

日本船舶振興会昭和51年度補助事業
“船舶の防食防汚方法の開発に関する研究”

研究資料 No. 260

第140研究部会

バラストタンクの腐食原因および 防食方法に関する研究

報告書

昭和52年3月

社団法人

日本造船研究協会

本研究は、5ヶ年計画の最終年度として、電気防食による防食方法の研究、スクラバー排水を利用した新しい防食方法の実船シミュレート試験、無機ジンクプライマー塗装と電気防食の併用による防食法、エレクトロコーティングの防食効果、軟鋼の低速度・低応力腐食防止に関する研究、実船バラストタンク内の塗装試験結果の調査を行った。

はしがき

本報告書は、日本船舶振興会の昭和51年度補助事業「船舶の防食防腐方法の開発に関する研究」の一部として日本造船研究協会第140研究部会においてとりまとめたものである。

第140研究部会委員名簿（敬称略、順不同）

部会長	秋田好雄（日本海事協会）	植田昭二（三菱重工業）
幹事	石井信夫（日本郵船） 植田健二（三菱重工業） 翁長一彦（船舶技術研究所） 瀬尾正雄 南義夫（横浜国立大学） 湯本秀（三井造船） 渡辺精三（日立造船）	太田元久（日本防蝕工業） 重野隼太（中川防蝕工業） 寺田泰治（日本海事協会） 三好貢 早稻田瑞秋（中国塗料）
委員	荒井要（神戸製鋼所） 石川浩（カナエ塗料） 伊藤剛平（日本造船工業会） 岩上彰夫（中央工産） 植田靖夫（船舶技術研究所） 小川信行（日本ペイント） 門智（新日本製鉄） 北田稔（尾道造船） 日下幹生（大阪造船所） 篠路真三（日本海事協会） 実藤公一（三井金鷲鉱業） 鈴木茂（関西ペイント） 染矢博文（三保造船） 谷川典人（新和海運） 永野侃（昭和海運） 播谷圭亮（石川島播磨重工業） 平山昭邦（神東塗料） 松島巖（日本鋼管） 宮本芳文（鬼田化学） 森宏（日立造船） 森山俊（三光汽船）	池田稔（川崎製鉄） 石田富之輔（日本ペイント） 伊東達夫（川崎汽船） 上田研一（海上保安庁） 岡嶽（佐野安船渠） 奥山孝志（日本中型造船工業会） 神谷敏夫（名村造船所） 木津圭二（大阪造船三井船舶） 河野忠雄（山下新日本汽船） 佐武二郎（住友金属工業） 坂本昭弘（佐世保重工業） 鈴木省輔（函館ドック） 高畑敏男（川崎重工業） 長門広司（笠戸船渠） 西川翠寛（東亜ペイント） 服部堅一（住友重機械工業） 藤井勝三（日立鉄工所） 宮本新平（三菱重工業） 村上正三（日本油脂） 村多明（ニッコー防食） 湯川光春（ジャパンライン）
討議參加者	岩武民哉（昭和海運） 内堀利也（日本防蝕工業） 大黒貴（三菱重工業） 片瀬和夫（ニッコー防食）	岩半滋（海上保安庁） 海野武人（中川防蝕工業） 大仲隆郎（鬼田化学工業） 加藤寛（船舶技術研究所）

沖 例 昭 一(住友重機械工業)	木 村 朝 夫(中川防蝕工業)
近 藤 慶 示(日立造船)	佐々木 義 昭(日本鋼管)
鷗 谷 四 郎(三井造船)	鈴 木 昌 也(日本防蝕工業)
田 所 新 一(ジャパンライン)	玉 田 明 宏(日本鋼管)
土 井 浩(日本油脂)	内 藤 正 一(船舶技術研究所)
永 江 康 雄(三菱重工業)	永 田 三 郎(住友金属工業)
布 村 信 昭(昭和海運)	前 田 信 広(日立造船)
山 本 郁 雄(中川防蝕工業)	山 本 昇 三(日立造船)
山 本 崇 也(三菱重工業)	

目 次

1. 研究の概要	1
2. 電気防食による防食方法の研究	3
2. 1 電気防食による割れ発生条件の研討	3
2. 2 流電陽極による防食効果の確認	20
2. 3 ブースタアノード併用による防食効果の確認	29
3. スクラバー排水を利用した新しい防食方法の実船シミュレート試験による効果の確認	37
4. 無機ジンクプライマー塗装と電気防食の併用による防食法	44
5. エレクトロコーティングの防食効果	61
6. 軟鋼の低速度低応力腐食の防止に関する研究	73
7. 実船バラストタンク内の塗装試験結果	91
8. バラストタンクの電気防食について	97

付録

電気防食とショッブプライマーを併用した実船例

1. 研究の概要

船舶のバラストタンクの腐食は損傷の原因となる場合が多く、効果的且つ経済的な防食対策を施すことは船舶の安全上極めて重要である。バラストタンクはその大きさや環境条件が多種多様であり、腐食の原因も極めて複雑である。したがって防食法もそれらの原因に応じた防食法を適用しなければ効果的といい難い。このため昭和47年4月より5ヶ年計画で腐食の原因および防食方法に関する研究が実施された。本年度はその最終年度である。

5ヶ年間の研究を大別すると、腐食の原因に関する研究、防食方法に関する研究および実船試験に分けられる。研究内容の詳細は各年度の報告書に述べられているが、これらを一覧表にまとめると別表のとおりであり、腐食原因に関する研究では各種の要因について研究されている。また防食方法としては従来の塗装法、電気防食について各種の条件下での効果が調査されたほか、新しい防食法としてイナートガスによる方法、エレクトロコーティングによる方法、スクラバー海水による方法、ショッププライマー塗装と電気防食の併用による方法等が研究され成果をあげた。実船試験ではバラストタンク内の実態を調査するため、長期間にわたってタンク内温度の計測、電位の計測、腐食速度の調査や各種防食法の効果について調査された。

以上の研究のうち本年度の研究の概要は次のとおりである。

- (1) 電気防食における割れ発生の条件を検討するため、バラスト条件、重量、繰返し速度、防食電流密度等を変えた各種の条件下で試験を行なった。
 - (2) 前年度までの試験は定電位または定電流試験であり、一方実船の場合は流電陽極であるので、この両者の相関関係が調査され、更に流電陽極とイナートガスを併用した場合の効果について調査され良好な効果のあることが確認された。
 - (3) 初期の防食効果を高めるための一方法として、ブスター・アノードとしてMg陽極を併用した場合の防食効果について試験を行ない、イナートガス・スクラバー海水の雰囲気中では良好な結果が得られた。
 - (4) 前年度開発したスクラバー海水を利用した新しい防食方法に対し、今年度は実船シミュレート試験による効果の確認試験を行ない、本方式の有用性を確認した。
 - (5) 無機ジンクプライマー塗装と電気防食の併用はすぐれた防食効果を発揮することが前年度の研究で明らかにされたが、今年度はその塗膜の劣化と電気防食の効果について長期的防食性能の検討を行ない、またこの方法は張排水の繰返される腐食環境下における疲労強度低下の防止にも有効であることが確かめられた。
 - (6) エレクトロコーティングの付着による防食効果について、流電陽極を用いて試験を行ない、前年度の定電位、定電流試験との関係を調査した。
 - (7) 前年度の研究でバラストタンク内における低速度低応力下では応力集中部に局部腐食の促進が認められたので、本年度は更に引続き海水温度、張排水繰返し等の影響について調査し、防食条件を検討した。
 - (8) バラストタンク内的一部に試験塗装を施して塗膜の経年変化を調査している実船試験は、試験塗装以来3年以上経過したが、3年目の調査結果ではいづれも塗膜の状況は良好であった。この試験は今後も自動的に引続いて行なわれる。
- 以上は5ヶ年の研究および本年度の研究の概要であるが、腐食、防食の試験は長年月を要するものであり、短期間の実験室試験より適確な結論を導くことは困難である。一応この研究は本年度をもって終了するが、引き続き各方面において研究されることを切に望むものである。

別 表

	研 究 項 目	年 度				
		1	2	3	4	5
腐食原因に関する研究	応力(歪)変化が腐食に及ぼす影響	↔				→
	温度変化が腐食に及ぼす影響	↔				
	材料の表面状況が腐食に及ぼす影響	↔				
	バラスト張水率が腐食に及ぼす影響	↔				
	水質が腐食に及ぼす影響	↔	→			
防食方法に関する研究	防食電流密度に及ぼす応力(歪)の影響	↔	→			
	材料の表面状況が電気防食に及ぼす影響	↔				
	塗装法による防食効果	↔	→			
	バラスト張水率の電気防食に及ぼす影響		↔	→		
	イナートガスによる防食効果		↔	→		↔
	タンク体積と表面積比の腐食および防食電流密度に及ぼす影響		↔	→		
	エレクトロコーティングの防食性			↔	→	
	スクラバー海水による新しい防食法				↔	→
	ショッッププライマー塗装と電気防食の併用による防食法				↔	→
	電気防食による割れ発生の条件の検討					↔
実船試験	流電陽極による防食効果の確認					↔
	ブスター・アノードによる防食効果の確認					↔
	タンク内鋼材の腐食速度の調査	↔	→			
	電気防食の効果の調査	↔				
	浮遊性防汚剤の効果の調査	↔				

2. 電気防食による防食方法の研究

2.1 電気防食における割れ発生条件の検討

これまでの研究から鋼材に繰り返し応力の付加された場合と繰り返し応力の付加されない場合では電気防食効果に著しい相違があることが明らかにされた。即ち図2.1.1に見られるように繰り返し応力の付加されない場合は防食電流密度 $100\text{ mA}/\text{m}^2$ で略完全な防食効果の得られるのに対して応力の付加されたときは $200\text{ mA}/\text{m}^2$ 程度の防食電流密度の増加を必要とする。一方(1)ひずみが1.4%をこえる高応力が繰り返し付加される。(2)海水の張排水が繰り返される。(3)高電流密度($200\text{ mA}/\text{m}^2$)が付加される等の条件が満たされるとある期間の後に腐食は少ないと、クラックの発生する結果を得た。

図2.1.1の結果から腐食量のみに注目すればバラストタンクの防食には電流密度増加案が考えられるし、特に高応力の集中する部分に防食亜鉛を集中的に取付ける案が考えられるが、上記のようなこともあるので以下の実験を行なった。

2.1.1 試験条件

試験条件は表2.1.1に見られるように応力付加条件を0.7%, 1.4%, 1.9%の定歪とし、応力くり返し回数を1日に2回、5回、10回、海水の張水を10日間排水を10日間の繰返しを4サイクル、8サイクルとし、雰囲気温度を40°Cとした。張水期間中の防食電流密度は亜鉛を陽極に0, 100, 150, 200mA/m²の定電流および亜鉛による流電陽極(亜鉛の電極電位に試験片電位を一致させるよう充分に亜鉛を取付ける。)とした。図2.1.5に亜鉛の取付要領を示した。試験装置は第1年度から使用した専用の応力付加試験装置¹⁾を使用した。

2.1.2 試験片

供試材はA級鋼板(KAS-板厚22mm)で形状を図2.1.2、stress-strain曲線、試験片のたわみδとひずみ率(%)、試験片上のたわみ(δ)とひずみの分布を図2.1.3、図2.1.4に示す。試験片の表面は機械仕上後(VVV)、トリクロレンで脱脂洗浄した後供試した。

2.1.3 試験片の後処置ならびに試験結果の表示

試験終了後、5%HCl+0.5%イビット(*1-1)約20°Cの溶液に2日浸漬後水洗、ブリッシングを行ない、飽和重曹水に浸漬、水洗、さらに中和防錆処理した。表面観察によって、破断したもの、目視によって明瞭にクラックの認められるもの以外は断面を顕微鏡で観察して、クラックの発生の有無を調べた。尚腐食速度を求めるために破断した試験片の外はポイントマイクロメータ(針先径0.3mm、感度5/1000mm)で板厚を計測した。

2.1.4 試験結果

2回/dayのくり返し応力を与えたときの試験片の電位変化を図2.1.5～図2.1.7に示し、5回/day、10回/dayのくり返し応力を与えたときの電位電化をそれぞれ図2.1.8～図2.1.13に示す。各種条件による侵食量の変化を図2.1.14に示す。図から電流密度の増加が腐食を抑制することは明らかである。表2.1.2に各種条件下での割れ発生の有無を示した。表中の升目の中に△○が同居しているのは、このような場合もあったと言う試験結果のバラツキを意味している。写真1は $200\text{ mA}/\text{m}^2$ の電流密度で2.0%歪2回/dayのくり返し歪みを与えたときのクラックの発生状況を示したもので、応力の平行部より離れたB部では腐食も僅かでクラック発生もないことがわかる。

写真2は図2.1.4で示した試験片上の歪分布と割れ発生領域を対応させたもので1.4%～1.5%歪より大きい領域でクラックの発生を示唆している。但し歪分布は試験前のものであり、試験中もこのようであるとは限らない点は注意を要する。写真2の結果から歪1.4%付近に注目して表2.1.2の割れ発生状況を見ると2回/dayのくり返し歪の場合、

1) 社团法人日本造船研究協会第140研究部会「バラストタンクの腐食原因および防食方法に関する研究」報告書

1.4%又、 $200 \text{ mA}/\text{m}^2$ 6ヶ月後の条件で割れの発生する場合のあることがわかるが、それより電流密度の高い流電陽極(Znアノード)の場合割れが発見されず、一方1.9%歪では $200 \text{ mA}/\text{m}^2$, Znアノードと発生しており、歪1.4%の付近は割れの発生に微妙な影響を与える値であることが推定される。5回/day, 10回/day のようにくり返し歪が多くなると電気防食による影響は殆どみられず、疲労による割れが優先するようと思われる。このように考えると極めて長周期の高応力のくり返しと、高電流密度の防食の条件下では割れの発生を誘起するようと思われる所以この点の追求の研究が今後実施されるべきではないかと考える。一方1.9%のくり返し歪、2回/dayの条件で電気防食条件 $100 \text{ mA}/\text{m}^2$ では6ヶ月後も割れの発生がなく電気防食効果の認められる場合もある。但しこの場合侵食量は図2.1.4にみられるように 0.24 mm で防食率約60%で、平均の腐食はかなり進行していることに注意を要する。このようにくり返し歪と電気防食条件は鋼材の腐食の進行と割れ発生に微妙に影響することがわかる。なお流電陽極による防食では応力集中部に電流の集中することが明らかになり実船での取付けには応力分布との相互関係に充分注意をする必要があろう。

以上の結果を要約すると次のようになる。

1. クリ返し歪数から5回/day以上になると歪1.4%以上では疲労による破断が優先し、電気防食の影響を認めない。
2. クリ返し歪数2回/dayでは歪値1.4%近くに高電流密度($200 \text{ mA}/\text{m}^2$)の電気防食条件で割れ発生の限界点のあることが示唆されたが引続き検討を要する。
3. クリ返しひずみを加えると応力集中点に大きな電流が集中する。

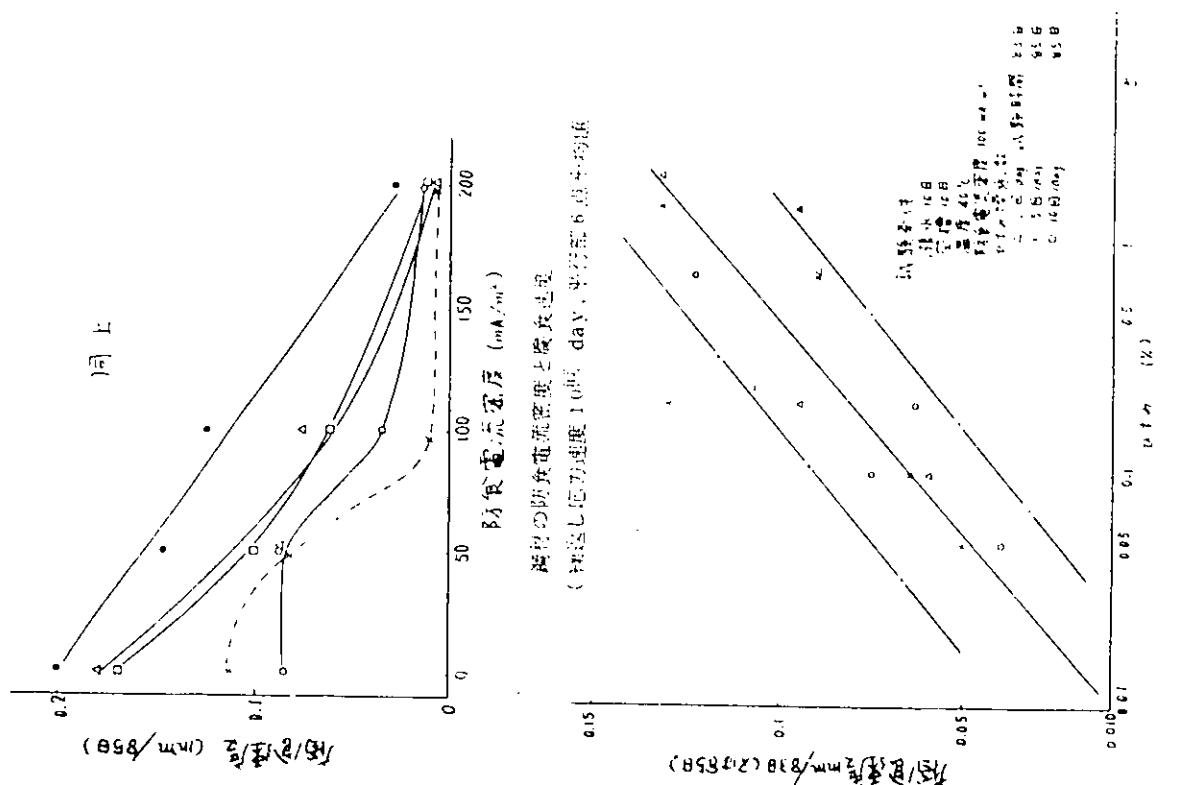
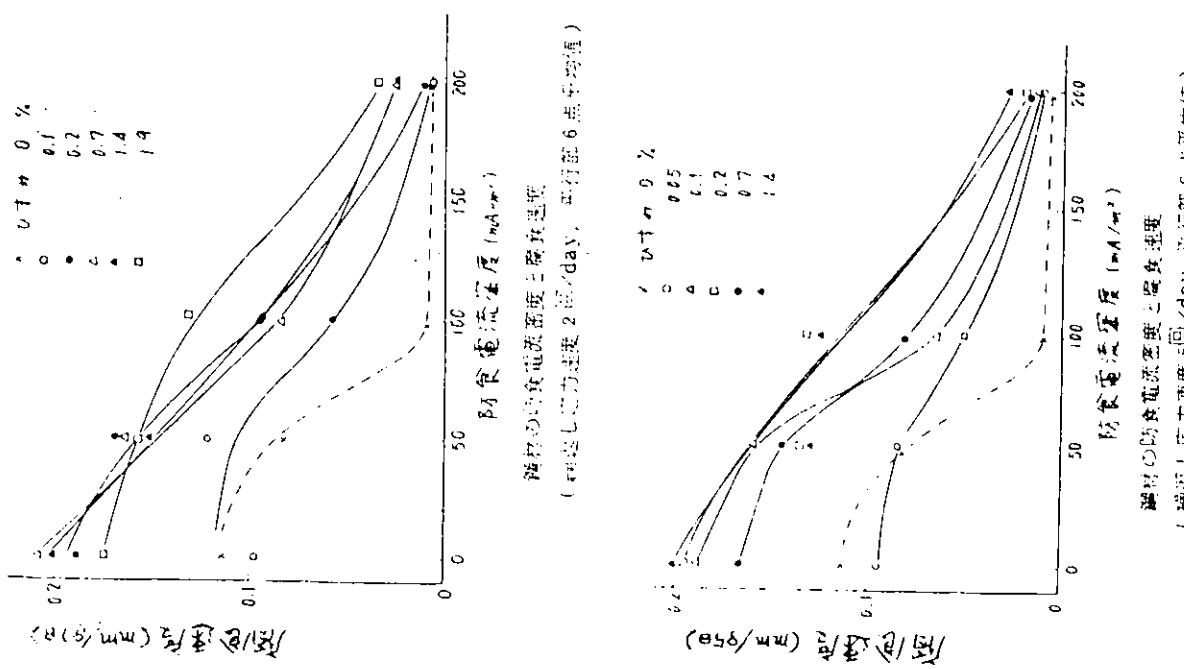


図 2.1.1 電気防食に及ぼす繰返し応力の影響
(第 3 年度報告書参照 (S 50 年 3 月))

表 2.1.1 電気防食における割れ発生条件の試験条件

パラメト条件	試験期間	繰り返し応力(ひずみ%)	繰り返し回数(回/day)	防食電流密度(mA/m ²)
海水浸漬 10日 湿り空気 10日 の繰返し	80日 160日	0.7 1.4 1.9	2	0, 100, 150, 200, 亜鉛陽極
			5	0, 100, 150, 200
			10	0, 100, 150, 200, 亜鉛陽極

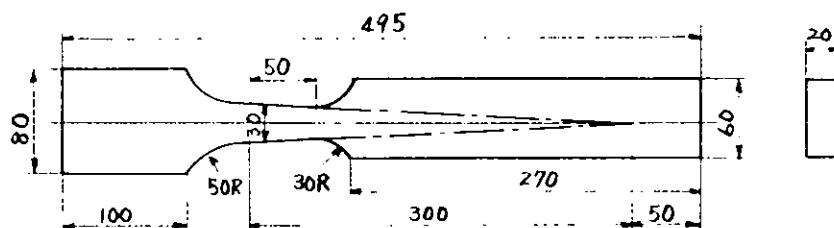


図 2.1.2 試験片の形状および寸法(mm)
(露出表面積 5.65 cm²)

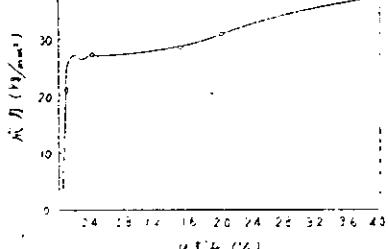


図 2.1.3 供試材(KA鋼)の
Stress-Stress曲線

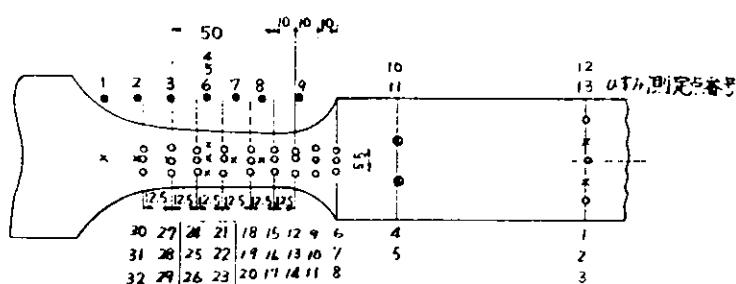
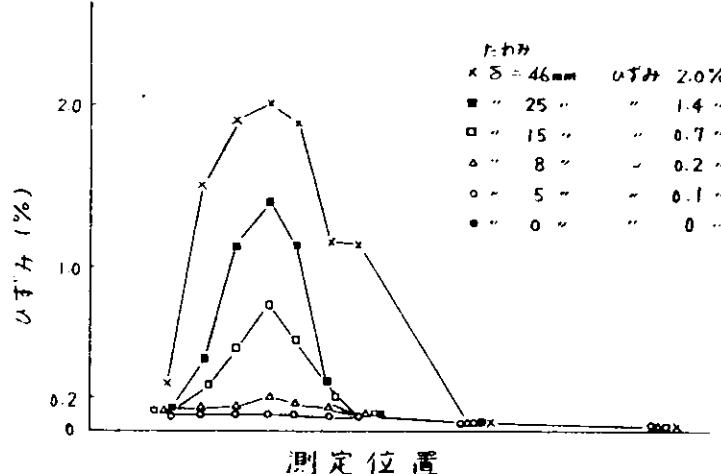


図 2.1.4 たわみ(δ)とひずみ(%)の関係

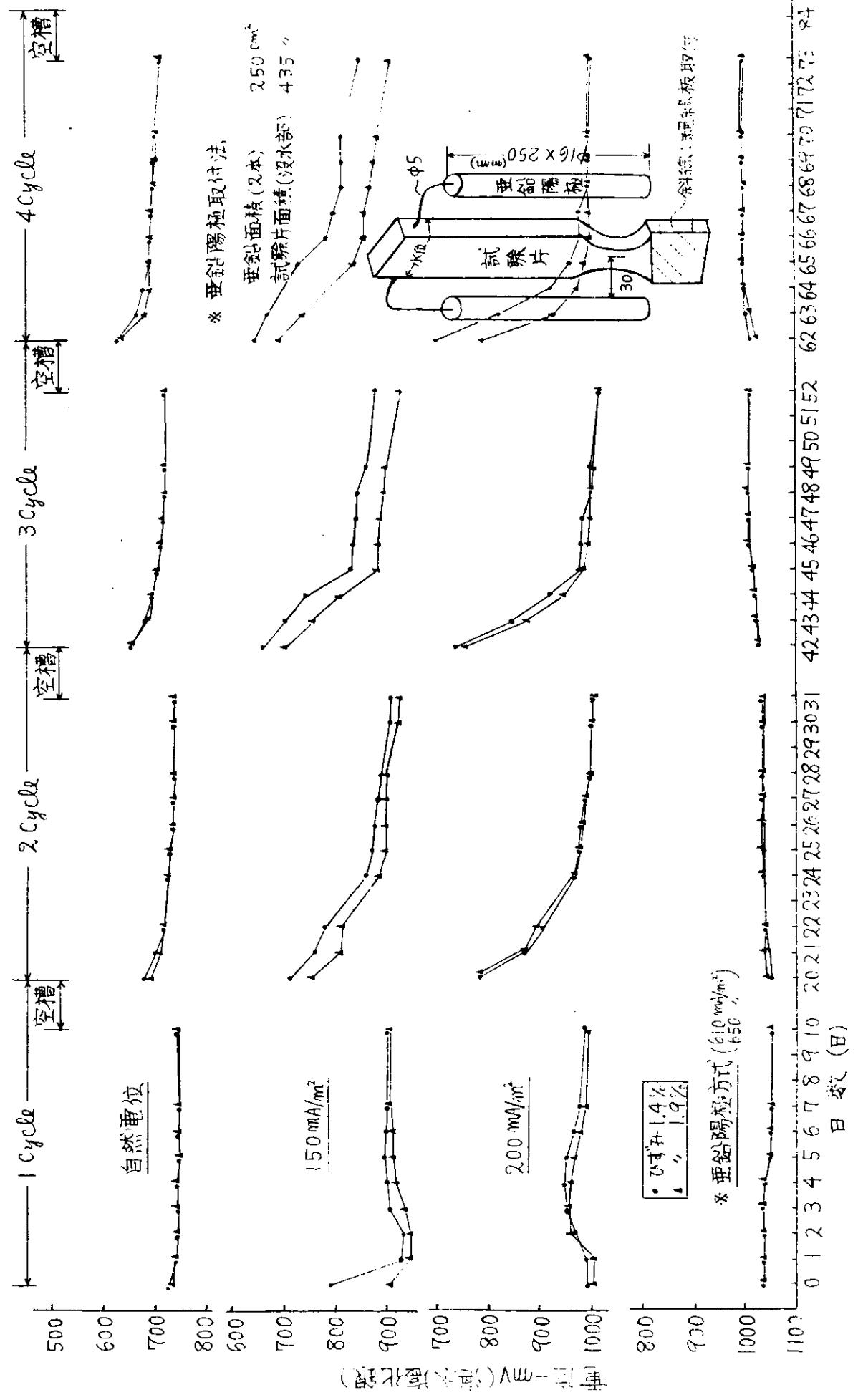


図2.1.5 海水中における電位経時変化(海水と満り空気 くり返し応力 2回/day)

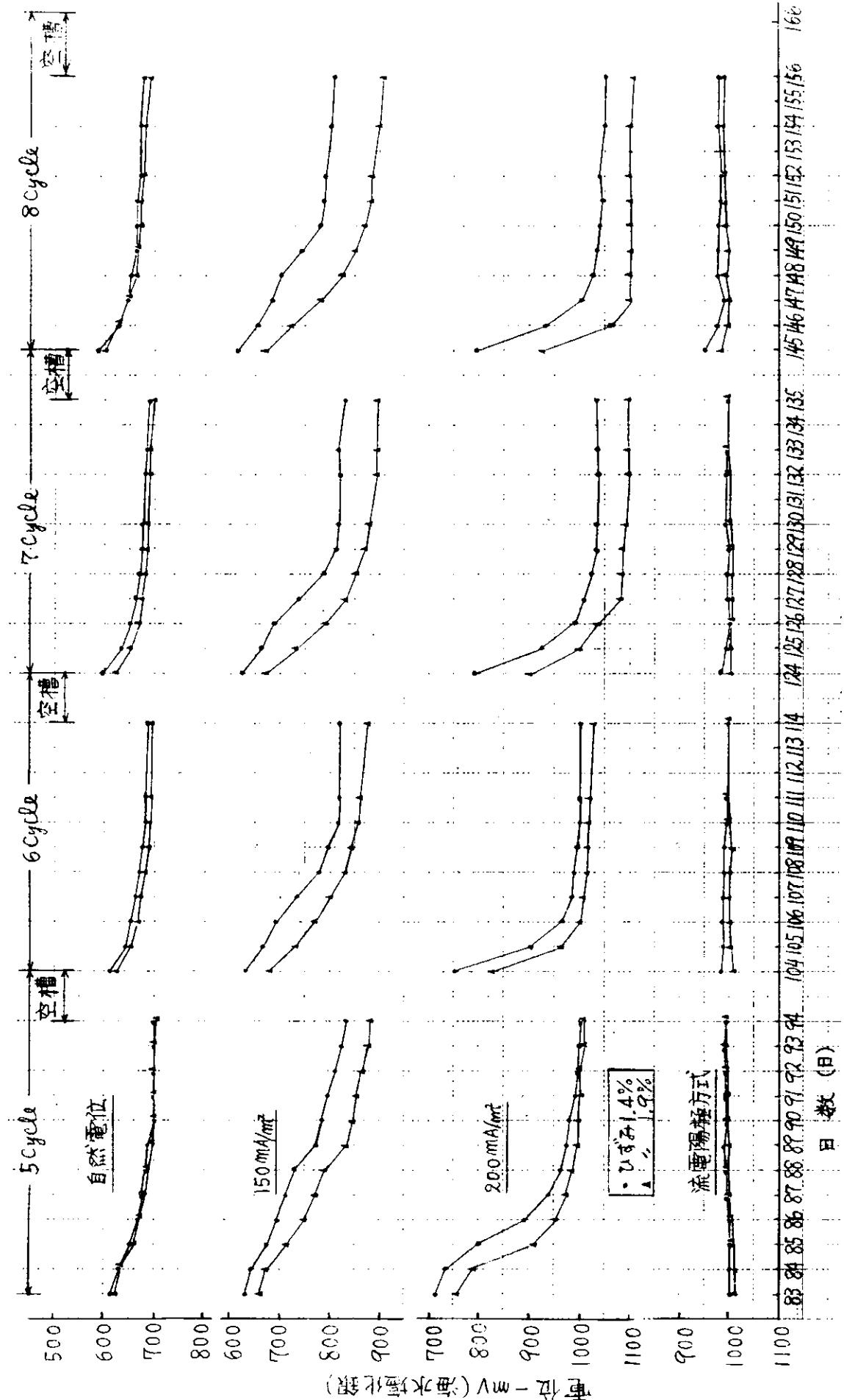


図 2.1.6 海水中における電位経時変化(海水と湿り空気の環境 くり返し応力 2回／day)

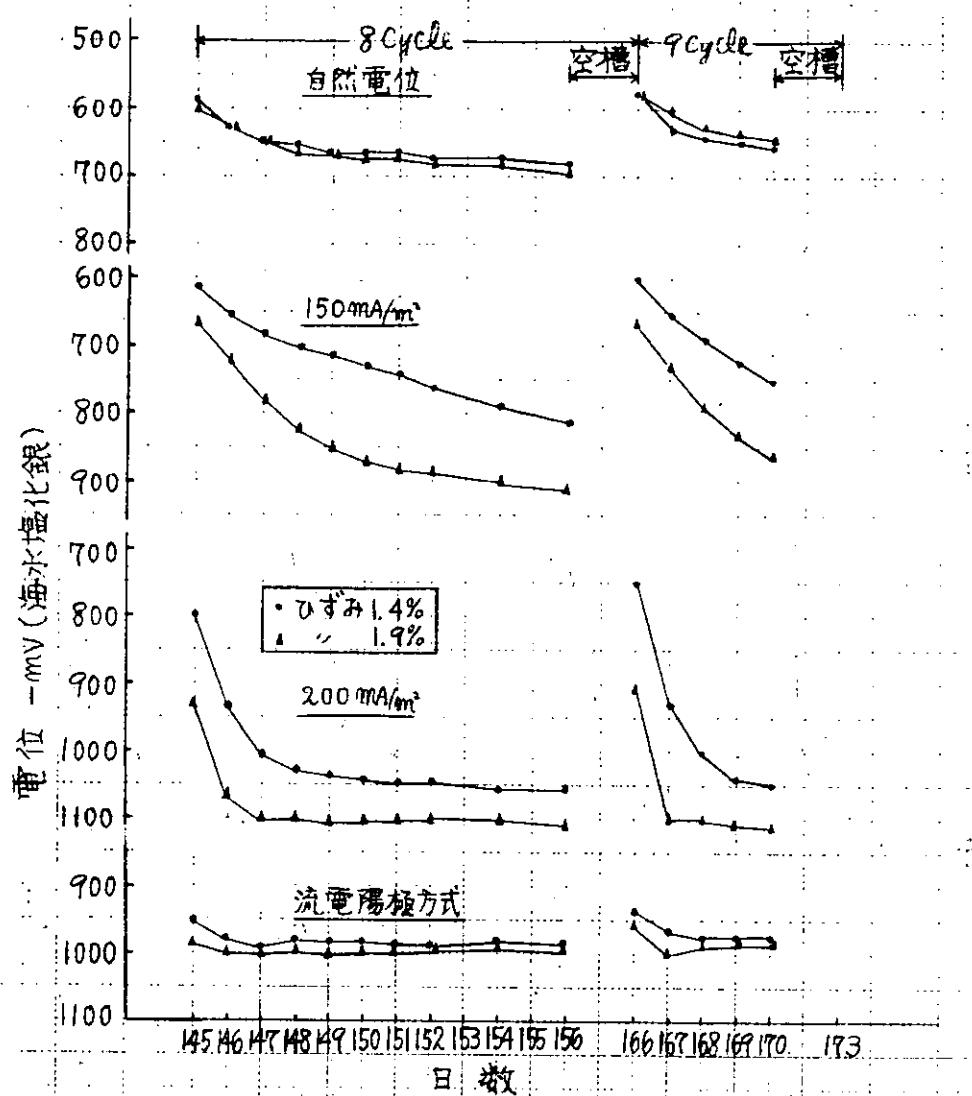


図 2.1.7 海水中における電位経時変化(海水と湿り空気の環境 くり返し応力
2回/day)

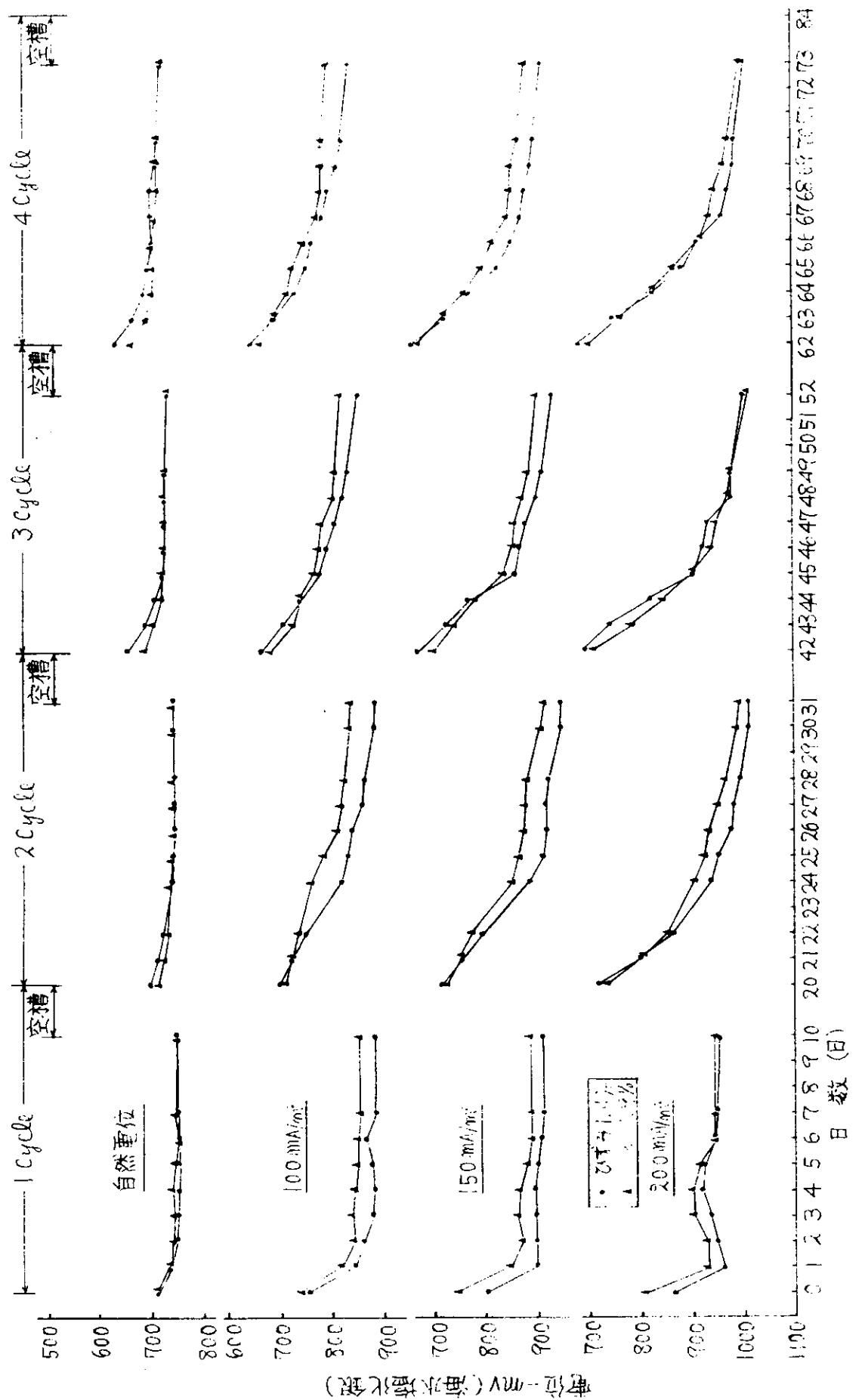


図 2.1.8 海水中における電位経時変化(海水と溼り空気 くり返し応力 5回./day)

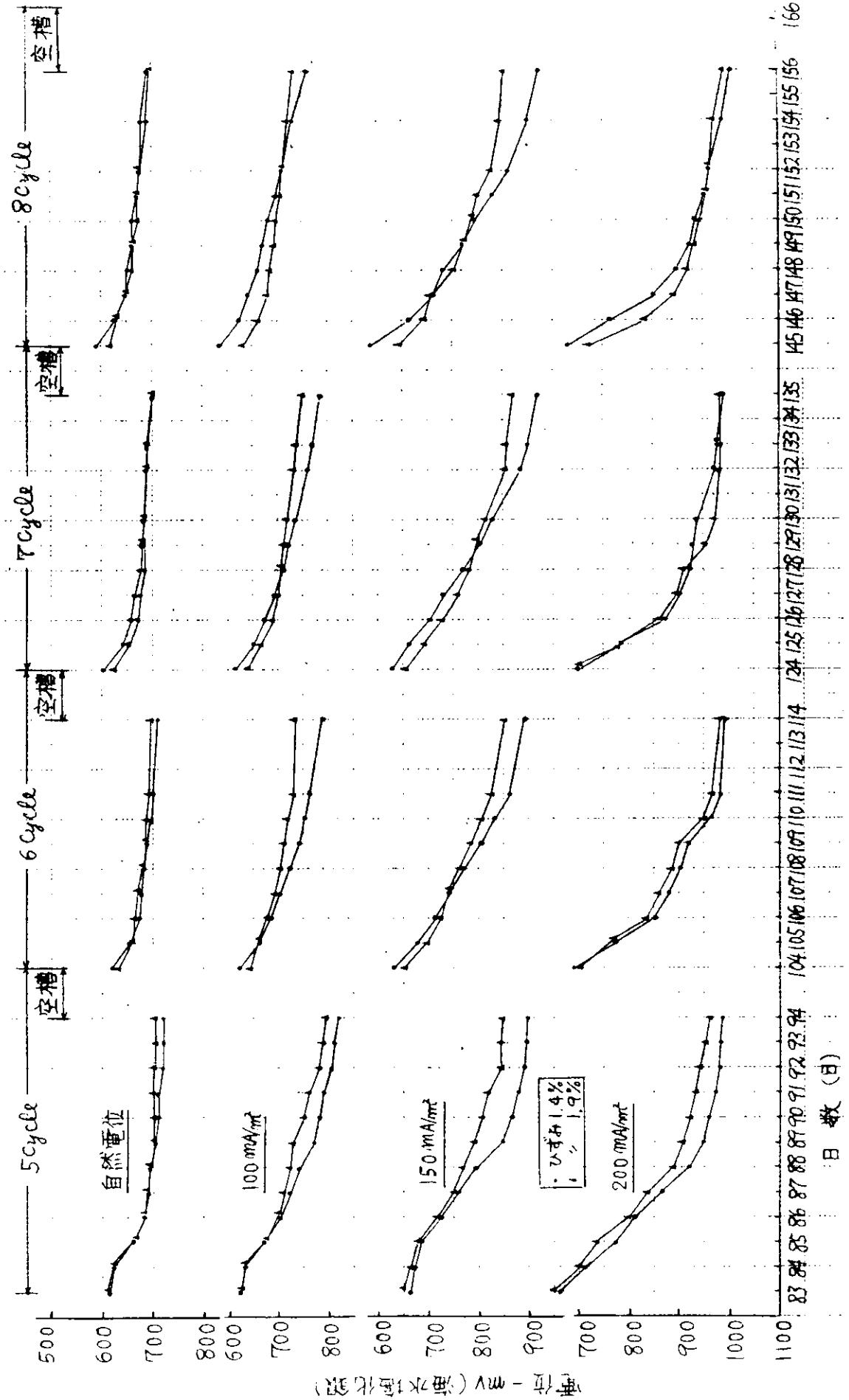


図2.1.9 海水中における電位経時変化(海水と湿り空気の環境 くり返し応力 5回/ day)

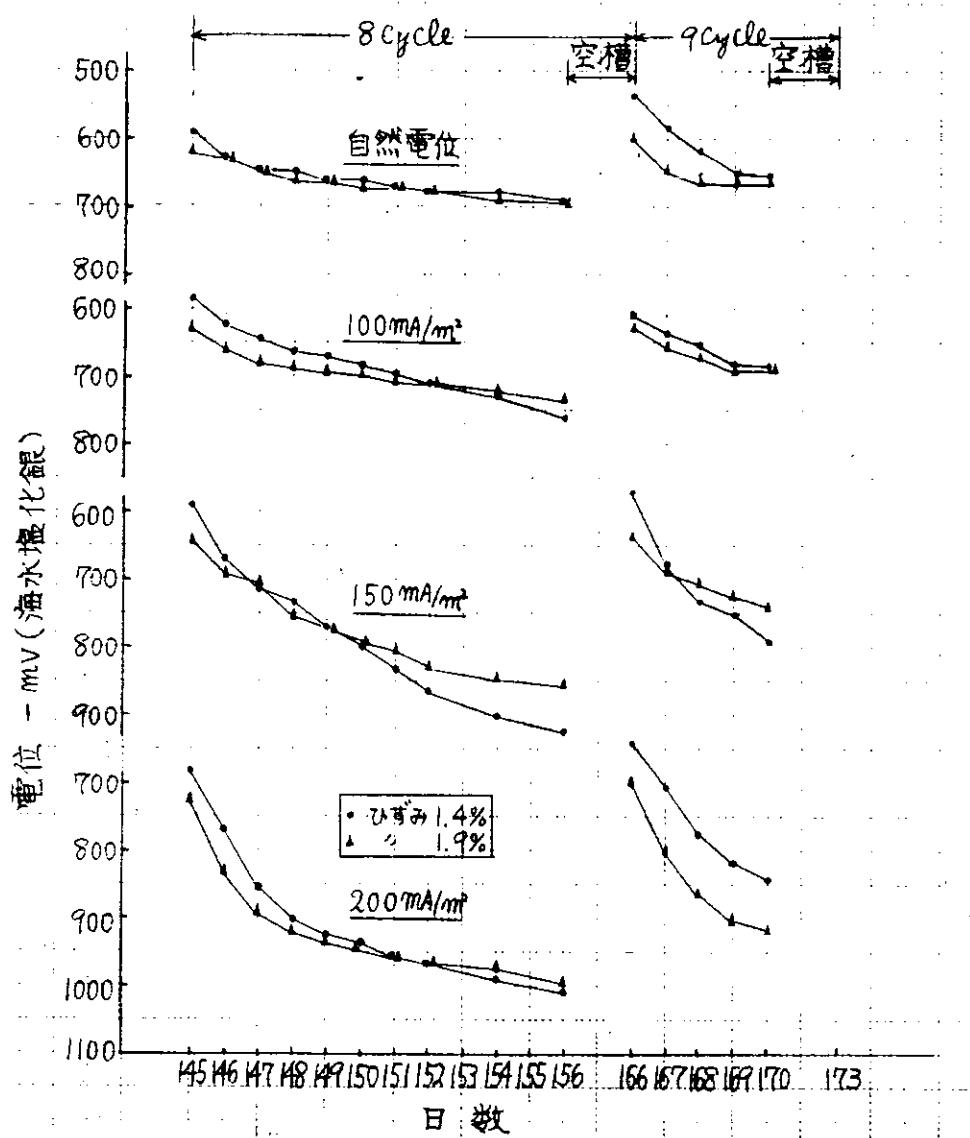


図 2.1.1.0 海水中における電位経時変化(海水と湿り空気の環境 くり返し応力 5回/day)

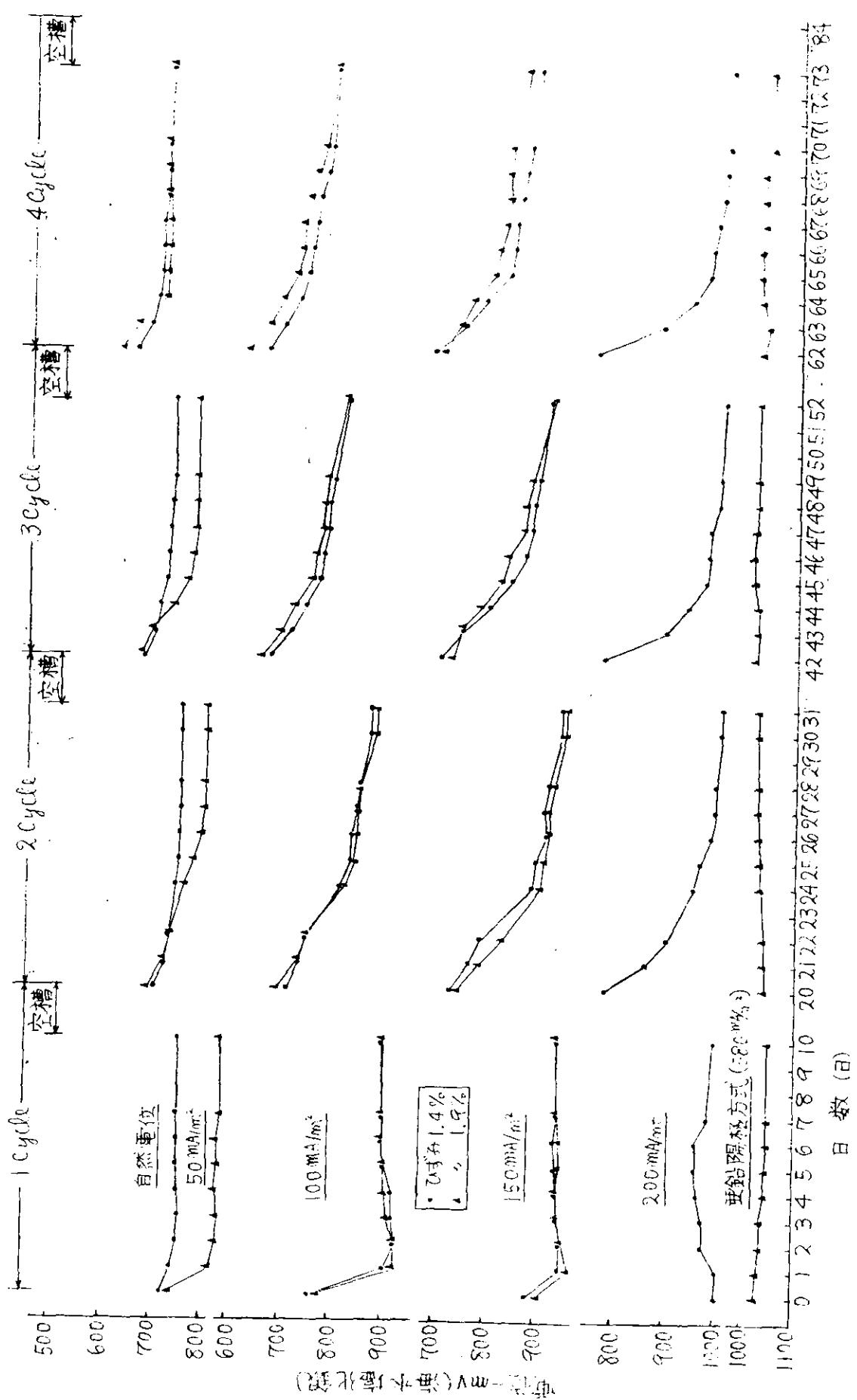


図 2.1.1 海水中における電位経時変化(海水と湿り空気 くり返し応力 1.0回/day)

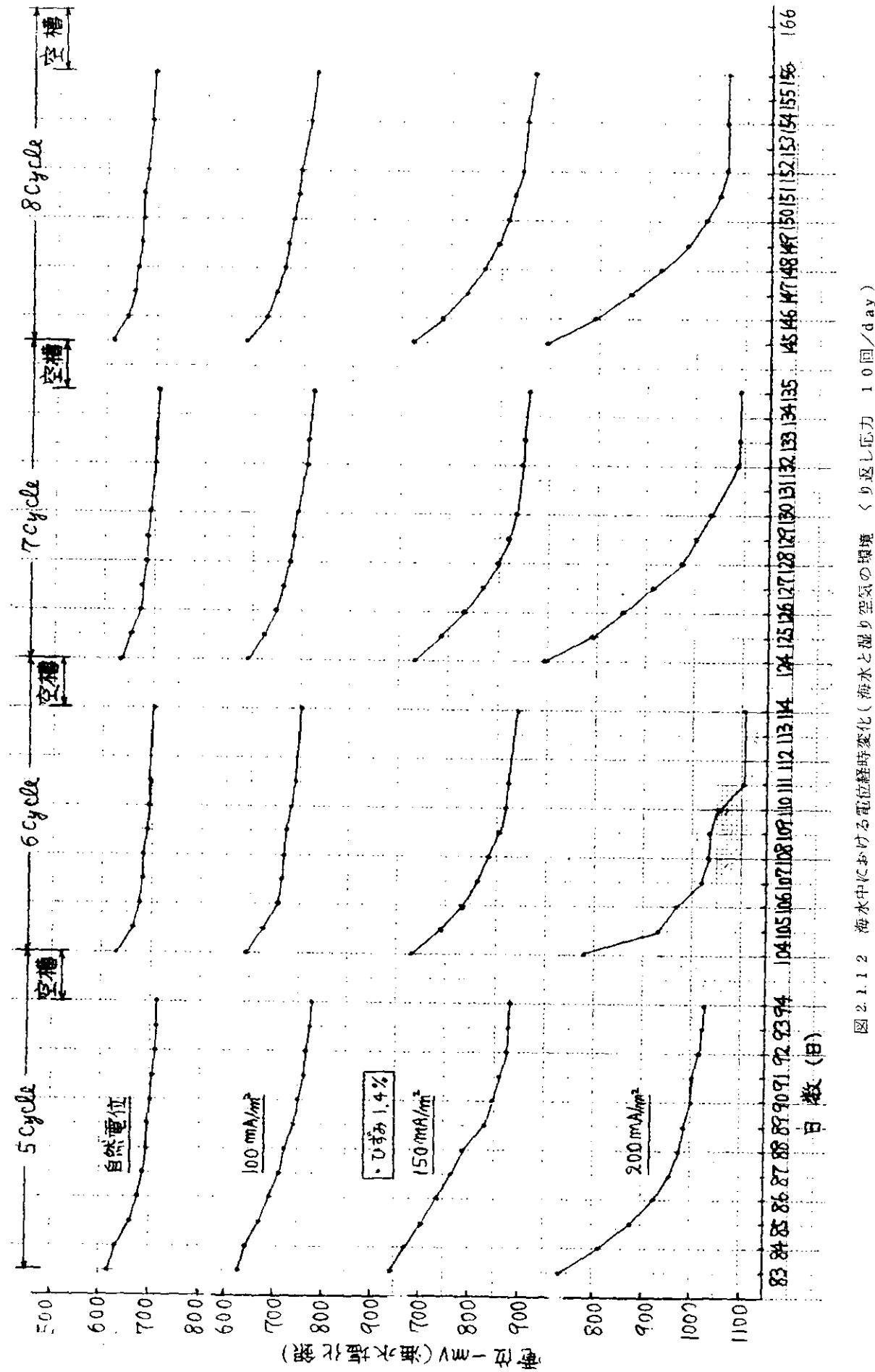


図 2.1.1.2 海水中における電位経時変化(海水と湿り空気の環境 くり返し応力 10回/day)

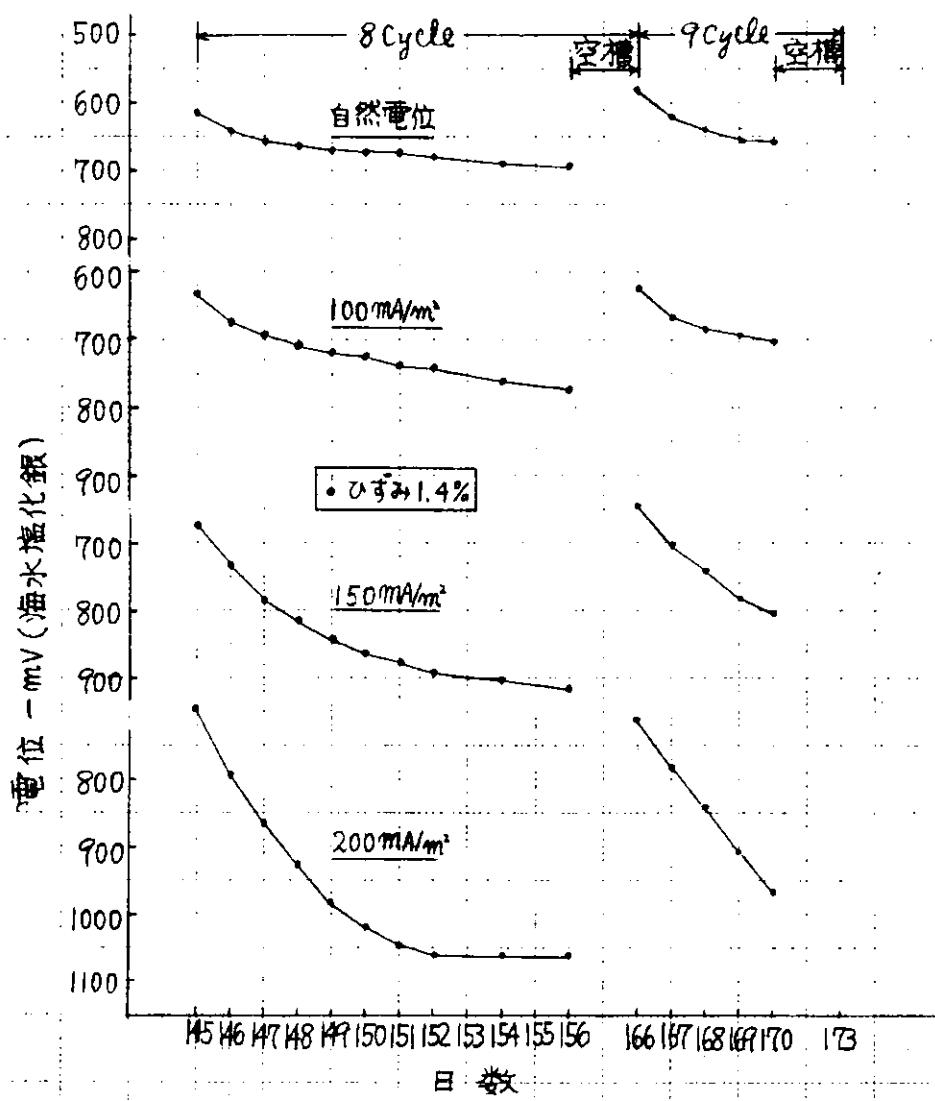


図 2.1.1.3 海水中における電位経時変化（海水と湿り空気の環境 くり返し応力 10回/day）

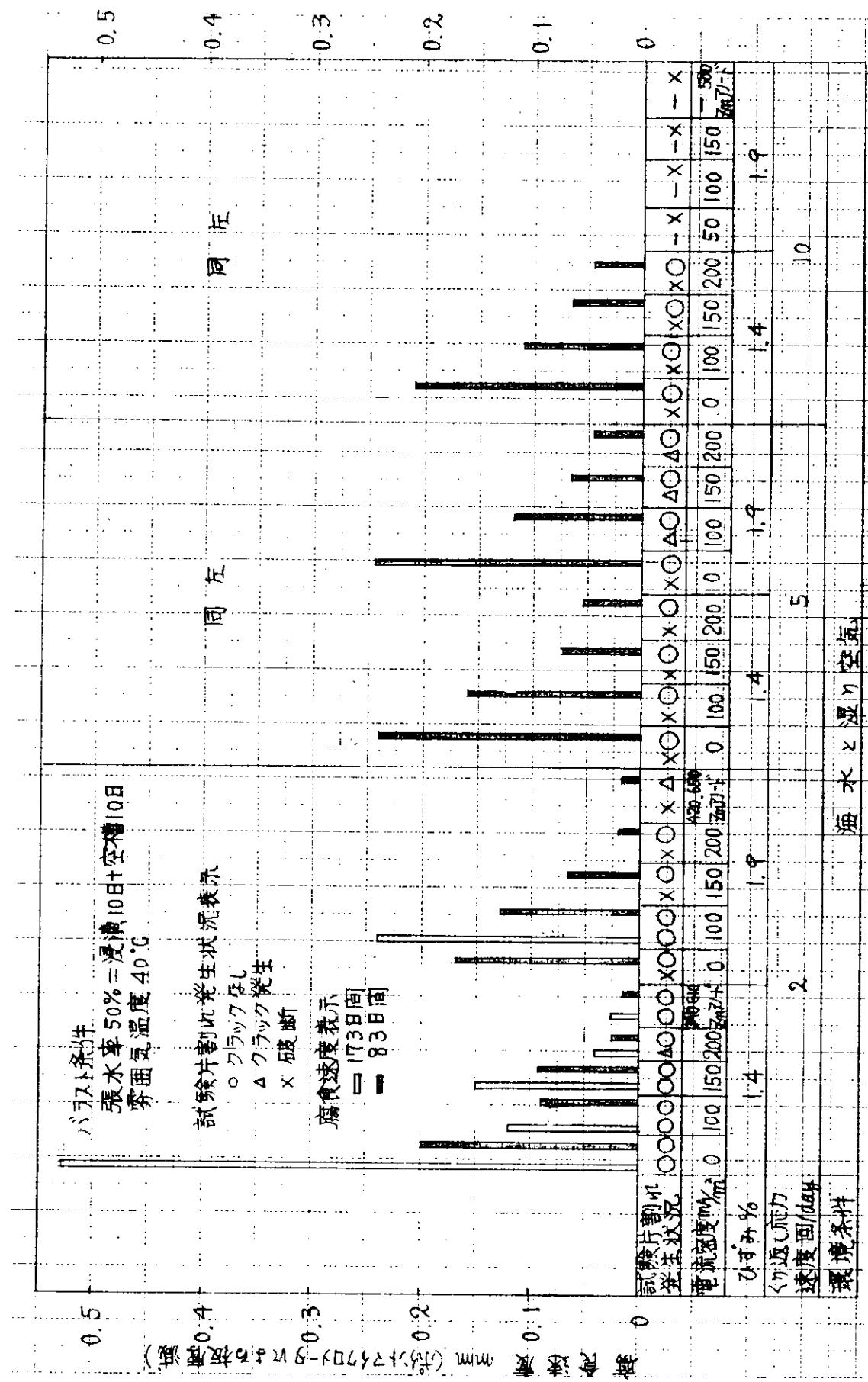


図 2.1.1-4 電気防食における割れ発生条件の検討（5年度 173 日間総合結果）

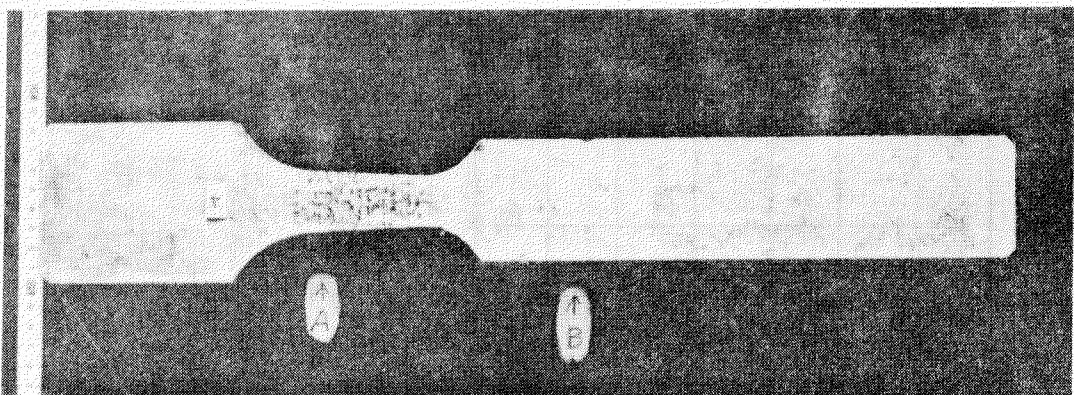
表2.1.2 割れ発生状況

		1.9						1.4						0.7(3年度)													
		電流密度(mA/m ²)			電流密度(mA/m ²)			電流密度(mA/m ²)			電流密度(mA/m ²)			電流密度(mA/m ²)			電流密度(mA/m ²)			電流密度(mA/m ²)			電流密度(mA/m ²)				
3ヶ月 テスト	(回/day)	0	100	150	200	Znアノード	0	100	150	200	Znアノード	0	100	150	200	0	100	150	200	0	100	150	200	0	100	150	200
		162	○	○	○	○△	650mA/m ²	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
6ヶ月 テスト	(回/day)	405	○	○	○	○	—	○	○	○	○	○	○	○	○	○	—	○	○	○	—	○	○	○	○	○	○
		810	×	×	×	×	580"	○	○	○	○	○○○ _x	—	○	○	○	○	○	○	○	○	—	○	○	○	○	○
6ヶ月 テスト	(回/day)	338	×○	×	×	×	420" _x	○	○	○	○	○△	390" _○	○	○	○	○	○	○	○	○	—	○	○	○	○	○
		845	×	△	△	△	—	×	×	×	×	—	—	—	—	—	—	—	○	○	○	—	○	○	○	○	○
6ヶ月 テスト	(回/day)	1690	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	○△	○	○	—	○	○	○	○	○	○

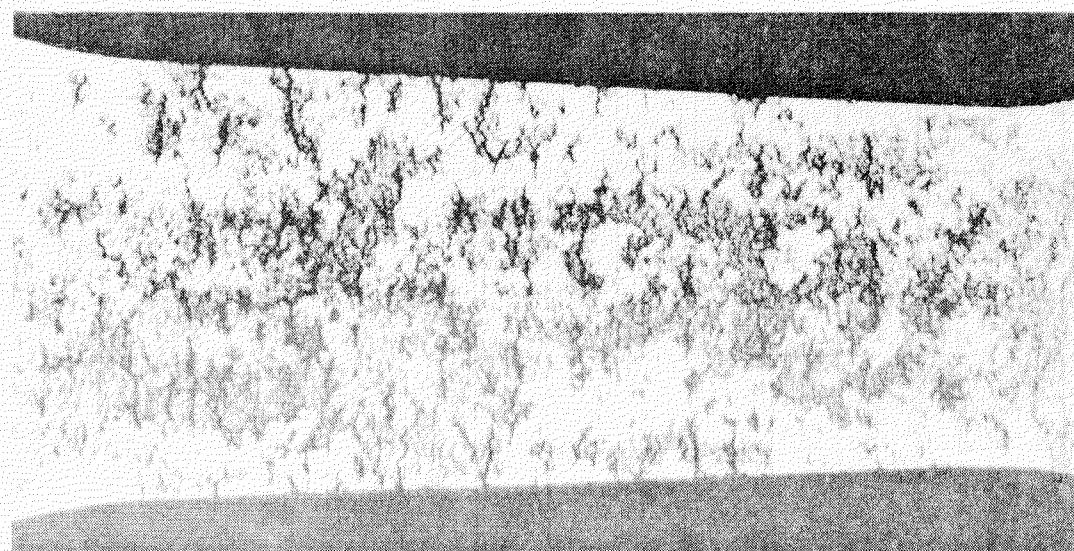
○ クラックなし

△ クラック発生

× 破断



A 部 拡 大



B 部 拡 大



写真 1 電気防食時の歪の影響
(200 mA/m^2 , 1.9% 2回/day, 180日後)

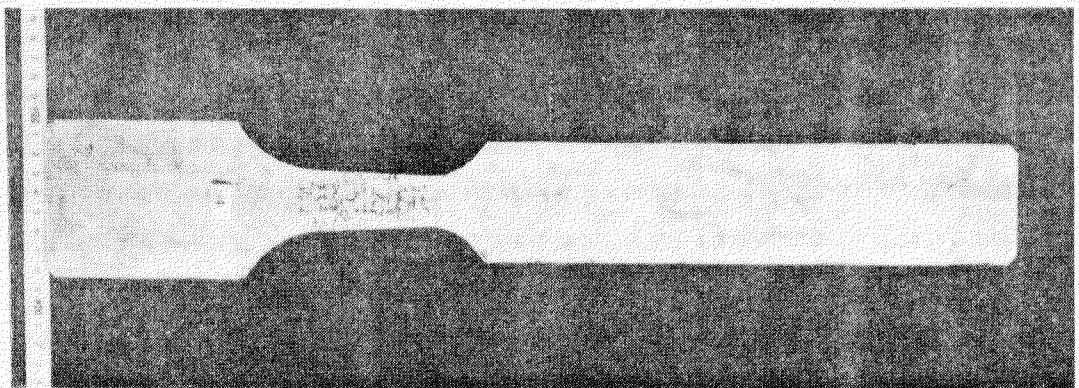
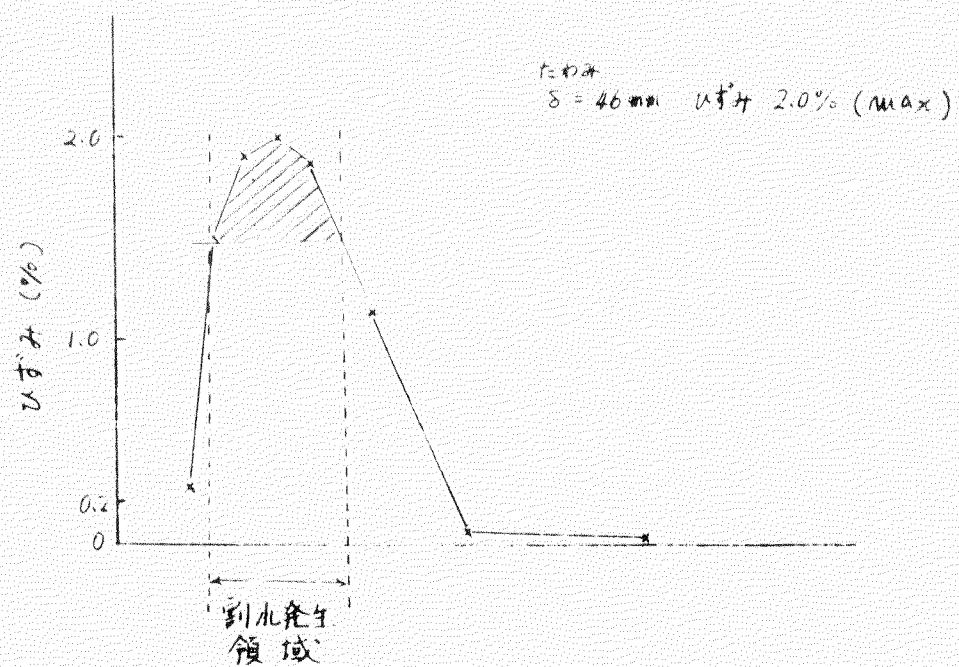


写真 2 電気防食時の歪の影響

2.2 流電陽極による防食効果の確認

第4年度までの電気防食に関する研究はいずれも定電流又は定電位条件下での電気防食の効果に関するものであり、実船の防食にあってはこの定電流一定電位条件下の間を変化する、いわば動的な電気防食条件のものであると言える。このような実船環境と実験室試験条件(定電流、定電位条件)の相互関係を検討しておくことは、実船の防食計画にあたって重要なことであるので以下の実験を行なった。なお第3年度の研究で空槽部分へのイナートガスの封入はバラスト部分の防食に有効である結果を示したので、電気防食との併用効果を検討した。

2.2.1 試験条件

第1年の研究で製作した恒温水槽 10 m (L) $\times 6\text{ m}$ (B) $\times 1\text{ m}$ (H)に軟鋼製の 1 m 角タンク蓋付の試験槽を設置し、温度を 40°C 一定に保ち、試験槽に海水を底から 70 cm 迄満たし一定期間毎に張排水を繰返した。

なお、張水時に海水レベルを底から 80 cm まで張水後 70 cm まで下げてバラスト水面付近の腐食の様相を調査した。なお解析の参考とするため張水期間中試験槽の電極電位を海水塩化銀電極を基準に計測した。

亜鉛陽極は試験槽中央部に $75\text{ mm}(\phi)\times 300\text{ mm}$ (L)のもの1本、2本、4本を目指電流密度に応じて吊下げた。試験条件を表2.2.1に示す。

2.2.2 試験片

供試材はJIS G 3101 SS 41の板材から切出して $30\times 50\times 6\text{ mm}$ の大きさに加工し、表面をショットブロスト仕上げし 1 m 角試験槽内の天井部から 10 cm 、 25 cm 、 40 cm 、 65 cm 、 90 cm の位置に吊下げた。一方 $65\times 45\times 6\text{ mm}$ の大きさの試験片を試験槽の蓋に取付けた。その取付状況を図2.2.1に示す。

2.2.3 試験結果

(1) 腐食量における試験片取付位置の影響を図2.2.2に示し、電気防食効果のおよぶバラスト部分(試験槽内の試験片の位置 40 cm 、 65 cm 、 90 cm 、図2.2.2参照)の平均減量の各種試験条件による変化を図2.2.3に示す。試験期間中の試験槽の電位変化および防食電流密度の変化を図2.2.4(I), (II), 図2.2.5(I), (II)に示す。これらの図に見られるように流電陽極によるときの防食電流密度の変化は定電流防食の場合に較べて初期に大きな電流が流れ時間の経過とともに試験槽電位(陽極)が低下すると発生電流も低下することが大きな特徴である。

さらに陽極と陰極の幾何学的因子が同じであっても(亜鉛の取付数、取付位置が同じ)バラスト周期の違いや空槽時の雰囲気が空気の場合とイナートガス雰囲気の場合のように腐食環境の相違によって発生電流の値の異なることも大きな特徴である。

図2.2.3に示したように防食効果は発生電流が大きいから防食効果がよいとは限らないことも流電陽極による防食方法の特異の一つと考えられる。即ち本研究で行った試験の中から陽極と陰極の幾何学的因子の同じものを試験条件から拾い出すと例えば図2.2.3の中の(1), (3), (6)(亜鉛陽極2本取付)と(2)(4)(亜鉛陽極4本取付)のグループにわけることができ下表のように腐食環境によって発生電流および防食効果は異なる。

グ ル 一 プ	(1)	(3)	(6)	(2)	(4)
周 期 (日)	20	40	20	20	40
電流密度 (mA/m^2)	9.0	8.8	4.3	1.00	8.8
侵 食 量 (mm)	0.083	0.049	0.016	0.062	0.088
腐 食 雰 囲 气	海水-空気	海水-空気	海水-イナートガス	海水-空気	海水-空気
亜鉛取付量(本)	2本			4本	

この一例でも示したように亜鉛陽極による防食では、同じ亜鉛の取付量(面積)でも発生電流が腐食環境(バラスト周期、バラスト率、温度、空槽時の雰囲気、歪の存在等)によって異なり、防食効果も異なるので、実験室実験で行なわれる定電流、定電位試験結果を亜鉛防食方法に適用するときは、充分外部条件を考えなければならないことが

わかる。

なお陰極一陽極の幾何学因子は異なるが同じ腐食環境のものをそれぞれ比較すると（図2.2.3中で(1)～(2), (3)～(4), (5)～(6)）で(3)～(4)の場合の侵食量が(1)～(2), (5)～(6)の場合と異なっていることがわかる。即ち亜鉛の取付量が多いにも拘らず、発生電流が増えるわけでもなく、侵食量が逆に大きくなっている。このような傾向は図2.2.3の左側に参考のため示した既研究結果（定電流試験）でも $200\text{mA}/\text{m}^2$ の電流密度のものが $100\text{mA}/\text{m}^2$ に較べてやはり防食効果がおもわしくない結果を示しており、その際の説明としてタンクの空槽時に有効に作用するエレクトロコーティングの化学組成、機械的性質が、防食条件によって異なり、単に電流密度の増加はあまり有効な防食方法ではないと述べていることと照らし合せると、亜鉛の取付量を増した事が初期のコーティング生成に影響をおよぼしてこのような結果になったものと推測される。もう少し詳細に調べると異常な腐食化傾向を示した(4)の侵食量のタンク内の腐食の分布は図2.2.2(B)にみられるようにバラスト上部の試験片の腐食が特に大きく、全体の侵食量を見掛け上増加させているので、この値を実験上のミスとして捨てれば防食効果も一般常識として考えられる同一腐食環境であれば電流密度が大きい程、防食効果もよいと結論できそうである。しかし、試験片上のエレクトロコーティングの付着状態（表面からコーティングが一皮浮上った状態で付着していた。），前述の定電流試験結果、更に後に述べる「Mgブースタマノード併用による防食効果」の研究結果で述べる理由から防食条件と腐食環境は微妙に作用しあってこのようなこともあると考えたい。

(2) 海水とイナートガス雰囲気での鋼の腐食

*3 第3年度の研究の中で張排水のくり返されるバラスト部分に対して腐食速度は時間と共に低下する傾向を示し、空気雰囲気に比べて著しい防食効果（SO₂ 0.02% O₂ 5%周期20日張水率50%で防食率が80日試験で36%，160日試験で60%）を示すことを報告した。これに流電陽極（亜鉛）による防食を併用した結果は図2.2.3に見られるように（⑤，⑥と⑦，⑧と①，②を比較のこと）試験期間160日で通常の電気防食が60%の防食率であるのに対し、この場合約90%の防食率を示し防食亜鉛の消耗は約1/2と言う結果を得た。

(3) まとめ

以上の結果をまとめると次のようになる。

- (a) 流電陽極によるときの防食電流密度の変化は定電流防食の場合に較べて初期に大きな電流が流れ、時間の経過とともに試験槽電位が低下すると発生電流も低下する。
- (b) 流電陽極による防食では陽極一陰極の配置が同一であっても発生電流（防食電流、亜鉛の消耗量）は、腐食環境によって大きく異なり、亜鉛発生電流値と防食効果は必ずしも一致しない。

バラストタンクのような空槽期間のある腐食環境では亜鉛取付面積の増加がからずしも良好な防食効果を与えるとは限らない。

亜鉛の取付位置（面積）の決定に当っては腐食環境を充分考慮する必要のあることが初めて認識された。

- (c) 電気防食と空槽期間中のイナートガスの封入による防食方法は周期20日張水率50%のとき90%の防食率を示し、従来の電気防食単独の60%よりかなり良好な結果を示した。

*1 昭和50年度成果報告書 P 29-43

*2 図2.2.3参照

*3 第3年度報告(S 50.3) P 48-51

表 2.2.1 試験条件

陽極材	目標電流密度	周 期	張水率	使用海水	空槽部雰囲気	結果番号
亜鉛陽極使用 ※右記電流密度を 目標として亜鉛の 使用量を調整した。	100mA/m ²	20日	50%	海水	空 気	3
	"	40日	"	"	"	11
	200mA/m ²	20日	"	"	"	4
	"	40日	"	"	"	12
	50mA/m ²	20日	"	"	イナートガス組成 O ₂ 5% CO ₂ 15% SO ₂ 0.02% 残N ₂	7
	100mA/m ²	20日	"	"		8

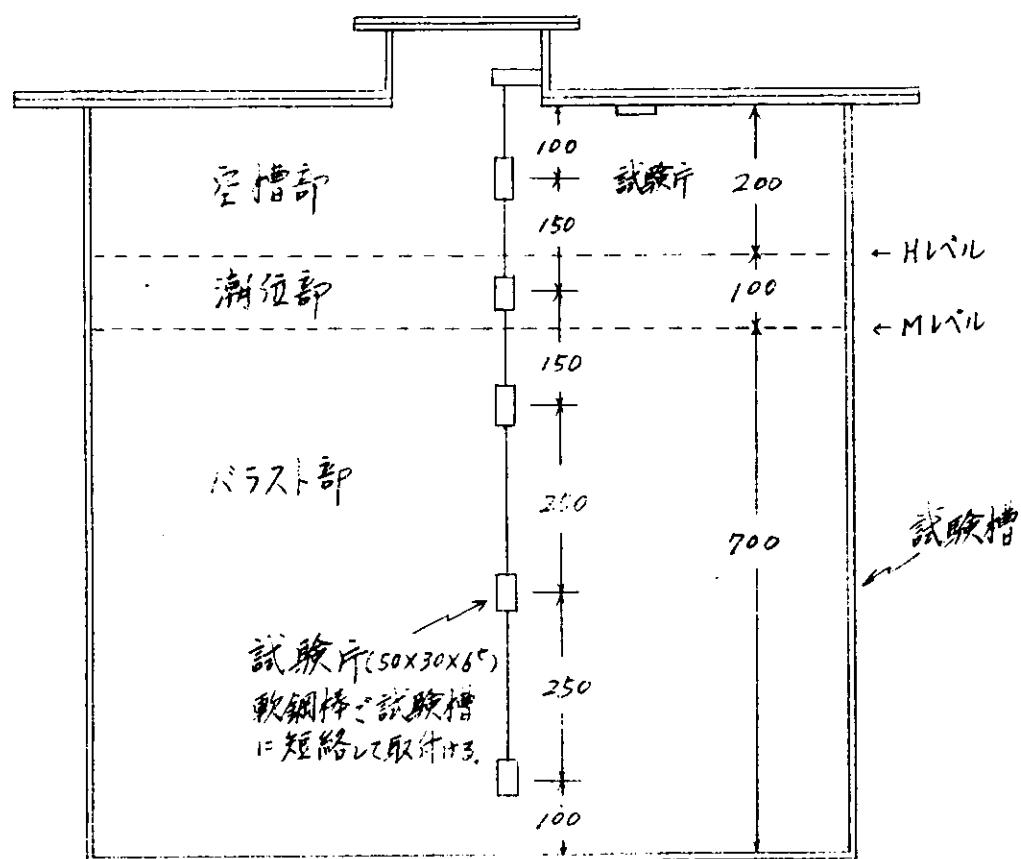


図 2.2.1 試験片の取付状況

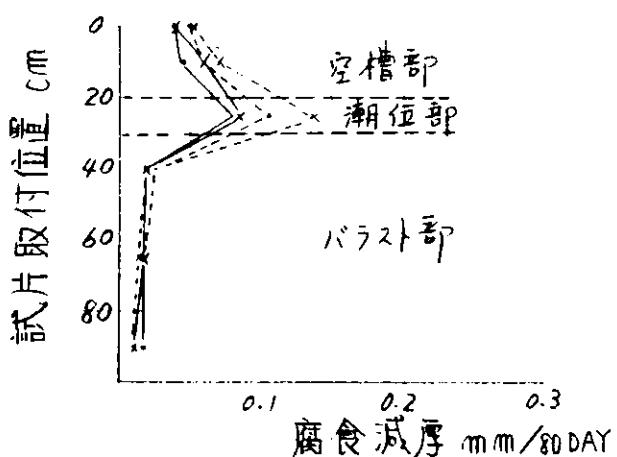
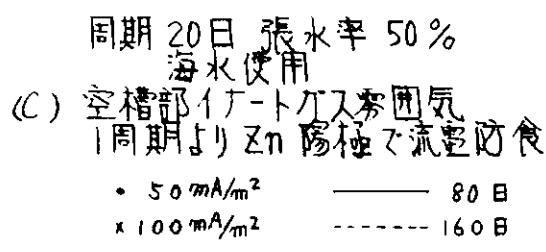
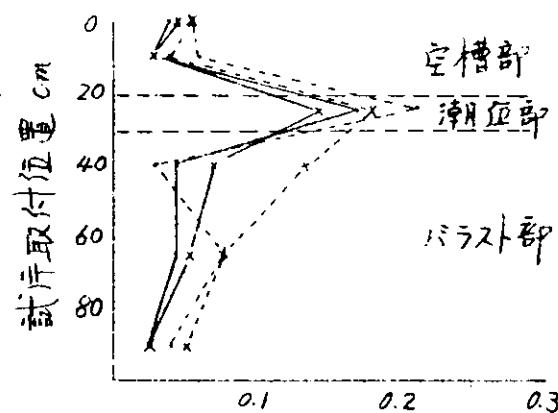
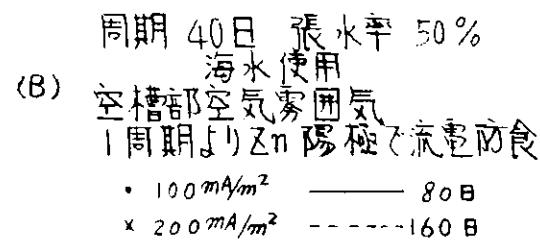
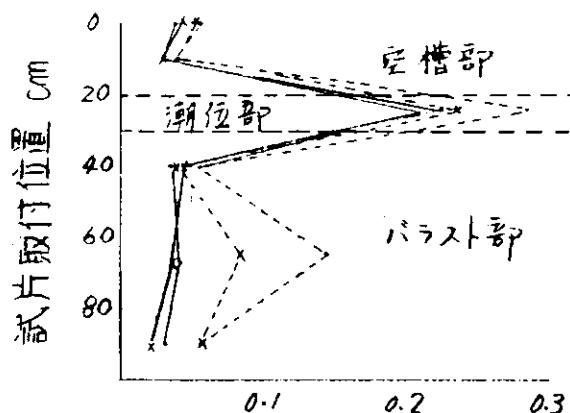
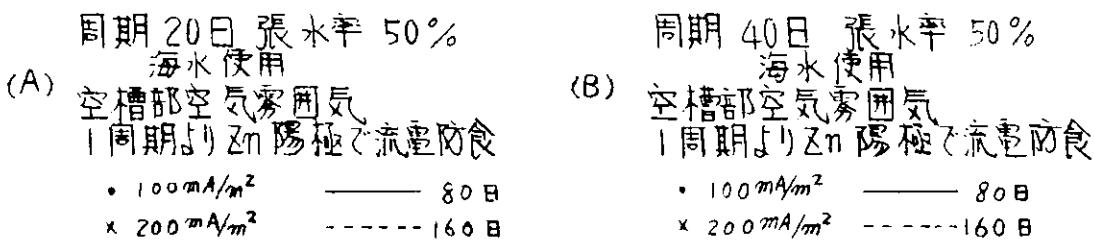


図 2.2.2 試験槽の腐食分布（腐食減量より求めた平均減厚）

1. 仕掛け気組成 O_2 5% CO_2 15% SO_2 0.72% 残 N_2

2. 実測電流密度は電流陽極の底量より計算した平均電流密度を示す。

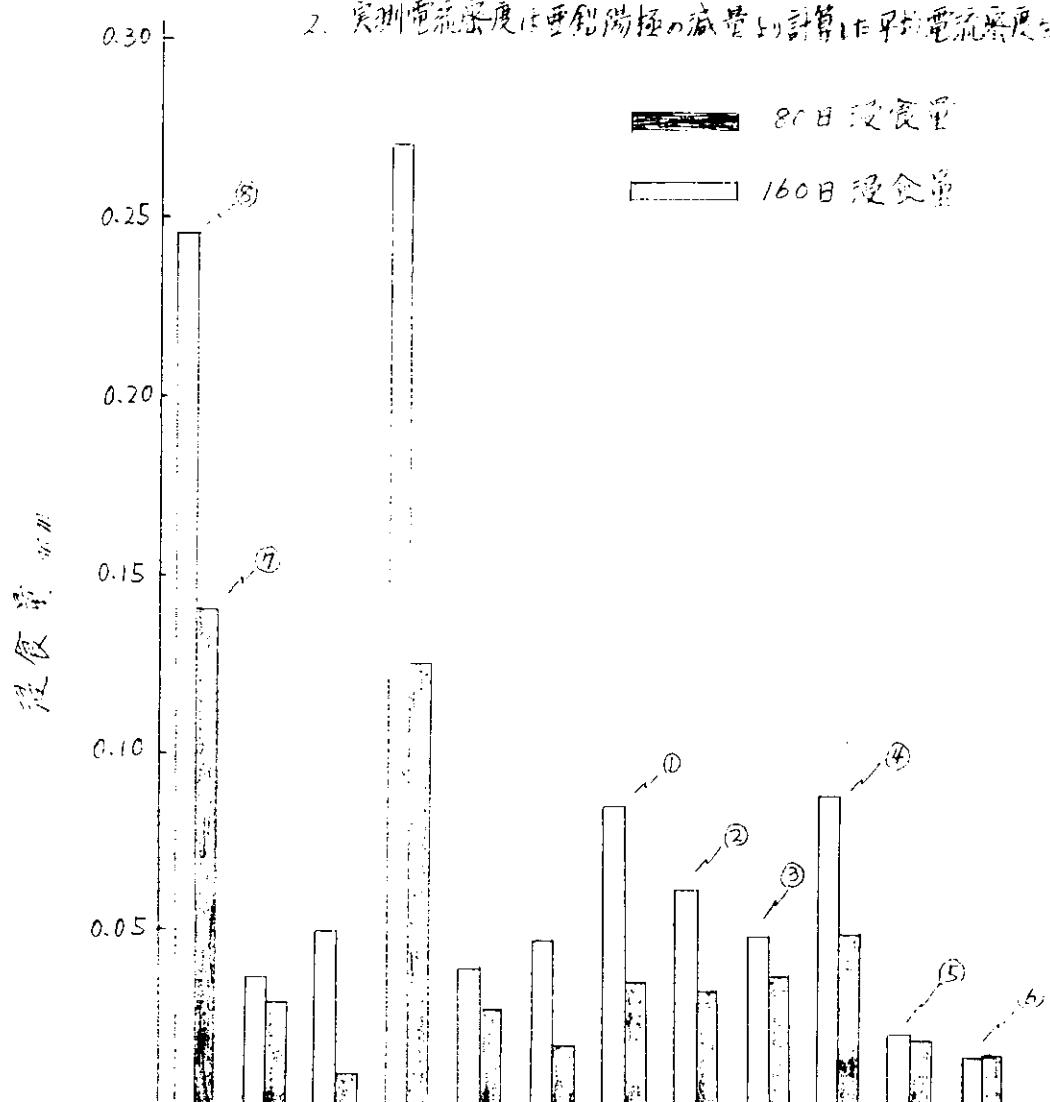
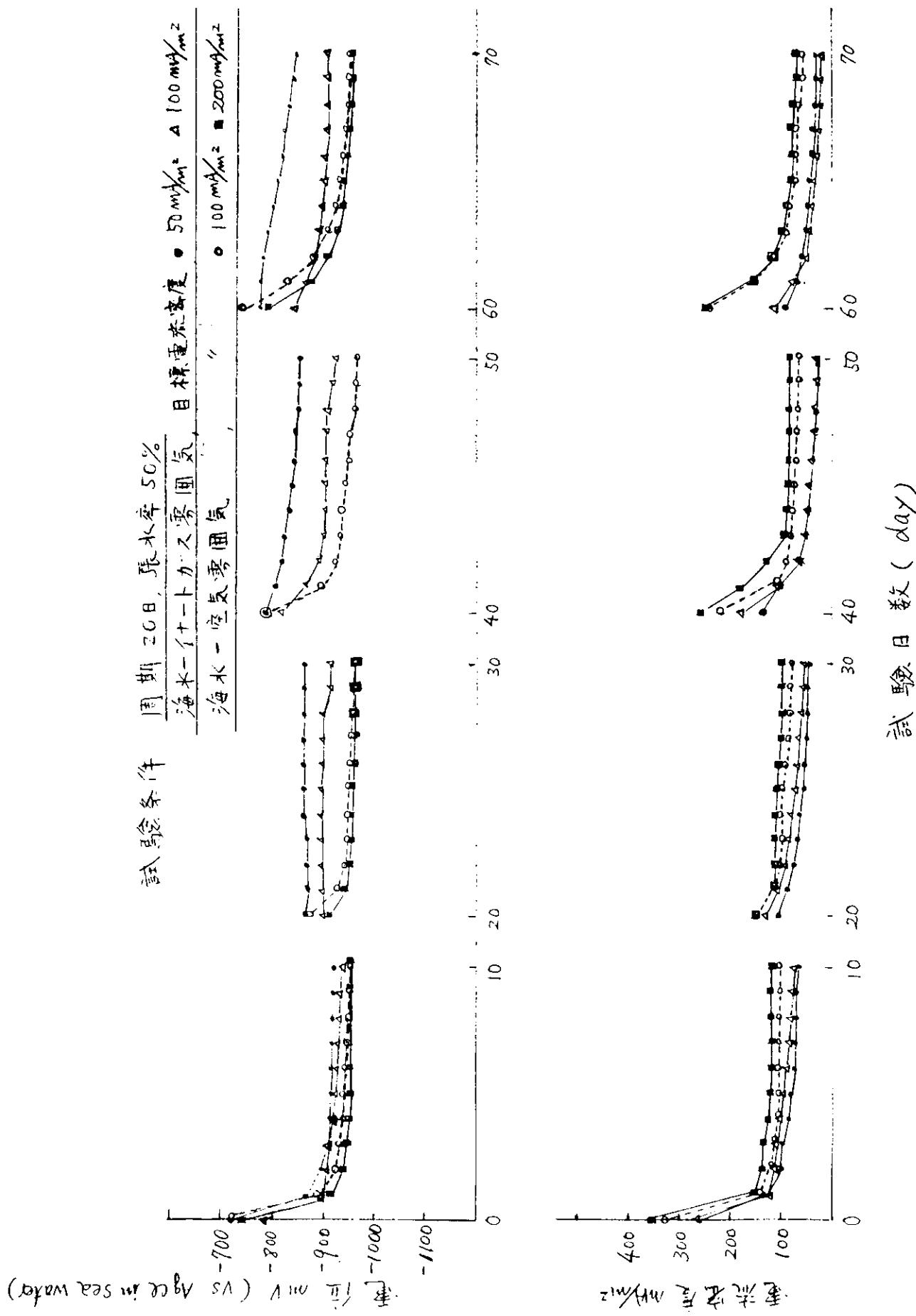


図 2.2.3 流電陽極による防食結果



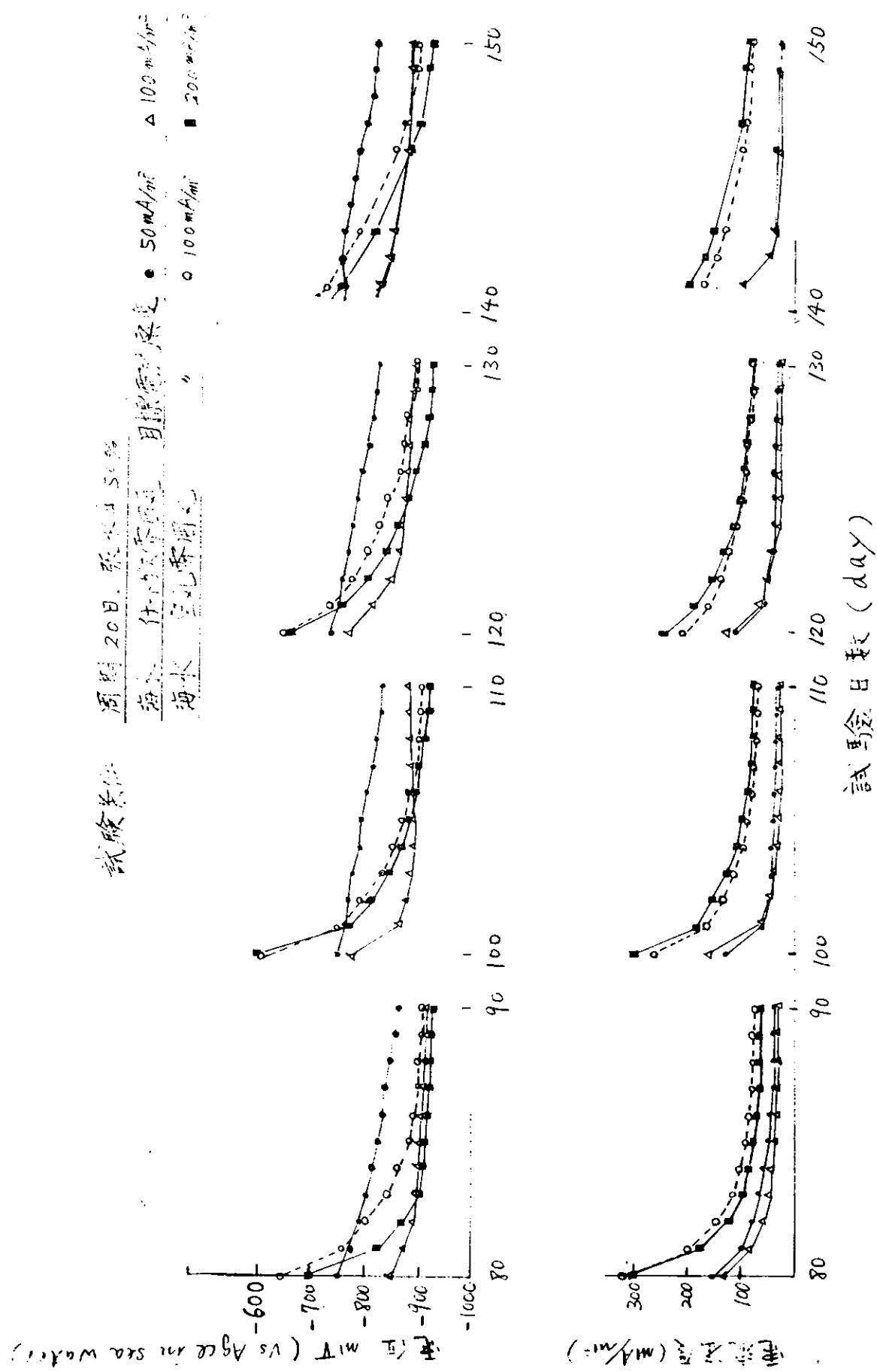


図 2.2.4 試験槽電位と防食電流密度の経時変化 (II)

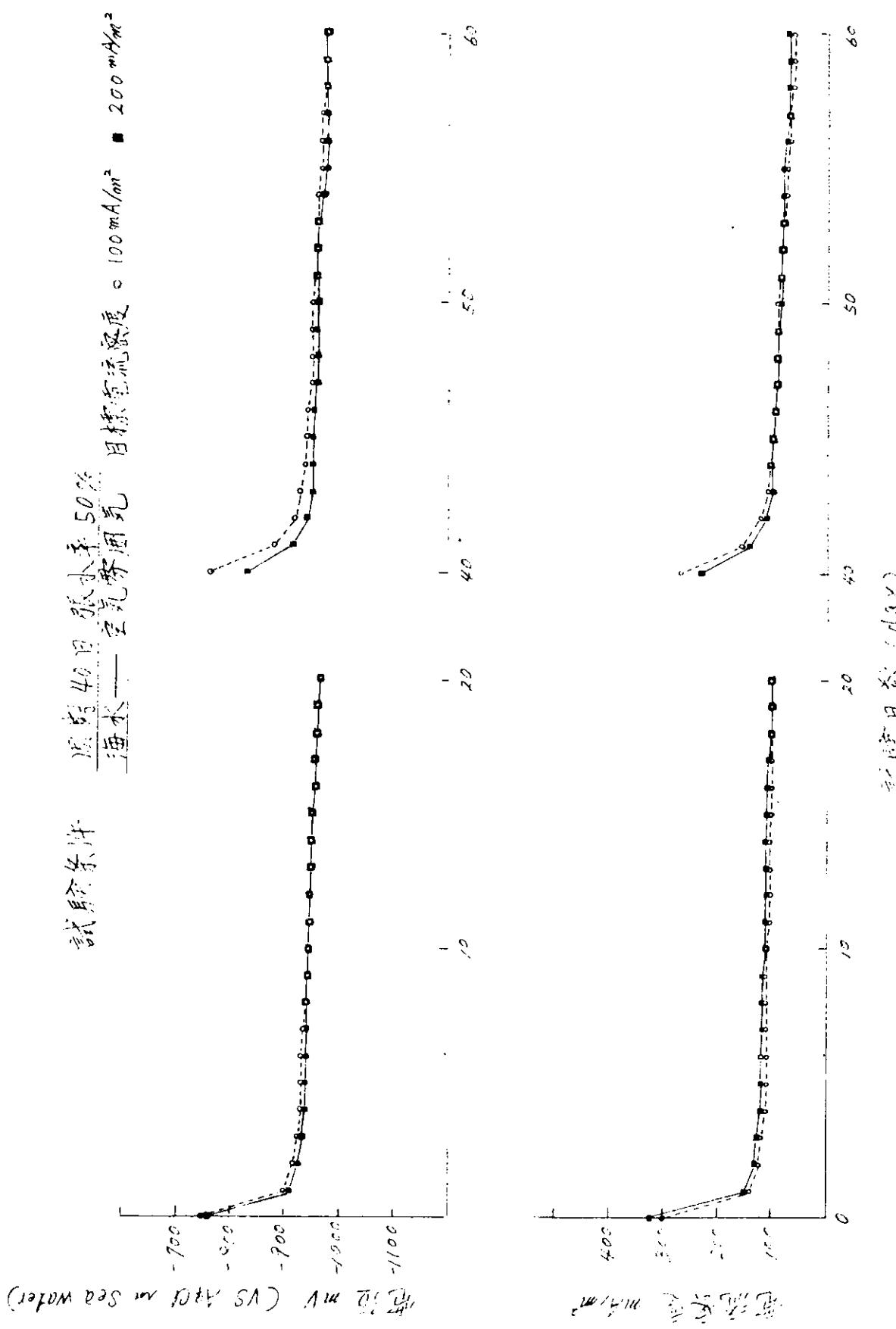


図 2.2.5 試験槽電位と防食電流密度の経時変化 (I)

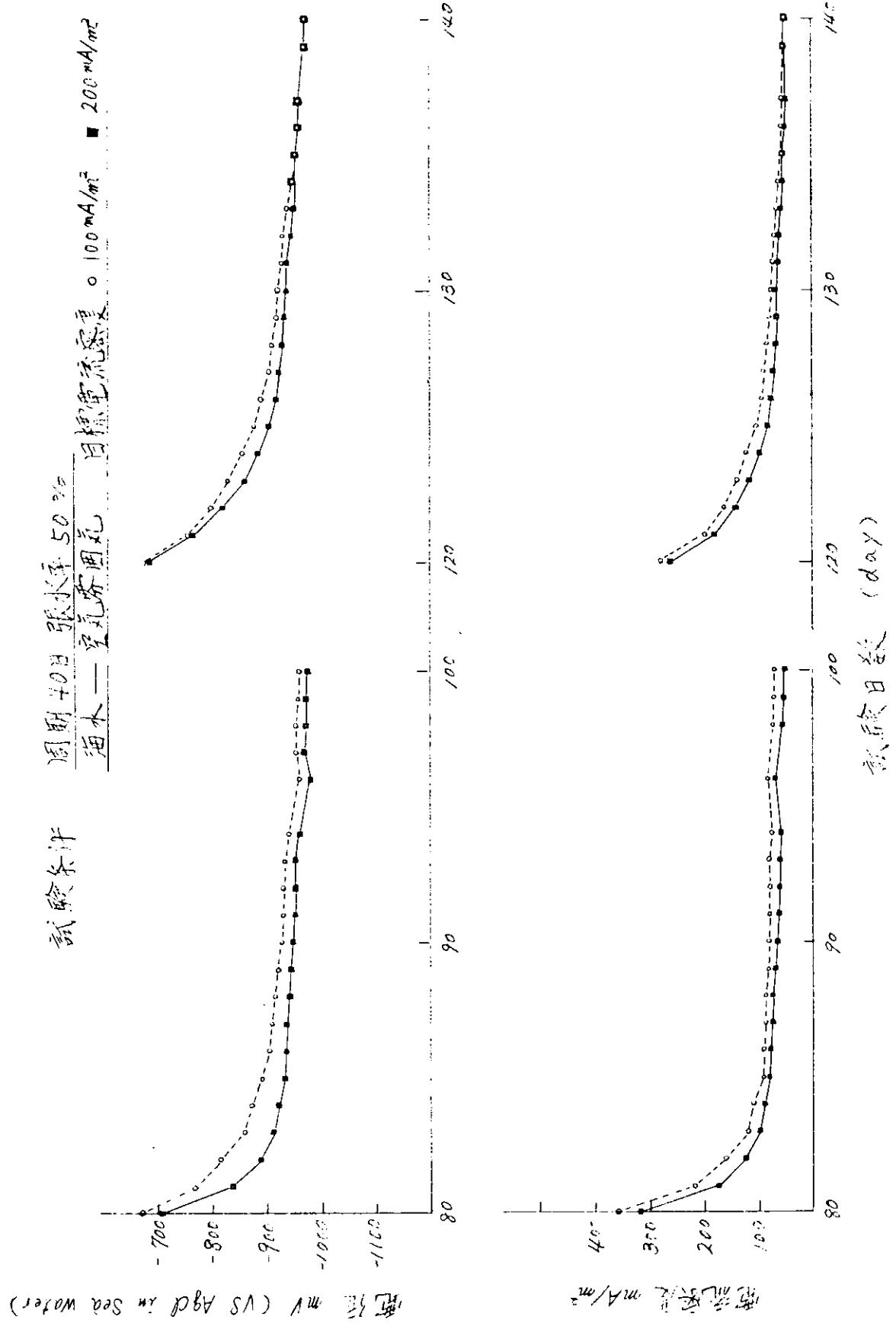


図 2.2.5 試験槽電位と防食電流密度の経時変化 (II)

2.3 ブースターアノード併用による防食効果の確認

これまでの研究からバラストタンクの防食は空槽期間中の防食が難であり、イナートガスの封入は一つの鍵になりうることが明らかになった。一方初期の防食も極めて重要であり、一旦、表面の錆びた鋼材は錆の環元に電流が消費され、鋼材の分極が進まず張水中にも腐食が進行し、本来この期間に生成すべきエレクトロコーティングが生成せず、次の空槽期間中に腐食が更に進行し、錆はますます増え、張水中の防食電流が不足するという悪循環をくり返し、いたずらに陽極の消耗だけが増加するという結果を招くことになる。この悪循環を断つのに建造時の一時防錆法（例えはジンクリッヂブライマーの塗布等）も有力な方法であるがここでは初期防食電流密度を増加する防食方法について検討した。

2.3.1 試験条件

初期の防食電流を増加する方法としては外部電源によるか、あるいは電位の低いMg陽極（ブースターアノード）の使用が考えられる。ここではブースターアノードとしてMg陽極を使用することとした。試験条件は表2.3.1に見られるように、張水期間の第1周期をMg陽極で防食し第2周期以降をZnによる流電陽極による防食とした。バラスト期間中の空槽部分又は空槽期間中の雰囲気を空気とイナートガスの2種としてその効果を比較した。

試験は2.2.1、2.2.2と同じように1m角水槽とその内部に50×30×6mmの試験片を取付けた。

2.3.2 試験結果

図2.3.1～図2.3.2に侵食量を図2.3.3(1)(II)～図2.3.4(1)(II)に電位電流の変化を示す。図2.3.3(1)(II)～図2.3.4(1)(II)に見られるように試験槽の電位、電流の変化は空槽部雰囲気が空気の場合とイナートガスの場合で大きく異なり、ブースターアノードによる変化を比較すると次のようになる。

	腐食雰囲気	周期(日)	第2周期の電流電位
A	空気と海水の繰返し	20	初750 → 950 mV 約170 → 50 mA/m ²
		40	760 → 990 mV 225 → 50 mA/m ²
B	イナートガスとスケラバー海水	20	960 → 980 mV 55 → 30 mA/m ²
		40	960 → 1000 mV 55 → 30 mA/m ²

注 Zn 75 Ø × 300 mm 2本を取付けた場合

このように空槽期間が空気雰囲気の場合にくらべて、イナートガス雰囲気の場合は電位が安定であると同時に終始防食電位以下に保持され、この状態は全試験期間を通じて維持され、侵食量も図2.3.2に示したように非常に少なく良好な防食方法である結果を得た。特にZnの消耗量は陽極1本の場合2.6～3.6mA/m²、2本の場合3.7mA/m²とさわめて僅かとなった。これに対して空気雰囲気の場合はMgアノードによる前処理法は良好な防食方法とは言えず図2.2.3の①～④の侵食量の結果と図2.3.2の①～④の侵食量の比較から、最初から亜鉛で防食する従来の防食方法よりも劣る結果を示した。このようにMgブースターアノードによる前処理が有効でない理由は、粗雑なエレクトロコーティングの生成がその主因と考えられる。

2.3.3 まとめ

以上の結果を要約すると次のようになる。

- (1) 空槽期間が空気雰囲気の場合Mgアノードによる初期電流密度の増加による防食方法は従来の亜鉛による電気防食方法よりも劣る。
- (2) イナートガススクラバー海水雰囲気でのMgアノード併用では良好な防食効果を示し、亜鉛の消耗量は従来の海水・空気雰囲気での1/2以下であった。

表 2.3.1 試験条件

陽極材	目標電流密度	周期	張水率	使用回数	空槽部雰囲気	結果番号
1 周期Mg陽極 2 周期以後Zn 陽極使用 右記電流密度を 目標として亜鉛 の使用量を調整 した。	50 mA/m ²	20日	50%	海 水	空 気	①
	"	40 "	"			⑨
	100 mA/m ²	20 "	"			②
	"	40 "	"			⑩
	50 mA/m ²	20 "	"	スクラバー 海 水 SO ₃ ²⁻ 60 ppm	イナートガス O ₂ 5% CO ₂ 1.5% SO ₂ 0.02% N ₂ 残	⑤
	"	40 "	"		⑬	
	100 mA/m ²	20 "	"		⑥	
	"	40 "	"		⑭	

注) Mg陽極は 20 Ø × 500 mm を各試験槽とも 4 本使用した。

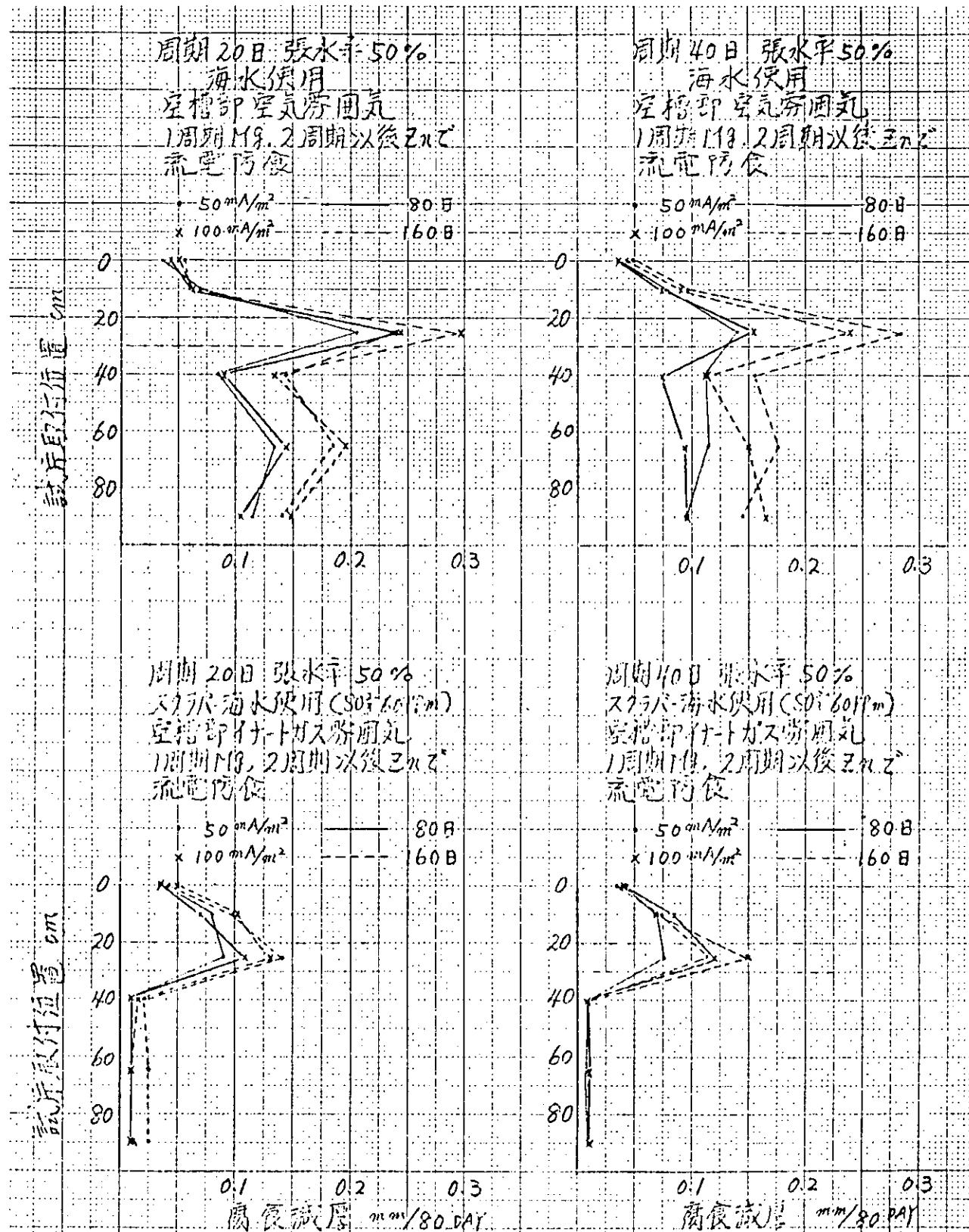
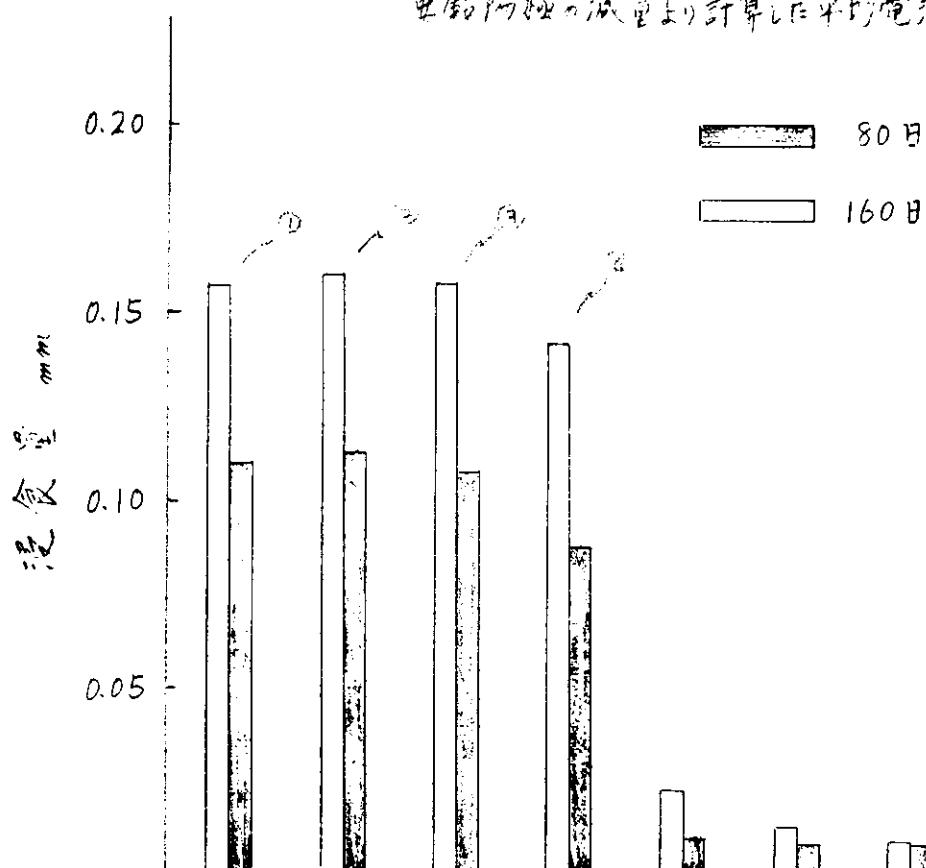


図 2.3.1 試験槽の腐食分布(腐食減量より求めた平均減厚)

1. 付-1段組成 O_2 5% CO_2 15% SO_2 0.02% pH 7.0

2. 目標電流密度は亜鉛汚染時を示し、実測電流密度は
亜鉛陽極の減量より計算した平均電流密度で示す。



周期	張水平	20日	50%	40日	50%	20日	50%	40日	50%
目標電流密度 mA/m^2	50	100	50	100	50	100	50	100	50
実測電流密度 mA/m^2	64	103	78.7	84	35.8	37.1	26.3	36.5	
海水性状		海水			スクラバ-海水 $SO_3^{2-} 60PPm$				
空槽寄附因数		空気			イナートガス				
防食方法		1周期 Mg 陽極, 2周期以後三井陽極で流電防食							

図 2.3.2 ブースターアノード併用による防食結果

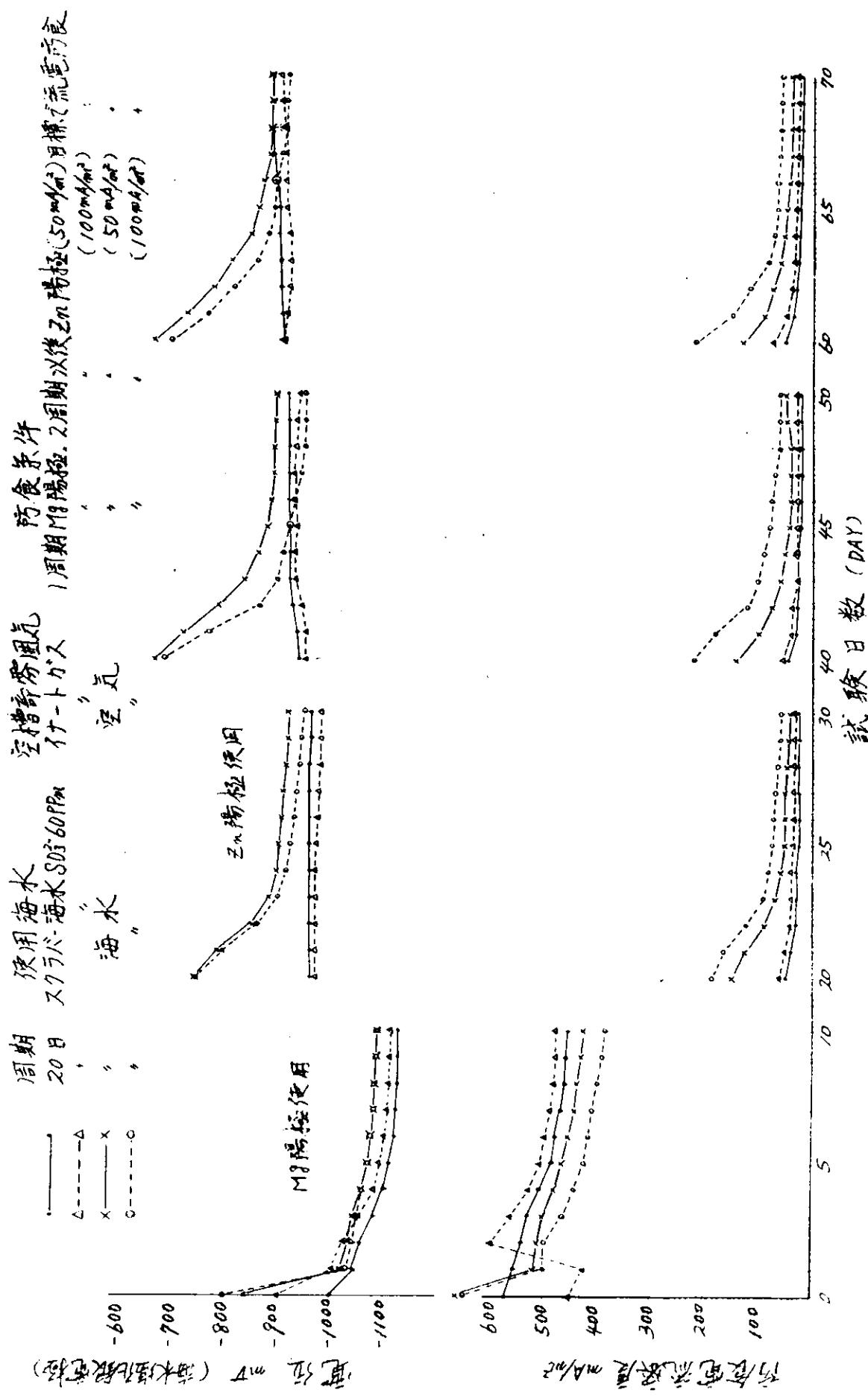


図 2.3.3 試験槽電位と防食電流密度の経時変化 (1)

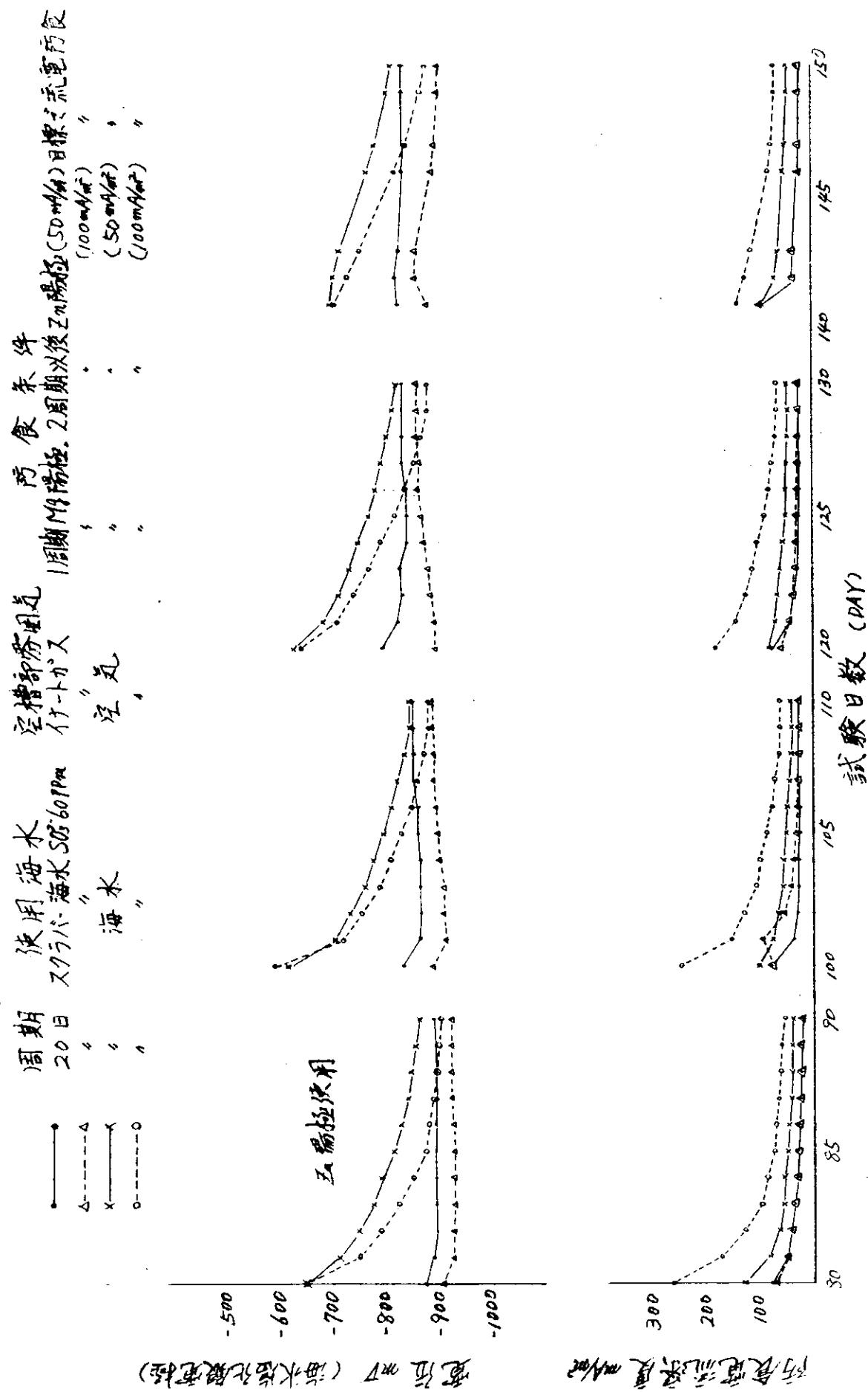


図 2.3.3 試験槽電位と防食電流密度の経時変化 (1)

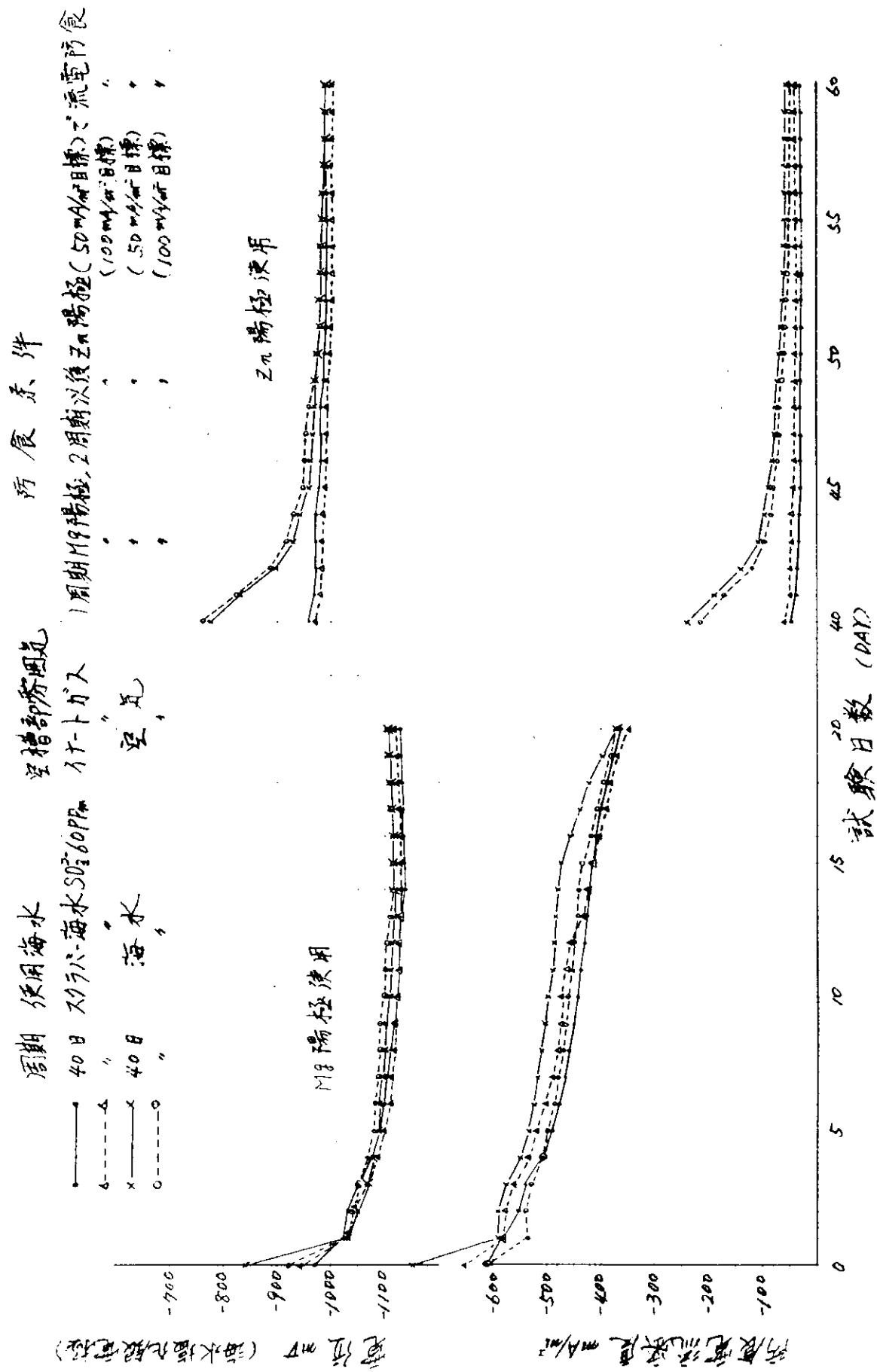


図2.3.4 試験槽電位と防食電流密度の経時変化 (I)

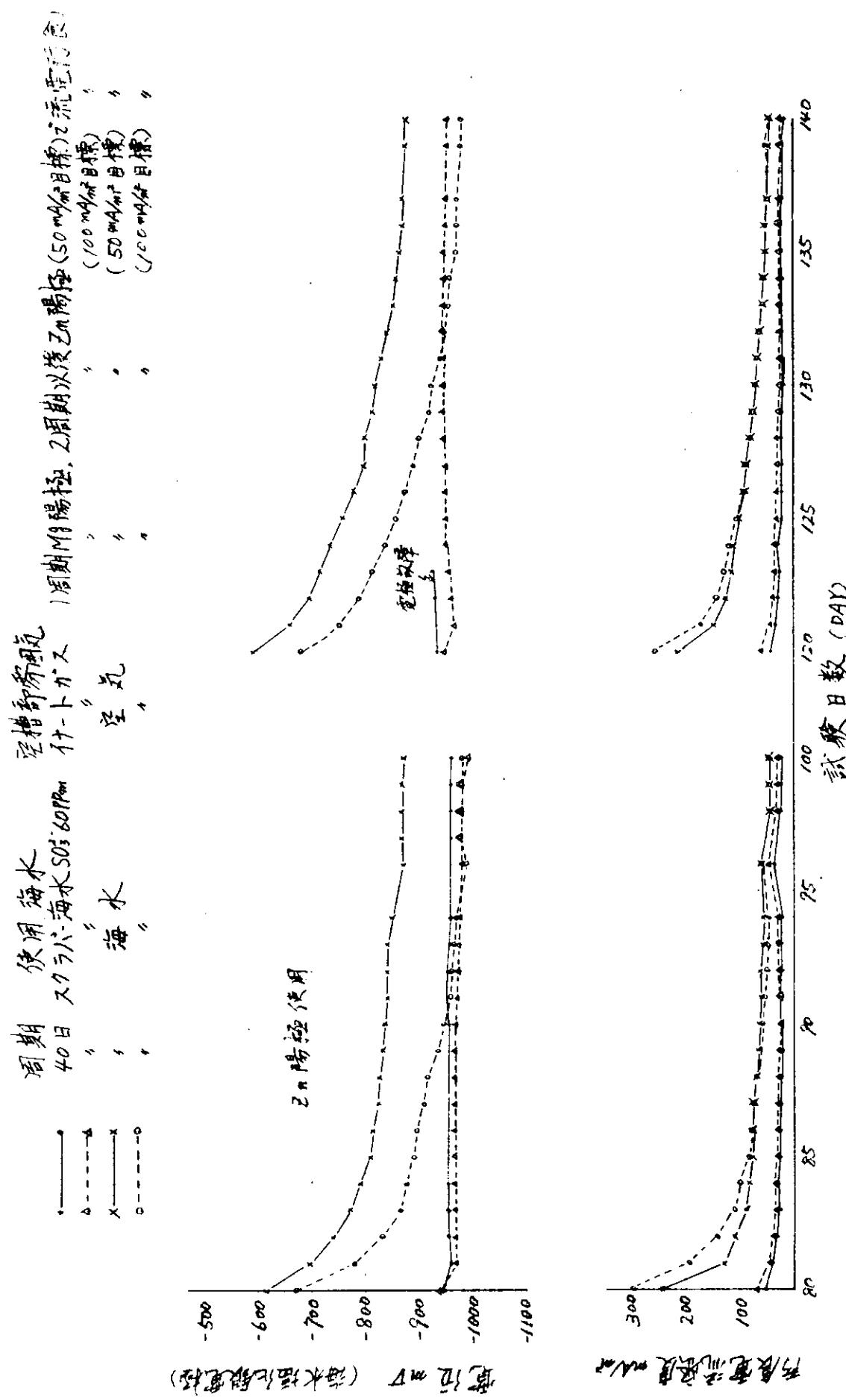


図 2.3.4 試験槽電位と防食電流密度の経時変化 (II)

3. スクラバー排水を利用した新しい防食方法の実船シミュレート

3.1 試験による効果の確認

イナートガスシステムは本来タンク爆発防止方法として採用されているもので、ボイラ燃焼排ガス中の亜硫酸ガスはタンク鋼材に腐食促進作用を示すとして、予め海水洗浄によって除去した後のガスをカーゴタンク内に封入するようになっている。したがって一方では亜硫酸を含んだ洗浄海水(300 m³/H程度)が現在のイナートガスシステム採用船では排出されている。

第4年度の研究ではこの洗浄海水をバラスト海水に混合したときのバラスト海水中の酸素除去作用と鋼材に対する防食効果について基礎試験を行ない、くり返し応力の存在する場合にもすぐれた防食効果を示し、バラストタンクの防食に極めて優れた防食方法であることを明らかにした。第4年度の研究は1m角の鋼製試験槽と人工燃焼ガスを使用して行なわれたものであり、Scale effectを見るため容積にして約10倍の3m×1.5m×2.5m(H)のタンクを製作し、実際の燃焼ガスを使用してスクラバー海水を作り、実験した。

3.1.1 試験条件と試験の方法

試験条件を次のように選んだ。

1. 周期 40日、張水率 5.0%
2. 海水性状 SO_3^{2-} 30 ppm 添加
3. 空槽部雰囲気 燃焼排ガス封入
4. 陰極防食 亜鉛陽極による流電防食
5. 目標防食電流密度 $\left\{ \begin{array}{l} \text{試験槽の中央に隔壁を設け、左室を } 150 \text{ mA/m}^2 \text{ とし } 40 \phi \times 300 \text{ mm 亜鉛を 8 本、右室を } \\ 80 \text{ mA/m}^2 \text{ 目標として } 40 \phi \times 300 \text{ mm 亜鉛を 4 本取付けた（亜鉛 1 本の表面積 } 400 \text{ cm}^2 \text{ ）} \\ \text{図 3.2.1 に亜鉛取付位を示す。} \end{array} \right.$
6. 防食面積 各室 1.4 m²
7. 試験片 $70 \times 60 \times 6$ (t) mm 軟鋼 ショットブラスト仕上げ

防食亜鉛および試験片の取付位置および試験槽の電位計測点の概要を図3.1.1に示す。試験装置の概要を図3.1.2に示す。図に示したようにイナートガスの調整は温水ボイラの燃料A重油に二硫化炭素を添加し、排ガス組成 O_2 5%, CO_2 15%, SO_2 2700 p.p.m (乾ガス) に調整し、1m角のスクラバー調整槽で海水に吸収させ、 SO_3^{2-} 300 p.p.m 程度の海水を作り、このスクラバー海水と原海水をミキシング槽で混合し、給水管を通じ 1.35 m³/H の速度で 10 m³ の試験槽へ 9 m³ バラストした。一方試験槽上部へ又はバラスト排出時はスクラバー海水調整槽から出たガス (O_2 5%, CO_2 12%, SO_2 200 p.p.m) を供給した。

3.1.2 試験結果

試験槽内の深さ方向に吊下げた試験片の侵食量を図3.1.3に、試験期間中の電位変化防食電流の変化を図3.1.4、図3.1.5に示す。防食電流は第1サイクル目に鋼材表面に生成した初期錆の環元電流と思われる 200 mA/m² 前後の電流が流れだが、第2周期では電位も約 -1000 mV を張水初期から示し、分極の形成と共に防食電流密度も 30 mA/m² ~ 35 mA/m²まで低下し、2~3で述べた 1m 角水槽による試験 (Mg ブースターアノード) + (スクラバー水) + (イナートガス) + (Zn 防食) と同じような傾向を示した。侵食量も図3.1.3に見られるように約 0.01 mm / 80 日以下と極めて良好な防食効果が得られた。

試験タンク内は従来の亜鉛防食で見られるような比較的厚い白色のコーティングに覆われることなく、水面より 1m 近

*1 本報の図2.3.5、図2.3.6 参照

が白と茶の小さなマダラ状を呈し、それよりボトム迄は灰白色の薄い皮膜に覆われ又、底部は茶色のマットによって覆われていた。(約2~3mm厚)表面状態の1例を写真1に示す。底部に置いた試験片の表面状態を焦点深度式表面粗度計で調べたところ右室、左室共に差がなく、0.017~0.010mmの凹凸を示しショットブラストの粗度(0.050mm)に較べて凸部が溶解した程度のものと判断された。

3.2.3まとめ

実際の燃焼排ガスを使用し約10m³のタンクを使用して、スクラバー排水利用の防食実験を行なった。1m³の試験槽と同じように10m³の試験槽でも良好な防食効果が得られ、本方式の有用性を確認した。

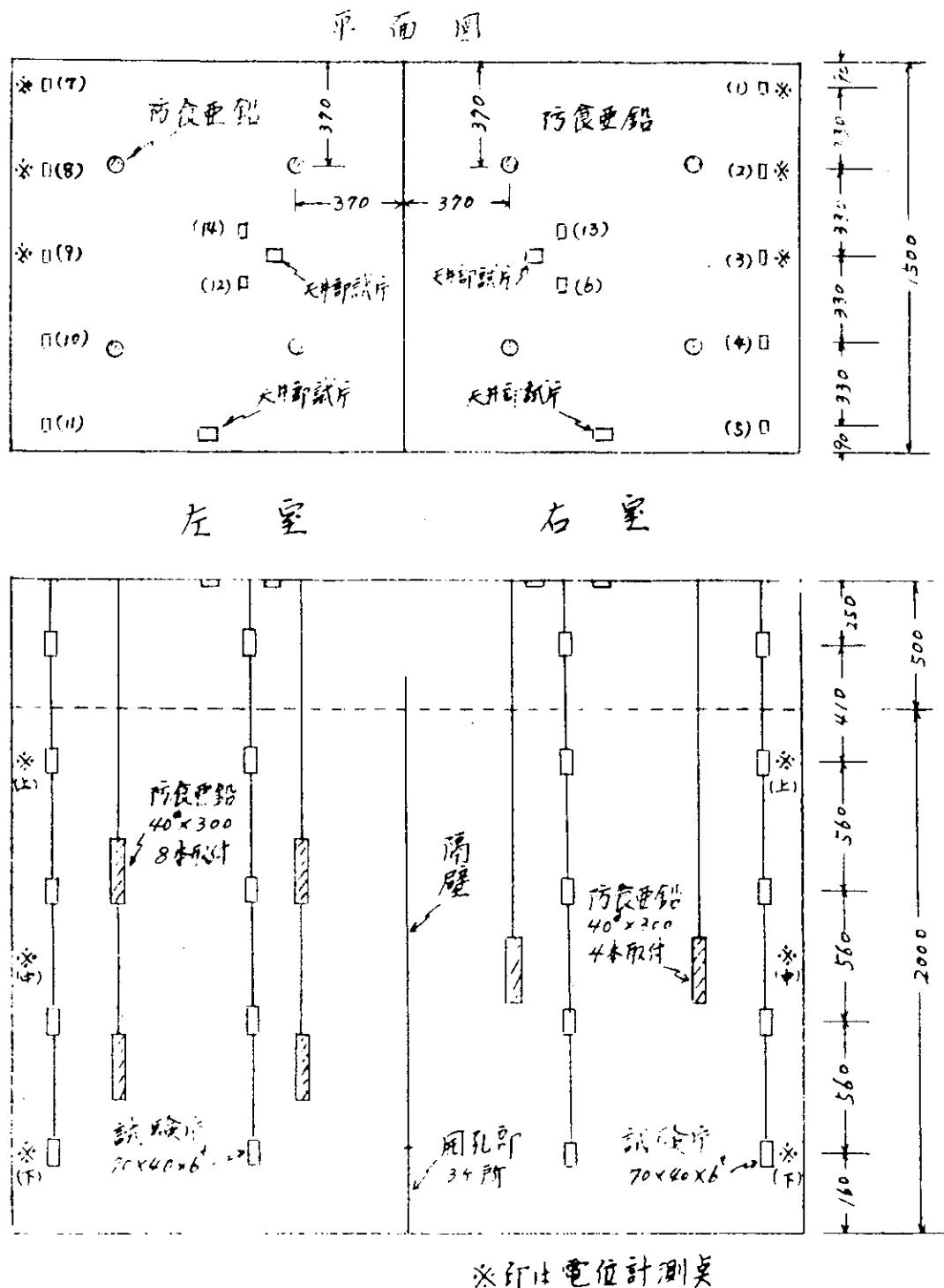


図3.1.1 防食垂鉛、試験片の取付位置と電位計測点

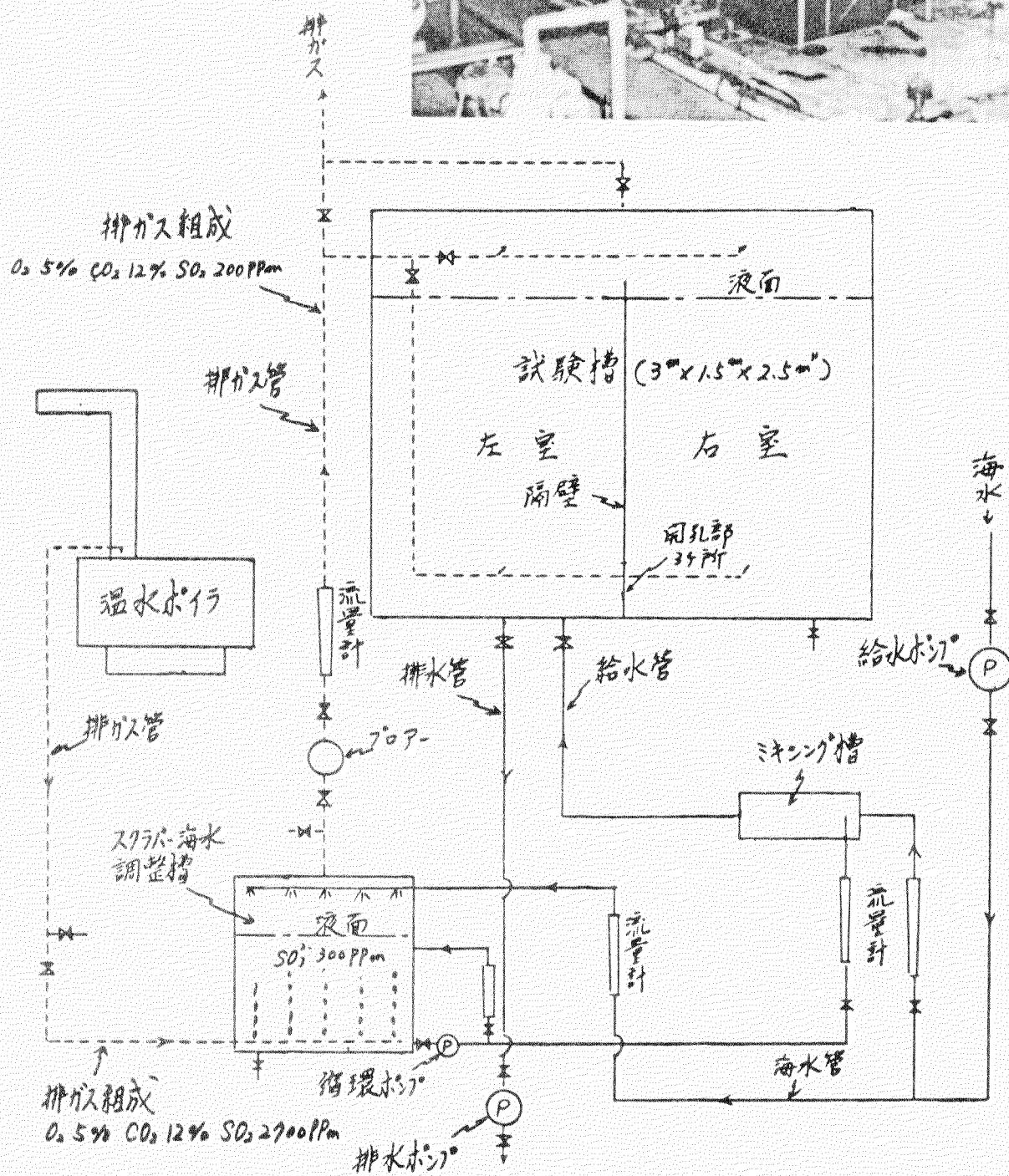
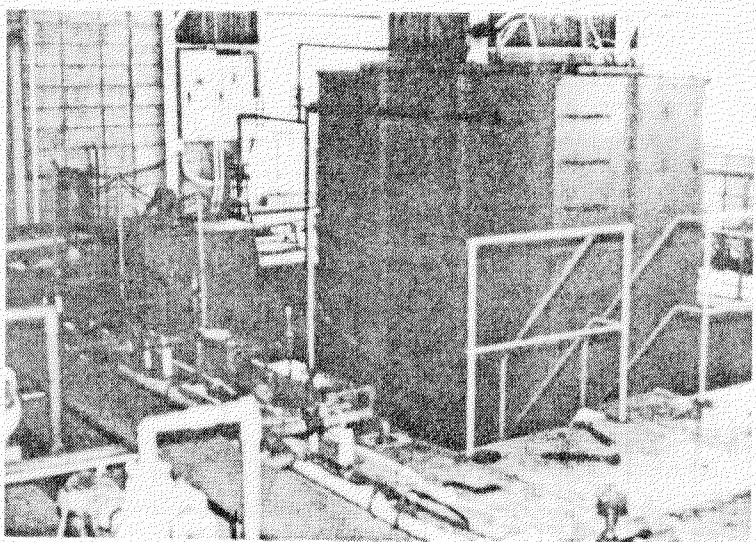


図 3.1.2 実船シミュレート試験装置

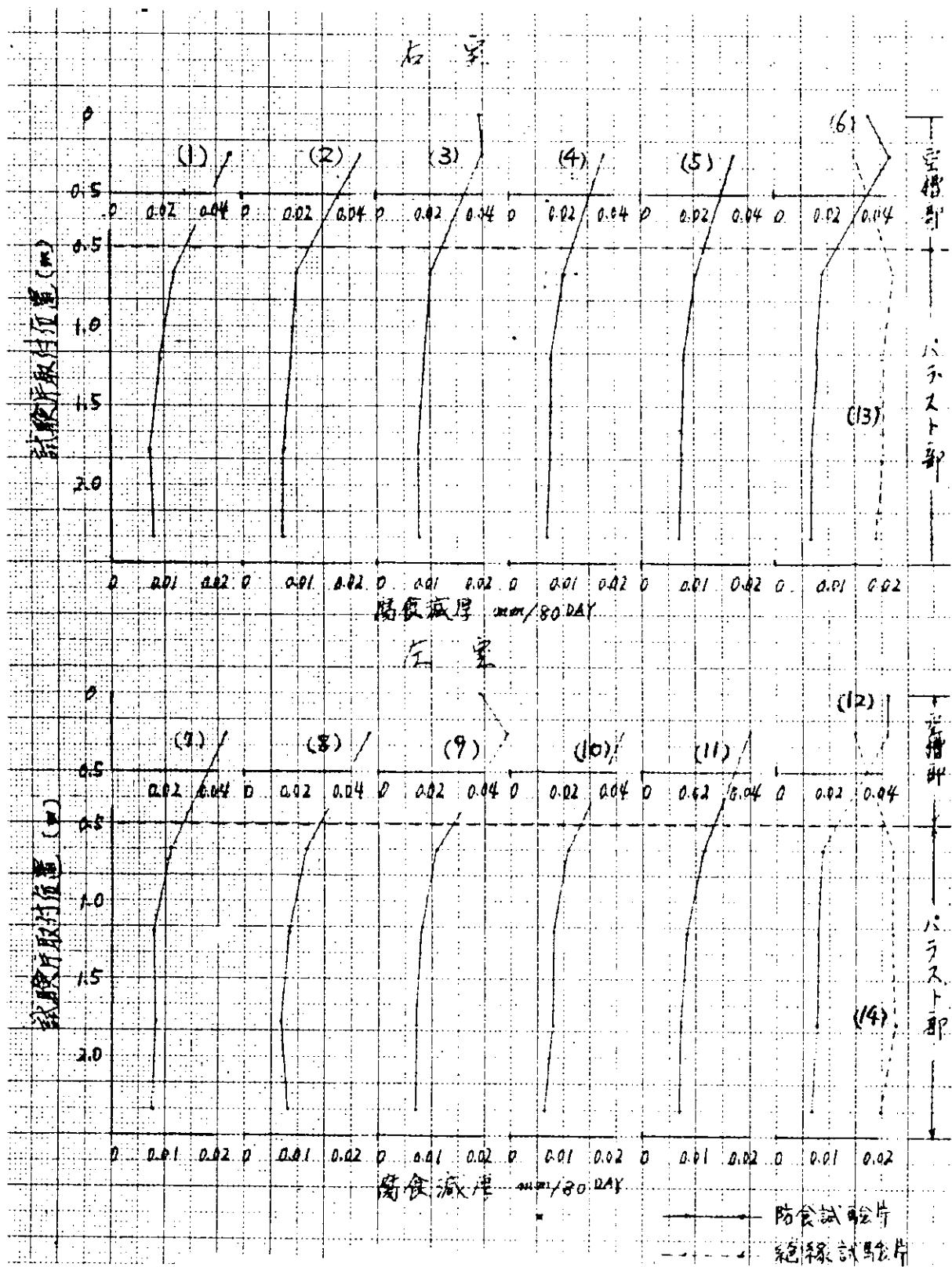


図 3.1.3 試験槽の侵食量

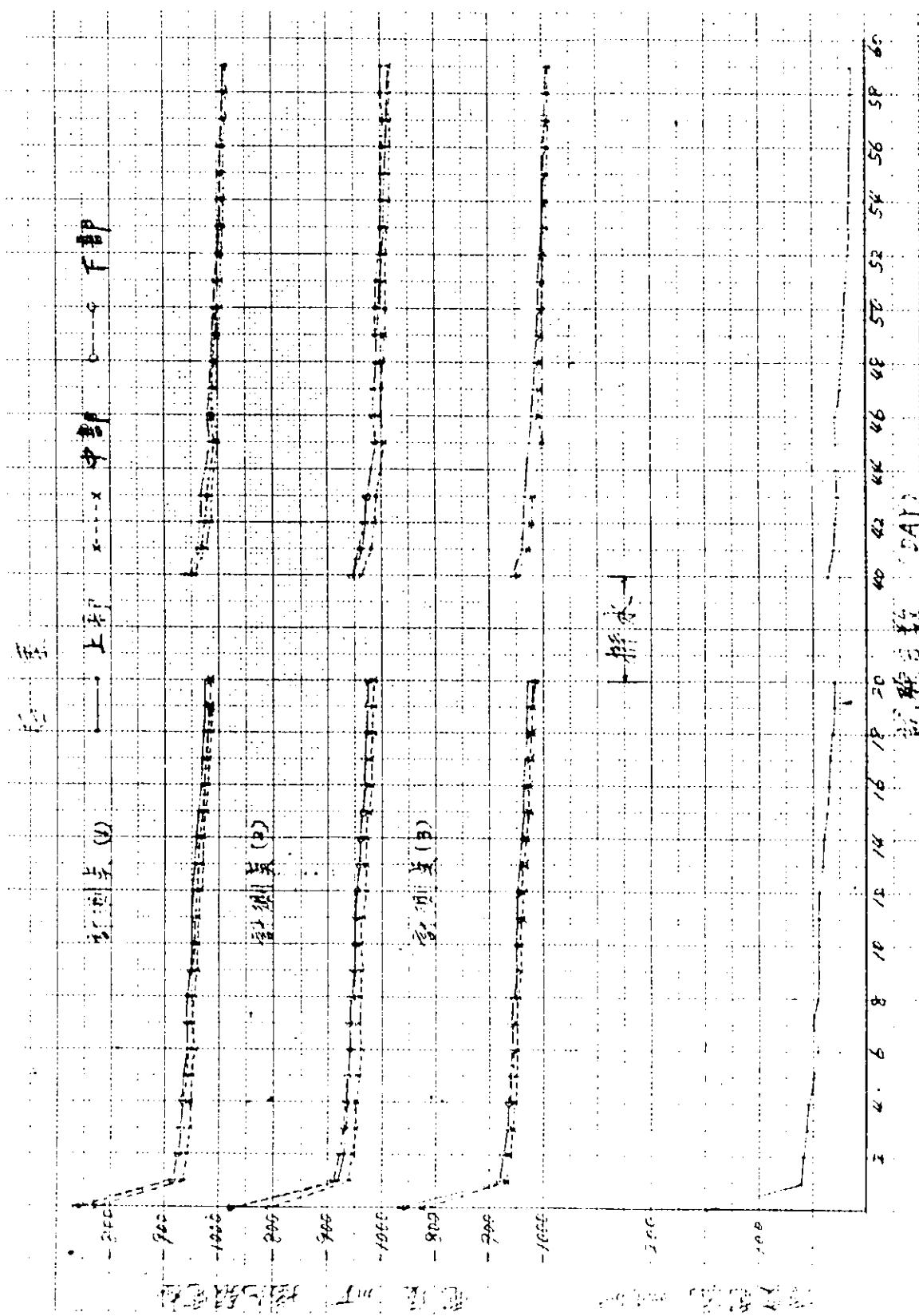


図 3.1.4 試験電位の経時変化

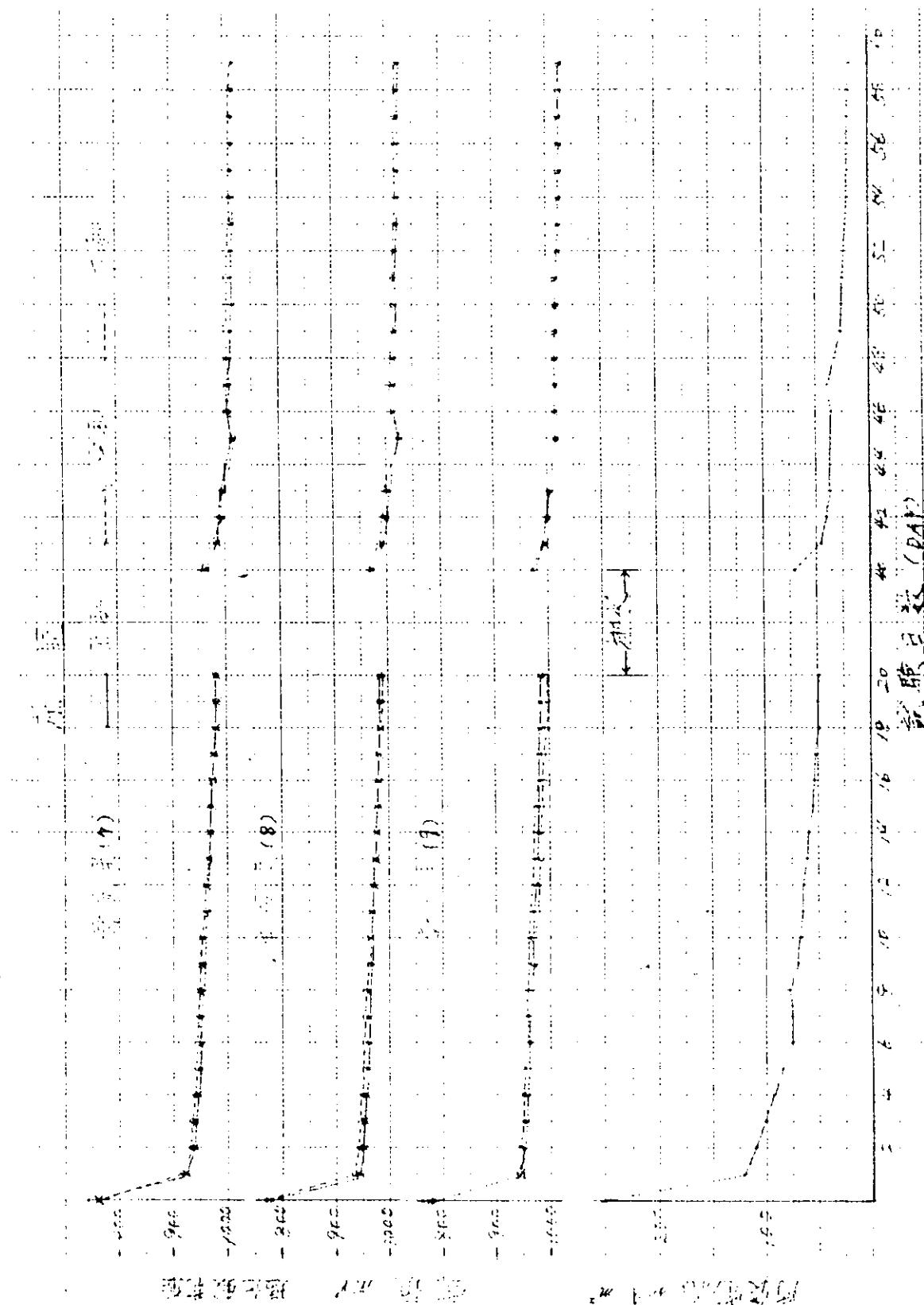


図 3.1.5 試験槽電位の経時変化

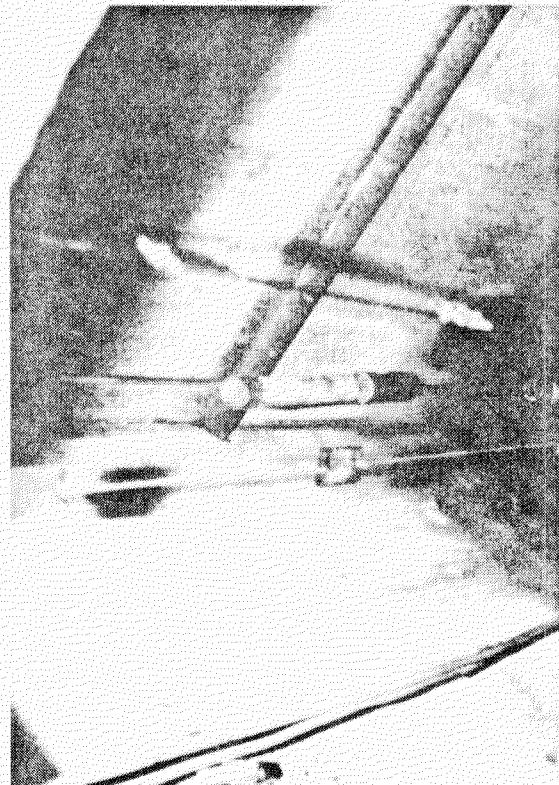
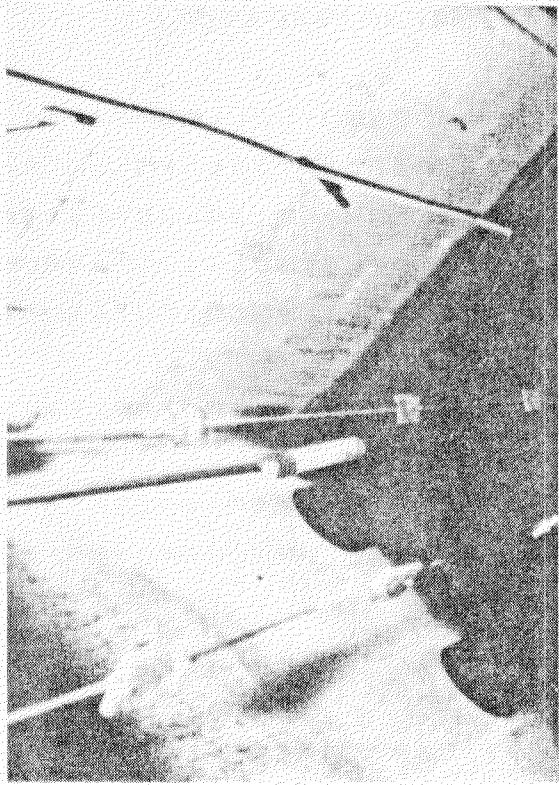


写真 1 試験槽内部の状態

4. 無機ジンクプライマ塗装と電気防食の併用による防食法

(無機ジンクプライマ塗装鋼の腐食疲労強度に及ぼす電気防食の効果)

4.1 はじめに

前年度の研究において、張排水を繰返されるようなバラストタンクの防食法の一つとして無機ジンクプライマ塗装に電気防食を併用すれば、比較的少ない防食電流でそれを防食性能を期待することができることを明らかにした。しかし、この防食法を適用するにあたり次の二つの問題点を検討し安全性の確認と信頼性の向上を計る必要があると考えられた。その一つは無機ジンクプライマ（以後、IZPと略す）塗装鋼に電気防食を併用することによって防食電流が集中した場合に疲労強度に悪影響がないかどうか、他の一つは電気防食の併用に有効なIZP塗膜の耐久性がどの程度あるのかという点である。

そこで、本実験においては、全期間張水および張排水繰返し腐食環境下で1分間に10回の応力繰返し速度で疲労試験を行ないIZP塗装鋼ならびに無塗装鋼の疲労強度に及ぼす電気防食の影響について検討した。さらに、IZP塗装と電気防食併用の防食性能を確認するため、前年度の試験に引き続き張排水環境下において最大応力10kg/mm²で1分間に0.6回の繰返し速度で約1.5年間の腐食試験を行ない、その防食性能と試験後の塗膜性状を調べ、本防食法に有効な塗膜の耐久性について考察を行なった。

4.2 供試材および試験片形状

本実験には板厚3.2mmのSS41鋼を用いた。その化学成分ならびに機械的性質を表4.1に示す。

試験片形状は図4.1に示すとおりである。その表面は、塗装の前処理として必要なショットブラスト処理を行なった。その処理グレードはSIS, Sa3とした。塗装は、エチルシリケート系の無機ジンクプライマ（亜鉛含有量：90wt%）の塗料をエアースプレーで塗布し、乾燥後の塗膜厚さを20～30μmになるようにした。塗装した試験片の両面には、均一ひずみが得られる中央部で軸方向に直角にナイフ（NTカッターL-500）を用いて長さ20mmの傷を付けた。

4.3 実験方法

実験に用いた腐食疲労試験機は、図4.2に示すようにクランク・ピストン形式の片持式板曲げ疲労試験機に腐食槽を設け、1軸6連型の構造である。その詳細は、48年度の研究報告書を参照されたい。試験片に働く応力は完全拘束平面曲げである。応力繰返し速度は1分間に10回とした。長期防食性能試験では1分間に0.6回とした。

腐食疲労試験は全期間張水と張排水繰返しの2条件で実施した。供試した海水は、ASTM, D-1141-52による人工海水で、40°Cとし、常に空気を吹込み溶存酸素を飽和状態に保った。張排水は原則として、張水を10日、排水を10日として繰返した。

電気防食は、流電陽極用亜鉛を対極とし、北斗電工製PGS-1型ボテンショスタットを用いて定電位法で実施した。照合電極は飽和カロメル電極を用いた。腐食疲労試験および長期防食性能試験に採用した電気防食の設定電位は-1.0V(SCE)とした。

塗膜の劣化特性を評価方法として、塗膜抵抗、自然電極電位、亜鉛の溶出量および陰極分極曲線を測定した。このときの試験片は、20×20mmの測定面以外をエポキシ系樹脂で被覆した。塗膜抵抗は、40°Cの人工海水中で対極を白金として万能ブリッジ（発振器1KHZ）を用いて測定した。塗膜抵抗の測定と同時に自然電極電位および塗膜から溶出する亜鉛量を測定したが、この亜鉛量は所定の時間経過ごとに試験液中の亜鉛イオンを原子吸光法により定量分析を行なって求めた。陰極分極曲線は自動分極測定装置（北斗電工製HA-101型ボテンショスタット）を用いてダイナミックスイープ法で自動記録した。この電位走査速度は50mV/minとした。

4.4 I Z P 塗装鋼の腐食疲労強度に及ぼす電気防食の効果

(1) 疲労試験結果

表 4.2 に全期間張水および張排水の雰囲気で試験した結果を示す。その結果を初期の表面応力と破断繰返し数との関係で図 4.3 に示す。これによると、全期間張水の場合には無塗装鋼でも電気防食だけで十分な防食効果が認められ、また、I Z P 塗装による防食だけでは傷が存在すると、その腐食疲労強度は無塗装鋼より低下することがわかる。一方、張排水の雰囲気では無塗装鋼に電気防食を実施しただけの試験片の疲労強度は、I Z P 塗装に電気防食を併用した試験片および傷を付与しない I Z P 塗装の試験片（無電防）よりもかなり低下する傾向を示している。従って、I Z P 塗装と電気防食の併用は、張排水を繰り返されるバラストタンクの腐食疲労防止対策にも極めて有効であるといえる。

(2) 電位および防食電流の経時変化

上述の疲労試験中における I Z P 塗装試験片について、塗膜自身の陰極防食作用の有効期間を検討するため電位の経時変化を調べた。図 4.4 および図 4.5 にその結果を示す。図 4.4 によると I Z P 塗装鋼は、張水中 20 ~ 30 日間まで陰極防食作用の効果を有していることがわかる。また、図 4.5 からわかるように張水だけの雰囲気よりも張排水の雰囲気の方が陰極防食作用の持続性がある。

図 4.6 および図 4.7 は防食電位を -1.0 v (SCE) に設定したときの電流の経時変化を示す。張水中での無塗装鋼は 100 mA/m² 以下の防食電流密度に低下するのに 30 ~ 50 日要することがわかる。しかし、I Z P 塗装鋼の場合には張水直後から 25 mA/m² 前後の防食電流で安定していることがわかる。従って、張排水の雰囲気では、無塗装鋼は各張水ごとに大きな初期電流が必要となり、その初期電流を抑制するためにも塗膜の効果が大きい。その結果が図 4.7 によく現われている。

4.5 電気防食を併用した I Z P 塗膜の耐久性

(1) 長期防食性能試験結果

I Z P 塗装鋼に -1.0 v (SCE) の電気防食を併用しながら、張排水雰囲気中、応力振幅 10 kg/mm², R = -1, 応力繰返し速度, 0.6 cpm で 560 日間の試験を行なった。その結果、素地金属の腐食は全く認められなかった。塗膜表面の外観状態は、写真 4.1 に示すように試験液の汚れによって銀灰色の塗膜が薄茶色に変化し、また一部には、ごま塩のように黒点が見られた。しかし、そのような塗膜表面の変化は素地からの腐食によって生じたものでないことが塗膜をか性ソーダ溶液で溶解して観察した結果から確認された。

(2) 防食電流の経時変化

上述した防食性能試験中、試験片の防食電流の経時変化を測定した結果を図 4.8 および図 4.9 に示す。I Z P 塗装鋼の防食電流は、最初の張水直後には塗膜中の活性亜鉛のために不要であることがわかる。その後、塗膜中の活性亜鉛の溶出とともに塗膜自身の電位が貴な電位に移行するため電気防食による陰極電流が流れようになる。参考のために、-0.9 v (SCE) に設定した I Z P 塗装鋼と比較して図中に示したが、-0.9 v (SCE) 設定の試験片は -1.0 v (SCE) の試験片に比べて初期の張水時には塗膜中の活性亜鉛が陽極電解されて激しく溶出したため大きな防食電流を必要とした。しかし、張排水 3 サイクル目からはその防食電流密度は逆転して -1.0 v (SCE) 設定の試験片に比べて小さくなっていることがわかる。-0.9 v (SCE) 設定の防食性能は 180 日の試験結果においては -1.0 v (SCE) 設定の防食性能に劣らなかった。しかし、49年度の研究において、無塗装鋼に電気防食を実施した場合の防食電位は -1.0 v (SCE) の設定が最もすぐれた防食性能を示したことから考えると I Z P 塗装鋼に対しても可能な限り -1.0 v (SCE) の電気防食設計が望ましい。

各張水時における防食電流は、張水直後比較的大きな値を示し、その後減衰して定常状態に近づくが、この定常状態での防食電流の経時変化を図 4.10 に示す。これによると -1.0 v (SCE) 設定の防食電流は 11 サイクル目の張水まで増加の傾向を示したが、それ以後増加することなく 560 日経過した時点でも安定していることがわかる。その防

食電流密度は、 $10 \sim 20 \text{ mA/m}^2$ であった。

(3) 塗膜抵抗の経時変化

図 4.1.1 は IZP 塗装鋼を 40°C の人工海水中に浸漬したときの塗膜中の活性亜鉛の溶出量、電位および塗膜抵抗の経時変化を測定した結果を示す。塗膜中の亜鉛の溶出は、浸漬直後から約 10 日まで激しく、その後ゆるやかになる。電位は亜鉛の溶出に伴って貴な電位に移行し、それとともに塗膜抵抗は増大している。そこで上述の 560 日の防食性能試験を実施した試験後の塗膜抵抗および同様の試験で 189 日試験した試験後の塗膜抵抗を測定した。その結果を表 4.3 に示す。この結果によると、塗膜抵抗は 560 日試験後には浸漬初期の 7.5 から $444 \Omega \cdot \text{cm}^2$ に増加した。塗膜抵抗と分極抵抗を合成した抵抗、すなわち電気防食における陰極面上の単位面積についての抵抗 r_0 を、図 4.1.2 に示す陰極分極曲線の変化から計算すると、IZP 塗装鋼について 560 日の防食性能試験を行なった試片では、

$$r_0 = 0.52 / 0.256 \times 10^{-4} = 2.03 \times 10^4 \Omega \cdot \text{cm}^2$$

3ヶ月屋外ばくろした IZP 塗装鋼について 336 日防食性能試験を行なった後の試片では、

$$r_0 = 0.47 / 0.094 \times 10^{-4} = 5.0 \times 10^4 \Omega \cdot \text{cm}^2$$

無塗装鋼の分極抵抗は

$$r_0 = 0.32 / 3.372 \times 10^{-4} = 9.49 \times 10^2 \Omega \cdot \text{cm}^2$$

となる。この結果から IZP 塗膜は、塗膜自身の陰極防食効果をなくした後、電気防食時の陰極面上の抵抗を 21~53 倍増加する効果を示した。なお、長期防食性能試験時の定常状態における IZP 塗装鋼の -1.0 V 設定陰極面上の抵抗は、図 4.1.0 から求めると約 $3 \times 10^3 \Omega \cdot \text{cm}^2$ であった。

(4) 塗膜構造の変化

写真 4.2 に 560 日の防食性能試験前後の塗膜断面の顕微鏡組織を示す。試験前の塗膜中には粒状の亜鉛粒子が多くみられるが、試験後の塗膜中には亜鉛粒子の存在は認められなかった。しかし、亜鉛粒子が消失した塗膜においても空孔らしきものがなく強固に付着していることがわかる。

4.6 考察

以上の結果から IZP 塗装に電気防食を併用すれば、すぐれた防食効果を示し、かつ腐食疲労の防止対策にも極めて有効であることが明らかになった。その防食機構は次のようにいえる。すなわち、初期の張水時には IZP 塗膜自身の陰極防食効果によって防食を行なうために非塗装材の電気防食に発生する過大電流を必要とせず、その後、塗膜自身は塗膜中の活性亜鉛粒子が溶出するとともに腐食生成物が形成されて貴の電位に移行し、陰極防食効果を失なうがそれとともに皮膜抵抗による防食効果を生じるようになり、従って電気防食は非塗装材に比べてごくわずかな防食電流 ($10 \sim 20 \text{ mA/m}^2$) で十分な防食効果を上げ得ることがわかった。

Pass と Meason の研究においても、シンクリッヂペイントは浸漬初期には陰極防食による防食効果を生じ、その後腐食生成物が塗膜中に形成されるとともに皮膜抵抗による防食効果を生じることを明らかにしている。Labe renz の研究⁴⁾によると、シンクリッヂ塗膜は見掛けの亜鉛粒子の消費による防食作用のみでなく、そのシンクリッヂペイントの組成によっては塗膜表面の亜鉛の腐食生成物が塗膜内に沈着して半透過性膜を形成するため未反応の亜鉛粒子が塗膜内に残存し、この亜鉛が長期間陰極防食効果をもたらすことが可能であることを示している。また、佐藤氏らは、シンクリッヂ塗膜中の亜鉛が有效地に作用している期間の目安に -800 mV の電位の持続日数を基準としてシンクリッヂ塗膜の防食性を比較すると、①電位の持続日数の長いもの。②電位の持続日数は短いが交流抵抗の増加の著しいもの。③電位の持続日数⁵⁾が短く、交流抵抗の増加も認められないものの順で防食性がすぐれていることを明らかにしている。

電気防食を併用した IZP 塗膜は、上述したように亜鉛粒子の消費後皮膜抵抗による防食効果を示すため、その耐久性はかなり長期間期待できるものと推察される。事実、560 日の試験結果では完全な防食性能を示した。また、昭和 47 年に就航した「あどりあ丸」および「あらふら丸」の海水積込専用 3 ウィングタンクに IZP 塗装（素材時）と電気防

食の併用が施工されているが、その防食状態について4年目の調査結果によると、防食効果は十分認められ、防食亜鉛の
6)
寿命延長にも十分期待できることが明らかにされている。

4.7 まとめ

無機ジンクプライマ塗装と電気防食の併用が腐食疲労強度を改善させる効果を知るために全期間張水ならびに張排水霧
囲気で疲労試験を実施した。また、この防食法における塗膜の耐久性を知るために560日間の防食性能試験を行なった。
それらの結果を要約すると次のようになる。

- (1) 腐食疲労強度に対する電気防食単独の効果は、全期間張水霧囲気中では極めて有効であるが、張排水霧囲気中ではそ
の効果が半減された。
- (2) 無機ジンクプライマ塗装に電気防食を併用すれば、張排水霧囲気中での腐食疲労の防止にも極めて有効であった。
- (3) この併用による防食法は、560日の防食性能試験で完全な防食効果を示した。また、実船における4年目の追せき
調査から十分な防食効果が確認された。従って、その塗膜の耐久性は5年以上期待できるものと思われる。
- (4) 防食電位は約-1.0 v (SCE) のとき最も効果的であった。
- (5) 電気防食を併用した無機ジンクプライマ塗膜は初期の張水時には塗膜自身の陰極防食効果によって非塗装材のときに
必要な電気防食の過大電流を抑制し、塗膜中の亜鉛粒子の消費後には皮膜抵抗による防食効果を生じ、従って電気防食
はわずかな防食電流 ($1.0 \sim 2.0 \text{ mA}/\text{m}^2$) で腐食を抑制した。
- (6) 塗膜中の亜鉛粒子が消費した塗膜抵抗はインピーダンス測定法で約 $4.40 \Omega \cdot \text{cm}^2$ を示した。この場合の塗膜抵抗と分
極抵抗を合成した抵抗は陰極分極曲線から約 $2 \times 10^4 \Omega \cdot \text{cm}^2$ で、非塗装材の約21倍であった。なお、-1.0 v (S
CE) 設定した無機ジンクプライマ塗装材の定常状態における合成抵抗は約 $3 \times 10^5 \Omega \cdot \text{cm}^2$ であった。

参考文献

- 1) 日本造船研究協会：第140研究部会48年度報告書，研究資料No.201，P56（昭49.3）
- 2) 日本造船研究協会：第140研究部会49年度報告書，研究資料No.222，P53（昭50.3）
- 3) A. Pass & J.E. Meason : Official Digest, 33, 506 (1961)
- 4) A. Laberenz : Farbe & Lack, 68, 682, 765, 859 (1962)
- 5) 佐藤，橋本：鉄道技術研究所速報，No.67～95（1965）
- 6) 三井造船：本報告書付録

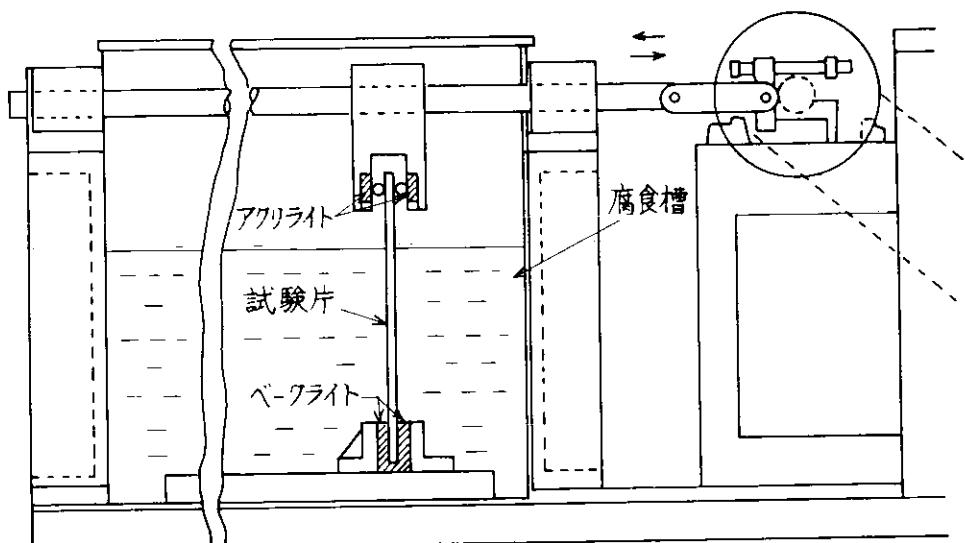


図 4.2 試験装置

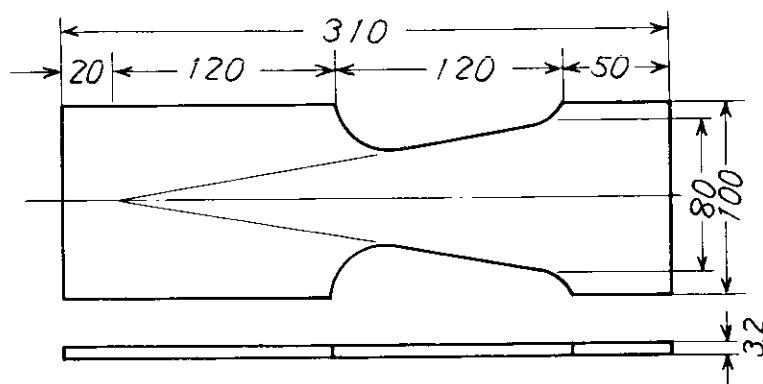


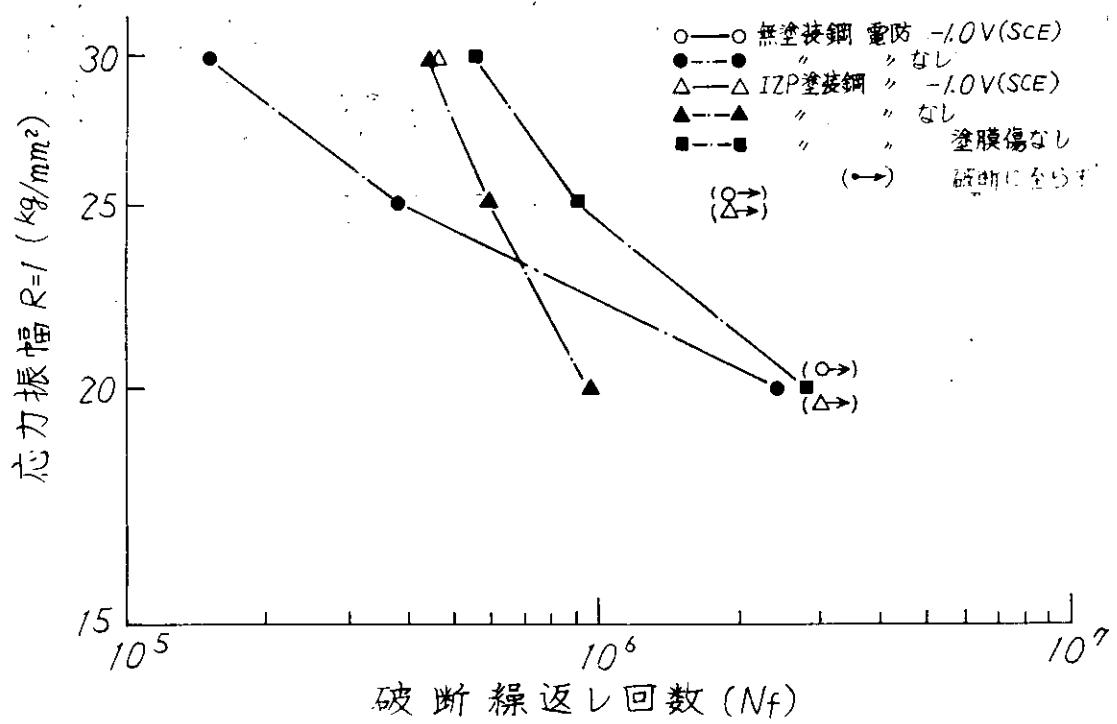
図 4.1 試験片の形状寸法

表 4.1 供試材

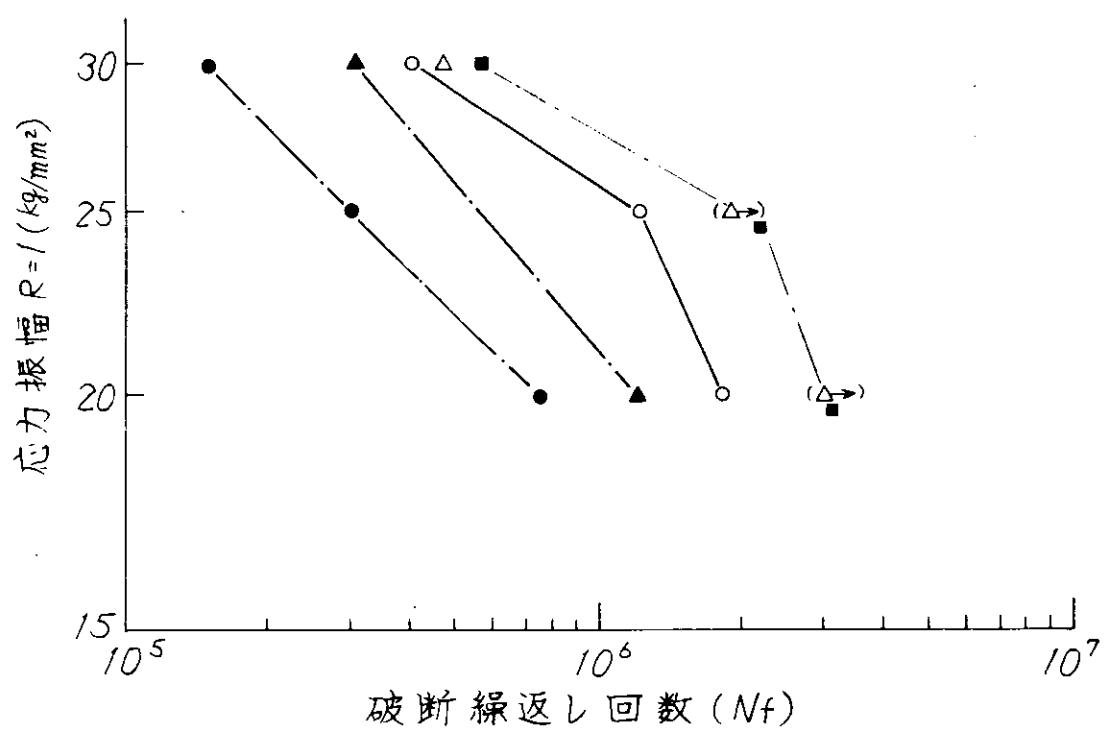
鋼種	板厚 (mm)	化 学 成 分 (%)					機 械 的 性 質		
		C	Si	Mn	P	S	降伏点 (kg/mm ²)	引張強さ (kg/mm ²)	伸び (%)
SS41	3.2	0.14	0.02 以下	0.66	0.019	0.016	33.5	46.7	36.4

表 4.2 疲勞試驗結果

試験片 種類	張排水試験				連続浸漬試験				試験条件				試験結果				
	電 防 電 力	應 力	塗膜傷	破断繰返し回数 Nf	破断時間	割れ位置	電 防 電 力	應 力	塗膜傷	破断繰返し回数 Nf	破断時間	試験結果	電 防 電 力	應 力	塗膜傷	破断時間	
無塗装鋼	-1.0 V	20 kg/mm ²	—	1,807,450	121	固定端端部	-1.0 V	20 kg/mm ²	—	—	—	破裂せり	225以上	—	—	—	
無塗装鋼	なし	"	—	747,900	51	固定端から10mm	なし	"	—	—	—	破裂せり	3.2 × 10 ⁶				
I Z P 塗装鋼	-1.0 V	"	ナイフカット	3.2 × 10 ⁶	225	以上	-1.0 V	"	ナイフカット	3.2 × 10 ⁶	225	破裂せり	225以上	—	—	—	
I Z P 塗装鋼	なし	"	"	1208,500	84	ナイフカット	なし	"	"	ナイフカット	3.2 × 10 ⁶	225	破裂せり	225以上	—	—	—
無塗装鋼	なし	"	なし	3,135,000	223	均一応力面の 工部	なし	"	なし	なし	なし	破裂せり	2.2 × 10 ⁶				
I Z P 塗装鋼	-1.0 V	25 kg/mm ²	—	1213,000	87	均一応力面の 上部	-1.0 V	25 kg/mm ²	—	—	—	破裂せり	156以上	—	—	—	
無塗装鋼	なし	"	—	297,835	24	固定端から10mm	なし	"	—"	—"	—"	—"	380,000	29	—"	—"	
I Z P 塗装鋼	-1.0 V	"	ナイフカット	2.2 × 10 ⁶	156	以上	-1.0 V	"	ナイフカット	2.2 × 10 ⁶	156以上	破裂せり	156以上	—	—	—	
無塗装鋼	なし	"	"	—	—	—	なし	"	—"	—"	—"	—"	585,140	43	—"	—"	
I Z P 塗装鋼	なし	"	なし	2,199,000	155	固定端から10mm	なし	"	—"	—"	—"	—"	899,600	65	—"	—"	
無塗装鋼	-1.0 V	30 kg/mm ²	—	407,250	28	固定端から10mm	-1.0 V	30 kg/mm ²	—	—	—	—"	—"	—"	—"	—"	
I Z P 塗装鋼	なし	"	—	150,000	11	25~35 mm	なし	"	—"	—"	—"	—"	150,000	11	—"	—"	
無塗装鋼	-1.0 V	"	ナイフカット	461,330	32	ナイフカット	-1.0 V	"	ナイフカット	450,410	31	—"	—"	—"	—"	—"	
無塗装鋼	なし	"	"	306,388	21	—"	なし	"	—"	—"	—"	—"	446,610	31	—"	—"	
無塗装鋼	なし	"	なし	561,400	39	固定端から10mm	なし	"	—"	—"	—"	—"	557,500	39	—"	—"	



a) 連続浸漬試験



b) 漸排水試験

図 4.3 S-N曲線

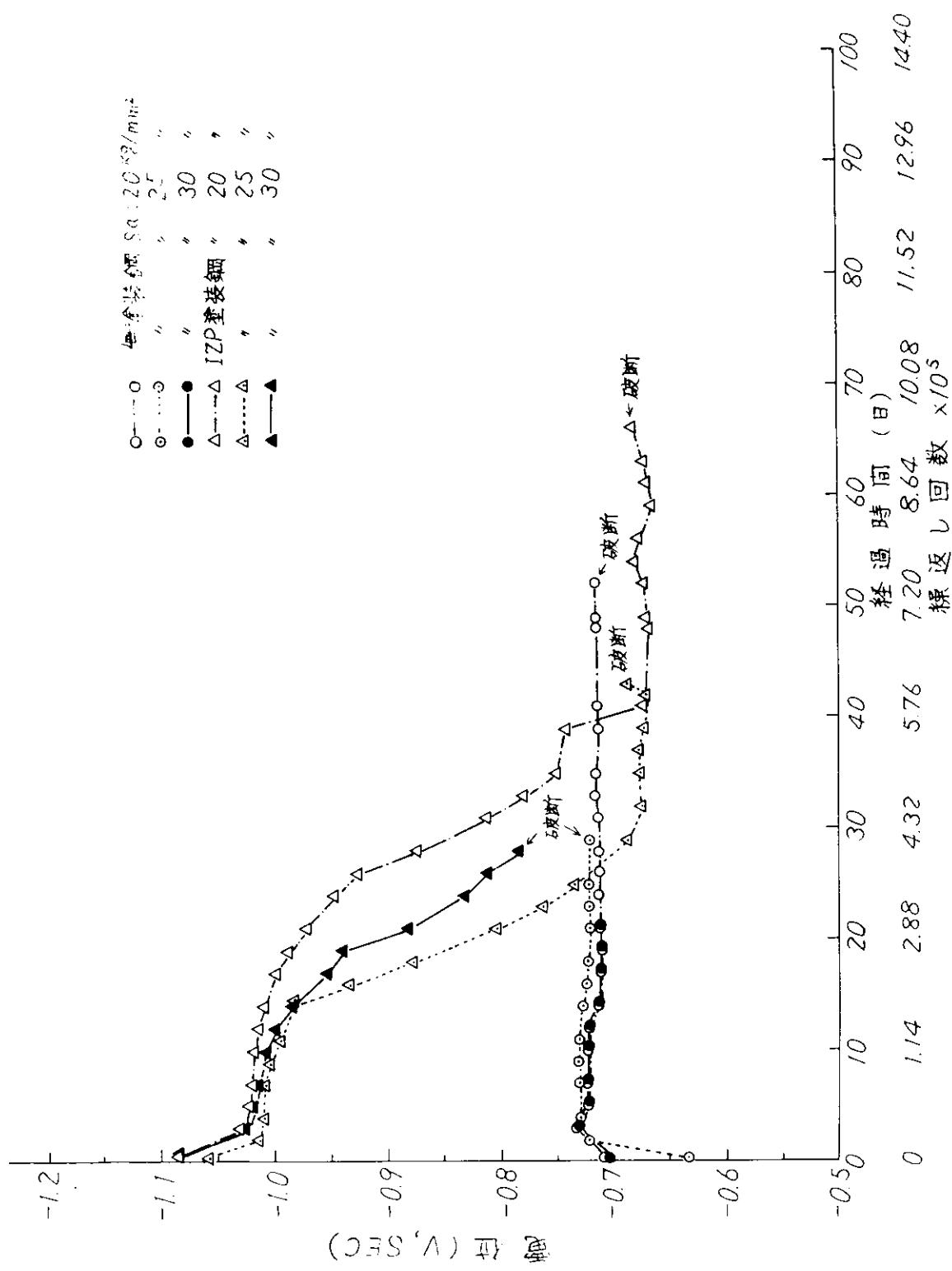


図 4.4 腐食疲劳試験中の試験片の位置（連続疲労、電防なし）

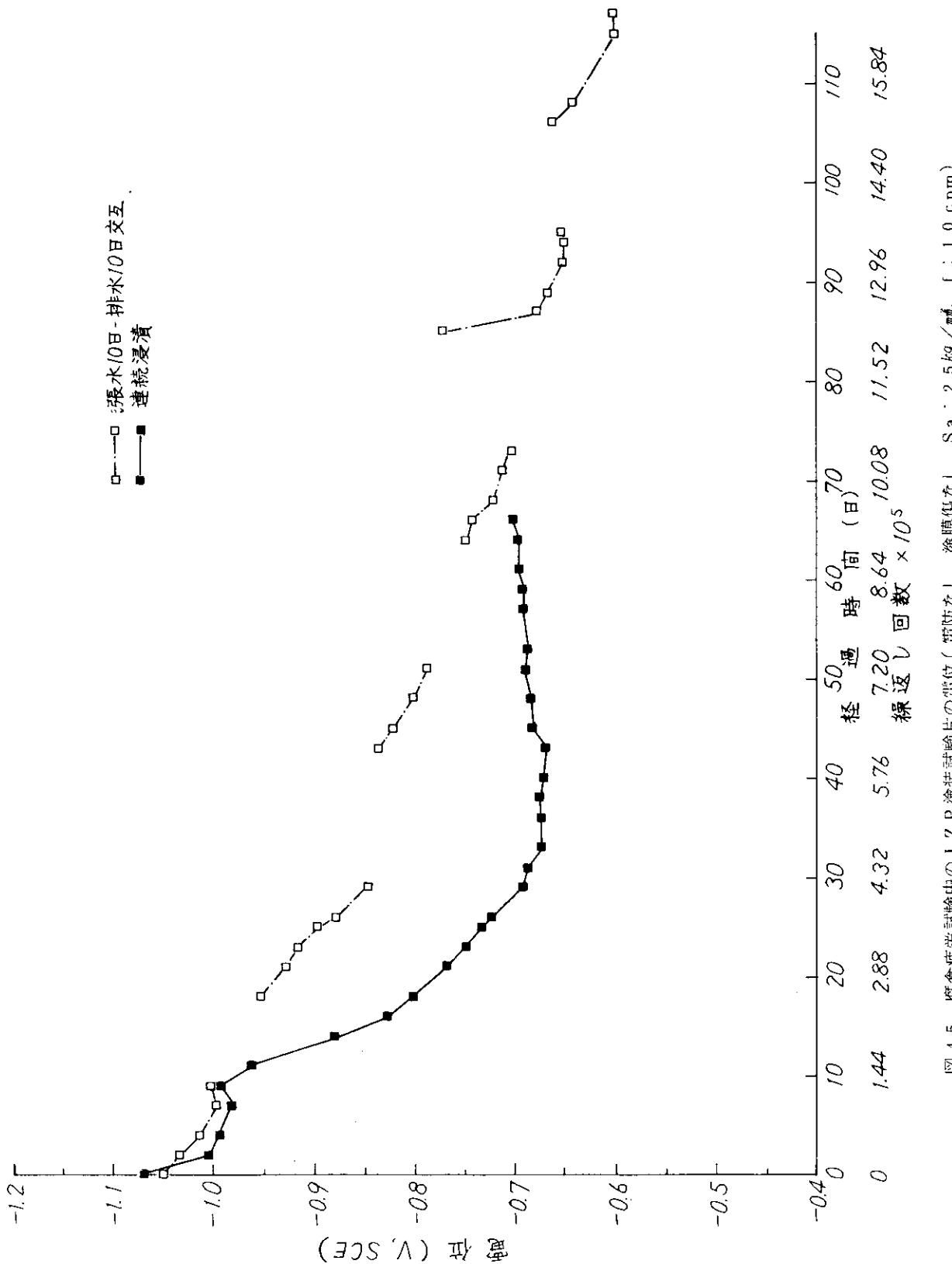


図 4.5 腐食疲労試験中の ZP 塗装試験片の電位(電防なし, 塗膜傷なし, $S_a : 2.5 \text{ kg/mm}^2$, $t : 10 \text{ cpm}$)

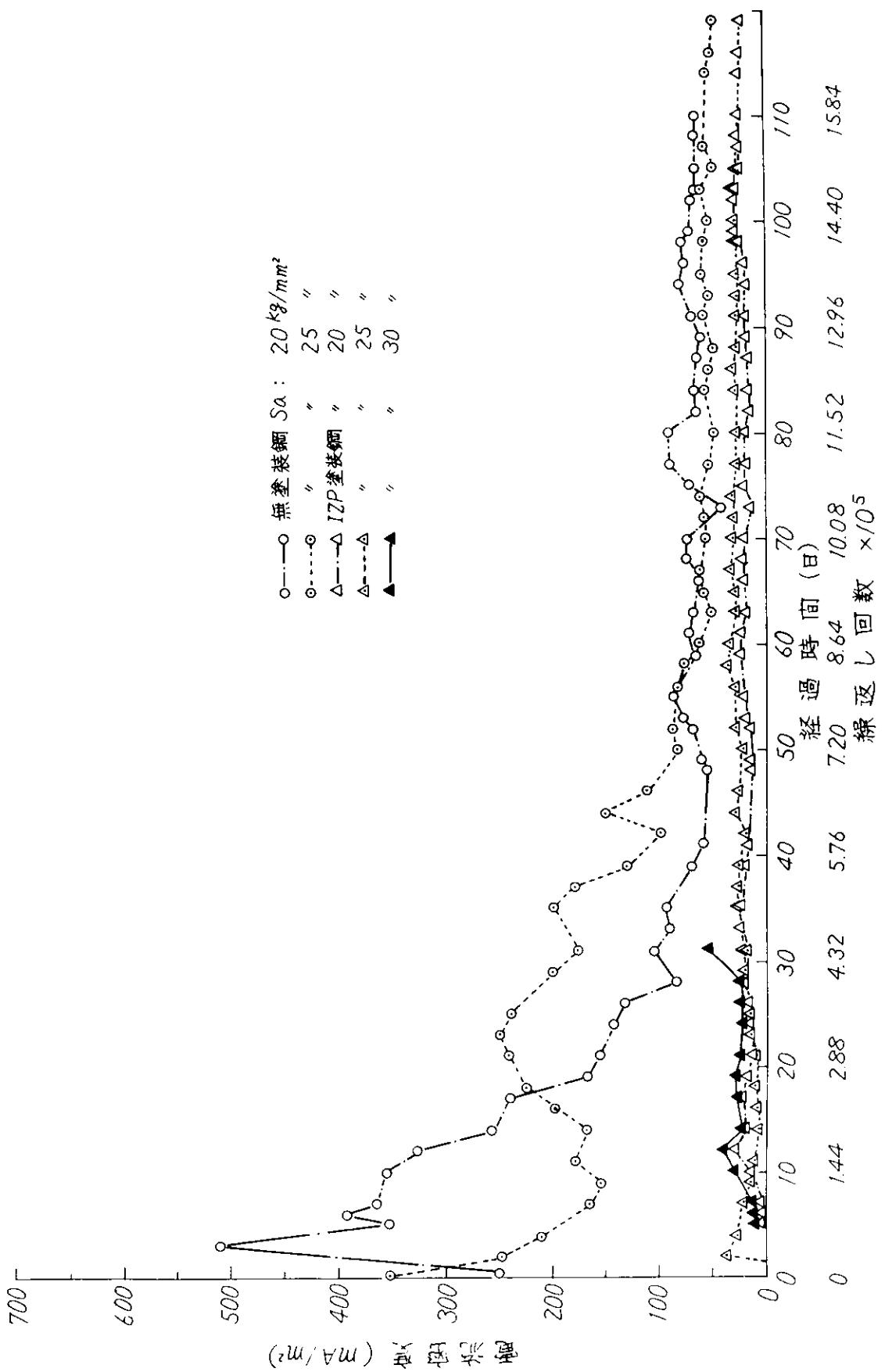


図4.6 腐食疲労試験中の試験片の防食比流密度（重繰投薬、電圧—1.0 V）

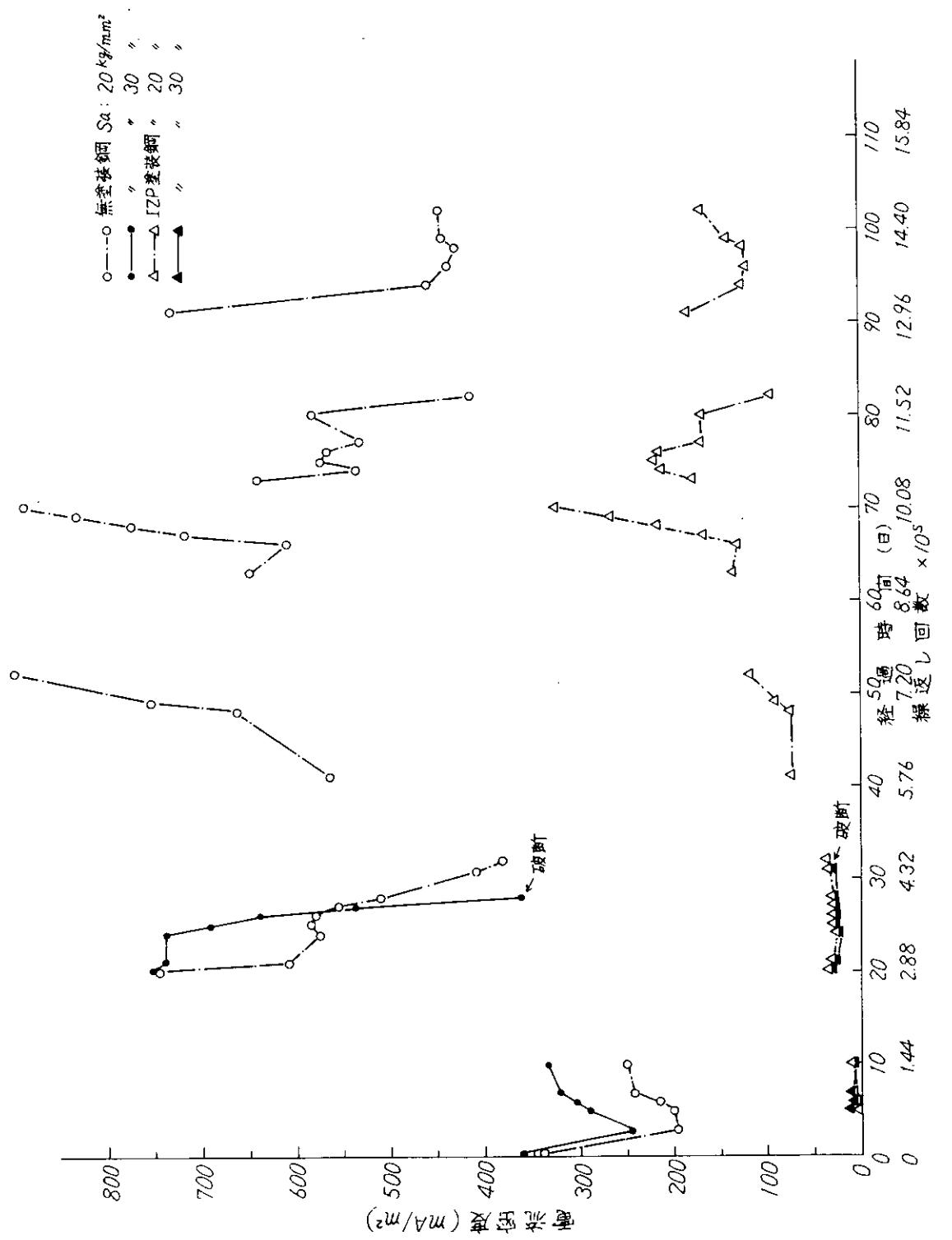
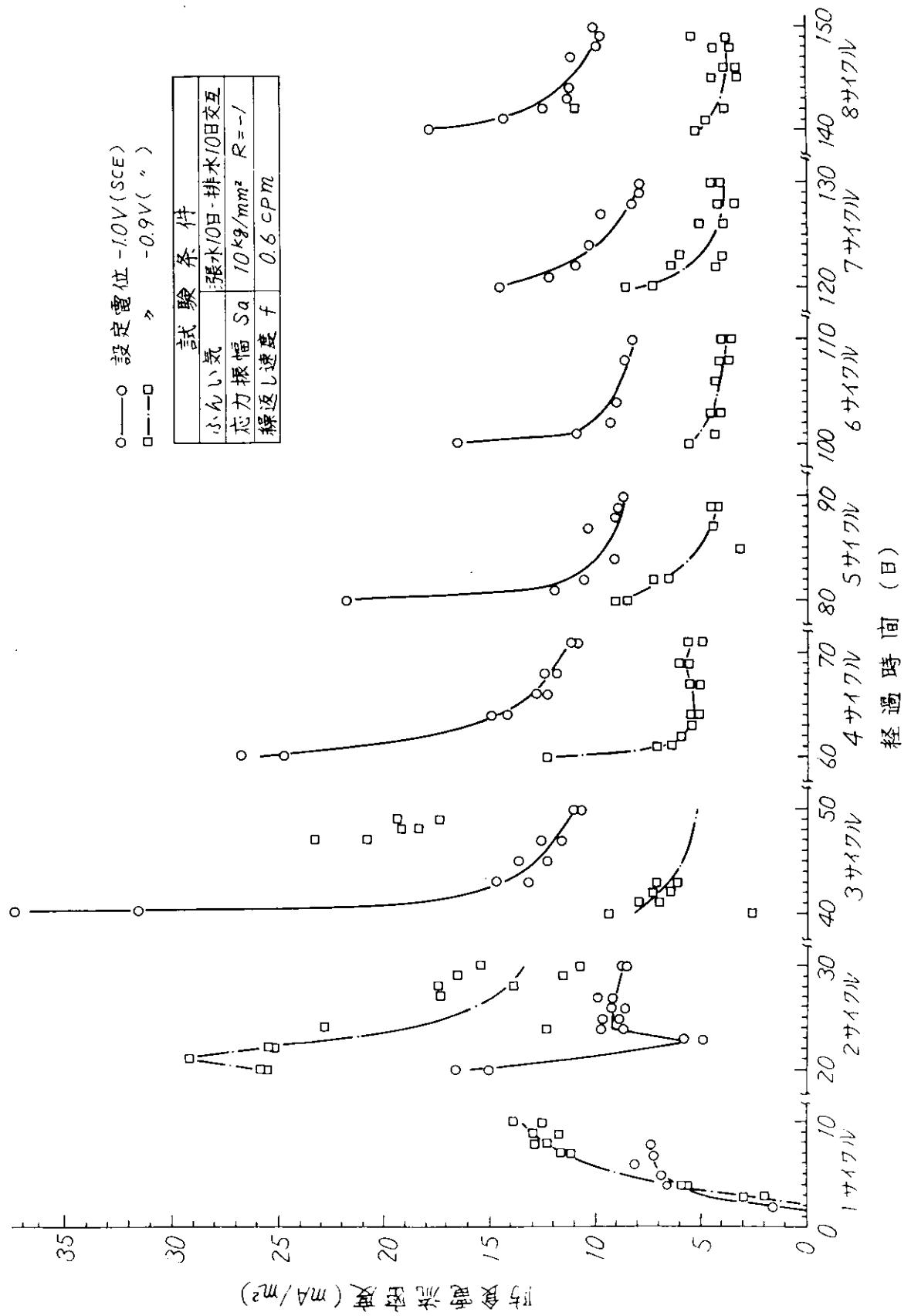


図 4.7 飽食疲労試験中の試験片の防食電流密度（張排水繰返し、電防-1.0 v）



[図4.8] Zn-P塗装鋼の防食電流密度の経時変化(期間0~150日)

試験条件	
設定電位	-1.0 V SCE
ふんい気	淡水(0日-排水10日交互)
応力振幅 Sa	10 kg/mm ² R = -1
繰返し速度 f	0.6 cpm

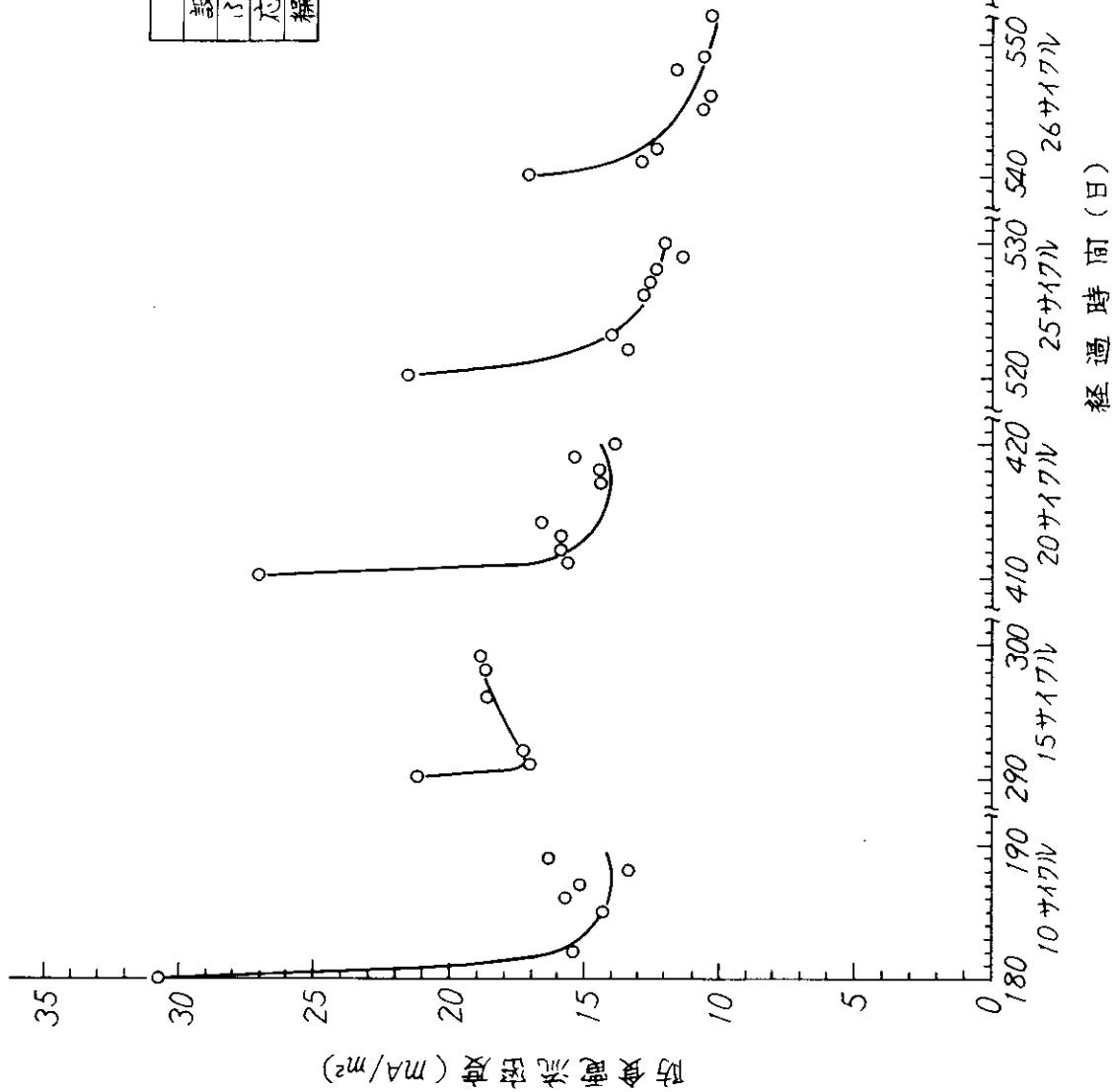


図 4.9 IZP塗装鋼の防食電流密度の変化(期間 150～560日)

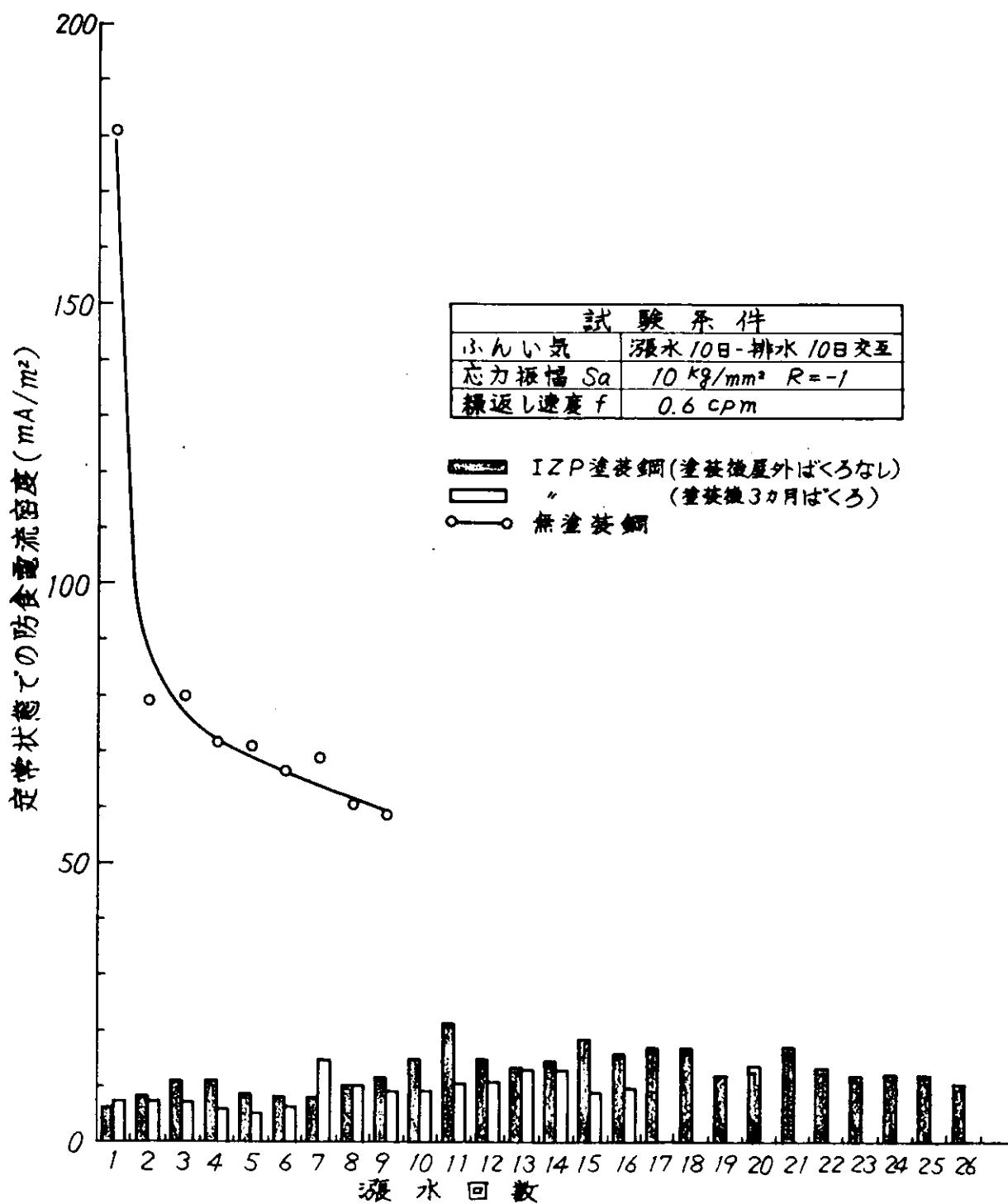


図 4.1.0 各張水時における-1.0 V (SCE) 設定の定常状態での防食電流密度

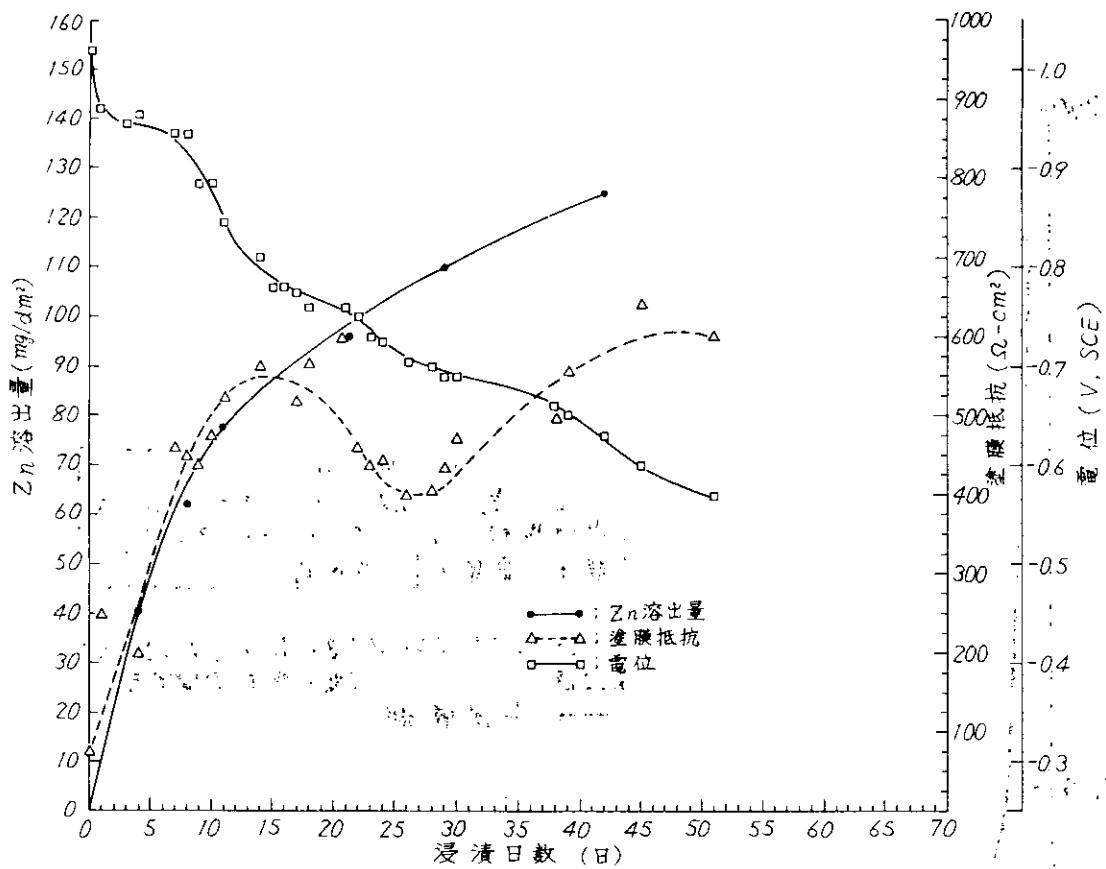


図 4.1.1 I Z P 塗膜の劣化特性

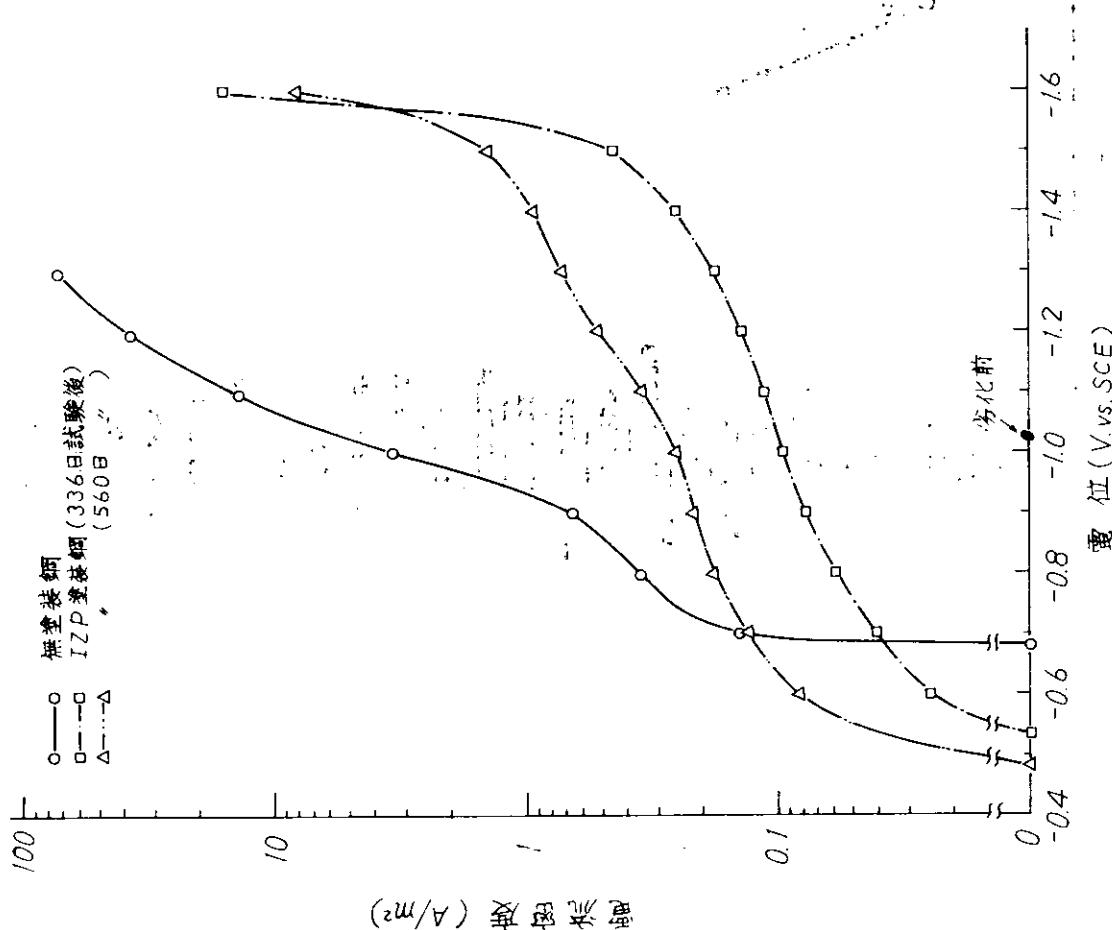


図 4.1.2 塗膜劣化後の陰極分極曲線

表 4.3 塗膜抵抗測定結果

種類	塗膜抵抗 ($\Omega - \text{cm}^2$)
5 6 0 日後の試験片	4 4 4
3 3 6 日後の試験片※	7 1 4
1 8 9 日後の試験片	3 7 9
試験前の試験片	7 5

(注) ※印の試験片は3カ月屋外ばくろの試験片

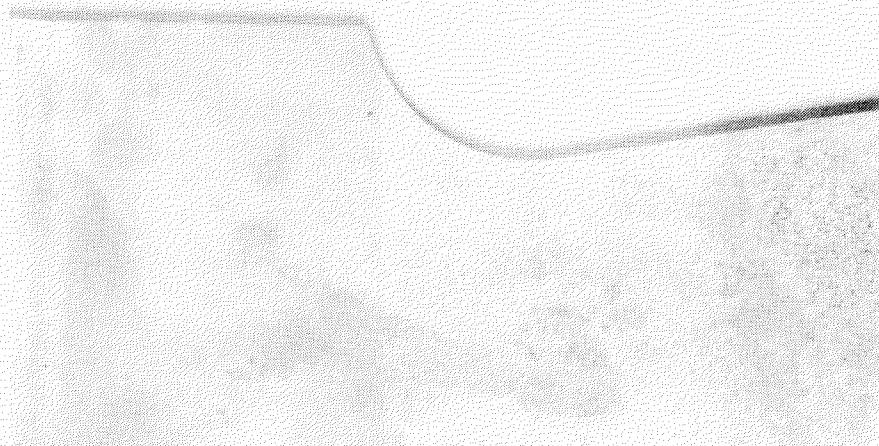


写真 4.1 5 6 0 日防食性能試験後の表面状態

写真 4.2 漆膜断面の顕微鏡写真 $\times 400$

560日試験後



前
試験



5. エレクトロコーティング(EC)の防食効果

5.1 目的

これまでの研究はエレクトロコーティング(EC)の付着による防食効果を定電位又は定電流条件下で種々な環境を与えて調査してきた。しかし、実船のバラストタンクを防食するのは定電位、定電流条件下ではなく動的な流電防食である。そこで最終年度の研究ではこれまでの実験室試験(定電位・定電流試験)と実船環境(流電防食)との関係を調査した。

5.2 実験方法

小型タンク(4基)の内壁を陰極とし 1基当たりの Zn 陽極の数量を変えて取付け 2週間間隔にて張排水を繰り返し流電防食を実施した。同時にタンク内に試験片を取付けて腐食減量等を調査した。その他に比較のため無防食状態のタンクを 1基加えた。また電位の測定は海水塩化銀電極(Ag / AgCl)にて実施した。

5.3 実験条件

項目	条件
実験期間	S 5.1.4.1.6 ~ S 5.1.1.1.2.4 (222日間)
張水率	50% (満水 2週間, 空槽 2週間)
使用海水	合成海水 JIS・K-5631
陰極	小型タンク(内壁 1.8 m ² / 1基)・試験片(露出面積 4.0 cm ² / 1枚)
陽極	Zn 丸棒(300)
計画電流密度※	50, 100, 300, 500 mA / m ² 及び Blank

※ 計画電流密度 : タンク内電位が平均 -900 mV とした場合に発生する電流を基礎にして算出した電流密度

5.4 調査項目

図 5.1 に示す。

5.5 実験結果

(1) 陰極電位と通電電流

結果を図 5.2 ~ 5.5 に示す。試験片の電位は計画電流密度に比例して單方向への変化が大きい。第 1 回張水から第 3 回張水迄の期間は、計画電流密度 50 mA / m² の試験片も含めてすべての試験片が張水後すぐに防食電位に達しているが第 4 回張水時から 50 mA / m² 試験片の電位上昇が極端に悪くなってしまっておりこの傾向はその後回復されない。その他の 100, 300, 500 mA / m² を与えた各試験片の電位上昇傾向及びその程度は第 1 回から第 8 回まで特に大きな変化はみられなかった。一方各計画電流での実測通電電流は陰極電位の上昇と対応し、50 mA / m² 試験片では第 4 回張水以後通電電流が他の電流密度のものに比し最大を示している。

(2) 試験片の分極特性

結果を図 5.6 ~ 図 5.8 に示す。5.4 日目, 13.8 日目及び 22.2 日目の各試験片分極特性から -0.9 V に対応する電流密度を比較すると表 5.1 のごとくなる。

表 5.1 - 0.9 V に 対応する 所要電流密度

計画電流密度 目 数 (mA/m²)	0	50	100	300	500
54日目	4.8 A/m²	0.25 A/m²	0.17 A/m²	0.12 A/m²	0.05 A/m²
138日目	8.0 "	0.9 "	0.35 "	0.15 "	0.07 "
222日目	4.2 "	0.65 "	0.1 "	0.05 "	0.02 "

222日目の値は138日目の値に比し少く現われているが、この傾向は腐食量の結果とも相似している。これは同一試験片を経時的に測定していないため別々の試験片の試験状態に左右されたものと考えられる。しかし、計画電流密度の高いもの程経過日数にかかわらず良好なエレクトロコーティングが生成することが一般的傾向として認められる。

(3) 通電電気量

Zn陽極消耗量より求めた全通電電気量(表5.2)は計画電流密度100mA/m²の場合は50mA/m²よりも少く、500mA/m²の場合は300mA/m²よりも少い。この両者の比較から見ると、計画電流密度の高い場合には通電電流が少なくなる傾向を示した。

表 5.2 通電電気量

計画電流密度	実測電流密度	通電電気量	Zn消耗量
50mA/m²	18.08mA/m²	47.72A·H/m²	112.8g
100 "	17.06 "	45.05 "	106.5 "
300 "	32.45 "	85.67 "	202.5 "
500mA/m²	28.14mA/m²	74.29A·H/m²	175.6g

通電時間 2640Hrs 防食面積 1.84m²(1~8サイクルの平均)

$$\text{通電電気量 (A·H/m²)} = \frac{\text{Zn消耗量 (kg)} \times 780 \text{A·H/m²}}{\text{防食面積 (m²)}}$$

$$\text{実測電流密度 (mA/m²)} = \frac{\text{通電電気量 (A·H/m²)}}{\text{通電時間 (H)}} \times 1000$$

(4) 防食状況

結果を図5.9~図5.11に示した。計画電流密度300mA/m²、500mA/m²では防食率90%近く表面状況もほぼ同様で、赤さびの発錆もみられなかった。計画電流密度100mA/m²では初期の防食率が低下するが5サイクル目頃より前記高電流密度域のものにはほぼ等しい防食率を示した。しかし、表面状況は前2種のものに比し赤さびの発錆も多く電流密度としてはやや不足しているように思われる。計画電流密度50mA/m²のものでは電位変化、防食率からみても電流密度不足が大きいことがわかる。

5.6 まとめ

本試験では小型タンクを陰極として用いたため実船のタンクにみられるごとく応力付加はない条件下の試験となっている。この条件下でえられた結果をまとめると以下のとくとなる。

- (1) 計画電流密度が50mA/m²程度と低いと張水初期に流れる防食電流が不足するため、充分なエレクトロコーティングが陰極面に形成されず、そのため張排水を繰り返す毎に防食電流は増加するが、防食状況は改善されない。
- (2) 計画電流密度を充分高くすれば、張水中の分極速度を高めることに有効である。これによつて実測防食電流密度(平均)を低下させ防食効果を高めると同時に陽極の消耗を少くするには200mA/m²程度(計画電流密度)の高い電流

密度が必要と思われる。

従って平均電流密度は少く、初期電流密度が大きくなるように陽極の形状等を考える必要がある。

以上のような事が今回の試験から考えられる。しかし、実船のタンク内では船体とその周囲の環境が実験室試験と違い動的な関係となるので、実船に応用するには更に実船試験をする必要がある。

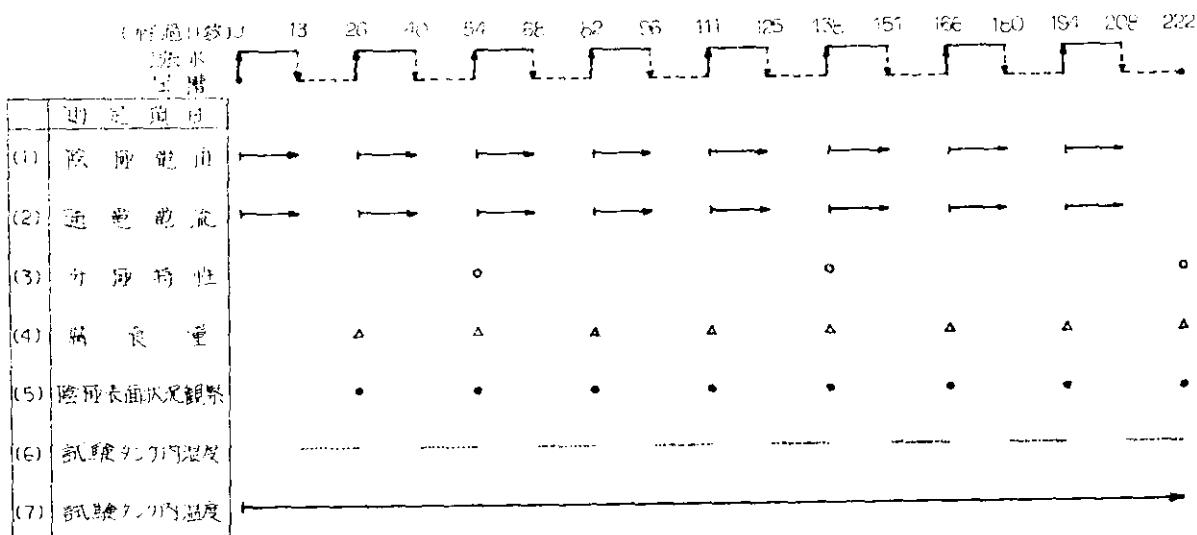


図 5.1 実験日程及び測定項目

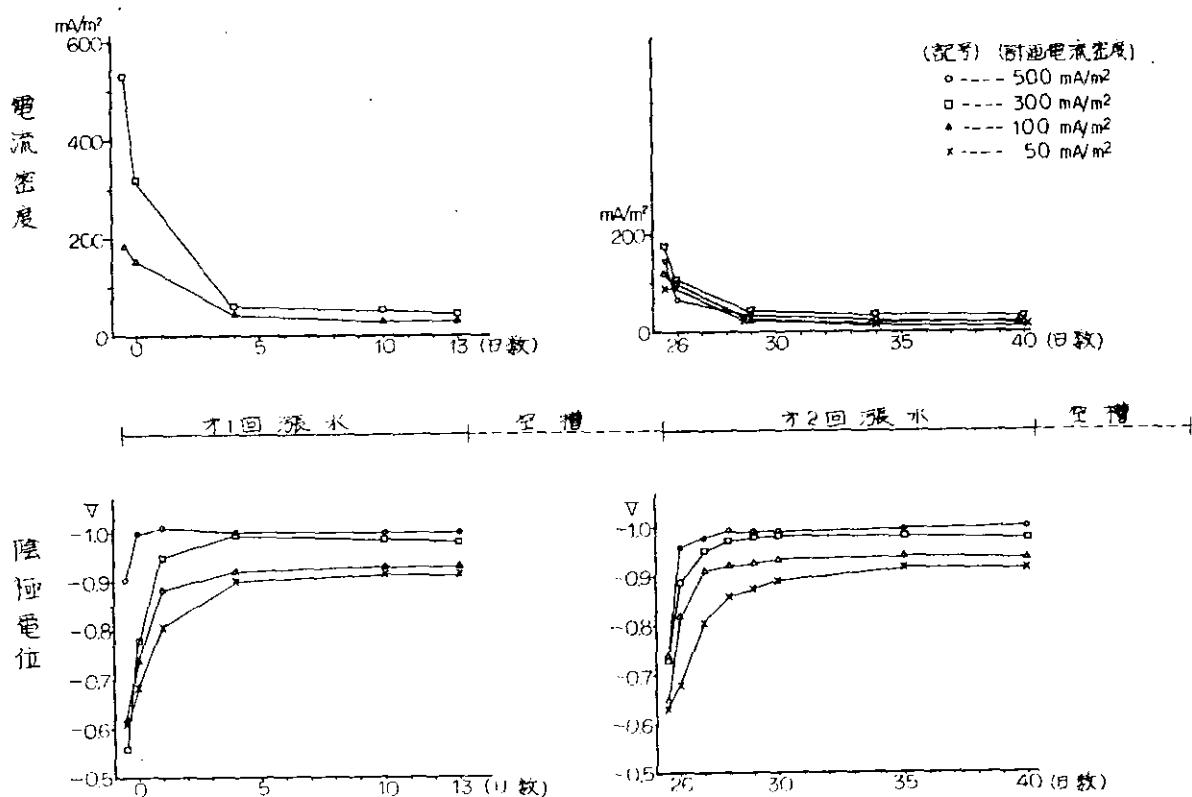


図 5.2 電極電位・電流密度の変化 (A g / A g O₂ 基準)

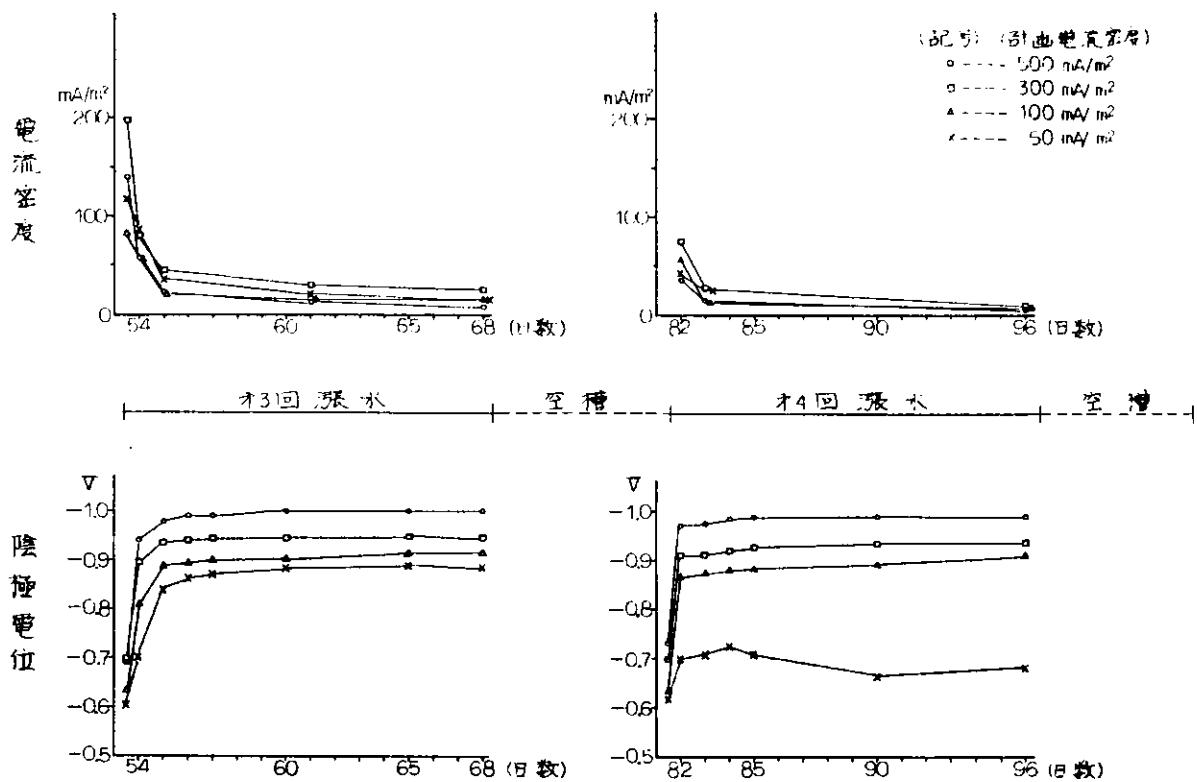


図 5.3 陰極電位・電流密度の変化 (A g / A g C L基準)

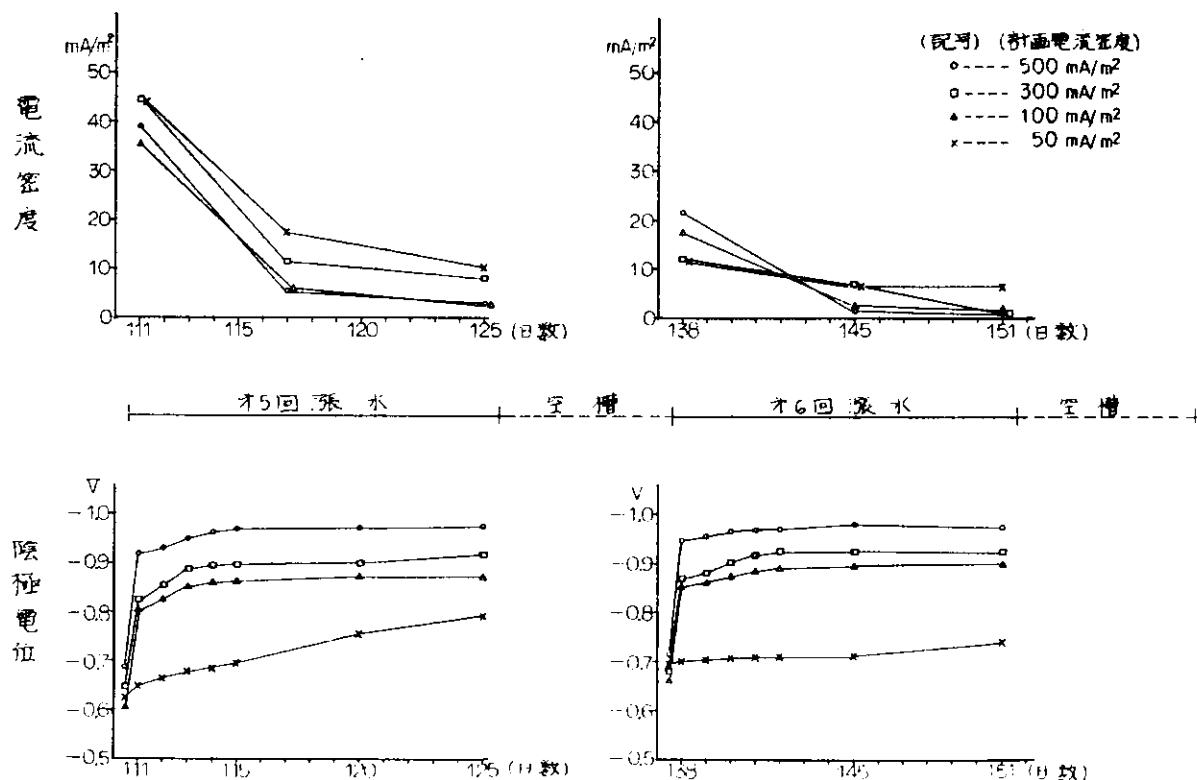


図 5.4 陰極電位・電流密度の変化 (A g / A g C L基準)

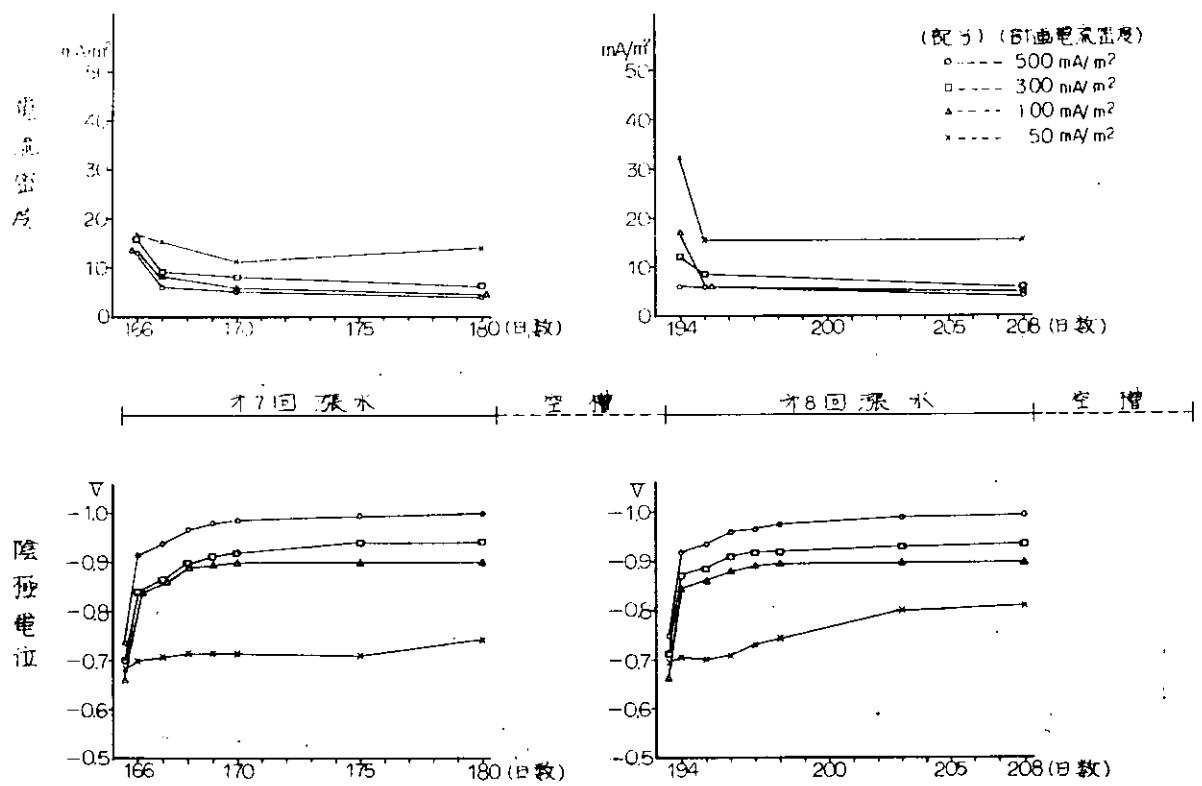


図 5.5 陰極電位・電流密度の変化 (Ag / AgCl 基準)

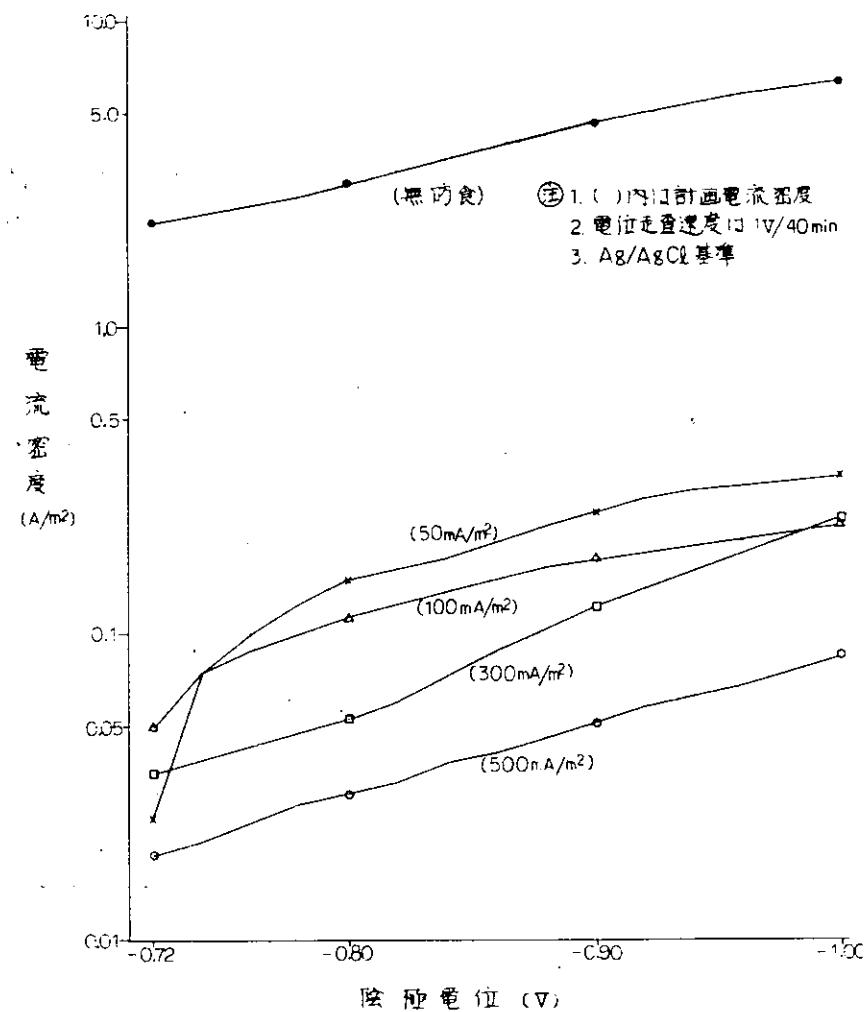


図 5.6 陰極電位と電流密度の関係 (54日経過後)

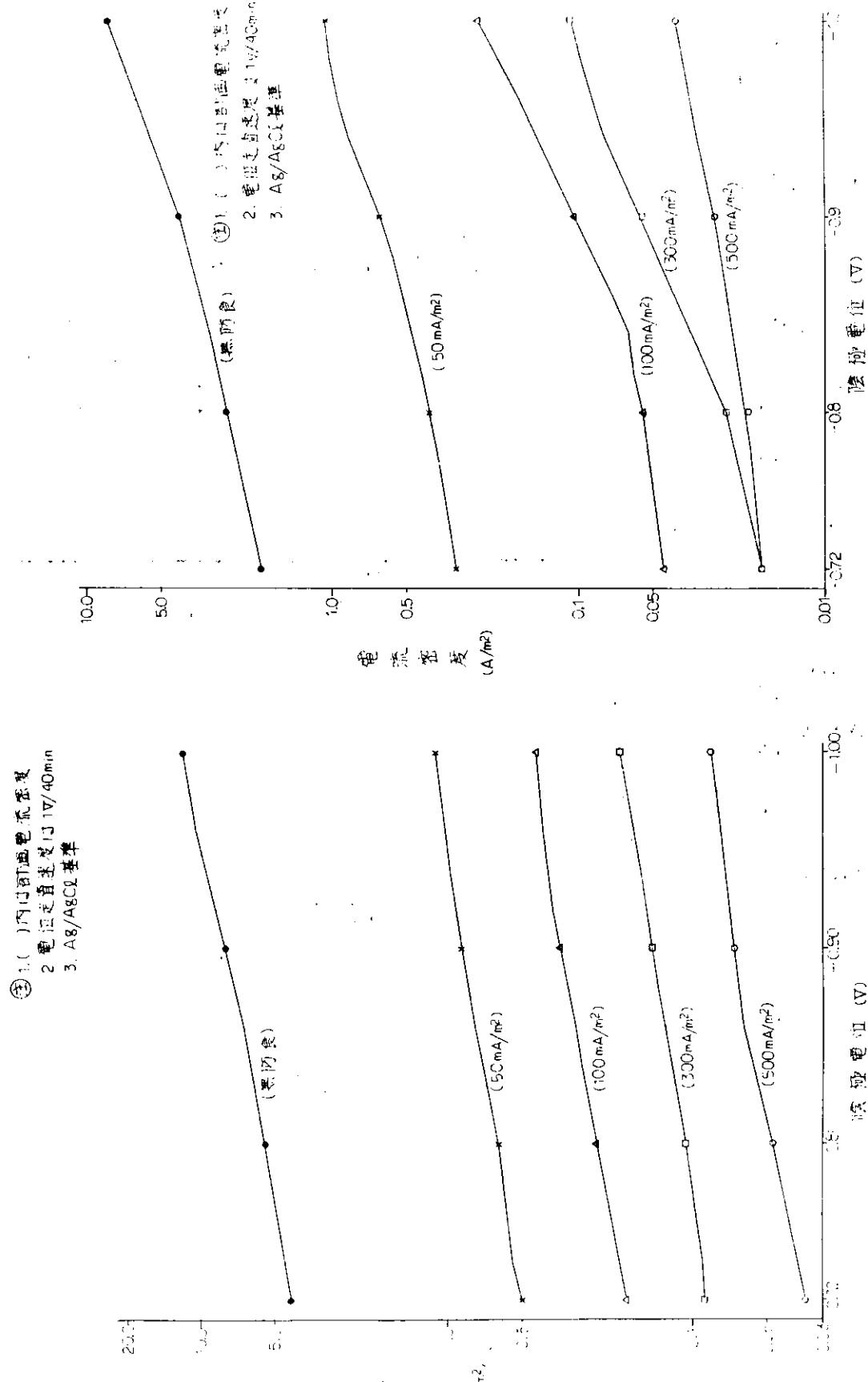


図 5.7 防錆電位と電流密度の関係(138日経過後)

図 5.8 防錆電位と電流密度の関係(222日経過後)

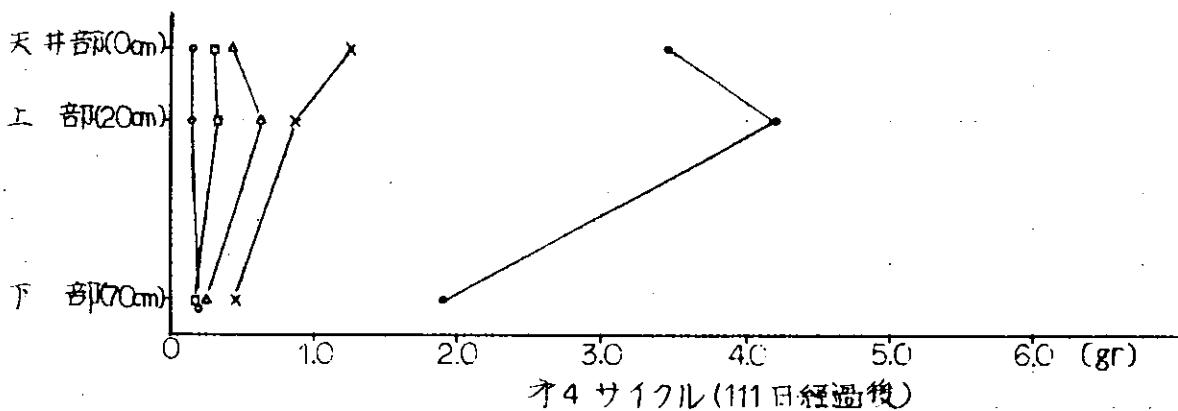
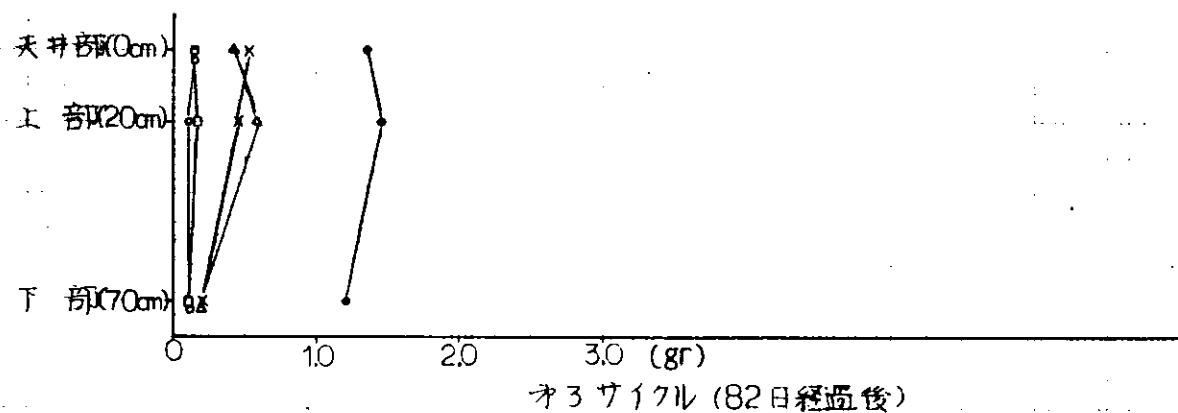
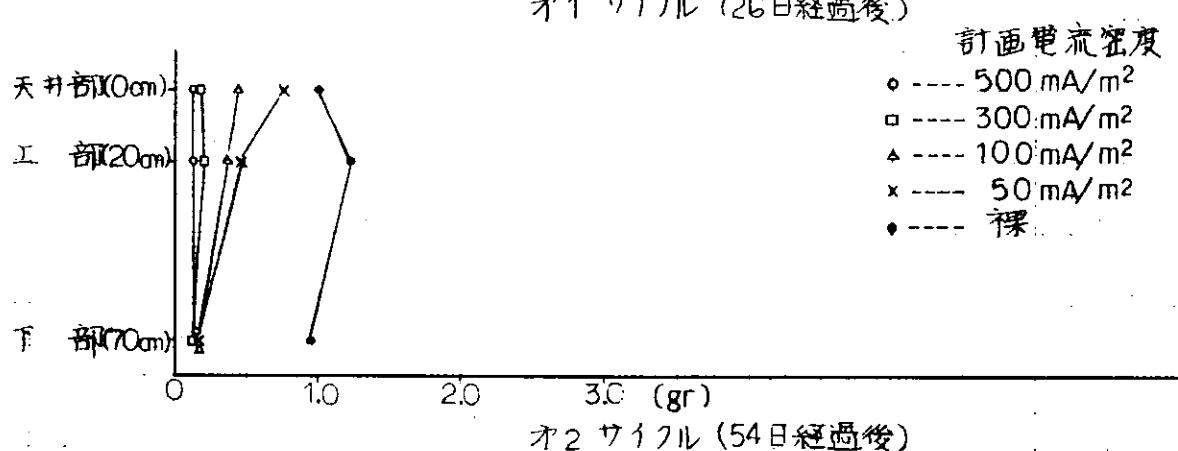
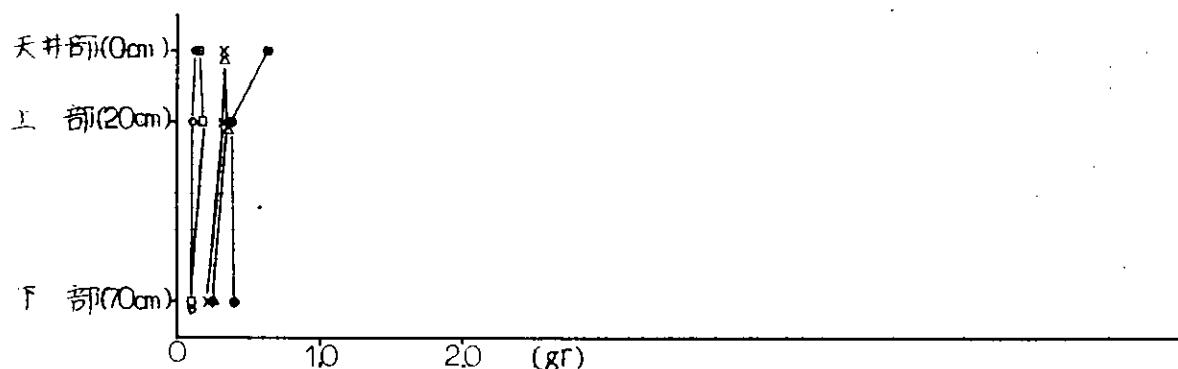


図 5.9 腐食量の変化

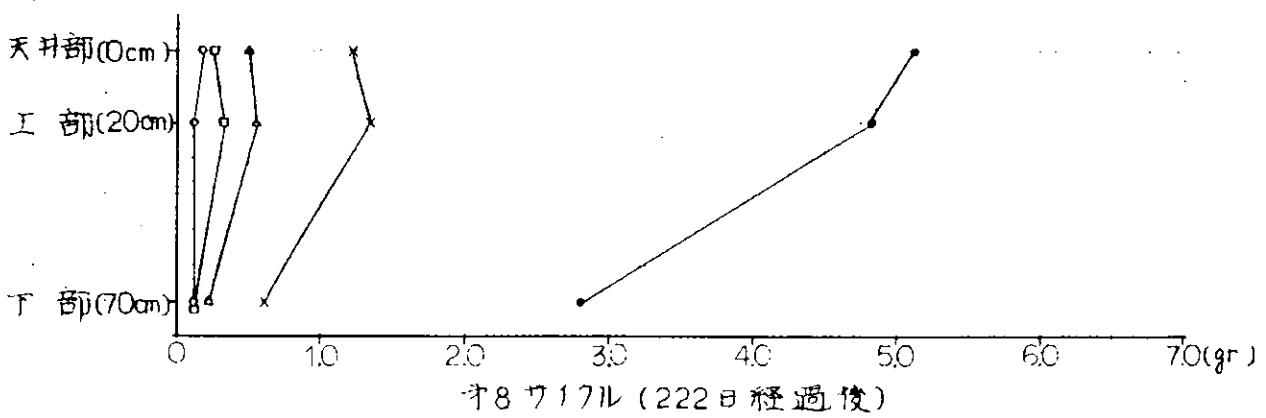
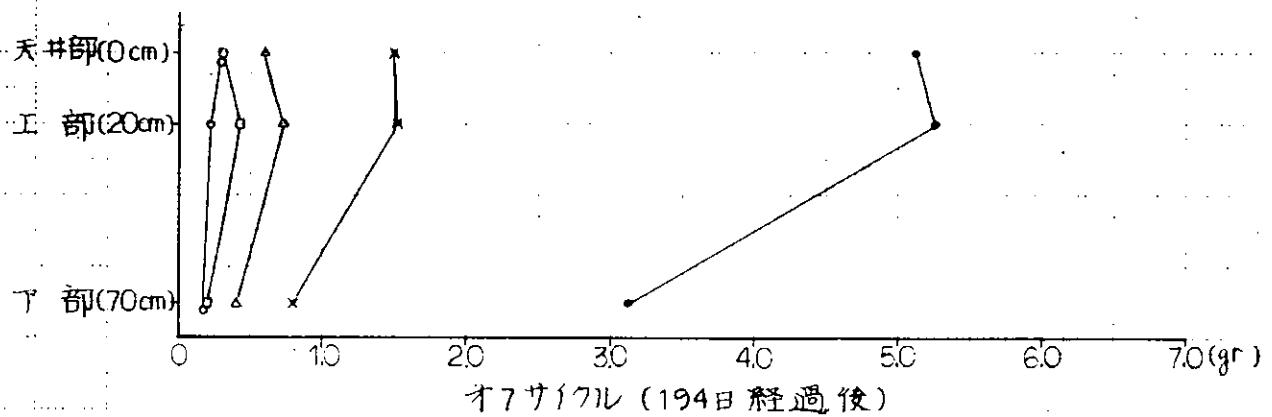
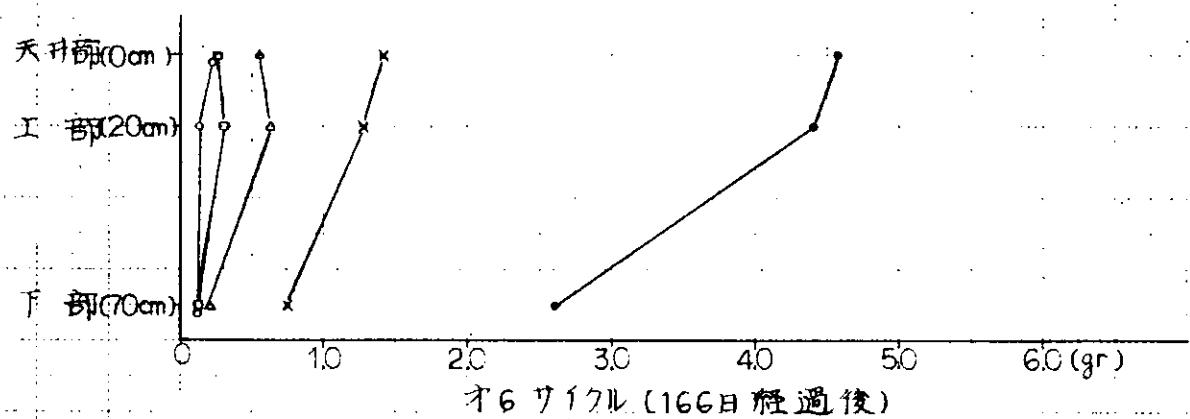
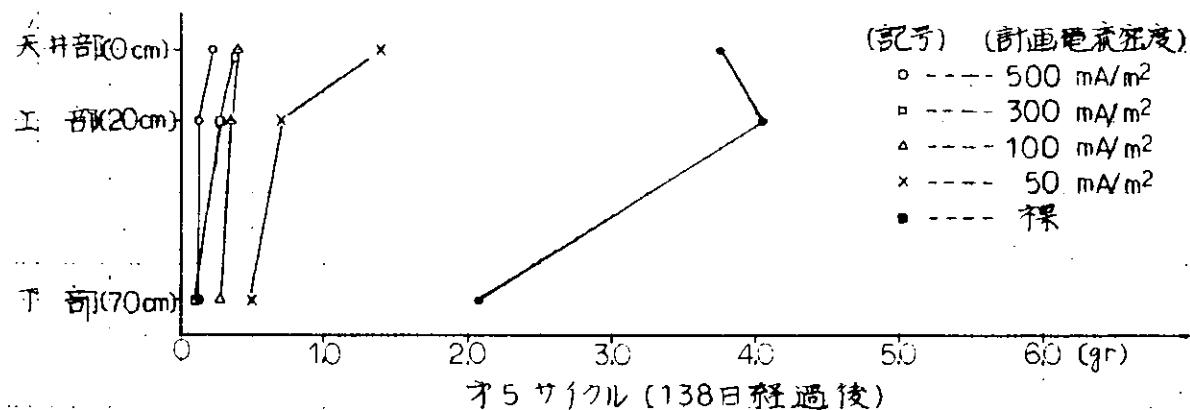


図 5.1.0 腐食量の変化

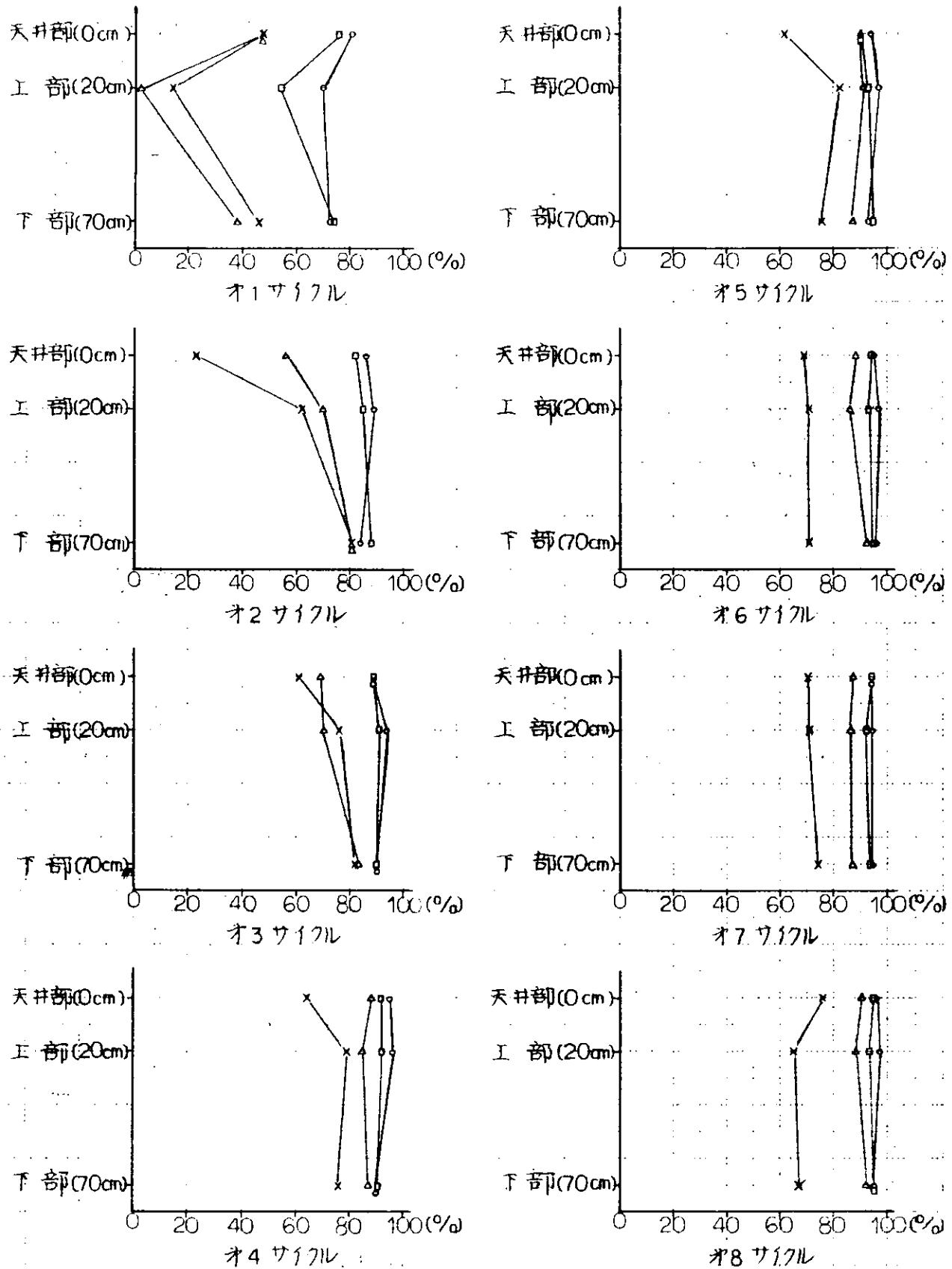


図 5.1.1 防食率の変化

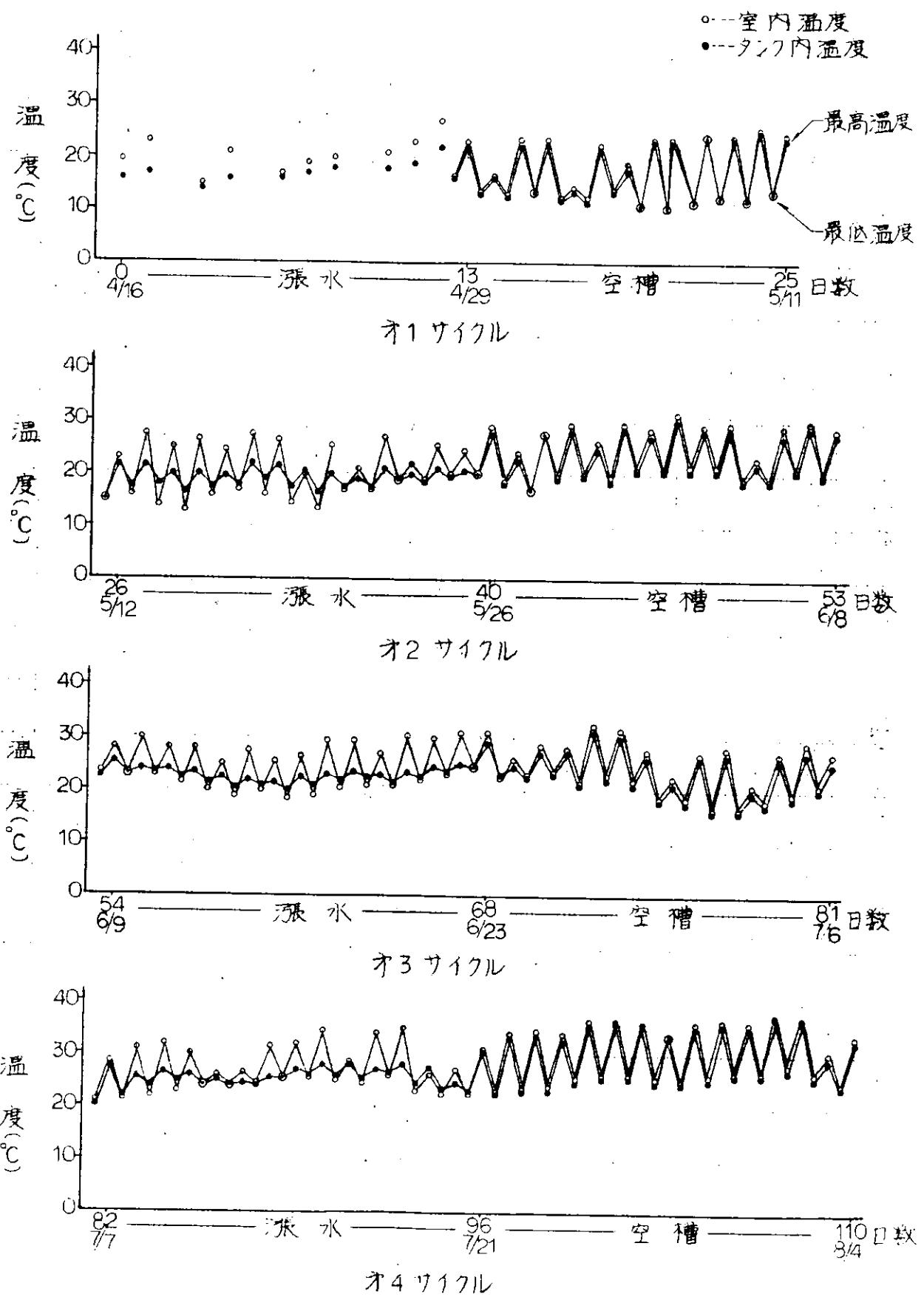


図 5.1.2 溫度測定記録

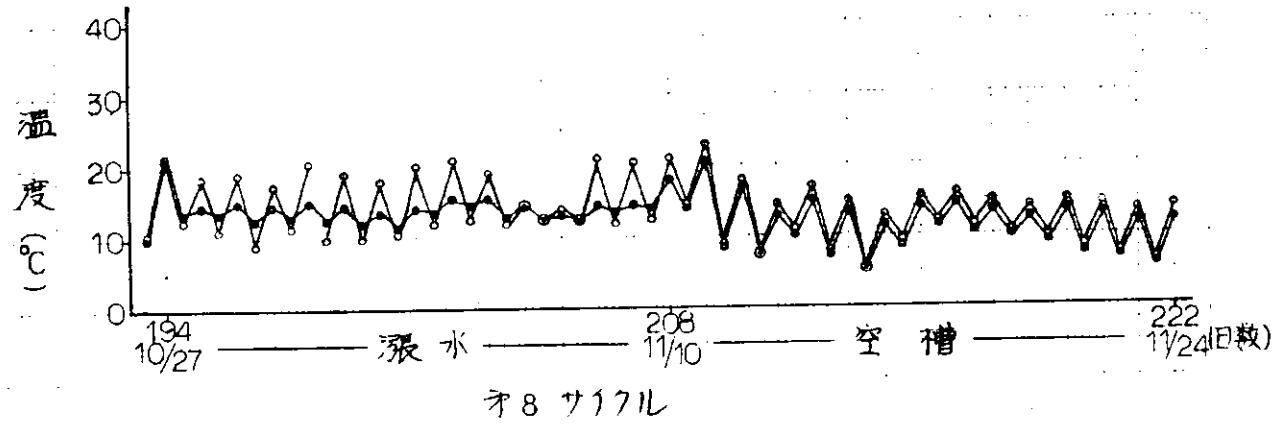
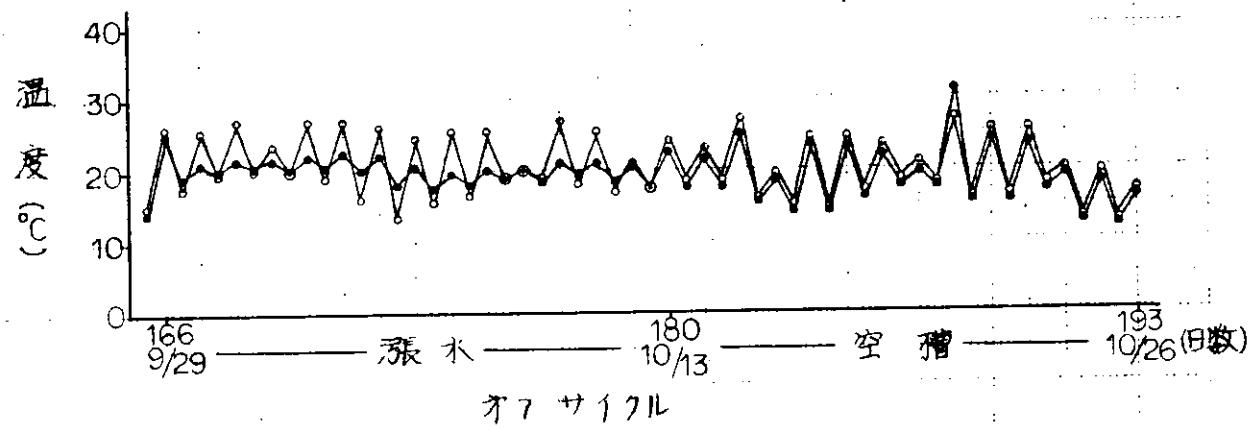
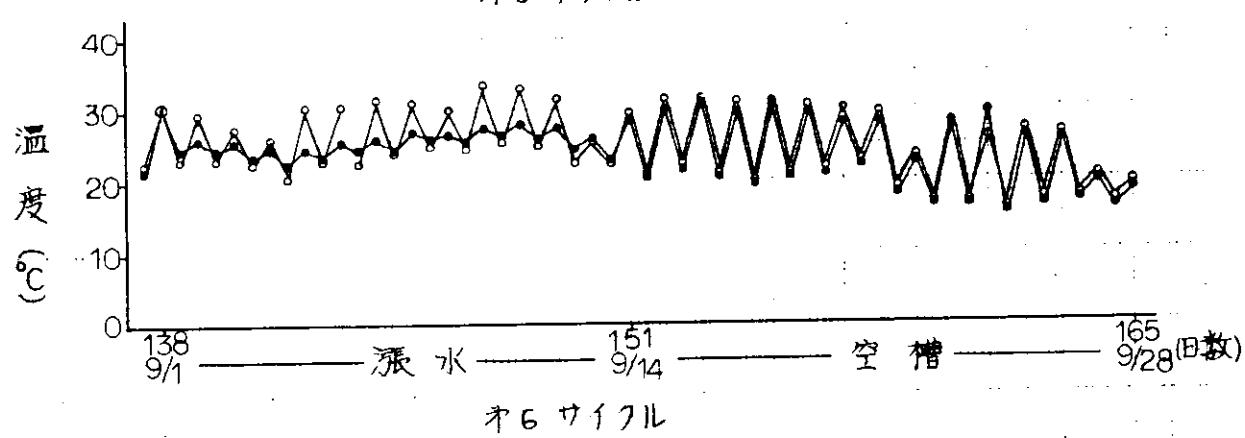
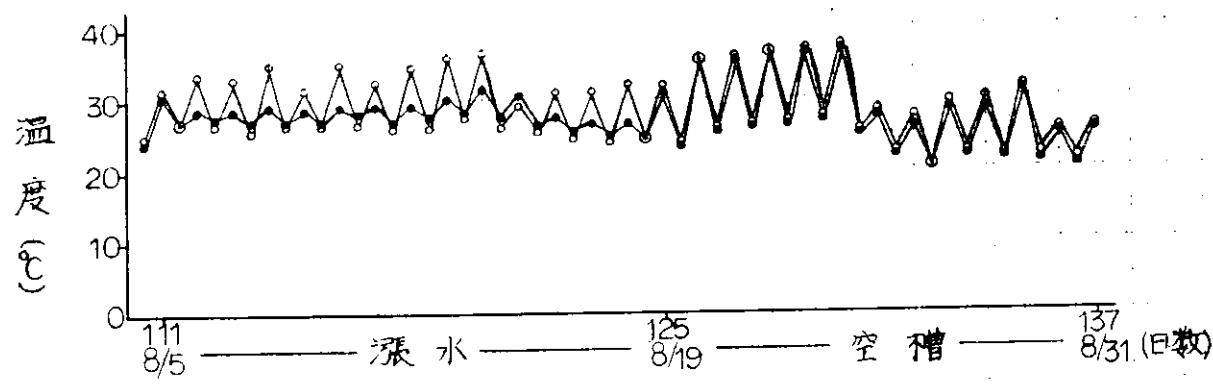


図 5.1.3 溫度測定記録

6. 軟鋼の低速度繰返し低応力腐食の防止に関する試験

船舶のバラストタンクにおける低速度繰返し低応力環境下の鋼材の腐食傾向については昭和50年度までの研究結果から低速度低応力の繰返しを受けた場合、応力集中部に局部腐食の促進が認められた。腐食環境としては海水の張水状態よりも張排水繰返し条件の方が腐食が激しく、また水温の高い方が腐食は大きいことも明らかとなつたが、繰返し応力の影響は試験としては長期間を要することも判明した。定電位による防食試験においては、張水状態よりも張排水繰返し条件下で防食率が低下し所要防食電流密度も大きいことが明らかとなり、これに繰返し応力が付加される場合については防食率で同程度、所要防食電流密度でやや大きい結果を得たがなお長期試験による確認の必要を認めた。またエレクトロコーティングについては繰返し応力条件下では皮膜抵抗の増大と低減が認められ、防食被覆の生成、破壊の反復が推定された。

本年度は応力集中部における局部腐食について、海水温度の影響、張水状態と張排水繰返し状態との比較、応力集中部に対する無応力部の面積比の影響などについて調査した。ほかに大型の試験片を用いて、バラスト張排水16サイクル、224日にわたる長期定電位防食試験を行ない、繰返し応力付加条件における防食条件・防食効果を検討した。

6.1 試験内容および試験条件

6.1.1 応力集中部における局部腐食および陰極防食

前年度まで使用した4点支持法による繰返し応力付加腐食試験装置を引き続き用い、試験片も前年度と同じく小型の板状とした。局部腐食試験は主として応力片に対する無応力片の面積比を変える短絡試験片によるマクロ腐食試験の方法によつた。

図6.1.1には繰返し応力付加腐食試験装置の概略を示す。図6.1.2には応力片の形状、寸法を示す。応力片は $7.5 \times 1.5 \times 1^1$ mmの軟鋼(S S 41、降伏強さ 28.6 kg/mm^2)板状で表面を800番まで研磨し、アセトンで脱脂先净のうち、引張応力の集中する凸面の中央部の表面 $1.5 \times 1.5 \text{ mm}$ を供試面とし、残部および裏面はすべて絶縁塗装を施した。応力片の供試面積は 2.25 cm^2 とし、無応力片はその1、5、10倍の積を有する同材質、同形、同厚みのやや大きい板状片を用いた。図6.1.3には応力付加試験片保持具を示した。試験片はガラス棒4本で固定し、中央下部から外力によって押上げ、たわみ制御によって所定の応力を与えた。

付加応力は 0.25 kg/mm^2 とし、繰返し速度は1時間負荷、1時間除荷を繰返す12回/dayとした。応力付加におけるたわみと応力の関係は、式 $\delta = \sigma \ell / 6 E h$ (δ :たわみmm, σ :応力kg/mm², ℓ :外側2支点間の距離mm, E:弾性係数, h:試験片の厚さmm)によって求めた。図6.1.4にはストレインゲージによる歪み率(%)分布の実測値を示す。図6.1.5には今回の4点支持法におけるたわみ(押上げストローク)-応力-歪みの関係を示す。歪み率は最大の値を有する供試部中央の実測値によつた。

供試したバラスト海水はASTM, D-1141-52による人工海水で、液量は30ℓ、水温は25であるいは40°Cとした。張排水はバラスト率50%で張水7日、排水7日の1サイクル14日とし、試験期間は3サイクルの42日間であった。全期間張水状態の試験においては試験期間は張排水条件の場合の張水日数と同じ21日間とした。なお張排水期とも試験槽は蓋で覆って空気閉の状態とし、排水期の空槽温度は室温放置とした。

陰極防食はボテンショスタットによる定電位防食法を適用し、陰極電位を-900, -1000, -1100mVに設定した。陽極には亜鉛合金を、照合電極には飽和カロメル電極を用いた。

測定は単独浸漬片、面積比を変えた短絡片の腐食量、この短絡片における短絡電流、防食片の重量減、防食率および定電位維持電流密度、腐食片の分極抵抗、陰分極曲線などについて実施した。分極抵抗は $1.0 \times 1.0 \times 1.0 \text{ mm}^3$ の炭素棒を対極に用い、試験片表面に微小電流を与える方式の分極抵抗測定器を使用した。

6.1.2 繰返し応力付加条件における陰極防食

4点支持法における試験片の20倍の供試面積を有する大型試験片を用いて、主として陰極防食条件を求める目的で長期試験を行なった。

図6.1.6に繰返し応力付加腐食試験装置の概略を示す。800×600×400mmの角型水槽に試験片保持具が装着しており、試験片の下端を保持具の下部に、上端を応力付加軸に固定し、手動の片振りによる所定のたわみで供試部に所定の応力(歪み)を与える。応力集中部における歪みー押レストロークの関係はあらかじめストレインゲージによつて調べた。

図6.1.7には試験片の寸法、形状を示す。軟鋼(S S 4 1、降伏強さ 28.6 kg/mm^2)の 3.2 mm 板状で表面を800番まで研摩し、アセトンで脱脂洗浄のち応力集中部およびその周辺の両面 4.5 cm^2 を残して他部を絶縁塗装した。

図6.1.8にはストレインゲージによる歪み率(%)分布の実測値を示す。図6.1.9にはこの片振り曲げ法における押レストロークー歪みの関係を示す。歪み率は最大の値を有する供試部中央の値によつた。付加応力値は歪み率と弾性係数から算出した。

付加応力は0、25、29kg/mm²とし、繰返し速度は負荷、除荷の繰返し1回/dayとした。この応力の負荷と除荷の各々の時間は最初の2週間は負荷8時間ー除荷16時間の繰返し、次の2週間は負荷16時間ー除荷8時間の繰返しで以降はこれを2週間ごとに交互に繰返した。

供試した海水はASTM, D-1141-52による人工海水で供試量は100L、水温は40℃とした。張排水はバラスト率50%で張水7日、排水7日の1サイクル14日とし、試験期間は16サイクルの224日とした。試験槽は蓋で覆つて空気閉の状態とし、排水期の空槽温度は室温放置とした。

陰極防食はボテンショスタッフによる定電位防食法を適用し、陰極電位を-900、-1000、-1100mVに設定した。陽極には亜鉛合金を、照合電極には飽和カロメル電極を用いた。

測定は腐食片の自然電位、腐食量および分極抵抗、防食片の重量減、防食率および定電位維持電流密度、防食片のdecay、腐食片の錆表面の抵抗、防食片のエレクトロコーティング被覆の抵抗などについて実施した。またエレクトロコーティングについては生成皮膜を採取して成分分析を行なった。錆およびエレクトロコーティングの抵抗測定は、80×150mmのステンレス板を対極とし、万能ブリッジを使用した。

6.2 試験結果

6.2.1 応力集中部における局部腐食

表6.2.1に4点支持法の小試験片による単独没漬の腐食量を示す。全期間を通じて25℃、張水状態というバラストタンクの環境としては比較的腐食性の弱い条件であり、繰返し応力のない場合、平均侵食度で0.1mm/Yr程度を示すが、25kg/mm²の繰返し応力付加で腐食は増加し0.13mm/Yrを示した。温度、張排水繰返しなどの腐食加速条件がないので応力の影響が表われたものと考えられる。これに対して40℃、張排水繰返しでは期間が2倍になってはいるものの繰返し応力付加の有無にかかわらず腐食量において4~5倍、平均侵食度では0.25mm/Yrと2倍以上を示す。しかし繰返し応力の影響は明瞭でない。また供試面積の大きさが増加すると全体の平均侵食度としてやや減少する傾向が認められる。

表6.2.2には面積比の異なる無応力片との短絡腐食の結果を示す。25℃、張水状態では表6.2.1の単独没漬の自然腐食と比較して面積比1:5において繰返し応力片には3倍の腐食促進が、また無応力片には30%の腐食軽減が認められる。その腐食速度の比は6.7:1を示す。これは温度、張排水条件が弱いので繰返し応力の影響がマクロ腐食のアノード部となって顕著に表われたものと考えられる。40℃、張排水条件下においても繰返し応力の影響は小面積のマクロアノードとして腐食促進が認められるが25℃、張水状態の場合ほど大きくない。

図6.2.1には40℃、張排水繰返し条件における短絡片の短絡電流変化を示す。面積比1:1を除けば応力片が第1

張水期はカソードとなり、第2張水期以後はアノードとなり、小面積の応力集中部が局部腐食を生じることを示している。

6.2.2 応力集中部における陰極防食

表6.2.3に4点支持法における小試験片による陰極防食の結果を示す。25°C、張水状態、21日間の定電位防食で-900mV維持の場合、9.2~9.3%、-1000mV維持の場合9.8~9.9%の高い防食率が得られた。

図6.2.2には防食電流の経時変化を示す。張水状態のため電流の安定は比較的早いが繰返し速度が12回/dayと大きいため防食電流密度の値としてはやや大きい。

図6.2.3には25°C、張水状態、21日間における応力付加試片の分極抵抗経時変化の逆数(すなわち腐食速度)を示す。無応力片に対して応力付加片の方が大きいが、期間中の変化は小さい。図6.2.4には同条件で21日間浸漬後の試験片の陰分極曲線を示す。繰返し応力付加片の分極が小さいのは発錆が著しく陰極電流がその還元に消費されるためであろう。

6.2.3 繰返し応力付加条件における陰極防食

(1) 自然電位

繰返し応力集中部とその周辺の計4.5cm²を有するやや大型の試験片を供試して、40°Cの人工海水の張排水繰返し応力繰返しの条件下で経時実測した自然電位変化を図6.2.5に示す。図の測定値は各張水期最終日の張水終了時のものであるが腐食片の自然電位は時間の経過とともに張排水の繰返しとともに次第に高くなる。当初の-730~-740mVから張排水16サイクル224日後の最後には-650mVまで上昇し約80mVの変化を示した。

表面の発錆が著しいためであるが、応力の負荷、除荷による差、繰返し応力の有無による差は明瞭でない。

(2) 分極抵抗

図6.2.6には各張水期終了直前に求めた分極抵抗実測値の逆数(腐食速度)を示す。第1張水期から第2張水期に移るとき1.5~2倍に増加する。その後の増加は小さく、繰返し応力付加の場合が少しづつ増大するものの無応力の場合はあまり変わらない。最終的には応力2.9kg/mm²のとき最大で、無応力のとき最小である。図6.2.3の25°C、張水状態の場合に比較すると3~4倍程度の値を示す。

(3) 腐食量および防食効果

表6.2.4には応力0、25、2.9kg/mm²(歪率0、0.12、0.14%)、繰返し速度1回/day、人工海水40°C張排水各7日のバラスト率50%，バラストサイクル16回、224日間における腐食試験結果および-900、-1000、-1100mVの定電位防食試験の結果を示す。腐食量は無応力の場合、平均侵食度で0.2mm/Yr、繰返し応力付加の場合0.2~0.3mm/Yrを示し、いずれも表面は錆で厚く覆われたが繰返し応力付加の場合は錆が粗で、錆割れが認められる。

定電位法による陰極防食の結果はいずれの防食電位においても防食効果は認められた。最も防食率の高いのは、-1000mVの場合で、無応力のとき9.5%，応力付加のとき9.2%を得た。-1100mVの場合は7.0~7.7%であった。-900mVの場合は防食率は約6.0%で防食効果が充分とはいえない。応力付加のときは無応力の場合に比較して防食率が数%低下している。

(4) 防食電流密度

図6.2.7には第2、10、16張水期における防食電流密度の変化を示す。張排水繰返し条件においては排水期に発錆が著しいので各張水期初期には所要防食電流密度が著しく増大する。しかし電流密度の低減もかなり大きい。図は試験期間の初期、中期、終期を比較したもので、各張水期の当初および終了時の値が次第に低減し、その差も次第に小さくなるのが判る。図6.2.8には全期間を通じての各張水期終了時における防食維持電流密度の変化を示す。張排水繰返しサイクルの経過とともに次第に低減する。-1000mVの場合が最小で第10張水期以後は1.00mA/mm²以下である。この場合、無応力片の値が最も小さく最終時は8.0mA/mm²を示しなお低減傾向が認められる。

繰返し応力付加片では低減はそれより小さく、約 9.5 mA/m^2 である。-900 mV では約 10.5 mA/m^2 、-1100 mV では最大の約 11.5 mA/m^2 を要している。

以上のような所要防食電流密度の低減は防食片の表面におけるエレクトロコーティング（電解被覆）作用による白色生成物の抵抗増加にもとづくものと考えられる。今回の実験における陰極防食は定電位法によるもので実船の場合の流電陽極法とは異なる。実船の流電陽極法においては張水にともなう陽極からの発生電流によって陰分極が進行するので防食電位に到達するまでに時間を要し、そのため低減は小さいものと予想される。これに対して定電位法は当初から強制的に防食設定電位に維持するので、没漬初期の所要電流は大きいが、低減は早くかつ大きいものと考えられる。従って実船の場合を想定すると、高い防食率を期待する防食電流密度は今回の実験結果より大きいものと考えるべきであろう。

(5) エレクトロコーティングの効果

防食片の表面にはいずれの場合もエレクトロコーティング作用による被覆物が付着している。エレクトロコーティング被覆は蛍光X線分析などによると Ca, Mg, Zn, Fe, Cl, Si などが検出され、X線回折の結果では CaCO_3 を主成分とし、 Mg(OH)_2 , ZnCO_3 , SiO_2 などが認められたがなお不明の部分が多い。

エレクトロコーティング被覆は防食電流の低減に有効といわれているが、その被覆効果として抵抗の変化を表 6.2.5 に示す。腐食片の場合は錆生成による表面抵抗の増加は $1 \sim 2.5 \Omega$ で無応力片が最も大きい。応力付加片の方が小さいのは繰返し応力によって錆に割れが反復発生するためであろうと思われる。これに対して防食片のエレクトロコーティング生成による被覆抵抗増加は著しく大きい。最も大きいのは薄いが固着性の皮膜を形成した-1000 mV の防食片で、中でも無応力片は 80Ω 以上の増加を示す。応力付加片でも 30Ω 以上で、-1100 mV の応力付加片の $15 \sim 22 \Omega$ より大きい。-1100 mV では多量に盛上って生成しているが粗雑である。-900 mV では数 Ω の増加を示すに過ぎない。この場合、白色の生成物が全面を被覆せず形成不充分といえよう。防食、非防食の場合とも応力付加片と無応力片との間にかなりの抵抗の差が認められ、特に防食片のエレクトロコーティングは外見上付着量が多くても繰返し応力の付加によって被覆効果が劣ることは明らかである。なお、この被覆効果の差異は前述の所要防食電流密度の差および防食効果の差異と有意の対応を示していると考えられる。

図 6.2.9 には最終張水期の 1 週間における被覆抵抗の経時変化を示す。防食条件による差異が明瞭であり、また 1 週間のうちにいずれも僅かではあるがなお抵抗の増加が認められる。

図 6.2.10 には-1000 mV の防食片における decay 曲線を示す。第 2, 3, 6, 16 張水期の通電終了直後数分間の電位のもどりをみると、張排水サイクルを増すほど decay 変化が小さい。エレクトロコーティング被覆の蓄積効果と考えられる。応力による差は当初は著しく、応力付加片の decay が大きいが張排水の継続とともに次第に差は小さくなる。-1100 mV, -900 mV の防食片の場合もほぼ同じ傾向である。

(6) 試験片の表面状況

写真 6.2.1 に張排水 16 サイクル、224 日後の腐食片および防食片の引上げ直後の表面状況を示す。腐食片は厚い錆で覆われ、応力付加片の錆には破壊が認められる。防食片は-900 mV のときはエレクトロコーティングが被覆としては全面に充分に形成せず、-1100 mV のときは白色多量の厚い生成物で被覆されたが応力付加片ではこの被覆が粗雑であり、厚い生成物は排水時に水分を含みやすいことが考えられる。これに対して-1000 mV ではエッジの一部に形成不良が認められるものの、他の電位と異なり、薄いが固着性の生成皮膜で被覆されているのが特徴である。

写真 6.2.2 には化学処理によって錆あるいは生成被覆を除去したのちの表面の腐食状況を示す。腐食片は全面に腐食が認められるが、繰返し応力 2.9 kg/mm^2 の集中部付近が特に粗い局部腐食面を呈している。しかし割れ発生は認められない。防食片は前述の防食率に対応した腐食状況を示しているが、無応力の-1000 mV 防食片の腐食が最も軽微でほぼ全面が試験前の金属研磨面のままである。応力付加の防食片には浅い腐食が応力集中部その他に散在して

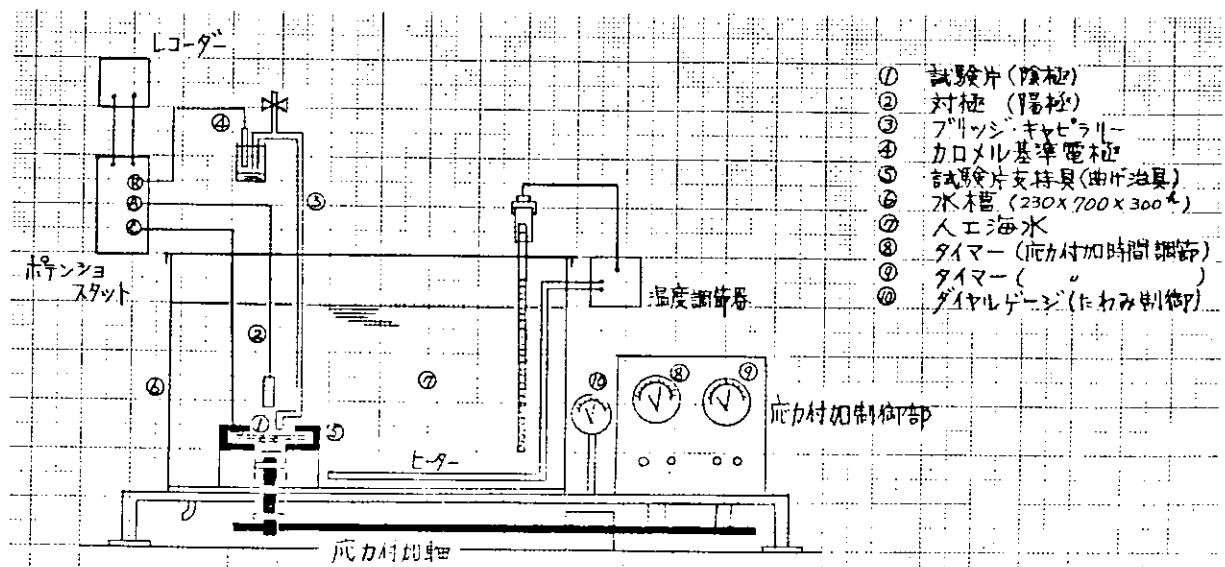
いて、割れはもちろん認められない。

写真 6.2.3 には最も腐食の大きい $2.9 \text{ kg}/\text{m}^2$ の腐食片と最も防食効果の良好な無応力、 -1000 mV の防食片の応力集中部付近をそれぞれ示す。

6.3 まとめ

バラストタンクの鋼材の腐食に関して、人工海水の張排水繰返し環境にさらに低速度の繰返し応力を付加した条件下において軟鋼の腐食状況を調べ、定電位法により陰極防食条件とその効果を確認した。

- (1) 応力付加片と無応力片とを短絡した試験により、応力集中部の腐食が促進されることが明らかとなった。
- (2) 定電位防食試験によると、応力付加の場合 -1000 mV の防食率が最高を示したが、 -900 mV ではエレクトロコーティングが不足し、 -1100 mV ではかえってエレクトロコーティングの被覆効果が劣り、ともに防食率が低下した。
- (3) 防食電流密度は時間とともに低減するものの応力集中部は比較的大きい値を必要とする。最終的には -1000 mV の場合が最も小さく、無応力片で $8.0 \text{ mA}/\text{m}^2$ 、応力付加片で $9.5 \text{ mA}/\text{m}^2$ を要したが、 -900 mV および -1100 mV の場合はこれより大きい。実船の流電陽極法の場合、本試験の定電位法よりも所要防食電流密度は若干大きいものと考えられるのでなお実験を要する。
- (4) 腐食表面の錯も防食表面のエレクトロコーティングとともに応力付加によって破壊されることが皮膜抵抗の測定から確認された。エレクトロコーティングの皮膜抵抗が大きい場合は防食電流の低減は大きく、防食率も高い。
- (5) 応力 $2.9 \text{ kg}/\text{m}^2$ (歪み率 0.14%) 以下で、繰返し速度 $1 \text{回}/\text{day}$ 、繰返し回数 $1 \sim 2$ 回の本実験では腐食片および防食片のいずれにも割れは発生しない。



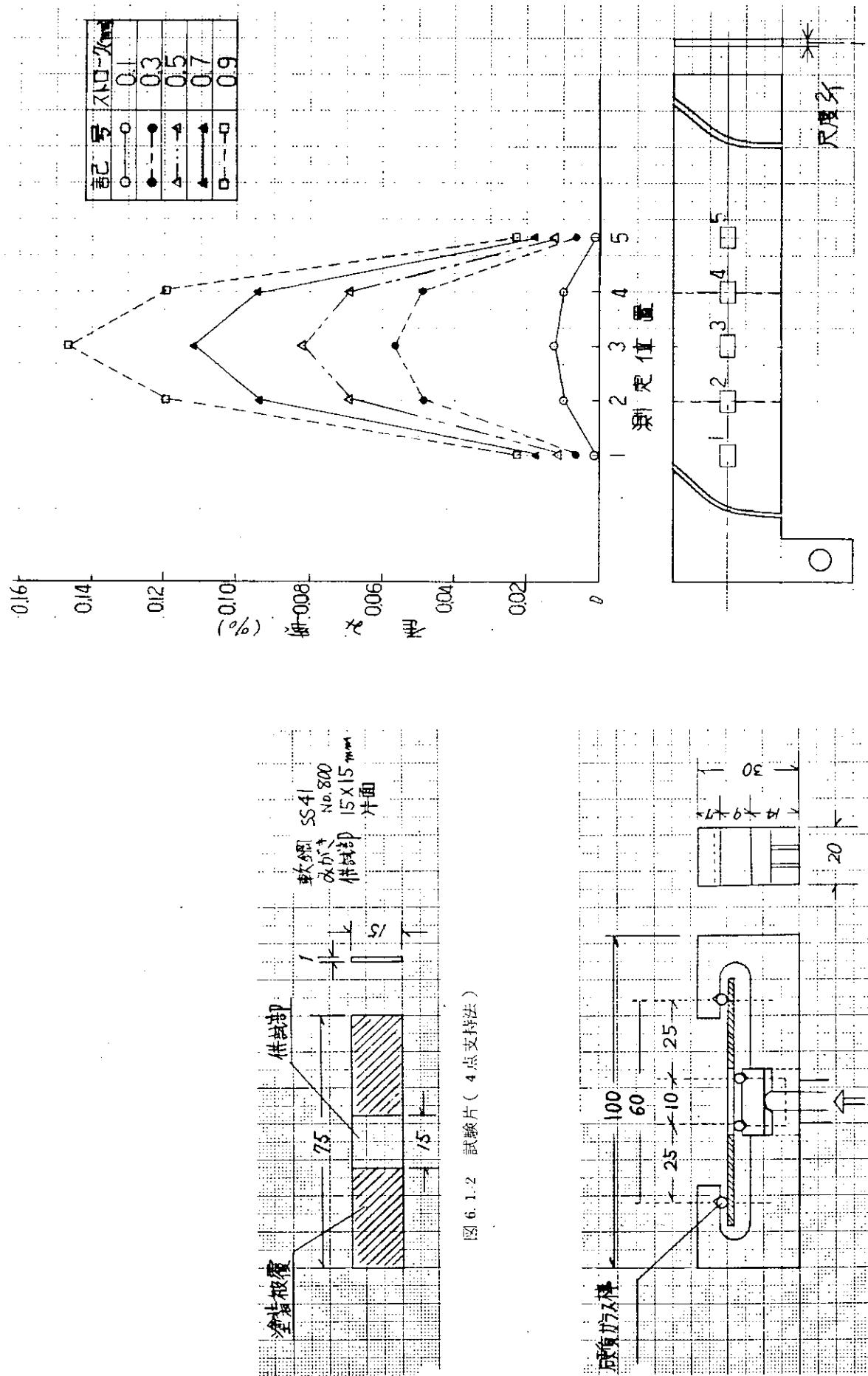


図 6.1.3 応力付加試験片保持具(4点支持法)

図 6.1.4 4点支持法における垂み率(応力)の分布

実測：供試部の中央

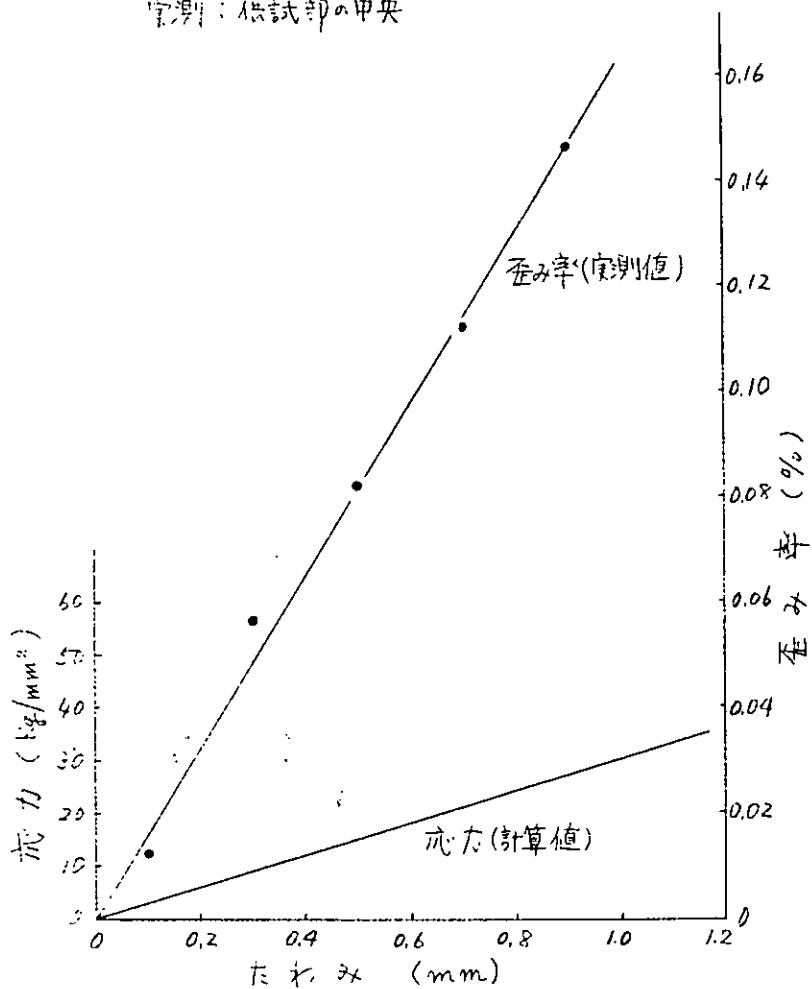


図 6.1.5 4点支持法における応力(歪み)とたわみの関係

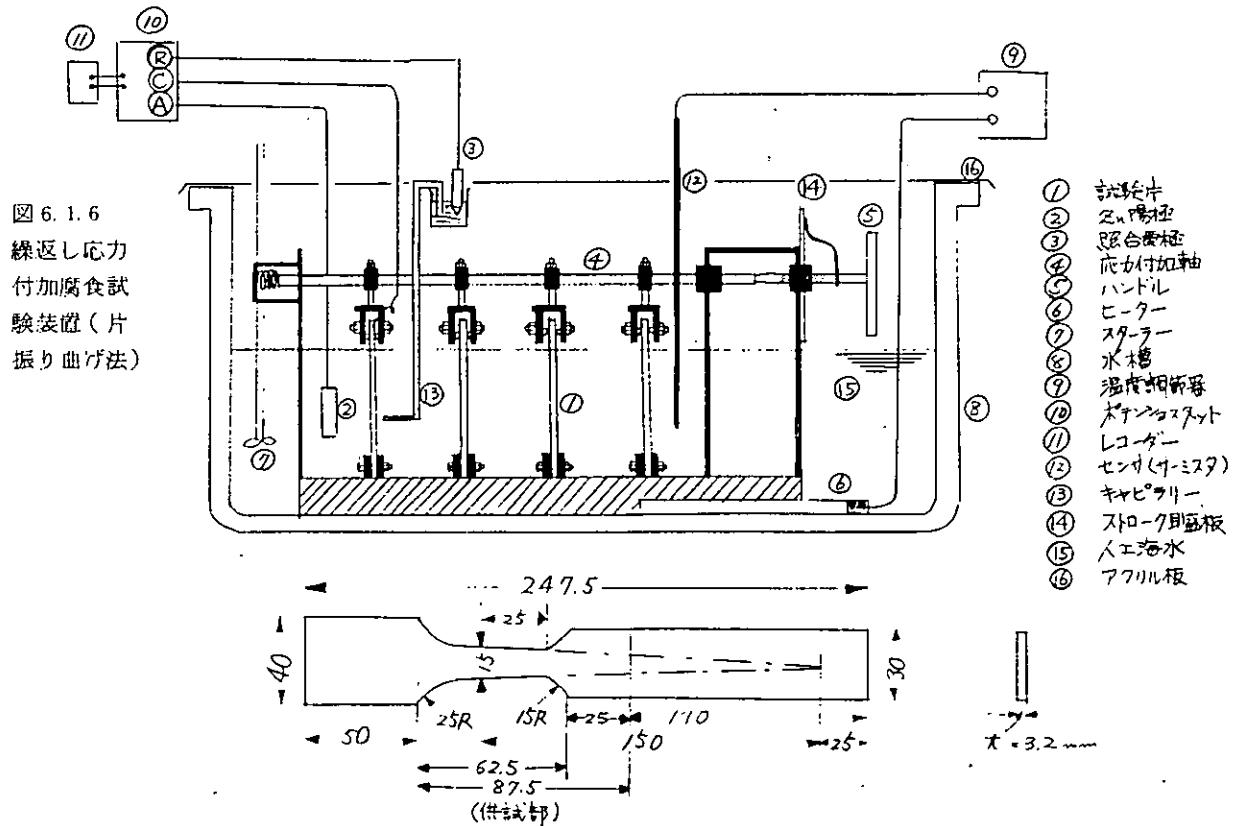


図 6.1.7 試験片の形状と寸法(片振り曲げ法)

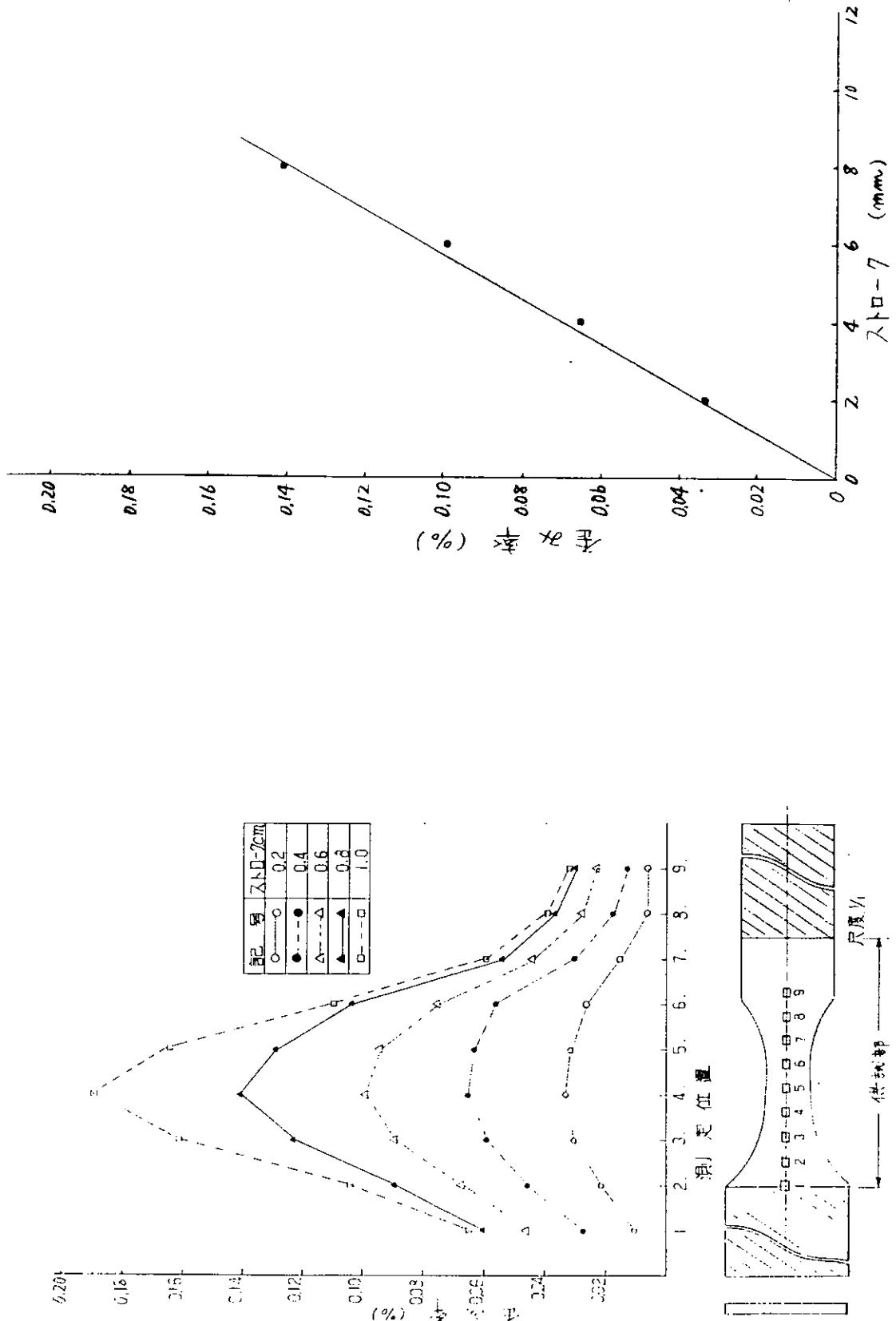


図 6.1.8 片振り曲げ法における歪み率の分布

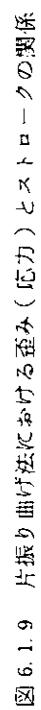


図 6.1.9 片振り曲げ法における歪み(応力)とストロークの関係

表 6.2.1 4点支持法における単独浸漬腐食

人工海水, 応力繰返し 12回/day, 張排水各 7日繰返し 3回

液温 (°C)	張排水	期間 (日)	応力 (kg/cm²)	面積(比) (cm²)	重量減 (mg)	平均侵食度 (mm/yr)
25	張水	21	0	2.25(1)	9.0	0.088
"	"		0	2.25(1)	11.4	0.112
"	"		0	11.25(5)	50.2	0.088
"	"		0	11.25(5)	51.8	0.090
"	"		2.5	2.25(1)	13.5	0.132
"	"		2.5	2.25(1)	13.1	0.128
40	張排水	42	0	2.25(1)	50.3	0.247
"	"		0	11.25(5)	256.9	0.252
"	"		0	22.5(10)	495.5	0.243
"	"		2.5	2.25(1)	51.1	0.251

表 6.2.2 4点支持法における短絡浸漬腐食

人工海水, 応力繰返し 12回/day, 張排水各 7日繰返し 3回

液温 (°C)	張排水	期間 (日)	応力 (kg/cm²)	面積(比) (cm²)	重量減 (mg)	平均侵食度 (mm/yr)
25	張水	21	2.5	2.25(1)	41.2	0.404
"	"		0	11.25(5)	31.7	0.062
40	張排水	42	2.5	2.25(1)	48.3	0.237
"	"		0	2.25(1)	44.9	0.220
"	"		2.5	2.25(1)	55.6	0.273
"	"		0	11.25(5)	237.7	0.233
"	"		2.5	2.25(1)	54.5	0.267
"	"	"	0	22.5(10)	443.9	0.218

表 6.2.3 4点支持法における電気防食の効果

人工海水, 張水 21日間, 応力繰返し 12回/day, 定電位防食法

液温 (°C)	張排水	応力 (kg/cm²)	面積 (cm²)	陰極電位 (mV)	重量減 (mg)	平均侵食度 (mm/yr)	防食率 (%)
25	張水	0	2.25	-900	0.7	0.007	93.1
"	"		2.5	"	1.0	0.010	92.6
"	"	0	"	-1000	0.1	0.001	99.2
"	"		2.5	"	0.3	0.003	97.7

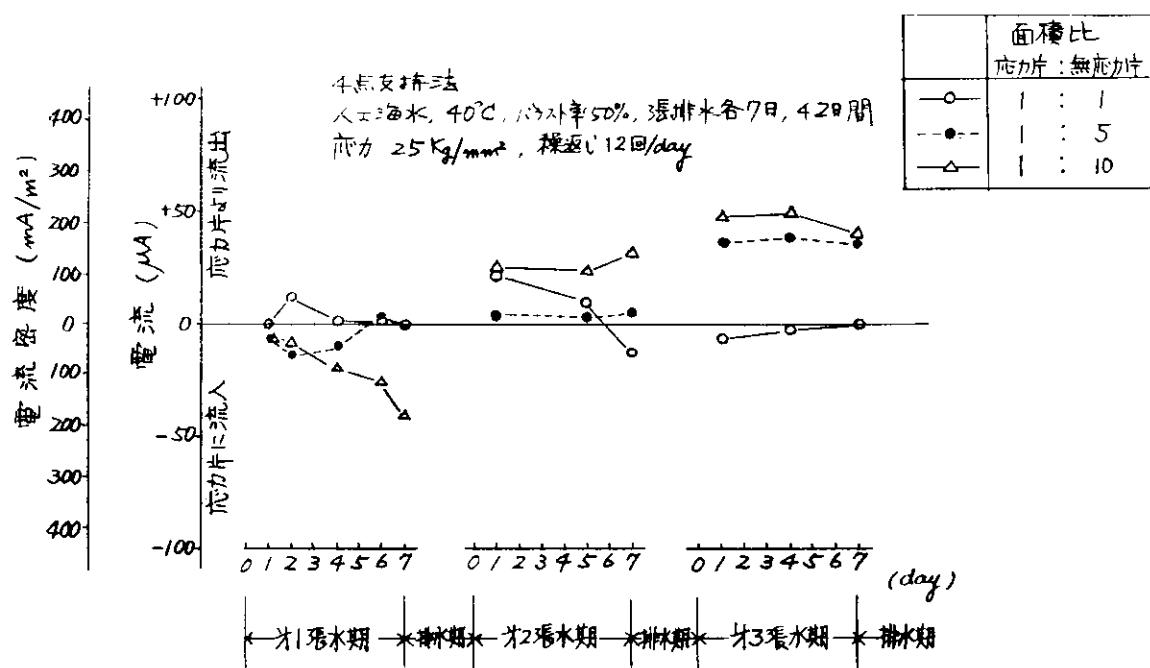


図 6.2.1 応力片と無応力片の短絡における短絡電流

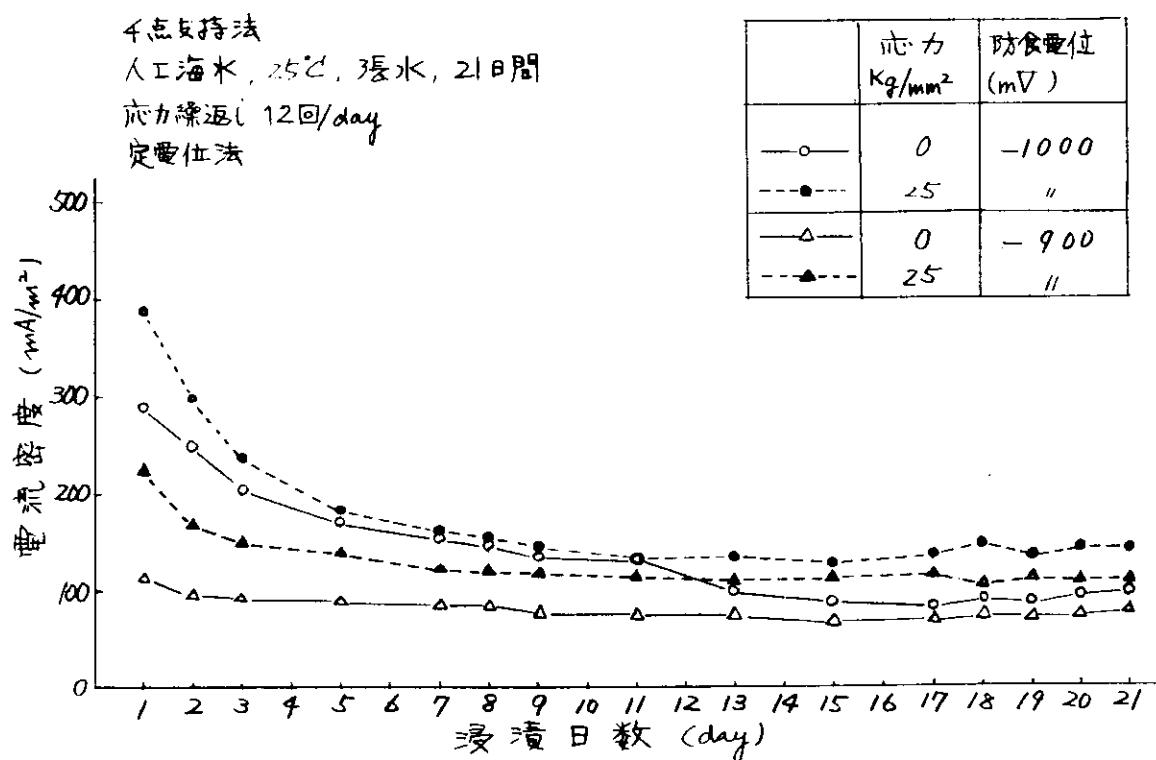


図 6.2.2 繰返し応力付加, 張水条件における防食電流経時変化

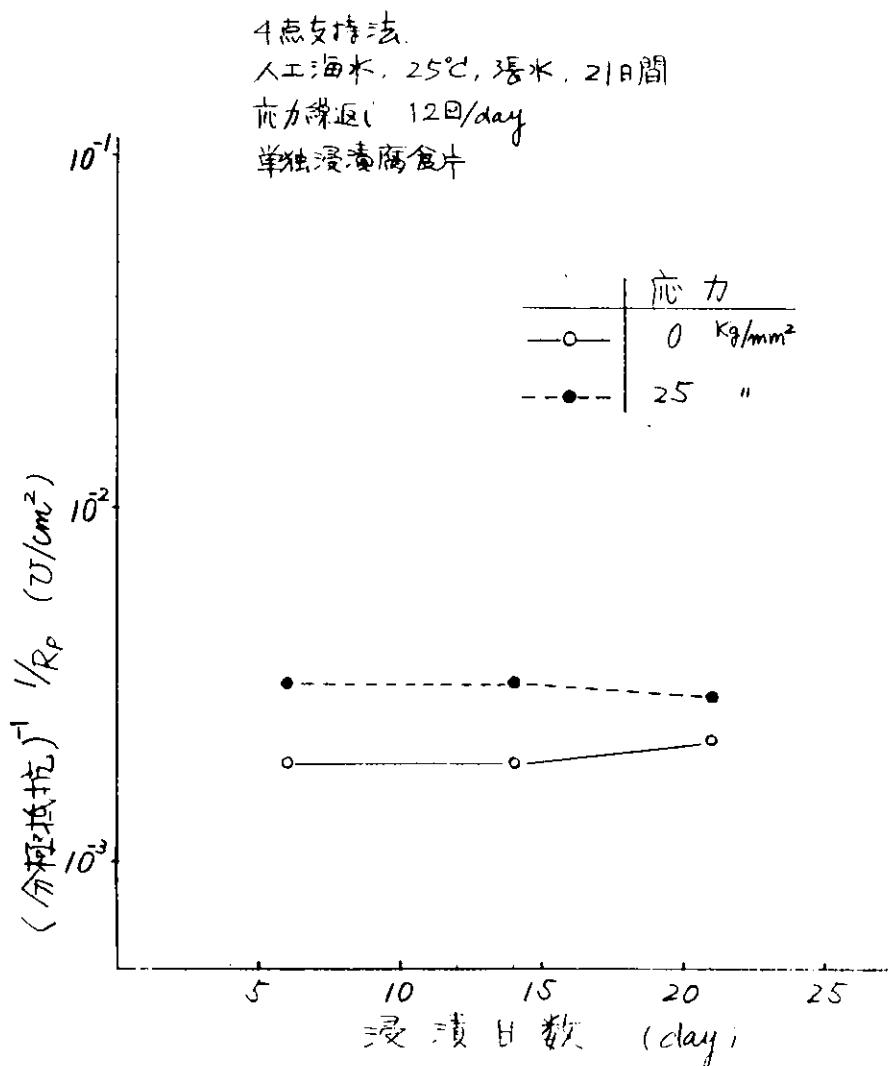


図 6.2.3 張水条件における分極抵抗の経時変化

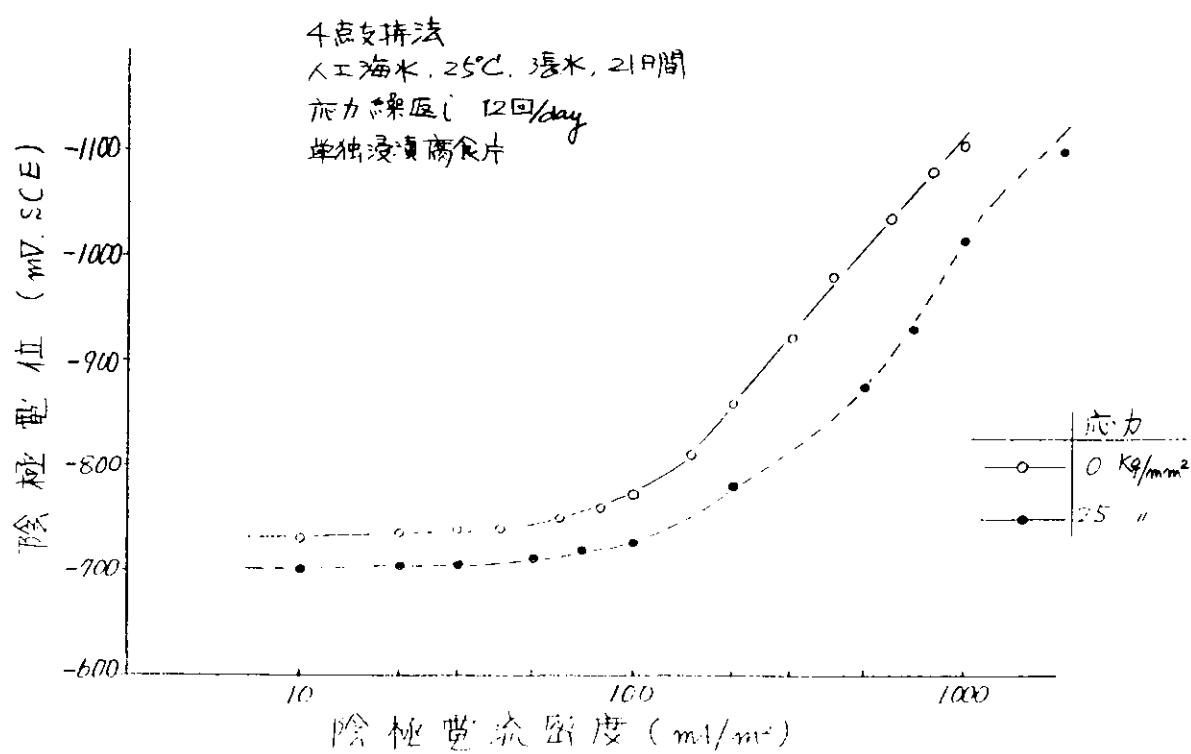


図 6.2.4 21日間浸漬後の陰分極曲線

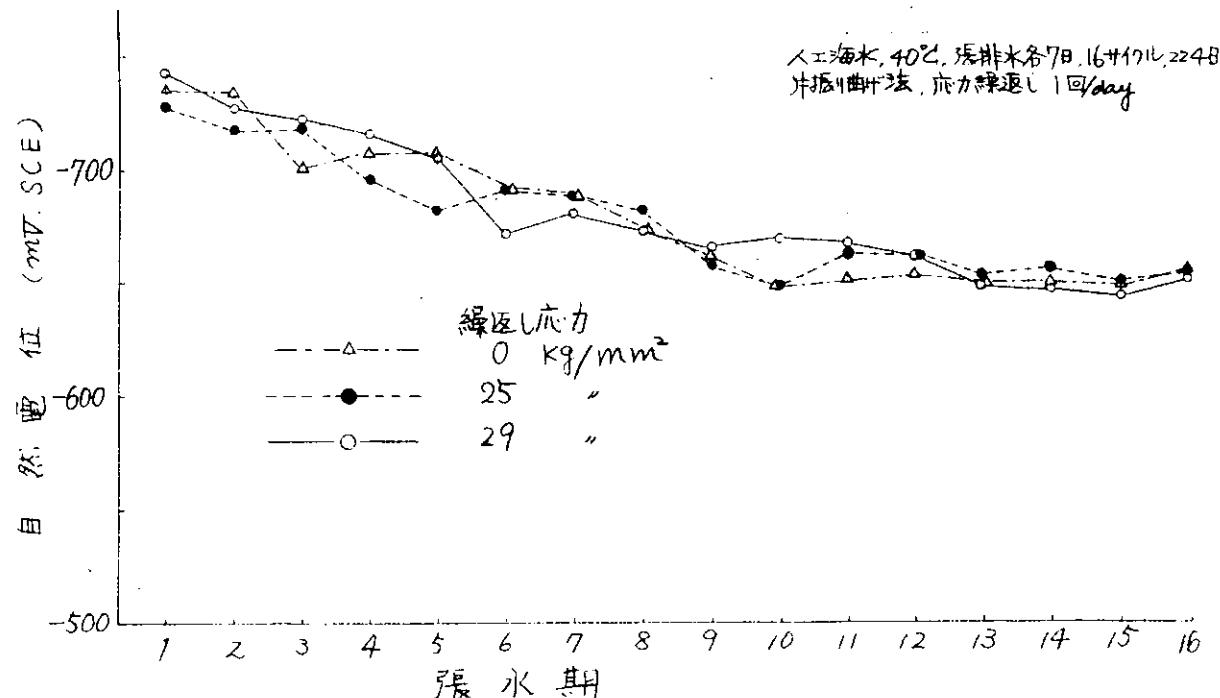


図 6.2.5 各張水期終了時の腐食片の自然電位経時変化

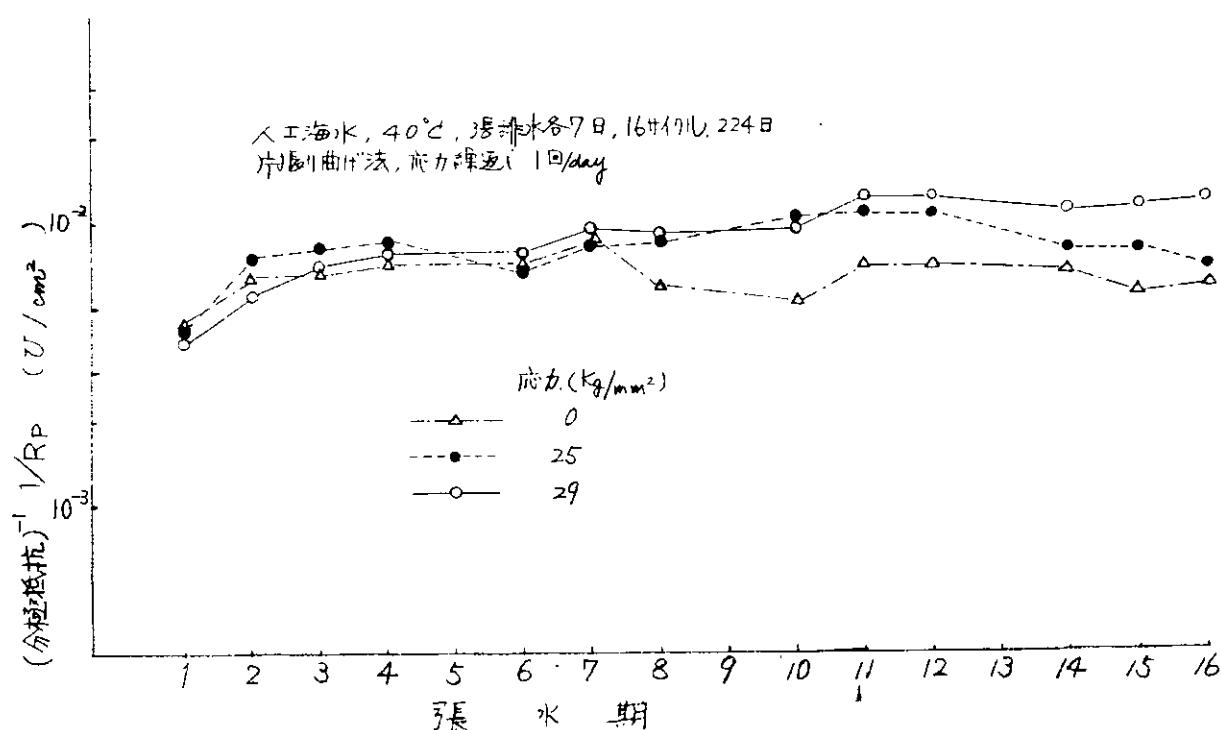


図 6.2.6 各張水期終了時における腐食片の分極抵抗の変化

表 6.2.4 片振り曲げ法における電気防食試験の結果

人工海水, 40°C, 張排水各7日繰返し16サイクル224日間, 応力繰返し, 1回/day, 繰返し回数192回
定電位防食法

応力 (kg/mm ²)	電位 (mV)	重量減 (g)	平均侵食度 (mm/yr)	防食率 (%)
0	腐食	4.4040	0.202	—
0	"	4.3600	0.200	—
2.5	"	4.5148	0.207	—
2.9	"	6.6326	0.305	—
2.9	"	5.4679	0.251	—
0	-900	1.8759	0.086	57.2
2.5	"	1.7556	0.081	61.1
0	-1000	0.1934	0.009	95.6
2.5	"	0.4167	0.016	92.3
2.9	"	0.4797	0.022	92.1
2.5	-1100	1.3658	0.063	69.7
2.9	"	1.3680	0.063	77.4

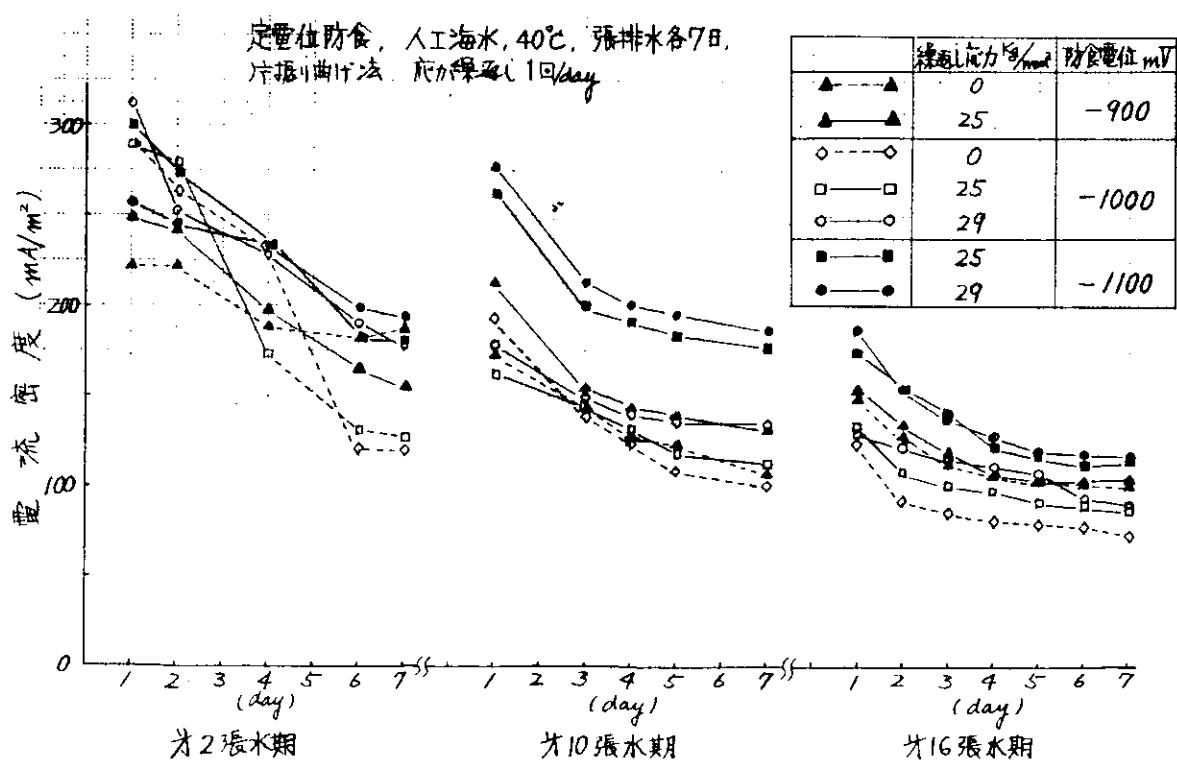


図 6.2.7 各張水期における防食電流の変化

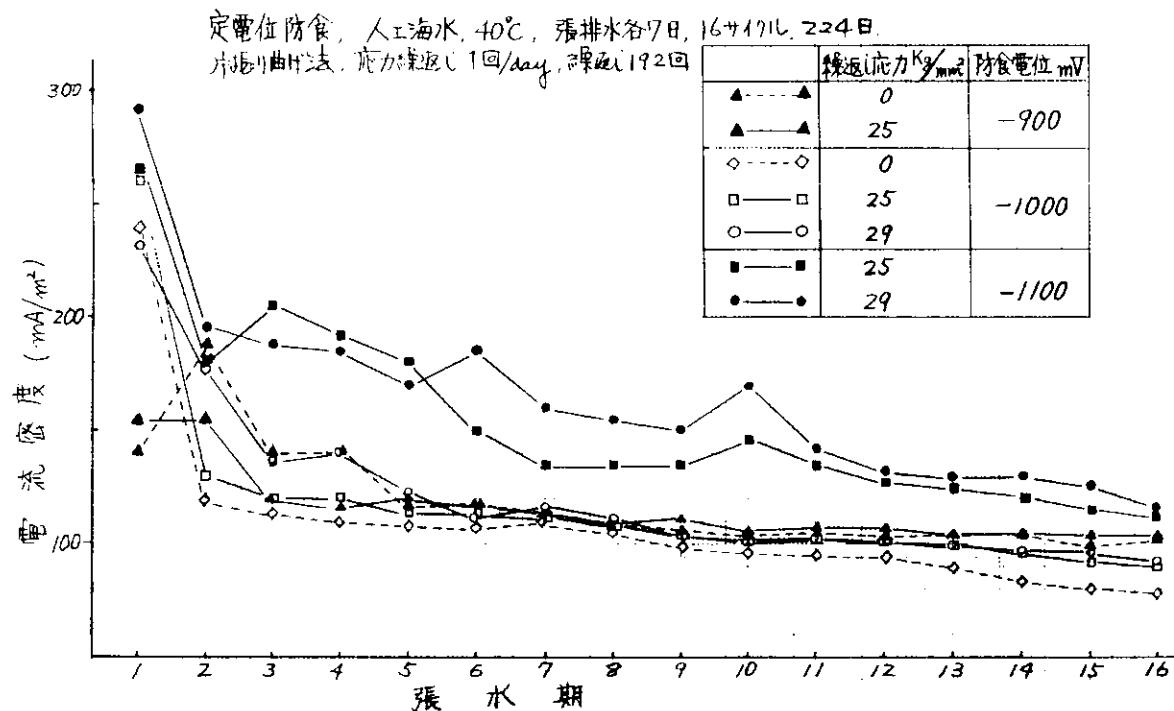


図 6.2.8 各張水期終了時の防食電流

表 6.2.5 各張水期終了時における表面の被覆抵抗の変化

片振り曲げ法、人工海水、40°C、張排水各7日、応力繰返し1回/day、定電位防食法

(Ω)※

張水期	設定電位 mV	腐 食			防 食								
		E corr			-900			-1000			-1100		
		0	25	29	0	25	29	0	25	29	0	25	29
浸漬直後		0.8	0.7	0.7	—	—	—	—	—	—	—	—	—
第 1		1.0	0.8	1.0	4.4	2.1	—	2.4	2.6	2.7	—	6.6	6.9
第 4		1.0	1.0	1.1	2.5	5.4	—	5.6	1.7	1.2	—	1.3	1.1
第 7		1.3	1.3	1.2	1.1	2.1	—	6.4	2.4	2.2	—	1.3	1.0
第 10		2.1	1.8	1.7	2.1	2.4	—	8.3	2.6	2.5	—	8.4	5.1
第 13		2.5	1.5	1.7	4.2	2.4	—	8.2	2.3	2.1	—	1.4	1.2
第 16		3.2	2.2	1.9	6.7	3.5	—	8.3	3.3	3.1	—	2.2	1.5

※ 試験片 (4.5 cm^2) と対極 (240 cm^2) との間の抵抗実測値、万能ブリッジ使用

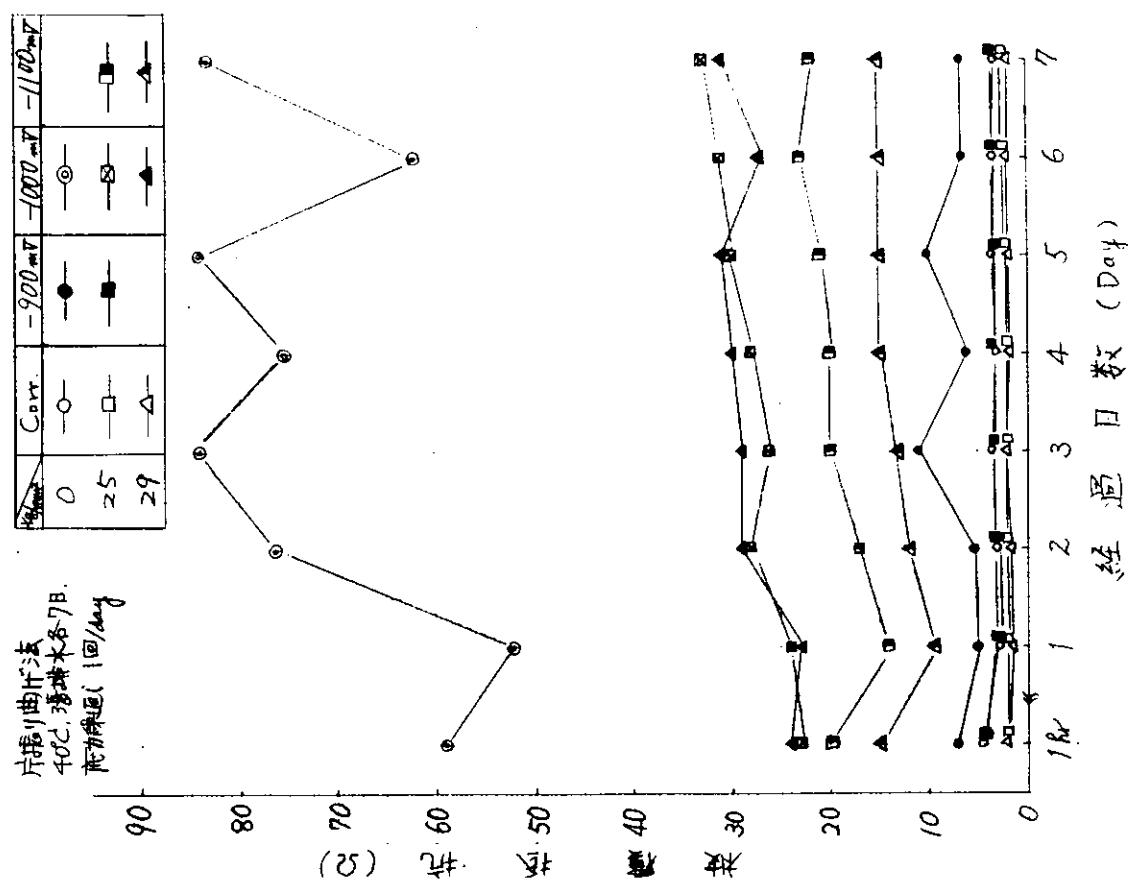


図 6.2.9 第16張水期における被覆底抗錆時変化

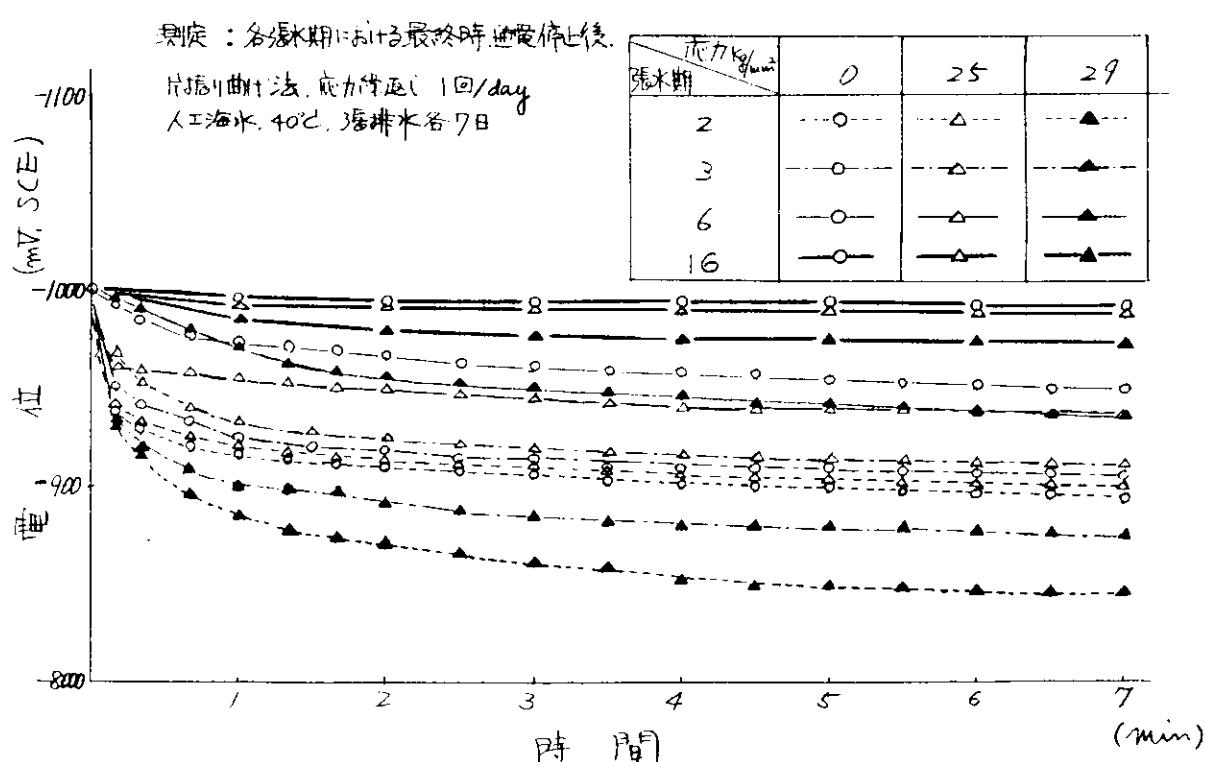


図 6.2.10 -1000 mV 防食試片の Decay 曲線

~~応力 kg/mm²~~
電位
SCE

0

25

29

Corrosion

-900
mV

-1000
mV

-1100
mV

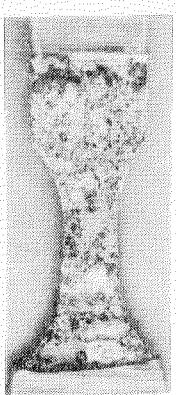
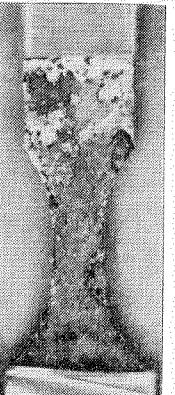
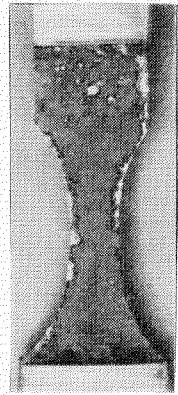
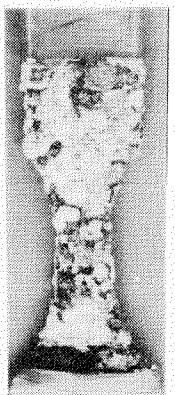
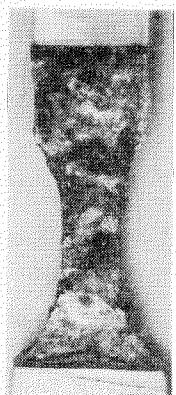
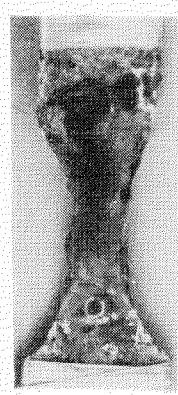


写真 6.2.1 試験後の表面状況

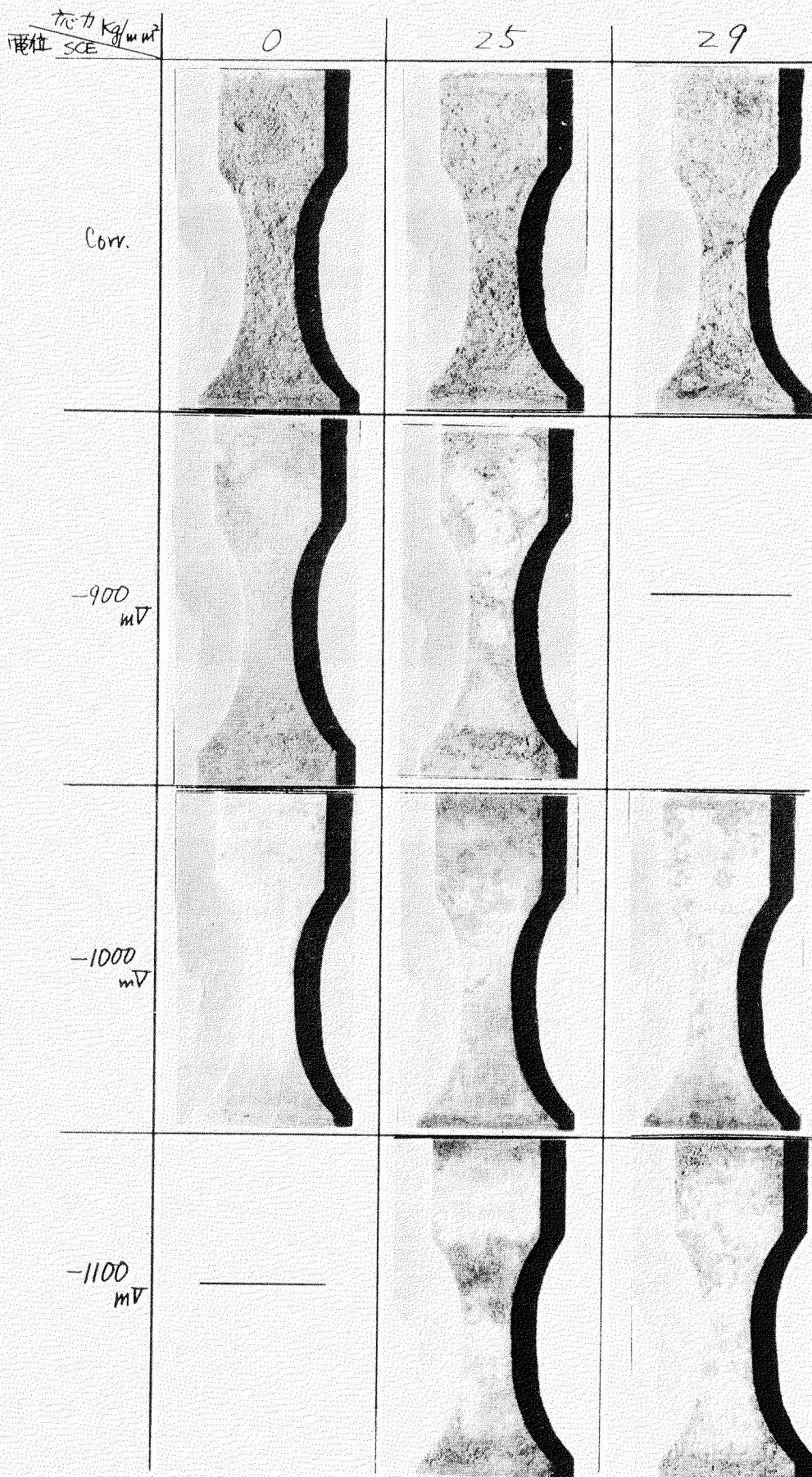


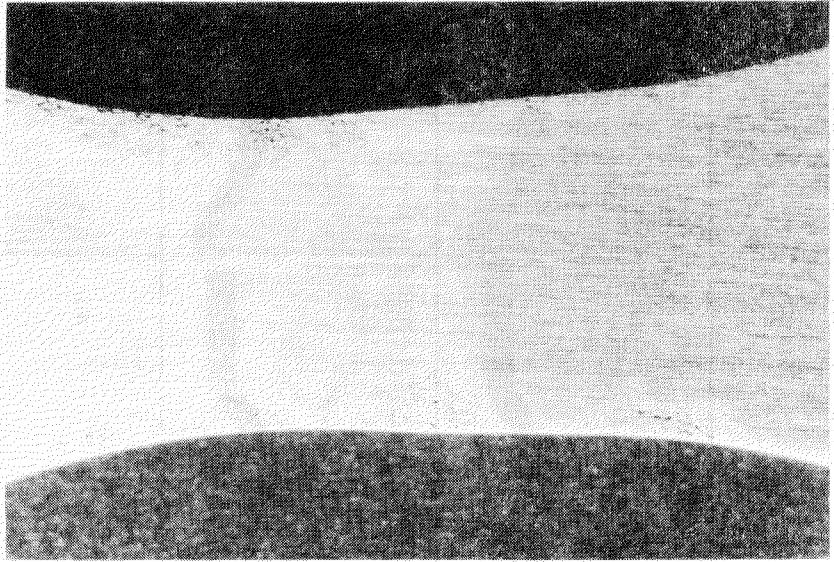
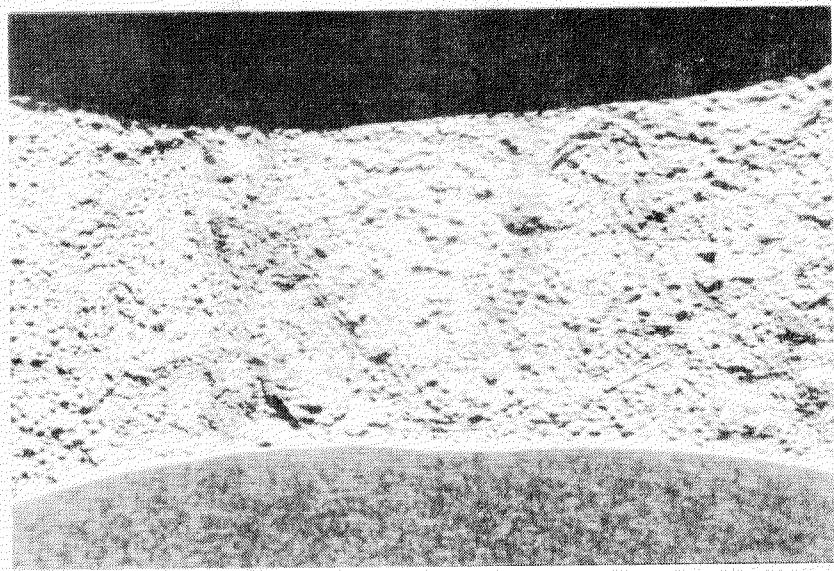
写真 6.2.2 試験後の腐食面

腐食

防食 (-1600 mV)

応力 29 kg/mm²

無荷重



車両 S541, 人工海水, 40℃, 3層排水各7日, 16サイクル, 224日, 底が保護され 1回/day

写真 6.2.3 試験後の腐食表面

7. 実船バラストタンク内の塗装試験結果

バラストタンクの腐食原因および防食方法に関する研究の一環としてバラストタンクの実船調査および実船試験を計画した。4・8年度に試験塗装を終了し、本年度（5・1年度）は追跡調査の3年目になる。

本年度は本研究の最終年度となるので3年間の調査結果をまとめて報告する。

7.1 試験対象船

表7.2 参照

7.2 バラストタンク内実船試験塗装概要

(1) バラストタンク内実船試験塗装概要

原則として試験塗装対象船の仕様に準ずる。また塗装箇所はタンク内の上、中、下部に各々約2m²実施する。
なお、塗料はJIS K-5664 タールエボキシ樹脂塗料1種適合品とする。

(2) 試験項目

(a) 塗装時

- (I) 下地処理方法および程度
- (II) 塗料および塗装系
- (III) 塗装方法および塗装条件
- (IV) 補修塗装

(b) 塗装後

- (I) 塗膜状態
- (II) 乾燥膜厚
- (III) 塗膜劣化試験(インピーダンス測定)

(c) 就航後

- (I) 塗膜の状態
- (II) 塗膜劣化試験
- (III) 航路、バラスト張水期間、張水率

7.3 試験結果

(1) 就航前(塗装時および塗装後)

表7.2 参照

(2) 就航後

(a) 調査状況

対象船は9隻であるが、外國人渠および2年毎人渠のため船によっては調査出来ない年度が多くあった。
なお、9隻のうち1隻(大光丸)は全て外國人渠のため3年間調査出来なかった。(表7.3)

(b) 塗膜の状態

3年目までの調査は3隻(鳥海丸、日晴丸、横田川丸)について調査したが、いずれもフクレ、サビ、ワレ、ハクリなどの欠陥もなく良好であった。他の5隻については、上記3隻の3年目の成績およびこれら5隻の1、2年目の結果から判断して3年目も良好なる成績を示すと考える。(表7.3)

いずれにしても3年目までの優れた成績は、タルエポキシ塗料の性能から考えれば当然の結果といえる。

(c) 塗膜劣化試験(インピーダンス測定)

就航後の $\tan \delta$ は経年と共に増加の傾向にあるが、3年目の数値は大体0.2前後となっている。

実験室での試験板による数値に比べて数値が若干高い傾向にあるが、これは実船における測定時の雰囲気条件(温度、湿度)によるものと考えられる。(表7.4、図7.1)

いずれにしても、各年ともインピーダンス測定における塗膜の抵抗値は $10^5 \Omega$ を保持しているため肉眼観察同様に優れた成績といえる。(図7.2)

(d) その他

(I) ショッププライマーについて

各対象船ともショッププライマーを使用しており、(表7.1)無機ジンクプライマー系、エポキシジンクプライマー系はウォッシュプライマー系に比べて防食性が優れているが、3年目までの結果はいずれも良好で差を認めない。更に長期になればショッププライマーの差が出てくるものと考えられる。

表7.1 実船試験塗装におけるショッププライマーの種類

一般名	商品名	試験対象船
ウォッシュプライマー系 (長バク型)	エバボンド	ジャパンアスター、鳥海丸 太栄丸、瀬田川丸、武光丸
エポキシ ジンクプライマー系	エポキシジンクリッヂプライマーB SDジンクプライマZ E # 100	あらすか丸 大光丸、日晴丸
無機ジンクプライマー系	ニッペジンキー 1000 PC-NC ウエルボンド	千尋山丸 日晴丸

(II) 下地処理程度および膜厚について

対象船は下地処理程度、膜厚(実測)などはそれぞれ異なるが、3年目までの結果からみて、下地処理、膜厚による差はない。

(III) 塗装箇所について

塗装箇所はタンク内の上、中、下部であるが、各対象船とも大きな差はない。勿論各部の成績はバラスト率などにもよるが、バラストタンク内は空槽部もスエット状態となり、短期間(3年以内)では差が出ないと考えられる。

(IV) 航路、バラスト率などについて

3年目までの結果からは差を認めない。

表7.2 バラストタンク内実船試験塗装概要

塗料メーカー	船名	造船所	船主	船種 (D/W)	引渡し 年月日	塗装個所	塗装年月日	塗装系		膜厚 (μ)
								ショックプライマー	塗装前処理	
日本ペイント (S/M962)	千尋山丸	三井玉野	大阪商船三井	バルクキャリアー (11,000)	M.2トップサイド (右舷)	4.8. 7	M.2トップサイド (右舷)	4.8. 5	エンベシッキー 1000PC-NC	エボタールM (2回塗)
大日本塗料 (S/M61712)	ジャパンライン	三菱長崎	カーキャンパー	4.8. 9 (23,700)	M.3バラストタンク (左舷)	4.8. 3	エバボンド FM-3	4.8. 4	ディスクサンダー パワーブラシ	SDCコート6.02TM および SDCコート4.02T (1回塗)
中國塗料 (S/M6235)	島梅丸	三菱島	日本郵船	バルクキャリアー (12,200)	M.5トップサイド (左舷)	4.8. 7	エバボンド FM-3	4.8. 3	ディスクサンダー パワーブラシ (St 2.5)	ビスコシHB (1回塗)
"	日晴丸	日立埠	山下新日本汽船	タンカー (23,500)	M.3バラストタンク (左舷)	4.8. 5	M.3センタータンク パラスト	4.8. 1	SDシンクブラ イマーM.10 ウェルボンド (上部のみ)	ビスコシHB (1回塗)
神東塗料 (S/M62339)	大栄丸	石橋横浜	日本郵船 其榮タンカー	タンカー (21,000)	M.3センタータンク (左舷)	4.8. 1.2	エバボンドEU	4.8. 7	ディスクサンダー パワーブラシ (St 2)	オビア#3000HB (2回塗)
関西ペイント (S/M64352)	大光丸	日立島	三光汽船	タンカー (18,000)	M.3バラストタンク (左舷)	4.8. 6	Z.E.M.100	4.8. 3	SDシンク プライマー (左舷)	エボシールM.100 (2回塗)
神戸ペイント (S/M62329)	瀬川丸	石橋製	川崎汽船	タンカー (27,1,000)	M.3バラストタンク (左舷)	4.8. 7	エバボンド 4.8. 3	エバボンド 4.8. 4	ディスクサンダー パワーブラシ (St 3)	エボシールM.100 (2回塗)
日本油脂 (S/M62286)	武光丸	石橋横浜	三光汽船	タンカー (23,1,000)	M.5バラストタンク M.3カーゴタンク (左舷)	4.8. 4	エバボンド 4.8. 11	エバボンド 4.8. 11	サンダーブラスト および ディスクサンダー パワーブラシ(S 125)	エビラックス5HB (1回塗)
鬼田化学 (S/M61040)	あらすか丸	三菱神戸	大阪商船三井	コンテナ (27,750)	M.4バラストタンク (左舷)	4.8. 6	エビコン ジンクリッヂ プライマーB (St 3)	4.7.12 4.8. 1	ディスクサンダー パワーブラシ (St 3)	ピチュラックM2000 (1回塗)

(質不拘)

表 7.3 試験対象船調査状況

船名	塗装箇所	塗装系		膜厚(μ)	追跡調査結果(インビーダンス判定と塗膜状況)				航跡
		塗装前処理	上塗		就航前	1年後	2年後	3年後	
千尋山丸	M62トップサイドタンク(右舷)	ショックライマー ニッペ ンキュー 1000PC-NC	サンドスイープ	エボタールM (2回塗)	上 350 中 400 下 340	4.9-4 (良好)	リスナベ入塗 (良好)	5.2-3 (良好)	入塗予定
ジャバヌアスター	M63バラストタンク(左舷)	エバボンド FM-3	ディスサンダー- パワー・ブラシ	SDCコート 6.02TM 4.02T (1回塗)	上 200~400 中 180~340 下 180~480	張水のため 測定不可	1年目入塗せず	5.0-8 0.191 (良好)	3年目入塗せず
鳥海丸	M65トップサイドタンク(左舷)	エバボンド FM-3	ディスサンダー- パワー・ブラシ (St 2.5)	ビスコーンHB (1回塗)	上 325 中 280	0.136 0.067	4.9-7 0.183 0.148 (良好)	5.0-8 0.197 0.146 (良好)	測定器故 調査不可
日晴丸	M63バラストタンク(左舷) (上部のみ)	SDシンクライマーZEM100 ウエルボンド	同	ビスコーン #1000 (2回塗)	上 245 中 270	0.247 0.219	4.9-5 0.252 0.239 (良好)	5.1-8 0.197 0.146 (良好)	日本→ベルギー (バラスト率) 70%
太栄丸	M63センターブラントンク(左舷)	エバボンド EU	ディスサンダー- パワー・ブラシ (St 2)	オピア #3000HB (1回塗)	上 220~300 中 210~250 下 230~270	0.118 0.098 0.080	4.9-1.2 0.124 0.103 0.084 (良好)	5.1-4 0.240 0.246 (良好)	日本→ベルギー (バラスト率) 70%
大光丸	M63バラストタンクSDSINK ブライマーZN#100	SDシンク ブライマー ZN#100	ディスサンダー- パワー・ブラシ (St 3)	エボシール #100 (2回塗)	上 213 中 230 下 235	リスナベ入塗	2年目入塗せず	5.1-4 0.240 0.246 (良好)	外国入渠
瀬田川丸	M63バラストタンク	エバボンド	サンドブラスト および ディスサンダー- パワー・ブラシ (St 2.5)	エビラックス 5・HB (1回塗)	上 227 中 200 下 335	0.127 0.135 0.085	4.9-7 0.135 0.135 (良好)	5.1-2 0.186 0.190 0.205 (良好)	日本→ベルギー (バラスト率) 50%
武光丸	M65バラストタンク(左舷) M63カーゴタンク(左舷)	エバボンド (St 2.5)	ディスサンダー- パワー・ブラシ (St 2.5)	バラスコ #800 (1回塗)	上 275 中 290 下 285	0.182	リスナベ入塗 (良好)	5.1-2 0.186 0.190 0.205 (良好)	リスナベ入塗
あらすか丸	M64バラストタンク(左舷)	エビコーン シンクリッヂ ライマーB	ディスクサンダー- パワー・ブラシ (St 3)	ビチュラック #2000 (1回塗)	上 275 中 290 下 285	0.110	4.9-6 0.203 0.203 (良好)	5.1-6 0.203 0.203 (良好)	タンク内排水 しないため調 査不可

注 一塗膜状態を示す。(順不同)

表 7.4 インピーダンス測定結果

船名	測定部位	周波数	航 前			航 後			航 後					
			KΩ	MF	tan δ	(容量)	KΩ	MF	tan δ	KΩ	MF	tan δ		
千尋丸	中 部 下 部	1 2	0.2	1.100 820 780	0.003 0.003 0.003	0.241 0.323 0.340				2.26 2.19 1.66 4.30	0.00458 0.00349 0.00402 0.00222	0.152 0.208 0.238 0.167		
ジャパンアスター	中 部 中 部	1 2 3 4	1.0											
鳥海丸	上 部 中 部	1 2 1 2	1.0	400 500	0.0021 0.0045	0.136 0.067	3.80 2.00	0.0031 0.0047	0.183 0.148	3.00 3.50 3.00 2.00	0.0030 0.0021 0.0040 0.0050	0.177 0.216 0.133 0.159		
日清丸	上 部 中 部	1 2 3 1 2 3	1.0											
太陽丸	上 部 中 部 下 部	1 2 1 2 3	1.0											
瀬田丸	上 部 中 部 下 部	1 2 1 2 3	1.0											
底光丸	上 部 中 部 下 部	1 2 3 4 5 6 7 8	1.0	424 900 700 600 200 500	0.0011 0.0018 0.0026 0.0020 0.0018 0.0021 0.0027 0.0029	0.182 0.084 0.088 0.095 0.088 0.084 0.092 0.084	0.127 0.135 0.118 0.098 0.440 5.60	0.0035 0.0035 0.0035 0.0035 0.103 0.084	0.124 0.124 0.124 0.124 0.124 0.124 0.124 0.124	3.70 4.40 5.60	0.0035 0.0035 0.0034	0.170 1.20 1.20 1.40 1.40 1.40 1.30 1.30	0.0051 0.0051 0.0050 0.0049 0.0046 0.0046 0.0047 0.0047	0.184 0.264 0.265 0.232 0.232 0.247 0.247 0.260
九三丸	中 部	1 2 3 4 5 6 7 8	1.0											

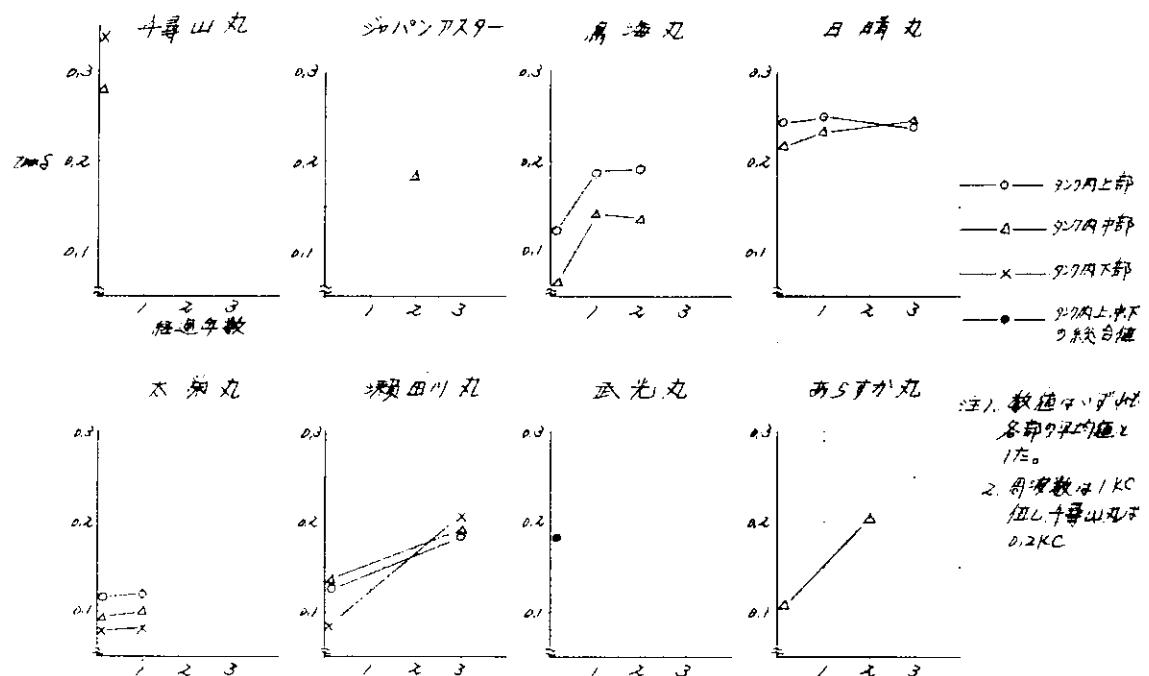


図 7.1 経過年数と $\tan \delta$ 値

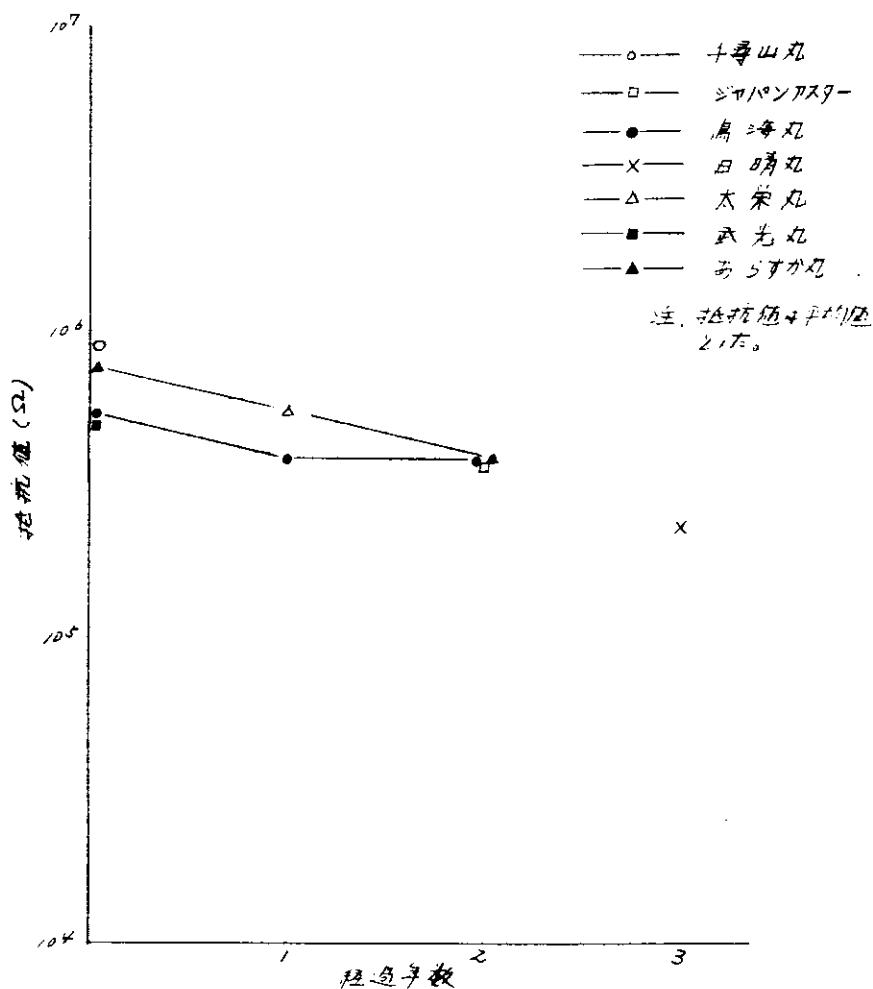


図 7.2 経過年数と抵抗値

8. バラストタンクの電気防食について

タンクの表面状態、繰返し応力の有無、バラスト状態等はタンクの防食基準に著しく影響する。しかもその影響程度は実験と実用時の状態でかなり大きい差があると考えられるから正確な防食基準を定めることは容易ではない。それゆえ本案においては応力の少ない状況において、タンクの使用状態によって大別して、それぞれの電気防食法について述べる。

タンクの使用状態もいろいろあるが大きく分けると常に海水を満すタンクと周期的に乾湿を繰返すタンクおよびカーゴタンクでバラストに使用するタンクである。

8.1 常に満水または空にすることの少ないタンク

この種のタンク防食は比較的容易であって、電気防食のみでも充分防食しうる。その場合の防食要領および留意すべき事項は次のとおりである。

- (1) 防食電流は初期著しく大きいが急速に低下した後、漸次減少して安定状態になる。計画としてはやや電流を大きく $80 \text{ mA}/\text{m}^2$ として初期腐食を防止する。安定電流は約 $40 \text{ mA}/\text{m}^2$ 程度であるから陽極の寿命は長くなるだろう。
- (2) 満水で天井部が漬つておれば問題はないが満水といつても天井は空気中に露らされている状態であれば、その可能性のある範囲は塗装することが望ましい。しかし、タンクが密閉状態にあるとすれば腐食は軽微であるから浮遊防食剤等によっても防止できる。
- (3) タンクが数区画に分かれている場合は、その連絡の構造にもよるが各区画毎に陽極を設置することが望ましい。

8.2 満水および空を繰返すタンク

空槽期間が短い場合はその影響は少ないが1週間以上になると空槽中の腐食と酸化による電位の上昇のため所要防食電流が増加する。これを繰返す毎に防食電位の保持が困難になり、タンクが腐食するから塗装と電気防食を併用するか、かなり多くの陽極を取付ける必要がある。この場合の実施要領は次のとおりである。

- (1) タールエボキシのような良好な塗料を注意して塗装すれば良好に防食ができるが、タンクは複雑な構造をしているから溶接部とかコーナーになるような部分に塗装の不良部を生じたり、また疵ついた部分を生ずることはまぬかれない。これらの部分は著しい腐食を生ずることがあるから少量の電気防食を併用する必要がある。電気防食はZnまたはAl陽極とし、その程度は電気防食のみの場合の1/10以下でよい。
- (2) 無塗装の新しいタンクの場合は電気防食は容易で $80 \sim 100 \text{ mA}/\text{m}^2$ 程度の計画防食電流で防食することができる。しかしタンクに錆を生ずると所要防食電流は次第に増加し $80 \sim 100 \text{ mA}/\text{m}^2$ の計画防食電流では防食し得なくなる。そのため張水中においても腐食が進行するから悪循環が繰返され腐食はますます進行する。これを防止するためには初期に過剰の電気防食を行なって、多少の錆を生じても充分防食電位を保持できるようにしなければならない。バラスト時の充分な防食はその後空槽にした場合でもある期間腐食の進行を防止しうる。それゆえ防食電流密度として計画は $200 \text{ mA}/\text{m}^2$ とする。この場合は一見不経済のように見えるが、陰極の電位は短時間で降下するから陽極の消耗が少なく寿命が2倍以上になるからむしろ経済的である。

8.3 時々貨物油タンクで時々バラストを入れるタンク

油を入れるとタンク表面に油が付着するから空とバラストを繰返すタンクより防食は容易になる。しかし、この場合は油の付着していないタンク内面が陽極になって激しいピッティングを生ずることがあるから注意する必要がある。防食方法としては前2項の場合と大差ない。

8.4 電気防食に及ぼすさびおよび空槽の影響

表 8.1 は海水中に自然電位のままに放置された試験片と 1 週間大気中に放置された試験片を $100 \text{ mA} / \text{m}^2$ 定電流分極試験を行なって比較した結果であつて、表中に示すとおり、大気中に放置されたことにより分極は著しく困難になっている。

表 8.1 各種試験片の定電流試験

A は磨いた試験片
C は鋸びた試験片

試験片の種類	大気放置の有無	浸漬後の電位 ($-mV$)						
		0 時間	2 時間	1 日目	2 日目	5 日目	7 日目	10 日目
A	なし	760	790	910	910	950	900	—
C	なし	730	755	775	780	790	800	—
A	あり	565	600	655	710	810	845	955
C	あり	480	535	615	640	660	690	795

8.5 維持電位の影響

(1) 浸漬して定電流分極試験を行なった場合の 20 時間後の電位は表 8.2 は試験片を各種電位に保った後 1 週間自然電位に保ったものおよび大気中に 1 週間放置した後 1 週間自然電位に保ったものについて試験片の電位を計測したものである。

表 8.2 定電流分極試験における防食電位(前処理)の影響

保持電位 7 日間後		大気中放置なし		大気中 1 週間放置	
自然電位 7 日間後		さびなし	さびあり	さびなし	さびあり
保持電位	自然電位	920	820	905	740
	-800 mV	830	820	930	815
	-900 mV	900	820	910	890
	-1000 mV	920	860	940	930

注) 数字は 20 時間後の電位 $-mV$

(2) 維持電位の影響

表 8.3 は 10 日間 -1200 mV より -900 mV に保ったあと 20 日自然電位に放置した試験片を、 -900 mV に維持するための所要電流および電気量を計測したものであつて、 -1200 mV に保持した試験片は裸鋼板に比べ著しく容易に分極している。

表 8.3 -900 mV 設定時の維持電流及び電気量

測定時間(日)	-1200 mV 試片	-900 mV 試片	裸試片
0	11.00 mA	1.500 mA	1.750 mA
1	1.05	2.04	1.80
2	0.90	1.57	1.50
3	0.88	1.37	1.33
4	0.85	1.24	1.23
5	0.82	1.15	1.29
10	0.74	0.99	1.01
15	0.69	0.88	0.90
20	0.67	0.85	0.86
電気量	56.6 C	81.8 C	77.9 C

8.6 計画電流密度の影響

表 8.4 は乾湿繰返し試験における試験片の分極特性試験において陰極を -800 mV に下げるための所要電流を示したものである。

表 8.4 分極特性試験における計画電流密度の影響

経過日数(日)		5 4 日	138 日	222 日
計 画 電 流 mA/m^2	0	2.95	5.5	2.7
	50	0.15	0.625	0.4
	100	0.113	0.25	0.055
	300	0.053	0.108	0.025
	500	0.03	0.048	0.02

注) 表中の数字は電流密度 (A/m^2)

張水率 50 % の比較的清浄なバラストタンクを防食するには $100 \text{ mA}/\text{m}^2$ の計画防食電流が必要であり、タンクが応力を受けている場合はさらに 20 % 程度の防食電流の増加が必要であろう。しかし電気防食は空槽時の防食はできないからタンク内は徐々に発銹したそのため張水時の所要防食電流は増加して、次第に防食電位に降下させることができなくなり腐食は促進される。これらの悪循環を防止するためには防食電流を増加して空槽時の防食と張水時の電位降下を良好にする必要があり、この場合の計画防食電流は $200 \text{ mA}/\text{m}^2$ 以上であろう。計画防食電流密度の増加は一見不経済のようであるが実際的には電位の降下が早いため使用電流が少なくなり陽極の消耗が減少して陽極の寿命が延びるからむしろ経済的であるともいえる。しかし、これらの防食方法については、まだいろいろ問題があり今後の検討が必要であろう。

その主なものは、

(1) 実験値と実用時の差異

実験室的実験と実船とではかなり大きい相違があるだろう。また実船でも船毎に大差あるようである。この実態を調査検討する必要がある。

(2) 過防食による脆化の問題

流電陽極の場合は計画電流密度を増加しても陰極の電位が下がるから実際的には電流は流れにくくなるから問題はないだろうが確認する必要がある。

(3) 応力の影響

実船での応力負荷の状態についてはさらに検討が必要であろう。特に応力分布、残留応力等については問題がある。

付録 電気防食とショッププライマーを併用した実船例

船名 S N O 9 1 7 あどりあ丸(大阪商船三井船舶所属 18万トン O / B / O) 4.7. 2引渡

S N O 9 5 0 あらふら丸(") 4.7.1 2引渡

1. 主題：バラストタンク内ショッププライマーと電防併用防食調査

2. 概要：本船の海水積込専用船 3 W . T . には、NK防食基準を準用して塗装及び電気防食が施されているが、特に本船の場合は、在来の無塗装電防対象部に対して脱落錆によるTANK内汚れを減じ、電防の効果を向上させる目的で、無機ジンク系ショッププライマー処理を行なっている。（プラケットの一部に、ジンクエボキシプライマーを比較テスト）

3. 新造時の仕様：

- 1) TANK内船殻材は、素材時にショットblast及びショッププライマー（無機質ジンクシリケート・エチル型）を 15~20μ処理した。
- 2) DECK裏及びタンク深 1/3までの範囲（主としてDECK裏を無機ジンク 75μ、その他をタールエボキシ 200μ）に重塗装を採用している。
- 3) 残る船底から 2/3までの範囲に対しては、加工組立後のショッププライマーダメージは補修しない。NKではショッププライマーは塗装とみなさないから、裸鋼板として、電流密度 80mA/m²で亜鉛電極による電防を行なう。（45%バラスト率）

4. 結果：

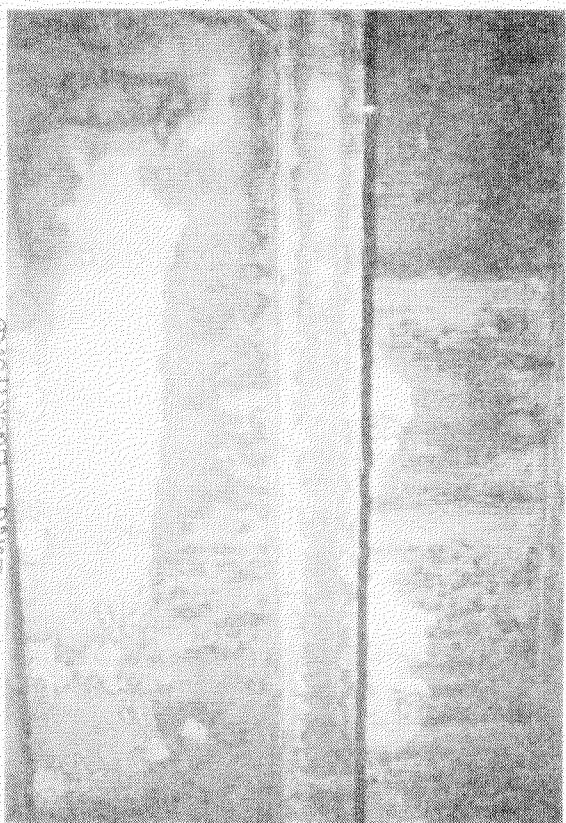
- 1) 無機ジンクショッププライマー 4年目（PHOTO-1&2），有機ジンクの1年目（PHOTO-3），共に電気防食併用の効果は十分見られ目的は達成されている。
- 2) カーゴタンクと隣接するTRANS-B^V-HD 及びLONG-B^L-HD (PHOTO-4)に関しては、隣接タンクとの温度差の影響か効果が低い。又HORIZONTAL部材の上面も錆は目立っていた。
- 3) アノードの消耗は在来と比べ極端に少いし、脱落錆の堆積物が大巾に減少した。

5. 結論：上記結果 4-2) の範囲を除いては、ほぼ塗装による防食法に近い防食状態が得られることと、アノードの寿命延長、タンク内掃除費用の削減が十分期待出来る。

注：1) 三井造船千葉造船所調査

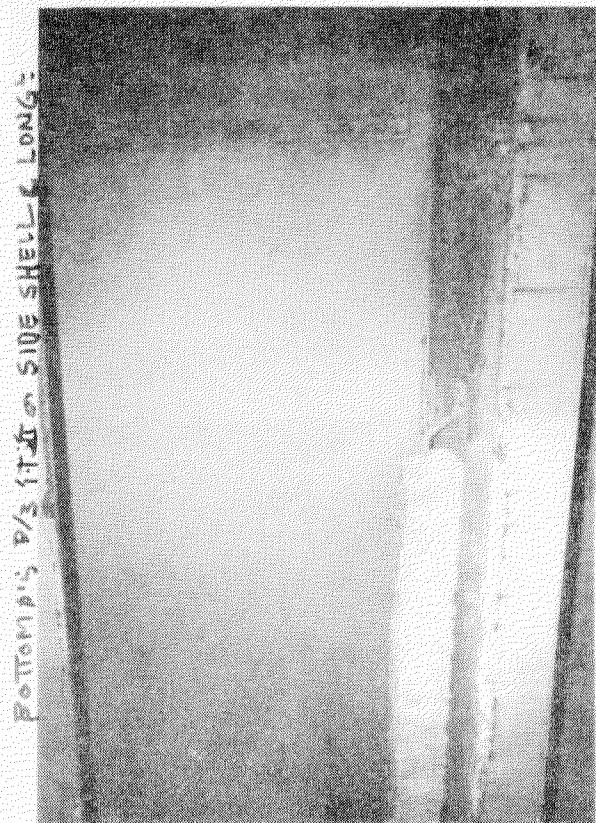
2) 定量的な調査は行なっていない。

Long & Bulk Head



(PHOTO - 1)

Exhibit 43



(PHOTO - 2)

Exhibit 44

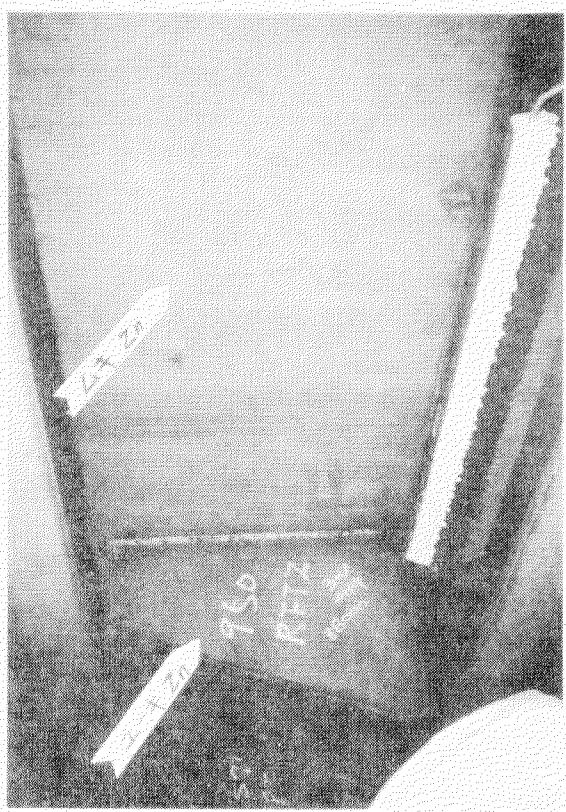


Exhibit 45

(PHOTO - 3)



(PHOTO - 4)

(PHOTO - 4)