

ISSN 0386—5878⁸
土木研究所資料第2121号
マイクロフィルム第 号

土木研究所資料

電気防食の設計法に関する研究
最 終 報 告 書

昭和59年3月

建設省土木研究所
財団法人 土木研究センター

Copyright ©1984 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。

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及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、電気防食の効果的な利用方法を確立するための基礎資料を得る目的をもって、「電気防食の設計法に関する研究」と題して、建設省土木研究所および財団法人土木研究センターの共同研究として、昭和54年度から研究が開始された。

研究の内容を大別すると次のとおりである。

- 1) 裸鋼材の電気防食特性試験
- 2) 流速環境下での電気防食特性試験
- 3) 塗装鋼材の電気防食特性試験
- 4) 塗膜の性能試験

共同研究は、昭和54年度から始まり昭和57年度で終了するという4カ年計画で進められた。

実験は、建設省土木研究所にある各種試験装置を使用して、種々の環境下における特性試験を行い、貴重なデータを数多く採取することができた。これらのデータを用いて解析を行い、各年度ごとに報告書としてまとめ、これまで第3報まで作成している。

本報告書は、共同研究の最終年度である昭和57年度に実施した実験と、これまでの成果を総合し、体系的に整理し、最終報告書としてまとめたものである。

本研究が所期の成果をあげることができたのは、これひとえに委員・幹事諸氏のご理解とご尽力によるところが極めて大きく、特に幹事諸氏には、多大のご苦勞をおかけした。ここに深く感謝の意を表するものである。

昭和58年3月

委員長 玉 野 治 光

ま え が き

海岸構造物だけでなく、道路構造物等の土木鋼構造物が腐食性の苛酷な海域に設置される例が多くなるにともない腐食に対する認識が高まり積極的な腐食対策を行うようになってきている。

電気防食は、腐食性の厳しい海域に建設される鋼構造物の海中部及び海底土中部の防食に極めて有効であり、信頼性の高い防食方法である。しかしながら、土木鋼構造物に電気防食を適用する場合の設計法に関する公的基準等の整備が不十分なため、土木鋼構造物の電気防食が必ずしも適正には行われていない現状にある。

そこで、建設省土木研究所と(財)土木研究センターは、昭和54年～57年度の4年間にわたり、共同研究として「電気防食の設計法に関する研究」を実施した。その結果、海域の環境条件に応じた防食電位、防食電流密度等の電気防食の設計条件に関する新しい知見を得た。

本報告は最終報告書としてこれらの成果をとりまとめたものである。

この共同研究の成果をもとに、海域に建設される土木鋼構造物の電気防食に関する基本的な設計が行えるよう、電気防食設計上、特に必要な事項をとりまとめて「電気防食設計指針(案)同解説」をとりまとめているので是非参考にさせていただくことを願います。

共同研究の実施にあたっては「電気防食委員会(委員長 玉野治光氏)」が設置されて研究計画の立案、実験の遂行、成果のとりまとめが行なわれた。ここに氏名を記して厚く謝意を表する次第である。

電 気 防 食 委 員 会 名 簿

(敬称略・50音順)

(昭和・年)

委員長	玉 野 治 光	首都高速道路公団	(54～57)
委 員	小 林 豊 治	日本防蝕工業株式会社	(54～57)
々	佐 藤 靖	大日本塗料株式会社	(54～57)
々	田 中 柳之助	鋼 管 杭 協 会	(54～57)
々	戸 村 寿 一	中川防蝕工業株式会社	(54～57)
々	蒔 田 実	建設省土木研究所	(54～57)
々	吉 野 久 雄	中川防蝕工業株式会社	(54～57)
幹事長	森 芳 德	建設省土木研究所	(54～57)
幹 事	石 川 光 男	日本防蝕工業株式会社	(54～57)
々	飯 島 勇	中川防蝕工業株式会社	(55～57)
々	瓜 谷 詔 夫	大日本塗料株式会社	(54～55)
々	落 合 直 隆	中川防蝕工業株式会社	(54～56)
々	片 脇 清 士	建設省土木研究所	(54～57)
々	篠 原 稔 雄	大日本塗料株式会社	(56～57)
々	白 水 司	中川防蝕工業株式会社	(56～57)
々	田 村 祐 一	日本防蝕工業株式会社	(54～57)
々	辻 敏 幹	大日本塗料株式会社	(56～57)
々	星 野 稔	大日本塗料株式会社	(54～55)
々	山 本 郁 雄	中川防蝕工業株式会社	(54～57)
事務局	荒 居 昇	財団法人 土木研究センター	(54～57)
々	篠 田 米 蔵	財団法人 土木研究センター	(54～57)

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
3.2 流速環境下での電気防食特性試験	15
3.3 塗装鋼材の電気防食特性試験	19
3.4 塗膜の性能試験	23
4. 試験結果および考察	38
4.1 裸鋼材の電気防食特性試験	38
4.2 流速環境下での電気防食特性試験	56
4.3 塗装鋼材の電気防食特性試験	65
4.4 塗膜の性能試験	84
4.5 塗装系の耐久性に関する考察	112
5. 総 括	115
5.1 裸鋼材の電気防食特性試験	115
5.2 流速環境下での電気防食特性試験	115
5.3 塗装鋼材の電気防食特性試験	116
5.4 塗膜の性能試験	116
5.5 電気防食条件下での塗装系の選定	117
あ と が き	118

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、条件およ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、流速環境下で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) 流速環境下における電気防食特性試験

鋼の腐食および防食に及ぼす流速の影響は大きい、詳細については不明な点が多い。ここでは沖合を想定し、裸鋼材を中心に（一部塗装鋼材を含む）試験を行い、流速に応じた最適な防食条件を把握する。

(3) 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。

(4) 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4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、塗膜の顔料濃度の影響、ガラスフレーク入り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) 適正電位選択試験

防食下地としてのジंकリッチペイントの適正電位を調べる。

3) 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。

4) 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、海水による劣化状態を観察する。

2.2 試験液と試験装置

2.2.1 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。海水の分析結果を下の表に示す。

pH	比抵抗	DO	COD	SO_4^{2-}	Cl^-
8.25	19.3 $\Omega\text{-cm}$	8.6 ppm	8.0 ppm	2700 ppm	19300 ppm

2.2.2 試験装置

各種試験水槽および付属装置状態を図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 $1.5 \times 3.0 \times 0.7 \text{ m}$ 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，石英ヒーター部を經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（ $5 \sim 35^\circ\text{C}$ の水温設定が可能である）。なお，水温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。（図2-3）

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2-4(1)に並列型の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。水温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。試験片は同図に示す3つの取付枠に固定され，各取付枠ごとに電位または電流の設定が可能である。

図2-4(2)に直列型の流速試験装置の概略を示す。断面積の異なる試験取付枠が直列に接続されており，1回の試験で5種類の流速の試験を行うことができる。

これらの装置を用い，沖合を想定した流速環境下で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 $3.5 \times 3.0 \times 0.7 \text{ h m}$ 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°C ）に保たれている。（図 2-3）

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（ $0.3 \times 0.6 \times 0.35 \text{ h m}$ ）は、「裸鋼材の電気防食特性試験」の一部で使用する。

又、寸法が $2.0 \times 0.5 \times 0.4 \text{ h m}$ の浸漬水槽では「塗膜の性能試験」のうち「耐過防食試験」、「適正電位選択試験」、「海水浸漬試験」を行う。

(5) 塩水噴霧試験機

本装置は J I S 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 I S O 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。

2.2.3 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（以下ポテンショスタットという）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。ポテンショ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 本のリード線がひきだされ、一方のはポテンショスタット、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。

定電流試験の場合にはポテンショスタットを定電流電解装置（以下ガルバノスタットという）に切り換えるが基本的には定電位試験と同様である。

各試験片の所要電流およ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) ポテンショ・ガルバノスタット

ポテンショ・ガルバノスタットは最大電解電流 1 A 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 5 A 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

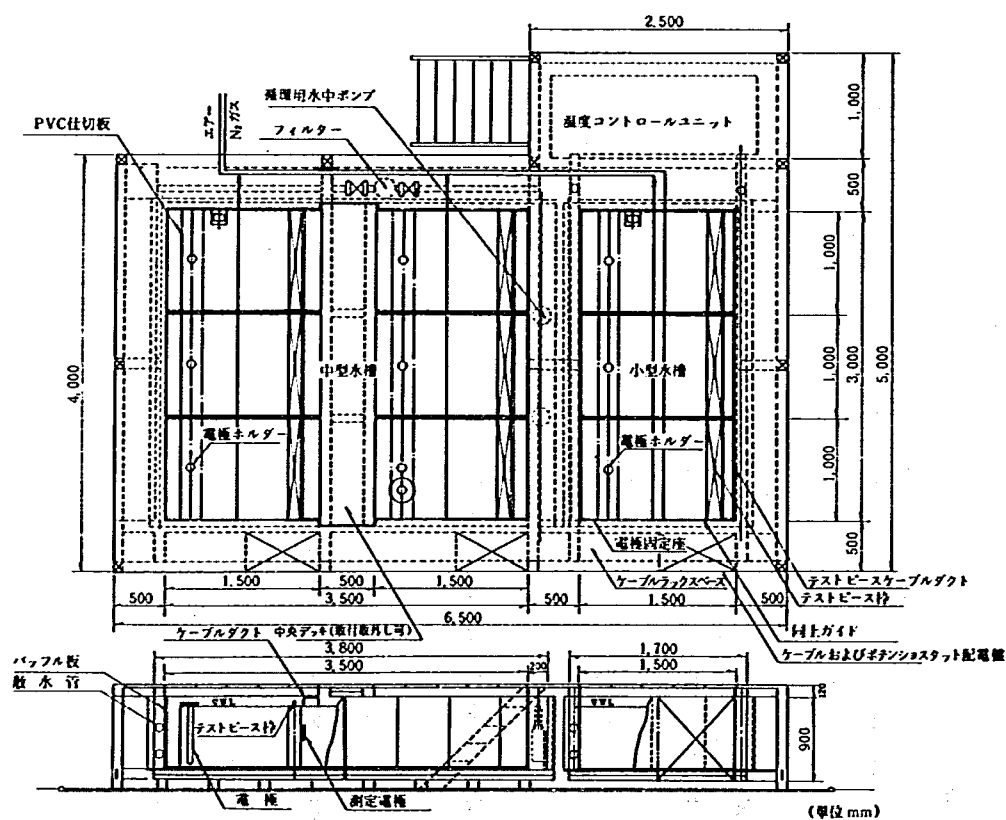
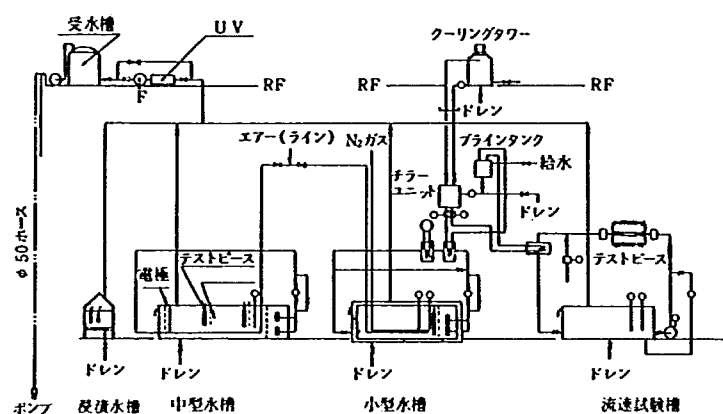
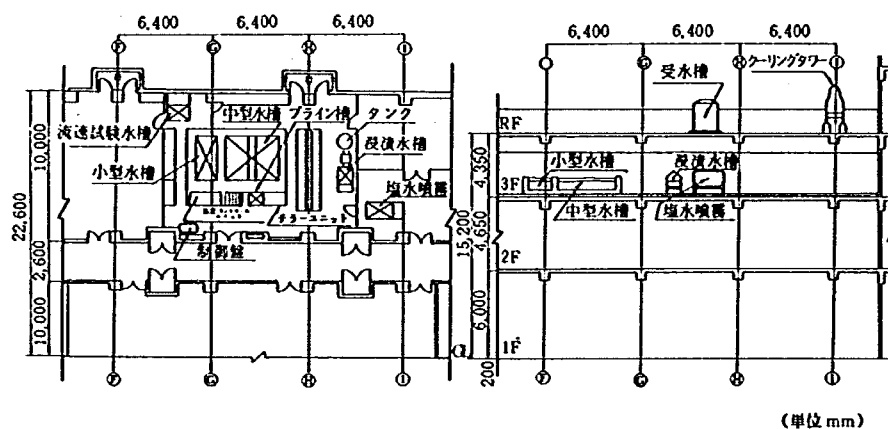
陽極は各試験槽ごとに適切な材料を選んで使用する。小型および中型水槽には白金メッキチタン電極を、流速試験装置には白金メッキチタン電極または高ケイ素鉄電極を、浸漬水槽にはアルミニウム合金陽極を用いる。

表2-1 (1) 全体試験計画

試験		試験条件										試験実施年度	水槽諸元		評価	
試験項目	試験環境との対応	試験液				試験片		電気的條件			試験実施年度	仕様等	取付枠数	評価項目	測定法	
		海水	DO	温度	流速	素地	寸法	設定電位	電流密度	挿入抵抗						
裸鋼材の電気防食特性試験	定電位試験	標準	天然飽和	25℃	微速	サンドブラスト処理・発錆処理	(mm)	自然電位	—	—	S54	小 型 				

表 2 - 1 (2) 全 体 試 験 計 画

試 験 項 目		試 験 条 件										試 験 実 施 年 度	水 槽 諸 元		評 価				
		試 験 液				試 験 片		塗 装 仕 様					電 気 的 条 件	仕 様 等	取 付 枚 数	評 価 項 目	測 定 法		
		海 水	D O	温 度	流 速	素 地	寸 法	防食下地	塗料の種類	膜 厚	スクラッチ の 有 無							設定電位	
塗 装 鋼 材 の 電 気 防 食 特 性 試 験		天 然	飽 和	室 温 (25℃)	微 速	サ ン ド ブ ラ ス ト 処 理	(mm)	な し	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 (比 較) タールウレタン エポキシ ビニル G F P	100μm 200μm 400μm (2000μm)	あ り な し	-900mV -1500mV	S54 ~S57	中 型	寸法 (m) 3.5×3.0×0.7H 水量約 7 m ³ DO飽和	Ep-ip	防食電流		
							100×	有機ジंक										イオン透過性	交流抵抗
							100×											塗膜物性	付着性
							3.2 ^t												耐衝撃性
							材質											ピンホール	ピンホール 測 定
SS41	無機ジंक	外観観察	写真記録																
塗 膜 の 性 能 試 験	耐 過 防 食 試 験	天 然	放 置	室 温 (25℃)	静 止	サ ン ド ブ ラ ス ト 処 理	(mm)	な し	タールエポキシ JIS-1.2.3種 タールウレタン エポキシ (ビュアエポキシ) (超 厚 膜 型) (高 PVC 型) ビニル 塩 化 ゴ ム 変 性 エ ポ キ シ G F P 1) G F P 5	標準膜厚 400μm その他	あ り な し	-900mV -2000mV	S54 ~S57	浸 漬	寸法 (m) 2.0×0.5×0.4H 水量約 0.4 m ³ 4	塗 装 鋼 材 の 電 気 防 食 特 性 試 験 の 評 価 に 準 じ る 。			
	適 正 電 位 選 択 試 験	天 然	放 置	室 温 (25℃)	静 止		70× 150× 3.2 ^t	有機ジंक	な し	-1000mV) -2000mV	S57								
	塩 水 噴 霧 試 験	5 多 食 塩 水	—	35℃	—		材質 SS41	無機ジंक	な し あ り	—	S54 ~S57	塩 水 噴 霧	JIS Z 2371	外観観察	写真記録				
	海 水 浸 漬 試 験	天 然	放 置	室 温 (25℃)	静 止		(ウオッシュ プライマー)		な し	自然電位	S54 ~S57	浸 漬	耐過防食試験< 水槽と同じ。	塗 装 鋼 材 の 電 気 防 食 特 性 試 験 の 評 価 に 準 じ る 。					



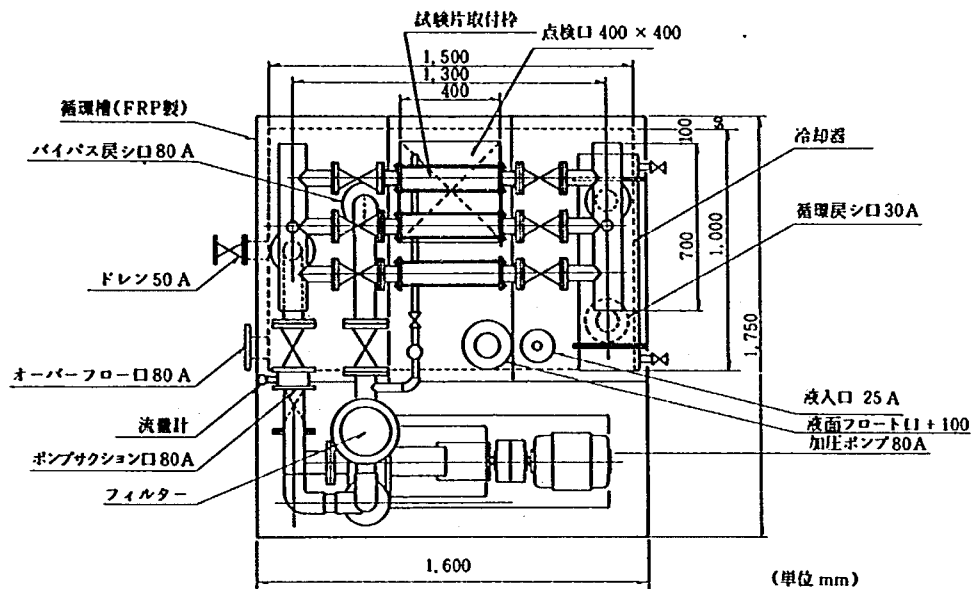


図 2 - 4 (1) 並列型流速試験装置 (平面図)

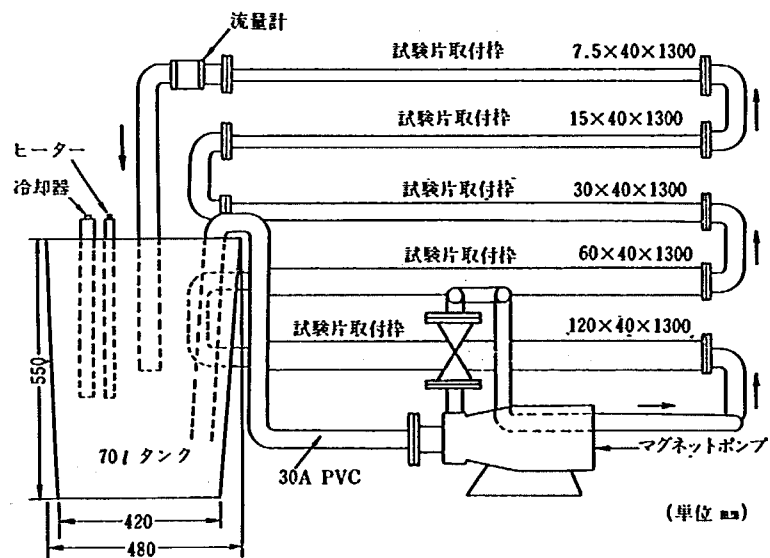


図 2 - 4 (2) 直列型流速試験装置

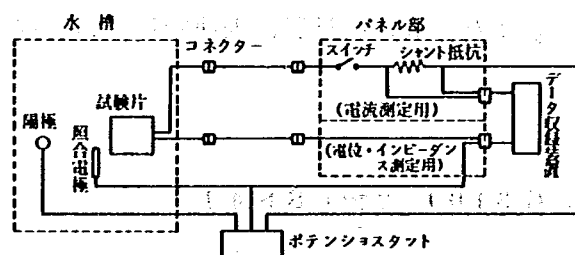
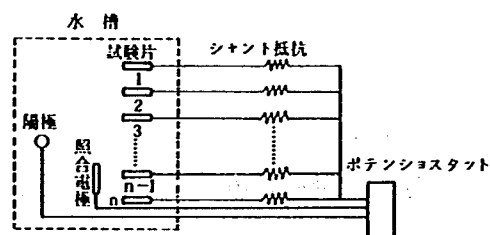


図 2 - 5 電気防食試験装置の基本回路 (定電位試験)

3. 研 究 方 法

3.1 裸鋼材の電気防食特性試験

裸鋼材の電気防食試験は標準環境，低温環境，希釈環境および汚染環境で行った。各環境条件はつぎのとおりである。

標準環境：空気吹き込みによる酸素飽和，水温 25℃ の天然海水

低温環境：空気吹き込みによる酸素飽和，水温 5℃ の天然海水

希釈環境：空気吹き込みによる酸素飽和，水温 25℃，比抵抗 200 Ω-cm に調整した希釈海水

汚染環境：窒素ガス雰囲気，水温 25℃ の海底土（東京都内海老取川河口より採取したヘドロ）。海底土の分析値はつぎのとおりである。

P H 7.1， 酸化還元電位 +68 mV

比抵抗 63.2 Ω-cm， 硫酸塩還元菌 1.1×10^4 MPN/ml

3.1.1 定電位試験

(1) 試験因子

試験因子，水準およびその組合せを表 3-1 に示す。

表 3-1 試験因子，水準およびその組合せ

環境 \ 設定電位 (mV)	自然電位	-760	-770	-800	-850	-900	-950	-1000
標準	○	○	○	○	○	○	○	○
低温	○	—	—	○	○	○	○	○
希釈	○	—	—	○	○	○	○	○
汚染	○	—	—	○	—	○	—	—

(2) 試験日数

各環境における試験日数はつぎのとおりである。

標準環境 6 ヶ月， 低温環境 7 ヶ月， 希釈環境 3 ヶ月， 汚染環境 2 ヶ月

(3) 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，結線部の絶縁被覆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 (SS41)

2) 表面状態

(i) サンドブラスト鋼：1) の鋼材を表面あらさ 30 S にブラスト処理

(表面あらさ : 10 点平均あらさ $30 \mu m$, 最大高さ $100 \mu m$, 基準長さ $8 mm$)

(ii) 発錆処理鋼 : 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) 試験片結線部の絶縁被覆

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, ビニルテープにより絶縁被覆した。

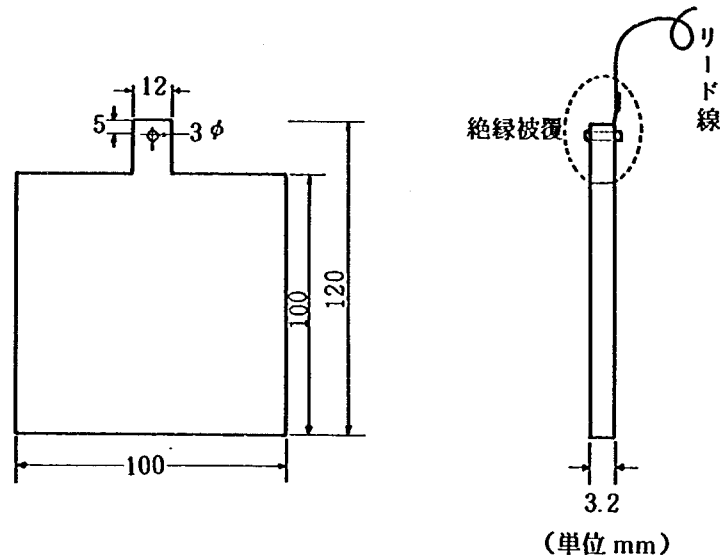


図 3-1 裸鋼材の電気防食特性試験用試験片の形状

(4) 試験水槽

標準, 低温および希釈環境での試験水槽は, 2.2.2 (i) 項で述べた小型水槽, 汚染環境では $600 \times 300 \times 360^h (mm)$ のアクリル製水槽を用いた。

(5) 試験片の配置

試験片の配置を図 3-2 に示す。標準, 低温および希釈環境では, 各設定電位について試験片 4 枚, 汚染環境では試験片 3 枚にポテンショスタットを 1 台配置し, 対極に白金メッキチタン線 ($1.5 \phi \times 300 mm$), 照合電極に飽和甘和電極を用いてそれぞれの電位に設定した。

(6) 測定項目

定電位試験に関す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

なお腐食量測定に際して, 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フロンクテストから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時の減量を補正した。

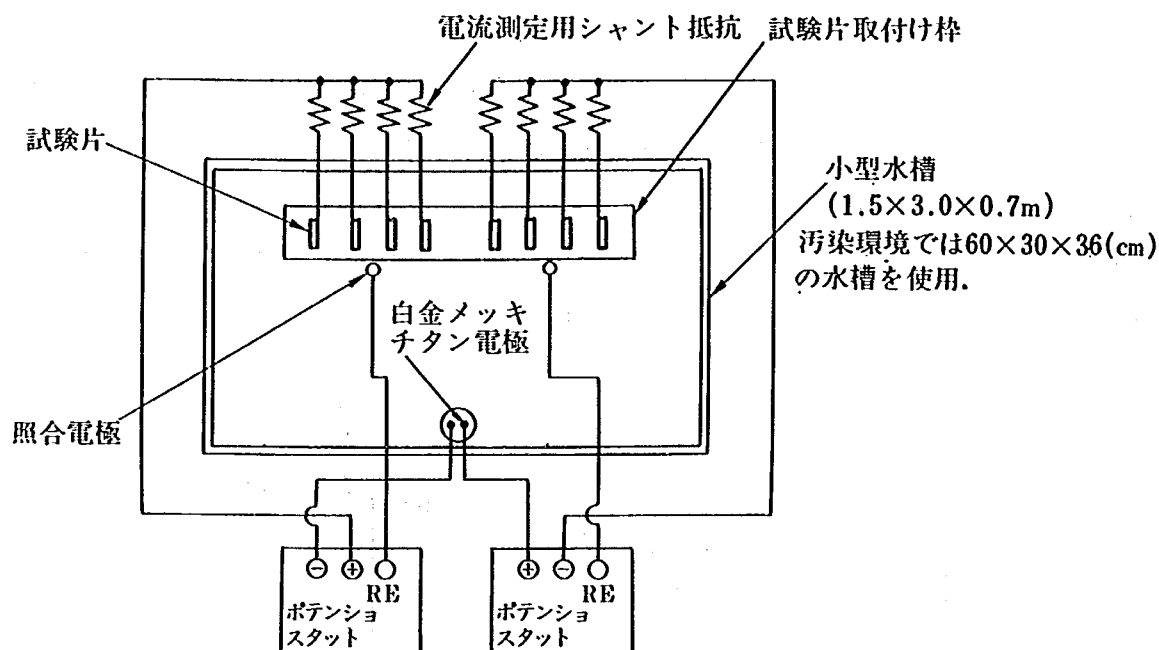


図 3 - 2 試験片の配置と電気防食回路（定電位試験）

3.1.2 定電流試験

(1) 試験因子

試験因子，水準およびその組合せを表 3 - 2 に示す。

表 3 - 2 試験因子，水準およびその組合せ

環境	設定電流 (mA/m ²)	自然電位	20	40	60	80	100	200	300
標準		○	○	○	○	○	○	—	—
低温		○	○	○	○	○	○	—	—
希釈		○	○	○	○	○	○	—	—
汚染		○	—	—	—	○	○	○	○

(2) 試験日数

各環境とも 2 ケ月

(3) 試験片

試験片の形状，材質，表面状態および結線部の絶縁被覆は，図 3 - 1 および 3.1.1 (3) 項と同じ。

(4) 試験水槽

試験水槽は 3.1.1 (4) 項と同じ。

(5) 試験片の配置

試験片の配置を図3-3に示す。各環境とも各設定電流密度について試験片3枚にガルバノスタットを1台配置し、対極に白金メッキチタン線(1.5φ×300mm)を用いてそれぞれの電流密度に設定した。

(6) 測定項目

定電流試験に関する調査項目は3.1.1(6)項と同じ。

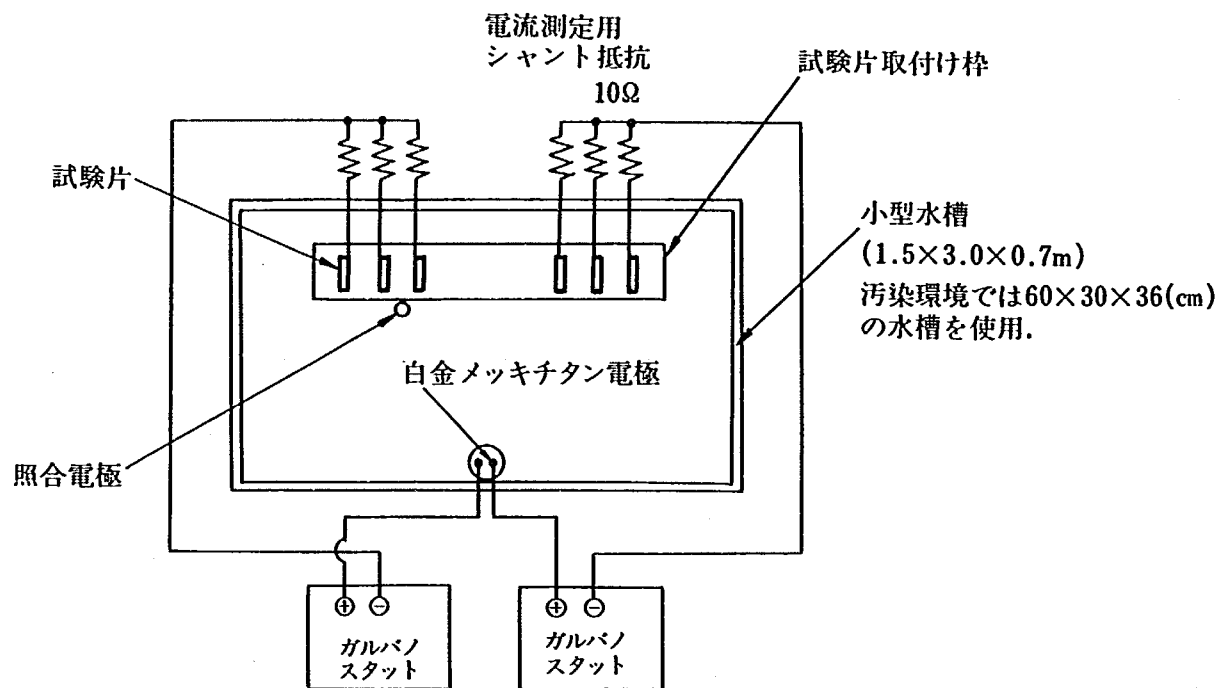


図3-3 試験片の配置と電気防食回路（定電流試験）

3.1.3 自然流電試験

(1) 試験因子

試験因子、水準およびその組合せを表3-3に示す。

表3-3 試験因子、水準およびその組合せ

挿入抵抗 (kΩ)	自然電位	0.03	0.05	0.1	0.2	0.3	0.5	0.7	1.0
標準	○	—	○	○	○	○	—	○	—
低温	○	—	○	○	○	○	—	○	○
希釈	○	—	○	○	—	○	○	○	○
汚染	○	○	○	○	○	—	—	—	—

(2) 試験日数

標準, 低温及び汚染環境 2 ヶ月, 希釈環境 3 ヶ月

(3) 試験片

1) 試験片 (陰極)

試験片の形状, 材質, 表面状態および結線部の絶縁被覆は, 図 3-1 及び 3.1.1 (3) 項と同じ。

2) アルミニウム合金陽極 (陽極)

アルミニウム合金陽極の形状を図 3-4 に示す。またアルミニウム合金陽極の化学組成, 陽極性能, 供試面積および結線部の絶縁被覆は下記のとおりである。

(i) 化学組成および陽極性能

アルミニウム合金陽極の化学組成および陽極性能を表 3-4 に示す。

(ii) 供試面積

供試面積 30.34 cm^2 を残し, 他は自己融着テープ, ビニルテープにより絶縁被覆した。

(iii) 結線部の絶縁被覆

アルミニウム合金陽極の上部平面にタップを切り, リード線をビスで固定し, シリコンシーラントで厚く覆い, 硬化後自己融着テープ, ビニルテープにより絶縁被覆した。

表 3-4 アルミニウム合金陽極の化学組成および性能

化 学 組 成 …………… (%)								陽 極 性 能		
Z n	M g	I n	S n	S i	F e	C u	A l	閉路電位 (mV)	有効電気量 (A・hr/kg)	陽極効率 (%)
1.0 ~ 3.5	1.0 ~ 3.0	0.015 ~ 0.030	0.005 ~ 0.010	0.10 以下	0.10 以下	0.004 以下	残	-1050	2300以上	80以上

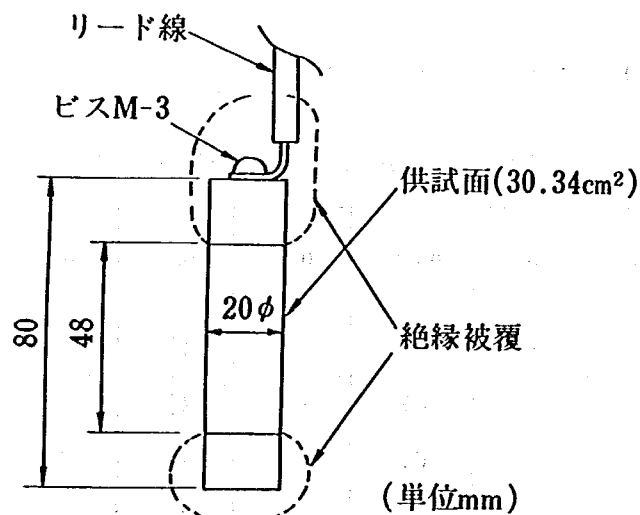


図 3-4 アルミニウム合金陽極の形状

(4) 試験水槽

試験水槽は、3.1.1(4)項と同じ。

(5) 試験片の配置

試験片の配置を図3-5に示す。各環境ともそれぞれの挿入抵抗について試験片とアルミニウム合金陽極各1枚を1組として短絡した。

(6) 測定項目

自然流電試験に関する調査項目は3.1.1(6)項と同じ。

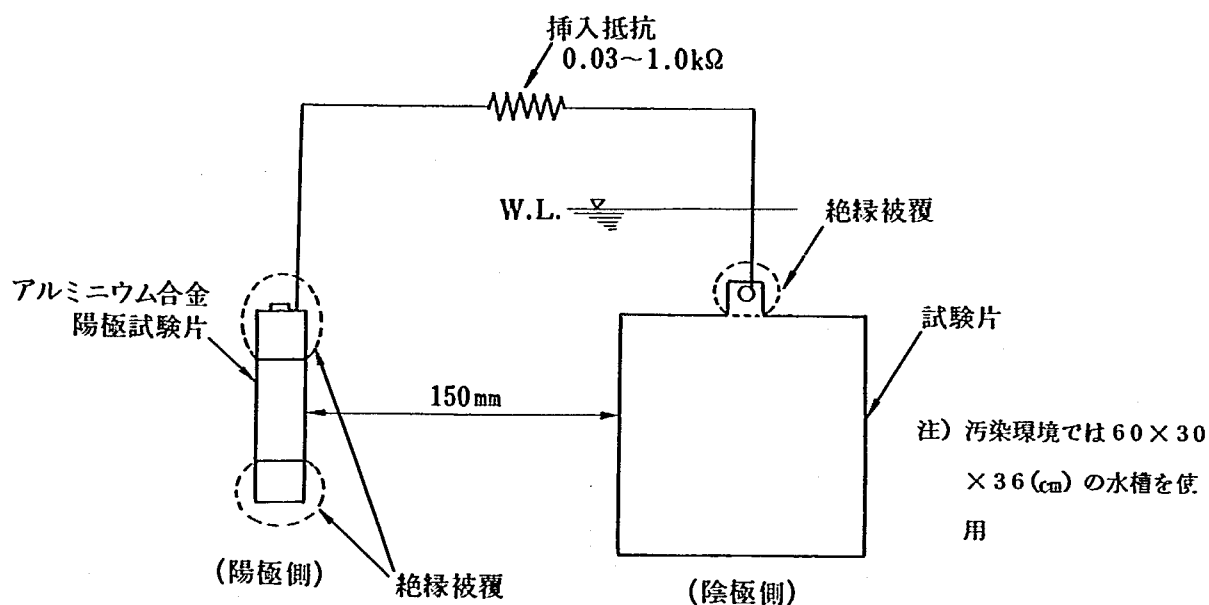


図3-5 自然流電試験の試験片配置

3.2 流速環境下での電気防食特性試験

3.2.1 定電位試験

(1) 試験因子

並列型および直列型試験装置での試験因子および水準とその組合せを表3-5に示す。

表3-5 試験因子および水準とその組合せ

流速(m/s) \ 設定電位(mV)	自然電位	-570	-620	-670	-720	-770	-800	-900
0.25	△▲	—	—	—	—	—	—	—
0.5	○△▲	—	—	—	—	—	○	○
1	○△▲	—	△	△▲	△	△▲	○△	○△▲
2	○△▲	—	—	—	—	▲	○	○
3	○	—	—	—	—	—	○	○
4	△	—	△	△	△	△	—	—
5	○	○	○	○	○	○	○	○
8	○	—	—	—	—	—	○	○

- 注) 記号 ○・・並列型試験装置による鋼材の電気防食特性試験
 △・・直列型試験装置による鋼材の電気防食特性試験
 ▲・・直列型試験装置による塗装鋼材の電気防食特性試験

試験液は天然海水を使用し、その水温は温度制御装置により 25°C 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。

試験は各条件で1～2ヶ月行った。

(2) 試験片

試験片の材質はSS41銅で、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3-6、3-7に示す形状である。図3-6に示す試験片は並列型試験装置用のもので、試験面は $60 \times 50\text{ mm}$ の片面 30 cm^2 を使用し、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3-7に示す試験片は直列型試験装置用のもので、試験面は $20 \times 35\text{ mm}$ の両面 14 cm^2 を使用している。試験片はいずれもアセトン脱脂、乾燥、秤量後試験に供した。また、図3-8に示す試験片は直列型試験装置用の塗装試験片であり、中央部分に素地に達する長さ 20 mm のスクラッチが1本入っている。塗料種はタールエポキシ(JIS-1種, ポリアミド, 防食下地 I-ZRP, 膜厚 $200\text{ }\mu\text{m}$) とした。

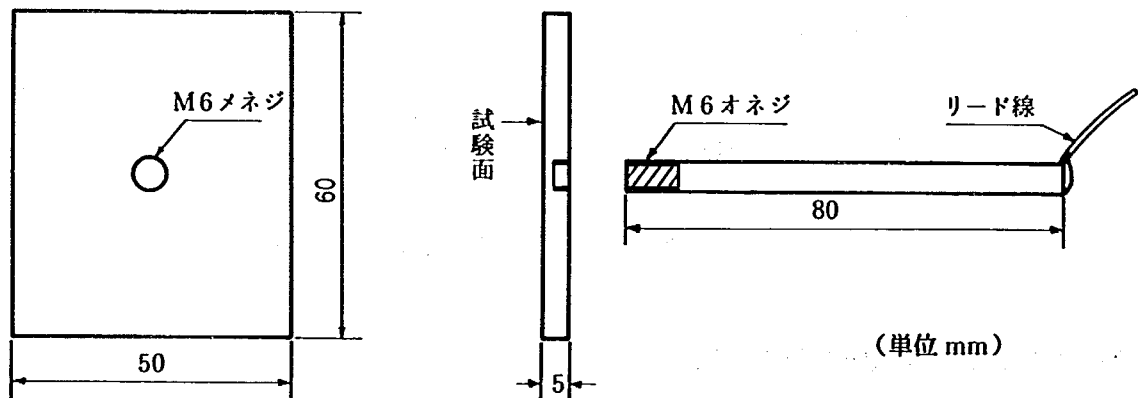


図3-6 並列型試験装置用試験片の寸法、形状

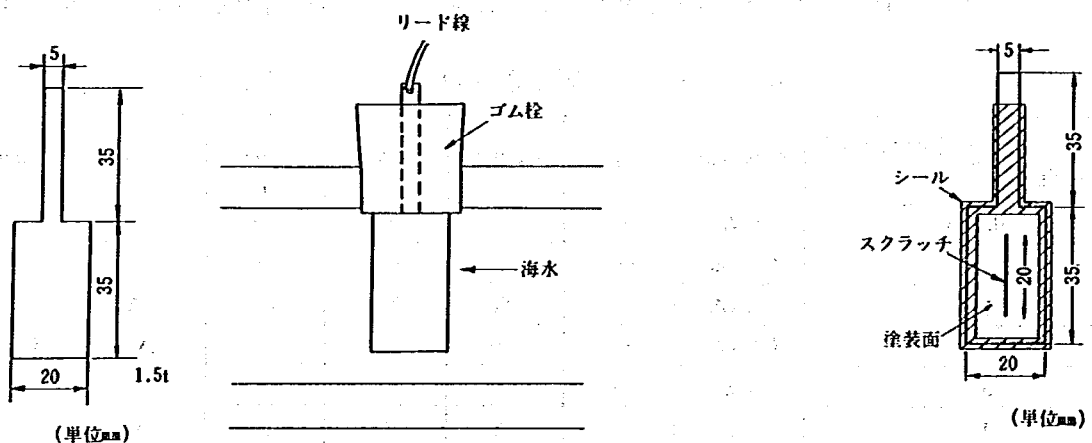


図3-7 直列型試験装置用試験片の寸法、形状、取付け

図3-8 塗装試験片

(3) 試験片の配置

並列型試験装置の試験片取付枠を図3-9に、各試験での試験片の配置を図3-10に示す。

並列型試験装置用試験片取付枠は図3-9に示すように、アクリル製の2つ割からなり、中央部の水路を挟んで、上部に陽極、下部に試験片を取付けた。試験片取付部は乱流の影響を少なくするため中央部に設け、陽極は電流分布が均一になるように面状陽極とした。なお、陽極には高ケイ素鉄電極($50 \times 220 \times 10 \text{ mm}$)を用いた。試験片の取付けは、試験面以外の面と取付枠との間にシリコンシーリング剤を充填して行った。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。なお、 5 m/s については、この他に $-570 \sim -770 \text{ mV}$ の設定電位についての試験も行った。

直列型試験装置は実環境に対応するように低流速域のデータ収集を目的としており、水路の大きな試験片取付枠を用いた。水路の断面は 120×40 、 60×40 、 30×40 、 15×40 、 $7.5 \times 40 \text{ mm}$ の5種類であり、これらの取付枠をそれぞれ直列に接続して海水を循環させるため、流速の影響を明確にすることができる。試験片の取付けはゴム栓を用い、水路の中央部に試験面が流れに対し平行になるように固定した。流速は枠ごとに 0.25 、 0.5 、 1 、 2 、 4 m/s とした。電気防食条件は、すべての流速については自然電位を、 1 、 2 、 4 m/s については $-620 \sim -900 \text{ mV}$ より適当な設定電位を選んで試験を行った。

定電位試験はポテンショスタットを用いて試験片を設定電位に保持し、防食電流の経時変化を 1Ω のシャント抵抗の電圧降下を測定することにより求め、試験後の重量減から腐食速度と防食率を求めた。

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

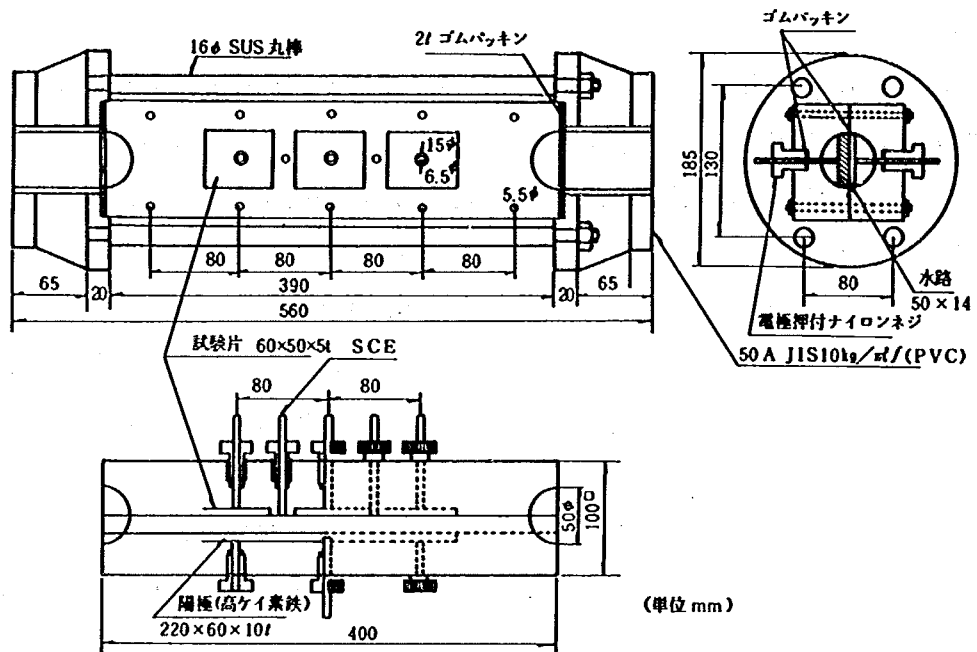
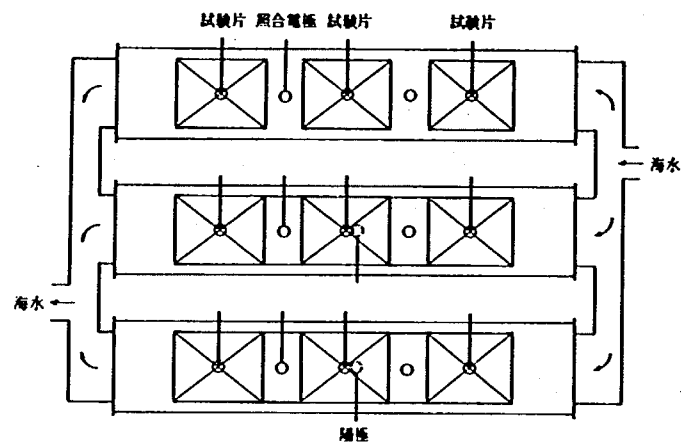
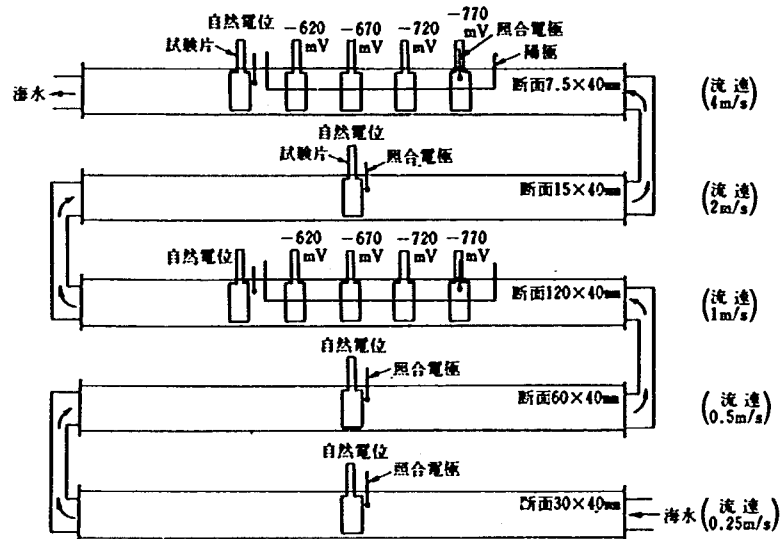


図 3 - 9 試験片取付枠（並列型流速試験装置）



(1) 並列型試験装置



(2) 直列型試験装置

図 3 - 10 試験片の配置

3.2.2 定電流試験

(1) 試験因子

定電流試験は並列型試験装置で行い、試験因子および水準とその組合せを表3-6に示す。

表3-6 試験因子および水準とその組合せ

設定電流密度 (mA/m²) 流速(m/s)	0	100	200	300	400	500	700
0.5	○	○	○	○	—	—	—
2	○	—	○	—	○	—	—
5	○	—	—	○	—	○	○

試験液は定電位試験と同様に天然海水(25℃, DO飽和)を使用した。

試験は各条件で2ヶ月行った。

(2) 試験片

定電位試験の図3-1に示す試験片と同じものを用いた。

(3) 試験片の配置

定電位試験の図3-5(1)に示す試験片の配置に準じ、左側の試験片を0 mA/m²(自然電位条件下)とし、他を所定の電流密度用の試験片とした。定電流装置はガルバノスタットを用い、シャント抵抗は1 KΩとした。所定の電流密度で電解し、電位の経時変化を測定し、試験後の重量減から防食率を求めた。

(4) 測定項目

3.2.1(4)項と同じ。

3.3 塗装鋼材の電気防食特性試験

(1) 試験因子

塗料種、設定電位、防食下地の有無、膜厚および塗膜損傷(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。)の有無を試験因子とした。

試験因子と水準を表3-11, その組合せを表3-12に示す。

塗料種としては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JIS規格(JIS K 5664)にもとづく種別(1種, 2種, 3種)を取りあげるだけでなく、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の種類を取りあげた。

タールエポキシのJIS規格における種別を表3-13に示す。

また、塗料種としてGFP(1)およびビニルについても追加試験を行い、その試験因子と水準

およびその組合せを各々表 3-14, 表 3-15 に示す。

表 3-11 試験因子および水準
(塗装鋼材の電気防食特性試験-1)

因子 \ 水準	1	2	3
塗料種と種別	タールエポキシ J I S K 5 6 6 4 1 種	タールエポキシ J I S K 5 6 6 4 2 種	タールエポキシ J I S K 5 6 6 4 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, 表面あらしが 30 S 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, 試験片のエッジ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 日間経過した後, 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 3-11 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 5 cm 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した試験片 (繰返し 2 枚とする) を中型水槽に配置する。

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 (1.5 φ × 300 mm) 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) 交流抵抗測定

表 3-12 試験因子と水準の組合せ（塗装鋼材の電気防食特性試験-1）

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																	
			防食下地	なし	あり	なし	あり	なし	あり	なし	あり	なし	あり	なし	あり					
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。

表 3-13 タールエポキシの種別

(J I S K 5 6 6 4 - 1 9 7 8)

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

表 3-14 試験因子および水準 (塗装鋼材の電気防食特性試験-2)

因 子 \ 水 準	1	2	3
塗 料 種	G F P (1)	ビ ニ ル	—
防 食 下 地	な し	O - Z R P	I - Z R P
膜 厚	標 準	—	—
設定電位 (mV)	- 9 0 0	- 1 5 0 0	—
スクラッチ	な し	あ り	—

注) 膜厚 (標準) : G F P (1) 2 0 0 0 μm ビ ニ ル 2 0 0 μm

表 3-15 試験因子と水準の組合せ (塗装鋼材の電気防食特性試験-2)

塗 料 種	設 定 電 位	- 9 0 0 mV		- 1 5 0 0 mV	
	塗 膜 厚	2 0 0 μm		2 0 0 0 μm	
	スクラッチ	な し	あ り	な し	あ り
	防食下地	な し	あ り	な し	あ り
G F P (1)	な し	○ (4)	○ (6)	○ (7)	○ (9)
	O - Z R P	○ (4)		○ (7)	
	I - Z R P	○ (4)		○ (7)	
ビ ニ ル	な し	○ (4)	○ (6)	○ (7)	○ (9)
	O - Z R P	○ (4)		○ (7)	
	I - Z R P	○ (4)		○ (7, 8)	

注) () 内は水槽番号を示す。

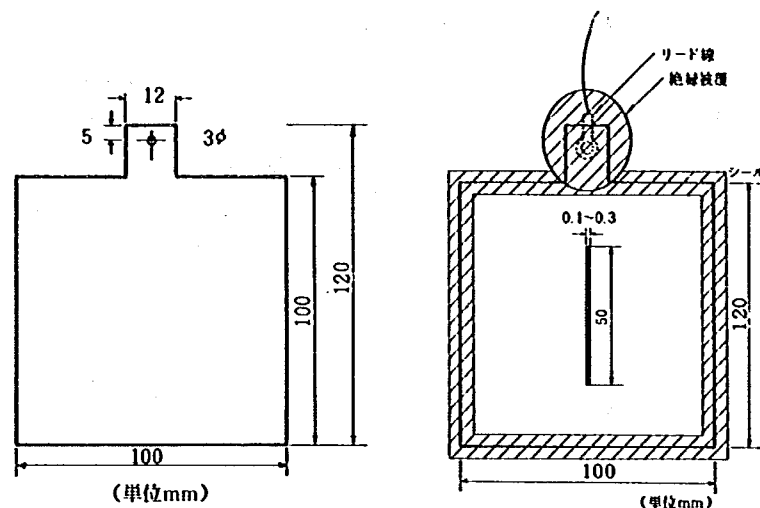


図 3 - 11 塗装鋼材の電気防食特性試験用試験片

3.4 塗膜の性能試験

3.4.1 耐過防食試験

電気防食条件下において耐久性の良好な塗料種および塗装系を選択するための促進試験として過防食条件下で次の 3 種類の試験を行う。

- 1) 各種塗膜の性能比較
- 2) 塗膜の顔料濃度の影響
- 3) G F P の膜厚と耐久性

(1) 試験因子

- 1) 各種塗膜の性能比較

試験因子と水準を表 3 - 16 , 試験片の組合せを表 3 - 17 に示す。

- 2) 塗膜の顔料濃度の影響

塗膜の適正な顔料濃度の検討を行う。これらの試験因子と水準を表 3 - 18 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 μm に統一する。

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

$$PVC (\%) = \frac{\frac{\text{含有顔料重量}}{\text{顔料真比重}}}{\frac{\text{含有顔料重量}}{\text{顔料真比重}} + \frac{\text{含有展色剤重量} \times \text{不揮発分} (\%) }{\text{展色剤真比重}}} \times 100$$

表 3-16 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

表3-17 試験片の組合せ

(各種塗膜の性能比較)

試験 開始	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)	ⓐ	—	—

表3-18 試験因子と試験片の組合せ

(塗膜顔料濃度の影響)

(1) 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	—

(2) 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	—	—	—	—	—	○

3) GF Pの膜厚と耐久性

GF Pの膜厚と耐久性の関係をみるため次の2通りに分けて検討する。

(i) 第1次試験

GF P(1)の膜厚と設定電位を試験因子として、その組合せを表3-19に示す。

(ii) 第2次試験

GF P(2)の膜厚と防食下地を試験因子とし、その組合せを表3-20に示す。

表3-19 試験因子と試験片の組合せ

(GF P(1)の膜厚と耐久性)

(1) 因子と水準

因子 \ 水準	1	2
GF P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	○	○

表 3-20 試験因子と試験片の組合せ

(GFP(2)の膜厚と耐久性)

(1) 因子と水準

因子 \ 水準	1	2	3	4
塗 料 種	GFP(2)	—	—	—
防 食 下 地	な し	O-ZRP	—	—
膜 厚 (μm)	200	400	600	800
設定電位 (mV)	-2000	—	—	—
スクラッチ	な し	あ り	—	—

(2) 試験片の組合せ

膜 厚 \ 防食下地	200 μm	400 μm	600 μm	800 μm
な し	○	○	○	○
O-ZRP	○	○	○	○

(2) 試 験 片

スクラッチを入れる試験片は図 3-12 のように塗装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。

(3) 試験条件

浸漬水槽を用い、天然海水中で試験片に電気防食を行う。

電位の設定はアルミニウム合金陽極 (50 × 50 × 1000 mm) およびポテンショスタットを用いてコントロールする。

(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通りである。

- 1) 外観観察
- 2) 電位測定
- 3) 電流測定
- 4) 交流抵抗測定

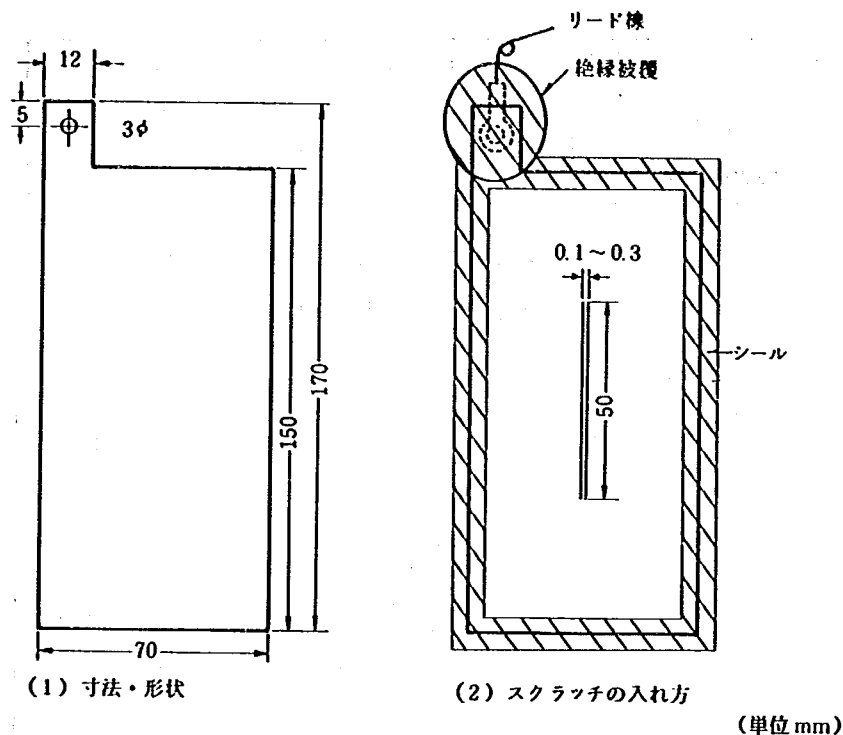


図 3 - 12 耐過防食試験の試験片

3.4.2 適正電位選択試験

塗装鋼材を -2000mV までカソード分極させたときに防食下地が短時間ではく離（または破壊）する現象が 3.4.1 (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、防食下地としての適正電位を選択するため設定電位を変えて次の 2 通りに分けて検討する。

なお、ジンクリッチペイントは展着剤として有機（エポキシ系）と無機（アルキルシリケート系）、亜鉛未含有量として標準型とダスト型を水準とする。

i) 第 1 次試験

試験因子と水準を表 3 - 21 に示す。

ii) 第 2 次試験

試験因子と水準を表 3 - 22 に示す。

(1) 試験片

試験片は塗装面中央部に 4cm^2 ($2\text{cm} \times 2\text{cm}$) のジンクリッチペイントの塗膜面を露出させ、その他の部分はタールエポキシで完全に被覆する。

この状態を図 3 - 13 に示す。

(2) 試験条件

3.4.1 (3) 項と同じ。

(3) 測定項目および評価

3.4.1 (4) 項と同じ。

但し、本試験では交流抵抗の測定は行わない。

表 3-21 試験因子および水準とその組合せ

(適正電位選択試験-1)

(1) 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%以下)	標準型 (80%以上)
設定電位 (mV)	-1500	-2000

注) 膜厚 (μm) は次の通りである。

ダスト型 : 75

標準型 : 75

(2) 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 3-22 試験因子および水準とその組合せ

(適正電位選択試験-2)

(1) 因子と水準

因子 \ 水準	1	2	3	4
防食下地の種類	O-ZRP	I-ZRP	WP	—
亜鉛末含有量による分類	ダスト型(80%以下)	標準型(80%以上)	—	—
設定電位 (mV)	-1000	-1200	-1300	-1400

注) WP: ウォッシュブライマー

標準膜厚 (μm) は次の通りである。

標準型 : 75

ダスト型 : 25

WP : 15

(2) 試験片の組合せ

防食下地 設定電位 (mV)	O-ZRP		I-ZRP		W P
	ダスト型	標準型	ダスト型	標準型	
-1000	○	○	○	○	○
-1200	○	○	○	○	○
-1300	○	○	○	○	○
-1400	○	○	○	○	○

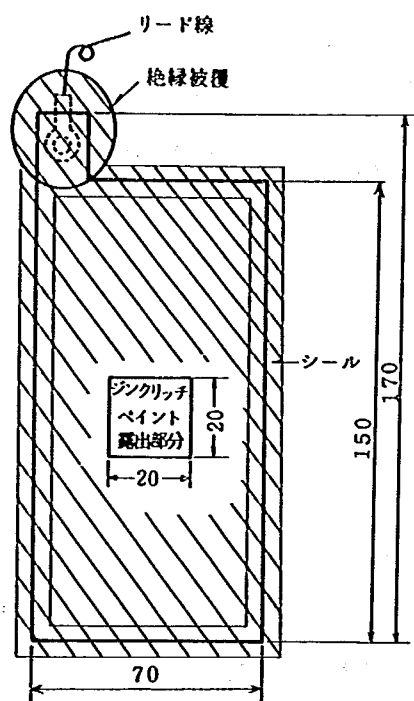


図 3-13 適正電位選択試験の試験片

3.4.3 塩水噴霧試験

(1) 試験因子

試験片の内訳を表 3-23 に示す。

(2) 試験片

試験片は SS 41 鋼を用い、図 3-14 に示す寸法・形状とする。

(3) 塩水噴霧試験

JIS Z 2371にもとづく装置を用い、表 3-24 の使用条件に維持された塩水噴霧室内に試験片を 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金属面の腐食状態を観察する。

表3-23 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			1000			
		O-ZRP			1075			
		I-ZRP			1075			
	エポキシ III (高PVC型)	なし			200			
		O-ZRP			275			
		I-ZRP			275			
	GFP (1) (ポリエステル)	なし			2000		○	○
		O-ZRP			2075			
		I-ZRP			2075			
	ビニル	なし			150			
		O-ZRP			225			
		I-ZRP			225			
	塩化ゴム	なし			200			
		O-ZRP			275			
		I-ZRP			275			
第 二 次 試 験	変性エポキシ(I)	なし		○				
	変性エポキシ(III)	なし		○				
	GFP (2) (イソフタル酸)	なし			1500			
	GFP (3) (ビスフェノール)	なし			1500			
	GFP (4) (ビニルエステル)	なし			1500			
	GFP (5) (エポキシ)	なし			1500			
	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 GFPの膜厚と耐久性

表 3 - 2 4 塩水噴霧試験条件

設 定 項 目	条 件
試験室内の温度	3 5 ± 1 °C
試験室内の相対湿度	9 5 ~ 9 8 %
塩水の濃度	5 w / v %
採取溶液の P H	6.5 ~ 7.2
採取溶液の比重 (2 0 °C)	1.0 2 6 3 ~ 1.0 4 1 0
噴霧量 (ml / 8 0 c d / h r)	1.0 ~ 2.0

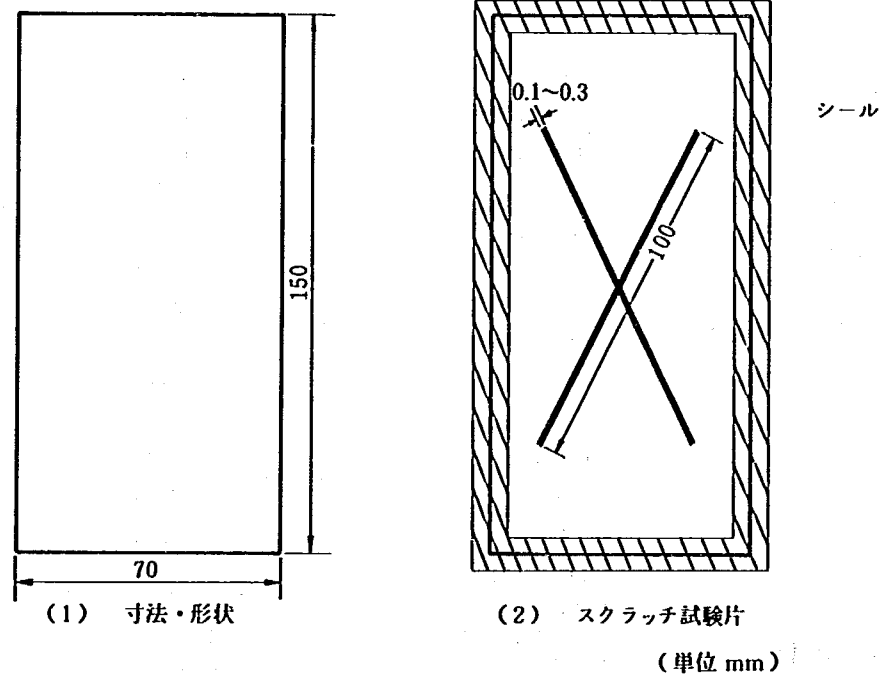


図 3 - 1 4 塩 水 噴 霧 試 験 片

3.4.4 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 - 2 5 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) 交流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 - 1 4 , 2) の場合は図 3 - 1 2 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通りである。

- 1) 外観観察
- 2) 交流抵抗測定

海水浸漬試験は、試験片を海水に浸漬し、試験片の表面に発生する腐食反応を観察し、試験片の交流抵抗を測定する。

試験片の表面に発生する腐食反応を観察し、試験片の交流抵抗を測定する。

表3-25 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)	膜厚 (μm)	
		100	200	400	400	標準	200	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 (ビュアエポキシ)	なし	●	●	◎					
	O-ZRP			○					
	I-ZRP			○					
エポキシ II (超厚膜型)	なし					◎ (1000)			
	O-ZRP					○ (1075)			
	I-ZRP					○ (1075)			
エポキシ III (高PVC型)	なし					○ (200)			
	O-ZRP					○ (275)			
	I-ZRP					○ (275)			
GFP (I) (ポリエステル)	なし					◎ (2000)		●	●
	O-ZRP					○ (2075)			
	I-ZRP					○ (2075)			
ビニル	なし					○ (150)			
	O-ZRP					○ (225)			
	I-ZRP					○ (225)			
塩化ゴム	なし					◎ (200)			
	O-ZRP					○ (275)			
	I-ZRP					○ (275)			
変性エポキシ (I)	なし				●				
変性エポキシ (III)	なし				●				
GFP (2) (イソフタル酸)	なし					● (1500)			
GFP (3) (ビスフェノール)	なし					● (1500)			
GFP (4) (ビニルエステル)	なし					● (1500)			
GFP (5) (エポキシ)	なし					● (1500)			
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 GFPの膜厚と耐久性

- 2) 記号 ◎ 長期浸漬および交流抵抗測定の実施
 ○ 長期浸漬のみ
 ● 交流抵抗測定のみ

3.4.5 塗膜物性試験

塗装鋼材の電気防食特性試験、海水浸漬試験に供した試験片および控試験片について塗膜物性をみるため付着強度試験と耐衝撃性試験を行う。

(1) 試験因子

1) 付着強度試験

試験因子と水準およびその組合せを表 3-26 に示す。

2) 耐衝撃性試験

試験因子と水準およびその組合せを表 3-27 に示す。

(2) 試験条件

1) 付着強度試験

試験に供した試験片は塩水噴霧試験を 48 時間行った後、十分水洗し、約 30 分間乾燥し、試験面を #240 番耐水研磨紙で研磨する。

別に接着面を十分清浄にした引張り試験用ドーリー（材質：アルミニウム、径：20 mm、形状：円筒形）をエポキシ系接着剤を用いて研磨面に接着し、15 時間以上経過した後、80℃、1 時間強制乾燥後、水冷し、約 30 分間乾燥する。

次にドーリーカッターでドーリー周辺の塗膜を素地に達するまで切り込み、引張り試験機を用いて引張り速度 2 mm/min で付着強度を測定する。

2) 耐衝撃性試験

試験に供した試験片は塩水噴霧試験を 48 時間行った後、十分水洗し、約 30 分間乾燥する。

次に JIS K 5400 の 6・13 項 B 法にもとづきデュボン式衝撃試験器を用いて荷重 1 kg、高さ 10、30、50 cm に変化させて衝撃面の付着性を観察する。

(3) 測定項目および評価

1) 付着強度測定

2) 耐衝撃性観察

表 3-26 試験因子と試験片の組合せ

(付着強度試験)

(1) 因子と水準

塗 料 種	防食下地	膜厚(μm)	設定電位(mV)
タールエポキシJIS 1種(アミンアダクト)	なし	100	— *1
タールエポキシJIS 1種(ポリアミド)	O-ZRP	200	自然電位 *2
タールエポキシJIS 2種(ポリアミド)	I-ZRP	400	-900
タールエポキシJIS 3種(ポリアミド)	—	—	-1500
エポキシ 1 (ビュアエポキシ)	—	—	—
タールウレタン	—	—	—

(2) 組 合 せ

塗 料 種	防 食 下 地			膜 厚 (μ m)			設 定 電 位 (m V)			
	なし	O-ZRP	I-ZRP	100	200	400	*1 —	*2 自然電位	-900	-1500
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)	○	○	○	○	○	○		○	○	○
タールエポキシ JIS 2種 (ポリアミド)	○	○	○		○		○		○	○
タールエポキシ JIS 3種 (ポリアミド)	○	○	○	○	○	○		○	○	○
エポキシ 1 (ビュアエポキシ)	○	○	○		○		○		○	○
タールウレタン	○	○	○		○		○		○	○

注) *1 : 控試験片

*2 : 海水浸漬試験片

表3-27 試験因子と試験片の組合せ
(耐衝撃性試験)

(1) 因子と水準

塗 料 種	防食下地	膜厚(μm)	設定電位(mV)
タールエポキシJIS 1種(アミンアダクト)	なし	100	— *
タールエポキシJIS 1種(ポリアミド)	O-ZRP	200	-900
タールエポキシJIS 2種(ポリアミド)	I-ZRP	400	-1500
タールエポキシJIS 3種(ポリアミド)	—	—	—
エポキシ 1 (ビュアエポキシ)	—	—	—
タールウレタン	—	—	—

(2) 組 合 せ

塗 料 種	防 食 下 地			膜 厚 (μm)			設 定 電 位 (mV)		
	なし	O-ZRP	I-ZRP	100	200	400	控試験片	-900	-1500
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)	○	○	○	○	○	○	○	○	○
タールエポキシ JIS 2種 (ポリアミド)	○	○	○		○		○	○	○
タールエポキシ JIS 3種 (ポリアミド)	○	○	○	○	○	○	○	○	○
エポキシ 1 (ビュアエポキシ)	○	○	○		○		○	○	○
タールウレタン	○	○	○		○		○	○	○

4. 試験結果および考察

4.1 裸鋼材の電気防食特性試験

標準、低温、希釈および汚染環境における鋼材の腐食と電気防食効果を検討する目的で定電位試験、定電流試験および自然流電試験を実施した。

4.1.1 定電位試験

サンドブラスト鋼、発錆処理鋼を自然電位および $-760\text{ mV} \sim -1000\text{ mV}$ の範囲で電位を設定し、自然電位、所要電流密度を測定した。試験終了後に重量測定を行い、腐食速度および防食率を求めた。

(1) 自然電位

各環境における自然電位の経時変化を図4-1に示し、定常値を表4-1に示す。

標準、低温および希釈環境における自然電位は、環境による差異が小さく、いずれの環境とも、サンドブラスト鋼は、試験開始直後卑方向へ変化した後、わずかに貴方向へ変換し定常値を示した。これに対して、発錆処理鋼は、試験開始初期においてサンドブラスト鋼に比べ貴な値を示すが、経過日数にともなう卑方向への変化が大きく、表4-1に示すように、定常値は、試験前の表面状態によらず、ほぼ同じ電位を示す傾向にある。これは、発錆処理鋼の錆が大気曝露で作られた酸化程度の高いものであるため、海水中では不安定であり、徐々に還元されて海水中で安定な錆へと変換し、一方、サンドブラスト鋼では、海水中で安定な錆が生成する結果、浸漬日数が長くなるにしたがって発錆処理鋼とサンドブラスト鋼の表面状態が同じになるためと考えられる。

汚染環境におけるサンドブラスト鋼は、標準環境などとは異なり、試験開始直後から貴方向へ変換し、その後定常値を示した。これに対して発錆処理鋼は、標準環境などと同様、試験開始初期においては、貴な値を示すが急速に卑方向へ変換し、定常値はサンドブラスト鋼より卑な値となった。汚染環境における定常値は、標準環境などに比べて数十mV 貴な値となったが、これは汚染環境中において、鋼表面に硫化鉄が生じたためと考えられる。

(2) 腐食速度および防食率

各環境における腐食速度および防食率を図4-2に示す。

標準、低温および希釈環境の自然電位における腐食速度は、いずれの場合もサンドブラスト鋼に比べ発錆処理鋼の方が大きい。

海水中における鋼材の腐食速度は、カソード反応である溶存酸素の還元反応に律速されているが、発錆処理鋼のように大気曝露で作られた酸化程度の高い錆が存在する場合、溶存酸素の還元反応に加えて、錆の還元反応が生じる。その結果カソード反応速度が大きくなり、アノード反応である鉄の溶解反応が促進される。このため、サンドブラスト鋼に比べ、発錆処理鋼の腐食速度が大きくなるものと考えられるが、自然電位の経時変化から見て、腐食速度に及ぼす錆の還元の影響は、試験開始初期において認められるものであり、長期間の浸漬では、サンドブラスト鋼、発錆処理鋼の

腐食速度の差は無視出来るほど小さくなるものと考えられる。

汚染環境における腐食速度は、サンドブラスト鋼に比べ発錆処理鋼の方が小さい。この傾向は、自然流電試験でも認められたが、定電流試験ではサンドブラスト鋼 0.0788 mm/yr 、発錆処理鋼 0.1662 mm/yr と発錆処理鋼の方が大きな値を示した。このような発錆処理鋼の腐食速度のバラツキは、ブランクテストおよび発錆処理鋼に予め生成した錆量のバラツキによるものと考えられ、汚染環境における鋼の腐食速度におよぼす表面状態の影響については、明確な結果が得られなかった。

各環境での腐食速度をサンドブラスト鋼で比較すると、標準環境 0.0527 mm/yr 、低温環境 0.0456 mm/yr 、希釈環境 0.1024 mm/yr 、汚染環境 0.0831 mm/yr となり、希釈環境、汚染環境で大きな値を示した。

しかし、希釈環境での腐食速度は、自然流電試験で 0.0566 mm/yr と標準、低温環境とはほぼ等しい値であった。このような腐食速度のバラツキは、海水に吹き込まれる空気量の違いによる海水の攪拌、流動あるいは溶存酸素の差によって生じたものと考えられる。したがって標準、低温および希釈環境では、環境の違いによる腐食速度の差異は小さいものと考えられ、空気飽和、静止海中の鋼材の腐食速度はいずれの環境とも $0.05 \sim 0.06 \text{ mm/yr}$ 程度と推定される。

汚染環境は、窒素ガス雰囲気であるため、溶存酸素が標準環境などに比べると極端に少ないにもかかわらず、サンドブラスト鋼で大きな腐食速度を示した。これは汚染環境とした河底土（ヘドロ）中に存在する嫌気性硫酸塩還元菌のためと考えられる。

希釈環境における発錆処理鋼は、予め生成した錆量のバラツキによって腐食速度が大きく、したがって、防食率が低下したものと考えられるが、同環境のサンドブラスト鋼および標準、低温環境におけるサンドブラスト鋼、発錆処理鋼の腐食速度および防食率は、 -800 mV より卑な電位において自然電位における腐食速度の約 $1/20$ に相当する約 0.003 mm/yr 以下となり、 97% 以上の高い防食率が得られた。このように海水中の鋼材はその表面状態によらず -800 mV でほぼ完全な防食状態が得られるものと考えられる。さらに -800 mV より、貴な設定電位での腐食速度、防食率を標準環境のサンドブラスト鋼で検討し、結果を図4-2(1)に示す。 -760 mV では腐食速度が 0.0338 mm/yr と大きい -770 mV では腐食速度が 0.0051 mm/yr 、防食率 90% となり、一般に云われている海水中で防食電位 -770 mV でかなり高い防食率が得られた。

汚染環境における -800 mV での腐食速度は、サンドブラスト鋼で 0.0136 mm/yr 、発錆処理鋼で 0.0095 mm/yr 、防食率はサンドブラスト鋼で 84% 、発錆処理鋼で 74% と標準環境などに比べて腐食速度が大きく、防食率が低い。 -900 mV での腐食速度はサンドブラスト鋼で 0.000 mm/yr 、発錆処理鋼で 0.0026 mm/yr 、防食率はサンドブラスト鋼で 100% 、発錆処理鋼で 93% を示し、 -900 mV でほぼ完全な防食状態が得られた。

(3) 電流密度

標準、低温および希釈環境中でサンドブラスト鋼、発錆処理鋼を -800 mV 、 -850 mV 、 -900 mV 、 -950 mV 、 -1000 mV の電位に設定した時の電流密度は、いずれの設定電位とも試験開始後急

速に低減した後はほぼ定常値となる。電流密度の経時変化を標準環境を例にとり図4-3に示す。

電流密度はサンドブラスト鋼、発錆処理鋼とも実験開始後急速に低減するが、実験開始初期においては、サンドブラスト鋼に比べ発錆処理鋼の方が、また設定電位が卑になるほど大きな値であった。これは、発錆処理鋼においては、錆の還元で電流が消費され、また還元される錆の量が電位が卑なほど多いためと考えられる。電流密度が定常値となるまでに要する時間は、電位が卑なほど長くなる傾向にあるが、各設定電位における定常電流密度を表4-2～表4-4に示す。定常電流密度は標準、低温環境に比べ希釈環境中で大きな値となった。これは先に述べた腐食速度と対応するものであり、希釈海水に吹き込まれる空気量が過大であったため海水の攪拌、流動が標準、低温環境に比べ大きくなり鋼表面に供給される酸素量が増加した結果、自然電位での腐食速度および各設定電位における定常電流密度が大きくなったものと考えられる。

一般に、標準、低温および希釈環境中における定電位試験は、図4-3に示すように試験開始初期において過大な電流が試験片に流れるために、その後の電流の低減が著しい傾向にある。

汚染環境における電流密度の経時変化を図4-4に示す。

電流密度は、表面状態および設定電位による差異は小さく、サンドブラスト鋼、発錆処理鋼の各設定電位とも試験開始後急速に低減し、その後増加した後再び徐々に低下する傾向を示した。電流密度は、一般に変動が大きく定常電流密度は得られなかったが、標準環境などに比べて大きな値を示した。

4.1.2 定電流試験

定電位試験によって、各環境中での防食電位が推定できたが、電気防食設計に必要な設計電流密度が不明であるため各環境中で定電流試験を行った。電流密度は $20 \sim 300 \text{ mA/m}^2$ の範囲で設定しサンドブラスト鋼、発錆処理鋼の電位を測定した。試験終了後に重量測定を行い防食率を求めた。

(1) 電 位

各環境中におけるサンドブラスト鋼、発錆処理鋼の電位の経時変化を図4-5～図4-8に示す。また標準、低温および希釈環境中において -800 mV に達するのに要する日数および最終測定電位を表4-5～表4-7に示す。

標準、低温および希釈環境においては、サンドブラスト鋼、発錆処理鋼とも一定の電流密度以上では分極が進み -800 mV に達する。

-800 mV に達するのに要する日数、電流密度は、表面状態や環境により多少の変動があるものの電流密度が 80 mA/m^2 以上であればほぼ1カ月以内にいずれの環境、いずれの表面状態でも -800 mV に達する。したがって標準、低温および希釈環境中における防食設計電流密度は、 80 mA/m^2 と推定される。

汚染環境中ではサンドブラスト鋼、発錆処理鋼とも試験開始初期において分極が大きいが、その後電位は貴方向に変化した後はほぼ定常値を示した。サンドブラスト鋼と発錆処理鋼との電位の差異は小さく、 80 mA/m^2 で約 -800 mV 、 100 mA/m^2 で約 $-850 \sim -890 \text{ mV}$ 、 200 mA/m^2 で -1000 。

mVであった。したがって汚染環境中における防食電位を標準環境などより100mV卑な-900mVとすれば防食設計電流密度は100~200mA/m²と推定される。

(2) 防食率

各環境中における防食率を図4-9に示す。いずれの環境でも防食率は電流密度が増すにしたがって高くなったが、高電流密度の場合でも定電位試験、自然流電試験に比べて低い値であった。これは定電流試験では、防食状態に達するまである程度の日数を必要とするため、防食状態に達するまでの間の腐食が防食率を低下させており、長期間の試験では防食率はより高くなるものと考えられる。

4.1.3 自然電流試験

定電位試験および定電流試験によって、各環境中での防食電位、防食設計電流密度が推定できたが、防食状態を維持するための電流密度すなわち定常防食電流密度が不明であるため、各環境中で自然流電試験を行った。自然流電試験では、アルミニウム合金陽極と0.03~1.0kΩの範囲の挿入抵抗を介して短絡したサンドブラスト鋼および発錆処理鋼の電位、電流密度を測定した。試験終了後に重量測定を行い防食率を求めた。

(1) 電位および電流密度

各環境中におけるサンドブラスト鋼、発錆処理鋼の電位および電流密度の経時変化を図4-10~図4-13に、標準、低温および希釈環境における定常電位、定常電流密度を表4-8~表4-10に示す。

標準、低温および希釈環境中での試験開始初期における電流密度の低減および分極は、挿入抵抗が小さいほど大きく、またサンドブラスト鋼に比べ発錆処理鋼で顕著である。時間の経過にともなう、サンドブラスト鋼と発錆処理鋼との差は小さくなりほぼ定常値となる。定常となった電位と電流密度の関係を図4-14に示す。-800mVを維持するに必要な定常電流密度は、表面状態や環境により多少異なり30mA/m²~40mA/m²と推定される。

汚染環境中ではサンドブラスト鋼、発錆処理鋼とも試験開始初期において電流密度の低減および分極が大きく、その後電流密度が増加し、分極が小さくなった後再び電流密度は低減し、分極が大きくなる傾向があり、定常値は得られなかったが-900mVを維持するのに必要な電流密度は80mA/m²~100mA/m²とみなせる。したがって汚染環境中における定常防食電流密度は100mA/m²と推定される。

(2) 防食率

各環境における防食率を図4-15に示す。挿入抵抗が小さくなるほど防食率は高くなる。標準、低温および希釈環境では、挿入抵抗0.1kΩで93%以上、汚染環境では0.05kΩで89%以上の防食率が得られた。

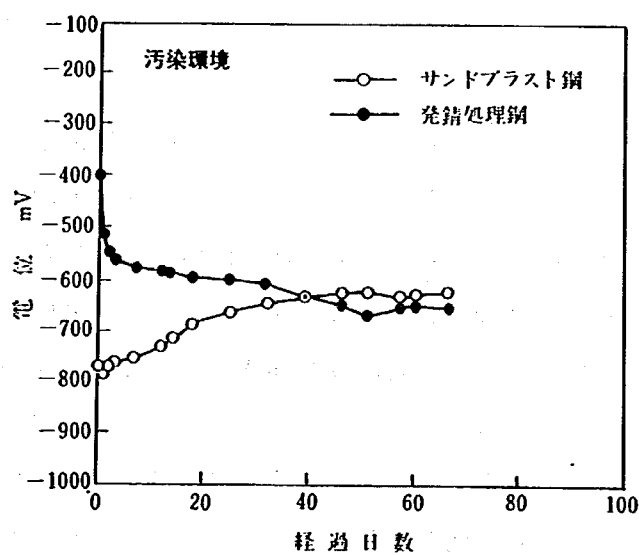
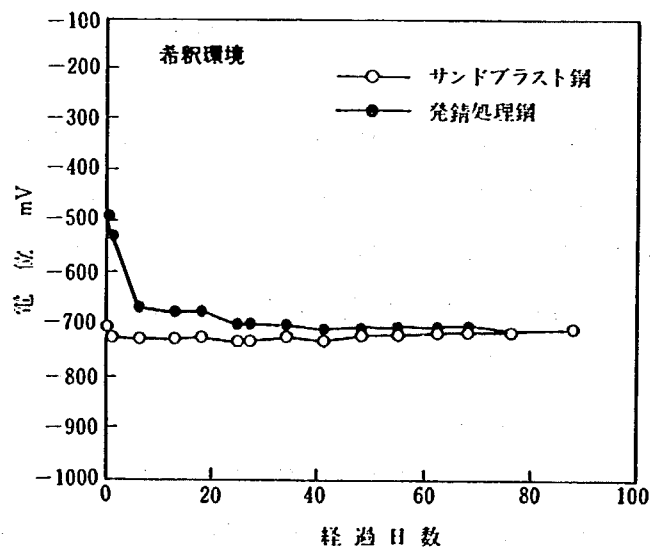
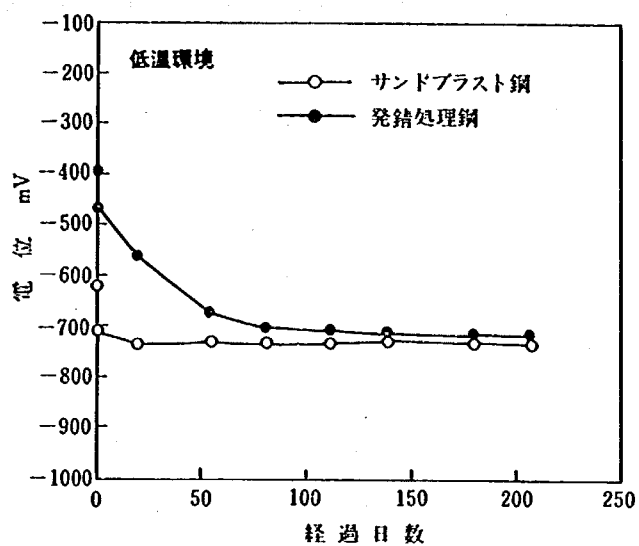
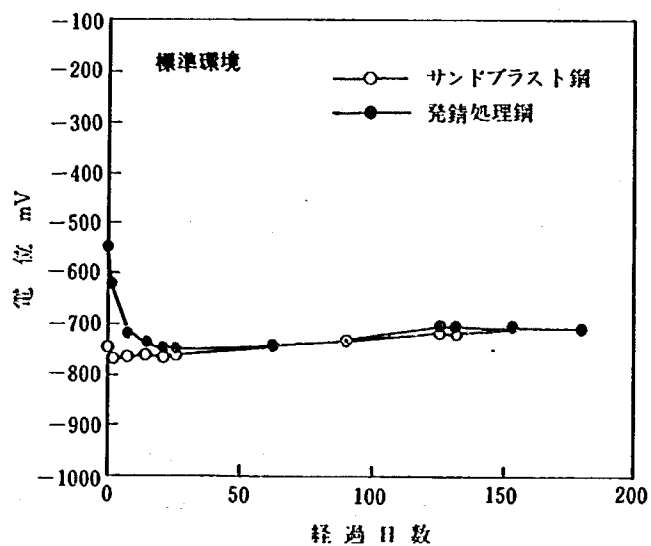


図4-1 各種環境中における自然電位の経時変化

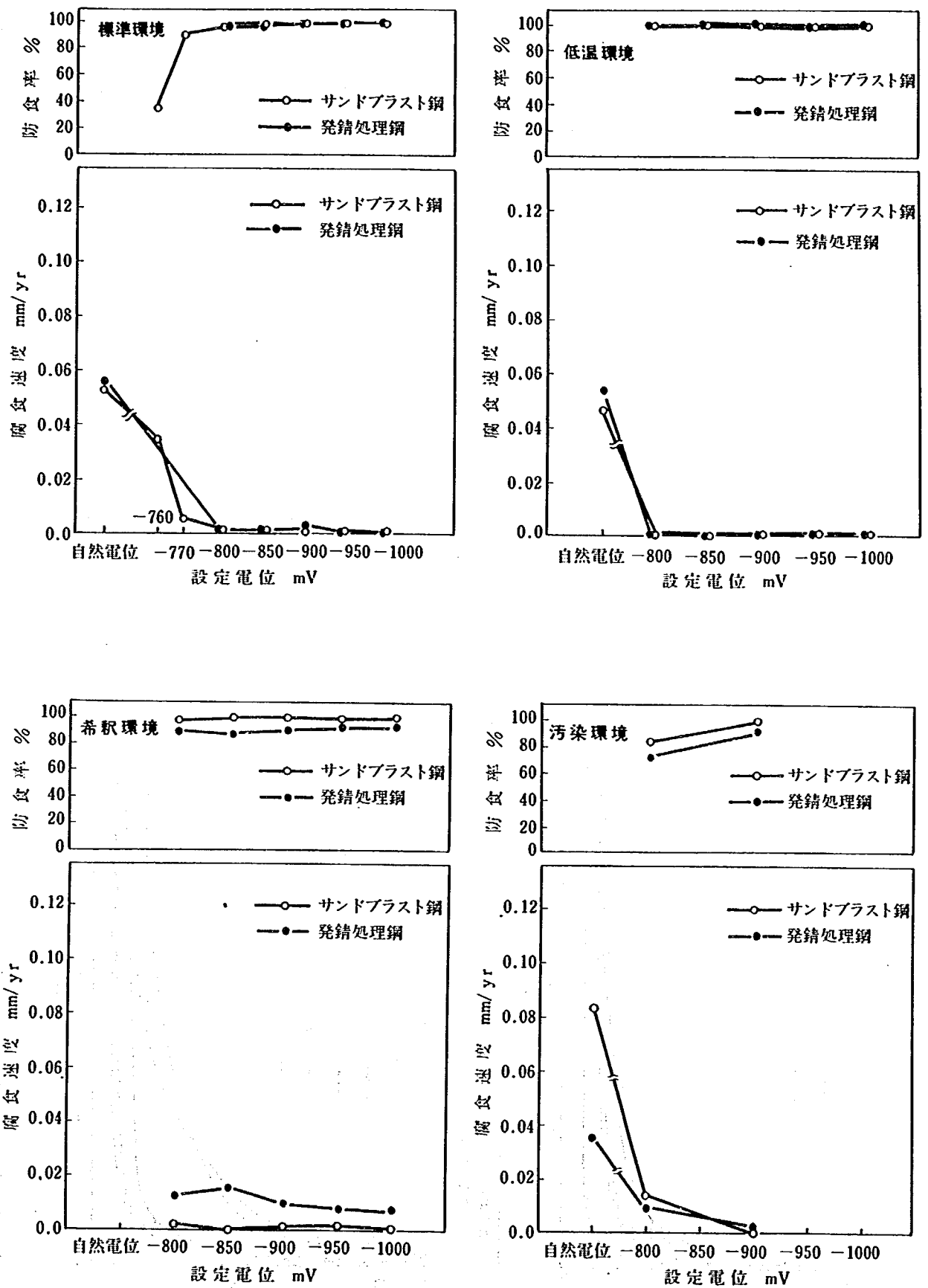


図 4-2 各種環境中における腐食速度および防食率 (定電位試験)

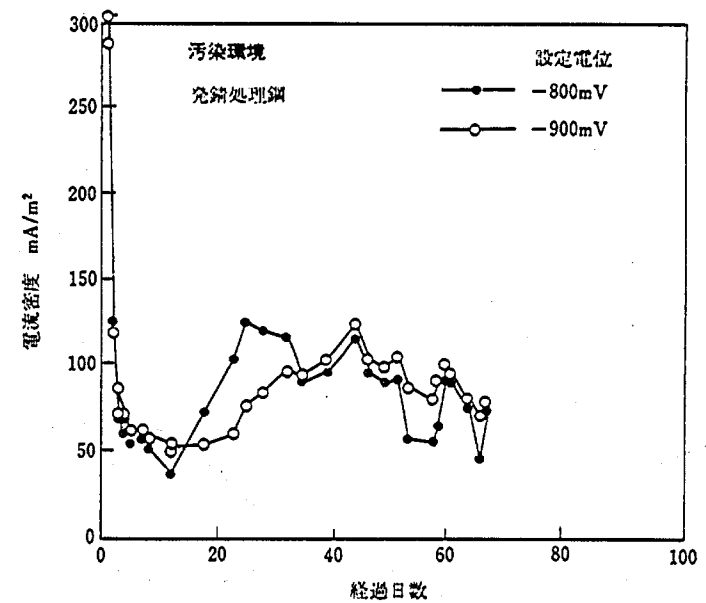
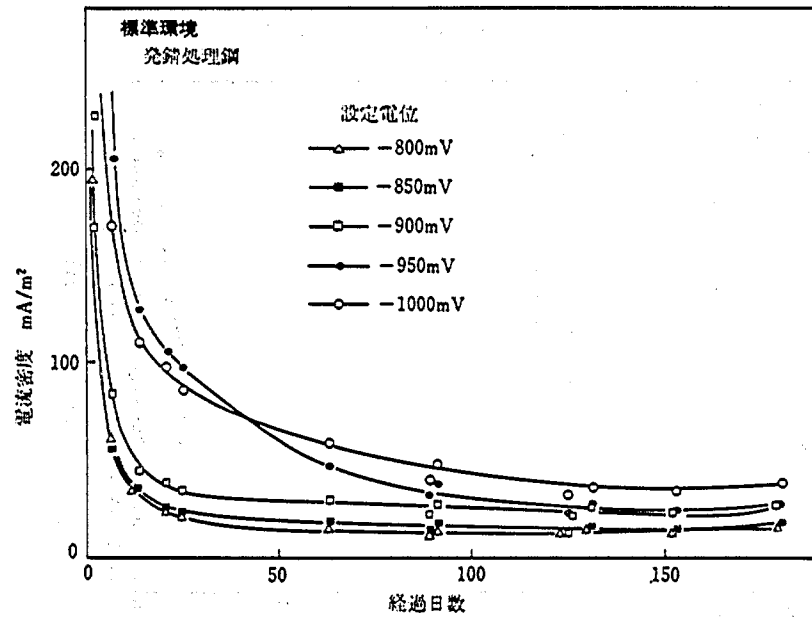
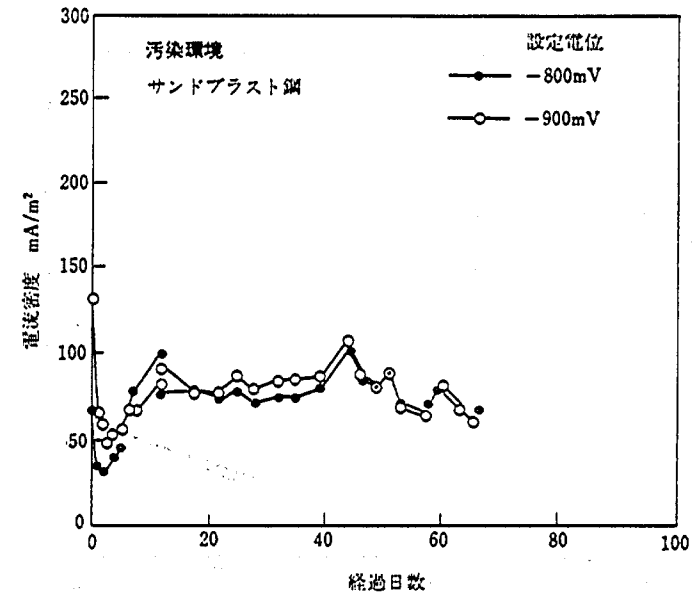
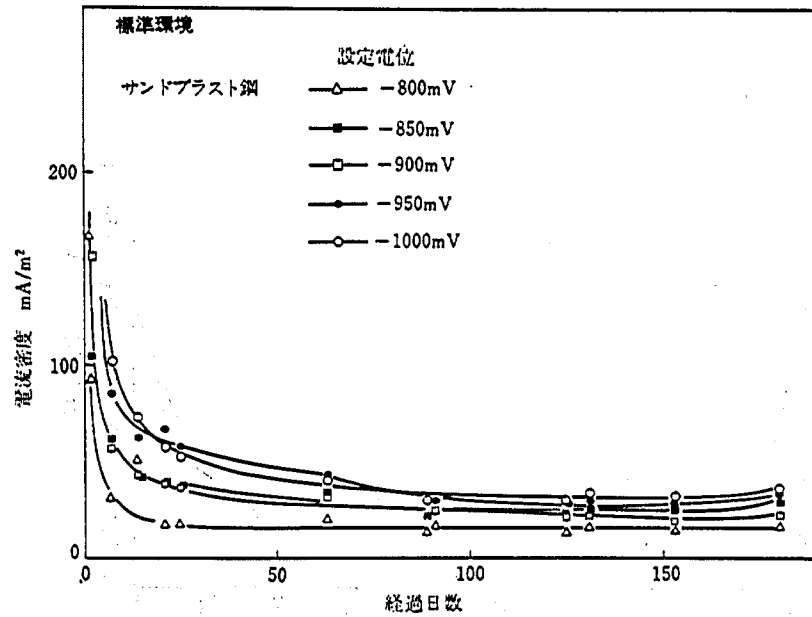


図 4-3 標準環境中における電流密度経時変化（定電位試験）

図 4-4 汚染環境中における電流密度の経時変化（定電位試験）

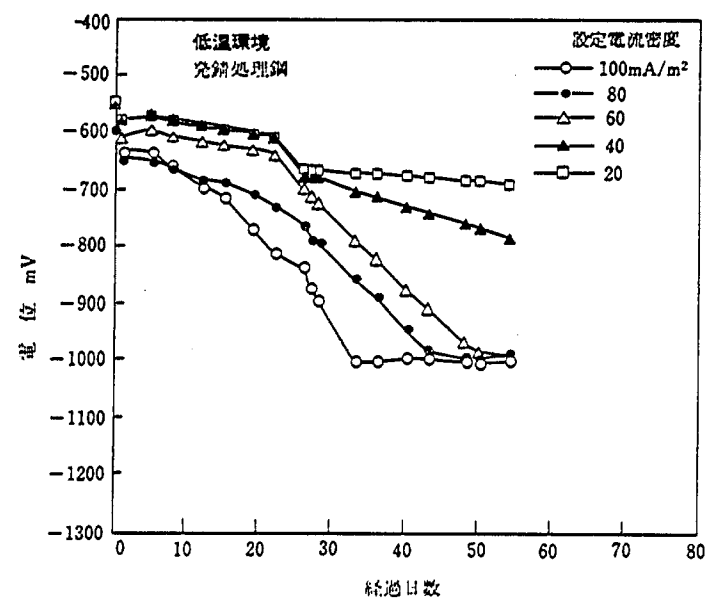
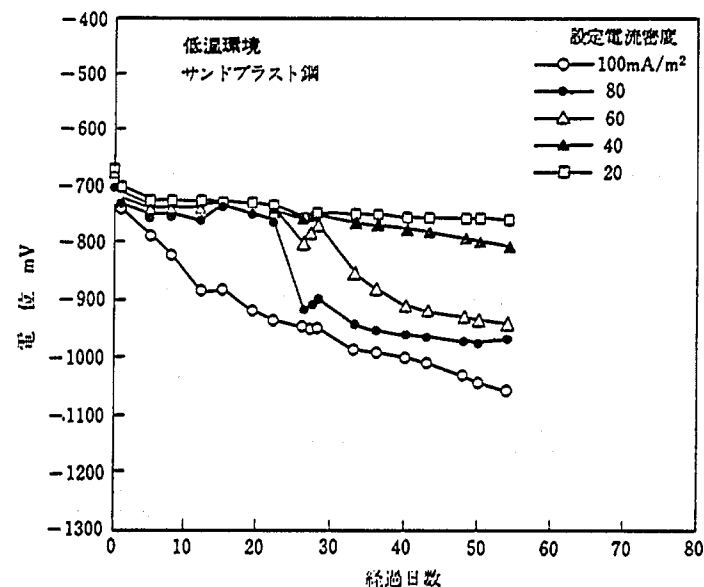
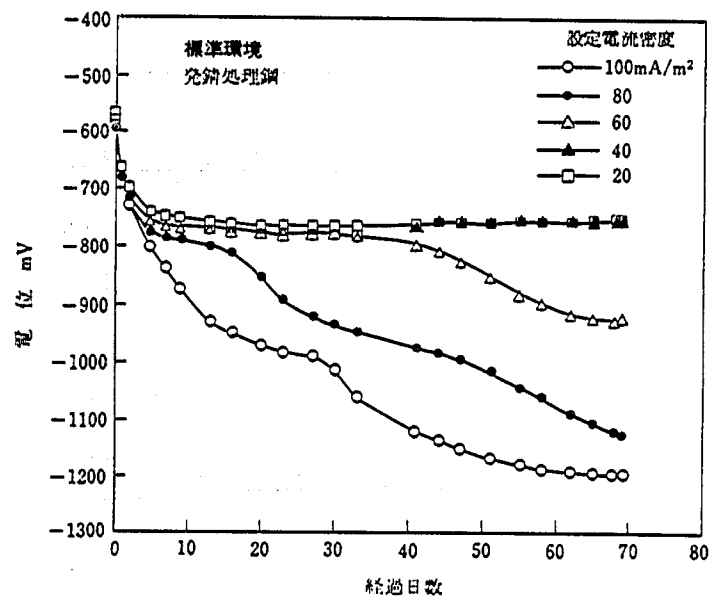
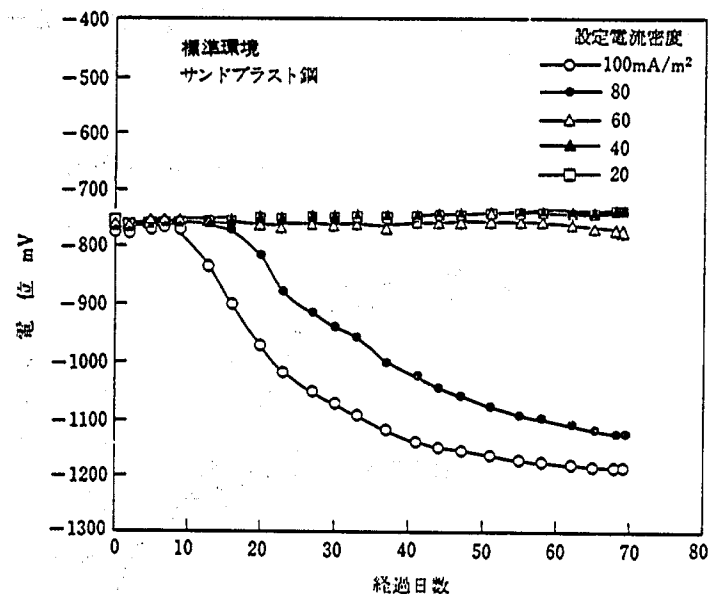


図 4-5 標準環境中における電位の経時変化 (定電流試験)

図 4-6 低温環境中における電位の経時変化 (定電流試験)

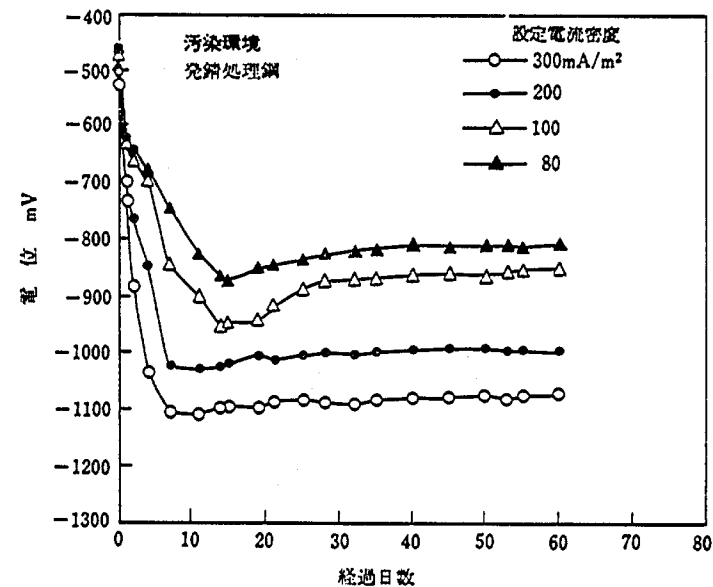
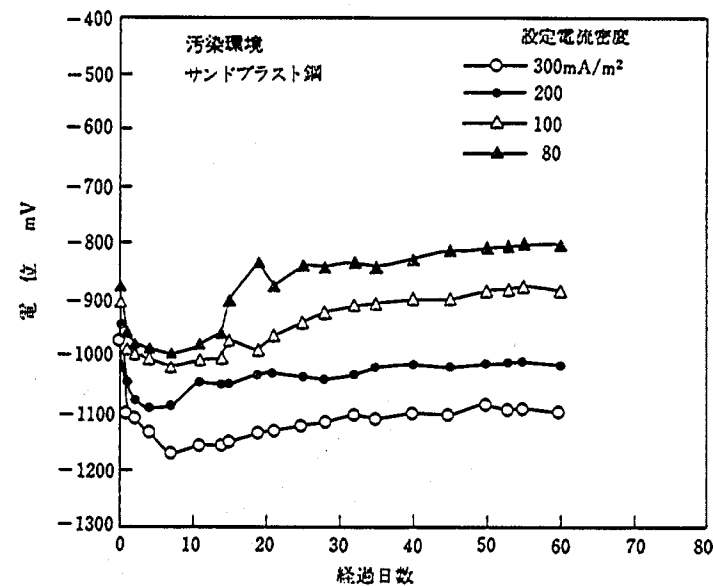
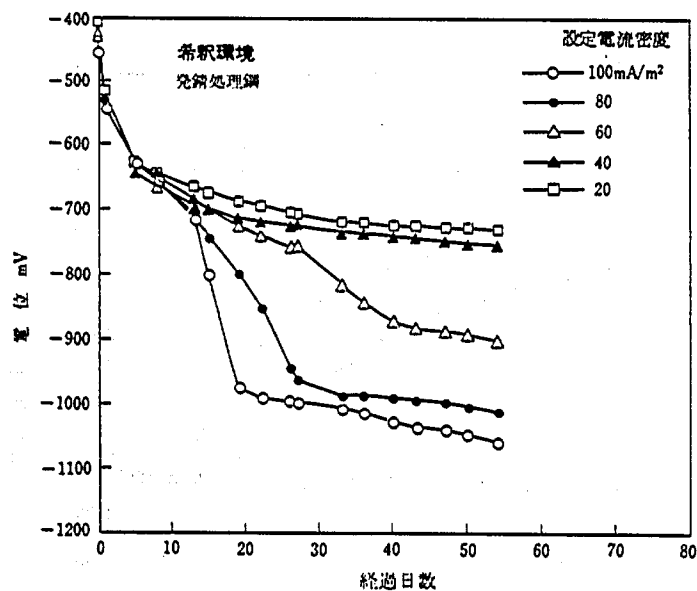
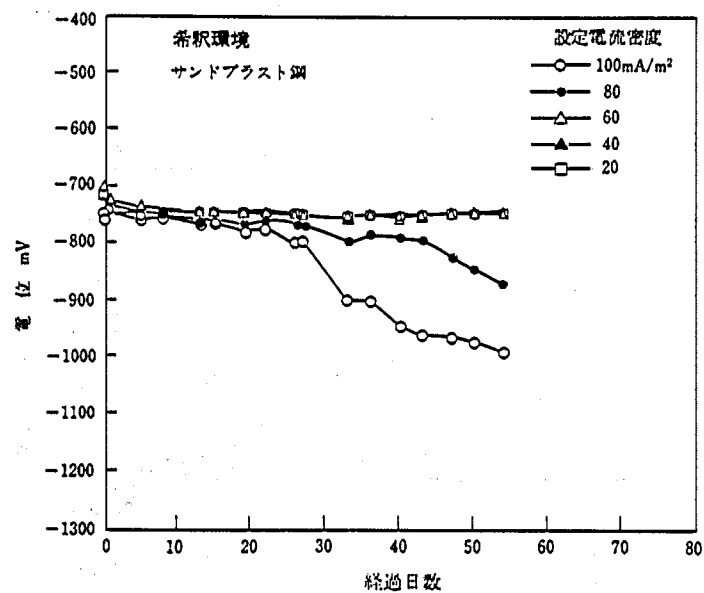


図 4-7 希釈環境中における電位の経時変化 (定電流試験)

図 4-8 汚染環境中における電位の経時変化 (定電流試験)

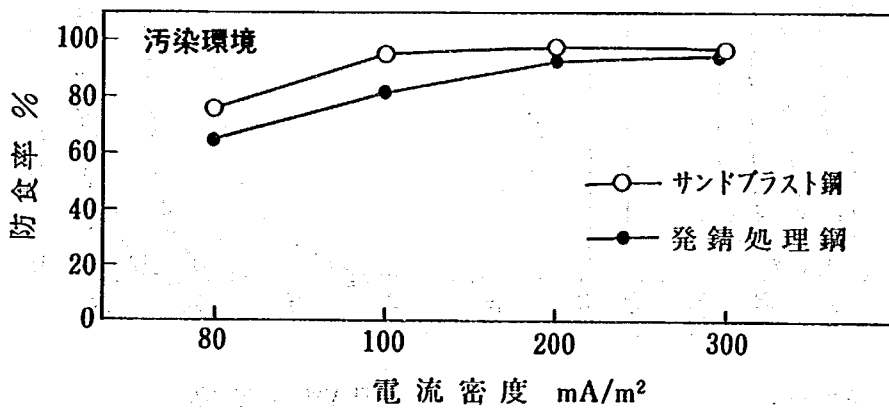
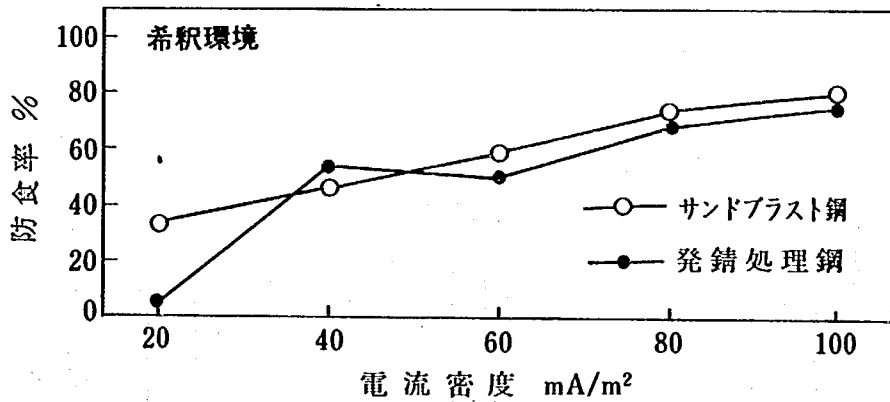
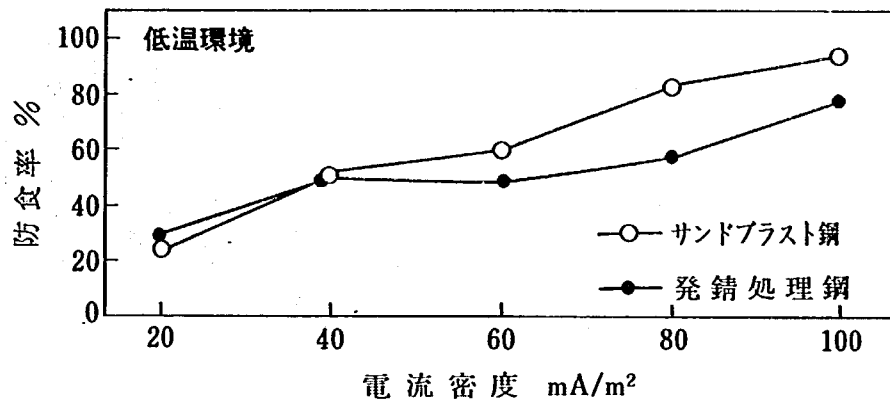
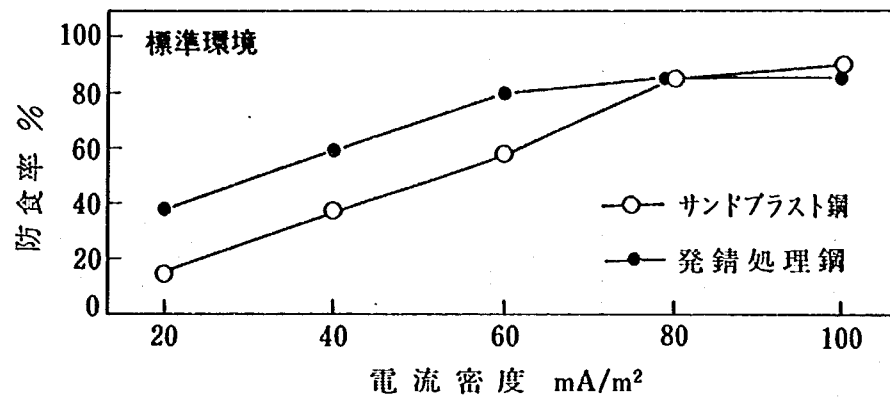


図4-9 各種環境中における防食率（定電流試験）

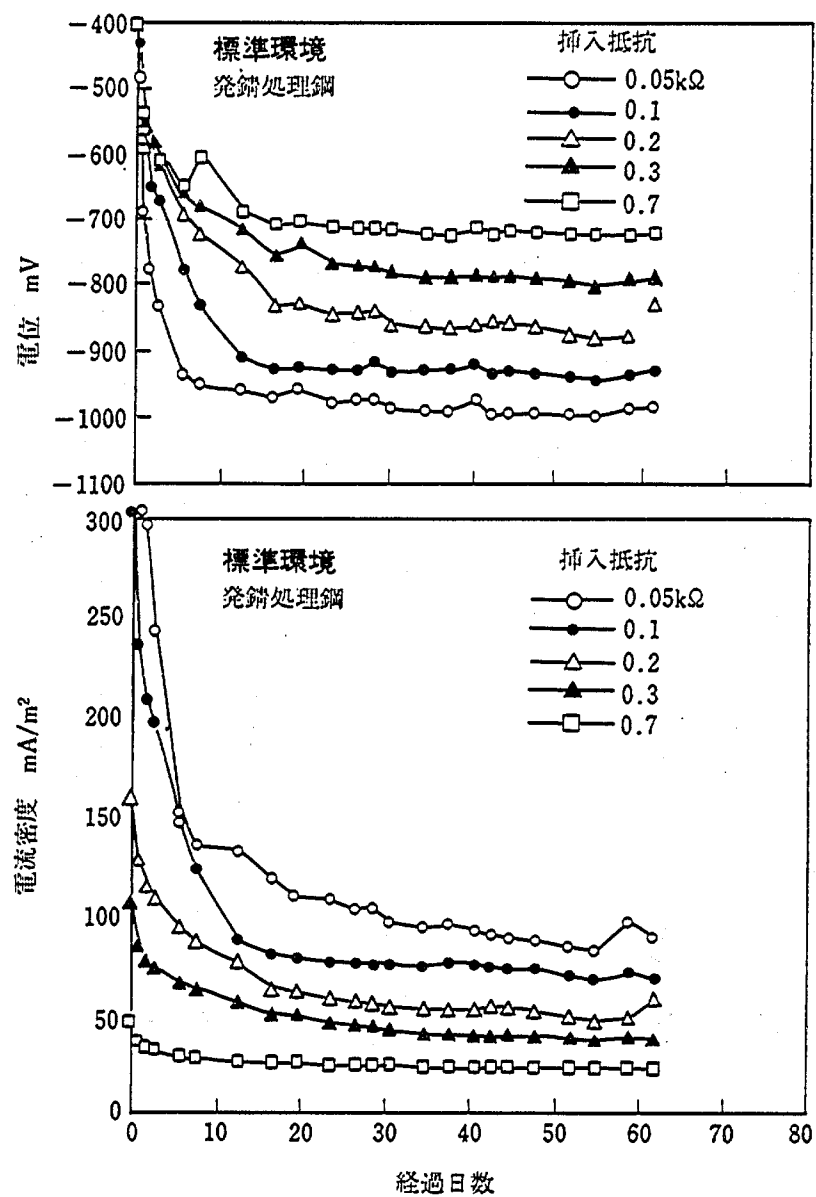
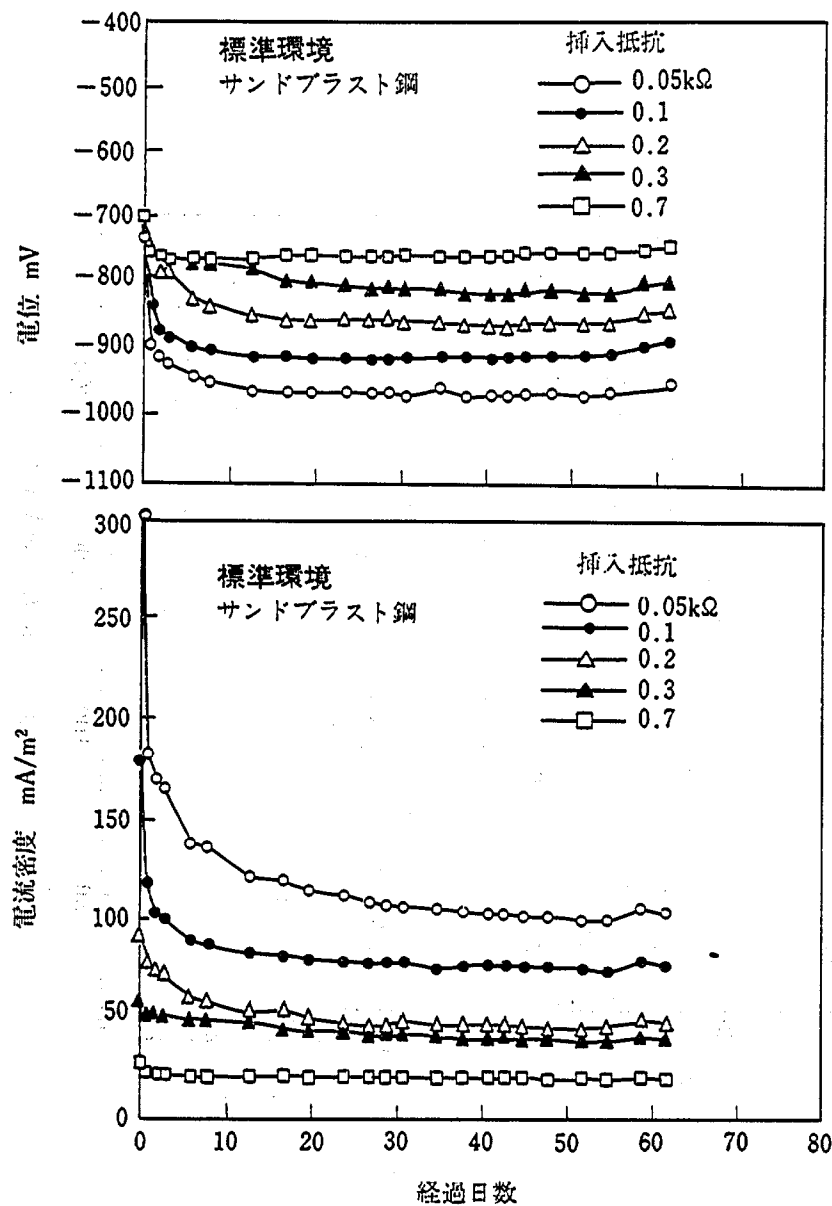


図4-10 標準環境中における電位，電流密度の経時変化（自然流電試験）

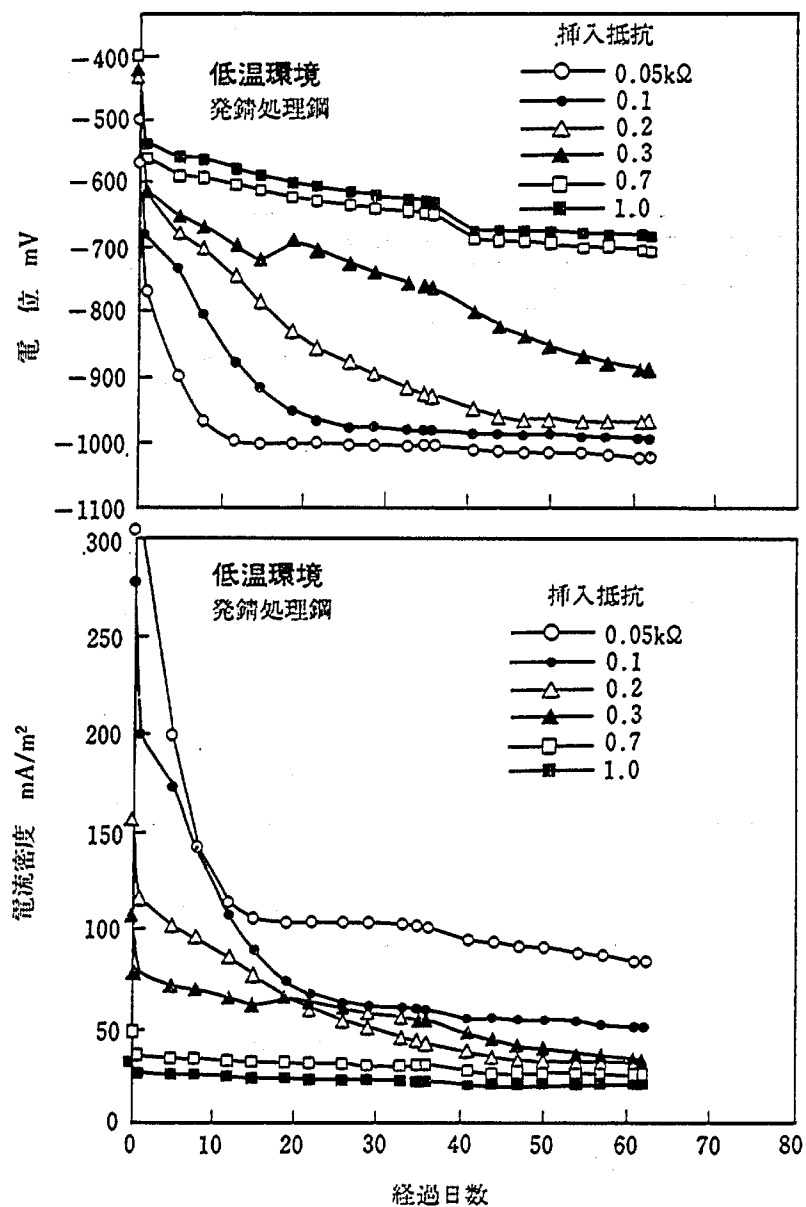
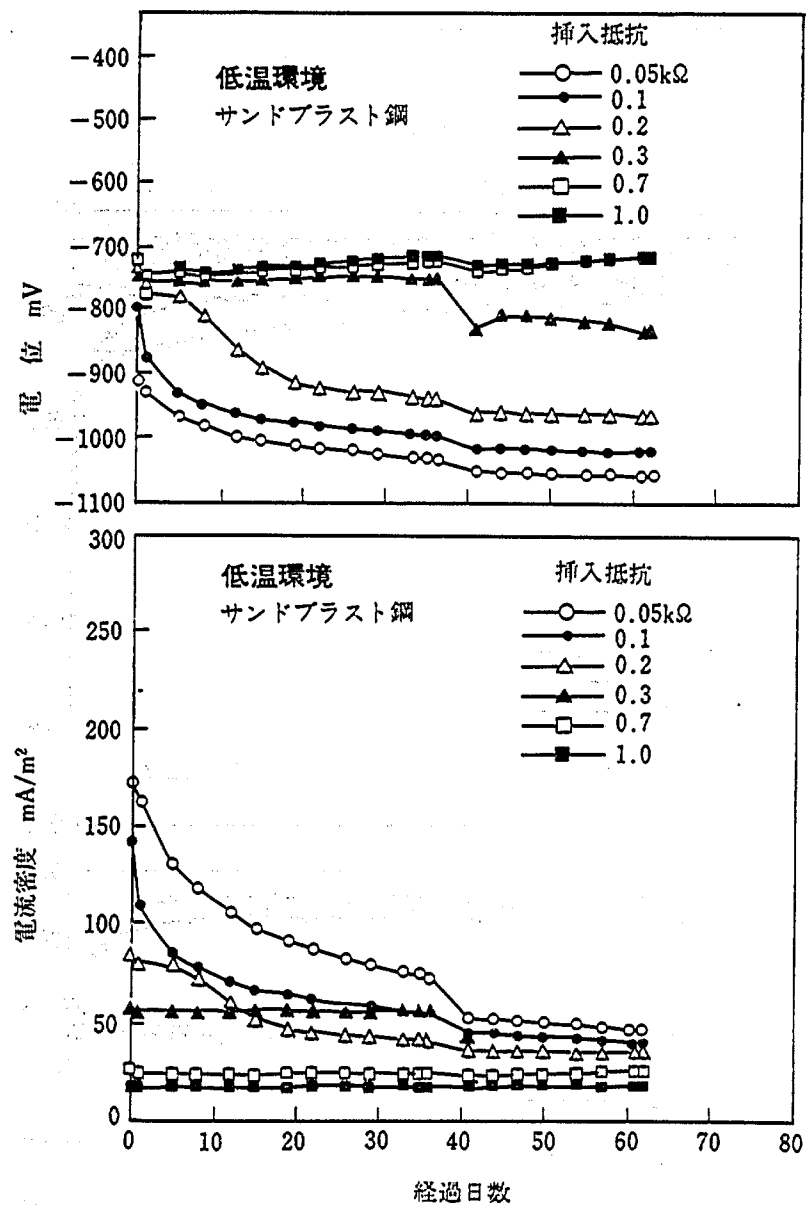


図4-11 低温環境中における電位、電流密度の経時変化(自然流電試験)

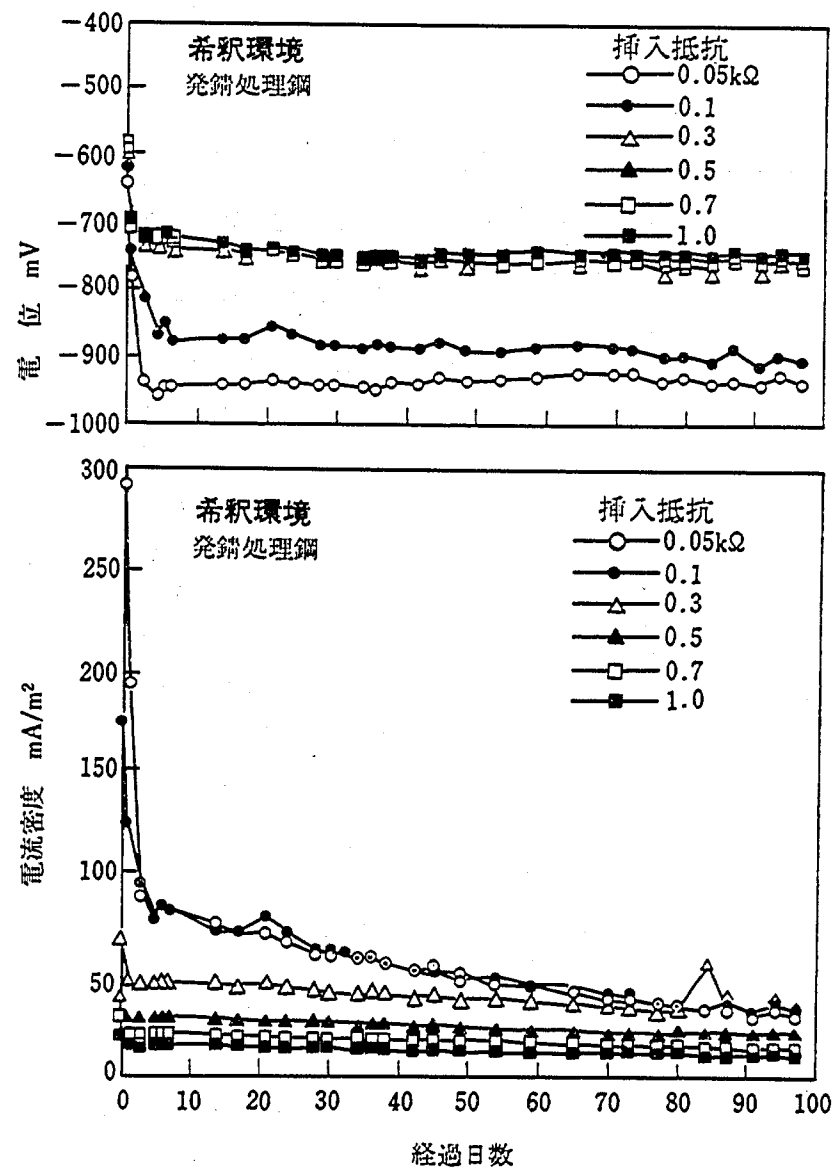
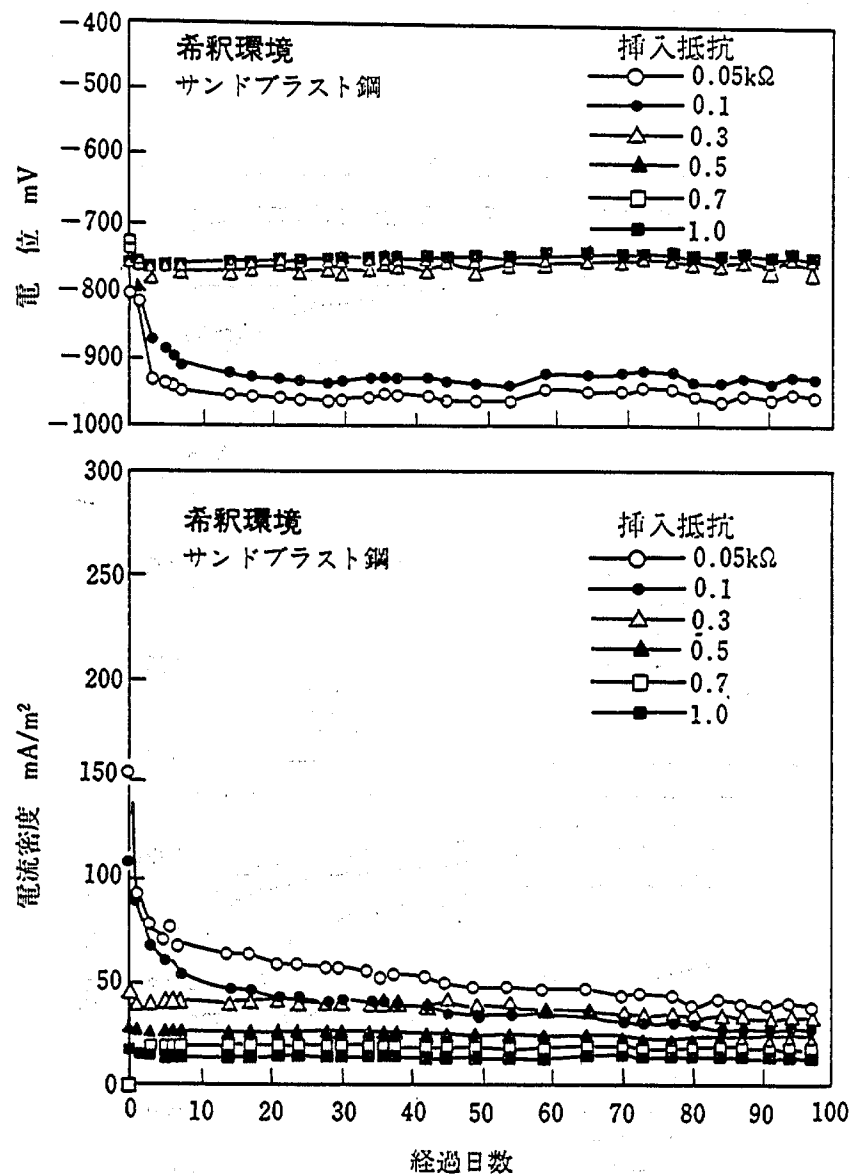


図 4 - 12 希釈環境中における電位，電流密度の経時変化（自然流電試験）

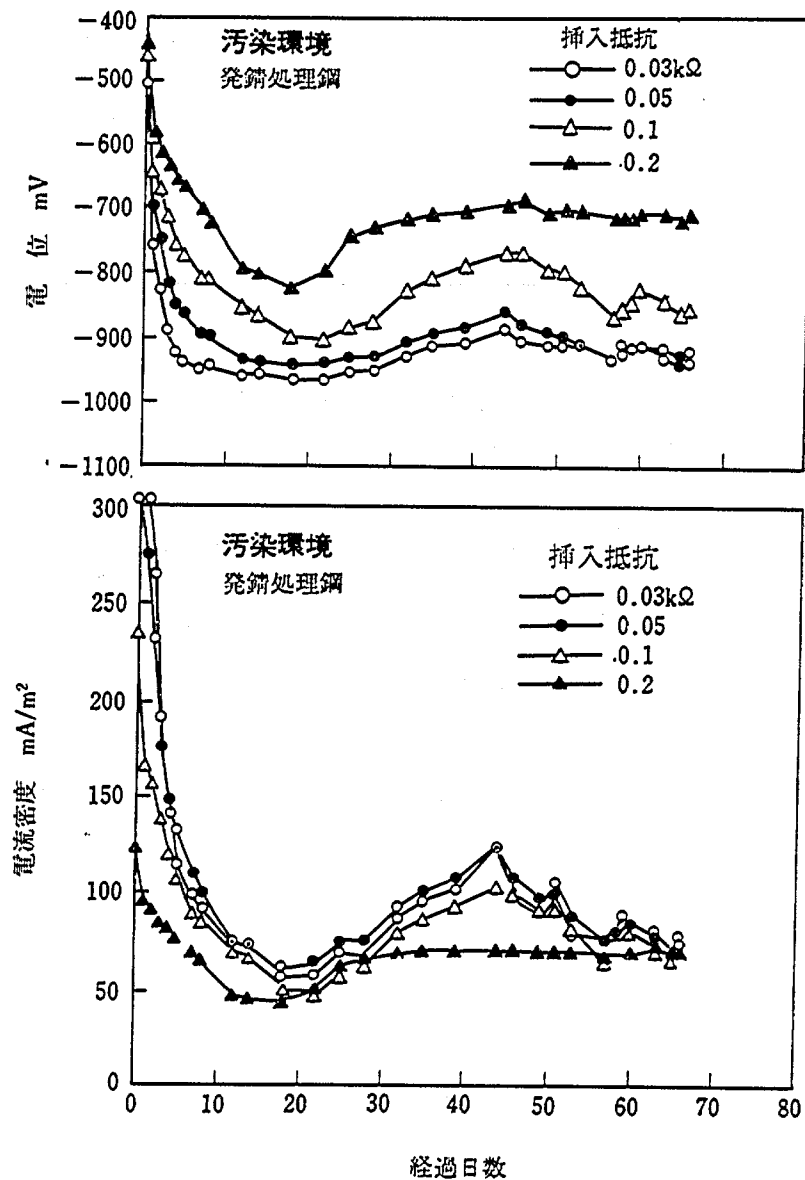
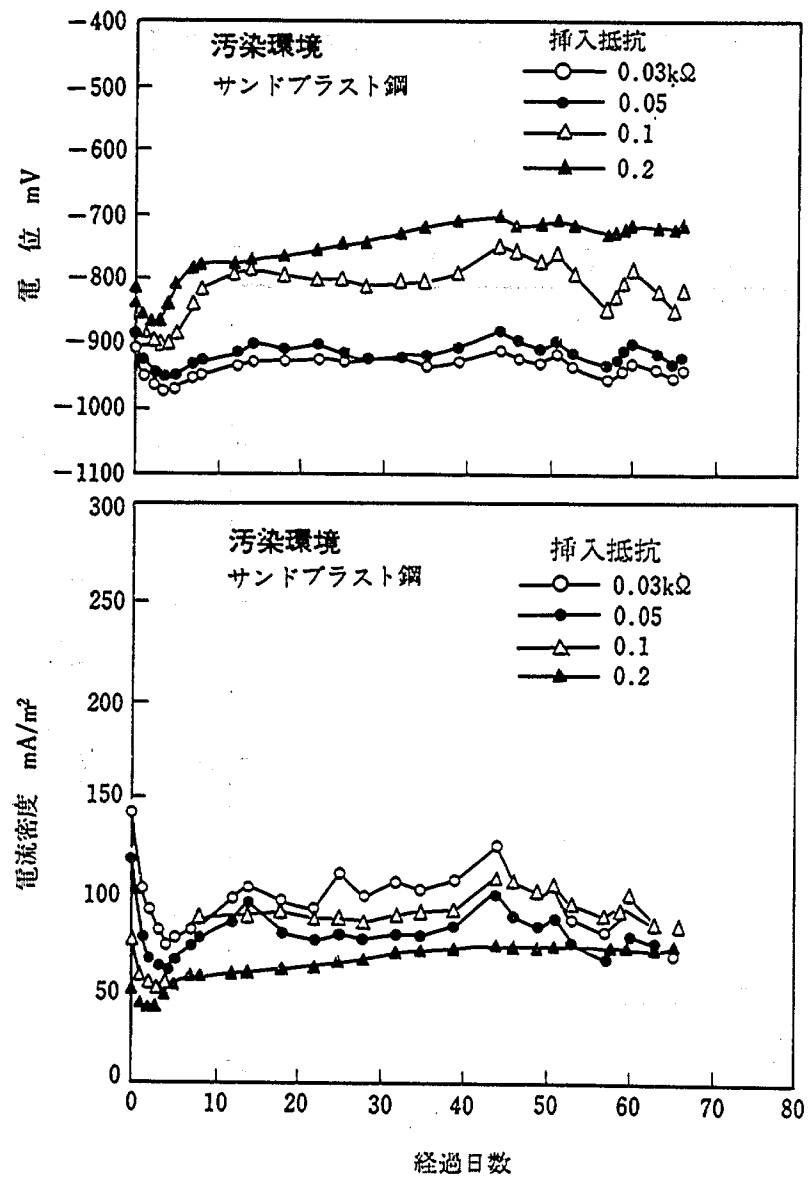


図4-13 汚染環境中における電位，電流密度の経時変化（自然流電試験）

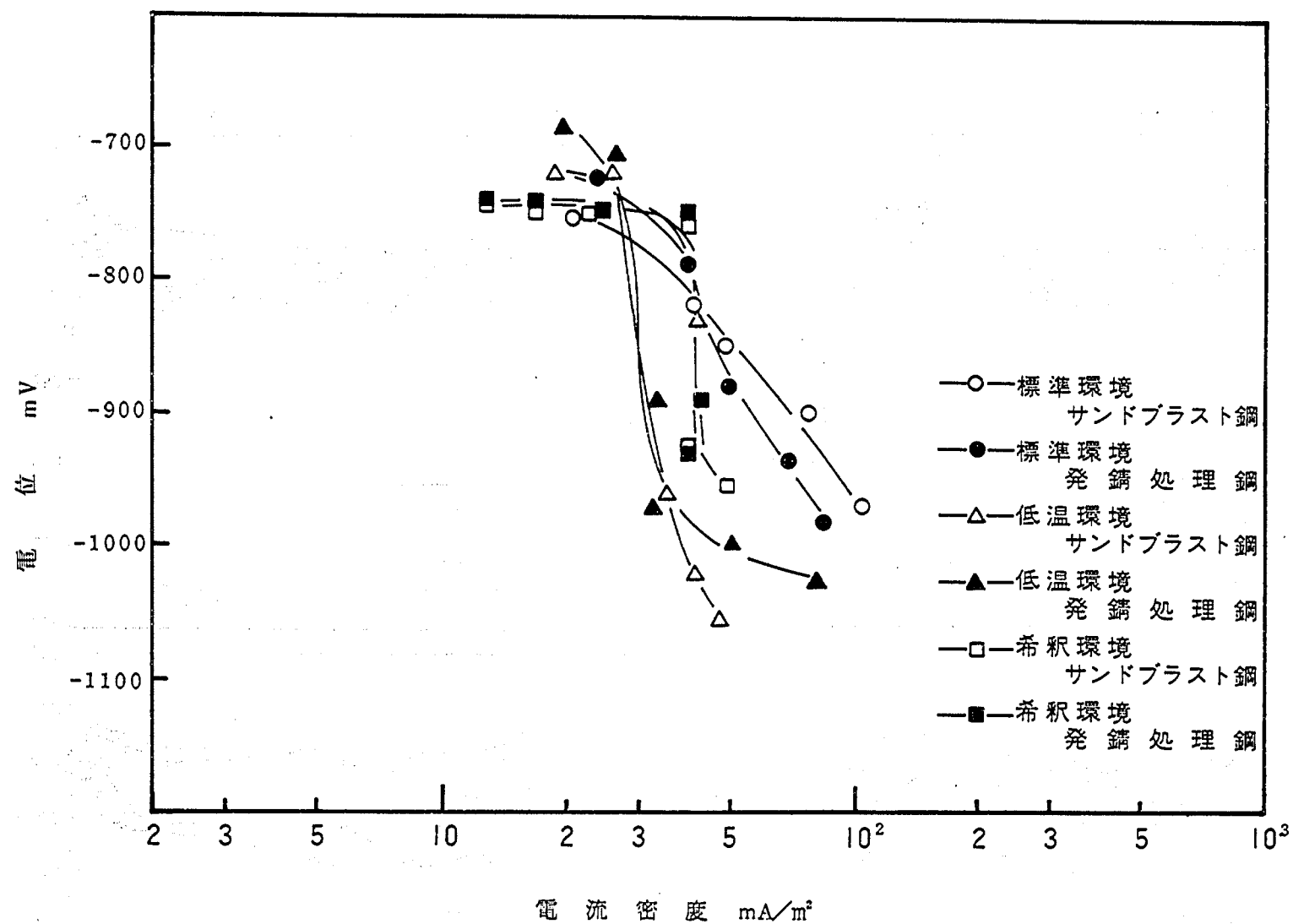


図4-14 標準、低温および希釈環境中における定常電位と定常電流密度の関係（自然流電試験）

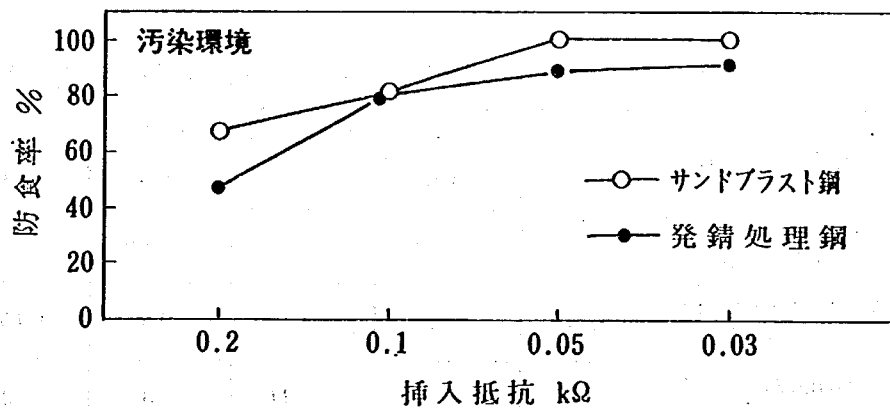
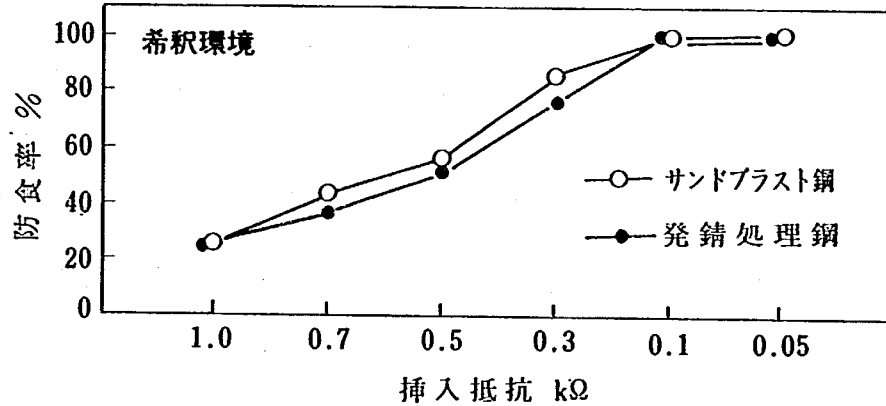
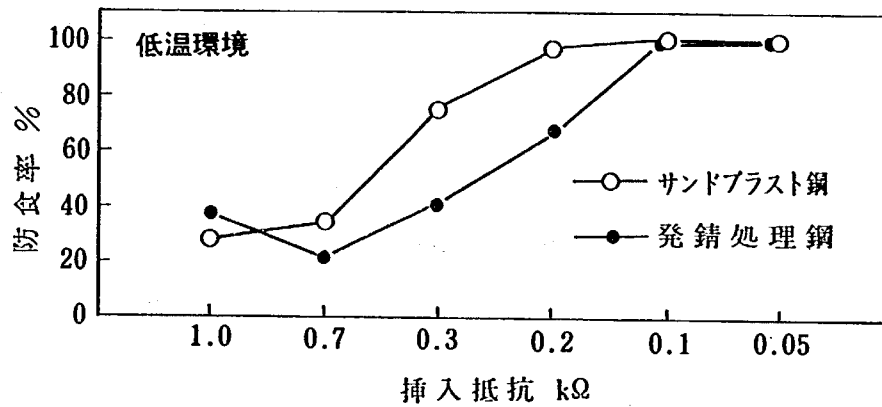
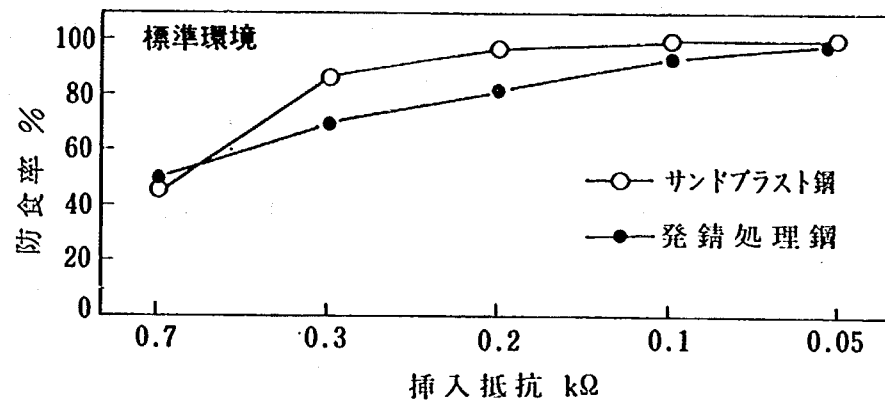


図4-15 各種環境中における防食率（自然流電試験）

表 4-1 各種環境中における自然電位 (定常値)

mV

銅 種	標 準 環 境	低 温 環 境	希 釈 環 境	汚 染 環 境
サンドブラスト銅	-707	-730	-707	-620
発 錆 処 理 銅	-709	-716	-704	-643

表 4-2 標準環境中における電流密度 (定常値)

mA/m²

銅 種 \ 設定電位 (mV)	-760	-770	-800	-850	-900	-950	-1000
サンドブラスト銅	26	17	15	28	23	30	35
発 錆 処 理 銅	—	—	15	15	25	28	38

表 4-3 低温環境中における電流密度 (定常値)

mA/m²

銅 種 \ 設定電位 (mV)	-800	-850	-900	-950	-1000
サンドブラスト銅	12	23	11	5	5
発 錆 処 理 銅	3	4	8	14	18

表 4-4 希釈環境中における電流密度 (定常値)

mA/m²

銅 種 \ 設定電位 (mV)	-800	-850	-900	-950	-1000
サンドブラスト銅	51	61	59	78	38
発 錆 処 理 銅	81	68	65	86	74

表 4-5 標準環境中における所要日数および最終測定電位

銅 種	項 目	電 流 密 度 (mA/m ²)				
		20	40	60	80	100
サンドブラスト銅	-800mVに到達するに要する日数	—	—	—	20	13
	最 終 測 定 電 位 (mV)	-741	-737	-773	-1129	-1190
発 錆 処 理 銅	-800mVに到達するに要する日数	—	—	44	16	5
	最 終 測 定 電 位 (mV)	-749	-751	-920	-1128	-1204

表 4-6 低温環境中における所要日数および最終測定電位

銅 種	項 目	電 流 密 度 (mA/m ²)				
		20	40	60	80	100
サンドブラスト銅	-800mVに到達するに要する日数	—	54	33	26	8
	最 終 測 定 電 位 (mV)	-758	-802	-937	-964	-1056
発 錆 処 理 銅	-800mVに到達するに要する日数	—	—	36	33	22
	最 終 測 定 電 位 (mV)	-686	-780	-987	-987	-998

表 4-7 希釈環境中における所要日数および最終測定電位

鋼 種	項 目	電 流 密 度 (mA/m^2)				
		20	40	60	80	100
サンドブラスト鋼	-800mVに到達するに要する日数	-	-	-	47	33
	最終測定電位 (mV)	-745	-741	-746	-869	-991
発錆処理鋼	-800mVに到達するに要する日数	-	-	33	22	19
	最終測定電位 (mV)	-729	-753	-899	-1010	-1056

表 4-8 標準環境における定常電位、電流密度

鋼 種	項 目	挿 入 抵 抗 ($\text{k}\Omega$)				
		0.7	0.3	0.2	0.1	0.05
サンドブラスト鋼	定 常 電 位 (mV)	-755	-820	-850	-900	-970
	定 常 電 流 密 度 (mA/m^2)	21	41	49	78	105
発錆処理鋼	定 常 電 位 (mV)	-725	-790	-880	-935	-982
	定 常 電 流 密 度 (mA/m^2)	24	40	50	70	85

表 4-9 低温環境中における定常電位、電流密度

鋼 種	項 目	挿 入 抵 抗 ($\text{k}\Omega$)					
		1.0	0.7	0.3	0.2	0.1	0.05
サンドブラスト鋼	定 常 電 位 (mV)	-720	-720	-830	-960	-1018	-1053
	定 常 電 流 密 度 (mA/m^2)	19	26	43	36	42	47
発錆処理鋼	定 常 電 位 (mV)	-685	-706	-890	-968	-996	-1024
	定 常 電 流 密 度 (mA/m^2)	20	27	34	33	51	83

表 4-10 希釈環境中における定常電位、電流密度

鋼 種	項 目	挿 入 抵 抗 ($\text{k}\Omega$)					
		1.0	0.7	0.5	0.3	0.1	0.05
サンドブラスト鋼	定 常 電 位 (mV)	-745	-750	-750	-760	-925	-955
	定 常 電 流 密 度 (mA/m^2)	13	17	23	40	40	50
発錆処理鋼	定 常 電 位 (mV)	-740	-745	-750	-750	-890	-930
	定 常 電 流 密 度 (mA/m^2)	13	17	25	40	43	40

4.2 流速環境下での電気防食特性試験

4.2.1 定電位試験

海水を $0.25 \sim 8 \text{ m/s}$ の流速で循環させ、1～2ヵ月間試を行った。設定電位が $-570 \sim 900 \text{ mV}$ の試験片については、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および防食率を求めた。

(1) 自然電位

各流速における裸鋼材の自然電位の経時変化を図4-16に示す。試験開始直後では $-500 \sim -600 \text{ mV}$ の貴な電位を示すが、急速に卑な値となり、約10日以降はほぼ定常値となった。自然電位は流速に依存し、大きな流速ほど貴な値となり、 $0.25 \sim 8 \text{ m/s}$ の各流速に対し、それぞれ -705 , -690 , -675 , -635 , -610 および -580 mV であった。このような自然電位の挙動は、試験片表面への溶存酸素の供給量の差により現われる。すなわち、流速が大きいほど試験片表面への溶存酸素の供給量が多くなるためである。

また、各流速における塗装鋼材の自然電位経時変化を図4-17に示す。浸漬直後では、防食下のジンクリッチペイントの影響を受け、約 -1040 mV の電位を示したが、急速に貴化し -600 mV 前後の値となった。その後徐々に卑な電位となり約 -620 mV で安定し、しかも流速の差異による影響はほとんど見られなかった。それは、スクラッチ部が幅約 0.5 mm 、深さ 0.2 mm の細長い隙間であり、その隙間内には、静止水膜が滞留するとともに腐食生成物がたい積するので、スクラッチ底部の金属面では、これらが障壁となって、流速の影響を受けなくなるためと考えられる。また、塗装鋼材は裸鋼材に比べて貴な電位を示しているが、これはスクラッチ部（陽極となっている）で生じた腐食生成物の加水分解によって pH が低下するためと考えられる。

(2) 腐食速度および防食率

非電気防食試験片の各流速における腐食速度を図4-18に示す。標準環境（ほぼ静止状態）における腐食速度が約 0.06 mm/yr であるのに対し 0.25 , 0.1 , 1 および 2 m/s の流速ではそれぞれ 0.2 , 0.26 , 0.4 および 0.535 mm/yr であり非常に大きな値であった。更に流速が増し 3 , 4 , 5 および 8 m/s となると腐食速度も更に大きな値となるが、その増加率は流速の増大とともに減少した。

海水中における鋼の腐食速度は、鋼表面に対する溶存酸素の拡散速度に支配されているが、流速が増大すると、溶存酸素の拡散速度が増大するので、鋼の腐食速度は、流速の影響を受けて大きくなる。しかし、鋼表面に腐食生成物が生成しある程度厚くなると溶存酸素の拡散は妨げられ、その後の腐食は小さくなり流速の影響は多少なりとも緩和される。これにより上に示したような流速と腐食速度の関係が得られたものと考えられる。

電気防食試験片の各流速における腐食速度および防食率を図4-19に示す。腐食速度は、非電気防食防食時の $1/100$ 程度であり非常に小さな値である。

腐食量の小さなことによる若干のバラツキを考慮すると、 -800 および 900 mV の防食条件では、

腐食速度は、流速にかかわらず約 0.003 mm/yr の値になるとみなされる。一方、防食率は -800 および -900 mV の電位で 98% 以上の高い値を示し、ほとんど流速の影響が見られなかった。

また、 1 および 4 m/s の流速における設定電位と防食率の関係を図 4-20 に示す。設定電位が -720 mV よりも卑な電位では、流速に関係なく 98% 以上の防食率が得られた。しかし -720 mV よりも貴な電位になると、流速の影響を受けるようになり、流速が小さいほど防食率は急速に低下し、 1 m/s で -620 mV では -286% 、 4 m/s で -620 mV では 82.3% であった。このような防食率の低下は、自然電位と関係している。図 4-16 で示したように、自然電位は流速が大きいほど貴な電位であるから、設定電位が同一であれば、自然電位と設定電位との差、すなわち陰分極は流速が大きいほど大きくなり、陰分極が防食に寄与する割合が高くなるためと考えられる。流速が 1 m/s よりも小さい 0.25 および 0.5 m/s では、自然電位が約 -700 mV であることから 98% 以上の高い防食率を得るためには -750 mV よりも卑な電位に設定すべきと考えられる。しかし、本試験のように定常的な流速のもとでは一般に言われている防食電位 (-770 mV) よりも貴な値で高い防食率を達成することができるが、実構造物においては流速が時間的あるいは場所的に変化するので、静止に準じ -770 mV を防食電位とすべきである。

(3) 防食電流密度

流速と防食電流密度の関係を図 4-21 に示す。試験開始直後では同図(1)にみられるように $0.5 \sim 8 \text{ m/s}$ の流速において、防食電流密度は、設定電位が -800 mV の場合では $2.2 \sim 5.9 \text{ A/m}^2$ 、設定電位が -900 mV の場合では $3.1 \sim 10.8 \text{ A/m}^2$ と非常に大きな値であった。電流は、時間の経過とともに急速に低減し流速ごとにある定常値(準定常値)となった。設定電位が -800 mV および -900 mV での低減の様子を代表として 8 m/s の場合を図 4-22 に示す。電流密度は、15 日経過後、各設定電位ごとにはほぼ定常値に達し、初期値の約 $1/5$ に低下した。明らかに異常と思われる電流密度を示すものを除き、流速と電流密度の準定常値との関係を図 4-21(2)に示す。試験開始直後と同様に準定常電流密度は設定電位に依存し $0.5 \sim 8 \text{ m/s}$ の流速に対し -800 mV で $110 \sim 290 \text{ mA/m}^2$ 、 -900 mV で $250 \sim 520 \text{ mA/m}^2$ であることから、 $0.5 \sim 2 \text{ m/s}$ の低流速では準定常電流密度は流速の増大とともに急激に増加せるが、 2 m/s 以上の高流速では電流の増加率が低下した。特に -800 mV では $2 \sim 8 \text{ m/s}$ で流速による変化が少なかった。一方、図 4-21 の(1)と(2)を比較すると、電流密度は、時間の経過とともに著しく減少し、約 1 カ月経過後の準定常値は初期値の $1/10$ 以下に低減することがわかった。

防食電位を決定するために 1 および 4 m/s の流速において行った $-520 \sim -770 \text{ mV}$ の試験における電流密度の経時変化をそれぞれ図 4-23 および図 4-24 に示す。電流密度の経時変化は、上述の試験の場合と同様な傾向を示すが、 1 m/s で -620 mV では 5 日以降に防食電流から腐食電流に変化し約 1500 mA/m^2 の大きさとなった。また、 1 m/s で -670 mV および 4 m/s で -620 mV では電流が零近くまで低下し逆転の気配を示した試験片もあり、防食率は比較的高い値を示しているが、かなり不安定な状態といえる。他の試験片では、電流密度、流速と設定電位に依

存し、流速が大きく、かつ設定電位が卑なほど電流密度は大きかった。

また、1および4 m/sの流速における設定電位と電流密度の準定常値との関係を図4-25に示す。自然電位よりもわずかに卑な電位になると、電流密度は急激に大きくなる。更に電位が卑な値になると電流密度は大きくなるが、その変化が低下した。しかし-900mVでは電流が急増した。これは本試験期間では、電流密度は完全な定常状態になっていないためであり、真の定常電流密度であれば、電位に対する変化は更に小さくなると考えられる。

塗装鋼材を試験片とした場合の電流密度の経時変化を図4-26に示す。試験開始後10日までには、裸鋼材のときと同様に、流速と設定電位の影響が見られたが、20日以降はこれらの影響は小さくなった。金属の露出部（スクラッチ部）の面積は約0.1 cm²で裸鋼試験片の約1/140であるが、塗装鋼材の電流密度は、裸鋼材の電流密度の約1/200である電流の低減に効果があった。

(4) 外観観察

裸鋼材の非電気防食試験片の腐食状態は全面腐食であり、流れの方向に沿って錆が付着していた。電気防食試験片では、錆の発生がなく、白色のエレクトロコーティングが生成していたが、流速が大きいはどその付着量が少なかった。

塗装試験片については、43日後に表面観察を行ったところ、非電気防食試験片では、いずれの流速においてもスクラッチ周辺部にC型のフクレ（資料集5参照）が見られ、流速が大きいはどわずかに多かった。一方、電気防食試験片では、電位が卑なほど塗膜のフクレの量は少なく-900mVではわずかであった。また、スクラッチ部の発錆は電気防食片では見られなかった。（ただし静止、非電気防食の条件での追試によれば、5日後にはフクレの発生が見られ、塗膜が異常であったことを示している。）

4.2.2 定電流試験

定電位試験により、防食電位および防食電流密度（定常値）を推定することができたが、設計電流密度（初期値）に対して不明であるため、0.5、2および5 m/sの流速において定電流試験を行った。100~700mA/m²の防食電流密度で2ヵ月間試験を行い、電位の経時変化を観察した。試験終了後には、重量測定を行い防食率を求めた。

(1) 電位の経時変化

0.5 m/sの流速における電位の経時変化を図4-27に示す。電流密度が200mA/m²以下では、分極量は非常に小さく、自然電位に近い値で安定していた。一方、電流密度が300mA/m²では、17日ごろより急速に分極が進み33日以降では約-950mVになりほぼ安定した。

2 m/sの流速の場合を図4-28に示す。400mA/m²以下では、55日後においても自然電位に近い値で分極は少なかった。図示していないが5 m/sの流速の場合も、2 m/sの場合と同様な電位の経時変化を示すが、更に分極はしにくく、55日後において700mA/m²の大電流密度でさえ分極量は小さかった。このように高流速下では、分極の進行が遅く、鋼表面に防食上必要な陰分極を生じさせるには、比較的長時間を要するか、あるいは初期にかなり大きい電流密度を印加する

必要がある。

(2) 防食率

電流密度と防食率の関係を図4-29に示す。いずれの流速においても電流密度が大きいほど防食率は高くなった。しかし、2および5 m/sの高流速下で高い防食率を得るためには、初期にかなり高い電流密度が必要であり、図4-29から推定すると、2 m/sでは700 mA/m²、5 m/sでは900 mA/m²以上である。

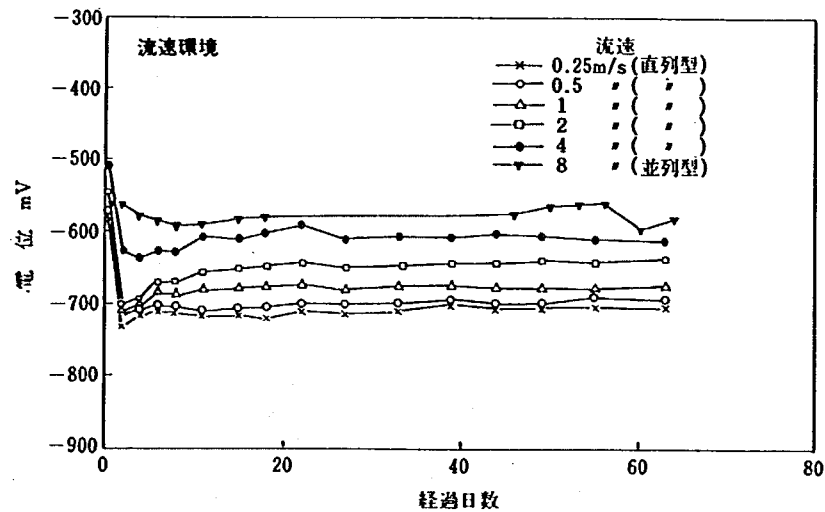


図4-16 各流速における裸鋼材の自然電位経時変化(直, 並列型)

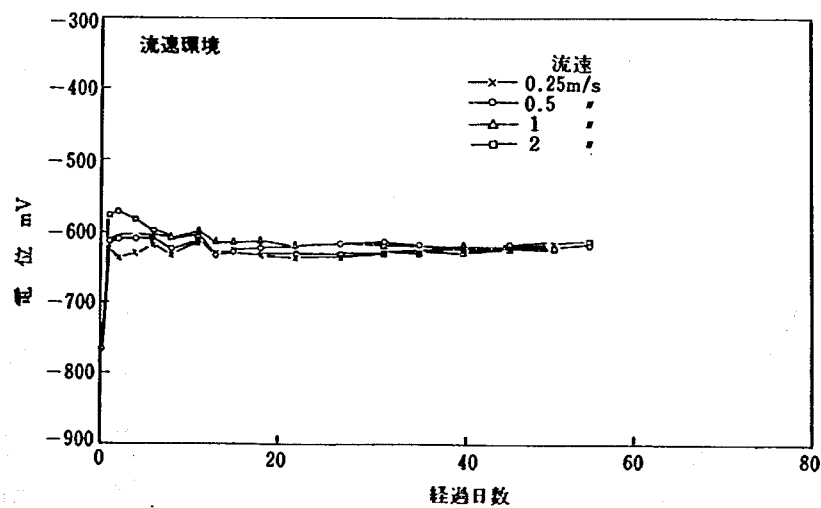


図4-17 各流速における塗装鋼材の自然電位経時変化(直列型)

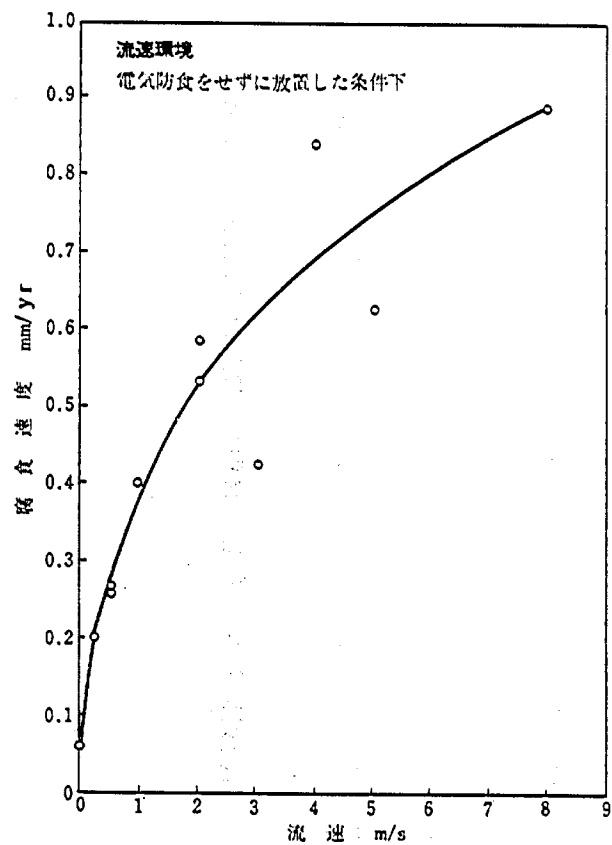


図 4-18 各流速における腐食速度
(直, 並列型)

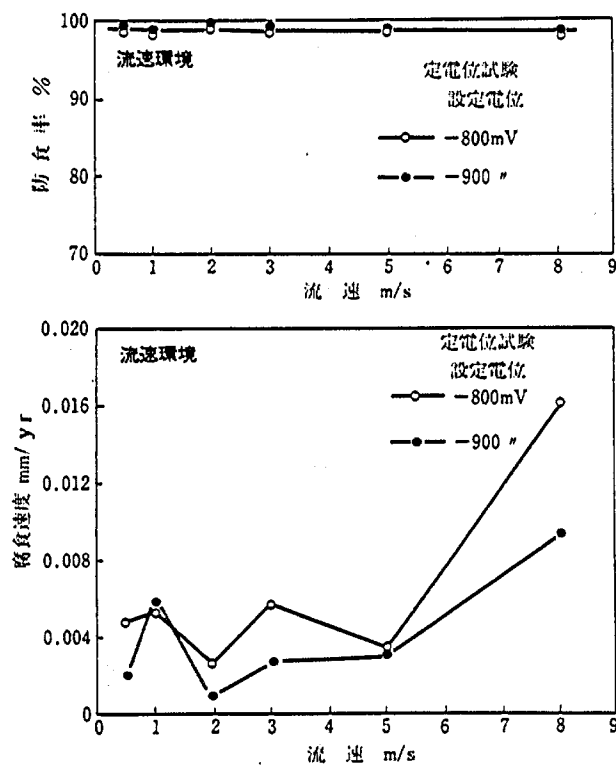


図 4-19 各流速における腐食速度および
防食率(電気防食, 並列型)

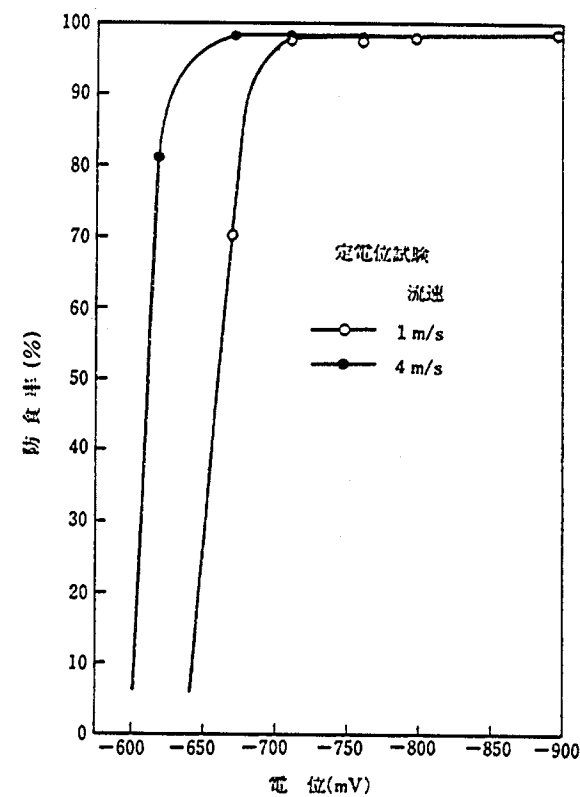


図 4-20 設定電位と防食率(直列型)

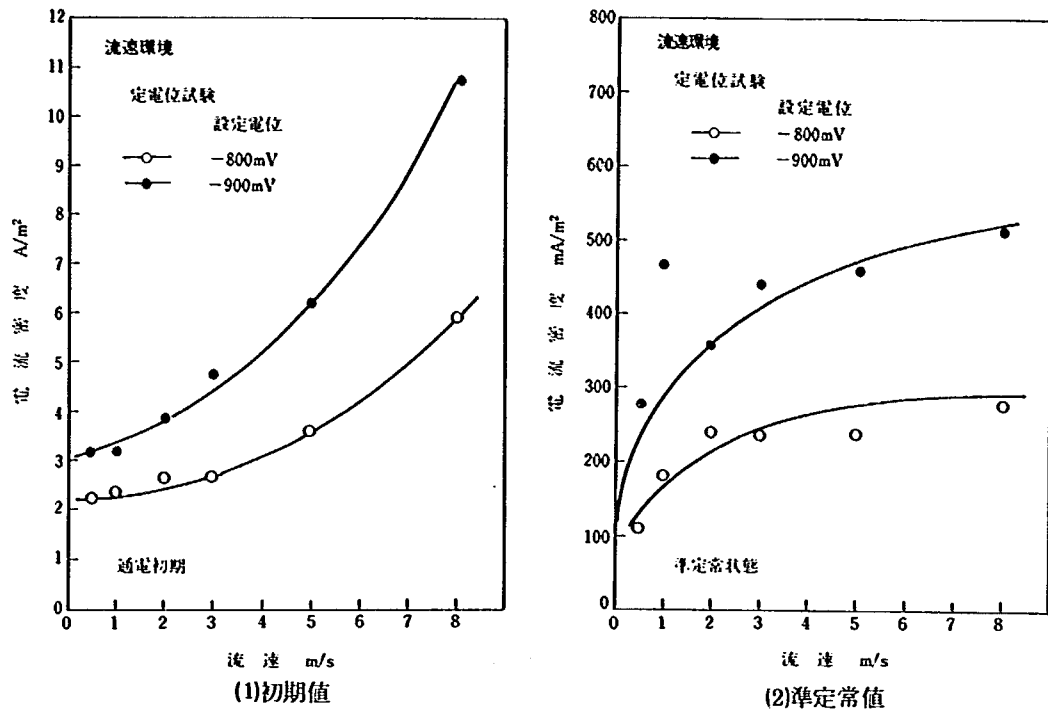


図4-21 流速と電流密度の関係（並列型）

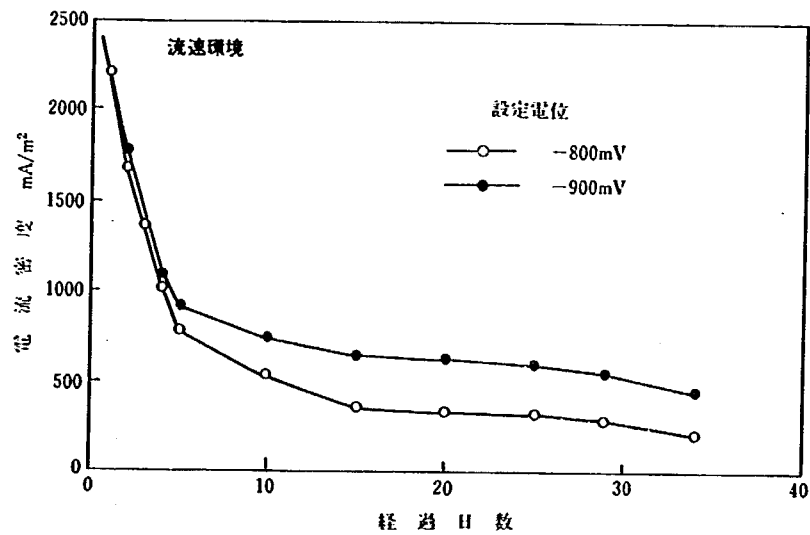


図4-22 8 m/s の流速における電流密度経時変化（並列型）

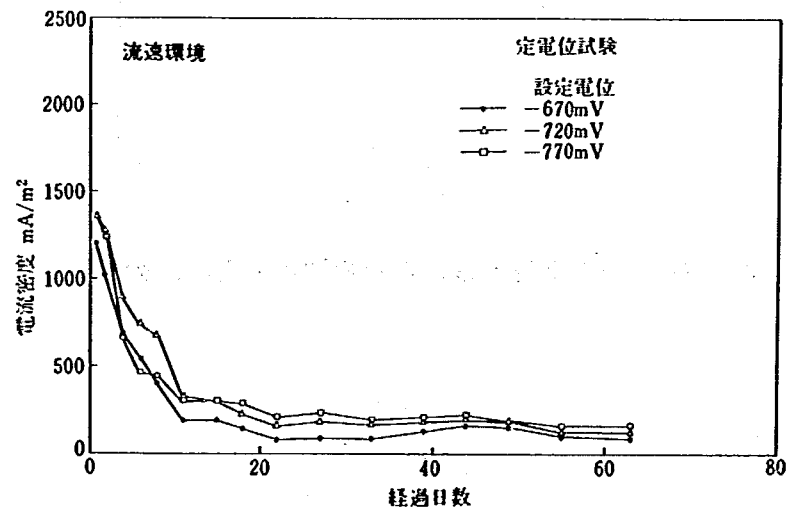


図4-23 1 m/s の流速における電流密度経時変化（直列型）

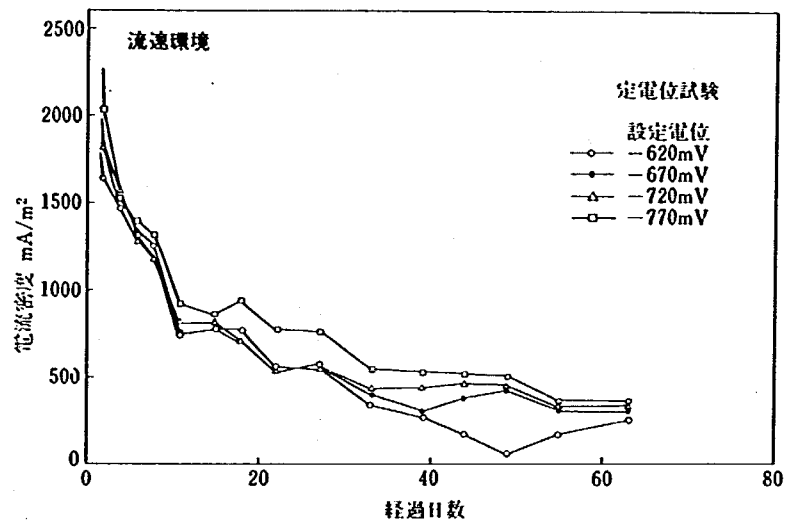


図 4 - 24 4 m/s の流速における電流密度経時変化 (直列型)

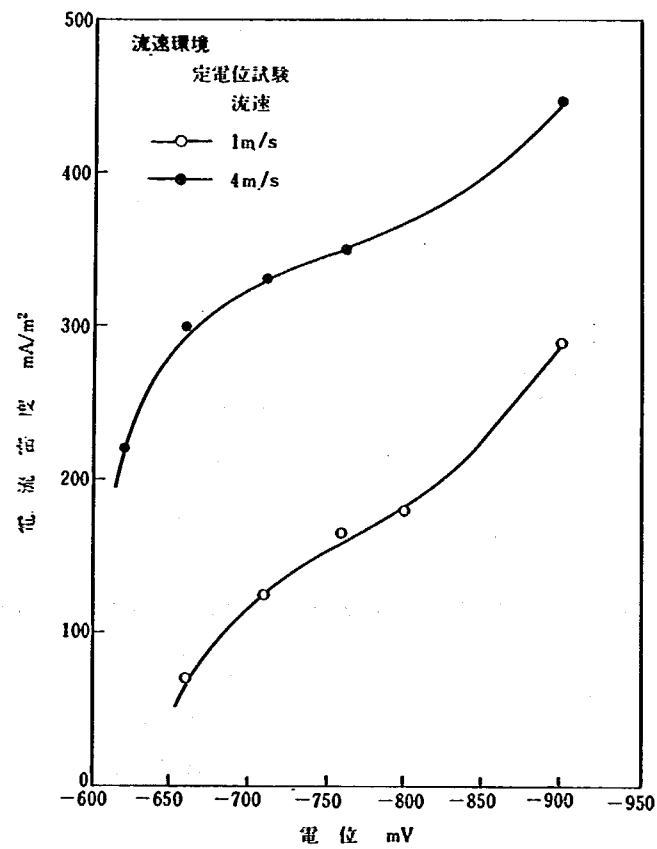


図 4 - 25 設定電位と電流密度の関係 (直, 並列型)

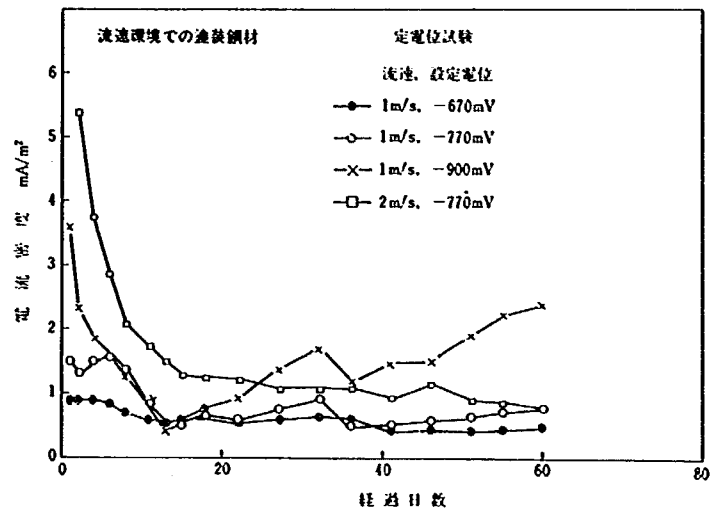


図4-26 塗装鋼材の電流密度経時変化(直列型)

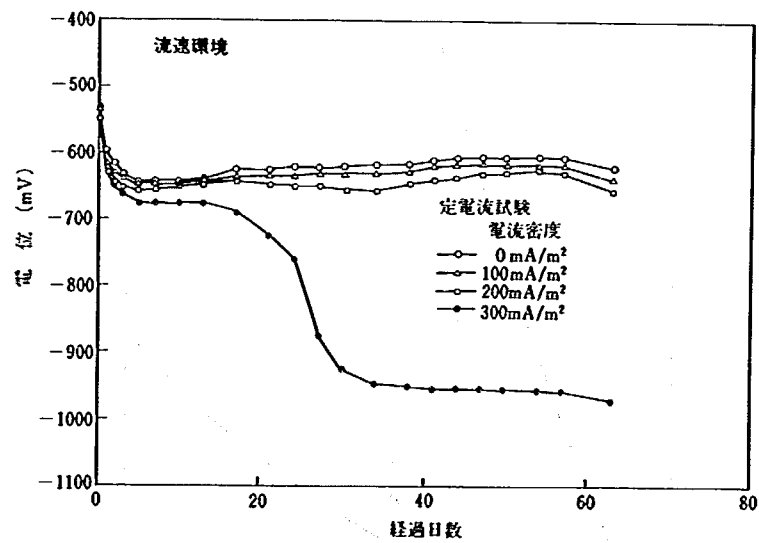


図4-27 0.5 m/s の流速における電位経時変化(並列型)

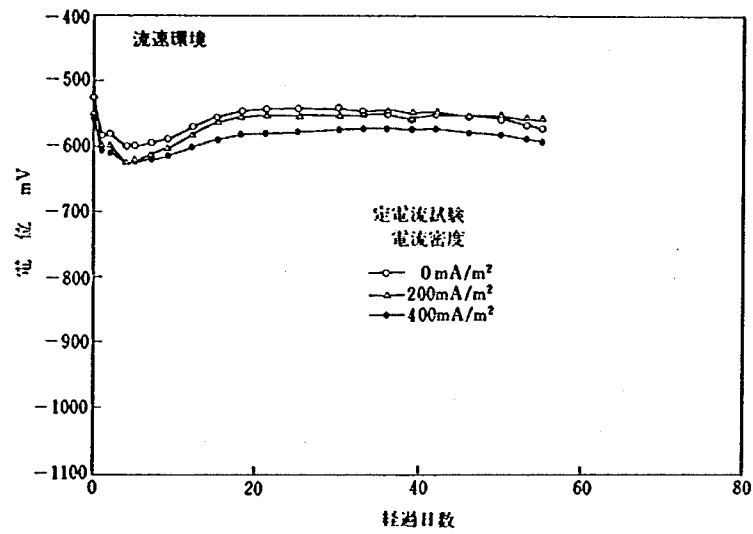


図 4 - 28 2 m/s の流速における電位経時変化 (並列型)

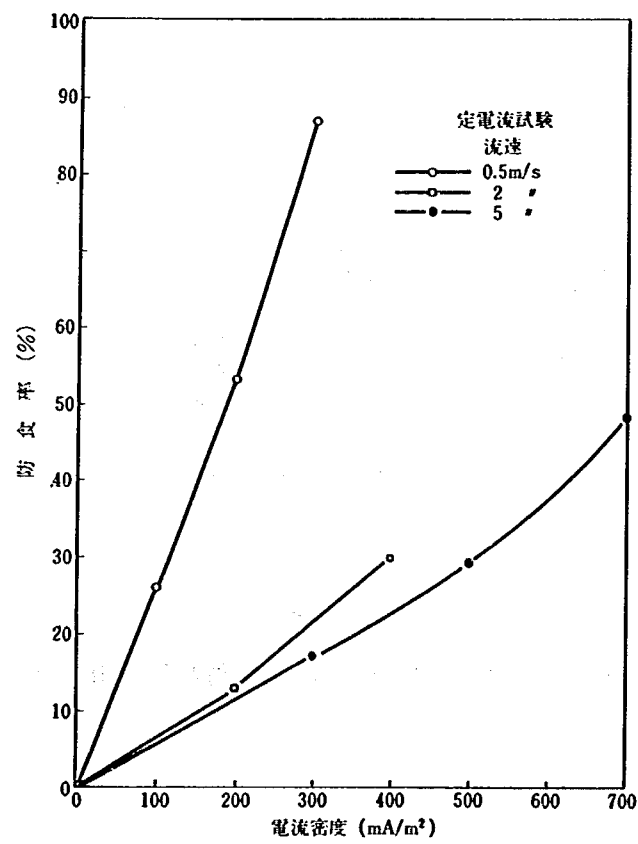


図 4 - 29 電流密度と防食率 (並列型)

4.3 塗装鋼材の電気防食特性試験

各種塗装鋼材の定電位防食条件下における所要電流，交流抵抗，塗膜外観および塗膜物性の測定を行った。

4.3.1 電流密度の経時変化

各種塗装鋼材を設定電位 -900mV ， -1500mV に維持するための所要電流密度に及ぼす防食下地，膜厚，タールエポキシ塗料中のエポキシ含有量，硬化剤および塗料種の影響について，設定電位別に代表的塗料系を例にとり，以下にまとめた。

(1) 設定電位 -900mV の場合

1) 防食下地の影響

タールエポキシ（JIS-1種，ポリアミド），膜厚 $100\mu\text{m}$ ， $200\mu\text{m}$ ， $400\mu\text{m}$ における防食下地の影響を図4-30に示す。

防食下地がない場合，膜厚 $100\mu\text{m}$ では，スクラッチの有無に関係なく次第に電流が増加し，膜厚 $200\mu\text{m}$ ではスクラッチのある時，電流が増加し塗膜の劣化を示している。また，膜厚 $400\mu\text{m}$ では，殆んど電流の増加は認められない。

これに対し，有機または無機ジंकリッチの防食下地がある場合は，スクラッチの有無に関係なく膜厚 $100\mu\text{m}$ でも電流の増加はなく，塗膜が健全であることを示している。従って，防食下地の有効性が認められるが，有機ジंकリッチと無機ジंकリッチによる差異は明確でない。

2) 膜厚の影響

タールエポキシ（JIS-1種，ポリアミド）防食下地なしおよび防食下地が無機ジंकリッチにおける膜厚の影響を図4-31に示す。

防食下地がない場合，一般に膜厚が大きいほど電流は小さく，またスクラッチの存在が電流を増加させることが確かめられた。

電流の増加が認められないのは，スクラッチがない $400\mu\text{m}$ で，スクラッチがある $400\mu\text{m}$ ，スクラッチのない $200\mu\text{m}$ の場合も電流の増加は極めて小さい。

膜厚 $200\mu\text{m}$ ではスクラッチがあれば，電流の増加はさけられず， $100\mu\text{m}$ では更に著しい電流の増加が認められる。

防食下地が無機ジंकリッチの場合は，スクラッチの有無に関係なく，全ての膜厚で電流の増加はなく，膜厚 $100\mu\text{m}$ でも良好な耐久性を有する。

3) タールエポキシ塗料中のエポキシ含有量の影響

タールエポキシ（ポリアミド），防食下地なし，膜厚 $200\mu\text{m}$ および $400\mu\text{m}$ におけるエポキシ含有量の影響を図4-32に示す。

膜厚の差異に関係なく，いずれの塗料種とも電流の増加は認められない。従って，エポキシ含有量による塗膜の耐久性に差異はないものとする。

4) 硬化剤の影響

タールエポキシ (JIS-1種) , 膜厚 200 μm 防食下地なしおよび防食下地が有機・無機ジंकリッチの場合の硬化剤の影響を図 4-33 に示す。

防食下地の有無および種類に関係なく、いずれの硬化剤とも電流の増加は認められない。

従って、硬化剤による塗膜に差異は認められない。

5) 塗料種の影響(1)

スクラッチのない場合について、塗料種としてタールエポキシ (JIS-1種, アミンアダクト) , タールウレタン, エポキシ, 膜厚 200 μm , 防食下地なしおよび防食下地が無機ジंकリッチにおける塗料種の影響を図 4-34 に示す。

タールウレタンは、防食下地の有無に関係なく僅かに電流の増加が認められるが、エポキシ, タールエポキシは、電流の増加は認められない。

6) 塗料種の影響(2)

塗料種として、ポリエステル (ガラスフレーク ; GFP) とビニルについて標準膜厚 (GFP ; 2000 μm , ビニル ; 200 μm) , 防食下地なしおよび防食下地が有機ジंकリッチにおける塗料種の影響を図 4-35 に示す。

スクラッチおよび防食下地の有無に関係なく、電流の増加は認められず、塗膜の耐久性は良好である。

(2) 設定電位 -1500mV の場合

1) 防食下地の影響

タールエポキシ (JIS-1種, ポリアミド) , 膜厚 100 μm , 200 μm , 400 μm における防食下地の影響を図 4-36 に示す。

スクラッチのある場合、防食下地の有無および膜厚に関係なく試験初期から著しく大きい電流を示しているが、膜厚 400 μm , 防食下地が無機ジंकリッチのみは、比較的電流値が小さい。

スクラッチのない場合、膜厚 100 μm において防食下地なしでは、経時的に電流の増加が著しく電流値も大きい、有機または無機ジंकリッチの防食下地のあるものは、経時的に電流の増加はみられるが、比較的電流値は小さい。

膜厚 200 μm においては、防食下地なしでは 100 μm と同様な傾向があるが、防食下地の種類による差異は明確に認められた。

即ち、有機ジंकリッチに比して、無機ジंकリッチは電流値が低く、また経時的な電流の増加傾向はみられない。

膜厚 400 μm においては、防食下地の有無および種類に関係なく、経時的に電流の増加がみられるが、その差異は認められない。

従って膜厚 200 μm 以下において、防食下地の効果が認められた。

2) 膜厚の影響

タールエポキシ (JIS-1 種, ポリアミド), 防食下地なしおよび防食下地が無機ジंकリッチにおける膜厚の影響を図 4-37 に示す。

防食下地がない場合, スクラッチなしでは膜厚 100 μm , 200 μm で電流が著しく増加するが, 膜厚 400 μm では, 電流の増加および電流値が小さく, 膜厚の増加にともなって塗膜の耐久性は向上する。

スクラッチありでは, いずれの膜厚とも電流の変動はあまりないが, 試験初期より電流値が大きい。これらの塗膜は, フクレが著しく, 膜厚 100 μm では 109 日, 膜厚 200 μm では 359 日で実験を中止した。

また, 前述したように膜厚 400 μm も比較的塗膜の劣化が著しい。

防食下地が無機ジंकリッチでスクラッチのない場合, 膜厚 100 μm , 400 μm では比較的電流値が小さく, 電流の増加も小さい。

これに対して, 膜厚 200 μm では, 電流の増加は殆んどないが, 膜厚 100 μm , 400 μm に比べて僅かに電流値が大きい。

これは, 膜厚 200 μm の試験片にピンホールなどの微小な塗膜欠陥が存在したためと考えられる。

スクラッチのある場合は, 膜厚 200 μm , 400 μm で経時的に電流の低減が認められ, 膜厚が増すほどその低減が大きく, 耐久性に有効なことがわかる。

3) タールエポキシ塗料中のエポキシ含有量の影響

タールエポキシ (ポリアミド), 防食下地なし, 膜厚 200 μm および 400 μm におけるエポキシ含有量の影響を図 4-38 に示す。

膜厚 200 μm では, いずれの塗料種とも早期に電流の増加が著しいが, この中では JIS-3 種が最も電流値が大きい。

膜厚 400 μm では, JIS-1 種が最も電流の増加および電流値が小さく, 次に JIS-2 種そして JIS-3 種が最も大きい。

従って, 塗膜の耐久性は JIS-1 種 > JIS-2 種 > JIS-3 種の順でエポキシ含有量の多いものほど良好である。

4) 硬化剤の影響

タールエポキシ (JIS-1 種, ポリアミド), 膜厚 200 μm , 防食下地なしおよび防食下地が有機, 無機ジंकリッチにおける硬化剤の影響を図 4-39 に示す。

防食下地の有無, 種類に関係なく, ポリアミドに比べ, アミンアダクトの方が電流値および電流の増加が小さく, 塗膜の耐久性は優れている。

防食下地を比較すると硬化剤の種類に関係なく, 有機ジंकリッチよりも無機ジंकリッチの方が電流値が小さい。

5) 塗料種の影響(1)

スクラッチのない場合について、塗料種としてタールエポキシ (JIS-1種, アミンアダクト), エポキシ, タールウレタン, 膜厚 $200\mu\text{m}$, 防食下地なしおよび防食下地が無機ジंकリッチにおける塗料種の影響を図4-40に示す。

スクラッチのない場合, 防食下地の有無および種類に関係なく, 塗料種の違いは認められず, 電流も比較的小さく, 塗膜の耐久性は良好である。

6) 塗料種の影響(2)

塗料種としてポリエステル (ガラスフレーク; GFP), ビニル, 標準膜厚 (GFP: $2000\mu\text{m}$, ビニル: $200\mu\text{m}$), 防食下地なしおよび防食下地が有機ジंकリッチにおける塗料種の影響を図4-41に示す。

スクラッチなしの場合, 防食下地が有機ジंकリッチでは, ビニルは電流の増加が認められないが, GFPは電流の増加が僅かに認められた。

これに対し, 防食下地なしでは, ビニルは電流の増加が僅かに認められ, GFPは電流の増加は認められない。

スクラッチのある場合は, GFP, ビニル共に初期より電流値が大きく, ビニルは電流の変動がないが, GFPは経時的に電流の減少する傾向が認められた。

これは, GFPのスクラッチ部におけるエレクトロコーティングによる効果であると考えられる。

また, GFPの塗膜は良好であったが, ビニルは塗膜に全面フクレが発生していた。

4.3.2 交流抵抗の経時変化

電気防食条件下で, スクラッチのない塗装鋼材の交流抵抗に及ぼす各要因の効果について, 設定電位別に代表的塗装系を例にとり以下にまとめた。

(1) 設定電位 -900mV の場合

1) 防食下地の影響

タールエポキシ (JIS-1種, ポリアミド), 膜厚 $100\mu\text{m}$, $200\mu\text{m}$, $400\mu\text{m}$ における防食下地の影響を図4-42に示す。

防食下地なしで膜厚 $100\mu\text{m}$ では, 交流抵抗の減衰が特に顕著であり, 362日経過後に塗膜にふくれが発生した。

また, 膜厚 $200\mu\text{m}$ でも交流抵抗の減衰は, 膜厚 $100\mu\text{m}$ ほど著しくないが, 575日経過後には塗膜にふくれが発生した。

これに対し, 有機または無機ジंकリッチの防食下地がある膜厚 $100\mu\text{m}$, $200\mu\text{m}$ でも, 交流抵抗の大きな減衰がみられるが, 両者には殆んど差異がなく, 塗膜にふくれは認められなかった。

また, 膜厚 $400\mu\text{m}$ では, 防食下地の有無および種類に関係なく高抵抗を維持しており塗膜は良好であった。

以上のことから、塗膜の外観からは膜厚 $200\mu\text{m}$ 以下で防食下地の効果が認められたが、交流抵抗においては、その効果は明確には認められなかった。

2) 膜厚の影響

タールエポキシ (JIS-1 種, ポリアミド), 防食下地なしおよび防食下地が無機ジンクリッチにおける膜厚の影響を図 4-43 に示す。

防食下地がない場合, 膜厚 $100\mu\text{m}$, $200\mu\text{m}$ では, 交流抵抗の減衰が大きく, 塗膜にふくれが認められたが, 膜厚 $400\mu\text{m}$ では高抵抗を維持しており, 塗膜は良好であった。

防食下地が無機ジンクリッチの場合, 膜厚 $400\mu\text{m}$ では高抵抗を維持しているが, 膜厚 $100\mu\text{m}$, $200\mu\text{m}$ では交流抵抗の減衰が著しい。

従って, 防食下地のない塗膜においては膜厚 $400\mu\text{m} \gg 200\mu\text{m} > 100\mu\text{m}$ の順に交流抵抗値は高い。

3) タールエポキシ塗料中のエポキシ含有量の影響

タールエポキシ (ポリアミド), 防食下地なし, 膜厚 $200\mu\text{m}$, $400\mu\text{m}$ におけるエポキシ含有量の影響を図 4-44 に示す。

膜厚 $200\mu\text{m}$ では, 交流抵抗の減衰は JIS-1 種, 2 種, 3 種共に同程度であり差異は認められない。

膜厚 $400\mu\text{m}$ では, JIS-1 種, 2 種のエポキシ含有量の多いタールエポキシは高抵抗を維持しているが, JIS-3 種は 900 日経過後, 交流抵抗の減衰が認められた。

これらの塗料中では JIS-1 種の膜厚 $200\mu\text{m}$ の塗膜のみにふくれ発生が認められたが, これ以外の塗膜はいずれも良好であった。

4) 硬化剤の影響

タールエポキシ (JIS-1 種), 膜厚 $200\mu\text{m}$, 防食下地なしおよび防食下地が有機, 無機ジンクリッチにおける硬化剤の影響を図 4-45 に示す。

防食下地の有無および種類に関係なく一般的に硬化剤としてはポリアミドよりアミンアダクトの方が交流抵抗値が高い。

5) 塗料種の影響(1)

塗料種としてタールエポキシ (JIS-1 種, アミンアダクト), エポキシ, タールウレタンについて, 膜厚 $200\mu\text{m}$, 防食下地なしおよび防食下地が無機ジンクリッチにおける塗料種の影響を図 4-46 に示す。

防食下地の有無および種類に関係なく, いずれも高抵抗を維持しており, 塗料種の差異は認められない。

6) 塗料種の影響(2)

塗料種としてポリエステル (ガラスフレーク; GFP), ビニルについて標準膜厚 (GFP: $2000\mu\text{m}$, ビニル: $200\mu\text{m}$), 防食下地なしおよび防食下地が有機ジンクリッチにおける塗料

種の影響を図4-47に示す。

防食下地の有無および種類に関係なく、いずれも高抵抗を維持しており、塗料種の差異は認められない。

(2) 設定電位-1500mVの場合

1) 防食下地の影響

タールエポキシ(JIS-1種, ポリアミド), 膜厚100 μ m, 200 μ m, 400 μ mにおける防食下地の影響を図4-48に示す。

膜厚100 μ m, 200 μ mの防食下地なしと、膜厚200 μ mの防食下地が有機ジंकリッチは、交流抵抗の減衰が著しい。

防食下地が無機ジंकリッチでは、膜厚100 μ m, 200 μ m共に比較的高抵抗を維持している。

これに対して、膜厚400 μ mでは、防食下地の有無および種類に関係なく高抵抗を維持している。

従って、膜厚200 μ m以下において防食下地の効果が認められるが、有機ジंकリッチと無機ジंकリッチの差異は明確には認められない。

2) 膜厚の影響

タールエポキシ(JIS-1種, ポリアミド), 膜厚100 μ m, 200 μ m, 400 μ m, 防食下地なしおよび防食下地が無機ジंकリッチにおける膜厚の影響を図4-49に示す。

防食下地がない場合、膜厚100 μ m, 200 μ mでは、交流抵抗の減衰が著しく、塗膜にふくれが発生したが、膜厚400 μ mでは高抵抗を維持しており、塗膜は良好である。

防食下地が無機ジंकリッチの場合、膜厚に関係なく高抵抗を維持している。

従って、設定電位-1500mVでも防食下地のない塗膜においては膜厚400 μ m>>200 μ m $\div$ 100 μ mの順に良好であり、膜厚の影響は顕著である。

3) タールエポキシ塗料中のエポキシ含有量の影響

タールエポキシ(ポリアミド), 防食下地なし, 膜厚200 μ mおよび400 μ mにおけるエポキシ含有量の影響を図4-50に示す。

膜厚200 μ mでは、JIS-1種, 2種, 3種共に交流抵抗の減衰が著しく、エポキシ含有量による差異は認められない。

膜厚400 μ mでは、エポキシ含有量の多いJIS-1種, 2種は高抵抗を維持しているが、JIS-3種は交流抵抗の減衰が著しい。

従って、設定電位-1500mVにおいてもJIS-1種 $\div$ 2種>>3種のエポキシ含有量の多い塗料順に良好である。

4) 硬化剤の影響

タールエポキシ(JIS-1種), 膜厚200 μ m, 防食下地なしおよび有機, 無機ジंकリッチにおける硬化剤の影響を図4-51に示す。

設定電位 -900mV と同様に防食下地の有無および種類に関係なく、一般的に硬化剤としてはポリアミドよりアミンアダクトの方が交流抵抗値が高い。

5) 塗料種の影響(1)

塗料種としてタールエポキシ(JIS-1種, アミンアダクト), エポキシ, タールウレタンについて膜厚 $200\mu\text{m}$, 防食下地なしおよび防食下地が無機ジंकリッチにおける塗料種の影響を図4-52に示す。

防食下地なしの場合, いずれの塗料種も高抵抗を維持しており, 塗料種の差異は認められない。

防食下地が無機ジंकリッチの場合, タールエポキシとタールウレタンは高抵抗を維持しているが, エポキシは僅かに交流抵抗が低く, 減衰も大きい。

6) 塗料種の影響(2)

塗料種としてポリエステル(ガラスフレーク; GFP), ビニルについて標準膜厚(GFP: $2000\mu\text{m}$, ビニル: $200\mu\text{m}$), 防食下地なしおよび防食下地が有機ジंकリッチにおける塗料種の影響を図4-53に示す。

防食下地の有無および種類に関係なく, いずれも高抵抗を維持しており, 塗料種の差異は認められない。

4.3.3 電流密度と交流抵抗の相関性

防食下地, 膜厚, 塗料種をブールし, スクラッチのない試験片について, 電流密度と交流抵抗および $\tan\delta$ の関係を図4-54, 4-55に示す。

これらの図より次のことがわかった。

1. 電流密度は $\tan\delta$ より交流抵抗の方が比較的相関性が良い。
2. 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 の方が相関性が良い。
3. また, 電流密度の分布は設定電位が -900mV に比して -1500mV の方が高電流密度側にシフトしている。

4.3.4 電流密度, 交流抵抗と塗膜外観の相関性

防食下地, 膜厚および塗料種をブールしスクラッチのない試験片について塗膜外観と電流密度および交流抵抗の関係を図4-56, 4-57に示す。

これらの図から次のことがわかった。

1. 塗膜外観と電流密度および交流抵抗との間には相関性が認められた。
2. 塗膜外観は, 交流抵抗より電流密度の方が僅かに相関性が高い。
3. 電流密度では設定電位が -900mV より -1500mV の方が相関性が良く, -900mV の相関性は小さい。
4. 交流抵抗では, 当然のことであるが, 設定電位 -900mV と -1500mV は直線回帰式は殆んど同じになった。

4.3.5 総合評価

各種塗装系の塗膜外観，電流密度，交流抵抗および塗膜物性（付着性，耐衝撃性）の関係を設定電位別に分けて表4-11，4-12に示す。

この表では，耐久性の評価を点数で示したが，要因別にまとめると次の通りである。

(1) 設定電位-900mVの場合

1) 防食下地の影響

スクラッチのある場合，膜厚 $200\mu\text{m}$ 以下では，防食下地の効果は顕著に認められるが，防食下地の種類による差異は認められない。

スクラッチのない場合，膜厚 $100\mu\text{m}$ では，防食下地の効果は顕著に認められるが，膜厚 $200\mu\text{m}$ 以上ではその差異は殆んど認められない。

2) 膜厚の影響

スクラッチのある場合，防食下地なしでは膜厚 $400\mu\text{m} \gg 200\mu\text{m} \div 100\mu\text{m}$ の順に良好であったが，防食下地が有機，無機シンクリッチでは膜厚による差異は認められない。スクラッチのない場合，防食下地なしでは膜厚 $400\mu\text{m} > 200\mu\text{m} \gg 100\mu\text{m}$ の順に，また防食下地のあるものは膜厚 $400\mu\text{m} > 200\mu\text{m} \div 100\mu\text{m}$ の順に良好であった。

3) タールエポキシ塗料中のエポキシ含有量の影響

硬化剤がポリアミド，膜厚 $200\mu\text{m}$ で比較すると，防食下地の有無および種類に関係なくタールエポキシJIS-2種 $\div$ JIS-3種 $>$ JIS-1種の順に良好であった。

タールエポキシJIS-1種の硬化剤がアミンアダクトで同様に比較した場合はエポキシ含有量の差異は認められない。

4) 硬化剤の影響

膜厚 $200\mu\text{m}$ では，防食下地の有無および種類に関係なくポリアミドよりアミンアダクトの方が良好であるが，膜厚 $100\mu\text{m}$ および $400\mu\text{m}$ の防食下地のない場合ではその差異は認められない。

5) 塗料種の影響(1)

膜厚 $200\mu\text{m}$ で比較した場合，防食下地の有無および種類に関係なく，エポキシ $\div$ タールエポキシJIS-2種（ポリアミド） $\div$ JIS-3種（ポリアミド） $\div$ タールエポキシJIS-1種（アミンアダクト） $>$ JIS-1種（ポリアミド）の順に良好であった。

しかし，塗料種間で著しい差異は認められない。

6) 塗料種の影響(2)

防食下地の有無および種類に関係なくポリエステル（ガラスフレーク；GFP）およびビニル共に良好であった。

(2) 設定電位-1500mVの場合

1) 防食下地の影響

スクラッチのない場合、膜厚 $200\mu\text{m}$ 以下では、防食下地の効果は認められるが、防食下地の種類による差異は認められない。また膜厚 $400\mu\text{m}$ では防食下地の効果は認められない。

スクラッチのある場合、膜厚 $200\mu\text{m}$ および $400\mu\text{m}$ で、僅かに防食下地の効果が認められるが、膜厚 $100\mu\text{m}$ ではその差異は認められない。

2) 膜厚の影響

スクラッチのない場合、防食下地なしでは膜厚 $400\mu\text{m} > 200\mu\text{m} > 100\mu\text{m}$ の順に良好であるが、防食下地のある場合は膜厚の影響は殆んど認められない。

一般的に、設定電位 -1500mV では塗膜の劣化が著しく、膜厚による差異は、 -900mV ほど明確には認められない。また、スクラッチのある場合、膜厚 $400\mu\text{m} > 200\mu\text{m} \approx 100\mu\text{m}$ の順に良好であるが、塗膜劣化が著しいためその差異はスクラッチのない場合ほど明確ではない。

3) タールエポキシ塗料中のエポキシ含有量の影響

防食下地なし、膜厚 $100\mu\text{m}$ 、 $200\mu\text{m}$ 、 $400\mu\text{m}$ で比較した場合、タールエポキシ J I S - 1 種 $>$ J I S - 2 種 $>>$ J I S - 3 種の順に良好であり、エポキシ含有量による差異が認められた。

4) 硬化剤の影響

膜厚 $200\mu\text{m}$ では、防食下地の有無および種類に関係なくポリアミドよりアミンアダクトの方が良好である。

5) 塗料種の影響(1)

防食下地なし、膜厚 $200\mu\text{m}$ 、スクラッチなしで比較すると、タールエポキシ J I S - 1 種 (アミンアダクト) $\approx$ タールウレタン $>$ エポキシ $>>$ タールエポキシ J I S - 2 種 (ポリアミド) $>$ J I S - 1 種 (ポリアミド) $\approx$ J I S - 3 種 (ポリアミド) の順に良好である。

6) 塗料種の影響(2)

スクラッチのない場合、G F P およびビニル共に良好であるが、スクラッチのある場合、ビニルは G F P に比して著しく劣る。

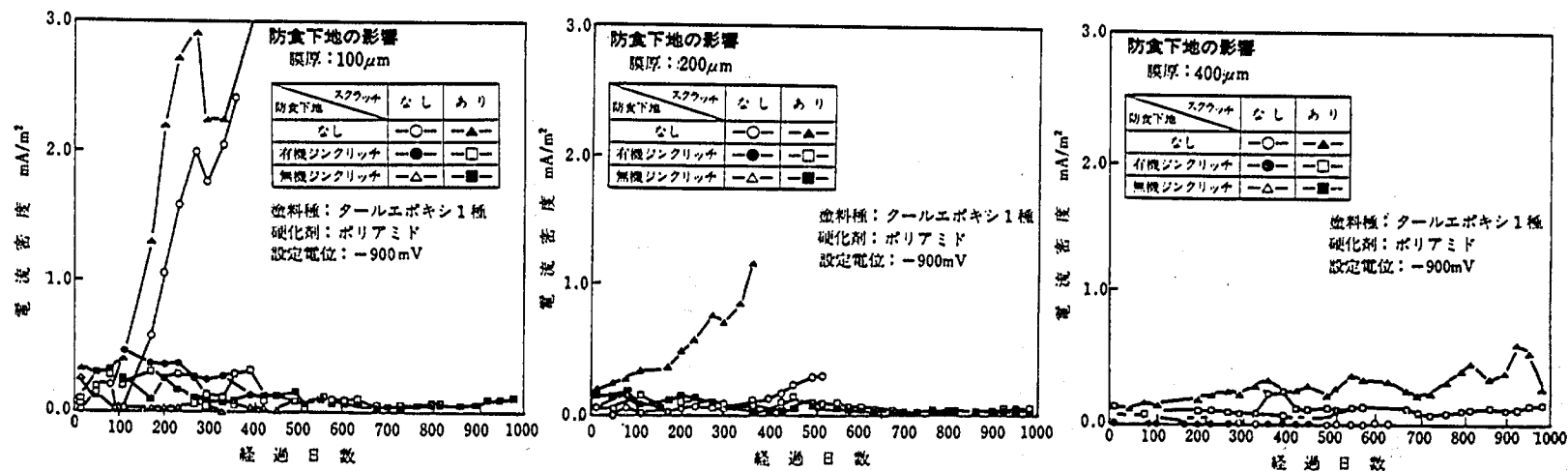


図4-30 防食下地の影響

塗料種: タールエポキシJIS-1種 硬化剤: ポリアミド 設定電位: -900mV

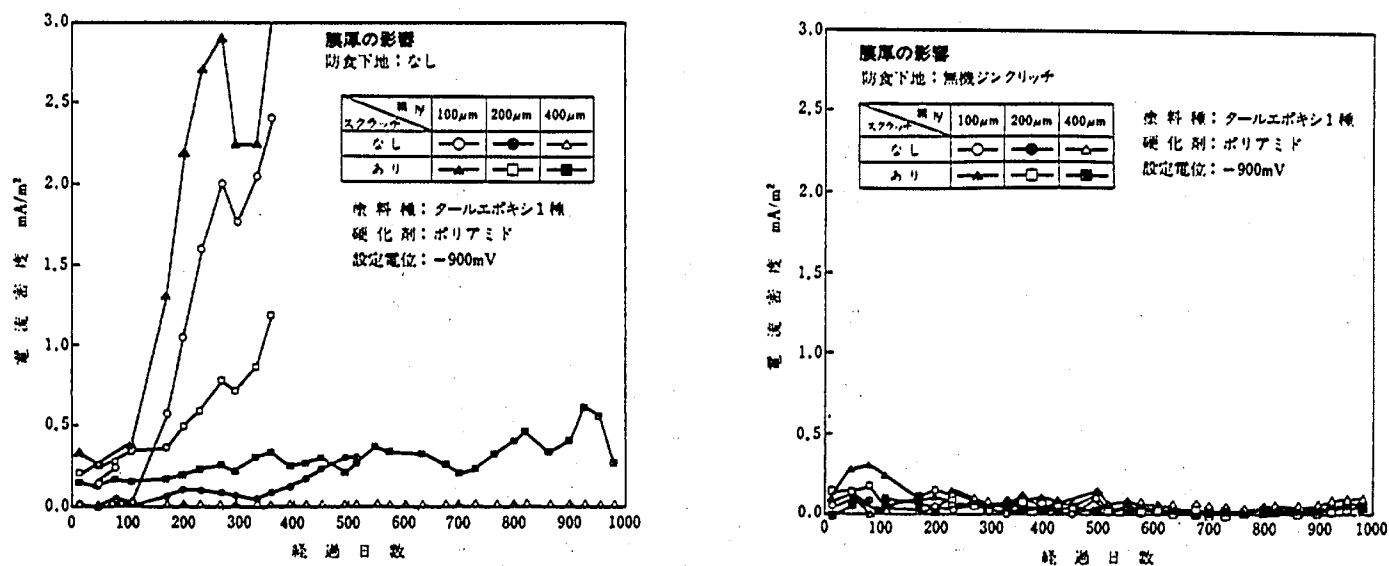


図4-31 膜厚の影響

塗料種: タールエポキシJIS-1種 硬化剤: ポリアミド 設定電位: -900mV

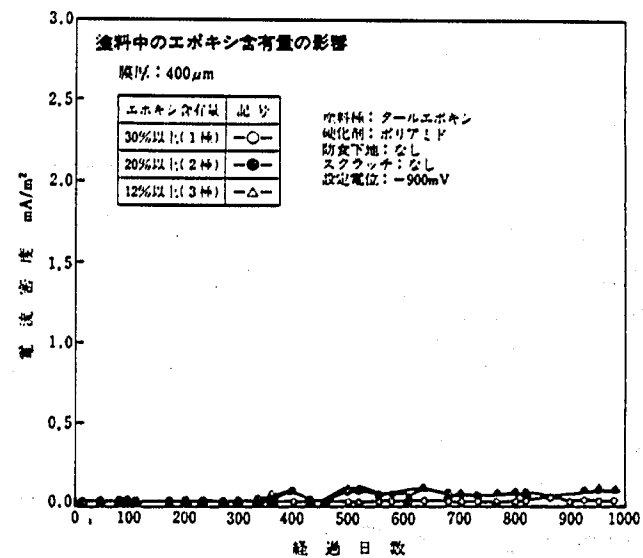
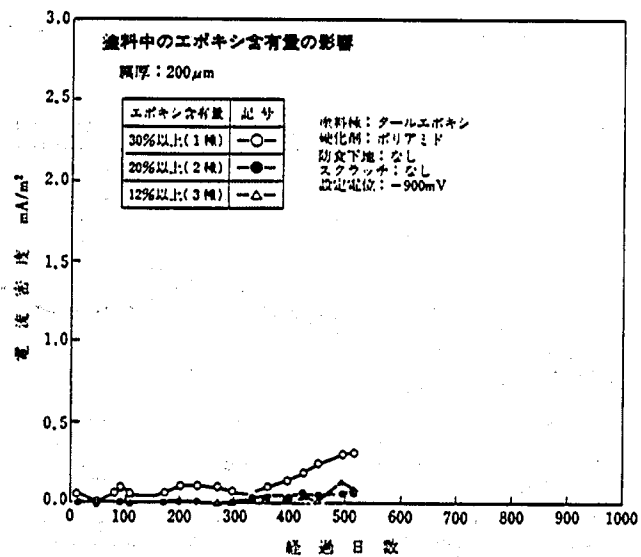


図4-32 タールエポキシ塗料中の
エポキシ含有量の影響

硬化剤：ポリアミド 防食下地：なし スクラッチ：なし 設定電位：-900mV

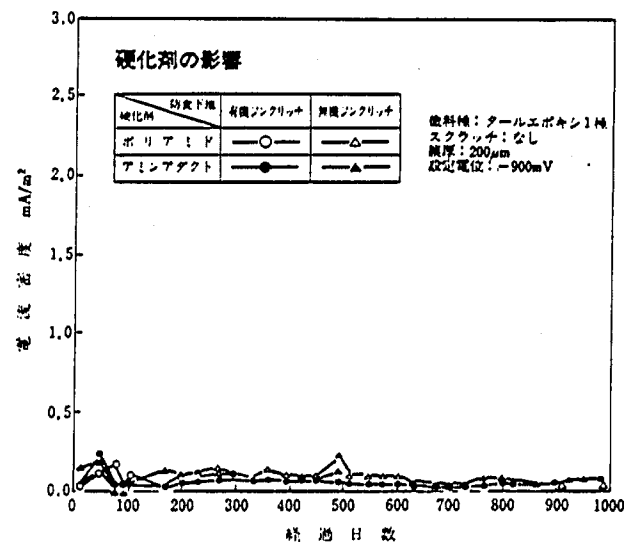
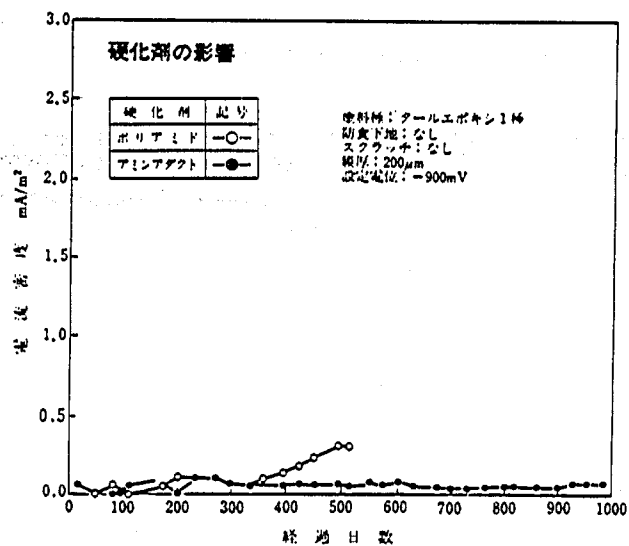


図4-32. 硬化剤の影響 塗料種：タールエポキシJIS-1種 防食下地：なし スクラッチ：なし 膜厚：200 μ m

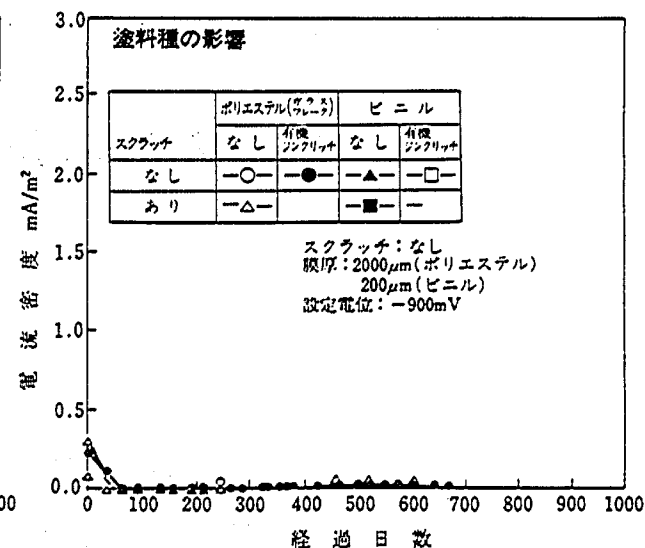
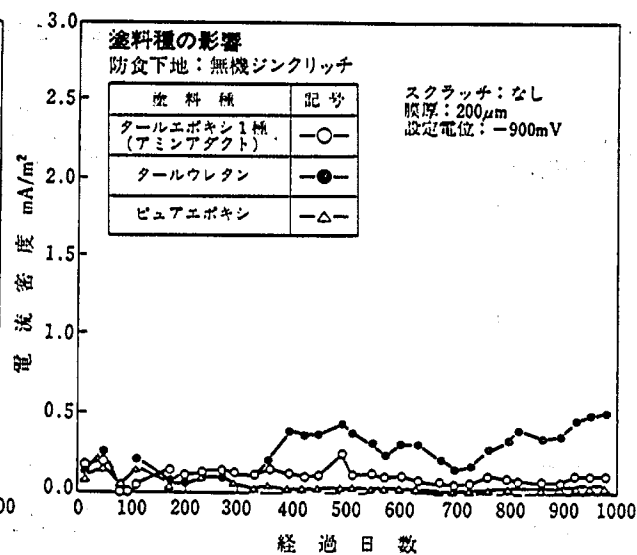
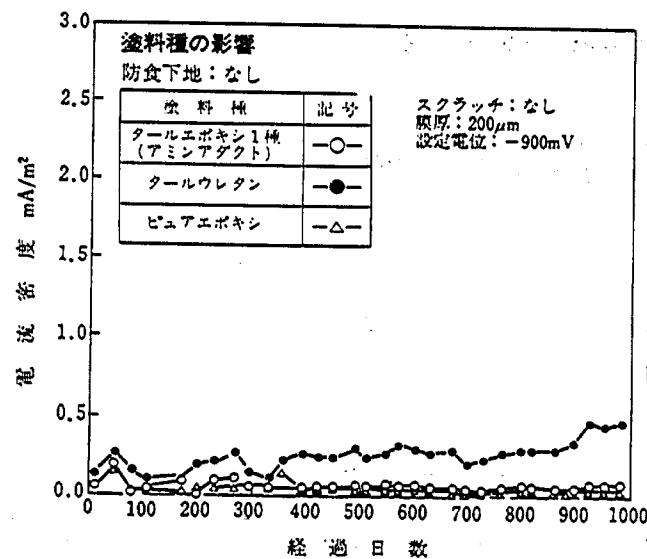


図4-34 塗料種の影響(その1)

スクラッチ：なし 膜厚：200 μ m 設定電位：-900mV

図4-35 塗料種の影響(その2)

膜厚：ポリエステル(ガラスフレイク) 2000 μ m ビニル 200 μ m
設定電位：-900mV スクラッチ：なし 膜厚：200 μ m

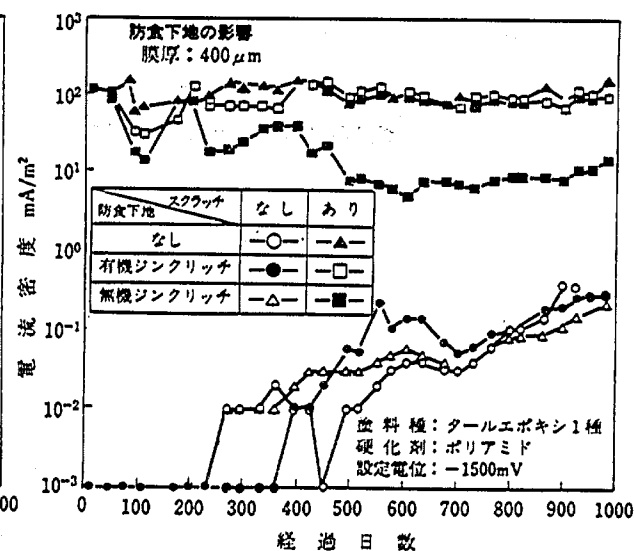
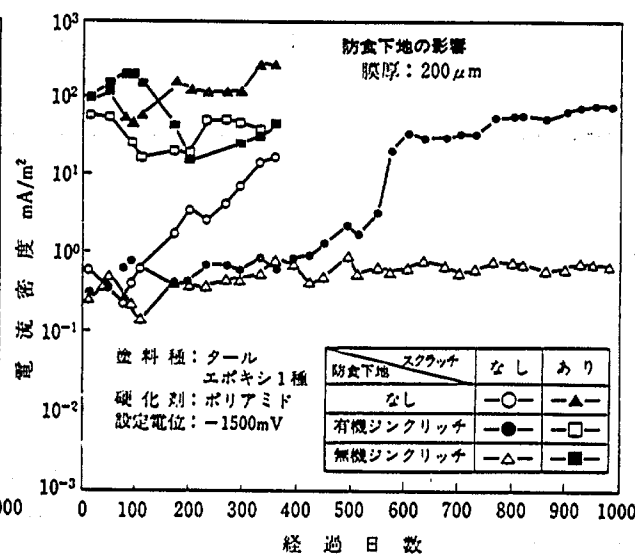
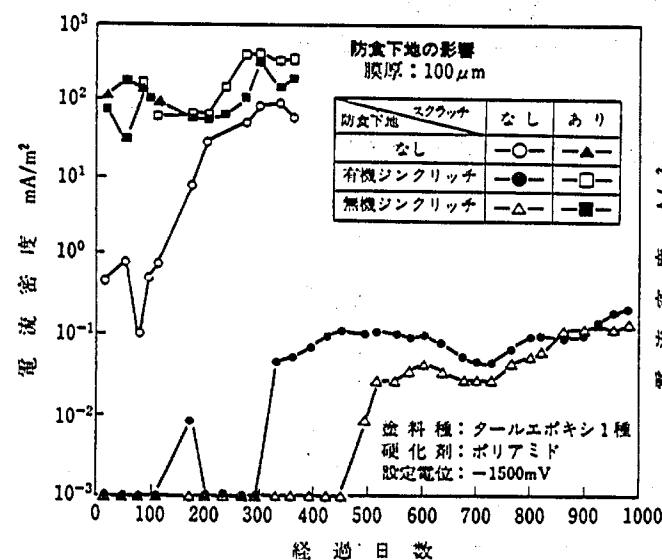


図4-36 防食下地の影響

塗料種：タールエポキシJIS-1種 硬化剤：ポリアミド 設定電位：-1500mV

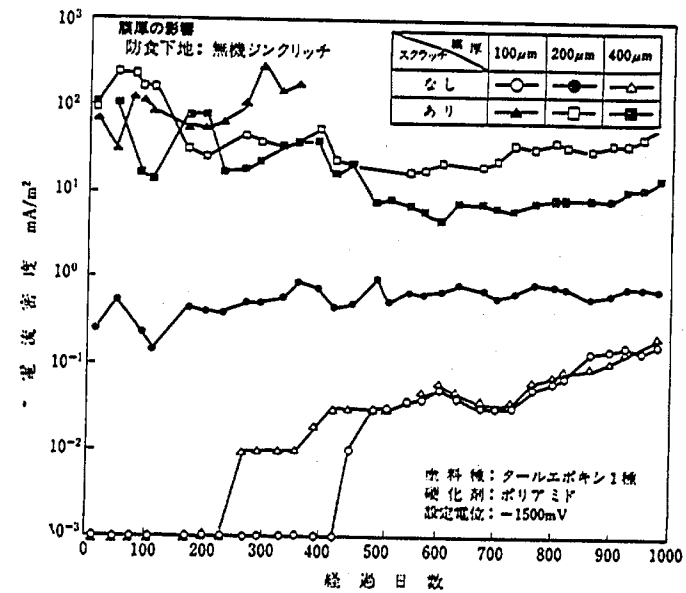
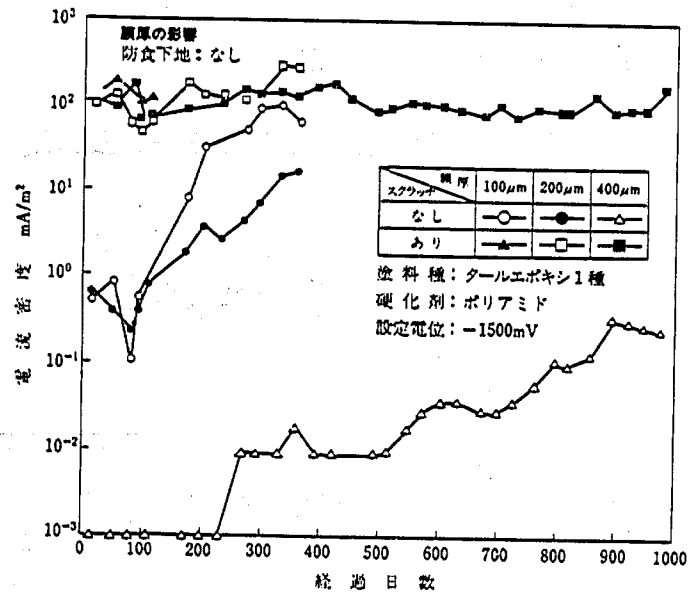


図4-37 膜厚の影響 塗料種：タールエポキシJIS-1種 硬化剤：ポリアミド 設定電位：-1500mV

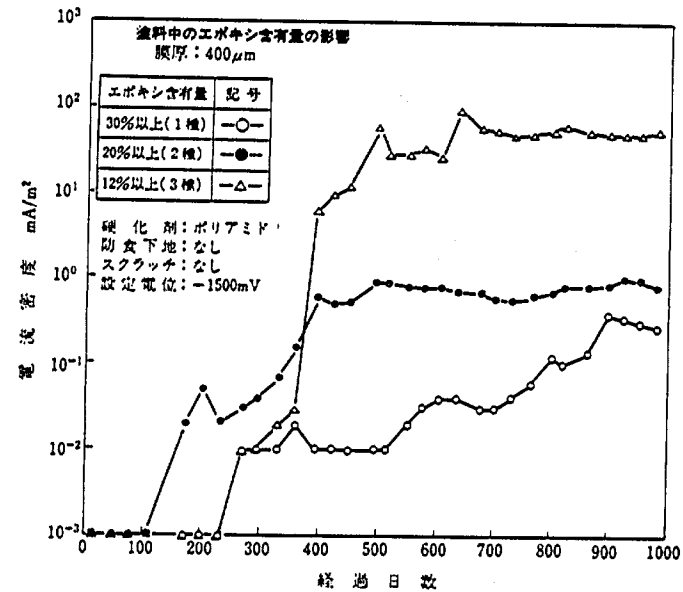
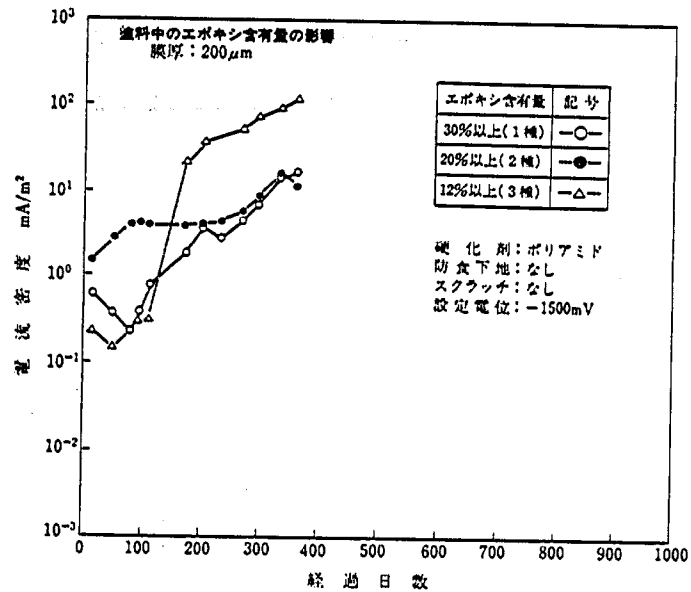


図4-38 タールエポキシ塗料中のエポキシ含有量の影響

硬化剤：ポリアミド 防食下地：なし スクラッチ：なし 設定電位：-1500mV

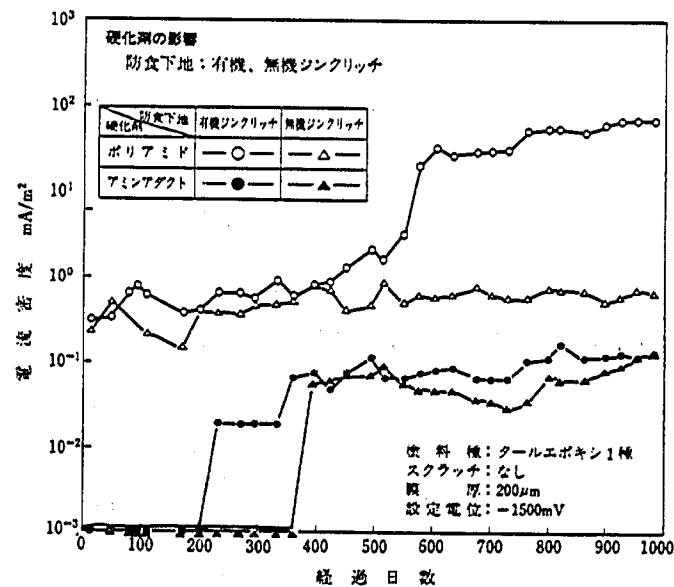
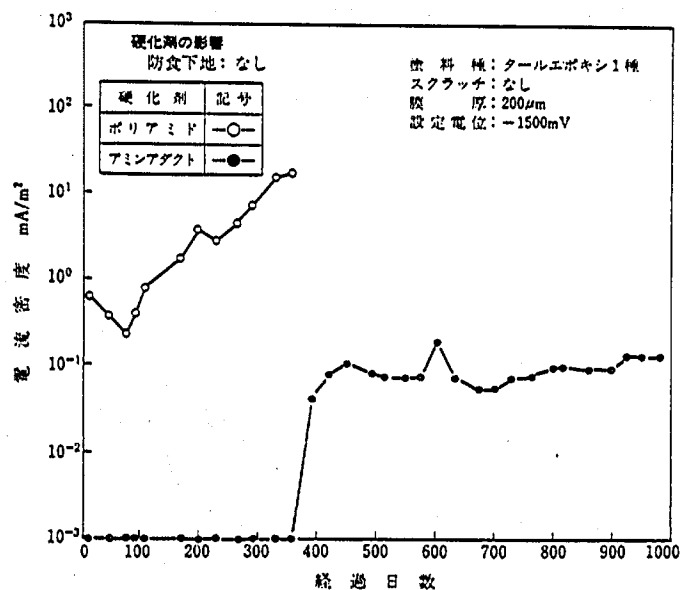


図4-39 硬化剤の影響 塗料種：タールエポキシJIS-1種 スクラッチ：なし 膜厚：200 μ m 設定電位：-1500mV

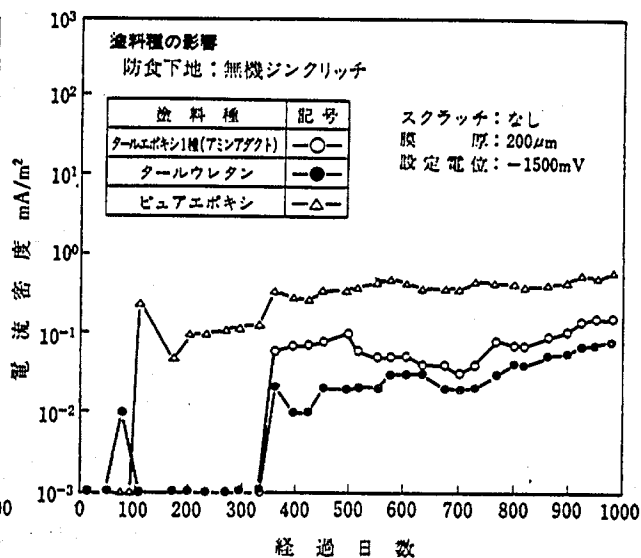
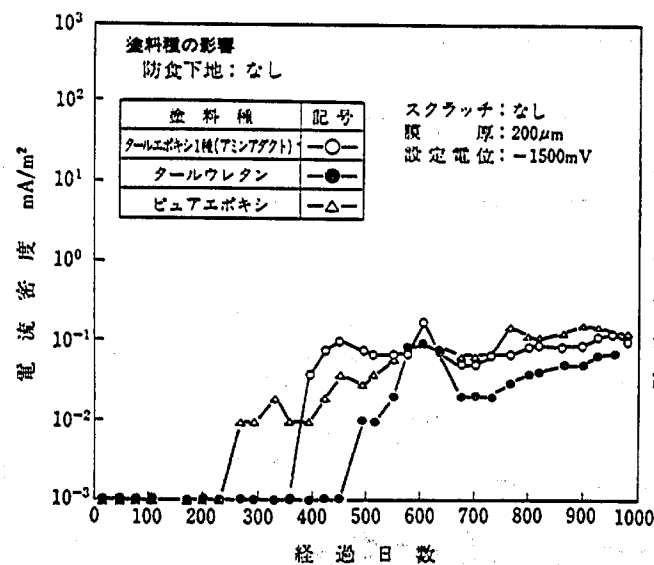


図4-40 塗料種の影響(1)
スクラッチ：なし 膜厚：200 μ m 設定電位：-1500mV

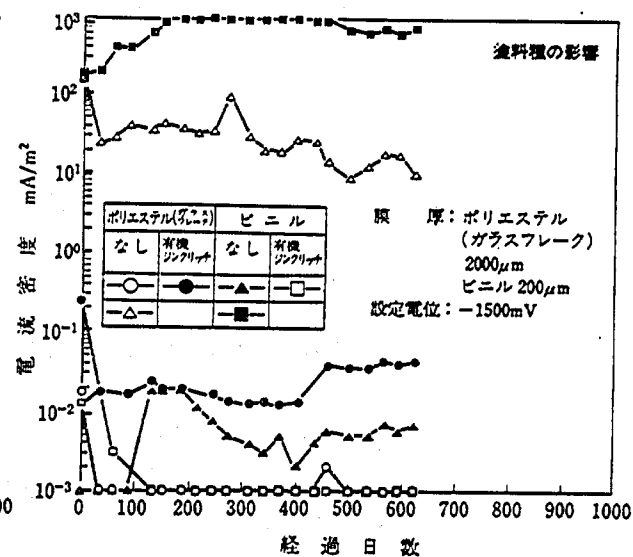


図4-41 塗料種の影響(2)
膜厚：ポリエステル(ガラスフレーク) 2000 μ m ビニル 200 μ m
設定電位：-1500mV

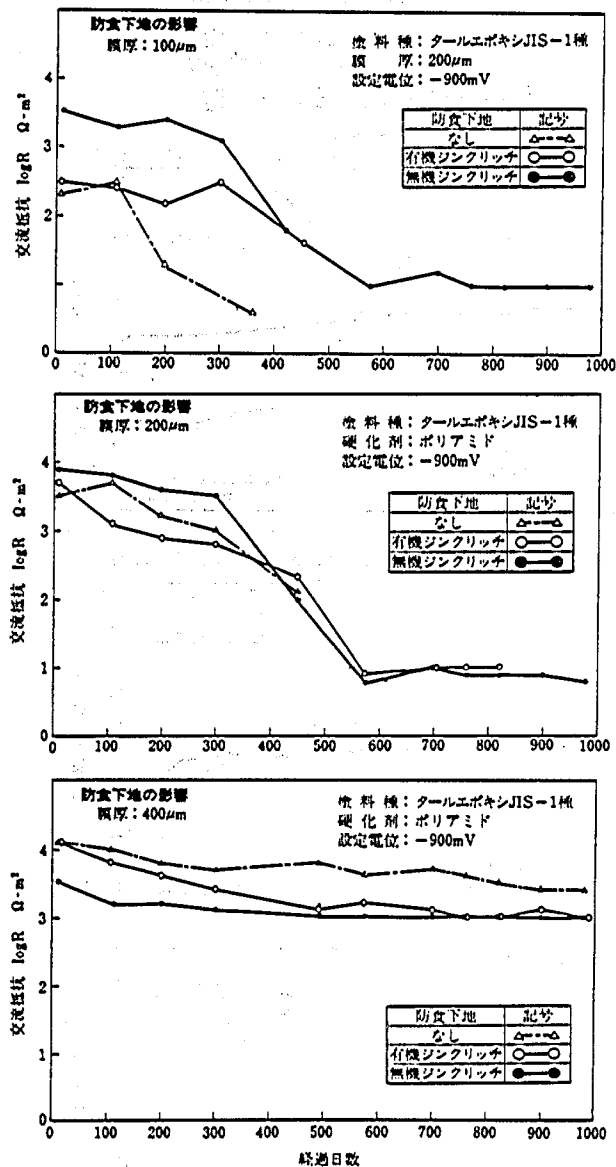


図4-42 防食下地の影響
塗料種: タールエポキシJIS-1種
硬化剤: ポリアミド
設定電位: -900mV

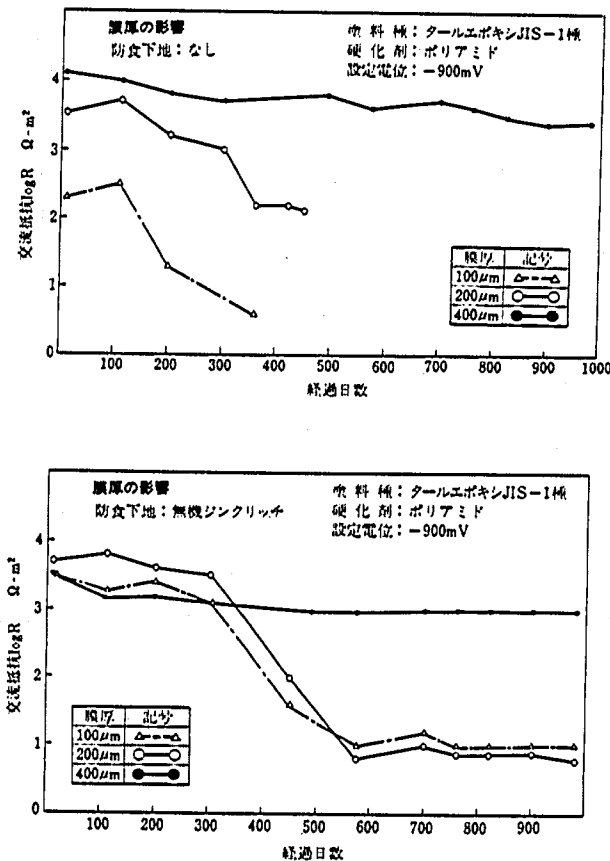


図4-43 膜厚の影響
塗料種: タールエポキシJIS-1種
硬化剤: ポリアミド
設定電位: -900mV

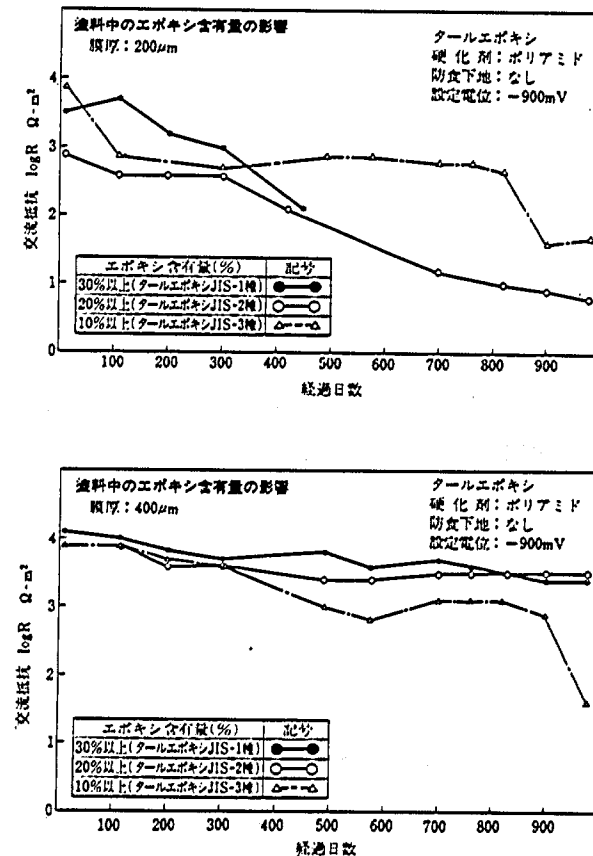


図4-44 タールエポキシ塗料中のエポキシ含有量の影響
硬化剤: ポリアミド
防食下地: なし
設定電位: -900mV

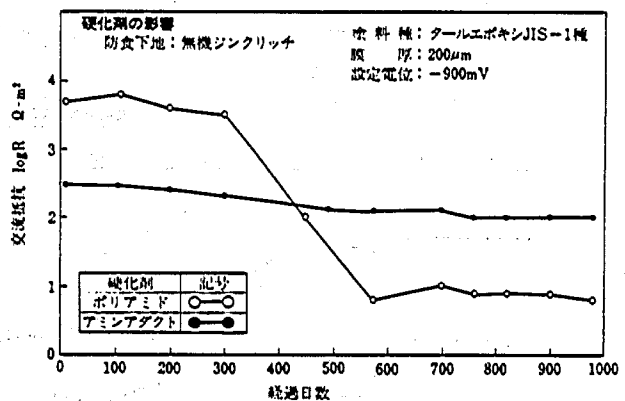
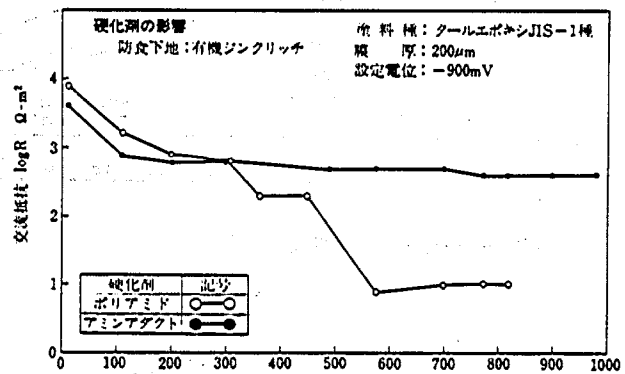
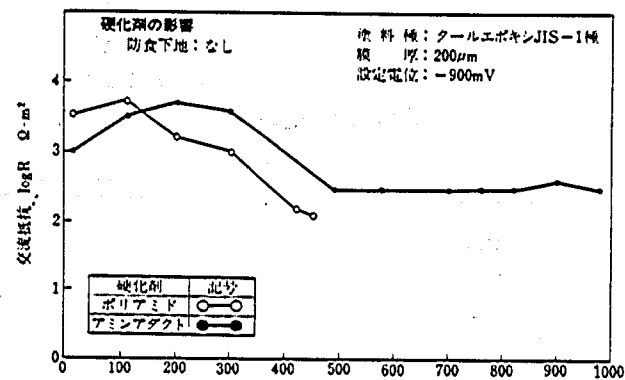


図4-45 硬化剤の影響
塗料種：タールエポキシJIS-1種
膜厚：200 μ m
設定電位：-900mV

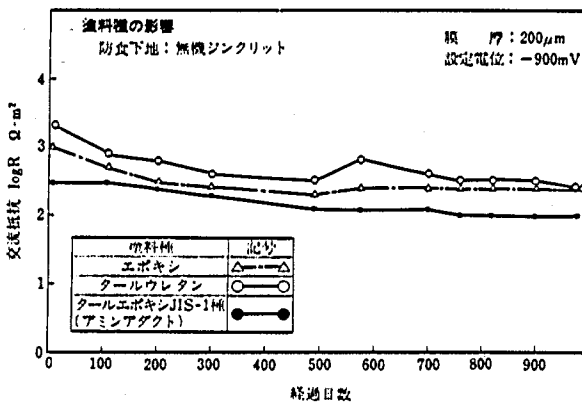
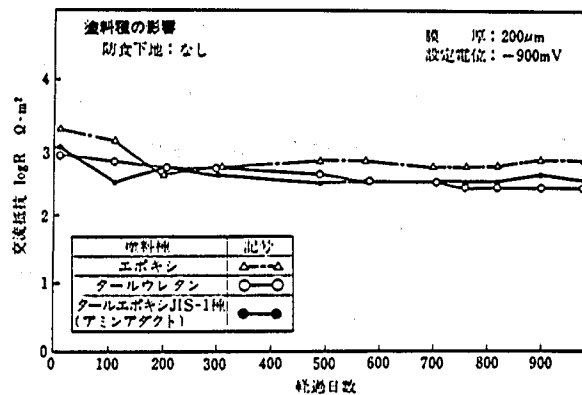
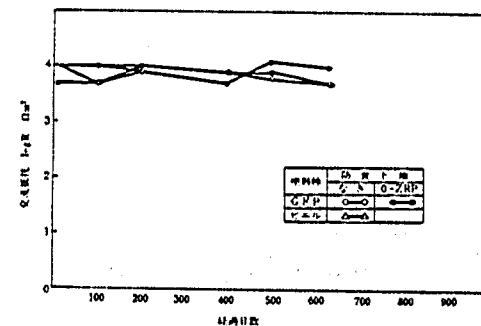


図4-46 塗料種の影響(1)

膜厚：200 μ m
設定電位：-900mV



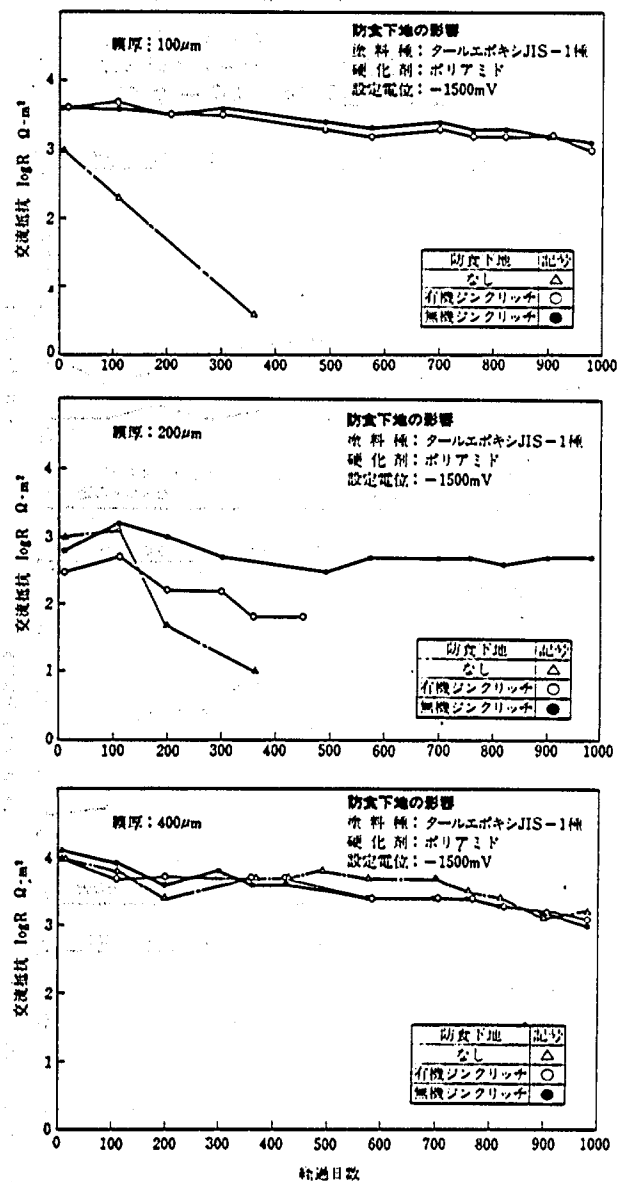


図 4-48 防食下地の影響
 塗料種：タールエポキシJIS-1種
 硬化剤：ポリアミド
 設定電位：-1500mV

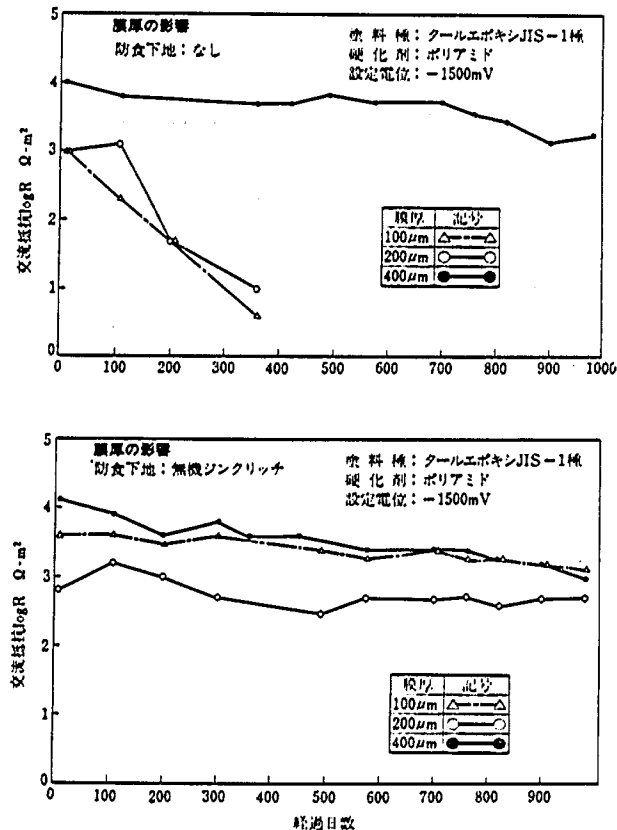


図 4-49 膜厚の影響
 塗料種：タールエポキシJIS-1種
 硬化剤：ポリアミド
 設定電位：-1500mV

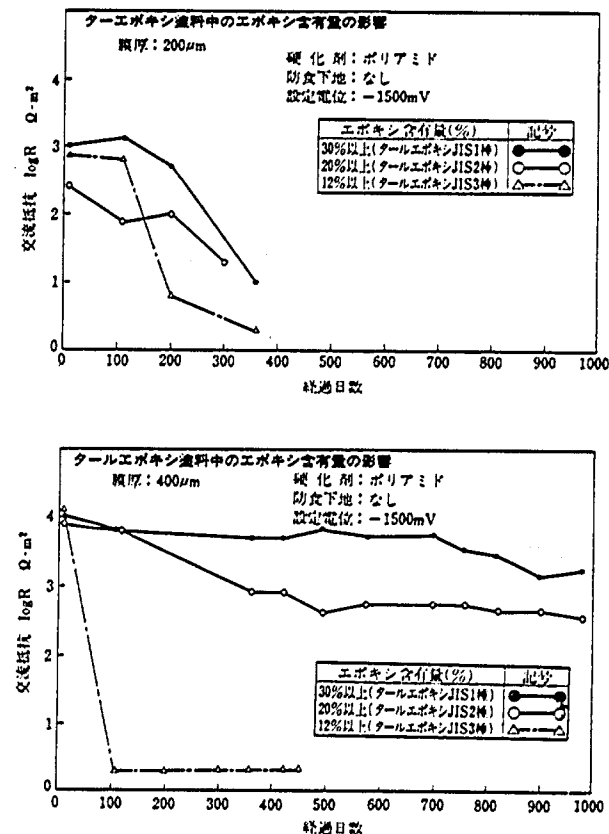


図 4-50 タールエポキシ塗料中のエポキシ含有量の影響
 硬化剤：ポリアミド
 防食下地：なし
 設定電位：-1500mV

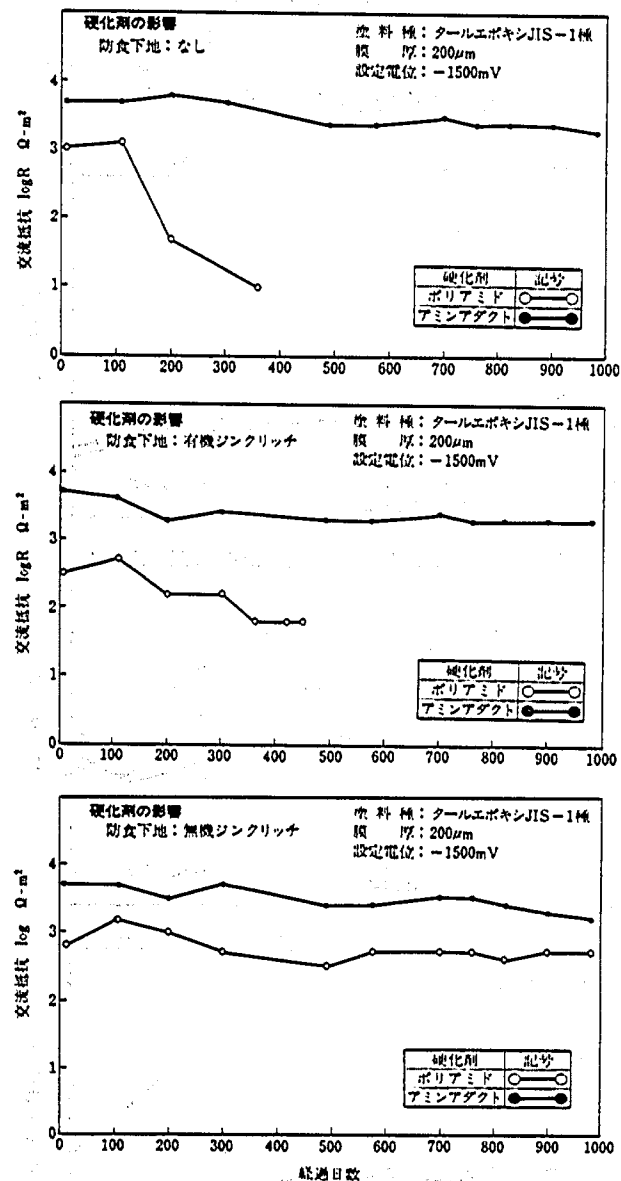


図4-51 硬化剤の影響
塗料種：タールエポキシJIS-1種
膜厚：200 μ m
設定電位：-1500mV

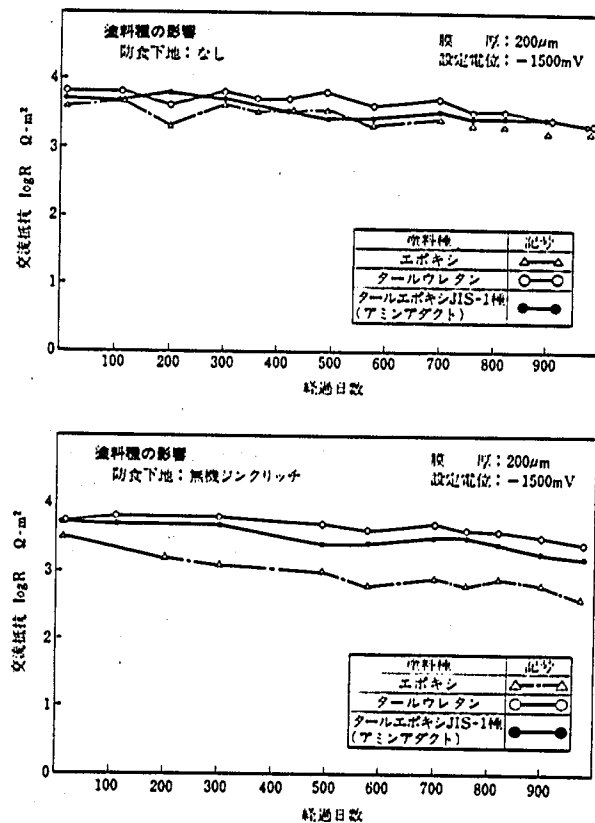


図4-52 塗料種の影響(1)
膜厚：200 μ m
設定電位：-1500mV

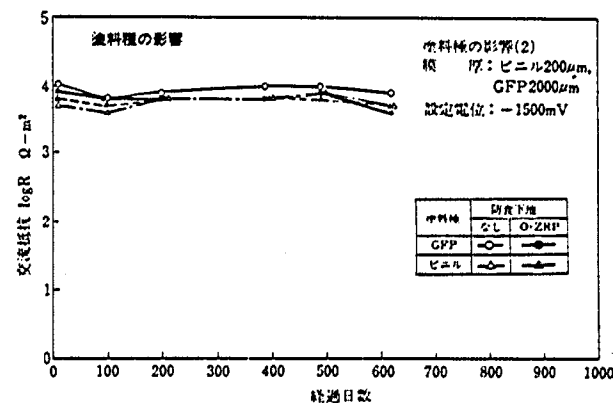


図4-53 塗料種の影響(2)
膜厚：ビニル200 μ m, GFP2000 μ m
設定電位：-1500mV

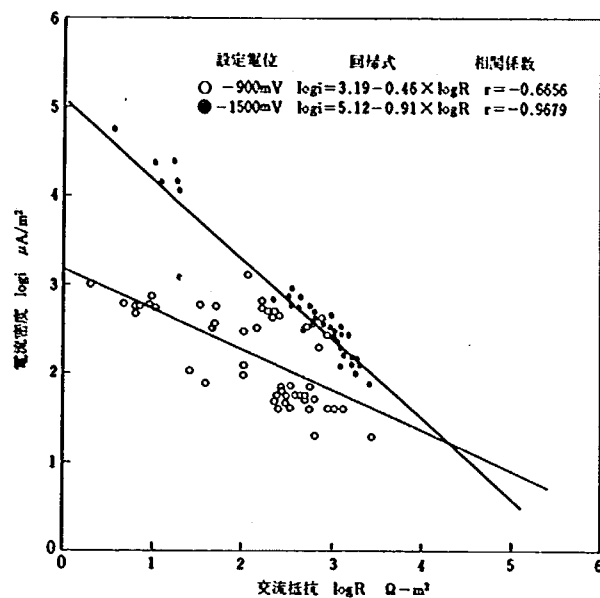


図 4-54 電流密度と交流抵抗の相関性

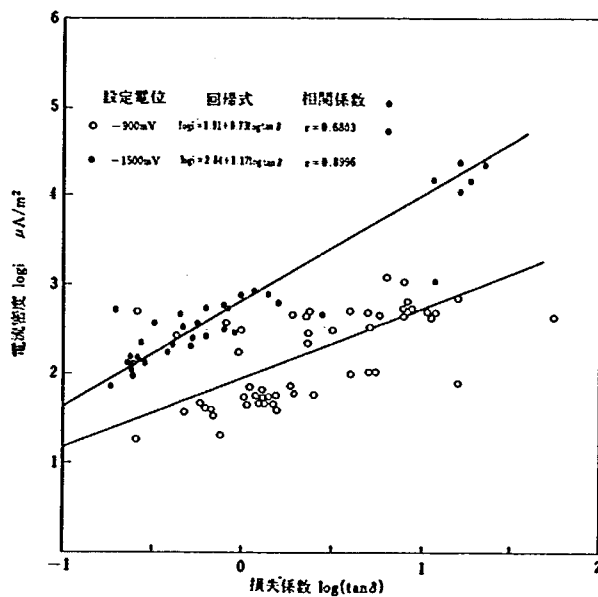


図 4-55 電流密度と $\tan \delta$ の相関性

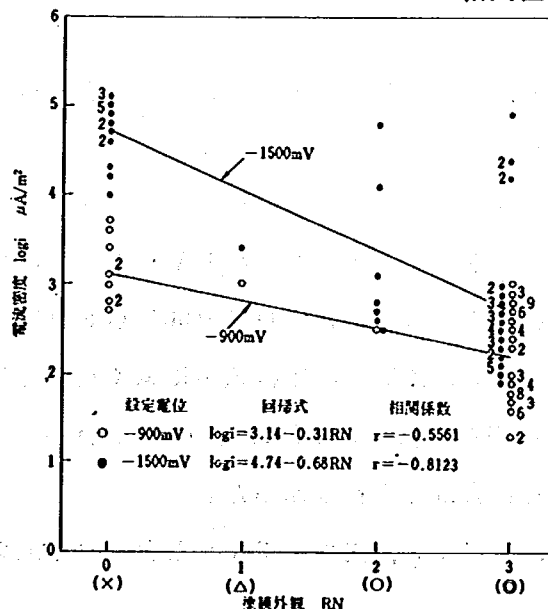
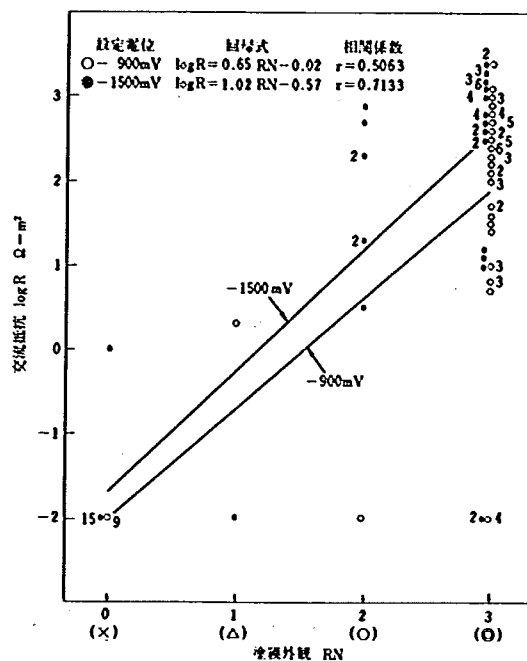


図 4-56 電流密度と塗膜外観の相関性

注) 図中の数字はプロットの重なった数を示す。



注) 図中の数字はプロットの重なった数を示す。

図 4-57 交流抵抗と塗膜外観の相関性

4.4 塗膜の性能試験

4.4.1 耐過防食試験

(1) 各種塗膜の性能比較

過防食条件下 (設定電位: $-2000mV$) における各種塗膜の耐久性を図 4-58 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。

各種塗装系における耐久性評価結果は次のとおりである。

- 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) 無機ジンクリッチを防食下地とした塗装系の耐久性は、有機ジンクリッチを防食下地とした塗装系よりも僅かに良い結果を示した。
- 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 (ビュアエポキシ) $\geq$ 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 II (高 PVC 型), 塩化ゴムの順に良好であった。
- 4) GFP の塗料種間の耐久性を比較すると、GFP (3) $\approx$ GFP (4) $>$ GFP (2) $>$ GFP (5) の順に良好であった。なお GFP (3), (4) については塗膜にふくれの発生は認められなかった。一方、防食下地のある塗膜の耐久性は防食下地のない場合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は見られなかった。

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) 塗膜の顔料濃度の影響

表4-11 塗装鋼材の電気防食特性試験の総合評価
(1) 設定電位-900mVの場合

塗 料 種	膜 厚 (μm)	防 食 下 地	スクラッチなし						スクラッチあり		
			塗膜 外 観	電 流 密 度	交 流 抵 抗	付 着 性	衝 撃 性	合 計	塗膜 外 観	電 流 密 度	合 計
タールエポキシ JIS1種 (ポリアミド)	100	なし	0	0	0	3	2	0(5)	0	0	0
		O-ZRP	3(L2)	2	0	3	2	5(10)	3	3	6
		I-ZRP	3(L2)	2	1	2	3	6(11)	3	3	6
	200	なし	2	2	0	3	0	4(7)	2	0	2
		O-ZRP	3(L2)	2	1	3	3	6(12)	3	3	6
		I-ZRP	3(L2)	2	0	1	3	5(9)	3	3	6
	400	なし	3	3	3	3	2	9(14)	2	3	5
		O-ZRP	3	3	3	2	2	9(13)	3	3	6
		I-ZRP	3	3	3	3	3	9(15)	3	3	6
タールエポキシ JIS2種 (ポリアミド)	100	なし	1	2	0			3			
		O-ZRP									
		I-ZRP									
	200	なし	3(L1)	3	1	3	2	7(12)			
		O-ZRP	3(L1)	3	2	3	2	8(13)			
		I-ZRP	3(L1)	3	2	2	3	8(13)			
タールエポキシ JIS3種 (ポリアミド)	100	なし	3	3	3			9			
		O-ZRP									
		I-ZRP									
	200	なし	0	0	0	1	2	0(3)			
		O-ZRP									
		I-ZRP									
タールエポキシ JIS1種 (アミンアダクト)	100	なし	3	3	2	3	2	8(13)			
		O-ZRP	3(L2)	3	2	2	3	8(13)			
		I-ZRP	3	3	3	2	3	9(14)			
	200	なし	2(L2)	2	1	3	0	5(8)			
		O-ZRP									
		I-ZRP									
タールウレタン	100	なし	0	1	0			1			
		O-ZRP									
		I-ZRP									
	200	なし	3	3	2	3	2	8(13)			
		O-ZRP	3	3	2	3	3	8(14)			
		I-ZRP	3	3	2	1	3	8(12)			
エポキシI (ビュアエポキシ)	100	なし	3	3	3			9			
		O-ZRP									
		I-ZRP									
	200	なし	3	3	3	3	3	9(15)	2	2	4
		O-ZRP	3	3	3	2	3	9(14)	3	3	6
		I-ZRP	3	3	2	1	3	8(12)	3	3	6
GFP(I) (ポリエステル系)	2000	なし	3	3	3	3	3	9(15)	3	3	6
		O-ZRP	3	3	3	3	3	9(15)			
		I-ZRP	3	3	3	2	3	9(14)			
ビニル	200	なし	3	3	3	1	2	9(12)	3	3	6
		O-ZRP	3	3	3	2	2	9(13)			
		I-ZRP	3	3	3	2	2	9(13)			

- 注) 1. 表中の数値は資料集(資料5)により評価した。
 2. 塗膜外観のL1, L2はリークした塗装試験片数を示す。
 3. 合計: 左側の数値は塗膜外観, 電流密度, 交流抵抗の評価点の合計
 ()内の数値は全試験項目の評価点の合計
 4. 海水浸漬日数は次の通りである。
 GFP, ビニル ; 620日
 それ以外 ; 980日

表4-12 塗装鋼材の電気防食特性試験の総合評価
(2) 設定電位-1500mVの場合

塗 料 種	膜 食 (μm)	防 食 下 地	スクラッチなし						スクラッチあり		
			塗 膜 外 観	電 流 密 度	交 流 抵 抗	付 着 性	衝 撃 性	合 計	塗 膜 外 観	電 流 密 度	合 計
タ ー ル エ ポ キ シ J I S 1 種 (ポ リ ア ミ ド)	100	なし	1	2	2	3	3	5(11)	1	0	1
		O-ZRP	3	3	3	3	3	9(15)	0	0	0
		I-ZRP	3	3	3	1	3	9(13)	0	0	0
	200	なし	0	0	1	1	3	1(5)	0	0	0
		O-ZRP	0(L2)	0	0	2	3	0(5)	0	0	0
		I-ZRP	3	3	2	3	3	8(14)	1	1	2
	400	なし	3(L1)	2	2	3	1	7(11)	0	1	1
		O-ZRP	3	3	3	3	1	9(13)	0	1	1
		I-ZRP	3	3	2	2	3	8(13)	1	2	3
タ ー ル エ ポ キ シ J I S 2 種 (ポ リ ア ミ ド)	100	なし	0	0	0			0			
		O-ZRP									
		I-ZRP									
	200	なし	1(L1)	0	1	2	2	2(6)			
		O-ZRP									
		I-ZRP									
	400	なし	3(L1)	3	3			9			
		O-ZRP									
		I-ZRP									
タ ー ル エ ポ キ シ J I S 3 種 (ポ リ ア ミ ド)	100	なし	0	0	0	1	3	0(3)			
		O-ZRP									
		I-ZRP									
	200	なし	0	0	0	3	3	0(6)			
		O-ZRP									
		I-ZRP									
	400	なし	0	0	0	3	2	0(5)			
		O-ZRP									
		I-ZRP									
タ ー ル エ ポ キ シ J I S 1 種 (ア ミ ン ア ダ ク ト)	100	なし	1	1	0			2			
		O-ZRP									
		I-ZRP									
	200	なし	3(L1)	3	3	2	2	9(13)			
		O-ZRP	3(L1)	3	3	3	2	9(14)			
		I-ZRP	3	3	3	1	3	9(13)			
	400	なし	2(L2)	2	2			6			
		O-ZRP									
		I-ZRP									
タ ー ル ウ レ タ ン	100	なし	2(L2)	3	2			7			
		O-ZRP									
		I-ZRP									
	200	なし	3	3	3	3	3	9(15)			
		O-ZRP	2(L2)	2	1	2	3	5(10)			
		I-ZRP	3	3	3	3	3	9(15)			
	400	なし	3(L2)	0	0			3			
		O-ZRP									
		I-ZRP									
エ ポ キ シ I (ビ ュ ア エ ポ キ シ)	200	なし	2	2	2	3	3	6(12)	0	0	0
		O-ZRP	3	3	3	3	3	9(15)	0	0	0
		I-ZRP	3	2	2	2	3	7(12)	0	0	0
G F P (1) (ポ リ エ ス テ ル 系)	2000	なし	3	3	3	2	3	9(14)	2	2	4
		O-ZRP	3	3	3	2	3	9(14)			
		I-ZRP	3	3	3	3	3	9(15)			
ビ ニ ル	200	なし	3	3	3	1	2	9(12)	0	0	0
		O-ZRP	3	3	3	1	2	9(12)			
		I-ZRP	3	3	3	1	2	9(12)			

- 注) 1. 表中の数値は資料集(資料5)により評価した。
 2. 塗膜外観のL1, L2はリークした塗装試験片数を示す。
 3. 合計: 左側の数値は塗膜外観, 電流密度, 交流抵抗の評価点の合計
 ()内の数値は全試験項目の評価点の合計
 4. 海水浸漬日数は次の通りである。
 G F P, ビニル : 620日
 それ以外 : 980日

エポキシ樹脂塗料の顔料濃度の異なる塗装試験片を設定電位 -900mV および -2000mV で耐久試験を行った結果を図4-59に示す。

設定電位 -2000mV 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日以下の耐久日数しか得られなかった。

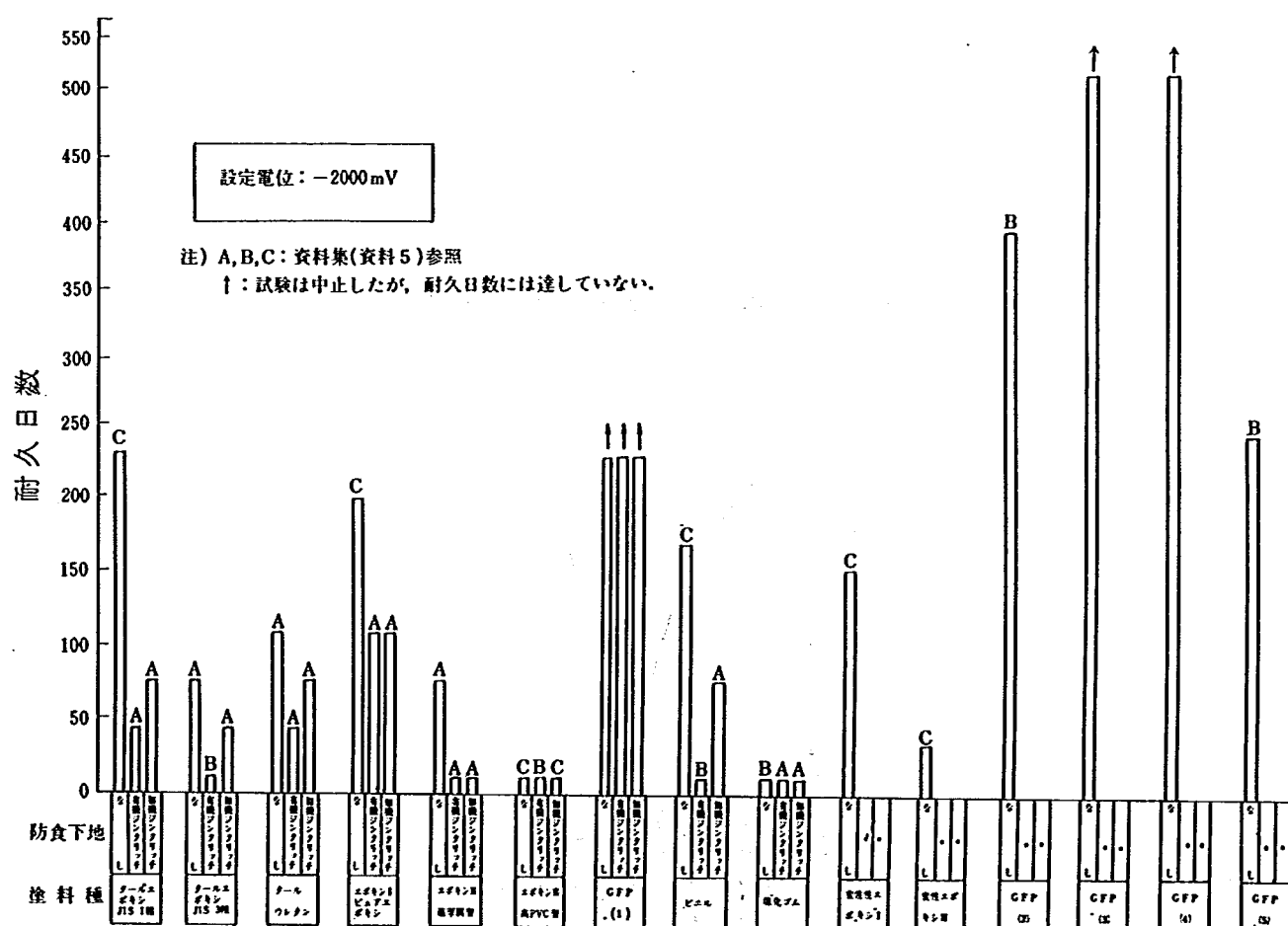
一方、スクラッチのない場合には、高PVCエポキシを除いて耐久日数は200日以上であり、顔料濃度の低い順に耐久性が良好であることが認められた。

ただし、高顔料濃度でも防食下地を用いた場合には耐久性は比較的良好である。

設定電位が -900mV 、スクラッチがある場合、いずれも良好な耐久性を示しているが、顔料濃度による耐久性の差異は殆んど認められない。しかし、防食下地を用いた高PVCエポキシは、ふくれが発生しやすい。

また、高PVCエポキシにおいて設定電位 -2000mV では、防食下地の効果が認められたが、 -900mV では負効果であった。

なお、電流密度や交流抵抗値におよぼす塗膜の顔料濃度の影響を図4-60、4-61に示す。過防食条件下において顔料濃度が増加するに従って交流抵抗値は低下し、電流密度は増大する傾向があることから、塗膜の耐久性は顔料濃度の低い方が良好であることを示している。



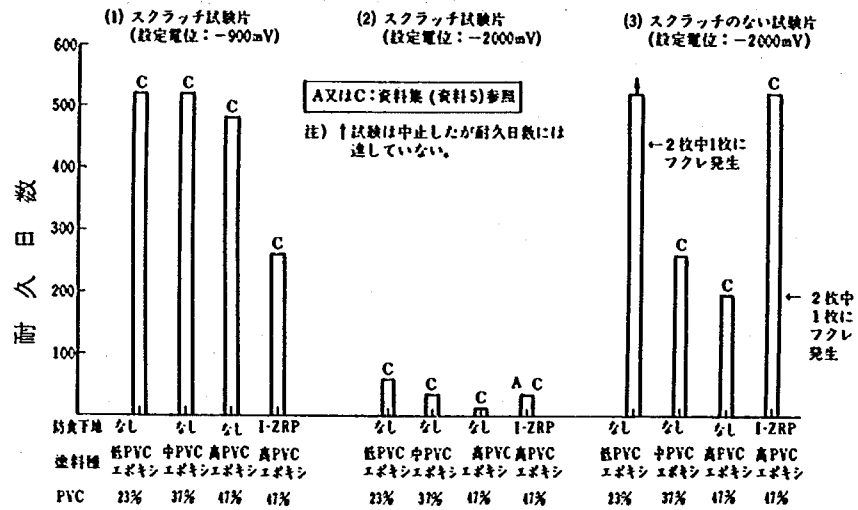


図4-59 塗膜の顔料濃度(PVC)の影響

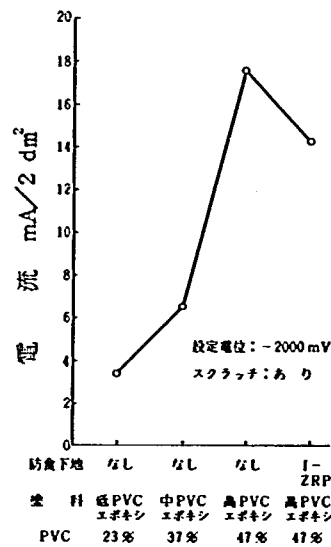


図4-60 塗膜の顔料濃度と電流密度の関係

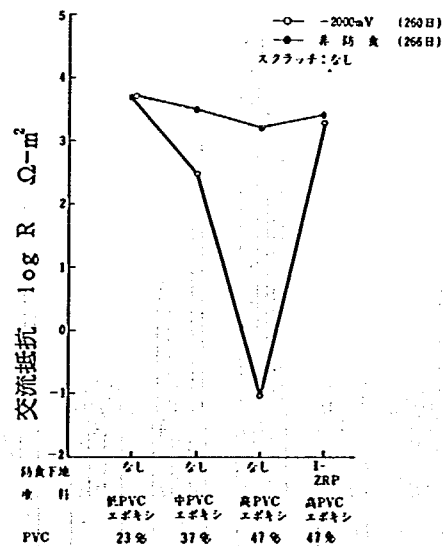


図4-61 塗膜の顔料濃度と交流抵抗の関係

(3) G F P の膜厚と耐久性(1)

G F P (1)の塗膜 (500 μ m, 1000 μ m) を -900mV, -2000mV の設定電位のもとで耐過防食試験した結果を図 4 - 6 2 に示す。

また、比較のために、タールエボキシ (J I S - 1 種 : ポリアミド, アミンアダクト) の 400 μ m の交流抵抗の経時変化と対比して図 4 - 6 3 に示す。

設定電位 -2000mV では、約 500 日経過後に塗膜にふくれが発生したが、-900mV では塗膜にふくれは認められなかった。

一方、G F P (1)の交流抵抗値は、タールエボキシより高く、500 日経過後も高抵抗を維持していた。

なお、G F P (1)の膜厚による耐久性の差異は認められなかった。

(4) G F P の膜厚と耐久性(2)

G F P (2)の膜厚 (200 μ m, 400 μ m, 600 μ m, 800 μ m) および防食下地の効果をより明らかにするため、設定電位 -2000mV で試験した結果を表 4 - 1 3, 表 4 - 1 4 に示す。

また、この表を基にした耐久日数の結果を図 4 - 6 4 に示す。

スクラッチのある試験片では次のことがわかった。

- 1) 防食下地がある場合、膜厚の効果が顕著に認められた。

防食下地がない場合は膜厚 $800\mu\text{m} \approx 600\mu\text{m} > 400\mu\text{m} >> 200\mu\text{m}$ の順に耐久性が良好であった。

- 2) 膜厚 200 μ m, 防食下地が有機ジンクリッチでは 30 日経過後、ジンクリッチ塗膜からはく離が生じた。

- 3) G F P (2)においても防食下地のない方が耐久性は良好である。

- 4) 電流密度は膜厚が大きくなるに従い低下し、防食下地はなしより有機ジンクリッチの方が増大する傾向が認められた。

スクラッチのない試験片では次のことがわかった。

- 1) 防食下地なしでは、膜厚による耐久性の差異は認められない。

- 2) 防食下地がある場合は、膜厚 200 μ m では 30 日経過後、塗膜にふくれが発生したが、膜厚 400 μ m 以上では耐久性の差異がなく、塗膜の状態も良好であった。

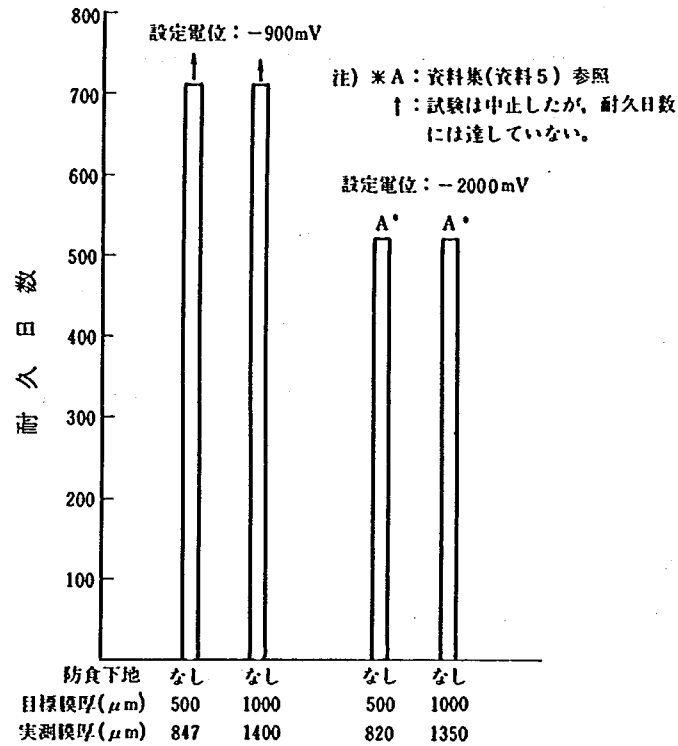


図4-62 GFP(1)の膜厚と耐久性の関係(スクラッチ試験片)

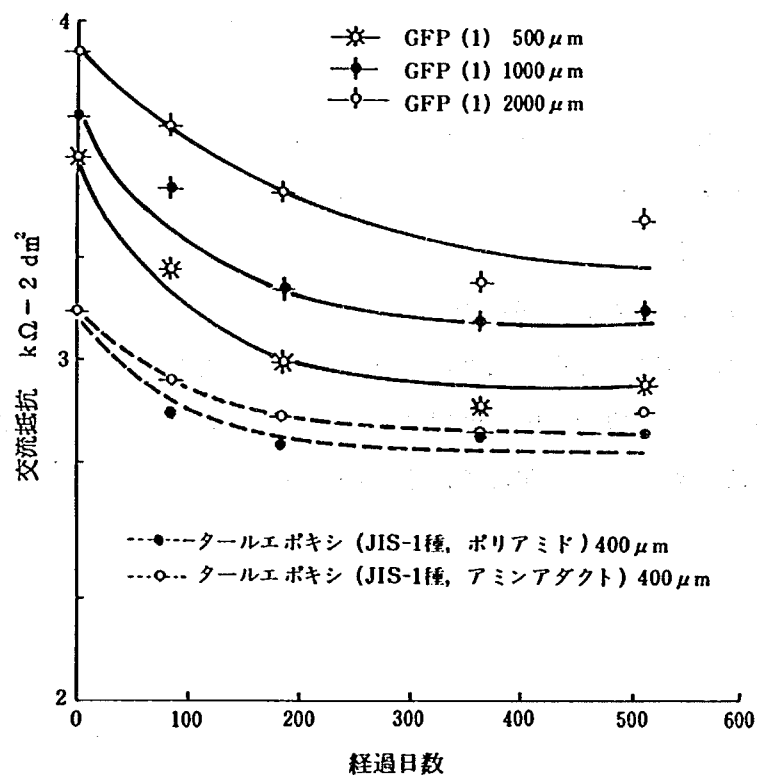


図4-63 GFP(1)の膜厚と交流抵抗の経時変化

表 4 - 1 3 G F P の耐過防食試験結果
(1) スクラッチ試験片

設定電位 (mV)	防食下地	目標膜厚 (μm)	経 過 日 数							耐久日数
			試験直後	33日	70日	131日	195日	279日	342日	
-2000	な し	200	(35.2)	◎ (12.6)	○ (28.1)	△ (16.6)	× (35.2)			166日
		400	(22.1)	◎ (7.1)	◎ (15.5)	◎ (9.5)	◎ (9.0)	○ (9.1)	△~× (12.4)	342日
		600	(19.2)	◎ (19.3)	◎ (16.0)	◎ (11.0)	◎ (11.3)	◎ (12.5)	◎~○ (5.2)	342日以上
		800	(14.5)	◎ (7.0)	◎ (14.2)	◎ (13.7)	◎ (12.8)	◎ (9.5)	◎~○ (4.4)	342日以上
	有機ジンク リッチ ペイント (O-ZRP)	200	(34.5)	× (204.3)	—	—	—	—	—	33日
		400	(20.1)	◎ (37.5)	◎ (25.4)	◎ (38.3)	× (59.7)	—	—	195日
		600	(9.6)	◎ (31.2)	◎ (21.8)	◎ (31.3)	○ (25.6)	△~× (37.2)	—	279日
		800	(7.9)	◎ (11.1)	◎ (15.7)	◎ (12.7)	◎ (15.1)	◎~○ (17.4)	× (11.8)	308日

注) ○ () 内は電流 (3 枚の試験片の平均値 ; $\text{mA}/2\text{dm}^2$)
 ○ 試験片の外観評価および判定は資料集 (資料 5) による。
 ○ サイドシール不良の試験片は 1 ヶ月ごとに再シールした。
 ○ 耐久日数は × と判定されるまでの経過日数。

表 4 - 1 4 G F P の耐過防食試験結果
(2) スクラッチのない試験片

設定電位 (mV)	防食下地	目標膜厚 (μm)	経 過 日 数						耐久日数
			34日	69日	98日	155日	210日	273日	
-2000	な し	200	◎ (0.0)	◎ (0.0)	◎ (0.0)	◎ (0.0)	◎ (0.0)	◎ (0.0)	273日以上
		400	◎ (0.0)	◎ (0.0)	◎ (0.0)	◎ (0.0)	◎ (0.0)	◎ (0.0)	273日以上
		600	◎ (0.0)	◎ (0.0)	◎ (0.0)	◎ (0.0)	◎ (0.0)	◎ (0.0)	273日以上
		800	◎ (0.0)	◎ (0.0)	◎ (0.0)	◎ (0.0)	◎ (0.0)	◎ (0.0)	273日以上
	有機ジンク リッチペイント (O-ZRP)	200	× (147.6)	—	—	—	—	—	34日
		400	◎ (0.0)	◎ (0.0)	◎ (0.0)	◎ (0.0)	◎ (0.0)	◎ (0.0)	273日以上
		600	◎ (0.0)	◎ (0.0)	◎ (0.0)	◎ (0.0)	◎ (0.0)	◎ (0.0)	273日以上
		800	◎ (0.0)	◎ (0.0)	◎ (0.0)	◎ (0.0)	◎ (0.0)	◎ (0.0)	273日以上

注) ○ () 内は電流 (3 枚の試験片の平均値 ; $\text{mA}/2\text{dm}^2$)
 ○ 試験片の外観評価および判定は資料集 (資料 5) による。
 ○ サイドシール不良の試験片は 1 ヶ月ごとに再シールした。
 ○ 耐久日数は × と判定されるまでの経過日数。

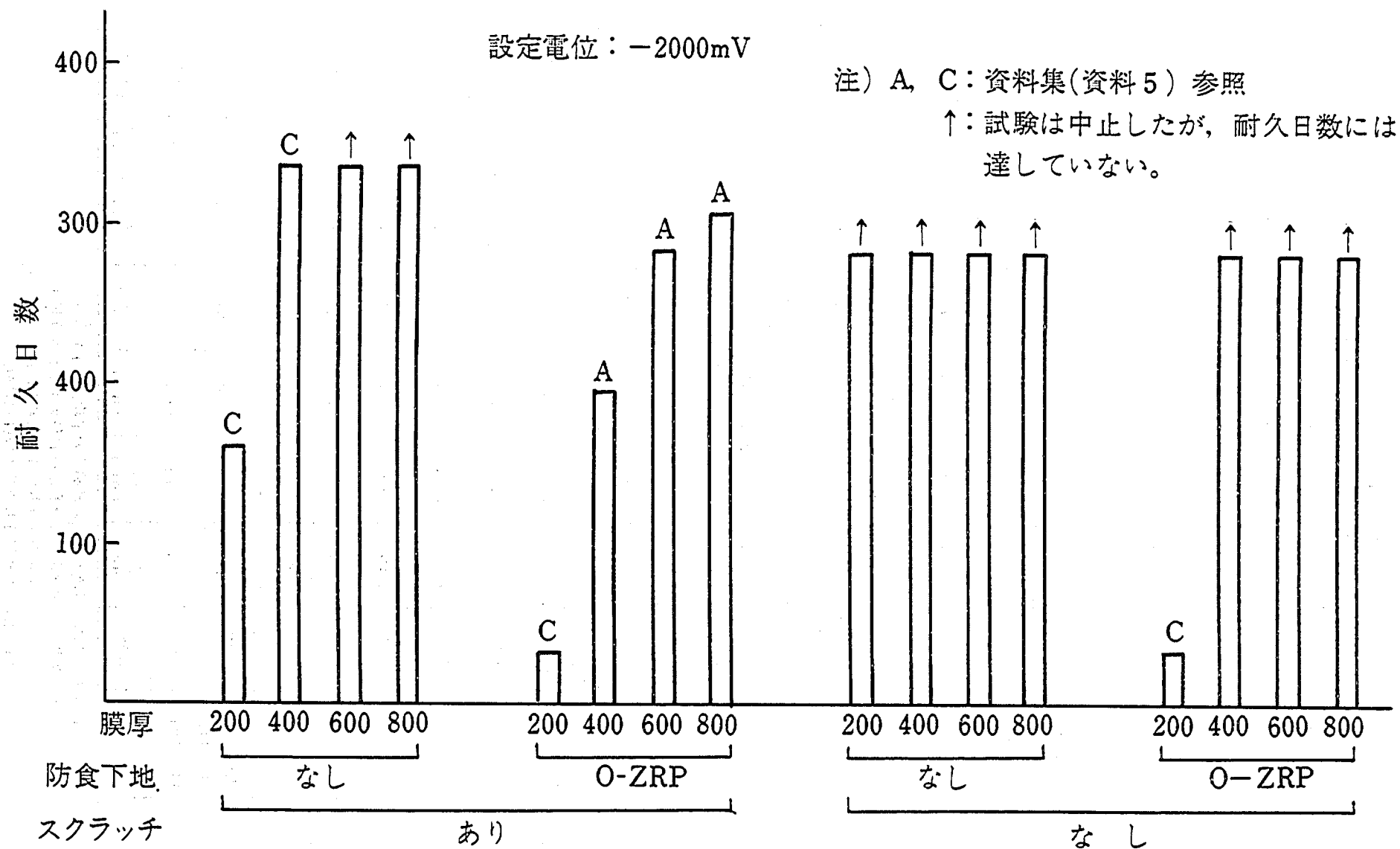


図4-64 G F P (2)の膜厚および防食下地と耐久性の関係

4.4.2 適正電位選択試験

(1) 第1次試験

各種ジंकクリッチペイントの塗装試験片の試験結果を表4-15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り、 -1500mV および -2000mV では、耐久性の小さいことが認められた。

また、無機ジंकクリッチ塗膜の電流は、有機ジंकクリッチより大きい値を示したが、これは前者の方がポーラスであるためと考えられる。

なお、塗膜劣化の外観の違いは次のとおりである。

有機ジंकクリッチ塗膜は、ふくれ発生およびその数割が壊れる程度に止まったが、無機ジंकクリッチ塗膜は、水素発生を伴いつゝ塗膜が層内または素地よりはく離する現象が認められた。

(2) 第2次試験

設定電位 -1500mV および -2000mV で検討した第1次試験の結果、これらの条件下では、ジंकクリッチ塗膜の破壊（はく離現象が見られた）が起ったため、その電位限界を見出すため追加試験を行った。

設定電位 -1000mV 、 -1200mV 、 -1300mV 、 -1400mV での各種防食下地の電流の経時変化を表4-16に示す。

過去のデータより電流が $1\text{mA}/4\text{cm}^2$ 以上になると、塗膜に異状が認められたので、この値を表4-16から求め、この結果を図4-65に示す。

この図から次のことが認められた。

- 1) 電流密度は、設定電位 $-1400\text{mV} > -1300\text{mV} > -1200\text{mV} > -1000\text{mV}$ の順に大きかった。
- 2) 防食下地別に電流密度から評価すると $\text{O-ZRP (標準)} \approx \text{I-ZRP (標準)} > \text{O-ZRP (ダスト)} \approx \text{I-ZRP (ダスト)} \gg \text{WP}$ の順に良好であった。
- 3) 設定電位が -1200mV より卑になると、電流密度が急増する傾向が認められた。

表 4 - 15 防食下地の適正電位選択試験結果(1)

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	
有機ジंक 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	8.24	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
無機ジंक 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	144	127	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 塗膜破壊による粗な表面 (素地露出なし)

表4-16 防食下地の適正位流選択試験結果 (2)

塗料種	亜鉛未含有量に よる類	標準膜厚 (μm)	設定電位 (mV)	電流密度 ($\text{mA}/4\text{cm}^2$)										塗膜外観 (試験終了後)
				1日	2日	14日	26日	34日	56日	89日	105日	154日	203日	
有機ジンク リッチメント (O-ZRP)	ダスト型	25	-1000	0.003	0.002	0.003	0.003	0.005	0.003	0.012	0.008	0.007	0.006	異状なし
			-1200	0.002	0.069	0.299	0.245	0.263	0.222	0.302	—	—	—	白色析出物が全面付着, 周辺部 (タールエボキシ) フクレ
			-1300	0.107	2.032	3.798	3.617	3.728	—	—	—	—	—	白色析出物が厚く全面付着, 周辺部 (タールエボキシ) フクレ
			-1400	0.360	3.097	—	—	—	—	—	—	—	—	白色析出物が30%付着, $\phi 0.5$ %フクレ10%発生
	標準型	75	-1000	0.052	0.018	0.005	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	異状なし
			-1200	0.014	0.010	0.003	0.018	0.033	0.028	0.028	—	—	—	白色析出物が全面付着, 周辺部 (タールエボキシ) フクレ
			-1300	0.037	0.027	0.132	0.399	0.648	—	—	—	—	—	白色析出物が厚く全面付着, 周辺部 (タールエボキシ) フクレ
			-1400	0.090	0.090	0.195	—	—	—	—	—	—	—	白色析出物が10%付着, フクレなし
無機ジンク リッチメント (I-ZRP)	ダスト型	25	-1000	0.001	0.002	0.004	0.005	0.006	0.009	0.008	0.006	0.006	0.006	白斑点が全面付着
			-1200	0.153	0.183	0.224	0.173	0.205	0.132	0.155	—	—	—	白色析出物が全面付着, 周辺部 (タールエボキシ) フクレ
			-1300	1.255	1.239	0.898	0.994	0.961	—	—	—	—	—	白色析出物が厚く全面付着, 周辺部 (タールエボキシ) フクレ
			-1400	1.237	1.057	—	—	—	—	—	—	—	—	白色析出物が全面付着 フクレなし
	標準型	75	-1000	0.002	0.004	0.002	0.004	0.005	0.008	0.006	0.008	0.003	0.003	白色析出物が全面付着, 周辺部 (タールエボキシ) フクレ
			-1200	0.188	0.187	0.130	0.085	0.098	0.064	0.073	—	—	—	白色析出物が全面付着, 周辺部 (タールエボキシ) フクレ
			-1300	0.684	0.654	0.530	0.607	0.662	—	—	—	—	—	白色析出物が厚く全面付着, 周辺部 (タールエボキシ) フクレ
			-1400	1.227	1.047	—	—	—	—	—	—	—	—	白色析出物が全面付着 フクレなし
ウォッシュ プライマー (WP)	—	15	-1000	0.008	0.008	0.007	0.006	0.007	0.012	0.011	0.009	0.006	0.007	$\phi 0.5\text{mm}$ 以下フクレ全面発生周辺部 (タールエボキシ) フクレ
			-1200	0.016	0.105	0.589	0.989	—	—	—	—	—	—	白色析出物が全面付着, 白斑点が 60%付着
			-1300	1.712	2.546	—	—	—	—	—	—	—	—	白色析出物が厚く全面付着, 周辺部 (タールエボキシ) フクレ
			-1400	2.597	—	—	—	—	—	—	—	—	—	白色析出物が全面付着, $\phi 0.5 \sim$ 1.0%, フクレが全面発生

注) 電流密度は3枚の試験片の平均値

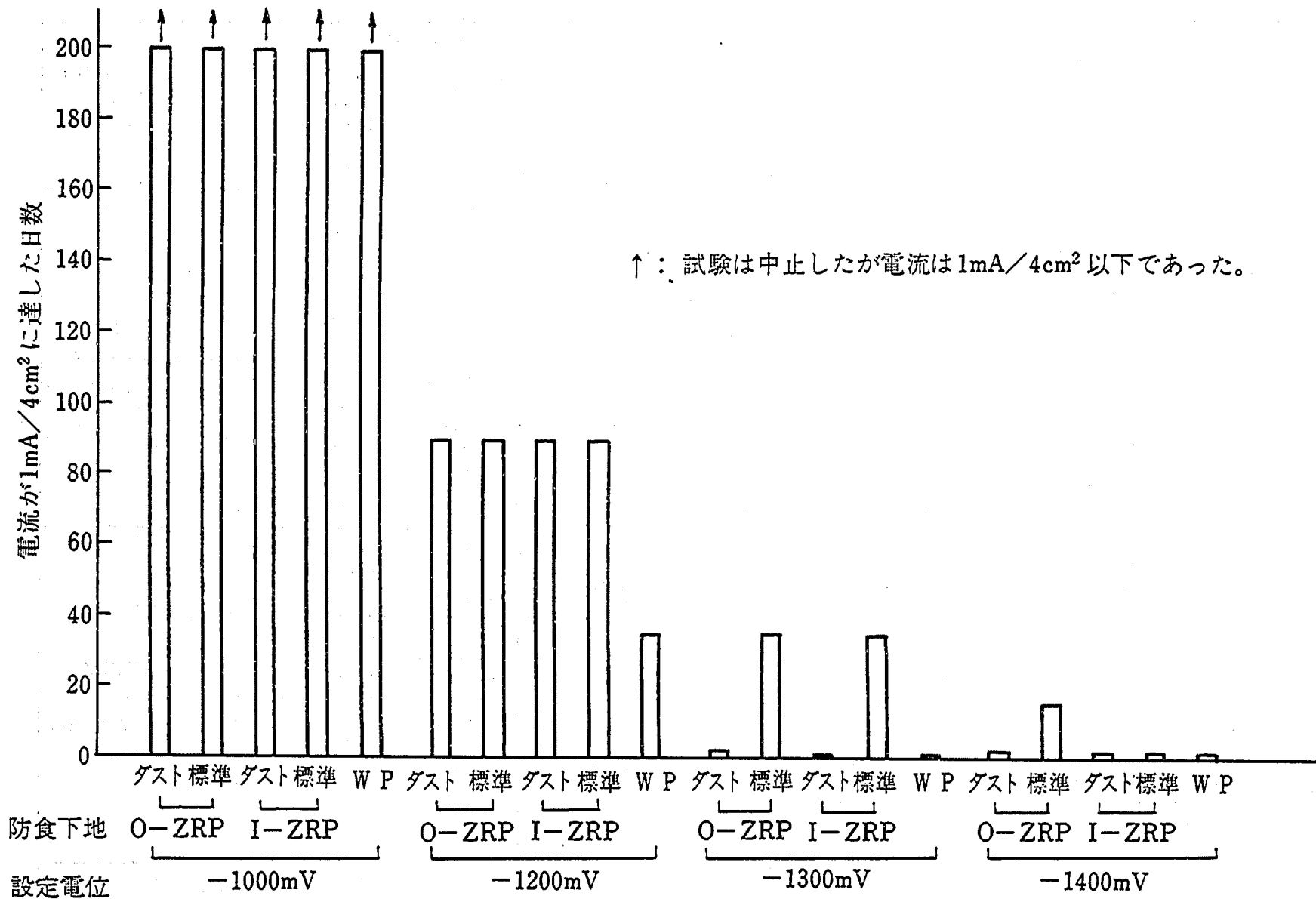


図 4-65 各種防食下地の電流の経時変化

4.4.3 塩水噴霧試験

塩水噴霧試験は、表4-17に示すように2回にわけて行った。第1次試験では5400時間経過後、第2次試験では5000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。

第1次試験の外観々察結果を表4-18に示す。

スクラッチのある試験片については、試験全体の防食性を判り易くするため、防食性の判定が×と評価されるまでの試験期間を求め、図4-66に示した。

塗料種としては、GFP(I), エボキシ(II)が比較的耐久性が良好であった。

また、防食下地の効果は、各塗料種共に十分認められたが、防食下地の種類と塗料種の組合せは、選択性があるようである。

一方、スクラッチのない試験片で、さびやふくれが発生した塗料種は、表4-19に示した通りエボキシ(III)(高PVC型)と塩化ゴムの2種類である。

第2次試験の外観々察結果を表4-20に示す。

スクラッチのない試験片は、高PVCエボキシ(II)にのみ塗膜にふくれ発生が認められた。

スクラッチのある試験片の防食性はGFP(I) 500 μ m, 1000 μ m>GFP(3), (4), (5)>GFP(2), 変性エボキシ(I), (II)>低PVCエボキシ(I), 中PVCエボキシ(II), 高PVCエボキシ(II), (HI)の順に良好であった。

また、第1次試験は19600時間(スクラッチを入れた後、14200時間)、第2次試験は12750時間(スクラッチを入れた後、7750時間)で試験片の塗膜をハク離して、金属素地の腐食状態を調べた。

その結果を表4-21に示す。

この表より防食性を評価すると次の通りである。

- (1) 有機および無機ジंकリッチを防食下地とした試験片のさび幅は、防食下地のないものより小さいことが認められた。
- (2) 防食下地の効果は、有機ジंकリッチより無機ジंकリッチの方が大きかった。
- (3) 塗料種としては、GFP(I)は比較的良好であるが、その他の塗料種の差異は顕著には認められない。

表4-17 塩水噴霧試験の経過

試 験	試験時間							
	5000	5400	6750	9740		1745	18620	21090
第 1 次試験	1 枚目							
	2 枚目							
	3 枚目							
	スクラッチを入れる							
第 2 次試験	1 枚目							
	2 枚目							
	3 枚目							
	スクラッチを入れる							

表4-18 塩水噴霧試験結果

(1)第1次塩水噴霧試験

(I)第1次塩水噴霧試験																									
スクラッチ	経過時間 防食地 塗料種	通 算： 5400時間			通 算： 9740時間 スクラッチ： 4340時間 後			通 算：11354時間 スクラッチ： 5954時間 後			通 算：13418時間 スクラッチ： 8018時間 後			通 算：15551時間 スクラッチ：10151時間 後			通 算：18619時間 スクラッチ：13219時間 後			通 算：19616時間 スクラッチ：14216時間 後			通 算：21092時間 スクラッチ：15692時間 後		
		な し	O-ZRP	I-ZRP	な し	O-ZRP	I-ZRP	な し	O-ZRP	I-ZRP	な し	O-ZRP	I-ZRP	な し	O-ZRP	I-ZRP	な し	O-ZRP	I-ZRP	な し	O-ZRP	I-ZRP	な し	O-ZRP	I-ZRP
		塗料種																							
な し	タールエポキシ (JIS-1種)	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	
	タールエポキシ (JIS-3種)	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	
	タールウレタン	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	
	エポキシ (I) (ビュアエポキシ)	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	
	エポキシ (II) (超厚膜型)	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	
	エポキシ (III) (高PVC型)	×	◎	◎	×	◎	◎	×	○	○	×	○	○	×	○	○	×	○	○	×	○	○	×	○	○
	G F P (I) (ポリエステル)	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	
	ビニル	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	
あ り	塩 化 ゴ ム	○~△	◎~○	△~×	×	◎~○	×	×	○	×	×	○	×	×	○	×	×	○	×	×	○	×	×	○	×
	タールエポキシ (JIS-1種)	—	—	—	×	×	△	×	×	△	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	
	タールエポキシ (JIS-3種)	—	—	—	△	△	△	△	△	△	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	
	タールウレタン	—	—	—	×	△	×	×	△	×	×	△	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	
	エポキシ (I) (ビュアエポキシ)	—	—	—	×	△	×	×	△	×	×	△	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	
	エポキシ (II) (超厚膜型)	—	—	—	◎	◎	◎	◎	◎	◎	△	◎	△	△	◎	×	×	○	×	×	○	×	×	×	
	エポキシ (III) (高PVC型)	—	—	—	×	△	○	×	△	○	×	△	○	×	×	△	×	×	×	×	×	×	×	×	
	G F P (I) (ポリエステル)	—	—	—	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	○	○	△	○	○	△	○	△	
ビニル	—	—	—	×	△	×	×	△	×	×	△	×	×	△	×	×	×	×	×	×	×	×	×		
塩 化 ゴ ム	—	—	—	×	×	△	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×		

注)。()中の数値は×と判定した時点での試験時間を示す。

○試験片の外観評価は資料集(資料5)による。

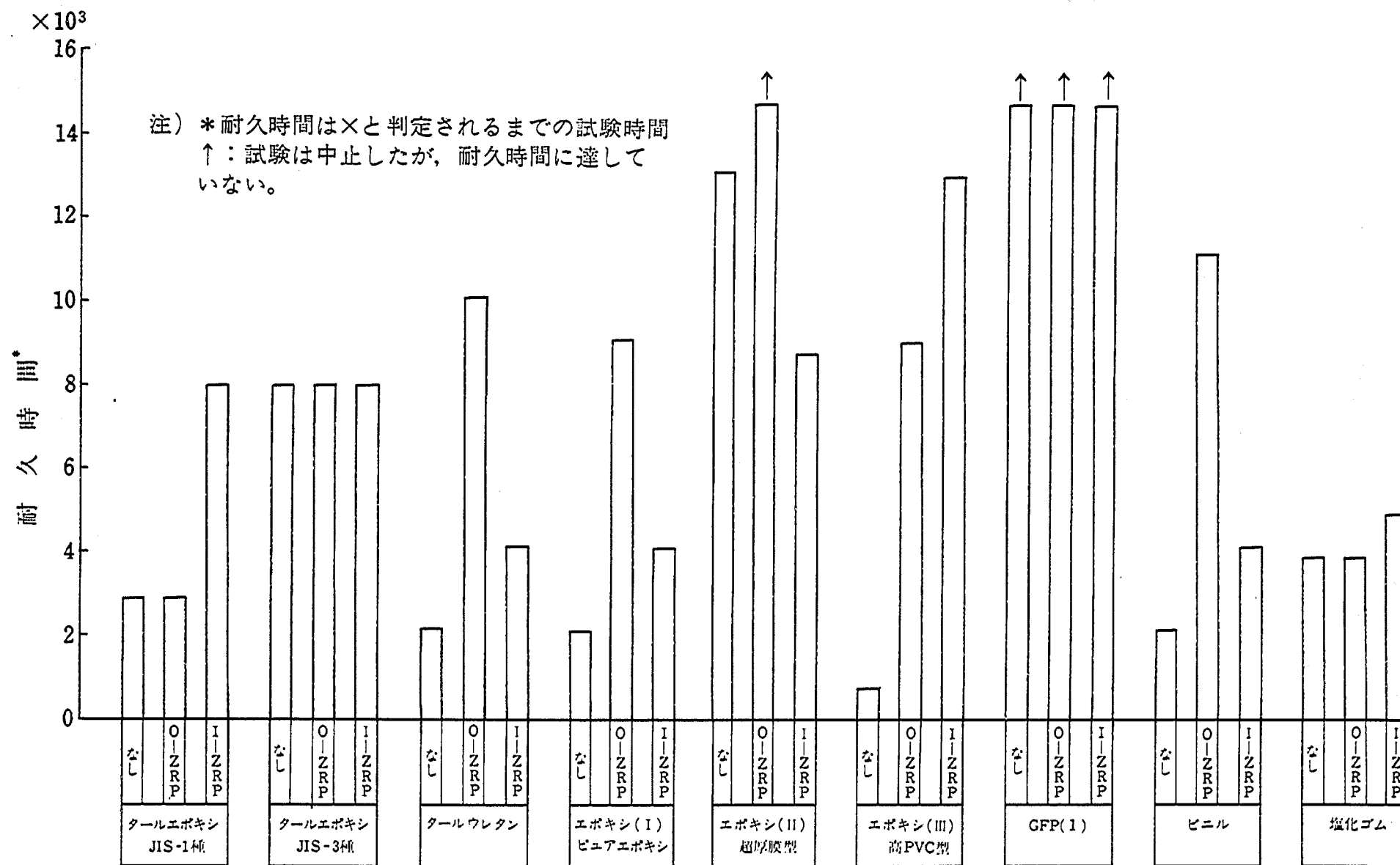


図4-66 第1次塩水噴霧試験の耐久時間(スクラッチのある試験片)

表 4 - 19 塩水噴霧試験結果

(スクラッチのない試験片で塗膜劣化の認められた塗装系)

試 験	塗 装 系			塗 膜 の 劣 化 状 態
	塗 料 種	防 食 下 地	膜 厚 (μm)	
第 1 次 試 験	エポキシⅢ (高PVC型)	—	200	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;塗膜下さび50%)
	塩 化 ゴ ム	I-ZRP	255	1200時間でふくれ発生があり、その後、ふくれが進行(2L)
第 2 次 試 験	高PVCエ ポキシⅣ		200	3800時間でふくれ発生があり、その後の変化は殆んどない(8S)

注) 試験時間は次の通りである。 第1次試験: 21,100時間 第2次試験: 17,450時間

表4-20 塩水噴霧試験結果

(I) 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	通算： 8681時間 スクラッチ後： 3681時間	通算： 11749時間 スクラッチ後： 6749時間	通算： 12746時間 スクラッチ後： 7746時間	通算： 15493時間 スクラッチ後： 10493時間	通算： 17446時間 スクラッチ後： 12446時間
	塗料種							
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(I) 500 μ m	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎
	GFP(I) 1000 μ m	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎
あり	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(I) 500 μ m	—	—	◎	◎	◎	—	—
	GFP(I) 1000 μ m	—	—	◎	◎	◎	—	—

注)。()中の数値は×と判定した時点での試験時間を示す。

。試験片の外観評価は資料集(資料5)による。

表4-21 塩水噴霧試験結果
(塗膜はく離後のスクラッチ部の発錆状態)

試験	防食下地 塗料種	な し					O - Z R P					I - Z R P				
		さび幅 (mm)			さび深さ (μm)	判 定	さび幅 (mm)			さび深さ (μm)	判 定	さび幅 (mm)			さび深さ (μm)	判 定
		最 大	最 小	平 均			最 大	最 小	平 均			最 大	最 小	平 均		
第 1 次 試 験	タールエポキシ (ポリアミド, J I S - 1 種)	13	3	10	800	△	7	2	5	900	○	5	0	2	550	◎
	タールエポキシ (ポリアミド, J I S - 3 種)	12	6	8	1000	△	6	2	4	1000	○	3	0	1	500	◎
	タールウレタン	16	4	8	850	△	9	2	4	1400	○	2	0	0.5	60	◎
	エポキシ (I) (ビュアエポキシ)	21	3	13	1250	△	8	2	4	500	○	4	0	2	350	◎
	エポキシ (II) (超厚膜型)	33	1	9	800	△	6	1	4	300	○	17	5	10	170	△
	エポキシ (III) (高 P V C 型)	33	17	25	950	×	9	0.5	3	1300	○	7	0.5	2	550	◎
	G F P (I) (ポリエステル)	6	3	4	700	○	4	0.5	2	600	◎	5	0.5	1	900	◎
	ビ ニ ル	16	4	10	900	△	8	0.5	5	1900	○	6	0.5	3	600	◎
	塩 化 ゴ ム	13	7	10	950	△	9	0.5	4	1150	○	0.5	0	0.5	100	◎
第 2 次 試 験	変性エポキシ (I)	12	3	7	450	△	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	変性エポキシ (II)	9	2	4	660	○	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	GFP (2) (イソフタル酸系)	6	2	4	710	○	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	GFP (3) (ビスフェノール系)	8	2	5	840	○	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	GFP (4) (ビニルエステル系)	14	3	5	780	○	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	GFP (5) (エポキシ系)	22	3	6	540	△	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	低 P V C エポキシ (L)	13	0.5	5	870	○	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	中 P V C エポキシ (M)	10	0	5	490	○	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	高 P V C エポキシ (H)	13	2	6	760	○	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	高 P V C エポキシ (H I)	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	2	0	1	170	◎
	GFP (1) 500 μm	10	3	6	750	○	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	GFP (2) 1000 μm	10	4	6	870	○	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—

注) 第1次試験通算19,616時間 スクラッチ後14,216時間 第2次試験通算12,746時間 スクラッチ後7,746時間

4.4.4 海水浸漬試験

海水に浸漬した塗装試験片（非電気防食）の外観観察結果から、塗膜に異状の認められた試験片についてのみ、その外観状態を表4-22に示す。

長期浸漬用試験片、交流抵抗測定用試験片は各々930日、790日経過したが、両試験共にさび又はふくれの発生した試験片は、防食下地のない塗装系で膜厚が100 μ m、200 μ mの試験片に多かった。

また、タールエポキシの膜厚が100 μ mでも、防食下地がある場合は、塗膜にさびやふくれは認められなかった。膜厚が100 μ m以上で塗膜劣化の認められた塗料種は、エポキシⅡ（超厚膜型）、エポキシⅢ（高PVC型）、タールウレタン、塩化ゴムであった。

次に海水浸漬試験片の交流抵抗（周波数：1 kHz）および抵抗減退率を表4-23に示す。

この表では防食性を数値化するために塗膜外観の結果を資料5に基づいて評価し、防食性評価点として同時に示した。

700日経過後の交流抵抗測定試験片の防食性評価点と交流抵抗の関係を図4-67に示す。

この結果より防食性評価点は、交流抵抗と比較的相関のあることが認められた。

表 4 - 2 2 海水浸漬試験の塗膜外観評価結果

塗 装 系			長期浸漬用試験片		交流抵抗測定用試験片		総合判定
塗 料 種	防食下地	膜 厚 (μm)	劣 化 状 態	930 日 の判定	劣 化 状 態	790 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(8M)を認めた。 その後の変化なし	○	3枚中1枚はふくれ(6L)とさび(6点)を認めた。 他の2枚はふくれ(8H)さび(9点)(700日で試験終了)	×~△	△
タールエポキシJIS-2種 (ポリアミド)	な し	100	異常なし	◎	3枚中2枚はふくれ, 点さびを数個認めた。 他の1枚は異常なし	○~◎	◎
タールエポキシJIS-3種 (ポリアミド)	な し	100	500日でふくれ(8VL~6VL), 点さび(6~8点) を認めた。(500日で試験終了)	×	580日でふくれ, 点さびを認め, その後, ふ くれ, さびが増加した(700日で試験終了)	×	×
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(8M)を認めた。その後, ふ くれの大きさ, 発生率に増加を認めた。	×~△	205日でふくれ(4M), さび(6点)を認めた。 (205日で試験終了)	×	×
エポキシ I (超厚膜型)	な し	1000	930日に塗膜下にさびを認めた。	△	700日で塗膜下にさびを認めた。	△	△
	O-ZRP	1075	716日にふくれ(8VL)を認めた。 その後, 変化なし	△	—	—	△
エポキシ II (高PVC型)	な し	200	60日でさび(8点), その後進行し, 772 日で塗膜下にさび50%を認めた。	×	617日でふくれ(8S)を認めた。 その後, 変化なし	△	×
	O-ZRP	275	878日でふくれ(8L)を認めた。930日で 塗膜下にさび20%を認めた。	×~○	—	—	△
	I-ZRP	275	878日でふくれ(6L)を認めた。 その後, 変化なし	△	617日でふくれ(8VS)を認めた。 その後, 変化なし	○	△
タールウレタン	な し	100	異常なし	◎	181日でふくれ(8VS), さび(9点)を認めた。その 後, ふくれ, さびが増加した。(588日で試験終了)	×	△
塩化ゴム	な し	200	220日にさび(8点)を認めた。 その後, 変化なし	○	異常なし	◎	○
	I-ZRP	275	752日で1枚にふくれを認めた。 他の1枚は930日でふくれを認めた。	○	異常なし	◎	○

注) 試験片の外観評価および判定は資料集(資料5)による。

表4-23 海水浸漬試験結果

(測定: 交流ブリッジ1kHz)

塗料種	膜厚 (μm)	初期交流 抵抗値 ($\text{k}\Omega\text{-m}^2$)	交流抵抗値 ($\text{K}\Omega\text{-m}^2$)					700日 目の塗 膜外観	防食性 評価点
			86日	205日	365日	588日	700日		
タールエポキシ JIS-1種 (ポリアミド)	100	8.1 (39)	5.0 (44)	4.5 (77)	1.9 (95)	0.4 (97)	0.2 (97)	△	3
	200	15.7 (47)	8.3 (54)	7.2 (67)	6.7 (56)	7.0 (60)	6.3 (63)	◎	9
	400	26.5 (47)	14.1 (58)	11.0 (54)	12.1 (54)	12.2 (63)	9.7 (63)	◎	9
タールエポキシ JIS-2種 (ポリアミド)	100	4.1 (17)	3.4 (34)	2.7 (58)	1.7 (79)	0.9 (79)	0.9 (79)	○~◎	7
	200	10.4 (45)	5.8 (44)	5.3 (61)	4.0 (59)	4.3 (63)	3.9 (63)	◎	9
	400	18.2 (26)	13.5 (40)	10.8 (47)	9.6 (42)	10.5 (58)	7.7 (58)	◎	9
タールエポキシ JIS-3種 (ポリアミド)	100	2.5 (23)	1.9 (38)	1.6 (71)	0.7 (71)	0.7 (100)	0.0 (100)	△	3
	200	8.9 (35)	5.8 (44)	5.0 (44)	5.0 (36)	5.7 (53)	4.2 (53)	◎	9
	400	14.5 (33)	9.7 (29)	10.3 (40)	8.7 (32)	9.9 (47)	7.7 (47)	◎	9
	I-ZRP +400	13.8 (34)	9.1 (45)	7.5 (38)	8.5 (32)	9.4 (45)	7.6 (45)	◎	9
タールエポキシ JIS-1種 (アミンアダクト)	100	6.3 (51)	3.1 (70)	1.9 (70)	-	-	-	×	0
	200	14.8 (49)	7.5 (62)	5.6 (62)	5.6 (66)	5.0 (70)	4.4 (70)	◎	9
	400	27.7 (37)	17.3 (52)	13.4 (56)	12.1 (56)	11.0 (60)	10.6 (62)	◎	9
タールウレタン	100	5.0 (78)	1.1 (77)	1.2 (100)	0.0 (100)	0.0 (100)	-	×	0
	200	13.9 (70)	4.1 (72)	3.9 (62)	5.3 (70)	4.2 (65)	5.1 (65)	◎	9
	400	21.0 (67)	6.9 (69)	6.5 (57)	9.0 (67)	6.9 (58)	8.8 (58)	◎	9
エポキシ I (ビュアエポキシ)	100	4.7 (54)	2.2 (60)	1.9 (61)	1.8 (66)	1.6 (70)	1.4 (70)	○	6
	200	10.1 (47)	5.4 (57)	4.4 (53)	4.8 (58)	4.3 (62)	3.9 (62)	◎	9
	400	18.2 (46)	9.9 (52)	8.7 (47)	9.6 (51)	9.0 (56)	8.0 (56)	◎	9
GFP (I)	500	78.0 (51)	38.4 (77)	17.7 (81)	14.5 (85)	11.6 (87)	10.3 (87)	◎	9
	1000	103.5 (39)	63.6 (79)	21.8 (76)	25.3 (83)	17.8 (85)	15.4 (85)	◎	9
	2000	161.4 (40)	97.5 (67)	53.1 (79)	33.8 (83)	27.5 (83)	28.0 (83)	◎	9

塗料種	膜厚 (μm)	初期交流 抵抗値 ($\text{k}\Omega\text{-m}^2$)	交流抵抗値 ($\text{k}\Omega\text{-m}^2$)					700日 目の塗 膜外観	防食性 評価点
			86日	205日	365日	588日	700日		
エポキシ (超厚膜型)	1000	11.6 (90)	1.2 (100)	0.0 (100)	0.0 (100)	0.0 (100)	0.0 (100)	△	3
ビニル	200	12.6 (7)	11.7 (31)	8.7 (13)	10.9 (21)	10.0 (27)	9.2 (27)	◎	9
塩化ゴム	200	13.6 (28)	9.8 (41)	8.0 (53)	6.4 (60)	5.5 (63)	5.0 (63)	◎	9
変性エポキシ (I)	400	8.7 (13)	7.6 (45)	4.8 (28)	6.3 (33)	5.8 (40)	5.2 (40)	◎	9
変性エポキシ (II)	400	6.0 (3)	5.9 (5)	5.8 (0)	6.0 (3)	5.9 (12)	5.3 (12)	◎	9
GFP (2) (イソフタル酸系)	1500	204.4 (14)	174.8 (62)	78.7 (75)	50.2 (79)	43.0 (78)	45.3 (78)	◎	9
GFP (3) (ビスフェノール系)	1500	128.9 (1)	126.9 (53)	60.2 (62)	48.8 (72)	35.4 (73)	35.4 (73)	◎	9
GFP (4) (ビニルエステル系)	1500	140.1 (28)	101.5 (67)	46.7 (80)	27.6 (87)	18.5 (89)	16.0 (89)	◎	9
GFP (5) (エポキシ系)	1500	30.4 (40)	18.2 (56)	13.3 (58)	12.8 (66)	10.4 (65)	10.7 (65)	◎	9
低PVCエポキシ (L)	200	9.6 (28)	6.9 (36)	6.2 (30)	6.8 (30)	6.7 (38)	6.0 (38)	◎	9
中PVCエポキシ (M)	200	6.4 (43)	3.6 (51)	3.2 (51)	3.2 (53)	3.0 (58)	2.7 (58)	◎	9
高PVCエポキシ (H)	200	5.6 (58)	2.3 (67)	1.9 (68)	1.8 (72)	1.5 (75)	1.4 (75)	△	3
高PVCエポキシ (HI)	I-ZRP +200	7.3 (58)	3.1 (62)	2.8 (64)	2.6 (69)	2.3 (71)	2.1 (71)	○	6

注) () 内は抵抗減退率(%)を示す。

・塗膜外観と防食性評価点は資料集(資料5)に従い評価した。

防食性評価点は3枚の試験片の合計点である。

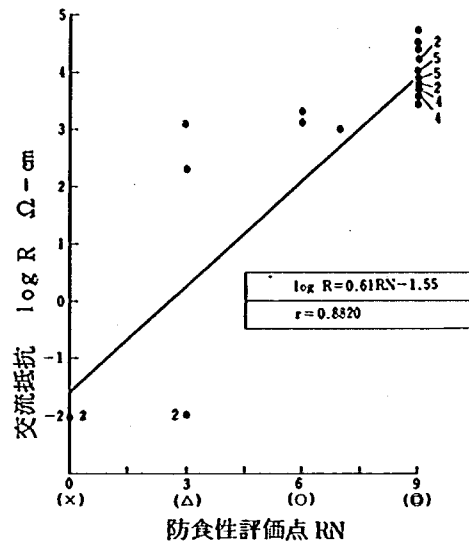


図 4-67 交流抵抗と防食性評価点の相関性
(防食性評価点は 3 枚の試験片の合計点)

4.4.5 塗膜物性試験

塗装鋼材の電気防食特性試験、海水浸漬試験に供した試験片および控試験片について、付着強度試験と耐衝撃性試験を行い塗膜物性を調べた。

1) 付着強度試験

各種塗膜の付着強度測定結果を表 4-24 に示す。

防食下地、膜厚および設定電位の効果と、これらの交互作用を求めるため、表 4-25 に示した 3 元配置で分散分析を行った。

この結果は、図 4-68 に示したが、防食下地についてのみ有意差が認められ、付着強度は防食下地なし > 有機ジンクリッチ > 無機ジンクリッチの順に高かった。

この理由としては、防食下地の凝集力が弱いため、測定時の破壊箇所がほとんど防食下地層の凝集破壊であったためと考えられる。

また、塗料種間の差異を求めるため表 4-26 に示したように防食下地との 2 元配置で分散分析を行った。

この結果においても防食下地のみ有意差が認められ、塗料種には有意差が認められなかった。

2) 耐衝撃性試験

各種塗膜の耐衝撃性試験結果を表 4-27 に示す。

分散分析するに当り耐衝撃性の評価を資料集 5 に基づいて数値化し、表 4-28 に示す 3 元配置で分散分析を行った。

この結果においても、防食下地についてのみ有意差が認められ、その他の要因については有意差が認められなかった。

防食下地の耐衝撃性は、無機ジンクリッチ > 有機ジンクリッチ > 防食下地なしの順に良好であった。

また、塗料種間については表 4-29 に示す 2 元配置に基づき分散分析を行った。

この結果は、図 4-69 に示したが、塗料種には有意差が認められなかった。

耐衝撃性試験において防食下地があり良好であるのは、ジंकリッチ塗膜がポーラスであるため、衝撃のエネルギーがジंकリッチ塗膜の変形に費やされるためであると考えられる。

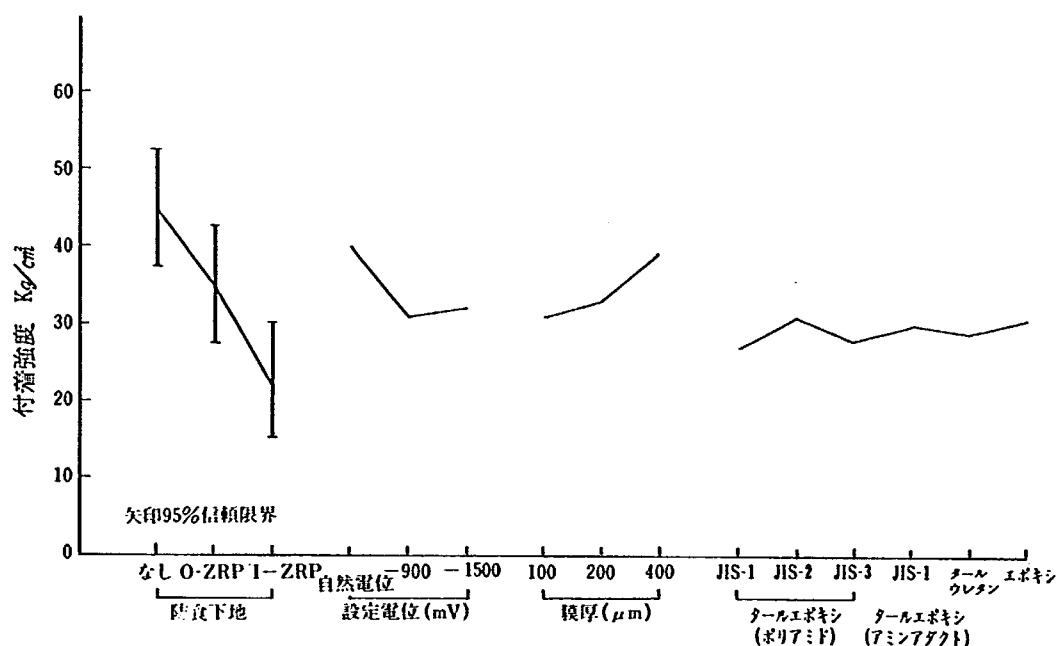


図 4-68 各要因の主効果

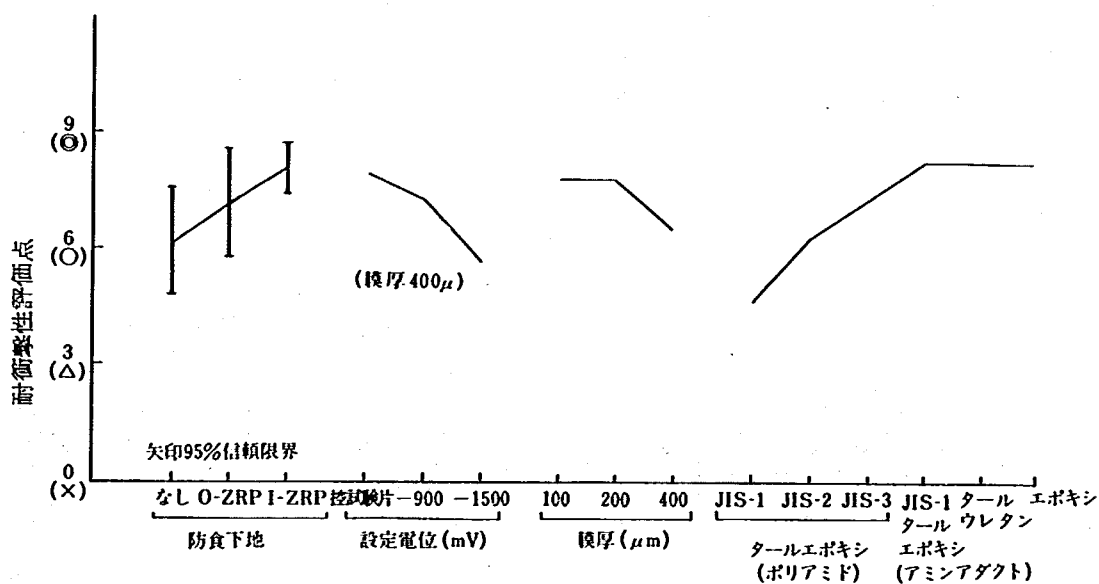


図 4-69 各要因の主効果

表4-24 付着強度試験結果

塗料種	防食下地	膜厚 (μm)	設定電位 (mV)	付着強度(%)		平均値 (%)
				1	2	
タールエポキシ JIS-1種 (アミンアダクト)	なし	200	—*1	40.1	39.2	39.7
	O-ZRP			31.5	25.2	28.4
	I-ZRP			11.8	12.7	12.3
	なし		-900	35.7	29.9	32.8
	O-ZRP			42.0	41.4	41.7
	I-ZRP			15.3	15.9	15.6
	なし		-1500	28.0	23.6	25.8
	O-ZRP			31.2	42.7	37.0
	I-ZRP			15.9	8.9	12.4
タールエポキシ JIS-1種 (ポリアミド)	なし	100	自然電位*2	54.1	51.0	52.6
		200		64.6	65.3	65.0
		400		63.1	58.3	60.7
	O-ZRP	100		36.6	52.5	44.6
		200		44.3	38.2	41.3
		400		47.8	33.8	40.8
	I-ZRP	100		12.7	14.3	13.5
		200		20.1	22.3	21.2
		400		15.3	22.9	19.1
	なし	100	-900	26.8	35.4	31.1
		200		22.3	38.9	30.6
		400		41.4	62.4	51.9
	O-ZRP	100		27.4	41.7	34.6
		200		37.3	31.8	34.6
		400		31.2	20.4	25.8
	I-ZRP	100		22.3	16.6	19.5
		200		12.7	19.7	16.2
		400		25.8	39.8	32.8
	なし	100	-1500	39.5	28.0	33.8
		200		25.2	6.9	16.1
		400		54.1	66.9	60.5
	O-ZRP	100		29.9	30.9	30.8
		200		30.6	27.1	28.9
		400		32.5	36.6	34.6
	I-ZRP	100		18.2	19.1	18.7
		200		44.6	31.8	38.2
		400		17.8	27.1	22.5
タールエポキシ JIS-2種 (ポリアミド)	なし	200	—	32.8	53.5	43.1
	O-ZRP			27.4	39.2	33.3
	I-ZRP			22.6	19.1	20.9
	なし		-900	42.7	29.6	36.2
	O-ZRP			48.1	36.0	42.1
	I-ZRP			26.1	20.7	23.4
	なし		-1500	27.4	29.3	28.4

塗料種	防食下地	膜厚 (μm)	設定電位 (mV)	付着強度(%)		平均値 (%)
				1	2	
タールエポキシ JIS-3種 (ポリアミド)	なし	100	自然電位	24.2	32.8	28.5
		200		34.4	33.4	33.9
		400		39.2	35.0	37.1
	O-ZRP	200		23.6	44.3	34.0
		400		37.3	47.8	42.6
		400		36.3	33.8	35.1
	I-ZRP	200		34.7	29.3	32.0
		400		14.0	16.6	15.3
	なし	100	-900	42.4	28.7	35.6
		200		46.5	35.0	40.8
		400		29.9	28.0	29.0
	O-ZRP	200	-1500	24.8	15.3	20.1
		400		11.5	20.7	16.1
エポキシ I (ビュアエポキシ)	なし	100	—	45.7	43.3	44.6
		200		40.4	41.4	40.9
		400		29.6	33.4	31.5
	O-ZRP	100	-900	63.1	35.3	49.2
		200		33.4	23.9	28.7
		400		14.3	17.5	15.9
	I-ZRP	100	-1500	29.6	—	29.6
		200		41.1	19.7	30.4
		400		22.0	22.0	22.0
タールウレタン	なし	100	—	49.7	49.0	49.4
		200		24.5	27.0	25.8
		400		20.4	26.4	23.4
	O-ZRP	100	-900	45.9	28.7	37.3
		200		24.5	41.7	33.1
		400		16.6	18.5	17.6
	I-ZRP	100	-1500	29.9	34.4	32.2
		200		17.2	28.0	22.6
		400		31.8	29.0	30.4

注) *1 控試験片
*2 海水浸漬試験片

表 4 - 2 5 分散分析表 (付着強度試験)
(Kg/cm²)

A 防食下地	B 膜 厚 (μ m)	C 設 定 電 位			要 因	S	ϕ	V	Fo
		自然電位	-900mV	-1500mV					
な し	100	52.6	31.1	33.8	A	2250.1	2	1125.0	11.6 *
	200	65.0	30.6	16.1	B	303.7	2	151.9	1.6
	400	60.7	51.9	60.5	C	455.7	2	227.9	2.3
O-ZRP	100	44.6	34.6	30.8	A $\times$ B	861.2	4	215.3	2.2
	200	41.3	34.6	28.9	B $\times$ C	172.9	4	43.2	0.4
	400	40.8	25.8	34.6	A $\times$ C	596.3	4	149.1	1.5
I-ZRP	100	13.5	19.5	17.8	E	778.0	8	97.2	
	200	21.2	16.2	38.2	T	5417.9	26		
	400	19.1	32.8	22.5					

注) 塗料種: ターレポキシJIS-1種 (ポリアミド)

* : 信頼度 99 %

単位: Kg/cm²

表 4 - 2 6 分散分析表 (付着強度試験)
(Kg/cm²)

A 塗 料 種	B 防 食 下 地			要 因	S	ϕ	V	Fo
	な し	O - ZRP	I - ZRP					
ターレポキシJIS-1種 (アミンダクト)	35.7 29.9	42.0 41.4	15.3 15.9	A	171.5	5	34.3	0.5
ターレポキシJIS-1種 (ポリアミド)	22.3 38.9	37.3 31.8	12.7 19.7	B	2551.7	2	1275.8	18.5 *
ターレポキシJIS-2種 (ポリアミド)	42.7 29.6	48.1 36.0	26.1 20.7	A $\times$ B	693.3	10	69.3	1.0
ターレポキシJIS-3種 (ポリアミド)	42.4 28.7	29.9 28.8	24.8 15.3	E	1243.3	18	69.1	
エポキシ I (ビュアエポキシ)	63.1 35.3	33.4 23.9	14.3 17.5	T	4659.7	35		
ターレウレタン	45.9 28.7	24.5 41.7	16.6 18.5					

注) 膜厚: 200 μ m

設定電位: -900 mV

* : 信頼度 99 %

単位: Kg/cm²

表4-27 耐 衝 撃 性 試 験 結 果

塗 料 種	防食下地	膜 厚 (μm)	設 電 定 位 (mV)	耐 衝 撃 性 1/2" R×1kg×高さ(cm)			評価点
				10	30	50	
タールエポキシ JIS-1種 (アミンアダクト)	なし	200	—	○	○	○	9
	O-ZRP			○	○	○	9
	I-ZRP			○	○	○	9
	なし		-900	○	○	○	7
	O-ZRP			○	○	○	9
	I-ZRP			○	○	○	9
	なし		-1500	○	○	○	6
	O-ZRP			○	○	○	6
	I-ZRP			○	○	○	9
タールエポキシ JIS-1種 (ポリアミド)	なし	400	—	○	○	△	6
	O-ZRP			○	○	○	9
	I-ZRP			○	○	○	9
	なし	100	-900	○	○	○	6
	なし			○	△	×	4
	なし			○	○	○	7
	O-ZRP	200		○	○	△	6
	なし	400		○	○	○	9
	なし	100		○	○	○	9
	I-ZRP	200		○	○	○	9
	なし	400		○	○	○	8
	なし	100	-1500	○	○	○	9
	なし	200		○	○	△	7
	なし	400		○	△	△	4
	O-ZRP	200		○	○	○	9
	なし	400		○	△	△	4
	なし	100		○	○	○	9
	I-ZRP	200		○	○	○	9
	なし	400		○	○	○	9
タールエポキシ JIS-2種 (ポリアミド)	なし	200	—	○	○	○	7
	O-ZRP			○	○	○	9
	I-ZRP			○	○	○	9
	なし		-900	○	○	△	5
	O-ZRP			○	○	△	5
	I-ZRP			○	○	○	9
	なし		-1500	○	○	○	6

塗 料 種	防食下地	膜 厚 (μm)	設 電 定 位 (mV)	耐 衝 撃 性 1/2" R×1kg×高さ(cm)			評価点
				10	30	50	
タールエポキシ JIS-3種 (ポリアミド)	なし	400	—	○	○	○	9
	O-ZRP			○	○	△	7
	I-ZRP			○	○	○	9
	なし	100	-900	○	○	○	7
	なし	200		○	○	×	4
	なし	400		○	△	×	3
	O-ZRP	200		○	○	○	9
	I-ZRP	200		○	○	○	9
	なし	100	-1500	○	○	○	9
	なし	200		○	○	○	8
	なし	400		○	○	○	7
エポキシ I (ビュアエポキシ)	なし	200	—	○	○	○	9
	O-ZRP			○	○	○	9
	I-ZRP			○	○	○	9
	なし		-900	○	○	△	7
	O-ZRP			○	○	○	9
	I-ZRP			○	○	○	9
	なし		-1500	○	○	○	8
	O-ZRP			○	○	△	7
	I-ZRP			○	○	○	9
タールウレタン	なし	200	—	○	○	○	9
	O-ZRP			○	○	○	9
	I-ZRP			○	○	○	9
	なし		-900	○	○	○	7
	O-ZRP			○	○	○	9
	I-ZRP			○	○	○	9
	なし		-1500	○	○	○	9
	O-ZRP			○	○	○	9
	I-ZRP			○	○	○	9

注) * 控試験片
衝撃性の評価は資料集(資料5)による。

表 4 - 2 8 分散分析表 (耐衝撃性試験)

A 防食下地	B 膜 厚 (μm)	C 設 定 電 位		要 因	S	ϕ	V	Fo	ブー mS	Fo'
		-900mV	-1500mV							
な し	100	6	9	A	21.8	2	10.9	4.7	VE = 2.57 $\phi_e' = 12$	4.25*
	200	4	7	B	7.1	2	3.6	1.5		1.40
	400	7	4	C	0.5	1	0.5	0.2		0.19
O-ZRP	100	6	8	A × B	1.3	2	0.7	0.3		
	200	9	9	B × C	9.3	2	4.7	2.0		
	400	7	4	A × C	10.9	4	2.7	1.2		
I-ZRP	100	9	9	E	9.3	4	2.3			
	200	9	9	T	60.3	17				
	400	8	9							

注) 塗料種: タールエポキシ J I S - 1 種 (ポリアミド)

数値は表 4 - 2 7 の評価点による。

*: 信頼度 99%

表 4 - 2 9 分散分析表 (耐衝撃性試験)

A 塗 料 種	B 防 食 下 地			要 因	S	ϕ	V	Fo
	な し	O-ZRP	I-ZRP					
タールエポキシ J I S - 1 種 (アミンアダクト)	7	9	9	A	3.3	5	0.7	1.9
タールエポキシ J I S - 1 種 (ポリアミド)	4	9	9	B	12.4	2	6.2	17.7 *
タールエポキシ J I S - 2 種 (ポリアミド)	5	5	9	A × B	4.9	10	0.5	1.4
タールエポキシ J I S - 3 種 (ポリアミド)	4	9	9	E	12.7	36	0.4	
エポキシ I (ビュアエポキシ)	7	9	9	T	33.3	53		
タールウレタン	7	9	9					

注) 膜厚: 200 μm

設定電位: -900 mV

数値は表 4 - 2 7 の評価点による。

*: 信頼度 99%

4.5 塗装系の耐久性に関する考察

各種の塗装系について塗装鋼材の電気防食特性試験、耐過防食試験、塩水噴霧試験、海水浸漬試験などを行いその耐久性を調査した。

表4-30には上記試験で得られた結果を整理した。また表4-31には塗料種についての総合評価を行った。これらの結果より次の2点を指摘することができる。

(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特性試験（設定電位：-900mV）においては、防食下地の効果は明らかに現われている。他方、耐過防食試験では、防食下地は逆の効果을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現われている。

次に、塗料種について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特性試験（設定電位：-900mV）ではタールウレタン系が良好であるが、耐過防食試験や塩水噴霧試験、海水浸漬試験では両塗料種には耐久性の差異は認められない。

以上のように、電気防食試験と他の試験法との間には明確な対応関係は得られていない部分もある。

(2) 電位の効果

設定電位が-900mVより卑な電位、-1500mV、-2000mVとなるに伴い塗膜の劣化が急速に進む傾向にある。特にスクラッチのある塗膜の劣化がより卑な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が限界であり、-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られる。

表4-30 塗装系の耐久性評価(試験項目ごとの結果)

塗料種	防食下地	膜厚 番号(μm)	塗装鋼材の電気防食特性試験												耐過防食 試験 -2000mV	塩水噴霧試験		海水浸漬 試験
			-900mV			-900mV,スクラッチあり			-1500mV			-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		◎			◎			◎			×		◎	◎	◎	◎
980日																		
GFP(1) (ポリエステル系)	なし	19		◎			◎			◎			○		◎	◎	○	◎
	O-ZRP	20		◎						◎					◎	◎	◎	◎
	I-ZRP	21		◎						◎					◎	◎	◎	◎
ビニル	なし	22		◎			◎			◎			×		◎	◎	△	◎
	O-ZRP	23		◎						◎					×	◎	○	◎
	I-ZRP	24		◎						◎					△	◎	◎	◎
620日																		
エポキシ II (超厚膜型)	なし	25													△	◎	△	△
	O-ZRP	26													×	◎	○	△
	I-ZRP	27													×	◎	△	◎
エポキシ II (高PVC型)	なし	28													×	×	×	×
	O-ZRP	29													×	○	○	△
	I-ZRP	30													×	○	◎	△
塩化ゴム	なし	31													×	×	△	○
	O-ZRP	32													×	○	○	◎
	I-ZRP	33													×	×	◎	◎
																21100時間	14200時間	930日
変性エポキシ(I)	なし	34													○	◎	△	◎
変性エポキシ(II)	なし	35													×	◎	△	◎
GFP(2)(イソフタル酸系)	なし	36													◎	◎	△	◎
GFP(3)(ビスフェノール系)	なし	37													◎	◎	○	◎
GFP(4)(ビニルエステル系)	なし	38													◎	◎	○	◎
GFP(5)(エポキシ系)	なし	39													◎	◎	○	◎
エポキシ(I)(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													△	◎	×	△
																17400時間	8700時間	670日

表 4 - 31 塗料種の総合評価

条件 試験 評価 方法 判定	電 気 防 食 下		非 電 気 防 食 下	
	電気防食特性試験	過 防 食 試 験	塩 水 噴 霧 試 験	海 水 浸 漬 試 験
	塗膜外観，電流密度 (設定電位：-900mV) (スクラッチ：なし)	設定電位 -2000 mV での耐久日数 (防食下地なし)	スクラッチ部のさび幅	塗 膜 外 観
◎	○ タールエポキシJIS-1種 (アミンアダクト) ○ エポキシI (ビュアエポキシ) ○ タールウレタン ○ タールエポキシJIS-2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-1種 (ポリアミド) ○ エポキシI (ビュアエポキシ) ○ GFP(1,2,3,4,5)	○ GFP(I)	表3-25から下記塗料種を除く全ての塗料種
○	○ タールエポキシJIS-1種 (ポリアミド)	○ ビニル ○ 変性エポキシ(II) ○ タールウレタン	○ 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) ○ エポキシI(ビュアエポキシ) ○ タールウレタン ○ ビニル	○ 塩化ゴム(200μm)
△		○ タールエポキシJIS-3種 (ポリアミド) ○ エポキシII (超厚膜型)	○ エポキシII (超厚膜型) ○ 塩化ゴム	○ タールエポキシJIS-1種 (ポリアミド, 100μm) ○ タールウレタン(100μm) ○ エポキシII (超厚膜型, 1000μm)
×		○ エポキシIII (高PVC型) ○ 塩化ゴム ○ 変性エポキシ(III)	○ エポキシIII (高PVC型)	○ タールエポキシJIS-1種 (アミンアダクト, 100μm) ○ タールエポキシJIS-3種 (ポリアミド, 100μm) ○ エポキシIII (高PVC型 200μm)

5. 総 括

5.1 裸鋼材の電気防食特性試験

- (1) 自然電位は標準，低温および希釈環境のいずれにおいても $-707 \sim -730$ mV，汚染環境においては $-620 \sim -643$ mVで安定した。
- (2) 腐食速度は標準，低温および希釈環境のいずれにおいても $0.05 \sim 0.06$ mm/yr，汚染環境においては 0.08 mm/yrである。
- (3) 防食率は標準，低温および希釈環境のいずれにおいても -800 mVより卑な電位で 97% ，汚染環境においては -900 mVで 93% 以上の値を示した。
- (4) 設計電流密度は標準，低温および希釈環境のいずれにおいても 80 mA/m²，汚染環境においては $100 \sim 200$ mA/m²と推定された。
- (5) 定常電流密度は標準，低温および希釈環境のいずれにおいても 40 mA/m²，汚染環境においては 100 mA/m²と推定された。
- (6) 標準，低温，希釈および汚染環境のいずれにおいてもサンドブラスト鋼と発錆処理鋼との間には，腐食および防食特性に大きな差異は認められなかった。

5.2 流速環境下での電気防食特性試験

- (1) 自然電位は，流速が大きいほど貴な値となり $0.25 \sim 8$ m/sの流速に対し $-705 \sim -580$ mVであった。
- (2) 腐食速度（非電気防食）は，流速が大きいほど大きな値となり $0.25 \sim 8$ m/sの流速に対し $0.2 \sim 0.89$ mm/yrであった。
- (3) 防食電位は，流速が大きいほど貴な電位となり 1 および 4 m/sの流速に対しそれぞれ -720 および -670 mVであった。
- (4) 防食率は，防食電位より卑な電位では，流速に関係なく 98% 以上の高い値を示した。
- (5) 設計電流密度（初期値）は，流速が大きいほど大きな値となり， $0.5 \sim 8$ m/sの流速に対し， $300 \sim 1000$ mA/m²になる。
- (6) 所要電流密度（定常値）は，設定電位および流速の影響を受け，電位が卑なほどそして流速が大きいほど大きく $0.5 \sim 8$ m/sの流速に対し -800 mVで $110 \sim 290$ mA/m²， -900 mVで $250 \sim 520$ mA/m²であった。
- (7) 塗装鋼材（スクラッチ有）の自然電位に対する流速の影響は小さく $0.25 \sim 2$ m/sの流速で約 -620 mVであった。
- (8) 塗膜劣化に対する流速の影響は小さく， -900 mVの電気防食条件下では劣化は抑制された。

- (9) 塗膜により防食電流の低減には有効であるが、塗膜損傷の部分が大きい場合には、この部分を裸鋼材と同様に見なさなければならない。

5.3 塗装鋼材の電気防食特性試験

- (1) 健全な塗膜を有する塗装鋼材の電流密度は、 $0.5\text{mA}/\text{m}^2$ 以下であり、無塗装鋼材の $1/100$ ないし $1/1000$ しか必要としなかった。
- (2) 設定電位 -900mV においては、スクラッチの有無にかかわらず、防食下地のある膜厚 $200\mu\text{m}$ 以上の塗装系は耐久性が良好である。
- (3) 設定電位 -1500mV においては、スクラッチのない場合、防食下地のある膜厚 $200\mu\text{m}$ 以上の塗装系は、耐久性が良好であるが、スクラッチがある場合は、どのような塗装系でも耐久性は不良である。
- (4) 電流密度と交流抵抗との間には、 μm 比較的良好な相関性が認められた。
また、相関性は設定電位が -900mV より -1500mV の方が高かった。
- (5) 塗膜外観と電流密度および交流抵抗の間にも相関性が認められたが、塗膜外観は、交流抵抗より電流密度の方が僅かに相関性が高い。
- (6) 電気防食条件下におけるタールエポキシ塗料中のエポキシ樹脂含有量による耐久性の差異は認められないが、この実験の範囲内では、硬化剤としてアミンダクトがポリアミドより良好であることが認められた。

5.4 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(28%)は、高PVCエポキシ(47%)より良好な耐久性を示した。
- (2) ガラスフレーク入りポリエステル(GFP)の耐過防食性は他の塗料種に比して良好であるが、防食下地のある場合は耐過防食性が著しく低下する。
また、防食下地のない場合、スクラッチがあっても膜厚 $600\mu\text{m}$ 以上では耐久性は良好である。
- (3) ジンクリッチペイント塗膜の耐久性のある限界電位は約 -1000mV であり、 -1200mV より卑な電位になるに従い耐久性が著しく低下する。
- (4) 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の進行は小さく、この防食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。
- 塗料種としては、エポキシ(超厚膜型)、ガラスフレーク入りポリエステル(GFP)とタールエポキシ(JIS-3種、ポリアミド)の3種類が比較的良好な耐久性を示した。

- (5) 海水浸漬試験において、錆やふくれの発生は、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）の膜厚100 μ mの塗装試験片に見られた。

しかし、これらの塗料種でも膜厚200 μ m，400 μ mには、錆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料種は、エポキシⅢ（高PVC型），エポキシⅡ（超厚膜型），タールウレタン，塩化ゴムの4種類であった。

- (6) 耐衝撃性試験では、荷重1kg，高さ50cmの衝撃によっても、どの塗装系においても著しい損傷は認められなかった。
- (7) 付着強度試験においては、測定時にジンクリッチ塗膜層の凝集破壊が起りジンクリッチを防食下地とする試料の付着強度は測定できなかった。防食下地のない試料の付着強度は比較的高い測定値が得られた。

5.5 電気防食条件下での塗装系の選定

塗装鋼材の試験結果から、電気防食条件下での長期耐久性のある塗装系および電気防食条件をまとめると次のとおりである。

塗装鋼材の防食電位は-1100mVより貴とする。塗装系は表5-1に示す。

表5-1 電気防食条件下での長期耐久性のある塗装系

防 食 下 地	塗 料 種
厚膜型有機ジンクリッチ 又は厚膜型無機ジンクリ ッチ（膜厚75 μ m）	タールエポキシJIS-1種，2種，3種，エポキシ，タールウレタン（膜厚200 μ m）
	ガラスフレーク入りポリエステル（膜厚600 μ m）
な し	タールエポキシJIS-1種，2種，3種，エポキシ，タールウレタン（膜厚400 μ m）
	ガラスフレーク入りポリエステル（膜厚600 μ m）

あ と が き

「電気防食の設計に関する研究」の成果にもとずき、海域に建設される土木鋼構造物の電気防食に関する基本的な設計が行えるよう電気防食上、特に必要な事項をとりまとめて「電気防食設計指針（案）同解説」を作成している。防食設計に携さわれている方々には是非参照していただくことをお願いする次第である。

なお、これまでに印刷した資料は以下の通りである。

- | | | |
|---|------------------|---|
| 1 | 土木研究資料 1 6 8 9 号 | 電気防食の設計法に関する研究
— 海域鋼構造物への電気防食の適用の現状と課題 — |
| 2 | 土木研究資料 1 7 8 3 号 | 電気防食の設計法に関する研究 |
| 3 | 土木研究資料 1 9 8 6 号 | 電気防食設計指針（案）同解説 |

電気防食の設計法に関する研究
(最終報告書)

ISSN 0386-5878
土木研究所資料 第2121号
マイクロフィルム 第 号
昭和59年 3 月 (1984)

キーワード; 橋脚, 下部工, 海域構造物, 片 勝 清 士
腐食防食設計, 電気防食

要 旨 土木構造物を対象として電気防食設計指針を作成
するに必要な技術資料を得るために, 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きた。本資
料は, 昭和54年から57年度までの研究成果を最終的に
とりまとめたものである。

郵便はがき

305-□□

40円切手
をはって
下さい。

茨城県筑波郡豊里町大字旭一番地
建設省土木研究所
地質化学部
化学研究室 御中

No. _____

No. _____

配布先氏名

配布先住所



土木研究所資料第2121号 部

上記のとおり受領しました。

所 属 (住所)

氏 名

