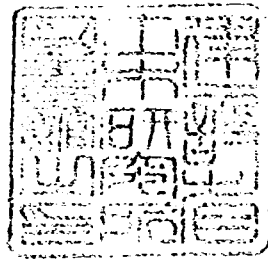


土木研究所資料

電気防食の設計法に関する研究



昭和57年 3 月

建設省土木研究所

地層化学部 化学研究室

實

Copyright © 57年度 by P. W. R. I

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

この報告書は、土木研究所長の承認を得て刊行したものである。したがって、本報告書の全部又は一部の転載、複写は土木研究所長の承認を得ずしてこれを行なってはならない。

まえがき

鋼材の防食対策の一つである電気防食について、各種条件下における防食効果および塗装を併用した場合の電気防食の条件等を実験によって明らかにし、電気防食の効率的な利用方法を確立するための基礎資料を得る目的で「電気防食の設計法に関する研究」と題して建設省土木研究所は財団法人土木研究センターと共同して研究を行っている。

本資料は昭和54年度および昭和55年度の研究成果をとりまとめ考察を加えたものである。

なお、本研究の遂行にあたっては財団法人土木研究センターに電気防食研究委員会（委員長玉野治光氏）を設置している。委員および幹事の方々の名を記して厚く謝意を表するものである。

電氣防食研究委員会名簿

(敬称略, 50音順)

委員長	玉野治光	首都高速道路公団
委員	小林豊治	日本防蝕工業株式会社
"	佐藤靖	大日本塗料株式会社
"	田中柳之助	鋼管杭協会
"	戸村寿一	中川防蝕工業株式会社
"	蒔田実	建設省土木研究所
"	吉野久雄	中川防蝕工業株式会社
幹事	森芳徳	建設省土木研究所
幹事	飯島勇	日本防蝕工業株式会社
"	石川光男	中川防蝕工業株式会社
"	瓜谷詔夫	大日本塗料株式会社
"	落合直隆	中川防蝕工業株式会社
"	片脇清士	建設省土木研究所
"	白水司	中川防蝕工業株式会社
"	田村祐一	日本防蝕工業株式会社
"	星野稔	大日本塗料株式会社
"	山本郁雄	中川防蝕工業株式会社
事務局	荒居昇	財団法人土木研究センター
"	篠田米蔵	財団法人土木研究センター

目 次

まえがき	
1. 研究目的	1
2. 研究概要	2
2.1 全体試験計画	2
2.2 試験内容	2
2.3 試験液と試験装置	3
3. 研究方法	10
3.1 裸鋼材の電気防食特性試験	10
3.1.1 標準環境	10
3.1.2 流速環境	10
3.2 塗装鋼材の電気防食特性試験	16
3.3 塗膜の性能試験	18
3.3.1 耐過防食試験	18
3.3.2 塩水噴霧試験	24
3.3.3 海水浸漬試験	27
4. 試験結果および考察	29
4.1 裸鋼材の電気防食特性試験	29
4.1.1 標準環境	29
4.1.2 流速環境	38
4.2 塗装鋼材の電気防食特性試験	45
4.3 塗膜の性能試験	65
4.3.1 耐過防食試験	65
4.3.2 塩水噴霧試験	72
4.3.3 海水浸漬試験	75
4.4 塗装系の耐久性に関する考察	80
5. 総 括	83
あとがき	85

1. 研究目的

土木鋼構造物の海中部分に適用する防食法として、電気防食法は信頼性が高く期待できる方法である。しかし、電気防食法を土木鋼構造物に適用する場合の参考資料はまだ不十分で、公的基準等も乏しいのが現状である。このため、共同研究の最終段階で電気防食設計指針（案）を作成することを目途として、その基本的資料を得るための研究を実施する。

- (1) 鋼材の腐食と電気防食条件に関する試験を標準海水、低温海水、汚染海水、希釈海水、および流速条件下について実施する。
- (2) 塗装を併用した電気防食に関する試験を実施し、塗膜の経時的劣化および防食電流密度の経時変化を調べる。
- (3) 電気防食と併用する塗料の品質規格に関する試験を各種塗装系について実施する。

2. 研究概要

2.1 全体試験計画

本試験は各種海域における土木鋼構造物に対する電気防食の設計法に関する基礎資料を得るために行うものであり、表2-1に各試験項目、条件及び日程等の全体試験計画を示す。試験内容は裸鋼材の電気防食特性試験、塗装鋼材の電気防食特性試験、塗膜の性能試験から構成されている。

(1) 裸鋼材の電気防食特性試験

海域土木鋼構造物はその立地状況により、清浄、低温、流速、希釈、汚染等の様々な海水環境におかれる。そして、各環境ごとに防食条件が異なることは明らかである。ここでは、裸鋼材の電気防食特性に及ぼす種々の実環境を想定した試験を行い、環境に応じた最適な防食条件を把握する。

(2) 塗装鋼材の電気防食特性試験

海域土木鋼構造物に適用する塗装系にはタールエポキシ樹脂系、エポキシ樹脂系、ポリエステル樹脂系など種々のものが考えられる。塗装鋼材について電気防食特性試験を行い、各種塗装系について塗膜性能、防食電流密度および防食電位等を求めることによって、塗装を併用した電気防食の設計基準の資料を得る。

(3) 塗膜の性能試験

海域土木鋼構造物に適用が予測される塗膜性能の把握を目的とした試験で次の3種類を行う。

1) 耐過防食試験

塗装鋼材に電気防食が併用される場合、その塗料には耐海水性、耐アルカリ性、付着性等の優れた性能が要求される。特に電気防食法を施工した場合、防食対象である鋼材表面にアルカリが生成されるため、塗膜の耐アルカリ性は重要な性質となる。

本試験はこうした条件下における塗膜の耐久性、各種塗料の性能比較、防食下地としてのジンクリッチペイントの耐過防食性、塗膜の顔料濃度の影響、ガラスフレーク充填ポリエステル樹脂塗料（以下GFPという）の膜厚の影響を調べる。

2) 塩水噴霧試験

塗膜の品質調査を目的として塩水噴霧試験を行う。

3) 海水浸漬試験

塗膜の品質調査を目的として、各種の塗装鋼材を天然海水に長期間浸漬し、海水による劣化を観察する。

2.2 試験内容

昭和54年度および55年度の試験内容を表2-2に示す。

(1) 裸鋼材の電気防食特性試験

標準環境（25℃天然海水）における裸鋼材の電気防食試験を小型水槽にて行った。流速環境（0.5～8 m/s）における裸鋼材の電気防食試験を流速試験装置にて行った。

(2) 塗装鋼材の電気防食特性試験

標準環境における塗装鋼材（主としてタールエポキシ樹脂塗料）の電気防食試験を中型水槽にて行った。

(3) 塗膜の性能試験

1) 耐過防食試験

塗装鋼材の耐過防食試験（ -2000 mV ）を浸漬水槽にて行った。

2) 塩水噴霧試験

塗装鋼材の塩水噴霧試験を塩水噴霧試験機にて行った。

3) 海水浸漬試験

塗装鋼材の海水浸漬試験を浸漬水槽にて行った。

2.3 試験液と試験装置

2.3.1 試験液

試験液は太平洋上の八丈島沖合の天然海水を用い、定期的に更新する。

2.3.2 試験装置

各種試験水槽及び付属装置の配置状態を図2-1、給排水フローシートを図2-2に示す。タンクローリー車で運搬された天然海水は水中ポンプで屋上の受水槽に移送され、フィルター及び紫外線殺菌装置を通して各水槽に供給される。

(1) 小型水槽

小型水槽の寸法は $1.5 \times 3.0 \times 0.7$ (H) mであり、その容量は約 3 m^3 である。水中ポンプにより海水は連続的に少量ずつ槽外に排出され、フィルター、チラーユニット、石英ヒーター部を経由して再び槽内へ微速循環されている。この際チラーユニットもしくは石英ヒーターにより温度調整が行われる（ $5 \sim 35^\circ\text{C}$ の水溫設定が可能である）。なお、水溫は制御盤に組み込まれた自動記録計に連続記録される。また、曝気装置として空気と窒素の2つの専用ガスラインを有し溶存酸素の調節を可能とする。

多くの機能を持つこの水槽を用いて種々の腐食環境を設定し、「裸鋼材の電気防食特性試験」を行う。

(2) 流速試験装置

図2-3に流速試験装置の概略を示す。大容量ポンプにより海水は約 1 m^3 の容量を有するタンクからフィルター、各種バルブ、冷却器、流量計さらに試験片取付枠を通り再びタンクへと循環される。水溫は設定することが可能で、通常は 25°C に設定している。流速は $0 \sim 10\text{ m/s}$ と幅広く変えることができる。

試験片は図2-3に示す3つの取付枠に固定され、各取付枠ごとに電位設定が可能である。

この装置では「裸鋼材の電気防食特性試験」のうち、沖合を想定した流速環境における裸鋼材の電気防食特性試験を行う。

(3) 中型水槽

中型水槽の寸法は $3.5 \times 3.0 \times 0.7$ (H) mであり、その容量は約 7 m^3 である。水中ポンプによ

り海水は微速循環され、このときフィルターを通過することにより懸濁物の除去が行われる。また、空気の吹き込みが行われ海水中の溶存酸素はほぼ飽和状態を保っている。なお、この水槽は温度調節装置を具備していないが、水温は室温（約25℃）に保たれている。

同一の環境条件で多数の試験片を浸漬するのに適した本水槽では「塗装鋼材の電気防食特性試験」を長期間にわたって行う。

(4) 浸漬水槽

浸漬水槽の寸法は2.0×0.5×0.4(H)mであり、その容量は約0.4m³である。海水の水温は室温にほぼ等しい。

この浸漬水槽では「塗膜の性能試験」のうち「耐過防食試験」と「海水浸漬試験」を行う。

(5) 塩水噴霧試験機

本装置はJIS Z 2371に基づく腐食促進試験機で、ミストマイザー内蔵の噴霧塔によりミストを発生させるISO方式であり、試験槽は蒸気加熱方式となっている。

この装置では、「塗膜の性能試験」のうち「塩水噴霧試験」を行う。

2.3.3 電気防食方法

(1) 電気防食回路

本試験では、試験片がきわめて多いため、電位を保持する方法を工夫した。定電位電解装置（以下ポテンシオスタットという）を用いて、多数の試験片を設定電位に維持し、かつ所要電流の変化を測定できるように、図2-5に示すような基本回路を構成した。ポテンシオスタットは各設定電位ごとに1台使用し、合計20台を用いている。試験片から2本のリード線が引きだされ、一方のはポテンシオスタット、陽極、試験片、スイッチ、シャント抵抗を通りたえず電気防食に必要な電流が流れており、他方のは電位或いはインピーダンスの測定に用いるために電流は流さない。各試験片の所要電流は回路に挿入されているシャント抵抗の電圧降下を測定することにより求めることができる。

各試験片の所要電流及び電位の測定にはデータ収録装置またはデジタルマルチメーターを用い、インピーダンスの測定には交流ブリッジを用いて行う。

(2) 電気防食用機器材料

1) ポテンシオスタット

ポテンシオスタットは最大電解電流1Aのものを用いるが、耐過防食試験については所要電流が大きいので5Aのものを用いる。

2) 照合電極

照合電極には飽和甘汞電極（SCE）を用いる。なお、本報告の電位はすべて飽和甘汞電極基準の値である。

3) 陽極

陽極は各試験槽ごとに適切な材料を選んで使用する。小型及び中型水槽には白金メッキチタン電極を、流速試験装置には白金メッキチタン電極または高ケイ素鉄電極を、浸漬水槽にはアルミニウム合金陽極を用いる。

表 2 - 1 全体試験計画

昭和55年度 現在

試 験		試 験 条 件										水 槽 諸 元		収 容 試験片 枚 数	試 験 日 程					評 価															
試験項目	試験環境との対応	試 験 液				試 験 片						化 様 等	取付枚数		54年度	55年度	56年度	57年度	58年度	評価項目	測定法														
1	鋼材の電気防食特性試験	標準	天然飽和	25℃		サンドブラスト処理 充錆処理 (黒皮)					自然電位 -800 mV -850 mV -900 mV -950 mV -1000 mV	(mm) 100 × 100 × 3.2 t 材 質 SS 41	小 寸法 (m) 1.5 × 3.0 × 0.7 ^H 水量 約 3 m ³ 水温 (設定範囲) 5 ~ 35℃ 流速 微速循環 DO 調整可能 air, N ₂ 吹き込み	3	48						腐食速度	重量減													
		低温	天然飽和	5℃																	E _p - i _p	防食電流													
		河口	10倍希釈飽和	25℃																	防食率	重量減													
		汚染	天然小	25℃	汚染																自然電位	電 位													
		汚染河口	10倍希釈小	25℃	汚染																表面状況	写真記録													
		流速	天然飽和	25℃	流速 0.5 ~ 8.0 m/s	サンド ブラスト処理					自然電位 -800 mV -900 mV	(mm) 60 × 50 × 5.0 t 材 質 SS 41	流 寸法 (m) 1.5 × 1.0 × 0.7 ^H 水量 約 1 m ³ 水温 (設定範囲) 常温 ~ 35℃ 流速 0 ~ 10 m/s DO 飽和	3	9							小型試験槽の評価に準じる													
2	塗装鋼材の電気防食特性試験	標準	天然飽和	25℃		サンド ブラスト処理	なし	ターレエポキシ JISK 5664 1.2.3 種 (硬化剤) ポリアミド アシアダクト (参考) ターレクレタン エポキシ	(膜厚) 100 μm 200 μm 400 μm	あり	-900 mV -1500 mV	(mm) 100 × 100 × 3.2 t 材 質 SS 41	中 寸法 (m) 3.5 × 3.0 × 0.7 ^H 水量 約 7 m ³ 流速 微速循環 DO 飽和 air 吹き込み	6	168 32						E _p - i _p	防食電流													
																					通過性	インピーダンス													
																					付着力	ゴバン目 プルオフ													
																					ピンホール	ピンホール測定													
																						外観観察	写真記録												
3	塗膜の性能試験	促進防食試験条件	天然放置	25℃		サンド ブラスト処理	なし	ターレエポキシ JISK 5664 1.2.3 種 ターレクレタン エポキシ ビシアダクト 超厚膜型 高PVC型 ポリエステル ビニル 塩化ゴム 変性エポキシ GFP	(膜厚) 標準膜厚 400 μm 他	あり	-2000 mV	(mm) 70 × 150 × 3.2 t 材 質 SS 41	没 寸法 (m) 2.0 × 0.5 × 0.4 ^H 水量 約 0.4 m ³ 水温 25℃ 流速 なし DO 放置	4	81 86							中型試験槽の評価に準じる													
		塩水噴霧試験	5%食塩水	35℃																								塩水噴霧	JIS Z 2371	81					外観観察
		海水浸漬試験	標準	天然飽和	25℃																			没	耐通防食試験槽と同じ DO 飽和 air 吹き込み		89						中型試験槽の評価に準じる		

表 2-2 昭和54年度及び55年度の試験内容

試験条件 試験項目			水槽	試験液				試験片				設定電位 mV	
				試験液	D O	水温℃	流速 $\frac{m}{s}$	素地	防食下地	塗料の種類	スクラッチ の付加		
1	裸鋼材の 電気防食 特性試験	標準 環境	小型	天然 海水	飽和	25	微速	サンド ブラスト処理 発錆処理 (黒皮)					自然電位 - 800 - 850 - 900 - 950 - 1000
		流速 環境	流速	天然 海水	飽和	25	0.5, 1.2 3.5, 8	サンドブラスト 処理					自然電位 - 800 - 900
2	塗装鋼材の 電気防食特性試験		中型	天然 海水	飽和	室温 (25)	微速	サンドブラスト 処理	なし 有機 ジंक 無機 ジंक	タールエポキシ JIS 1, 2, 3種 (硬化剤)ポリアミド アミンアダクト タールウレタン エポキシ	(膜厚) 100 μ m 200 μ m 400 μ m	あり なし	- 900 - 1500
3	塗膜の 性能試験	耐過防食 試験	浸漬	天然水	放置	室温 (25)	静止	サンドブラスト 処理	なし 有機 ジंक 無機 ジंक	タールエポキシ JIS 1, 2, 3種 タールウレタン エポキシ (ピュアエポキシ 超厚膜型 高PVC型 ポリエステル ビニル 塩化ゴム 変性エポキシ GFP	(膜厚) 標準膜厚 400 μ m 他	あり なし	- 2000
		塩水噴霧 試験	塩水噴霧	5%食塩水	—	35	—					なし あり	
		海水浸漬 試験	浸漬	天然水	飽和	室温 (25)	静止					なし	自然電位

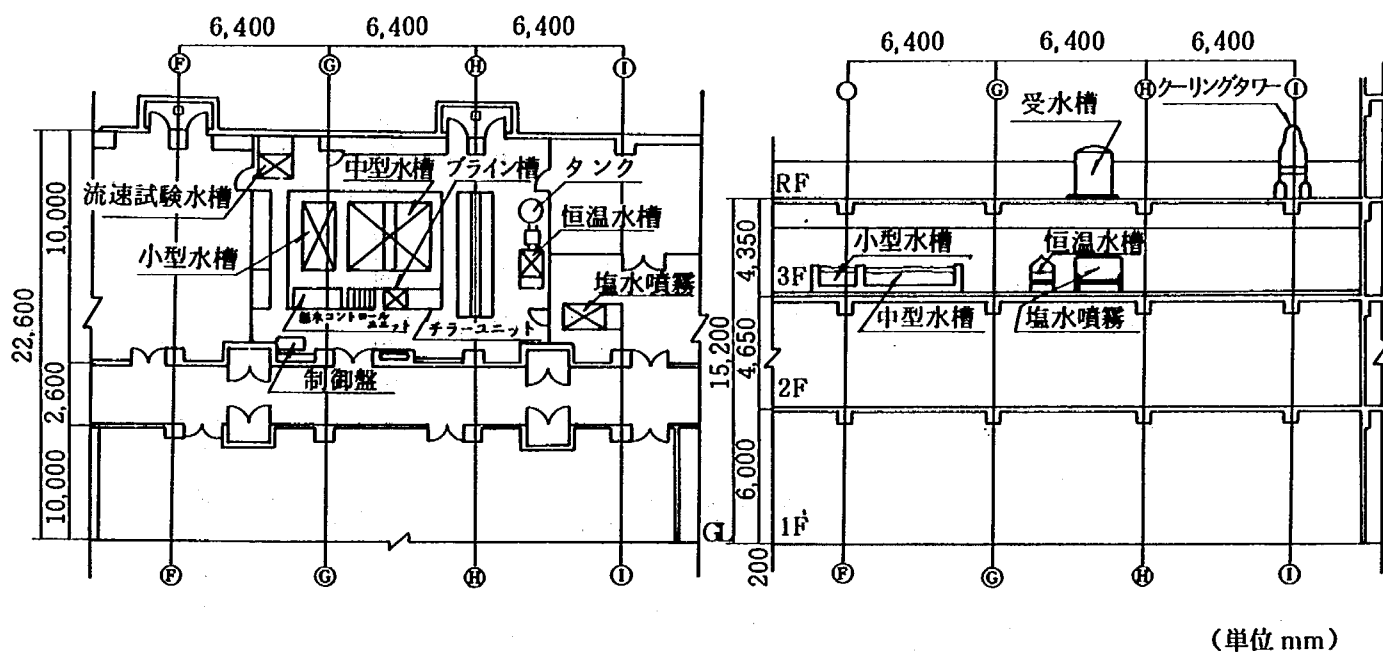


図 2-1 腐食防食試験装置

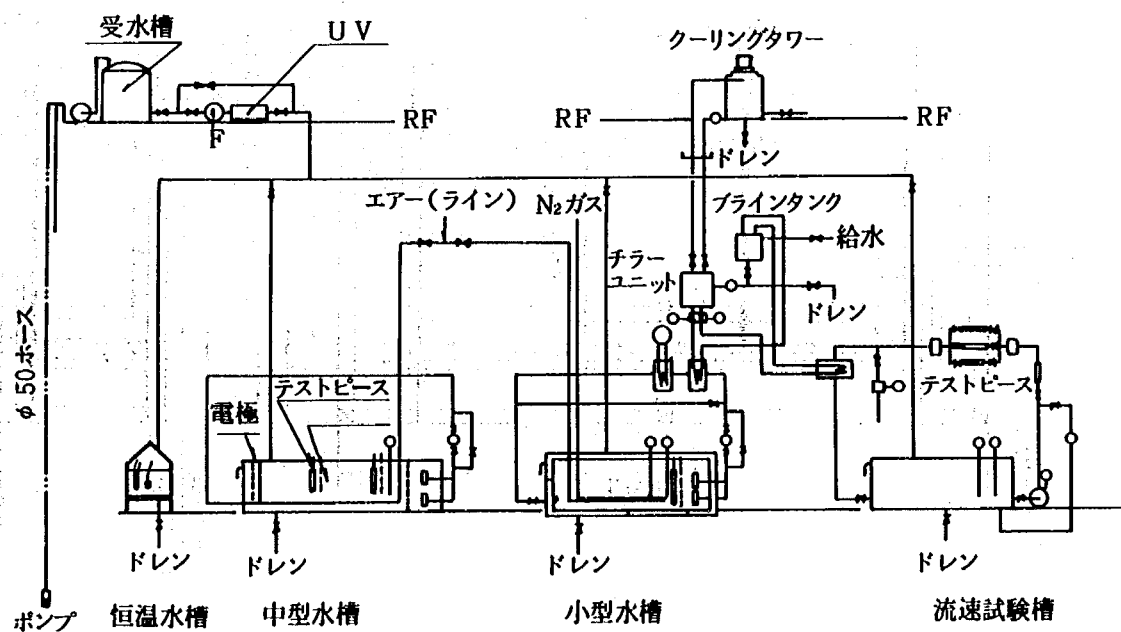


図 2-2 給排水フローシート

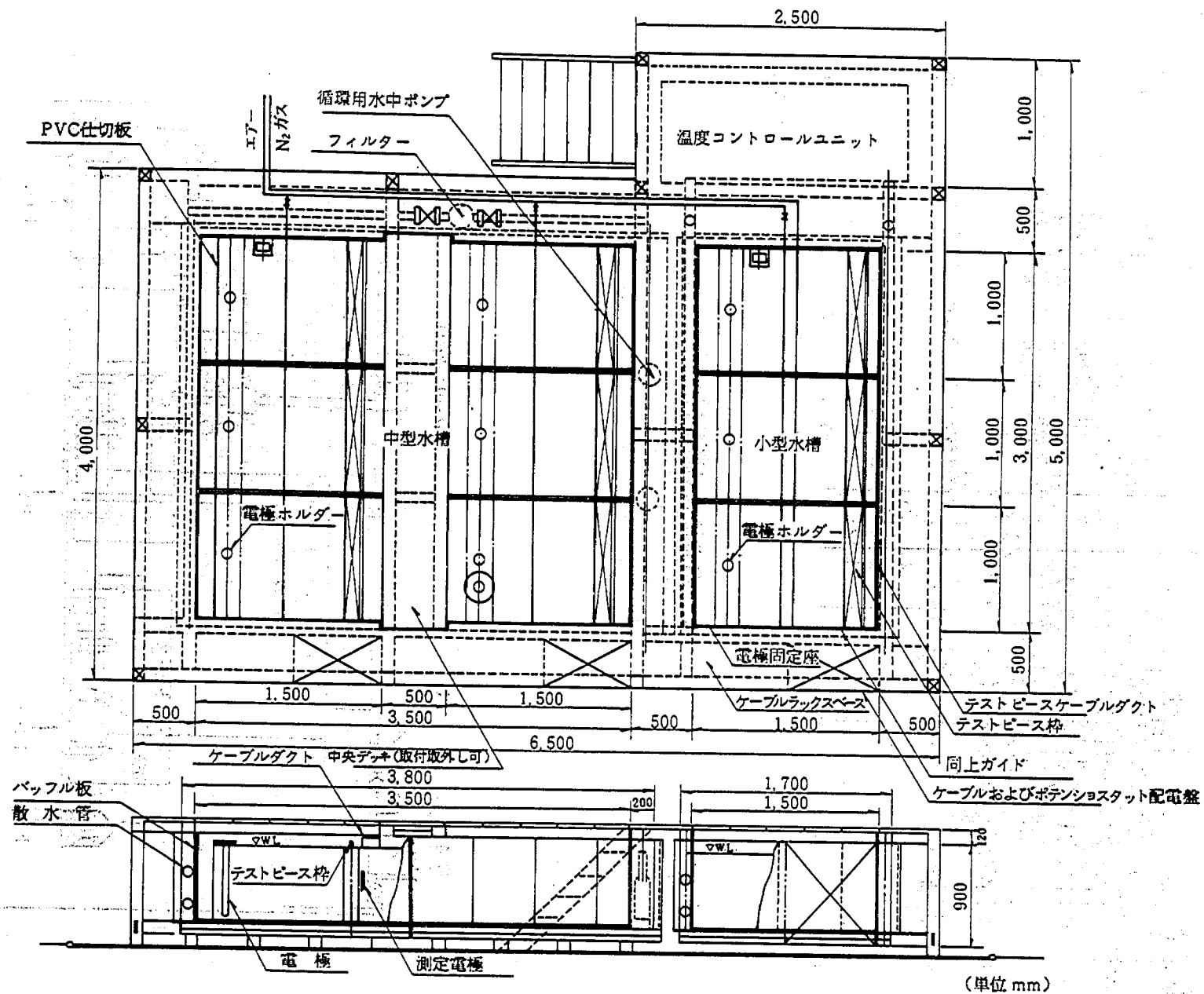


図 2 - 3 小型及び中型水槽

3. 研究方法

3.1 裸鋼材の電気防食特性試験

3.1.1 標準環境

ここで云う“標準環境”とは汚染因子を含まない天然海水を試験液として、流速の影響を受けない（微速循環）いわば理想的な環境である。

標準環境における小型水槽試験は表3-1に示すように第1次、第2次に分けて実施した。

第1次試験ではサンドブラスト鋼、黒皮付鋼および発錆処理鋼を用いて、設定電位を -800 mV 、 -900 mV および -1000 mV とする定電位法により実施し、主に防食効果の確認実験とした。また、第2次試験では、サンドブラスト鋼、発錆処理鋼の2種類を用いて、設定電位を -800 mV 、 -850 mV 、 -900 mV 、 -950 mV および -1000 mV とし、主に所要電流の確認試験とした。

(1) 試験因子

第1次および第2次試験の因子水準は表3-1に示したとおりである。

(2) 試験片

試験片の形状を図3-1に示す。また試験片の材質、表面状態、結線部の被覆状態は下記のとおりである。

1) 材質 一般構造用圧延鋼材 JIS G 3101 2種 (SS 41)

2) 表面状態

(i) サンドブラスト鋼 1) の鋼材を表面あらさ30Sにブラスト処理（表面あらさ；10点平均あらさ $35\text{ }\mu\text{m}$ ，最大高さ $100\text{ }\mu\text{m}$ ，基準長さ 8 mm ）

(ii) 黒皮付鋼 1) の鋼材をブラスト処理をしないまま使用

(iii) 発錆処理鋼 第1次試験では、サンドブラスト鋼を塩水噴霧中で2週間曝露して発錆処理。

第2次試験では、サンドブラスト鋼を30日間大気曝露（土木研究所実験棟屋上）し、その間週2回海水浸漬して発錆処理。

3) 試験片結線部分の絶縁方法 図3-1に示すとおり、リード線をビス止めし、結線部を硬化性パテで厚く覆い、硬化乾燥後自己融着テープを巻き、更にその上から絶縁テープで絶縁被覆した。

表3-1 裸鋼材の電気防食特性試験

日 程	昭 和	54 年			55 年												56 年		
	月	10	11	12	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	1	2	3
			第 1 次 試 験 (265 日 間)											第 2 次 試 験 (180 日 間)					
試 験 因 子	設 定 電 位		-800 mV 、 -900 mV 、 -1000 mV											-800 mV 、 -850 mV 、 -900 mV 、 -950 mV 、 -1000 mV					
	試 験 片		サンドブラスト処理、黒皮付、発錆処理											サンドブラスト処理、発錆処理					

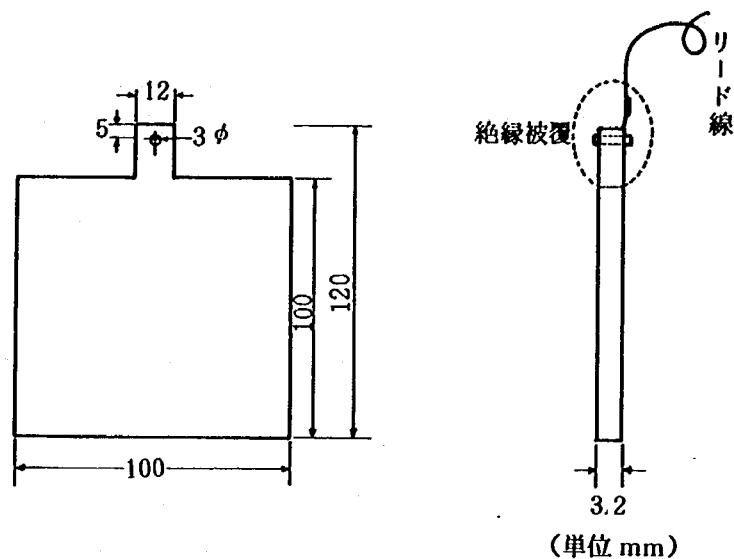


図 3—1 裸鋼材の電気防食特性試験用試験片の形状

(3) 試験片の配置

試験片を表 3—2 に示す通り 1 条件 4 枚ずつ 48 枚供試した。

表 3—2 試験片枚数

次	試験片	設定電位	自然電位	-800 mV	-850 mV	-900 mV	-950 mV	-1000 mV	計
第一次試験	サンドブラスト鋼		4	4	—	4	—	4	16
	黒皮付鋼		4	4	—	4	—	4	16
	発錆処理鋼		4	4	—	4	—	4	16
	計		12	12	—	12	—	12	48
第二次試験	サンドブラスト鋼		4	4	4	4	4	4	24
	発錆処理鋼		4	4	4	4	4	4	24
	計		8	8	8	8	8	8	48

試験片の配置は図 3—2 に示す。試験片 4 枚についてポテンショスタットを 1 台配置し、飽和甘汞電極を照合電極とし、白金メッキチタン線 (1.5 $\phi \times 300$ mm) を対極としてそれぞれの設定電位とした。

(4) 測定項目

裸鋼材の電気防食特性試験に関する調査項目は次のとおりである。

- 1) 外観観察
- 2) 電位測定
- 3) 電流測定
- 4) 腐食量測定

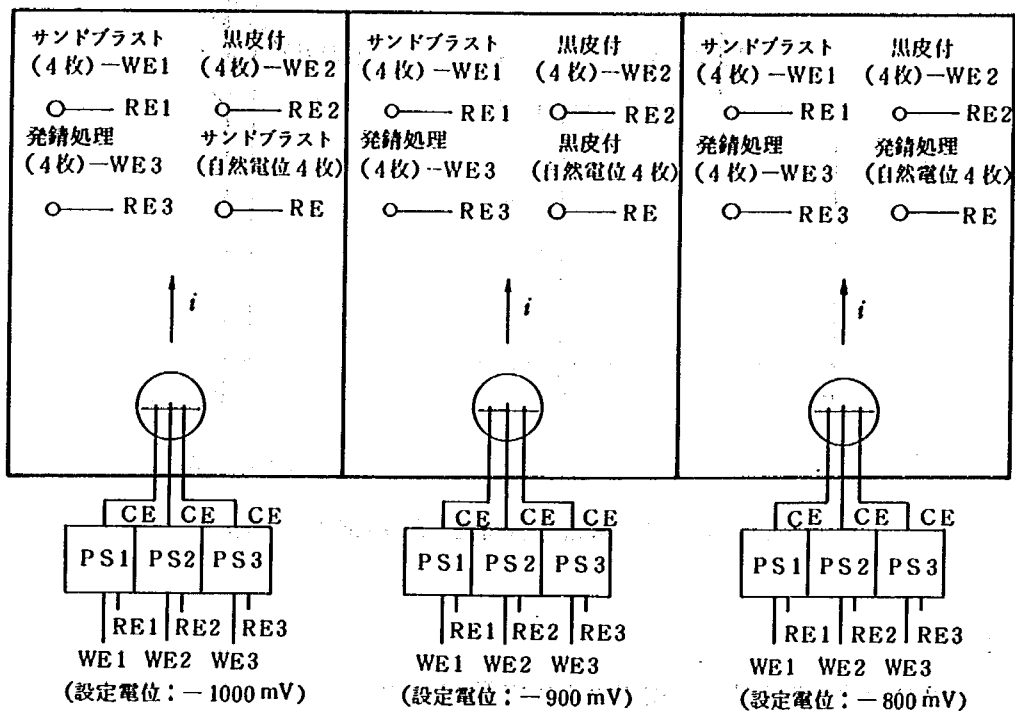


図3-2 小型水槽試験の電気防食条件

3.1.2 流速環境

(1) 試験因子

第1次試験での試験因子および水準を表3-3に示す。

表3-3 試験因子と水準

因子 \ 水準	1	2	3	4	5	6
設定電位 (mV)	自然電位	-800	-900	—	—	—
流速 (m/s)	0.5	1	2	3	5	8

各流速ごとに約1ヶ月の試験を行う。

第2次試験では、試験片取付枠を改造し、第1次試験と同様の設定電位で2 m/sの流速で1～2ヶ月の試験を3回行った。

なお、水温は温度制御装置により25℃に維持され、そして溶存酸素は空気の巻き込みにより飽和となっている。

(2) 試験片

試験片の材質はSS41鋼で、素地調整は3.1.1(2)項に準じ表面をサンドブラスト処理を行った。試験片は図3-3に示すとおり独自の形状であり、裏面には電氣的接続をとるためにネジ切り加工が施されている。

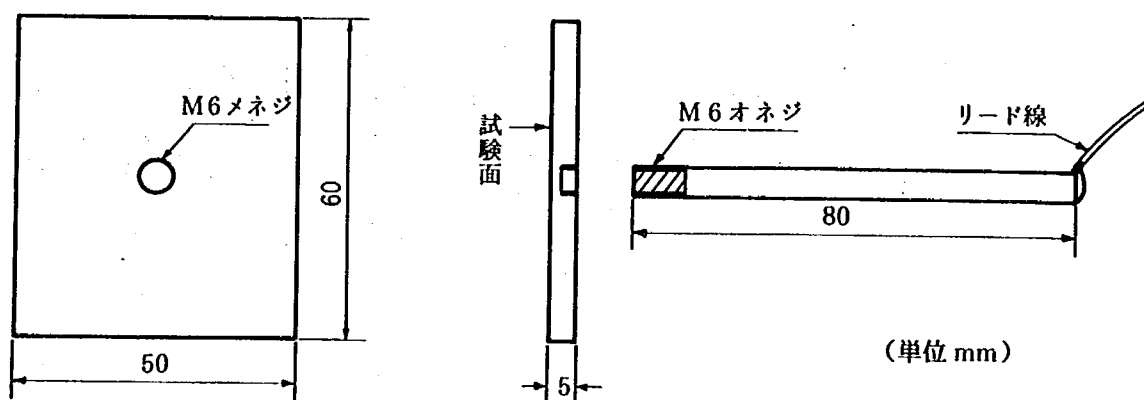


図3-3 流速試験片の寸法, 形状

(3) 試験片の配置

第1次試験の取付枠を図3-4に, 第2次試験の取付枠を図3-5にそして各試験での試験片の配置を図3-6に示した。

1) 第1次試験

試験片取付枠はアクリル製の2つ割からなり, 中央部の水路(断面 50×5 mm)を挟んで, 上部に陽極, 下部に試験片を取付けた。試験片取付用切込みは4つあるが, 内側の1つを照合電極用とし, 他の3つを試験片用とした。陽極は白金メッキチタン電極($1.5 \phi \times 320$ mm)を用いた。

試験片はアセトン脱脂, 乾燥, 秤量ののち試験片取付枠に固定した。試験面は 60×50 mmの片面 30 cm^2 を使用し, それ以外の面は取付枠との間にシリコンシーリング剤を充填して被覆した。

電気防食条件は取付枠ごとに自然電位, -800 mV, -900 mVの3種類の電位を設定した。

2) 第2次試験

試験片取付枠を次の点において改良した。すなわち, (i) 低流速域での流速設定を精度よくするため水路の断面を 50×14 mmに広げた。(ii) 試験片取付部を中央部に設け, 乱流の影響を少なくした。(iii) 照合電極専用の穴を2個設け電位設定および測定精度を向上させた。(iv) 電流分布が均一になるように線状陽極を面状陽極に変更した。なお, 陽極には高ケイ素鉄電極($50 \times 220 \times 10^t$ mm)を用いた。

試験片の処理および取付は第1次試験と同様に行った。

電気防食条件は第1次試験と同様に取付枠ごとに自然電位, -800 mV, -900 mVの電位とした。

(4) 測定項目

流速試験における測定項目は次のとおりである。

- 1) 外観観察
- 2) 電位測定
- 3) 電流測定
- 4) 腐食量測定

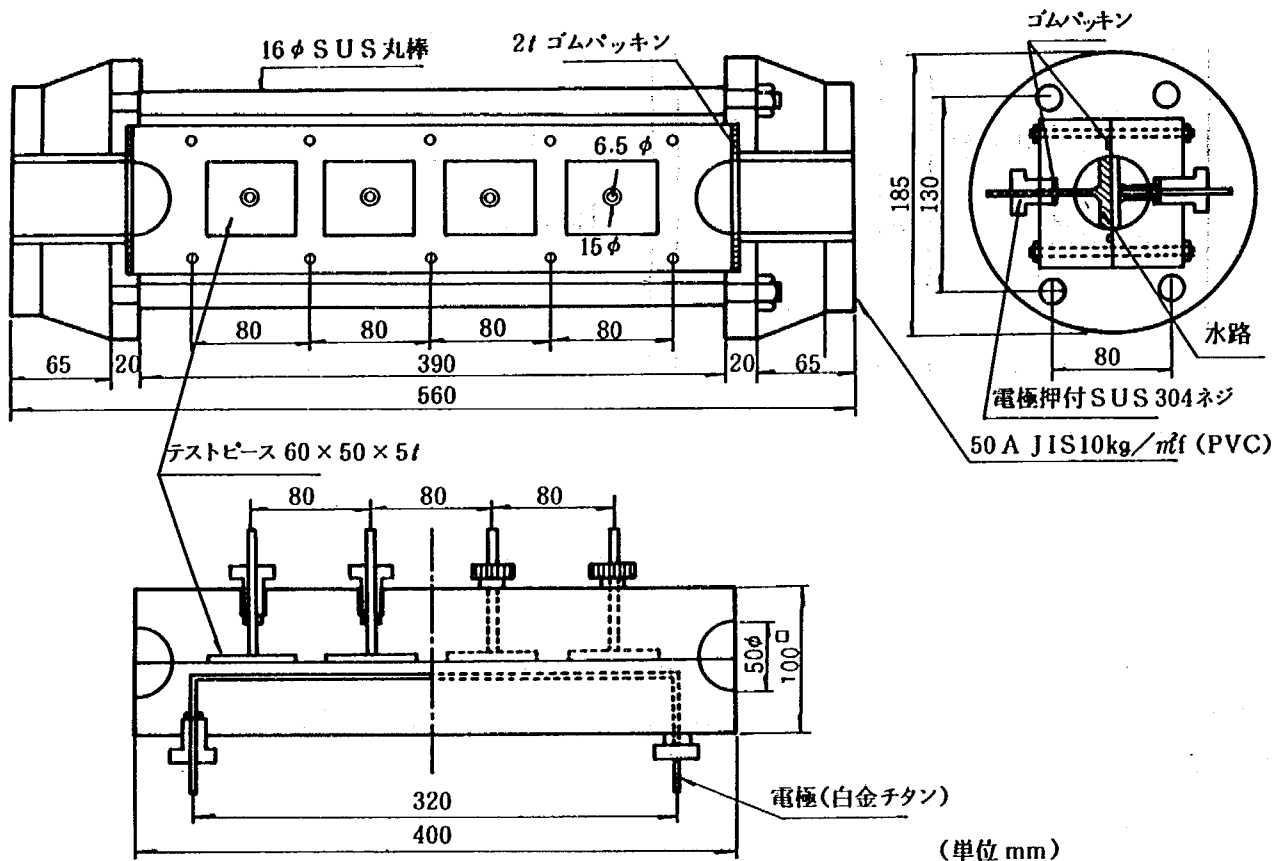


図 3-4 試験片取付枠(流速試験水槽)第 1 次試験

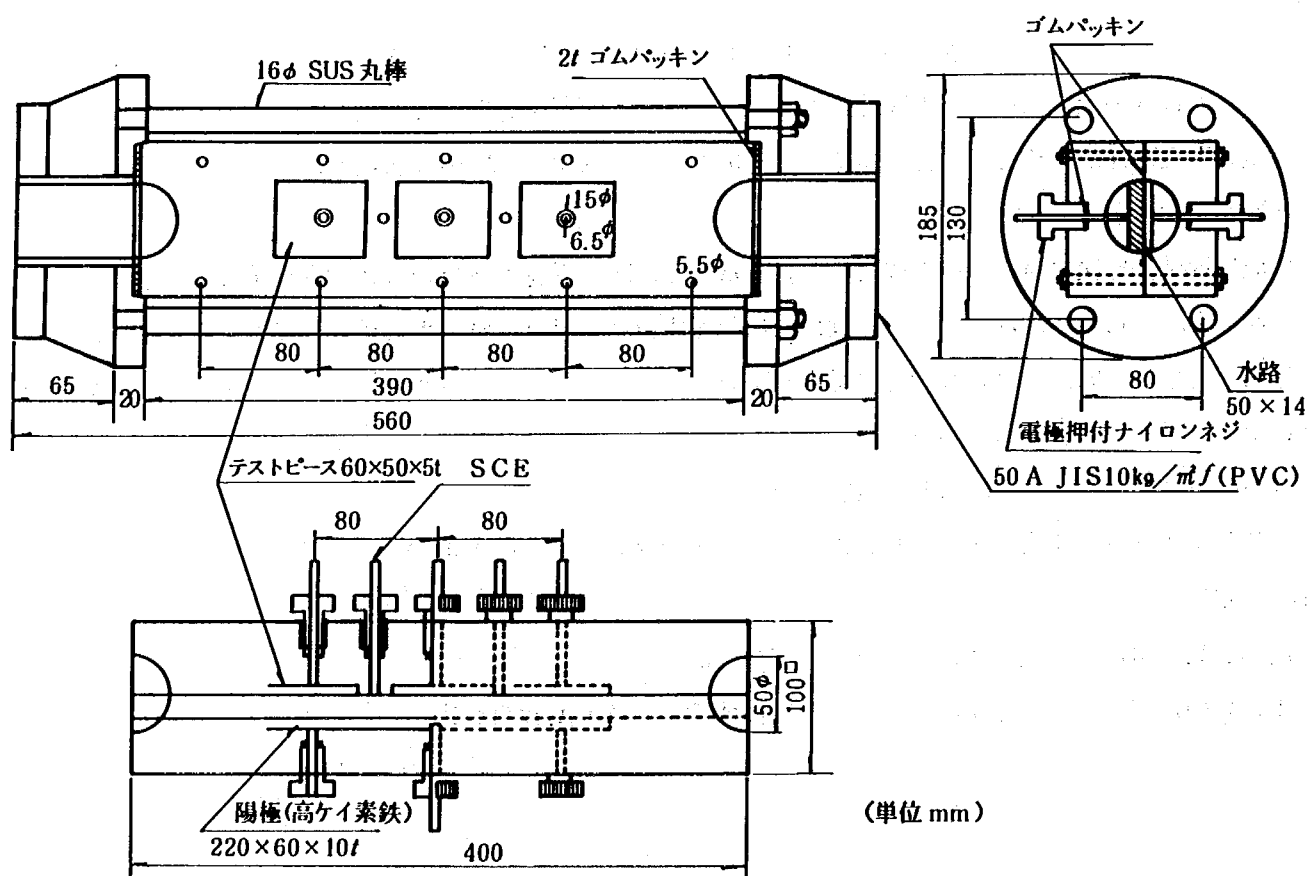
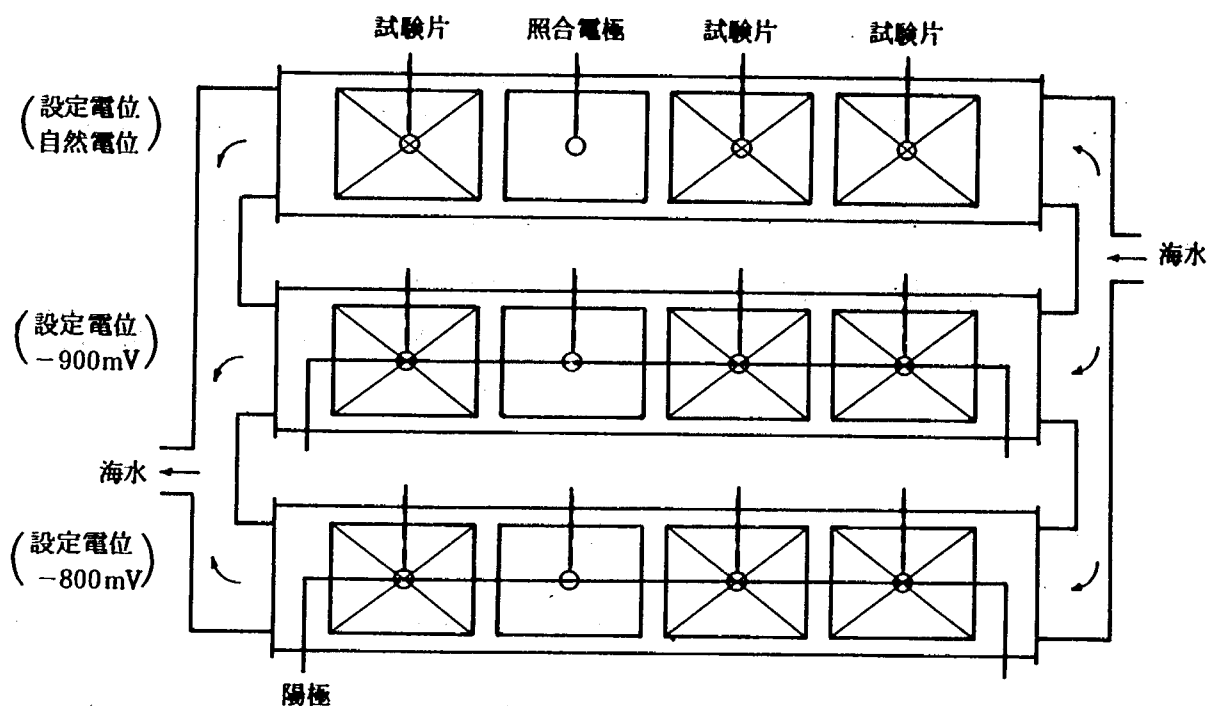
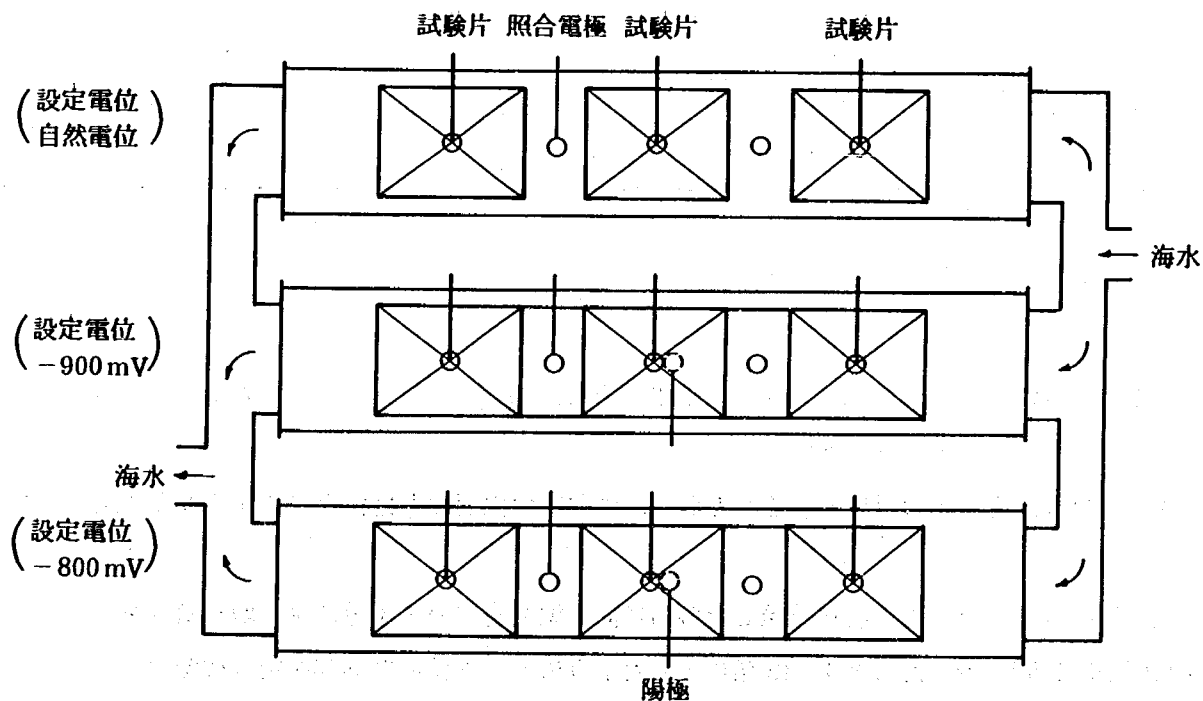


図 3-5 試験片取付枠(流速試験水槽)第 2 次試験



(1) 第1次試験



(2) 第2次試験

図3-6 試験片の配置

3.2 塗装鋼材の電気防食特性試験

(1) 試験因子

塗料種類のほかに電位、防食下地の有無、膜厚、塗膜損傷（鋭利な刃物で塗装面に素地に達する傷を入れる。以下スクラッチという。）を試験因子とした。

試験因子と水準を表3-4、その組合せを表3-5に示す。土木鋼構造物で使用実績の多いタールエポキシを取りあげ、その比較としてタールウレタン、エポキシを取りあげた。

タールエポキシは規格（JIS-K-5664）にもとづく種別（JIS-1種、2種、3種）を取りあげるだけでなく、JIS-1種については塗膜性能に影響すると考えられる硬化剤種類を取りあげた。

タールエポキシ種別を表3-6に示す。

表3-4 試験因子および水準
(塗装鋼材の電気防食特性試験)

因子 \ 水準	1	2	3
塗料種と種別	タールエポキシ JIS-K-5664 1種	タールエポキシ JIS-K-5664 2種	タールエポキシ JIS-K-5664 3種
硬化剤の種類	アミンアダクト	ポリアミド	———
防食下地	なし	O-ZRP	I-ZRP
膜厚 (μm)	100	200	400
設定電位 (mV)	-900	-1500	———
スクラッチ	なし	あり	———

注) O-ZRP: 有機ジンクリッチペイント

I-ZRP: 無機ジンクリッチペイント

(2) 試験片

SS41鋼を用い、3.1.1(2)項に示す寸法と形状とし、表面あらかさが30Sになるようにサンドブラスト処理し、塗装したものを試験片とする。

試験片は表裏両面を評価の対象にすることから、試験片の両面とも目標膜厚になるようにエアースプレー塗装を行う。

また試験片の端部は塗装面が硬化乾燥したのちに同一塗料を用いて十分に厚く増し塗りをする。

乾燥時間が30日間経過したら3.1.1(2)項に示したようにリード線の結線部を絶縁被覆する。

またスクラッチを入れる試験片は試験開始直前に図3-7に示すように、試験片表面の中央部分に素地に達する長さ5cmのスクラッチを1本入れる。

(3) 試験片の配置

試験因子と水準との組合せにもとづいて塗装された試験片（繰返し数枚とする）を中型水槽に配置する。

表 3 - 5 試験因子と水準の組合せ (塗装鋼材の電気防食特性試験)

塗料の水準			設定電位	- 900 mV						- 1500 mV										
塗料種	硬化剤		塗膜厚	100 μm		200 μm		400 μm		100 μm		200 μm		400 μm						
			スクラッチ	なし	あり	なし	あり	なし	あり	なし	あり	なし	あり							
			防食下地																	
タールエポキシ	アミンアダクト	JIS-K-5664 1種	なし	○(4)		○(5)		○(5)		○(7)		○(7)		○(8)						
			O-ZRP			○(5)						○(7)								
			I-ZRP			○(5)						○(7)								
		JIS-K-5664 2種	なし																	
			O-ZRP																	
			I-ZRP																	
		JIS-K-5664 3種	なし																	
			O-ZRP																	
			I-ZRP																	
	ポリアミド	JIS-K-5664 1種	なし	○(4)	○(6)	○(4)	○(6)	○(5)	○(6)	○(7)	○(9)	○(7)	○(9)	○(8)	○(9)					
			O-ZRP	○(4)	○(6)	○(4)	○(6)	○(5)	○(6)	○(7)	○(9)	○(7)	○(9)	○(8)	○(9)					
			I-ZRP	○(4)	○(6)	○(4)	○(6)	○(5)	○(6)	○(7)	○(9)	○(7)	○(9)	○(8)	○(9)					
		JIS-K-5664 2種	なし	○(4)		○(4)		○(5)		○(7)		○(7)		○(8)						
			O-ZRP			○(4)														
			I-ZRP			○(4)														
		JIS-K-5664 3種	なし	○(4)		○(4)		○(5)		○(7)		○(7)		○(8)						
			O-ZRP			○(4)														
			I-ZRP			○(4)														
比較塗料	タールウレタン	なし	○(4)		○(5)		○(5)		○(7)		○(8)		○(8)							
		O-ZRP			○(5)						○(8)									
		I-ZRP			○(5)						○(8)									
	エポキシ	なし			○(5)	○(6)					○(8)	○(9)								
		O-ZRP			○(5)	○(6)					○(8)	○(9)								
		I-ZRP			○(5)	○(6)					○(8)	○(9)								
試験片数			タールエポキシ 33×2=66 タールウレタン 5×2=10 エポキシ 6×2=12						計 88枚											
									タールエポキシ 29×2=58 タールウレタン 5×2=10 エポキシ 6×2=12						計 80枚					

注) () は水槽枠番号を示す。

中型水槽を6区画に分割し、設定電位の2水準は3水槽ずつに割当てて、各設定電位ともに3区画の内の1区画にはスクラッチの有る試験片をまとめて配置し、残りの2区画は膜厚毎に配置する。

陽極は白金メッキチタン線（1.5φ×300mm）を用い陽極ホルダーに固定する。

電位の設定はポテンショスタットで行い、水槽区画毎に1台を配置した。

塗装試験片の電位の設定と測定は各区画に1本配置した照合電極で行う。

(4) 測定項目および評価

塗装鋼材の電気防食特性試験における測定項目は次のとおりである。

- 1) 外観観察
- 2) 電位測定
- 3) 電流測定
- 4) 塗膜インピーダンス測定（以下、塗膜抵抗測定という）

表3-6 タールエポキシの種別
(JIS-K-5664-1978)

種 別	適 用	可使時間	エポキシ樹脂含有量
1 種	特に耐油性、耐薬品性が優れているもの。	3 時間以上	30 % 以上
2 種	耐油性、耐薬品性をもっているもの。		20 % 以上
3 種	耐油性、耐薬品性を必要としない箇所に用いるもの。	5 時間以上	12 % 以上

3.3 塗膜の性能試験

3.3.1 耐過防食試験

電気防食と組合せて用いる塗料種や塗装系の選択および適性な塗膜組成に関する資料を得るために、過防食条件のもとで下記4種類の試験を行う。

- 1) 各種塗膜の性能比較
- 2) 防食下地の耐過防食性
- 3) 塗膜の顔料濃度の影響
- 4) GFPの膜厚と耐久性

(1) 試験因子

- 1) 各種塗膜の性能比較

これら試験因子と水準を表3-7に、試験片の組合せを表3-8に示す。

表3-7 試験因子（各種塗膜の性能比較）

因子 \ 水準	1	2	3
塗料種	15 種類		
防食下地	なし	O-ZRP	I-ZRP
膜厚 (μm)	400	標準	——

塗料種 15 種類	標準膜厚 (μm)
1 タールエポキシ (JIS-1種, ポリアミド)	400
2 タールエポキシ (JIS-3種, ポリアミド)	400
3 タールウレタン	400
4 エポキシ I (ピュアエポキシ)	400
5 エポキシ II (超厚膜型)	1000
6 エポキシ III (高PVC型)	400
7 GFP (1) (ポリエステル)	2000
8 ビニル	200
9 塩化ゴム	200
10 変性エポキシ (I)	400
11 変性エポキシ (II)	400
12 GFP (2) (イソフタル酸系)	1500
13 GFP (3) (ビスフェノール系)	1500
14 GFP (4) (ビニルエステル系)	1500
15 GFP (5) (エポキシ系)	1500

2) 防食下地の耐過防食性

塗装鋼材を -2000 mV までカソード分極させたときに、防食下地が短時間でハク離（又は破壊）する現象が1)の試験で認められた。そこでジンクリッチペイント単独塗装試験片を用いて -1500 mV 、 -2000 mV における防食下地の耐過防食性を確かめることとし、ジンクリッチペイントの展着剤種類と乾燥塗膜中の金属亜鉛末濃度について試験することとした。これら試験因子と水準を表3-9に示す。

なおジンクリッチペイントの膜厚は $75\text{ }\mu\text{m}$ に統一する。

3) 塗膜の顔料濃度の影響

塗膜として適正な塗膜の顔料濃度の検討を行う。これら試験因子と水準を表3-10に示す。なお、塗料は展色剤としてエポキシ樹脂を用い、塗膜の膜厚は $200\text{ }\mu\text{m}$ に統一する。

塗膜の顔料濃度 (Pigment Volume Concentration) は次の式で表わす。

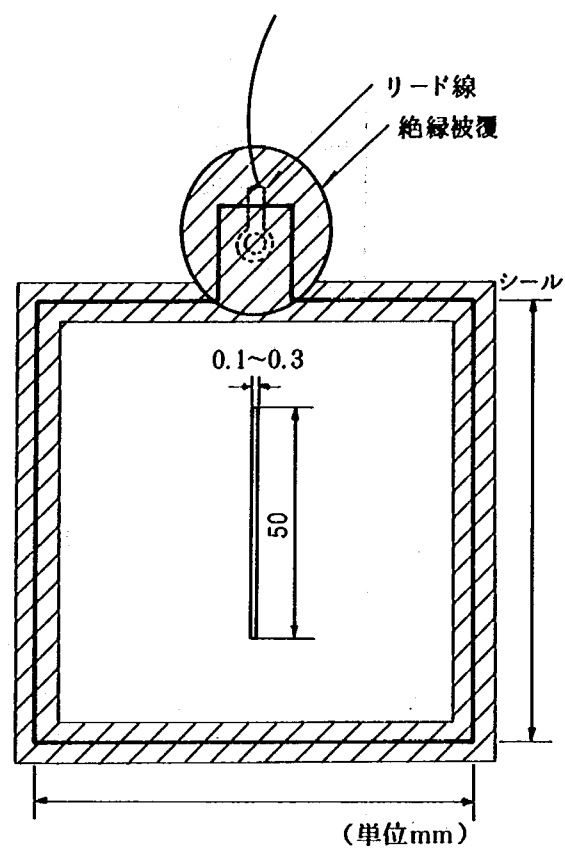
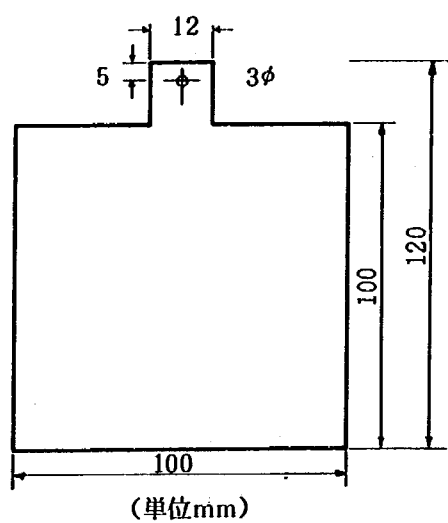


図 3 - 7 塗装鋼材の電気防食特性試験用試験片

$$PVC = \frac{\text{含有顔料重量}(\%) \div \text{顔料真比重}}{\frac{\text{含有顔料重量}(\%)}{\text{顔料真比重}} + \frac{\text{含有ビヒクル重量}(\%) \times \text{不揮発分}(\%)}{\text{ビヒクル真比重}}} \times 100$$

表 3-8 試験片の組合せ

(各種塗膜の性能比較)

	設定電位 (mV)		- 2000		
	膜 厚 (μm)		400 (○) 標準 (ⓐ)		
	塗料種	防食下地	な し	O-ZRP	I-ZRP
第 1 次 試 験	1	タールエポキシ 1 種	○	○	○
	2	タールエポキシ 3 種	○	○	○
	3	タールウレタン	○	○	○
	4	エポキシ (I)	○	○	○
	5	エポキシ (II)	ⓐ	ⓐ	ⓐ
	6	エポキシ (III)	○	○	○
	7	GFP (1)	ⓐ	ⓐ	ⓐ
	8	ビニル	ⓐ	ⓐ	ⓐ
	9	塩化ゴム	ⓐ	ⓐ	ⓐ
第 2 次 試 験	10	変性エポキシ (I)	○	—	—
	11	変性エポキシ (II)	○	—	—
	12	GFP (2)	ⓐ	—	—
	13	GFP (3)	ⓐ	—	—
	14	GFP (4)	ⓐ	—	—
	15	GFP (5)	ⓐ	—	—

4) GFPの膜厚と耐久性

防食塗装の設計膜厚が 1000 μm 以下の場合、GFP 塗料又は厚膜型塗料のいずれを選ぶかの判断を必要とする。そのための資料を得るために GFP 塗料の膜厚を試験因子とした。その試験因子と水準を表 3-11 に示す。

(2) 試験片

1), 2), 3) の試験片は表面中央部に素地に達する長さ 5 cm のスクラッチを 1 本入れる。

2) の試験片は表面中央部に 4 cm² (2 × 2 cm) のジंकリッチペイントの塗膜面を露出させる。これらを図 3-8 に示す。

(3) 試験片の配置

試験水槽を用い、天然海水中で試験片に電気防食を行う。

アルミニウム合金陽極 (50×50×1000mm) を用い、ポテンショスタットを用いて、電位を設定する。

(4) 測定項目および評価

耐過防食試験における測定項目は次のとおりである。

- 1) 外観観察
- 2) 電位測定
- 3) 電流測定

表 3-9 試験因子および水準とその組合せ
(防食下地の耐過防食性)

(i) 因子と水準

因 子 \ 水 準	1	2
防 食 下 地 の 種 類	O-ZRP	I-ZRP
亜鉛末含有量による分類	ダスト型 (<80%)	標準型 (80%>)
設 定 電 位 (mV)	-1500	-2000

(ii) 試験片の組合せ

防食下地 \ 設定電位	O-ZRP		I-ZRP	
	ダスト型	標準型	ダスト型	標準型
-1500 mV	○	○	○	○
-2000 mV	○	○	○	○

表 3-10 試験因子と試験片の組合せ
(塗膜顔料濃度の影響)

(i) 因子と水準

因子 \ 水準	1	2	3
塗膜の顔料濃度	低 濃 度 (20~25%)	中 濃 度 (35~40%)	高 濃 度 (45~50%)
防 食 下 地	な し	I-ZRP	—
設定電位 (mV)	-900	-2000	—
スクラッチ	な し	あ り	—

(ii) 試験片の組合せ

塗 料 種	スクラッチ	設定電位 防食下地 \ 顔料濃度	-900 mV			-2000 mV		
			低	中	高	低	中	高
エ ポ キ シ (ピュアエポキシ)	あ り	な し	○	○	○	○	○	○
		I-ZRP	—	—	○	—	—	○
	な し	な し	—	—	—	○	○	○
		I-ZRP	—	—	—	—	—	○

表 3-11 試験因子と試験片の組合せ
(GFP(1)の膜厚と耐久性)

(1) 因子と水準

因子 \ 水準	1	2
GFPの膜厚 (μm)	500	1000
設 定 電 位 (mV)	-900	-2000

(2) 組 合 せ

設定電位 \ 膜厚	500 μm	1000 μm
-900 mV	○	○
-2000 mV	○	○

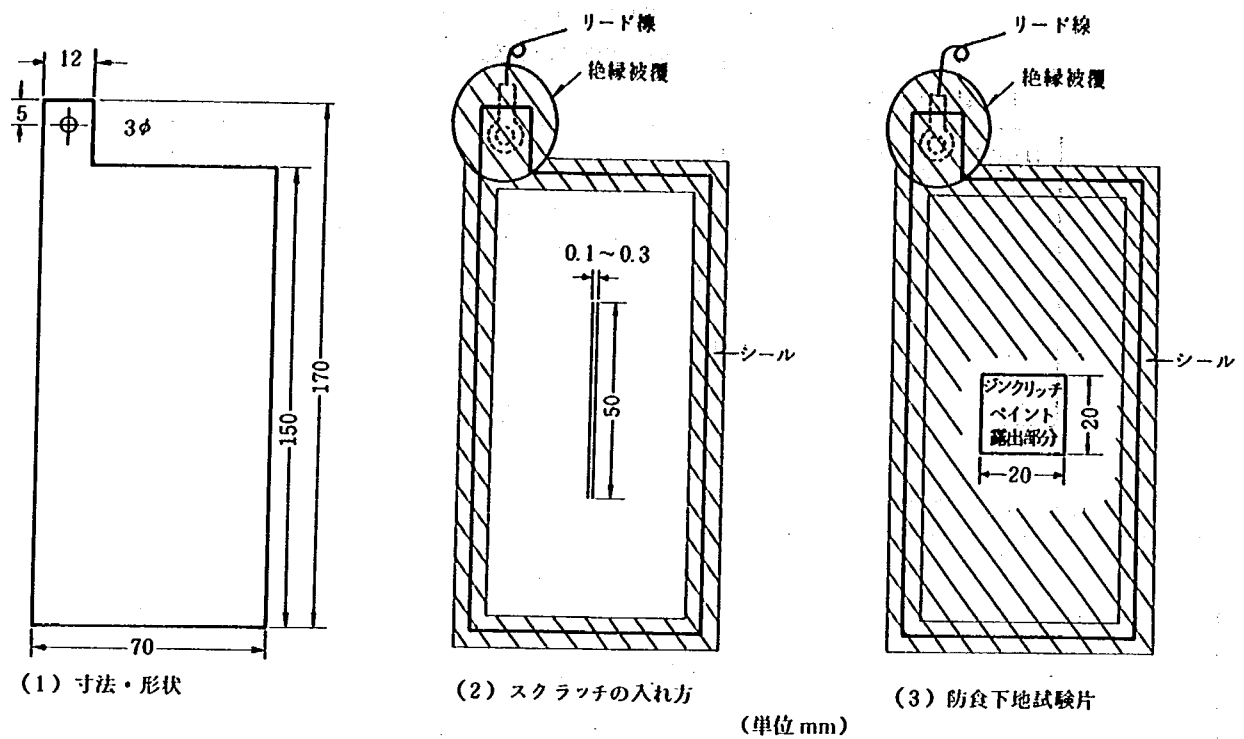


図 3-8 耐過防食試験の試験片

3.3.2 塩水噴霧試験

(1) 試験因子

試験片の内訳を表 3-12 に示す。

(2) 試験片

試験片は S S 4 1 鋼を用い、図 3-9 に示す寸法・形状とする。

(3) 塩水噴霧試験

J I S - Z - 2 3 7 1 にもとづく装置を用い、表 3-13 の使用条件に維持された塩水噴霧室内に塗装試験片を 30 度傾けて保持する。

(4) 測定項目および評価

塩水噴霧試験における測定項目は外観観察と塗膜はく離後の試験片の腐食状態を観察する。

表 3 - 12 塩水噴霧試験用試験片

塗 料 種		防食下地	膜厚(μm)	膜 厚(μm)		膜厚(μm)	膜 厚 (μm)	
			400	400	標準	200	500	1000
第 一 次 試 験	タールエポキシ (JIS-1種) (ポリアミド)	な し	○					
		O-ZRP	○					
		I-ZRP	○					
	タールエポキシ (JIS-3 種) (ポリアミド)	な し	○					
		O-ZRP	○					
		I-ZRP	○					
	タールウレタン	な し	○					
		O-ZRP	○					
		I-ZRP	○					
	エポキシ I (ピュアエポキシ)	な し	○					
		O-ZRP	○					
		I-ZRP	○					
	エポキシ II (超厚膜型)	な し			○			
		O-ZRP			○			
		I-ZRP			○			
	エポキシ III (高PVC型)	な し			○			
		O-ZRP			○			
		I-ZRP			○			
	GFP (1) (ポリエステル)	な し			○		○	○
		O-ZRP			○			
		I-ZRP			○			
	ビニル	な し			○			
		O-ZRP			○			
		I-ZRP			○			
	塩化ゴム	な し			○			
		O-ZRP			○			
		I-ZRP			○			
第 二 次 試 験	変性エポキシ(I)	な し		○				
	変性エポキシ(II)	な し		○				
	GFP (2) (イソフタル酸)	な し			○			
	GFP (3) (ビスフェノール)	な し			○			
	GFP (4) (ビニルエステル)	な し			○			
	GFP (5) (エポキシ)	な し			○			
	エポキシ (L) (低PVC型)	な し				○		
	エポキシ (M) (中PVC型)	な し				○		
	エポキシ (H) (高PVC型)	な し				○		
	エポキシ (HI) (高PVC型)	I-ZRP				○		
			①	②		③	④	

注) ① 塗装鋼材の電気防食特性試験

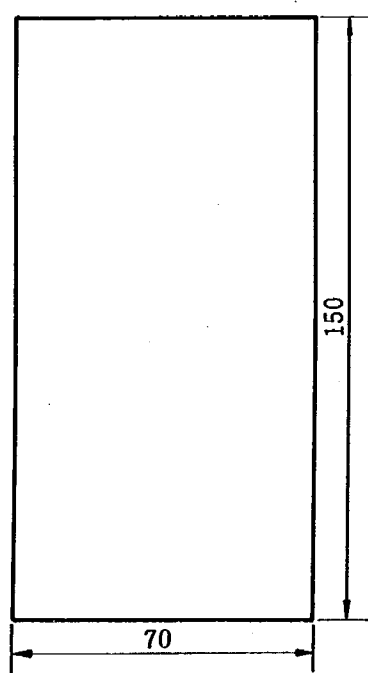
② 各種塗膜の性能比較試験

③ 塗膜顔料濃度の影響

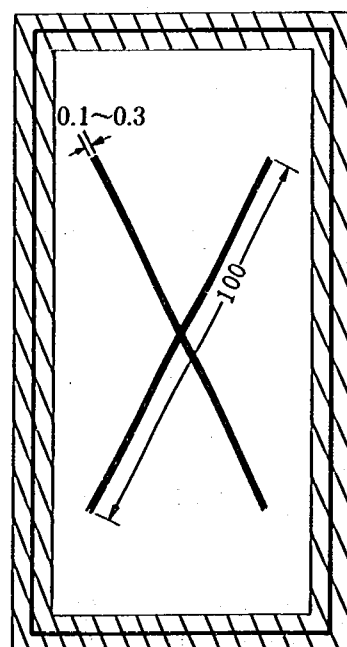
④ 膜厚の影響

表 3 - 1 3 塩水噴霧試験条件

設 定 項 目	条 件
試験室内の温度	35 ± 1℃
試験室内の相対湿度	95 ~ 98%
塩水の濃度	5 w/v %
採取溶液のPH	6.5 ~ 7.2
採取溶液の比重 (20℃)	1.0263 ~ 1.0410
噴霧量 (ml / 80cm ² / hr)	1.0 ~ 2.0



(1) 寸法・形状



(2) スクラッチ試験片

(単位 mm)

図 3 - 9 塩水噴霧試験片

3. 3. 3 海水浸漬試験

(1) 試験因子

海水浸漬試験は塩水噴霧試験に用いた試験因子と水準およびその組合せを用いる。その内訳を表 3 - 14 に示す。

(2) 試験片

海水浸漬試験片は次の 2 種類とする。

1) 長期間の天然海水浸漬を目的とする試験片

2) 塗膜抵抗測定を目的とする試験片

試験片は S S 4 1 鋼を用い, (1)の場合は図 3 - 9 の寸法, 形状とし, (2)の場合は図 3 - 18 の寸法, 形状とする。

(3) 試験片の配置

試験片は海水浸漬水槽の中に 20 度傾けて保持できる専用枠を設置して浸漬する。試験片は浸漬時にその上端が水面下 10 cm 以上の深さに位置するように天然海水の量を調整する。

(4) 測定項目および評価

海水浸漬試験における測定項目は次のとおりである。

1) 外観観察

2) 塗膜抵抗測定

表 3 - 14 海水浸漬試験用試験片

塗 料 種	防食下地	膜 厚 (μm)			膜厚(μm)		膜厚(μm) 200	膜厚(μm)	
		100	200	400	400	標準		500	1000
タールエポキシ (JIS-1種) (ポリアミド)	なし	◎	◎	◎					
	O-ZRP	○	○	○					
	I-ZRP	○	○	○					
タールエポキシ (JIS-2種) (ポリアミド)	なし	◎	◎						
	O-ZRP		○						
	I-ZRP		○	◎					
タールエポキシ (JIS-3種) (ポリアミド)	なし	◎	◎	○					
	O-ZRP		○	◎					
	I-ZRP		○	◎					
タールエポキシ (JIS-1種) (アミンアダクト)	なし	◎	◎						
	O-ZRP		○						
	I-ZRP		○	◎					
タールウレタン	なし	◎	◎	○					
	O-ZRP		○	○					
	I-ZRP		○		◎	●			
エポキシ I (ピュアエポキシ)	なし		○		●				
	O-ZRP		○		●				
	I-ZRP		○			◎			
エポキシ II (超厚膜型)	なし					○			
	O-ZRP					○			
	I-ZRP					○			
エポキシ III (高PVC型)	なし					○			
	O-ZRP					○			
	I-ZRP					◎		●	●
GFP (1) (ポリエステル)	なし					○			
	O-ZRP					○			
	I-ZRP					◎			
ビニル	なし					○			
	O-ZRP					○			
	I-ZRP					◎			
塩化ゴム	なし					○			
	O-ZRP					○			
	I-ZRP				●				
変性エポキシ (I)	なし				●				
変性エポキシ (II)	なし					●			
GFP (2) (イソフタル酸)	なし					●			
GFP (3) (ビスフェノール)	なし					●			
GFP (4) (ビニルエステル)	なし					●			
GFP (5) (エポキシ)	なし								
エポキシ (L) (低PVC型)	なし						●		
エポキシ (M) (中PVC型)	なし						●		
エポキシ (H) (高PVC型)	なし						●		
エポキシ (HI) (高PVC型)	I-ZRP						●		
		①			②		③	④	

注 1) ① 塗装鋼材の電気防食特性試験

② 各種塗膜の性能比較試験

③ 塗膜顔料濃度の影響

④ 膜厚の影響

2) 記号 ◎ 長期浸漬および塗膜抵抗測定の実施

○ 長期浸漬のみ

● 塗膜抵抗測定のみ

4. 試験結果および考察

4.1 裸鋼材の電気防食特性試験

4.1.1 標準環境

(1) 腐食速度および防食率

第1次試験の結果を表4-1に、第2次試験の結果を表4-2にそれぞれ示す。黒皮付鋼、発錆処理鋼については同材質、同寸法、同表面状態の別試験片のブランクテストから黒皮、錆の付着量を推定し、サンドブラスト鋼についても腐食生成物除去の際の減量を補正している。

またこれらの結果を鋼材の表面状態ごとに比較したものを図4-1に示す。

非電気防食試験片の腐食速度はいずれも 0.1 mm/Yr 以下を示し、発錆処理鋼が最大でサンドブラスト鋼、黒皮付鋼の順に小さくなる。

発錆処理鋼の腐食量が大きくなる原因として、塩水噴霧及び大気曝露で生成した錆層の電位が貴で、海水中で錆層の還元が起こり素地の腐食反応が増すと考えられる。これは後述する自然電位の変化からも推測できる。

防食率は発錆処理鋼の -900 mV より貴な電位で若干低い96%前後の値を示すほかは、いずれの表面状態も、すべての設定電位において99%以上の高い値を示しており、ほぼ完全な防食状態といえる。

電流密度が発錆処理鋼の方が初期多く必要なのは錆の還元で電流が消費されるためと思われる。

また各条件における防食電流密度の定常値は、 $15\sim 38\text{ mA/m}^2$ と、実際の環境とくらべて小さな値を示した。

本実験ではポテンショスタットを用い初期に強制的に大電流を与えるため、アルミニウム合金陽極を用いる流電陽極法に比べて電流の低減が大きくなり、防食電流密度の定常値も小さくなったものと考えられる。

(2) 電流密度の経時変化

サンドブラスト鋼及び発錆処理鋼の電流密度の経時変化を図4-2、4-3に、さらに設定電位毎の経時変化を図4-4～図4-8に示す。

サンドブラスト鋼、発錆処理鋼ともいずれの設定電位においても電流値は試験開始後、急速に低下したのちほぼ定常値を示すが、この定常値を示すまでの日数と定常電流値を設定電位毎に整理して表4-3に示す。

表4-3 定常値を示すまでの日数と定常値

表面状態	項目 設定電位 mV	定常値までの日数					防食電流密度(定常値) mA/m^2				
		-800	-850	-900	-950	-1000	-800	-850	-900	-950	-1000
サンドブラスト処理		20	40	50	90	90	15	28	23	30	35
発 錆 処 理		25	40	50	120	130	15	15	25	28	38

表4-1 第1次試験結果

	設定電位 (mV)	試験片番号	初期重量 (g)	後重量* (g)	腐食量* (g)	腐食速度 (mm/Yr) (平均)	防食率 (%)
サンドブラスト鋼	-800	3-1	244.578	244.485	0.093	0.00077	0.00083 98.7
		3-2	244.469	244.369	0.100	0.00083	
		3-3	242.728	242.616	0.112	0.00092	
		3-4	242.109	242.012	0.097	0.00080	
	-900	2-1	245.192	245.141	0.051	0.00042	0.00041 99.4
		2-2	245.269	245.227	0.042	0.00035	
		2-3	244.956	244.910	0.046	0.00038	
		2-4	243.648	243.590	0.058	0.00048	
	-1000	1-1	243.967	243.927	0.040	0.00033	0.00040 99.4
		1-2	243.310	243.262	0.048	0.00040	
		1-3	245.011	244.936	0.075	0.00062	
		1-4	244.878	244.845	0.033	0.00027	
	自然電位	1-29	242.134	234.589	7.545	0.0623	0.06570
		1-30	243.503	234.661	8.842	0.0729	
		1-31	243.616	236.026	7.590	0.0626	
		1-32	243.518	235.637	7.881	0.0650	
黒皮付鋼	-800	3-5	245.982	245.965	0.017	0.00014	0.00031 99.5
		3-6	246.599	246.576	0.023	0.00019	
		3-7	245.703	245.643	0.060	0.00050	
		3-8	246.428	246.377	0.051	0.00042	
	-900	2-5	247.931	247.935			0.00005 99.9
		2-6	247.068	247.075			
		2-7	246.780	246.766	0.014	0.00012	
		2-8	245.014	244.991	0.023	0.00019	
	-1000	1-5	246.778	246.795			0.0000 100
		1-6	246.893	246.913			
		1-7	245.953	245.947	0.006	0.00005	
		1-8	245.459	245.458	0.001	0.00001	
	自然電位	2-29	245.426	237.800	7.626	0.0629	0.05850
		2-30	243.425	237.846	5.779	0.0477	
		2-31	243.522	237.123	6.399	0.0528	
		2-32	247.430	238.863	8.567	0.0707	
発錆処理鋼	-800	3-25	244.921	244.556	0.435	0.00359	0.00475 94.9
		3-26	243.517	242.716	0.871	0.00719	
		3-27	242.646	242.168	0.548	0.00452	
		3-28	244.989	244.612	0.447	0.00369	
	-900	2-25	243.485	242.454	1.101	0.00908	0.00568 93.9
		2-26	243.786	242.867	0.989	0.00816	
		2-27	241.487	241.333	0.224	0.00185	
		2-28	244.994	244.625	0.439	0.00362	
	-1000	1-25	245.369	245.350	0.089	0.00073	0.00000 100
		1-26	245.123	245.308			
		1-27	246.358	246.257	0.171	0.00141	
		1-28	242.102	242.837			
	自然電位	3-29	245.159	234.262	10.967	0.0905	0.09240
		3-30	243.956	232.928	11.098	0.0916	
		3-31	246.215	235.227	11.054	0.0912	
		3-32	245.312	233.703	11.679	0.0964	

* ブラソク補正後の値

表 4 - 2 第 2 次試験結果

	設 定 電 位 (mV)	試 験 片 番 号	初 期 重 量 (g)	後 重 量* (g)	腐 食 量* (g)	腐 食 速 度 (mm/Yr) (平均)		防 食 率 (%)
サ ン ド ブ ラ ス ト 鋼	-800	1-51	250.958	250.785	0.173	0.00210	0.00116	97.8
		1-52	249.501	249.436	0.065	0.00079		
		1-53	251.667	251.577	0.090	0.00109		
		1-54	246.867	246.813	0.054	0.00066		
	-850	1-41	251.192	251.154	0.038	0.00046	0.00092	98.3
		1-42	249.085	249.046	0.039	0.00047		
		1-43	251.593	251.562	0.031	0.00038		
		1-44	248.860	248.665	0.195	0.00237		
	-900	1-31	249.347	249.325	0.022	0.00027	0.00027	99.5
		1-32	250.790	250.763	0.027	0.00033		
		1-33	250.356	250.345	0.011	0.00013		
		1-34	250.284	250.254	0.030	0.00036		
	-950	1-21	250.960	250.938	0.022	0.00027	0.00028	99.5
		1-22	250.825	250.805	0.020	0.00024		
		1-23	251.509	251.486	0.023	0.00028		
		1-24	251.427	251.400	0.027	0.00033		
	-1000	1-11	248.910	248.878	0.032	0.00039	0.00048	99.1
		1-12	251.409	251.362	0.047	0.00057		
		1-13	251.154	251.112	0.042	0.00051		
		1-14	250.087	250.651	0.036	0.00044		
	自然電位	1-61	249.666	245.307	4.359	0.0529	0.0527	
		1-62	249.335	245.116	4.219	0.0512		
		1-63	252.401	248.014	4.387	0.0533		
		1-64	249.436	245.035	4.401	0.0535		
発 錆 処 理 鋼	-800	2-51	250.593	250.491	0.102	0.00124	0.00144	97.4
		2-52	252.929	252.779	0.150	0.00182		
		2-53	250.406	250.256	0.150	0.00182		
		2-54	250.263	250.190	0.073	0.00089		
	-850	2-41	252.623	252.643			0.00140	97.5
		2-42	251.495	251.182	0.313	0.00380		
		2-43	248.871	248.672	0.199	0.00242		
		2-44	252.641	252.671				
	-900	2-31	250.393	250.177	0.216	0.00262	0.00207	96.3
		2-32	250.970	250.636	0.334	0.00406		
		2-33	250.769	250.790				
		2-34	252.815	252.661	0.154	0.00187		
	-950	2-21	252.139	252.186			0.00061	98.9
		2-22	249.640	249.581	0.059	0.00072		
		2-23	248.949	248.824	0.125	0.00152		
		2-24	250.409	250.345	0.064	0.00078		
	-1000	2-11	249.333	249.395				
		2-12	251.795	251.956				
		2-13	251.011	251.026				
		2-14	251.152	251.052	0.100	0.00122		
	自然電位	2-61	249.903	245.669	4.234	0.0514	0.0561	
		2-62	252.273	247.604	4.669	0.0567		
		2-63	251.554	247.033	4.521	0.0549		
		2-64	252.258	247.208	5.050	0.0613		

* ブランク補正後の値

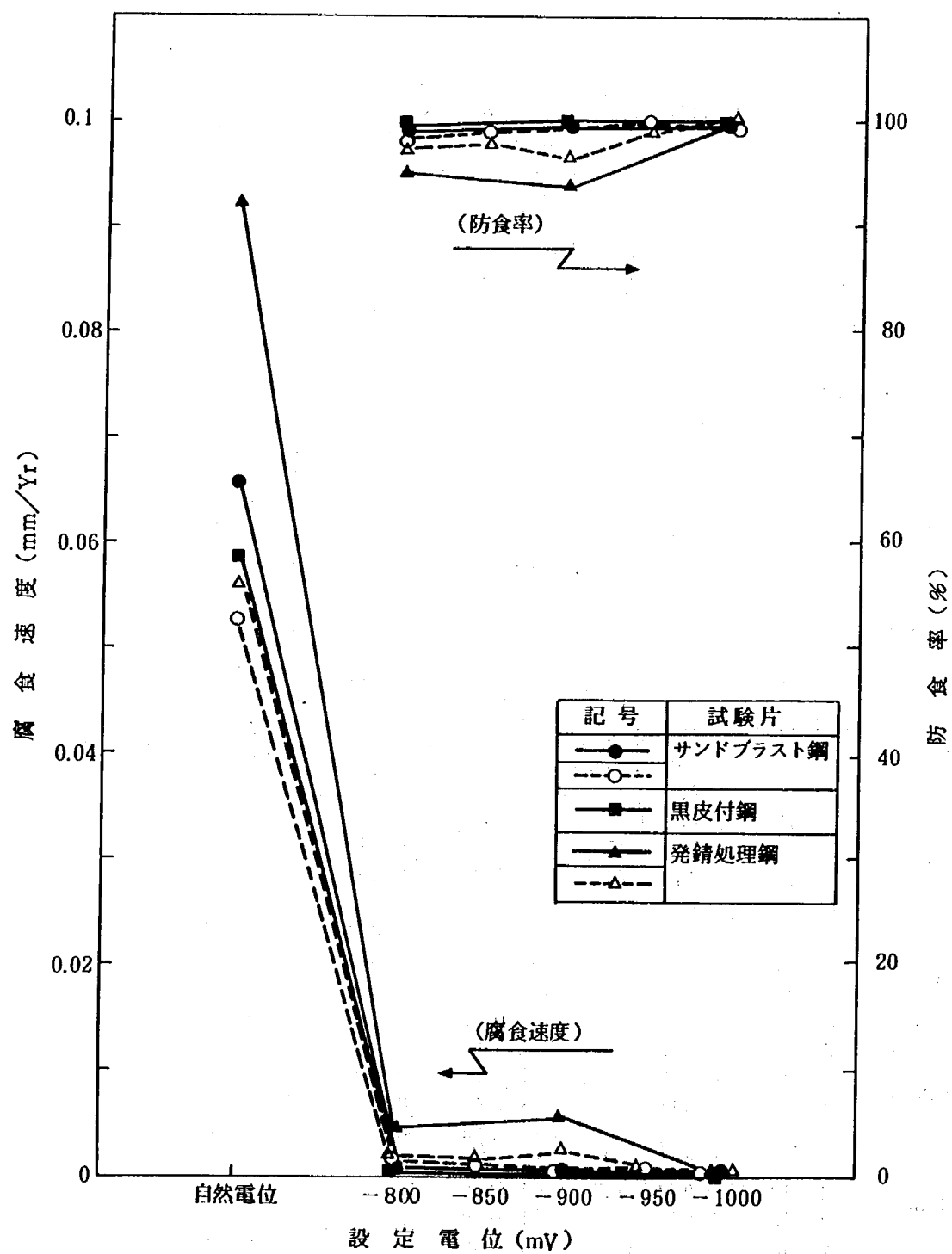


図4-1 裸鋼材の腐食速度及び防食率

定常値を示すまでの時間は設定電位が卑なほど長時間を要する。またサンドブラスト鋼に比べて発錆処理鋼の方が長時間を要し、その差は -950 mV より卑な場合に大きくなる。

定常値は設定電位が卑なほど大きく、サンドブラスト鋼と発錆処理鋼との差はほとんど認められない。

(3) 累積電気量および平均電流密度

各条件下における防食電流を測定間隔毎に加算し、その変化を直線と仮定し、電気量を算出したものを試験期間中の累積電気量として表4-4に示し、経時変化を図4-9、4-10に示す。また累積電気量より算出した平均電流密度を表4-5に示す。発錆処理鋼の累積電気量および平均電流密度がサンドブラスト鋼より大きい。

累積電気量および平均電流密度に差が生じるのは、試験開始初期に錆の還元に電流を要するためと思われる。

表4-4 累積電気量 ($\text{mA} \cdot \text{day}/\text{m}^2$)

試 験 片	経過日数	-800mV	-850mV	-900mV	-950mV	-1000mV
サンドブラスト処理	180	3917	6305	6466	8834	9829
	63	2029	3055	3359	5095	5886
発 錆 処 理	180	5293	5290	7531	12251	13982
	63	3687	3419	4584	8605	9220

表4-5 累積電気量より求めた平均電流密度 (mA/m^2)

試 験 片	経過日数	-800mV	-850mV	-900mV	-950mV	-1000mV
サンドブラスト処理	180	21.8	35.0	35.9	49.1	54.6
	63	32.2	48.5	53.3	80.9	93.4
発 錆 処 理	180	29.4	29.4	41.8	68.1	77.7
	63	58.5	54.3	72.8	136.6	146.3

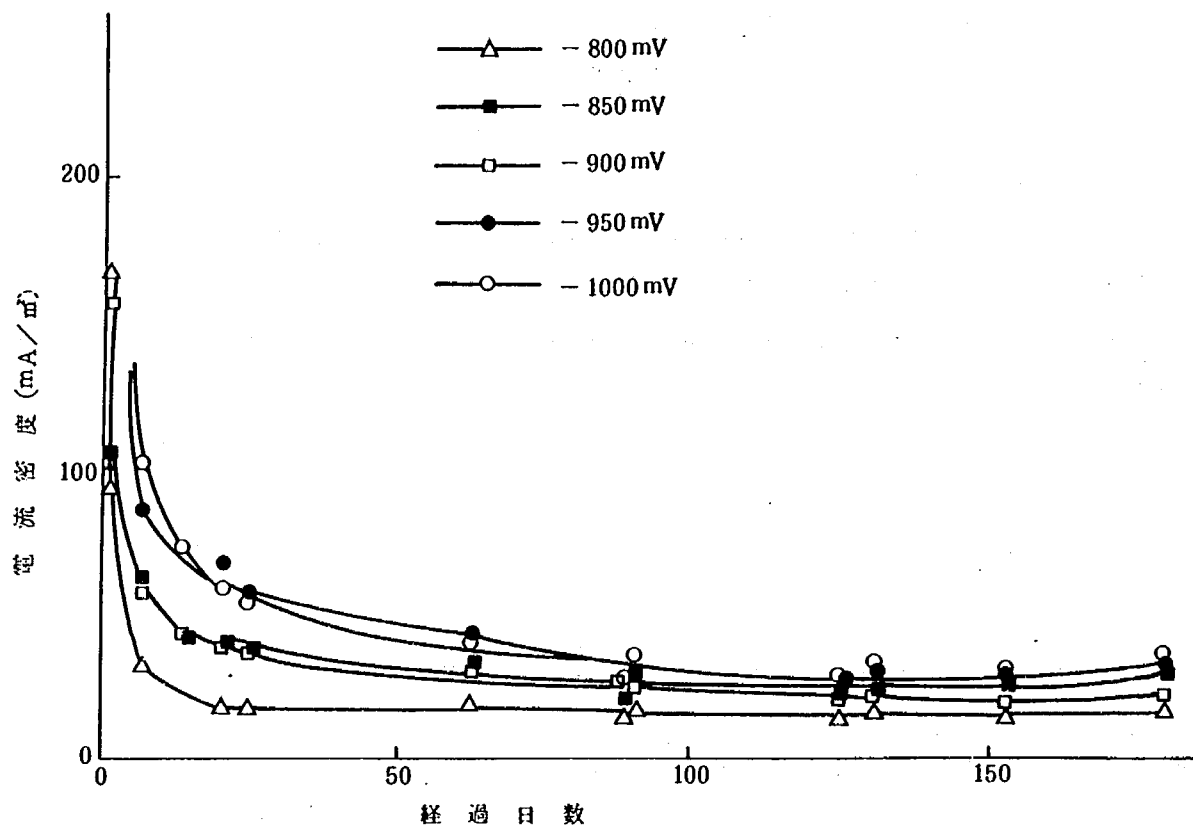


図4-2 サンドブラスト鋼の電流密度経時変化

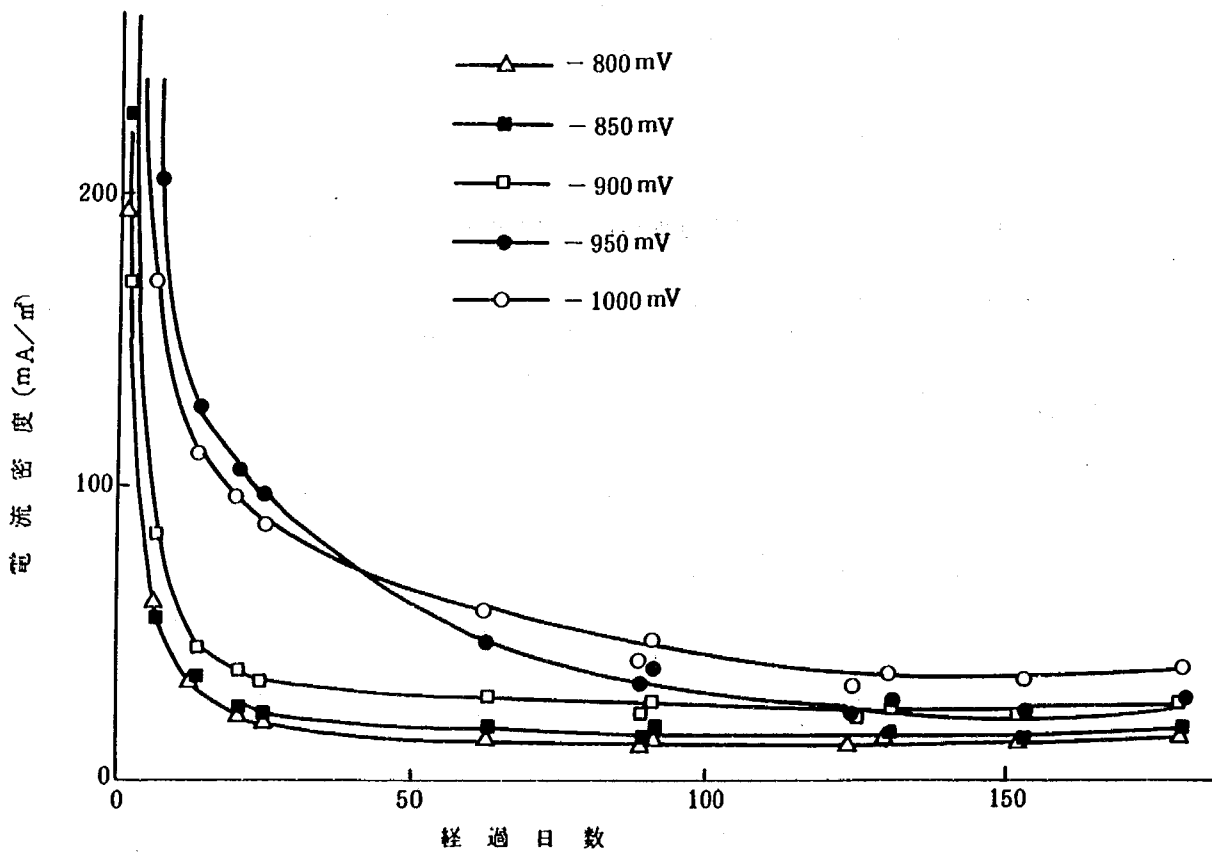


図4-3 発錆処理鋼の電流密度経時変化

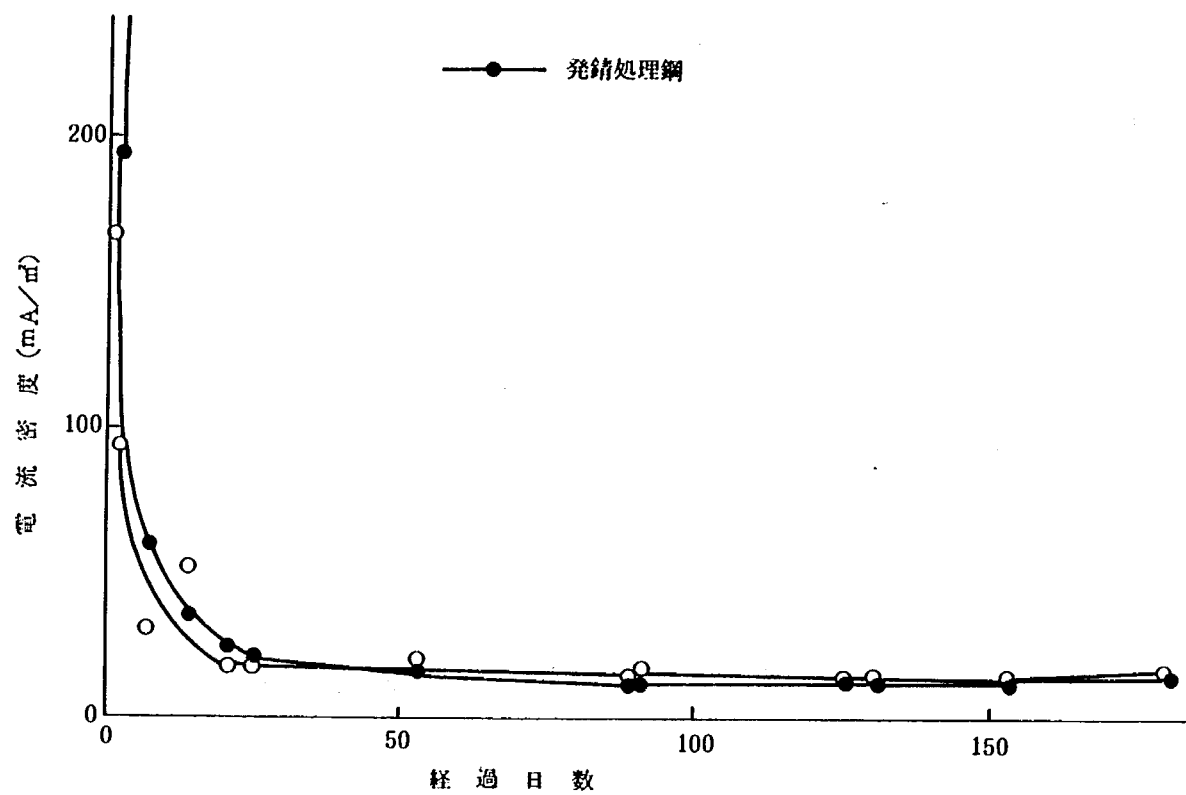


図4-4 -800mV の電流密度経時変化

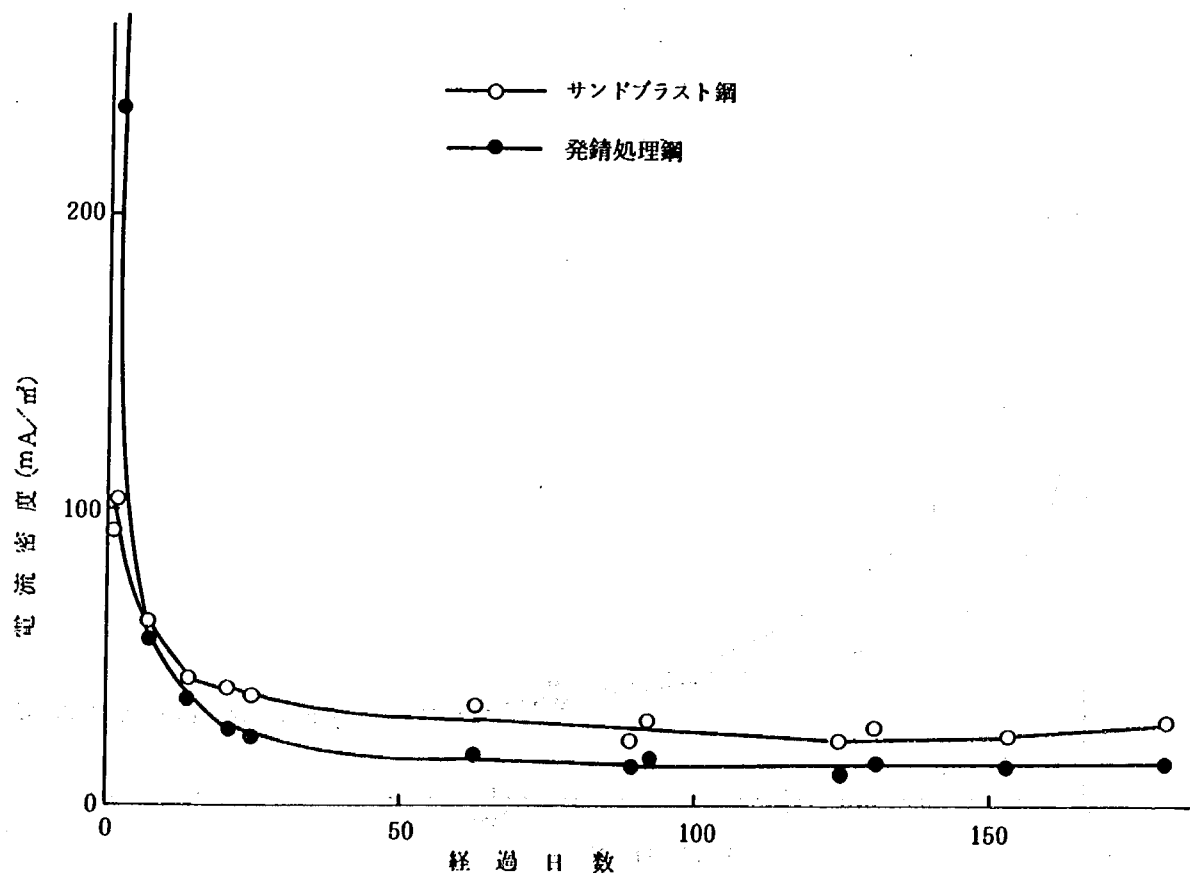


図4-5 -850mV の電流密度経時変化

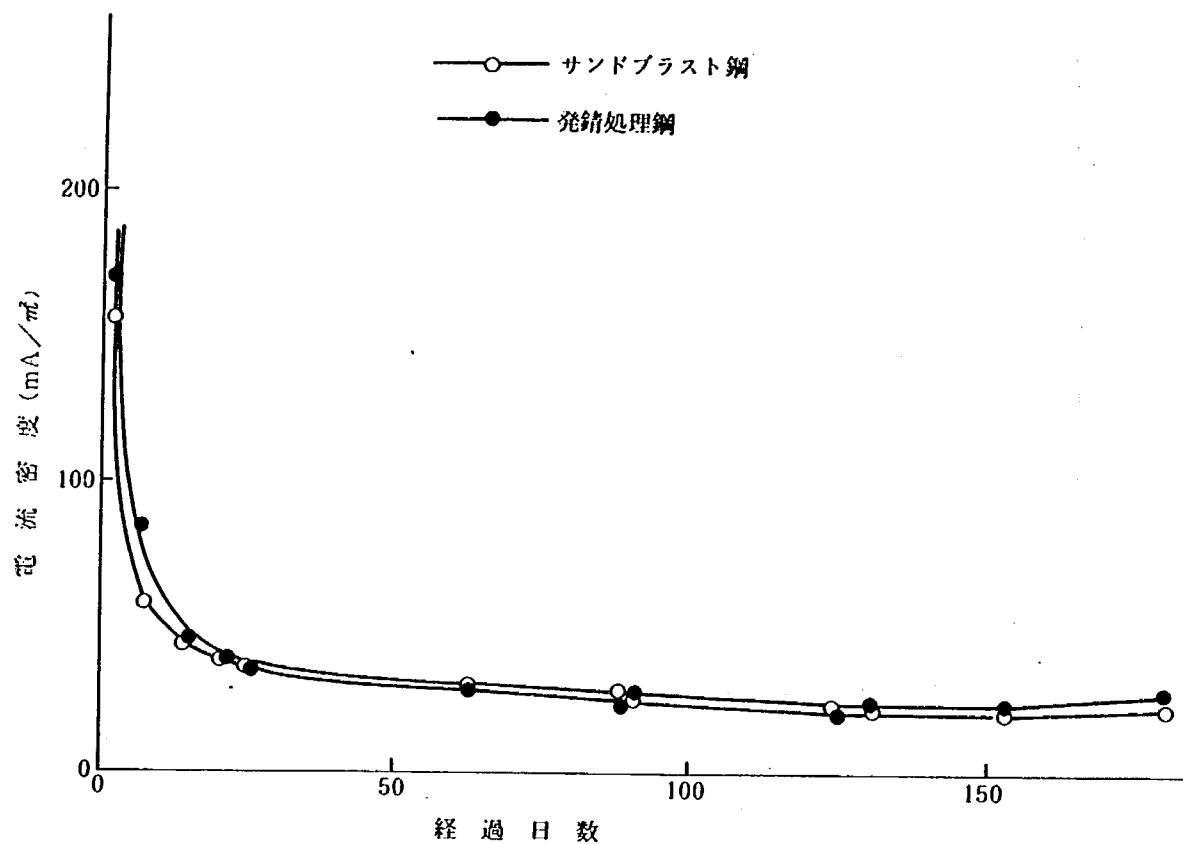


図4-6 -900mVの電流密度経時変化

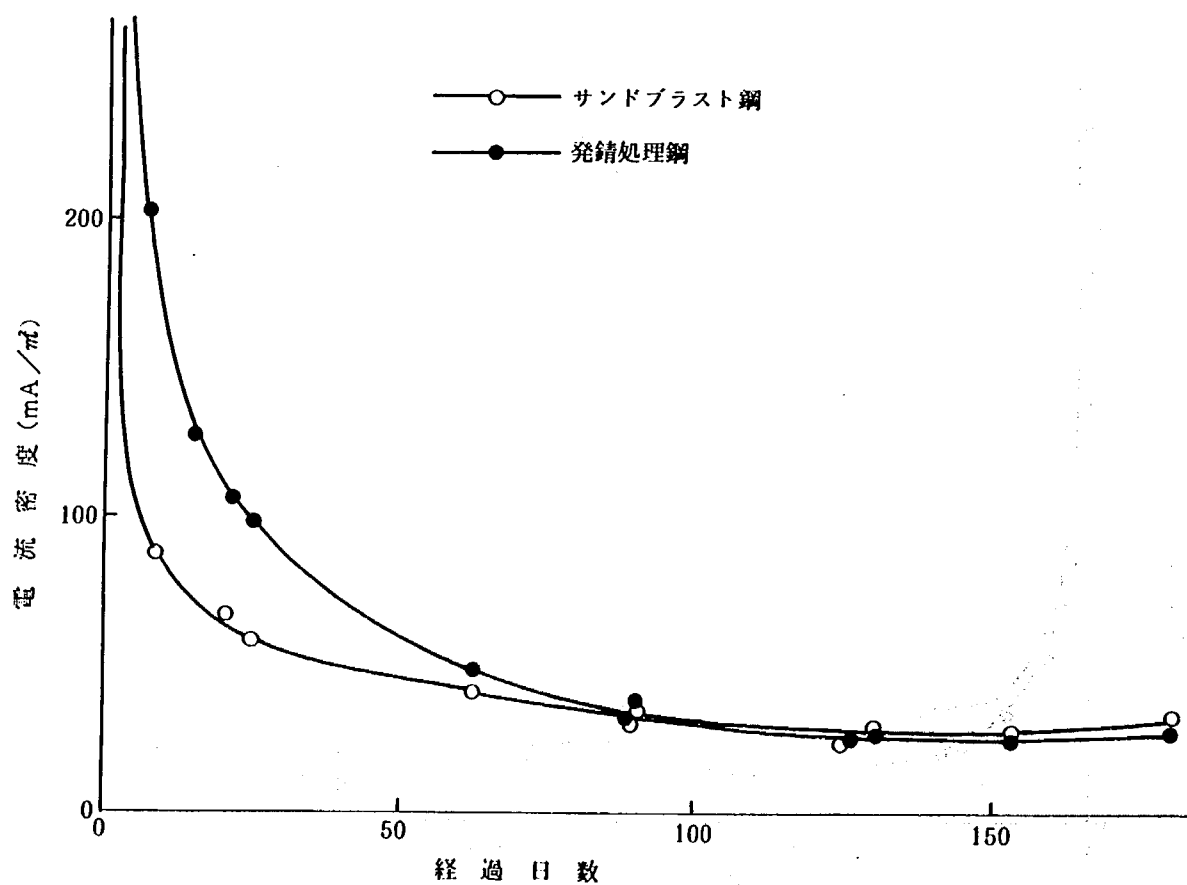


図4-7 -950mVの電流密度経時変化

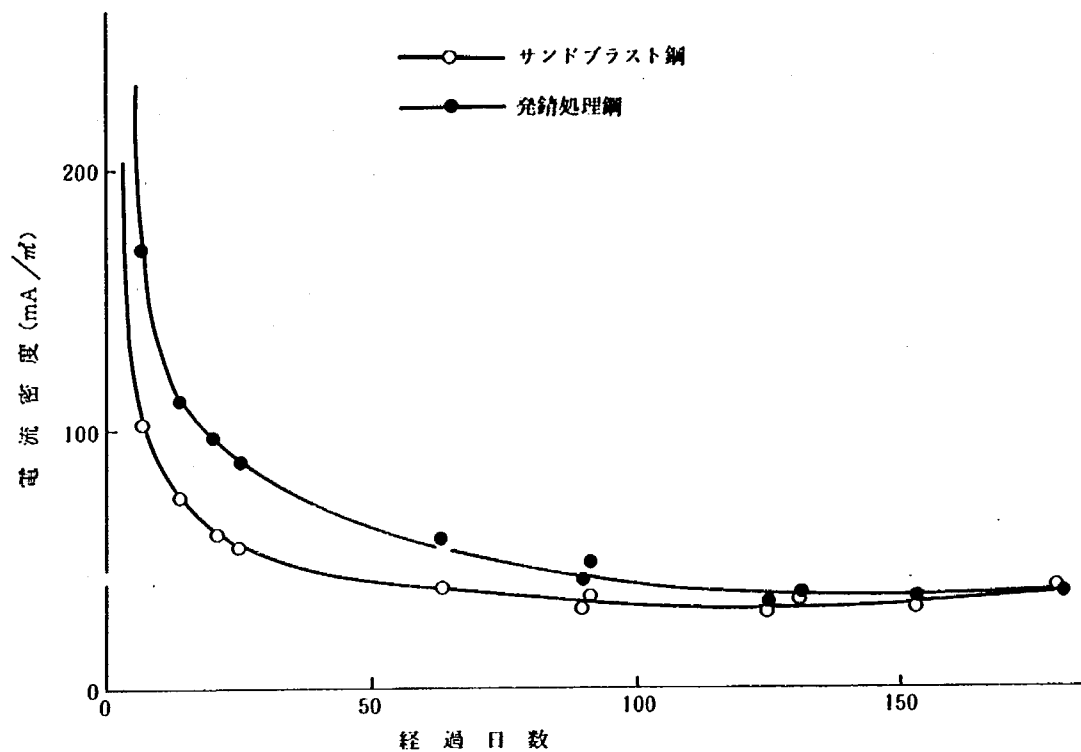


図4-8 -1000mV の電流密度経時変化

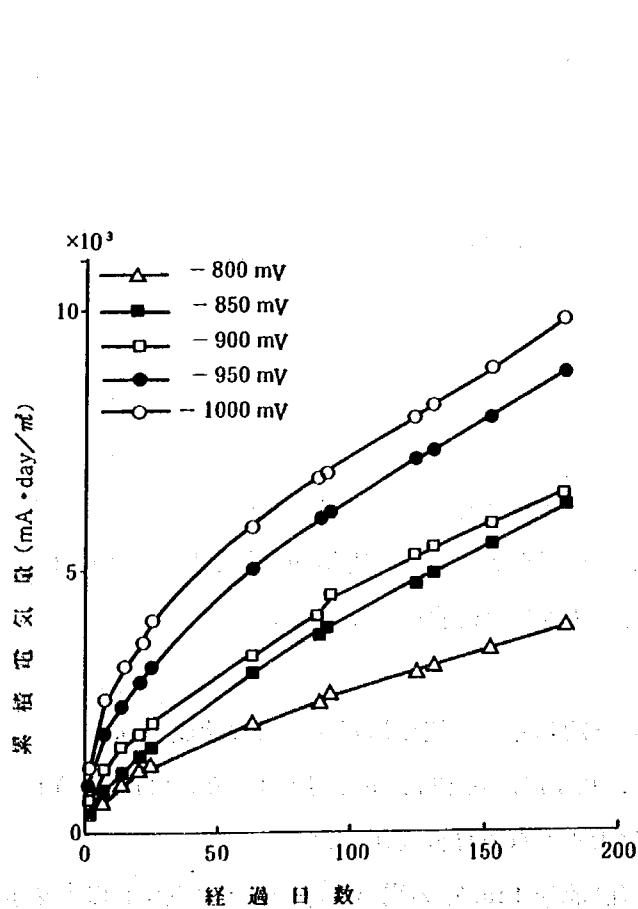


図4-9 サンドブラスト鋼の累積電気量

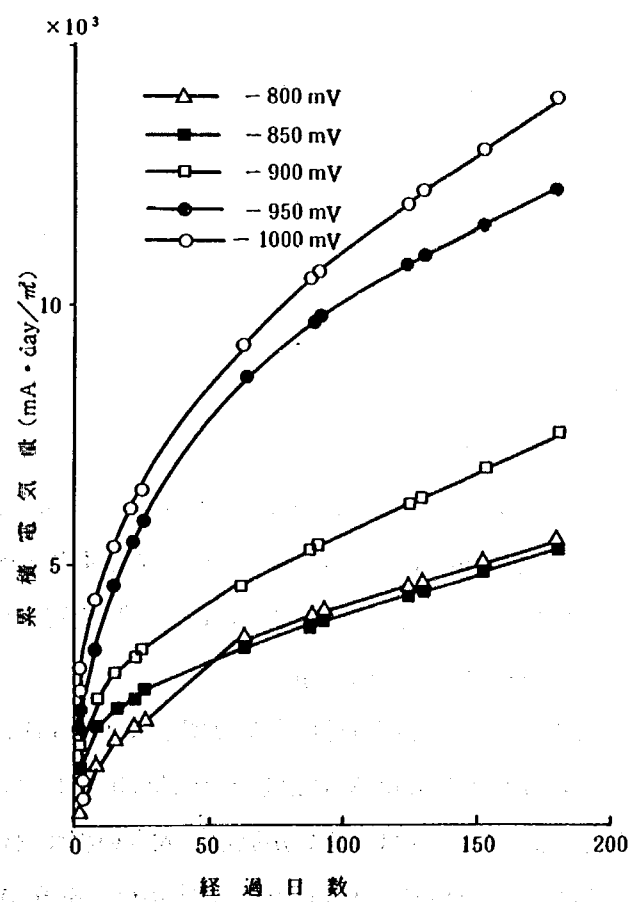


図4-10 発錆処理鋼の累積電気量

(4) 自然電位の経時変化

非防食時のサンドブラスト鋼、黒皮付鋼および発錆処理鋼試験片の自然電位の経時変化を図4-11に示す。サンドブラスト鋼、発錆処理鋼については第2次試験結果を、黒皮付鋼については第1次試験結果を示す。

サンドブラスト鋼の自然変化は試験開始直後より卑であるが、発錆処理鋼では -500mV と貴な値から徐々に卑化しており25日経過後ではサンドブラスト鋼と同様な電位となった。また黒皮付鋼も試験開始当初 -688mV と貴な値を示したが14日経過後にはサンドブラスト鋼とほぼ同じ電位を示した。

すなわち、サンドブラスト鋼と同一電位を示すまでの日数は発錆処理鋼で25日、黒皮付鋼で12日であり、その後は試験片の表面状態に関係なくゆるやかに貴化をつづけ、ほぼ120日経過後には -700mV の値で安定した。

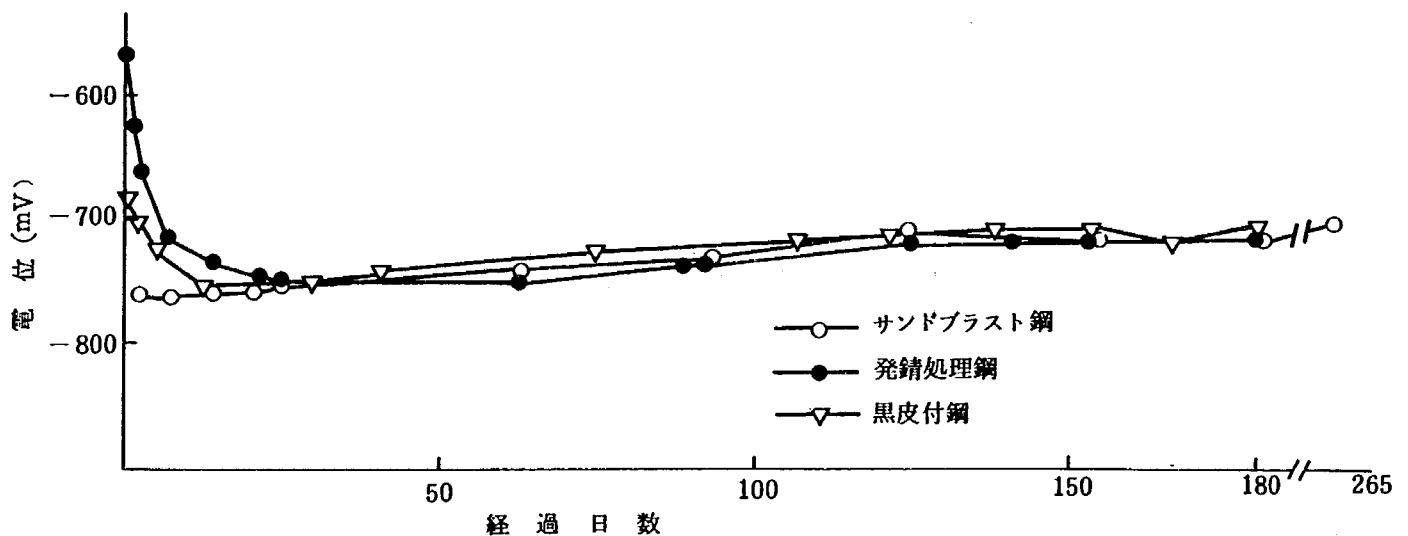


図4-11 自然電位経時変化

4.1.2 流速環境

(1) 第1次試験

海水を 0.5 , 1 , 2 , 3 , 5 および 8 m/s の流速で循環させ各々約1ヶ月間試験を行った。 -800mV および -900mV における試験片については電位と所要電流密度を測定し、非電気防食試験片については自然電位を測定した。試験終了後には、重量測定を行い腐食速度及び防食率を求めた。

1) 腐食速度および防食率

各流速における腐食速度と防食率を表4-7(I), 図4-12に示す。流速に対する腐食速度は 0.5 , 1 , 2 , 3 , 5 および 8 m/s に対しそれぞれ 0.258 , 0.112 , 0.592 , 0.421 , 0.331 および 0.892 mm/Yr を示した。バラツキは大きいが流速が大きい程腐食速度は大きくなる傾向を示した。

防食率は(I)流速 0.5 m/s (設定電位 -800mV), (II)流速 1 m/s の場合を除いて全て98%以上を示し、流速および設定電位に依存しないことがわかった。ここで(I)の場合には陽極が断線し試験開始後26日～

31日が不通電となったため、(Ⅲ)の場合には除錆処理にこの場合のみ10%クエン酸ニアンモニウム溶液(煮沸)を用い、電気防食試験片の腐食減量が0.0066~0.0199 g(補正後)であるのに対し、ブランクテストによる減量が0.0375~0.0395 gと大きな値を示したため、防食率が小さな値を示したものと考えられる。

2) 電流密度

流速と試験開始直後の電流密度の関係を図4-13(1)に示す。0.5~8 m/sの流速において、所要電流密度は流速が大きい程大きく、設定電位が-800mVの場合では2~5.6 A/m²、設定電位が-900mVの場合では2.4~9 A/m²であった。

なお、流速が2 m/sの値は測定器が故障したため信頼性が乏しい。所要電流密度は試験開始直後は大きいのが、急速に減衰した。

流速と定常電流密度の関係を図4-13(2)に示す。0.5~8 m/sにおける防食電流密度は流速が大きくなるが、その影響は小さく、-800 mVで125~300 mA/m²、-900 mVで270~550 mA/m²であった。

3) 自然電位

各流速における自然電位の経時変化を図4-14に示す。試験開始直後では-500mV前後の貴な電位を示すが、1~2日経過後には-600mV前後の電位ではほぼ定常値となり、自然電位は0.5~8 m/sの流速に対しほとんど影響を受けなかった。

(2) 第2次試験

第2次試験は2 m/sの流速で、第1次試験と同様に1~2ヶ月間の試験を3回行った。

腐食速度および防食率を表4-7(2)に示す。非電気防食試験片の腐食速度は0.0245~0.142 mm/Yr、-800 mVでの防食率は61.1~92.7%、-900mVでの防食率は71.0~96.7%であった。また、電流密度経時変化を図4-15に示す。-800mV及び-900mVでの定常電流密度はそれぞれ40~130 mA/m²および100~690 mA/m²であった。

試験条件は同一であるにもかかわらず試験結果には非常に大きなバラツキがあった。1回目は停電があり、2回目は冷却装置が故障し高温(50℃)となったことがバラツキの大きくなった原因のひとつと考えられる。

3回目の非電気防食試験片の腐食速度は0.0245 mm/Yrで第1次試験の値が0.592 mm/Yrであるのに比べ非常に小さな値であり、また、標準環境の腐食速度(0.0527~0.0657 mm/Yr)に比べても1/2以下であり異常な値と考えられる。

用いた海水水質の影響、汚れの影響(3回まで海水を交換しなかった)などが考えられるが、原因については不明の点が多く、本流速試験結果についてはさらに検討している。

自然電位経時変化を図4-16に示す。1回目の自然電位は-680mVで第1次試験の結果より卑な値であったが、2回目及び3回目では第1次試験に近い-620~-630 mVであった。第1次及び第2次試験より流速のある場合、自然電位は-600mV前後の値で定常値となるが、標準環境では-700mVで定常値となる。これは流速の影響と考えられるが、流速の大きさには依存しなかった。

表4-6(1) 流速環境における腐食速度と防食率 (第1次試験)

流 速 (m/s)	設定電位 (mV)	試験片 No	初期重量 (g)	後 重 量 (g)	腐 食 量 (g)	腐食速度 (mm/Yr) (平 均)		防 食 率 (%)
0.5	自然電位	• 568	112.8984	112.4174	0.4810	0.240	0.258	—
		• 569	111.7714	111.2404	0.5310	0.265		
		• 560	112.0173	111.4781	0.5392	0.269		
	— 800	• 541	112.0382	111.9692	0.0690	0.034*	0.015*	94.2*
		• 542	112.5184	112.4888	0.0296	0.015*		
		• 543	111.9474	111.8679	0.0795	0.040*		
	— 900	• 554	112.4081	112.4005	0.0076	0.004	0.002	99.2
		• 555	111.9619	111.9601	0.0018	0.001		
		• 556	111.6274	111.6253	0.0021	0.001		
1	自然電位	168	111.4873	111.2867	0.2006	0.107	0.112	—
		169	112.4877	112.2589	0.2288	0.122		
		160	112.2304	112.0300	0.2004	0.107		
	— 800	141	112.5218	112.5020	0.0198	0.011	0.010	91.1
		142	112.0954	112.0755	0.0199	0.011		
		143	112.3545	112.3370	0.0175	0.009		
	— 900	154	112.7028	112.6862	0.0166	0.009	0.007	93.8
		155	111.9967	111.9802	0.0165	0.009		
		156	112.9839	112.9773	0.0066	0.004		
2	自然電位	2' 68	112.8641	111.7815	1.0826	0.508	0.592	—
		2' 69	113.5883	112.3093	1.2790	0.600		
		2' 60	113.0015	111.5722	1.4293	0.670		
	— 800	2' 41	112.7219	112.7155	0.0064	0.003	0.0026	99.6
		2' 42	112.4165	112.4105	0.0060	0.0028		
		2' 43	113.4187	113.4143	0.0044	0.0021		
	— 900	2' 54	112.4632	112.4615	0.0017	0.0008	0.0010	99.8
		2' 55	113.7859	113.7829	0.0030	0.0014		
		2' 56	113.5276	113.5257	0.0019	0.0009		
3	自然電位	368	113.4754	112.7285	0.7469	0.428	0.421	—
		369	112.3666	111.6762	0.6904	0.396		
		360	113.4623	112.6930	0.7693	0.441		
	— 800	341	111.7739	111.7648	0.0091	0.0052	0.0057	98.6
		342	113.1640	113.1542	0.0098	0.0056		
		343	112.1465	112.1353	0.0112	0.0064		
	— 900	354	111.7665	111.7631	0.0034	0.0019	0.0027	99.4
		355	112.9483	112.9434	0.0049	0.0028		
		356	112.8020	112.7960	0.0060	0.0034		
5	自然電位	568	111.5187	110.9319	0.5868	0.336	0.331	—
		569	113.2317	112.6186	0.6131	0.351		
		560	112.7176	112.1859	0.5317	0.305		
	— 800	541	113.0440	113.0388	0.0052	0.0030	0.0034	99.0
		542	113.0166	113.0107	0.0059	0.0034		
		543	112.7069	112.7004	0.0065	0.0037		
	— 900	554	112.1182	112.1132	0.0050	0.0029	0.0033	99.0
		555	113.1245	113.1189	0.0056	0.0032		
		556	111.8150	111.8083	0.0067	0.0038		
8	自然電位	1068	112.5073	110.5621	1.9452	0.885	0.892	—
		1069	112.6465	110.7321	1.9144	0.871		
		1060	112.0795	110.0601	2.0194	0.919		
	— 800	1041	113.2512	113.2027	0.0485	0.0221	0.0163	98.2
		1042	113.1406	113.1076	0.0330	0.0150		
		1043	112.9743	112.9484	0.0259	0.0118		
	— 900	1054	112.6761	112.6664	0.0097	0.0044	0.0094	98.9
		1055	112.3672	112.3423	0.0249	0.0113		
		1056	112.4822	112.4547	0.0275	0.0125		

注) *は故障発生のため参考値

表 4 - 6 (2) 流速環境における腐食速度と防食率 (第 2 次試験)

試験 回数	流 速 (m/s)	設 定 電 位 (mV)	試験片 No	初期重量 (g)	後 重 量 (g)	腐 食 量 (g)	腐食速度 (mm/Yr) (平 均)		防 食 率 (%)
1 回 目	2	自然電位	14	115.3034	114.9794	0.3240	0.147	0.142	—
			15	115.0767	114.7745	0.3022	0.138		
			16	115.3792	115.0693	0.3099	0.141		
		— 800	11	116.0817	116.0256	0.0561	0.0225	0.0337	76.3
			12	115.1023	115.0152	0.0871	0.0396		
			13	115.1564	115.0770	0.0794	0.0361		
		— 900	17	115.9889	115.9556	0.0333	0.0152	0.0188	86.8
			18	115.2064	115.1530	0.0534	0.0243		
			19	115.2833	115.2459	0.0374	0.0170		
2 回 目	2	自然電位	27	115.5633	115.4583	0.1050	0.0650	0.0606	—
			28	115.7769	115.6729	0.1040	0.0644		
			29	114.6933	114.6084	0.0849	0.0525		
		— 800	21	115.0926	115.0630	0.0296	0.0183	0.0236	61.1
			22	115.3829	115.3474	0.0355	0.0220		
			23	114.0767	114.0273	0.0494	0.0306		
		— 900	24	115.1153	115.0925	0.0228	0.0141	0.0176	71.0
			25	115.3182	115.2877	0.0305	0.0189		
			26	115.5923	115.5605	0.0318	0.0197		
3 回 目	2	自然電位	37	116.1009	116.0164	0.0845	0.0214	0.0245	—
			38	115.2054	115.1157	0.0897	0.0227		
			39	115.6688	115.5532	0.1156	0.0293		
		— 800	31	115.8598	115.8546	0.0052	0.00132	0.00180	92.7
			32	115.3310	115.3232	0.0078	0.00198		
			33	115.1188	115.1105	0.0083	0.00210		
		— 900	34	115.0032	115.0029	0.0003	0.00076	0.00085	96.7
			35	113.9751	113.9694	0.0057	0.00145		
			36	115.1630	115.1590	0.0040	0.00101		

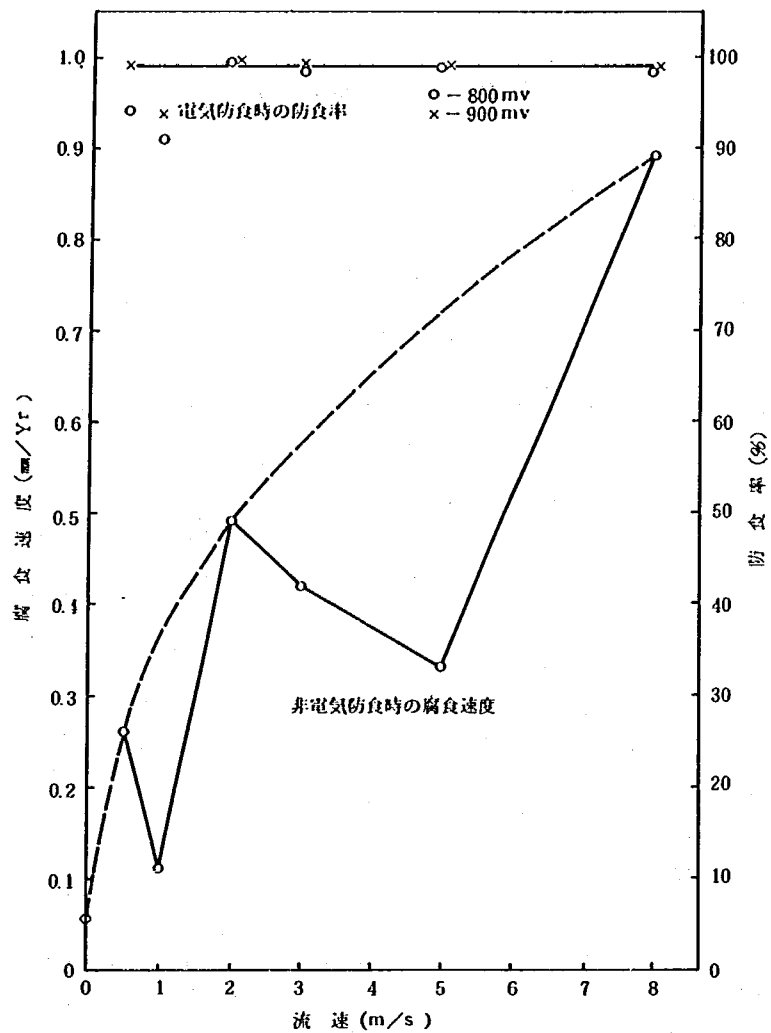


図 4-12 各流速における腐食速度と防食率

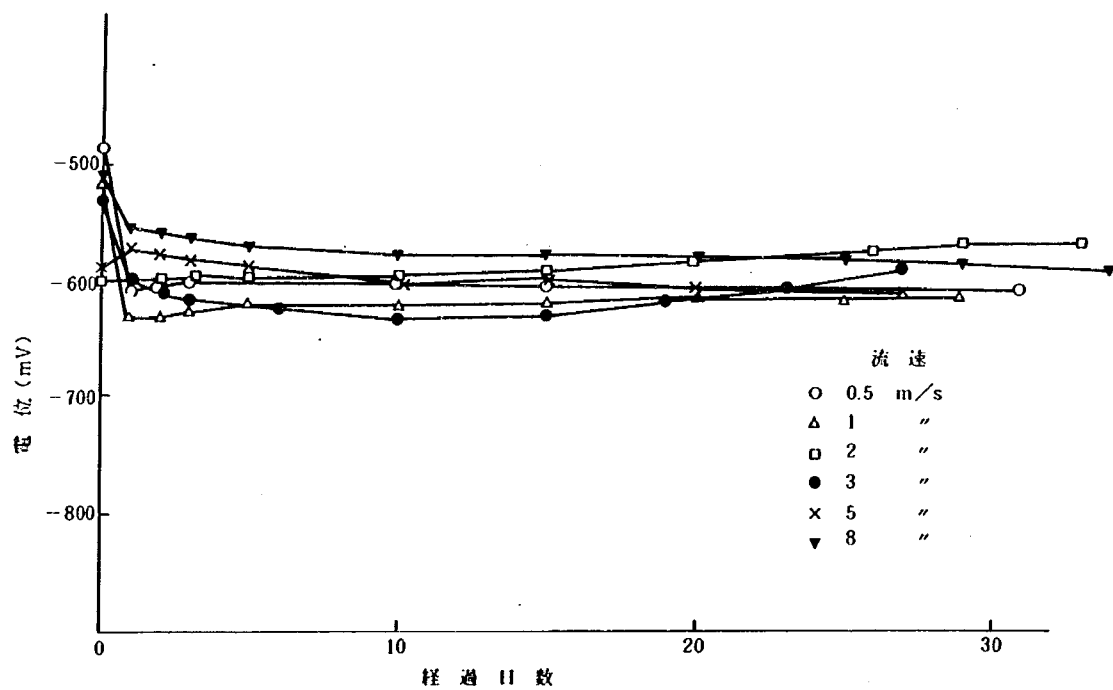
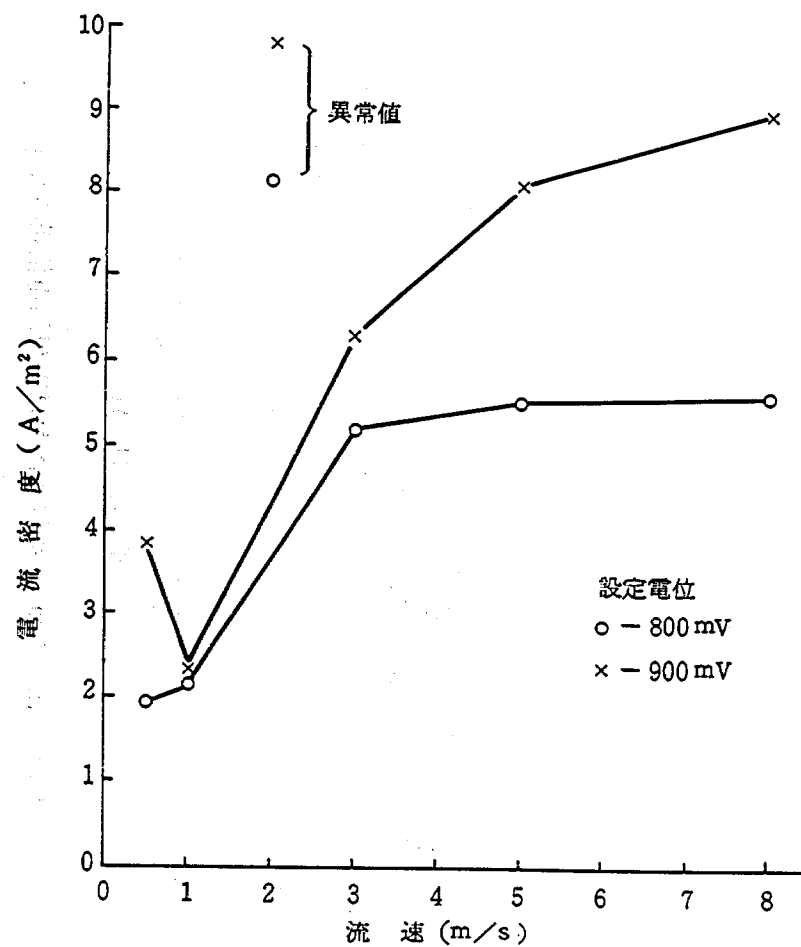
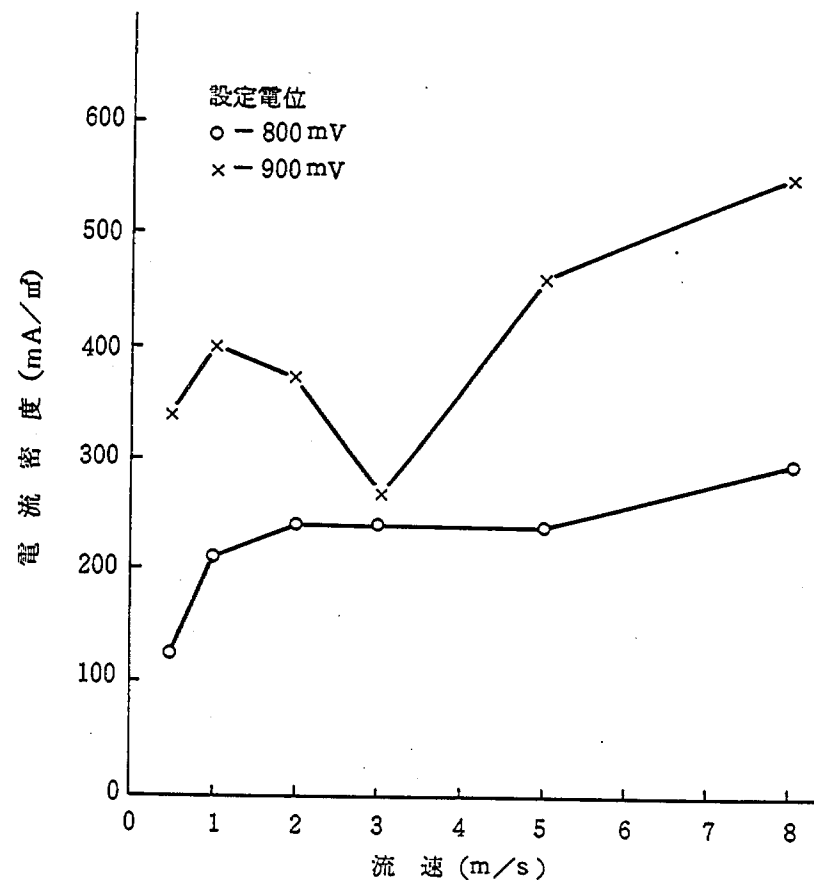


図 4-14 各流速における自然電位経時変化



(1) 試験開始直後



(2) 定常値

図4-13 流速と電流密度の関係

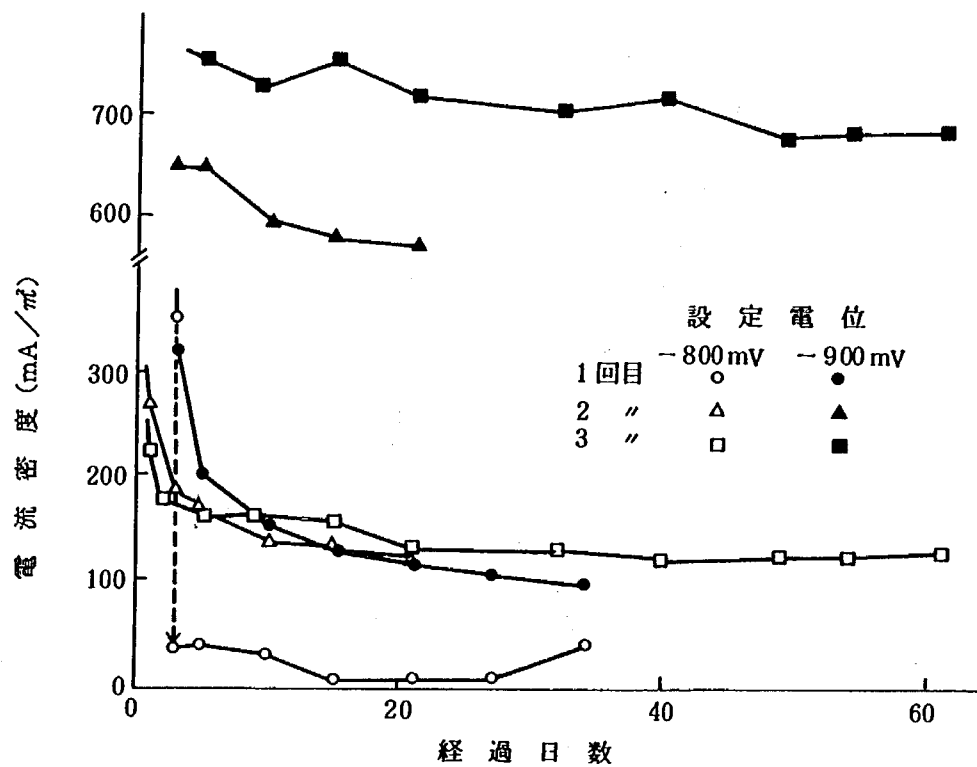


図4-15 2 m/s の流速における電流密度経時変化

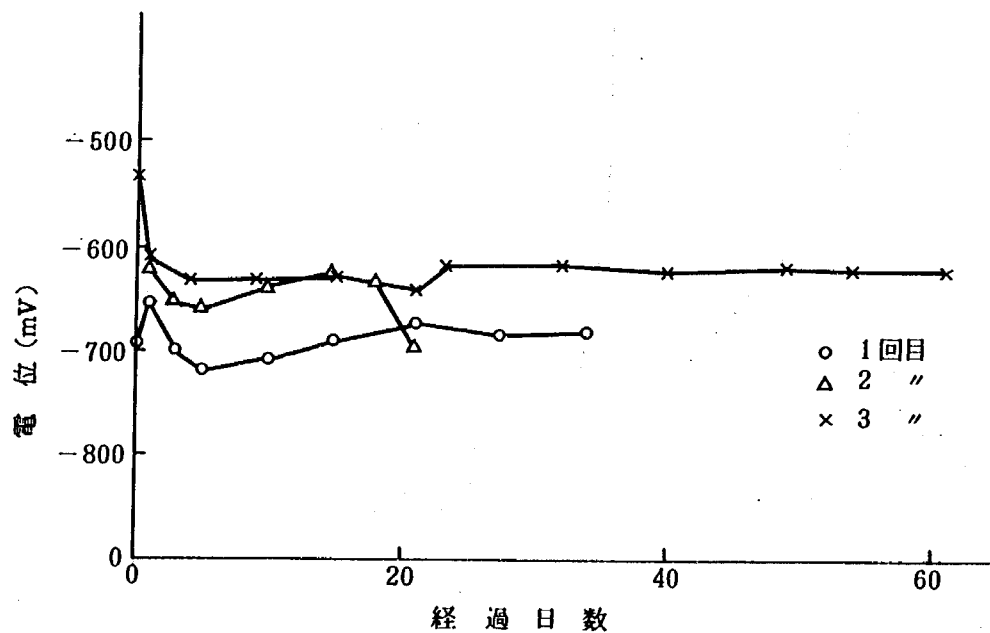


図4-16 2 m/s の流速における自然電位経時変化

4.2 塗装鋼材の電気防食特性試験

(1) 電流密度の測定結果

1) 電流密度の経時変化

電流密度に及ぼす防食下地、電位、膜厚、塗料種及び硬化剤の影響について検討した。

(i) 防食下地の影響

タールエポキシ (JIS-1種, ポリアミド) 試験片での防食下地が異なる場合の電流密度を図4-17に示す。

防食下地なしで膜厚 $100\mu\text{m}$ の場合には、スクラッチの有無に関係なく次第に電流が増加する。膜厚 $200\mu\text{m}$ の場合には、スクラッチのある時に電流が増加する。

これに対し有機または無機ジンクリッチの防食下地のある膜厚 $100\mu\text{m}$ 、 $200\mu\text{m}$ の場合には、電流の増加が認められない。また膜厚 $200\mu\text{m}$ 以下では防食下地が有効であることが認められる。

(ii) 電位の影響

タールエポキシ (JIS-1種, ポリアミド, 防食下地なし) の試験片で設定電位の異なる場合の電流密度を図4-18に示す。

スクラッチがない場合には、設定電位 -900mV では電流の増加はなく、塗膜にふくれの発生はない。これに対して -1500mV では電流の増加が著しく、塗膜にふくれが発生した。

スクラッチがある場合は、設定電位 -900mV では電流は徐々に増加する傾向を示す。これに対して -1500mV では膜厚 $100\mu\text{m}$ 、 $200\mu\text{m}$ 、 $400\mu\text{m}$ とともに試験初期から大きな電流値を示し、約 $100\text{mA}/\text{m}^2$ の値で推移する。

以上の結果から電気防食を併用する塗装系では、下地処理の無い場合には $400\mu\text{m}$ 以上の膜厚が必要であり、 $200\mu\text{m}$ 程度の膜厚では耐久性が不足するものと考えられる。

(iii) 膜厚の影響

タールエポキシ (JIS-1種, ポリアミド, スクラッチなし) 試験片における膜厚の影響を図4-19に示す。

防食下地がある場合、膜厚が $100\mu\text{m}$ と薄くとも電流の増加はない。

防食下地がない場合、設定電位 -900mV では膜厚 $100\mu\text{m}$ の試験片でも電流の増加が認められ、膜厚が小さいほど電流の増加が著しいことが確かめられた。

(iv) 塗料種の影響

3種類のタールエポキシ (ポリアミド, 膜厚 $200\mu\text{m}$) 試験片の電流密度を図4-20に示す。

防食下地の有無に関係なく、 -900mV の場合はいずれの塗料種であっても電流の増加はない。また -1500mV の場合の電流増加時期は、3種が最も早く、2種が最もおそいが最終的には各塗料種とも塗膜にふくれが発生した。

(v) 硬化剤の影響

タールエポキシ (膜厚 $200\mu\text{m}$ スクラッチなし) 試験片における硬化剤の影響を図4-21に示す。

設定電位 -900mV では、防食下地の種類に関係なく電流の増加はない。 -1500mV では、防食

下地のない場合と有機ジンクリッチを防食下地としたポリアミド系試験片に電流の経時的増加があるが、アミンアダクト系試験片では増加は認められない。

2) 電流密度の分散分析結果

表4-8に示す3元配置表にもとづき試験開始3日後および359日後の電流密度の測定結果を用いて分散分析を行った。

表4-7 解析に用いた3元配置表

3元配置(1) 膜厚 200 μ m スクラッチなし				
要 因 \ 水 準	1	2	3	4
A 設 定 電 位	-900mV	-1500mV	————	————
B 防 食 下 地	な し	O-ZRP	I-ZRP	————
C 塗 料 種	タールエポキシJIS1種 アミンアダクト	タールエポキシJIS1種 ポリアミド	タールウレタン	エポキシ (ピュアエポキシ)

3元配置(2) 防食下地なし, スクラッチなし				
要 因 \ 水 準	1	2	3	4
A 設 定 電 位	-900mV	-1500mV	————	————
B 膜 厚	100 μ m	200 μ m	400 μ m	————
C 塗 料 種	タールエポキシJIS1種 ポリアミド	タールエポキシJIS2種 ポリアミド	タールエポキシJIS3種 ポリアミド	タールウレタン

3元配置(3) 塗料種：タールエポキシJIS-1種, ポリアミド, スクラッチ入り			
要 因 \ 水 準	1	2	3
A 設 定 電 位	-900mV	-1500mV	————
B 防 食 下 地	な し	O-ZRP	I-ZRP
C 膜 厚	100 μ m	200 μ m	400 μ m

まず配置表(1)の場合の分散分析結果を図4-22に示す。

① 設定電位の効果

塗装試験片においても設定電位 -1500mV における防食電流は -900mV の場合より大きく電位による電流密度の差は時と共に大きくなる傾向にある。

② 防食下地の効果

防食下地の無い試験片は電流密度が大きい。

③ 塗料種の効果

タールエポキシ(JIS-1種, アミンアダクト)とタールウレタンは, 3日後, 359日後とも他の塗料種に比較して電流密度は小さかった。またエポキシは, 3日後では最も電流密度は小さかったが, 359日後

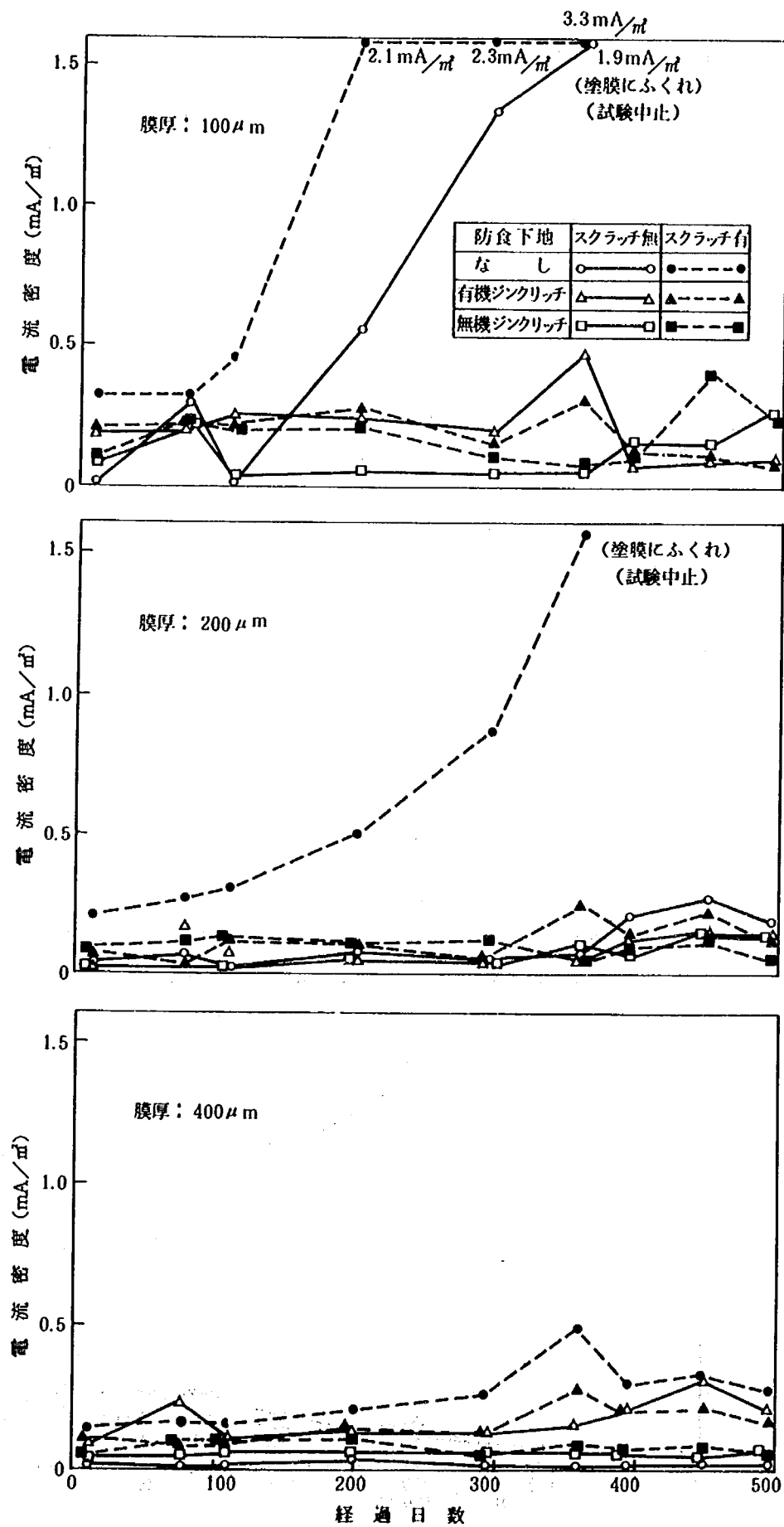


図4-17 防食下地が異なる場合の電流密度

(タールエポキシ (JIS-1種, ポリアミド), 設定電位 = 900 mV)

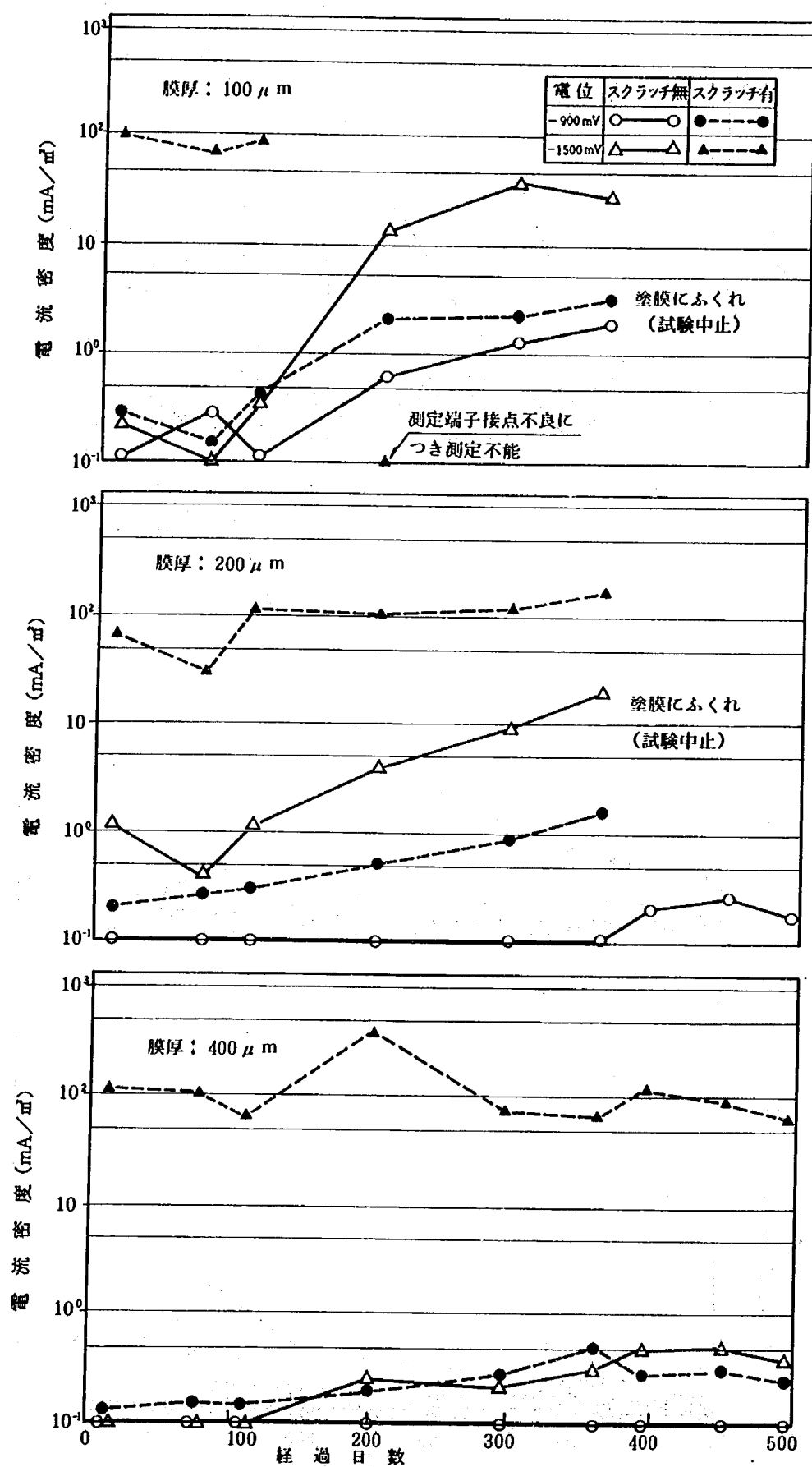


図4-18 設定電位が異なる場合の電流密度(タールエポキシ(JIS-1種; ポリアミド)防食下地なし)

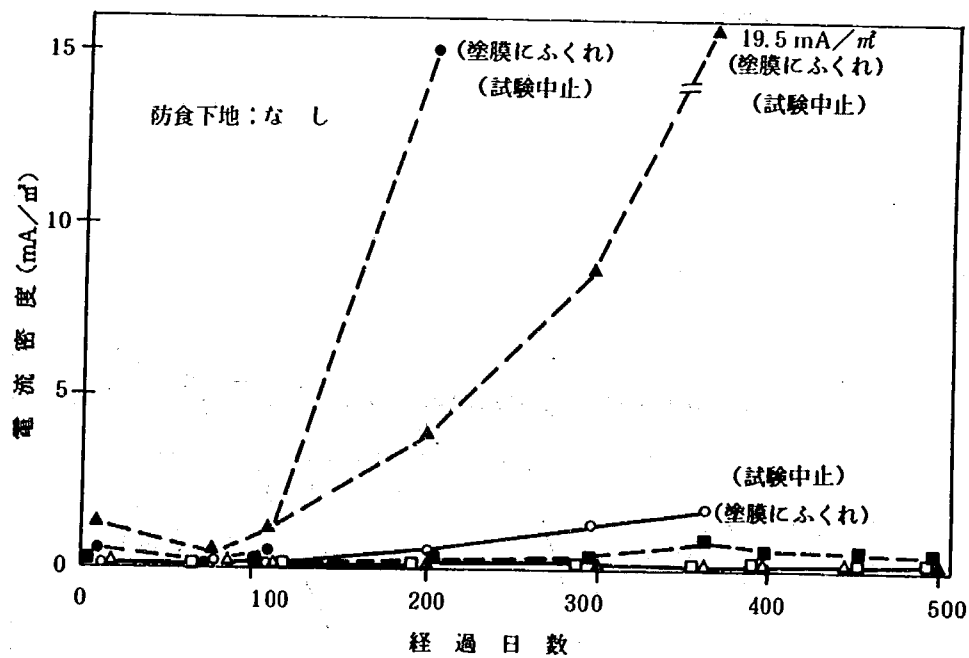
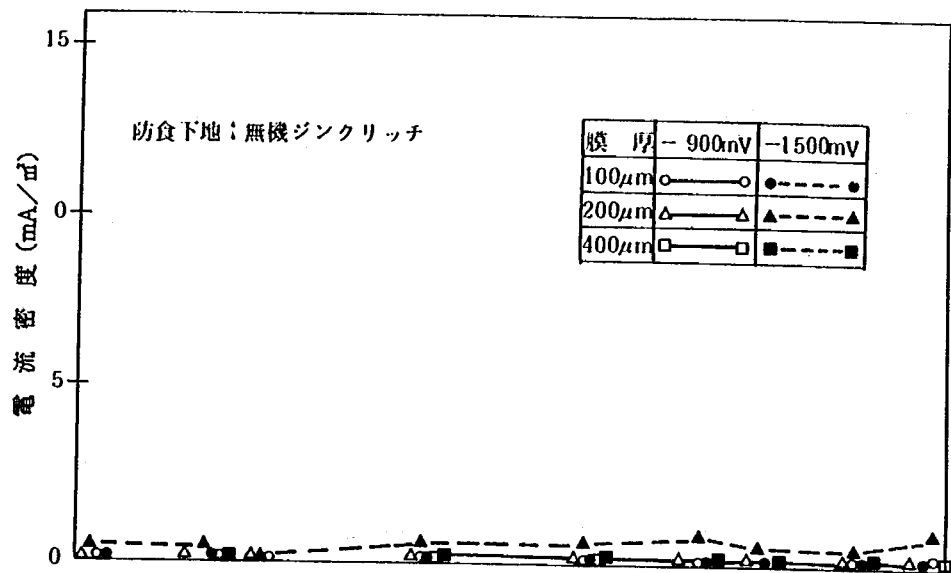


図4—19 膜厚の影響 (タールエポキシ (JIS-1種, ポリアミド) スクラッチなし)

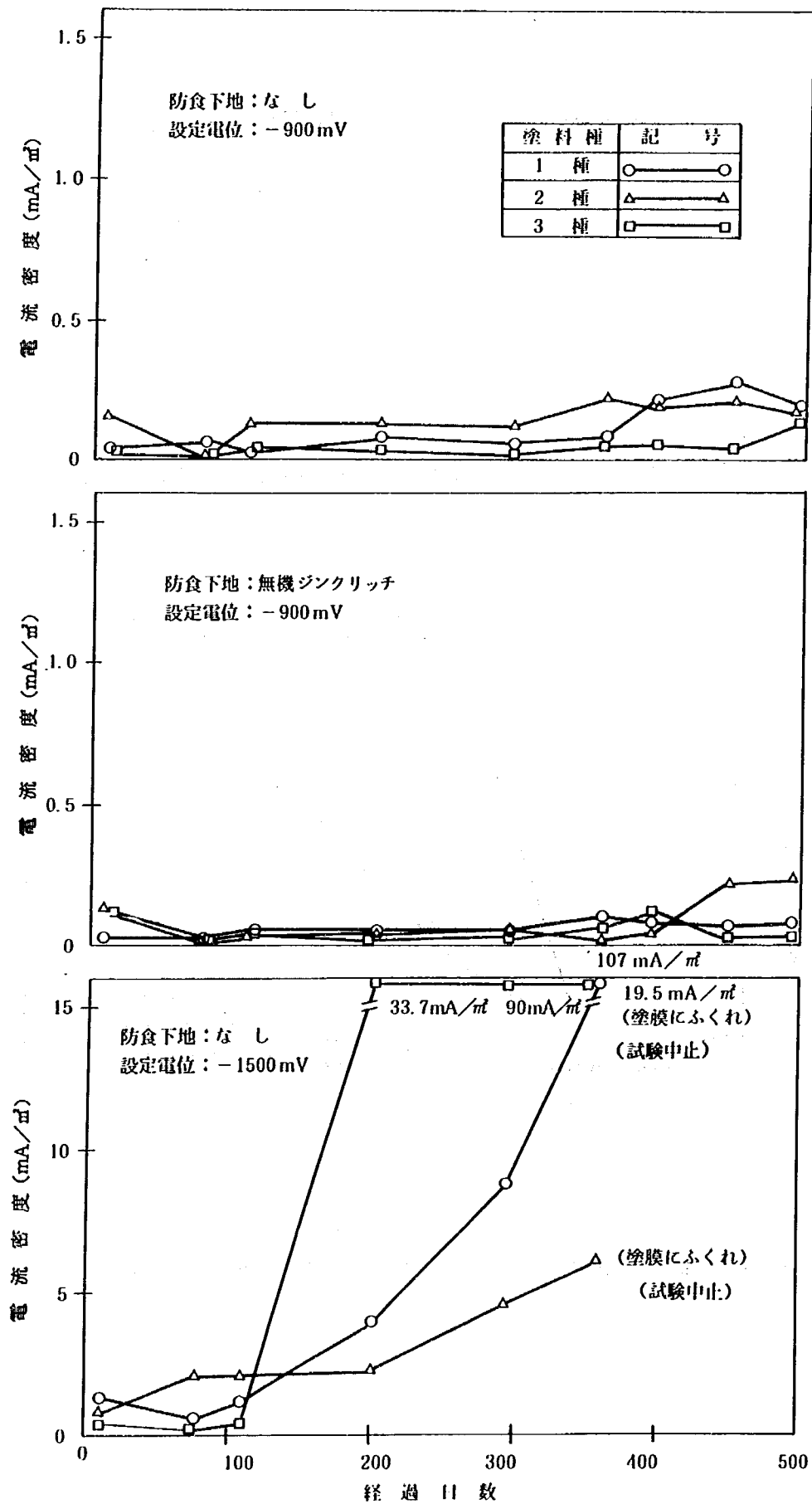


図4-20 塗料種の影響(タールエポキシ(ポリアミド)膜厚200 μ m)

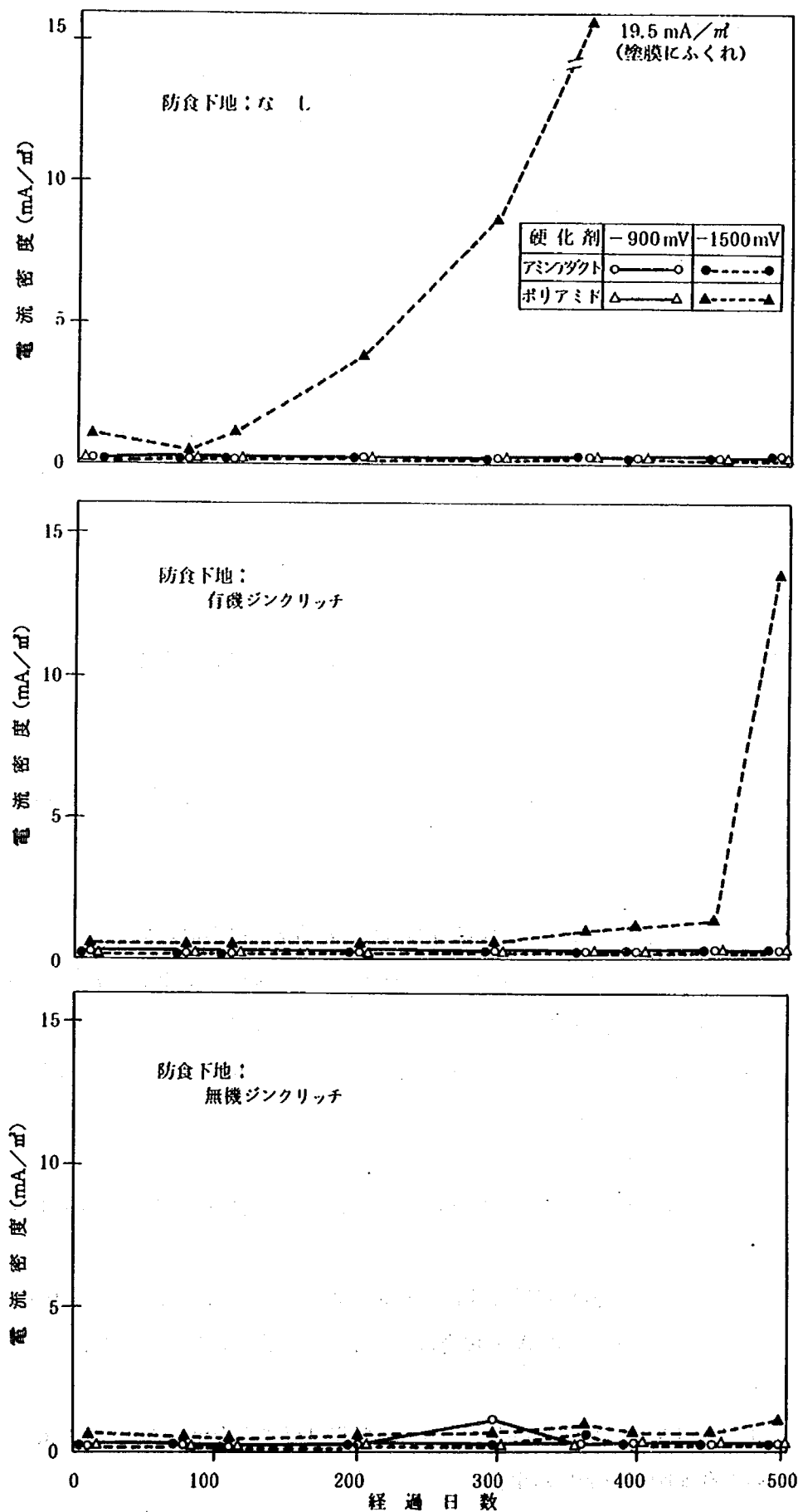


図4-21 硬化剤の影響（タールエポキシ（JIS-1種）膜厚 200 μ m スクラッチなし）

ではタールエポキシ(JIS-1種, ポリアミド)と同様に大きかった。

交互作用の分析結果によれば図4-23のように塗料種の効果はさらにはっきりする。

次に配置表(2)の場合の分散分析結果を図4-24, 図4-25に示す。

① 設定電位の効果

同様に設定電位による電流密度の差は大きい。

② 膜厚の効果

膜厚が小さい程, 電流密度は大きくなる。

③ 塗料種の効果

タールウレタンは最も電流密度が小さく, タールエポキシJIS-1種, 2種, 3種の中ではJIS-2種が最も小さかった。塗料種と設定電位の交互作用では図4-25に示すように-900mVと-1500mVの電流密度の差異は, タールエポキシJIS-1種, 2種, 3種において顕著であったが, タールウレタンでは小さかった。

さらに配置表(3)の場合の分散分析結果を図4-26, 図4-27に示す。

① 設定電位の効果

設定電位-900mVに比べて-1500mVでの塗装試験片の電流密度は大きく, 今回の組み合わせでは3日後には約1000倍, 359日後では約100倍であった。

② 膜厚の効果

膜厚による電流密度の差異は3日後では小さかったが359日後では大きく, 膜厚が厚いほど電流密度は小さかった。

③ 防食下地の効果

設定電位-1500mVの試験片では防食下地の有無にかかわらず, 電流密度は大きかった。

しかし, -900mVの試験片では無機ジンクリッチペイントにおいて, 電流密度がもっとも小さくなり, 有機ジンクリッチペイント, 防食下地なしの順に大きくなった。これはジンクリッチペイントがある場合防食下地なしに比べて自然電位が卑となるため設定電位との電位差が小さくなるためであろう。

(2) 塗膜抵抗の測定結果

1) 防食電流密度と塗膜抵抗の相関性

スクラッチのない試験片について, 493日経過後の電流密度と塗膜抵抗および $\tan\delta$ 値の関係を図4-28, 4-29に示す。

図中に示した如く, 相関係数と直線回帰式は設定電位によって異なり, -900mVに比し, -1500mVのほうが相関性が良く, また, -1500mVの場合は分布が高電流密度側にシフトした。

2) 塗膜抵抗の経時変化

タールエポキシJIS-1種, 2種, 3種をプールし, 各膜厚毎に平均値を求め, 自然電位を含む各電位別の塗膜抵抗の経時変化を図4-30に示す。

通常, 水溶液中での塗膜抵抗の経時変化は浸漬初期の速い減衰と長期にわたる平衡状態, さらに後段での減衰の3段階にわかれる。それぞれの各段階は吸水, 膨潤平衡, 劣化に対応している。自然電位に比較

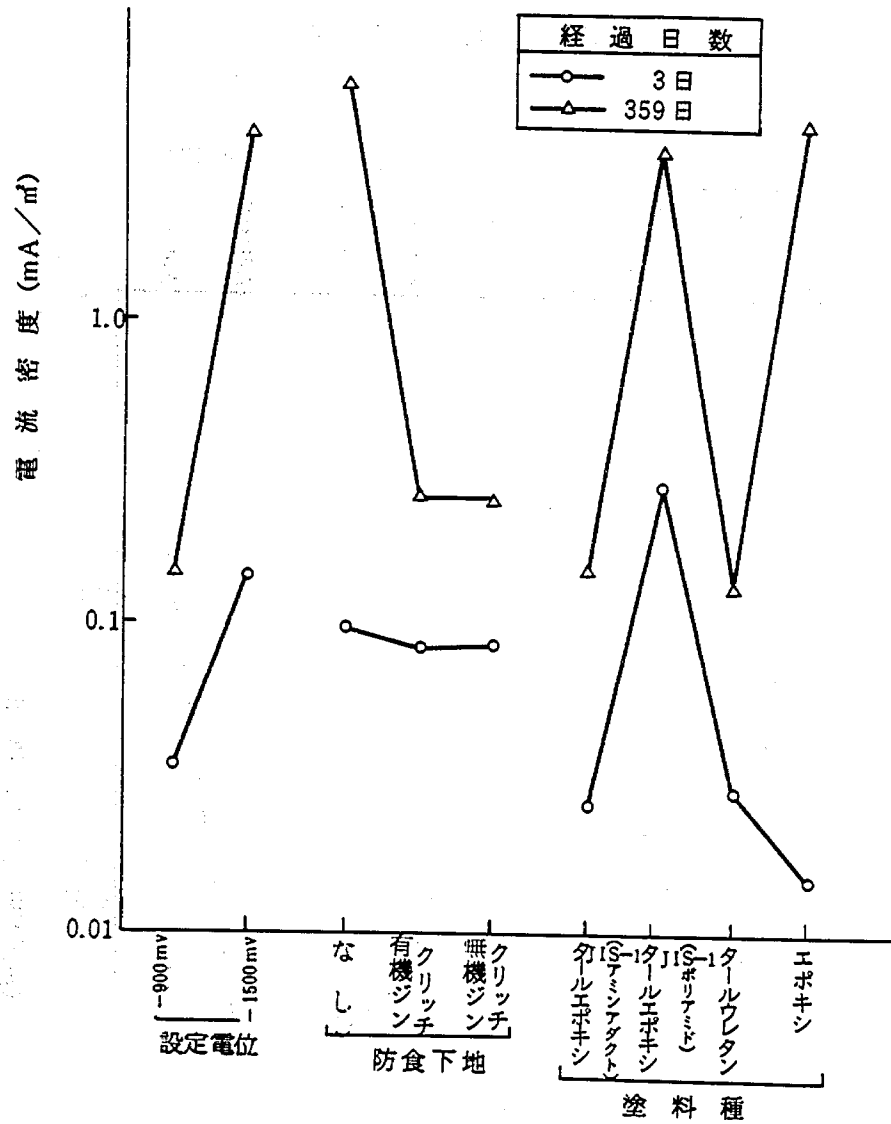


図 4-22 3 元配置(1)の各要因主効果

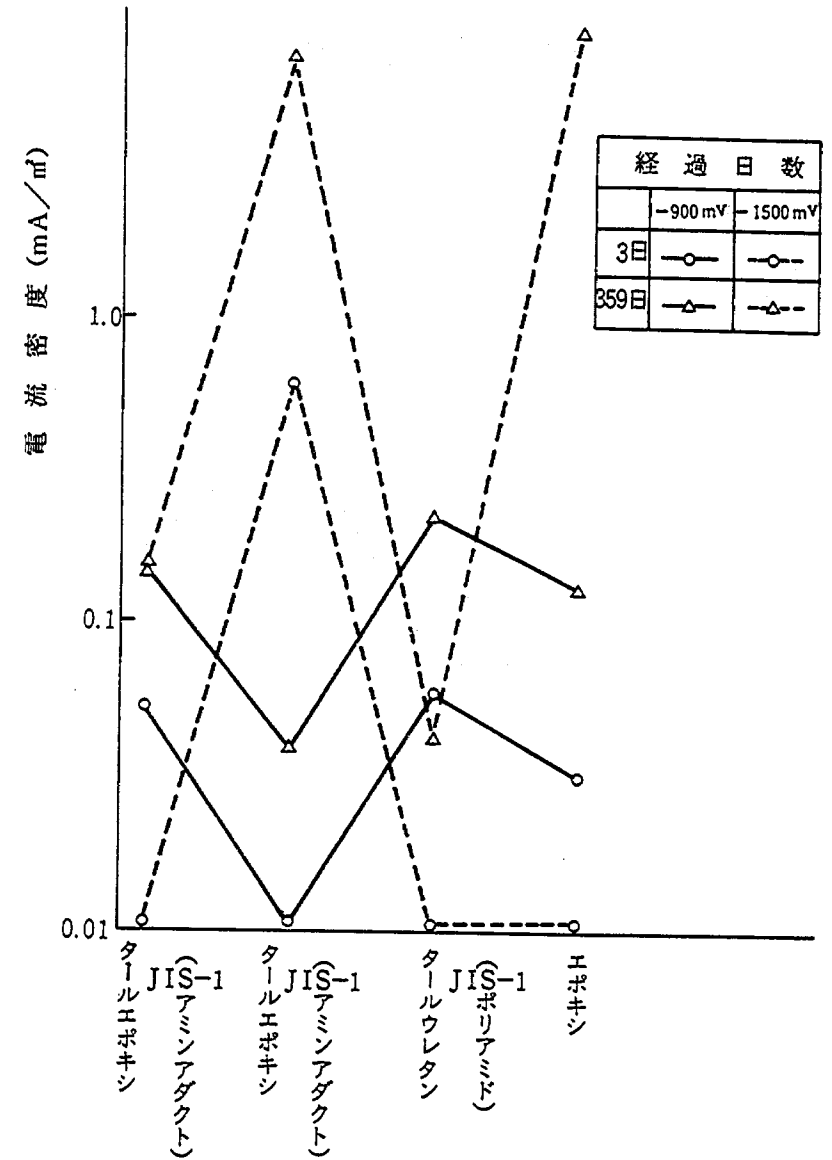


図 4-23 3 元配置(1)の交互作用

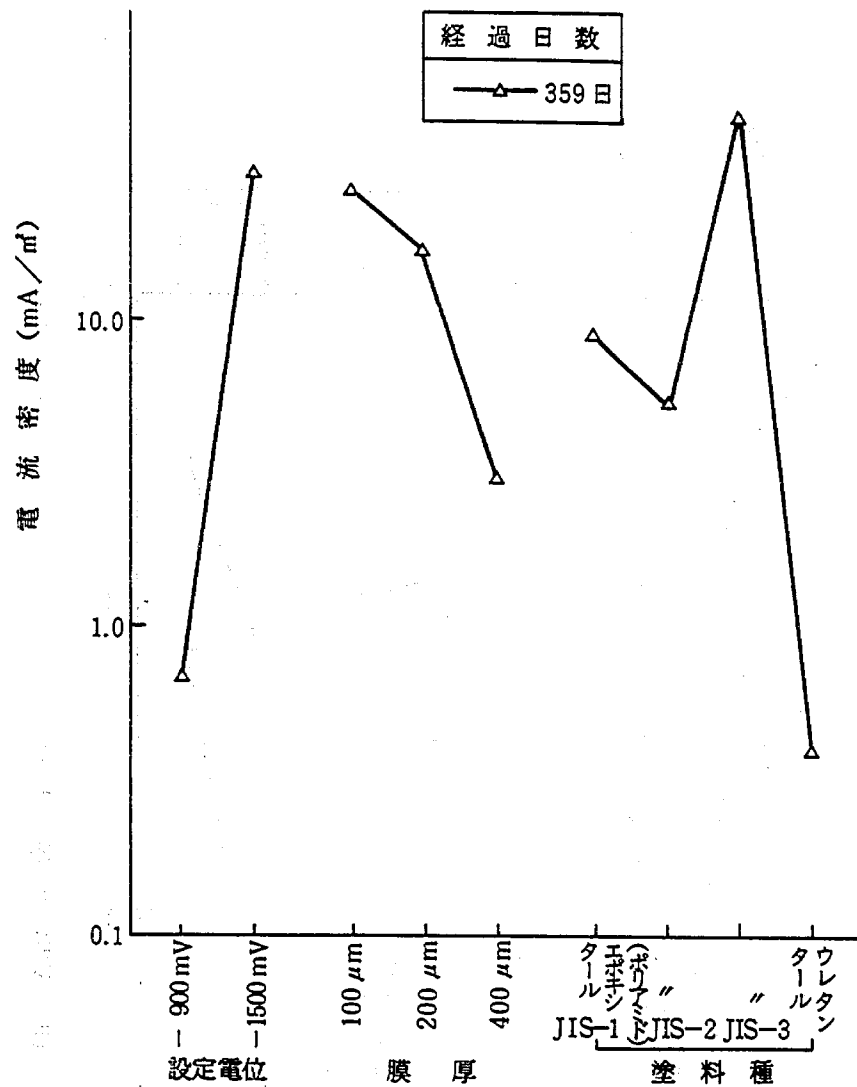


図 4-24 3 元配置(2)の各要因主効果

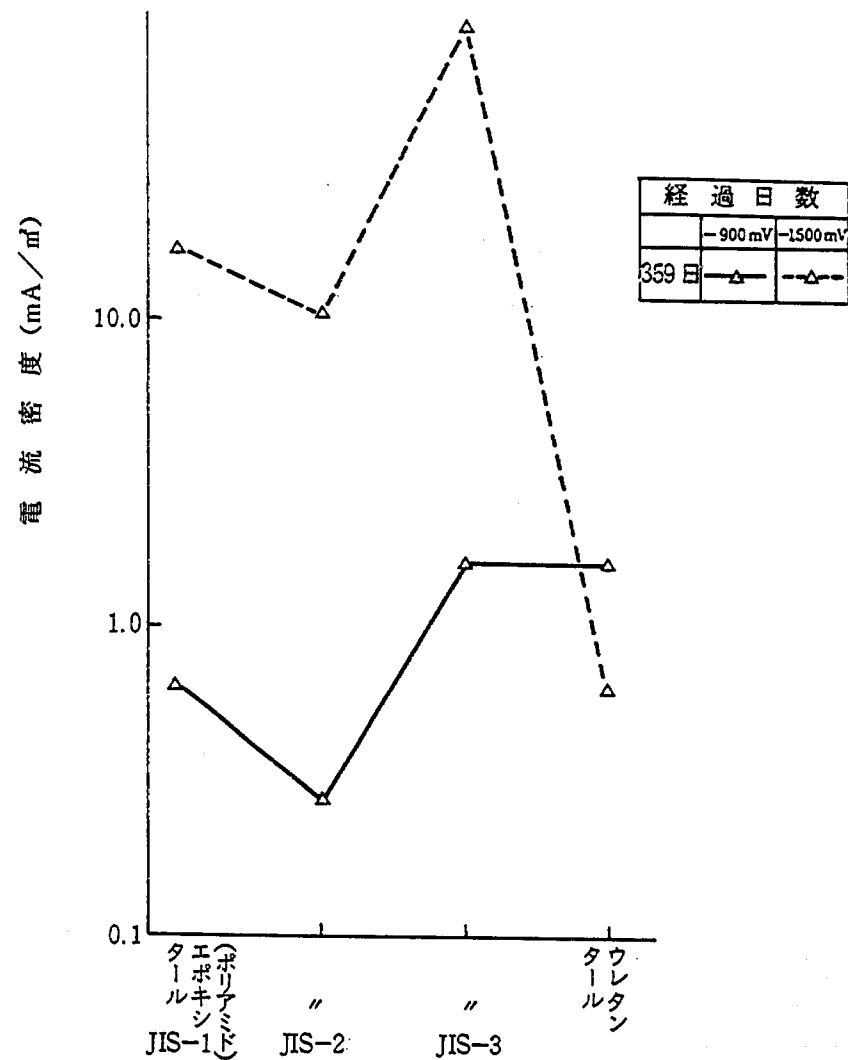


図 4-25 3 元配置(2)の交互作用

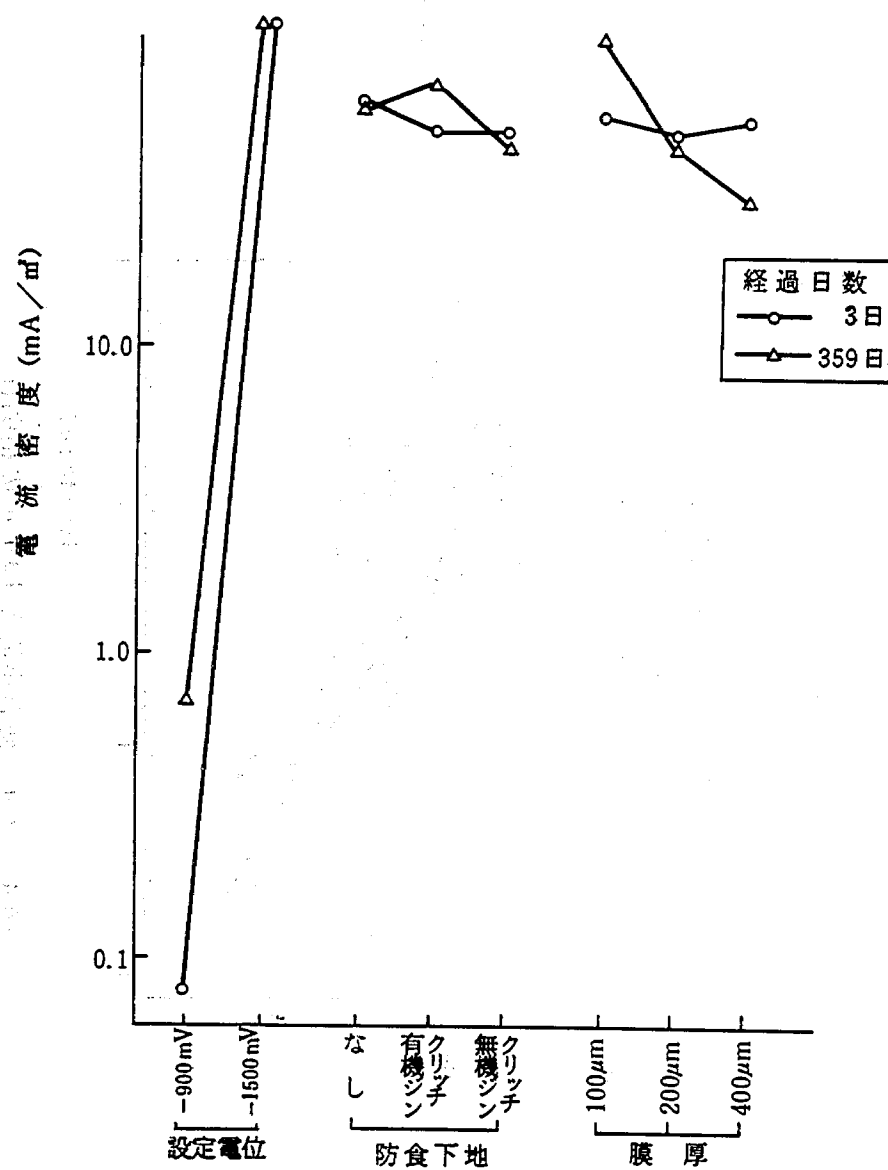


図 4-26 3 元配置(3)の各要因主効果

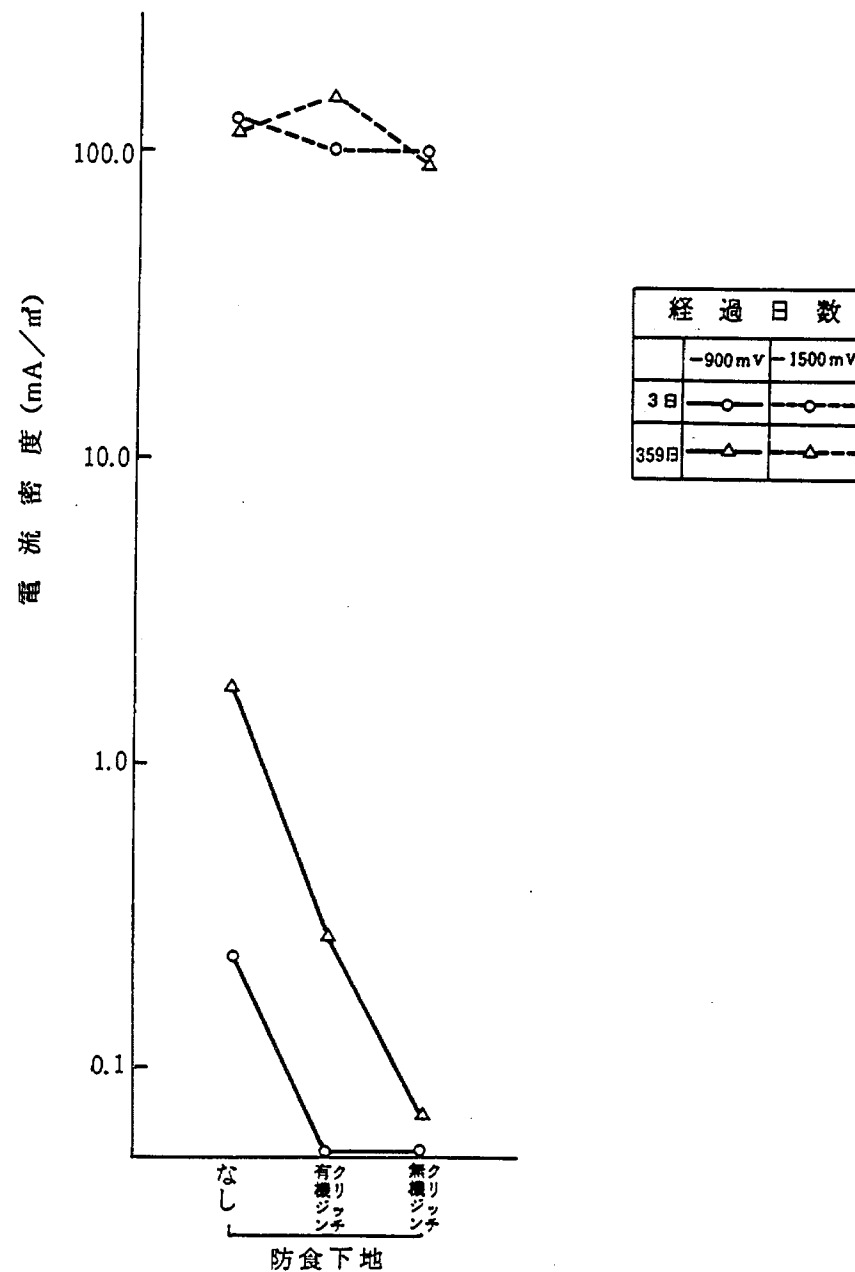


図 4-27 3 元配置(3)の交互作用

(防食下地の効果)

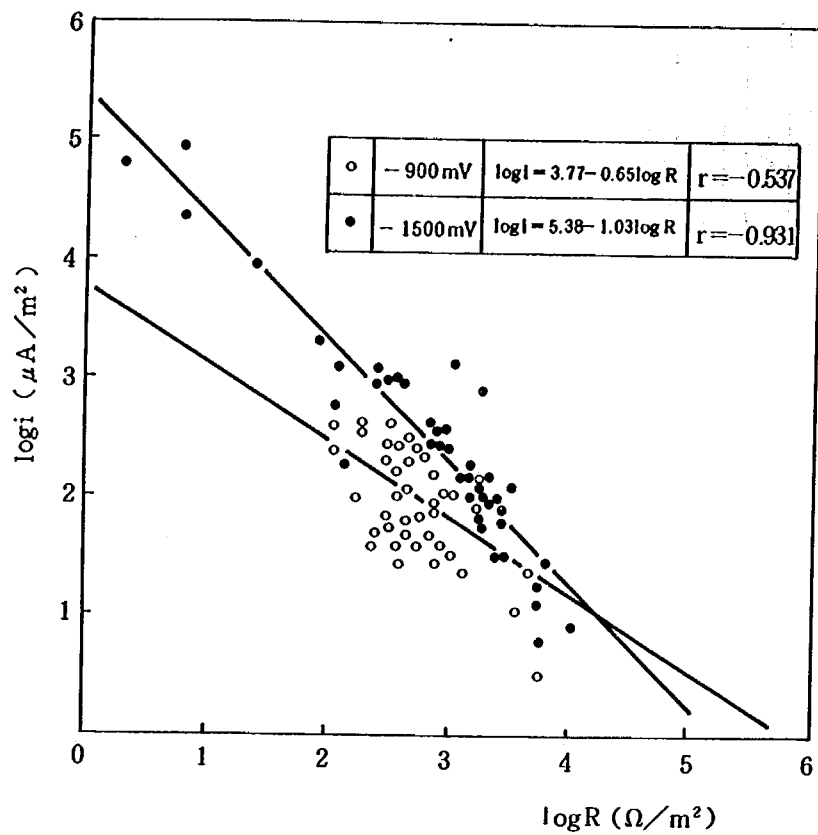


図 4 - 2 8 防食電流と塗膜抵抗の相関性

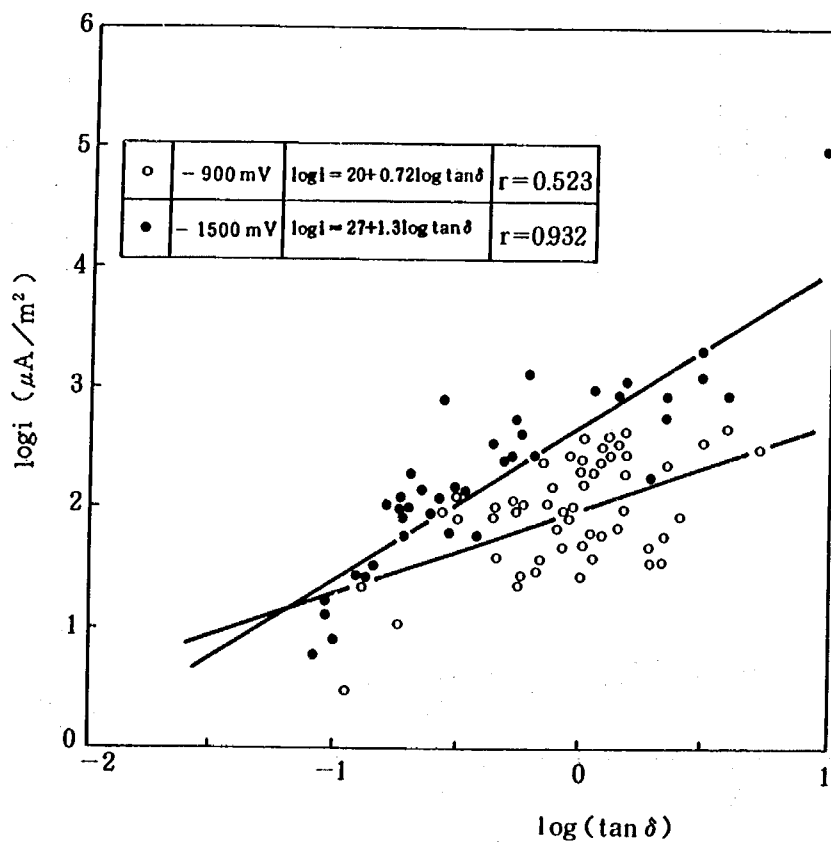


図 4 - 2 9 防食電流と $\tan \delta$ の相関性

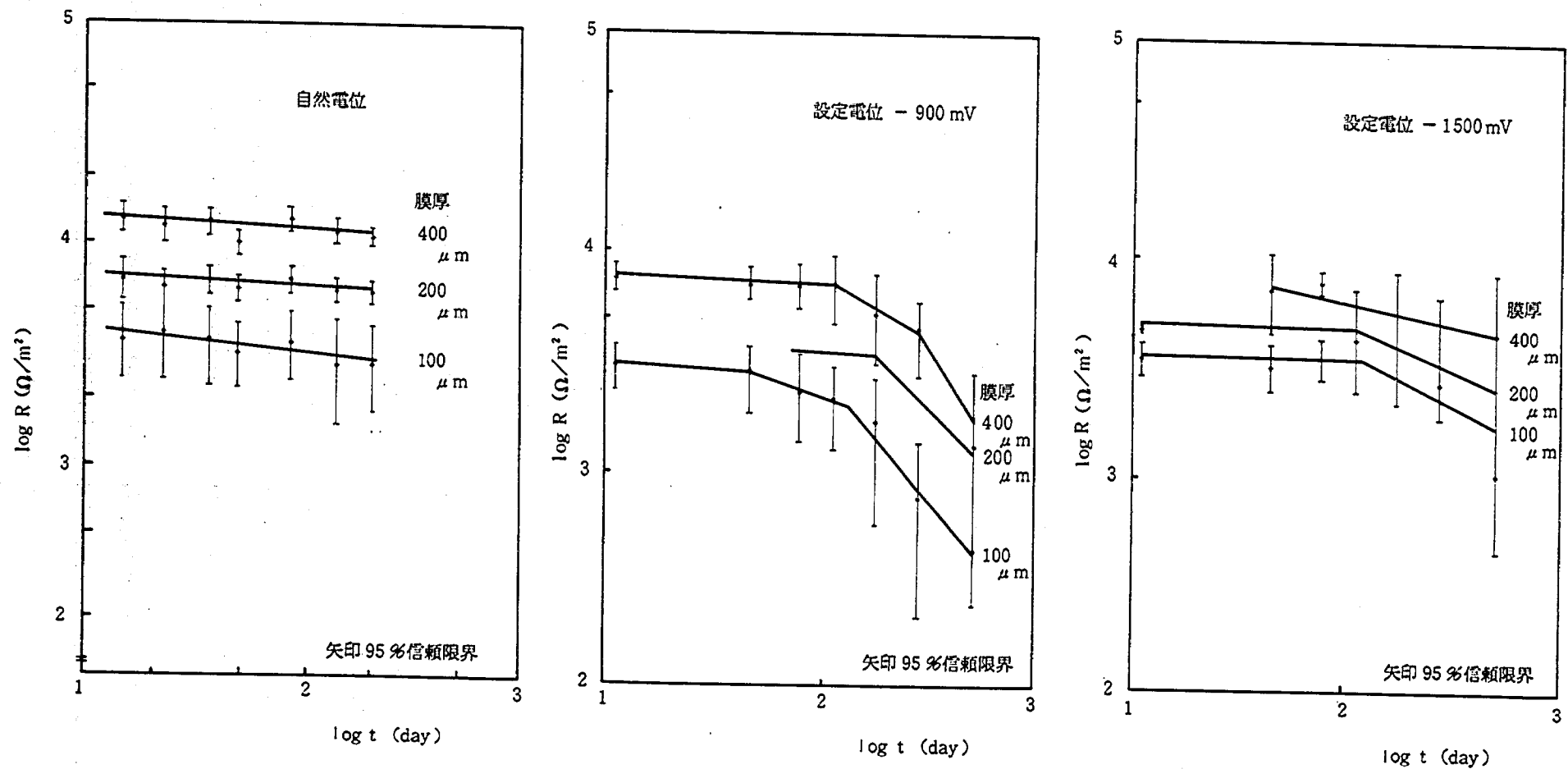


図4-30 塗膜抵抗の経時変化

(タールエポキシ JIS-1, 2, 3 種平均)

して電気防食条件下では3段目の抵抗減衰が始まる時期が早く、特に -900mV においてその傾向が著しい。また、 -900mV の場合、塗膜抵抗が $10^2\Omega/\text{m}^2$ 以下になるとふくれの発生率が高くなる傾向にあり、図中の減衰直線を $10^2\Omega/\text{m}^2$ まで外挿することによって塗膜寿命を推定することができる。例えば、最も減衰の速い $100\mu\text{m}$ の場合、塗膜寿命は約5年と推定される。

図4-31には防食下地なし、膜厚 $200\mu\text{m}$ の場合の塗料種別(タールエポキシ(JIS-1種, アミンアダクト), タールウレタン, エポキシ樹脂塗料)の塗膜抵抗の経時変化を示す。自然電位、 -1500mV では塗料種による差異が認められるが、 -900mV の場合にはほとんど差異がなく同一直線となった。また、減衰の仕方も前述のタールエポキシ(JIS-1種, ポリアミド)に比し速い。

自然電位ではタールエポキシ(JIS-1種, アミンアダクト) $>$ エポキシ $>$ タールウレタンの順に塗膜抵抗が大きい、 -1500mV ではタールウレタン $>$ タールエポキシ(JIS-1種, アミンアダクト) $>$ エポキシの順になり、各設定電位における順位相関は認められなかった。

取り上げた変動要因のうち、防食下地の影響は明瞭には認められなかったが、特に有意差のあったタールエポキシJIS-1種の場合の経時変化のみを図4-32に示す。図に示した如く、防食下地の影響は膜厚によって異なり、 $100\mu\text{m}$ では有効であるが、 $400\mu\text{m}$ では逆に負効果となった。防食下地の膜厚は平均 $75\mu\text{m}$ であるが、総膜厚に対するその寄与率は当然 $100\mu\text{m}$ の方が大きく、防食下地よりもむしろ膜厚効果があらわれたものと解釈できる。

3) 各要因の効果

防食下地なしの系統を取り上げ、電位(自然電位を含む)、膜厚、および塗料種(タールエポキシJIS-1種, 2種, 3種, タールウレタン)の各要因効果をより明らかにするため、表4-8の3元配置のわりつけにもとづいて分散分析を行った。浸漬日数を自然電位の場合と合わせるため、200日後のデータを対象とした。

分散分析の結果は表4-8に示した如く、電位、膜厚、塗料種の主効果と電位-膜厚の交互作用に有意差が認められた。図4-33にそれぞれの主効果を、図4-34に電位と膜厚の交互作用を示す。

塗膜抵抗の順位は電位に関して、自然電位 $> -1500\text{mV} \approx -900\text{mV}$ となり、電気防食条件下で抵抗減衰が促進されることが確認できる。

膜厚に関しては $400\mu\text{m} > 200\mu\text{m} > 100\mu\text{m}$ の順であるが、これを体積固有抵抗に換算すると、すべて等しい範囲内 $[(1.45 \pm 0.05) \times 10^9 \Omega \cdot \text{cm}]$ に入り、海水中における塗膜抵抗の減衰に関して200日以内では膜厚の影響は認められないといえる。

塗料種に関しては、タールエポキシJIS-1種 $>$ JIS-2種 $>$ JIS-3種 $>$ タールウレタンの順となり、一般にいわれているタールエポキシ系のエポキシ含有量と耐久性の関係がそのまま当てはまる。但し、タールウレタンの順位については後述の解析結果と矛盾するところがあり、この点については後に考察した。

図4-34の電位と膜厚の交互作用をみると、設定電位が卑になるに従って膜厚による抵抗の差が小さくなる傾向にある。通電による一様な塗膜抵抗の減衰と共に膜厚に依存しない何らかの欠陥が発生したものと思われる。

次に膜厚 200 μ m の系について、浸漬日数を変え（3 日、137 日、493 日）、各要因、設定電位、防食下地、塗料種（タールエポキシ（JIS-1 種、ポリアミド）、タールエポキシ（JIS-1 種、アミンアダクト）、タールウレタン、エポキシ）の効果を表 4-13 に従って解析した。

分散分析の結果は表 4-13 に示した如く、設定電位、塗料種の主効果と交互作用に有意差が認められた。図 4-35 にそれぞれの主効果を、図 4-36 に交互作用を示す。

設定電位が塗膜抵抗の減衰に及ぼす影響は -900mV と -1500mV の間で明らかにその傾向が異なり、2) 項で述べた如く、-1500mV のほうが減衰は緩慢である。このことから単なる通電による塗膜劣化以外の何らかの作用が考えられる。その一つとして水素ガス発生に伴う塗膜中の欠陥部の封孔、あるいは露出金属面の水素ガス被覆が上げられる。-900mV よりも -1500mV のほうがその効果が顕著になるため、-1500mV のほうが塗膜抵抗が高く維持されたと解釈できる。

防食下地の効果についてはほとんど有意差が認められなかった。

また塗料種別にみた塗膜抵抗の順位は初期、エポキシ>タールウレタン>タールエポキシ（JIS-1 種、アミンアダクト）>タールエポキシ（JIS-1 種、ポリアミド）であったが、493 日後にはタールウレタン>タールエポキシ（JIS-1 種、アミンアダクト）>エポキシ>タールエポキシ（JIS-1 種、ポリアミド）の順となり、エポキシの抵抗減衰が最も大であった。タールウレタンは自然電位を含めたデータ処理では前述のタールエポキシ JIS 各種の中で最も低い順位となっているが、ここでは逆の傾向にある。その理由として、図 4-36 に示した如く、電位との交互作用が上げられる。即ち、-1500mV においてタールウレタンの塗膜抵抗は最も高い値に維持されているが、-900mV では最低値であった。これを水素ガス被覆効果とみなすと、タールウレタン塗膜には他種塗膜よりも多くの封孔されやすい微小欠陥が存在すると推測される。

一方、タールエポキシ（JIS-1 種、ポリアミド）はタールウレタンとは逆の傾向にあり、抵抗減衰は -1500mV のほうが著しい。

両者のこのような差異は恐らく塗膜物性の差異に起因すると考えられる。タールウレタンに比し、タールエポキシ（ポリアミド）はより可撓性であり、ち密な塗膜を形成する。

塗料種間の塗膜抵抗の差異は浸漬期間と共に小さくなる傾向にあり、特に -900mV の場合はほとんど有意差が認められない。これに対し、封孔効果が考えられる -1500mV の場合はタールウレタン>タールエポキシ（JIS-1 種、アミンアダクト）>エポキシ>タールエポキシ（JIS-1 種、ポリアミド）の抵抗順位となった。

4) $\tan\delta$ 値からみた塗膜劣化発生率

健全塗膜の $\tan\delta$ 値は通常 0.2 以下の値であり、0.5 以上になると塗膜に何らかの欠陥があるとみなされている。ちなみに無塗装鋼材の $\tan\delta$ 値はほぼ 1 に等しい。

ここでは 493 日経過後の $\tan\delta$ 値が 1 以上の発生率をふくれを生じている試験片の比率と比較した。図 4-37 に各要因別にまとめた結果を示す。ふくれ発生した塗膜の $\tan\delta$ 値はすべて 1 以上になっているが、 $\tan\delta$ 値が 1 以上の塗膜は必ずしもふくれを生じているとは限らない。

2, 3 の例外を除き、ふくれ発生率と $\tan\delta > 1$ の発生率の間には良い相関が認められた。2, 3 の例外

として、 -1500mV の場合とタールウレタンの場合が上げられる。

即ち、設定電位 -900mV と -1500mV を比較すると $\tan\delta$ 値とふくれ発生の上に逆の傾向があり、 -1500mV ではふくれ発生率が大いににもかかわらず、 $\tan\delta$ 値は -900mV の場合より低くなった。これは前述の水素ガス被覆によって見かけの $\tan\delta$ 値が低くなったものと解釈できる。

また、タールウレタンは逆にふくれ発生率が低く、 $\tan\delta$ 値が高くなる傾向を示した。この場合にはふくれ発生以外の微少欠陥が $\tan\delta$ 値を高める原因になっていると考えられる。

ふくれ発生率は $200\mu\text{m}$ を例にとると、タールエポキシ (JIS-1 種, ポリアミド) が 42% で最も大きく、エポキシ (8%), タールエポキシ (JIS-1 種, アミンアダクト), タールウレタン (0%) の順となった。

また、全体としての発生率は 56% であり、 $100\mu\text{m}$ では 70%, $200\mu\text{m}$ では 20%, $400\mu\text{m}$ では 17% となって、ふくれ発生に対する膜厚の効果が認められた。

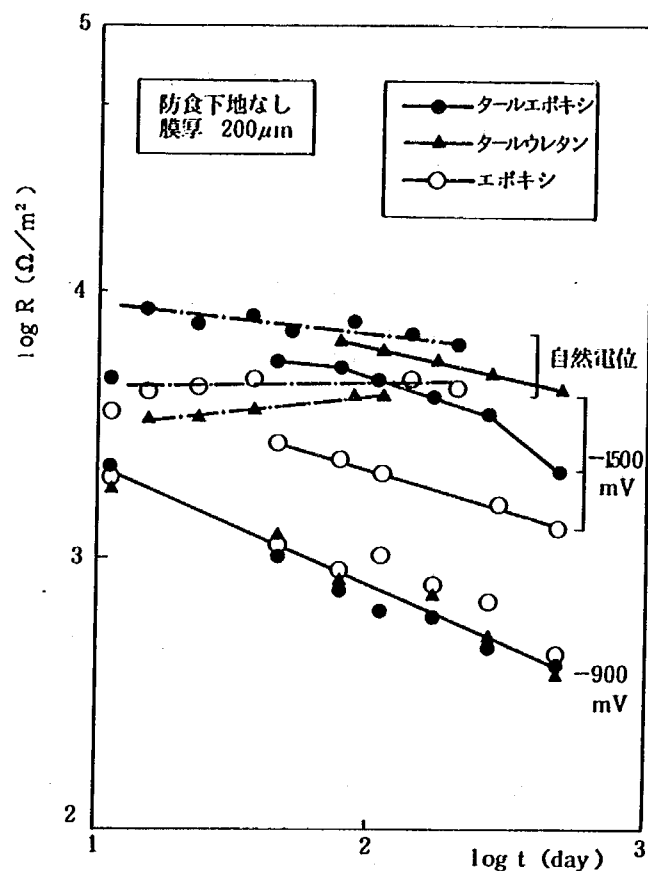


図 4-31 塗膜抵抗経時変化におよぼす塗料種の影響

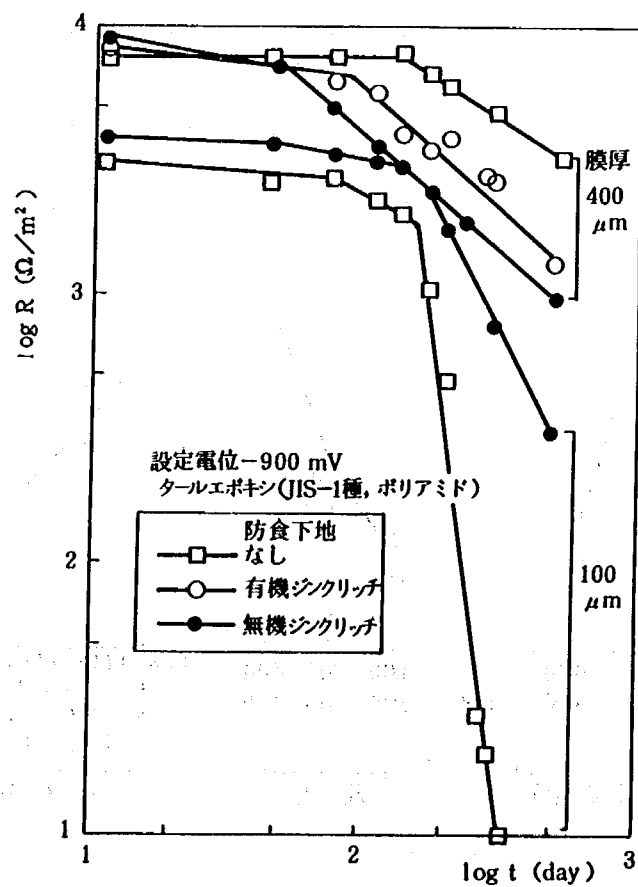


図 4-32 塗膜抵抗経時変化におよぼす防食下地の影響

表 4 - 8 分 散 分 析 表

(KΩ/m²)

A 設定電位 (mV)	B 膜 厚 (μm)	C 塗 料 種				要 因	S	φ	V	Fo
		タールエポキシ JIS-1種	タールエポキシ JIS-2種	タールエポキシ JIS-3種	タールウレタン					
自然電位	100	4.3	2.5	0.72	0.87	A	69.3	2	48.2	44.5 ^{**}
	200	7.0	5.9	5.2	4.0	B	102.2	2	51.1	47.2 ^{**}
	400	11.0	11.1	9.3	5.9	C	36.8	3	12.3	11.3 ^{**}
-900	100	0.48	1.24	0.34	1.16	A×B	42.9	4	10.7	9.9 ^{**}
	200	1.48	0.52	1.00	0.46	B×C	16.7	6	2.8	2.6
	400	6.5	4.1	5.6	2.12	A×C	15.3	6	2.5	2.4
-1500	100	2.9	1.28	1.16	1.40	e	13.0	12	1.1	
	200	4.5	1.04	0.01	3.6	T	323.2	35		
	400	5.5	5.0	0.16	0.72					

- 注) 1) 浸漬日数 200日
 2) 防食下地 なし
 3) **: 信頼度 99%

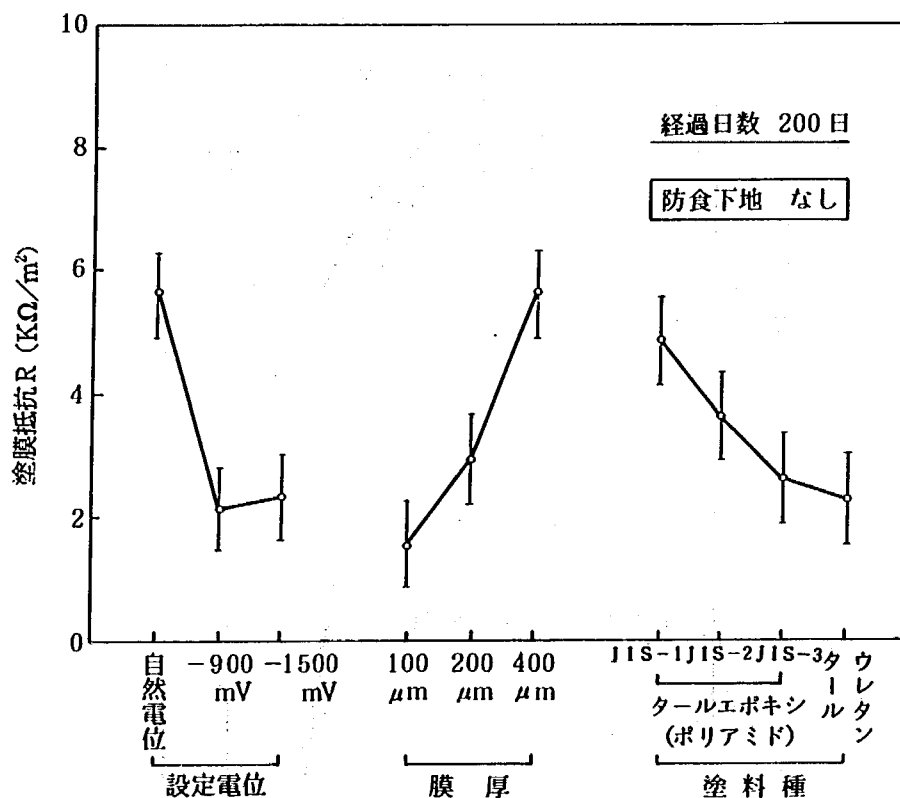


図 4 - 3 3 各要因の主効果

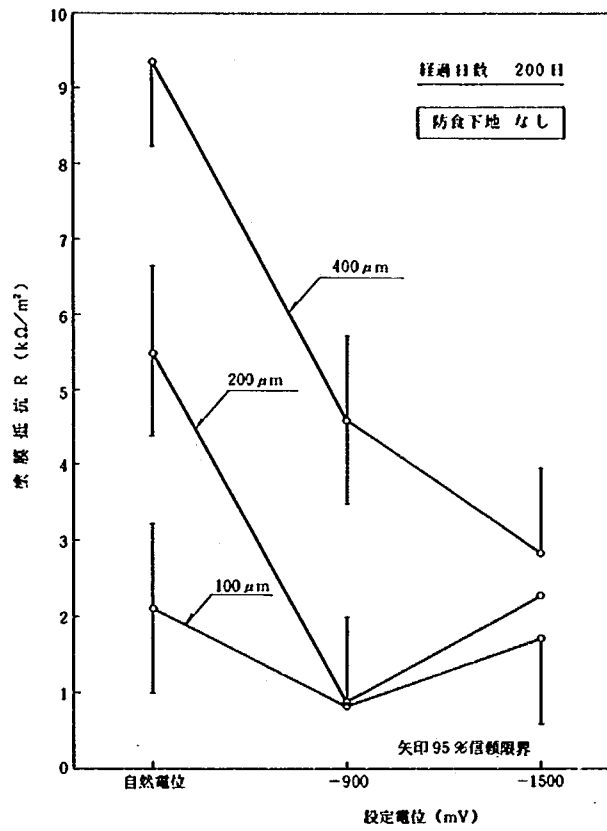


図 4-34 電位と膜厚の交互作用

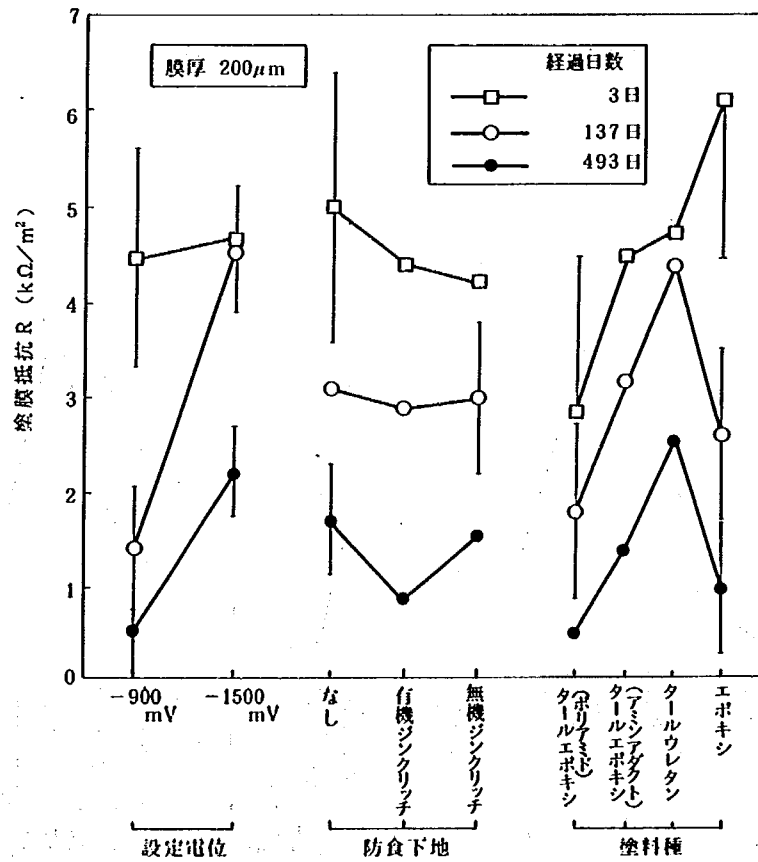


図 4-35 各要因の主効果

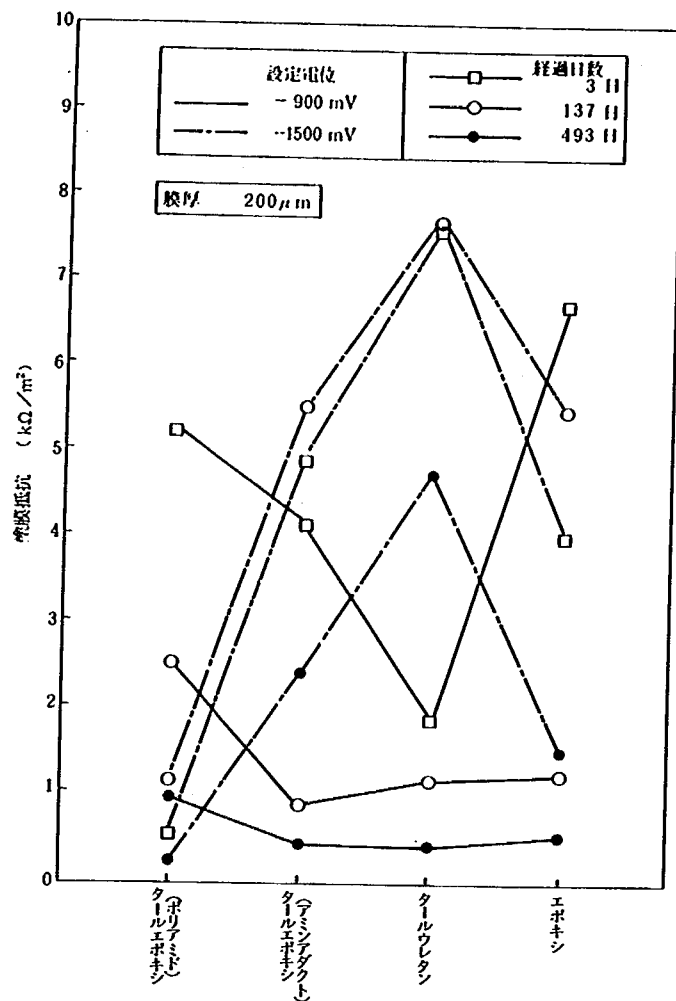


図 4-36 電位と塗料種の交互作用

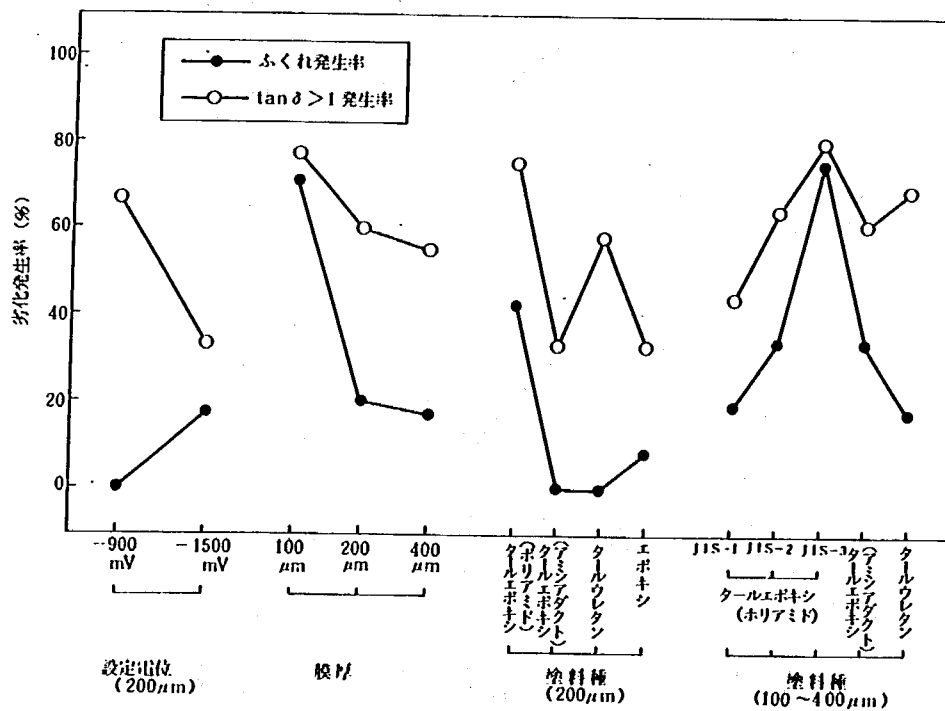


図 4-37 塗膜劣化発生率 (493日現在)

4.3 塗膜の性能試験

4.3.1 耐過防食試験

(1) 各種塗膜の性能比較

過防食条件下 (-2000 mV) における各種塗膜の耐久性を図4-38に示す。塗膜の耐久性は図中に示したふくれ発生形態に達したときを試験終了として、それまでの経過日数 (以下、耐久日数という) で示す。

- 1) ジンクリッチペイントを防食下地とした塗装系の耐久日数は防食下地のない塗装系よりも小さかった。
- 2) I-ZRPを防食下地とした塗装系の耐久性はO-ZRPを防食下地とした塗装系よりも良い結果を示した。
- 3) 防食下地のない塗装系で塗料種間の耐久性比較をすると、GFP (1, 2, 3, 4, 5) $\geq$ タールエポキシ (JIS-1種, ポリアミド), エポキシI (ピュアエポキシ) $>$ ビニル, 変性エポキシI $>$ タールエポキシ (JIS-3種, ポリアミド), タールウレタン, エポキシII (超厚膜型) $>$ 変性エポキシII $\geq$ エポキシIII (高PVC型), 塩化ゴムの順になった。

一方、防食下地のある塗装系では塗膜の耐久性は前述に比べて小さくなり、塗料種間の耐久性順序にも前述のような差異が見られなかった。

また、タールエポキシ、エポキシ、変性エポキシなどでは組成の違いにより耐久性の異なることが認められた。

(2) 防食下地の耐過防食性

ジンクリッチペイント塗装試験片の試験結果を表4-9に示す。いずれの試験片も20時間以内の短時間でふくれ発生や塗膜はく離が起こり、 -2000 mV , -1500 mV における耐久性の小さいことが認められた。またI-ZRP塗膜の電流はO-ZRPよりも大きい値を示したが、これは前者のほうが空隙やピンホールなどを生じ易いためと考えられる。

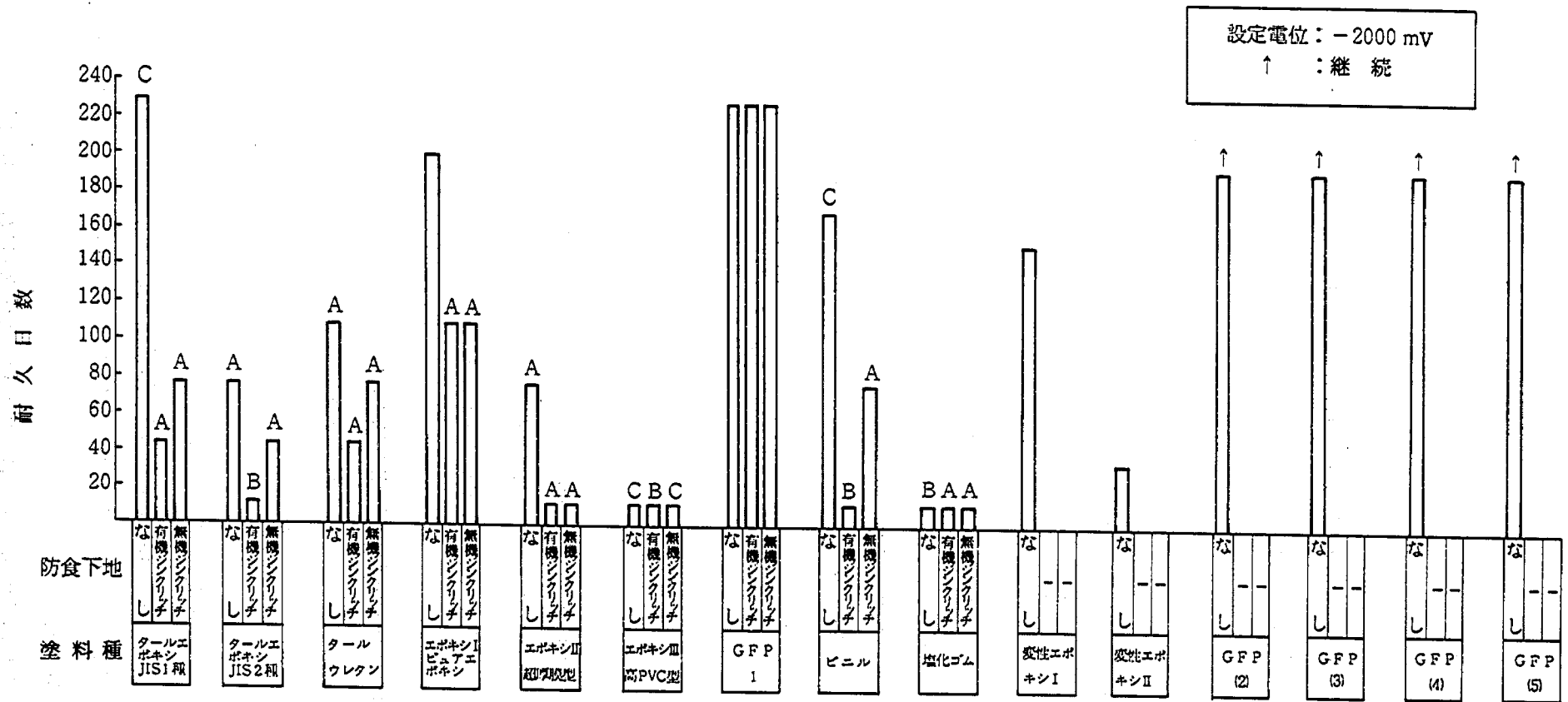
なお、塗膜劣化の外観的違いは次のとおりである。O-ZRP塗膜はふくれ発生およびその数割が壊れる程度に止まったが、I-ZRP塗膜は水素発生を伴いつつ塗膜が層内又は素地よりはく離する状態が認められた。

(3) 塗膜の顔料濃度の影響

塗膜中の顔料濃度の異なる塗装試験片の耐久性試験結果を図4-39に示す。

まず、設定電位 -2000 mV では、スクラッチのある場合いずれの塗装試験片にもふくれを生じ最長でも60日前後の耐久日数しか得られなかった。

一方、スクラッチのない場合には、高顔料濃度エポキシ試験片を除いて耐久日数は200日を超えている。



注) ふくれの発生形態

- A スクラッチを中心にふくれの大きさ(幅)が 10 mm 以内
- B スクラッチを中心にふくれの大きさ(幅)が 10 mm 以上
- C スクラッチ周辺に円形ふくれが発生

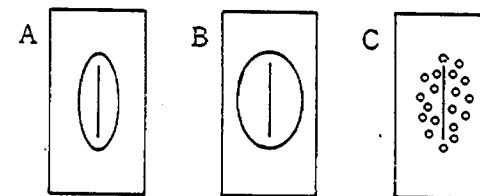


図 4-38 各種塗膜の性能比較試験結果

表4-9 防食下地の耐過防食性試験結果

塗料種	亜鉛末 含有量に よる分類	目標 膜厚 (μm)	設 定 電 位 (mV)	電 流 ($\text{mA}/4\text{cm}^2$)			塗 膜 外 観 (20 時間後)
				試 験 直 後	2 時間	20 時間	
有機ジンクリッチペイント (O-ZRP)	ダスト型	75	- 1500	0.018	0.053	6.18	白色析出物が全面付着 $\phi 1 \sim 2\text{mm}$ ふくれ全面発生
			- 2000	2.10	82.4	99.9	白色析出物が全面付着 $\phi 1 \sim 2\text{mm}$ ふくれ全面発生 ふくれの幾つかがはく離
	標準型	75	- 1500	0.002	0.005	0.10	白色析出物が全面付着 $\phi 1 \sim 2\text{mm}$ ふくれ全面発生 ふくれのはく離多い
			- 2000	0.36	0.24	1.97	白色析出物が全面付着 $\phi 1 \sim 2\text{mm}$ ふくれ全面発生 ふくれのはく離多い
無機ジンクリッチペイント (I-ZRP)	ダスト型	75	- 1500	0.03	0.37	2.25	白色析出物が全面付着 粗大面の塗膜はく離多い (素地露出)
			- 2000	51.5	14.4	12.7	白色析出物が全面付着 粗大面の塗膜はく離多い (素地露出)
	標準型	75	- 1500	4.91	5.42	2.67	白色析出物が全面付着 塗膜破壊による粗暴な表面 (素地露出なし)
			- 2000	81.7	89.8	95.0	白色析出物が全面付着 塗膜破壊による粗暴な表面 (素地露出なし)

ただし、高顔料濃度エポキシ試験片でも防食下地を用いた場合には耐久性は良好である。

設定電位が -900 mV の試験片では、スクラッチがあっても、いずれも良好な耐久性を示している。しかし、高顔料濃度の塗装試験片ではふくれが発生しやすい。

なお、電流値や塗膜抵抗減退率におよぼす塗膜の顔料濃度の影響を図4-40、4-41に示す。過防食条件下において低PVCエポキシは電流値が小さく、抵抗減退率も小さいが、高PVCエポキシは電流値が大きく、抵抗減退率も大きい結果を示し、塗膜の耐久性的観点から低PVCの方がよいことを示している。また過防食条件下における塗膜抵抗減退率は非電気防食塗膜よりも大きくなることが認められた。

(4) GFPの膜厚と耐久性

GFP(1)の塗膜($500\text{ }\mu\text{m}$, $1000\text{ }\mu\text{m}$)を -900 mV , -2000 mV の設定電位のもとで試験した結果を図4-43に示す。

なお比較のためにタールエポキシ(JIS-1種; ポリアミド, アミンアダクト)の $400\text{ }\mu\text{m}$ 塗膜の抵抗減退率を同図中に示している。

GFP(1)塗膜の抵抗値は、タールエポキシの場合よりも大きな値を示しているが、その抵抗減退率はタールエポキシの場合よりも大きいことが確められた。しかし、GFP(1)塗膜は、スクラッチのある場合でもふくれなどの劣化は見当らず、過防食条件下でも良好な耐久性を示しているようである。

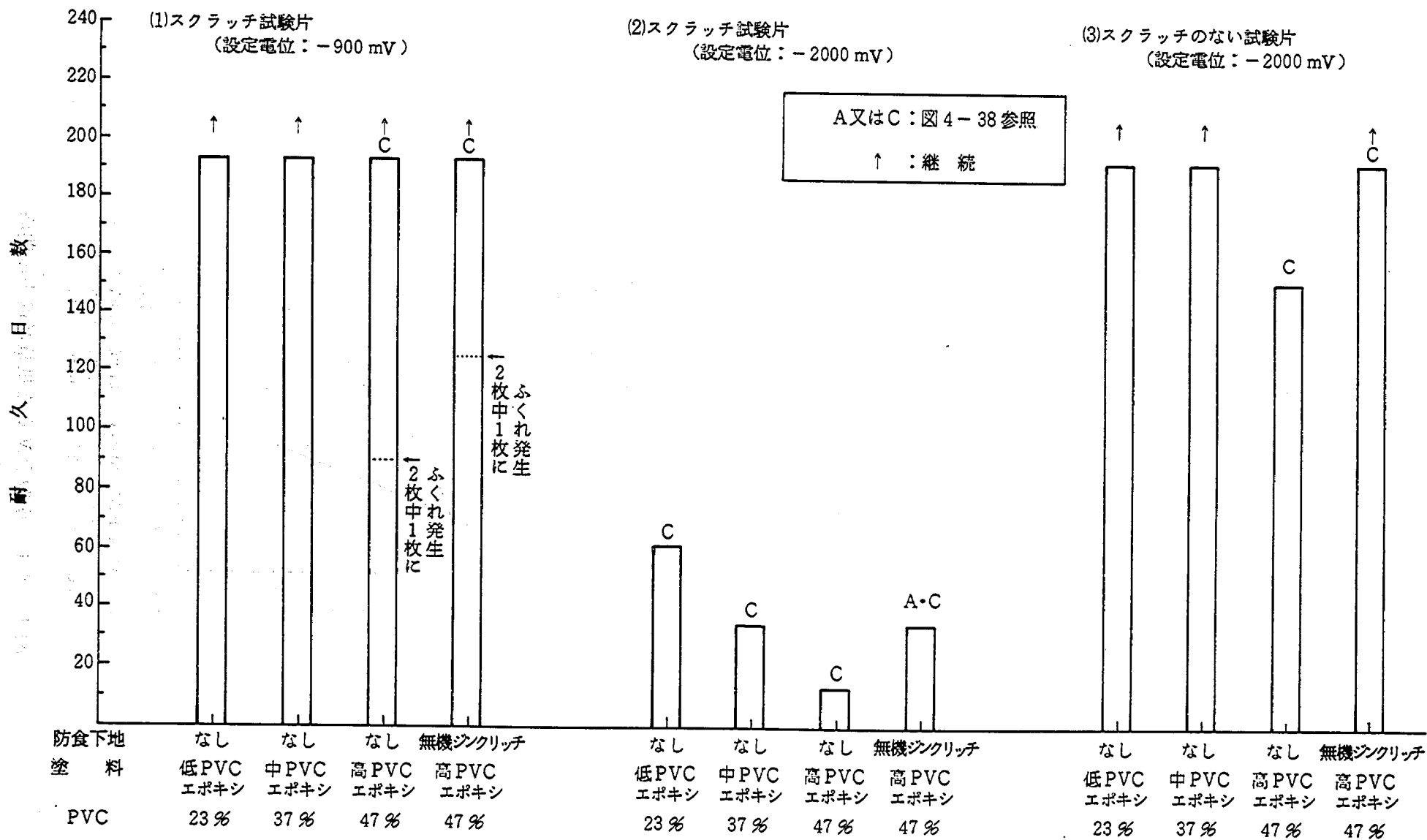


図4-39 塗膜の顔料濃度（PVC）の影響

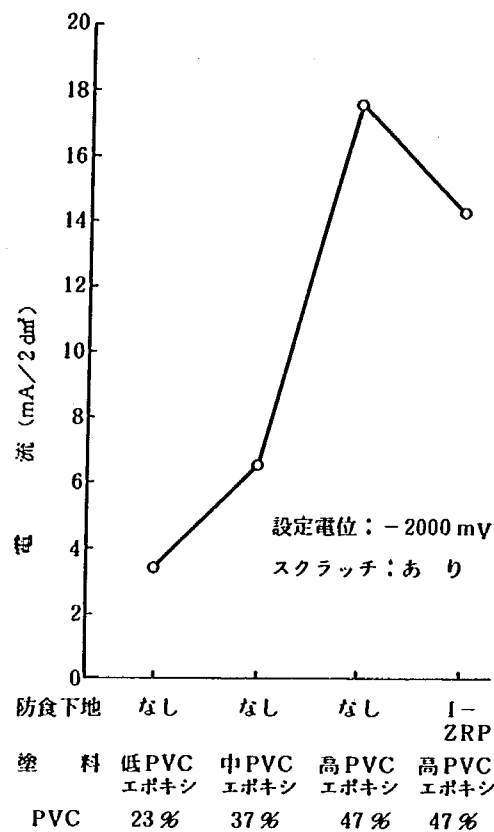


図 4-4 0 塗膜 P V C と電流測定値の関係

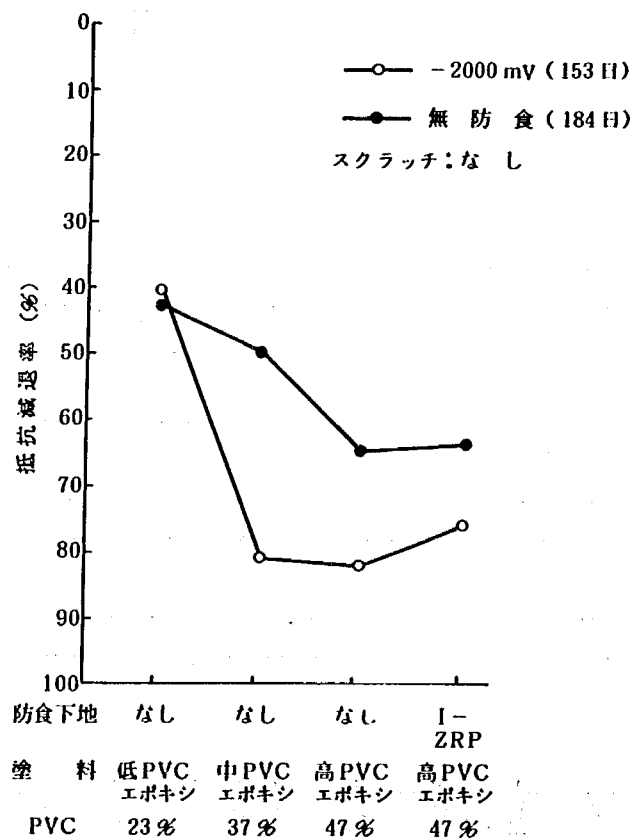


図 4-4 1 塗膜 P V C と抵抗減退率の関係

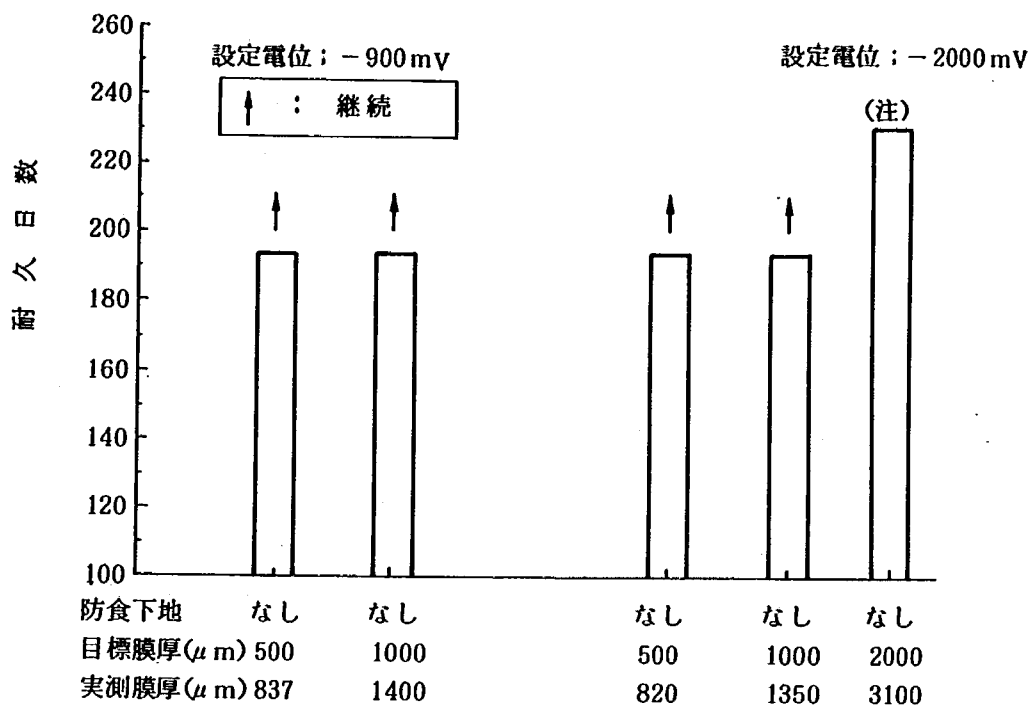


図4-42 GFP(1)の膜厚と耐過防食性(スクラッチ試験片)

注) 試験は中止したが、異常なし。

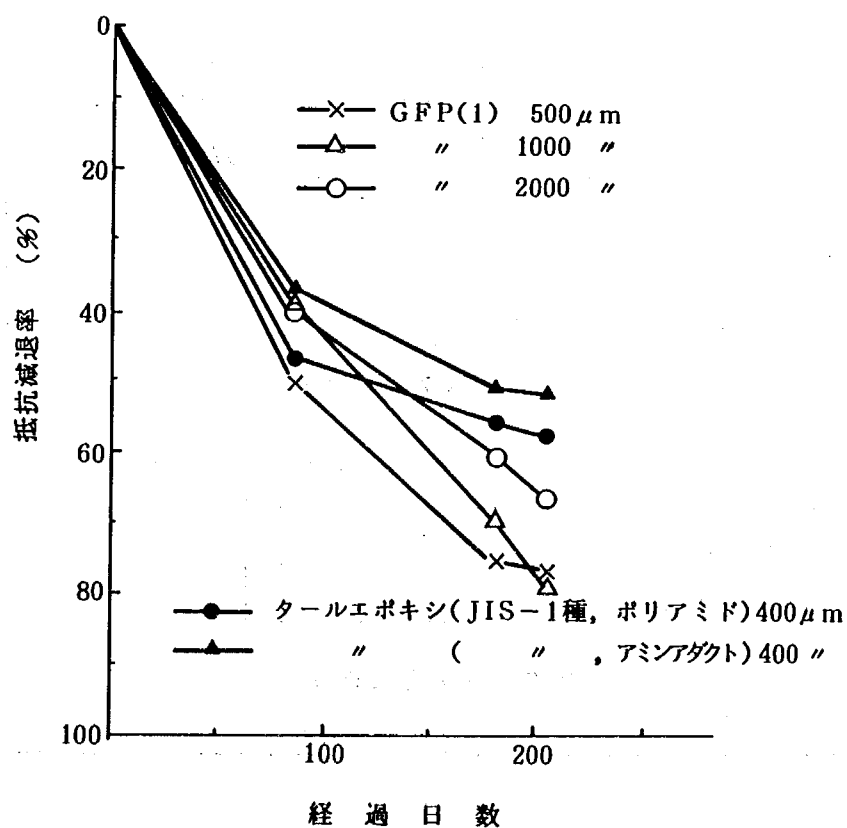


図4-43 GFP(1)の膜厚と塗膜抵抗減退率(スクラッチのない試験片)

4.3.2 塩水噴霧試験

塩水噴霧試験は表4-10に示すように2回に分けて行った。第1次試験では5400時間経過後に、試験片3枚の内2枚にスクラッチを入れた。5400時間以後にスクラッチ試験片にはさびやふくれが発生しはじめたが、その外観から塗料種の比較をすることがむずかしかった。9740時間（スクラッチを入れたのち4340時間）経過時点で、スクラッチ試験片2枚の内1枚の試験片の塗膜をハク離して試験片素地の腐食状態を調べた。観察結果を表4-11(1)に示す。第2次試験ではスクラッチのない試験片を用い、塩水噴霧試験が5000時間に達したところの外観状態を表4-11(2)に示す。この表より高PVCエポキシにはふくれ発生が認められた。

- 1) スクラッチのない試験片でさびやふくれの発生が認められたのはエポキシⅢ（高PVC型）、塩化ゴムの2種類であった。その観察結果を表4-12に示す。
- 2) 塗膜ハク離したスクラッチ試験片のスクラッチ部のさび幅をもとに防食下地及び塗料種間の比較を表4-13に示す。この表より有機及び無機ジンクリッチペイントを防食下地とした試験片のさび幅は防食下地のない塗装系よりも小さいことが認められた。また防食下地の効果は無機ジンクリッチペイントのほうが大きかった。

また、塗料種としてはGFP(1)、タールエポキシ（JIS-1種、ポリアミド）の2種類は他の塗料種より良い防食性を示した。

表4-10 塩水噴霧試験の経過

試験開始	試験時間				
	0	5000	5400	9740	11354
第1次試験	1枚め				} 継続
	2枚め		○		
	3枚め		○	○終了	
	スクラッチを入れる				
第2次試験	1枚め				} 継続
	2枚め	○			
	3枚め	○			
	スクラッチを入れる				

表4-11(1) 塩水噴霧試験結果

(1) 第1次塩水噴霧試験

スクラッチ	塗料種	経過時間 防食下地	通算: 5400時間 スクラッチ試験片: ———			通算: 9740時間 スクラッチ試験片: 4340時間			通算: 11354時間 スクラッチ試験片: 5954時間			塗膜はく離後のスクラッチ部のさび巾 (mm) (通算: 9740時間 スクラッチ試験片: 4340時間)								
			なし	O-ZRP	I-ZRP	なし	O-ZRP	I-ZRP	なし	O-ZRP	I-ZRP	なし			O-ZRP			I-ZRP		
												平均	最大	最小	平均	最大	最小	平均	最大	最小
あり	タールエポキシ (JIS-1種)	—	—	—	×	×	△	×	×	△	△	5	7	2	3	15	1	1	2	0
	タールエポキシ (JIS-3種)	—	—	—	△	△	△	△	△	△	△	3	4	1	1	3	0	0.5	1	0
	タールウレタン	—	—	—	×	△	×	×	△	×	×	5	7	2	1	5	0	0	0	0
	エポキシ(I) (ピュアエポキシ)	—	—	—	×	△	×	×	△	×	×	7	11	3	2	7	0	0.5	1	0
	エポキシ(II) (超厚膜型)	—	—	—	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	4	7	1	1.5	2	1	1	1.5	0
	エポキシ(III) (高PVC型)	—	—	—	×	△	○	×	△	○	○	8	14	2	1	2	0	0	0	0
	GFP (1) (ポリエステル)	—	—	—	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	2	8	0.5	0.5	1	0	0.5	1.5	0
	ビニル	—	—	—	×	△	×	×	△	×	×	5	7	2	1	1.5	0	0.5	1	0
	塩化ゴム	—	—	—	×	×	△	×	×	×	×	4	5	2	0.5	1	0	0	0	0
なし	タールエポキシ (JIS-1種)	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎									
	タールエポキシ (JIS-2種)	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎									
	タールウレタン	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎									
	エポキシ(I) (ピュアエポキシ)	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎									
	エポキシ(II) (超厚膜型)	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎									
	エポキシ(III) (高PVC型)	×	◎	◎	×	◎	◎	×	○	○	○									
	GFP (1) (ポリエステル)	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎									
	ビニル	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎									
	塩化ゴム	○~△	◎~○	△~×	×	◎	×	×	×	○	×									

表4-11 (2) 第2次塩水噴霧試験

スクラッチ	経過時間		通算：3480時間	通算：5000時間
	塗料種	防食下地	スクラッチ な し	スクラッチ な し
なし	変性エポキシ (I)		◎	◎
	変性エポキシ (II)		◎	◎
	GFP (2)		◎	◎
	GFP (3)		◎	◎
	GFP (4)		◎	◎
	GFP (5)		◎	◎
	低PVCエポキシ(L)		◎	◎
	中PVCエポキシ(M)		◎	◎
	高PVCエポキシ(H)		○～△	△
	高PVCエポキシ(HI)		◎	◎
	GFP (1) 500 μ m		◎	◎
	GFP (2) 1000 μ m		◎	◎

表4-12 塩水噴霧試験結果

(スクラッチのない試験片で変化の認められるもの)

試験開始	塗 装 仕 様			塗膜劣化の状況 (11354時間経過時)
	塗料種	防食下地	膜厚	
第1次試験	エポキシ (高PVC型)	—	標準	1200時間で点さび発生があり、その後、塗膜下でのさび進行が著しい (さび評点2)
		I-ZRP	〃	8240時間で点さび発生 (8～4点) があり、その後の変化はない
	塩化ゴム	—	標準	1200時間で点さび発生があり、その後、点さび発生が増加 (さび評点6)
		I-ZRP	〃	1200時間でふくれ発生があり、その後、ふくれの大きさ、頻度が進行 (6-HL)
第2次試験	高PVC エポキシ (H)	—	200	3800時間でふくれ発生があり、その後の変化はわずかである

表 4-13 塩水噴霧試験における塗料種とスクラッチ部のさび巾との比較
(塗膜はく離後)

銷 幅	塗 料 種
3 mm 以下	タールエポキシ (J I S-3 種) GFP (1)
6 mm 以下	タールエポキシ (J I S-1 種) タールウレタン ビニル 塩化ゴム
6 mm 以上	エポキシ I (ピュアエポキシ) エポキシ III (高PVC型)

4.3.3 海水浸漬試験

海水に浸漬した塗装試験片 (非電気防食) の外観観察結果のうち欠陥の見られる試験片について表 4-14 に記した。

長期浸漬用試験片は 444 日、塗膜抵抗測定用試験片は 184 日経過したが、さび又はふくれが生じた試験片はいずれも防食下地のない塗装系で膜厚が 100 μ m, 200 μ m の試験片であることが多い。一方、ジंकリッチペイントを防食下地にした試験片では膜厚が 100 μ m のものでもさびやふくれは発生しなかった。

海水浸漬試験片の塗膜抵抗や塗膜抵抗減退率を表 4-15 に示した。またこれらをまとめて表 4-16 に示した。塗膜抵抗や塗膜抵抗減退率と外観評価との関係などを求めたものが図 4-44, 4-45 である。184 日時点での塗膜の外観と塗膜抵抗、塗膜の外観と塗膜抵抗減退率との間の相関係数は各々 0.237 と 0.076 でありこれらの間に相関性は無い。つまり海水浸漬試験の場合、塗膜抵抗が小さいからふくれが出やすいとはいえないようである。また塗膜抵抗と塗膜抵抗減退率との関係も小さい。

表4-14 海水浸漬試験片の外観評価結果

塗 装 仕 様			長 期 浸 漬 用 試 験 片		塗 膜 抵 抗 測 定 用 試 験 片		現 状 での 総合判定
塗 料 種	防 食 地	膜 厚 (μm)	劣 化 状 態	444日 の判定	劣 化 状 態	184日 の判定	
タールエポキシ (JIS-1種, ポリアミド)	なし	100	374日にふくれ(8-M)を 認めた。その後の変化なし	○	140日にふくれ(8-M)と 点さび(3コ)とを認めた。そ の後の変化なし	○	○
タールエポキシ (JIS-2種, ポリアミド)	なし	100	異常なし	◎	112日に3枚中1枚に点さび (1コ)とを認めた。その後の 変化なし	◎	◎
タールエポキシ (JIS-3種, ポリアミド)	なし	100	220日にふくれ(8-M)を 認めた。その後ふくれの大き さ, 頻度の増加あり	△~×	112日に3枚中2枚に点さび (3コ)を認めた。その後変 化なし	◎	△
タールエポキシ (JIS-1種, アミンアダク ト)	なし	100	374日にふくれ(8-M)を 認めた。その後の変化なし	○	112日にふくれ(6-vs)と 点さび(8コ)とを認めた。 その後, ふくれ・さびともに 進行した	×	△
エポキシⅡ (超厚膜型)	なし	1000	異常なし	◎	112日に3枚中1枚に点さび (2コ)を認めた。その後の変 化なし	◎	◎
エポキシⅢ (高PVC型)	なし	200	90日にさび(8点)を認めた。 その後, さびの進行が著しい	×	—	—	×
塩化ゴム	なし	200	220日にさび(8点)を認めた。 その後の変化なし	○	異常なし	◎	○

注) 試験片の外観評価及び判定は資料集による。

表 4 - 15 海水浸漬試験片の塗膜抵抗減退率

(測定 ; 交流ブリッジ 1 KHZ)

塗 料 種	膜 厚 (μm)	初 期 値 ($K\Omega/2dm^2$)	抵 抗 減 退 率 (%)		
			86日	184日	205日
タールエポキシ (JIS-1種, ポリアミド)	100	406	39	45	44
	200	784	47	54	54
	400	1324	47	56	58
タールエポキシ (JIS-2種, ポリアミド)	100	204	17	27	34
	200	522	45	48	49
	400	910	26	39	40
タールエポキシ (JIS-3種, ポリアミド)	100	126	23	38	38
	200	445	35	44	44
	400 (O-ZRP)	726	33	39	29
	400 (I-ZRP)	690	34	42	45
タールエポキシ (JIS-1種, アミンアダクト)	100	314	51	61	70
	200	740	49	55	62
	400	1387	37	51	52
タールウレタン	100	251	78	88	—
	200	693	70	71	—
	400	1050	67	67	—
エポキシ I (ピュアエポキシ)	100	237	54	58	60
	200	507	47	51	57
	400	912	46	52	52
GFP (1)	500	3900	51	75	77
	1000	5177	39	70	79
	2000	8068	40	61	67

塗 料 種	膜 厚 (μm)	初 期 値 ($K\Omega/2dm^2$)	抵 抗 減 退 率 (%)		
			86日	184日	205日
エポキシ II (超厚膜型)	1000	580	90	100	100
ビニル	200	630	7	19	31
塩化ゴム	180	679	28	40	41
変性エポキシ (I)	400	437	13	39	45
変性エポキシ (II)	400	302	1	2	5
GFP (2) (イソフタル酸系)	1500	10221	14	52	62
GFP (3) (ビスフェノール系)	1500	6443	1	38	53
GFP (4) (ビニルエステル系)	1500	7003	28	59	67
GFP (5) (エポキシ系)	1500	1519	40	55	56
低PVC エポキシ (L)	200	481	28	43	36
中PVC エポキシ (M)	200	322	43	50	51
高PVC エポキシ (H)	200	278	58	65	67
高PVC エポキシ (HI)	200	366	58	64	62

表4-16 海水浸漬試験結果(まとめ)

塗料種	膜厚 (μm)	初期値 ($\text{K}\Omega/\text{2dm}^2$)	抵抗減退率(%)			抵抗値* ($\text{K}\Omega/\text{2dm}^2$)	外観による評価	
			86日	184日	205日		184日	
タールエポキシ(JIS-1種, ポリアミド)	100	406	39	45	44	223	○	1
	200	784	47	54	54	361		0
	400	1324	47	56	58	583		0
タールエポキシ(JIS-2種, ポリアミド)	100	204	17	27	34	149	◎	1
	200	522	45	48	49	271		0
	400	910	26	39	40	555		0
タールエポキシ(JIS-3種, ポリアミド)	100	126	23	38	38	78	△	2
	200	445	35	44	44	249		0
	400	726	33	39	29	443		0
	400(O-ZRP)	690	34	42	45	400		0
タールエポキシ(JIS-1種, アミンアダクト)	100	314	51	61	70	122	△	2
	200	740	49	55	62	333		0
	400	1387	37	51	52	680		0
タールウレタン	100	251	78	88		30		0
	200	693	70	71		201		0
	400	1050	67	67		347		0
エポキシⅡ (ピュアエポキシ)	100	237	54	58	60	100		0
	200	507	47	51	57	248		0
	400	912	46	52	52	438		0
GFP(Ⅰ)	500	3900	51	75	77	975		0
	1000	5177	39	70	79	1553		0
	2000	8068	40	61	67	3147		0
エポキシⅡ(超厚膜型)	1000	580	90	100	100	0	◎	1
ビニル	200	630	7	19	31	510		0
塩化ゴム	180	679	28	40	41	407	○	1
変性エポキシ(Ⅱ)	400	437	13	39	45	267		0
変性エポキシ(Ⅲ)	400	302	1	2	5	296		0
GFP(2)(イソフタル酸系)	1500	10221	14	52	62	4906		0
GFP(3)(ビスフェノール系)	1500	6443	1	38	53	3995		0
GFP(4)(ビニルエステル系)	1500	7003	28	59	67	2871		0
GFP(5)(エポキシ系)	1500	1519	40	55	56	684		0
低PVCエポキシ(L)	200	481	28	43	36	274		0
中PVCエポキシ(M)	200	322	43	50	51	161		0
高PVCエポキシ(H)	200	278	58	65	67	97	×	3
高PVCエポキシ(HI)	200	366	58	64	62	132		0

(注) 異常なしを0

○ ◎ を1

△ を2

× を3

* 184日の値

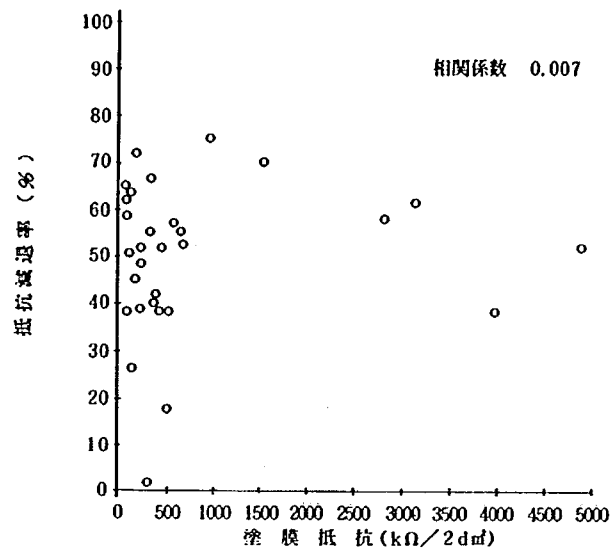


図 4 - 4 4 塗膜抵抗と塗膜抵抗減退率との関係

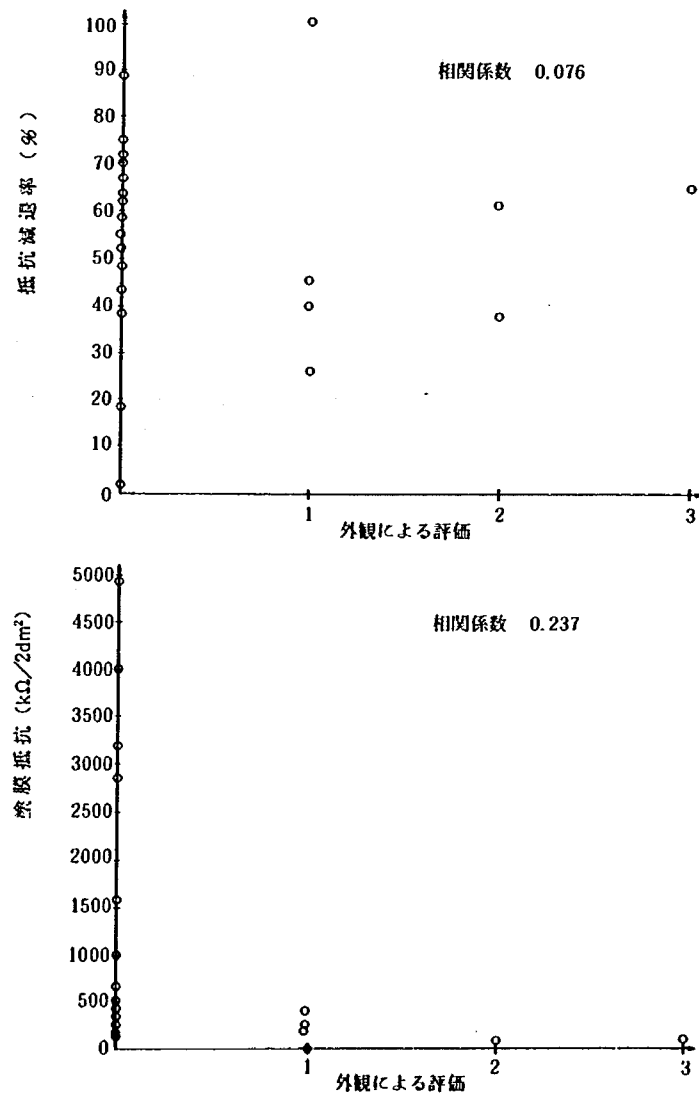


図 4 - 4 5 外観評価と塗膜抵抗減退率，塗膜抵抗との関係

4.4 塗装系の耐久性に関する考察

塗装鋼材の電気防食試験や過防食試験、塩水噴霧試験、海水浸漬試験において各種の塗装を施した試験片の耐久性を調査してきた。

表4-17には昭和54年および昭和55年度で得られた結果を整理してみた。また表4-18に塗膜の総合評価を行った。まだ試験の途中であり中間的な評価しか下しえないがおよそ次のようにはいえよう。

(1) 各試験間の相関性

たとえば、防食下地の効果について見れば塗装鋼材の電気防食試験（設定電位 -900mV ）においては防食下地の効果は明らかにあらわれている。他方、過防食試験では防食下地は逆の効果を及ぼしている。塩水噴霧試験と海水浸漬試験の結果からは防食下地の効果はわずかながらあらわれている。

次に、塗料種の耐久性の比較例としてタールエポキシ（JIS-1種、ポリアミド系）とタールウレタンとを比較する。塗装鋼材の電気防食試験（設定電位 -900mV ）ではタールウレタン系が良好であるようにみえるが、過防食試験や塩水噴霧試験、海水浸漬試験のいずれも両種類間の耐久性の差は得られない。

以上のように、電気防食試験と他の試験法との間にはいままでのところでは明確な対応関係は得られていないものもある。さらに長期間塗装鋼材の電気防食試験を続ける過程で相関が得られることも考えられ、これらの試験を続けることにする。

(2) 電位の効果

設定電位が -900mV をこえ、 -1500mV 、 -2000mV となるにともない塗膜の劣化が急速に進む傾向にある。とくにスクラッチのある塗膜の劣化が低電位条件下で著しいことから、実用上の防食電位はほぼ -1000mV が下限であり -1500mV や -2000mV の防食電位は、塗装併用電気防食の設計において設定してはならないと考える。

表 4-17 塗装系の耐久性評価 (試験項目ごとの結果)

塗 料 種	下地防食	牌 号	塗装鋼材の電気防食試験												過防食試験 -2000 mV	塩水噴霧試験		海水浸漬試 験
			-900 mV			-900mV.スクラッチあり			-1500 mV			-1500mV.スクラッチあり				スクラッチ なし	スクラッチ あり	
			100	200	400	100	200	400	100	200	400	100	200	400				
タールエポキシ (JIS-1種) (ポリアミド)	なし	1	×	○	○	×	×	△	×	×	○	×	×	×	○	○	×	○
	O-ZRP	2	○	○	○	○	○	△	○	○	○	×	×	×	△	○	×	○
	I-ZRP	3	○	○	○	△	△	△	○	○	○	×	×	×	△	○	×	○
タールエポキシ (JIS-2種) (ポリアミド)	なし	4	×	○	○				×	×	○	×	×	×	△			
	O-ZRP	5		○							○							
	I-ZRP	6		○														
タールエポキシ (JIS-3種) (ポリアミド)	なし	7	×	○	○				×	×	×				△	○	△	△
	O-ZRP	8		○											×	○	△	○
	I-ZRP	9		○											△	○	△	○
タールエポキシ (JIS-1種) (アミンアダクト)	なし	10	×	○	○				×	○	○							△
	O-ZRP	11		○						○								○
	I-ZRP	12		○						○								○
タールウレタン	なし	13	○	○	○				○	○	○				○	○	×	○
	O-ZRP	14		○						○					△	○	△	○
	I-ZRP	15		○						○					△	○	×	○
エポキシ I (ビュアエポキシ)	なし	16		○				△		×			×		○	○	×	
	O-ZRP	17		○				△		○			×		○	○	△	
	I-ZRP	18		○				△		○					○	○	△	
エポキシ II (超厚膜型)	なし	19											×		△	○	×	
	O-ZRP	20													×	○	○	
	I-ZRP	21													×	○	○	
エポキシ III (高PVC型)	なし	22													×	×	×	×
	O-ZRP	23													×	○	△	×
	I-ZRP	24													○	○	○	
G.F.P (1) (ポリエステル系)	なし	25													○	○	○	
	O-ZRP	26													○	○	○	
	I-ZRP	27													○	○	○	
ビニル	なし	28													×	○	×	
	O-ZRP	29													○	○	△	
	I-ZRP	30													×	○	×	
塩化ゴム	なし	31													×	×	×	
	O-ZRP	32													×	○	×	
	I-ZRP	33													○	×	×	
変性エポキシ (I)	なし	34													△			
変性エポキシ (II)	なし	35													○			
G.F.P (2) (イソフタル酸系)	なし	36													○			
G.F.P (3) (ビスフェノール系)	なし	37													○			
G.F.P (4) (ビニルエステル系)	なし	38													○			
G.F.P (5) (エポキシ系)	なし	39													○			
エポキシ (L) (低PVC型)	なし	40																
エポキシ (M) (中PVC型)	なし	41																
エポキシ (H) (高PVC型)	なし	42																
エポキシ (HI) (高PVC型)	I-ZRP	43																
3362 時間																1135時間	5959 時間	444日での 外観評価

表4-18 塗膜の総合評価 (中間結果)

判定	条件 試験名 評価方法	電 気 防 食		非 電 気 防 食	
		電気防食特性試験	耐過防食試験	塩水噴霧試験	海水浸漬試験
		設定電位-900mV および-1500mV でのふくれ発生率	設定電位-2000mV での耐久日数 (防食下地なし)	スクラッチ部のさび 巾	ふくれ発生率と塗膜 抵抗減退率
◎		タールウレタン	タールエポキシ (JIS-1種, ポリアミド) エポキシ (ピュアエポキシ) GFP (1, 2, 3, 4, 5)	GFP (1)	表3-16から下記 塗料種を除く全ての 塗料種
○		タールエポキシ (JIS-2種, ポリアミド) タールエポキシ (JIS-1種, アミン アダクト) エポキシ (ピュアエポキシ)	ビニル 変性エポキシ (I)	タールエポキシ (JIS-3種, ポリアミド)	タールエポキシ (JIS-1種, ポリアミド, 100 μm)
△		タールエポキシ (JIS-1種, ポリアミド) タールエポキシ (JIS-3種, ポリアミド)	タールエポキシ (JIS-3種, ポリアミド) タールウレタン エポキシ II (超厚膜型)	タールエポキシ (JIS-1種, ポリアミド) タールウレタン ビニル 塩化ゴム	タールエポキシ (JIS-3種, ポリアミド, 100 μm) タールエポキシ (JIS-1種, アミン アダクト, 100 μm)
×			エポキシ III (高PVC型) 塩化ゴム 変性エポキシ	エポキシ III (高PVC型) エポキシ I (ピュアエポキシ)	エポキシ III (高PVC型)

5. 総括

以上の試験結果を総括すると次のとおりである。

5.1 裸鋼材の電気防食特性試験

- 1) 防食率は標準環境、流速環境のいずれにおいても -800 mV より卑な電位で95%以上の値を示した。
- 2) 標準環境において、防食電流密度は $1.5\sim 3.8\text{ mA/m}^2$ の範囲で安定した値を示した。流速環境では、 $1.25\sim 5.50\text{ mA/m}^2$ と大きな値を示した。
- 3) 鋼材の表面状態が異なっても定常状態における防食電流はほぼ一定の値を示すことが確かめられたが、定常状態に至る時間は異なり、発錆処理鋼はサンドブラスト処理鋼に比べて長時間を必要とするだけでなく、累積電気量も多く必要とした。
- 4) 鋼材の自然電位は標準環境においては -700 mV 、流速環境においては -600 mV であった。

5.2 塗装鋼材の電気防食特性試験

- 1) 塗装鋼材の防食電流密度は大部分 0.5 mA/m^2 以下の範囲にあり、無塗装材の $1/100$ ないし $1/1000$ の電流しか必要としなかった。また、一部の塗装系を除いては塗装鋼材にはふくれなども発生せず、塗装鋼材自身長期の耐久性があることも確かめられた。
- 2) 設定電位が -1500 mV 、膜厚が不十分な場合($200\text{ }\mu\text{m}$ 以下)、スクラッチ入りの場合などの苛酷な条件下では約3ヶ月経過後から電流が増大し始める試験片があり、その大きさは $10\sim 100\text{ mA/m}^2$ に達する場合があった。なお、電流密度が 0.5 mA/m^2 を超えると、試験片の塗膜はふくれを発生する傾向にある。
- 3) 設定電位 -900 mV に比べて -1500 mV のほうが電流密度が 0.5 mA/m^2 を超える確率が大きくかつふくれ発生率も高い。けれども 0.5 mA/m^2 以下の試験片の塗膜抵抗は -1500 mV の方が高く、電流密度と塗膜抵抗の間には良い相関を示すなどの点も明らかとなった。
- 4) 電気防食条件下では塗膜抵抗の減衰が促進され、その傾向は設定電位 -1500 mV の場合よりも -900 mV の方が顕著であった。なお塗膜のふくれ発生率が増大するのは塗膜抵抗が $10^2\text{ }\Omega/\text{m}^2$ 以下、 $\tan\delta$ 値が1以上の場合である。
- 5) 電気防食条件下では、ふくれの発生を抑えるには、一般には膜厚は $200\text{ }\mu\text{m}$ 以上が必要である。ただし適正な電位設定や防食下地塗装を用いることによってふくれの発生を低減することが可能である。

たとえば膜厚 $200\text{ }\mu\text{m}$ 以下では、防食下地を必要とし、しかもその効果は有機ジンクリッチペイントよりも無機ジンクリッチペイントのほうが優れていた。ただしこの場合でも電位は -1500 mV としてはならない。

6) 電気防食条件下においてタールエポキシ塗料の耐久性は、JIS-2種、JIS-1種、JIS-3種の順に良好であった。

-1500 mVにおいて良好な耐久性を示した塗料種は、タールウレタンとタールエポキシ (JIS-1種、アミンアダクト) のみであった。

5.3 塗膜の性能試験

1) 耐過防食試験においては、低PVCエポキシ(23%)は高PVCエポキシ(47%)よりも良好な耐久性を示した。

2) 過防食条件下においてジンクリッチペイント単独塗膜は20時間程度で劣化することから、水素発生領域ではジンクリッチペイントのような凝集力の小さい塗膜の使用は不適當である。

3) 塩水噴霧試験において、ジンクリッチペイントを防食下地とした塗装系のスクラッチ部の錆進行は小さく、この防錆の効果は無機ジンクリッチペイントが有機ジンクリッチペイントより大きい。ガラスフレーク充填ポリエステル (GFP) とタールエポキシ (JIS-3種、ポリアミド) の2種類が良好な耐塩水噴霧性を示した。

4) 海水浸漬試験においてさびやふくれの発生は、タールエポキシ (JIS-1種、JIS-2種、JIS-3種ポリアミド) とタールエポキシ (JIS-1種、アミンアダクト) の100 μ m塗膜に見られた。しかし、これら塗料種でも膜厚200 μ m、400 μ mにはさびやふくれの発生はなかった。また上記以外に錆発生が見られた塗膜は、エポキシⅢ (高PVC型)、エポキシⅡ (超厚膜型)、塩化ゴムの3種類であった。

あとかき

昭和54年度より始めた本研究は昭和57年度まで継続する予定である。電気防食技術のうちこれまで未解明であった部分が一連の体系的な研究でかなりの程度まで明らかにしえたように思う。

今後とも財団法人土木研究センターおよび委員、幹事の方々の御協力と御助言を得て研究を積極的に遂行する予定である。

電気防食の設計法に関する研究

ISSN 0386-5878

土木研究所資料 第1783号

マイクロフィルム第 号

昭和57年 3 月 (1982)

片 脇 清

キーワード 海域 鋼構造物 電気防食 塗装 防食 設計 潮流

要 旨

土木構造物を対象として新しく電気防食設計・施工指針を作成するための技術資料を得ようとして、各種実験を建設省土木研究所と財団法人土木研究センターは共同研究を進めている。本資料は、昭和54年および55年度の研究成果をとりまとめたものである。

○