

日本船舶振興会昭和48年度補助事業
“船舶の防食防汚方法に関する研究”

研究資料 No. 201

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49年3月

社 団 法 人

日 本 造 船 研 究 協 会

はしがき

本報告書は、日本船舶振興会の昭和48年度補助事業「船舶の防食防汚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。

本研究部会の委員は、次のとおりである。

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)	翁長一彦 (船舶技術研究所)
	植田健二 (三菱重工業)	瀬尾正雄
	国広敏之 (日立造船)	太田元久 (日本防蝕工業)
	寺田泰治 (日本海事協会)	三好貢 (神東塗料)
	南義夫 (横浜国立大学)	重野隼太 (中川防蝕)
	早稻田瑞秋 (中國塗料)	石田富之輔 (日本ペイント)
委員	池田 稔 (川崎製鉄)	伊東達夫 (川崎汽船)
	伊藤剛平 (日本造船工業会)	平山昭邦 (神東塗料)
	植田清夫 (船舶技術研究所)	岡 肇 (佐野安船渠)
	小川信行 (日本ペイント)	金井一十三 (昭和海運)
	門智 (新日本製鉄)	北田 実 (尾道造船)
	木津圭二 (大阪商船三井船舶)	上田研一 (海上保安庁)
	小池金広 (山下新日本汽船)	佐武二郎 (住友金属工業)
	坂見史朗 (三井造船)	柴田有三 (三井金属鉱業)
	沢田馨 (日立造船)	村上正三 (日本油脂)
	日下幹生 (大阪造船)	坂井在広 (カナエ塗料)
	鈴木茂 (関西ペイント)	鈴木省輔 (函館ドック)
	原義人 (三保造船所)	荒川 要 (神戸製鋼所)
	高島敏男 (川崎重工業)	長門広司 (笠戸船渠)
	谷川典人 (新和海運)	服部堅一 (住友重機械工業)
	石田卓雄 (佐世保重工業)	播谷圭亮 (石川島播磨重工業)
	松島巖 (日本鋼管)	藤井勝三 (臼杵鉄工所)
	神谷敏夫 (名村造船所)	奥山孝志 (日本中型造船工業会)
	湯川光春 (ジャパンライン)	宮本新平 (三菱重工業)
	森山俊 (三光汽船)	
	西川孝寛 (東亜ペイント)	
討議者 参 加 者	青木真一 (川崎製鉄)	荒川要 (神戸製鋼)
	五十嵐清幸 (石川島播磨重工)	石沢隆夫 (神戸製鋼)
	伊藤宏一 (三井造船)	岩竹民哉 (尾道造船)
	内堀利也 (日本防蝕)	岡崎章三 (川崎重工)
	岡部利正 (三菱重工)	岡本信昭 (関西ペイント)
	織田貞四郎 (三菱重工)	加藤 寛 (船舶技術研究所)

討 參 加 議 者		
	上寺孝明	(中國塗料)
	河野忠夫	(新日本製鉄)
	佐々木義昭	(日本鋼管)
	参木武	(日本防蝕)
	多田俊文	(日本ペイント)
	玉野井 豊	(臼杵鉄工)
	森 理市	(新日本製鉄)
	中尾 学	(中國塗料)
	原 寅志	(日本防蝕)
	本多洋二	(住友金属)
	森 宏	(日立造船)
	渡辺常安	(新日本製鉄)
	神例昭一	(住友重機械)
	木下元洋	(三菱重工)
	坂本進	(日本ペイント)
	鈴木昌己	(日本鋼管)
	玉田明宏	(日本鋼管)
	徳岡泰広	(日本油脂)
	永江康夫	(三菱重工)
	萩原宏治	(海上保安庁)
	富士盛襄司	(海上保安庁)
	村井謙二	(日本海事協会)
	山本昇三	(日立造船)

目 次

1. 研究の概要	1
2. 腐食原因に関する研究	2
2.1 応力の変化の裸鋼および塗装鋼に関する研究	2
2.1.1 試験装置と試験方法	2
2.1.2 試験結果	2
2.2 バラスト張水率と張水期間の影響	6
2.2.1 試験装置と試験方法	6
2.2.2 試験結果	6
2.2.3 まとめ	7
2.3 水質の影響調査(その1)	13
2.3.1 試験装置と試験方法	13
2.3.2 試験結果	13
2.3.3 まとめ	14
2.4 水質の影響調査(その2)	18
2.4.1 調査項目	18
2.4.2 調査方法	18
2.4.3 試験条件	18
2.4.4 計器	18
2.4.5 測定結果	18
2.4.6 まとめ	19
2.5 タンク体積と表面積率影響調査(V/S率の影響)	30
2.5.1 試験装置と試験の方法	30
2.5.2 試験結果	31
2.5.3 まとめ	32
3. 防食方法に関する研究	39
3.1 イナートガス組成と防食効果	39
3.1.1 試験装置と試験の方法	39
3.1.2 試験結果	39
3.1.3 イナートガスチャージ量と鋼材の腐食について	39
3.1.4 まとめ	40
3.2 応力の変化に対するイナートガスの防食効果	49
3.2.1 試験装置と試験方法	49
3.2.2 試験結果および検討	49
3.2.3 まとめ	50
3.3 応力の変化に対する塗膜の防食効果	56
3.3.1 試験装置および試験方法	56
3.3.2 試験結果とその検討	57
3.3.2.1 繰返し応力下における塗膜損傷部の腐食	57

3. 3. 2. 2 腐食疲れ寿命に及ぼす塗膜の影響	5 8
3. 3. 2. 3 塗膜劣化に及ぼす繰返しひずみ影響	5 8
3. 3. 2. 4 海中における塗装鋼の電気化学的挙動	5 9
3. 3. 3 まとめ	5 9
4. 実船調査および実船試験	7 0
4. 1 バラストタンクの温度測定	7 0
4. 1. 1 対象タンク	7 0
4. 1. 2 計測方法	7 0
4. 1. 3 計測器具および使用材料	7 0
4. 2 腐食速度、腐食効果の調査	7 5
4. 2. 1 調査結果	7 5
4. 2. 2 まとめ	7 5
4. 3 バラストタンクの試験塗装	7 8
4. 3. 1 試験塗装対象船	7 8
4. 3. 2 実施要領	7 8
4. 3. 3 塗装仕様	7 9
4. 3. 4 試験項目	7 9
4. 3. 5 試験結果	7 9
付録 I 昭和47年度報告書補遺	8 1
付録 II 第140研究部会委員会提出資料一覧表	1 0 4

1. 研究の概要

船舶のバラストタンク内部材の腐食は、バラストタンクの大きさ、使用条件、環境条件等によって多種多様である。これらの腐食を防止するためには、腐食原因と考えられる要素一つ一つについて調査を行なわなければ効果的な防食法を見出すことは困難である。

この研究は上記の観点から五ヶ年計画の第2年目の研究として行なわれたもので、腐食原因に関する研究、防食法に関する研究、実船試験などを行ったものである。

腐食原因に関する研究としては、小型試験片およびバラストタンクの模型を用いて、変動応力を与えた場合の裸鋼及び塗装鋼の腐食の状況、バラスト張水率、張水期間が腐食に及ぼす影響、水質が腐食に及ぼす影響、タンク体積とその表面積の比が腐食に及ぼす影響について調査した。

また腐食方法に関する研究としては、イナートガスの防食効果の調査としてガスの組成の影響、変動応力のある場合のイナートガスの効果について実験を行なった。また、二種類の塗料を用いてそれぞれの塗膜について応力が作用した場合の塗膜の劣化、腐食疲労について実験を行った。

実船試験としてはバラストタンク内の温度を測定するため、タンカーのバラストタンク内に温度計を取りつけ、航行中のタンク内温度を計測した。また、タンカー、鉱石船のバラストタンク内に試験片を取り付け、腐食速度や防食効果を調査した。さらにタンク内的一部分に試験塗料を塗り防食効果を調査するため準備を進めている。

2. 腐食原因に関する研究

2.1 応力の変化の裸鋼および塗装鋼に関する研究

2.1.1 試験装置と試験方法

(1) 試験装置の概要

試験装置は第1年度に製作した専用の応力付加試験装置¹⁾を使用し、前回と同様に腐食環境を調節するためのバラスト海水の試験タンク内への張水は図2.1.1に示した補助タンクで予め保温した海水を使用した。その他装置の詳細は既報¹⁾を参照されたい。

(2) 試験条件

応力付加条件を0, 0.05% (10kg/mm^2), 0.1% (18kg/mm^2), 0.2% (27kg/mm^2), 0.7% (-10kg/mm^2) の5段階の定ひずみとし応力繰返し速度を前年度の2回/dayに比較して5回/dayおよび10回/dayと多くし、腐食環境の張水期間10日、空槽期間10日、雰囲気温度40°Cは前回と同一条件とした。

(3) 試験片

試験片はA級鋼板(KAS一板厚2.2mm)から機械仕上後(VVV)トリクロレンで脱脂洗浄して重量および板厚計測(1.03mmポイントマイクロメータ)した裸試験片とこれにタールエポキシ塗料を塗布した2種類のものを用意した。塗装条件は表2.1.1に示したように第1年度の試験と同一にした。

表2.1.2 塗装条件

塗料	タールエポキシ (ビスコンH.B.)	鉛筆硬度	F-2H
混合比	主剤8.5 硬化剤1.5	塗装間隔	1回スプレー塗
膜厚	250μ	乾燥時間	48日乾燥後 10日間自然放置

2.1.2 試験結果

図2.1.2に試験期間中の裸鋼材の自然電位の変化を示した。図には第1年度目に実施した繰返し応力2回/dayのもとの比較のため併記した。

試験開始の1cycleの自然電位は-770mV程度まで降下しているが、試験時間と共に除々に貴側にずれ4cycle目には-700mV附近まで上昇した。しかしながら特に応力付加速度の影響は認められない。

試験は現在(49年1月末)4cycle(80日)の試験を終了し、腐食速度その他は現在とりまとめ中である。

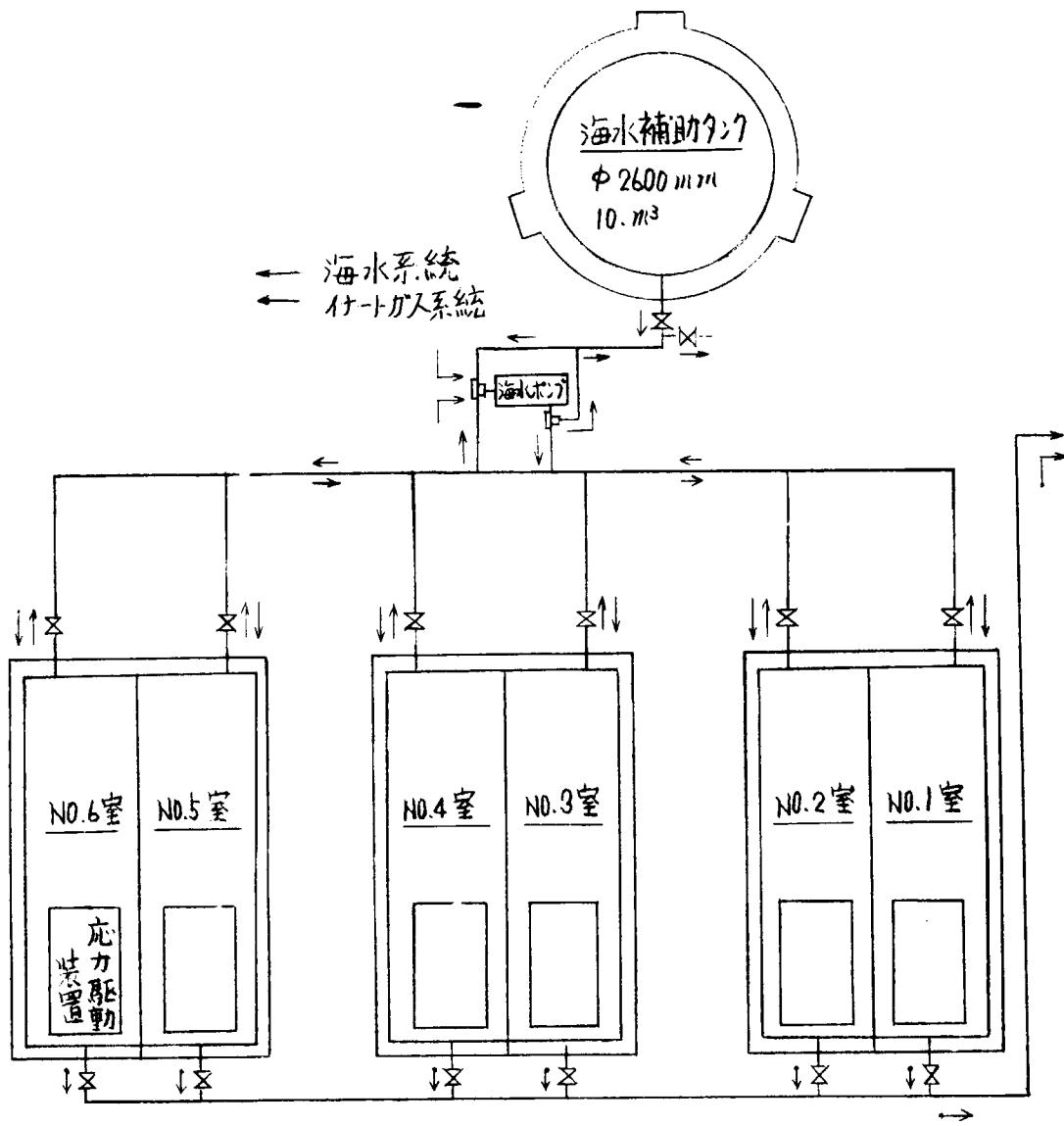
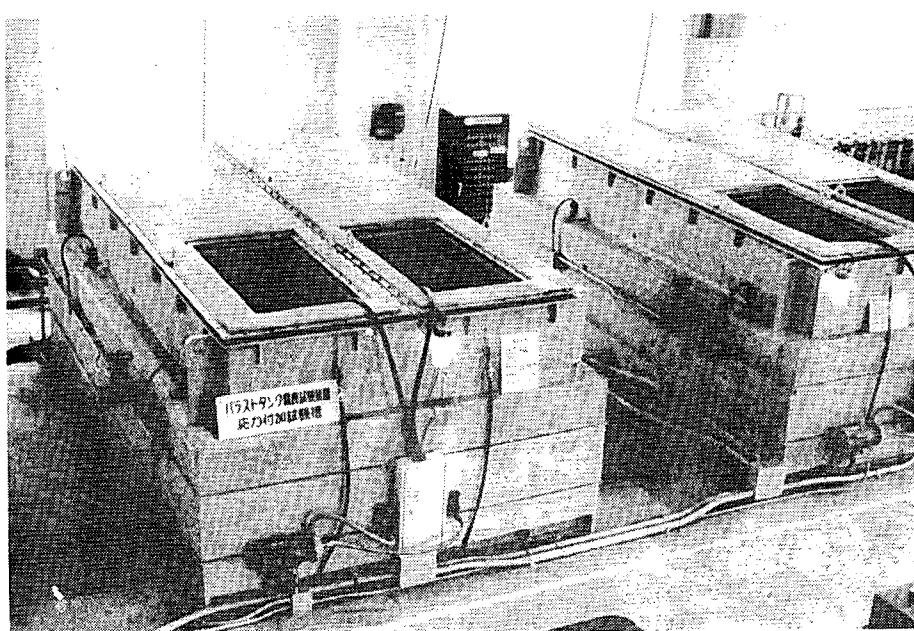


図 2.1.1 バラストタンク応力付加試験装置配管系統



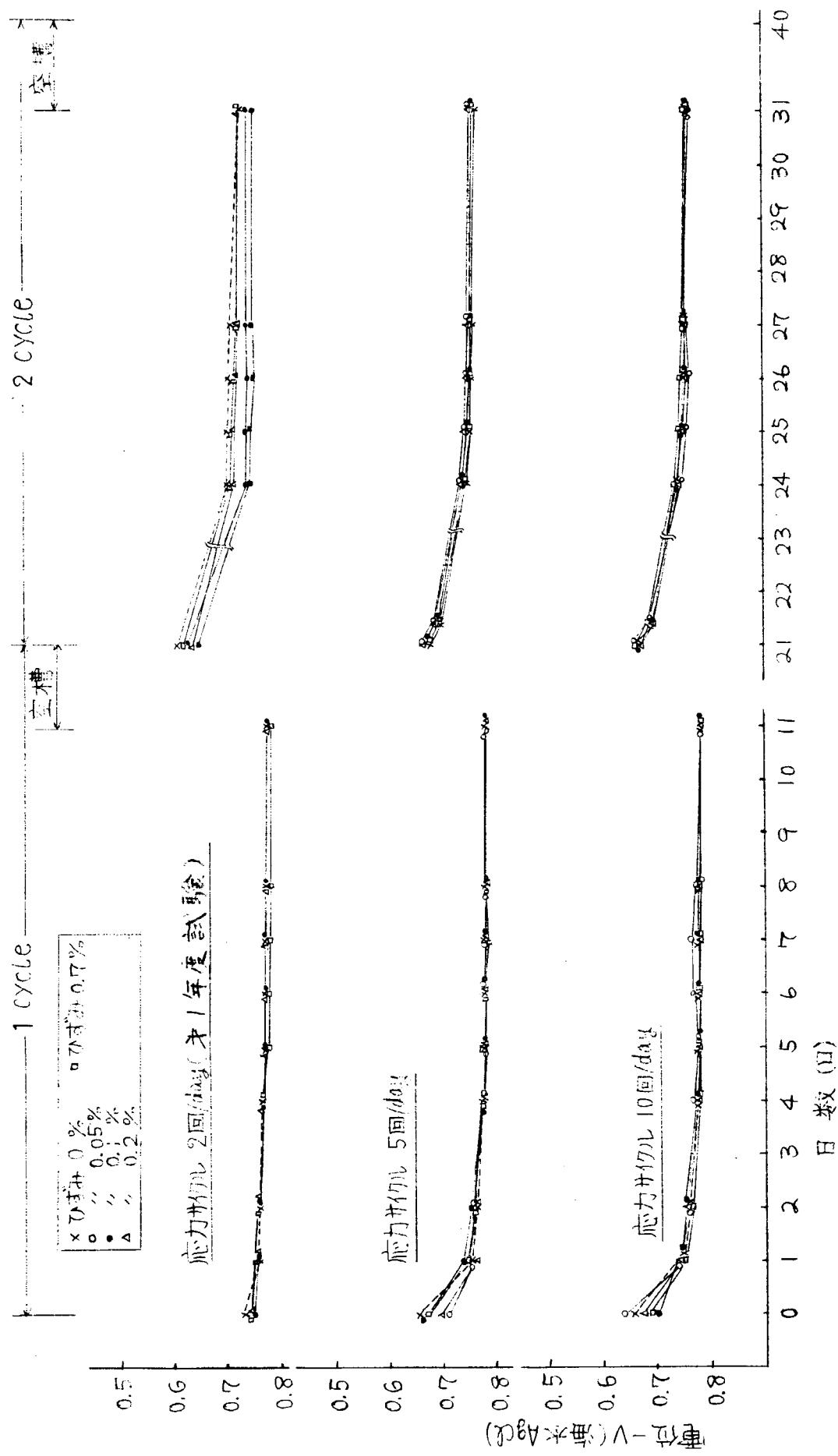


図 2.1.2 応力附加条件下における鋼材電位の経時変化

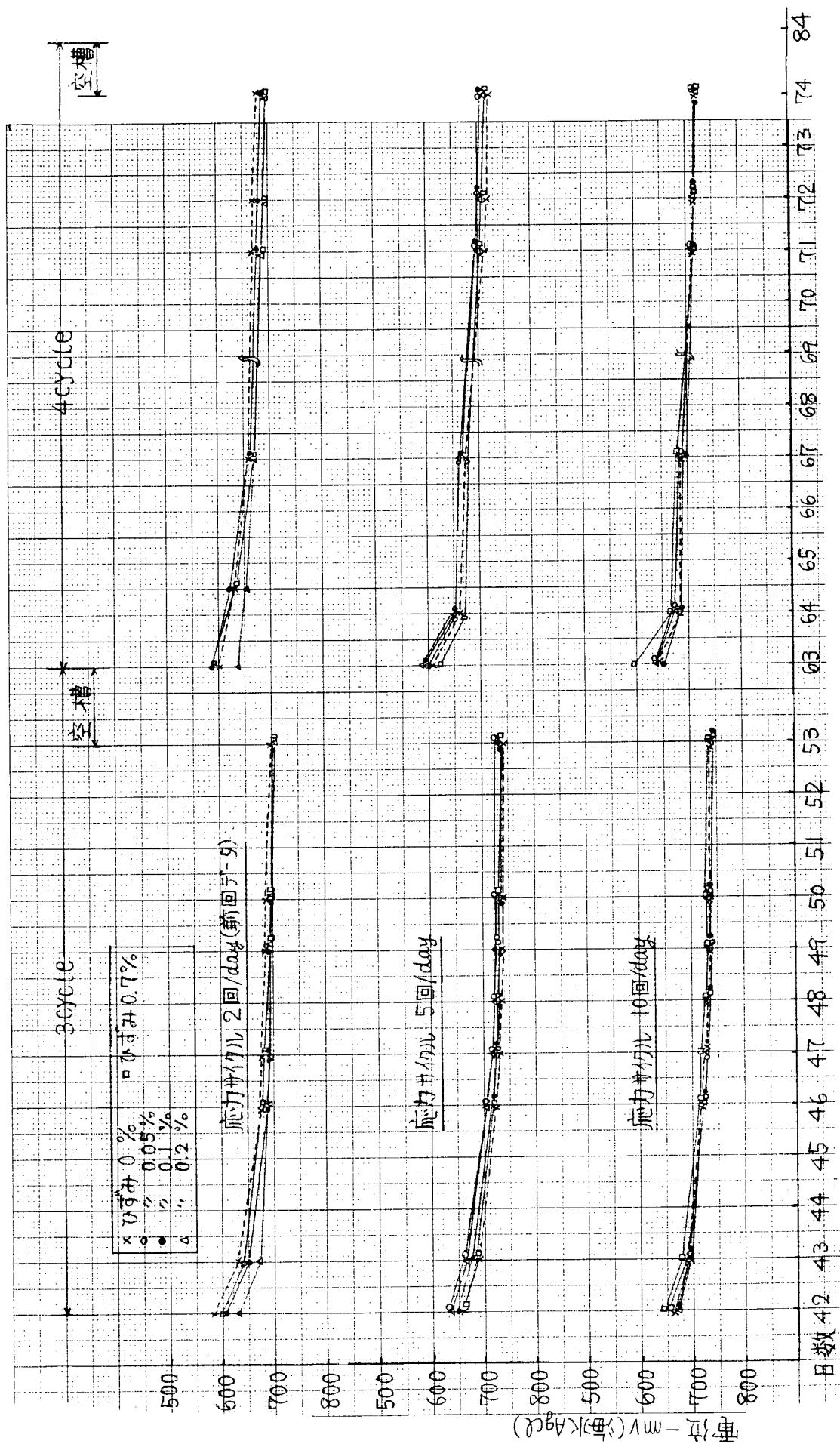


図 2.1.3 応力付加条件下における鋼材電位の経時変化

2.2 バラスト張水率と張水期間の影響

2.2.1 試験装置と試験方法

(1) 試験の概要

第1年度研究において製作した恒温水槽 ($10\text{m}(\text{L}) \times 6\text{m}(\text{B}) \times 1\text{m}(\text{H})$ 2基) に 1m 角の軟鋼製タンク蓋付のものを前記恒温水槽に浸漬し、試験槽への海水の供給排出は予め定められた周期で張排水した。

試験水槽への海水は底から 70cm の高さまで満たし、張水期間中は1日に1回海水レベルを 10cm (底から 80cm) 程上昇して、船体の波浪によって生じると予想されるバラスト水面付近の腐食の様相を調査できるように考慮した。尚、張水期間中の試験槽の自然電位を海水塩化銀電極を基準電極として計測した。

(2) 試験条件

試験条件を表2.2.1に示す。張水率 $30, 50, 70\%$ 、同期 $10, 20, 40$ 日を組合せた9種類の条件に張水率 100% (満水) と 0% (空槽、飽和温度) の条件を加えた。

表2.2.1 張排水試験条件

周期 (DA/S)	張水率 (%)	張水期間 (DA/S)	排水期間 (DA/S)	温度 (°C)						
					10	20	30	40	50	60日
1	—	0	0	40						
2	—	100	∞	40						
3	10	30	3	40	■	■	■	■	■	
4	20	30	6	40	■	■	■	■	■	
5	40	30	12	40	■	■	■	■	■	
6	10	50	5	40	■	■	■	■	■	
7	20	50	10	40	■	■	■	■	■	
8	40	50	20	40	■	■	■	■	■	
9	10	70	7	40	■	■	■	■	■	
10	20	70	14	40	■	■	■	■	■	
11	40	70	28	40	■	■	■	■	■	

(注) 

(3) 試験槽とモニター試験片

供試材はJIS G3101 SS41の板材から切出して図2.2.1に示した試験槽を組立て、内面をショットブロスト処理した。試験槽内への吊下げ試験片は $30 \times 50 \times 8\text{mm}$ のものと $1000 \times 50 \times 6\text{mm}$ の長尺物の2種をショットブロスト仕上げとした。

2.2.2 試験結果

図2.2.2に張水率と張水期間の変化による試験槽電位の経時変化を示した。張水率 100% のタンクの電位が -760mV であるのに対し、張水率の変化したものはそれよりも貴な電位を示し、僅ながら張水率の小さいものほど貴電位を示した。

試験槽の各位置における単独試験片の腐食速度を図2.2.3、図2.2.4に示す。¹

図の実線は重量減より求めた腐食速度を示し、点線は直径 6mm のマイクロメータにより計測した厚の減少から腐食速度を求めたものである。実線と点線で示した腐食量の差が表面の粗度を示していると考えてよい。

腐食速度は試験槽内の腐食環境に応じた特異な腐食のパターンを示し、1日1回の海水の湿润を繰り返した潮位部が他の部分よりも最も大きな腐食速度を示した。

*1 連続試験片の解析はとりまとめ中である。

図 2.2.5 に潮位部および空槽部(天井部)の腐食速度におよぼす張水率の影響を図 2.2.6 にバラスト部平均腐食速度の張水率による変化を示した。

水槽内の各部の腐食を詳細に調べた図 2.2.5, 図 2.2.6 の結果から次のことが判る。

- (イ) 空槽部の腐食は張水率、張排水周期の変化の影響を殆んど受けず略一定で他の 2 部分より極めて小さい。
- (ロ) 潮位部の腐食は 30 ~ 70 % の張水率変化には殆んど影響を受けないが、この部分の腐食は張排水周期の影響は大きく受けて、張排水周期が長くなれば腐食は小さくなる。しかしながら、空槽部、バラスト部に較べて 1 番腐食が激しい。
- (ハ) バラスト部の腐食は潮位部の腐食よりいくらか小さいが、バラスト率、張排水周期の両方に影響される。

以上述べたように空槽部の腐食が一番おだやかである。しかるに現実には腐食は激しいとされており、この原因の一つとして実船のタンク天井部の日光による温度上昇が腐食に影響をおよぼすとの想定から予備的に試験水槽の天井部(張排水周期 40 日、張水率 50 %)を 1 日の中で 8 時間加熱を毎日繰り返して天井部の腐食状態を調査した。

図 2.2.7 はこのときの試験槽内各部の温度変化の 1 例を示したもので、参考のため張水率 0 % (空槽の試験槽)^{*} と張水率 100 % の試験槽の天井部の温度を併記した。

腐食試験結果は図 2.2.3 (右下図)に見られるように特に腐食促進の傾向を示さなかった。この原因としては天井部を加熱しない水槽の天井部の温度がバラスト部の温度より低い(露点温度以下)ため通常天井部には多量の水滴が付着した状態であるが本試験で加熱した程度では図 2.2.7 にみられるようにバラスト部温度と天井部の温度に殆んど差がなく、付着水分の蒸発による濃縮が殆んど起きなかつたためと考えられる。今後更に温度差を広げて試験を行なう考えである。

2.2.3 まとめ

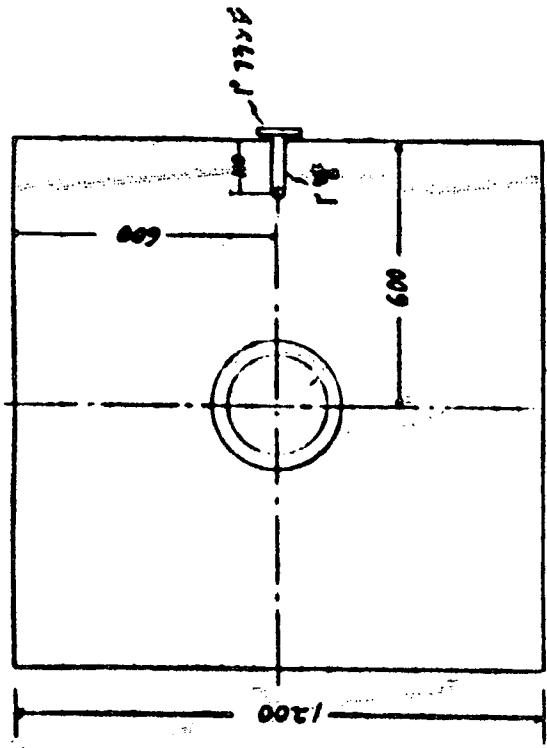
以上の試験結果をまとめると次のようになる。すなわち、

- (イ) バラスト部の腐食は張水率 50 % 付近にピークがあり、張排水周期が長くなる程腐食ピークは低くなる。
- (ロ) 空槽部分の腐食は張排水周期、張水率に殆んど影響を受けず、極めて僅かである。
- (ハ) 潮位部の腐食は張水率よりも張排水周期の影響を受け、20 日周期以下で特に激しい腐食を生じる。

これらの結果はいずれも単独試験片によるものであり、長尺試験片については現在解析中であり、結果のまとめり次第報告の予定である。

* 空気の入れ替えは原則として 80 日間行なわないようにした。

試験槽蓋



試験槽木体

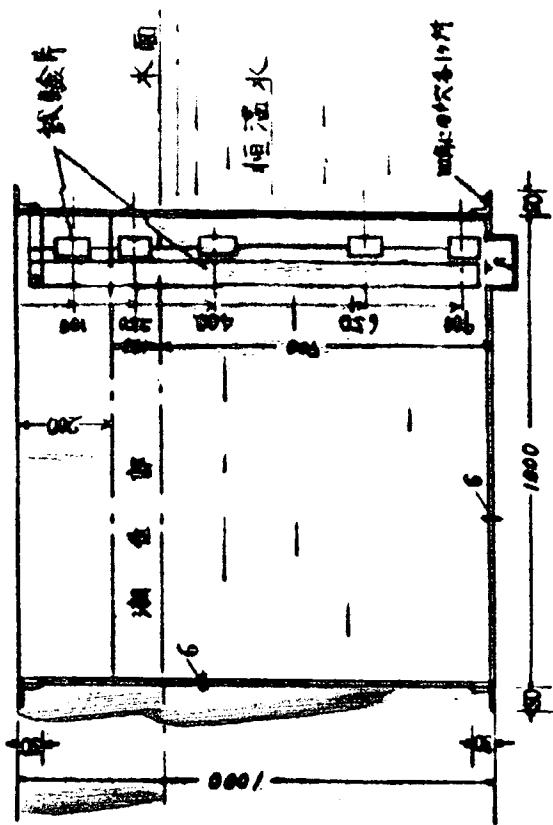
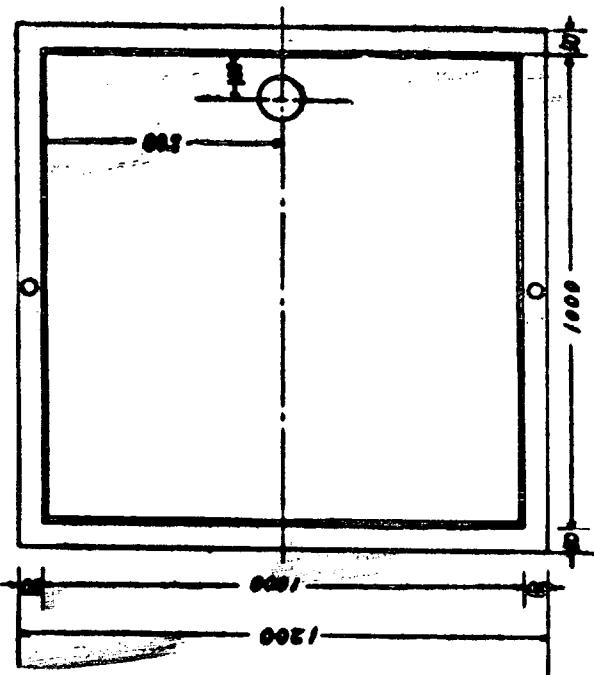


図 2.2.1 試験槽の概要

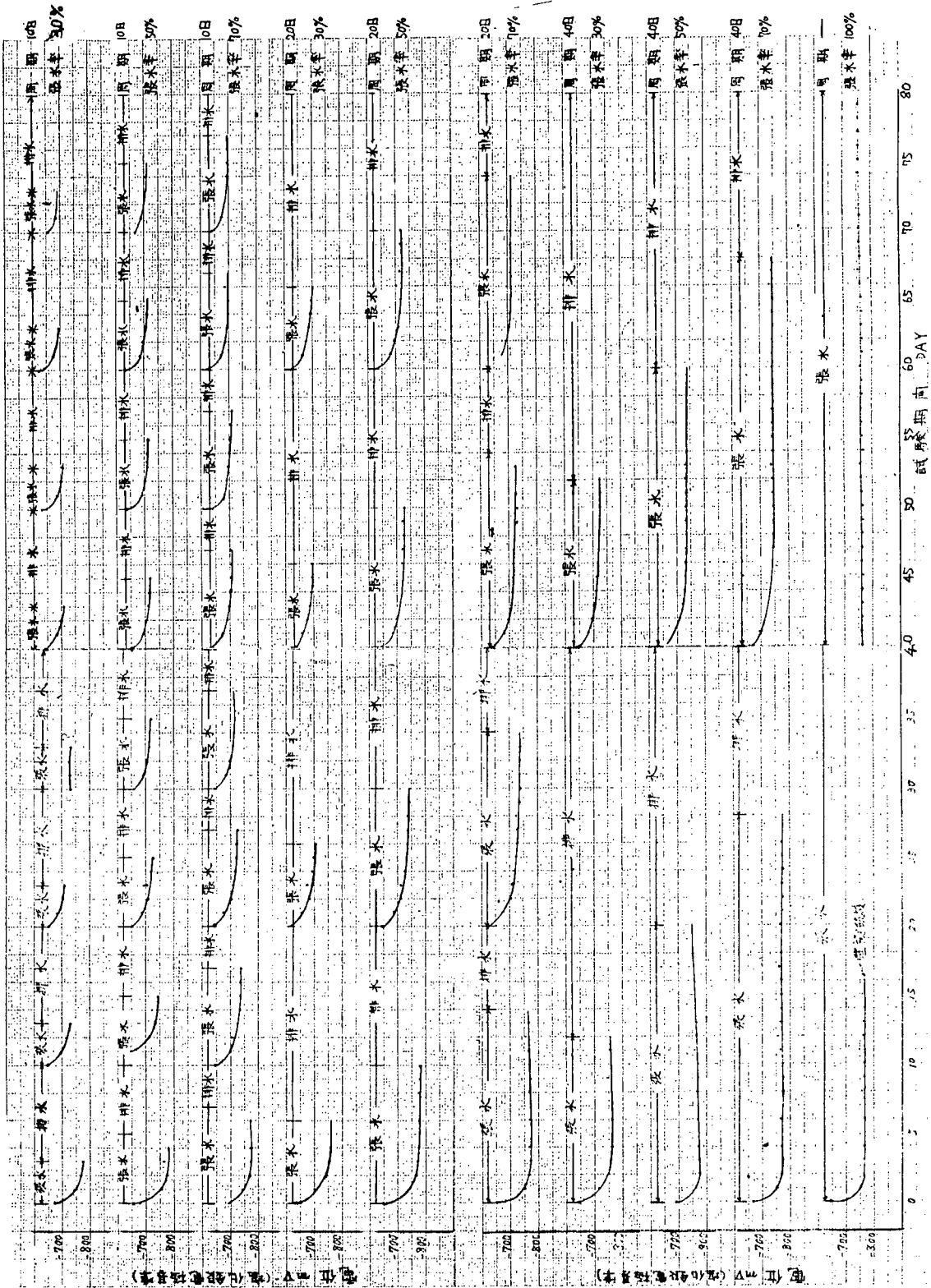


図 2.2.2 張排テストタンク電位の経時変化

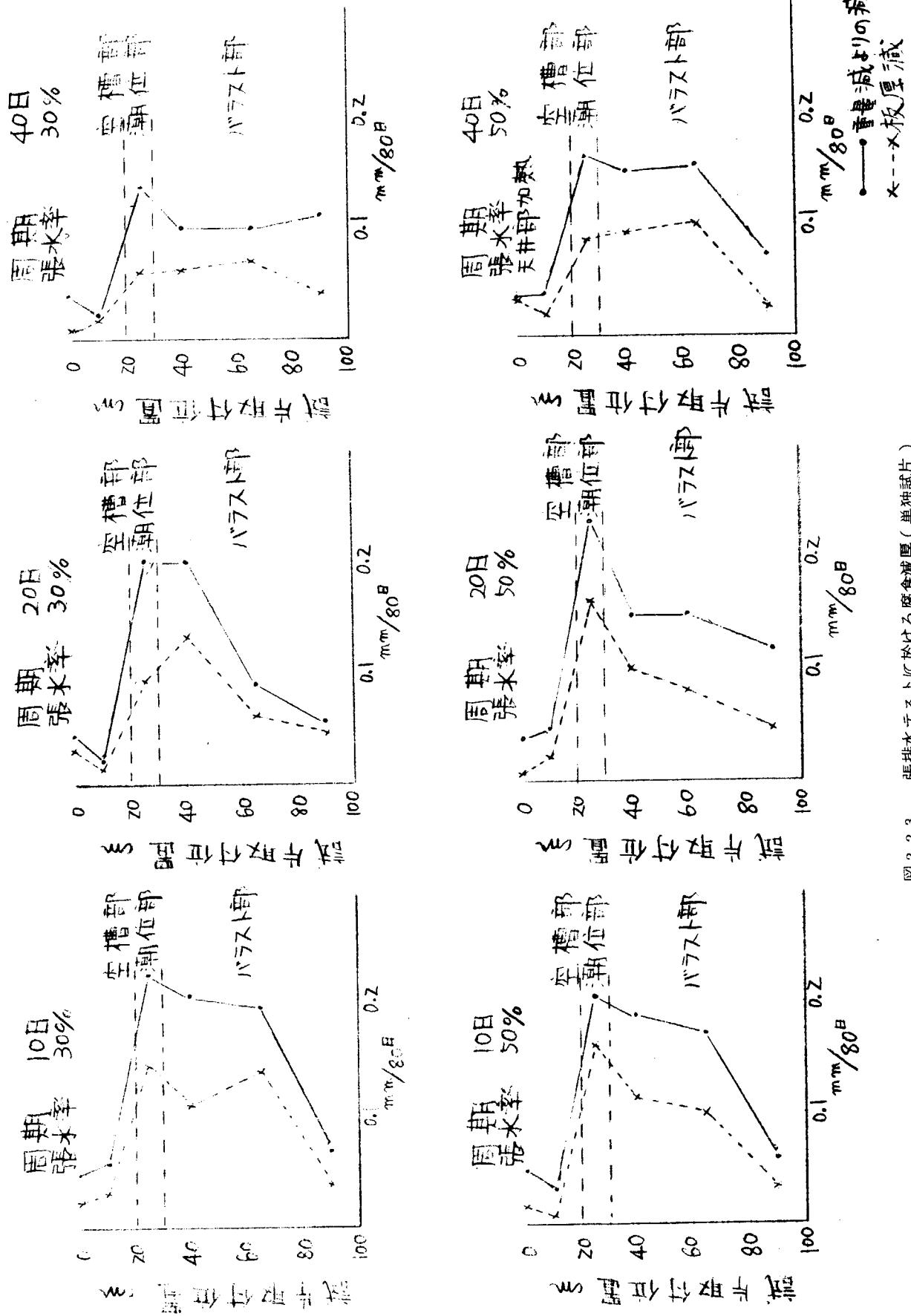


図2.2.3 張排水テストに於ける腐食減厚(単独試片)

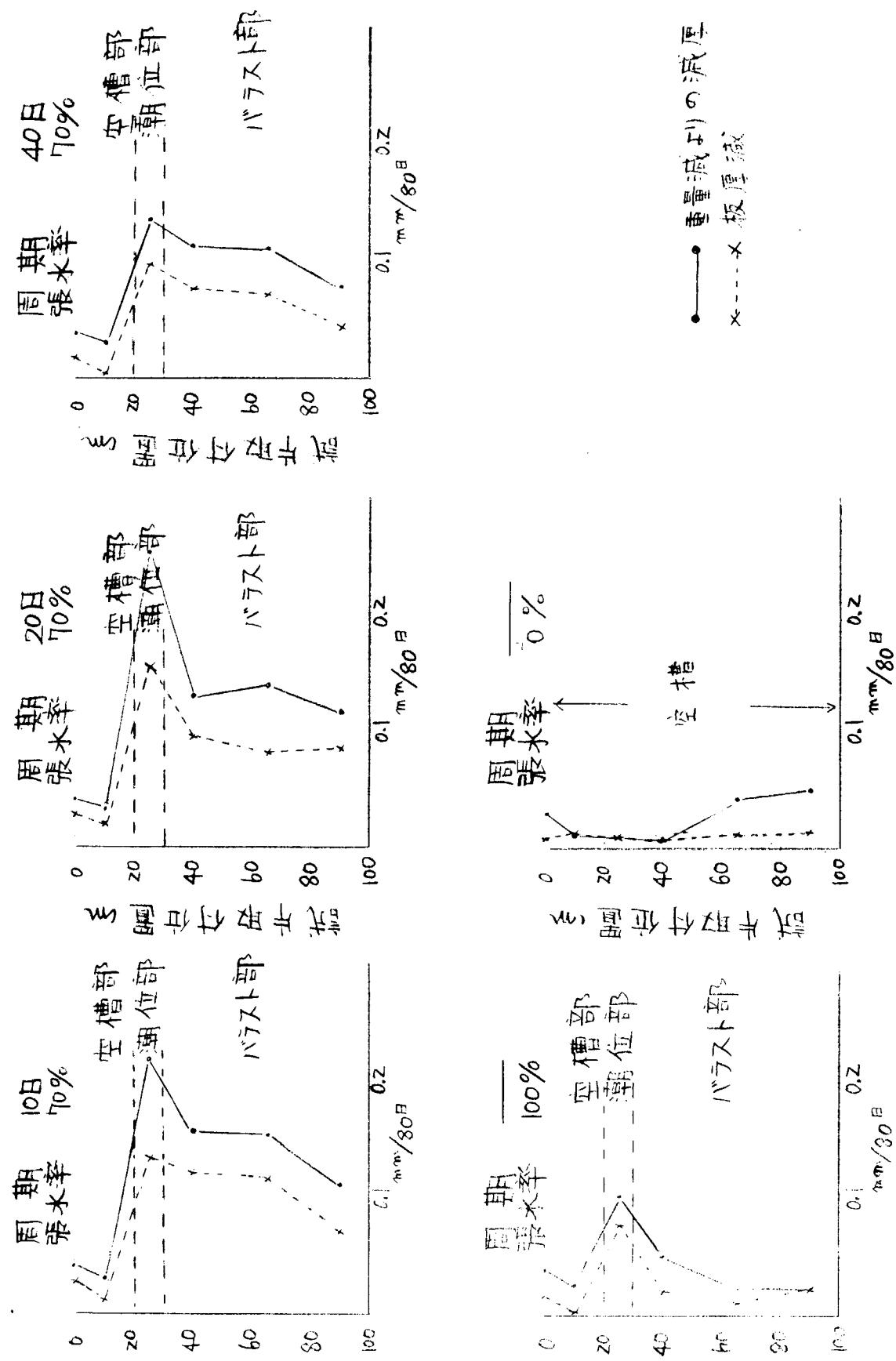


図 2.2.4 張排水テス^TCに於ける腐食減厚（単独試片）

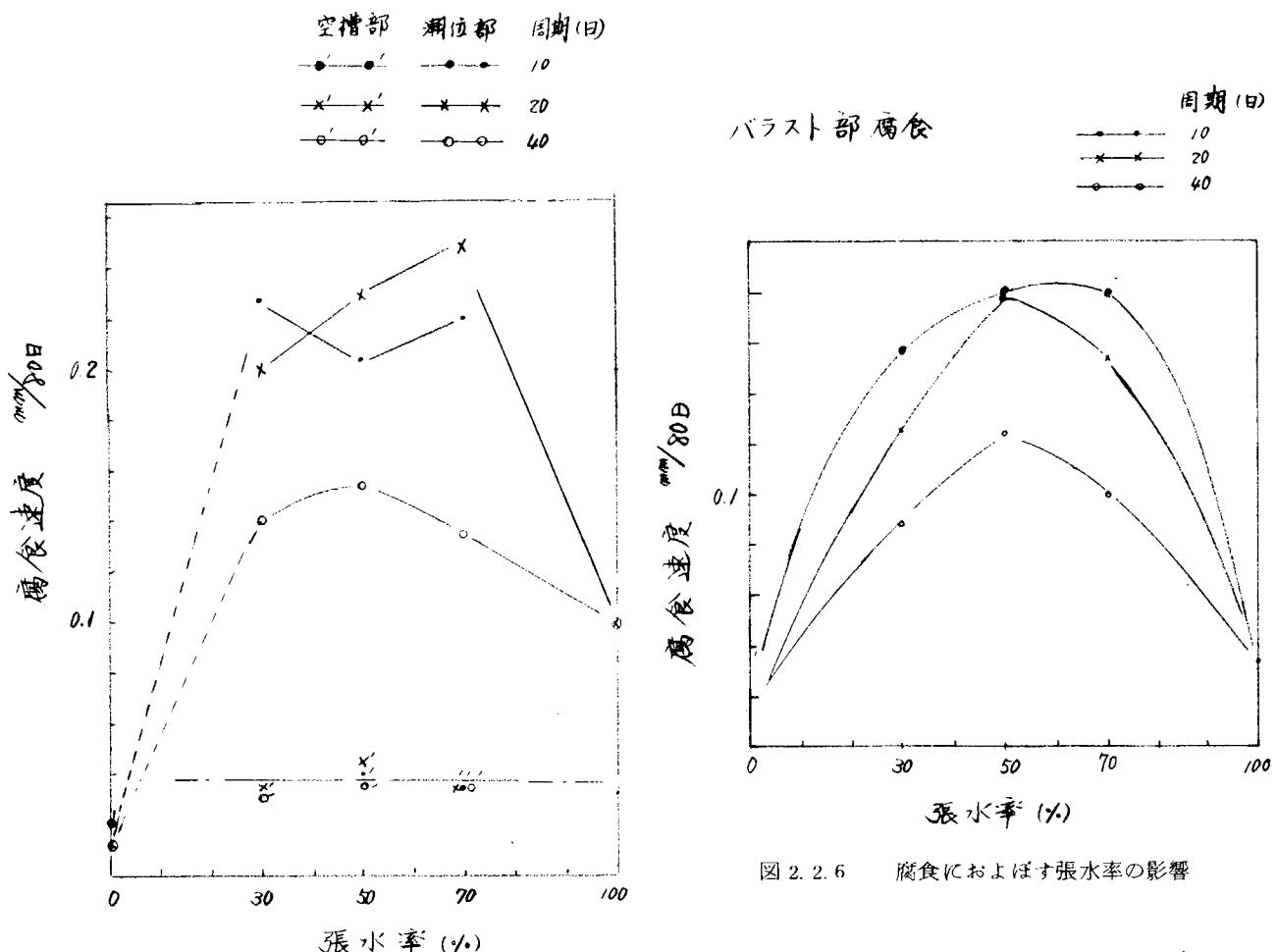


図 2.2.5 潮位部と空槽部の腐食速度におよぼす影響

図 2.2.6 腐食におよぼす張水率の影響

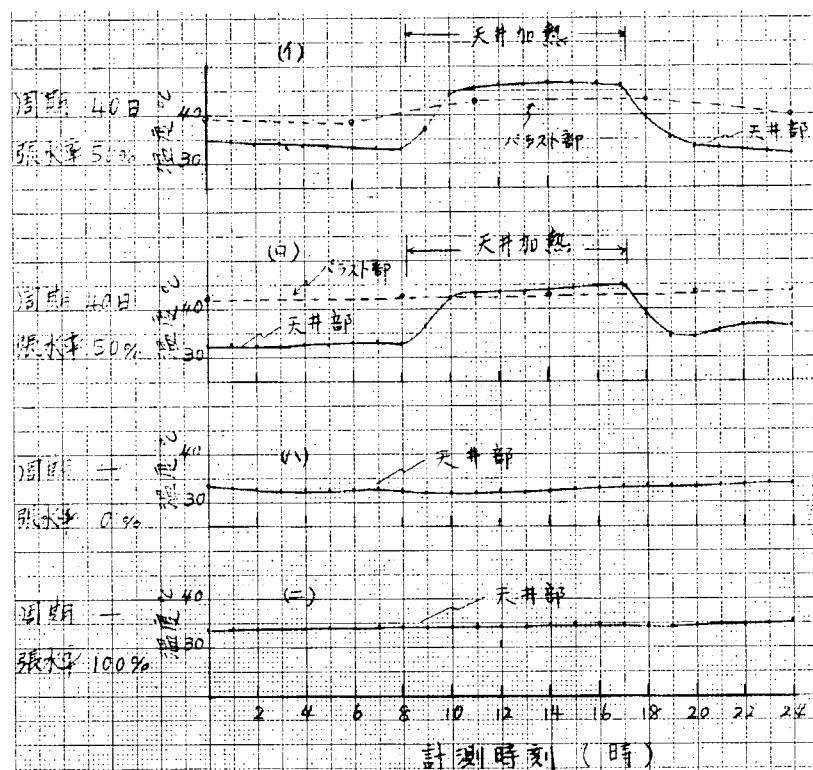


図 2.2.7 試験槽の天井部およびバラスト部の温度計測の 1 例

- (1) 排水時のバラスト部と天井部の温度 (天井加熱)
- (2) 張水時のバラスト部と天井部の温度 (天井加熱)
- (3) 常時空槽試験槽の天井部の温度
- (4) 常時張水時の天井部の温度

2.3 水質の影響調査（その1）

2.3.1 試験装置と試験方法

(1) 試験の概要

ここでは主として海水水質の腐食要因としてpHを選んだ。試験は2.2.1で述べた恒温試験水槽に1m角の軟鋼試験槽および水槽内にモニター試験を吊下げたものに自動pH調整装置で予め定められたpHをもった海水を張水した。張水期間中のpHの調整は行なわず自然変化にまかせた。試験槽は完全密閉と空気が自由に入り出しえる2種類とした。

(2) 試験条件

試験条件を表2.3.1に示す。pH 4.5, 6.0の2種で張水率50%, 周期20日を選んで、pHの異なる海水の張排水を繰返した。試験温度は2.2と同じく40°Cを一定とし、試験水槽は2.2(図2.2.1)で行なったような完全密閉の場合と酸素の拡散が自由に行なえるよう水槽蓋に200φの穴をあけたものの2種類とした。

表2.3.1 水質の影響調査試験条件

pH	タンクの状態	周期(DAYS)	張水率(%)	張水期間(DAYS)	排水期間(DAYS)	温度(°C)
4.5	開放タンク	20	50	10	10	40
4.5	密閉タンク	20	50	10	10	40
6.0	開放タンク	20	50	10	10	40
6.0	密閉タンク	20	50	10	10	40

(3) 試験水槽とモニター試験片

2.2.1-(3)で述べたと同様SS41板材から30×50×8mmの短柵型のものと1000×50×6mmの長尺物の2種をショットブロスト仕上げをした。

2.3.2 試験結果

自然電位の経時変化を図2.3.1, 図2.3.2に示した。1cycleの自然電位は自然海水, pH調整海水, 開放タンクのいずれも殆んど同じ電位を示したが, 2cycle目から開放タンクと他のタンクとの間に20mV程度の差を生じ, 開放タンクの電位が密閉タンクに較べて卑の電位を示した。

pH 4.5開放タンク電位が最も卑のようであるが, 明確ではない。

図2.3.3は試験槽各部の単独試験片の腐食速度を示したもので, 潮位部, バラスト部, 空槽部の順位で腐食が小さくなってくる。図2.3.4のバラスト部, 空槽部および潮位部の腐食速度を棒グラフで示した。

pHの低下は予想に反してバラスト部, 潮位部ともに自然海水より腐食量の小さくなる結果を示した。更に開放タンクの場合pHの4.5, 6調整海水の場合著しく腐食を促進する結果を示した。自然海水の場合開放と密閉の場合のデータがないが, 補遺2.2で簡単に述べたように温度30°C, 50°Cの2条件で特に腐食速度に差がなかったこと, この試験で空槽部の腐食が特に開放, 密閉状態で余り変わること等からみて海水pHと酸素濃度は, バラスト部の腐食に極めて大きな影響因子であることが判る。

図2.3.5は, 試験槽内のpHの経時変化を示したもので, pH 4.5調整海水も1~2日でpH 6程度に上昇し, 同様にpH 6のものもpH 6.5に高くなった。図示はしていないが自然海水の試験槽のpHは約8を示し, 特にこのような現象はなかった。このpHの変化は計測時点が錆層のかなり発達した状態での結果であり, 試験初期でもこのような現象があるかどうか確認のうえ, これらの原因を考えてみたい。

2.3.3 まとめ

以上の結果をまとめると次のようなになる。

- (1) 空槽部の腐食は海水 pH の変化や空気の流通に影響されることなくバラスト部、潮位部よりも腐食は少ない。
- (2) 空気の流通の悪い状態でのバラスト部の腐食は海水が弱酸性側に傾くと減少する。
- (3) 空気の流通の良い状態でのバラスト部の腐食は海水の pH が弱酸性側で促進される。

これらの結果はいずれも単独試験片による結果であり、長尺試験片による腐食結果は現在解析中であり、これらの結果のまとめた時点で再度検討を加えたい。

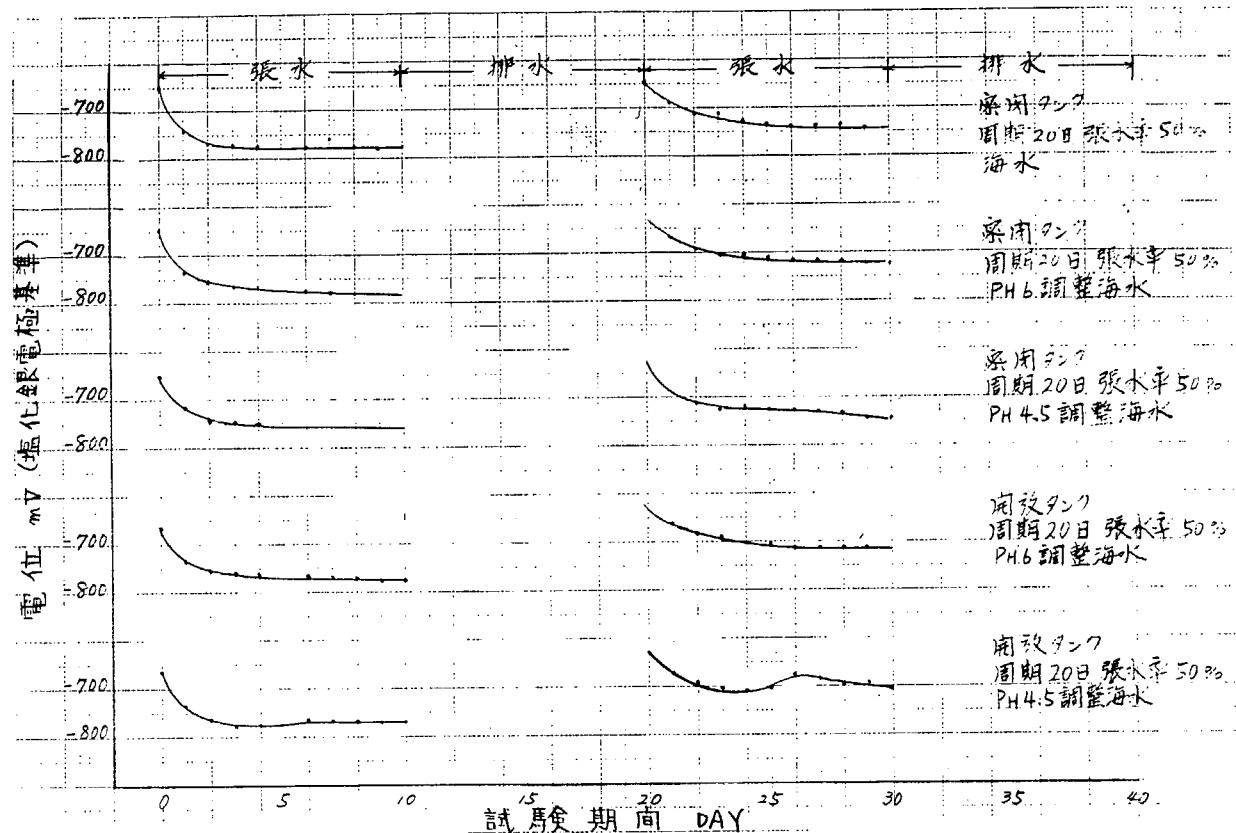


図 2.3.1 pH テストタンク電位の経時変化

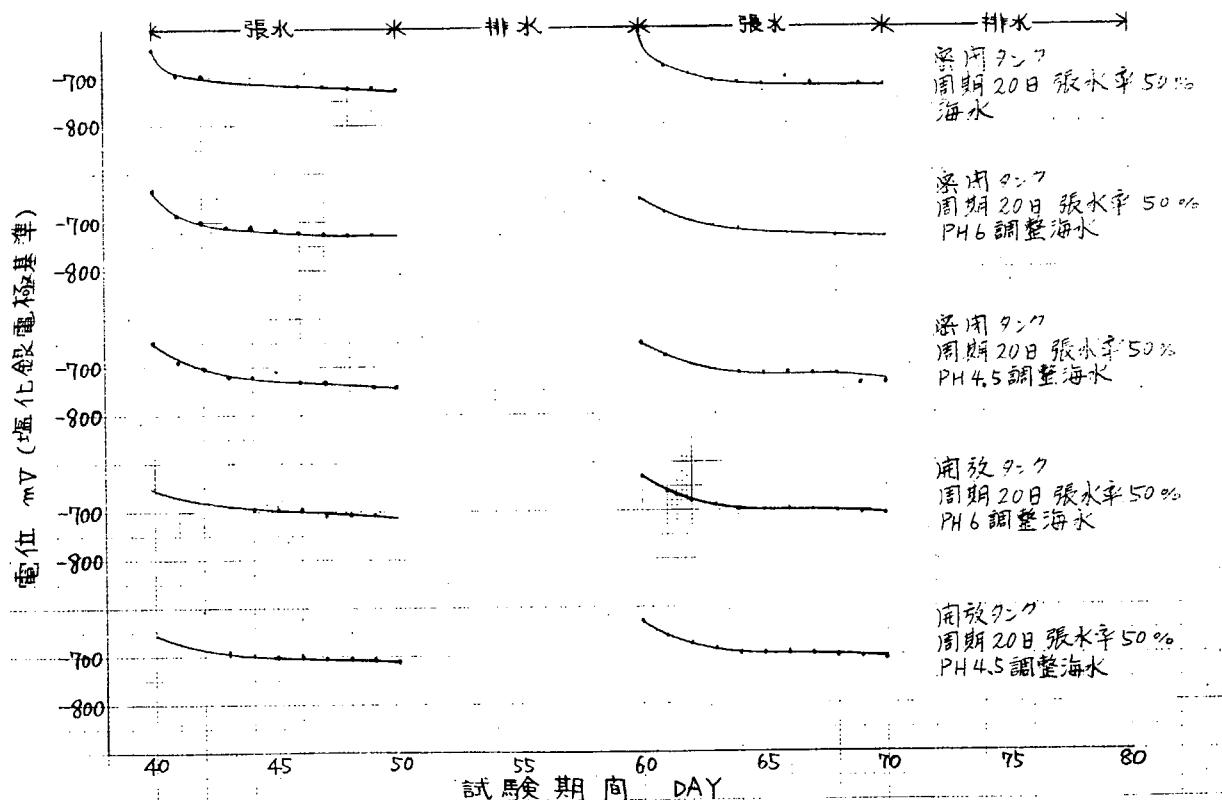


図 2.3.2 pH テストタンク電位の経時変化

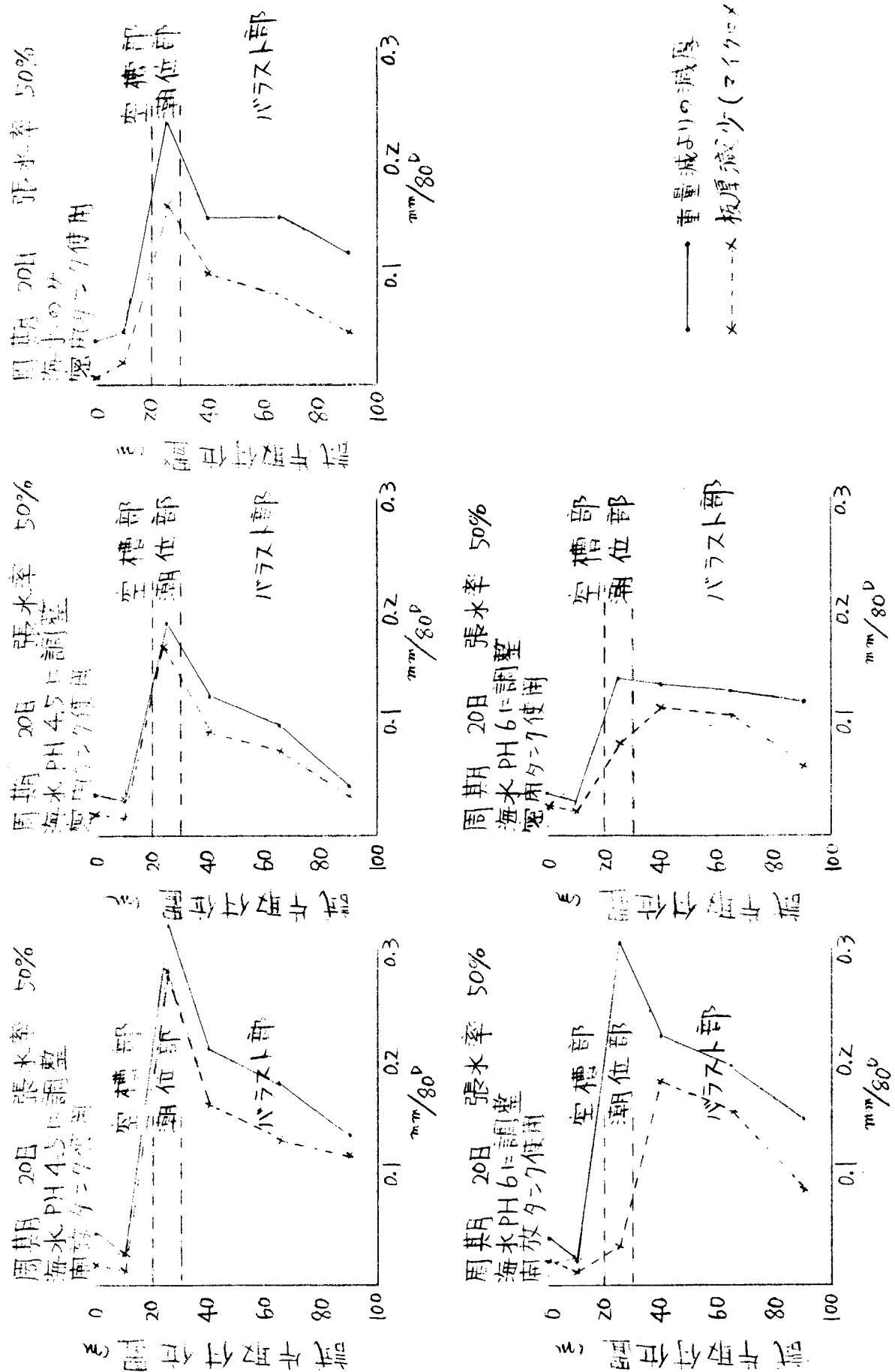


図 2.3.3 pH テストに於ける腐食減厚(単独試片)

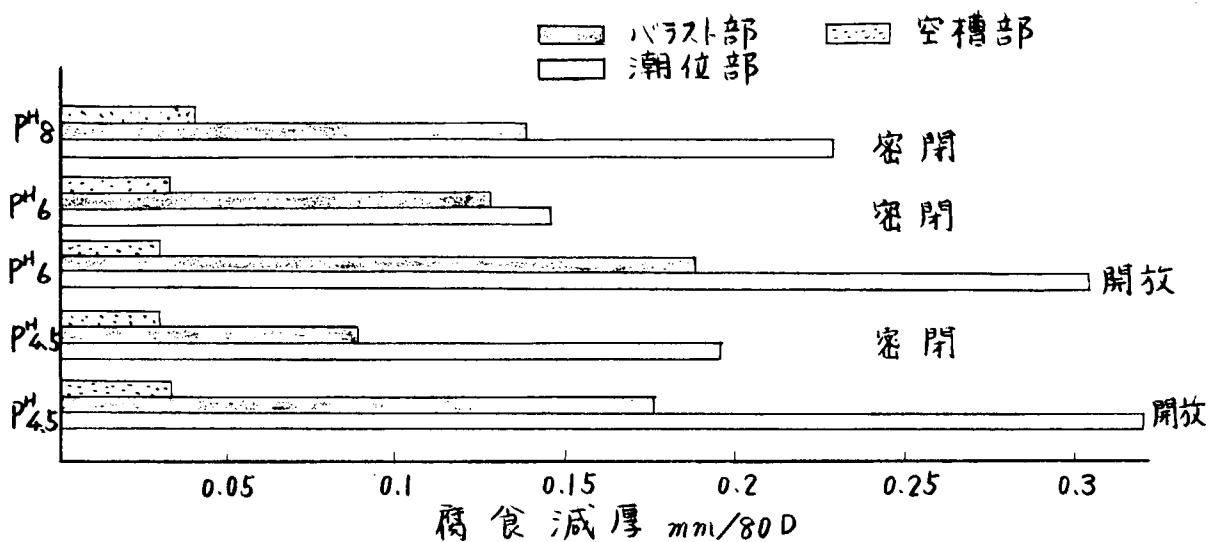


図 2.3.4 pH テストにおける腐食減厚

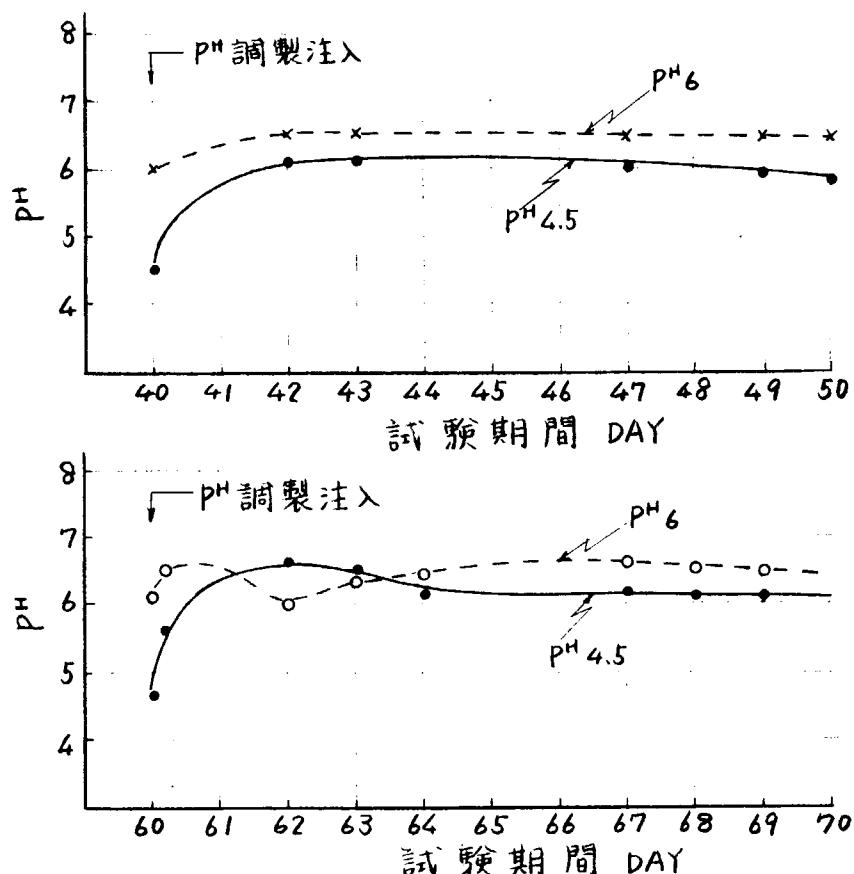
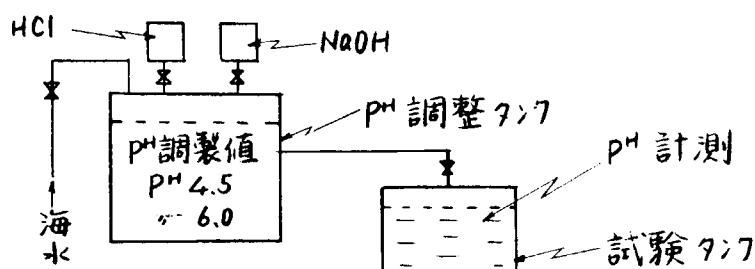


図 2.3.5 pH 調製海水の経時変化



2.4 水質の影響調査（その2）

バラストタンク内のごとく張水、排水を繰返す条件下で温度、張排水の履歴が電気防食適用時如何なる影響を及ぼすかを明らかにする目的にて48年度においては次の項目につき調査した。

2.4.1 調査項目

- (1) 張排水、温度が所要防食電流に及ぼす影響
- (2) 張排水、温度が電気防食効果に及ぼす影響
- (3) 張排水をくり返す条件下での鋼材表面のpH変化

2.4.2 調査方法

900×900×800mm腐食槽内に試験片を上中下3枚に設置し、温度を一定とした上、一定期間をおいて水位を上、下させて各投の試験片が一定張水率になるようにした。同一槽内でZn陽極を接続した電気防食試験片を並列設置した。各試験片にはリード線を接続し、Zn陽極の接続、電位測定線とした。張水時槽内に約10分空気吹込みを行った。

(1) 電位測定

海水塩化銀電極を基準とし、打点式電位記録計にて連続測定、測定試験片は表2.4.1のP.Rにて示した。

(2) 防食電流変化

腐食試験片、防食試験片各について、海水塩化銀電極基準-900mV設定時の電流変化を測定した。試験片は通電履歴の影響を除くため、図2.4.1中P.Sにて示すごとく各サイクルごとに別のものを使用した。

(3) pH

張水前、排水後の試験片表面のpHを試験紙にて測定した。

2.4.3 試験条件

試験片	寸法 SS材 100×50×3t(mm) 80×50mm 片面を残しエポキシにて絶縁塗装
試験片表面処理	エメリ--No.160にて研磨、脱脂、洗滌後使用
張水率	25%, 50%, 100%
張水日数	連続8日
温度	30℃, 50℃
試験液	人工海水 JIS K-5631 pH 8.0にて調整
陽極	Zn陽極 13φ×60mm×10本 電流分布が均一になるよう配置

2.4.4 計器

定電位装置	北斗電工製 HA-101
電位記録装置	横河製 NE-220

2.4.5 測定結果

(1) 電位変化

測定結果を図2.4.2～図2.4.4にて示した。

自然電位についてみると50%, 100%張水では張排水をくり返すことにより電位は貴方向に変化するがその傾向は30℃より50℃, 50%より25%張水の方がいちぢるしい。これは腐食程度と類似の傾向を示す。

Fe/Zn=10/1程度に充分な量(通常取付比100/1～150/1)のZn陽極にて防食した場合の試片の電位をみると30℃では25%張排水時においてもサイクルに関係なく防食電位に達するが50℃ 25%では3サイクル目より極端な電位の貴化がみられた。

(2) 所要防食電流

電気防食を適用した面には防食性の石灰質被膜が生成するが、張排水を繰返すことによりこの皮膜が劣化する程度を所要防食電流変化より調査した。

最初の張水時(1サイクル)より各サイクル時の防食電流変化を図示したもののうち、張水率25%，50℃、張水率50%，30℃条件のものを図2.4.5、図2.4.6に示した。

ここで防食試片については張水時は図2.3.2、図2.3.3のごとく-900~-950mVの電位を維持したものを使用した。

初期と96時間後(終期)の電流密度の値をサイクル毎に図示したものを図2.4.7に示した。

図2.4.7より防食皮膜は張排水を繰返すことにより劣化するが、この程度は温度による影響が大きいようと思われる。

特に50℃25%ではサイクルが増加するにつれて初期電流値は腐食試験片と同程度に増大しており、防食効果の低下を裏付けている。しかし図2.4.5、図2.4.6よりみると防食試験片では電流値の低減が急激であり4サイクル程度では未だ防食皮膜の効果がある程度認められる。

(3) 腐食量との関連

表面処理の異なる各試験片および取付位置の違いによる各試験片につき各パラスト率についての侵食度、最大孔食率および防食効果を30℃、50℃で比較した結果を図2.4.8、図2.4.9に示した。

50℃より30℃における腐食量が全体的に大きく出ている。

この原因については、Ⅰ)海水中へのZnイオンの混入(混入量Zn減量より200~300ppm) Ⅱ)排水時の試片表面のぬれの状態等が考えられるが明確でなく次年度検討を予定している。

また、電気防食効果をみると試験片の電位を-900~-950mVに維持することにより、50%張水時最大孔食深さを約程度に低減しうることが認められた。

定電位試験に用いた試験片の腐食量を孔食深さを比較したものを表2.4.1に示した。

腐食試験片の孔食深さは30℃に比し50℃が大きく、特に25%張水率では張水初期に防食電流を通電することが以後の孔食防止に有効の傾向が覗えた。

(4) 表面のpH変化

張排水を繰返す鋼材表面のpH変化を図2.4.10、図2.4.11に示す。

腐食試験片では1回の張排水を経ることにより3.0~4.0付近の値となり、以後漸次酸性側に移行し、72日後には2.5付近を示した。これに反し防食試験片では一回の張水によりpH11.0付近となり以後ほとんど変化を示さなかった。全体的に温度が高く、張水率が低下すると何れも僅か酸性側に移る傾向がみられた。

2.4.6 まとめ

- (1) 張水率25%(張水4日、排水12日)50℃条件下では試験片の自然電位は貴化傾向がいちぢるしくなる。
Zn陽極には電位を-900~-950mVに維持した場合でも上記条件下では3サイクル目より電位の回復(4日以内)は困難となる。
- (2) 張排水を繰返す環境では電気防食により生成する防食皮膜の劣化が促進される。この傾向は特に温度による影響が強いようと思われる。
- (3) 鋼材表面のpHは一回の張排水によりpH-4付近となる。この酸性化は張水率、温度にはほとんど影響されない。
- (4) 同一張水率においても排水期間の鋼材表面の乾燥速度、ぬれ程度が腐食速度を支配する主要な因子と考えられる。この点の検討が今後必要である。

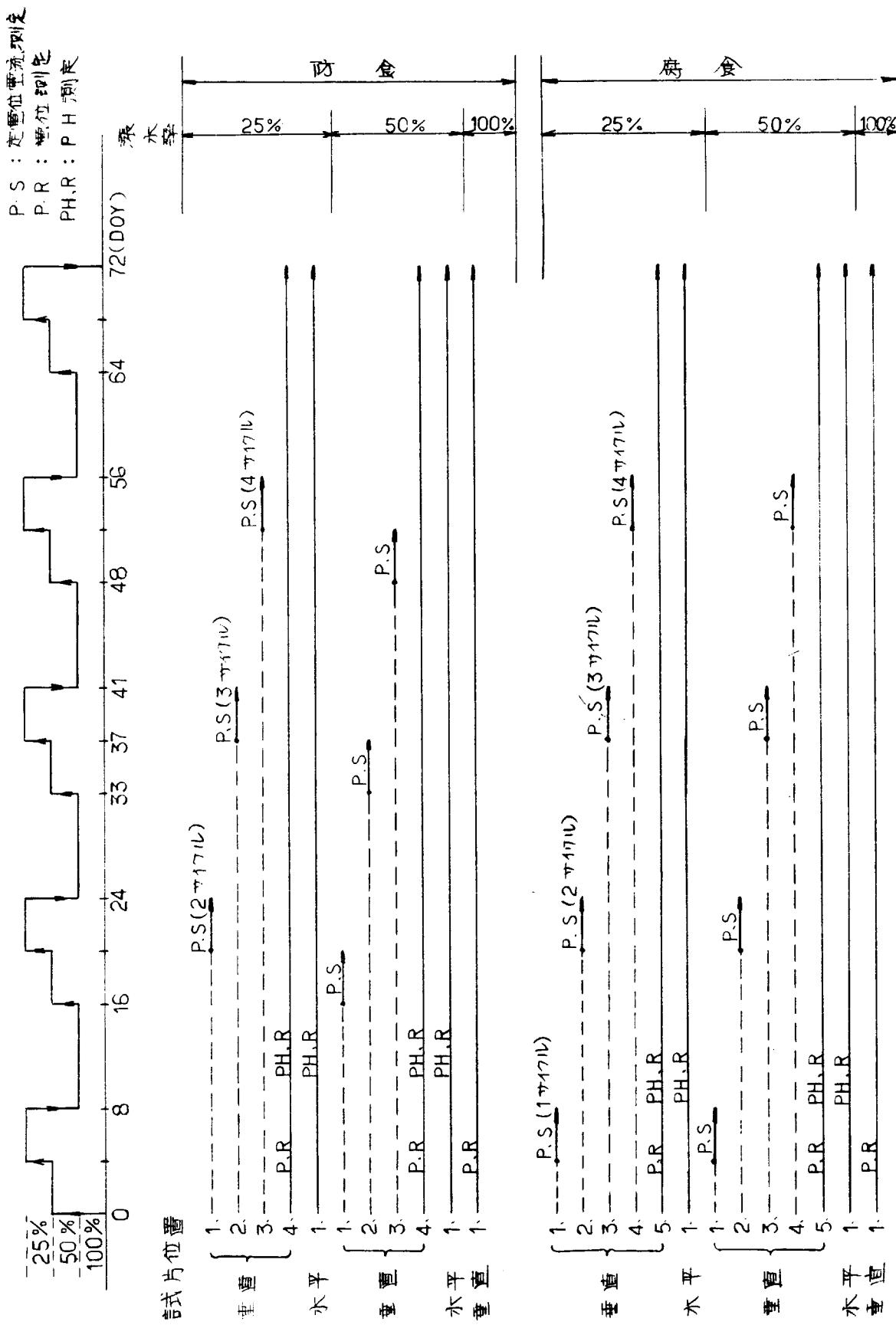


図 2.4.1 張排水順序と測定項目

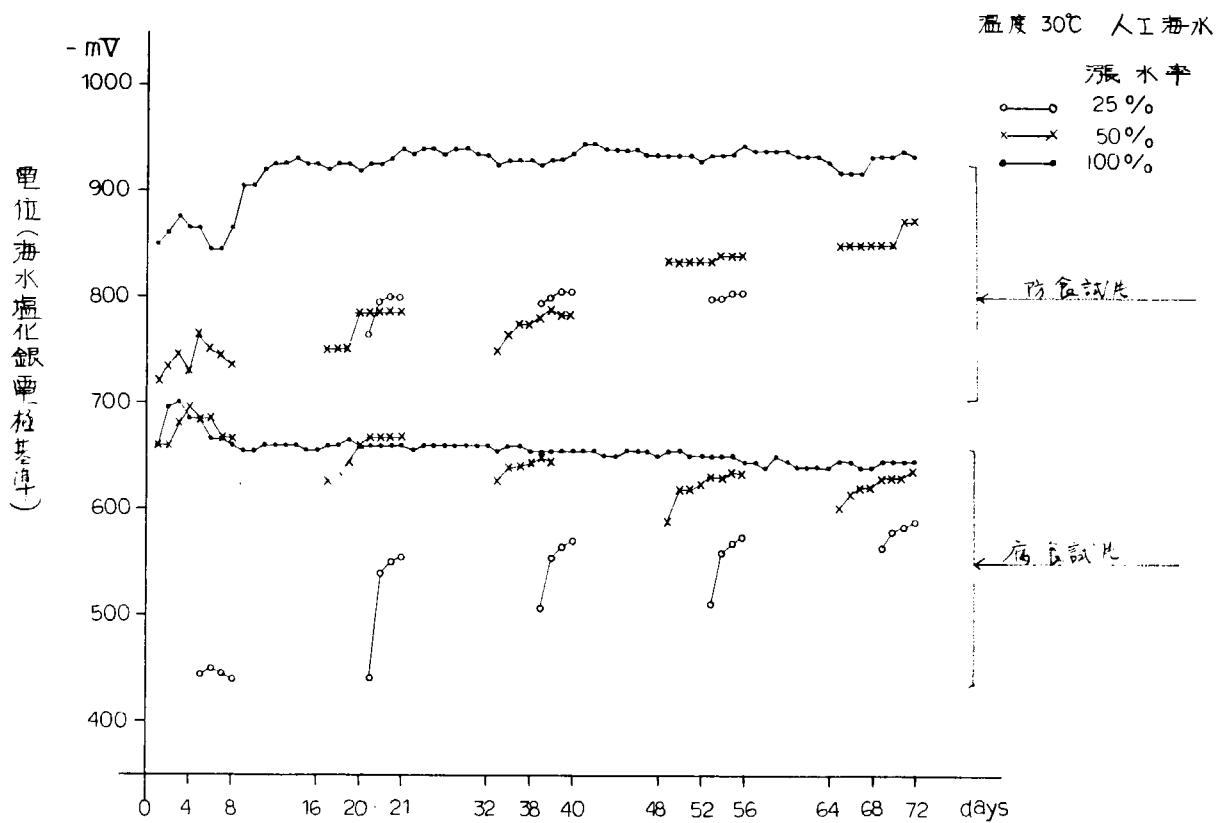


図 2.4.2 試片の電位変化 (30°C)

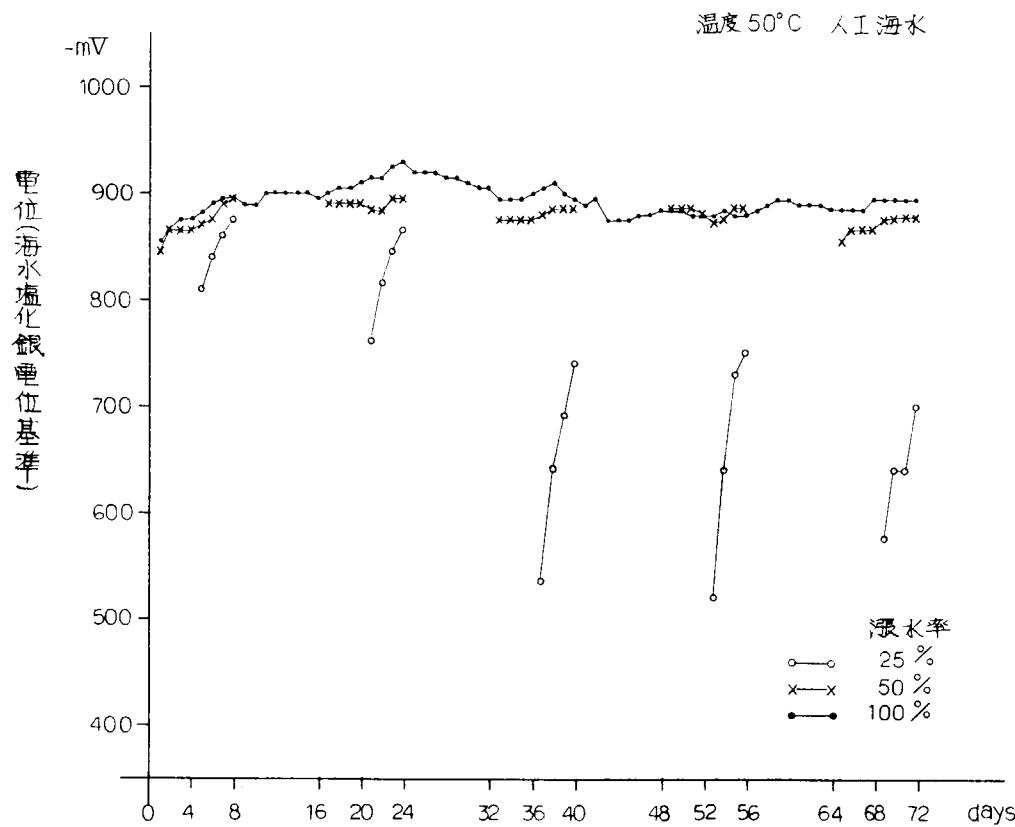


図 2.4.3 防食試片の電位変化 (50°C)

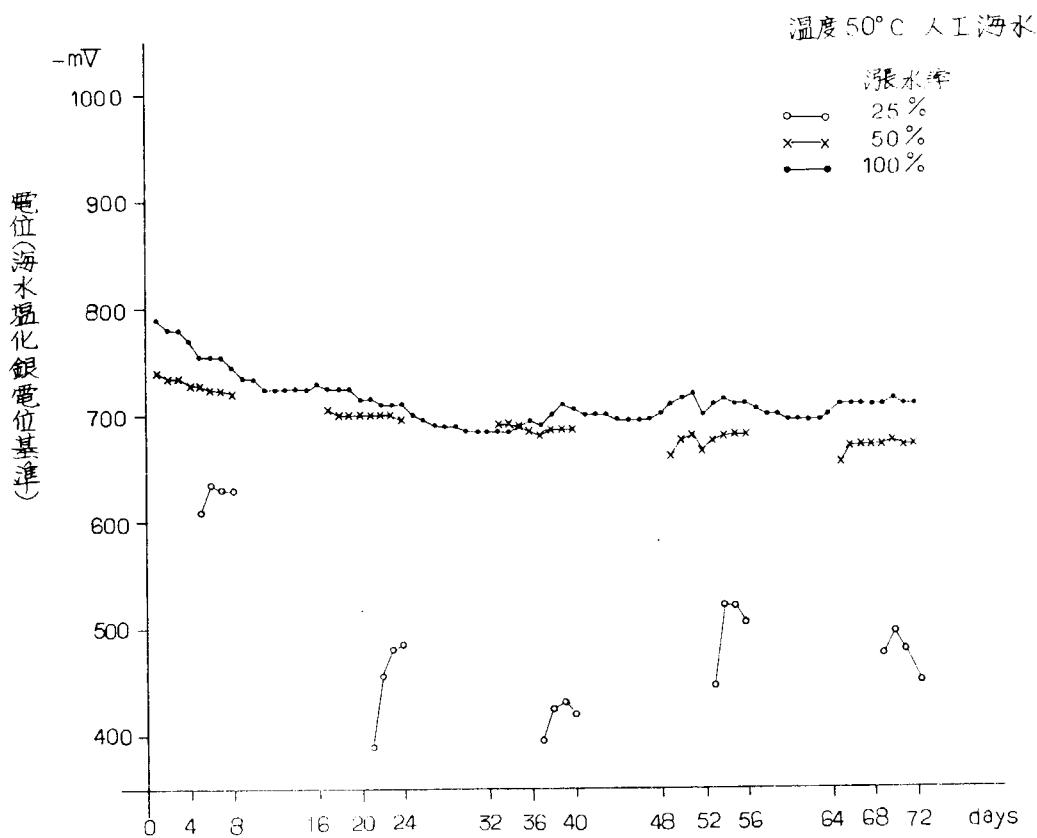


図 2.4.4 腐食試片の電位変化 (50°C)

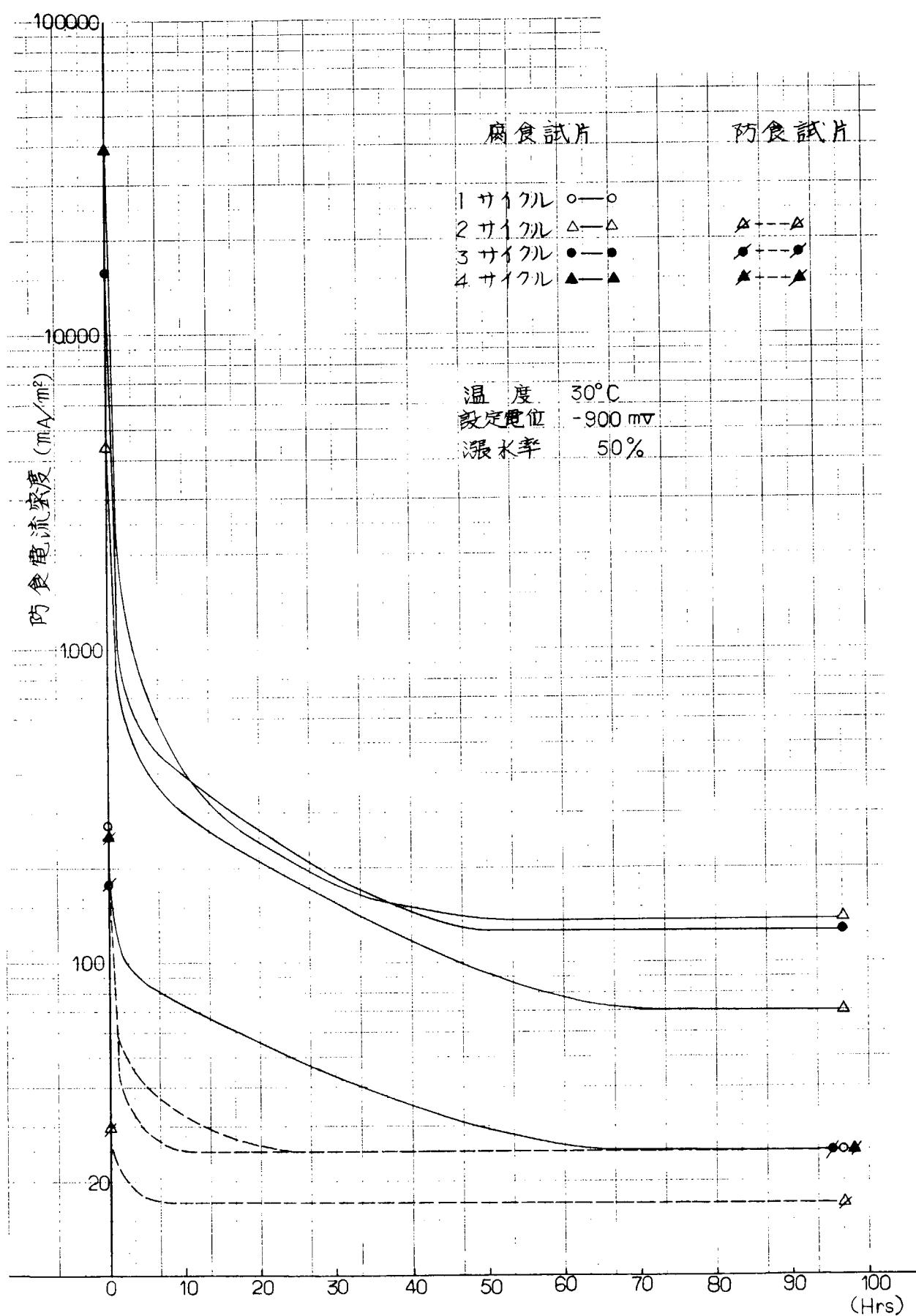


図 2.4.5 所要電流の変化

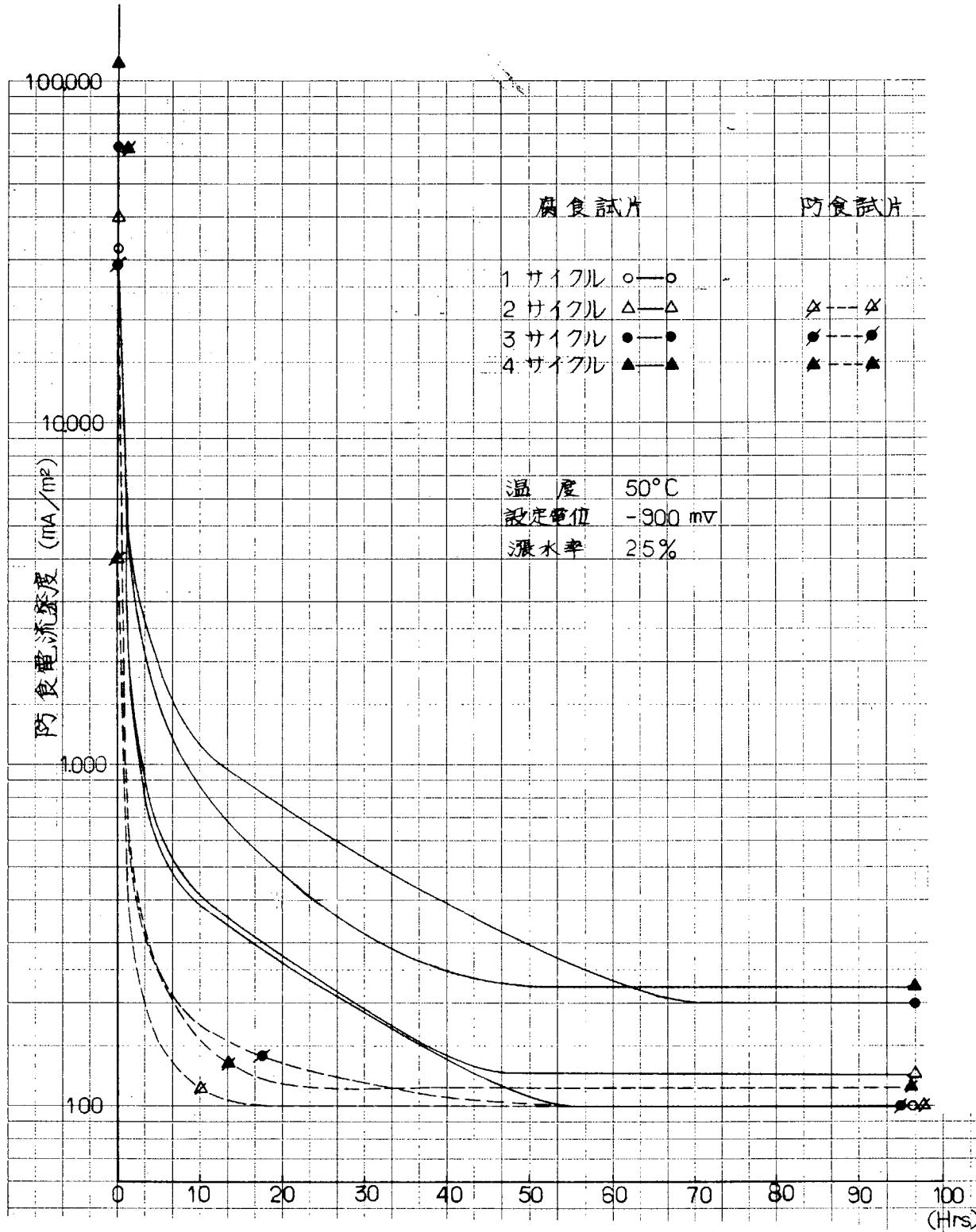


図 2.4.6 所要電流の変化

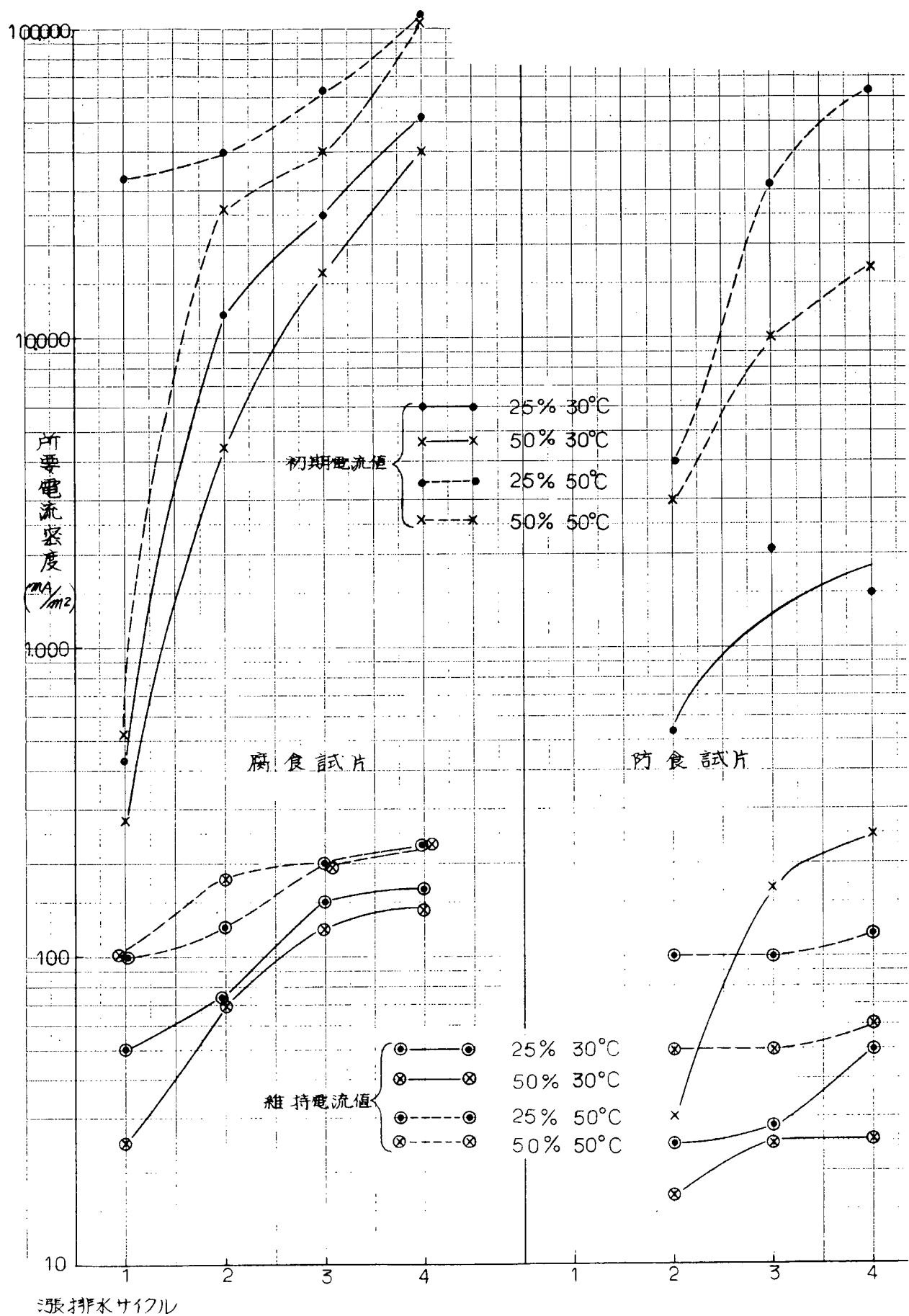


図 2.4.7 張排水サイクルによる防食電流変化 (-900 mV 定電位時)

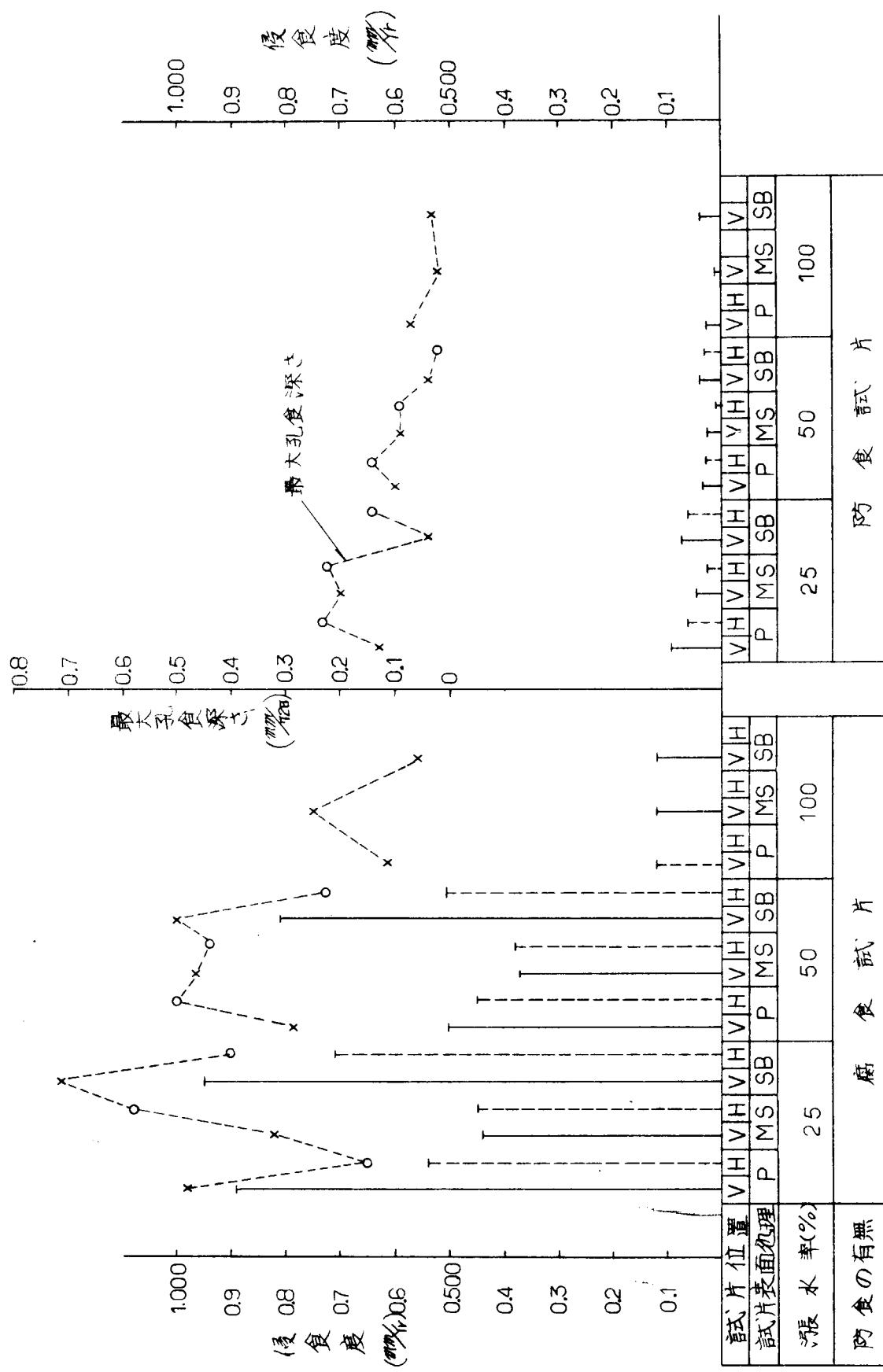


図 2.4.8 溫度 30 °C における各試片の腐食量

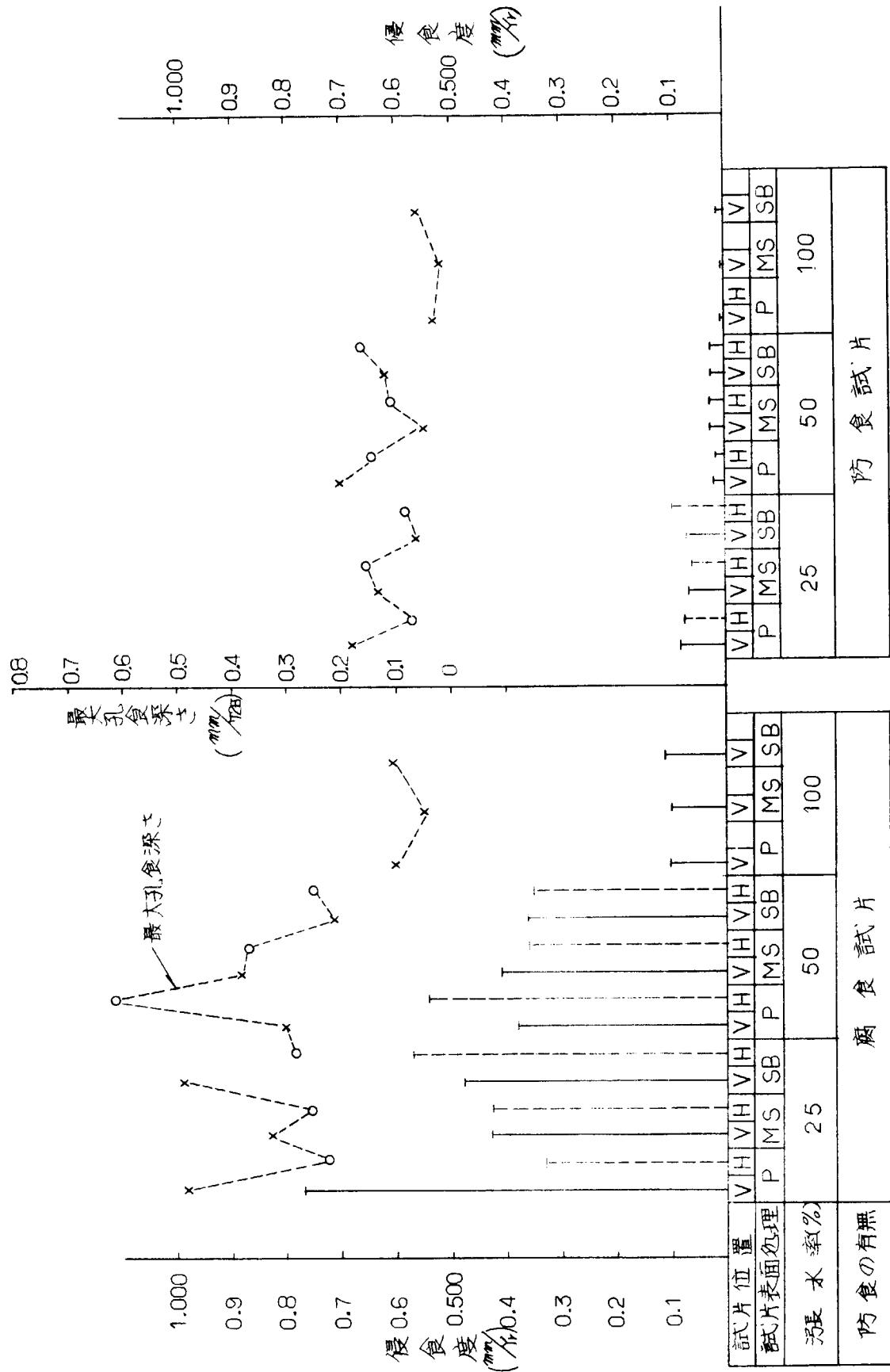


図 2.4.9 溫度 50 °C における各試片の腐食量

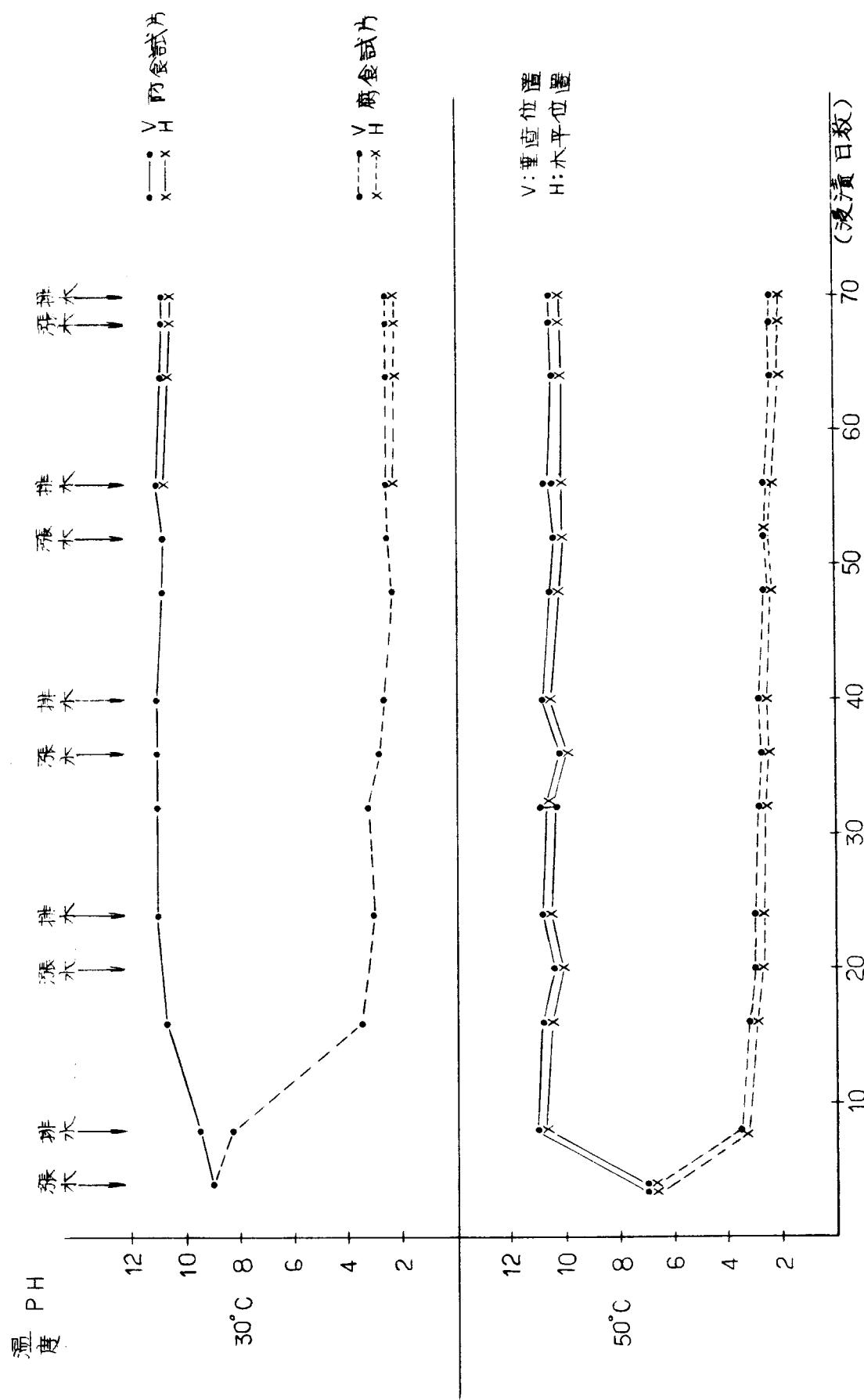


図 2.4.10 鋼材表面の pH 変化 (2.5% 張水率)

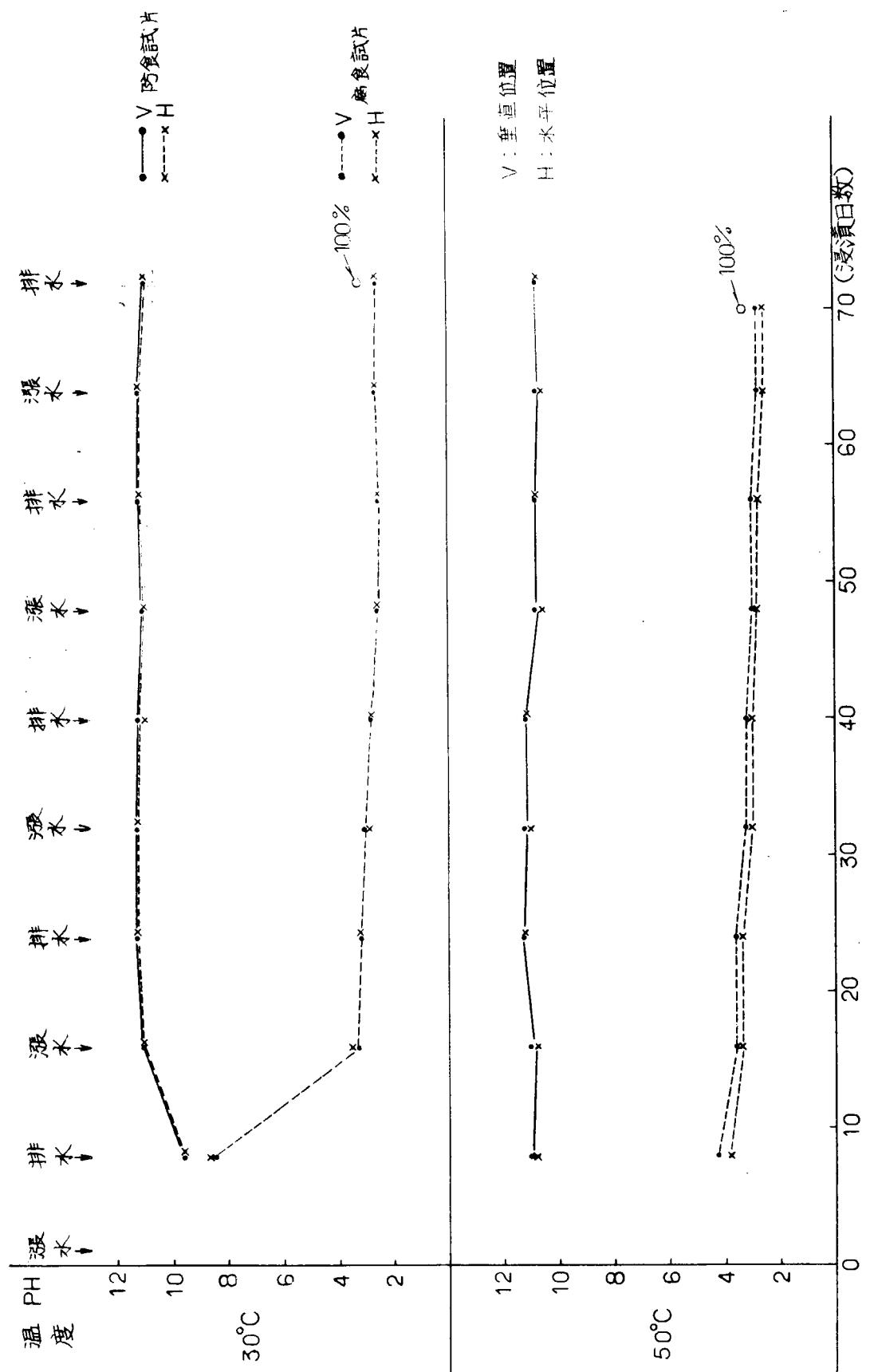


図 2.4.1.1 鋼材表面の pH 変化 (50% 張水率)

表 2.4.1 定電位試験片の腐食量と孔食深さ

			30°C			50°C		
	深さ(ヤル) %	侵食度 No.	防食率 %	最大孔食深さ mm/72days	侵食度 mm/Yr	防食率 %	最大孔食深さ mm/72days	
防 食	25	1	0.0686	88.96	0.20	0.0926	83.87	0.15
		2	0.0603	90.78	0.15	0.0947	81.72	0.10
		3	0.0474	94.69	0.17	0.0886	87.36	0.10
	50	1	0.0251	93.39	0.15	0.0223	94.74	0.05
		2	0.0296	94.44	0.13	0.0293	93.25	0.07
		3	0.0332	92.63	0.18	0.0307	93.43	0.09
腐 食	25	1	0.7269		0.26	0.4895		0.22
		2	0.6228		0.23	0.5738		0.47
		3	0.6541		0.36	0.5179		0.44
		4	0.6914		0.34	0.7011		0.63
	50	1	0.4500		0.22	0.4825		0.29
		2	0.3799		0.28	0.4233		0.14
		3	0.5318		0.29	0.4336		0.34
		4	0.4500		0.22	0.4670		0.29

2.5 タンク体積と表面積率影響調査 (V/S 率の影響)

2.5.1 試験装置と試験の方法

(1) 試験の概要

2.2, 2.3 (その1) で述べたと同じ恒温水槽に 1 m 角の軟鋼製タンクを浸漬し, 2.2, 2.3 (その1) と同じ要領で海水を給排水した。

(2) 試験条件と試験槽および試験片

試験条件を表 2.5.1 に示す。試験タンクの体積と表面積比の調整は、図 2.5.1 に見られるように試験槽内面にタルエボキシ塗装を施して鋼表面の露出面積を減らして調整した。張水率 50 %, 張排水周期 40 日, 20 日の 2 種を選び、張水期間中は 1 日 1 回海水レベルを 10 cm (底から 80 cm, 通常 70 cm 保持) 上昇して、潮位部を作った。

試験構内面の露出部はショットブラスト仕上げとし、モニターとして試験構内へ 30×50×8 mm のものと 1000×50×6 mm の鋼材をショットブラスト仕上げの後槽内各部に入れた。表 2.5.2 に実船の V/S 率を示す。

表 2.5.1 (タンク体積/表面積)率の試験条件

V/S	周期(DAYS)	張水率(%)	張水期間(DAYS)	排水期間(DAYS)	温度°C
1/0.7	20	50	10	10	40
1/2.1	"	"	"	"	"
1/0.7	40	"	20	20	"
1/2.1	"	"	"	"	"
1/6	20	"	10	10	"
1/6	40	50	10	10	40

2.5.2 試験結果

自然電位は、図 2.5.2、図 2.5.3 に見られるように条件の相異によって特に変った傾向は見られない。

図 2.5.4 に張排水周期 20 日の試験条件における酸素濃度の経時変化を示した。尚、張水中の酸素濃度は、バラスト上部の空槽部分の空気中の酸素濃度の変化を示したものである。この図は、V/S 率の相違によって試験槽内の酸素消費速度の異なることを示しており、補遺 1.3.1.2-3 で予想したとおりの酸素の減少傾向を示した。

張水時の酸素の変化は海水を水槽に満たす際、水槽上部より内部の空気が除々に押し出されて置換し、更に 1 日 1 回潮位部のレベルを調整する際に空気の出入り (100 ℥、空槽部の $\frac{1}{6}$ に相当する) があるために除々に濃度を増していくもので、5 日目位で腐食に消費される量と空気補給量のバランスがとれていることを示している。

このように、水槽内部の環境状態は、V/S 率の相違によって明瞭に異っているにも拘らず腐食速度は図 2.5.5、図 2.5.6 に見られるように余り相違がない。

図 2.5.6 はバラスト部の腐食を示したもので、V/S 率の大きなものが、いくらか大きい程度である。

空槽期間中の酸素の消費量を鋼の単位面積当たりで求めると各 V/S 率で次のようになる。

$$V/S = 1/0.7 \left(\frac{21 - 16.3}{100} \right) \times \frac{1}{0.7} \times 1000 \ell = 67.1 \ell \text{ O}_2 / \text{Fem}^2$$

$$V/S = 1/2.1 \left(\frac{21 - 11}{100} \right) \times \frac{1}{2.1} \times 1000 \ell = 47.6 \ell \text{ O}_2 / \text{Fem}^2$$

$$V/S = 1/6 \left(\frac{21 - 0}{100} \right) \times \frac{1}{6} \times 1000 \ell = 35 \ell \text{ O}_2 / \text{Fem}^2$$

今、空槽期間中のみについて考え、酸素と鉄が同じ割合で反応するとすれば、各 V/S 率での腐食速度の比は次のようになるであろう。(V/S (1/6) を 1 とした。)

$$V/S (1/0.7) = 1.9$$

$$V/S (1/2.1) = 1.36$$

$$V/S (1/6) = 1$$

一方、張水時の海表面の溶存酸素濃度の変化は昭和 47 年度報告書補遺の中の 3.1.2.3 (Page 22) 図 3.1.2.4 で述べたように空槽時に生成した鉄化合物 (多分 2 倍の鉄) によって脱酸素されることを示した。その脱酸素の程度は空槽期間中の酸素消費の激しい場合 (酸欠雰囲気) に大きいから V/S 率の小さいもの (ここでは V/S = 1/6) 程、溶存酸素の脱酸作用も大きいと考えてよい。もしも張水期間中のバラスト部の腐食が酸素濃度に比例する陰極復極に支配されるものとするならば、V/S 率の小さいもの程、この期間での腐食は小さくならねばならない。

このように考えると張水一排水 (空槽) 期間のいずれにおいても V/S 率の大きい程腐食は激しいと考えられる。

実験結果の V/S 率 1/0.7~1/6 の範囲であまり腐食に差がなかったことに対する解釈として

- (1) V/S 率の変化は張排水を繰り返すバラスト部のような環境の鋼の腐食に対して殆んど影響を与えない。

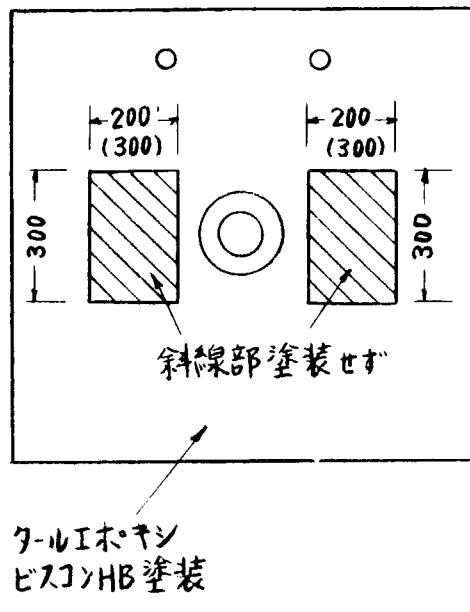
(2) \sqrt{S} 率の相違によって腐食のメカニズムが異なり、本試験条件では、たまたま同一腐食速度を示したものであって、張水率、張水期間、温度等の変化によって変ることは充分考えられ、本試験で腐食速度が略同じであったこと事体を重視すべきでない。

のいづれかが結論される。更に検討を続け、これらの問題について明らかにしたいと考えられている。

2.5.3 まとめ

\sqrt{S} 率を変えた試験の結果は外部情報（酸素濃度の変化等）から予測されたものよりはるかに影響の少ない結果を得た。

これらの結果は単独試験片による腐食減量より求めたものである。長尺試験片による結果は、現在解析中であってこれらの結果のまとめ次第更に詳細に報告の予定である。



* V/S 比 1/0.7 の場合 ($1 \text{ m}^3 / 0.7 \text{ m}^2$)

$$\begin{aligned}
 \text{タンク天井 } & 0.3 \text{m} \times 0.2 \text{m} \times 2 \text{面} \cdots 0.12 \text{ m}^2 \\
 \text{タンク側面 } & 0.23 \text{m} \times 1.0 \text{m} \times 2 \text{面} \cdots 0.46 \text{ m}^2 \\
 \text{タンク底面 } & 0.12 \text{m} \times 1.0 \text{m} \cdots 0.12 \text{ m}^2 \\
 & \hline
 & \text{計 } 0.7 \text{ m}^2
 \end{aligned}$$

* V/S 比 1/2.1 の場合 ($1 \text{ m}^3 / 2.1 \text{ m}^2$)

$$\begin{aligned}
 \text{タンク天井 } & 0.3 \text{m} \times 0.3 \text{m} \times 4 \text{面} \cdots 0.36 \text{ m}^2 \\
 \text{タンク側面 } & 0.345 \text{m} \times 1.0 \text{m} \times 4 \text{面} \cdots 1.38 \text{ m}^2 \\
 \text{タンク底面 } & 0.18 \text{m} \times 1.0 \text{m} \times 2 \text{面} \cdots 0.36 \text{ m}^2 \\
 & \hline
 & \text{計 } 2.1 \text{ m}^2
 \end{aligned}$$

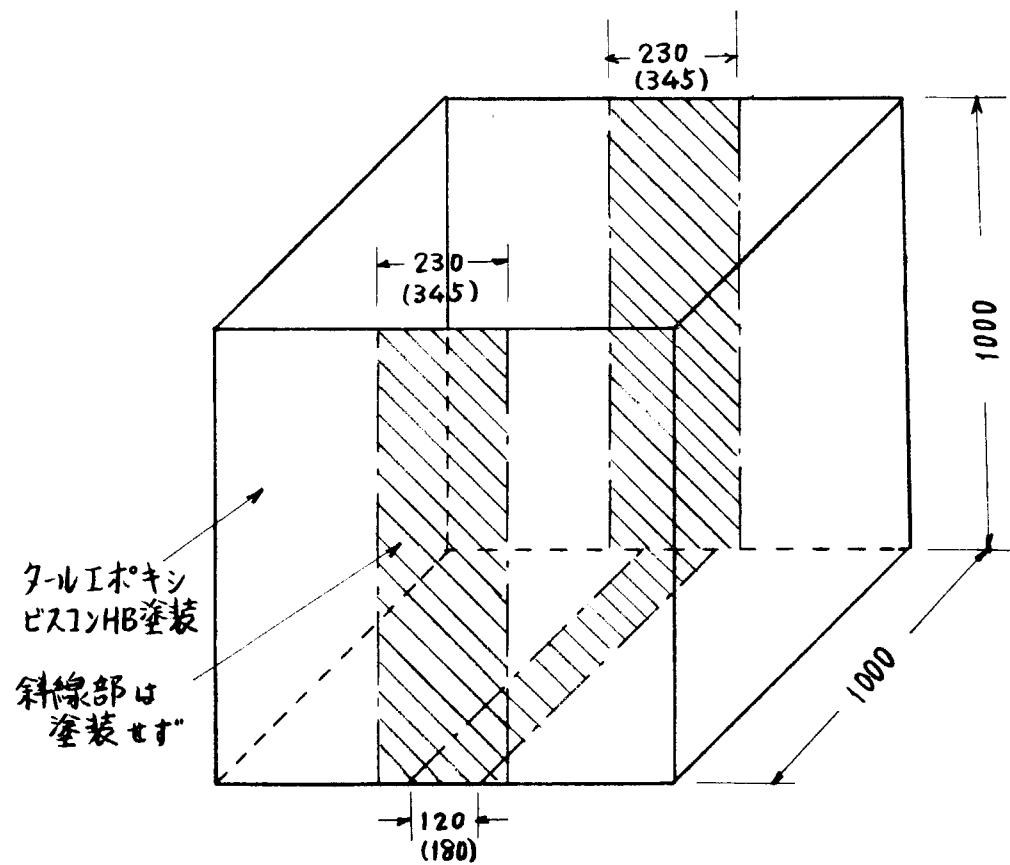


図 2.5.1 V/S テスト用試験タンクの内面塗装方法

表2.5.2 実船のV/S比

船体	V/S	V/S	V/S	V/S
30mセンターダンク	14302m ³ 9310m ²	1 0.64	30mサイドタンク	13311m ³ 12445m ² 0.93
237,000t	60m "	28604m ³ 17945m ²	1 0.63	60m " 26622m ³ 23612m ² 1.13
261,000t	3138m "	17050m ³ 10528m ²	1 0.62	3138m " 13963m ³ 13343m ² 0.93
262,76m	62.76m "	34100m ³ 20112m ²	1 0.59	62.76m " 27925m ³ 24314m ² 0.87
322,000t	26.5m "	17366m ³ 10234m ²	1 0.59	26.5m " 14300m ³ 14654m ² 1.02
	53m "	34731m ³ 18388m ²	1 0.53	53m " 28600m ³ 26414m ² 0.93

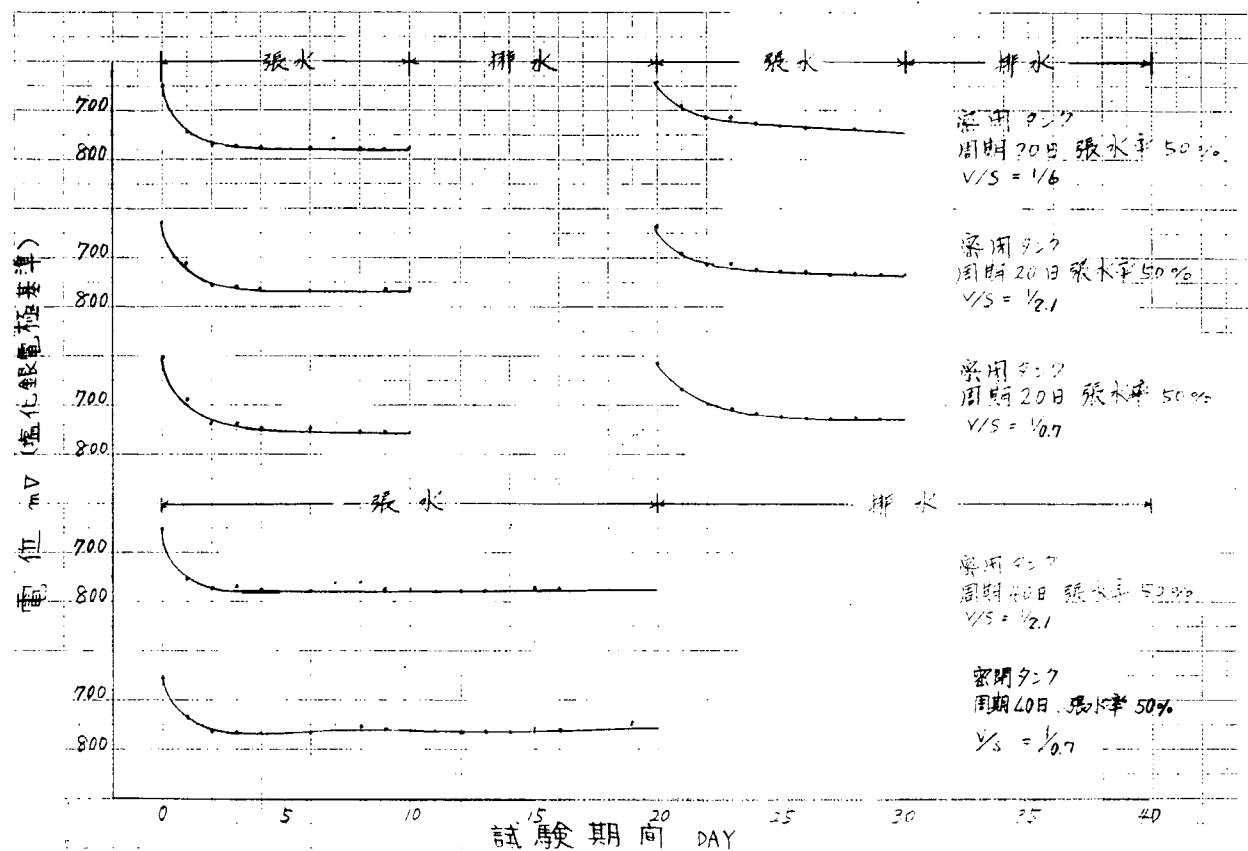


図 2.5.2 V/S テストタンク電位の経時変化

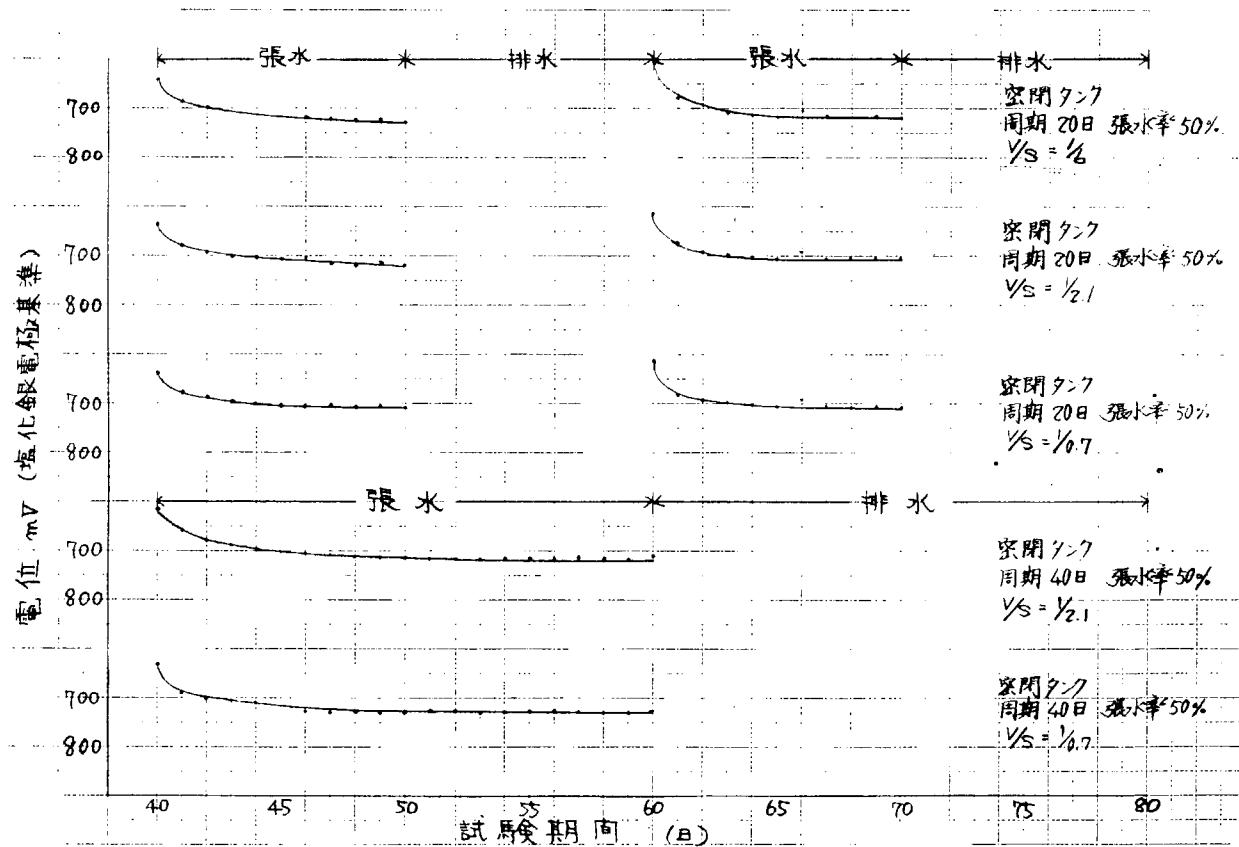


図 2.5.3 V/S テストタンク電位の経時変化

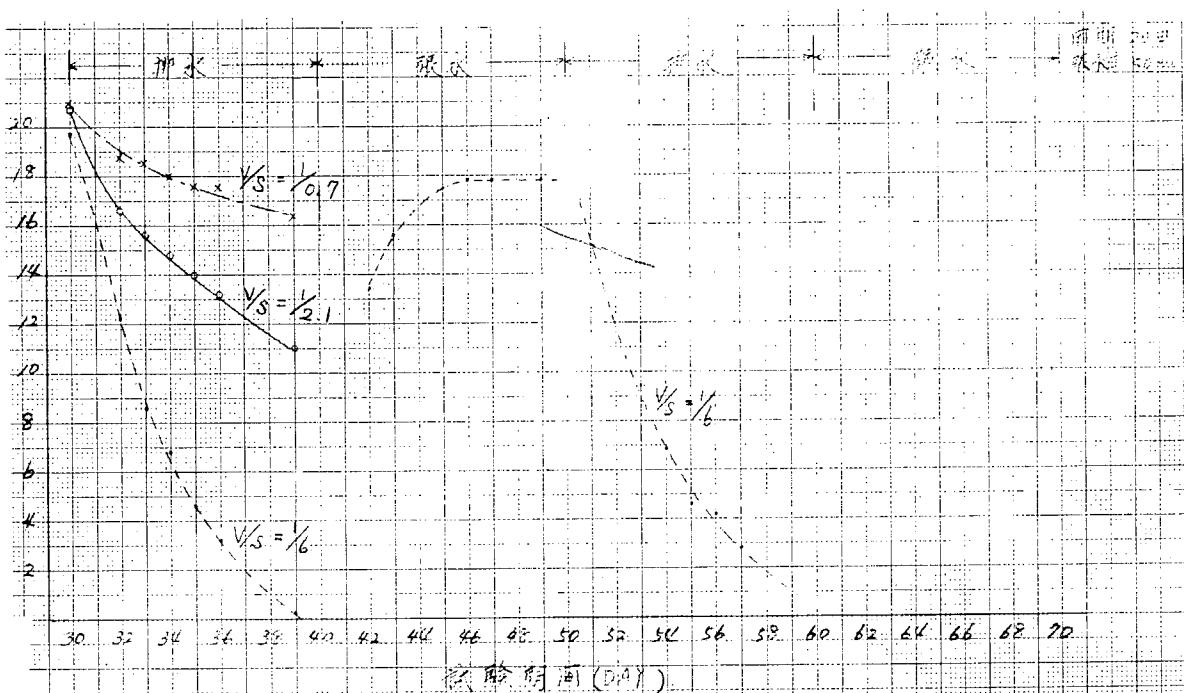


図 2.5.4 試験タンク内酸素の経時変化

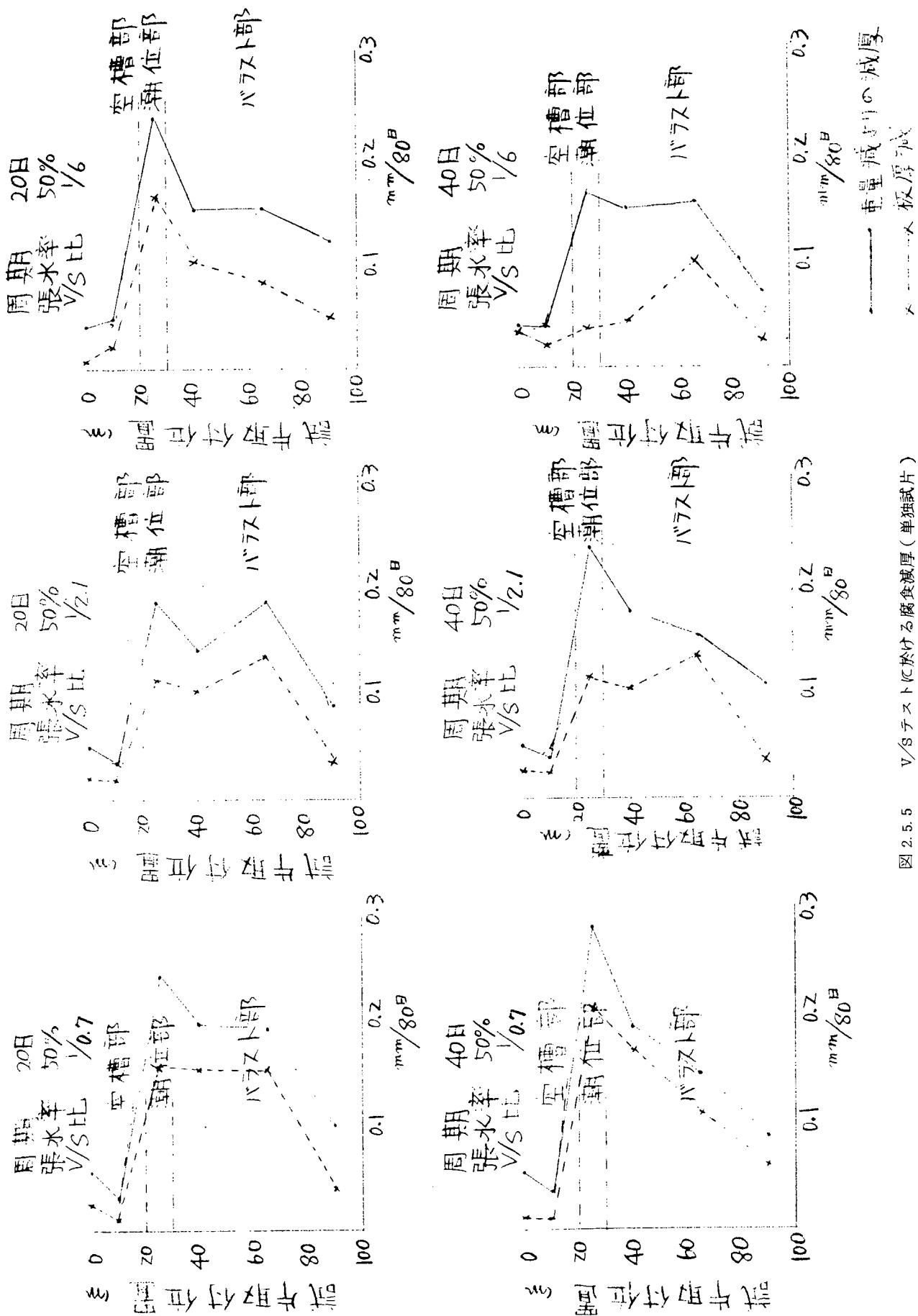


図 2.5.5 V/S テスト(CC)における腐食減厚(単独試片)

試験条件

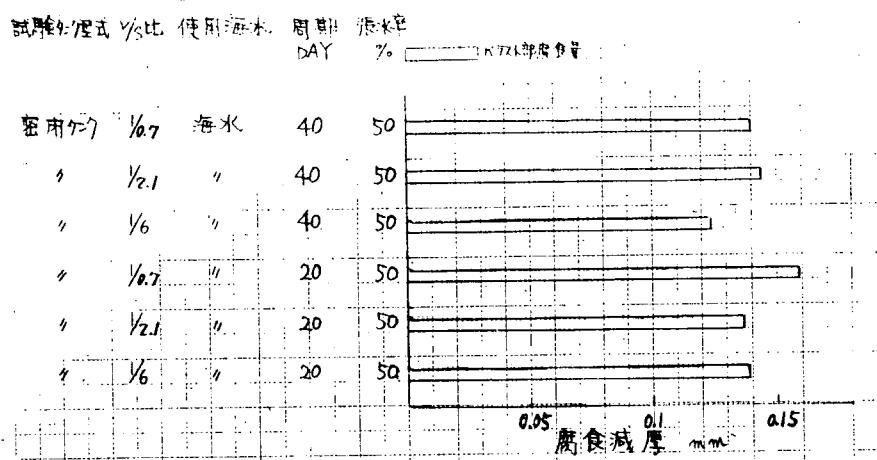


図 2.5.6 V/S テストに於ける腐食減厚(単独試片による)

3. 防食方法に関する研究

3.1 イナートガス組成と防食効果

3.1.1 試験装置と試験の方法

燃焼排ガスによる防食効果確認のため、人工排ガスを使用して空槽部（タンク天井部）を対象に腐食を検討した。

2.2～2.4で述べたと同じ恒温水槽（40℃）に1m角の軟鋼タンクを浸漬し、10日に1回予め調整した一定組成の人工ガスをチャージした。試験槽底部には僅かに海水を残し、雰囲気が常時湿り雰囲気となる様考慮した。

試験条件を表3.1.1にまとめて示す。

表3.1.1 試験条件

ガス組成	CO ₂ (%)	O ₂ (%)	SO ₂ (%)	備考
1	15	2	0.02	実船のスクラバー処理後のガスに相当するもの
2	15	5	0.02	
3	15	8	0.02	
4	15	2	0.1	排ガスそのままに相当するもの
5	15	5	0.1	
6	15	8	0.1	

試験槽内面はショットプラス仕上とし、腐食モニターとして試験槽内へ30×50×8mmのものと1000×50×6mmの鋼材をショットプラス仕上げの後槽内に入れた。

3.1.2 試験結果

一定濃度のガスをチャージ後の試験槽内のガス組成の時間による変化の一例を図3.1.1、図3.1.2にモニター試験片による腐食の結果を図3.1.3に示す。腐食試験結果を2.2の図2.2.4（周期20日張水率50%）の空気雰囲気の場合における空槽部の腐食と比較すると実船のスクラバー処理相当のイナートガス組成（0.02%SO₂）のものが若干腐食の少ない結果を示した。

排ガスそのものに相当するSO₂ 0.2%を含むガスでは0.02%のものよりも、若干腐食が大きいのが見られ、特に酸素2%の場合は、恒温水槽の液面部分の腐食が大きかった。

写真3.1.1はSO₂ 0.02%の場合と空気のみチャージした試験槽内部の状態を示したもので天井部やタンク側面で凝縮した水滴の流下の模様が見られ天井より30cm下まで黒錆それより下は赤錆を示しており當時、空気空槽タンクが全面黒褐色の薄い錆であるのに対して異なった様子を示した。

図3.1.1、図3.2.2で興味あることは、CO₂、O₂濃度減少状態がSO₂濃度によって異なっていることである。すなわち、SO₂濃度0.02%では、CO₂、O₂濃度が略同じ程度で減少しているのに對し、SO₂ 0.2%ガスでは、酸素濃度の高いガス（8%O₂）で炭酸ガスの減少が激しい。これらのガス濃度の変化がどのように腐食に影響をおよぼすのか本試験だけからは前述した腐食速度との関連を求めるることはできないけれども、腐食生成物の組成の検討等を行ない追求したいと考えている。

表3.1.2は試験に使用したイナートガスの使用量を示したもので鋼の単位面積当りのガス量を下段に示しておいた。チャージしたガス量と腐食の関係については後の3.1.3で述べる。

3.1.3 イナートガスチャージ量と鋼材の腐食について

油タンクの爆発防止に使用されるイナートガスは通常0.02%程度のSO₂が含有されており、これがタンク壁面に蓄積すると見られ、長期的には、腐食を促進することも考えられる。

ここでは、バラストタンク天井部を想定して常時湿り雰囲気中の鋼に人工イナートガスのチャージ量および期間を変えて腐食速度を調べた。

(1) 試験方法

試験装置を図3.1.4に試験条件を表3.1.3に示した。海水汚染したものと清浄なもの2種の試験片を試験容器に吊り下げる、人工ガスを一定量注入後密閉状態で40°Cに28日間保持した。その間表3.1.3に示すようにガスのチャージを行なった。

(2) 試験結果

図3.2.5に腐食結果を示した。

この結果

(イ) 人工排ガス雰囲気で腐食量は著しく減少したが、ガスチャージの量の増加によって図3.1.5a～c、又はa'～c'に見られるように腐食抑制効果は減少する。

(ロ) 人工排ガス中のSO₂濃度の高い方が同じ排ガスチャージ量であれば腐食の抑制効果は少ない。

(ハ) 海水による汚染は、腐食を増加するが、イナートガス雰囲気は相当の腐食抑制効果を与える。

これらの結果は、SO₂を含む排ガスはSO₂濃度が低ければかなりの腐食抑制効果のあることを示している。

以上、イナートガスはSO₂濃度の低い程、チャージ量の少ない程防食に有効である事が判ったが、3.1.2のような長期間で、且つチャージ量も多い場合は、いくらか腐食抑制効果のあることを示しただけで図3.1.5に見られるような著しい腐食抑制効果を示さなかった。これは湿り雰囲気における腐食が穏やかなこととSO₂のチャージ量の影響に起因するものと考える。

3.1.4 まとめ

バラストタンクの空槽部を想定した湿り雰囲気中の鋼材の腐食に対し、イナートガスの防食効果を調査した。

その結果次の通りである。

- (1) 略一定温度の湿り雰囲気での鋼の腐食は海水の張排水の繰り返される場合に較べて腐食も穏やかなためイナートガスによる防食効果は顕著でない。
- (2) イナートガス中の濃度、チャージ量は防食効果に影響し、SO₂量は少ないことが望ましいが酸素濃度は2～8%で特に変わらない。

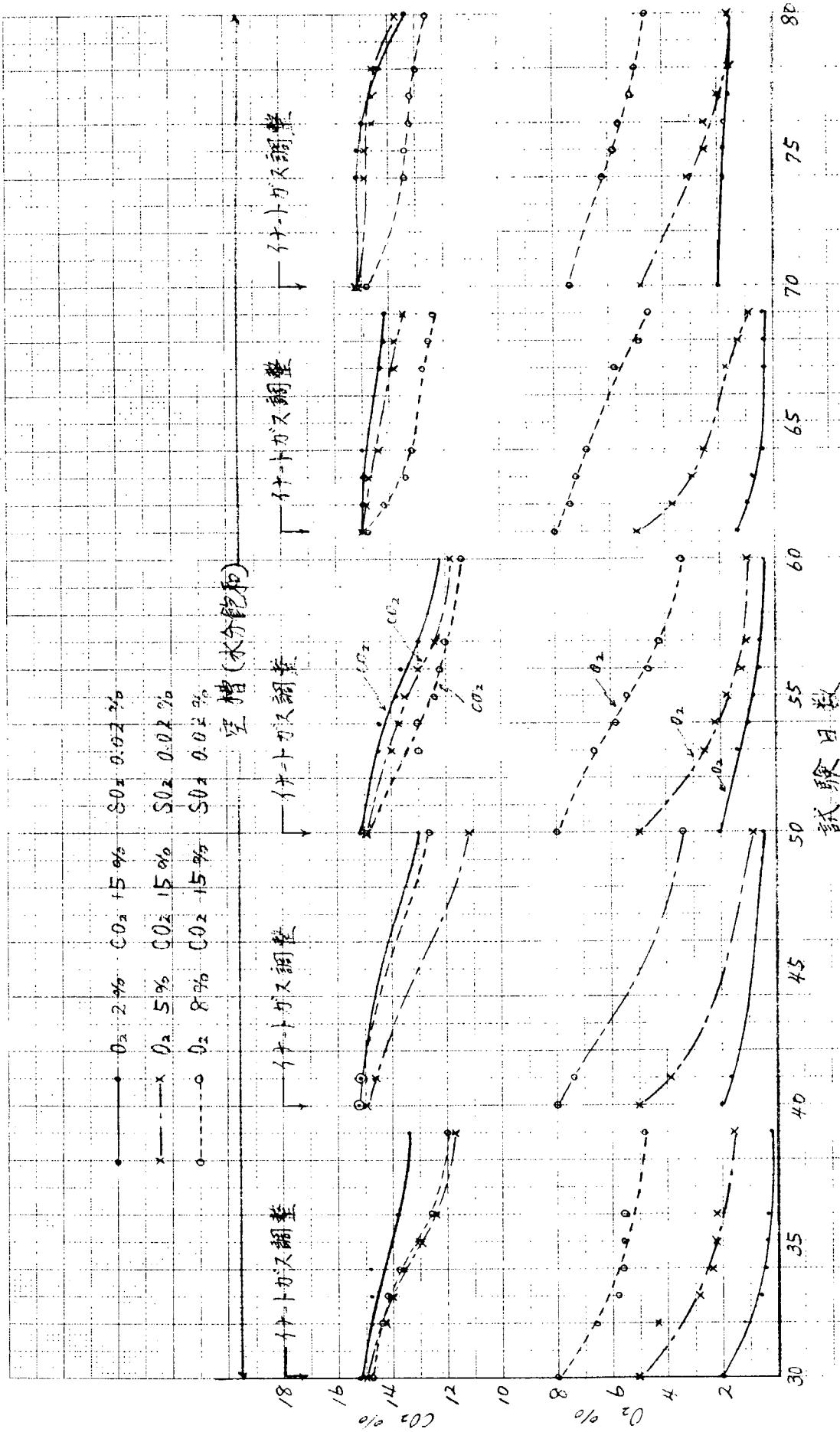


図 3.1.1 IGS テストタンク内イナートガスの経時変化

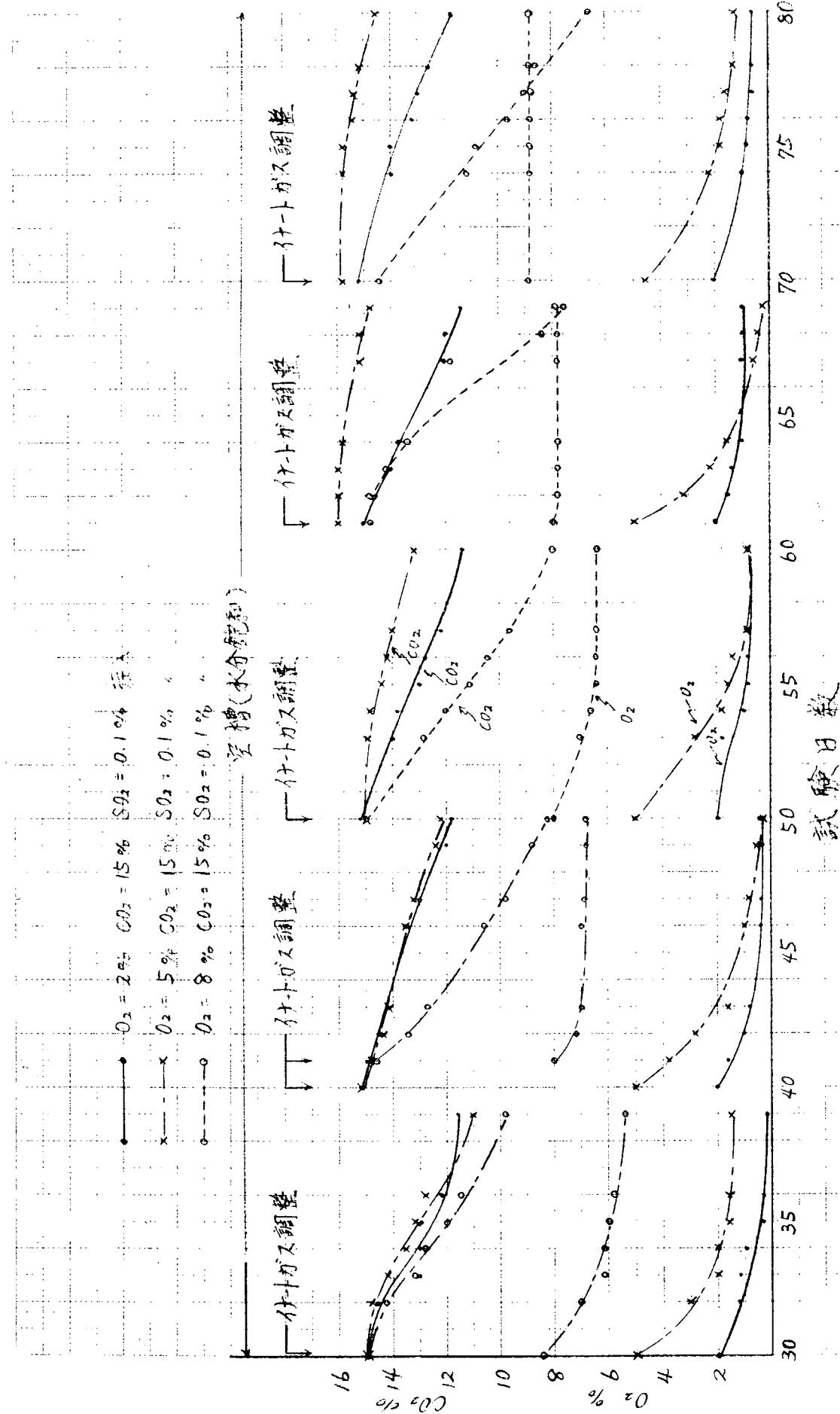


図 3.1.2 IGS テストタンク内イナートガスの経時変化

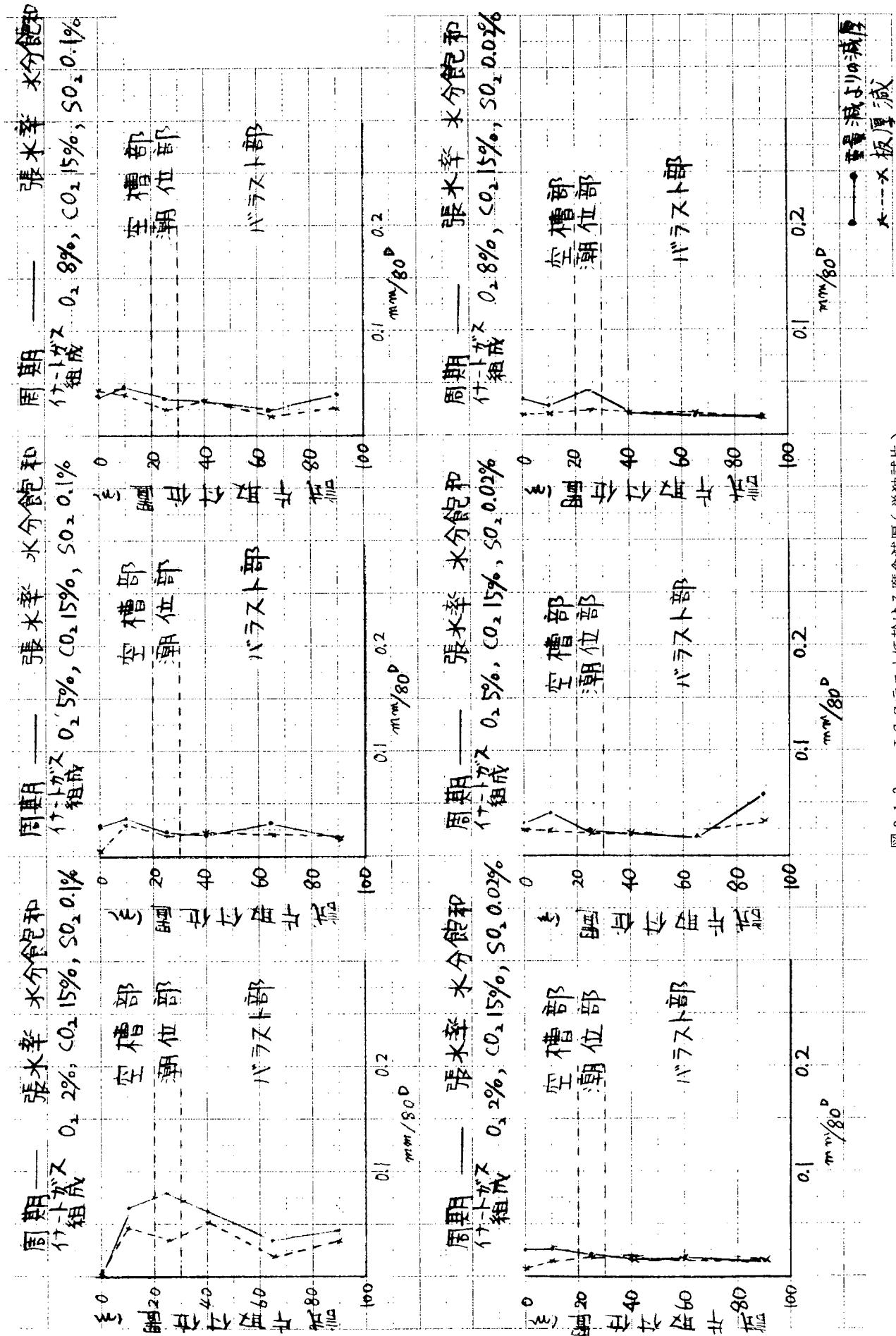
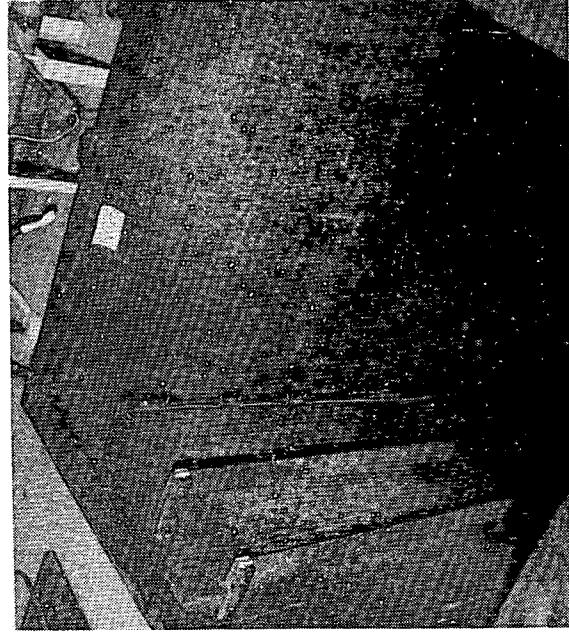
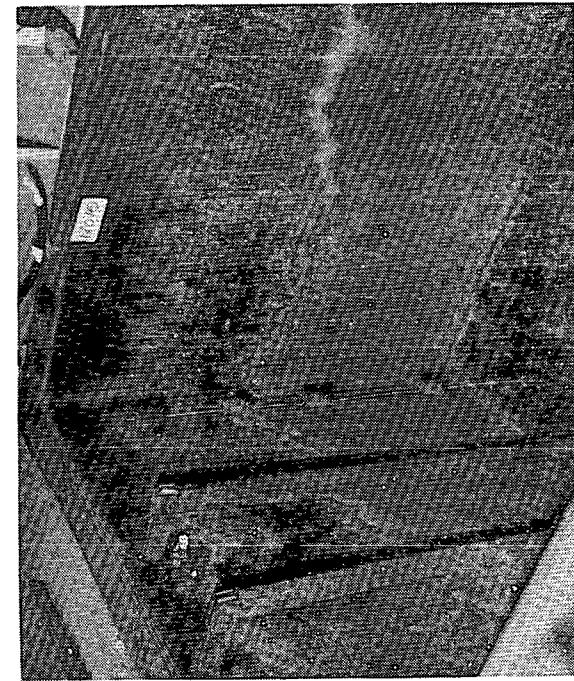


図 3.1.3 IGS テストに於ける腐食減厚(単独試片)



密閉タンク
水分飽和
イナートガス組成

O₂ 2%
CO₂ 15%
SO₂ 0.02%



空気密閉
(注)
O₂ 8%
CO₂ 15%
SO₂ 0.02%

O₂ 5%
CO₂ 15%
SO₂ 0.02%



写真 3.1.1 イナートガス試験槽の表面状況

表3.1.2 イナートガス使用量

イナートガス 条件	イナートガス組成				イナートガス組成				イナートガス組成			
	N ₂	O ₂	C O ₂	S O ₂	N ₂	O ₂	C O ₂	S O ₂	N ₂	O ₂	C O ₂	S O ₂
8.3%	2%	1.5%	0.1%	8.0%	5%	1.5%	0.1%	7.7%	8%	1.5%	0.1%	7.7%
ℓ	13000	198	2287	20.8	13400	556	2356	21.3	13000	830	2287	20.8
ガス注入量 ℓ/m^2	2167	33	381	3.5	2237	93	393	3.6	2167	138	381	3.5

S O₂ $mg/cm^2 \div 1 mg/cm^2$

イナートガス 条件	イナートガス組成				イナートガス組成				イナートガス組成			
	N ₂	O ₂	C O ₂	S O ₂	N ₂	O ₂	C O ₂	S O ₂	N ₂	O ₂	C O ₂	S O ₂
8.3%	2%	1.5%	0.02%	8.0%	5%	1.5%	0.02%	7.7%	8%	1.5%	0.02%	7.7%
ℓ	13400	204	2357	4.58	14197	591	2446	4.82	12600	802	2216	4.32
ガス注入量 ℓ/m^2	2233	34	393	0.76	2368	98.5	401	0.80	2100	134	369	0.72

S O₂ $mg/cm^2 \div 0.2 mg/cm^2$

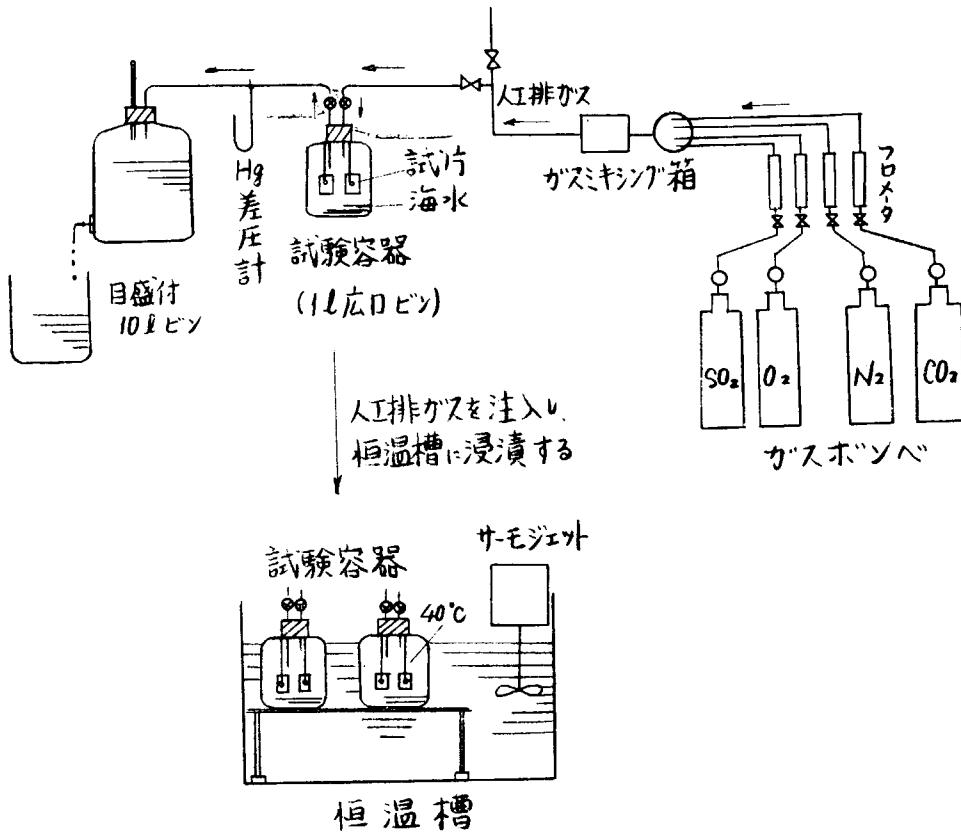


図 3.1.4 試験装置

表 3.1.3 試験条件

項目	内 容					
雰囲気条件 (40°C)	A	湿り空気				
	B	湿り人工排ガス	$\left\{ \begin{array}{l} SO_2 \ 0.1\% \\ CO_2 \ 12.0\% \\ O_2 \ 5.0\% \\ N_2 \ 残り \end{array} \right.$			
	C	湿り人工排ガス	$\left\{ \begin{array}{l} SO_2 \ 0.02\% \\ CO_2 \ 12.0\% \\ O_2 \ 5.0\% \\ N_2 \ 残り \end{array} \right.$			
人工排ガス注入量 * $SO_2 (mg) / 表面積 (cm^2)$	人工排ガス注入量 雰囲気条件B 雰囲気条件C 5l ----- 0.0342 ----- 0.0068 10l ----- 0.0684 ----- 0.0136 15l ----- 0.1026 ----- 0.0204					
人工排ガス注入方式	5l注入時 10l注入時 15l注入時 初回(初日)----- 5.0l ----- 5.0l ----- 5.0l 第2回(2日目)--- - ----- 2.5l ----- 2.5l 第3回(6日目)--- - ----- 2.5l ----- 2.5l 第4回(15日目)--- - ----- - ----- 2.5l 第5回(20日目)--- - ----- - ----- 2.5l					
試験片	KA材, $15 \times 30 \times 4 (mm)$, $12.6 cm^2$ 200番シガキ仕上, 溶剤洗浄後乾燥, 重量計測後 { 海水汚染して供試 清浄のまま供試					
*ボウム海水(mg)/表面積(cm ²)	$38 ml / 419. cm^2 = 0.091 ml/cm^2$					
試験期間	28日間					
* 表面積: 試験片 $12.6 \times 2 \frac{(cm^2)}{(枚)} = 25.2 cm^2$ } $419. cm^2$ 器壁部 $394. cm^2$						
* ボウム海水: 38 ml						

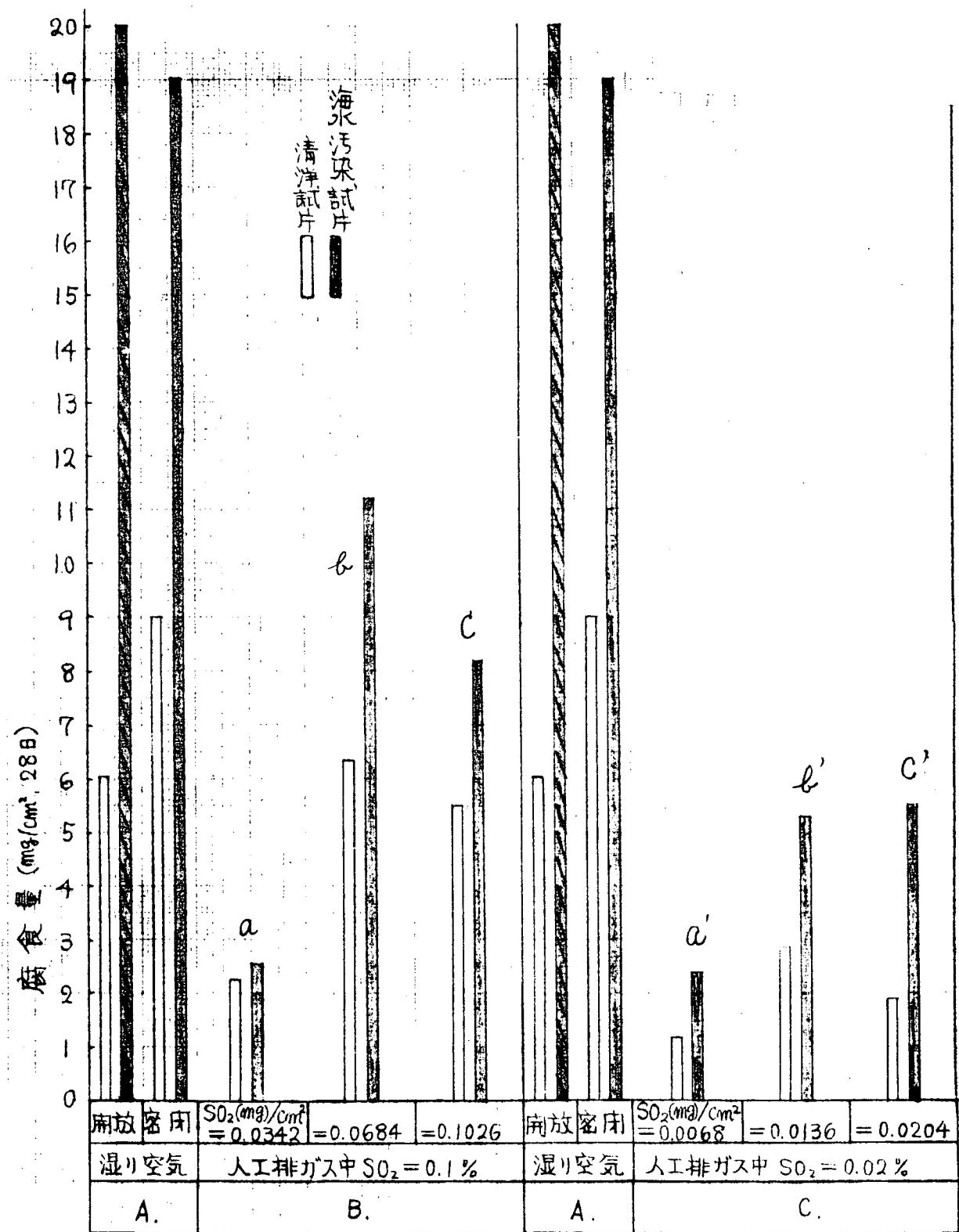


図 3.1.5 鋼材腐食におよぼす人工排ガス中の SO₂ の影響

3.2 応力の変化に対するイナートガスの防食効果

3.2.1 試験装置と試験方法

(1) 人工排ガス使用による防食試験装置

試験タンクとしては、第1年度研究で製作した専用の応力付加試験槽を使用し、内部の湿り雰囲気中(40°C)に試験片をばく露して90日間試験した。

応力付加試験槽ならびに試験片、応力付加方法など細部については、第1年度報告を参照されたい。

人工排ガスの注入装置の系統図を図3.2.1に示す。

一定流量の4種のガス(CO_2 , O_2 , SO_2 , N_2)を混合して一定組成の人工排ガスを調製し、各試験槽に封入して試験中は常に所定雰囲気に保持した。

試験槽内のガス更新は大体1回/週の割合で各試験槽に一定量の人工排ガスを封入して行ない試験を続行した。なお、各試験槽には予め約300ℓの海水をタンク底に入れ、試験中は槽内を常に湿り雰囲気に保持するようにした。

調製ガスおよび試験槽内のガス計測は CO_2 , O_2 , SO_2 について行ない、 CO_2 , O_2 の場合はオルザットガス分析器、 SO_2 は人工排ガスの注入時に途中のラインよりサンプリングしてJIS.K0103-1963法により定量し、 SO_2 注入濃度として表わした。

(2) 試験条件

試験条件の概要を表3.2.1に示す。試験中の計測は試験槽内の器壁部のpH、ドレン海水のpHおよび全鉄(E.D.T.A法)等について参考程度に行なった。

試験後、試験片を取出して写真撮影後、従来法により酸洗処理してサビを除去し腐食速度を算出した。

3.2.2 試験結果および検討

試験中の試験槽内の性状変化(器壁部およびポットム海水のpH、ポットム海水の溶存 O_2 および全Fe量)を表3.2.2に示す。

試験後サビを除去して腐食速度を求めた結果を図3.2.2～図3.2.3に示す。

(1) 表3.2.3に見られるように、試験中の試験槽内は人工排ガス雰囲気により器壁部のpHが時間と共に著しく低下した。これは、人工排ガス中に含まれる SO_2 が器壁部の水滴に吸収され、時間と共に蓄積したものと解される。

一方、ポットム海水中に沈積したと見られる全Feの量の分析結果からは、人工排ガス雰囲気のタンクでは、湿り雰囲気のタンクに比べ、かなり減少し、腐食雰囲気としては穏やかな状態にあると推定される。

ただ、これは各試験槽内の試験片の数や沈積した鉄サビの分析状態によっても異なるので、一概に判定はできないであろう。

(2) 鋼材の腐食速度は図3.2.1に見られる通りで、これらの結果を整理すると次の様である。

(イ) 清浄な試験片の無応力状態での腐食速度は湿り空気雰囲気の場合と各種イナートガス雰囲気の場合で全体の腐食量が小さいため、3.1で得られたと同じように両雰囲気で殆んど変わらない。これに対し、試験片を海水で予め汚染したものは SO_2 濃度0.1%の場合若干腐食が大きいように感じられるが、汚染処理を各試験片で同じ状態に保つことは難しく、この方のバラツキの影響も考えられ明確でない。

いずれにしても、バラストタンク天井部等のような空槽部分は、海水で汚染されないことが望ましいが、現実には無理なことであろう。

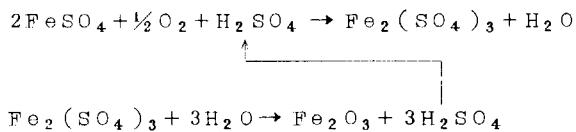
(ロ) 繰り返し応力が付加されたときの応力平行部6点の平均腐食速度は、海水の張排水の繰り返されるバラスト部の腐食に比較して極めて小さく、殆んど応力の影響はないと考えてよい。しかしながら、C.S.P.が後期にずれるだ

補遺 2.1の図2.1.9を参照し比較すれば判る。

補遺 2.1参照

けで長時間後には、やはりその影響は表われてくるものと考えられ、このような目で見ると SO_2 濃度が高く、酸素濃度の低い条件 D が一番今後影響を受けそうである。

一般に鋼材の湿り状態における亜硫酸ガスによる腐食の一例を示せば SO_2 ガスの吸着、酸化によって腐食生成物として硫酸第一鉄を生成し、これが酸素によって酸化され



となって H_2SO_4 の循環が考えられる。

これがタンク天井部のような高温になる雰囲気では硫酸或は塩類の濃縮が起き、一番激しい腐食雰囲気を形成する場合のあることも予想される。

2.2 でも触れておいたが今後試験槽タンク天井部の加熱による影響を検討したいと考えている。

(イ) タールエポキシ塗装鋼は図 2.3.3 に見られるように、いずれの雰囲気、応力条件によってもすぐれた防食性を示し、クロスカット部分も第一年度報告したようなバラスト部の場合のような異常な腐食はなかった。

なお、無機ジンクリッヂ塗装鋼は歪 1.4 % で塗膜が剥離した。

3.2.3まとめ

バラスト天井部を想定してイナートガス雰囲気における裸鋼材および塗装鋼のくり返し応力による腐食を調べた結果次のことが明らかになった。

(イ) くり返し応力が付加されたときの鋼材の腐食はバラスト部の腐食に比較して極めて少なく、通常は促進しないとみてよい。

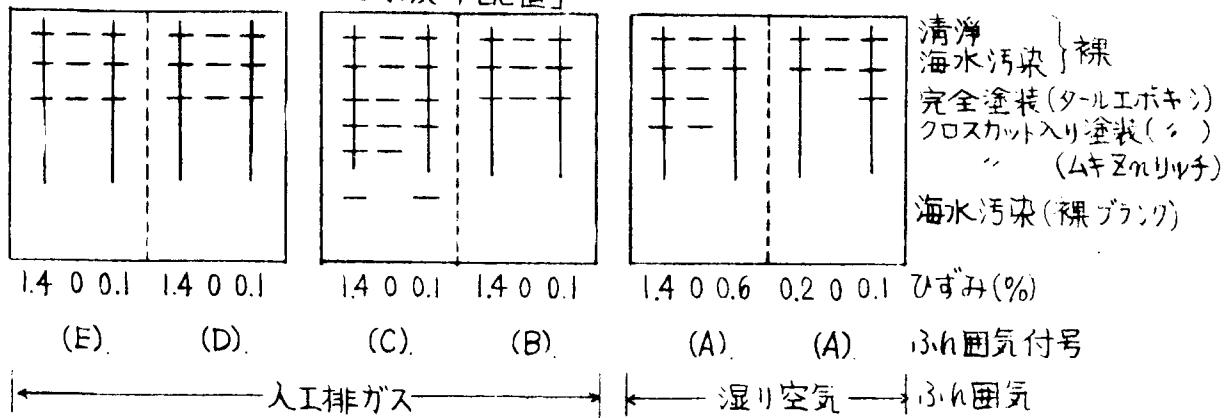
(ロ) タールエポキシ塗装鋼に人工傷をつけたものも第 1 年度に報告したようなバラスト部における異常な腐食はみられなかった。

これらの結果は温度変化のない場合であって、乾湿或いは熱サイクルのくり返される部分については今後検討の予定である。

表 3.2.1 試験条件

番号	項目	内 容
1.	裸試験片	A級鋼材 $495 \times 80 \times 60 \text{ mm/m}$ (従来通り) 機械仕上後 トリクレン洗浄、重量板厚計測してタンク内に取付、一旦水洗・アルコール洗い(1回)後次の2種に分けて供試。 ① 清浄のままである。② 海水汚染(海水で濡らす)
2.	塗装試験片	塗装名、タルエボキシ(ビスコンH-B) その他 ムキズルリッシュ(ガルボンS-N) 塗装方法、従来通りSR-140指定による 試片種類、完全塗装およびクロスカット入り塗装
3.	繰返し応力(ひずみ)	0 0.1 0.2 0.6 1.4 %, 2回/day 繰返し
4.	ふれ囲気(40°C)	(A) 湿り空気 ガス濃度(%) 使用ガス量(m^3) (B) 人工排ガス $\text{CO}_2 \text{ O}_2 * \text{SO}_2 \text{ N}_2$ $\text{CO}_2 \text{ O}_2 \text{ SO}_2 \text{ N}_2$ $12.5 \ 5.0 \ 0.1$ 残 $7.5 \ 4.0 \ 0.065 \ 41.3$ ▲($9.4\text{g}/\text{m}^2$) (C) □ $12.5 \ 5.0 \ 0.02$ 残 $7.6 \ 4.0 \ 0.022 \ 42.3$ ▲($3.2\text{g}/\text{m}^2$) (D) ≈ $12.5 \ 2.0 \ 0.1$ 残 $7.5 \ 2.5 \ 0.067 \ 43.0$ ▲($9.7\text{g}/\text{m}^2$) (E) △ $12.5 \ 2.0 \ 0.02$ 残 $7.4 \ 2.4 \ 0.025 \ 42.3$ ▲($3.7\text{g}/\text{m}^2$) ※ 注入時の人工排ガス中の SO_2 (%)で示す ▲ 壁単位面積当りの SO_2 推定付着量(推定器壁面積 20m^2)
5.	ボトム海水	各室 300 l
6.	試験期間	90日間 (昭和48.6.11 ~ 9.10)

「試験片配置」



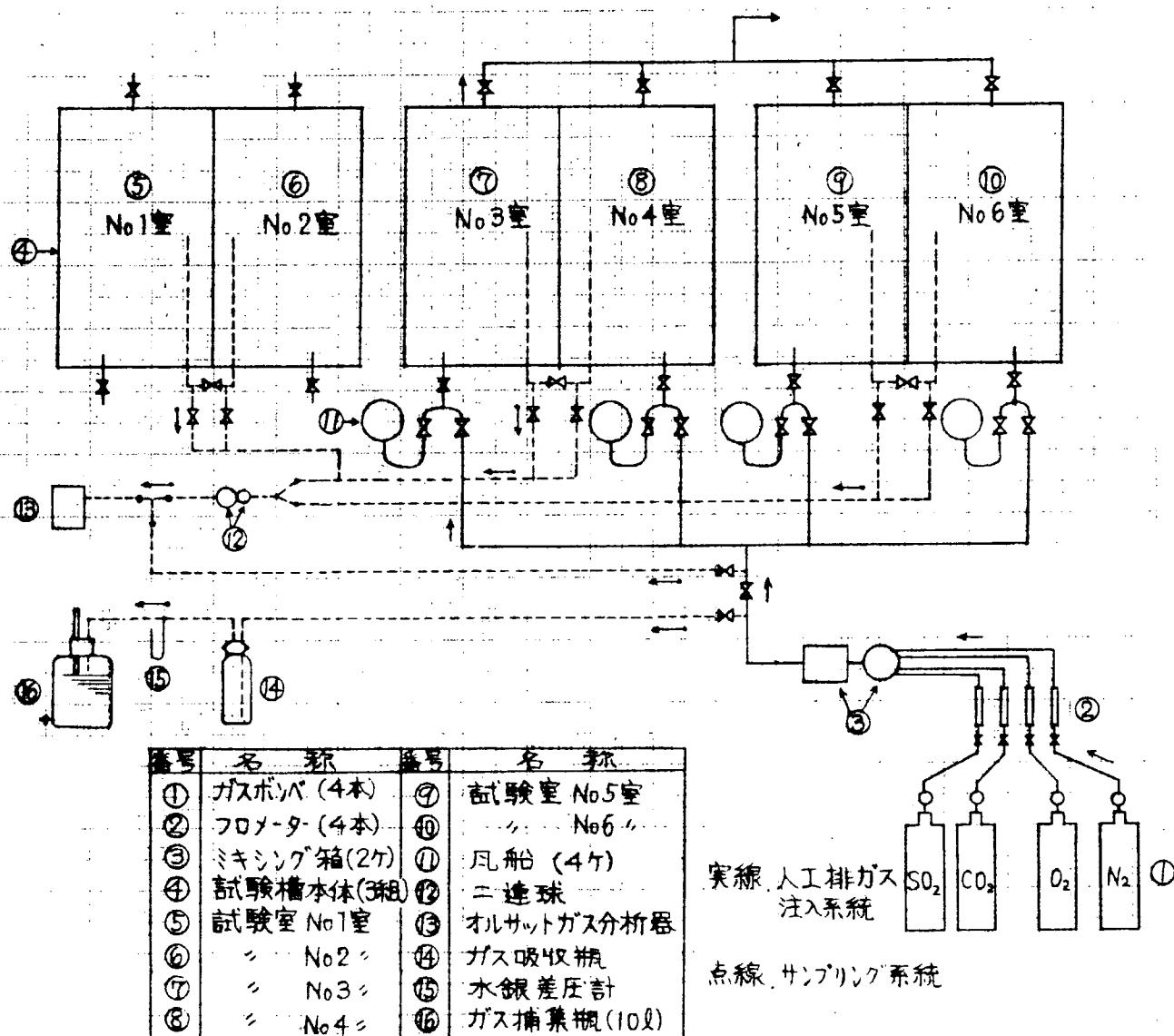


図 3.2.1 人工排ガスによる鋼材の防食試験装置

表 3.2.2 イナートガスによる試験タンク内の性状変化

計測項目	計測個所	日数(日)	No.1室	No.2室	No.3室	No.4室	No.5室	No.6室
			(湿り空気 ボットム海水)	{ 同左 }	% CO ₂ 12% O ₂ 5% SO ₂ 0.1% ボットム海水	{ CO ₂ 12% O ₂ 5% SO ₂ 0.02% 同左 }	{ CO ₂ 12% O ₂ 2% SO ₂ 0.1% 同左 }	{ CO ₂ 12% O ₂ 2% SO ₂ 0.02% 同左 }
PH	器壁部	11	6.4~6.8	6.4~6.8	5.2~5.6	4.4~4.8	4.8~5.2	4.0~4.6
		17	5.8~6.2	5.8~6.2	4.6~5.0	4.0~4.4	4.4~4.8	4.0~4.4
		29	5.4~5.8	5.4~5.8	3.8~4.2	4.2~4.6	3.4~3.8	3.8~4.2
		45	5.0~5.4	5.0~5.4	3.6~4.0	4.0~4.4	3.2~3.6	3.8~4.2
		61	5.0~5.4	5.2~5.6	3.2~3.6	4.0~4.4	3.4~3.8	3.8~4.2
		74	5.0~5.4	5.2~5.8	3.2~3.6	4.0~4.4	(電極 3.8) 3.4~3.6	(電極 4.4) 3.6~4.0
		88	5.0~5.4	5.0~5.4	3.0~3.4	4.0~4.4	3.2~3.6	3.6~4.0
		張水時	8.1	8.1	8.0	8.0	8.1	8.1
ボットム海水	ボットム海水	11	7.3	7.3	7.0	6.9	7.0	7.1
		17	6.9	6.9	6.7	6.5	6.8	6.4
		29	6.4	6.4	6.6	6.6	6.4	6.4
		45	6.3	6.2	6.4	6.6	6.5	6.5
		61	6.35	6.4	6.6	6.6	6.4	6.5
		74	6.2	6.2	6.5	6.5	6.3	6.4
		88	6.2	6.1	6.4	6.4	6.3	6.4
		溶存O ₂ (PPm)	同上	5.1	5.0	3.7	3.7	3.4
全Fe量(ppm)	同上	56	5.0	4.8	3.6	3.5	3.1	3.2
		74	5.1	4.9	3.7	3.5	3.1	3.1
		88	—	—	—	—	—	—
		25	—	160	95	70	50	40
		50	—	210	110	90	70	65
		74	—	270	130	115	75	60
		88	—	280	150	130	90	60

▲ PH計測法 器壁部はPH試験紙、ボットム海水はPHY-1-1により計測。

▲ 溶存O₂(PPm) 溶存O₂ Y-9-1による。

▲ 全Fe量 EDTA法による。

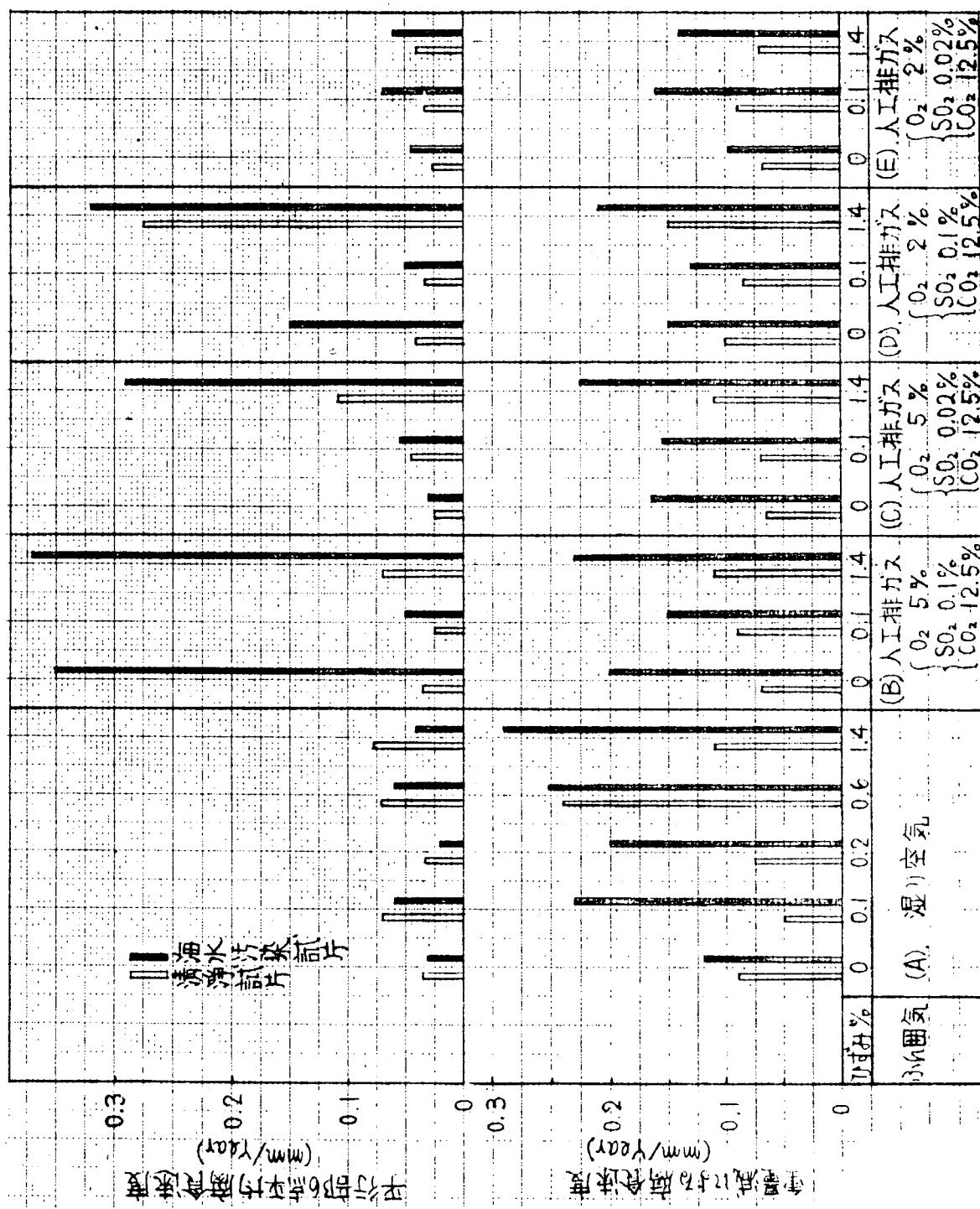


図 3.2.2 裸鋼材の人工排ガス中における腐食速度（その 1）

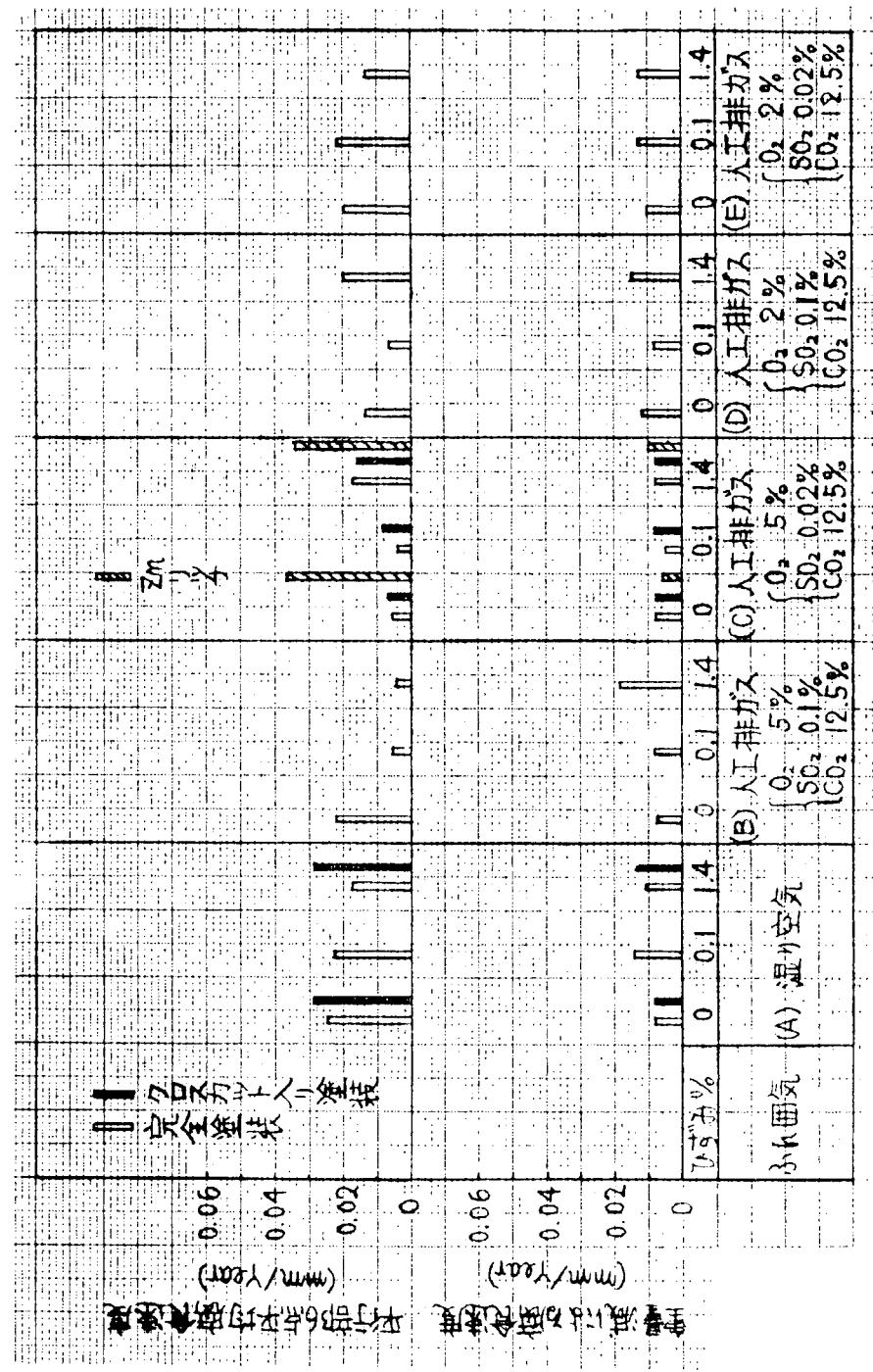


図 3.2.3 塗装鋼の人工排ガス中における腐食速度

3.3 応力の変化に対する塗膜の防食効果

本節では、タルエポキシ塗料および無機質ジンクリッヂ塗料を塗装した鋼板について、海水中における繰返し応力下の腐食に及ぼす応力および応力の繰返し速度の影響について基礎的な研究を行ない、さらに腐食疲れ強さの比較を行ない、繰返し応力下における塗膜の防食効果を検討した。

3.3.1 試験装置および試験方法

(1) 試験装置

試験装置は、図3.3.1に示すように12枚の試験片を同時に腐食試験タンク内において、応力の繰返し速度を1.0～0.03cpmの範囲で、繰返し両振平面曲げ腐食疲れ試験が再現できるように計画し製作した。すなわち、試験片をマシンバイタイプの固定台①にベークライト製案内板を介して固定し、試験片の自由端にピストン棒②に固定された荷重付加ヘッド③によって往復運動を与え、その繰返しによって試験片に繰返し両振平面曲げ応力が得られる。曲げ応力は、回転運動から往復運動に変える偏心輪④の偏心距離を変化させることによって変る。応力の繰返し速度は、無段变速モーター⑤とウォーム減速機⑥により変化する。荷重は加ヘッド③と支点⑦との間は、電気的に絶縁し試験片と他の試験片および腐食試験タンク内の構成材料とのガルバニックコロージョンの影響を防止した。試験液の温度をコントロールするため、500Wの電熱パイプと自動温度調節器を設置した。また、試験液中の溶存酸素を飽和に保つために150mmピッチで1.5mm中の穴を5か所にあけた空気吹込み管をタンク底部に設け、エアポンプで空気を吹きこむようにした。

(2) 試験片

試験片の形状は、図3.3.2に示すように広い範囲で均一ひずみ分布が得られるように設計した。参考のために、試験片を試験装置にセットしてたわみを与えたときのひずみ分布の測定例を図3.3.3に示す。供試鋼材は、板厚3.2mmの一般構造用圧延鋼板で、その化学成分および機械的性質を表3.3.1に示す。試験片の表面は、塗装のための前処理として必要なショットブロスト処理を行なった。その程度はSIS, Sa.3である。

(3) 塗装および塗装条件

タルエポキシ塗料およびアルカリシリケート系無機質ジンクリッヂ塗料の2種類を用い、表3.3.2に示す塗装条件で塗装した。

(4) 試験条件

応力付加条件は、曲げ応力を0, 10, 20, 30%の4段階とし、応力の繰返し速度を1.0, 0.6, 0.03cpmの3段階とした。試験は、いずれも同一条件で2回づつ繰り返して、評価を行った。腐食試験環境は、表3.3.3に示すように調製した人工海水を用い、40℃の温度で、空気飽和状態とした。塗装試験片の塗膜損傷は、ナイフ(NT Cutter I-500)を用いて試験片両面(均一ひずみ領域)の塗膜に曲げ応力に直角に長さ20mmの切傷を人工的に作った。

(5) 腐食量の測定方法

塗装試験片の欠陥部における孔食深さの測定方法は、試験後、水洗乾燥して表面状況を観察した後、試験片の塗膜損傷に直角断面を切り出し、これをエボラック樹脂に固めて切断面を検鏡試料と同様に研磨し、それを万能投影器で10倍に拡大して侵食深さを光電式マイクロメータ(最小読み取単位0.001mm)で測定した。裸鋼の腐食速度は、試験前後の均一ひずみ領域の板厚分布ポイントマイクロメーター(精度1/100mm)で測定し、その表示は、片面の腐食速度で示した。なお、試験後の腐食生成物の除去は、5%HCl + 0.5%イビット(ヰ1-L)で酸洗した。

(6) 自然電極電位(腐食電位)の測定方法

海水中における試験片の腐食電位は、カロメル電極に照合して北斗電工製ボテンショスタット(PS-500B)を用いて測定した。

(7) 繰返し応力一サイクル間の腐食電位振動巾の測定方法

裸鋼の試験片に20mm角の測定面(均一ひずみ分布領域の中央片面のみ)を深いて、フロンマスク(絶縁塗料)で

完全に被覆し、40°Cの海水中で応力繰返し速度を一定(0.6 cpm)に保って1サイクル間の電位の振動巾を測定した。

3.3.2 試験結果とその検討

3.3.2.1 繰返し応力下における塗膜損傷部の腐食

(1) 腐食状況

写真3.3.1～3.3.2にて40°Cの海水中曲げ応力20kgf/mm²、応力繰返し速度0.03cpmで91日間(繰返し数：3762回)試験した後の腐食状況を示す。写真3.3.1-(a)は、タールエポキシ塗装鋼の表面状態を示したものであり、塗膜が試験前の状態で保たれている状況がよく現われている。しかし塗膜損傷部の塗膜を剥がしてみると、その素地金屈は写真3.3.1-(b)に示すように腐食がかなり進行している。この腐食型態を明瞭に現わすために塗膜損傷に対して直角断面を10倍に拡大した写真を写真3.3.2-(a)に示す。応力を付加しない試験片では、写真3.3.2-(b)に示すように塗膜損傷部の孔食は非常に小さいことがわかる。一方、無機質シンクリッヂ塗装鋼の表面状況についてみると、応力を付加しない試験片は、塗装損傷部においても赤サビの発生がなく、腐食が認められなかったが、繰返し応力を付加した試験片の塗膜損傷部の腐食は、写真3.3.2-(c)に示したように孔食状となる。

この孔食は、タールエポキシ塗装鋼と比較すると小さい。このように塗装鋼の塗膜損傷部における腐食に対して繰返し応力の影響が大きいことを写真はよく示している。

(2) 塗膜損傷部の腐食速度に及ぼす繰返し応力の影響

40°Cの海水中で応力繰返し速度を0.03cpmと一定にした時の繰返し応力と20日間における腐食速度との関係を図3.3.4に示す。この図からわかるようにタールエポキシ塗装鋼の塗膜損傷部の腐食速度は、応力を付加しないときには、0.04mm/20日であるが、曲げ応力20kgf/mm²の繰返し応力を付加すると0.81mm/20日となる。一方無機質シンクリッヂ塗装鋼の塗膜損傷部の腐食速度は、応力を付加しないときには3.3.2.4項で詳しく述べるように塗膜による陰極防食作用のために腐食しないが20kgf/mm²の繰返し応力を付加すると0.4mm/20日になる。このように、塗膜損傷部の腐食は、繰返し応力が増加するほど著しく促進されることがわかる。また、その腐食速度は塗膜の種類によっても異なり、無機質シンクリッヂ塗装鋼の塗膜損傷部の腐食速度は、タールエポキシ塗装鋼の場合の約1/2になる。

これらの塗膜損傷部の腐食は、裸鋼より促進するのかどうかを検討するため、裸鋼について同一試験条件で曲げ応力を30kgf/mm²の範囲内で変化させて91日間試験を行なった。裸鋼の腐食状況は、全面腐食となるが均一ひずみ領域で板厚減少量が最小となるので、その腐食速度の表示は、均一ひずみ領域の板厚減少量から片面での腐食速度(mm/日)で示した。

その結果は、図3.3.5に示すように繰返し応力20kgf/mm²のときの裸鋼の腐食速度は、応力を付加しないときの約1.7倍であり、その影響は、塗膜損傷部の腐食速度に及ぼす繰返し応力の影響に比較すると極めて小さいことがわかる。

(3) 塗膜損傷部の腐食速度に及ぼす応力の繰返し速度の影響

40°Cの海水中で、繰返し速度を10～0.03cpmの範囲で変化させて20日間試験を行ない塗装鋼の塗膜損傷部の侵食深さを測定した。その結果を対数函数のグラフで表わすと、図3.3.6に示すように繰返し速度f(cpm)と腐食速度CR(mm/20日)との間には、ほぼ直線関係が得られ、繰返し速度fが大きくなると、腐食速度CRは増大することがわかる。図3.3.6から、曲げ応力10kgf/mm²のときの繰返し速度f(cpm)と腐食速度CR(mm)との間には、タールエポキシ塗装鋼の場合

$$\log CR = 0.27642 \quad \log f = 0.10033 \quad \dots \dots \dots \quad (1)$$

また、無機質シンクリッヂ塗装鋼の場合

$$\log CR = 0.27642 \quad \log f = 0.35714 \quad \dots \dots \dots \quad (2)$$

の関係式が近似的に得られる。

(4) 塗膜損傷部における侵食深さの経時変化

上述の実験で明らかのように海水中、繰返し応力が作用すると塗膜損傷部で腐食が促進され、20日間の試験で無視できない深さに成長する。

そこで、塗膜損傷部の侵食深さの経時変化を調べるために、同一条件の試験片を6枚準備し、曲げ応力20%，繰返し速度0.3cpmの試験条件で、91日までの範囲で試験時間を見て2枚づつ同時に試験片を取り出し、侵食深さを測定した。その結果は図3.3.7に示すように初期腐食が大きく、その後定常状態になって腐食が進行することを示唆している。この図から曲げ応力20%，繰返し速度0.3cpmの条件で試験日数Tと定常状態での侵食深さP(mm)との間には、

タルエポキシ塗装鋼の場合

$$\log P = 0.22819 \quad \log T - 0.39568 \quad \dots \dots \dots \quad (3)$$

また、無機質ジンクリッヂ塗装鋼の場合

$$\log P = 0.14972 \quad \log T - 0.61824 \quad \dots \dots \dots \quad (4)$$

の関係式が得られる。

3.3.2.2 腐食疲れ寿命に及ぼす塗膜の影響

腐食と機械的繰返し応力が同時に作用すると、塗膜損傷部の素地金属が著しく腐食することを明らかにしたが、これは繰返し数の増加で、腐食疲れき裂を引き起こす要因となる。従って、塗膜に損傷が存在する塗装鋼の腐食疲れ寿命は、著しく減少することが予想される。この点について検討を加えるために応力の繰返し速度10cpmとし、40℃の海水中で疲れ試験を行ないS-N曲線を求めた。その結果によると、図3.3.8に示すように塗膜による腐食疲れ寿命の向上は、ほとんど認められず、むしろ塗膜に素地金属まで達する損傷が存在すると腐食疲れ寿命は著しく低下することを示している。

次に、腐食疲れ寿命に及ぼす応力繰返し速度の影響について検討するため、曲げ応力30%で、繰返し速度を10cpmから0.6cpmに変えて、海水中での疲れ寿命の変化を調べた。その結果を図3.3.9に示す。この図から明らかなように腐食疲れにおいては、繰返し速度が小さくなると破壊繰返し数は小さくなり、破壊までの時間は長くなる。また、低速度の繰返しになると腐食疲れ寿命に及ぼす塗膜の損傷の影響が、さらに大きくなり、その破壊繰返し数は著しく低下することがわかる。この試験条件での腐食疲れ破壊寿命は、腐食疲れにおけるき裂発生前の腐食穴の進行が破壊寿命を減少させた大きな要因であることを示唆している。腐食疲れ寿命に及ぼす塗膜の種類の影響についてみると、塗膜が完全であれば、タルエポキシ塗膜は、疲れ寿命の向上に効果が認められるが、無機質ジンクリッヂ塗膜は、疲れ寿命の向上に効果が認められなかった。その原因は後で述べるように無機質ジンクリッヂ塗装鋼は、高応力の繰返しによって塗膜自身にき裂あるいははくりが起こるためであると考えられる。また、塗膜に損傷を与えたときの腐食疲れ寿命は、著しく低下するが、曲げ応力が20%以下では無機質ジンクリッヂ塗膜よりタルエポキシ塗膜の方が短くなる。これは、上述の実験で明らかのように無機質ジンクリッヂ塗装鋼の塗膜損傷部における腐食速度がタルエポキシ塗装鋼の場合より遅いためであると推定できる。参考のため、破面の状況を写真3.3.3に示す。塗膜損傷を与えた試験片の腐食疲れき裂は、塗膜損傷部から発達していることを写真はよく示している。

3.3.2.3 塗膜劣化に及ぼす繰返しひずみ影響

ここでは、塗膜自身の劣化あるいは損傷に注目して検討する。写真3.3.4は、上述の試験で実施した後の無機質ジンクリッヂ塗装試験片の表面状況の代表例を示したものであるが、繰返し応力の増加にしたがって点サビあるいは塗膜のはくりが激しくなっている状況を示す。この結果から無機質ジンクリッヂ塗膜は、ひずみ量0.095%以上の繰返しひずみを受ける環境条件下での使用に適しないことがわかる。タルエポキシ塗膜は、いずれの試験条件下においても良好である。

3.3.2.4 海水中における塗装鋼の電気化学的挙動

繰返し応力下の塗装鋼の腐食挙動について基礎的な知見がかなり得られたが、この腐食挙動を解釈するための一助として電気化学的測定を行なった。

(1) 電位の経時変化

図3.3.10は、付加応力を与えない各試験片の海水中における電位の経時変化と繰返し応力下（曲げ応力3.0%、繰返し速度0.6cpm）の海水中における各種試験片の電位の経時変化を比較して示す。無機質ジンクリッヂ塗装鋼は繰返し応力を付加しないときには塗膜損傷の有無にかかわらず試験片の電位は、鉄の防食電位（-0.77V, VS, SEC）より卑な方向にあり、塗膜中の亜鉛末顔料による陰極防食効果で防食されていることを示している。しかし、繰返し応力が作用すると、その電位は、試験開始後2日目で裸鋼の腐食電位になる。一方、タールエポキシ塗装鋼の腐食電位は、裸鋼に対して貴な電位を示す傾向にあり、とくに繰返し応力が作用すると貴な方向に変化し、塗膜損傷部の腐食を促進することを示している。

(2) ひずみの変動と電位の関係

海水中、繰返し応力下の1サイクル間の裸鋼の電位変化を実測すると、引張りによって電位は卑な方向に移行し、除荷によって回復する。また、圧縮によって電位は貴な方向へ移行し、除荷によって回復する。この1サイクル間の電位の振動巾△Eは、図3.3.11に示すように繰返し応力が増加するほど大きくなるのが明らかになった。電位の卑方向への移行は、金属表面の腐食反応に対する活性が増加することを意味する。したがって、損傷を与えた塗装鋼に繰返し応力が作用すると塗膜面のカソード面積がアノード面積より非常に大きいためにカソード分極曲線の形は同一であるのに対して、塗膜損傷部の素地金属は引張りによってアノード分極曲線の形は、貴な方向に平行移動し、腐食電流が増大する。この腐食電流の増大によって塗膜損傷部の腐食が促進されるものと考えられる。

3.3.3 まとめ

タールエポキシ塗料および無機質ジンクリッヂ塗料による塗装鋼について、海水中での塗膜劣化ならびに塗膜損傷部の腐食に及ぼす応力繰返し速度の影響について基礎的な検討を行なった。

その結果を要約すると次のとおりである。

- (1) 海水中、塗装鋼に繰返し応力が作用すると、無機質ジンクリッヂ塗装鋼は、2.0%以上の繰返し曲げ応力（ひずみ量0.0.9%以上）で、その塗膜にき裂あるいははくりを起こした。一方タールエポキシ塗装鋼は、繰返し応力が作用しても劣化しなかった。
- (2) 塗膜に損傷が存在すると、塗膜損傷部の腐食は、繰返し応力の増加および応力繰返し速度の上昇にしたがって裸鋼の場合よりも著しく促進されることが明らかになった。
- (3) その腐食速度CR(mm/20日)は、曲げ応力1.0%のとき、応力繰返し速度f(cpm)との間に、タールエポキシ塗装鋼では

$$\log CR = 0.2764 - \log f - 0.10033$$

無機ジンクリッヂ塗装鋼では

$$\log CR = 0.27642 - \log f - 0.35714$$

の関係式が得られた。

- (4) 20日以上の定常状態における侵食深さP(mm)は、曲げ応力2.0%，応力繰返し速度0.0.3cpmのときに、試験日数Tとの間にタールエポキシ塗装鋼では

$$\log P = 0.22819 - \log T - 0.39568$$

無機質ジンクリッヂ塗装鋼では

$$\log P = 0.14972 - \log T - 0.61824$$

の関係式が得られた。

- (5) 腐食疲れ寿命に及ぼす塗膜効果は、タルエポキシ塗膜では認められるが、無機質ジンクリッヂ塗膜では、認められなかった。塗膜に損傷が存在する塗装鋼の腐食疲れ寿命は、裸鋼より著しく短くなることが明らかになった。
- (6) 繰返し応力の上昇にしたがって大きくなることが認められた。

表 3.3.1 供試 鋼 (板厚 3.2)

化 学 成 分					機 械 的 性 質		
C	Si	Mn	P	S	引張強さ kg/mm ²	降伏点 kg/mm ²	伸びGL50 %
0.13	0.02	0.52	0.006	0.011	40.5	26.8	39.4

表 3.3.2 供試 塗料と塗装条件

項目	種類	タルエポキシ塗料	無機質ジンク塗料
タ イ プ	ハイビルドタイプ	ポストキュアータイプ	
配 合 割 合	主剤：硬化剤 85 : 15	ベース：粉末 25 : 75	
塗 装 方 法	エアレススプレー	エアスプレー	
塗 装 回 数	1	1	
実測膜厚μ	280	113	
乾燥条件	10日室内自然放置	10日室内自然放置	

表 3.3.3 海水の調製方法

薬品名	重 量 (g)	備 考
NaCl	2500	
Na ₂ SO ₄ · 10H ₂ O	950	
MgCl ₂ · 4H ₂ O	1000	
KI	5	
KCl	60	
CaCl ₂ · 2H ₂ O	150	
		以上の薬品 に水道水 を加えて 100ℓとした

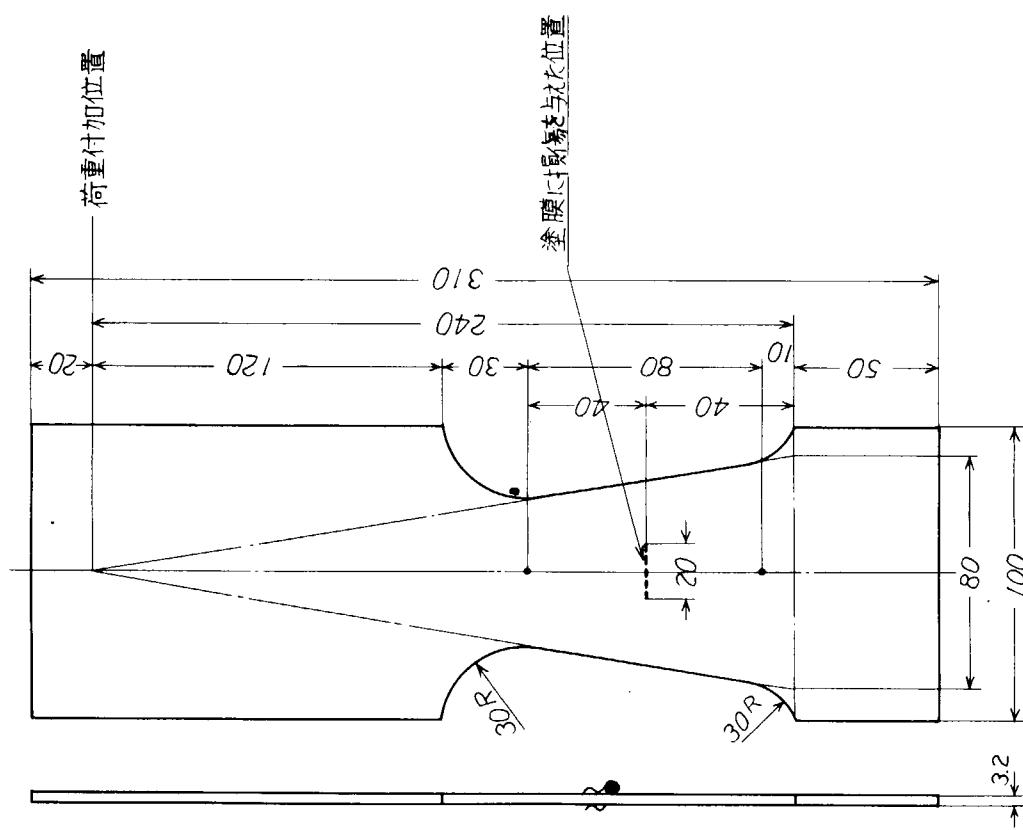


図 3.3.2 試験片の形状

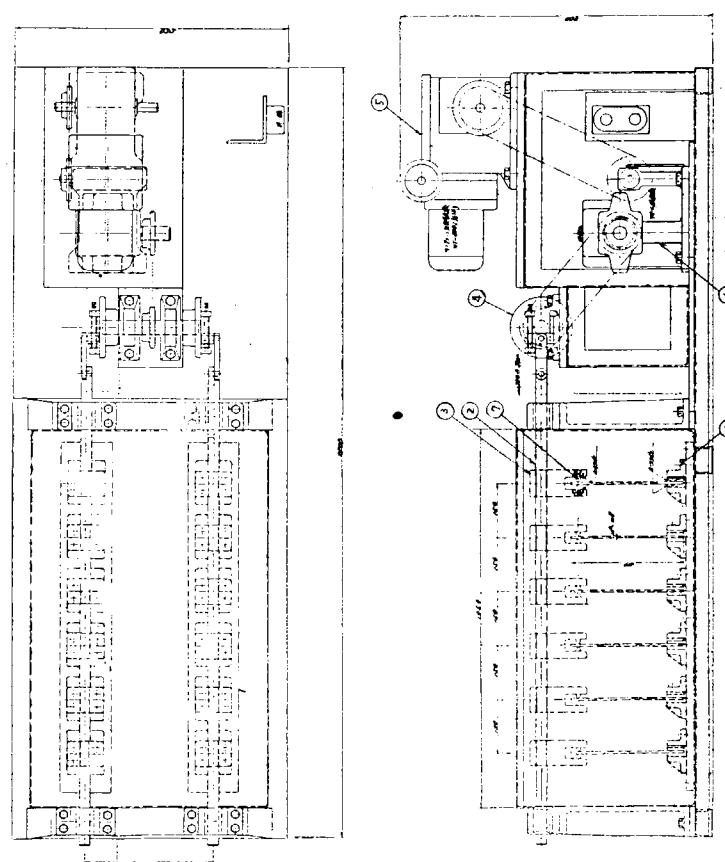


図 3.3.1 試験装置

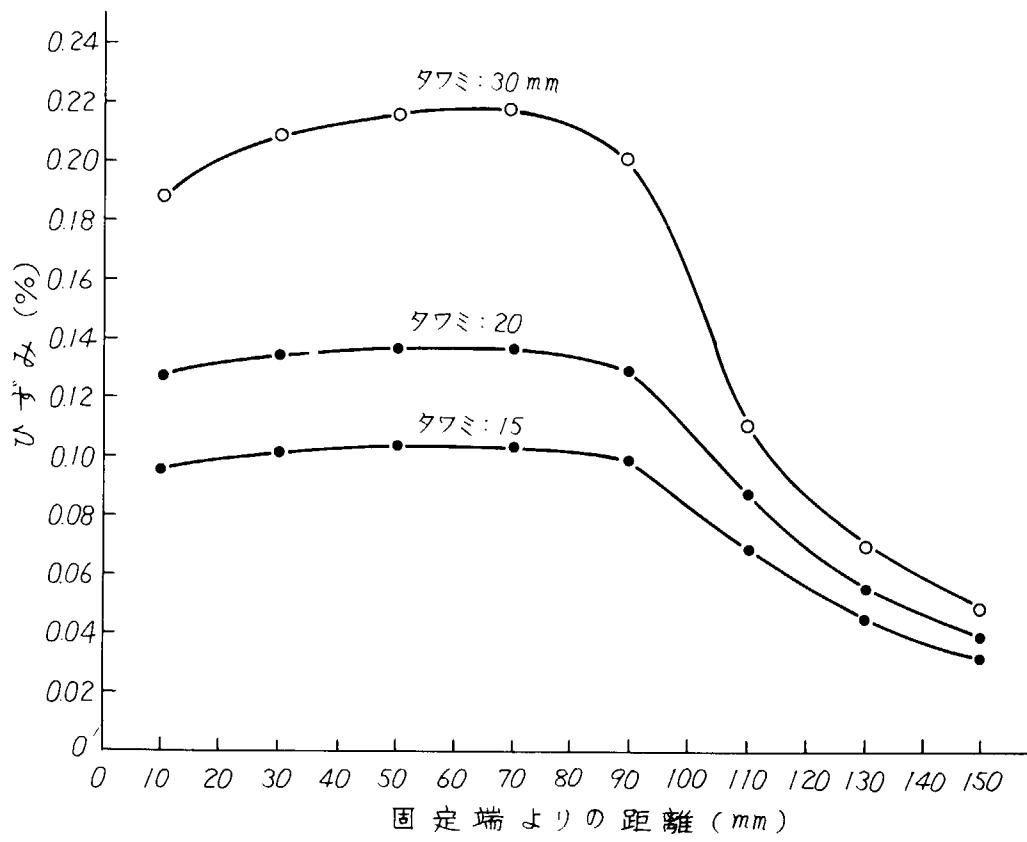


図 3.3.3 荷重を付加したときの試験片のひずみ分布

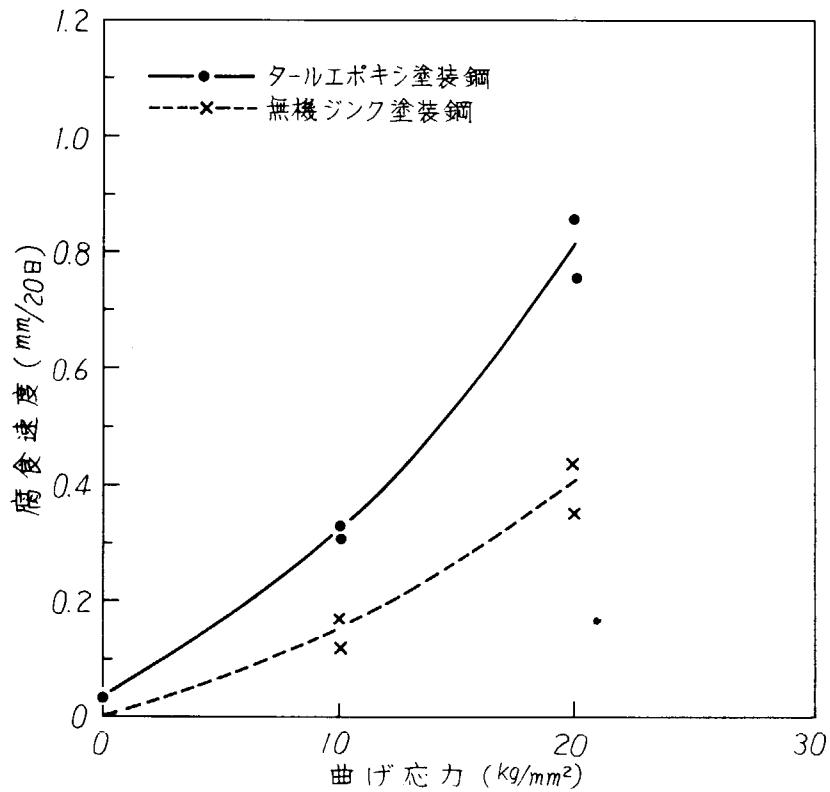


図 3.3.4 塗膜損傷部の腐食速度における繰返し応力の影響

(40°Cの海水中, 繰返し速度 0.03 cpm,)
(繰返し数 868 回, 試験期間 20 日)

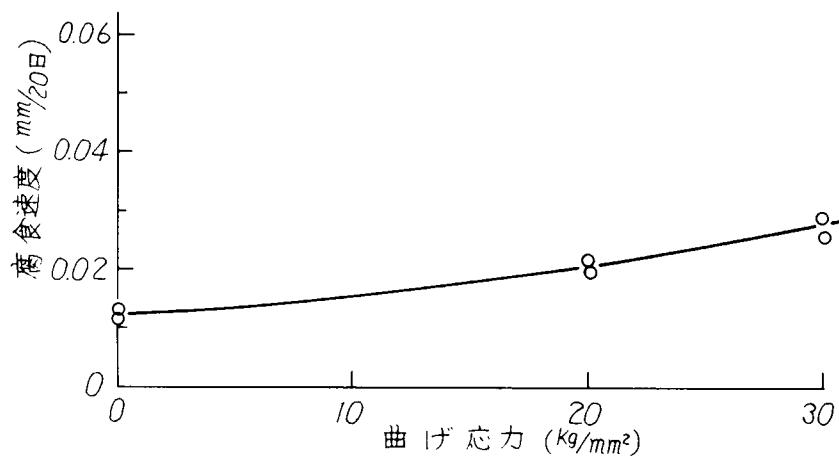


図 3.3.5 裸鋼の腐食速度におよぼす繰返し応力の影響

40 °C 海水中, 繰返し速度 0.03 cpm,
繰返し数 3762 回, 試験期間 91 日

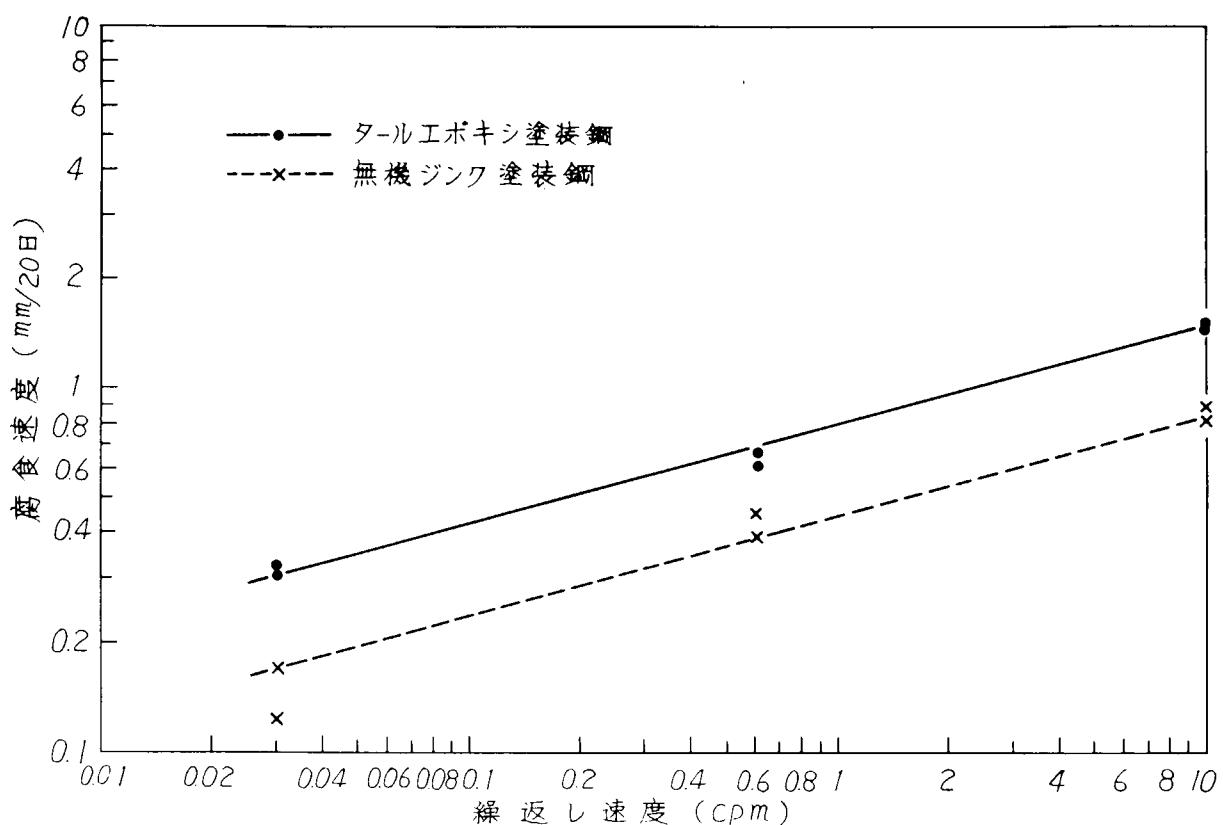


図 3.3.6 塗膜損傷部の腐食速度におよぼす応力の繰返し速度の影響

(40 °C 人工海水中, 曲げ応力 10%, 試験期間 20 日)

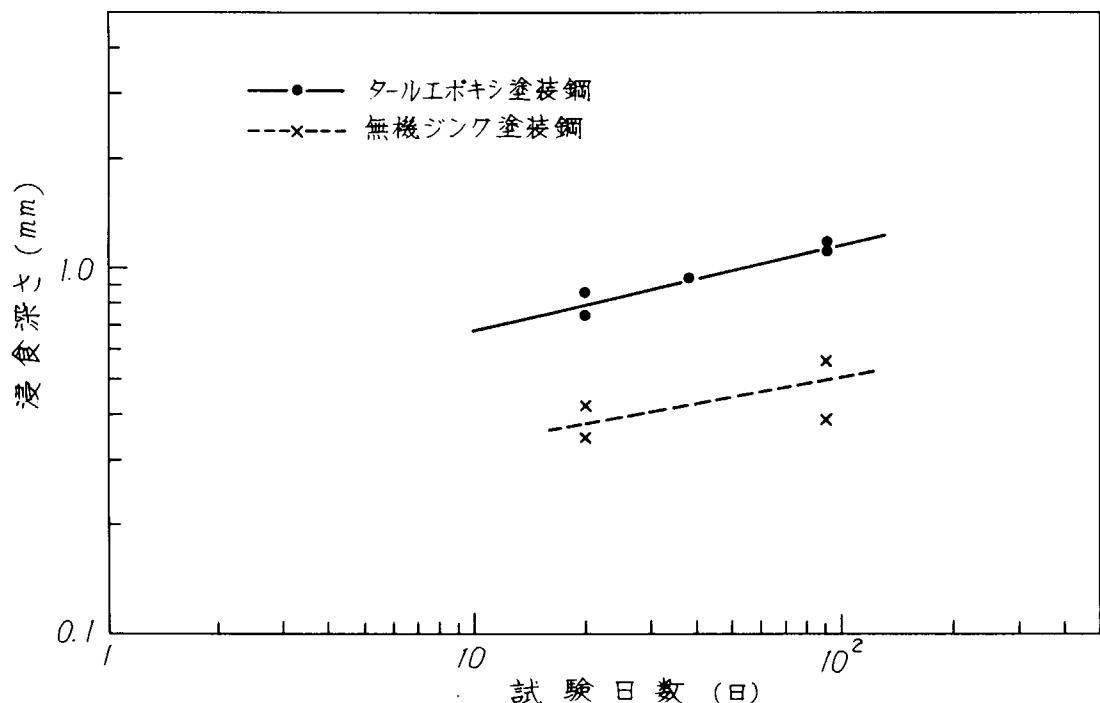


図 3.3.7 塗膜損傷部の腐食進行曲線
(40°C 海水中, 繰返し速度 0.3 cpm, 曲げ応力 20%)

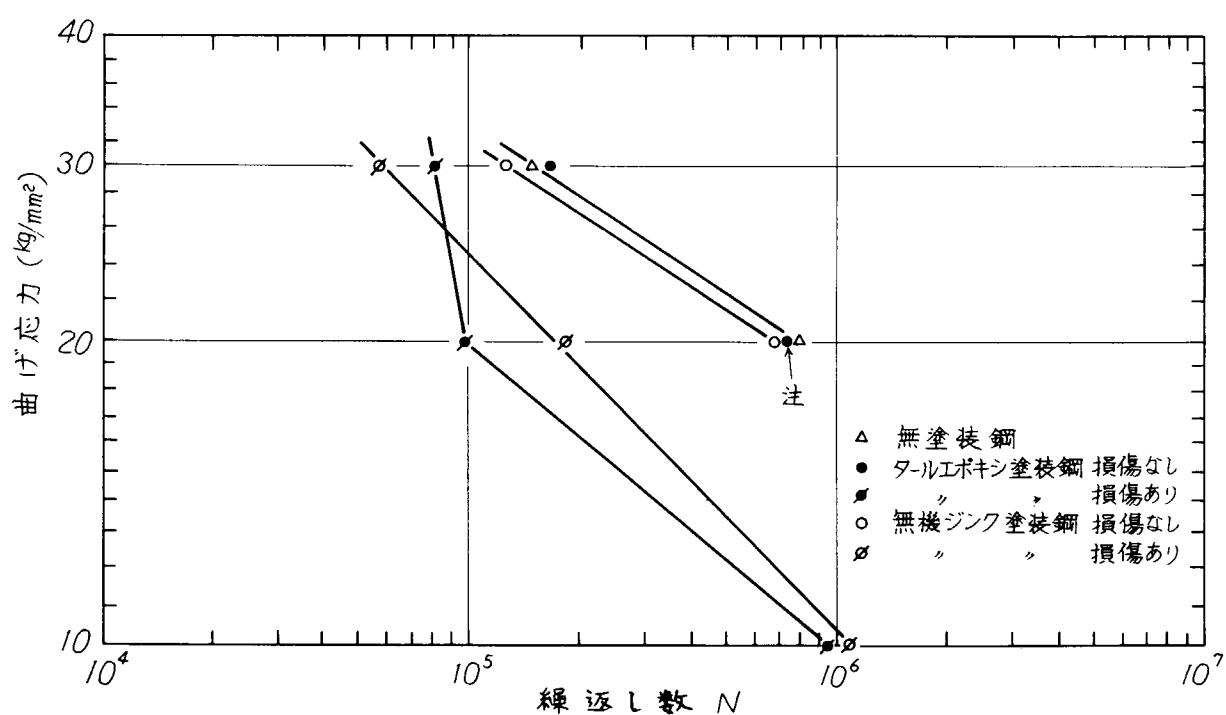


図 3.3.8 海水中における塗装鋼板の腐食疲れ寿命 (応力の繰返し速度 10 cpm)
注) 固定端から破断

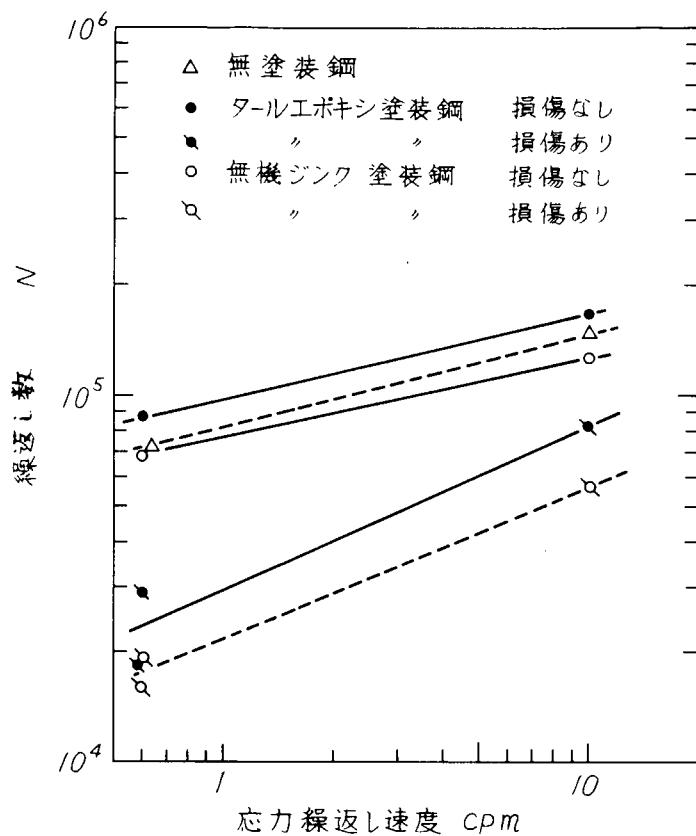


図 3.3.9 海水中における腐食疲れ寿命におよぼす応力の繰返し速度の影響(曲げ応力 30 kg/mm^2)

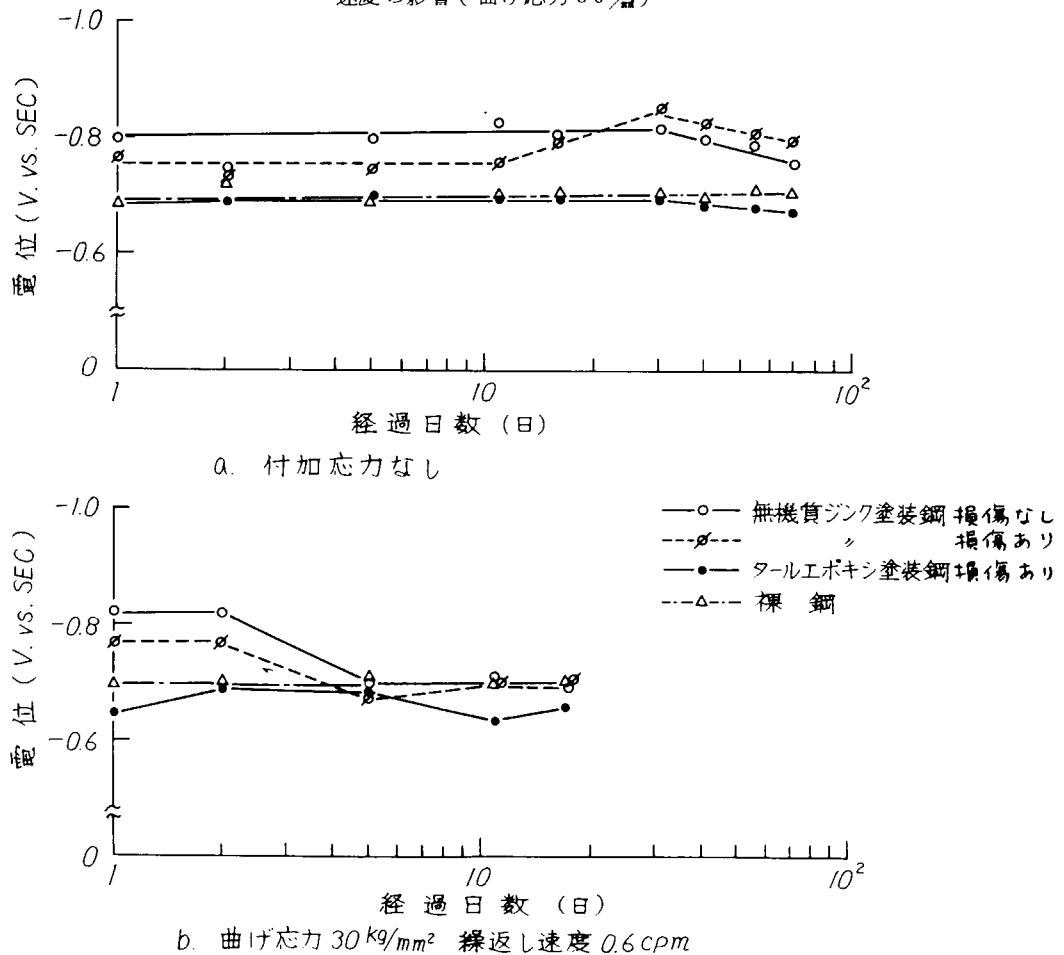


図 3.3.10 各種試験片電位の経時変化 (40 °C 海水中)

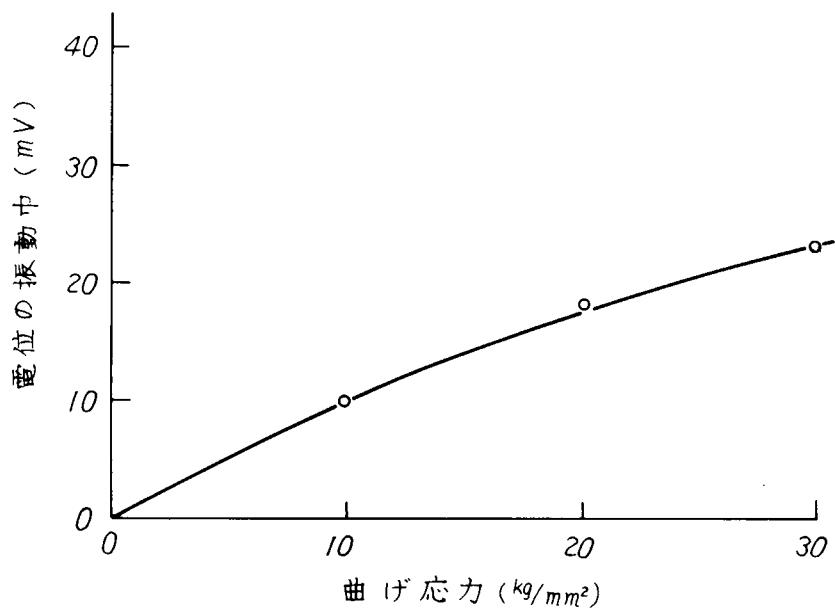
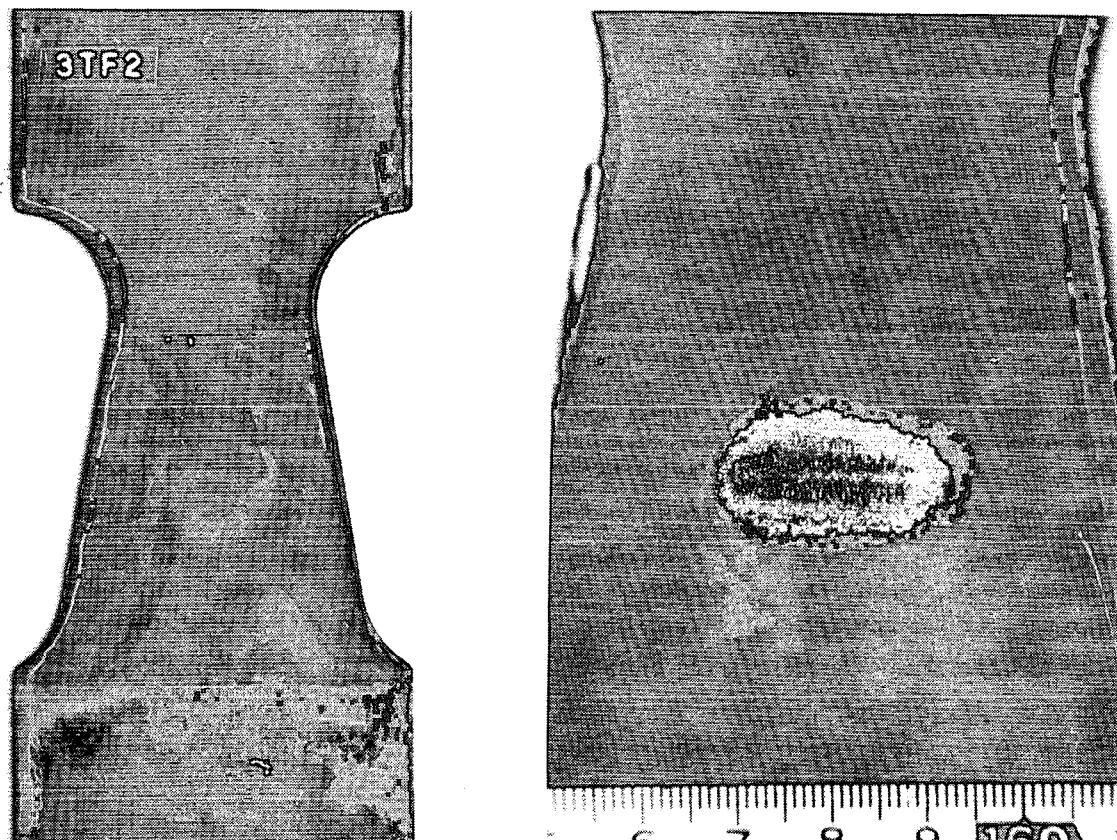


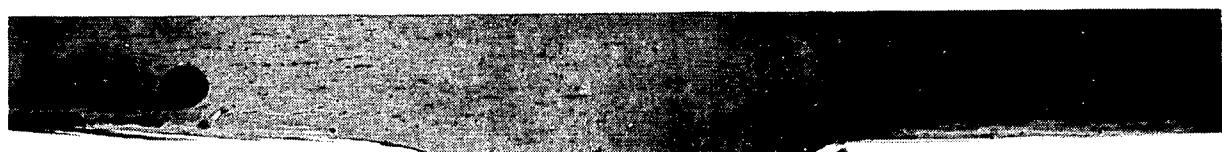
図 3.3.11 海水中における裸鋼の繰返し応力と電位の振動巾との関係



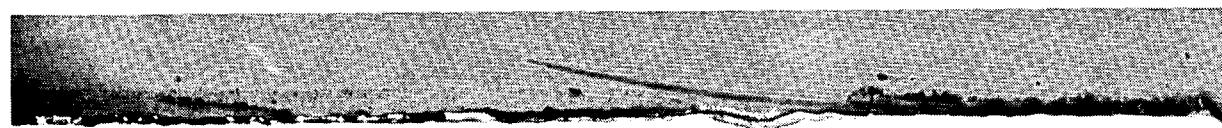
(a) 試験後の表面

(b) 塗膜損傷部の素地金属の腐食状況

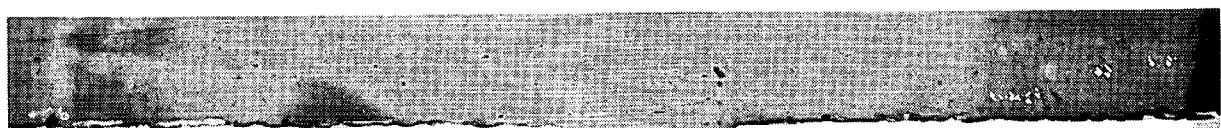
写真 3.3.1 損傷を与えたタールエポキシ塗装鋼の試験後の表面状況
40°C 海水中, 曲げ応力 20%, 応力繰返し速度 0.03 cpm,
繰返し数 3762 回, 試験期間 91 日



(a) タールエポキシ塗装鋼, 曲げ応力 20%



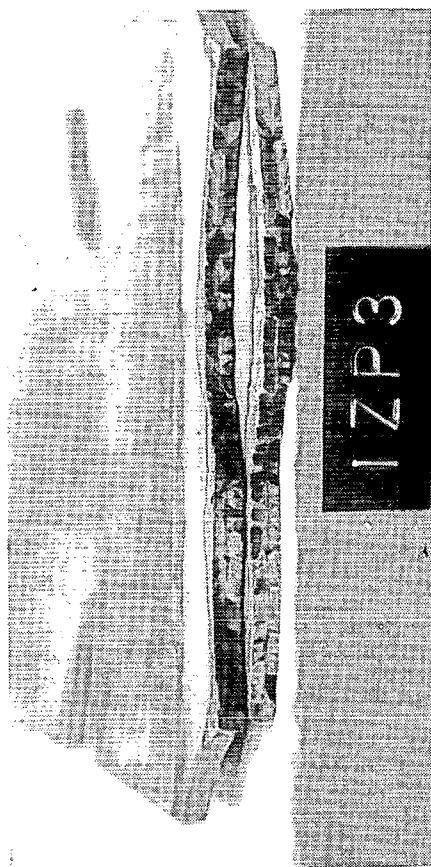
(b) タールエポキシ塗装鋼, 曲げ応力なし



(c) 無機質ジンク塗装鋼, 曲げ応力 20%

写真 3.3.2 塗膜損傷部の腐食断面

× 10

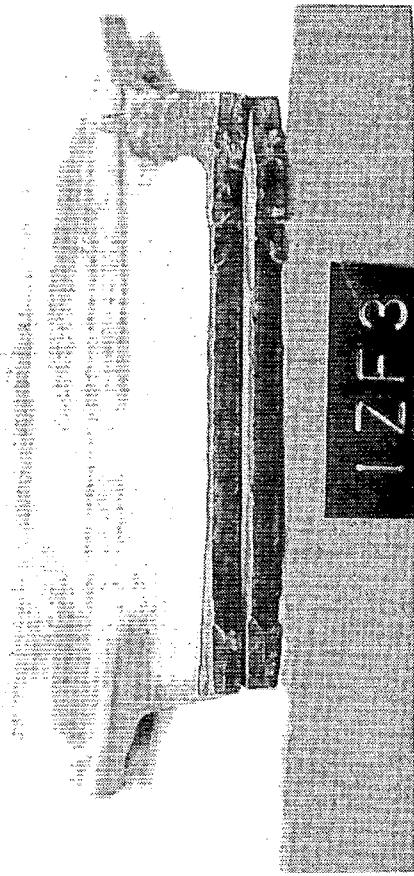


無機シンク損傷なし
10 cpm, 30%
12,4,5,7,4 サイクル

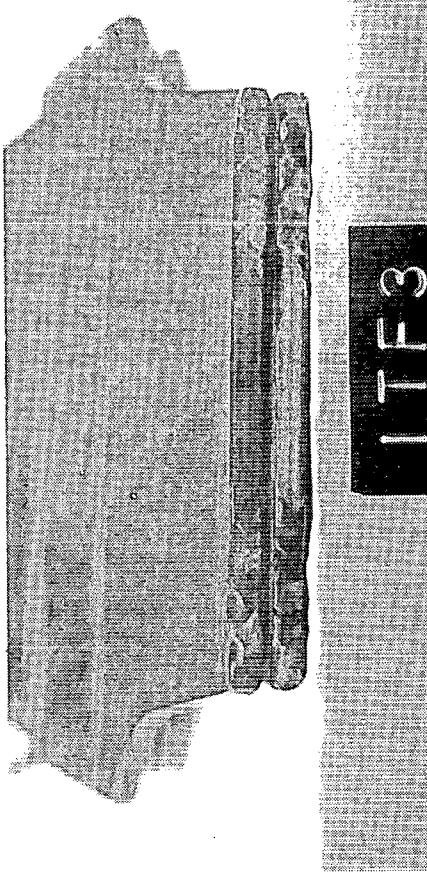


タールエボキシ損傷なし
10 cpm, 30%
16,4,8,9,0 サイクル

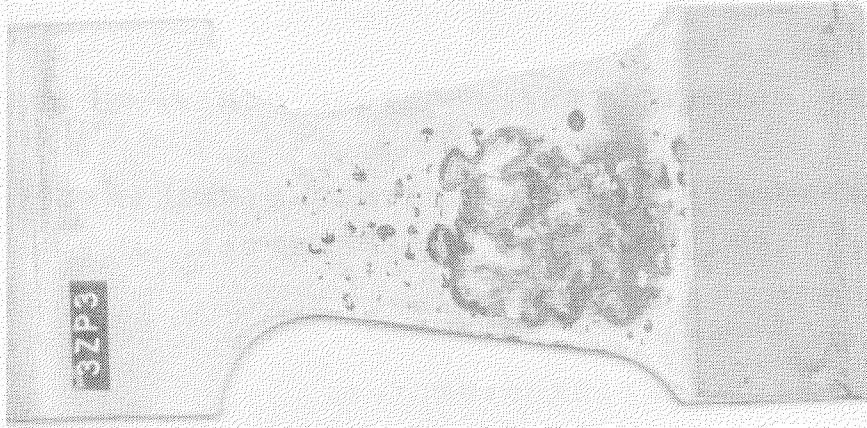
写真 3. 3. 3 痕食疲れ破面



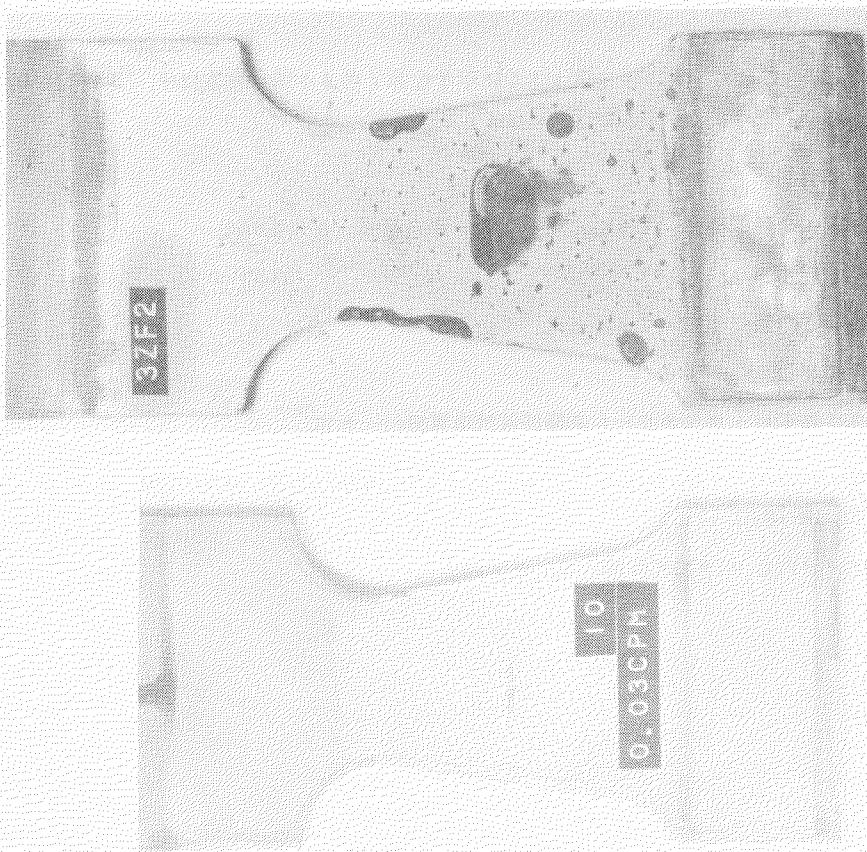
無機シンク損傷あり
10 cpm, 30%
5,6,5,9,2 サイクル



タールエボキシ損傷あり
10 cpm, 30%
8,2,1,5,0 サイクル



$\sigma = 3.0 \text{ kg/mm}^2$



$\sigma = 2.0 \text{ kg/mm}^2$



$\sigma = 0$

写真 3.3.4 無機質ジンク塗膜の劣化におよぼす繰返し応力の影響
(40°C 海水中, 応力繰返し速度 0.03 cm, 繰返し数 3762 N, 試験期間 91 日)

4. 実船調査および実船試験

4.1 バラストタンクの温度電位測定

バラスト専用槽内に温度計、照合電極を設置して深大タンク内の温度分布およびこれとタンク壁防食効果との関連を調査する。

実験は、太平洋海運(株)の御協力により、三菱重工(株)長崎造船所にて建造された「祥和丸」を対象船として下記要領により工事を行い、昭和48年12月末より実験(期間1ヶ年)を開始し現在継続中である。

4.1.1 対象タンク

「祥和丸」 M3 P.W.B.T 左舷

本タンクはタールエポキシ塗装とZn陽極による電気防食を併用している。

Zn陽極仕様 $70 \times 70 \times 250 \text{ mm}$ 重量約10kg 2年寿命

4.1.2 計測方法

CCサーモカップル、Zn照合電極を図4.1.4、図4.1.5に示す位置(各6ヶ所)に取付け、測定線を居住区内に設置した打点式自動記録計に結線した。

4.1.3 計測器具および使用材料

- (1) 温度記録計 本質安全防爆構造 12打点式 1台 測定範囲 $0 \sim 100^\circ\text{C}$
測定範囲 $0 \sim 100^\circ\text{C}$
- (2) 電位記録計 本質安全防爆構造 12打点式 1台
測定範囲 $0 \sim 600 \text{ mV}$
- (3) 温 度 計 C.C熱電対：グラスウール絶縁鉛被補償導線付 6本
- (4) Zn照合電極 SRYCYリード線付
- (5) 補 償 導 線 WCCCH-SRDCYS
- (6) 配 線 タンク内S.G.Pにて保護、デッキ上鋼板カバー

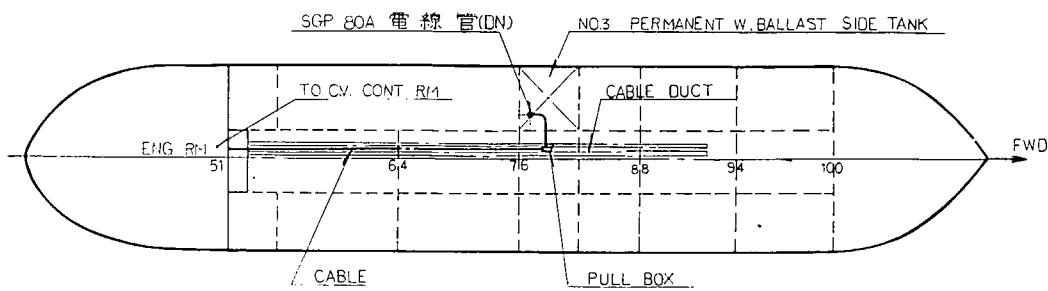
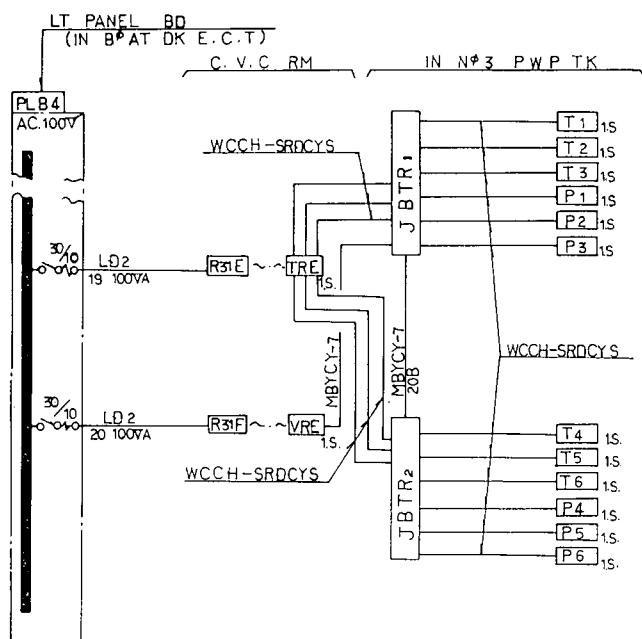


図 4.1.1 UPPER DECK PLAN



- R31F** RECEPTACLE (3P)
- TRE_{1S}** TEMP. RECORDER
- VRE_{1S}** POTENTIAL RECORDER
- JBTR** EXPLOSION PROOF J. BOX.
- T1~6** THERMO COUPLE
- P1~6** Zn REF ELECTRODE

図 4.1.2 タンク内温度測定用系統図

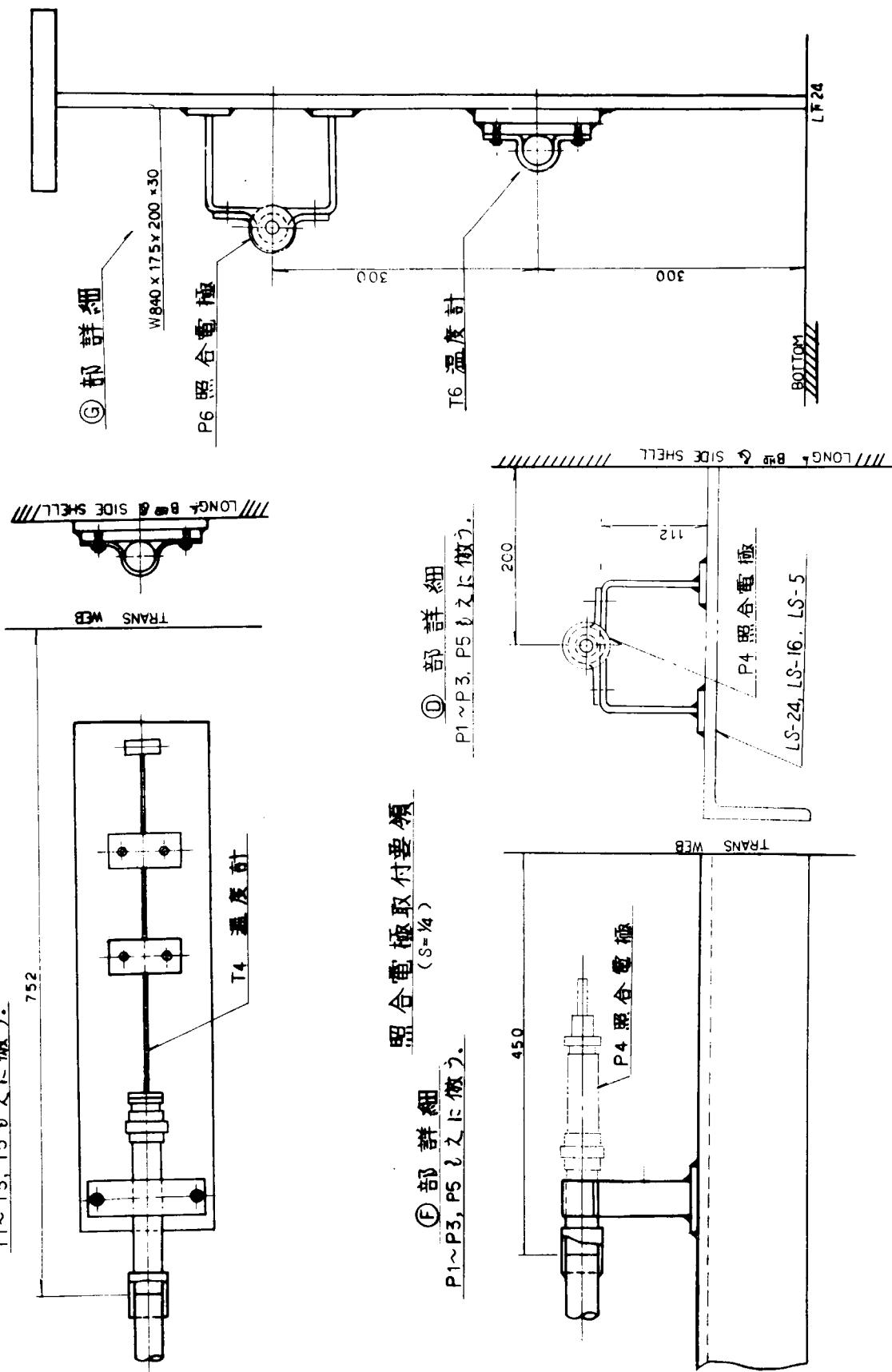
温度計取付要領

(S= $\frac{1}{4}$)
E 部詳細

T1~T3, T5 に於ける。
T1~T4, T6 に於ける。

752.

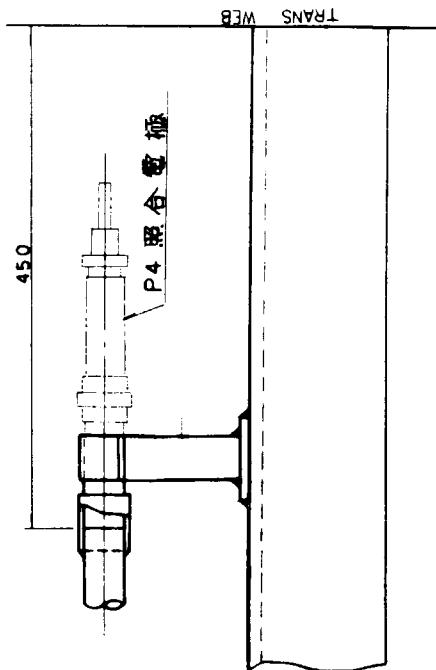
F.77
C 部詳細
T1~T3, T5 に於ける。



照合電極取付要領

(S= $\frac{1}{4}$)
F 部詳細

P1~P3, P5 に於ける。
P1~P3, P5 に於ける。



D 部詳細
P1~P3, P5 に於ける。

E 部詳細
P1~P3, P5 に於ける。

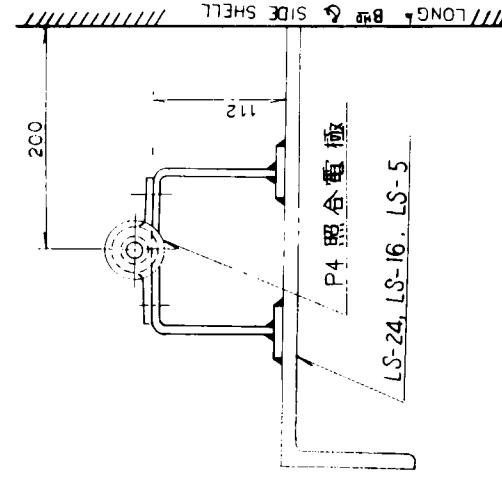


図 4.1.3 温度計、照合電極取付要領図

F.77 SEC (NO.3 P.W.B. T^b)
LOCK AFT.

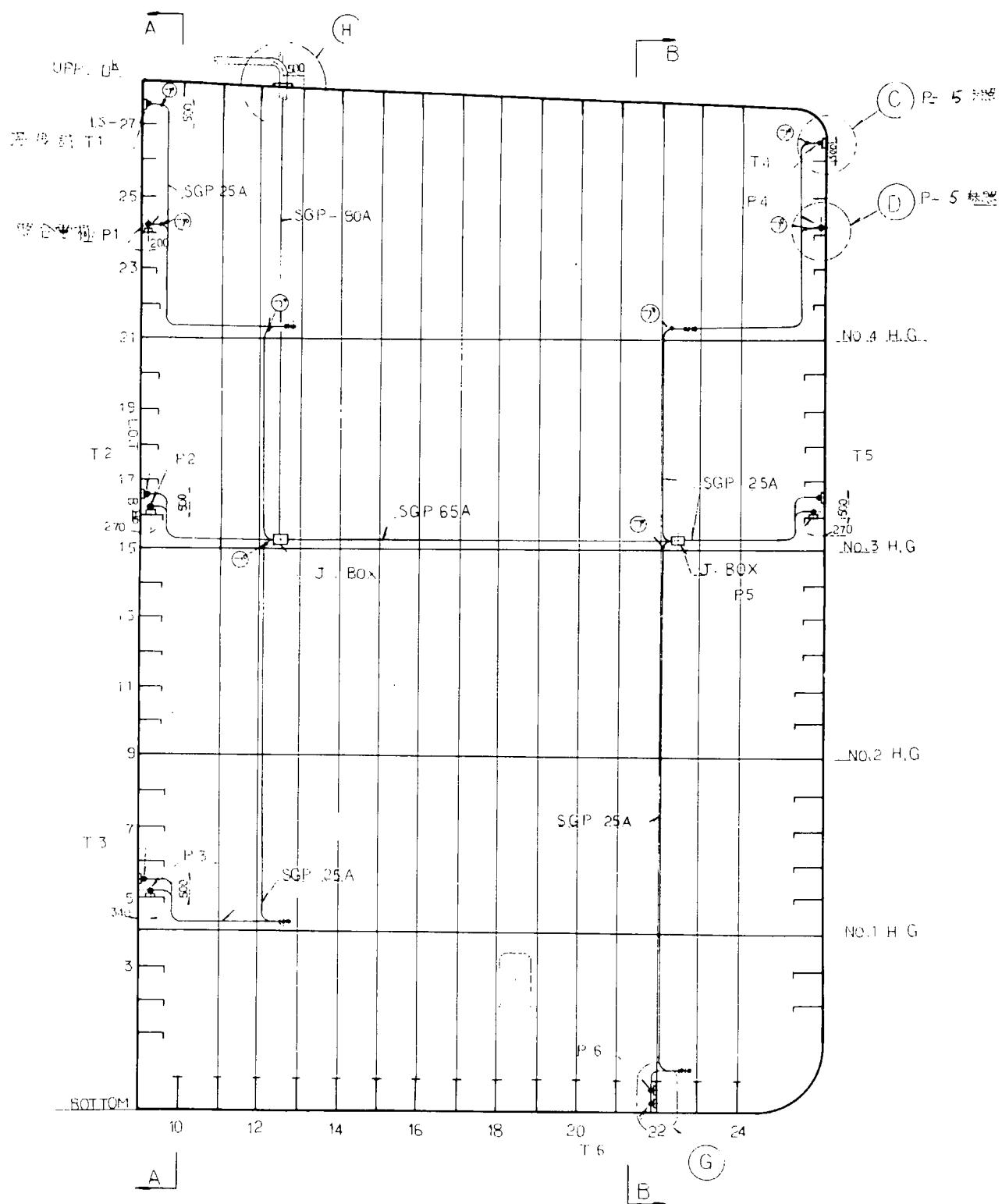
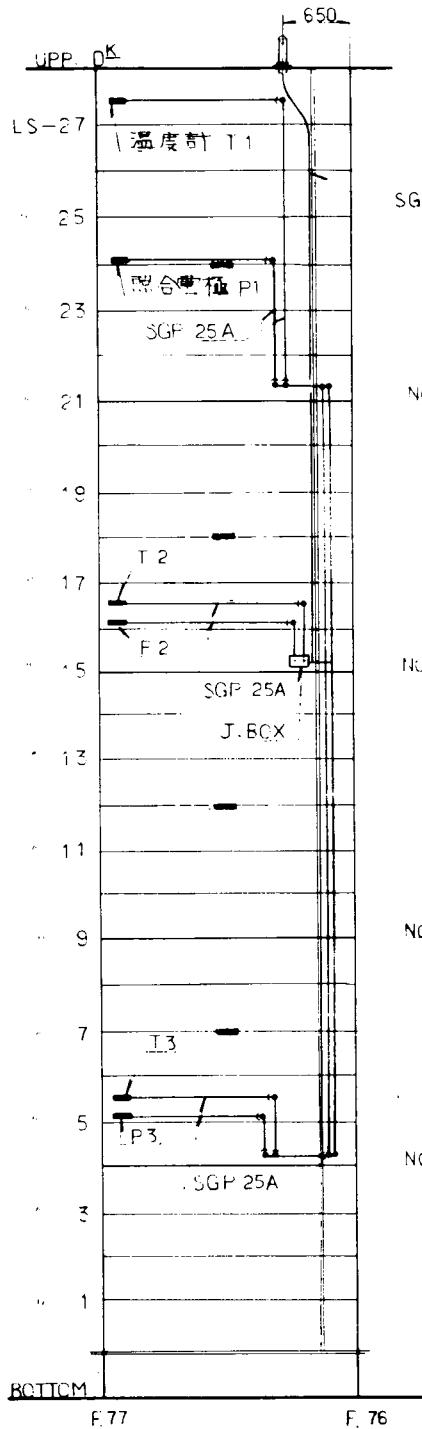


図 4.1.4 溫度計、照合電極取付位置図

LONG^L B HD

LOOK A-A



SIDE SHELL

LOOK B-B

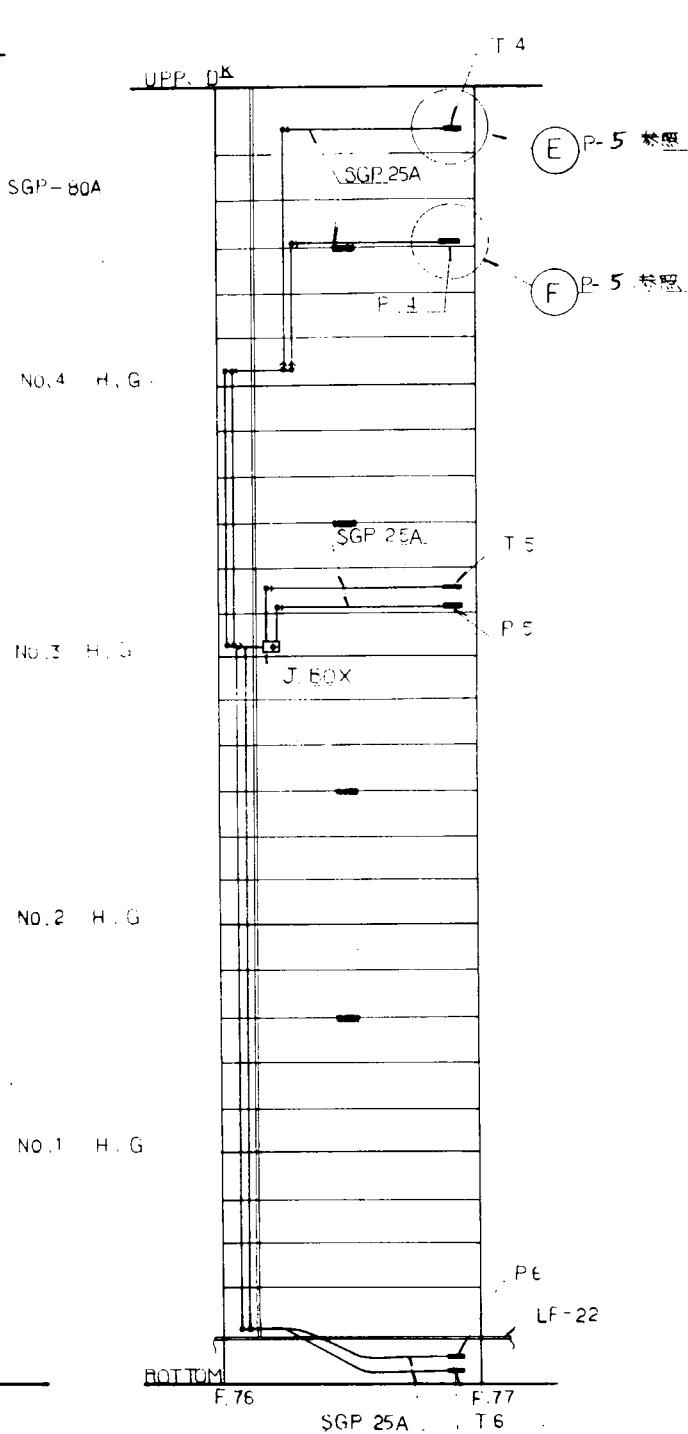


図 4.1.5　温度計、照合電極取付位置図

4.2 腐食速度防食効果の調査

47年度に設置した試験片のうち一年経過後のものについて侵食度、防食、最大孔食深等につき調査した。

試験片、調査方法は、昭和47年度に準じた。（研究資料第185号 P33～34参照）

4.2.1 調査結果

結果はまとめて表4.1.2.1～表4.1.2.5に示した。

(1) ジャパンカンナ

M6-P取付試験片はタンク内防食剤塗布の際同時に塗布されたため腐食試験片の腐食量が抑えられ防食効果が低下している。

(2) 第2亜細亜丸

本船は張水日数が連続2～3日と少く、張水率も20%以下という条件下であったが、平均35～40%程度の防食効果を示した。最大孔食は試験片に比し $\frac{1}{2}$ ～ $\frac{1}{3}$ に低下した。平均防食電流密度が高く出ているのは低張水率のためと思われる。

(3) 尾上丸

タンク上部で39%，中部で60～80%の防食効果を示したが、下部においては40～50%と低下している。
これは在部の腐食量自体が非常に少いため、試験片処理上の誤差が大きく影響したものと考えられる。

(4) おうすとらりあ丸

全般に防食率が低く出ているが、これは防食試験片の後処理に時間を長くかけたため腐食減量が多く出た結果になったためである。実際には尾上丸と同程度の値と思われる。

4.2.2 まとめ

本試験結果を要約してみると

- (1) 防食効果はタンク高さにより、上部、中部、下部と区分すれば、上部で20～50%，中部で40～60%，下部では80～95%程度の結果が得られた。
- (2) 電気防食を適用した場合には最大孔食深さを少くとも $\frac{1}{2}$ に低下しうる。
- (3) タンカーに比し鉱石船のバラストタンクでは全体的に防食効果が高い。
- (4) タンク内侵食度はタンカーで上部0.5～0.7mm/yr，中部0.2～0.5mm/yr，下部0.2～0.28mm/yrを示した。
鉱石船では、上部0.3～0.37mm/yr，中部0.1～0.3mm/yr，下部0.05～0.2mm/yrを示した。

表 4.2.1 ジャパン・カンパニー試験片試験結果

表 4.2.2 第2重細胞丸試験片試験結果(1)

タンク名	取付高さ	C.P Cor	Y別 Cor	テスト ピース 数	侵食度 mA/m ²	平均侵食速度 mA/Yr	防食率	最大引食深さ mm/133Yr	取付位置 向き
K - P . TANK (22/22)	上 部	C.P Cor	3	0253	129.97	25.78	1.01	S. SHELL FR75-74	上 部 (18/19)
	中 部	C.P Cor	4	0341	"	1.52	"	L. BED FR74-75	Cor (5/19)
	下 部	C.P Cor	5	0232	13021	55.08	0.99	"	中
	中 部	C.P Cor	6	0516	"	1.96	"	T. BED FR74-75	Cor C.P Cor
	下 部	C.P Cor	11	0013	5143	93.03	0.09	S. SHELL FR75-74	Cor C.P Cor
	中 部	C.P Cor	12	0194	"	0.75	"	"	Cor C.P Cor
	下 部	C.P Cor	25	0032	53.51	91.75	0.17	T. WEB FR75	Cor C.P Cor
	中 部	C.P Cor	26	0393	"	1.73	"	BOTTOM FR74-75	Cor C.P Cor
	下 部	C.P Cor	27	0010	35.99	95.97	0.22	"	Cor C.P Cor
	中 部	C.P Cor	7	0044	4219	54.71	0.22	S. SHELL FR51-52	Cor C.P Cor
	下 部	C.P Cor	8	0098	"	0.50	"	T. BED FR51	Cor C.P Cor

タンク名	取付高さ	C.P Cor	Y別 Cor	テスト ピース 数	侵食度 mA/m ²	平均侵食速度 mA/Yr	防食率	最大引食深さ mm/133Yr	取付位置 向き
K - P . TANK (22/22)	上 部	C.P Cor	3	0253	129.97	25.78	1.01	S. SHELL FR75-74	上 部 (18/19)
	中 部	C.P Cor	4	0341	"	1.52	"	L. BED FR74-75	Cor (5/19)
	下 部	C.P Cor	5	0232	13021	55.08	0.99	"	中
	中 部	C.P Cor	6	0516	"	1.96	"	T. BED FR74-75	Cor C.P Cor
	下 部	C.P Cor	11	0013	5143	93.03	0.09	S. SHELL FR75-74	Cor C.P Cor
	中 部	C.P Cor	12	0194	"	0.75	"	"	Cor C.P Cor
	下 部	C.P Cor	25	0032	53.51	91.75	0.17	T. WEB FR75	Cor C.P Cor
	中 部	C.P Cor	26	0393	"	1.73	"	BOTTOM FR74-75	Cor C.P Cor
	下 部	C.P Cor	27	0010	35.99	95.97	0.22	"	Cor C.P Cor
	中 部	C.P Cor	7	0044	4219	54.71	0.22	S. SHELL FR51-52	Cor C.P Cor
	下 部	C.P Cor	8	0098	"	0.50	"	T. BED FR51	Cor C.P Cor

テスト期間
灌水日数
テストピース面積
Tank 高さ

485日
186日
8674cm²
2.8m

357日
58日 (灌水率 16.25%) 滞留流 2~3s
86.74cm² (小型試験片)
1.9m

表 4.2.3 第2垂細丸試験片試験結果(2)

表 4.2.4 尾上丸試験片結果

タンク名	取高さ	C.P の別 Cor	テスト ビース No. 1	侵食度 No. 1	平均電極密度 mA/m ²	防食率 %	最大防食率 0.09Yr	取付位置 き
(10/19)	上部	C.P 116	0.5498	21064	2086	1.06	L.BHD 垂直FR74~75	
		Cor 37	0.6947	—	224			
		C.P 100	0.6331	19553	—	1.58		
		Cor 32	0.5911	—	255	水平 "		
		C.P 108	0.2868	39150	4610	1.15	垂直FR71~72	
		Cor 19	0.5321	—	224			
		C.P 97	0.1524	23995	5173	0.50		
		Cor 28	0.3157	—	083	水平 "		
		C.P 109	0.1758	51376	5301	0.58	T.BHD 垂直FR71	
		Cor 17	0.3741	—	1.39			
(10/19)	中部	C.P 99	0.1129	21262	6070	0.51		
		Cor 29	0.2873	—	1.16	水平 "		
		C.P 110	0.1402	25246	5451	0.52	垂直 "	
		Cor 18	0.3082	—	1.12			
		C.P 112	0.0799	15185	4501	0.58		
		Cor 31	0.1453	—	0.74	水平 "		
		C.P 111	0.0218	13905	8629	0.27	BOTTOM 垂直FR71~72	
		Cor 30	0.02027	—	0.75			
		C.P 117	0.0340	91.84	8692	0.64		
		Cor 20	0.02599	—	1.17	水平 "		
下部	C.P 98	—	21043	—	0.63	垂直 "		
	Cor 27	0.2837	—	—	1.34			
	C.P 107	0.0496	18727	8229	0.52	水平 "		
	Cor 36	0.2801	—	149	1.49	水平 "		

テスト期間 357日間
張水日数 58日間(漲水率1.625%) 流水速度2~3日
テストビース面積 360cm²(大型試験片)
Tank高さ 1.9m

テスト期間 369日間
張水日数 50日(推定)
テストビース面積 360cm²(大型試験片)
Tank高さ 1.7m

タンク名	取高さ	0.P の別 Cor	侵食度 mA/m ²	防食率 %	最大防食率 0.10Yr	取付位置 き	
(18/19)	上部	C.P 116	0.5498	21064	2086	1.06	
		Cor 37	0.6947	—	224	L.BHD 垂直FR74~75	
		C.P 100	0.6331	19553	—		
		Cor 32	0.5911	—	255	水平 "	
		C.P 108	0.2868	39150	4610	1.15	
		Cor 19	0.5321	—	224	垂直FR71~72	
		C.P 97	0.1524	23995	5173	0.50	
		Cor 28	0.3157	—	083	水平 "	
		C.P 109	0.1758	51376	5301	0.58	
		Cor 17	0.3741	—	1.39	T.BHD 垂直FR71	
(10/19)	中部	C.P 99	0.1129	21262	6070	0.51	
		Cor 29	0.2873	—	1.16	水平 "	
		C.P 110	0.1402	25246	5451	0.52	垂直 "
		Cor 18	0.3082	—	1.12		
		C.P 112	0.0799	15185	4501	0.58	
		Cor 31	0.1453	—	0.74	水平 "	
		C.P 111	0.0218	13905	8629	0.27	BOTTOM 垂直FR71~72
		Cor 30	0.02027	—	0.75		
		C.P 117	0.0340	91.84	8692	0.64	
		Cor 20	0.02599	—	1.17	水平 "	
下部	C.P 98	—	21043	—	0.63	垂直 "	
	Cor 27	0.2837	—	—	1.34		
	C.P 107	0.0496	18727	8229	0.52	水平 "	
	Cor 36	0.2801	—	149	1.49	水平 "	

表 4.2.5 おうすとらりあ丸試験片結果

サンプル番号	O.P Cor	アスト ビース A	浸食度 Yr	平均浸食度 mm/yr	防食率 %	最大孔食深さ mm 092Yr	取付位置
B.TK 4.19	C.P	122	0.1854	4554	5097	053	L.BHD 垂直 FR53~54
	Cor	42	0.3781			1.51	
	C.P	114	0.1903	4249	4484	058	水平 "
	Cor	46	0.3450			1.10	
	C.P	118	0.2188	4536	2662	090	SIDE 垂直 SHELL FR53~54
	Cor	39	0.2975			1.45	
	C.P	129	0.1252	2328	6480	022	水平 "
	Cor	33	0.3557			1.25	
	C.P	124	0.2114	57.90	3329	062	L.BHD 垂直 FR53~54
	Cor	38	0.3169			092	
B.TK 7.19	C.P	115	0.1010	27.48	3307	025	SIDE 水平 SHELL FR53~54
	Cor	34	0.1509			070	
	C.P	126	0.0924	21.76	31.91	032	TRANS 垂直 WEB FR54
	Cor	47	0.1357			1.63	
B.TK 下部	C.P	121	0.1135	31.60	4541	040	水平 "
	Cor	40	0.2079			073	

テスト期間 397日間

漲水日数 涨水率50%（推定） 涨水運送 11~16日

テストビース面積 360cm²（大型試験片）

Tank 高さ 19m

4.3 バラストタンクの試験塗装

「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」に關し、現在主として応力の変化による影響が検討されているが、塗装の有無の影響を実船と対比して検討するという意図から、実船試験を下記のように行った。

なお、就航後の追跡調査は49年度となる。

4.3.1 試験塗装対象船

国内での保証入渠を含め、隨時国内に寄港し調査可能な船舶とする。別表参照のこと。

4.3.2 実施要領

(1) 供試塗料

原則としてJIS K-5664 1種タールエポキシ塗料2回塗りとするが、これに限定するものではない。ただし、この場合は内容を明示すること。

(2) 試験塗装箇所

(a) タンカー

タイトまたはスオッシュバルクヘッドの上、中、下部に面積、各々約2m²で実施する。

上部……デッキ裏付近で調査可能な箇所、例えば梯子付近

中部……水平ガーター上で作業容易な部分

下部……スラッジの影響を受けない部分。底部より約1m上の部分

(b) バルクキャリアー

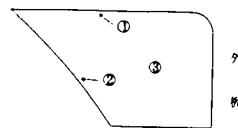
トップサイドタンク内で、下図の①, ②, ③の付近で実施する。

上部……デッキ①

底部……②の部分

垂直部……バルヘッド③の部分

(c) その他の船種については(a), (b)に準じて行う。



4.3.3 塗装仕様

塗装仕様は原則として試験塗装対象船の仕様に準ずる。

4.3.4 試験項目(調査項目)

(1) 塗装時

(a) 下地処理方法および程度(表示はSISで表わす)

ショッププライマーの種類を明記する。

(b) 塗料および塗装系

供試塗料の内容、および塗装系(塗回数)の明記。

(c) 塗装方法および塗装条件

造船所の標準により行う。

(d) 補修塗装

通常の方法で行い、その状態を記録しておく。

(2) 塗装後

(a) 塗膜状態

肉眼で行う。

(b) 乾燥膜厚

測定時間……完全硬化後(1~2週間)

測定箇所……5~6点/2m²

(c) 塗膜劣化試験(インピーダンス測定)

各社の試験器が同一のものでないので各社が適宜行う。

(3) 就航後

(a) 塗膜の状態

肉眼で行う。

(b) 塗膜劣化試験

(2)の(c)と同様に測定し就航前と比較する。

原則として入渠時に行う。

(c) 航路、バラスト張水期間、張水率など。

4.3.5 試験結果(調査結果)

塗装時および塗装後の調査結果は別表を参照のこと。

就航後の調査は4~9年度となる。

別表

バス・タンクの試験塗装概要

(塗装時、塗装後の調査結果)

塗料メーカー	船名	造船所	番船	船名	船種 (D/w)	引渡し	試験塗装箇所	塗装年月日	塗装系		膜厚 (平均μ)	
									ショアプライマー	塗装前処理		
日本ペイント	大阪商船三井	三井、玉野	962	高城山丸	バルクキャリアー (110,000)	4.8.7	M6.2トップサイドタンク (右舷)	4.8.5.20	ニッペジンキー	サンドスイープ (Sa.2.5)	エポタールM (2回塗)	
大日本塗料	ジャパンライン	三菱、長崎	1712	ジャパンアスター	タンカー (237,000)	4.8.9.4	M6.3ペラストタンク (左舷)	4.8.3 4.8.4.2~1.1	エバボンドFM-3	デイスクリサンダー- パワーブラシ	SDCコート6.02TM おじび SDCコート4.02T (1回塗)	
日本郵船	三菱、広島	235	鳥海丸	バルクキャリアー (122,000)	4.8.7.26	M6.5トップサイドタンク (左舷)	4.8.2.2.1 4.8.3.6	エバボンドFM-3	デイスクリサンダー- パワーブラシ (St.2.5)	ビスコソH3 (1回塗)	上 3.2.5 下 2.8.0	
中国塗料	山下新日本正汽船	日立、堺	4351	日勝丸	タンカー (235,000)	4.8.5	M6.3ペラストタンク (左舷)	4.8.1.2.3~2.4	SDノンシンクリアマー- Z.E.M.1.0.0 ウエルボンド(上部のみ)	デイスクリサンダー- パワーブラシ (St.2.5)	ビスコソH3.0.0.0 (2回塗)	上 2.4.5 中 2.7.0
神東塗料	日本郵船共栄タンカー	石橋、横浜	2339	太栄丸	タンカー (210,000)	4.8.1.2	M6.3セントータンク (ペラスト)	4.8.5.2.1~ 4.8.7.1.0	エバボンドEU	デイスクリサンダー- パワーブラシ (St.2)	オピア#3.0.0.0HB (1回塗)	上 2.2.0~3.0.0 中 2.1.0~2.5.0 下 2.3.0~2.7.0
神西ペイント	三光汽船	日立、因島	4352	大光丸	タンカー (180,000)	4.8.6	M6.3ペラストタンク (左舷)	4.8.1.1.4~3.0 4.8.3.5~6	SDノンシンクリアマー- Z.E.M.1.0.0	デイスクリサンダー- パワーブラシ (St.3)	エポシールM.1.0.0 (2回塗)	上 2.1.3 中 2.3.0 下 2.3.5
神戸ペイント	川崎汽船	石橋、吳	2329	瀬田川丸	タンカー (271,400)	4.8.7	M6.3ペラストタンク	4.8.2.2.8 4.8.3.2.4 4.8.4.9	エバボンド	サントラスト(Sa.2) おじびデスクサンダー- パワーブラシ (St.2.5)	エビラクタス5HB (1回塗)	上 2.2.7 中 2.0.0 下 3.3.5
日本油脂	三光汽船	石橋、横浜	2286	武光丸	タンカー (231,000)	4.8.4	M6.5ペラストタンク (左舷) M6.3ガーニゴタンク (左舷)	4.7.1.1.2.5 4.7.1.1.2.8	エバボンド	デイスクリサンダー- パワーブラシ (St.2.5)	ブルスコH8.0.0 (1回塗)	上 2.7.5 中 2.9.0 下 2.8.5
兎田化学	大阪商船三井	三菱、神戸	1040	あらすか丸	コンテナー (27.750)	4.8.6.2.6	M6.4ペラストタンク (左舷)	4.7.1.2.1.8 4.8.1.1.5	エビコン シンクリチップライマーB	デイスクリサンダー- パワーブラシ (St.3)	ビチ・ラックM200.00 (1回塗)	

注 1. 神東塗料のS/M.955(第一中央汽船)は中止。

2. 膜厚の頂で、上、中、下となるのは、タンク内の上、中、下部を示す。

3. 上塗供試塗料はいずれもJIS K 5664 1種相当品。

(順不同、微細略)

本章は昭和 47 年度の研究報告「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」の中で

- 腐食におよぼす応力(歪)の変化影響の実験
- 溫度変化および材料表面状況の影響の実験
- 防食電流密度におよぼす材料表面状況の影響

のその後の検討結果をとりまとめたものである。したがって、試験方法、装置等 47 年度報告と重複したところは一部割愛してある。

本報告で述べる表題、図番等は 47 年度報告と対応して示してある。

2. 腐食原因に関する研究

2.1 腐食におよぼす応力(歪)の変化の影響の実験(試験期間の腐食におよぼす影響)

2.1.1 諸験装置と試験方法

(1) 試験の概要

試験装置として具備すべき条件は、バラストタンク天井部分のように常に湿りガス中の腐食雰囲気で高応力付加のくり返されることおよびバラスト部分のように張水、空槽雰囲気もできることであって、このようなことを考慮して試験装置を計画した。応力付加腐食試験装置の全景を図 2.1.1^{*}に示し、概要を(図 2.1.2, 2.1.3)^{*}に示す。

図 2.1.1 の写真で前面が腐食試験槽、写真には見えないが、後方の壁の向う側に補助タンクが設置されている。

腐食環境を調節するためのバラスト海水の試験タンク内への張水ならびに排水は補助タンクとポンプ装置の付属弁を操作し、一定時間毎に予め保温した新鮮な海水を補助タンクから試験タンクに注入し、一定時間後排出した。

試験装置は温度条件を一定にするため二重タンクを構成し、外側タンクに水を入れて温度調節を行うようにした。試験片を入れる内部タンクは二室に密閉区分され、各室に応力付加試験片取付台 2 組と無応力試験片取付台 1 組をそれぞれ取付け応力の付加は図 2.1.2^{*}に示したパワーシリンダー①を駆動して応力負荷軸②を移動させて試験片③にたわみを与えた。

この試験装置の内面はタルエポキシ塗装を施して腐食から保護した。

尚、次後の解析の参考とするため張水期間中の試験片の自然電位を測定するため、海水塩化銀電極を基準電極として試験片の応力平行部の近くに設置した。

(2) 試験条件

応力付加条件は 0, 18, 26, 28, 29, 31^{b/a} の 6 段階の定歪とし、応力繰り返し回数は 1 日に 2 回とした。また、試験期間については下図の通り張水 10 日間、空槽 10 日間の合計 4 サイクルおよび 9 サイクルとし雰囲気温度は 40°C とした。



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(S 4.8.3)参照

*1 張水期間、空槽期間は休日等のため若干異っている。特に 9 サイクル目は、張水 5 日、空槽 5 日となった。

(3) 試験片

供試材は A 級鋼板 (KAS - 板厚 2.2 mm) から採取した。形状 Stress-Strain 曲線、試験片のたわみ、 δ とひずみ率 (%) の関係および板厚計測位置などを図 2.1.6^{*2}、図 2.1.7^{*2} に示す。板厚計測はポイントマイクロメータ (針先径 0.3 mm, 感度 5/1,000 mm) を使用した。

試験片には表面を機械仕上後 (VVV)、トリクレンで脱脂洗浄した裸試片とこれにタールエポキシ塗料を塗布した 2 種類のものを用意した。供試材の化学成分を表 2.1.1^{*2} に塗装条件を表 2.1.2^{*2} に示す。

(4) 試片の後処置ならびに腐食速度の表示

試験終了後、試片を取り出し表面状況を撮影した。また、酸洗法として 5% HCl + 0.5% イビット (#1-L) 約 20 °C に 2 日間浸漬後水洗、ブラッシングを行ない飽和重槽水に浸漬後水洗、さらに中和防錆処理を数時間行なった。

そして中和防錆処理後乾燥して表面状況を撮影し、重量および板厚計測に供した。

尚、重量減、板厚計測法による腐食速度の表示はいずれも試験片の片面の腐食速度を示した。

2.1.2 試験結果と考察

(1) 腐食速度

試験片の応力平行部 6 点のポイントマイクロメータによる腐食速度および重量減による腐食速度におけるひずみと試験期間の影響を図 2.1.8 に、ひずみの影響を図 2.1.9 に示した。

これらの図は、重量減計測によるときは、試験期間 3 ヶ月間では腐食速度に対し、繰り返し応力の影響を殆んど示さないが、6 ヶ月後の試験結果は腐食の促進されることを示している。これに対してポイントマイクロメータによる計測法では 3 ヶ月の試験ではひずみ 0.1% 以上になると急激な腐食の進行を示している。3 ヶ月間試験の結果により一応、応力と腐食速度の関係は、鋼の降伏応力である 20 数 % の応力値をこすと腐食は増加すると考えていくことが 6 ヶ月試験の結果により、鋼の弾性領域内でも歪ないしほ応力の繰り返し付加によって異常に腐食は促進されると拡張される結果を与えた。

図 2.1.8 のポイントマイクロメータ計測は腐食速度は一応初期腐食段階を終り、鋼表面の錆の生成による腐食抑制効果のあらわれた腐食速度鈍化の傾向を示しているが、繰り返し応力の付加される場合の腐食は試験期間と指數関係にある腐食傾向を示した。

このように腐食に対して応力の繰り返しは試験時間の経過と共にその影響度を大きく示し、たとえ鋼の弾性領域内の応力値 (0.1 ひずみ) であっても異常に腐食を促進することを示した。重量減計測結果も腐食の値は小さいが、ポイントマイクロメータ法と同じ傾向を示した。重量減法で応力による腐食効果の少ないのは応力の影響を受ける部分 (ひずみ平行部) の面積が試験片全体に較べて小さいため、応力平行部の腐食効果がその他の部分でマスクされたためである。

既研究で錆層の破壊応力は数 % で鋼の弾性域内にあることを予想していたが、本試験の 6 ヶ月の試験結果からこの錆層の破壊は腐食を促進する有力な因子であることが明らかとなった。しかしながら錆層の破壊応力値が腐食促進応力値の下限界とするには、本研究の応力レベルのとり方が高応力側に偏しているため、明らかでない。今後この様な観点から、応力レベルの低値 (20% 以下) 側について繰り返し応力と腐食の関係について検討する考えである。

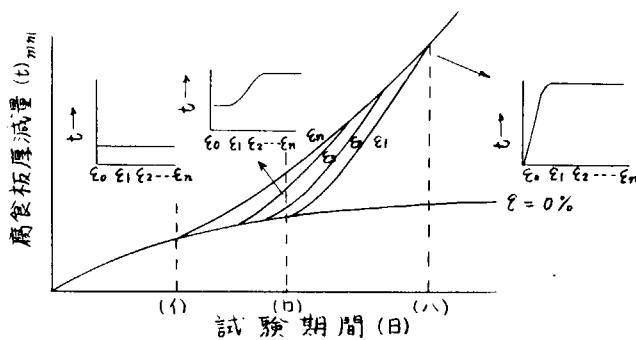
一般に腐食環境によって錆の生成速度、錆の構造 (組成、密度等) は異なるため、錆層の厚みの増加、錆の不均一による内部歪の増加、応力付加のタイミング等によって破壊する応力値は当然異なると思われる。

*2 第 1 年度報告参照

* 未発表論文

したがって、ひずみによる腐食の促進効果は腐食環境およびひずみの周期によって早期に現われる場合もあれば、徐々に現われる場合もあることが予想される。

参考図1は以上の考察をもとにひずみをパラメーターに腐食量におよぼす試験期間の影響を模式的に示したものである。



参考図1 腐食におよぼす試験期間の影響を示す模式図

この図は腐食におよぼすひずみの影響のあらわれ始める時間（これを Corrosion Starting Point と仮に定義し、以下 C.S.P で表す）C.S.P がひずみの小さい程、後期にその影響が表わされてくる様子を示している。試験期間(イ)ではひずみの影響を認めないが、(ロ)期間後にはひずみを $\varepsilon_2, \varepsilon_3, \varepsilon_n$ でひずみの影響を認めるようになる。さらに(ハ)期間後には $\varepsilon_1 \sim \varepsilon_n$ までひずみの影響を示すようになる。

腐食環境、ひずみの大きさによって C.S.P は当然異なるが、その本質はかわりないと考える。

尚、本研究で採用したポイントマイクロメータによる計測結果(p)は孔食状態を指示するものと考えられ、重量減計測法は平均腐食速度(d)を示すものとすれば孔食係数^{*1} $K = p/d$ で示される。

図 2.1.8, 2.1.9 の結果をこのような目で見ると 3 ケ月試験ではひずみ 0.1 %までは $K \approx 1$, 0.2 %以上で $K \approx 1.5$ となり、6 ケ月試験では 0.1 %以上で $K \approx 1.8$ となり、ひずみ又は応力の繰り返しは孔食（局部腐食）を促進することが推定できる。

これらの結果はいずれも応力分布の存在する場合であるが、一定応力をうける平行部のみを露出して、その他の部分を塗装で被覆したときの腐食速度（ポイントマイクロメータ計測）は図 2.1.9 の(◎)に示したようにひずみ 1.4 %では腐食は促進されているが、ひずみ 0.2 %では腐食の促進はないことを示している。ひずみ 1.4 %の繰り返して腐食が促進されているのは塗膜が破壊されたために、純粋な一定応力平行部の状態が保持されなくなつたためと考えられないこともないが、損傷部の面積が応力平行部に比べて狭いことを考えると、やはり繰り返し応力は腐食を促進すると考えた方がよさそうである。

応力分布のある場合の腐食の激しい原因 (C.S.P が短い) としては応力の影響の少ない部分が陰極に応力集中部が陽極になるマクロセル形成が考えられる。

以上の結果から次の結論が導かれる。

イ 応力分布のある場合

繰り返し応力の付加によって腐食は促進されるが、その効果は鋼表面の錆層の生成された後の腐食促進が大きく、腐食量は時間の指數函数で示される。

* 1



孔食係数

$$K = \frac{p}{d}$$

- ロ 腐食を促進する鋼の破壊応力は長時間後は鋼の弾性域内の応力レベルに下り、充分な錆層が形成された後は僅かな応力の繰り返しでも腐食は促進される。それ故、短時間では腐食促進効果は認められないが、僅少でも繰り返し応力のある場合は長時間での腐食促進の影響に注意すべきである。
- ハ 応力分布のないときの腐食促進効果は応力分布のある場合に較べて少ない。
- ニ 応力による腐食促進現象は応力による鋼の活性化よりも、応力の付加によって鋼表面の錆層が破壊されるためである。(long range)
- ホ C.S.P(Corrosion Starting Point)を定義し、繰り返し応力と腐食速度におよぼす試験期間の影響の概念を明らかにした。

2.2 温度変化および材料表面状況の影響の実験

2.2.1 試験装置と試験方法

(1) 試験の概要

バラストタンク内の温度は四季により、又張水、排水期間や同一タンク内部でも天井部や中央部等の場所の相違によってかなり異なるので温度および鋼材表面状態の腐食速度におよぼす影響を調査するため図2.2.1に示した恒温試験水槽および各種表面処理した試験槽を作成した。

恒温水槽は2条件の温度を選べるように約 $1.0\text{m(L)} \times 6\text{m(B)} \times 1\text{m(H)}$ の水槽2基並べ、温度調節は温水ボイラによる温水の循環と水槽へ挿入した電熱ヒーターで自動調節した。

試験槽は軟鋼製の1m角タンク蓋付のものを図2.2.2に示したように恒温水槽に浸漬し、試験槽への海水を底から70cmの高さまで満たすように一定期間毎に張排水した。張水期間中は1日1回程度海水レベルを10cm(底から80cm)程上昇するようにして船体の波浪による動搖によって生じると予想されるバラスト水面付近の腐食の様相を調査できるように考慮した。尚、試験は完全密閉と開放の2種とし、その後の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電極として計測した。

(2) 試験条件

温度を30°C、50°Cの2条件とし、張水期間10日間、空槽期間10日間の張水率50%とした。タンク水面は試験の概要でも述べたが、図2.2.1に示したように海水を一旦80cmの水位まで入れて直ちに70cmまで落すようにこれを張水期間中に1日に1回行った。

バラストタンクの天井部に相当する試験槽の蓋の内面は常時湿り雰囲気にさらされることになるが、腐食におよぼす塩分付着の影響を見るため、予め海水で汚染したものとそうでないものの2種とした。

(3) 試験槽とモニター試験片

供試材はJIS G3101 SS41の板材から切出して図2.2.2に示した試験槽を溶接構造とした。

蓋の部分には、海水の給水用、排水用および後で述べる電気防食用陽極の取付フランジが設けである。

試験に先立ち試験槽本体の側面および蓋の数ヶ所を超音波厚み計(KRAUTKRAMER D-METER DM1)で計測した。試験槽内への吊下げモニター試験片は図2.2.3に示したように $30 \times 50 \times 8\text{mm}$ の単独試験片と $1000 \times 50 \times 6\text{mm}$ の連続試験片の2種とし、試験槽、試験片の表面はミルスケール付のものショットブラストおよびサンダー仕上とした。

2.2.2 試験結果と考察

(1) 試験後のタンクの内面観察

5サイクル(100日)後の試験槽内部の腐食状況の代表例として、ショットブラスト処理の試験槽の内面および天井部の状況を写真2.2.4に示した。写真2.2.5、2.2.6は試験槽内に吊下げたモニター試験片の腐食状況を示したもので、後で述べる電気防食した試験片と並べて示してある。

写真 2.2.4 に見られるように試験槽壁面の錆の状態は実船で経験した状態と極めて類似しており、モニターとして挿入した試験片と試験槽の壁面の錆の状態を比較すると、色の変化はよく相似しているがタンク壁面の錆層の剥離状態、肌の状況はとうてい小型試験片からは相像できないことをこれらの写真は示している。

試験槽内の錆のパターンは、写真に見られるように天井部、空槽部、潮位部（1日1回水位を調節した部分 10 cm巾）バラスト上部、バラスト下部、底部にわけて見ることができる。

各部の観察所見の概要を表 2.2.1 に示す。

これらの観察所見で触れていないが、鋼材の表面処理による相異はミルスケール付のものの空槽部の一部にそのままミルスケール付着を認めただけで特に変ったところは認めなかった。

又、密閉槽と開放槽を比較すると空槽部におけるセルプラ状錆の発生が開放槽に殆んど見られなかつたことでセルプラ状の黒錆は湿い雰囲気の酸素欠乏状態で発生する特異なものであることを示している。

試験温度による顕著な外観上の相違は試験槽下部の錆と 5 ~ 10 mm 堆積したマッドの色およびバラスト部分（試験槽の中央帶）の錆の剥離状態である。（写真 2.2.4 の A-1-1, A-1-2 参照）

30°C 試験槽の下部は黒色、マッドは黒緑色を呈し、硫化水素臭があるのに比して 50°C 槽の下部は紅色を呈し、それぞれ還元雰囲気と酸化性雰囲気の好対照を示している。タンク中央帶では 30°C の槽の錆の剥離は殆んど認められないのに対して 50°C 槽では殆んど完全に表面層の錆の脱落を生じ、錆の下層部である黒色酸化鉄層が現われている。このように試験温度による外観の相違は極めて著しく、その原因として試験槽底部の色の相違については硫酸塩還元菌等のバクテリヤの繁殖温度が 40°C 以下であることによる影響が考えられる。

一方、50°C でのバラスト中間帶の錆の脱落の激しいことに対する対応としては 10 日ごとの張排水時の試験槽内外の水位の差による応力の発生および張水に自然海水を予め加熱することなくそのまま使用したことによる張水時の試験槽壁面の一次的冷却による熱応力の発生によるものではないかと考えている。

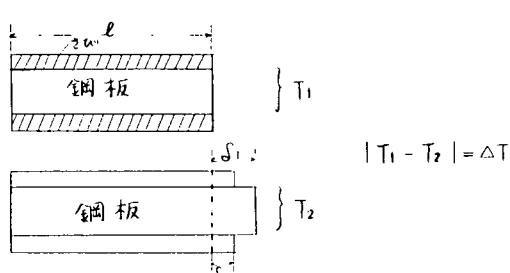
以下この影響について考察してみる。

(2) 試験槽タンクの熱応力の発生と鋼板表面の脱落について

(1) 述べたように 30°C, 50°C のモニター試験片および 30°C 試験槽では表面錆の脱落はなかった。これに対して 50°C 試験槽では表面錆が殆んど脱落していた。

最初にモニター試験片のように外周から一様に熱変動を受けるものについて応力又はひずみについて考える。

(1) 鋼板が曲げられない時の鋼板と錆の伸びについて



鋼板と錆が T_1 から T_2 °C 温度が変化した場合

$$\text{鋼板の伸び } \delta_1 = \alpha_1 |T_1 - T_2| \cdot l \dots \dots \dots (1)$$

$$\text{錆の伸び } \delta_2 = \alpha_2 |T_1 - T_2| \cdot l \dots \dots \dots (2)$$

ここで α_1, α_2 は鋼板および錆の線膨張率である。
鋼板の剛性が大きいので、錆は鋼板によって(1), (2)
の伸び差 δ_0 だけ引き伸される。

$$\begin{aligned} \delta_0 &= \delta_1 - \delta_2 = (\alpha_1 - \alpha_2) \cdot T_1 - T_2 \cdot l \\ &= (\alpha_1 - \alpha_2) \cdot \Delta T \cdot l \end{aligned} \quad \dots \dots \dots (3)$$

一方、伸び δ と応力 σ との間には次の一般式がある。

$$\begin{aligned} \delta &= \frac{W \cdot l}{A \cdot E} = \sigma \cdot \frac{l}{E} \\ \therefore \sigma &= \frac{\delta \cdot E}{l} \end{aligned} \quad \dots \dots \dots (4)$$

(3), (4)式から錆を引張る応力 σ_2 が求まる。

$$\sigma_2 = (\alpha_1 - \alpha_2) \cdot \Delta T \cdot E \quad \dots \dots \dots \quad (5)$$

一方、錆が鋼板によって引き伸ばされた歪 ϵ_0 は(3)式から

$$\epsilon_0 = \frac{\delta_0}{\ell} = (\alpha_1 - \alpha_2) \cdot \Delta T \quad \dots \dots \dots \quad (6)$$

(d) 鋼板が温度差 ΔT によって曲がった時の鋼板と錆の伸び差 δ_0

本研究に使用した試験槽は、内面のみに温度変化を生じることになるから鋼板はモニター試験片と異なりたわみを受ける。鋼材の厚み(6mm)に対し錆の厚みは僅かである

のでこの影響を無視できるし、更に鋼板面積も大きいので中央部では拘束なしとして計算を進める。

参考図に示したように鋼板の上下方向に対して温度が直線的に変化し、膨張も直線的に起るものと仮定すれば周辺の自由な鋼板の熱膨張によるたわみは弧状(曲率)をなす。

最大膨張量と中心面の膨張量との差は $\frac{\alpha_1 \Delta T}{2}$ であり、曲率と次の関係にある。

$$\frac{\alpha_1 \Delta T}{2} = \frac{2\pi(r + \frac{h}{2}) - 2\pi r}{2\pi r} = \frac{h}{2r} \quad \dots \dots \dots \quad (7)$$

その結果、曲率 $\frac{1}{r}$ は次式のようになる。

$$\frac{1}{r} = \frac{\alpha_1 \Delta T}{h} \quad \dots \dots \dots \quad (8)$$

一方、曲げモーメント M と曲率 $\frac{1}{r}$ の間には次式の関係がある。

$$\frac{1}{r} = \frac{M}{E I} \quad \dots \dots \dots \quad (9)$$

ここで I は断面二次モーメント

E は鋼のヤング率

(8), (9)より

$$M = \frac{\alpha_1 \cdot \Delta T \cdot E \cdot I}{h} \quad \dots \dots \dots \quad (10)$$

$$Z = I / \frac{h}{2} = \frac{2I}{h} \quad \dots \dots \dots \quad (11)$$

$$\therefore \sigma = \frac{M}{2} = \frac{\alpha_1 \cdot \Delta T \cdot E}{2} \quad \dots \dots \dots \quad (12)$$

中心面の半径 r は(8)式より

$$r = \frac{h}{\alpha_1 \cdot \Delta T} \quad \dots \dots \dots \quad (13)$$

外面の半径は

$$r + \frac{h}{2} = \frac{h}{\alpha_1 \cdot \Delta T} + \frac{h}{2} \quad \dots \dots \dots \quad (14)$$

膨張差は(13), (14)より

$$\Delta r = 2\pi r - 2\pi(r + \frac{h}{2}) = 2\pi \frac{h}{2} = \pi h \quad \dots \dots \dots \quad (15)$$

ひずみ率は(6)式又は(15)式の合成となるから

$$\begin{aligned} \epsilon_0' &= \frac{\pi r}{2\pi r} + (\alpha_1 - \alpha_2) \Delta T \\ &= \frac{h}{2r} + (\alpha_1 - \alpha_2) \Delta T \end{aligned} \quad \dots \dots \dots \quad (16)$$

(13), (16)式から

$$\begin{aligned}\varepsilon_0' &= \frac{h}{2 \cdot \frac{h}{\alpha_1 \Delta T}} + (\alpha_1 - \alpha_2) \Delta T \\ &= \frac{\alpha_1 \Delta T}{2} + (\alpha_1 - \alpha_2) \Delta T \\ \varepsilon_0 &= (1.5 \alpha_1 - \alpha_2) \Delta T \quad \dots \dots \dots \quad (17)\end{aligned}$$

錆の膨張率 α_2 は今のところ不明であるが、今 $\alpha_1 \gg \alpha_2$ あるとすれば
モニター試験片の歪率は(6)式から

$$\varepsilon_0 = \alpha_1 \cdot \Delta T \quad \dots \dots \dots \quad (18)$$

試験槽壁面の歪率は(17)式から

$$\varepsilon_0' = 1.5 \alpha_1 \Delta T \quad \dots \dots \dots \quad (19)$$

それぞれ(18), (19)式で示される。海水温度を 20 °C として計算した結果を下の参考表に示す。

参考表 (計算条件 $\alpha_1 = 10^{-5} 1/\text{°C}$)

試験片種類	温度差 (°C)	歪計算値 (%)	錆の状態
モニター	10	0.01	固着
モニター	30	0.03	"
試験槽	10	0.015	"
試験槽	30	0.045	脱落

本研究の 2.1.2 で鋼材表面の錆層は ± 0.03 % 以上のひずみ率で破壊されることを示した。参考表に示したように熱応力によるひずみの効果と考えたひずみ率と、機械的なひずみの値とはよく一致した傾向を示した。一般に海水中の鋼の腐食に対して錆は不完全ながらも保護作用を示すこととは 2.1 で示した無応力試験片 (図 2.1.8) の腐食傾向からも明らかなることであるが、僅かな歪の発生によって錆層の破壊又は脱落することは、錆層の腐食抑制効果のそこなわれることを意味し、試験の方法の相違によって得られる腐食情報も当然異なってくることを意味する。

実船のバラストタンクは本研究で実施したと同じように壁面は伝熱構造となっているところがわかるから波浪等の外力の他に、温度変化によるこのような錆層の破壊による腐食促進効果も充分考えられるところである。尚、試験槽壁面の板厚を超音波厚み計で追跡したが、充分な精度が得られなかつた。このような大型試験方法に対して、腐食速度の計測法の開発が望まれるところである。

イ) 試験片による腐食の状況

試験層の各位置における各種試験材の腐食速度を図 2.2.4, 図 2.2.5 に示す。図 2.2.4 は温度 30 °C, 図 2.2.5 は温度 50 °C の場合を示したもので、それら単独試験片と連続試験片の腐食速度を重量減法と板厚計測法で比較して示したものである。

連続試験片の重量減による平均腐食速度も参考のため板厚計測結果図の下部に矢印で示しておいた。

これらの図から次のことが判る。即ち

- ① 単独試験片による腐食速度は 30 °C におけるミルスケールの板厚減結果が若干異なるのを除けば鋼材の表面処理の相異や温度変化 (30 °C ~ 50 °C) による影響を殆ど受けていない。

② これに対し、連続試験片の板厚減計測は、ショットブロスト処理のものはミルスケール、サンダー仕上げのものより大きな値を示した。

③ 連続試験片の重量減による腐食速度はミルスケール付着およびショットブロスト試験片では温度変化による影響を受けていないが、サンダー仕上試験片は30°Cで0.13mm/100日から50°Cで0.17mm/100日と若干増える傾向を示した。

④ 単独試験片、連続試験片いずれも同じように試験槽内の腐食環境に応じた特異な腐食のパターンを示し、1日1回の海水湿润を繰り返した潮位部が最も大きな腐食速度を示した。

これに対して空槽部は0.05mm/100日と他の部分（バラスト部、潮位部）に較べて最も低い腐食速度を示した。

一般に重量減法から求めた腐食速度に較べて板厚計測法による情報の相違は表面状態の荒れの状態を示唆するもので、参考図Aのように考えることができる。すなわち、板厚計測はマイクロメータの計測面が6mmφと大きいことから腐食孔の計測よりも腐食面の凸部を計測したことになる。



参考図 A

腐食孔より小さな物で、板厚を計測すれば腐食速度の関係は逆転することもありうる。

図2.2.6は試験片の表面粗度を触針型表面粗度計で計測したもので極めて小さな深い孔が多数存在していることを示し、この間の事情をよく説明している。

図2.2.6には電気防食した試験片の表面粗度も同時に示してあるが肌荒れが小さく後述する電気防食の効果をよくあらわしている。

以上述べたように単独試験片と連続試験片による腐食形態を比較すると、単独試験片では表面処理の相違にあまり関係なく、略同じ程度の腐食と表面粗度（孔食）を示したのに対し、連続試験片の場合はショットブロスト処理よりもサンダー仕上とミルスケール付とが孔食の深い腐食形態を示す若干の相違が認められた。

一方、バラスト部の水面部と下部の腐食を比較すると単独試験片では下部になる程、腐食速度が減少するのに対して連続試験片の場合は下部で腐食速度が増大する傾向を示している。

下部での腐食速度の増大は水面部と底面部の酸素濃度の差に基づくガルバニック電流によるものと考えられ、連続試験片の水面から下方約10mm巾が腐食の少ないのが目視でもよく確かめられた。

図2.2.6はそのような意味合いも含めて表面粗度を水面部と下部にわけて観察したものである。

常時空槽部の腐食が実船のタンク天井部の腐食から予想されたよりも意外に少なかった理由については、試験片が湿り雰囲気の一定温度の環境に保持されたのみで、実船天井部のように昼夜による激しい温度変化（結露状態の変化を生じる）を受けることが少なかったためではないかと考えられる。第2年度の試験でタンク天井部にテストピースを取り付け、温度サイクルを与えることを計画している。

尚、密閉試験槽と開放試験槽（天井部2000φ穴開）の腐食速度は30°Cの場合、50°Cの場合、いずれも殆んど変わなかった。

3.1.2 防食電流密度によぼす材料表面状況の影響

(1) 試験装置と試験方法

2.1.2で述べた恒温試験水槽（図-2.2.1参照）に各種表面処理した1m角型の軟鋼製試験槽（図-2.2.2参照）を浸漬し、試験槽中央に円筒状の防食亜鉛を吊下げて張水期間中一定電流密度で通電した。

*1 海水が一定の周期で張排水される部分、ここでは試験槽の水位300mm～1000mm迄の部分

通電方法は図-2.1.4に示したと同じ要領で外部から定電流源で、電流一定とし、試験槽の電位をタンク側壁に貼付けた微小塩化銀電極を基準電極として計測した。

(2) 試験条件

温度を20°C, 50°Cの2条件とし、2.2-(2)で述べたと同じように張水期間10日、排水期間10日、張水期間中1日1回の水面の上昇を行ない、試験期間5サイクル(100日間)とし、防食電流密度は50mA/m², 100mA/m², 200mA/m²の3種とした。

(3) 試験片および防食亜鉛

2.2-(2)と同じく供試材はJIS, G3101, SS41の板材から切出して図-2.2.2に示した試験槽を溶接構造としミルスケール付のまま、ショットブластおよびサンダー仕上とした。

防食亜鉛は、市販のアルミ入り防食亜鉛85mmφ×300mmφのものを防食電流密度50mA/m²と100mA/m²のものに対しては1本、200mA/m²の試験槽には2本直列(85mmφ×600mmL相当)として試験槽蓋のフランジ穴から槽中央に吊下げた。

3.1.2.2 試験結果と考察

(1) 表面状態と電流-電位曲線について

第1年度報告参照

(2) 試験片による腐食の状況

大型の試験槽によるときは小型の試験片では得られない。すくなくとも視覚上は実船の状況に近い腐食状況の得られることが明らかになった。この意味から試験槽内に吊下げたモニター試験片による腐食速度の検討は試験槽壁面の腐食状況を充分再現するものとは言えないうらみがあるが、この点については今後の検討事項とするとして、試験片によって得られた結果を図3.1.2.2に示す。

この結果、タンク部の腐食環境について整理すると次のとおりである。

(イ) 空槽部に対しては当然のことながら電気防食効果は認められない。

(ロ) 1日1回の短時間(数分~10分程度)の海水の潮位の繰り返された部分(潮位部10cm巾)に対して電気防食の効果は通電時間が短いにも拘らず極めて大きい。

(ハ) バラスト部分の腐食速度^{*1}は電気防食のない場合は温度30°Cと50°Cで殆んど差が見られないのに対して、電気防食の効果(防食率)は図3.1.2.3に示したように高温で低下し、試験槽壁面の熱応力計算とスケールの剥離状況から推定された腐食の予想とよく一致した。

(3) 試験槽内の酸素濃度の変化

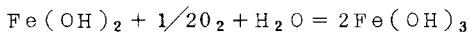
海水の張水時の溶存酸素の経時変化ならびに空槽期間中の酸素ガスの経時変化を図3.1.2.4に示す。計測器(ガルバニ式)の都合で試験途中からのデータしかないが、この結果は張排水のくり返される密閉タンクの腐食機構の推定に極めて有効である。図には試験槽蓋に200mm径の穴を開けた開放の場合も併記してあるがバラスト張水中の溶存酸素の消耗程度が密閉の場合に比べて少ないことが判る。

この図は空槽期間から海水をバラストした瞬間に水中の溶存酸素は脱酸素されること、更に又空槽期間中に試験槽内の酸素ガスは、除々に消耗されることを示している。空槽期間中の酸素濃度の変化の模様は電気防食のある場合あるいは雰囲気温度の相違によって異なっている。特に30°Cで防食電流100~200mA/m²の場合に酸素の消耗の少ないのが目立っており、又50°Cでは電気防食の有無に余り関係なく、試験槽内酸素の70~80%の酸素が消耗されている興味ある現象が示された。

空槽一張水期間中の酸素濃度の挙動から次のような防食のメカニズムが推測される。

即ち空槽期間中にタンク内の酸素によって鋼材の腐食が進行するが、鋼による酸素の自己消耗のために腐食雰囲気は酸素不足の状態となり、この時生成する鉄の腐食生成物は大部分が2価の低級酸化物(水和化合物)であ

ろうと推定される。したがって次の週期で海水が張水されると、この低級酸化物と溶存酸素は反応し試験槽内の海水中の酸素は脱酸素されることになる。開放試験槽の張水時の溶存酸素の減少の少ないのは空槽時の酸素供給が充分な為、この期間での低級酸化物の生成の少ないという理由によって説明できる。



張水期間中（例えば図 3.1.2.4 の試験日数 60 ~ 70 日間等）は槽内の水位を 70 cm ~ 80 cm に 1 日 1 回調節するので新鮮な空気が約 100 ℥ (1 m × 1 m × 0.1 m = 100 ℥ 酸素にて 21 ℥) 毎日供給されるが、溶存酸素の計測結果は、この供給空気から溶解する酸素は次々に鉄の酸化物で脱酸素されていることを示している。この空気は空槽部および潮位部の腐食に一部関与しているのは当然である。したがって腐食速度が酸素濃度に比例するとき、張水期間中の腐食は例えば、錆の脱酸素作用のない場合の 0.5/7 程度に減少することになり、空槽期間中に生成した錆によって張水期間中の腐食は抑制されることになる。

電気防食を施した場合は、空槽期間中の錆の生成が少なく上述した錆による張水期間中の脱酸素作用は小さくなるであろうが、この時は陰極防食作用によって、脱酸素による効果とは違った防食作用によってやはり防食されることになる。それ故このような密閉系にあるバラスト部は陰極防食の実施の有無に拘らず殆んど空槽期間中に進行していると考えることができる。

図 3.1.2.4 の空槽期間中の酸素濃度の変化から温度 50 °C での電気防食効果は 30 °C に較べて低いことを示唆し、すでに述べた試験槽壁面のスケールの剥離状況による腐食の推定、モニター試験片による腐食結果とよく符合する結果を得た。このように、試験槽内の酸素ガス濃度の追跡は腐食の機構解明への有力な手段であることが本試験の結果明らかになった。

次に本試験での腐食環境と実船の腐食環境を鋼の表面積とそれと接する空気量との比をとって示したのが表 3.1.2.3 である。この表から空気量／鋼表面積の関係はタンクの種類、大きさによって異なるが 2.3 ~ 3.2 万トンタンカーの場合 (2 m² / 1 m²) ~ (1 m² / 1 m²) の範囲にあることがわかる。これに対し本研究では空気量／鋼表面積は (0.2 m³ 空気 / 1 m² 鋼) の関係であり、実船の方が 5 ~ 10 倍空気量の多いことになる。

したがって実船での空槽時の酸素濃度の変化は本研究で得られた程の低下ではなく、且つ張水中の脱酸素作用も少ないことが予想される。

今 30 °C、無防食の場合と 30 °C、100 mA/m² の電気防食の場合の酸素の減少量を図 3.1.2.3 より求め、これから実船での酸素量の低下を予想してみよう。

10 日間の酸素消費量はそれぞれ次のようになる。

30 °C 無防食、0.16 m³ O₂ / 10 日間

30 °C 100 mA/m²、0.045 m³ O₂ / 10 日間

鋼材の表面積は天井部を塗装してあるとすれば、5 m² として鋼の単位面積および 1 日当りの酸素消費量は

※ 30 °C、無防食槽 0.003 m³ O₂ / m² • D

※ 30 °C、100 mA/m² 防食槽 0.0009 m³ O₂ / m² • D

となる。実船の空槽期間を 20 日とすると

※ 無防食タンク

$$\frac{(2-1) \times 0.21 - 0.003 \times 20}{(2-1)} \times 100 = 18 \sim 15\%$$

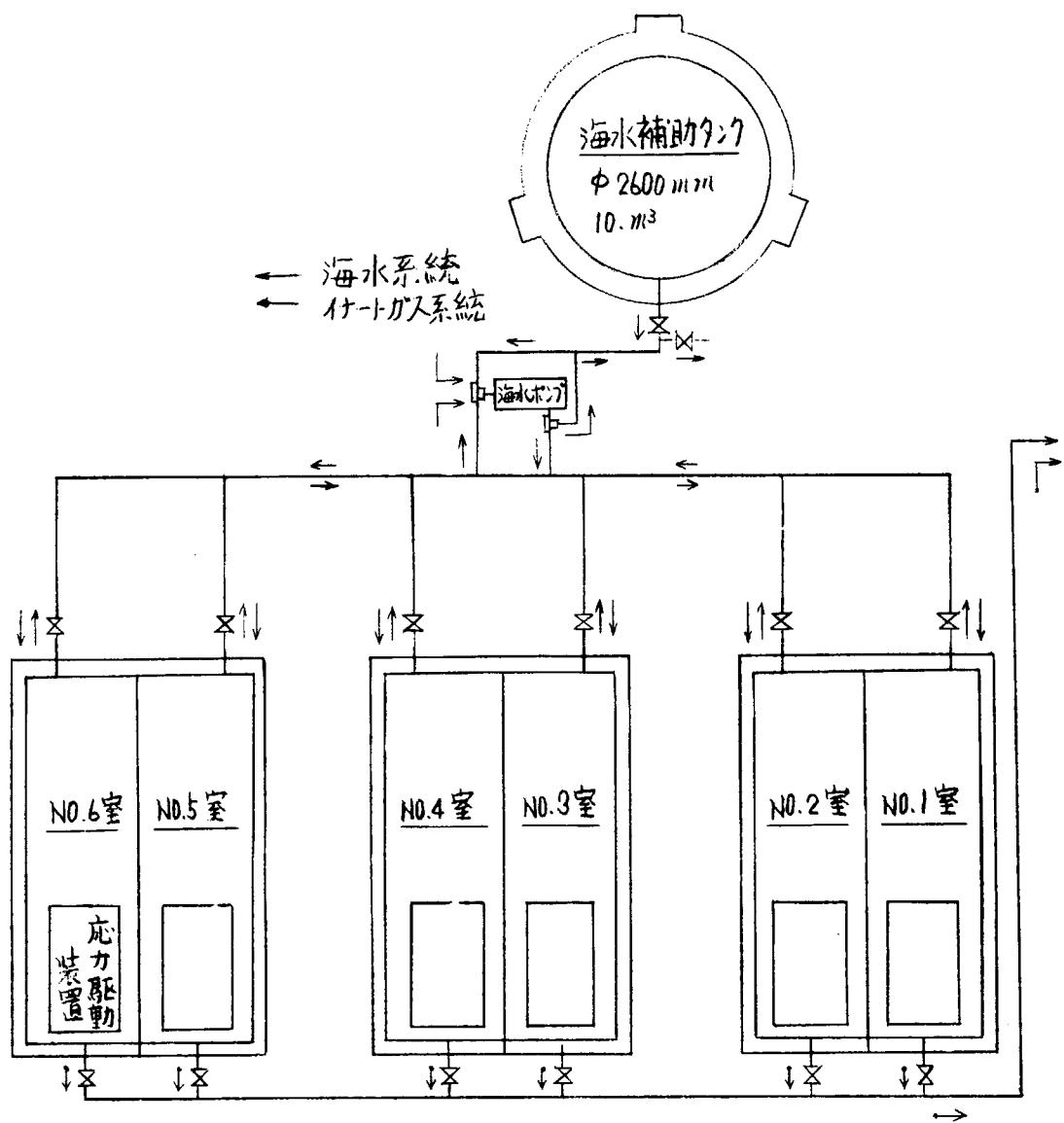
※ 防食 (100 mA/m² の場合) タンク

$$\frac{(2-1) \times 0.21 - 0.0009 \times 20}{(2-1)} \times 100 = 20.1 \sim 19.2\%$$

酸素濃度は略 20～15%程度までタンクの種類によって変化することになる。

このように実船の場合は、酸素の供給が充分ある事になり、本試験の結果より腐食は厳しいことが予想される。

このようにバラストタンクのような密閉系の腐食に対し、V/S (volume/surface) は重要な腐食因子と考えられるので、第2年度次降の研究でとり上げることにしている。



パラストタンク応力付加試験装置配管系統



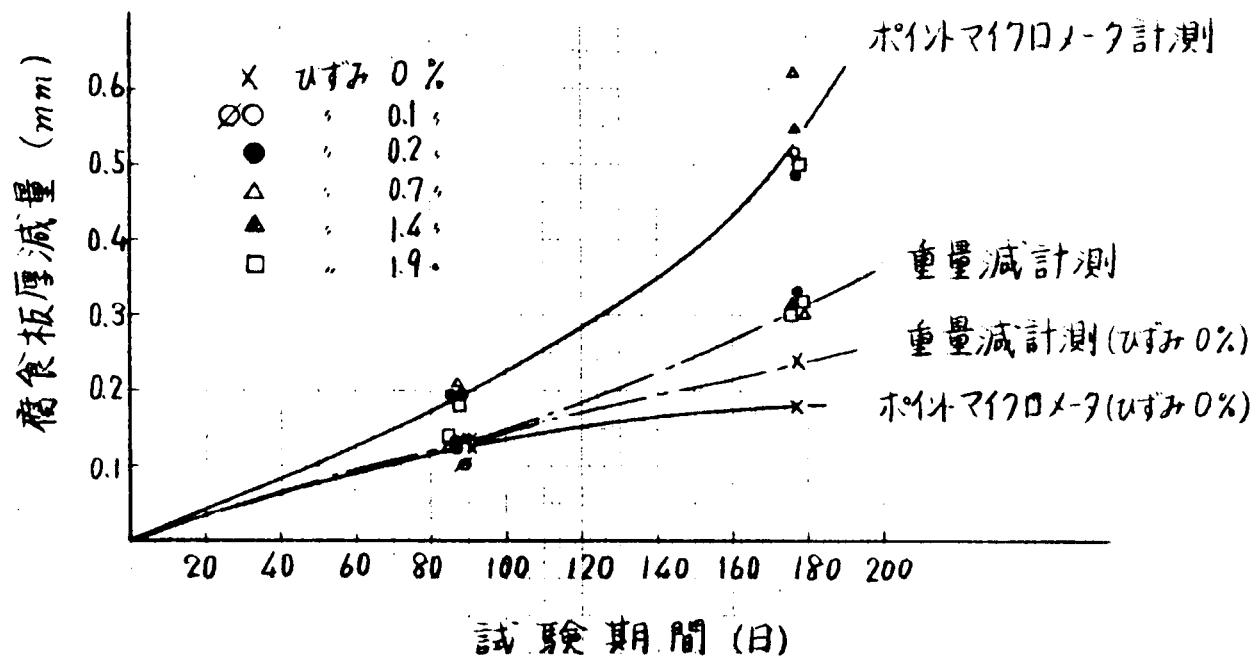


図 2.1.8 腐食厚減におよぼす試験期間の影響

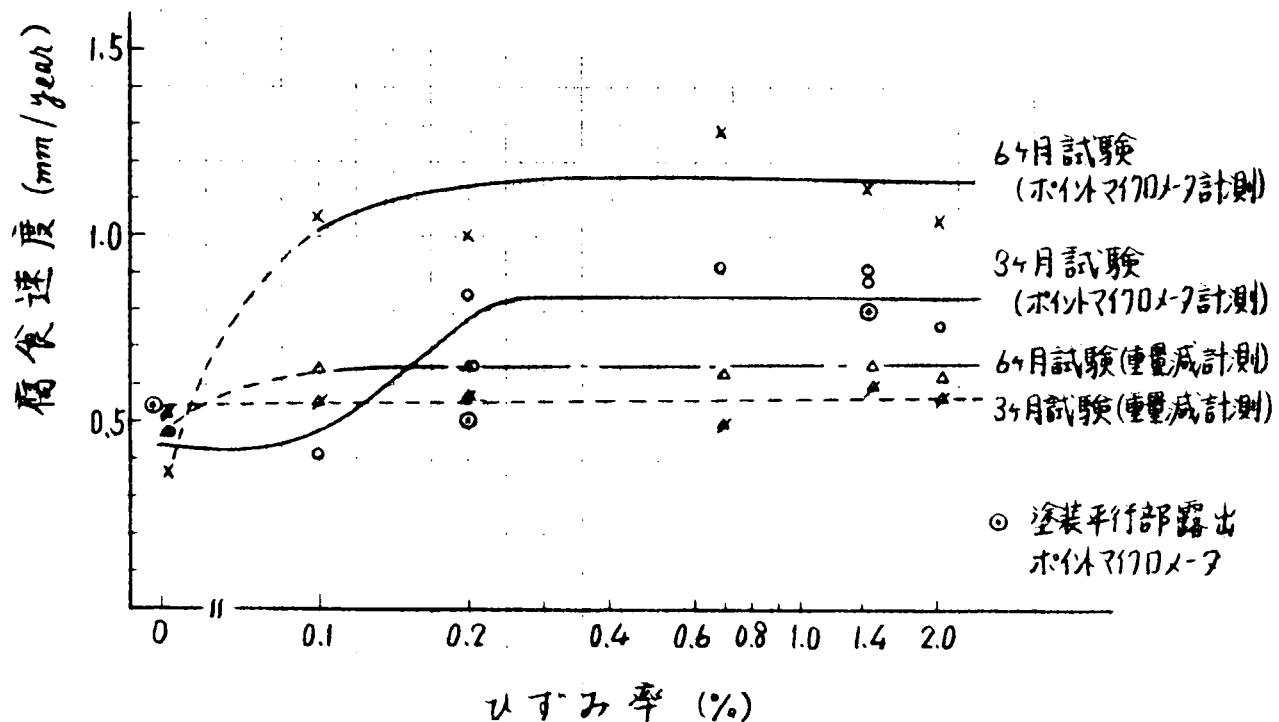


図 2.1.9 腐食速度におよぼすひずみと試験期間の影響

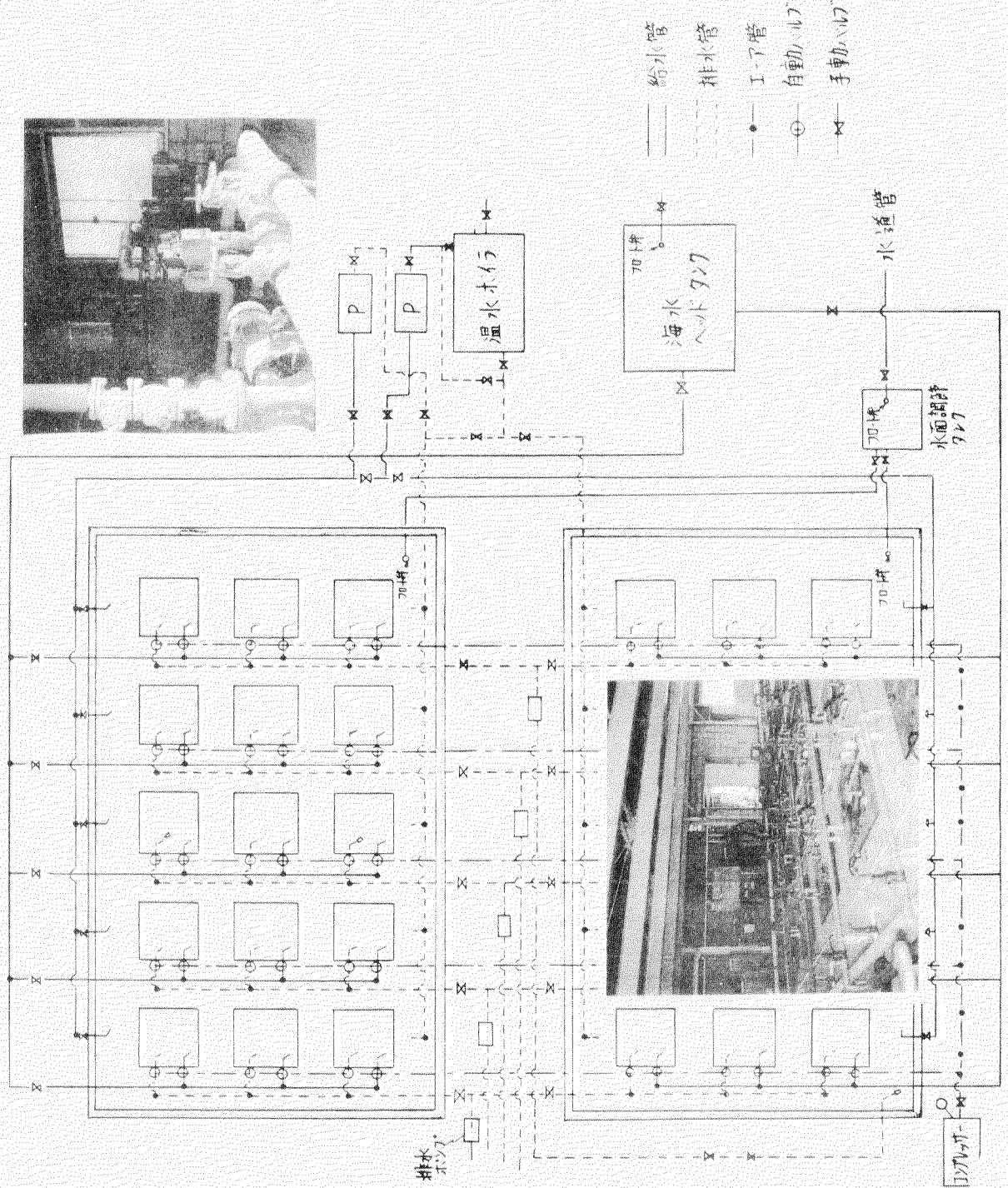


図 2.2.1 恒温試験装置

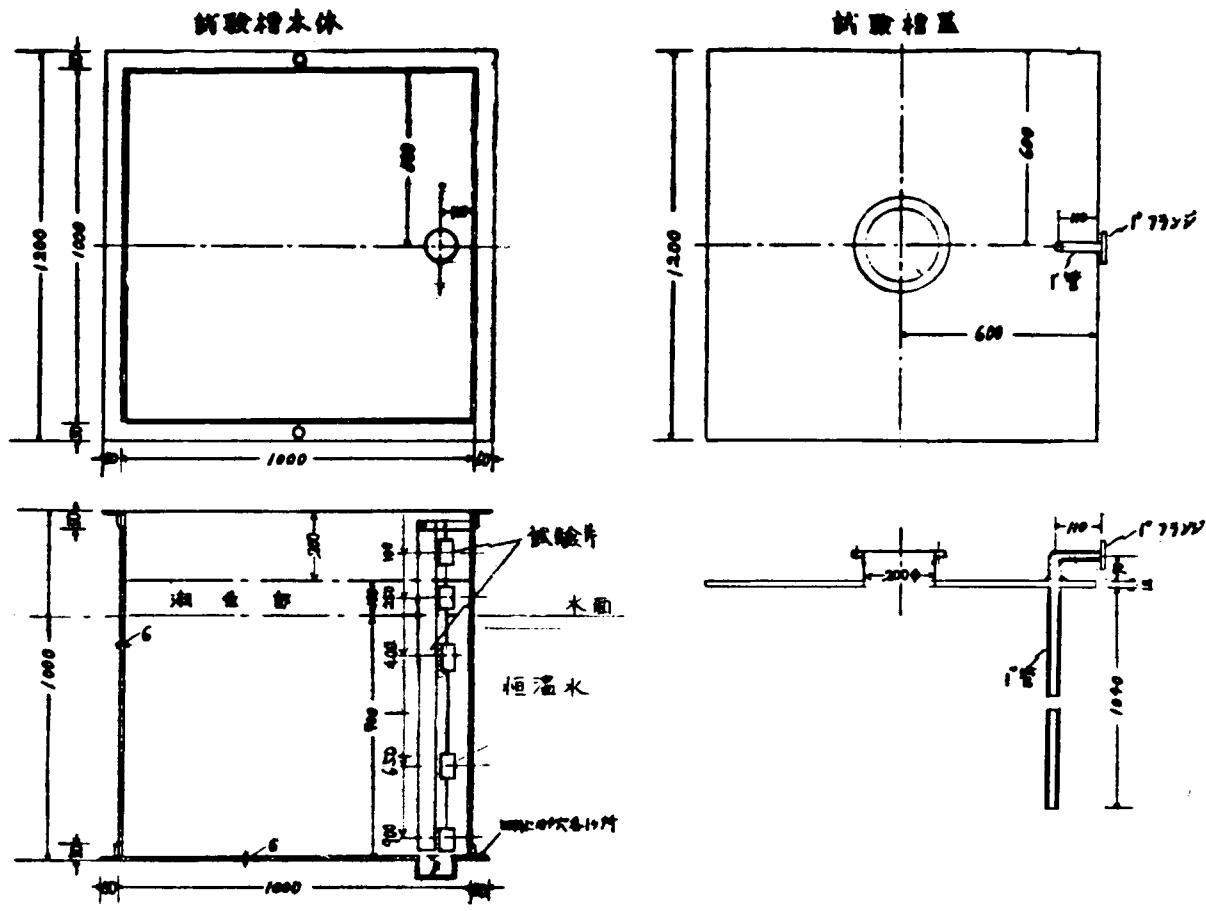


図 2.2.2 試験槽の概要

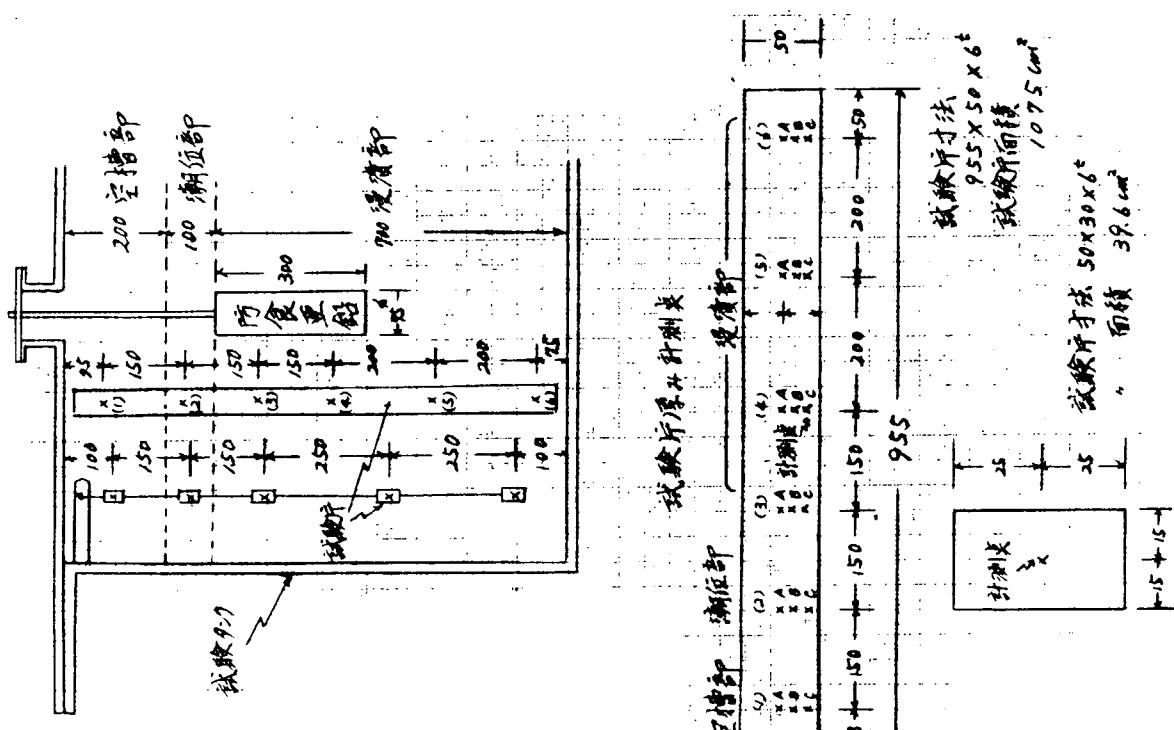


図 2.2.3 試験片取付位置および腐食厚計測点

写真 2.2.4 試験タンク内の錆発生状況

A-1-1 30℃ 密閉槽 E-1-1 30℃ 開放槽
A-1-1 50℃ 密閉槽 E-1-1 50℃ 開放槽

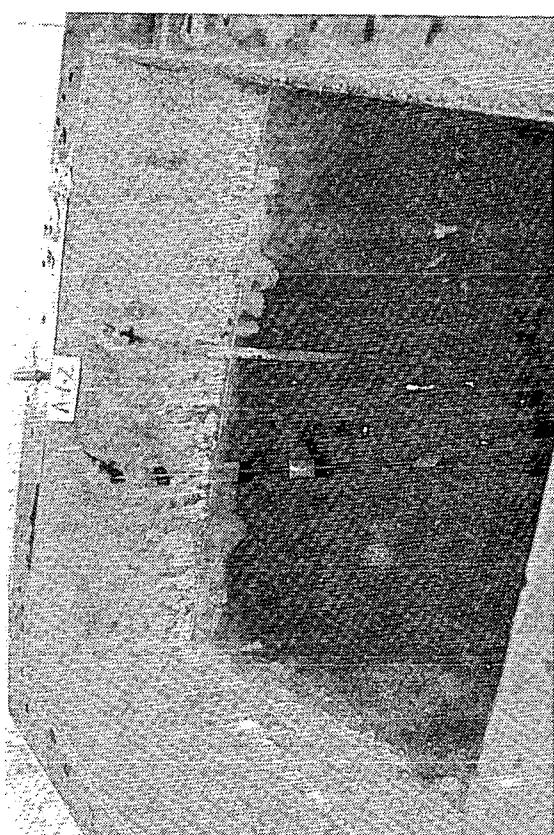
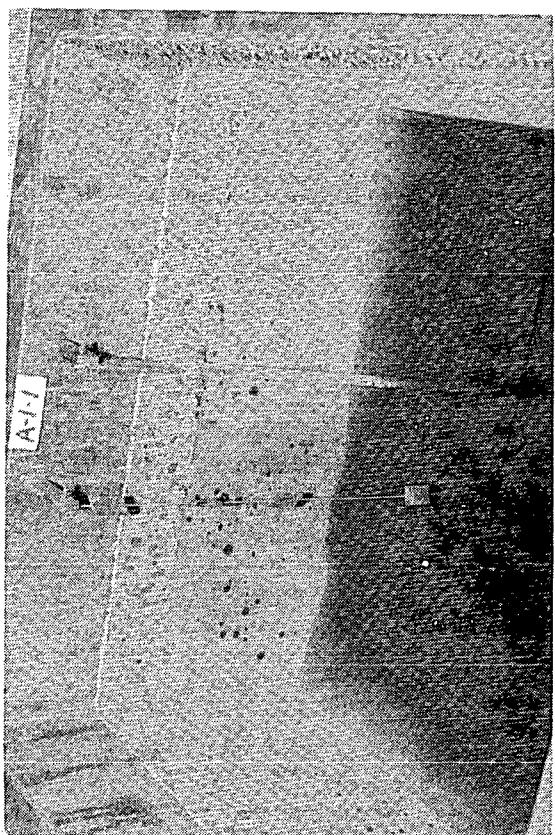
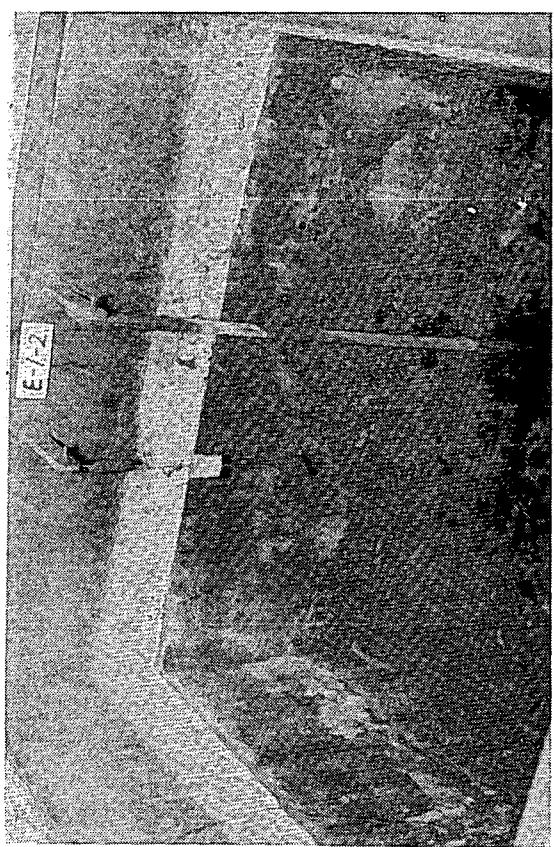
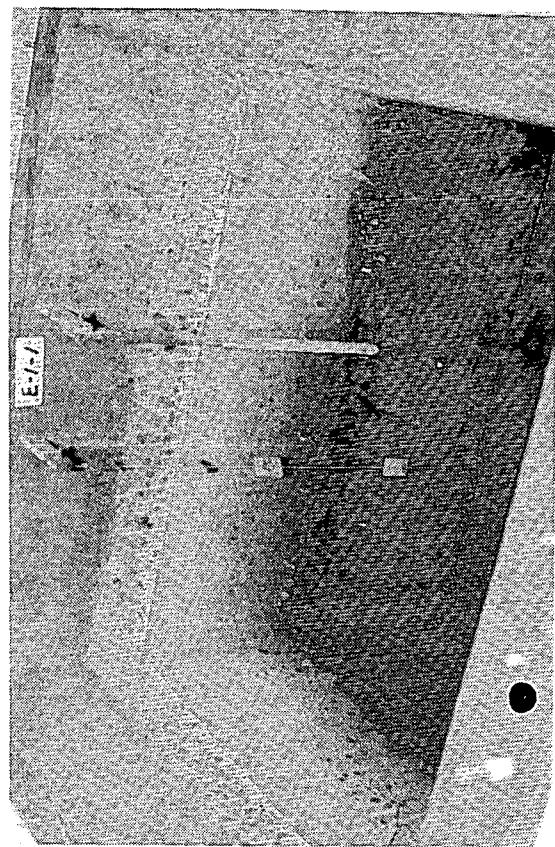
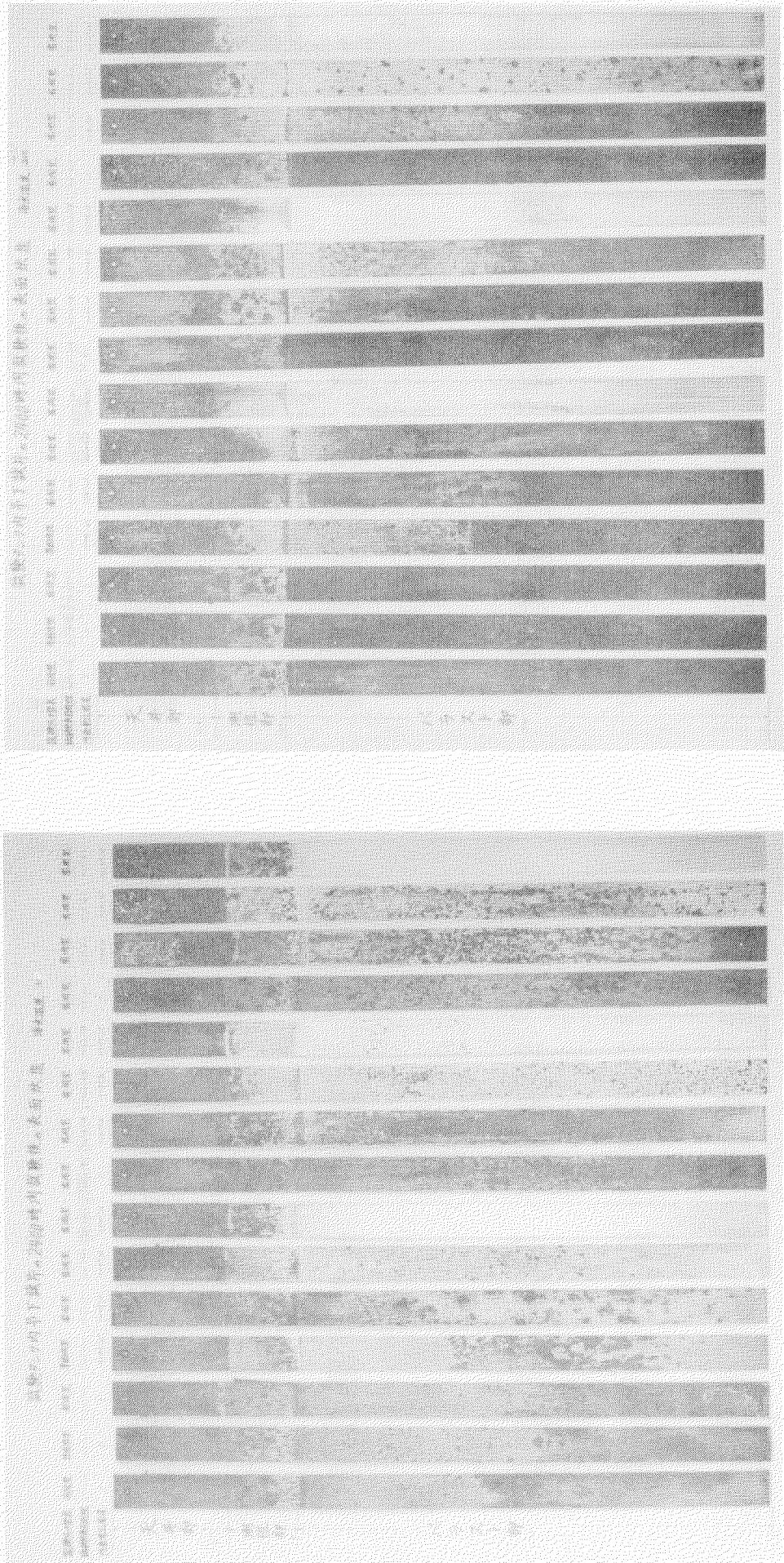
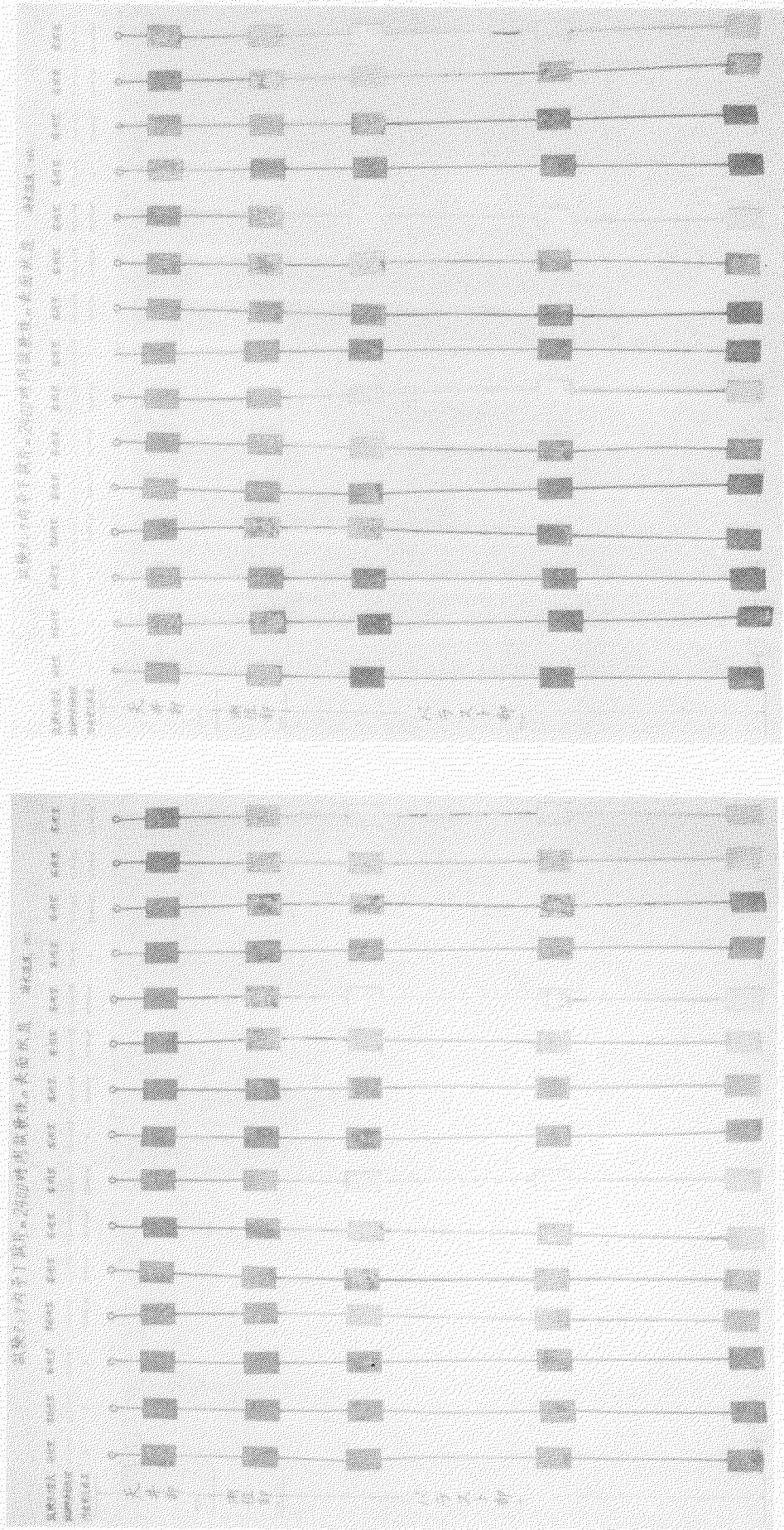


写真 2.2.5 吊下げ試験片の表面状況
(海水温度 30°C)
各試片連続の場合





(海水温度 30°C)
写真 2.2.6 吊下試片の表面状況(100日)
各試片単独の場合

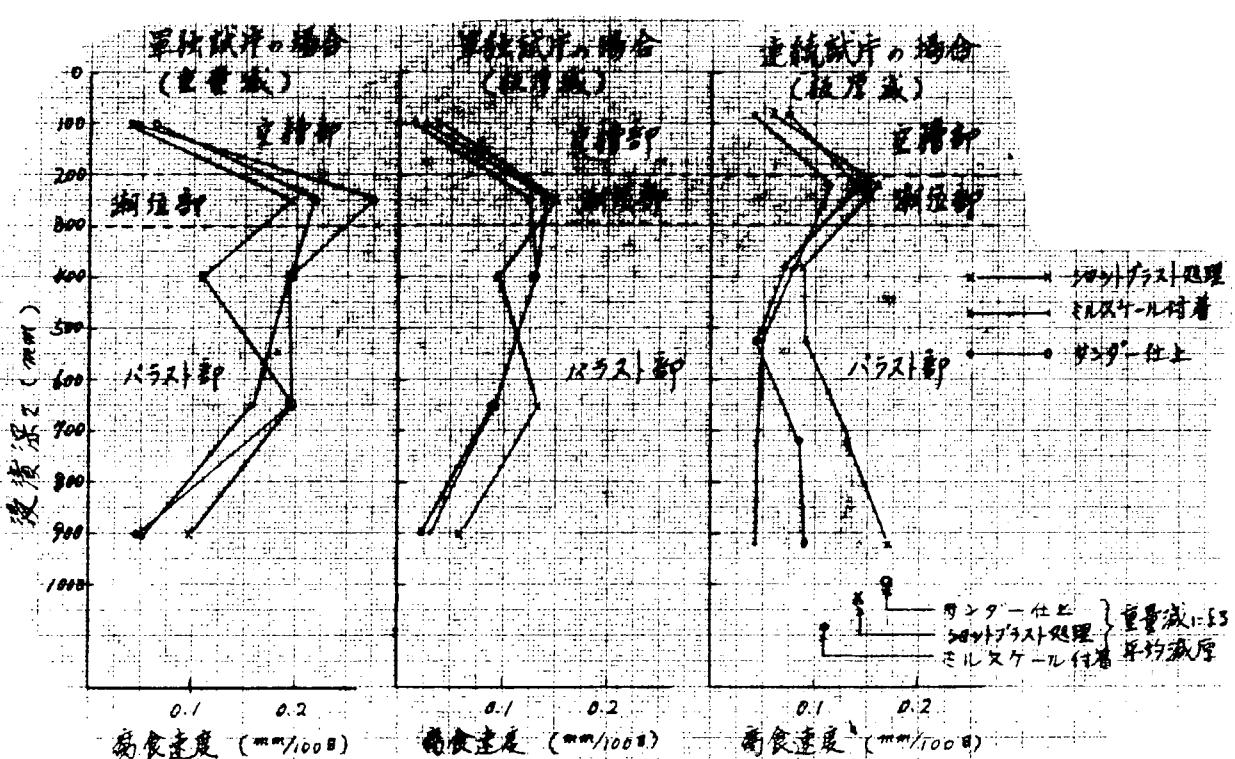
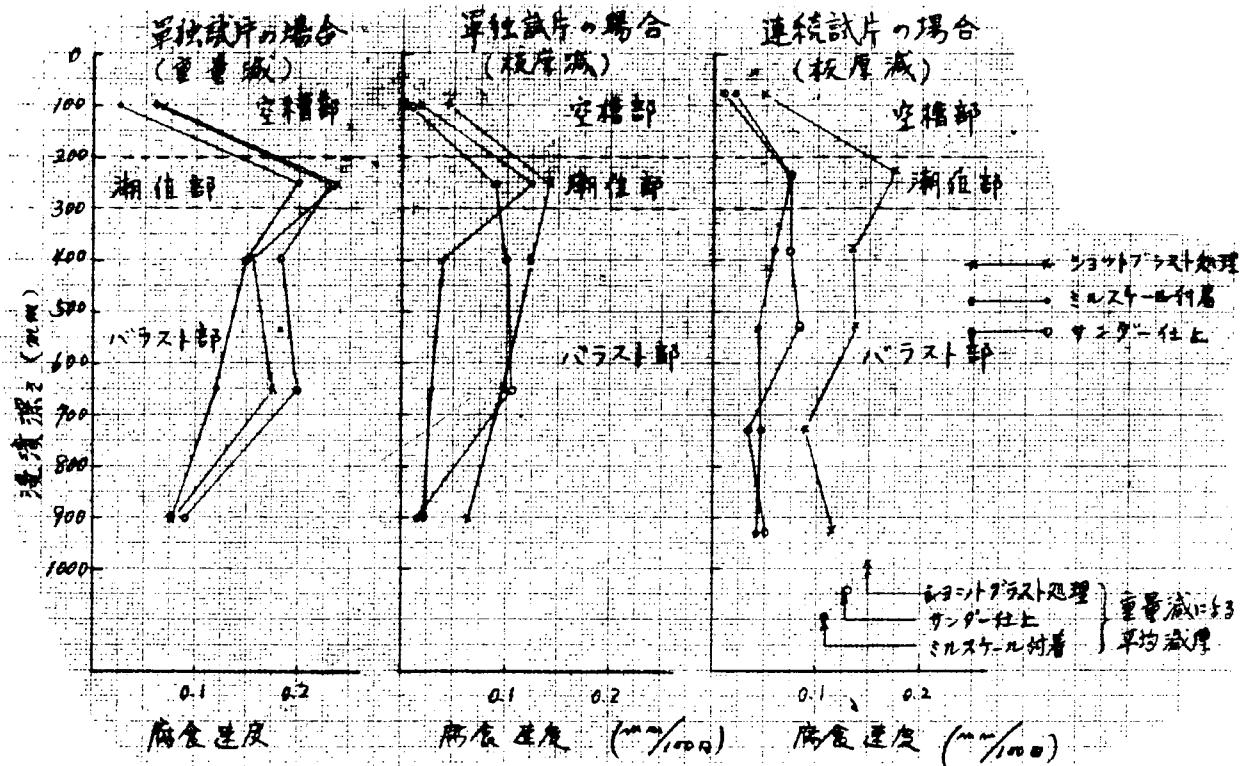


図 2.2.5 タンク位置と各種試験片の腐食速度（試験温度 50 °C）

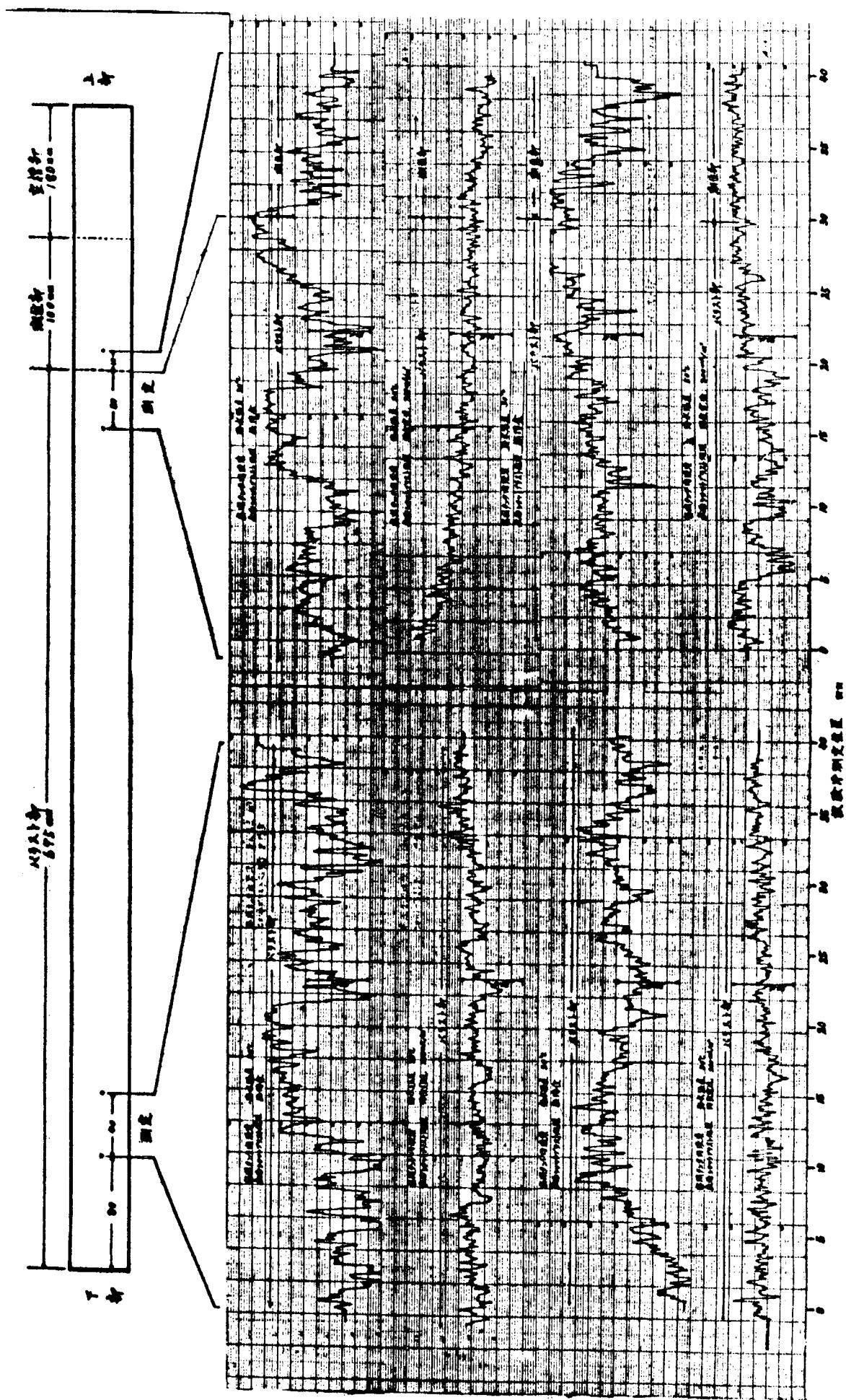


図 2.2.6 防食及び防食試験片の表面アラサ測定

ショットブラスト処理

ミルガウル付着

サンドペーパー上

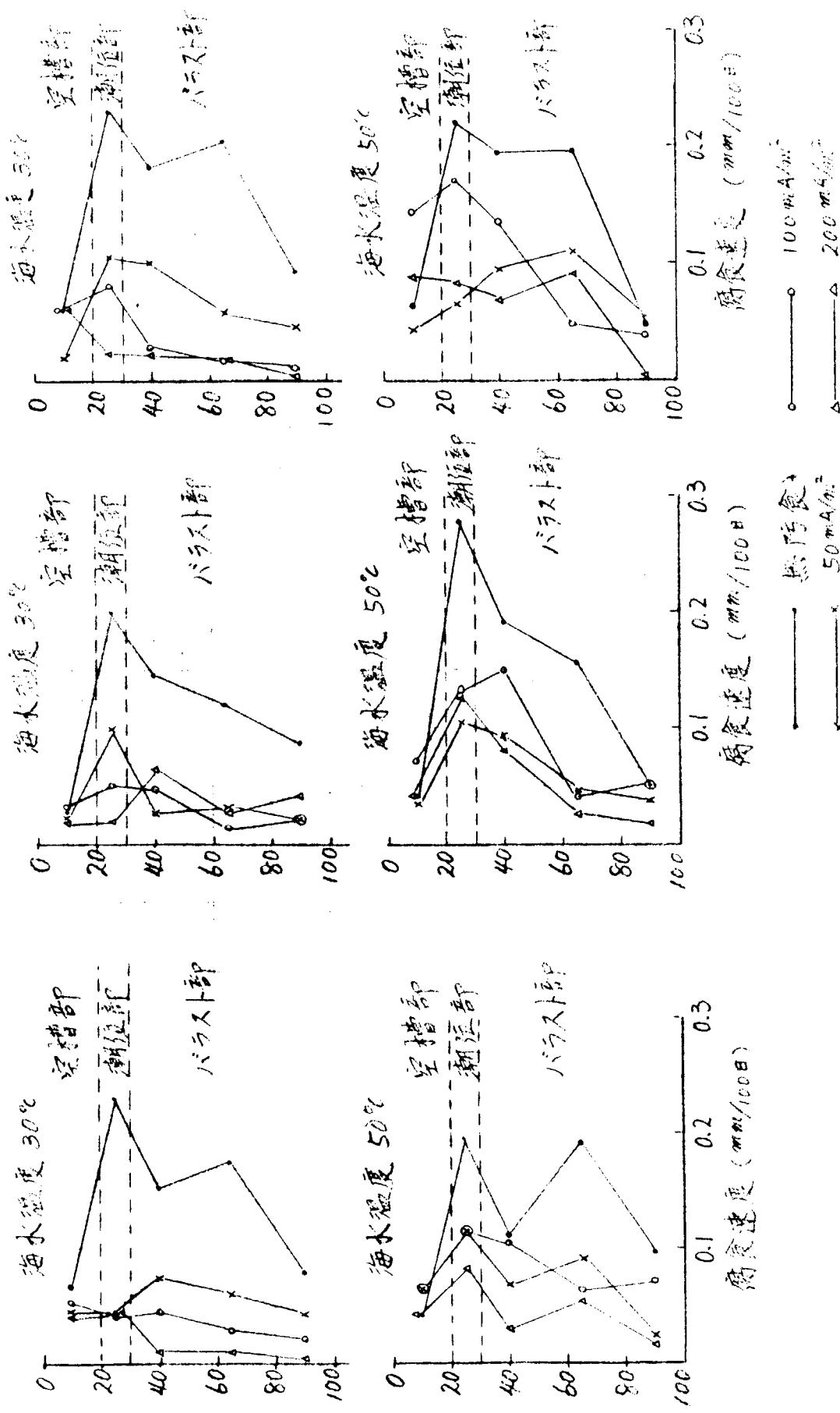


図 3.1.2.2 腐食速度におよぼす電気防食の効果(単独試験片)

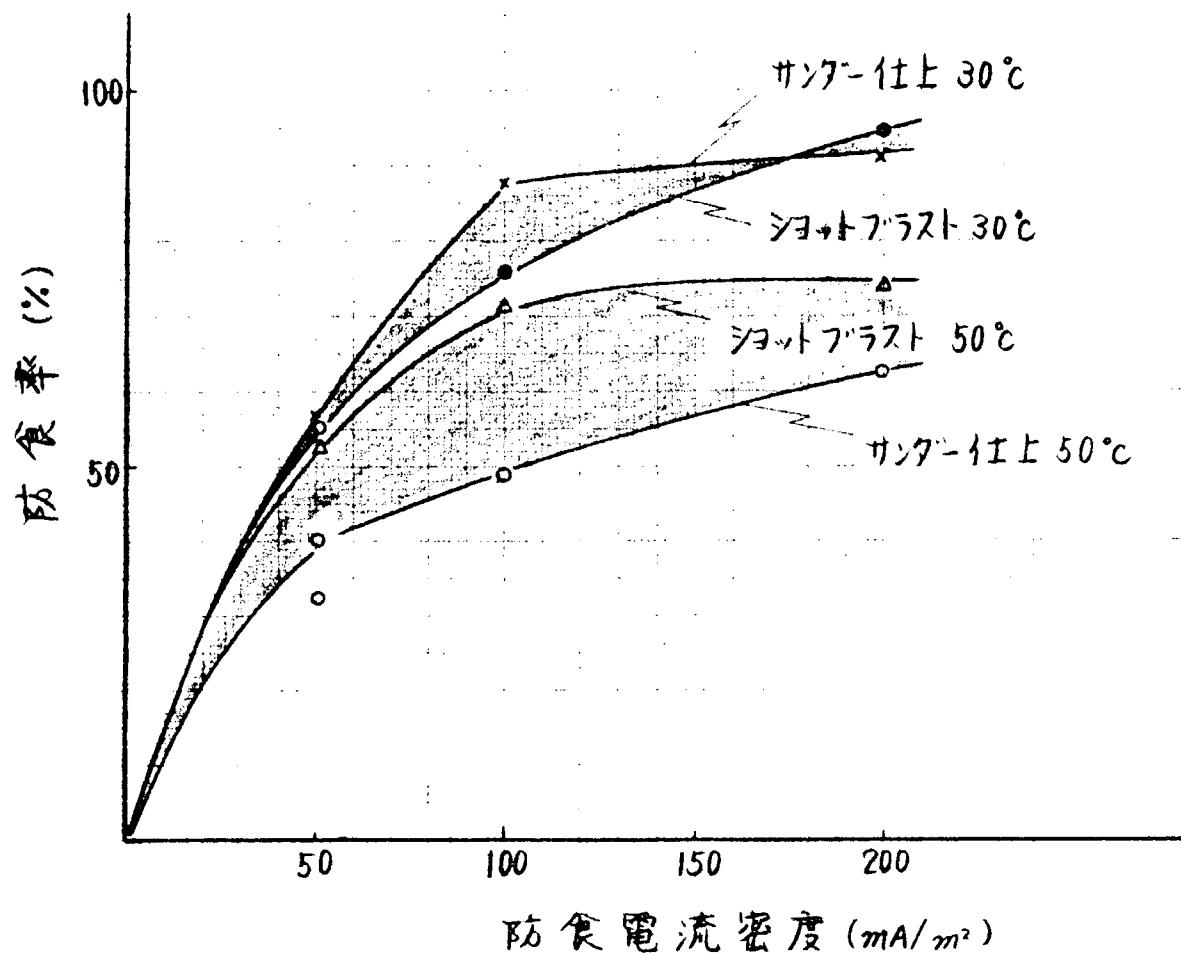


図 3.1.2.3 鋼材の防食率におよぼす防食電流の影響

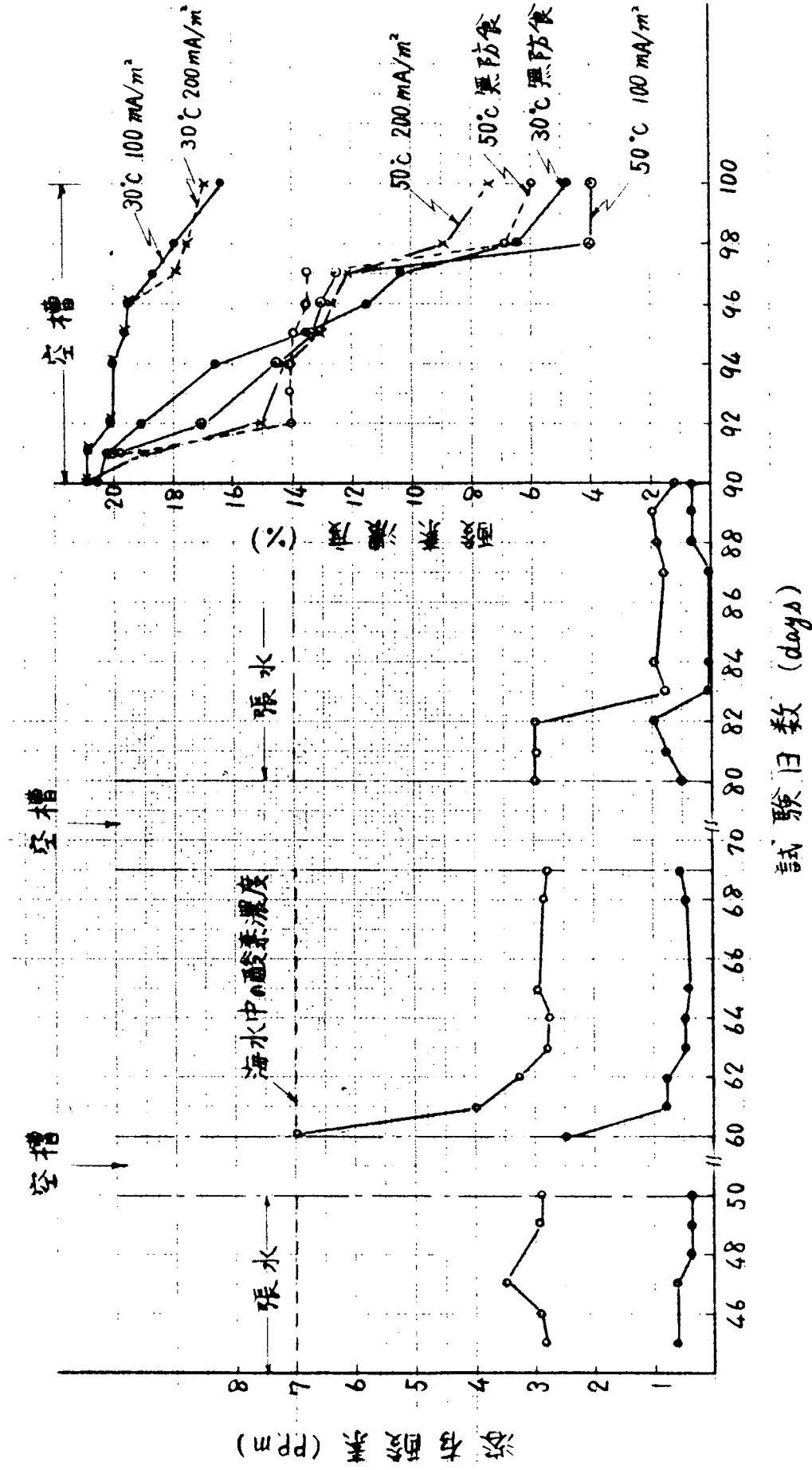


図 3.1.24 張水 - 空槽期間中の酸素濃度の変化

付録Ⅱ

第140研究部会委員会提出資料

年月日	会議名	資料番号	資料名	提出会社
48. 4.11	SR128第15回幹事会およびSR140第4回幹事会合同	資料一 1	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(SR140部会)と船の腐食疲れによる損傷防止対策に関する研究(SR128部会)の対照表	三菱長研
		資料一 2	SR128研究の概要	三菱長研
		資料一 2	SR128 48年度研究概要	横浜国大
		資料一 3	SR140 研究の概要	三菱長研
		資料一 4	Plane Bending Fatigue	東京大学
		資料一 5	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(23応力の変化に対する塗膜の防食効果 48年度研究実施要領)	日立技研
48. 4.12	SR140第5回幹事会	SR140-幹5-1	バラストタンクの防食原因および防食方法に関する48年度研究実施方案	三菱長研
		SR140-幹5-2	応力変化に対する塗膜の防食効果、48年度研究実施要領	日立技研
		SR140-幹5-3	48年度「水質の影響調査」計画書	日本防蝕
		SR140-幹5-4	48年度「実船調査および実船試験計画書」	日本防蝕
		SR140-幹5-4	タンク内腐食状況調査	日本防蝕
48. 6. 6	SR140第4回委員会	SR140-委4-1	実施予定表	三菱長研
		SR140-委4-2	48年度「水質の影響調査」計画書	日本防蝕
		SR140-委4-3	「応力の変化に対する塗膜の防食効果」 48年度研究実施要領	日立技研
		SR140-委4-4	48年度実船調査および実船試験計画書	日本防蝕
		SR140-委4-5	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	三菱長研
		SR140-委4-6	図6 張水-空槽期間中の酸素濃度の変化	三菱長研
		SR140-委4-7	Fig.1 腐食厚減に及ぼす試験期間の影響 Fig.2 腐食速度とひずみの関係	三菱長研
48. 9.21	SR140第6回幹事会	SR140-幹6-1	SR140部会(昭和48年度)中間報告	三菱長研
		SR140-幹6-2	応力の変化に対する塗膜の防食効果	日立技研

年月日	会議名	資料番号	資料名	提出会社
		S R 1 4 0 - 幹 6 - 3	腐食量-応力等(参考資料)	日立技研
		S R 1 4 0 - 幹 6 - 4	水質の影響等調査	日本防蝕
		S R 1 4 0 - 幹 6 - 5	S R 1 4 0 実船試験塗装概要	中国塗料
		S R 1 4 0 - 幹 6 - 6	パラストタンクの腐食原因および防食方法に関する49年度研究実施方案	三菱長研
		S R 1 4 0 - 幹 6 - 7	パラストタンクの腐食原因および防食方法に関する研究(塗装法に関する研究)49年度研究方案	日立技研
		S R 1 4 0 - 幹 6 - 8	軟鋼の低サイクル応力腐食に関する試験(案)	中川防蝕
48.10. 4	S R 1 4 0 第5回委員会	S R 1 4 0 - 委 5 - 1	昭和48年度中間報告	三菱長研
		S R 1 4 0 - 委 5 - 2	繰返し応力下の腐食に対する塗装の効果48年度中間報告	日立技研
		S R 1 4 0 - 委 5 - 3	48年度研究進捗状況および中間報告	日本防蝕
		S R 1 4 0 - 委 5 - 4	実船試験塗装概要	中国塗料
		S R 1 4 0 - 委 5 - 5	パラストタンクの腐食原因および防食方法に関する49年度研究実施方案	三菱長研
		S R 1 4 0 - 委 5 - 6	49年度研究計画(案)	日立技研
		S R 1 4 0 - 委 5 - 7	49年度研究実施方案	日本防蝕
		S R 1 4 0 - 委 5 - 8	49年度研究実施方案	中川防蝕
48.12. 7	S R 1 4 0 第7回幹事会	S R 1 4 0 - 幹 7 - 1	中間報告(その2)	三菱長研
		S R 1 4 0 - 幹 7 - 2	水質の影響等調査	日本防蝕
		S R 1 4 0 - 幹 7 - 3	繰返し応力下の腐食に対する塗装の効果	日立技研
		S R 1 4 0 - 幹 7 - 4	49年度研究実施方案	三菱長研
		S R 1 4 0 - 幹 7 - 5	船舶の防食防汚の開発に関する研究(49年度研究計画)	造船研
49. 1.3 1	S R 1 4 0 第6回委員会	S R 1 4 0 - 委 6 - 1	昭和47年度報告書補遺	三菱長研
		S R 1 4 0 - 委 6 - 2	昭和48年度報告書	"
		S R 1 4 0 - 委 6 - 3	水質の影響調査(昭和48年度報告書)	日本防蝕
		S R 1 4 0 - 委 6 - 3	同上 新旧人工海水中の腐食速度比	"
		S R 1 4 0 - 委 6 - 4	実船式験調査(昭和48年度報告書)	"
		S R 1 4 0 - 委 6 - 5	応力の変化に対する塗膜の防食効果(昭和48年度報告書)	日本技研
		S R 1 4 0 - 委 6 - 6	昭和49年度研究費一覧表	造船研
		S R 1 4 0 - 委 6 - 7	「軟鋼の低速低応力腐食に関する研究」昭和49年度研究計画	中川防蝕