

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 5 0 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49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，五十音順）

部 会 長	秋 田 好 雄（日本海事協会）	
幹 事	石 井 信 夫（日本郵船）	植 田 昭 二（三菱重工業）
	植 田 健 二（三菱重工業）	翁 長 一 彦（船舶技術研究所）
委 員	国 広 敏 之（日立造船）	重 野 隼 太（中川防蝕工業）
	瀬 尾 正 雄	太 田 元 久（日本防蝕工業）
	寺 田 泰 治（日本海事協会）	南 義 夫（横浜国立大学）
	三 好 貢（神東塗料）	早稲田 瑞 秋（中国塗料）
	荒 井 要（神戸製鋼所）	池 田 稔（川崎製鉄）
	石 井 弥二郎（ニッコー防食）	石 田 卓 雄（佐世保重工業）
	石 田 富之輔（日本ペイント）	伊 藤 剛 平（日本造船工業会）
	伊 東 達 夫（川崎汽船）	上 田 研 一（海上保安庁）
	植 田 靖 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）	奥 山 孝 志（日本中型造船工業会）
	金 井 一十三（昭和海運）	門 智（新日本製鉄）
	神 谷 敏 夫（名村造船）	北 田 実（尾道造船）
	木 津 圭 二（大阪商船三井船舶）	日 下 幹 生（大阪造船）
	小 池 金 広（山下新日本汽船）	坂 見 史 朗（三井造船）
	佐 武 二 郎（住友金属工業）	実 藤 公 一（三井金属工業）
	沢 田 馨（日立造船）	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）
	染 矢 博 文（三保造船）	高 畠 敏 男（川崎重工業）
	谷 川 典 人（新和海運）	長 門 広 司（笠戸船渠）
	西 川 孝 寛（東亜ペイント）	播 谷 圭 亮（石川島播磨重工業）
討 参 加 議 者	服 部 堅 一（住友重機械工業）	平 山 昭 邦（神東塗料）
	藤 井 勝 三（白杵鉄工所）	松 島 巖（日本鋼管）
	宮 本 新 平（三菱重工業）	宮 本 芳 文（兎田化学）
	村 上 正 三（日本油脂）	森 山 俊（三光汽船）
	湯 川 光 春（ジャパンライン）	
	青 木 眞 一（川崎製鉄）	飯 田 勇（住友重機械工業）
	伊 藤 宏 一（三井造船）	岩 竹 民 哉（尾道造船）
	内 堀 利 也（日本防蝕工業）	海 野 武 人（中川防蝕工業）
	小 井 孝 行（関西ペイント）	帯 屋 継 昭（兎田化学）

上 寺 孝 明 (中国塗料)
神 例 昭 一 (住友重機械工業)
嶋 谷 四 郎 (三井造船)
諏訪部 伝 司 (神東塗料)
谷 口 治 正 (三菱重工業)
轟 理 市 (新日本製鉄)
服 部 要 (海上保安庁)
森 宏 (日立造船)
山 本 昇 三 (日立造船)

川 路 正 (昭和海運)
清 水 義 明 (日本鋼管)
鈴 木 昌 己 (日本防蝕工業)
高 井 元 弘 (船舶技術研究所)
寺 岡 泰 治 (尾道造船)
徳 岡 泰 広 (日本油脂)
平 間 敏 郎 (関西ペイント)
森 稔 (川崎重工業)
吉 野 守 男 (東亜ペイント)

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（ないし歪）の変化の影響の実験	2
2.1.1 試験装置と試験方法	2
2.1.2 試験結果	2
2.1.3 まとめ	3
2.2 水質の影響調査	8
2.2.1 調査項目	8
2.2.2 調査方法	8
2.2.3 試験条件及び計器	8
2.2.4 測定結果	9
3. 防食方法に関する研究	16
3.1 防食電流密度におよぼす応力（歪）の影響の実験	16
3.1.1 試験装置と試験方法	16
3.1.2 試験結果	16
3.1.3 まとめ	17
3.2 防食電流密度におよぼす張水率、張水期間の影響	29
3.2.1 試験装置と試験方法	29
3.2.2 試験結果	29
3.2.3 まとめ	31
3.3 タンク体積／表面積比の防食電流密度におよぼす影響（ V/S 率の影響）	42
3.3.1 試験装置と試験の方法	42
3.3.2 まとめ	43
3.4 イナートガス組成と防食効果の実験	48
3.4.1 試験装置と試験の方法	48
3.4.2 試験結果	48
3.4.3 まとめ	48
3.4.4 バラストタンク天井部の腐食について	52
3.5 塗膜損傷部の腐食に対する抑制法の検討	52
3.5.1 試験方法	52
3.5.2 試験結果	53
3.5.3 まとめ	54
3.6 軟鋼の低速度低応力腐食に関する試験	62
3.6.1 試験方法および試験条件	62
3.6.2 試験結果	62
3.6.3 まとめ	63
4. 実船調査および実船試験 2の1	68

4.1	バラストタンクの温度・電位測定	68
4.2	計測結果	68
4.3	まとめ	68
4.3.1	温度	68
4.3.2	タンク電位	68
5.	実船調査および実船試験 その2	85
5.1	実船試験の概要	85
5.1.1	試験対象船	85
5.1.2	実施要領	85
5.1.3	塗装仕様	85
5.1.4	試験項目	85
5.2	就航後の調査結果	87
5.2.1	調査進捗状況	87
5.2.2	調査結果	87
5.3	あとがき	91
5.3.1	塗膜状態	91
5.3.2	塗膜劣化試験（インピーダンス測定による $\tan \delta$ ）	91
5.4	実船試験におけるインピーダンス測定（参考資料）	91
5.4.1	まえがき	91
5.4.2	測定装置	91
5.4.3	測定方法	92
5.4.4	塗膜性能（防食性）とインピーダンス	92

1. 研究の概要

船舶のバラストタンクの腐食原因及び防食法に関する研究の五ヶ年計画の第3年目として次の研究が実施された。

腐食原因に関する研究としては、前年度に引続き小型の裸鋼試験片及びタールエボキシを塗布した塗装試験片を用い、約260日の長期間にわたって一定の漲排水周期の下に、繰返し応力の大きさ、繰返し速度を変化させてこれらが腐食速度に及ぼす影響を調査した。また、バラストタンクは主として空槽時の環境下で腐食が促進されるといわれているが、電気防食を行なった場合の鋼板面に生成されるエレクトロコーティングの生成条件と防食性について調査した。

防食対策としては、バラストタンクの内面全面にわたり良質の塗料で塗装することが最も効果的と考えられるが、それには造船所の設備、塗装工の養成、工期の延引、船価の上昇等多くの問題があり、現状では全面塗装を実施するのが困難な状況にある。従って全面塗装に代る有効な方法を見出す必要があり、その方法として電気防食、電気防食と塗装の併用、イナートガスの利用等が考えられる。今年度の防食対策の研究として塗装の効果や上記の方法の基礎的な研究が実施された。

- (1) 小型試験を用い応力サイクルと防食電流密度の関係を調査した。
- (2) 鋼製タンクを用い、防食電流密度に及ぼす漲水率、漲水期間の影響を調査した。
- (3) タンク体積と表面積の比を変化させた防食試験を行ない、この比が防食電流密度に及ぼす影響を調査した。
- (4) 燃焼排ガスをバラストタンクに充填した場合の防食効果を調査するため、鋼製タンクを用いてガスの組成とバラスト条件を変えて実験を行なった。
- (5) バラストタンク天井部の腐食を定量的に調査するため、鋼製タンクを用いて一定のバラスト条件の下に温度及び温度サイクルと腐食速度の関係を調査した。
- (6) 塗装欠陥部の防食対策として、電気防食を併用した場合の、最適下地処理法を調査するため、4種類のショブプライマーを塗装した試験片に繰返し応力を作用させ腐食状況を調査した。

上記実験の外に実船試験としてタンカーのバラストタンク内に温度計及び照合電極を取り付け、日本ーベルシャ湾の往復航海中のバラストタンク内の温度、電位を計測した。また9隻のタンカーあるいは鉾石船のバラストタンク内の一部に試験塗装を施し塗装の劣化状態を調査した。この試験は引続き継続され経年変化を調査する計画である。

上に述べた各試験の詳細及びその結論については各章を参照されたい。

2. 腐食原因に関する研究

2.1 応力（ないし歪）の変化の影響の実験

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を使用し、第1年度、第2年度試験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予め試験温度に保温した海水を使用した。その他装置の詳細は既報告^{1).2)}を参照されたい。

(2) 試験条件

応力付加条件を0, 0.05% ($10\text{kg}/\text{mm}^2$), 0.1% ($18\text{kg}/\text{mm}^2$), 0.2% ($27\text{kg}/\text{mm}^2$), 0.7% ($1\text{kg}/\text{mm}^2$) 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℃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）から機械仕上げ後（VV）トリクレンで脱脂洗浄して重量および板厚計測（針先0.03mm ポイントマイクロメータ先端角度30°）した裸鋼試験片とこれにタールエポキシ塗装を塗布した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. 1

塗 料	タールエポキシ (ビスコン H・B)	鉛 筆 硬 度	F - 2 H
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	2 5 0 μ	乾 燥 時 間	4 8 日 乾 燥 後 1 0 日 間 自 然 放 置

2.1.2 試験結果

図2.1.1, 図2.1.2に試験後半（約200～250日迄）の裸鋼材の自然電位^{*1}の変化を示した。試験開始の自然電位は1サイクル目の張水期間の最後には-770mV程度まで低下しているが、徐々に貴側にずれ最終サイクルでは-600～-680mV迄上昇した。しかし、特に繰返し応力付加回数（速度）の影響は認められない。

図2.1.3に腐食速度におよぼす繰返しひずみ速度の影響を腐食時間をパラメータにして示した。2回/dayの繰返しひずみの長期試験は行っていないけれども、この図から繰返し速度の2回/day～10回/dayの変化は長期間後の腐食速度に相違を与えないとみてよさそうである。

繰返し速度の増加は材料表面からの腐食の促進の外に新しい腐食面を生じる疲労破壊という異なった次元の現象を伴うので腐食の観察に当っては注意を要する。本試験でも10回/day 繰返しひずみ率0.7%のものは180日試験（繰返し数1800回）後に試験片にクラックを生じているのを発見した。クラックを生じた試験片とクラックを生じていない（5回/day, 0.7%ひずみ）試験片やその他ひずみを与えてもクラックを生じていない試験片との間の腐食の面相には甚だしい相違がみられ、クラックを生じた試験片の表面は均一化する傾向を示した。これは多分クラックの

²⁾
*1 試験開始から約74日迄の自然電位の変化は前報に記したので省略した。

*2 180日後の調査でクラックを発見したもので、実際はそれ以前にクラックは発生していることになる。

発生によって表面歪が殆んどなくなったためと考えられる。

図 2.1.4 は図 2.1.3 を別の角度からまとめたもので、ひずみの影響の表われる時間はひずみの大きさ、ひずみ速度によって異なることを示している。即ち、ひずみの大きい程腐食におよぼす影響は早く表われ、特に弾性変形領域のひずみでは予想に反して繰返し応力回数の多い方が腐食は少なくなることを示している。弾性変形領域内で繰返し応力回数の多い方が腐食が少ない点については実験数が少なく、この結果のみから早急に結論を出すのは危険でありもう少し詳細な実験をして確認したいと考えている。図 2.1.5 はひずみなしの試験片の腐食量を 1 としてひずみ付加試験片の腐食量との比をとったもので、この図から腐食はあるひずみ（この値の下限は 0.05%²⁾までしか実験していないので不明であるが鋼の弾性域内）以上の付加によって加速され始め、この腐食の加速され始める時期（Corrsion Starting Point）はひずみの大きさによって異なり腐食は鋼の弾性域内のひずみであっても時間がたつと塑性変形ひずみを与えた場合と略同じ大きさに近づいていく傾向を示していることが判る。

この図はひずみ 0.05% のような通常のバラストタンクではおこり得る程度のひずみの存在においても 1 年後には 4 倍の腐食の加速を生じ、1 年数ヶ月後では鋼の弾性限界以上の応力の付加されたと同じ腐食速度に近くなることが予想される。

実船においてどの程度のひずみが、どの程度の回数（速度）で起っているのか不明であるがこの試験結果から低サイクルのひずみはたとえ僅かであっても長期間後には腐食に対して重要な因子となる事が明らかになった。

塗装鋼の腐食結果を図 2.1.6 に示した。塗膜のクロスカット部に沿って腐食が進行しているもののひずみ繰返し数の増加による腐食促進の効果は裸鋼の場合と同じく特に認められなかった。むしろ、いくらか繰返し数の増加は腐食をおだやかにしている感じさえた。塗装仕上りのバラツキ、クロスカットの入れ方など人為的な相違も腐食結果に影響すると思われる、腐食の評価方法（表面粗さの数値的表示等）も入れた試験方法そのものの検討が必要であろう。クロスカットの入っていない完全塗装鋼は 0.7% のひずみでも 80 日後の試験では既研究結果と同じく特に塗膜の剝離を認めなかったが 180 日では 10 回/day、0.7% で塗膜劣化が認められた。

2.1.3 まとめ

海水の張排水の繰返されるバラスト部分を想定した腐食環境での繰返し歪数の影響を調べた結果を得た。

- (1) 塑性変形域 0.2% 以上の歪では繰返し数 2 回/day ~ 10 回/day の相違による腐食速度に変化はない。但し、10 回/day 繰返し歪 0.7% の試験片は 180 日後にクラックを生じ、クラックを生じた試片の腐食面は均一化する傾向を示した。
- (2) 弾性域内のひずみ 0.05 ~ 0.1% では当初の予想とは逆に 2 回/day よりも 5, 10 回/day と数の多い方が腐食速度は小さくなる結果を得た。然しながら試験回数の少ない事、低ひずみレベルでの試験の困難な事等からこの結果から早急に結論を出すのは危険であり、もう少し詳細な実験が望ましい。
- (3) 予歪は定常状態の腐食に特に影響しない。
- (4) たとえ僅かな繰返しひずみ（応力）であっても長期間後には腐食を促進するので、注意を要する。

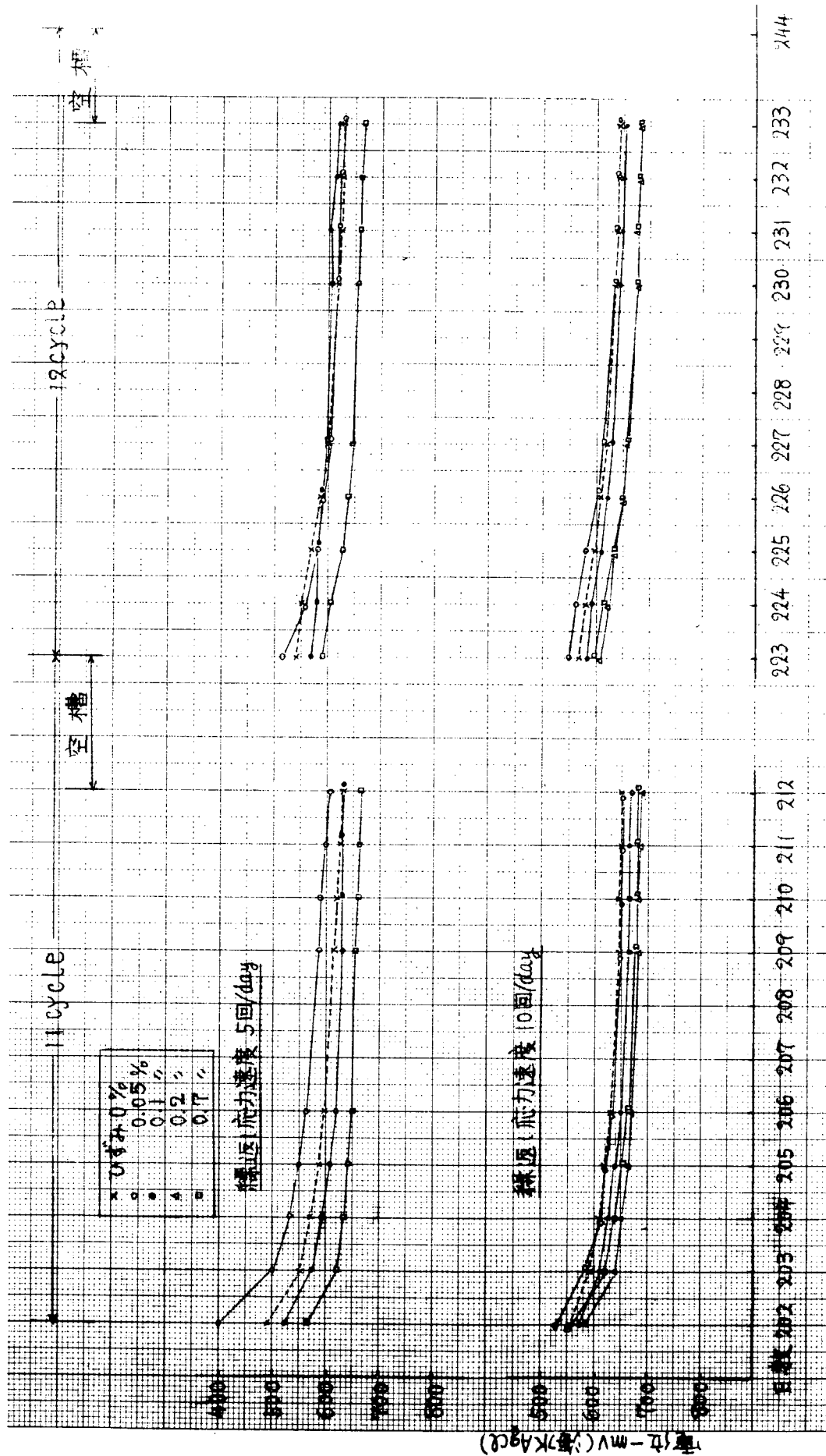


図 2.1.1 繰返し応力の付加された裸鋼材電位の経時変化

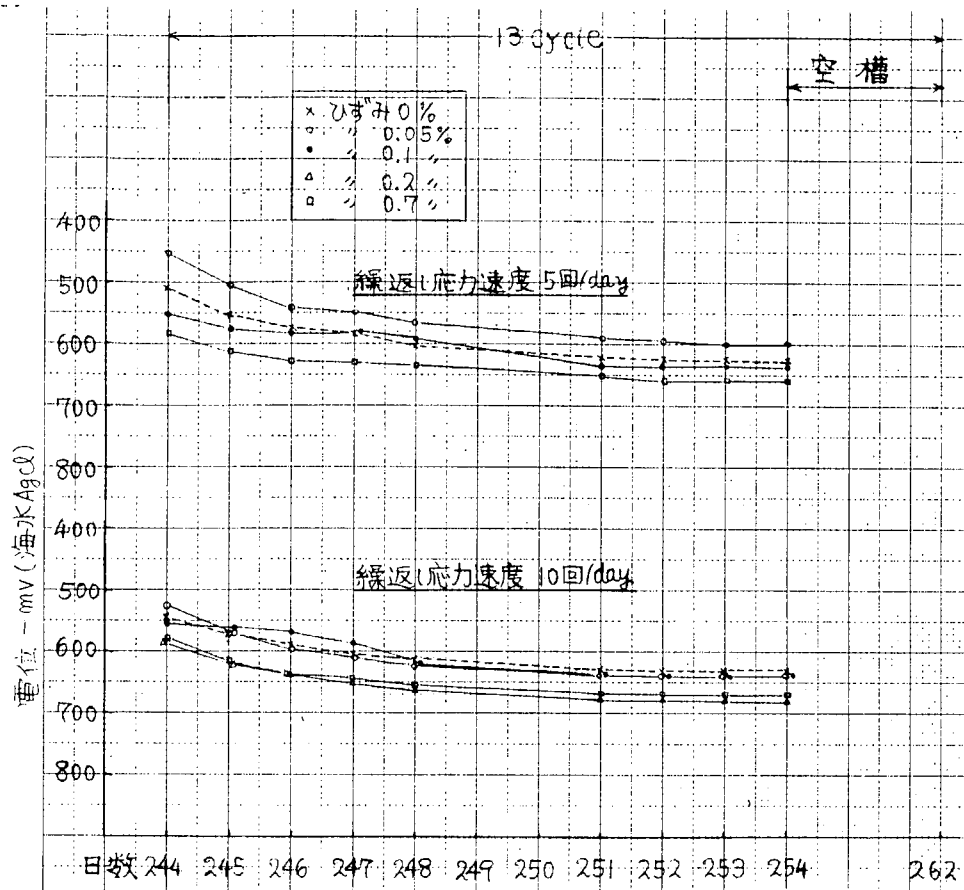


図 2.1.2 繰返し応力の付加された裸鋼材電位の経時変化

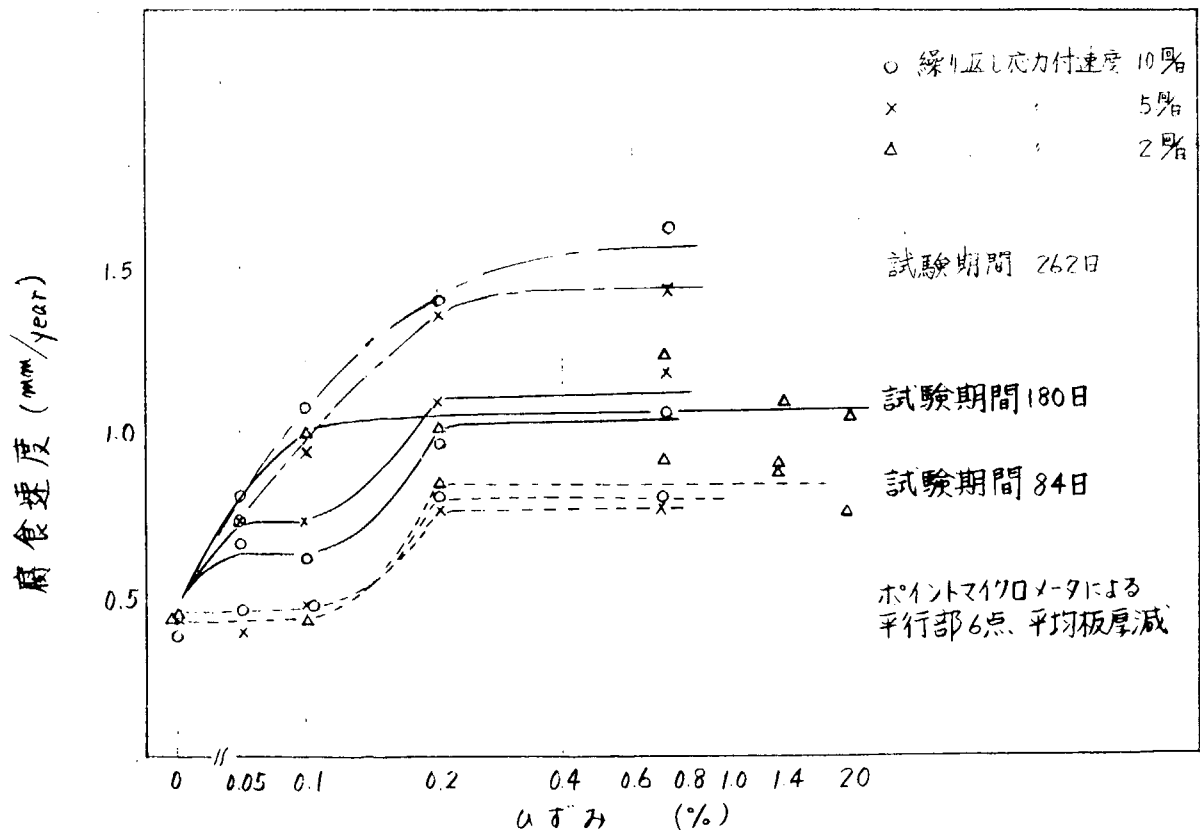


図 2.1.3 鋼の腐食におよぼす繰返し応力（ひずみ率）の影響

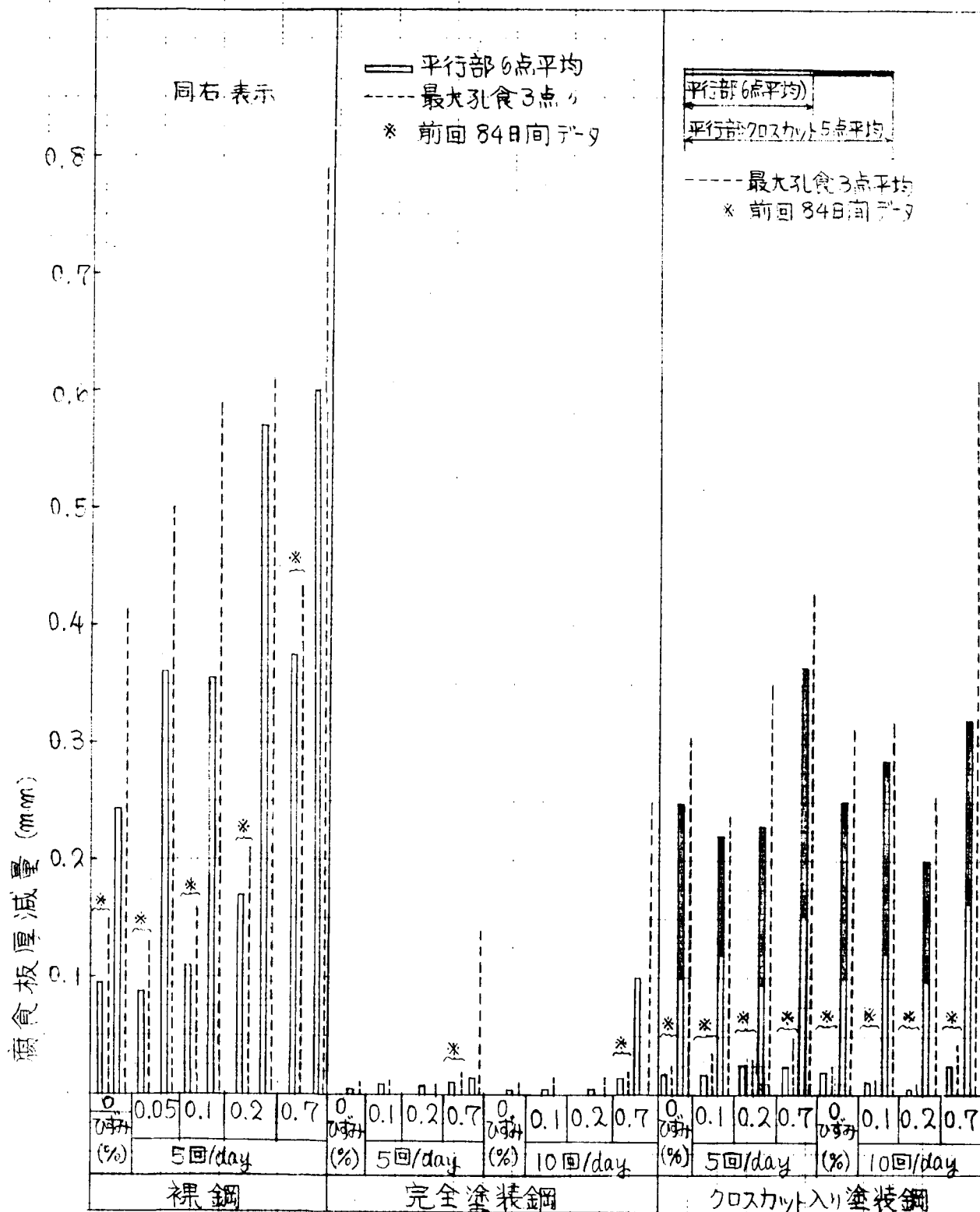


図 2.1.6 応力 (ひずみ) 変化に対する塗装鋼の腐食減量

(ポイントマイクロメーターによる182日間および84日間データ)

2.2 水質の影響調査

漲排水を繰返すバラストタンクの腐食は主として空槽時の腐食に支配される。この種の環境下で電気防食の効果を高めるには漲水中に生成するエレクトロコーティング（E.C）が空槽時に防食性を発揮し、これが持続することである。

昭和49年度はこのE.Cの生成条件と防食性について調査した。

2.2.1 調査項目

- (1) E.C. 生成電位と防食性
- (2) E.C. 通電量と防食性

2.2.2 調査方法

- (1) 900×900×800 mm槽内に試験片100×50×3tを80×50mm片面を残しエポキシ樹脂にて被覆しこれを-0.9Vまたは-1.0Vにて8日間通電した上、50℃湿度100%恒温槽内にて4日間または50℃乾燥器内にて4日間放置した後、25～30℃の人工海水中にて腐食速度比を計測し、8日間後に試験片を引上げ重量減を求めた。
試験順序は下記の通り

E.C.生成(8日)	暴 露	腐食速度測定
-0.9V設定	湿度 0%, 50℃ または 湿度 100%, 50℃	25～30℃ 人工海水中
-1.0V設定		
← 8日 →	← 4日 →	← 8日 →

重量減測定

- 電位は海水塩化銀電極基準
- 腐食速度測定後引上げ重量減測定

- (2) (1)項と同様槽内に同寸法の試験片を用いて-1.0V設定にて、日数を変えて通電したものについて温度50℃、湿度100%の空槽条件、-1.0V設定、通電条件にて、各8日間放置しこれを1サイクルとして3サイクル経過後、重量減を計測してE.C.の防食性を比較した。

試験順序は下記の通りとした。

表 2.2.1 試験順序

No.	E.C.生成条件	空 槽	防 食	空 槽	防 食	空 槽
A	-1.0V設定 24日	50℃ 湿度 100%	-1.0V 設定	50℃ 湿度 100%	-1.0V 設定	50℃ 湿度 100%
B	-1.0V設定 16日					
C	-1.0V設定 8日					
D	-1.0V設定 4日					
		← 8日 →	← 8日 →	← 8日 →	← 8日 →	← 8日 →
	← 1 cycle →	← 2 cycle →		← 3 cycle →		

重量減計測

2.2.3 試験条件及び計器

- 試 験 片 SS材、寸法100×50×3t (mm) 80×50mm 片面を残しエポキシ樹脂にて絶縁塗装。
- 表 面 処 理 エメリーNo.160にて研磨、脱脂、洗浄後使用
- 試 験 液 人工海水 JIS K-5631 PH8.0に調整

陽 極 Zn 陽極 13φ×100mmℓ 1本
定電位装置 北斗電工製 HA-101, HA-111
腐 食 計 北斗電工製 HK-101
照 合 電 極 海水塩化銀電極

2.2.4 測定結果

(1) 腐食速度の測定結果を図 2.2.1～図 2.2.3 に、各条件下での腐食減量を表 2.2.2 に示した。

50℃ 乾燥条件下では -0.9V に設定した試片と -1.0V に設定した試片の腐食減量に大差がないが、-1.0V に設定した試片の減量がやや少ない。

50℃ 湿度 100% 条件下では設定電位の差による影響が大きく表われており、-1.0V に設定した試片は -0.9V に設定した試片の約 $\frac{1}{8} \sim \frac{1}{10}$ の減量を示した。

腐食速度の測定結果よりみると E.C. の効果は海水浸漬後に急増する段階を抑制する点に表われている。

-0.9V 設定、-1.0V 設定 8 日間の通電量を比較すると前者が 5.42 AH/m^2 、後者が 5.25 AH/m^2 となり前者は後者の約 $\frac{1}{10}$ である。一般に防食性の高い E.C. は電気量 $60 \text{ AH/m}^2 \sim 100 \text{ AH/m}^2$ といわれているが、この点からみても -0.9V 設定試片の E.C. は防食性が低いことが窺える。

(2) (1) 項の試験結果より

a) -1.0V 設定による E.C. が防食性が高い。

b) 50℃, 100% 湿度条件は E.C. 防食性の比較に適している。

以上のことが判明したので上記条件を満たした上で通電々気量の防食性に及ぼす影響を調査した。

各 E.C. 生成条件下での各サイクル毎に計測した重量減を通電々気量に対し図示すると図 2.2.4 の如くなる。

通電時間と通電量は定電位設定としたため正確には一致していないが A 試片を除くといずれも 3 サイクル目の腐食量が急増している。A 試片の電気量は 66.9 AH/m^2 と他のものに比較して特に多く、この試片が 3 cycle 目に於ても防食性が高い点からみても 60 AH/m^2 の電気量が必要であろう。

各試片に生成した E.C. の分析結果、各サイクル毎の電流低減状況を図 2.2.5、図 2.2.6、図 2.2.7 に示した。

図 2.2.5 に示すごとく電気量の増加と共に E.C. 内の Ca 成分は増加しているが Mg 成分はほぼ一定であった。

Ca/Mg をみると B 試片のみその比が異常に高い。このことは図 2.2.7 の 1 cycle 目と「電流密度と Ca/Mg の関係」を示す図 2.2.8 を比較すれば B 試片のみ平均電流密度が他のものに比較して低いことに原因していると考えられる。

電気量からみると、B 試片の腐食減量が D 試片の腐食減量を上まわり逆の結果となっている。このことは E.C. の防食性は電気量と共に Ca/Mg 比に左右されることが考えられる。

ま と め

(1) E.C. の防食性は 50℃ 乾燥条件下では、ほとんど低下しないが 50℃ 100% 湿度条件下では低下が著しい。

(2) 50℃ 100% 湿度条件下で有効な E.C. は -1.0V 設定にて電気量 60 AH/m^2 以上を必要とする。

(3) E.C. の防食性は通電電気量と共に E.C. の組成特に Ca/Mg 比に影響されることが推定された。

表 2. 2. 2 設定条件による腐食減量

試片 名称	設 定 電 位 (通電日数)	暴 露 条 件	海 水 中	重 量 減 (ϕ)
A	- 0.9 V	乾燥 50℃ 4 日	} 25 ~ 30℃ 8 日	0.0 2 8 3
B	- 0.9 V (8 日)	" " 8 日		0.0 2 6 7
C	- 1.0 V	乾燥 50℃ 4 日	} 25 ~ 30℃ 8 日	0.0 1 6 6
D	- 1.0 V (8 日)	" " 8 日		0.0 1 8 5
E	- 0.9 V	湿度 100% 50℃ 4 日	} 25 ~ 30℃ 8 日	0.4 3 4 3
F	- 0.9 V (8 日)	" " " 8 日		0.8 0 5 0
G	- 1.0 V	湿度 100% 50℃ 4 日	} 25 ~ 30℃ 8 日	0.0 8 5 8
H	- 1.0 V (8 日)	" " " 8 日		0.0 3 1 0
I	—	湿度 100% 50℃ 4 日	} 25 ~ 30℃ 8 日	0.2 2 4 8
J	—	" " " 8 日		0.3 5 8 1
K	- 0.9 V		} 25 ~ 30℃ 1 6 日	0.0 5 1 6
L	- 1.0 V (8 日)			0.0 2 2 4
M	—		25 ~ 30℃ 1 6 日	0.0 6 6 6

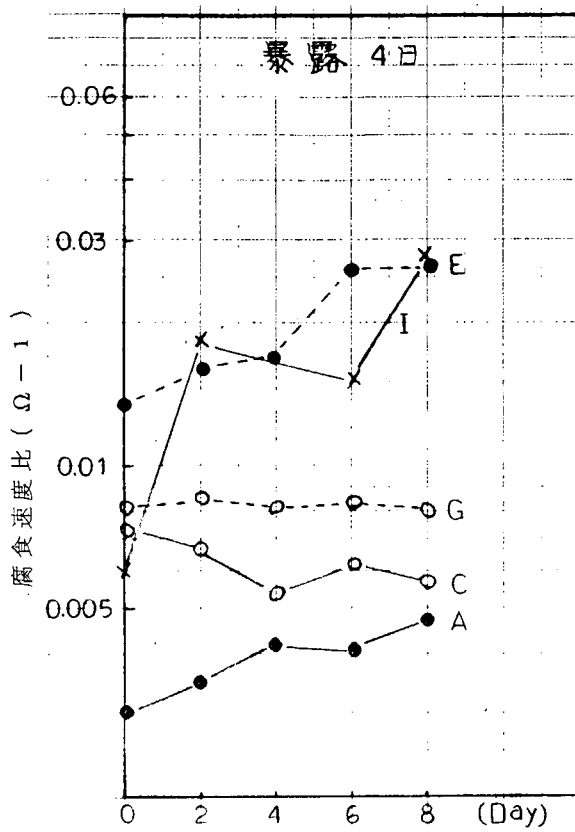


図. 2. 2. 1

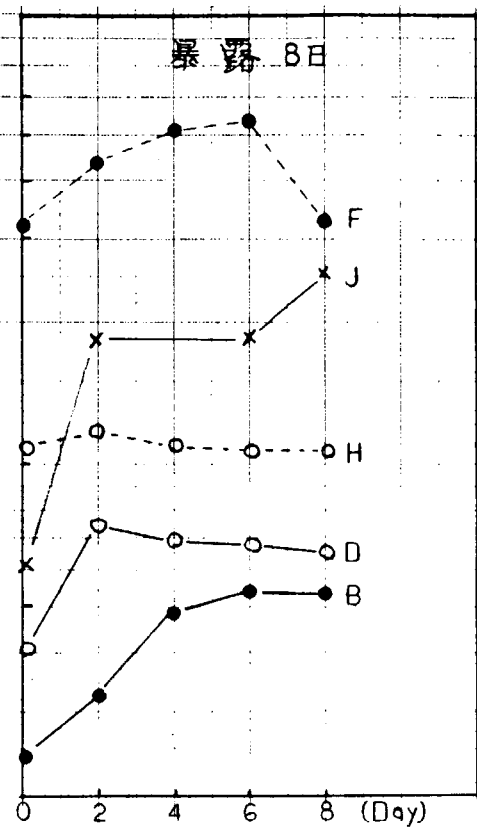


図. 2. 2. 2

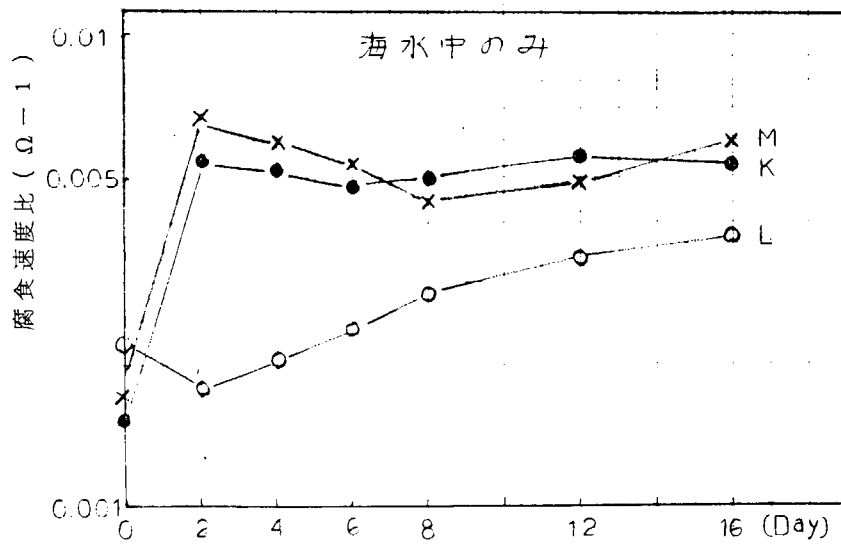
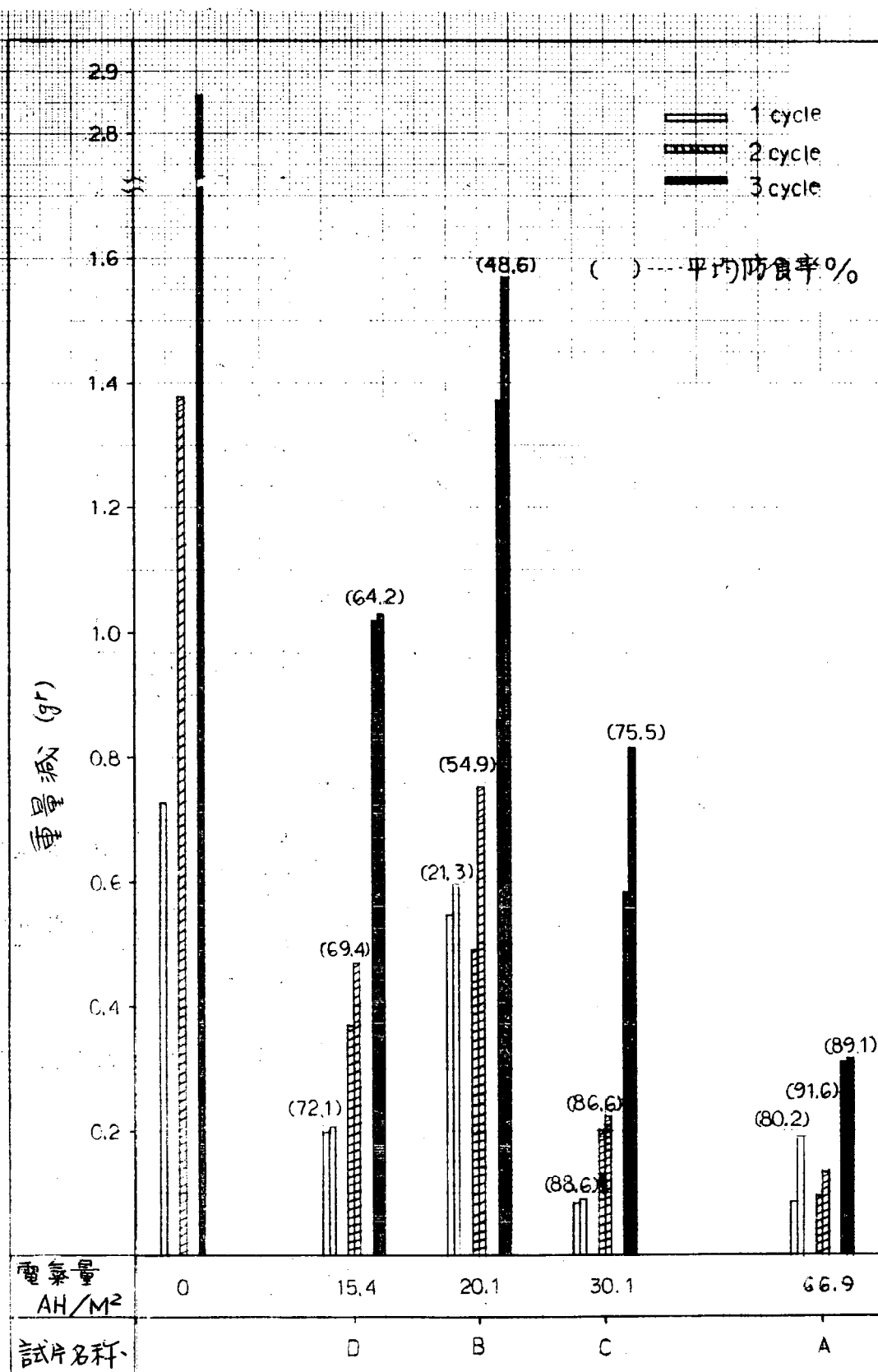


図. 2. 2. 3

エレクトロコート付試片の腐食速度

- -900 } 乾燥 50°C
- -1000 }
- -900 } 湿度 100%
- -1000 } 50°C
- x—x

試片名称は表 2.2.2. 参照



試片名称は
表 2. 2. 1 参照

図 2. 2. 4 通電々気量の違いによる重量減の差

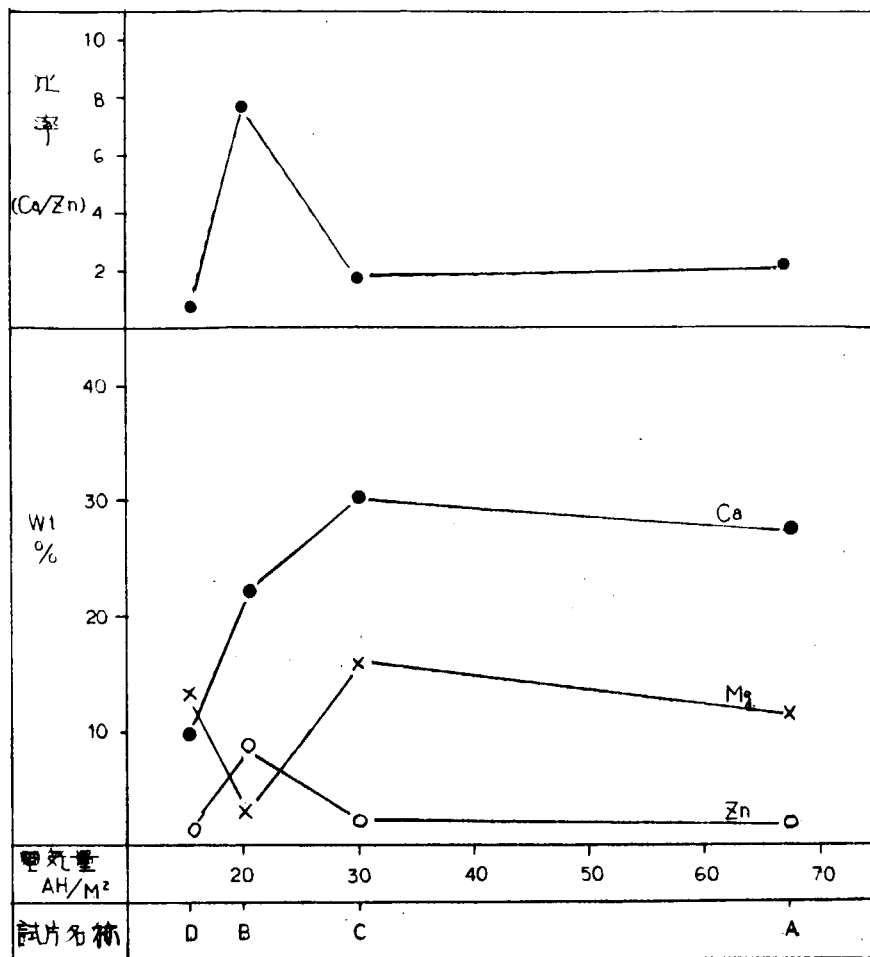
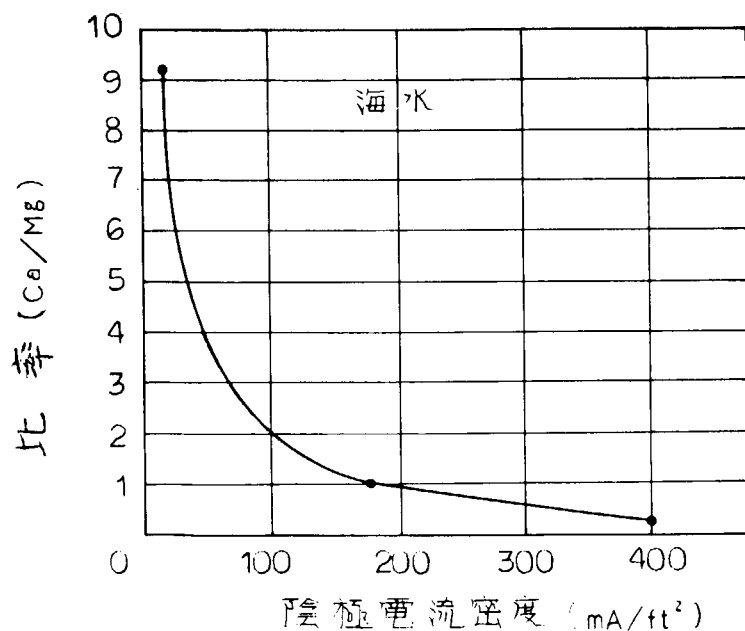


図 2.2.5 E.C. の組成



(H. A. Robinson : Corrosion, 2, 199^t (1946))

図 2.2.8 エレクトロコート組成比と
陰極電流密度の関係

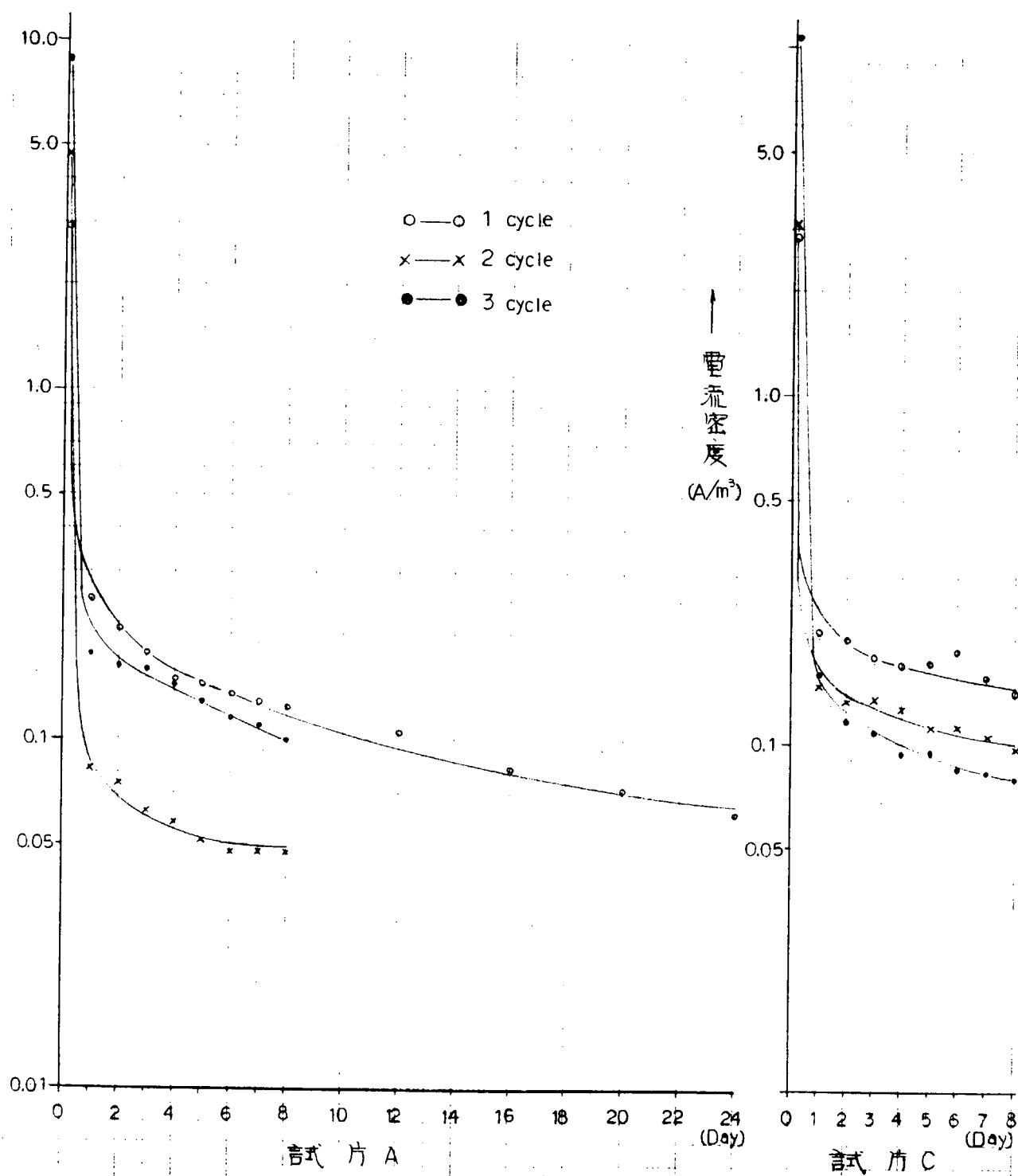
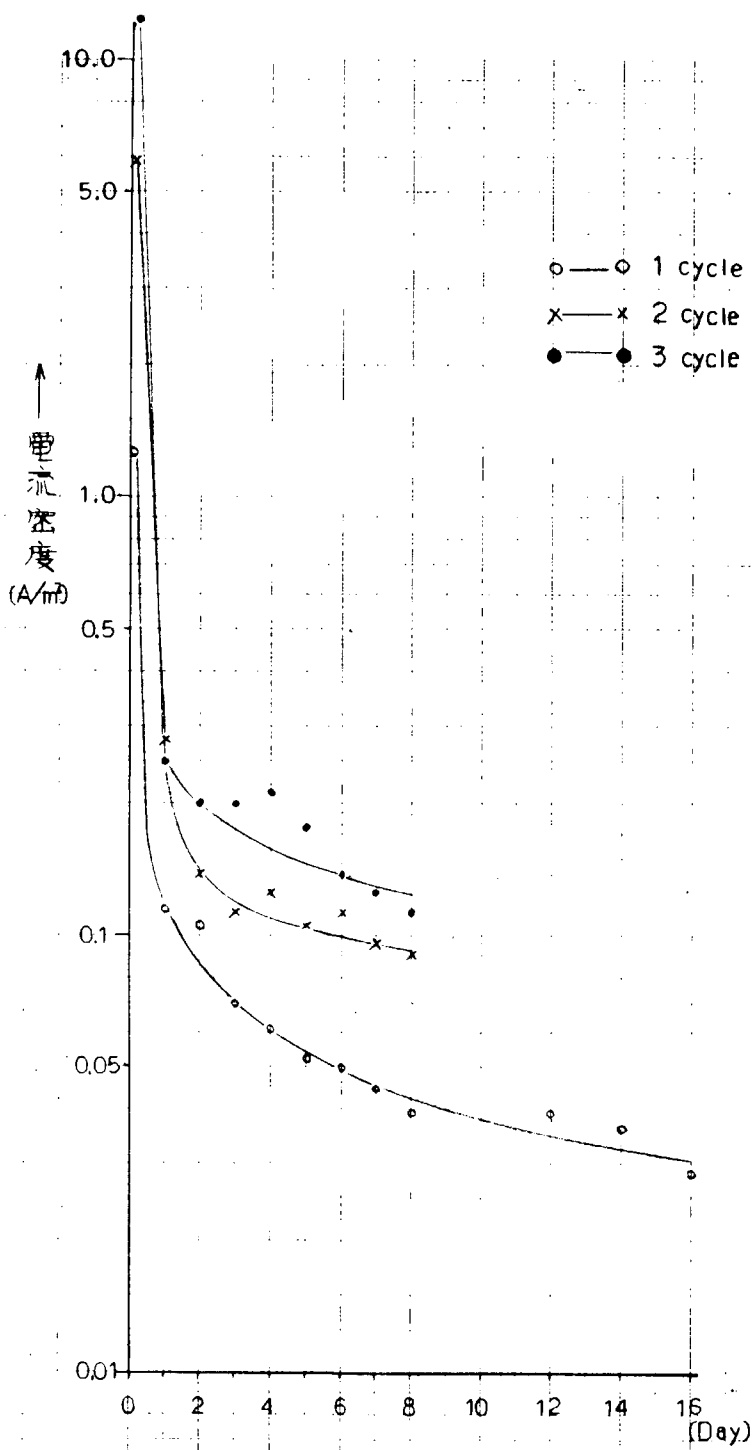
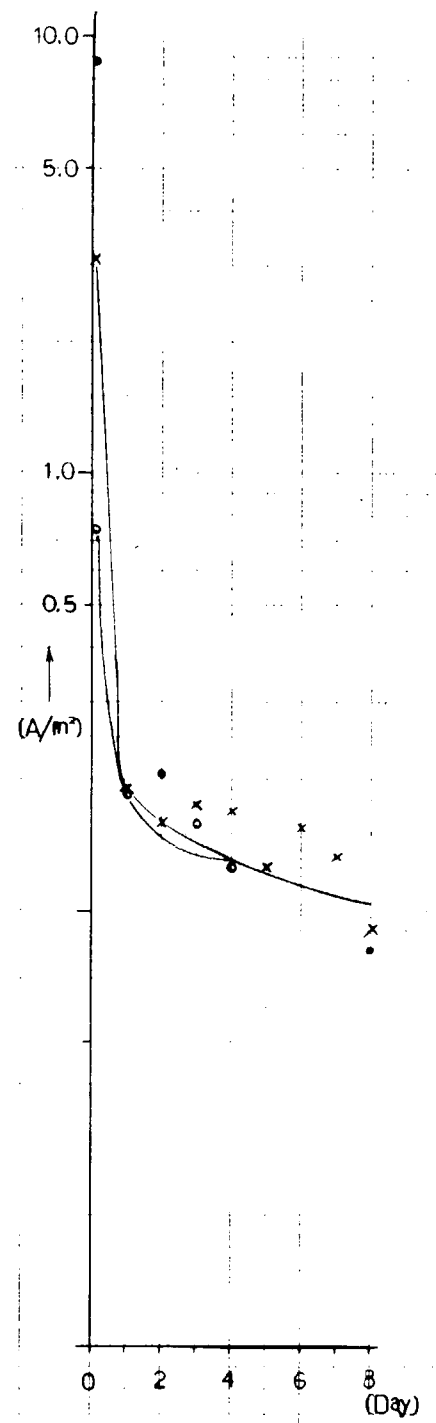


図 2.2.6 - 1.0 V 設定時の電流変化



試片 B



試片 D

図 2.2.7 - 1.0 V 設定時の電流変化

3. 防食方法に関する研究

3.1 防食電流密度におよぼす応力（歪）の影響の実験

3.1.1 試験装置と試験方法

2.1の腐食原因に関する研究で述べたように応力付加試験装置と試験片を使用してバラスト水の漲水期間中一定電流密度による防食を行なった。陽極は亜鉛を使用し、電気防食条件を 50 mA/m^2 、 100 mA/m^2 、 200 mA/m^2 とし、そのときの電位を参考のため記録した。

ひずみ付加条件を0, 0.05%, 0.1%, 0.2%, 0.7%（一部1.4%）定歪とし、繰返し回数を既研究の2回/day¹⁾に対して5回/day, 10回/day, の2種類とした。漲水期間10日間、空槽期間10日間、雰囲気温度40℃とした。

試験片および試験終了後の処置腐食速度の表示は既研究と同じく、ポイントマイクロメータによる板厚計測によった。

3.1.2 試験結果

(a) 表面状況

4 cycle（約80日）後の試験後の表面状態は第1年度報告（2回/dayのひずみ付加）で示したと同じく、防食電流 200 mA/m^2 の試験片の表面は灰白色を呈し、 100 mA/m^2 では白色および錆層の混合した色を 50 mA/m^2 では防食電流なしと略同じ褐色を呈していた。

(b) 電気防食の効果

繰返し速度のそれぞれ異なった鋼材の腐食速度と防食電流密度の関係を図3.1.1～図3.1.3に示した。図3.1.1は第1年度に試験した繰返し速度2回/dayの結果を比較のため示したものである。図3.1.4, 図3.1.5に防食率の変化を示した。これらの図は繰返し応力のある場合と繰返し応力のない場合では防食効果を上げるに必要な防食電流密度に大きな相違のあることを示している。しかし、繰返し回数が2～10回/dayに変化しても特に繰返し回数による所要防食電流の変化は見られない。むしろ、0.05%の低ひずみであっても、充分な電気防食効果を上げるには、 200 mA/m^2 程度の防食電流が必要であることを示している。図3.1.6は平均防食電流密度 100 mA/m^2 のときの鋼材の腐食におよぼすひずみの影響を示したもので、 100 mA/m^2 での防食時の腐食とひずみとの間には略指数関係が成立する。

(c) 電位の経時変化と分極曲線

図3.1.7～3.1.10に各電流密度による電位の経時変化を示した。図において点線で示したひずみ0%の計測結果は2.1腐食原因の研究のところで実施した結果を記入したもので、浸漬、空槽期間が、試験時季の違いから若干違っているのに注意されたい。電位は第1周期では防食電流密度 50 mA/m^2 でも防食電位 -780 mV に1日で達しているが、第2周期目からは 50 mA/m^2 では防食電位に達せず、ひずみなしの場合は 100 mA/m^2 で防食充分の電位にすみやかに保持されるのに対して、ひずみが付加された場合は 100 mA/m^2 で浸漬後半にやっと防食電位に達する状態である。 200 mA/m^2 では電位はひずみ付加の影響を受けることが少なく防食電位以下に常時保持された。

これらの電位挙動と図3.1.1, 3.1.2に示した腐食の実情はよい一致を示し、電位挙動からも 100 mA/m^2 の電流密度ではひずみの存在する場合防食は完全でないことを示した。

図3.1.11～図3.1.14は、図3.1.8～図3.1.9に示した電位の経時変化から、各漲水期間における2日目、8～9日目の電位を抜き出してひずみをパラメータに試験片の電流密度－電位の曲線を求めたものである。この図から一定電位に鋼の電位を保持するのに必要な電流密度を知ることができる。この図を使用して、ひずみなしの試験片を防食電位（ -800 mV ）に保持するのに必要な電流密度を1として各ひずみの付加された試験片に必要な防食電流の比を示したのが、図3.1.15である。ひずみの負荷による防食電流密度の増加は、2周期より次第に表われており、防食電流密度の増加にひずみは大きく関与していることがわかる。但し、ここで得られた図3.1.11～図3.1.14に見ら

れる電位電流曲線、或は、図 3.1.15 のひずみと所要防食電流密度増加の関係は第 1 年度報告で述べたようなひずみパターンをもった試験片の場合であって、この電位電流曲線の形はひずみ分布（試験片形状等）で異なるから実船のような複雑なひずみパターンを持つと考えられるものに対して如何程の防食電流密度の増加（平均防食電流）が必要であるかは張排水周期との関係も含めて今後考慮さるべき事項である。

図 3.1.11 ～図 3.1.15 の結果から防食に必要な電位を基準に考えれば、ひずみの付加される腐食環境でも略 -1000 mV の値を防食電位とすれば充分であることが推察される。

3.1.3 ま と め

鋼に付加されるひずみの繰返し数を 2 回/day, 5 回/day, 10 回/day, と変えて、防食電流密度におよぼす影響を調べた。その結果

- (a) 特に繰返し数の変化は所要防食電流密度に影響を与えない。
- (b) 0.05% ひずみでも充分な防食効果をあげるには、 200 mA/m^2 の電流密度を必要とする。
- (c) 無防食のときの腐食におよぼすひずみの影響は低ひずみ（0.05%）のときは腐食効果としてあらわれるのに相当の日数（200 日、図 2.1.5）を要するのに対して電気防食を行なったときは、短时日（図 3.1.1 ～ 3）にその影響があらわれる。

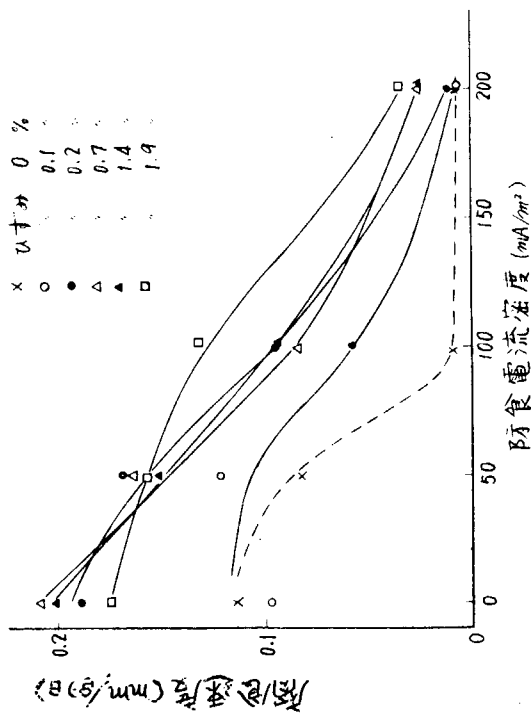


図 3.1.1 鋼材の防食電流密度と腐食速度
(繰返し応力速度 2 回/day, 平行部 6 点平均値)

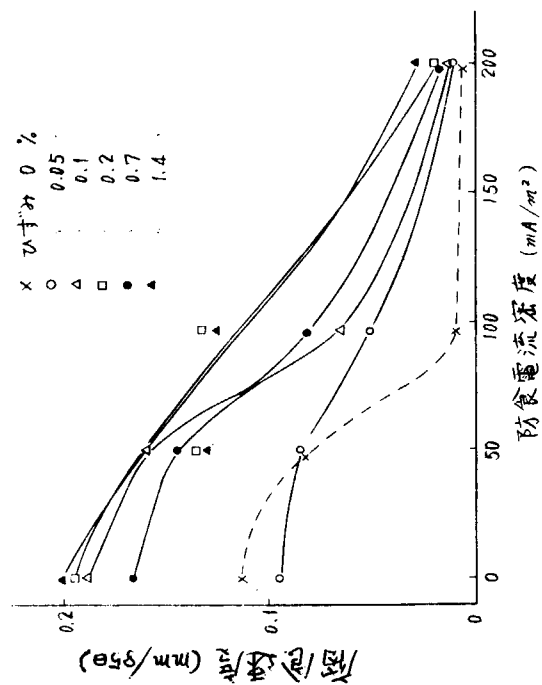


図 3.1.2 鋼材の防食電流密度と腐食速度
(繰返し応力速度 5 回/day, 平行部 6 点平均値)

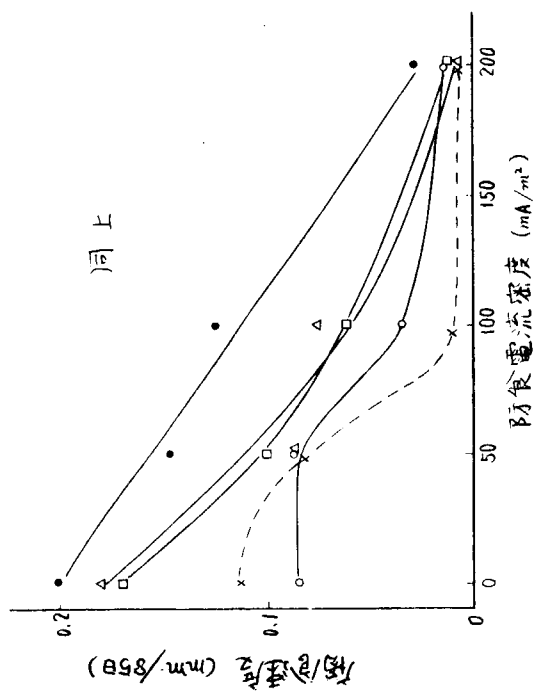


図 3.1.3 鋼材の防食電流密度と腐食速度
(繰返し応力速度 10 回/day, 平行部 6 点平均値)

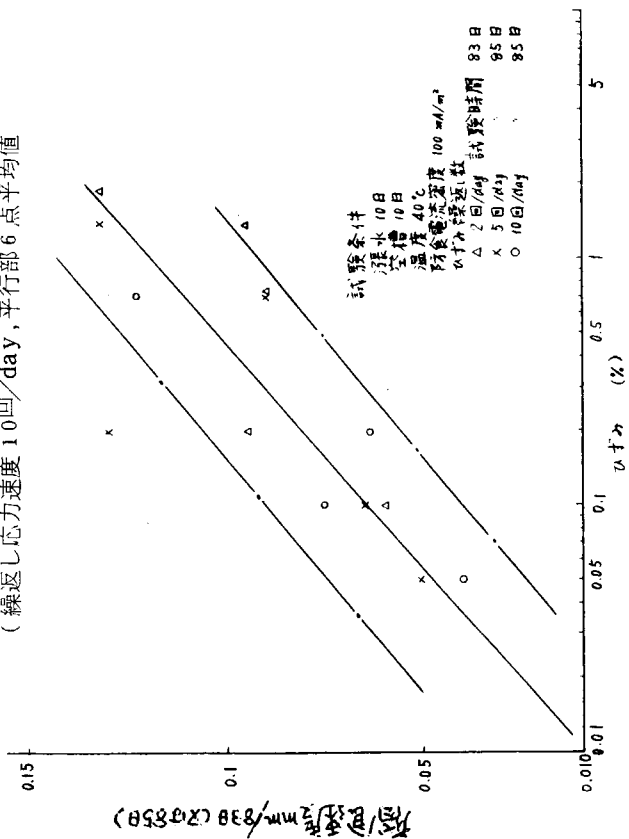


図 3.1.6 腐食速度におよぼす塩分濃度の影響

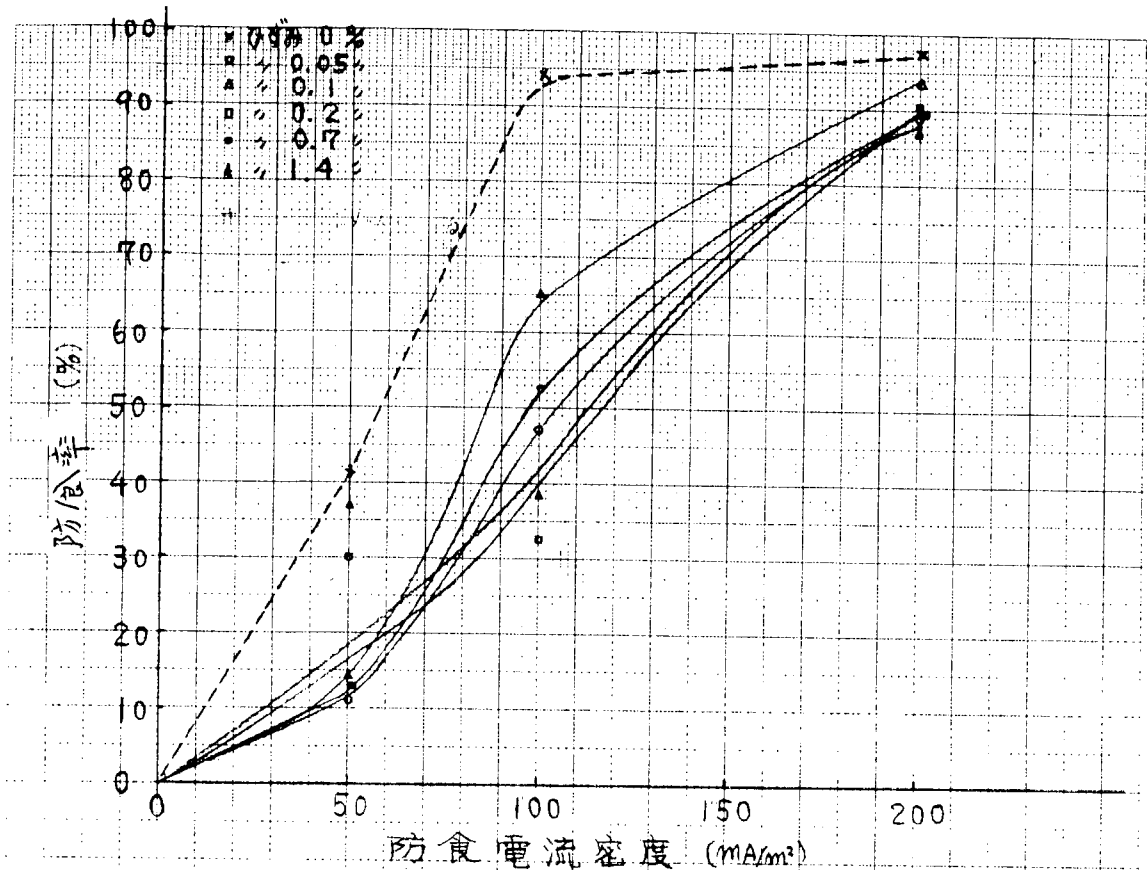


図 3.1.4 防食率におよぼす電流密度とひずみの影響
(繰返し応力速度 5 回/day, 応力平行部 6 点平均より求む)

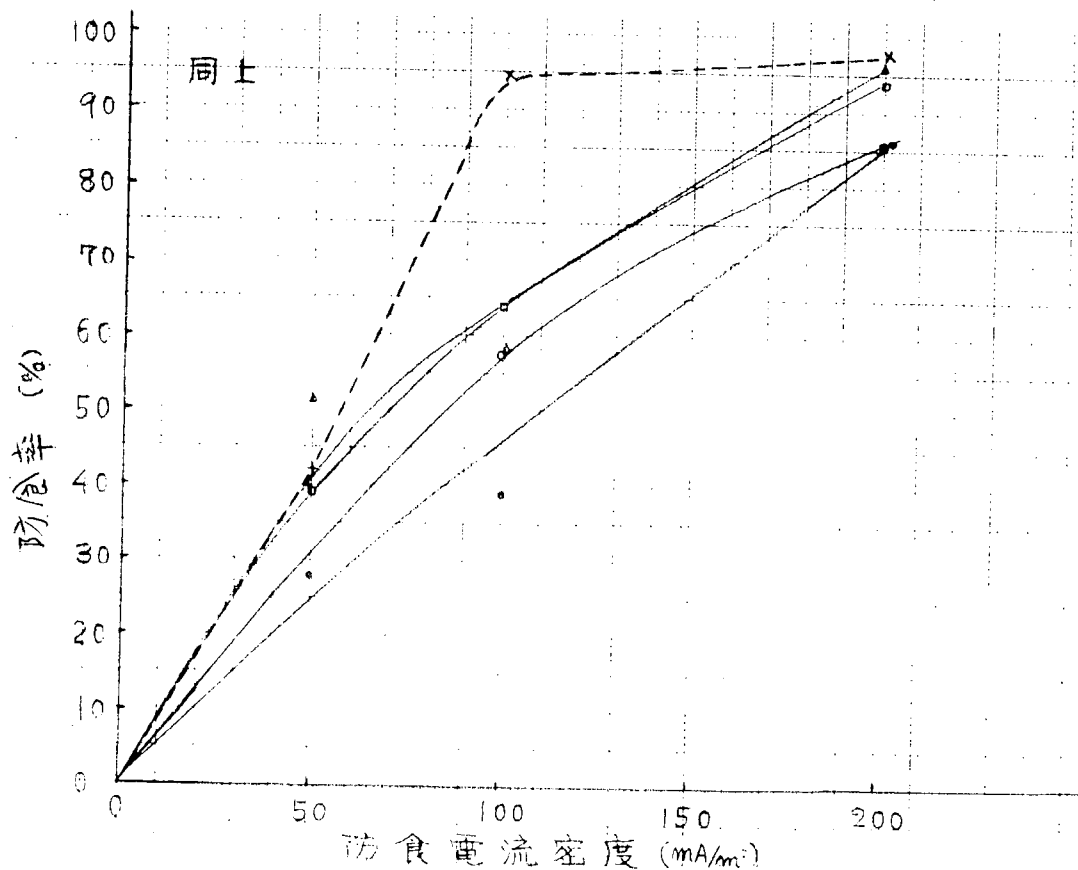


図 3.1.5 防食率におよぼす電流密度とひずみの影響
(10 回/day, 応力平行部 6 点平均より求む)

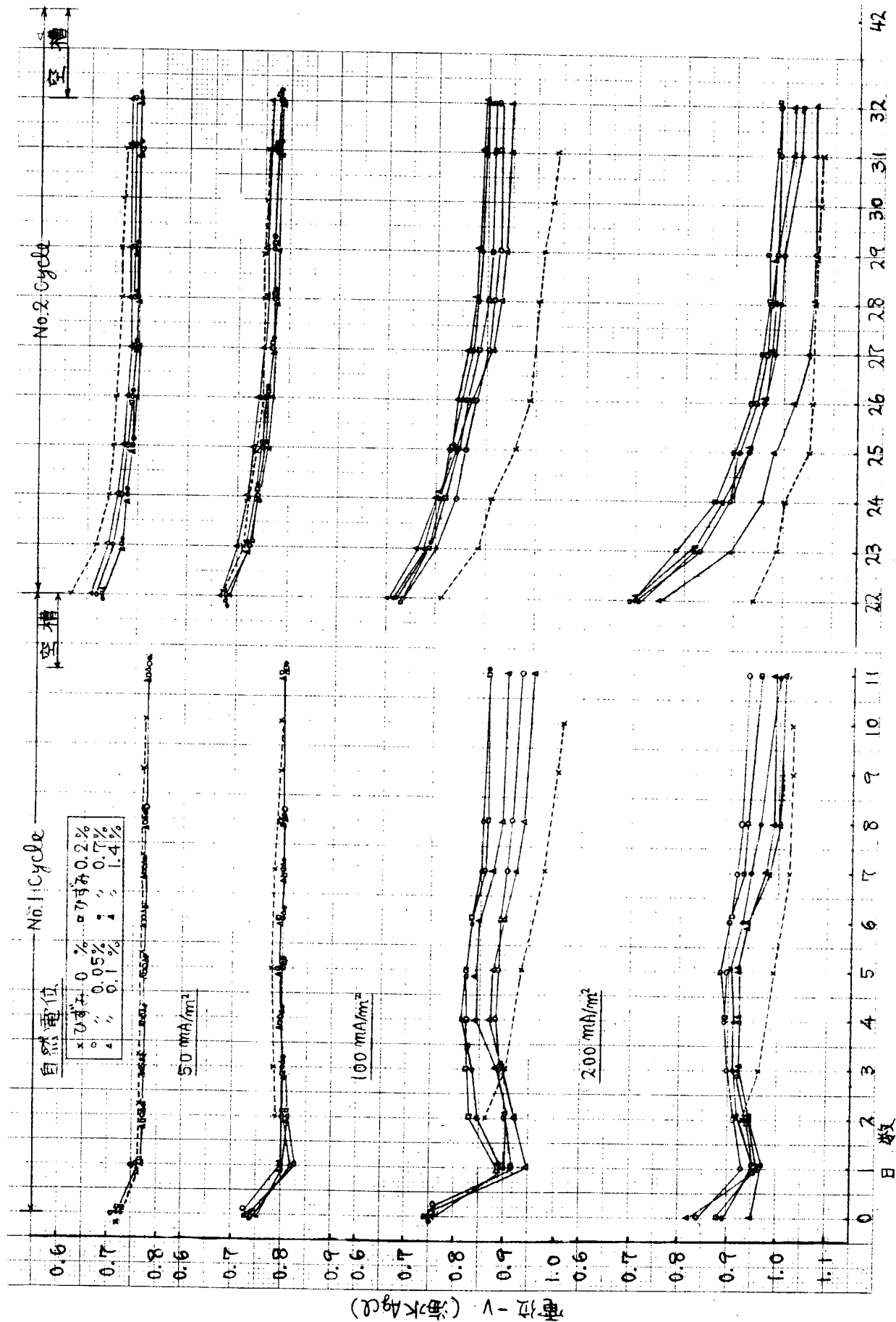


図 3.1.7 繰返し応力付加時の防食電流密度による鋼材電位変化 (繰返し応力速度 5 回/day)

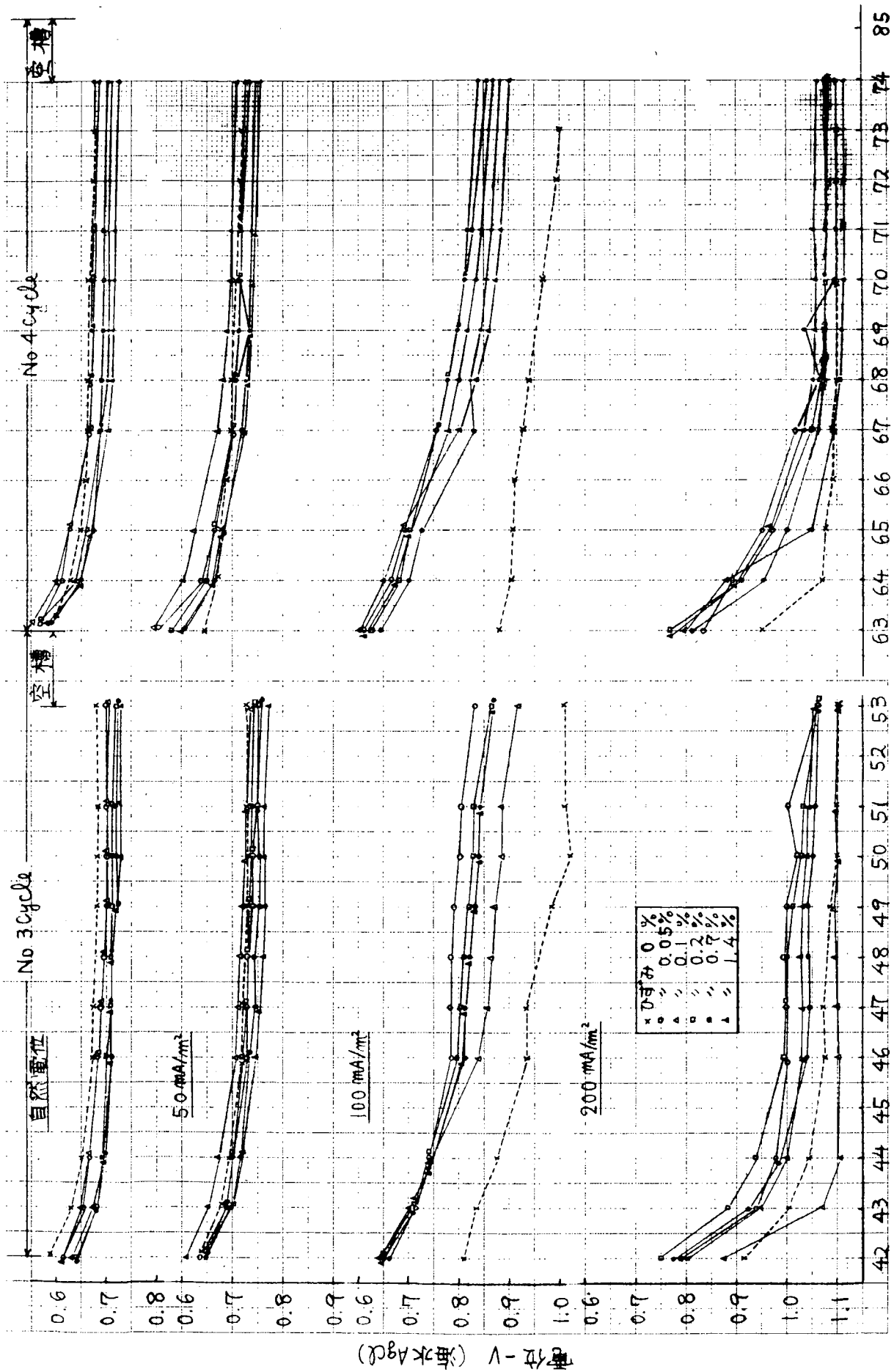


図 3.1.8 繰返し応力付加時の防食電流密度による鋼材電位変化 (繰返し応力速度 5 回/day)

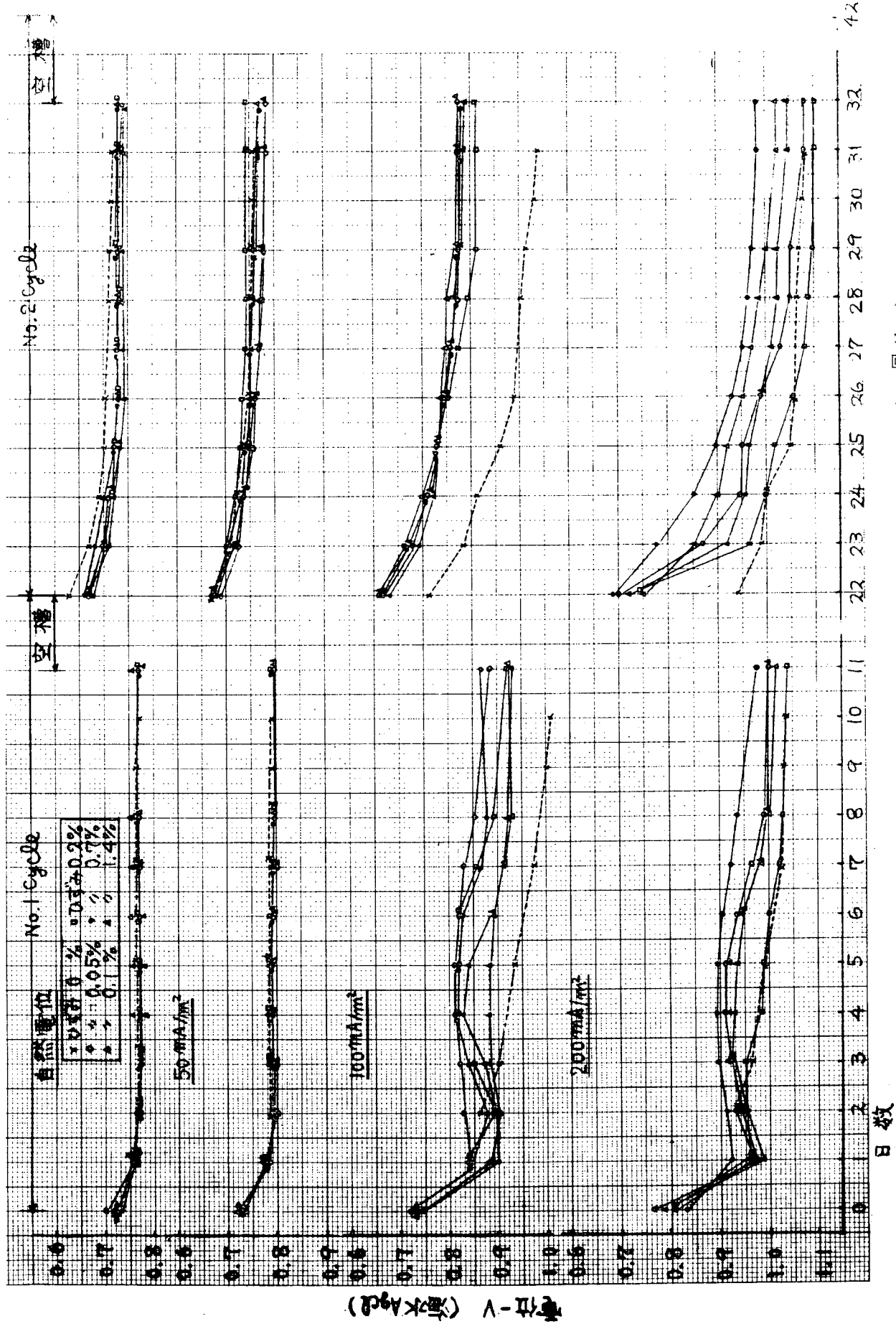


図 3.1.9 繰返し応力付加時の防食電流密度による鋼材電位変化 (繰返し応力速度 10回/day)

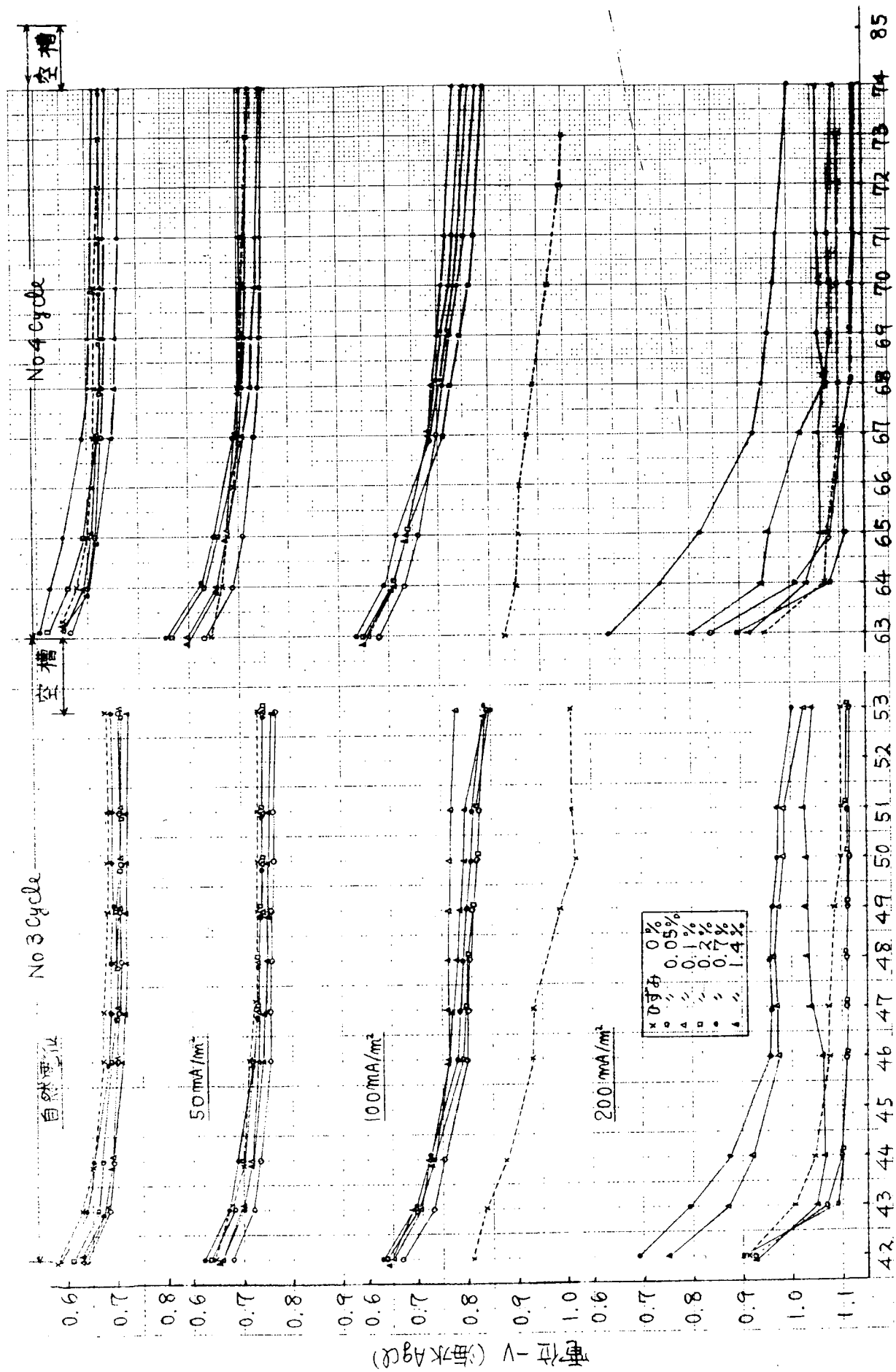


図 3.1.10 繰返し応力付加時の防食電流密度による鋼材電位変化 (繰返し応力速度 10回/day)

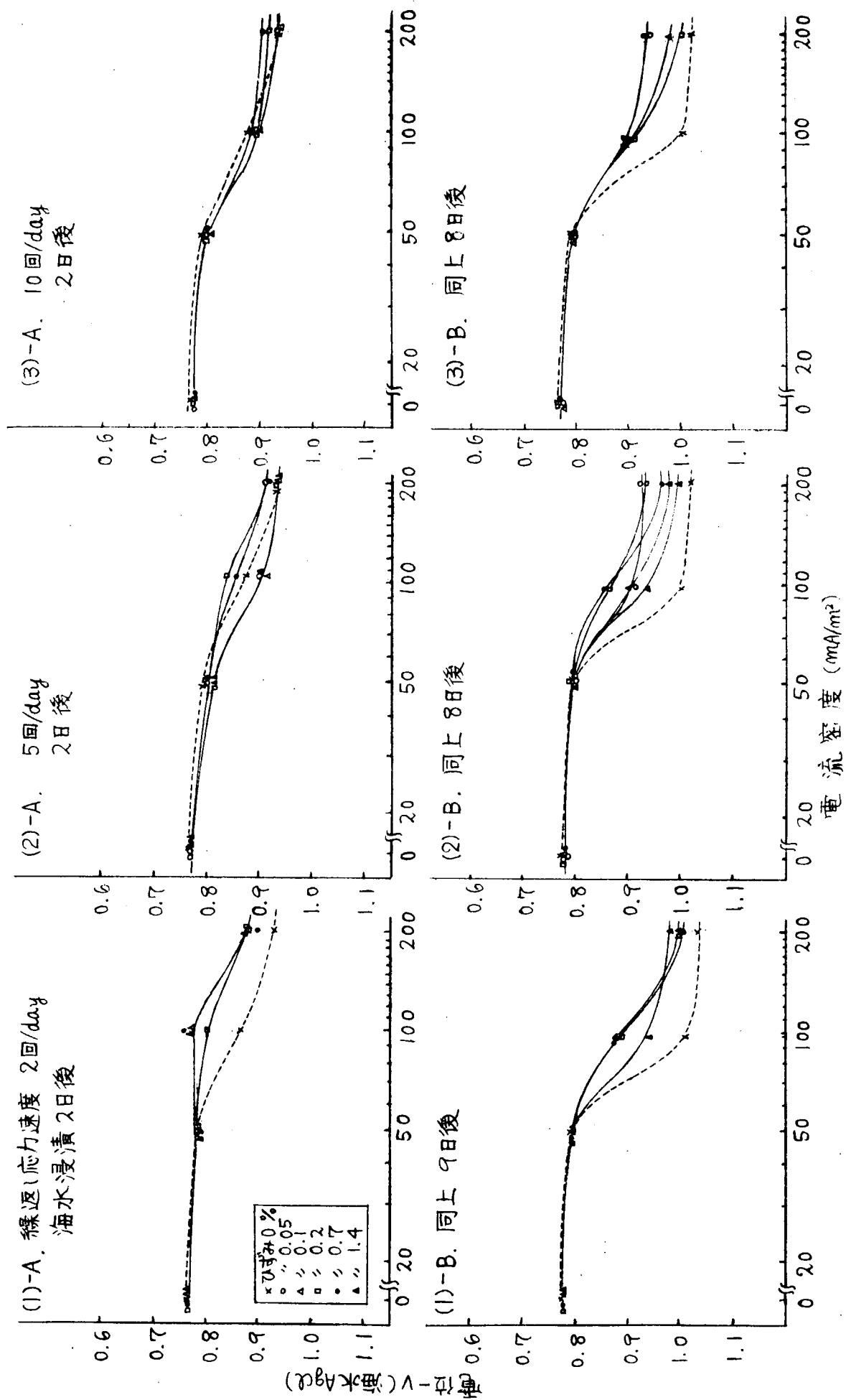


図 3.1.11 電流密度と電位の関係におよぼす繰返し応力の影響 (海水浸漬 1 cycle)

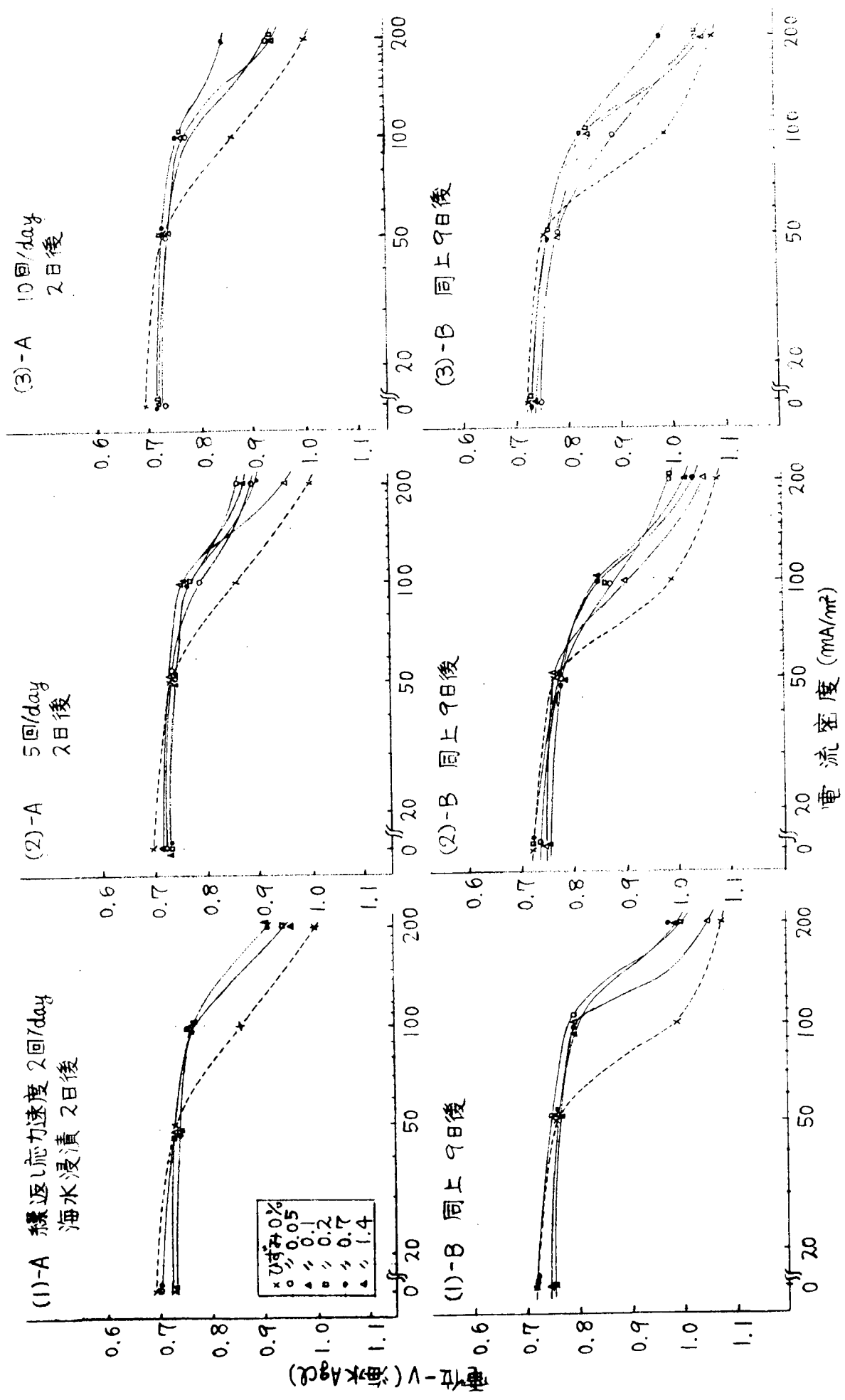


図 3.1.12 電流密度と電位の関係におよぼす繰返し応力の影響 (海水浸漬 2 cycle)

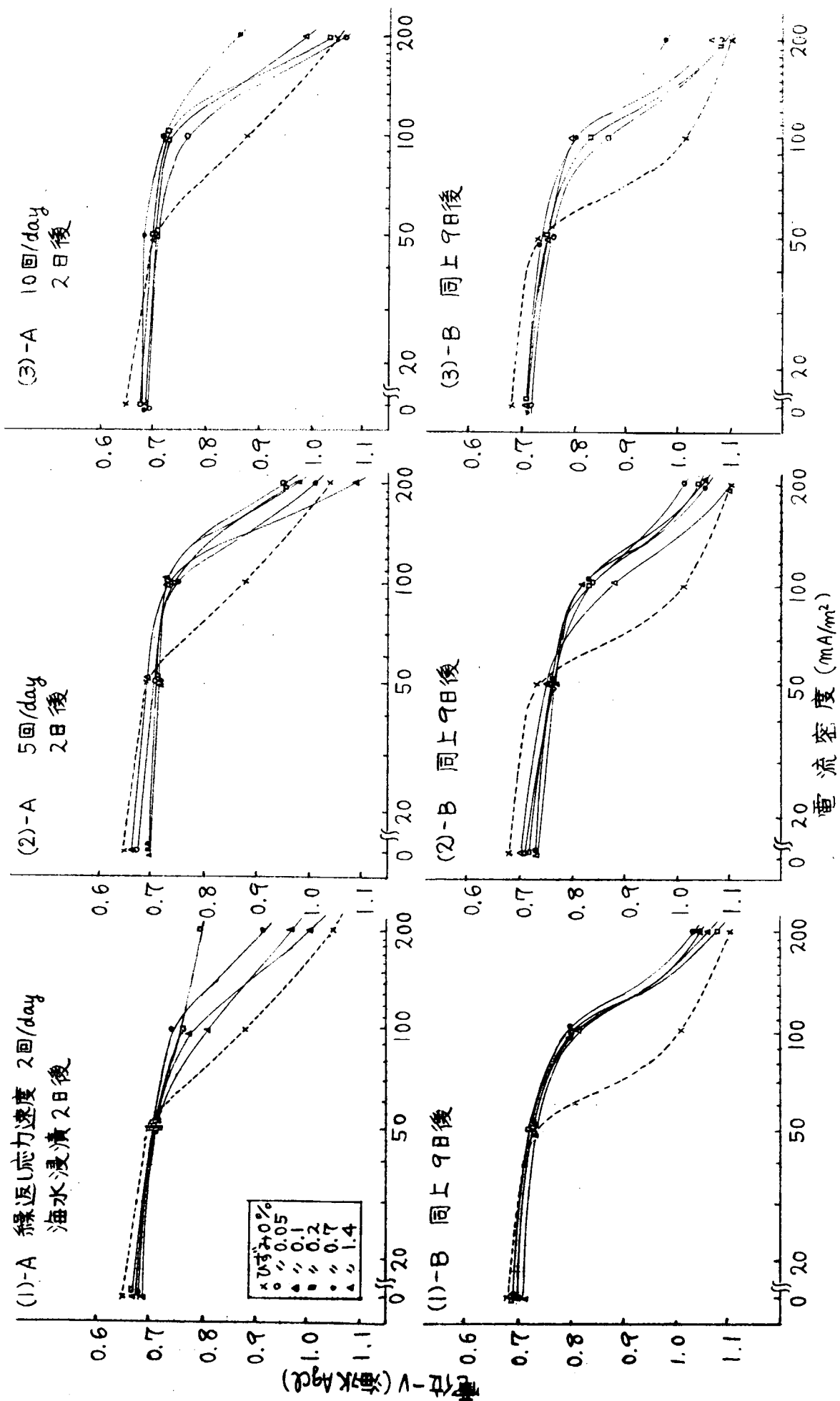


図 3.1.13 電流密度と電位の関係におよぼす繰返し応力の影響 (3 cycle)

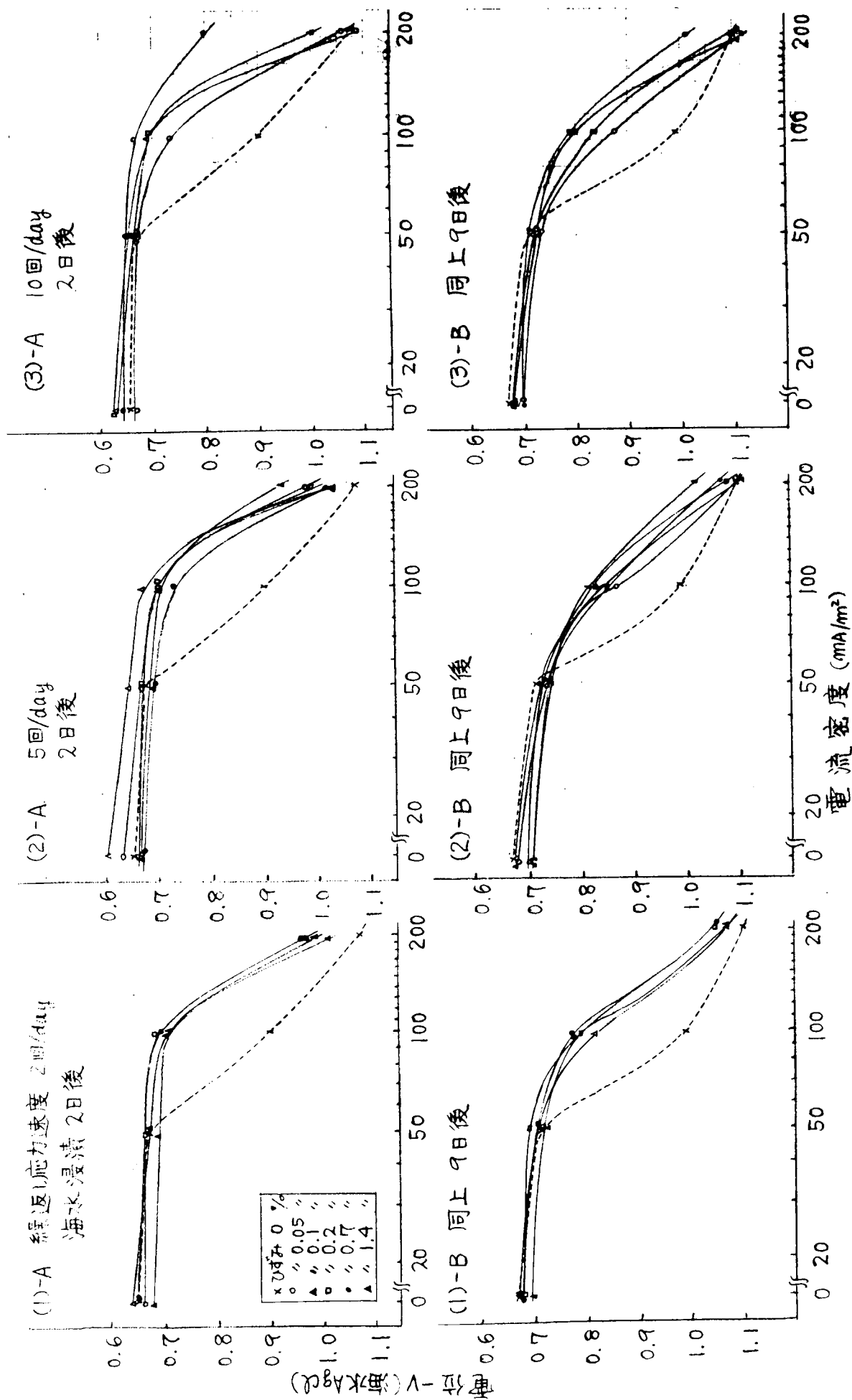
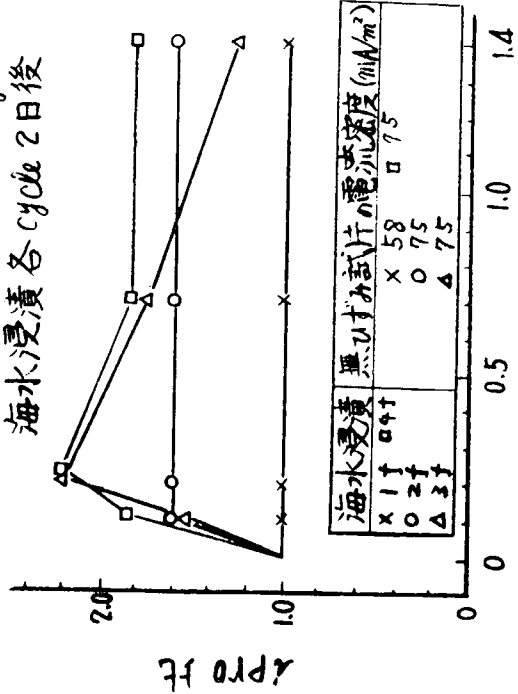
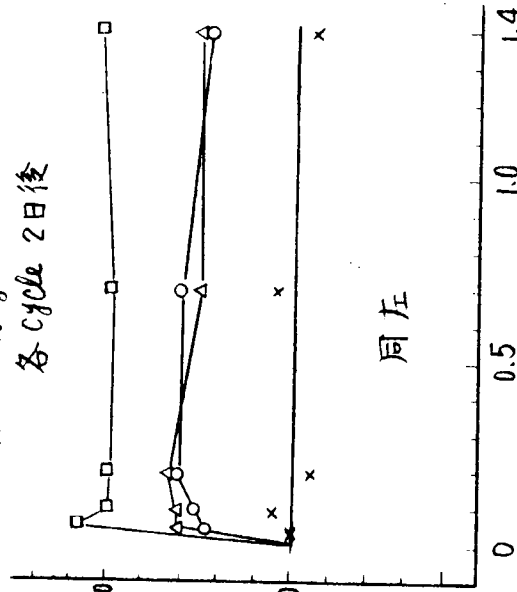


図 3.1.14 電流密度と電位の関係におよぼす繰返し応力の影響 (4 cycle)

(1)-A 繰返v_反力速度2回/day
海水浸漬各 cycle 2日後

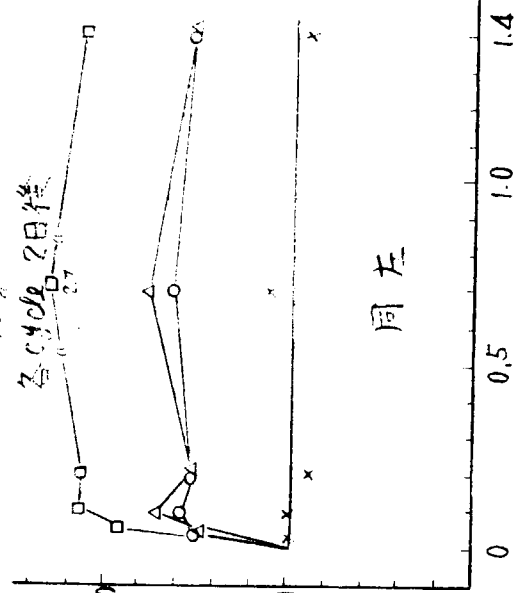


(2)-A 5回/day
各 cycle 2日後



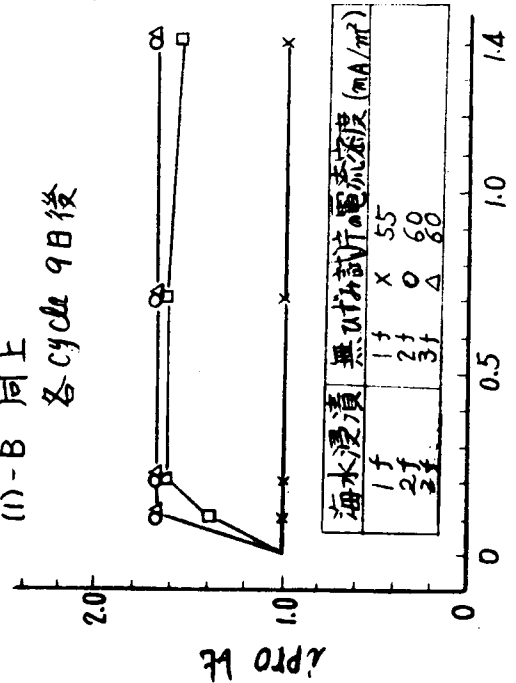
同左

(3)-A 10回/day
各 cycle 2日後

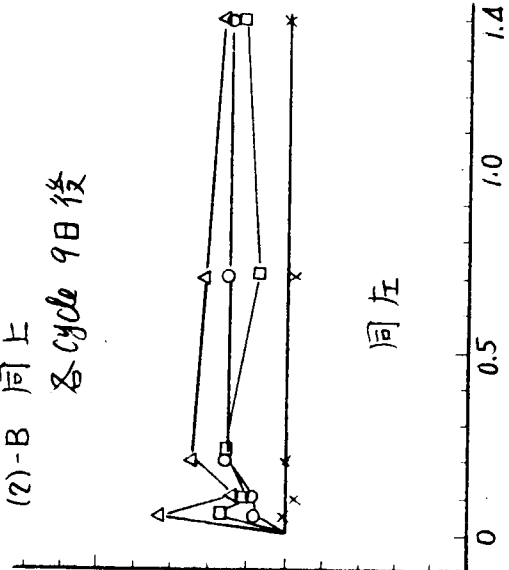


同左

(1)-B 同上
各 cycle 9日後

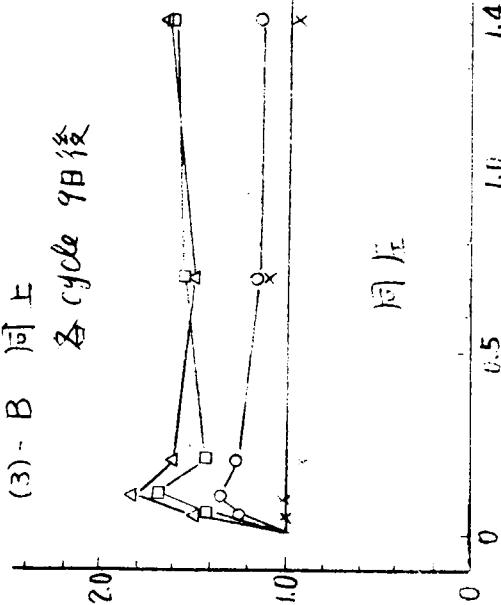


(2)-B 同上
各 cycle 9日後



同左

(3)-B 同上
各 cycle 9日後



同左

図 3.1.15 防食電流密度におよぼす歪率の影響 (-800 mV の場合)

3.2 防食電流密度におよぼす張水率、張水期間の影響

3.2.1 試験装置と試験方法

(1) 試験の概要

第一年度研究において製作した恒温水槽(10m(L)×6m(B)×1m(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考慮した。張水期間中所定の防食電流を亜鉛陽極より流し、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3.2.1に示す張水率30, 50, 70%, 周期10, 20, 40日を組合わせたバラスト条件に電気防食条件 $100, 200\text{mA}/\text{m}^2$ を加えた。

(3) 試験槽とモーター試験片

前回試験と同様にJISG3101, SS41よりなる1m角試験槽の内面をショットブラスト処理した。

試験槽内への吊下げ試験片は $30\times50\times8\text{mm}$ のものと $1000\times50\times6\text{mm}$ の長尺物の2種をショットブラスト仕上とした。(取付け状況は第2年度報告補遺 P95参照)

3.2.2 試験結果

各種の試験条件における電位変化を図3.2.1～3.2.4に示す。

図3.2.1～図3.2.3は80日迄の電位変化を示し、図3.2.4は80日～160日の電位変化の数例を示したものである。

図3.2.5, 図3.2.6は試験槽の各位置における試験片の腐食を示したもので電気防食効果をみるため第2年度研究で得られた電気防食なしの腐食も併記した。空槽部は電気防食効果はないのでバラスト部の腐食の平均値(3ヶの試験片の平均値)を用いて、各種バラスト条件と電気防食条件の腐食におよぼす影響を棒グラフにして図3.2.7に示した。

電流密度 $100\text{mA}/\text{m}^2$ のときのバラスト条件と防食率の関係を図3.2.8および図3.2.9に示した。図3.2.10, 図3.2.11はバラスト条件1周期における張水日数と腐食速度の関係を示した。

図3.2.8～図3.2.10の結果は周期の短い張水率の小さいバラスト条件(例えば周期10日, 張水率30%等)では電気防食効果の劣る傾向のあることを示し、図3.2.1～図3.2.4に示した電位変化も、そのようなバラスト条件では分極し難いことを示しており、これまでの研究と同様に電位計測によって、腐食の状況を予測できることがわかる。

図3.2.8～図3.2.10の結果から防食効果 P (防食時の腐食量)と $f\times\alpha$ (1週期の中での張水日数)の間には

$$P = K_1 e^{-K_2 f \cdot \alpha} \dots\dots\dots (1)$$

(ここに f : 周期(日), α : 張水率)が成立しそうであるが P と $f\cdot\alpha$ の関係を示した図3.2.10から $f\cdot\alpha$ の小さい部分ではバラツキが大きくこのように簡単に表現できるかどうかは問題のあるところである。

今80日, 160日の腐食試験結果をそのまま年間の腐食に適用できるとしたときの張水経続日数と腐食速度 mm/year の関係を図3.2.11に示した。

仮にバラストタンク構造材の正常腐食を $3\text{mm}/12\text{年}$ 以下 $0.25\text{mm}/\text{年}$ と考え、それ以上は全て異常腐食と考えると図3.2.11の鎖線A以下になるように防食条件を選ぶことができよう。

バラストタンクの温度の影響を考慮せず、本試験の結果のみに限って言えることは、1回の張水経続日数が少なくとも8日以上あれば防食電流密度は $100\text{mA}/\text{m}^2$ あれば防食率80%程度になり充分であってそれより張水日数の短い場

* $0.25\text{mm}/\text{年}$ という数値は図3.2.8に示した腐食量のA又はBに位置する。各バラスト条件における腐食に対し、 $0.25\text{mm}/\text{年}$ に防食できたとして防食率を求めると約50～60%程度となる。

合は防食電流密度を増加するかその他の防食対策を必要とすると言える。

しかしながら、図 3.2.8 の棒グラフにもみられるように電流密度増加策もバラスト条件によっては余り有効でないことは注意を要する。特にこの図で言えることは、 200 mA/m^2 の電流密度では試験時間が長くなると防食効果が低下する傾向にあると言うことである。むしろ、 100 mA/m^2 の電流密度の方が長期的間には良好である傾向さえみえる。もちろん、電流密度の相違によるこの腐食量の差は張水日数の長い場合 (>8 日) には正常腐食を 0.25 mm/year と考えるならば、実験誤差の範囲と考えて処理できる程度のものである。

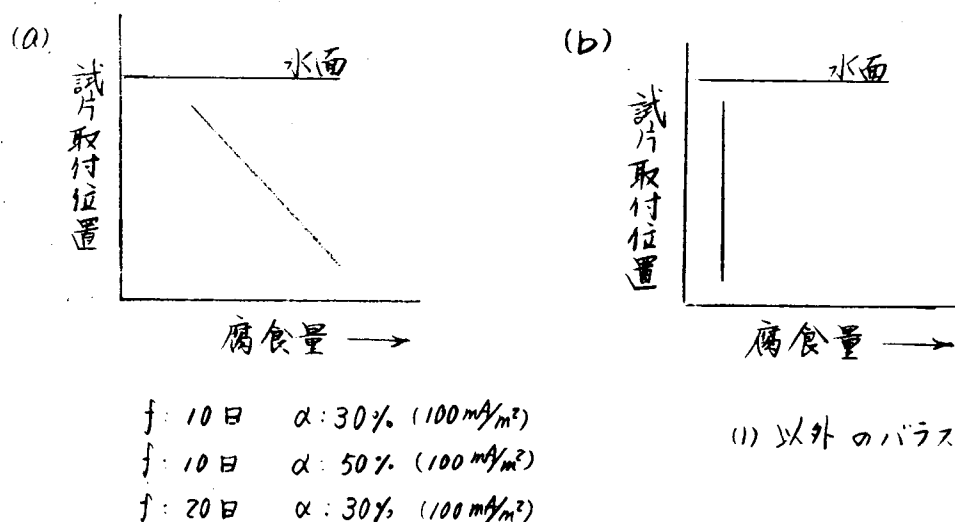
さて、周期 20 日、張水率 30%、防食電流密度 200 mA/m^2 の条件で防食効果のおもわしくないことは先に述べたが、このときの電位変化は図 3.2.1 (0~80 日間の結果) にみられるように、通電後、直ちに -1100 mV まで低下し、特に電位の保持に問題があったとは思えない。ただ各周期の張水の始まりの電位が 100 日以後の周期から急激に上昇しているのと一定電位例えば -1000 mV に達するまでの時間が徐々に長くなっているのがみられる。このことは空槽期間中の腐食の進行が 100 日頃から表われ始めたと考えれば、80 日と 160 日後の腐食速度の差の説明がつく。

第 1 年度の研究 (第 2 年度報告補遺) において、鋼板表面に生成する錆又は電気防食時のエレクトロコーティング層の熱応力による破壊と防食効果の低下の可能性について触れておいたが、 200 mA/m^2 の電流密度においては、コーティング量の多いこと (内部ストレスの増大)、被膜の組成の相違等が影響しあい、2.1 の繰返し応力の影響でのべたと同じように防食被膜の損傷によって徐々に防食効果が落ちてくるものと考えられる。しかも、これらの結果は破損した被膜は張水期間中の通電によって完全に補修されにくいことを示唆している。

このように電気防食による二次効果として期待される陰極析出物による空槽時の保護作用を、単なる電流密度増加の方法だけで達成しようとすることは困難であることを示す結果が得られた。

バラスト条件の相異によるバラスト部分の平均的な腐食に関する結果は上記した通りであるが、電気防食時のバラスト部分の深さ方向の腐食は図 3.2.6、図 3.2.7 から次の二つのパターンのあることがわかる。

即ち、バラスト上部の腐食が底部より大きい場合(a)、と場所によって相違のない場合(b)がある。



(a)の腐食パターンを示すものは、張水継続日数の短いもので、そのときの電位は図 3.2.1, Na 1, Na 2, Na 5 のように電位が 800 mV に達する程度のものである。ケース(a)では明らかに下部試験片から上部試験片へのマクロセル形成 (多分酸素濃淡電池の形成であろう) による腐食電流が考えられる。

このマクロセルの形成については帯状試験片上の腐食パターン (第 2 年度報告補遺参照 P 88) からすでに述べたことであるが、実船の場合にこの現象を照らして考えると、タンクの腐食環境条件によってはタンク上部よりタンク下部の腐食の激しい場合がある事も予想される。

このようにバラストタンクの腐食はバラスト条件によって極めて著しい腐食の変化を示すことがこの試験によって明

らかになった。

3.2.3 ま と め

以上の試験結果をまとめると次のようになる。即ち

- (1) 電気防食条件下でのバラスト部の腐食はバラスト条件と密接な関係にあり、1回の張水日数が8日より短いと $100\text{mA}/\text{m}^2$ の防食効果は期待できない。
- (2) バラスト条件として、張水経続日数の短い場合はタンク底部が上部より腐食の大きい場合がある。
- (3) 電流密度増加 ($200\text{mA}/\text{m}^2$) による防食もバラスト条件によっては充分効果を発揮できない。電流密度増加 ($200\text{mA}/\text{m}^2$) の場合、特に長時間後の防食効果の劣化が懸念される。

本試験は2.1で述べたような機械的なストレスの付加されないときの結果であって、バラスト条件が張水日数の短い条件になる場合は2.1で述べた以上に腐食におよぼすストレスの影響が考えられるので張水経続日数の短いバラスト条件は極力さけるよう考慮する必要がある。

もちろん、これらの結果は定電流条件での試験結果であり、実船で採用されている流電陽極による防食方法との対応^{*}については今後の研究にまきたい。

* 張水初期に電流密度が高い。

表 3.2.1 張排水試驗條件

	周期 (DA/S)	張水率		張水期間		排水期間		溫度 (°C)	電流密度 (mA/m ²)					
		(%)	(DA/S)	(DA/S)	(DA/S)	(DA/S)	(DA/S)		10	20	30	40	50	60
1	—	0	0	∞	∞	∞	∞	40						
2	—	100	∞	∞	∞	∞	∞	40						
3	10	30	3	3	7	7	7	40						
4	20	30	6	6	14	14	14	40						
5	40	30	12	12	28	28	28	40						
6	10	50	5	5	5	5	5	40						
7	20	50	10	10	10	10	10	40						
8	40	50	20	20	20	20	20	40						
10	10	70	7	7	3	3	3	40						
11	20	70	14	14	6	6	6	40						
12	40	70	28	28	12	12	12	40						

(注) 張水 排水
—— 周期 ——

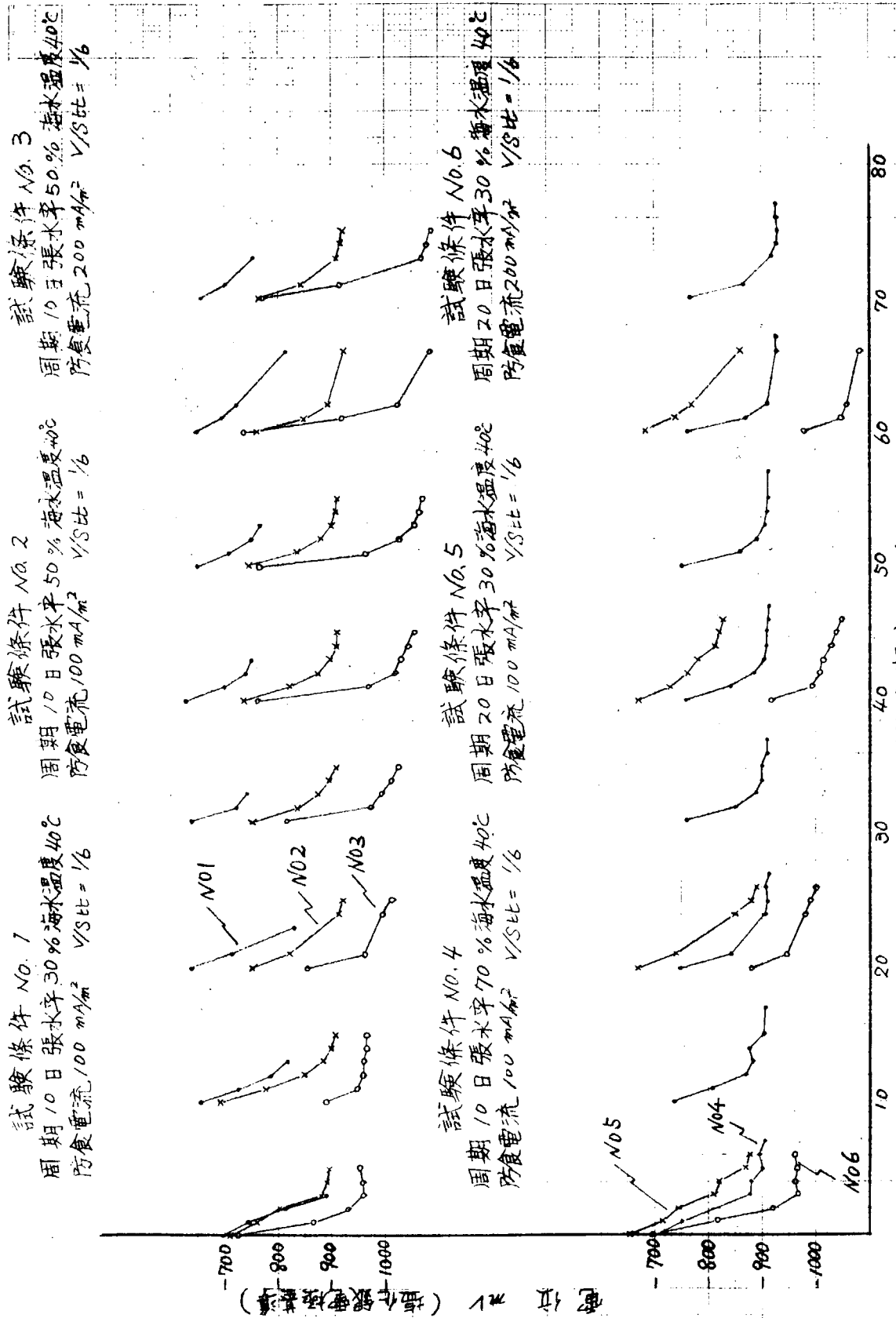


図 3. 2. 1 試験槽電位の経時変化

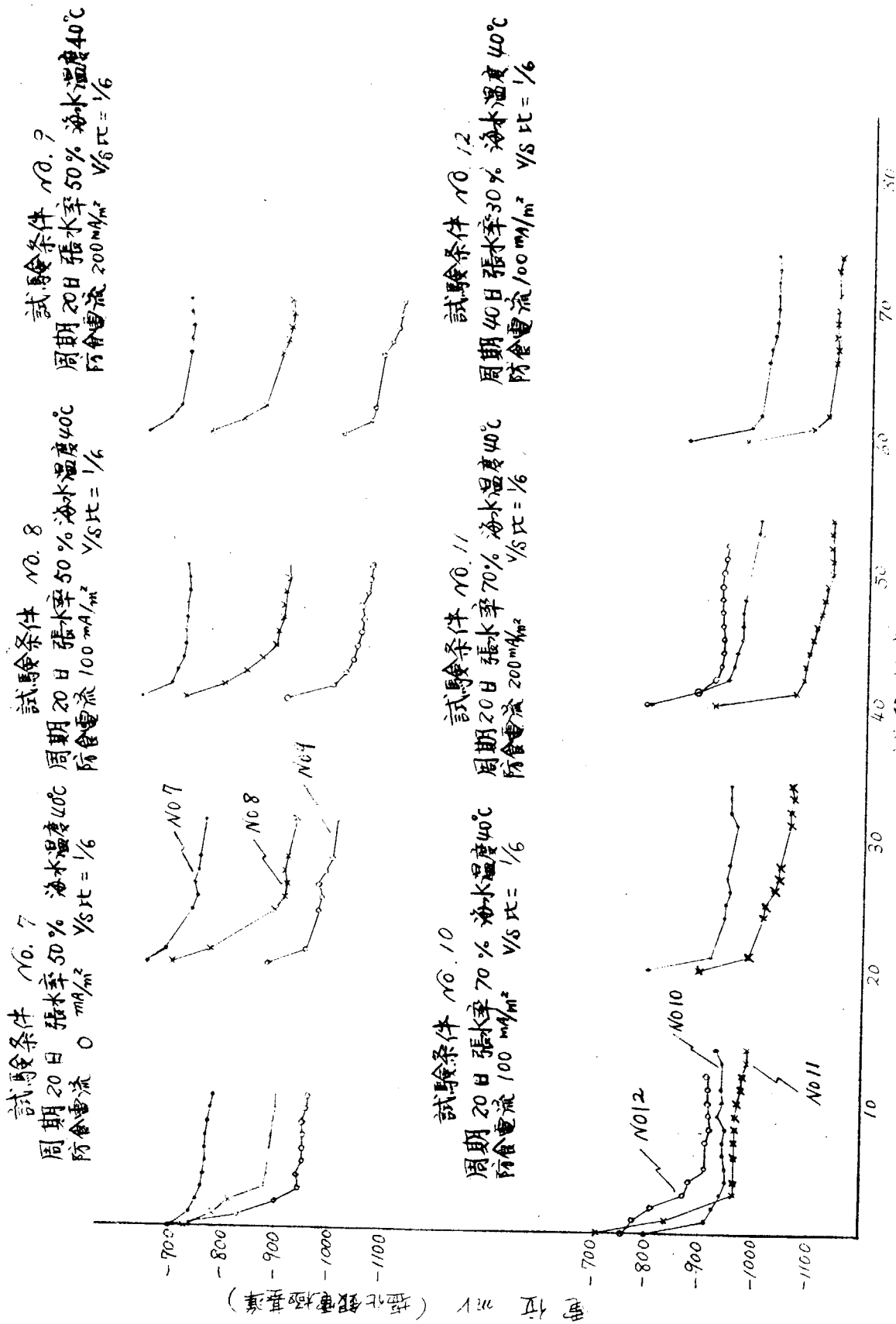


図 3.2.2 試験槽電位の経時変化

試験条件 No. 15
 周期 40日 張水率 70% 海水温度 40℃
 防食電流 100 mA/m² V/S比 = 1/6

試験条件 No. 14
 周期 40日 張水率 50% 海水温度 40℃
 防食電流 200 mA/m² V/S比 = 1/6

試験条件 No. 13
 周期 40日 張水率 50% 海水温度 40℃
 防食電流 100 mA/m² V/S比 = 1/6

試験条件 No. 16
 周期 160日 張水率 100% 海水温度 40℃
 防食電流 100 mA/m² V/S比 = 1/6

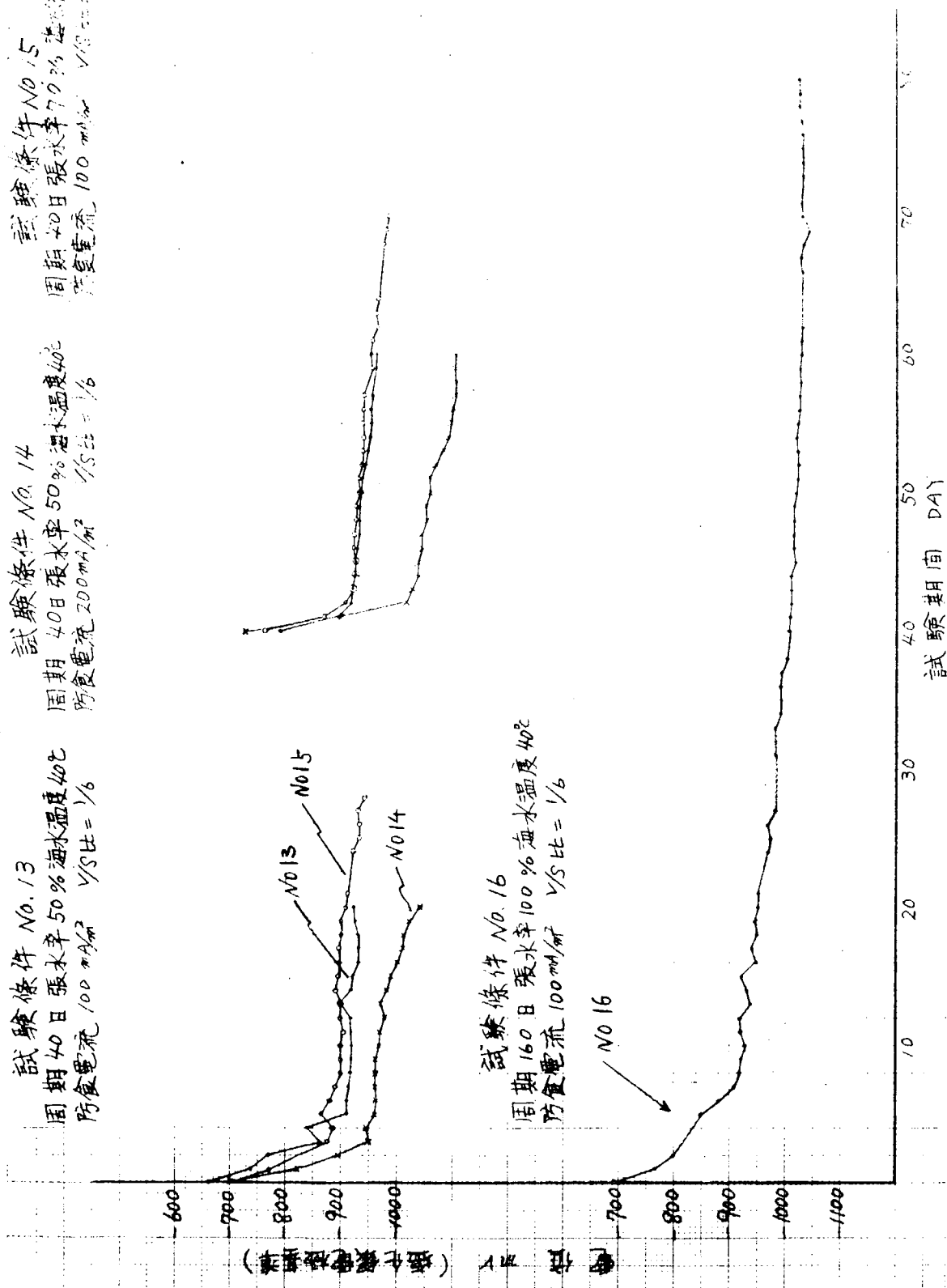


図 3.2.3 試験槽電位の経時変化

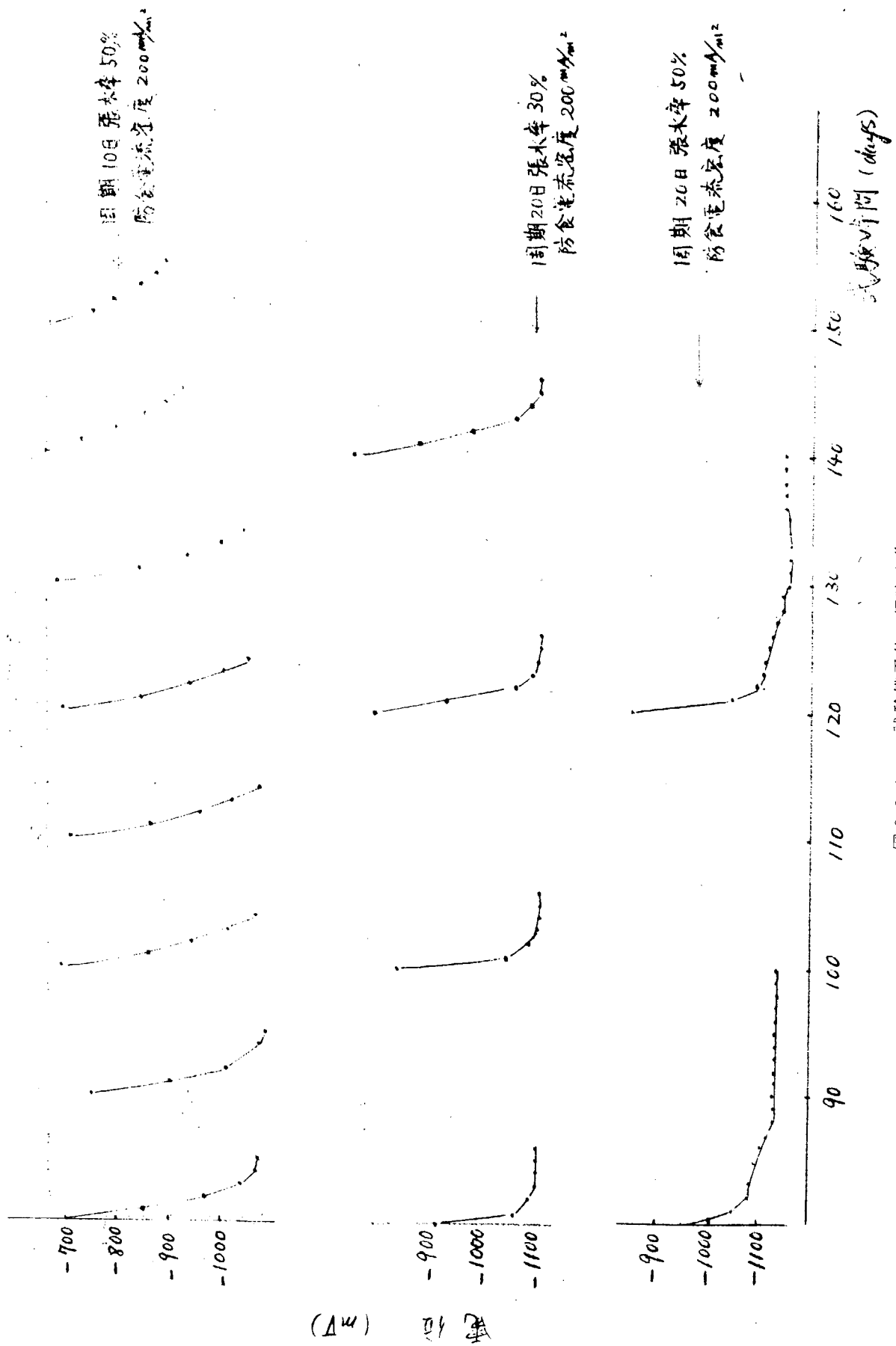


図 3.2.4 試験槽電位の経時変化

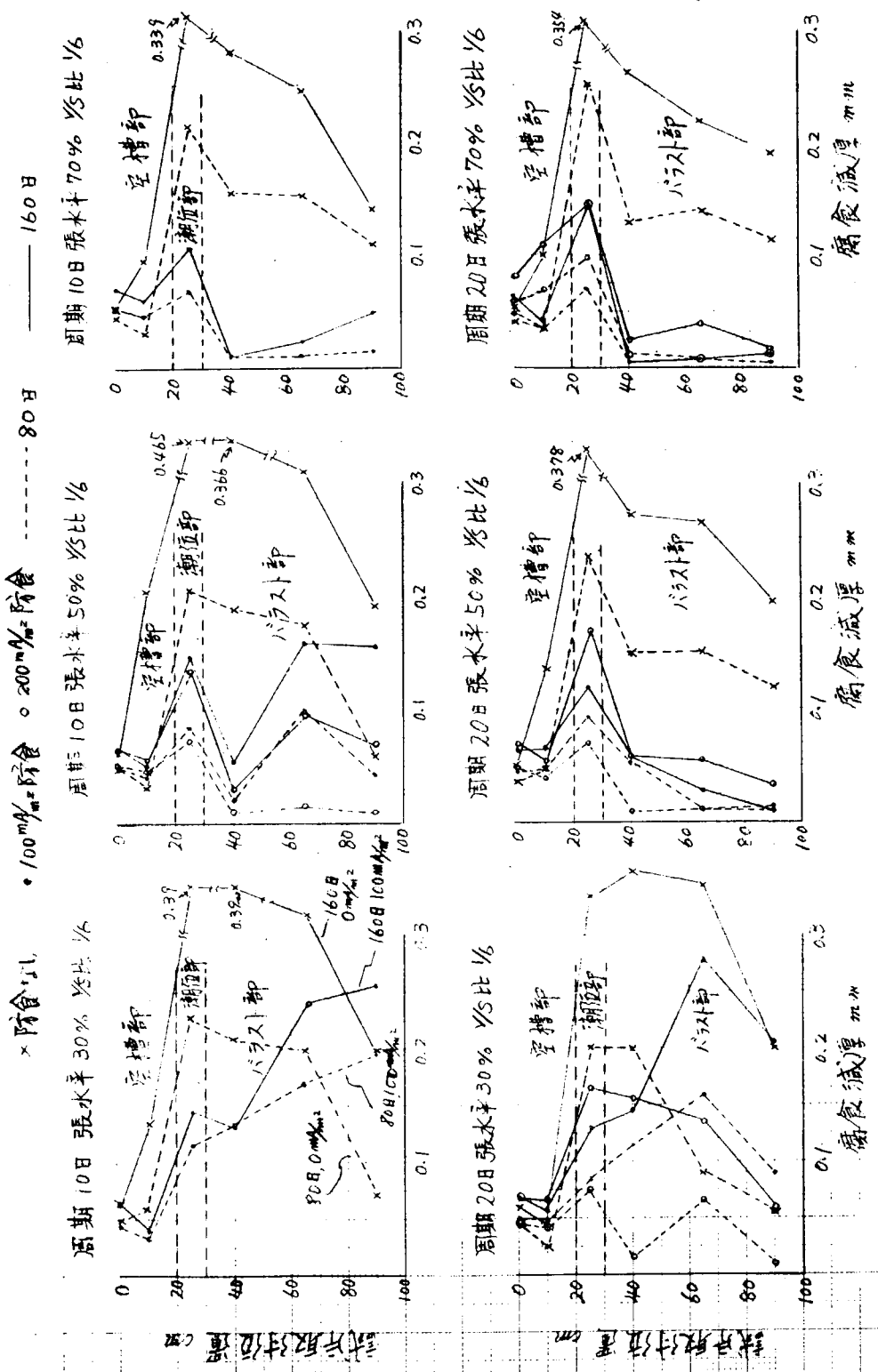


図 3.2.5 張排水テストに於けるバラスト部の腐食減厚 (単独試片の重量減より求めた)

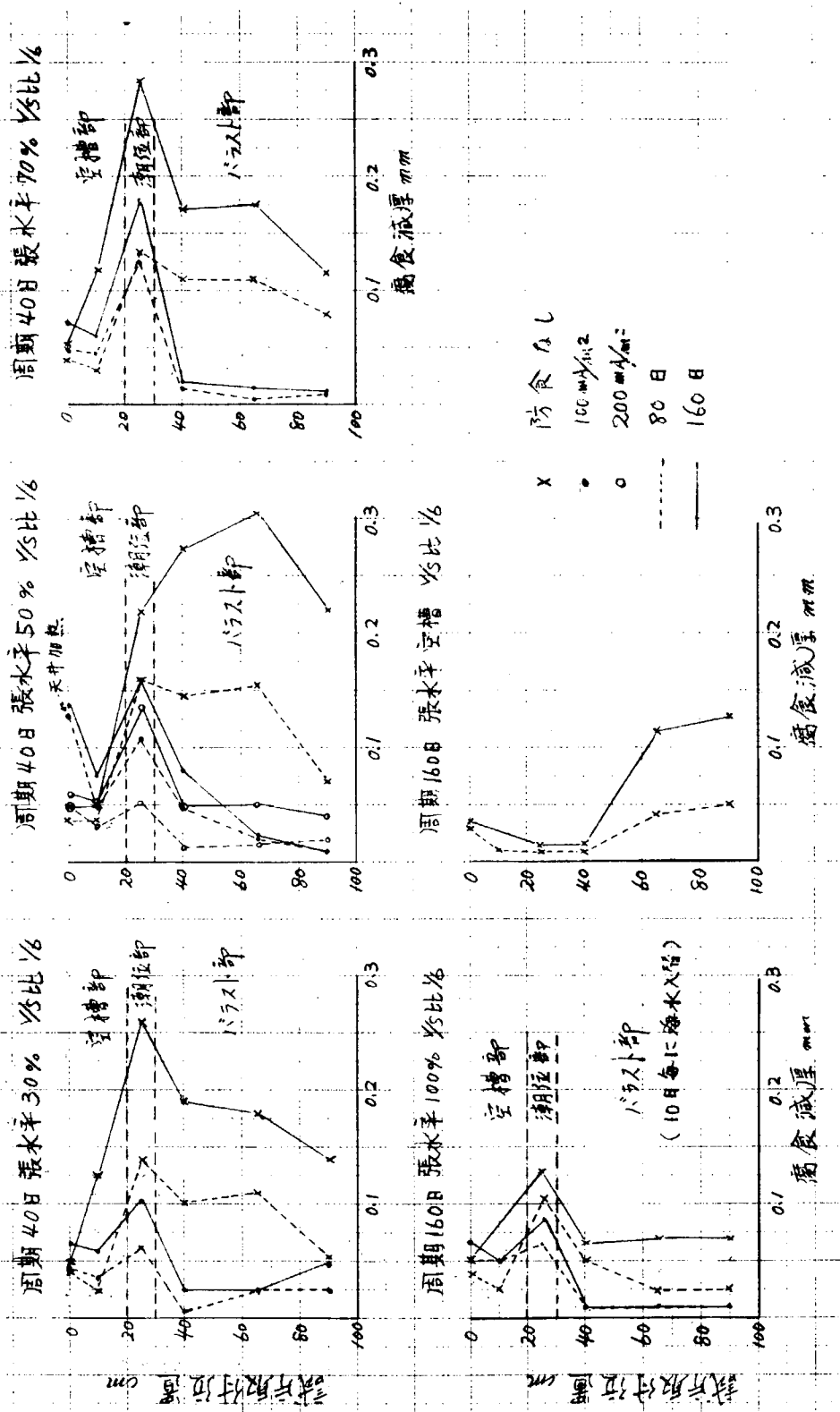


図 3.2.6 張排水テストに於けるプラスチック部の腐食減厚 (単独試片の重量減より求めた)

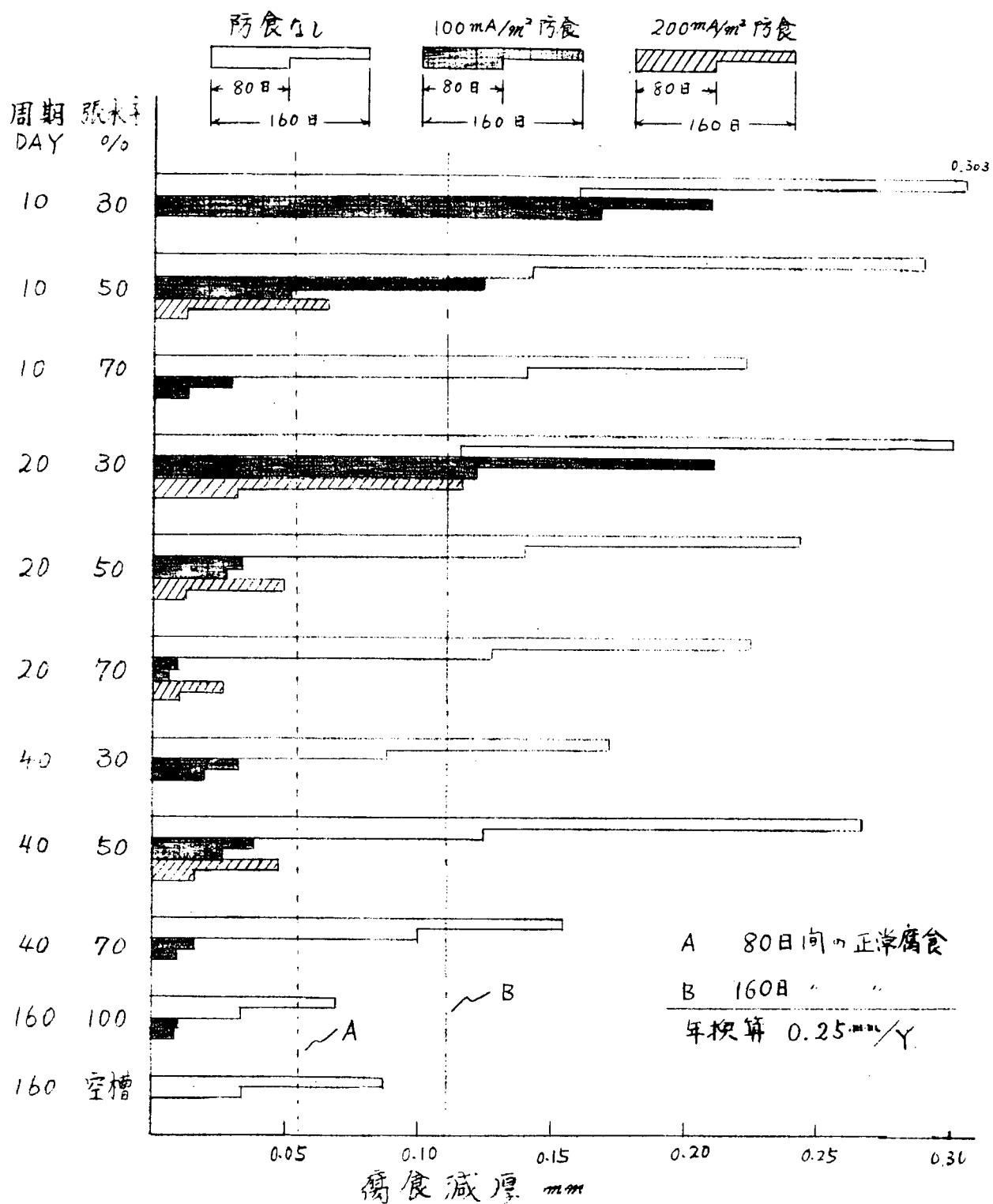


図 3.2.7 張排水テストに於けるバラスト部の腐食減厚
(単独試片の重量減より求めた)

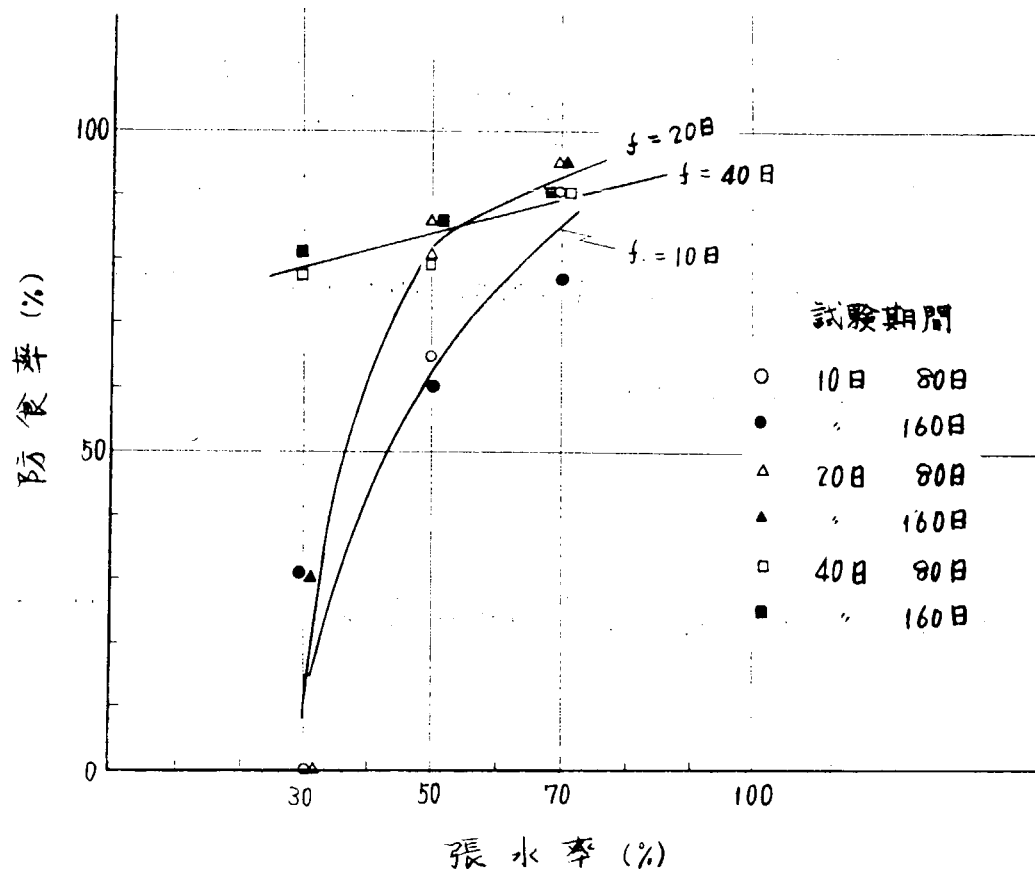


図 3. 2. 8 防食率におよぼす張水率の影響 (電流密度 100 mA/m^2)

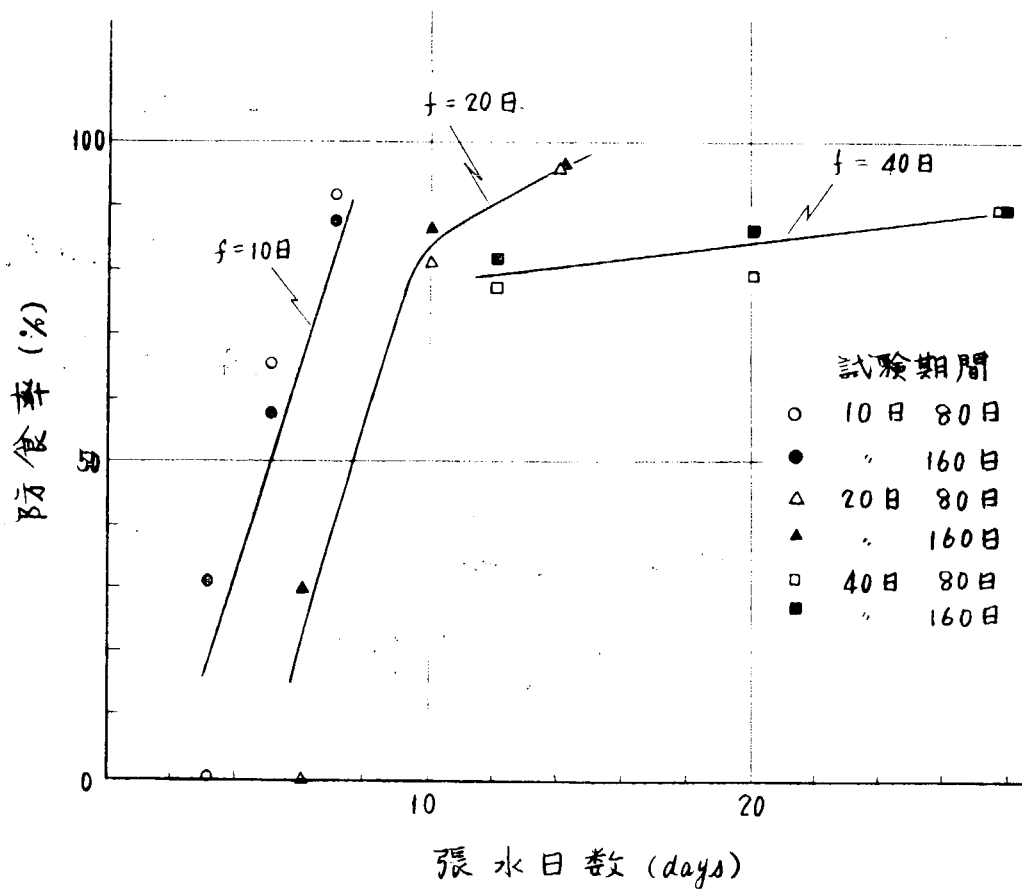


図 3. 2. 9 防食率におよぼす張水日数の影響 (電流密度 100 mA/m^2)

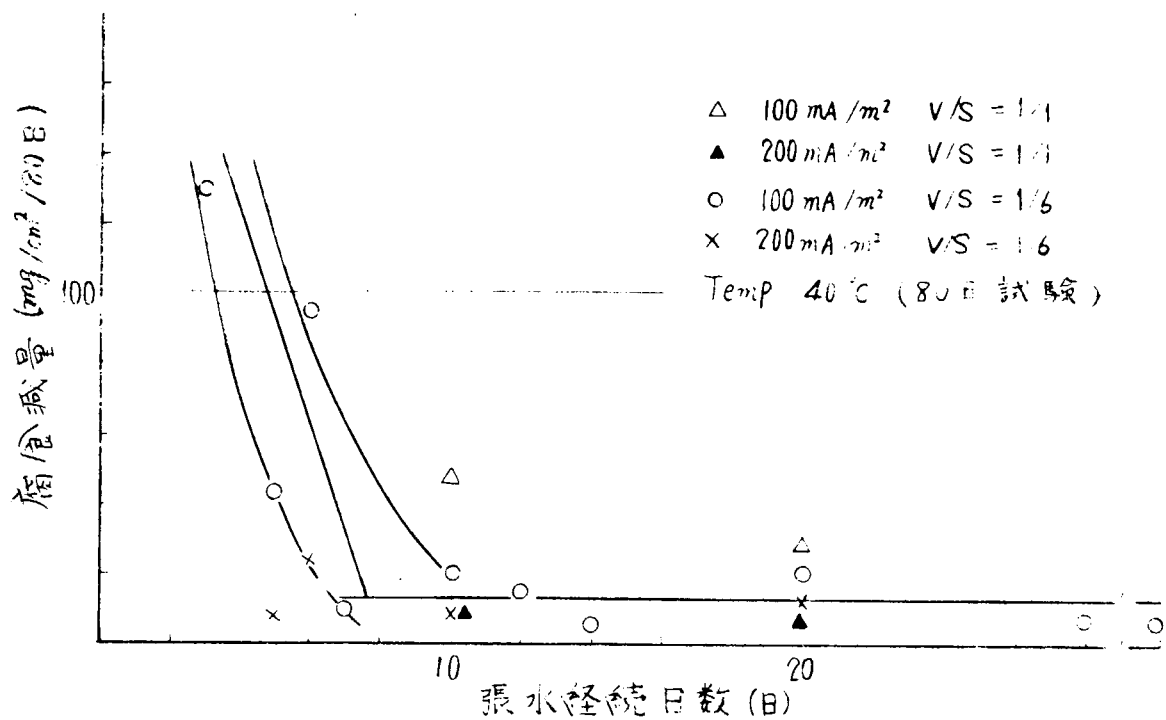


図 3.1.2 10 腐食速度によらず張水経続日数の影響

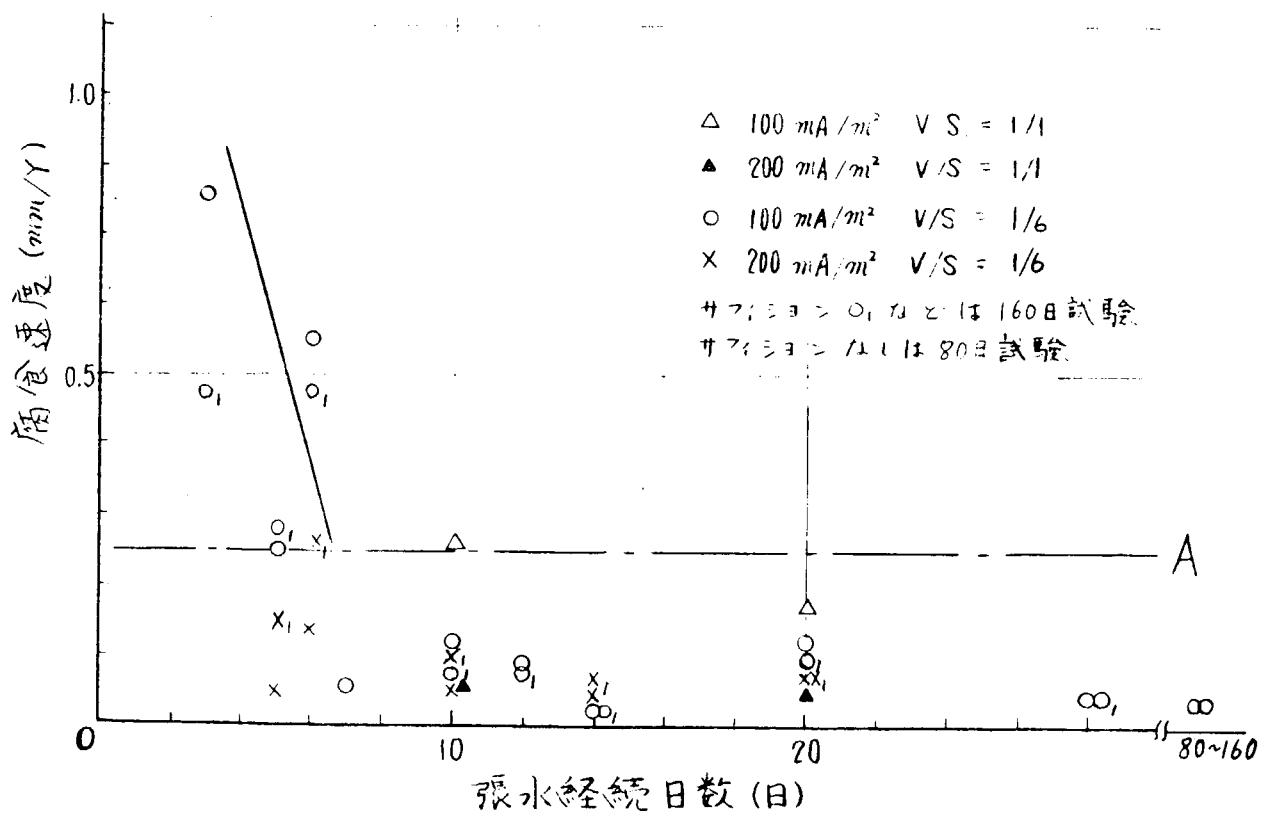


図 3.2.1 1 腐食速度によらず張水経続日数の影響

3.3 タンク体積／表面積比の防食電流密度におよぼす影響（ V/S 率の影響）

3.3.1 試験装置と試験の方法

(1) 試験の概要

3.2 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、3.2 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 3.3.1 に示す。試験タンクの体積と表面積比の調整は第 2 年度報告で述べたと同じ要領で試験槽内面にタールエポキシ塗装を施して銅表面の露出面積を減らして調整した。（図 3.3.1）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。電気防食はタンク中央部に亜鉛を吊下げ所定電流に保持した。

試験槽内面の露出部はショットブラス仕上とし，モニターとして試験槽へ 30×50×8mm のものを深さ方向に独立に数個吊下げ，更に 1000×50×6 mm の鋼材を入れた。（詳細は第 2 年度報告補遺 P 95 参照）

表 3.3.1 （タンク体積／表面積）率の試験条件

V/S	周 期 (日)	張 水 率 (%)	張水期間 (日)	排水期間 (日)	電 流 密 度 (mA/m^2)	温 度 $^{\circ}C$
1/0.7	20	50	10	10	100	40
1/0.7	20	50	10	10	200	40
1/0.7	40	50	20	20	100	40
1/0.7	40	50	20	20	200	40
1/6	20	50	10	10	100, 200	40
1/6	40	50	20	20	100, 200	40

(3) 試験結果

試験槽電位の経時変化を図 3.3.1，図 3.3.2 に試験槽内各部の腐食の変化を図 3.3.3 に示す。

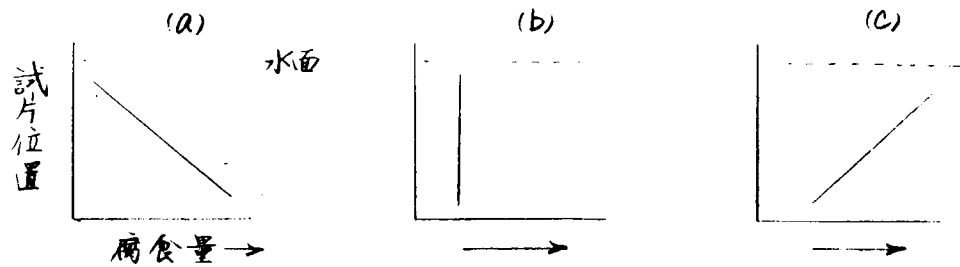
図 3.3.4 はバラスト部の腐食の平均値（試験片 3 ケの平均値）を用いてバラストタンク体積／表面積比の腐食におよぼす影響を示したものである。

無防食時の腐食は V/S 比の影響をあまり受けないように見えるが電気防食を実施したとき，その防食効果に著しい影響を与えていることがこの図より明らかである。

興味ある結果はバラスト周期によって，腐食におよぼす防食電流密度の変化の影響の異なる事である。即ち，周期 40 日（ $\alpha = 50\%$ ）では V/S 比の増大によって $100 mA/m^2$ の電流密度では電気防食効果が著しく阻害されているものの $200 mA/m^2$ の電流密度では一応防食効果を示している。これに対して周期 20 日（ $\alpha = 50\%$ ）の場合には $100 mA/m^2$ ， $200 mA/m^2$ のいずれの場合も防食効果は V/S 比の増加によって低下している。周期 20 日の場合特に $200 mA/m^2$ の電流密度で，防食効果の低下が甚だしく，長期になるほど，電流密度の増加は有効でなくなる結果を示している。

単なる電流密度増加策は長期になれば防食効果を期待できないという傾向は V/S 比の変化の場合にも示された。

図 3.3.3 の腐食パターンは 3.2.1 章で述べたような水面近くの腐食の少ないパターン(a)と場所によってあまり変化のない場合(b)の外に水面近くの腐食が大きく底部の腐食の少ない(c)のあることを示している。（ $200 mA/m^2$ ， $f = 20$ 日， $\alpha = 50\%$ ，160 日の結果，図 3.3.3 の左上図）



この(c)の場合は(a)の場合のような酸素濃度電池によるマクロセルの形成によって説明できない。(c)の腐食パターンを示す別の例として 3.2.1 章の図 3.2.5 (周期 20 日, 張水率 30 %, $V/S = 1/6$, 200 mA/m^2) にその傾向をみることができる。

このような腐食パターンを示す原因については明らかではないが, 防食電流密度の高い場合, 長期間後には防食効果の低下する傾向のあることからみて, バラスト条件と関連して生成するエレクトロコーティング被膜の防食性に関連があるものと考えられる。

3.3.2 ま と め

タンク体積／表面積比の防食電流密度におよぼす影響についてバラスト条件をかえて検討し次の結果を得た。

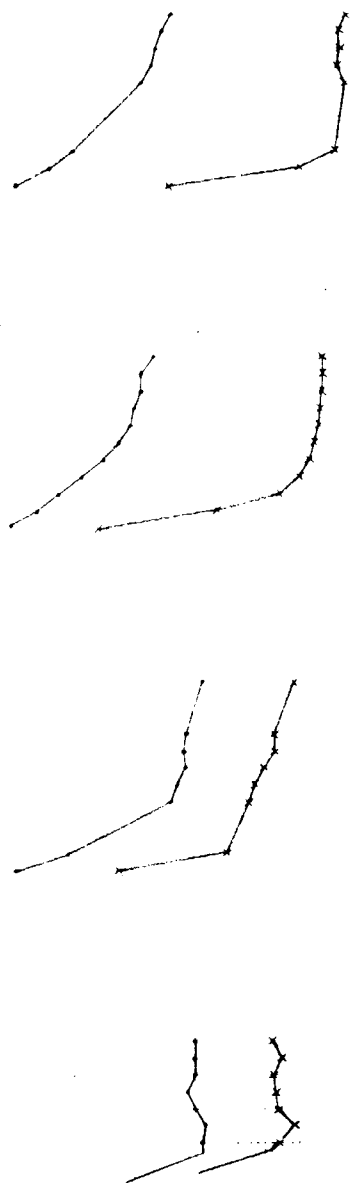
- (1) 電気防食効果はバラスト条件の外に V/S 比にも影響され, V/S 比が大きくなると防食効果は低下する。
- (2) バラスト条件, V/S 比条件, 電気防食条件によってバラスト部の深さ方向の腐食分布には 3 種類あることが明らかになった。

試験条件 No. 17

周期 20 日 張水率 50 % 海水温度 40°C
防食電流 100 mA/m² V/S比 = 1/1

試験条件 No. 18

周期 20 日 張水率 50 % 海水温度 40°C
防食電流 200 mA/m² V/S比 = 1/1



試験条件 No. 19

周期 40 日 張水率 50 % 海水温度 40°C
防食電流 100 mA/m² V/S比 = 1/1

試験条件 No. 20

周期 40 日 張水率 50 % 海水温度 40°C
防食電流 200 mA/m² V/S比 = 1/1

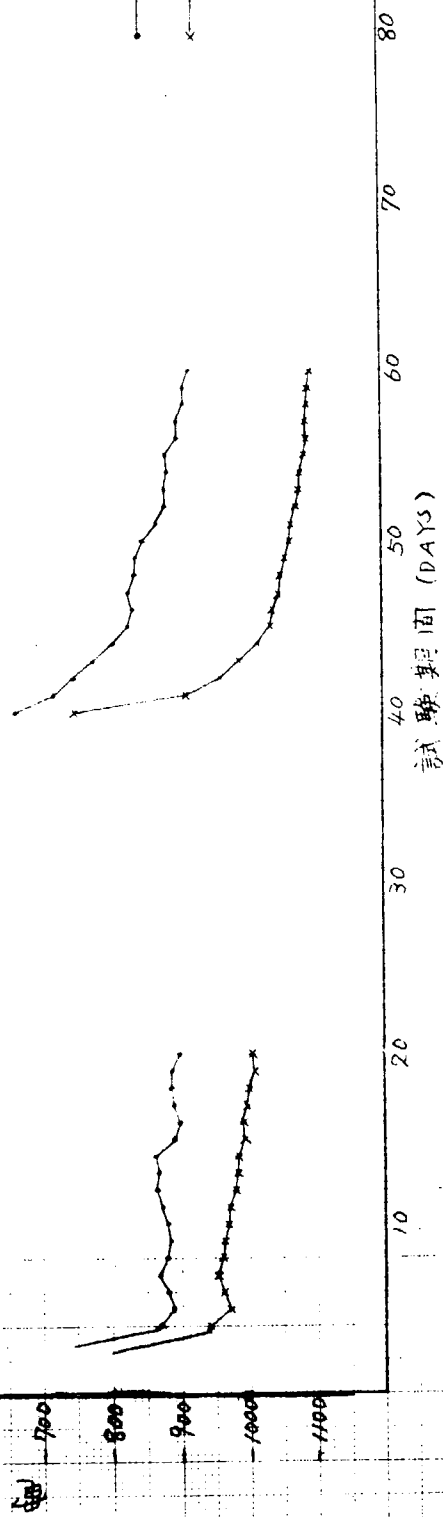


図 3.3.1 試験槽電位の経時変化

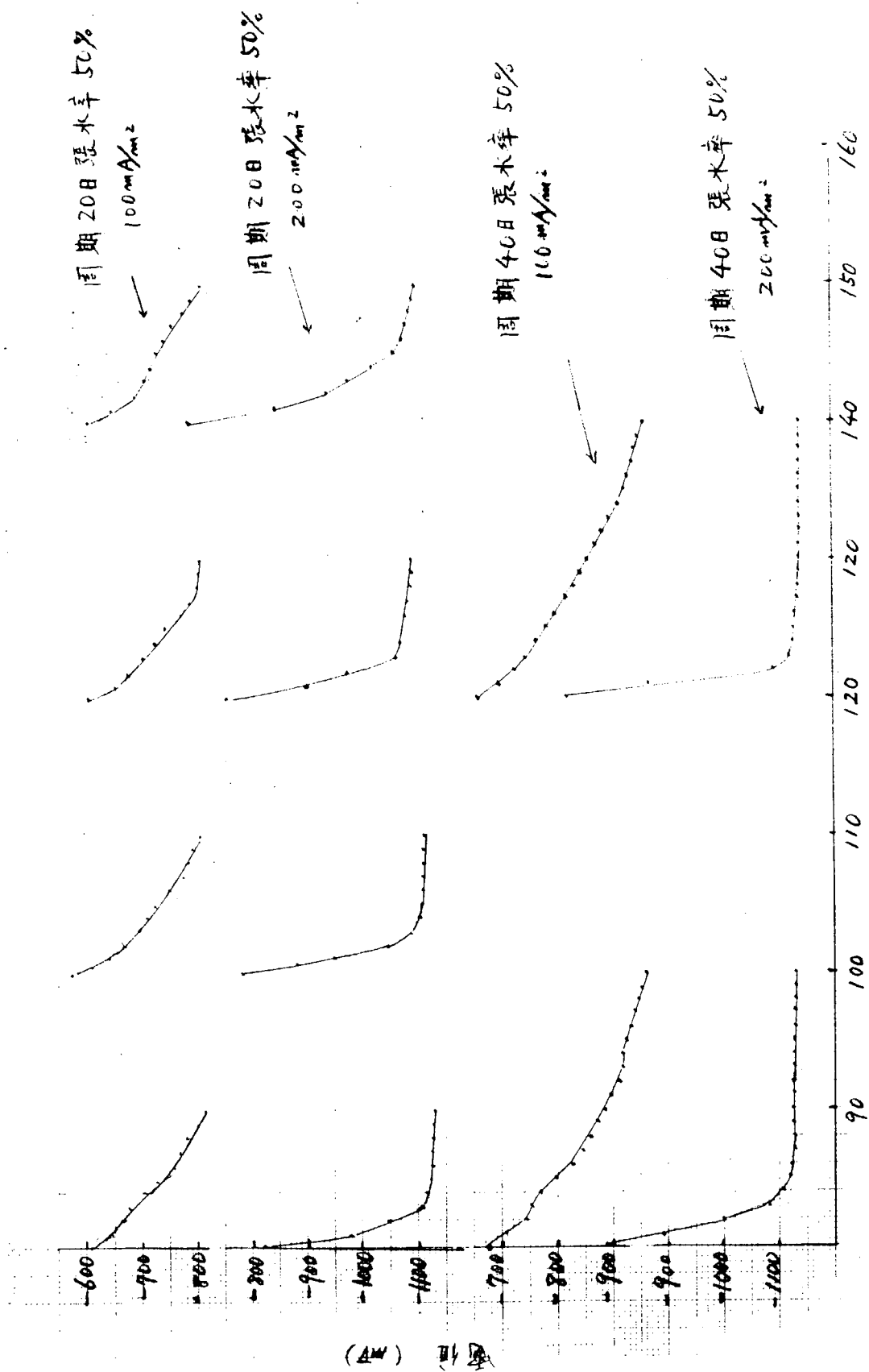


図 3.3.2 試験槽電位の経時変化

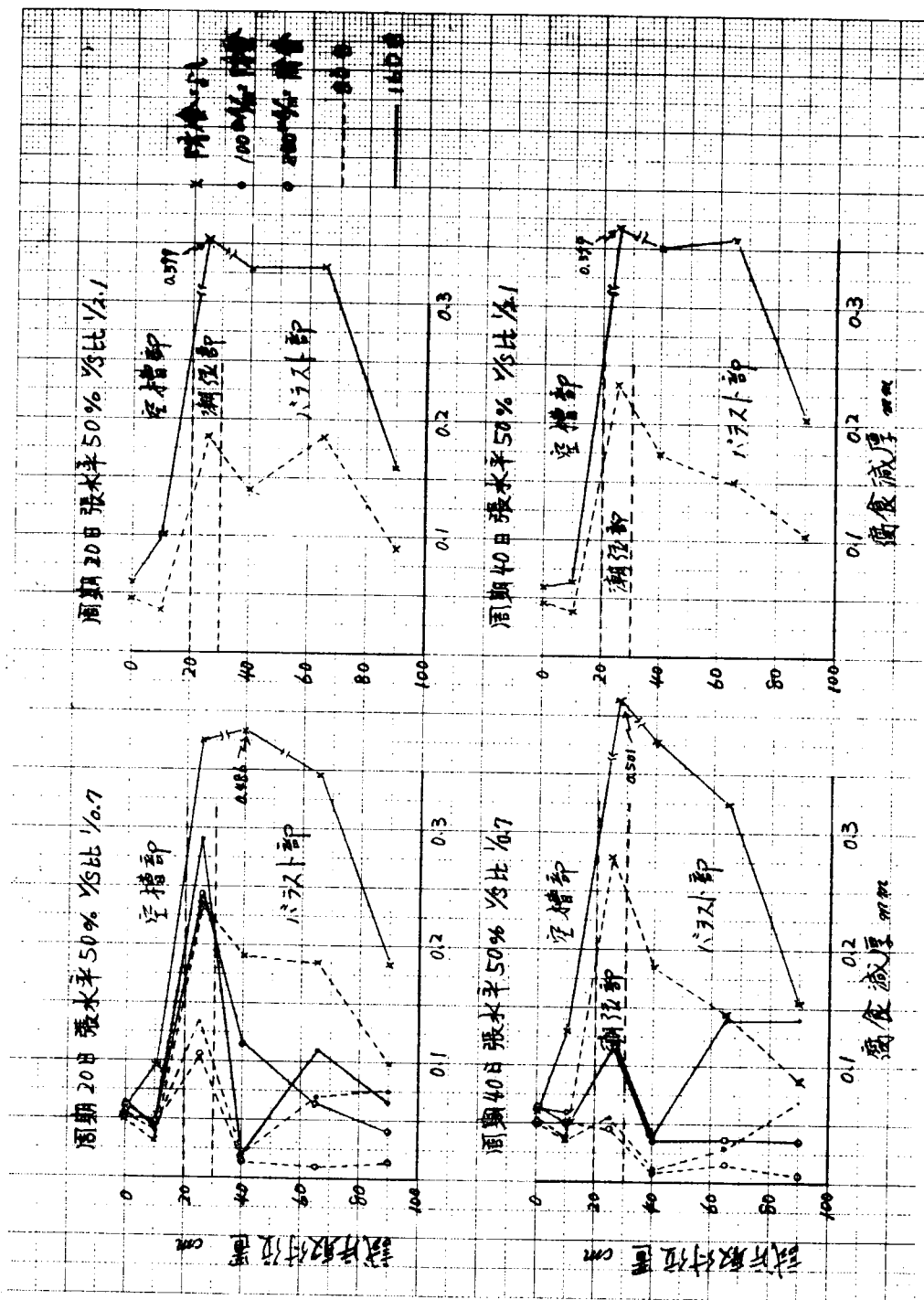


図 3.3.3 V/S テストに於ける腐食減厚 (単独試片の重量減より求めた)

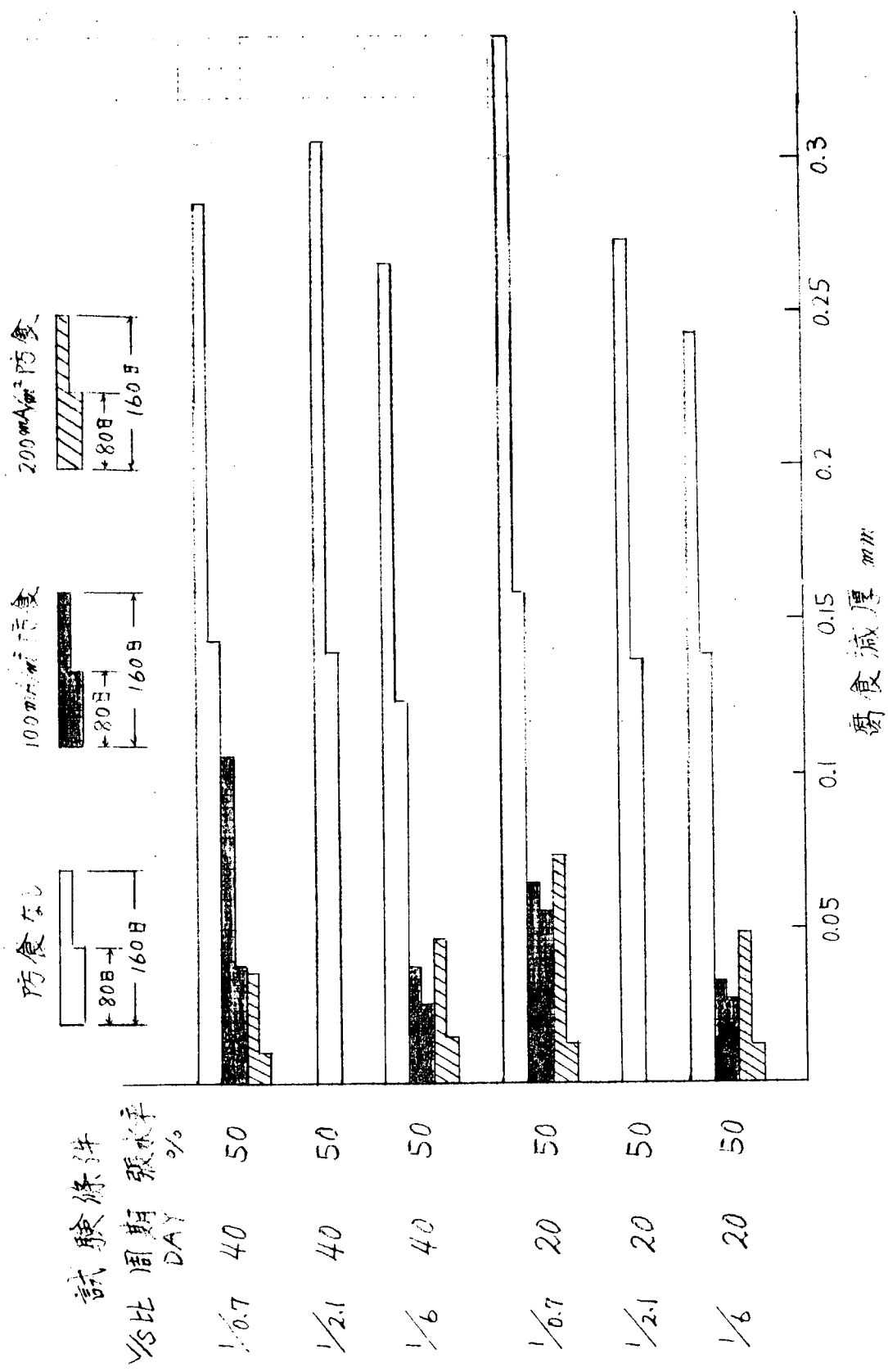


図 3.3.4 V/S テストに於ける腐食減厚 (単独試片の重量減より求めた)

3.4 イナートガス組成と防食効果の実験

3.4.1 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海水のバラストされる部分を対象に腐食を^{*}検討した。

3.1～3.2で述べたと同じ恒温水槽（40℃）に1m角の軟銅タンクを浸漬し、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。バラスト海水の排水期間（空槽期間）には試験槽底部に僅かに海水を残し、雰囲気が常時湿り雰囲気となるように考慮した。試験条件を表3.4.1に示す。その他の条件は3.1，3.2に順じた。

表 3.4.1 試験条件

ガス組成	CO ₂ (%)	O ₂ (%)	SO ₂ (%)	
1	15	5	0.1	周 期 20日
2	15	5	0.02	張 水 率 50%
3	15	2	0.1	張水日数 10日
4	15	2	0.02	排水日数 10日

3.4.2 試験結果

電位変化の一例を図3.4.1に試験槽各部分の腐食分布を図3.4.2に示す。バラスト部分3ヶ所の平均値を用いて各種のイナートガス条件における腐食の変化を図3.4.3に示した。図の中で黒棒は第2年度で試験したバラストタンクの常時空槽部分を想定した（水分飽和状態で且つ海水によって鋼の表面が汚染されない）場合の腐食を今回の試験結果と比較のため示したものである。空気雰囲気と燃焼排ガス雰囲気のバラストタンク天井部（常時空槽部分）に対しては酸素濃度の低い亜硫酸ガスの濃い場合の腐食が若干大きい。実際の環境に近いガス雰囲気（O₂ 5%，SO₂ 0.02%）では特に腐食を促進する傾向はみられない。腐食速度にイナートガス雰囲気の場合時間と共に低下する傾向を示し、空気雰囲気に比べて、良い結果を示している。この傾向はバラスト海水の張排水される部分に対して特に顕著に表われ、イナートガス雰囲気はバラスト部分に対して、防食効果のある結果を得た。即ち、SO₂ 0.02%，O₂ 5%において防食率は80日試験で36%，160日試験で60%を示した。

実船のイナートガスの防食効果については現在、疑問視されているが、本試験では天井部分については有害とするよりもむしろ有効との結果を得た。

このことは実船におけるイナートガスの使用雰囲気が原油ガス雰囲気で使用されている事と関連があるものと考えられ、これに対しては別途研究の必要があるが少なくともパーマネントバラストタンクの防食には完全でないにしても有効であると考えられる。

3.4.3 ま と め

イナートガスの防食効果をバラストタンクの常時空槽部分とバラスト部分に分けて検討し、次の結果を得た。

(1) 常時、空槽部分（天井部）に対する効果

通常の排ガス組成では（SO₂ 0.02%）,特に腐食を促進する傾向はみられず若干、防食効果が期待できる程度である。

(2) 張排水の繰返されるバラスト部分に対する効果

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% で防食率が80日試験で36%，160日試験で60%）を示した。

* 第2年度は空槽部（タンク天井部）を対象に試験した。

試験条件

No	CO ₂	O ₂	SO ₂
1	15	5	0.1
2	15	5	0.02
3	15	2	0.1
4	15	2	0.02

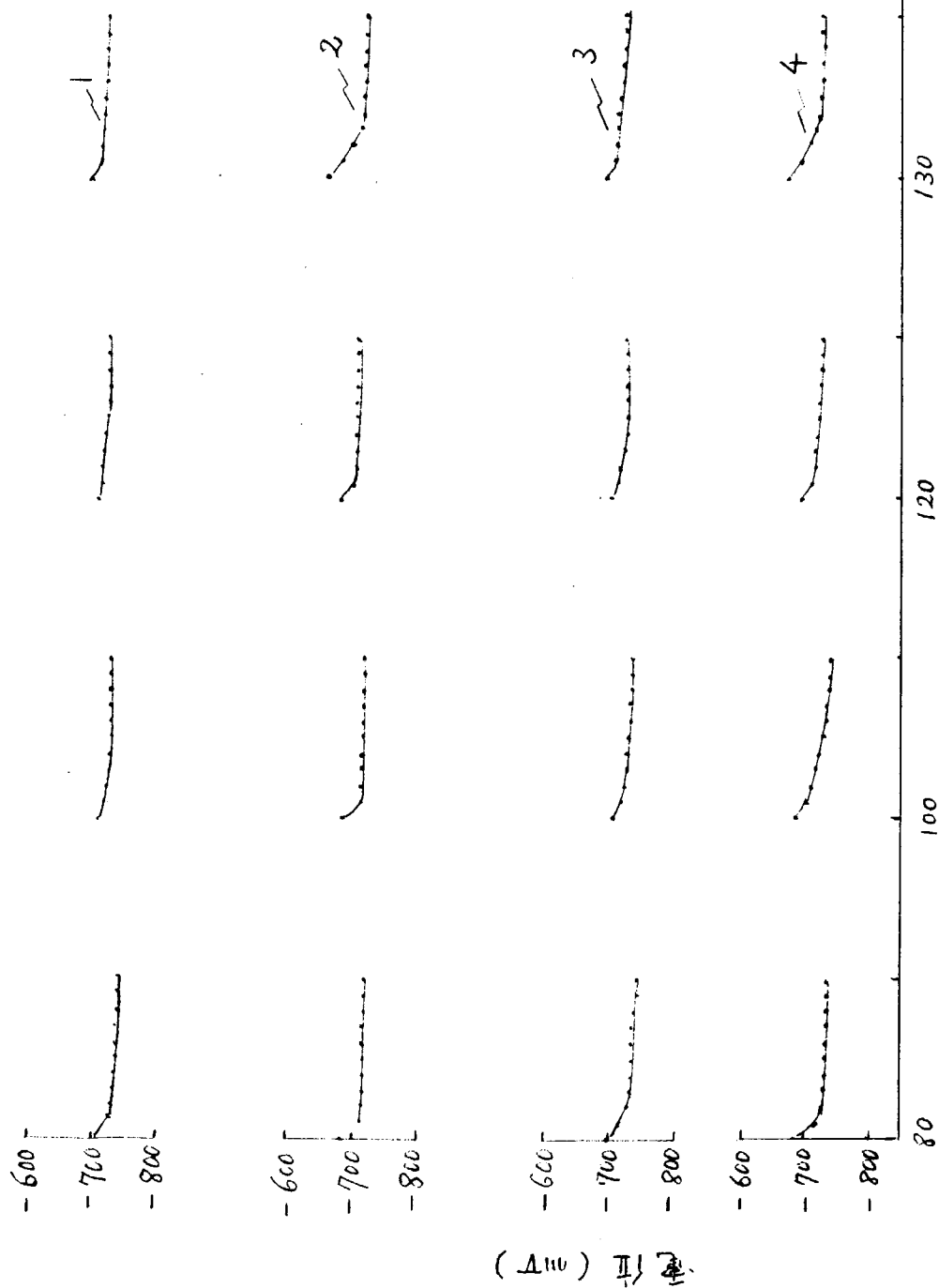


図 3.4.1 試験槽の電位変化

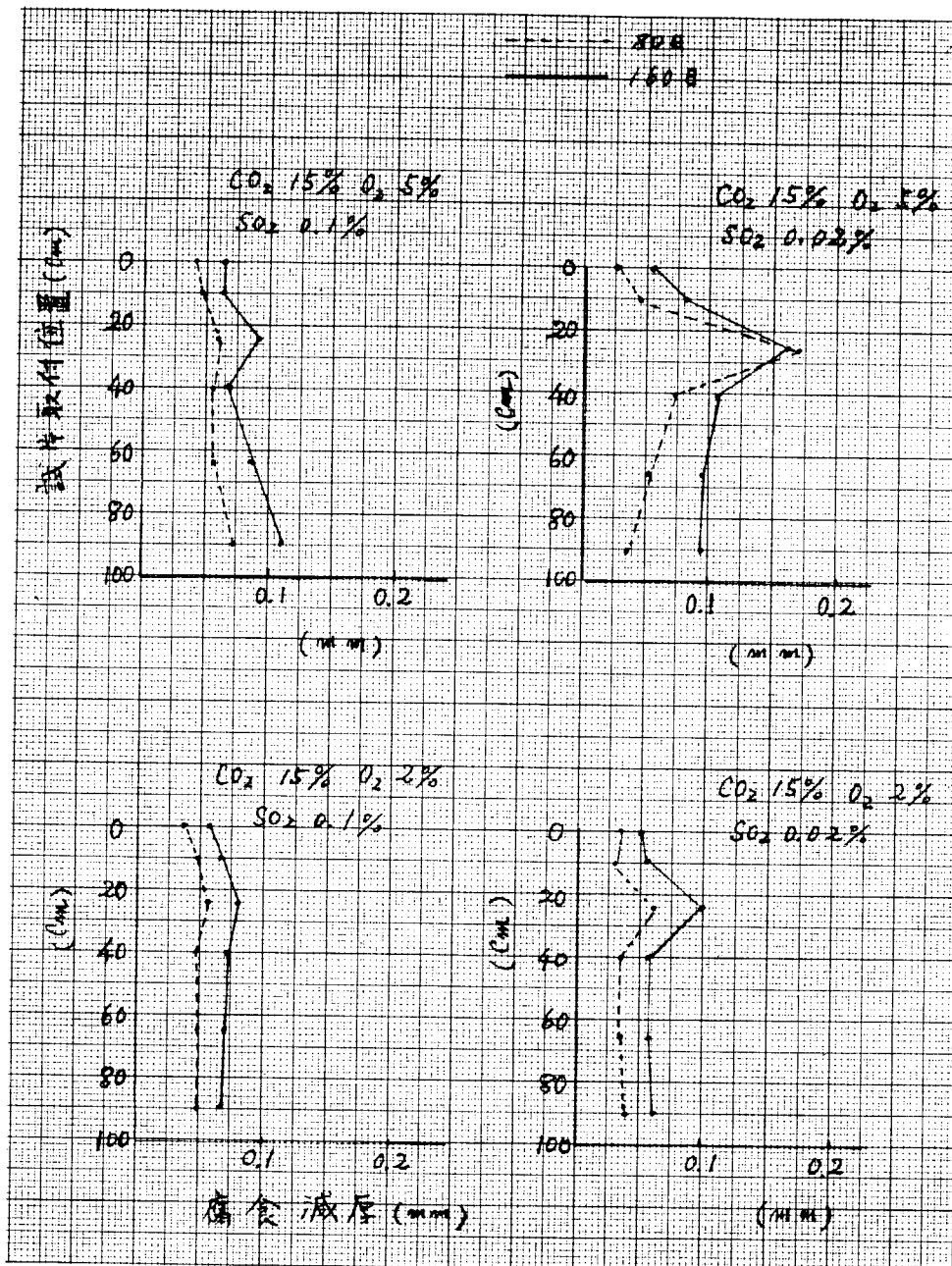


図 3. 4. 2 イナートガス雰囲気における腐食

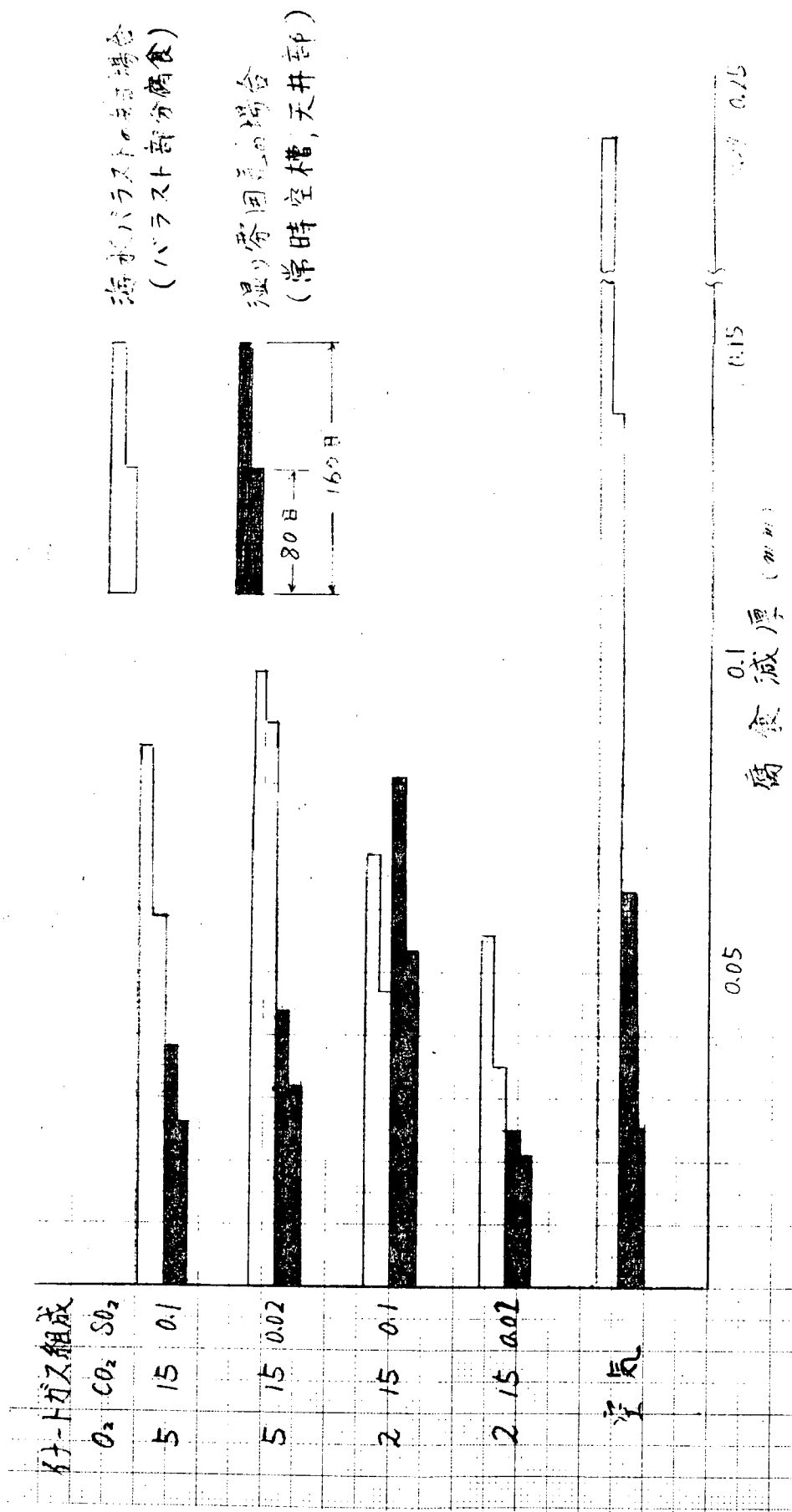
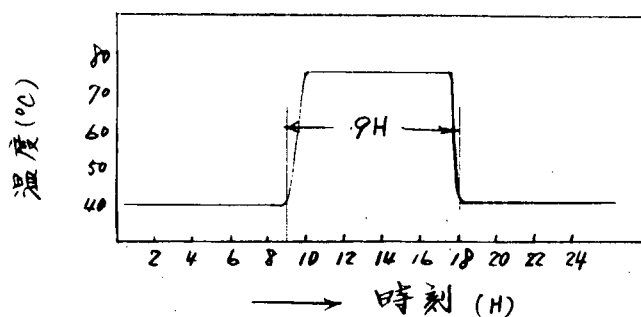


図 3. 4. 3 イナートガスによる防食効果

3.4.4 バラストタンク天井部の腐食について

バラストタンクの中で常時空槽部を形成すると考えられる天井部分の腐食は第2年度報告でも述べたように、本研究の結果では一番おだやかな腐食帯であることを示した。しかるに現実にはこの部分は最も腐食が激しいとされており、他に適当な防食手段のないまま画一的に塗装による防食が実施されている。

実船の天井部の腐食の激しい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第2年度研究で予備的に試験水槽の天井部を1日の中で8時間加熱を毎日繰返して実験したが、上昇温度が低く(34℃→45℃程度)腐食の促進がみられなかった。今回は70℃～80℃に1日のうち約9時間保持してみた。



この結果は表3.2.1.2にみられるように、温度の上昇によってバラスト部分に腐食に匹敵するほどの腐食の加速がみられた。

表 3.4.2 タンク天井部加熱による腐食
(周期40日, 張水率50%)

	試験期間 80日	試験期間160日
加熱なし	0.05mm	0.06mm
加熱	0.13mm	0.14mm

しかしながら、腐食速度はバラスト部分のような一定速度を示さず、時間と共に減少する傾向を示した。温度条件(昇温速度, 温度)繰返し応力付加によって腐食速度は種々変化すると思われるが、温度サイクルは天井部腐食の要因であることはこの試験の結果からまちがいないと考えられる。

3.5 塗膜損傷部の腐食に対する抑制法の検討

前年度実施した「応力の変化に対する塗膜の防食効果」の実験において、タールエポキシ塗料による塗装は、繰返し応力下でもすぐれた防食効果を示すが、塗膜に欠陥が存在するとその欠陥部の腐食が加速され、無塗装の場合より腐食疲れ寿命を低下することが判明した。

そこで、本実験は、タールエポキシ塗装鋼の塗膜損傷部の腐食を抑制するため、タールエポキシ塗装系の塗膜損傷部の防食性に及ぼすショッププライマーの効果ならびに電気防食を併用したときの副次効果として得られるエレクトロコーティング(電解被覆)による防食効果について調べた。

3.5.1 試験方法

(1) 試験装置および腐食環境条件

試験装置は、前年度の試験において製作した専用の両振平面曲げ腐食試験装置¹⁾を使用し、試験槽内の腐食環境は、前回と同様に人工海水を用いて40℃に調節した。液中の溶存酸素は、常に空気を吹込み飽和状態とした。腐食試験中、試験片に付加する両振平面曲げの条件は、曲げ応力を10kg/mm²、応力繰返し速度を0.6cpmとした。

(2) 試験片および塗装条件

供試材は、表 3.5.1 に示す化学成分の一般構造用圧延鋼材 (SS41, 板厚 3.2 mm) で、試験片は前回と同様に図 3.5.1 に示す形状に機械加工し、その表面はショットブラスト処理を行なって SIS:Sa3 とした。

その表面のアラサは、50S になるように留意した。塗料は、表 3.5.2 に示すように、2 種類のエポキシジンクリッチ系プライマと無機質ジンク系プライマおよびウオッシュプライマのショッププライマ・塗料を 4 種類と表 3.5.3 に示す厚膜型タールエポキシ系の防食塗料を用いた。これらの塗料を用いて表 3.5.4 に示す塗装仕様にしたがって 5 種類の塗装試験片を作製した。電解被覆の防食効果を調べるための、塗装試験片は、試験片 No.5 の仕様どおり直接タールエポキシ塗料を塗布して試験に供した。

塗膜欠陥は、ナイフ (NTCutterL-500) を用いて、図 3.5.1 に示したように長さ 20 mm の切傷を金属素地に達するまで入れて人工的に作った。

(3) 電解被覆形成方法

上述の試験片を両振平面曲げ腐食試験装置に取付けたのち、試験片 1 枚につき 1 個の流電陽極用亜鉛 (50×20×5 mm) を対極にして、北斗製 PGS-1 型ポテンシオスタットを使用して試験片と流電陽極用亜鉛 (50×20×10 mm) との電気回路を形成した。亜鉛は、試験片 1 枚に 1 個づつリード線で吊り下げ、また、電位設定のための照合電極は、飽和甘汞電極を用いて同一試験条件の試験片 2 枚につき 1 個づつ設置した。

このようにして、各試験片の電極電位をポテンシオスタットにより、外部電源防食法の形式で電位を 8 日間一定に維持して電解被覆を形成させた。

ポテンシオスタットにより設定する電位は、 -0.9 V および -1.0 V (SCE) の 2 水準とした。

(4) 電解被覆防食効果の評価方法

電解被覆の防食性能を調べる方法は、表 3.5.5 に示すように電解被覆処理した試験片をそれぞれ 2、5 日、10 日および 20 日ごとに 2 日間再電解被覆処理を行ない、これを、1 サイクルとして繰返し、無電解時間 (腐食試験時間) が、累計 20 日に到達するまで試験したのち、発錆状況の観察および侵食深さを測定した。また、各サイクルごとの設定電位に対する陰極電流を測定して、評価の参考とした。侵食深さの測定方法は、試験片につけた塗膜の人工傷に対して直角断面を切り出し、これをエポラック樹脂に固めて検鏡試料と同様に鏡面に仕上げたのち、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ーで測定した。

3.5.2 試験結果

(1) 塗膜損傷部の腐食に対するショッププライマの防食効果

図 3.5.2 に 40℃ の人工海水中、繰返し応力下で 20 日間試験を行った各種タールエポキシ塗装系試験片の塗膜損傷部に発生した腐食の深さを測定した結果を示す。また、写真 3.5.1 にこれらの腐食断面の形態を示す。

タールエポキシ塗料を直接塗布した塗膜損傷部の腐食は、20 日間に 0.6 mm 進行するのに対して、タールエポキシ塗膜の下地に供試無機質ジンクプライマーおよび長暴型ウオッシュプライマーを塗布した試験片の腐食は、タールエポキシ塗料単独の場合の約 $\frac{1}{2}$ 、エポキシジンクリッチプライマーを下塗りに塗布した試験片の腐食は、約 $\frac{1}{3}$ に抑制されることが明らかになった。

(2) 電解被覆の防食効果

(a) 裸鋼に対する防食効果

-0.9 および -1.0 V (SCE) でそれぞれ電解被覆を形成させた裸鋼の試験片について、40℃ の人工海水中繰返し応力下で、腐食と再電解被覆処理とのインターバルを変化させて試験を繰返し、累積腐食時間が 20 日経過した後の発錆状況を観察した。

写真 3.5.2 および写真 3.5.3 に試験後の外観を示す。また、図 3.5.3 に腐食-再電解被覆処理とのインターバルと発錆率との関係を示す。 -1.0 V (SCE) で電解被覆を形成させた試験片は、腐食環境条件で、連続 20 日間経過しても試験片の側面が発錆している程度で、側面の発錆を考慮しても、発錆率は 4% 程度である。

試験片表面の大部分は、写真 3.5.2 に示したように、白色の石灰質皮膜で覆われ防食されている。しかし、 -0.9 V (SCE) で形成させた試験片は、 -1.0 V (SCE) で形成させたものに比較するとかなりの発錆が認められ、かつ、腐食-再電解被覆処理のインターバルが、長くなるほど発錆率が增大する傾向が顕著に現われている。

(b) 塗膜損傷部に対する防食効果

図 3.5.4 は、人工的に損傷を付与したタールエポキシ塗装試験片に上述の裸鋼の場合と同様に -0.9 V (SCE) および -1.0 V (SCE) で、それぞれ電解被覆処理を行ったのち、各条件で腐食試験を行ない腐食再電解被覆処理のインターバルと塗膜損傷部の侵食深さとの関係を示したものである。この図から、塗膜損傷部の侵食深さは、腐食-再電解被覆処理のインターバルが長くなるにしたがって増大する傾向を示し、また、 -0.9 V (SCE) よりも -1.0 V (SCE) で電解被覆した方が、少ないことがわかる。しかし、この電解被覆の防食効果は、図 3.5.2 に示したジョッププライマーの防食効果の試験結果と比較してみると明らかになるように、 -0.9 V (SCE) の電解被覆処理でもいずれのジョッププライマーの防食効果よりすぐれており、腐食速度が約 $\frac{1}{6}$ に抑制される。

(c) 設定電位に対する維持電流の変化

電解被覆を適用した面には保護的な石灰被覆が生成し、腐食を抑制するが、この皮膜が劣化し発錆すると再電解被覆のための設定電位に対する所要電流が変化する。この電流変化から塗膜損傷部の電解被覆の劣化状況を検討した。図 3.5.5 は、 -1.0 V (SCE) で電解被覆後、腐食-再電解被覆処理のインターバルを 2.5 で試験した各サイクルごとの維持電流の経時変化を 1 例として示した。

この維持電流は、時間の経過とともに減衰するものの数 10 時間後には、ほぼ定常値に落つく。各サイクルごとの維持電流は、2 サイクル目以上になると、1 サイクル目よりも大きくなっている。この傾向を明瞭に示すために腐食-再電解被覆処理のインターバルを変えて得られた試験片の維持電流の定常値をまとめて、各サイクルごとにプロットすると図 3.5.6 のようになる。

この図から腐食-再電解被覆処理サイクルで、連続の腐食時間が長くなるほど定電位における維持電流が著しく増大することがわかる。

3.5.3 ま と め

以上の結果をまとめると次のようになる。

- (1) タールエポキシ塗膜の損傷部に起る激しい腐食は、その塗膜の下塗りにジョッププライマーを塗布することによってかなり抑制できる。
- (2) その効果は、長暴型ウオッシュプライマーおよび供試無機質ジンクリッチプライマーで約 $\frac{1}{2}$ ，エポキシジンクリッチプライマーで約 $\frac{1}{3}$ に腐食を抑制できる。
- (3) 電解被膜による防食効果は、ジョッププライマーの防食効果より大である。
- (4) 電解被覆は、形成した電位が -1.0 V (SCE) のとき良好な被膜となる。

参 考 文 献

- 1) 日本造船研究協会：第 140 研究部会 48 年度研究報告書

研究資料 No. 201 P. 56 昭 49 年 3 月

表 3.5.1 供試鋼の化学成分 (%)

C	Si	Mn	P	S
0.13	0.02	0.52	0.006	0.011

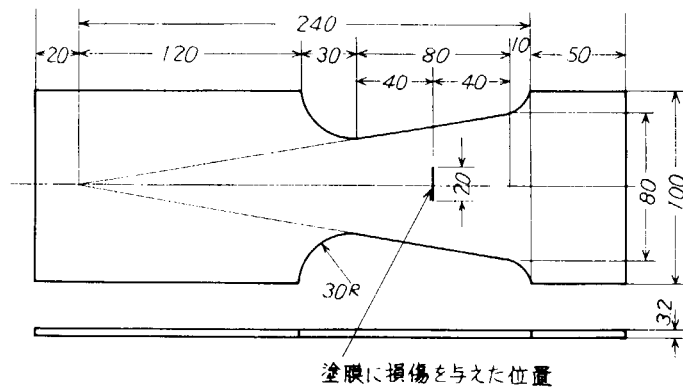


図 3.5.1 試験片の形状

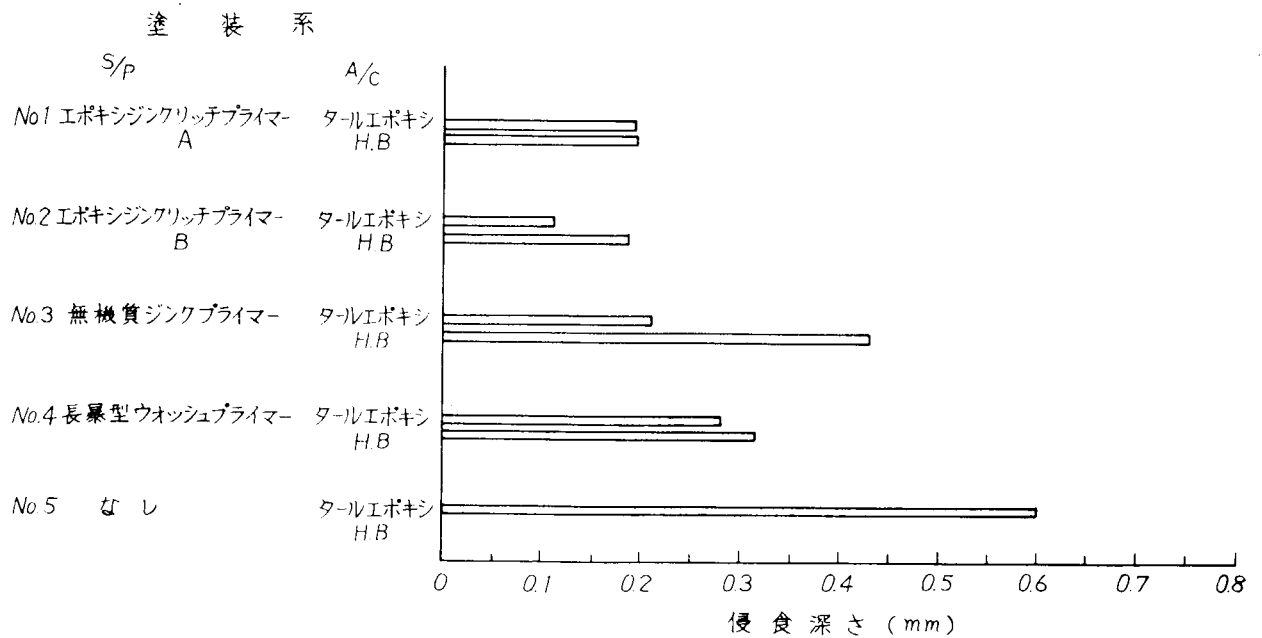


図 3.5.2 各種タルエポキシ塗装系試験片の塗膜損傷部の侵食深さ
(40℃人工海水中, 応力繰返し速度 0.6 cpm, 曲げ応力 10 kg/mm^2 , 試験期間 20 日)

表 3.5.2 供試ショットブライマーの性状

種 類 項 目	エポキシジンク ブライマー (A)	エポキシジンク ブライマー (B)	無機質ジンク ブライマー	長暴型ウォッシュ ブライマー
色 相	灰 色	灰 桃 色	灰 緑 色	暗 緑 色
比重 (調合塗料)	2.8	2.3	1.55	0.90
配合割合 (重量比)	主 剤 : 2.4 硬化剤 : 1.2 亜鉛末 : 11.4	主 剤 : 4.2 硬化剤 : 1.3 亜鉛末 : 9.5	主 剤 : 4 添加剤 : 2 粉 末 : 4	主 剤 : 4 添加剤 : 1
亜鉛末含有量 (乾燥塗膜中)	91%	80%	70%	0
膜 厚	18 μ	18 μ	13~18 μ	15 μ

表 3.5.3 供試タールエポキシ樹脂塗料の性状

種 類 項 目	ハイビルド型タールエポキシ樹脂塗料
比 重	1.20
配合割合 (重量比)	主 剤 : 85 硬化剤 : 15
膜 厚	250 μ

表 3.5.4 試験片塗装仕様

試 験 片 仕 様	1	2	3	4	5
塗 装 前 処 理	ショットブラスト	ショットブラスト	ショットブラスト	ショットブラスト	ショットブラスト
ショットブライマー (膜厚: μ)	エポキシジンク ブライマー (A) (18)	エポキシジンク ブライマー (B) (18)	無機質ジンク ブライマー (18)	長暴型ウォッシュ ブライマー (15)	—
防 食 塗 料 (膜厚: μ)	HBタールエポキシ (250)	HBタールエポキシ (250)	HBタールエポキシ (250)	HBタールエポキシ (250)	HBタールエポキシ (250)

表 3.5.5 電解被覆試験片の腐食試験条件

	1 サイクル中の 腐食経続時間 (days)	1 サイクル中の 電防経続時間 (days)	繰 返 し 数	累 積 腐 食 時 間 (days)
a	2.5	2	8	20
b	5	2	4	20
c	10	2	2	20
d	20	2	1	20



№ 1
エポキシジンク
リッチプライマー A



№ 2
エポキシジンク
リッチプライマー B



№ 3
無機質 ジンク
プライマー



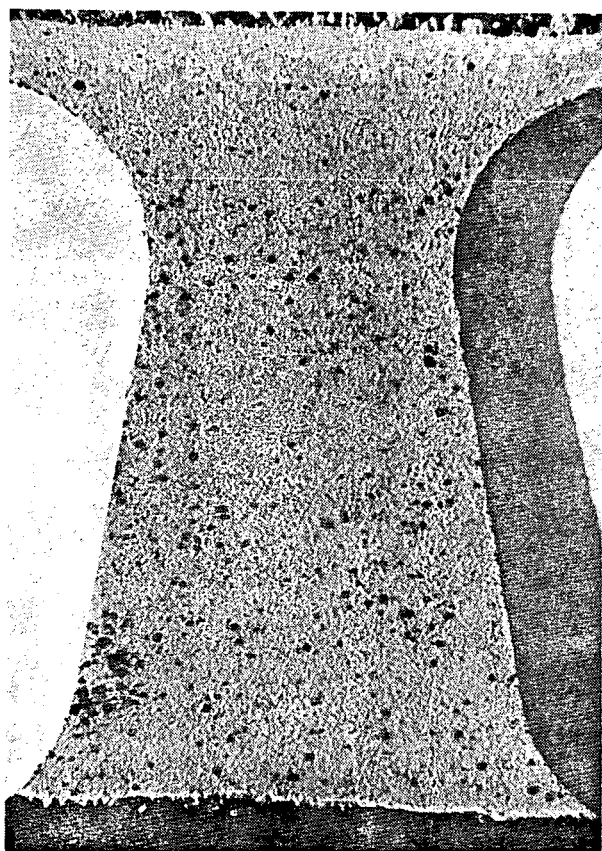
№ 4
長 暴 型
ウオッシュプライマー



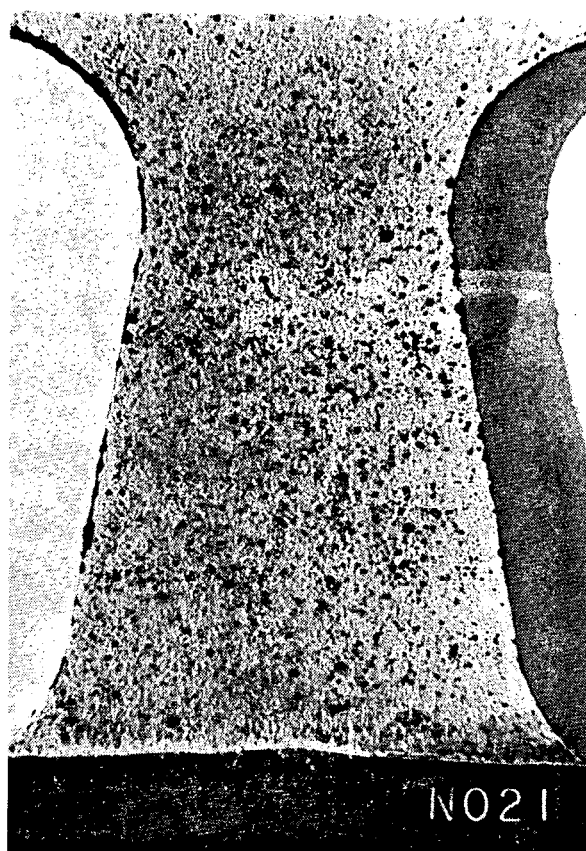
№ 5
プライマーなし



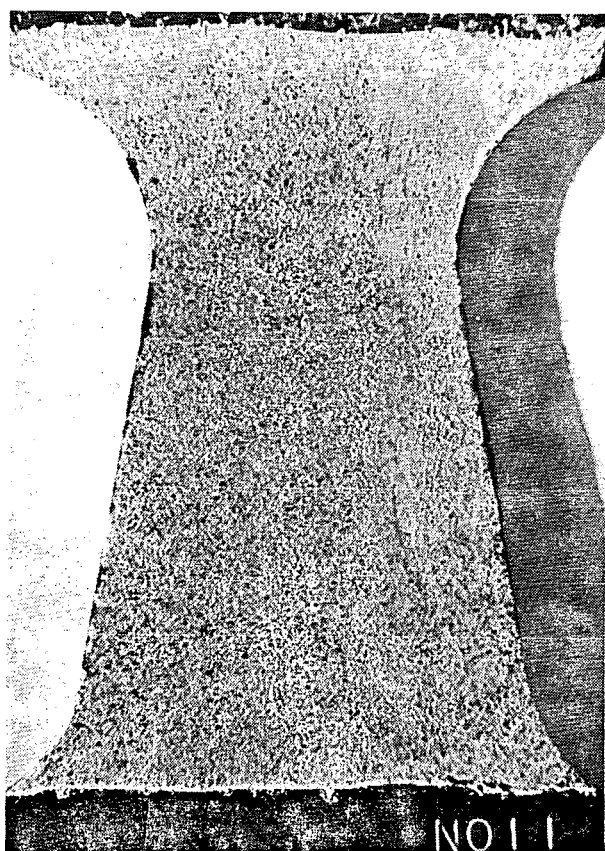
写真 3. 5. 1 タールエポキシ塗膜損傷部の腐食断面 × 1 0



(a) 2.5日腐食サイクル



(b) 5日腐食サイクル



(c) 10日腐食サイクル



(d) 20日腐食サイクル

写真 3.5.2 電解被覆した裸鋼の試験後の外観 (- 1.0 V)



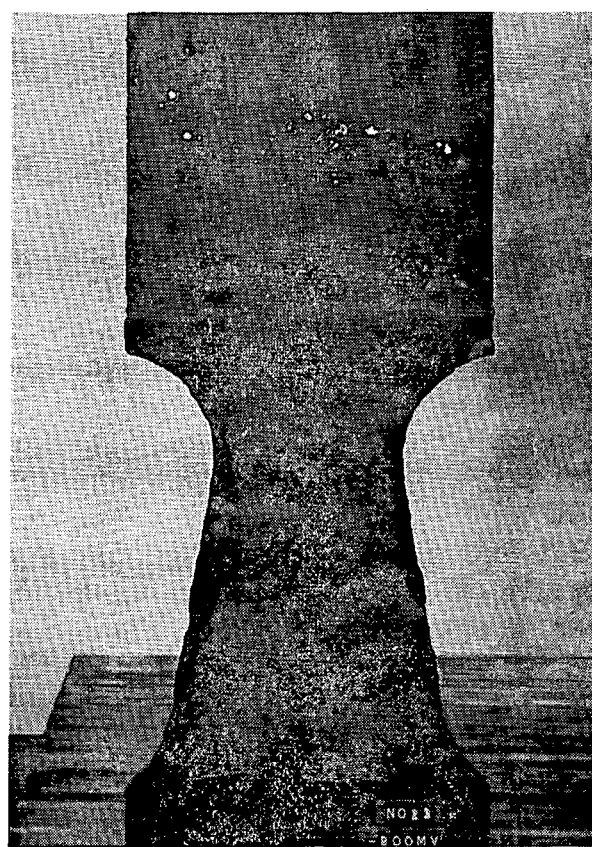
(a) 2.5日腐食サイクル



(b) 5日腐食サイクル



(c) 10日腐食サイクル



(d) 20日腐食サイクル

写真 3.5.3 電解被覆した裸鋼の試験後の外観 (- 0.9 V)

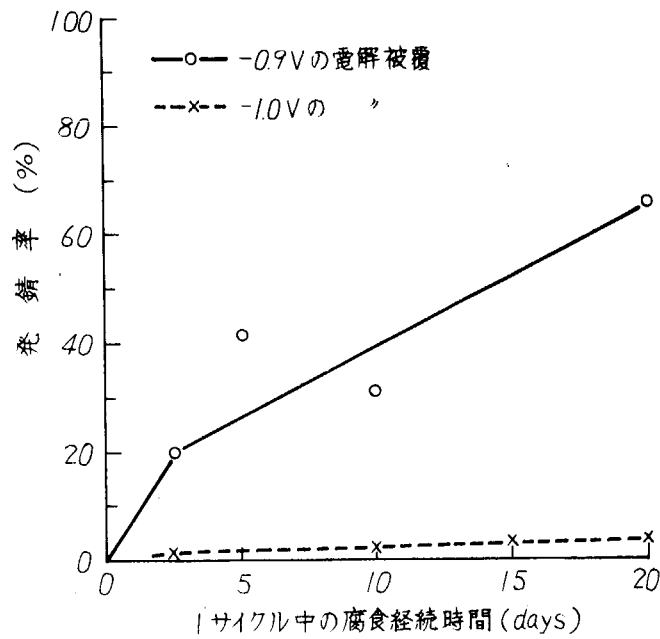


図 3.5.3 電解被覆した裸鋼の腐食-電防1サイクル中の腐食経続時間と発錆率との関係

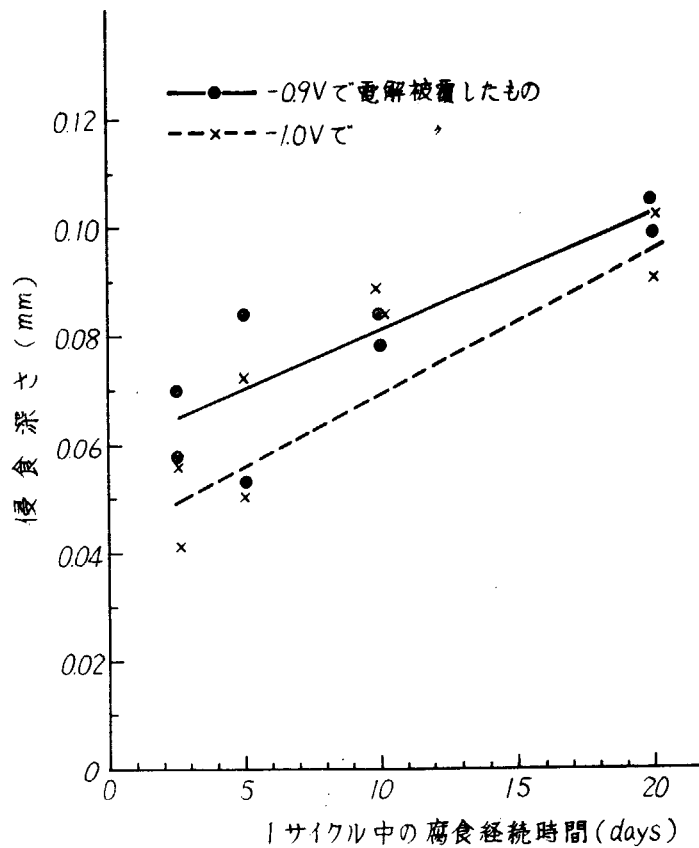


図 3.5.4 タールエポキシ塗装鋼の塗膜損傷部の腐食に
およぼす腐食-電防1サイクル中の腐食経続時間の影響
40℃人工海水中応力繰返し速度 0.6 cpm, 曲げ応力 10 kg/cm^2
累積腐食経続時間 20 days

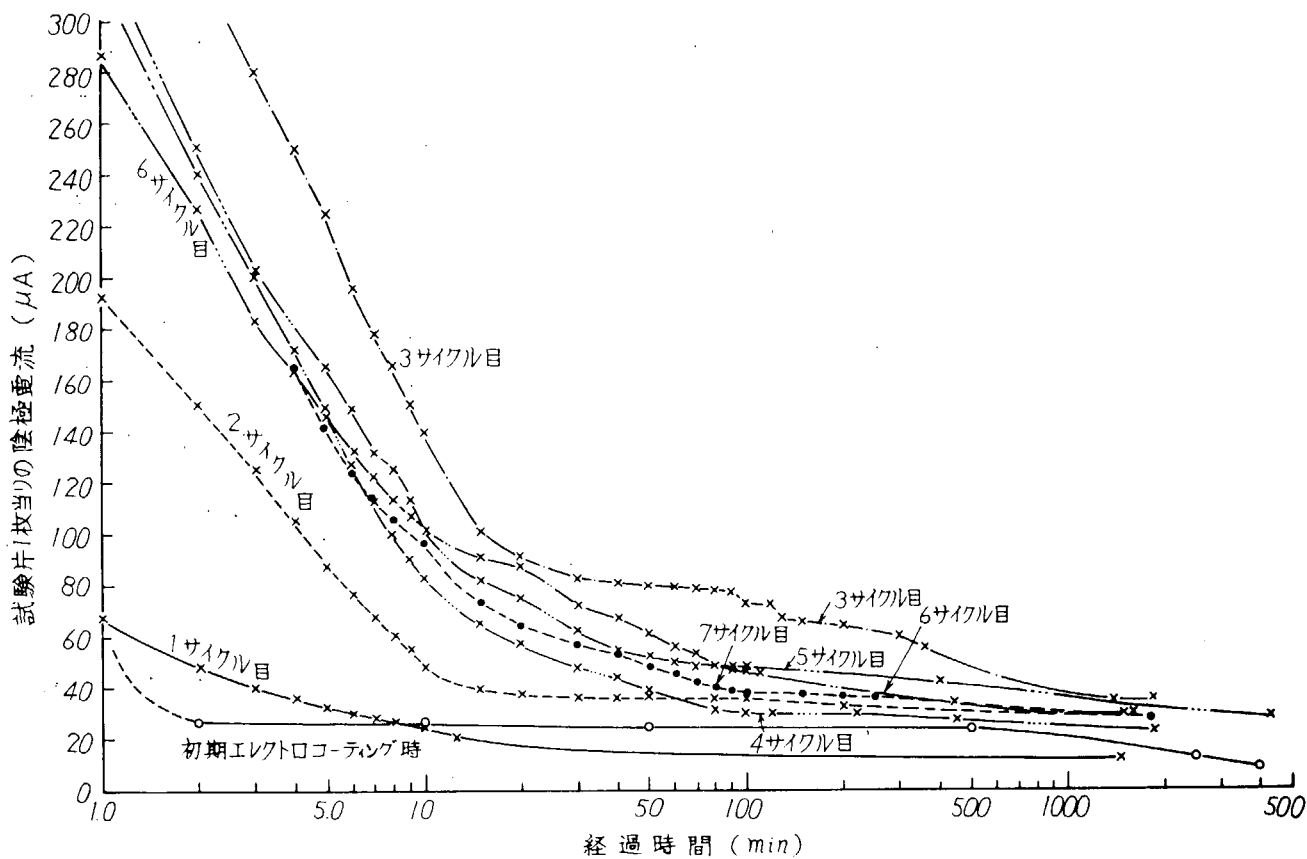


図 3.5.5 タールエポキシ塗膜損傷部の陰極設定電位 (-0.1 V vs SCE) に対する所要電流の変化
(腐食-電防1サイクル中の腐食経続時間2.5日の場合)

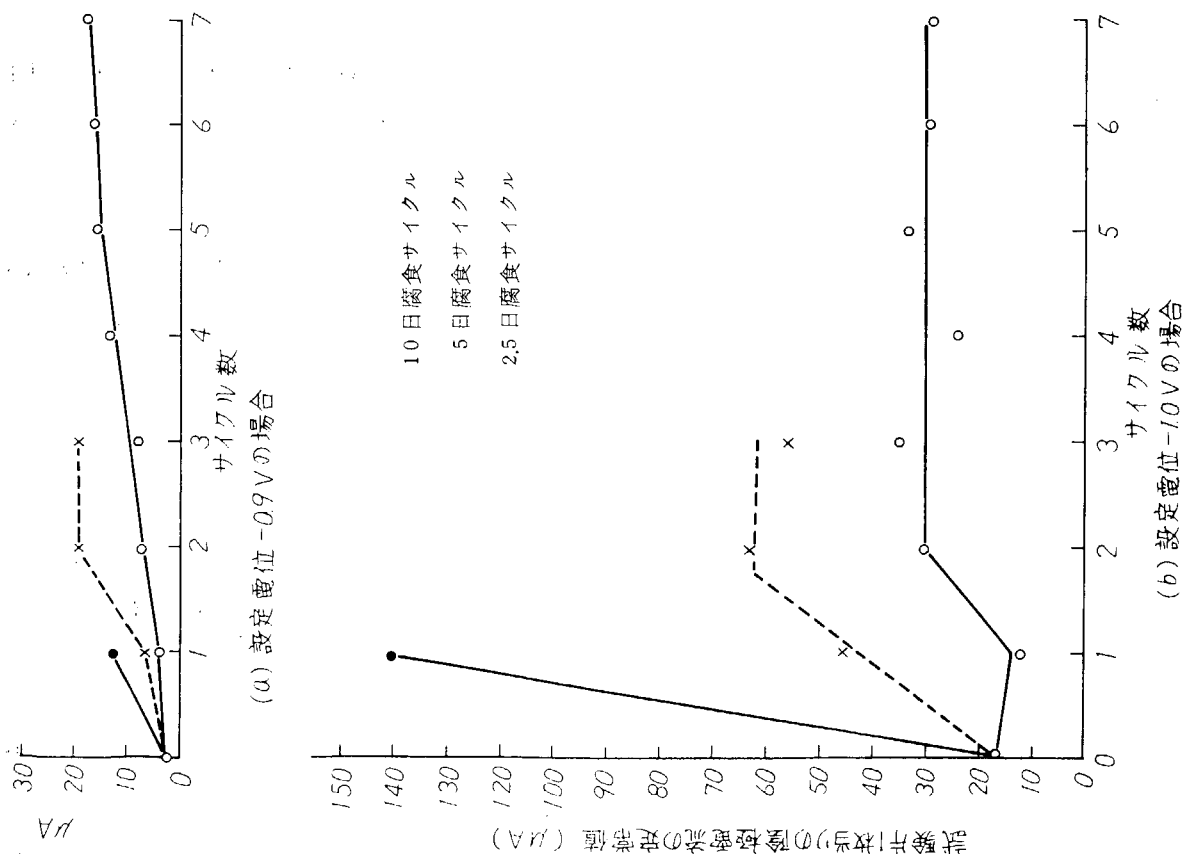


図 3.5.6 腐食-電防サイクルによる陰極電流変化

3.6 軟鋼の低速度低応力腐食に関する試験

船舶のバラストタンクにおける低速度低応力環境下の鋼材の腐食促進については、昭和48年度の研究結果から応力あるいは歪みを付加した場合、繰返し付加条件下においては孔食をとまなり腐食促進の傾向が認められている。本研究は海水バラスト条件にさらに低速度低応力繰返し条件を加えて鋼の腐食の加速状況を調査するものである。

本年度は中温40℃の海水バラスト張排水条件さらに低速度低応力の繰返し条件を加え、応力の有無による腐食促進の可能性および表面状況を調べる。

3.6.1 試験方法および試験条件

(1) 試験方法

応力付加が腐食現象に影響を与えるならば表面状態の変化すなわち表面生成物の性状の変化が電気化学的に電位の変化、分極抵抗の変化あるいは電気的に抵抗の変化としてあらわれるものと予想されるのでそれらを計測することとした。

試験装置は腐食環境の調節が可能な試験槽内にビーム法応力腐食試験片ホルダーを固定し所定の条件により応力を付加した。

(2) 試験片

応力付加試験片ホルダーの概略を図3.6.1に示す。試験片の中央に生じるたわみと付加された応力とは次式の関係を有する。(1966年1月、学振9.7委ステンレス鋼分科会資料による)

$$\delta = \frac{\sigma l^2}{6 E h}$$

δ : たわみ mm
 σ : 応力 kg/mm^2
 l : 外側の2支点の距離 mm
 E : 弾性係数 kg/mm^2
 h : 試験片の厚さ mm

たわみ δ はダイヤルゲージまたはマイクロメータを用いて測定する。

試験片は軟鋼(SS41)で形状を図3.6.2に示す。寸法は15×85×1mmの板状で表面は研摩紙800番で仕上げアセトンで脱脂洗浄した。引張応力のかゝる凸側の片面の中央部15×15mmを暴露し他はゴム系塗覆剤(ブライオボンド)で絶縁した。

(3) 試験条件

付加応力は0~49 kg/mm^2 の数種とし、応力繰返し条件は2~12回/dayの範囲内で変えた。バラスト海水はASTMの人工海水で液温40℃とし、バラスト率は50%とした。

3.6.2 試験結果

最初に海水バラスト条件、応力付加条件を種々に変えて予備的に各種の測定を行なった。

(1) 常温海水中的自然電位に対する応力の影響

試験の全期間を25℃、人工海水の張水状態にし、応力49 kg/mm^2 を付加したときの鋼の自然電位(腐食電位)を無応力の場合と比較して図3.6.3に示す。両試験片とも当初約-370mVを示すが5時間後には約-700mVとなつてほぼ定常状態を示した。その間、浸漬20分後から5時間後までの間 σ_{49} の試験片は σ_0 より卑な値を示したが、応力付加によって表面加工時の酸化皮膜の破壊が促進されたものと思われる。

(2) 40℃海水中における自然電位および自然腐食量

図3.6.4には海水温度40℃の張水期間における自然電位と応力の関係を示す。40℃程度の中温条件下では付加応力にもとづく自然電位の差は小さく明瞭でない。

表3.6.1にはこのときの試験片の腐食減量を示す。付加応力の大きい場合の腐食が大きい σ_{20} と σ_{40} の差は小さい。腐食表面は25℃の場合の赤錆に比べて40℃では黒味がかつた錆が認められる。

(3) 応力繰返し条件下における自然電位および分極抵抗

海水温度 40℃ で張排水繰返しに応力繰返しを加えた条件下における自然電位の測定結果を図 3.6.5 に示す。張水期間中の応力繰返しにともなう自然電位の変化は小さく付加応力のきさによる差も明瞭でないが、試験期間の途中に排水期（空槽）をはさむと次の張水期の初めに著しく貴電位を示し短時間では排水期前の電位に回復しない。これは排水期間中さらに発錆（酸化）が著しかったことを示している。

この条件下において測定した分極抵抗の変化を図 3.6.6 に示す。試料に対してその表面の自然腐食状態が乱れない程度の小さい外部電流（ ΔI ）を印加し、その分極を電位変化（ ΔE ）として測定すると、画かれる分極曲線（ $\Delta I - \Delta E$ ）は腐食電位にごく近い電位領域（ $\pm 20 \text{ mV}$ ）で直線関係を示しその勾配すなわち分極抵抗（ $\Delta E / \Delta I$ ）と腐食速度との間には次式が成り立つ。

$$\text{腐食速度} = K \frac{\Delta I}{\Delta E}$$

図 3.6.6 は応力繰返し過程における分極抵抗の逆数（ $1/R_p$ ）を示す。1 時間ごとの応力繰返しの最初の 3 サイクルでは腐食速度に対する応力付加の影響は明らかで σ_{20} 、 σ_{40} の場合は σ_0 の 1.5 ～ 2 倍を示している。その後応力付加状態で 4 1 時間の排水期間を経た後は排水前の約 10 倍を示すが σ_{20} の影響は低減する。以上のように応力繰返しによって腐食が促進されることは明らかであるがバラスト張排水の繰返しによる影響が極めて大きいことも明らかである。

(4) バラスト張排水繰返し条件下における自然電位、自然腐食量および分極抵抗自然電位に対する海水バラスト張排水の影響を図 3.6.7 に示す。付加応力による差は小さく排水による影響が著しい。前述したように排水期における生成錆のために各張水期の初めは著しく貴電位を示し、張水期間中に徐々に卑となる。この各張水期の初めと終りの電位は張排水サイクルを重ねるごとに各応力の場合とも貴となり、錆の生成がすすんでいることを示している。その間の付加応力の影響は顕著でない。

表 3.6.2 には試験片の腐食減量を示す。張排水をとまなわない表 2.4.1 に比較すると張排水によって腐食促進が大きいことが明らかである。しかし付加応力の影響は認められない。腐食表面は赤錆部分が少なく黒味がかかった部分が多い。この傾向は張排水を繰返すごとに顕著になる。空気閉と液温 40℃ に原因があるものと思われる。

図 3.6.8 には張排水繰返しによる分極抵抗の変化を示す。排水期の影響が極めて大きく、3 サイクル目には腐食速度は約 10 倍を示しさらに増加の傾向にある。ここでも付加応力の影響は明らかでない。

3.6.3 ま と め

- (1) 一般に短期間のバラスト海水の張水状態および張排水繰返し状態において鋼の自然腐食電位に対する付加応力の影響は小さく有意の差を認めがたい。しかし張排水繰返し状態では応力の有無にかかわらず自然電位は次第に貴化する傾向が明らかである。
- (2) 分極抵抗の測定によれば応力繰返し条件にともなう腐食速度の増加が明らかであるが、バラスト張排水の繰返しの方が腐食速度にはより大きな影響を与える。
- (3) 重量減少測定によれば張水状態では付加応力による腐食増大が認められたが、張排水繰返し条件下では腐食促進が大きく付加応力の効果は顕著にあらわれない。
- (4) バラスト張排水繰返しに付加応力繰返しを加えられた条件下では、短期間には付加応力の影響が認められないので長期にわたる実験が必要である。

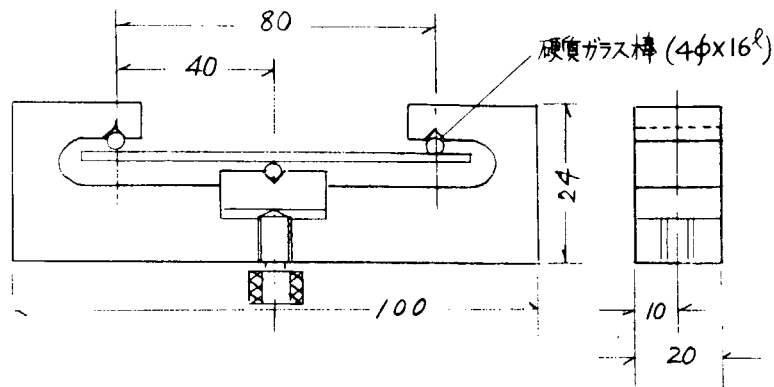
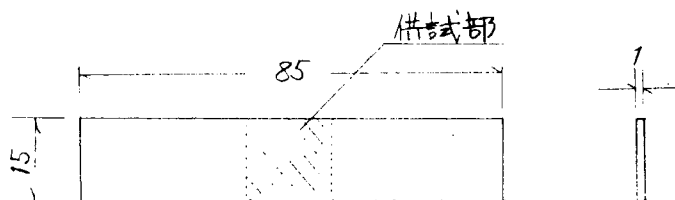


図 3. 6. 1 応力付加試験片ホルダー



軟金鋼 SS

みがき 研摩紙 800 番

暴露供試部: 片面の中央 15mm×15mm, 2.25cm²
他部はフライオボンド絶縁塗装

図 3. 6. 2 試験片

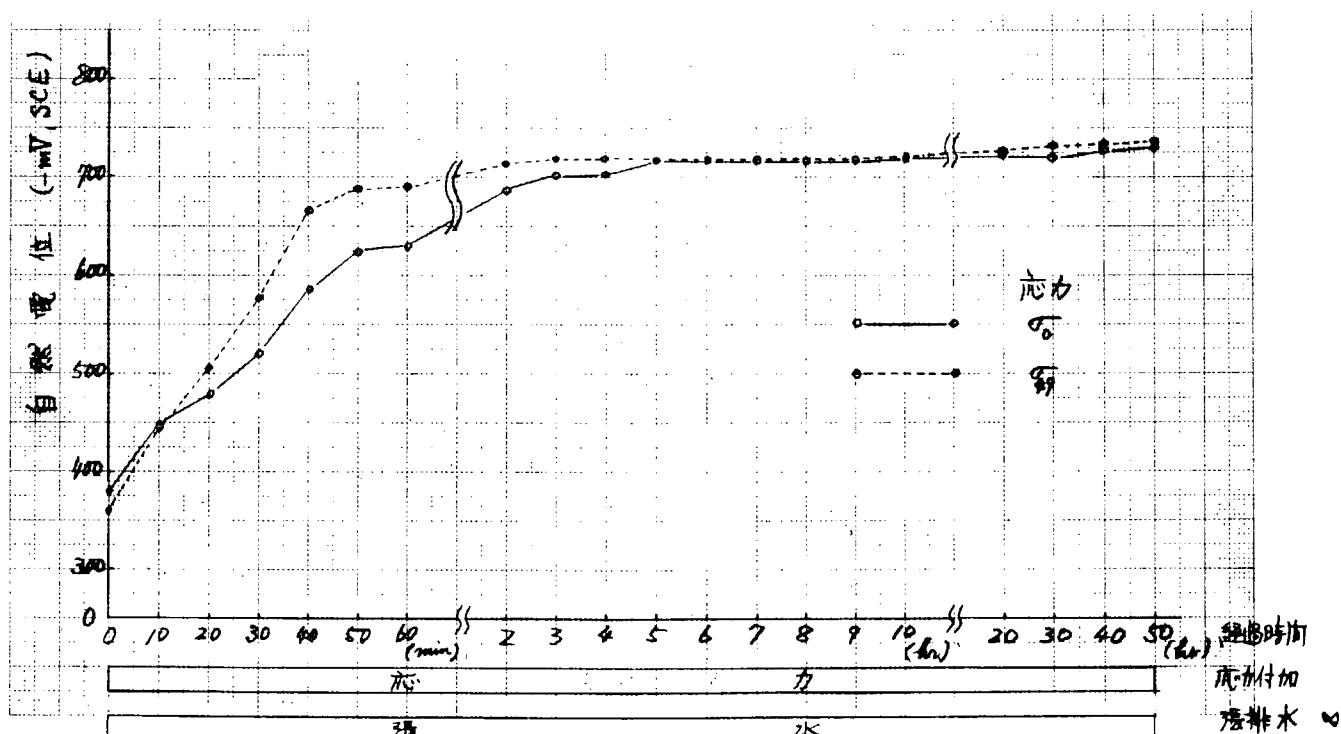


図 3. 6. 3 張水, 応力付加状態における自然電位の変化
人工海水, 25℃, 張水, 応力一定

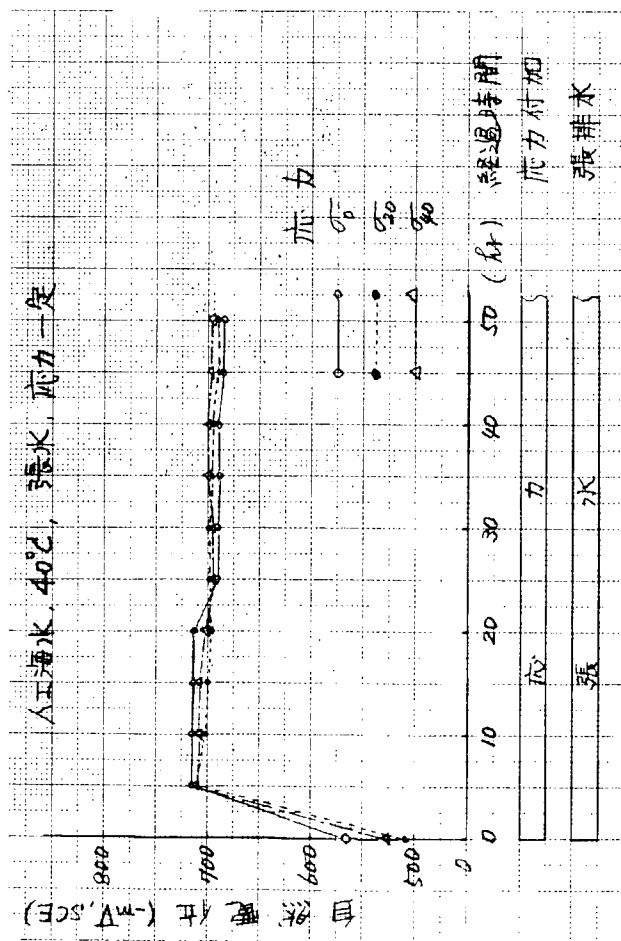


図 3.6.4 張水, 応力付加状態における自然電位の変化

表 3.6.1 張水, 応力付加状態における鋼の腐食量

付加応力 kg/cm^2	重量減 g	腐食速度 $\text{g}/\text{cm}^2/\text{hr}$
0	0.0063	0.292
20	0.0091	0.421
40	0.0100	0.463
人工海水, 40℃, 96 hr		
供試面積 2.25 cm^2		

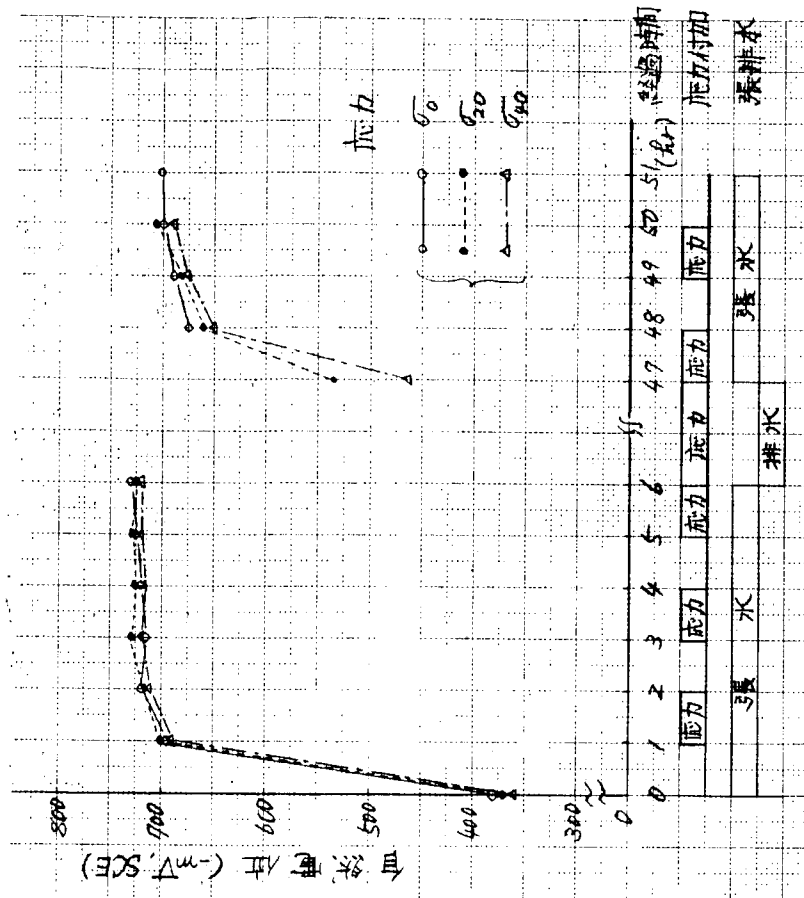


図 3.6.5 応力繰返し条件下における自然電位の変化

人工海水, 40℃, 張排水, 応力繰返し

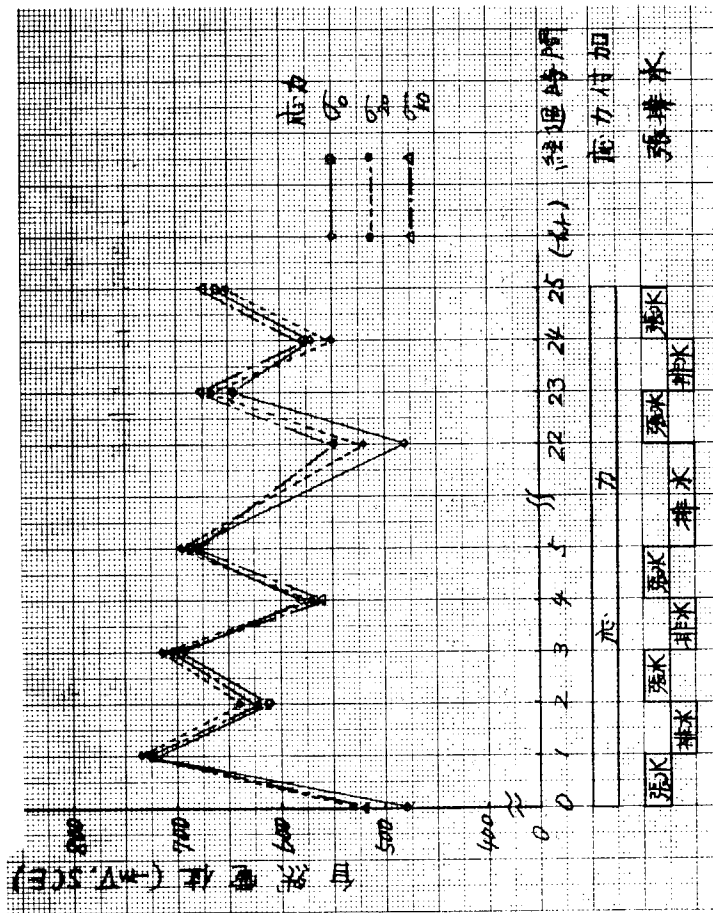


図 3.6.7 張排水繰返し，応力付加状態における自然電位の変化

人工海水，40℃，張排水繰返し，応力一定

表 3.6.2 張排水繰返し，応力付加状態における鋼の腐食量

付加応力 Kg/mm^2	重量減 g	腐食速度 $g/mm^2/yr$
0	0.0060	1.067
20	0.0054	0.960
40	0.0060	1.067
人工海水，40℃，25 hr，張排水繰返し， 併試面積 2.25 cm^2		

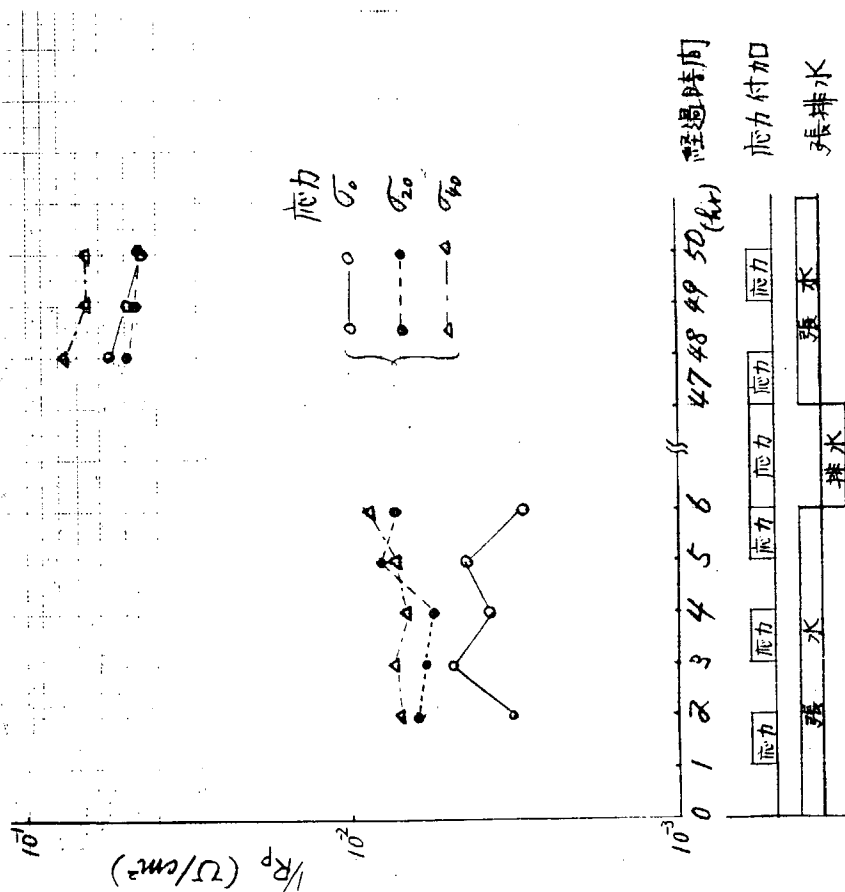


図 3.6.6 応力繰返し条件下における（分極抵抗） $^{-1}$ の変化

人工海水，40℃，張排水，応力繰返し

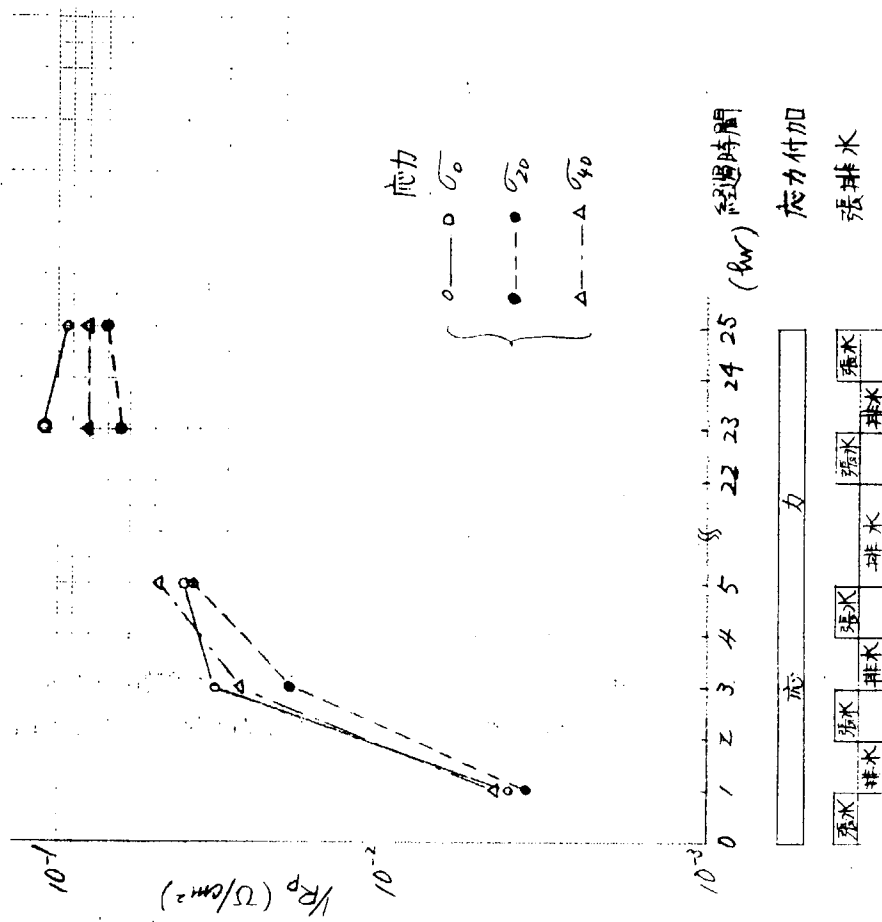


図 3.6.8 張排水繰返し，応力付加状態における（分極抵抗）⁻¹ の変化
人工海水，40℃，張排水繰返し，応力一定

4. 実船調査および実船試験 その1

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係を調査した。

実験は太平洋海運株式会社の御協力により，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，昭和48年12月末より計測（期間1ケ年）を開始し，現在継続中である。

対象タンク，計測方法，計測器具，電極位置等は昭和49年度研究資料No.201を参照されたい。

4.2 計測結果

温度計測は図4.1. ～図4.7. に，

電位計測は図4.8. ～図4.14. にまとめて示した。

4.3 まとめ

これまでの結果より判明したことをまとめてみると下記の如くである。

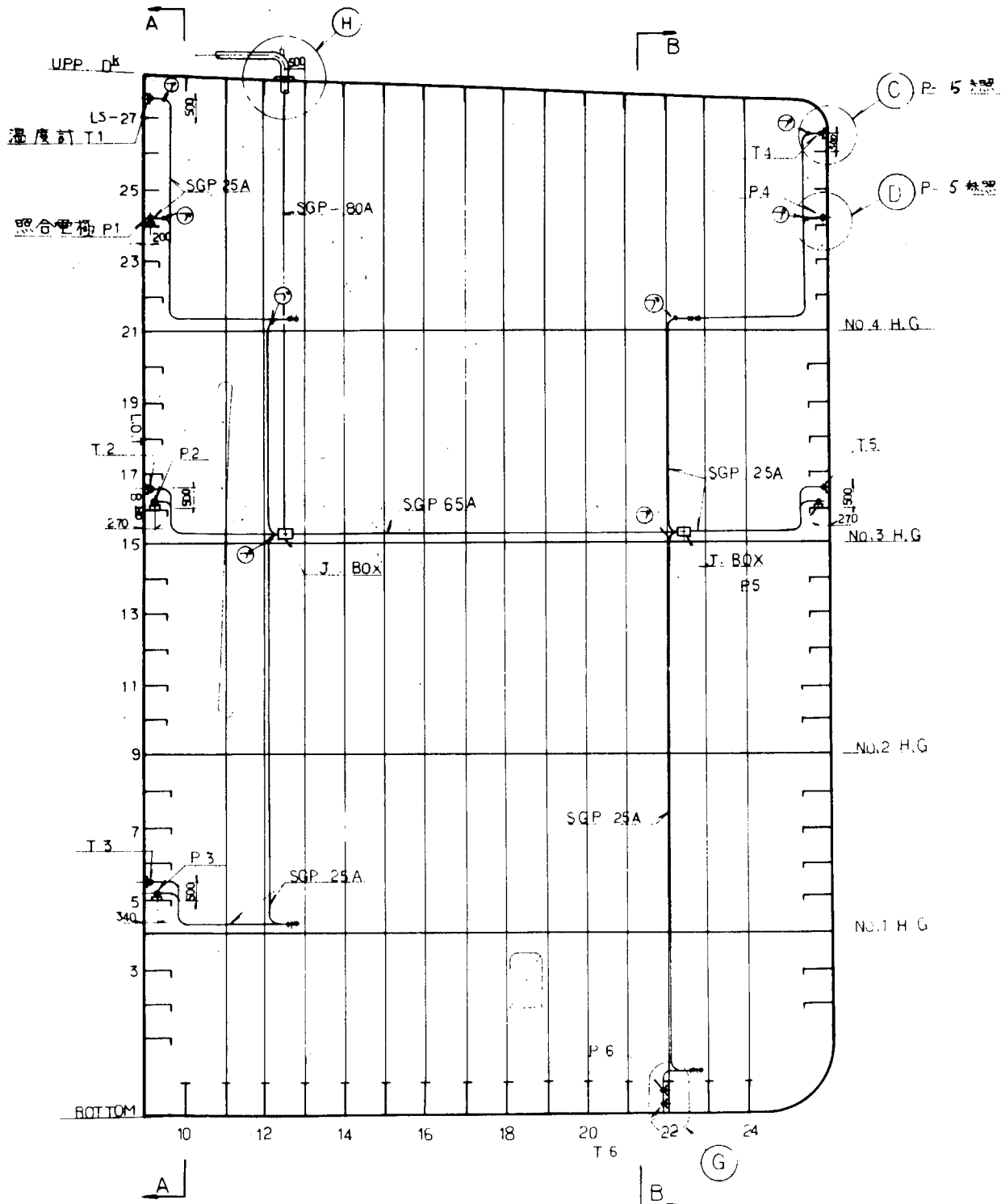
4.3.1 温 度

- (1) SIDE SHELL 側の温度変化は外気温度とほぼ似た傾向を示す。
- (2) B^{HD} 側はSIDE SHELL 側に比し温度変化が少い。特に積荷状態（帰路）でその傾向が強い。
- (3) DECK 裏では全航路を通じて昼夜の気温の変化が激しい（max. 30℃）往路は片舷のみにこの傾向がみられるが帰路は両舷にこの傾向がみられた。

4.3.2 タンク内電圧

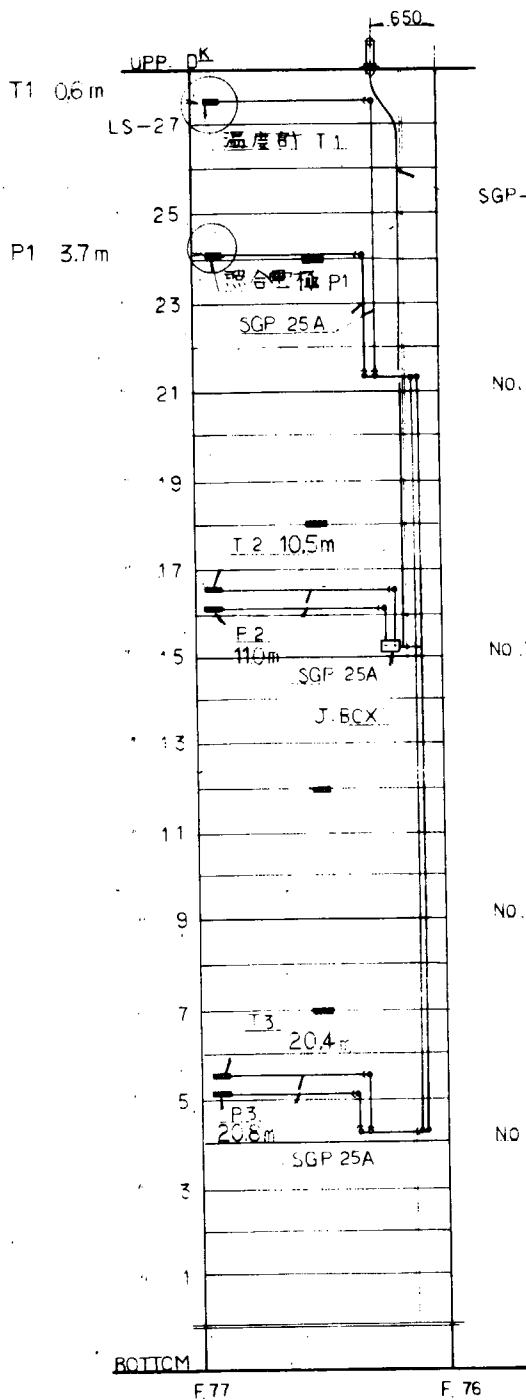
- (1) 上部，下部での電位にほとんど差がない。
- (2) 5航海目頃より電位安定までの時間が長くなり，6航海目より安定電位が貴方向に移行している。この電位の差が塗装の劣化分防食電流の不足かは不明である。

LOOK AFT.



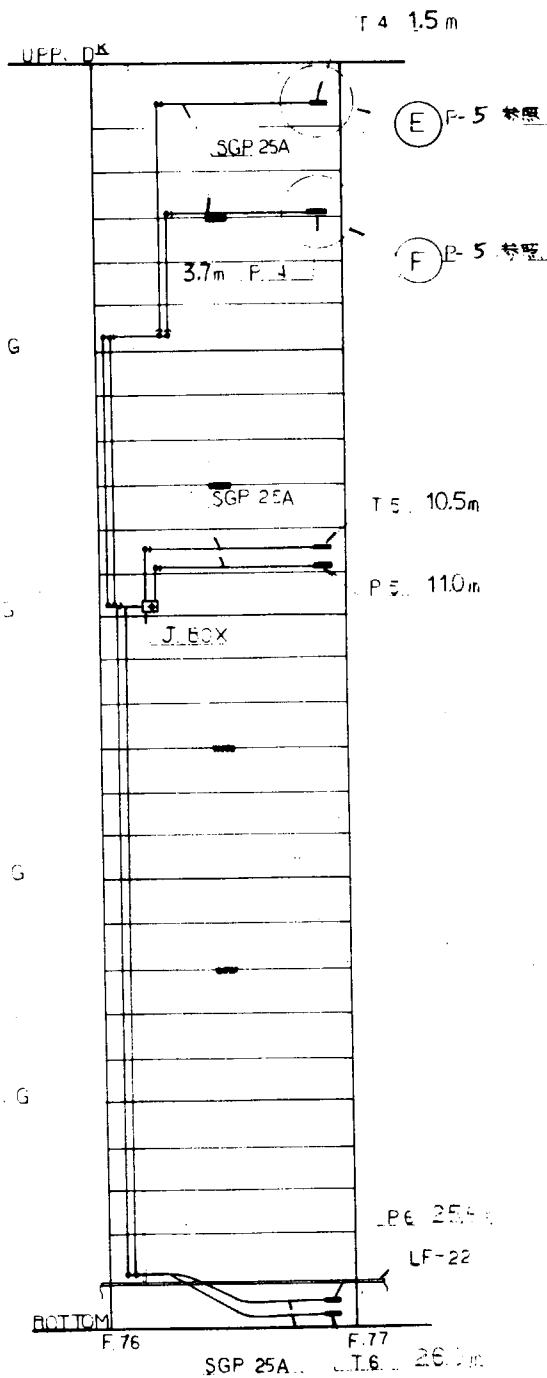
LONG B^{HD}

LOOK A-A



SIDE SHELL

LOCK B-B



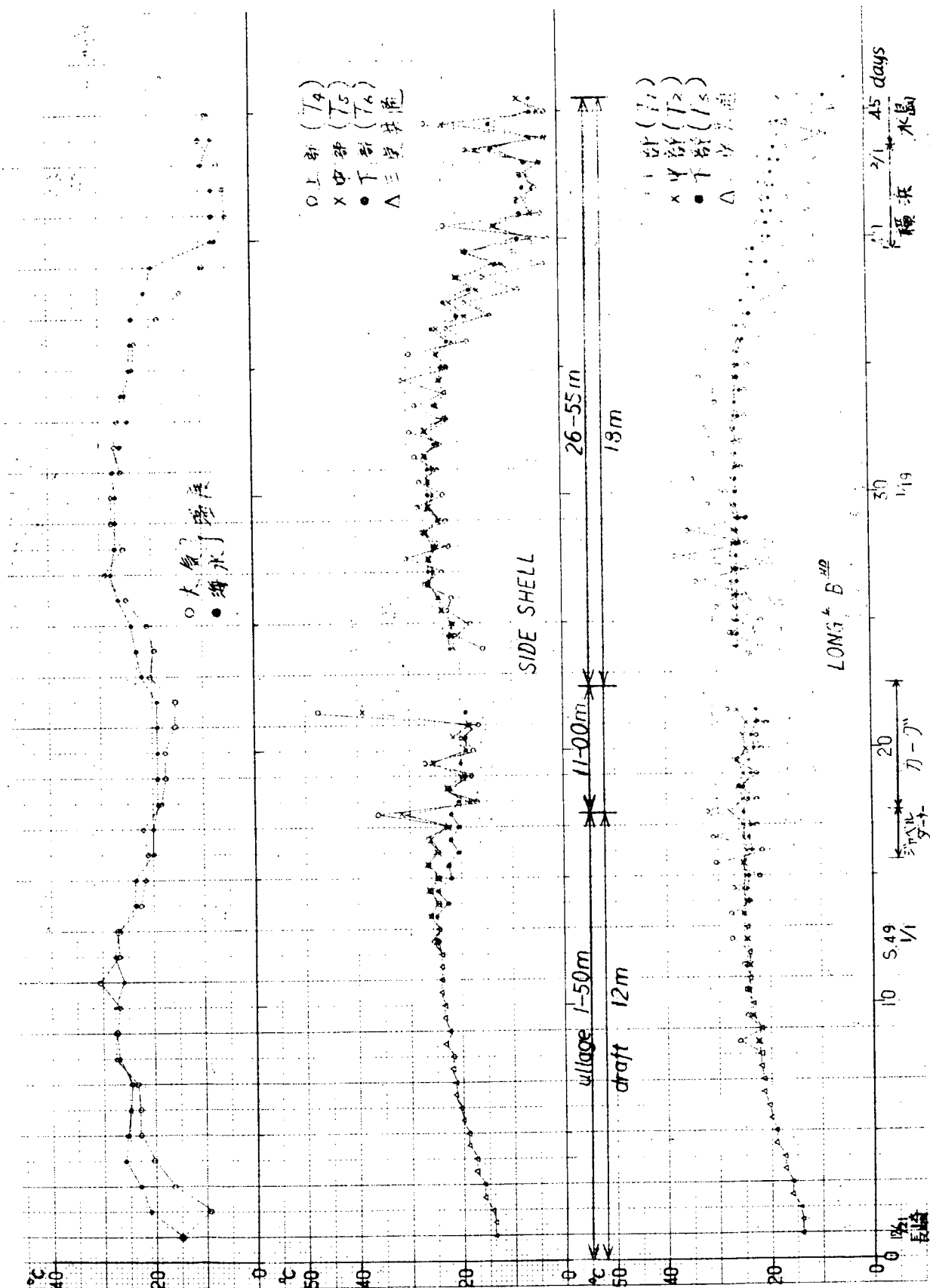


図 4.1 祥和丸 No. 3 - P.W.B. Tank 内温度 (1)

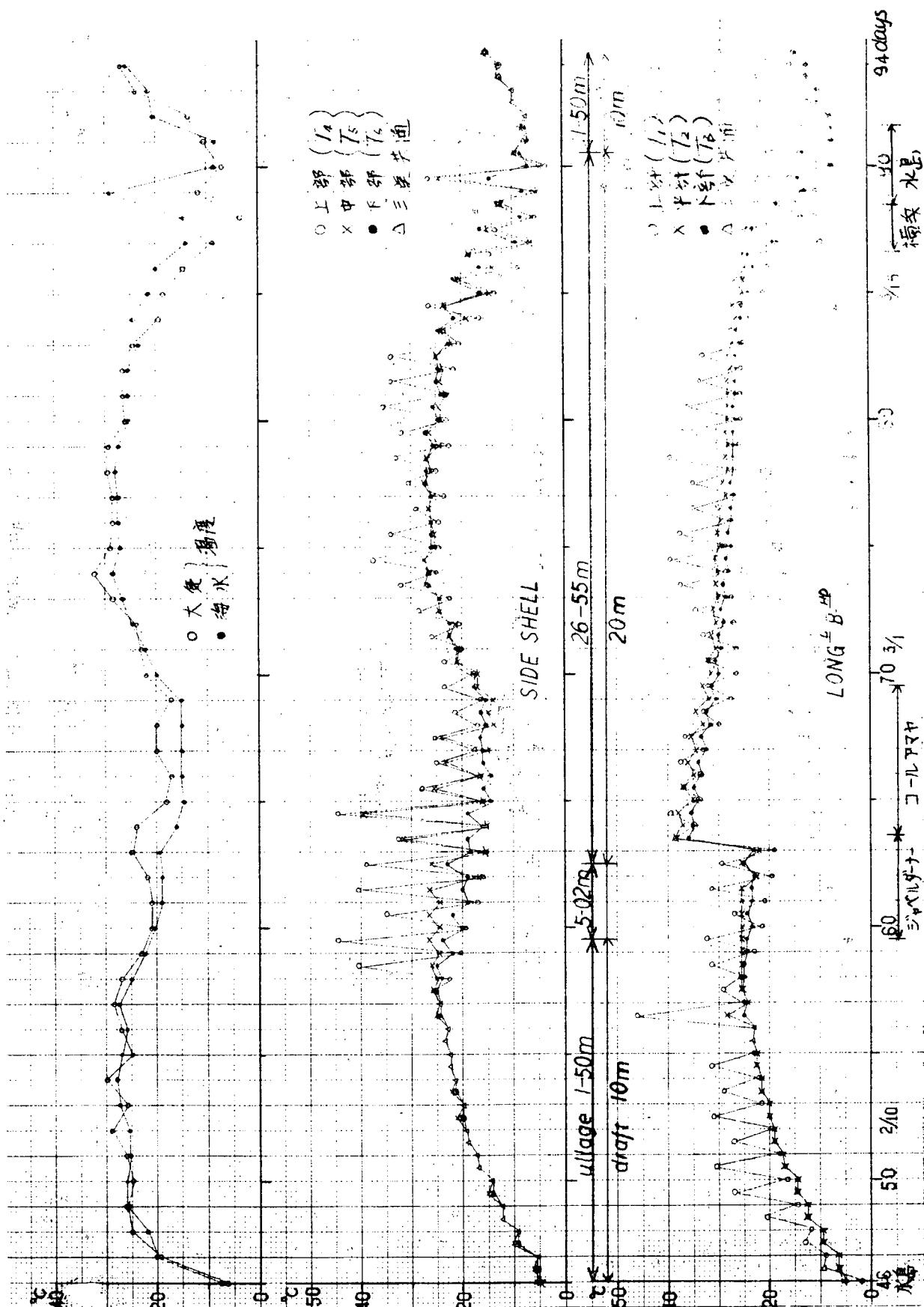


図 4.2 祥和丸 No. 3 - P.W.B. Tank 内温度 (2)

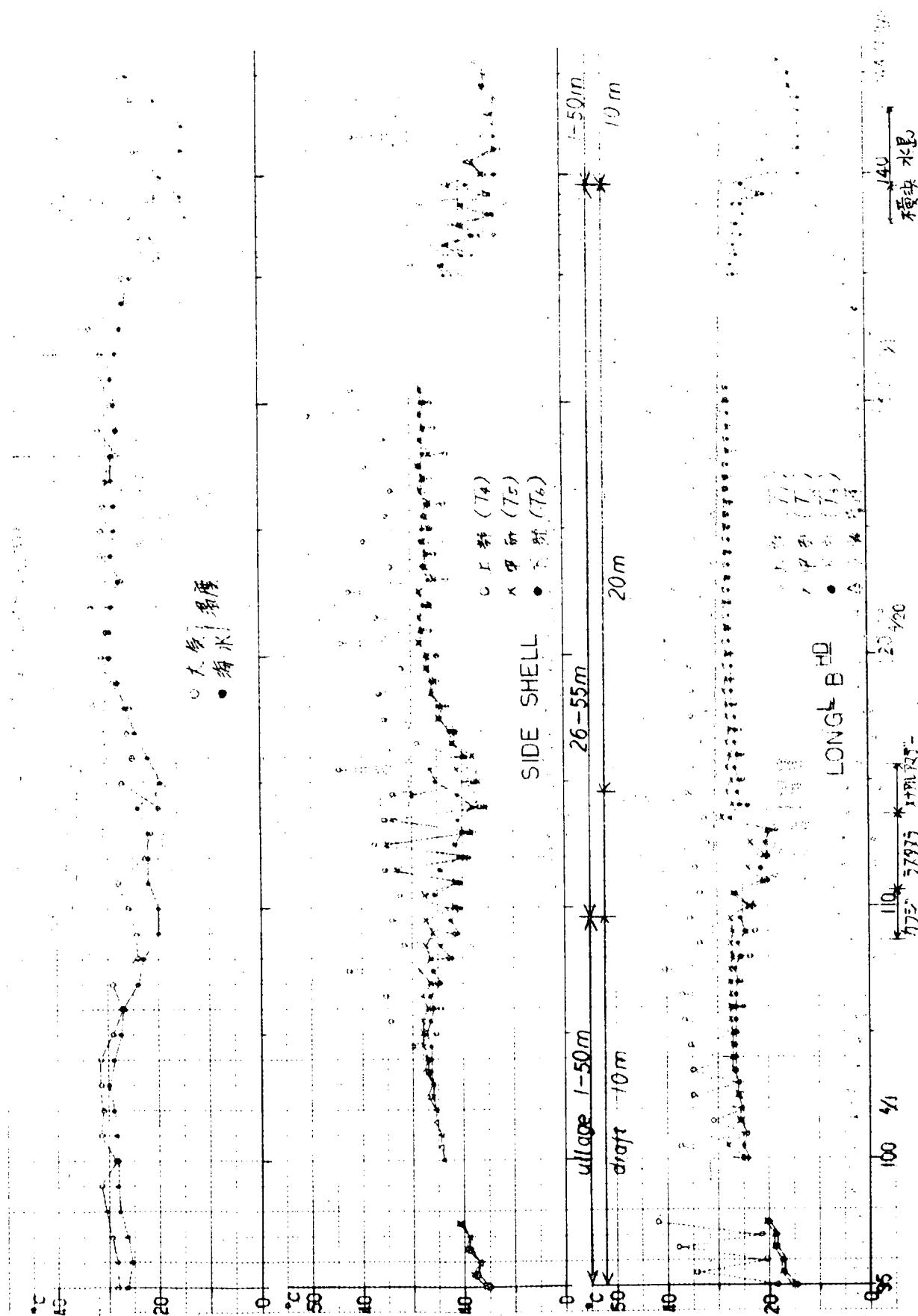


図 4.3 昭和丸 No. 3 - P.W.B. Tank 内温度 (3)

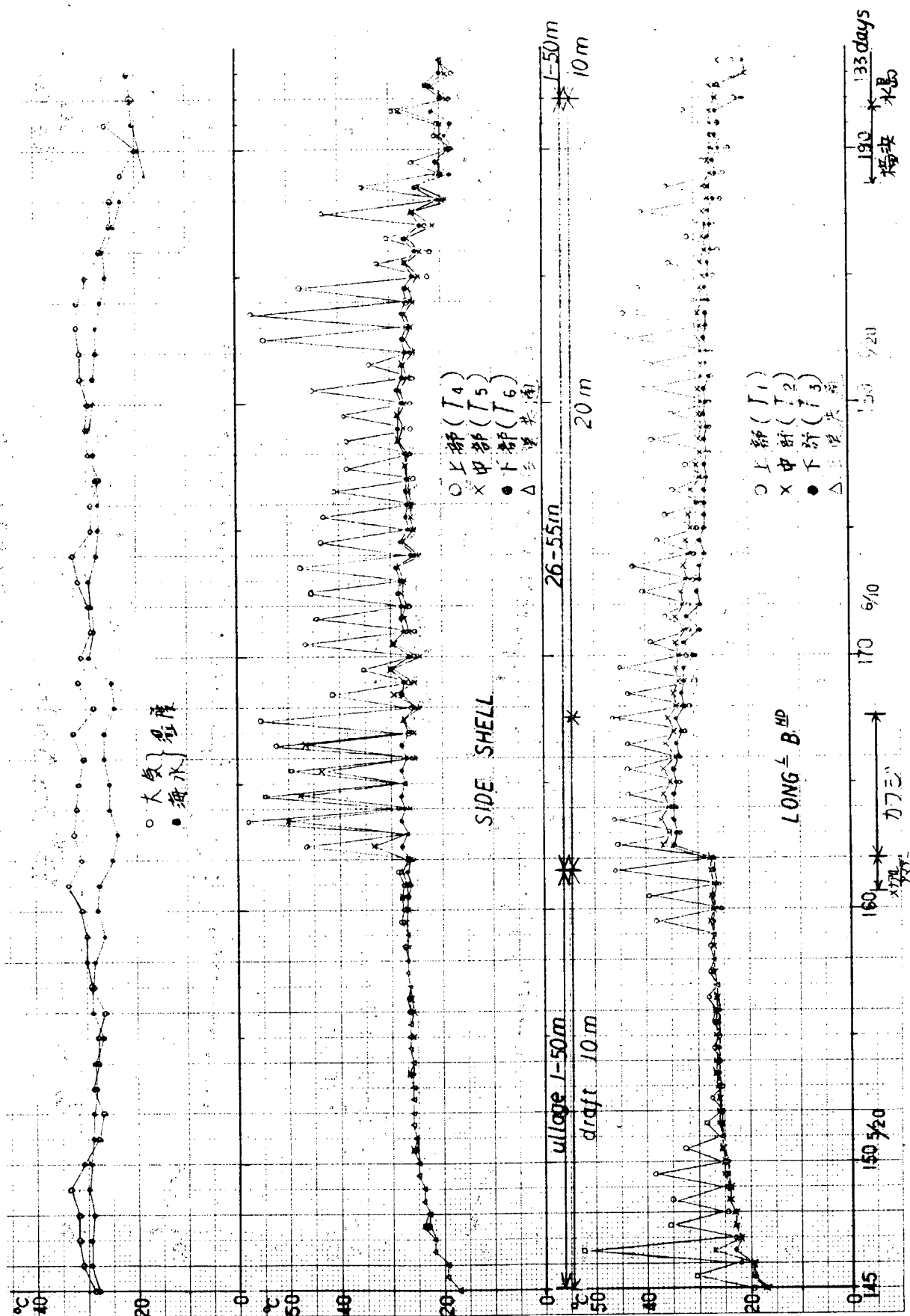


図 4.4 祥和丸 No. 3 - P.W.B. Tank 内温度 (4)

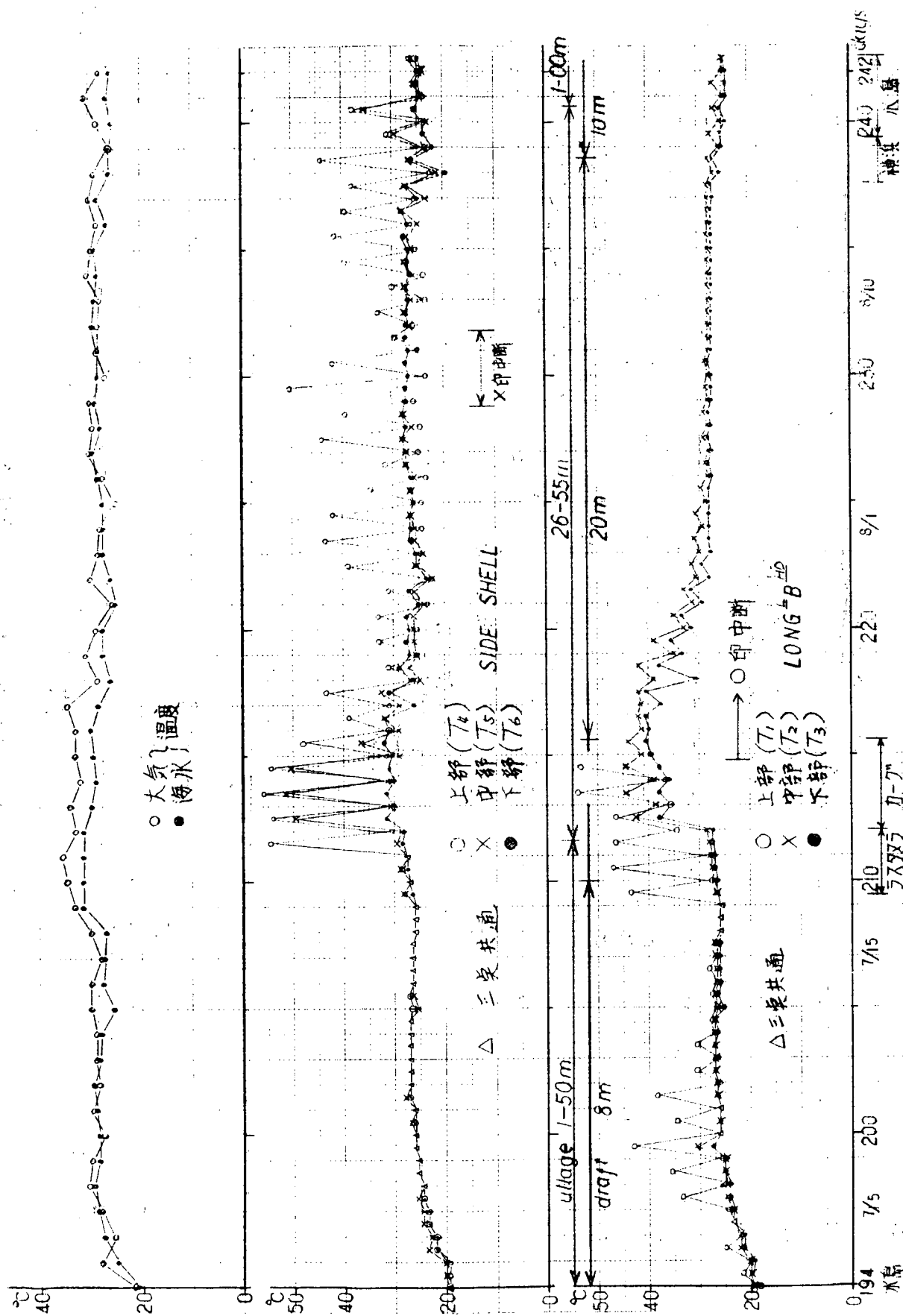


図 4.5 祥和丸 No. 3 - P.W.B. Tank 内温度 (5)

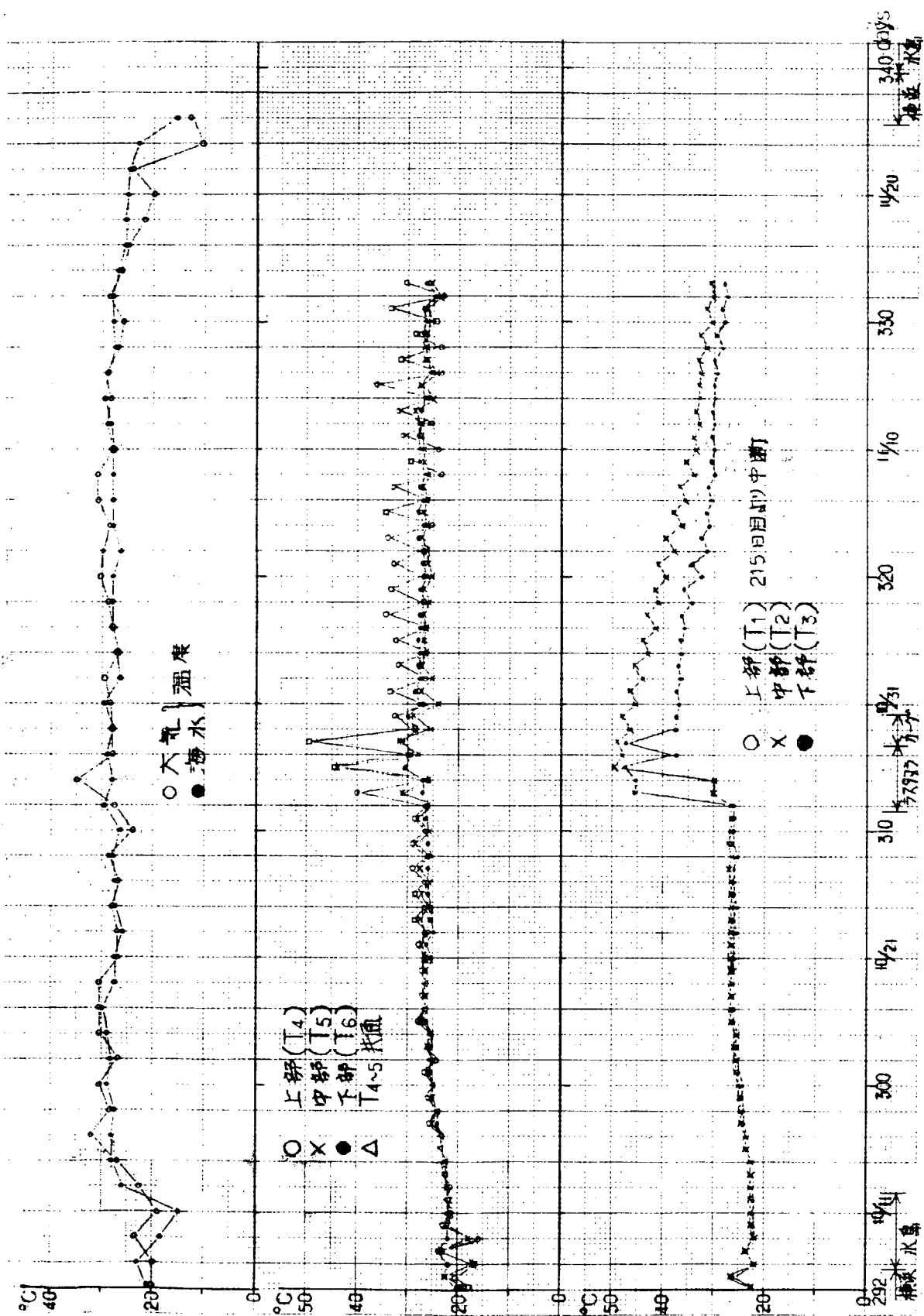


図 4.7 祥和丸 No. 3 - P.W.B. Tank 内水位 (7)

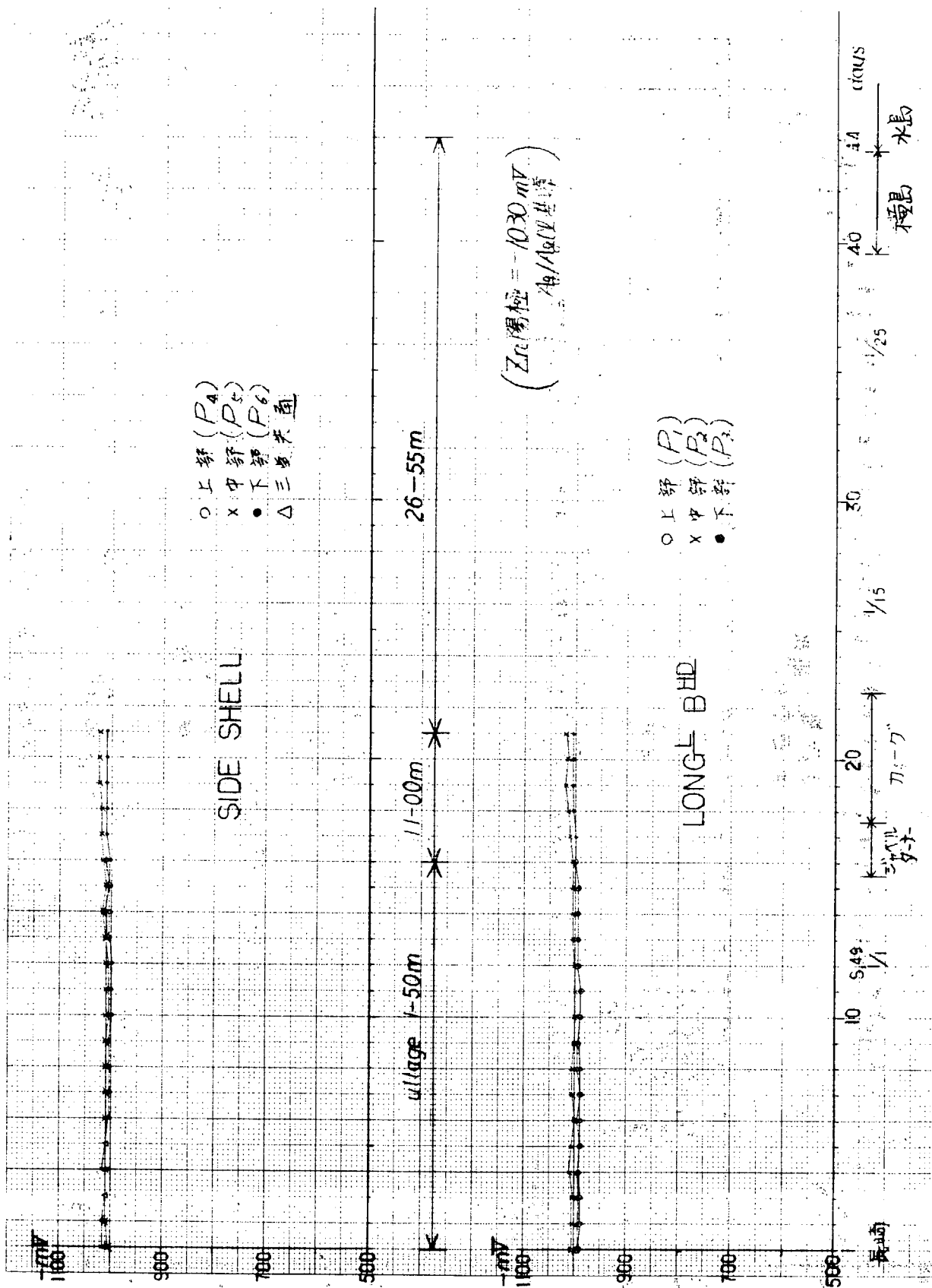


図 4.8 祥和丸 No. 3 - P.W.B. Tank 内電位 (I)

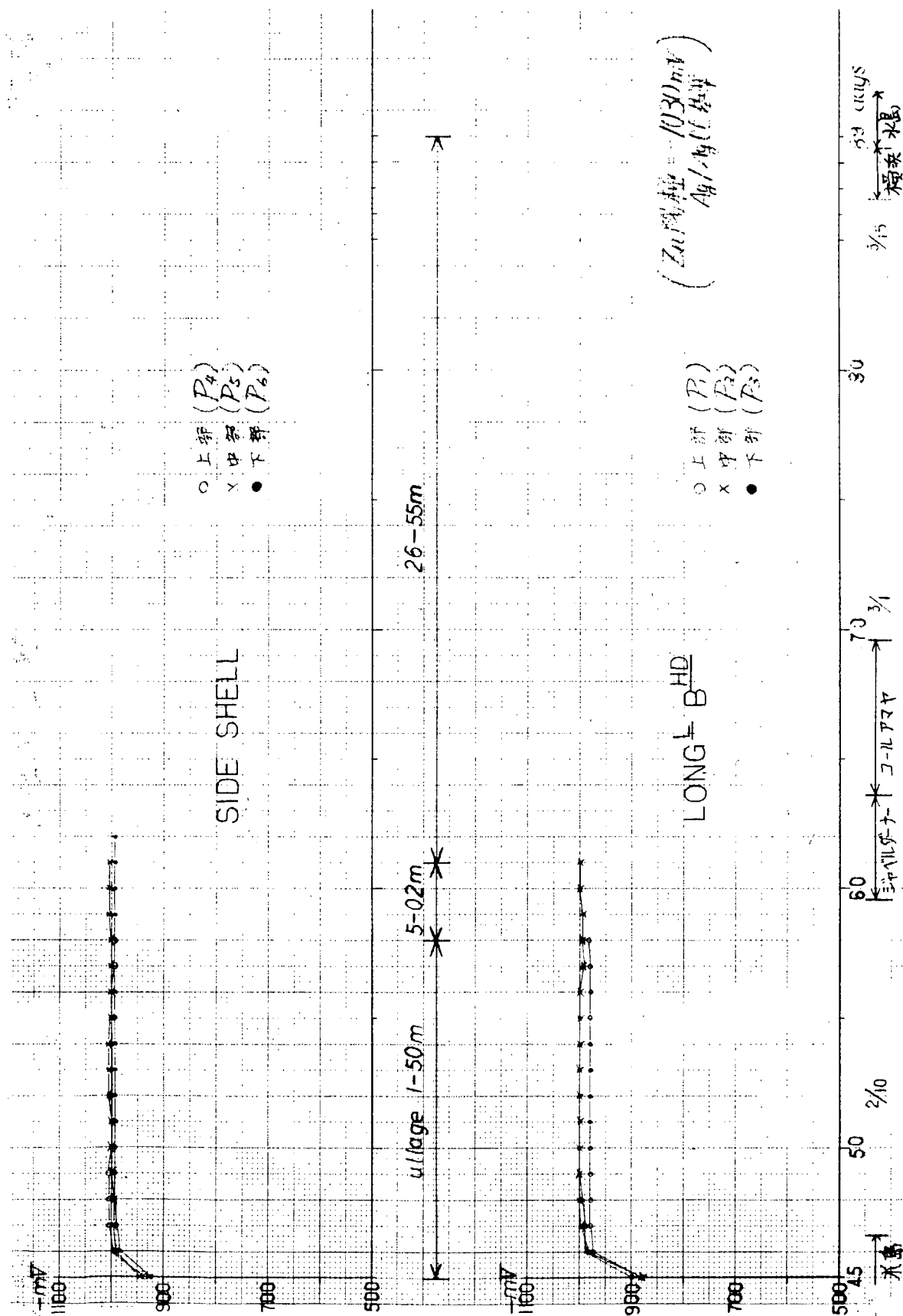


図 4.9 祥和丸 No. 3 - P.W.B. Tank 内電位(2)

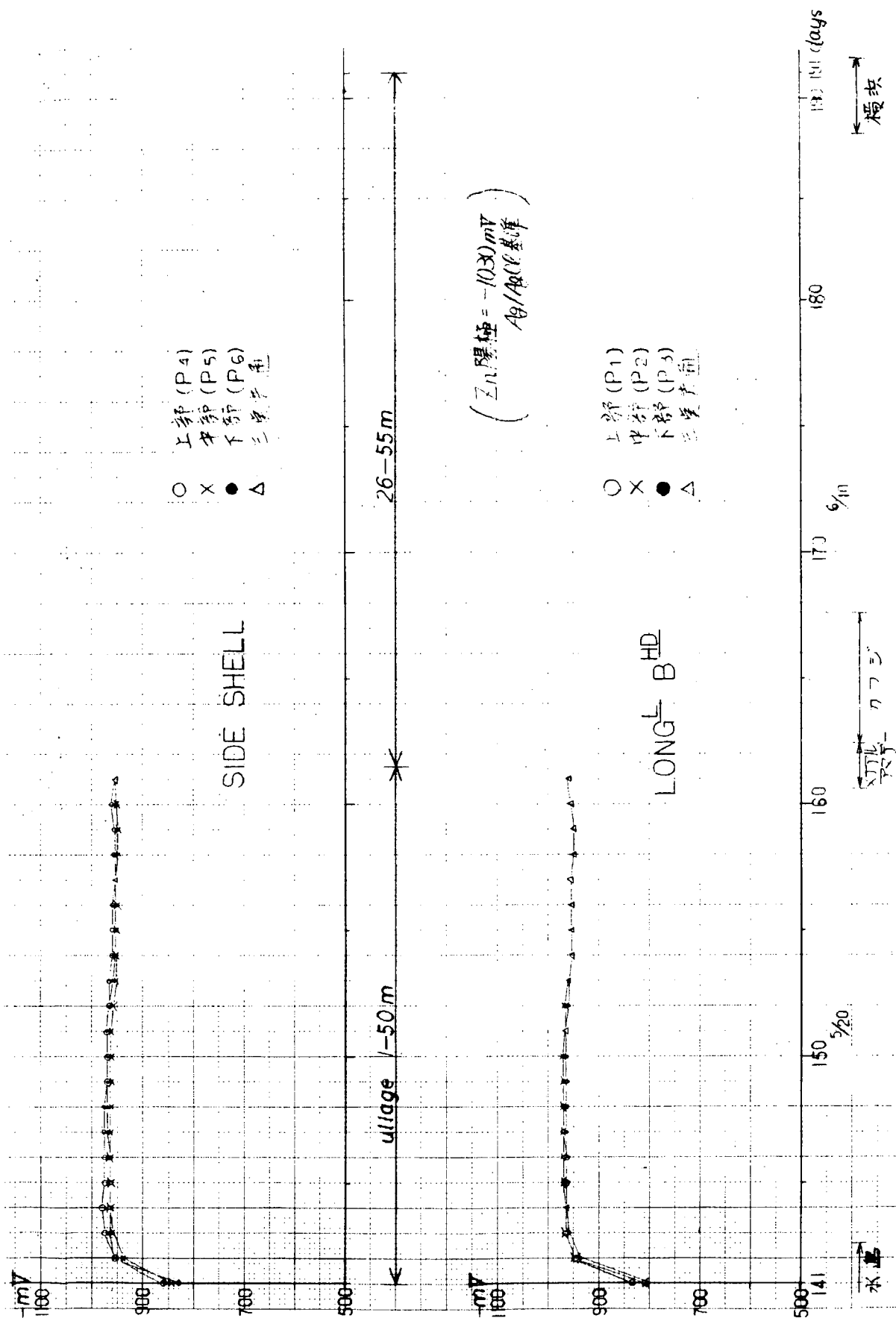


図 4.11 祥和丸No.3 - P.W.B. Tank 内電位(4)

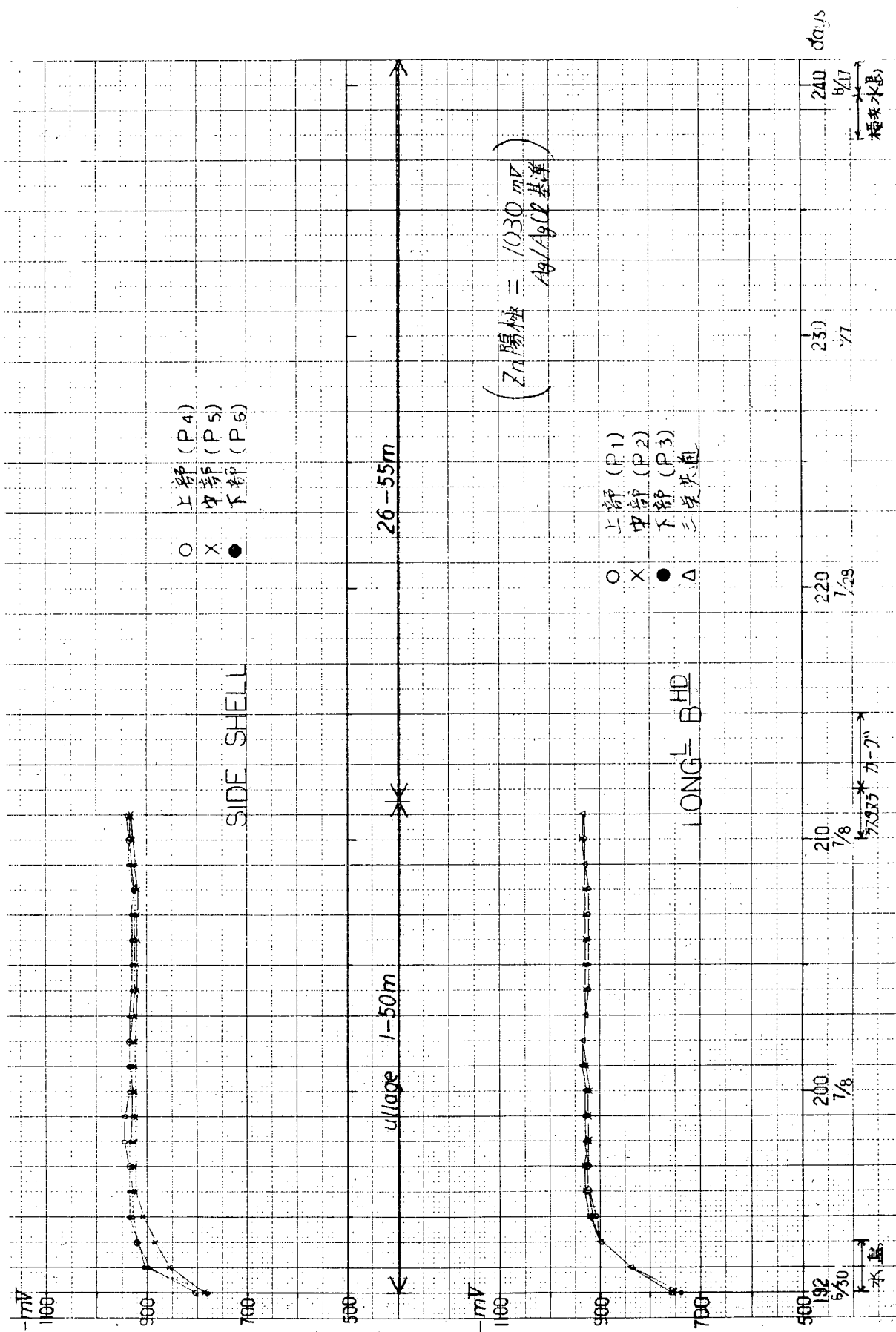


図 4.12 祥和丸 No. 3 - P.W.B. Tank 内電位 (5)

5. 実船調査および実船試験 その2

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。48年度は別表のように対象船9隻の試験塗装を終了し本年度(49年)は1年目の追跡調査を行っている。現在9隻のうち7隻が1年目の調査を終了しており、この調査結果を報告する。

5.1 実船試験の概要

5.1.1 試験対象船

国内での保証入渠を含め随時国内に寄港し調査可能な船舶とする。

5.1.2 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

タンク内の上, 中, 下部に各々約2㎡実施する。

5.1.3 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。

5.1.4 試験項目

(1) 塗装時

(a) 下地処理方法および程度

(b) 塗料および塗装系

(c) 塗装方法および塗装条件

(d) 補修塗装

(2) 塗装後

(a) 塗膜状態

(b) 乾燥膜厚

(c) 塗膜劣化試験(インピーダンス測定)

(3) 就航後

(a) 塗膜の状態

(b) 塗膜劣化試験

(c) 航路, バラスト張水期間, 張水率

表 5.1.1 バラストタンク内実船試験塗装概要

昭和50年2月7日

塗料メーカー	船名	造船所	船主	船種 (D/W)	引渡し	塗装箇所	塗装年月日	塗 装			膜 厚 (μ)	1 年 後 追 跡 調 査 年 月 日
								シ ョ ッ プ ブ ラ イ マ ー	塗 装 前 処 理	上 塗		
日本ペイント	千 尋 丸 (S/N 962)	三井 玉野	大阪商船三井	バルクキャリアー (110,000)	48. 7	No.2 トップサイ ドタンク (右舷)	48. 5	ニッペジンキー 1000 PC-NC	サントスライプ (Sa 2, 5)	エポタールM (2 回塗)	上 350 中 400 下 340	49. 7
大日本塗料	ジャパンアスター (S/N 1712)	三菱 長崎	ジャパンライン	タンカー (237,000)	48. 9	No.3 バラスト タンク (左舷)	48. 3 48. 4	エバボンド FM-3	ディスクサンダー パワーブラシ	SDCコート602 TMおよび SOCコート402 T (1 回塗)	上 200 ~ 400 中 180 ~ 340 下 180 ~ 480	50 年入渠 予定のため 未調査
中国塗料	鳥 海 丸 (S/N 235)	三菱 広島	日 本 郵 船	バルクキャリアー (122,000)	48. 7	No.5 トップサイ ドタンク (左舷)	48. 2 48. 3	エバボンド FM-3	ディスクサンダー パワーブラシ (st 2, 5)	ビスコン HB (1 回塗)	上 325 下 280	49. 7
"	日 晴 丸 (S/N 4351)	日立 堺	山下新日本 日 正 汽 船	タンカー (235,000)	48. 5	No.3 バラスト タンク (左舷)	48. 1	ZEプライマー No.100 ウェルボンド (上部のみ)	ディスクサンダー パワーブラシ (st 2, 5)	ビスコン No.1000 (2 回塗)	上 245 中 270	49. 5
神 東 塗 料	太 栄 丸 (S/N 2339)	石播 横浜	日 本 郵 船 共 栄 タ ン カ ー	タンカー (210,000)	48.12	No.3 センター タンク (バラスト)	48. 5 48. 7	エバボンド EU	ディスクサンダー パワーブラシ (st 2)	オビア # 3000 HB (1 回塗)	上 220 ~ 300 中 210 ~ 250 下 230 ~ 270	49.12
関西ペイント	大 光 丸 (S/N 4352)	日立 因島	三 光 汽 船	タンカー (180,000)	48. 6	No.3 バラスト タンク (左舷)	48. 1 48. 3	SDノンジンク プライマー ZE No.100	ディスクサンダー パワーブラシ (st 3)	エポシール No.100 (2 回塗)	上 213 中 230 下 235	リズナペ入 渠のため 未調査
神戸ペイント	瀬 田 川 丸 (S/N 2329)	石播 呉	川 崎 汽 船	タンカー (271,400)	48. 7	No.3 バラスト タンク (左舷)	48. 2 48. 3 48. 4	エバボンド	サントブラスト おし (Sa 2) ディスクサンダー 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	49. 7
日 本 油 脂	武 光 丸 (S/N 2286)	石播 横浜	三 光 汽 船	タンカー (231,000)	48. 4	No.5 バラストタンク (左舷) No.3 カーゴタンク (左舷)	48.11	エバボンド	ディスクサンダー パワーブラシ (st 2, 5)	バラスコ No.800 (1 回塗)	上 275 中 290 下 285	49. 9
兎 田 化 学	あ ら す か 丸 (S/N 1040)	三菱 神戸	大阪商船三井 山 下 新 日 本	コンテナ (27,750)	48. 6	No.4 バラスト タンク (左舷)	47.12 48. 1	エビコン ジンクリッチ プライマー-B	ディスクサンダー パワーブラシ (st 3)	ビチュラック No.2000 (1 回塗)		49. 6

(順不同, 敬称略)

5.2 就航後の調査結果

5.2.1 調査進捗状況

表 5.2.1 調査進捗状況

船 名	船 主	造船所	塗料メーカー	引渡し	調査年月	備 考
千 尋 丸	大阪商船 三井	三井, 玉野	日本ペイント	48. 7	49. 7	
ジャパンアスター	ジャパンライン	三菱, 長崎	大日本塗料	48. 9	—	50年 入渠予定 ※
鳥 海 丸	日 本 郵 船	三菱, 広島	中国塗料	48. 7	49. 7	
日 晴 丸	山下新日本 日 正 汽 船	日立, 堺	〃	48. 5	49. 5	
太 栄 丸	日 本 郵 船 共 栄タンカー	石播, 横浜	神 東 塗 料	48. 12	49. 12	
大 光 丸	三 光 汽 船	日立, 因島	関西ペイント	48. 6	—	リスナへ入渠のため 未調査 ※
瀬 田 川 丸	川 崎 汽 船	石播, 呉	神戸ペイント	48. 7	49. 7	
武 光 丸	三 光 汽 船	石播, 横浜	日 本 油 脂	48. 4	49. 9	
あ ら す か 丸	大阪商船 三井 山 下 新 日 本	三菱, 神戸	兎 田 化 学	48. 6	49. 6	

※ 未調査

5.2.2 調査結果

(1) 塗膜の状態（肉眼観察）

調査各船ともにフクレ、サビ、塗膜のハクリなどなく良好。

使用塗料（タールエボキシ塗料）の性能、耐久性から推察して当然の結果であると考ええる。

(2) 塗膜劣化試験（インピーダンス測定）

調査した7隻のうち測定されたのは6隻であるが、この内2隻は測定値のバラツキが大きく、今回の報告から削除した。（瀬田川丸、あらすか丸）

表 5.2.2 インピーダンス測定結果

船 名	測定値 周波数 タンク内部位 (K C)	就 航 前			就 航 後		
		抵 抗 (KΩ)	容 量 (MF)	$\tan\delta$	抵 抗 (KΩ)	容 量 (MF)	$\tan\delta$
千 尋 丸	中 部	未 測 定			960	0.003	0.282
	下 部				780	0.003	0.340
鳥 海 丸	上 部	400	0.0021	0.132	380	0.0031	0.183
	下 部	500	0.0045	0.067	200	0.0047	0.148
日 晴 丸	上 部	500	0.0031	0.247	450	0.0035	0.252
	中 部	480	0.0029	0.219	400	0.0037	0.239

太 栄 丸	上 部	0.2	2300	0.0037	0.094	2000	0.0039	0.101
		0.5	820	0.0034	0.114	740	0.0036	0.119
		1	410	0.0033	0.118	370	0.0035	0.124
		2	230	0.0032	0.108	220	0.0033	0.112
	中 部	0.2	2400	0.0038	0.087	2200	0.0040	0.091
		0.5	910	0.0035	0.100	810	0.0037	0.106
		1	480	0.0034	0.098	440	0.0035	0.103
		2	250	0.0033	0.097	220	0.0034	0.104
	下 部	0.2	3200	0.0035	0.071	2800	0.0037	0.077
		0.5	1200	0.0034	0.078	1100	0.0036	0.081
		1	600	0.0033	0.080	560	0.0034	0.084
		2	320	0.0031	0.080	290	0.0033	0.082
瀬 田 川 丸	上 部	0.2	3190	0.0014	0.035			
		0.5	2000	0.0014	0.057			
		1	890	0.0014	0.127			
	中 部	0.2	1940	0.0022	0.187			
		0.5	1000	0.0021	0.152			
		1	560	0.0021	0.135			
	下 部	0.2	3740	0.0016	0.133			
		0.5	2500	0.0014	0.091			
		1	1260	0.0015	0.084			

船 名	タンク内部位	測定値 周波数 No (K C)	就 航 前			就 航 後		
			抵 抗 (KΩ)	容 量 (MF)	$\tan\delta$	抵 抗 (KΩ)	容 量 (MF)	$\tan\delta$
DB-11(p)	上部	1 1	350	0.0029	0.157			
		3 1	400	0.0023	0.173			
	中部	2 1	500	0.0023	0.138			
		4 1	200	0.0034	0.234			
		5 1	220	0.0026	0.278			
		6 1	500	0.0025	0.127			
あらすか丸	中部	1 1	700	0.0026	0.088			
		2 1	800	0.0020	0.0995			
		3 1	1000	0.0018	0.088			
		4 1	900	0.0021	0.084			
		5 1	700	0.0027	0.092			
		6 1	600	0.0029	0.084			
		7 1	200	0.0047	0.169			
		8 1	500	0.0028	0.173			

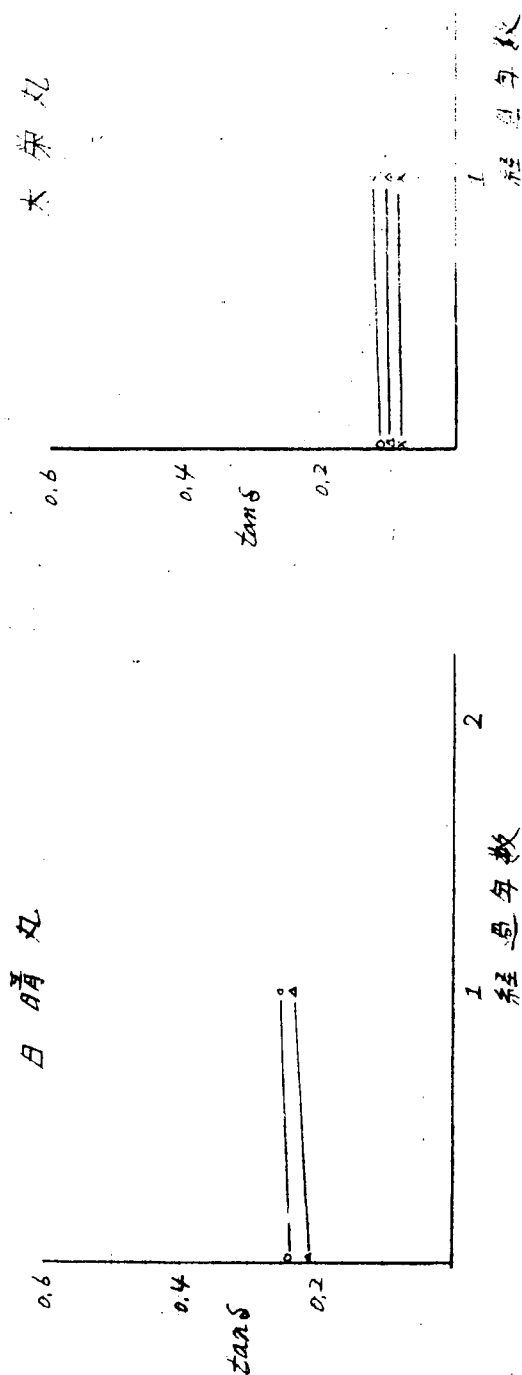
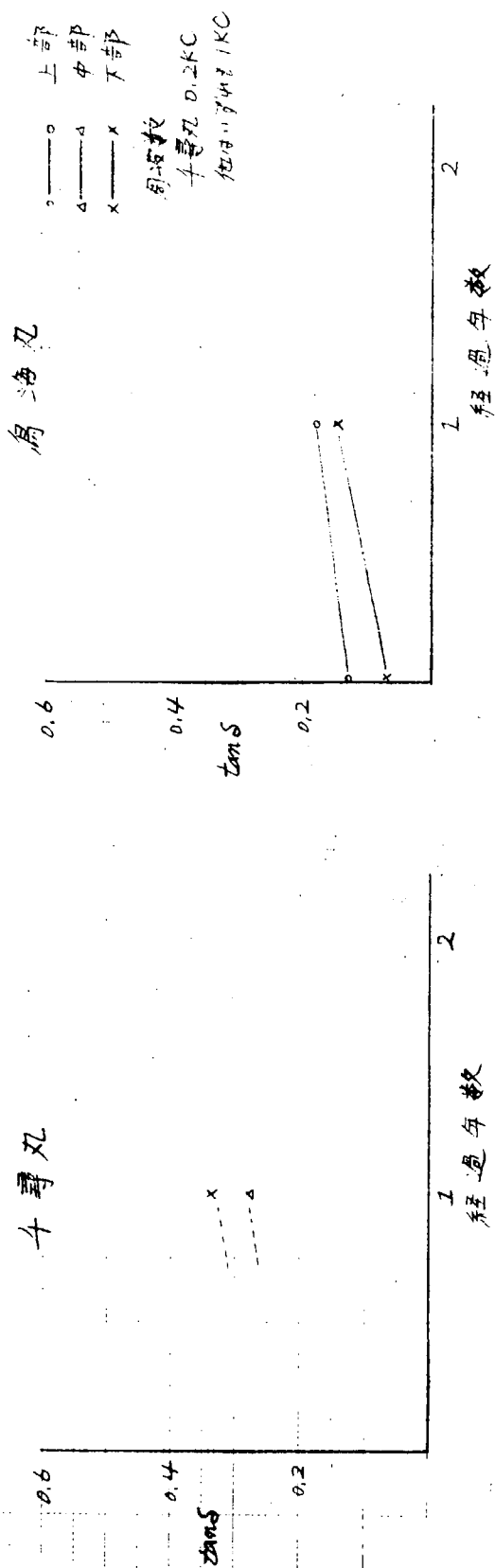


図 5. 2. 1 インピーダンス測定 ($\tan \delta$) 結果

表 5. 2. 3 調査結果一覧表

昭和50年2月7日現在

船名	塗料メーカー	塗 装 系		塗 装 年月日	引 渡 し 年月日	調 査 年月日	膜 厚 (平均 μ)	塗膜の 状 態	塗 膜 劣 化 試 験 ($\tan\delta$, 平均値)	
		塗	上						就 航 前	就航後(1年)
千 尋 丸	日本ペイント	ニッペジンキー 1000P-NC	エポタールM (2回塗)	48. 5	48. 7	49. 7	上 350 中 400 下 340	良 好	—	0.282 0.340
鳥 海 丸	中国塗料	エバボンド FM-3	ビスコンHB (1回塗)	48. 2 48. 3	48. 7	49. 7	上 325 下 280	"	0.132 0.067	0.183 0.148
日 晴 丸	"	ZEブライマー No100 ウエルボンド(上部のみ)	ビスコン No1000 (2回塗)	48. 1	48. 5	49. 5	上 245 中 270	"	0.247 0.219	0.252 0.239
太 栄 丸	神東塗料	エバボンドEU	オビア#3000HB (1回塗)	48. 5 48. 7	48.12	49.12	上 250 中 230 下 260	"	0.118 0.098 0.080	0.124 0.103 0.084
瀬 田 川 丸	神戸ペイント	エバボンド	エビラックス5・HB (1回塗)	48. 2 48. 3 48. 4	48. 7	49. 7	上 227 中 200 下 335	"	0.127 0.135 0.085	※1
武 光 丸	日本油脂	エバボンド	パラスコ No800 (1回塗)	47.11	48. 4	49. 9	上 275 中 290 下 285	"	0.182	※2
あ ら す か 丸	兎田化学	エピコン ジックリッチブライマーB	ピチュラックNo20000 (1回塗)	47.12 48. 1	48. 6	49. 6	上 280 中 295 下 306 中 232 下 234	"	0.165 0.194 — 0.109	※3

(順不同, 敬称略)

※1, ※3 バラツキ大きいため削除
 ※2 リスナベ入渠のため未測定
 注, ショップブライマー
 エポキシジックブライマー系: ニッペジンキー1000P-NC, エピコンジックリッチブライマーB, ZEブライマーND, 100
 ウォッシュブライマー系: エバボンド
 無機ジックリッチブライマー: ウエルボンド

5.3 あとがき

本実船試験は対象船9隻のうち7隻が1年目の調査を終了しているがその結果をまとめると次のようになる。

5.3.1 塗膜状態

7隻の調査結果において肉眼観察による塗膜状態は各船ともにフクレ、発サビ、塗膜のハクリなどなく良好であったが、これは使用塗料（タールエポキシ塗料）のすぐれた防食性から判断して当然のことであり、むしろ今後2、3年後の調査が重要となる。

5.3.2 塗膜劣化試験（インピーダンス測定による $\tan \delta$ ）

従来実船における塗膜の防食性は肉眼観察によってその結果を判定しておりこの評価法で充分であると確信するが、今後はインピーダンス測定のような定量的評価法の確立を進めたい。

5.4 実船試験におけるインピーダンス測定法（参考資料）

5.4.1 まえがき

鋼板の腐食が水分と酸素の存在下での電気化学反応であることは周知の通りであるが、塗料の防食効果の判定にも電気化学的方法が用いられるようになった。

すなわち、交流周波数特性の時間的変化を測定するインピーダンス測定法である

5.4.2 測定装置

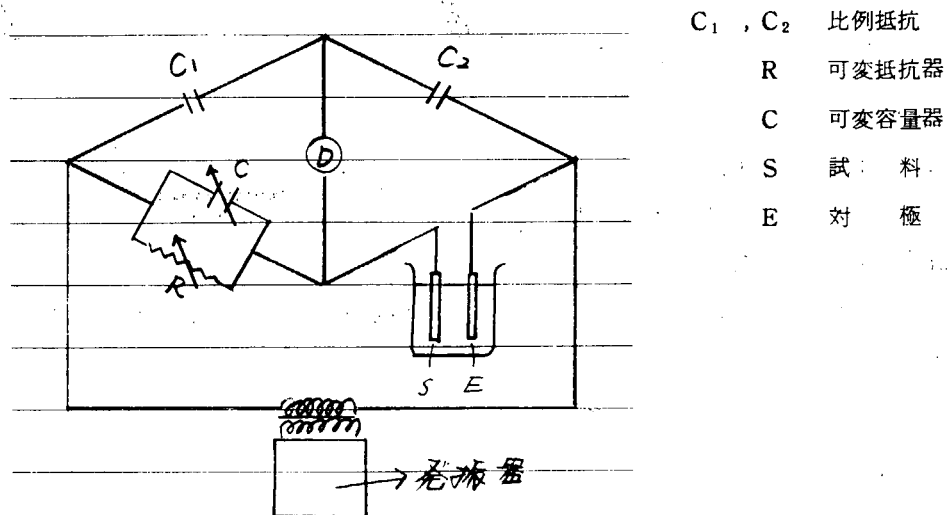


図 5.4.2 インピーダンス測定装置

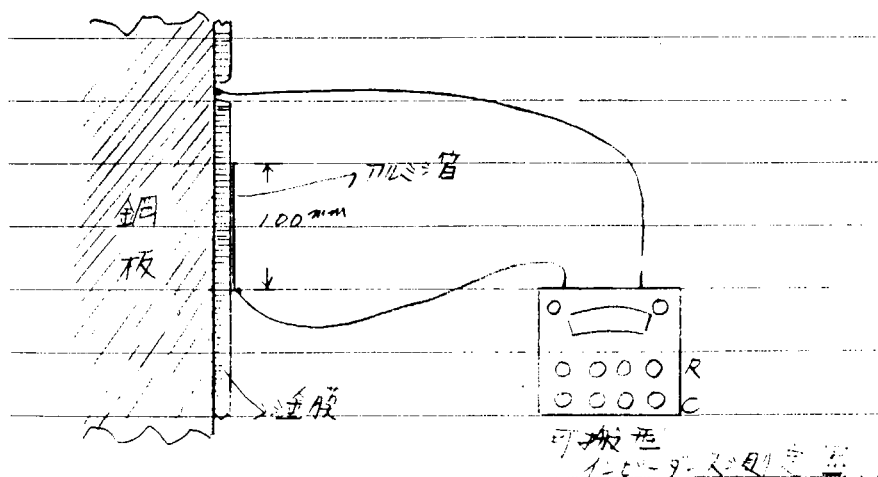


図 5.4.3 実船におけるインピーダンス測定

5.4.3 測定方法

100×100 mm のアルミ箔に糊（3%の塩水に2%のカルボキシルメチルセルロースを溶解させたもの）をはりつけ対極とする。一方塗膜の一部をナイフなどでけずり鋼板面を露出させそれぞれ測定器に接続し約30分間放置後塗膜の抵抗および電気容量を測定し、次式によって $\tan \delta$ を算出する。

$$\tan \delta = \frac{1}{2\pi \cdot f \cdot C \cdot R}$$

f : 周波数

C : 容量

R : 抵抗

5.4.4 塗膜性能（防食性）とインピーダンス

塗膜が海水などの電解質に接すると塗膜の劣化とともに電気容量Cの増大と抵抗Rの減少が起り、このために $\tan \delta$ は増大する。したがって防食性の優れた塗膜ほど電気容量が小さく、抵抗が大きい。海水中で金属が腐食する場合は下図の反応が起る。

この系が交流電場（電圧V）におかれると塗膜内を損失電流 $I_A = V/R$ および充電電流 $I_C = 2\pi f CV$ が流れる。

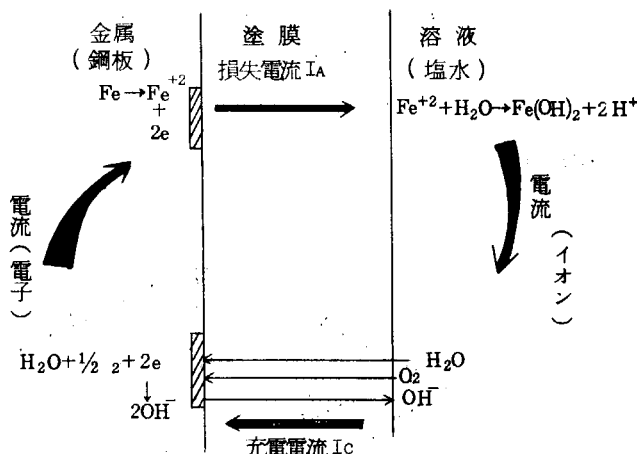
$\tan \delta$ は損失電流 I_A の充電電流 I_C に対する比として定義される。

$$\tan \delta = \frac{I_A}{I_C} = \frac{V/R}{2\pi f CV} = \frac{1}{2\pi f CR}$$

（損失角）

ここで $2\pi f$ は一定であり、Cは一定面積一定の厚さでは $\tan \delta$ の相違の主要な因子とはならない。したがって塗膜の劣化、腐食は $\tan \delta$ の逆数である抵抗に依るところ

が大きい。このことは損失電流の小さいもの（抵抗の大きいもの）ほど塗膜性能は良く、また $\tan \delta$ の値の小さい程塗膜性能は良い。



$\tan \delta$ 値と抵抗、時間曲線測定による

耐塩水性評価の比較

塗料の種類	$\tan \delta$		抵抗時間 曲線の 評価
	0.2KC	10KC/sec	
油性系 鉛丹系	1.25	0.11	やや良
酸化鉄系	1.40	0.15	〃
ジクロール系	1.15	0.14	〃
アルミニウム粉系	0.10	0.043	良
アマニ油 シアナミド鉛	0.38	0.21	やや良
コールドプラスチック系			
鉛丹系	0.085	0.060	良
酸化鉄系	0.15	0.075	〃
ジクロール系	0.20	0.072	〃
アルミニウム粉系	0.20	0.035	やや優
塩化ビニル 鉛丹系	0.078	0.040	〃
アルミニウム粉系	0.10	0.040	良
ネオブレン	0.65	0.070	不良
ネオブレンリン酸塩下地処理	0.08	0.080	良

左表引用文献

工業化学雑誌

第61巻 第3号(1958)

「塗装鋼板の $\tan \delta$ と耐塩水性」

著者

岡本 剛

諸住 高

山科 俊郎

上表は耐塩水性と $\tan \delta$ の値の比較であるが、耐塩水性の良いものは $\tan \delta$ の値が0.2以下である。