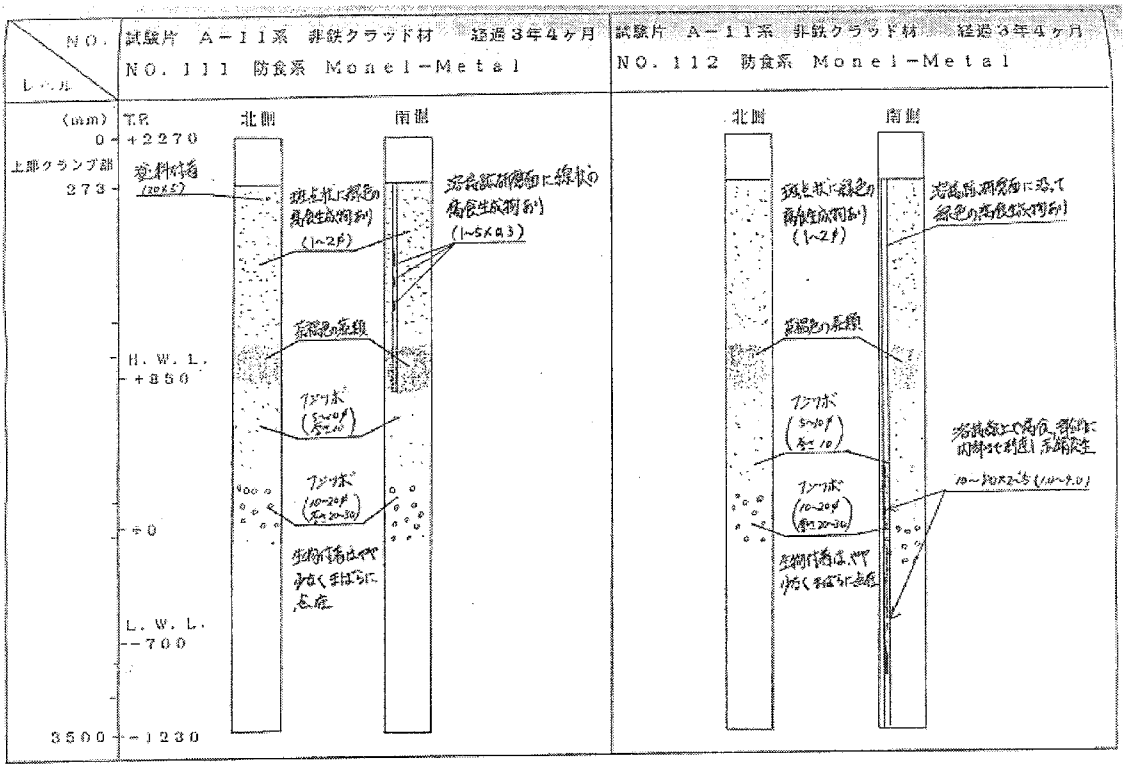


図 4.3.43 1987 年モネル(A-11-1,2)

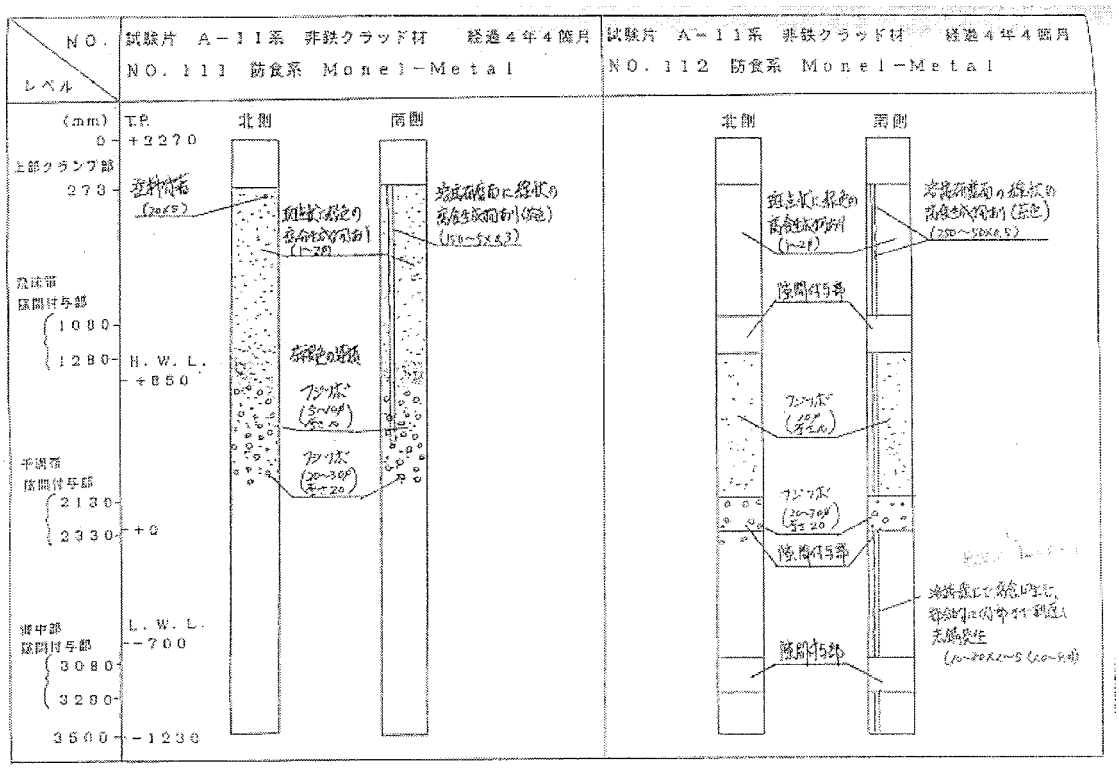


図 4.3.44 1988 年モネル(A-11-1,2)

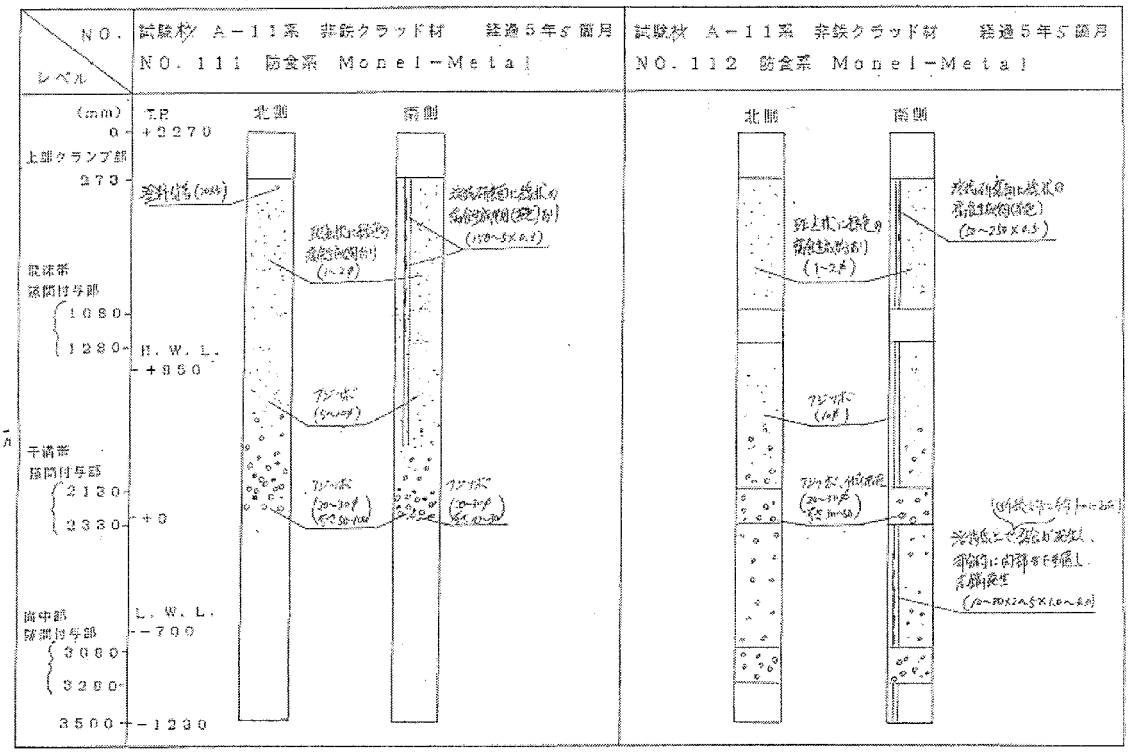


図 4.3.45 1989 年モネル(A-11-1,2)

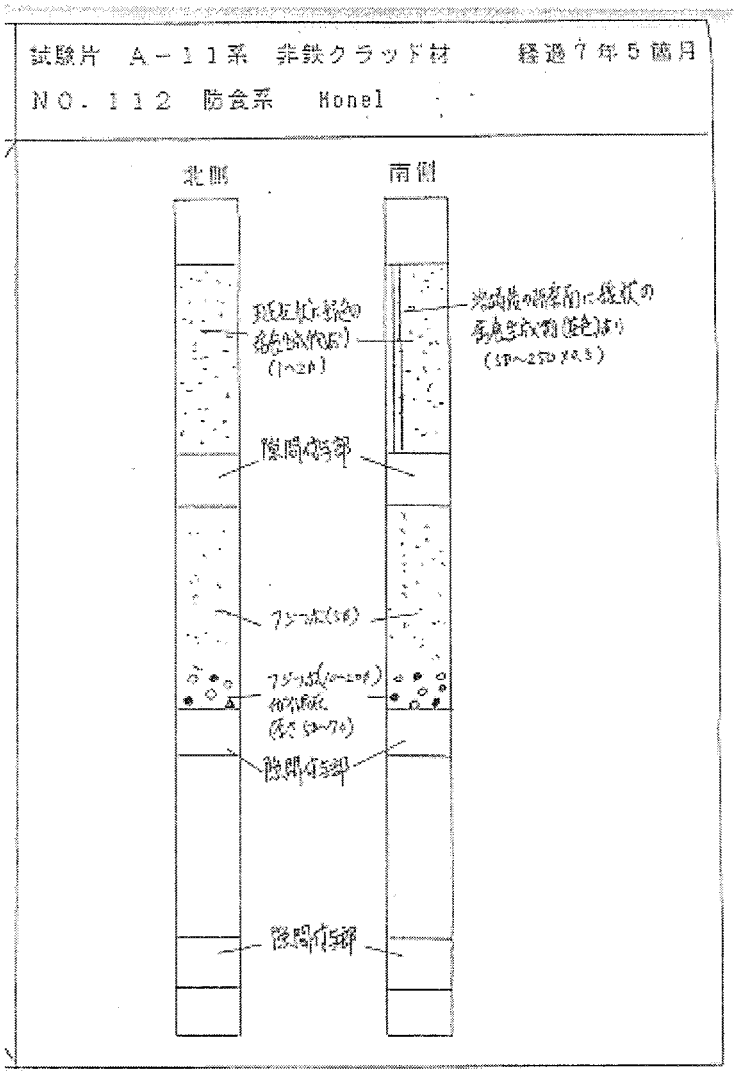


図 4.3.46　1991 年モネル(A-11-1,2)

表 4.3.6　チタン試験期間および純チタンと純チタン及びチタン合金間での腐食研究内容

試験片	試験開始	試験終了	試験片内容
(A-13-A)	1983 年	1993 年	鋼管全面を純チタンで被服
(A-13-B)	1983 年	現在継続中	鋼管全面を純チタンで被服
			Ti-6Al-4V 短冊片をスポット溶接
			Ti-3Al-2.5V 短冊片をスポット溶接
			Ti-0.5Pd 短冊片をスポット溶接
(A-13-C)	1983 年	現在継続中	鋼管全面を純チタンで被服
			純チタン ASTMG4 短冊片をスポット溶接
			純チタン 4 種短冊片をスポット溶接
			純チタン 3 種短冊片をスポット溶接
			純チタン 2 種短冊片をスポット溶接
			純チタン 1 種短冊片をスポット溶接

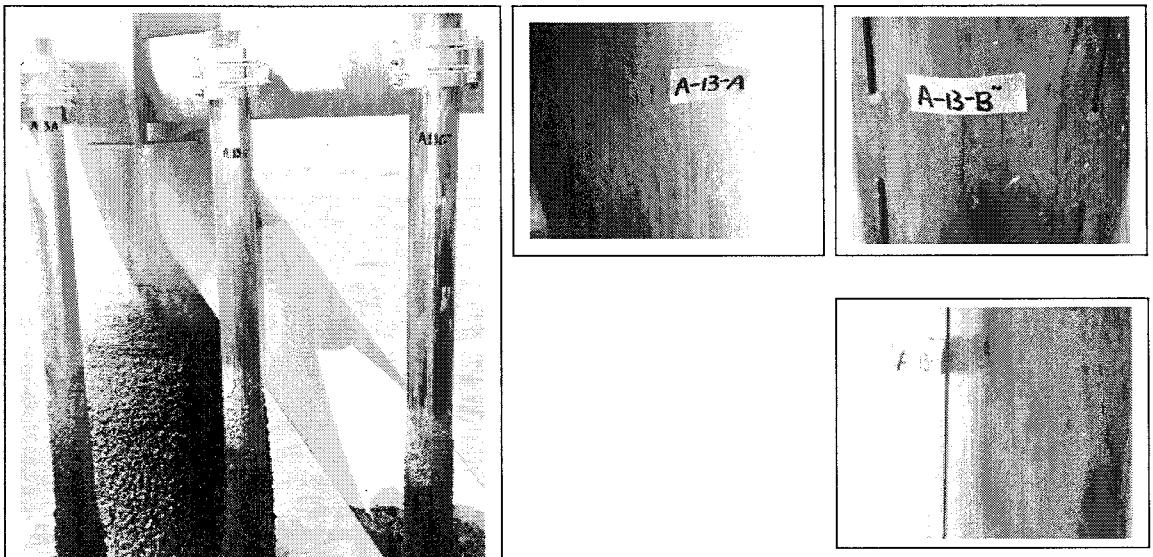


図 4.3.47　1984 年チタン（A-13-A,B,C）

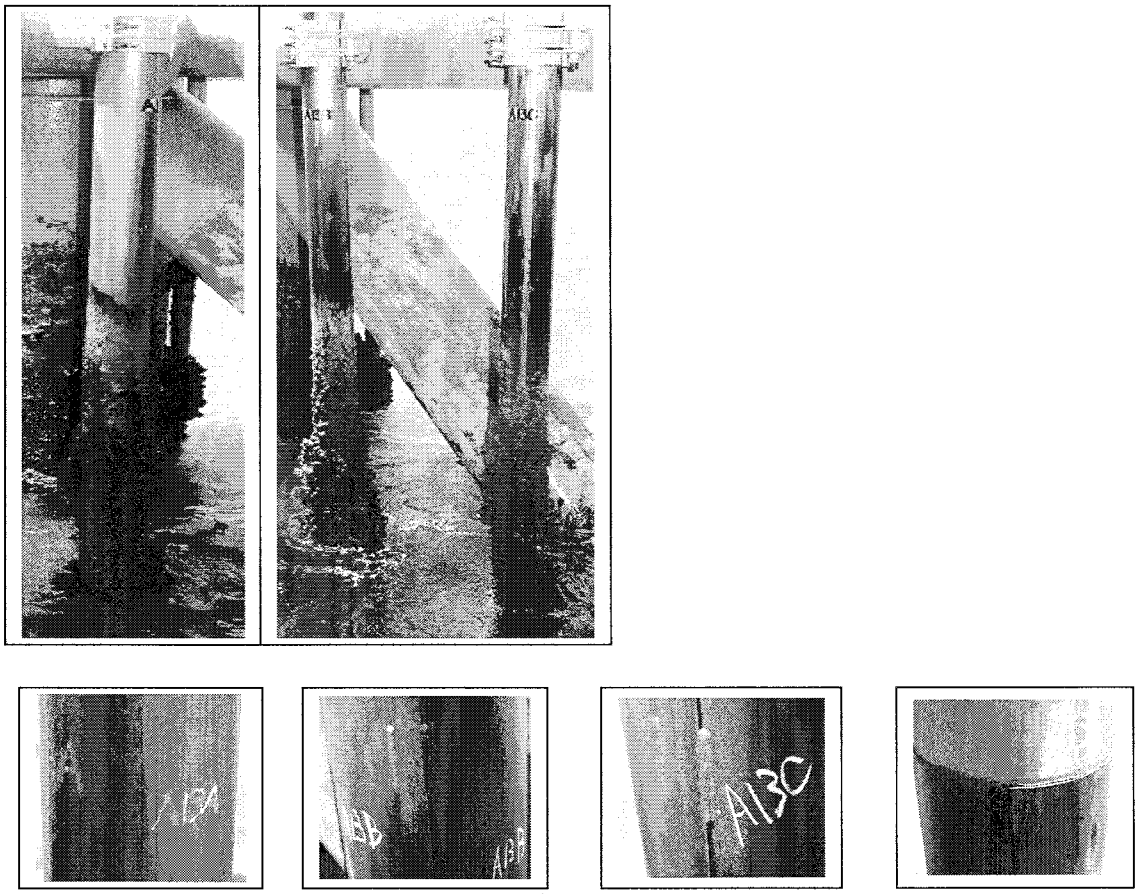
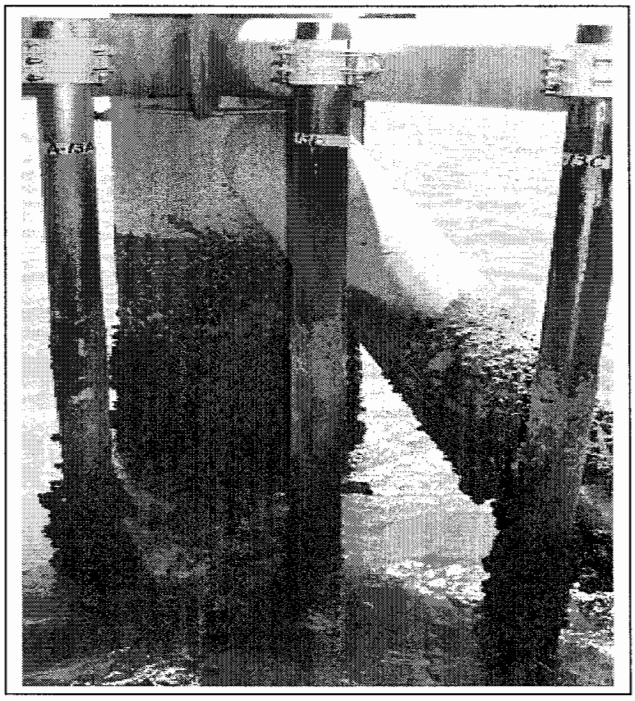
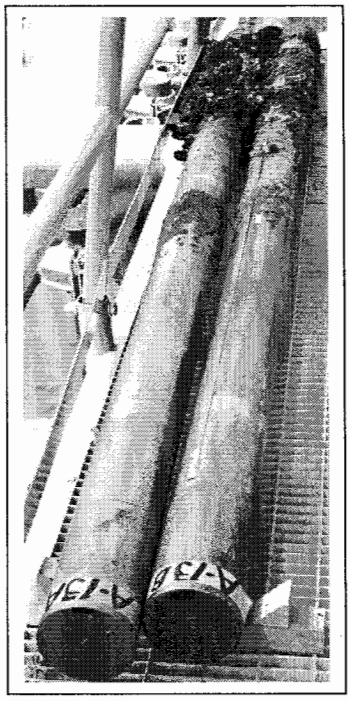


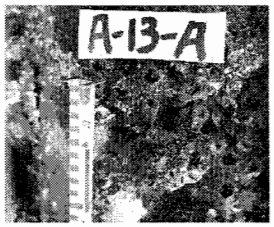
図 4.3.48　1985 年チタン（A-13-A,B,C）







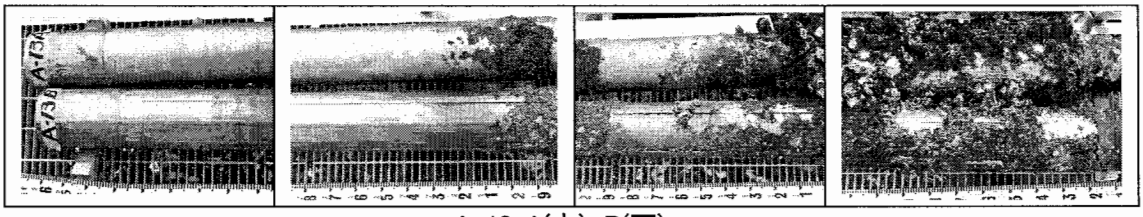
生物除去前



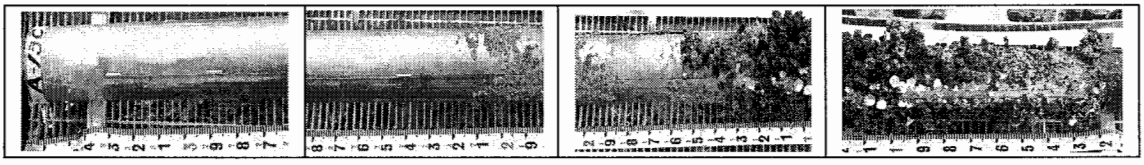
生物除去後



A-13-C 溶接部

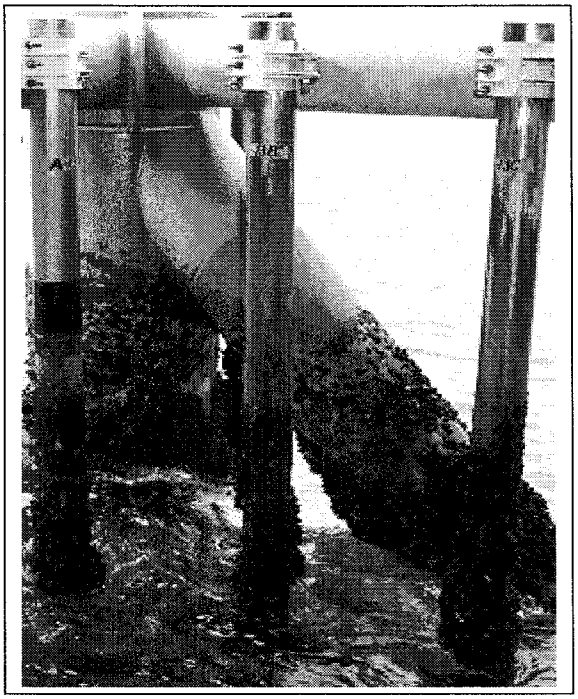


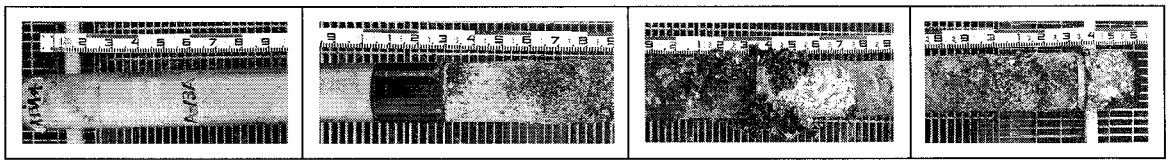
A-13-A(上)、B(下)

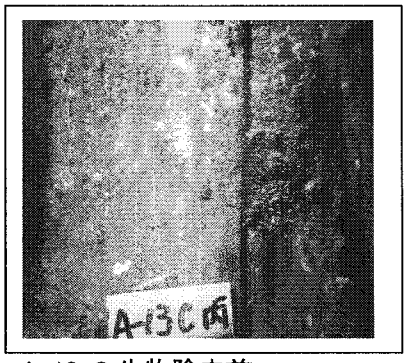


A-13-C

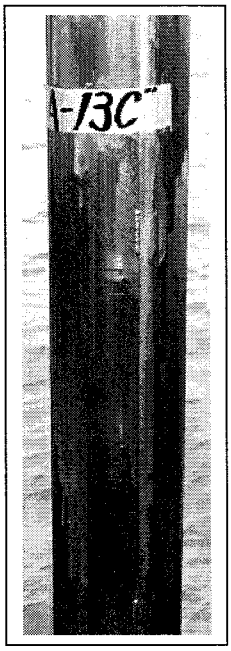
図 4.3.49　1986 年チタン（A-13-A,B,C）







A-13-C 生物除去前

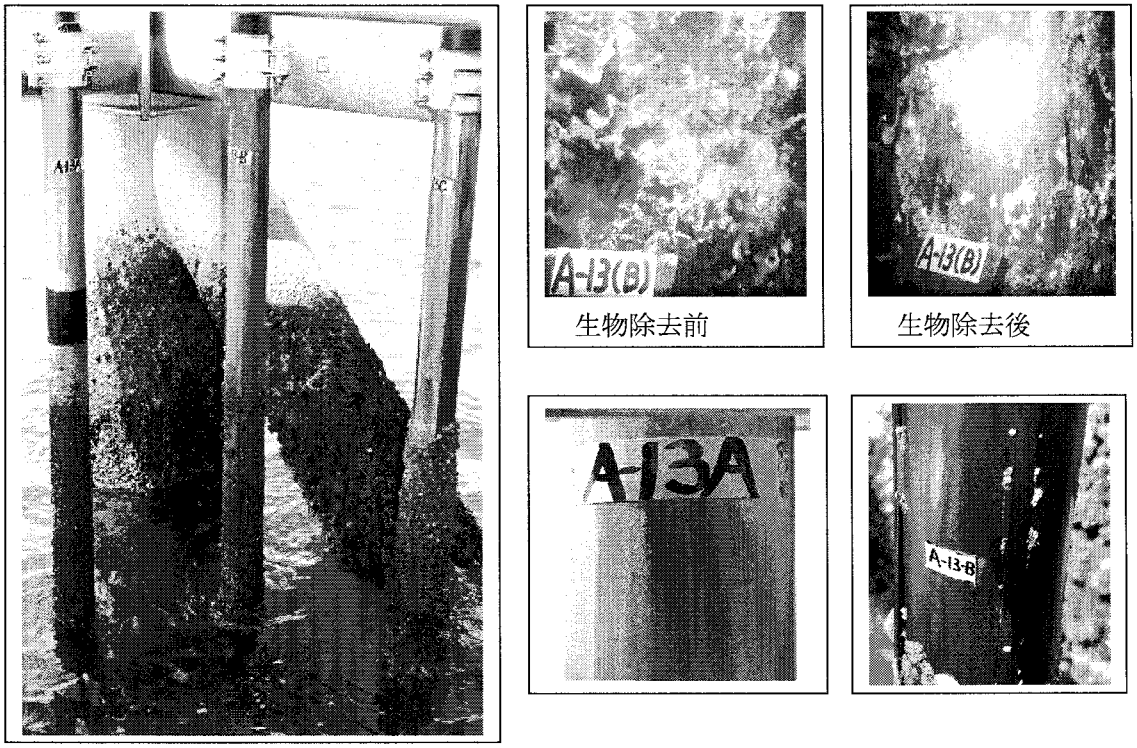






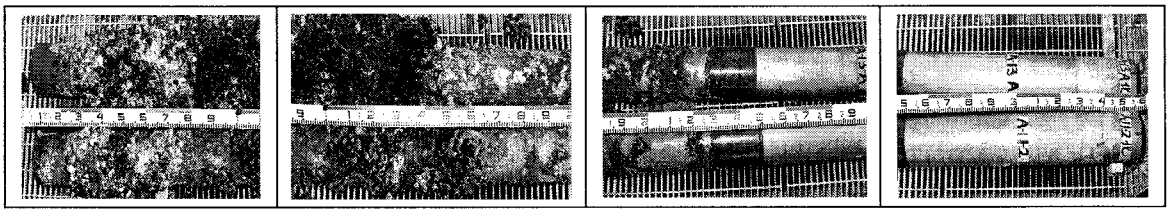
A-13-C 生物除去後

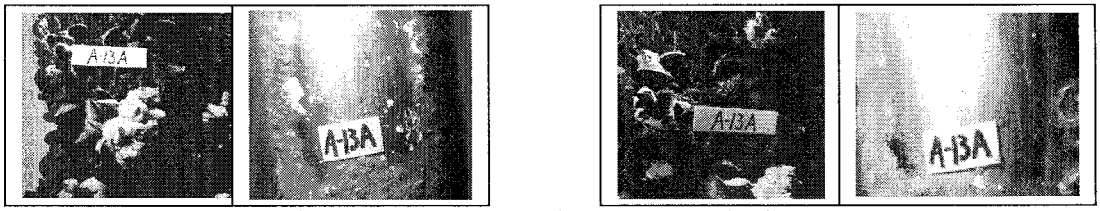
図 4.3.50　1987 年チタン(A-13-A,B,C)



生物除去前　　生物除去後

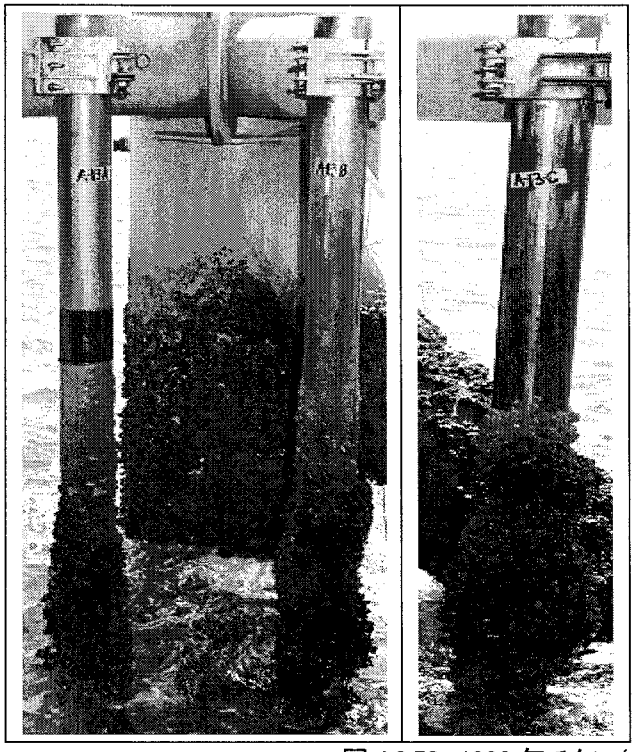
図 4.3.51　1988 年チタン（A-13-A,B,C）





生物除去前(左)、同差（後）　　生物除去前(左)、同差（後）

図 4.3.52　1989 年チタン（A-13-A,B,C）



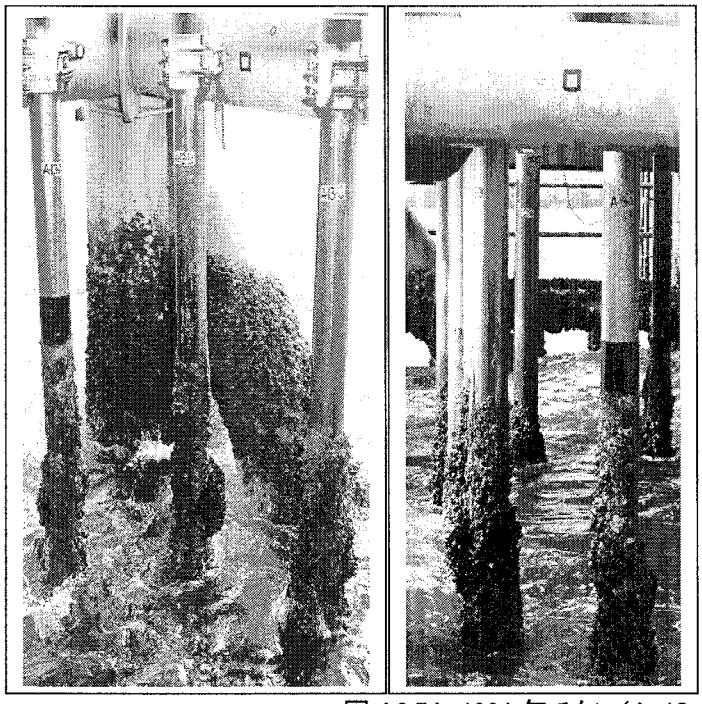


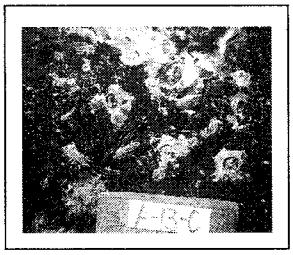
A-13-B 生物除去前



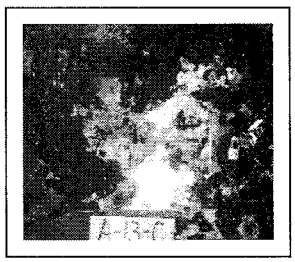
同上　生物除去後

図 4.3.53　1990 年チタン(A-13-A,B,C)





生物除去前



生物除去後

図 4.3.54　1991 年チタン(A-13-A,B,C)

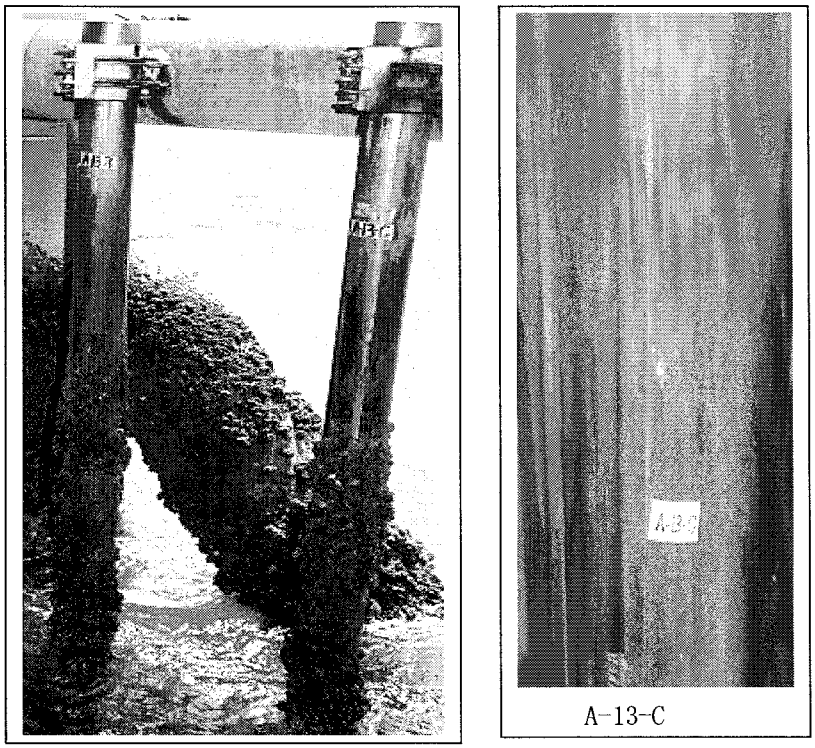


図 4.3.55　1994 年チタン(A-13-B,C)

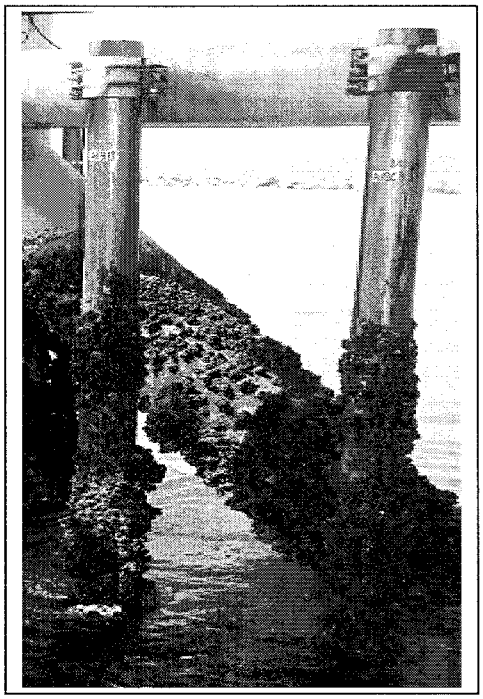


図 4.3.56　1995 年チタン(A-13-B,C)

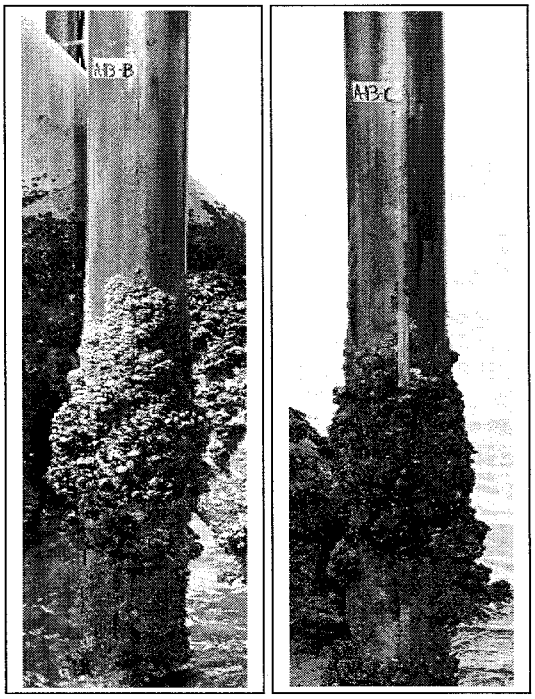


図 4.3.57　1994 年チタン(A-13-B,C)

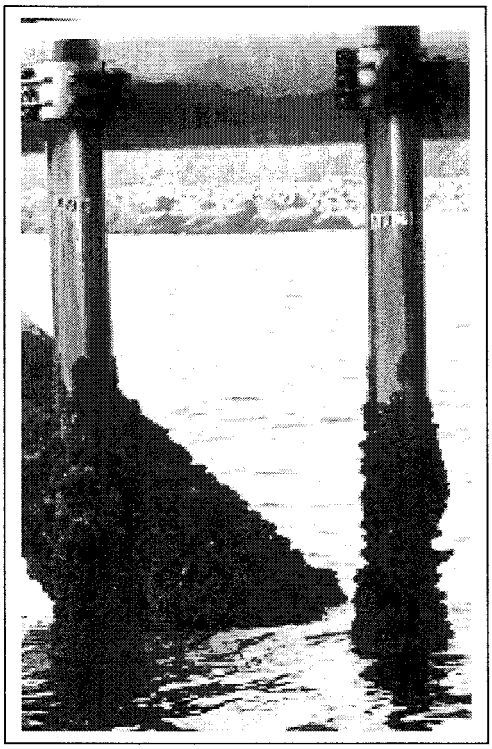


図 4.3.58　1997 年チタン(A-13-B,C)

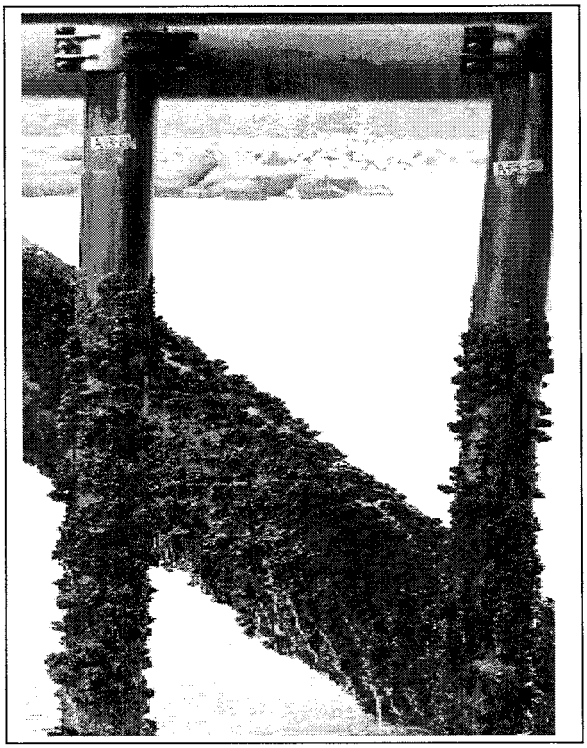


図 4.3.59　1998 年チタン(A-13-B,C)

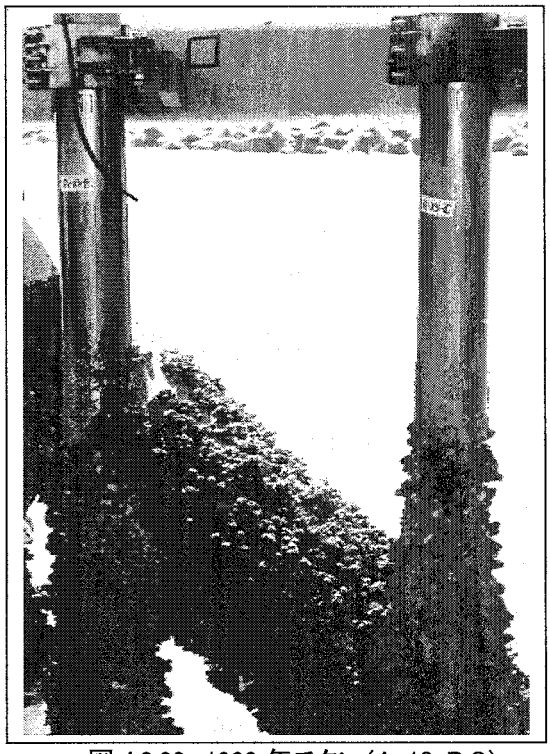


図 4.3.60　1999 年チタン(A-13-B,C)

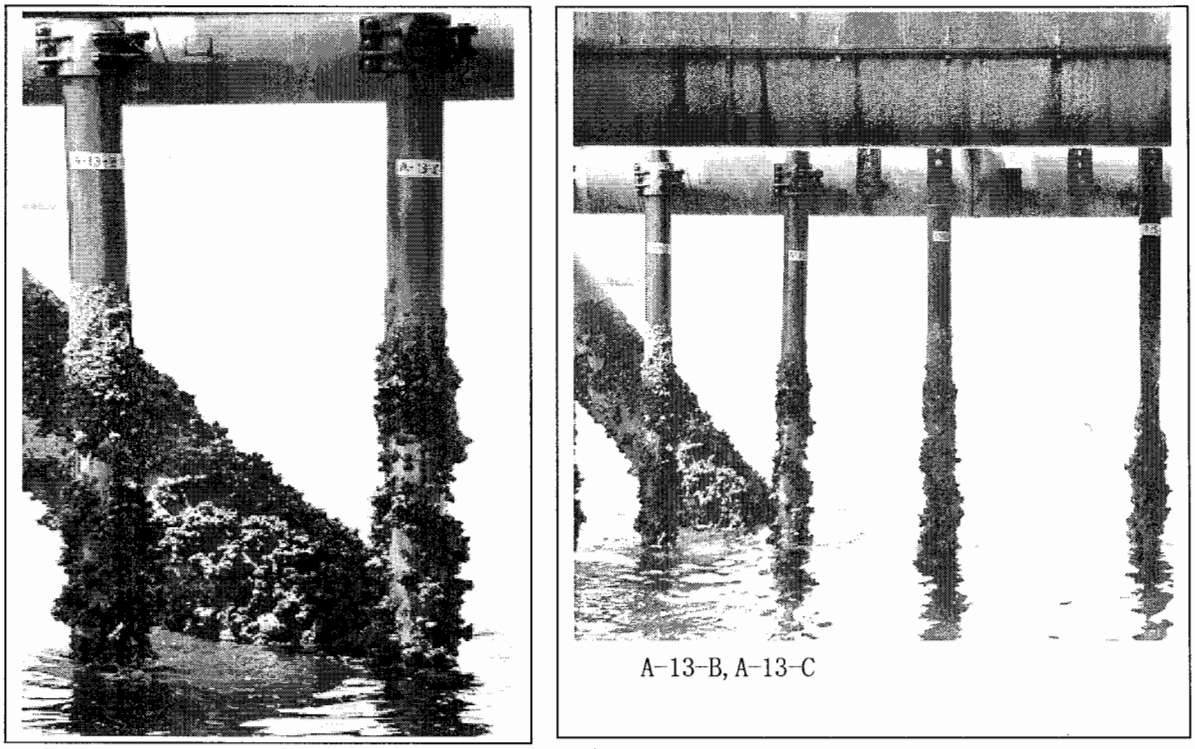


図 4.3.61　2001 年チタン（A-13-B,C）

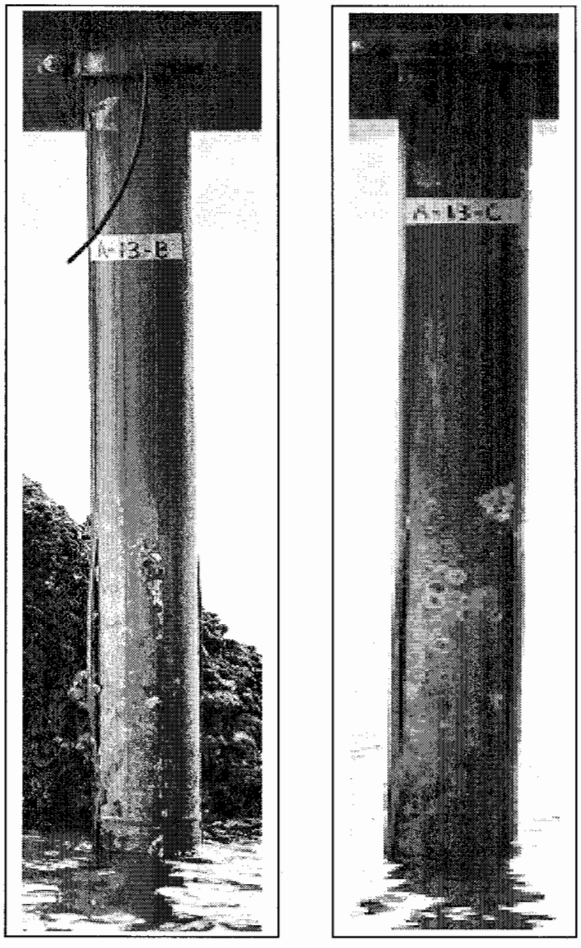


図 4.3.62　2003 年(1)チタン（A-13-B,C）



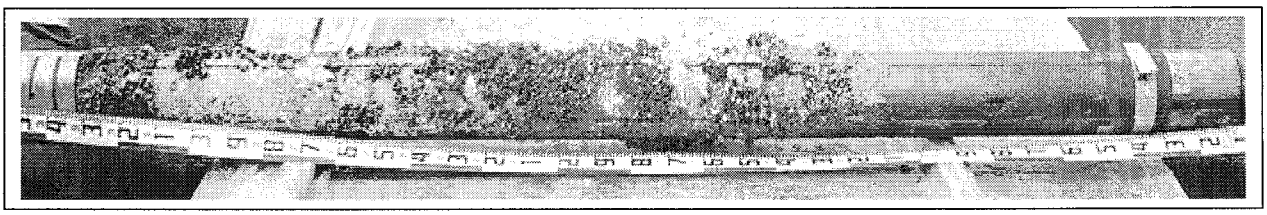
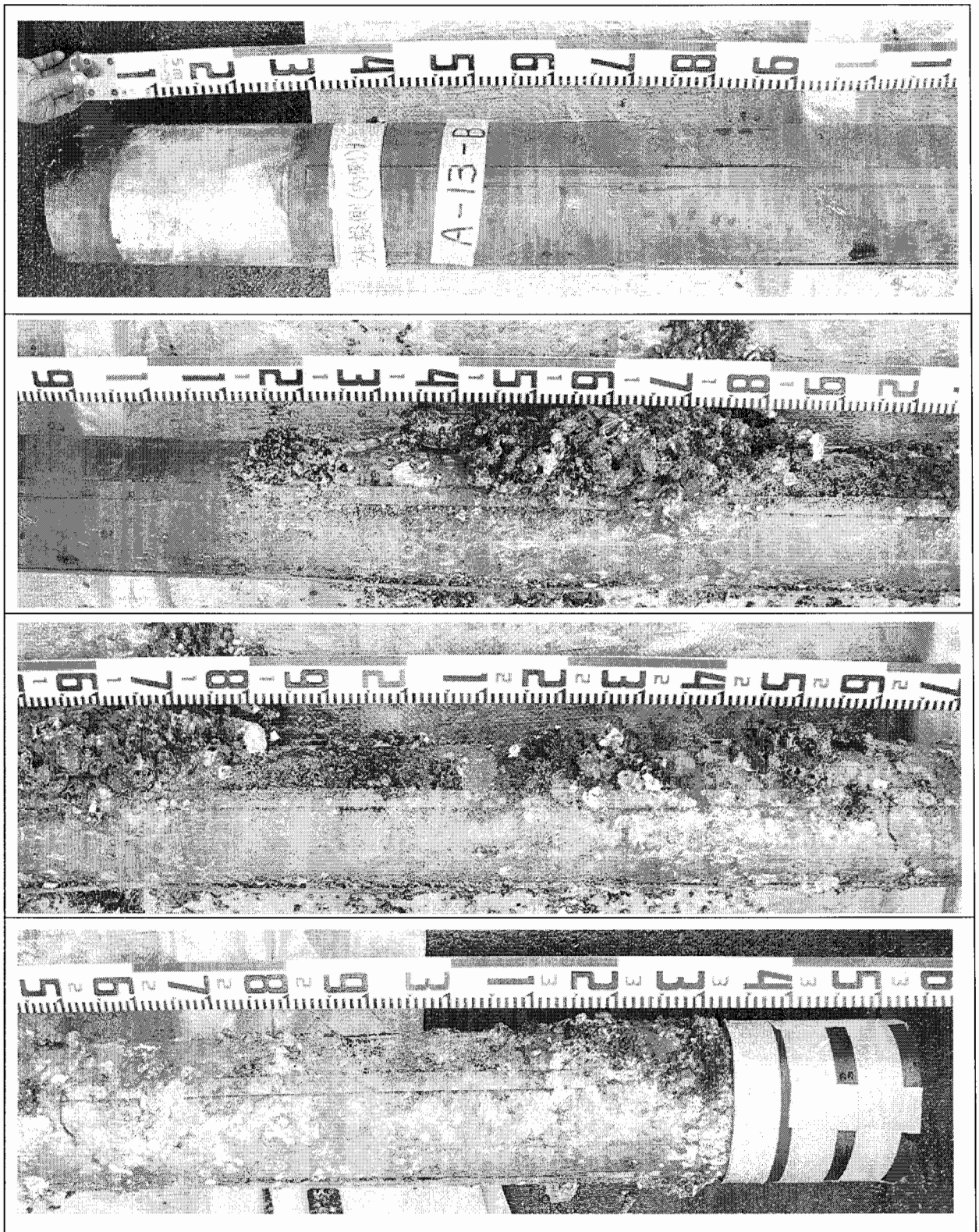
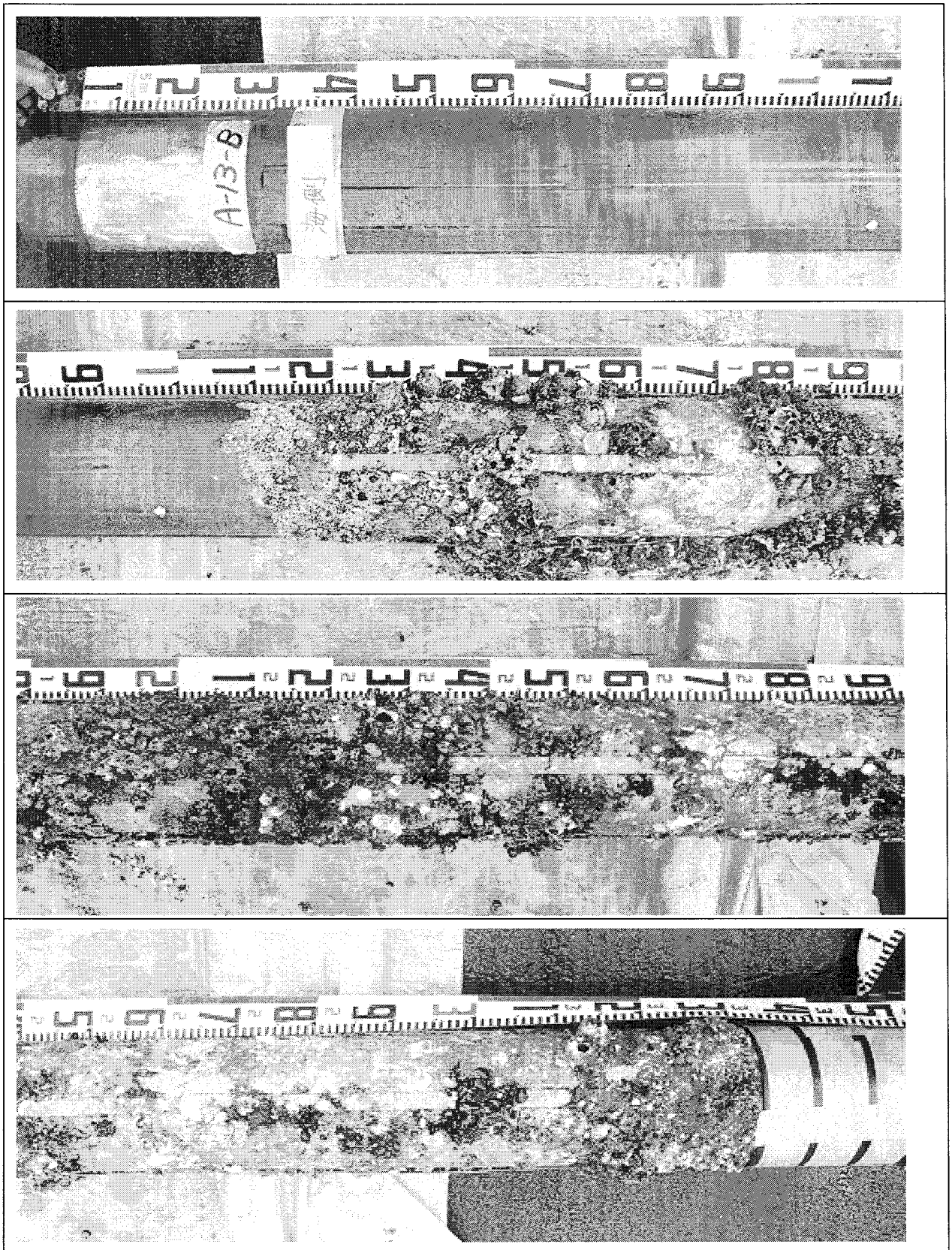


図 4.3.63　2003 年(2)チタン(A-13-B)



A-13-B 施設側

図 4.3.64 2003 年(3)チタン(A-13-B)



A-13-B 海側

図 4.3.65　2003 年(4)チタン(A-13-B)

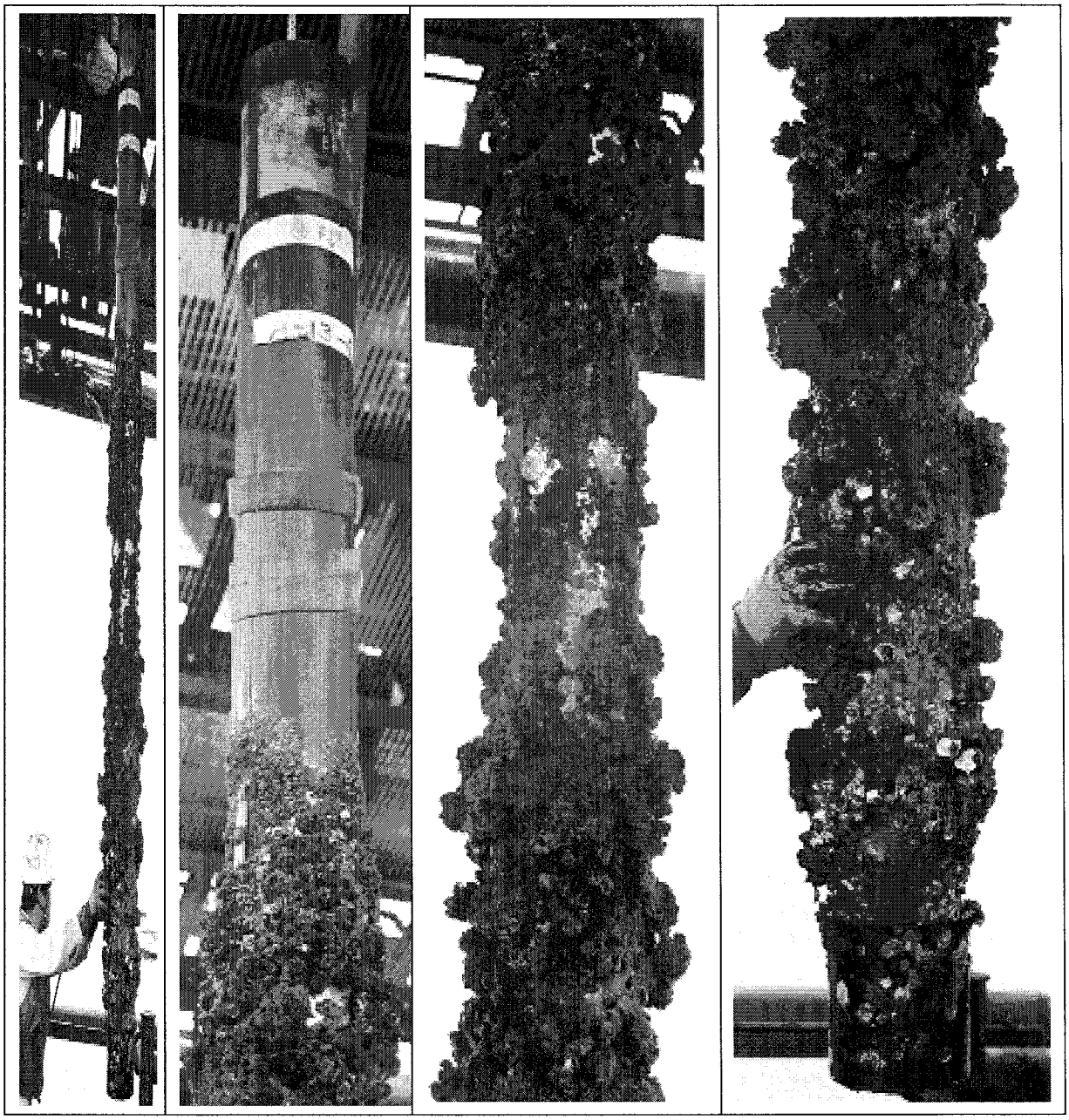
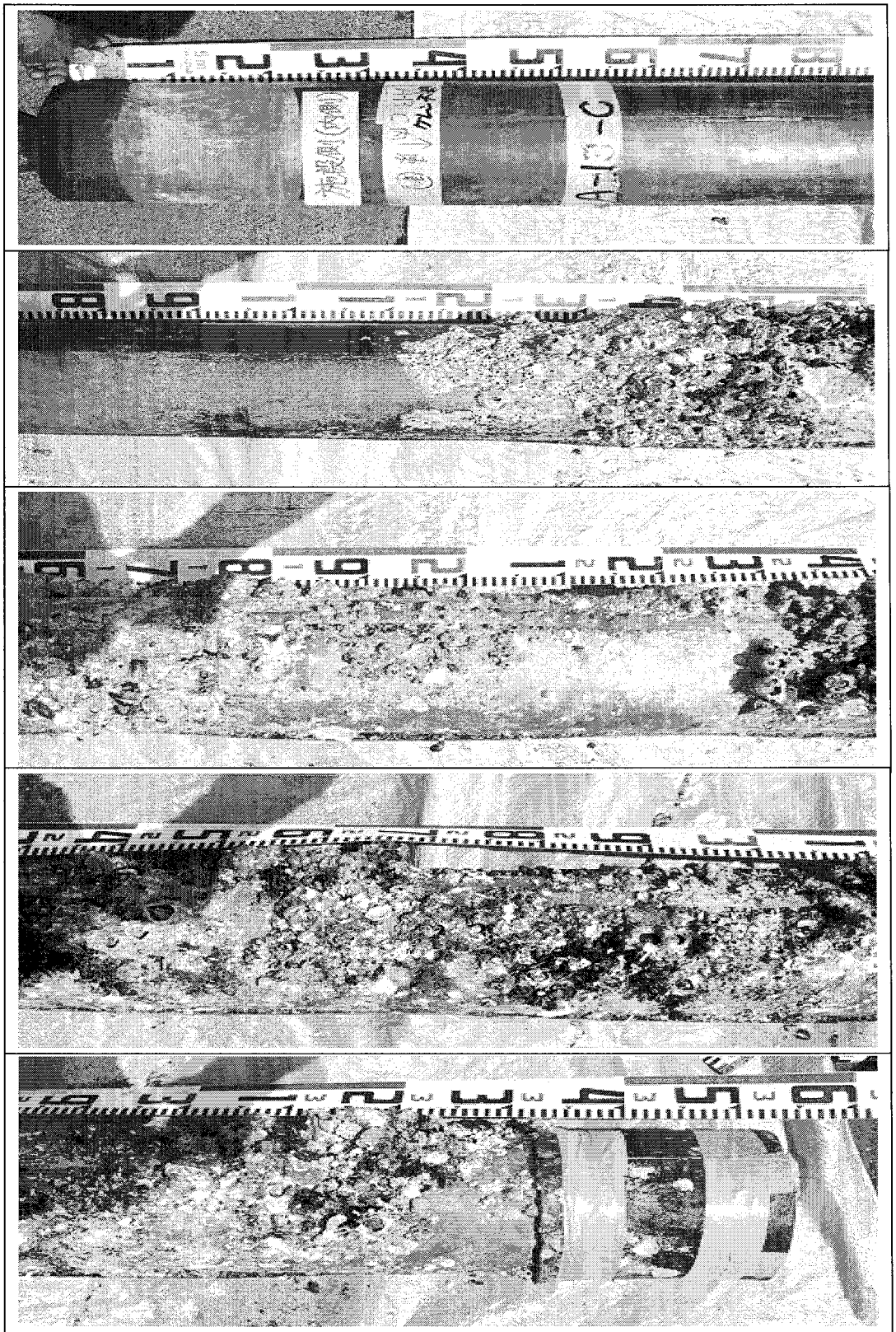


図 4.3.66　2003 年(5)チタン(A-13-C)



A-13-C 施設側

図 4.3.67　2003 年(6)チタン(A-13-C)

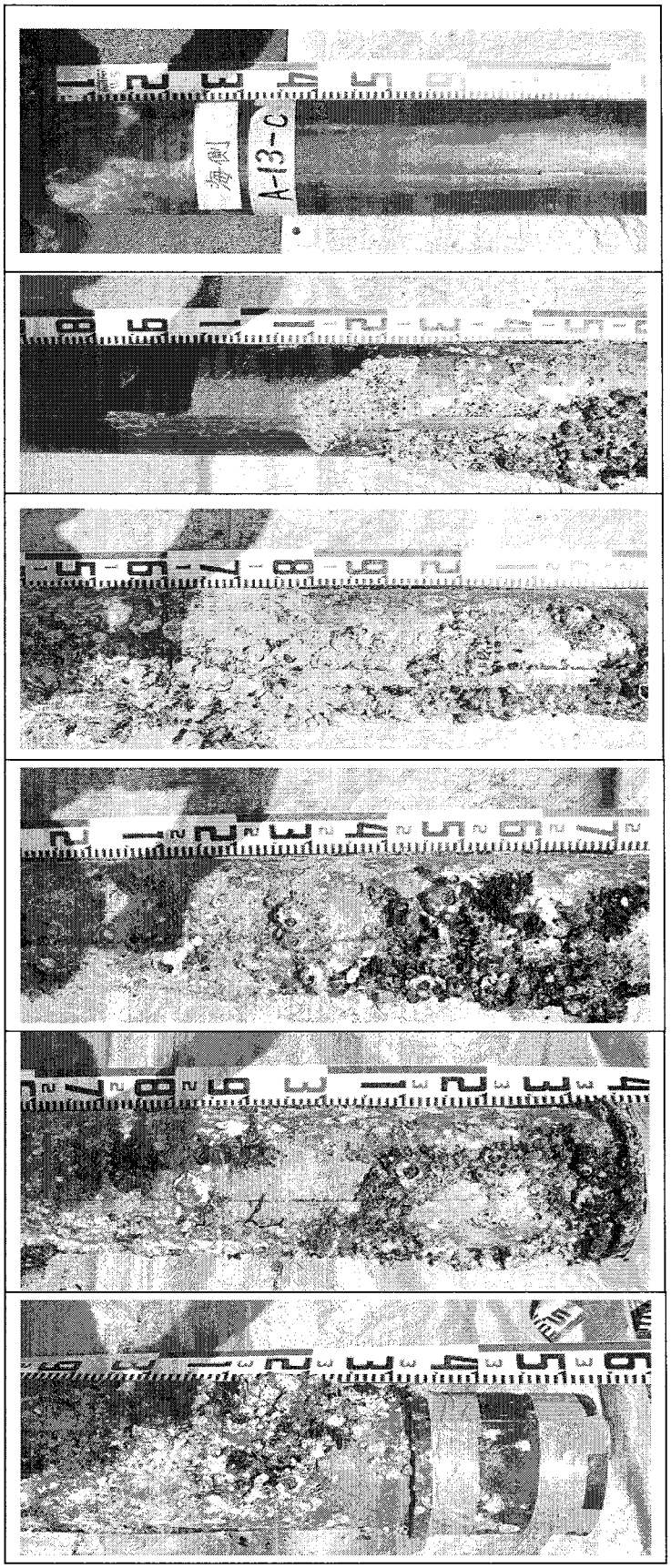


図 4.3.68　2003 年(7)チタン(A-13-C)海側

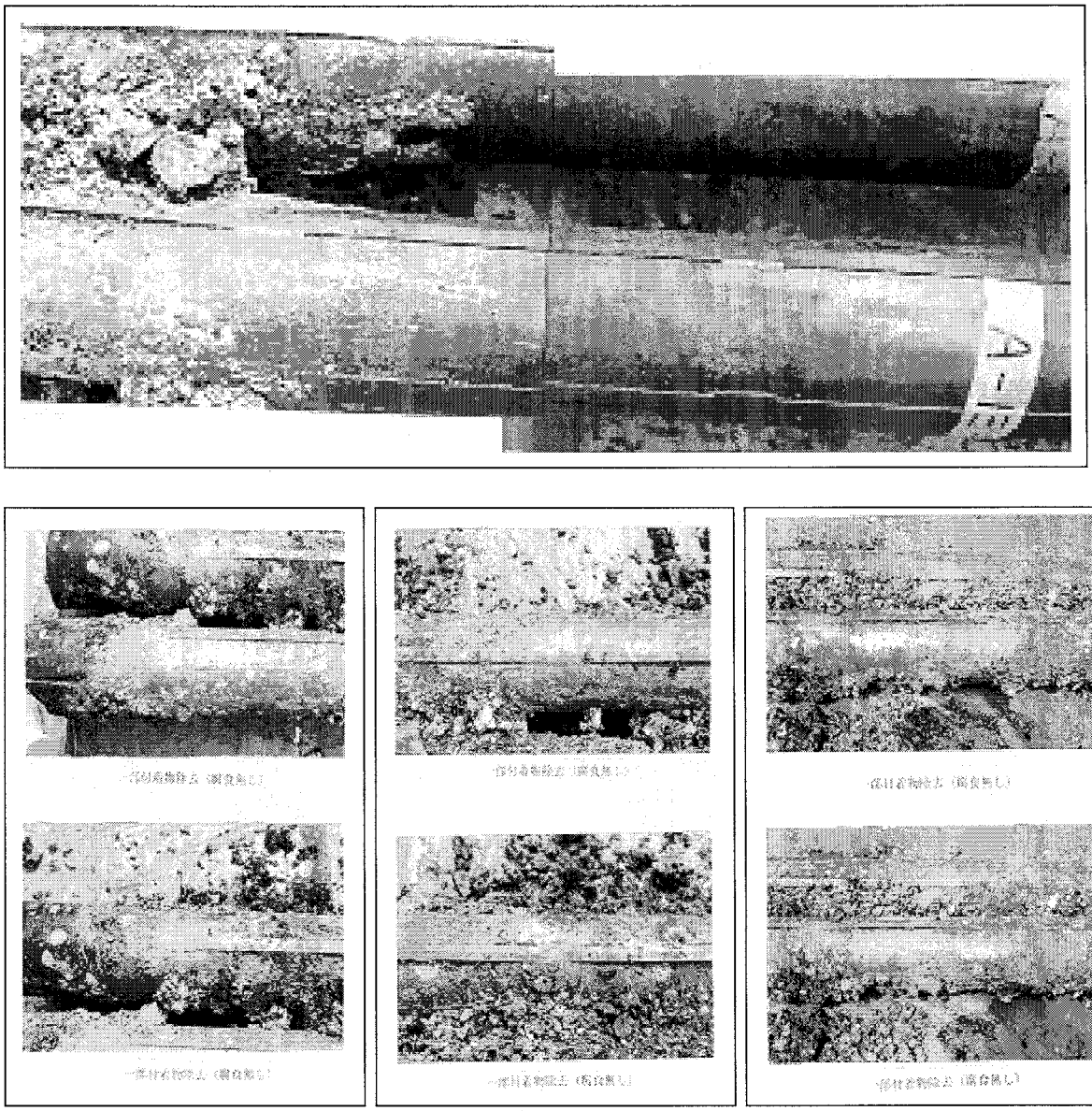
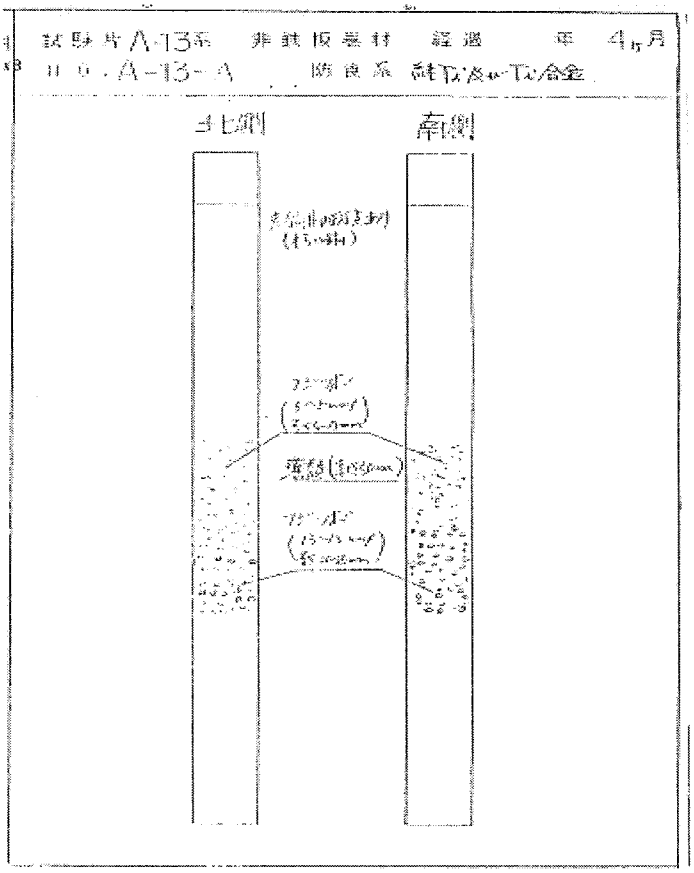


図 4.3.69　2003 年(8)チタン(A-13-B,C)

チタンとチタン合金(短冊状)間の隙間腐食、発生なし



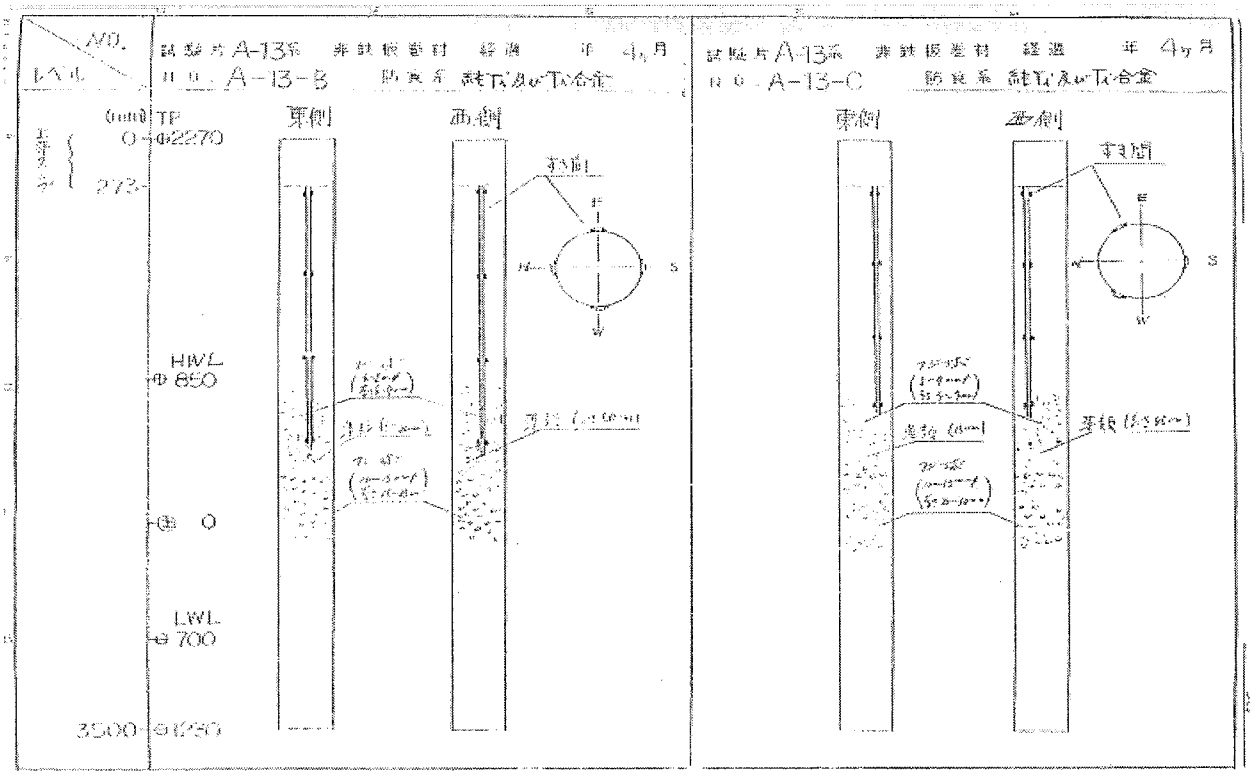
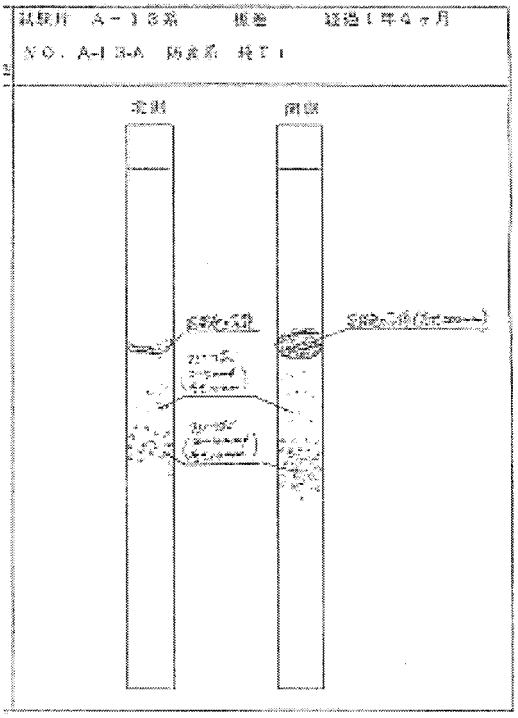


図 4.3.70 1984 年チタン(A-13-A,B,C)



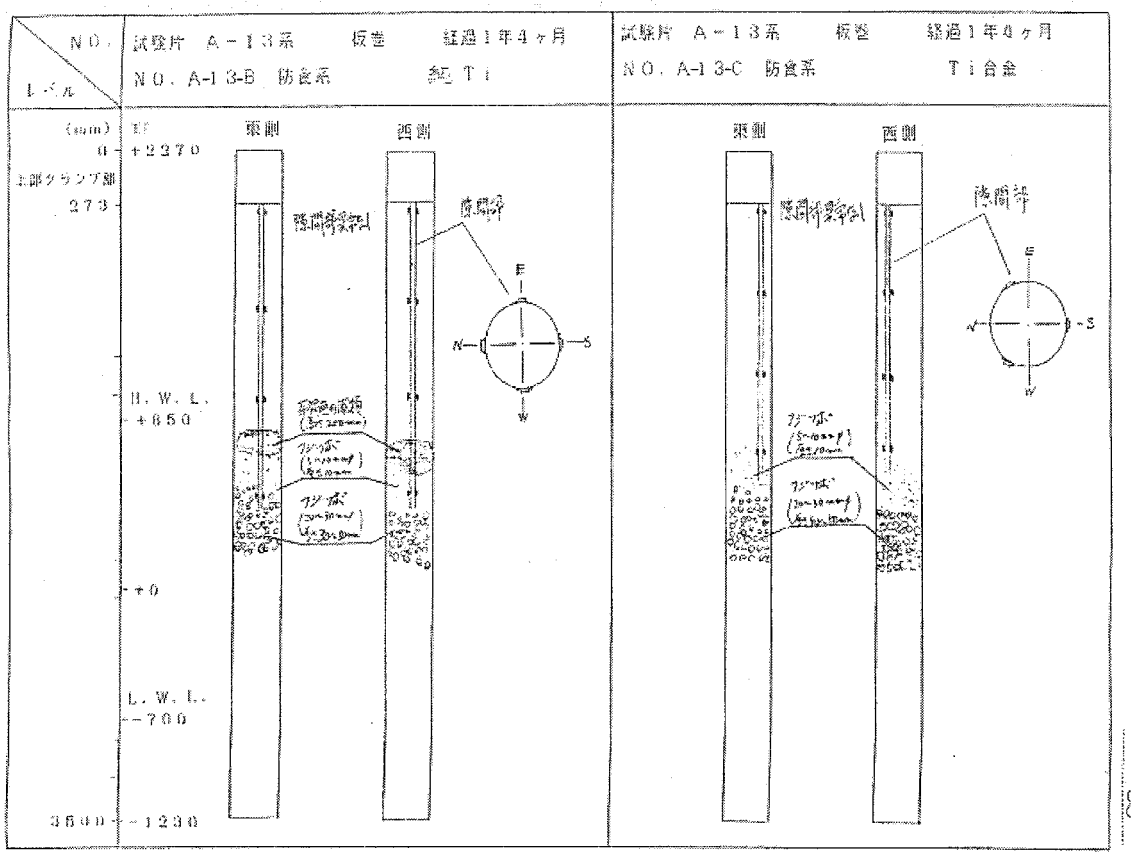
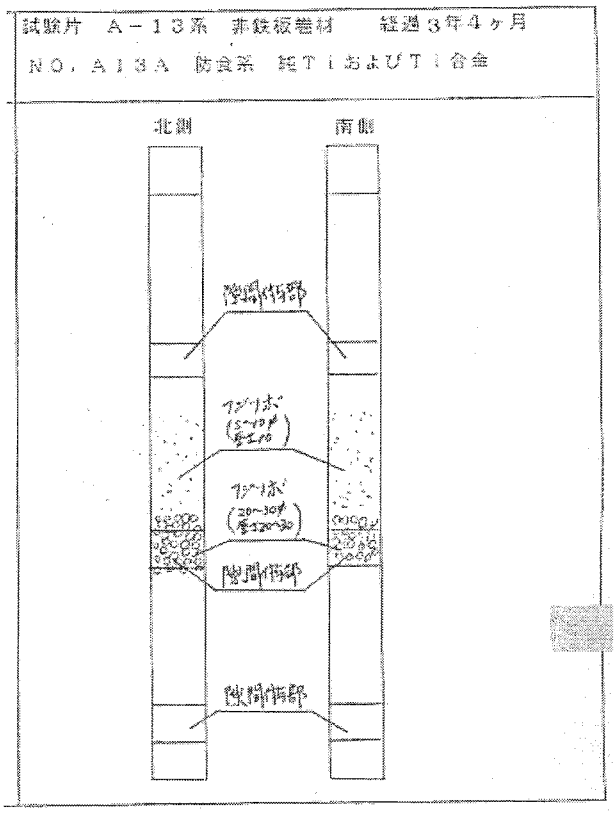


図 4.3.71 1985 年チタン(A-13-A,B,C)



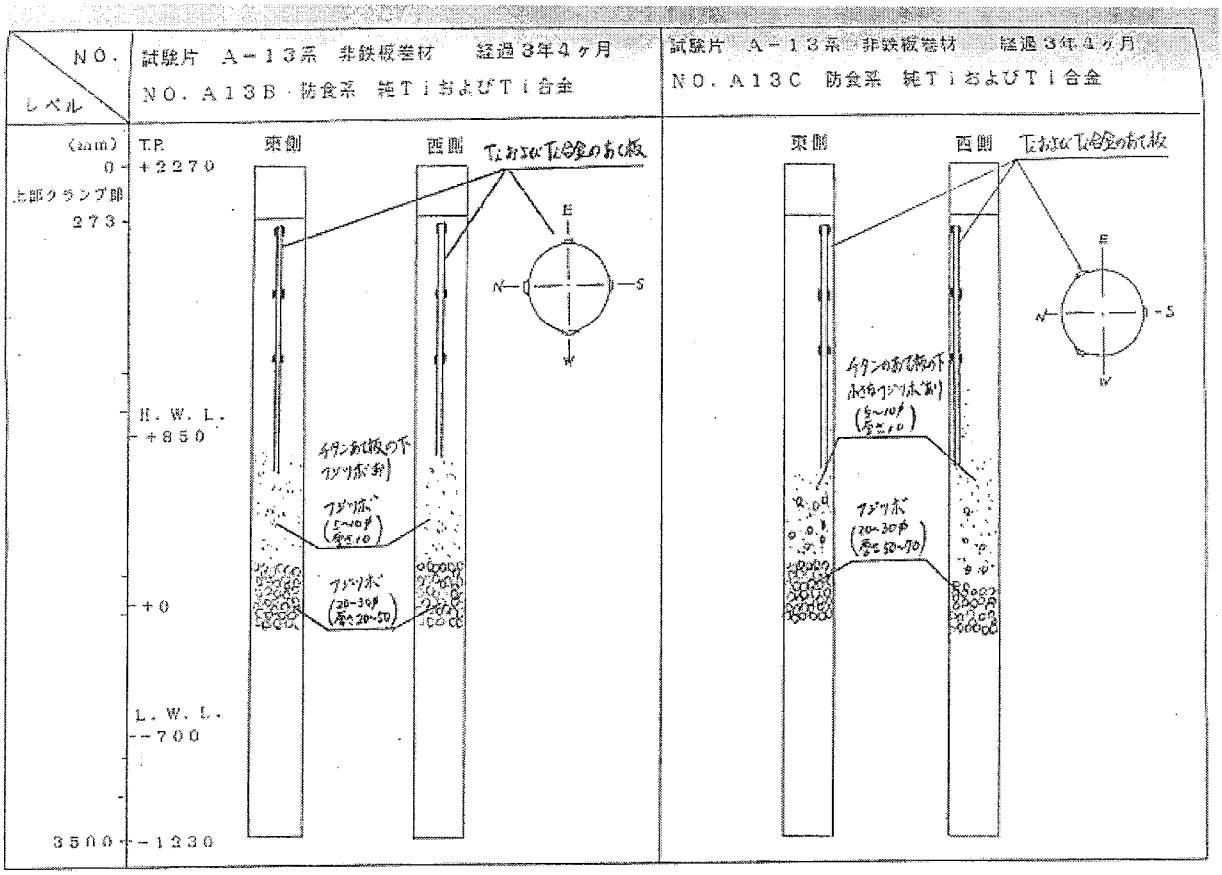
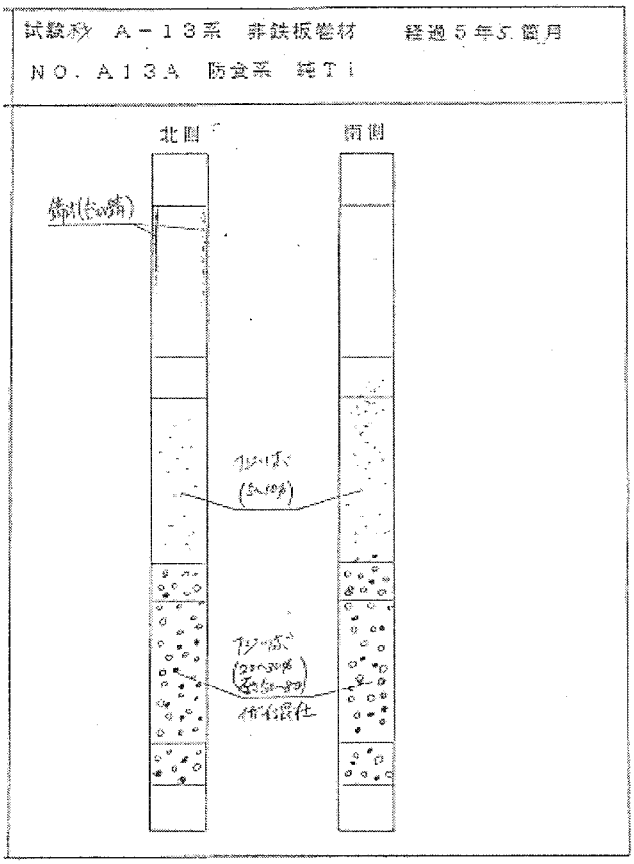


図 4.3.72　1987 年チタン(A-13-A,B,C)



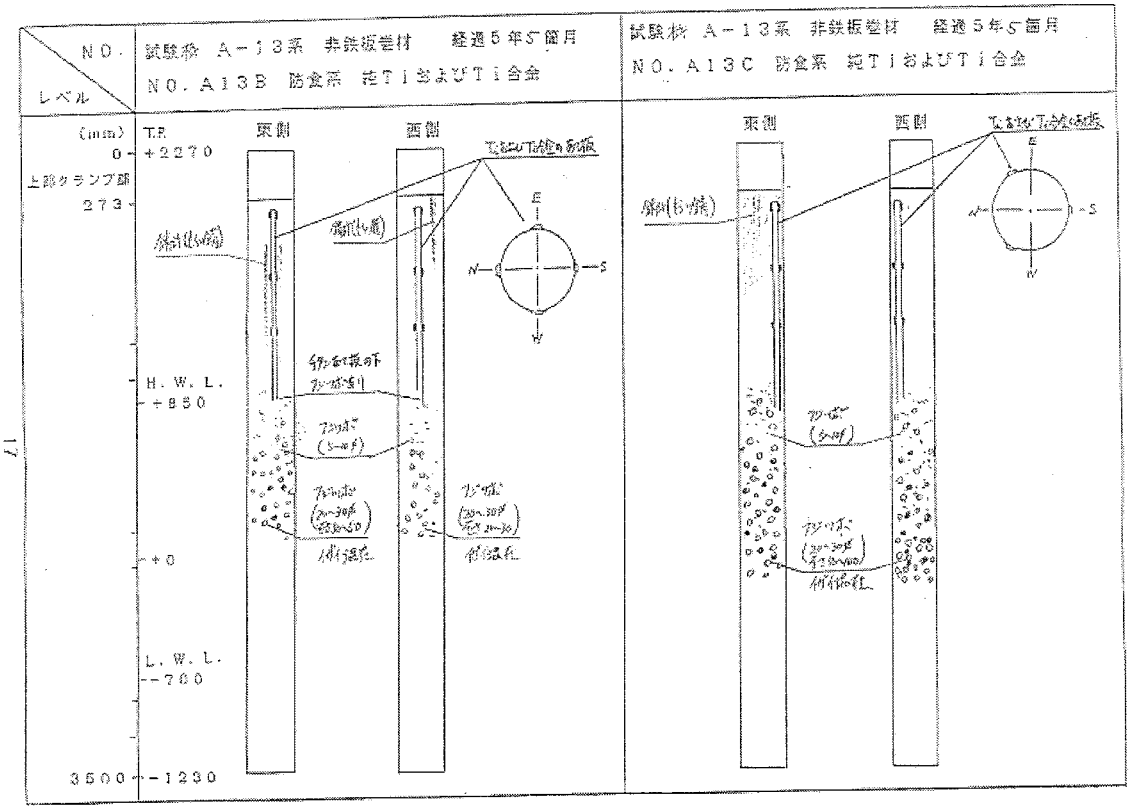
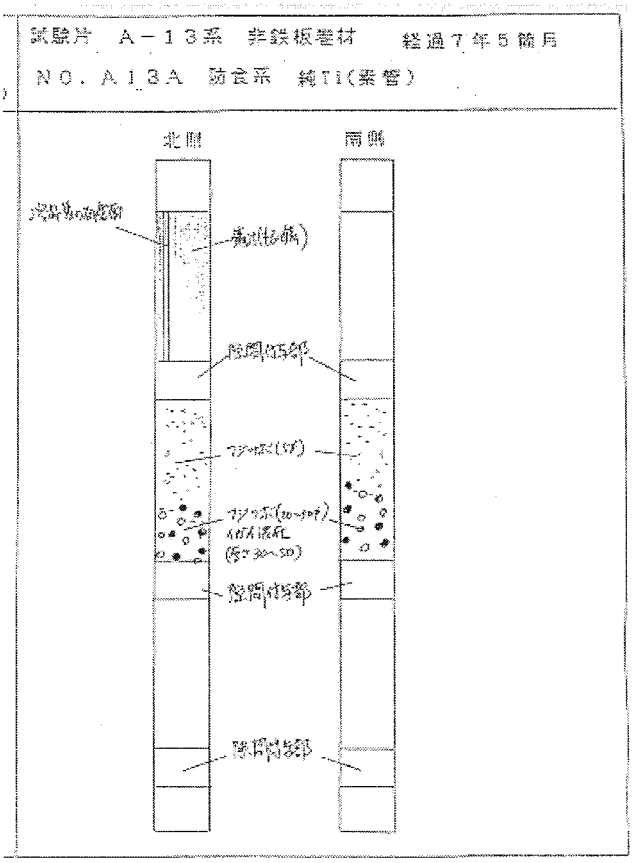


図 4.3.73 1989 年チタン(A-13-A,B,C)



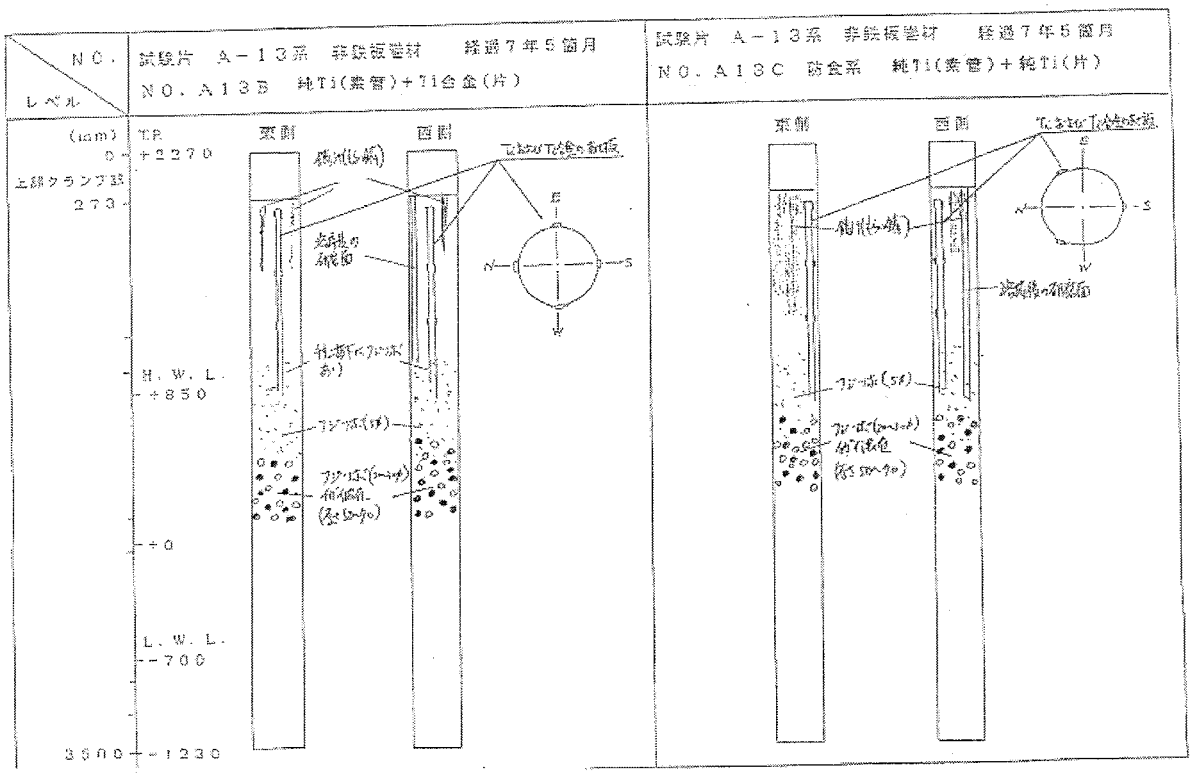
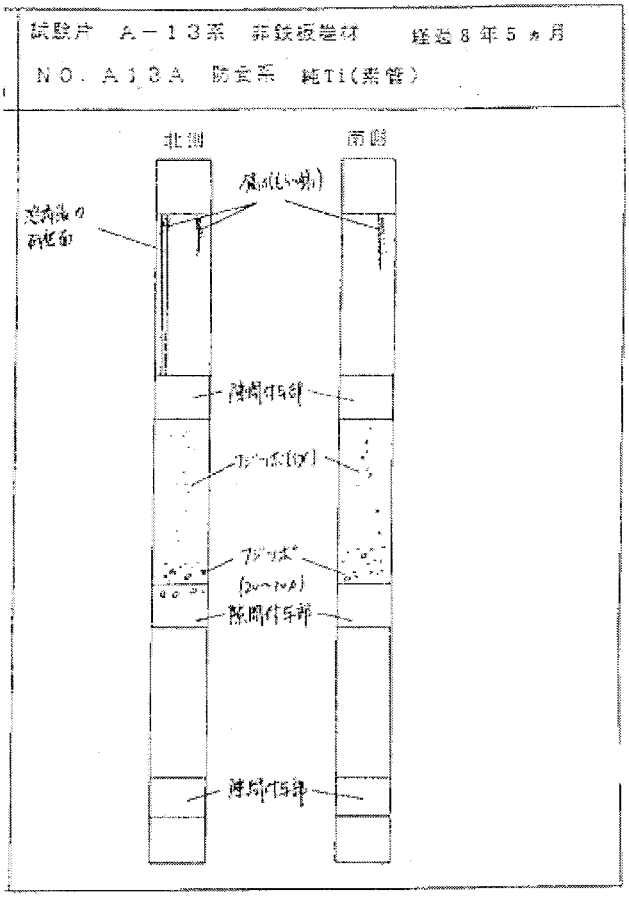


図 4.3.74　1991 年チタン(A-13-A,B,C)



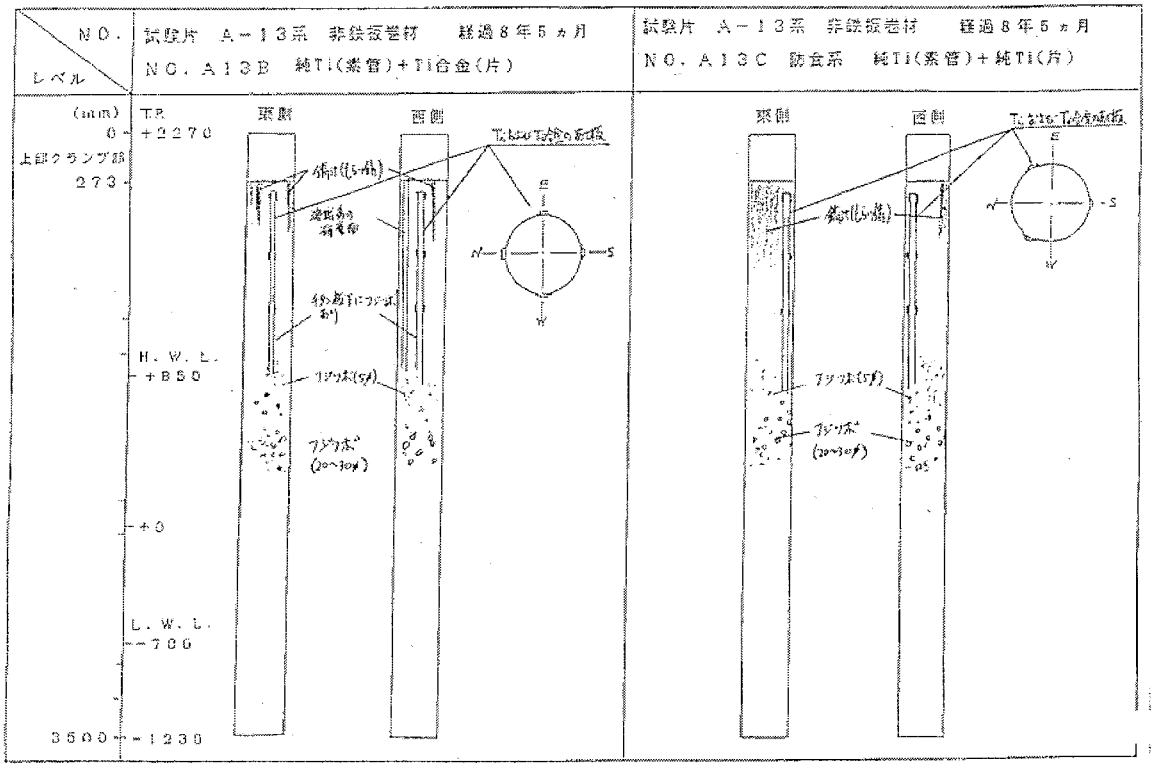


図 4.3.75　1992 年チタン(A-13-A,B,C)

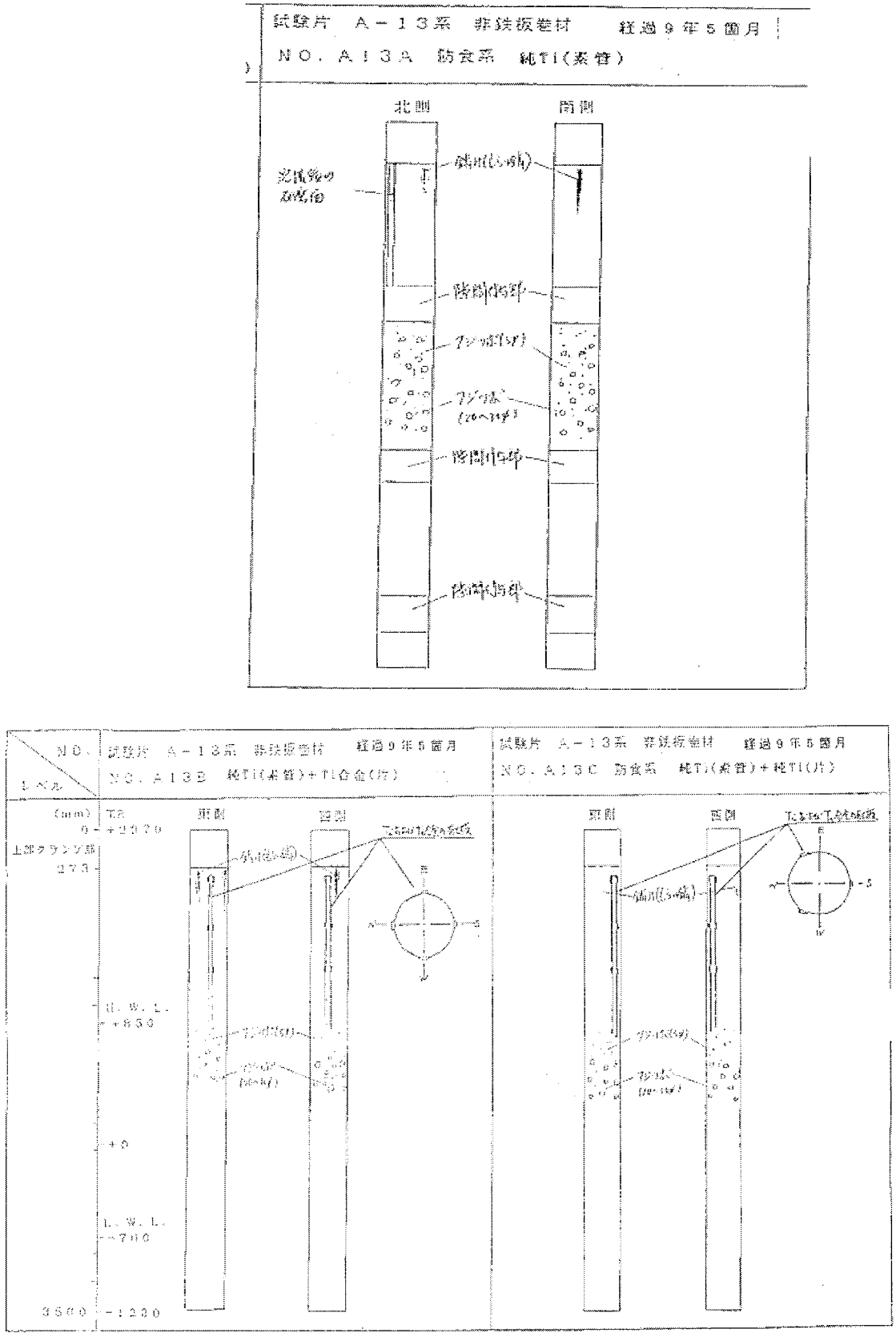


図 4.3.76　1993 年チタン(A-13-A,B,C)

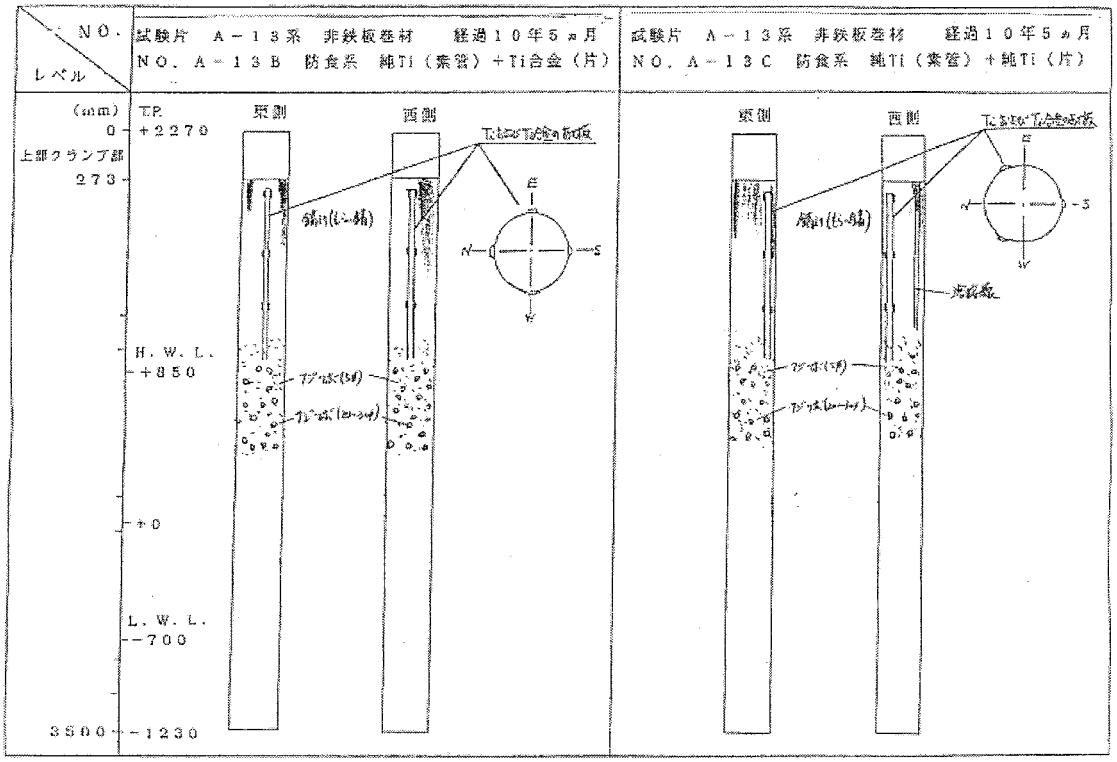


図 4.3.77 1994 年チタン（A-13-B,C）

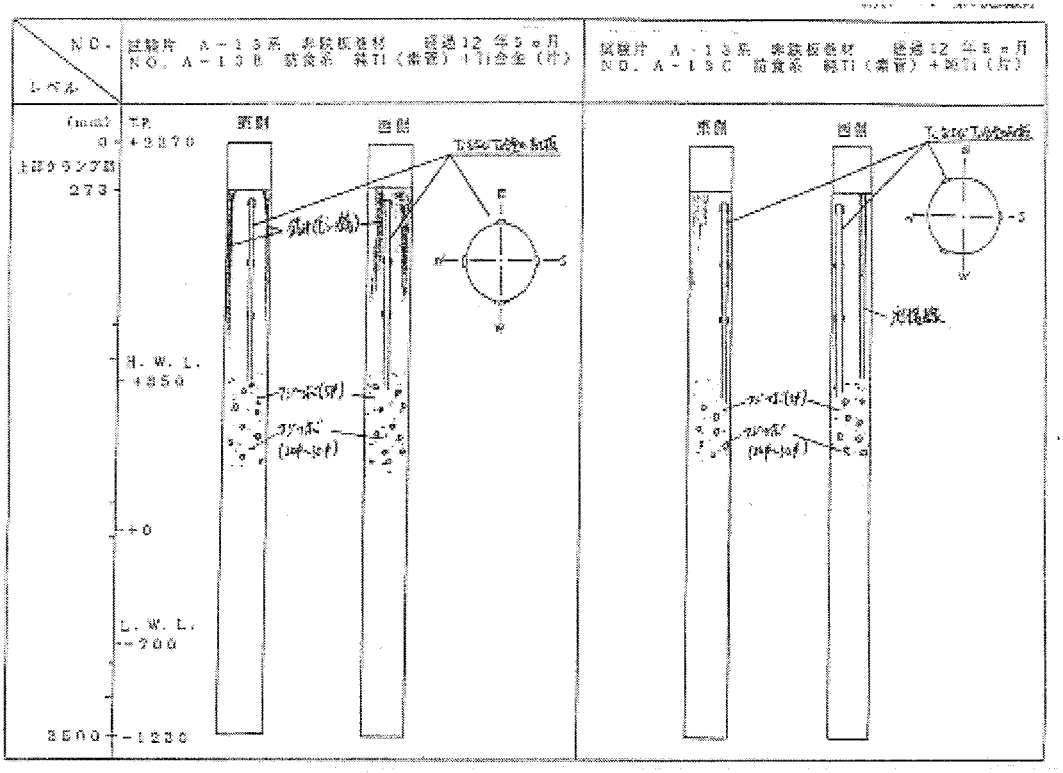


図 4.3.78 1996 年チタン（A-13-B,C）

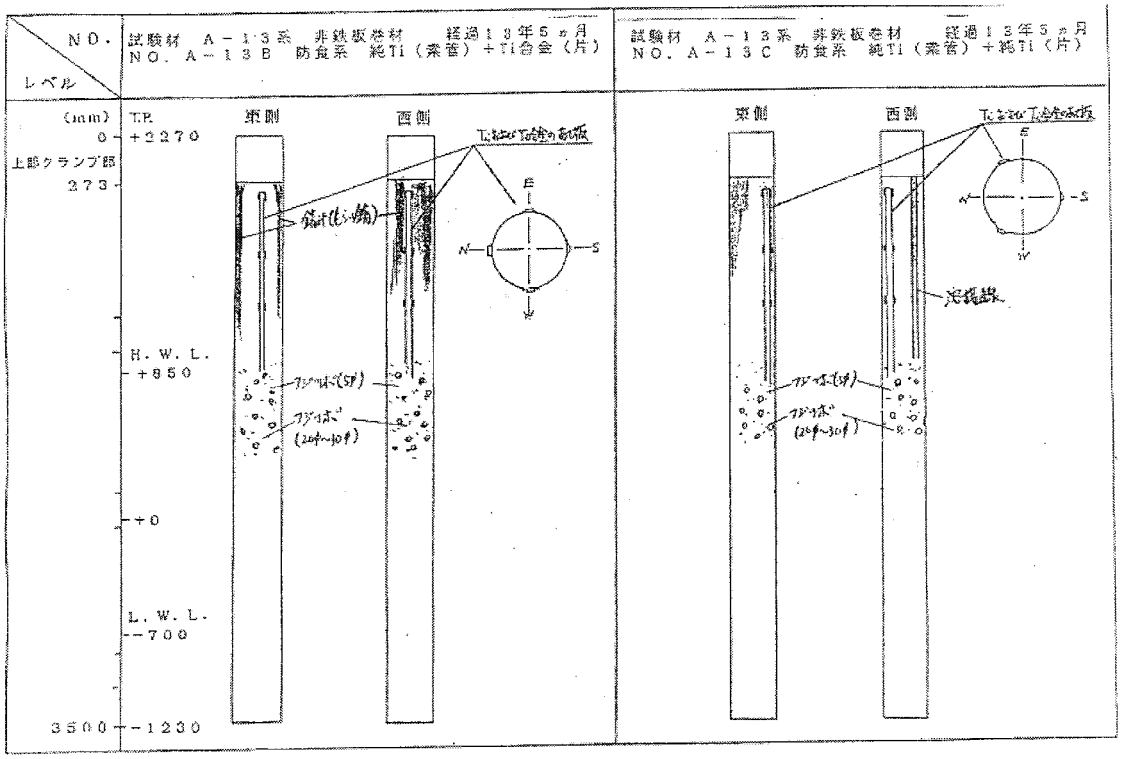


図 4.3.79 1997 年チタン（A-13-B,C）

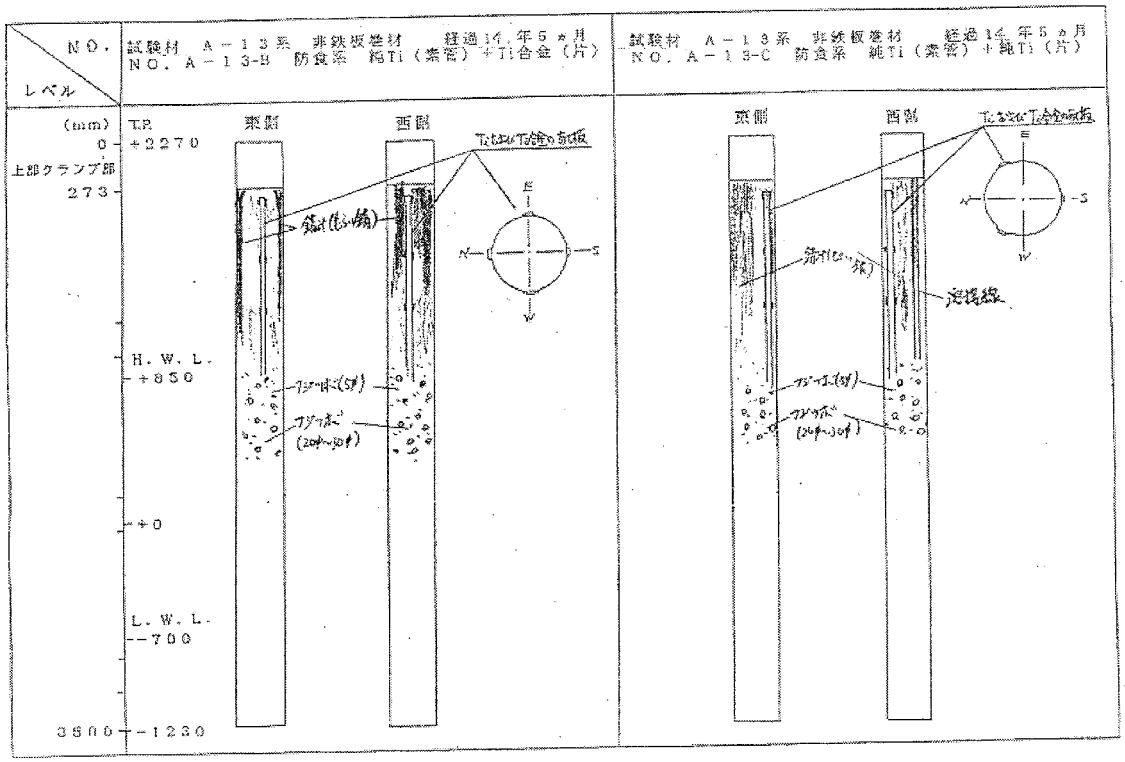


図 4.3.80 1998 年チタン（A-13-B,C）

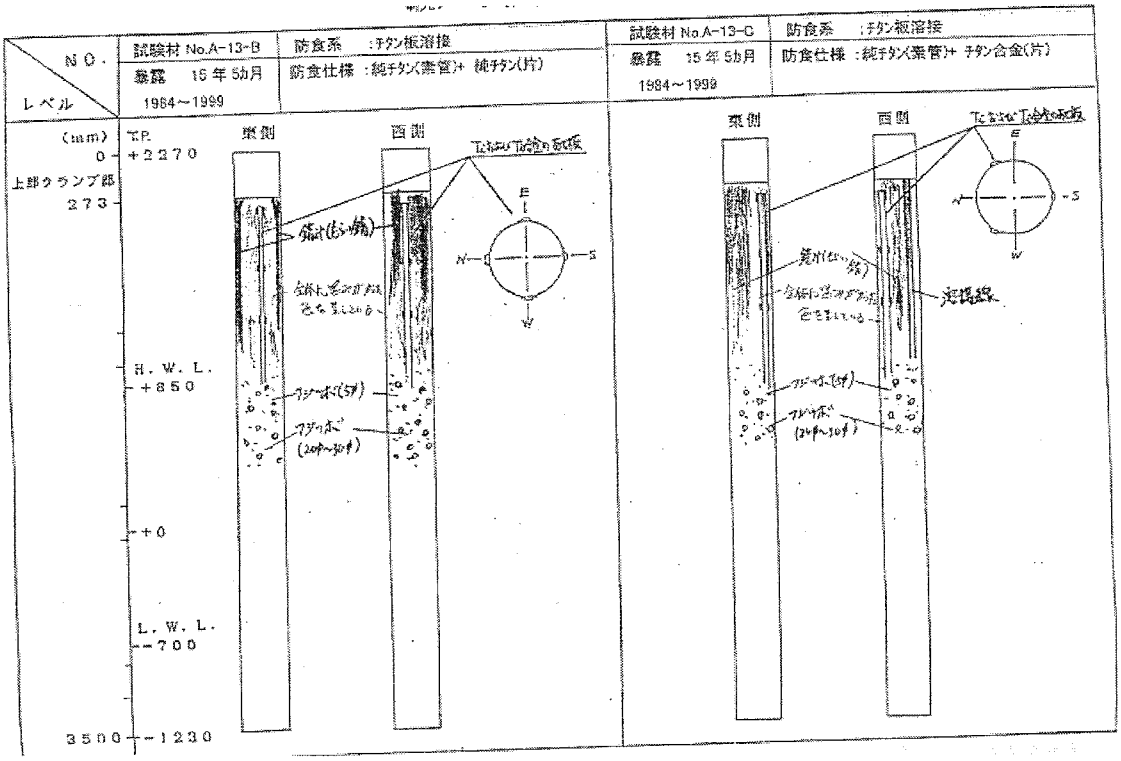


図 4.3.81 1999 年チタン(A-13-B,C)

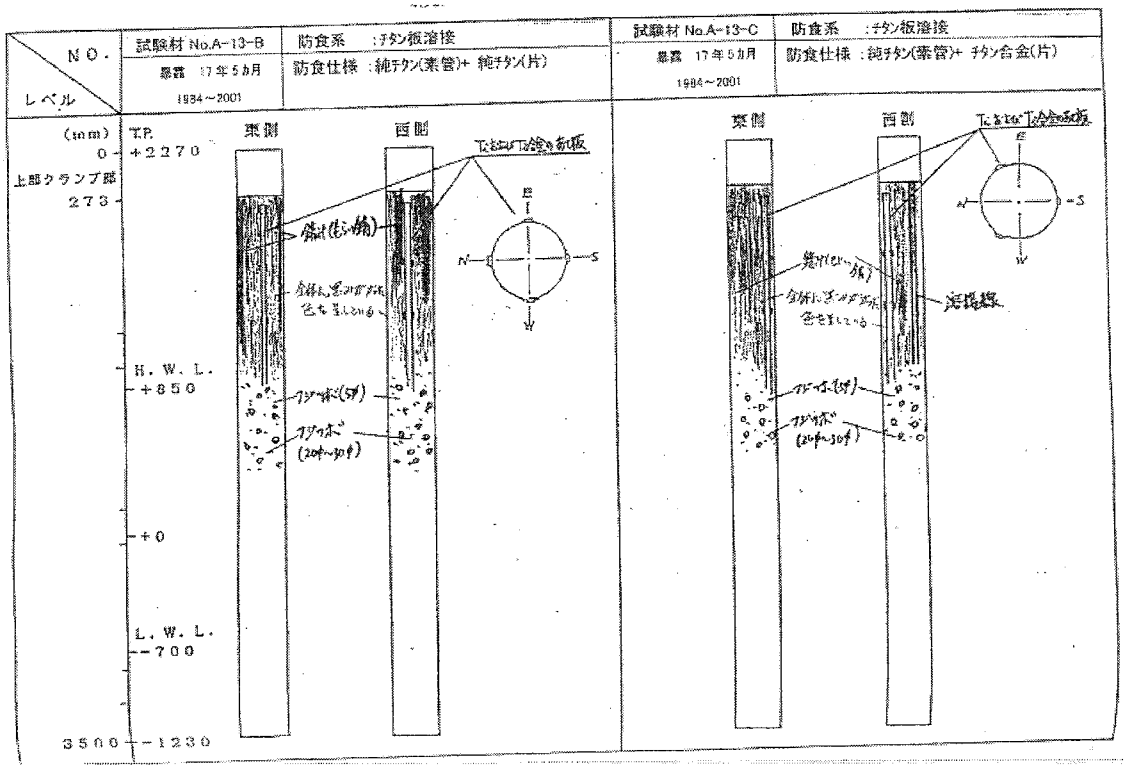


図 4.3.82 2001 年チタン(A-13-B,C)

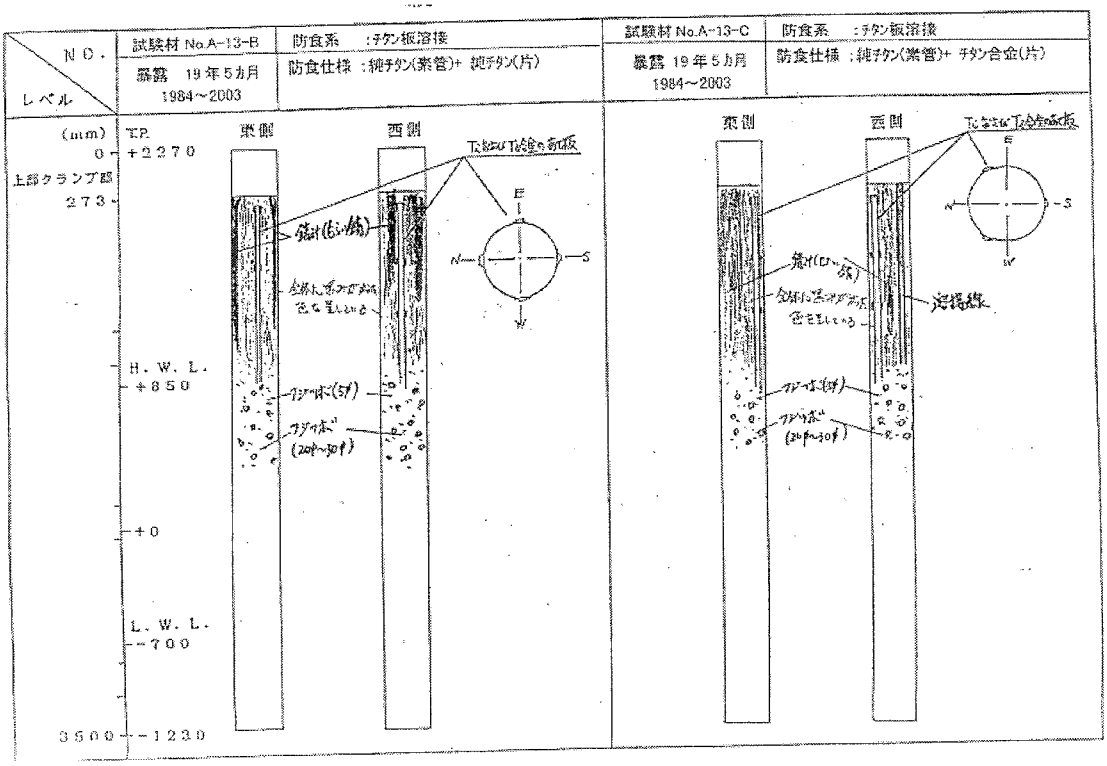


図 4.3.83 2003 年チタン(A-13-B,C)

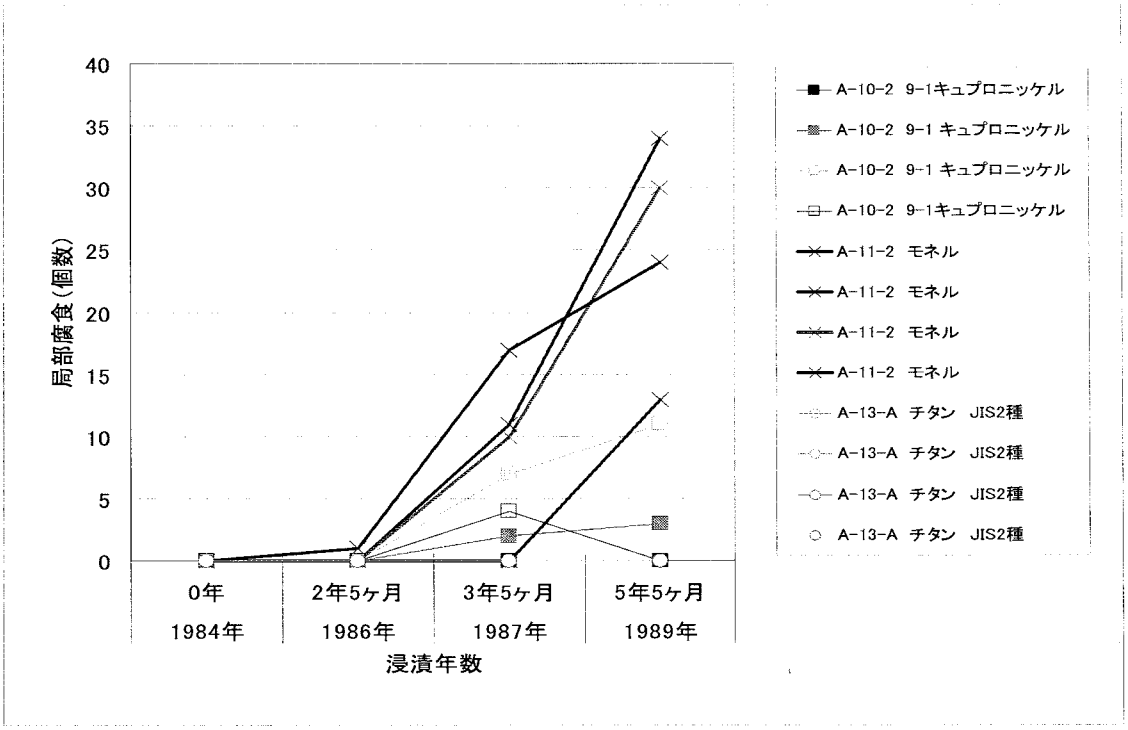


図 4.3.84 海洋生物付着下での隙間腐食発生状況

(干満上部、干満中上部、干満中下部、海中部)

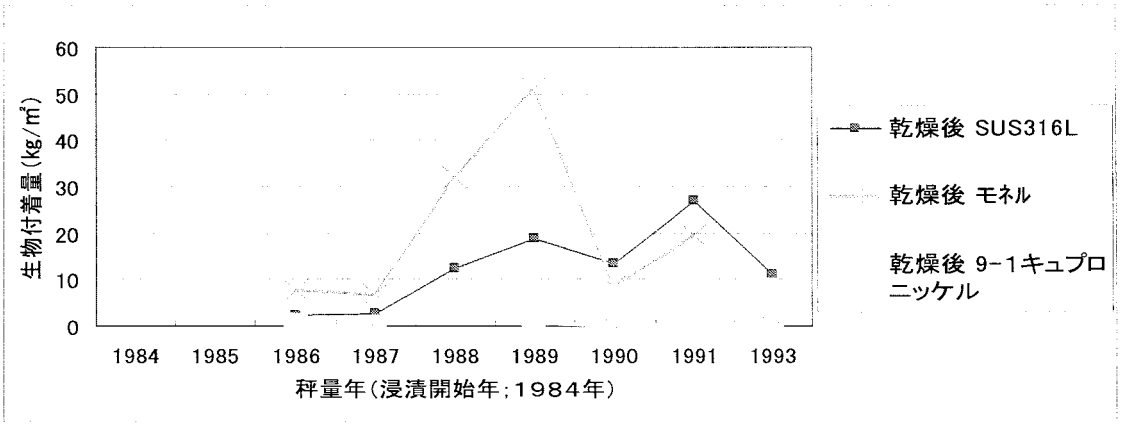


図 4.3.85 各種金属材料での海洋生物付着量
(生物採取後乾燥して秤量)

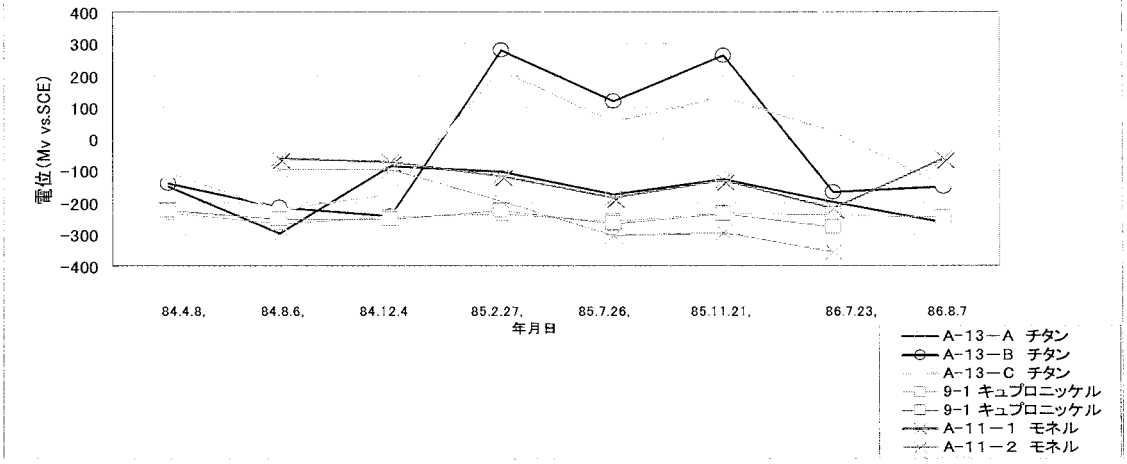


図 4.3.86 各種金属材料の海水中での電位変化

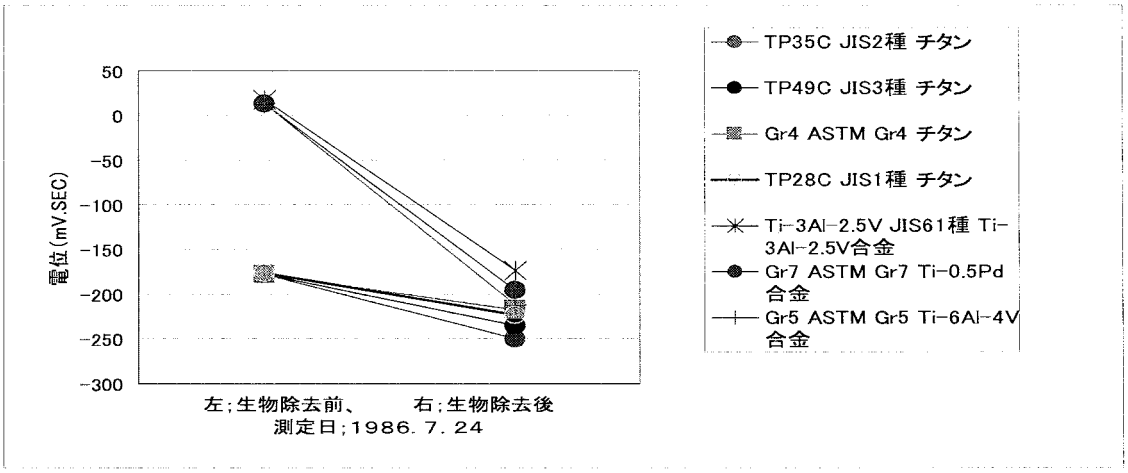


図 4.3.87 チタンの電位変化

４．４　有機ライニング鋼材の耐久性に関する研究

4．4．1 研究の目的

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の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、鋼材の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と比して、さらに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。

4．4．2 試験材および試験方法

表4.4.1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、C-5）、従来の黒色ポリウレタンを被覆したもの（C-6）、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。この内、C-5およびC-6については暴露試験を2013年までさらに10年間暴露試験を延長した。また、E-4およびE-5はそれぞれ95年と96年に試験材が流出したので、本項では、C-2、C-3、C-4、C-7、E-1、E-2、E-3の結果を中心に報告する。

図4.4.1に各試験体の代表的な形状と平均水位に対するレベルと試験材の位置の関係を示す。試験材の全長は3,500mm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1,550mmの領域が干満帯、残りの1,092もしくは1,420mmの領域が飛沫帯にそれぞれ暴露された部位になる。

図4.4.2に各試験材の暴露取り付け位置を示す。

表4.4.2に暴露試験開始後の詳細調査の調査項目を示す。93年、95年、98年、2000年、2003年に詳細調査を行い、それ以外の年は目視観察を主体とした一般調査を行った。なお、色差および光沢度の測定は、暴露試験材の取り付け治具に由来するもらいさびの影響を除くため、別途小試験片で測定を行った。

表4.4.1　有機ライニング試験材の内容と暴露予定

	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 (μm)	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	ポリウレタン(黒)+着色ふっ素(淡青)※	管	165.2φ×3500^{l}		淡青	13	'03回収
	C-3		ポリエチレン樹脂被覆	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+アクリルウレタン樹脂塗料	ポリウレタン(黒)+アクリルウレタン(濃緑)※				濃緑	13	'03回収
	C-5		ポリウレタン樹脂塗料	着色ポリウレタン(緑2500μm)※			2530	緑	23	2013まで延長
	C-6		ポリウレタン樹脂塗料	黒色ポリウレタン(2500μm)※			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	水中硬化型アクリル系(下塗り;2000μm 中塗り;300μm)+着色ふっ素・シリコン共重合(灰色70μm)※			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	165.2φ×3500^{l}×3.2^{t}		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	丸ダイ法※		267.4φ×2900^{l}×11.1^{t}	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	丸ダイ法※		165.2φ×3500^{l}×3.2^{t}	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	シート貼り付け方法	板			ブルー	2	'95 流失
	E-5		ポリエチレン樹脂被覆	多重ラミネート貼り付け方法		250w×3800^{l}×12^{t}	2450	石積調	2	'96 流失

(注) 1) ※は別途小試験片(板状または管状)を光沢・色差測定用に暴露

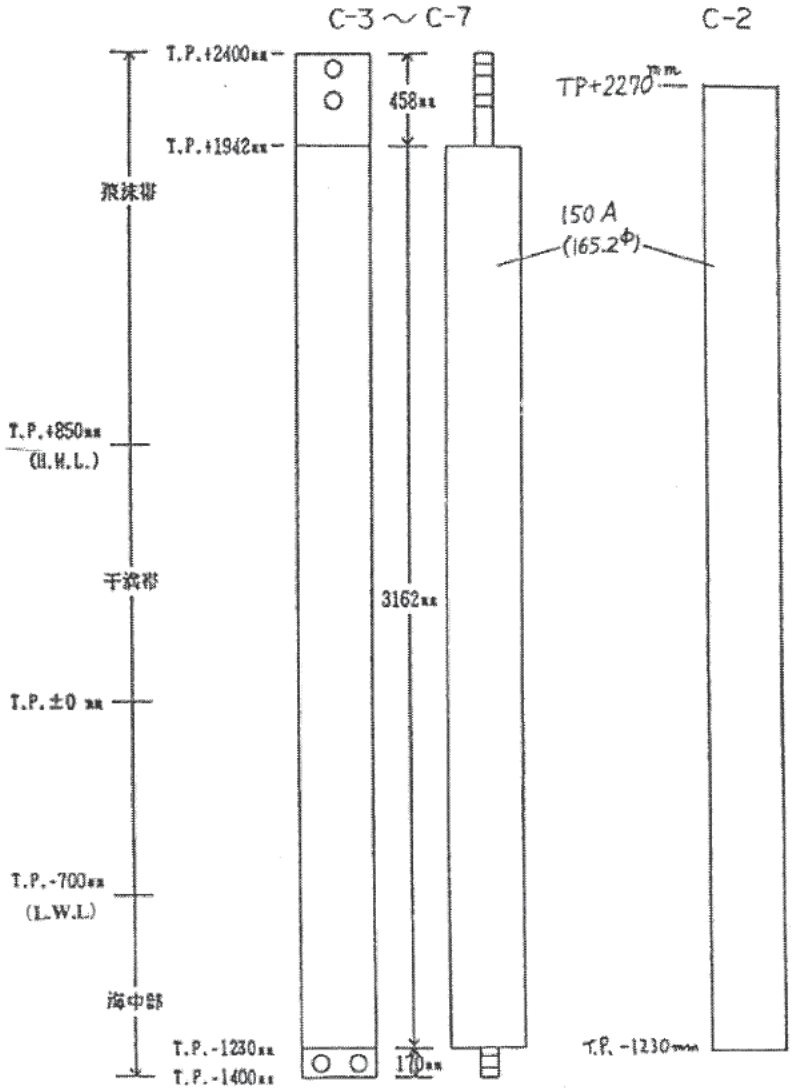
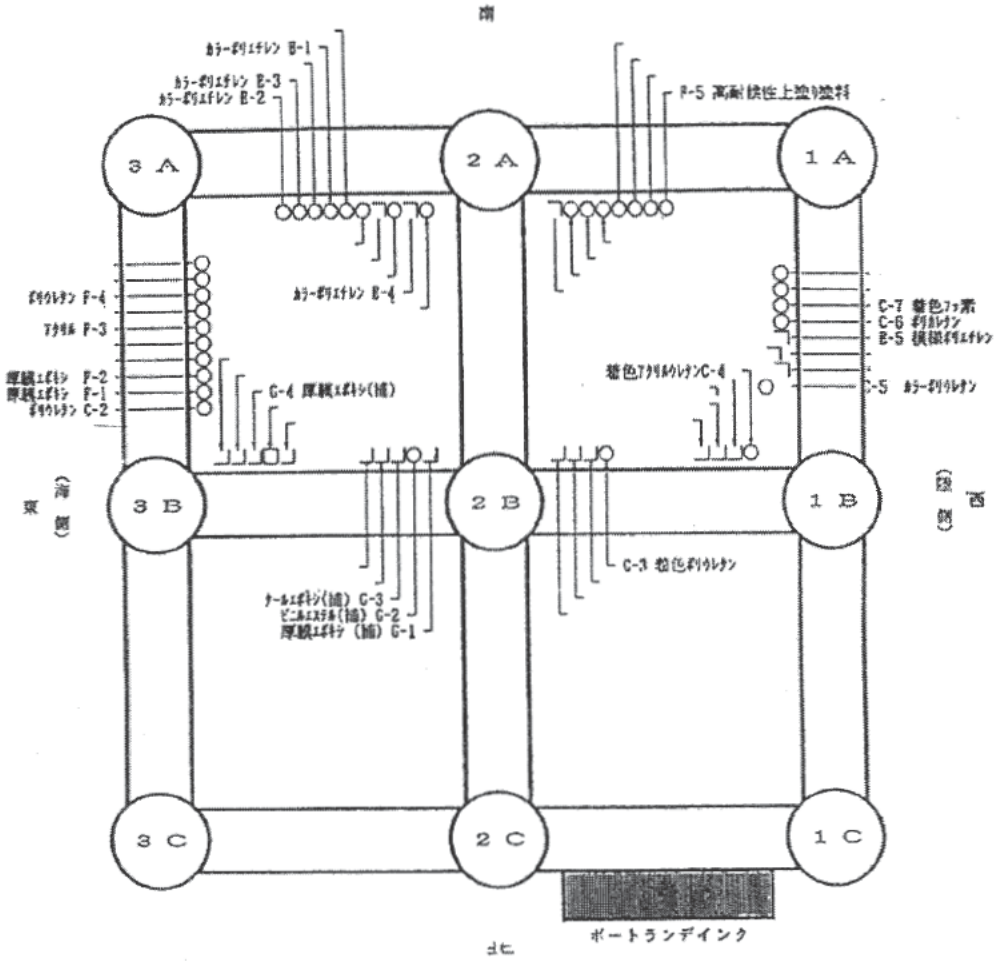


図4.4.1　有機ライニング試験材の形状と暴露レベル



(1) 形状
○：管状
I：板状
L：L形状
□：角パイプ状

(2) 取付年度
1990年度：C系
1993年度：E, F, G系

図4.4.2 有機ライニング試験材の暴露配置

表4.4.2　試験項目および調査方法

調査項目	調査方法
外観観察	目視
生物付着状況	目視
被覆層劣化状況	目視
膜厚測定	KETT膜厚計、VL-30B型、レンジ3（300μm～8mm）
交流抵抗	三田無線㈱、LCRメーター、D-55型（交流0.2, 0.5, 1kHz）
塗膜ピンホール	サンコー電子㈱、ホリスターⅠ型、5kV印加
被覆打診	プラスチックハンマーによる打診
色差　（小試験体）	ミノルタカメラ、CR-200
光沢　（小試験体）	村上色彩研究所、GMX-202

4．4．3 試験結果

4．4．3．1 外観調査結果

表4.4.3と表4.4.4は、それぞれC系とE系の試験材の暴露試験における外観の経時変化を示す。C-3では暴露試験１年後から２×２㎜の当て傷が発生し、さらに、暴露８年後に30×30㎜の当て傷が発生したが、いずれも鋼材面に達するものではなかった。同様にE-3については、暴露５年後に10×10㎜の当て傷が発生したが、鋼面に達するものではなかった。

表4.4.5は、C系の試験材の暴露試験におけるピンホール発生状況を調査した結果を示す。いずれもピンホールの発生は認められなかった。

図4.4.3は、C-2暴露試験材の暴露13年後の外観スケッチを示す。海中部、干満帯および飛沫帯に渡って防食層のはく離、ピンホールの発生、流れさびの発生および防食層のふくれ等は認められなかった。

図4.4.4は、C-3暴露試験材の暴露13年後の外観スケッチを示す。海中部、干満帯および飛沫帯に渡って防食層のはく離、ピンホールの発生、流れさびの発生および防食層のふくれ等は認められなかった。

図4.4.5は、C-4暴露試験材の暴露13年後の外観スケッチを示す。海中部から干満帯上部にかけて表面に付着した海生生物の侵食による防食層のクレーター状の凹みが多数観測されたが、防食層のはく離、ピンホールの発生、流れさびの発生および防食層のふくれ等は認められなかった。

図4.4.6は、E-1暴露試験材の暴露10年後の外観スケッチを示す。海中部、干満帯および飛沫帯に渡って防食層のはく離、ピンホールの発生、流れさびの発生および防食層のふくれ等は認められなかった。

図4.4.7は、E-2暴露試験材の暴露10年後の外観スケッチを示す。海中部、干満帯および飛沫帯に渡って防食層のはく離、ピンホールの発生、流れさびの発生および防食層のふくれ等は認められなかった。

図4.4.8は、E-3暴露試験材の暴露10年後の外観スケッチを示す。海中部、干満帯および飛沫帯に渡って防食層のはく離、ピンホールの発生、流れさびの発生および防食層のふくれ等は認められなかった。

表4.4.3 有機ライニング試験材の外観(1)

2003年度

系	C					
記号	C－2	C－3	C－4	C－5	C－6	C－7
防食系	超厚膜塗装系					
防食仕様	ポリウレタン(黒) ＋ 着色ふっ素(淡青)	着色ポリエチレン (淡緑)	ポリウレタン(黒) ＋ 着色アクリルウレタン (淡青)	ポリウレタン(30μm) ＋ 着色ポリウレタン (緑2500μm)	ポリウレタン(30μm) ＋ 着色ポリウレタン (黒2500μm)	水中硬化型アクリル (下塗り 2000μm 中塗り 300μm) ＋ 着色ふっ素・シリコン共重合 (灰色 70μm)
1991年(1年)	異状なし	南側にあて傷(2×2)	異状なし	異状なし	異状なし	異状なし
1992年(2年)	異状なし	南側にあて傷(2×2)	異状なし	異状なし	異状なし	異状なし
1993年(3年)	異状なし	南側にあて傷(2×2)	異状なし	異状なし	異状なし	異状なし
1994年(4年)	異状なし	南側にあて傷(2×2)	異状なし	異状なし	異状なし	異状なし
1995年(5年)	異状なし	南側にあて傷(2×2)	異状なし	異状なし	異状なし	異状なし
1996年(6年)	異状なし	南側にあて傷(2×2)	異状なし	異状なし	異状なし	異状なし
1997年(7年)	異状なし	南側にあて傷(2×2)	異状なし	異状なし	異状なし	異状なし
1998年(8年)	異状なし	南側にあて傷(2×2) 北側にあて傷(30×30)	異状なし	異状なし	異状なし	異状なし
1999年(9年)	異状なし	南側にあて傷(2×2) 北側にあて傷(30×30)	異状なし	異状なし	異状なし	1998年度回収
2001年(11年)	異状なし	南側にあて傷(2×2) 北側にあて傷(30×30)	異状なし	異状なし	異状なし	
2003年(13年)	異状なし	南側にあて傷(2×2) 北側にあて傷(30×30)	異状なし	異状なし	異状なし	

(注) 1990年度暴露
※ 試験材C-7は1998年度回収

表4.4.4　有機ライニング試験材の外観(2)

2003年度

系	E		
記号	E－1	E－2	E－3
防食系	カラーポリエチレン系		
防食仕様	ポリエチレン樹脂被覆 (ｸﾞﾚｲｯｼｭ ｲｴﾛｰｸﾞﾘｰﾝ)	ポリエチレン樹脂被覆 (ｸﾞﾚｲｯｼｭ ｲｴﾛｰｸﾞﾘｰﾝ)	ポリエチレン樹脂被覆 (ｸﾞﾚｲｯｼｭ ｸﾞﾘｰﾝ)
1994年(1年)	異状なし	異状なし	異状なし
1995年(2年)	異状なし	異状なし	異状なし
1996年(3年)	異状なし	異状なし	異状なし
1997年(4年)	異状なし	異状なし	異状なし
1998年(5年)	異状なし	異状なし	南側にあて傷(10×10)
1999年(6年)	異状なし	異状なし	南側にあて傷(10×10)
2001年(8年)	異状なし	異状なし	南側にあて傷(10×10)
2003年(10年)	異状なし	異状なし	南側にあて傷(10×10)

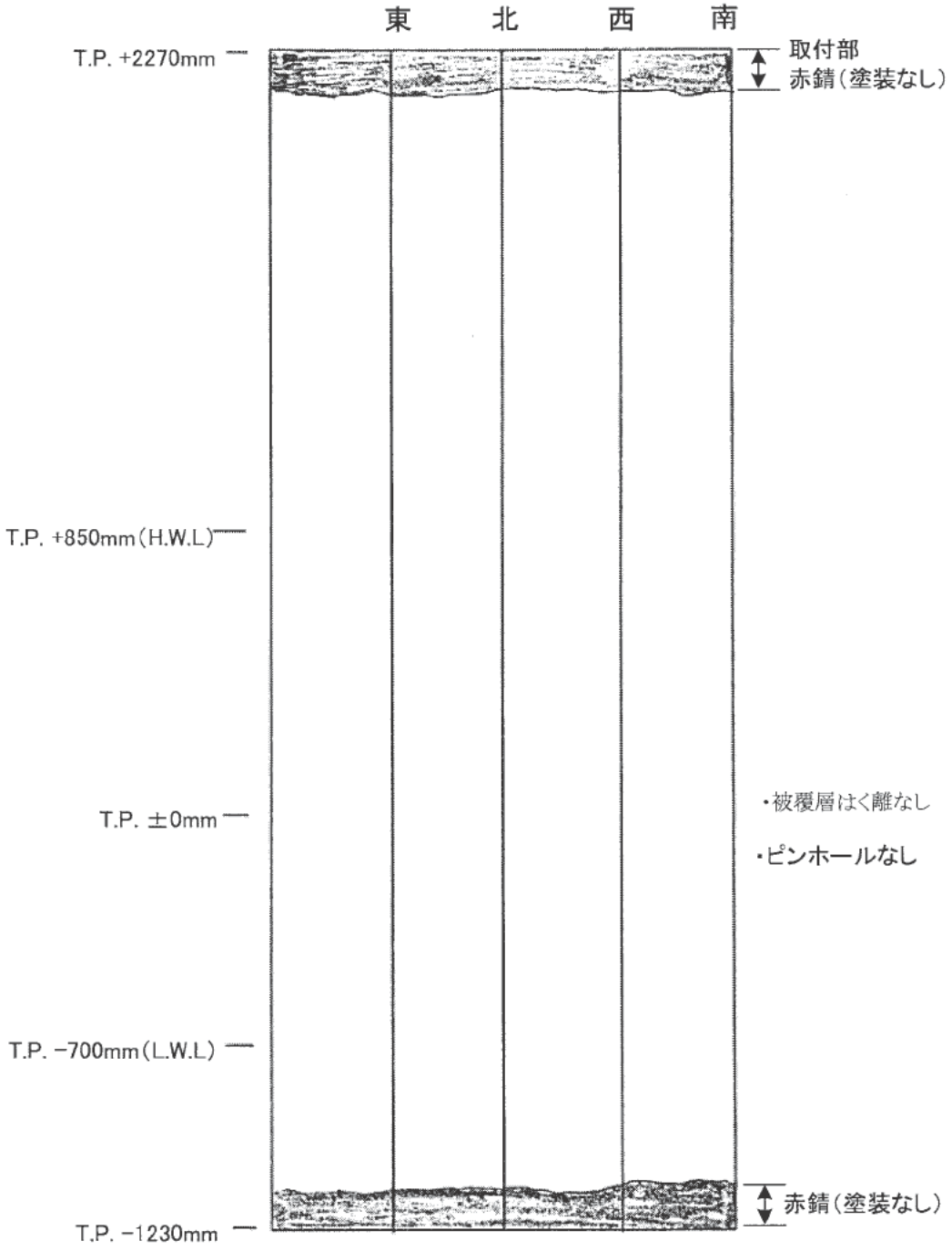
(注)　1993年度暴露

表4.4.5　有機ライニング試験材のピンホール発生状況

(1998年度)　　(μm)

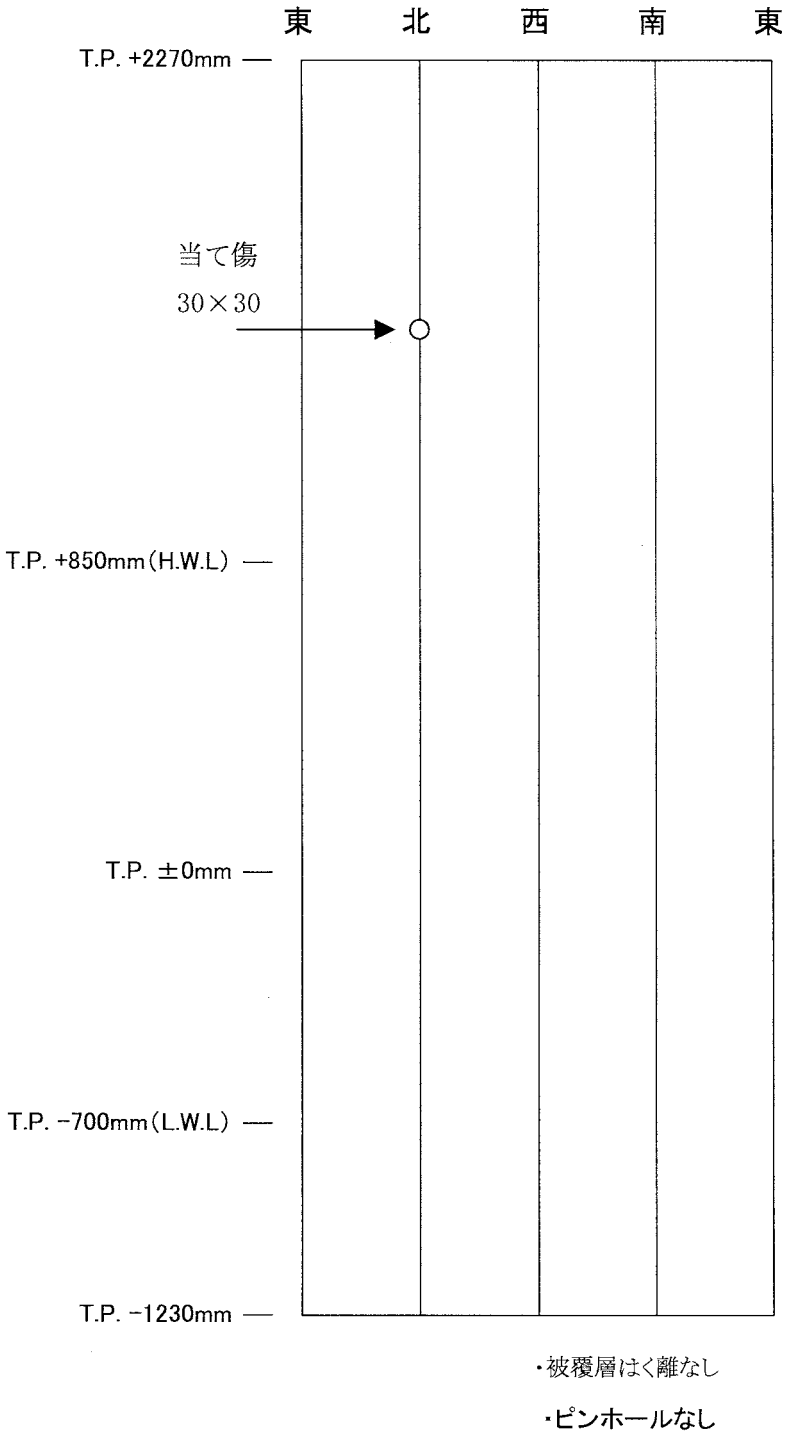
系	記号 No.	防食系	防食仕様	1993年	1998年	2003年
C	C-2	超厚膜塗装系	ポリウレタン(黒) ＋ 着色ふっ素(淡青)	なし	なし	なし
	C-3		着色ポリエチレン(淡緑)	なし	なし	なし
	C-4		ポリウレタン(黒) ＋ 着色アクリルウレタン(淡緑)	なし	なし	なし
	C-5		ポリウレタン系プライマー(30μm) ＋ 着色ポリウレタン(緑 2500μm)	なし	なし	なし
	C-6		ポリウレタン系プライマー(30μm) ＋ 着色ポリウレタン(2500μm)	なし	なし	なし
	C-7		水中硬化型アクリル系 (下塗:2000μm、中塗:300μm) ＋ 着色ふっ素・シリコン共重合 (灰色 70μm)	なし	—	—

(注) 1993年度暴露
※ 試験材C-7は1998年度撤去回収



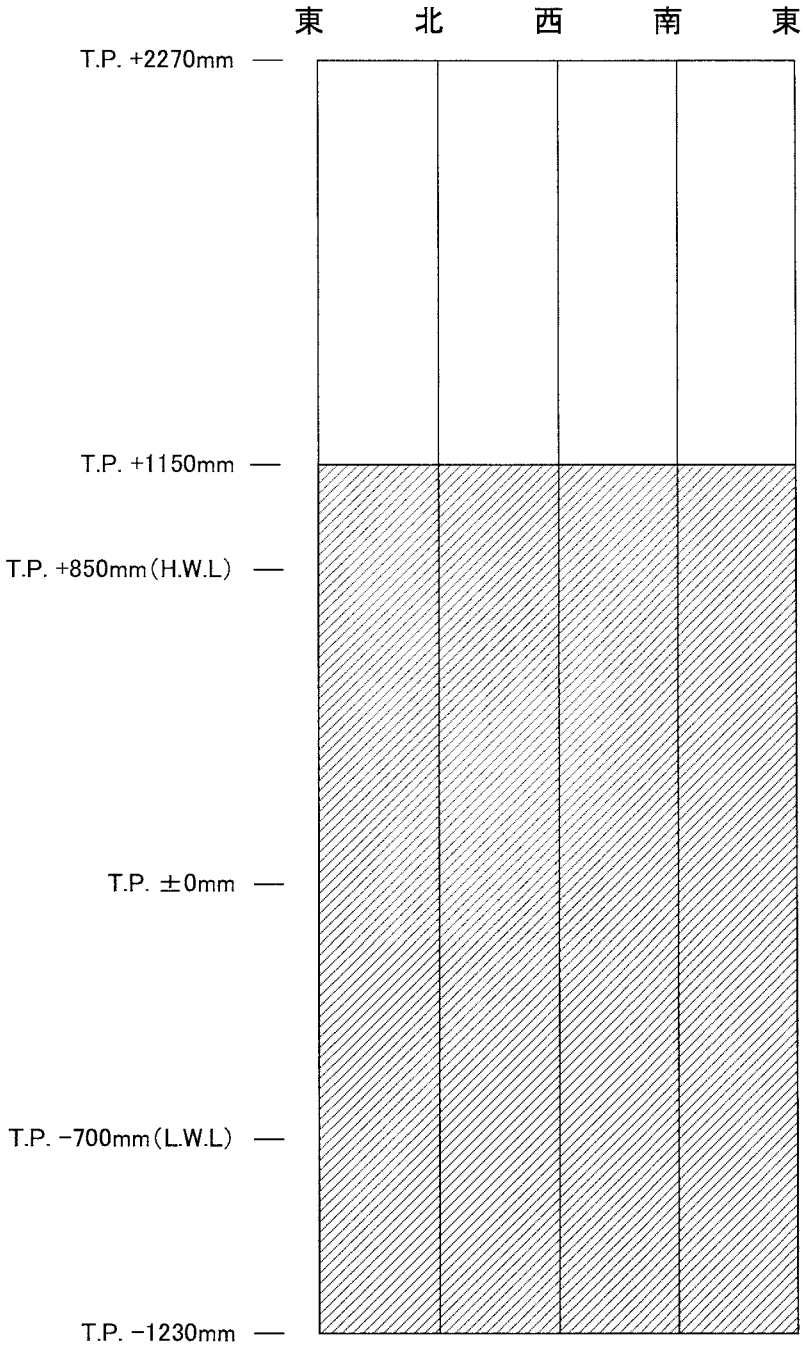
C-2 材、ポリウレタン(黒)+着色ふっ素(淡青)
13年暴露、2003年度回収

図 4.4.3　有機ライニング試験材の外観状況



C-3 材、着色ポリエチレン(淡緑)
13年暴露、2003年度回収

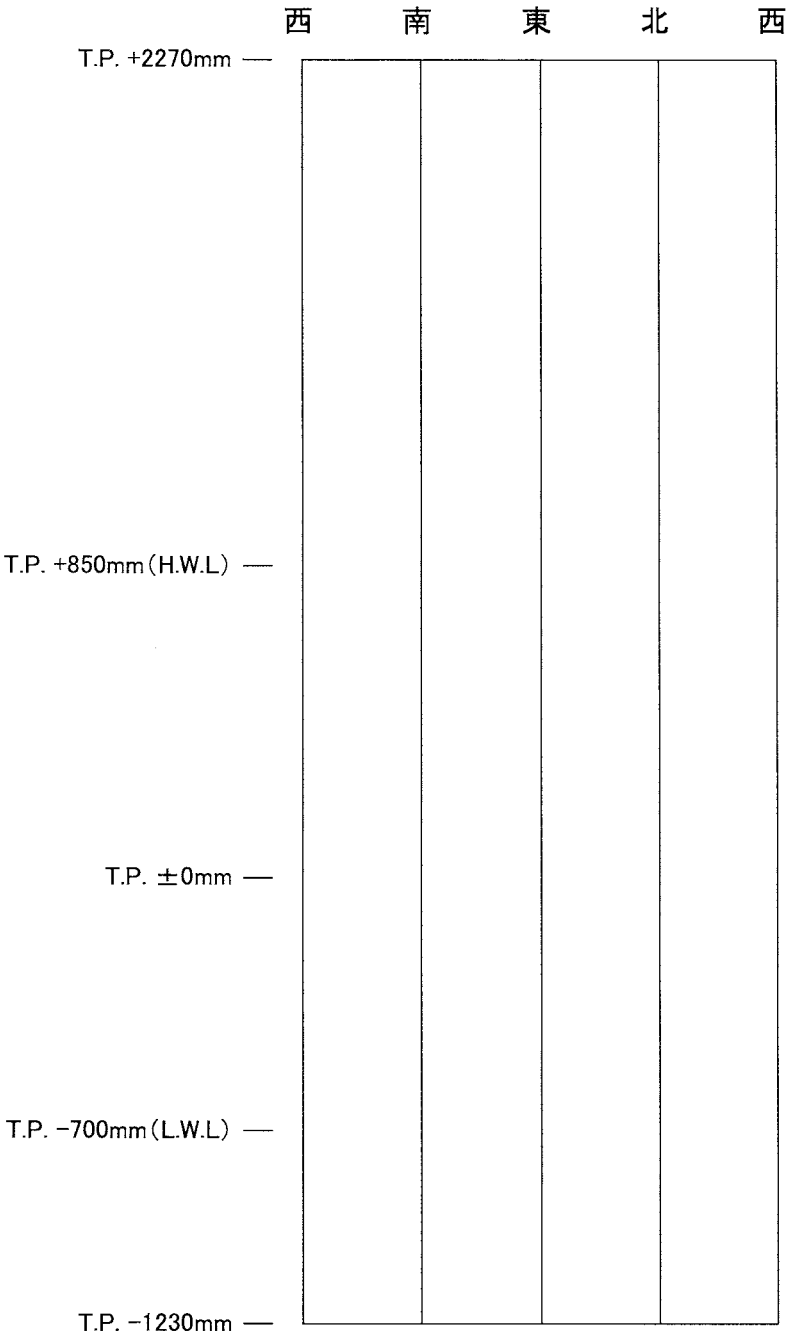
図 4.4.4　有機ライニング試験材の外観状況



·斜線部　除貝時ポリウレタンへの貝の食い込み
·ピンホールなし

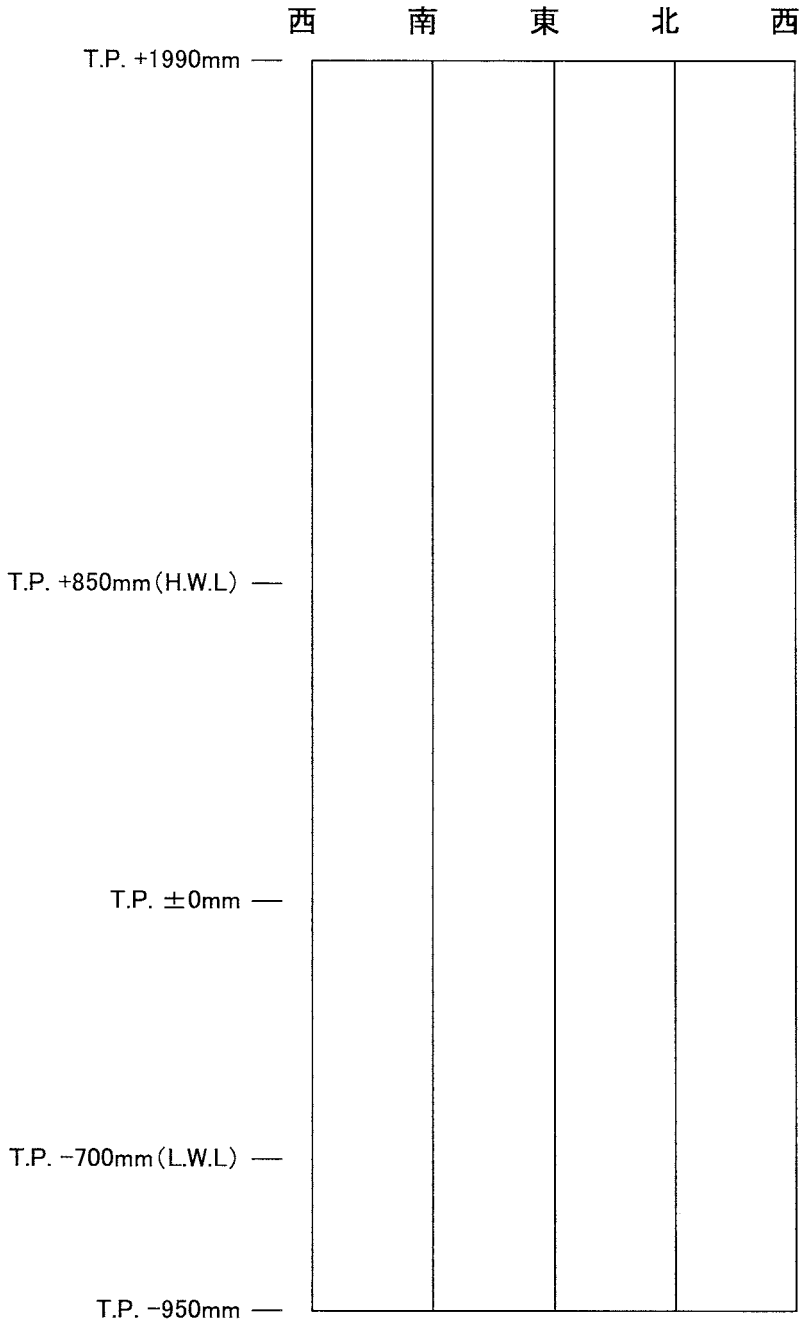
C−4材、着色ポリウレタン(黒)＋アクリルウレタン(淡緑)
13年暴露、2003年度回収

図 4.4.5　　有機ライニング試験材の外観状況



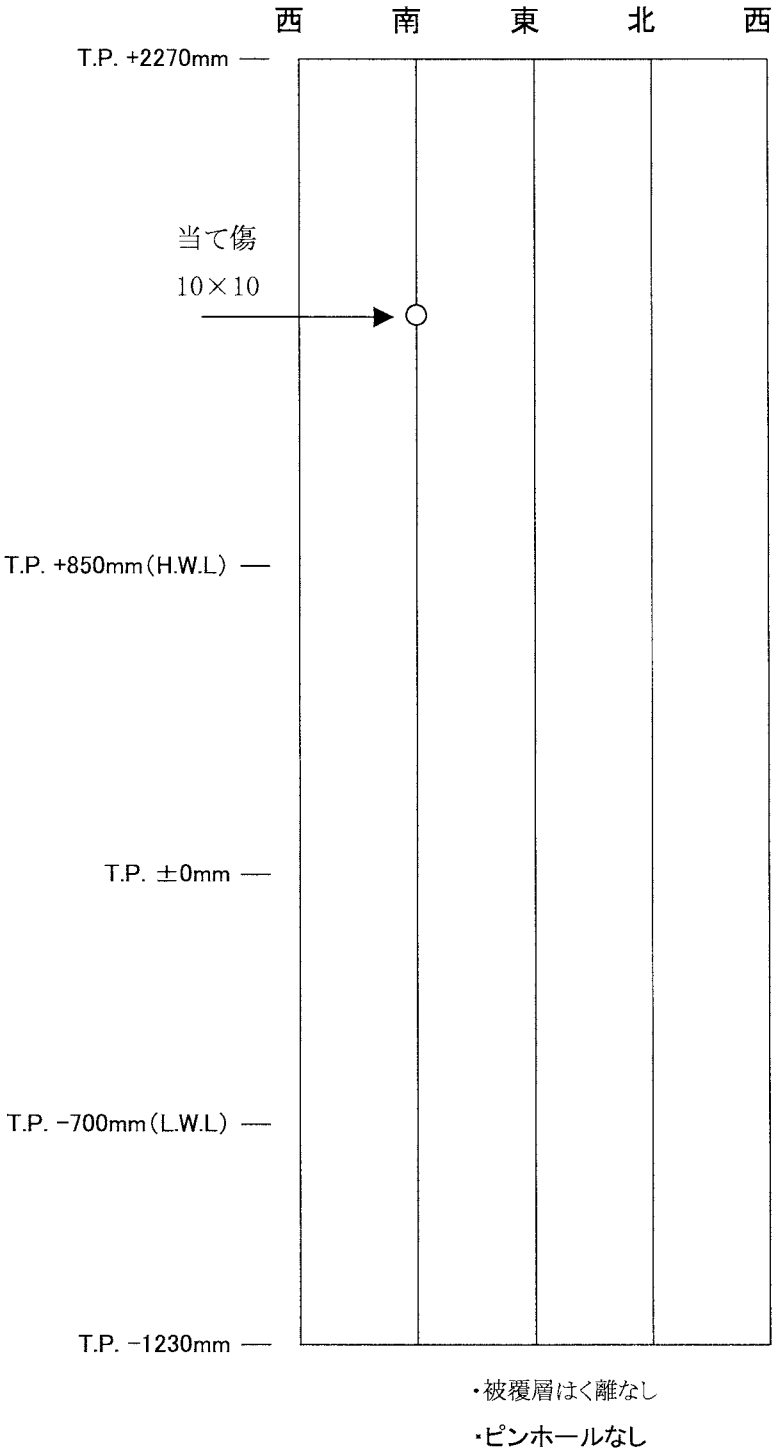
E-1 材、カラーポリエチレン
10年暴露、2003年度回収

図 4.4.6　有機ライニング試験材の外観状況



E-2 材、カラーポリエチレン
10年暴露、2003年度回収

図 4.4.7　有機ライニング試験材の外観およびピンホール



E-3 材、カラーポリエチレン
10年暴露、2003年度回収

図 4.4.8　有機ライニング試験材の外観およびピンホール

4．4．3．2 膜厚調査結果

表4.4.6はＣ系の試験材の暴露試験における防食層の膜厚の経時変化を示す。膜厚は、T.P.+1,770近傍の飛沫帯で、施設側に向いた部位を測定した。いずれの試験材も膜厚の大きな変化は無かった。

表4.4.7は、Ｃ-3試験材の暴露試験前と暴露13年後の防食層の膜厚を示す。なお、膜厚の測定位置を図4.4.9に示す。20箇所の膜厚の平均値で比較すると、13年間の暴露試験でおよそ280μm膜厚が減少した。

表4.4.8は、Ｃ-4試験材の暴露試験前と暴露13年後の防食層の膜厚を示す。なお、膜厚の測定位置を図4.4.10に示す。20箇所の膜厚の平均値で比較すると、13年間の暴露試験でおよそ480μm膜厚が減少した。

表4.4.9は、Ｅ－２試験材の暴露試験前と暴露10年後の防食層の膜厚を示す。なお、膜厚の測定位置を図4.4.11に示す。12箇所の膜厚の平均値で比較すると、10年間の暴露試験でおよそ270μm膜厚が減少した。

表4.4.6　有機ライニング試験材の膜厚

(2003年度)　　(μm)

系	記号 No.	防食系	防食仕様	1993年	1998年	2003年
C	C-2	超厚膜塗装系	ポリウレタン(黒) ＋ 着色ふっ素(淡青)	3400 3400 3400	3400 3400 3300	3400 3400 3400
	C-3		着色ポリエチレン(淡緑)	2400 2500 2400	2600 2400 2500	2500 2400 2500
	C-4		ポリウレタン(黒) ＋ 着色アクリルウレタン(淡緑)	4600 4500 4500	4500 4300 4800	4700 4700 4600
	C-5		ポリウレタン系プライマー(30μm) ＋ 着色ポリウレタン(緑 2500μm)	3800 3800 3900	3700 4000 3700	3700 3900 3800
	C-6		ポリウレタン系プライマー(30μm) ＋ 着色ポリウレタン(2500μm)	3200 3300 3300	3400 3400 3400	3100 3200 3100
	C-7		水中硬化型アクリル系 (下塗:2000μm、中塗:300μm) ＋着色ふっ素・シリコン共重合 (灰色 70μm)	2900 2800 2600	—	—

試験材膜厚測定部位：　TP+1770近傍(飛沫帯)

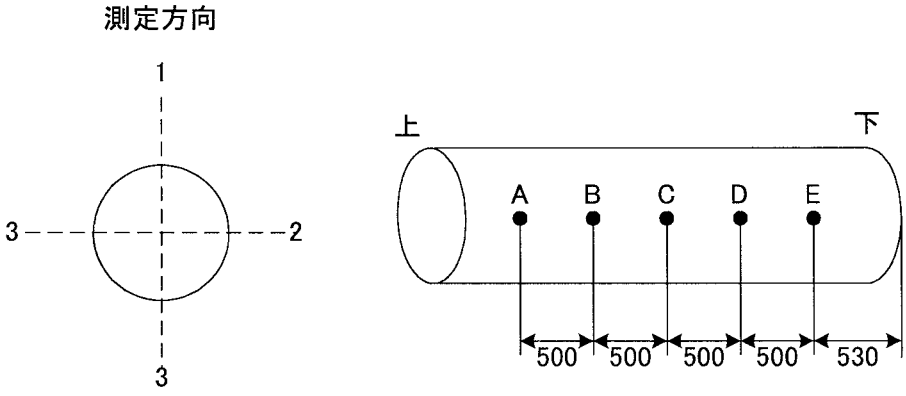


図 4.4.9　有機ライニング試験材の膜厚測定位置(C-3 材)

表 4.4.7　有機ライニング試験材の膜厚初期値との比較
13 年暴露、C-3 材 : 着色ポリエチレン

(1)初期値(1990年度)　(μm)

測定位置	A	B	C	D	E
1	2700	2690	2670	2680	2710
2	3200	3190	3130	3150	3170
3	2950	3010	2980	3080	3030
4	2380	2440	2400	2430	2440

(2)暴露13年後(2003年度)　(μm)

	A	B	C	D	E
1	2600	2700	2630	2620	2600
2	2700	2720	2800	2800	2800
3	2500	2500	2600	2600	2600
4	2200	2200	2200	2300	2130

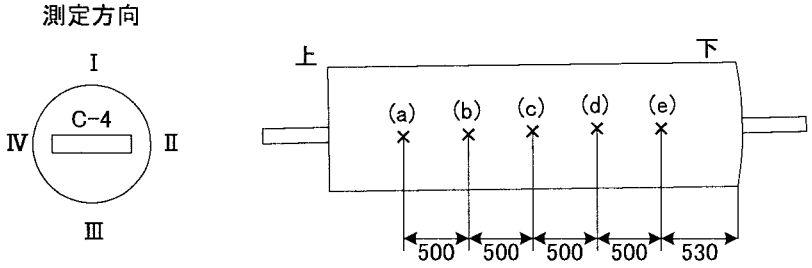


図 4.4.10　有機ライニング試験材の膜厚測定位置(C-4 材)

表 4.4.8　有機ライニング試験材の膜厚初期値との比較

13 年暴露、C-4 材、ポリウレタン＋アクリルウレタン

(1)初期値(1990 年度)　(μm)

測定位置	(a)	(b)	(c)	(d)	(e)
I	4000	3800	4000	4200	3600
II	4200	4200	4600	4800	4000
III	5200	5800	5000	5600	5200
IV	5000	5000	4800	4200	4400
平均	4600	4700	4600	4700	4300

(2)暴露 13 年後(2003 年　(μm)

測定位置	(a)	(b)	(c)	(d)	(e)
I	3500	3400	3500	3500	3200
II	3900	3300	3300	3900	3400
III	4500	4700	4300	4500	4300
IV	5000	5100	5000	5000	4800
平均	4225	4125	4025	4225	3925

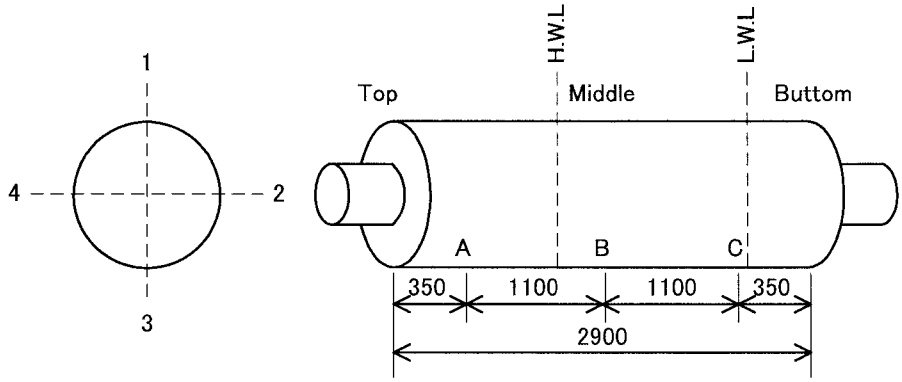


図 4.4.11　有機ライニング試験材の膜厚測定位置(E-2 材)

表 4.4.9　有機ライニング試験材の被覆厚の初期値との比較

E-2 材、カラーポリエチレン

(1)初期値(1993年度)　(μm)

測定位置	A	B	C
1	3500	3400	3400
2	3600	3600	3700
3	3200	3000	3100
4	4000	4000	4000
平均	3575	3500	3550

(2)暴露10年後(2003年度)　(μm)

	A	B	C
1	3200	3300	3300
2	3200	3300	3400
3	2730	2770	2970
4	3430	3800	3830
平均	3140	3293	3375

注)測定位置 1～4 が確認できないため、2003 年度は施設位置における内側を起点として膜厚を測定し、初期値の膜厚傾向に合わせた。

4．4．3．3 インピーダンス測定結果

暴露試験による防食層の劣化程度をモニタリングするため、経時で有機ライニング鋼材の交流インピーダンスを測定した。T.P.+1,770近傍の飛沫帯で、施設側に向いた部位を測定した。

図4.4.12は、C系の試験材の13年間の暴露試験における防食層の交流抵抗値の経時変化を0.2kHzの交流電圧で測定した結果である。試験材によって多少のばらつきがあるが、いずれも$10^9\Omega cm^2$程度の交流抵抗値を示し、暴露試験の間ほぼ一定の値を示した。

図4.4.13は、C系の試験材の13年間の暴露試験における防食層の交流抵抗値の経時変化を0.5kHzの交流電圧で測定した結果である。試験材によって多少のばらつきがあるが、いずれも$10^9\Omega cm^2$程度の交流抵抗値を示し、暴露試験の間ほぼ一定の値を示した。

図4.4.14は、C系の試験材の13年間の暴露試験における防食層の交流抵抗値の経時変化を1.0kHzの交流電圧で測定した結果である。試験材によって多少のばらつきがあるが、いずれも$10^9\Omega cm^2$程度の交流抵抗値を示し、暴露試験の間ほぼ一定の値を示した。

図4.4.15は、C系の試験材の13年間の暴露試験における防食層の静電容量成分の経時変化を0.2kHzの交流電圧で測定した結果である。試験材によって多少のばらつきがあるが、暴露試験の間ほぼ一定の値を示した。

図4.4.16は、C系の試験材の13年間の暴露試験における防食層の静電容量成分の経時変化を0.5kHzの交流電圧で測定した結果である。試験材によって多少のばらつきがあるが、暴露試験の間ほぼ一定の値を示した。

図4.4.17は、C系の試験材の13年間の暴露試験における防食層の静電容量成分の経時変化を1.0kHzの交流電圧で測定した結果である。試験材によって多少のばらつきがあるが、暴露試験の間ほぼ一定の値を示した。

図4.4.18は、C系の試験材の13年間の暴露試験における防食層の$\tan\delta$の経時変化を0.2kHzの交流電圧で測定した結果である。C-2については暴露9年後以降にやや$\tan\delta$の上昇が認められたが、その他の試験材は暴露試験の間ほぼ一定の値を示した。

図4.4.19は、C系の試験材の13年間の暴露試験における防食層の$\tan\delta$の経時変化を0.5kHzの交流電圧で測定した結果である。C-2については暴露9年後以降に若干$\tan\delta$の上昇が認められたが、その他の試験材は暴露試験の間ほぼ一定の値を示した。

図4.4.20は、C系の試験材の13年間の暴露試験における防食層の$\tan\delta$の経時変化を1.0kHzの交流電圧で測定した結果である。いずれの試験材も暴露試験の間ほぼ一定の値を示した。

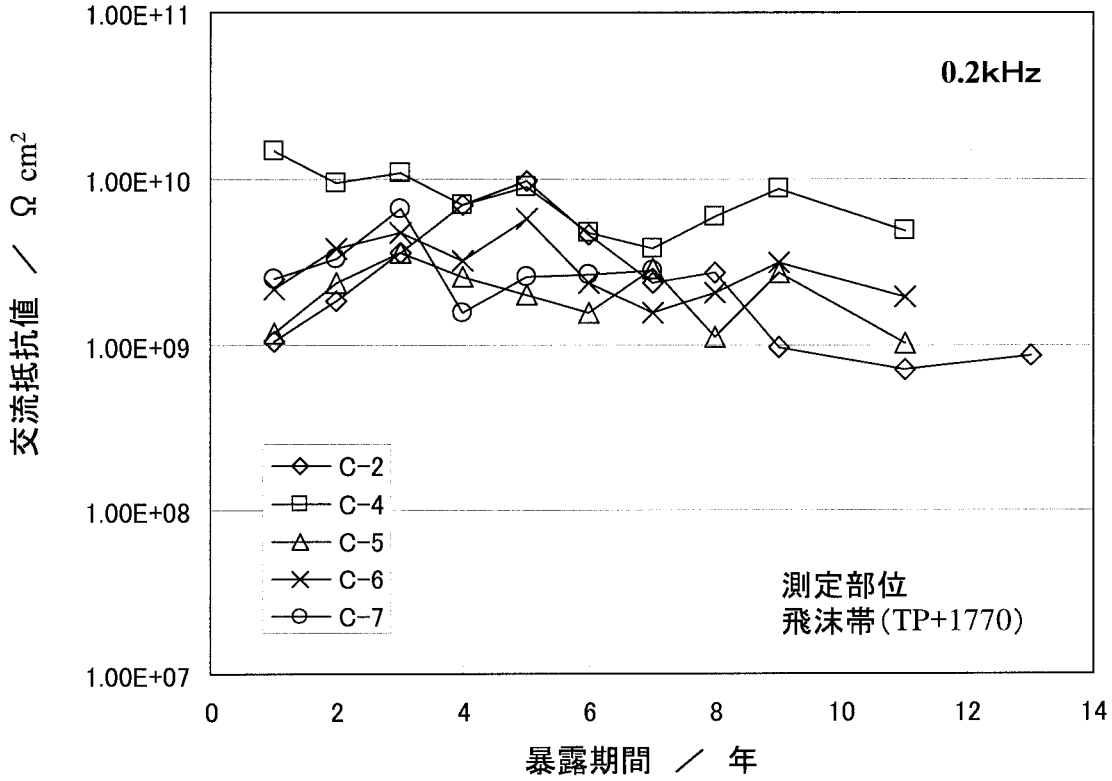


図4.4.12 有機ライニング試験材の交流抵抗値に及ぼす暴露期間の影響(現地測定、0.2kHz)

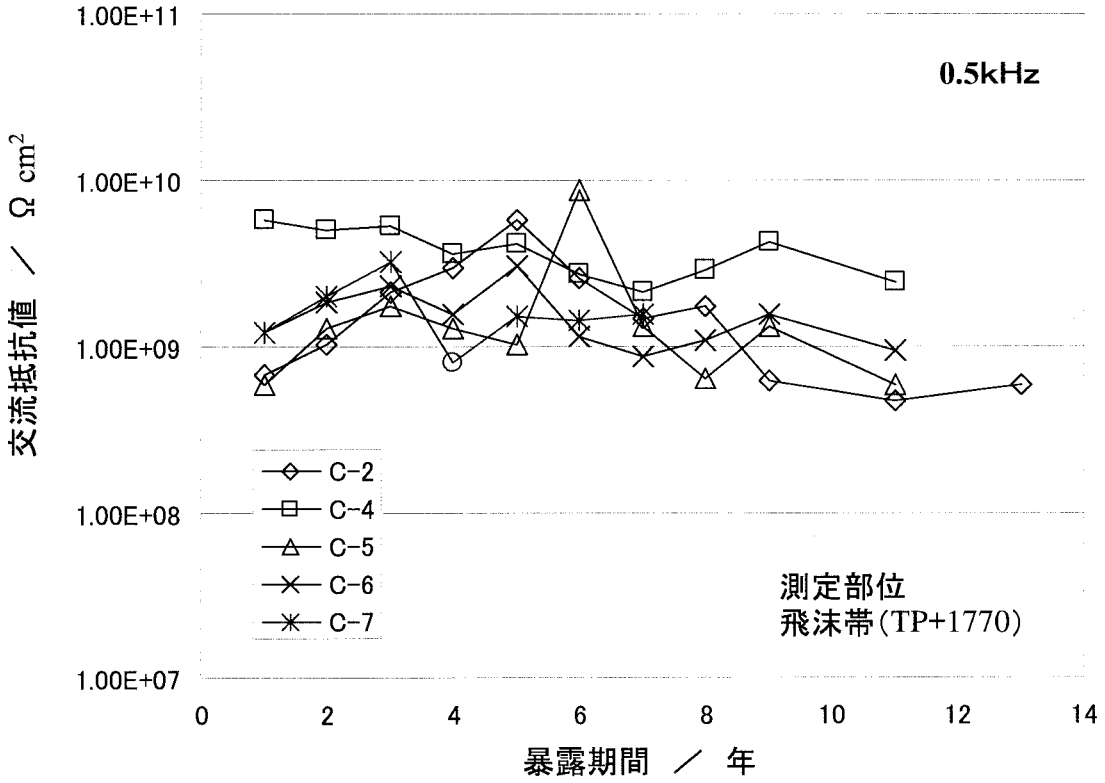


図4.4.13 有機ライニング試験材の交流抵抗値に及ぼす暴露期間の影響(現地測定、0.5kHz)

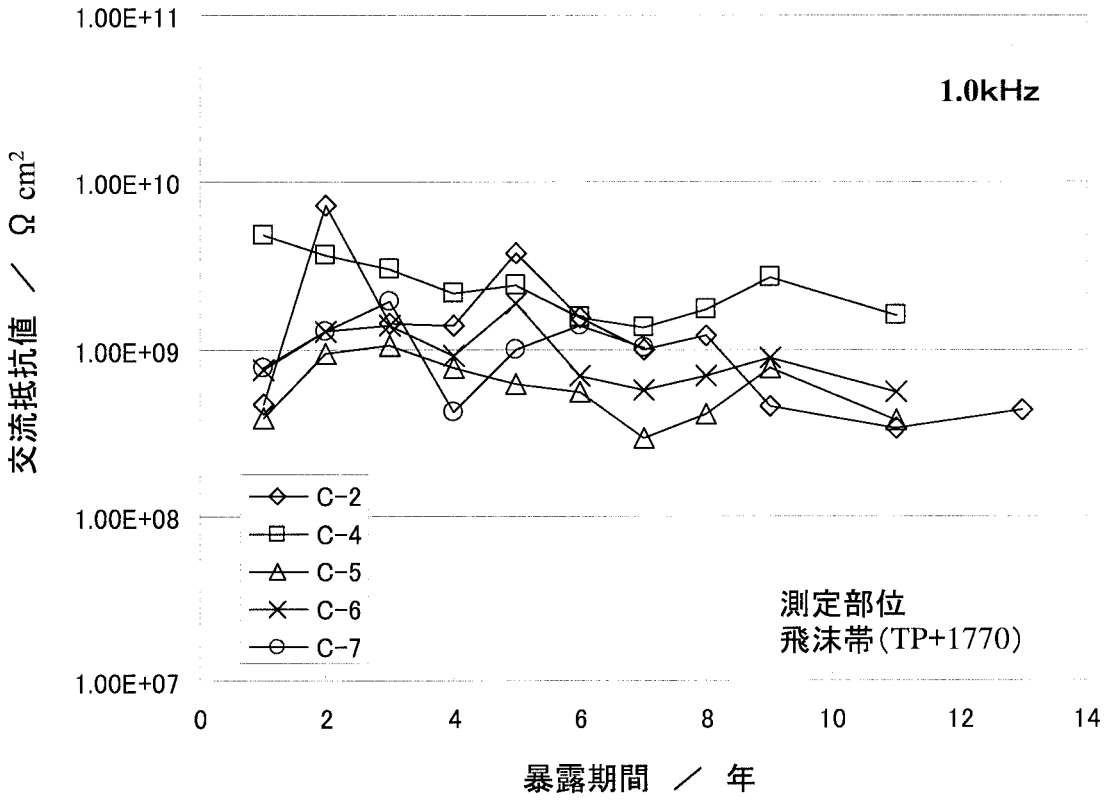


図4.4.14 有機ライニング試験材の交流抵抗値に及ぼす暴露期間の影響(現地測定、1.0kHz)

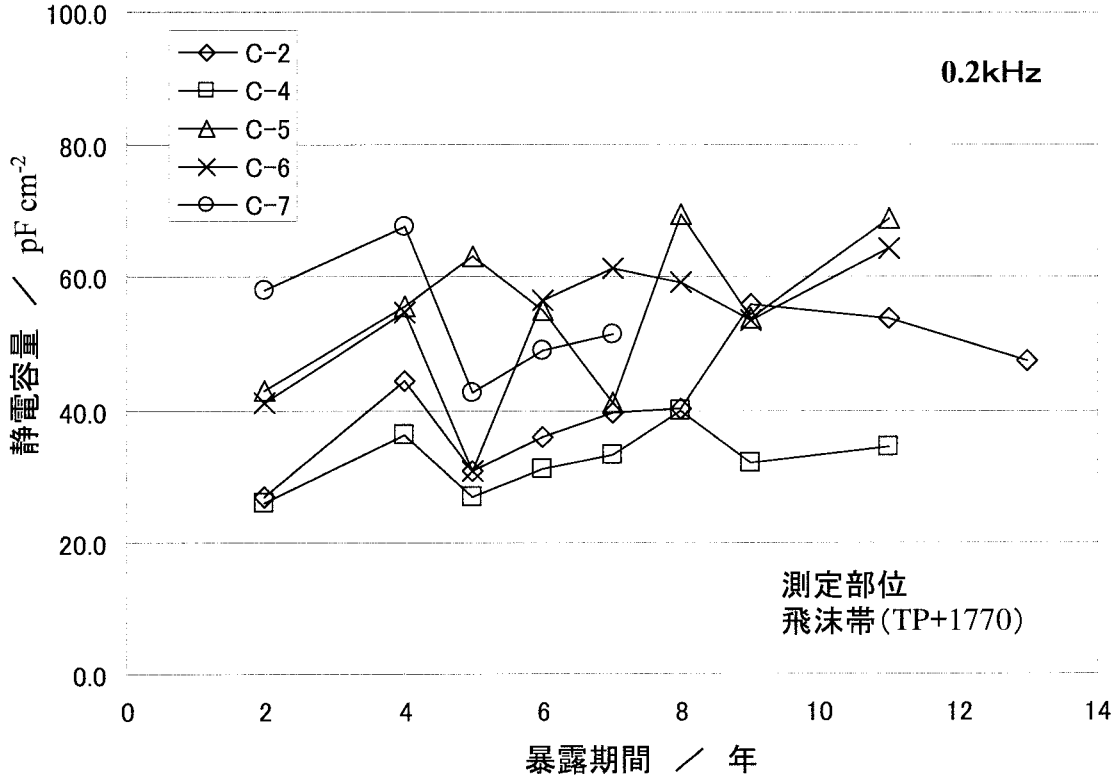


図4.4.15 有機ライニング試験材の静電容量に及ぼす暴露期間の影響(現地測定、0.2kHz)

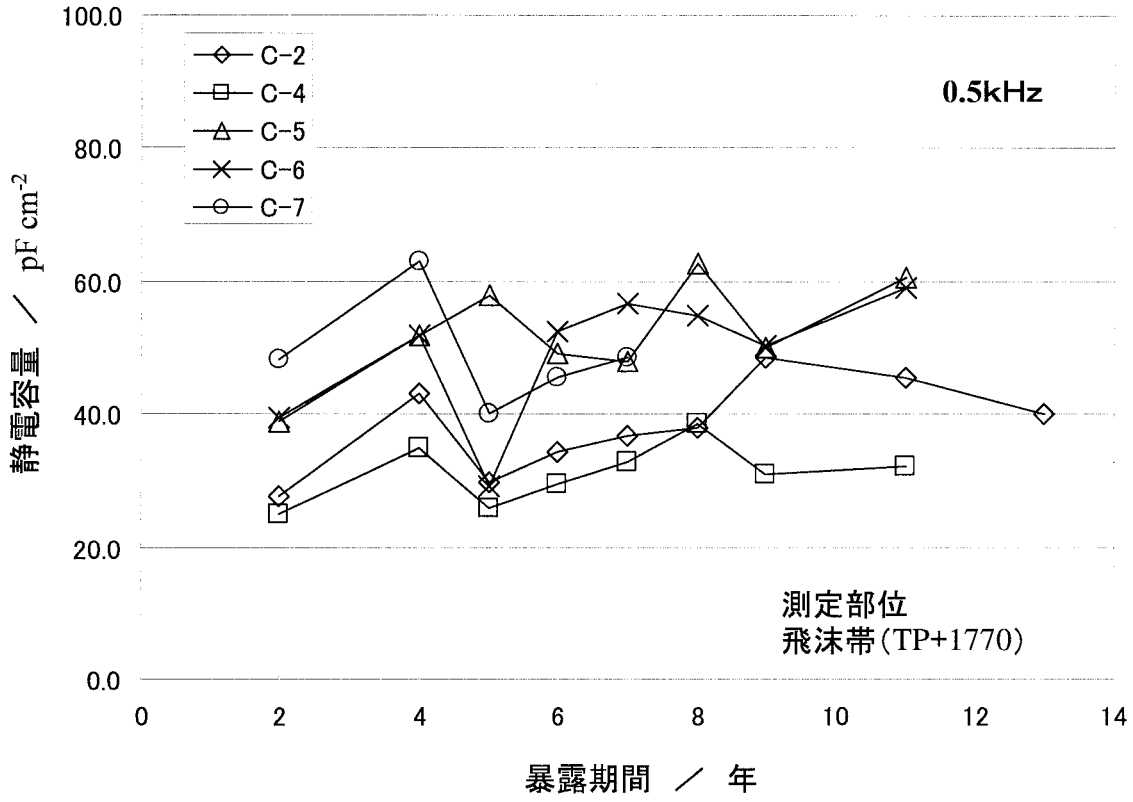


図4.4.16 有機ライニング試験材の静電容量に及ぼす暴露期間の影響(現地測定、0.5kHz)

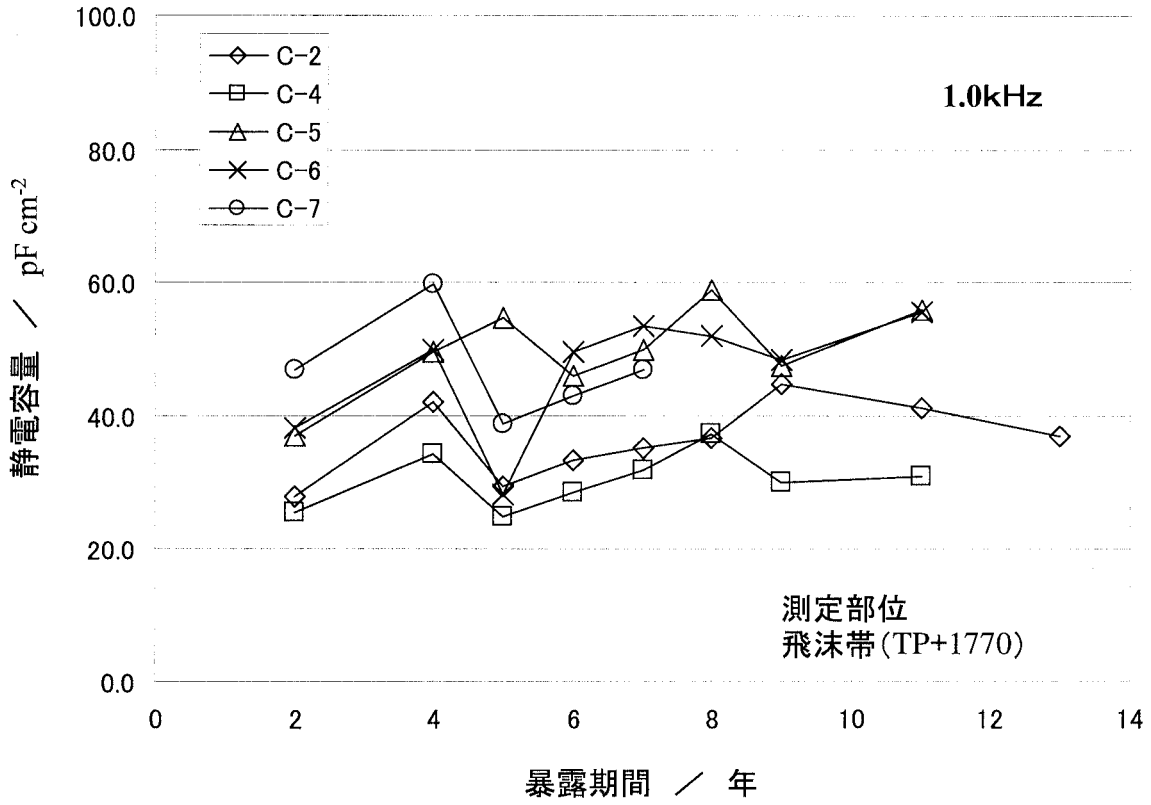


図4.4.17　有機ライニング試験材の静電容量に及ぼす暴露期間の影響(現地測定、1.0kHz)

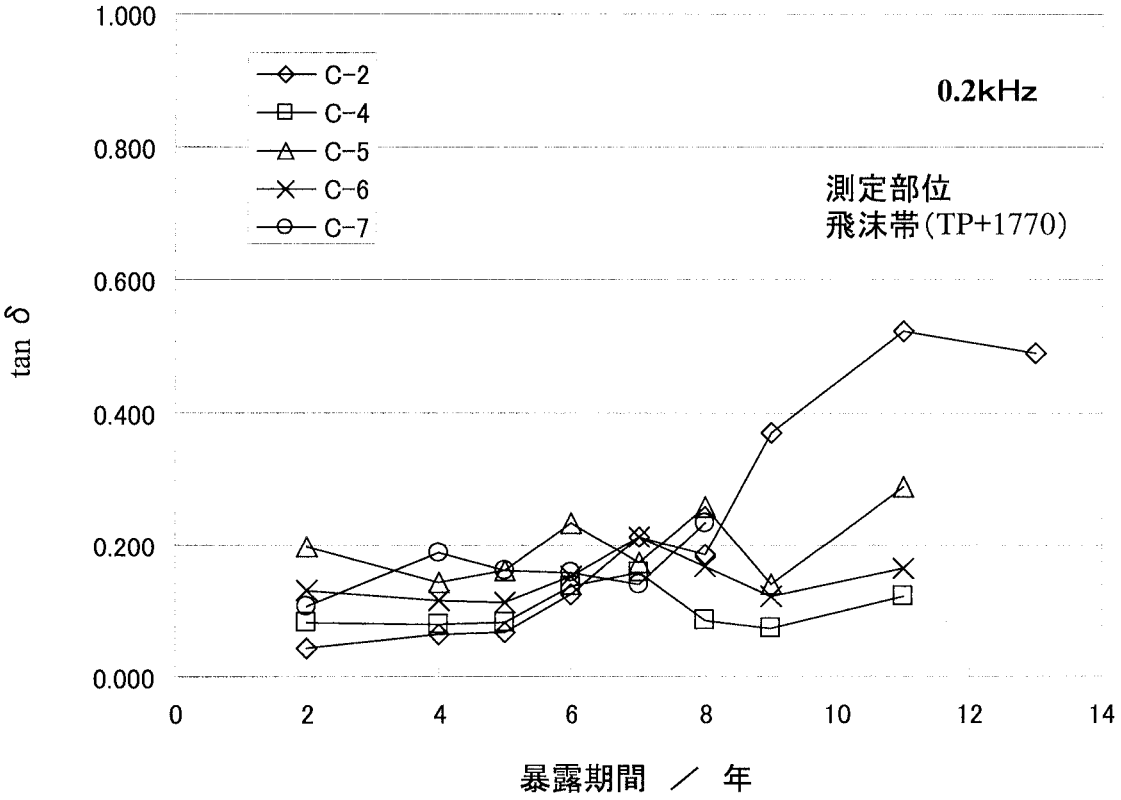


図4.4.18　有機ライニング試験材のtan δに及ぼす暴露期間の影響(現地測定、0.2kHz)

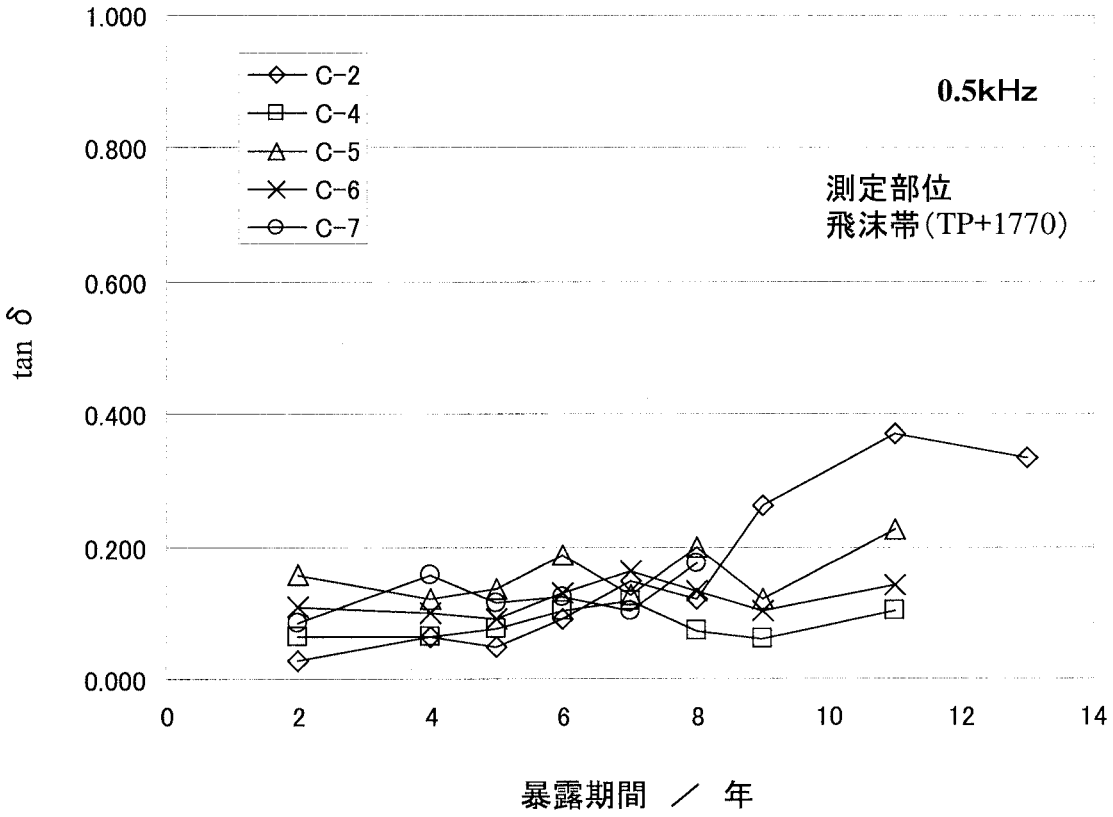


図4.4.19 有機ライニング試験材のtan δに及ぼす暴露期間の影響(現地測定、0.5kHz)

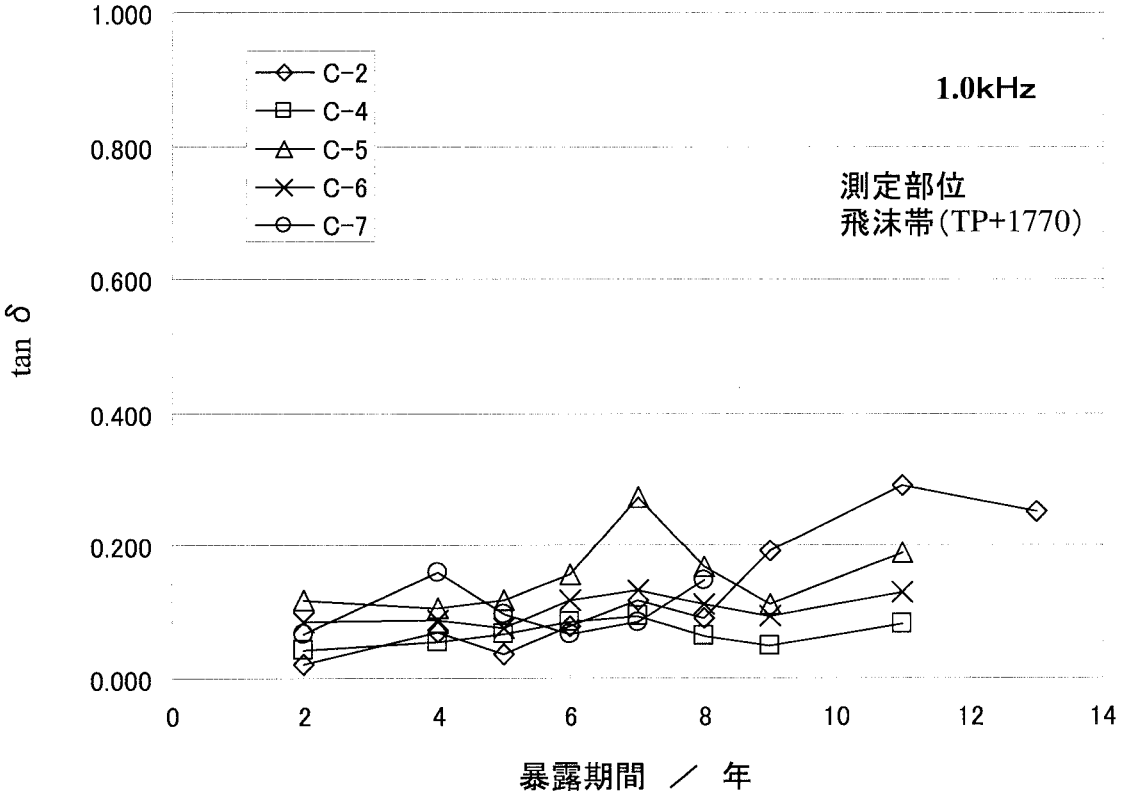


図4.4.20　有機ライニング試験材のtan δに及ぼす暴露期間の影響（現地測定、1.0kHz）

4．4．3．4 色差・光沢保持率測定結果

図4.4.21はＣ系およびＥ系の小型試験片の、５年間の暴露試験における光沢保持率の経時変化を示す。Ｅ-1、Ｅ-2およびＥ-3の試験材については、５年間の暴露試験で70%以上の光沢保持率を示した。Ｃ-2およびＣ-4の試験材については、暴露試験５年後に光沢保持率が40%程度に低下した。Ｃ-5、Ｃ-6については暴露試験１年後で、Ｃ-7については暴露試験３年後で光沢保持率が20%未満に低下した。

図4.4.22はＣ系およびＥ系の小型試験片の、５年間の暴露試験における色差の経時変化を示す。Ｅ-1、Ｅ-2、Ｅ-3およびＣ-7の試験片は、５年間の暴露試験で色差は５未満であった。Ｃ-4、Ｃ-5およびＣ-6については、経時とともに色差がそれぞれ一定の値に収束し、５年間の暴露試験でおおよそ７～10程度であった。Ｃ-2については時間の経過に伴って色差が増大した。

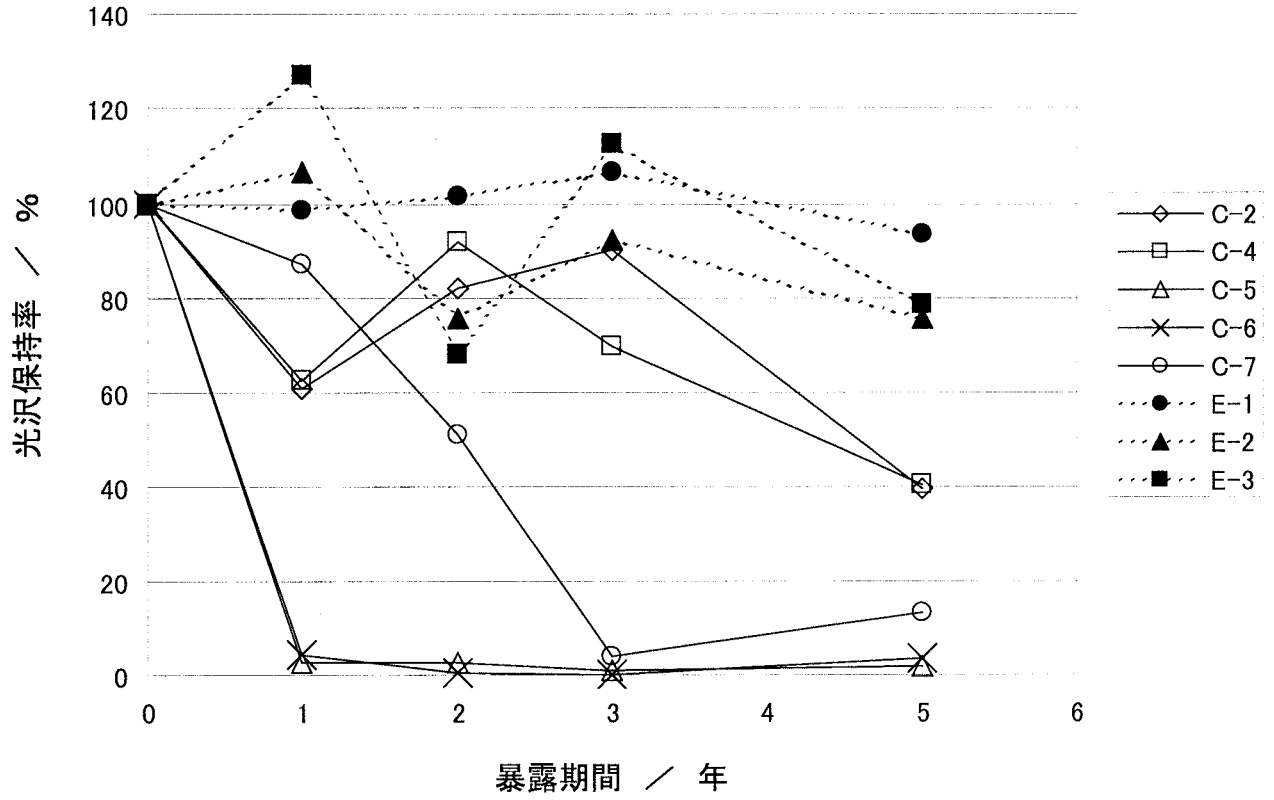


図4.4.21　有機ライニング試験材の光沢保持率に及ぼす暴露期間の影響

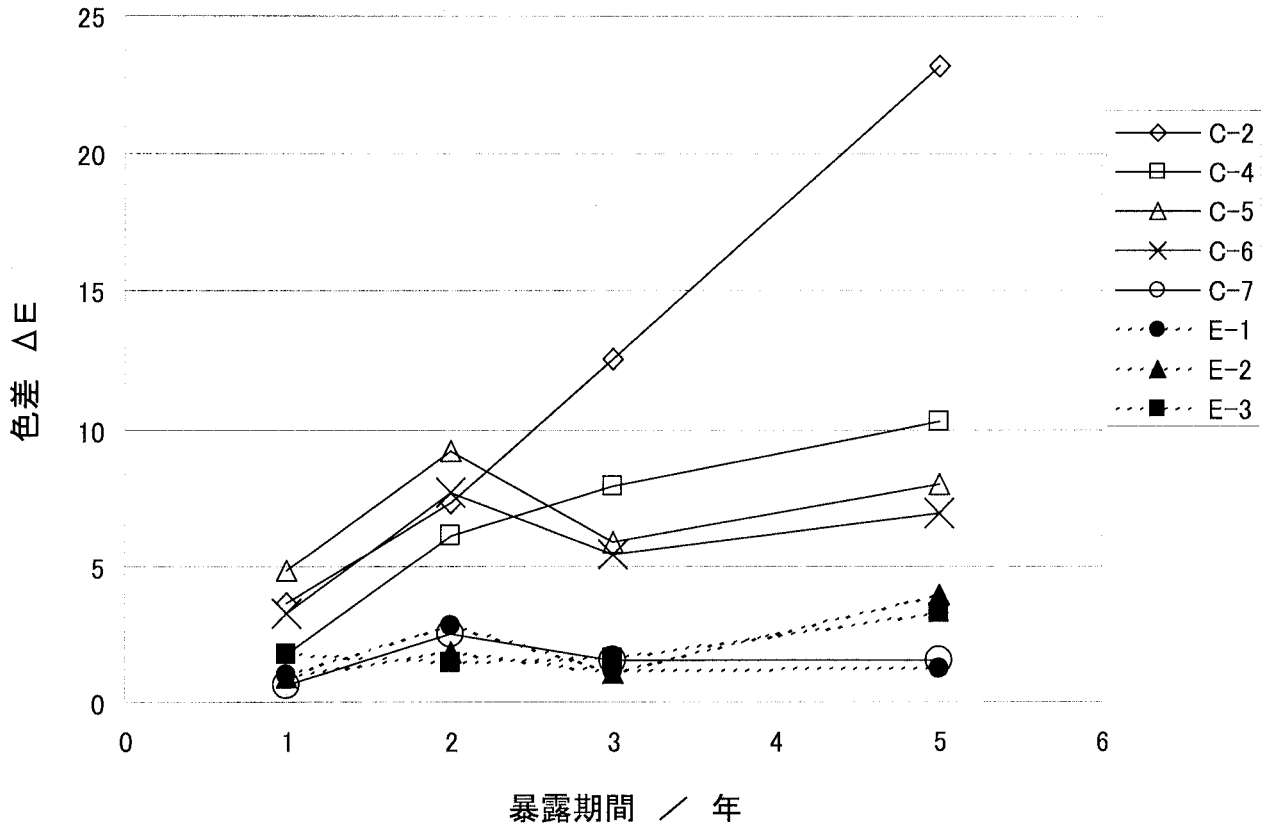


図4.4.22　有機ライニング試験材の色差に及ぼす暴露期間の影響

4．4．4 考察

本研究は、比較的波の荒い海洋環境において、有機ライニング鋼材の耐久性を海中部から飛沫帯に渡って10年間（主としてポリエチレン被覆鋼材）および13年間（主としてポリウレタン被覆鋼材）調査したものである。

有機ライニング鋼材の耐久性は、防食層のそれ自身の材料としての耐久性と、被覆された鋼材の防食性能の耐久性の観点から論じることができる。前者の防食層自身の材料としての耐久性は、暴露試験後の防食層の割れの有無（耐衝撃性）、イオン透過抵抗や防食層の膜厚等で評価できる。一方、後者の有機ライニング鋼材の防食性能の耐久性としては、暴露試験後の外観、即ち、さびやふくれの発生の有無で評価できる。また、前者の防食層の材料としての耐久性は、後者の有機ライニング鋼材の防食性能の耐久性に対して影響を及ぼす。なぜならば、防食層の劣化によって鋼材の外部腐食環境からの遮断機能が低下した場合には、鋼材が腐食する可能性が高まるからである。

本研究では、これらの有機ライニング鋼材の耐久性に関する基本的な確性試験だけではなく、周囲の景観への調和にも配慮した、有機系のカラーライニング鋼材について、その色調の堅牢性を光沢保持率と色差の観点から評価した。従来の有機ライニング鋼材は、防食層の樹脂の光酸化劣化を長期に渡って効率よく抑制するために防食層にカーボンブラックを添加しており、その結果、外観は黒色であった。今回、防食層を着色するため、少なくとも最外層の樹脂層にはカーボンブラックを添加しておらず、紫外線照射量の厳しい海洋環境において長期に渡って樹脂の光酸化劣化を抑制するためには、耐候性に優れる適切な樹脂組成を選定することが重要となる。特に、樹脂層の光酸化劣化が進展すると樹脂の低分子量化によって脆化し、チョーキングによる著しい膜厚の低下や、耐衝撃性の低下による防食層の割れが発生すると考えられ、その場合、景観調和性だけではなくライニング被覆鋼材の防食性能が損なわれる可能性がある。

今回、10～13年間海洋暴露試験に供したポリエチレン被覆鋼材は、一部の試験材に飛沫帯を中心に当て傷が観察されたが（表4.4.3：C-3、30×30mm１箇所、表4.4.4：E-3、10×10mm１箇所）、いずれも鋼面に達せず、当て傷を起点としたさびやふくれの発生は認められなかった。同様に、ポリウレタン被覆鋼材についても、一部の試験材（C-4）に防食層への貝の食い込みが認められたが（図4.4.5）、鋼面に達する防食層の傷、割れや剥落は認められなかった。防食層に貝が食い込んだ部位においても十分な防食層厚みが確保されており、さびやふくれの発生は一切認められなかった。また、暴露試験に起因する防食層へのピンホールの発生は、ポリエチレン被覆鋼材およびポリウレタン被覆鋼材ともに認められなかった（表4.4.5）。以上の結果より、今回の試験に供したポリエチレン被覆鋼材およびポリウレタン被覆鋼材の防食層は、波の荒い大井川沖でも長期間耐える十分な耐衝撃性と、紫外線照射量の多い海洋環境で防食層の脆化を抑制する十分な耐候性を兼ね備えていると考えられる。一般的には、何らかの原因で防食層が欠損し鋼材が露出した場合には、少なくとも鋼材が腐食環境に露出した部分については防食性能が喪失すると考えられるの

で、供試材の耐衝撃性と耐候性が有機ライニング鋼材の防食性能の維持に寄与したものと考えられる。なお、防食層の健全な個所についても腐食は一切認められなかった。

海洋暴露試験による防食層の膜厚の減少速度は、ポリウレタン被覆鋼材についてはC-4が37μm/年、ポリエチレン被覆鋼材については、C-3が22μm/年（表4.4.7）、E-2が27μm/年（表4.4.9）であった。初期と暴露試験後とで必ずしも同一の箇所で膜厚を測定できていないこと、部位によって初期膜厚のばらつきが大きいことを考え合わせると、上記の膜厚減少速度は再現性に欠ける可能性がある。いずれにしろ、初期膜厚が2.5mm以上であることを考慮すると、耐久性の観点から防食層の耐候性は許容の範囲内にあると考えられる。

有機ライニング鋼材の防食層の健全度を定量的に測定する試みの一つとして、交流インピーダンスを測定した。一般に樹脂を紫外線のあたる環境に暴露すると、樹脂が光酸化劣化を起こし低分子量化するため、吸水率が増大し、防食性能が著しく低下する可能性がある。このような状況で有機ライニング鋼材の交流インピーダンスを測定すると、防食層の膨潤によりイオン透過抵抗が低下するため、交流抵抗値が低下する。また、膨潤により誘電率が増大するため、静電容量成分が増加する。その結果、複素数で表したインピーダンスの実数成分（概ね交流抵抗値に比例）に占める虚数成分（概ね静電容量成分に比例）の割合が大きくなり、tanδの値が大きくなる。以上の観点から暴露試験を行った有機ライニング鋼材の交流インピーダンス測定結果を考察すると、防食層の交流抵抗値は暴露期間に依らず概ね$10^9\ \Omega\cdot cm^2$オーダーの値を示し、静電容量成分も暴露期間に依らず20～60 pF cm^{-2}の範囲内で概ね一定の値を示した（図4.4.12～17）。tanδの値については、C-2において暴露10年以降でやや値の増加が認められたものの、他の試験材については0.3以下の領域でほぼ一定の値を示した（図4.4.18～20）。また、C-2のtanδの値にしても、増大したとはいえ1.0以下であり（図4.4.18）、有機ライニング鋼材の防食性能の低下は認められず、実用上問題ないと思われる。以上の結果より、本試験に供した試験材の防食層は、海洋環境における10～13年の暴露にもかかわらずほとんど劣化を起こしておらず、その結果、十分な防食性能を保持したものと考えられる。

最後に、10～13年間暴露試験を行った有機ライニング鋼材の色調と光沢の変化について考察する。着色した樹脂の色調は光沢保持率が高く、色差が小さいほど初期の状態を保っていると言える。ここで、暴露５年後の光沢保持率60%以上を「光沢保持率　大」、20%以上60%未満を「光沢保持率　中」、20%未満を「光沢保持率　小」とし、同様に、色差５未満を「色差　小」、５以上15未満を「色差　中」、15以上を「色差　大」と仮定した。この区分に基づき、図4.4.21と図4.4.22に示された光沢保持率と色差の結果を表4.4.10に整理すると、有機ライニング鋼材の色調と光沢の経時変化は最外層の樹脂の種類に依存することが明らかになった。

4. 4. 5 まとめ

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。

（有機ライニング鋼材の使用上の留意点）

有機ライニング鋼材の特徴は、

①防食層としてポリエチレンあるいはウレタンエラストマーを用いる。

②工場で管理の元、被覆、製造される。

③防食層の膜厚が2.0mm以上である。

④全数、全面ピンホールが無いことを確認する。

などであり、海洋環境において長期に渡って優れた耐久性を保持する。

しかし、

①防食層に傷をつけないよう取り扱うこと

②防食層に傷が生じたら定められた方法で速やかに補修すること

③取り扱い方法および補修方法については「【鋼管杭・鋼管矢板・鋼矢板】防食ハンドブック－設計・施工・維持管理－」（鋼管杭協会）を参照すること

などが必要である。

表4.4.10　5年間海洋暴露試験を行った有機ライニング試験材の外観に及ぼす樹脂種の影響

記号	光沢保持率	色差	最外層樹脂種
C-2	中	大	ふっ素
C-4	中	中	アクリルウレタン
C-5	小	中	ウレタン
C-6	小	中	
C-7	小	小	ふっ素シリコン共重合
E-1	大	小	ポリエチレン
E-2	大	小	
E-3	大	小	

光沢保持率：大(60%以上)、中(20%以上、60%未満)、小(20%未満)
色差：小(5未満)、中(5以上、15未満)、大(15以上)

４．５　厚膜塗装材の耐久性に関する研究

4．5．1 研究の目的

研究開始当時に開発された新しい防食塗装および厚膜塗装材の実海域での有用性を評価する。具体的には、「新規塗覆装材料および工法の実使用状態での確性」を目的として、駿河湾内に設置された海洋技術総合研究施設の第３デッキおよびそれより下に試験材を取り付けた。この位置は飛沫帯および干満帯にある。

4．5．2 試験材および試験方法

4．5．2．1 厚膜塗装材

塗装に関する８種の試験材の防食仕様を表4.5.1に示す。８種の塗装系はガラスフレーク樹脂塗料、厚膜エポキシ樹脂塗料、厚膜ウレタン樹脂塗料およびエポキシ系レジンモルタルであり、膜厚が1,000μm以上の超厚膜塗装材の１種に分類される塗装材である。これら厚膜塗装材を工場塗装し現地まで曳航して研究施設本体に設置施工した。研究施設本体に対する厚膜塗装材の位置と暴露レベルを表4.5.2に示す。また、厚膜塗装材の調査計画を表4.5.3に、調査項目および試験方法を表4.5.4に示す。具体的には、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測定を行なった。インピーダンス測定は、現場用インピーダンス測定装置を用いて厚膜塗装材の交流抵抗値および静電容量を測定した。測定周波数は、0.2kHz、0.5kHz、1.0kHzの３水準とし、３％食塩水を含有した水のりを塗布したアルミ箔を塗装材に貼りつけ、60分経過後インピーダンスの測定を行なった。測定面積は10×10cm^2（100cm^2）であった。

4．5．2．2 新規厚膜塗装材

1993年より、新規厚膜塗装材を海洋技術総合研究施設の第３デッキおよびそれより下に試験材を取り付けた。その５種類の防食仕様を表4.5.5に示す。試験方法は外観観察、膜厚測定およびインピーダンス測定であった。

4．5．3 試験結果

4．5．3．1 厚膜塗装材

(1) 外観の経時変化

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4.5.1に示し、水平材および斜材の外観経時変化を図4.5.2に示す。図4.5.1および図4.5.2の結果より、直立材ではNo.1（ビニルエステル系プライマー／ガラスフレーク入りビニルエステル／ポリウレタン）およびNo.4（ガラスフレーク入りエポキシ）塗装系に若干さび、ふくれが見られる。しかしながらさび、ふくれの発生程度が0.5%以下なので、20年経過後の劣化程度は非常に小さいといえる。水平材および斜材についてはNo.8 8-1（エポキシ系プライマー／エポキシ系レジンモルタル／ポリウレタン）以外はさび、ふくれが見られるが、直立材と同じくその

程度は小さい。

(2) 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4.5.3および図4.5.4参照）

(3) 膜厚の経時変化

厚膜塗装材の膜厚経時変化を図4.5.5に示す。厚膜塗装材の膜厚経時変化としては、紫外線による耐候性劣化、外的要因（流木等）によるふくれ、われによる鋼材の腐食による塗膜隆起が主として考えられるが、測定した全ての厚膜塗装材に膜厚の変化はほとんど見られなかった。

(4) インピーダンスの経時変化

前述した試験方法に従いインピーダンスを測定した。経験的に交流抵抗値の変化や比較を論ずる時は周波数１kHzの値を用いることが多い。周波数１kHzにおける交流抵抗値の経時変化を図4.5.6に、静電容量値の経時変化を図4.5.7に示す。

図4.5.6の結果より、No.４（ガラスフレーク入りエポキシ）以外は20年経過後も交流抵抗値は$10^8\Omega\cdot cm^2$以上の高抵抗を示した。また、図4.5.7の結果より、No.４（ガラスフレーク入りエポキシ）以外は静電容量が小さく、塗膜および塗膜下への大量の水の浸透は少ないと思われる。No.4は13年経過前後で交流抵抗値が下がり、静電容量が上昇傾向にある。電気事業連合会は、水門鉄管塗替指針を定めており[1)]、交流抵抗値および静電容量の測定結果から塗膜の状態を４つの劣化度に分類している。その内容を図4.5.8に示す。

塗装した実構造物のインピーダンスを測定し、各周波数での交流抵抗値および静電容量から塗膜の劣化判断を行なっている。判定は、劣化度Ⅰ（異常なし）、劣化度Ⅱ（塗膜が固く付着し上塗りだけが劣化している）、劣化度Ⅲ（塗膜にさび・ふくれなどを生じている）、劣化度Ⅳ（塗膜の劣化が著しい）となっている。20年間暴露した８種類の厚膜塗装材は塗装系はいずれも$10^6\Omega\cdot cm^2$以上の交流抵抗値を示し、$10^{-10}F/cm^2$以下の静電容量である。図4.5.8の電気事業連合会が作成した水門鉄管塗替指針によると今回の測定値は劣化度Ⅰに分類され異常なしと判断される。

(5) 付着力の経時変化

代表的な厚膜塗装材No.２、No.６およびNo.７について５年ごとに付着力を測定した。その測定結果を図4.5.9に示す。図4.5.9の結果より、20年暴露しても付着力の経時変化は見られなかった。また、はく離面も塗装材の凝集破壊であり、鋼素地との付着力が充分維持されている。

4．5．3．2 新規厚膜塗装材

(1) 外観の経時変化

1993年に暴露を開始した新規厚膜塗装材の外観経時変化を表4.5.6に示す。10年経過後も新規厚膜塗装材の塗膜外観は良好であった。

(2) 膜厚の経時変化

1993年に暴露を開始した新規厚膜塗装材の膜厚経時変化を表4.5.7に示す。５種類の新規厚膜塗装材とも10年経過しても膜厚の経時変化は見られなかった。

(3) インピーダンスの経時変化

前述4.5.3.1と同じく周波数１kHzにおける交流抵抗値の経時変化を図4.5.10に、静電容量の経時変化を図4.5.11に示す。図4.5.10および11の結果より、５種類の新規厚膜塗装材の交流抵抗値は10年経過後もほぼ$10^{8}\Omega\cdot cm^{2}$以上であり、静電容量はほぼ$10^{-10}F/cm^{2}$以下であった。図4.5.8の劣化度判定基準によると、厚膜塗装材と同じく、劣化度Ｉで新規厚膜塗装材は異状なしと判断できる。

4．5．3．3 17.5年経過厚膜塗装材の外観写真

図4.5.12～14に厚膜塗装材を17.5年暴露した時の外観写真を示す。いずれの試験体も打痕傷あるいは溶接部や端部の施工不充分と思われる部分から集中的にさびが発生していた。

4．5．4 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、図4.5.8の塗膜劣化度判定基準から判断すると、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、端部等施工不充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。

（厚膜塗装材の適用上の留意点）

海洋防食用塗装材の種類は表4.5.8に示すように多々あり、その性能を発揮するためには施工・管理を充分に行なう必要がある。具体的には、端部や構造上膜厚が付きにくい部分は充分管理して規定膜厚を確保することが必要である。

また、要望される性能にあった塗装系を選択することが必要である。

参考文献

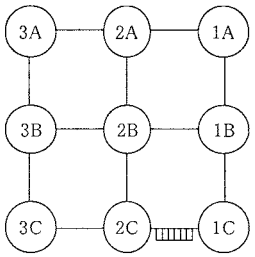
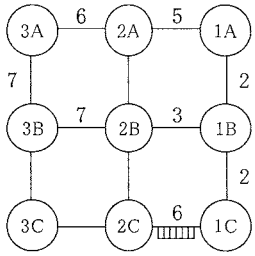
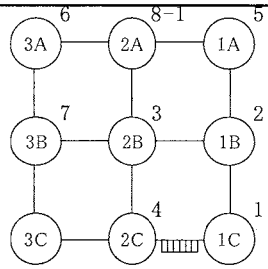
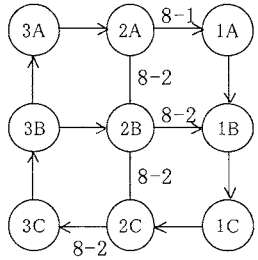
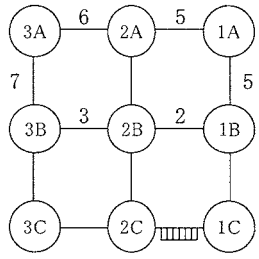
1) 水門鉄管塗替指針（昭和44年土木保守関係課長会議、電気事業連合会）

表4.5.1　厚膜塗装材の仕様

No.	防食系	防食仕様	施行対象部材	
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(30μm)／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(30μm)	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	有機ジンクリッチ(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(3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(3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(30μm) ／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	有機ジンクリッチ(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 2B ↘ 3B
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

表4.5.2　試験施設に対する厚膜塗装材の位置と暴露レベル

暴露レベル（TP）	位　置・方　向
飛沫帯直立材 (+4245～-3100)	
飛沫帯水平材 (+2300～-1894)	
飛沫帯～干満帯～ 海中部　直立材 (+3100～-1750)	
飛沫帯～干満帯～ 海中部 ※　斜材 矢印が下方向を 示す	
海中部水平材 (-1197～-1603)	

※　杭No.1B,2Cは-1750～海底土壌まで下記の塗装
No.1B　無機ｼﾞﾝｸﾘｯﾁ(75μm)+ﾀｰﾙｳﾚﾀﾝ(150μm×2)
No.2B　無機ｼﾞﾝｸﾘｯﾁ(75μm)+GF入りﾎﾟﾘｴｽﾃﾙ(500μm×2)

表4.5.3　　長期調査計画

年	'84	'85	'86	'87	'88	'89	'90	'91
経過年数	05	1.5	2.5	3.5	4.5	5.5	6.5	7.5
調査	○	○	◎	○	○	◎	○	○

年	'92	'93	'94	'95	'96	'97	'98	'99
経過年数	8.5	9.5	10.5	11.5	12.5	13.5	14.5	15.5
調査	○	◎	○	◎	○	○	◎	○

年	'00	'01	'02	'03	'04
経過年数	16.5	17.5	18.5	19.5	20.5
調査	—	○	—	◎▲	△

（注）　1)　○ ： 定期一般調査
2)　◎ ： 定期詳細調査（破壊調査含む）
3)　△ ： 一時引当補修後再設置
4)　▲ ： 一時撤去調査後再設置

表4.5.4　　調査項目および試験方法

調査項目	試験方法	'03 調査	定期 一般	定期 詳細
外観観察	目視（健全部、異常部）	○	○	◎
外観写真	全景、接写（健全部、異常部）	○	○	◎
生物付着状況	目視、秤量	※1	○	◎
塗覆装劣化調査	目視	○	○	◎
膜厚測定	kett膜厚計、VL-30B、ﾚﾝｼﾞⅢ(300μm～8mm)	○	○	◎
交流抵抗測定	三田無線、LCRﾒｰﾀｰ、D-55(交流0.2,0.5,1.0kHz)	○	○	◎
塗膜ピンホール測定	ｻﾝｺｰ電子、ﾎﾘｽﾀｰⅠ型(3～12kV)、5kV印加	○	○	◎
塗膜付着力測定	ｴﾙｺﾒｰﾀｰ社、ｱﾄﾞﾋｼﾞｮﾝﾃｽﾀｰ(0～70kg/m^2)			◎
塗膜下素地面観察	目視、写真			◎
塗膜剥離部補修	各社仕様による			◎
被覆打診調査	ﾌﾟﾗｽﾁｯｸﾊﾝﾏｰによる打診	○	○	◎

（注）　※1　初期の調査で状況を把握したので1994年以降中止

表4.5.5　新規厚膜塗装試験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	試験材サイズ (mm)	塗膜厚さ (μm)	色調	暴露期間 (年)	備考
F系	F-1	耐食耐候性塗料	超厚膜形ｴﾎﾟｷｼ樹脂塗料	有機ｼﾞﾝｸ(20μm)/ｴﾎﾟｷｼ(1000μm×2)※			管	165.2φ×3500l	2020	淡緑	10	'03回収
	F-2		超厚膜形ｴﾎﾟｷｼ樹脂塗料	有機ｼﾞﾝｸ(20μm)/ｴﾎﾟｷｼ(1250μm×2)※					2520	青	20	2013年まで延長
	F-3		ｱｸﾘﾙ系樹脂塗料	ﾌﾟﾗｲﾏｰ(70μm)/ｱｸﾘﾙ(1500+1000μm)/ｱｸﾘﾙ(50μm)※					2620	青	5	'98回収
	F-4		ﾎﾟﾘｳﾚﾀﾝ系樹脂塗料	ﾌﾟﾗｲﾏｰ(70μm)/ﾎﾟﾘｳﾚﾀﾝ(2500μm)※					2530	黒	20	2013年まで延長
	F-5		高耐候性上塗塗装	ｼﾘｺﾝ樹脂塗料	有機ｼﾞﾝｸ(20μm)	ｼﾘｺﾝ用中塗(30μm)/ｼﾘｺﾝ上塗(25μm)※	各1/3周		2075	下塗淡緑	10	・側面は円周で3等分して塗り分ける ・'03回収
				ふっ素樹脂塗料	/	ふっ素用中塗(30μm)/ふっ素上塗(25μm)※			2075			
			(接海水環境)	ﾎﾟﾘｳﾚﾀﾝ樹脂塗料	ｴﾎﾟｷｼ(1000μm×2)	ﾎﾟﾘｳﾚﾀﾝ用中塗(30μm)/ﾎﾟﾘｳﾚﾀﾝ上塗(35μm)※			2090	下塗白		

(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

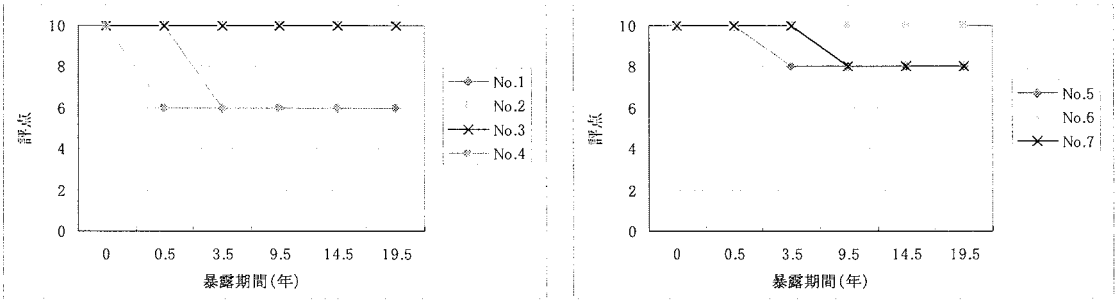


図4.5.1　　直立材の外観経時変化

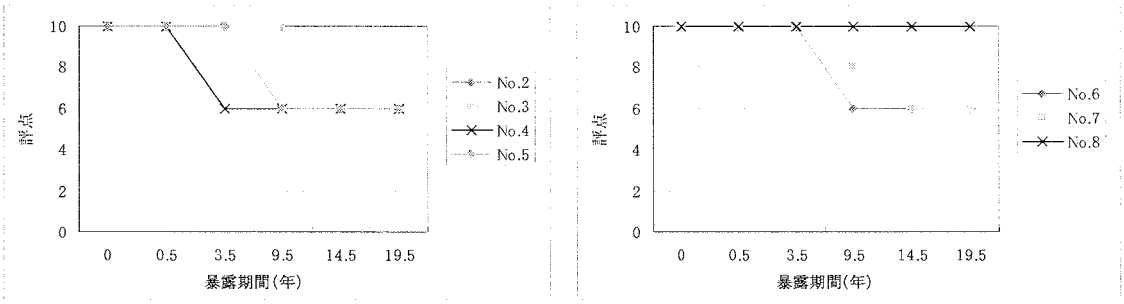


図4.5.2　　水平材および斜材の外観経時変化

注)　評価基準

評点 10 ： 異常なし

評点　8 ： 上塗りのみ剥離、さび・ふくれが数点あり

評点　6 ： さび・ふくれの面積0.5%以下

評点　4 ： さび・ふくれの面積0.6～10%

評点　2 ： さび・ふくれの面積11～30%

評点　0 ： さび・ふくれの面積31%以上

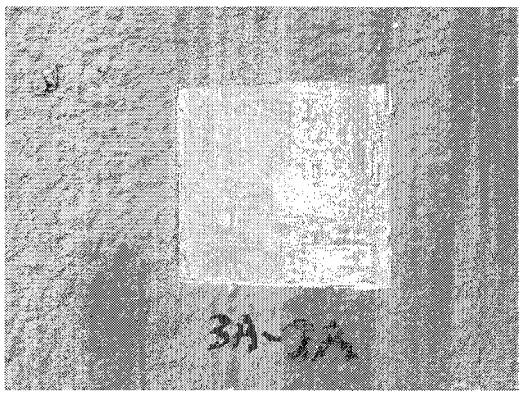


図 4.5.3　　塗膜下鋼素地観察
No.6 ： 有機ｼﾞﾝｸﾘｯﾁ／ｴﾎﾟｷｼ塗装系

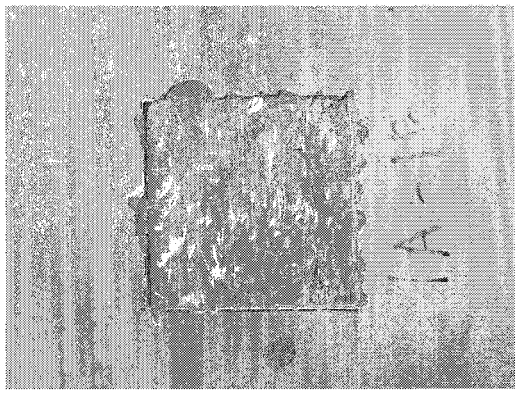


図 4.5.4　　塗膜下鋼素地観察
No.2 ： 有機ｼﾞﾝｸﾘｯﾁ／ｶﾞﾗｽﾌﾚｰｸ入り
ﾎﾟﾘｴｽﾃﾙ塗装系

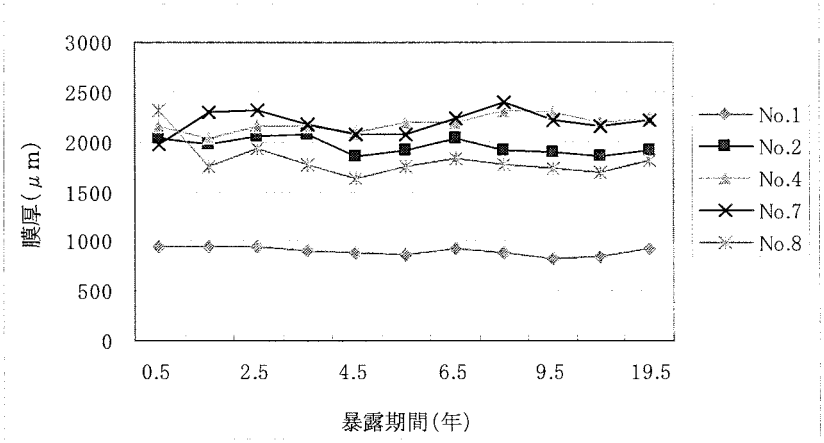


図4.5.5　　膜厚の経時変化

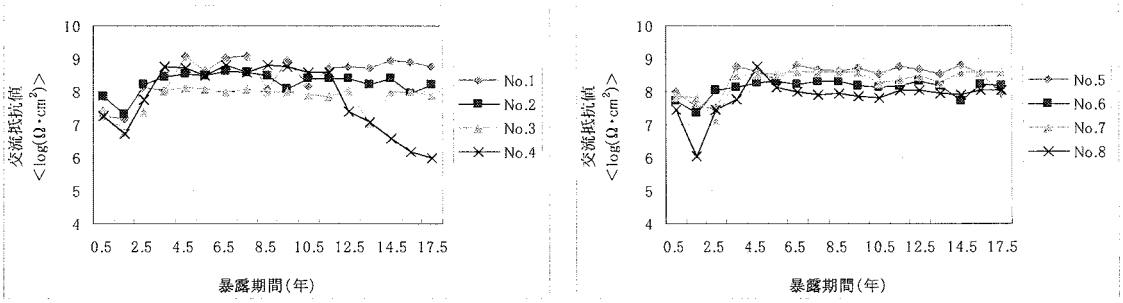


図4.5.6　　交流抵抗値の経時変化（周波数1kHz）

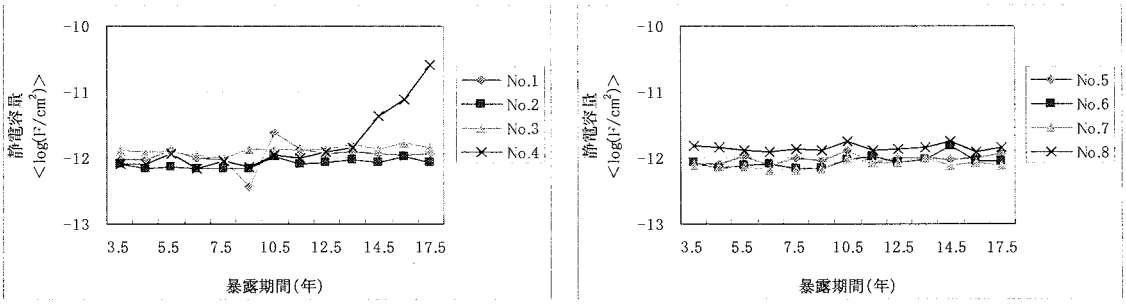
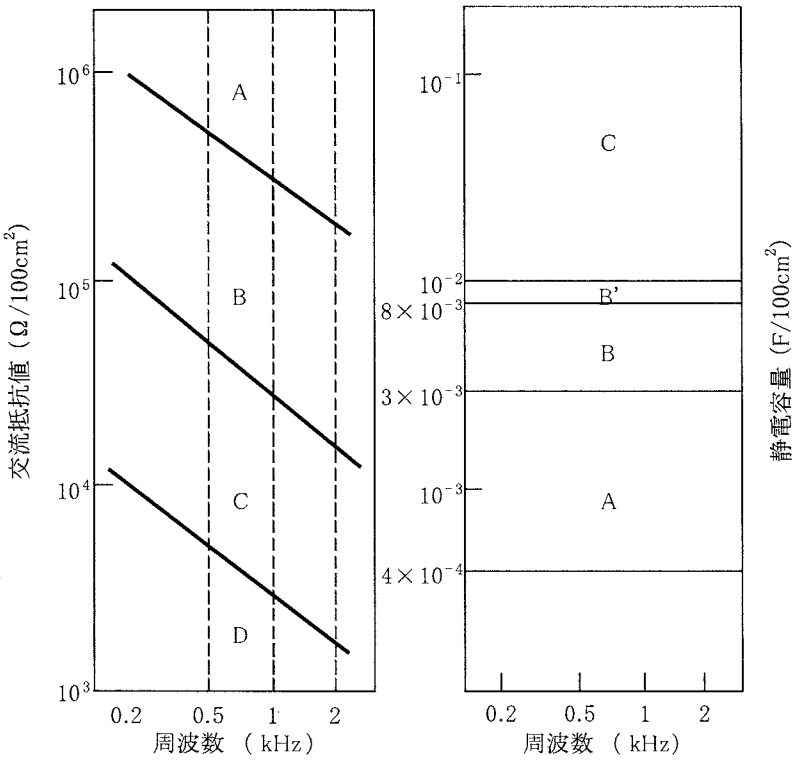


図4.5.7　　静電容量の経時変化（周波数1kHz）



劣化度	インピーダンス測定値		塗膜の状態
	抵抗値	静電容量	
Ⅰ	A,B	A	異常なし
Ⅱ	C	B	塗膜が固く付着し上塗だけが劣化している
Ⅲ	C	B'	塗膜にさび・ふくれなどを生じている
Ⅳ	D	C	塗膜の劣化著しい

図4.5.8　インピーダンスの測定による塗膜劣化度判定基準の例

（電気事業連合会：水門鉄管塗替指針[1)]）

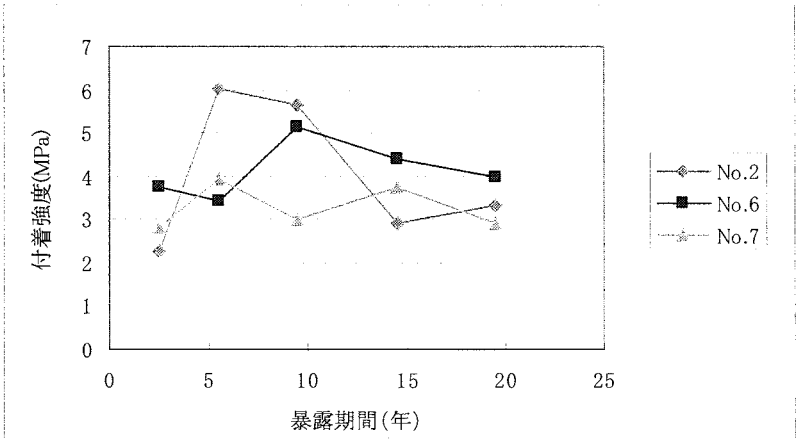


図4.5.9　　付着強度の経時変化

表4.5.6　新規厚膜塗装試験材の外観

記号	F－1	F－2	F－3	F－4	F－5
防食系	耐食耐候性塗装系				
防食仕様	有機ｼﾞﾝｸﾘｯﾁﾍﾟｲﾝﾄ(20μm) エポキシ(1000μm×2)	有機ｼﾞﾝｸﾘｯﾁﾍﾟｲﾝﾄ(20μm) ＋ エポキシ(1250μm×2)	プライマー(70μm) ＋ アクリル(1500+1000μm) ＋ アクリル(50μm)	プライマー(30μm) ＋ ポリウレタン(2500μm)	有機ｼﾞﾝｸﾘｯﾁﾍﾟｲﾝﾄ(20μm) ＋エポキシ(1000μm×2) --- 各1/3 ｼﾘｺﾝ用中塗(30μm)＋ｼﾘｺﾝ用上塗(25μm) ふっ素用中塗(30μm)＋ふっ素上塗(25μm) ﾎﾟﾘｳﾚﾀﾝ用中塗(35μm)＋ﾎﾟﾘｳﾚﾀﾝ用上塗(25μm)
1994年(1年)	異常なし	異常なし	異常なし	異常なし	異常なし
1995年(2年)	異常なし	異常なし	異常なし	異常なし	異常なし
1996年(3年)	異常なし	異常なし	異常なし	異常なし	異常なし
1997年(4年)	異常なし	異常なし	異常なし	異常なし	異常なし
1998年(5年)	異常なし	異常なし	異常なし	異常なし	異常なし
1999年(6年)	異常なし	異常なし	1998年度撤去回収	異常なし	異常なし
2001年(8年)	異常なし	異常なし		異常なし	異常なし
2003年(10年)	異常なし	異常なし		異常なし	異常なし

(注) 1993年度暴露

表4.5.7　新規厚膜塗装材の膜厚

（μm）

記号 No.	防食系	防食仕様	1993年（初期）	1998年（5年後）	2003年（10年後）
F-1	耐食耐候塗料系	有機ジンクリッチ(20μm) ＋エポキシ(1000μm×2)	2400 2400 2400	2400 2300 2400	2300 2300 2300
F-2		有機ジンクリッチ(20μm) ＋エポキシ(1250μm×2)	2400 2200 2300	2400 2300 2300	2500 2400 2400
F-3		プライマー(70μm) ＋アクリル(1500+1000μm) ＋アクリル(50μm)	2400 2400 2400	－	－
F-4		プライマー(30μm) ＋ポリウレタン(2500μm)	3600 3700 3700	3700 3800 3600	4000 3900 3800
F-5		有機ジンクリッチ(20μm)＋エポキシ(1000μm) 各1/3周 シリコン用中塗(170μm)＋シリコン用上塗(160μm) ふっ素用中塗(30μm)＋ふっ素用上塗(25μm) ポリウレタン用中塗(35μm)＋ポリウレタン用上塗(35μm)	1200 1300 1200	1300 1300 1400	1450 1450 1500

（注）・膜厚は3ヵ所3回測定の平均値
・F-5は、上端部より65cmの部位を測定
・1993年度暴露

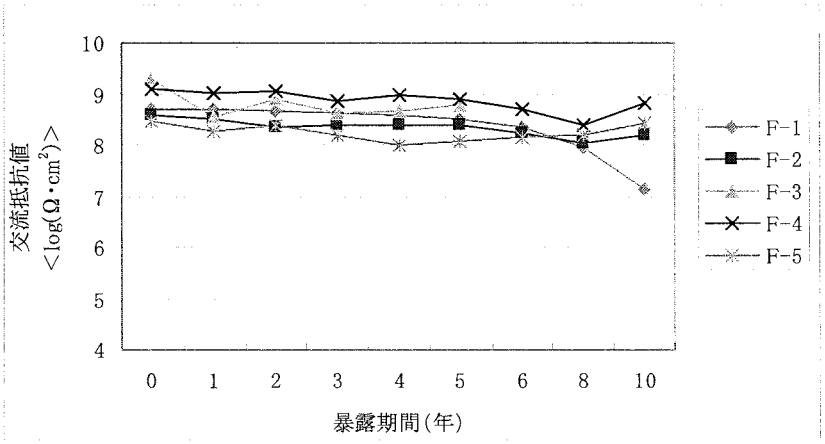


図4.5.10　　交流抵抗値の経時変化

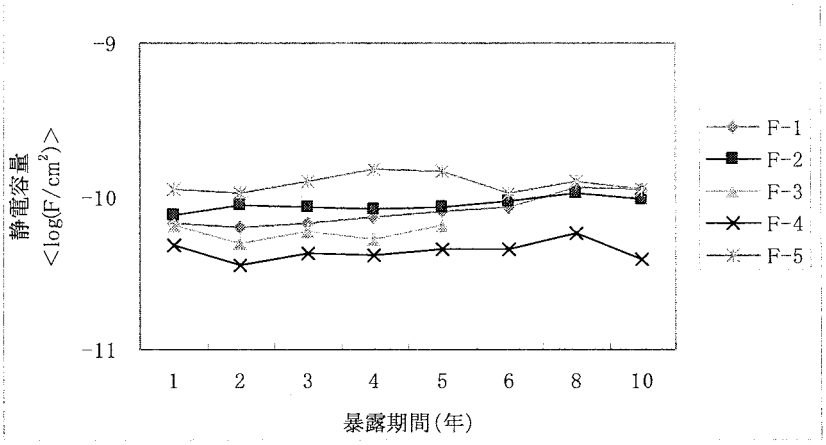


図4.5.11　　静電容量の経時変化

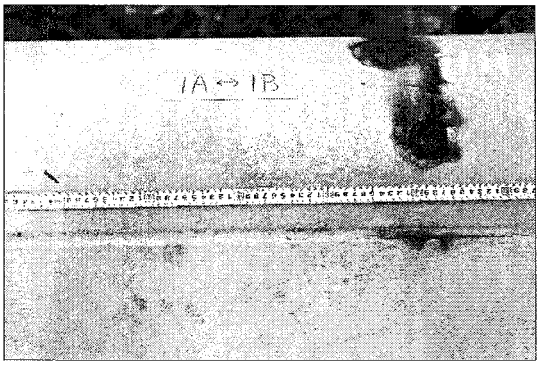


図 4.5.12　17.5 年後の塗装材外観
（第1デッキ水平材、損傷部）

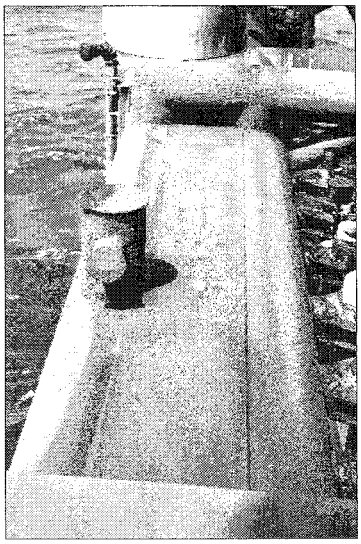


図 4.5.13　17.5 年後の塗装材外観
（第1デッキ水平材、
膜厚のつきにくいエッジ部）

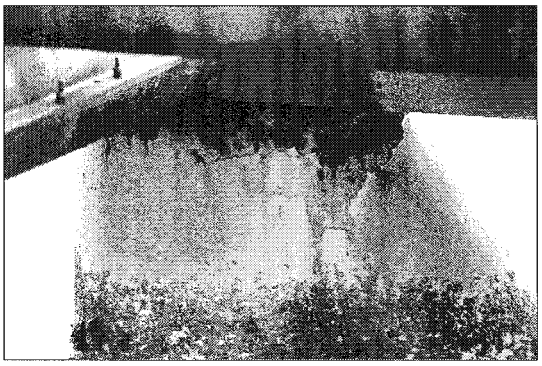


図 4.5.14　17.5 年後の塗装材外観
（第1デッキ下垂直部、
膜厚のつきにくいエッジ部）

表4.5.8 海洋防食用厚膜塗装材の種類と特徴

厚膜塗装材種類		ガラスフレーク含有 ビニルエステル塗装材	ガラスフレーク含有 ポリエステル塗装材	ガラスフレーク含有 エポキシ塗装材	エポキシ樹脂レジン モルタル塗装材	超厚膜エポキシ樹脂 塗装材	超厚膜ポリウレタン樹脂 塗装材	アクリル樹脂塗装材
組成概要	主な樹脂	ビニルエステル樹脂	ポリエステル樹脂	エポキシ樹脂	エポキシ樹脂	エポキシ樹脂	ポリウレタン樹脂	アクリル樹脂
	主な顔料	ガラスフレーク	ガラスフレーク	ガラスフレーク	セメントモルタル	一般的な顔料	一般的な顔料	一般的な顔料
	硬化機構	ﾊﾟｰｵｷｻｲﾄﾞによる ラジカル重合	ﾊﾟｰｵｷｻｲﾄﾞによる ラジカル重合	アミンによる付加重合	アミンによる付加重合	アミンによる付加重合	ｲｿｼｱﾈｰﾄ・ｱﾐﾝによる 重縮合	ﾊﾟｰｵｷｻｲﾄﾞによる ラジカル重合
標準的な膜厚（μ）		500～1500	500～1500	500～1500	2000～5000	1000～3000	2000～3000	500～1500
機能		ミリ以上の厚膜化によって腐食因子を遮断すること、及び一回で厚膜塗装が可能なこと						
耐久性能	仕上がり	塗膜表面が比較的粗い	塗膜表面が比較的粗い	塗膜表面が比較的粗い	塗膜表面が粗い	塗膜表面が比較的平滑	塗膜表面が比較的平滑	塗膜表面が比較的平滑
	物理特性	硬く、磨耗に優れる	硬く、磨耗に優れる	磨耗に優れる	硬く、磨耗に優れる	バランスに優れた物性	弾性に優れる	硬い
	化学特性	耐酸性に優れる	耐酸性に優れる	耐アルカリ性に優れる		耐アルカリ性に優れる	耐酸性に優れる	
	上塗適合性	適性範囲が狭い	適性範囲が狭い	比較的適性範囲が狭い	適性範囲が非常に狭い	適性範囲が広い	比較的適性範囲が狭い	比較的適性範囲が狭い
施工性能	荷姿	2液型	2液型	2液型	2液型	2液型	2液型	2～3液型
	貯蔵期間	比較的短い（3ヶ月程度）	比較的短い（3ヶ月程度）	長い（1年程度）	中（6ヶ月程度）	長い（1年程度）	中（6ヶ月程度）	中（6ヶ月程度）
	塗装機	一般的な塗装機	一般的な塗装機	一般的な塗装機	特殊塗装機	一般的な塗装機	特殊塗装機	特殊塗装機
	可使時間	比較的短い	比較的短い	長い（2～3時間程度）	長い（2～3時間程度）	長い（2～3時間程度）	短い	短い
	硬化時間	比較的速い	比較的速い	比較的速い	比較的遅い	比較的遅い	速い	非常に速い
	塗装作業性	比較的優れる	比較的優れる	比較的優れる	比較的劣る	優れる	比較的優れる	比較的優れる
	厚塗性	500μ／回　可能	500μ／回　可能	500μ／回　可能	500μ／回	2500μ／回　可能	2500μ／回　可能	1000μ／回　可能
海洋構造物への適用実績		中	中	中	少ない	多い	中	少ない

４．６　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

4．6．1 研究の目的

研究テーマ３の第１次試験材No.12系のペトロラタム系防食材＋各種保護カバーは、海洋試験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ものであり、実海域における有用性を評価することを目的とするものである。

図4.6.1に示すように、Ⅰ-2-1は塗装＋FRP保護カバー（カバー内面に吸水性高分子層を装着）系に対して電気防食を併用した試験材である。FRP保護カバー内側に吸水性高分子層を内装し、その表面にエポキシ樹脂塗料を塗布した後、直ちに鋼管へ被覆する。本試験では、保護カバー下端部にアルミニウム合金陽極を設置したが、実際は既設の電気防食装置を利用することを前提としている。本試験材では、FRP保護カバー内部（飛沫帯～海中部）の鋼材への電気防食効果の検証を目的とした。

図4.6.2に示すように、Ⅰ-2-2は非油系の有機材料として防食層に特殊ウレタン系樹脂（ウレタン樹脂＋吸水性高分子材）を用いた試験材で、保護カバー内側に特殊ウレタン樹脂を塗布し、鋼管へ被覆する防食方法である。本試験材では、特殊ウレタン樹脂の長期耐久性および防食性を検証することを目的とした。

4．6．2 試験材および試験方法

4．6．2．1 ペトロラタム系防食材＋各種保護カバー系（研究テーマ３第１次試験材№12系）

(1) 外観観察

目視により試験材の損傷、変形等の有無を観察した。

(2) 防食効果の観察

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。

4．6．2．2 塗装＋FRP保護カバー＋電気防食系（研究テーマ３第２次試験材Ⅰ-2-1）

(1) 電位測定

保護カバー内部にあらかじめ設置した照合電極（海水銀／塩化銀電極）により、所定のレベルにおける電位を測定し、保護カバー内部の防食状態を確認した。

測定レベル：T.P.+1,300，T.P.+300，T.P.-700

(2) 防食効果の観察

試験材引き上げ後（暴露期間５年）、保護カバーを開放し、目視により鋼材表面のエポキシ樹脂塗膜の外観状態およびその塗膜下の鋼材の防食状態を観察した。

4．6．2．3 特殊ウレタン系樹脂＋FRP保護カバー系（研究テーマ３第２次試験材Ⅰ-2-2）

(1) 交流抵抗値測定

保護カバー内部にあらかじめ設置した測定用の電極と鋼材との間の交流抵抗値を測定した。

測定レベル：T.P.+1,300，T.P.+300，T.P.-700

測定周波数：１KHz

(2) 防食効果の観察

試験材引き上げ後（暴露期間５年）、特殊ウレタン系樹脂を除去し、鋼材面の防食状態を目視により観察した。

4．6．3 試験結果

4．6．3．1 ペトロラタム系防食材＋各種保護カバー系（研究テーマ３第１次試験材№12系）

(1) 試験経緯

研究テーマ３の第１次試験材No.12系のペトロラタム系防食材＋各種保護カバーは、海洋試験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ものである。防食被覆の仕様は、表4.6.1に示すように暴露試験開始時（1984年）にはペトロラタム系防食材＋各種保護カバーとして５種類およびペトロラタム系防食材＋FRPライニングの計６種類の方式を供試したが、1989年に実施した保護カバー開放時に防食効果が確認されたため杭1Ｃを除く他のすべての杭を1Ｃの防食材仕様に統一し、FRP保護カバー厚さを変えて更新した。その後、南東に面した試験材が台風時の波浪や漂流物の衝突により損傷を受けたため、1993年には杭1Ａ、2Ａ、3Ａ、3Ｂ、3Ｃの５本に耐衝撃性能を向上させたFRP保護カバーを用いたペトロラタム系防食材＋FRP保護カバー系を供試した。また、2003年に杭1Ｂ、1Ｃ、2Ｂ、2Ｃおよび3Ａ（下段）の５本についても耐衝撃性能を向上させたFRP保護カバーを用いたペトロラタム系防食材＋FRP保護カバー系を供試した。

(2) 外観調査

1984年に暴露を開始したが、表4.6.2に示すように1986年より南東に面した試験材に波浪や漂流物の衝突によるあて傷やカバー脱落等の損傷が見られ、1989年に杭1Ａ、2Ａ、3Ａ、3Ｂ、3ＣのFRPカバーを更新したが、1990年から1992年にかけてふたたび変形やカバー表層のクラック等の損傷が認められたため、1993年に耐衝撃性能を向上させたFRP保護カバー（表4.6.3に一例を示す）による被覆を行なった。その結果、2003年の調査で杭3Ａの下段カバーの流失が確認されたものの、標準仕様のFRP保護カバーに比べ耐衝撃性能を向上させたものであるため、損傷箇所が減少した。1984年に暴露開始した杭1Ｃ、1989年にFRP保護カバーを更新した杭1Ｂ、2Ｂ、2Ｃに関しては、1997年からカバー表層のクラックやチョーキング等が見られ始めたため、2003年に耐衝撃性能を向上させたFRP保護カバーに更新した。

(3) 防食効果の調査

1984年に暴露開始したペトロラタム系防食材＋FRP保護カバーの一部の試験材に関して５年５ヵ月後（1989年）に保護カバーおよび防食層を解体し、防食効果の確認調査を行なった結果、鋼素地面には浸水や発錆等の異状は見られなかった。また、2003年にも杭1Ｃ（1984年暴露開始）および杭1Ｂ、2Ｂ、2Ｃ（1989年暴露開始）の確認調査を行なったが、1989年調査時と同様、異状は見られなかった。

4．6．3．2 塗装＋FRP保護カバー＋電気防食系（研究テーマ３第２次試験材Ⅰ-2-1）

(1) 電位測定

電位測定結果を表4.6.4に示す。1998年に暴露を開始し、翌年の1999年度調査時には-1,035mV(vs.SCE)(T.P.+1,300)～-1,065mV(vs.SCE)(T.P.+300)で良好な防食状態にある電位を示していた。この後、2001年度調査以降電位測定が不能となり、電位による防食状態を把握することが出来なかった。2003年度の回収による詳細調査でFRP保護カバーを開放し、内装していた照合電極を確認したところ、電極の破損（保護カバー表面に漂流物と思われる衝突痕が見られたことから、外的な衝撃により電極が折れたと考えられた）が認められたため、このことが電位測定不能の原因であると判断した。

(2) 防食効果の観察

2003年度の詳細調査で回収した試験材のFRP保護カバーには、漂流物が衝突したと思われる擦り傷が見られたが、クラックや脱落等の異状は見られず、またFRP保護カバーを固定するボルト・ナットにも緩みはなく、良好な状態であることが認められた。FRP保護カバーを開放し、図4.6.3～6に示す内部のエポキシ樹脂塗膜（膜厚200μm）を観察したところ、φ2～10mm程度のふくれが見られたが、塗膜下の鋼材面に発錆は認められなかった。このことから、2001年度以降電位測定が不能であり防食状態を把握することが出来なかったが、塗膜下の鋼材面に腐食が生じていなかったことから、良好な防食状態にあったと判断する。

4．6．3．3 特殊ウレタン系樹脂＋FRP保護カバー系（研究テーマ３第２次試験材Ⅰ-2-2）

(1) 交流抵抗値測定

表4.6.5および図4.6.7に示すように交流抵抗値は、暴露開始初期から10^5～$10^6\Omega\cdot cm^2$程度で、厚膜塗装系に比べ若干低い値を示す傾向にある。これはウレタン系樹脂中に含まれる吸水性高分子材の吸水作用によるものと考えられるが、経時変化は小さく、安定した傾向を示した。

(2) 防食効果の観察

2003年度の詳細調査で回収した試験材のFRP保護カバーには、クラックや欠損等の異状は見られず、またFRP保護カバーを固定するボルト・ナットにも緩みはなく、良好な状態であった。FRP保護カバー開放後の鋼材面の外観状況を図4.6.8～10に示す。

特殊ウレタン系樹脂は、鋼材面に対して強固に付着しており、塗膜下の鋼材面には発錆は認められず良好な防食状態であった。しかし、FRP保護カバー上・下端部とフランジ付近の一部にわずかな発錆が見られた。これは、端部のシール部およびフランジ部からの浸水により生じたものと考えられた。

4．6．4 まとめ

1）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。

2) 塗装＋FRP保護カバー＋電気防食系であるⅠ-2-1材では、暴露期間中に内挿した照合電極が損傷し、FRP保護カバー内部の電位を計測することが不能となり、経時的に防食状況を把握することができなかったが、暴露開始後５年目の開放調査でFRP保護カバー内部を観察した結果、エポキシ樹脂塗膜にふくれが認められたにもかかわらず塗膜下での腐食は生じていなかったことから、本仕様の有効性が確認された。

3) 特殊ウレタン系樹脂＋FRP保護カバー系であるⅠ-2-2材は、暴露期間が５年間と短かったため長期耐久性を評価するには至らなかったが、特殊ウレタン系樹脂下の防食状況は良好であり、本仕様は鋼構造物の防食工法として有効であると考えられた。

（保護カバー材を用いた被覆防食工法の適用に関する留意点）

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現地防食工法として、また塗装やライニング系などの防食の現地補修工法として有効である。その適用例を図4.6.11～13に示す。

保護カバー材を用いた被覆防食工法は、防食材とその防食材を保護するFRP保護カバー材との組み合わせによる防食システムである。防食材は、防食対象物である鋼材面に所定の厚さで被覆することで、鋼材面を腐食環境から遮断する。さらに、防食材の表面に取り付けるFRP保護カバー材は、防食層が外力（波力・漂流物等）による損傷を受けないよう長期間にわたって保護するとともに、防食材を防食対象物の表面に圧着して防食効果を維持する機能を有する。これらのことから、長期間にわたって防食効果を維持するには、防食材を保護するFRP保護カバー材の強度特性が重要な要素となる。

本暴露試験では当初、標準的な仕様のFRP保護カバー材を適用していたが、暴露環境が非常に厳しかったため、波浪や漂流物の衝突等で損傷を受ける結果となったことから、衝撃性能が高いFRP保護カバー材へ変更することで損傷を低減させることができた。

したがって、本工法を適用する際には、適用環境条件（波浪状況、漂流物の有無等）を把握した上で、FRP保護カバー材の機械的強度特性（特に、耐衝撃性能）に留意し、選定する必要がある。

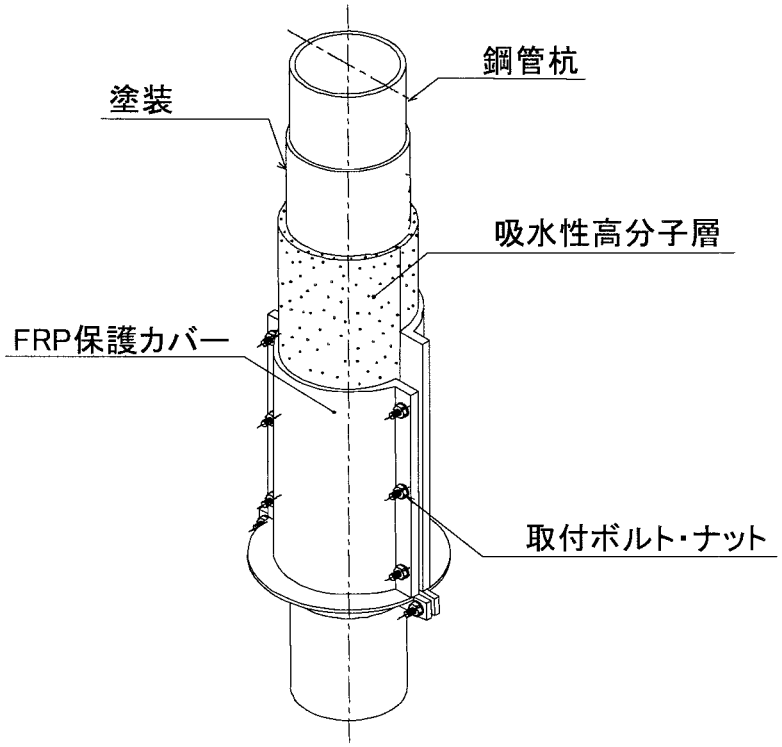


図4.6.1　試験材I-2-1概要図

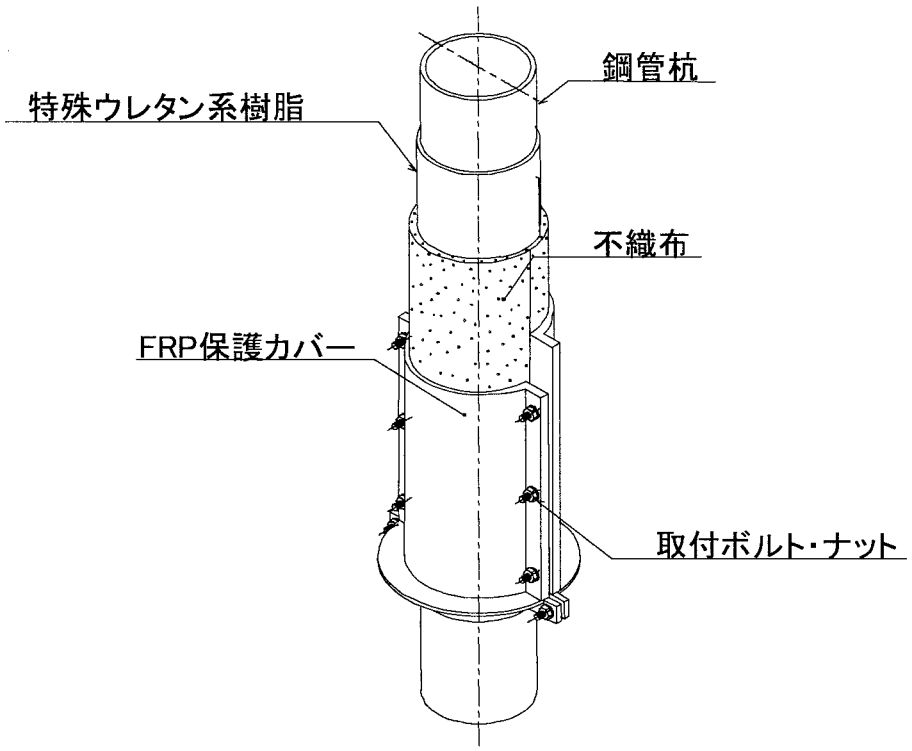


図4.6.2　試験材I-2-2概要図

表4.6.1　塗覆装系試験材履歴
（研究施設本体）

試験材記号No.			テーマ	次	防食系 防食施工法	防食仕様	基礎・施工 部位	基礎・施工 位置対象	開始	暴露期間（年） '84	'85	'86	'87	'88	'89	'90	'91	'92	'93	'94	'95	'96	'97	'98	'99	'00	'01	'02	'03	回収（年）	備考
										0.5	1.5	2.5	3.5	4.5	5.5	6.5	7.5	8.5	9.5	10.5	11.5	12.5	13.5	14.5	15.5	16.5	17.5	18.5	19.5		
12	-1		3	1	ペトロラタム＋各種保護カバー	ペトロラタムペースト(0.5kg／m²)＋ペトロラタムテープ(55%ラップ)＋発泡(10mm)＋FRP保護カバー(2mm)	直立材大・飛接続部	1A	'84																						'89	
								1C	'84																				'03	
	-2	-1				ペトロラタムペースト(0.5kg／m²)＋ペトロラタムテープ(55%ラップ)＋発泡(10mm)＋FRPP保護カバー(2mm)		2A	'84																						'89	
		-2				ペトロラタムペースト(0.5kg／m²)＋シート(2mm)＋発泡(10mm)＋FRPP保護カバー(2mm)		2C	'84																						'89	
	-3	-1				ペトロラタムペースト(0.5kg／m²)＋ペトロラタムテープ(55%ラップ)＋発泡(10mm)＋PE保護カバー(3mm)		1B	'84																						'89	
								2B	'84																				'89	
		-2				ペトロラタムペースト(0.5kg／m²)＋ペトロラタムテープ(55%ラップ)＋発泡(10mm)＋PE保護カバー(3mm)		3B	'84																						'89	
	-4					ペトロラタムペースト(0.5kg／m²)＋ペトロラタムテープ(55%ラップ)＋FRPライニング(2mm)		3A	'84																						'89	
								3C	'84																				'89	
12	-1		3	1	ペトロラタム＋FRP保護カバー*（* 補修）	ペトロラタムペースト(0.5kg／m²)＋ペトロラタムテープ(55%ラップ)＋発泡PE(10mm)＋FRP保護カバー(2mm)	直立材大・飛接続部	1A	'89																						'93	
								2A	'89																				'93	
								3A	'89																				'93	
								1B	'89																				'03	
								2B	'89																				'03	
								3B	'89																				'93	
								2C	'89																				'03	
								3C	'89																				'93	
12	-1		3	1	ペトロラタム＋FRP保護カバー*（* 補修）	ペトロラタムペースト(0.5kg／m²)＋ペトロラタムテープ(55%ラップ)＋発泡PE(10mm)＋FRP保護カバー(4,5mm)	直立材大・飛接続部	1A	'93																						継続	
								2A	'93																				継続	
								3A	'93																				継続	
								3B	'93																				継続	
								3C	'93																				継続	

注1) FRP保護カバー：ポリエステル樹脂＋ガラス繊維で構成された繊維強化プラスチック

表4.6.2　塗覆装試験材の外観観察結果
研究テーマ3、第1次試験材

2003年度　　大：海上大気部　飛：飛沫帯

テーマ	次材	系	記号No.	防食系	防食仕様	施工部位	施工位置	暴露開始年	外観	最初の発生年度
3	1		12	ペトロラタム＋保護カバー	ペトロラタムペースト(0.5kg／m²)＋ペトロラタムテープ(55%ラップ)＋発泡PE(10mm)＋FRP保護カバー(2mm)	大直立材(接続部)→飛	1B	'89	地震計を固定しているステンレスバンドによるカバーの変形、南側に80mmlのクラック、東側に微細クラックがいずれも表層に数カ所 南西側にチョーキング 東側に表層隔離(90×200)*	'97 カバー変形 '97 表層クラック '01 チョーキング '03 表層剥離
							2B	'89	上部カバーのずれによる緩衝材の露出	'01 緩衝材露出
							1C	'84	南西側にチョーキング 南東側に緩衝材の露出*	'01 チョーキング '03 緩衝材露出
							2C	'89	南側にカバー欠損(150×700*)	'03 カバー欠損
					ペトロラタムペースト(0.5kg／m²)＋ペトロラタムテープ(55%ラップ)＋発泡PE(10mm)＋FRP保護カバー(4,5mm)		1A	'93	異状なし※1	'91 上部カバー一部破損
							2A	'93	異状なし※1	'87 カバー脱落 '91 表層クラック
							3A	'93	最下部カバー流失*	'90 カバー変形 '03 一部カバー流失
							3B	'93	異状なし※1	'86 あて傷 '90 カバー変形 '91 表層クラック
							3C	'93	異状なし※1	'85 ライニング剥離

(注) 1) 表中の( )内の数値は錆、傷等の大きさを示す。単位(mm)
2) ※1 防食テープ、保護カバー等の損傷に対しては補修が行われており、2003年度では異状ない
3) ＊は2003年度発生
4) FRP保護カバー：ポリエステル樹脂＋ガラス繊維で構成された繊維強化プラスチック

表 4.6.3 FRP 保護カバー材の耐衝撃性能比較例

	カバー設計厚さ(mm)	衝撃エネルギー(Kgf・m)	衝撃強度比(－)	暴露期間
標準仕様	2.0	0.81	1.0	1984年～1997年
	4.5	2.30	2.8	－
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

※耐衝撃仕様 FRP 保護カバー

標準仕様および耐衝撃仕様のどちらも基本的には強化材であるガラス繊維にマトリックスである不飽和ポリエステル樹脂を含浸させて成型したガラス繊維強化プラスチックであるが、そのガラス繊維の積層構成が異なる。積層用のガラス繊維として、チョップドストランドマットとロービングクロスを使用しており、これらの組み合わせ方により機械的強度特性を変化させている。耐衝撃仕様の場合、標準仕様と比べてロービングクロスの構成比率を高めており、同厚の標準仕様よりも機械的強度を高めている。

表4.6.4　I-2-1（塗装+FRP保護カバー+電気防食）

研究テーマ3　第2次試験材

(mV vs SCE)

防食系	塗装＋FRP保護カバー＋電気防食		
防食仕様	ｴﾎﾟｷｼ樹脂塗料（水中用）200μm FRP保護カバー（3mm） 電気防食：アルミニウム合金陽極（200×100×40t）		
試験材No.	I-2-1		
暴露期間	1998年～2003年（5年間）		
測定位置	T.P.+1300	T.P.+300	T.P.-700
1998年（暴露開始）	測定不能	測定不能	測定不能
1999年（1.0年）	-1035	-1065	測定不能
2001年（3.0年）	測定不能	測定不能	測定不能
2003年（5.0年）	測定不能	測定不能	測定不能

注）FRP保護カバー：ﾎﾟﾘｴｽﾃﾙ樹脂＋ガラス繊維で構成された繊維強化プラスチッ

※2003年度に試験材を回収後、開放点検を行なった結果、保護カバー内部に設置された照合電極（銀／塩化銀電極）の損傷が確認された。この損傷が電位測定不能の原因と考えられる。

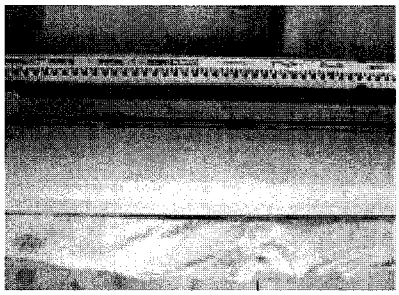


図4.6.3　外観状況（T.P.+1300付近）

保護カバー開放後の塗膜・鋼材表面状態

図4.6.3～図4.6.5は、保護カバー開放後の鋼材面に塗装されたエポキシ樹脂塗膜の外観、図4.6.6はエポキシ樹脂塗膜下の鋼材面の外観を示す。塗膜表面にはφ2～10mm程度のふくれが見られたが、その塗膜下の鋼材表面に発錆箇所は見られず、良好な防食状態であることが確認された。

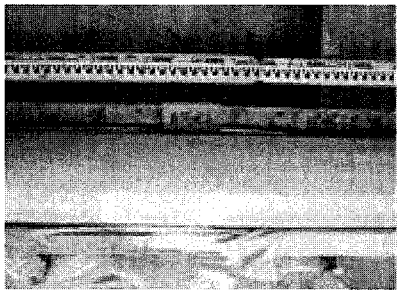


図4.6.4　外観状況（T.P.+300付近）

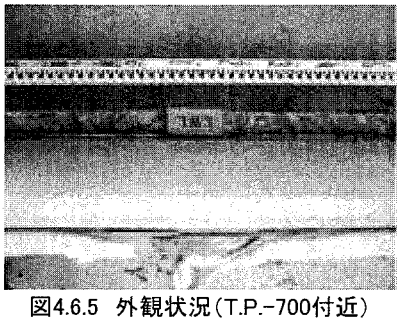


図4.6.5　外観状況（T.P.-700付近）

エﾎﾟｷｼ樹脂塗膜除去

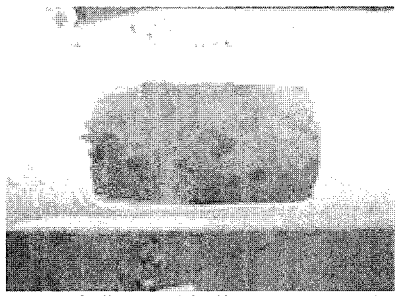


図4.6.6　塗膜下の外観状況（T.P.+300付近）

表4.6.5　I-2-2(特殊ウレタン系樹脂＋FRP保護カバー)
研究テーマ3　第2次試験材

($\Omega \cdot cm^2$)

防食系	特殊ウレタン系樹脂＋FRP保護カバー系		
防食仕様	特殊ウレタン系樹脂(2000 μ m)＋FRP保護カバー(3mm)		
試験材No.	I-2-2		
暴露期間	1998年～2003年(5年間)		
測定周波数	1KHz		
測定位置	T.P.＋1300	T.P.＋300	T.P.－700
1998年(暴露開始)	—	—	—
1999年(1.0年)	2.29E+05	2.01E+05	1.15E+05
2001年(3.0年)	1.22E+06	2.02E+06	3.98E+05
2003年(5.0年)	4.33E+06	4.18E+06	2.81E+05
2003年(5ヶ月放置)	2.20E+07	1.20E+07	2.38E+06

・特殊ウレタン系樹脂:ウレタン樹脂中に、吸水性高分子材を添加したもの
・FRP保護カバー:ポリエステル樹脂＋ガラス繊維で構成された繊維強化プラスチック
・1998年度暴露
・「5ヶ月放置」とは、回収後約5ヶ月間試験材を屋外で放置した状態

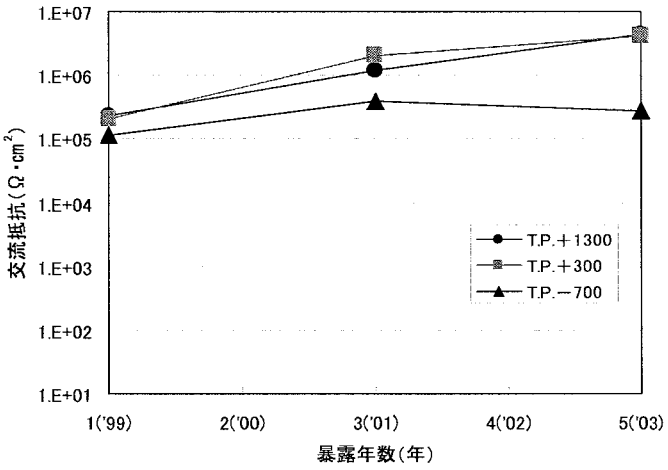


図4.6.7　交流抵抗値経時変化

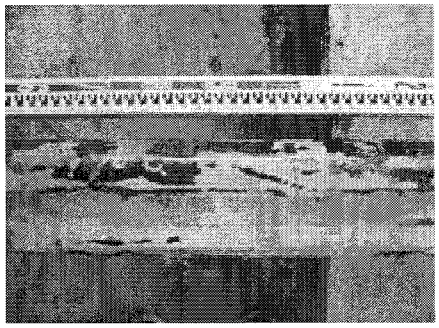


図4.6.8　開放後の外観状況(T.P.+1300.付近)

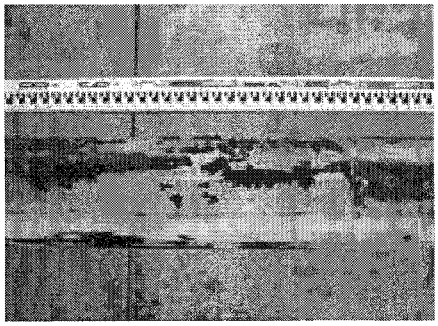


図4.6.9　開放後の外観状況(T.P.+300付近)

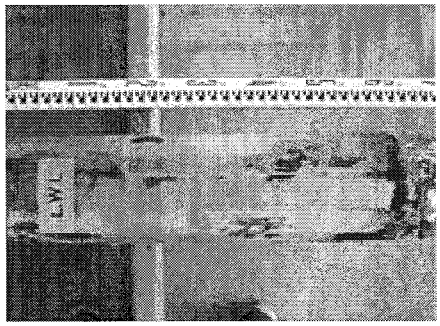


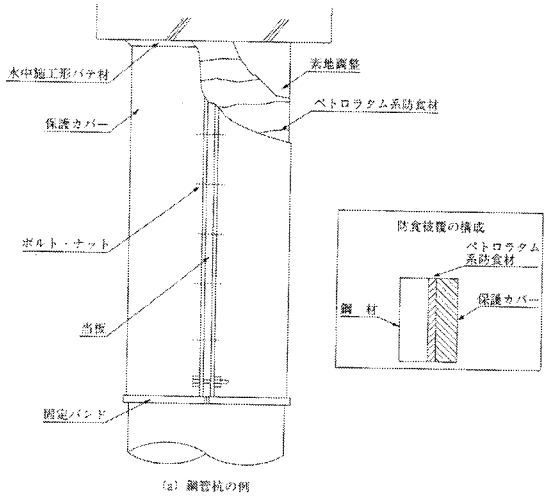
図4.6.10　開放後の外観状況(T.P.-700付近)

交流抵抗値測定方法

各レベル毎にカバー内に測定用の電極を内装し、電極からリード線を保護カバー外側に立ち上げ、暴露状態のままインピーダンスメーターにより測定。

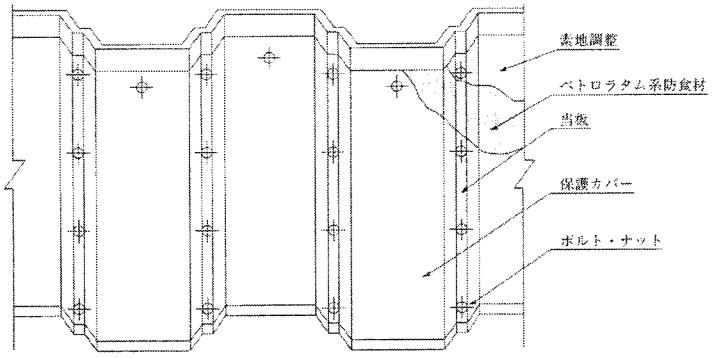
交流抵抗値と鋼材表面状態

交流抵抗値は厚膜型塗装系に比べ若干低い値を示したが、図4.6.8～図4.6.10に示すように特殊ウレタン系樹脂除去後の鋼材表面には発錆がなく、良好な防食状態であることが確認された(鋼材表面の黒色部分は特殊ウレタン系樹脂)。



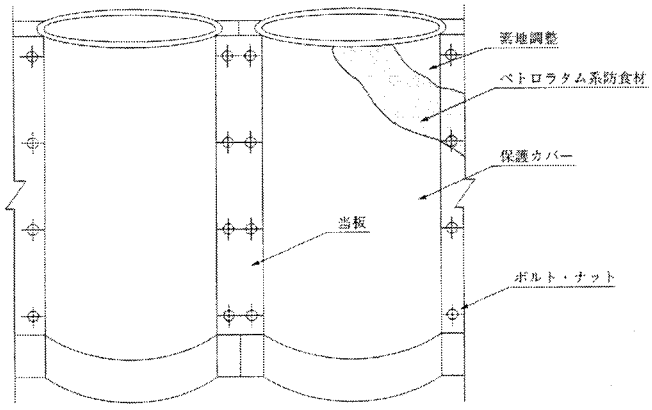
(a) 鋼管杭の例

図4.6.11　鋼管杭への適用例



(b) 鋼矢板の例

図4.6.12　鋼矢板への適用例



(c) 鋼管矢板の例

図4.6.13　鋼管矢板への適用例

５．総まとめ

5．1 普通鋼と低合金鋼

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。

5．2 ステンレス鋼

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、すきま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ま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Cr+3Mo+10N量が38(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、Cr+3Mo+10N≧38(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。

5．3 キュプロニッケル、モネル、チタン

1) キュプロニッケルは、暴露3.5年経過時の観察で局部腐食が認められ、6.5年経過時には生物付着下にも局部腐食が認められた。生物付着量については、他の試験体（ステンレス、チタン、有機樹脂など）に比べ、最も少なかった。

2) モネルは、キュプロニッケルよりも早い段階から、局部腐食の発生が認められた。

3) 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。

5．4 有機ライニング鋼材

10～13年間の海洋暴露試験の結果、今回の実験に供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。

5．5 厚膜塗装材

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、端部等施工不充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。

5．6 保護カバーを用いた現地防食方法

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

独立行政法人土木研究所、社団法人日本鉄鋼連盟は、駿河湾における「海洋技術総合研究施設」を用いて、1984年から2003年までの約20年間にわたって「海洋構造物の耐久性向上技術に関する研究」（以下、旧暴露試験と呼ぶ）を実施し、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取得された。

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、20年間の暴露試験で十分な耐食性を保持している防食材料のさらに長期の耐久性を検証するため暴露を継続したい試験体があること、期間途中から暴露試験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、より耐久性に優れた防食仕様・補修仕様を実海域で評価するととした。

新規暴露試験の概要を以下に示す。

①1984年から20年間の暴露試験の成果・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、本暴露試験は、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分科会が実施する。

表6　活動計画の概要

15FY (2003)	16FY (2004)	17FY (2005)	18FY (2006)	19FY (2007)	20FY (2008)	21FY (2009)	22FY (2010)	23FY (2011)	24FY (2012)	25FY (2013)	26FY (2014)
暴露年	1年	2年	3年	4年	5年	6年	7年	8年	9年	10年	
開始 暴露	補修	一般 調査			詳細 調査			一般 調査		最終 調査	評価

あとがき

駿河湾海洋技術総合研究施設における20年間の海洋暴露試験の結果，鋼構造物の各種防食技術に関する貴重なデータが取得された。これらのデータは，鋼構造物の耐久性向上に大いに役立つことが期待される。

今後，さらに長期間の耐久性を検証するとともに、新たな防食材料についても暴露試験を行う予定である。

謝　辞

20年という長期間にわたる本共同研究にこれまで携られた多数の関係者の皆様に謝意を表します。

また，海洋技術総合研究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謝意を表します。